

筑波大学

## 陸域環境研究センター報告

第7号  
2006

|  |  |    |
|--|--|----|
| 序 .....                                    | 田 中 正 .....                              | 1  |
| 報 文  |  |    |
| 霞ヶ浦流域における河川水の水質・流量特性について .....             | 藪崎 志穂<br>田中 正<br>福島 武彦<br>浅沼 順一<br>飯田 真一 | 3  |
| 茨城県つくば市における湧水の特徴 .....                     | 水尻 正博<br>藪崎 志穂<br>田瀬 則雄<br>辻村 真貴         | 15 |
| 伊豆新島・羽伏浦における海食崖の崩壊プロセス .....               | 森 僚多<br>松 倉 公憲                           | 31 |
| タブレット野外風化実験にまつわるいくつかの問題点 .....             | 松 倉 公憲<br>八反地 剛                          | 41 |
| 沖縄島荒崎海岸の迷子石「カサカンジャー」の<br>定置時期に関する一考察 ..... | 青木 久<br>小暮 哲也<br>前門 晃<br>松 倉 公憲          | 53 |
| モンゴルにおける環境変化診断のための領域気候シミュレーション .....       | 佐藤 友徳<br>木村 富士男                          | 59 |
| 遅沢式拡散係数測定装置を用いた草地土壌のガス拡散係数の測定 .....        | 濱田 洋平<br>及川 武久                           | 71 |
| 鉛直風標準偏差の普通関数を用いた<br>顕熱フラックス測定エラーの補正 .....  | 岩田 拓記<br>杉田 倫明                           | 87 |

(目次-つづく)

筑波大学陸域環境研究センター

2006年11月

(目次-つづき)

資 料

|                     |       |    |
|---------------------|-------|----|
| 熱収支・水収支観測資料 -2005年- | 渡 来 靖 | 99 |
|                     | 山 中 勤 |    |

|   |                    |     |
|---|--------------------|-----|
| A Dataset of Wave-Flume Experiments of the Threshold<br>for Ripple Formation on Beds with Perturbations | Tomohiro SEKIGUCHI | 125 |
|---|--------------------|-----|

|         |     |
|---------|-----|
| セミナーの記録 | 135 |
|---------|-----|

|       |     |
|-------|-----|
| 論文リスト | 139 |
|-------|-----|

|     |     |
|-----|-----|
| その他 | 143 |
|-----|-----|

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 1993年以前の「水理実験センター報告」掲載記事に関する著作権委譲のお願い | 146 |
|---------------------------------------|-----|

## 序

法人化2年目を迎えた平成17年度は、研究面においてはセンター第2期中期計画に沿って順調に推移しましたが、運営面では次年度の概算要求、老朽化した施設・設備に係わるインフラ整備に多大の労力が費やされました。

年度当初に作成した教育計画、「センター施設を利用した陸域環境に関する教育を推進する」に関しては、学群生10名、大学院生14名が本センター施設を利用し、卒業論文10編、修士論文1編、博士論文2編が作成されました。研究テーマとして、土壌水の水素・酸素安定同位体比の形成プロセス、植生遷移に伴う水循環の変化、大気―植生間のエネルギー・物質輸送、水理条件の変化に伴う河床形状の変動など総計30テーマに上る陸域環境に関する多様な教育・研究が実施されました。

また、研究計画における「陸域環境に関わる国際プロジェクト研究の推進」については、昨年度に引き続き科学技術振興事業団戦略的創造推進事業プロジェクト(CREST)、文部科学省総合地球環境学研究所プロジェクト、地球環境研究総合推進費(GERF)による炭素収支研究プロジェクト、科学研究費成果公開促進費によるGAME―AANデータベースをそれぞれの関係機関と密接な連携をとりつつ推進しました。さらに、平成17年度概算要求事項特別教育研究経費(研究推進)の配分を受け、戦略的研究プロジェクト「地球温暖化に伴う植生の変化が地下水涵養機構に与える影響に関する研究」を推進し、本研究プロジェクトに関連した国際ワークショップをセンター主催で開催しました。この他、同位体トレーサーに関する国内ワークショップも開催しました。これらの国際・国内ワークショップの開催は、センターの教育・研究内容を国内外に広く伝える意味において、また関連する研究分野間の積

極的な交流を推進する上で効果的であるものと思われ、今後もセンター主催として継続的に開催する予定であります。

国際研究者の受入を図り、高度職業人を育成する観点から、北アフリカ研究センターの協力のもとにチュニジアからのJICA研修生の受入を行い、「水環境:水文地質コース」を開設して国際交流を通じた高度職業人の育成に努めました。

平成16年度からの法人化施行により、センターへの運営費交付金は毎年度確実に減額されています。旧水理実験センター発足当時の運営費に比較すると、平成17年度の交付金はその半額をすでに割り込んでいます。こうした状況から、自ずと外部資金の導入を図らなくてはならない状況になっており、そのために費やされるセンター教職員のエネルギーと時間は計り知れません。こうした中、本年度に申請した平成18年度概算要求によって予算の確保が図られ、これによってセンターの今後の運営計画にある程度のめどが立てられるようになったことは、本年度の大きな成果の一つであると思われます。

また、現在センターが抱えている大きな課題として、センターが所有する施設・設備等のインフラ整備があります。センター創設時より30年が経過し、研究・教育の基盤となる施設・設備の老朽化には著しいものがあります。折りしも、平成18年度の概算要求に際し、センターが保有する仮設水路実験棟と工作棟の建築強度が不足している事態が明らかとなり、安全性の面から使用禁止の措置を取らざるを得ない状況に追い込まれました。センター利用学生と教職員に対する危険性を回避し、安全性を確保する観点から、老朽化した施設・設備のインフラ整備は最優先に進めなくてはなりません。しかし、削減されつつあるセンター予算だけでは到底インフラ整備もままならな

い状況であります。センターの将来設計の中に、老朽化施設・設備のインフラ整備を計画的に組込み、マスタープランに沿って進めることはもちろんですが、同時に、大学執行部ならびに関係部局と連携を密にし、この危機管理を成し遂げたいと考えています。

人事面では、昨年度末の鷹巣明美事務職員の北アフリカ研究センターへの異動に伴い、金子孝子専門職員が4月1日付けで着任しました。また、同日付けで藪崎志穂研究機関研究員、6月1日付けで関口智寛講師、6月16日付けで吉村恵美子研究支援推進員、7月1日付けで八反地 剛準研究

員、12月1日付けで吉田瑞穂研究支援推進員がそれぞれ着任しました。目代邦康準研究員が6月30日付けで退職されました。

法人化の施行により、予算・人事の両面においてセンターを取り巻く状況には厳しいものがあります。関係各位におかれましては本センターの研究・教育活動をご理解いただき、より一層のご指導ご助言を賜れば幸いです。

平成 18 年 3 月

陸域環境研究センター長

田 中 正

# 霞ヶ浦流域における河川水の水質・流量特性について

Characteristics of Water Quality and Stream Discharge of River Water  
in the Kasumigaura Basin

藪崎 志穂\*・田中 正\*・福島 武彦\*\*・浅沼 順\*・飯田 真一\*\*\*

Shiho YABUSAKI\*, Tadashi TANAKA\*, Takehiko FUKUSHIMA\*\*,  
Jun ASANUMA\* and Shin'ichi IIDA\*\*\*

## 1 はじめに

茨城県の南東に位置する霞ヶ浦は桜川をはじめとした大小の河川が流入している。また、流域面積は 2,156.7 km<sup>2</sup> と茨城県全体 (6,095.68 km<sup>2</sup>: 国土交通省国土地理院, 2006) の約 35% を占めており (国土交通省関東地方整備霞ヶ浦河川事務所, 2005), 県南地域の水・物質循環に大きく関与している。

流域の気候は、冬には北西の季節風が卓越し降水量は少なく、夏には南東の季節風が卓越し降水量も相対的に多くなる特徴を示しており、表日本気候に属している。気温は山間部を除いて流域内での地域差は小さく、年平均気温は約 14℃、年降水量の平均値は 1278 mm であり全国平均の約 1700 mm と比べるとやや少なくなっている。

霞ヶ浦の湖の面積は 220 km<sup>2</sup> (西浦: 172 km<sup>2</sup>, 北浦: 36 km<sup>2</sup>, 外浪逆浦: 6 km<sup>2</sup>, 常陸利根川: 6 km<sup>2</sup>) で、日本では琵琶湖 (670.25 km<sup>2</sup>) に次いで 2 番目に大きな淡水湖である (国土交通省関東地方整備霞ヶ浦河川事務所, 2005)。霞ヶ

浦は、主湖である西浦とそれに付随する北浦および外浪逆浦およびこれら 3 つの湖を結ぶ河川などをすべて含めた総称である。かつては海が深く入りこんだ入り江であったが、利根川などの堆積作用と第三紀末以後の関東造盆地運動によって、海から遮断されて生じた。西浦の湖盆は皿状であるが、北浦は谷状をなす (日本陸水学会, 2006)。堤防延長は 248.9 km (西浦: 120.5 km, 北浦: 74.5 km, 常陸利根川: 53.9 km) である。水面標高は 4 月～10 月中旬は Y.P.+1.10 m, 10 月中旬～3 月下旬では Y.P.+1.30 m となっている。平均水深は 4 m で、最大水深は 7 m と浅い湖である。貯流量は約 8.5 億 m<sup>3</sup> であり、県南地域の上水道用水 (最大取水量: 3.85 m<sup>3</sup>/sec), 農業用水 (113.78 m<sup>3</sup>/sec), 工業用水 (12.24 m<sup>3</sup>/sec) などに利用されており、水資源として重要な役割を担っている。また霞ヶ浦周辺では、水郷地帯の稲作や、生産量が全国第 1 位のレンコン栽培、鯉の養殖などが盛んに行われている。霞ヶ浦には 56 本の河川が流入しており、流出口は利根川の 1 本だけである。霞ヶ浦の滞留時間は 200 日と長く、

\* 筑波大学陸域環境研究センター

\*\* 筑波大学生命環境科学研究科

\*\*\* 筑波大学生命環境科学研究科 (現: 科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業)

一度汚濁が進むと回復するまでに長い時間を要すると考えられている（国土交通省関東地方整備霞ヶ浦河川事務所，2005）。

このように地域に密着した霞ヶ浦であるが，昭和40年代の高度経済成長期に家庭排水や産業排水の流入が増えると共に水質は次第に悪化し，昭和40年代後半ではCOD（化学的酸素要求量）は7mg/L台となり，昭和54年には11.3 mg/Lとピークを示した。その後，水質浄化対策の促進によってCOD濃度は若干低下したものの，7～9 mg/Lの間で横ばいとなっており，現在でも環境基準値である3.0 mg/Lを大きく超えている。また，湖水の全窒素濃度や全リン濃度も環境基準値を大きく上回っており，長期的な水質汚濁が継続している。

霞ヶ浦の汚濁要因には，大きく外部要因と内部要因とに分けられる。外部要因には河川を通じて入るもの（自然起源・生活排水・工場・畜産・農業廃水起源など）と湖に直接流入するもの（降水など）があり，内部要因には湖内部でのプランクトンの増殖や底泥からの汚染物質の溶出がある。このように，湖の水質は流域内における土地利用や産業，農業活動などの影響を強く受けており，ひいては，それらの影響を霞ヶ浦へともたらす河川のもつ役割が非常に重要となる。霞ヶ浦の水質汚染や物質収支を考える際には，湖へ流入する河川の水質や流量を把握することが不可欠である。

本論文では，霞ヶ浦流域における主要な河川について調査・採水を実施し，それらの結果をもとに，河川流量，河川水・霞ヶ浦の水質特性の把握，および河川から霞ヶ浦へともたらされる物質の負荷量の推定値等について報告する。

## II 調査概要と分析方法

調査・採水は2005年11月27日～28日に実施した。11月27日に流域内の主要9河川において，簡易水質測定，流量観測および採水を行った。ま

た11月28日に遊覧船に乗り，霞ヶ浦の3地点において簡易水質測定および採水を実施した。

調査を行った河川および湖の地点をFig. 1に示した。対象とした河川は，一ノ瀬川，清明川，梶無川，園部川，菱木川，桜川，小野川，花室川，恋瀬川の9河川であり，それぞれ流量観測および採水を実施した。現地では，EC（ECメータ，MODEL SC82，YOKOGAWA製），pH，水温（pHメータ，MODEL PH81，YOKOGAWA製），全窒素（パケットテスト，WAK-TN・i，共立理化），硝酸（パケットテスト，ZAK-NO<sub>3</sub>，共立理化），化学的酸素要求量（COD，パケットテスト，ZAK-COD，共立理化）の測定を実施した。また採水は100 mlのポリ容器を用いて採取した。流量観測は，山本（1968）や新井（2003）に記載されている方法に準じた。

霞ヶ浦では，土浦港そばの掛馬，湖心，麻生の3地点を対象とし，それぞれ表面付近の湖水と湖底の湖水を採水して調査・分析を実施した。現地では，EC，pH，水温，全窒素，硝酸，CODを測定した（各測定に利用した測器，測定方法は，河川と同じである）。また，湖水についても同様に100 mlのポリ容器に採取した。

採取した河川および湖水のサンプルは大学に持ち帰った後，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>（pH4.8アルカリ度滴定法），Cl<sup>-</sup>，NO<sub>3</sub><sup>-</sup>，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>，Na<sup>+</sup>，K<sup>+</sup>（イオンクロマトグラフHIC-SP/VP Super，デュアル流路システム，Shimadzu），Ca<sup>2+</sup>，Mg<sup>2+</sup>，SiO<sub>2</sub>（ICPプラズマ発光分光分析装置，ICAP-757v，Nippon Jarrell-Ash），酸素安定同位体比，水素安定同位体比（Finnigan MAT 252，Thermo Electron）について分析を実施した。

## III 結果・考察

### 1. EC，pH，水温，パケットテスト測定結果

9河川および霞ヶ浦のEC，pH，水温，パケットテスト（全窒素，硝酸，COD）の結果をTable 1

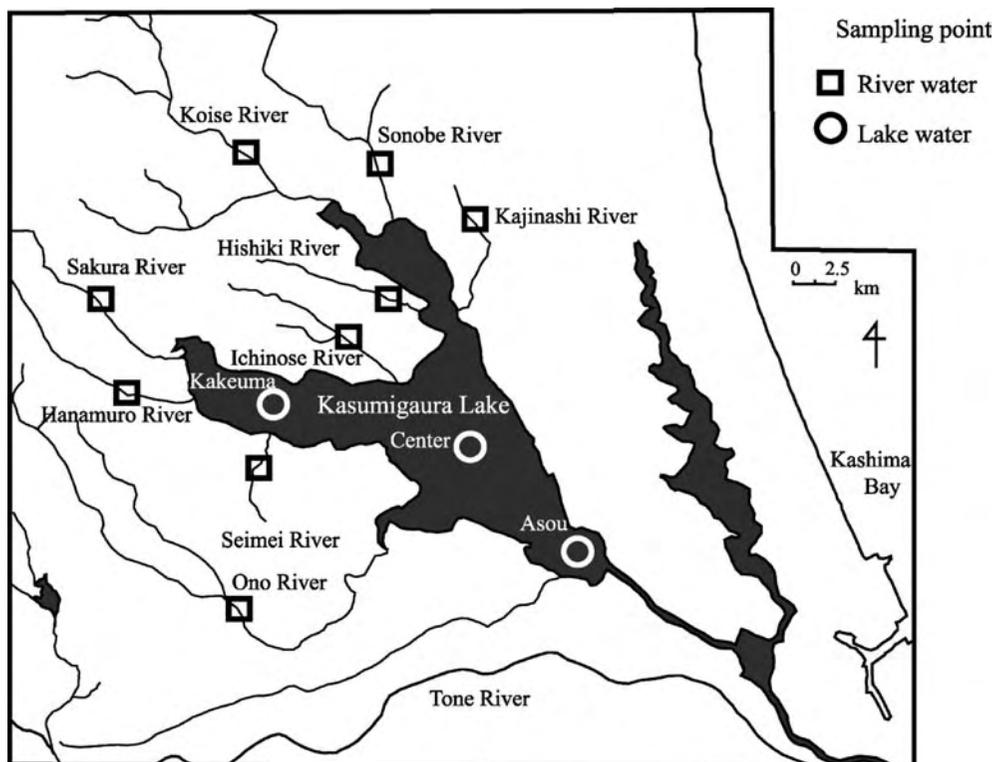


Fig.1 Location map

Table 1 Result of field survey of Kasumigaura Lake and rivers

| Observation point | Date             | EC                          | Water temperature      | pH   | Total nitrogen           | COD                      | Nitrate                  | Nitrate nitrogen         | Discharge |      |
|-------------------|------------------|-----------------------------|------------------------|------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|------|
|                   |                  | ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | ( $^{\circ}\text{C}$ ) |      | ( $\text{mg}/\text{L}$ ) | ( $\text{mg}/\text{L}$ ) | ( $\text{mg}/\text{L}$ ) | ( $\text{mg}/\text{L}$ ) |           |      |
| Kasumigaura       | Kakeuma (top)    | 28 Nov. 2005                | 208                    | 10.7 | 8.73                     | 1                        | 5                        | 4                        | 0.9       |      |
|                   | Kakeuma (bottom) | 28 Nov. 2005                | 208                    | 10.8 | 8.68                     | 2                        | 13                       | 4                        | 0.9       |      |
|                   | Center (top)     | 28 Nov. 2005                | 233                    | 12.6 | 8.96                     | 0.5                      | 7                        | 3                        | 0.7       |      |
|                   | Center (bottom)  | 28 Nov. 2005                | 232                    | 12.1 | 8.88                     | 0                        | 8                        | 1                        | 0.2       |      |
|                   | Asou (top)       | 28 Nov. 2005                | 240                    | 11.2 | 9.28                     | 0                        | 6                        | 1.5                      | 0.3       |      |
|                   | Asou (bottom)    | 28 Nov. 2005                | 262                    | 11.0 | 9.25                     | 0                        | 7                        | 1                        | 0.2       |      |
| River             | Ichinose         | 27 Nov. 2005                | 214                    | 12.0 | 8.68                     | 5                        | 5                        | 15                       | 3.4       | 0.20 |
|                   | Seimei           | 27 Nov. 2005                | 301                    | 13.2 | 8.17                     | 2.5                      | 5                        | 14                       | 3.2       | 0.32 |
|                   | Kajinashi        | 27 Nov. 2005                | 274                    | 15.4 | 7.66                     | 8                        | 7                        | 30                       | 6.8       | 0.26 |
|                   | Sonobe           | 27 Nov. 2005                | 231                    | 12.6 | 6.79                     | 7                        | 5                        | 30                       | 6.8       | 0.94 |
|                   | Hishiki          | 27 Nov. 2005                | 265                    | 11.3 | 9.08                     | 7                        | 5                        | 20                       | 4.5       | 0.22 |
|                   | Sakura           | 27 Nov. 2005                | 198                    | 9.5  | 8.42                     | 4                        | 5                        | 10                       | 2.3       | 2.87 |
|                   | Ono              | 27 Nov. 2005                | 243                    | 12.3 | 7.46                     | 5                        | 10                       | 15                       | 3.4       | 0.63 |
|                   | Hanamuro         | 27 Nov. 2005                | 227                    | 12.0 | 7.63                     | 5                        | 5                        | 7                        | 1.6       | 0.45 |
|                   | Koise            | 27 Nov. 2005                | 119                    | 12.6 | 7.44                     | 5                        | 5                        | 5                        | 1.1       | 2.32 |

に示した。

河川水の EC は 119 ~ 301  $\mu\text{S}/\text{cm}$  と地点ごとに異なった値を示している。恋瀬川 (119  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) や桜川 (198  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) のように比較的大きな河川では EC は相対的に低くなっているが、清明川 (301  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )、梶無川 (274  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )、菱木川 (265  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) では相対的に値が高くなっている。湖水では、208 ~ 262  $\mu\text{S}/\text{cm}$  と河川水と比べて 3 地点間の差異は小さくなっている。また、上流側の掛馬では低く、下流側の麻生が最も高い値を示しているが、各地点とも表層と湖底での差はほとんどみられない。これは湖の水深が浅いため、湖水が比較的良く混合していることに起因すると考えられる。

pH は河川水では 6.79 ~ 9.08 となっており、園部川を除いてアルカリ性が強くなっている。特に、一ノ瀬川、菱木川で値が高くなっている。湖水では 8.68 ~ 9.28 と河川よりも更にアルカリ性が強くなっており、植物性プランクトンによる光合成の影響があらわれていると考えられる。西側の掛馬 (上流側) から南東側の麻生 (下流側) に向かって pH が高くなっていることから、下流部では塩水の混入による影響も生じていると考えられる。これは EC の分布においても示唆される。また表層のほうが湖底よりも値が若干高くなる傾向があらわれている。

河川水の水温は 9.5 $^{\circ}\text{C}$  の桜川と 15.4 $^{\circ}\text{C}$  の梶無川以外は 12 $^{\circ}\text{C}$  前後の値となっている。湖水の水温は湖心でやや高くなっているが (12 $^{\circ}\text{C}$  前後)、表層と湖底の差はほとんどみられない。

河川の全窒素濃度は梶無川の 8 mg/L が最も高く、他の河川でも 2.5 ~ 7 mg/L となっており、湖の値 (未検出 ~ 2 mg/L) と比べると相対的に多くの窒素が含まれている。また硝酸の値をみると、花室川 (7 mg/L) と恋瀬川 (5 mg/L) では比較的低濃度となっているが、他の河川では軒並み 10 mg/L を超えており、特に梶無川や園部川では 30 mg/L と相対的に高い値を示している。

一方、湖水の硝酸濃度は 1 ~ 4 mg/L と河川と比べると低くなっている。霞ヶ浦流域では市街地や農地の割合が高くなっているため、流域内の河川に流入する窒素の負荷量は高くなり、従って、河川水には湖水よりも高い濃度の窒素や硝酸が含まれていると考えられる。COD は河川水よりも湖水のほうが相対的に高くなっており、湖水の富栄養化の影響があらわれている。

## 2. 水質測定結果

河川水および湖水のヘキサダイアグラムを Fig.2 に、数値データを Table 2 に示した。河川水は  $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$  型を示しているが、清明川では  $\text{Na}^+$  が多くっており湖水のヘキサダイアグラム ( $\text{Na}^+$  が相対的に高い) と類似した形状を呈している。梶無川、菱木川、一ノ瀬川では  $\text{Mg}^{2+}$  の割合が高くなっている。湖水の値は下流部の麻生で  $\text{Na}^+$  が最も高くなっていることから、塩水の流入の存在が示唆されている。一方、上流部の掛馬では湖心や麻生とはヘキサダイアグラムの形状が若干異なっていることから、流入河川の影響を受けているものと考えられる。 $\text{NO}_3^-$  の値をみると、湖水では含有量が僅かであるのに対し、河川では全地点で相対的に高い値を示しており、特に梶無川、園部川、菱木川で高濃度となっている。これは周辺の土地利用 (住宅地や農地) の影響を受けていることに起因する。

## 3. 河川流量

各河川の流量を Fig.3 に、数値データを Table 3 に示した。流量は桜川 (2.87  $\text{m}^3/\text{sec}$ ) と恋瀬川 (2.32  $\text{m}^3/\text{sec}$ ) の両河川が群を抜いて高い値となっている。園部川も 0.94  $\text{m}^3/\text{sec}$  と相対的に流量が多くなっているが、他の河川流量は 0.2 ~ 0.6  $\text{m}^3/\text{sec}$  と比較的少ない値を示している。

各河川の流域面積と流量の関係を Fig.4 に示した。この図から、小野川は流域面積に対する流量の割合が他の河川と比べて非常に小さい。また、

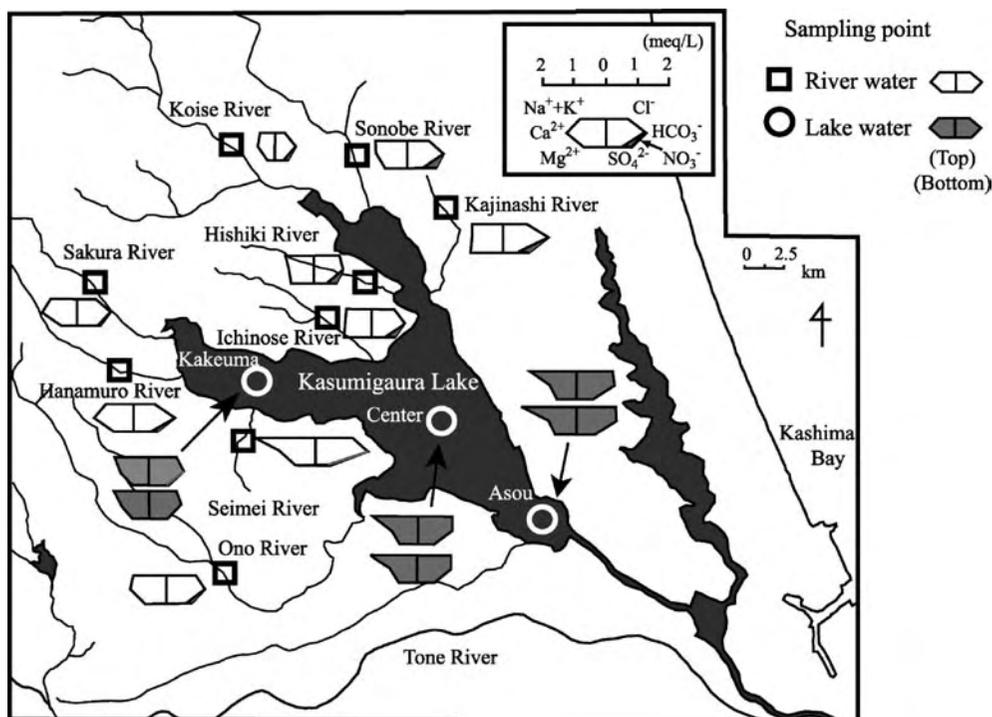


Fig.2 Water quality of the lake and river water

Table 2 Water quality and isotope data of Kasumigaura Lake and river water

| Observation point | Cl <sup>-*1</sup><br>(mg/L) | NO <sub>3</sub> <sup>-*1</sup><br>(mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-*1</sup><br>(mg/L) | HCO <sub>3</sub> <sup>-*3</sup><br>(mg/L) | Na <sup>++*1</sup><br>(mg/L) | K <sup>++*1</sup><br>(mg/L) | Mg <sup>2+*2</sup><br>(mg/L) | Ca <sup>2+*2</sup><br>(mg/L) | SiO <sub>2</sub> <sup>*2</sup><br>(mg/L) | δ <sup>18</sup> O <sup>*4</sup><br>(‰) | δD <sup>*4</sup><br>(‰) |     |
|-------------------|-----------------------------|--|---|---|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--|--|-------------------------|-----|
| Kasumigaura       | Kakeuma (top)               | 30.35                                    | 3.03                                      | 26.83                                     | 66.50                        | 23.12                       | 4.51                         | 6.39                         | 18.34                                    | 17.14                                  | -5.2                    | -33 |
|                   | Kakeuma (bottom)            | 30.29                                    | 3.01                                      | 26.56                                     | 63.15                        | 23.04                       | 4.41                         | 6.39                         | 18.23                                    | 17.40                                  | -5.2                    | -33 |
|                   | Center (top)                | 39.17                                    | 0.62                                      | 25.63                                     | 65.89                        | 30.25                       | 4.49                         | 7.06                         | 16.62                                    | 17.24                                  | -4.8                    | -31 |
|                   | Center (bottom)             | 38.74                                    | 0.56                                      | 25.26                                     | 67.11                        | 30.25                       | 4.49                         | 7.21                         | 16.91                                    | 17.38                                  | -4.7                    | -32 |
|                   | Asou (top)                  | 40.34                                    | 0.28                                      | 25.30                                     | 71.99                        | 32.39                       | 4.91                         | 7.41                         | 17.10                                    | 16.65                                  | -4.7                    | -33 |
|                   | Asou (bottom)               | 44.61                                    | 0.33                                      | 26.00                                     | 75.96                        | 37.96                       | 5.23                         | 8.51                         | 18.44                                    | 17.27                                  | -4.7                    | -32 |
| River             | Ichinose                    | 25.75                                    | 21.58                                     | 19.51                                     | 64.06                        | 18.12                       | 0.00                         | 10.30                        | 17.51                                    | 26.37                                  | -6.1                    | -39 |
|                   | Seimei                      | 42.69                                    | 8.09                                      | 15.31                                     | 104.33                       | 41.50                       | 4.59                         | 6.97                         | 21.78                                    | 33.21                                  | -6.5                    | -42 |
|                   | Kajinashi                   | 28.01                                    | 29.72                                     | 15.69                                     | 89.07                        | 18.88                       | 7.38                         | 12.70                        | 20.06                                    | 32.26                                  | -6.6                    | -42 |
|                   | Sonobe                      | 23.33                                    | 29.62                                     | 19.75                                     | 71.69                        | 20.34                       | 3.97                         | 8.91                         | 19.82                                    | 30.77                                  | -6.8                    | -43 |
|                   | Hishiki                     | 28.12                                    | 23.33                                     | 16.05                                     | 57.96                        | 19.73                       | 1.95                         | 8.98                         | 16.02                                    | 26.05                                  | -6.4                    | -41 |
|                   | Sakura                      | 20.47                                    | 5.93                                      | 30.07                                     | 65.28                        | 17.68                       | 2.69                         | 6.11                         | 22.62                                    | 23.29                                  | -6.7                    | -43 |
|                   | Ono                         | 32.36                                    | 13.58                                     | 25.68                                     | 74.43                        | 22.99                       | 2.77                         | 8.47                         | 23.87                                    | 27.81                                  | -6.6                    | -42 |
|                   | Hanamuro                    | 22.57                                    | 8.75                                      | 27.05                                     | 80.53                        | 17.69                       | 3.49                         | 8.22                         | 25.06                                    | 36.95                                  | -6.4                    | -41 |
|                   | Koise                       | 9.30                                     | 9.79                                      | 10.06                                     | 39.66                        | 10.43                       | 1.39                         | 3.28                         | 11.47                                    | 25.56                                  | -7.1                    | -45 |

\*1 : Ion Chromatograph (HIC - SP/VP Super, dual flow system, Shimadzu Co., Ltd.)

\*2 : ICP (ICAP - 757v, Inductivity Coupled Argon Plasma Atomic Emission Spectrometer, Nippon Jarrell - Ash)

\*3 : pH4.8 alkalinity titration method

\*4 : Equilibration method (Finnigan MAT 252, Thermo Electron Co., Ltd.)

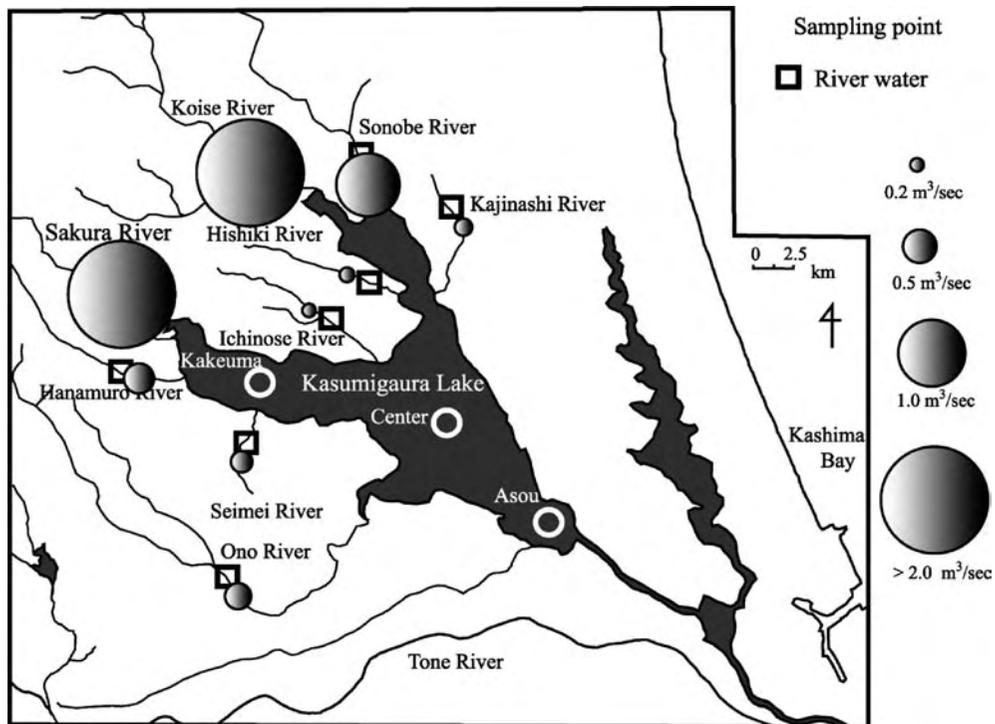


Fig.3 Stream discharge of nine rivers

Table 3 Catchment area and specific discharge

| River     | Area (km <sup>2</sup> ) |                  |                 |                |       |   |   | Total | Discharge<br>(m <sup>3</sup> /sec) | Specific<br>discharge<br>(m <sup>3</sup> /sec/km <sup>2</sup> )<br>× 10 <sup>-3</sup> |
|-----------|-------------------------|------------------|-----------------|----------------|-------|---|---|-------|------------------------------------|---|
|           | Urban<br>area           | Wooded<br>forest | Upland<br>field | Paddy<br>field | Lotus | Conversion from<br>paddy field to<br>upland field | Non-cultivating<br>land of paddy<br>field |       |                                    |   |
| Ichinose  | 4.3                     | 11.8             | 6.2             | 4.0            | 1.4   | 0.5   | 0.1                                       | 28.3  | 0.2                                | 7.1   |
| Seimei    | 4.6                     | 11.6             | 5.8             | 3.3            | 0.3   | 0.2   | 0.3                                       | 26.1  | 0.3                                | 12.3  |
| Kajinashi | 3.6                     | 15.8             | 7.3             | 4.6            | 0.1   | 0.7   | 0.3                                       | 32.4  | 0.3                                | 8.0   |
| Sonobe    | 11.5                    | 34.3             | 19.1            | 9.9            | 0.8   | 1.3   | 1.0                                       | 77.9  | 0.9                                | 12.1  |
| Hishiki   | 2.6                     | 9.4              | 5.1             | 3.3            | 1.0   | 0.5   | 0.1                                       | 22.0  | 0.2                                | 10.0  |
| Sakura    | 47.7                    | 158.6            | 53.8            | 62.2           | 0.2   | 13.1  | 5.0                                       | 340.6 | 2.9                                | 8.4   |
| Ono       | 31.5                    | 75.9             | 30.0            | 28.5           | 0.9   | 1.7   | 2.3                                       | 170.8 | 0.6                                | 3.7   |
| Hanamuro  | 9.8                     | 14.6             | 7.9             | 5.0            | 0.9   | 0.9   | 0.3                                       | 39.4  | 0.5                                | 11.4  |
| Koise     | 22.0                    | 123.6            | 39.3            | 26.7           | 0.7   | 1.7   | 2.6                                       | 216.6 | 2.3                                | 10.7  |

小野川, 桜川, 恋瀬川を除いた6河川は, 流域面積, 流量共に似通っていることが示されている.

各河川の比流量(流量/流域面積)をFig.5に示した. 清明川, 園部川は  $12 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{km}^2 \times 10^{-3}$  とほぼ同一であり, 花室川と恋瀬川がそれに続いて多くなっている(約  $11 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{km}^2 \times 10^{-3}$ ). 小

野川は  $3.7 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{km}^2 \times 10^{-3}$  と最も比流量が少ないことがこの図においても示されている.

#### 4. 土地利用と河川のT-N, COD負荷量

各河川流域における土地利用(茨城県生活環境部霞ヶ浦対策, 2004)の割合をFig.6に, 面積値

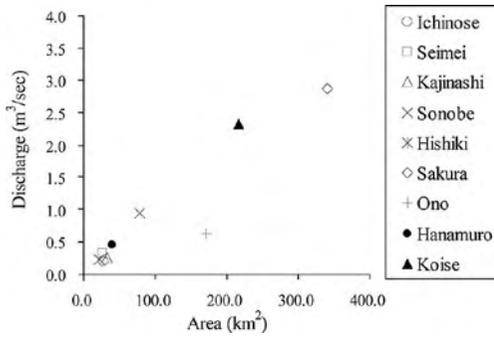


Fig.4 Catchment area versus discharge

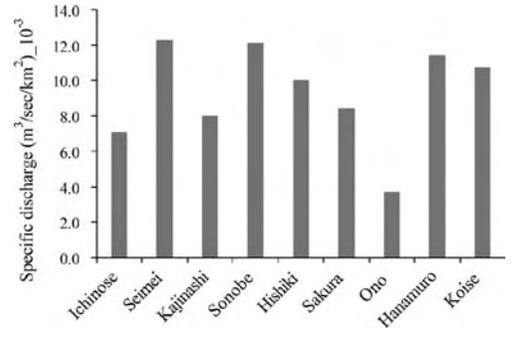


Fig.5 Specific discharge of nine rivers

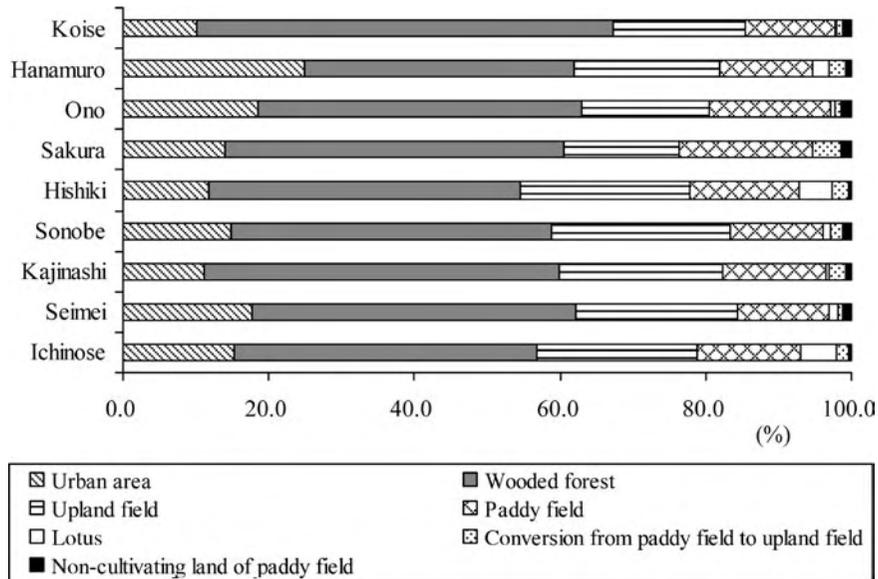


Fig.6 Rate of land use in catchment area of nine rivers

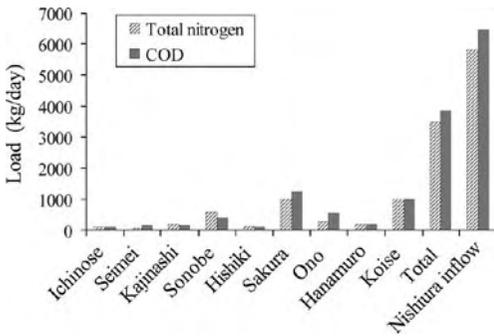


Fig.7 Total nitrogen load and COD load of nine rivers

Table 4 Stream discharge, total nitrogen load and COD load

| Observation point | Discharge<br>(m <sup>3</sup> /sec) | Total nitrogen load |                      |
|-------------------|------------------------------------|---------------------|----------------------|
|                   |                                    | (kg/day)            | COD load<br>(kg/day) |
| Ichinose          | 0.20                               | 86                  | 86                   |
| Seimei            | 0.32                               | 69                  | 138                  |
| Kajinashi         | 0.26                               | 179                 | 156                  |
| Sonobe            | 0.94                               | 570                 | 408                  |
| Hishiki           | 0.22                               | 133                 | 95                   |
| Sakura            | 2.87                               | 992                 | 1240                 |
| Ono               | 0.63                               | 272                 | 544                  |
| Hanamuro          | 0.45                               | 194                 | 194                  |
| Koise             | 2.32                               | 1002                | 1002                 |
| Total             | 8.21                               | 3497                | 3863                 |
| Nishiura inflow   | 13.7                               | 5833                | 6447                 |

を Table 3 に示した。すべての河川で山林の占める割合が最も大きく、40～50%となっている。特に恋瀬川における割合は57.1%と高くなっているが、これは流域内に山地を多く含んでいるためである。山林の割合が高いことが、恋瀬川の水質（ECやイオン濃度が低い）に影響を与えていると考えられる。市街地と畑地、水田はほぼ同じ割合となっているが、花室川では市街地の割合が相対的に高くなっている。ハス田は菱木川と一ノ瀬川の流域で比較的高い割合となっている。転作田や不作付田の割合は、桜川を除く河川ではいずれも数パーセントと低い割合となっている。

各河川的全窒素負荷量とCOD負荷量について Fig.7 に、数値データは Table 4 に示した。桜川、恋瀬川、園部川で全窒素負荷量、COD負荷量が高くなっていることがあらわれている。これらの3つの河川に含まれる全窒素およびCOD濃度自体は9つの河川の中では相対的に低い濃度であるが、河川流量が多いため、負荷量としては高い値となっている。9河川の負荷量の合計をみると、全窒素では3497 kg/day、CODでは3863 kg/dayであり、これに9河川の流域面積の合計（954.2 km<sup>2</sup>）と西浦の総流域面積（1596.8 km<sup>2</sup>）を考慮して霞ヶ浦に流入する総負荷量を求めると、全窒素では5.85 t/day（=3.497 t/day × (1596.8 km<sup>2</sup>/954.2 km<sup>2</sup>)), CODでは6.47 t/day（=3.863 t/day × (1596.8 km<sup>2</sup>/954.2 km<sup>2</sup>))となる。霞ヶ浦で観測した3地点の全窒素とCODの平均値（それぞれ、0.853 t/day, 7.667 t/day）に霞ヶ浦の容積（642.1 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>）を掛けることによって、湖内の物質総量を求めることができる（全窒素：374.3 t, COD：4923 t）。この湖内の物質総量を霞ヶ浦に流入する総負荷量で割るとそれぞれの物質の滞留時間が求められ（全窒素：374.3/5.85, COD：4923/6.47）、全窒素では64日、CODでは761日となった。

また水の滞留時間を求めるため、9河川の流量の合計（8.21 m<sup>3</sup>/sec）と西浦流域からの流入量

（13.7 m<sup>3</sup>/sec）を合わせた値（21.91 m<sup>3</sup>/sec）で霞ヶ浦の容積（642.1 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>）を割ると、339日となる。一般的に霞ヶ浦の水の滞留時間は200日とされており（国土交通省関東地方整備霞ヶ浦河川事務所、2005）、今回の観測結果では滞留時間は約2倍弱になっている。この理由として、以下の3点が想定される。1）今回の各河川の観測地点が限られているため、観測地点よりも下流の流量を考慮に入れていない、2）観測した時点の流量は渇水期の流量である、3）霞ヶ浦へ流入するのは河川水のみでなく地下水も流入している可能性がある。以上の要因によって流域から湖への流入量が過小評価され、従って算出された滞留時間が長くなったと考えられる。

全窒素、CODおよび水の滞留時間を比較すると、全窒素は水の滞留時間に比較して短く、CODは長くなっている。これは、窒素は湖内で脱窒およびプランクトンに取り込まれて沈降することによって、湖水での濃度が減少するため、滞留時間が短くなっていると考えられる。一方、CODは湖内で植物プランクトンの増殖などによって生産されるため（内部生産）、湖水の濃度が高くなり、結果として滞留時間が相対的に長くなっていると考えられる。

## 5. 酸素・水素安定同位体分布

各河川水および湖水の酸素安定同位体比（以下 $\delta^{18}\text{O}$ 値とする）と水素安定同位体比（以下 $\delta\text{D}$ 値とする）をそれぞれ Fig.8 と Fig.9 に、数値データを Table 2 に示した。

各河川の $\delta^{18}\text{O}$ 値および $\delta\text{D}$ 値は、恋瀬川では相対的に低く（ $\delta^{18}\text{O}$ 値：-7.1‰,  $\delta\text{D}$ 値：-45‰）、一ノ瀬川では相対的に高い値（ $\delta^{18}\text{O}$ 値：-6.1‰,  $\delta\text{D}$ 値：-39‰）となっているが、他の7河川はほぼ同じ値を示している。恋瀬川流域には山地が含まれており、標高の高い場所で涵養された同位体比が相対的に低い水が含まれていると考えられ（例えば、筑波山東側斜面の渓流水の $\delta^{18}\text{O}$ は

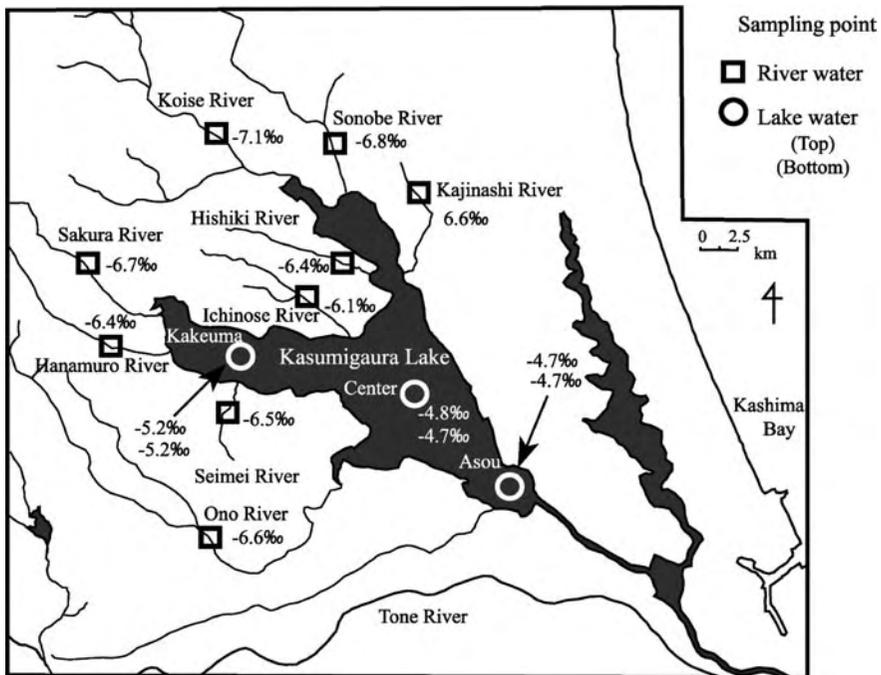


Fig.8 Stable isotope ratios of oxygen of lake and river water

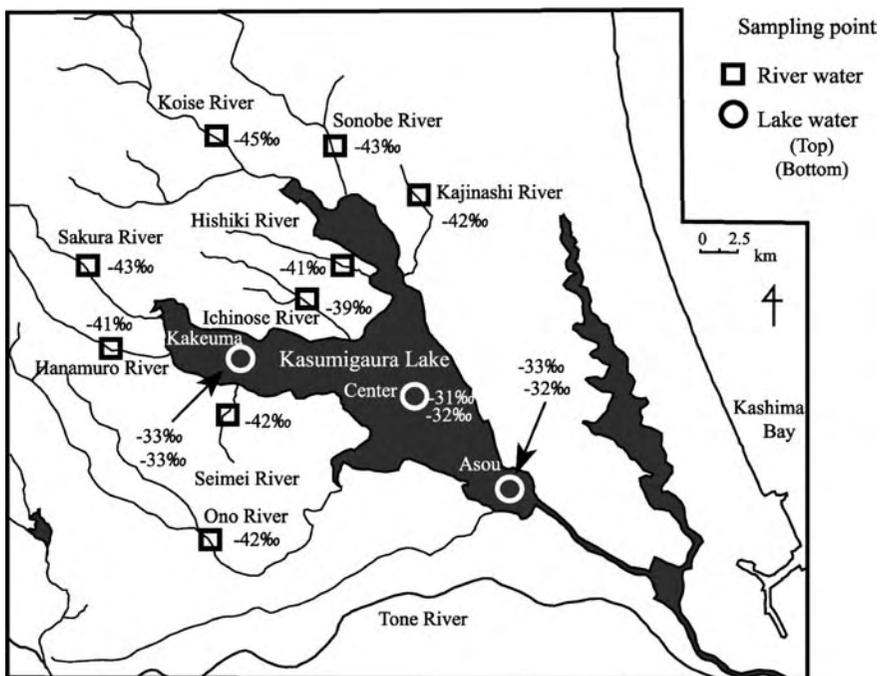


Fig.9 Stable isotope ratios of hydrogen of lake and river water

-8.0‰,  $\delta D$  は-50‰: 藪崎ほか, 2006), こうした影響が河川水の安定同位体比にあらわれていると考えられる。一方, 一ノ瀬川は流域面積が相対的に小さく, また流量も少ないため, 蒸発による同位体濃縮の影響が及んでいることが推測される。一方, 湖水の  $\delta^{18}O$  値および  $\delta D$  値は河川と比べると相対的に高くなっており, 蒸発の影響を受けて同位体比が高くなっていると考えられる。また湖水の  $\delta^{18}O$  値は下流部ほど値が高くなっていることから, 滞留時間の長い水ほど, 蒸発濃縮の影響があらわれていることが示唆される。

#### IV まとめ

霞ヶ浦流域の河川水および湖での調査・採水を実施した結果, 以下のことが明らかとなった。

- (1) 水質は河川と湖では異なっており, 特に河川では  $NO_3^-$  濃度が高くなっている。河川水の水質は流域内の土地利用とも関連している。湖では上流部 (掛馬) と湖心・下流部 (麻生) では若干水質が異なっており, 前者は流入河川の影響を, 後者は塩水の影響を受けていると考えられる。これは, EC や pH の結果とも整合している。
- (2) 河川流量は恋瀬川と桜川および園部川で相対的に多くなっている。比流量に換算すると, 清明川, 園部川, 花黒川, 恋瀬川が相対的に多く, 小野川が相対的に少ない。
- (3) 流域の土地利用割合から, 恋瀬川では山林の占める割合が高く, 花室川は市街地の占める割合が高くなっている。こうした土地利用は河川水質にも影響を与えている。
- (4) 9 河川の全窒素の総負荷量は 3497 kg/day, COD の総負荷量は 3863 kg/day であり, 西浦の流入量を考慮したうえで霞ヶ浦内の物質の滞留時間を求めたところ, 全窒素では 64 日, COD では 761 日となった。また水の滞留時間は 339 日となった。窒素は脱窒,

沈降によって湖水の濃度が低下するため, 滞留時間は相対的に短くなっている。一方, COD は内部生産によって湖水の濃度が増加するため, 滞留時間は相対的に長くなっている。

- (5) 河川の  $\delta^{18}O$  値,  $\delta D$  値は恋瀬川で相対的に低く, 一ノ瀬川で相対的に高い値を示している。これは流域の土地利用の違いに起因していると考えられる。霞ヶ浦の湖水の  $\delta^{18}O$  値,  $\delta D$  値は河川水と比較すると高くなっており, 蒸発濃縮の影響があらわれている。

今回の調査では観測期間や観測地点などが限られていたため, 流域内の物質や水の滞留時間の推定値には多少疑問が残されているが, 今後, 他の地点においても調査を行うことによって, より信頼性の高いデータを得ることができると期待される。

#### 謝辞

本研究は, 平成 17 年度水文学野外実験 A (2005 年 11 月 27 日~30 日実施) において実施された調査をもとに考察を行いました。調査に参加された学群生および TA としてご協力いただきました院生の方々に, 厚く御礼申し上げます。また, 調査見学に際し, 国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所の方には大変有意義なお話をいただきました。記して, ここに感謝の意を表します。

#### 文献

- 新井 正 (2003): 「水環境調査の基礎 改訂版」, 古今書院, 170p.
- 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策 (2004): 第 4 期の霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画策定関係資料集, 221p.
- 国土交通省関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所

- (2005):「霞ヶ浦」. 44p.
- 国土交通省国土地理院 (2006):「全国都道府県市区町村別面積調 (平成 17 年版)」。日本地図センター. 168p.
- 日本陸水学会 (2006):「陸水の事典」講談社, 578p.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・辻村真貴・林 陽生 (2006): 筑波山における渓流水, 湧水, 降水の水質・安定同位体特性および涵養域の推定. (地球惑星科学連合 2006 年合同大会, CD-ROM 版予稿集有り, 講演番号: H121-P015).
- 山本荘毅 (1968):「陸水」. 共立出版, 347p.
- (2006 年 5 月 31 日受付, 2006 年 8 月 10 日受理)



## 茨城県つくば市における湧水の特徴

Characteristics of Spring Water in Tsukuba City, Ibaraki Prefecture

水尻 正博\*・藪崎 志穂\*\*・田瀬 則雄\*\*\*・辻村 真貴\*\*\*

Masahiro MIZUJIRI\*, Shiho YABUSAKI\*\*, Norio TASE\*\*\* and Maki TSUJIMURA\*\*\*

### 1 研究の背景

湧水とは一般的に地下水が自然状態で地表面に流出したものであり、身近な生活用水として古代から利用されている。現在では「名水」などと呼ばれ観光の名所としても親しまれている。山地周辺や扇状地の扇端部、台地の崖線部などに広く分布し、各地域の湧水を対象とした研究も盛んに行われている。例えば井野（1987）や佐藤ほか（1997）では富士山周辺の湧水について、島野（1994, 1997, 2001）では阿蘇山周辺の湧水について研究が行われている。また、日本地下水学会（1994, 1999）では、1985年に環境庁によって選定された「名水百選」を中心に全国の名水が紹介されている。

湧水は水道水に比べて“おいしい”“きれい”と認識される傾向があり、飲料などとして利用するために湧水をくみに訪れる人々が多くみられる。湧水を含む地下水の水質は地域により多様であるが、水道水に比べてカルシウムなどの無機イオンを多く含む場合が多く、これが“湧水はおいしい”とされる由来であろう。しかし、湧水・地下水が“きれい”であるかということ、必ずしもそう

ではない。環境省環境管理局水環境課（2005）によると、水質汚濁に係る環境基準のうち、人の健康の保護に関する環境基準（健康項目）については、現在、カドミウム・鉛等の重金属類、トリクロロエチレン等の有機塩素系化合物、シマジン等の農薬など、26項目が設定されているほか、さらに要監視項目としてクロロホルムなどの27項目が設定されている。全国的な地下水水質状況の把握を目的として平成16年度（2004年度）に実施された概況調査の結果によると、調査対象井戸（4,955本）の7.8%（387本）において各項目の環境基準を超過する井戸がみられた（環境省環境管理局水環境課、2005）。また、1999年2月に要監視項目から環境基準となった硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素の環境基準超過率は5.5%と、他の項目と比較して最も高くなっている。硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素が一定以上含まれている水を摂取すると、乳幼児を中心に血液の酸素運搬能力が失われ酸欠になる症状（メトヘモグロビン血症）を引き起こす。硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素による地下水の汚染については、田瀬（2003）などが指摘しているように全国的なスケールで発生している。汚染原因は畑地での過剰施肥や家畜排泄物な

\* 筑波大学第一学群自然学類

\*\* 筑波大学陸域環境研究センター

\*\*\* 筑波大学生命環境科学研究科

どの農業起源、し尿や家庭排水などの生活排水起源を中心として、工業起源や大気起源など多様である。地下水の一部である湧水についても同様のことがいえるであろう。

また、都市化に伴う水環境の変化に起因する湧水の湧出量の減少や、湧水そのものが枯渇・消失したケースも存在する。例えば、東京都環境局は東京都内の湧水についての調査を平成2年から毎年行っている。平成12年では717ヶ所において湧水が確認されたが、これは5年前の平成7年度の調査と比較して70ヶ所の湧水が消失していたことになる（東京地下水研究会、2003）。この原因として、建物の建設や土地の造成などによる湧水地点そのものの消失や、都市化に伴い地表が建物やアスファルトなどで被覆され、雨水浸透が減少したことが挙げられる。

以上のような湧水の水質汚染、湧出量の減少や消失および枯渇などを背景に、東京都など一部の自治体では湧水・地下水の保護・保全への取り組みが進められている。

茨城県つくば市には、筑波山山麓を中心に多くの湧水が広域にわたって分布している。つくば市によりこれまで多数の湧水が確認されており、市民参加型の調査活動も活発に行われるなど、市民の関心も高い。さらに、つくば市は湧水の分布や利用方法、歴史、周囲の自然環境などに関して聞き取り調査を行っている（つくば市、2004）。この調査の中で、複数の湧水地点で湧出量の減少および湧水地点の消失が明らかにされている。また、都市化に伴う水文環境の変化も吉谷ほか（2001）により指摘されている。このようなことから、つくば市においても湧水の保護・保全に向けた取り組みが必要であると考えられる。しかしながら、つくば市においてはこれまでに湧出機構や水質特性などの水文学的な立場に立った調査はあまり実施されていない。湧水の保護・保全への取り組みを進めるためには、湧水の調査を行い、その実態を明らかにすることが必要である。そこで、

本研究では、茨城県つくば市周辺の湧水を対象として、湧水の分布状況や湧出機構、および水質特性などを明らかにすることを目的として調査・解析を行った。

## II 研究対象地域の概要と研究方法

### 1. つくば市の地形・地質

つくば市は茨城県の南西に位置し、多くの研究教育機関が集まる筑波研究学園都市を構成している（Fig. 1）。南北に30.4 km、東西に14.9 kmと南北に長い形状をしており、面積は約287km<sup>2</sup>と県内では3番目に広い面積を有している（つくば市市長公室行政経営課編、2005）。市北部には筑波山が位置するほか、市の大部分は筑波台地で構成されている。

筑波山はつくば市北部に位置し、女体山（標高877 m）と男体山（標高871 m）の双峰をなす。4つの山塊（八溝、鷲子、鶏足、筑波）からなる八溝山地が茨城県を南北に伸びているが、筑波山は南端の筑波山塊に属する。山頂部はんれい岩で構成され急斜面をなす。山麓部は花崗岩や変成岩を基盤岩とし、花崗岩が風化してできたマサ土が地表を覆い緩斜面が発達している（池田、2001）。

一方、つくば市の大部分を構成する筑波台地は、桜川および小貝川に挟まれた標高10～30 m程度の洪積台地であり、花室川、小野川、（東）谷田川、西谷田川などの河川によって開析され崖線を形成している。浅層部の地質層序は上位から、関東ローム層、常総層、木下層からなる。筑波台地における地下水面は通常地表面下10 m以内の関東ローム層や常総粘土層中に位置している（宇野沢ほか、1988）。

### 2. 土地利用と上下水道

筑波山はブナやアカガシなどの森林で覆われており、つくば市の林地面積の多くはこの地域に存

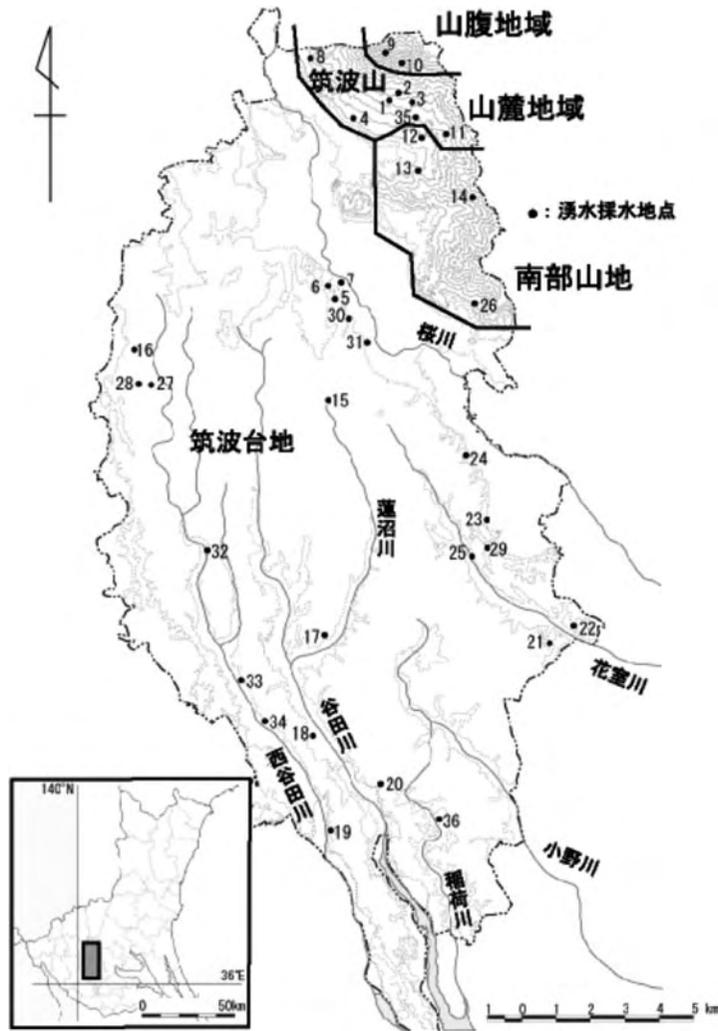


Fig. 1 研究対象地域の概要

在している。桜川低地には水田が広がり、筑波台地は大部分が畑地と宅地で構成されている。全体として約 1/4 を占めている畑地では、シバ（出荷量日本一を誇る）やハクサイ、ネギなどの野菜が栽培されている。桜川低地を中心に各河川沿いに水田が発達し、また畜産なども行われている。しかし近年では筑波研究学園都市を中心として都市化が進んでおり、宅地は増加傾向にある（つくば市市長公室行政経営課編，2005）。また、2005 年 8 月にはつくば市と東京の秋葉原とをつなぐつく

ばエクスプレスが開通し、つくば市の都市化はさらに加速していくと予想される。

また、つくば市では上下水道の整備が進められている。つくば市市長公室行政経営課編（2005）によると、上水道（簡易水道・専用水道を含む）の普及率は平成 15 年度末で 68%（簡易水道等を含めると 81%）、下水道普及率は平成 16 年度に 74.6% に達している。つくば市の上水は霞ヶ浦浄水場から供給されており、霞ヶ浦や地下水が起源となっているが、地下水の割合は 5～10% 程度

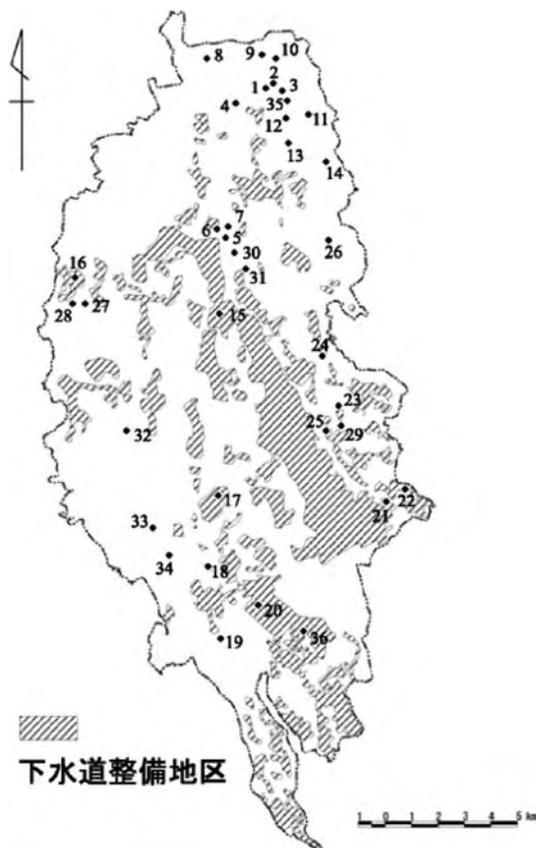


Fig. 2 対象地域における上下水道の普及率

であり、ほとんどは霞ヶ浦から取水された水である。茨城県土浦市大岩田地区に設置された浄水場で浄化され、つくば市内に配水されている。下水道の整備状況を Fig. 2 に示す。水と汚水の排水はそれぞれ別系統で処理する分流式となっており、雨水は分散放流される。汚水は筑波研究学園都市公共下水道及び霞ヶ浦常南流域下水道に集めて利根町の終末処理場で高度処理され、利根川に放流されている（つくば市市長公室行政経営課編，2005）。

### 3. 湧水の分布とその状況

現地調査は、対象地域内の湧水 36 地点について行った。多くは湧出地点にて調査を行ったが、中には湧出地点までたどり着けず下流にて調査・

採水した地点もある。

## 4. 調査方法

### 1) 現地調査の概要

2005 年 7 月 24, 30, 31 日（一回目の調査）および、2005 年 11 月 10～25 日（二回目の調査）において、湧水地点の現地調査を実施した。各調査地点を Fig. 1 に示した。現地調査をはじめ、つくば市市民環境部環境課（2004）やつくば市環境保全部環境課より提供していただいた調査資料を基に各調査地点の概況について Table 1 にまとめた。調査・採水が可能であった湧水地点は 36 カ所であった。湧水地点の中には実際に湧出している地点までたどり着けず、湧水と考えられる表流水を採取した地点もある。現地では採水・観察のほか、ポータブルメーターを用いた水質測定および湧出量測定を実施した。

一回目の調査は、つくば市市民環境部環境課（2004）およびつくば市環境保全部環境課の湧水調査資料に基づいて行った。上記の資料では井戸水や深層地下水を人工的に流出させたものも湧水としているが、本研究ではそれらは湧水として扱わなかった。資料で紹介されていた湧水のうち、調査・採水が可能であった地点は No. 1-24 の計 24 カ所であった。

二回目の調査では、筑波台地の崖線部を中心に探索し、発見できた湧水について調査を行った。これには 7 月の調査で発見できなかった湧水も含まれている。調査・採水が可能であった地点は No. 25-36 の計 12 カ所であった。

### 2) 降水量

対象地域内にある筑波大学陸域環境研究センターで観測されている調査期間内の日降水量を Fig. 3 に示した。7 月の調査日前後にあたる 7 月 25～26 日にかけて、台風が北上した影響によるまとまった降雨があった。11 月の下旬は高気圧に覆われ、晴れの日が続いた。

Table 1 採水地点とその概要

| No. | 地点名または湧水名   | 概要  |
|-----|-------------|---|
| 1   | 清水          | 筑波山麓に位置し、筑波山神社を中心とする集落内にある。   |
| 2   | 御神水         | 筑波山神社の境内にあり、参拝者の清め水として利用できるよう整備されている。   |
| 3   | つくばふれあいの里近く | 筑波ふれあいの里から下って雑木林に入ったところにある。ふれあいの里の職員により整備され、湧出量が多いことから湧水を汲みに来る人も多い。                       |
| 4   | 稲葉酒造        | 筑波山神社から南西に下った稲葉酒造の敷地内にある。上流 250 m 付近の湧出地点から導水している。  |
| 5   | 佐①          | 佐地区にある湧水のひとつ。筑波台地末端斜面の中腹に位置し、使われなくなった水田の脇にある枯れ木の根元から染み出た水をパイプによって集水され湧出している。(現在は使用されていない) |
| 6   | 佐②          | 同じく佐にある湧水で、台地末端斜面を下る水田の畦で湧出。水田は段丘状につくられ、地形変換点から湧出している。                                    |
| 7   | 佐③          | 佐②の少し下流に位置していた。概況は佐②とほぼ同じである。   |
| 8   | 一乗院         | 筑波山麓の西に位置する上大島の集落にある一乗院から東側の山の斜面を 100 m ほど登ったところにある湧水。                                    |
| 9   | 御海          | 男体山山頂から 100 m 程下った地点にある湧水。大きな岩の陰から湧出していた。   |
| 10  | 男女川源流近く     | 実際に水源を確認することができなかったため、湧出した水が作ったと考えられる渓流水を採取した。  |
| 11  | 十五の泉        | 筑波山の南東部に作られたつくばねゴルフクラブ内、15 番ホールの脇にある。飲料用に整備され、くりぬかれた岩の穴から流出していた。                          |
| 12  | ヒヤミズ        | 筑波山麓の南東にある六所神社の西側に位置する。湧水付近の住民が飲料水・生活水として使用している。  |
| 13  | 蚕影山         | ヒヤミズから南にある蚕影山神社の山道入り口にある流出口から採水した。  |
| 14  | 不動峠         | 筑波山南部山地の中腹に位置し、北条から不動峠に至る山道の脇から湧出している。  |
| 15  | 蓮沼          | 筑波台地上の蓮沼集落にある民家の敷地内にある。蓮沼川の源流部でもあり、以前は蓮沼川の水源として多量の湧出量があったが、現在の湧出量は僅かである。                  |

| No. | 地点名または湧水名 | 概要  |
|-----|-----------|---|
| 16  | 吉沼        | 台地上の吉沼集落にある民家脇のコンクリート排水溝のつなぎ目からわずかに湧き出している。かつては周辺の水田を涵養できるほどの水量があったという。 |
| 17  | 柳橋        | 蓮沼川下流、柳橋地区にある民家の裏手に存在している。高さ 3~4 m 程度の露頭があり、その側壁から染み出るように湧出している。        |
| 18  | おうまや池     | 谷田部川の西側にある谷田部地区の中心にある民家の敷地内に存在している。                                     |
| 19  | 谷田部       | 谷田部地区の南、谷田川の左岸に位置する。  |
| 20  | 羽成        | 谷田川の左岸側、羽成地区に位置する。  |
| 21  | 下広岡       | 常磐自動車道の桜土浦 IC の近くに位置する。雑木林に囲まれた水田傍の高さ 2 m ほどの崖の下から湧出している。               |
| 22  | 栄泉寺       | 下広岡にある栄泉寺の近く、花室川の左岸沿いに位置する。   |
| 23  | 桜庁舎近く     | 桜庁舎のある高台の下、東側約 100 m にある水田地帯の水田と畑が隣接する部分から湧出している。                       |
| 24  | 上境        | 上境地区の台地末端斜面に位置する。   |
| 25  | 九重小学校・西   | 花室地区にある九重小学校を西に下り、台地斜面と水田のあいだに位置する。                                     |
| 26  | 小田        | 筑波山南部山地の南端に位置する。  |
| 27  | 前原・東      | 前原地区に広がる畑地の脇に湧出している。染み出るように湧出し、小さな川を作って流出している。                          |
| 28  | 前原・西      | 前原地区の畑地にはさまれた排水溝のつなぎ目からかすかに湧出している。                                      |
| 29  | 花室        | 花室地区の桜川低地に面した台地末端斜面に位置する。   |
| 30  | 若森        | 若森地区の台地末端斜面、雑木林の中に位置する。地表面から染み出るように流出し、小さな川を形成している。                     |
| 31  | 太田橋近く     | 若森地区の太田橋近くにある水田の脇に位置している。   |
| 32  | 高山小学校・北   | 下河原崎地区の西谷田川左岸に位置する。   |
| 33  | みずほ団地・北   | 鳥名地区の南に位置し、すぐ西側には西谷田川左岸が流れている。  |
| 34  | みずほ団地・南   | 谷田部地区の北部にあるみずほ団地の南に位置する。  |
| 35  | 弘法水       | 筑波山南東の中腹にあり、ふれあいの里近くの湧水のやや南側に位置する。                                      |
| 36  | 畜産試験場・南   | 菅間地区の稲荷川左岸に位置する。  |

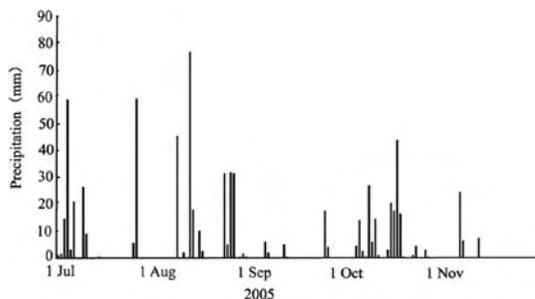


Fig. 3 筑波大学陸域環境研究センターにおける日降水量 (2005年7月～11月)

### 3) 簡易水質測定および採水方法

現地にて湧水地点とその周辺の地形を観察し、簡単なスケッチを行った。湧水サンプルは100 mlのポリエチレン製のビンを用いて採水・保存した。実験室に持ち帰ったサンプルは常温の暗所にて保存した。

現地では水温、電気伝導度 (EC)、pHを測定した。使用した測器は、ポータブル電気伝導度・pH計 (WM-22EP, DKK-TOA) である。水温については電気伝導度計の値を採用した。

### 4) 湧出量測定

湧出量は測定可能なものについてはバケツやビニール袋などを用いて一定時間 (3秒～10秒間) 採水し、プラスチック製のメスシリンダーにて計測した後、毎秒当たりの湧出量 (ml/s) として算出した。計測が不可能な場合については目視にて見積もった。

### 5) 水質分析

採取したすべての湧水サンプルについて、水質分析を実施した。分析項目は主要溶存成分である陽イオン ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) および陰イオン ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) である。イオンクロマト測定およびICP測定については、あらかじめ試料水を孔径  $0.20 \mu\text{m}$  のシリンジフィルター (DISMIC-25cs, ADVANTEC) で濾過したものをを用いた。

$\text{HCO}_3^-$  は採水を行った後、pH4.8アルカリ度

滴定法により速やかに分析を行った。MR-BCG混合試薬を指示薬とし、ビュレットシステム (TITRONIC basic, SCHOTT) を使用して1/50 N硫酸による中和滴定を行った。

$\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  の分析は、筑波大学研究基盤総合センター分析部門のプラズマ発光分光分析装置 (ICAP-757v, Nippon Jarrell-Ash) を用いて行った。測定値は4点検量法により算出し、3回の測定の平均値を使用した。ただし、7月24日に採取した試料水の  $\text{K}^+$  および7月30-31日に採取した試料水の  $\text{Na}^+$  と  $\text{K}^+$  については、後述するイオンクロマトグラフィーによるデータを用いた。

$\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  については、筑波大学生命環境科学研究科のイオンクロマトグラフィー (HIC-SP/VP Super, Shimadzu) を用いて行った。先述したように  $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  の一部の分析項目についてもイオンクロマトグラフィーによる分析結果を採用した。また、11月に採取した試料については、ウルトラユニットフィルター (USY-1, ADVANTEC) を用いて有機物を除去し、筑波大学研究基盤総合センター分析部門のイオンクロマトアナライザー (IC-7000, YOKOGAWA) を用いて  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  の分析を行った。測定値は4点検量法により算出した。

## III 結果・考察

### 1. 湧出量と湧出機構

各地点における湧水のオーダー別湧出量を Fig. 4 に示した。つくば市の湧水は湧出量が1000 ml/s を超えるものが少なく、過半数は50 ml/s に満たない湧水であることから全体として湧出量は少量であるといえる。湧出量が特に多いのは御神水 (No. 2) や、ふれあいの里近くの湧水 (No. 3)、小田 (No. 26) である。それぞれ1000 ml/s 以上の湧出があり、いずれも筑波山山麓に位置する湧水である。しかし、同じ筑波山山麓でも不動峠

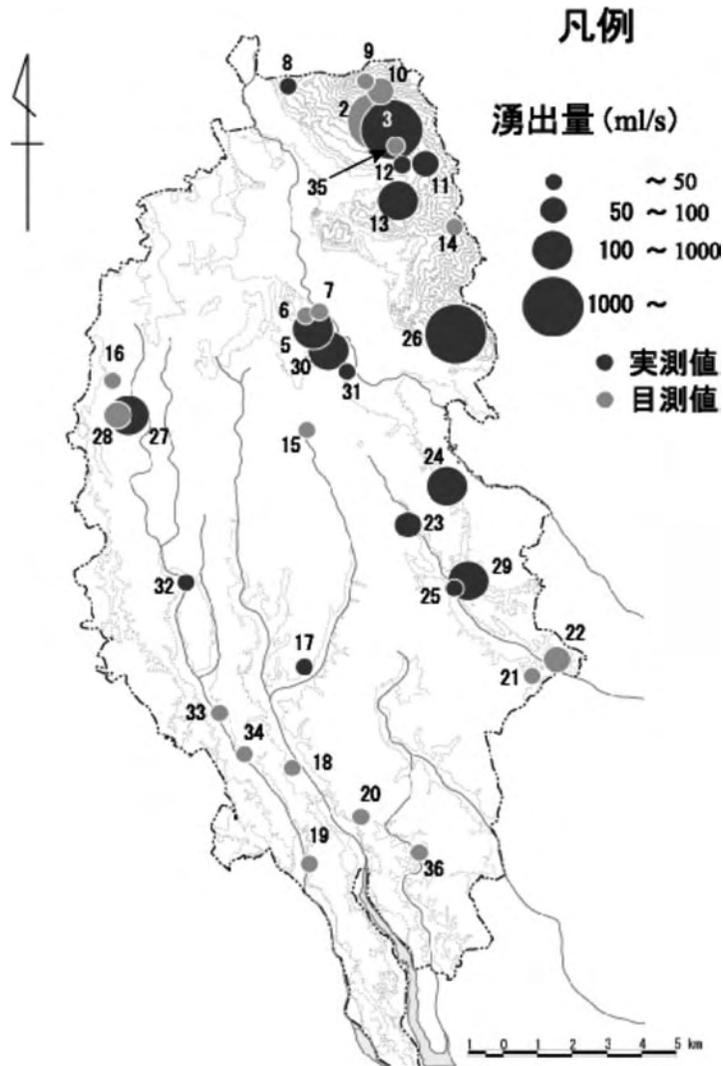


Fig. 4 各地点の湧出量

(No. 14) や弘法水 (No. 35) などでは湧出量は 50 ml/s に満たない。また、筑波山山腹に位置する御海 (No. 9) や男女川源流近く (No. 10) は 100 ml/s 以下と少量であった。筑波台地に分布する湧水では上流部に位置する佐① (No. 5) や上境 (No. 24), 前原・東 (No. 27) が相対的に多量であるが、それでも 300 ml/s 以下の湧出量であり、下流部では 50 ml/s に満たない湧水がほとんどである。こうしたことから、筑波台地周辺に位置する湧水の

湧出量は相対的に少ないといえる。

現地調査での地形観察や、1981年3月茨城県農地部農地計画課発行の5万の分1表層地質図、宇野沢ほか(1988)などを参考に、各湧水が該当すると考えられる湧出機構の模式図を作成した(Fig. 5)。本研究対象地域では以下の5タイプが想定された。

1) 裂罅<sup>れっか</sup>型

基盤岩類中の割れ目や亀裂を流れる地下水が地

表面に流出するものである。本地域では筑波山山腹に位置する御海（No. 9）がこのタイプと一致し、また男女川源流近く（No. 10）もこのタイプに属すると考えられる。これらの地域の基盤岩ははんれい岩に相当しており、湧出量は少ない。

2) 斜面型 (a, b)

山麓部の崖錐緩斜面に堆積した未固結堆積物を帯水層とし、地形変換点などの地表面と地下水面が交わる所から湧出するものである。湧出形態は同じであるが、地質の違いから更に2つのタイプに分けられる。aは筑波山山麓に分布する湧出機

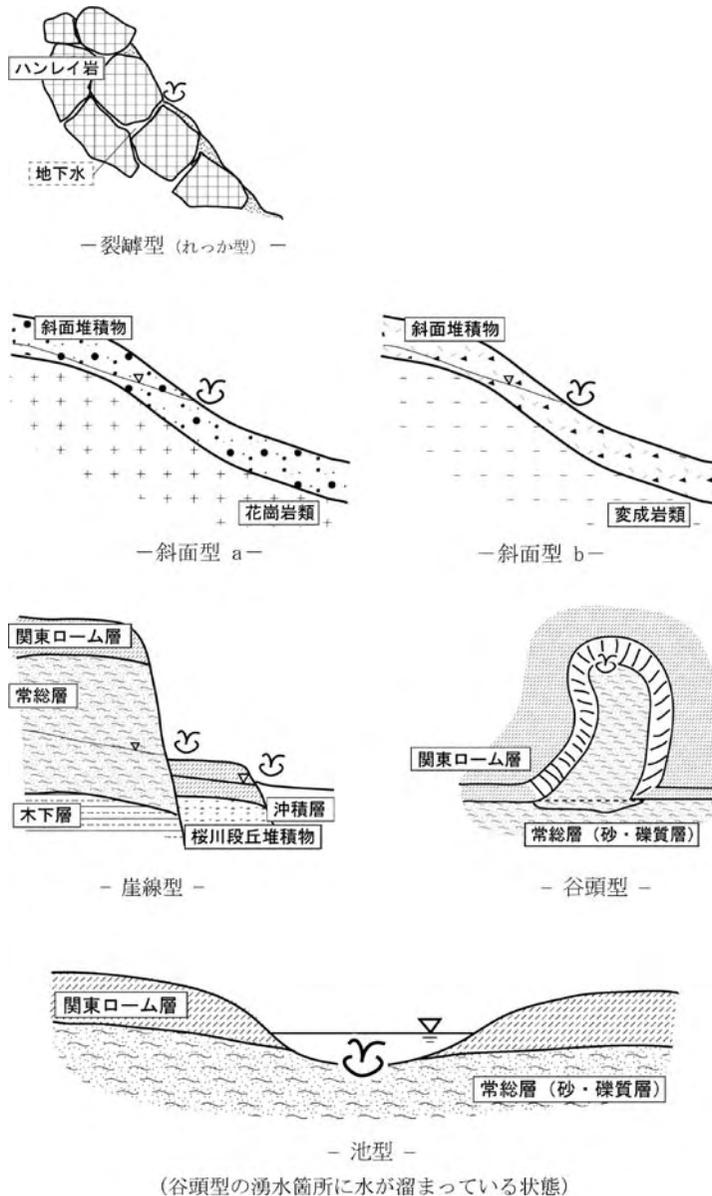


Fig. 5 湧出機構模式図

構タイプである。花崗岩類が基盤となっており、その上には、はんれい岩や花崗岩の風化土が主体である緩斜面堆積物が堆積している(磯部, 1990)。bは筑波山から南へ延びる山地(以下、筑波山南部山地と呼ぶ)のタイプとした。片麻岩やホルンフェルスなどの変成岩を基盤岩とし、地表は変成岩や花崗岩の風化土で覆われている。いずれのタイプにおいても、湧出量の多い湧水が多数存在する。

### 3) 崖線型

台地辺縁部の崖下や斜面で地表面と帯水層が交わる地点から湧出するタイプである。本研究対象地域では関東ローム層や常総層の上部を帯水層とする不圧地下水が湧出しており、後述する4)、5)タイプについても同様のことが言える。西谷田川などの河川沿いを中心に筑波台地の崖線部に多数分布しているが、湧出量は少ない。

### 4) 谷頭型

湧水の流出により周囲の土壌が削り取られ形成された湧出形態である。帯水層は3)と同様である。研究対象地域内では少数しか見られず、蓮沼(No. 15)や吉沼(No. 16)がこのタイプに属しており、湧出量は少量である。

### 5) 池型

池やくぼ地の底部より湧出しているタイプである。その形態の特徴から発見することが容易ではないため、おうまや池(No. 18)や桜庁舎近く(No. 23)のように少数しか見られなかった。湧出量は目視によっても計測は難しく、今回は欠測とした。

## 2. 湧水の水質特性

### 1) 研究対象地域の全体的な水質特性

湧水の水質分析結果をもとに、各地点のヘキサダイアグラムをFig. 6に示した。

筑波山山麓にはCa-HCO<sub>3</sub>型の湧水(No. 1, 2, 4, 8, 11)と、Ca-HCO<sub>3</sub>型およびCa-SO<sub>4</sub>型の間中型の水質組成を示す湧水(No. 3, 35)が分布する。

溶存分量的には若干異なるが、互いに似通った水質を示している。全般的に溶存分量が少ないが、稲葉酒造の湧水(No. 4)は分量がやや多く、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>の割合が高い。山頂部では溶存分量はかなり少なく、御海(No. 9)はCa-Cl型、男女川源流近く(No. 10)はCa-HCO<sub>3</sub>型とCa-Cl型との中間型の水質組成を示す。筑波山南部山地の湧水(No. 12・13・14・26)の組成はNa-HCO<sub>3</sub>型とNa-Cl型の間中型であり、溶存分量は相対的に低い。

筑波台地周辺の湧水は溶存分量が相対的に多いが、水質組成にはそれぞれの地点で特徴がみられる。筑波台地北部の佐・若森では、佐①(No. 5)、②(No. 6)、太田橋近く(No. 31)はCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型、佐③(No. 7)はCa-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型、若森(No. 30)はCa-HCO<sub>3</sub>型を示す。筑波台地上の蓮沼(No. 15)ではCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型の組成を呈する。筑波台地北西部の吉沼・前原の湧水である吉沼(No. 16)、前原・東(No. 27)および前原・西(No. 28)もCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型を示している。また、前原・西はMg<sup>2+</sup>やCl<sup>-</sup>の割合が特に高い。筑波台地東部では、下広岡(No. 21)の組成はCl<sup>-</sup>・HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>・SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の3成分が均衡している。また、栄泉寺(No. 22)、桜庁舎近く(No. 23)、九重小学校・西(No. 25)ではCa-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型を示しているが、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の割合も高い。上境(No. 24)もCa-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型の水質を示すがNa<sup>+</sup>やCl<sup>-</sup>の割合も大きいという特徴を持つ。花室(No. 29)はCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型の組成を呈するが、Mg<sup>2+</sup>の割合がかなり高い。筑波山南東部から南部にかけては、柳橋(No. 17)、谷田部(No. 19)がCa-HCO<sub>3</sub>型、畜産試験場・南(No. 36)がCa-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型の組成を示すがMg<sup>2+</sup>の割合も高い。おうまや池(No. 18)の組成はCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型に近いが、Na<sup>+</sup>の割合も高い。羽成(No. 20)ではCa-Cl型とCa-SO<sub>4</sub>型の間中型に近いが、Mg<sup>2+</sup>の割合が高い。高山小学校・北(No. 32)はCa-SO<sub>4</sub>型の組

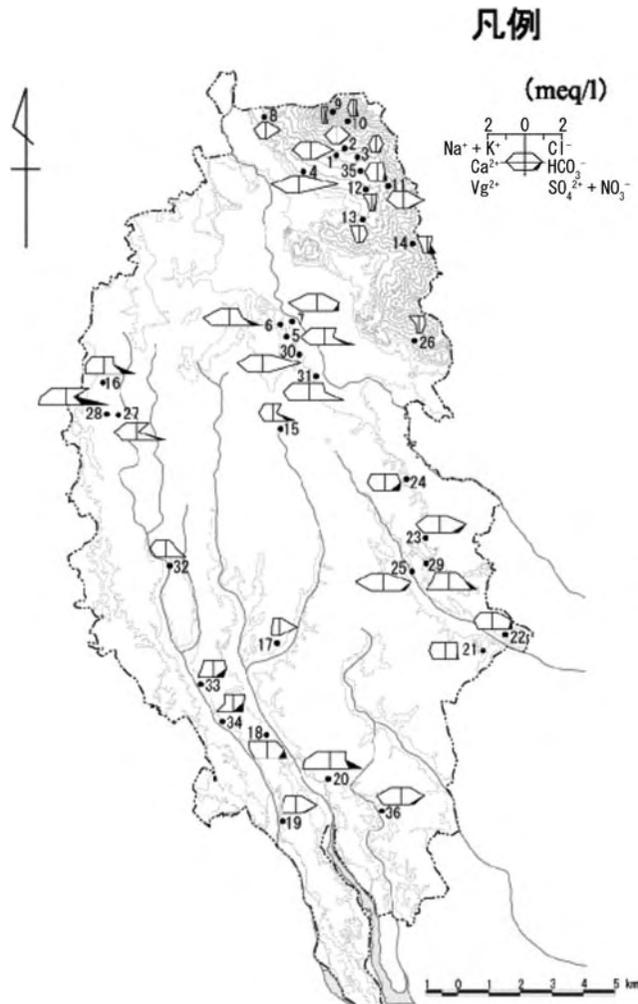


Fig. 6 ヘキサダイアグラムによる水質分布図

Table 2 筑波山の地質と水質特性区分

| 地点名または湧水名      | グループ | 水質タイプ                                   | 地質                | 湧出機構       |
|----------------|------|---|-------------------|------------|
| 9. 御海          | 山腹地域 | Ca-Cl                                   | はんれい岩             | れっか<br>裂隙型 |
| 10. 男女川源流近く    |      | Ca-(HCO <sub>3</sub> +Cl)               |                   |            |
| 1. 清水          | 山麓地域 | Ca-HCO <sub>3</sub>                     | 花崗岩<br>+<br>斜面堆積物 | 斜面型①       |
| 2. 御神水         |      | Ca-HCO <sub>3</sub>                     |                   |            |
| 3. つくばふれあいの里近く |      | Ca-(HCO <sub>3</sub> +SO <sub>4</sub> ) |                   |            |
| 4. 稲葉酒造        |      | Ca-HCO <sub>3</sub>                     |                   |            |
| 8. 一乗院         |      | Ca-HCO <sub>3</sub>                     |                   |            |
| 11. 十五の泉       |      | Ca-HCO <sub>3</sub>                     |                   |            |
| 35. 弘法水        |      | Ca-(HCO <sub>3</sub> +SO <sub>4</sub> ) |                   |            |
| 12. ヒヤミズ       | 南部山地 | Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)               | 変成岩類<br>+<br>花崗岩  | 斜面型②       |
| 13. 蚕影山        |      | Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)               |                   |            |
| 14. 不動峠        |      | Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)               |                   |            |
| 26. 小田         |      | Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)               |                   |            |
|                |      | Na-(HCO <sub>3</sub> +Cl)               |                   |            |

成を呈する。みずほ団地・北および南 (No. 33, 34) では Ca-HCO<sub>3</sub> 型と Ca-Cl 型の中間型を示すが、Mg<sup>2+</sup> の割合もかなり高い。

## 2) 筑波山の水質特性

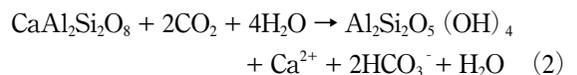
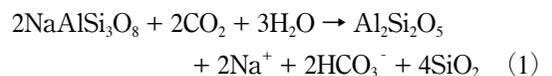
筑波山に分布する湧水について、地域や湧出機構から大きく3つのグループに分類することができる (Fig. 1 および Table 2)。ここではこのグループをそれぞれ山腹地域 (No. 9, 10)、山麓地域 (No. 1~4, 8, 11, 35)、南部山地 (No. 12~14, 26) とよぶこととする。ヘキサダイアグラムをみると、グループごとに水質特性があらわれている。

一般的に地下水は降水が地表に浸透したものであり、地層中からの成分溶出などにより水質が形成される。その成分量は滞留時間が長くなるほど多い。筑波山山腹地域の湧水 (No. 9, 10) の溶存成分量は非常に少なく、電気伝導度も低い値を示している。この地域の湧水は降水が浸透してから比較的短時間で湧出したもの、つまり雨水に近い湧水であるといえる。

山麓地域の湧水は Ca-HCO<sub>3</sub> 型、南部山地では Na-(HCO<sub>3</sub>+Cl) 型の水質タイプを示し、双方には大きな違いが認められる。筑波山周辺の土地利用は森林が大部分を占めており地表からの汚染は少ないと考えられるため、水質の違いは地質的要因によるものと推測し、以下の考察を行った。筑波山周辺の地質分布をみると (磯部, 1990)、山麓地域の地質は、基盤岩である筑波花崗岩の上にマサ土やはんれい岩角礫などで構成された緩斜面堆積物である。一方、南部山地ではホルンフェルスや片麻岩などの筑波変成岩類を基盤岩とし、貫入した花崗岩類の小岩体が多く分布している。地表面には花崗岩類や変成岩類の風化土が堆積していると考えられる。

嶋田 (1985) は南部山地の沢水およびトンネル湧水の水質形成についての研究を行っており、沢水は相対的に溶存イオン濃度が小さく、また Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> および HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> が多く含まれていることが示されているが、こうした特徴は本研究で調査を

行った南部山地の湧水の水質とほぼ同様であることがわかる。嶋田 (1985) によると、南部山地を構成する片麻岩、花崗岩等の結晶質岩類は多くの斜長石を含み、これが地下水に溶解することにより陽イオンを形成する。斜長石 (plagioclase) は、ナトリウム分の多い曹長石 (albite) からカルシウム分の多い灰長石 (anorthite) にわたって広く存在し、大気から供給された CO<sub>2</sub> が地下水中に多く存在する地表付近の風化帯では、以下の (1) 式、あるいは (2) 式で示されるような反応を生じる。



こうした反応により斜長石が地下水に溶解し、Na<sup>+</sup> や Ca<sup>2+</sup> などの陽イオンを生成していることが多い。また、片麻岩や花崗岩の結晶質岩には Cl が含まれているとされている (関ほか, 1999)。従って、今回調査した湧水の水質に関しても、斜長石が地下水中に湧出し、南部山地では主に (1) 式の反応により Na-(HCO<sub>3</sub>+Cl) 型の水質を示していると考えられる。

鶴巻 (1989) によると、花崗岩質の岩石中においても、溶出する成分のうち Ca<sup>2+</sup> と Na<sup>+</sup> は斜長石に由来するとされている。ゆえに山麓地域についても斜長石の溶出が水質の形成に大きく寄与しており、(2) 式で示される反応により Ca<sup>2+</sup> が多く供給され、Ca-HCO<sub>3</sub> 型の水質が形成されたと推測される。また、はんれい岩では主に Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> が溶出することから (鶴巻, 1989)、緩斜面堆積物を構成するはんれい岩の角礫も水質形成に寄与しているものと考えられる。

## 3) 筑波台地の水質特性と土地利用

筑波台地に分布する湧水の水質組成をみると

(Fig. 6), この地域では筑波山に比べて高い値の硝酸イオン濃度が検出されている。永井 (1991) は,  $\text{NO}_3^-$  による汚染のほかに地表面の人間活動に起因する  $\text{SO}_4^{2-}$  や  $\text{Ca}^{2+}$  などの無機イオンが地下水へと負荷され, これに伴って  $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$  や  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  が富み, 無機汚染の方向へ進化することを指摘している。つくば台地の湧水においても  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  等が相対的に多く含まれており, 人為的影響により無機汚染が生じていると考えられる。

しかしながら, 水質汚染の進行状況は各湧水によって異なっている。水質汚染は地表面での人間活動と密接に関わっているため, 土地利用が大きく関与している。そこで湧水の水質タイプと湧水周辺の土地利用について Table 3 にまとめ, これに基づいて各湧水の汚染原因について考察した。

No. 7, 18, 22, 23, 24, 25, 36 は  $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$  型に属する。カルシウムイオンや重炭酸イオンが

多く, 一般的な土壌や岩石由来の成分が基本型となっている。しかし溶存成分量が多く, 硝酸イオン濃度も高い値を示した。マグネシウムイオンも多く, No. 7, 22, 23, 24 では硫酸イオンも高い値を示している。No. 7 および No. 24 の周囲の土地利用は宅地と畑地の混在である。また, 下水道の整備が完了している地域がほとんどであることから (Fig. 2), これらの湧水の汚染は主に畑地における施肥の影響によるものと考えられる。

No. 5, 6, 15, 16, 20, 27, 28, 29, 31, 32 は  $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  型に属する。 $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$  型と同じく, 硝酸イオン濃度が高いほか硫酸イオンも高濃度を示している。またこのタイプの特徴として, 重炭酸イオンが比較的少ないことが挙げられる。田瀬 (2004) によれば, 重炭酸イオンが少ないタイプは大量に使用されたアンモニア系あるいは有機系の窒素肥料や堆肥・家畜排泄物の硝化が原因である可能性を指摘している。湧水地点の周辺の土地利用としては, 宅地や畑地が混在している場合が多いが, No. 6 では水田や畑地が, No. 5, 27, 28 では畑地が広がっている。また, このタイプに属する湧水の周辺地域では下水道の整備が完了している。以上のことからこのタイプの湧水の汚染に関しても畑地による施肥が主な汚染源であると推測される。ただし No. 31, 32 の湧水周辺も畑地が多いため施肥などの影響が少なからず及んでいると考えられるが, 硝酸イオンは相対的に少なく, No. 32 ではほとんど検出されなかった。硝酸イオンが消失したとすると, その要因として湧出前の地下水が湿地, もしくは湿地流入前の台地斜面末端部などの地下水帯において自然浄化 (脱窒) 作用を受けた可能性が考えられる (田淵, 1975; Devito *et al.*, 2000; 井岡・田瀬, 2004)。しかし脱窒の有無を指摘するためには更なる調査が必要である。

以上に挙げた2つの水質タイプを持つ湧水の多くは, 硝酸イオンのほか, カルシウム, マグネシウム, 硫酸イオンを多く含むという特徴を持って

Table 3 つくば台地の水質特性と土地利用区分

| 地点名         | 水質タイプ                                      | 土地利用     |
|-------------|--|----------|
| 5. 佐①       | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 林・畑      |
| 6. 佐②       | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 水田・畑     |
| 7. 佐③       | $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$ | 水田・畑     |
| 15. 蓮沼      | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 宅地・畑     |
| 16. 吉沼      | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 宅地・畑     |
| 17. 柳橋      | $\text{Ca} - \text{HCO}_3$                 | 林 (工業団地) |
| 18. おうまや池   | $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$ | 宅地       |
| 19. 谷田部     | $\text{Ca} - \text{HCO}_3$                 | 林・宅地     |
| 20. 羽成      | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 宅地・畑     |
| 21. 下広岡     | 複合型①                                       | 宅地・水田    |
| 22. 栄泉寺     | $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$ | 宅地・畑     |
| 23. 桜庁舎近く   | $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$ | 宅地・畑     |
| 24. 上境      | $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$ | 畑・林      |
| 25. 九重小学校・西 | $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$ | 宅地       |
| 27. 前原・東    | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 畑        |
| 28. 前原・西    | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 畑        |
| 29. 花室      | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 宅地・畑     |
| 30. 若森      | $\text{Ca} - \text{HCO}_3$                 | 林・畑      |
| 31. 太田橋近く   | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 畑・宅地     |
| 32. 高山小学校・北 | $\text{Ca} - (\text{SO}_4 + \text{NO}_3)$  | 畑        |
| 33. みずほ団地・北 | 複合型②                                       | 宅地・畑     |
| 34. みずほ団地・南 | 複合型②                                       | 宅地・畑     |
| 36. 畜産試験場・南 | $\text{Ca} - (\text{HCO}_3 + \text{NO}_3)$ | 宅地・畑     |

いる。カルシウムとマグネシウムの起源は、肥料に含まれる溶成リンの副成分、もしくは土壌の酸性化の改善のために使用されている苦土質肥料の成分にあると推測される（田瀬，2004）。また硫酸イオンは主要な窒素肥料である硫酸アンモニウムも起源となっていると考えられる。

Ca-HCO<sub>3</sub>型にはNo. 17, 19, 30が該当する。このNo. 17, 19とNo. 30地点の水質は溶存成分量が異なるものの硝酸イオンが少ないため、汚染があるとは考えにくい。No. 17の上流は公園や工業団地が広がっているが、下水道は整備されている。またNo. 30では付近に産業廃棄物処理場があるものの、上流側のほとんどは林地で覆われ、土地利用の点においても汚染源は見当たらないことから、この3地点は汚染が進んでいないものと考えられる。

複合型として、No. 18は硝酸イオン濃度が高いほか、ナトリウムイオン濃度がカルシウムイオンより高いという特徴を持つ。周囲はほとんどが宅地として利用されており、下水道が整備されている。No. 21は硝酸イオンが比較的少ないものの、各イオン当量はほぼ同量であるという特徴を持つ。湧出地点の近傍には水田があるが、上流部はほぼ宅地で占められている。No. 33, 34では硫酸イオンが非常に少なく、硝酸イオンが多い。また、マグネシウムイオン濃度がカルシウムイオン濃度を超えており、ナトリウムイオンや塩素イオンの割合が高い点も特徴的である。この2地点の周辺では畑地や宅地が混在しているが、宅地では下水道が未整備である。従って、この2地点の湧水は農業系と生活排水系の両面の影響を受けていると推測される。

#### IV まとめ

茨城県つくば市に分布する湧水の湧出量や湧出機構、水質特性についての調査を行った結果、つくば市に分布する湧水は筑波山と筑波台地では大

きく異なる特徴を示した。それらをまとめると以下ようになる。

（筑波山）

- 1) 山腹地域では湧水は<sup>れっか</sup>裂罅型の湧出機構を持ち、湧出量はかなり少ない。また、この地域の湧水は溶存成分量が少ないことから、滞留時間が短く、雨水に近い地下水が湧出していると考えられる。
- 2) 山麓地域における湧水は斜面型 a の湧出機構であり、湧出地点によっては湧出量が多い。水質はCa-HCO<sub>3</sub>型を示し、その起源としてこの地域を構成する花崗岩や斜面堆積物に含まれる斜長石、特に灰長石やはんれい岩から溶出したものと推測される。
- 3) 南部山地の湧水は斜面型 b の湧出機構を持ち、湧出量が多い地点が目立つ。湧水が分布する標高や湧出形態は山麓地域に近いが、Na-(HCO<sub>3</sub>+Cl)型の水質を示す。それらの物質はこの地域を構成する変成岩や堆積した風化土に含まれる斜長石から溶出し、形成されたものに由来すると考えられる。

（筑波台地）

- 1) 湧出機構は崖線型、谷頭型、池型の3タイプに分かれるが、崖線型の湧水が大半を占めている。湧出量は上流部では相対的に多いが、全体として少量である。
- 2) 筑波山に比べて高い硝酸イオン濃度が検出された。また、水質進化の方向は無機汚染に向かっており、この地域の湧水は水質汚染が進んでいることが示された。
- 3) Ca-(HCO<sub>3</sub>+NO<sub>3</sub>)型とCa-(SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>)型の水質を持つ湧水が多く、この2タイプの水質が筑波台地における代表的な汚染タイプであるといえる。土地利用は宅地や林地の多い地点もあるが、いずれの場合も畑地が混在しているか、または畑地が大部分を占めている。ほとんどの地域で下水道の整

備が完了していることから、主な汚染源は畑地における施肥などであると推測される。

- 4) No. 33, 34 の湧水は硫酸イオンがほとんど含まれておらず、硝酸イオンやナトリウムイオン、塩素イオンの割合が高い。この2地点の周辺は宅地や畑地が混在しており、下水道も未整備のままである。従って、畑地での施肥による影響のほか、生活排水なども影響して水質汚染に繋がっているものと考えられる。

以上の結果から、筑波山の湧水は地形・地質的要因によって特徴付けられ、3つのグループに分類することができた。一方、筑波台地に分布する湧水は土地利用に大きく支配され、湧水の多くでは水質汚染が進行していることが明らかとなった。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、茨城県つくば市役所環境保全部、都市建設部下水道事務所の担当の方々には多くの貴重な資料や有益なご助言をいただきました。また、筑波大学環境科学研究科の関口陽高氏（現：前田工織）、吉田 顕氏にはフィールド調査において惜しめない協力をいただきました。さらに筑波大学環境科学研究科流域環境研究室の大学院生の方々にも有益なご助言をいただきました。査読者の先生方にも懇切丁寧な御指摘をいただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

本研究は、筑波大学学内プロジェクト（筑波山における気象・水文環境の高精度モニタリングによる大気・水循環場の解明）の成果の一部である。

## 文献

井岡聖一郎・田瀬則雄（2004）：茨城県筑波台地、

斜面－湿地プロットでの地下水帯における硝酸イオンの還元場。地下水学会誌, **46**, 131-144.

池田 宏（2001）：「地形を見る目」。古今書院, 152p.

磯部一洋（1990）：茨城県筑波山・加波山周辺の緩斜面堆積物の形成について。地質調査所月報, **41**, 357-371.

井野盛夫（1987）：富士山東南西麓の湧水。ハイドロロジー, **17**, 63-74.

宇野沢 昭・磯部一洋・遠藤秀典・田口雄作・永井 茂・石井武政・相原輝雄・岡 重文（1988）：2万5千分の1筑波研究学園都市及び周辺地域の環境地質図説明書。特殊地質図(23-2), 地質調査所, 139p.

環境省環境管理局水環境課（2005）：「平成16年度地下水質測定結果」。44p.

佐藤芳徳・安池慎治・河野 忠・北川光雄・鈴木裕一・高山茂美（1997）：富士山周辺の湧水および地下水の水質について。日本水文科学会誌, **27**, 17-25.

嶋田 純（1985）：筑波トンネルの掘削に伴う結晶質岩中の地下水挙動と水質変化。ハイドロロジー, **15**, 42-54.

島野安雄（1994）：阿蘇火山東麓地域における湧水・河川水の水文化的研究。宇都宮文星短期大学紀要, **5**, 17-37.

島野安雄（1997）：阿蘇カルデラ内における湧水の水文化的研究。宇都宮文星短期大学紀要, **8**, 43-67.

島野安雄（2001）：阿蘇火山西麓地域における湧水・河川水の水文化的研究。宇都宮文星短期大学紀要, **12**, 3-36.

関 陽児・金井 豊・上岡 晃・月村勝宏・濱崎聡志・金沢康夫・中嶋輝允（1999）：採石場の湧水からみた地質と地下水質との関係－八溝山地周辺の例－。地質調査所月報, **50**, 683-697.

- 田瀬則雄 (2003): 硝酸・亜硝酸性窒素による水質汚染の現状と動向. 水環境学会誌, **27**, 24-30.
- 田瀬則雄 (2004): 硝酸・亜硝酸性窒素による地下水汚染の現状と動向. 環境管理, **40**, 255-263.
- 田淵敏雄 (1975): 農地排水と水質汚濁－水田肥料の流出－. 農業土木学会誌, **43**, 525-529.
- つくば市市長公室行政経営課編 (2005): 「統計つくば 2004」. つくば市, 109p.
- つくば市市民環境部環境課 (2004): つくば湧水探検マップ. つくば市市民環境部環境課, 9p.
- 鶴巻道二 (1989): 地下水の挙動を水質から診る. 地盤を観る・視る・診る. 中世古幸次郎教授退官記念論文集, 29-45.
- 東京地下水研究会編 (2003): 「水循環における地下水・湧水の保全」. 信山社サイデック, 254p.
- 永井 茂 (1991): 地下水汚染の水文化学的アプローチ－無機汚染の実態と問題点－. 地下水学会誌, **33**, 145-154.
- 日本地下水学会編 (1994): 「名水を科学する」. 技報堂出版, 299p.
- 日本地下水学会編 (1999): 「続・名水を科学する」. 技報堂出版, 246p.
- 吉谷純一・木内 豪・戸嶋光映・賈 仰文・倪 广恒・河原能久 (2001): 茨城県谷田川流域における地下水位と地下水水質の実態調査. 土木技術資料, **43**, 50-55.
- Devito, K. J., Fitzgerald, D., Hill, A. R. and Aravena, R.(2000) : Nitrate dynamics in relation to lithology and hydrologic flow path in a river riparian zone, *Journal of Environmental Quality*, **29**, 1075-1084.

(2006年5月31日受付, 2006年9月28日受理)



## 伊豆新島・羽伏浦における海食崖の崩壊プロセス

Instability of Coastal Cliff Made of Base Surge  
Deposits in Habushi-ura, Niijima Island

森 僚多\*・松倉 公憲\*\*

Ryota MORI\* and Yukinori MATSUKURA\*\*

### I はじめに

伊豆新島東岸に直線状に約 5 km 延びる羽伏浦海岸には、高さ数 10 m の海食崖が連なっている。この海食崖は、島南部の向山が 886 年に噴火した際に生じた火山噴出物（ベースサージ堆積物）からなっている。この堆積物は非常に侵食されやすく、そのため海食崖の後退速度は大きく、それに関する研究もいくつか報告されてきた（たとえば、矢島, 1966 ; Sunamura, 1987 ; 磯部・安田, 1995）。Sunamura (1987) によれば、海食崖形成後の後退速度は羽伏浦海岸の南北でほとんど差異はなく、886 年, 1500 年, 1968 年にそれぞれ 2 m/y, 1.5 m/y, 1.2 m/y と見積もられるという。また、波の営力に注目したモデルを構築し、将来については A.D. 2500 年に 0.9 m/y, 3000 年には 0.7 m/y という後退速度を予測している。

海食崖の後退速度のみならず、後退プロセスについて詳細に議論するためには、崖を侵食する波の営力だけではなく、崖を構成する物質の物性やそこで生起する崩壊などの侵食プロセスについても吟味する必要がある。しかし、これまでの研究では、崖の崩壊プロセス等に関する研究は皆無

である。ところで、崖の構成物質を火山地形学的立場から調査した横山・徳永 (1978) および徳永・横山 (1979) によれば、この海食崖はベースサージ堆積物から構成されており、海岸線の南北方向において、崖の高さや堆積物の構造、堆積物に含まれる礫の粒径などに差異がみられるという。したがって、海食崖の南北方向での崖構成物質の物性が異なり、それに伴い崩壊プロセスや周期に差異がみられる可能性がある。そこで本研究では、羽伏浦北部の約 2.5 km の範囲を対象地域として、現地調査をもとに海食崖の崩壊プロセスを明らかにし、モデルを用いた安定解析によって崩壊の規模や周期に関する考察を行うことを目的とする。

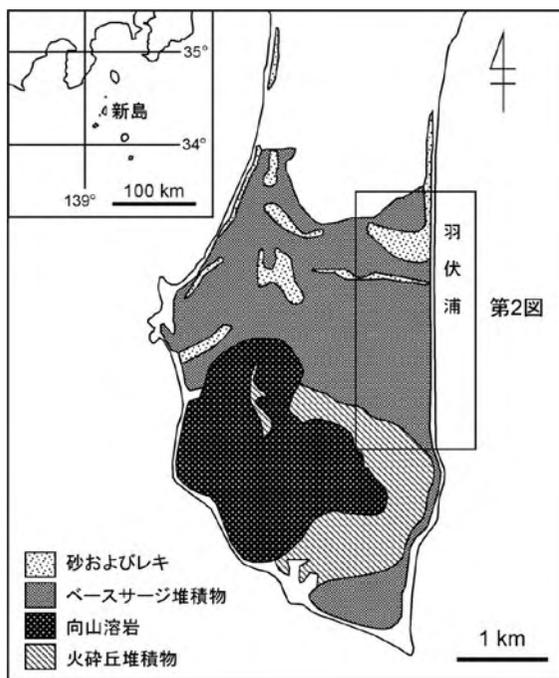
### II 調査地域

伊豆新島は複数の流紋岩～玄武岩質の単成火山からなる火山島で、最新の噴火は、886 年に島の南部にある向山火山で発生した（一色, 1987）。向山の一連の火山活動には 3 つのステージがあり、第 1 期にはベースサージ、第 2 期には降下火砕物、第 3 期には粘性の高い溶岩が噴出した

\* 筑波大学自然学類

\*\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

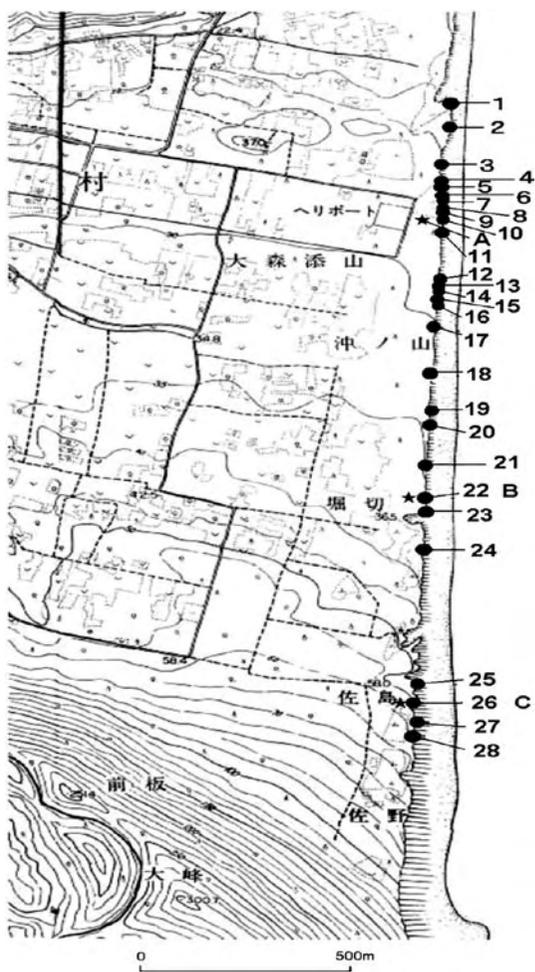
とされている(横山・徳永, 1978; 徳永・横山, 1979). 本研究の調査対象地域である羽伏浦には, その第1期に噴出したベースサージ堆積物(白ママ層)から成る海食崖が連なる(第1図). 横山・徳永(1978)および徳永・横山(1979)によると, ベースサージ堆積物の厚さは, 島の南端の端々(はばた)で約90 mと最も厚く, 北方へ次第に薄くなる. すなわち調査地域の南端で約60 m, 羽伏浦北端では10 m以下となる. この堆積物は黒雲母流紋岩などの本質岩片と, 886年以前の火山活動による火山岩や凝灰岩の異質岩片の未固結混合物で, 粒度組成や厚さの異なる多数の単層から成っている. 岩片の大きさは径数10 cm程度のものが多いが, 南に向かうほどより大きな岩片を含む層が現れ, 羽伏浦南部では2 mに及ぶ巨大な岩塊を含む層が見られる. また, 羽伏浦よりさらに北で見られるベースサージ層では堆積物の粒度がより細粒である.



第1図 調査地域および調査地域周辺の地質図

### III 海食崖の形状および崩壊の形状

羽伏浦で発生する崩壊プロセスを明らかにするために, 2005年の7月と11月に現地で崖の観察と測量を行った. 測量は第2図中に示した1-28のサイトでレーザー距離計を用いて行った. 測量データから各崖のプロファイル(第3図)を作成し, 崖の基部と最上部の標高差から崖の高さ $H$  (m)を算出した. また, プロファイル図から傾斜の大きく変わる点を判断し, それらを結んだ直線から傾斜を算出した. 汀線の位置は, 気象庁発表の大島・岡田と三宅島の潮位データを参考に



第2図 調査地域の地形図と調査地点の位置

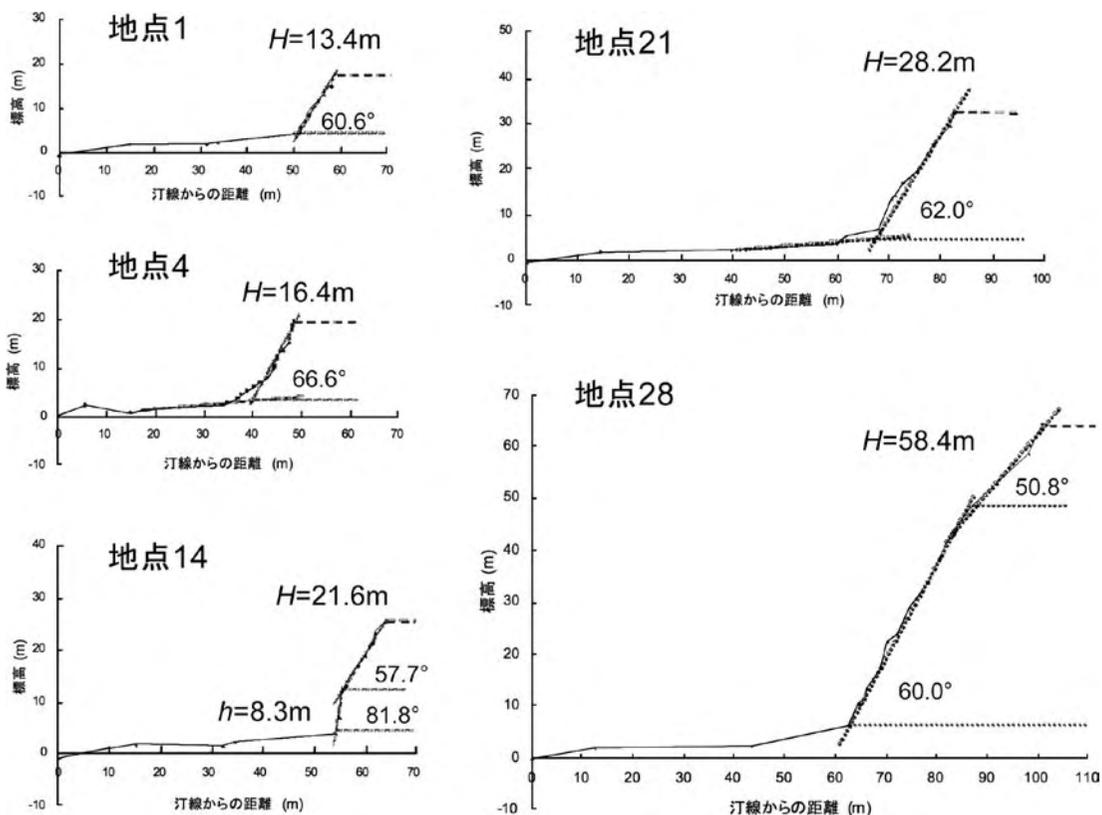
補正を行った。

現地観察の結果、地点4、7、10、12、15などで基部に横幅10 - 20 m程度の崩壊堆積物がたまっており、最近でも頻繁に崩壊が発生していることが伺える。崖の高さと傾斜を第1表に示す。崖の高さは、調査地の最北に位置する地点1で13.4 mと最も低く、堀切（ほりきり）付近の地点22 - 24などでは約30 m、調査地の最南部にあたる地点28では58.4 mと、南ほど高度が大きい。崖の形態・傾斜に注目すると、崖には大きく2つのタイプがある。一つは傾斜が60° - 70°程度の部分が基部から上部までほぼ一様に続くものであり（例えば第3図の地点1、21）、もう一つは、崖の基部が75° - 90°近い急傾斜になっていてその上部が60° - 70°程度になっているものである（例えば第3図の地点14）。後者のタイプにおける急

傾斜部分の高さは崖によって異なり、3 m程度のものから9 mほどのものまで見られた。また、いくつかの地点では、崖の最上部が40° - 50°程度の緩傾斜になっているところがあった。

#### IV 崩壊モデル

Sunamura (1992) によると、基部の波食による崖の不安定化と崩壊による安定化がくり返される結果、崖の後退が進行していく。崩壊の形式は主にfall, topple, slide, flowの4タイプあり、それらは崖を構成する物質の地質構造、層位、抵抗力などによって決まる。本調査地域では、至る所で崖の基部に崩壊堆積物が観察され、堆積物の背後の崖には、崩壊した部分と思われる凹形の地形がみられた。これらのことから、本調査地では



第3図 海食崖のプロファイルの計測例。それぞれの地点の位置は第2図を参照

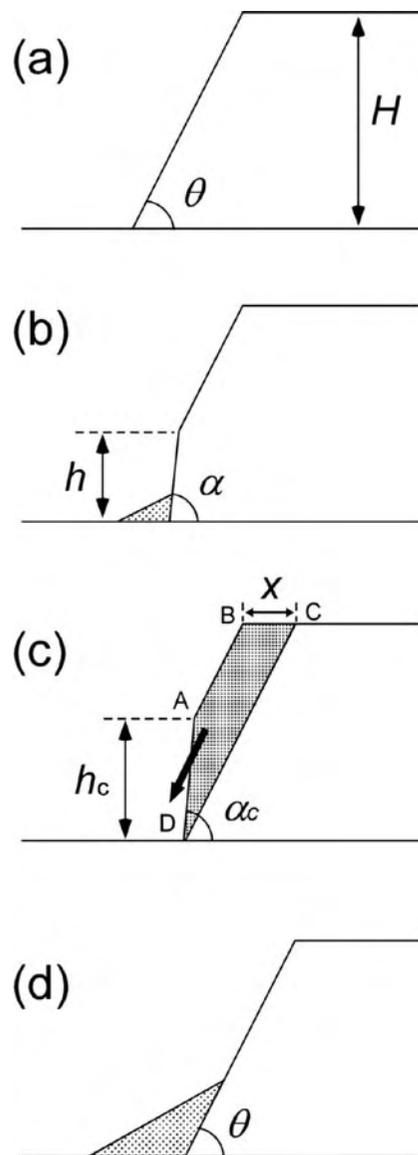
slide タイプの崩壊が頻繁に発生していると考えられる。またいくつかの場所では、崖の基部に波食によって形成されたと思われる急傾斜部分が観察されたが、このような急傾斜部分が崖の上部まで続いているところはなかった。したがって、急傾斜部分がある程度の高さに達すると崩壊し、傾斜が一様になるものと考えられる。また、崩壊堆積物や崩壊部分の大きさから、一回の崩壊の幅は 10 - 20 m 程度であると推定される。崩壊直後と思われる崖とその隣の崖で汀線からの距離を比較したところ、両者の関係はほぼ同じか、崩壊直後のもののほうが陸側に数 m 後退していた。これらは、幅 10 - 20 m 程度の崩壊によって、その崖

は数 m 陸側に後退し、その後相対的に海側に張り出した周囲の崖で次の崩壊が発生するということを示唆する。

海食崖の現地観察の結果をもとに、本調査地での崖の崩壊を「のり先を通る平面破壊」と仮定し、以下のような 2 次元モデルを構築した（第 4 図）。

第 1 表 崖の地形計測および崖構成物質の土壤硬度測定結果

| 地点    | 崖の高さ<br>$H$ (m) | 崖の傾斜<br>$\theta$ (°) | 波食面の          |                    | 土壤硬度<br>$p$ (mm) |
|-------|-----------------|----------------------|---------------|--------------------|------------------|
|       |                 |                      | 高さ<br>$h$ (m) | 傾斜<br>$\alpha$ (°) |                  |
| 1     | 13.4            | 60.6                 | -             | -                  | 19.8             |
| 2     | 18.5            | 64.1                 | 6.9           | 74.6               | 22.4             |
| 3     | 21.1            | 61.7                 | 3.9           | 81.3               | 24.2             |
| 4     | 16.4            | 66.6                 | -             | -                  | -                |
| 5     | 17.8            | 73.9                 | -             | -                  | -                |
| 6     | 17.7            | 67.6                 | -             | -                  | -                |
| 7     | 18.7            | 72.1                 | -             | -                  | -                |
| 8     | 19.5            | 51.8                 | 9.6           | 85.2               | -                |
| 9     | 18.9            | 50.5                 | 9.8           | 79.6               | -                |
| 10    | 20.1            | 69.2                 | -             | -                  | -                |
| A     | (21.0?)         | -                    | -             | -                  | 21.9             |
| 11    | 23.4            | 59.8                 | 4.5           | 83.1               | -                |
| 12    | 20.2            | 64.8                 | -             | -                  | -                |
| 13    | 19.7            | 66.1                 | -             | -                  | -                |
| 14    | 21.6            | 57.7                 | 8.3           | 81.8               | 23.9             |
| 15    | 20.3            | 70.2                 | -             | -                  | -                |
| 16    | 20.5            | 69.5                 | -             | -                  | -                |
| 17    | 24.5            | 72.0                 | -             | -                  | -                |
| 18    | 24.2            | 60.9                 | 3.5           | 85.1               | 25.1             |
| 19    | 26.8            | 56.9                 | -             | -                  | -                |
| 20    | 26.6            | 70.1                 | -             | -                  | -                |
| 21    | 28.2            | 62.0                 | -             | -                  | -                |
| 22, B | 32.4            | 65.0                 | -             | -                  | 22.1             |
| 23    | 30.9            | 55.7                 | -             | -                  | 23.5             |
| 24    | 31.0            | 57.3                 | -             | -                  | 24.0             |
| 25    | 43.9            | 62.9                 | 8.4           | 83.2               | 28.9             |
| 26, C | 51.8            | 54.9                 | 2.6           | 72.9               | 27.0             |
| 27    | 43.0            | 64.8                 | -             | -                  | -                |
| 28    | 58.4            | 60.0                 | -             | -                  | 27.5             |



第 4 図 羽伏浦海食崖の崩壊のモデル

- (1) 崖の高さ  $H$  (m) は、崖が後退しても変化しない。また、崖を構成する物質の物性は高さ方向に変化しない (第4図 (a))。
- (2) 波食を受けていない初期地形の傾斜を  $\theta$  ( $^\circ$ ) で表す (第4図 (a))。  $\theta$  は、崖の崩壊直後の勾配であり、崖の崩壊が前述したように「のり先を通る平面破壊」と仮定すると、その破壊面は崖を構成する物質のせん断抵抗角  $\phi$  ( $^\circ$ ) と以下の関係にある (この状態はランキンの主動土圧状態に相当する)：

$$\theta = 45 + \frac{\phi}{2} \quad (1)$$

- (3) 崖の基部が波によって削られる。基部にノッチはできず、波食を受けた部分のすぐ上部が崩れ、崩壊堆積物として崖基部に供給される。このとき基部に現れる垂直に近い傾斜の部分の比高を  $h$  (m)、傾斜角を  $\alpha$  ( $^\circ$ ) とする (第4図 (b))。
- (4) 崩壊堆積物は波によって除去され、再び崖基部がさらされ波食を受ける。
- (5) 上記の (3) と (4) がくり返される ( $h$  が徐々に増加する)。
- (6)  $h$  がある高さに達したとき、崖全体で崩壊が発生する。この時の  $h$ 、 $\alpha$  をそれぞれ、 $h_c$ 、 $\alpha_c$  とする (第4図 (c))。せん断面は平面形で、崩壊堆積物は崖基部に堆積する (第4図 (d))。1回の崩壊で崖が後退した距離を、崩壊の厚さ  $x$  (m) とする。
- (7) 崩壊堆積物はやがて波によって除去され、再び崖基部がさらされ、波食を受ける ((2) に戻り、くり返す)。

モデルの崩壊時における、せん断面付近の力のつり合いより、潜在崩壊面におけるせん断力  $T$  とせん断抵抗力  $S$  は以下のように表される。

$$T = W \sin \theta \quad (2)$$

$$S = cL + W \cos \theta \tan \phi \quad (3)$$

ここで、 $c$ 、 $\phi$  は崖構成物質の粘着力、せん断抵抗角である。 $W$  は台形 ABCD 部分の重量 (奥行き、すなわち厚さ方向は単位長さ 1 を考える) であり、以下のように表される：

$$W = \frac{\gamma}{2} h_c (2H - h_c) \left( \frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha_c} \right) \quad (4)$$

ここで  $\gamma$  は崖構成物質の単位体積重量である。(2) ~ (4) 式を組み合わせることによって、崖の安全率 ( $FS$ ) は以下ようになる。

$$FS = \frac{S}{T} = \frac{2cH}{\gamma h_c (2H - h_c) \left( \frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha_c} \right) \sin^2 \theta} + \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \quad (5)$$

ここで、崩壊時の  $h_c$  は、 $FS = 1$  とおくことにより以下のように求められる：

$$h_c = H - \sqrt{H^2 - \frac{2cH}{\gamma \sin \theta \cos \theta \left( 1 - \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{\tan \phi - \tan \theta}{\tan \alpha_c} \right)}} \quad (6)$$

となる。また 1 回の崩壊によって崖が後退する距離  $x$  は以下ようになる：

$$x = \frac{h_c}{\tan \theta} - \frac{h_c}{\tan \alpha_c} \quad (7)$$

測定の結果、いくつかの地点では崖最上部に本来の傾斜と比べて傾斜の緩い部分がみられた。この部分は最上部の強度の弱い土層や、崖上部からの流水による崩壊などの要因が考えられるが、本モデルでは崖構成物質の物性は高さ方向に変化しないものとしており、これらを考慮していない。したがって、本研究ではこの緩傾斜部分は崖本来の傾斜が最上部まで続くものと見なしていること

になる。

## V 崖構成物質の物性測定

海食崖の斜面安定解析を行うために、すなわち上記のモデル計算に必要な物性値を求めるために、複数の地点で海食崖構成物質のせん断強度、土壤硬度、密度の測定を行った。土壤硬度は地点 1 - 3, 14, 18, 22 - 26, 28 の崖基部で山中式土壤硬度計を用いて行った。各地点で 20 回の測定の平均を値とした。崩壊堆積物があるところではその上部の堆積物のない面で測定した。また、地点 A では崖の鉛直方向への土壤硬度変化を捉えるために、高度の異なる 5 点で測定を行った。各測定地点における土壤硬度 ( $p$ ) を第 1 表に示す。最も北に位置する地点 1 では他に比べてやや小さな値が得られた。他の地点では、地点 2 - 24 までと地点 25 - 28 で大きく 2 分され、南部で値が大きくなるという傾向が得られた。また、地点 A における鉛直方向の土壤硬度測定では、崖最上部の土層部分で値が小さくなったほかは土壤硬度に差はみられなかった。崖構成物質のせん断強度はベーンせん断試験によって測定した。この方法は野外で直接的に土のせん断強度を測定するもので (Matsukura and Tanaka, 1982)、サンプリングなどによる条件変化がなく、実際の状況に近い測定値を得られる利点がある。何段階かの垂直荷重でのせん断強度のデータから、近似直線を引き対象物質の粘着力とせん断抵抗角を得ることができる。試験は第 2 図の A - C の 3 地点で自然含水比のもとで行った。ここでの自然含水比とは、試験中の自然保湿状態での含水比を指す。試験の結果、粘着力は 3 つの試験サイトで明確な差が現れた (地点 A で  $90.8 \text{ gf/cm}^2$ , 地点 B で  $118.2 \text{ gf/cm}^2$ , 地点 C で  $132.4 \text{ gf/cm}^2$ )。すなわち、崖の高い地点ほど粘着力が大きい傾向が認められた。せん断抵抗角は地点 A で若干大きな値 ( $38.7^\circ$ ) を示したが、他の 2 地点はほぼ等しい値であった

(地点 B で  $35.7^\circ$ , 地点 C で  $35.9^\circ$ )。また、ベーンせん断試験を行った A - C の 3 地点で海食崖構成物質をサンプリングし、実験室で自然含水比条件下での単位体積重量を測定した。結果は地点 A で  $1.54 \text{ gf/cm}^3$ , 地点 B で  $1.39 \text{ gf/cm}^3$ , 地点 C で  $1.63 \text{ gf/cm}^3$  となり、3 地点の値に多少のばらつきが見られた。

## VI 考察

### 1. モデルによる安定解析

安定解析を行う地点の各物性値を以下のように決定した。土壤硬度は、地点 A での崖最上部の土層部分を除いて大きな差異がないという結果から、調査地の他の地点でも、崖基部で行った土壤硬度測定値がその地点の崖全体の代表値であるとみなした。土壤硬度の測定を行っていない地点では、測定を行った 11 地点のうち最も近い場所のデータを用いた。粘着力は、せん断試験を行った 3 地点の粘着力と土壤硬度データの直線回帰式：

$$c = 5.71 \times p - 21.2 \quad (R^2 = 0.61) \quad (8)$$

に各地点における土壤硬度値を代入し、得られた値をその地点の粘着力とした。また、せん断抵抗角と単位体積重量は 3 地点のうちで各崖から最も近い測定地点のデータを値とした。

現地調査で得られた各崖のデータを (6), (7) 式に適用し、 $h_c$  と  $x$  を推定した。現地の崖の波食面の傾斜  $\alpha$  は垂直から  $75^\circ$  まで値に幅があったので、モデルに適用する波食面の傾斜  $\alpha_c$  は  $75^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $85^\circ$ ,  $90^\circ$  の場合を想定した。

第 5 図は崖の高さと波食面の限界高さ  $h_c$  の関係を示したものである。 $\alpha_c = 90^\circ$ ,  $85^\circ$ ,  $80^\circ$  の場合は崖の高さ  $H$  に関係なく、 $h_c$  はそれぞれ 3 - 4, 3.5 - 4.5, 5 - 6 m の範囲内ではほぼ同じような値をとる。一方、 $\alpha_c = 75^\circ$  の場合は、 $H$  が 30 m 以下の低いところでは 11 - 7 m で、崖が低いほ

ど  $h_c$  が大きくなる傾向が認められ、 $H$  が 30 m 以上では、 $h_c=7-8$  m と一定であった。このように  $h_c$  は  $\alpha_c$  が小さい場合を除けば、崖の高さによる差はなく、その値は  $\alpha_c$  が小さいほど大きくなる傾向がみられた。

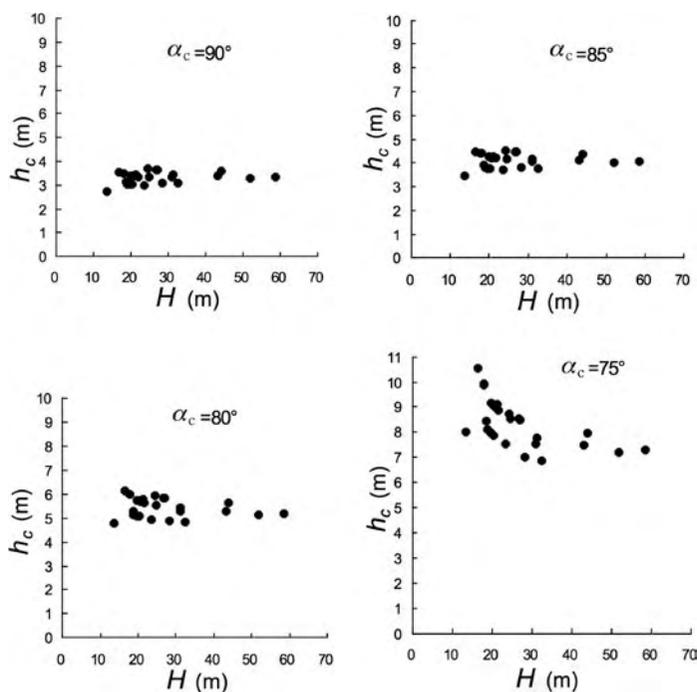
第 6 図は、崖の高さと崩壊の厚さ  $x$  の関係を示したものである。 $\alpha_c=90^\circ$  の場合は、崖の高さが 25 m 以下の低いところで  $x$  が 1.5 m 以下のやや小さい値をとるところがみられたが、それらを除くと崖の高さに関係なく  $x$  は 1.6 - 1.9 m の範囲内で類似の値をとった。 $\alpha_c=85^\circ$  と  $80^\circ$  の場合も同様に、崖の高さが 25m 以下のところで  $x$  が 1.5 m 程度とやや低い値をとるところがあったが、全体的には崖の高さに関係なく 1.6 - 1.9 m あるいは 1.7 - 2.0 m の範囲内の値をとった。 $\alpha_c=75^\circ$  の場合では、崖の高さが 30m 以下のところで  $x$  は 1.6 - 2.4m と値の範囲が広がったが、崖の高さが 30 m 以上のところでは 1.7 - 1.9 m 程度の似たような値をとった。このように、崩壊の厚さ  $x$  は

崖の高さによらず、ほぼ同じような値をとっている。

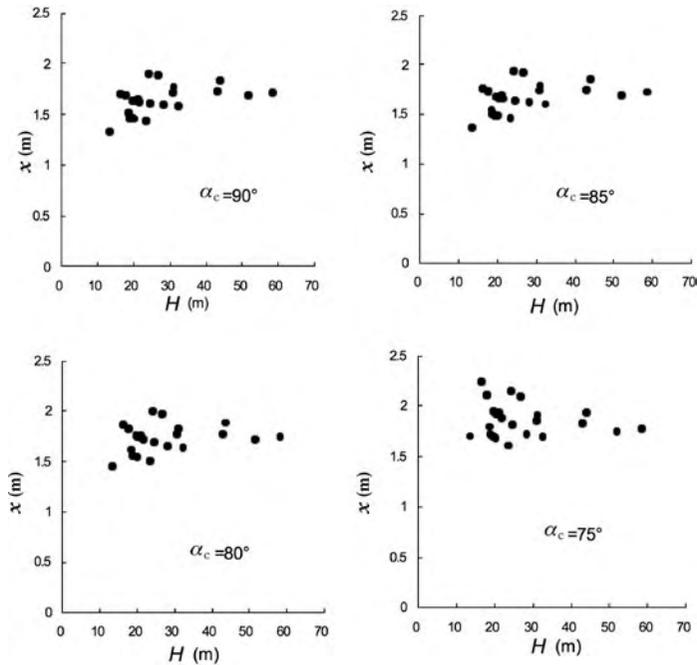
第 7 図は各  $\alpha_c$  での  $h_c$ ,  $x$  の値の範囲と平均値を表したものである。これを見ると  $h_c$  は  $\alpha_c$  が小さいほど増加し、その値の範囲は  $\alpha_c$  が小さい場合ほど広いという傾向が現れた。一方  $x$  は  $\alpha_c$  の影響は小さく、おおまかにみると 1.6 - 1.9 m (2 m 弱) 程度の厚さの崩壊が起きているということが示されている。

## 2. モデル計算結果と現地との比較

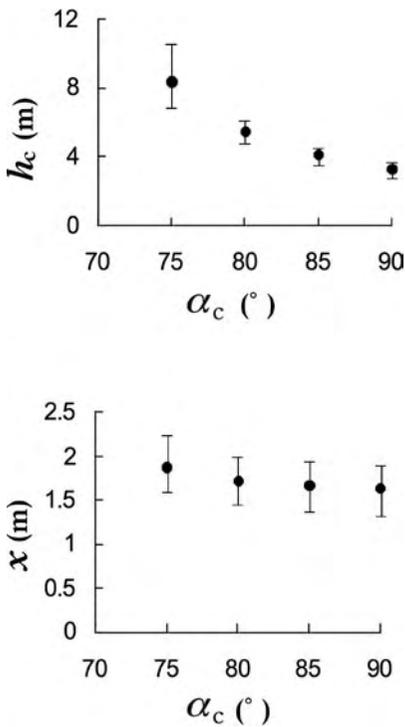
安定解析を行った地点のうち現在基部に波食面が見られるのは 9 地点あった。これらの地点における現在の波食面の傾斜  $\alpha$  を用いて  $h_c$  を予測し、予測値と実際の波食面の高さ  $h$  とを比較し、モデルが現地の崩壊プロセスをどの程度正確に表現できているかを調べた。その結果、9 地点中 4 地点で  $h_c$  予測値が実際の波食面の高さ  $h$  よりも小さい。すなわちモデルでは崖がすでに崩壊してもい



第 5 図 崖の高さ ( $H$ ) と波食面の限界高さ ( $h_c$ ) との関係



第6図 崖の高さ ( $H$ ) と崩壊の厚さ ( $x$ ) との関係



第7図  $h_c$  と  $x$  の値の取りうる範囲と平均値

いはずであるが、まだ急傾斜を保っているという結果になった。この原因の一つに、隣接する崖との地形の関係、すなわち陸側に後退しているところでは相対的に安定度が増し、限界高さ以上の波食面であっても崩壊しないということが考えられる。もう一つの要因に、本研究では未考慮の、崖最上部が緩傾斜になっていることが挙げられる。最上部が緩傾斜になっているところでは傾斜が緩くなった分だけせん断力が小さくなり、解析結果は実際よりも不安定に見積もっている可能性が考えられる。

### 3. 崩壊プロセスと崩壊周期

海食崖の後退は波による崖の侵食とそれに伴う崩壊によってもたらされる。これまでに矢島 (1966) や Sunamura (1987) によって、羽伏浦では海岸に押し寄せる波の営力に、南北での差がないことが推定されている。本研究では、現地調査や安定解析を行い、崖の高さの異なる南北で基

部の波食に伴う slide 型の崩壊がくり返されており、崖の高さが異なってもその崩壊の厚さ  $x$  と波食面の限界高さ  $h_c$  に差がないという結果を得た。これらから、羽伏浦では南北で同じプロセス、同じ速度によって海食崖が後退しているということが示唆される。またこのことは、羽伏浦の海岸が南北に約 5 km にわたって直線状であり、平行後退してきたこととも調和する。

崩壊の厚さ  $x$  と崖の後退速度から、同じ場所では崖の崩壊が発生する周期を推定できる。前述したように、Sunamura (1987) は 1968 年時点における後退速度を 1.2 m/y と推定している。この値を現在の後退速度と仮定して各地点の崩壊周期を推定したところ、崖の高さによる違いはほとんどなく、1.5 年前後の周期で崩壊がくり返されるという結果が得られた。前述のように、崩壊した箇所は周囲より数 m 陸側に後退し、その周辺が相対的に海側に張り出し次の崩壊が起こる、というように順番に発生していくことが推測される。従って崩壊周期は、崖基部を侵食するような暴浪が訪れる頻度と、崖が海側に張り出すまでの時間によって決まると考えられる。

## VII 結論

本研究では、崩壊（侵食）に対する抵抗力の小さいベースサージ堆積物から成る新島羽伏浦の海食崖について、現地調査とモデルによる安定解析を行い、崩壊プロセスとその周期について議論した。その結論は以下のように要約される。

- (1) 本調査地では、基部の波食に起因する slide 型の崩壊がくり返され、崖が後退してきたと考えられる。
- (2) 調査地の南北でベースサージ堆積物の物性に若干の差異が見られた。粘着力は南ほど、せん断抵抗角は北側で大きい。土壌硬度は調査地の最南部で高い値を示した。
- (3) モデル解析の結果、調査地の南北で崩壊の厚

さに差はなく、2 m 弱程度であると推定された。また波食面の限界高さも、南北での差がないという結果が得られた。既存研究の結果と併せると、崖は南北で同じプロセス、速度で後退していると考えられる。

- (4) 崩壊の厚さと、Sunamura (1987) で予測された後退速度から、崖の崩壊周期は調査地の南北で差が無く、1.5 年前後であると推定された。崩壊周期には、基部を波食するような波の訪れる頻度と、相対的な崖の張り出しのサイクルが関わっていると考えられる。

本研究では波食面の傾斜を  $75^\circ - 90^\circ$  の範囲内で幅を持たせて解析、議論を行った。これは、崩壊時の波食面の傾斜を、現在残されている地形からでは判断しかねたからであるが、波食面の傾斜によっては、その限界高さやモデルと現地との比較結果などに大きな差が現れた。また、本研究では波食面の限界高さを大きく超えるような暴浪による崩壊は考慮に入れていないが、実際にはこのような非常に大きな波によって、崩壊が引き起こされていることも考えられる。その場合、崩壊の厚さは今回得た結果よりも大きくなり、崖の崩壊の幅もより広く、一斉に後退することが予想される。これらのことを考慮に入れて羽伏浦の崩壊プロセスをより厳密に議論するには、暴浪時に海岸および崖の様子を観察する必要があると思われる。

## 謝辞

野外調査およびデータ整理においては、本学院生である小花和宏之・松四雄騎・小暮哲也・木崎昇平さんらに手伝っていただいた。記して謝意を表します。また本研究は、学術振興会の科学研究費（基盤研究 B，課題番号 16300292，研究代表者 松倉公憲）の補助を受けて行われたものである。

## 文献

- 磯部一洋・安田 聡 (1995): 伊豆新島南東部における大海食崖の後退について－空中写真を用いた火砕丘の侵食量の測定－. 地質調査所月報, **46**, 457-475.
- 一色直記 (1987): 新島地域の地質. 「地域地質研究報告」: 地質調査所, 85p.
- 徳永 徹・横山勝三 (1979): 伊豆新島向山火山の噴火様式と生成過程. 地理学評論, **52**, 111-125.
- 矢島昭弘 (1966): 波の営力を中心とした伊豆諸島・羽伏浦における海崖の後退に関する研究. 昭和 40 年度東京教育大学卒業論文, 17p.
- 横山勝三・徳永 徹 (1978): 伊豆新島向山のベースサージ堆積物. 火山, 第 2 集, **23**, 249-262.
- Matsukura, Y. and Tanaka, Y. (1983): Stability analysis for soil slips of two grass-slopes in southern Abukuma Mountains, Japan: *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **4**, 229-239.
- Sunamura, T. (1987): Coastal cliff erosion in Niijima Island, Japan: Present, past, and future – an application on mathematical model – . In Gardiner, V. ed. *International Geomorphology 1986 Part I*, John Wiley & Sons, 1199-1212.
- Sunamura, T. (1992): *Geomorphology of Rocky Coasts*: John Wiley & Sons, Chichester, 302p.
- (2006 年 5 月 31 日受付, 2006 年 8 月 7 日受理)

# タブレット野外風化実験にまつわるいくつかの問題点

## Some Problems on Field Experiments on Weathering Rates Using Rock Tablets

松倉 公憲\*・八反地 剛\*\*

Yukinori MATSUKURA\* and Tsuyoshi HATTANJI\*\*

### I はじめに

地形変化速度を議論する場合、その地形を構成する岩石の風化速度がしばしば問題となる。しかし Brunsden (1979) や Kukal (1990) らの指摘を待つまでもなく、自然条件下における風化速度に関する定量的情報は極めて少ない。その原因は、岩石の風化速度が極めて遅いことと、風化の開始した時間や風化継続期間を特定することが困難であることにある。そこで、従来、岩石の風化速度のデータは建立年代の明かな墓石や石造建造物などの損傷量を計測することによって得られてきた(松倉, 1994)。しかしこの方法でも、墓石や石造建造物の初期状態を厳密に復元することが難しい(すなわち風化量の正確な見積もりが難しい)という問題を含んでいる。風化速度を知るためのもう一つの方法が、岩石タブレットを用いた野外実験である。この方法は、重量を計測した岩石試料(タブレット)を野外の土層中に埋設し、ある期間経過後に回収し、再度重量を計測することにより、その期間内での欠損重量から風化速度を見積もるものである。この方法は野外での風化をそのまま模擬している点で優れてい

る。そこで、筆者らも10年ほど前から、このタブレット風化実験を行ってきている。その初期の5年間の結果については、Matsukura and Hirose (1999) や Matsukura *et al.* (2001) で報告した。また、10年の結果についても現在まとまりつつある(Matsukura *et al.*, submitted)。その過程において、タブレット法によって解明できる点が多いことも判ったが、同時にこの方法のいくつかの弱点・欠点も判ってきた。本稿はそれらのことをまとめたものである。

### II タブレット風化野外実験に関する研究のレビュー

#### 1. 従来の研究

「タブレット風化実験」は、岩石試料(タブレット型(円盤状)であることが多いが、直方体や場合によっては不定形の試料が用いられることもある)を野外に埋設し、ある期間経過後、あるいはある一定期間ごとにそれを回収し、重量の減少量を計測することによって、岩石の風化量あるいは風化速度を知るものである。この手法を最初に考案したのは、Chevalier (1953) や Gams (1959a, b)

\* 筑波大学生命環境科学研究科

\*\* 筑波大学陸域環境研究センター(現:筑波大学生命環境科学研究科)

とされている (Trudgill, 1975). その後, それらをもとに Newson (1970) や Trudgill (1972) が洗練された方法に改良した.

これまでのタブレット研究をまとめたのが, 第1表である (筆者らの研究については後述するので, ここでは除いてある). 以下では, 研究の古いものから順にその内容を紹介する.

地形学における最初のタブレットによる風化研究の結果は Trudgill (1977) によって報告されている. 彼は直径 1.5 cm, 厚さ 0.5 cm の石灰岩タブレットをスコットランドの土壌と基岩の境界部に1年間埋設した. その結果, 溶食量 (侵食量) として, 夏の湿潤期 (雨量が 32.5 mm/month)

では 0.043 g/y, 冬の乾燥期 (雨量が 22.5 mm/month) では 0.01 g/y という値が得られた.

Caine (1979) は, コロラドの San Juan 山脈の森林限界より高度の高い2つの地域の71箇所に, 破碎した (不定形試料) およそ 60g の流紋石英安山岩を地表面に5年間露出させるという野外実験を行った. その結果, 平均の重量損失速度は  $0.079 \pm 0.012$  %/y となった. さらに, 時間とともに重量損失速度が遅くなることもわかった. また, 土壌の pH と土壌層中や土壌層の上を流れる水の量や滞留時間等 (これらは冬の雪の被覆の分布にコントロールされている) が風化速度に影響を与えることを考察している.

第1表 タブレット風化実験に関する従来の研究例

| Reference   | block, tablet or disc                       | rock type                                 | buried position                            | period                     | environment                 | weight-loss ratio                              |
|---|---|---|--|----------------------------|-----------------------------|--|
| Trudgill (1977)   | tablet:<br>$\phi = 1.5$ cm, $h = 0.5$ cm    | limestone                                 | soil-bedrock interface                     | 1 year                     | Scotland                    | 0.01-0.043 g/y                                 |
| Caine (1979)  | 6.3 mm fragments: 60 g                      | rhyodacite                                | on the soil surface                        | 5 years                    | USA, Colorado               | 0.079 %/y                                      |
| Jennings (1977 & 1981)  | tablet:<br>40 × 25 × 10 mm                  | limestone<br>cave stream                  | soil                                       | 3-7 years<br>0.27-0.67 %/y | Australia, Coleman Plain    | 0.11-0.4 %/y                                   |
| Crabtree and Burt (1983)                                      | tablet:<br>$\phi = 3.1$ cm, $h = 0.7$ cm    | sandstone                                 | soil-rock interface                        | 15 months                  | England, hillslope          | 0.24-0.34 %/y                                  |
| Crabtree and Trudgill (1985)<br>Trudgill <i>et al.</i> (1994) | tablet:<br>$\phi = 3.1$ cm, $h = 0.7$ cm    | limestone<br>0.60 m deep alluvial soils   | soil-bedrock interface<br>10 years         | 2 years                    | England, hillslope          | 0.11-0.85 %/y<br>0.01-0.03 %/y                 |
| Campbell <i>et al.</i> (1987)                                 | cube:                                       | gypsum                                    | 25 cm deep in regolith                     | 2 years                    | Sudan (semi-arid)           | 0.95-2.7 %/y                                   |
| Hall (1990)   | tablet: 5 × 5 × 2 cm                        | quartz-micashist                          | on the ground                              | 5 years                    | Antarctic, Signy Island     | 0.02 %/y                                       |
| Inkpen (1995)   | tablet: 50 × 50 × 10 mm                     | limestone                                 | exposure to air                            | 2 years                    | England, London             | 0.82-1.55 %/y                                  |
| 漆原ほか (1999 a, b)  | tablet:<br>$\phi = 4.0$ cm, $h = 0.4$ cm    | limestone<br>土層 A 層<br>土層 B 層             | 地上 1.5 m                                   | 5 years                    | 日本各地                        | 0.3-0.86 %/y<br>0.42-1.32 %/y<br>0.60-1.53 %/y |
| Dixson <i>et al.</i> (2001)                                   | 6.3 mm fragments: 60 g                      | dolomite<br>granite                       | on the ground                              | 5 years                    | Sweden, Kärkevagge          | 0.326 %/y<br>0.121 %/y                         |
| Thorn <i>et al.</i> (2002)                                    | disks:<br>$\phi = 4.0$ cm, $h = 0.2-0.3$ cm | dolomite<br>granite<br>limestone          | soil horizon (shallow, intermediate, deep) | 5 years                    | Sweden, Kärkevagge          | 0.473 %/y<br>0.032 %/y<br>1.104 %/y            |
| Sumner (2004)   | clast (100 - 370 g)                         | basalt (gray lava)<br>basalt (black lava) | on the ground                              | 3 years                    | Subantarctic, Marion Island | 0.02-0.1 %/y<br>0.44-0.72 %/y                  |
| Plan (2005)   | tablet: 5 × 5 × 1 cm                        | limestone<br>dolostone                    | sub-soil, sub-arial                        | 1 year                     | Austrian alps               | 1.1-4.8 cm/1000 y                              |

Jennings (1981) は、オーストラリアの Cooleman Plain の土壌層と洞窟内の流水中に  $40 \times 25 \times 10$  mm の石灰岩タブレットを埋設し、3 - 7 年間の溶食量を計測した。溶食速度は重量損失の割合として、%/y という単位が使われたが、この単位がその後の研究において多く使われるようになる。土層中では  $0.11 - 0.4$  %/y であるのに対し、洞窟の流水中では  $0.27 - 0.67$  %/y と若干溶食速度が大きくなっている。

Crabtree and Burt (1983) は、直径 3.1 cm、厚さ 0.7 cm の砂岩タブレットをイングランド南西部の丘陵斜面の土壌層 - 基岩の境界部に埋設した。15ヶ月間の溶食量を計測したが、その溶食速度は  $0.24 - 0.34$  %/y と見積もられた。そして谷底から遠い斜面上方ほど溶解量が増加することを指摘した。

また、Crabtree and Trudgill (1985) は直径 3.1 cm、厚さ 0.7 cm の石灰岩タブレットをイングランド北部の丘陵斜面の深さ約 60 cm の土壌層 - 基岩の境界部に埋設した。2年間の溶食量を計測したが、谷底に近い斜面の下部では溶食速度が  $0.11$  %/y と比較的小さいのに対し、谷底から遠い斜面上部では  $0.85$  %/y と大きいことを報告した。この計測はその後も継続して行われ、その 10 年間の結果は Trudgill *et al.* (1994) によって報告されている。それによると、風化速度は  $0.01 - 0.03$  %/y と 1 - 2 年の計測のそれより、かなり遅くなっている。計測期間が長くなって風化速度が遅くなった理由は、以下のように考えられている：(1) 風化の初期は新鮮な面がでていたので風化が速いが、風化が進むとタブレットの表面に風化皮膜が形成されて、そのために風化速度が遅くなる；(2) 風化が進むと風化によってできたエッチピットに土が入り込み、洗浄してもそれが除去できなくなることが多くなる。したがって長期間の計測ほど重量損失の割合が少なくなり、結果として風化速度が小さくなる；(3) 埋設に伴う土層の攪乱が影響するかもしれない（短期間の

計測では、タブレットと土層の土との接触が少なく、土層の間隙を流れる水との接触する機会が多くなるので風化速度が速くなる)；(4) 土壌水分の変化；1980 年代後半から 1990 年代前半が乾燥した年が続いたので（計測は 1982 年 3 月から 1992 年 4 月まで）、乾燥した年の多かった後半に風化速度が小さかった。ところで、タブレットの風化速度は、前述したように斜面の上部・下部で異なるという空間分布が存在する。この分布に影響を与えるのは、基岩との境界にある土層の pH、炭酸の含有量、水文条件である：すなわち、サイト 1, 2, 3 は平らな斜面の裾野で、pH が 7 - 8 で斜面上方から横に水が流れる場であり、斜面上方は炭酸の含有量が小さく pH が 5 - 6 で流水は鉛直に浸透する場であり、これらの差異がタブレットの風化速度の差異を生じさせるという。この論文において、著者らは以下のような結論を導いている：「タブレット実験は風化の絶対速度に関しては信頼性のあるデータや時間変化に関するデータを提供するというよりは空間分布の差異に関する有用なデータを提供する」。

Campbell *et al.* (1987) は、スーダンの片麻岩から成るインゼルベルク - ペディメント斜面において、重量 11g、表面積  $37$  cm<sup>2</sup> の立方体の形状をもつ石膏のタブレットを、インゼルベルク斜面、ペディメント斜面および両者の接合部の合計 3 箇所において、いずれもレゴリス層（深さ 25 cm）の中に埋設した。2年間の埋設により、平均で 5.4%（インゼルベルク斜面：28 個のタブレット）、2.0%（接合部：14 個）、1.9%（ペディメント斜面：17 個）の重量損失が認められた。この結果から、ペディメントや接合部で風化量が小さいのは、このような場所は水の浸透が少ないためではないか、と考察した。

Hall (1990) は、南極の Signy 島において、 $5 \times 5 \times 2$  cm の石英 - 雲母片岩のタブレットを地表面に 5 年間露出させた。その結果  $0.02$  %/y という値が得られた。これらは物理風化（凍結破

砕)による風化と考えられ、南極の海岸における物理風化は比較的緩速度で進行していると判断された。

Inkpen (1995) の実験は、タブレットを空中に曝して、大気汚染や酸性雨による風化量を調べる方法である。土木・建築の分野での、いわゆる暴露実験に相当する。Portland Stone と Monks Park という 2 種類の石灰岩を使い、2 年間の実験をした。実験では、タブレットの暴露に対する準備の段階、フレームに固定する段階、重量の再計測の段階がそれぞれ計測結果にどのように影響を与えるかについて評価した。実験の結果では、すべての手順段階において統計学的に有意な差はなかったが、二つの岩石では、それぞれの段階に対して異なった反応が認められた。このことはタブレットの風化の空間パターンを評価する上で、岩石の性質が重要であることを示唆している。

漆原ほか (1999 a, b) は 4 種の石灰岩片 (直径 40 mm, 厚さ 4 mm) を日本各地の 7 地点に設置した。それぞれの地点において、地上 1.5 m, A 層, B 層の土層中の合計 3 点における溶食量の計測を、1992 年から 1997 年の 5 年間にわたって行った。その結果、地上の溶食量は土層中の 1/3 - 1/2 にすぎないこと、岩種別では中国・桂林産の石灰岩が比較的溶食速度が大きいことがわかった。

Dixson *et al.* (2001) は、スウェーデンの Kärkevagge (北極圏の高山地域に相当) の谷において、平均で 6.3 mm の粒径をもつドロマイトと花崗岩の岩石破片 (およそ 60 g) を 5 年間曝した。その結果、ドロマイトの重量損失速度は平均して  $0.326 \pm 0.115$  %/y, 花崗岩では  $0.121 \pm 0.020$  %/y という値が得られた。彼ら (Thorn *et al.*, 2002) は同じ場所で、同じ時期に、直径 4 cm, 厚さ 0.2 - 0.3 cm のディスクを地中の浅いところ、深いところ、その中間の 3 箇所の深さ (最大で 0.5 - 0.6 m) に埋設した。岩石の種類はドロマイト、花崗岩にさらに石灰岩を加えた 3 種

類である。その結果、ドロマイトと石灰岩はそれぞれ  $0.473 \pm 0.145$  %/y,  $1.104 \pm 0.446$  %/y と風化速度が大きいのにに対し、花崗岩は  $0.032 \pm 0.005$  %/y と小さかった。排水の悪い、すなわち湿った場所とか pH の小さい (酸性) 場所では、ドロマイトの風化が促進される。個々の場所における地表と地中の風化速度には、ドロマイトのケースでは相関が認められるが、花崗岩ではそれが認められなかった。

Sumner (2004) は 100 - 370 g の玄武岩 (灰色熔岩と黒色熔岩の 2 種類) の碎屑物を、南極に近い Marion 島において海岸から内陸の高山の方向の高度の異なる 4 箇所の地表に曝した。灰色熔岩の重量損失速度は海岸で 0.02 %/y であり、高度 730 m の場所では 0.10 %/y となった。黒色熔岩の平均重量損失速度は 0.72 %/y であり、高度依存性は認められなかった。また海水飛沫帯における重量損失を 1 年間モニタリングしたところ、灰色熔岩では 0.30 %, 黒色熔岩では 0.41 % であった。

Plan (2005) は、70 個の石灰岩・苦灰岩 (dolostone) のタブレット (5 × 5 × 1 cm : 片面にはワニスを塗っている) をオーストリア・アルプスの 13 箇所 (高度 660 ~ 2153 m の間に 500 m の高度差ごとの所) に埋設した。大部分は 10 cm の深さの土壤中であるが、2 つのセットは地表上に、1 つのセットはドリーネの中に埋設した。1 年間の埋設から得られた結果をもとに計算された溶食速度は、地上で 1.3 - 4 cm/ky, 土壤中で 1.1 cm/ky, ドリーネの中で 4.8 cm/ky となった。この論文では、これらの溶食速度のほかに、以下のような議論がなされている：

- (1) ドロマイトは溶けにくい (ドロマイトは石灰岩の 43%)。
- (2) 石灰岩でも SiO<sub>2</sub> を含むものは溶解しにくい可能性がある。
- (3) タブレットの表面を磨いたものは、切りっばなしのものより溶けにくい。

- (4) 地中のタブレットにおいては、高度が高いほど溶解が大きい。地上のタブレットは、高度に影響されない。
- (5) ドリーネの中に埋設したものは溶解が速い：ドリーネは水が集中するからと思われるが、このことはカルスト地形の self organization (自己組織) を示唆している。
- (6) 溶食速度にあたる植生の影響は小さい。

そして、水文データから計算された流域の低下速度は 9.5 cm/1000 年であり、タブレットから見積もられた最大のもの（ドリーネのそれを除く）より 2.5 倍の速度となった。

## 2. 従来の研究によって得られた知見

第 1 表にまとめたように、タブレット実験といっても、従来の研究のそれぞれにおいて、その実験条件は多様である。たとえば、岩石試料の形状についてみると、タブレット（円盤状）、立方体、直方体、不定形のもの多様であり、しかも同じ形状であっても研究者によりその大きさが異なっている。使われる岩石試料の岩種としては、石灰岩やドロマイトなどの炭酸塩岩が多い。これは炭酸塩岩が水が関与する風化に対して敏感である（すなわち風化速度が速い）ことと無関係ではないであろう。試料の設置場所としては、地上 1.5 m の空中（漆原ほか、1999 a, b）を除いては、ほとんどが地上か地中（土層中、とくに土層と基岩との境界部分）である。実験期間は最低でも 1 年であり、長いものでは 5 年となっている。風化環境としては、Hall (1990) が南極の Signy 島において石英-雲母片岩のタブレットを地上に 5 年間暴露したものがあり、凍結破碎等の物理的風化速度を計測しているが、その他の研究は主として岩石の溶食速度（すなわち主に化学的風化速度）を計測したものと理解される。

得られた結果の中で、最も大きい風化速度の値は、Thorn *et al.* (2002) の 1.104 %/y (石灰岩) である。また、石灰岩に比較してドロマイ

トは風化速度が小さい（たとえば、Plan, 2005; Thorn *et al.*, 2002）とか、斜面の位置によって風化速度が異なる（たとえば、Crabtree and Burt, 1983; Crabtree and Trudgill, 1985; Campbell *et al.* 1987）、風化速度は計測時間が長いほど小さくなる（Caine, 1979; Trudgill *et al.*, 1994）といったような結果が示されている。しかし、Plan (2005) も指摘しているように、風化速度（重量損失速度）は、高度・埋設深度（あるいは地表か地中か）・植生・地形・土壌水分・岩質・岩石表面形態など多くの要素に影響されている。したがって、従来得られた結果をもとに、これらを統一的に理解しようとすることは現状では不可能であろう。

## III 阿武隈におけるタブレット風化実験

### 1. 実験目的と実験方法

石灰岩が溶解しやすいということは、よく知られている。しかし、石灰岩が他の岩石に比較してどれだけ溶解しやすいのか、あるいは逆に石灰岩以外の岩石がどれだけ溶解し難いのかについては、よく判っていない。すなわち、上述したように、従来 of タブレット研究では、岩石が異なると重量損失速度にどのような差異があるかの研究は極めて少ない。そこで筆者らはまずそのことを研究テーマにしようと考えた（Matsukura and Hirose, 1999; Matsukura *et al.*, 2006）。試料としては、花崗岩、花崗閃緑岩、ハンレイ岩、石灰岩、安山岩、流紋岩、結晶片岩、凝灰岩の 8 岩型を選んだ（これらの鉱物組成、化学組成、物理的性質・力学的性質をまとめたのが、第 2 表である）。

次に、これをどこに置いて観測するかを考えた。従来の研究から、土層の深さによる風化速度の違いがあり、その違いには土壌水分の影響が大きいことも指摘されている（たとえば、Jennings, 1981）。したがって、飽和帯と不飽和帯における差異も気になった。そこで、地上、不飽和帯、不飽和帯、飽和帯中の 4ヶ所に埋設することにし

第2表 タブレット実験に使用した岩石の鉱物学的・物理的・化学的・力学的諸性質 (after Matsukura *et al.*, 2006)

|                                     | Granite<br>(Cretaceous) | Granodiorite<br>(Jurassic) | Gabbro<br>(Jurassic) | Limestone<br>(Triassic?) | Andesite<br>(Pleistocene) | Rhyolite<br>(Holocene) | Tuff<br>(Neogene)       | Crystalline schist<br>(Paleozoic) |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Mineral<br>composition <sup>a</sup> | Qtz<br>Kfs<br>Pl<br>Bt  | Qtz<br>Kfs<br>Pl<br>Bt     | Pl<br>Hbl<br>Px      | Cal<br>Dol               | Pl<br>Px<br>Mg<br>Ol      | Qtz<br>Kfs<br>Pl<br>Bt | Qtz<br>Kfs<br>Pl<br>Cpl | Pl<br>Am<br>Chl                   |
| SiO <sub>2</sub>                    | 70.98                   | 66.41                      | 46.83                | 0.09                     | 53.00                     | 76.67                  | 79.54                   | 46.80                             |
| TiO <sub>2</sub>                    | 0.36                    | 0.75                       | 1.29                 | -                        | 0.87                      | 0.10                   | 0.14                    | 0.79                              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | 14.81                   | 14.52                      | 17.95                | 0.04                     | 21.00                     | 11.89                  | 11.42                   | 14.70                             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO | 2.84                    | 3.87                       | 11.23                | 0.03                     | 9.40                      | 0.75                   | 1.17                    | 12.52                             |
| MnO                                 | 0.07                    | 0.08                       | 0.23                 | -                        | 0.15                      | 0.06                   | 0.02                    | 0.20                              |
| MgO                                 | 0.82                    | 2.09                       | 7.82                 | 0.83                     | 2.30                      | 0.13                   | 0.62                    | 14.40                             |
| CaO                                 | 3.26                    | 4.44                       | 12.87                | 52.00                    | 7.80                      | 0.70                   | 2.02                    | 8.53                              |
| Na <sub>2</sub> O                   | 4.07                    | 3.19                       | 1.49                 | 0.20                     | 3.00                      | 4.25                   | 2.15                    | 2.01                              |
| K <sub>2</sub> O                    | 2.68                    | 3.40                       | 0.11                 | 0.00                     | 1.80                      | 3.23                   | 2.92                    | 0.00                              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>       | 0.12                    | 0.24                       | 0.16                 | 0.01                     | -                         | 0.02                   | 0.02                    | 0.05                              |
| H <sub>2</sub> O(-)                 | -                       | -                          | -                    | -                        | -                         | 0.16                   | -                       | -                                 |
| H <sub>2</sub> O(+)                 | -                       | -                          | -                    | -                        | -                         | 2.03                   | -                       | -                                 |
| (CO <sub>2</sub> )                  | -                       | -                          | -                    | 47.00                    | -                         | -                      | -                       | -                                 |
| Total (wt.%)                        | 100.01                  | 98.99                      | 99.98                | 100.20                   | 99.32                     | 99.99                  | 100.02                  | 100.00                            |
| Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )   | 2.67                    | 2.69                       | 3.00                 | 2.71                     | 2.14                      | 1.60                   | 1.45                    | 2.86                              |
| Specific gravity                    | 2.71                    | 2.76                       | 3.05                 | 2.75                     | 2.62                      | 2.42                   | 2.48                    | 2.87                              |
| Porosity (%)                        | 1.51                    | 2.36                       | 1.58                 | 1.48                     | 18.29                     | 33.87                  | 41.32                   | 0.24                              |
| Equotip hardness                    | 720                     | 731                        | 711                  | 486                      | 652                       | 480                    | 438                     | 625                               |

a Qtz: quartz, Kfs: K-feldspar, Pl: plagioclase, Bt: biotite, Hbl: hornblende, Px: pyroxene, Cal: calcite, Dol: dolomite, Mg: magnetite, Ol: olivine, Cpl: clinoptilolite, Am: amphibole, Chl: chlorite

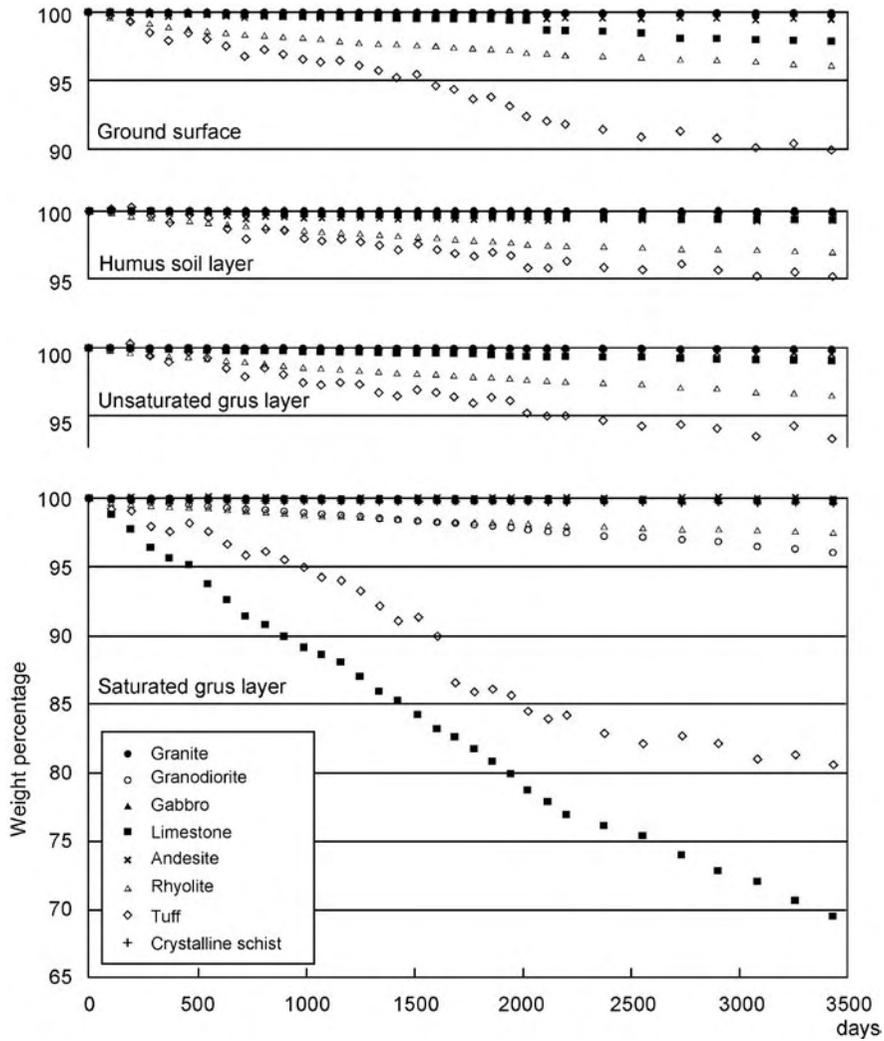
た。すなわち筆者らの実験は、岩型（岩質）の影響と場所（風化環境）の影響の二つを明らかにしようとしたものである。

以上のように、風化速度に対する、岩型の違いと場の条件（風化環境）の違いによる影響を明らかにするため、岩石タブレットを用いた野外実験を行った。上述した8岩型を、直径3.45 cm、厚さ約1 cmに成形したものを各岩型ごとに60個用意した。水洗、炉乾燥した後、15個づつを1つのセットにし、重量を計測し初期試料とした。8岩型ごとに1セット（15個のタブレット）づつをメッシュの袋に入れ、阿武隈山地の花崗閃緑岩を基盤とする斜面の、地上、不飽和帯（15 cm深）、不飽和帯（60 cm深）、飽和帯中と4ヶ所に埋設した。実験は1992年の年末から開始し、約3ヶ月あるいは半年毎に繰り返し重量計測を行った。

## 2. 実験結果および考察

現在までの約10年間の計測の結果をまとめたのが、第1図である。重量損失はほぼ等速に起こっているとみなせるので、以下では単純に年平均損失率で議論することにする。第3表にその値を示した（この表には最初の5年の年平均損失率も併記した）。

設置場所の違いを無視して、岩型別に重量欠損率を単純に平均化すると、凝灰岩（Tf）が最も大きく（1.027 %/y）、次いで石灰岩（Ls, 0.861 %弱）、流紋岩（Ry, 0.324 %）、花崗閃緑岩（Gd, 0.115 %）、安山岩（An）、結晶片岩（Cs）、ハンレイ岩（Gb）、花崗岩（Gr）という順になる。すなわち、Tf>Ls>Ry>Gd>An>Cs>Gb>Grの順序である。しかしこの順序は、設置場所別にみると同じではない。たとえば、飽和帯においてはLs>Tf>>Gd>Ry>Cs>Gb>Gr>Anとなり、地上でTf>Ry>Ls>An>Gd、Cs>Gb>Grとなる。また、設置場所ごとの単純平均では、飽和帯が最も



第 1 図 10 年間の重量変化 (after Matsukura *et al.*, 2006)

第 3 表 10 年間の欠損重量速度 (風化速度) (括弧内は最初の 5 年間の風化速度) (単位: %/y) (after Matsukura *et al.*, 2006)

| Rock type          | Ground surface | Humus soil layer | Unsaturated grus layer | Saturated grus layer | Mean for the four settlements |
|--------------------|----------------|------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Granite            | 0.012 (0.011)  | 0.014 (0.015)    | 0.013 (0.014)          | 0.017 (0.020)        | 0.014 (0.015)                 |
| Granodiorite       | 0.023 (0.019)  | 0.017 (0.018)    | 0.015 (0.016)          | 0.403 (0.397)        | 0.115 (0.113)                 |
| Gabbro             | 0.017 (0.016)  | 0.016 (0.018)    | 0.015 (0.016)          | 0.024 (0.031)        | 0.018 (0.020)                 |
| Limestone          | 0.218 (0.110)  | 0.071 (0.082)    | 0.098 (0.094)          | 3.058 (3.672)        | 0.861 (0.990)                 |
| Andesite           | 0.053 (0.091)  | 0.070 (0.125)    | 0.043 (0.070)          | 0.005 (0.002)        | 0.043 (0.072)                 |
| Rhyolite           | 0.394 (0.538)  | 0.302 (0.435)    | 0.349 (0.426)          | 0.249 (0.342)        | 0.324 (0.438)                 |
| Tuff               | 1.013 (1.274)  | 0.480 (0.660)    | 0.665 (0.808)          | 1.949 (2.290)        | 1.027 (1.258)                 |
| Crystalline schist | 0.023 (0.025)  | 0.021 (0.024)    | 0.019 (0.019)          | 0.034 (0.048)        | 0.024 (0.029)                 |
| Mean of all rocks  | 0.219 (0.261)  | 0.124 (0.170)    | 0.152 (0.181)          | 0.717 (0.850)        | 0.303 (0.366)                 |

大きく (0.717%), 次いで地上 (0.219%), 不飽和帯 (0.152%), 腐植直下 (0.124%) の順となり, すなわち飽和帯 > 地上 > 不飽和帯 > 土壌帯 の順になる. しかし岩型によっては最大値をとるのが飽和帯でないものもある. たとえば, Ry は地上での損失率が最も大きく, An では土層中が最も大きい. 以上のことから重量損失は岩型と風化環境の両者に強く依存していることが伺われる.

そこで次に, 風化速度と埋設場所との関わりを岩型別にみていくと, 大きく次のような3つのタイプに分類された. 1) 飽和帯のみが特に大きく変化したもの (石灰岩, 花崗閃緑岩), 2) どの場所でも比較的大きく変化したもの (凝灰岩, 流紋岩), 3) どの場所でも変化の小さかったもの (花崗岩, ハンレイ岩, 結晶片岩, 安山岩), の3つである. 以下にそれぞれのタイプごとに詳細に検討する. 1) の飽和帯のみが特に大きく変化したのは, 石灰岩と花崗閃緑岩である. これらの風化は化学的風化によるものと思われる. とくに石灰岩は飽和帯以外の欠損重量が極めて小さいので, 飽和帯以外では溶解があまり働かないようである. 2) のどの場所でも比較的風化速度が大きいものとして凝灰岩と流紋岩がある. これらの岩石は, 間隙率が大きく, 強度が弱いという物性をもつことが共通している. また, 3) のどの場所でも風化速度が遅いものとしては, 安山岩, 結晶片岩, 花崗岩, ハンレイ岩がある. 安山岩はかなりポーラスであり, 他の岩石と間隙率は異なっているが, 強度 (エコーチップ硬度:  $L$  値) をみると他の3岩型とはほぼ類似の大きな値をもっている.

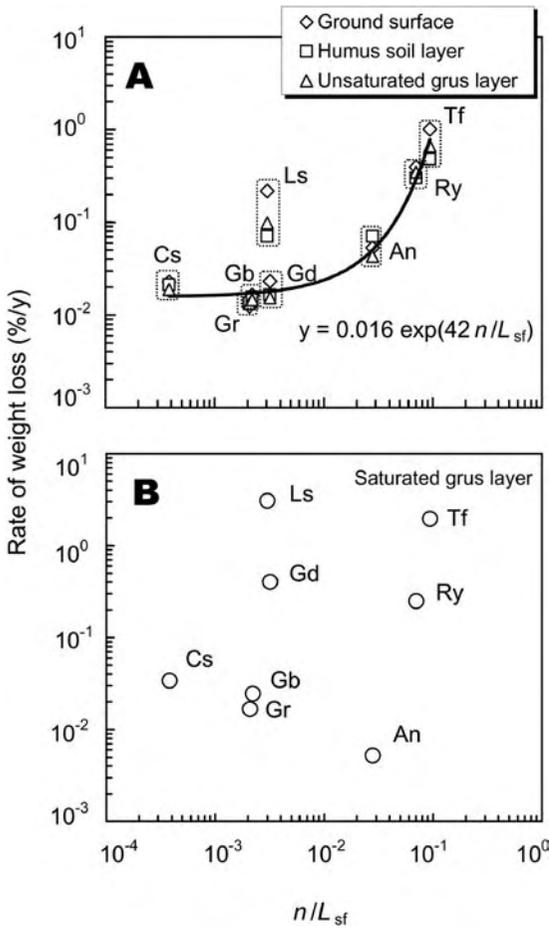
以上のような風化速度の結果をもとに, 風化速度が何によってコントロールされているかを検討した. 間隙率 ( $n$ ) を強度 ( $L$  値) で割った指標と風化速度の関係をみたのが第2図である. この図によれば, 飽和帯のデータ (第2図B) はランダムにプロットされ, 全く傾向が認められないが, その他の場所のデータ (第2図A) では, 横軸の値が大きくなると風化速度が大きくなる関

係が認められた. 横軸の指標は, Matsukura and Matsuoka (1996) などで提案されている易風化指数に相当するものであり, 一種の物理風化のし易さを表すものである. したがって, この図から, 飽和帯以外の場所における風化としては, 物理的風化作用の関与が示唆された. しかし, この場所でのどのような物理的風化作用が生起しているかについては情報が少なく, 現状ではこれ以上の議論はできない.

#### IV おわりに: タブレット風化実験の問題点

II では, 従来のタブレット実験のレビューをし, III では阿武隈山地における著者らによる10年にわたるタブレット風化実験の概略を示した. これらの研究をとおして, タブレット実験の長所とともにいくつかの短所・欠点 (問題点) も明らかとなってきた. タブレット実験では, 岩石の野外での風化速度を直接計測することが可能であり, その点は長所であろう. しかし, タブレット実験は野外実験であるが故に, それのみでは物理風化と化学風化のどちらが卓越して働いているのか, 両者の割合を特定できないという欠点を併せ持っている. また, データを得るためには数年の長さが必要であり, かなり長期の研究計画を立てなければならないという短所もある. それ以外にも, タブレットの形状から派生する問題もあるようである. 以下にそのことを議論したい.

Yokoyama and Matsukura (2006) は, 野外実験で使用したものと同一花崗閃緑岩のタブレットを用いて室内で溶解実験 (化学的風化速度に関する実験) を行った. 4つのタブレットを100 ml のプラスチックの容器にお互いが接触しないように立て, そこに野外と同じ条件の pH6 - 7 の蒸留水を  $29 \pm 1 \text{ ml d}^{-1}$  を流す流通系の実験をおこなった. 温度は  $20^\circ\text{C}$  であり, 攪拌や振とうは行わない. この結果では,  $2.1 \times 10^{-5} \text{ wt\% d}^{-1}$  となった. これに対して, 野外実験では  $1.2 \times 10^{-3}$



第2図 易風化指数と風化速度との関係：  
 (A) 地上，土層，不飽和帯における結果，  
 (B) 飽和帯における結果 (after Matsukura *et al.*, 2006)

wt% d<sup>-1</sup> となり，野外の方が50倍も風化（重量損失）が速いことがわかった。

このような野外と室内の実験結果の差異について，Yokoyama and Matsukura (2006) は以下のような観察をもとに以下のように考察した：

(1) 10年の野外実験終了後のサンプルには，風化によって雲母が剥落したと思われる多くの穴が観察された。そこで，タブレットの上面の1×2 cmの範囲において3Dスキャナーを用いて穴の形状を把握した。その結果，穴の合計体積は5.59 (mm<sup>3</sup>) と見積もられた。したがって，もしこ

のような穴の形成がタブレットの全表面積 (31 cm<sup>2</sup>) において起こると仮定すると，穴の全体積は  $5.59/2 \times 31/1000 = 0.087$  cm<sup>3</sup> となり，黒雲母の密度を2.83 g/cm<sup>3</sup> とすると， $2.83 \times 0.087 = 0.25$  gの重量損失があったと計算される。一方，実際の野外における欠損重量は10年間で4.0%であり，タブレット1個 (30 g) あたりの欠損重量は  $30 \times 0.04 = 1.2$  gということになる。したがって全損失量の79% [= (1.2 - 0.25) / 1.2 × 100] がエッジでの損失であり，21%だけが表面からの損失となる。

(2) 10年間野外実験をしたタブレットを一週間蒸留水に浸しておいたのちに，タブレットを水から引き上げると，ピーカーの底に黒雲母の粒子が何個も残留した。このことはタブレットから黒雲母がすでに分離していたことを示す。

上記 (1)，(2) の観察から，黒雲母の離脱は，鉱物の粒界が溶解することと一つの黒雲母粒子の中での劈開での分離などによって起こると思われる。すなわち室内実験は純然たる化学的風化速度を計測しているが，野外実験では化学的風化のほかに黒雲母の離脱を促す，何らかの物理的プロセス（侵食プロセスやタブレット洗浄の際の人為的作用？など）が働いているのであろう。このような物理的プロセスはタブレットの面よりエッジの部分で作用しやすいので，野外の風化実験での風化速度が大きくなる，というものである。

以上の議論は，風化速度にタブレットの形状が大きく影響していることを示唆している。すなわち，タブレットには上下の円周の周囲にあるエッジにおいて風化が極度に速くなるという問題である。このことは同時に，回収して洗浄するときには剥離しそうな鉱物を物理的（人為的）に剥がしているのではないかという危惧も抱かせる。この点は今後に残された課題である。

そして，最後に指摘しておきたいのは，第1図にも表されているのであるが，凝灰岩・安山岩などで，前回の計測より重量が増加することがある

ことである。このことは、重量計測の誤差では説明できないものであり、これらの岩石の間隙が多い(大きい)ことから、目詰まりをおこしていることが考えられる。とくに5月の計測時に重量が増加することが多く、その原因については不明である。この解明も今後に残された課題である。

いずれにしても、タブレット実験は研究者により、さまざまな形状と岩種を使用していることからデータを比較できないという問題が生ずる。このような問題を解決するためには、試料の大きさや表面状態、埋設の場所等に関するスタンダードな実験方法を確立する必要があるのではないだろうか。

## 謝辞

本研究を行うに際し、学術振興会・科学研究費・基盤研究B(課題番号16300292 研究代表者・松倉公憲)を使用した。

## 文献

漆原和子・鹿島愛彦・榎本浩之・庫本 正・フラ  
ンツディーター ミオトケ・仲程 正・比嘉正  
弘(1999 a): 日本における石灰岩溶食率の経  
年変化とその地域性。地学雑誌, **108**, 45-58.

漆原和子・榎本浩之・鹿島愛彦(1999 b): 岩種に  
よる石灰岩片の溶食率とその溶食形態の差。  
日本地理学会講演要旨集, No. 55, 330-331.

松倉公憲(1994): 風化過程におけるロックコン  
トロール: 従来の研究の動向と今後の課題。  
地形, **15**, 203-222.

Brunsdon, D. (1979): Weathering. In: Embleton,  
C. and Thornes, J.(eds): *Process in  
geomorphology*: 73-129; Edward Arnold,  
London.

Caine, N. (1979): Rock weathering rates at the soil  
surface in an alpine environment. *Catena*, **6**,

131-144.

Campbell, M. D., Shakesby, R. A. and Walsh, R.  
P. D. (1987): The distribution of weathering  
and erosion on an inselbergs-pediment  
system in semi-arid Sudan. In Gardiner, V.  
ed. *International Geomorphology 1986 Part  
II*, John Wiley & Sons, 1249-1270.

Chevalier, P. (1953): Erosion or corrosion?  
*Proceedings of the International Speleological  
Conference, Paris*, **1**, 35-40.

Crabtree, R. W. and Burt, T. P. (1983): Spatial  
variation in solutional denudation and soil  
moisture over a hillslope hollow. *Earth  
Surface Processes and Landforms*, **8**, 151-160.

Crabtree, R. W. and Trudgill, S. T. (1985):  
Chemical denudation on a Magnesian  
Limestone hillslope, field evidence and  
implications for modeling. *Earth Surface  
Processes and Landforms*, **10**, 331- 341.

Dixson, J. C., Thorn, C. E., Darmody, R. G. and  
Schlyter, P. (2001): Weathering rates of fine  
pebbles at the soil surface in Kärkevegge,  
Swedish Lapland. *Catena*, **45**, 273-286.

Gams, I. (1959 a): Experimental with tablets in  
the Podpeska cave. *Nase Jame*, **2**, 76-77 (in  
Slovene).

Gams, I. (1959 b): On the situation and genesis of  
the longest Slovene cave. *Nase Jame*, **1**, 4-9 (in  
Slovene).

Hall, K. (1990): Mechanical weathering rates on  
Signy Island, maritime Antarctic. *Permafrost  
and Periglacial Processes*, **1**, 61-67.

Inkpen, R. (1995): Errors in measuring the  
percentage dry weight change of stone  
tablets. *Earth Surface Processes and  
Landforms*, **20**, 783-793.

Jennings, J. N. (1977): Limestone tablet  
experiments at Cooleman Plain, New South

- Wales, Australia and their implications. *Abhandlungen zur Karst-und Höhlenkunde Reihe A-Speläologie*, **15**, 26-38.
- Jennings, J. N. (1981): Further results from limestone tablet experiments at Cooleman Plain. *Australian Geographical Studies*, **19**, 224-227.
- Kukal, Z., ed. (1990): The rate of geological processes. *Earth Science Reviews*, **28** (Special Issue), 7-258.
- Matsukura, Y. and Hirose, T. (1999): Five year measurements of rock tablet weathering on a forested hillslope in a humid temperate region. *Engineering Geology*, **55**, 69-76.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996): The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., Suppl. Bd.*, **106**, 57-72.
- Matsukura, Y., Hirose, T. and Oguchi, C. T. (2001): Rates of chemical weathering of porous rhyolite: 5-year measurements using the weight-loss method. *Catena*, **43**, 341-347.
- Matsukura, Y., Hattanji, T., Oguchi, C. T. and Hirose, T. (2006): Ten year measurements of weathering rates of rock tablets on a forested hillslope in a humid temperate region, Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F.* (in press).
- Newson, M. D. (1970): Studies in chemical and mechanical erosion by streams in limestone terrains. *Unpublished Ph.D.thesis, University of Bristol*.
- Plan, L. (2005): Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps. *Geomorphology*, **68**, 201-212.
- Sumner, P. D. (2004): Rock weathering rates on subantarctic Marion Island. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **36**, 123-127.
- Thorn, C. E., Darmody, R. G., Dixon, J. C. and Schlyter, P. (2002): Weathering rates of buried machine-polished rock disks, Kärkevagge, Swedeish Lapland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, 831-845.
- Trudgill, S. T. (1972): Quantification of limestone erosion in intertidal, subsoil environments with special reference to Aldabra Atoll, Indian Ocean. *Transactions of the Cave Research Groups of Great Britain*, **14-2**, 176-179.
- Trudgill, S. T. (1975): Measurement of erosional weight loss of rock tablets. *British Geomorphological Research Group Technical Bulletin*, **17**, 13-20.
- Trudgill, S. T. (1977): Problems in the estimation of short-term variations in limestone erosion processes. *Earth Surface Processes*, **2**, 251-256.
- Trudgill, S. T., Crabtree, R. W., Ferguson, R. I., Ball, J. and Gent, R. (1994): Ten year remeasurement of chemical denudation on a Magnesian Limestone hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, **19**, 109-114.
- Yokoyama, T. and Matsukura, Y. (2006): Field and laboratory experiments on weathering rates of granodiorite: separation of chemical and physical processes. *Geology*, (in press).
- (2006年5月31日受付, 2006年8月7日受理)



## 沖縄島荒崎海岸の迷子石「カサカンジャー」の 定置時期に関する一考察

The Time of Settling of a Limestone Erratic “KASAKANJA”  
at the Arasaki Coast, Okinawa Island

青木 久\*・小暮 哲也\*\*・前門 晃\*\*\*・松倉 公憲\*\*\*\*

Hisashi AOKI\*, Tetsuya KOGURE\*\*, Akira MAEKADO\*\*\* and Yukinori MATSUKURA\*\*\*\*

### 1 はじめに

沖縄島の最南端の荒崎海岸に、通称「カサカンジャー（沖縄のことばで「笠かぶり」の意）」と呼ばれる巨礫岩塊が存在している。琉球の歴史書「球陽」に、この地域には、今から170年ほど前、1832年の旧暦9月10日に猛烈な台風が沖縄島に襲来し、3個の岩塊が打ち上げられたことと、それらの岩塊の大きさと海岸からの距離が記載されている（河名ほか，2005）。河名ほか（2005）は、このカサカンジャーの起源について、球陽の中に記載されている3個のうちの1個の岩塊が、大きさと海岸からの距離という点で、カサカンジャーに相当するとした。さらにこの岩塊は約35m西方にある海食崖に発達したノッチの上半部が剥離し移動してきたものと推測している。以上のことが正しければカサカンジャーは170年前の大波でこの位置まで運搬され定置したことになるが、その確証はない。

ところで、著者らは最近、喜界島において巨礫

を載せる石灰岩からなる台座岩（ペDESTAL, pedestals あるいは pedestal rock）について報告した（松倉ほか，2005）。台座岩とは、石灰岩からなる地表面において迷子石（erratics）などの巨礫の存在により、その遮蔽効果によって巨礫の下部が溶解されずに残り、その部分が台座状になったもののことである。喜界島東海岸中央付近の末吉神社の境内には、巨礫の下に地表面からの高さ約20cm（土層を除去した基盤からの高さは約65cm）の台座岩がある。この台座岩は4300年前に離水した段丘面にあることから、松倉ほか（2005）はサンゴ礁が離水する以前に巨礫が置かれたと仮定し、ペDESTALの高さ（65cm）を離水後の経過時間（4300年）で除すことにより、溶解による台座岩の形成速度（すなわち、段丘面の低下速度）を0.015cm/yearと見積もっている。

我々は、沖縄島荒崎海岸において、カサカンジャーに覆われている基盤部の高度が周辺部よりもやや高くなっており、喜界島の巨礫の下部と同様に、台座岩となっているのを見出した。さら

\* 琉球大学大学院理工学研究科（現：筑波大学陸域環境研究センター）

\*\* 筑波大学生命環境科学研究科大学院生

\*\*\* 琉球大学法文学部人間科学科

\*\*\*\* 筑波大学生命環境科学研究科

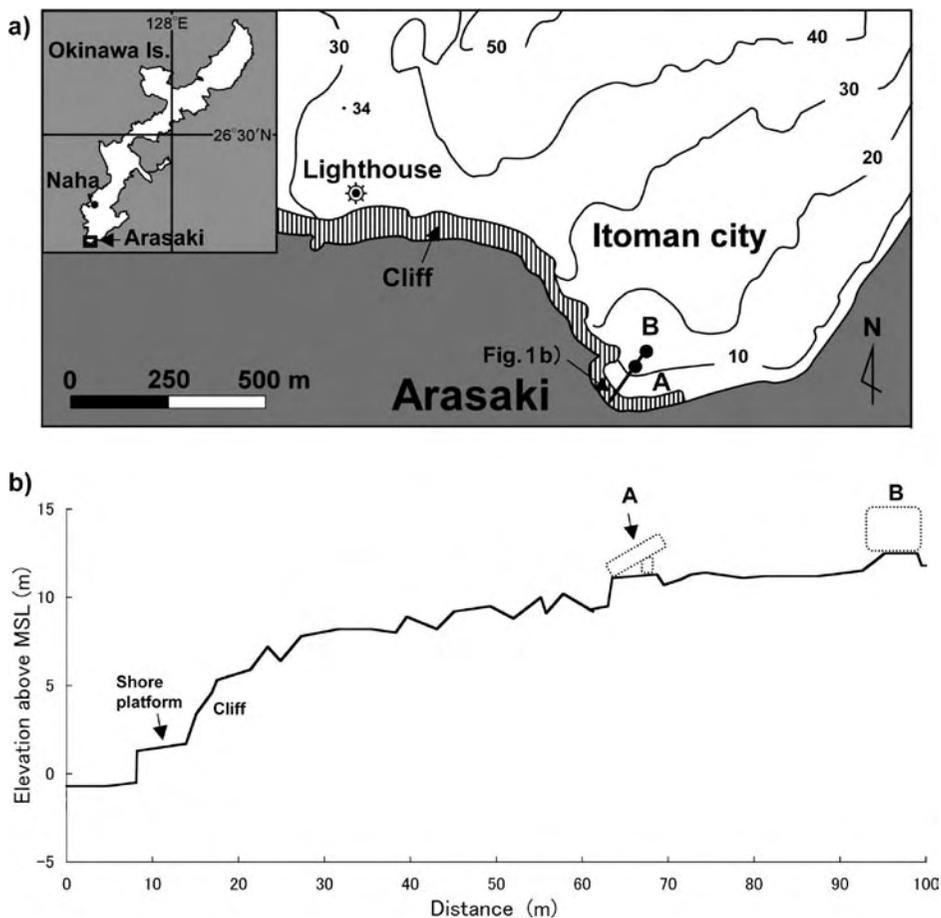
に、この海岸には、溶食凹地（solution basins あるいは solution pools）が発達する。そこで本研究では、この台座岩の性状と周辺にみられる溶食凹地の発達程度を考察することによって、カサカンジャーが、いつ、その位置に定置されたのかについて考えてみた。

## II 調査地域の概要とカサカンジャー

荒崎海岸は沖縄島の最南端に位置する太平洋に面する岬で、この一帯は琉球石灰岩（第四系更新統琉球層群那覇累層）が広く分布する（第1図 a）。地形的には、ドリーネやカルスト湧泉、

過去に地殻変動を受けて生じた海成段丘や断層、断層に影響されたと考えられている石灰岩堤（limestone wall）で特徴づけられる。集落周辺の土地利用は、大部分が畑地で海岸付近は原野となっている。琉球列島の典型的な石灰岩地域の景観を呈しているが、しかし、海岸におけるサンゴ礁の発達はそれほど良くない。

荒崎海岸には、琉球石灰岩からなる海食崖が良好に発達している（第1図 a）。東西約 600 m にわたる海食崖は約 5 ~ 20 m ほどの比高があり、崖は西に行くほど高くなっている。灯台周辺の崖の基部にはノッチが形成されており、崖の崩落による巨大な岩塊が多数分布する（Maekado, 1991;

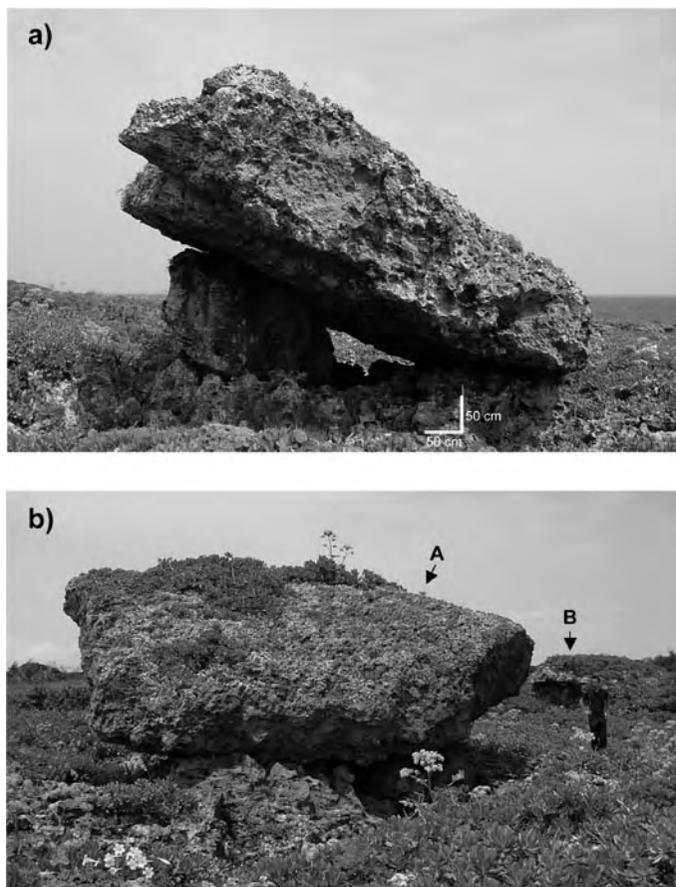


第1図 調査地域と巨礫周辺の地形断面 a) 調査地域, b) 縦断形

小暮ほか, 2003 : Kogure *et al.*, 2006). また, 岬の東側には, 波食棚 (サーフベンチ) が発達している (森山, 1997). 海食崖より陸側には, 緩傾斜地が続き, 段丘面を形成している. 段丘面上には, 顕著な溶食凹地が形成されていると同時に, 多くの節理と層理に沿ったブロック単位の削剥が生じている場所も存在する.

その段丘面上の標高約 10 m の場所には, カサカンジャーと呼ばれるものを含め, 2 個の巨礫が存在する (第 1 図 b, 第 2 図 a, b). カサカンジャーを巨礫 A, もう一つを巨礫 B と呼ぶことにする. これらはいずれも, 基盤と類似の岩相をもつ石灰岩である. これらの巨礫に共通する特徴は, 台座

状の基盤岩の上に載っていることである. 台座状の基盤岩は周辺の段丘面と連続する. 巨礫がこれらの地点に定置したのちに, 周辺の岩盤が溶解されて低下したのに対して, 巨礫下の基盤は, 溶解から保護されたことによって出現した地形 (すなわち台座岩) と判断される. そこで, これらの二つの巨礫と台座岩について, それぞれの巨礫の長径, 短径, 厚さ, および台座岩の高さを折尺やレーザー距離計を用いて計測した. また巨礫 A については, 台座表面に発達する溶食凹地 (雨水やしぶきなどの溶解・溶食によって形成された凹地) や巨礫周辺に発達する溶食凹地 (溶食溝) の台座上面からの鉛直深を計測した.



第 2 図 a) 荒崎海岸のカサカンジャー (巨礫 A) (西側から撮影),  
b) カサカンジャー (巨礫 A) と巨礫 B (南側から撮影)

巨礫 A (カサカンジャー) は、海食崖から北東に 50 m の内陸に位置する (第 2 図 a)。この巨礫の大きさは長径 8.3 m、短径 6.4 m、厚さ 1.7 m であり、この巨礫と基盤の間には径 1 m ほどの岩塊が挟まっており、基盤と巨礫との境界には大きな隙間がある (第 2 図 a)。第 2 図に示したように、巨礫下部の基盤は周辺部よりもやや高くなっており、台座岩となっている。その高さはおよそ 60 ~ 70 cm であった。台座岩の表面には、深さ 50 ~ 70 cm ほどの溶食凹地が発達しており、また台座岩 (巨礫) 周辺の地表にも、深さ 1.8 ~ 2.1 m ほどの溶食凹地がみられる。

巨礫 B は、巨礫 A の 30 m ほど北側に位置する。その大きさは、長径 7.5 m、短径 5.0 m、厚さ 3 m である。巨礫 A と同様に、台座岩を持ち、その高さはおよそ 55 ~ 60 cm であった。また周辺の地表はアダン、ガジュマル、ユウナなどの植生や土壤に覆われているため、溶食凹地の発達を確認できなかった。

### III カサカンジャーの定置時期の推定

#### 1. 台座岩の高さからの推定

二つの巨礫のうち、巨礫 A の下にある台座岩の高さは、上述したように 60 ~ 70 cm と計測された。ところで、河名ほか (2005) が報告したように、ある時期の大波によって、巨礫 A が 1832 年に運搬されてきたものとし、その後台座岩の形成が始まったと仮定すると、170 年間で 60 ~ 70 cm の高さの台座岩が形成されたことになる。

したがって、台座岩の形成速度 (すなわち石灰岩の地表面低下速度) は、 $60 \sim 70 \text{ cm} \div 170 \text{ year} = 0.35 \sim 0.41 \text{ cm/year}$  と計算される。

これまでに報告されている、台座岩から推定された地表面低下速度 (溶解による台座岩の形成速度) を第 1 表にまとめた。データは 6 例ほどしかないが、溶解による台座岩の形成速度は 0.0013 ~ 0.015 cm/year という範囲をとる。前述の計算結果は、従来の研究結果より 2 桁以上も大きく、その値には疑問が残る。

そこで、気候条件や岩質が類似している喜界島における溶解速度を用いて再計算を試みた。本研究地域の台座岩 (高さ:  $h$ , cm) が、喜界島の例 (松倉ほか, 2005) と同じ 0.015 cm/year の速度で形成されたと仮定し、巨礫が現在の位置に置かれた時期から現在までの経過時間を  $T$  (year) とすると、

$$h = 0.015 T \quad (1)$$

という関係が成り立つ。この式は次のように変形される；

$$T = 66.7 h \quad (2)$$

この (2) 式を用いると、台座岩の高さから、巨礫が定置した時期  $T$  を推定することが可能になる。この式に、巨礫 A の台座高 ( $h = 60 \sim 70 \text{ cm}$ ) を代入すると  $T = 4002 \sim 4669 \text{ year}$  という値が求まる。また巨礫 B についても同様の計算

第 1 表 台座岩の形成速度に関する従来の研究

| Area                     | Formative rates (cm/year)<br>(Surface lowering around pedestal) | References                     |
|--------------------------|---|--------------------------------|
| Maren Mts, Switzerland   | 0.0015  | Bögli (1961)                   |
| Clare-Galway, Ireland    | 0.0015  | Williams (1966)                |
| Leitrim, Ireland         | 0.0042  | Williams (1966)                |
| Craven, England          | 0.0042  | Sweeting (1966)                |
| Mt Java, West Irian Jaya | 0.0032  | Peterson (1982)                |
| Kikai Island, Japan      | 0.015   | Matsukura <i>et al.</i> (2005) |

をすると、 $T = 3669 \sim 4002$  yearとなる。したがって、これら二つの巨礫は、約 4700 ～ 3700 年前の時期に、現在の場所に定置したことになる。

## 2. 溶食凹地の深さからの推定

次に、巨礫 A 周辺の岩盤表面および台座岩の表面に発達する溶食凹地の深さから、巨礫の定置時期を推定する。青木・前門 (2006) は、喜界島の東海岸および沖縄島南部の具志頭海岸を調査対象として、離水年代が異なる離水サンゴ礁 (サンゴ石灰岩) 上に発達する溶食凹地の発達速度について調べた。離水後から溶食凹地が形成されはじめたと仮定して、溶食凹地の深さを計測し、離水後の経過時間  $T$  (year) との関係について検討した。その結果、溶食凹地の深さ ( $D$ , cm) は、以下のように表されることを明らかにした：

$$D = 0.025 T \quad (3)$$

この式は、次のように変形される：

$$T = 40 D \quad (4)$$

この式を用いることで、溶食凹地の  $D$  の値から石灰岩段丘の離水年代 ( $T$ ) を推定できる。(4) 式に、巨礫 A 周辺の溶食凹地の深さ ( $D = 180 \sim 210$  cm) を代入すると、巨礫 A の載っている段丘面の離水年代が  $T = 7200 \sim 8400$  year と求まる。このことから、段丘面全体の (岩盤表面の) 溶食・削剥を考慮しても、巨礫 A の載る段丘面は、少なくとも 8400 ～ 7200 年前には、離水していたことが伺える。

さらに、台座上の基盤表面には、周辺よりも浅いが深さ 50 ～ 70 cm ほどの凹地が観察される。この凹地は段丘面が離水してから巨礫が定置するまでの間に発達し続け、礫の定置後は溶食が停止したと仮定すると、この深さから、段丘面が離水してから巨礫が定置されるまでの経過時間を推定

できる。(3) 式に溶食凹地の鉛直深  $D = 50 \sim 70$  cm を代入すると、 $T = 2000 \sim 2800$  year という値が求まる。このことは段丘面が離水してから約 2000 ～ 2800 年後に巨礫が現在の位置に置かれた可能性を示唆している。

以上のように、周辺岩盤の溶食凹地の深さから、段丘面の離水年代は 8400 ～ 7200 年前と見積もられた。また台座岩の溶食凹地の深さから、離水時から巨礫が載るまでの時間が 2000 ～ 2800 年と見積もられた。したがって、これらの年代から、巨礫が定置された時期は (8400 ～ 7200) - (2000 ～ 2800) = 6400 ～ 4400 年前と計算される。この値は台座岩から計算された 4700 ～ 3700 年前と調和的であり、興味深い。

## 3. カサカンジャーの定置時期および台座岩形成に関するシナリオ

台座岩の高さおよび溶食凹地の深さから得られた本研究の結果より、巨礫の定置時期について、次のようなシナリオを描くことができる。1) 少なくとも約 8400 ～ 7200 年前頃に、この段丘面が離水した。2) 離水後、約 2000 ～ 2800 年の間に、海食崖にはノッチが形成され、崖上には溶食凹地が形成された。3) 4700 ～ 3700 年前頃に、台風あるいは津波による大波が巨礫を運搬し、現在の位置に定置させた。4) その後、巨礫周囲の地表面は雨水や海水のしぶきによる溶解によって徐々に低下し、巨礫の下に台座岩が形成された。

## IV おわりに

沖縄島南部の荒崎海岸のカサカンジャーと呼ばれる巨礫岩塊の定置時期について、溶解による台座岩の形成速度、および溶食凹地の発達速度に基づいて推察した。その結果、カサカンジャーが現在の位置に定置した時期は、約 4700 ～ 3700 年頃前と推定された。この 4700 ～ 3700 年前という値は、琉球の歴史書「球陽」に記載されている、今

から170年ほど前という時期と大きく異なる。定置時期を特定する問題の解決には、より多角的に様々な分野からのアプローチ・更なる詳しい検討が必要であり、今後に残された課題である。

## 謝辞

本研究を行うに際し、琉球大学理工学研究科21世紀COEプログラムの研究費及び2つの科学研究費（基盤研究A，課題番号16201009，研究代表者・土屋 誠（分担研究者・前門 晃）；基盤研究B，課題番号16300292，研究代表者・松倉公憲）を使用した。

## 文献

青木 久・前門 晃（2006）：離水サンゴ礁に形成される溶食プールの発達速度について，平成18年度日本地理教育学会・沖縄地理学会発表要旨集，**49**。

河名俊男・正木 讓・宮城邦昌・神山 英・荻野亮・森田秀樹・濱中 望・仲宗根直司・比嘉淳（2005）：沖縄島糸満市南部の台風石－歴史書の「球陽」に記載された1832年の台風の高波による岩塊の移動（荒崎の「カサカンジャー」）及び喜屋武における戦後の台風の高波による岩塊群の移動－：沖縄地理学会会報，**43**，7-8。

小暮哲也・青木 久・前門 晃・松倉公憲（2003）：琉球石灰岩からなる海食崖の崩落に関する斜面安定解析の再検討。筑波大学陸域環境研究センター報告，**4**，97-101。

松倉公憲・前門 晃・廣瀬 孝・青木 久・小暮哲也（2005）：台座岩から推定される石灰岩地表面の溶解による低下速度：喜界島における一例。筑波大学陸域環境研究センター報告，**6**，17-21。

森山 靖（1997）：沖縄島荒崎におけるサーフベンの発達要因について。沖縄地理，**4**，39-52。

Bögli, A. (1961): Karrentische, ein Beitrag sur Karstmorphologie. *Z. Geomorph.*, **5**, 185-193.

Kogure, T., Aoki, H., Maekado, A., Hirose, T. and Matsukura, Y. (2006): Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan. *Geomorphology*, (in press).

Maekado, A. (1991): Recession of coastal cliff made of Ryukyu limestone: Arasaki coast, southern end of Okinawa Island, Japan. *Bull. Okinawa Geogr. Soc.*, **3**, 63-70.

Peterson, J. A. (1982): Limestone pedestals and denudation estimates from Mt Jaya, Irian Jaya. *Aust. Geogr.*, **15**, 170-173.

Sweeting, M. M. (1966): The weathering of limestones, with particular reference to the Carboniferous Limestones of northern England. In *Essays in Geomorphology*, G. H. Dury (ed.), 177-210. London, Heinemann.

Williams, P. W. (1966): Limestone pavements: with special reference to western Ireland. *Trans. Inst. Br. Geog.*, **40**, 155-172.

（2006年5月31日受付，2006年8月10日受理）

## モンゴルにおける環境変化診断のための 領域気候シミュレーション

Regional Climate Simulations to Diagnose Environmental Changes  
in Mongolia

佐藤 友徳<sup>\*</sup>・木村 富士男<sup>\*\*</sup>

Tomonori SATO<sup>\*</sup> and Fujio KIMURA<sup>\*\*</sup>

### Abstract

Arid/semi - arid region in Northeast Asia has been suffering from climate change due to the global warming. Cold season temperature has been rapidly increasing in recent years, especially during the cold season. Dynamical downscaling using a regional climate model is one of the methods to evaluate the regional - scale climate change with high resolution. In this study, numerical experiments were carried out in order to reproduce past and future regional climate condition in Mongolia for the use of environmental studies in RAISE project (Sugita, 2002). A modified version of the Regional Atmospheric Modeling System developed at Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba (TERC - RAMS) was adopted to simulate hydrometeorological condition with 30 km horizontal resolution. Spatio - temporal features in ten - year integration for 1994 - 2003 were compared with local observations obtained during RAISE (The Rangelands Atmosphere - hydrosphere - biosphere Interaction Study Experiment in northeastern Asia; Sugita, 2002) project. Seasonal changes of temperature and precipitation were well reproduced in the TERC - RAMS although cold - season temperature and precipitation were overestimated.

Downscale experiments nested within the global warming test runs of general circulation model for 2071 - 2080 period indicated the possible climate change in Northeast Asia including Mongolia. One - hour interval dataset of model variables in both recent and future climate integrations will be provided to the research community. Variety of impact assessment such as on agricultural production, ground water, and carbon cycle can be possible by the use of this dataset.

---

\* 日本学術振興会特別研究員・東京大学気候システム研究センター

\*\* 筑波大学生命環境科学研究科

## I Introduction

Mongolia is a landlocked and elevated country on the Mongolian Plateau in Northeast Asia. The western part of the country contains very complex topography with major mountain ranges of Altai and Khangai Mts. while relatively gentle topography occupies the eastern part. Vegetation cover also changes drastically. Southern Mongolia is arid area where vegetation is hardly seen in Gobi desert. But northern part of Mongolia is covered by grassland and forest being connected to Taiga forest in Siberia. Thus, Mongolian territory exhibits a transition of vegetation. During winter, snow accumulates in northern part. In general, transition zones of vegetation or snow cover are likely to show vulnerability against the external forcing such as global-scale climate change. Furthermore, most of local people rely their water on river and groundwater. After the global change, shortage of available water may occur if precipitation is decreased, or evaporation is increased. Additionally, abundant grass in Mongolian steppe has maintained traditional pasturage for a long time. If the land degradation extends, and if it causes the shortage of grass in Mongolia, their grazing activity becomes difficult to continue in the future.

In order to assess future changes of water resources or vegetation product, projection of the climate change with high spatial resolution is necessary. In the RAISE (The Rangelands Atmosphere-hydrosphere-biosphere Interaction Study Experiment in northeastern Asia ; Sugita, 2002) project, changes of atmosphere-hydrosphere-biosphere interactions have been studied using three physical models, regional climate model, distributed hydrological model,

and terrestrial carbon cycle model. Atmospheric condition under the global warming due to increasing greenhouse gases emission is evaluated by the use of regional climate model and general circulation model products.

Sato *et al.* (2006) proposed a new downscaling method using regional climate model which makes possible to enhance simulation skills reproducing the past climate by using reanalysis data as well as the general circulation model products. Since their interest was only for the precipitation during summertime, year-round validation of meteorological variables is the target of this study. The evaluations compose of two integrations, the recent climate runs and the future climate runs. This paper validates, at first, the ability to reproduce recent climate by the regional climate model, and second, reports the changes of meteorological variables simulated by the model. Section II describes the regional climate model and experimental design. Comparisons of meteorological variables between recent climate simulation and observation are addressed in section III. Future changes of precipitation and temperature are described in section IV.

## II Method

### 2.1. model description

The Regional Atmospheric Modeling System (RAMS; Pielke *et al.*, 1992), which was originally developed at Colorado State University, is adopted in this study. The physical schemes in RAMS has been modified and replaced at Terrestrial Environment Research Center (TERC) to improve the predictability in regional

climate simulation (hereinafter TERC-RAMS). Detail of configuration of TERC-RAMS for the RAISE project was described in Sato *et al.* (2006). Arakawa-Schubert type convective parameterization (Arakawa and Schubert, 1974) and microphysics parameterization (Walko *et al.*, 1995) are used to calculate precipitation in the model. Formation of the subgrid scale cumulus near the top of the convective boundary layer, which affects the surface radiation balance, is parameterized by grid mean relative humidity. The concentration of carbon dioxide is assumed to be constant in all experiments by the TERC-RAMS experiments. The TERC-RAMS has two grid systems for two-level two-way nesting. The coarse grid system is centered on the Tibetan Plateau with a 150 km horizontal resolution covering an area of  $12,000 \times 9,000$  km. The fine grid system covers the whole of Mongolia with a 30 km resolution. Both coarse and fine grid systems contain 30 vertical layers in a terrain following coordinate system. The thicknesses of the vertical layers vary from 110 m, at the lowest layer, to 800 m in the upper layers. The top of the model atmosphere is 17,500 m. Surface conditions in the TERC-RAMS domains are given by a global land cover characterization dataset provided by the U. S. geological survey (Loveland *et al.*, 2000), which is based on satellite observations by an Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). The TERC-RAMS uses distributions of the Leaf Area Index (LAI), the vegetation albedo, the roughness height, and other parameters of vegetation determined in the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS; Dickinson *et al.*, 1986). The soil texture is assumed uniformly as sandy clay loam type with saturated volumetric soil water content of 0.42. The TERC-

RAMS does not contain snow model. Initial soil moisture for numerical integration in coarse and fine grid systems are firstly computed by one-month integration of TERC-RAMS starting from homogeneous soil moisture condition.

Meteorological variables in the coarse grid system are nudged to the forcing dataset with the time coefficient of 10 minutes in six grids from the lateral boundaries. The inner part of the domain is also nudged very weakly with the coefficient of four days. For the ten-year calculations of both recent and future climate runs, time-slice experiment is performed in which each integration covers 35-day period initialized by the forcing dataset.

We use two forcing datasets for each of the recent climate run and the future climate run which are mentioned in section 2.2. and 2.3. After section III, the results in the fine grid system are mainly presented and discussed, since the target of this study is regional climate validation and prediction in Mongolia.

## 2.2. Recent climate run

Meteorological variables, such as wind speed, temperature, humidity, and geopotential height, in the coarse grid system are nudged to the NCEP/NCAR reanalysis (Kalnay *et al.*, 1996). The NCEP/NCAR reanalysis is produced by the model incorporating surface and upper air observations in the world, which can be regarded as the representative of the recent climate. By use of the six-hourly reanalysis, recent climate run prognoses meteorological variables from March of 1994 through February of 2004. Variables at each of 30 km resolution grids are archived with one-hour interval.

The results from recent climate run are tested

by comparing with the observational data in Mongolia. Three-hour-interval meteorological elements from 1993 through 2004 are provided by Institute of Meteorology and Hydrology (IMH), Mongolia. Sensible and latent heat flux and 4-component radiation data at both of KBU site (108.78E, 47.28N) and Forest site (108.65E, 48.35N) are also used to validate the TERC-RAMS simulations.

### 2.3. Future climate run

A new forcing dataset were made for the future climate run using 6-hourly product of SRES-A2 (Nakicenovic and Swart, 2000) scenario run by MRICGCM2 (Yukimoto *et al.*, 2001). The procedure to make the forcing dataset for TERC-RAMS is as followings.

$$A(x, y, z, t) = N(x, y, z, t) + G'(x, y, z, m) \quad (1)$$

where A is meteorological variables, such as wind speed, temperature, humidity, geopotential height, and Sea Surface Temperature (SST) in the new forcing dataset. N represents the atmospheric variables in NCEP/NCAR reanalysis and sea surface temperature provided by Reynolds *et al.* (2002) from 1993 through 2004. Both A and N are in six-hour interval. G' is the perturbation term defined as the changes of monthly-mean variables in each month evaluated by MRICGCM2. G' can be calculated as

$$G'(x, y, z, m) = \overline{GF}(x, y, z, m) - \overline{GR}(x, y, z, m), m=1,2,\dots,12 \quad (2)$$

where  $\overline{GF}$  and  $\overline{GR}$  are ten-year-mean of monthly-means of variables during 2071-2080 and 1991-2000, respectively.

Biases induced by GCM are much reduced by

using the new forcing dataset instead of some limitations in downscaled future climate. We evaluate the changes of meteorological variables under the global warming, which are addressed in section IV, as the difference between recent climate run and future climate run. Recently, very similar approach to reduce GCM bias was attempted by Misra and Kanamitsu (2004). Advantages and disadvantages of this method to apply to global warming studies were discussed in Sato *et al.* (2006).

## III Comparison with observations

### 3.1. Temperature

Figure 1a and 1e shows winter (December-January-February) temperature. Temperature in TERC-RAMS tends to show higher value than observations. The largest bias is found over central and northwest regions where Khangai and Altai mountains are located. Around these two regions, temperature in TERC-RAMS is about 5 K higher than observations. This is mainly attributed to the fact that current version of TERC-RAMS does not explicitly simulate accumulation and melting of snow. Another reason relates to the method of comparison between the observation and the model. Usually numerical models use digital elevation maps comprised of mean elevation in the grid box. On the other hand, local observation sites are usually located at city or village rather than high place like mountain top. Therefore, the elevations of the local observation site and the neighboring model grid are basically different, in particular, near mountains. At worst, this effect causes the difference of elevation more than 500 m in the

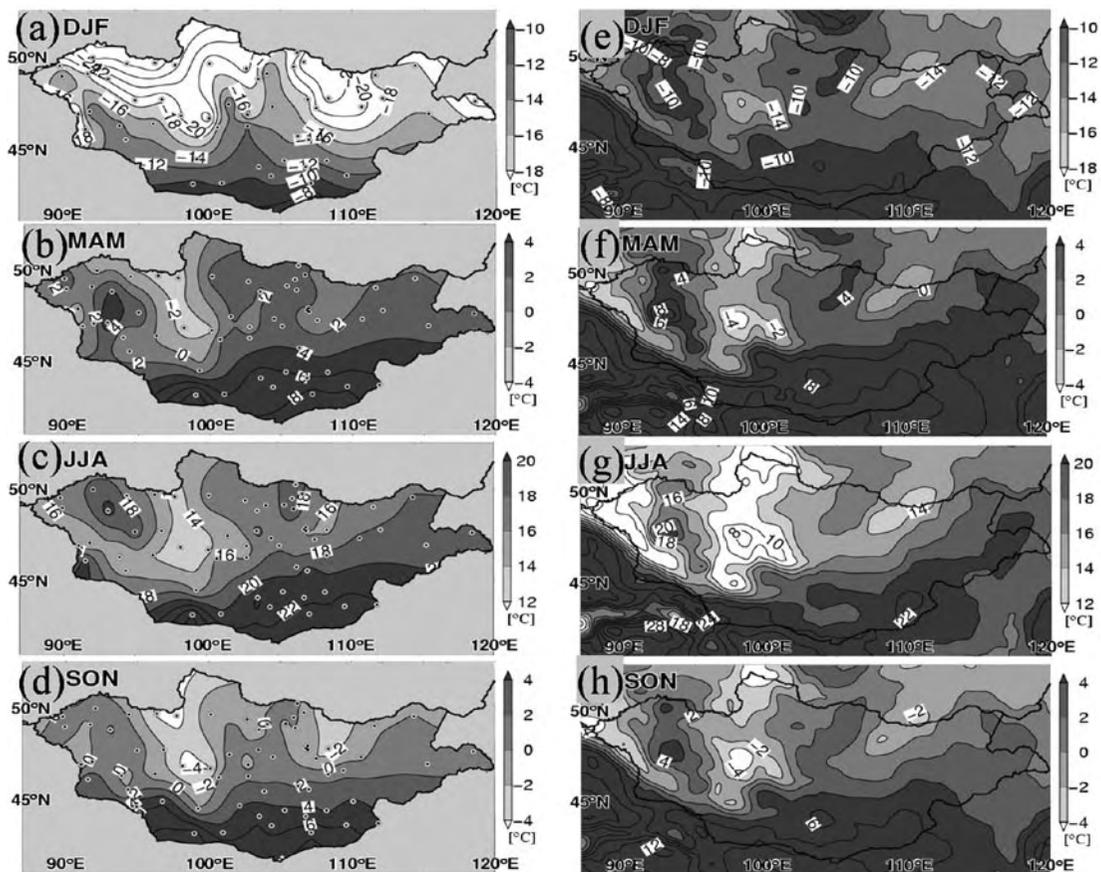


Fig.1 Ten-year-mean temperature distribution from the (left) observation and (right) model. (a) and (e) December-January-February. (b) and (f) March-April-May. (c) and (g) June-July-August. (d) and (h) September-October-November. Shades and contour intervals are different with seasons.

mountainous area. During the cold season, due to cold land surface, stratification near ground surface becomes very stable. Therefore, warm bias in the model is the most significant in winter. In spring (March-April-May), TERC-RAMS simulates seasonal mean temperature and its distribution very well (Figs. 1b and 1f). In summer (June-July-August), the model shows slightly lower temperature around mountainous regions (Figs. 1c and 1g). In autumn (September-October-November), temperature distribution is very well reproduced (Figs. 1d and 1h). Since wintertime temperature is higher in the model, annual range

of temperature is lower in the model than the observations (Fig. 2).

Figure 3 shows seasonal/intraseasonal variations of temperature at six representative stations. The model excellently captures intraseasonal variations which are mainly caused by the passage of cyclones and fronts. However, December-January-February temperature is overestimated except for stations in southern Mongolia. At Muren and Khovd, simulated temperatures during the summer are lower than observations. Cumulus over the mountain may be formed too frequent intercepting solar radiation

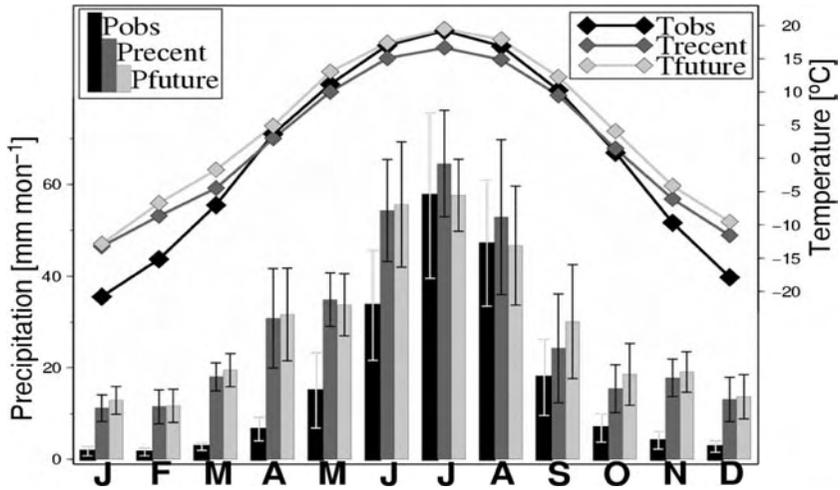


Fig.2 Ten-year-mean seasonal variations of temperature (lines) and precipitation (bars). Black lines and bars represent observation. Dark and light shaded lines and bars represent model results from recent climate experiment and future climate experiment, respectively. Error bars indicate standard deviation.

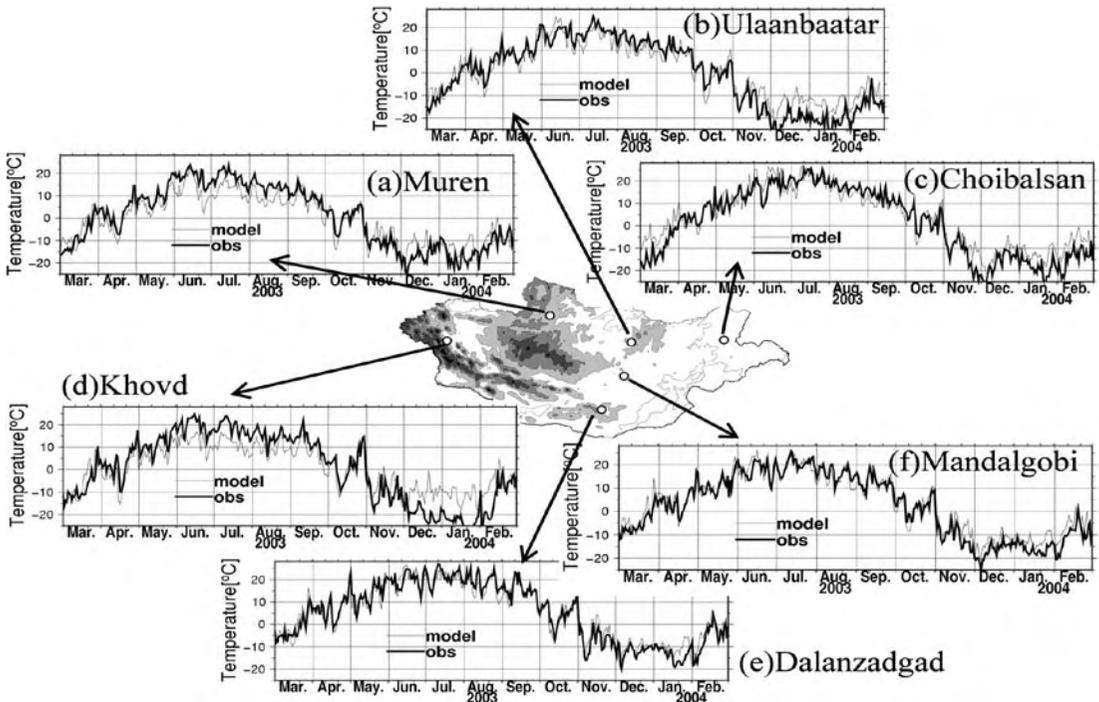


Fig.3 Intraseasonal variations of daily mean temperature from observation (thick line) and model (thin line) at representative stations in Mongolia. Periods are from March 2003 through February 2004. (a) Muren (100.15°E 49.65°N, 1288 m). (b) Ulaanbaatar (106.87°E 47.92°N, 1306 m) (c) Choibalsan (114.52°E 48.07°N, 759 m) (d) Khovd (91.65°E 48.02°N, 1405 m) (e) Dalanzadgad (104.42°E 43.58°N, 1462 m) (f) Mandalgobi (106.27°E 45.75°N, 1393 m).

around these two stations.

### 3.2. Flux and radiation

Sensible and latent heat flux and radiation at KBU and Forest site are compared with those from model using nearest grid point value. Figure 4 represents seasonal change of net radiation at two sites. From early summer to autumn, net radiation from TERC-RAMS is in good agreement with the observation. During the cold season, simulated net radiation shows larger amount than that observed. This is because the model does not contain snow processes; thus, surface albedo tends to be smaller. Seasonal change of sensible heat is well reproduced by the model albeit too large amount in June. Seasonal change of latent heat is also well reproduced. The model tends to overestimate latent heat flux in April,

which might be related with large amount of precipitation in this season as addressed in the next section.

### 3.3. Precipitation

Figure 5 shows the comparison of precipitation. Precipitation in the model tends to overestimate in all seasons. Especially, over the mountain, simulated precipitation exceeds twice of observations in spring, autumn, and winter, although the model captures regional distribution, i.e., less precipitation in southern part, and seasonal cycle. Such overestimation except for summer can be also attributed to the absent of snow in the model which results to absorb more solar energy at the surface owing to the lower surface albedo. Heated surface is useful to organize or intensify the precipitation systems;

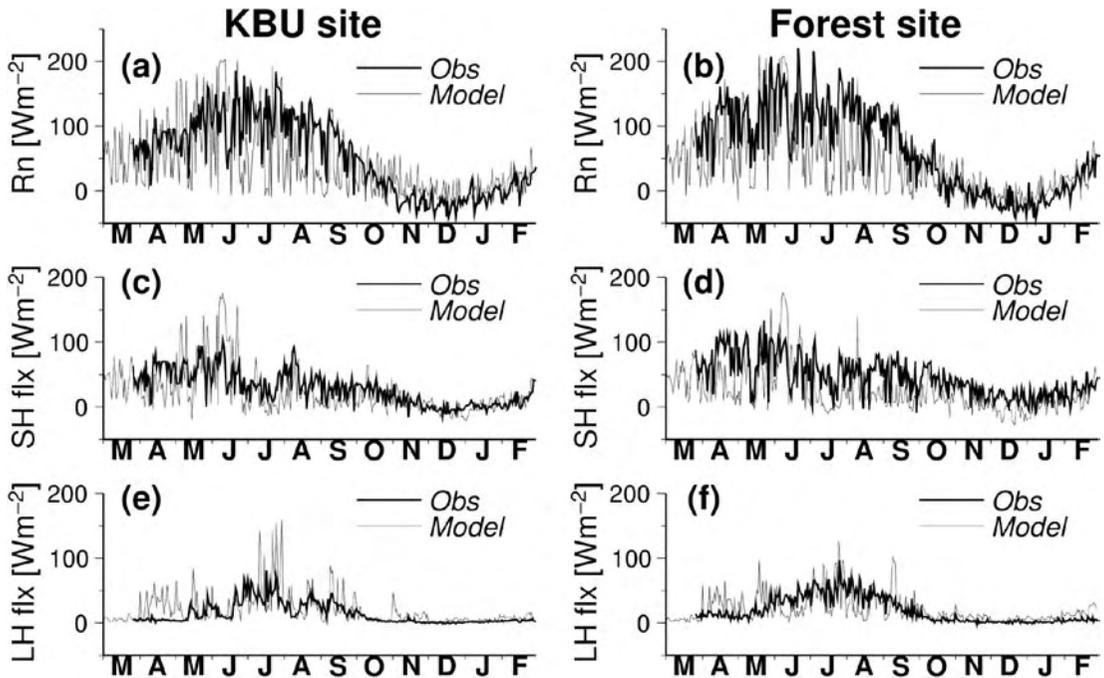


Fig.4 Intraseasonal variations of (top) daily mean net radiation, (middle) daily mean sensible heat flux, and (bottom) daily mean latent heat flux at KBU site (108.78°E 47.28°N) and Forest site (108.65°E 48.35°N). Thick lines from observation and thin lines from model.

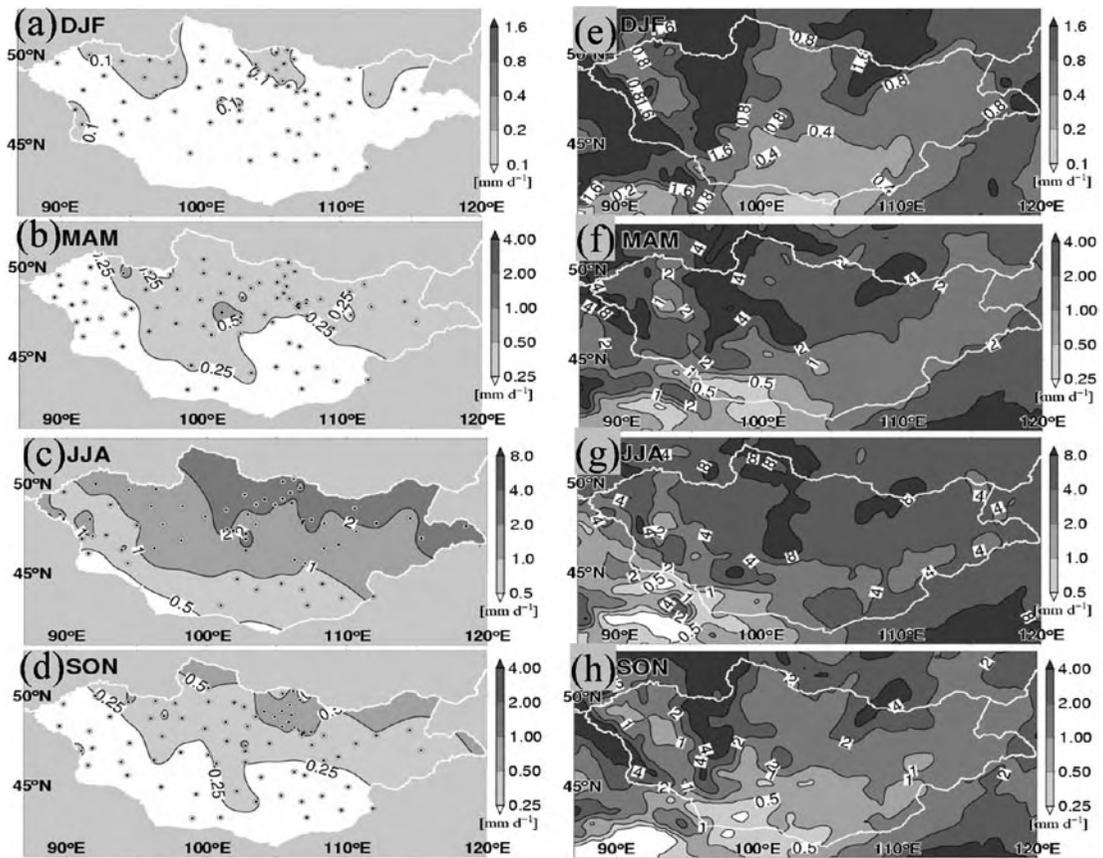


Fig.5 Ten-year-mean rainfall distribution from the (left) observation and (right) model. (a) and (e) December-January-February. (b) and (f) March-April-May. (c) and (g) June-July-August. (d) and (h) September-October-November. Shades and contour intervals are different with seasons.

thus, it causes too much precipitation in the model. On the other hand, observed precipitation during winter might be too small possibly due to the problem in snowfall collection by rain gauges.

In Mongolia, more than half portion of annual precipitation falls during the warm season. As seen in Fig.2, the TERC-RAMS well reproduce the warm season rainfall. Interannual variation of warm season rainfall is also well reproduced in the model (no figure). Additionally, probability density distribution of daily rainfall intensity is very well simulated in the model. More detail description on the warm season rainfall can be

found in Sato *et al.* (2006).

#### IV Future changes

In general, changes of meteorological elements estimated by TERC-RAMS are strongly dependent on the choice of the forcing GCM, greenhouse gas emission scenarios, and the period of analysis. In this section, evaluated changes by downscaling experiment using A2 scenario run of MRCGCM2 is addressed.

#### 4.1. Temperature

Increase of air temperature due to the global warming is more drastic in the high-latitude region. Northern Eurasia including Mongolia is one of the regions expecting largest increase of air temperature (Houghton *et al.*, 2001). Usually, the increment of air temperature in wintertime is known to be larger than that in summertime. In TERC-RAMS, the increment is larger in autumn and summer rather than winter and spring (Fig. 6). In summer, increase of mean temperature exceeds 2 K in whole Mongolia while it is less than 1 K in winter. Monthly mean temperature shows higher in all seasons after the global warming as seen in Fig. 2. Therefore, annual mean temperature, on average, rises 2-3 K in Mongolia. In our evaluation, annual range of temperature does not change largely. But, when snow processes at the surface can be treated appropriately, the annual range will be decreased significantly after the global warming owing to more severe temperature rise during winter.

#### 4.2. Precipitation

Change of precipitation under the global warming is very complex; and thus, it has been difficult to estimate. By TERC-RAMS, precipitation change in winter and autumn shows slight increase compared to the recent years (Fig. 7). On the other hand, precipitation decreases in spring and summer. Most prominently, in summer, precipitation decreases almost entire Mongolia, especially around mountain. The change of annual mean precipitation shows decrease in central Mongolia where Khangai Mountain located and increase in western and southeastern Mongolia. Decrease of warm season rainfall is a serious concern for river water and ground water management. Natural vegetation growth might be also affected by shortage of available water. Changes of rainfall intensity and interannual variability in summer are addressed in Sato *et al.* (2006).

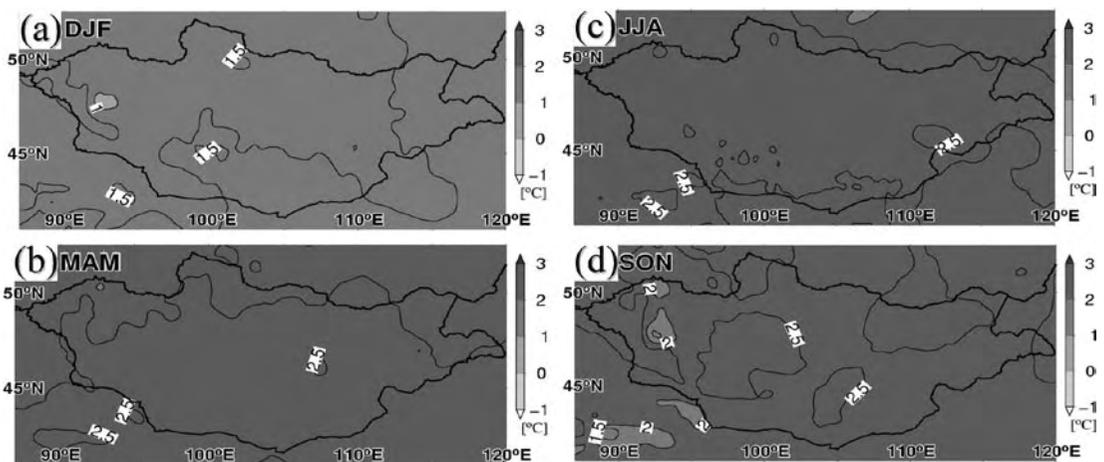


Fig.6 Difference of seasonal mean temperature between future climate experiment and recent climate experiment. (a) December-January-February. (b) March-April-May. (c) June-July-August. (d) September-October-November.

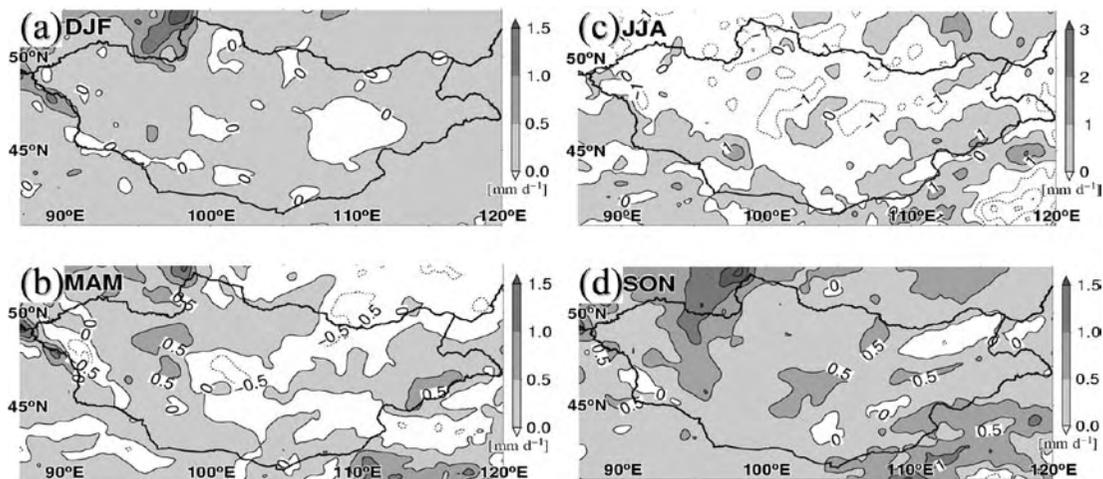


Fig.7 Difference of seasonal mean precipitation between future climate experiment and recent climate experiment. (a) December-January-February. (b) March-April-May. (c) June-July-August. (d) September-October-November.

## V Conclusion

Numerical experiments are carried out in order to reproduce regional climate condition in Mongolia for the evaluation of environmental changes in RAISE project. Spatio-temporal features of meteorological elements in ten-year integration for 1994-2003 are compared with local observations obtained during RAISE. Seasonal changes of temperature and precipitation are well simulated in the TERC-RAMS although cold-season temperature and precipitation tend to be overestimated. These results indicate that the snow model should be included in the TERC-RAMS for the evaluation of winter season climate. During warm season, the model well reproduces the meteorological elements in Mongolian region. The TERC-RAMS well captures seasonal/intraseasonal variation of temperature and rainfall distributions.

Downscale experiments using global warming test runs by general circulation model for

2071-2080 period indicate the possible climate change in Northeast Asia including Mongolia. Temperature rises in the entire Mongolia in all seasons after the global warming. Warm season precipitation decreases, especially in central Mongolia where sources of the major rivers are located.

One-hour interval dataset of meteorological elements in both recent and future climate runs are planned to distribute to the research community. Variety of impact assessment or researches such as on agricultural production, ground water, and carbon cycle can be possible using this dataset.

## References

- Arakawa, A. and Schubert, W. H. (1974): Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., Kennedy,

- P. J. and Wilson, M. F. (1986): Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. *NCAR Technical Note NCAR/TN275+STR*, 69p.
- Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C. A. (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881p.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R. and Joseph, D. (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-472.
- Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, J., Yang, L. and Merchant, J. W. (2000): Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR Data: *Int. J. Remote Sens.*, **21**, 1303-1330.
- Misra, V. and Kanamitsu, M. (2004): Anomaly nesting: A methodology to downscale seasonal climate simulations from AGCMs, *J. Climate*, **17**, 3249-3262.
- Nakicenovic, N. and Swart, R. (2000): *Special Report on Emissions Scenarios : A Special Report of Working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 599p.
- Pielke, R. A., Cotton, W. R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J. and Copeland, J. H. (1992): A comprehensive meteorological modeling system RAMS, *Meteor. Atmos. Phys.*, **49**, 69-91.
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C. and Wang, W. (2002): An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, **15**, 1609-1625.
- Sato, T., Kimura, F. and Kitoh, A. (2006): Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J. Hydrol.*, in press.
- Sugita, M. (2002): The rangelands atmosphere-hydrosphere-biosphere interaction study experiment in northeastern Asia, *Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center*, **3**, 147-156.
- Walko, R. L., Cotton, W. R., Meyers, M. P. and Harrington, J. Y. (1995): New RAMS cloud microphysics parameterization. Part 1: The single-moment scheme, *Atmos. Res.*, **38**, 29-62.
- Yukimoto, S., Noda, A., Kitoh, A., Sugi, M., Kitamura, Y., Hosaka, M., Shibata, K., Maeda, S. and Uchiyama, T. (2001): The new Meteorological Research Institute coupled GCM (MRI-CGCM2). - Model climate and variability -. *Pap. Meteor. Geophys.*, **51**, 47-88.
- (2006年5月31日受付, 2006年9月6日受理)



## 遅沢式拡散係数測定装置を用いた 草地土壌のガス拡散係数の測定

Measurement of Gaseous Diffusion Coefficient  
in a Grassland Soil Using an Osozawa-Type  
Diffusion Apparatus

濱田 洋平\*・及川 武久\*

Yohei HAMADA\* and Takehisa OIKAWA\*

### Abstract

Gaseous diffusion coefficient in a soil ( $D_s$ ) is essential to evaluate soil gas fluxes such as soil respiration rate using diffusion equations. Although many researchers have studied on the relationship between  $D_s$  and soil physical properties such as air-filled porosity ( $\theta_a$ ) and total porosity, a universal relationship that can be applied to any soil has not been established. Considering spatial heterogeneity of the soil, a simple, rapid and inexpensive method that can directly measure  $D_s$  of soil samples is needed. In this study, a diffusion apparatus that can be used to determine  $D_s$  of undisturbed soil core samples was developed after previous works by Osozawa (1987) and Osozawa and Kubota (1987), and the procedure of operation and the correction of measured values were established. The influence of measurement errors of the parameters used in the calculation of  $D_s$  was also evaluated. Measured values of  $D_s$  for a grassland soil were generally proportional to  $\theta_a$ , and the relationship was well represented by Troeh's model, which gives the relative diffusion coefficient ( $D_s/D_a$ , where  $D_a$  is gaseous diffusion coefficient in free air) as  $[(\theta_a - u)/(1 - u)]^v$  (where  $u$  and  $v$  are empirical constants determined by statistical analysis), rather than other traditional models having no empirical parameters. Indeed the discovery of a universal relationship between  $D_s$  and soil physical properties is one of the ultimate goals in soil physics, the direct measurement of  $D_s$  and the use of Troeh's model are more useful and practical for flux researches.

---

\* 筑波大学生命環境科学研究科

## 1 はじめに

陸域生態系における炭素循環の中で、土壌から大気へ向かう二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) のフラックスは土壌呼吸と呼ばれ、光合成と並んで大気-生態系間における主要な炭素フラックスの1つである。そのため、様々な生態系における土壌呼吸速度の定量は、その生態系における炭素動態の把握にとどまらず、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の決定における陸域生態系の役割を評価する上でも不可欠である。土壌呼吸速度の定量には、チャンバー法と総称される直接測定法が以前より用いられている。これは、チャンバーと呼ばれる小型の容器を地表面にかぶせ、土壌から容器中へ放出される CO<sub>2</sub> 量から土壌呼吸速度を求める方法であり、CO<sub>2</sub> の定量の仕方によっていくつかの手法に細分される。この手法の利点は、土層全体からの CO<sub>2</sub> 生産速度を直接定量可能な点であるが、土壌内部をブラックボックスとして扱っているため、土壌呼吸に対する深度別の寄与率の評価といった詳細な解析を行うことはできない。

土壌呼吸速度を定量するもう1つの方法として、拡散法と呼ばれる手法がある。土壌中におけるガス輸送は、主として土壌空気中における分子拡散によるとされており、この場合任意の深度  $z$  における鉛直方向のガスフラックス  $q$  は次式で与えられる。

$$q = -D_s \frac{dC}{dz} \quad (1)$$

ここで、 $D_s$  は対象とするガスについての土壌中の拡散係数、 $C$  はガスの濃度を表し、 $dC/dz$  は深度  $z$  における鉛直方向の濃度勾配を意味する。濃度勾配は複数深度における対象ガスの濃度測定から求めることができるため、CO<sub>2</sub> についての土壌のガス拡散係数が分かれば、(1) 式より各深度における CO<sub>2</sub> フラックスが求まり、またその差分から土層別の CO<sub>2</sub> 生産速度を計算することがで

きる。この手法は、チャンバー法と比較すると適用事例が限られているが (例えば de Jong and Schappert, 1972; Uchida, 1995; Hamada, 1999 など)、チャンバー法では不可能な土壌内部における CO<sub>2</sub> の生産・輸送過程を解析することが可能である。植物の根系や土壌有機物の含有量、地温・土壌水分量といった、土壌呼吸速度に影響を及ぼす環境因子の多くが深度方向に大きく変化することを考慮すると、地上部の環境変化に対する土壌呼吸速度の応答をより正確に予測するためには、このような詳細な解析が必要となる。

このような有効性にもかかわらず、適用事例が少ない理由の一つとして、 $D_s$  の値を決定することの難しさが挙げられる。ガスの拡散が土壌空気中で生じることから、 $D_s$  と土壌の気相率との関係を調査する研究が従来から行われてきており、これまでに Penman (1940)、Millington (1959)、Millington and Quirk (1961) などによって、気相率 (および間隙率) から  $D_s$  を推定するモデル式が提示されている。これに対して、すべての土壌に適用可能なモデル式というのは現実的ではないという考えもある。Jin and Jury (1996) は、攪乱土壌を再充填した試料については従来の推定式が成立するが、不攪乱土壌については試料によるばらつきが大きく、 $D_s$  と土壌物理特性との間にユニバーサルな関係は成立しないと結論している。Troeh *et al.* (1982) が提示したモデル式には、土壌によって異なる経験的なパラメータが2つ含まれており、実測結果に基づいてそれらを決定する必要がある。このような現状を踏まえると、より正確な  $D_s$  値の決定には、気相率や間隙率といった容易に測定可能な土壌物理特性からの推定では不十分であり、調査対象の土壌における  $D_s$  の実測を行うことが望ましい。

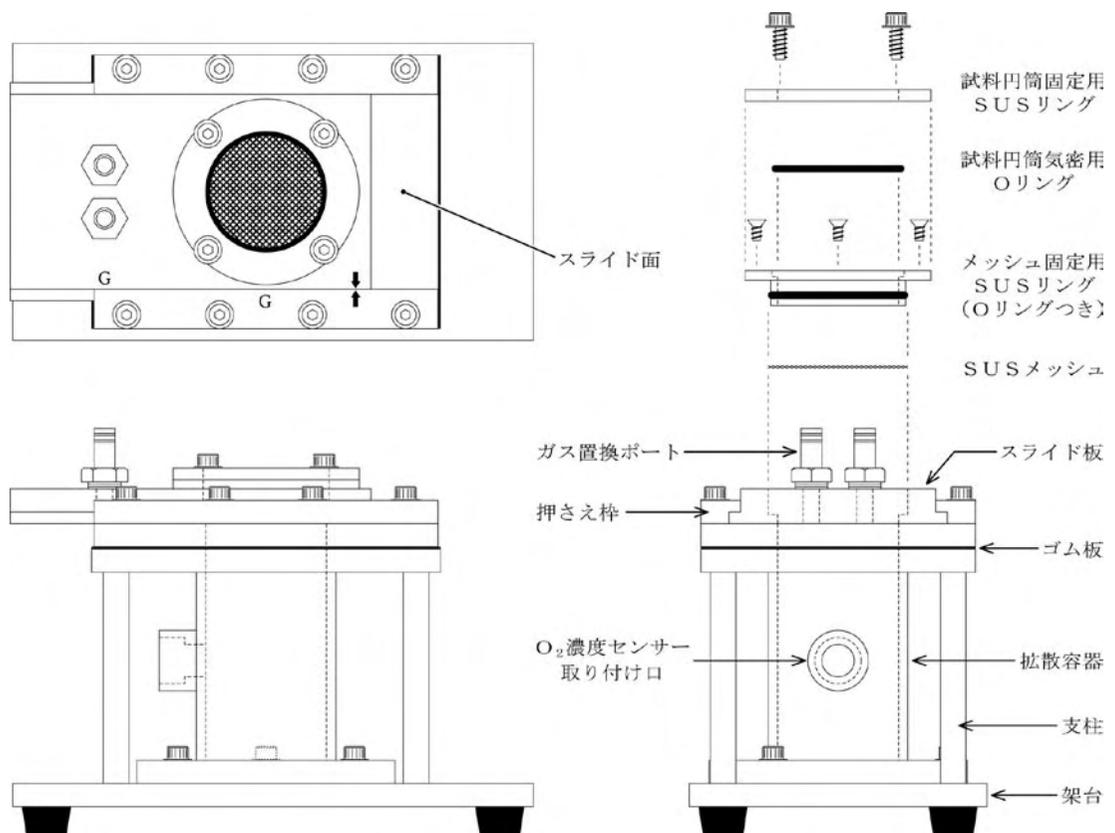
$D_s$  を直接測定する手法についても、推定法と同様に従来から多くの研究事例があるが、土壌の空間不均一性を考慮すると、数多くの土壌試料について迅速かつ簡便に測定できることが要求され

る。遅沢 (1987) および遅沢・久保田 (1987) は、従来の測定法を比較検討した上で、簡便・安価かつ能率的な測定手法として非定常状態における  $N_2$  ガスと大気の相互拡散の原理に基づく測定装置を開発し、その有効性を検証している。本研究ではこれと同等の装置を製作し、測定操作の手順、生じる測定誤差の影響評価やその補正、最終的な  $D_s$  値の決定法などについての検討を通して、不攪乱土壌試料のガス拡散係数を測定する手法を確立した。また、対象とした草地土壌における  $D_s$  と気相率との関係を調査し、従来のモデル式による関係との比較を行った。

## II 方法

### 1. 拡散係数測定装置の概要

本研究において製作および使用した、土壌のガス拡散係数測定装置の概要を第1図に示す。本装置は、遅沢 (1987) および遅沢・久保田 (1987) が開発した装置に基づいて製作したもので、同装置による測定結果の妥当性については原論文において十分に検証されている。同タイプの装置の適用事例として Shimamura (1992)、町野 (1995) などがある。また Xu *et al.* (1992) は、本装置と同一の測定原理に基づくほぼ同じ構造を持つ装置を開発している。なお、実際の設計および製作はサンケイ理化株式会社に委託した。



第1図 遅沢式拡散係数測定装置の概要 (左上：上面図；左下および右下：側面図；右上：試料円筒据え付け機構の詳細)

装置の基本構造は、大きく分けてスライド部と台座部からなる。スライド部は、長さ 155mm・幅 94mm（上面は 84mm）・厚さ 15mm のステンレス板（スライド板）に、100cm<sup>3</sup> の土壤試料円筒（DIK-1801、大起理化；内径 50mm）の据え付け機構と 2 つのガス置換ポート（外径 9mm）を取り付けたもので、必要に応じて所定の位置にスライドさせることができる。試料円筒の据え付け部には、試料円筒の内径と同じ直径 50mm の開口部があるが、上面から深さ 11mm までは一回り大きい直径 60mm の穴になっており、この底部に土壤試料の落下を防ぐためのステンレスメッシュを置き、その上から O リングの付いたリング状のステンレス金具を締め付けてメッシュを固定した。測定時には、土壤試料をメッシュの上に載せ、その上からさらに O リングと固定用のステンレスリングで締め付ける仕組みになっている。

スライド板の下面に接する台座部の上端は、長さ 150 mm・幅 118 mm・厚さ 10 mm、中央に直径 50 mm の開口部を持つステンレス板で、スライド面は平滑に研磨されている。スライドのしやすさと気密性を向上させるため、スライド面には真空グリースを薄く塗布し、またスライド方向を固定するためにスライド板を挟む形で押さえ枠を取り付けた。台座部の中央には、内径 50 mm・高さ 83 mm のアクリル製の円筒（拡散容器）があり、円筒の下端には直径 110 mm・厚さ 10 mm のアクリル製円盤を接着して底部とし、円筒の上端には台座部上端のステンレス板とほぼ同じサイズ・構造のアクリル板を取り付け、厚さ 1 mm のゴム板を介してステンレス板と接合させた。また、円筒側面の中ほどに内径 20 mm のアクリル製小パイプを取り付け、後述する O<sub>2</sub> 濃度センサーの取り付け口とした。台座部の一番下には、長さ 224 mm・幅 128 mm・厚さ 10 mm のゴム足付きのステンレス板を置いて架台とし、アクリル板の四隅に支柱を立ててこれを支えると同時に、

重心の位置を低くして装置全体の安定性を向上させた。

拡散容器に取り付ける O<sub>2</sub> 濃度センサーには、デジタル酸素濃度計 XO-326ALB（新コスモス電機）を使用した。この測器は隔膜ガルバニ電池式の O<sub>2</sub> センサーで、測定範囲 0～40%、分解能 0.1%、指示精度±0.3%、90% 応答が 20 秒以内となっている。本器の受感部は直径 20 mm のゴム製カバーに覆われた円形構造になっており、使用時にはカバーに真空グリースを塗布して取り付け口に直接挿入した。また、O<sub>2</sub> 濃度が 18% 以下になると警報音が鳴るようになっているが、これを切るスイッチがないため内部の配線を切断して対処した。

遅沢らの装置に対する本装置の改良点としては、架台と支柱を追加して拡散容器のみにかかっていた上からの荷重を分散させた点、また試料円筒をはめる O リングを締め付ける機構を追加してリークの危険性を低減させた点などが挙げられる。

## 2. 測定の原理

本装置を用いた拡散係数の測定原理は以下の通りである。まず、ガス置換ポートを通して拡散容器内を N<sub>2</sub> ガスで満たす。その後、スライド板を動かして拡散容器の直上に土壤試料を移動させ、試料中を通して容器内の N<sub>2</sub> と外部の大気とを相互に拡散させる。大気の流入に伴って容器内の O<sub>2</sub> 濃度が上昇するが、その速度は土壤試料中での拡散のしやすさに依存する。したがって、拡散容器内の O<sub>2</sub> 濃度の時間変化から土壤試料の拡散係数を求めることができる。

測定結果から拡散係数を求める計算式として、遅沢（1987）および遅沢・久保田（1987）は、用いる仮定の違いによって 2 種類の式を提示しているが、本研究ではより現実の条件に近い、土壤試料中のガス貯留を考慮した式（Currie の式）を使用した（式の導出過程については原論文を参照）。

土壌試料の上端における O<sub>2</sub> 濃度が常に大気中の濃度に等しく、また拡散容器内ではガスはすみやかに混合し濃度差が生じないと仮定すると、土壌試料の拡散係数  $D_s$  を含む以下の式が近似的に成り立つ。

$$\frac{C(t) - C_i}{C_o - C_i} = \frac{2\theta_a}{L_A} \cdot \frac{\exp(-D_s \alpha_1^2 \cdot t / \theta_a)}{L_S \{\alpha_1^2 + (\theta_a / L_A)^2\} + \theta_a / L_A} \quad (2)$$

ここで  $C$  は O<sub>2</sub> 濃度を表し、 $C_o$  および  $C(t)$  はそれぞれ初期および時刻  $t$  における拡散容器内の濃度、 $C_i$  は大気中の濃度を表す。 $L_S$  および  $L_A$  はそれぞれ試料円筒および拡散容器の長さ、 $\theta_a$  は土壌試料の気相率である。また  $\alpha_1$  は、次の (3) 式を満たす  $\alpha_n$  の 1 番目の正の根である。

$$\alpha \tan(\alpha \cdot L_S) = \theta_a / L_A \quad (3)$$

(2) 式は、両辺の自然対数を取ることで以下のように変換される。

$$\ln \frac{C(t) - C_i}{C_o - C_i} = -\frac{D_s \alpha_1^2}{\theta_a} t + \ln \left[ \frac{2\theta_a}{L_A} \frac{1}{L_S \{\alpha_1^2 + (\theta_a / L_A)^2\} + \theta_a / L_A} \right] \quad (4)$$

(4) 式の右辺第 2 項は時間変化しない定数項であるため、(4) 式の左辺と時刻  $t$  の間には勾配  $-D_s \alpha_1^2 / \theta_a$  の直線関係が成立する。この勾配は、任意の時刻  $t_1 \sim t_2$  ( $t_1 < t_2$ ) 間の時間差と、それぞれの時刻における (4) 式の左辺値の差から以下のように求められる。

$$-\frac{D_s \alpha_1^2}{\theta_a} = \frac{\ln(C_i - C(t_2)) - \ln(C_i - C(t_1))}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

(5) 式を  $D_s$  について整理し、各パラメータに測定値を代入すれば、土壌試料の拡散係数が求められる。

なお、 $D_s$  は温度や気圧、対象とするガスの種類などによって異なるため、土壌中の拡散しやすさを表す指標としては一般に、同じ温度・気圧条件下での自由大気中の拡散係数  $D_a$  に対する比で

ある相対拡散係数  $D_s / D_a$  で示すことが多い。これを求めるため、 $D_a$  を次式から計算した。

$$D_a = D_0 \cdot \frac{1013}{P} \cdot \left( \frac{T}{273.15} \right)^n \quad (6)$$

ここで、 $P$  および  $T$  はそれぞれ  $D_s$  測定時の気圧 (hPa) および温度 (K) である。 $D_0$  は標準状態における  $D_a$ 、 $n$  は経験的なパラメータであり、いずれも対象とするガスによって異なるが、N<sub>2</sub> - 大気相互拡散の場合はそれぞれ 0.178 cm<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup> および 1.67 という値が知られており (化学工学協会, 1970)、計算にはこれらの値を用いた。

### 3. 操作の手順

#### (1) 測定前の準備

測定に先立ち、2つのガス置換ポートに開閉コック付きのチューブを取り付け、一方を圧力調整器を介して N<sub>2</sub> ガスボンベに接続し、もう一方を大気開放とした。また、清浄な外気中で O<sub>2</sub> 濃度センサーの校正を行い、21.0% を示すよう調整した。なお、実験室内と外気との気温差が大きいうまく校正できない傾向が見られたため、そのような場合は外気にさらす時間を短くしたり、十分に換気した室内で校正を行うなどの対処をした。

#### (2) 土壌試料の据え付け

まず、試料を据え付ける際にメッシュを通してスライド面に土粒子が落ちないように、開口部がスライド面から完全に外れる位置までスライド板を動かし (スライド板の G マークと押さえ枠の矢印を合わせる; 第 1 図)、また試料円筒固定用リングと気密用 O リングを外しておく。次に、試料の下側の蓋を外し、端から約 5 mm のところまで O リングをはめ込んだ。この際、O リングに土粒子が付着しないよう注意した。続いて、O リングを装着した側を下にして試料をメッシュの上に静置し、上側の蓋を外して固定用リングを通した。その後再び上側の蓋を付け、試料をメッシュ

に押し付けながら固定用リングのボルトを六角レンチで締め付けた。試料の乾燥を防ぐため、上側の蓋は測定開始直前まで付けたままとした。

### (3) N<sub>2</sub> ガスの充填

まず、拡散容器の上にガス置換ポートが来る位置までスライド板を動かした（スライド板と押さえ枠の G マークを合わせる；第 1 図）。開閉コックを 2 つとも開いた状態にしてから圧力調整器の出口弁を開き、拡散容器内の O<sub>2</sub> 濃度が 0.1% 以下になるまで N<sub>2</sub> ガスを通気した。2～3 分以内にこの濃度まで低下するよう、N<sub>2</sub> ガス流量を調整した。O<sub>2</sub> 濃度が十分低下したら、出口弁とボンベ側のコックを閉じて N<sub>2</sub> ガスを止めた後、容器内の圧力を大気圧と平衡させるため、大気開放側のコックを開いた状態で約 1 分放置した。大気の逆流を抑制するため、チューブ（長さ 70 cm）の出口には桁違い管を介して内径 3 mm の細いチューブ（長さ 5 cm）を取り付けたが、この条件では 5 分経過後も容器内の O<sub>2</sub> 濃度の上昇は見られなかった。

### (4) O<sub>2</sub> 濃度のモニタリング

スライド板を、試料が拡散容器の直上に重なる位置（スライド板と押さえ枠の矢印を合わせる；第 1 図）にすばやくスライドし、その瞬間を時刻ゼロとして測定を開始した。はじめのうちは短く、徐々に間隔を広げ、数分～十数分間隔で O<sub>2</sub> 濃度センサーの読みを記録した。使用したセンサーの分解能が 0.1% と低かったため、読み取り時刻の前後数秒～数十秒（濃度の上昇速度に応じて変更）の間にセンサーの値が変化した場合はその平均をその時刻の値とし、擬似的に分解能を 2 倍にした。30 分経過した時点で O<sub>2</sub> 濃度が 8～10% 以上に達した場合はそこで測定を終了した。拡散係数が小さく、この濃度に達しない試料については引き続き測定を継続したが、試料の乾燥を抑制するため最長でも 60 分までとした。

### (5) 各パラメータ値の測定および決定

拡散容器内の O<sub>2</sub> 濃度の時系列以外に  $D_s$  および

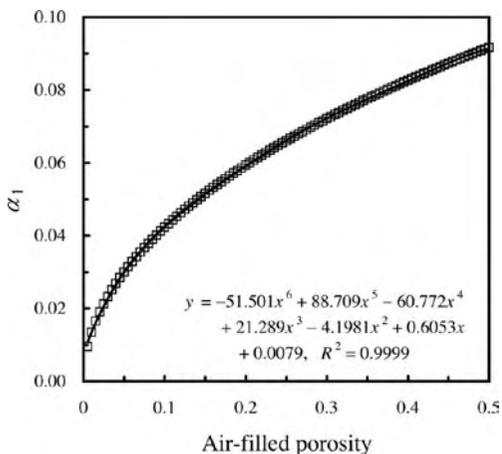
$D_s/D_a$  の計算に必要となる、(2)～(6) 式中の各パラメータの値を以下のように測定あるいは決定した。

$C_i$  は、測定の前後に O<sub>2</sub> 濃度センサーを拡散容器から取り外し、数分間安定させて実験室内の濃度を読み取ってその平均値を用いた。 $L_s$  は 5.1 cm、 $L_A$  はアクリル円筒の底部からメッシュの上端までの 10.8 cm とした。 $\theta_a$  には、測定の前後に秤量した試料重量から計算した気相率を適用した。試料からの水分の蒸発に伴い、測定中に 0.3～0.4% の気相率の増加が生じたが、測定値に対する影響はないと判断した。 $\alpha_1$  については陽解的に求めることができないため、MS-Excel 上で動作するマクロを作成して収束計算を行って求めた。なお、 $L_s$  および  $L_A$  が一定であれば、 $\alpha_1$  は  $\theta_a$  のみの関数となるため、使用する装置と試料円筒のサイズに応じて近似式を求めておけば、 $\theta_a$  から  $\alpha_1$  を直ちに算出できる。参考までに、本装置における両者の関係ならびにそれを 6 次式で近似した結果を第 2 図に示す。

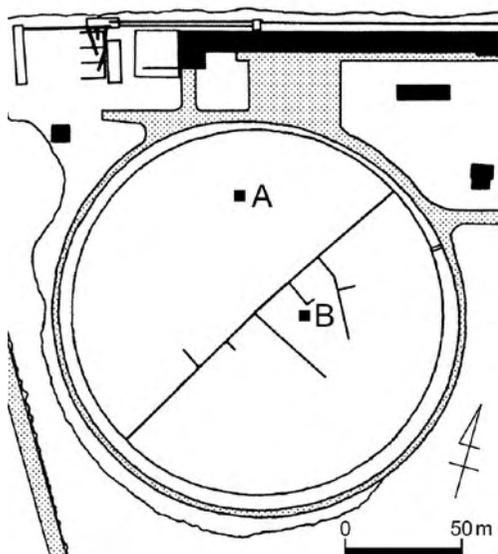
$D_s/D_a$  の計算に必要である  $T$  には、装置近傍における測定前後の室温の平均値を適用した。また気圧  $P$  は 1013hPa で一定とした。

## 4. 土壌試料の採取および気相率の調整

土壌試料の採取は、筑波大学陸域環境研究センター (TERC) 熱収支・水収支観測圃場で行った。試料の採取地点を第 3 図に示す。採取は 2006 年 1 月に行い、A・B 各地点で 12 試料ずつ、合計 24 試料を深度 10～40 cm から 10 cm 間隔で採取した。採取にはコアサンプラー (HSC-5, 藤原製作所) および採土器 (DIK-1601, 大起理化) を使用した。採取した土壌試料は蓋の周囲にパラフィルムを巻いて水分の蒸発を抑制し、作業終了後直ちに重量および土壌三相計 (DIK-1130, 大起理化) による気相率の測定を行った。なお、これ以降の重量変化はすべて含まれている水分量の増加あるいは減少 (= 気相率の減少あるいは増



第2図  $\alpha_1$  と気相率の関係



第3図 土壌試料採取地点の位置

加) によるものとみなし、これ以降の気相率は、その時の試料の重量と採取時の重量と気相率の関係から計算した。

$D_s$  の測定は、まず採取時の気相率で行った後、試料を湿潤あるいは乾燥させて異なる気相率に調整し、試料ごとに2～5回行った。試料を乾燥させる場合は、金網付きの蓋 (DIK-4001-15, 大起理化) を試料の上下にかぶせて放置した。乾燥

時間による気相率の増加はおおむね8時間で2～3%、16時間で4～5%、24時間で7～8%であった。なお、粘土質の試料は乾燥しすぎると収縮を起こし、亀裂や試料円筒との間に隙間を生じるため、必要最小限の乾燥にとどめた。試料を湿潤化する場合は、まず金網付きの蓋と試料の間に濾紙を挟み、小さい容器内に浅く張った蒸留水に浸して密閉し、24時間以上放置して吸水させた。その後、残った蒸留水を捨てて丸めたキムワイプを試料の下に敷き、再度24時間以上密閉して重力排水を促した。重力排水を行ったのは、①測定中に排水が生じて拡散容器や $O_2$ 濃度センサーを濡らすおそれがある、②水分が試料の下部に集中し拡散を効率的に遮断する可能性がある、③野外では降雨後約24時間で重力排水が終了するため、圃場容水量以上の水分領域での測定は実際の野外条件におけるガスフラックスの推定にはあまり重要ではない、などの理由による。なお、乾燥・湿潤いずれの場合も、気相率の調整終了後パラフィルムを巻いて密封し、3日以上放置して試料内の気相率分布を十分均一化した後に測定に供した。

すべての測定が終了した後、試料を $110^\circ C$ で24時間以上炉乾燥して水分を飛ばし、重量を測定して採取時の体積含水率および間隙率を計算した。

### III 結果および考察

#### 1. 測定結果に基づく拡散係数の決定手順の確立

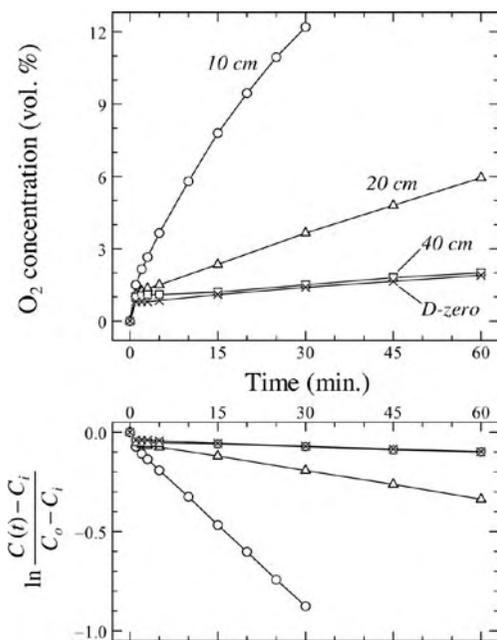
##### (1) 測定原理に対する本装置の適合性

実際の測定時における拡散容器内の $O_2$ 濃度、およびそれから求めた(4)式の左辺値の時系列を第4図に示す。例としてプロットしたのは、B地点の深度10cm、20cm、40cmから採取した試料についての測定結果であり、いずれも各深度について得られた典型的な時系列である。これらの試料の測定時の気相率はそれぞれ38.9%、16.9%、2.3%であった。また、 $D_s$ がゼロである試料(D-zero)についての結果も併せてプロッ

トした。これは、試料円筒とほぼ同じ外径を持つ有底のプラスチック円筒を試料円筒の代わりに取り付け、他の土壌試料と同様に測定したものである。

O<sub>2</sub> 濃度は測定開始時にはほぼ0%であるが、開始と同時にメッシュ下部の空間に含まれていた大気が拡散容器内の N<sub>2</sub> に混合するため、開始1分後には1% 前後まで急速に上昇した。その後、土壌試料中を通じた拡散に伴って容器内の O<sub>2</sub> 濃度が徐々に上昇するが、その速度は試料によって異なり、気相率の大きい深度 10 cm の試料で最も大きく、ついで 20 cm, 40 cm の順となった。また、深度 10 cm の時系列によく示されているように、O<sub>2</sub> 濃度の上昇速度は測定の初期に大きく、時間とともに漸減した。

このような O<sub>2</sub> 濃度の変化から計算された (4) 式の左辺値は、大気混合の影響を受ける開始直後を除いてほぼ直線的な時間変化を示した。この事



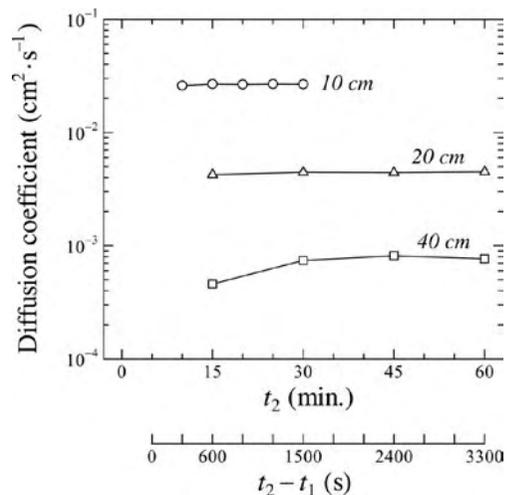
第4図 測定中の拡散容器内の O<sub>2</sub> 濃度 (上) および (4) 式左辺値 (下) の時系列。数字は土壌試料の採取深度、D-zero は拡散係数がゼロの試料を表す

実は、本装置を用いた測定が、前述した測定の原理を適用できる条件を満たしていることを示すものである。これに関連して遅沢・久保田 (1987) では、本研究と同様に開始後数分間における直線性の悪さを指摘しているほか、(4) 式の左辺値が -3 を下回るような、大気と容器内の O<sub>2</sub> 濃度差が極めて小さくなった領域においても直線から外れる傾向があることを示している。

## (2) D<sub>s</sub> の決定

(5) 式より、この直線の勾配は任意の時刻 t<sub>1</sub> および t<sub>2</sub> の時間差と、それぞれの時刻における拡散容器内の O<sub>2</sub> 濃度差から求められる。t<sub>1</sub> としては、開始直後の攪乱が十分に安定したと考えられる 5 分 (300 秒) を適用した。この t<sub>1</sub> に対して、組み合わせる t<sub>2</sub> を変えた場合の D<sub>s</sub> の値を比較した結果を第 5 図に示す。各深度の値は、第 4 図に示した対応する深度についての時系列から計算した。深度によって D<sub>s</sub> 値のオーダーが異なっていたため、縦軸を対数軸としてプロットした。

測定開始後 5 分以降の (4) 式の左辺値が時刻に対して完全に直線的に変化すれば、D<sub>s</sub> は t<sub>2</sub> によらず一定となるが、実際にはある程度のばらつ



第5図 異なる t<sub>2</sub> を適用して (t<sub>1</sub> は 5 分に固定) 計算された拡散係数の比較。数字は土壌試料の採取深度を表す

きが見られる。ばらつきの大きさは全般的に、 $t_2$  が小さく容器内の  $O_2$  濃度があまり高くない範囲で大きく、 $t_2$  が増加するにつれて一定値に収束してゆく傾向が各深度で見られた。また、 $O_2$  濃度の上昇速度が小さい深度 40 cm におけるばらつきは、速度の大きい深度 10 cm よりも顕著であった。

この原因として、 $t_1$  からの濃度の上昇幅が、 $O_2$  濃度測定分解能に対して十分大きくないことが考えられる。 $O_2$  濃度の読み取り分解能は前述の通り 0.05% であるが、濃度の上昇速度が小さい試料では測定開始後 5 分～60 分の上昇幅がわずかに 0.5% 程度の場合もあった。いま、 $t_1=300$  秒、 $t_2=3600$  秒、 $C_i=21.0\%$ 、 $C(t_1)=1.0\%$  であるとし、 $C(t_2)$  として  $1.5 \pm 0.05\%$  および  $10.0 \pm 0.05\%$  (分解能分の誤差を考慮) を与えると、(5) 式の値はそれぞれ  $-7.67 \pm 0.77 \times 10^{-6}$  および  $-1.81 \pm 0.01 \times 10^{-4}$  となり、値に対する誤差の大きさの割合はそれぞれ 10.1% および 0.8% となる。このように、 $C(t_1) \sim C(t_2)$  間の濃度差があまり大きくない時間範囲あるいは試料の場合、読み取った  $O_2$  濃度の分解能レベルのわずかな違いが  $D_s$  の計算結果に大きな影響を及ぼす。この影響を最小にするには、 $t_2$  として最も大きな濃度差が得られる測定終了時の時刻を与えればよい。しかし、第 4 図に示した深度 40 cm のように濃度の上昇速度が極めて小さい場合は、終了時の濃度を用いてもこの影響は依然として大きく、ある 1 つの期間の濃度差のみから  $D_s$  を計算することは大きな誤差を生じる危険がある。

以上の点を考慮し、 $D_s$  の計算を以下のように行うこととした。まず、 $O_2$  濃度の上昇速度が大きく 30 分で測定を終了した試料については、 $t_2=30$  分 (1800 秒) として (5) 式から計算した値をそのまま採用した。それ以外の試料については、 $t_2$  として 30 分、45 分 (2700 秒)、60 分 (3600 秒) を与えて計算した値の平均値をその試料の  $D_s$  とした。 $t_2=15$  分 (900 秒) での値は、多くの

測定で 30 分以降の値との間に差が見られたため使用しないこととした。この方法に基づいて、第 4 図に示された結果から各深度の  $D_s$  値を計算すると、浅い順に  $2.67 \times 10^{-2}$ 、 $4.45 \times 10^{-3}$ 、 $7.75 \times 10^{-4}$  ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ ) となった。

### (3) 装置からのリークとその補正法

第 4 図にプロットされた D-zero は、試料円筒の内部を通じた拡散が生じない状態で測定されたものである。装置の他の部位から拡散容器中への大気の流入がなければ、容器内の濃度は測定開始時の大気の混合分を除いて時間的に変化しないが、実際には時間経過に伴ってわずかに上昇する傾向を示し、開始後 5 分～60 分の間に 0.4～1.1% の上昇が見られた。この上昇は、試料円筒中以外を通じた大気の流入の結果であり、通常の土壤試料の測定時にも生じていると考えられる。すなわち、第 4 図に示された  $O_2$  濃度の上昇には、土壤試料中を拡散した成分に加えて装置の他の部位からリークした成分が含まれている。土壤試料の真の  $D_s$  を求めるためには、このリーク分を補正する必要がある。

遅沢・久保田 (1987) では、試料円筒中にガラス管を粘土で固定して屈曲のない気相系を作り、得られた  $D_s$  と気相率の関係式から気相率 0% における  $D_s$  を求め、この値を差し引くことでリーク分を補正している。本研究では、同様の試料が用意できなかったこと、また、リークの様子はスライド面の摩耗やグリースの塗布具合などによってその時々により変化すると考えられるが、 $D_s$  と気相率の関係式を求める作業をその都度行うのは煩雑であることから、一連の  $D_s$  測定の最初と最後に D-zero の測定を行い、その結果に基づく補正を行った。

具体的には、前述した  $D_s$  の決定と同様、 $t_2=30$  分、45 分、60 分における D-zero についての (5) 式の値の平均を、土壤試料について得られた (5) 式の値から差し引き、それに基づいて計算した  $D_s$  をその試料の真の  $D_s$  とした。(5) 式の値を用

いたのは、「リーク分の拡散係数」の計算に必要な気相率や $\alpha_1$ が求められないためである。また、D-zero と土壤試料の測定時の温度の違いを補正するため、(6) 式を援用して D-zero の値をいったん標準状態における値に変換し、土壤試料の補正に適用する際にはその試料の測定時の温度での値に再変換して使用した。

第4図に示した D-zero の測定結果に基づき、先に得られた  $D_s$  の値を補正すると、深度 10 cm および 20 cm について、それぞれ  $2.57 \times 10^{-2}$  および  $3.46 \times 10^{-3}$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) となった。これらは元の値に比べてそれぞれ 3.8% および 22.3% の減少となり、値が小さいほどリークの影響が大きく

現れている。なお、深度 40 cm にこの補正を適用したところ負の値が算出された。負の  $D_s$  は、土壤試料中を通した拡散が極めて小さく、 $\text{O}_2$  濃度の上昇のほぼすべてがリークによるものである場合に生じることがあり、このような場合はその試料の  $D_s$  をゼロとした。

## 2. パラメータの測定誤差が測定結果に及ぼす影響

$D_s$  および  $D_s/D_a$  の決定に關与する、(2) ~ (6) 式に含まれる各パラメータの測定誤差の影響を定量的に評価し、その結果を第1表にまとめた。誤差の影響の大きさは  $D_s$  の値によっても異なるため、第4図に示した3深度の試料についての測

第1表 各パラメータの測定誤差が拡散係数に及ぼす影響

| 項目 (単位)    | 誤差    | $D_s$ の真値からのずれ (%) |       |        | 項目 (単位)           | 誤差     | $D_s$ の真値からのずれ (%) |       |        |
|------------|-------|--------------------|-------|--------|-------------------|--------|--------------------|-------|--------|
|            |       | 10 cm              | 20 cm | 40 cm  |                   |        | 10 cm              | 20 cm | 40 cm  |
| $C$ (体積 %) |       |                    |       |        | $\theta_a$ (体積 %) | -5.0   | -0.76              | -0.77 | -      |
| $C_i$      | -0.30 | +2.56              | +1.81 | +1.55  |                   | -1.0   | -0.15              | -0.15 | -0.16  |
|            | -0.10 | +0.84              | +0.60 | +0.51  |                   | -0.5   | -0.08              | -0.08 | -0.08  |
|            | -0.05 | +0.42              | +0.30 | +0.26  |                   | +0.5   | +0.08              | +0.08 | +0.08  |
|            | +0.05 | -0.41              | -0.30 | -0.25  |                   | +1.0   | +0.15              | +0.15 | +0.16  |
|            | +0.10 | -0.83              | -0.59 | -0.51  |                   | +5.0   | +0.76              | +0.78 | +0.79  |
|            | +0.30 | -2.43              | -1.75 | -1.50  | $\alpha_1$        | -0.001 | +2.50              | +3.77 | +10.70 |
| $C(t_i)$   | -0.30 | +2.52              | +5.88 | +32.34 |                   | -0.000 | +0.25              | +0.37 | +1.00  |
|            | -0.10 | +0.84              | +1.97 | +10.83 |                   | -0.000 | +0.02              | +0.04 | +0.01  |
|            | -0.05 | +0.42              | +0.99 | +5.42  |                   | +0.000 | -0.02              | -0.04 | -0.01  |
|            | +0.05 | -0.42              | -0.99 | -5.44  |                   | +0.000 | -0.25              | -0.37 | -0.98  |
|            | +0.10 | -0.85              | -1.98 | -10.89 |                   | +0.001 | -2.41              | -3.57 | -9.22  |
|            | +0.30 | -2.56              | -5.98 | -32.83 | $T$ (K)*          | -1.0   | +0.57              | +0.57 | +0.56  |
| $L_s$ (cm) | -0.10 | -2.07              | -2.01 | -1.97  |                   | -0.5   | +0.28              | +0.28 | +0.28  |
|            | -0.05 | -1.04              | -1.01 | -0.98  |                   | -0.1   | +0.06              | +0.06 | +0.06  |
|            | -0.01 | -0.21              | -0.20 | -0.20  |                   | +0.1   | -0.06              | -0.06 | -0.06  |
|            | +0.01 | +0.21              | +0.20 | +0.20  |                   | +0.5   | -0.28              | -0.28 | -0.28  |
|            | +0.05 | +1.04              | +1.01 | +0.98  |                   | +1.0   | -0.56              | -0.56 | -0.56  |
|            | +0.10 | +2.08              | +2.01 | +1.97  | $P$ (hPa)*        | -50    | -4.94              | -4.94 | -4.94  |
| $L_A$ (cm) | -0.10 | -0.87              | -0.90 | -0.92  |                   | -10    | -0.99              | -0.99 | -0.99  |
|            | -0.05 | -0.44              | -0.45 | -0.46  |                   | -5     | -0.49              | -0.49 | -0.49  |
|            | -0.01 | -0.09              | -0.09 | -0.09  |                   | +5     | +0.49              | +0.49 | +0.49  |
|            | +0.01 | +0.09              | +0.09 | +0.09  |                   | +10    | +0.99              | +0.99 | +0.99  |
|            | +0.05 | +0.44              | +0.45 | +0.46  |                   | +50    | +4.94              | +4.94 | +4.94  |
|            | +0.10 | +0.87              | +0.90 | +0.92  |                   |        |                    |       |        |

\* $D_s/D_a$  の真値からのずれを示した

定時のパラメータ値を基準とし、項目ごとに適当な大きさの誤差を与えて計算した  $D_s$  (あるいは  $D_s/D_a$ ) の真値に対するずれの割合 (%) を示してある。なお、ここでは測定時に生じる誤差の影響を議論するのが目的であるため、リーク分の補正は行っていない。以下、項目ごとに詳細に議論する。

#### (1) $O_2$ 濃度

$D_s$  の決定に必要な  $O_2$  濃度は、(5) 式に含まれる  $C_i \cdot C(t_1) \cdot C(t_2)$  の3つである。ここでは  $t_2$  の値として深度 10 cm で 30 分、深度 20 cm および 40 cm で 60 分を適用して解析を行った。その結果のうち、 $C_i$  および  $C(t_1)$  にそれぞれ個別に  $\pm 0.05\%$  ( $O_2$  濃度センサーの読み取り分解能)  $\sim \pm 0.3\%$  (メーカー公称精度) の誤差が生じた場合の結果を表中に示した。

まず、3つすべてに同じ符号かつ同じ量の誤差が生じた場合は、 $D_s$  への影響はまったく見られなかった。これは (5) 式にある通り、濃度自体ではなくその差が用いられるためである。このような状況は、校正後の時間経過に伴うセンサー応答のドリフトによって生じる可能性があるが、 $D_s$  の値への影響は考えなくてよい。

次に、大気中の濃度  $C_i$  のみに誤差が生じた場合、 $\pm 0.3\%$  の誤差によって 1.5 ~ 2.5% の影響が生じ、深度が浅い方にその影響がより強く現れた。 $C_i$  は測定の前後に拡散容器からセンサーを外して測定するが、この時の安定待ち時間が不十分な場合に過小評価されることが考えられる。浅い深度で影響が大きくなったのは、終了時の濃度  $C(t_2)$  が  $C_i$  に近いほどその差分は小さくなり、その自然対数が  $D_s$  の計算に用いられるため、差分が小さいほど誤差の影響が大きく現れるためである。実際状況を考えると、 $D_s$  が大きく  $C(t_2)$  が  $C_i$  に近い場合は  $C_i$  測定時の安定待ち時間は短くなり、過小評価が生じる可能性は低下するであろう。したがって、実際の測定時に生じる誤差は表中に示した値よりも低くなるものと予想され

る。

続いて、測定開始後 5 分の濃度  $C(t_1)$  のみに誤差が生じた場合、その影響は深度とともに急増し、深度 10 cm では  $\pm 0.3\%$  の誤差の影響が 2.5% 程度であるのに対し、深度 40 cm では 30% を超える結果となった。このような状況は、開始後 5 分における拡散容器内の濃度上昇が速く、センサーの応答が追従できない場合などに生じる可能性がある。しかし、第 4 図に示したように深度 40 cm における濃度上昇の速度は極めて小さく、センサー応答の顕著な遅れが生じるとは考えにくい。したがって、計算上示された 30% を超える影響は実際には生じないであろう。むしろ、深度 10 cm のように濃度上昇の速度が大きい場合、 $C(t_1)$  に加えて  $C(t_2)$  にもセンサー応答の遅れが出る可能性がある。この 2 つに等量の誤差が生じた場合の結果は表中に示さなかったが、その値は  $C_i$  のみに誤差が生じた場合の誤差の正負の符号を反対にしたものとまったく同一であった。すなわち、 $\pm 0.3\%$  の誤差によって 1.5 ~ 2.5% の影響が生じた。

ところで、本研究で使用した  $O_2$  濃度センサーの校正は、その原理上  $O_2$  濃度 0% での値は固定しておき、清浄な大気中の濃度である 21.0% の方でスパン調整を行うというものである。このため、校正後にセンサー出力のドリフトが生じた場合、その影響はすべての濃度範囲で等しく作用するとは限らず、低濃度で小さく高濃度で大きくなる可能性も検討しておく必要がある。このような場合の測定誤差は  $C(t_1)$  で小さく、 $C_i$  および  $C(t_2)$  で大きくなる。後者 2 つに等量の誤差が生じた場合の結果はやはり表中に示していないが、その値は先ほどと同様、 $C(t_1)$  のみに誤差が生じた場合の誤差の正負の符号を反対にしたものとまったく同一であった。すなわち、 $\pm 0.3\%$  の誤差によって深度 10 cm で約 2.5%、深度 40 cm で 30% を超える影響が現れた。しかしこの場合もまた、第 4 図に示したように深度 40 cm の試料

では濃度の上昇幅が小さく、 $C(t_2)$  はあまり高くなっていないため、ドリフトに伴う誤差も小さいと考えられる。

最後に、 $C(t_2)$  のみに誤差が生じた場合の影響は、 $C(t_1)$  のみに生じた場合よりやや大きく、 $\pm 0.3\%$  の誤差によって深度 10 cm では約 5%、深度 40 cm では 34% 前後であった。誤差による影響は大きめであるが、実際の測定において  $C(t_2)$  のみに顕著な誤差が生じる可能性は考えにくいいため、考慮する必要性は小さいであろう。

なお、これまで各深度における  $D_s$  の真値に対するずれの割合で議論してきた結果、深度によって大きな違いが見られる場合もあったが、 $D_s$  の値自体が深度によって大きく異なるため、実際のずれの絶対値で議論すると状況は異なる。例として、表中に示された値の中で最大である、 $C(t_1)$  のみに  $+0.3\%$  の測定誤差が生じたケースで計算すると、各深度における  $D_s$  (リーク分の補正前) のずれの大きさは浅い順に  $6.84 \times 10^{-4}$ 、 $2.66 \times 10^{-4}$ 、 $2.54 \times 10^{-4}$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) となり、すべての深度で同じオーダーとなる。

## (2) 試料円筒および拡散容器の長さ

試料円筒の長さ  $L_S$  および拡散容器の長さ  $L_A$  は、(3) 式から決定される  $\alpha_1$  の値を介して  $D_s$  に影響を及ぼす。いずれも深度による差は小さく、 $D_s$  に対する影響を 1% 前後に抑えるためには  $L_S$  を  $\pm 0.5$  mm、 $L_A$  を  $\pm 1$  mm の精度で測定すればよい。 $L_S \cdot L_A$  ともに、使用する装置や試料円筒の種類が変わらなければ一定であり、一度測定しておけば測り直す必要は基本的にない。ただし、土壌試料底面の整形が悪く大きなえぐれや盛り上がりが見られるものや、底面の近傍のみが極度に乾燥した場合などは、 $L_S$  の値を実質的に増減させる可能性がある。 $L_A$  についても、試料の据え付けが悪く試料下面とメッシュの間に空間ができると、その分は  $L_A$  の増加分として作用する。このような状態での測定結果に対して既知の値を適用してしまうと、測定時の値との差が誤差を生じ

るので注意が必要である。

## (3) 気相率

気相率  $\theta_a$  は、(5) 式による  $D_s$  の計算に直接影響を及ぼすほか、(3) 式を通して  $\alpha_1$  の決定にも関与する。 $D_s$  への影響は、 $\pm 5\%$  の誤差に対しても 0.8% 未満と小さく、深度による違いもほとんどなかった。これは、 $\theta_a$  と  $\alpha_1$  の間に第 2 図に示したような関係があり、また (5) 式において両者が分母と分子に別れているため、 $\theta_a$  の直接的な影響と  $\alpha_1$  を介した間接的な影響とが相殺し合うためと考えられる。このように、 $\theta_a$  の誤差の影響は  $D_s$  の測定値自体に対しては小さいものの、後述するような  $D_s/D_a$  と  $\theta_a$  との関係を議論する際の信頼性に影響を及ぼすため、できる限り正確に測定しておくことは重要である。また、粘土質の試料は乾燥に伴って亀裂や隙間を生じやすいが、このような連続した空気間隙は拡散によるガス輸送を容易にし、 $\theta_a$  の増加による効果以上の  $D_s$  値の上昇を生じさせる可能性がある。

## (4) $\alpha_1$

$\alpha_1$  は  $L_S \cdot L_A \cdot \theta_a$  の関数であり、それぞれの測定誤差が及ぼす影響については既に触れた。ここでは、 $\alpha_1$  をどの程度の桁数まで求める必要があるかを調べるため、 $10^{-3} \sim 10^{-5}$  の各オーダーレベルでの誤差の影響を示した。 $10^{-5}$  オーダーの誤差の影響がいずれの深度においても 0.1% 以下であるのに対し、 $10^{-3}$  オーダーでは深度 10 cm で 2.5%、深度 40 cm では 10% に及んだ。表中に示した通り、 $\alpha_1$  の推定精度としては最低でも  $10^{-4}$  オーダー(深度 40 cm で 1% 以内のずれ)が必要であろう。なお、本研究におけるマクロを用いた推定では収束計算の打ち切りを  $10^{-8}$  に設定しており、十分な精度で推定できていると言える。また、第 2 図に示した近似式を使用した場合の  $D_s$  の真値からのずれは、浅い方から順に  $+0.04\%$ 、 $+0.56\%$ 、 $+5.78\%$  となり、深い深度ほどずれが大きい結果となった。

(5) 温度および気圧

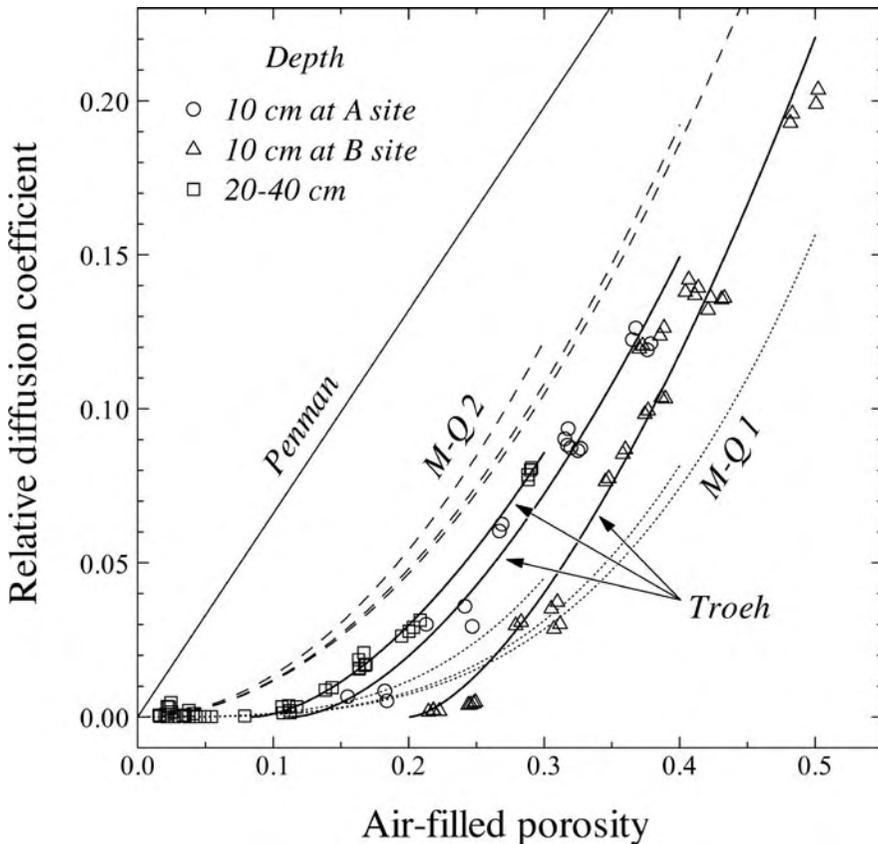
温度  $T$  および気圧  $P$  は、測定時の条件における  $D_s$  値の決定には関与しないが、異なる条件下での  $D_s$  値の推定や  $D_s/D_a$  の計算に関係するため、表中には  $D_s/D_a$  の真値に対する誤差の影響を示した。  $T \cdot P$  ともに深度による違いはほとんどなく、  $\pm 1^\circ\text{C}$  および  $\pm 10 \text{ hPa}$  の誤差あるいは変動の影響はいずれも 1% 未満であった。したがって、室温の測定に用いる温度計の精度は  $\pm 1^\circ\text{C}$  あれば十分であり、また通常の気象条件における気圧変動の影響はほぼ無視できる。

3. 草地土壌における拡散係数と気相率の関係

これまでに述べた測定操作および決定の手順、ならびにリーク分の補正を経て、最終的に得られ

た  $D_s$  の測定結果を、  $D_s/D_a$  と気相率の関係として第 6 図に示す。両者の間には全体的に正の相関が見られるが、より詳しく見ると最表層である深度 10 cm と 20 ~ 40 cm との間で異なっているほか、10 cm については A・B の地点間でも違いが認められたため、この 3 つのグループに分類してプロットした。また、両者の関係を表す既存のモデルを適用した結果を併せて示した。それぞれのモデル式は、Penman (Penman, 1940), M-Q 1 および 2 (Millington, 1959; Millington and Quirk, 1961), Troeh (Troeh *et al.*, 1982) の順に以下の通りである。

$$D_s/D_a = 0.666\theta_a \quad (7)$$



第 6 図 相対拡散係数と気相率の関係および既存のモデル式の適用結果

$$D_s/D_a = \theta_a^{10/3} / \theta_t^2 \quad (8)$$

$$D_s/D_a = \theta_a^2 / \theta_t^{2/3} \quad (9)$$

$$D_s/D_a = \left( \frac{\theta_a - u}{1 - u} \right)^v \quad (10)$$

ここで、(8)式および(9)式の $\theta_t$ は間隙率であり、グループごとの平均値を適用した。第6図に示した曲線の長さが短い順に、深度20~40 cm、A地点の深度10 cm、B地点の深度10 cmであり、それぞれの間隙率の平均は63.3%、76.0%、79.7%であった。また、(10)式の $u$ および $v$ は土壌によって異なるパラメータであり、実測値に基づいて決定する必要がある。そこで、データ解析ソフトウェアKyPlot 3.0の関数フィット機能を使用してグループごとに $u$ および $v$ の値を求め、その結果を第2表に示した。

実測結果とモデル式の適合の度合を比較すると、まず最も初期に提示されたモデルの1つであるPenman式は、すべての範囲で実測値を大きく過大評価する結果となった。Penman式は乾燥した砂についての実験結果から導かれたものであり、本研究で用いた水分を含む粘質な黒ボク土壌とは試料の性質が著しく異なっているため、適合性が悪かったと考えられる。次にM-Q1式は、気相率5%以下の湿潤で $D_s/D_a$ がほぼ0となる範囲では実測値とよく合っていたが、より乾燥した条件ではおおむね過小評価する傾向を示した。M-Q2式では逆に、大半の実測値に対して過大な値を示す結果となった。最後のTroeh式による近似曲線は、第2表に示したように決定係数がいずれも0.96以上という結果となり、実測値をよく再現することができた。

Troeh式は実測結果に基づいてパラメータを決定しているため、実測値との適合性がある程度高いことは当然であるが、式の形として他のモデルより優れているのは、気相率が0%より大きい値で $D_s/D_a$ が0になるという関係を再現できる点

第2表 Troeh式におけるパラメータの推定結果

| Depth           | $u$   | $v$   | $n$ | $R^2$  |
|-----------------|-------|-------|-----|--------|
| 10 cm at A site | 0.114 | 1.682 | 18  | 0.9720 |
| 10 cm at B site | 0.201 | 1.539 | 38  | 0.9644 |
| 20 - 40 cm      | 0.084 | 1.699 | 41  | 0.9952 |

である。これは、団粒内部の封入空気や開口部が1ヶ所しかない袋小路状の空間など、土壌中のすべての空気間隙が拡散フラックスに寄与するわけではないことを考えれば妥当である。これに関してShimamura(1992)は、乾燥した砂と細粒物質を様々な割合で混合した試料についての実測結果ならびに乾燥条件で実測された過去の事例について、 $D_s/D_a$ が原点を通る式である気相率の $n$ 乗( $n=1.33 \sim 10$ )の形でよく再現できることを示している。これは、毛管力によって間隙の狭いところに保持される土壌水分が拡散に寄与しない空気間隙の形成に大きな役割を果たしていること、水分を含まない試料ではこの効果が期待できないため気相率が0%になるまで $D_s/D_a$ が0にならないことを示す結果であると考えられる。

(10)式の $u$ が、 $D_s/D_a$ が0になる時の気相率の値に対応する。Troeh *et al.* (1982)では、15件の研究で示された23種類の試料の実測結果について $u$ の値を概算し、一部の特殊な試料を除き0~0.15という値を得ている。遅沢(1987)では複数の種類の土壌についての $D_s/D_a$ を比較し、黒ボク土・黄色土は灰色低地土・砂丘未熟土に比べてグラフの立ち上がりの気相率が高いことを指摘しているが、 $u$ としては0.05~0.2という値がグラフから読み取れる。先に挙げたShimamura(1992)の試料を湿潤化した場合の実測結果では、おおむね0.1~0.2の間であった。本研究で得られた値は、従来の研究で示されたこれらの値の範囲内であり、妥当な測定結果であると言える。なお、Troeh式のもう1つのパラメータである $v$ は曲線の曲率を表すもので、 $v=1$ で直線になり、値が大きいほど曲線の曲がりが大きくなる。先に

示した Troeh *et al.* (1982) による過去の実測事例に基づく概算では、 $v$  の値として 1.1 ~ 2.0 を得ているが、本研究の結果は 1.54 ~ 1.70 と、やはりこの範囲内に収まるものであった。

3つに分類されたグループ間の違いを定量的に吟味すると、 $u$  の値は深度 20 ~ 40 cm, A 地点の深度 10 cm, B 地点の深度 10 cm の順に大きくなっており、これは各グループの間隙率の順に一致する。土壤試料を採取したのは人工的に造成された草地であり、天地返しを含めた大規模な土壤の改変が行われているため (濱田ほか, 1998)、局所的な分布の不均一性を除けば、土粒子の粒径分布や土壤の母材に深度あるいは地点間で系統的な違いがあるとは考えにくい。したがって、この間隙率の違いは植物根の伸長や土壤動物の活動といった、草地の造成後に生じた間隙率を増加させる作用の深度・地点による違いを反映していると考えられる。主として生物学的なこれらの作用は、間隙率を増加させると同時に土壤に有機物を供給し、団粒の生成にも寄与するであろう。その結果、生物活動が活発であるほど、間隙率および封入空気などの拡散に寄与しない空気間隙が増加し、Troeh 式における  $u$  の値が大きくなったと推察される。これに関連して、遅沢 (1987) はつくば地域の黒ボク土壤において、上位層の土壤ほどグラフの立ち上がり時の気相率が高いことを観測し、この理由として黒ボク土表層では粒状構造が発達し、孔隙が入り組み封入空気が多いためであるとしている。なお、式中に間隙率をパラメータとして持つ M-Q モデルの 2 つの式は、 $D_s/D_a$  の値自体は十分に再現しているとは言えないものの、間隙率が大きいほど同じ気相率の値に対して  $D_s/D_a$  が小さくなる関係を再現している。この関係を Troeh 式に組み入れることにより、間隙率の違いに起因するグループ間のパラメータの差異を解消できるような、新たなモデル式を構築することができるかもしれない。

## IV まとめ

遅沢 (1987) および遅沢・久保田 (1987) によって開発された装置に基づいて、不攪乱土壤試料のガス拡散係数を測定する装置を製作し、測定手順を確立した。測定から得られた草地土壤の拡散係数と気相率の関係は、土壤固有のパラメータに依存しない既存のモデル式では十分に再現できず、このパラメータを持つ Troeh *et al.* (1982) が提示したモデル式によって良好に近似された。Troeh 式におけるパラメータの値は過去の実測事例の範囲内であり、本装置による測定値の妥当性を示す結果となった。

本研究で示されたように、土壤の拡散係数と気相率をはじめとする土壤物理特性との関係は、土性や母材が同じ土壤においても深度や地点によって異なる。土壤固有のパラメータに依存しない、すべての土壤に対して適用可能なモデル式を導出することは、土壤物理学における重要な課題の一つと言えるが、物質循環研究の一環として野外におけるガスフラックスを評価する場合には、対象とする土壤ごとに拡散係数を測定するのが現実的である。本研究で製作した装置は 30 万円弱と比較的安価であり、多数の土壤試料の拡散係数を十分な精度で測定可能である。Troeh 式のパラメータについても、以前はグラフ上のプロットから視覚的に概算するしかなかったが、現在では安価なデータ解析ソフトウェアを用いて PC 上で求めることができる。今後、本装置を用いた拡散係数測定が広く行われることにより、土壤中におけるガス拡散フラックスの推定精度の向上に寄与することが期待される。

## 謝辞

本研究を進めるに当たり、筑波大学陸域環境研究センターのスタッフの方々には、土壤試料の採取に関して便宜を図って頂きました。ここに記し

て感謝申し上げます。

なお、本研究は平成11年度科学研究費補助金(特別研究員奨励費)ならびに環境省地球環境研究総合推進費S-1による助成を受けた。

## 文献

- 遅沢省子 (1987): 土壌ガス拡散係数測定と土壌診断. 土壌の物理性, **55**, 53-60.
- 遅沢省子・久保田 徹 (1987): 土壌のガス拡散係数の測定法. 日本土壌肥科学雑誌, **58**, 528-535.
- 化学工学協会 編 (1970): 「物性定数・8集」. 丸善, 230p.
- 濱田洋平・A. R. インドラ F・田中 正 (1998): 筑波大学水理実験センター内アカマツ林および熱収支・水収支観測圃場における土壌の物理特性. 筑波大学水理実験センター報告, **23**, 1-10.
- 町野 彰 (1995): 首都圏の土壌からのメタン発生量の推算. 日本化学会誌, 1995, 203-207.
- de Jong, E. and Schappert, H. J. V. (1972): Calculation of soil respiration and activity from CO<sub>2</sub> profiles in the soil. *Soil Sci.*, **113**, 328-333.
- Hamada, Y. (1999): Production and transport processes of carbon dioxide in soil profiles at a coniferous forest and an adjacent grassland. *Ph.D. diss.*, University of Tsukuba.
- Jin, Y. and Jury, W. A. (1996): Characterizing the dependence of gas diffusion coefficient on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**, 66-71.
- Millington, R. J. (1959): Gas diffusion in porous media. *Science*, **130**, 100-102.
- Millington, R. J. and Quirk, J. P. (1961): Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, **57**, 1200-1207.
- Penman, H. L. (1940): Gas and vapor movements in the soil. I. The diffusion of vapors through porous solids. *J. Agric. Sci.*, **30**, 437-462.
- Shimamura, K. (1992): Gas diffusion through compacted sands. *Soil Sci.*, **153**, 274-279.
- Troeh, F. R., Jabro, J. D. and Kirkham, D. (1982): Gaseous diffusion equations for porous materials. *Geoderma*, **27**, 239-253.
- Uchida, M. (1995): Determination of CO<sub>2</sub> flux from forest soil using <sup>222</sup>Rn and diffusion process of soil CO<sub>2</sub> to the atmosphere. *M. Env. S. diss.*, University of Tsukuba.
- Xu, X., Nieber, J. L. and Gupta, S. C. (1992): Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56**, 1743-1750.

(2006年5月31日受付, 2006年8月10日受理)

# 鉛直風標準偏差の普遍関数を用いた顕熱フラックス測定エラーの補正

Correction of Sensible Heat Flux Measurement Errors  
Using a Universal Function of Standard Deviation of  
Vertical Wind Velocity

岩田 拓記\*・杉田 倫明\*\*

Hiroki IWATA\* and Michiaki SUGITA\*\*

## 1 はじめに

地表面における熱収支は、その土地の微気象や、より大きな大気循環に影響を及ぼす。その熱収支の変化は、降雨や植生の活動状態などのような自然現象に影響されるほか、人為的な土地利用の改変によっても変化する。後者が自然環境へ与える影響は長期間に及ぶことが多い。人為的な土地利用変化は、人間の生活様式を反映している。都市化によって生じる農地から住宅地への変化はその典型的な例である。つくば市でも研究学園都市建設法の制定以来、人口が増加しており、2005年10月の調査によれば、20万人を越えたと発表されている（つくば市役所ホームページ参照）。それに伴い、つくば市では住宅化が進んでいる。このようなことから、地表面での熱収支を監視し、土地利用変化が熱収支に与える影響を評価することは、地球環境を研究する上で必要である。

筑波大学陸域環境研究センター(TERC)では、1981年8月より連続して気象観測を実施している。その中の超音波風速計(SAT)によって測

定された顕熱フラックスを用いることにより、周辺の土地利用の変化が熱収支に与える影響を評価することができる可能性がある。TERCのようにSATを用いて20年以上も連続測定をしている観測所は稀であり、貴重なデータを収録していると言える。この長期データを解析した研究例として桜ほか(1999)や福田(1998)がある。これらの研究では、1994年から顕熱フラックスが急激に上昇していることが指摘された。しかし、この顕熱フラックスの急激な上昇は、土地利用の変化のみでは説明できないほど大きく、その他の要因については明確にされてこなかった。一方、運動量フラックスは、1994年4月以前のデータに過小評価が見られることがわかっており、その原因は観測システム内の信号増幅器の設定エラーによる鉛直風速信号の回路内での飽和である可能性が指摘されている(田・杉田, 1996)。本稿では、その鉛直風速信号の飽和が顕熱フラックスの過小評価の原因でもあることを報告する。

本研究の目的は、顕熱フラックスの過小評価の程度を推定できる指標を見つけて、その指標を用

\* 筑波大学生命環境科学研究科

\*\* 筑波大学地球科学系

第1表 TERC 気象観測のうち本研究で用いている主な測定要素とその測定高度

| 測定要素                  | 測定高度   |
|-----------------------|--------|
| 風向                    | 30.5 m |
| 風速 <sup>a</sup>       | 29.5 m |
| 運動量フラックス <sup>a</sup> | 29.5 m |
| 顕熱フラックス <sup>a</sup>  | 29.5 m |
| 全短波放射                 | 1.5 m  |
| 気温、露点温度               | 29.5 m |
| 降水量、気圧                | 地上     |

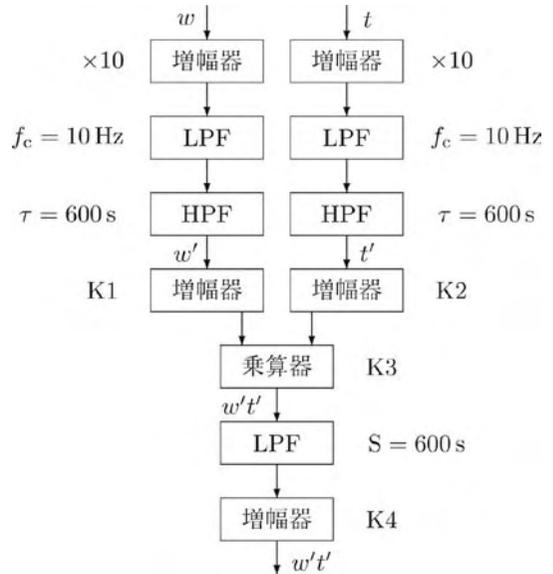
<sup>a</sup> 南東 (123 度) の向き。ただし、1997 年 7 月 31 日以降は下の高度に設置してあった SAT を北西 (303 度) の向き、29.5 m に移動し、常時 2 方向で測定している。

いて過小評価を補正する式を得ることである。顕熱フラックスを補正することによって、TERC 周辺の土地利用の変化が熱収支に与える影響を正確に評価することができる。

## II 観測システム

TERC では、1981 年の観測開始より 2003 年 4 月までアナログ演算器で構成された観測システム（以下、アナログ観測システムと称する）によりデータ収録を行っていた。2003 年 4 月以降は浅沼ほか (2004) で説明されているデジタル観測システムに移行している。第 1 表に本研究で主に用いる測定要素とその測定高度を記す。本研究で補正を行う顕熱フラックスは高度 29.5 m の SAT (Kaijo 社、DAT-300) によって測定された値である。以下では、顕熱フラックスの過小評価が起こっていた期間 (1981 年の観測開始時から 1994 年 7 月 7 日まで) にデータ収録を行っていたアナログ観測システムのフラックス算出方法を説明する。

過相関法によるフラックスの算出は、フラックスメータと呼ばれるアナログ回路 (光田ほか、1973; 第 1 図) を用いて行われていた。このアナログ回路は増幅器、ローパスフィルター (LPF)、ハイパスフィルター (HPF)、乗算器から構成されている。SAT から出力される鉛直風速 ( $w$ )、



第 1 図 フラックスメータの回路図

$w$  は鉛直風速信号、 $t$  は温度信号、プライム (') はそれぞれの変動成分、そして、 $w't'$  は鉛直風速変動と温度変動の積を示す。LPF: ローパスフィルター (ノイズ除去、および平均化)、HPF: ハイパスフィルター (変動成分の取り出し)、 $f_c$ : 遮断周波数、 $\tau$ : 遮断時間、 $S$ : 平均化時間、 $K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4$ : 増幅器・乗算器の可変倍率

温度 ( $t$ ) が信号 ( $\pm 1V$ ) としてフラックスメータへ入力される。そこで、まず、増幅器 (10 倍) を通過後、ローパスフィルター (LPF) とハイパスフィルター (HPF) から構成されるバンドパスフィルターによって 10 分間の移動平均からの変動が出力される (鉛直風速の変動成分  $w'$ 、温度の変動成分  $t'$ )。そして、増幅器を通過後、乗算器によって掛け合わされ鉛直風速変動と温度変動との積 ( $w't'$ ) が得られる。この信号を LPF により 10 分間の移動平均とし、増幅をかけた後に出力される。さらに、その出力信号をデジタル的に 1 時間平均した結果、共分散である  $\overline{w't'}$  が記録されていた (鳥谷ほか、1989)。フラックス観測において現在では多くの場合なされる SAT の座標変換や横風補正等は施されていない。

フラックスメータの増幅器の倍率は、最初の増幅器の倍率 ( $\times 10$ ) を除き、変更可能であり、

第2表 増幅器・乗算器の倍率設定

|    | 観測開始から<br>1994年7月7日 | 1994年7月7日<br>から現在 |
|----|---------------------|-------------------|
| K1 | 10                  | 1                 |
| K2 | 10                  | 10                |
| K3 | 1                   | 10                |
| K4 | 5                   | 5                 |

K1, K2は倍率1, 2, 5, 10より, K3は倍率1, 10より, K4は倍率1, 5より選択可能である。電気回路としては, 増幅した結果として生じる電圧値が仕様上で $\pm 10\text{ V}$ まで対応でき, それ以上になると回路が飽和して正しい値が出力されなくなる。実際には, 信号電圧が $\pm 11 - \pm 12\text{ V}$ 程度までは問題無く動き,  $\pm 15\text{ V}$ (回路の動作電圧)に達したところで完全に飽和する(カイジョーソニック, 林孝明, 私信, 2004)。第2表に1994年7月7日以前とそれ以降の増幅器・乗算器の倍率設定を示す。1994年以前の顕熱フラックスの過小評価は鉛直風速の信号がHPFの後の増幅器(K1)によって飽和していたことが原因であると考えられる。このことから, SATからの信号を分岐し, 1994年以前の倍率設定でのアナログ測定システムによる測定と信号飽和の影響を受けていない生データの記録を同時に行い, 得られたデータから顕熱フラックスの過小評価の程度とそれを説明する指標を見つけることを試みた。

### III 過小評価の推定と補正方法

フラックスの過小評価を推定するために, 上述のアナログ測定システムでの測定とLabview(National Instruments社製)を用いたデジタル測定(浅沼ほか, 2004)を並行して行った。測定を行った期間は冬季で, 2005年11月26日から2006年1月30日までの約2ヵ月間である。アナログ測定は, 過去の過小評価を含む測定を再現するために, 増幅器の設定を誤っていた期間の設定とした。一方, Labviewでのデジタル測定は

フラックスメータの手前で信号を分岐しているため, 信号の飽和が生じていないデータを記録することができる。サンプリング周期は $10\text{ Hz}$ である。デジタルデータからのフラックス計算は上述したようなフラックスメータのアナログ演算を模して行った。デジタルデータから計算したフラックス( $\overline{w't'_a}$ )を真値とし, フラックスメータから得られたフラックス( $\overline{w't'_a}$ )の真値に対する比を過小評価の割合とした。過去に生じていた過小評価の原因が鉛直風速信号の飽和であると予想されることから, その標準偏差( $\sigma_w$ )を用いて過小評価を推定することができると考えられる。よって, デジタルデータから計算される $\sigma_w$ を過小評価の指標として, フラックスの過小評価を表す式 $f$ を得た。式 $f$ の関数形は任意である。

$$f(\sigma_w) = \frac{\overline{w't'_a}}{w't'_d} \quad (1)$$

なお,  $\sigma_w$ もフラックス計算と同様に10分間の移動平均からの偏差を変動成分とし, その標準偏差として計算されている。式(1)の過小評価を表す式を得る際には, データの精度を保証するために, 以下の制限によりデータを選択した。1) 1時間の平均風向がSATの開口部を中心にした $120$ 度以内であること。2)  $\overline{w't'_a}$ と $\overline{w't'_d}$ の絶対値が $0.01\text{ Kms}^{-1}$ 以上であること。3) 水平風速( $u$ ),  $w$ , 温度( $t$ )の尖度(K)が $2 \leq K \leq 5$ であること。4) 運動量フラックスと顕熱フラックスの定常性ファクター(SF; Foken and Wichura, 1996)が $0.7 \leq SF \leq 1.3$ であること。5) 吹上角度が $\pm 10$ 度以内であること。6) 降雨イベントが起こっていないこと。本研究の観測時には, SATが $29.5\text{ m}$ の高度に南東と北西向きに設置されていたため, 風向に応じてデータを使用した。

アナログ測定においては $\sigma_w$ の記録は残されていないことから, フラックス補正の適用にあたっては,  $\sigma_w$ を推定する必要がある。本研究では, 摩擦速度 $u_*$ ( $\equiv \sqrt{-\overline{w'u'}}$ )と大気安定度パラメー

タ  $\zeta$  (式 2) から, 接地層で成立する普遍関数 (式 3) を用いて,  $\sigma_w$  を算出した (Kaimal and Finnigan, 1994).

$$\zeta = \frac{z - d_0}{L} = - \frac{k \frac{g}{T_v} (z - d_0) \overline{w' t'}}{u_*^3} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \begin{cases} 1.25 (1 + 3|\zeta|)^{1/3} & \zeta < 0 \\ 1.25 (1 + 0.2|\zeta|) & \zeta > 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで,  $z$  は測定高度,  $d_0$  はゼロ面変位,  $L$  はオブコフ長,  $k$  はカルマン定数 ( $=0.4$ ),  $g$  は重力加速度,  $T_v$  は仮温度である. ゼロ面変位は TERC 周辺の平均的な値 (4.0 m) を用いた (Hiyama *et al.*, 1996). ここで, 問題となるのが,  $u_*$  と  $\zeta$  はアナログ測定の記録から算出可能であるが, それぞれが鉛直風速信号の飽和の影響を受けているということである. そこで, まず,  $u_*$  を別の方法から推定することを考えた. 大気安定度誤差の影響については, 「結果と考察」の節で述べる.

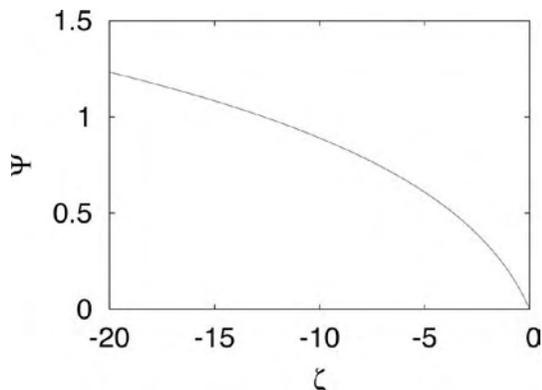
$u_*$  を求める方法には, 渦相関法の他にバルク法がある. バルク法では, 粗度長  $z_0$  と  $d_0$  が既知であれば, 測定された接地層内 1 高度の風速と大気安定度から  $u_*$  を算出することが可能である. バルク式は以下の式で表される.

$$u_* = \frac{kU}{\ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right) - \Psi(\zeta)} \quad (4)$$

ここで,  $U$  はタワー上部 (29.5 m) での風速,  $\Psi$  は大気安定度補正関数である.

$$\Psi(\zeta) = 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

ここで,  $x = (1 - 16\zeta)^{1/4}$  である. ただし, 夜間は接地層の高さが SAT の測定高度 (29.5 m) 以下になる場合があり, その時はバルク式による  $u_*$  の算出ができない. よって, 本研究では, このバルク式による  $u_*$  の推定は, 日中のデータに対してのみ行う. この制限により, 本研究では顕熱



第 2 図 大気安定度補正関数

フラックスの補正を, 昼間のデータに対してのみ行った. 式 4 において,  $u_*$  は右辺の大気安定度補正関数内にも現れるため,  $u_*$  は以下のように再帰的に計算される. 1) まず, 第一回目の計算において, 中立成層を仮定して (すなわち,  $\Psi=0$ ), 式 4 から  $u_*$  を求める. 2) これより得られる  $u_*$  と測定された顕熱フラックス (このフラックスは過小評価を含んでいる) を用いて, 大気安定度を計算し (式 2), 再び, 式 4 から  $u_*$  を計算する. 3) この 2 の計算を繰り返す, 結果が十分に収束 (計算される  $u_*$  の変化が 0.0001 以下とした) した時の値を最終的に求めた. この際に, 過小評価を含んだ顕熱フラックスを用いているが, 大気安定度補正関数  $\Psi$  は, 中立近くを除いては, 大気安定度によって大きく変化しない (第 2 図) ので, 大気安定度 (すなわち, 顕熱フラックス) の誤差が計算結果である  $u_*$  に与える影響は比較的小さい. 式 4 から  $u_*$  を計算する際に, 重要なパラメータが  $z_0$  である. 本研究では, デジタルデータから計算された, それぞれ真値である  $U$ ,  $u_*$ , 顕熱フラックスを用いて, 式 4 から風向毎に  $z_0$  を求めた. その結果を第 3 表に示す. 過去のデータに適用する際には, この  $z_0$  の正確な推定が  $u_*$  の計算に影響し, それが最終的に顕熱フラックスの補正にも影響する. これについては, 「結果と考察」の節でその影響について考察をする.

第3表 本研究の観測時における粗度長  $z_0$

| 風向                  | $z_0$ (m) |
|---------------------|-----------|
| 北 (33° 以下, 303° 以上) | 1.16      |
| 東 (33° から 123°)     | 0.82      |
| 南 (123° から 213°)    | 1.02      |
| 西 (213° から 303°)    | 1.04      |

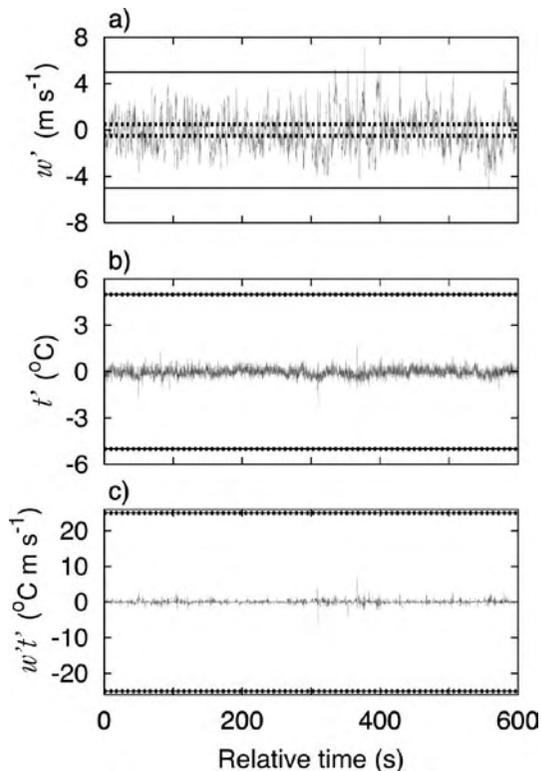
## IV 結果と考察

### 1. 鉛直風速信号の回路内での飽和

顕熱フラックスの過小評価の原因が、鉛直風速信号の回路内での飽和であることを確認するために、顕熱フラックスの過小評価が起きている時のデジタルデータを調べた。その一部を第3図に示す。 $t'$ および $w't'$ に係わる倍率設定は1994年7月7日以前も以降も問題が無く、回路の飽和が起きていないことが分かる。一方、 $w'$ の信号処理途中の増幅器の倍率K1に関しては、1994年7月7日以前の設定値(K1=10)では大きすぎ、回路内で信号が飽和してしまっている。これが原因となり、この期間の $\overline{w't'}$ が過小評価されたと考えられる。また、風速が大きい場合には、1994年7月7日以降の設定値(K1=1)においても $w'$ 信号が飽和している可能性がある。なお、各ブロック毎に回路内で飽和が起こらない鉛直風速 $w$ と温度 $t$ の入力値を第4表に示す。

### 2. 顕熱フラックスの過小評価

第4図では $\overline{w't'_a}$ と $\overline{w't'_d}$ との比(すなわち、顕熱フラックスの過小評価の割合)を $\sigma_w$ に対してプロットしている。ただし、データ選択の制限(2; フラックスの絶対値が $0.01 \text{ Kms}^{-1}$ 以上)により、 $\sigma_w$ が小さい時のデータは除外されている。 $\sigma_w$ が大きくなるにしたがい、フラックスの過小評価は最初に急激に減少し、 $\sigma_w$ が $0.7 \text{ ms}^{-1}$ を越えたあたりからは緩やかな減少を示した。 $\sigma_w$ が $1.5 \text{ ms}^{-1}$ を越えたところでは、 $\overline{w't'_a}$ は真値である $\overline{w't'_d}$ の20%程度になっている。このように、フラックスの過小評価が $\sigma_w$ によってよく表されて

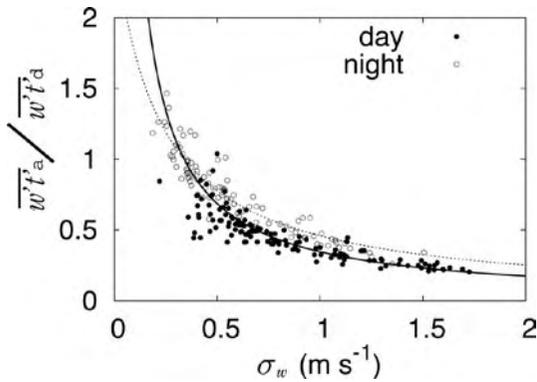


第3図 a) 鉛直風速  $w'$ , b) 温度  $t'$ , c) 鉛直風速と温度の積  $w't'$  の時間変化  
薄い実線がそれぞれの変動、濃い実線が1994年7月7日からの倍率設定で回路が飽和に達する値、点線が1994年7月7日までの倍率設定で回路が飽和に達する値である

いることから、 $\sigma_w$ をフラックスの過小評価を表す指標として用いることができる。昼間と夜間でわけてデータを見てみると、夜間の顕熱フラックスの方が昼間に比べて過小評価の割合が小さいことがわかる。これは、温度と鉛直風速との相関に関係していると考えられる。観測期間中の典型的な相関係数は、昼間と夜間に対して、それぞれ0.4と-0.2であった。この相違により、昼間の顕熱フラックスの方が、鉛直風速信号の飽和の影響をより大きく受けているようである。本研究では、昼間のみのデータを補正するため、昼間の顕熱フラックスの過小評価を表す式 $f$ が必要である。第4図を見ると、昼間の過小評価の大部分が

第4表 1994年7月7日以前と以降の倍率設定でのフラクスメータ各ブロックにおける最大許容信号値  
各ブロック通過後に10Vになる信号が記載されている。例えば、K4通過後に回路が飽和しないためには、 $w't' < 5 \text{ }^\circ\text{Cms}^{-1}$ である必要がある

| 設定<br>入力            | 1994年7月7日以前<br>K1=10, K2=10, K3=1, K4=5<br>x: 鉛直風速 1V=5 ms <sup>-1</sup><br>y: 温度 1V=50°C | 1994年7月7日以降<br>K1=1, K2=10, K3=10, K4=5<br>x: 鉛直風速 1V=5 ms <sup>-1</sup><br>y: 温度 1V=50°C |
|---------------------|---|---|
| (1) 最初の増幅器 (x10) の後 | x: 10 V=5 ms <sup>-1</sup><br>y: 10 V=50°C  | x: 10 V=5 ms <sup>-1</sup><br>y: 10 V=50°C  |
| (2) 増幅器 (K1, K2) の後 | x: 10 V=0.5 ms <sup>-1</sup><br>y: 10 V=5°C   | x: 10 V=5 ms <sup>-1</sup><br>y: 10 V=5°C   |
| (3) 乗算器 (K3) の後     | xy: 10 V=25°Cms <sup>-1</sup>   | xy: 10 V=25°Cms <sup>-1</sup>   |
| (3) 増幅器 (K4) の後     | xy: 10 V=5°Cms <sup>-1</sup>  | xy: 10 V=5°Cms <sup>-1</sup>  |



第4図 顕熱フラックスの過小評価と鉛直風標準偏差 $\sigma_w$ の関係。実線が昼間のデータに対する補正式、破線が夜間のデータに対する補正式を示す

0.8以下であることから、外挿をさけるために以下のように式 $f$ を得た。1) まず、夜間のデータに対して回帰式を得た。式の関数形としては、方程式 $y=a/(x-b)+a$ を選択し、非線型最小二乗法によりパラメータ $a$ と $b$ を決定した。パラメータ $b$ は顕熱フラックスの過小評価が無くなる時の $\sigma_w$ の値を表している。2) 昼間の過小評価がなくなる $\sigma_w$ の値を夜間の値と同じであると仮定し、パラメータ $b$ を固定して、昼間のデータから同様に回帰式のパラメータを得た(第5表)。得られた補正式を以下に示す。

第5表 非線型最小二乗法によって得られた関数型 $y=a/((x-b)+a)$ のパラメータ値、標準誤差、有意水準。夜間と昼間のデータ数は、それぞれ94と134である

|    | 係数  | 推定                | 標準誤差  | 有意水準                  |
|----|-----|-------------------|-------|-----------------------|
| 夜間 | $a$ | 0.56              | 0.030 | $2.0 \times 10^{-16}$ |
|    | $b$ | 0.34              | 0.007 | $2.0 \times 10^{-16}$ |
| 昼間 | $a$ | 0.35              | 0.016 | $2.0 \times 10^{-16}$ |
|    | $b$ | 0.34 <sup>b</sup> |       |                       |

<sup>b</sup>夜間の $b$ と同一。

$$\overline{w't'_d} = \frac{1}{f(\sigma_w)} \overline{w't'_a}$$

$$f(\sigma_w) = \begin{cases} \frac{0.35}{(\sigma_w - 0.34) + 0.35} & \sigma_w \geq 0.34 \\ 1 & \sigma_w < 0.34 \end{cases} \quad (6)$$

$\sigma_w$ が $0.34 \text{ ms}^{-1}$ 以下ではアナログ測定によるフラックス $\overline{w't'_a}$ が真値を表していると仮定した。実際には、 $\sigma_w$ が $0.34 \text{ ms}^{-1}$ 以下ではフラックスの絶対値が小さいために、フラックス比が1にはならず値がばらついてしまうが、これはフラックスの絶対値が小さいことに起因する計算の不安定さの結果である。顕熱フラックスの過小評価は、 $\sigma_w$ が $0.7 \text{ ms}^{-1}$ 以上では比較的良好に式6の近くに分布しているが、 $\sigma_w$ が $0.7 \text{ ms}^{-1}$ 以下ではばらつきが大きくなっている。これが顕熱フラッ

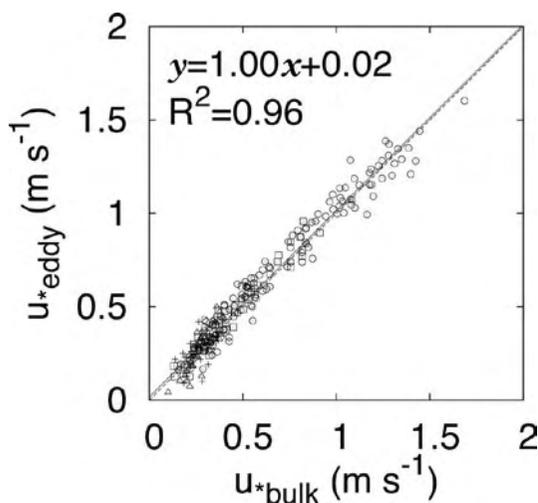
クスに与える影響は、顕熱フラックスの大きさによって異なることが考えられる。すなわち、顕熱フラックスの値が小さければ、最終的な補正にはあまり影響しないが、顕熱フラックスが大きければ影響も大きい。

### 3. 鉛直風速の標準偏差

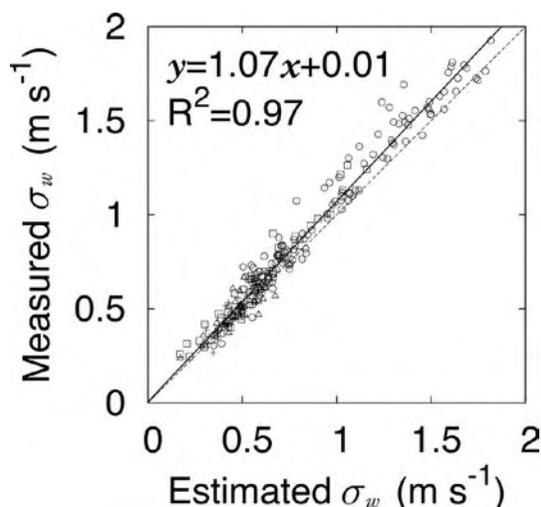
以上の解析により、顕熱フラックスの過小評価を見積もる上で、 $\sigma_w$ の有効性が示された。しかしながら、過去の観測では $\sigma_w$ の記録が残されていない。よって、以下では「過小評価の推定」の節で述べた $\sigma_w$ の推定方法の有効性とその精度について調べる。鉛直風速標準偏差の接地層普遍関数(式3)から $\sigma_w$ を算出するためには、 $u_*$ と $\zeta$ が必要である。そこで、式4のバルク式を用いた再帰的計算によって $u_*$ を算出した。 $z_0$ は第3表に示されている値を用いた。第5図はそのバルク法によって計算した摩擦速度 $u_{*bulk}$ と渦相関法によって計算した摩擦速度 $u_{*eddy}$ の比較である。回帰直線の傾きはほぼ1に等しい。両者がよく一致していることから、 $z_0$ の値が正確にわかっている

場合には、バルク式から $u_*$ を精度よく求めることができると言える。計算において過小評価を含んだ顕熱フラックス $\overline{w't'_a}$ を用いているが、得られる $u_*$ の値には大きく影響していない。その理由は、上述したように、強い不安定時には大気安定度補正関数 $\Psi$ が大気安定度に大きく依存しないからである。

次に、バルク法によって得られた $u_{*bulk}$ を用いて、式3から $\sigma_w$ を求めた。推定された $\sigma_w$ と測定された $\sigma_w$ の比較が第6図で示されている。回帰直線の傾きは1.07となり、推定された $\sigma_w$ が過小評価されている結果となった。この原因は、式3を適用する際に過小評価された顕熱フラックスである $\overline{w't'_a}$ から $\zeta$ を算出していることである。これより、不安定度 $(-\zeta)$ が実際より小さく計算され、結果的に $\sigma_w$ の過小評価につながっている。特に、 $\sigma_w$ が1.0以上の時に、絶対値としての過小評価が大きい。しかしながら、第4図からわかるように、 $\sigma_w$ が1.0以上の時はフラックスの過小評価の割合が $\sigma_w$ に対して大きくは変化しないことから、顕熱フラックスの補正への影響は緩和されると考えられる。



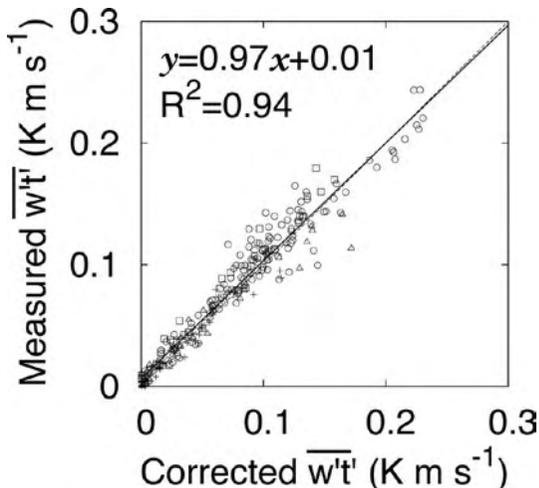
第5図 バルク法で求めた摩擦速度 $u_{*bulk}$ と渦相関法で求めた摩擦速度 $u_{*eddy}$ の比較。  
□：北，+：東，△：南，○：西。実線は回帰直線を示す



第6図 推定された鉛直風標準偏差と測定された鉛直風標準偏差の比較。□：北，+：東，△：南，○：西。実線は回帰直線を示す

#### 4. 顕熱フラックスの補正

第7図は補正が施された顕熱フラックスとデジタルデータから渦相関法によって計算された顕熱フラックスの比較である。回帰直線の傾きは0.97であり、1にとっても近い。 $\sigma_w$ の推定時には過小評価が見られたが、上述した理由により、顕熱フラックスの補正には大きくは影響していない。顕熱フラックスが0.1から0.2の間で誤差が大きくなっているのは、補正式(式6)の精度が $\sigma_w$ が $0.7 \text{ ms}^{-1}$ 以下の範囲に対して不十分であることが原因だと考えられる。顕熱フラックスの値が大きくなると、補正式と実際のフラックスの過小評価の差が大きくなるという条件が重なった時に、顕熱フラックスの誤差が大きくなる。



第7図 補正された顕熱フラックスと測定された顕熱フラックスの比較。□：北，+：東，△：南，○：西。実線は回帰直線を示す

#### 5. 過去のデータ補正時の精度の評価

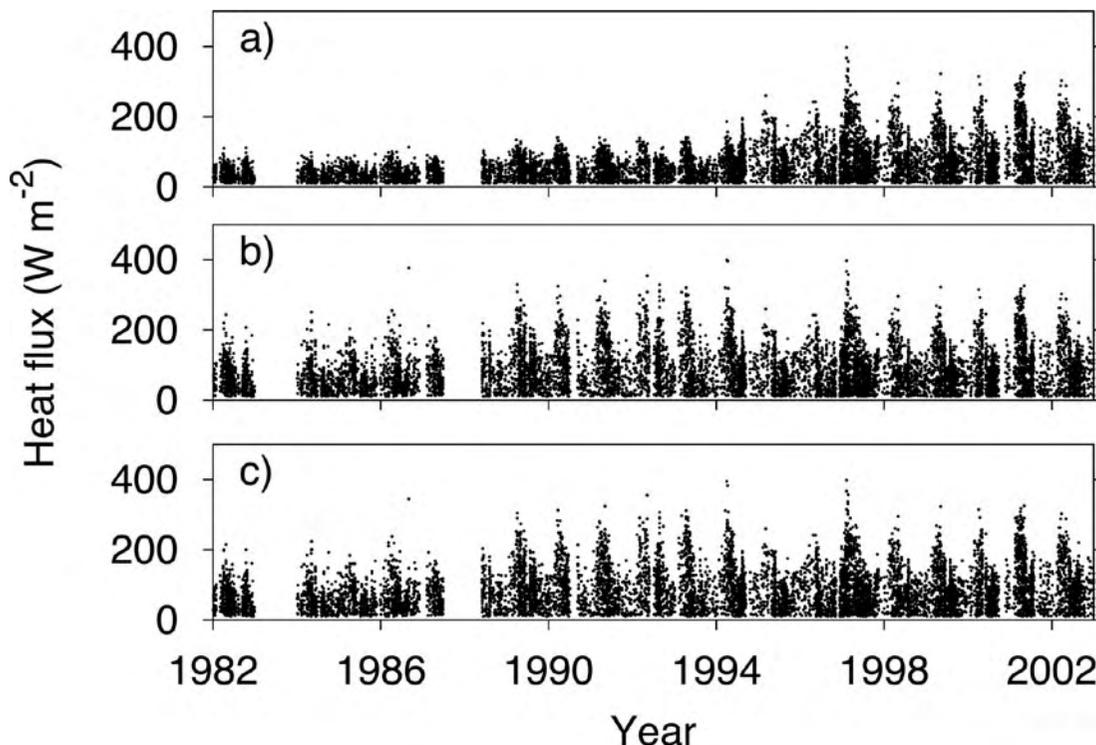
以上は、正しい $z_0$ が既知であるという前提のもとでの結果である。過去のデータにおいては、 $z_0$ の推定記録が残されていることは稀であり、何らかの方法で推定しなければならない。その $z_0$ の推定が過大、もしくは過小評価されていた場合には、顕熱フラックスの補正にも影響を与える。よって、本研究で観測されたデータを用いて、 $z_0$ を第3表に示した値から変化させて、顕熱フラックスの補正を行った。それにより、 $z_0$ の推定誤差が結果である顕熱フラックスの補正に与える影響を評価した。第6表は $z_0$ を0.5倍から2倍に変化させた時の顕熱フラックス補正の結果を示している。RMSEはデジタルデータから計算された顕熱フラックスと補正が施された顕熱フラックス間の平均二乗誤差、傾き・切片は両フラックスに線形回帰を行った結果である。結果より、 $z_0$ が0.5倍から1.5倍の誤差を持つ場合には、顕熱フラックスの補正にも $\pm 15\%$ 程度の誤差が生じるようである。

第8図は過去の顕熱フラックスデータに補正を適用した結果を示している。顕熱フラックスは1時間平均値であり、昼間の南風の時のみを示して

第6表  $z_0$ の推定誤差が顕熱フラックスの補正結果に及ぼす影響

| $z_0$     | RMSE                  | 傾き   | 切片    |
|-----------|-----------------------|------|-------|
| $0.5z_0$  | $3.40 \times 10^{-4}$ | 1.11 | 0.005 |
| $0.75z_0$ | $2.24 \times 10^{-4}$ | 1.03 | 0.005 |
| $z_0$     | $1.82 \times 10^{-4}$ | 0.97 | 0.006 |
| $1.25z_0$ | $1.97 \times 10^{-4}$ | 0.91 | 0.007 |
| $1.5z_0$  | $2.61 \times 10^{-4}$ | 0.86 | 0.008 |
| $2z_0$    | $5.05 \times 10^{-4}$ | 0.78 | 0.009 |

いる。第8図a)は補正前の顕熱フラックスを示しており、1994年以前の顕熱フラックスが極端に小さく、1998年以降と比べると半分以下になっている。第8図b)とc)は異なる $z_0$ の推定を用いて補正を行った結果である。前者では、本研究の観測時に得られた $z_0$ (=1.02)を過去すべての期間に対して適用しており、後者では1992年の $z_0$ (0.80: Hiyama *et al.*, 1996)と本研究で得られた $z_0$ とを線形で内外挿した $z_0$ の値を用いている。第8図b)では、一定の $z_0$ が用いられているため、第8図c)よりも補正量が大きくなっている。過去の $z_0$ の値は正確には分からないが、その推定が実際の $z_0$ の0.5倍から1.5倍の範囲であると仮



第8図 南風時，昼間のみを選択した1時間平均の顕熱フラックスの経年変化. a) 補正前. b) 2005年時の粗度長  $z_0$  を過去に適用. c) 1992, 2005年の粗度長  $z_0$  を線形内外挿して補正

定すると，顕熱フラックスも  $\pm 15\%$  以内の精度で得られていると言える．この補正の正確さは，過去の  $z_0$  の推定の正確さに依存していることに注意をする必要である．

最後に，タワーを通して吹いてきた風に対して以上の補正方法が適用できるかを調べた．風がタワーを通して吹いている場合は，タワーの影響が観測値に反映されていると考えられる．過去の観測においては，SATが南東方向（123度）にしか設置されていないため，そのような状況での補正方法の適用性を調べた．そのために，風向と逆向きに設置されているSATで測定されたデータを用いて顕熱フラックスの補正を行い，その結果を風向向きに設置されているSATで測定された真値の顕熱フラックスと比較を行った．その結果，顕熱フラックス間のRMSEは， $1.89 \times 10^{-4}$ で，

回帰直線の傾きと切片は，それぞれ0.97と0.007であった．これらの値は，タワーを通して吹いていない場合の結果とほぼ同じである（第6表）．このことから，本研究の補正方法はタワーを通して吹いてくる風に対しても有効であると言える．

## V まとめ

陸域環境研究センター（TERC）では，1981年より連続して気象観測を行っているが，フラックスメータ内の増幅器の設定エラーにより，顕熱フラックスが過小評価されていたことが最近になって判明した．よって，本研究では，過小評価された顕熱フラックスを再現し，同時に過小評価を受けていないデータをデジタル測定することにより，顕熱フラックスの過小評価の割合とそれを補

正する方法を得た。その結果と考察を以下にまとめる。この方法では、 $u_*$  をバルク法から求める必要があるので、昼間のデータのみにも適用を限定した。

1. 顕熱フラックスの過小評価が起こっている時のデジタルデータを調べることで、過小評価の原因が鉛直風速  $w'$  の回路内飽和であることを確認した。また、1994年7月7日以降においても、風速が大きい場合には  $w'$  信号の飽和が発生している可能性があり、今後その影響を調べる必要がある。
2. 顕熱フラックスの過小評価は、鉛直風速の標準偏差  $\sigma_w$  によって表すことができ、 $\sigma_w$  が増加するにつれて急激に過小評価は大きくなり、 $\sigma_w$  が  $0.7 \text{ ms}^{-1}$  を越えたあたりからは過小評価は緩やかに大きくなった。過小評価を表す式は、 $\sigma_w$  が  $0.7 \text{ ms}^{-1}$  以上では、比較的データと一致しているが、 $0.7 \text{ ms}^{-1}$  以下ではフラックスの過小評価を正確に表さない場合もある。その際に、実際の顕熱フラックスが大きいと絶対値としての誤差も大きくなる。
3.  $\sigma_w$  を残された過去のデータから推定するために、まず、摩擦速度  $u_*$  をバルク式から得た。この  $u_*$  の推定は、粗度長  $z_0$  が正確に分かっていることを条件として、バルク式から正確に求めることができる。そして、接地層での普遍関数を用いて  $\sigma_w$  を推定した。この時、過小評価を受けた顕熱フラックスを用いて大気安定度を計算しているため、推定された  $\sigma_w$  は、特に  $\sigma_w$  が1以上で過小評価が大きくなった(約7%)。しかし、 $\sigma_w$  が1以上の時は、フラックスの過小評価が  $\sigma_w$  に対して大きくは変化しないので、フラックスの補正に及ぼす影響は小さい。

4. 本研究で得た補正方法によって過小評価されている顕熱フラックスの補正が可能である。しかし、この補正の精度は  $u_*$  を求める際の  $z_0$  の推定精度に依存している。 $z_0$  の推定が実際の  $z_0$  の0.5倍から1.5倍の範囲である場合には、顕熱フラックスを $\pm 15\%$ 以内で補正することができる。
5. 本研究での補正方法は、風がタワーを通して吹いている時のデータにも適用可能である。

## 文献

- 浅沼 順・野原大輔・原 政之・寄崎哲弘 (2004): 第3世代気象・水文観測データ収集・公開システムについて。筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 157-174.
- 桜 久美子・新村典子・木村富士男 (1999): 長期データを用いた草原の熱収支の変動について。筑波大学水理実験センター報告, **24**, 97-106.
- 田 少奮・杉田倫明 (1996): 熱収支・水収支観測資料-1994年・1995年-。筑波大学水理実験センター報告, **21**, 61-115.
- 鳥谷 均・川村隆一・嶋田 純・谷口真人・西本貴久 (1989): 気象日報作成装置新システムについて。筑波大学水理実験センター報告, **13**, 147-158.
- 福田友紀子 (1998): 広域の地表面被覆変化が熱収支に与える影響。筑波大学第一学群自然科学類卒業研究論文, 52p.
- 光田 寧・花房龍男・藤谷徳之助 (1973): 乱流輸送量の実時間測定法について。京都大学防災研究所年報, **16B**, 305-317.
- Foken, T. and Wichura, B. (1996): Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agri. For. Meteorol.*, **78**, 83-105.

Hiyama, T., Sugita, M. and Kotoda, K. (1996):  
Regional roughness parameters and  
momentum fluxes over a complex area, *J.*  
*Appl. Meteorol.*, **35**, 2179-2190.

Kaimal, J. and Finnigan, J. J. (1994): *Atmospheric*

*Boundary Layer Flow*, Oxford Univ. Press,  
New York, 289p.

(2006年8月14日受付, 2006年9月20日受理)



## 熱収支・水収支観測資料 - 2005 年 -

Observational Data of Heat Balance and Water Balance  
- 2005 -

渡来 靖\*・山中 勤\*

Yasushi WATARAI\* and Tsutomu YAMANAKA\*

### I はじめに

この「熱収支・水収支観測資料」は、筑波大学陸域環境研究センター(TERC)の直径160mを有する実験圃場でルーチン観測を行っている熱収支・水収支関係要素の、2005年における観測値を研究資料として整理したものである。TERC圃場におけるルーチン観測は、1981年8月以降24年余にわたる長期データが蓄積された事を受けて、新たに全期間で一貫したクオリティコントロールを施したデータ(Ver. 2.0データ)を作成した(渡来ほか, 2006)。本資料で用いられたデータは、Ver. 2.0データの日平均値および日積算値である。ただし、風向に関しては月別風向別頻度を掲載した。

測定に用いられる機器は、年一回の保守・点検を行い、測器の精度を保つようにしている。2005年は3月22日に行った。また、10月15~16日は停電のため、日中は予備電源へつなぎかえて観測を行った。

1993年以降、圃場内は年1回冬季のみに草刈りを行ってきたが、夏季から秋季の草丈が年々高くなり、圃場内の地上観測に支障が出始めたた

め、夏季、冬季の年2回草刈りを実施することとなった。2005年は7月20~22日と11月19~22日に行われた。

### II 観測要素および観測測器の説明

#### 1. 風向 : Wind Direction

観測用鉄塔の高度29.5m南東側に設置されている超音波風速温度計によって測定されている。値は、正時の10分間平均値である。

渡来ほか(2006)で述べられているように、2005年の風向データにはバイアスが見られた。そこで、渡来ほか(2006)と同様に-39.31度の補正値を加えて風向の値とした。

#### 2. 風速 : Wind Speed

観測用鉄塔に取り付けた超音波風速温度計によって得られた水平風速の日平均値である。測定高度は地表面から1.6mおよび29.5m、単位はm/sである。

1997年8月1日以降、高度29.5mでは、超音波風速温度計が観測用鉄塔の南東及び北西側に設置してある。このため、本資料においても昨年

\* 筑波大学陸域環境研究センター

と同様に、29.5m の値として、日平均風向が 33–213 度のときは南東側の値を、0–33 度及び 213–360 度のときは北西側の値を採用した。また、風向が欠測の場合は、南東側と北西側の平均値とした。

また、1997 年から主風向の成分として北成分が強くなる秋に高度 1.6 m の南東側のものを北西側に、逆に南成分が強くなる春に北西側のものを南東側に付けかえる作業を行っている。2005 年は、4 月 6 日に北西のもの（高度 1.6m）を南東に移動させ、12 月 22 日に南東のものを北西に移動させた。なお、2004 年までは草丈の生長にともなって、夏場に 1.6 m のものを 2.15 m に持ち上げる作業を行っていたが、2005 年は夏季にも草刈りを行ったため、持ち上げ作業は行わなかった。

### 3. 運動量フラックス : Momentum Flux

超音波風速温度計によって測定された水平風速の変動成分  $u'$ 、垂直風速の変動成分  $w'$  から得られる 2 つの変動量の積の平均  $\overline{u'w'}$  の日平均値である。上向きを正としており、単位は  $\times 0.1\text{m}^2/\text{s}^2$  である。測定高度は地表面から 1.6 m および 29.5 m である。1 時間平均値に 1 つでも欠測あるいは異常が見られる場合にはその日の日平均値を欠測とした。詳しくは齊藤・浅沼（2004）を参照されたい。

高度 1.6 m および 29.5 m での観測の詳細は、2 に記述したものと同様である。

### 4. 顕熱フラックス : Sensible Heat Flux

超音波風速温度計によって測定された鉛直風速および気温の変動量の積の平均  $\overline{w'T'}$  の日平均値である。上向きを正としており単位は  $\times 0.1^\circ\text{C} \cdot \text{m}/\text{s}$  である。測定高度および欠測処理は運動量フラックスと同様である。詳しくは齊藤・浅沼（2004）を参照されたい。

高度 1.6 m および 29.5 m での観測の詳細は、2

に記述したものと同様である。

### 5. 全天短波放射量 : Total Short-wave Radiation

熱電対式全天日射計を地表面から高度 1.5 m に設置して測定した値の日平均値である。単位は  $\text{W}/\text{m}^2$  である。

### 6. 正味放射量 : Net Radiation

通風型熱電対式放射収支計を地表面から高度 1.5 m に設置して測定した値の日平均値である。単位は  $\text{W}/\text{m}^2$  である。

### 7. 地中熱流量 : Soil Heat Flux

熱電対式地中熱流板によって得られた日平均値で、測定深度は地表面から 2 cm である。2005 年 3 月 22 日に、新型の熱電対式地中熱流板に交換・移設された。単位は  $\text{W}/\text{m}^2$  である。

### 8. 日照時間 : Sunshine Duration

研究棟の屋上に設置した回転式日照計によって得られた日積算値である。2004 年 10 月 17 日以降、日照時間のデータは不良な状態が続いている。本資料では図表の掲載を省略した。

### 9. 気温 : Air Temperature

観測用鉄塔の北東側に取り付けた通風式白金抵抗温度計によって得られた日平均値である。測定高度は地表面から 1.6 m、12.3 m および 29.5 m、単位は  $^\circ\text{C}$  である。

### 10. 地温 : Soil Temperature

直径 10 mm、長さ 15 cm の防水型白金抵抗温度計によって得られた日平均値である。測定深度は地表面から 2 cm (ST-1)、10 cm (ST-2)、50 cm (ST-3) および 100 cm (ST-4) であり、単位は  $^\circ\text{C}$  である。センサーは深度 1 m の穴の側壁に地表面と平行に挿入し、埋土した。2005 年 3 月 22 日に、新たなセンサーに交換・移設された。

## 11. 地下水位：Ground Water Level

地表面から地下水面までの深さの日平均値で単位は m である。観測には水圧式水位計が使用された。測定深度は、2.2 m 深（GW-1、スクリーン深度は 0.7～2 m）、10.0 m 深（GW-2、同 8～9 m）と新 2.0 m 深（GW-4、同 0.5～2 m）の 3 種類であるが、うち 2.2 m 深（GW-1）は 2005 年 7 月 22 日に運用を停止した。

## 12. 露点温度：Dew Point Temperature

観測用鉄塔の南西側に取り付けられた塩化リチウム露点温度計によって得られた日平均値である。単位は℃、測定高度は気温と同様である。

## 13. 降水量：Precipitation

1 転倒 0.5 mm、直径 20 cm の転倒ます型隔測自記雨量計を使用して測定された。単位は mm（水深換算）で、日積算値である。

## 14. 蒸発散量：Evapotranspiration

直径 2 m、深さ 2 m の円筒型容器に不攪乱の土（関東ローム）を詰めたウェイングライシメータにより測定された。総重量は約 9 トンであり、蒸発あるいは降水による重量変化を ± 250 kg（水深換算約 80 mm）の範囲で測定できる。秤量感度は 100 g（水深換算 0.032 mm）である。単位は mm（水深換算）で、日積算値である。降水日には雨量計で測定された日降水量をライシメータの生の測定値に加えた値を真の日蒸発散量とした。ただし、その結果が -0.5 より小さい時は欠測、-0.5～0 の場合は雨量計の測定誤差を考慮して 0.0 とした。さらに、何らかの理由でウェイングライシメータの雨量測定値が雨量計のそれより小さい場合があると日蒸発散量が過大評価されてしまうので、そのような時には蒸発散量を欠測としてある。観測期間中欠測日が少なからず存在するが、これは降水後の強制排水前後における乱れや、点検・調整などが主な原因である。田・杉田

（1996）の記述のとおり、ライシメータの秤の感度の問題でデータの信頼性には若干の問題が残されていた。データの平均化処理を行うコントローラ（MUC-175SZ：ミュー精器株式会社）をライシメータの秤の感度の問題を解決するために 1998 年 8 月 14 日よりコントローラを使用し計測している。現在はコントローラを導入することにより、風の影響は取り除かれるようになった。

しかしながら平均化処理をほどこしたことにより、測器の劣化によるものと考えられる影響が測定値に含まれていることが発覚した。ただし、日ベースのデータとしては信頼できると考えられる。詳細については新村・杉田（1999）を参照されたい。

齊藤・山中（2005）はセンター圃場のライシメータで観測された蒸発散量の長期解析を行い、降水直後のデータに水漏れの影響と思われる過大評価傾向が現われていることなどを指摘した。本資料で用いたデータでは、この過大評価に関する補正も行った。詳しくは渡来ほか（2006）を参照されたい。

## 15. 気圧：Atmospheric Pressure

観測用鉄塔直下の計測ボックス内に設置された気圧計（PTB210：ヴァイサラ株式会社）において測定された。単位は hPa である。

## III おわりに

本資料は 1980 年に出版した「熱収支・水収支観測資料（1）」（1977 年 8 月 - 1979 年 3 月）、1988 年に出版した「熱収支・水収支観測資料（2） - 熱収支編 -」（1981 年 7 月 - 1987 年 12 月）、1989 年に出版した「熱収支・水収支観測資料（3） - 水収支編 -」（1981 年 8 月 - 1987 年 12 月）、に続いて 1 年ごとにまとめられ（渡来・山中、2005 など）、水理実験センター報告及び陸域環境研究センター報告に掲載されている「熱収支・水収支

観測資料」の2005年分のものである。

これらの観測値のさらに高度な利用を望まれる研究者に対しては、1時間平均値あるいは積算値が、陸域環境研究センターのホームページ (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/>) の熱収支・水収支観測圃場日報データベース (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/database.html>) に保管されている。また2003年5月1日以降は、10秒平均値及び30分平均値データも保管してある。データの集録・処理方法については浅沼ほか(2004)を参照されたい。

さらに、2003年4月以前の気象日報(原簿)および自記打点記録紙などの保管されている原資料の利用も可能である。2003年以前のデータの集録・処理方法については鳥谷ほか(1989)を、1987年以前のデータの集録・処理方法については古藤田ほか(1983)を参照されたい。

TERC 圃場における24年余にわたるルーチン観測データは、Ver. 2.0 データという形でクオリティコントロールがなされ、「TERC 熱収支・水収支観測データベース図表集」としてまとめられた(渡来ほか, 2006)。Ver. 2.0 データは今後、陸域環境研究センターのホームページ上で公開される予定である。

## 謝辞

陸域環境研究センター研究支援推進員の吉田瑞穂さんには、データのクオリティチェックと作図・作表に協力頂いた。本資料の全ての図は、The Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1991) を用いて作成されたものである。

## 文献

浅沼 順・野原大輔・原 政之・寄崎哲弘  
(2004): 第3世代気象・水文観測データ収  
集・公開システムについて。筑波大学陸域環

境研究センター報告, **5**, 157-174.

古藤田一雄・甲斐憲次・中川慎治 (1983): 気象  
日報作成装置について。筑波大学水理実験セ  
ンター報告, **7**, 75-85.

齊藤 誠・浅沼 順 (2004): 陸域環境研究セ  
ンター熱収支・水収支観測圃場におけるフ  
ラックスデータのシステム間比較と信頼  
性。筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**,  
87-97.

齊藤 誠・山中 勤 (2005): ウェイングライシ  
メータによる蒸発散量長期観測データの解析  
とクオリティコントロール。筑波大学陸域環  
境研究センター報告, **6**, 53-62.

田 少奮・杉田倫明 (1996): 熱収支・水収支観  
測資料 - 1994年・1995年 -。筑波大学水理  
実験センター報告, **21**, 61-115.

鳥谷 均・川村隆一・嶋田 純・谷口真人・西本  
貴久 (1989): 気象日報作成装置新システム  
について。筑波大学水理実験センター報告,  
**13**, 147-158.

新村典子・杉田倫明 (1999): ウェイングライシ  
メータによる蒸発散量のばらつきの改善につ  
いて。筑波大学水理実験センター報告, **24**,  
107-115.

渡来 靖・藪崎志穂・山中 勤 (2006): TERC  
熱収支・水収支データベース図表集。筑波大  
学陸域環境研究センター報告, **7 別冊**, 97p.

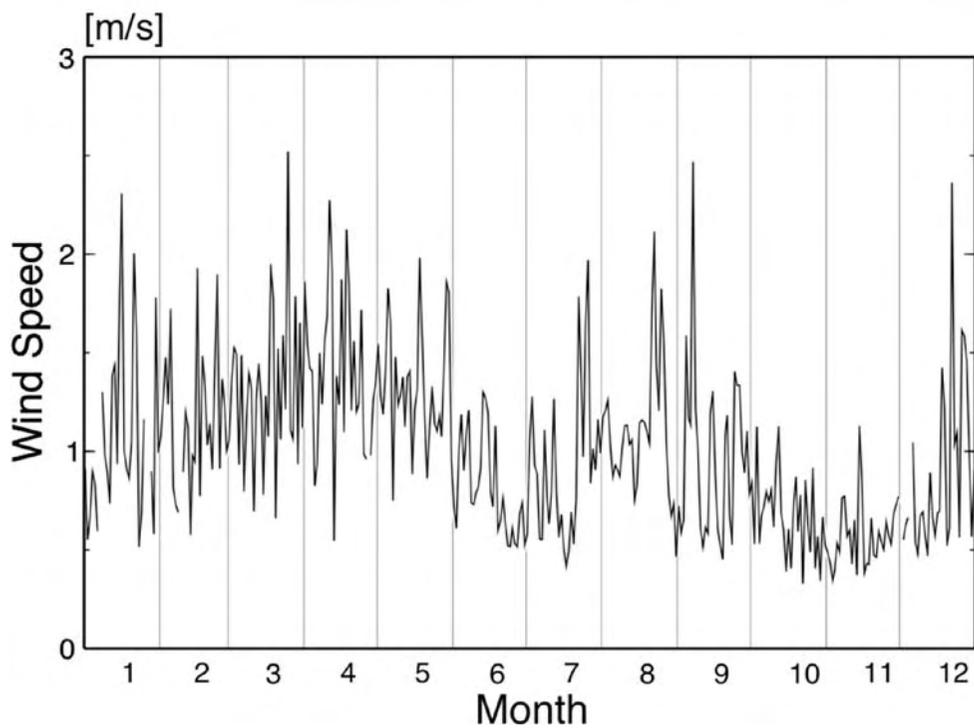
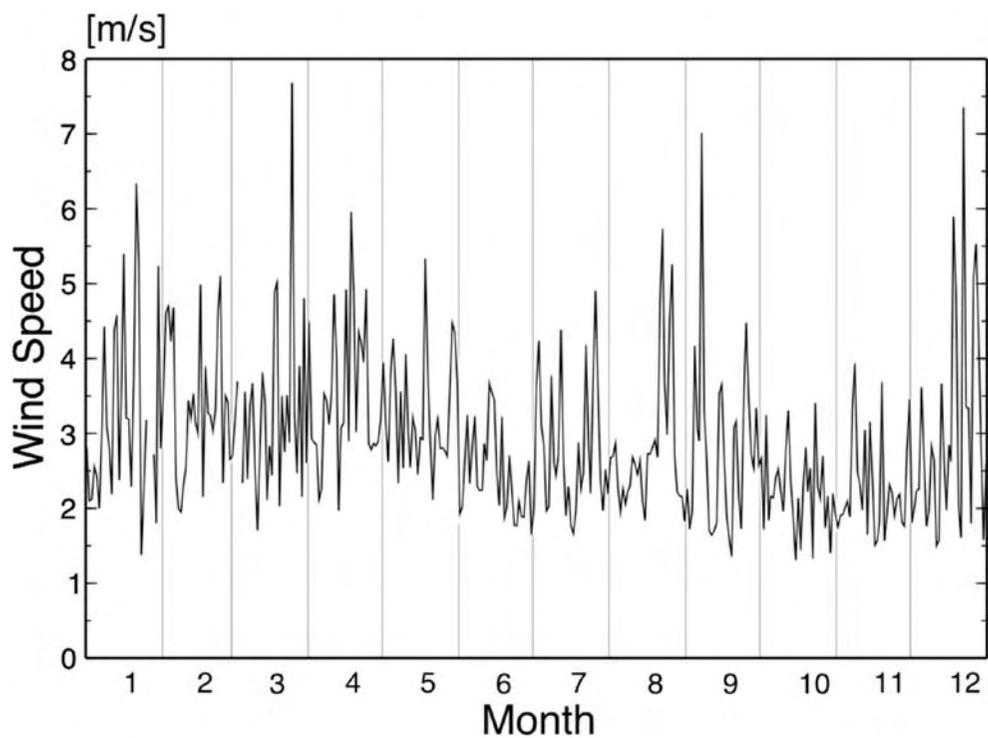
渡来 靖・山中 勤 (2005): 熱収支・水収支観  
測資料 - 2004年 -。筑波大学陸域環境研究  
センター報告, **6**, 63-88.

Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1991): Free  
software helps map and display data. *EOS*  
*Trans. Amer. Geophys. U.*, **72**, 445-446.

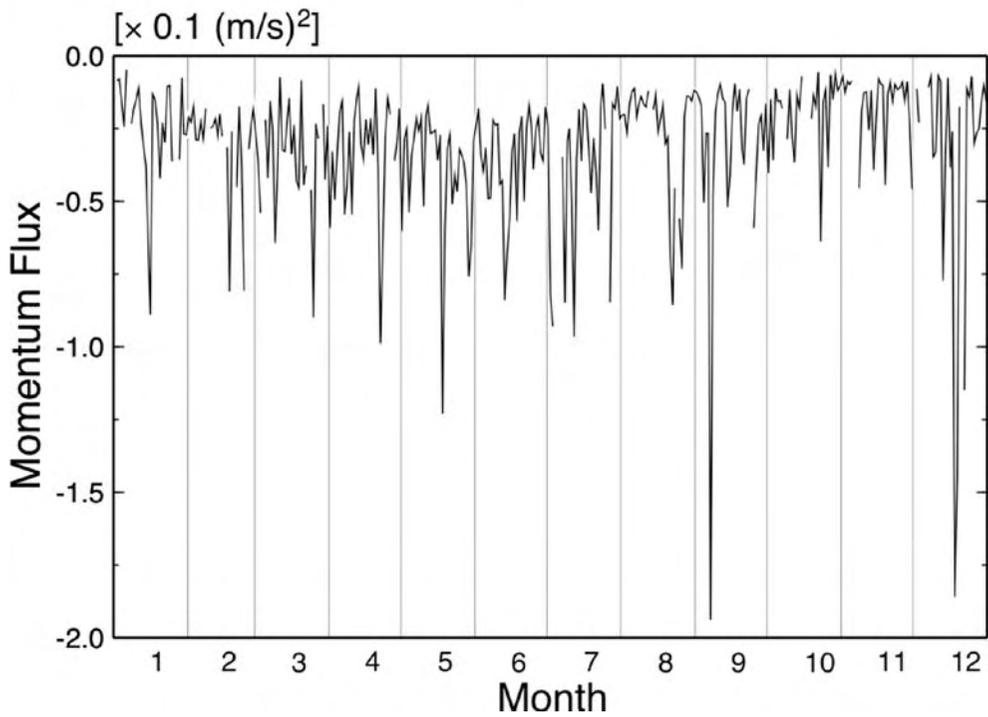
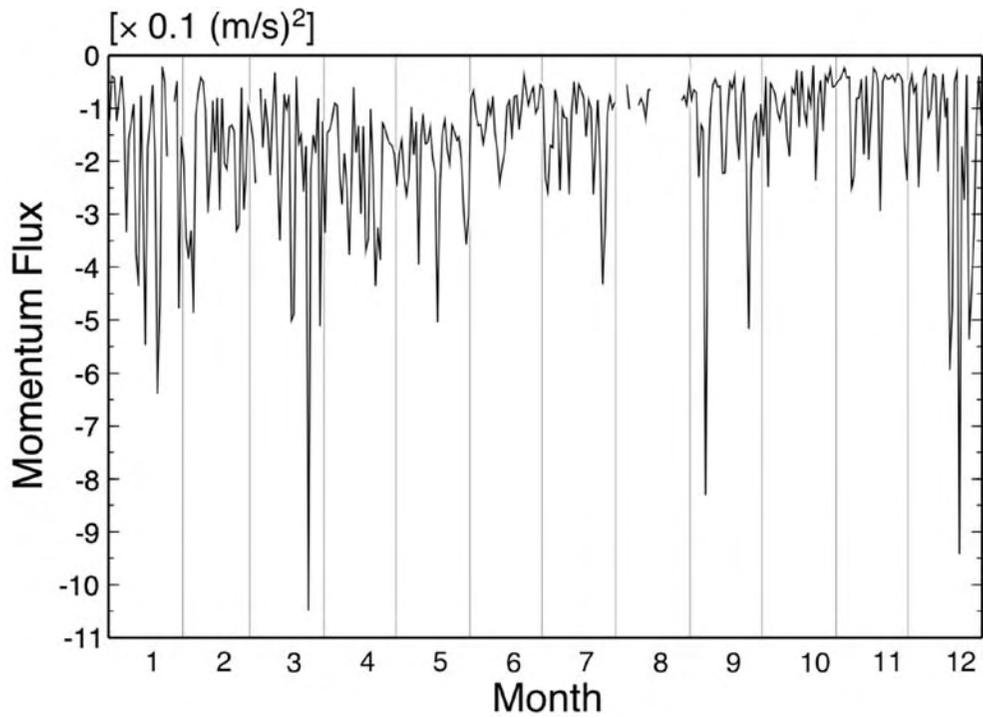
## 気象・水文表

### 表の見方

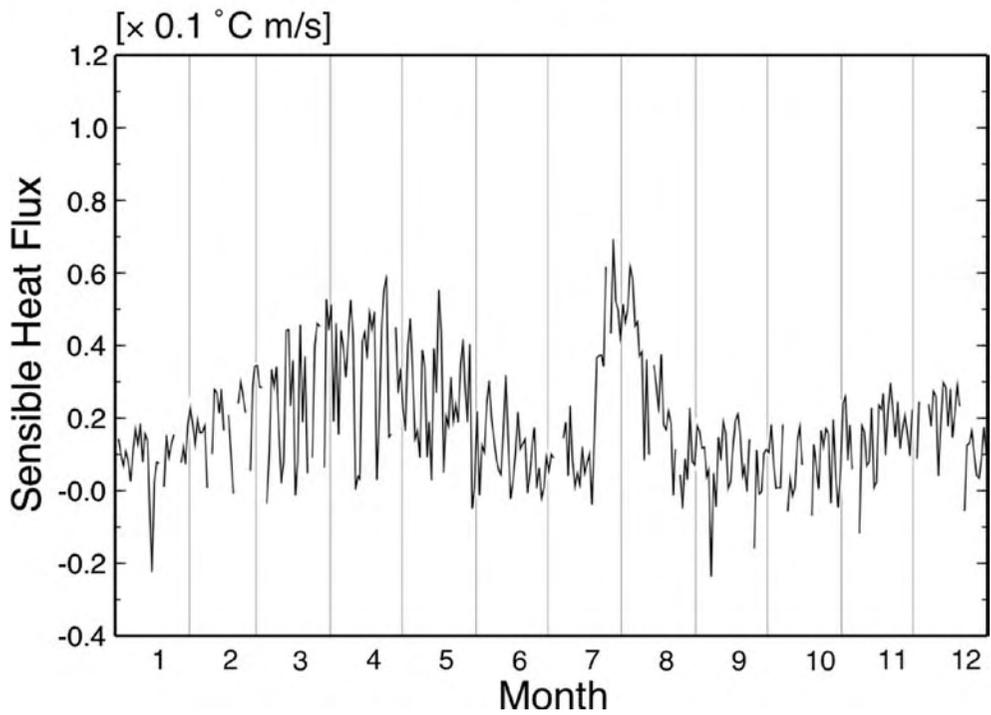
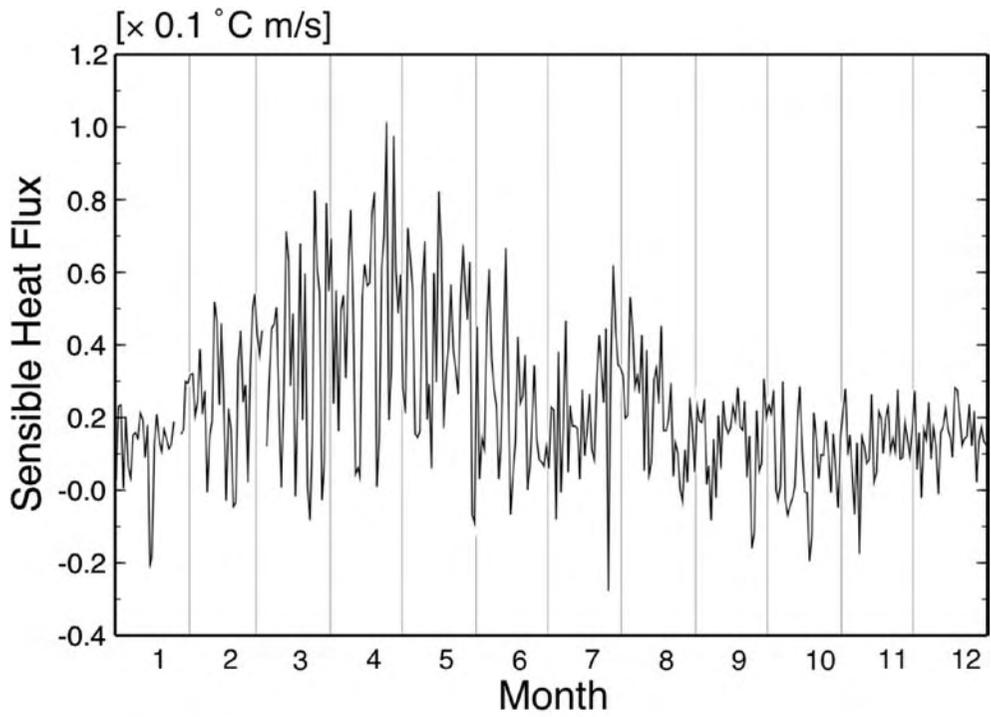
- (1) ITEM は観測要素, INSTRUMENT は観測測器を示す.
- (2) UNIT に関して, MONTHLY FREQUENCY は月毎の頻度を示す.
- (3) 表の横軸は月, 縦軸は日である.
- (4) 表中の \*\*\* は欠測を, …は対応する日がないことを示す.
- (5) NO DATA は欠測頻度を示す.
- (6) MEAN は月平均値, TOTAL は月積算値を示す.



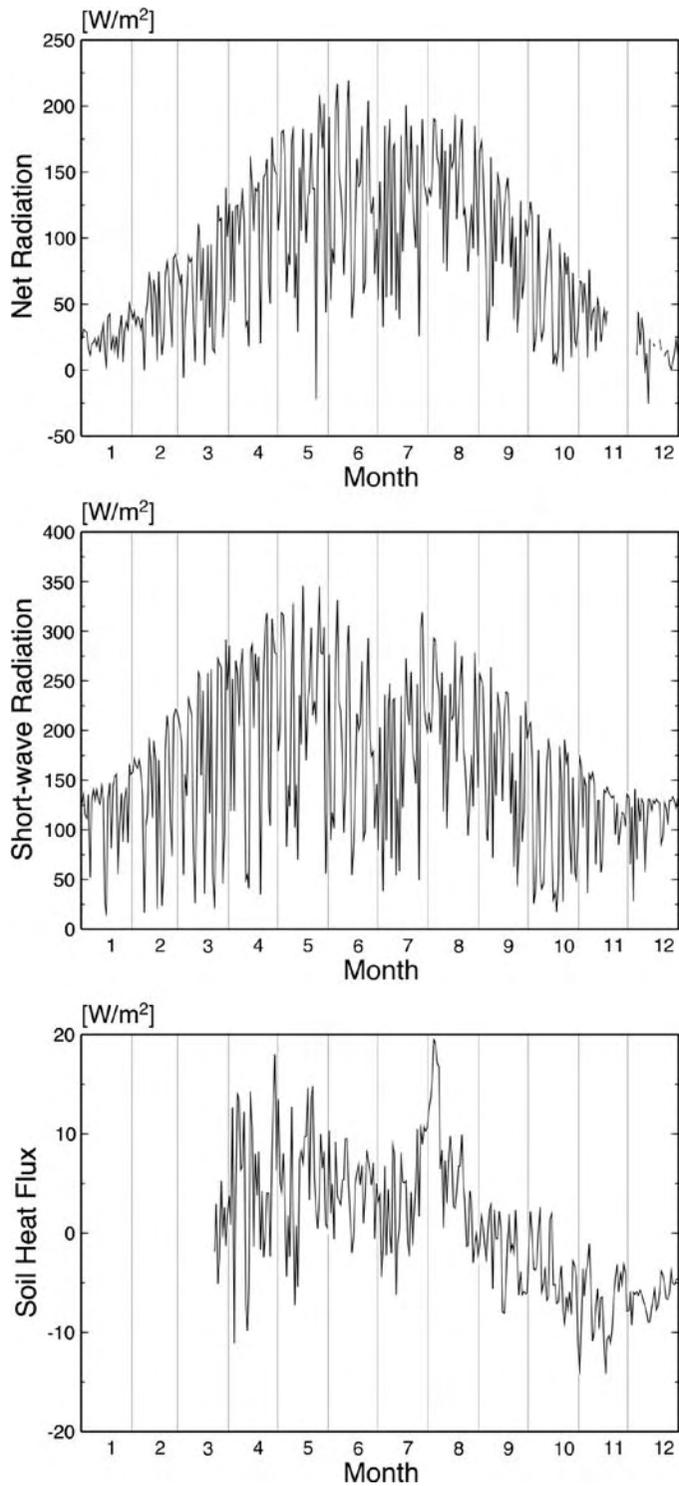
第1図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における風速の日平均値の季節変化



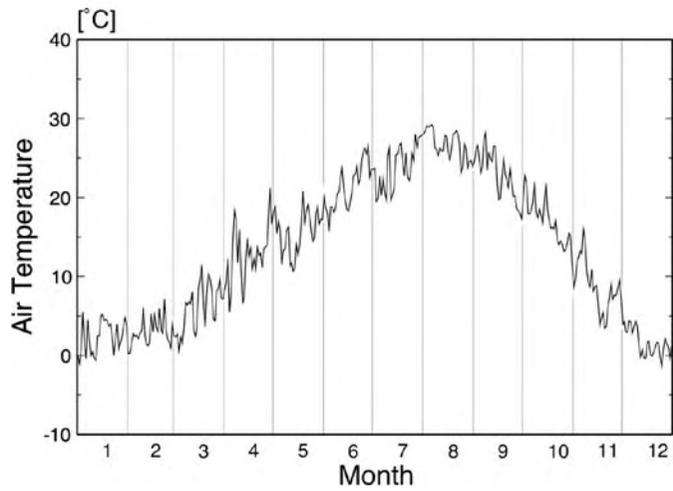
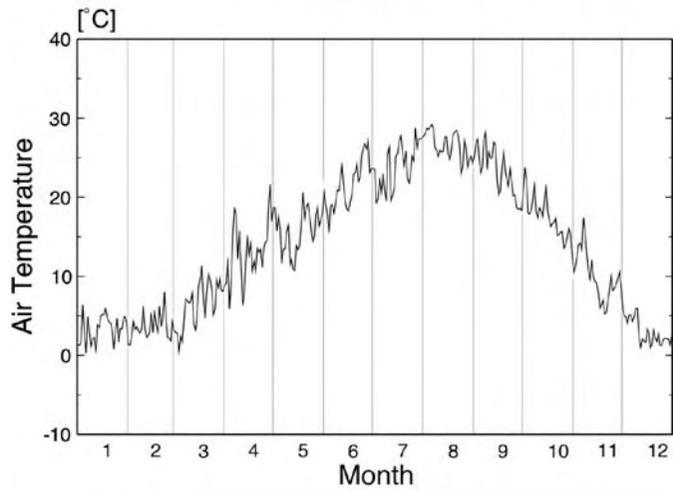
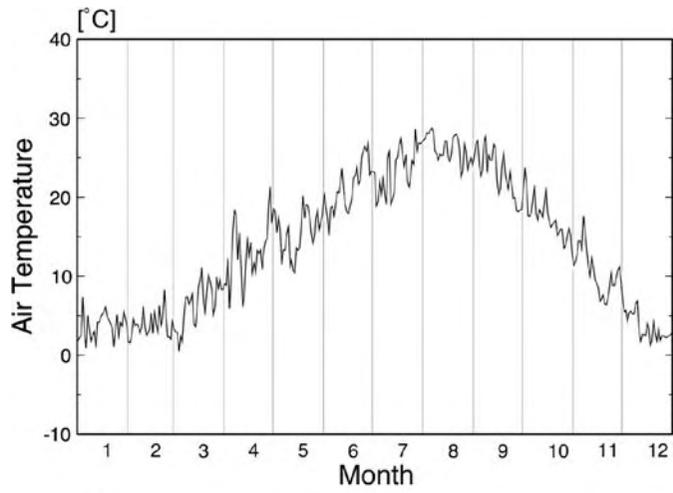
第2図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における運動量フラックスの日平均値の季節変化



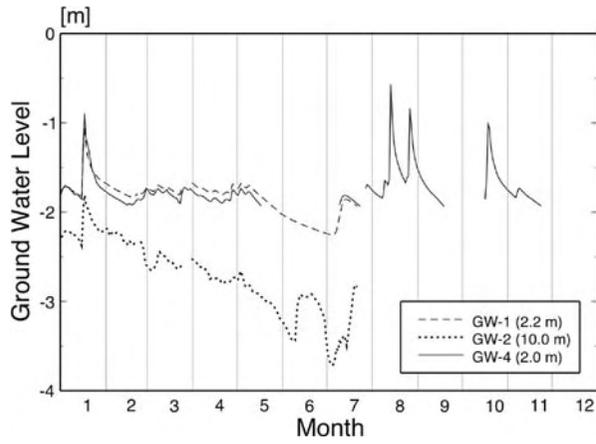
第3図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における顕熱フラックスの日平均値の季節変化



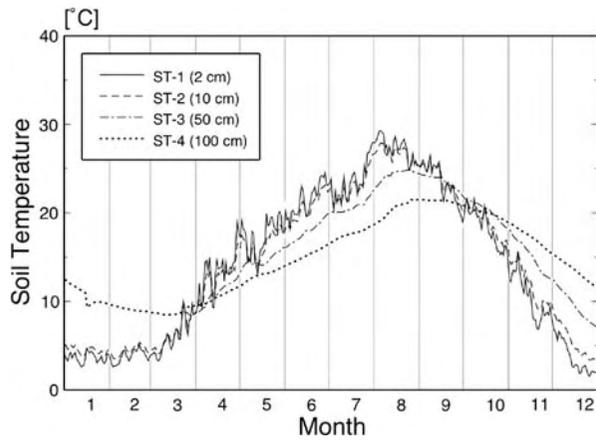
第4図 正味放射量（上図），全天短波放射量（中図），および地中熱流量（下図）の日平均値の季節変化



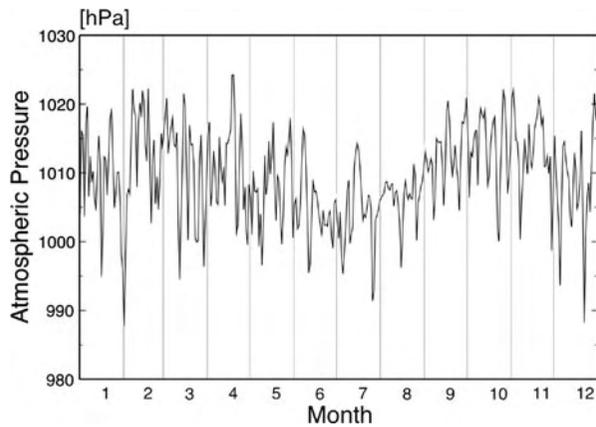
第5図 測定高度 29.5 m (上図), 12.3 m (中図), および 1.6 m (下図) における気温の日平均値の季節変化



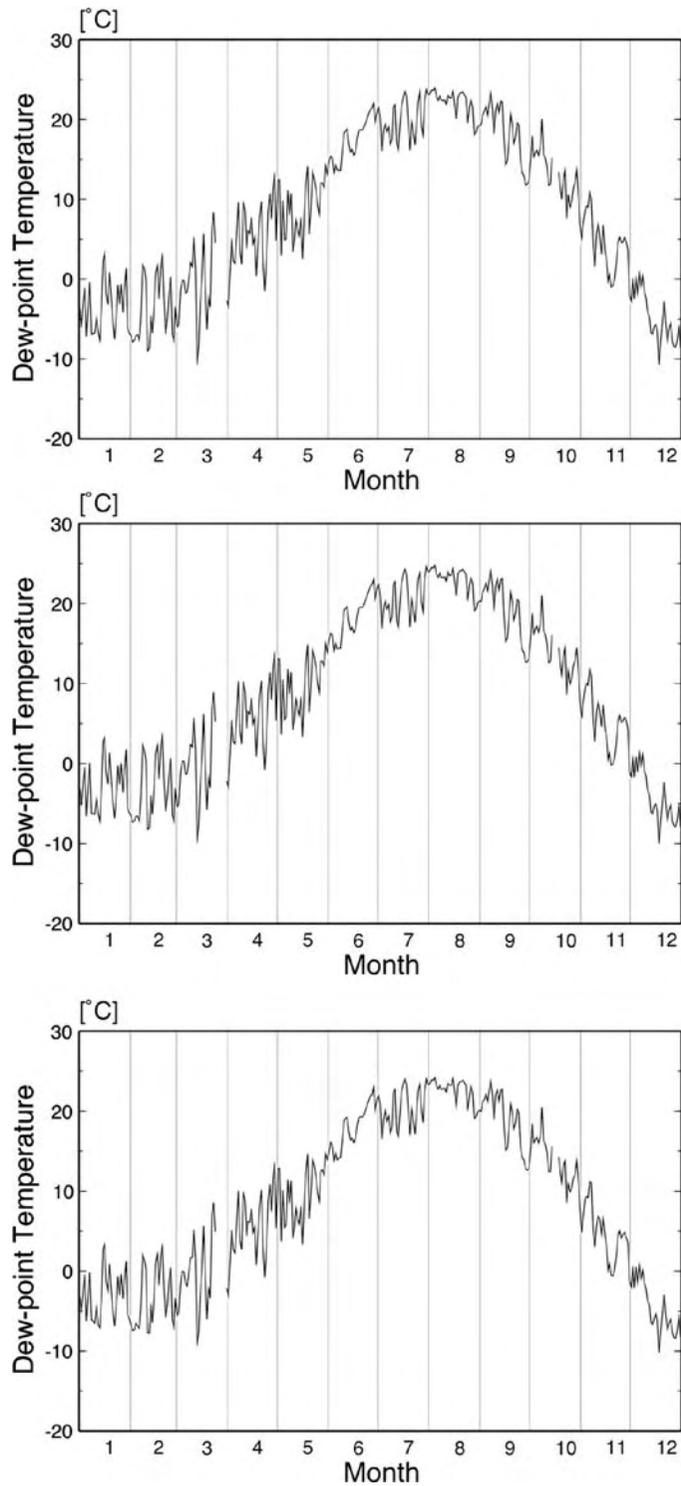
第 6 図 3 深度 (2.2 m, 10 m, 新 2.0 m) の観測井における地下水位の日平均値の季節変化



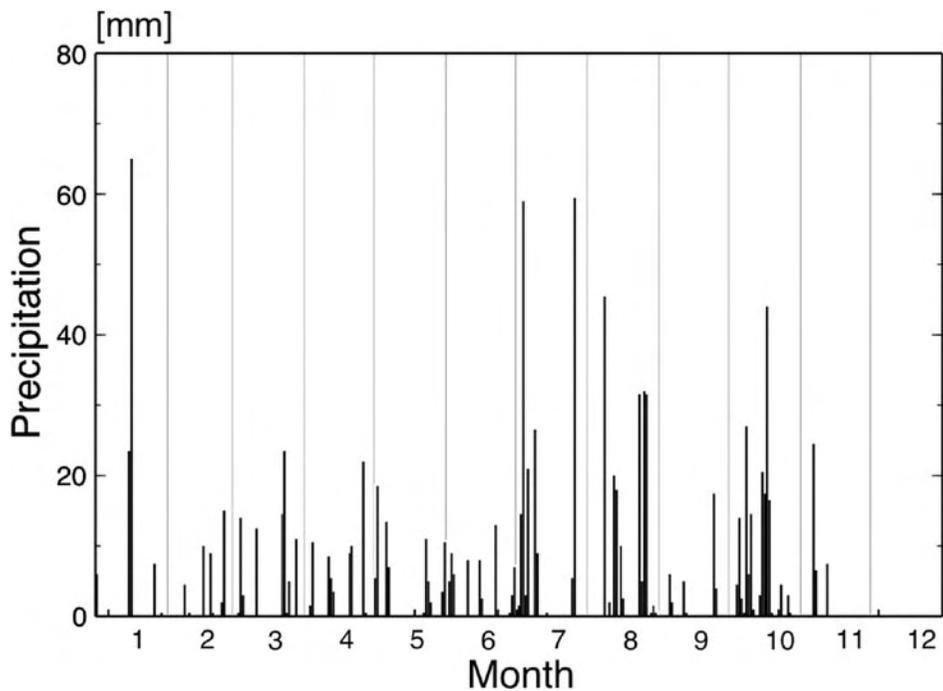
第 7 図 4 深度 (2 cm, 10 cm, 50 cm, 100 cm) における地温の日平均値の季節変化



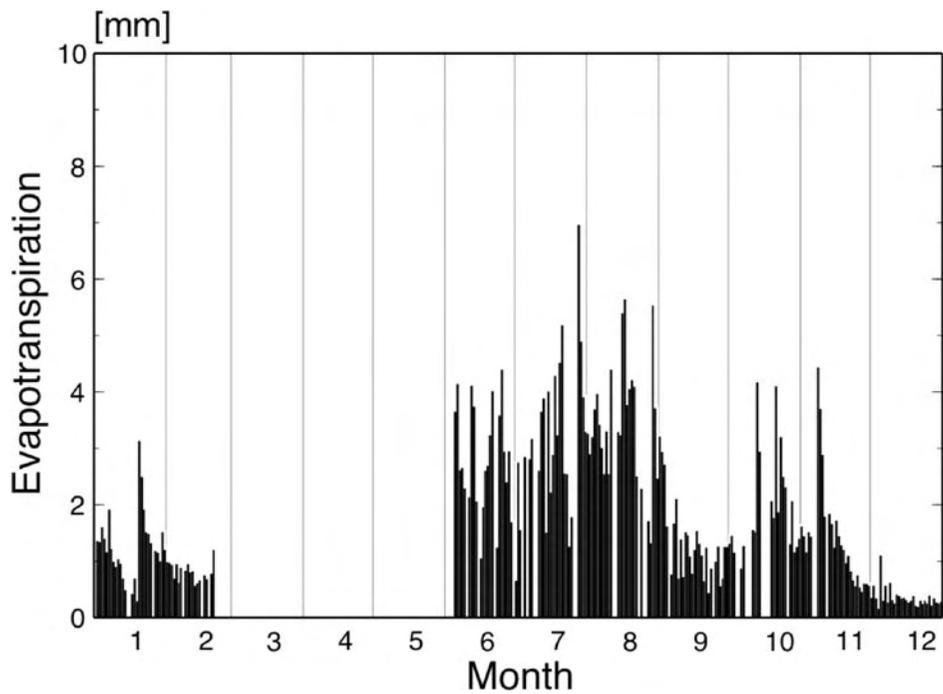
第 8 図 気圧の日平均値の季節変化



第9図 測定高度 29.5 m (上図), 12.3 m (中図), および 1.6 m (下図) における露点温度の日平均値の季節変化



第 10 図 日降水量の季節変化



第 11 図 日蒸発散量の季節変化

ITEM WIND DIRECTION (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT MONTHLY FREQUENCY  
 YEAR 2005

| MONTH   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N       | 33  | 33  | 21  | 11  | 19  | 12  | 5   | 13  | 24  | 73  | 30  | 19  |
| NNE     | 21  | 11  | 12  | 7   | 15  | 11  | 14  | 17  | 37  | 49  | 16  | 12  |
| NE      | 17  | 20  | 14  | 35  | 36  | 32  | 18  | 31  | 61  | 73  | 24  | 18  |
| ENE     | 28  | 40  | 59  | 79  | 127 | 99  | 88  | 99  | 145 | 127 | 79  | 27  |
| E       | 41  | 103 | 95  | 143 | 166 | 168 | 245 | 165 | 153 | 75  | 59  | 29  |
| ESE     | 13  | 31  | 51  | 79  | 92  | 104 | 105 | 92  | 51  | 42  | 49  | 28  |
| SE      | 7   | 11  | 16  | 32  | 32  | 41  | 36  | 38  | 26  | 19  | 25  | 10  |
| SSE     | 4   | 7   | 11  | 18  | 33  | 48  | 22  | 26  | 18  | 17  | 13  | 7   |
| S       | 13  | 8   | 22  | 32  | 28  | 59  | 32  | 48  | 21  | 9   | 6   | 7   |
| SSW     | 2   | 8   | 28  | 72  | 71  | 67  | 49  | 111 | 49  | 23  | 19  | 27  |
| SW      | 9   | 17  | 23  | 40  | 21  | 19  | 35  | 20  | 22  | 12  | 25  | 22  |
| WSW     | 20  | 24  | 45  | 23  | 10  | 11  | 14  | 14  | 20  | 11  | 29  | 63  |
| W       | 72  | 68  | 57  | 27  | 15  | 14  | 16  | 10  | 15  | 26  | 44  | 101 |
| WNW     | 163 | 154 | 119 | 46  | 4   | 14  | 25  | 17  | 14  | 44  | 92  | 172 |
| NW      | 178 | 88  | 112 | 52  | 37  | 8   | 28  | 25  | 32  | 67  | 137 | 150 |
| NNW     | 91  | 49  | 52  | 23  | 37  | 12  | 11  | 18  | 32  | 76  | 73  | 52  |
| NO DATA | 32  | 0   | 7   | 1   | 1   | 1   | 1   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   |

ITEM WIND SPEED (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT (m/s)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1     | 0.9 | 1.1 | 1.1 | 1.9 | 1.5 | 0.7 | 0.6 | 1.2 | 0.7 | 0.8 | 0.5 | *** |
| 2     | 0.6 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.3 | 0.6 | 1.1 | 1.2 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.6 |
| 3     | 0.7 | 1.5 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1.0 | 1.3 | 1.3 | 0.7 | 1.1 | 0.3 | 0.6 |
| 4     | 0.9 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.4 | 1.2 | 0.9 | 1.0 | 1.6 | 0.5 | 0.4 | 0.7 |
| 5     | 0.8 | 1.7 | 0.9 | 0.8 | 1.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.2 | 0.7 | 0.5 | *** |
| 6     | 0.6 | 0.8 | 1.5 | 0.9 | 1.7 | 1.1 | 0.6 | 0.9 | 1.1 | 0.7 | 0.5 | 1.0 |
| 7     | *** | 0.7 | 0.8 | 1.5 | 0.7 | 1.2 | 0.6 | 0.9 | 2.5 | 0.8 | 0.8 | 0.5 |
| 8     | 1.3 | 0.7 | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 0.7 | 1.1 | 0.9 | 1.2 | 0.7 | 0.8 | 0.5 |
| 9     | 1.0 | *** | 1.4 | 1.6 | 1.2 | 0.7 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.7 |
| 10    | 0.9 | 0.9 | 1.3 | 1.7 | 1.3 | 0.8 | 0.6 | 1.1 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.7 |
| 11    | 0.7 | 1.2 | 0.7 | 2.3 | 1.4 | 0.8 | 0.8 | 1.1 | 0.5 | 0.9 | 0.4 | 0.6 |
| 12    | 1.4 | 1.1 | 1.3 | 1.9 | 1.1 | 0.9 | 1.3 | 1.0 | 0.6 | 1.1 | 0.7 | 0.5 |
| 13    | 1.4 | 0.6 | 1.4 | 0.5 | 1.4 | 1.3 | 0.8 | 1.1 | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.9 |
| 14    | 0.9 | 1.0 | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 0.6 | 1.1 | 0.7 |
| 15    | 1.8 | 0.9 | 0.8 | 1.2 | 0.9 | 1.2 | 0.7 | 0.8 | 1.3 | 0.4 | 0.8 | 0.6 |
| 16    | 2.3 | 1.9 | 1.3 | 1.9 | 1.2 | 0.8 | 0.5 | 1.1 | 0.9 | 0.6 | 0.4 | 0.7 |
| 17    | 1.0 | 0.8 | 1.1 | 1.1 | 1.3 | 0.7 | 0.4 | 1.2 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.7 |
| 18    | 0.9 | 1.5 | 1.9 | 2.1 | 2.0 | 1.1 | 0.5 | 1.1 | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 1.4 |
| 19    | 0.9 | 1.3 | 1.8 | 1.9 | 1.6 | 0.6 | 0.7 | 1.1 | 0.5 | 0.9 | 0.7 | 1.2 |
| 20    | 1.1 | 1.0 | 0.7 | 1.2 | 1.2 | 0.7 | 0.5 | 1.0 | 1.1 | 0.6 | 0.5 | 0.5 |
| 21    | 2.0 | 1.1 | 1.5 | 1.6 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 1.7 | 1.2 | 0.8 | 0.5 | 0.6 |
| 22    | 1.6 | 0.9 | 1.1 | 1.2 | 1.1 | 0.6 | 1.8 | 2.1 | 0.7 | 0.3 | 0.6 | 2.4 |
| 23    | 0.5 | 1.4 | 1.6 | 1.2 | 1.3 | 0.5 | 1.4 | 1.4 | 0.5 | 0.9 | 0.5 | 1.0 |
| 24    | 0.7 | 1.9 | 1.2 | 1.7 | 1.1 | 0.5 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 0.6 | 0.5 | 1.1 |
| 25    | 1.2 | 0.9 | 2.5 | 1.0 | 1.1 | 0.6 | 1.7 | 1.8 | 1.3 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| 26    | *** | 1.4 | 1.1 | 1.0 | 1.2 | 0.5 | 2.0 | 1.6 | 1.3 | 0.9 | 0.6 | 1.6 |
| 27    | *** | 1.2 | 1.1 | *** | 1.1 | 0.5 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 0.4 | 0.5 | 1.6 |
| 28    | 0.9 | 1.0 | 1.8 | 1.0 | 1.4 | 0.7 | 1.0 | 0.8 | 0.9 | 0.6 | 0.7 | 1.5 |
| 29    | 0.6 | ... | 0.9 | 1.3 | 1.9 | 0.7 | 0.9 | 0.7 | 1.1 | 0.3 | 0.7 | 1.0 |
| 30    | 1.8 | ... | 1.7 | 1.3 | 1.8 | 0.5 | 1.2 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.6 |
| 31    | 1.0 | ... | 1.1 | ... | 1.0 | ... | 1.0 | 0.5 | ... | 0.5 | ... | 0.9 |
| MEAN  | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.3 | 0.8 | 0.9 | 1.1 | 1.0 | 0.7 | 0.6 | 0.9 |

| ITEM       | WIND SPEED (29.5 m HEIGHT)             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| INSTRUMENT | SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| UNIT       | (m/s)                                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| YEAR       | 2005                                   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| MONTH      | 1                                      | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| 1          | 2.8                                    | 3.5 | 2.7 | 4.5 | 3.9 | 1.9 | 2.0 | 2.7 | 2.3 | 2.7 | 1.8 | 1.8 |
| 2          | 2.1                                    | 4.6 | 3.2 | 2.9 | 3.1 | 2.0 | 3.6 | 2.7 | 1.7 | 1.7 | 1.9 | 2.0 |
| 3          | 2.1                                    | 4.7 | 3.7 | 2.9 | 2.6 | 2.6 | 4.2 | 2.9 | 2.0 | 3.2 | 1.9 | 2.2 |
| 4          | 2.6                                    | 4.2 | *** | 2.8 | 3.8 | 3.2 | 3.1 | 2.3 | 4.2 | 1.8 | 2.0 | 2.3 |
| 5          | 2.4                                    | 4.7 | 2.3 | 2.1 | 4.3 | 2.3 | 2.8 | 1.9 | 3.1 | 2.2 | 2.1 | 3.6 |
| 6          | 2.0                                    | 2.4 | 3.6 | 2.3 | 3.6 | 2.8 | 2.0 | 2.3 | 2.9 | 2.1 | 1.9 | 2.7 |
| 7          | 3.0                                    | 2.0 | 2.4 | 3.5 | 2.3 | 3.2 | 2.0 | 2.1 | 7.0 | 2.4 | 3.3 | 1.8 |
| 8          | 4.4                                    | 2.0 | 3.4 | 3.4 | 3.6 | 2.3 | 3.8 | 2.2 | 3.3 | 2.5 | 3.9 | 2.0 |
| 9          | 3.1                                    | 2.3 | 3.7 | 3.1 | 2.5 | 2.2 | 2.6 | 2.3 | 2.7 | 2.2 | 2.5 | 2.8 |
| 10         | 2.8                                    | 2.5 | 2.6 | 3.5 | 4.1 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 1.7 | 2.0 | 2.3 | 2.6 |
| 11         | 2.2                                    | 3.4 | 1.7 | 4.9 | 3.0 | 2.9 | 2.7 | 2.6 | 1.6 | 2.8 | 2.0 | 1.5 |
| 12         | 4.4                                    | 3.2 | 2.8 | 4.0 | 2.5 | 2.6 | 4.4 | 2.5 | 1.7 | 3.3 | 3.0 | 1.6 |
| 13         | 4.6                                    | 3.5 | 3.8 | 2.0 | 3.2 | 3.7 | 2.7 | 2.6 | 1.8 | 2.4 | 1.6 | 3.7 |
| 14         | 2.4                                    | 3.2 | 3.4 | 3.1 | 3.0 | 3.5 | 1.9 | 2.1 | 3.5 | 1.9 | 3.2 | 2.7 |
| 15         | 3.8                                    | 3.0 | 2.1 | 3.1 | 2.5 | 3.5 | 2.3 | 1.8 | 3.7 | 1.3 | 2.4 | 2.0 |
| 16         | 5.4                                    | 5.0 | 2.8 | 4.9 | 2.9 | 2.5 | 1.8 | 2.7 | 2.7 | 2.1 | 1.5 | 2.8 |
| 17         | 3.2                                    | 2.2 | 2.4 | 2.9 | 2.9 | 2.0 | 1.7 | 2.7 | 1.9 | 1.4 | 1.6 | 2.6 |
| 18         | 3.2                                    | 3.9 | 4.9 | 6.0 | 5.3 | 3.2 | 2.0 | 2.8 | 1.6 | 2.3 | 1.8 | 5.9 |
| 19         | 2.3                                    | 3.3 | 5.0 | 4.9 | 3.8 | 1.9 | 2.9 | 2.9 | 1.4 | 2.8 | 3.7 | 4.9 |
| 20         | 3.8                                    | 3.2 | 2.0 | 3.0 | 2.9 | 2.0 | 2.3 | 2.7 | 3.1 | 2.2 | 1.6 | 2.0 |
| 21         | 6.3                                    | 3.0 | 3.5 | 4.4 | 2.1 | 2.7 | 2.5 | 4.7 | 3.2 | 2.5 | 1.9 | 1.6 |
| 22         | 5.3                                    | 3.3 | 2.8 | 4.2 | 3.0 | 2.2 | 4.2 | 5.7 | 2.2 | 1.3 | 2.3 | 7.4 |
| 23         | 1.4                                    | 4.6 | 3.5 | 3.9 | 3.2 | 1.8 | 2.9 | 3.7 | 1.7 | 3.4 | 2.2 | 3.4 |
| 24         | 2.2                                    | 5.1 | 2.9 | 4.9 | 2.8 | 1.8 | 2.2 | 3.0 | 3.4 | 2.3 | 1.9 | 3.3 |
| 25         | 3.2                                    | 2.3 | 7.7 | 2.9 | 2.8 | 2.1 | 3.6 | 4.5 | 4.5 | 2.1 | 2.1 | 1.8 |
| 26         | ***                                    | 3.5 | 3.3 | 2.8 | 2.8 | 1.9 | 4.9 | 5.3 | 3.5 | 2.7 | 2.2 | 5.1 |
| 27         | ***                                    | 3.4 | 2.5 | 2.9 | 2.7 | 1.9 | 3.6 | 2.7 | 2.7 | 1.7 | 1.8 | 5.5 |
| 28         | 2.7                                    | 2.7 | 3.9 | 2.8 | 3.5 | 2.4 | 2.4 | 2.2 | 2.5 | 2.2 | 1.8 | 4.3 |
| 29         | 1.8                                    | ... | 2.2 | 2.9 | 4.5 | 2.6 | 2.0 | 2.2 | 3.3 | 1.4 | 2.8 | 2.8 |
| 30         | 5.2                                    | ... | 4.8 | 3.2 | 4.3 | 1.6 | 2.5 | 2.2 | 2.6 | 2.2 | 3.5 | 1.6 |
| 31         | 2.8                                    | ... | 2.6 | ... | 3.7 | ... | 2.2 | 1.8 | ... | 1.9 | ... | 2.6 |
| MEAN       | 3.2                                    | 3.4 | 3.3 | 3.5 | 3.3 | 2.5 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 2.2 | 2.3 | 3.0 |

| ITEM       | MOMENTUM FLUX (1.6 m HEIGHT)           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| INSTRUMENT | SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| UNIT       | x 0.1 (m/s) <sup>2</sup>               |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| YEAR       | 2005                                   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| MONTH      | 1                                      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
| 1          | ***                                    | -0.212 | -0.266 | -0.592 | -0.603 | -0.240 | -0.240 | -0.203 | -0.125 | -0.403 | -0.070 | ***    |
| 2          | -0.084                                 | -0.228 | -0.364 | -0.328 | -0.286 | -0.179 | -0.820 | -0.202 | -0.144 | -0.148 | -0.125 | -0.113 |
| 3          | -0.080                                 | -0.171 | -0.540 | -0.496 | -0.252 | -0.344 | -0.930 | -0.265 | -0.171 | -0.358 | -0.087 | -0.228 |
| 4          | -0.158                                 | -0.289 | ***    | -0.337 | -0.538 | -0.396 | ***    | -0.168 | -0.504 | -0.111 | -0.099 | ***    |
| 5          | -0.243                                 | -0.291 | -0.220 | -0.192 | -0.341 | -0.316 | -0.395 | -0.123 | -0.266 | -0.156 | -0.086 | ***    |
| 6          | -0.049                                 | -0.227 | -0.420 | -0.156 | -0.285 | -0.489 | ***    | -0.112 | -0.266 | -0.154 | ***    | ***    |
| 7          | ***                                    | -0.285 | -0.154 | -0.544 | -0.214 | -0.488 | -0.347 | -0.210 | -1.939 | -0.182 | ***    | -0.108 |
| 8          | -0.234                                 | -0.181 | -0.252 | -0.439 | -0.257 | -0.220 | -0.849 | -0.167 | -0.480 | ***    | -0.454 | -0.072 |
| 9          | -0.179                                 | ***    | -0.643 | -0.261 | -0.211 | -0.239 | -0.293 | -0.139 | -0.192 | -0.286 | -0.189 | -0.346 |
| 10         | -0.149                                 | -0.249 | -0.388 | -0.546 | -0.516 | -0.234 | -0.250 | -0.165 | -0.130 | -0.115 | -0.126 | -0.332 |
| 11         | -0.111                                 | -0.242 | -0.073 | -0.220 | -0.206 | -0.441 | -0.495 | -0.175 | -0.097 | -0.277 | -0.123 | -0.068 |
| 12         | -0.229                                 | -0.217 | -0.323 | -0.147 | -0.169 | -0.429 | -0.966 | -0.119 | -0.147 | -0.367 | -0.255 | -0.087 |
| 13         | -0.311                                 | -0.274 | -0.328 | -0.106 | -0.266 | -0.841 | -0.353 | ***    | -0.160 | -0.133 | -0.119 | -0.773 |
| 14         | -0.378                                 | -0.200 | -0.223 | -0.305 | -0.263 | -0.678 | -0.184 | -0.184 | -0.521 | -0.178 | -0.393 | -0.322 |
| 15         | -0.666                                 | -0.276 | -0.145 | -0.357 | -0.254 | -0.564 | -0.361 | -0.133 | -0.415 | -0.069 | -0.219 | -0.075 |
| 16         | -0.889                                 | ***    | -0.338 | -0.218 | -0.358 | -0.328 | -0.166 | -0.262 | -0.193 | ***    | -0.079 | -0.386 |
| 17         | -0.132                                 | -0.315 | -0.237 | -0.304 | -0.271 | -0.267 | -0.184 | -0.219 | -0.094 | -0.059 | -0.099 | -0.260 |
| 18         | -0.152                                 | -0.811 | -0.432 | -0.214 | -1.230 | -0.569 | -0.318 | -0.169 | -0.189 | ***    | -0.100 | -1.860 |
| 19         | -0.237                                 | -0.260 | -0.453 | -0.340 | -0.590 | -0.262 | -0.471 | -0.301 | -0.115 | -0.215 | -0.445 | -1.455 |
| 20         | -0.422                                 | ***    | -0.084 | -0.112 | -0.318 | -0.208 | -0.282 | -0.280 | -0.322 | -0.135 | -0.132 | -0.175 |
| 21         | -0.229                                 | -0.449 | -0.446 | -0.383 | -0.271 | -0.499 | -0.397 | -0.693 | -0.373 | -0.174 | -0.090 | ***    |
| 22         | -0.299                                 | -0.173 | -0.378 | -0.989 | -0.511 | -0.246 | -0.600 | -0.857 | -0.145 | -0.056 | -0.156 | -1.148 |
| 23         | -0.105                                 | -0.363 | ***    | -0.641 | -0.409 | -0.168 | -0.167 | -0.455 | -0.115 | -0.638 | -0.098 | -0.111 |
| 24         | -0.101                                 | -0.807 | -0.460 | -0.274 | -0.467 | -0.244 | -0.096 | ***    | ***    | -0.157 | -0.116 | -0.142 |
| 25         | -0.363                                 | ***    | -0.898 | -0.147 | -0.320 | -0.390 | -0.251 | -0.558 | -0.118 | -0.108 | -0.108 | -0.071 |
| 26         | ***                                    | -0.320 | -0.233 | -0.202 | -0.344 | -0.251 | ***    | -0.732 | -0.407 | -0.384 | -0.090 | -0.304 |
| 27         | ***                                    | -0.230 | -0.285 | ***    | -0.368 | -0.214 | -0.846 | -0.208 | -0.234 | -0.065 | -0.157 | -0.265 |
| 28         | -0.357                                 | -0.185 | ***    | -0.360 | -0.444 | -0.333 | -0.164 | -0.138 | -0.206 | -0.150 | -0.088 | -0.252 |
| 29         | -0.075                                 | ...    | -0.167 | -0.298 | -0.759 | -0.362 | -0.182 | -0.140 | -0.326 | -0.062 | -0.227 | -0.158 |
| 30         | -0.268                                 | ...    | -0.425 | -0.182 | -0.659 | -0.175 | -0.104 | -0.155 | -0.164 | -0.118 | -0.459 | -0.102 |
| 31         | -0.271                                 | ...    | -0.240 | ...    | -0.290 | ...    | -0.217 | -0.118 | ...    | -0.103 | ...    | -0.159 |
| MEAN       | -0.251                                 | -0.302 | -0.336 | -0.334 | -0.396 | -0.354 | -0.390 | -0.264 | -0.311 | -0.192 | -0.171 | -0.360 |

ITEM MOMENTUM FLUX (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT x 0.1 (m/s)<sup>2</sup>  
 YEAR 2005

| MONTH | 1      | 2      | 3       | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     | 12     |
|-------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | -1.215 | -2.029 | -1.259  | -3.351 | -2.463 | -0.796 | -0.631 | ***    | -0.833 | -1.520 | -0.490 | -0.565 |
| 2     | -0.388 | -3.437 | -1.606  | -1.454 | -1.848 | -0.663 | -2.328 | ***    | -0.646 | -0.400 | -0.447 | -0.370 |
| 3     | -0.428 | -3.845 | -2.415  | -1.403 | -1.606 | -1.097 | -2.572 | ***    | -0.707 | -2.481 | -0.339 | -0.697 |
| 4     | -1.235 | -3.307 | ***     | -1.182 | -2.291 | -1.330 | -1.692 | ***    | -2.297 | -0.534 | -0.241 | -0.568 |
| 5     | -0.810 | -4.865 | -0.619  | -0.896 | -2.634 | -1.301 | -1.741 | -0.549 | -1.314 | -0.601 | -0.424 | -2.492 |
| 6     | -0.388 | -1.119 | -1.741  | -0.940 | -2.280 | -1.659 | -0.643 | -1.019 | -1.418 | -0.726 | -0.403 | -1.383 |
| 7     | -1.021 | -0.707 | -0.817  | -2.202 | -0.971 | -1.399 | -0.935 | ***    | -8.309 | -1.033 | -2.493 | -0.400 |
| 8     | -3.338 | -0.413 | -1.338  | -2.815 | -1.875 | -0.891 | -2.549 | -0.773 | -2.160 | -1.222 | -2.274 | -0.258 |
| 9     | -1.571 | -0.507 | -2.264  | -1.854 | -1.249 | -1.120 | -1.004 | ***    | -1.015 | -0.949 | -0.804 | -1.164 |
| 10    | -1.261 | -1.051 | -1.090  | -2.502 | -3.954 | -0.773 | -1.173 | -0.949 | -0.573 | -0.749 | -0.803 | -1.022 |
| 11    | -0.920 | -2.968 | -0.321  | -3.772 | -1.554 | -1.461 | -1.183 | -0.814 | -0.444 | -1.551 | -0.444 | -0.361 |
| 12    | -3.733 | -2.088 | -1.925  | -2.248 | -1.100 | -1.809 | -2.619 | -0.926 | -0.598 | -1.905 | -1.869 | -0.390 |
| 13    | -4.352 | -0.851 | -3.494  | -0.597 | -1.668 | -2.412 | -1.051 | -1.220 | -0.582 | -0.617 | -0.385 | -2.192 |
| 14    | -0.761 | -1.831 | -2.039  | -1.837 | -1.638 | -2.086 | -0.493 | -0.650 | -2.224 | -0.725 | -1.975 | -0.899 |
| 15    | -2.928 | -0.796 | -0.721  | -1.322 | -1.350 | -1.827 | -1.107 | -0.644 | -2.223 | -0.274 | -1.133 | -0.345 |
| 16    | -5.474 | -2.928 | -1.012  | -2.995 | -1.939 | -0.953 | -0.550 | ***    | -1.133 | -1.359 | -0.240 | -1.172 |
| 17    | -1.734 | -0.807 | -0.736  | -1.339 | -2.201 | -0.855 | -0.656 | ***    | -0.503 | -0.295 | -0.317 | -0.800 |
| 18    | -1.222 | -2.034 | -5.002  | -3.707 | -5.042 | -1.582 | -0.807 | -1.091 | -0.625 | -1.016 | -0.516 | -5.938 |
| 19    | -0.556 | -2.154 | -4.896  | -3.478 | -2.470 | -0.779 | -1.529 | ***    | -0.384 | -1.279 | -2.943 | -4.813 |
| 20    | -1.874 | -1.356 | -0.401  | -1.010 | -1.467 | -0.751 | -0.830 | ***    | -1.596 | -0.654 | -0.490 | -0.501 |
| 21    | -6.394 | -1.313 | -1.662  | -2.244 | -1.219 | -1.402 | -1.009 | ***    | -1.976 | -0.941 | -0.367 | -0.306 |
| 22    | -4.701 | -1.440 | -1.507  | -4.353 | -1.766 | -0.965 | -2.623 | ***    | -0.755 | -0.195 | -0.452 | -9.426 |
| 23    | -0.210 | -3.302 | -2.579  | -3.243 | -2.057 | -0.366 | -1.487 | ***    | -0.497 | -2.368 | -0.426 | -1.727 |
| 24    | -0.498 | -3.200 | -1.718  | -3.866 | -1.322 | -0.717 | -0.840 | ***    | -2.083 | -0.803 | -0.371 | -2.732 |
| 25    | -1.909 | -0.602 | -10.482 | -1.282 | -1.451 | -0.938 | -2.085 | ***    | -5.167 | -0.479 | -0.490 | -0.368 |
| 26    | ***    | -2.911 | -2.171  | -1.389 | -1.600 | -0.724 | -4.325 | ***    | -2.215 | -1.434 | -0.352 | -5.360 |
| 27    | ***    | -2.075 | -1.505  | -1.570 | -1.540 | -0.605 | -3.349 | ***    | -1.249 | -0.383 | -0.369 | -4.398 |
| 28    | -0.867 | -0.999 | -1.852  | -1.655 | -1.971 | -1.093 | -1.094 | -0.850 | -1.114 | -0.499 | -0.479 | -3.373 |
| 29    | -0.484 | ...    | -0.803  | -1.707 | -2.967 | -0.973 | -0.775 | -0.764 | -1.938 | -0.249 | -1.693 | -1.286 |
| 30    | -4.775 | ...    | -5.119  | -1.863 | -3.576 | -0.546 | -1.009 | -0.935 | -0.919 | -0.598 | -2.368 | -0.386 |
| 31    | -1.523 | ...    | -1.236  | ...    | -3.007 | ...    | -0.875 | -0.441 | ...    | -0.580 | ...    | -1.318 |
| MEAN  | -1.951 | -1.962 | -2.144  | -2.136 | -2.067 | -1.129 | -1.470 | -0.830 | -1.583 | -0.917 | -0.880 | -1.839 |

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT x 0.1 (°C m/s)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1     | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | ***   | 0.23  | 0.35  | 0.51 | 0.23  | 0.22  | 0.06  | 0.51  | 0.18  | 0.11  | 0.24  | ***   |
| 2     | 0.14  | 0.18  | 0.29  | 0.19 | 0.16  | -0.01 | 0.10  | 0.47  | 0.16  | 0.18  | 0.26  | 0.09  |
| 3     | 0.10  | 0.13  | 0.28  | 0.46 | 0.40  | 0.13  | 0.09  | 0.50  | 0.12  | 0.07  | 0.08  | 0.25  |
| 4     | 0.07  | 0.20  | ***   | 0.16 | 0.47  | 0.11  | ***   | 0.62  | 0.12  | 0.01  | 0.18  | ***   |
| 5     | 0.11  | 0.16  | -0.04 | 0.44 | 0.32  | 0.24  | 0.24  | 0.59  | 0.04  | 0.01  | 0.06  | ***   |
| 6     | 0.08  | 0.16  | 0.10  | 0.39 | 0.14  | 0.30  | ***   | 0.45  | 0.06  | 0.01  | ***   | ***   |
| 7     | 0.02  | 0.18  | 0.33  | 0.31 | 0.16  | 0.20  | 0.14  | 0.47  | -0.24 | 0.18  | ***   | 0.24  |
| 8     | 0.11  | 0.01  | 0.29  | 0.42 | 0.09  | 0.14  | 0.19  | 0.37  | 0.05  | ***   | -0.12 | 0.18  |
| 9     | 0.17  | ***   | 0.34  | 0.53 | 0.39  | 0.09  | 0.04  | 0.38  | -0.04 | -0.06 | 0.18  | 0.27  |
| 10    | 0.13  | 0.10  | 0.16  | 0.43 | 0.34  | 0.06  | 0.23  | 0.08  | 0.15  | 0.03  | 0.16  | 0.26  |
| 11    | 0.18  | 0.28  | 0.02  | 0.00 | 0.09  | 0.04  | 0.08  | 0.36  | 0.08  | -0.01 | 0.07  | 0.04  |
| 12    | 0.08  | 0.27  | 0.08  | 0.04 | 0.19  | 0.16  | 0.01  | 0.10  | 0.19  | 0.01  | 0.08  | 0.18  |
| 13    | 0.16  | 0.21  | 0.44  | 0.03 | 0.03  | 0.32  | 0.05  | ***   | 0.16  | 0.13  | 0.23  | 0.30  |
| 14    | 0.14  | 0.28  | 0.44  | 0.41 | 0.39  | 0.14  | 0.02  | 0.35  | 0.01  | 0.18  | 0.01  | 0.29  |
| 15    | -0.08 | 0.17  | 0.23  | 0.44 | 0.27  | -0.02 | 0.12  | 0.29  | 0.02  | 0.07  | 0.02  | 0.18  |
| 16    | -0.22 | ***   | 0.36  | 0.36 | 0.55  | 0.03  | 0.05  | 0.21  | 0.12  | ***   | 0.24  | 0.28  |
| 17    | 0.03  | 0.21  | -0.01 | 0.49 | 0.44  | 0.10  | 0.08  | 0.38  | 0.19  | 0.02  | 0.22  | 0.15  |
| 18    | 0.08  | 0.10  | 0.08  | 0.45 | 0.05  | 0.22  | 0.10  | 0.18  | 0.21  | ***   | 0.27  | 0.21  |
| 19    | 0.07  | -0.01 | 0.46  | 0.49 | 0.20  | 0.11  | -0.04 | 0.17  | 0.16  | -0.07 | 0.10  | 0.29  |
| 20    | ***   | ***   | 0.19  | 0.03 | 0.18  | 0.13  | 0.14  | 0.22  | 0.04  | 0.13  | 0.22  | 0.23  |
| 21    | 0.01  | 0.24  | 0.37  | 0.20 | 0.31  | 0.14  | 0.37  | 0.19  | 0.07  | 0.07  | 0.30  | ***   |
| 22    | 0.15  | 0.30  | 0.05  | 0.45 | 0.19  | -0.01 | 0.37  | -0.01 | 0.00  | 0.00  | 0.22  | -0.06 |
| 23    | 0.09  | 0.26  | ***   | 0.55 | 0.24  | 0.05  | 0.37  | 0.11  | 0.14  | 0.17  | 0.15  | 0.13  |
| 24    | 0.13  | 0.21  | 0.09  | 0.59 | 0.19  | 0.13  | 0.34  | ***   | ***   | 0.12  | 0.25  | 0.13  |
| 25    | 0.15  | ***   | 0.40  | 0.15 | 0.35  | 0.17  | 0.62  | 0.04  | -0.16 | 0.17  | 0.12  | 0.16  |
| 26    | ***   | 0.05  | 0.46  | 0.16 | 0.42  | 0.01  | ***   | -0.05 | 0.11  | 0.16  | 0.17  | 0.10  |
| 27    | ***   | 0.29  | 0.45  | ***  | 0.29  | 0.06  | 0.43  | 0.09  | -0.01 | -0.03 | 0.21  | 0.04  |
| 28    | 0.08  | 0.34  | ***   | 0.45 | 0.19  | -0.02 | 0.69  | 0.03  | 0.00  | 0.20  | 0.16  | 0.03  |
| 29    | 0.12  | ...   | 0.06  | 0.27 | 0.40  | 0.01  | 0.52  | 0.23  | 0.10  | 0.04  | 0.10  | 0.09  |
| 30    | 0.07  | ...   | 0.53  | 0.34 | -0.05 | 0.09  | 0.50  | 0.08  | 0.12  | -0.05 | 0.22  | 0.17  |
| 31    | 0.18  | ...   | 0.44  | ...  | 0.01  | ...   | 0.41  | 0.07  | ...   | 0.05  | ...   | 0.10  |
| MEAN  | 0.09  | 0.19  | 0.26  | 0.34 | 0.25  | 0.11  | 0.23  | 0.26  | 0.07  | 0.07  | 0.16  | 0.17  |

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT x 0.1 (°C m/s)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1     | 2     | 3     | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 0.03  | 0.32  | 0.43  | 0.69 | 0.28  | 0.45  | 0.06  | 0.32  | 0.23  | 0.23  | 0.22  | 0.27  |
| 2     | 0.23  | 0.32  | 0.37  | 0.24 | 0.21  | 0.03  | 0.23  | 0.20  | 0.19  | 0.21  | 0.28  | 0.06  |
| 3     | 0.24  | 0.20  | 0.44  | 0.55 | 0.72  | 0.15  | 0.22  | 0.21  | 0.19  | 0.28  | 0.10  | 0.16  |
| 4     | 0.01  | 0.25  | ***   | 0.16 | 0.64  | 0.11  | -0.08 | 0.53  | 0.25  | 0.00  | 0.15  | -0.02 |
| 5     | 0.20  | 0.39  | 0.12  | 0.49 | 0.55  | 0.45  | 0.38  | 0.45  | 0.02  | -0.03 | 0.05  | 0.17  |
| 6     | 0.07  | 0.21  | 0.30  | 0.54 | 0.16  | 0.61  | -0.01 | 0.28  | 0.07  | 0.01  | -0.07 | 0.14  |
| 7     | 0.04  | 0.27  | 0.44  | 0.31 | 0.15  | 0.36  | 0.17  | 0.31  | -0.08 | 0.30  | 0.13  | 0.24  |
| 8     | 0.15  | -0.01 | 0.46  | 0.60 | 0.16  | 0.28  | 0.47  | 0.27  | 0.14  | -0.03 | -0.18 | 0.09  |
| 9     | 0.16  | 0.15  | 0.50  | 0.77 | 0.56  | 0.23  | 0.05  | 0.43  | -0.02 | -0.07 | 0.15  | 0.17  |
| 10    | 0.14  | 0.19  | 0.24  | 0.52 | 0.69  | 0.03  | 0.23  | 0.05  | 0.21  | -0.04 | 0.12  | 0.12  |
| 11    | 0.21  | 0.52  | 0.01  | 0.04 | 0.19  | 0.13  | 0.18  | 0.39  | 0.06  | -0.02 | 0.07  | -0.01 |
| 12    | 0.19  | 0.47  | 0.25  | 0.06 | 0.29  | 0.38  | 0.18  | 0.04  | 0.25  | 0.01  | 0.09  | 0.16  |
| 13    | 0.09  | 0.24  | 0.71  | 0.04 | 0.06  | 0.67  | 0.17  | 0.08  | 0.18  | 0.19  | 0.26  | 0.18  |
| 14    | 0.18  | 0.46  | 0.63  | 0.54 | 0.60  | 0.30  | 0.03  | 0.31  | 0.16  | 0.29  | 0.02  | 0.22  |
| 15    | -0.20 | 0.25  | 0.29  | 0.62 | 0.30  | -0.07 | 0.28  | 0.34  | 0.17  | 0.11  | 0.05  | 0.17  |
| 16    | -0.18 | -0.03 | 0.49  | 0.56 | 0.82  | 0.04  | 0.10  | 0.24  | 0.23  | 0.00  | 0.22  | 0.14  |
| 17    | 0.13  | 0.23  | -0.02 | 0.57 | 0.68  | 0.13  | 0.16  | 0.45  | 0.19  | -0.01 | 0.20  | 0.09  |
| 18    | 0.21  | 0.17  | 0.26  | 0.76 | 0.17  | 0.42  | 0.26  | 0.16  | 0.28  | -0.20 | 0.10  | 0.28  |
| 19    | 0.14  | -0.05 | 0.68  | 0.82 | 0.33  | 0.24  | 0.11  | 0.16  | 0.18  | -0.12 | 0.20  | 0.28  |
| 20    | 0.11  | -0.03 | 0.19  | 0.01 | 0.39  | 0.26  | 0.08  | 0.19  | 0.17  | 0.21  | 0.23  | 0.21  |
| 21    | 0.17  | 0.36  | 0.60  | 0.13 | 0.57  | 0.37  | 0.30  | 0.30  | 0.24  | 0.15  | 0.11  | 0.12  |
| 22    | 0.14  | 0.44  | 0.01  | 0.61 | 0.38  | 0.00  | 0.43  | 0.04  | 0.04  | 0.03  | 0.14  | 0.14  |
| 23    | 0.11  | 0.24  | -0.08 | 0.70 | 0.33  | 0.06  | 0.33  | 0.13  | 0.15  | 0.10  | 0.11  | 0.15  |
| 24    | 0.13  | 0.29  | 0.14  | 1.01 | 0.26  | 0.21  | 0.24  | 0.10  | -0.16 | 0.10  | 0.28  | 0.24  |
| 25    | 0.19  | 0.02  | 0.83  | 0.19 | 0.53  | 0.34  | 0.45  | 0.00  | -0.12 | 0.19  | 0.09  | 0.12  |
| 26    | ***   | 0.34  | 0.61  | 0.32 | 0.68  | 0.14  | -0.28 | -0.03 | 0.22  | 0.10  | 0.09  | 0.22  |
| 27    | ***   | 0.50  | 0.54  | 0.98 | 0.57  | 0.08  | 0.35  | 0.11  | 0.05  | -0.01 | 0.19  | 0.02  |
| 28    | 0.15  | 0.54  | -0.03 | 0.61 | 0.47  | 0.08  | 0.62  | 0.02  | 0.07  | 0.16  | 0.14  | 0.14  |
| 29    | 0.17  | ...   | 0.08  | 0.49 | 0.63  | 0.07  | 0.44  | 0.25  | 0.31  | 0.05  | 0.09  | 0.18  |
| 30    | 0.30  | ...   | 0.79  | 0.60 | -0.07 | 0.12  | 0.35  | 0.17  | 0.20  | -0.05 | 0.17  | 0.13  |
| 31    | 0.30  | ...   | 0.55  | ...  | -0.09 | ...   | 0.34  | 0.05  | ...   | 0.15  | ...   | 0.12  |
| MEAN  | 0.13  | 0.26  | 0.36  | 0.48 | 0.39  | 0.22  | 0.22  | 0.21  | 0.14  | 0.07  | 0.13  | 0.15  |

ITEM SHORT-WAVE RADIATION (1.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PYRANOMETER (GORCYNYSKI TYPE) (MS-43F)  
 UNIT (W/m²)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 126.2 | 158.0 | 212.6 | 285.2 | 179.2 | 276.6 | 79.2  | 217.9 | 256.5 | 203.9 | 175.1 | 132.6 |
| 2     | 136.6 | 172.2 | 201.6 | 118.8 | 198.4 | 89.5  | 203.3 | 198.1 | 250.8 | 207.7 | 163.5 | 65.0  |
| 3     | 115.4 | 165.4 | 188.6 | 252.3 | 318.7 | 117.6 | 114.6 | 217.2 | 244.8 | 167.9 | 102.3 | 123.0 |
| 4     | 111.5 | 161.6 | 54.7  | 119.1 | 316.8 | 101.8 | 38.0  | 293.0 | 170.2 | 25.8  | 151.3 | 28.3  |
| 5     | 135.5 | 170.3 | 156.4 | 270.7 | 278.7 | 267.6 | 236.2 | 289.9 | 100.9 | 36.0  | 144.4 | 141.4 |
| 6     | 52.1  | 156.9 | 134.0 | 257.4 | 82.9  | 331.4 | 89.7  | 252.4 | 88.9  | 89.8  | 36.5  | 70.7  |
| 7     | 129.0 | 135.9 | 234.3 | 204.8 | 145.2 | 229.4 | 222.7 | 240.0 | 164.2 | 180.2 | 155.7 | 132.2 |
| 8     | 140.4 | 16.8  | 233.3 | 264.6 | 123.6 | 219.6 | 247.4 | 186.2 | 264.0 | 55.3  | 150.7 | 108.7 |
| 9     | 129.4 | 102.8 | 214.9 | 282.7 | 262.7 | 172.2 | 71.5  | 258.4 | 71.5  | 40.6  | 157.7 | 131.4 |
| 10    | 139.9 | 116.6 | 92.7  | 202.7 | 328.0 | 97.3  | 230.1 | 118.4 | 198.2 | 46.1  | 146.2 | 126.8 |
| 11    | 129.2 | 192.8 | 26.1  | 49.4  | 102.3 | 140.9 | 232.1 | 235.4 | 134.2 | 93.4  | 65.0  | 57.4  |
| 12    | 126.1 | 169.3 | 119.1 | 55.1  | 145.6 | 278.2 | 53.9  | 101.8 | 238.8 | 166.2 | 129.2 | 99.2  |
| 13    | 143.9 | 112.4 | 258.7 | 40.9  | 69.9  | 305.9 | 130.9 | 156.3 | 223.8 | 192.0 | 129.3 | 131.1 |
| 14    | 130.8 | 189.7 | 254.0 | 278.4 | 235.8 | 166.9 | 58.3  | 246.9 | 186.8 | 178.3 | 57.1  | 130.2 |
| 15    | 25.7  | 170.6 | 155.0 | 285.7 | 186.3 | 54.6  | 235.1 | 211.0 | 129.1 | 89.3  | 69.7  | 119.9 |
| 16    | 13.3  | 20.6  | 240.2 | 202.6 | 345.5 | 83.9  | 122.4 | 215.1 | 214.5 | 29.7  | 139.9 | 129.6 |
| 17    | 129.9 | 170.7 | 36.0  | 277.4 | 259.6 | 141.9 | 190.7 | 289.9 | 238.6 | 36.7  | 137.5 | 126.8 |
| 18    | 147.4 | 96.8  | 154.5 | 249.3 | 170.3 | 217.3 | 273.1 | 168.6 | 237.6 | 17.4  | 142.9 | 131.5 |
| 19    | 81.3  | 23.3  | 258.0 | 274.3 | 230.7 | 199.6 | 218.1 | 217.2 | 200.1 | 53.3  | 136.9 | 128.6 |
| 20    | 144.2 | 65.5  | 117.2 | 34.9  | 242.8 | 207.0 | 205.2 | 247.4 | 116.4 | 184.5 | 134.6 | 127.1 |
| 21    | 153.4 | 178.8 | 261.7 | 145.2 | 303.7 | 269.6 | 259.4 | 275.4 | 177.6 | 149.7 | 132.2 | 85.7  |
| 22    | 155.8 | 214.9 | 56.1  | 262.6 | 215.5 | 90.8  | 179.1 | 182.2 | 63.1  | 27.9  | 134.5 | 93.5  |
| 23    | 55.8  | 197.2 | 20.9  | 306.8 | 229.6 | 98.8  | 167.8 | 169.1 | 149.8 | 190.9 | 94.9  | 127.9 |
| 24    | 104.5 | 112.1 | 118.4 | 318.2 | 206.7 | 241.2 | 146.4 | 133.4 | 43.4  | 167.6 | 126.9 | 121.7 |
| 25    | 137.1 | 73.8  | 272.5 | 123.1 | 286.2 | 293.0 | 246.7 | 94.3  | 80.0  | 178.0 | 84.6  | 105.2 |
| 26    | 87.8  | 212.6 | 268.0 | 104.1 | 345.3 | 195.6 | 49.3  | 139.7 | 214.9 | 95.7  | 103.0 | 129.8 |
| 27    | 131.8 | 221.8 | 263.2 | 312.5 | 278.3 | 174.4 | 302.5 | 175.0 | 87.7  | 55.8  | 117.6 | 129.4 |
| 28    | 142.8 | 221.1 | 45.7  | 295.4 | 277.0 | 179.0 | 319.1 | 123.8 | 117.8 | 152.9 | 116.0 | 133.2 |
| 29    | 86.9  | ...   | 96.3  | 277.9 | 304.0 | 101.6 | 228.4 | 278.6 | 229.5 | 57.1  | 103.0 | 128.8 |
| 30    | 166.5 | ...   | 291.8 | 277.8 | 56.0  | 146.3 | 210.1 | 213.8 | 191.8 | 49.9  | 136.1 | 121.7 |
| 31    | 155.8 | ...   | 241.0 | ...   | 123.3 | ...   | 199.3 | 142.4 | ...   | 94.3  | ...   | 131.4 |
| MEAN  | 118.2 | 142.9 | 169.9 | 214.3 | 220.9 | 183.0 | 179.4 | 202.9 | 169.5 | 106.9 | 122.5 | 114.5 |

ITEM NET RADIATION (1.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT NET RADIOMETER (MIDDLETON TYPE) (CN-11)  
 UNIT (W/m<sup>2</sup>)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1    | 2    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11   | 12    |
|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 1     | 23.5 | 39.3 | 74.3  | 125.9 | 105.7 | 192.0 | 53.0  | 137.4 | 165.5 | 113.2 | 67.5 | ***   |
| 2     | 31.0 | 45.0 | 65.3  | 52.9  | 128.8 | 53.3  | 143.1 | 132.6 | 173.2 | 127.7 | 66.9 | ***   |
| 3     | 29.7 | 34.3 | 72.6  | 120.6 | 179.6 | 92.0  | 97.0  | 144.7 | 152.8 | 113.9 | 43.2 | ***   |
| 4     | 28.4 | 40.6 | -5.8  | 51.2  | 181.4 | 80.8  | 32.7  | 190.1 | 110.1 | 13.8  | 65.7 | ***   |
| 5     | 16.8 | 38.1 | 33.5  | 124.1 | 162.0 | 197.4 | 184.9 | 188.6 | 69.6  | 21.2  | 49.5 | ***   |
| 6     | 11.5 | 30.9 | 56.0  | 125.0 | 59.1  | 216.7 | 55.2  | 161.3 | 21.8  | 38.7  | 9.4  | 11.2  |
| 7     | 20.1 | 39.5 | 86.6  | 95.3  | 88.6  | 150.6 | 165.8 | 155.1 | 46.3  | 117.8 | 76.2 | 44.1  |
| 8     | 21.0 | 0.1  | 81.9  | 121.1 | 79.7  | 137.0 | 190.1 | 122.0 | 161.3 | 37.2  | 29.8 | 19.1  |
| 9     | 24.5 | 42.0 | 85.1  | 137.7 | 173.5 | 113.9 | 56.5  | 182.7 | 48.2  | 23.1  | 44.1 | 40.0  |
| 10    | 18.6 | 51.8 | 45.9  | 113.2 | 184.4 | 72.5  | 167.2 | 81.3  | 129.4 | 30.9  | 47.2 | 28.7  |
| 11    | 25.3 | 74.6 | 6.9   | 33.4  | 54.6  | 108.7 | 171.0 | 166.3 | 82.3  | 56.3  | 14.4 | -2.3  |
| 12    | 13.5 | 63.7 | 60.9  | 36.9  | 88.3  | 197.8 | 45.2  | 74.7  | 150.0 | 79.5  | 53.7 | 12.7  |
| 13    | 29.1 | 25.2 | 110.7 | 18.0  | 29.2  | 219.2 | 104.2 | 121.4 | 140.2 | 96.2  | 48.1 | -25.3 |
| 14    | 34.6 | 68.5 | 96.3  | 162.4 | 153.4 | 125.3 | 38.8  | 171.5 | 112.8 | 107.4 | 21.4 | 23.7  |
| 15    | 12.4 | 56.9 | 52.8  | 139.7 | 105.5 | 39.5  | 178.1 | 153.3 | 80.2  | 62.5  | 30.4 | ***   |
| 16    | 0.9  | 7.1  | 92.8  | 105.2 | 183.1 | 58.7  | 89.6  | 158.8 | 122.0 | 4.4   | 45.5 | 20.3  |
| 17    | 40.3 | 74.9 | 4.0   | 137.4 | 137.5 | 108.7 | 134.2 | 193.5 | 135.0 | 11.9  | 35.5 | 18.1  |
| 18    | 42.6 | 32.3 | 54.6  | 135.4 | 96.6  | 160.3 | 200.7 | 114.2 | 145.7 | 5.1   | 44.7 | ***   |
| 19    | 15.2 | 11.4 | 94.7  | 142.4 | 131.5 | 138.8 | 142.4 | 148.2 | 125.7 | 17.5  | ***  | ***   |
| 20    | 25.1 | 27.9 | 32.4  | 20.2  | 134.3 | 141.4 | 135.7 | 169.0 | 78.1  | 96.3  | ***  | 23.3  |
| 21    | 14.6 | 70.9 | 95.3  | 88.0  | 179.7 | 184.8 | 185.0 | 189.9 | 116.5 | 69.3  | ***  | 15.4  |
| 22    | 25.4 | 81.8 | 16.1  | 146.4 | 137.3 | 58.2  | 133.4 | 116.7 | 38.3  | -1.1  | ***  | ***   |
| 23    | 8.2  | 71.0 | 13.3  | 148.7 | 137.4 | 66.6  | 109.3 | 122.2 | 100.6 | 89.1  | ***  | 10.3  |
| 24    | 30.0 | 45.6 | 58.3  | 160.0 | -22.1 | 166.9 | 92.8  | 102.7 | 28.2  | 72.3  | ***  | 13.4  |
| 25    | 41.8 | 17.3 | 125.1 | 66.4  | 159.1 | 204.1 | 170.5 | 74.5  | 47.8  | 86.0  | ***  | 14.9  |
| 26    | 6.2  | 84.8 | 112.9 | 50.5  | 208.7 | 130.8 | 26.0  | 106.5 | 128.2 | 55.3  | ***  | 4.4   |
| 27    | 30.6 | 87.7 | 114.9 | 176.3 | 196.1 | 118.4 | 133.2 | 125.7 | 54.0  | 9.7   | ***  | 0.4   |
| 28    | 37.2 | 83.5 | 24.1  | 158.6 | 168.2 | 131.5 | 190.0 | 92.0  | 67.5  | 73.8  | ***  | -6.3  |
| 29    | 31.4 | ...  | 48.2  | 150.9 | 201.7 | 72.7  | 140.7 | 185.2 | 114.3 | 21.7  | ***  | 13.5  |
| 30    | 50.6 | ...  | 138.1 | 148.8 | 43.8  | 107.1 | 136.3 | 138.2 | 101.3 | 18.3  | ***  | 23.8  |
| 31    | 46.5 | ...  | 101.0 | ...   | 76.8  | ...   | 126.2 | 86.3  | ...   | 33.5  | ...  | 12.9  |
| MEAN  | 25.4 | 48.1 | 66.1  | 109.7 | 127.2 | 128.2 | 123.5 | 138.9 | 101.6 | 54.9  | 44.1 | 15.0  |

ITEM SOIL HEAT FLUX (0.02 m DEPTH)  
 INSTRUMENT SOIL HEAT FLUX METER (CPR-PHF-01)  
 UNIT (W/m<sup>2</sup>)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1   | 2   | 3    | 4     | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10    | 11    | 12   |
|-------|-----|-----|------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| 1     | *** | *** | ***  | 3.7   | 13.5 | 10.3 | 3.1  | 12.5 | -1.3 | 2.6   | -14.2 | -7.8 |
| 2     | *** | *** | ***  | 0.8   | 5.0  | 2.0  | 3.8  | 13.5 | 1.7  | -6.0  | -9.1  | -5.9 |
| 3     | *** | *** | ***  | 12.7  | 4.2  | 4.9  | -4.5 | 15.5 | 0.8  | -5.1  | -3.6  | -9.3 |
| 4     | *** | *** | ***  | -11.1 | 8.0  | -0.6 | -1.5 | 19.5 | -1.2 | -3.4  | -6.3  | -5.9 |
| 5     | *** | *** | ***  | 4.2   | 3.3  | 9.2  | 6.7  | 19.0 | -2.9 | -6.8  | -3.8  | -6.2 |
| 6     | *** | *** | ***  | 14.0  | -4.4 | 3.7  | -2.2 | 17.1 | -0.3 | -6.5  | -3.3  | -5.9 |
| 7     | *** | *** | ***  | 13.4  | 1.8  | 3.3  | 4.4  | 16.7 | 2.3  | 1.4   | -1.1  | -6.3 |
| 8     | *** | *** | ***  | 6.4   | -2.4 | 2.9  | 0.2  | 6.4  | 2.9  | 2.0   | -5.4  | -5.8 |
| 9     | *** | *** | ***  | 6.8   | 12.7 | 5.3  | -2.0 | 8.3  | -5.6 | -5.2  | -10.9 | -6.1 |
| 10    | *** | *** | ***  | 12.2  | 1.7  | 5.4  | 8.9  | 0.5  | 2.4  | -5.2  | -9.9  | -6.8 |
| 11    | *** | *** | ***  | -7.2  | -7.3 | 9.5  | 8.0  | 7.3  | -0.6 | -7.1  | -7.5  | -7.3 |
| 12    | *** | *** | ***  | -9.9  | 0.8  | 9.5  | -6.2 | 3.0  | -0.6 | -6.9  | -5.6  | -8.1 |
| 13    | *** | *** | ***  | -5.3  | -5.4 | 4.7  | -1.0 | 6.9  | 2.2  | -4.9  | -9.6  | -9.0 |
| 14    | *** | *** | ***  | 14.3  | 7.5  | 1.3  | 0.5  | 9.8  | 0.5  | -3.3  | -6.5  | -8.9 |
| 15    | *** | *** | ***  | 10.3  | 8.3  | -2.0 | 8.1  | 7.8  | -7.9 | -7.9  | -6.4  | -7.5 |
| 16    | *** | *** | ***  | -1.4  | 7.1  | -0.2 | 5.1  | 2.7  | -8.1 | -9.1  | -11.3 | -6.6 |
| 17    | *** | *** | ***  | 8.0   | 9.7  | 5.0  | 5.1  | 2.5  | -5.3 | -6.4  | -14.2 | -5.7 |
| 18    | *** | *** | ***  | 3.8   | 9.8  | 6.1  | 5.3  | 4.3  | -0.8 | -7.7  | -10.7 | -7.8 |
| 19    | *** | *** | ***  | 8.2   | 14.7 | 7.0  | -1.0 | 6.8  | 1.9  | -5.9  | -10.4 | -7.4 |
| 20    | *** | *** | ***  | -1.7  | 3.3  | 4.8  | -2.3 | 6.7  | -1.7 | -8.2  | -11.1 | -6.0 |
| 21    | *** | *** | ***  | 4.3   | 13.7 | 6.8  | 4.1  | 9.9  | -1.2 | -2.8  | -9.8  | -3.8 |
| 22    | *** | *** | ***  | -2.5  | 14.8 | 1.0  | -1.2 | 4.8  | -2.0 | -3.3  | -6.5  | -4.3 |
| 23    | *** | *** | ***  | -1.9  | 0.0  | 5.3  | 4.3  | 3.2  | 2.3  | -4.3  | -4.6  | -5.2 |
| 24    | *** | *** | ***  | 2.9   | 4.0  | 2.3  | 8.4  | 4.9  | -1.4 | -2.6  | -6.4  | -3.2 |
| 25    | *** | *** | ***  | -5.1  | 4.0  | 0.4  | 7.2  | 10.5 | -1.3 | -6.3  | -7.7  | -5.9 |
| 26    | *** | *** | ***  | -2.6  | -2.4 | 4.3  | 6.2  | 1.7  | 4.3  | -3.9  | -5.9  | -4.1 |
| 27    | *** | *** | ***  | 5.3   | 8.3  | 10.0 | 4.8  | 10.9 | 3.2  | -6.2  | -8.2  | -5.2 |
| 28    | *** | *** | ***  | -0.4  | 13.4 | 6.5  | 7.1  | 8.9  | -3.0 | -5.9  | -2.8  | -3.2 |
| 29    | *** | ... | 2.6  | 18.0  | 8.2  | -0.6 | 10.7 | -1.2 | -6.2 | -3.3  | -4.0  | -5.2 |
| 30    | *** | ... | -1.3 | 6.3   | 0.9  | 5.0  | 10.3 | -0.1 | -6.0 | -4.3  | -7.9  | -4.7 |
| 31    | *** | ... | 1.6  | ...   | 0.5  | ...  | 10.7 | -2.3 | ...  | -11.2 | ...   | -4.6 |
| MEAN  | *** | *** | 0.1  | 4.5   | 5.1  | 4.7  | 3.6  | 6.5  | -2.0 | -4.2  | -7.2  | -6.3 |

ITEM AIR TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1    | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1     | 0.1  | 0.2 | 2.6  | 8.3  | 18.3 | 20.1 | 23.5 | 28.1 | 24.5 | 19.9 | 8.6  | 3.9  |
| 2     | -1.0 | 0.3 | 2.3  | 9.2  | 18.9 | 18.8 | 23.7 | 28.5 | 26.0 | 22.8 | 9.8  | 4.3  |
| 3     | 0.6  | 1.6 | 2.7  | 12.3 | 15.5 | 18.0 | 19.5 | 29.1 | 26.6 | 21.9 | 12.1 | 3.1  |
| 4     | 5.5  | 2.7 | 0.6  | 5.5  | 17.0 | 15.7 | 19.9 | 28.9 | 24.8 | 18.0 | 12.4 | 2.9  |
| 5     | 1.6  | 2.3 | 2.3  | 8.0  | 15.9 | 18.8 | 22.7 | 29.1 | 23.1 | 17.9 | 13.2 | 4.4  |
| 6     | -0.4 | 2.6 | 1.5  | 14.3 | 11.5 | 18.8 | 20.3 | 29.2 | 23.9 | 18.3 | 12.9 | 4.3  |
| 7     | 4.5  | 2.1 | 3.5  | 18.3 | 13.3 | 18.2 | 22.5 | 28.7 | 27.3 | 19.5 | 16.0 | 2.8  |
| 8     | 2.0  | 2.8 | 6.7  | 17.1 | 13.5 | 18.9 | 20.7 | 26.3 | 28.2 | 22.0 | 14.6 | 3.8  |
| 9     | 0.0  | 3.1 | 6.4  | 11.8 | 15.8 | 20.4 | 19.7 | 26.0 | 23.5 | 18.2 | 10.7 | 4.4  |
| 10    | 0.5  | 6.1 | 6.8  | 15.9 | 16.2 | 20.7 | 25.2 | 25.4 | 25.6 | 17.4 | 9.2  | 3.6  |
| 11    | -0.3 | 2.5 | 6.6  | 11.0 | 11.3 | 22.4 | 26.3 | 26.3 | 24.8 | 18.5 | 8.7  | 1.1  |
| 12    | -0.6 | 1.3 | 8.1  | 6.7  | 11.8 | 23.7 | 19.6 | 25.9 | 24.5 | 17.7 | 10.9 | -0.2 |
| 13    | 2.5  | 1.3 | 3.2  | 7.1  | 10.7 | 21.3 | 20.4 | 25.9 | 26.5 | 16.8 | 8.1  | 0.7  |
| 14    | 2.5  | 1.7 | 2.4  | 12.2 | 11.1 | 19.6 | 21.3 | 27.9 | 26.5 | 19.5 | 8.7  | -0.3 |
| 15    | 5.0  | 5.3 | 3.4  | 14.9 | 14.1 | 18.5 | 25.4 | 27.8 | 22.0 | 21.9 | 8.9  | -0.3 |
| 16    | 5.2  | 3.0 | 8.5  | 12.6 | 12.7 | 18.2 | 25.5 | 25.7 | 19.7 | 18.3 | 6.3  | 1.6  |
| 17    | 4.4  | 5.5 | 9.7  | 13.7 | 13.9 | 19.5 | 26.6 | 24.8 | 19.9 | 17.0 | 3.8  | 1.8  |
| 18    | 4.6  | 3.6 | 11.5 | 11.0 | 17.1 | 20.6 | 26.9 | 26.2 | 22.8 | 16.1 | 4.6  | 0.2  |
| 19    | 4.4  | 3.0 | 6.5  | 12.2 | 20.8 | 22.8 | 24.8 | 28.0 | 24.8 | 16.2 | 5.4  | -0.1 |
| 20    | 3.7  | 6.0 | 3.6  | 10.8 | 16.8 | 23.0 | 22.7 | 28.1 | 22.8 | 16.0 | 3.5  | 0.4  |
| 21    | 4.0  | 3.2 | 8.0  | 13.7 | 18.2 | 24.0 | 25.7 | 28.5 | 22.4 | 17.0 | 3.7  | 1.0  |
| 22    | 2.5  | 2.8 | 10.3 | 12.6 | 19.1 | 21.7 | 22.7 | 28.0 | 21.3 | 14.7 | 6.2  | 1.7  |
| 23    | 0.0  | 7.1 | 9.8  | 13.0 | 17.6 | 22.4 | 22.1 | 26.8 | 23.6 | 14.1 | 7.3  | 1.6  |
| 24    | 2.1  | 3.3 | 8.4  | 11.1 | 15.8 | 24.8 | 23.0 | 23.1 | 22.0 | 14.5 | 9.0  | -0.2 |
| 25    | 4.0  | 2.1 | 4.7  | 13.5 | 14.4 | 25.7 | 25.6 | 23.9 | 20.1 | 14.1 | 7.1  | -1.4 |
| 26    | 0.8  | 1.6 | 4.4  | 13.8 | 14.8 | 26.2 | 24.6 | 26.8 | 20.2 | 13.2 | 7.7  | 0.8  |
| 27    | 1.6  | 1.0 | 8.2  | 14.0 | 17.9 | 25.5 | 28.0 | 26.2 | 18.6 | 13.4 | 7.6  | 2.1  |
| 28    | 2.4  | 3.9 | 8.4  | 17.8 | 18.9 | 26.5 | 26.4 | 23.8 | 18.3 | 14.2 | 8.5  | 1.6  |
| 29    | 4.0  | ... | 9.7  | 21.3 | 16.7 | 22.6 | 27.7 | 24.5 | 18.0 | 15.5 | 9.6  | 1.1  |
| 30    | 4.8  | ... | 7.3  | 16.6 | 17.3 | 23.6 | 27.7 | 24.7 | 17.3 | 15.1 | 7.4  | -0.4 |
| 31    | 3.6  | ... | 7.1  | ...  | 17.2 | ...  | 27.9 | 23.9 | ...  | 11.5 | ...  | 1.2  |
| MEAN  | 2.4  | 2.9 | 6.0  | 12.7 | 15.6 | 21.4 | 23.8 | 26.6 | 23.0 | 17.1 | 8.7  | 1.7  |

ITEM AIR TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12  |
|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1     | 1.4 | 1.3 | 3.2  | 8.9  | 18.7 | 20.6 | 23.6 | 27.7 | 25.2 | 20.6 | 10.5 | 5.6 |
| 2     | 1.3 | 1.3 | 2.9  | 9.1  | 18.7 | 19.1 | 23.5 | 28.1 | 26.8 | 23.8 | 11.4 | 5.0 |
| 3     | 1.7 | 2.4 | 2.8  | 12.4 | 15.7 | 17.7 | 19.3 | 28.7 | 27.3 | 22.0 | 12.7 | 4.9 |
| 4     | 6.4 | 4.3 | 0.6  | 5.9  | 17.6 | 15.5 | 19.8 | 28.6 | 24.7 | 18.0 | 14.0 | 4.0 |
| 5     | 2.7 | 3.3 | 2.4  | 9.4  | 16.1 | 18.9 | 22.4 | 28.9 | 23.1 | 17.9 | 14.2 | 5.1 |
| 6     | 0.3 | 3.6 | 1.7  | 15.3 | 11.6 | 19.1 | 20.7 | 29.2 | 23.8 | 18.3 | 13.4 | 5.1 |
| 7     | 4.9 | 3.1 | 4.4  | 18.5 | 13.5 | 18.0 | 23.0 | 28.6 | 27.3 | 19.8 | 17.4 | 4.3 |
| 8     | 3.2 | 2.8 | 7.2  | 17.8 | 13.5 | 19.4 | 20.9 | 26.3 | 28.2 | 21.9 | 15.5 | 4.9 |
| 9     | 1.2 | 3.4 | 6.9  | 12.2 | 15.6 | 20.9 | 19.5 | 25.9 | 23.5 | 18.2 | 12.8 | 5.9 |
| 10    | 2.1 | 6.2 | 6.6  | 15.8 | 16.5 | 20.8 | 25.4 | 25.2 | 25.7 | 17.4 | 10.7 | 5.9 |
| 11    | 2.3 | 3.4 | 6.8  | 11.3 | 11.5 | 22.2 | 26.3 | 26.0 | 25.0 | 18.7 | 9.7  | 2.3 |
| 12    | 0.3 | 2.3 | 7.9  | 6.6  | 12.1 | 23.9 | 19.5 | 25.7 | 24.9 | 18.2 | 12.1 | 1.0 |
| 13    | 3.8 | 2.5 | 3.9  | 7.2  | 10.9 | 21.3 | 20.2 | 25.8 | 27.0 | 17.5 | 10.0 | 2.1 |
| 14    | 3.6 | 3.0 | 3.2  | 11.9 | 10.7 | 19.4 | 21.1 | 27.6 | 26.6 | 19.5 | 9.3  | 1.8 |
| 15    | 5.0 | 5.4 | 4.7  | 15.2 | 13.9 | 18.5 | 25.2 | 27.6 | 22.3 | 21.6 | 9.2  | 1.6 |
| 16    | 5.2 | 2.9 | 8.6  | 12.8 | 13.3 | 18.2 | 25.5 | 25.4 | 20.4 | 18.3 | 8.0  | 3.4 |
| 17    | 5.1 | 5.7 | 9.7  | 14.2 | 13.9 | 19.4 | 27.1 | 24.8 | 20.8 | 17.1 | 6.0  | 2.9 |
| 18    | 5.9 | 4.0 | 11.3 | 10.7 | 16.9 | 20.3 | 27.7 | 26.1 | 24.0 | 16.3 | 6.4  | 1.0 |
| 19    | 4.8 | 2.9 | 7.0  | 11.9 | 20.6 | 22.8 | 25.7 | 27.9 | 25.7 | 16.8 | 7.0  | 1.3 |
| 20    | 4.3 | 6.3 | 4.7  | 10.7 | 17.4 | 23.2 | 24.0 | 28.2 | 23.2 | 16.8 | 5.3  | 3.2 |
| 21    | 4.1 | 3.7 | 8.1  | 13.5 | 18.7 | 24.2 | 25.8 | 28.5 | 22.4 | 17.3 | 5.4  | 2.2 |
| 22    | 3.4 | 4.3 | 10.3 | 13.0 | 19.2 | 22.0 | 22.4 | 27.9 | 21.4 | 15.1 | 6.9  | 1.7 |
| 23    | 0.8 | 8.0 | 9.7  | 13.4 | 17.7 | 22.5 | 21.8 | 26.6 | 23.6 | 15.2 | 8.3  | 2.8 |
| 24    | 2.9 | 4.6 | 8.5  | 11.1 | 15.8 | 25.4 | 22.9 | 23.0 | 22.0 | 15.6 | 10.1 | 1.2 |
| 25    | 4.7 | 2.3 | 5.1  | 13.6 | 14.4 | 26.2 | 25.2 | 23.8 | 20.1 | 15.7 | 8.2  | 1.3 |
| 26    | 1.6 | 2.2 | 5.9  | 14.4 | 15.1 | 26.7 | 24.5 | 27.2 | 20.3 | 13.6 | 8.5  | 2.0 |
| 27    | 3.4 | 1.8 | 9.6  | 14.5 | 17.7 | 26.1 | 28.8 | 26.3 | 18.7 | 14.0 | 9.0  | 2.2 |
| 28    | 3.4 | 4.3 | 8.5  | 18.8 | 18.8 | 27.2 | 26.3 | 23.8 | 18.5 | 14.9 | 9.7  | 2.1 |
| 29    | 4.9 | ... | 9.8  | 21.7 | 16.4 | 23.1 | 27.4 | 24.6 | 18.6 | 16.0 | 10.6 | 2.1 |
| 30    | 4.9 | ... | 8.3  | 16.9 | 17.2 | 23.7 | 27.3 | 25.2 | 18.3 | 15.5 | 8.8  | 1.3 |
| 31    | 3.9 | ... | 8.1  | ...  | 17.8 | ...  | 27.5 | 24.3 | ...  | 12.6 | ...  | 2.4 |
| MEAN  | 3.3 | 3.6 | 6.4  | 12.9 | 15.7 | 21.5 | 23.9 | 26.6 | 23.3 | 17.6 | 10.0 | 3.0 |

ITEM AIR TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12  |
|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1     | 1.7 | 1.7 | 3.4  | 9.1  | 18.6 | 20.5 | 23.2 | 27.2 | 25.2 | 20.9 | 11.4 | 6.6 |
| 2     | 2.2 | 1.6 | 2.9  | 8.9  | 18.2 | 18.9 | 23.1 | 27.5 | 26.8 | 23.7 | 11.9 | 5.5 |
| 3     | 2.5 | 2.5 | 2.9  | 12.3 | 15.5 | 17.3 | 18.9 | 28.2 | 27.2 | 21.7 | 12.8 | 5.7 |
| 4     | 7.4 | 4.5 | 0.5  | 5.9  | 17.5 | 15.2 | 19.4 | 28.1 | 24.2 | 17.7 | 14.5 | 4.3 |
| 5     | 2.9 | 3.7 | 2.4  | 10.0 | 15.9 | 18.6 | 22.0 | 28.5 | 22.7 | 17.6 | 14.5 | 5.4 |
| 6     | 0.9 | 3.9 | 1.7  | 15.4 | 11.5 | 18.9 | 20.4 | 28.8 | 23.4 | 18.0 | 13.4 | 5.6 |
| 7     | 5.1 | 3.7 | 5.0  | 18.3 | 13.3 | 17.6 | 22.8 | 28.1 | 26.9 | 19.7 | 17.6 | 5.2 |
| 8     | 3.5 | 2.8 | 7.3  | 17.7 | 13.3 | 19.2 | 20.5 | 25.9 | 27.7 | 21.5 | 15.7 | 5.3 |
| 9     | 1.8 | 3.6 | 7.4  | 12.1 | 15.3 | 20.7 | 19.1 | 25.5 | 23.1 | 17.9 | 13.2 | 6.6 |
| 10    | 2.5 | 6.2 | 6.4  | 15.5 | 16.2 | 20.6 | 25.0 | 24.7 | 25.3 | 17.1 | 11.2 | 6.9 |
| 11    | 3.0 | 3.6 | 6.8  | 11.3 | 11.2 | 21.8 | 25.9 | 25.5 | 24.7 | 18.4 | 10.0 | 3.1 |
| 12    | 0.9 | 2.5 | 7.7  | 6.4  | 12.0 | 23.6 | 19.1 | 25.3 | 24.7 | 18.0 | 12.3 | 1.7 |
| 13    | 4.2 | 2.9 | 4.0  | 7.1  | 10.7 | 20.9 | 19.8 | 25.4 | 26.7 | 17.5 | 11.3 | 2.7 |
| 14    | 4.2 | 3.3 | 3.6  | 11.6 | 10.4 | 18.9 | 20.7 | 27.1 | 26.2 | 19.3 | 9.6  | 2.6 |
| 15    | 4.9 | 5.3 | 5.2  | 15.0 | 13.6 | 18.1 | 24.7 | 27.1 | 22.0 | 21.2 | 9.1  | 2.5 |
| 16    | 5.2 | 2.8 | 8.6  | 12.6 | 13.3 | 17.9 | 25.1 | 25.0 | 20.3 | 18.0 | 8.6  | 4.0 |
| 17    | 5.5 | 5.8 | 9.6  | 14.3 | 13.6 | 19.0 | 26.7 | 24.5 | 21.0 | 16.9 | 6.8  | 3.4 |
| 18    | 6.1 | 4.0 | 11.1 | 10.4 | 16.6 | 19.9 | 27.4 | 25.6 | 24.2 | 16.2 | 7.0  | 1.2 |
| 19    | 4.9 | 2.9 | 7.0  | 11.7 | 20.2 | 22.4 | 25.4 | 27.5 | 25.5 | 16.6 | 7.6  | 1.8 |
| 20    | 4.5 | 6.3 | 5.1  | 10.5 | 17.3 | 22.8 | 23.9 | 27.9 | 22.9 | 16.8 | 6.5  | 4.2 |
| 21    | 4.0 | 3.8 | 8.0  | 13.3 | 19.1 | 23.8 | 25.4 | 28.0 | 22.0 | 17.1 | 6.4  | 2.8 |
| 22    | 3.5 | 4.6 | 10.2 | 12.8 | 18.9 | 21.7 | 21.9 | 27.4 | 21.1 | 15.1 | 7.2  | 1.8 |
| 23    | 1.1 | 8.3 | 9.5  | 13.3 | 17.5 | 22.2 | 21.3 | 26.1 | 23.2 | 15.5 | 8.6  | 3.3 |
| 24    | 3.3 | 4.9 | 8.4  | 10.9 | 15.5 | 25.1 | 22.5 | 22.6 | 21.6 | 16.0 | 10.5 | 1.9 |
| 25    | 5.1 | 2.3 | 5.1  | 13.4 | 14.1 | 25.8 | 24.7 | 23.4 | 19.8 | 15.9 | 8.8  | 2.5 |
| 26    | 2.1 | 2.3 | 6.2  | 14.5 | 15.0 | 26.4 | 24.1 | 26.8 | 20.0 | 13.5 | 8.8  | 2.4 |
| 27    | 4.1 | 2.0 | 10.0 | 14.8 | 17.4 | 25.8 | 28.7 | 25.9 | 18.3 | 13.9 | 9.7  | 2.2 |
| 28    | 3.7 | 4.3 | 8.4  | 18.7 | 18.4 | 26.9 | 25.9 | 23.4 | 18.2 | 15.0 | 10.7 | 2.2 |
| 29    | 5.6 | ... | 9.6  | 21.4 | 15.9 | 22.8 | 26.9 | 24.3 | 18.4 | 16.0 | 11.2 | 2.4 |
| 30    | 4.8 | ... | 8.4  | 16.7 | 16.9 | 23.3 | 26.8 | 25.0 | 18.4 | 15.4 | 9.3  | 2.5 |
| 31    | 3.9 | ... | 8.3  | ...  | 17.6 | ...  | 27.0 | 24.0 | ...  | 12.8 | ...  | 2.7 |
| MEAN  | 3.7 | 3.8 | 6.5  | 12.9 | 15.5 | 21.2 | 23.5 | 26.1 | 23.0 | 17.4 | 10.5 | 3.6 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.02 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1   | 2   | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12  |
|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1     | 4.0 | 3.6 | 4.0  | 8.9  | 17.3 | 20.2 | 23.3 | 27.9 | 25.1 | 19.7 | 12.6 | 7.1 |
| 2     | 3.6 | 2.9 | 4.0  | 9.7  | 19.1 | 19.2 | 23.8 | 28.2 | 25.7 | 21.2 | 12.2 | 6.6 |
| 3     | 3.3 | 2.6 | 4.2  | 12.0 | 18.2 | 19.5 | 21.5 | 28.6 | 26.0 | 21.6 | 13.2 | 6.4 |
| 4     | 3.9 | 2.7 | 4.1  | 9.5  | 18.0 | 18.2 | 20.3 | 29.2 | 25.3 | 20.2 | 13.6 | 5.6 |
| 5     | 4.3 | 2.7 | 3.4  | 9.4  | 17.3 | 20.1 | 22.5 | 29.3 | 24.7 | 19.8 | 13.3 | 6.6 |
| 6     | 3.6 | 2.9 | 3.3  | 12.1 | 14.4 | 20.3 | 21.2 | 29.1 | 24.6 | 20.0 | 13.6 | 6.3 |
| 7     | 4.0 | 2.9 | 3.5  | 14.5 | 14.9 | 19.8 | 22.0 | 28.9 | 25.8 | 20.2 | 15.6 | 5.8 |
| 8     | 4.2 | 3.6 | 4.1  | 14.6 | 14.5 | 19.9 | 21.9 | 27.3 | 26.5 | 21.6 | 13.7 | 5.9 |
| 9     | 3.6 | 3.8 | 5.0  | 13.4 | 17.9 | 19.8 | 20.9 | 27.7 | 24.5 | 20.3 | 12.5 | 5.4 |
| 10    | 3.3 | 4.5 | 5.3  | 15.0 | 17.7 | 20.2 | 22.9 | 26.6 | 25.4 | 19.5 | 11.6 | 5.2 |
| 11    | 3.0 | 4.5 | 5.5  | 12.3 | 14.4 | 21.8 | 24.1 | 27.5 | 25.3 | 19.7 | 11.0 | 4.4 |
| 12    | 2.6 | 3.8 | 6.3  | 9.4  | 14.3 | 23.1 | 21.8 | 26.8 | 25.2 | 19.1 | 12.7 | 4.2 |
| 13    | 2.7 | 3.7 | 5.9  | 9.3  | 12.9 | 22.5 | 21.2 | 26.5 | 25.4 | 18.2 | 10.9 | 3.5 |
| 14    | 2.9 | 3.3 | 4.9  | 13.0 | 14.8 | 20.9 | 21.4 | 28.2 | 25.8 | 19.4 | 10.6 | 2.6 |
| 15    | 3.7 | 3.6 | 4.6  | 14.6 | 15.9 | 19.6 | 23.3 | 28.6 | 23.9 | 20.8 | 11.4 | 2.6 |
| 16    | 4.7 | 4.1 | 5.2  | 13.7 | 16.0 | 19.6 | 23.8 | 27.7 | 22.2 | 19.8 | 10.2 | 2.8 |
| 17    | 4.4 | 4.5 | 6.1  | 13.8 | 16.3 | 20.3 | 24.4 | 27.1 | 21.4 | 18.9 | 8.3  | 2.9 |
| 18    | 4.2 | 4.6 | 6.9  | 13.8 | 16.9 | 21.2 | 24.6 | 27.1 | 22.4 | 17.7 | 7.9  | 2.7 |
| 19    | 4.4 | 4.4 | 6.6  | 14.6 | 19.9 | 22.3 | 23.7 | 27.8 | 23.4 | 17.5 | 7.9  | 1.9 |
| 20    | 4.2 | 4.7 | 5.7  | 12.3 | 18.6 | 22.5 | 22.0 | 28.0 | 23.2 | 17.1 | 6.9  | 1.9 |
| 21    | 3.9 | 5.2 | 5.7  | 14.5 | 18.7 | 23.0 | 23.1 | 28.3 | 22.9 | 17.9 | 6.8  | 2.6 |
| 22    | 3.7 | 4.6 | 8.2  | 13.1 | 19.5 | 21.9 | 23.3 | 27.6 | 22.3 | 17.0 | 7.5  | 2.6 |
| 23    | 3.1 | 4.4 | 10.0 | 13.1 | 19.5 | 22.1 | 23.0 | 27.3 | 23.2 | 16.4 | 8.1  | 2.8 |
| 24    | 3.3 | 4.4 | 9.3  | 13.9 | 18.4 | 23.5 | 23.4 | 25.2 | 22.7 | 15.6 | 9.3  | 2.2 |
| 25    | 3.5 | 3.9 | 7.1  | 13.7 | 18.1 | 24.2 | 25.4 | 24.8 | 21.4 | 15.7 | 8.4  | 1.7 |
| 26    | 3.8 | 3.7 | 6.3  | 14.4 | 17.9 | 24.2 | 24.3 | 25.7 | 21.3 | 15.3 | 8.5  | 1.6 |
| 27    | 3.1 | 3.3 | 7.9  | 14.4 | 19.7 | 24.0 | 26.7 | 26.7 | 20.6 | 15.6 | 8.8  | 2.0 |
| 28    | 3.0 | 3.7 | 8.1  | 16.7 | 20.1 | 24.5 | 26.8 | 25.4 | 20.1 | 15.2 | 8.5  | 2.1 |
| 29    | 3.3 | ... | 9.7  | 19.0 | 19.6 | 23.3 | 27.2 | 25.9 | 19.6 | 16.3 | 9.3  | 2.0 |
| 30    | 4.1 | ... | 8.5  | 17.7 | 17.8 | 23.1 | 27.8 | 25.3 | 19.0 | 16.2 | 8.2  | 1.9 |
| 31    | 4.0 | ... | 8.6  | ...  | 17.9 | ...  | 28.0 | 25.4 | ...  | 14.9 | ...  | 2.1 |
| MEAN  | 3.6 | 3.8 | 6.1  | 13.2 | 17.3 | 21.5 | 23.5 | 27.3 | 23.5 | 18.3 | 10.4 | 3.7 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.10 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1   | 2   | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12  |
|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1     | 5.2 | 4.4 | 4.5 | 8.7  | 16.1 | 18.3 | 22.6 | 26.7 | 25.2 | 20.3 | 15.0 | 8.9 |
| 2     | 4.9 | 4.0 | 4.6 | 9.3  | 17.4 | 18.7 | 22.9 | 26.9 | 25.4 | 21.0 | 14.2 | 8.4 |
| 3     | 4.6 | 3.6 | 4.7 | 10.2 | 17.1 | 18.6 | 22.0 | 27.2 | 25.6 | 21.6 | 14.3 | 8.3 |
| 4     | 4.7 | 3.6 | 4.8 | 10.2 | 16.8 | 18.2 | 20.7 | 27.6 | 25.5 | 21.0 | 14.7 | 7.5 |
| 5     | 5.1 | 3.5 | 4.3 | 9.2  | 16.8 | 18.7 | 21.5 | 27.9 | 25.1 | 20.6 | 14.4 | 7.9 |
| 6     | 4.9 | 3.6 | 4.1 | 10.5 | 15.4 | 19.2 | 21.3 | 27.9 | 24.7 | 20.5 | 14.5 | 7.8 |
| 7     | 4.8 | 3.6 | 4.1 | 12.3 | 14.6 | 19.2 | 21.4 | 27.8 | 25.3 | 20.4 | 15.6 | 7.5 |
| 8     | 5.1 | 4.0 | 4.5 | 13.1 | 14.8 | 19.1 | 21.7 | 26.9 | 25.8 | 21.2 | 14.8 | 7.4 |
| 9     | 4.7 | 4.2 | 5.1 | 12.6 | 15.9 | 19.0 | 21.1 | 26.6 | 25.1 | 21.0 | 14.2 | 7.1 |
| 10    | 4.4 | 4.6 | 5.5 | 13.3 | 16.6 | 19.3 | 21.7 | 26.4 | 25.0 | 20.3 | 13.5 | 6.9 |
| 11    | 4.2 | 4.9 | 5.7 | 12.9 | 15.3 | 20.1 | 22.8 | 26.6 | 25.3 | 20.2 | 12.8 | 6.4 |
| 12    | 3.9 | 4.6 | 6.2 | 10.7 | 14.6 | 21.1 | 22.3 | 26.4 | 25.1 | 19.9 | 13.5 | 6.1 |
| 13    | 3.7 | 4.4 | 6.3 | 10.1 | 14.0 | 21.3 | 21.4 | 25.8 | 25.1 | 19.3 | 12.7 | 5.7 |
| 14    | 3.7 | 4.1 | 5.7 | 11.3 | 14.2 | 20.6 | 21.3 | 26.8 | 25.5 | 19.5 | 12.2 | 5.0 |
| 15    | 4.1 | 4.1 | 5.3 | 12.9 | 15.0 | 19.8 | 22.1 | 27.5 | 24.8 | 20.5 | 12.6 | 4.7 |
| 16    | 4.9 | 4.5 | 5.4 | 13.2 | 15.2 | 19.5 | 22.8 | 27.3 | 23.5 | 20.4 | 12.1 | 4.7 |
| 17    | 4.8 | 4.7 | 6.2 | 12.8 | 15.5 | 19.6 | 23.3 | 26.7 | 22.5 | 19.7 | 10.9 | 4.6 |
| 18    | 4.8 | 5.1 | 6.8 | 13.3 | 15.8 | 20.1 | 23.5 | 26.6 | 22.8 | 18.8 | 10.2 | 4.6 |
| 19    | 4.8 | 4.9 | 6.9 | 13.6 | 17.3 | 20.9 | 23.4 | 27.0 | 23.3 | 18.5 | 10.1 | 4.1 |
| 20    | 4.8 | 5.0 | 6.4 | 12.8 | 17.5 | 21.3 | 22.3 | 27.2 | 23.5 | 18.1 | 9.4  | 3.8 |
| 21    | 4.7 | 5.4 | 6.1 | 13.4 | 17.2 | 21.6 | 22.5 | 27.4 | 23.2 | 18.4 | 9.0  | 4.0 |
| 22    | 4.5 | 5.2 | 8.0 | 13.1 | 17.9 | 21.4 | 22.9 | 27.2 | 22.8 | 18.2 | 9.1  | 4.1 |
| 23    | 4.2 | 5.0 | 9.9 | 12.8 | 18.1 | 21.3 | 22.7 | 27.0 | 23.0 | 17.7 | 9.4  | 4.2 |
| 24    | 4.1 | 5.0 | 9.1 | 13.3 | 17.6 | 22.0 | 22.8 | 25.6 | 23.1 | 16.9 | 10.1 | 3.9 |
| 25    | 4.2 | 4.8 | 8.2 | 13.3 | 17.5 | 22.6 | 23.9 | 25.2 | 22.4 | 16.9 | 9.8  | 3.6 |
| 26    | 4.4 | 4.4 | 7.2 | 13.9 | 17.2 | 22.9 | 23.9 | 25.4 | 21.9 | 16.6 | 9.7  | 3.4 |
| 27    | 4.1 | 4.2 | 7.6 | 13.5 | 18.0 | 22.9 | 25.0 | 26.1 | 21.6 | 16.7 | 9.9  | 3.4 |
| 28    | 3.9 | 4.2 | 8.3 | 14.9 | 18.7 | 23.2 | 25.5 | 25.7 | 21.1 | 16.2 | 9.6  | 3.5 |
| 29    | 3.9 | ... | 8.9 | 16.4 | 18.6 | 22.9 | 25.8 | 25.7 | 20.7 | 16.8 | 10.1 | 3.5 |
| 30    | 4.4 | ... | 8.7 | 16.6 | 17.8 | 22.3 | 26.4 | 25.4 | 20.2 | 16.9 | 9.7  | 3.4 |
| 31    | 4.5 | ... | 8.6 | ...  | 17.5 | ...  | 26.6 | 25.5 | ...  | 16.4 | ...  | 3.4 |
| MEAN  | 4.5 | 4.4 | 6.4 | 12.5 | 16.5 | 20.5 | 22.9 | 26.6 | 23.8 | 19.0 | 11.9 | 5.4 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.50 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1   | 2   | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1     | *** | *** | *** | 8.7  | 13.3 | 16.1 | 19.9 | 22.7 | 24.4 | 21.7 | 18.2 | 12.4 |
| 2     | *** | *** | *** | 8.7  | 13.6 | 16.2 | 20.0 | 22.9 | 24.3 | 21.5 | 17.9 | 12.3 |
| 3     | *** | *** | *** | 8.8  | 13.9 | 16.3 | 20.1 | 23.1 | 24.3 | 21.5 | 17.6 | 12.0 |
| 4     | *** | *** | *** | 9.0  | 14.2 | 16.5 | 20.2 | 23.3 | 24.3 | 21.5 | 17.3 | 11.8 |
| 5     | *** | *** | *** | 9.2  | 14.3 | 16.5 | 20.1 | 23.5 | 24.2 | 21.4 | 17.1 | 11.6 |
| 6     | *** | *** | *** | 9.3  | 14.4 | 16.6 | 20.1 | 23.7 | 24.2 | 21.3 | 17.0 | 11.4 |
| 7     | *** | *** | *** | 9.4  | 14.4 | 16.8 | 20.1 | 23.9 | 24.1 | 21.2 | 16.8 | 11.3 |
| 8     | *** | *** | *** | 9.8  | 14.3 | 16.9 | 20.1 | 24.1 | 24.1 | 21.1 | 16.7 | 11.1 |
| 9     | *** | *** | *** | 10.2 | 14.2 | 17.0 | 20.1 | 24.3 | 24.1 | 21.1 | 16.7 | 10.9 |
| 10    | *** | *** | *** | 10.5 | 14.3 | 17.1 | 20.1 | 24.2 | 24.1 | 21.1 | 16.5 | 10.8 |
| 11    | *** | *** | *** | 10.8 | 14.4 | 17.2 | 20.1 | 24.2 | 24.0 | 21.0 | 16.3 | 10.6 |
| 12    | *** | *** | *** | 11.0 | 14.4 | 17.4 | 20.3 | 24.2 | 24.0 | 20.9 | 16.1 | 10.4 |
| 13    | *** | *** | *** | 10.9 | 14.3 | 17.6 | 20.4 | 24.6 | 24.0 | 20.8 | 15.9 | 10.2 |
| 14    | *** | *** | *** | 10.8 | 14.2 | 17.8 | 20.3 | 24.5 | 24.0 | 20.6 | 15.7 | 9.9  |
| 15    | *** | *** | *** | 10.7 | 14.1 | 18.0 | 20.3 | 24.5 | 24.0 | 20.5 | 15.5 | 9.7  |
| 16    | *** | *** | *** | 11.0 | 14.1 | 18.0 | 20.3 | 24.7 | 24.0 | 20.5 | 15.3 | 9.4  |
| 17    | *** | *** | *** | 11.2 | 14.1 | 18.0 | 20.5 | 24.7 | 23.7 | 20.6 | 15.1 | 9.2  |
| 18    | *** | *** | *** | 11.4 | 14.2 | 18.0 | 20.6 | 24.7 | 23.5 | 20.4 | 14.8 | 9.0  |
| 19    | *** | *** | *** | 11.5 | 14.3 | 18.1 | 20.8 | 24.7 | 23.3 | 20.2 | 14.5 | 8.8  |
| 20    | *** | *** | *** | 11.7 | 14.5 | 18.2 | 20.9 | 24.7 | 23.2 | 20.0 | 14.2 | 8.6  |
| 21    | *** | *** | *** | 11.8 | 14.8 | 18.4 | 20.9 | 24.8 | 23.1 | 19.8 | 13.9 | 8.4  |
| 22    | *** | *** | *** | 11.9 | 14.9 | 18.6 | 20.9 | 24.8 | 23.1 | 19.7 | 13.5 | 8.2  |
| 23    | *** | *** | 8.8 | 12.0 | 15.1 | 18.7 | 20.9 | 24.8 | 22.9 | 19.6 | 13.3 | 8.1  |
| 24    | *** | *** | 8.8 | 12.0 | 15.3 | 18.8 | 20.9 | 24.9 | 22.9 | 19.4 | 13.1 | 8.0  |
| 25    | *** | *** | 8.8 | 12.1 | 15.5 | 19.0 | 21.0 | 24.8 | 22.8 | 19.2 | 13.0 | 7.9  |
| 26    | *** | *** | 8.7 | 12.2 | 15.5 | 19.2 | 21.3 | 24.8 | 22.7 | 19.0 | 12.9 | 7.7  |
| 27    | *** | *** | 8.5 | 12.4 | 15.6 | 19.4 | 21.6 | 24.7 | 22.5 | 18.8 | 12.8 | 7.6  |
| 28    | *** | *** | 8.4 | 12.4 | 15.7 | 19.6 | 21.8 | 24.6 | 22.4 | 18.6 | 12.7 | 7.4  |
| 29    | *** | ... | 8.4 | 12.6 | 15.9 | 19.8 | 22.0 | 24.6 | 22.2 | 18.4 | 12.5 | 7.3  |
| 30    | *** | ... | 8.5 | 13.0 | 16.0 | 19.9 | 22.2 | 24.5 | 21.9 | 18.3 | 12.5 | 7.2  |
| 31    | *** | ... | 8.6 | ...  | 16.1 | ...  | 22.5 | 24.4 | ...  | 18.3 | ...  | 7.1  |
| MEAN  | *** | *** | 8.6 | 10.9 | 14.6 | 17.8 | 20.7 | 24.3 | 23.5 | 20.3 | 15.2 | 9.6  |

ITEM SOIL TEMPERATURE (1.00 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1    | 2   | 3   | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1     | 12.5 | 9.6 | 8.8 | 9.5  | 11.7 | 14.0 | 16.5 | 18.7 | 21.5 | 20.8 | 18.9 | 15.3 |
| 2     | 12.4 | 9.6 | 8.7 | 9.5  | 11.8 | 14.1 | 16.6 | 18.8 | 21.5 | 20.8 | 18.8 | 15.2 |
| 3     | 12.2 | 9.6 | 8.7 | 9.6  | 12.0 | 14.2 | 16.7 | 18.9 | 21.5 | 20.7 | 18.7 | 15.1 |
| 4     | 12.1 | 9.5 | 8.7 | 9.6  | 12.1 | 14.3 | 16.8 | 19.0 | 21.5 | 20.6 | 18.6 | 15.0 |
| 5     | 12.0 | 9.5 | 8.7 | 9.6  | 12.2 | 14.3 | 16.9 | 19.1 | 21.4 | 20.5 | 18.5 | 14.9 |
| 6     | 11.9 | 9.4 | 8.6 | 9.7  | 12.3 | 14.4 | 17.0 | 19.3 | 21.4 | 20.4 | 18.4 | 14.8 |
| 7     | 11.8 | 9.4 | 8.6 | 9.7  | 12.5 | 14.5 | 17.2 | 19.4 | 21.4 | 20.4 | 18.2 | 14.6 |
| 8     | 11.7 | 9.3 | 8.6 | 9.8  | 12.6 | 14.6 | 17.2 | 19.5 | 21.4 | 20.3 | 18.1 | 14.5 |
| 9     | 11.6 | 9.3 | 8.5 | 9.9  | 12.7 | 14.6 | 17.3 | 19.8 | 21.4 | 20.3 | 18.0 | 14.4 |
| 10    | 11.5 | 9.2 | 8.5 | 9.9  | 12.8 | 14.7 | 17.4 | 20.0 | 21.4 | 20.2 | 17.9 | 14.3 |
| 11    | 11.4 | 9.2 | 8.5 | 10.1 | 12.8 | 14.8 | 17.4 | 20.0 | 21.4 | 20.2 | 17.8 | 14.2 |
| 12    | 11.3 | 9.2 | 8.5 | 10.2 | 12.9 | 14.9 | 17.5 | 20.1 | 21.4 | 20.2 | 17.7 | 14.0 |
| 13    | 11.2 | 9.1 | 8.5 | 10.3 | 12.9 | 14.9 | 17.5 | 20.5 | 21.4 | 20.1 | 17.6 | 13.9 |
| 14    | 11.1 | 9.1 | 8.5 | 10.4 | 13.0 | 15.0 | 17.6 | 20.7 | 21.4 | 20.1 | 17.5 | 13.8 |
| 15    | 11.0 | 9.1 | 8.5 | 10.5 | 13.0 | 15.1 | 17.6 | 20.7 | 21.4 | 20.0 | 17.4 | 13.7 |
| 16    | 9.6  | 9.1 | 8.5 | 10.5 | 13.1 | 15.2 | 17.6 | 20.8 | 21.4 | 20.0 | 17.3 | 13.5 |
| 17    | 9.3  | 9.0 | 8.5 | 10.6 | 13.1 | 15.3 | 17.7 | 20.8 | 21.4 | 20.0 | 17.2 | 13.4 |
| 18    | 9.6  | 9.0 | 8.6 | 10.7 | 13.1 | 15.4 | 17.7 | 20.9 | 21.4 | 20.0 | 17.1 | 13.2 |
| 19    | 9.7  | 9.0 | 8.6 | 10.8 | 13.1 | 15.5 | 17.8 | 20.9 | 21.4 | 19.9 | 16.9 | 13.1 |
| 20    | 9.8  | 8.9 | 8.6 | 10.9 | 13.2 | 15.5 | 17.8 | 21.0 | 21.3 | 19.9 | 16.8 | 13.0 |
| 21    | 9.9  | 8.9 | 8.6 | 10.9 | 13.2 | 15.6 | 17.9 | 21.0 | 21.3 | 19.8 | 16.7 | 12.8 |
| 22    | 9.9  | 8.9 | 9.0 | 11.0 | 13.3 | 15.7 | 17.9 | 21.0 | 21.3 | 19.8 | 16.5 | 12.7 |
| 23    | 10.0 | 8.9 | 9.4 | 11.1 | 13.3 | 15.8 | 18.0 | 21.1 | 21.2 | 19.7 | 16.4 | 12.5 |
| 24    | 9.9  | 8.9 | 9.4 | 11.2 | 13.4 | 15.9 | 18.0 | 21.1 | 21.1 | 19.6 | 16.2 | 12.4 |
| 25    | 9.9  | 8.9 | 9.4 | 11.3 | 13.5 | 15.9 | 18.1 | 21.2 | 21.1 | 19.5 | 16.1 | 12.3 |
| 26    | 9.9  | 8.9 | 9.4 | 11.3 | 13.6 | 16.0 | 18.1 | 21.5 | 21.1 | 19.4 | 15.9 | 12.1 |
| 27    | 9.9  | 8.8 | 9.4 | 11.4 | 13.7 | 16.1 | 18.3 | 21.5 | 21.0 | 19.3 | 15.8 | 12.0 |
| 28    | 9.8  | 8.8 | 9.4 | 11.5 | 13.7 | 16.2 | 18.4 | 21.6 | 21.0 | 19.2 | 15.7 | 11.9 |
| 29    | 9.8  | ... | 9.4 | 11.6 | 13.8 | 16.3 | 18.5 | 21.5 | 21.0 | 19.1 | 15.5 | 11.8 |
| 30    | 9.7  | ... | 9.5 | 11.6 | 13.9 | 16.4 | 18.5 | 21.5 | 20.9 | 19.0 | 15.4 | 11.7 |
| 31    | 9.7  | ... | 9.5 | ...  | 14.0 | ...  | 18.6 | 21.5 | ...  | 19.0 | ...  | 11.6 |
| MEAN  | 10.7 | 9.1 | 8.8 | 10.5 | 13.0 | 15.2 | 17.6 | 20.4 | 21.3 | 20.0 | 17.3 | 13.5 |

ITEM GROUND WATER LEVEL (2.2 m DEPTH)  
 INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE)  
 UNIT (m)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1     | -1.78 | -1.68 | -1.73 | -1.68 | -1.73 | -2.03 | -2.24 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 2     | -1.74 | -1.70 | -1.74 | -1.70 | -1.72 | -2.04 | -2.25 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 3     | -1.72 | -1.71 | -1.75 | -1.71 | -1.68 | -2.05 | -2.25 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 4     | -1.71 | -1.72 | -1.76 | -1.73 | -1.68 | -2.06 | -2.25 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 5     | -1.72 | -1.73 | -1.77 | -1.73 | -1.70 | -2.07 | -2.25 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 6     | -1.73 | -1.74 | -1.74 | -1.73 | -1.72 | -2.08 | -2.24 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 7     | -1.74 | -1.75 | -1.71 | -1.73 | -1.73 | -2.09 | -2.21 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 8     | -1.76 | -1.76 | -1.70 | -1.74 | -1.71 | -2.10 | -2.13 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 9     | -1.76 | -1.76 | -1.71 | -1.75 | -1.70 | -2.10 | -2.05 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 10    | -1.78 | -1.77 | -1.72 | -1.76 | -1.72 | -2.11 | -1.99 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 11    | -1.79 | -1.78 | -1.73 | -1.77 | -1.73 | -2.12 | -1.91 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 12    | -1.80 | -1.79 | -1.73 | -1.78 | -1.75 | -2.13 | -1.87 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 13    | -1.81 | -1.80 | -1.72 | -1.79 | -1.77 | -2.13 | -1.86 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 14    | -1.81 | -1.81 | -1.72 | -1.78 | -1.78 | -2.14 | -1.86 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 15    | -1.82 | -1.81 | -1.73 | -1.76 | -1.80 | -2.15 | -1.86 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 16    | -1.28 | -1.82 | -1.74 | -1.76 | -1.81 | -2.15 | -1.87 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 17    | -1.06 | -1.83 | -1.75 | -1.77 | -1.83 | -2.16 | -1.88 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 18    | -1.26 | -1.83 | -1.76 | -1.78 | -1.84 | -2.17 | -1.89 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 19    | -1.36 | -1.83 | -1.78 | -1.79 | -1.85 | -2.17 | -1.91 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 20    | -1.43 | -1.83 | -1.79 | -1.80 | -1.87 | -2.18 | -1.92 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 21    | -1.48 | -1.81 | -1.80 | -1.80 | -1.88 | -2.18 | -1.93 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 22    | -1.52 | -1.79 | -1.80 | -1.79 | -1.90 | -2.19 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 23    | -1.55 | ***   | -1.80 | -1.78 | -1.91 | -2.20 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 24    | -1.57 | -1.79 | -1.71 | -1.78 | -1.93 | -2.20 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 25    | -1.59 | -1.79 | ***   | -1.78 | -1.94 | -2.21 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 26    | -1.61 | -1.78 | ***   | -1.78 | -1.95 | -2.22 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 27    | -1.63 | -1.76 | ***   | -1.70 | -1.97 | -2.22 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 28    | -1.64 | -1.73 | ***   | -1.68 | -1.98 | -2.23 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 29    | -1.65 | ...   | ***   | -1.70 | -2.00 | -2.23 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 30    | -1.66 | ...   | ***   | -1.72 | -2.01 | -2.24 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 31    | -1.67 | ...   | -1.67 | ...   | -2.02 | ...   | ***   | *** | ... | *** | ... | *** |
| MEAN  | -1.63 | -1.77 | -1.74 | -1.75 | -1.83 | -2.15 | -2.03 | *** | *** | *** | *** | *** |

| ITEM       | GROUND WATER LEVEL (10.0 m DEPTH)            |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |
|------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| INSTRUMENT | WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE) |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |
| UNIT       | (m)  |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |
| YEAR       | 2005   |       |       |       |       |       |       |     |     |     |     |     |
| MONTH      | 1  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
| 1          | -2.28  | -2.18 | -2.61 | -2.54 | -2.76 | -3.24 | -3.57 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 2          | -2.27  | -2.19 | -2.62 | -2.56 | -2.71 | -3.27 | -3.64 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 3          | -2.23  | -2.27 | -2.65 | -2.56 | -2.66 | -3.30 | -3.69 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 4          | -2.21  | -2.24 | -2.65 | -2.59 | -2.71 | -3.32 | -3.72 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 5          | -2.22  | -2.23 | -2.64 | -2.61 | -2.77 | -3.37 | -3.70 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 6          | -2.23  | -2.22 | -2.60 | -2.62 | -2.83 | -3.41 | -3.64 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 7          | -2.22  | -2.23 | -2.57 | -2.61 | -2.84 | -3.43 | -3.53 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 8          | -2.23  | -2.23 | -2.47 | -2.62 | -2.84 | -3.45 | -3.55 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 9          | -2.23  | -2.24 | -2.44 | -2.64 | -2.82 | -3.44 | -3.45 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 10         | -2.25  | -2.24 | -2.48 | -2.65 | -2.84 | -3.13 | -3.46 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 11         | -2.27  | -2.26 | -2.49 | -2.69 | -2.89 | -3.02 | -3.42 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 12         | -2.29  | -2.31 | -2.49 | -2.75 | -2.89 | -2.96 | -3.38 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 13         | -2.31  | -2.33 | -2.50 | -2.74 | -2.89 | -2.92 | -3.41 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 14         | -2.33  | -2.35 | -2.52 | -2.75 | -2.91 | -2.94 | -3.50 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 15         | -2.38  | -2.36 | -2.55 | -2.75 | -2.91 | -2.95 | -3.38 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 16         | -2.01  | -2.31 | -2.56 | -2.74 | -2.93 | -2.95 | -3.24 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 17         | -1.81  | -2.33 | -2.57 | -2.74 | -2.95 | -2.95 | -3.13 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 18         | -1.90  | -2.36 | -2.57 | -2.76 | -2.95 | -2.95 | -2.97 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 19         | -1.95  | -2.37 | -2.61 | -2.76 | -2.96 | -2.94 | -2.85 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 20         | -1.99  | -2.35 | -2.62 | -2.80 | -2.99 | -2.92 | -2.81 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 21         | -2.03  | -2.34 | -2.63 | -2.80 | -3.01 | -2.93 | -2.84 | *** | *** | *** | *** | *** |
| 22         | -2.09  | -2.33 | -2.64 | -2.79 | -3.02 | -2.96 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 23         | -2.13  | ***   | -2.62 | -2.78 | -3.01 | -2.98 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 24         | -2.14  | -2.33 | -2.57 | -2.78 | -3.03 | -3.00 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 25         | -2.16  | -2.36 | ***   | -2.79 | -3.04 | -3.02 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 26         | -2.19  | -2.42 | ***   | -2.77 | -3.07 | -3.07 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 27         | -2.22  | -2.54 | ***   | -2.75 | -3.10 | -3.11 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 28         | -2.21  | -2.59 | ***   | -2.73 | -3.12 | -3.15 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 29         | -2.22  | ...   | ***   | -2.73 | -3.16 | -3.20 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 30         | -2.22  | ...   | ***   | -2.76 | -3.20 | -3.39 | ***   | *** | *** | *** | *** | *** |
| 31         | -2.19  | ...   | -2.52 | ...   | -3.21 | ...   | ***   | *** | ... | *** | ... | *** |
| MEAN       | -2.17  | -2.31 | -2.57 | -2.71 | -2.94 | -3.12 | -3.38 | *** | *** | *** | *** | *** |

| ITEM       | GROUND WATER LEVEL (NEW: 2.0 m DEPTH)        |       |       |       |       |     |       |       |       |       |       |     |
|------------|--|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| INSTRUMENT | WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE) |       |       |       |       |     |       |       |       |       |       |     |
| UNIT       | (m)  |       |       |       |       |     |       |       |       |       |       |     |
| YEAR       | 2005   |       |       |       |       |     |       |       |       |       |       |     |
| MONTH      | 1  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6   | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12  |
| 1          | -1.81  | -1.78 | -1.75 | -1.77 | -1.81 | *** | ***   | -1.77 | -1.55 | ***   | -1.77 | *** |
| 2          | -1.74  | -1.79 | -1.78 | -1.79 | -1.78 | *** | ***   | -1.78 | -1.59 | ***   | -1.78 | *** |
| 3          | -1.72  | -1.80 | -1.80 | -1.80 | -1.74 | *** | ***   | -1.80 | -1.63 | ***   | -1.79 | *** |
| 4          | -1.70  | -1.81 | -1.80 | -1.82 | -1.75 | *** | ***   | -1.81 | -1.66 | ***   | -1.81 | *** |
| 5          | -1.72  | -1.82 | -1.81 | -1.81 | -1.78 | *** | ***   | -1.82 | -1.69 | ***   | -1.82 | *** |
| 6          | -1.72  | -1.83 | -1.79 | -1.82 | -1.80 | *** | ***   | -1.83 | -1.71 | ***   | -1.84 | *** |
| 7          | -1.73  | -1.84 | -1.75 | -1.82 | -1.79 | *** | ***   | -1.84 | -1.73 | ***   | -1.78 | *** |
| 8          | -1.76  | -1.85 | -1.74 | -1.83 | -1.77 | *** | ***   | -1.81 | -1.75 | ***   | -1.73 | *** |
| 9          | -1.78  | -1.86 | -1.76 | -1.84 | -1.77 | *** | -1.92 | -1.65 | -1.77 | ***   | -1.74 | *** |
| 10         | -1.80  | -1.87 | -1.77 | -1.86 | -1.79 | *** | -1.88 | -1.66 | -1.79 | ***   | -1.76 | *** |
| 11         | -1.80  | -1.88 | -1.78 | -1.87 | -1.82 | *** | -1.83 | -1.70 | -1.81 | ***   | -1.78 | *** |
| 12         | -1.80  | -1.89 | -1.78 | -1.88 | -1.83 | *** | -1.81 | -1.63 | -1.82 | ***   | -1.79 | *** |
| 13         | -1.82  | -1.90 | -1.76 | -1.88 | -1.85 | *** | -1.81 | -0.57 | -1.84 | ***   | -1.81 | *** |
| 14         | -1.83  | -1.91 | -1.75 | -1.86 | -1.87 | *** | -1.82 | -0.94 | -1.86 | ***   | -1.82 | *** |
| 15         | -1.86  | -1.92 | -1.78 | -1.84 | -1.89 | *** | -1.83 | -1.20 | -1.88 | ***   | -1.83 | *** |
| 16         | -1.33  | -1.91 | -1.80 | -1.84 | -1.91 | *** | -1.84 | -1.33 | -1.90 | -1.86 | -1.85 | *** |
| 17         | -0.89  | -1.91 | -1.81 | -1.86 | -1.93 | *** | -1.85 | -1.41 | -1.92 | -1.65 | -1.86 | *** |
| 18         | -1.17  | -1.92 | -1.82 | -1.87 | ***   | *** | -1.86 | -1.47 | -1.94 | -1.01 | -1.87 | *** |
| 19         | -1.24  | -1.91 | -1.84 | -1.89 | ***   | *** | -1.88 | -1.52 | ***   | -1.07 | -1.88 | *** |
| 20         | -1.31  | -1.90 | -1.84 | -1.90 | ***   | *** | -1.89 | -1.56 | ***   | -1.26 | -1.89 | *** |
| 21         | -1.42  | -1.87 | -1.86 | -1.89 | ***   | *** | -1.91 | -1.61 | ***   | -1.37 | -1.91 | *** |
| 22         | -1.53  | -1.86 | -1.89 | -1.87 | ***   | *** | -1.92 | -1.64 | ***   | -1.45 | -1.92 | *** |
| 23         | -1.56  | -1.86 | -1.90 | -1.86 | ***   | *** | -1.93 | -1.67 | ***   | -1.51 | -1.93 | *** |
| 24         | -1.61  | -1.86 | -1.80 | -1.86 | ***   | *** | ***   | -1.62 | ***   | -1.56 | ***   | *** |
| 25         | -1.67  | -1.86 | -1.74 | -1.87 | ***   | *** | ***   | -1.59 | ***   | -1.60 | ***   | *** |
| 26         | -1.69  | -1.84 | -1.72 | -1.87 | ***   | *** | ***   | -0.84 | ***   | -1.64 | ***   | *** |
| 27         | -1.71  | -1.79 | -1.74 | -1.77 | ***   | *** | -1.74 | -1.05 | ***   | -1.66 | ***   | *** |
| 28         | -1.73  | -1.73 | -1.75 | -1.75 | ***   | *** | -1.69 | -1.25 | ***   | -1.69 | ***   | *** |
| 29         | -1.74  | ...   | -1.75 | -1.77 | ***   | *** | -1.71 | -1.37 | ***   | -1.71 | ***   | *** |
| 30         | -1.75  | ...   | -1.74 | -1.79 | ***   | *** | -1.73 | -1.44 | ***   | -1.73 | ***   | *** |
| 31         | -1.76  | ...   | -1.75 | ...   | ***   | ... | -1.75 | -1.51 | ...   | -1.75 | ...   | *** |
| MEAN       | -1.64  | -1.86 | -1.78 | -1.84 | -1.82 | *** | -1.83 | -1.51 | -1.77 | -1.53 | -1.82 | *** |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (LiCl DEW CELL) (E-771)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12    |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1     | -3.2 | -6.7 | -5.5 | -3.1 | 12.8 | 14.9 | 22.0 | 23.4 | 19.9 | 15.1 | 4.8  | -2.0  |
| 2     | -4.9 | -7.4 | -5.2 | 1.0  | 12.9 | 16.1 | 20.8 | 23.9 | 21.2 | 18.4 | 6.9  | 0.6   |
| 3     | -2.9 | -7.4 | -1.7 | 5.2  | 3.7  | 15.7 | 16.5 | 23.9 | 21.4 | 16.0 | 9.0  | -2.1  |
| 4     | -0.4 | -6.6 | 0.0  | 2.7  | 10.1 | 13.8 | 18.8 | 24.2 | 22.1 | 16.5 | 9.3  | 0.5   |
| 5     | -6.3 | -6.9 | -0.1 | 2.2  | 5.5  | 14.8 | 20.1 | 23.2 | 21.2 | 16.7 | 9.2  | -1.4  |
| 6     | -2.9 | -7.2 | -1.5 | 5.7  | 5.9  | 13.9 | 18.7 | 22.8 | 22.5 | 16.0 | 11.2 | 0.7   |
| 7     | -0.2 | -4.4 | -1.9 | 10.0 | 11.5 | 14.2 | 19.4 | 23.3 | 23.7 | 16.8 | 11.0 | -1.0  |
| 8     | -6.1 | 2.0  | -0.1 | 3.9  | 8.5  | 14.2 | 17.2 | 22.7 | 22.1 | 20.5 | 5.3  | 0.1   |
| 9     | -6.2 | 1.4  | 1.6  | 2.7  | 11.3 | 16.5 | 18.0 | 22.8 | 18.9 | 16.2 | 3.0  | -1.5  |
| 10    | -6.5 | 0.2  | 1.7  | 10.0 | 4.1  | 18.8 | 22.3 | 22.9 | 22.0 | 15.9 | 5.7  | -2.2  |
| 11    | -4.6 | -7.7 | 5.2  | 8.8  | 5.4  | 19.1 | 22.7 | 22.4 | 22.7 | 14.8 | 6.9  | -3.8  |
| 12    | -6.7 | -7.8 | 1.6  | 4.4  | 7.8  | 19.2 | 17.4 | 23.5 | 21.3 | 12.4 | 6.5  | -4.2  |
| 13    | -7.1 | -4.1 | -9.4 | 6.2  | 6.6  | 17.4 | 16.8 | 23.2 | 22.7 | 12.4 | 4.6  | -6.5  |
| 14    | -3.5 | -6.5 | -7.4 | 6.1  | 5.9  | 16.4 | 19.8 | 23.2 | 22.7 | 15.6 | 6.5  | -6.7  |
| 15    | 2.8  | -3.5 | -3.0 | 7.8  | 8.1  | 16.7 | 22.5 | 24.1 | 18.0 | ***  | 4.6  | -5.9  |
| 16    | 3.4  | 1.1  | -0.1 | 4.9  | 3.3  | 16.1 | 23.4 | 22.4 | 15.1 | ***  | 3.1  | -5.3  |
| 17    | -1.2 | 2.1  | 5.7  | 5.6  | 8.5  | 16.6 | 24.0 | 20.7 | 15.4 | ***  | 0.1  | -6.2  |
| 18    | -2.4 | -1.8 | -0.6 | 0.8  | 12.5 | 18.2 | 23.3 | 23.3 | 18.1 | 14.3 | 0.9  | -10.2 |
| 19    | 0.9  | 1.7  | -6.1 | 5.0  | 14.6 | 19.2 | 20.0 | 23.6 | 20.9 | 12.4 | -0.5 | -7.8  |
| 20    | -2.4 | 3.4  | -2.0 | 8.2  | 6.5  | 19.3 | 17.0 | 23.7 | 19.8 | 11.1 | -0.6 | -5.2  |
| 21    | -4.9 | -2.1 | -3.4 | 10.2 | 9.8  | 19.3 | 20.2 | 23.9 | 17.8 | 13.1 | 0.2  | -2.9  |
| 22    | -6.9 | -5.8 | 7.0  | 2.9  | 14.0 | 19.5 | 18.9 | 23.5 | 18.5 | 13.8 | 1.8  | -5.5  |
| 23    | -4.4 | -4.3 | 8.6  | -0.8 | 13.2 | 20.2 | 17.1 | 23.3 | 20.3 | 8.6  | 4.4  | -7.3  |
| 24    | -0.7 | -1.2 | 4.9  | 3.0  | 11.7 | 20.8 | 19.3 | 20.1 | 19.9 | 10.9 | 5.1  | -6.5  |
| 25    | -3.0 | 0.5  | ***  | 8.6  | 9.8  | 21.3 | 22.5 | 21.9 | 15.5 | 9.9  | 4.1  | -6.0  |
| 26    | -0.4 | -6.2 | ***  | 10.9 | 8.7  | 21.9 | 23.3 | 23.1 | 14.2 | 10.3 | 4.5  | -7.7  |
| 27    | -3.5 | -7.1 | ***  | 7.5  | 12.5 | 22.0 | 20.3 | 22.3 | 13.9 | 11.6 | 4.8  | -8.4  |
| 28    | -1.0 | -3.4 | ***  | 11.2 | 12.7 | 23.0 | 18.6 | 19.1 | 12.8 | 12.0 | 4.2  | -8.4  |
| 29    | 1.2  | ...  | ***  | 13.6 | 12.0 | 20.1 | 22.6 | 19.2 | 12.6 | 13.8 | 3.6  | -7.4  |
| 30    | -5.4 | ...  | ***  | 5.4  | 14.6 | 21.5 | 24.0 | 19.9 | 12.7 | 11.4 | -1.2 | -5.7  |
| 31    | -5.9 | ...  | -2.2 | ...  | 13.9 | ...  | 23.3 | 20.1 | ...  | 7.9  | ...  | -8.2  |
| MEAN  | -3.1 | -3.4 | -0.6 | 5.7  | 9.6  | 18.0 | 20.4 | 22.6 | 19.0 | 13.7 | 4.6  | -4.6  |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (LiCl DEW CELL) (E-771)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12    |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1     | -3.1 | -6.5 | -5.4 | -3.0 | 13.1 | 15.4 | 22.5 | 24.0 | 20.2 | 15.6 | 5.7  | -1.7  |
| 2     | -5.3 | -7.3 | -5.1 | 1.1  | 13.1 | 16.3 | 21.0 | 24.6 | 21.4 | 18.8 | 7.8  | 1.0   |
| 3     | -2.8 | -7.2 | -1.3 | 5.5  | 3.6  | 16.0 | 16.8 | 24.4 | 21.9 | 16.2 | 9.4  | -1.7  |
| 4     | -0.4 | -6.6 | 0.3  | 2.7  | 10.5 | 14.1 | 19.2 | 24.8 | 22.6 | 16.9 | 10.0 | 0.9   |
| 5     | -6.6 | -6.6 | 0.3  | 2.4  | 5.5  | 15.0 | 20.3 | 23.7 | 21.6 | 17.2 | 9.8  | -1.0  |
| 6     | -2.9 | -7.2 | -1.3 | 5.9  | 5.8  | 14.3 | 19.3 | 23.2 | 22.9 | 16.4 | 11.8 | 1.3   |
| 7     | 0.1  | -4.2 | -1.3 | 10.3 | 11.8 | 14.4 | 19.9 | 23.8 | 24.1 | 17.3 | 11.0 | -0.3  |
| 8     | -6.3 | 2.4  | 0.4  | 4.2  | 8.7  | 14.4 | 17.6 | 23.2 | 22.3 | 21.1 | 5.4  | 1.1   |
| 9     | -6.3 | 1.7  | 2.4  | 2.5  | 11.4 | 16.9 | 18.4 | 23.2 | 19.1 | 16.6 | 2.7  | -0.9  |
| 10    | -6.3 | 0.2  | 2.1  | 10.3 | 4.2  | 19.2 | 22.4 | 23.4 | 22.1 | 16.2 | 6.5  | -1.5  |
| 11    | -4.5 | -8.2 | 5.8  | 9.0  | 5.6  | 19.3 | 22.7 | 22.8 | 23.1 | 14.9 | 7.7  | -3.4  |
| 12    | -6.3 | -8.0 | 1.7  | 4.4  | 8.0  | 19.6 | 17.8 | 24.0 | 21.7 | 12.6 | 6.5  | -3.8  |
| 13    | -7.2 | -3.9 | -9.9 | 6.5  | 6.9  | 17.7 | 17.0 | 23.5 | 23.1 | 12.7 | 4.6  | -6.1  |
| 14    | -3.2 | -6.4 | -7.4 | 6.2  | 6.0  | 16.7 | 20.2 | 23.6 | 23.1 | 16.1 | 7.3  | -6.3  |
| 15    | 2.8  | -3.4 | -2.7 | 8.2  | 8.3  | 17.0 | 22.6 | 24.4 | 18.3 | ***  | 4.5  | -5.2  |
| 16    | 3.3  | 1.2  | 0.3  | 4.9  | 3.3  | 16.4 | 23.7 | 22.7 | 15.2 | ***  | 3.4  | -5.0  |
| 17    | -1.1 | 2.2  | 6.2  | 5.8  | 8.7  | 16.9 | 24.3 | 21.0 | 15.7 | ***  | 0.5  | -6.0  |
| 18    | -2.6 | -1.9 | -0.3 | 0.9  | 12.8 | 18.5 | 23.6 | 23.7 | 18.5 | 14.5 | 1.4  | -10.0 |
| 19    | 1.4  | 1.8  | -5.8 | 5.2  | 14.9 | 19.5 | 20.3 | 24.1 | 21.4 | 12.4 | -0.2 | -7.4  |
| 20    | -2.0 | 3.8  | -1.7 | 8.5  | 6.4  | 19.6 | 17.1 | 24.1 | 20.2 | 11.1 | -0.1 | -4.8  |
| 21    | -4.8 | -2.1 | -3.0 | 10.3 | 10.0 | 19.5 | 20.5 | 24.3 | 17.9 | 13.4 | 0.7  | -2.3  |
| 22    | -6.9 | -6.0 | 6.8  | 2.8  | 14.2 | 19.8 | 19.3 | 23.9 | 18.7 | 14.4 | 2.5  | -5.0  |
| 23    | -4.4 | -4.2 | 8.9  | -0.8 | 13.3 | 20.5 | 17.6 | 23.7 | 20.6 | 8.6  | 5.2  | -7.0  |
| 24    | -0.3 | -1.3 | 5.3  | 3.2  | 12.0 | 21.0 | 19.9 | 20.4 | 20.3 | 11.5 | 6.0  | -5.8  |
| 25    | -2.6 | 0.7  | ***  | 8.8  | 10.1 | 21.5 | 23.0 | 22.3 | 15.8 | 10.0 | 5.1  | -5.2  |
| 26    | 0.0  | -6.5 | ***  | 11.4 | 8.9  | 22.1 | 23.8 | 23.2 | 14.2 | 10.6 | 5.3  | -7.2  |
| 27    | -3.6 | -7.3 | ***  | 8.0  | 12.8 | 22.3 | 20.3 | 22.5 | 13.9 | 12.3 | 5.8  | -7.8  |
| 28    | -0.7 | -3.1 | ***  | 11.6 | 12.8 | 23.0 | 19.0 | 19.1 | 12.7 | 12.9 | 5.4  | -7.9  |
| 29    | 1.7  | ...  | ***  | 13.9 | 12.2 | 20.5 | 23.2 | 19.3 | 12.7 | 14.5 | 4.3  | -7.0  |
| 30    | -5.6 | ...  | ***  | 5.4  | 14.9 | 21.9 | 24.6 | 20.1 | 13.1 | 11.6 | -1.1 | -5.1  |
| 31    | -6.1 | ...  | -2.2 | ...  | 13.8 | ...  | 23.9 | 20.3 | ...  | 7.9  | ...  | -7.9  |
| MEAN  | -3.0 | -3.4 | -0.3 | 5.9  | 9.8  | 18.3 | 20.7 | 22.9 | 19.3 | 14.1 | 5.2  | -4.2  |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (LiCI DEN CELL) (E-771)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1    | 2    | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12    |
|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1     | -3.6 | -7.1 | -6.0  | -3.5 | 12.5 | 14.8 | 21.6 | 23.2 | 19.4 | 14.8 | 5.1  | -2.7  |
| 2     | -6.0 | -7.9 | -5.8  | 0.7  | 12.4 | 15.4 | 20.1 | 23.7 | 20.6 | 17.9 | 7.2  | 0.1   |
| 3     | -3.4 | -7.7 | -1.6  | 5.1  | 3.0  | 15.2 | 16.0 | 23.6 | 21.1 | 15.3 | 8.5  | -2.5  |
| 4     | -1.1 | -7.1 | -0.2  | 2.3  | 9.8  | 13.4 | 18.5 | 23.9 | 21.6 | 15.9 | 9.2  | -0.1  |
| 5     | -7.2 | -7.0 | -0.2  | 2.0  | 4.9  | 14.3 | 19.4 | 22.9 | 20.6 | 16.2 | 9.0  | -1.7  |
| 6     | -3.5 | -7.7 | -1.8  | 5.5  | 5.0  | 13.7 | 18.5 | 22.4 | 22.0 | 15.5 | 10.9 | 0.7   |
| 7     | -0.4 | -4.7 | -1.6  | 9.7  | 11.2 | 13.7 | 19.1 | 23.0 | 23.3 | 16.5 | 10.0 | -0.9  |
| 8     | -6.9 | 1.8  | 0.1   | 3.6  | 8.1  | 13.6 | 16.9 | 22.5 | 21.4 | 20.0 | 4.4  | 0.4   |
| 9     | -6.9 | 1.4  | 2.1   | 1.8  | 10.8 | 16.1 | 17.5 | 22.3 | 18.1 | 15.6 | 1.6  | -1.5  |
| 10    | -6.7 | -0.1 | 1.6   | 9.8  | 3.4  | 18.3 | 21.6 | 22.4 | 21.1 | 15.2 | 5.7  | -2.3  |
| 11    | -5.0 | -9.0 | 5.3   | 8.5  | 4.9  | 18.5 | 21.9 | 21.9 | 22.0 | 14.1 | 6.9  | -4.2  |
| 12    | -6.6 | -8.7 | 1.2   | 3.9  | 7.4  | 18.8 | 17.0 | 23.0 | 20.9 | 11.8 | 5.4  | -4.7  |
| 13    | -7.7 | -4.5 | -10.7 | 6.0  | 6.3  | 16.9 | 16.2 | 22.7 | 22.3 | 11.9 | 3.1  | -6.7  |
| 14    | -3.7 | -6.8 | -8.2  | 5.7  | 5.4  | 15.9 | 19.3 | 22.8 | 22.2 | 15.2 | 6.8  | -6.9  |
| 15    | 2.2  | -3.9 | -3.1  | 7.7  | 7.7  | 16.3 | 21.7 | 23.5 | 17.3 | ***  | 3.6  | -5.9  |
| 16    | 3.2  | 0.7  | -0.1  | 4.4  | 2.6  | 15.5 | 22.8 | 21.7 | 14.3 | ***  | 2.5  | -5.7  |
| 17    | -1.7 | 1.6  | 5.7   | 5.3  | 8.0  | 16.0 | 23.5 | 20.0 | 14.9 | ***  | -0.2 | -6.6  |
| 18    | -3.2 | -2.5 | -0.8  | 0.4  | 12.1 | 17.7 | 22.9 | 22.8 | 17.8 | 13.4 | 0.6  | -10.7 |
| 19    | 0.8  | 1.3  | -6.3  | 4.6  | 14.2 | 18.6 | 19.4 | 23.2 | 20.6 | 11.5 | -1.0 | -8.0  |
| 20    | -2.4 | 3.2  | -2.3  | 7.9  | 5.6  | 18.7 | 16.1 | 23.3 | 19.2 | 10.0 | -0.8 | -5.4  |
| 21    | -5.2 | -2.5 | -3.5  | 9.8  | 9.0  | 18.7 | 19.6 | 23.4 | 17.0 | 12.4 | 0.0  | -2.8  |
| 22    | -7.5 | -6.9 | 6.1   | 2.1  | 13.5 | 19.0 | 18.5 | 23.0 | 17.8 | 13.6 | 1.9  | -5.5  |
| 23    | -4.9 | -5.0 | 8.4   | -1.5 | 12.5 | 19.5 | 16.8 | 22.7 | 19.6 | 7.6  | 4.6  | -7.7  |
| 24    | -0.7 | -1.8 | 4.6   | 2.6  | 11.2 | 20.2 | 19.1 | 19.5 | 19.3 | 10.6 | 5.2  | -6.3  |
| 25    | -3.1 | 0.3  | ***   | 8.2  | 9.3  | 20.7 | 22.2 | 21.5 | 14.9 | 9.0  | 4.6  | -5.5  |
| 26    | -0.6 | -6.9 | ***   | 10.8 | 8.1  | 21.2 | 23.5 | 22.5 | 13.3 | 9.7  | 4.6  | -7.8  |
| 27    | -4.2 | -7.8 | ***   | 7.5  | 12.0 | 21.4 | 19.4 | 21.6 | 13.0 | 11.3 | 5.2  | -8.5  |
| 28    | -1.1 | -3.5 | ***   | 11.0 | 12.1 | 22.0 | 18.1 | 18.1 | 11.8 | 12.1 | 4.7  | -8.5  |
| 29    | 1.3  | ...  | ***   | 13.3 | 11.4 | 19.7 | 22.4 | 18.4 | 11.9 | 13.7 | 3.6  | -7.6  |
| 30    | -6.1 | ...  | ***   | 4.8  | 14.2 | 20.9 | 23.7 | 19.1 | 12.3 | 10.6 | -2.1 | -5.8  |
| 31    | -6.7 | ...  | -2.7  | ...  | 13.1 | ...  | 23.1 | 19.2 | ...  | 6.9  | ...  | -8.6  |
| MEAN  | -3.5 | -3.9 | -0.8  | 5.3  | 9.1  | 17.5 | 19.9 | 22.1 | 18.4 | 13.2 | 4.4  | -4.8  |

ITEM PRECIPITATION (0.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT RAIN GAUGE (TRIPPING BUCKET TYPE) (B-011-00)  
 UNIT (mm)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7     | 8     | 9    | 10    | 11   | 12  |
|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|-----|
| 1     | 6.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 5.5  | 0.0  | 1.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 2     | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 18.5 | 5.0  | 1.5   | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 3     | 0.0   | 0.0  | 0.5  | 1.5  | 0.0  | 9.0  | 14.5  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 4     | 0.0   | 0.0  | 14.0 | 10.5 | 0.0  | 6.0  | 59.0  | 0.0   | 0.0  | 4.5   | 0.0  | 1.0 |
| 5     | 0.0   | 0.0  | 3.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 3.0   | 0.0   | 6.0  | 14.0  | 0.0  | 0.0 |
| 6     | 1.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 13.5 | 0.0  | 21.0  | 0.0   | 2.0  | 2.5   | 24.5 | 0.0 |
| 7     | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 7.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.5   | 6.5  | 0.0 |
| 8     | 0.0   | 4.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 45.5  | 0.0  | 27.0  | 0.0  | 0.0 |
| 9     | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 26.5  | 0.0   | 0.0  | 6.0   | 0.0  | 0.0 |
| 10    | 0.0   | 0.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 8.0  | 9.0   | 2.0   | 0.0  | 14.5  | 0.0  | 0.0 |
| 11    | 0.0   | 0.0  | 12.5 | 8.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 5.0  | 1.0   | 0.0  | 0.0 |
| 12    | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 5.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 20.0  | 0.5  | 0.0   | 7.5  | 0.0 |
| 13    | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 3.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 18.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 14    | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.5   | 0.0   | 0.0  | 3.0   | 0.0  | 0.0 |
| 15    | 23.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 8.0  | 0.0   | 10.0  | 0.0  | 20.5  | 0.0  | 0.0 |
| 16    | 65.0  | 10.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 2.5  | 0.0   | 2.5   | 0.0  | 17.5  | 0.0  | 0.0 |
| 17    | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 44.0  | 0.0  | 0.0 |
| 18    | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 1.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 16.5  | 0.0  | 0.0 |
| 19    | 0.0   | 9.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.5   | 0.0  | 0.0 |
| 20    | 0.0   | 0.5  | 0.0  | 9.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 21    | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 10.0 | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 22    | 0.0   | 0.0  | 14.5 | 0.0  | 0.5  | 13.0 | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 1.0   | 0.0  | 0.0 |
| 23    | 0.0   | 0.0  | 23.5 | 0.0  | 11.0 | 1.0  | 0.0   | 31.5  | 0.0  | 4.5   | 0.0  | 0.0 |
| 24    | 0.0   | 2.0  | 0.5  | 0.0  | 5.0  | 0.0  | 0.0   | 5.0   | 17.5 | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 25    | 0.0   | 15.0 | 5.0  | 0.0  | 2.0  | 0.0  | 5.5   | 32.0  | 4.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 26    | 7.5   | 0.0  | 0.0  | 22.0 | 0.0  | 0.0  | 59.5  | 31.5  | 0.0  | 3.0   | 0.0  | 0.0 |
| 27    | 0.0   | 0.0  | 0.0  | 0.5  | 0.0  | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.5   | 0.0  | 0.0 |
| 28    | 0.0   | 0.0  | 11.0 | 0.0  | 0.0  | 0.5  | 0.0   | 0.5   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 29    | 0.5   | ...  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 3.0  | 0.0   | 1.5   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 30    | 0.0   | ...  | 0.0  | 0.0  | 3.5  | 7.0  | 0.0   | 0.5   | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0 |
| 31    | 0.0   | ...  | 0.0  | ...  | 10.5 | ...  | 0.0   | 0.0   | ...  | 0.0   | ...  | 0.0 |
| TOTAL | 103.5 | 41.5 | 84.5 | 71.0 | 78.0 | 63.0 | 201.0 | 200.5 | 35.0 | 181.0 | 38.5 | 1.0 |

ITEM EVAPOTRANSPIRATION (0.00 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT WEIGHING LYSTMETER (RL-15TFA)  
 UNIT (mm)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1    | 2    | 3   | 4   | 5   | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|------|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 1     | ***  | 1.0  | *** | *** | *** | ***  | 0.7  | 3.3  | 3.2  | 1.3  | 1.6  | 0.4  |
| 2     | 1.4  | 1.0  | *** | *** | *** | ***  | 2.8  | 2.9  | 2.9  | 1.5  | 1.4  | 0.6  |
| 3     | 1.3  | 0.9  | *** | *** | *** | ***  | 1.6  | 3.2  | 2.7  | 1.2  | 1.2  | 0.3  |
| 4     | 1.6  | 0.7  | *** | *** | *** | ***  | ***  | 3.7  | 1.6  | ***  | 1.5  | 0.2  |
| 5     | 1.4  | 1.0  | *** | *** | *** | 3.7  | 2.9  | 4.0  | ***  | ***  | 1.4  | 1.1  |
| 6     | 1.2  | 0.6  | *** | *** | *** | 4.1  | ***  | 3.4  | 0.8  | 0.9  | ***  | 0.3  |
| 7     | 1.9  | 0.9  | *** | *** | *** | 2.6  | 2.8  | 3.0  | 1.7  | 1.3  | ***  | 0.6  |
| 8     | 1.2  | ***  | *** | *** | *** | 2.7  | 3.2  | 2.5  | 2.1  | ***  | 4.4  | 0.3  |
| 9     | 1.0  | 0.8  | *** | *** | *** | 2.3  | ***  | 3.3  | 0.7  | ***  | 3.7  | 0.6  |
| 10    | 0.9  | 1.0  | *** | *** | *** | ***  | ***  | 2.5  | 1.4  | ***  | 2.9  | 0.3  |
| 11    | 1.0  | 0.8  | *** | *** | *** | 2.1  | 2.6  | 4.4  | 0.7  | 1.6  | 1.8  | 0.3  |
| 12    | 1.0  | 0.8  | *** | *** | *** | 4.1  | 3.7  | ***  | 1.5  | 1.5  | ***  | 0.4  |
| 13    | 0.7  | 0.6  | *** | *** | *** | 3.7  | 3.9  | ***  | 1.5  | 4.2  | 1.8  | 0.4  |
| 14    | 0.5  | 0.6  | *** | *** | *** | 2.1  | 1.5  | 3.3  | 1.1  | 2.9  | 1.7  | 0.3  |
| 15    | ***  | 0.7  | *** | *** | *** | ***  | 4.0  | 3.2  | 0.8  | ***  | 1.2  | 0.4  |
| 16    | ***  | ***  | *** | *** | *** | 1.1  | 2.2  | 5.4  | 1.2  | ***  | 1.7  | 0.3  |
| 17    | 0.4  | 0.8  | *** | *** | *** | 2.0  | 2.9  | 5.6  | 1.5  | ***  | 1.4  | 0.3  |
| 18    | 0.7  | 0.7  | *** | *** | *** | 2.6  | 4.3  | 3.8  | 1.3  | ***  | 1.3  | 0.3  |
| 19    | 0.3  | ***  | *** | *** | *** | 2.7  | 3.2  | 4.1  | 1.1  | 2.1  | 1.2  | 0.4  |
| 20    | 3.1  | 0.8  | *** | *** | *** | 3.2  | 4.5  | 4.2  | 0.6  | 1.8  | 1.0  | 0.2  |
| 21    | 2.5  | 1.2  | *** | *** | *** | 4.0  | 5.2  | 4.1  | 1.2  | 4.1  | 1.1  | 0.2  |
| 22    | 1.9  | ***  | *** | *** | *** | ***  | 2.6  | 2.5  | 0.4  | 1.9  | 0.8  | 0.3  |
| 23    | 1.5  | ***  | *** | *** | *** | 1.2  | 2.5  | ***  | 0.9  | 3.2  | 0.7  | 0.2  |
| 24    | 1.5  | ***  | *** | *** | *** | 3.6  | 1.3  | 2.3  | ***  | 2.5  | 0.6  | 0.3  |
| 25    | 1.3  | ***  | *** | *** | *** | 4.4  | 1.8  | ***  | 1.0  | 2.3  | 0.8  | 0.3  |
| 26    | ***  | ***  | *** | *** | *** | 2.9  | ***  | ***  | 1.3  | ***  | 0.5  | 0.4  |
| 27    | 1.2  | ***  | *** | *** | *** | 2.4  | ***  | 1.7  | 0.6  | 1.3  | 0.5  | 0.2  |
| 28    | 1.2  | ***  | *** | *** | *** | 3.0  | 7.0  | 1.3  | 0.7  | 2.1  | 0.6  | 0.3  |
| 29    | 1.0  | ...  | *** | *** | *** | 1.7  | 4.9  | 5.5  | 1.3  | 1.2  | 0.6  | 0.3  |
| 30    | 1.5  | ...  | *** | *** | *** | ***  | 3.9  | 3.7  | 1.3  | 1.3  | 0.6  | 0.3  |
| 31    | 1.2  | ...  | *** | ... | *** | ...  | 3.3  | 2.5  | ...  | 1.4  | ...  | 0.3  |
| TOTAL | 34.4 | 14.7 | *** | *** | *** | 62.1 | 78.9 | 89.4 | 37.0 | 41.2 | 38.0 | 10.8 |

ITEM ATMOSPHERIC PRESSURE (1.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT BAROMETER (PTB210)  
 UNIT (hPa)  
 YEAR 2005

| MONTH | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1     | 1004 | 988  | 1016 | 1016 | 1007 | 1005 | 1003 | 1006 | 1013 | 1015 | 1021 | 1015 |
| 2     | 1016 | 999  | 1019 | 1017 | 1001 | 1006 | 1001 | 1007 | 1012 | 1006 | 1022 | 1010 |
| 3     | 1016 | 1007 | 1021 | 1005 | 1010 | 1002 | 1004 | 1007 | 1010 | 1013 | 1018 | 1007 |
| 4     | 1004 | 1008 | 1013 | 1008 | 1007 | 1002 | 998  | 1009 | 1011 | 1012 | 1015 | 1003 |
| 5     | 1017 | 1007 | 1015 | 1013 | 1007 | 1005 | 995  | 1009 | 1012 | 1014 | 1014 | 994  |
| 6     | 1020 | 1015 | 1017 | 1011 | 1008 | 1012 | 999  | 1008 | 1011 | 1016 | 1011 | 1005 |
| 7     | 1007 | 1022 | 1018 | 1006 | 999  | 1016 | 1002 | 1008 | 1003 | 1016 | 1000 | 1014 |
| 8     | 1012 | 1019 | 1014 | 1005 | 1004 | 1015 | 1007 | 1008 | 1006 | 1008 | 1006 | 1015 |
| 9     | 1009 | 1018 | 1014 | 1015 | 997  | 1010 | 1009 | 1008 | 1015 | 1017 | 1010 | 1012 |
| 10    | 1010 | 1008 | 1016 | 1011 | 1003 | 1003 | 1000 | 1005 | 1015 | 1019 | 1015 | 1010 |
| 11    | 1006 | 1017 | 1003 | 1009 | 1013 | 995  | 1001 | 1007 | 1014 | 1019 | 1012 | 1009 |
| 12    | 1005 | 1020 | 995  | 1011 | 1007 | 997  | 1002 | 1007 | 1015 | 1018 | 1010 | 1004 |
| 13    | 1010 | 1018 | 1004 | 1005 | 1008 | 1003 | 1011 | 1006 | 1011 | 1019 | 1017 | 1002 |
| 14    | 1015 | 1022 | 1012 | 1014 | 1015 | 1009 | 1013 | 1003 | 1005 | 1014 | 1012 | 1007 |
| 15    | 1012 | 1021 | 1022 | 1014 | 1010 | 1007 | 1014 | 996  | 1010 | 1008 | 1011 | 1013 |
| 16    | 995  | 1014 | 1020 | 1015 | 1012 | 1007 | 1013 | 1001 | 1019 | 1009 | 1013 | 1010 |
| 17    | 1001 | 1012 | 1009 | 1016 | 1017 | 1006 | 1011 | 1007 | 1020 | 1014 | 1017 | 1005 |
| 18    | 1012 | 1022 | 1000 | 1024 | 1008 | 1004 | 1007 | 1009 | 1017 | 1016 | 1017 | 1006 |
| 19    | 1012 | 1013 | 1017 | 1024 | 1003 | 1002 | 1003 | 1007 | 1012 | 1018 | 1018 | 1009 |
| 20    | 1007 | 1003 | 1014 | 1017 | 1010 | 1001 | 1004 | 1006 | 1009 | 1018 | 1021 | 1016 |
| 21    | 1012 | 1011 | 1014 | 1001 | 1009 | 1005 | 1003 | 1007 | 1011 | 1013 | 1019 | 1004 |
| 22    | 1018 | 1015 | 1011 | 1002 | 1004 | 1002 | 1005 | 1006 | 1014 | 1002 | 1017 | 988  |
| 23    | 1019 | 1006 | 1001 | 1011 | 1000 | 1002 | 1007 | 1006 | 1011 | 1000 | 1018 | 1001 |
| 24    | 1012 | 1009 | 1000 | 1019 | 1004 | 1002 | 1007 | 1011 | 1009 | 1010 | 1011 | 1007 |
| 25    | 1005 | 1005 | 1000 | 1014 | 1011 | 1004 | 1005 | 1010 | 1005 | 1016 | 1011 | 1009 |
| 26    | 1007 | 1009 | 1012 | 1005 | 1014 | 1004 | 991  | 1000 | 1012 | 1022 | 1013 | 1004 |
| 27    | 1010 | 1016 | 1016 | 1008 | 1013 | 1001 | 993  | 1006 | 1017 | 1021 | 1010 | 1011 |
| 28    | 1010 | 1013 | 1007 | 1002 | 1015 | 999  | 1003 | 1007 | 1017 | 1016 | 1012 | 1018 |
| 29    | 1006 | ...  | 996  | 1000 | 1018 | 1006 | 1004 | 1008 | 1019 | 1007 | 999  | 1022 |
| 30    | 998  | ...  | 1002 | 1008 | 1012 | 1006 | 1005 | 1009 | 1021 | 1010 | 1007 | 1018 |
| 31    | 996  | ...  | 1008 | ...  | 1001 | ...  | 1006 | 1011 | ...  | 1013 | ...  | 1021 |
| MEAN  | 1009 | 1012 | 1010 | 1011 | 1008 | 1005 | 1004 | 1007 | 1013 | 1014 | 1013 | 1009 |

## A Dataset of Wave-Flume Experiments of the Threshold for Ripple Formation on Beds with Perturbations

Tomohiro SEKIGUCHI\*

### I Introduction

The purpose of this report is to present the total dataset of the wave-flume experiments conducted by Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005), who examined the threshold for rippling on sand beds with different bottom perturbations.

### II Laboratory experiment

The experiment was carried out using the wave flume (14 m long, 50 cm deep, and 25 cm wide) with a piston-type wave generator (Fig. 1). At the onshore end, a fixed slope of 1/20 was installed to reduce energy of waves reflected from the down-wave side of the flume. A sand bed (3 m long, 25 cm wide, and 3 cm thick) was constructed in the horizontal portion of the flume; both ends of the bed tapered off to reduce the local disturbance of flow. Three types of sand beds with different perturbations were prepared: (1) a horizontal flat

bed, here referred to as “the flat bed,” (2) a bed with a notch (Fig. 2a), described as “the notched bed,” and (3) a bed with a notch and two mounds (Fig. 2b), called “the notch-mounded bed,” with bed perturbation increasing in this order. The heights of disturbances on the bottom were 1.5 cm for the notched bed, and 2.3 cm for the notch-mounded bed.

Three kinds of well-sorted quartz sand were employed for the bed material; they have similar densities, 2.6–2.7 g/cm<sup>3</sup>, but different median grain sizes, i.e.,  $D = 0.021, 0.038, \text{ and } 0.054 \text{ cm}$ . The hydraulic parameters were:  $20 \text{ cm} \leq h \leq 30 \text{ cm}$ ,  $1.0 \text{ sec} \leq T \leq 3.5 \text{ sec}$ , and  $1.7 \text{ cm} \leq H \leq 13.0 \text{ cm}$ , where  $h$  is the water depth above the horizontal portion of the sand bed,  $T$  is the wave period, and  $H$  is the wave height over the sand bed. The hydraulic conditions were kept constant through each experiment run. By combining these experimental parameters, Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005) carried out 47 runs for

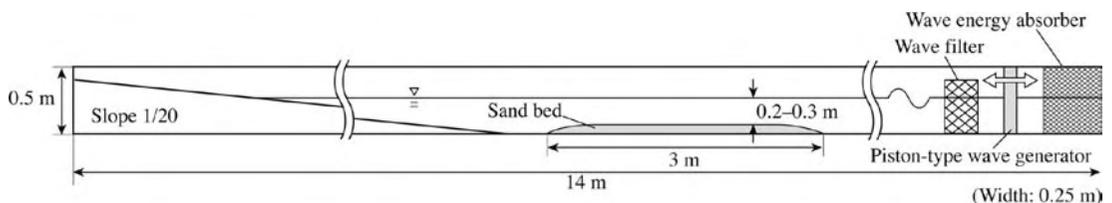


Fig. 1 Wave flume used in the present study

\* Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba

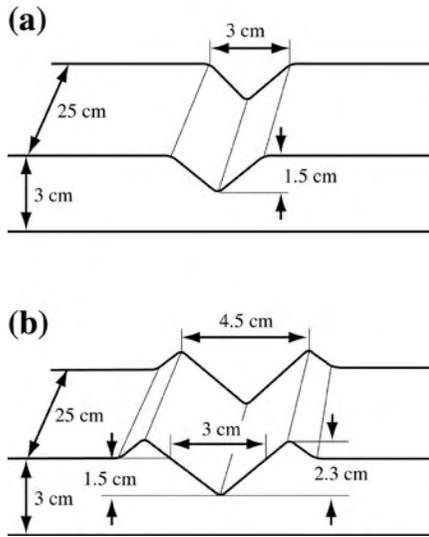


Fig. 2 Two types of topographic disturbances used in the experiments: a notch (a), and a notch and two mounds (b), both located in the central portion of the sand bed

the flat bed (Table 1), 113 runs for the notched bed (Table 2), and 82 runs for the notch-mounded bed (Table 3). Each run had 30-min wave action. Ripple formation was recorded using a digital video camera, and photographs were taken at a certain interval of time.

### III The analysis of Sekiguchi and Sunamura (2005)

Three dimensionless parameters were employed in the analysis of Sekiguchi and Sunamura (2005): (1) the relative water depth to the wavelength, (2) the mobility number, and (3) the Reynolds number. The relative water depth to the wavelength can be described as  $kh$  ( $k = 2\pi/L$ ; where  $L$  is the wavelength). According to linear wave theory (e.g., Komar, 1998, pp. 161–168),  $L$  is given by:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh \quad (1)$$

where  $g$  is the gravity acceleration.

The mobility number,  $M$ , is a simplified form, which neglects the frictional effect, of the Shields parameter that describes the relative magnitude of bed shear stress to the resisting force against the motion of sand grains, and is given by the following equation:

$$M = \frac{u_b^2}{(s-1)gD} \quad (2)$$

where  $u_b$  is the near-bottom orbital velocity, and  $s$  is the specific gravity of sediment. Sekiguchi and Sunamura (2005) employed  $s = 2.65$ . Linear wave theory gives  $u_b$  as:

$$u_b = \frac{\pi d_0}{T} = \frac{\pi H}{T \sinh kh} \quad (3)$$

where  $d_0$  is the orbital diameter.

The value of the Reynolds number was used in order to describe flow disturbance due to the perturbation of the bottom surface. The Reynolds number is expressed by:

$$Re = \frac{u_b h_m}{\nu} \quad (4)$$

where  $h_m$  is the height of disturbances on the bottom, and  $\nu$  is the kinematic viscosity of water. If the bottom is flat and smooth,  $h_m$  should be replaced by  $D$ :

$$Re = \frac{u_b D}{\nu} \quad (5)$$

which is often called the particle Reynolds number (e.g., Nielsen, 1992, p.165).

Their analysis showed that the threshold decreases with increase in bed roughness and

Table 1 Data of the ripple initiation from Flat bed

| Run No. | D (cm) | h (cm) | T (sec) | L (cm) | H (cm) | $u_b$ (cm/sec) | $d_0$ (cm) | kh   | M    | Re   | Remarks   |     |           |
|---------|--------|--------|---------|--------|--------|----------------|------------|------|------|------|-----------|-----|-----------|
| F20-1   | 0.020  | 25     | 1.0     | 130    | 7.2    | 14.8           | 4.7        | 1.21 | 6.8  | 29   | No Ripple |     |           |
| F20-2   |        |        |         |        | 7.9    | 16.2           | 5.2        | 1.21 | 8.1  | 32   | No Ripple |     |           |
| F20-3   |        |        |         |        | 8.3    | 17.1           | 5.4        | 1.21 | 9.0  | 34   | Ripple    |     |           |
| F20-4   | 0.020  | 25     | 1.5     | 217    | 6.2    | 16.5           | 7.9        | 0.72 | 8.4  | 33   | No Ripple |     |           |
| F20-5   |        |        |         |        | 8.1    | 21.4           | 10.2       | 0.72 | 14.2 | 43   | Ripple    |     |           |
| F20-6   | 0.020  | 25     | 2.0     | 300    | 6.9    | 19.6           | 12.5       | 0.52 | 11.9 | 39   | No Ripple |     |           |
| F20-7   |        |        |         |        | 7.7    | 22.1           | 14.0       | 0.52 | 15.1 | 44   | Ripple    |     |           |
| F20-8   | 0.020  | 25     | 2.5     | 381    | 7.4    | 21.9           | 17.4       | 0.41 | 14.9 | 44   | No Ripple |     |           |
| F20-9   |        |        |         |        | 8.3    | 24.6           | 19.6       | 0.41 | 18.7 | 49   | Ripple    |     |           |
| F20-10  |        |        |         |        | 9.8    | 29.0           | 23.1       | 0.41 | 26.1 | 58   | Ripple    |     |           |
| F20-11  | 0.020  | 25     | 3.0     | 461    | 7.3    | 22.0           | 21.0       | 0.34 | 15.0 | 44   | No Ripple |     |           |
| F20-12  |        |        |         |        | 8.0    | 24.1           | 23.0       | 0.34 | 18.0 | 48   | Ripple    |     |           |
| F20-13  | 0.020  | 25     | 3.5     | 540    | 5.8    | 17.5           | 19.5       | 0.29 | 9.5  | 35   | No Ripple |     |           |
| F20-14  |        |        |         |        | 7.3    | 22.1           | 24.6       | 0.29 | 15.1 | 44   | No Ripple |     |           |
| F20-15  |        |        |         |        | 8.3    | 25.1           | 28.0       | 0.29 | 19.5 | 50   | Ripple    |     |           |
| F20-16  |        |        |         |        | 9.6    | 29.1           | 32.4       | 0.29 | 26.1 | 58   | Ripple    |     |           |
| F38-1   | 0.038  | 25     | 1.0     | 130    | 8.4    | 17.4           | 5.5        | 1.21 | 4.9  | 66   | No Ripple |     |           |
| F38-2   |        |        |         |        | 8.9    | 18.4           | 5.9        | 1.21 | 5.5  | 70   | No Ripple |     |           |
| F38-3   | 0.038  | 25     | 1.2     | 166    | 9.4    | 22.5           | 8.6        | 0.95 | 8.2  | 85   | No Ripple |     |           |
| F38-4   | 0.038  | 25     | 1.5     | 217    | 8.3    | 22.1           | 10.5       | 0.72 | 7.9  | 84   | No Ripple |     |           |
| F38-5   |        |        |         |        | 9.8    | 26.0           | 12.4       | 0.72 | 11.0 | 99   | No Ripple |     |           |
| F38-6   |        |        |         |        | 11.0   | 29.1           | 13.9       | 0.72 | 13.8 | 110  | Ripple    |     |           |
| F38-7   | 0.038  | 25     | 2.0     | 300    | 9.2    | 26.2           | 16.7       | 0.52 | 11.2 | 99   | No Ripple |     |           |
| F38-8   |        |        |         |        | 10.0   | 28.5           | 18.2       | 0.52 | 13.2 | 108  | No Ripple |     |           |
| F38-9   | 0.038  | 25     | 2.0     | 300    | 11.7   | 33.4           | 21.3       | 0.52 | 18.1 | 126  | Ripple    |     |           |
| F38-10  | 0.038  | 25     | 2.5     | 381    | 8.4    | 24.9           | 19.8       | 0.41 | 10.1 | 94   | No Ripple |     |           |
| F38-11  |        |        |         |        | 10.3   | 30.4           | 24.2       | 0.41 | 15.0 | 115  | No Ripple |     |           |
| F38-12  |        |        |         |        | 11.2   | 33.0           | 26.3       | 0.41 | 17.7 | 125  | Ripple    |     |           |
| F38-13  |        |        |         |        | 11.2   | 33.0           | 26.3       | 0.41 | 17.7 | 125  | Ripple    |     |           |
| F38-14  |        |        |         |        | 13.0   | 38.4           | 30.5       | 0.41 | 23.9 | 145  | Ripple    |     |           |
| F38-15  | 0.038  | 25     | 3.0     | 461    | 9.0    | 27.1           | 25.9       | 0.34 | 12.0 | 103  | No Ripple |     |           |
| F38-16  |        |        |         |        | 10.3   | 31.0           | 29.6       | 0.34 | 15.7 | 117  | Ripple    |     |           |
| F38-17  | 0.038  | 25     | 3.5     | 540    | 7.5    | 22.7           | 25.3       | 0.29 | 8.4  | 86   | No Ripple |     |           |
| F38-18  |        |        |         |        | 10.0   | 30.4           | 33.9       | 0.29 | 15.1 | 115  | Ripple    |     |           |
| F54-1   | 0.054  | 25     | 1.0     | 130    | 9.0    | 18.5           | 5.9        | 1.21 | 3.9  | 100  | No Ripple |     |           |
| F54-2   |        |        |         |        | 1.5    | 217            | 11.0       | 29.1 | 13.9 | 0.72 | 9.7       | 157 | No Ripple |
| F54-3   |        |        |         |        | 2.0    | 300            | 12.1       | 34.7 | 22.1 | 0.52 | 13.8      | 187 | No Ripple |
| F54-4   | 0.054  | 25     | 2.5     | 381    | 10.3   | 30.5           | 24.3       | 0.41 | 10.7 | 164  | No Ripple |     |           |
| F54-5   |        |        |         |        | 11.0   | 32.6           | 25.9       | 0.41 | 12.2 | 175  | Ripple    |     |           |
| F54-6   |        |        |         |        | 13.0   | 38.4           | 30.5       | 0.41 | 16.8 | 206  | Ripple    |     |           |
| F54-7   | 0.054  | 25     | 3.0     | 461    | 7.3    | 21.8           | 20.9       | 0.34 | 5.5  | 118  | No Ripple |     |           |
| F54-8   |        |        |         |        | 9.8    | 29.4           | 28.1       | 0.34 | 9.9  | 158  | No Ripple |     |           |
| F54-9   |        |        |         |        | 11.8   | 35.4           | 33.8       | 0.34 | 14.4 | 190  | Ripple    |     |           |
| F54-10  |        |        |         |        | 13.0   | 39.2           | 37.4       | 0.34 | 17.6 | 211  | Ripple    |     |           |
| F54-11  | 0.054  | 25     | 3.5     | 540    | 7.8    | 23.6           | 26.3       | 0.29 | 6.4  | 127  | No Ripple |     |           |
| F54-12  |        |        |         |        | 9.2    | 27.9           | 31.0       | 0.29 | 8.9  | 150  | No Ripple |     |           |
| F54-13  |        |        |         |        | 11.2   | 34.1           | 38.0       | 0.29 | 13.3 | 183  | Ripple    |     |           |

Table 2 Data of the ripple initiation from Notched bed

| Run No. | D (cm) | h (cm) | T (sec) | L (cm) | H (cm) | $u_b$ (cm/sec) | $d_0$ (cm) | kh   | M    | Re   | Remarks   |
|---------|--------|--------|---------|--------|--------|----------------|------------|------|------|------|-----------|
| N20-1   | 0.020  | 25     | 1.0     | 130    | 3.6    | 7.4            | 2.4        | 1.21 | 1.7  | 1112 | No Ripple |
| N20-2   |        |        |         |        | 5.1    | 10.4           | 3.3        | 1.21 | 3.4  | 1560 | No Ripple |
| N20-3   |        |        |         |        | 5.4    | 11.1           | 3.5        | 1.21 | 3.8  | 1653 | No Ripple |
| N20-4   |        |        |         |        | 5.6    | 11.6           | 3.7        | 1.21 | 4.1  | 1730 | Ripple    |
| N20-5   |        |        |         |        | 6.0    | 12.3           | 3.9        | 1.21 | 4.7  | 1838 | Ripple    |
| N20-6   |        |        |         |        | 6.8    | 14.0           | 4.4        | 1.21 | 6.0  | 2085 | Ripple    |
| N20-7   |        |        |         |        | 7.9    | 16.3           | 5.2        | 1.21 | 8.2  | 2440 | Ripple    |
| N20-8   |        |        |         |        | 8.5    | 17.5           | 5.6        | 1.21 | 9.4  | 2610 | Ripple    |
| N20-9   | 0.020  | 25     | 1.5     | 217    | 2.9    | 7.7            | 3.7        | 0.72 | 1.8  | 1152 | No Ripple |
| N20-10  |        |        |         |        | 4.4    | 11.6           | 5.5        | 0.72 | 4.1  | 1728 | No Ripple |
| N20-11  |        |        |         |        | 4.7    | 12.4           | 5.9        | 0.72 | 4.7  | 1847 | Ripple    |
| N20-12  |        |        |         |        | 4.9    | 13.0           | 6.2        | 0.72 | 5.2  | 1946 | Ripple    |
| N20-13  |        |        |         |        | 5.3    | 14.1           | 6.7        | 0.72 | 6.1  | 2105 | Ripple    |
| N20-14  |        |        |         |        | 6.9    | 18.2           | 8.7        | 0.72 | 10.3 | 2721 | Ripple    |
| N20-15  |        |        |         |        | 8.8    | 23.4           | 11.2       | 0.72 | 16.9 | 3495 | Ripple    |
| N20-16  |        |        |         |        | 9.7    | 25.6           | 12.2       | 0.72 | 20.3 | 3833 | Ripple    |
| N20-17  | 0.020  | 25     | 2.0     | 300    | 3.2    | 9.2            | 5.8        | 0.52 | 2.6  | 1370 | No Ripple |
| N20-18  |        |        |         |        | 4.2    | 12.0           | 7.7        | 0.52 | 4.5  | 1799 | No Ripple |
| N20-19  |        |        |         |        | 4.6    | 13.0           | 8.3        | 0.52 | 5.3  | 1949 | No Ripple |
| N20-20  |        |        |         |        | 4.9    | 14.0           | 8.9        | 0.52 | 6.1  | 2098 | Ripple    |
| N20-21  |        |        |         |        | 5.3    | 15.2           | 9.7        | 0.52 | 7.1  | 2270 | Ripple    |
| N20-22  | 0.020  | 25     | 2.5     | 381    | 4.0    | 11.8           | 9.4        | 0.41 | 4.3  | 1770 | No Ripple |
| N20-23  |        |        |         |        | 4.6    | 13.5           | 10.7       | 0.41 | 5.6  | 2014 | Ripple    |
| N20-24  |        |        |         |        | 4.7    | 13.9           | 11.1       | 0.41 | 6.0  | 2080 | No Ripple |
| N20-25  |        |        |         |        | 5.1    | 15.0           | 11.9       | 0.41 | 6.9  | 2235 | Ripple    |
| N20-26  | 0.020  | 25     | 3.0     | 461    | 4.2    | 12.7           | 12.1       | 0.34 | 5.0  | 1891 | No Ripple |
| N20-27  |        |        |         |        | 4.3    | 12.8           | 12.2       | 0.34 | 5.1  | 1914 | No Ripple |
| N20-28  |        |        |         |        | 4.5    | 13.4           | 12.8       | 0.34 | 5.6  | 2004 | Ripple    |
| N20-29  |        |        |         |        | 4.5    | 13.6           | 12.9       | 0.34 | 5.7  | 2026 | Ripple    |
| N38-1   | 0.038  | 25     | 1.0     | 130    | 3.5    | 7.1            | 2.3        | 1.21 | 0.8  | 1066 | No Ripple |
| N38-2   |        |        |         |        | 3.6    | 7.4            | 2.4        | 1.21 | 0.9  | 1112 | No Ripple |
| N38-3   |        |        |         |        | 4.0    | 8.3            | 2.6        | 1.21 | 1.1  | 1236 | No Ripple |
| N38-4   |        |        |         |        | 4.7    | 9.7            | 3.1        | 1.21 | 1.5  | 1452 | No Ripple |
| N38-5   |        |        |         |        | 5.3    | 10.9           | 3.5        | 1.21 | 1.9  | 1622 | No Ripple |
| N38-6   |        |        |         |        | 6.6    | 13.5           | 4.3        | 1.21 | 3.0  | 2023 | No Ripple |
| N38-7   |        |        |         |        | 7.0    | 14.5           | 4.6        | 1.21 | 3.4  | 2162 | Ripple    |
| N38-8   |        |        |         |        | 7.1    | 14.7           | 4.7        | 1.21 | 3.5  | 2193 | Ripple    |
| N38-9   | 0.038  | 25     | 1.2     | 166    | 9.0    | 21.5           | 8.2        | 0.95 | 7.5  | 3215 | Ripple    |
| N38-10  | 0.038  | 25     | 1.5     | 217    | 2.9    | 7.7            | 3.7        | 0.72 | 1.0  | 1152 | No Ripple |
| N38-11  |        |        |         |        | 6.1    | 16.2           | 7.7        | 0.72 | 4.3  | 2423 | No Ripple |
| N38-12  |        |        |         |        | 6.6    | 17.4           | 8.3        | 0.72 | 4.9  | 2602 | No Ripple |
| N38-13  |        |        |         |        | 6.9    | 18.2           | 8.7        | 0.72 | 5.4  | 2721 | Ripple    |
| N38-14  |        |        |         |        | 7.3    | 19.3           | 9.2        | 0.72 | 6.0  | 2880 | Ripple    |
| N38-15  |        |        |         |        | 9.6    | 25.4           | 12.1       | 0.72 | 10.5 | 3793 | Ripple    |
| N38-16  | 0.038  | 25     | 2.0     | 300    | 3.2    | 9.2            | 5.8        | 0.52 | 1.4  | 1370 | No Ripple |
| N38-17  |        |        |         |        | 5.8    | 16.5           | 10.5       | 0.52 | 4.4  | 2471 | No Ripple |
| N38-18  |        |        |         |        | 6.1    | 17.5           | 11.1       | 0.52 | 5.0  | 2612 | Ripple    |
| N38-19  |        |        |         |        | 6.5    | 18.6           | 11.9       | 0.52 | 5.6  | 2784 | Ripple    |
| N38-20  |        |        |         |        | 8.0    | 22.9           | 14.6       | 0.52 | 8.6  | 3426 | Ripple    |
| N38-21  |        |        |         |        | 8.9    | 25.5           | 16.2       | 0.52 | 10.6 | 3811 | Ripple    |
| N38-22  |        |        |         |        | 12.4   | 35.4           | 22.5       | 0.52 | 20.4 | 5289 | Ripple    |

Table 2 Continued

| Run No. | $D$<br>(cm) | $h$<br>(cm) | $T$<br>(sec) | $L$<br>(cm) | $H$<br>(cm) | $u_6$<br>(cm/sec) | $d_0$<br>(cm) | $kh$ | $M$  | $Re$ | Remarks   |
|---------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|---------------|------|------|------|-----------|
| N38-23  | 0.038       | 25          | 2.5          | 381         | 5.6         | 16.6              | 13.2          | 0.41 | 4.5  | 2478 | No Ripple |
| N38-24  |             |             |              |             | 5.9         | 17.5              | 13.9          | 0.41 | 5.0  | 2611 | Ripple    |
| N38-25  |             |             |              |             | 6.4         | 18.8              | 15.0          | 0.41 | 5.8  | 2810 | Ripple    |
| N38-26  | 0.038       | 25          | 3.0          | 461         | 5.0         | 14.9              | 14.2          | 0.34 | 3.6  | 2229 | No Ripple |
| N38-27  |             |             |              |             | 5.4         | 16.1              | 15.4          | 0.34 | 4.2  | 2409 | No Ripple |
| N38-28  |             |             |              |             | 5.5         | 16.6              | 15.8          | 0.34 | 4.5  | 2477 | Ripple    |
| N38-29  |             |             |              |             | 6.0         | 18.1              | 17.3          | 0.34 | 5.3  | 2702 | Ripple    |
| N38-30  |             |             |              |             | 12.2        | 36.6              | 35.0          | 0.34 | 21.8 | 5471 | Ripple    |
| N38-31  | 0.038       | 25          | 3.2          | 493         | 5.3         | 15.9              | 16.2          | 0.32 | 4.1  | 2375 | No Ripple |
| N38-32  |             |             |              |             | 5.9         | 17.7              | 18.0          | 0.32 | 5.1  | 2647 | Ripple    |
| N38-33  | 0.038       | 25          | 3.5          | 540         | 4.4         | 13.2              | 14.8          | 0.29 | 2.9  | 1979 | No Ripple |
| N38-34  |             |             |              |             | 4.6         | 14.0              | 15.6          | 0.29 | 3.2  | 2093 | No Ripple |
| N38-35  |             |             |              |             | 4.9         | 14.9              | 16.6          | 0.29 | 3.6  | 2229 | No Ripple |
| N38-36  |             |             |              |             | 5.4         | 16.4              | 18.3          | 0.29 | 4.4  | 2457 | No Ripple |
| N38-37  |             |             |              |             | 6.0         | 18.1              | 20.2          | 0.29 | 5.3  | 2707 | Ripple    |
| N38-38  |             |             |              |             | 11.8        | 35.8              | 39.9          | 0.29 | 20.8 | 5346 | Ripple    |
| N54-1   | 0.054       | 25          | 1.0          | 130         | 3.6         | 7.4               | 2.4           | 1.21 | 0.6  | 1112 | No Ripple |
| N54-2   |             |             |              |             | 7.9         | 16.3              | 5.2           | 1.21 | 3.1  | 2440 | No Ripple |
| N54-3   |             |             |              |             | 8.1         | 16.6              | 5.3           | 1.21 | 3.2  | 2487 | No Ripple |
| N54-4   |             |             |              |             | 8.4         | 17.4              | 5.5           | 1.21 | 3.5  | 2595 | No Ripple |
| N54-5   |             |             |              |             | 8.6         | 17.8              | 5.7           | 1.21 | 3.6  | 2657 | No Ripple |
| N54-6   |             |             |              |             | 10.3        | 21.2              | 6.7           | 1.21 | 5.1  | 3166 | No Ripple |
| N54-7   | 0.054       | 25          | 1.2          | 166         | 6.3         | 14.9              | 5.7           | 0.95 | 2.6  | 2233 | No Ripple |
| N54-8   |             |             |              |             | 7.9         | 18.9              | 7.2           | 0.95 | 4.1  | 2822 | No Ripple |
| N54-9   |             |             |              |             | 8.9         | 21.2              | 8.1           | 0.95 | 5.1  | 3162 | Ripple    |
| N54-10  | 0.054       | 25          | 1.5          | 217         | 2.9         | 7.7               | 3.7           | 0.72 | 0.7  | 1152 | No Ripple |
| N54-11  |             |             |              |             | 7.0         | 18.5              | 8.8           | 0.72 | 3.9  | 2760 | No Ripple |
| N54-12  | 0.054       | 25          | 1.5          | 217         | 7.1         | 18.7              | 8.9           | 0.72 | 4.0  | 2800 | No Ripple |
| N54-13  |             |             |              |             | 8.6         | 22.9              | 10.9          | 0.72 | 6.0  | 3416 | Ripple    |
| N54-14  |             |             |              |             | 8.6         | 22.9              | 10.9          | 0.72 | 6.0  | 3416 | No Ripple |
| N54-15  |             |             |              |             | 11.3        | 30.0              | 14.3          | 0.72 | 10.3 | 4488 | Ripple    |
| N54-16  |             |             |              |             | 11.6        | 30.8              | 14.7          | 0.72 | 10.9 | 4607 | Ripple    |
| N54-17  |             |             |              |             | 11.8        | 31.2              | 14.9          | 0.72 | 11.2 | 4667 | Ripple    |
| N54-18  | 0.054       | 25          | 2.0          | 300         | 3.2         | 9.2               | 5.8           | 0.52 | 1.0  | 1370 | No Ripple |
| N54-19  |             |             |              |             | 6.5         | 18.6              | 11.9          | 0.52 | 4.0  | 2784 | No Ripple |
| N54-20  |             |             |              |             | 6.5         | 18.6              | 11.9          | 0.52 | 4.0  | 2784 | No Ripple |
| N54-21  |             |             |              |             | 7.5         | 21.4              | 13.6          | 0.52 | 5.2  | 3190 | Ripple    |
| N54-22  |             |             |              |             | 7.7         | 21.9              | 14.0          | 0.52 | 5.5  | 3276 | No Ripple |
| N54-23  |             |             |              |             | 8.9         | 25.4              | 16.1          | 0.52 | 7.4  | 3790 | Ripple    |
| N54-24  |             |             |              |             | 9.1         | 26.1              | 16.6          | 0.52 | 7.8  | 3897 | Ripple    |
| N54-25  |             |             |              |             | 10.3        | 29.4              | 18.7          | 0.52 | 9.9  | 4390 | Ripple    |
| N54-26  |             |             |              |             | 12.1        | 34.5              | 22.0          | 0.52 | 13.7 | 5160 | Ripple    |
| N54-27  | 0.054       | 25          | 2.5          | 381         | 5.5         | 16.3              | 13.0          | 0.41 | 3.0  | 2434 | No Ripple |
| N54-28  |             |             |              |             | 5.5         | 16.3              | 13.0          | 0.41 | 3.0  | 2434 | No Ripple |
| N54-29  |             |             |              |             | 6.8         | 20.1              | 16.0          | 0.41 | 4.6  | 3009 | Ripple    |
| N54-30  |             |             |              |             | 8.0         | 23.7              | 18.9          | 0.41 | 6.4  | 3540 | Ripple    |
| N54-31  |             |             |              |             | 8.0         | 23.7              | 18.9          | 0.41 | 6.4  | 3540 | No Ripple |
| N54-32  |             |             |              |             | 10.0        | 29.6              | 23.6          | 0.41 | 10.0 | 4425 | Ripple    |
| N54-33  | 0.054       | 25          | 3.0          | 461         | 4.5         | 13.6              | 12.9          | 0.34 | 2.1  | 2026 | No Ripple |
| N54-34  |             |             |              |             | 5.6         | 16.9              | 16.1          | 0.34 | 3.3  | 2522 | No Ripple |
| N54-35  |             |             |              |             | 6.1         | 18.4              | 17.6          | 0.34 | 3.9  | 2747 | Ripple    |
| N54-36  |             |             |              |             | 8.0         | 24.1              | 23.0          | 0.34 | 6.7  | 3602 | Ripple    |
| N54-37  | 0.054       | 25          | 3.5          | 540         | 5.0         | 15.2              | 17.0          | 0.29 | 2.7  | 2275 | No Ripple |
| N54-38  |             |             |              |             | 6.8         | 20.6              | 22.9          | 0.29 | 4.8  | 3071 | Ripple    |
| N54-39  |             |             |              |             | 6.8         | 20.6              | 22.9          | 0.29 | 4.8  | 3071 | No Ripple |
| N54-40  |             |             |              |             | 8.3         | 25.1              | 28.0          | 0.29 | 7.2  | 3753 | Ripple    |

Table 3 Data of the ripple initiation from Notch-mounded bed

| Run No. | $D$<br>(cm) | $h$<br>(cm) | $T$<br>(sec) | $L$<br>(cm) | $H$<br>(cm) | $u_b$<br>(cm/sec) | $d_0$<br>(cm) | $kh$ | $M$ | $Re$ | Remarks   |
|---------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|---------------|------|-----|------|-----------|
| M20-1   | 0.020       | 25          | 1.0          | 130         | 3.7         | 7.5               | 2.4           | 1.21 | 1.8 | 1729 | No Ripple |
| M20-2   | 0.020       | 25          | 1.0          | 130         | 4.2         | 8.7               | 2.8           | 1.21 | 2.3 | 1989 | No Ripple |
| M20-3   | 0.020       | 25          | 1.0          | 130         | 5.2         | 10.6              | 3.4           | 1.21 | 3.5 | 2439 | Ripple    |
| M20-4   | 0.020       | 25          | 1.5          | 217         | 2.9         | 7.6               | 3.6           | 0.72 | 1.8 | 1736 | No Ripple |
| M20-5   | 0.020       | 25          | 1.5          | 217         | 3.8         | 10.0              | 4.8           | 0.72 | 3.1 | 2284 | Ripple    |
| M20-6   | 0.020       | 25          | 1.5          | 217         | 4.2         | 11.2              | 5.3           | 0.72 | 3.9 | 2558 | Ripple    |
| M20-7   | 0.020       | 25          | 1.5          | 217         | 5.5         | 14.6              | 7.0           | 0.72 | 6.6 | 3350 | Ripple    |
| M20-8   | 0.020       | 25          | 2.0          | 300         | 3.3         | 9.5               | 6.0           | 0.52 | 2.8 | 2167 | No Ripple |
| M20-9   | 0.020       | 25          | 2.0          | 300         | 4.1         | 11.6              | 7.4           | 0.52 | 4.2 | 2659 | Ripple    |
| M20-10  | 0.020       | 25          | 2.0          | 300         | 4.3         | 12.3              | 7.8           | 0.52 | 4.7 | 2824 | Ripple    |
| M20-11  | 0.020       | 25          | 2.0          | 300         | 5.6         | 15.9              | 10.1          | 0.52 | 7.8 | 3644 | Ripple    |
| M20-12  | 0.020       | 25          | 2.5          | 381         | 1.7         | 5.0               | 4.0           | 0.41 | 0.8 | 1154 | No Ripple |
| M20-13  | 0.020       | 25          | 2.5          | 381         | 3.0         | 8.7               | 7.0           | 0.41 | 2.4 | 2002 | No Ripple |
| M20-14  | 0.020       | 25          | 2.5          | 381         | 4.1         | 12.0              | 9.5           | 0.41 | 4.4 | 2748 | Ripple    |
| M20-15  | 0.020       | 25          | 2.5          | 381         | 5.0         | 14.7              | 11.7          | 0.41 | 6.6 | 3359 | Ripple    |
| M20-16  | 0.020       | 25          | 3.0          | 461         | 2.4         | 7.1               | 6.8           | 0.34 | 1.6 | 1623 | No Ripple |
| M20-17  | 0.020       | 25          | 3.0          | 461         | 2.8         | 8.3               | 7.9           | 0.34 | 2.1 | 1899 | No Ripple |
| M20-18  | 0.020       | 25          | 3.0          | 461         | 3.6         | 10.7              | 10.2          | 0.34 | 3.5 | 2451 | Ripple    |
| M20-19  | 0.020       | 25          | 3.5          | 540         | 2.2         | 6.5               | 7.3           | 0.29 | 1.3 | 1500 | No Ripple |
| M20-20  | 0.020       | 25          | 3.5          | 540         | 2.4         | 7.2               | 8.0           | 0.29 | 1.6 | 1639 | No Ripple |
| M20-21  | 0.020       | 25          | 3.5          | 540         | 2.9         | 8.7               | 9.7           | 0.29 | 2.3 | 1988 | No Ripple |
| M20-22  | 0.020       | 25          | 3.5          | 540         | 3.3         | 9.9               | 11.0          | 0.29 | 3.0 | 2267 | Ripple    |
| M20-23  | 0.020       | 25          | 3.5          | 540         | 3.8         | 11.4              | 12.7          | 0.29 | 4.0 | 2616 | Ripple    |
| M20-24  | 0.020       | 15          | 0.7          | 66          | 4.3         | 9.7               | 2.2           | 1.43 | 2.9 | 2229 | Ripple    |
| M20-25  | 0.020       | 20          | 0.8          | 89          | 4.4         | 8.9               | 2.3           | 1.42 | 2.5 | 2041 | No Ripple |
| M20-26  | 0.020       | 20          | 0.8          | 89          | 4.9         | 9.9               | 2.5           | 1.42 | 3.0 | 2273 | Ripple    |
| M20-27  | 0.020       | 20          | 0.8          | 89          | 5.4         | 10.9              | 2.8           | 1.42 | 3.7 | 2505 | Ripple    |
| M38-1   | 0.038       | 25          | 1.0          | 130         | 5.2         | 10.8              | 3.4           | 1.21 | 1.9 | 2463 | No Ripple |
| M38-2   | 0.038       | 25          | 1.0          | 130         | 6.4         | 13.1              | 4.2           | 1.21 | 2.8 | 3008 | No Ripple |
| M38-3   | 0.038       | 25          | 1.0          | 130         | 6.8         | 14.0              | 4.4           | 1.21 | 3.2 | 3197 | Ripple    |
| M38-4   | 0.038       | 25          | 1.0          | 130         | 8.3         | 17.1              | 5.4           | 1.21 | 4.7 | 3908 | Ripple    |
| M38-5   | 0.038       | 25          | 1.0          | 130         | 8.8         | 18.1              | 5.8           | 1.21 | 5.3 | 4145 | Ripple    |
| M38-6   | 0.038       | 25          | 1.5          | 217         | 2.9         | 7.6               | 3.6           | 0.72 | 0.9 | 1736 | No Ripple |
| M38-7   | 0.038       | 25          | 1.5          | 217         | 4.0         | 10.6              | 5.1           | 0.72 | 1.8 | 2436 | No Ripple |
| M38-8   | 0.038       | 25          | 1.5          | 217         | 5.0         | 13.2              | 6.3           | 0.72 | 2.8 | 3015 | Ripple    |
| M38-9   | 0.038       | 25          | 1.5          | 217         | 5.5         | 14.5              | 6.9           | 0.72 | 3.4 | 3319 | Ripple    |
| M38-10  | 0.038       | 25          | 2.0          | 300         | 3.4         | 9.7               | 6.2           | 0.52 | 1.5 | 2233 | No Ripple |
| M38-11  | 0.038       | 25          | 2.0          | 300         | 3.9         | 11.2              | 7.1           | 0.52 | 2.0 | 2561 | Ripple    |
| M38-12  | 0.038       | 25          | 2.0          | 300         | 4.7         | 13.5              | 8.6           | 0.52 | 3.0 | 3086 | Ripple    |
| M38-13  | 0.038       | 25          | 2.0          | 300         | 5.9         | 16.9              | 10.8          | 0.52 | 4.7 | 3874 | Ripple    |
| M38-14  | 0.038       | 25          | 2.0          | 300         | 6.8         | 19.3              | 12.3          | 0.52 | 6.1 | 4432 | Ripple    |
| M38-15  | 0.038       | 25          | 2.0          | 300         | 8.1         | 23.2              | 14.8          | 0.52 | 8.8 | 5319 | Ripple    |
| M38-16  | 0.038       | 25          | 2.5          | 381         | 2.9         | 8.6               | 6.8           | 0.41 | 1.2 | 1968 | No Ripple |
| M38-17  | 0.038       | 25          | 2.5          | 381         | 3.7         | 11.0              | 8.7           | 0.41 | 2.0 | 2511 | No Ripple |
| M38-18  | 0.038       | 25          | 2.5          | 381         | 4.2         | 12.4              | 9.9           | 0.41 | 2.5 | 2850 | No Ripple |
| M38-19  | 0.038       | 25          | 2.5          | 381         | 4.6         | 13.6              | 10.8          | 0.41 | 3.0 | 3121 | Ripple    |
| M38-20  | 0.038       | 25          | 2.5          | 381         | 5.7         | 16.9              | 13.4          | 0.41 | 4.6 | 3868 | Ripple    |
| M38-21  | 0.038       | 25          | 3.0          | 461         | 3.8         | 11.3              | 10.8          | 0.34 | 2.1 | 2589 | No Ripple |
| M38-22  | 0.038       | 25          | 3.0          | 461         | 4.4         | 13.3              | 12.7          | 0.34 | 2.9 | 3038 | Ripple    |
| M38-23  | 0.038       | 25          | 3.0          | 461         | 5.0         | 15.1              | 14.4          | 0.34 | 3.7 | 3452 | Ripple    |
| M38-24  | 0.038       | 25          | 3.0          | 461         | 6.8         | 20.5              | 19.6          | 0.34 | 6.8 | 4695 | Ripple    |
| M38-25  | 0.038       | 25          | 3.0          | 461         | 7.6         | 22.9              | 21.9          | 0.34 | 8.5 | 5247 | Ripple    |

Table 3 Continued

| Run No. | $D$<br>(cm) | $h$<br>(cm) | $T$<br>(sec) | $L$<br>(cm) | $H$<br>(cm) | $u_b$<br>(cm/sec) | $d_0$<br>(cm) | $kh$ | $M$  | $Re$ | Remarks   |
|---------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|---------------|------|------|------|-----------|
| M38-26  | 0.038       | 25          | 3.0          | 461         | 8.4         | 25.2              | 24.0          | 0.34 | 10.3 | 5765 | Ripple    |
| M38-27  | 0.038       | 25          | 3.5          | 540         | 2.6         | 7.9               | 8.8           | 0.29 | 1.0  | 1814 | No Ripple |
| M38-28  |             |             |              |             | 3.3         | 9.9               | 11.0          | 0.29 | 1.6  | 2267 | No Ripple |
| M38-29  |             |             |              |             | 3.9         | 11.9              | 13.2          | 0.29 | 2.3  | 2721 | No Ripple |
| M38-30  |             |             |              |             | 4.5         | 13.5              | 15.1          | 0.29 | 3.0  | 3104 | Ripple    |
| M54-1   | 0.054       | 25          | 1.2          | 166         | 6.5         | 15.5              | 5.9           | 0.95 | 2.8  | 3560 | No Ripple |
| M54-2   |             |             |              |             | 7.8         | 18.5              | 7.1           | 0.95 | 3.9  | 4245 | Ripple    |
| M54-3   | 0.054       | 25          | 1.5          | 217         | 4.7         | 12.4              | 5.9           | 0.72 | 1.7  | 2832 | No Ripple |
| M54-4   |             |             |              |             | 5.3         | 14.0              | 6.7           | 0.72 | 2.2  | 3197 | No Ripple |
| M54-5   |             |             |              |             | 6.0         | 15.8              | 7.6           | 0.72 | 2.9  | 3624 | Ripple    |
| M54-6   |             |             |              |             | 7.3         | 19.3              | 9.2           | 0.72 | 4.3  | 4415 | Ripple    |
| M54-7   | 0.054       | 25          | 2.0          | 300         | 3.3         | 9.5               | 6.0           | 0.52 | 1.0  | 2167 | No Ripple |
| M54-8   |             |             |              |             | 4.4         | 12.6              | 8.0           | 0.52 | 1.8  | 2889 | No Ripple |
| M54-9   | 0.054       | 25          | 2.0          | 300         | 4.7         | 13.3              | 8.5           | 0.52 | 2.0  | 3053 | Ripple    |
| M54-10  | 0.054       | 25          | 2.5          | 381         | 3.3         | 9.6               | 7.7           | 0.41 | 1.1  | 2205 | No Ripple |
| M54-11  |             |             |              |             | 4.0         | 11.8              | 9.4           | 0.41 | 1.6  | 2714 | No Ripple |
| M54-12  |             |             |              |             | 5.3         | 15.7              | 12.5          | 0.41 | 2.8  | 3596 | No Ripple |
| M54-13  |             |             |              |             | 6.0         | 17.6              | 14.0          | 0.41 | 3.6  | 4038 | Ripple    |
| M54-14  | 0.054       | 25          | 3.0          | 461         | 3.7         | 11.0              | 10.5          | 0.34 | 1.4  | 2520 | No Ripple |
| M54-15  |             |             |              |             | 4.3         | 12.8              | 12.2          | 0.34 | 1.9  | 2934 | No Ripple |
| M54-16  |             |             |              |             | 5.0         | 15.1              | 14.4          | 0.34 | 2.6  | 3452 | Ripple    |
| M54-17  | 0.054       | 25          | 3.5          | 540         | 1.8         | 5.5               | 6.1           | 0.29 | 0.3  | 1256 | No Ripple |
| M54-18  |             |             |              |             | 2.8         | 8.4               | 9.3           | 0.29 | 0.8  | 1918 | No Ripple |
| M54-19  |             |             |              |             | 3.3         | 10.0              | 11.2          | 0.29 | 1.2  | 2302 | No Ripple |
| M54-20  |             |             |              |             | 4.5         | 13.7              | 15.3          | 0.29 | 2.1  | 3139 | No Ripple |
| M54-21  |             |             |              |             | 5.0         | 15.2              | 17.0          | 0.29 | 2.7  | 3488 | No Ripple |
| M54-22  |             |             |              |             | 5.7         | 17.2              | 19.2          | 0.29 | 3.4  | 3941 | Ripple    |

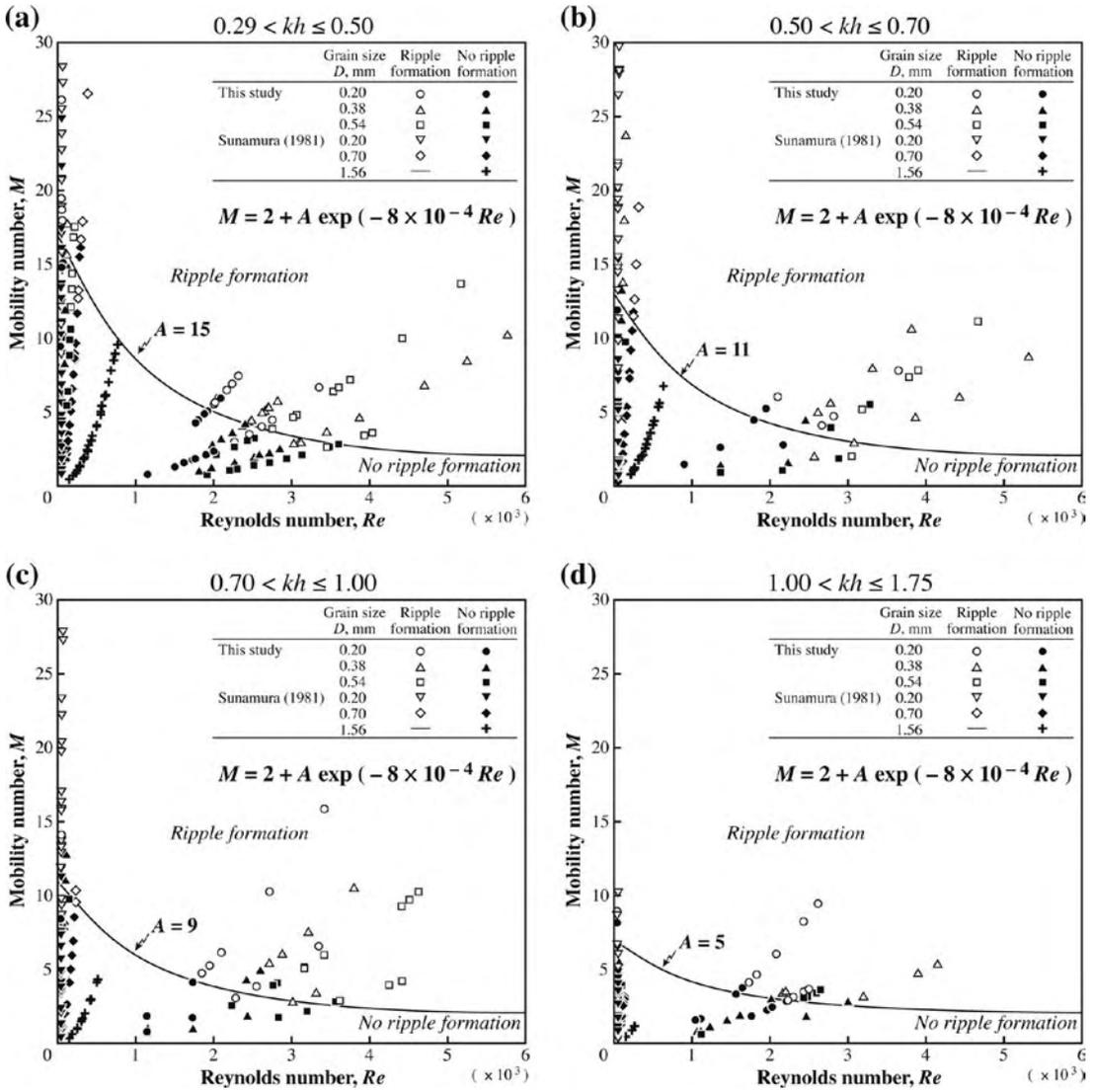


Fig. 3 Relationship between the Reynolds number,  $Re$ , and the mobility number,  $M$ , for ripple initiation with different ranges of the relative water depth,  $kh$  (after Sekiguchi and Sunamura, 2005). The solid curve in each graph denotes the threshold for ripple formation.

attains constant value with further increased bed roughness (Fig. 3). The threshold also decreases as  $kh$  increases. They proposed the following empirical model of the threshold for rippling considering the effect of bed perturbation:

$$M = 2 + A \exp B \quad (6)$$

where

$$A = 5.7 \left( \frac{3.79}{kh - 0.65} - 1 \right) \quad (7)$$

and

$$B = -8 \times 10^{-4} Re \quad (8)$$

## References

- Komar, P. D. (1998): *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 544p.
- Nielsen, P. (1992): *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*. World Scientific Publishing Corporation, Singapore, 324p.
- Sekiguchi, T. and Sunamura, T. (2004): Effects of bed perturbation and velocity asymmetry on ripple initiation: wave-flume experiments. *Coastal Engineering*, **50**, 231–239.
- Sekiguchi, T. and Sunamura, T. (2005): Threshold for ripple formation on artificially roughened beds: wave-flume experiments. *Journal of Coastal Research*, **21**, 323–330.
- Sunamura, T. (1981): Bedforms generated in a laboratory wave tank. *Science Report A2*, University of Tsukuba, 31–43.
- (2006年5月31日受付, 2006年7月25日受理)



## 2005 年度 陸域環境研究センターセミナーの記録

- 2005.5.12 第 84 回セミナー 参加者 21 名  
浅沼 順 (筑波大学 陸域環境研究センター)  
「米国デューク大学滞在報告」
- 2005.5.30 第 85 回セミナー 参加者 35 名  
Jean-Yves Parlange (米国コーネル大学)  
Fingering and Infiltration
- 2005.6.28 第 86 回セミナー 参加者 17 名  
関口智寛 (筑波大学 陸域環境研究センター)  
「瀬戸内海松山市沖海域の砂堆の特徴と堆積環境」
- 2005.7.21 第 87 回セミナー 参加者 12 名  
植村 立 (国立極地研究所)  
「古気候指標としての水安定同位体比の可能性－最近の極域アイスコアの研究例－」
- 2006.2.6. 第 88 回セミナー 参加者 25 名  
Roy C. Sidle (京都大学 防災研究所 地盤災害研究部門)  
Spatial and Temporal Aspects of Sedimentation Related to Land Use: Keys to Assessing Sustainable Land Use Practices
- 2006.2.24 第 89 回セミナー 参加者 13 名  
C. M. Madduma Bandara (スリランカ・ペラデニヤ大学地理学教室)  
Hydrological Impacts of the Recent Tsunami Event in Sri Lanka



## 米国デューク大学滞在報告

浅沼 順\*

2004年3月より2005年1月までの10ヶ月間、文部科学省在外研究員制度によって、米国ノースカロライナ州にあるデューク大学に留学したので、報告する。デューク大学は、20世紀初頭に創立された由緒ある大学であり、医学部が地域医療を担う大規模な病院を経営している。もともとは、法学・教養学部など文科系を中心とした大学であったが、近年、工学や環境学に力を入れており、これらの部門で急速な展開を行っている注目の大学である。水文学の分野においても、近年、力のある若手が集まっており、現在注目されるグループの一つである。特に環境学部（元林学部）が管理・運営する Duke Forest と呼ばれる演習林において、森林水文・生態水文・炭素循環に関する実験研究を集中的に行っていることは、有名である。特に FACE (Free Atmosphere Carbon Enrichment) と呼ばれる、大規模実験は既に Nature や Science などとその結果が発表されており、高い評価を得ている。また、欧米での水文学での新しい潮流として、Ecohydrology (生態水文学) と呼ばれる生態学と水文学の間の横断的分野について、紹介した。

## 瀬戸内海松山市沖海域の砂堆の特徴と堆積環境

関口 智寛\*・布川 裕也\*\*・  
大平 亮\*\*\*・岩本 直哉\*\*\*\*・  
井上 卓彦\*\*\*\*・井内 美郎\*\*\*\*

複数チャネルからの流れの影響下にある堆積地形と流れ場の関係について、瀬戸内海松山市沖海域をモデルフィールドとして検討した。調査海域北部には“大洲”と呼ばれる砂堆、南部には“ツガイ州”と呼ばれる二つの砂堆が分布し、その南西には釣島海峡と高浜瀬戸が隣接する。'04年7月20・21日に RESON 社製ナローマルチビーム音響測深器 SeaBat 8101 ER 型を用いて海底地形の測深を、'04年7月3・4日に RD Instruments 社製超音波ドップラー流速プロファイラー Workhorse Sentinel 600 kHz を使用して流れ場の観測を行った。また、'01 から '03 年にかけて採取した 611 の表層底質試料を用いて表層堆積物分布を調べた。調査結果を基に描いた海底地形図から、大洲南端を境界として砂堆のクレストラインの伸張方向が急激に変換することがわかった。一方、流速測定結果から調査海域南部では潮汐渦が発達することが明らかになり、クレストラインの変換点はこの潮汐渦が影響を及ぼす限界とほぼ一致した。また、砂堆の最大傾斜面の傾斜方向と砂堆上に発達するデューンのそれとが、北部では一致するのに対し南部では一致しない。砂堆とデューンの最大傾斜方向はそれぞれ平均流の方向、最大流の方向と整合的であった。さらに、堆積物の中央粒径は海峡から離れるほど細粒化するものの、南部海域の砂堆上より北部海域の砂堆上の粒径の方が大きい傾向があった。以上の結果から、調査海域北部と南部で砂堆の形成メカニズムが異なり、北部では海峡部から運ばれてきた堆積物が流れの減衰により集積して砂堆を

\* 筑波大学陸域環境研究センター

\* 筑波大学陸域環境研究センター

\*\* (株) ナイトライド・セミコンダクター

\*\*\* (株) オーシャンエンジニアリング

\*\*\*\* 愛媛大学

形成しているのに対し，南部では潮汐渦の発達により渦中心へ堆積物が集まって砂堆が発達したものと推測される．

## 古気候指標としての 水安定同位体比の可能性 —最近の極域アイスコアの研究例—

植村 立\*

極域のアイスコアには，過去 10 万年以上にわたる気候変動の記録が保存されている．なかでも，水の安定同位体比は気候変動の復元につかわれる重要な指標である．水の同位体比から気温を復元するには「同位体比と気温の相関関係」をもとにした「同位体温度計」を用いることが一般的であるが，気温推定の妥当性については，いくつかの問題が指摘されている．

本発表では，この「水同位体温度計に関する研究の現状」を紹介する．また，水蒸気起源海域の環境復元をすることで，同位体温度計の精度向上にも役立つと期待されている d-excess をもちいた研究について，日本隊が掘削した南極ドームふじアイスコアの研究例を紹介する．

---

\* 国立極地研究所 気水圏研究グループ

## 論文リスト

本論文リストは当センターを利用した研究で、2005年4月から2006年3月までの間に学術誌に発表された論文と、各大学において受理された卒業論文、修士論文、博士論文のリストである。

### 一般研究論文

- 青木 久・佐々木智也・松倉公憲 (2005): 大谷石からなる風化岩盤の表面の強度に関する非破壊測定法: エコーチップ硬さ試験機と赤外線水分計を利用した例. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 33-38.
- 飯田真一・中谷 壮・田中 正 (2006): 山地源流域の落葉広葉樹林における樹液流速測定に基づく林分蒸散量の評価. 水文・水資源学会誌, **19**, 7-16.
- 恩田裕一・辻村真貴・田中高志・笹木浩二・水山高久・内田太郎・田井中 治・田中秀夫 (2006): 降雨流出特性を用いた土石流警戒避難基準の策定法の検討. 砂防学会誌, **58**, 13-17.
- 恩田裕一・辻村真貴・野々田稔朗・竹中千里 (2005): 荒廃した人工林における浸透能測定. 水文・水資源学会誌, **18**, 688-694.
- 齊藤 誠・山中 勤 (2005): ウェイングラシメータによる蒸発散量長期観測データの解析とクオリティーコントロール. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 33-38.
- 清水亮介・山中 勤 (2005): 微気象学的スケールにおける大気水蒸気同位体組成の空間構造. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 3-9.
- 辻村真貴・恩田裕一・原田大路 (2006): 荒廃したヒノキ林における降雨流出に及ぼすホートン地表流の影響. 水文・水資源学会誌, **19**, 17-24.
- 西川知行・恩田裕一・田中幸哉・加藤弘亮・辻村真貴・関 李紀・浅野真紀・Gombo Davaa・Dambaravjaa Oyunbaatar (2005): Cs-137を用いたモンゴル国における土壤侵食量の推定. 砂防学会誌, **58(3)**, 4-14.
- 花房龍男・青島 武・渡来 靖 (2005): 超音波風速温度計と熱電対温度計による潜熱輸送量の簡単な評価方法. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 11-15.
- 濱田洋平・飯田真一・林 敦史・角張順一・田中正 (2006): カラマツ人口林および天然広葉樹林の長期的な林分生長量. 筑波大学演習林報告, **22**, 33-44.
- 松倉公憲・前門 晃・廣瀬 孝・青木 久・小暮哲也 (2005): 台座岩から推定される石灰岩地表面の溶解による低下速度: 喜界島における一例. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 17-21.
- 藪崎志穂・田瀬則雄 (2005): つくば市における降水の安定同位体比の特徴について. 水文・水資源学会誌, **18**, 592-602.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・辻村真貴 (2005): 土壌水の酸素・水素安定同位体比鉛直プロファイルの形成過程. 同位体科学, **1**, 35-39.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・萩野谷成徳 (2005): 陸域環境研究センターにおける蒸発散量推定法の検討. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 45-51.
- 山中 勤・松尾大悟・矢野 翠・角張順一・飯田真一・涌井久司・清水亮介・田中 正 (2005): 遷移過程のアカマツ二次林における

- 植物種間の根系分布の差異. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 39-44.
- 山本まりえ・青木 久・松倉公憲 (2005): 青島砂岩の塩類風化速度に与える間隙率の影響に関する一実験. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 23-31.
- Asanuma, J., Ishikawa, H., Tamagawa, I., Ma, Y., Hayashi, T., Qi, Y., and Wang, J.( 2005): Application of bandpass covariance technique to portable flux measurements over Tibetan plateau. *Water Resour. Res.*, **41(9)**, W09407, doi:10.1029/2005WR003954.
- Hamada, Y. and Tanaka, T. (2005): Characteristics of diurnal change of soil water potential in a forested soil. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 1-4.
- Iida, S. Kakubari, J. and Tanaka, T. (2005): "Litter marks" indicating infiltration area of stemflow-induced water. *Tsukuba Geoenvironmental. Sciences, Univ. Tsukuba*, **1**, 27-31.
- Iida, S., Suzuki, A. and Tanaka, T. (2005): Infiltration area of stemflow-induced water around Formosa Sweet Gum and Japanese Zelkova. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 21-24.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2005): Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Jour. Hydrol.*, **315**, 154-166.
- Kawase, H., Sato, T. and Kimura F.(2005): Numerical experiments on cloud streets in the lee of island arcs during cold-air outbreaks. *Geophysical Research Letters*, **32**, L14823, doi:10.1029/2005GL023256.
- Kawase, H., Takeuchi, Y., Sato, T., and Kimura, F. (2006): Precipitable water vapor round orographically induced convergence line. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, **2**, 25-28.
- Lee, G. Z., Lee, P. Z., Kim, W. S. and Oikawa, T. (2005): Development and validation of hourly based Sim-CYCLE Fine in a temperate C3/C4 coexisting grassland, *The Korean Journal of Ecology*, **28**, 353-363.
- Li, S., Asanuma, J., Kotani, A., Eugster, W., Davaa, G., Oyunbaatar, D., and Sugita, M.(2005): Year-round measurements of net ecosystem CO<sub>2</sub> flux over a montane larch forest in Mongolia. *Journal Geophys. Res. -Atmos.*, **110**, doi: 10.1029/2004JD005453.
- Li, S. G., Asanuma, J., Eugster, W., Kotani, A., Liu, J.-J., Urano, T., Oikawa, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D., and Sugita, M. (2005): Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, **11**,1941-1955,doi:10.1111/j.1365-2486.2005.01047.x.
- Li, S. G., Tsujimura, M., Sugimoto, A., Davaa, G. and Sugita, M. (2006): Natural recovery of steppe vegetation on vehicle tracks in central Mongolia. *Journal of Bioscience*, **31**, 85-93.
- Li, S. G., Tsujimura, M., Sugimoto, A., Sasaki, L., Yamanaka, T., Davaa, G., Oyunbaatar, D. and Sugita, M. (2006): Seasonal variation in oxygen isotope composition of waters for a montane larch forest in Mongolia. *Trees*, **20**, 122-130. DOI10.1007/s00468-005-0019-1.
- Saito, M., Miyata, A.,Nagai, H. and Yamada, T. (2005):Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan, *Agricultural and Forest Meteorology*, **135**,

93-109.

- Sato, T. and Kimura, F. (2005): Diurnal cycle of convective instability around the central mountains in Japan during the warm season. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **62**, 1626-1636.
- Shimoda, S., Wenhong, M. and Oikawa, T. (2005): The effects of characteristics of Asian monsoon climate on interannual CO<sub>2</sub> exchange in a humid temperate C3/C4 co-occurring grassland, *SOLA*, **1**, 169-172.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2005): The role of slope and soil thickness on dynamic of soil water and its chemistry in hillslope area. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 45-50.
- Subagyono, K., Tanaka, T., Hamada, Y. and Tsujimura, M. (2005): Defining hydrochemical evolution of streamflow through flowpath dynamics in Kawakami headwater catchment, central Japan. *Hydrological Process*, **19**, 1939-1965.
- Tanaka, T. (2005): Ecohydrological water use and water management in the island of Bali, Indonesia. *Proc. Int. Symposium on Ecohydrology, UNESCO IHP-VI Tech. Documents in Hydrology*, **4**, 207-211.
- Tanaka, T. ed. (2005): *Proceedings of International Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose Zone*. TERC Univ. Tsukuba, 64p.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, J. and Hamada, Y. (2005): The role of stemflow inputs in infiltration/percolation and groundwater recharge processes in a forested catchment. *Hydrology, Ecology and Water Resources, Int. Conf. Headwater Control VI*, CD-ROM, 9p.
- Tanaka, T., Kakubari, J., Iida, S. and Hamada, Y. (2005): Effect of succession from Japanese red pine to evergreen oak on unsaturation process in a vadose zone. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 51-54.
- Tsunematsu, N., Sato, T., Kimura, F., Kai, K., Kurosaki, Y., Nagai, T., Zhou, H. and Mikami, M. (2005): Extensive dust outbreaks following the morning inversion breakup in the Taklimakan Desert. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D21207, doi:10.1029/2005JD005994.
- Wang, W., Ohse, K., Liu, J., Mo, W. and Oikawa, T. (2005): Contribution of root respiration to soil respiration in a C3/C4 mixed grassland. *J. Biosci.*, **30**, 507-514.
- Yang, Y., Tanaka, T., Zhang, X. and Luo, G. (2005): Groundwater recharge from precipitation in agricultural field in the piedmont region of the Taihang mountains, China. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 33-43.
- Yoshikane, T., Kimura, F. (2005): Climatic features of the water vapor transport around east Asia and rainfall over Japan in June and September. *Geophysical Research Letters*, **32**, L18712, doi:10.1029/2005GL023665.

#### 博士論文

- Lee, Gilzae (2006): Simultaneous simulation of the carbon and water dynamics and plant growth in a temperate C3/C4 co-existing grassland. 138p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

Shimoda, Seiji (2006): Micro-meteorological factors of interannual variation in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes over a C3/C4 mixture grassland: an experimental study, 160p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

### 卒業論文

大田清宏 (2006): クロロフルオロカーボン類を用いた地下水の滞留時間推定法に関する基礎研究. 67p. (筑波大学第一学群自然科学類)

恩田 真 (2006): 水面蒸発フラックスの同位体組成に関する観測的研究－Craig-Gordonモデルの野外検証－. 41p. (筑波大学第一学群自然科学類)

加藤信哉 (2006): 栃木県鹿沼地域における地下水と河川水の交流関係. 62p. (筑波大学第一学群自然科学類)

澁澤昌宏 (2006): 火成岩からなる山地流域の湧

水における流出プロセスと滞留時間. 47p. (筑波大学第一学群自然科学類)

鈴木 茜 (2006): 樹幹流の浸透範囲について. 43p. (筑波大学第一学群自然科学類)

野村あゆみ (2006): 筑波山における降水の安定同位体比形成プロセス. 47p. (筑波大学第一学群自然科学類)

林 敦史 (2006): キャパシタンス式水分計による土壌水分測定. 31p. (筑波大学第一学群自然科学類)

松尾大悟 (2006): アカマツの水利用様式に関する同位体生態水文学的研究－アカマツ単純林における事例－. 35p. (筑波大学第一学群自然科学類)

水尻正博 (2006): 茨城県つくば市における湧水の特徴. 51p. (筑波大学第一学群自然科学類)

矢野 翠 (2006): アカマツ林地における表層土壌水分の日周変化について. 63p. (筑波大学第一学群自然科学類)

# 平成 17 年度陸域環境研究センター施設利用状況

(平成 18 年 3 月 31 日現在)

|                   | 教育関係                                  | 研究関係       |                       |               |
|-------------------|---------------------------------------|------------|-----------------------|---------------|
| 学群                | 地形プロセス学・同実験 (自然科学類)                   | 20 名× 15 回 | 卒業研究利用者<br>自然科学類      |               |
|                   | 地球科学実験Ⅲ (自然科学類)                       | 33 名× 2 回  |                       | 7 名           |
|                   | 気候学・気象学実験 (自然科学類)                     | 30 名× 10 回 |                       |               |
|                   | 水文学実験 (自然科学類)                         | 23 名× 3 回  |                       |               |
|                   | 〃                                     | 25 名× 10 回 |                       |               |
|                   | 水資源利用学実験 (生物資源学類)                     | 10 名× 5 回  |                       |               |
| 計測制御工学実験 (生物資源学類) | 35 名× 1 回                             |            |                       |               |
|                   | 合計 (延) 数                              | 1,070 名    | 合計 (延) 数              | 7 名           |
| 大学院               | 実習 (環境科学研究科)                          | 21 名× 1 回  | 生命環境科学研究科             | 10 名          |
|                   | 地域調査法 (教育研究科)                         | 9 名× 10 回  | 生命環境科学研究科 (実験室のみ)     | 1 名           |
|                   |                                       |            | 環境科学研究科               | 3 名           |
|                   |                                       |            | 人間総合科学研究所 (体育科学専攻)    | 1 名           |
|                   | 合計 (延) 数                              | 111 名      | 合計 (延) 数              | 15 名          |
| 教職員               | 学生の指導                                 | 59 名       | 陸域環境研究センター            | 9 名           |
|                   |                                       |            | 生命環境科学研究科 (地球環境科学専攻)  | 4 名           |
|                   |                                       |            | 環境科学研究科               | 4 名           |
|                   | 合計 (延) 数                              | 59 名       | 合計 (延) 数              | 17 名          |
| 他大学等              | 地理情報・環境教育研究野外調査 A<br>(立正大学地球環境学部地理学科) | 2 名× 1 回   | 千葉大学環境リモートセンシング研究センター | 1 名           |
|                   | IHP トレーニングコース (名古屋大学)                 | 20 名× 1 回  | 名古屋大学地球水循環研究センター      | 1 名           |
|                   |                                       |            | 立正大学地球環境科学研究科         | 1 名           |
|                   |                                       |            | 国立科学博物館               | 1 名           |
|                   |                                       |            | 産業技術総合研究所             | 1 名           |
|                   |                                       |            | NHK エデュケーションル         | 4 名           |
|                   | 合計 (延) 数                              | 22 名       | 合計 (延) 数              | 9 名           |
| その他               | 研究会・年次報告会                             | 5 回 参加者    | 177 名                 |               |
|                   | セミナー                                  | 6 回 参加者    | 123 名                 |               |
|                   | ワークショップ                               | 2 回 参加者    | 100 名                 | (国際・国内 各 1 回) |
|                   | 機器の利用                                 |            | 6 名                   |               |
|                   | データの利用                                |            | 7 名                   |               |
|                   | 見学者                                   |            |                       |               |
|                   | 国内                                    |            | 410 名                 |               |
| 国外                |                                       | 12 名       |                       |               |
|                   | 利用者合計                                 |            | 2,145 名               |               |

## 主 な 行 事

| 年 月 日           | 記 事                         |
|-----------------|-----------------------------|
| 2005. 4. 1      | 藪崎 志穂研究機関研究員採用              |
| 2005. 4. 22     | 茨城高校見学 (46名)                |
| 2005. 4. 23     | 科学技術週間・センターの一般公開            |
| 2005. 5. 26     | 茨城県立竹園高校見学 (180名)           |
| 2005. 6. 1      | 関口 智寛講師着任                   |
| 2005. 6. 8      | 山形県立米沢中央高校見学 (35名)          |
| 2005. 6. 16     | 吉村 恵美子研究支援推進員採用             |
| 2005. 6. 28     | 平成 17 年度第 1 回運営委員会          |
| 2005. 6. 30     | 目代 邦康準研究員退職                 |
| 2005. 7. 1      | 八反地 剛準研究員着任                 |
| 2005. 7. 19     | 宮城県立宮崎北高校見学 (45名)           |
| 2005. 7. 20     | 圃場整備 (草刈)                   |
| 2005. 8. 4      | 自然学類体験学習 (38名)              |
| 2005. 8. 9      | NHK 教育番組「NHK 高校講座 地学」撮影     |
| 2005. 10. 14    | 高崎福祉大学高崎高校見学 (78名)          |
| 2005. 10. 26    | 鳥取県立鳥取東高校 (10名)             |
| 2005. 11        | 「陸域環境研究センター報告第 6 号」発行       |
| 2005. 11. 10    | 栃木県立栃木高校見学 (45名)            |
| 2005. 11. 21    | 圃場整備 (草刈)                   |
| 2005. 12. 1     | 吉田 瑞穂研究支援推進員採用              |
| 2005. 12. 2     | 常盤大学高校見学 (40名)              |
| 2005. 12. 16    | 陸域環境研究センター国際ワークショップ開催       |
| 2005. 12. 19    | 陸域環境研究センター国内ワークショップ開催       |
| 2006. 1. 14     | 筑波グランドフェスティバル見学 (10名)       |
| 2006. 1. 16-19  | 飯島技術専門職員ショベルローダー講習会受講       |
| 2006. 1. 16     | 平成 17 年度第 2 回運営委員会          |
| 2006. 1. 19     | 中国科学院研究者見学 (8名)             |
| 2006. 1. 27     | 大型水路天井走行電車定期点検実施            |
| 2006. 2. 9      | 圃場観測機器の定期点検実施               |
| 2006. 3         | 実験室空調機更新                    |
| 2006. 3. 1-3. 2 | 超音波風向風速計の定期点検実施             |
| 2006. 3. 7      | IHP トレーニングコース (名古屋大学主催、20名) |
| 2006. 3. 3      | 平成 17 年度陸域環境研究センター年次研究報告会   |
| 2006. 3. 3      | 及川武久教授退職記念会                 |

## 陸域環境研究センター 熱収支・水収支観測資料について

下記の表は学内外の利用希望者に対する利用できるデータの種類、収録期間、メディアの種類、利用方法を示す。利用希望者は、データ利用願い (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/new/use/use.html#4>) を記入の上センター宛提出されたい。

| データの種類  | 収録期間                   | メディア                       | 利用方法  |
|---|------------------------|----------------------------|---|
| 1時間ごとの全測定項目および、日平値（または日積算）値・日最小値・日最大値が入った月ごとのアスキーファイル | 1981年/11月～<br>現在       | 陸域環境研究センターのホームページ          | 陸域環境研究センターのホームページ ( <a href="http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/">http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/</a> ) の TERC 熱収支・水収支観測データベース ( <a href="http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/japanese/database.html">http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/japanese/database.html</a> ) にアクセスする。<br>●月ごとのデータは、( <a href="http://hojyo.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/archives/monthly/">http://hojyo.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/archives/monthly/</a> ) に保存されており、ファイル名のつけ方は次の通りである。Dyy-mm.DAT、yyは年、mmは月を表している。例えば、2002年4月のデータは、D02-04.DATである。<br>●年ごとに圧縮されたデータは、( <a href="http://hojyo.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/archives/yearly/">http://hojyo.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/archives/yearly/</a> ) に保存されている。圧縮形式はlzh形式またはtar + gzip形式である。 |
| 上記データのプリントアウト   | 1983年/7月～<br>2003年/3月  | 冊子体 (3枚/1日)<br>一冊/3ヶ月      | コピーをとるか (*), 写し取り, 利用する。または貸し出しを行うので (一週間まで) 持ち帰って利用する。   |
| 測定項目ごとの1時間ごとのプリントアウト                                  | 1989年/1月～<br>利用時の1-2年前 | 冊子体<br>1枚/1月               | 同上  |
| 各項目の日平均値のプリントアウト                                      | 1989年/1月～<br>利用時の1-2年前 | 冊子体<br>(センター報告)<br>1ページ/1年 | 同上  |
| 各項目のアナログ出力を記録したチャート                                   | 1980年/1月～<br>2003年/3月  | チャート<br>一冊/1月              | コピーをとるか (*) センター内で読み取る。   |

(\*) センターのコピー機を使う場合、学生用コピーカードを使用し、何枚使用したかを記録用ノートに記入する（教職員の場合は本人あてに、学生の場合は指導教員あてに利用額が後ほどセンターから請求される）。

## 筑波大学陸域環境研究センター出版物の 著作権について

1. 筑波大学陸域環境研究センター報告等に掲載されたすべての報文等（以下、報文等と称する）の著作権は筑波大学陸域環境研究センター（以下、本センターと称する）に帰属する。
2. 本センターの出版物に掲載された報文等の全部あるいは一部を他の出版物に転載、翻訳、あるいはその他のために利用する場合には、本センターに文書による利用許諾を得た上で、出所明示して利用しなければならない。
3. ただし、学説の展開、および教育目的の著作の中で、本センターの出版物に掲載された報文等の一部を出所明示の上で引用する場合には、前項にかかわらず利用許諾の申請は不要とする。

### 1993年以前の「水理実験センター報告」掲載記事に関する 著作権委譲のお願い

近年、国内外の多くの学術雑誌が電子化・ウェブ公開化されてきており、その重要性が高まってきております。筑波大学陸域環境研究センター（以下、センターと呼ぶ）でも、研究成果公表のために発行してきた紀要「陸域環境研究センター報告」や、前身である水理実験センター時代の紀要「水理実験センター報告」の電子化と、センターホームページ（<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/>）での公開を進めてきました（目代・塩澤，2005）。

1994年発行の「水理実験センター報告」第19号以降、掲載記事の著作権がセンターに帰属することが明示されておりますが、1993年以前のものについては著作権の記載がありません。そのため、個々の著者に連絡を取り承諾を得てきましたが、すべての著者からの承諾を得るには至っておりません。

そこで、ここに1993年以前の「水理実験センター報告」掲載記事のすべての著者に対し、当該記事の著作権をセンターに委譲されることをお願いする次第です。ただし、電子化・ウェブ公開を希望されない記事については、お知らせ頂ければ対象から除外致します。本件に関するご質問やご意見がある場合は、センター事務宛にご連絡下さい。お申し出期間は**2007年2月末日まで**と致します。お申し出が無い場合はご了承頂けたものとして、1993年以前の記事に関しても電子化・ウェブ公開の対象とさせていただきます。

今回の著作権委譲は、センター出版物の電子化・ウェブ公開化を行うことにより、研究の便宜を図り、論文の価値を高めることが目的であり、著者の再利用を妨げるものではありません。

何卒、皆様のご理解とご協力をお願い致します。

#### 「参考文献」

目代邦康・塩澤暁子（2005）：水理実験センター報告，陸域環境研究センター報告のWWWでの公開について．筑波大学陸域環境研究センター報告，**6**，89-91．

連絡先：筑波大学陸域環境研究センター事務室

電話：029-853-2532

FAX：029-853-2530

e-mail：jimu@suiri.tsukuba.ac.jp

|   |     |
|---|-----|
| Observational Data of Heat Balance and Water Balance -2005-<br>.....Yasushi WATARAI and Tsutomu YAMANAKA .....  | 99  |
| A Dataset of Wave-Flume Experiments of the Threshold for Ripple Formation on Beds with Perturbations<br>.....Tomohiro SEKIGUCHI .....                           | 125 |
| Lecture .....   | 135 |
| Literature List .....   | 139 |
| Miscellaneous .....   | 143 |
| A request of copyright transfer about the publication papers of<br>“Bulletin of the Environmental Research Center, the University of Tsukuba” before 1993 ..... | 146 |

---

---

---

## 筑波大学陸域環境研究センター報告

第7号

2006年11月発行

編集発行 筑波大学陸域環境研究センター  
茨城県つくば市天王台1-1-1  
〒305-8577 電話 029-853-2532  
FAX 029-853-2530  
e-mail jimu@suii.tsukuba.ac.jp  
http://www.suii.tsukuba.ac.jp/

© 筑波大学陸域環境研究センター，2006

印刷所 有限会社 アレス  
茨城県つくば市筑穂1-14-2  
〒300-3257 電話 029-877-4888

---

---

BULLETIN  
OF THE  
TERRESTRIAL ENVIRONMENT RESEARCH CENTER  
THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

---

No.7

November

2006

---

Contents

|  |   |    |
|--|---|----|
| Foreword.....  | Tadashi TANAKA .....  | 1  |
| Characteristics of Water Quality and Stream Discharge of River Water in the Kasumigaura Basin<br>.....                                     | Shiho YABUSAKI, Tadashi TANAKA, Takehiko FUKUSHIMA,<br>Jun ASANUMA and Shin'ichi IIDA ..... | 3  |
| Characteristics of Spring Water in Tsukuba City, Ibaraki Prefecture<br>.....   | Masahiro MIZUJIRI, Shiho YABUSAKI, Norio TASE and Maki TSUJIMURA.....                       | 15 |
| Instability of Coastal Cliff Made of Base Surge Deposits in Habushi-ura, Niijima Island<br>.....   | Ryota MORI and Yukinori MATSUKURA .....   | 31 |
| Some Problems on Field Experiments on Weathering Rates Using Rock Tablets<br>.....   | Yukinori MATSUKURA and Tsuyoshi HATTANJI .....  | 41 |
| The Time of Settling of a Limestone Erratic "KASAKANJA" at the Arasaki Coast, Okinawa Island<br>.....                                      | Hisashi AOKI, Tetsuya KOGURE, Akira MAEKADO and Yukinori MATSUKURA .....                    | 53 |
| Regional Climate Simulations to Diagnose Environmental Changes in Mongolia<br>.....  | Tomonori SATO and Fujio KIMURA .....  | 59 |
| Measurement of Gaseous Diffusion Coefficient in a Grassland Soil Using an Osozawa-Type<br>Diffusion Apparatus<br>.....                     | Yohei HAMADA and Takehisa OIKAWA .....  | 71 |
| Correction of Sensible Heat Flux Measurement Errors Using a Universal Function of Standard<br>Deviation of Vertical Wind Velocity<br>..... | Hiroki IWATA and Michiaki SUGITA .....  | 87 |



Copyright © Terrestrial Environment Research Center,  
The University of Tsukuba, Ibaraki 305-8577 JAPAN, 2006