

筑波大学

## 陸域環境研究センター報告

第 8 号  
2007

---

序 .....	田 中 正 .....	1
<b>報 文</b>		
アカマツ林の熱的応答の季節変化 .....	小長谷 瑞 木 .....	3
	林 陽 生	
土壌水の酸素・水素安定同位体比鉛直プロファイルの 形成過程について .....	藪 崎 志 穂 .....	17
	田 瀬 則 雄	
フラット・アレイ型ソーダーについて .....	花 房 龍 男 .....	27
	大 和 佳 祐 .....	27
	渡 来 靖	
石垣島における台座岩の形成条件と形成速度 .....	青 木 久 .....	35
	春 田 知 実 .....	35
	松 四 雄 騎 .....	35
	前 門 晃 憲 .....	35
	松 倉 公	
石灰岩タブレットを用いた野外風化実験 - 水質が風化速度に与える影響 - .....	八反地 剛 .....	41
	松 倉 公 憲	
<b>研究ノート</b>		
PCカメラを用いた土壌のガス拡散係数測定 of 半自動化 .....	濱 田 洋 平 .....	49
<b>資 料</b>		
熱収支・水収支観測資料 - 2006年 - .....	渡 来 靖 .....	55
	山 中 勤	
セミナーの記録 .....		81
論文リスト .....		85
その他 .....		89

---

筑波大学陸域環境研究センター

2007年11月



# 序

法人化3年目を迎えた平成18年度は、大学当局および関係者の支援を受けて、老朽化した施設・設備に係るインフラ整備が一部実施され、長年の懸案事項の一つが達成されました。また、研究面においては昨年度に引き続きセンター第2期中期計画に沿って研究を推進するとともに、新たな研究課題にも挑戦しました。

まず、平成18年度営繕事業経費によって、水理実験棟・工作棟の取設(新営)が行われ、また、同学群教育用設備整備費によって、可傾型水理実験水路が全面的に改修されたことは、本年度の最大の成果でした。これによって、センター利用学生と教職員の安全性が確保され、また教育・研究のための施設・設備環境の一部が整備されたこととなります。今後も年次計画を策定し、インフラ整備に一層の力を注ぐ必要があるものと考えています。ご支援をいただきました大学当局、ならびに生命環境科学研究科はじめ関係の皆様がこの場を借りて御礼申し上げます。

年度当初に作成した教育計画に関しては、学群生9名、院生10名がセンターを利用し、卒業論文8編、修士論文10編、博士論文1編が作成されました。研究テーマとして、樹種の違いが土壌水質に及ぼす影響、キャパシタンス式水分計による土壌水分の測定、同位体を用いた植物の水利用に関する研究、地下水同位体モデルを用いた数値解析、湖上における水蒸気同位体収支、ドップラーソーダーの比較実地試験、掃流粒子の磨耗に関する実験、岩盤河川の下刻に対する流量・流速・掃流砂の影響評価など、総計27課題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、研究面においては、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18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」について、4つのサブプロジェクトからなるTERCプロジェクトを立ち上げ、組織的に戦略的研究を推進する体制を強化しました。

新たな事業として、平成18年度文部科学省拠点システム構築事業「国際教育協力イニシアティブ調査研究」の配分を受け、「循環を基調とした水・環境問題解決のためのキャパシティービルディング構築：高度実務者養成に関するリソース・ニーズマッピング」事業を推進しました。本事業は、文部科学省において平成18年8月に取りまとめられた国際教育協力懇談会報告2006「大学発知のODA-知的国際貢献に向けて-」を踏まえ、文部科学省が平成19年度より実施する新たな事業の方向性を示唆する調査研究を行うことを目的として公募されたものであり、「高等教育・環境」部門におけるわが国唯一の調査研究であります。また、本年度は、「CEOP第2期つくばレファレンスサイト」に参加し、全世界に本センターにおける観測データの発信を開始しました。つくばレファレンスサイトは、つくば地域の大学および各研究機関が所有する水収支・熱収支観測データを一つの地域観測データとしてまとめ、全世界に公開しようとするものであり、またGEOSS(全球観測システム)の先駆的なプロジェクトであることから、本センターの観測データがGEOSSへの貢献となることが期待されます。そのほか、モンスーンアジア水文気候研究計

画（MAHASRI）にも参加しました。

ワークショップ関係では、中国科学院遺伝学・進化生物学研究所・農業資源研究センターで開催された国際ワークショップ「水循環と持続可能な水資源利用」を共催しました。また、国内ワークショップ「北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスとその相互作用に関するワークショップ」を開催し、関連する研究分野間の交流を積極的に推進しました。

国際交流を推進する観点から、中国科学院地理科学・資源研究所との国際交流協定の締結を行いました。本協定は、当該研究所と生命環境科学研究科および本センターとの部局間交流協定であり、新年度より実質的な国際交流が開始される予定となっています。これに加え、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：水質地質コース」を開設して国際交流を通じた高度職業

人の育成にも努めました。

人事面では、八反地 剛準研究員が6月16日付けで本学生命環境科学研究科地球環境科学専攻講師に転出し、7月16日付けで青木 久準研究員が着任しました。また、渡来 靖準研究員及び藪崎志穂研究機関研究員が新年度4月1日付けでそれぞれ立正大学地球環境科学部助手に、また同じく青木 久準研究員が大東文化大学経営学部専任講師に転出する予定です。

法人化後3年を経て、第1期中期計画の半分が経過したことになります。関係各位におかれましては本センターの教育・研究活動により一層のご理解をいただき、さらなるご指導ご助言を賜れば幸いです。

平成19年3月

陸域環境研究センター長  
田 中 正

## アカマツ林の熱的応答の季節変化

Seasonal Change of Thermal Response of Air Layer in a Red Pine Stand

小長谷 瑞木\*・林 陽生\*\*

Mizuki KONAGAYA\* and Yousay HAYASHI\*\*

### Abstract

To clarify seasonal responses of air layer characterized by a Red Pine stand, meteorological observations were conducted from April to December, 2006. The Red Pine stand is composed of matured Red Pine with other shrubs, and is located to the south part of the Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba. Discussions were focused mainly on the relationship between LAI (Leaf Area Index) and heat storage of the air in the stand.

Hourly data were analyzed to obtain time and space distribution of the thermal fields. The LAI became the maximum stage in June or July and at a constant value in the summer season. In the morning, air temperature in the canopy layer rose quickly and reached the highest temperature within the stand. Simultaneously, upward and downward heat transportations appeared. Especially, the downward component was clearly shown through the trunk layer throughout a growing season of the year 2006, i.e. June to September. In spring and late autumn seasons, the canopy layer of the air performed as a remarkable heat sink and source compared with summer season, respectively.

Regarding a principal regime related between vertical temperature distribution and heat transfer within a stand, the followings were discussed; (1) as heat capacity of the leaf and tree-trunk was larger than that of the air, the canopy layer required relatively large amount of energy for heating, (2) as solar radiation was shaded by the canopy layer, when LAI is larger, sensible heat flux from the ground surface was reduced.

The thermal response of the Red Pine stand to the ambient air temperature changes was strongly influenced by the LAI. Consequently, the seasonal change of the thermal conditions of the Red Pine stand mentioned in this study was essentially caused by increase of LAI of the canopy.

---

\* 筑波大学第一学群自然学類

\*\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

## I はじめに

植物群落の周囲には固有の環境が形成されている。その植物群落の周辺環境と相互する機能を適切に理解して、活用していくことは重要である。また、群落機能が熱エネルギーなどの移動など、周りの環境に対してどのような反応を持つのか、さらにはその反応が周りの環境に対してどのように変化を及ぼすのかを理解する必要がある。

植物群落と周辺環境に関する研究は数多くあり、群落自体の種類や構造がその環境と密接に関係している事が指摘されている。林ほか(1989)では、筑波大学水理実験センター(現、筑波大学陸域環境研究センター)のアカマツ群落にて測定を行い、植物群落が1日の外的な気象変化に対して、熱エネルギー的・植物生理的にどのような反応をするかを示している。

しかし、外的な気象変化には、日変化に加えて季節的变化もあり、それに伴い植物群落自体にも季節的变化が見られる。植物群落には、葉などの構造的な季節的变化が見られ、その変化はLAI(葉面積指数)から観察される。そのために、植物群落の機能を適切に理解するためには、季節的な応答を評価する必要があると考えられる。

そこで、これらの点を明らかにするため、アカマツ群落を対象としたほぼ通年の気象観測を行った。群落内外の季節変化を考慮したうえで、群落キャノピーの熱的応答を観測によって明らかにする事を目的とした。特に赤松群落の貯熱量・放熱量が季節的にどのように変化するか、群落内の季節的な変化であるLAIが熱的応答にいかに関わっているかに注目して解析を行なった。

## II 測定対象群落の概要と測定方法

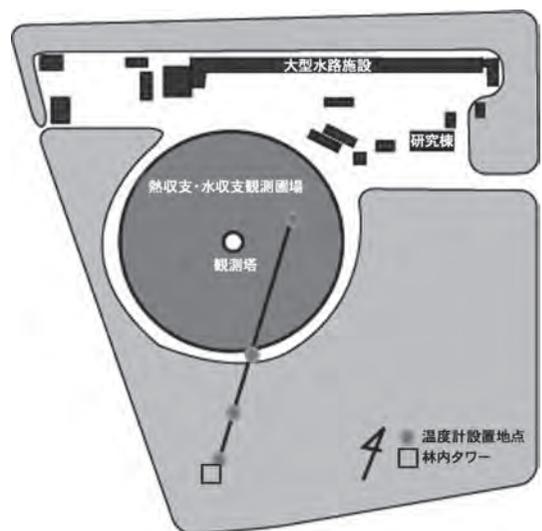
### 1. 対象群落(アカマツ林)

筑波大学陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場の南側に位置するアカマツ群落を対象と

した。このアカマツ林は二次林であるが、1980年ころから低層木の伐採が行われておらず、様々な陰樹が林内へ侵入している。飯田ほか(2001, 2003)によれば、主な低層木を構成しているのはシラカシ、ヒサカキ、ヤマウルシ、コナラ、クリ、ウワミズザクラなどである。また、高本層アカマツの平均樹高は15.0 m、低木層のシラカシとヒサカキの最大樹高は、それぞれ11.7 m、8.6 mとなっている。一方、草本層では、特にアズマネザサとチヂミザサが卓越している。このアカマツ混合林の総面積は約1.9 haである(杉田, 1985)。その他のアカマツ林の構造に関しては、飯田ほか(2003)、飯田ほか(2001)に示されているので参照いただきたい。

### 2. 測定要素および方法

第1図に観測地の概要を示した。水平方向には圃場とアカマツ林を結ぶ基線上に4箇所、地上1.5 m地点に温度計を設置した。□印で示した場所は、アカマツ林内に立てられた高さ15 mのタワーである。このタワーは、林ほか(1989)で使用されたものと同じで、今回の研究でもこのタ



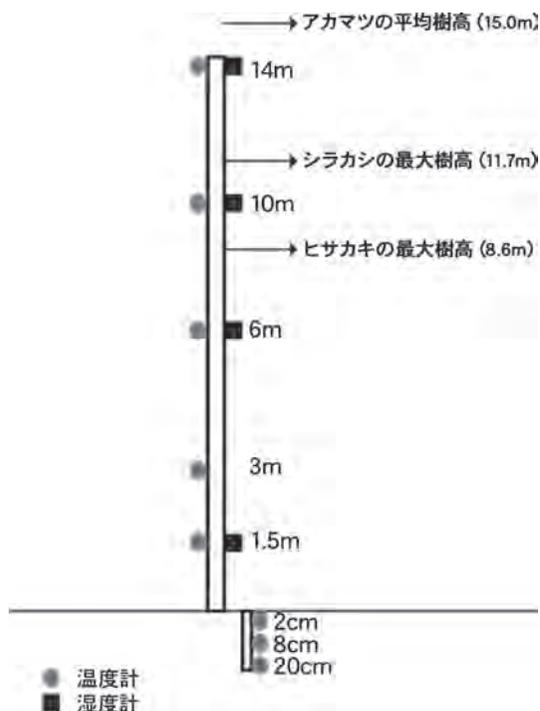
第1図 観測地の概要(陸域環境研究センターホームページ提供)

ワーを用いて群落内および群落直上の気象要素を測定した。

第2図には林内タワーの概要図を示した。タワーでは、5高度に温度計を設置した。また、このうちの4箇所に湿度計も設置した。また自作した地温計をそれぞれ、タワーの直下に2cm, 8cm, 20cmの深さに設置した。計8個の温度計は全て2006年4月8日に、4個の湿度計および地温計は2006年6月15日に観測を開始した。

温度計はおんどり Jr.(TR-52)、湿度計は TR-72U を使用し、それぞれシェルターの中に入れ、5分毎に測定した。5分毎にとったデータは1時間毎の平均値に修正し解析に用いた。

第1表に、解析に用いた日の代表的な気象要素を示した。数値は全て24時間平均値で、筑波大学陸域環境研究センターのルーチン観測値 (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/database.html>) である。5月9日は曇天日、5月13日は



第2図 アカマツ群落内タワーにおける測定方法の概要

雨天日の代表日である。その他の日は全て晴天日である。また、どの日も強風ではなく、比較的安定した気象条件である。

### 3. LAI の評価

アカマツ林の熱収支の季節変化を評価するにあたって、林の構造を示す LAI (葉面積指数) は重要なパラメータの一つである。本研究では、林床から林冠に向けて撮影した写真をモノクロ画像化し、その黒い部分の面積率を求めた。こうして被覆率 (%) が求まる。第3図に5月中旬における画像を示した。被覆率の季節的な変化を第4図に示す。第5図に杉田・古藤田 (1987) が本研究の対象地と同じアカマツ林で測定した LAI の季節的な変化を示した。測定した1987年に比較して、現在はアカマツの立木密度は減少し、低木層の立木密度は増加している。飯田ほか (2003) では、1985 ~ 1986 年当時の最大 LAI=4.0 に比べ、2001 ~ 2002 年における最大 LAI=5.0 (± 0.3) となり増加している事を示している。

第4図と第5図を比較すると同様な季節的な変化を見せていて、今回のアカマツ林の被覆率を求める方法は、アカマツ林の葉の繁茂の割合を示すのに十分であると考えられる。すなわち、アカマツ林は4月もしくは5月に葉の量が最も少なくな

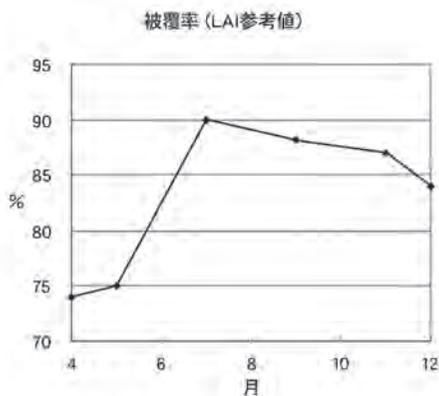


第3図 アカマツ群落内の様子 (黒の面積を被覆率 (%) とした)

第1表 解析に用いた日の気象要素 (2006年4月28日～12月4日)

気温 (Air temperature [°C]) は高さ 1.6 m で、通風式白金抵抗温度計を使用している。風速 (Wind speed [m/s]) は高さ 29.5 m の水平風速のデータで、超音波風速温度計を使用している。降水量 (Precipitation) は地表面上約 0.3 cm に設置された、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している。下向き長波放射 (Downward short-wave radiation [W/m<sup>2</sup>]) は熱伝対式全天日射計を地表面から高度 1.5 m に設置して測定している。

date	Air temperature [°C] *1.6m height	Wind speed [m/s] *30.5 m height	Precipitation [mm/day]	Downward short-wave radiation [W/m <sup>2</sup> ]
28-Apr	13.4	2.141	0	296.20
30-Apr	16.4	2.671	0	248.84
1-May	20.4	2.867	0	256.03
9-May	13.9	2.735	0	148.44
13-May	12.0	2.602	11	49.953
25-May	15.6	2.873	3	324.46
31-May	20.4	2.734	0	311.56
1-Jun	20.6	2.367	0	291.70
29-Jun	25.4	2.825	0	282.67
4-Jul	23.0	2.890	0	252.98
3-Aug	26.7	1.853	0	282.04
4-Aug	27.9	1.859	0	287.42
5-Aug	27.7	2.531	0	292.61
2-Sep	22.7	2.161	0	252.84
3-Sep	23.7	2.698	0	256.50
5-Sep	26.0	2.579	0	249.99
20-Sep	22.8	2.280	0	229.42
21-Sep	21.0	2.714	0	205.27
24-Sep	19.6	3.575	0	227.89
9-Oct	17.1	2.316	0	210.46
10-Oct	18.8	1.840	0	192.67
8-Nov	10.8	2.307	0	157.06
9-Nov	10.9	1.802	0	150.00
16-Nov	9.5	2.225	0	137.82
2-Dec	6.1	2.149	0	120.32
3-Dec	4.3	1.652	0	122.25



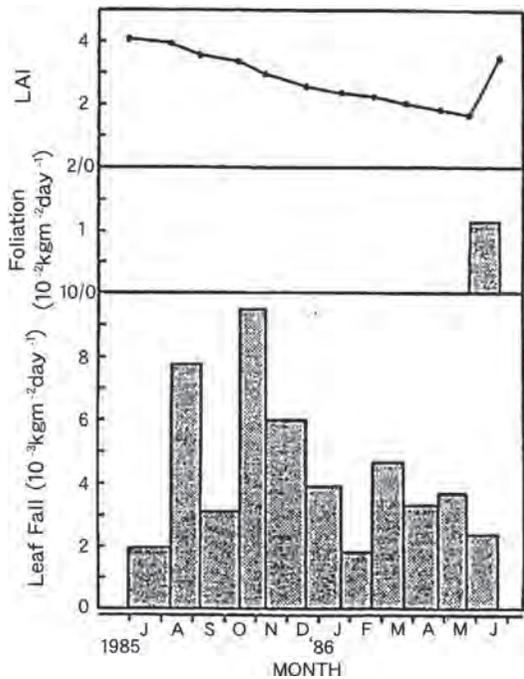
第4図 2006年同観測値におけるアカマツ群落の樹木・葉による被覆率の季節変化 (%)

り、梅雨時期に一気に成長して葉を展開させる。7月頃にピークに達してゆっくりと翌年の4月もしくは5月まで葉を減少させる。第5図では、5月が最も葉が少なくなっているが、2006年は5月の下旬には葉が展開し始めていたと考えられる。

#### 4. 林内の熱量の評価

$$Q_{a(z_1, z_2)} = \int_{z_1}^{z_2} \rho C_p \left( \frac{dT}{dt} \right) dz = \rho C_p (Z_2 - Z_1) \left( \frac{dT}{dt} \right) \quad \text{①}$$

上記の①式は、McCaughy and Saxton (1988)



第5図 1985~86年の同観測地におけるアカマツ群落の葉面積指数

及び林ほか (1989) が群落内の空気の熱量の変化量 ( $Q_a$ ) を求める時に用いた式である。これらの研究では、樹木の貯熱量 ( $Q_v$ ) も考慮していたが、今回は  $Q_a$  のみ考察する。林ほか (1989) では、 $(Q_v / Q_a) = 0.012$  となすと示しており、 $Q_a$  のみでも群落内の気層に熱的特徴について十分考察できると考えることができる。 $Q_a(z_1, z_2)$  は、群落内 (高さ  $Z_1$  から  $Z_2$ ) の空気の貯熱量である。 $\rho$  は空気の密度で、定数とし  $1.225 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$ 、また  $C_p$  は空気の定圧比熱で、定数とし  $1004 \text{ [JK}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{]}$  をそれぞれ①式に代入した。 $d \langle T \rangle / dt$  は、高さ  $Z_1$  から  $Z_2$  の群落内の平均気温  $\langle T \rangle$  の時間変化である。今回アカマツ林内の空気の熱量  $Q_a$  を求めるために、温度計を設置している5地点を各境界高として、4つの層に分けて考えた。つまり林内全体の空気の貯熱量は、

$$Q_{a(1.5m, 14m)} = \rho C_p \left( \int_{10}^{14} \frac{d\langle T \rangle}{dt} dz + \int_6^{10} \frac{d\langle T \rangle}{dt} dz + \int_3^6 \frac{d\langle T \rangle}{dt} dz + \int_{1.5}^3 \frac{d\langle T \rangle}{dt} dz \right) \quad (2)$$

で求められる。

林ほか (1989) では、Trunk (幹) 層の貯熱量のみを対象として解析を行ったが、今回は Leaf (葉) 層も取り入れ、林内全体の評価を行う。

### III 結果と考察

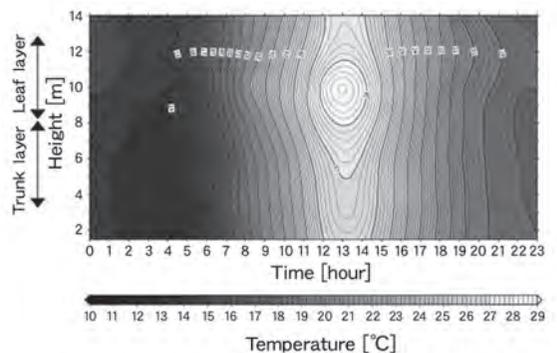
#### 1. 日変化

##### 1) 春期の時間-高度断面における気温変化

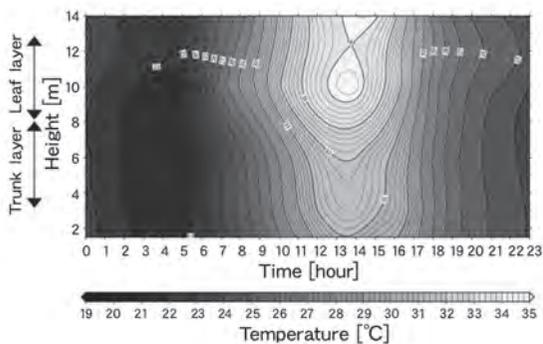
第6図に5月1日のアカマツ林内の温度のアイソプレスを示した。縦軸は高さ、横軸は時間を示している。第6図の左側に矢印で示してあるのは、高さの領域である。高さ約7~12.5mの層は、葉面積密度が特に大きな領域 (葉層) でありL層 (leaf layer) と呼ぶ。また高さ約1~7mの領域は、葉が茂っている割合が少ない層 (幹層) でT層 (trunk layer) と呼ぶ。1m以下の層は低木などが茂っているためにT層とは区別する。

日中L層を中心に気温が高くなっている特徴が第6図に見られる。5月1日にはL層とT層の気温差は約2.5℃に達している。林内では安定成層となり、このような傾向は他の種や同種の植物群落でも確かめられており (福岡・松尾, 1988), 日中の一般的な特徴と考えられる。

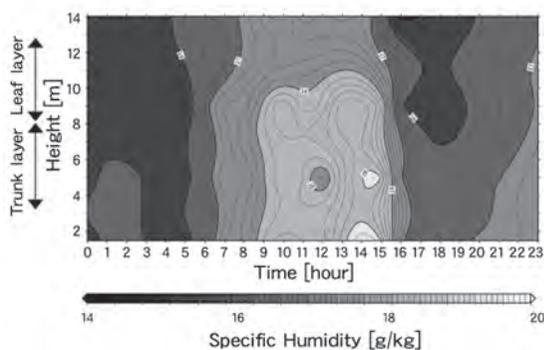
直接届く日射によってL層が暖められて出来たこの高温域からT層への熱の伝播が、約1時



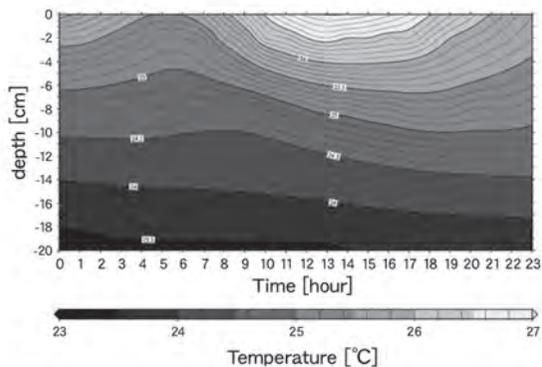
第6図 アカマツ群落内の気温アイソプレス (1, May)



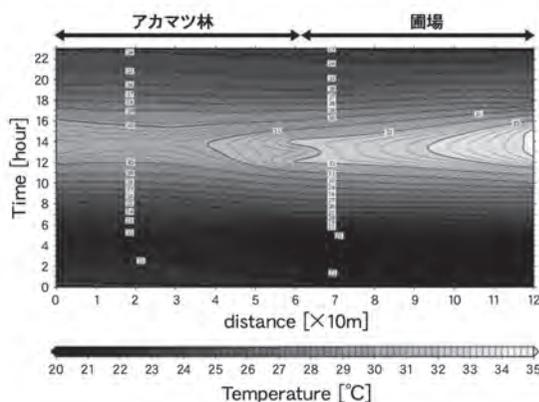
第7図 a アカマツ群落内の気温アイソプレス (4, August)



第7図 b アカマツ群落内の比湿アイソプレス (4, August)



第7図 c アカマツ群落内の地中温度の分布 (18, August)



第7図 d アカマツ群落内から圃場へ水平面方向の気温変化分布 (高さ1.5m) (4, August)

間の位相で見られる。これも林ほか (1989) で確認されている。

夜間は群落内全層で気温は降下する。明け方頃には地表面付近に、冷たい空気が溜まり安定層となっている。この安定層の形成の原因としては、樹木の葉や枝が昼間に吸収した熱を放出して相対的な熱源となっていることや、大気との交換があまりないために相対的に冷たく重い空気が T 層に溜まっていることが考えられる。しかし林 (1989) では夜間には、地表面付近で弱い不安定層になっている。相異の理由として観測時期 (10 月下旬 ~ 11 月上旬) が違うことが考えられ、冷却がより強いものであると、林内上部から冷やされ不安

定層が形成されると考えられる。今回の観測でも 11, 12 月頃の夜間には不安定層が形成されている (第 8 図 a)。

## 2) 夏期 (気温・比湿・地温) と冬期 (気温・地温) の比較

夏期と冬期のアカマツ林内の温度、地温および比湿のアイソプレス、森林から圃場への水平方向の気温アイソプレスをそれぞれ第 7 図、第 8 図に示した。夏期 (第 7 図: 8 月 4 日) のアカマツ林は第 6 図 (5 月 1 日) 及び冬期 (第 8 図: 12 月 4 日) よりも L 層が密である。そのため、第 7 図 a を見ると L 層により暖められて T 層との気温差

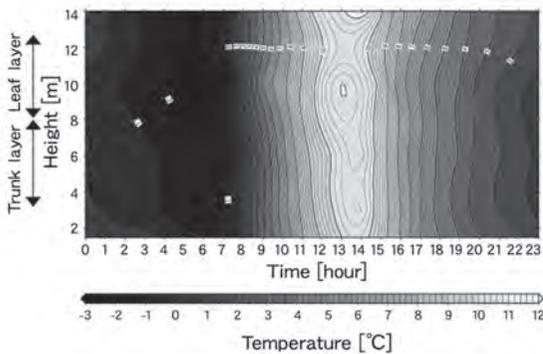
が大きくなり、最大約4℃になっている。また、その熱は地中面にも伝播して約8 cmの深さまで1時間ほどの位相で伝播している(第7図c)。また、第7図bには林内の鉛直方向の比湿のアイソプレスを示した。草木からの蒸散、地中に貯えられた水分の蒸発によって、日中の地表付近に水蒸気が多く分布している。夜間には、水蒸気量は減少して、8月4日にはさらに乾いた空気が林外から侵入しているのが分かる。

第7図dには、森林から圃場への水平面方向の気温アイソプレス(高さ1.5 m)を示した。縦軸に時間、横軸に距離をとった。日中に注目すると、圃場で気温が上昇して、アカマツ林内との気温差は最大で約3℃となっている。夜間になると

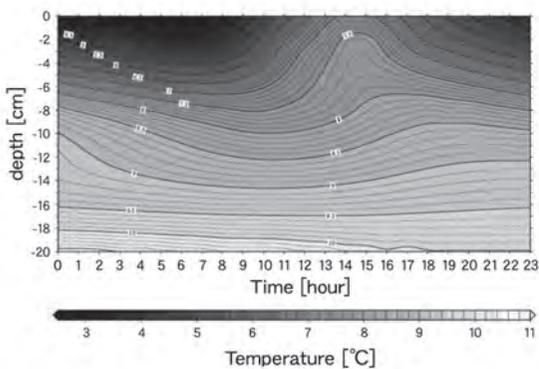
この気温勾配は逆となり林内の方が圃場より約1℃高くなっている。この要因としては、昼間は日射によって圃場の地表付近が暖められ、顕熱伝達によって気温上昇したためだと考えられる。夜間は放射冷却によって圃場の気温が下がるが、林内では展空率が小さいため放射冷却が弱まり、さらに樹木からの下向き長波放射の影響で、林床付近では気温が下がりにくくなっていると考えられる。

また、水平面方向の気温アイソプレ스에現れる夏期と冬期の大きな違いは、L層が疎になった事、日射時間の減少、さらに気温の低下があげられる。第8図cに冬期の森林から圃場への水平方向の気温アイソプレス(1.5 m)を示した。夏期(第7図d)と比較すると、林内と圃場間での温度差が昼間では小さく、夜間では温度差が大きくなっているのが見て取れる。これは、圃場での放射冷却の強化されている事と昼間に林内の地表付近にも日射が届くようになった事が理由としてあげられるだろう。

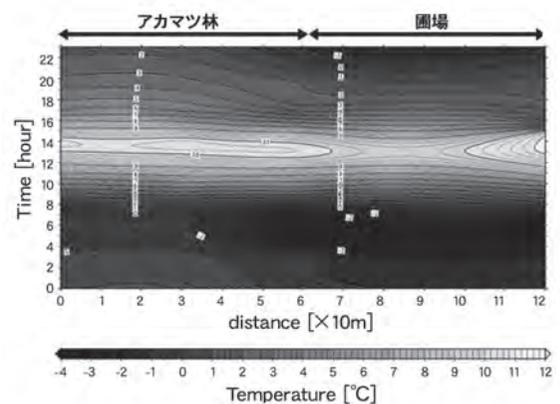
第8図aで示した冬期の林内の高さ-時間アイソプレスでは、夏期の同図(第7図a)とは異なり、日中のL層とT層の気温差がほぼ無い。どの高さもほぼ一様に日中は時間とともに暖められ



第8図a アカマツ群落内の気温アイソプレス(4, December)



第8図b アカマツ群落内の地中温度の分布(4, December)



第8図c アカマツ群落内から圃場へ水平面方向の気温変化分布(高さ1.5 m)(4, December)

て、日没後は時間とともに冷やされている。夏期同様に熱は約1時間の位相で地中にも流出入している(第8図b)。しかし冬期の地温勾配は地表面付近が冷やされているため、深くなればなるほど地温が高い。

## 2. アカマツ林内大気の熱的応答

### 1) 熱的応答の季節変化

前章に示した②式を用いて  $Q_a$  を求めた。第9図は縦軸に  $Q_a$  [ $w/m^2$ ]、横軸に群落直上(高さ14m)の気温変化 [ $^{\circ}C/h$ ] としてある。すなわち、前1時間の気温変化とその1時間の  $Q_a$  の関係を示した。4月~12月を解析期間としており、各期間とも代表的な2~3日ずつを選択している。いずれも風速が弱い日で、天候の影響を解析するために選んだ5月上旬の3日間以外は晴天日を選択しており、それぞれの気象要素は第1表に示した通りである。これらのグラフから、群落直上の気温変化と林内の熱量の出入りが見て取れる。また、近似直線の傾き(貯熱係数 [ $w/m^2/K$ ]) が大きいほど、林内に貯えられたり放出されたりする熱の移動量が多いことを示している。

McCaughy and Saxton (1988) は、夏期のカエデ群落内に関して  $1^{\circ}C$  群落外気温が変化すると、 $Q_a+Q_v$  (群落内の空気及び樹木の熱量) の熱量が約  $16.3$  [ $w/m^2$ ] 変化することを示している。また、林ほか(1989)では、 $1^{\circ}C$  群落直上の気温が上昇すると群落内 T 層の気層には、 $6.5$  [ $w/m^2$ ] のエネルギーが貯えられる事を示している。今回の観測とほぼ同じ季節で比較すると、第9図に示してある近似式の傾き(貯熱係数 [ $w/m^2/K$ ]) に示されるように、McCaughy and Saxton (1988) の約  $0.25$  倍、林ほか(1989)の約  $0.64$  倍のエネルギー貯熱量/放熱量となった。この違いは、主として植生の違いや、植生の遷移などの影響による群落構造の差異によるもの、さらには  $Q_v$  について評価していない影響もあると考えられる。林ほか(1989)が観測した後、18年経過して実施

した今回の観測地の様子を見てみると、アカマツの本数が減少する一方、下層植生が密になるなど大きな変化が現れている。その結果、林内の大気の貯熱/放熱の効果が小さくなったと考えられる。

第2表に、第9図で求めた関係の時期による違いを示した。アカマツ林の貯熱量/放熱量が季節的に変化している様子が分かる。近似直線の傾きは、群落直上の気温が  $1^{\circ}C$  上昇した時のアカマツ林内大気に貯えられるエネルギー量 [ $w/m^2$ ] (=貯熱係数 [ $w/m^2/K$ ]) に相当する。主として夏期に貯熱係数が小さくなり、春期、冬期に貯熱係数が大きくなっている変化が見て取れる。この変化傾向は、LAIの季節的変化(第4図、第5図)と関連していると考えられる。第10図に第2表に示した貯熱係数 [ $w/m^2/K$ ] と LAI 参考値(被覆率 [%]) の関係を示した。その結果、

$$Y = -0.030X + 6.747 \quad (R^2=0.887)$$

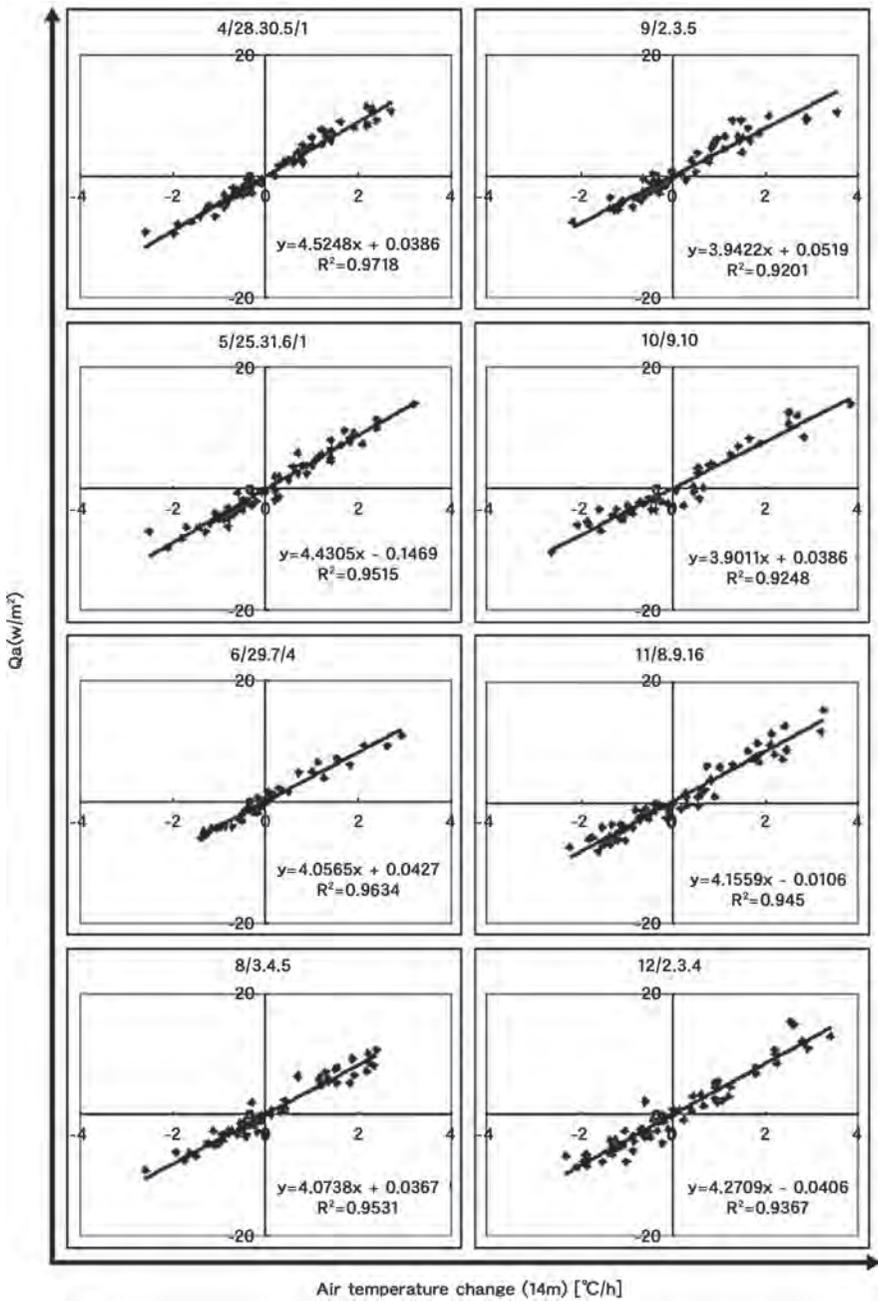
の関係が得られた。つまり、林内の L 層が密生すると、林内の大気の貯熱量/放熱量が減少することを意味している。この現象については後の3節で考察する。

### 2) 気象条件による応答の差異

前節までは、全て晴天日を対象にして見てきた

第2表 第10図における近似直線の傾き(貯熱係数)の季節変化

date	貯熱係数 [ $w/m^2/K$ ]	$R^2$
28,30-Apr, 1-May	4.53	0.972
25,31-May, 1-Jun	4.43	0.952
29-Jun, 4-Jul	4.06	0.963
3,4,5-Aug	4.07	0.953
2,3,5-Sep	3.94	0.920
9,10-Oct	3.90	0.925
8,9,16-Nov	4.16	0.945
2,3,4-Dec	4.27	0.937



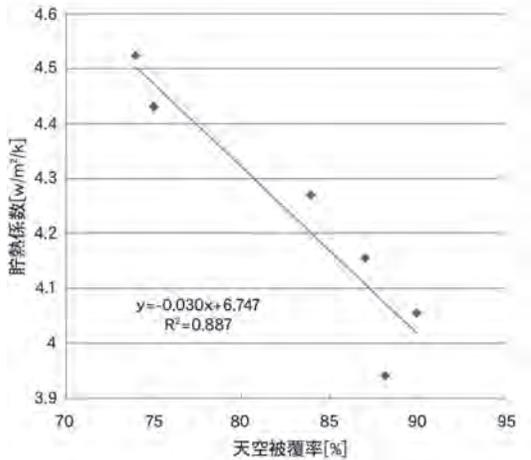
第9図 群落内直上の空気温度変化量と群落内空気熱変化量における相関関係の季節変化

が、ここでは気象条件が異なる日について注目する。第11図に群落の状態に大きな変化のない5月上旬の3日間を選択し、第9図と同様の関係を

示した。5月3日は快晴日、5月9日は曇天日、5月13日は雨天日である。気象要素は第1表を参考にさせていただきたい。

どの日も貯熱係数（群落直上の気温が1℃上がった時、群落内のエネルギー増加量）は、ほぼ同様な結果となった。第9図における、4、5月

の結果ともほぼ一致していることから、気象条件が異なってもその貯熱量を表す近似直線の傾き（貯熱係数）は大きく変わらないことが分かる。つまり林内に貯えられるエネルギー量は、気象条件ではなく LAI など群落自体の構造の季節変化に依存していると考えられる。



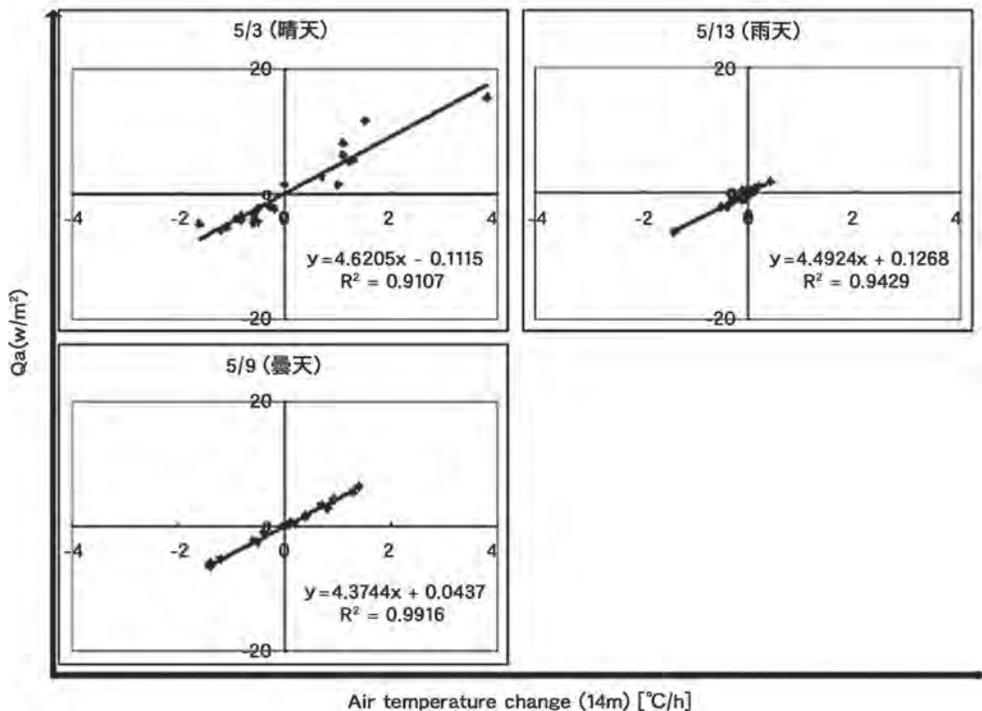
第10図 第4図における被覆率(%)と第9図における貯熱係数の大きさの相関

### 3. なぜL層が密になると林内に貯えられるエネルギーは少なくなるか

以下の2つの仮説が提唱できる。

#### 1) 仮説1) 樹木葉の熱容量の効果

葉や樹木は、空気に比べて熱容量は大きい。林ほか（1989）では、樹幹部の密度（ $\rho_v$ ）は  $\rho_v = 0.3 \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ 、樹木の比熱  $C_v$  は水の70%として  $C_v = 3 \text{ [J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$  である。それを用いると空気と樹木の熱容量は、それぞれ  $\rho \cdot C = 1,229.9 \text{ [J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$  及び  $\rho_v \cdot C_v = 900,000 \text{ [J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot$



第11図 群落内直上の空気の温度変化量と群落内空気の熱量変化量における相関関係の季節変化（天候による比較）

$K^{-1}$ ] となる。つまり樹木は大気の約 732 倍の熱容量を持つ。しかし、林内において樹木と大気とを比べると、温度変化が樹木の方が圧倒的に小さいために  $Q_v$  は  $Q_a$  より小さくなると考えられる。そのために L 層が発達している夏期には葉層を含む樹木全体を暖めるために多くのエネルギーが使われる。その結果、林内全体の貯熱量が相対的に少なくなっていると考えられる。また、T 層には L 層の繁茂により直接日射が届きにくく地表付近に顕熱の発生が少なくなり、下層を貯める熱量は少なくなると考えられる。

ここで議論している貯熱量は、その場の気温上昇の大きさを定義している。つまり時間当たりの気温上昇が大きいほど貯えられるエネルギーも大きい。第 6 図、第 7 図 a、第 8 図 a を見ると、実際に夏期（第 7 図 a）よりも、春期（第 6 図）及び冬期（第 8 図 a）の方が全層の気温変化が大きい事が分かる。また、どの季節にも夕方から夜間にかけて L 層の気温が相対的に高くなっている。これは、葉や樹木が、空気に比べて熱容量が大きいために冷めにくいという現象を裏付けている。

## 2) 〈仮説 2〉葉の遮へい効果

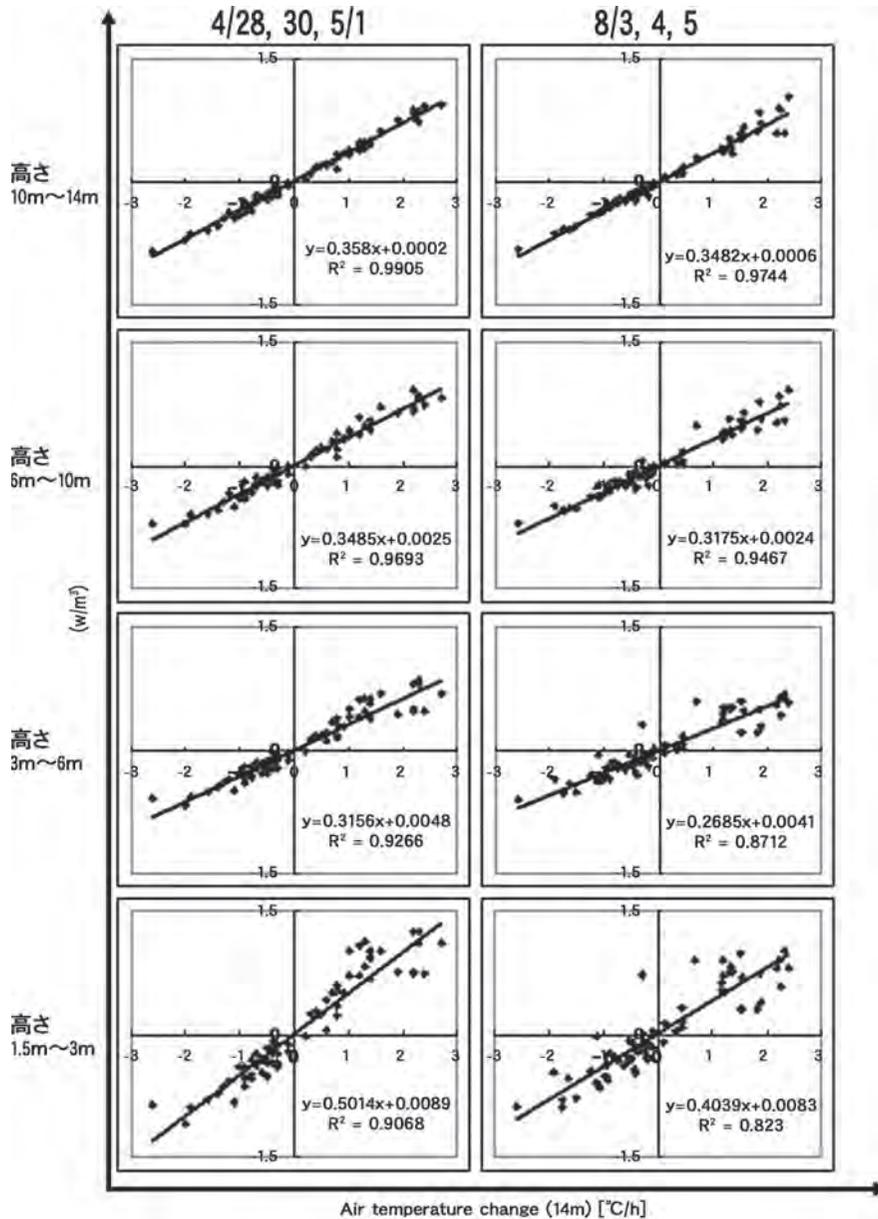
アイソプレスの図で見たように、日中に群落が気温上昇するとき L 層から気温が高くなり、そこからの熱の伝播によって全層が遅れて気温上昇している。特にその現象は L 層が発達している夏期に顕著となる。熱容量が大きい葉、樹木の層がなぜ先に暖まるのだろうか。おそらく、葉は薄いため、日射を遮へいして暖まった後に短時間で大気を暖めるからだろう。特に葉は、日射に直接当たる L 層上部から暖められ、顕熱を発生させて、結果として全層に熱を伝播させると考えられる。

同時に、地表付近では、上層の葉による遮へい効果で日射が直接届きにくい。そのために地表付近の顕熱の発生は夏期には少なくなり、T 層以下の気温が高くならなかったと考えられる。

## 4. 考察のまとめ

林外の環境変化に対するアカマツ林の熱的応答を季節的に見ることによって、熱的応答の特性が、林内の LAI に大きく関わっている事が確認された。夏期に L 層は最も密に繁茂する。そのため夏期では L 層を中心に日中に気温が上昇する様子が見られた。一方 T 層では葉の遮へい効果によって林床から大気へ伝わる顕熱が少なくなり、春期、冬期に比べて気温上昇の割合は小さくなり貯熱量・放熱量も小さくなった。全層をまとめて見ると大気の熱の交換量は夏期に最も小さく、L 層が疎になる春期、冬期が大きい結果となった。

第 12 図に、林内大気を層別にみた熱の動きについて、春期と夏期を比較した。第 9 図で取り扱ったデータを再整理したものであるが、縦軸は体積あたりの熱の輸送量を示しており、層ごとに比較ができる。全体の評価としては、どの層においても夏期より春期の方がより多く熱の交換が行われている傾向がある。このうち L 層（高さ約 7 m ~ 12.5 m）では春期・夏期間では大きな変化は見られず、主に違いが見られるのは T 層（高さ約 1 m ~ 7 m）である。T 層で春期により多くの熱交換がなされているが、夏期ではその量は大きく減少している。その主な原因は仮説 2 で示した葉の遮へい効果であると考えられる。葉によって日射の多くが地表面に直接届かなくなり、顕熱の発生が減少して、結果として T 層での熱の交換量は減少する。また、遮へい効果を起こす L 層では、春期に比べてより多くの熱を得ていると考えられるにも関わらず、その熱の交換量は変わらない。その原因としては仮説 1 で示した、大気に比べて大きな葉の熱容量が考えられる。葉の温度上昇にエネルギーが使われるため、結果として林内における大気の熱交換量の変化は明瞭でないと考えられる。



第 12 図 横軸は第 9 図と同様. 縦軸は体積あたりの熱量 (春期と夏期を層別に比較)

#### IV 結論

アカマツ林内外で 2006 年 4 月から 12 月まで気象要素の観測を行った. 晴天日を対象とした解析においては, 群落内-地中温度で鉛直方向のアイ

ソプレスを作成, また群落と圃場を水平方向のアイソプレスを作成して季節的な気温分布から熱の動きを見た. 比湿についても鉛直方向のアイソプレスを作成して林内における水蒸気の動きを見た. その結果,

(i) 林内ではL層を中心に気温は上昇して、L層が最も繁茂する夏期に林内では特に高温層となった。春期、冬期には、夏期と比較すると全層で一様な気温変化が見られた。春期、夏期の夜間林内には、安定層が形成されているが、冬期には群落上からの冷気の侵入によって不安定層が形成された。

(ii) 林内の水蒸気分布では、日中に地表付近の低木や地面自体の蒸発散が活発となり、林床付近で水蒸気が多く分布している様子が確認された。

(iii) 次に群落直上の気温変化と群落内の貯熱量との季節的な関係について解析した。その結果、外気温の変化に対する林内全層では、LAIが大きい夏期に貯熱量の割合は最も小さく、春期・冬期の方が貯熱量は大きくなった。その要因としては、a) 樹幹や葉の熱容量が大気に比べて大きいこと、b) L層が密になるため日射の遮へい効果が生じることが考えられた。

(iv) また、曇天日と雨天日を対象とした解析を行なった結果、晴天日とほぼ同様の傾向であったことから、林内の熱の交換量は日々変化する気象条件より、むしろLAIなど林内の構造の季節的な変化に依存すると考えられた。

さらに以下の課題が示された。今回の観測によって季節的に考えると、樹木自体に貯えられる熱量にも注目する必要があると考えられた。また、エネルギーのインプット要素である日射量が夏期に増加しているにも関わらず、林内における空気の熱の交換量は夏期に小さくなった。L層、T層、林内直上の気層の間には熱収支に基づいた密接な相関関係があることが確認されたが、どれが要因となり働きかけているのかについて、今後の研究で説明することが必要である。

また、現在大きな問題になっている地球温暖化を考える上にも植物群落の評価を考えないわけにはいかないだろう。今後の地球温暖化の影響評価においても植物群落がどのような反応をもつ能力

があるのかを適切に評価する必要性があり、今後も植物群落の機能に関して観測、解析を進める必要性があるだろう。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって筑波大学の木村富士男教授、田中 博教授、上野健一助教授、植田昭宏講師、日下博幸講師には、ゼミや発表の場において多くの貴重なアドバイスを頂きました。さらに渡来 靖準研究員、飯泉仁之直さん、昆 盛太郎さんをはじめとする先輩方には、研究を進めるにあたっての技術や方法などを丁寧にご指導いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

今回筑波大学陸域環境研究センターにて観測をさせて頂き、貴重なデータも使用させて頂きました。学群実験では3年生に観測をお手伝いいただき、解析作業では、気象学・気候学分野の4年生に助言を頂きました。心より感謝して謝辞の言葉とさせていただきます。

なお、本研究は、平成18年度筑波大学第一学群自然学類（地球科学専攻）卒業論文をまとめたものである。

## 文献

飯田真一・濱田洋平・田中 正 (2001): 筑波大学陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林の胸高直径と立木密度の変化について。筑波大学陸域環境研究センター報告, **2**, 1-6.

飯田真一・濱田洋平・安部 豊・田中 正 (2003): 筑波大学陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林の下層植生について。筑波大学陸域環境研究センター報告, **4**, 1-9.

杉田倫明・古藤田一雄 (1987): アカマツ林の葉面積指数の季節変化。筑波大学陸域環境研究センター報告, **11**, 111-112.

林 陽生・原蘭芳信・那須野正明・鳥谷 均

## 利用したデータ

- (1989): 群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答 1. 赤松群落内外の温度場の特徴. 筑波大学水理実験センター報告, **13**, 97-103.
- 福岡義隆・松尾克美 (1988): アカマツ林からの蒸発散に関する熱収支気候学的研究. 水資源研究センター報告, **8**, 41-54
- McCaughy, J.H. and Saxton, W.L.(1988): Energy balance storage terms in a mixed forest. *Agric. and Forest Meteor.*, **44**, 1-18.

筑波大学陸域環境研究センター(TERC) 熱収支・水収支観測圃場におけるルーチン観測データ (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/database.html>)

(2007年5月20日受付, 2007年9月3日受理)

# 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について

Formation Process of Vertical Profile of Stable Isotopes in Soil Water at TERC

藪崎 志穂\*・田瀬 則雄\*\*

Shiho YABUSAKI\* and Norio TASE\*\*

## Abstract

Use of the stable isotopes of oxygen and hydrogen has been considered as one of effective methods to estimate soil water movement. The soil water were extracted from a loamy soil layer at University of Tsukuba, Japan, eleven times from April to November in 2001, and groundwater and event precipitation were also collected. The vertical profiles of isotopes in soil water showed large variations near the soil surface, because soil water is affected by the evaporation and precipitation. The variation, however, decreases gradually with increasing depth and become almost constant near the water table. Some cyclic variations were observed in the vertical profiles of isotopes of soil water. The temporal variations of isotopes in soil water and precipitation suggest that the isotopically enriched soil water was formed in summer period, and it moved downward during fall season when intensive rainfall occurred. The time-depth cross section of isotopic composition indicates that groundwater recharge occurs under the condition that rainfall amount exceeds 50 mm per event. The isotopes in soil water can be used for estimation of the soil water movement in these places such as depositing of loamy soil mainly in Japan.

## 1 はじめに

土壌中の水の挙動は、地表面付近の水蒸気や地表水、そして地下水に至るまでの降水-降下浸透-地下水涵養過程において大きな役割を担っており、資源としての地下水利用を行う際においても重要である。また、土壌水は地中の物質の動きと

も関連しているため、土壌や地下水の汚染の防止・対策を考える上でも欠かすことのできない情報となる。土壌水の挙動を明らかにする方法の一つとして、酸素・水素安定同位体比の鉛直プロファイルを用いる方法が有効であると考えられる。土壌水の酸素・水素安定同位体比を用いて土壌水の挙動を推定する方法は海外の乾燥・半

---

\* 立正大学地球環境科学部

\*\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

乾燥地域（例えば，Allison and Hughes, 1983 や Barnes and Allison, 1988），湿潤地域（Gazis and Feng, 2004）などで行われており，その有効性が示唆されている．著者らは，厚い不飽和帯が存在する武蔵野台地北西部に位置する金子台において土壌コアを採取し，抽出した土壌水の酸素・水素安定同位体比およびトリチウム濃度を測定した．この結果から，安定同位体比の鉛直プロファイルにサイクリックな変動が確認され，d-excess 値や降水の同位体比と比較することにより，土壌水の涵養された時期の推定や地下水涵養量の把握を行うことが可能であることが示され，安定同位体をトレーサーとして利用する方法が適用できることが示された（藪崎，2000；嶋田・藪崎，2000）．こうした方法を他の地域にも適用するためには，地中における安定同位体比鉛直プロファイルの形成過程を明らかにすることが必要である．本研究では，同一の地点で継続的に土壌採取および観測を行い，抽出した土壌水の安定同位体比鉛直プロファイルを求め，これらの形成要因について明らかにすることを目的として調査を実施した．

## II 研究対象地域の概要

筑波大学の陸域環境研究センター（以下，TERC とする）構内のトレンチにおいて（Fig. 1），2001 年 4～11 月にかけて計 11 回の土壌採取を実施した．トレンチは長さ約 6 m，幅約 2 m，深さは約 2 m の方形に掘られており，壁面には土壌が露出している．トレンチ周辺には丈の短い雑草が生えている（Photo 1）．土壌採取地点の地質は，表層から 20 cm 深度までは砂質土壌（sandy loam），20～170 cm 深度はローム質土壌（関東ローム層）が堆積し，170～220 cm 深度はローム質土壌と粘土質土壌の漸移層で，220 cm 以深では粘土質土壌が堆積している．地下水位は 8～10 月に低下するが，10 月以降は台風や

前線性の降水などの影響を受けて水位の上昇が生じており，このような季節変動が毎年観測されている．過去の観測では水位が地表面付近まで上昇したこともあったが，本研究の観測期間内においては，最も水位が上昇したときで地表面から 100 cm 深度，最も低下したときで 250 cm 深度であり，8～10 月以外のほとんどの期間で 150～200 cm 深度（ローム層下部から粘土層中）に水位があらわれていた．つくばの年平均気温は 13.5℃，年降水量は 1235 mm であり（いずれも 1971 年から 2000 年までの平均値），梅雨前線の発達する初夏，および秋雨前線の発達する秋季において降水量が相対的に多くなっている．

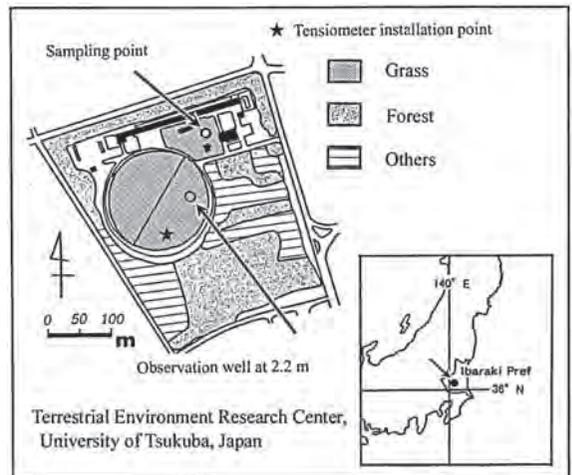


Fig. 1 Study area



Photo 1 Condition at the trench

### III 研究方法

#### 1. 土壌採取および地下水、降水の採取方法

土壌水抽出用の土壌（攪乱土壌）は2001年4月から11月の間に計11回採取し、土壌の物理測定のための土壌コア（不攪乱土壌）は3回採取した（Table 1）。攪乱土壌は、トレンチ壁面の土壌を表面から30 cmほど取り除いた後、5 cm 深度間隔で採取した。採取した土壌はビニール袋に保存し、蒸発が生じないように冷暗所で保存して、できるだけ時間をあけずに土壌水を抽出した。不攪乱土壌はハンドオーガーを利用して、10 cm 深度間隔でトレンチの壁面から採取し、100 cc の土壌サンプル缶に保存した。また、採取した攪乱土壌についても100 cc の土壌サンプル缶に詰め、重量を測定した後、遠心分離法によりpF3.0とpF4.2の土壌水を抽出した。土壌採取と併せて地下水の採取も実施した。地下水は、TERC 観測圃場内に設置された2.2 m の地下水観測井と、土壌採取を行ったトレンチ近傍の2箇所で定期的に採取した。降水サンプルは筑波大学構内の研究棟の屋上に蒸発防止構造を有した装置を用いて、1998年8月から月単位の降水を、2000年1月からは併せてイベント単位の降水の採取を継続して行っ

Table 1 Schedule of soil sampling

No.	Date of soil sampling for isotope analysis (Disturbed soil samples) <sup>*1</sup>	Date of soil core sampling for soil physical analysis (Undisturbed soil samples) <sup>*2</sup>
1	28 April 2001	5 May 2001
2	5 May 2001	14 October 2001
3	22 June 2001	15 November 2001
4	26 July 2001	
5	25 August 2001	
6	2 September 2001	
7	8 September 2001	
8	14 September 2001	
9	24 September 2001	
10	14 October 2001	
11	15 November 2001	

<sup>\*1</sup> Soil samples were collected every 5-cm depth.

<sup>\*2</sup> Soil samples were collected every 10-cm depth.

ている。

#### 2. 分析方法

不攪乱土壌（土壌コア）を用いて、三相測定、透水試験およびpF試験を実施し、土壌の物理性について分析した。また、抽出した土壌水、採取した地下水および降水について、酸素・水素安定同位体比を測定した。安定同位体は自動平衡法を用いて前処理を行った後、安定同位体質量分析計（Finnigan MAT 252）にて測定を実施した。同位体比はスタンダード（V-SMOW：標準平均海水）からの千分率偏差（ $\delta$  値）として表示した。測定精度は、酸素安定同位体比で $\pm 0.1\%$ 、水素安定同位体比で $\pm 1\%$ である。また、一部のサンプルについては、トリチウム分析を実施した。

### IV 結果・考察

#### 1. 降水および地下水の酸素・水素安定同位体比の特徴

2000年～2006年までのイベント降水の降水量、気温、酸素・水素安定同位体比（以下、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ とする）、d-excess値（ $=\delta\text{D}-8\times\delta^{18}\text{O}$ ）をFig.2に示した。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ には周期的な変動はほとんど認められないが、d-excess値は夏季に低く、冬季に高いという季節変化が明瞭にあらわれている。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta\text{D}$ が相対的に低い（軽い）値を示しているイベントがあるが（例えば、2000年6月、2003年8月など）、これらは梅雨および秋雨前線性の降水や台風によってもたらされた降水量が相対的に多いイベントに相当している。また、2001年1月や2002年12月、2005年1月～3月、2006年1月も同位体比は相対的に低い値を示しているが、この時期は多量の降雪があり、この降雪の影響を受けて同位体比が相対的に低くなっていると考えられる。2000～2006年における降水の同位体比の年加重平均値は、 $\delta^{18}\text{O}$ が $-8.2\%$ 、 $\delta\text{D}$ が $-52\%$ であ

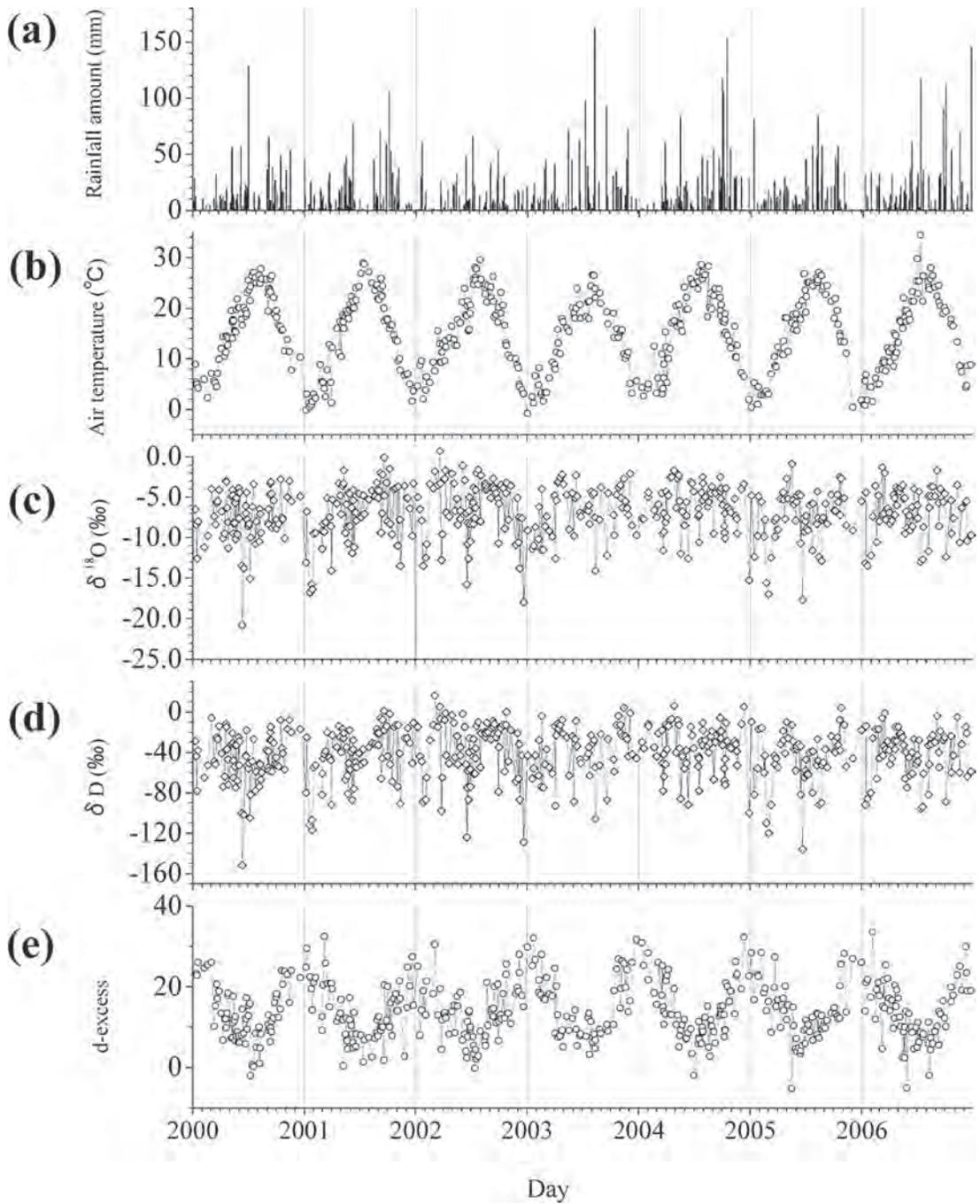


Fig. 2 Temporal variation of (a) rainfall amount, (b) air temperature, (c)  $\delta^{18}\text{O}$ , (d)  $\delta\text{D}$  and (e) d-excess in Tsukuba for event precipitation from 2000 to 2006

る。イベント降水の同位体比を用いて計算を行った結果、つくばの降水の天水線 (LMWL) は、 $\delta D = 7.7\delta^{18}O + 11.2$  ( $R^2 = 0.919$ ) であり、Craig の天水線 ( $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ ) に近い値を示している。

イベント降水をある一定の降水量で区分してそれぞれ同位体比の加重平均値を求め、このデータを利用して  $\delta$  ダイアグラムを作成した (Fig. 3)。降水量と同位体比の関係をみると、降水量が増加するに従い、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  共に低い値となることが明らかであり、つくばの降水の同位体比には雨量効果が存在すると考えられる。

## 2. 降水および地下水の酸素・水素安定同位体比の特徴

トレンチ近傍で採取した地下水の 2001 年～2002 年における  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$ 、d-excess、地下水位を Fig. 4 に示した。地下水位は地表面から約 130～240 cm 深度とかなりの変動が生じているが、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  値はほぼ一定した値を示している。このことから、TERC では多量の降水が発生した場合においても preferential flow (卓越流) の影響はあまり及んでいないと考えられる。地下水の

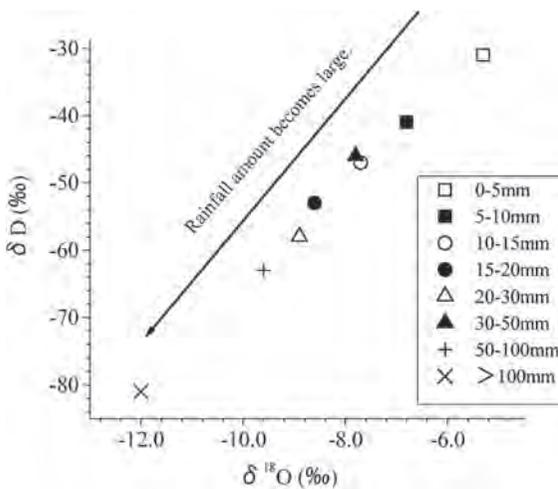


Fig. 3  $\delta$ -diagram using the data of amount-weighted mean event-based  $\delta$ -values for each level of rainfall amount in Tsukuba

同位体比の平均値は、 $\delta^{18}O$  は  $-6.7\%$ 、 $\delta D$  は  $-45\%$  であり、つくばのイベント降水の同位体比の年加重平均値 (それぞれ、 $-8.2\%$ 、 $-52\%$ ) と比較すると、地下水の方が相対的に高い値を示していることが明らかとなった。これは地表面付近で蒸発の影響を受け同位体比が高くなった土壌水が下方へと浸透し、地下水を涵養しているためであると考えられる。

降水と地下水の同位体比の関係は世界各地で異なった結果が報告されている (例えば、Central Australia のように降水の同位体比の方が地下水の同位体比よりも高くなっている地域 (Harrington *et al.*, 2002)、England のようにほぼ同じ値を示している地域 (Darling and Bath, 1988)、金子台 (藪崎, 2000; 藪崎ほか, 2006) や八ヶ岳 (Tsumijura and Tanaka, 1998) のように降水の同位体比の方が低い値を示している地域

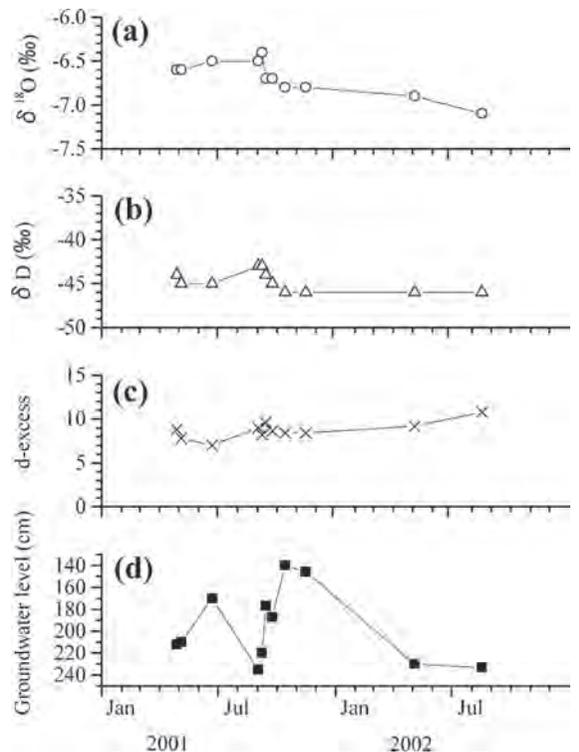


Fig. 4 Values of (a)  $\delta^{18}O$ , (b)  $\delta D$ , (c) d-excess and (d) groundwater level from the soil surface

など)。こうした現象は、乾燥・半乾燥地域および湿潤地域における降水量や気温の違い、土壌中の水分量の違いなどが土壌水の浸透過程に影響を与え、その結果生じていると考えられる。このように降水と地下水の同位体比の比較・解析を行なって得られた結果を、地下水涵養のプロセスを解明するための指標の一つとして活用することの有効性が示唆される。

### 3. 土壌水の酸素・水素安定同位体比の鉛直プロフィールと形成過程について

不攪乱の土壌コアを用いて測定した三相分布図の結果から、固相は 20～30%、体積含水率は平均すると約 70% であり、地下水面近傍まで気相が存在していることが示された (Fig. 5)。

トレンチで採取した土壌から遠心分離法で抽出した土壌水の  $\delta^{18}\text{O}$  鉛直プロフィールの 11 回分のデータを Fig. 6 に示した。地表面近くの  $\delta^{18}\text{O}$  値は相対的に高い値を示しており、蒸発の影響を受けていると考えられる。特に、7/26～9/8 の夏季に相当するデータではこの傾向が顕著にあらわれている。鉛直プロフィールには幾つかのサイクリック (Cyclic) な変動が確認され、それらはあ

る時期にピークを保ちながら下方へと浸透している (ピークの下方向への移動を ← で示した)。また、深度が増すにつれ  $\delta^{18}\text{O}$  値の変動幅は減少し、地下水面近傍ではほぼ一定した値となることが示されている。 $\delta^{18}\text{O}$  値と d-excess の鉛直プロフィールを比較すると、 $\delta^{18}\text{O}$  値が高くなっている深度の d-excess 値は低くなっていることから、この深度に存在している土壌水は、夏季に蒸発の影響を強く受けた水が浸透したものであるということが考えられる。このように、同位体比や d-excess を利用することによって、水が土壌中へ浸透した時期の推定を行うことが可能となる。

$\delta^{18}\text{O}$  値の時間-深度断面図を Fig. 7 に示した。降水量と降水の  $\delta^{18}\text{O}$  値についても同図に併せて示した。7～9 月にかけて、地表面近傍の土壌水の  $\delta^{18}\text{O}$  値は非常に高い値となっている。また、多量の降水が発生したイベント降水時の後 (図中に矢印で示した時期) で、 $\delta^{18}\text{O}$  鉛直プロフィールが下方へと移動していることが明らかとなった。このときのイベント降水量はいずれも 50 mm 以上となっており、本研究地域では 50 mm 以上のイベント降水が発生した時 (特に秋雨前線性の降水や台風による降水が生じた時) に土壌水の下方

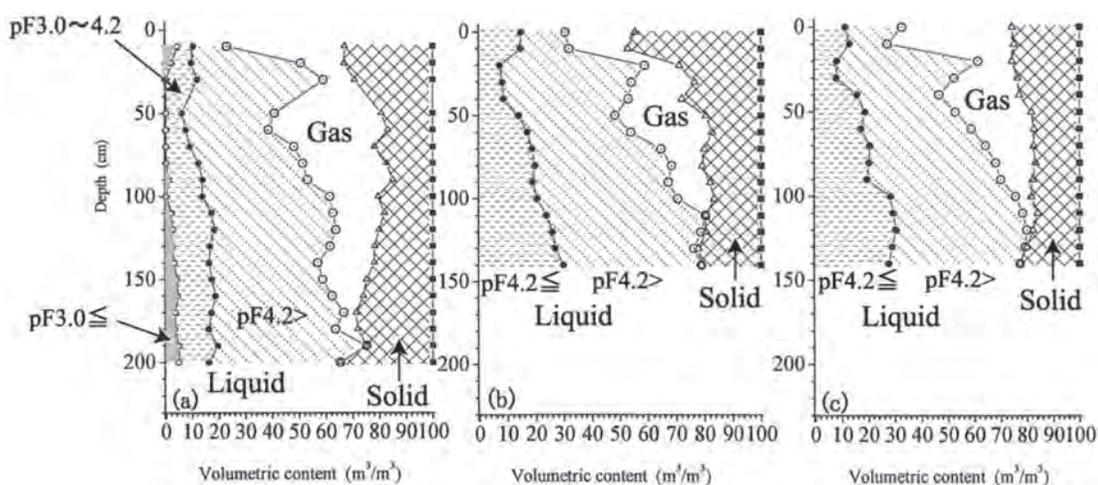


Fig. 5 Three-phase distribution of undisturbed soil samples at trench (a) on 5 May, (b) on 14 October and (c) on 15 November, 2001

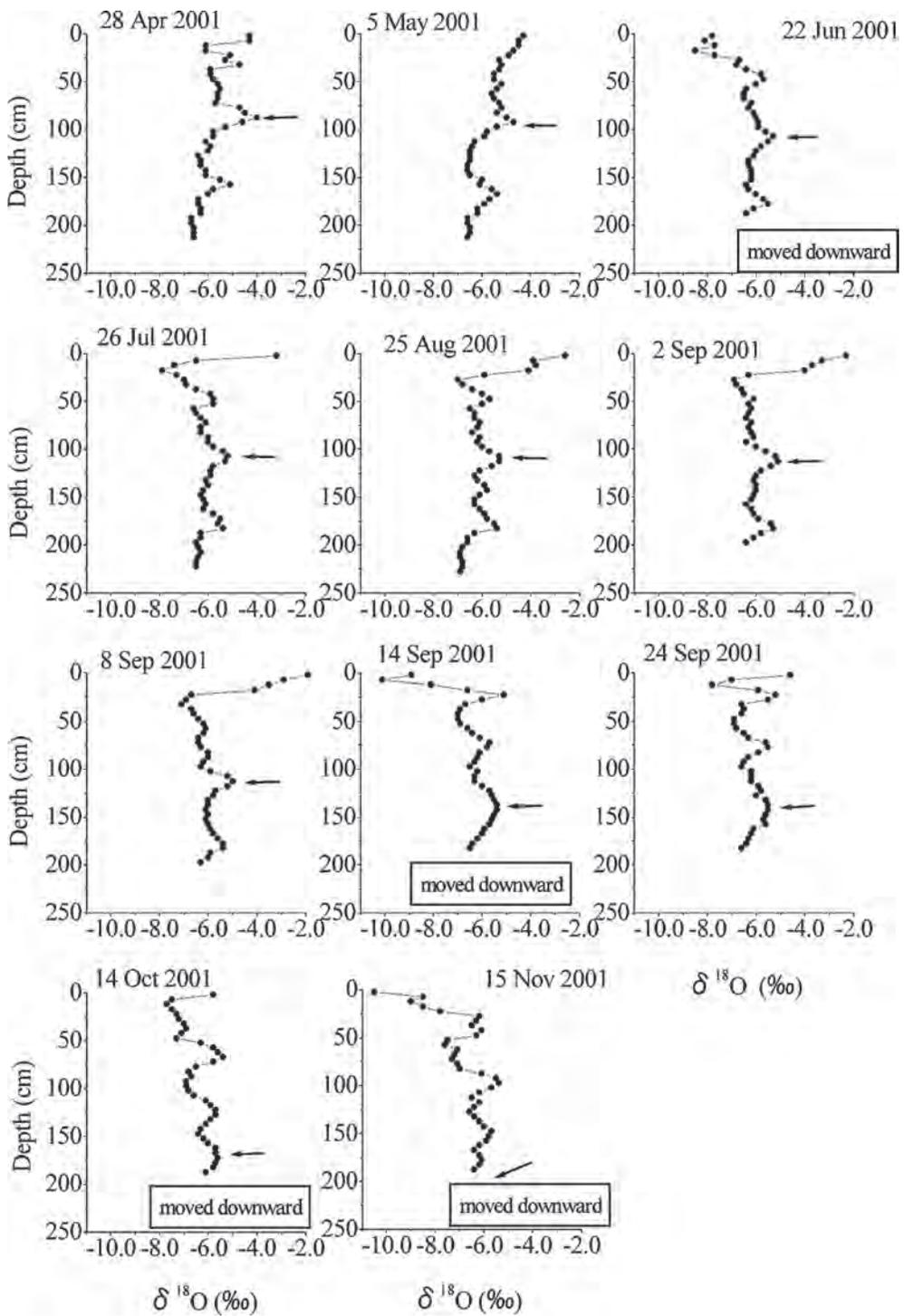


Fig. 6 Vertical profiles of  $\delta^{18}\text{O}$  of soil water in the trench

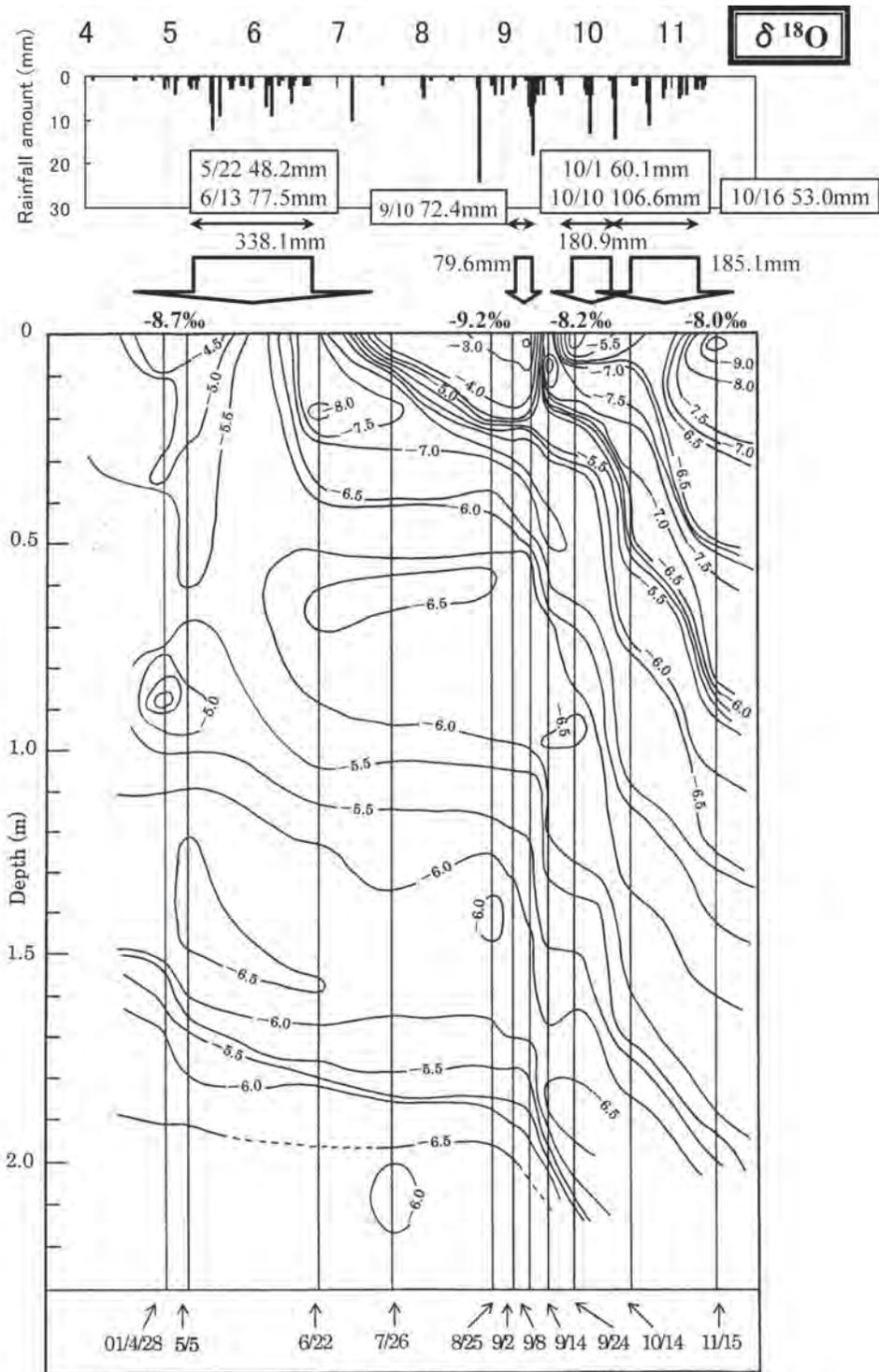


Fig. 7 Time-depth cross section of  $\delta^{18}\text{O}$  of soil water

浸透が生じていると考えられる。この結果、夏季に蒸発の影響を受けて同位体比の高くなった土壤水が、秋季の同位体比が相対的に低い値を示す多量の降水が発生した時に下方へと押し出されるように浸透することによって、土壤水の同位体比のサイクリックな変動が形成されていると考えられる。また、土壤中を浸透するに従い、移流・分散の働きを受けて土壤水の同位体比は均質化してゆくと考えられる。安定同位体比の鉛直プロファイルの下方移動と土壤中の水分量を考慮して計算した結果、地下水涵養量は 658 mm/year となった。これは降水量から Penman 法により求めた蒸発量を差し引いた値とほぼ同様の値となっており、同位体比を利用した方法の妥当性が示唆された。

## V まとめ

土壤水や降水の同位体比の変動を比較検討することにより、土壤水の安定同位体比鉛直プロファイルの形成過程を明らかにすることができた。また、研究の結果、土壤水の挙動や地下水涵養過程を解明する際に、土壤水の安定同位体比の利用が有効であることが示唆された。今後は他の地域においてもこうした方法が有効であるか、さらにデータを蓄積して考察を行う予定である。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、筑波大学生命環境科学研究科の辻村真貴准教授および筑波大学陸域環境研究センターの山中 勤講師には多くのご助言をいただきました。併せて、筑波大学水文学教室の先生方にも貴重なコメントをいただきました。また、査読者のかたにも細かなご指摘をいただきました。記して、御礼申し上げます。

## 文献

- 嶋田 純・藪崎志穂 (2000): 環境同位体による土壤水の滞留時間・浸透機構の解明. 土壤層の持つ土地利用メモリーと地中水との相互作用の解明 平成9年度～平成11年度科学研究費補助金 研究成果報告書 (課題番号: 09480113), 58-64.
- 藪崎志穂 (2000): 酸素・水素安定同位体比およびトリチウム濃度を用いた土壤水の浸透速度と涵養量の推定. 筑波大学環境科学研究科修士論文, 79p.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・島野安雄・嶋田 純 (2000): 降水と地下水の安定同位体比について. 土壤層の持つ土地利用メモリーと地中水との相互作用の解明 平成9年度～平成11年度科学研究費補助金 研究成果報告書 (課題番号: 09480113), 52-57.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・辻村真貴 (2006): 酸素・水素安定同位体を用いた地下水涵養過程の解明に関する研究. 同位体科学, **2**, 41-44.
- Allison, G. B. and Hughes, M. W. (1983): The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region. *J. Hydrol.*, **60**, 157-173.
- Barnes, C. J. and Allison, G. B. (1988): Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *J. Hydrol.*, **100**, 143-176.
- Darling, W. G. and Bath, A. H. (1988): A stable isotope study of recharge processes in the English chalk. *J. Hydrol.*, **101**, 31-46.
- Gazis, C. and Feng, X. (2004): A stable isotopic study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths. *Geoderma*, **119**, 97-111.
- Harrington, G. A., Cook, P. G. and Herczeg, A. L. (2002): Spatial and temporal variability of

ground water recharge in central Australia:  
A tracer approach. *GROUND WATER*, **40**,  
518-527.

Tsujimura, M. and Tanaka, T. (1998): Evaluation  
of evaporation rate from forested soil surface

using stable isotopic composition of soil  
water in a headwater basin. *Hydrol. Process.*,  
**12**, 2093-2103.

(2007年5月30日受付, 2007年8月6日受理)

# フラット・アレイ型ソーダーについて

On a Flat Array Sodar

花房 龍男\*・大和 佳祐\*\*・渡来 靖\*\*\*

Tatsuo HANAFUSA\*, Yoshihiro YAMATO\*\*  
and Yasushi WATARAI\*\*\*

## Abstract

The outline of a Flat Array Type Doppler Sodar is discussed and the field test observations with the comparison of the sonic anemometer on the 30m tower are shown.

## I はしがき

環境調査などで、上層の風向・風速を測定するためには、①鉄塔などに風向風速計を設置する。②ゾンデなどを利用する。③リモートセンシングを利用する、などの方法がある。それぞれ長所、短所があるが、ここでは、最近開発された小型のフェイズドアレイ型ドップラーソーダーの特徴とその実地試験結果について述べる。

## II ドップラーソーダーの原理

大気中に音波を送信すると大気温度や風の微細な変化により、音波の一部はあらゆる方向に散乱するため、音波送信場所にも戻ってくる。音波散乱を与える上空の大気が静止していれば、受信周波数は送信周波数と同じであるが、もし、大気が動いていると、そこでドップラー効果が生じ、

受信周波数は送信周波数と少しずれてくる。ドップラーソーダーはこのずれの周波数（ドップラー偏移周波数）を検出して、上空の大気の動き、すなわち風向・風速を測定するものである。しかし、一方向の送信ではその方向の成分しか測定できないが、3方向に送信して、各成分を観測してベクトル合成すれば簡単に上空の風向・風速を求めることができる（McAllister *et al.*, 1969, 花房ほか, 1996）。

ソーダーによる風向・風速の測定原理について述べる。

乾燥空気中では音速  $C$  は次式で示される。

$$C = (C_p / C_v \cdot R \cdot T)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $C_p$  は乾燥空気の定圧比熱で  $C_p = 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、 $C_v$  は乾燥空気の定積比熱で、 $C_v = 717 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、 $R_p$  は乾燥空気の気体定数で

\* 元気象庁気象研究所

\*\* 英弘精機株式会社

\*\*\* 筑波大学陸域環境研究センター（現：立正大学地球環境科学部）

$R=287.04\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $T$  は絶対温度である.

風速変動は散乱断面積に無関係であり, 音波の発信期間  $T_p$  は音速を  $C$  とすると一つの波グループ  $L_p=C/T_p$  で空気中を散乱していく. 音波の最後の発信時間から  $t_a$  後, グループの初めと終わりの間の空間的な広がり

$$C \times (T_a + t_a) - C \times t_a = L_p \quad (2)$$

で表される.

しかしながら, 受信機に音波が戻るまでの時間が必要なので, 時間  $t_a$  の後, 送信機の位置で受信する後方散乱の信号は  $C \times (T_p + t_a) / 2$  から  $C \times t_a / 2$  の間になる必要がある. このグループの長さは  $C \times (T_p + t_a) / 2 - C \times t_a / 2 = L_p / 2$ . 言い換えれば実際の波長  $L_p$  の半分である. これは効果的波長  $L_E (= L_p / 2)$  と呼ばれている.

後方散乱信号の周波数は送信された音波パルスの風速成分によって偏移され, その周波数の偏移は次式で表される.

$$\delta f = -2 \frac{u_r}{c} f \quad (3)$$

$$\delta f_v = -2 \frac{w}{c} f_v \quad (4)$$

ここで,  $f$  は送信音波パルスの周波数で, 周波数  $f_v$  と鉛直風速  $w$  については  $\delta f_v$  は  $w$  に比例することを意味しており, 添え字  $r$  は方向成分を表わす.

東西方向に  $\theta_E$  だけ傾斜した周波数  $f_E$  と東方向成分の水平風速成分  $u$  を考えると, 周波数偏移は次のように表される.

$$\delta f_E = -2 \frac{u}{c} f_E \sin(\theta_E) - 2 \frac{w}{c} f_E \cos(\theta_E) \quad (5)$$

東方向, 北方向及び鉛直方向の3つのビームを考え, それぞれ周波数偏移を  $f_E$ ,  $f_N$ ,  $f_V$  とし, 傾斜を  $\theta_E$ ,  $\theta_N$ ,  $\theta_V (= \text{垂直})$  とし, 東成分を  $u$ ,

北成分を  $v$ , 鉛直成分を  $w$  とすると, 周波数のずれによる風速は次のようになる.

$$u = -\frac{\delta f_E}{2f_E} \frac{c}{\sin(\theta_E)} + \frac{\delta f_V}{2f_V} \frac{c}{\tan(\theta_E)} \quad (6)$$

$$v = -\frac{\delta f_N}{2f_N} \frac{c}{\sin(\theta_N)} + \frac{\delta f_V}{2f_V} \frac{c}{\tan(\theta_N)} \quad (7)$$

$$w = -\frac{\delta f_V}{2f_V} c \quad (8)$$

もちろん  $f_E = f_N = f_V$  である.

東, 北, 西, 南方向のビーム傾斜角  $\theta_E$ ,  $\theta_N$ ,  $\theta_W$ ,  $\theta_S$  で周波数がそれぞれ  $f_E$ ,  $f_N$ ,  $f_W$ ,  $f_S$ , とし鉛直方向を  $f_V$  としたとき, 対象としている層で3次元風速が各々のビームで等しいと仮定して反対のビームについて平均し,  $\theta_E = -\theta_W$ ,  $\theta_N = -\theta_S$  とすれば,

$$u = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\delta f_E}{2f_E} \frac{c}{\sin(\theta_E)} + \frac{\delta f_W}{2f_W} \frac{c}{\sin(\theta_W)} \right] \quad (9)$$

$$v = -\frac{1}{2} \left[ \frac{\delta f_N}{2f_N} \frac{c}{\sin(\theta_N)} + \frac{\delta f_S}{2f_S} \frac{c}{\sin(\theta_S)} \right] \quad (10)$$

$$w = -\frac{\delta f_V}{f_V} \frac{c}{2} \quad (11)$$

平均化時間  $t_{av}$  を考えると, これは最少解像層  $\Delta Z = t_{av} \times C / 2$  に対応する. フーリエ変換理論から解るように, 時間  $t_{av}$  で可能な最良の周波数解像は  $\Delta f = 1 / t_{av}$  である.

ドップラーソーダの鉛直解像と解像可能な最大周波数の間には次のような関係がある.

$$\Delta Z \cdot \Delta f = \frac{c}{2} \quad (12)$$

10m の鉛直解像の場合には周波数解像は 17Hz が可能である. 例えば 2400Hz の場合には  $\theta = 29$  度で鉛直解像  $\Delta W$  は 1.2 m/s となり, 風速の解像  $\Delta u$  は 2.5 m/s となる.

また, 鉛直方向からの受信信号を信号強度の度合いで濃度表示することにより, エコーターンの

情報が得られ、これにより逆転層など上空の大気状態を把握することができる。

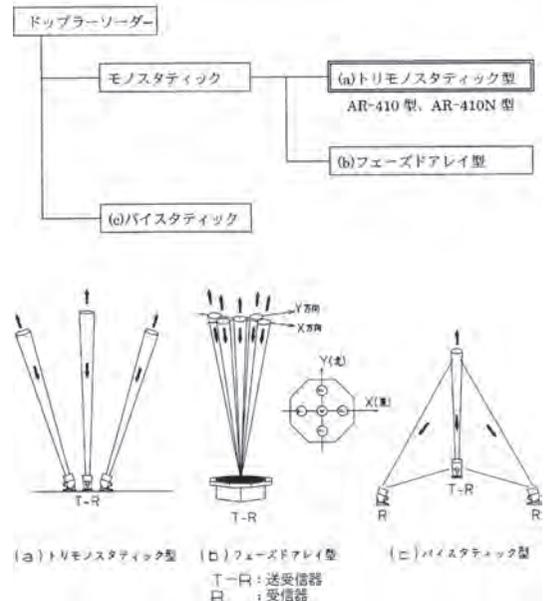
### III フェイズドアレイ型ドップラーソーダー(SFAS64)

ドップラーソーダーにはバスタティック型、モノスタティック型、およびフェーズドアレイ型がある(第1図)。バスタティック型は、鉛直上方へ音波を送信し、ある距離離れて設置した受信機で受信するもので、設備面積が比較的広い場所で設置可能なものである。これに対して送受信器を一箇所に設置して行なうモノスタティック型のものもある。

最近開発され、実用化されたフェイズドアレイ型(フラットアレイ型)は、フラットアレイアンテナを使用したもので、送受信器が一体となっており、小型化され、設置等が非常に便利になっている。フェイズドアレイ型ドップラーソーダー(SFAS64)の最大測定設定高度は500m、最小測

定高度は10mで、主な特徴は次の通りである。

- ①送受信器が一体となっているので、設置が非常に簡単である。

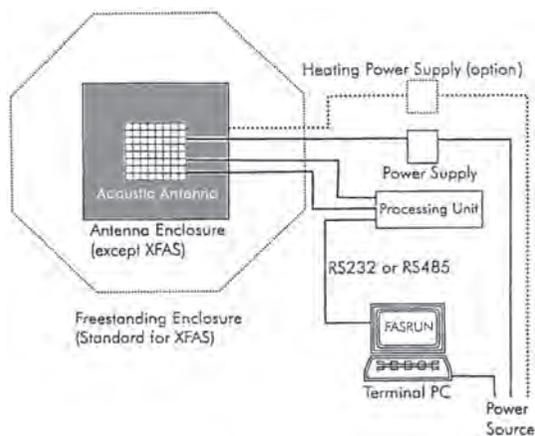


第1図 ドップラーソーダーの分類図

第1表 SFAS64型ソーダーの仕様

項目	SFAS64	備考
エレメント数	64 個	ピエゾ素子
周波数	2850 ~ 4750 Hz	設定可
出力	2.5 W	設定可
使用周波数	80 波長から最大 10 波長選択	設定可
送受信アングル	0°、± 22°、± 26°	9 ビーム設定可
垂直測定層	最大 100	設定可
垂直測定厚み	5 ~ 100 m	設定可
最低測定設置高度	10 m	最低層高度
最大測定設定高度	200 m ~ 500 m	マルチ周波数モード時
平均時間設定	1 分 ~ 60 分	パラメータ設定による
水平風速精度	0.1 ~ 0.3 m/s	マルチ周波数モードにおいて
垂直風速精度	0.1 ~ 0.3 m/s	マルチ周波数モードにおいて
風向精度	2 ~ 3°	風速 2 m/s 以上
水平測定範囲	- 50 ~ +50 m/s	
垂直測定範囲	- 10 ~ +10 m/s	
動作温度範囲	- 35 ~ +50°C	アンテナ、プロセッシングユニット
電力	± 18VDC700W ピーク	
	平均 80 ~ 350 W	
サイズ	0.44 × 0.46 × 0.13 m	音響エンクロージャ無し
重量	11.5 kg	

- ②送信周波数を複数発信して、その中で1番SN比の良いものを選択する方法が採用されているので、データの取得率の向上が期待できる。
- ③機器全体が簡素化されているので持ち運び



第2図 SFAS64型ソーダーのブロックダイアグラム



第3図 送受信機

が便利である。

- ④測定高度、間隔等が簡単に変更可能である。
- ⑤開発されて間もないので、強風、豪雨、耐久性などの資料がまだ不十分である。

また、主な仕様を第1表に示し、ブロックダイアグラムを第2図に示す。

送受信機は64個(8×8)のスピーカーから構成され(第3図)、音波は第2表に示すように9方向に約2秒ごとに発射される。したがって1回の観測時間は約20秒である。この間は風の状態が定常であると考えられる。

#### IV SFAS64による実地観測

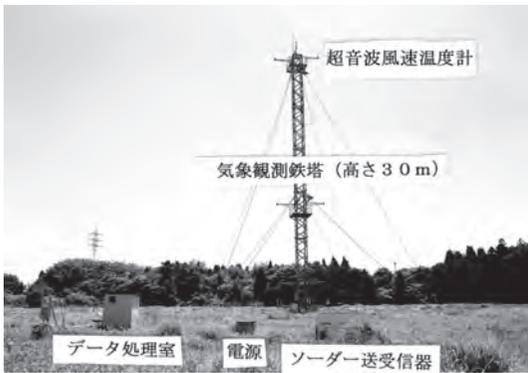
筑波大学陸域環境研究センターの協力でSFASドップラーソーダーの実地試験を行なったので、その観測結果について述べる。

##### 1. 観測場所と観測方法

観測場所は筑波大学陸域環境研究センターの圃場で、第4図に観測状況を示す。高さ30mの気象観測鉄塔の頂部に設置されている3次元超音波風速温度計で観測された、風向・風速の30分間平均値とドップラーソーダーの観測値との比較を中心に解析を実施した。観測は2006年8月から2007年3月末まで断続的に日中のみ行った。今回は2006年8月4日～8日の5日間のデータについて解析を行った。

第2表 音波の発信方向と発信数

Identifier	Beam directions SFAS	
	Main beam	Mirrored beam
Vertical	0° (vertical)	
N	24° north	19° south
E	24° east	19° west
S	24° south	19° north
W	24° west	19° east



第4図 観測状況図

## 2. 解析結果

### 1 測定高度

最大測定高度を第3表に示す。ハッチのついた時間は測定高度が200mに届かない時間帯を示す。最大高度を200mに設定したがほとんどのケースで、200mまで観測されているが、夕刻になると測定可能な測定高度が低くなる傾向が全ての日に認められるので、その原因の追究が必要である。

### 2 超音波風速温度計値との比較

鉄塔の30mに設置されている超音波風速温度計による値(30分平均値)との比較を行なった。時間変化と散布図を第5図及び第6図に示す。第6図からわかるように、値はほぼ直線的に並んでいるが、両者の間には比較的大きな差がある場合が見られる。この原因としては、超音波風速温度計は空間の1点での瞬間値を測定するのに対し、ドップラーソーダはある程度の空間的な平均を約2分かけて測定をしているので両者の測定方法は原理的に異なっていることが挙げられる。両者の間の差の原因となるものとして、①場の定常性、②風速の高度分布等が考えられる。

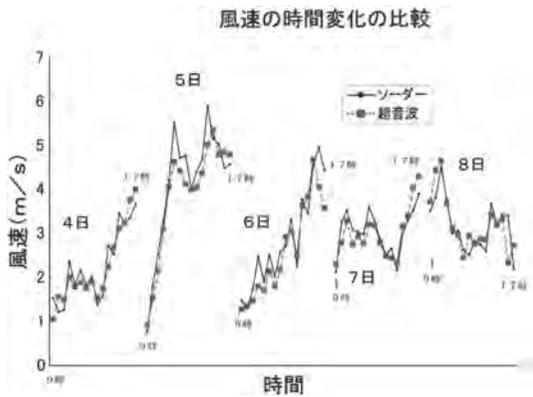
場が比較的定常と考えられる風速が比較的強い場合(30分平均風速が両方とも3m/s以上)の相対比を示したのが第7図である。

明らかに風向による違いによって相対比の違い

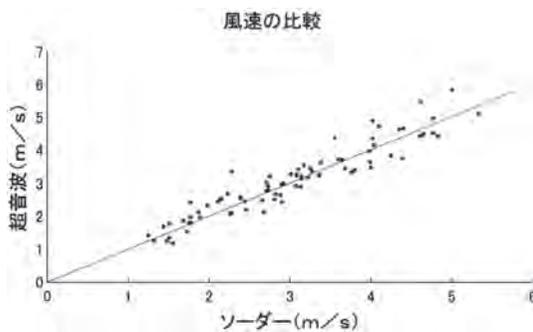
第3表 最大測定高度 (m) <設定: 200 m >

	8月4日	5日	6日	7日	8日
9時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
10時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
11時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
12時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
13時	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200
14時	200	200	200	200	175
	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	185
	200	200	200	200	155
	200	200	200	200	170
	200	200	200	200	140
15時	200	200	200	180	145
	200	200	200	165	165
	200	200	200	200	190
	200	200	200	200	200
	200	185	200	200	170
	200	160	200	200	180
16時	170	155	200	200	180
	200	135	200	200	160
	200	165	170	200	190
	125	200	145	105	200
	165	200	200	200	175
	150	190	200	185	190
17時	130	200	145	200	150

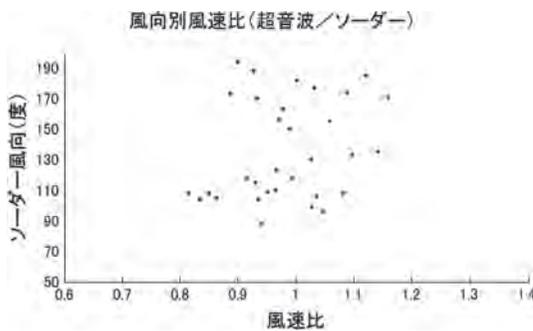
が認められる。したがって風上の条件によって風速の高度分布に差が発生し、一点観測値と空間平均値との間に違いが出てきたものと考えられる。空間平均と一点観測値の比較には注意が必要である。



第5図 風速変動の時間変化の比較



第6図 ソーダー値と超音波値の比較



第7図 相対値の風向依存性

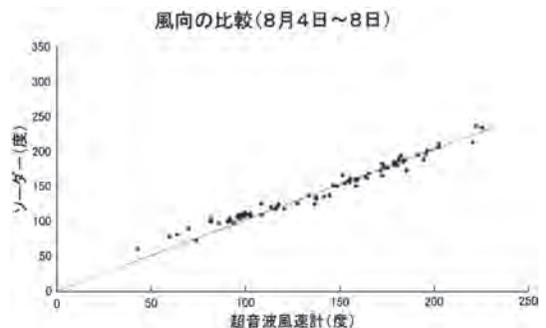
### 3 風向の比較

風速を無視して両者の関係を図示したのが第8図である。全体としては、両者はよく一致している。

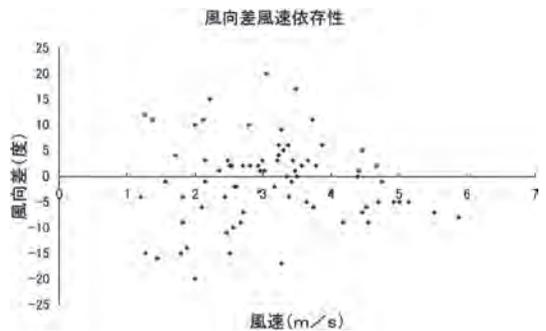
ソーダーの風速を基準に両者の風向差を見ると(第9図)、当然ではあるが風速が小さい時、両者の間のばらつきが大きく、風速が増加するにつれて一致する傾向が見られるが、必ずしも0とはなっていない。この結果が機器の設置誤差によるものか、あるいは1点の観測値と空間値の差によるものかは、より詳細な観測を行って確認する必要がある。

## V 今後の課題

今回の観測の結果から、特に顕著な両者の機器による差は認められなかった。今後は、強風時や



第8図 風向比較図



第9図 風向差の風速（ソーダー値）依存性

降雨時にデータが正常に取得できるかどうかを調査する必要がある。

### 文献

花房龍男・菊池幸雄・伊藤芳樹・小玉 亮・安達隆史・永沼 剛・有沢有三・竹内清秀 (1996): Evaluation of doppler sodar data for diffusion study. *Preprints of 13th*

*International Clean Air & Environment Conference*. Clean Air Society of Australia, 489-494.

McAllister, L. G., Polland, J. R., Mahoney, A. R. and Shaw, P. J. R. (1969): Acoustic sounding -A new approach to the study of atmospheric structure. *Proc. IEE*, **57**, 579-587.

(2007年6月4日受付, 2007年8月30日受理)



## 石垣島における台座岩の形成条件と形成速度

The Formative Conditions and Formative Rates of Pedestal Rocks in Ishigaki Island,  
Okinawa, Japan

青木 久\*・春田 知実\*\*・松四 雄騎\*\*\*・前門 晃\*\*\*\*・松倉 公憲\*\*\*\*\*

Hisashi AOKI\*, Tomomi HARUTA\*\*, Yuki MATSUSHI\*\*\*,  
Akira MAEKADO\*\*\*\* and Yukinori MATSUKURA\*\*\*\*\*

### 1 はじめに

台座岩 (pedestal または pedestal rock) とは、巨礫の存在により、その下の基盤岩が凸型の地形を形成しているものをいう。これは、巨礫周辺部の地表面が雨水による溶解によって低下する一方で、巨礫が傘の役目を果たすことにより、巨礫の下の部分が溶解を免れて台座状に残存したものである。

台座岩の形成に関する従来の研究は、台座岩が溶解を受けやすい石灰岩からなる事例のみである (松倉ほか, 2005 を参照)。そのため、石灰岩の溶食速度を見積もる一つの手法として利用され、それらのほとんどは、氷河の解氷以降の時間と台座岩の高さから台座岩の形成速度を求めたものであった (例えば, Sweeting, 1966; Williams, 1966; Peterson, 1982)。最近、松倉ほか (2005) と Matsukura et al. (2007) は、南西諸島にある鹿児島県喜界島の完新世の離水サンゴ礁面 (段丘

面) 上には、いくつかの巨礫の載った台座岩があることを報告した。彼らは巨礫の多くが段丘の離水を引き起こした地震時に発生した津波によって運搬・定置した津波石であると仮定し、台座岩の高さと段丘面の離水年代を用いて、台座岩の形成速度を明らかにした。

沖縄県石垣島の東海岸や陸上には、津波によりサンゴ礁の礁縁 (リーフエッジ) が破壊されて打ち上げられたと考えられる津波石群が存在する (河名ほか, 1987; 河名・中田, 1994)。河名・中田 (1994) によれば、これらの津波石は 1771 年の明和津波、およびそれ以前の大津波によって運ばれたものと考えられている。特に南部の大浜には津波大石と呼ばれる、きわめて大きな津波石 (1131 m<sup>3</sup>) が存在し、この津波石の下部の基盤岩は砂岩からなり、高さ 40 ~ 85 cm の台座になっているという。上述したように、従来報告されている台座岩は、石灰岩で構成されているものだけであり、砂岩で構成される台座岩の存在は興味深

\* 筑波大学陸域環境研究センター (現: 大東文化大学経営学部)

\*\* 筑波大学第一学群自然学類

\*\*\* 筑波大学研究基盤総合センター (現: 東京大学工学系研究科)

\*\*\*\* 琉球大学法文学部人間科学科

\*\*\*\*\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

い。また津波大石の下部が台座状の地形になるということは、島内に分布する、他の津波石も台座岩になっている可能性が高い。

そこで、本研究では、石垣島を研究対象地域として、定置年代が既知の津波石について、その下部が台座状になっているかどうかを観察し、台座岩の形成条件を吟味する。さらに台座岩については、その高さを計測し、台座岩の形成速度についての考察を行う。

## II 石垣島の地質・地形と八重山地震津波

石垣島は八重山諸島の東端に位置し、沖縄県那覇市の西南西約 400 km、台湾の北東端から東へ約 200 km の所にある。島の中南部は約 13 km 四方のほぼ正方形をしており、そこには島の最高点である標高 526 m の於茂登岳がある。その北東端から北東に平久保半島、北西端から北に川平、西に屋良部半島が延びる（第 1 図）。石垣島の地質としては、南部では礁性のサンゴ石灰岩・礫質あるいは砂質石灰岩からなる大浜層が広く分布しており、北東部では塩基性片岩・砂質片岩・泥質片岩からなる変成岩類であるトムル層が分布している。

石垣島周辺には過去数千年間において、数回の大津波が襲来した（河名・中田，1994）。有史以来で最も大きな津波の 1 つは 1771 年の明和津波で、約 12,000 人の犠牲者を出し未曾有の災害をもたらした。津波によりサンゴ礁の礁縁（リーフエッジ）が破壊され、それが打ち上げられて定置した津波石の場合は、それに含まれるサンゴ化石の中で最も新しい年代を津波の発生した時期と考えることができる。河名・中田（1994）は、宮古諸島から石垣島など八重山諸島全域における総計 65 個の津波石の  $^{14}\text{C}$  年代値（未較正值）に基づき、1771 年明和津波以前の大津波の時期を、約 500 年前、約 600 年前、約 1100 年前、約 2000 年前、約 2400 年前、約 3750 年前、約 4350 年前および



第 1 図 石垣島の位置と津波石の分布  
 (○印は台座をもつ津波石、●印は台座をもたない津波石を示す)

約 4450 年前と推測した。

## III 調査対象地域・調査方法

河名・中田（1994）の調査結果に基づき、石垣島の大浜、登野城、真栄里、および白保地域の計 4 地点の津波石について現地調査を行った。津波石の分布を第 1 図に示す。津波石について、台座岩の有無、津波石下部の土壌の有無、巨礫を構成する岩石および基盤岩石の種類について調べた。特に津波石の下部が台座岩になっている場合には、台座の高さを折れ尺やレーザー距離計を用いて測定した。大浜の砂岩は砂質石灰岩である可能性があると考え、希塩酸を岩石表面に滴下し、発泡の有無を確認した。

#### IV 野外調査結果

各地点の津波石に関する調査結果、すなわち、台座岩の有無、台座岩の高さ、土壌の有無、基盤岩石の種類、海拔高度について、河名・中田(1994)の結果( $^{14}\text{C}$ 年代、岩塊の大きさ)とともに第1表にまとめた。次に各地点における津波石および周辺の地形や土層などについて述べる。

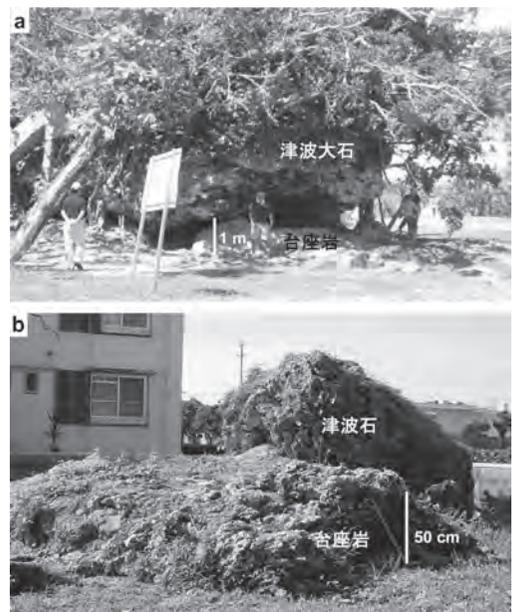
##### 1) 大浜

大浜には津波大石と呼ばれるサンゴ石灰岩からなる巨礫が存在する(第2図a)。サンゴ化石の成長方向は上向きで、その最新部(巨礫の上部)の $^{14}\text{C}$ 年代値は、 $1980 \pm 80$  yrBPを示し、約2000年前の津波によって打ち上げられたものと考えられている(河名・中田, 1994)。その大きさは、長径12.8 m、短径10.4 m、高さ5.9 mであり、下部の基盤には台座岩が形成されている。台座岩の高さは東西南北の4方向において測定した。東側では33~80 cmと場所的差異がみられ、どの部位までを台座とみなすかの判断が難しかった。他の方位については、南側では34 cm、西側では25 cm、北側では30 cmと台座の高さはほぼ一定であり、東側の高さを33 cmで代表させて、四方位の平均値を求めた(30.5 cm)。津波石の周辺は、薄い土層が基盤の上に存在しているものの、津波石と台座の間には土層は見られなかった。河名・中田(1994)によると、津波石の下の基盤は砂岩で構成されていると報告している。しかし、

岩石表面にスポイトで塩酸を滴下したところ、気泡が発生した。そのことから、この岩石は、炭酸カルシウムを含んだ石灰質砂岩であると示唆される。

##### 2) 登野城(公務員宿舎内)

登野城の公務員宿舎内にも津波石が存在する(第2図b)。この津波石に含まれるサンゴ化石の $^{14}\text{C}$ 年代値は、 $1000 \pm 80$  yrBPを示し、約1100年前の津波によって打ち上げられたものと考えられている(河名・中田, 1994)。この津波石の下部



第2図 津波石と台座岩の様子  
(a) 大浜, (b) 登野城(公務員宿舎内)

第1表 野外調査結果

調査地点	台座岩の有無	津波石と基盤岩間の土層の有無	基盤岩石	台座岩の高さ(cm)	津波石の $^{14}\text{C}$ 年代*(yrBP)	津波石の大きさ*( $\text{m}^3$ )	海拔高度(m)
大浜	有	無	石灰質砂岩	30.5	$1980 \pm 80$	1131	10
登野城(公務員宿舎内)	有	無	サンゴ石灰岩	55	$1000 \pm 80$	12	6
登野城(公園内)	無	有	サンゴ石灰岩	-	$2300 \pm 90$	13.5	6.5
真栄里(ふたご石, 東側)	無	有	サンゴ石灰岩	-	$2420 \pm 90$	351	12
真栄里(ふたご石, 西側)	無	有	サンゴ石灰岩	-	$2230 \pm 100$	369	12
白保	無	有	サンゴ石灰岩	-	不明	不明	10~20

\*河名・中田(1994)による

は、ほぼ平坦な頂部をもつ台座岩となっており、台座岩の高さは55 cmであった。津波石は台座から転落した形となっており、完全に台座岩を覆ってはいない。台座上の露出部には、植生の付きが少ないことから上部に載っていた津波石が転落してからそれほど時間は経過していないと思われる。台座岩を構成する基盤岩石は比較的新鮮なサンゴ化石を含む完新世サンゴ石灰岩である。また津波石の周辺には薄い土層が発達しているが、津波石と台座の間に土層は観察されなかった。

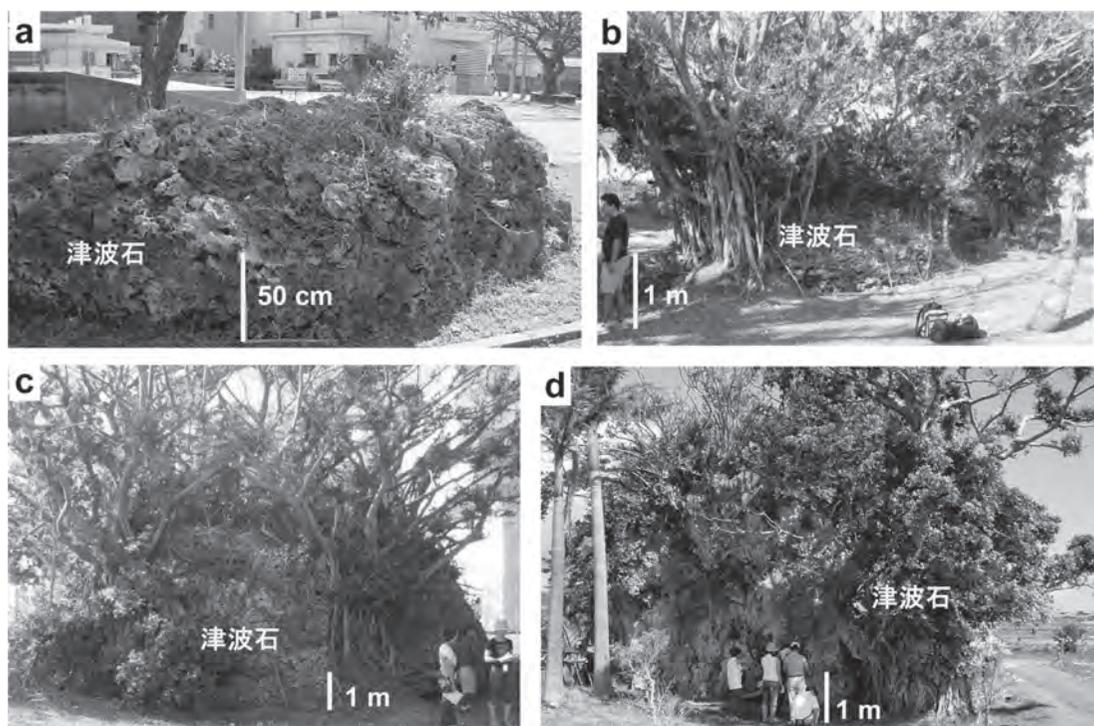
### 3) 登野城 (公園内)

登野城の公園内にも津波石が存在する (第3図 a)。この津波石中のサンゴ化石の<sup>14</sup>C年代値は、 $2300 \pm 90$  yrBPを示し、約2400年前の津波によって打ち上げられたものである (河名・中田, 1994)。津波石の周辺および下部には基盤岩石は露出しておらず、台座岩の形成はみられない。津

波石は土壤上に載っており、若干土壤の中に埋もれているようにもみえる。公園内ということもあり、人為的影響を受けている可能性もある。

### 4) 真栄里 (ふたご石)

真栄里に二つの津波石が隣り合って存在しており、ふたご石と呼ばれている (第3図 b, c)。この津波石の<sup>14</sup>C年代値は東側のもの (第3図 b) が $2420 \pm 90$  yrBP、西側のもの (第3図 c) が $2230 \pm 100$  yrBPを示し、両者ともに2400年前の津波によって打ち上げられたと考えられている。津波石の下部および周辺では、厚く土層が発達している。津波石のサイズは $351 \text{ m}^3$ および $369 \text{ m}^3$ と大きい。その下部には台座岩は見られなかった。地質図によると、この地点の土層の下の基盤岩石は、礁性のサンゴ石灰岩・礫質あるいは砂質の石灰岩からなる大浜層である。



第3図 津波石の様子 (a) 登野城 (公園内), (b) 真栄里 (ふたご石, 東側), (c) 真栄里 (ふたご石, 西側), (d) 白保 (轟川付近)

## 5) 白保（轟川沿い）

白保の轟川の近くで津波石の存在が確認された（第3図d）。この津波石は、河名・中田（1994）に記載されているもののうち、どの津波石に相当するのかが断定できないため、これを打ち上げた津波の時期は特定できない。津波石の下には台座岩の形成はみられなかった。この津波石は耕作地の中にあり、その下には土壌がかなり厚く発達している。付近の住民の話によると、このあたりの他の津波石は、農地改良の際に壊されたようである。

## V 室内試験

台座岩の形成がみられた登野城（公務員宿舎内、IV-2）地域の基盤岩であるサンゴ石灰岩と大浜地域の石灰質砂岩のサンプリングを行い、これらの岩石中に含まれる石灰成分の量比を計測した。方法は次のように行った：(1) それぞれの岩石を砕いて約10gずつを採取し、十分乾燥させて重量( $W_0$ )を計測した。(2) それらの岩石試料を塩酸に浸し、石灰分をすべて溶解させた。(3) 残留物を乾燥させて、それらの重量( $W_1$ )を計測した。

$W_0 - W_1$ は溶解量であり、石灰分の含有率( $X$ , %)を次式により算出した：

$$X = (W_0 - W_1) \times 100 / W_0 \quad (1)$$

試験の結果として、大浜の石灰質砂岩には8.6%の石灰質成分が含まれており、登野城のサンゴ石灰岩は99%が石灰質成分であることがわかった。

## VI 考察

### 1. 台座岩の形成条件

台座岩の形成の有無、土壌の有無、基盤岩石の

種類などの調査結果から、どのような条件において台座岩が形成されるのかを考察する。台座岩が見られた地点は大浜と登野城（公務員宿舎内）である。第1表から、この2地点の台座岩の共通点は、台座岩（基盤岩）と津波石の間に土層がみられなかったことである。これに対し、登野城（公園内）、真栄里や白保では、基盤岩が石灰岩であるにもかかわらず、津波石と基盤岩との間に土層がある場合には台座岩は形成されていなかった。これは、津波石と基盤岩の間に土層が存在すると、雨水が土層中を通して津波石の下部までまわりこみ、それによって土層の下の石灰岩を溶解させるためではないかと考えられる。すなわち、台座岩が形成されるためには、津波石が打ち上げられた地表面が土壌に覆われず、岩盤が露出しているという条件が重要であるといえる。

### 2. 台座岩の形成速度の差異

台座岩の平均高さは、1100年前に打ち上げられた登野城（公務員宿舎内）の津波石の下で55cm、2000年前の大浜のものでは、30.5cmであり、溶解時間の短い登野城の台座の方が高くなっている。台座岩の形成速度は等速であるというMatsukura et al. (2007)の主張を援用すると、上記2地点での台座岩の形成速度は、台座の高さを溶解時間で除すことによって、登野城で500mm/kyr、大浜で152.5mm/kyrと計算される。したがって、登野城の台座岩の方が、大浜よりも3倍強も大きい形成速度をもつことになる。

この速度の違いは何によってもたらされるのであろうか。一般に、石灰岩の溶解速度に影響を与える要因としては、雨量、気温、土壌のCO<sub>2</sub>濃度、石灰岩の岩質などが考えられる。大浜と登野城の両地域は、同じ石垣島の中にあり、数kmしか離れておらず、気候条件に大きな差があるとは考えにくい。本研究では、大浜と登野城の基盤岩石について、石灰質成分の量比を調べたが、大浜の石灰質砂岩には石灰質成分が8.6%含まれ、登野城

のサンゴ石灰岩には、石灰質成分が99%含まれるという結果が得られた。この結果から、石灰質成分が99%含まれるサンゴ石灰岩からなる登野城地域での台座岩の形成速度はきわめて大きく、石灰質成分が8.6%である砂質石灰岩からなる大浜地域では小さいということになる。これは、石灰質成分の含有率が多いほど、溶解されやすく、溶解速度が大きくなり、結果として台座岩の形成速度が大きくなることを示唆する。すなわち、2地域における台座岩の形成速度の差異は、基盤岩石の石灰質成分の含有率によって説明される。

## VII 結論

本研究では、石垣島において、年代が既知の津波石を利用することにより、その下部に発達する台座岩の形成条件を吟味した。また台座岩に含まれる石灰質成分の含有率を調べることにより、台座岩の形成速度への岩質の影響を調べた。得られた結果は以下のとおりである。

1) 台座岩が形成される条件として、津波石の打ち上げ時に地表面が土壌に覆われていないことが重要である。

2) 台座岩の形成速度は、基盤が石灰質砂岩であるときよりも純粋な石灰岩である場合のほうが大きい。これは、岩石中に含まれる石灰質成分の含有率が多い岩石ほど、溶解しやすいということから説明される。

## 謝辞

本研究を行うに際し、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

- 河名俊男・中田 高・大村明雄（1987）：石垣島大浜の“津波大石”のサンゴ化石年代。第四紀研究, **26**, 155-158.
- 河名俊男・中田 高（1994）：サンゴ質津波堆積物の年代からみた琉球列島南部周辺海域における後期完新世の津波発生時期。地学雑誌, **103**, 352-376.
- 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.
- Matsukura, Y., Maekado, A., Aoki, H., Kogure, T. and Kitano, Y. (2007): Surface lowering rates of uplifted limestone-terraces estimated from the height of pedestals on a subtropical island of Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**, 1110-1115.
- 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.

(2007年6月27日受付, 2007年8月3日受理)

## 石灰岩タブレットを用いた野外風化実験 －水質が風化速度に与える影響－

Field Experiment on Weathering of Limestone Tablets:  
Effect of Water Chemistry on Weathering Rates

八反地 剛\*・松倉 公憲\*

Tsuyoshi HATTANJI\* and Yukinori MATSUKURA\*

### 1 はじめに

石灰岩は比較的溶解しやすい岩石であり、石灰岩からなる山地では化学的風化作用、とくに溶解によってドリーネなどのカルスト地形が形成される。また、特に日本においては、石灰岩により構成される部分が、周辺の他の岩石からなる部分よりも比高が高くなり、台地として残っている場合が多い（鈴木, 2000, p.905-909）。こうした石灰岩山地特有の地形の形成過程やその速度を議論する上で、石灰岩の化学的風化、特に溶解メカニズムや溶解速度を明らかにすることは重要な課題である。

これまでカルスト台地の流域で、カルシウムイオン濃度や重炭酸イオン濃度を観測し、化学的剝蝕速度を求めた研究は多い（Smith and Atkinson, 1976, 井倉ほか, 1989）。この手法で計算される化学的剝蝕速度から、流域スケールでの侵食速度を知ることができるが、流域内のどこでどの程度石灰岩が溶解したかということは議論できない。

一方、主に地球化学分野において、室内実験により pH や温度条件の異なる溶液中におけるカル

サイト粉末の溶解メカニズムと溶解速度を明らかにする研究が進められてきた（例えば Plummer *et al.*, 1978）。また、地形学分野では粉碎しない石灰岩試料を用いた室内実験が行われてきた（廣瀬ほか, 1995；鈴木ほか, 2000；橋本ほか, 2003, 高屋ほか, 2006）。室内実験では条件を自由にコントロールできるため、カルサイトや石灰岩の溶解メカニズムを明らかにできるという利点がある。しかし、実験室で測定された現象が、実際に野外で観測される現象とどのように関わっているかという点については十分に議論されていない。

室内実験と野外観測の欠点を補う手法として野外風化実験がある。重量が既知であるタブレット型の岩石試料を野外に設置し、ある一定期間経過した後に回収し、重量の欠損量を計測する手法が多い。いくつかの問題点があるものの、野外風化実験は、野外での風化速度をコントロールする要因を直接的に明らかにできるという利点がある（松倉・八反地, 2006）。そのため、多くの研究者が石灰岩タブレットを用いた野外風化実験を実施している（Trudgill, 1977；Jennings, 1981；Crabtree and Trudgill, 1985；Trudgill *et al.*, 1994；Inkpen, 1995；漆原ほか, 1999；Thorn

\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

*et al.*, 2002 ; Plan, 2005). しかし、これらの事例の多くがカルスト台地や山地斜面の土層中を対象としたものであり、石灰岩の流域とその他の基盤岩石を持つ流域で野外風化実験を実施し、その結果を比較した例は報告されていない。

筆者らは、阿武隈山地のカコウ閃緑岩流域において石灰岩を含む8岩型の岩石タブレットを用いた風化実験を1992年から実施している(Matsukura and Hirose, 1999 ; Matsukura *et al.*, 2007). 特に飽和帯に埋設した石灰岩は風化速度が早く、10年間で初期重量の60%まで低下した。しかし、石灰岩の流域で石灰岩タブレットがどの程度の風化速度を持つかは不明であった。そこで、阿武隈山地の石灰岩流域の渓流水中に岩石タブレットを設置し、その重量変化を測定した。本稿では、その結果をもとに、カコウ閃緑岩流域と石灰岩流域という場の条件の違いが、石灰岩の野外風化速度にどのような影響を与えるかを明らかにすることを試みる。

## II 野外風化実験

### 1. 実験方法

実験で使用した石灰岩は福島県田村市(旧滝根町)で産出したものである。これを直径3.45 cm、厚さ約1 cmのタブレット状に成形し、水洗い、炉乾燥の後、5個ずつを1つのセットにし、重量を計測し初期試料とした。3セット(計15個)をメッシュの袋に入れ、福島県田村市滝根町神俣(羽山)の基盤がカコウ閃緑岩からなる小流域内にある湧水点直下の土層(飽和帯)に1992年12月28日に埋設した。また、1998年4月27日に別の1セット(5個)を福島県田村市大越町(仙台平)にある石灰岩流域のVノッチ堰内に設置した。この堰はHirose *et al.* (1994)による水文観測で使用されたものである。各設置地点の位置を第1図に示す。これ以降、カコウ閃緑岩流域の湧水直下の設置地点をGD湧水、石灰岩流域の堰

(溪流)をLS堰と略称する。

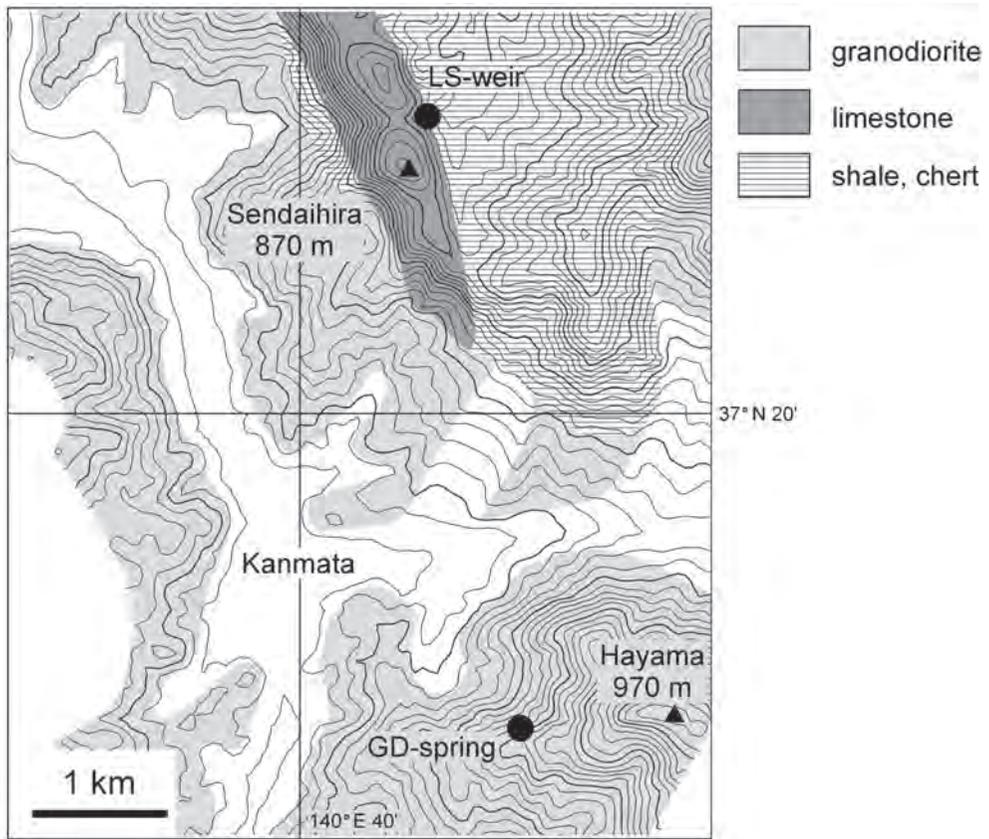
実験開始後、一定の埋設期間を経過した後にタブレットを回収し、水洗い、炉乾燥(110℃, 24時間)、重量計測、埋設の作業を繰り返し実施した。1992年12月から1999年12月までの埋設期間は3ヶ月、1999年12月以降の埋設期間は6ヶ月である。なお、GD湧水には、石灰岩を含む合計8岩型の岩石タブレットも同時に埋設しており、その結果の詳細は、Matsukura and Hirose (1999)やMatsukura *et al.* (2007)により報告されている。

### 2. 実験結果

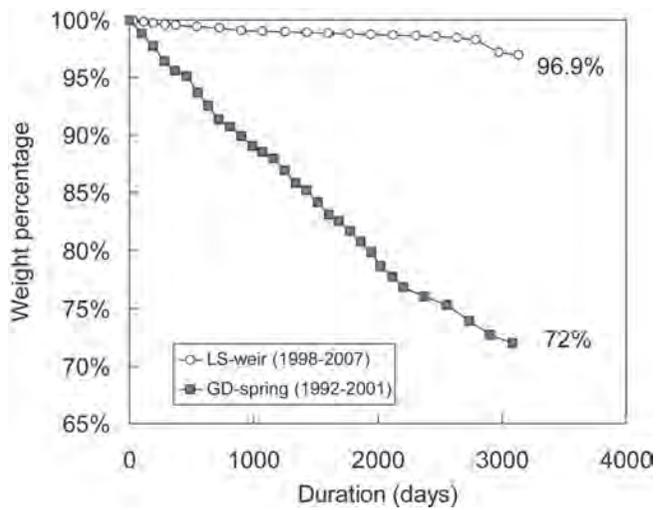
実験開始から約8.5年後(野外埋設積算期間約3100日)までのタブレット重量の時間変化を第2図に示す。縦軸は各時点におけるタブレットの重量を初期の重量(実験開始時点のタブレット重量)で割った値であり、タブレット重量の残存率と呼ぶことにする。なお、GD湧水での実験は1992年12月28日から開始され、LS堰では1999年4月27日から開始した。両者の実験期間はずれていることになるが、これらの期間を通して大きな環境の変化は見られないことから、実験開始日時の違いは考慮しないこととする。

いずれの流域でも実験開始からタブレット重量がほぼ等速で減少した。GD湧水での重量減少の傾きはLS堰でのそれよりも大きく、重量低下速度が速いことがわかる。GD湧水では2000日前後から傾きがわずかにゆるやかとなっている。

実験開始から約8.5年経過後(正確な埋設期間はGD湧水で3086日、LS堰で3135日)のタブレット重量の残存率はGD湧水で72%、LS堰で96.9%であった。これらの値から1年間(365日)のタブレット重量の減少率、すなわち重量低下速度を計算すると、GD湧水で3.3%/y、LS堰で0.36%/yであった。したがって、GD湧水ではLS堰の9.1倍の速度で重量が低下したことになる。



第1図 調査地域の地形と地質  
等高線の間隔は20 m. 地質図は福島県（1995, 1996）の表層地質図を参照した.



第2図 タブレット重量残存率の時間変化

### III 考察

#### 1. 重量低下速度と水質の関係

石灰岩タブレットの重量低下速度が、GD 湧水と LS 堰の 2 地点で異なっている理由について検討する。一般に、野外での風化作用として、化学的風化以外にも、凍結融解作用などの物理風化がはたらく可能性がある。しかし、GD 湧水、LS 堰では通年で流出が観測され、後述するように年間最低水温は 2～3℃ 程度である。したがって、いずれの設置地点においても凍結融解作用ははたらいっていないと考えられる。タブレットが水中にあることから、石灰岩を構成するカルサイト ( $\text{CaCO}_3$ ) の溶解が重量低下の主な要因であると考えられる。

White (1988, p.119-124) によるとカルサイトの溶解反応は以下のように要約できる。



左辺の二酸化炭素  $\text{CO}_2$  は水中に溶存しているものであり、その供給源は主に土壤空気である。二酸化炭素が水中に溶け込むと以下の反応が起こり炭酸となる。



水中の二酸化炭素の分圧が高くなると、(2) の反応により pH が低下するとともに、(1) で示したカルサイトの溶解も促進される。溶解反応がすすむと、水素イオンが消費されるため pH は上昇する。したがって、pH はカルサイトの溶解において重要な指標の 1 つである。このほか、水温は溶解速度に影響をあたえる。さらに、溶解したイオンがすみやかに除去されるか否かという点で、流速も溶解速度に影響をあたえる (高屋ほか, 2006)。溶解反応がすすみ、カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) や重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) の濃度が増加

すると、溶液はカルサイトに対して飽和状態に近づくため、溶解速度が遅くなると考えられる。カルシウムイオン ( $\text{Ca}^{2+}$ ) や重炭酸イオン ( $\text{HCO}_3^-$ ) の濃度が高ければ、電気伝導度 (EC) の値も高くなるため、EC は飽和状態に近いかどうかを見る簡便な指標になる。

設置地点 (GD 湧水と LS 堰) の環境条件、特に水質条件を把握するため、2007 年 4 月 28 日に EC, pH, 水温および流量を測定した。同時に採水を行い、実験室において pH4.8 アルカリ度滴定法により重炭酸イオン濃度を測定した。これらの測定結果を第 1 表に示した。なお重炭酸イオン濃度以外の要素は過去、それぞれ別の時期に測定されており、そのデータを収集し第 2 表にまとめて示した。第 1 表および第 2 表によると、GD 湧水は、LS 堰に比べて常に pH, EC が小さかった。流速については測定できなかったが、2 地点とも一定の流量が年間を通して観測されており、溶解されたイオンが十分に交換される条件にある。水温については、2 地点間では顕著な差は見られなかった。したがって、2 地点における風化速度の違いは pH や EC など水質の違いに起因していると考えられる。

LS 堰の渓流水や GD 湧水の水質は、雨水が地下水となり湧出するまでの流出経路と関連している。LS 堰の場合、土壌を通過した雨水は基盤岩中を浸透する過程で石灰岩を溶解し、pH, EC, 重炭酸イオン濃度が上昇する。その結果、渓流水の起源となっている地下水は、カルサイトに対して飽和条件に近づいていることが予想される。GD 湧水の場合も、土層 (マサ) やカコウ閃緑岩の基盤岩に含まれる黒雲母、長石などの鉱物を溶解すると思われるが、含有鉱物にカルサイトが含まれていないため、その溶解がない。その結果、pH, EC, 重炭酸イオン濃度が比較的低いまま流出する。したがって、GD 湧水の渓流水がカルサイトを溶解する能力は LS 堰に比べて格段に高いと考えられる。この溶解能力の差が、タブ

第1表 2007年4月28日に観測された水質と流量

	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\text{HCO}_3^-$ 濃度 ( $\text{mg}/\text{L}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	流量 ( $\text{L}/\text{s}$ )
LS堰	7.8	235	136	9.3	0.84
GD湧水	6.8	62	16	8.4	0.026

第2表 過去に各地点で観測された水質と流量

	測定期間	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	流量 ( $\text{L}/\text{s}$ )
LS堰	1991~1993*	n/a	100~300* (連続)	2~13* (N = 18)	n/a
LS堰	1998~1999	7.5~7.8 (N = 3)	198~230 (N = 3)	n/a	0.01~>15** (avg. 0.68)
GD湧水	2003~2004	n/a	n/a	n/a	0.022~0.036 (N = 4)
GD湧水	2004~2005	6.0~7.0***	56 (N = 1)	3~14 (連続)	n/a

Nは期間中の測定回数である。

n/aはデータ欠測を示す。

\* Hirose (1996) による。

\*\* LS堰の流量連続観測は1998年3月~6月、同年9月~1999年3月まで。

\*\*\* Yokoyama and Matsukura (2006) による。

レット重量低下速度の差に反映されたのであろう。

## 2. 既存の研究で報告された重量低下速度との比較

既存の石灰岩タブレットの風化実験から、本研究と類似した条件のものを選定し、その結果と本研究の結果を比較する。石灰岩以外の基盤岩からなる流域の土層中で、石灰岩タブレットの風化実験を行った事例として、Thorn *et al.* (2002) が挙げられる。彼らはスウェーデンの Kärkevagge 地域の谷の土層内に石灰岩タブレットを埋めて、5年後にその重量を再計測した。この地域の基盤岩は変成岩であり、地下水のpHは5.4と低い(Thorn *et al.*, 2001)。石灰岩タブレットの重量低下速度は平均で1.10%/yであり、設置地点によって0.05~2.85%/yの差異があった(Thorn *et al.*, 2002: Table II, p.837)。特に、pHが低く、排水性の悪い土層で溶解がすすんだことが指摘されている。彼らの実験で得られた重量低下速度

の最大値(2.85%/y)はGD湧水の重量低下速度(3.3%/y)に近い。

一方、Jennings (1981) はオーストラリア、Coolman Plain の鍾乳洞内の水流に3セットの石灰岩の方形試料(40 × 25 × 10 mm)を設置し、3年間の重量変化を測定した。その結果、0.27~0.47%/yの重量低下速度が得られた。この値は、本研究のLS堰の重量低下速度(0.36%/y)とほぼ一致している。

本研究とThorn *et al.* (2002) やJennings (1981) の研究では実験に使用している石灰岩の種類や大きさ、期間、気候条件などが異なるため、厳密な意味では比較できない。しかし、それぞれ類似した環境条件で、本研究で得られた値とほぼ同様の重量低下速度が観測された点は興味深い。

## IV 結論

阿武隈山地のカコウ閃緑岩流域の湧水(GD湧

水)と石灰岩流域の堰(LS堰)において、石灰岩タブレットの野外風化実験を実施した。タブレットを1992年12月にGD湧水に、1998年4月にLS堰に設置した。実験開始から約8.5年経過後のタブレット重量の残存率はGD湧水で72%、LS堰で96.9%であった。この値を重量低下速度に換算すると、GD湧水で3.3%/y、LS堰で0.36%/yとなり、GD湧水ではLS堰の約9倍の速さで風化がすすんでいることが明らかとなった。GD湧水は、LS堰に比べて、pHと電気伝導度(EC)がいずれも小さかった。このことから石灰岩タブレットの重量低下速度は、設置地点の水質条件に支配されることが示唆される。議論を深めるためには、より詳細な水質分析とデータ解析を行う必要がある。特にカルサイトに対する飽和度を計算することにより、石灰岩の野外での風化速度の支配要因をさらに明確にしたい。さらに水文地形学的観点から、石灰岩の野外での風化速度、水循環、カルスト台地の発達の相互関係についても検討していきたい。

## 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19300305 研究代表者・松倉公憲)を使用した。アルカリ度の測定では、筑波大学・水文学研究室の滴定装置を利用させていただき、その測定方法等は、陸域環境研究センターの藪崎志穂博士(現所属・立正大)にご教示いただいた。

## 文献

井倉洋二・吉村和久・杉村昭弘・配川武彦(1989):秋吉台の地下水およびその溶存物質に関する研究1-秋芳洞の流出量および炭酸カルシウム排出量に基づく石灰岩の溶食速度-。洞窟学雑誌, **14**, 51-61.

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):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.

鈴木隆介(2000):「建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段丘・丘陵・山地」古今書院, 942p.

鈴木麻沙美・高屋康彦・松倉公憲(2000):石灰岩タブレットを用いた溶解実験。筑波大学陸域環境研究センター報告, **1**, 19-25.

高屋康彦・廣瀬 孝・青木 久・松倉公憲(2006):室内実験における石灰岩の溶解特性に関する一考察。地学雑誌, **115**, 136-148.

橋本亜希子・小口千明・松倉公憲(2003):高濃度の二酸化炭素環境下における石灰岩の溶解実験。筑波大学陸域環境研究センター報告, **4**, 141-148.

廣瀬 孝・八田珠郎・松倉公憲(1995):室内実験における深成岩類と石灰岩の溶解速度。地形, **16**, 43-51.

福島県(1995):土地分類基本調査5万分の1「常葉」。

福島県(1996):土地分類基本調査5万分の1「小野新町」。

松倉公憲・八反地 剛(2006):タブレット野外風化実験にまつわるいくつかの問題点。筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 41-51.

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.

Hirose, T. (1996): Hydrological characteristics and sediment yield in four small catchments with different bedrock types in a humid temperate region. Ph.D dissertation, University of Tsukuba. 140p.

- Hirose, T., Onda, Y. and Matsukura, Y. (1994): Runoff and solute characteristics in four small catchments with different bedrocks in the Abukuma mountains, Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **15A**, 31-48.
- 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. (1981): Further results from limestone tablet experiments at Coleman Plain. *Australian Geographical Studies*, **19**, 224-227.
- 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., Hattanji, T., Oguchi, C. T. and Hirose, T. (2007): Ten year measurements of weathering rates of rock tablets on a forested hillslope in a humid temperate region, Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F.*, **51**, 27-40.
- Plan, L. (2005): Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps. *Geomorphology*, **68**, 201-212.
- Plummer, L. N., Wigley, T. M. L. and Parkhurst, D. L. (1978): The kinetics of calcite dissolution in CO<sub>2</sub> - water systems at 5 degrees to 60 degrees C and 0.0 to 1.0 atm CO<sub>2</sub> -. *American Journal of Science*, **278**, 179-216.
- Smith, D. I. and Atkinson, T. C. (1976): Process, landforms, and climate in limestone regions. Derbyshire, E., ed.: *Geomorphology and Climate*, John Wiley and Sons, 367-409.
- Thorn, C. E., Darmody, R. G., Dixon, J. C. and Schlyter, P. (2001): The chemical weathering regime of Kärkevagge, arctic-alpine Sweden. *Geomorphology*, **41**, 37-52.
- Thorn, C. E., Darmody, R. G., Dixon, J. C. and Schlyter, P. (2002): Weathering rates of buried machine-polished rock disks, Kärkevagge, Swedish Lapland. *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, 831-845.
- 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.
- White, W. B. (1988): *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford University Press, New York, 464p.
- Yokoyama, T. and Matsukura, Y. (2006): Field and laboratory experiments on weathering rates of granodiorite: separation of chemical and physical processes. *Geology*, **34**, 809-812.

(2007年5月31日受付, 2007年8月7日受理)



# PC カメラを用いた土壌のガス拡散係数測定 of 半自動化

## Semi-automated Measurement of Gaseous Diffusion Coefficient of Soil Core Samples Using a PC Camera

濱田 洋平\*

Yohei HAMADA\*

### I はじめに

土壌中のガス拡散係数 ( $D_s$ ) は,  $\text{CO}_2$  やメタンといった温室効果ガスをはじめとする, 土壌中にシンク・ソースを持つ気体の土壌-大気間での交換過程を解明する上で重要なパラメーターの1つである. 著者は前稿において, 遅沢 (1987) および遅沢・久保田 (1987) によって開発された, 安価かつ簡便に  $D_s$  を測定する装置を実際に製作し, 測定の手順や誤差の評価法を確立した後, 草地土壌の  $D_s$  測定に適用した (濱田・及川, 2006).

この際に用いた手法のうち, 拡散容器内の  $\text{O}_2$  濃度のモニタリングについては, 測定開始からの経過時間をストップウォッチを用いて計測し, 所定の経過時間ごとに  $\text{O}_2$  濃度センサーの指示値を目視によって確認していた. このため, 測定中は定期的に装置の前に来て記録する手間がかかり, 得られた時系列データの連続性にも限界があった.

測定値を外部へ電氣的に出力する端子が備わっているセンサーの場合は, それを介して外部のデータロガーに測定値を記録することができるが, 本装置で用いた  $\text{O}_2$  濃度センサー (デジタル酸素濃度計 XO-326ALB; 新コスモス電機製) には

出力端子が備えられていない. また, 出力端子を持つタイプのセンサーの中で比較的安価であり, かつ拡散容器側面のセンサー取り付け口のサイズに適合するような他のセンサーも確認できなかった.

そこで本稿では, 近年安価に入手できる PC 接続式の小型カメラ (PC カメラあるいは Web カメラ) を用いて,  $\text{O}_2$  濃度の時系列を連続的にモニタリングする手法を開発した.

### II 方法

#### 1. システムの概要

今回新たに開発した,  $\text{O}_2$  濃度の自動連続モニタリングシステムの概要を第 1 図に示す.

使用した PC カメラはエレコム株式会社製 UCAM-E1C10 で, 1/7 インチ CMOS センサーを搭載し, 画素数は 10 万, 最大  $352 \times 288$  ピクセルの画像取り込みが可能で, USB ケーブルを介して PC に接続する. このカメラには, 液晶モニター外縁部等に固定するためのクリップが本体下部に備えられており, このクリップでビュレットホルダーを挟み, カメラを下向きに固定した. なお, ビュレットホルダーの反対側には室温測定用

\* 筑波大学大学院生命環境科学研究科

の温度計の受感部を固定した。

次に、カメラの真下にO<sub>2</sub>濃度センサーを置き、正しく写るようにカメラのピント・アングル・高さを調節した。また、センサーの液晶表示部の下に計時用のストップウォッチを置き、測定開始からの経過時間が同一の画像内に記録されるようにした。O<sub>2</sub>濃度センサー・ストップウォッチともに液晶は反射式であるため、視認性を良くするためにPCカメラの上部にライトを取り付けた。反射光が直接カメラに入ると逆に見にくくなるため、ライトの角度を適宜調節した。

## 2. 画像の自動保存

PCカメラで撮影された画像のPC上での表示および保存には、秀まるお氏制作のフリーソフト「写亀」を使用し、1分間隔でカメラの画像を自動保存した（第2図）。実際の保存間隔はカメラが接続されたPCの内蔵時計に依存するため、ス



第1図 O<sub>2</sub>濃度の自動連続モニタリングシステムの概要

トップウォッチによる計時とは若干のずれが生じるが、その大きさは測定開始から60分後で数秒程度であり、測定結果への影響は無視できる程度であった。

測定開始直後にはスライド部の操作や室温の記録などの作業が入るため、実際には測定開始から1分経過後に自動保存をスタートさせた。この操作により、さらに1分経過後の測定開始2分後からの画像が自動的に保存される。同じ名前の画像ファイルが既に存在する場合、上書き保存しない設定にするとファイル名に自動的に枝番(0番～)が付加されて保存されるが、ファイル管理の利便性を考慮すると枝番と測定開始からの経過時間(分)が一致していることが望ましい。このため、あらかじめ所定のファイル名を持つ画像に加え、枝番0と1が入ったファイル名を持つ画像を保存先フォルダに置いておき、実際の測定時の画像ファイルが枝番2から保存されるようにした。

画像のサイズとして、選択できるものの中で最小の160×120ピクセルを指定したが、このサイズでもO<sub>2</sub>濃度センサー・ストップウォッチともに指示値を明瞭に読み取ることができた。ビデオ形式としてI420、静止画像の保存形式としてJPEGを指定したところ、保存されたファイルのサイズは1つ当たり30キロバイト弱となった。なお、保存先ドライブの残り容量が著しく小さくなると、



第2図 保存されたPCカメラの画像

画像が保存されなくなるので注意が必要である。

測定終了後、枝番2以降の画像ファイルをその土壌試料用のサブフォルダに移動した。

### 3. 測定値の読み取り

一日の測定がすべて終了した後、保存した画像ファイルからO<sub>2</sub>濃度センサーの指示値を読み取った。指示値の読み取りにはK\_OKADA氏制作のフリーソフト「ViX」等を使用し、土壌試料ごとに画像を一覧表示させて行った(第3図)。

一覧表示する画像のサイズは、元の画像と同じか、判読可能な場合にはちょうど縦横半分のサイズに縮小して表示した。このように設定することで、中途半端なサイズに縮小されて画像が劣化

し、指示値が読み取りにくくなる状況を回避した。また、画像を日付順に並べることで、ファイル名に関係なく記録された順に表示させることができる。

このようにして、測定開始2分後以降の画像からセンサーの指示値を順次読み取り、データ処理用のExcelファイルに入力した。

## III 結果および考察

### 1. O<sub>2</sub>濃度の時系列

今回開発した手法を適用して得られた、実際の測定時における連続的な時系列データを第4図に示す。測定に供した土壌試料は、陸域環境研究セ



第3図 保存された画像の一覧表示と読み取った指示値の入力

ンター (TERC) 熱収支・水収支観測圃場の中央部 (濱田・及川 (2006) 第3図に示したB地点の近傍) の各深度から採取した。上側のプロットは1分間隔で記録された拡散容器内のO<sub>2</sub>濃度の指示値, 下側のプロットは次の(1)式の左辺値である。

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

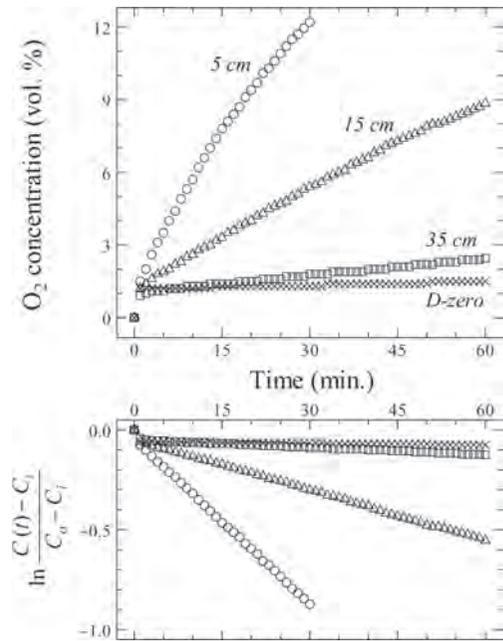
ここで,  $C$  はO<sub>2</sub>濃度を表し,  $C_o$  および  $C(t)$  はそれぞれ初期および時刻  $t$  における拡散容器内の濃度,  $C_i$  は大気中の濃度を表す。  $L_s$  および  $L_A$  はそれぞれ試料円筒および拡散容器の長さ,  $\theta_a$  は土壤試料の気相率である。また  $\alpha_1$  は, 次の(2)式を満たす  $\alpha_n$  の1番目の正の根である。

$$\alpha \tan(\alpha \cdot L_s) = \theta_a / L_A \quad (2)$$

この図と同じ時系列を示した従来の手法に基づくプロット (濱田・及川 (2006) 第4図) と比較すると, O<sub>2</sub>濃度および(1)式左辺値とも変化の傾向自体はほぼ同様であるが, 5~15分間隔のプロットであった従来法に比べて, より間隔の短い今回の手法では経時変化の様子がより明確に示されている。

## 2. $D_s$ の計算

$D_s$  の値は, 第4図下に示した(1)式左辺値の時系列プロットの勾配に基づいて計算される。従来の手法では, 測定開始5分後の値と30分, 45分, 60分後の値とをそれぞれ直線で結んで勾配を出し, その平均値を用いていた。今回は, 統計的な処理を行うのに十分なデータが得られると判断し, 測定開始5分後から測定終了までのデータについて直線回帰を行い, 勾配の値を一意に求めた。



第4図 測定中の拡散容器内のO<sub>2</sub>濃度 (上) および(1)式左辺値 (下)の時系列。数字は土壤試料の採取深度,  $D=zero$ は拡散係数がゼロの試料を表す

時系列プロットから分かるように, (1)式左辺値はほぼ直線的に変化しており, 回帰直線の決定係数は多くの場合ほぼ1に近い値となった。決定係数と測定時間内のO<sub>2</sub>濃度の上昇量, ならびに求められた相対拡散係数 (大気中の拡散係数  $D_a$  に対する  $D_s$  の比, 以降  $D_s / D_a$ ) との関係を示す。測定に供した土壤試料は, TERC熱収支・水収支観測圃場内の数地点で, 40 cmまでの深度から採取したものである。回帰直線の決定係数は, O<sub>2</sub>濃度の上昇量で1%以上,  $D_s / D_a$ の値で0.01以上の範囲ではほぼ1に近い値を示すが, これらの値を下回る範囲では急激に減少した。使用したO<sub>2</sub>濃度センサーの分解能が0.1%であり, この値に対してある程度十分な濃度上昇が得られない場合, 回帰直線の相関が悪くなり,  $D_s / D_a$ の測定精度も低下することが分かる。測定時間が短い場合 (25~30分) と長い場合 (50~60分)の間でも, この傾向に差は見られなかった (第5

図上).

### 3. 従来法との比較

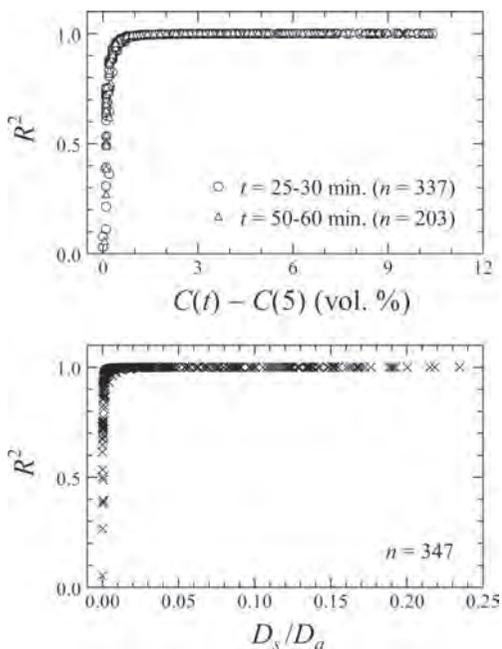
今回の手法で求めた  $D_s / D_a$  の値について、従来の手法で求めた値との比較を行った (第6図). 従来法による値は、今回の手法で得られた連続的な時系列データから、5分、30分、45分、60分のデータを抜き出して計算した.

両者の関係はほぼ1:1で、回帰直線の決定係数もほぼ1となり、絶対値で比較した場合には今回の手法と従来法との間で差はなかった. しかし、今回の手法による結果を真値と見なして相対誤差を計算すると、 $D_s / D_a$  が0.01以下の範囲で手法間の差が拡大し、2~2.5倍の差が生じる場合もあった. この理由として、この範囲では相対誤差の分母である  $D_s / D_a$  自体の値が小さいこと、(1)式左辺値の時系列プロットの回帰直線の相関

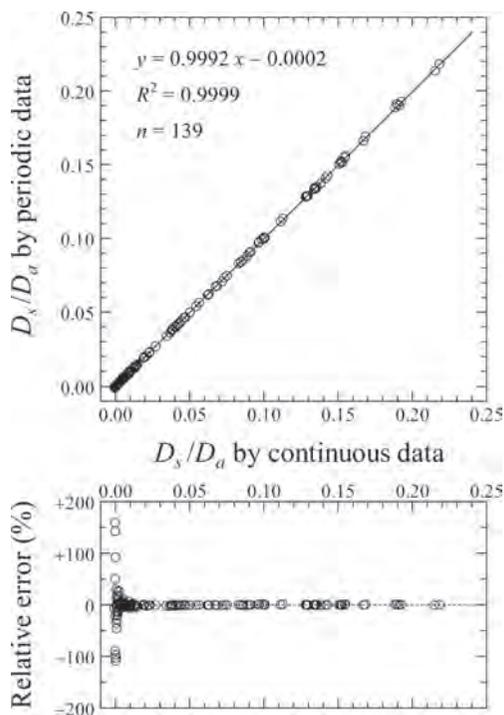
が低いこと (第5図下) に加え、従来法における間隔の長い時系列データに基づく計算では、読み取った値のわずかな違いによって測定値が大きな影響を受けることが考えられる.

## IV まとめ

本稿において開発した、PCカメラを用いて拡散容器内の  $O_2$  濃度を自動モニタリングする手法は、従来法における目視による定期的な指示値の読み取りの手間を省くと同時に、間隔の短い連続的な時系列データを生成することにより、求められた  $D_s$  の確度を高めることに寄与する. また、 $D_s$  が小さく測定中の  $O_2$  濃度の上昇量が不十分な場合に精度が低下する傾向については前稿で既に指摘しているが (濱田・及川 (2006) 第1表ほか)、本稿では (1)式左辺値の時系列プロットの



第5図 回帰直線の決定係数と測定時間内の  $O_2$  濃度の上昇量 (上) および求められた相対拡散係数 ( $D_s / D_a$ ; 下) との関係.  $t$  は測定時間 (分),  $n$  はデータ数を表す



第6図 従来法で求めた  $D_s / D_a$  との比較 (上) およびその相対誤差 (下)

回帰直線の決定係数を用いることで、 $O_2$  濃度の上昇量で 1%,  $D_s / D_a$  の値で 0.01 といった、本装置による測定の精度が低下する閾値を定めることができた。

今回開発した PC カメラを活用したモニタリング手法は、内蔵のデータロガーや外部への出力端子を持たない目視式のセンサーによる測定値を、安価・簡便に自動連続モニタリングするのに応用が可能である。PC カメラについては、現在では今回使用したものよりも高い画素数 (30 万～100 万) のものがおおむね 1 万円以下で入手できる。制御用のソフトウェアについても、カメラに添付されているもののほか、多数の高性能なフリーソフトが開発されている。中には保存した画像を電子メールに添付して指定したアドレスに送信したり、映像に大きな変化が生じたときのみ画像として保存したりする機能を備えているものもあり、

遠隔地にあるセンサーによる測定結果の自動的な回収や、野外に設置した測器の監視等への応用が期待される。

## 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.
- 濱田洋平・及川武久 (2006): 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. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 71-86.

(2007 年 5 月 9 日受付, 2007 年 7 月 26 日受理)

# 熱収支・水収支観測資料 - 2006年 -

Observational Data of Heat Balance and Water Balance  
- 2006 -

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、2006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。本資料には、観測値の一次的な統計処理による日平均値および日積算値が掲載されている。ただし、風向に関しては月別風向別頻度を掲載した。

本資料に掲載した日平均値および日積算値は、取得された生データのうちの1時間平均値(あるいは積算値)を用いて、簡単なクオリティチェックを施した後、1日分24データの平均(積算)値として算出した。この時、欠測でないデータが20個未満であった場合は、その日平均(積算)値は欠測とした。また、欠測でないデータが20個以上24個未満であった場合は、準完全値として、表中に\*印を付して区別した。

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。2006年は2月9日に行った。また、10月14~15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。

圃場内の草刈りは、2005年より夏季、冬季の年2回実施することとなった。2006年は7月27日と11月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。

本資料では、風向データは16方位に変換し、風向別頻度としてまとめた。この際、風速が0.2m/s以下であれば静穏(calm)と判定した。

### 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

\* 筑波大学陸域環境研究センター(現:立正大学地球環境科学部)

\*\* 筑波大学陸域環境研究センター

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と同様に、29.5 m 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、5 月 9 日に北西のもの（高度 1.6 m）を南東に移動させ、11 月 29 日に南東のものを北西に移動させた。

### 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。2006 年 3 月 20 日に、新しい測器（英弘精機 MS-402F）への交換が行われた。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。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られ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。

2006 年 12 月 14 ~ 15 日に、新しい温湿度センサー (CVS-HMP45D, クリマテック株式会社) への交換が行われた。温度計測には白金抵抗温度計が用いられている。

### 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。

#### 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、10.0 m 深（GW-2、スクリーン深度は 8～9 m）と新 2.0 m 深（GW-4、同 0.5～2 m）の 2 種類である。

#### 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。

2006 年 12 月 14～15 日に、温度計が新しい温湿度センサー（CVS-HMP45D、クリマテック株式会社）へ更新された。湿度計測には静電容量式高分子膜センサーが用いられている。これに伴い、露点温度  $T_d$  [℃] は新温湿度センサーの温度  $T$  [℃]・相対湿度  $RH$  [%] から、以下のように求めるよう変更された。

$$T_d = \{b \times \log_{10}(e/6.11)\} / \{a - \log_{10}(e/6.11)\}$$

ここで、 $e$  は水蒸気圧 [hPa] であり、

$$e = es \times RH / 100$$

である。 $es$  は飽和水蒸気圧 [hPa] であり、Tetens の近似式

$$es = 6.11 \times 10^{aT / (b+T)}$$

より求めた。係数  $a$ 、 $b$  は水面上での値 ( $a = 7.5$ 、 $b = 237.3$ ) を用いた。

#### 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  $\pm 250$  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、 $-0.5 \sim 0$  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た。

2006 年 9、10 月に、数回のみまとまった降水イベントとそれに付随する地下水面の上昇が起こったが、その際にライシメータ地下室の排水ポンプの不具合が重なり、センサー部が水没したため故障した。ライシメータに関しては、これまでも老朽化による漏水の影響などによりデータの信頼性に問題がある事が指摘されている事もあり（齊藤・山中、2005）、2006 年 10 月に運用を停止した。

#### 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)

## 文献

「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, 2006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2006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/TERC/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年以前のデータの収録・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。

なお, 2005年までの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, 各観測要素の気候値が算出されている。その結果は, 「TERC熱収支・水収支観測データベース図表集」(渡来ほか, 2006)としてまとめられている。

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.

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.

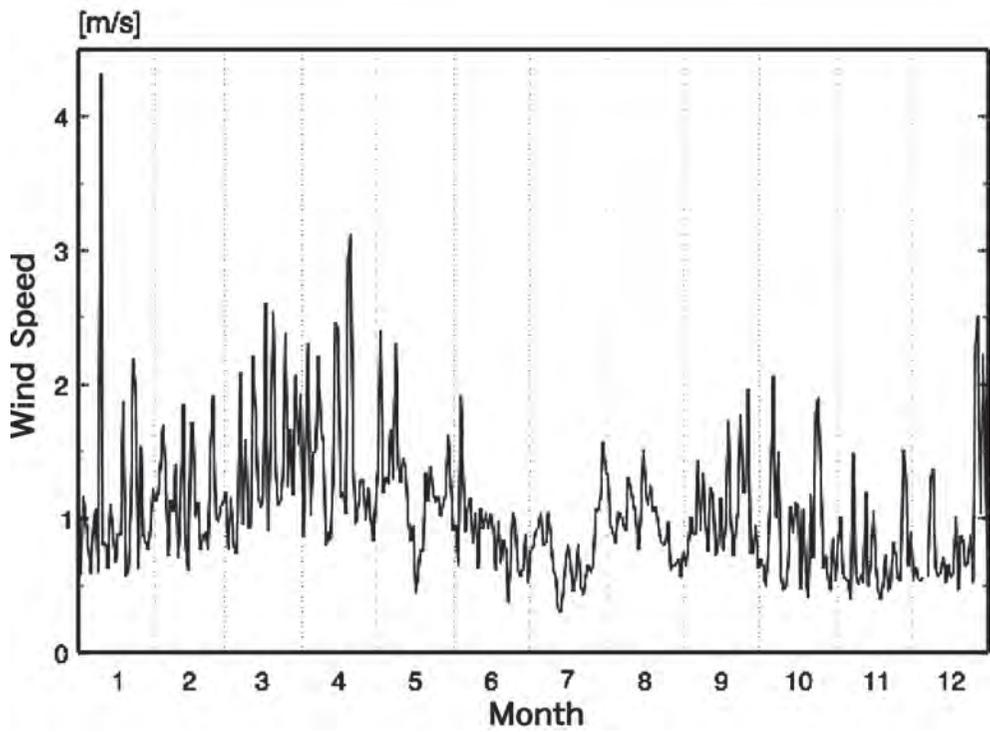
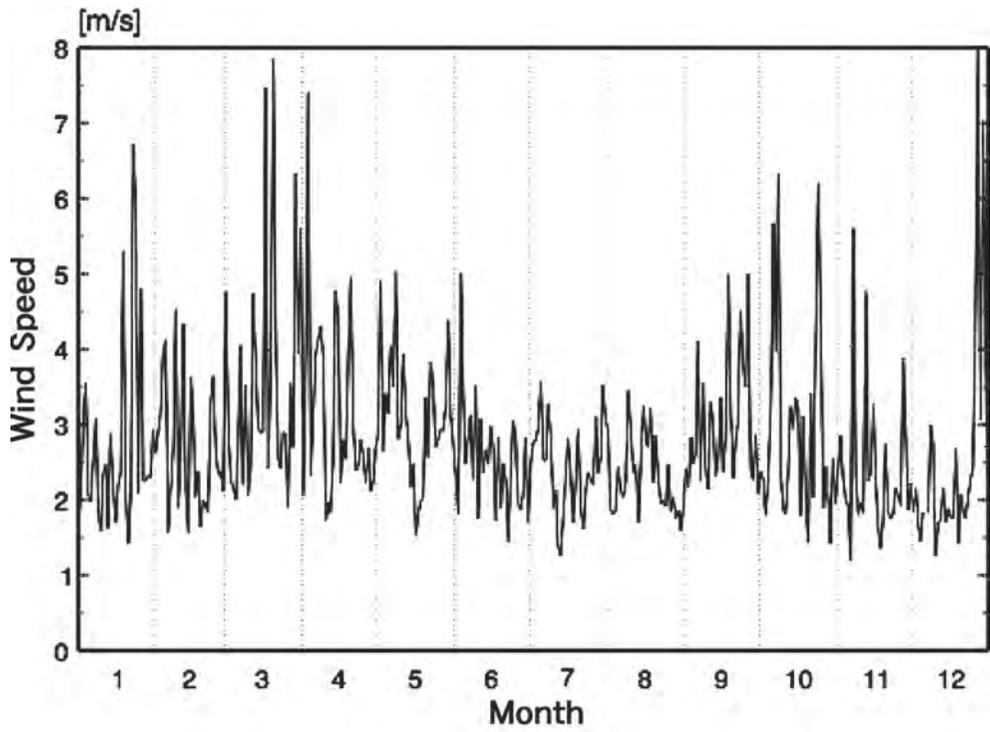
渡来 靖・藪崎志穂・山中 勤(2006): TERC熱収支・水収支データベース図表集。筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**別冊, 97p.

渡来 靖・山中 勤(2006): 熱収支・水収支観測資料-2005年-。筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 99-124.

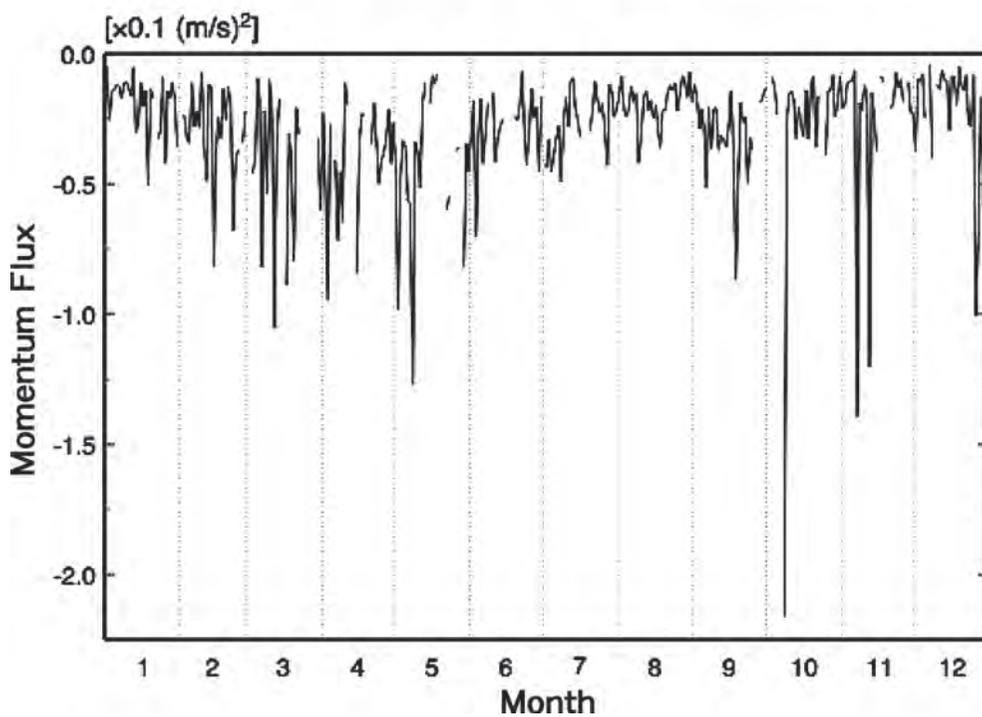
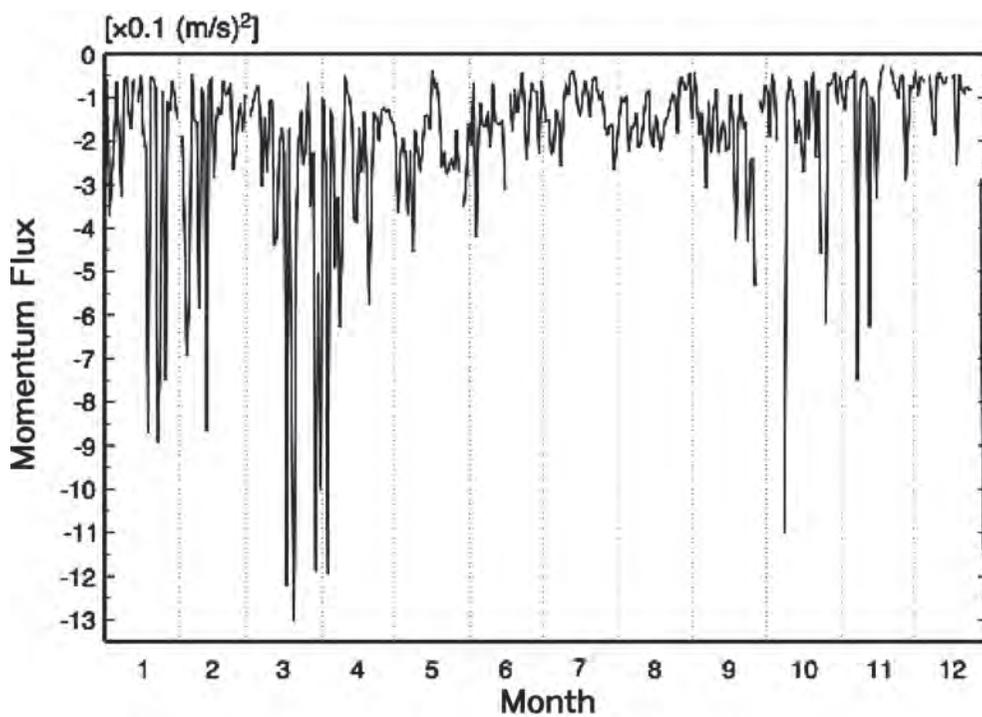
## 気象・水文表

### 表の見方

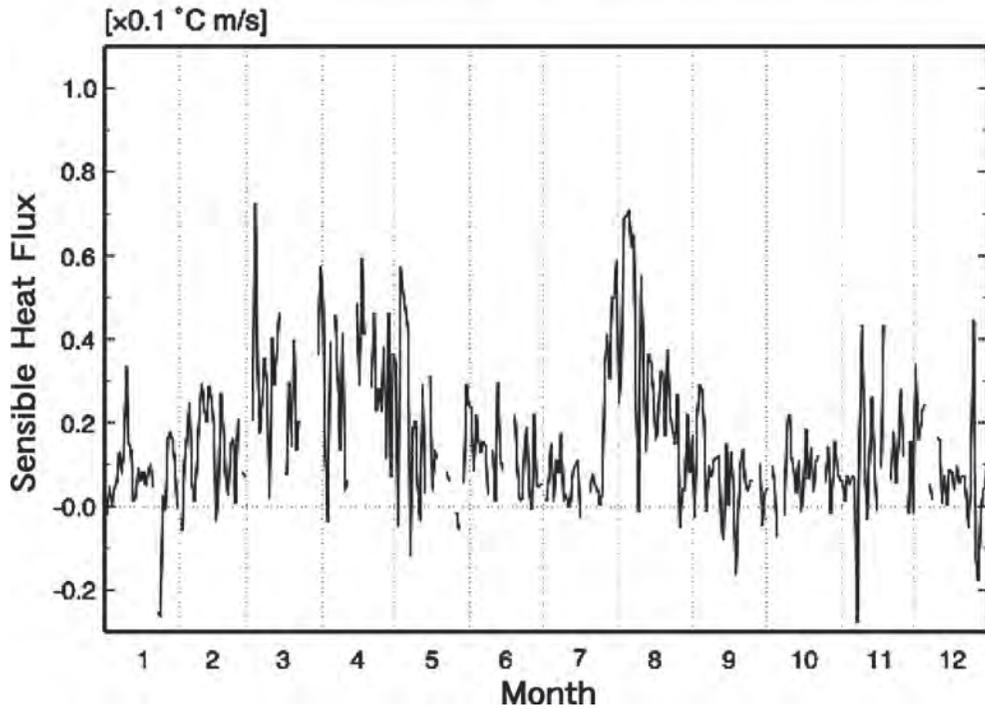
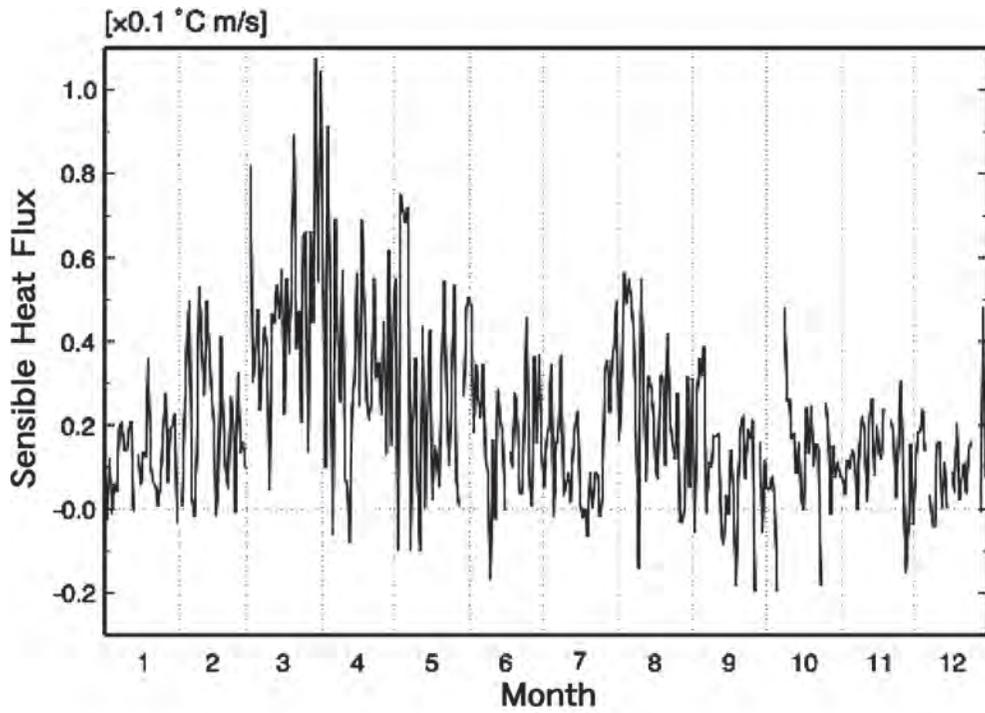
- (1) ITEM は観測要素, INSTRUMENT は観測測器を示す.
- (2) UNIT に関して, MONTHLY FREQUENCY は月毎の頻度を示す.
- (3) 表の横軸は月, 縦軸は日である.
- (4) 表中の \*\*\* は欠測を, …は対応する日がないことを示す.
- (5) CALM は静穏, NO DATA は欠測頻度を示す.
- (6) MEAN は月平均値, TOTAL は月積算値を示す.
- (7) \* 印が付いた値は準完全値を示す.



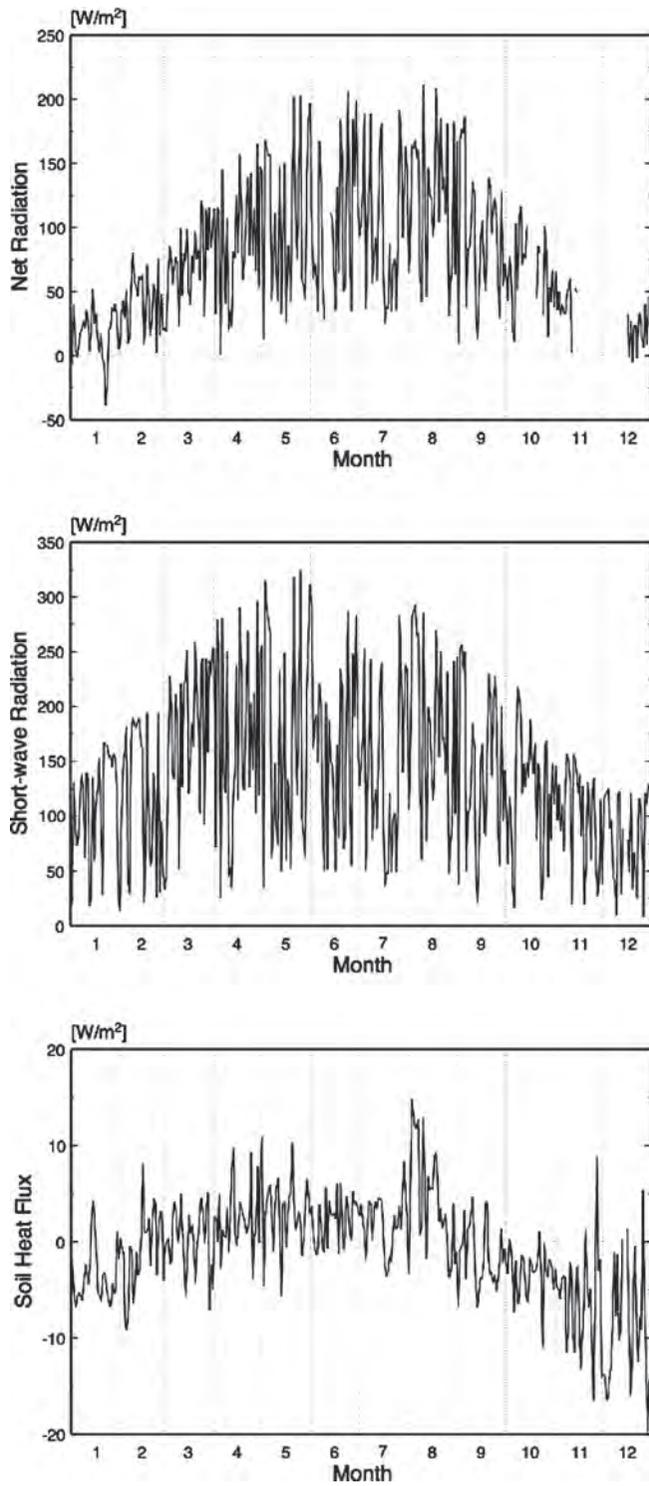
第1図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における風速の日平均値の季節変化



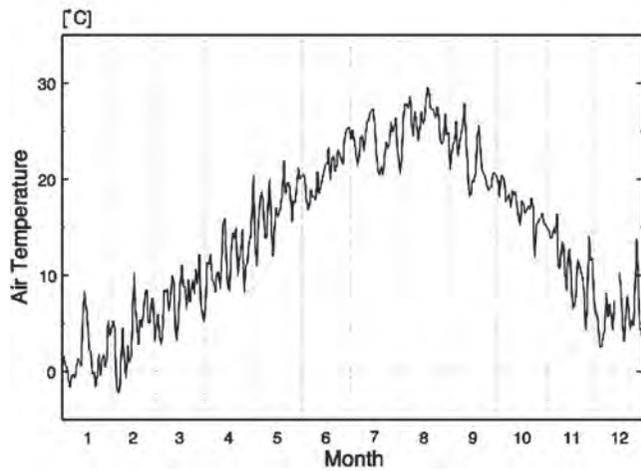
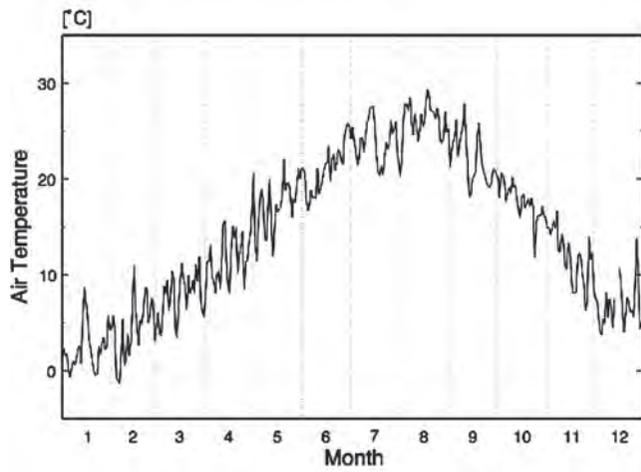
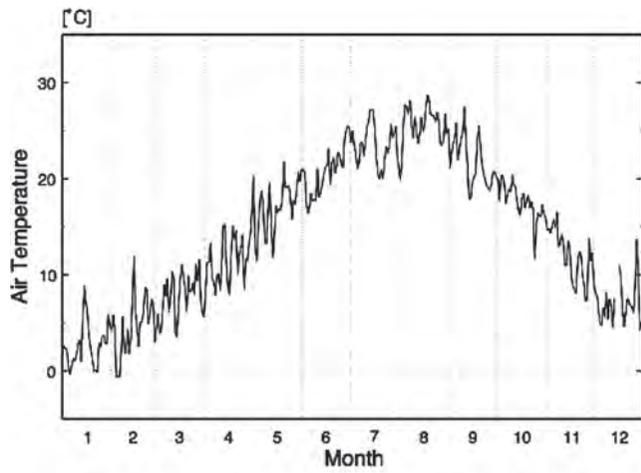
第2図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における運動量フラックスの日平均値の季節変化



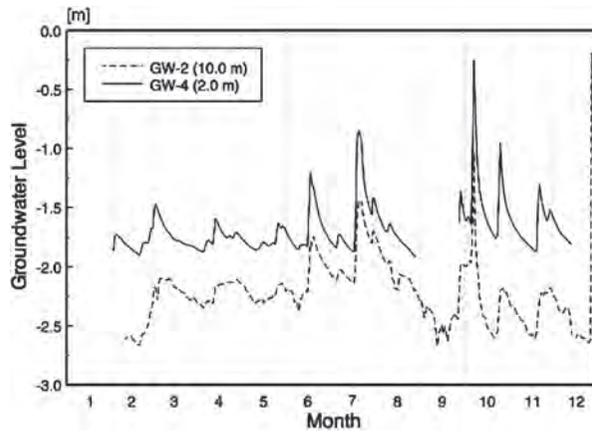
第3図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における顕熱フラックスの日平均値の季節変化



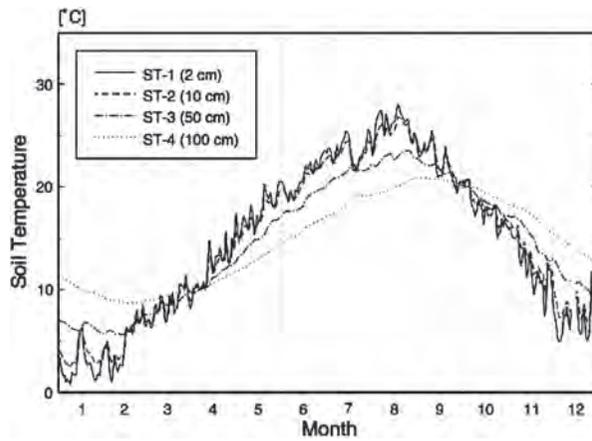
第4図 正味放射量（上図），全天短波放射量（中図），および地中熱流量（下図）の日平均値の季節変化



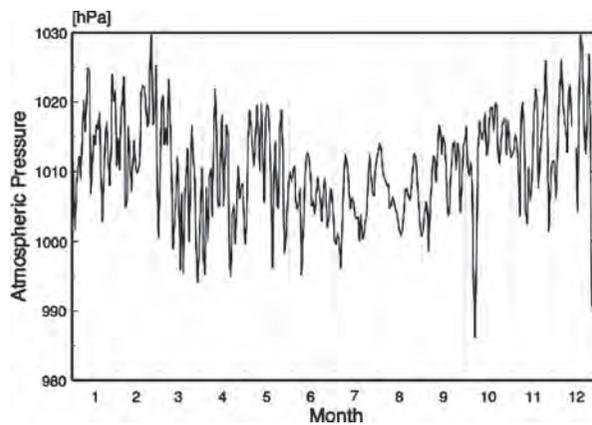
第 5 図 測定高度 29.5 m (上図), 12.3 m (中図), および 1.6 m (下図) における気温の日平均値の季節変化



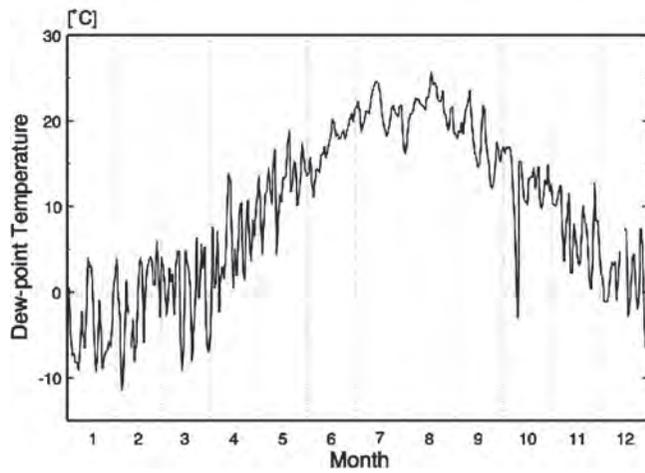
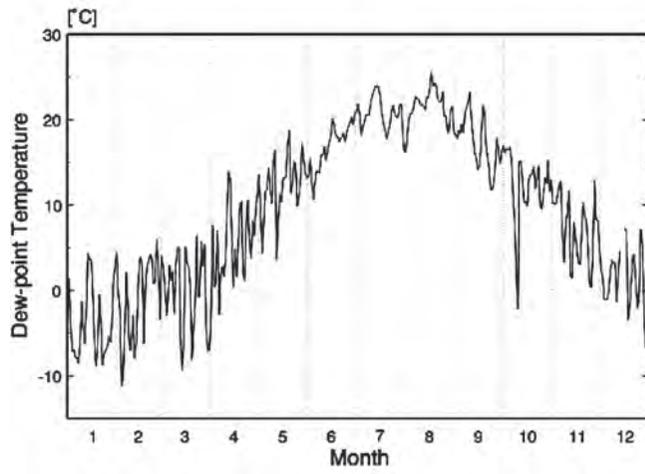
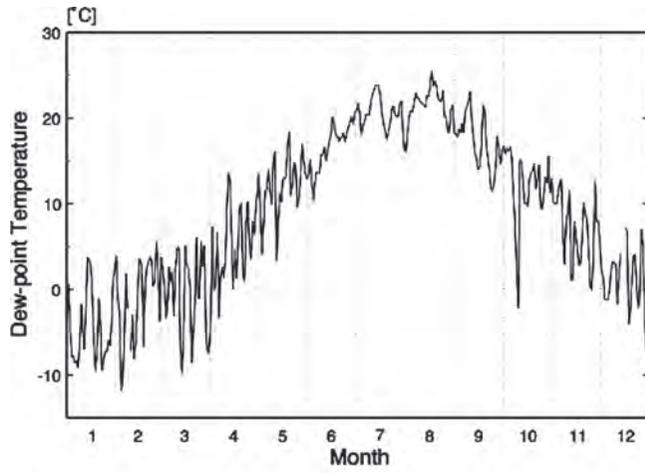
第6図 2深度（10 m，新 2.0 m）の観測井における地下水位の日平均値の季節変化



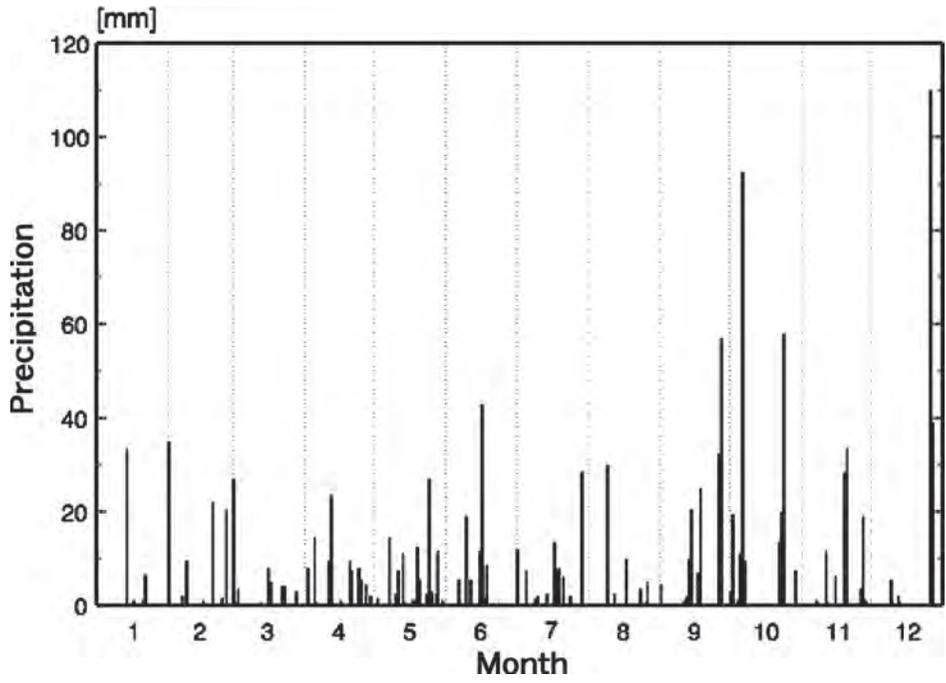
第7図 4深度（2 cm，10 cm，50 cm，100 cm）における地温の日平均値の季節変化



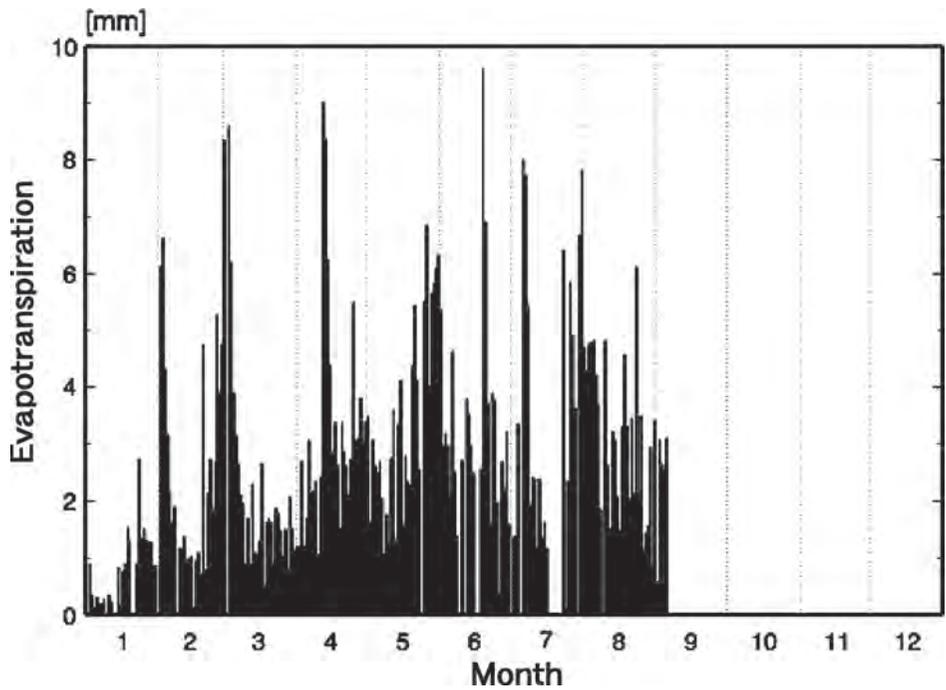
第8図 気圧の日平均値の季節変化



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 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	159	119	85	46	25	30	14	16	65	85	113	99
NNE	61	53	48	37	34	21	20	8	67	79	57	51
NE	26	29	33	17	10	17	14	11	36	37	23	22
ENE	18	14	13	21	17	23	13	21	46	48	23	22
E	17	45	19	50	32	36	36	47	104	85	49	26
ESE	47	86	81	85	126	170	200	134	152	129	101	33
SE	37	72	77	135	106	159	217	182	108	89	47	24
SSE	17	26	62	60	70	74	103	97	38	32	30	11
S	19	16	13	21	31	33	21	55	8	9	12	10
SSW	11	11	16	25	30	36	11	29	5	13	9	13
SW	23	14	37	39	71	28	26	48	27	7	10	19
WSW	16	13	27	45	110	23	21	40	15	13	26	30
W	13	20	25	19	16	8	15	14	4	12	18	49
WNW	47	23	35	23	14	19	15	15	12	19	32	97
NW	57	48	60	37	16	15	6	9	9	33	37	119
NNW	176	83	112	59	34	27	12	18	24	54	133	98
CALM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO DATA	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	21

ITEM WIND SPEED (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT (m/s)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.6	1.1	* 1.2	0.9	1.4	1.0	0.8	1.3	0.6	0.7	0.8	0.5
2	0.6	1.2	0.8	1.6	2.4	0.7	0.8	1.0	0.8	0.6	1.0	0.6
3	1.2	1.4	1.2	2.3	1.2	1.9	0.9	0.9	1.0	0.5	0.6	0.6
4	1.0	1.7	0.8	1.0	1.3	1.3	0.9	0.8	0.9	0.8	0.5	0.5
5	0.8	1.3	0.7	1.5	1.3	0.9	1.0	1.1	0.9	1.3	0.5	0.6
6	0.6	0.7	1.0	1.5	1.7	1.1	0.8	1.0	1.4	2.1	0.4	***
7	0.9	1.1	2.1	2.2	1.3	1.2	0.8	1.0	0.9	1.0	1.5	* 0.6
8	1.1	1.0	1.0	1.7	2.3	0.8	1.1	0.9	1.3	1.5	0.8	1.3
9	0.6	1.4	1.6	1.6	1.4	1.0	0.8	1.3	1.0	0.6	0.5	1.4
10	4.3	0.7	0.9	0.8	1.3	0.6	0.6	1.2	0.8	0.5	0.6	0.6
11	0.8	1.1	0.9	0.9	1.5	1.1	0.6	1.1	1.2	0.5	0.5	0.6
12	0.8	1.9	2.2	0.8	1.4	0.9	0.3	1.0	1.2	0.6	1.2	0.6
13	0.6	0.8	1.8	1.3	1.0	1.0	0.3	0.8	0.7	1.1	0.5	0.7
14	1.1	0.6	1.2	2.5	0.8	0.9	0.4	1.0	0.8	0.9	0.7	0.5
15	0.9	1.7	1.1	2.4	0.9	1.0	0.7	1.5	1.2	1.1	1.1	0.7
16	0.7	1.7	1.2	1.2	0.4	0.9	0.8	1.2	0.8	1.1	0.7	0.6
17	0.9	1.0	2.6	1.2	0.6	0.6	0.7	1.1	1.0	0.5	0.5	0.6
18	0.9	1.1	0.9	1.0	0.8	1.0	0.5	1.3	1.7	1.1	0.4	1.0
19	1.9	0.8	1.7	3.0	0.7	0.7	0.6	1.0	1.0	0.6	0.5	0.5
20	0.6	0.9	2.5	* 3.1	1.3	0.8	0.8	1.1	0.7	0.4	0.7	0.9
21	0.6	0.9	1.3	1.4	1.1	0.8	0.5	1.0	0.9	1.2	0.5	0.8
22	1.0	0.8	1.1	1.0	1.4	0.4	0.4	0.8	1.0	0.7	0.5	0.6
23	2.2	1.5	1.1	1.1	1.2	0.7	0.6	0.8	1.8	1.8	0.8	0.7
24	1.9	1.9	1.3	1.3	1.1	1.0	0.7	0.8	1.2	1.9	0.7	0.9
25	0.6	1.0	2.4	1.3	1.2	0.9	0.6	1.0	1.2	1.3	0.5	* 0.5
26	1.5	1.0	* 1.2	1.0	1.0	0.6	0.7	0.6	2.0	0.6	0.5	* 2.3
27	0.9	1.1	1.7	1.2	1.1	0.6	1.1	0.7	0.7	0.7	1.5	2.5
28	0.8	1.1	1.2	1.0	1.2	0.6	1.1	0.7	0.7	0.5	1.3	1.0
29	0.8	...	2.1	0.8	1.6	0.9	1.2	0.7	1.0	0.5	0.6	2.2
30	0.9	...	1.6	1.1	1.3	0.5	1.6	0.6	0.6	0.9	0.9	1.3
31	1.2	...	1.9	...	0.9	...	1.4	0.8	...	0.5	...	0.5
MEAN	1.1	1.2	1.4	1.5	1.2	0.9	0.8	1.0	1.0	0.9	0.7	0.9

ITEM WIND SPEED (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT (m/s)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.5	2.6	4.8	2.1	2.9	2.3	2.5	2.9	2.4	2.4	2.4	1.8
2	2.0	2.9	3.0	3.9	4.9	1.8	2.8	1.9	2.2	2.3	2.9	2.1
3	3.1	3.1	* 2.3	7.4	2.6	5.0	2.8	1.8	2.8	1.8	2.3	1.7
4	3.5	4.0	2.2	2.3	3.4	3.3	3.0	1.9	2.5	2.3	2.0	1.5
5	2.1	4.1	2.0	3.1	3.1	2.5	3.6	2.4	2.6	3.3	1.9	1.8
6	2.0	1.6	2.7	3.9	4.0	2.8	2.5	2.1	4.1	5.7	1.2	***
7	2.5	2.1	4.1	4.1	3.5	3.1	2.5	2.0	2.3	4.0	5.6	* 1.8
8	3.1	2.7	2.2	4.3	5.0	2.3	3.3	2.2	3.6	6.3	2.3	3.0
9	1.8	4.5	3.5	3.9	2.8	3.5	2.8	3.5	2.4	2.3	1.8	2.8
10	1.6	1.9	2.1	1.7	3.0	1.8	1.9	2.9	2.1	1.9	2.0	1.3
11	2.3	2.6	2.4	2.0	3.9	3.1	2.1	2.4	3.3	1.8	1.8	1.7
12	2.5	4.3	4.7	1.8	3.2	2.4	1.4	2.5	3.0	2.3	4.8	1.7
13	1.6	2.1	3.9	2.5	2.8	2.7	1.3	1.7	2.3	3.2	2.3	2.2
14	2.9	1.6	3.0	4.8	2.2	2.5	1.7	2.5	2.5	2.9	2.4	1.7
15	2.2	3.6	2.9	4.5	2.5	3.0	2.3	3.3	3.4	3.4	3.3	* 1.9
16	1.7	3.3	2.9	2.2	1.5	2.7	2.8	2.8	2.4	3.2	2.4	1.8
17	2.2	2.0	7.5	2.8	1.8	1.7	2.4	2.7	2.9	1.8	1.7	1.8
18	2.4	2.4	2.4	2.5	2.0	2.8	1.7	3.2	5.0	3.1	1.4	2.7
19	5.3	1.6	3.8	3.9	2.0	1.9	2.2	2.2	3.1	2.0	1.7	1.4
20	2.1	2.0	7.9	5.0	* 3.4	2.5	2.9	2.9	2.3	1.4	2.8	2.1
21	1.4	1.9	4.1	3.0	2.6	2.3	1.9	2.3	2.8	3.4	1.8	1.8
22	2.0	1.8	2.5	2.4	3.8	1.4	1.6	2.0	3.0	2.0	1.8	1.8
23	6.7	3.3	2.4	2.5	3.6	2.2	2.1	2.0	4.5	4.2	1.8	2.0
24	5.9	3.6	2.9	2.8	2.7	3.1	2.4	1.9	3.8	6.2	2.2	2.3
25	2.1	2.7	2.9	* 2.6	2.8	2.9	2.3	2.5	3.5	4.1	2.1	* 2.4
26	4.8	2.3	1.9	2.2	2.9	2.0	2.2	1.9	5.0	1.9	1.9	* 4.7
27	2.3	2.4	3.5	2.7	2.9	* 1.9	3.1	2.0	2.4	2.4	3.9	8.0
28	2.3	2.1	2.7	2.1	3.3	2.1	2.4	1.8	2.3	1.9	2.8	3.1
29	2.3	...	6.3	2.2	4.4	2.8	2.6	1.9	2.9	1.4	1.9	7.0
30	2.3	...	4.0	2.7	* 3.1	1.7	3.5	1.6	2.1	2.5	2.2	4.2
31	2.9	...	5.6	...	2.7	...	3.1	1.9	...	2.0	...	1.6
MEAN	2.7	2.7	3.5	3.1	3.1	2.5	2.4	2.3	3.0	2.9	2.4	2.5

ITEM MOMENTUM FLUX (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT x 0.1 (m/s)<sup>2</sup>  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-0.072	***	***	-0.229	-0.417	-0.313	***	-0.172	-0.117	-0.131	-0.207	-0.373
2	-0.050	-0.237	***	-0.520	-0.982	-0.180	-0.440	-0.087	-0.177	***	-0.194	-0.101
3	-0.255	-0.242	-0.460 *	-0.947	-0.470	-0.700	-0.330	-0.211	-0.288	-0.090	-0.116	-0.100
4	-0.144	-0.327	-0.404 *	-0.270	-0.333	-0.319	-0.452	-0.242	-0.210	-0.131	-0.105	-0.077
5	-0.137	-0.346	-0.093	***	-0.358	-0.174 *	-0.391	-0.212	-0.280	-0.232	-0.102	-0.247
6	-0.117	-0.113 *	-0.170 *	-0.409	-0.567	-0.423	-0.329	-0.126	-0.515	***	-0.065	***
7	-0.128	-0.277	-0.819	-0.717	-0.574	-0.301	-0.277	-0.184	-0.207	***	-1.393 *	-0.043
8	-0.170	-0.221	-0.219	-0.452	-1.269	-0.192	-0.492	-0.153	-0.364	-2.166	-0.187	-0.401
9	-0.114	-0.283	-0.535	-0.647	-0.339	***	-0.272 *	-0.418	-0.210	-0.248	-0.215	***
10	* -0.108	-0.074	-0.099 *	-0.109 *	-0.378	-0.149	-0.169	-0.319	-0.211	-0.156	-0.121	-0.121
11	-0.129	-0.349	-0.220 *	-0.199 *	-0.516	-0.416	-0.281	-0.170	-0.369	-0.144 *	-0.157	-0.134
12	-0.161	-0.488 *	-1.052	***	-0.197	-0.320	-0.112	-0.141 *	-0.317	-0.175	-1.204	-0.063
13	-0.052	-0.116 *	-0.335 *	-0.465 *	-0.113	-0.281	-0.093	-0.215	-0.327	-0.324	-0.152	-0.099
14	* -0.306	-0.135 *	-0.174	***	***	-0.249	-0.208	-0.179 *	-0.360 *	-0.205	-0.248 *	-0.105
15	-0.269	-0.815	*** *	-0.844	-0.191	***	-0.255	-0.246	-0.282 *	-0.276 *	-0.372 *	-0.294
16	-0.112	-0.384	*** *	-0.335	-0.084	***	-0.320	-0.197	-0.145	-0.318	***	-0.085
17	-0.203	-0.243 *	-0.889 *	-0.232	-0.115	-0.205	*** *	-0.284 *	-0.353	-0.141	-0.086	-0.090
18	-0.141	-0.324	-0.305	-0.237	-1.078	***	***	-0.361 *	-0.869	-0.326 *	-0.110	-0.196
19	-0.504	-0.134	-0.407	***	***	-0.241	***	-0.217	-0.467	-0.117	***	-0.050
20	-0.134 *	-0.254	-0.796	*** *	-0.778	-0.252	-0.299	-0.217	-0.188	-0.087	***	-0.125
21	* -0.170	-0.128 *	-0.208 *	-0.347	***	-0.194 *	-0.215	-0.152	-0.267	-0.359	-0.211	-0.141
22	***	-0.188 *	-0.310	-0.187	-0.600	-0.067	-0.107	-0.122	-0.246 *	-0.161	-0.184	-0.082
23	-0.330	-0.677	***	-0.337	-0.546	-0.281	-0.177	-0.140	-0.494	***	-0.072	-0.270
24	-0.295	-0.418	*** *	-0.499	***	-0.426	-0.222	-0.114	-0.321	***	-0.130	-0.280
25	-0.090	-0.369	*** *	-0.411	***	-0.294	-0.191	-0.217	-0.371	-0.392	-0.099 *	-0.083
26	-0.419	***	***	-0.381	-0.371	-0.134	-0.282	-0.153	***	-0.146	-0.188 *	-1.009
27	-0.145	-0.341	*** *	-0.327	-0.359	-0.246	-0.428	-0.084	***	-0.139	***	-0.704
28	-0.167	-0.221	***	-0.216	***	-0.204	-0.120	-0.102	-0.188	-0.083	-0.108	-0.167
29	-0.113	...	***	-0.424	-0.821	-0.451 *	-0.151	-0.166	-0.172	-0.239	-0.222	-0.585
30	-0.169	...	* -0.325	-0.265	-0.343	-0.165	-0.244	-0.070	-0.139	-0.202	-0.232	-0.254
31	-0.356	...	-0.602	...	-0.452	...	-0.210	-0.186	...	-0.088	...	-0.117
MEAN	-0.185	-0.296	-0.421	-0.400	-0.450	-0.276	-0.262	-0.189	-0.302	-0.272	-0.249	-0.221

ITEM MOMENTUM FLUX (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT x 0.1 (m/s)<sup>2</sup>  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-0.515	***	***	-1.022	-1.942	-2.120	-1.150	-1.547	-0.444	-0.836	-0.922	-0.401
2	-0.618	-1.865 *	-1.450 *	-2.477	-3.654	-0.666	-1.565	-1.001	-1.184 *	-1.926	-1.294	-0.972
3	-3.717	-3.938 *	-1.172 *	-11.960	-2.345	-4.224	-1.512	-1.113	-1.874	-0.466	-0.587	-0.536
4	-2.822	-6.932	-0.896	-1.258	-1.949	-1.934 *	-2.302	-0.969	-1.347	-0.778	-0.538	-0.567
5	-1.929	-5.357	-0.726	-1.531	-2.306	-1.123	-2.203	-2.243	-1.956	-1.989	-0.543	-0.661
6	-0.637	-0.469 *	-1.168	-4.900	-3.695	-1.634	-1.298	-1.664	-3.093	***	-0.398	***
7	-1.918	-1.525	-3.037	-3.279	-2.201	-1.673	-1.550	-1.697	-1.101	***	-7.488 *	-0.496
8	-3.271	-1.562	-1.455	-6.274	-4.544	-1.337	-2.574	-1.358	-2.261	-10.999	-1.104	-1.402
9	-0.588	-5.857 *	-2.717	-3.706	-1.768 *	-2.134	-1.202 *	-2.144	-1.314 *	-1.172	-0.580 *	-1.868
10	-0.520	-0.787	-1.086	-0.507	-2.251	-0.682	-0.676	-2.047	-0.813	-0.557	-0.566	-0.512
11	-1.276	-1.018	-1.046 *	-0.909	-2.691	-1.569 *	-0.945	-1.502	-2.273	-0.788	-0.787	-0.429
12	-1.717	-8.657	-4.409 *	-1.001	-2.113	-1.596	-0.476	-0.932	-1.743	-1.028	-6.265	-0.614
13	-0.590	-0.701	-4.223	-1.524	-1.430	-1.621	-0.372	-0.836	-1.543	-2.063	-0.982	-0.713
14	***	-0.554	-2.210	-3.813	-1.405	-1.524	-0.662	-1.935 *	-2.226 *	-1.523	-1.167	-0.519
15	-1.128	-2.859	-1.686	-3.867	-1.743	-3.126	-1.253	-2.141	-2.168	-2.016	-3.325	***
16	-0.499	-1.611	-2.261	-1.682	-0.373	***	-1.417	-1.412	-0.942	-2.715	-0.922	-0.565
17	-1.813	-1.225 *	-12.245	-2.719	-0.798	-0.908	-0.966	-1.658	-1.763	-0.629	-0.442	-0.477
18	-2.156	-1.399	-1.727	-1.339	-0.671 *	-1.776	-0.602	-2.229	-4.270	-1.946	-0.257	-2.548
19	-8.697	-0.608	-7.865	-2.660 *	-1.219	-0.824	-0.924	-1.933	-1.631	-0.681	***	-0.475
20	-0.533	-0.953 *	-13.043	-5.751 *	-2.594	-1.349	-1.457	-1.546	-0.927	-0.425	***	-0.820
21	-0.579	-0.901	-3.676 *	-3.081	-2.239	-0.920 *	-0.586	-1.443	-1.708	-2.385	-0.319	-0.910
22	-0.770	-0.670	-1.986	-1.347	-2.759	-0.423	-0.530	-1.178	-1.573	-0.836	-0.646	-0.755
23	-8.927	-2.655	-1.306	-1.455	-2.638	-1.103	-0.849	-0.920	-4.309	-4.601	-0.804	-0.788
24	-6.648	-2.258	-2.542	-1.986	-2.400	-2.434	-1.054	-0.964	-2.457	***	-1.010	-0.849
25	-0.838	-1.493	-2.137 *	-1.342	-2.647	-1.418	-0.882	-1.819	-2.397	-6.199	-0.505	***
26	-7.489 *	-1.151	-0.652	-1.225	-1.743	-0.676	-1.620	-0.556	-5.337	-0.658	-0.516	***
27	-1.105	-1.785	-3.504	-1.362 *	-2.716 *	-0.863	-1.869	-0.556	***	-0.708 *	-2.915	***
28	-1.305	-0.932	-2.254	-1.267	***	-0.871	-1.653	-0.849	-1.081	-0.583	-1.671	-2.883
29	-0.608	...	-11.878	-1.521	-3.496	-2.291	-1.616	-0.753	-1.360	-0.422	-0.711	-11.401
30	-0.973	...	* -5.053	-1.582 *	-2.844	-0.620	-2.670	-0.449	-0.721	-1.145	-0.789	-4.222
31	-1.492	...	-10.004	...	-1.597	...	-2.127	-1.486	...	-0.528	...	-0.324
MEAN	-2.189	-2.212	-3.647	-2.612	-2.226	-1.498	-1.308	-1.383	-1.925	-1.807	-1.359	-1.412

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT x 0.1 (°C m/s)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.06	***	***	0.50	0.34	0.24	***	0.25	-0.02	0.04	0.06	0.34
2	-0.02	-0.06	***	0.12	-0.05	0.09	0.01	0.35	0.22	***	0.01	0.16
3	0.05	0.11	0.21 *	-0.04	0.57	0.22	0.07	0.69	0.29	0.10	0.07	0.19
4	0.00	0.17	0.72 *	0.40	0.51	0.16	0.15	0.69	0.28	0.05	0.05	0.23
5	0.04	0.25	0.34	***	0.47	0.13	* 0.01	0.71	0.20	-0.07	0.07	0.24
6	0.06	0.06	* 0.18	* 0.46	0.42	0.16	0.11	0.62	-0.01	***	0.06	***
7	0.13	0.01	0.25	0.31	-0.12	0.14	0.08	0.65	0.10	***	-0.28	* 0.05
8	0.08	0.09	0.36	0.13	0.18	0.03	0.17	0.23	0.07	-0.02	0.19	0.01
9	0.15	0.21	0.29	0.42	* 0.20	***	0.01 *	-0.01	0.11	0.20	0.43	***
10	0.34	0.29	0.02	* 0.04	* 0.04	0.14	0.03	0.55	0.11	0.22	0.13	0.16
11	0.15	0.24	0.40	* 0.06 *	-0.03	0.01	0.00	0.34	0.12	0.12	* -0.03	0.16
12	0.14	0.20	* 0.29	***	0.29	0.30	0.01	0.13	* -0.05	0.09	0.12	0.01
13	0.01	0.29	* 0.37	* 0.13	* 0.03	0.12	0.08	0.37	-0.08	0.03	0.26	0.07
14	* 0.02	0.25	* 0.46	***	***	0.09	0.10	0.35	* 0.15	* 0.11	0.11	* 0.00
15	0.09	0.19	***	* 0.49	0.31	***	0.11	0.27	0.00	* -0.01	* -0.01	* 0.09
16	0.06	-0.03	***	* 0.29	0.04	***	-0.03	0.16	0.13	0.04	***	0.08
17	0.08	0.03	0.07	* 0.59	0.13	0.10	***	* 0.19	* 0.04	0.19	0.09	0.04
18	0.05	0.27	0.30	0.41	0.11	***	***	0.32	* -0.17	0.06	* 0.43	0.10
19	0.09	0.18	0.14	***	***	0.22	***	0.32	-0.01	0.14	***	0.05
20	0.10	* 0.06	0.40	***	* -0.05	0.09	0.03	0.17	0.11	0.04	***	0.07
21	* 0.04	0.03	* 0.13	* 0.28	***	0.01	* 0.08	0.37	0.14	0.11	0.06	0.07
22	***	0.15	* 0.21	0.46	0.08	0.02	0.05	0.22	0.06	* 0.12	0.18	0.02
23	-0.25	0.16	***	0.23	0.06	0.13	0.04	0.19	0.04	***	0.06	-0.05
24	-0.26	0.01	***	* 0.28	***	0.19	0.00	0.15	0.06	***	0.15	0.08
25	0.03	0.21	***	* 0.23	***	0.04	0.04	0.27	0.06	0.06	0.28	* 0.45
26	-0.01	***	***	0.38	-0.01	-0.01	0.32	-0.05	***	0.14	0.12	* -0.13
27	0.16	0.08	***	* 0.11	-0.06	0.22	0.41	0.04	***	-0.02	***	-0.18
28	0.18	0.07	***	0.46	***	0.05	0.31	0.04	0.10	0.07	-0.02	-0.01
29	0.16	...	***	0.07	0.06	0.05	* 0.50	0.22	-0.05	0.16	* 0.16	0.04
30	0.11	...	* 0.36	0.36	0.29	0.05	0.50	0.08	0.03	0.08	-0.02	0.05
31	-0.01	...	0.57	...	0.24	...	0.59	0.17	...	0.06	...	0.15
MEAN	0.06	0.14	0.30	0.29	0.16	0.11	0.14	0.29	0.07	0.08	0.11	0.09

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)  
 UNIT x 0.1 (°C m/s)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.06	***	***	0.61	0.55	0.48	0.05	0.16	-0.06	0.05	0.08	0.11
2	-0.03	0.01	* 0.82	* 0.10	-0.10	0.18	0.16	0.27	0.28	* 0.05	0.03	0.19
3	0.12	0.22	0.30	* 0.92	0.75	0.35	0.20	0.57	0.36	0.08	0.12	0.18
4	-0.01	0.41	0.36	0.43	0.71	0.26	* 0.35	0.49	0.32	0.02	0.10	0.24
5	0.06	0.50	0.48	-0.06	0.68	0.22	-0.02	0.55	0.39	-0.20	0.14	0.14
6	0.04	0.03	* 0.23	0.69	0.72	0.35	0.15	0.49	-0.01	***	0.12	***
7	0.19	-0.02	0.34	0.41	-0.10	0.12	0.19	0.41	0.11	***	0.00	* 0.03
8	0.21	0.13	0.43	0.26	0.19	0.09	0.37	0.17	0.10	0.48	0.16	-0.04
9	0.14	0.53	* 0.38	0.57	0.36	* -0.17	0.03	* -0.14	0.18	* 0.26	0.22	* -0.04
10	0.14	0.40	0.05	0.07	0.05	0.17	0.06	0.55	0.17	0.26	0.19	0.16
11	0.18	0.27	0.47	* 0.06	-0.10	-0.03	* 0.09	0.31	0.18	0.17	0.02	0.16
12	0.21	0.50	0.44	* -0.08	0.44	0.28	0.01	0.07	-0.05	0.18	0.22	0.00
13	-0.01	0.38	0.53	0.24	0.00	0.22	0.13	0.32	-0.08	0.09	0.26	0.11
14	***	0.28	0.46	0.31	0.24	0.18	0.20	0.29	* 0.03	* 0.16	0.08	0.00
15	0.13	0.20	0.57	0.56	0.43	0.00	0.24	0.23	-0.01	0.03	0.20	***
16	0.06	-0.02	0.23	0.25	0.02	***	0.01	0.09	0.14	0.00	0.14	0.09
17	0.14	0.07	* 0.55	0.69	0.15	0.14	-0.02	0.07	0.03	0.24	0.12	0.04
18	0.12	0.41	0.37	0.49	0.12	* 0.10	0.00	0.32	-0.18	0.13	0.24	0.21
19	0.36	0.20	0.55	0.26	* 0.05	0.28	-0.07	0.32	0.08	0.25	***	0.02
20	0.10	0.09	* 0.89	0.21	0.36	0.21	0.09	0.10	0.20	0.10	***	0.08
21	0.07	0.05	0.38	* 0.27	0.54	0.04	* 0.00	0.42	0.22	0.16	0.21	0.11
22	0.06	0.27	0.47	0.55	0.27	0.04	0.09	0.20	0.07	0.15	0.18	0.04
23	0.01	0.21	0.21	0.31	0.10	0.22	0.08	0.16	0.19	-0.18	0.03	0.14
24	0.06	-0.01	0.65	0.35	0.29	0.46	-0.02	0.12	-0.17	***	0.15	0.16
25	0.17	0.32	0.66	* 0.22	0.53	0.08	0.03	0.28	0.21	0.25	0.31	***
26	0.27	* 0.13	0.14	0.45	0.06	0.01	0.33	-0.03	-0.20	0.19	0.08	***
27	0.06	0.16	0.66	0.13	* 0.01	0.37	0.36	-0.03	***	* -0.01	* -0.15	***
28	0.19	0.10	0.44	0.62	***	0.16	0.23	0.01	0.16	0.15	-0.06	-0.01
29	0.20	...	1.08	0.15	0.27	0.37	0.36	0.32	-0.06	0.08	0.15	0.48
30	0.23	...	* 0.54	0.47	0.48	0.15	0.39	0.05	0.12	0.11	-0.04	0.08
31	-0.03	...	1.04	...	0.51	...	0.50	0.31	...	0.08	...	0.15
MEAN	0.12	0.22	0.49	0.35	0.29	0.18	0.15	0.24	0.10	0.12	0.12	0.11

ITEM SHORT-WAVE RADIATION (1.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PYRANOMETER (GORCZYNSKI TYPE) (MS-43F: MS-402F since Mar 20, 2006)  
 UNIT (W/m²)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	52.5	13.7	33.4	253.2	256.0	291.7	127.9	105.8	38.4	104.4	145.5	114.6
2	20.0	100.0	45.3	71.7	34.6	161.8	144.3	154.6	252.8	56.6	95.9	120.2
3	131.1	144.0	140.7	279.1	315.1	185.6	169.7	282.0	256.4	117.3	128.8	122.1
4	88.4	160.0	228.2	245.1	289.5	192.6	253.0	287.4	234.2	98.9	87.0	125.5
5	73.3	181.6	205.2	25.5	278.2	149.0	50.1	292.6	250.0	35.0	110.5	88.5
6	80.9	41.8	137.6	281.0	267.7	220.6	121.6	264.4	49.8	15.9	68.3	96.3
7	120.3	29.8	134.1	138.3	62.2	200.5	171.7	267.6	104.3	154.6	127.7	44.4
8	138.1	170.8	211.6	121.3	84.8	90.2	242.5	119.8	104.8	218.0	156.9	40.6
9	118.8	* 189.6	185.3	250.2	148.4	50.3	78.4	60.2	128.5	210.4	149.9	9.7
10	62.1	184.3	51.8	45.2	86.5	203.2	109.1	285.6	184.9	192.6	130.6	120.1
11	139.6	180.5	221.2	53.1	73.5	51.4	124.1	162.3	162.3	120.3	19.3	122.8
12	135.6	185.7	126.3	34.7	232.7	187.0	88.4	77.3	43.5	147.7	156.1	29.0
13	18.3	189.4	221.0	118.0	49.9	148.6	149.4	198.9	21.3	126.8	152.6	88.7
14	25.0	166.5	223.8	139.2	137.1	148.8	223.4	186.2	76.2	148.8	138.1	***
15	135.3	161.1	251.3	237.7	249.3	103.8	239.8	149.7	153.8	135.5	121.0	***
16	59.3	21.2	120.1	115.0	60.2	49.5	99.0	114.9	166.1	188.1	137.7	78.5
17	111.4	45.2	150.4	290.3	133.1	165.1	36.2	135.8	87.3	152.9	81.2	48.3
18	124.2	194.2	184.6	241.0	120.4	80.6	49.2	269.5	82.3	138.9	127.5	121.7
19	152.8	105.9	162.7	126.3	52.9	234.2	47.9	224.2	163.2	165.9	20.0	33.6
20	105.3	55.0	258.4	124.0	189.3	220.6	121.1	154.7	229.4	78.2	56.1	66.7
21	28.3	58.8	218.7	204.6	318.5	70.5	49.4	250.3	205.2	148.5	130.8	46.3
22	167.4	139.2	185.2	268.9	174.5	82.0	96.4	169.0	136.7	127.4	112.6	25.1
23	164.9	120.2	102.6	126.6	119.9	210.1	102.7	172.6	200.4	24.1	60.5	115.6
24	164.7	25.3	240.3	203.4	199.1	286.8	48.9	139.2	227.9	39.6	125.2	116.0
25	153.0	194.7	244.2	142.8	324.4	118.7	108.1	231.6	185.8	163.0	135.1	83.0
26	154.8	30.2	92.8	212.2	98.1	55.1	282.8	48.1	82.1	169.0	60.6	8.1
27	144.7	95.1	244.5	103.0	81.6	248.0	240.2	74.1	54.7	44.1	26.9	121.7
28	157.0	47.5	158.2	296.1	62.3	191.7	140.0	89.7	199.7	120.4	39.3	111.5
29	154.2	...	247.7	119.5	212.4	282.6	205.0	241.1	95.8	78.5	114.9	128.8
30	129.1	...	229.3	248.8	261.6	172.4	238.1	102.0	142.2	147.6	38.6	125.1
31	26.7	...	253.3	...	311.5	...	231.6	245.0	...	111.4	...	118.3
MEAN	107.6	115.4	177.5	170.5	170.5	161.8	141.6	179.2	144.0	121.9	101.8	85.2

ITEM NET RADIATION (1.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT NET RADIOMETER (MIDDLETON TYPE) (CN-11)  
 UNIT (W/m<sup>2</sup>)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	17.2	5.7	21.2	114.5	143.5	105.5	93.1	64.5	9.7	61.0	65.8	***
2	-6.2	33.5	18.8	32.8	13.0	60.0	101.2	91.1	168.5	42.9	35.8	***
3	39.6	* 43.1	60.1	* 115.9	168.1	72.3	126.6	163.9	176.8	76.7	49.8	***
4	5.8	29.4	85.4	112.5	161.4	60.8	188.8	161.6	173.1	66.0	31.5	***
5	-1.3	50.7	76.2	1.3	156.1	* 34.4	36.5	168.1	186.6	20.4	40.1	***
6	6.2	9.5	55.6	145.0	156.5	167.8	99.6	154.6	37.7	11.0	33.2	***
7	17.7	13.4	68.5	79.7	43.5	136.1	130.9	160.1	83.2	102.7	32.6	***
8	20.7	56.3	77.3	41.0	73.3	59.0	188.6	* 60.3	83.9	* 51.2	48.2	***
9	26.4	* 80.1	70.2	106.7	111.6	27.9	56.4	42.1	100.8	107.4	53.1	***
10	21.4	57.4	22.7	19.7	59.9	***	76.8	211.2	135.9	116.8	* 60.4	***
11	35.6	54.7	99.3	34.7	42.2	***	92.3	115.4	125.9	71.1	2.3	***
12	28.4	* 46.4	* 46.8	22.4	147.5	***	58.2	45.7	32.1	79.4	***	***
13	3.2	61.8	* 79.9	80.7	32.2	111.3	112.0	146.2	13.1	* 75.7	52.7	***
14	19.8	59.3	73.8	76.2	92.6	106.9	169.4	124.8	55.5	* 101.4	49.5	***
15	51.7	62.8	98.5	124.9	150.0	67.8	181.0	123.6	94.1	***	***	***
16	24.6	9.1	* 50.3	80.2	25.7	35.4	70.9	93.2	105.1	***	***	32.8
17	33.1	21.1	* 39.6	156.7	85.4	131.5	25.5	109.6	67.8	***	***	-0.7
18	13.5	70.9	77.9	120.4	85.2	65.3	38.7	208.2	50.5	***	***	27.0
19	* 2.5	47.7	* 65.0	59.0	42.4	183.8	37.1	173.1	107.9	***	***	-5.0
20	16.2	15.8	96.6	* 77.4	139.8	159.6	87.6	104.6	138.6	44.4	***	23.8
21	-2.5	27.3	75.6	109.6	201.6	49.7	34.3	185.5	131.2	* 85.4	***	22.9
22	-5.4	55.8	82.6	138.9	109.9	54.3	70.0	129.3	95.5	80.4	***	-2.1
23	-38.4	51.2	58.8	78.4	75.1	146.4	75.2	138.9	118.3	***	***	31.9
24	-21.5	2.2	120.6	142.0	132.8	205.9	35.2	110.2	123.1	31.8	***	33.1
25	20.7	75.5	113.2	78.3	202.7	80.9	83.5	180.8	103.3	100.6	***	13.9
26	* 21.4	16.2	30.6	114.5	58.9	34.9	191.6	31.0	52.6	83.6	***	6.4
27	37.1	47.7	114.0	65.5	54.2	184.6	170.7	55.0	29.5	15.0	***	40.3
28	34.8	19.7	82.6	165.3	44.0	132.4	91.8	69.3	128.3	53.0	***	8.2
29	40.2	...	115.6	53.5	138.1	198.9	133.4	181.9	54.1	41.8	***	46.3
30	32.8	...	84.3	147.2	183.7	119.7	163.2	63.3	71.9	66.2	***	***
31	5.7	...	* 100.0	...	196.8	...	141.8	167.3	...	37.9	...	***
MEAN	16.2	40.2	72.9	89.8	107.3	103.4	102.0	123.7	95.2	65.0	42.7	19.9

ITEM SOIL HEAT FLUX (0.02 m DEPTH)  
 INSTRUMENT SOIL HEAT FLUX METER (CPR-PHF-01)  
 UNIT (W/m<sup>2</sup>)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-1.7	0.3	-0.4	2.5	10.9	3.7	2.6	-3.3	-6.7	-2.3	-2.8	-13.7
2	-2.8	-0.5	0.0	2.5	-4.6	0.8	3.9	5.1	-0.8	-3.3	-4.7	-13.9
3	-5.6	-1.2	0.3	0.0	2.7	-0.7	2.4	14.8	-0.4	0.3	-5.0	-16.4
4	-6.8	-8.8	-2.3	4.9	4.2	-1.3	1.2	13.1	-0.3	-0.3	-6.0	-16.3
5	-5.6	-9.2	-2.1	-2.7	5.4	-0.9	-1.9	11.9	3.3	-2.9	-3.9	-14.1
6	-5.3	-7.2	2.8	1.2	5.9	3.9	1.4	11.9	-3.9	-7.4	-3.5	-13.0
7	-5.7	-0.5	4.1	0.6	3.0	1.7	4.2	12.8	1.4	-1.9	-3.7	-8.0
8	-6.1	-0.8	3.1	0.4	-1.0	-0.7	4.0	0.7	1.4	-6.4	-11.5	-1.1
9	-4.1	* -6.4	0.0	3.5	3.8	-1.1	0.1	1.5	2.7	-6.4	-9.2	-7.7
10	-2.3	-4.9	0.6	-1.1	5.8	5.6	3.3	12.9	4.7	-3.3	-2.1	-1.3
11	-3.1	-1.1	5.0	3.8	6.6	-0.7	4.2	5.3	0.2	-1.4	-2.8	-10.2
12	-4.4	-3.5	1.1	7.5	1.1	4.2	3.4	-1.7	-4.4	-1.7	-9.9	-9.2
13	-2.4	-2.9	-2.2	9.7	-5.6	3.0	4.6	6.8	-6.8	-3.9	-11.5	0.2
14	2.7	0.8	-5.6	0.7	3.9	2.7	4.5	5.4	-5.3	-6.1	-3.0	***
15	4.3	8.1	-1.3	-0.4	4.1	3.0	4.3	5.7	-3.7	-6.3	-2.5	***
16	1.5	1.0	2.8	1.2	-0.5	2.4	1.2	5.4	-3.8	-1.7	-8.1	1.4
17	-1.3	1.0	0.9	4.1	2.8	6.0	-2.5	8.8	-1.9	-2.3	-13.1	-7.1
18	-5.4	1.1	1.7	3.5	4.6	-1.3	-3.6	9.3	4.0	-3.2	-10.0	-16.0
19	-5.6	2.4	-0.2	2.7	5.2	6.1	-3.1	7.0	4.2	-3.1	-6.5	-13.4
20	-6.2	-2.5	-4.3	-2.2	10.3	3.2	-1.4	2.1	-2.0	-2.8	1.2	-4.1
21	-3.4	2.1	-0.3	0.9	4.0	-0.8	-2.1	3.5	-3.5	-1.8	-4.4	-0.5
22	-3.2	4.4	0.9	1.3	1.2	0.9	1.0	1.4	-3.2	1.1	-6.8	-8.4
23	-4.4	4.1	4.1	2.5	1.9	4.7	2.8	1.9	-4.2	-3.4	-4.9	-12.5
24	-5.6	-3.5	4.6	9.3	3.1	3.5	1.3	2.9	-3.5	-10.9	-11.4	-7.9
25	-6.7	1.5	2.9	-3.8	2.1	0.8	1.6	0.5	-5.1	-0.2	-16.5	-9.1
26	-6.7	3.1	-0.1	0.4	-1.4	0.2	3.8	-3.6	-4.0	-2.9	-4.5	5.4
27	-4.3	3.1	3.5	1.5	0.2	5.2	1.2	-3.7	-2.2	-3.7	8.9	-5.9
28	-5.4	-4.1	5.1	7.8	3.7	3.9	5.6	-1.9	1.3	-1.8	-3.0	-12.5
29	-5.1	...	-7.1	-0.1	6.5	4.1	8.3	3.9	-2.2	-2.0	-1.9	-19.8
30	1.1	...	-2.4	7.6	5.0	3.5	5.3	-2.3	-0.7	-2.8	-14.2	-14.5
31	-1.8	...	-5.0	...	2.9	...	2.5	-1.1	...	-5.0	...	-13.6
MEAN	-3.6	-0.9	0.3	2.5	3.2	2.2	2.1	4.4	-1.5	-3.2	-5.9	-9.1

ITEM AIR TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.3	4.4	4.8	7.5	20.4	20.6	24.1	20.6	21.0	19.9	14.9	5.9
2	1.6	5.3	6.0	11.4	13.5	20.1	25.1	23.2	22.7	18.2	14.7	6.1
3	0.6	4.6	3.6	11.2	11.0	17.9	24.0	26.7	23.7	20.4	13.9	4.3
4	0.5	-1.3	2.8	12.2	15.4	16.9	23.0	27.9	24.0	20.3	14.0	2.6
5	-0.9	-2.2	4.6	9.6	17.6	17.2	21.5	27.7	26.0	19.8	14.9	2.6
6	-1.6	-2.0	8.5	9.3	18.7	18.9	22.3	27.4	22.5	17.7	14.3	3.6
7	-0.3	1.5	8.2	8.3	17.6	18.1	24.4	28.6	23.7	18.1	16.4	4.4
8	-0.3	4.5	8.6	10.3	14.0	18.1	24.5	25.7	24.7	18.4	10.8	8.2
9	-0.7	* 0.9	6.2	10.3	13.9	17.9	22.9	24.5	25.6	17.1	10.9	5.7
10	0.5	-0.7	7.7	8.7	17.4	20.8	24.6	27.1	27.9	18.8	13.4	7.0
11	1.4	2.7	10.0	11.9	19.9	18.5	26.0	25.8	24.7	18.4	13.3	5.7
12	1.1	0.9	9.4	15.4	15.2	19.2	26.1	24.0	21.5	18.7	10.2	4.3
13	0.5	1.5	4.1	15.9	12.0	20.1	26.9	25.2	18.3	17.3	8.4	7.4
14	5.4	4.6	3.3	11.4	14.7	20.8	27.2	27.0	18.4	16.0	12.5	***
15	8.3	10.2	6.2	8.7	17.0	21.5	27.3	25.7	19.9	15.2	12.7	***
16	6.9	6.7	9.0	8.4	16.1	21.6	25.4	26.3	19.8	17.8	9.5	10.3
17	5.1	4.8	11.1	12.6	16.5	23.3	22.5	28.1	20.7	17.4	6.6	8.8
18	2.3	2.8	8.8	14.5	17.2	20.0	20.9	29.6	24.3	16.5	6.9	5.1
19	2.1	5.4	8.8	13.7	18.5	22.2	20.4	29.0	25.6	16.8	8.0	3.1
20	-0.2	4.7	6.6	15.0	21.9	22.4	21.3	27.3	22.8	17.2	11.6	5.8
21	0.0	6.1	9.6	10.0	18.5	20.8	20.4	27.3	21.0	16.9	11.2	7.8
22	-1.6	8.2	7.3	11.6	19.6	21.5	22.4	27.1	20.7	18.0	10.4	6.5
23	-0.5	8.5	8.9	12.7	19.6	23.0	23.9	26.4	20.3	17.1	9.8	4.4
24	1.8	5.1	9.5	14.8	18.6	22.6	23.3	27.5	19.6	11.9	8.3	5.3
25	-0.4	5.1	8.1	8.2	15.6	22.0	23.7	26.6	18.8	15.3	4.4	4.8
26	1.3	7.6	10.6	11.0	17.8	21.6	25.9	23.9	19.1	15.5	7.0	8.9
27	1.7	7.5	9.1	11.3	17.6	24.2	24.9	23.7	19.3	15.9	14.1	13.8
28	0.4	3.2	12.2	13.4	19.4	25.0	25.4	24.2	20.7	15.9	11.6	9.2
29	1.3	...	7.0	14.1	21.2	25.4	26.4	26.8	20.6	16.5	11.8	4.4
30	5.3	...	5.9	16.4	20.1	25.4	23.3	24.6	20.3	15.4	8.1	4.5
31	3.7	...	5.2	...	20.4	...	21.9	24.8	...	15.3	...	1.8
MEAN	1.5	4.0	7.5	11.6	17.3	20.9	23.9	26.1	21.9	17.2	11.2	5.9

ITEM AIR TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.6	4.3	4.6	8.4	20.6	21.1	24.2	20.3	21.3	20.2	14.9	7.4
2	2.3	5.7	6.0	11.5	13.4	20.6	25.4	22.8	22.9	18.1	15.0	7.4
3	1.5	4.6	3.8	11.4	11.4	17.7	23.9	26.4	23.9	20.6	14.2	5.7
4	1.8	-0.8	3.7	13.1	15.3	16.7	23.1	27.9	24.3	20.4	14.8	4.2
5	0.0	-1.1	6.0	9.7	17.9	17.2	21.4	27.8	26.2	19.8	15.6	3.8
6	-0.7	-1.3	8.8	9.4	18.9	18.8	22.0	27.2	22.4	17.7	14.9	5.4
7	0.3	1.8	8.0	8.1	17.6	18.0	24.2	28.5	23.5	18.5	16.7	5.0
8	1.0	5.4	9.5	10.2	13.7	18.2	24.3	25.8	24.6	19.1	12.4	8.2
9	0.6	* 0.6	6.3	10.4	13.6	18.0	22.8	24.6	25.4	18.5	12.5	5.5
10	1.3	1.2	7.6	8.6	17.2	21.1	24.5	26.8	27.9	20.2	14.2	7.5
11	2.3	3.8	10.4	11.8	20.0	18.4	25.9	25.5	24.8	19.2	13.5	6.6
12	2.6	1.5	9.6	15.3	15.2	18.9	26.3	24.0	21.5	19.4	11.0	4.5
13	0.8	3.0	4.0	15.7	12.0	19.9	27.4	25.0	18.2	17.8	10.5	7.5
14	5.3	6.3	3.5	11.2	14.6	20.8	27.5	26.8	18.3	16.7	13.3	***
15	8.8	11.0	6.9	8.7	17.3	21.6	27.6	25.5	20.0	16.0	12.9	***
16	7.2	6.6	9.4	8.1	16.6	21.7	25.4	26.0	20.3	18.1	9.9	10.7
17	5.7	4.7	11.2	12.6	16.9	23.4	22.4	27.9	20.8	18.4	8.1	9.4
18	3.1	2.7	9.6	15.1	17.0	19.8	20.7	29.3	24.3	17.0	8.1	6.1
19	2.2	5.3	8.8	13.8	18.3	22.0	20.4	28.7	25.8	17.4	8.1	4.1
20	0.9	4.9	6.4	14.9	22.1	22.6	21.3	27.2	23.4	17.9	11.5	6.0
21	-0.1	6.2	10.0	10.2	18.8	20.9	20.4	27.1	21.6	17.2	12.3	7.7
22	-0.5	8.6	8.1	12.1	19.5	21.8	22.3	27.0	20.9	18.0	11.8	7.2
23	-0.3	8.7	8.7	12.9	19.6	23.1	23.8	26.3	20.3	17.1	10.0	6.1
24	2.6	5.0	9.4	14.5	18.5	22.8	23.1	27.4	19.7	11.9	8.9	6.3
25	1.7	5.8	8.1	8.5	16.0	21.9	23.7	26.5	19.3	15.5	6.3	5.6
26	2.9	7.5	11.1	11.4	17.9	21.5	26.1	23.9	19.1	16.1	7.3	8.8
27	3.4	7.4	9.3	11.5	17.6	24.6	24.8	23.8	19.6	16.2	14.0	13.8
28	2.2	3.1	11.9	13.3	19.3	25.3	25.2	24.3	21.0	16.3	11.6	9.9
29	2.5	...	7.2	14.5	21.1	25.8	26.0	27.0	21.0	17.1	12.3	4.3
30	5.8	...	6.0	16.7	20.1	25.6	22.9	24.9	20.5	16.2	8.7	5.0
31	4.3	...	5.6	...	21.1	...	21.6	25.2	...	16.0	...	3.6
MEAN	2.4	4.4	7.7	11.8	17.4	21.0	23.9	26.0	22.1	17.7	11.8	6.7

ITEM AIR TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.7	4.2	4.5	8.8	20.3	21.0	23.8	19.9	21.1	20.0	14.6	8.0
2	2.6	5.8	6.0	11.3	13.1	20.7	25.0	22.3	22.6	17.7	14.8	8.0
3	2.4	4.5	3.9	11.3	11.4	17.3	23.4	26.0	23.7	20.4	14.3	6.3
4	2.2	-0.7	4.0	13.4	15.1	16.4	22.7	27.7	24.2	20.3	15.1	5.0
5	0.4	-0.5	6.5	9.6	17.7	16.9	21.0	27.5	25.8	19.5	15.8	4.7
6	-0.3	-0.7	9.0	9.3	18.7	18.5	21.6	26.7	21.9	17.4	14.9	6.6
7	0.6	1.9	7.8	7.9	17.3	17.7	23.7	28.2	23.0	18.4	16.6	5.5
8	1.3	5.7	9.6	9.9	13.4	17.9	23.8	25.5	24.1	18.9	12.9	8.1
9	1.1	* 1.9	6.2	10.2	13.2	17.7	22.3	24.2	24.9	18.7	13.2	5.4
10	1.7	2.0	7.4	8.4	16.8	21.0	24.0	26.4	27.5	20.4	14.2	7.5
11	2.7	4.4	10.3	11.5	19.6	18.1	25.5	24.9	24.4	19.3	13.3	6.8
12	3.2	1.8	9.7	15.1	14.9	18.5	25.8	23.6	21.1	19.2	10.9	4.5
13	1.0	3.4	3.9	15.3	11.8	19.4	27.1	24.6	17.8	17.7	11.0	7.6
14	5.2	7.5	3.5	10.9	14.3	20.5	27.2	26.4	18.0	16.6	13.6	***
15	8.9	11.9	7.0	8.6	17.2	21.2	27.2	24.9	19.7	16.2	12.8	***
16	7.2	6.4	9.6	7.9	16.5	21.4	25.0	25.5	20.2	17.9	10.0	11.0
17	5.8	4.6	11.1	12.3	16.9	23.2	22.0	27.4	20.5	18.5	8.8	9.8
18	3.4	2.6	9.9	15.1	16.7	19.4	20.4	28.7	23.9	17.0	8.5	6.4
19	2.2	5.1	8.7	13.7	17.9	21.6	20.0	28.2	25.5	17.8	8.1	4.6
20	1.3	5.0	6.2	14.6	21.8	22.2	20.9	26.7	23.2	19.3	11.4	6.0
21	-0.1	6.1	9.9	10.1	19.0	20.5	20.0	26.6	21.5	17.0	12.4	7.5
22	0.1	8.6	8.2	12.1	19.1	21.5	21.9	26.5	20.7	17.7	12.3	7.4
23	-0.1	8.6	8.5	12.8	19.3	22.7	23.4	25.9	19.9	16.8	10.1	6.8
24	2.8	4.9	9.2	14.2	18.2	22.4	22.7	26.9	19.3	11.7	9.0	6.7
25	2.4	5.9	8.0	8.5	15.8	21.5	23.3	26.1	19.0	15.3	7.2	6.1
26	3.6	7.5	11.1	11.7	17.7	21.1	25.7	23.6	18.8	16.4	7.4	8.8
27	3.8	7.2	9.3	11.4	17.3	24.2	24.3	23.5	19.4	16.1	13.8	13.8
28	2.8	3.0	11.6	13.2	19.0	25.0	24.7	24.0	20.8	16.2	11.4	10.0
29	2.9	...	7.2	14.5	20.7	25.5	25.5	26.7	20.7	17.3	12.3	4.2
30	5.9	...	6.0	16.6	19.7	25.2	22.4	24.7	20.2	16.3	9.3	5.1
31	4.7	...	5.6	...	21.0	...	21.1	25.2	...	16.0	...	4.5
MEAN	2.7	4.6	7.7	11.7	17.1	20.7	23.5	25.7	21.8	17.6	12.0	7.0

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.02 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (° C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2.1	4.4	6.4	8.7	17.4	20.4	23.2	23.0	22.9	20.4	15.9	8.0
2	3.3	4.2	7.0	10.1	15.5	20.1	23.8	23.8	22.9	19.9	16.0	7.3
3	2.2	5.0	7.1	10.1	15.0	19.5	23.8	25.9	23.4	20.7	15.3	6.4
4	1.6	3.1	6.4	10.6	15.6	19.1	23.3	26.7	23.4	20.7	15.0	5.3
5	1.7	1.5	6.3	10.5	16.4	18.5	22.2	27.0	24.3	20.5	15.1	4.8
6	1.0	1.0	6.9	10.1	17.2	19.4	22.5	27.4	23.4	18.9	15.0	5.1
7	1.3	2.4	8.3	10.0	16.7	19.6	23.4	27.4	23.6	18.1	15.8	5.7
8	1.0	3.4	8.6	10.3	16.4	18.9	24.0	26.0	24.2	17.9	13.1	7.4
9	0.8	* 2.5	7.7	10.8	16.1	18.6	23.2	24.9	24.6	17.1	12.3	7.3
10	2.0	2.0	7.9	10.0	16.9	19.7	23.6	27.1	25.5	17.5	13.0	8.4
11	1.7	2.7	9.5	11.0	18.2	19.5	24.2	26.5	24.8	18.0	14.2	7.2
12	1.7	2.7	9.2	13.0	17.3	20.1	24.5	25.4	23.3	18.7	13.1	6.1
13	1.7	2.6	8.5	14.8	15.4	20.4	24.8	25.7	21.7	18.1	11.3	8.1
14	3.7	3.5	6.8	13.7	16.0	20.5	25.4	26.2	20.9	17.7	12.0	***
15	6.0	5.6	6.9	11.6	17.2	20.7	25.3	26.2	21.2	16.3	13.4	***
16	6.0	6.4	7.6	11.7	16.6	21.4	25.0	26.4	21.0	17.6	12.2	9.4
17	6.3	6.1	9.5	13.3	16.8	22.1	23.4	27.3	21.1	17.9	10.6	9.0
18	4.4	5.8	8.5	13.3	17.6	21.6	22.4	28.0	22.5	17.1	9.5	6.1
19	3.4	6.4	9.7	13.3	18.0	22.0	21.6	27.8	23.9	17.2	10.4	5.7
20	2.7	5.7	7.6	14.1	20.3	22.4	21.8	27.1	22.9	17.1	11.5	5.8
21	2.7	6.2	8.1	13.3	19.5	21.5	21.4	26.9	22.0	17.7	11.7	7.9
22	2.9	7.4	8.2	12.9	19.1	21.4	22.0	26.5	21.6	18.1	10.6	7.8
23	2.6	8.0	9.7	13.1	18.8	22.3	22.8	26.3	21.3	17.8	10.9	5.5
24	1.9	6.7	10.6	15.6	19.4	22.6	23.0	26.6	20.8	15.0	10.3	5.0
25	1.3	6.8	10.5	13.2	18.5	22.1	23.0	26.5	20.2	15.5	7.4	5.5
26	1.1	7.4	10.2	12.5	18.0	21.8	23.8	25.0	19.9	15.6	8.2	7.7
27	1.6	8.6	10.3	13.1	17.9	22.8	23.6	24.3	19.3	16.5	12.6	11.7
28	1.9	6.6	11.4	15.0	18.7	23.1	24.5	24.1	20.0	16.1	12.1	7.8
29	1.6	...	10.1	13.9	20.0	23.4	25.6	25.2	20.4	16.8	11.9	5.0
30	3.1	...	8.7	15.6	20.5	23.6	25.4	24.9	20.5	16.3	10.2	4.2
31	3.3	...	8.1	...	20.5	...	24.6	24.1	...	16.0	...	3.3
MEAN	2.5	4.8	8.5	12.3	17.7	21.0	23.6	26.0	22.2	17.7	12.3	6.7

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.10 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3.3	4.4	6.8	8.8	15.5	19.7	22.7	23.4	23.8	20.7	16.5	10.2
2	4.0	4.5	7.1	9.8	15.6	19.7	22.9	23.2	23.2	20.4	16.6	9.5
3	3.7	5.0	7.1	10.1	14.6	19.4	23.1	24.3	23.5	20.7	16.2	8.8
4	3.3	4.4	6.8	10.1	14.8	19.1	22.9	25.2	23.5	20.8	15.9	7.9
5	3.1	3.4	6.7	10.7	15.4	18.6	22.4	25.6	23.9	20.8	15.8	7.3
6	2.8	2.7	6.8	10.0	16.0	18.8	22.2	25.9	23.8	19.9	15.8	7.3
7	2.7	2.9	7.8	10.2	16.2	19.2	22.6	26.0	23.5	18.7	16.2	7.3
8	2.6	3.6	8.1	10.2	16.1	19.0	23.2	25.7	23.9	18.8	15.0	8.1
9	2.4	* 3.7	8.0	10.4	15.6	18.7	23.0	24.9	24.1	18.2	14.1	8.5
10	2.8	3.2	8.0	10.4	16.1	18.9	23.0	25.6	24.7	18.2	14.0	8.8
11	2.9	3.3	8.6	10.5	17.0	19.3	23.4	25.8	24.7	18.5	14.7	8.7
12	2.9	3.6	9.0	11.8	16.9	19.4	23.7	25.4	23.9	18.9	14.4	7.8
13	2.8	3.4	8.7	13.0	16.0	19.8	23.9	25.0	22.7	18.7	13.2	8.4
14	3.6	3.7	7.8	13.2	15.6	19.9	24.4	25.4	21.8	18.5	13.0	***
15	5.2	4.7	7.4	12.0	16.4	20.2	24.4	25.5	21.7	17.6	13.8	***
16	5.8	6.0	7.7	11.7	16.5	20.8	24.5	25.6	21.6	18.0	13.4	9.6
17	6.2	5.9	9.0	12.3	16.3	21.1	23.7	26.1	21.6	18.2	12.5	9.8
18	5.4	5.8	8.5	12.6	16.8	21.4	22.9	26.7	22.2	17.9	11.5	8.4
19	4.7	6.1	9.3	12.9	17.3	21.2	22.1	26.8	23.2	17.8	11.7	7.6
20	4.1	6.1	8.4	13.4	18.5	21.7	22.0	26.6	22.9	17.8	11.7	7.1
21	3.9	6.1	8.2	13.1	18.7	21.4	21.8	26.4	22.4	18.1	12.3	8.2
22	3.9	6.7	8.4	12.6	18.6	21.1	21.9	26.2	22.1	18.2	11.7	8.7
23	3.7	7.3	9.1	12.8	18.4	21.4	22.4	26.0	21.8	18.2	11.8	7.4
24	3.4	7.2	9.8	14.0	18.8	21.8	22.7	26.1	21.4	16.6	11.7	6.8
25	3.0	6.8	10.1	13.6	18.2	21.8	22.7	26.2	21.0	15.9	10.0	7.0
26	2.7	7.1	10.1	12.6	18.1	21.6	23.1	25.4	20.7	16.3	9.6	7.7
27	2.8	7.9	10.0	13.0	17.9	21.8	23.2	24.8	19.7	16.9	11.8	11.6
28	3.0	7.3	10.6	13.7	18.2	22.3	23.6	24.4	20.1	16.6	12.4	9.3
29	2.9	...	10.6	13.8	18.9	22.5	24.3	24.7	20.6	17.0	12.3	7.7
30	3.4	...	9.3	14.3	19.5	22.7	24.5	25.0	20.6	16.8	11.8	6.5
31	3.9	...	9.0	...	19.7	...	24.2	24.3	...	16.7	...	5.7
MEAN	3.6	5.1	8.5	11.9	17.0	20.5	23.1	25.4	22.5	18.3	13.4	8.2

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.50 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	7.0	5.8	7.6	9.8	12.8	17.3	20.2	22.1	22.7	20.1	17.1	13.0
2	6.9	5.8	7.6	9.7	13.1	17.4	20.3	22.1	22.5	20.1	17.1	12.8
3	6.9	5.9	7.6	9.7	13.3	17.6	20.5	22.0	22.4	20.0	17.0	12.6
4	6.9	6.0	7.6	9.8	13.4	17.6	20.6	22.1	22.2	20.0	17.0	12.3
5	6.8	6.1	7.6	9.9	13.5	17.6	20.7	22.2	22.2	20.0	17.0	12.0
6	6.7	6.0	7.6	10.0	13.6	17.6	20.8	22.4	22.1	20.0	16.9	11.7
7	6.6	5.8	7.6	10.1	13.9	17.6	20.8	22.6	22.1	19.8	16.8	11.4
8	6.5	5.7	7.8	10.1	14.1	17.6	20.8	22.8	22.1	19.5	16.8	11.1
9	6.4	* 5.7	7.9	10.2	14.2	17.7	20.9	23.0	22.1	19.4	16.6	11.0
10	6.2	5.7	8.0	10.2	14.3	17.7	21.0	23.0	22.1	19.2	16.4	10.9
11	6.2	5.7	8.1	10.3	14.4	17.7	21.1	23.1	22.2	19.0	16.2	10.9
12	6.1	5.6	8.3	10.3	14.6	17.8	21.2	23.2	22.2	18.9	16.0	10.9
13	6.1	5.6	8.4	10.6	14.8	17.9	21.3	23.2	22.2	18.8	15.9	10.7
14	6.0	5.6	8.6	10.9	14.9	18.0	21.4	23.1	22.0	18.8	15.7	***
15	6.0	5.6	8.5	11.2	14.9	18.1	21.6	22.6	21.8	18.7	15.5	***
16	6.2	5.8	8.5	11.3	14.9	18.5	21.7	22.7	21.6	18.6	15.3	10.6
17	6.4	6.0	8.5	11.3	15.0	18.8	21.9	22.8	21.4	18.4	15.2	10.7
18	6.7	6.2	8.6	11.4	15.1	18.9	22.2	22.9	21.2	18.4	14.9	10.8
19	6.8	6.4	8.7	11.5	15.2	19.1	22.2	23.1	21.2	18.3	14.6	10.7
20	6.8	6.5	8.8	11.6	15.4	19.2	22.1	23.2	21.3	18.2	14.0	10.5
21	6.7	6.6	8.9	11.8	15.7	19.3	21.9	23.4	21.3	18.1	13.7	10.3
22	6.6	6.7	8.9	12.0	16.0	19.4	21.7	23.4	21.3	18.1	13.6	10.2
23	6.5	6.9	8.9	12.0	16.2	19.4	21.6	23.5	21.2	18.1	13.6	10.2
24	6.4	7.1	9.0	12.1	16.3	19.5	21.5	23.5	21.1	18.0	13.5	10.1
25	6.3	7.2	9.1	12.2	16.6	19.6	21.5	23.5	21.0	17.8	13.4	9.9
26	6.2	7.3	9.3	12.4	16.7	19.7	21.6	23.5	20.8	17.5	13.2	9.7
27	6.0	7.3	9.5	12.4	16.7	19.8	21.6	23.3	20.6	17.3	12.9	9.2
28	5.9	7.5	9.6	12.4	16.7	19.8	21.6	23.0	20.3	17.3	12.8	9.7
29	5.8	...	9.7	12.5	16.8	19.9	21.7	22.8	20.2	17.2	12.9	9.9
30	5.8	...	9.9	12.6	16.9	20.1	22.0	22.8	20.1	17.2	13.0	9.8
31	5.8	...	9.8	...	17.1	...	22.1	22.7	...	17.2	...	9.6
MEAN	6.4	6.2	8.5	11.1	15.1	18.5	21.4	22.9	21.6	18.6	15.2	10.8

ITEM SOIL TEMPERATURE (1.00 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2006

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

ITEM GROUND WATER LEVEL (10.0 m DEPTH)  
 INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE)  
 UNIT (m)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	***	***	-2.30	-2.32	-2.15	-2.18	-2.06	-1.75	-2.28	-2.00	-2.33	-2.25
2	***	***	-2.17	-2.32	-2.16	-2.20	-2.08	-1.78	-2.37	-1.99	-2.33	-2.27
3	***	***	-2.19	-2.32	-2.17	-2.20	-2.09	-1.82	-2.43	-1.95	-2.35	-2.32
4	***	***	-2.28	-2.34	-2.20	-2.20	-2.11	-1.87	-2.39	-1.95	-2.36	-2.35
5	***	***	-2.14	-2.35	-2.21	-2.22	-2.11	-1.90	-2.33	-1.97	-2.38	-2.37
6	***	***	-2.10	-2.31	-2.23	-2.30	-2.05	-1.92	-2.35	-1.64	-2.42	-2.40
7	***	***	-2.10	-2.29	-2.25	-2.28	-2.03	-1.95	-2.37	-1.03	-2.42	-2.39
8	***	***	-2.10	-2.30	-2.27	-2.29	-2.03	-1.98	-2.38	-1.79	-2.44	-2.37
9	***	***	-2.11	-2.28	-2.31	-2.38	-2.04	-1.98	-2.40	-1.96	-2.45	-2.35
10	***	-2.61	-2.11	-2.30	-2.31	-2.28	-2.06	-1.94	-2.43	-2.09	-2.47	-2.34
11	***	-2.60	-2.11	-2.31	-2.30	-2.27	-2.08	-1.97	-2.55	-2.25	-2.49	-2.36
12	***	-2.59	-2.10	-2.26	-2.29	-2.22	-2.08	-2.10	-2.67	-2.33	-2.52	-2.42
13	***	-2.59	-2.11	-2.17	-2.29	-2.21	-2.09	-2.12	-2.56	-2.41	-2.57	-2.57
14	***	-2.59	-2.13	-2.16	-2.26	-2.21	-2.11	-2.18	-2.53	-2.43	-2.58	***
15	***	-2.61	-2.16	-2.16	-2.27	-2.21	-2.13	-2.19	-2.49	-2.43	-2.57	***
16	***	-2.62	-2.18	-2.14	-2.31	-2.04	-2.14	-2.20	-2.57	-2.50	-2.59	-2.60
17	***	-2.63	-2.17	-2.14	-2.28	-1.79	-2.14	-2.06	-2.51	-2.53	-2.58	-2.57
18	***	-2.65	-2.20	-2.14	-2.28	-1.82	-1.96	-2.07	-2.56	-2.55	-2.61	-2.57
19	***	-2.66	-2.19	-2.15	-2.27	-1.74	-1.57	-2.08	-2.63	-2.56	-2.56	-2.59
20	***	-2.66	-2.21	-2.13	-2.27	-1.78	-1.46	-2.08	-2.53	-2.59	-2.39	-2.61
21	***	-2.60	-2.21	-2.13	-2.27	-1.83	-1.48	-2.09	-2.47	-2.60	-2.28	-2.60
22	***	-2.57	-2.22	-2.13	-2.25	-1.87	-1.45	-2.09	-2.43	-2.59	-2.22	-2.60
23	***	-2.57	-2.23	-2.13	-2.24	-1.89	-1.56	-2.10	-2.42	-2.55	-2.22	-2.62
24	***	-2.54	-2.24	-2.13	-2.25	-1.91	-1.62	-2.11	-2.39	-2.38	-2.25	-2.63
25	***	-2.51	-2.26	-2.13	-2.17	-1.94	-1.66	-2.13	-2.42	-2.21	-2.21	-2.65
26	***	-2.48	-2.28	-2.12	-2.14	-1.96	-1.71	-2.15	-2.45	-2.18	-2.22	-2.62
27	***	-2.40	-2.28	-2.11	-2.16	-1.98	-1.76	-2.20	-2.22	-2.19	-2.21	-0.19
28	***	-2.36	-2.27	-2.11	-2.14	-2.00	-1.77	-2.19	-1.98	-2.22	-2.17	-1.30
29	***	...	-2.25	-2.13	-2.14	-2.01	-1.80	-2.23	-1.97	-2.21	-2.19	-1.51
30	***	...	-2.28	-2.13	-2.15	-2.04	-1.70	-2.26	-1.99	-2.24	-2.24	-1.74
31	***	...	-2.30	...	-2.21	...	-1.71	-2.29	...	-2.28	...	-1.97
MEAN	***	-2.57	-2.19	-2.21	-2.23	-2.08	-1.89	-2.06	-2.40	-2.21	-2.39	-2.28

ITEM GROUND WATER LEVEL (NEW; 2.0 m DEPTH)  
 INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE)  
 UNIT (m)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	***	***	-1.67	-1.85	-1.76	-1.72	-1.79	-1.49	***	-1.60	-1.59	-1.61
2	***	-1.87	-1.50	-1.86	-1.77	-1.74	-1.80	-1.54	***	-1.61	-1.62	-1.64
3	***	-1.74	-1.47	-1.86	-1.79	-1.76	-1.82	-1.58	***	-1.58	-1.64	-1.66
4	***	-1.72	-1.52	-1.87	-1.80	-1.78	-1.83	-1.61	***	-1.61	-1.67	-1.68
5	***	-1.73	-1.55	-1.87	-1.81	-1.80	-1.83	-1.64	***	-1.64	-1.69	-1.70
6	***	-1.75	-1.58	-1.82	-1.82	-1.82	-1.73	-1.66	***	-1.08	-1.70	-1.72
7	***	-1.76	-1.61	-1.78	-1.83	-1.84	-1.72	-1.68	***	-0.26	-1.72	-1.73
8	***	-1.77	-1.63	-1.77	-1.84	-1.85	-1.74	-1.71	***	-0.71	-1.74	-1.75
9	***	-1.79	-1.66	-1.79	-1.85	-1.85	-1.77	-1.70	***	-1.05	-1.76	-1.77
10	***	-1.80	-1.68	-1.80	-1.85	-1.82	-1.78	-1.64	***	-1.24	-1.77	-1.77
11	***	-1.81	-1.70	-1.81	-1.86	-1.81	-1.80	-1.65	***	-1.35	-1.78	-1.79
12	***	-1.82	-1.71	-1.72	-1.85	-1.81	-1.81	-1.67	***	-1.43	-1.80	-1.80
13	***	-1.83	-1.73	-1.59	-1.84	-1.81	-1.83	-0.70	***	-1.49	-1.81	-1.81
14	***	-1.84	-1.74	-1.61	-1.82	-1.82	-1.84	-0.72	***	-1.54	-1.82	***
15	***	-1.85	-1.76	-1.65	-1.79	-1.83	-1.86	-1.74	***	-1.58	-1.83	***
16	***	-1.87	-1.77	-1.67	-1.79	-1.50	-1.87	-1.75	***	-1.61	-1.84	***
17	***	-1.87	-1.78	-1.69	-1.80	-1.20	-1.87	-1.77	***	-1.65	-1.86	***
18	***	-1.88	-1.78	-1.72	-1.81	-1.30	-1.61	-1.78	***	-1.67	-1.87	***
19	***	-1.89	-1.78	-1.73	-1.82	-1.32	-0.94	-1.79	***	-1.70	-1.87	***
20	***	-1.90	-1.79	-1.74	-1.82	-1.40	-0.85	-1.81	***	-1.72	-1.48	***
21	***	-1.86	-1.79	-1.75	-1.81	-1.47	-0.88	-1.82	***	-1.74	-1.31	***
22	***	-1.81	-1.80	-1.74	-1.80	-1.52	-0.94	-1.83	***	-1.76	-1.40	***
23	***	-1.79	-1.80	-1.74	-1.80	-1.57	-1.17	-1.84	***	-1.73	-1.48	***
24	***	-1.79	-1.81	-1.75	-1.81	-1.61	-1.30	-1.86	***	-1.42	-1.53	***
25	***	-1.80	-1.81	-1.76	-1.69	-1.65	-1.38	-1.87	***	-0.95	-1.58	***
26	***	-1.79	-1.82	-1.72	-1.63	-1.67	-1.44	-0.89	***	-1.18	-1.61	***
27	***	-1.72	-1.82	-1.70	-1.66	-1.70	-1.46	-1.90	-1.63	-1.33	-1.59	-0.45
28	***	-1.67	-1.82	-1.72	-1.67	-1.72	-1.53	-1.92	-1.36	-1.42	-1.52	-0.92
29	***	...	-1.83	-1.73	-1.65	-1.75	-1.56	***	-1.46	-1.48	-1.54	-1.30
30	***	...	-1.84	-1.74	-1.66	-1.77	-1.42	***	-1.54	-1.53	-1.58	-1.54
31	***	...	-1.85	...	-1.69	...	-1.44	***	...	-1.56	...	-1.67
MEAN	***	-1.81	-1.72	-1.75	-1.78	-1.67	-1.57	-1.73	-1.50	-1.43	-1.67	-1.57

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (LiC) DEW CELL (E-771)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-4.7	3.9	4.1	-3.0	13.1	13.9	21.5	16.2	18.5	16.9	10.4	2.1
2	0.5	-0.8	2.9	7.6	9.7	15.8	22.3	18.3	17.9	16.2	10.2	1.9
3	-4.5	-2.7	0.6	0.5	4.4	12.9	21.2	20.2	18.8	17.0	10.1	-1.0
4	-7.4	-11.4	-2.7	1.0	7.9	11.1	18.7	20.9	18.6	16.8	11.0	-1.1
5	-7.1	-10.4	-1.1	7.1	11.4	12.7	19.5	20.8	19.8	17.0	12.2	-1.2
6	-8.2	-4.8	2.9	-2.3	11.8	14.4	20.1	21.7	18.5	15.7	12.5	-0.2
7	-8.2	1.3	1.2	1.9	14.4	14.3	21.2	22.7	21.0	11.8	6.7	2.1
8	-9.1	-2.5	2.2	3.0	12.0	14.0	21.1	22.4	21.6	8.5	3.6	3.5
9	-6.3	***	-2.6	1.6	10.3	16.0	20.8	22.6	22.2	1.6	7.3	3.1
10	-2.3	-6.5	3.0	4.0	15.2	16.1	22.5	22.0	23.6	-3.0	9.2	3.5
11	-4.7	-3.2	4.7	9.8	16.7	17.0	23.5	21.8	20.3	15.2	11.6	-1.0
12	-6.6	-8.1	4.8	13.8	4.4	15.6	24.0	21.6	18.2	15.3	2.3	2.1
13	-2.5	-6.1	-6.3	13.2	8.6	16.7	24.6	21.3	16.3	13.2	2.2	4.7
14	4.0	-1.5	-9.2	7.0	11.4	17.5	24.6	22.7	15.7	10.8	7.9	***
15	2.8	3.5	-4.7	0.5	10.5	18.3	24.3	22.8	14.5	10.5	6.7	***
16	3.2	4.0	4.9	5.0	13.4	20.2	23.0	24.1	14.9	10.2	5.0	7.5
17	-0.4	2.6	3.4	1.9	13.2	19.7	20.9	25.8	17.5	13.2	3.3	7.0
18	-5.9	-6.0	2.5	5.3	13.7	18.2	19.6	24.2	21.8	13.4	3.2	-2.8
19	-9.3	0.3	0.5	9.9	17.1	18.5	18.9	24.5	21.4	13.5	6.4	-1.4
20	-6.9	2.7	-8.0	10.5	18.9	17.8	18.1	24.1	17.5	14.4	10.2	1.5
21	-0.9	3.5	-4.6	2.4	11.7	18.0	18.9	22.5	16.0	12.1	8.2	4.3
22	-4.0	4.2	-0.9	1.4	12.8	18.6	19.9	22.2	15.0	13.4	7.7	4.4
23	-9.0	3.6	6.4	8.0	15.3	18.9	21.5	22.3	12.4	14.7	5.0	0.3
24	-7.6	0.8	-0.7	10.8	15.0	17.8	21.8	23.5	12.2	10.0	1.2	-2.0
25	-6.9	0.9	-0.6	5.7	10.1	18.7	21.1	20.7	12.9	9.8	0.3	-0.5
26	-6.8	6.0	5.6	3.7	11.4	19.4	20.7	20.7	14.8	11.2	4.4	7.4
27	-5.7	2.6	2.8	8.4	13.4	20.3	20.5	19.0	17.6	13.1	12.7	5.8
28	-6.3	-3.0	5.3	6.5	17.4	20.8	21.7	19.1	16.4	12.5	8.3	-1.1
29	-4.5	...	-4.2	9.7	15.7	19.9	21.9	21.4	15.2	14.9	8.3	-6.5
30	0.6	...	-7.0	11.1	14.3	21.4	18.8	21.6	16.5	11.8	5.2	-6.3
31	1.9	...	-6.8	...	13.6	...	16.4	18.5	...	12.6	...	-4.7
MEAN	-4.3	-1.0	-0.1	5.5	12.6	17.2	21.1	21.7	17.6	12.4	7.1	1.1

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (L1C) DEW CELL) (E-771)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-4.3	4.4	4.1	-3.1	13.6	13.5	20.9	16.2	18.4	17.0	10.2	2.3
2	1.4	-0.6	2.7	7.6	9.6	15.4	21.9	18.3	17.8	16.1	10.1	1.8
3	-3.6	-2.2	0.5	0.4	4.3	12.6	20.6	20.2	18.8	16.6	10.1	-1.0
4	-7.2	-11.2	-3.0	0.8	7.7	10.6	18.2	20.8	18.4	16.4	11.2	-1.0
5	-6.9	-10.2	-1.2	7.0	11.6	12.4	19.2	20.7	19.5	16.8	12.5	-1.1
6	-7.9	-4.5	2.9	-2.8	11.8	14.0	19.7	21.7	18.4	15.4	12.8	-0.1
7	-7.8	2.1	1.2	1.8	14.4	13.9	20.6	22.7	20.8	11.3	6.4	2.2
8	-8.6	-2.0	2.3	2.9	11.8	13.7	20.5	22.4	21.4	8.0	3.3	3.5
9	-5.7	*-7.1	-2.7	1.6	10.1	15.9	20.6	22.4	22.0	2.1	7.9	3.2
10	-1.3	-6.9	2.9	3.9	15.2	15.8	22.2	21.8	23.2	-2.2	9.1	3.2
11	-3.9	-2.9	4.9	9.9	16.4	16.8	22.9	21.8	19.9	15.1	11.7	-1.4
12	-6.2	-8.0	5.0	13.9	3.7	15.2	23.3	21.6	18.0	15.1	1.7	2.2
13	-2.1	-6.2	-6.8	13.2	8.1	16.4	23.9	21.2	16.2	13.1	1.5	4.6
14	4.4	-1.6	-9.4	6.9	11.3	17.3	23.9	22.7	15.5	10.3	8.0	***
15	3.6	3.5	-4.7	0.3	10.4	18.1	23.8	22.6	14.2	10.3	6.6	***
16	3.6	4.0	5.1	4.9	13.2	20.2	22.6	23.9	14.5	9.9	5.0	7.3
17	-0.3	2.5	3.1	1.6	13.0	19.4	20.7	25.5	17.1	13.1	3.2	6.9
18	-5.9	-6.2	2.6	5.2	13.4	18.1	19.6	23.9	21.6	13.5	3.0	-3.5
19	-8.9	0.3	0.3	9.9	16.9	18.1	18.7	24.3	21.1	13.7	6.3	-2.1
20	-6.4	2.8	-8.1	10.4	18.8	17.4	17.7	23.9	17.1	14.5	10.3	1.2
21	-0.5	3.5	-4.7	2.0	11.4	17.8	18.7	22.3	15.6	11.9	8.8	4.0
22	-3.4	4.2	-1.0	1.2	12.5	18.0	19.5	22.0	14.5	13.0	8.1	4.2
23	-8.7	3.8	6.4	8.0	15.1	18.4	21.1	22.1	12.0	14.6	5.0	0.9
24	-7.5	0.8	-0.8	10.5	14.7	17.4	21.7	23.3	11.7	9.8	0.7	-2.0
25	-7.0	1.1	-0.7	5.5	9.8	18.5	20.6	20.3	12.6	9.6	0.3	-0.7
26	-6.6	6.0	5.7	3.8	11.0	19.1	20.3	20.5	14.6	11.3	4.4	7.1
27	-5.4	2.4	2.9	8.2	13.2	19.6	20.3	18.5	17.8	13.2	12.9	5.5
28	-6.0	-3.3	5.4	6.4	17.2	20.2	21.7	18.6	16.3	12.5	8.2	-1.5
29	-3.9	...	-4.5	9.7	15.4	19.4	21.8	21.1	14.8	15.2	8.3	-6.7
30	1.4	...	-7.1	11.2	13.7	20.7	18.7	21.5	16.3	11.6	5.4	-6.6
31	2.9	...	-7.0	...	13.1	...	16.3	18.3	...	12.9	...	-5.2
MEAN	-3.8	-1.1	-0.1	5.4	12.3	16.8	20.7	21.5	17.3	12.3	7.1	0.9

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (L1C) DEW CELL) (E-771)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-5.0	3.9	3.8	-3.3	13.4	13.4	20.8	16.0	18.2	16.8	10.2	2.1
2	0.6	-1.2	2.2	7.3	9.3	15.1	21.8	18.3	17.8	15.8	10.0	1.5
3	-3.9	-2.6	0.3	-0.1	4.1	12.4	20.5	20.2	18.7	16.5	10.0	-1.2
4	-7.9	-11.8	-3.4	0.5	7.5	10.4	18.1	20.9	18.3	16.1	11.2	-1.1
5	-7.7	-11.0	-1.4	6.6	11.5	12.2	19.0	20.7	19.4	16.6	12.6	-1.2
6	-8.6	-5.4	2.7	-3.4	11.7	13.7	19.6	21.8	18.3	15.2	12.8	-0.2
7	-8.4	1.8	0.9	1.5	13.9	13.7	20.5	23.0	20.8	10.9	6.0	2.0
8	-9.2	-2.2	2.0	2.5	11.6	13.6	20.4	22.4	21.3	7.7	3.0	3.3
9	-6.3	***	-3.0	1.4	9.9	15.7	20.4	22.2	21.9	1.9	8.2	3.0
10	-1.7	-7.2	2.5	3.7	14.8	15.8	22.1	21.8	23.1	-2.2	9.1	2.9
11	-4.4	-3.0	4.8	9.7	16.1	16.6	22.8	21.7	19.7	15.0	11.5	-1.8
12	-7.0	-8.1	4.9	13.6	3.3	15.0	23.3	21.5	17.8	15.0	1.1	1.9
13	-2.9	-6.4	-7.2	13.0	7.6	16.3	23.8	21.2	16.0	12.9	1.1	4.3
14	3.7	-2.0	-9.8	6.6	11.2	17.2	23.8	22.7	15.3	10.1	7.9	***
15	3.4	3.4	-5.0	0.0	10.2	18.0	23.7	22.5	14.0	10.1	6.3	***
16	2.9	3.6	5.1	4.6	13.0	20.1	22.4	23.8	14.3	9.7	4.8	7.2
17	-0.9	2.3	2.7	1.3	12.8	19.2	20.5	25.5	16.9	12.9	2.9	6.7
18	-6.5	-6.7	2.4	5.1	13.3	18.0	19.2	23.8	21.5	13.5	2.9	-4.0
19	-9.5	0.0	0.0	9.6	16.7	18.0	18.4	24.3	20.9	13.8	6.0	-2.5
20	-6.8	2.5	-8.6	10.0	18.5	17.3	17.6	23.8	16.9	14.7	10.1	1.2
21	-1.1	3.1	-5.1	1.6	10.9	17.7	18.5	22.3	15.3	11.7	8.8	4.0
22	-3.9	3.8	-1.4	0.9	12.2	17.8	19.4	22.1	14.2	12.8	8.2	4.1
23	-9.5	3.4	6.1	7.8	14.9	18.3	21.0	21.9	11.7	14.5	4.7	0.9
24	-8.2	0.4	-1.0	10.2	14.5	17.2	21.4	23.2	11.5	9.5	0.3	-2.2
25	-7.3	0.9	-1.1	5.3	9.6	18.3	20.5	20.1	12.4	9.4	-0.1	-1.0
26	-7.3	5.6	5.5	3.5	10.7	19.0	20.2	20.2	14.4	11.3	4.2	7.1
27	-5.9	2.1	2.7	7.9	13.0	19.5	20.1	18.3	17.9	13.1	12.7	5.2
28	-6.6	-3.7	5.1	6.4	17.0	20.1	21.7	18.4	16.3	12.4	8.0	-1.8
29	-4.4	...	-5.2	9.5	15.2	19.3	22.0	21.0	14.6	15.6	7.9	-6.9
30	1.0	...	-7.5	11.1	13.5	20.7	18.7	21.5	16.2	11.3	5.3	-6.9
31	2.3	...	-7.3	...	12.9	...	16.2	18.3	...	12.9	...	-5.6
MEAN	-4.4	-1.3	-0.4	5.1	12.1	16.7	20.6	21.5	17.2	12.2	6.9	0.7

ITEM PRECIPITATION (0.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT RAIN GAUGE (TRIPPING BUCKET TYPE) (B-011-00)  
 UNIT (mm)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.5	35.0	27.0	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	4.5	3.0	0.0	0.0
2	0.5	0.5	0.5	8.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.5	0.0	0.0
3	0.0	0.0	3.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	14.5	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	92.5	0.0	0.0
7	0.0	2.0	0.0	0.0	14.5	0.5	0.0	0.0	0.0	9.5	1.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	* 9.5	0.0	0.0	0.0	19.0	1.5	30.0	0.0	0.0	0.0	5.5
10	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
11	0.0	0.0	0.0	9.5	7.5	5.5	0.0	0.0	1.0	0.0	11.5	0.0
12	0.0	0.0	0.5	23.5	0.0	0.5	0.0	2.5	2.0	0.0	0.5	2.0
13	0.0	0.0	0.5	0.5	11.0	0.0	0.5	0.0	10.0	0.0	0.0	0.5
14	33.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	2.5	0.0	20.5	0.0	0.0	***
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	***
16	0.0	1.0	8.0	1.0	0.0	43.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
17	1.0	0.0	5.0	0.0	1.0	1.5	13.5	10.0	7.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.5	0.0	1.0	8.5	7.5	0.0	25.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	0.0	8.0	0.0	0.0	0.0	28.5	0.0
20	0.0	22.0	0.0	9.5	5.5	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	33.5	0.0
21	1.0	0.0	0.0	7.5	0.0	0.5	6.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0
22	6.5	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	13.5	0.0	0.0
23	0.0	0.0	4.0	0.0	2.5	0.5	0.5	3.5	0.0	20.0	0.0	0.0
24	0.0	1.5	0.0	8.0	27.0	0.0	2.0	0.0	0.0	58.0	0.5	0.0
25	0.0	0.0	0.0	5.5	3.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.0	20.5	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	5.0	32.5	0.0	3.5	110.0
27	0.0	0.0	0.0	4.5	2.5	0.0	0.0	0.0	57.0	0.0	19.0	39.0
28	0.0	0.0	3.0	0.0	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
29	0.0	...	0.0	2.0	0.0	0.0	28.5	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0
30	0.0	...	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	0.0
31	0.0	...	0.0	...	0.0	...	0.0	0.0	...	0.0	...	0.0
TOTAL	43.0	92.0	56.5	95.0	105.5	97.0	93.0	53.5	159.5	235.5	106.0	157.5

ITEM EVAPOTRANSPIRATION (0.00 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT WEIGHING LYSIMETER (RL-15TFA)  
 UNIT (mm)  
 YEAR 2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.0	***	* 8.4	1.2	3.5	5.4	***	4.7	0.6	***	***	***
2	0.0	6.1	***	0.5	1.6	3.0	1.4	4.3	3.1	***	***	***
3	0.9	6.6	8.6	2.7	3.1	3.2	1.4	4.8	2.7	***	***	***
4	0.4	* 4.3	6.2	1.2	2.6	3.0	3.4	4.8	2.5	***	***	***
5	0.1	3.2	* 3.9	1.7	2.5	2.1	***	4.8	3.1	***	***	***
6	0.3	2.2	3.2	3.1	2.7	* 4.6	8.0	4.2	***	***	***	***
7	0.2	1.6	2.7	2.1	2.0	2.5	7.7	* 3.7	***	***	***	***
8	0.2	1.9	2.1	2.2	1.1	1.4	* 5.4	1.9	***	***	***	***
9	0.3	***	2.0	2.4	1.8	***	2.0	***	***	***	***	***
10	0.0	1.2	0.9	1.1	1.3	2.7	2.4	4.8	***	***	***	***
11	0.4	1.2	1.7	2.4	2.8	***	2.4	2.6	***	***	***	***
12	0.2	1.4	0.9	* 9.0	3.6	* 3.8	1.2	1.5	***	***	***	***
13	0.0	0.9	2.3	8.4	1.3	3.5	2.4	3.2	***	***	***	***
14	***	1.0	1.1	6.2	3.4	3.0	1.3	3.1	***	***	***	***
15	0.8	1.0	1.1	* 4.4	4.1	* 2.5	1.6	2.1	***	***	***	***
16	0.2	0.1	1.3	2.9	1.6	***	1.2	1.5	***	***	***	***
17	0.8	1.0	2.7	3.4	2.8	***	***	3.3	***	***	***	***
18	0.9	1.1	0.5	2.6	2.3	2.6	***	4.6	***	***	***	***
19	1.5	0.7	1.6	1.5	2.3	9.6	***	3.3	***	***	***	***
20	1.3	* 4.8	1.7	3.4	4.4	* 6.9	***	2.0	***	***	***	***
21	***	0.8	1.6	2.9	5.4	3.7	***	3.5	***	***	***	***
22	***	* 2.1	0.9	2.6	4.1	1.6	***	* 2.1	***	***	***	***
23	0.9	2.8	1.9	2.1	2.6	3.9	6.4	* 6.1	***	***	***	***
24	2.8	1.9	1.8	2.7	***	3.8	0.1	2.1	***	***	***	***
25	1.3	2.7	1.5	* 5.5	5.5	2.0	2.4	3.5	***	***	***	***
26	1.5	* 5.3	1.0	* 3.1	* 6.9	0.4	* 5.9	1.1	***	***	***	***
27	1.3	3.9	1.5	3.1	4.0	2.7	4.9	1.4	***	***	***	***
28	1.3	4.8	0.8	3.8	* 5.7	2.2	3.7	1.6	***	***	***	***
29	1.3	...	2.1	3.0	* 5.8	3.2	***	2.9	***	***	***	***
30	0.9	...	1.5	3.4	6.1	1.6	6.7	0.9	***	***	***	***
31	0.9	...	1.1	...	6.3	...	7.8	3.4	...	...	...	...
TOTAL	20.6	64.4	68.4	94.7	103.2	84.9	79.6	93.9	12.0	***	***	***

ITEM           ATMOSPHERIC PRESSURE (1.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT BAROMETER (PTB210)  
 UNIT           (hPa)  
 YEAR          2006

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1021	1011	1007	1011	1000	1010	1004	1013	1002	1016	1012	1011
2	1007	1015	1001	997	1003	1009	1000	1014	1004	1011	1012	1006
3	1002	1010	1010	995	1015	1010	1000	1014	1006	1009	1013	1012
4	1008	1018	1020	1008	1019	1011	1001	1011	1005	1011	1015	1018
5	1011	1021	1021	1000	1017	1006	1000	1009	999	1008	1014	1023
6	1012	1024	1014	1009	1013	1005	996	1009	1005	993	1011	1026
7	1009	1005	1016	1010	1011	1006	1002	1008	1008	986	1004	1020
8	1015	1006	1014	1004	1015	1008	1008	1008	1012	998	1018	1017
9	1020	* 1017	1023	1014	1020	995	1013	1005	1012	1013	1020	1016
10	1016	1012	1018	1022	1016	1000	1012	1005	1009	1017	1016	1013
11	1019	1007	1010	1017	1010	1007	1010	1006	1012	1016	1004	1022
12	1025	1011	999	1005	1020	1012	1007	1006	1017	1015	1003	1022
13	1025	1015	1003	1005	1013	1013	1005	1005	1016	1016	1011	1016
14	1007	1011	1006	1013	1006	1012	1006	1004	1013	1018	1006	***
15	1010	1010	1012	1018	1018	1010	1006	1002	1015	1012	1007	***
16	1015	1010	1005	1005	1020	1005	1004	1001	1014	1013	1012	1013
17	1014	1012	996	1011	1019	1006	1003	1001	1011	1017	1018	1004
18	1017	1021	1007	1017	1015	1004	1004	1002	1004	1019	1022	1020
19	1016	1022	995	1016	1007	1007	1000	1005	1004	1019	1021	1030
20	1019	1022	1006	997	996	1009	1004	1008	1009	1016	1008	1028
21	1010	1020	1009	995	1011	1008	1000	1008	1012	1020	1012	1021
22	1003	1016	1013	1004	1014	1005	1001	1006	1014	1020	1015	1014
23	1008	1017	1000	1005	1005	1003	1003	1006	1014	1013	1018	1013
24	1015	1026	1007	1000	1005	1007	1004	1008	1010	1011	1020	1019
25	1017	1030	1017	1005	1016	1009	1009	1010	1014	1014	1026	1027
26	1012	1017	1012	1011	1019	1006	1013	1013	1013	1017	1019	1017
27	1008	1017	1009	1006	1013	1002	1009	1012	1004	1018	1001	991
28	1013	1025	999	1008	998	1003	1007	1009	1009	1018	1006	998
29	1024	...	994	1008	1000	1008	1006	1005	1014	1012	1011	1005
30	1020	...	999	1004	1005	1007	1010	1002	1014	1017	1012	1018
31	1022	...	1005	...	1009	...	1012	1001	...	1014	...	1025
MEAN	1014	1016	1008	1007	1011	1007	1005	1007	1010	1013	1013	1016

## 2006 年度 陸域環境研究センターセミナーの記録

2006,5.17 第 90 回セミナー 参加者 16 名

Vishwas Kale (University of Pune)

The Palaeoflood Record of Monsoonal Rivers: Central and Western India

2006,5.26 第 91 回セミナー 参加者 18 名

宮下雄次 (神奈川県 温泉地学研究所)

「足柄平野における自噴地下水について－自噴域は回復する (している) のか?－」

2006,7.7 第 92 回セミナー 参加者 28 名

Wilfried Brutsaert (Cornell University)

Indications of an Accelerating Hydrologic Cycle During the Second Half of the 20th Century

2006,10.12 第 93 回セミナー (RAISE Project 成果報告会

モンゴル草原の水循環と環境変化) 参加者 51 名

杉田倫明 (筑波大学 生命環境科学研究科)

「北東アジア植生変遷域: 水循環研究の重要性と研究戦略」

浅沼 順 (筑波大学 生命環境・陸域環境研究センター)

「モンゴル・ヘルレン川流域における地表面熱・水収支」

鞠子 茂 (筑波大学 生命環境科学研究科)

「モンゴル・ヘルレン川流域における植生・土壌・炭素収支」

辻村真貴 (筑波大学 生命環境科学研究科)

「マルチ・トレーサー手法によるモンゴル・ヘルレン川流域における水・物質循環プロセス研究の成果」

木村富士男 (筑波大学 生命環境科学研究科)

「モンゴルの降水と気温の変動予測」

陸 旻皎 (長岡技術科学大学 環境・建設系)

「ヘルレン流域の水収支と温暖化」

2006,12.14 第 94 回セミナー 参加者 18 名

青木 久 (筑波大学 陸域環境研究センター)

「沖縄島辺戸岬における石灰岩波食棚の形成プロセスについて」

2007,1.26 第 95 回セミナー 参加者 15 名

Roy C. Sidle (京都大学防災研究所)

The Importance of Roads and Trails as Sediment Sources and Vectors

# The Palaeoflood Record of Monsoonal Rivers: Central and Western India

Vishwas Kale\*

Monsoon floods are the most widespread and destructive of natural hazards in India. The post-1950 period has witnessed increased frequency of devastating monsoon floods leading to considerable loss of life and property. In this regard, one of the crucial questions is, just how unusual are these extreme flood events? The available instrumental records (<100 years) are too short to provide any satisfactory answer to this crucial question. In the last few decades a variety of proxy records have been employed to reconstruct the frequency and magnitude of past hydrological events. Terrestrial records of extreme hydrological events include 'slackwater flood deposits'. Stratigraphical, sedimentological and chronological studies of the slackwater deposits provide fairly accurate information about ancient or palaeofloods. Palaeoflood investigations in some large rivers of central and western India indicate significant changes in the frequency and magnitude of large floods during the last 2000 years. In general, the records reveal absence of large-magnitude floods during the late Middle Age and Little Ice Age (ca. 1300 and 1850 AD). Historical and other proxy records indicate that this was also the period of increased frequency of droughts in South Asia

---

\* Department of Geography, University of Pune, India

足柄平野における自噴地下水について  
—自噴域は回復する（している）のか?—

宮下 雄次\*

足柄平野中流部には、神奈川県内で最大規模を誇る地下水の自噴域が存在し、自噴域の面積は足柄平野の約 1/4 に相当する 16 km<sup>2</sup>、年間の自噴量は事業所及び水道用揚水量の 15% にあたる 849 万トンと見積もられている。足柄平野の自噴域は、1963 年から 1977 年までの間におよそ 25% 減少し、1960 年代後半から 70 年代前半にかけての地下水揚水量の増加との関係が指摘されている。一方、足柄平野では、1992 年以降、地下水揚水量が減少傾向に転じており、小田原市における工業用地下水揚水量が 1965 年以前のレベルにまで減少するなど、自噴域を形成する地下水環境は、近年急激に変化しつつあることが予想される。そこで、今年度、自噴域の減少機構の解明と、自噴域回復の可能性について検討を行うため、自噴井を対象とした三次元的水頭分布調査を計画しているので、足柄平野における地下水研究のレビューとともに、今年度の調査計画について紹介する。

---

\* 神奈川県温泉地学研究所

## Indications of an Accelerating Hydrologic Cycle during the Second Half of the 20th Century

Wilfried Brutsaert\*

It is generally agreed that the evaporation from pans has been decreasing for the past half century over many regions of the Earth. However, the significance of this negative trend, as regards terrestrial evaporation, is still somewhat controversial and its implications for the global hydrologic cycle remain unclear. The controversy stems from the alternative views that these evaporative changes resulted, either from global radiative dimming, or from the complementary relationship between pan and terrestrial evaporation. Actually, these factors are not mutually exclusive but act concurrently. It is shown that, with the available measurements of

net radiation, despite global dimming, decreasing pan evaporation was a sign of increasing terrestrial evaporation, and together with the documented precipitation trends, likely evidence of an accelerating hydrologic cycle.

\* Cornell University, U.S.A.

## モンゴル草原の水循環と環境変化 (RAISE Project 成果報告会)

科学技術振興事業団の戦略的創造研究推進事業 (CREST) として 2001 年 12 月から 2007 年 3 月にかけて実施された RAISE プロジェクト (正式課題名「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明」(The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia)) の最終成果報告会を兼ねて、第 93 回の陸域環境研究センターセミナーを開催した。発表者と発表内容は下記の通りである。

1. 杉田倫明 (筑波大学 生命環境科学研究科)  
「北東アジア植生変遷域: 水循環研究の重要性と研究戦略」
2. 浅沼 順 (筑波大学 生命環境科学研究科, 陸域環境研究センター)  
「モンゴル・ヘルレン川流域における地表面熱・水収支」
3. 鞠子 茂 (筑波大学 生命環境科学研究科)  
「モンゴル・ヘルレン川流域における植生・土壌・炭素収支」
4. 辻村真貴 (筑波大学 生命環境科学研究科)  
「マルチ・トレーサー手法によるモンゴル・ヘルレン川流域における水・物質循環プロセス研究の成果」
5. 木村富士男 (筑波大学 生命環境科学研究科)  
「モンゴルの降水と気温の変動予測」
6. 陸 旻皎, 上米良秀行 (長岡技術科学大学 環境建設系)

「ヘルレン流域の水収支と温暖化」

本プロジェクトの目標は、モンゴルを中心とした北東アジア半乾燥域における水循環と生物・大気圏の相互作用の解明と予測であり、現状把握のための多種多様な現地観測と将来予測のためのモデリング・シミュレーションが実施された。5 年余にわたる研究の積み重ねにより当初の目標は概ね達成され、その成果は 144 件の学会発表や 82 編の学術論文として公開された。

## 沖縄島辺戸岬における波食棚の 形成プロセスについて

青木 久\*

岩石海岸には、水平な平坦面と海側末端に急崖をもつ波食棚 (shore platform) が形成される。特に、石灰岩で構成される波食棚の形成プロセスについては、波食作用、風化 (溶解) 作用、あるいは生物侵食作用の三説があり、統一的な見解が得られていないのが現状である。そこで本研究では、石灰岩で構成される海岸に発達する波食棚の形成プロセスについて、襲来する沖波のエネルギーおよび構成岩石の強度の場所的な差異が小さいと考えられる沖縄島辺戸岬を調査地域として、石灰岩波食棚がどのような条件で形成され、どの高度に形成されるのかという問題について定量的考察を行った。その結果、(1) 波食棚は、前面水深が 10 m 以下という暴浪時に、碎波となりやすい浅い条件で形成され、それより深い地点では形成されないことがわかった。(2) 波食棚前面での波高が大きいほど、波食棚の高度が低くなる傾向を持つことがわかった。この結果は、波食作用のみの要素を取り込んだ崖侵食に関する既存の室内実験の結果と調和的であった。以上の事柄から、辺戸岬の石灰岩波食棚の形成には、波による力学的な侵食作用が深く関与していることが示された。

\* 筑波大学陸域環境研究センター (現: 大東文化大学)



## 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、2006年4月から2007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・小暮哲也・前門 晃・松倉公憲 (2006): 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. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 53-58.
- 岩田拓記・杉田倫明 (2006): 鉛直風標準偏差の普通関数を用いた顕熱フラックス測定エラーの補正. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 87-97.
- 佐藤友徳・木村富士男 (2006): 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. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 59-69.
- 佐藤友徳・寺島 司・井上忠雄・木村富士男 (2006): 東京都域における夏季の降水システムの強化. 天気, **53**, 479-484.
- 田中 正 (2006): 陸域環境研究センターの現状と今後の展望. 筑波フォーラム, **73**, 60-63.
- 田中 正 (2006): 公害防止条例と地方分権. 環境研究, **142**, 168-172.
- 濱田洋平・及川武久 (2006): 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. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 71-86.
- 松倉公憲・八反地 剛 (2006): タブレット野外風化実験にまつわるいくつかの問題点. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 41-51.
- 水尻正博・藪崎志穂・田瀬則雄・辻村真貴 (2006): 茨城県つくば市における湧水の特徴. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 15-29.
- 森 僚多・松倉公憲 (2006): 伊豆新島・羽伏浦における海食崖の崩壊プロセス. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 31-40.
- 藪崎志穂・田中 正・福島武彦・浅沼 順・飯田真一 (2006): 霞ヶ浦流域における河川水の水質・流量特性について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 3-13.
- 山中 勤・飯塚幸子・田中 正 (2006): 共存植物種間の水源分化: 同位体生態水文学的アプローチ. 水文・水資源学会誌, **19**, 458-464.
- 涌井久司・山中 勤 (2006): 安定同位体組成からみた那須扇状地扇央部における地下水涵養源とその地域性. 地下水学会誌, **48**, 263-277.
- Asanuma, J. and Iemoto, K. (2007): Measurements of regional sensible heat flux over Mongolian grassland using large aperture scintillometer. *Journal of Hydrology*, **333**, 58-67.
- Asanuma, J., Tamagawa, I., Ishikawa, H., Ma, Y., Hayashi, T., Qi, Y. and Wang, J. (2007): Spectral similarity between scalars at very low frequencies in the unstable atmospheric surface layer over the Tibetan plateau. *Boundary-Layer Meteorology*, **122**, 85-103.
- Chkribene, A., Tsujimura, M., Charef, A. and Tanaka, T. (2006): Role of alluvial valleys in nitrate removal from groundwater: Case of Kurokawa alluvial aquifer, Tochigi prefecture, Japan. *Abstract of Tunisian-Japan Symposium on Society, Science and Technology*, **63**.

- Hattanji, T. and Matsushi, Y. (2006): Effect of runoff processes on channel initiation: comparison of four forested mountains in Japan. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **27**, 319-336.
- Hattanji, T., Onda, Y. and Matsukura, Y. (2006): Thresholds for bed load transport and channel initiation in a chert area in Ashio Mountains, Japan: An empirical approach from hydrogeomorphic observations. *Journal of Geophysical Research*, **111**, F02022, doi:10.1029/2004JF000206.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2006): Change of evapotranspiration components due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Journal of Hydrology*, **326**, 166-180.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2006): Change of water balance during the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Proceedings of International Conference on Hydrology and Ecology: The Groundwater/Ecology Connection*, Czech Association of Hydrogeologist, 65-68.
- Iizumi, T., Hayasi, Y. and Kimura, F. (2006): Influence on rice production in Japan from cool and hot summers after global warming, *Journal of Agricultural Meteorology*, **63**, 11-23
- Li, S.-G., Asanuma, J., Kotani, A., Davaa, G. and Oyunbaatar, D. (2007): Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints. *Journal of Hydrology*, **333**, 133-143.
- Li, S.-G., Eugster, W., Asanuma, J., Kotani, A., Davaa, G., Oyunbaatar, D. and Sugita, M. (2006): Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia. *Agriculture and Forest Meteorology*, **137**, 89-106.
- Mariko, S., Urano, T. and Asanuma, J. (2007): Effects of irrigation on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from Mongolian steppe soil. *Journal of Hydrology*, **333**, 118-123.
- Sato, T., Kimura, F. and Kitoh, A. (2006): Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model, *Journal of Hydrology*, **333**, 144-154.
- Shimoda, S. and Oikawa, T. (2006): Temporal and spatial variations of canopy temperature over a C3-C4 mixture grassland, *Hydrological Processes*, **20**, 3503-3516.
- Subagyono, K., Tanaka, T. and Tsujimura, M. (2006): Calcium (Ca<sup>2+</sup>) deterioration under the subsurface runoff in a forested headwater catchment. Wing-Huen Ip ed.: *Advances in Geosciences 4: Hydrological Sciences*, Scientific Publishing Co., Singapore, 261-269.
- Sugita, M., Asanuma, J., Tsujimura, M., Mariko, S., Lu, M., Kimura, F., Azzaya, D. and Adyasuren, T. (2007): An overview of the rangelands atmosphere-hydrosphere-biosphere interaction study experiment in northeastern Asia (RAISE). *Journal of Hydrology*, **333**, 3-20.
- Tanaka, T. (2006): Groundwater resources, development and management in the Kanto Plain, the largest tectonic sedimentary basin in Japan. *Proc. Int. Workshop on Water Cycle and Sustainable Use of Water Resources*, Center for Agricultural Resources Research, CAS, 183-189.
- Tanaka, T., Abe, Y. and Tsujimura, M. (2006): Characteristics of infiltration/percolation and groundwater recharge processes in arid

and semi-arid regions. *Abstract of Tunisian-Japan Symposium on Society, Science and Technology*, **43**.

Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, J. and Hamada, Y. (2006): Effect of forest stands succession on groundwater recharge process due to global warming. *Proc. Int. Conf. on Hydrology and Ecology: The Groundwater/Ecology Connection*, Czech Association of Hydrogeologist, 87-90.

Tsujimura, M., Abe, Y., Tanaka, T., Shimada, J., Higuchi, S., Yamanaka, T., Davaa, G. and Oyunbaatar, D. (2007): Stable isotopic and geochemical characteristics of groundwater in Kherlen River basin, a semi-arid region in eastern Mongolia. *Journal of Hydrology*, **333**, 47-57.

Tsujimura, M., Sasaki, L., Yamanaka, T., Sugimoto, A., Li, S-G., Matsushima, D., Kotani, A. and Saandar, M. (2007) : Vertical distribution of stable isotopic composition in atmospheric water vapor and subsurface water in grassland and forest sites, eastern Mongolia. *Journal of Hydrology*, **333**, 35-46.

Yabusaki, S., Tase, N. and Tsujimura, M. (2006): Temporal variation of stable isotope in precipitation at Tsukuba City. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, **2**, 31-35,

Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D. and Ganbold, T. (2007) : Characteristics and controlling factors of regional-scale surface soil moisture variability over semi-arid grassland in Mongolia. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **85A**, 261-270.

Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D. and Ganbold T. (2006) : Soil water balance at Mongolian steppe region without perennial

rivers. *Proceedings of International Workshop on Water Cycle and Sustainable Use of Water Resources*, 88-94.

Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D. and Ganbold, T. (2007) : Summertime soil hydrological cycle and surface energy balance on the Mongolian steppe. *Journal of Arid Environments*, **69**, 65-79.

Yamanaka, T., Tsujimura, M., Oyunbaatar, D. and Davaa, G. (2007) : Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle. *Journal of Hydrology*, **333**, 21-34.

#### 博士論文

Saito, Makoto (2007): Characteristics of vertical heat and water vapor transport at around spectral gap scales over land surfaces, 91 p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

#### 修士論文

アドリアナ太田春美 (2006): Re-evaluation of ground radiation load in human exercisers. (運動中のヒトへの地面放射熱負荷の再評価) 93p. (筑波大学大学院人間総合科学研究科)

池田崇史 (2006) : スカイラジオメーターを用いた衛星リモートセンシングの大気補正：植生指標について. 71p. (筑波大学大学院環境科学研究科)

郷原裕紀 (2006) : 筑波台地末端部における硝酸イオンの自然浄化能の評価. 68p. (筑波大学大学院環境科学研究科)

斎藤 誠 (2006) : 水田による都市気候の緩和効果. 67p. (筑波大学大学院環境科学研究科)

保坂亜紀子 (2006) : 筑波台地緩斜面における地下水流動と硝酸性窒素の挙動. 86p. (筑波大

学大学院環境科学研究科)

吉田 顕 (2006): 樹木による地下水中の硝酸性窒素の浄化. 131p. (筑波大学大学院環境科学研究科)

Kakubari, Jun'ichi (2007): Effect of vegetation species difference on percolation and soil solution processes. 70p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

Shimizu, Ryosuke (2007): Isotopic composition of lake origin vapor and its mixing with regional atmospheric vapor. 84p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

Tanaka, Aya (2007): Occurrence of hydraulic lift in temperate humid region. 45p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

Wakui, Hisashi (2007): Numerical simulation on isotopic changes in groundwater in the Nasu fan, Tochigi Prefecture. 73p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

## 卒業論文

市毛 智 (2007): 舗装の違いが下層大気に及ぼす熱的影響. 44p. (筑波大学第一学群自然学類)

後藤啓太 (2007): 梅雨期及び秋雨期の GPS 可降水量と水蒸気輸送. 47p. (筑波大学第一学群自然学類)

新橋龍太郎 (2007): 筑波山および周辺地域の湧水と渓流水の特徴. 40p. (筑波大学第一学群自然学類)

中河内 雅加 (2007): 都市と農地境界付近におけるヒートアイランドの精密観測. 64p. (筑波大学第一学群自然学類)

原田直幸 (2007): 1882 年 (明治 15 年) の東京府下における地下水位 (頭) の復元. 36p. (筑波大学第一学群自然学類)

前田明大 (2007): 栃木県那須扇状地における水田灌漑が地下水涵養に果たす影響. 82p. (筑波大学第一学群自然学類)

松本 剛 (2007): 樹幹流の浸透範囲の時空間分布について. 42p. (筑波大学第一学群自然学類)

宮澤隆則 (2007): 樹種の違いが樹幹流の無機水質成分に及ぼす影響. 43p. (筑波大学第一学群自然学類)

# 平成 18 年度陸域環境研究センター施設利用状況

(平成 19 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(自然学類)	25 名× 14 回	卒業研究利用者	
	気候学・気象学実験(自然学類)	30 名× 7 回	自然学類	4 名
	水文学実験(自然学類)	30 名× 4 回	その他	2 名
	〃	32 名× 2 回		
	計測工学実験(生物資源学類)	25 名× 1 回		
	水理学実験(生物資源学類)	12 名× 5 回		
	地球科学実験 3 体験学習	30 名× 2 回 47 名× 1 回		
	936 名	合計(延)数	6 名	
大学院	地域調査法	10 名× 9 回	生命環境科学研究科	10 名
			環境科学研究科	3 名
	合計(延)数	90 名	合計(延)数	13 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	8 名
			人間総合科学研究科	1 名
	合計(延)数	59 名	合計(延)数	18 名
他大学等	JICA 研修	2 名× 4 回	千葉大学環境リモートセンシング研究センター	1 名
			名古屋大学地球水循環研究センター	1 名
			千葉大学自然科学研究科	1 名
			国立科学博物館	1 名
			英弘精機(株)	1 名
			エン・テク(株)	1 名
	合計(延)数	8 名	合計(延)数	6 名
その他	研究会・年次報告会	4 回 参加者	154 名	
	セミナー	6 回 参加者	146 名	
	ワークショップ	1 回 参加者	78 名(国内)	
	機器の利用		8 名	
	データの利用		11 名	
	見学者			
	国内		842 名	
国外		0 名		
	利用者合計		2375 名	

## 主 な 行 事

年 月 日	記 事
2006. 4. 18	群馬県立中央高校見学（40名）
2006. 4. 22	科学技術週間・センターの一般公開
2006. 5.9~10	（株）エン・テクとの共同研究
2006. 5. 26	茨城県立竹園高校見学（24名）
2006. 6. 6	山形県立米沢中央高校見学（50名）
2006. 6. 16	八反地剛準研究員地球環境科学専攻講師に転任
2006. 7. 16	青木久準研究員着任
2006. 7. 18	平成 18 年度第 1 回陸域環境研究センター運営委員会
2006. 7. 22	圃場整備（草刈）
2006. 7. 26	筑波大学説明会（226名）
2006. 7	「陸域環境研究センター報告第 7 号別冊」発行
2006. 8. 4	自然学類体験学習（46名）
2006. 8. 7	埼玉県立越谷北高校（42名）
2006. 8. 20	つくば宇宙少年団（35名）
2006. 8. 28	立正大学地球環境科学部見学（10名）
2006. 8. 29	神奈川県立生田高校見学（14名）
2006. 9. 11	千葉大学理学部・大学院自然科学研究科見学（7名）
2006. 9.22~29	工作室・水路実験棟の解体工事
2006. 10.16~17	国際ワークショップ開催（陸域環境研究センター共催：中国科学院農業資源研究センターにおいて）
2006. 10. 17	栃木県立石橋高校（60名）
2006. 10. 18	鳥取県立鳥取東高校（6名）
2006. 10. 26	群馬県明和県央高校（60名）
2006. 11	工作室・水路実験棟の改修工事開始
2006. 11	「陸域環境研究センター報告第 7 号」発行
2006. 11. 10	群馬県立桐生高校見学（40名）
2006. 11. 22	圃場整備（草刈）
2006. 11. 24	茨城県立緑岡高校見学（40名）
2006. 12. 5	工作室・水路実験棟の改修工事完了
2006. 12. 5	長崎県立長崎西高校見学（42名）
2006. 12. 6	長崎県立長崎西高校見学（42名）
2006. 12. 8	牛久市立牛久第二小学校見学（63名）
2007. 1.25~26	陸域環境研究センター国内ワークショップ開催
2007. 3. 2	平成 18 年度陸域環境研究センター年次研究報告会
2007. 3. 26	平成 18 年度第 2 回陸域環境研究センター運営委員会

## 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、データ利用申請書 ([http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/use\\_application.html](http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/use_application.html)) 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、日平均値（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～ 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/TERC/database.html">http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/database.html</a> ) にアクセスする。 ●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。 ●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～ 2003年/3月	冊子体 (3枚/1日) 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～ 利用時の1-2年前	冊子体 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～ 利用時の1-2年前	冊子体 (センター報告) 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～ 2003年/3月	チャート 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」掲載記事の 著作権委譲のお礼

陸域環境研究センター報告第7号（p146）やホームページを通じて、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ようお願いしておりました（2007年2月末日締切）が、電子化・ウェブ公開を希望されない記事について、お知らせ頂いたものを除いて、著作権委譲をご許可いただけたものとして、2007年3月よりセンターホームページにてウェブ公開（<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/publication/ercbull.html>）を行っております。

皆様にご理解とご協力をいただきましたことを、この場をお借りして御礼申し上げますと共に、皆様の研究の一助としてお役立ていただければ幸いです。

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

---

---

## 筑波大学陸域環境研究センター報告

第8号

2007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](mailto: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，2007

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.8

November

2007

---

Contents

Foreword.....	Tadashi TANAKA .....	1
Seasonal Change of Thermal Response of Air Layer in a Red Pine Stand .....	Mizuki KONAGAYA and Yousay HAYASHI .....	3
Formation Process of Vertical Profile of Stable Isotopes in Soil Water at TERC .....	Shiho YABUSAKI and Norio TASE .....	17
On a Flat Array Sodar .....	Tatsuo HANAFUSA, Yoshihiro YAMATO and Yasushi WATARAI .....	27
The Formative Conditions and Formative Rates of Pedestal Rocks in Ishigaki Island, Okinawa, Japan .....	Hisashi AOKI, Tomomi HARUTA, Yuki MATSUSHI, Akira MAEKADO and Yukinori MATSUKURA .....	35
Field Experiment on Weathering of Limestone Tablets: Effect of Water Chemistry on Weathering Rates .....	Tsuyoshi HATTANJI and Yukinori MATSUKURA .....	41
Semi-automated Measurement of Gaseous Diffusion Coefficient of Soil Core Samples Using a PC Camera .....	Yohei HAMADA .....	49
Observational Data of Heat Balance and Water Balance -2006- .....	Yasushi WATARAI and Tsutomu YAMANAKA .....	55
Lecture .....		81
Literature List .....		85
Miscellaneous .....		89



Copyright © Terrestrial Environment Research Center,  
The University of Tsukuba, Ibaraki 305-8577 JAPAN, 2007