

筑波大学

陸域環境研究センター報告

第 9 号
2008

序	田 中 正	1
報 文		
リレンカレンの形状とそれを規定する要因：従来の研究のレビュー	松 倉 公 憲	3
筑波山南斜面における降水の安定同位体比特性	藪 崎 志 穂	15
	田 瀬 則 雄	
	辻 真 貴	
	林 陽 生	
研究ノート		
二方向振動板装置の開発	関 口 智 寛	25
ススキ株の空間構造とその季節変化	濱 田 洋 平	29
筑波山における風の観測法について	依 田 知 浩	35
	花 房 龍 男	
	林 陽 生	
	大 和 佳 祐	
人工岩石を用いた滝つぼ形成実験に関する予察的報告	井 口 達 也	43
	関 口 智 寛	
資 料		
熱収支・水収支観測資料 - 2007年 -	大 庭 雅 道	49
	山 中 勤	
セミナーの記録		75
論文リスト		79
その他		83

筑波大学陸域環境研究センター

2008年11月

序

法人化4年目を迎えた平成19年度は、昨年度に引き続き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実施されました。また、研究面においても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19年度マスタープラン対応設備経費によって、二次元造波水路の更新が行われました。これによって、格段に精度の高い実験が可能となり、他大学との共同実験も開始されました。また、同年度のリニューアル経費によって、長年の懸案事項であったトイレの全面改修が行われたことは、特記事項の一つと言えます。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3名、院生15名がセンターを利用し、卒業論文2編、修士論文5編、博士論文1編が作成されました。研究テーマとして、複数の光学センサーを用いた湿潤草地における長期モニタリング、ドップラーソーダーの実地試験、草地における潜熱エネルギー輸送の動態解明、樹種の違いが土壌水の水収支に及ぼす影響、北東アジア・シベリア間の大気物質輸送解析、同位体手法による湖沼水収支の評価、植生遷移に伴う水利用様式の変化、貧砂状況における地形変動、複合流ベッドフォームの形状に関する実験、ポットホルの形成・発達に関する基礎的研究、北海道日高地方における斜面崩壊に関する研究など、陸域環境に関する多種・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、昨年度に引き続き概算要求事項特別教育研究経費（研究推進）の配分を受け、戦略的研究プロジェクト「地球温暖

化に伴う植生の変化が地下水涵養機構に与える影響に関する研究」を推進しました。本研究は昨年度立ち上げたプロジェクト研究の継続であり、これによって組織的・戦略的研究を推進する体制が強化されました。その他、日中気象災害協力研究センタープロジェクト（JICA）、総合地球環境学研究所研究プロジェクト2-4、モンスーンアジア水文気候研究計画（MAHASRI）、Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project（CEOP）に参加し、関係機関と密接に連携して研究を推進しました。

国際協力・国際連携に関しては、昨年度に引き続き、日本学術振興会二国間共同研究経費（インドネシアとの共同研究）の配分を受け、国際ワークショップ「湿潤熱帯地域における持続可能な水利用のための統合流域管理」を開催しました。また、平成19年度文部科学省「国際協力イニシアティブ」教育協力拠点形成事業として2件の配分を受け、水・環境分野に係わる知的支援リソースデータベースとマッチングシステム構築事業および中国の水資源問題に係るOJTを実施しました。これらの事業により、水・環境分野におけるリソース・ニーズマッチング機関としての国際協力拠点を整備しました。さらに、モンゴル国における「持続可能な地下水管理」に係わる「UNESCO Chair」が設置され、これによって国際協力支援機関としての拠点整備が行われました。また、UNESCO関連の事業として、ユネスコ・アジア文化センター（ACCU）による大学生交流プログラムの支援を受け、本学学群・大学院生14名を2週間にわたってモンゴル国および中国に派遣し、国際交流事業を推進しました。

上記した各事業等を通じて、国際論文18編、国内論文10編が作成されました。の中には、平成19年度ノーベル平和賞を受賞した「IPPC第

4次報告書」の第2委員会報告の分担執筆論文が含まれており、本センターの研究成果として高く評価されるものと思われます。また、これら論文のほかに、本年度は陸域環境研究センター熱収支・水収支データベース、GAME-AAN データベース、水・環境分野における国際支援リソース・ニーズデータベースをそれぞれ作成しました。

人事面では、昨年度末の金子孝子事務職員の退職に伴い、中澤美智男専門職員が4月1日付けで着任しました。また、10月1日付けで岩田拓記準

研究員と大庭雅道準研究員がそれぞれ着任しました。

法人化後4年を経て、第1期中期計画の2/3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20年3月

陸域環境研究センター長
田 中 正

リレンカレンの形状とそれを規定する要因： 従来の研究のレビュー

Rillenkarrren on Limestone Pinnacles: A Brief Review

松倉 公憲*

Yukinori MATSUKURA*

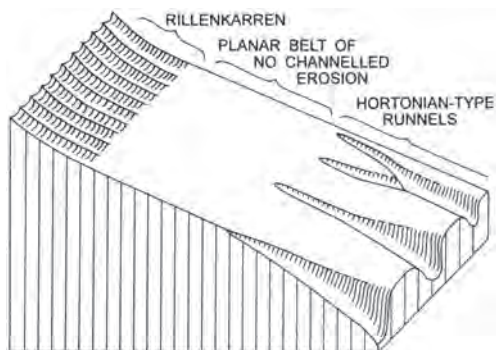
Ⅰ はじめに

石灰岩のような可溶性の岩石において、雨水や地表流、土壌水、地下水などの溶解作用によって、露頭表面に形成される種々の溝状の微地形を総称してカレン（Karren：独語）あるいはラピエ（lapiés：仏語）という。カレンを最初に系統的に論じたのは Bögli（1960）であり、その後 Jennings（1971）、Sweeting（1972）、Ford and Williams（1989）によって各種の分類が試みられている（分類に関する研究史については、中村（1991）や羽田（2005）に詳しい）。たとえば、Ford and Williams（1989）によれば、カレンは以下の4つに分類される：(A) ピットやパンなどの円形の穴、(B) 割れ目にコントロールされてできた直線状の形状：splitkarren や grikes または kluftkarren、(C) 流水にコントロールされてできた直線状の形状：microkarren (microrills), rillenkarrren, rinnenkarren (solution runnel), decantation runnel, decantation flutings, fluted scallops または solution ripple、(D) karrenfeld や limestone pavement などの複合形。

本稿で扱うのは、この中の直線上の溝である rillenkarrren（漆原和子編著「カルスト」のカルスト用語集によれば、この語は「条溝カレン」と

訳されているが、あまり使用例を見ないことから、本稿では「リレンカレン」としておく）である。リレンカレンの一般的な形状を第1図に示した。たとえば、三浦（1996）によれば、リレンカレンとは、「緻密な岩質の石灰岩に形成される。岩石表面の傾斜 40-80 度の斜面に、最大傾斜方向に延びた溝が並列する溶食溝群である。浅い丸底の溝が縦長に並び、溝と溝の間は鋭い畝をなし、その形状は揃っていて、溝の幅は 1-4 cm 深さは 1-2 cm の規模を一様に保持した波頭状の断面計を示し、その長さは発生する場所によって違いはあるが、おおむね数 10 cm である。石灰岩露頭における尾根状の突出部の両側に規則的に群をなして生じ、降下してきた雨水がまだ比較的高濃度の CO₂ を含んでいる尾根付近でもっとも完全に発達し、斜面下方で溝の起伏は鈍化し、やがて消失する。……」とまとめられている。また、リレンカレンの先駆的な研究となった Bögli（1960）によれば、リレンカレンの特徴は以下のようまとめられている：(1) リレンカレンは、水の流れが遅くなる水平面や水平に近い面には形成されない；(2) 急な斜面にでき易く、斜面が急なほどリレンカレンは大きくなる；(3) 高温なほど化学的反応が活発なので、熱帯で最も発達が良く、大きさも大きくなる；(4) 冷涼なあるいは積

* 筑波大学大学院生命環境科学研究科



第1図 リレンカレンの模式図
(Ford and Williams, 1989, Fig. 9.3 の
一部を引用・改変)

雪に覆われるような場所では発達が悪い；(5) 降雨強度が大きいほど形成されるリレンカレンの長さも大きくなる；(6) 幅は2-3 cmであることが多く、その地域差は小さい。

このBögli (1960)の研究以来、およそ30編ほどのリレンカレンに関する研究が報告されてきているが、(1) その大きさ(長さ、幅、深さなど)が何によってコントロールされているのか、(2) その形成速度はどのようなものか、などに関して不明な点が多い。本稿は、このような従来のリレンカレンに関する研究をレビューするものであり、そのことから今後の研究の展望を考えてみたい。なお、リレンカレンは、石灰岩以外の岩石にもできるという報告もあるが(たとえば、ハワイの玄武岩：Palmer, 1927, アイルランドのドレイイト・シル：Reynolds, 1961, 花崗岩：Twidale, 1982, pp. 267-279；Migoń, 2006, pp. 149-153, 砂岩：Williams and Robinson, 1994 など)、本稿では石灰岩を含む炭酸塩岩等の可溶性の岩石(物質)に形成されるものに限って議論することにする。

II リレンカレンが形成される場の条件

リレンカレンが形成されるのは、主に石灰岩の露岩表面である。第1図にも示されているよう

に、地形場としてはある程度傾いた面が必要であり、しかもその面上でもとくにその上部において形成されやすい。たとえば、この図では、露岩のクレストから斜面上部にかけての部分にリレンカレンが形成されており、中部ではリレンカレンが形成されず平坦な溶解表面(“Ausgleichsfläche”とも呼ばれる(Bögli (1960)))となっている。そして下部には、通常の流水でできる(Hortonian)侵食リルが形成されている。

リレンカレンの形成される地形場としては、ピナクルの頂部付近がもっとも適している。しかし、リレンカレンがどのような場に形成されているかに関する情報は、多くの論文でそれほど明確にされている訳ではなく、そのため形状の測定もどのような地形のところで行ったか不明な場合も多い。

Bögli (1960)がまとめたように、リレンカレンは緩勾配な斜面には形成されにくく、またその逆に急すぎる斜面にも形成されないようである。たとえば、Sweeting (1972)は、リレンカレンの発達が最も良いのは40°から80°(とくに60°から80°)の傾斜のところであると報告している。また、Piggott and Shakesby (1980)によれば、40°以下の斜面ではリレンカレンの発達は悪く、発達のいいのは60°付近の斜面であると指摘されている。オーストラリアのCoolman PlainとWee Jasperでの観察から、Dunkerley (1979)は、リレンカレンの形成される最小勾配斜面が24°と17°であり、形成場の平均は40°と46°であることを示した。また、Goudie *et al.* (1989)は、同じオーストラリアのNapier Rangeでの観察から、樹枝状や直線状の本来のリレンカレンは35°から80°の傾斜のところに形成されており、それより急になると、箱形のカレンに形状を変化させることを報告した。一方、世界の8箇所ではリレンカレンを観察したMottershead *et al.* (2000)のデータをみると、リレンカレンの形成されている斜面の勾配は20°から66°までばらついており、

必ずしも高い勾配にのみ形成されてはいない。

以上のことから、リレンカレンが特に顕著に発達する勾配があるわけではないようである。しかし、リレンカレンは直接の降雨によって形成されるものであることは間違いないであろう。なぜならリレンカレンは溶解によって形成されるものであり、溶解に寄与する水の供給源は、このような形成の地形場から降水以外には考えられないからである。

III リレンカレンの形状

第1図にも示されているように、リレンカレンは、規則正しい形状と大きさをもった直線的な溝の地形である。たとえば第2図には、秋吉台のピナクルに発達しているリレンカレンを示した。このようにリレンカレンは基本的には小さな縦溝の集合体である。溝は半円形をしており、溝と溝の間は鋭く尖った稜をなす。したがって、リレンカレンの形状値としては、長さ、幅、深さがある。長さはリレンカレンの最上部から消失する最下端部までの長さ、幅は稜と稜との間の長さ、深さは溝の最大深ということになる。ただし、深さについては、溝が斜面上に発達するものであるので、垂直深をとるか鉛直深をとるかで、特に傾斜が大きいところでは値がかなり異なるはずであるが、そのことに注意を払って計測している研究者は少ないようである。

地形研究者にとっての基本的なデータ採取としては、対象とする地形種の形状計測がある。従って、リレンカレンの研究者の多くも、それぞれ各自の研究対象地域にみられるリレンカレンの地形形状値（すなわち、長さ・幅・深さ）を計測している。Dunkerley (1979) は、深さの代わりに、リレンカレンの断面形（断面の曲率や断面積）を計測している。ところで、リレンカレンの幅は1 cm 程度であり、深さは1 cm 以下というような小さなものである。一般的には、その幅や深

さの計測には、建築現場で使われる「型どりゲージ」が使われる。

第1表は、従来の研究で計測されたリレンカレンの形状値をまとめたものである。ヨーロッパとオーストラリアにおけるデータが多いようである。表の最下部にはGlew and Ford (1980)、羽田 (2008) によって行われた室内実験において形成されたリレンカレンのデータを掲載してある。アジア以外の地域におけるデータをみると、リレンカレンの長さは11 cm から44 cm までばらついているが、その幅については二、三の例外を除くと1-2 cm 程度と揃っている。同様に深さも1 cm 以下のものが多く、値の幅は小さい。それに対し、アジア地域のデータは、いずれの形状値も他の地域に比較して大きくなっている。たとえばヒマラヤでは長さが50-200 cm と大きく、深さも3-5 cm と大きい。また、日本におけるデータ (羽田, 2007) も幅がいずれも3 cm 台と他地域に比較して若干大きいようである。そして羽田 (2007) によって計測されたスロベニアのデータが、ヨーロッパの値よりも日本の値に近いことは興味深い。

ところで、Glew and Ford (1980) はPlaster of Paris (gypsum, 焼き石膏) と岩塩の上に人工降雨を降らせリレンカレンをつくる実験をおこなった。その結果、石膏にできたリレンカレンの幅は自然の野外で石灰岩にできるものよりかなり



第2図 秋吉台のピナクル上に発達するリレンカレン

第1表 リレンカレンの形状値データ一覧（地域別に並べてある：上から順に、ヨーロッパ、北米、アフリカ、オセアニア、アジア・日本、室内実験のデータ）

Location	Mean Length (in cm)	Mean Width (in cm)	Mean Depth (in cm)	Rock Type	Source
Central Europe	< 50	2-3		Various limestones	Bögli (1960)
Europe	11.8			Various limestones	Heinemann <i>et al.</i> (1977)
Yugoslavia	16.0	1.70		Medium cryst. limestone	Lundberg (1976)
Valencia, Spain	12.2	1.8	0.40	Limestone (Cretaceous)	Gil-Senis (1992)
Lluc, Mallorca, Spain		1.0-2.5		Fine-grained limestone	Piggott & Shakesby (1980)
Lluc, Mallorca, Spain	24.2	1.72	0.46	Fine-grained limestone	Mottershead (1996)
Lluc, Mallorca, Spain	22.0	1.70	0.44	Fine-grained limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Lluc, Mallorca, Spain	19.0	1.82	0.42	Fine-grained limestone	Crowther (1998)
Es moli, Balears, Spain	28.0	1.51	0.53	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
England & Wales		1.68-2.09		Limestone (Carboniferous)	Vincent (1996)
Black Head, Co. Clare, Ireland	30.0	1.60	0.35	Limestone (Carboniferous)	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Lassithi, Crete, Greece	32.0	2.06	0.72	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Lipica, Slovenia		3.6 (2.4-5.1)	1.5 (0.7-3.2)	Limestone	羽田 (2007)
Rocky Mts. Canada		1.25-1.45		Medium to fine, cryst. limestone	Glew & Ford (1980)
Griqualand West, South Africa		1.76		Dolomite limestone	Marker (1985)
Namib Desert	17.3-20.7	2.19-2.99	0.15-0.3	Fine-grained marble	Sweeting & Lancaster (1982)
Chillagoe, Queensland, Australia		1.52	0.44	Recrystallined, coarse limestone	Lundberg (1977)
Chillagoe, Queensland, Australia		1.95	0.84	Sparry Fossiferous limestone	Lundberg (1977)
Chillagoe, Queensland, Australia		2.02		Sparry Fossiferous limestone	Lundberg (1976)
Chillagoe, Queensland, Australia	22.5, 33.5	1.74, 2.08		Recrystallined, coarse limestone	Dunkerley (1983)
Cooleman Plain, New South Wales	11.6	1.60		Coarse-grained limestone	Dunkerley (1979)
Wee Jasper, New South Wales	34.8	1.90		Fine-grained limestone	Dunkerley (1979)
Wee Jasper, New South Wales	44.0	4.09	1.66	Fine-grained limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Buchan (Wilson), Victoria, Australia	35.0	2.27	1.29	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Buchan (Main Reserve), Australia	35.0	2.25	0.39	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Buchan (Pot Hole), Australia	20.0	1.70	0.25	Limestone	Mottershead <i>et al.</i> (2000)
Napier Range, Western Australia		1.95		Limestone (Devonian)	Goudie <i>et al.</i> (1989)
Yarrongobilly, Australia	41.0 & 20.0			Fine-grained limestone	Jennings (1982)
Owen Range, New Zealand	20.0			Coarse-grained limestone	Jennings (1982)
Kashmir, northwestern Himalaya	50-200	3-7	3-5	Limestone	Mazari (1988)
Gunnung Mulu, Sarawak	40.0	1.62	0.2-1.5	Limestone	Osmaston & Sweeting (1982)
秋吉台、山口・日本		2.4	0.5-1.5	Limestone	中村 (1991)
秋吉台、山口・日本	10-60	2-5	0.4-1.6	Limestone	網本 (1992)
秋吉台、山口・日本		3.7 (1.7-6.5)	0.9 (0.2-2.1)	Limestone	羽田 (2007)
平尾台、福岡・日本		3.8 (2.0-7.6)	0.7 (0.2-2.1)	Marble	羽田 (2007)
山里、沖縄・日本		3.1 (1.5-6.4)	1.3 (0.4-4.2)	Limestone	羽田 (2007)
Laboratory simulation	14.0	0.55 & 1.75		Plaster of Paris & Salt	Glew & Ford (1980)
<i>ditto</i>		0.2-0.3	0.05-0.2	Plaster of Paris	羽田 (2008)

小さかったが（幅が0.55 cm）、岩塩には石灰岩とほぼ同じ大きさのものが形成された（幅が1.75 cm）。また、最近、羽田（2008）も石膏ブロックの45度斜面上にリレンカレンをつくり出すことに成功しているが、その幅は0.2–0.3 cm、深さは0.05–0.2 cm とかなり小さいものである。しかし実験によるデータは少なく、これだけで野外のデータとの比較をするのは難しい。

IV リレンカレンの形状を コントロールする要因

1. 斜面勾配等の地形場の影響

斜面勾配とリレンカレンの長さに関しては多くの論文で議論されているが、その結論は多様であり、統一見解が得られてはいないようである。たとえば、Sweeting（1972）は、リレンカレンが最も発達がいいのは60°から80°の傾斜のところであるが、リレンカレンの長さは露出した斜面の長さに依存することを示した。多くの研究者は、傾斜が大きくなるほど長さも長くなることを示している。しかし、Heinemann *et al.*（1977）は、最も長いものは60°周辺の斜面に形成され、もう一つの形成のピークは25°付近の斜面にあるということを示した。Glew and Ford（1980）の実験では、リレンカレンの長さとう配の間には強い相関のあることが示された。また、彼らのロッキー山脈やスロベニアなどの野外における石灰岩の計測によれば、長さとう配の間には単純な相関が見られるが、しかしそのプロットはばらついているという。

Ginés（1996）はマリョルカ島の標高150 m～1150 m に分布するリレンカレンの幅と深さを計測しているが、標高と幅には関連性がないが、標高が高いほど深さと長さは小さいことを指摘している。

2. 降雨や気温（風化環境）の影響

岩石が溶解することによりリレンカレンが形成

されるとすると、溶解を促進させるものとしての雨（雨量、雨滴の大きさ、降雨強度、雨水の化学組成やpHなど）や気温等がリレンカレンの形状を決める重要な要因となろう。しかし、どのような環境がどのようなリレンカレンを形成させるのかに関する統一的な見解はないようである。特に深さについていえば、溶解が進むほど深さが増大するように思えるが、ヒマラヤの3–5 cm のデータを除くと、従来の報告された多くのものは1 cm 以下である。このことは幅（W）と深さ（D）の比（W/D）には限界値がある可能性もある。たとえば、Mottershead *et al.*（2000）のデータによれば、この比の最小は2.33 と与えられているが、しかし、この値の意味することは議論されていない。

リレンカレンの大きさと雨量の関係についても、あまり明瞭な説明はなされていないようである。その理由の一つは、野外の場合は、形成要因の中から降雨だけの影響を単独に抽出することが難しいからであろう。

Dunkerley（1979）によると、気温が10度上昇すると2倍の溶解量になることから、リレンカレンの形成には、降雨強度や水理学的特性よりも、石灰岩の溶解特性や気温が効果的であるという。したがって、多くのカルスト研究者が指摘しているように、熱帯の暖かい地域においては、リレンカレンは温帯や寒帯の地域のそれより発達がよく、その形状も、より長く、より広く、より深くなるはずである。実際、これらのことはいくつかのデータによって支持されているが、しかし明確な結論が出ているわけではない。というのも、もし気温の高いところでリレンカレンの発達がよいということが事実であっても、その関係は温度による粘性の減少の効果によって説明されるというFord and Lundberg（1987）の主張があるからである。

Glew and Ford（1980）は、リレンカレンの形成には雨滴の大きさが重要であると主張してい

る。羽田 (2008) の実験では、直径 0.8 mm の雨滴ではリレンカレンが形成されず、0.4 mm の雨滴によってリレンカレンが形成されたという。また、Sweeting (1972, p. 81) はアドリア海岸にリレンカレンが広く発達するのは冬の豪雨が強く影響しており、ブリテン島にリレンカレンの発達があまり良くないのは、そこでは霧雨 (こぬか雨) しか降らないからであると解釈した。そして彼女は、露岩表面の豊富な地衣類や他の植物の成長がリレンカレンの形成を小さくする、と主張した。しかしこれに対し Heinemann *et al.* (1977) は、カナダのロッキー山脈の Surprise Valley において、岩石表面に存在する地衣類がリレンカレンの形成にほとんど影響しないことを示した。

3. 岩石・岩質の影響

Sweeting (1972: pp. 80-81) が、ドロマイトや軟らかい石灰岩では、リレンカレンがたとえ形成されてもすぐ破壊され、地形として残りにくい (結果として形成されにくい) と主張して以来、石灰岩の岩質とリレンカレンの形成・形状に関する議論も数多くなされてきた。たとえば、Dunkerley (1983) は、粗い岩石組織をもった岩石ではピットや小さな runnel ができやすく、リレンカレンは形成されにくいと主張している。また、Marker (1985) は南アフリカの Transvaal 地方におけるリレンカレンは、ある特定の岩質のところに限定されていることを示した (このことは降雨の強さがリレンカレン形成の第一の規制要因ではないことを示している)。しかし様な岩石組織がリレンカレンの形成にとって、かなり重要であることは示されているものの、間隙率などの物性と何か有意な関係があるかどうかについての明瞭な関係は示されなかった。また、Osmaston and Sweeting (1982) は、密度が高く細粒の硬い石灰岩 (シュミットハンマー反発値が 56) にリレンカレンが形成されていることを報告している。さらに、Sweeting and Lancaster

(1982) は、ナミブ砂漠においては、物理的風化に対する抵抗力の大きい細粒で等質な大理石に、リレンカレンの発達がよいことを報告している。

Ford and Lundberg (1987) によって、リレンカレンと岩石の関係は以下のようにまとめられている: (1) 岩石組織は特に重要な要因であり、最もよくリレンカレンが発達するのは岩石組織が均一 (等質) であるところであり、そして粒径が中粒から細粒であるところである; (2) たとえば、露頭が安定であれば、等質な石膏や岩塩ではリレンカレンがみられる; (3) リレンカレンは粗粒なところでも形成されることがあるが、それは稀である; (4) ドロマイトでも形成は稀である (なぜならドロマイトは一般的に粗粒であり表面の凹凸が大きい); (5) 岩石が不均質な場合 (たとえば粒径分布が広い岩石など) は形成されにくい; (6) 溶解し難い珪質の化石などが含まれる場合 (たとえば、「がま」などの空隙などがある場合) は形成は稀である; (7) 岩石が結晶の grus に分解するような岩石の場合も、リレンカレンの形成は稀である。

Dunkerley (1979, 1983) は、オーストラリアのいくつかの地域における調査結果をもとに、リレンカレンの長さや岩石の粒径の間には以下に関係があることを主張している。すなわち、粗粒な Coolman Plain 石灰岩には短いリレンカレンが発達し、細粒な Wee Jasper 岩石には長いリレンカレンが発達しているという。そして Chillagoe での粗粒岩においても、同様の長いリレンカレンが発達している。しかし一方で、Lundberg (1976, 1977) は、同じ Chillagoe での粗粒で結晶質である石灰岩に形成されている小さいリレンカレンは、単純に若い (形成時間が短い) のものであると考えた。なぜならそれらの岩石は粒状風化や剥離によって破壊され続けているからである。

同様に、リレンカレンの幅と岩石の粒径との関係を見ると、Glew and Ford (1980) の実験の結果から、幅の狭いリレンカレンが細粒で等質な石

膏の上につくられ、幅の広いものが粗粒で等質な岩塩につくられていることがわかる。しかし、両者の岩石の化学組成が異なっていることから、形成されたリレンカレンを単に粒径の効果だけから説明するのは厳密には正しくないであろう。比較をするためには、同じ化学組成をもち粒径だけが異なる物質でリレンカレンをつくる実験をすべきであろう。

Goudie *et al.* (1989) は、オーストラリアの Napier Range におけるリレンカレンの発達に寄与するデボン紀の石灰岩の詳細な岩石物性の調査を行った。おもな調査項目は、岩石硬度、不溶性物質の含有量、吸水率、薄片観察 ((A) ファブリック観察 (すなわち、内砕屑物に富むか、化石に富むか、オーライトに富むかという判別); (B) セメント物質の組み合わせとその量 (すなわちマイクライトとスパーライトの組み合わせとそれぞれの量); (C) 鉱物組成 (すなわちカルサイトとドロマイトの量比) などである。その結果、シュミットハンマー反発値 (R 値) が 50 以上の硬いものにしかリレンカレンが形成されないことがわかった。しかし、R 値が 50 以上でもリレンカレンが形成されない岩石もあり、R 値 = 50 はリレンカレン形成の必要条件ではあっても十分条件ではないようである。また R 値以外の分析結果からリレンカレンの形成を説明する岩石物性を導き出すことには成功していない。

また、Mottershead *et al.* (2000) は、石灰岩と石膏、岩塩にできるリレンカレンを比較することにより、リレンカレンの形成に寄与する岩石物性を知らうと考えた。しかし、石灰岩にできるリレンカレンが岩塩にできるものより大きい、ということは判ったが、岩石物性とリレンカレンの形状との関係に関する明瞭な結論を導びくには至らなかった。

以上を概観すると、硬くて等質で粒径の細かい岩石においてリレンカレンが発達し易いことが多くの研究で主張されているが、その形状に与える

岩石物性の影響に関する共通理解はほとんどないようである。

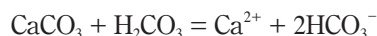
V リレンカレンの起源と形成プロセスと形成速度

1. リレンカレンの起源と形成プロセス

リレンカレンの形成プロセスに関しては、Ford and Lundberg (1987) に要約されているので、それを以下に紹介する。

リレンカレンの形状がどのようにして形成されるのか、ということに関する 2 つの基本的に異なった主張がある。一つは Bögli (1960, 1980) に代表されるような、化学的溶解によるという考えと、もう一つは Glew and Ford (1980) の主張する物理的プロセスによるという考えである。

リレンカレンの初期の研究として有名な Bögli (1960, 1980) は、リレンカレンの形成を、以下のように説明している。リレンカレンの形成は CO_2 との反応による CaCO_3 の溶解による結果である。



この反応は極めて迅速 (数秒以内) に起こると考えられる。次のステージ (リレンカレンを形成するプロセス) は水溶液中の CO_2 の水和作用である。



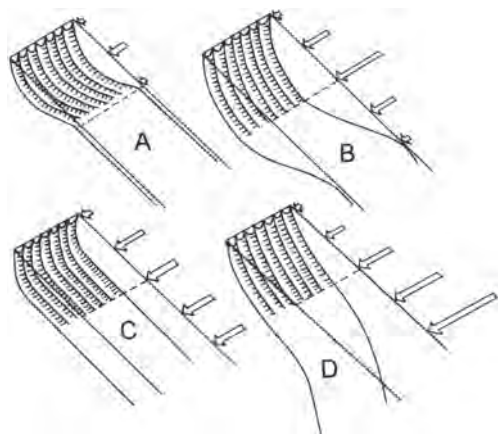
このプロセスは非常に長い時間が必要となる。

このモデルのエッセンスは、雨滴中での H_2CO_3 あるいは H^+ の瞬間的な反応がリレンカレンの峰の部分で、あるいは他の雨滴が当たった最初の地点において最大になるということである。そして反応はリレンカレンの下部 (すなわち斜面の下方) にいくに従い消費されてしまう。リレンカレンの下方に形成されている Ausgleichsfläche は

溶解が少ないゾーンであり、そこでは溶解の能力を CO_2 の摂取によって、再度取り戻すことができる。

一方、彼の説明に対し、Ford and Lundberg (1987) は以下のような疑問を呈している（第3図参照）。すなわちリレンカレンに比較して Ausgleichsfläche における溶解速度が小さくなることである。Bögli (1960) の化学モデルによれば、リレンカレンの下部を通過するとほとんど侵食力がなくなることになる（第3図A参照）。しかし、彼自身のダイアグラムではここが最大の侵食域になっている（Bögli 1980, 第3図B）。それに対し、Glew and Ford (1980) はマイクロメーターで低下速度を計測したが、その結果、リレンカレンと平坦面の両者共に同じ速度で除去されることを示した（第3図C：このプロファイルが野外で最も普通に見られるものであるということは興味深い）。

Ausgleichsfläche を伴ったリレンカレンが石膏や岩塩にも発達するという事実は、石灰岩上でリレンカレンが化学的なプロセスで発達するという主張を否定することになる（Glew and Ford,



第3図 リレンカレンの縦断形
細い線は岩盤表面のオリジナルな形状を示し、矢印はそこでの侵食速度の大きさを示している（Ford and Lundberg, 1987, Figure 4 を引用，一部改変）

1980). なぜなら、石膏や岩塩は水が存在するだけで単純な解離によって溶解することと、 CO_2 の摂取などのような化学反応がその溶解プロセスを妨害したり加速させたりすることはないからである。Glew and Ford (1980) は、彼らの実験結果から、彼らのモデルから計算された溶解量は1%飽和よりも小さかったことを見つけた。そして彼らは、リレンカレンと Ausgleichsfläche の両者において、そこでは溶解鉱物が存在するかどうかに関係なく溶解作用が強く残存していることがわかった。

Glew and Ford (1980) の実験は以下のことを示唆している：(1) リレンカレンは、峰から形成が始まり、その長さが安定なものになる所までは、下に向って形成される、(2) リレンカレンは峰で数多くの短く浅いリルとして形成され始める。そしてそれらは徐々に深くなり長くなり、横に連結し、そして、より小さな hanging リルを消滅させる、(3) 表面の横の端にあるリルは長い、なぜならここでは薄い流れが保持されるからである。リレンカレンの横断形は、平衡時には（下に凸の）放物線の形に近くなる。また、彼らは、石灰岩の表面が削剥される低下速度は、雨の強さと傾斜に依存することを示した（実験においては、最大の低下（削剥）速度は 45° の周辺で起こる）。そのことを基に、以下のような物理的「リム効果」モデルが提案された：(1) クレストのリムでは雨滴は、岩石表面での乱流反応を可能にするように、飽和した粘性のある薄い流れの下層を通して滲入する；(2) クレストから下流方向に向い、流れの深さは、もはや雨滴が岩石表面に直接衝撃を与えないような、ある限界値になるような所（すなわちリム効果がもはや及ばない所）までは増加する；(3) リレンカレンはリム効果の及ぶ範囲内にある限り、特徴的に安定な形状をもつ。放物線型の横断形は、溝の側壁に与える雨滴の衝撃を最小に抑える最も効果的な形状であり、したがって水のエネルギーを溝の中央部分に集中させ

ることができる。

一方、横断形状についていえば、Dunkerley (1983) はリレンカレンの形状を双曲線型として記載した。しかし放物線型であろうが双曲線型であろうが、上に凹な形状であれば、どんな形状であっても、水のエネルギーを集中させることができるので、そのことは特に問題にはならないであろう。

また、リレンカレンの形成に biokarst (生物カルスト作用) が関与しているという主張もある。Fiol *et al.* (1996) は、藻類が石灰岩の表面を溶解し、結晶構造を弱くすると、雨滴の衝撃による侵食がより効果的になり、それがリレンカレンの形成を促すことを主張した。

2. 形成速度

Sweeting (1972, p.81) によれば、リレンカレンはほんの数ヶ月で形成されることもあるという。地中海地域においては、歴史時代の森林伐採や土壌浸食によって新しく露出した岩石 (ピナクル) の表面にリレンカレンが形成されていることは、歴史時代に溶解が進行したことを示している。彼女は解釈した。

一方、Dunkerley (1983) は石灰岩にリレンカレンが発達するのに 2600 年の時間が必要であると示唆した (これは、リレンカレンで採水し硬度を計測 (その値は 30 mg/litre)). 降雨の 75% が露岩面を流れ、1 年間に 46 mg の石灰岩を溶解する: すなわち 60 度の斜面上の幅 1.9 cm 長さ 27 cm のリレンカレンにおいて溶解すると仮定して計算したものである。リレンカレン形成のために除去された部分の体積は 45 cm³ であるので、それに見合う重量を 1 年間に 46 mg という溶解量で割ると 2600 年が必要という計算になる)。Glew and Ford (1980) は、実験によって安定したリレンカレンの形状ができるのに要する時間は 250-350 時間であることを示している。同様に、羽田 (2008) によっても、リレンカレンの形状が平衡形に達するのは実験開始後数 100 時間である

ことが示されている。

VI リレンカレンの研究における今後の課題

リレンカレンは、カルスト地形の中では微地形に属するが、雨滴の当たる石灰岩の露岩表面には普遍的に見られるものであり、その研究も少なくはない。本稿では、それらの研究をレビューしたが、その結果リレンカレンには未解明な問題の多いことがわかった。以下にそれらをまとめるとともに、今後取り組むべき課題について提言する。

- (1) リレンカレンは、一般的にはピナクルなどの頭部に形成されることが多いようであり、形成の地形場が重要だと思われる。しかし多くの研究では、形状の把握に主眼が置かれており、論文中に地形場の情報がほとんどないようである。石灰岩の形成されている地形場の情報を正確・詳細に把握・報告する必要がある。
- (2) 形状に関する情報は多い。しかし、その計測法 (たとえば深さは垂直深なのか鉛直深なのか) やデータの数やその処理の方法が論文によって異なるという問題がある。このことが、他地域のリレンカレンと比較するのを躊躇させる要因となっている。標準的な計測数や統計処理に関する指針の提示が望まれる。
- (3) アジア地域にみられるリレンカレンの形状値が、ヨーロッパやオーストラリア地域のそれに比較して、若干大きいのはどのような理由によるのであろうか。また、羽田 (2007) によって計測されたスロベニアのデータが、ヨーロッパの値よりも日本の値に近いことは興味深い。
- (4) リレンカレンの形成に関して、岩石物性からのアプローチが極めて少ない。Goudie *et al.* (1989), Mottershead *et al.* (2000) などの研究があるだけであり、しかも彼らの研究

においても、どのような岩石物性がリレンカレンの形状をコントロールしているかの明瞭な解はないようである。Glew and Ford (1980) や羽田 (2008) による室内実験からのリレンカレン形成へのアプローチは非常に興味深いものである。このような実験をより多く積み重ねることにより、リレンカレンの形成に関与する要因（たとえば、水の流れ方・石灰岩の溶解と流水との関係・雨量（流量）、乾燥と水との接触時間の割合など）の重要度を知ることが必要であろう。

(5) 溶解する側の環境の要因の解明も重要であろう。Sweeting (1972) は降雨が強くなければリレンカレンが形成されない、と主張しているが、定量的なデータで裏付けられたものではない。一方で、雨滴の大きさや気温が重要という指摘もあり、残された問題点も多い。

(6) 上述したように、室内実験においては、数100時間でリレンカレンの形状は平衡形になるという報告があるが (Glew and Ford, 1980; 羽田, 2008), リレンカレンの形成時間に関する野外データはほとんどない。したがって、たとえば、眼前にあるリレンカレンが、その発達過程のどの段階にあるのかは現状では全く推測すらできない。このことは場所の異なるリレンカレン同志を比較する時には問題となろう。すなわち、形成速度がかなり速く、いわゆる平衡形が維持される時間が長い場合は問題にならないが、形成速度が小さい場合には問題となろう。最近、宇宙線生成放射性核種を用いた侵食速度に関する研究が増加しつつある。石灰岩の場合には、各種としてCaをターゲットに生成する ^{36}Cl (半減期: 0.3 Myr) が応用できる可能性がある (松四ほか, 2007; 2008)。

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。

文献

- 網本 昇 (1992): 秋吉台における溶食条溝の形態について. エリア山口, **21**, 11-18.
- 中村 学 (1991): 秋吉台カルストにおけるカレンの形態の研究. 三浦 肇編: 秋吉台カルストの地理. 三浦 肇教授退官記念事業会, 25-56.
- 羽田麻美 (2005): カレンの研究史とカレンの発達過程にもとづく分類の一試案. 法政地理, **37**, 25-34.
- 羽田麻美 (2007): 日本とスロベニアの炭酸塩岩地域におけるリレンカレンの形態の差異. 地形, **28**, 41-52.
- 羽田麻美 (2008): 室内実験による石膏ブロック上のリレンカレンの形成過程. 地形, **29**, 301-311.
- 松四雄騎・笹 公和・高橋 努・長島泰夫・松倉公憲 (2008): Insitu ^{36}Cl を用いた石灰岩ピナクルの溶食速度推定. 地形, **29**, 80-81.
- 松四雄騎・若狭 幸・松崎浩之・松倉公憲 (2007): 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的应用. 地形, **28**, 87-107.
- 三浦 肇 (1996): 条溝カレン. 漆原和子編「カルスト: その環境と人びとのかかわり」大明堂, 325p.
- Bögli, A. (1960): Kalklösung und Karrenbildung. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl. Bd., **2**, 4-21.
- Bögli, A. (1980): *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Berlin, Springer-Verlag, 284p.
- Crowther, J. (1998): New methodologies for

- investigating rillenkarren cross-sections: a case study at Lluc, Mallorca. *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 333-344.
- Dunkerley, D. L. (1979): The morphology and development of Rillenkarren. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **23**, 332-348.
- Dunkerley, D. L. (1983): Lithology and micro-topography in the Chillagoe karst, Queensland, Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **27**, 191-204.
- Fiol, Ll., Fornós, J. J. and Ginés, A. (1996): Effects of biokarstic processes on the development of solutional rillenkarren in limestone rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, **21**, 447-452.
- Ford, D. C. and Lundberg, J. (1987): A review of dissolutional rills in limestone and other soluble rocks. *Catena*, Suppl. Bd., **8**, 119-140.
- Ford, D. C. and Williams, P. W. (1989): *Karst Geomorphology and Hydrology*. Chapman & Hall, London, 601p.
- Gil-Senís, M. V. (1992): Quantitative analysis of solution flutes in La Safor Karst, Valencia, Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl. Bd., **85**, 89-100.
- Ginés, À. (1996): Quantitative data as a base for the morphometrical definition of rillenkarren features found on limestones. In Fornós, J. J. and Ginés, À. (eds) *Karren Landforms*, Palma, 177-191.
- Glew, J. R. and Ford, D. C. (1980): A simulation study of the development of rillenkarren. *Earth Surface Processes and Landforms*, **5**, 25-36.
- Goudie, A. S., Bull, P. A. and Magee, A. W. (1989): Lithological control of rillenkarren development in the Napier Range, Western Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl. Bd., **75**, 95-114.
- Heinemann, U., Kaaden, K. and Pfeffer, K. -H. (1977): Neue Aspekte zum Phänomen der Rillenkarren. *Abhandlungen zur Karst und Höhlenkunde*, Reihe A, **15**, 56-80.
- Jennings, J. N. (1971): *Karst*. MIT Press, Cambridge (Mass.) & London, 252p.
- Jennings, J. N. (1982): Karst of northeastern Queensland reconsidered. *Tower Karst, Chillagoe Caving Club*, Occ. Pap. **4**, 13-52.
- Lundberg, J. (1976): The geomorphology of Chillagoe limestones: variations with lithology. *Unpublished M.Sc. thesis, Aust. Nat. Univ., Canberra*.
- Lundberg, J. (1977): An analysis of the form of rillenkarren from the tower karst of Chillagoe, North Queensland, Australia. *Proc. 7th. Internat. Speleol. Congr. Sheffield*, 294-296.
- Marker, M. A. (1985): Factors controlling micro-solutional karren on carbonate rocks of the Griqualand West sequence. *Cave Science*, **12**, 61-65.
- Mazari, R. K. (1988): Himalayan karst-karren in Kashmir. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **32**, 163-178.
- Migoñ, P. (2006): *Granite Landscapes of the World*. Oxford University Press, New York, 384p.
- Mottershead, D. N. (1996): A study of solution flutes (Rillenkarren) at Lluc, Mallorca. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Suppl. Bd., **103**, 215-241.
- Mottershead, D. N., Moses, C. A. and Lucas, G. R. (2000): Lithological control of solution form: a comparative study. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **44**, 491-512.
- Osmaston, H. A. and Sweeting, M. M. (1982):

- Geomorphology*. Sarawak Museum Jour. **30** (51), 75-93.
- Palmer, H. S. (1927): Lapiés in Hawaiian basalts. *Geographical Review*, **17**, 627-631.
- Piggott, N. R. and Shakesby, R. A. (1980): Lapiés at Lluch, Mallorca. *Swansea Geographer*, **18**, 54-59.
- Reynolds, D. L. (1961): Lapiés and solution pits in olivine-dolerite sills at Slieve Gullion, Northern Ireland. *Journal of Geology*, **69**, 110-117.
- Sweeting, M. M. (1972): *Karst Landforms*. Macmillan, London, 362p.
- Sweeting, M. M. and Lancaster, N. (1982): Solutional and wind erosion forms on limestone in the Central Namib Desert. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **26**, 197-207.
- Twidale, C. R. (1982): *Granite Landforms*, Elsevier, Amsterdam, 372p.
- Vincent, P. (1996): Rillenkarren in the British Isles. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., **40**, 487-497.
- Williams, R. B. G. and Robinson, D. A. (1994): Weathering flutes on siliceous rocks in Britain and Europe. In: Robinson, D. A. and Williams, R. B. G. (eds), *Rock Weathering and Landform Evolution*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 413-432.
- (2008 年 6 月 4 日受付, 2008 年 7 月 23 日受理)

筑波山南斜面における降水の安定同位体比特性

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation at South Slope of Mt. Tsukuba

藪崎 志穂^{*}・田瀬 則雄^{**}・辻村 真貴^{**}・林 陽生^{**}

Shiho YABUSAKI^{*}, Norio TASE^{**}, Maki TSUJIMURA^{**} and Yousay HAYASHI^{**}

Abstract

We analyze monthly precipitation samples collected at six sites on south slope of Mt. Tsukuba from January to December in 2006. Precipitation amount is relatively large at an elevation of 450 m. Seasonal variation of stable isotopes of oxygen and hydrogen in precipitation at all sites show similar tendencies. In July and October, $\delta^{18}\text{O}$ and δD values are relatively lower because of amount effect. In January, low $\delta^{18}\text{O}$ and δD values are caused by a snowfall. The d-excess values of precipitation are lower at summer period and higher at winter period. The local meteoric water line is expressed as $\delta\text{D} = 7.78 \delta^{18}\text{O} + 12.6$ ($r^2 = 0.939$). The altitude effects of the precipitation of $\delta^{18}\text{O}$ and δD were calculated to be $-0.1\%/100$ m and $-0.9\%/100$ m, respectively. The altitude effects at Mt. Tsukuba are relatively lower than the common values those have been observed in Japan.

1 はじめに

降水の酸素・水素安定同位体は、降水量の違いや緯度・経度、標高および気温の違いなどにより値が異なることから地域ごとに固有の特徴を有している。こうした特徴は、これまでに地下水涵養過程の解明やその他の水循環の研究などにおいて多く用いられており、その有効性が示されている。降水の安定同位体の特徴の一つに高度効果が挙げられる。高度効果とは、標高の低い場所に降る降水の同位体比は相対的に高く（重い同位体が多い）、標高の高い場所に降る降水ほど同位体比

が相対的に低くなる（軽い同位体が多い）という現象である。これは、大気中の水蒸気が凝結して雨滴になる際には、雨滴に重い同位体が濃縮し、気相には軽い同位体が留まることに起因している。このような同位体分別が生じる相変化はレイリー過程（Rayleigh process）に準じている（Clark and Fritz, 1997）。具体的に示すと、山体部においては、標高の低い場所に降る降水はより初期の降水であるため水蒸気には重い同位体が多く含まれており、そこから凝結した雨滴の同位体比も相対的に高くなるが、降水が続いたまま時間が経過するに従い水蒸気中から重い同位体が除去

^{*} 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

されてゆくため、結果としてより後期の水蒸気から凝結して形成された雨滴の同位体比は初期のものに比べて低くなる。

しかし、イベント降水の同位体比に着目すると、降水の起源となる水蒸気の性状は様々である。例えば、降水の同位体比は対象とする地点に至るまでにその水蒸気がどれほどの降水を降らせてきたのかという過去の履歴に依存しており、同じ場所においても各イベントで降水の同位体比には大きな差が生じる。しかし、降水が地下に浸透して帯水層内において良く混合することにより、多くの場合、地下水の同位体比は一定値となる(風早・安原, 1999)。こうしたことから、ある斜面における降水の同位体高度効果が明らかになれば、山体における地下水や湧水等の涵養域の推定を行う際に有用な情報と成り得ると考えられる。そこで、本研究では、筑波山の南斜面の複数地点において観測を行い、明らかとなった降水の安定同位体比の季節変化および高度効果などの特徴について報告する。

II 研究対象地域の概要

研究対象地域である筑波山は茨城県の南西部に位置し、西側に男体山(標高 871 m)、東側に女体山(標高 877 m)の 2 つの峰からなる独立峰である。地質は山頂から標高 400 m には斑れい岩が、400 m 以下には花崗岩や斜面堆積物が同心円状に広がっている。筑波山の西側には桜川、東側には恋瀬川が流れており、山体を流れる溪流水や地中水は西側斜面は桜川に、東側斜面は恋瀬川へと流出し、やがて霞ヶ浦へと流出している。山頂付近には観光用の施設が建てられており、南側斜面の標高 200 m 付近から山麓にかけて民家が密集している。また、山麓部の西・南・東側斜面の一部には果樹園があり、主にみかん栽培が行われている。標高 50 m 以下の平野部には水田が多く広がっており、米の産地としても知られている。

筑波山山頂(旧筑波山測候所、標高 868 m)で観測された気象データによれば(1982 ~ 2000 年データ)、年降水量は 1230 mm、年平均気温は 9.7℃である。降水量は 5 ~ 6 月の梅雨時期と、9 ~ 10 月の秋雨前線の時期に相対的に多くなる傾向が認められる。日平均気温は 7 ~ 8 月の夏季には 20℃を超え、1 ~ 2 月の冬季には 0℃を下回ることが多い。一方、筑波山より南西約 13km の下妻(標高 20 m)における 1979 ~ 2000 年の気象データでは、年降水量は 1217 mm、年平均気温は 13.7℃である。

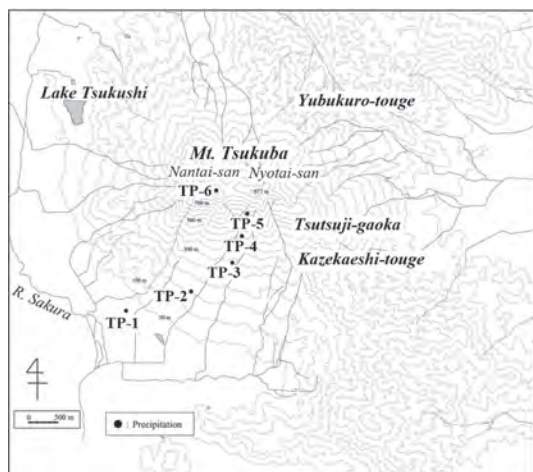
III 研究方法

筑波山の南斜面の 6 地点において、2005 年 12 月から月ごとの降水採取を行った。採取装置を設置する際には、できる限り樹木の影響の少ない場所を選んだ。採取地点は、山麓部から TP-1 (30 m)、TP-2 (160 m)、TP-3 (275 m)、TP-4 (450 m)、TP-5 (640 m)、TP-6 (878 m)とした(第 1 図)。それぞれの地点の概要を記すと、TP-1 は関東鉄道つくば北営業所に隣接する駐車場の一角、TP-2 は旧筑波駅から筑波山神社へとむかう車道の脇、TP-3 は筑波山神社よりやや北東方向に登った場所、TP-4 と TP-5 は筑波山神社から御幸ヶ原へと続く登山道の脇、TP-6 は男体山の山頂にある筑波山測候所の跡地(現在は筑波大学気象観測ステーションが設置されている)である。

それぞれの地点に、蒸発防止構造を有した降水装置を設置した。降水採水装置に取り付けたロートは直径 15 cm、容器は 5 L のポリエチレン製のものをを用いた。採水は基本的には毎月 1 回、月末に採取した。現地では降水の採取量、pH、EC を測定した。また各地点の降水量は以下の式により求めた。

$$P = S / (3.14 \times r^2) \times 10 \quad (1)$$

ここで、P は降水量 (mm)、S は採取量 (ml)、



第1図 降水採取地点

r は装置に取り付けたロートの半径 (cm) である。

採取した降水は 100 ～ 1000 ml のポリエチレン製の容器に保存して研究室に持ち帰った後、一般水質および酸素・水素安定同位体測定を実施した。一般水質のうち、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} についてはイオンクロマトグラフ (HIC-SP/VP Super, デュアル流路システム, Shimadzu 社製, および DX-120, DIONEX 社製) を、 HCO_3^- については pH 4.8 アルカリ度滴定法を用いて分析を行った。酸素・水素安定同位体比は自動平衡装置による前処理を実施した後、安定同位体質量分析装置 (Finnigan MAT 252, Thermo Electron 社製) により分析した。同位体比は、標準平均海水 (V-SMOW) からの 1000 分率偏差である δ 値で示した。

また、毎月の降水採取と併せて筑波山の渓流水、地下水、湧水等の採取も複数回実施しているが、この結果については別途報告する予定である。

IV 結果・考察

本稿では、採取した降水データのうち、2006 年 1 月から 12 月までの 1 年分のデータを用いて考察を行うこととする。なお、TP-2 では、降水

採取装置の破損により、8 ～ 12 月のデータは欠測となっている。

1. 降水量, EC, pH の観測結果

TP-1 ～ TP-6 の地点の降水量, EC, pH の測定データを第 1 表に示した。

降水量はいずれの地点においても 7 月と 10 月は相対的に多く、1 ～ 3 月は相対的に少なくなっている。全体的にみると標高が高くなるにつれ降水量は多くなっているが、TP-5 の標高 640 m で特に多くなる傾向がみられる。これは雲底高度と関係していると考えられる。雲底とは雲が存在する部分で一番低いところのことを指し、また水蒸気の凝結が生じて雲粒が生成されはじめる高度のことを雲底高度という (吉野ほか, 1985)。雲物理学的な観点からすると、降水は雲底高度で相対的に多くなる (例えば、浅井ほか, 1981)。こうしたことから、筑波山においては標高 640 m 付近に雲底高度が存在することが多いために、TP-5 の降水量が多くなっているのではないかと推定される。

EC は標高が高い地点ほど低くなる傾向が認められるが、それほど大きな差はない。年変動をみると、1 ～ 4 月において相対的に高い値を示す一方、7 月と 10 月においては相対的に値が低くなっている。これらの月は降水量が多くなっており、降水による希釈の影響があらわれていると考えられる。

pH は標高が高くなるにつれて値が低くなっている。一般的に、炭酸ガス飽和時の降水の pH は 5.6 となり、それよりも低い pH を示す降水を酸性雨と呼んでいる。酸性雨は、化石燃料の放出に伴って大気中に排出された硫黄酸化物や窒素酸化物、塩化物、フッ化化合物が複雑な化学反応によって硫酸イオン、硝酸イオン、塩化物イオン、フッ化物イオンに変化し、これらを大気中で取り込み酸性度が高くなることにより生じている。日本各地における酸性雨の平均値は pH 4.7 ～ 4.8 を示しており、その約半分が硫黄化合物、約半分が窒素化合

物に因るものであるとされている（日本陸水学会，2006）．筑波山のデータをみると，TP-1 の標高の低い部分では降水の pH は 5.6 以上となる場合が多く，酸性雨の影響があまり及んでいないと思われるが，他の地点においてはほとんどの場合が pH 5.6 以下を示している．特に TP-6 の男体山山頂の pH は他の地点と比較しても値が低くなっており，より酸性雨の影響が強くあらわれている．季節変化をみると，2，3 月の pH は相対的に低くなっている．この時期の降水量は相対的に少ないことが降水の pH の低下に関与していると考えられる．

2. 酸素・水素安定同位体比の測定結果

TP-1 ～ TP-6 の降水量，酸素安定同位体比（以下， $\delta^{18}\text{O}$ とする），水素安定同位体比（以下， δD とする）および d-excess の月変化を第 2 図に， $\delta^{18}\text{O}$ ， δD および d-excess の数値データを第 1 表に示した．

各地点における降水量， $\delta^{18}\text{O}$ および δD 値はほぼ同じ季節変化を示している．降水量の多い 7 月と 10 月の安定同位体比はいずれの地点においても相対的に低くなっており，雨量効果が認められた．また，1 月の同位体比は相対的に低くなっている（第 2 図）．筑波大学構内で採取したイベント降水のデータ（Yabusaki *et al.*, 2006）によると，2006 年 1 月 21 日に約 14 mm の降雪があった．このイベントの同位体比は， $\delta^{18}\text{O}$ は -13.5% ， δD は -86% と低い値を示しており，筑波山においてもこの時期の降雪の影響を受けているため同位体比が低くなったと考えられる．地点間でデータを比較すると，標高の高い地点ほど同位体比は低くなる傾向が認められた（第 1 表）．

d-excess 値をみると，冬季に高く，夏季に低くなっており，4 月と 10 月に大きく変化する傾向が認められる（第 2 図）．d-excess 値は以下の式で定義される（Dansgaard, 1964）．

$$d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O} \quad (2)$$

Dansgaard（1964）はまた，降水の d-excess 値は降水の起源となる水蒸気が蒸発するときの相対湿度に大きく依存していると指摘している．例を示すと，相対湿度の低い乾燥した場所において急速に蒸発・水分補給が生じた場合の水蒸気の d-excess 値は高い値となり，相対湿度の高い湿潤な環境下でゆっくりとした蒸発および水分補給が生じて形成された水蒸気の d-excess 値は低くなるという現象である．日本においては，日本海起源の水蒸気からもたらされた降水の d-excess 値は相対的に高く，太平洋起源の水蒸気によってもたらされた降水の d-excess 値は相対的に低くなる．従って，関東地方の降水の d-excess 値は，太平洋起源の気団が活発になる夏季においては相対的に低くなり，日本海起源の気団が活発になる冬季においては相対的に高くなるという特徴があらわれている．こうした性質を利用することにより，ある地点における降水の起源などについて推定することが可能となる場合もある．

筑波大学構内で採取したイベント降水および月降水のデータ（前述）においても，d-excess 値は冬季に高く，夏季に低いという特徴が明瞭にあらわれている．また，その変換点は 4 月と 10 月に認められることから，この時期に太平洋側の気団と日本海側の気団の勢力の交代があるのではないかと考えられる（藪崎・田瀬，2005）．筑波山の降水についても同様の傾向が認められる．中部日本における平均的な d-excess 値は 9.1 ～ 22.2 であるとの報告がなされており（早稲田・中井，1983），筑波山の降水の d-excess 値もほぼその範囲内にある．また，各地点のデータを比べてみると，標高の低い地点のほうが d-excess 値は低く，高い地点ほど d-excess 値は高くなる傾向があらわれている．こうした現象は御嶽山の南東斜面においても観測されている（中村ほか，2002）．このように，筑波山の南斜面において標高の低い地点で d-excess 値が低くなる原因として，雨滴蒸発の影響が考えられる．これは降水蒸

第 1 表 各地点における降水量および安定同位体比データ (2006 年 1 月～12 月)

TP-1 (30 m)							TP-2 (160 m)						
Month	Precipitation amount mm	EC $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	d-excess	Month	Precipitation amount mm	EC $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	d-excess
January	34.3	28.8	6.7	-12.9	-87	16.2	January	29.3	24.8	6.7	-13.2	-93	12.7
February	54.4	20.8	4.7	-9.8	-61	18.0	February	63.7	19.6	5.4	-9.8	-60	18.2
March	30.9	29.3	4.9	-7.1	-38	18.6	March	41.3	26.7	4.5	-7.8	-45	17.5
April	73.0	24.4	6.1	-6.8	-39	15.2	April	81.2	29.3	6.1	-7.0	-41	15.3
May	98.5	18.7	6.1	-6.3	-40	10.1	May	87.2	45.3	6.1	-6.3	-39	11.5
June	125.5	28.2	6.0	-6.1	-41	7.9	June	91.7	14.2	5.5	-7.5	-51	8.5
July	232.4	11.5	7.1	-10.5	-74	9.6	July	229.9	9.2	7.7	-10.7	-77	8.6
August	86.6	19.9	6.6	-7.4	-52	7.1	August	-	-	-	-	-	-
September	94.3	10.7	5.4	-6.0	-34	13.8	September	-	-	-	-	-	-
October	227.0	8.9	6.6	-10.8	-76	10.4	October	-	-	-	-	-	-
November	69.1	11.2	5.2	-8.4	-46	20.8	November	-	-	-	-	-	-
December	123.4	18.9	5.7	-9.7	-63	14.8	December	-	-	-	-	-	-

TP-3 (275 m)							TP-4 (450 m)						
Month	Precipitation amount mm	EC $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	d-excess	Month	Precipitation amount mm	EC $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	d-excess
January	40.9	12.9	6.3	-13.1	-90	14.2	January	32.9	26.3	6.2	-13.5	-93	14.8
February	99.5	11.3	4.9	-10.4	-64	18.7	February	73.8	20.2	4.7	-10.6	-66	18.9
March	48.0	20.3	4.3	-8.0	-46	17.9	March	39.9	30.4	4.3	-8.4	-50	17.6
April	105.7	19.2	5.6	-7.5	-43	17.0	April	81.0	30.4	5.3	-7.6	-43	17.7
May	121.2	13.4	5.2	-7.0	-44	11.7	May	103.5	16.7	5.7	-6.8	-43	11.0
June	136.2	21.0	4.8	-8.0	-54	10.0	June	119.0	14.1	5.3	-7.8	-53	9.9
July	295.8	11.3	6.3	-10.8	-77	9.0	July	226.5	14.5	5.6	-11.5	-82	10.3
August	101.3	17.0	6.2	-8.0	-55	8.3	August	83.8	18.3	5.3	-8.0	-55	9.3
September	183.2	7.0	5.2	-6.3	-34	16.0	September	109.0	28.4	5.4	-6.9	-40	14.9
October	284.8	2.9	6.1	-10.8	-75	11.5	October	265.5	5.8	6.1	-11.3	-78	12.4
November	112.7	8.1	5.0	-9.3	-54	21.1	November	74.5	14.3	5.1	-9.2	-52	21.8
December	178.3	7.1	4.5	-10.0	-62	17.8	December	146.1	9.6	5.4	-10.0	-62	18.1

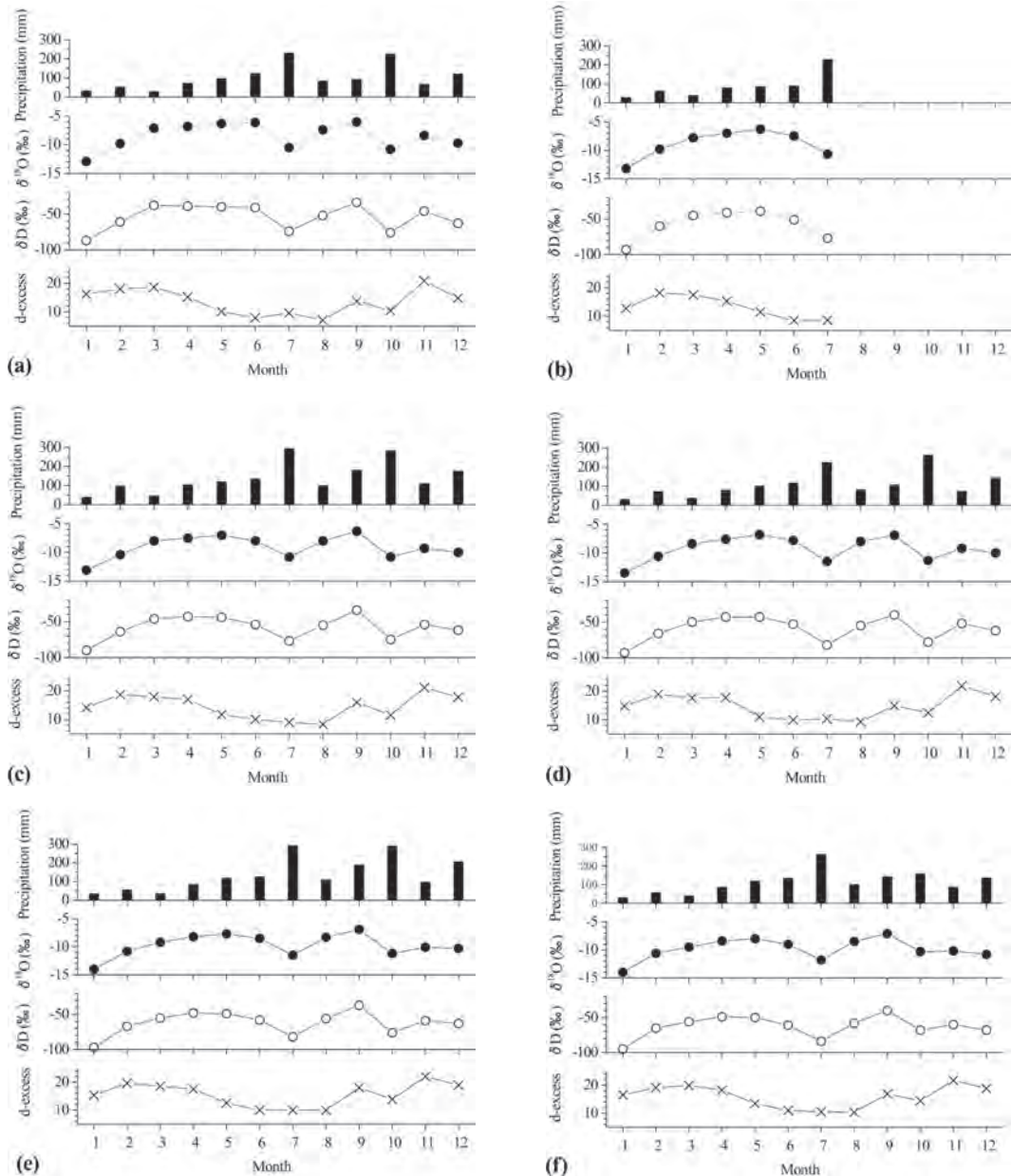
TP-5 (640 m)							TP-6 (871 m)						
Month	Precipitation amount mm	EC $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	d-excess	Month	Precipitation amount mm	EC $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	d-excess
January	36.1	20.7	6.3	-14.0	-97	15.3	January	31.5	26.3	4.7	-14.0	-95	16.5
February	56.6	28.0	4.9	-10.8	-67	19.6	February	58.7	17.0	4.7	-10.6	-65	19.1
March	37.0	31.8	5.2	-9.2	-55	18.5	March	42.1	24.3	4.4	-9.5	-56	19.9
April	85.7	29.8	5.1	-8.2	-48	17.5	April	89.1	22.9	4.9	-8.4	-49	18.2
May	119.5	17.6	5.1	-7.7	-49	12.5	May	120.4	9.8	5.5	-8.0	-50	13.4
June	127.4	14.8	5.2	-8.5	-58	10.0	June	136.0	16.5	4.4	-9.0	-61	11.0
July	293.6	10.3	8.1	-11.5	-82	10.0	July	264.1	25.0	5.5	-11.8	-84	10.5
August	110.4	17.6	5.1	-8.3	-56	9.9	August	102.5	16.3	4.7	-8.5	-58	10.3
September	190.2	11.0	5.5	-6.9	-37	18.0	September	144.1	6.4	5.6	-7.1	-40	16.9
October	291.3	5.4	6.0	-11.2	-76	13.8	October	160.2	5.5	5.7	-10.3	-68	14.4
November	97.4	13.0	5.3	-10.1	-59	22.0	November	88.9	10.9	4.8	-10.2	-60	21.7
December	207.8	8.6	5.7	-10.3	-63	18.9	December	137.3	7.6	5.7	-10.8	-68	18.8

発ともよばれており、雲底から雨滴や雪などの降水粒子が落下する際、周囲の空気が一般に水蒸気未飽和の状態にあるため、多かれ少なかれ、落下しながら蒸発あるいは昇華することをいう（吉野ほか, 1985）。山体における降水発生のメカニズムでは、雲が山体の斜面に沿うようにして標高の高い部分へと上昇してゆくことが一般的に示されているが、筑波山においてはこうした降水過程だ

けでなく、山頂付近に雲がかかり、弱い降水が続くような場合も認められている。仮に、雲低高度が 640 m 付近にあると仮定した場合、降雨強度が弱く相対湿度が低いような条件下では、雨滴が落下する際に蒸発の影響を受けて降水の同位体比は高くなる。また、雲底からの距離が長いほど蒸発の影響が大きくなるため、より標高の低い地点の降水ほど雨滴蒸発による同位体濃縮が強くあら

われていると考えられる。降水の同位体比を地点ごとに分けて δ -ダイアグラム上にプロットし、各地点の天水線を求めた結果、天水線の傾きはTP-3 から TP-6 までは 7.8 ~ 7.9 とほぼ同一であったが、一番標高の低い TP-1 の傾きは 7.6 と

やや小さくなっていた。このことから、TP-1 においては降水の蒸発の影響が他の地点よりも強くあらわれており、これは雨滴蒸発に起因するのではないかと想定される。雨滴蒸発については今後も更に検討を行い、明瞭に示してゆきたいと考え



第2図 降水量と $\delta^{18}\text{O}$ および δD 値の月変化 (2006年1月~12月)
(a): TP-1, (b): TP-2, (c): TP-3, (d): TP-4, (e): TP-5, (f): TP-6

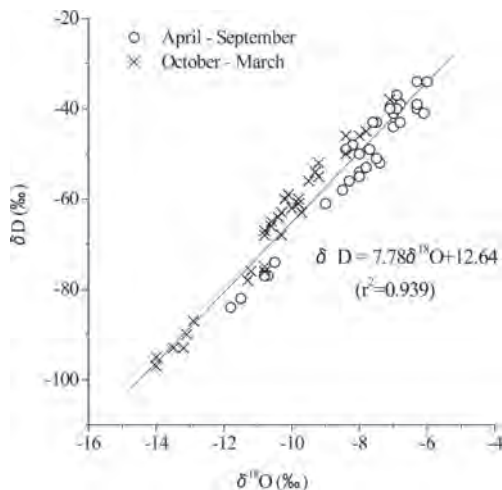
ている。

全地点の降水の同位体比を δ -ダイアグラム上にプロットしたのが第3図である。4～9月と、10～3月のデータを分けて表示した。データはほぼ一直線上に分布している。天水線は $\delta D = 7.78 \delta^{18}O + 12.64$ ($r^2 = 0.939$) であり、Craig (1961) によって示された世界の天水線 (Global Meteoric Water Line: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$) とほぼ同じである。また、筑波大学構内で採取した降水の天水線 ($\delta D = 7.7 \delta^{18}O + 11.9$ ($r^2 = 0.90$)), Yabusaki *et al.*, 2006) と一致している。10～3月のデータは相対的に天水線の上部側に位置しており、この図においても冬季の降水の d-excess 値が相対的に高いことが示唆される。また、10～3月の同位体比は相対的に低い値であることも示されている。

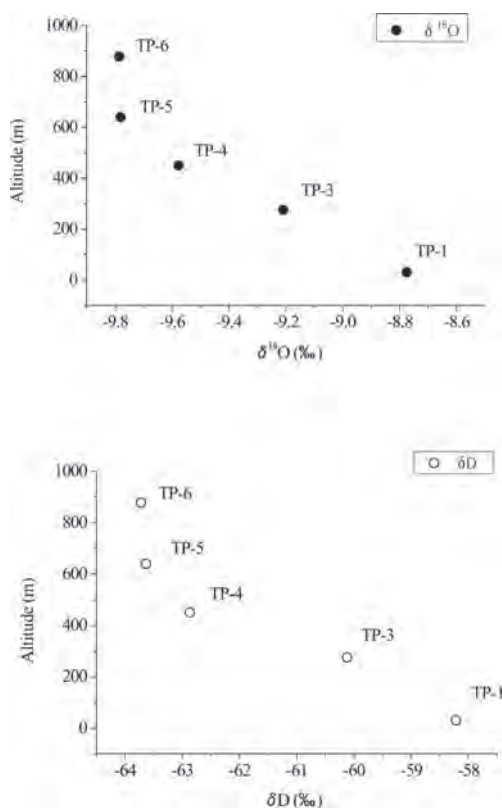
3. 降水の安定同位体の高度効果について

標高と降水の $\delta^{18}O$ および δD の関係を第4図に示した。それぞれの同位体比データは、各地点の2006年1～12月までの値を降水量で重み付けをして求めた加重平均値として示している。この結果をみると、標高の低い地点から高い地点にゆくに従い同位体比は低くなる傾向が明瞭に示されている。しかしながら、TP-5とTP-6では、 $\delta^{18}O \cdot \delta D$ 共にほぼ同じ値となっている。これはIVの1.でも述べたように、TP-5(標高640m)付近に雲底高度が生じることが多いため、これよりも高い標高の場所に降る降水は雲内(水蒸気内)でよく混合しており、同位体比は一定した値を示していると考えられる。

TP-1～TP-5の値を用いて $\delta^{18}O$ および δD の高度効果を求めた結果を第2表に示した。いずれの時期においても高度効果の影響は認められるが、特に3～6月で高度効果が強くあらわれていることが認められる。この時期の高度効果の平均値を求めると、 $\delta^{18}O$ で $-0.18\text{‰}/100\text{ m}$ 、 δD で $-1.4\text{‰}/100\text{ m}$ であり、年平均値よりも大きな値となっている。筑波山周辺においては、3～6月



第3図 降水の δ -ダイアグラム



第4図 標高と $\delta^{18}O$ および δD の年加重平均値の関係
(TP-2は8月～12月のデータが欠測のため表示していない)

は卓越風向が南西方向あるいは南東方向であるため（気象庁ホームページ）、観測地点を設置した南側斜面では降水の同位体の高度効果があらわれやすい条件であることが、この間の高度効果の値の上昇に起因していると思われる。高度効果の年間の平均値は、 $\delta^{18}\text{O}$ は $-0.1\text{‰}/100\text{ m}$ 、 δD は $-0.9\text{‰}/100\text{ m}$ である。日本各地の降水の安定同位体比の高度効果（代表値）は $\delta^{18}\text{O}$ は $-0.2 \sim -0.3\text{‰}/100\text{ m}$ 、 δD は $-2.0\text{‰}/100\text{ m}$ であるとされており（早稲田・中井，1983），これらの値と比較すると筑波山の高度効果の値はやや小さい。他の地域で観測された高度効果の一例を示すと、富士山では $\delta^{18}\text{O}$ ： $-0.4\text{‰}/100\text{ m}$ （早稲田・中井，1983），岩手山では $\delta^{18}\text{O}$ ： $-0.23\text{‰}/100\text{ m}$ 、 δD ： $-2.0\text{‰}/100\text{ m}$ （風早・安原，1999），八ヶ岳では $\delta^{18}\text{O}$ ： $-0.29\text{‰}/100\text{ m}$ 、 δD ： $-2.33\text{‰}/100\text{ m}$ （風早・安原，1994）など比較的高度効果が強くあらわれている地域がある一方で、比叡山の $\delta^{18}\text{O}$ ： $-0.19\text{‰}/100\text{ m}$ 、 δD ： $-0.4\text{‰}/100\text{ m}$ （小林ほか，1997）や、御嶽山の $\delta^{18}\text{O}$ ： $-0.14\text{‰}/100\text{ m}$ 、 δD ： $-0.95\text{‰}/100\text{ m}$ （中村ほか，2002）の研究のように高度効果が小さい値を示している地域もある。筑波山の北側斜面において1987年9月～1988年8月に観測された結果（Sanjo，1990）では、

第2表 各月における降水の安定同位体比の高度効果（2006年1月～12月）

	$\delta^{18}\text{O}$ (‰/100m)	δD (‰/100m)
January	-0.1	-0.9
February	-0.1	-0.7
March	-0.2	-2.0
April	-0.1	-1.1
May	-0.2	-1.3
June	-0.2	-1.3
July	-0.1	-1.1
August	-0.1	-0.5
September	-0.1	-0.7
October	-0.1	-0.7
November	-0.2	-1.5
December	-0.1	-0.5
Weighted mean	-0.1	-0.9

降水の高度効果は $\delta^{18}\text{O}$ ： $-0.14\text{‰}/100\text{ m}$ 、 δD ： $-0.68\text{‰}/100\text{ m}$ であり、対象とした期間は異なるが、本研究対象地である南側斜面の値とほぼ同じ値を示している。筑波山の降水の同位体比の高度効果が相対的に小さくなっている原因としては、筑波山に降水をもたらす雲（水蒸気）の性質や、季節による卓越風向の違い、また雨滴蒸発の影響等が複雑に関わっているためであると考えられ、安定同位体比の変化は単純にレイリー過程のみで説明することは難しい。筑波山における降水の高度効果について更に考察を深めるためには、降水をもたらした雲のパターンなどを併せて検討を進めてゆく必要があると考えられる。

V まとめ

筑波山南斜面で月降水を採取し、調査・分析を行った結果、以下の事柄が明らかとなった。

- 1) 降水量は標高 640 m で相対的に多くなっており、雲底高度はこの付近に位置するものと思われる。
- 2) 降水の $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD の月変化はいずれの地点においても同様の傾向を示している。2006年7月と10月の同位体比は相対的に低くなっており、これは降水量が多かったためである（雨量効果）。また、1月の同位体比は雪の影響を受けて低い値を示している。
- 3) d-excess の季節変化をみると、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。これは降水をもたらす気団の違いに由来している。
- 4) 標高の低い地点の降水の d-excess 値は相対的に低い値を示している。 δ -ダイアグラムの結果から、雨滴蒸発による同位体濃縮の存在が示唆された。
- 5) TP-1～TP-6 の全データを用いて求めた筑波山の降水の天水線は $\delta\text{D} = 7.78 \delta^{18}\text{O} + 12.64$ ($r^2 = 0.939$) であり、Craig の天水線とほぼ同じ値

である。

- 6) 降水の高度効果は、3～6月で相対的に強くあらわれていた ($\delta^{18}\text{O}$ で $-0.18\text{‰}/100\text{ m}$, δD で $-1.4\text{‰}/100\text{ m}$)。年平均値は, $\delta^{18}\text{O}$ は $-0.1\text{‰}/100\text{ m}$, δD は $-0.9\text{‰}/100\text{ m}$ であり, これは日本の平均値よりもやや小さい値となっている。この要因として気象条件の季節による違いや雨滴蒸発の影響等が複雑に関わっていることが考えられ, 単純にレイリー過程による同位体変化のみでは説明できない。

今後は, 降水の同位体比と筑波山の渓流水, 湧水等のデータを比較して, 山体における水の涵養域について考察を進めてゆきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり, 降水装置の設置をお許しくださしました関東鉄道つくば北営業所および筑波山神社の皆さま方に心より御礼申し上げます。また, 査読者および編集者のかたの懇切なご指摘に感謝致します。

本研究は, 筑波大学の平成17年度学内プロジェクト研究『筑波山における気象・水文環境の高精度モニタリングによる大気・水循環場の解明』の助成を受けて実施しました。

文献

- 浅井富雄・武田喬男・木村龍治 (1981): 「大気科学講座 2 雲や降水を伴う大気」東京大学出版会, 249p.
- 風早康平・安原正也 (1994): 湧水の水素同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程. ハイドロロジー (日本水文科学会誌), **24**, 107-119.
- 風早康平・安原正也 (1999): 岩手火山の地下水流動系—同位体水文学的手法による予察結果—. 月刊地球, **21** (5), 290-295.

気象庁ホームページ URL: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

- 小林正雄・北岡豪一・吉岡龍馬・堀内公子・笹井恵美 (1997): 比叡山地東麓一帯の降水・河川水および地下水の水素・酸素の同位体比. 日本水文科学会誌, **27** (3), 143-150.
- 中村太郎・佐藤 努・安原正也 (2002): 御嶽山南東斜面における天水の高度効果. 日本水文科学会誌, **32** (4), 135-147.
- 日本陸水学会 (2006): 「陸水の事典」講談社, 578p.
- 藪崎志穂・田瀬則雄 (2005): つくば市における降水の安定同位体比の特徴について. 水文・水資源学会誌, **18** (5), 592-602.
- 吉野正敏・浅井富雄・河村 武・設楽 寛・新田尚・前島郁雄 (1985): 「気候学・気象学辞典」二宮書店, 742p.
- 早稲田 周・中井信之 (1983): 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成. 地球化学, **17**, 83-91.
- Clark, I. and Fritz, P. (1997): *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, 328p.
- Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Dansgaard, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, **16** (4), 436-468.
- Sanjo, K. (1990): Environmental isotope hydrology of Mt. Tsukuba. Ph.D dissertation, Doctoral program in Geosciences, University of Tsukuba, 101p.
- Yabusaki, S., Tase, N. and Tsujimura, M. (2006): Temporal variation of stable isotopes in precipitation at Tsukuba City. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, **2**, 31-35.

(2008年6月2日受付, 2008年8月22日受理)

二方向振動板装置の開発

Development of a Two-dimensional Oscillatory Bed

関口 智寛*

Tomohiro SEKIGUCHI*

1 はじめに

波によって引き起こされる振動流が未固結な砂質堆積物からなる海底に作用すると、一般に“ウェーブリップル”と呼ばれるベッドフォームが発達し、海底における土砂輸送に影響をおよぼす。このため、二次元造波水路や振動流トンネル、振動板装置などを用いた数多くの実験的研究により、一次元振動流下のウェーブリップルの形状やサイズと振動流や堆積物の特性の関係が明らかにされてきた（たとえば Sekiguchi, 2003 およびその引用文献を参照）。

しかし、自然界において、振動流は必ずしも一次元的ではない。たとえば、鉛直な岸壁に対して波が斜めに入射し、入射波と反射波が重なり合わさって short-crested waves が生じる場合には、楕円から円軌道を描く二次元振動流が底面付近に生じる（たとえば Silvester, 1972）。この場合、振動流の水平軌道は岸沖方向に変化し、一次元振動流から円軌道を描く二次元振動流への遷移的变化が繰り返される。Short-crested waves のように周期と波高が等しい波が重なり合わさるのではなく、周期や波高、進行方向が異なる波が重なり合わさる場合には、より複雑な軌跡を描く二次元振動流が底面付近に生じえる。

二次元振動流下で形成されるベッドフォームに関する実験的研究例は極めて少なく、short-

crested waves 下のベッドフォームについての平面造波水槽実験が数例行われてきたに過ぎない（Silvester, 1972, 1975; Lin *et al.*, 1986; Jan and Lin, 1998）。それらの研究により、振動流場の空間変化に応じてベッドフォームのパターンが変化し、特に円軌道を描く振動流下では波峰線が多角形状のパターンを示す interference ripple（Allen, 1982, p.435）が形成されることが示されている（たとえば Jan and Lin, 1998）。

しかしながら、前述のように short-crested waves 下においては振動流の水平軌道が空間的に変化するため、平面造波水槽を用いた実験では、二次元振動流の特性とベッドフォームの形状・サイズの対応関係について厳密な議論をおこなうのは難しい。このため、楕円軌道もしくは円軌道を描く振動流など、比較的単純な二次元振動流によって生じるベッドフォームについてさえも、二次元振動流とベッドフォームの形状・サイズの関係についてほとんど議論されていない状況にある。また、既往研究で用いられてきた平面造波水槽は巨大で実験に労力を要する上に、装置そのものが高価である。特に、周期や波高・進行方向が異なる波の重ね合わせが可能な平面造波水槽を導入するには、多大な費用が必要となる。

このような問題点を克服し、二次元振動流下のベッドフォームに関する研究を促進するために、あらたに二方向振動板装置を開発したので、ここ

* 筑波大学陸域環境研究センター

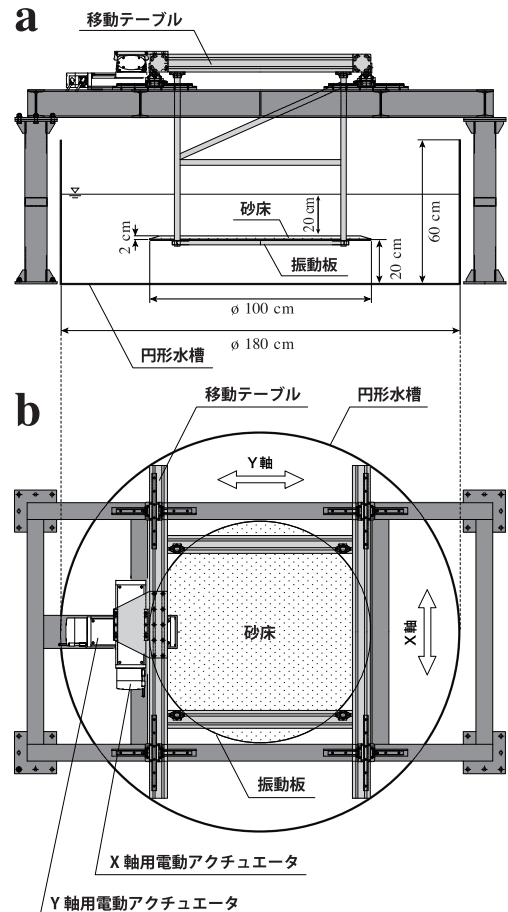
に報告する。

II 二方向振動板装置

今回開発した二方向振動板装置（株式会社西日本流体技研，VM-AX2，第1図，第2図）は，トラバース装置，円形水槽，および制御システムからなり，砂床をのせた振動板を静水中で二次元水平振動運動させることによって，二次元振動流と砂床との相互作用を再現する．振動板と水槽内壁・水面との間隔が小さいと，振動板の振動運動によって実験で想定していない水面波や流れが生じやすいため，この装置では直径180 cm，深さ60 cmの円形水槽（第1図）を採用し，振動板から水槽内壁・水面までの距離を十分に確保できるようにした．水槽底面から振動板最下部までの高さは20 cmであり，砂面から振動板最上部までの水深を20 cmとして使用することを想定している．

トラバース装置（第1図）は2基の電動アクチュエータ，移動テーブル，振動板，およびそれらを支えるフレームからなる．2基の電動アクチュエータは互いに直交するように設置されており，移動テーブルと連結された円形振動板（直径100 cm）に対して，互いに直交する2方向（ここではそれぞれx，y方向と呼ぶことにする）の水平振動運動を加えることができる．各振動運動の振幅や加速度は，電動アクチュエータの性能によって制限され，振幅の上限は10 cm，砂床の厚さを2 cmとする場合の加速度の上限は150 cm/sec²である．

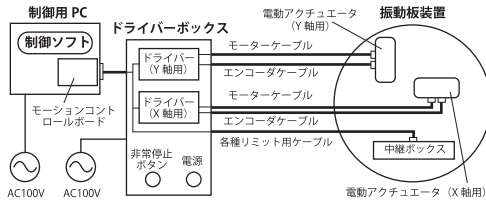
制御システムの概略図（第2図）に示すように，電動アクチュエータはドライバーボックスとモーションコントロールボードを介して制御用コンピュータ（OS：Windows XP）に接続されており，その動作はソフトウェア「Motion Controller」により制御される．このソフトウェアを使用し，（1）正弦運動，もしくは（2）座標



第1図 トラバース装置および円形水槽：
(a) 側面図，(b) 上面図，(c) 写真．

データに基づく任意の振動運動を発生させることができる．

正弦運動を発生させる場合，x方向，y方向そ



第2図 制御システム概略図

それぞれの振動運動について周波数，振幅，位相を指定でき，これらの組み合わせを変化させることで様々な二次元振動流を発生させることができる．たとえば， x, y 方向の振動運動の周波数，位相を等しくすると，振幅の組み合わせを変えることで，任意の方向，振幅の一次元振動運動を発生させられる．また， x, y 方向の振動運動の周波数が等しく，位相差が $\pi/2$ である場合，振幅の組み合わせを変えることで，長軸の向きを一定とする任意の楕円運動を発生させることが可能である．

水面波によって生じる非対称振動流（たとえば Komar, 1998, p.324）を再現するため，この二方向振動板装置では，1 周期分の (x, y) 座標データを入力することにより任意波形の振動流を発生させられるようにした．ただし，座標データについては次の条件が満たされる必要がある．以下，時間 t における座標を $(x(t), y(t))$ とし， $x(t)$ ， $y(t)$ の導関数をそれぞれ $x'(t)$ ， $y'(t)$ として：

- (1) x 振動， y 振動の周期が等しい（ここではその周期を T とする）
- (2) $x(0) = x(T)$ かつ $y(0) = y(T)$
- (3) $x'(0) = x'(T)$ かつ $y'(0) = y'(T)$
- (4) $x'(t)$ ， $y'(t)$ の符号変化は $0 \leq t \leq T$ で 2 度のみ

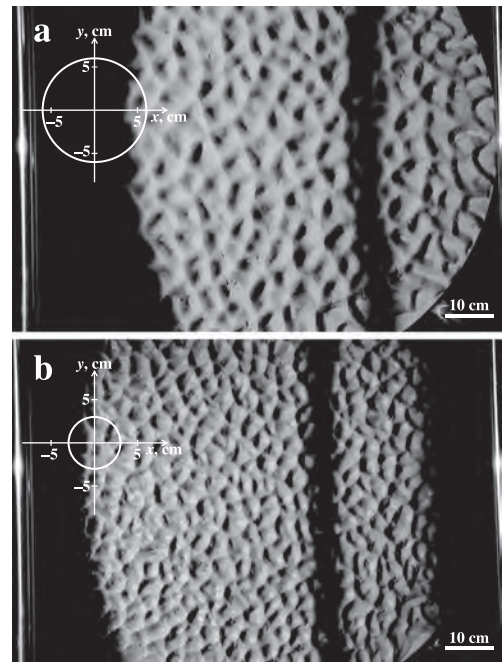
III 実験・考察

前述したように，円軌道を描く振動流下において interference ripple が形成されることが既往の平面水槽実験によって示されている．そこで本研究では，円軌道を描く二次元振動運動によって

interference ripple が形成されるか検証し，二次元振動板装置が複雑な二次元振動流で生じるベッドフォームの研究に適用可能か検討する．

実験には中央粒径 0.2 mm の淘汰のよい石英砂を用いた．振動板上の砂床の厚さを 2 cm とし，初期地形を平滑床とした．また，砂面上の水深を 20 cm とした． x, y 方向の振動運動の周期をいずれも 2 sec とし，両者の位相差を $\pi/2$ とした．両者の振幅を 3 cm もしくは 6 cm（したがって，円軌道の直径はそれぞれ 6 cm, 12 cm）として，2 ケースの実験を行った．リップルが定常状態に達したと判断された時点で実験を終了した．水面での照明の反射を抑制するために円形水槽の水を抜き，ベッドフォームの上面写真を撮影した．

実験の結果，今回開発した装置を用いて interference ripple（第3図）を形成できることが確認された．また，第3図 a と第3図 b を比較すると明白のように，円軌道の直径の差が



第3図 円運動（周期 2 sec）により生じた interference ripple. 円運動の直径：(a) 12 cm, (b) 6 cm.

interference ripple のサイズ（波峰の間隔）に反映される。以上から、今回開発した二次元振動板装置は、二次元振動流の特性とベッドフォームの形状、サイズに関する研究に有用であると考えられる。今後、システマティックな実験をすることによって、複雑な振動流下におけるベッドフォームについて、定性的・定量的な理解が進むと期待される。

IV まとめ

二次元振動流下におけるベッドフォームの研究を促進することを目的に、二方向振動板装置を開発し、その特性について述べた。また、この装置を用いて円軌道を描く振動流下のベッドフォームについて実験を行い、interference ripple の形成に成功した。同時に、そのサイズが円運動の直径に依存する可能性が示唆された。二方向振動板装置は、二次元振動流下におけるベッドフォームの実験へ適用可能であり、今後の研究が期待される。

謝辞

この二方向振動板装置は、橋詰泰久氏をはじめとする（株）西日本流体技研の諸氏の協力により開発された。ここに記し感謝の意を表します。なお、本研究は科研費（課題番号 19740309）、筑波大学生命環境科学研究科平成 19 年度研究科研究プロジェクト等支援経費の助成を受けたものである。

文献

- Allen, J. R. L. (1982): *Sedimentary Structures, their Character and Physical Basis, Vol. I*. Elsevier, Amsterdam, 593p.
- Jan, C. D. and Lin, M. C. (1998): Bed forms generated on sandy bottom by oblique standing waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **124** (6), 295-302.
- Komar, P. D. (1998): *Beach Processes and Sedimentation (2nd ed.)*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 544p.
- Lin, M. C., Wu, C. T., Lu, Y. C. and Liang, N. K. (1986): Effects of short-crested waves on the scouring around the breakwater. *Proceedings of the 20th Conference on Coastal Engineering*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2050-2064.
- Sekiguchi, T. (2003): *A Wave-Flume Study of Ripple Marks: Their Initiation and Deformation*. PhD thesis, Osaka University, 209p.
- Silvester, R. (1972): Wave reflection at sea walls and breakwaters. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, **51**, 123-131.
- Silvester, R. (1975): Sediment transmission across entrances by natural means. *Proceedings of the 16th Congress of International Association for Hydraulic Research*, **1**, 145-156.

(2008 年 7 月 3 日受付, 2008 年 8 月 1 日受理)

ススキ株の空間構造とその季節変化

Seasonal Change in the Structure of Cespitose *Miscanthus sinensis*

濱田 洋平*

Yohei HAMADA*

I はじめに

筑波大学陸域環境研究センターの熱収支・水収支観測圃場は、長期的な気象観測のために造成されたほぼ平坦な半径 80m の円形の草地である。1978 年および 1987 年には、草原植生を均一にするために牧草が播種されたが、圃場周辺に生育する植物種の侵入が徐々に進行した結果、現在では様々な植物種が不均一に混生している。

1993 年には、それまで夏と冬の年 2 回行われていた圃場全面の刈り取り作業が、年 1 回・冬のみに変更され、2005 年に再び年 2 回に戻るまでの間、圃場の植生は夏季の生長を阻害されることがなくなった。このような管理下における草原植生の生態を調査することを目的として、1992 ~ 2003 年にかけて（1995 年を除く）、出現した植物種とその被度、また主要な種については LAI および地上部バイオマスが、圃場内に設置された 40 ~ 80 個の定置コドラートにおいて毎年ほぼ同じ手法で測定されてきた（劉厦・及川, 1993；Liu, 1994；赤沢・及川, 1995；田中・及川, 1998；1999；横山・及川, 2000；2001；井桝ほか, 2002；莫ほか, 2003；横山ほか, 2004）。これらの調査によると、2003 年時点の草原植生は、関東地方低地の二次林の伐採跡地や耕作放棄地に見られるアズマネザサ・ススキ群集のチガヤ

・ススキ群落に区分される（莫ほか, 2003；横山ほか, 2004）。植生遷移の観点では、暖温帯の中生立地における二次遷移の過程にあり、第Ⅲ草本ステージ（セイタカアワダチソウ群落）から第Ⅳ草本ステージ（ススキ群落）への移行期にあると推定されている（莫ほか, 2003；横山ほか, 2004）。

このような生態学的調査と並行して、草原生態系と大気との熱・水・CO₂ の交換過程を微気象学的手法によって解明する研究も進められてきた（戸田ほか, 1997；Saigusa *et al.*, 1998；李・及川, 2000；Toda *et al.*, 2000；下田ほか, 2002；2003；2004；Li *et al.*, 2003；2005；Shimoda *et al.*, 2005）。これらのフラックス観測の結果を草原植生の生態に基づいて考察する際、植物種の不均一な分布が問題となる。この状況を改善するための試みとして、李ほか（2002）は、パラグライダーから撮影した圃場の空中写真を用いて草原植生の優占種とその空間分布を明らかにした。それによると、圃場の植生は主としてセイタカアワダチソウ（*Solidago altissima*）・チガヤ（*Imperata cylindrica*）・ススキ（*Miscanthus sinensis*）の 3 種で構成されており、それぞれの種が優占する群落が占める面積は圃場全体の 33.6%, 30.3%, 36.1% となった。この結果、主要な 3 つの群落を代表する地点においてそれぞれ測定された生理・

* 筑波大学陸域環境研究センター

生態特性に関するパラメータに面積率を加味することにより、圃場全体での加重平均値を求めることができるようになった。

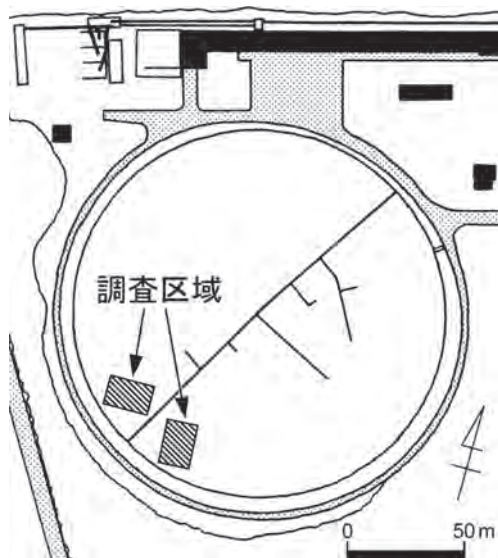
李ほか（2002）の研究では、2001年7～11月にかけて毎月空撮を行っているが、主要な3種の分布が最も判別しやすい10月の写真を用いて占有面積を計算している。3種のうち、セイタカアワダチソウおよびチガヤの生長は主として垂直方向であり、水平方向への伸長はあまり見られない。これに対して、同心円状に叢生して大きな株を形成するススキは、垂直方向のみならず水平方向にも大きく枝葉を伸長させるため、上空から見た場合の占有面積は季節的に変化する。生理・生態特性の中でも、土壌呼吸フラックスや根系・土壌有機物の量など地下部に関するパラメータは、ススキ株の中心部と周辺部では大きく異なることが予想される。圃場の草原植生における地下部を含めた生理・生態プロセスを解明するには、ススキ株の基底部の面積と、生長に伴って覆われる周辺部の面積とを個別に把握しておくことが望ましい。発達したススキ株では基底部の面積の増加速度は小さいため、春先、水平方向への伸長がほとんど生じていない時点での占有面積を基底部の面積、その後の生長に伴う占有面積の増加分を周辺部の面積とみなすことで、ススキの占有面積に占める両者の割合とその季節変化を推定できる。

これらの状況を踏まえ、本研究では、李ほか（2002）で得られたススキ群落の占有面積の値を時間方向に拡張することを目的として、ススキ株の空間構造の季節変化を地上における調査から明らかにした。

II 方法

1. 調査区の位置

李ほか（2002）によると、圃場に生育するススキは南西部に成立した大規模な群落と全域に散在する孤立した株からなる。本研究ではこのうち、



第1図 調査区域の位置

ススキのバイオマスの主たる部分を占める南西部の群落内に調査区を2箇所設定し（第1図）、調査対象として10株ずつ、合計20のススキ株を選定した。

2. ススキ株の半径および草丈の測定

ススキ株の半径および草丈の測定は、2007年4月～10月の毎月中旬～下旬にかけて以下のように行った。

まず調査株の選定時に、株の番号を書いたテープを貼った竹棒を株の中心に垂直に立てた。ススキ株の半径は、株の周囲4方向の外縁に竹棒を垂直に立て、中心からの水平距離を1cm単位で記録した。竹棒を立てる方向を毎回一致させるため、圃場中央のタワーと株の中心とを結んだ延長線上に1本目を立て、そこから90度ずつ時計回りに移動しながら測定した。隣接して生育する他のススキ株やセイタカアワダチソウと重なる場所では、重なった葉や茎の高さがほぼ同じ場合はちょうど中間の位置、高低差がある場合は高い位置を占めている側の植生の端の位置を基準とした。これは、空中写真による判定結果と比較する

ためである。

草丈は、測高桿を用いて5 cm単位で測定した。株の内部で高さの異なる場所がある場合は、それぞれの場所で数回ずつ測定を行い、おおよその平均値を算出して記録した。また、9月の出穂以降は葉と穂の間に明らかな高度差が生じたため、それぞれについて個別に測定し記録した。

3. 水平面積および地上部体積の計算

ススキ株の水平面積 S は、株の形状が楕円で近似できるものと仮定し、以下の式を用いて推定した。

$$S = \frac{r_1 + r_3}{2} \times \frac{r_2 + r_4}{2} \times \pi \quad (1)$$

ここで、 $r_1 \sim r_4$ は時計回りに順次測定した中心からの水平距離、 π は円周率である。また、ススキ株の占める空間の地上部の体積 V は以下の式で計算した。

$$V = S \times h \quad (2)$$

ここで h は草丈であるが、9月の出穂以降は葉の高さと穂の高さをそれぞれ適用した場合について個別に求めた。

III 結果および考察

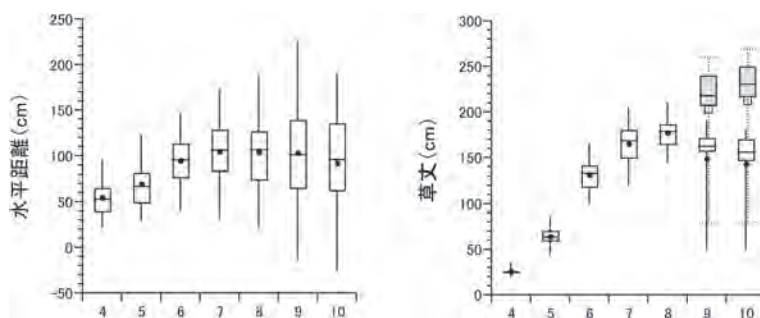
1. 中心からの水平距離および草丈

野外調査から得られた、ススキ株の中心から外周までの水平距離および草丈の季節変化を第2図に示す。この図に示された結果と調査時の観察から、ススキ株の生長に伴う空間構造は次の3つのステージに分類される。

第Ⅰ期は4～6月で、水平・垂直方向ともに順調に伸長しており、この期間内に中心からの水平距離はほぼ倍増し、草丈は5倍を超える伸びを示した。

第Ⅱ期は7～8月で、生長がやや鈍る傾向を示した。これは植物季節的な影響のほか、水平方向については隣接する株との競合に伴って伸長が鈍化する場所が多く見られた。測定手法の関係上、相対的に低い株は隣接する高い株に覆われた分だけ水平距離を減らすことになり、その結果平均値にはあまり変化はないものの、株や測定位置によるばらつきは増加した。

第Ⅲ期は9～10月で、9月上旬のススキの出穂に伴う大きな変化が生じた。まず、約半数の株で全体または一部の稈が根元から倒壊した状態となった。未倒壊の株にも隣接した株の倒壊部に押されたり覆われたりしたものが多数見られ、中に



第2図 各月におけるススキ株の中心から外周までの水平距離（左）および草丈（右）箱ひげは下から順に最小値・25%点・中央値・75%点・最大値を、黒丸は平均値をそれぞれ表す。水平距離は株毎の平均は取らず、4方向×20株の80データを対象とした。9月および10月の草丈については、穂の高さを含めたものを灰色・点線の箱ひげおよび白四角で示した。

は株の中心を越えて隣接株に覆われたため、水平距離がゼロやマイナスとして測定される場合もあった。10月には開花期を迎えたセイタカアワダチソウの伸長がススキ株の周囲で顕著になり、ススキの葉の高さを上回る場所も見られた。これらの結果、水平距離の測定位置間のばらつきはさらに増大し、平均でもわずかに減少した。

草丈については、穂の高さが第Ⅱ期から大きく伸長したのに対し、葉の高さは逆に低下した。この低下は倒壊の影響を受けていない株にもおこむね認められたため、植物季節的な変化も含まれていると考えられる。倒壊の影響はむしろ、株間のばらつきの変化に明瞭に現れており、第Ⅰ～第Ⅱ期には平均値と中央値がほぼ一致していたのに対して、第Ⅲ期には完全に倒壊した株の低い草丈に引きずられ、平均値は25%点を下回った。

2. 水平面積および地上部体積

第2図に示した結果に基づいて(1)式および(2)式から計算した、ススキ株の占める水平面積および地上部体積の季節変化を第3図に示す。

水平面積は、第Ⅰ期に相当する4～6月にかけて増加したのに対し、第Ⅱ～第Ⅲ期に相当する7月以降はほぼ一定となった。地上部の体積も、同様に第Ⅰ期に急速に増大し、第Ⅱ～第Ⅲ期の変化は小さくなった。9月および10月については、葉の高さおよび穂の高さを適用した場合の体積を

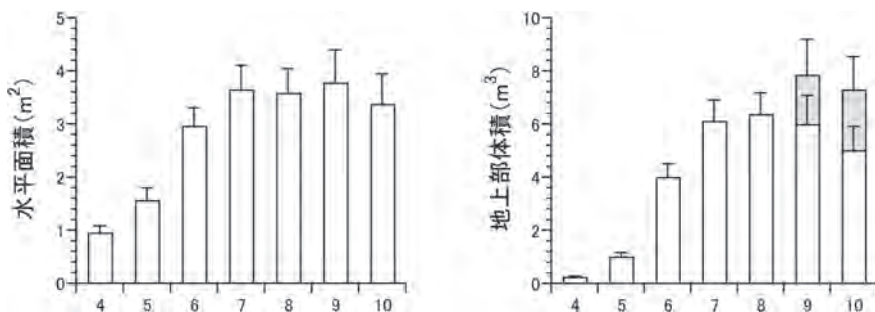
示したが、いずれの月も両者の間に有意差が見られた($P<0.01$)。

3. 生長に伴う相対変化

李ほか(2002)による圃場の群落分布図の作成に使用された10月の値を基準とした、ススキ株の水平面積および地上部体積の相対変化を第1表に示す。水平面積は、株の基底部の面積に相当する4月の30%弱から9月の112%まで大きく変化した。李ほか(2002)で推定されたススキ群落の面積率を当てはめると、圃場全体に占めるススキの占有面積は10.2%～40.4%の間で変化することになる。地上部体積の変化はより大きく、4月には10月の5%未満であったのに対し、8～9月にかけては10月の120～130%程度の値を示した。

第1表 10月の結果を基準としたススキ株の水平面積および地上部体積の相対変化

調査日	水平面積	地上部体積	
		草の高さに基づく	穂の高さに基づく
2007/4/21	28.2 %	4.9 %	3.4 %
5/16	46.4	20.1	13.8
6/13	87.8	79.9	54.9
7/17-18	108.1	122.2	83.8
8/18-19	106.2	127.2	87.3
9/18-19	112.0	119.7	107.7
10/18	100.0	100.0	100.0



第3図 各月におけるススキ株の占める領域の水平面積(左)および地上部体積(右) エラーバーは標準誤差を表す。9月および10月の体積については、草丈に穂の高さを適用したものを灰色で示した。

圃場の草原植生が生長を開始した4月の時点で、ススキ株の周辺、および株の中央部が枯れてできた円形の空間である dead center には、セイトカアワダチソウをはじめヨモギ (*Artemisia princeps*) やスギナ (*Equisetum arvense*) などの C3 植物が数多く確認された。ススキ群落内のセイトカアワダチソウは、その後も株間の隙間で生長を続け、比較的株間の広い場所では群生してススキを超える草丈に達するものも見られた。その一方、もう1つの圃場の優占種であるチガヤは、ススキ群落の内部では年間を通してほとんど確認できなかった。したがって、ススキ群落の占有面積の季節変化は、セイトカアワダチソウ群落の面積と相補的な関係にあると見なすことができる。本研究の成果に基づいて、優占種が占める面積をその季節変化まで含めて評価することにより、圃場に成立した草原植生の生態をより詳細に解析することができると期待される。

文献

- 赤沢孝之・及川武久 (1995): 水理実験センター草原生態系における主要植物種の現存量の季節変化とその生態学的解析. 筑波大学水理実験センター報告, **20**, 69-77.
- 井桝史彦・莫 文紅・加藤美恵子・及川武久 (2002): 陸域環境研究センター圃場における 2001 年の C3/C4 混生草原の LAI と地上部バイオマスの季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **3**, 17-25.
- 下田星児・莫 文紅・村山昌平・及川武久 (2004): 渦相関法と大気炭素安定同位体手法による夜間生態系呼吸量の細分化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 21-28.
- 下田星児・莫 文紅・村山昌平・高村近子・及川武久 (2003): 大気炭素安定同位体比による C3/C4 混生草原生態系 CO₂ 交換特性の解析. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **4**, 11-17.
- 下田星児・李 勝功・及川武久 (2002): 草原における群落表面温度と微気象要素の日変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **3**, 111-114.
- 田中克季・及川武久 (1998): 水理実験センター内円形圃場草原における C3・C4 植物の LAI の季節変化 (1996, 1997). 筑波大学水理実験センター報告, **23**, 87-89.
- 田中克季・及川武久 (1999): C3/C4 植物が混生した水理実験センター内円形草原圃場におけるバイオマスと LAI の季節変化特性. 筑波大学水理実験センター報告, **24**, 121-124.
- 戸田 求・三枝信子・木村富士男・及川武久 (1997): 草原群落-大気間の CO₂/H₂O 交換過程の季節変化に関する実験的研究. 筑波大学水理実験センター報告, **22**, 79-80.
- 莫 文紅・井桝史彦・横山智子・及川武久 (2003): 陸域環境研究センター圃場における 2002 年の C3/C4 混生草原の LAI と地上部バイオマスの季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **4**, 109-117.
- 横山智子・及川武久 (2000): 水理実験センター圃場における 1999 年の C3/C4 混生草原の LAI とバイオマスの季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **1**, 67-71.
- 横山智子・及川武久 (2001): 陸域環境研究センター圃場における 2000 年の C3/C4 混生草原の LAI とバイオマスの季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **2**, 37-39.
- 横山智子・莫 文紅・及川武久 (2004): 陸域環境研究センター圃場における 2003 年の C3/C4 混生草原の LAI と地上部バイオマスの季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 119-127.
- 李 勝功・及川武久 (2000): C3/C4 混生草原における CO₂ フラックスの日変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **1**, 73-75.

- 李 載錫・李 吉宰・及川武久 (2002): パラグライダーから撮影した写真に基づく草原群落の種組成解析とバイオマスとリター量の推定について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **3**, 27-33.
- 劉 厦・及川武久 (1993): 水理実験センター草原生態系の現存量の種別の季節変化と環境条件. 筑波大学水理実験センター報告, **18**, 69-75.
- Li, S.-G., Lai, C.-T., Lee, G., Shimoda, S., Yokoyama, T., Higuchi, A. and Oikawa, T. (2005): Evapotranspiration from a wet temperate grassland and its sensitivity to microenvironmental variables. *Hydrological Processes*, **19**, 517-532.
- Li, S.-G., Lai, C.-T., Yokoyama, T. and Oikawa, T. (2003): Carbon dioxide and water vapor exchange over a *Miscanthus*-type grassland: Effects of development of the canopy. *Ecological Research*, **18**, 661-675.
- Liu, S. (1994): Seasonal changes of biomass and carbon dioxide flux in a grassland. M.S. thesis of the Master's Program in Environmental Sciences, Univ. Tsukuba, 50 p.
- Saigusa, N., Oikawa, T. and Liu, S. (1998): Seasonal variations of the exchange of CO₂ and H₂O between a grassland and the atmosphere: An experimental study. *Agricultural and Forest Meteorology*, **89**, 131-139.
- Shimoda, S., Mo, W. and Oikawa, T. (2005): The effect of characteristics of Asian monsoon climate on interannual CO₂ exchange in a humid temperate C3/C4 co-occurring grassland. *SOLA*, **1**, 169-172.
- Toda, M., Saigusa, N., Oikawa, T. and Kimura, F. (2000): Seasonal changes of CO₂ and H₂O exchanges over a temperate grassland. *Journal of Agricultural Meteorology*, **56**, 195-207.
- (2008 年 4 月 25 日受付, 2008 年 8 月 28 日受理)

筑波山における風の観測法について

Observational Method of Wind over the Top of Mt. Tsukuba

依田 知浩^{*}・花房 龍男^{**}・林 陽生^{*}・大和 佳祐^{**}

Tomohiro YODA^{*}, Tatsuo HANAFUSA^{**}, Yousay HAYASHI^{*} and Yoshihiro YAMATO^{**}

I はじめに

大気境界層上部の風向風速を観測するためには観測塔などを建てて計測する方法があるが、十分な高度をとるには多くの経費が必要となる。そこで、山岳に観測地点を設け、上空の風場を測定することが一般に行われるが、山体の影響を受けた風向風速の値を観測することになる場合が往々にしてある。特に、プロペラ型風向風速計のように風向と風速の感部が一体の測器で測定する場合には、風の乱れが強くなると風向変動が大きくなるため風速を過小評価することが示唆されている(光田, 1970)。

超音波風向風速温度計は、こうした問題点を解明するために有効である。実用的な超音波風向風速温度計は1960年代に開発された(Businger *et al.*, 1969)。その後光田(1970)は、超音波風向風速温度計を基準として種々の風速計を比較し、弱風時や風の鉛直成分が大きな場合には一般の風速計では誤差が生じることを示した。一方、上空の風場を観測する際にはドップラーソーダーが有効であり、花房ほか(1994)やHanafusa *et al.* (1995)が複雑な地形上での測定を行っている。その他のリモートセンシングによる風観測の有効性については花房(2003)がまとめている。

本研究では、筑波山の男体山(標高871 m)の山頂に設置したプロペラ型風向風速計の観測値が山体の影響をどの程度受け、誤差を含んでいるかについて、超音波風向風速温度計、ドップラーソーダーの観測値を用いて解析したので報告する。

II 観測方法および観測機器

2006年1月より筑波山の男体山山頂で、筑波大学がアメダスを継承して気象観測を開始した(Hayashi *et al.*, 2006)。観測項目には風向風速が含まれており、プロペラ型風向風速計(YOUNG MODEL 05103-47)を旧アメダスと同様に気象観測所の屋上に設置して風向と風速を観測している。プロペラ型風向風速計から約1.5 m離れた位置に、3次元超音波風向風速計(USA-1)(英弘精機, 2007))を設置した(第1図)。さらに、山頂より標高の低い地点(ケーブルカー山頂駅付近)にフラット・アレイ型ドップラーソーダー(SFAS64)を設置した。第2図aに筑波山の地形図を示す。第2図bは第2図a上の線A-Bに沿った地形断面図に測器の設置概要を示した。プロペラ型風向風速計、超音波風向風速温度計、ドップラーソーダーの測器の仕様を第1表、第2表、第

^{*} 筑波大学大学院生命環境科学研究科

^{**} 英弘精機株式会社

3表にそれぞれ示す。

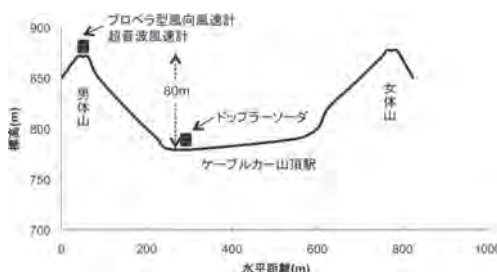
超音波風向風速温度計については2007年11月から2008年3月に観測を行い10分間平均値を求めた。ドップラーソーダーは2007年7月から10月に観測を行い30分平均値を求め解析に用いた。超音波風向風速温度計とドップラーソーダーは同



第1図 プロペラ型風向風速計と超音波風向風速計の設置状況



第2図a 観測地域の概要



第2図b 測器の設置地点と地形の関係

時期に設置することが望ましかったが、今回は測器の設置の都合上、異なる時期での観測となった。しかし、本研究の目的は、筑波山山頂における風系調査ではなく、現在観測を実施している手法による値の差異を明らかにすることであるため本質的な影響はないと判断した。

超音波風向風速温度計は、送受信機の中の音の伝播速度から風向風速を測定するもので、感部自体に可動部分がないため風の乱れにより測定値が左右されない利点がある (Hanafusa *et al.*, 1995)。また、ドップラーソーダーは上空に発射した音波のドップラーシフトから上空の風向風速を測定するもので、塔などの設置が不要で上空まで観測ができ、原理的に検定が不必要な機器である (花房ほか, 2007)。

第1表 プロペラ型風向風速計 (YOUNG MODEL 05103-47) の仕様

項目	
起動風速	風速: 1.0 m/s (測定範囲 0~60 m/s) 風向: 1.1 m/s (10°)
距離常数*	風速: 2.7 m/s (63%)

* 風速を急に变化させた時に、風速計がその変化に63% 追従する間に気塊が風速計を通過する距離

第2表 3次元超音波風向風速計 (USA-1) の仕様

項目	
測定範囲/分解能	風速: 0 ~ 45 m/s $\pm$ 0.01 m/s
	X, Y, Z 風速: - 45 ~ + 45 m/s $\pm$ 0.01 m/s
	風向: 0 ~ 359° $\pm$ 1°
	温度: - 30 ~ + 50° $\pm$ 0.01 K
サンプリングレート	0.1 ~ 25 Hz
アナログ出力4成分	0 ~ 10 VDC
シリアルポート出力	RS422
超音波パス長	180 mm
動作温度	- 30 ~ + 50°
電源	24 VDC 2.5 W
重量	3 Kg

第3表 フラット・アレイ型ドップラーソーダー(SFAS64)の仕様

項 目	SFAS64 の仕様	備 考
エレメント数	64	ピエゾ粒子
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
最低測定設定高度	10 m	最低層高度
最大測定設定高度	200 ～ 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	0.3 ～ 0.1 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 最大	
垂直測定範囲	- 10 ～ +10 m 最大	
動作温度範囲	- 35 ～ +50℃	アンテナ、プロセッシングユニット
電力	± 18 VDC 100 W ピーク 平均 30 ～ 50 W	
サイズ	0.44 × 0.46 × 0.13 m	音響エンクロジャ無
重量	11.5 Kg	

III 観測結果

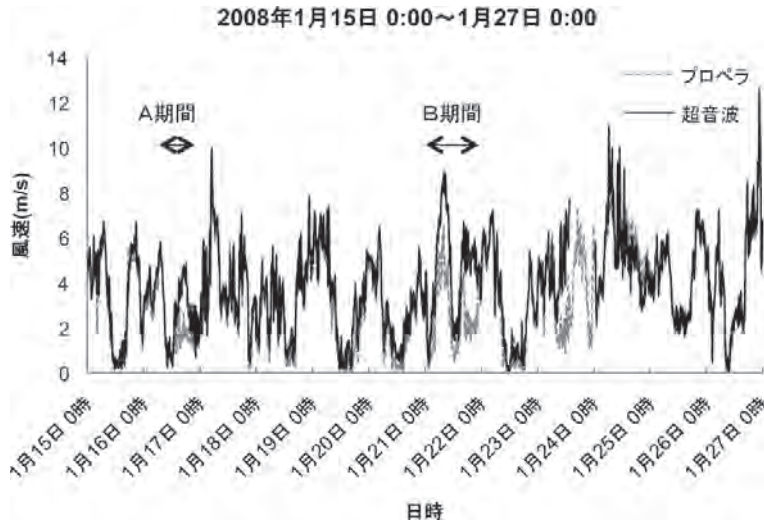
1. プロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計の比較

第3図に2008年1月15日0時から1月27日0時におけるプロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計の風速の10分間平均値の時間変化を示す。この図によると、図中に示したA期間（1月16日12時頃～16日22時頃）、B期間（1月21日2時頃～21日22時頃）において、プロペラ型風向風速計の観測値が超音波風向風速温度計に比べ小さくなっていることが認められた。また、第4図にプロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計による風速の比較を示す。値はほぼ1:1の直線上に並んでいるが、一部分においてプロペラ型風向風速計の値が小さくなっていることが確認できた。第3図、第4図から、ある固有の条件においてプロペラ型風向風速温度計の観測値が過小評価されるのではないかと推測される。

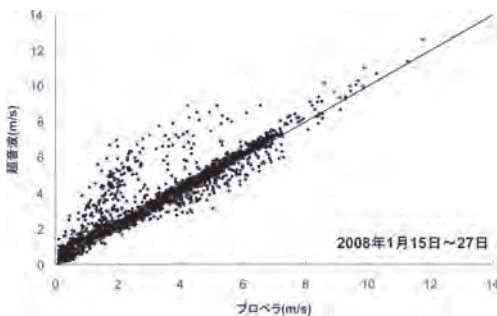
そこで、超音波風向風速温度計で観測された平

均風速が3 m/s 以上の場合について、全ての期間にわたって風向別にプロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計の風速比を第5図に示す。風速比はプロペラ型風向風速計の観測値を超音波風向風速温度計の観測値で除した値である。この図から明らかなように、プロペラ型風向風速計の観測値は超音波風向風速温度計の観測値に比べ風速を弱く示したことが分かった。さらに、超音波風向風速温度計の風向が50度付近になる場合に限って風速比が小さくなる、つまり、プロペラ型風向風速計による観測値が過小評価されていることが示唆された。この値は第3図や第4図においてプロペラ型風向風速計の観測値が小さく表れている場合と対応していた。一方、90度付近と270度付近は風速比が大きくなっており、プロペラ型風向風速計の過大評価が考えられる。

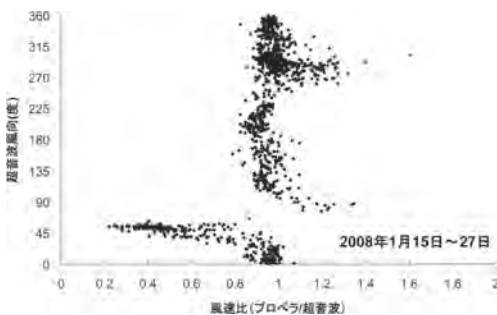
また、第6図にプロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計による風向の比較を示す。この図から、超音波風向風速温度計の風向が50度近傍を示す場合に、プロペラ型風向風速計の観測値と



第3図 風速の時間変化の比較 (2008年1月15日0:00～27日0:00)



第4図 風速の比較 (プロペラ／超音波)



第5図 風向別風速比 (プロペラ／超音波)

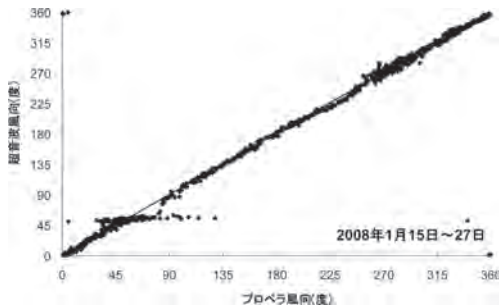
一致していないことが分かった。

以上の結果から、超音波風向風速温度計の風向

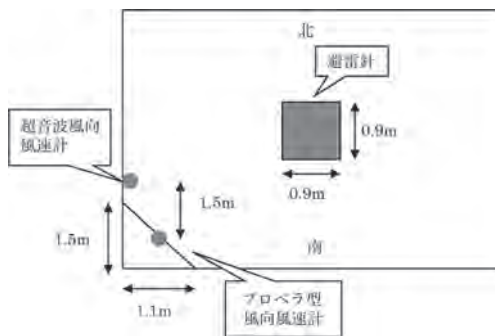
が約50度を示した場合に、プロペラ型風向風速計の観測値は正確な値となっていない可能性があることが示唆された。この要因については2節に述べる。

2. 風速の観測値が異なる要因

第7図aに気象観測所の屋上の概要図を示す。プロペラ型風向風速計は気象観測所の屋上の南西側の角に設置しており、超音波風向風速温度計はプロペラ型風向風速計の西側に約1.5 m 離して設置した。その他に、屋上の中央には第7図bに示したような避雷針が存在しており、プロペラ型風向風速計の北東側、超音波風向風速温度計の東北東側に位置している。そのため、超音波風速温度計では、70度方向からの風は避雷針が障害となるため正確な観測ができないと考えられる。また、東北東の風が避雷針を回り込む際に、東側を通過した気流はプロペラ型風向風速計では正確に観測できるが、超音波風向風速温度計ではその影響が出ているものと考えられる。反対に、避雷針の北側を通過する気流は超音波風向風速温度計では正確に観測できるが、プロペラ型風向風速計では影響が出ていると考えられる。さらに、避雷針



第 6 図 風向の比較（プロペラ／超音波）



第 7 図 a 気象観測所屋上の概要図

の影響で気流に乱れが生じると、光田（1970）が指摘しているようにプロペラ型風向風速計では風速を過小評価していると思われる。そのため、第 5 図の風向別風速比では、50 度付近で風速比の低下、70 度付近の観測値がごく僅かであるが風速比が小さく、90 度付近で風速比が大きくなっていると考えられる。

また、第 5 図では 270 度付近においても風速比の増大が見られた。この要因として、プロペラ型風向風速計と超音波風向風速温度計は屋上の西側に面しているため、約 270 度からの風は、建物からの吹き上げが影響していると考えられる。厳密には、プロペラ型風向風速計は屋上の南西側の角に設置されているので、屋上の西端からは若干距離があるため吹き上げてきた強風の気流を測定しやすいが、超音波風向風速温度計は屋上の西端のすぐ上に設置したので、建物の影響で弱風域の風



第 7 図 b 避雷針の様子

を測定しているためと思われる。すなわちプロペラ型風向風速計では強めに、超音波風向風速温度計では弱めに観測され、結果として風速比が大きくなったものと考えられるが、これについては今後の課題として実験的に調べる必要性がある。

3. プロペラ型風向風速計とドップラーソーダーの比較

プロペラ型風向風速計の観測値には 2 節で言及した建物の影響のほかに地形の影響を含んでいることが考えられる。そこで、ケーブルカーの山頂駅付近に設置したドップラーソーダーの観測値との比較を行った。但し、第 2 図 b から分かるように、ドップラーソーダーの東西にはそれぞれ女体山と男体山が位置するため、ドップラーソーダーの観測値に地形の影響を含んでしまう可能性がある。そこで、ドップラーソーダーの設置個所から高さ 180 m の観測値を基準に強風時（3 m/s 以上）で比較的地形の影響が少ないと思われる南北の風の場合を比較対象とした。

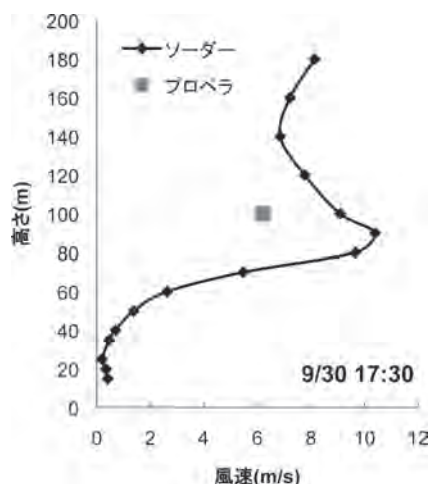
第 8 図 a・b、第 9 図 a・b は、北風の場合（9 月 30 日 17 時 30 分）と南風の場合（9 月 9 日 21 時 30 分）について、それぞれドップラーソーダーで観測した風向風速の鉛直プロファイルとその時のプロペラ型風向風速計の観測値を示した。特に

北風の場合に、ドップラーソーダーの観測値に比べてプロペラ型風向風速計の観測値が小さいことが分かった。第8図a, 第9図aのドップラーソーダーで測定した風の鉛直プロファイルを見ると、高さ100 m付近で風速の極大を迎えており、この高さはプロペラ型風向風速計を設置している高さに相当する。つまり、プロペラ型風向風速計が設置してある高さでは山体の影響で風速が強く、

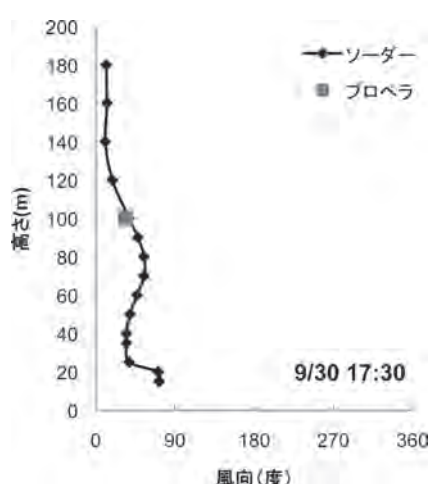
乱れの強い気流が生じていることが推測される。そのため、風向と風速の感部が一体であるプロペラ型風向風速計では風向変動が大きくなるため、風速が過小評価されることが考えられた。

IV まとめ

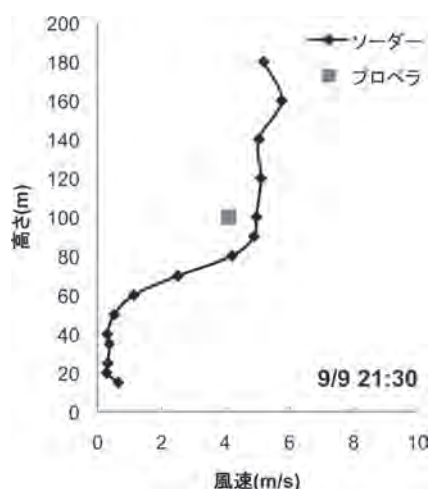
山頂に設置したプロペラ型風向風速計の観測値



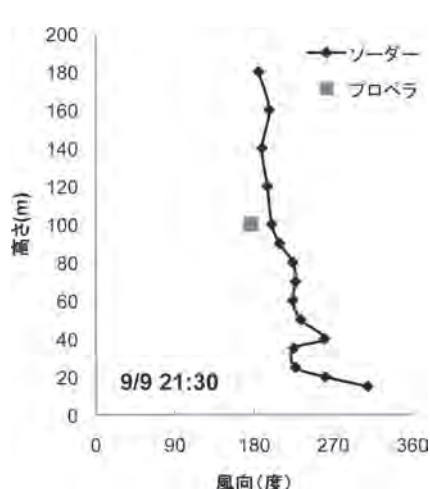
第8図a 風速の鉛直分布
(2007年9月30日 17:30)



第8図b 風向の鉛直分布
(2007年9月30日 17:30)



第9図a 風速の鉛直分布
(2007年9月9日 21:30)



第9図b 風向の鉛直分布
(2007年9月9日 21:30)

について、ほぼ同じ位置に設置した超音波風向風速温度計の観測値と比較したところ、ある特定の風向において観測値に差異が生じることが確認された。特に、超音波風向風速温度計の風向が50度近傍で風速比が極端に小さくなることが分かった。この要因として、次の2点が考えられた。すなわち、①建物の屋上にある避雷針が東北東からの風の障害となっていること、②風向と風速の感部が一体であるプロペラ型風向風速計では、気流に乱れが生じると、風速計の感部が左右に激しく動き、風速が過小評価されることが考えられた。また、風の鉛直成分が大きい場合には、水平成分しか検知しないプロペラ型風向風速計では観測値が小さくなることが考えられた。

また、ケーブルカー山頂駅付近に設置したドップラーソーダーの観測値との比較では、現在のプロペラ型風向風速計の設置高度では山体の影響を受けている可能性があり、一般風の観測値として利用するのは充分注意をする必要のあることが分かった。

今回の解析結果から、筑波山山頂で上空の大気を代表する風を正確に観測するためには、現在の設置高度を上げるか、または風向変動に左右されない超音波風向風速温度計等の風速計を利用する必要があることが確認された。山の影響を受けない充分な高度まで観測可能なドップラーソーダー等のリモートセンシングによる風向風速の観測が理想的である。

謝辞

観測場所の提供を快く承諾してくださった筑波山神社、電源の便宜をはかり、機器の監視をしていただきました筑波観光鉄道株式会社に感謝いた

します。また、ドップラーソーダーの設置には、筑波大学生命環境科学研究科の野林 暁氏と松岡 諒氏の協力を得ましたので感謝いたします。

文献

- 花房龍男 (2003): リモートセンシングによる風観測. 日本風工学会誌, **94**, 3-11.
- 花房龍男・加藤真規子・高橋俊二・伊藤芳樹・青木和久・竹内清秀 (1994): ドップラーソーダーの複雑地形上における観測値について. 第13回風工学シンポジウム論文集, 43-48.
- 花房龍男・大和佳祐・渡来 靖 (2007): フラット・アレイ型ソーダーについて. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **8**, 27-33.
- 光田 寧 (1970): 種々の風速計の比較について. 京都大学防災研究所年報, 第**13**号A, 219-226.
- Businger, J.A., Miyake, M., Inoue, E., Mitsuta, Y. and Hanafusa, T. (1969): Sonic anemometer comparison and measurements in the atmospheric surface layer. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **47** (1), 1-12.
- Hanafusa, T., Kato, M. and Takahashi, S. (1995): Wind measurement of Doppler Sodars over complex terrain. *Pap. Meteorology and Geophysics*, **46** (3), 67-84.
- Hayashi, Y. and Research Group for Intramural Project (S) (2006): Meteorological observation station at the summit of Mt. Tsukuba. *Tsukuba Geoenvironmental Science*, **2**, 19-24.

(2008年6月25日受付, 2008年8月13日受理)

人工岩石を用いた滝つぼ形成実験に関する予察的報告

A Preliminary Experiment of Plunge Pool Formation Using Artificial Rock

井口 達也^{*}・関口 智寛^{**}

Tatsuya IGUCHI^{*} and Tomohiro SEKIGUCHI^{**}

I はじめに

滝（遷急点）の直下には、いわゆる滝つぼが形成されることが多く、滝に関する論文中に滝つぼについての記載が数多く認められる（たとえば Philbick, 1970; Alexandrowicz, 1994; Lamb *et al.*, 2007）。滝つぼのサイズ、形状、発達速度は多様性に富み、滝つぼを持たない滝が存在する一方で（たとえば Young, 1985）、ダムの直下において4年間で深さ 50 m の滝つぼが形成されたとの報告もある（Thomas, 1976）。このような滝つぼの多様性の要因を明らかにし、滝つぼの形成プロセス、形状、サイズ、形成速度とその規制因子の関係を定性的・定量的に評価することは、滝という地形全体の理解を深める上で重要な課題である。

天然の滝つぼでは（1）原地形の復元が困難であること、（2）滝つぼの形成には時間がかかること、（3）侵食営力の定量的評価が困難であること、（4）連続観測には限界があることが多い。このため、現地調査だけから形成プロセスの全体像を把握し、形状、サイズ、形成速度とその規制因子の関係を評価することには限界がある。

そこで本研究では、滝つぼの形成プロセス理解の一助とするため、滝つぼの人工岩石の侵食実験に取り組むことにする。水路実験では現地スケ-

ルの現象の再現が困難であるというデメリットはあるものの、各種の条件をコントロールしやすく、連続観測が容易であるというメリットは大きい。今回は人工岩石を二種類の方法で作成し、人工岩石の作成法による実験への影響に注目する。また、流量・落差が滝つぼに与える影響の評価を試みる。

II 実験

本研究では、落差 h から落下する水を人工岩石に作用させて、滝つぼを発達させた。実験には整流槽、水路部、低水槽、およびポンプ・送水パイプからなる循環水路（第1図）を用いた。滝つぼで起こる現象を二次元化し、観察や計測を簡便にするため、水路部の幅を 3 cm（長さ 49 cm、高さ 98 cm）とした。水路部は厚さ 5 mm の透明アクリル板製であり、水路側方から地形や水流を観察することができる。水路部は整流槽と流出溝でつながれており、これらの相対的な鉛直位置を変えることで、落差（流出溝から人工岩石の初期地形面までの鉛直距離、第1図）を調節した。また、低水槽から整流槽へと水を送るポンプにはスライダックを取り付け、ポンプにかかる電圧を変化させることで送流量を調整した。

^{*} 筑波大学大学院生命環境科学研究科

^{**} 筑波大学陸域環境研究センター

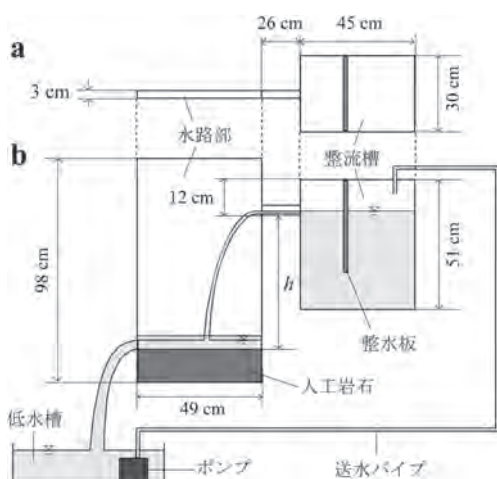
侵食実験に用いる試料として、本研究では Sunamura (1973, 1994), 戸田 (1990) などを用いられた人工岩石を採用した。この人工岩石は、砂とポルトランドセメント、水を混合し、静水中で十分な期間静置して固結させて作られるもので、砂とセメントの混合比を変えることで強度をコントロールできる (たとえば戸田, 1990)。本研究では中央粒径 0.2 mm の豊浦標準砂とポルトランドセメントを用い、砂：セメントの重量比を 100 : 1 とした。戸田 (1990) の実験では、この重量比で形成した人工岩石の一軸圧縮強度は 1000 gf/cm² であった。砂とセメントを乾燥状態で十分に混ぜ合わせた後、砂の 1/3 の重量の水を

加えて更に混ぜ合わせた上で、水路部下部に充填して押し固めた。

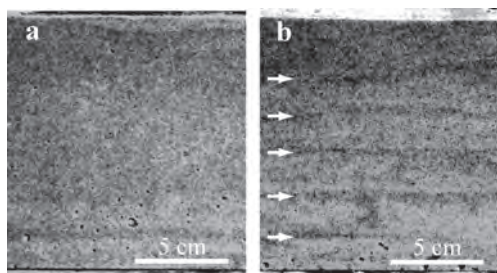
今回の実験には、一度に砂・セメント・水の混合物を流し込んで作成した試料 (以後、試料 A とよぶ) と、厚さ 2 ~ 3 cm 毎数回に分けて水平に充填した試料 (試料 B) の二種類を用いた (第 2 図)。試料 A には多くの気泡が混入する傾向があった (第 2 図 a)。一方、試料 B 中の気泡は比較的少なかったが、数回に分けて混合物を充填した際の境界部に、周囲と比べて暗色を示す 2 ~ 3 mm の薄層が観察された (第 2 図 b)。いずれの試料についても、人工岩石の強度が安定するとされる 1ヶ月以上の期間 (戸田, 1990)、静水中に安置した。実験に供する際には、人工岩石表面を成形して平滑な初期地形面を作った。実験開始時の試料の厚さは 16 cm もしくは 6 cm であった。

試料 A を用いて、流量と落差の組み合わせを変えて計 4 回の実験 (Runs A1-A4) を行った (第 1 表)。この際、流量 Q は 267 cm³/sec, 464 cm³/sec, もしくは 527 cm³/sec とし、落差 h は 45 cm もしくは 65 cm とした。また、試料 B を用いた実験 (Run B1) では、 $Q = 527$ cm³/sec, $h = 25$ cm とした。いずれの実験においても研磨剤は投入しなかった。また、滝つぼの発達にともなって生じる砂は低水槽に堆積し、滝つぼの発達には影響を及ぼさない。

実験の際、水路側方に固定したデジタルカメラを用い、一定時間おきに通水を停止して滝つぼの形状を撮影したほか、必要に応じて通水状態で撮影を行った。通水を止めたのは、水流の影響を除



第 1 図 実験装置の概略図：
(a) 平面図, (b) 側面図



第 2 図 人工岩石の特徴：(a) 試料 A, (b) 試料 B. b 中の矢印は暗色薄層を示す

第 1 表 実験条件
試料 A・B については本文参照のこと

Run	試料	砂：セメント	試料の厚さ cm	落差, h cm	流量, Q cm ³ /sec
A1	試料 A	100 : 1	6	65	267
A2	試料 A	100 : 1	16	65	464
A3	試料 A	100 : 1	6	65	527
A4	試料 A	100 : 1	16	45	527
B1	試料 B	100 : 1	16	25	527

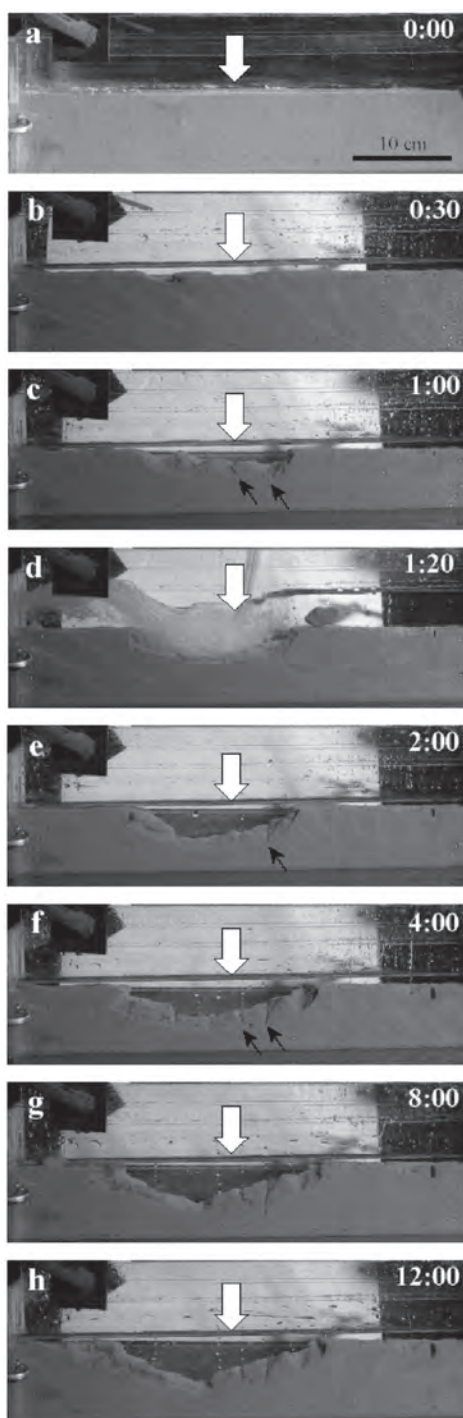
くことで、地形面をより明瞭に撮影するためである。滝つぼの形状がほぼ変化しなくなるか、コンテナの底面が露出した時点で実験終了とした。

III 結果

どの実験条件においても水の落下点付近で人工岩石が侵食され、滝つぼ状の地形が形成された。以下、各実験に共通して観察された滝つぼの形成プロセスについて、Run A2（第3図）を例に述べる。実験開始直後には、人工岩石表面の砂粒子が流水により少しずつはぎ取られて侵食が進行し、水の落下地点付近から落下点より数 cm 下流側にかけて滝つぼが形成されはじめた（第3図 b）。侵食が進むにつれて滝つぼ表面に長さ数 mm 程度のクラックが現れ、その周辺が選択的に侵食されてクラックが拡大した（第3図 c、矢印）。さらに侵食が進むと、クラックを起点として人工岩石のブロックが剥がれ去った（第3図 d、第4図）。ここでは、このような現象をブロック状剥離と呼ぶことにする。ブロック状剥離が発生した箇所では侵食が進むと、ブロック状剥離のきっかけとなったクラックの延長上に再びクラックが出現し（第3図 e-f、矢印）、場合によってはそれをきっかけとして再度ブロック状剥離が発生した。以上のような水流による砂粒子の剥離、クラックの発達、ブロック状剥離によって侵食が進み、滝つぼのサイズが増していった（第3図 a-g）。滝つぼが十分に発達すると、その形状、サイズはほとんど変化しなくなった（第3図 g-h）。

このような滝つぼの形成プロセスは全実験で共通していたものの、滝つぼの発達方向や、実験終了時の滝つぼの形状は異なった。第5図には各実験で観察された滝つぼの縦断面形トレースの時間変化を示す。本研究で観察された滝つぼは多かれ少なかれ三次元的な形状を示したため、第5図には地形面最浅部のトレースを用いた。

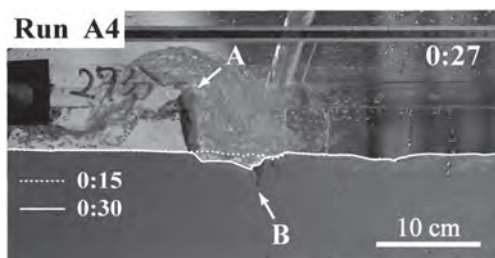
試料 A を用いた Runs A1-A3（第5図 a-c）



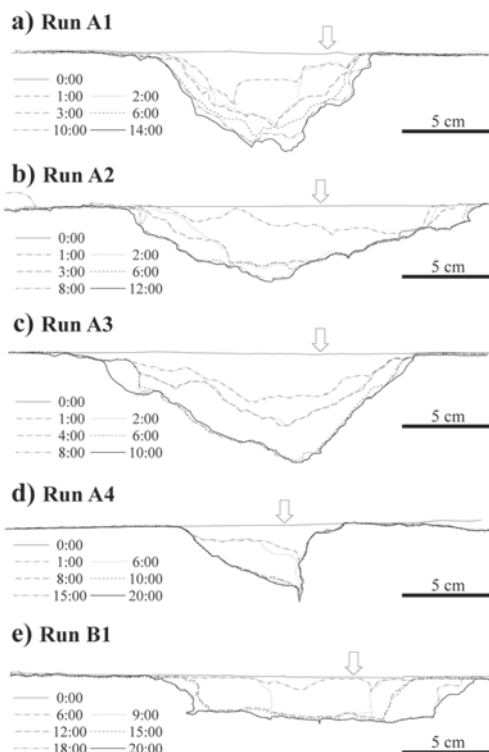
第3図 Run A2 実験結果
白抜き矢印は水の落下地点を、黒矢印はクラックを示す。また、右上の数字は経過時間を示す。

では、様々な方向のクラックが出現し、時間とともに滝つぼの幅、深さともに増加した。実験終了時の滝つぼは下に凸な半円形から逆三角形の縦断面形状を示し、最深部は水の落下地点の下流側数 cm に位置した。

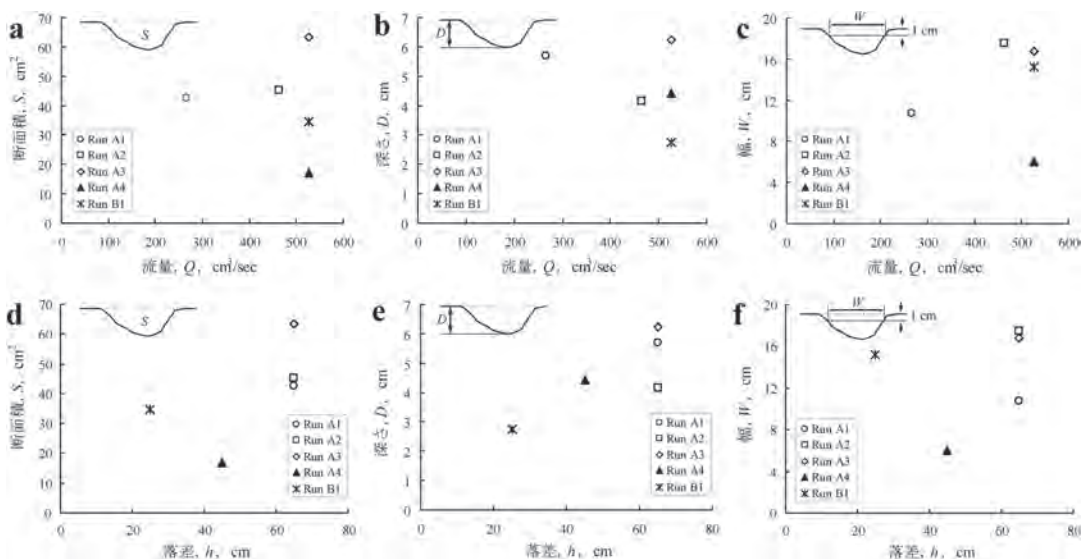
同じく試料 A を用いた Run A4（第 5 図 d）では、水の落下点付近に大きな鉛直クラックが出現し、それを起点とするブロック状剥離が繰り返された。この際、クラックより下流側でブロック状剥離がおき、クラックの上流側はあまり侵食され



第 4 図 ブロック状剥離の瞬間
矢印 A は剥がれ去った人工岩石を、
矢印 B はブロック状剥離のきっかけ
となったクラックを示す。



第 5 図 滝つぼ地形の時間変化



第 6 図 流量・落差と滝つぼの諸元の関係：流量と (a) 断面積，(b) 深さ，(c) 幅の関係，および
落差と (d) 断面積，(e) 深さ，(f) 幅の関係。

なかった。実験開始1時間後以降、滝つぼの幅はほとんど変化せず、下刻のみが進んだ。最終的には逆レの字型の滝つぼが形成され、その最深部は水の落下点とほぼ一致した。

試料Bを用いたRun B1（第5図e）では、実験開始9時間後に、滝つぼの最深部が試料充填時に生じた暗色薄層まで達すると、それ以降には暗色薄層付近に生じた水平クラックでのブロック状剥離が起こり、滝つぼが発達した。その間下刻はほとんどおこらず、滝つぼの幅のみが増加した。最終的には底面がほぼ水平な台形状の滝つぼが形成され、その底面は暗色薄層とほぼ一致した。

各実験で最終的に形成された滝つぼの断面積 S 、深さ D 、幅 W と流量 Q 、落差 h の関係について検討したが、滝つぼの諸元と流量 Q 、落差 h の間に明瞭な相関関係は見られなかった（第6図）。ただし、滝つぼの幅の計測を容易にするため、本研究では滝つぼの幅の代表値として初期地形面下1 cmにおける値を用いた。

IV 考察

上述したように、本実験で観察された滝つぼの最終的な形状は、試料の充填方法によって異なり、試料Bを用いた実験（第5図e）では、ほぼ水平な底面を持つ台形状の滝つぼが発達した。まず、この要因について考えたい。

Run B1 で形成された滝つぼの水平底面は、人工岩石充填時に生じた暗色薄層（第2図b）とほぼ一致したことから、暗色薄層部は周囲よりも強度が大きく、それ以降への下刻を妨げたものと考えられる。おそらく暗色薄層部分では周囲よりもセメントの含有率が高く、そのために周囲よりも暗い色を示し、人工岩石の強度が大きかったのであろう。また、暗色薄層部とそれ以外で強度が異なるため、その境界が弱線となって水平クラックが形成されやすかったものと推測される。

暗色薄層は、砂・セメント・水混合物を数回に

分けて充填した際の境界部に存在した。このことから、混合物を充填して押し固めた際に、間隙水とともにセメントが人工岩石の表面に流出し、表層にセメント粒子が集積して暗色薄層を形成したものと考えられる。

試料Bの暗色薄層の存在が滝つぼの形状や形成プロセスに影響したのに対し、多くの気泡の存在が確認された試料Aでは、気泡の有無による系統だった影響は見られなかった。したがって人工岩石中の気泡の影響は、暗色薄層の影響と比べて十分に小さいと判断できる。

本実験では、クラックの存在が滝つぼの形成プロセスや最終形状に強く影響をおよぼした。たとえば、本研究の全実験において、クラックが観察されるようになると、クラック付近で選択的侵食とクラックを基点とするブロック状剥離が起こった（第3図）。また、Run A4（第5図d）では落下地点付近に大きな垂直クラックが観察され、クラック下流側でのみブロック状剥離が続いたために、特徴的断面形状の滝つぼが形成された。

では、クラックは実験開始前から存在していたのだろうか、それとも落下する水の衝撃により実験中にクラックが形成されたのだろうか。戸田（1990）の人工岩石侵食実験では類似するクラックが報告されており、クラックは実験開始前に形成されたと考えられている。一方、同様の人工岩石を用いて海食崖の侵食実験を行った Sunamura（1973, 1994）ではクラックは形成されていない（砂村、私信）。これらを踏まえると、クラックが落水の影響によって形成されたとは考えにくく、実験前から存在していたものと推測される。つまり、クラックが初成的に存在した場所では人工岩石の強度が小さいため選択的な侵食を受けてクラックが露出し、結果としてブロック状剥離へとつながったのであろう。クラックの形成には、人工岩石充填時に容器（水路部）に生じた歪みや、人工岩石作成後、実験準備中に加わった衝撃などが寄与したと考えられる。

文献

以上述べてきたように、本実験で観察された滝つぼは、試料内の層状構造や試料内に初成的に存在したクラックに左右されたと考えられる。本研究において滝つぼの諸元と流量・落差とに明瞭な相関関係を見いだすことができなかったのは、層構造やクラックによる人工岩石内の強度不均一性が影響したためと考えてよいだろう。

本研究の結果は、自然界においても滝つぼの形状やサイズに地層やクラックをはじめとする地質構造が強く影響し得ることを示唆する。したがって、滝つぼに対する理解を深める上で、流量・落差といった水理パラメータや研磨剤の影響だけではなく、岩石強度やその不均一性（層状構造やクラック等）の影響についての知見を積み重ねる必要がある。そのような観点に立って実験を行う場合、内部の強度不均一性を制御した人工岩石をいかにして作成するかが重要な課題になる。

V 結論

本研究の結果から、地層やクラックといった地質構造が滝つぼの形状やサイズに強く影響することが示唆された。今回の実験では流量・落差と滝つぼの諸元に明瞭な関係は認められず、これは人工岩内に意図しない強度不均一性が存在したためと考えられる。本研究の問題点を改善した上で、今後のさらなる研究が望まれる。

謝辞

本研究を行うにあたっては、陸域環境研究センターの飯島英夫氏にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

戸田真夏（1990）：流水による岩盤侵食に及ぼす割れ目の影響－室内実験による研究－．筑波大学大学院博士課程地球科学研究科，平成元年修士論文，69p.

Alexandrowicz, Z. (1994): Geologically controlled waterfall types in the Outer Carpathians. *Geomorphology*, **9**, 155-165.

Lamb, M. P., Howard, A. D., Dietrich, W. E. and Perron, J. T. (2007): Formation of amphitheater-headed valleys by waterfall erosion after large-scale slumping on Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, **119**, 805-822.

Philbick, S. S. (1970): Horizontal configuration and the rate of erosion of Niagara Falls. *Geological Society of America Bulletin*, **81**, 3723-3732.

Sunamura, T. (1973): Coastal cliff erosion due to waves—Field investigations and laboratory experiments. *Journal of Faculty of Engineering, University of Tokyo*, **32**, 1-36.

Sunamura, T. (1994): Rock control in coastal geomorphic process. *Transactions Japanese Geomorphological Union*, **15**, 253-272.

Thomas, H. H. (1976): *The Engineering of Large Dams*. Wiley, London, 818p.

Young, R. W. (1985): Waterfalls: form and process. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.* **55**, 81-95.

（2008年7月3日受付，2008年8月1日受理）

熱収支・水収支観測資料 － 2007 年 －

Observational Data of Heat Balance and Water Balance
－ 2007 －

大庭 雅道^{*}・山中 勤^{*}

Masamichi OHBA^{*} 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、2007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。2007年は2月8日に行った。また、10月13～14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。2007年は7月27日と10月23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29.5 m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0.2 m/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1.6 mおよび29.5 m、単位はm/sである。

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

^{*} 筑波大学陸域環境研究センター

と同様に、29.5 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 1.6m 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。2007 年は、5 月 17 日に北西のもの（高度 1.6 m）を南東に移動させ、11 月 7 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。単位は W/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 W/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 W/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単位は分である。2004 年 10 月 17 日以降、データの不良が続いていたが、2007 年 4 月 13 日の日照計本体の更新によって、2007 年度からテーブルを復活させた。

9. 気温：Air Temperature

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

10. 地温：Soil Temperature

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

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。GW-4はほとんどの時期で水面が2 mよりも低くなっており、欠測としている。

12. 露点温度 : Dew-point Temperature

観測用鉄塔の南西側に取り付けた静電容量式高分子膜センサーによって得られた湿度より算出さ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。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。

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

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, 受水口直径 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. 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) によって測定された。単位は hPa である。

III おわりに

本資料は 1980 年に出版した「熱収支・水収支観測資料 (1)」(1977 年 8 月-1979 年 3 月), 1988 年に出版した「熱収支・水収支観測資料 (2) - 熱収支編 -」(1981 年 7 月-1987 年 12 月), 1989 年に出版した「熱収支・水収支観測資料 (3) - 水収支編 -」(1981 年 8 月-1987 年 12 月), に続いて 1 年ごとにまとめられ (渡来・山中, 2007 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 2007 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おり, 2007 年以降ホームページで公開している。

文献

浅沼 順・野原大輔・原 政之・寄崎哲弘
(2004): 第3世代気象・水文観測データ収
集・公開システムについて. 筑波大学陸域環
境研究センター報告, **5**, 157-174.

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

齊藤 誠・浅沼 順 (2004): 陸域環境研究セ
ンター熱収支・水収支観測圃場におけるフ
ラックスデータのシステム間比較と信頼性.

筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**,
87-97.

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.

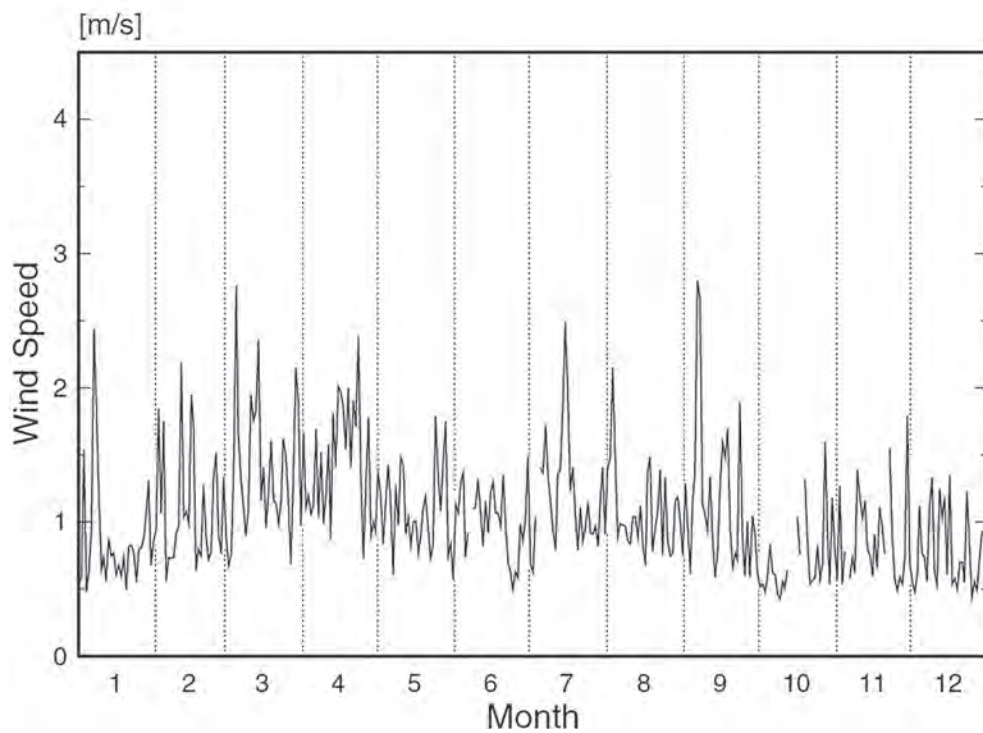
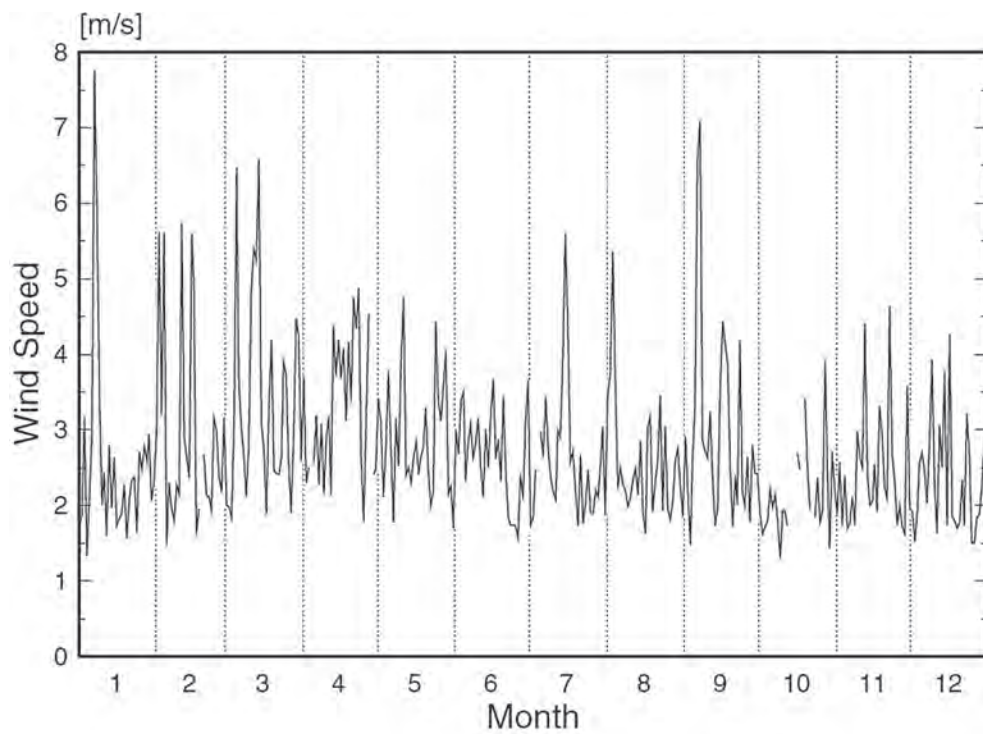
渡来 靖・藪崎志穂・山中 勤 (2006): TERC
熱収支・水収支データベース図表集. 筑波大
学陸域環境研究センター報告, **7** 別冊, 97p.

渡来 靖・山中 勤 (2007): 熱収支・水収支観
測資料－2006年－. 筑波大学陸域環境研究
センター報告, **8**, 55-80.

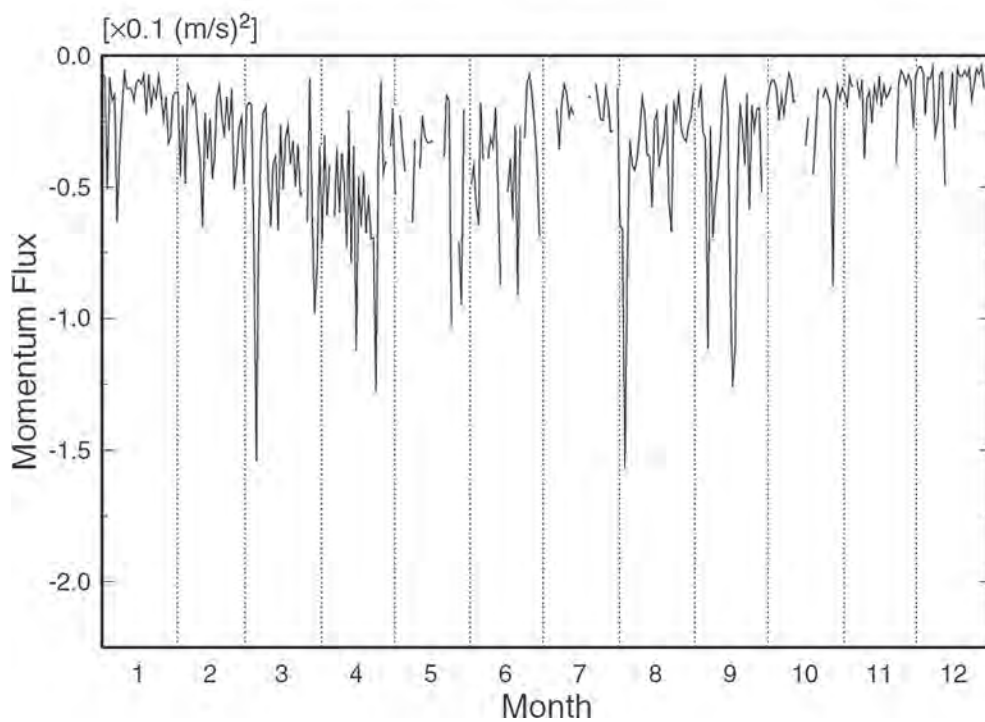
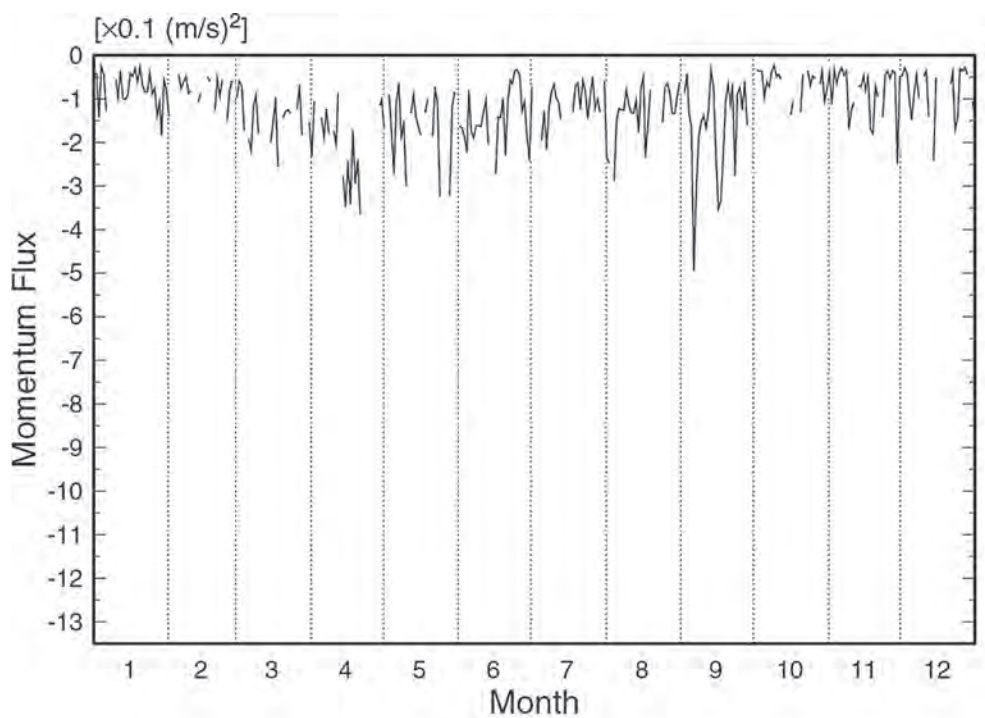
気象・水文表

表の見方

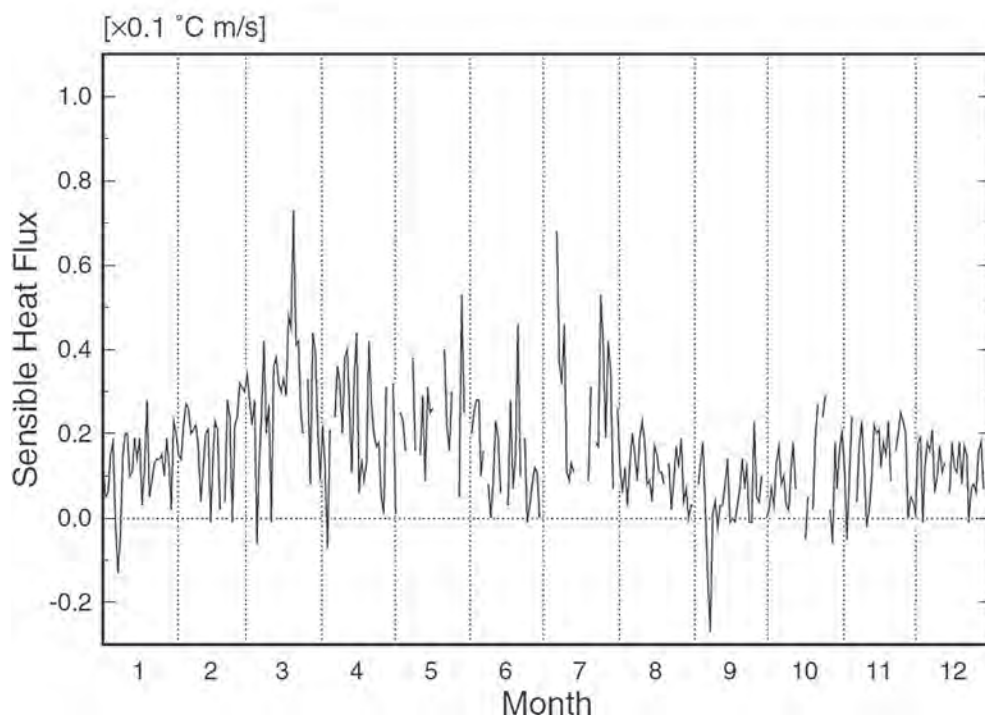
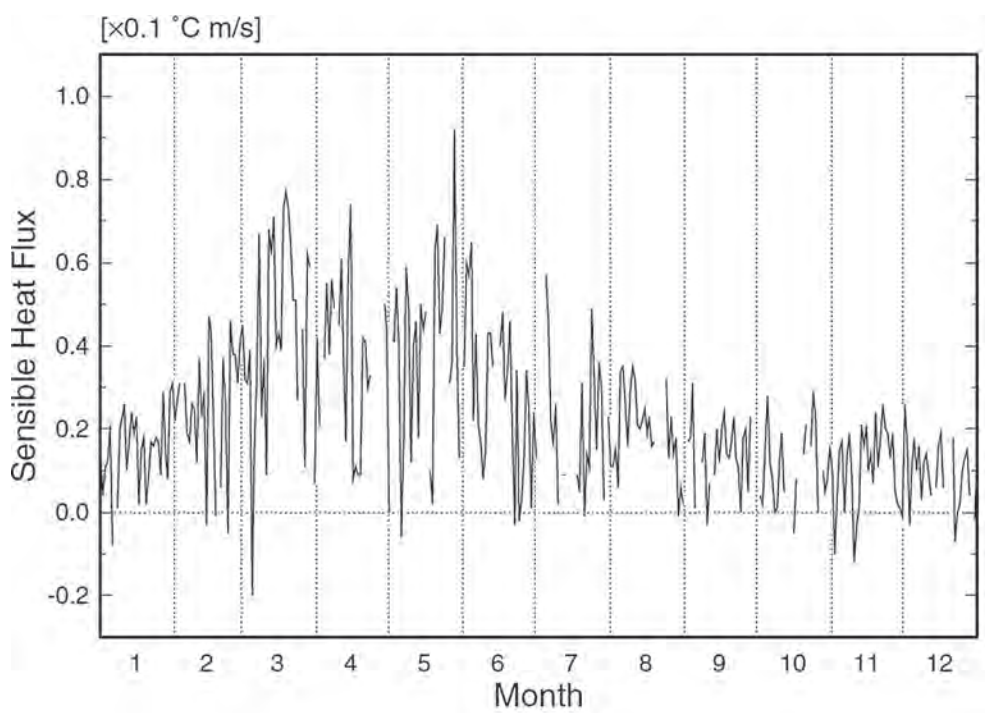
- (1) ITEM は観測要素, INSTRUMENT は観測測器を示す.
- (2) UNIT に関して, MONTHLY FREQUENCY は月毎の頻度を示す.
- (3) 表の横軸は月, 縦軸は日である.
- (4) 1 日 24 データ中 (データ識別 160), 20 個未満の日は欠測「***」,
データが 20 個以上 24 個未満は準完全値「・・・」とする.
「---」は対応する日がないことを示す.
- (5) CALM は静穏, NO DATA は欠測頻度を示す.
- (6) MEAN は月平均値, TOTAL は月積算値を示す.



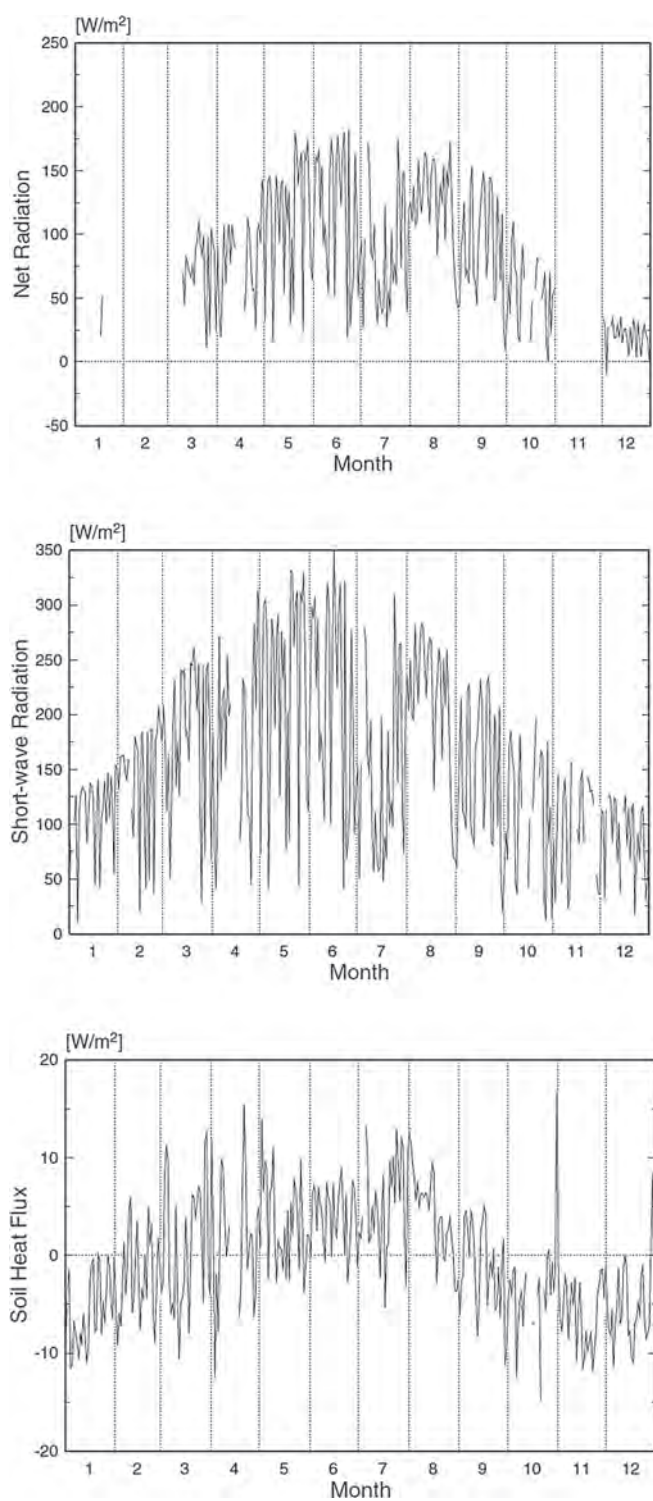
第 1 図 測定高度 29.5 m（上図），および 1.6 m（下図）における風速の日平均値の季節変化



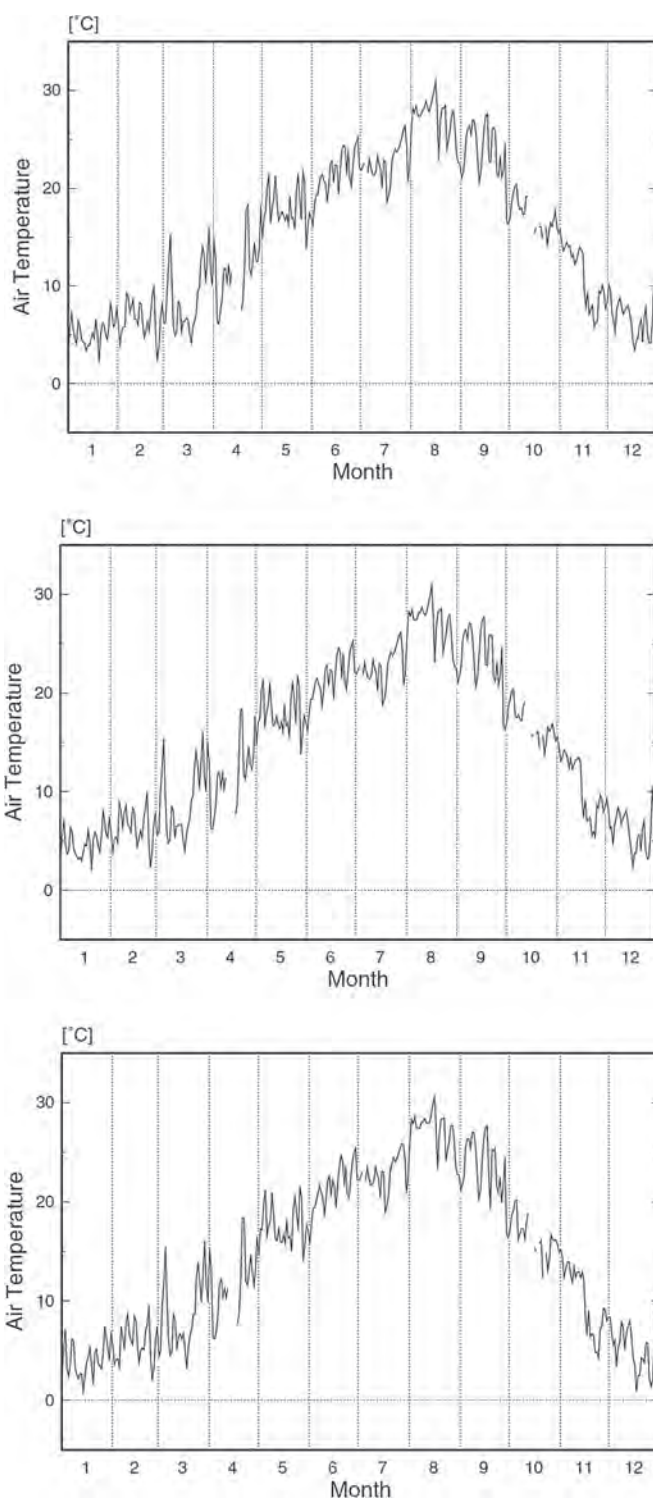
第2図 測定高度 29.5 m（上図），および 1.6 m（下図）における運動量フラックスの日平均値の季節変化



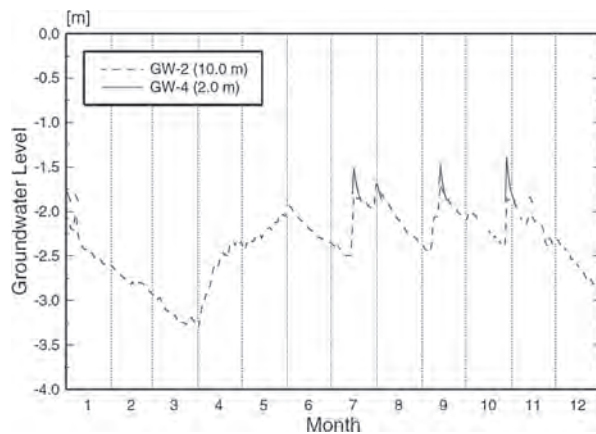
第3図 測定高度 29.5 m（上図），および 1.6 m（下図）における顕熱フラックスの日平均値の季節変化



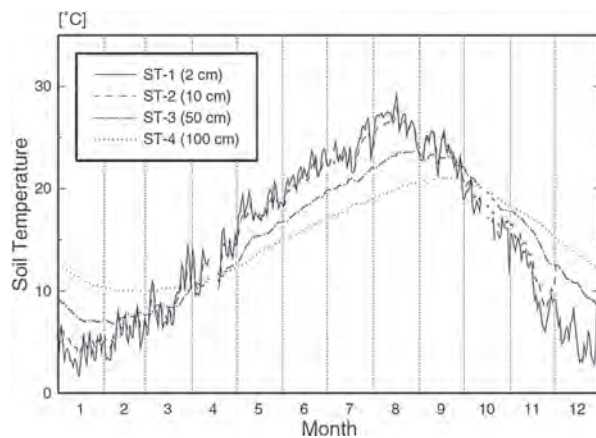
第4図 正味放射量（上図），全天短波放射量（中図），および地中熱流量（下図）の日平均値の季節変化



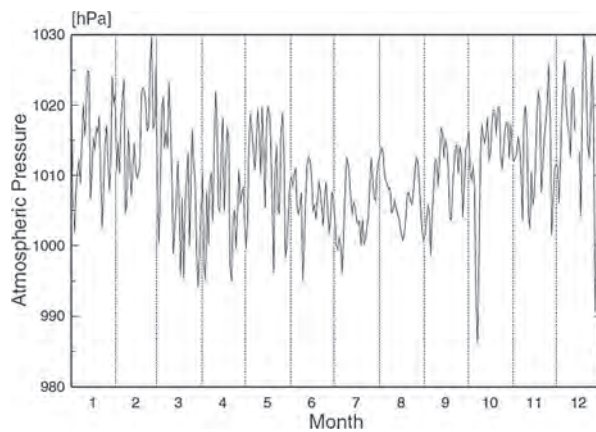
第 5 図 測定高度 29.5 m（上図）、12.3 m（中図）、および 1.6 m（下図）における気温の日平均値の季節変化



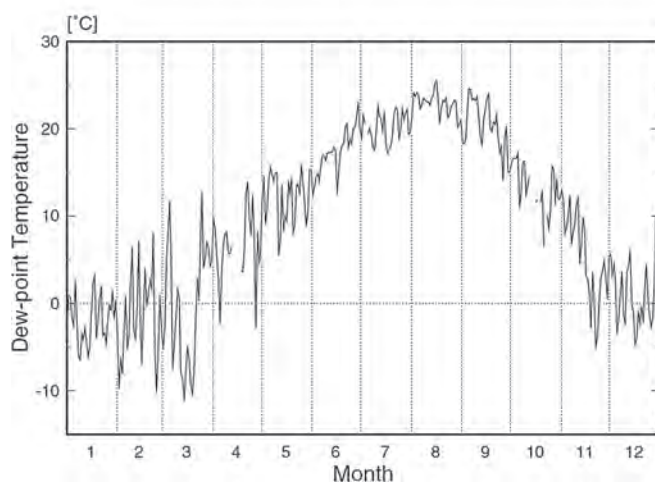
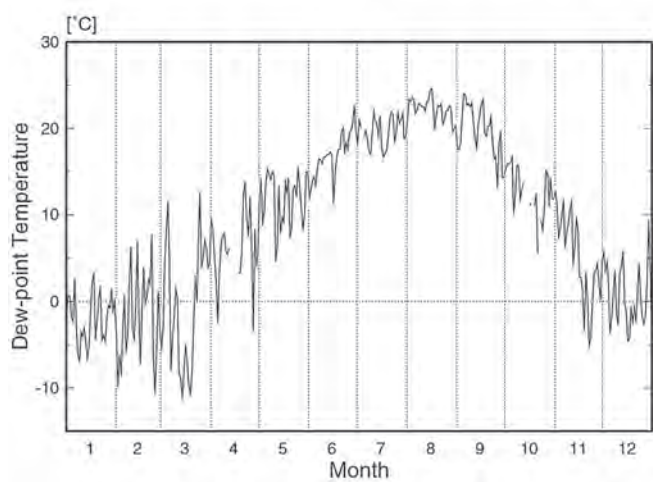
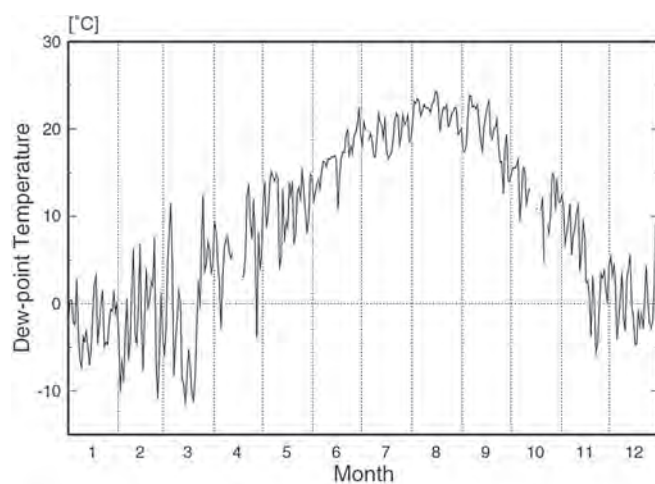
第 6 図 2 深度（10 m，新 2.0 m）の観測井における地下水位の日平均値の季節変化



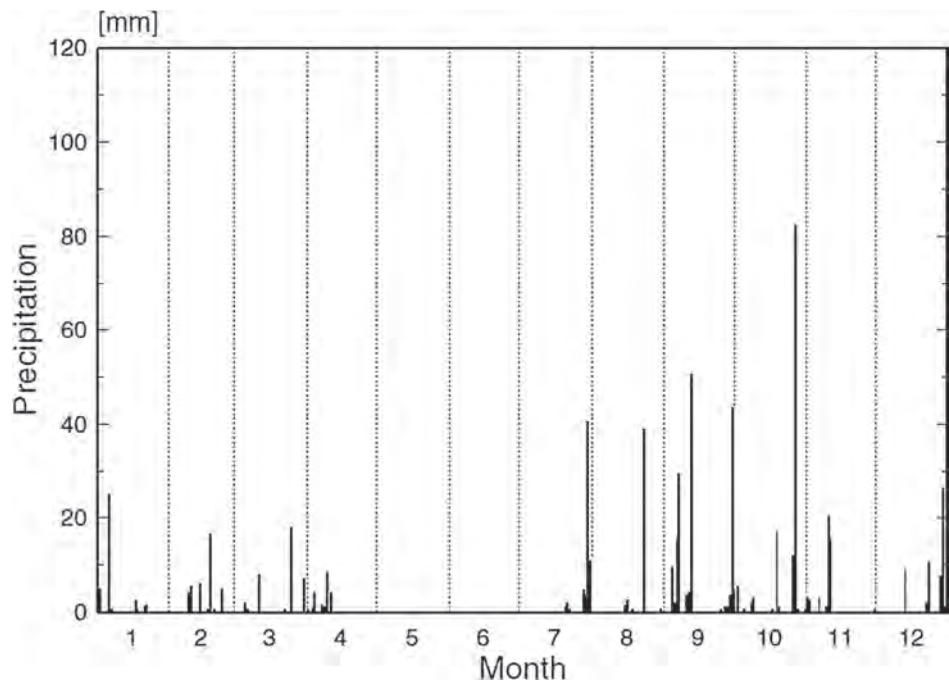
第 7 図 4 深度（2 cm，10 cm，50 cm，100 cm）における地温の日平均値の季節変化



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

ITEM WIND DIRECTION (29.5 m HEIGHT)
INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)
UNIT MONTHLY FREQUENCY
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	19	39	17	23	17	15	9	14	17	35	44	30
NNE	19	21	14	23	15	9	13	8	13	30	29	25
NE	45	41	27	59	22	15	52	35	59	39	44	28
ENE	44	56	77	112	89	99	205	108	165	97	98	53
E	42	47	69	85	163	185	166	96	94	77	61	36
ESE	18	42	50	43	47	78	96	57	41	40	29	18
SE	11	13	24	12	37	41	20	24	13	19	11	16
SSE	3	21	22	5	56	26	25	44	30	17	7	12
S	8	25	28	28	59	60	34	104	61	6	8	10
SSW	13	19	50	90	68	64	16	105	105	14	18	14
SW	19	22	22	21	30	21	13	29	16	13	18	27
WSW	34	22	24	13	19	15	11	23	9	24	21	52
W	82	52	47	41	22	15	12	23	13	23	48	70
WNW	160	100	118	47	61	18	22	37	13	58	91	150
NW	156	114	101	57	25	28	18	19	35	105	140	142
NNW	71	38	54	61	14	20	21	18	36	74	71	57
NO DATA						11	11			73		

ITEM WIND SPEED (1.6 m HEIGHT)
INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)
UNIT (m/s)
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.55	0.94	0.88	1.67	1.38	1.13	0.69	1.41	1.29	0.52	0.57	0.55
2	0.58	1.85	0.68	1.11	1.21	1.07	0.63	1.47	0.95	0.54	1.27	0.48
3	1.54	1.07	0.76	1.20	0.84	1.30	1.04	2.15	0.62	0.48	0.54	0.63
4	0.48	1.75	1.43	1.06	1.14	1.37	***	1.48	1.14	0.60	0.78	1.12
5	0.64	0.56	2.76	1.13	1.43	0.74	1.40	0.89	1.37	0.84	· · ·	0.77
6	0.95	0.74	1.66	1.69	1.14	0.92	1.37	0.99	2.80	0.62	0.58	0.74
7	2.44	0.73	1.33	1.04	0.61	***	1.72	0.98	2.67	0.61	0.74	0.56
8	1.83	0.74	1.13	1.52	1.28	1.10	1.34	0.97	1.13	0.46	0.62	1.11
9	1.14	0.92	0.90	0.99	0.98	1.11	1.14	0.86	1.06	0.43	1.39	1.33
10	0.65	0.97	1.09	1.22	1.48	1.32	0.93	0.84	0.94	0.56	1.18	0.62
11	0.74	2.19	1.95	1.58	1.43	1.09	0.79	1.04	1.34	0.51	1.03	0.53
12	0.56	1.04	1.76	0.87	0.91	0.82	1.37	1.04	0.88	0.64	1.16	1.25
13	0.88	1.08	1.83	1.81	1.03	1.16	1.38	0.89	0.59	***	0.80	1.03
14	0.75	0.99	2.36	1.41	0.83	0.92	1.83	1.12	0.78	***	0.75	1.19
15	0.77	1.95	1.16	2.01	1.00	1.22	2.49	0.82	1.29	***	0.60	0.61
16	0.61	1.74	1.41	1.97	1.01	1.30	1.97	0.68	1.59	1.04	0.91	1.35
17	0.68	0.64	0.96	1.86	0.77	1.07	1.23	1.37	1.48	0.76	0.66	0.54
18	0.60	0.80	1.23	1.54	0.88	1.07	1.41	1.49	1.70	***	1.11	0.58
19	0.74	0.75	1.61	2.00	1.09	0.97	1.06	0.78	0.94	1.32	0.98	0.50
20	0.50	1.28	1.16	1.41	1.19	1.35	0.79	0.95	0.66	0.86	0.77	0.70
21	0.82	0.90	1.14	1.91	0.97	0.96	1.11	1.07	0.77	0.54	· · ·	0.70
22	0.83	0.72	0.99	1.71	0.73	0.69	0.86	1.39	0.72	***	1.55	0.55
23	0.77	0.78	1.17	2.39	0.83	0.64	0.96	0.75	1.89	0.59	0.90	1.23
24	0.55	1.33	1.62	1.34	1.79	0.50	1.15	1.33	0.91	0.83	0.58	0.84
25	0.80	1.52	1.50	0.73	1.36	0.63	0.92	0.86	0.60	0.57	0.49	0.44
26	0.81	0.90	1.18	1.30	1.08	0.59	0.91	0.75	1.00	0.69	0.59	0.56
27	0.89	0.77	0.69	1.78	1.45	0.99	0.97	0.77	0.59	1.60	0.54	0.49
28	1.09	1.34	1.33	0.90	1.75	0.86	0.82	1.16	1.05	0.89	0.73	0.73
29	1.31	-- --	2.15	1.00	0.75	1.02	1.19	1.19	0.92	0.54	1.79	0.93
30	0.68	-- --	1.90	0.93	0.84	1.49	1.41	1.00	0.62	1.18	0.69	0.92
31	0.86	-- --	0.97	-- --	0.57	-- --	0.91	0.75	-- --	0.82	-- --	0.77
MEAN	0.87	1.11	1.38	1.44	1.09	1.01	1.19	1.07	1.14	0.73	0.87	0.79

ITEM WIND SPEED (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)
 UNIT (m/s)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.73	2.96	2.00	3.70	3.41	3.01	1.74	3.47	2.92	1.89	1.88	1.92
2	1.86	5.62	1.98	2.29	3.11	2.68	1.83	3.74	2.15	1.62	2.57	1.52
3	3.17	3.19	1.83	2.50	2.11	3.39	2.47	5.36	1.47	1.72	1.74	1.93
4	1.33	5.61	3.13	• • •	2.77	3.50	***	3.68	2.60	1.79	2.39	2.55
5	2.11	1.47	6.47	2.56	3.78	2.31	2.97	2.22	3.30	2.21	1.69	2.70
6	2.97	2.30	3.68	3.19	2.77	2.81	2.64	2.51	6.59	1.98	1.76	2.47
7	7.76	1.95	3.05	2.28	1.77	3.07	3.43	2.28	7.09	2.13	2.12	2.02
8	5.82	1.79	2.68	3.08	3.16	2.63	2.73	2.20	2.86	1.79	1.74	2.80
9	3.36	2.27	2.12	2.16	2.52	2.82	2.36	1.99	2.72	1.30	2.97	3.93
10	2.01	2.15	2.78	2.92	3.88	3.16	2.18	2.10	2.63	1.93	2.64	2.28
11	2.44	5.74	4.83	3.17	4.75	2.51	2.07	2.34	3.24	1.93	2.50	1.63
12	1.60	2.90	5.40	2.14	2.40	2.11	2.99	2.49	2.36	1.74	4.41	3.06
13	2.80	2.64	5.23	4.38	2.50	3.01	2.90	2.14	1.73	***	2.39	2.50
14	1.97	2.36	6.58	3.71	2.30	2.50	3.96	2.85	1.96	***	2.01	3.77
15	2.63	5.59	3.08	4.19	2.63	3.19	5.60	1.90	3.55	***	2.05	1.74
16	1.73	4.97	2.75	3.68	2.84	3.67	4.36	1.63	4.44	2.69	2.55	4.27
17	1.82	1.61	1.88	4.08	2.41	2.62	2.57	3.02	4.14	2.48	1.91	1.85
18	1.89	1.95	3.29	3.11	2.63	2.87	2.71	3.18	3.86	***	3.32	1.79
19	2.28	• • •	4.19	4.16	2.76	2.32	2.20	1.92	2.46	3.41	2.95	1.70
20	1.56	2.68	2.46	3.38	3.29	3.44	1.73	2.30	1.72	2.51	2.24	1.78
21	2.08	2.14	2.42	4.75	2.47	2.39	2.67	2.57	2.40	1.94	2.09	2.34
22	2.33	2.11	2.41	4.34	1.99	1.84	1.76	3.45	2.01	***	4.63	1.74
23	2.37	1.93	2.64	4.88	2.18	1.74	2.03	1.93	4.18	1.84	2.67	3.22
24	1.64	3.16	3.90	2.62	4.43	1.74	2.47	3.04	2.17	2.37	2.32	2.70
25	2.71	2.99	3.74	1.78	3.39	1.73	1.90	1.95	1.99	1.78	1.74	1.50
26	2.48	2.38	2.60	3.18	3.11	1.57	1.89	1.81	2.64	1.93	2.00	1.50
27	2.77	2.17	1.90	4.53	3.57	2.42	2.20	2.05	1.78	3.91	1.72	1.84
28	2.58	3.16	2.90	• • •	4.05	2.08	2.11	2.60	2.80	2.35	1.63	1.88
29	2.94	--	4.47	2.41	2.15	3.10	2.58	2.75	2.42	1.43	3.58	2.26
30	2.06	--	4.25	2.48	2.26	3.65	3.04	2.25	2.42	2.71	1.95	2.85
31	2.30	--	2.59	--	1.70	--	1.87	1.85	--	2.22	--	3.07
MEAN	2.55	2.95	3.33	3.27	2.87	2.66	2.60	2.57	2.95	2.14	2.41	2.36

ITEM MOMENTUM FLUX (1.6 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)
 UNIT x 0.1 (m/s)²
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-0.068	-0.137	-0.194	-0.706	-0.529	-0.487	-0.272	-0.648	• • •	-0.129	-0.144	-0.047
2	-0.076	-0.459	-0.179	-0.302	• • •	-0.420	• • •	-0.658	-0.196	-0.091	-0.188	-0.042
3	-0.509	-0.191	-0.188	-0.607	-0.229	-0.566	-0.415	-1.567	-0.115	-0.094	-0.083	-0.067
4	-0.083	-0.485	-0.725	-0.417	-0.353	-0.644	***	-0.780	-0.292	-0.127	-0.118	-0.225
5	-0.172	-0.110	-1.543	-0.441	-0.179	• • •	-0.319	-0.314	-0.245	• • •	-0.085	-0.085
6	-0.148	-0.132	-0.752	-0.612	***	-0.395	-0.200	-0.418	-1.115	-0.153	-0.095	-0.092
7	-0.632	-0.185	-0.348	-0.349	• • •	***	-0.357	-0.435	-0.265	-0.223	-0.155	-0.047
8	-0.368	-0.156	-0.215	-0.598	-0.635	-0.392	-0.181	-0.386	-0.692	-0.139	-0.092	-0.301
9	-0.207	-0.293	-0.193	-0.370	-0.321	-0.313	-0.111	-0.286	-0.545	-0.067	-0.392	-0.249
10	-0.054	-0.396	-0.473	-0.489	***	-0.346	-0.143	-0.158	-0.452	-0.099	-0.162	-0.072
11	-0.121	-0.650	-0.648	-0.729	-0.427	-0.197	-0.233	-0.219	-0.340	-0.176	-0.135	-0.061
12	-0.126	-0.218	-0.411	-0.210	-0.228	-0.498	-0.196	-0.377	-0.153	-0.172	-0.256	-0.493
13	-0.128	-0.390	-0.383	-0.790	-0.307	-0.871	-0.223	-0.382	-0.076	***	-0.119	-0.190
14	-0.168	-0.238	-0.663	-0.344	-0.329	***	• • •	-0.577	-0.201	***	-0.171	-0.064
15	-0.103	-0.466	-0.264	-1.124	-0.331	***	***	-0.245	-0.818	***	-0.077	-0.278
16	-0.091	-0.396	-0.508	-0.464	-0.322	-0.517	-0.662	-0.216	-1.260	-0.342	-0.193	-0.046
17	-0.107	-0.163	-0.314	-0.650	***	-0.390	• • •	-0.421	-1.118	-0.234	-0.115	-0.080
18	-0.074	-0.113	-0.265	-0.444	-0.276	-0.621	• • •	-0.361	-0.456	***	-0.160	-0.076
19	-0.225	-0.227	-0.412	-0.673	• • •	-0.267	-0.158	-0.314	-0.182	-0.451	-0.144	-0.058
20	-0.074	-0.309	-0.323	-0.529	• • •	-0.912	-0.156	-0.185	-0.274	-0.302	-0.117	-0.077
21	-0.199	-0.155	-0.499	-0.698	-0.387	-0.272	• • •	-0.553	-0.417	-0.124	• • •	-0.049
22	-0.124	-0.287	-0.337	-0.691	-0.152	• • •	-0.106	-0.669	-0.145	***	-0.406	-0.167
23	-0.159	-0.126	-0.531	-1.275	-0.171	-0.313	-0.179	-0.173	-0.586	-0.158	-0.109	-0.109
24	-0.076	-0.508	-0.525	-0.381	-1.029	-0.104	-0.244	-0.244	-0.190	-0.125	-0.057	-0.049
25	-0.147	-0.412	• • •	-0.096	***	-0.072	-0.245	-0.135	-0.280	-0.151	-0.075	-0.072
26	-0.244	-0.274	-0.631	-0.449	• • •	-0.152	-0.124	-0.281	-0.204	-0.186	-0.109	-0.039
27	-0.155	-0.237	-0.084	-0.404	-0.708	-0.258	-0.181	-0.313	-0.198	-0.873	-0.071	-0.124
28	-0.332	-0.488	-0.614	• • •	-0.947	-0.394	-0.289	-0.327	-0.520	-0.204	-0.099	***
29	-0.312	--	-0.983	-0.344	-0.207	-0.687	-0.287	-0.262	• • •	-0.113	-0.273	***
30	-0.153	--	-0.792	-0.200	• • •	• • •	• • •	-0.235	-0.193	-0.161	-0.075	***
31	-0.141	--	-0.344	--	***	--	-0.124	-0.136	--	-0.124	--	• • •
MEAN	-0.180	-0.293	-0.478	-0.534	-0.416	-0.411	-0.231	-0.396	-0.414	-0.203	-0.150	-0.121

ITEM MOMENTUM FLUX (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)
 UNIT x 0.1 (m/s)²
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-0.378	-1.395	-0.971	-2.313	-1.690	-1.623	-0.703	-2.358	. . .	. . .	-0.401	-0.462
2	-0.429	. . .	-0.590	-1.045	. . .	-1.670	. . .	-2.474	-0.870	-0.335	-1.123	-0.298
3	-1.425	-1.765	-0.699	***	-0.910	-1.851	-1.507	. . .	-0.418	-0.359	-0.326	-0.431
4	-0.260	***	-1.729	. . .	-1.725	-2.211	***	-2.877	-1.331	-0.364	-0.654	-0.959
5	-0.449	-0.446	***	-1.433	-2.739	-0.796	-1.943	-1.484	-1.639	-0.974	-0.397	-1.487
6	-1.279	-0.767	-1.923	-1.881	-1.044	-1.758	-1.271	-1.227	-4.938	-0.607	-0.280	-0.887
7	***	-0.607	-2.183	-1.228	-0.646	-1.892	-2.153	-1.252	-3.046	-0.717	-0.458	-0.448
8	-5.242	-0.486	-1.168	-1.796	-1.930	-1.609	-1.196	-1.265	-1.867	-0.372	-0.358	-0.977
9	. . .	-0.868	-0.910	. . .	-1.508	-1.606	-0.827	-0.785	-1.531	-0.238	-1.694	. . .
10	-0.562	-0.809	-1.784	-1.738	-2.987	-1.627	-0.676	-1.133	-1.386	-0.485	-1.240	-0.469
11	-0.964	***	***	-2.053	. . .	-1.305	-1.006	-1.312	-1.669	-0.435	-1.091	-0.349
12	-0.347	. . .	***	-0.857	-1.329	-1.021	-1.048	-1.325	-1.260	-0.551	. . .	-1.399
13	-0.976	-1.072	. . .	. . .	-0.915	-2.053	-1.465	-1.020	-0.332	***	-0.700	. . .
14	-1.017	-0.851	***	-2.764	-1.419	. . .	***	-1.766	-0.715	***	-0.724	-2.417
15	-0.912	***	-1.996	-3.488	-1.631	. . .	***	-0.730	-2.245	***	-0.459	-0.505
16	-0.421	***	-1.549	-2.421	-1.837	-2.726	-3.550	-0.489	-3.522	-1.369	-0.806	. . .
17	-0.486	-0.508	-0.965	-3.420	***	-1.412	. . .	-2.344	-3.357	-1.051	-0.451	-0.445
18	-0.305	-0.582	-2.556	-1.712	-1.318	-1.432	-1.292	-1.592	-2.281	***	-1.699	. . .
19	-0.613	. . .	. . .	-2.938	-0.996	-0.988	-0.693	-0.796	-1.046	. . .	-1.805	***
20	-0.273	-1.263	-1.438	-2.383	. . .	-2.291	-0.634	. . .	-0.668	-1.302	-0.710	***
21	-0.683	-0.524	-1.290	-3.650	-1.856	-1.013	-1.251	-1.295	-1.138	-0.443	-0.945	-0.647
22	-0.839	-0.949	-1.245	. . .	-0.719	-0.558	-0.575	. . .	-0.658	***	***	-0.394
23	-0.840	-0.567	-1.325	-3.265	-1.111	-0.656	-0.810	. . .	-2.764	-0.348	-1.412	-1.705
24	-0.410	. . .	. . .	. . .	-3.235	-0.346	-1.467	-1.525	-0.880	-0.698	-0.447	-1.453
25	-0.890	-1.513	. . .	-0.314	***	-0.335	-0.956	-0.722	-0.739	-0.472	-0.357	-0.303
26	-0.754	-0.813	-1.223	. . .	-1.683	-0.451	-0.480	-0.639	-1.254	-0.528	-0.534	-0.360
27	-1.388	-0.590	-0.676	-4.044	. . .	-1.283	-1.220	-0.892	-0.587	***	-0.353	-0.281
28	-1.059	. . .	-1.831	. . .	-3.220	-1.063	-1.018	-1.338	-1.609	-0.658	-0.404	-0.441
29	-1.844	---	. . .	-1.159	-1.185	-1.862	-1.290	-1.338	. . .	-0.357	-2.500	. . .
30	-0.562	---	. . .	-1.012	-0.849	-2.420	. . .	-0.940	. . .	-1.063	-0.493	-1.063
31	-0.802	---	-1.518	---	. . .	---	-0.584	-0.623	---	-0.792	---	-1.361
MEAN	-0.911	-0.862	-1.408	-2.132	-1.603	-1.423	-1.185	-1.316	-1.620	-0.631	-0.815	-0.814

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (1.6 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)
 UNIT x 0.1 (°C m/s)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.135	0.148	0.342	0.222	0.013	0.203	0.159	0.124	. . .	0.024	0.117	0.177
2	0.052	0.135	0.281	0.123	. . .	0.250	. . .	0.063	0.078	0.072	-0.051	0.190
3	0.061	0.223	0.219	-0.073	0.246	0.283	0.188	0.122	0.137	0.027	0.102	-0.014
4	0.147	0.272	0.282	0.213	0.229	0.284	***	0.028	0.177	0.126	0.238	0.121
5	0.179	0.262	-0.059	. . .	0.156	0.099	. . .	0.133	0.015	0.174	. . .	0.181
6	-0.013	0.201	0.115	0.243	***	0.157	0.683	0.204	-0.144	0.077	0.035	0.157
7	-0.130	0.205	0.241	0.362	. . .	***	0.365	0.151	-0.275	0.104	0.174	0.208
8	-0.037	0.219	0.418	0.321	0.380	0.084	0.321	0.089	0.006	0.031	0.226	0.062
9	0.154	0.175	0.195	0.203	0.160	0.002	0.463	0.192	0.042	0.024	0.123	0.097
10	0.204	0.040	0.267	0.378	***	0.089	0.107	0.226	-0.020	0.119	-0.016	0.175
11	0.204	0.117	-0.008	0.403	0.153	0.228	0.093	0.180	0.033	0.176	0.022	0.112
12	0.103	0.196	0.357	0.276	0.290	0.188	0.129	0.077	0.032	0.071	0.090	0.127
13	0.106	0.214	0.377	0.114	0.085	0.057	0.110	0.094	0.083	***	0.223	. . .
14	0.185	-0.006	0.322	0.328	0.314	***	. . .	0.039	0.135	***	0.197	0.062
15	0.144	0.154	0.303	0.438	0.254	***	***	0.166	-0.010	***	0.212	0.184
16	0.191	0.227	0.326	0.062	0.260	0.032	0.271	0.151	0.004	-0.046	0.119	0.123
17	0.027	0.212	0.288	0.140	***	0.282	. . .	0.106	-0.011	0.050	0.183	0.111
18	0.125	0.019	0.483	0.086	0.038	0.072	. . .	0.107	0.035	***	0.146	0.181
19	0.276	. . .	0.450	0.134	. . .	0.138	0.095	0.082	0.066	0.025	0.235	0.081
20	0.050	0.040	0.534	0.331	. . .	0.075	0.389	. . .	0.142	0.193	0.086	0.165
21	0.092	0.275	0.411	0.272	0.404	0.101	. . .	0.127	0.072	0.274	. . .	0.150
22	0.128	0.238	0.420	0.198	0.222	. . .	0.176	0.016	0.126	***	0.159	-0.013
23	0.142	-0.013	0.255	0.175	0.161	0.190	0.172	0.090	-0.007	0.239	0.195	0.073
24	0.141	0.219	0.196	0.185	0.304	-0.014	0.531	0.169	-0.006	0.292	0.254	0.077
25	0.152	0.243	. . .	0.049	***	0.031	0.411	0.121	0.230	. . .	0.233	0.064
26	0.098	0.318	0.332	0.008	. . .	0.079	0.195	0.186	0.049	0.022	0.204	0.156
27	0.186	0.310	0.084	0.308	0.049	0.118	0.423	0.043	0.044	-0.056	-0.001	0.182
28	0.125	0.304	0.437	. . .	0.531	0.112	0.354	0.066	0.103	0.177	0.053	0.073
29	0.020	---	0.396	. . .	0.247	0.000	0.073	0.003	. . .	0.068	0.042	***
30	0.227	---	0.217	0.317	. . .	. . .	. . .	0.032	-0.004	0.162	0.013	***
31	0.202	---	0.095	---	***	---	0.255	0.033	---	0.206	---	. . .
MEAN	0.119	0.183	0.286	0.215	0.225	0.126	0.271	0.107	0.041	0.105	0.129	0.121

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DAT-300)
 UNIT x 0.1 (°C m/s)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.163	0.216	0.451	0.415	0.005	0.355	0.130	0.106	• • •	• • •	0.101	0.262
2	0.039	0.269	0.318	0.205	• • •	0.603	• • •	0.105	0.167	0.044	-0.103	0.157
3	0.106	0.314	0.309	***	0.409	0.572	0.229	0.159	0.176	0.015	0.038	-0.027
4	0.122	• • •	0.387	0.374	0.538	0.652	***	0.056	0.306	0.150	0.150	0.100
5	0.212	0.310	-0.198	0.548	0.399	0.221	0.566	0.341	0.015	0.282	0.168	0.185
6	-0.077	0.188	0.145	0.382	-0.055	0.426	0.464	0.346	• • •	0.121	-0.003	0.103
7	• • •	0.169	0.316	0.558	0.176	0.206	0.216	0.256	***	0.085	0.130	0.161
8	0.014	0.263	0.666	0.487	0.593	0.171	0.156	0.161	0.118	0.001	0.186	0.026
9	0.202	0.249	0.226	• • •	0.488	0.082	0.260	0.287	0.195	0.012	0.092	0.119
10	0.226	0.116	0.369	0.448	0.125	0.146	0.018	0.348	-0.031	0.131	-0.116	0.138
11	0.257	0.369	0.093	0.611	0.400	0.428	• • •	0.319	0.067	0.185	-0.029	0.092
12	0.097	0.234	0.680	0.378	0.463	0.433	0.089	0.211	***	0.053	0.010	0.041
13	0.168	0.288	0.621	0.166	0.182	0.352	0.094	0.197	0.090	***	0.206	• • •
14	0.239	-0.026	0.709	0.584	0.503	• • •	***	0.223	0.203	***	0.160	0.058
15	0.192	0.470	0.398	0.744	0.438	• • •	***	0.245	0.115	***	0.212	0.158
16	0.226	0.436	0.429	0.079	0.481	0.400	0.165	0.191	0.204	-0.047	0.096	0.188
17	0.016	0.229	0.388	0.114	***	0.478	• • •	0.228	0.243	0.076	0.139	0.064
18	0.154	-0.013	0.733	0.090	0.100	0.270	0.094	0.161	0.140	***	0.070	• • •
19	0.179	• • •	0.768	0.086	0.020	0.342	0.046	0.168	0.126	• • •	0.242	***
20	0.023	0.057	0.734	0.419	0.631	0.461	0.308	• • •	0.167	0.145	0.111	***
21	0.094	0.367	0.638	0.411	0.689	0.188	-0.014	0.312	0.225	0.215	0.175	0.177
22	0.174	0.258	0.508	0.301	0.430	-0.027	0.140	• • •	0.130	***	0.264	-0.065
23	0.165	-0.050	0.513	0.330	0.492	0.342	0.114	• • •	0.114	0.162	0.198	0.002
24	0.181	0.463	0.272	• • •	0.659	-0.024	0.495	0.325	-0.005	0.289	0.195	0.023
25	0.172	0.382	• • •	0.007	***	0.034	0.319	0.132	0.182	0.216	0.128	0.100
26	0.095	0.382	0.437	• • •	0.307	0.125	0.148	0.232	0.201	0.003	0.192	0.134
27	0.293	0.310	0.109	0.584	0.359	0.344	0.360	0.136	0.047	***	0.045	0.155
28	0.139	0.411	0.615	• • •	0.919	0.244	0.304	0.182	0.226	0.100	0.021	0.044
29	0.082	- - -	0.591	0.503	0.404	0.011	0.033	-0.006	• • •	0.050	0.007	• • •
30	0.292	- - -	• • •	0.440	0.127	0.240	• • •	0.057	• • •	0.085	-0.015	-0.022
31	0.308	- - -	0.074	- - -	• • •	- - -	0.231	0.023	- - -	0.162	- - -	0.131
MEAN	0.152	0.256	0.424	0.371	0.381	0.288	0.207	0.196	0.143	0.110	0.102	0.096

ITEM SHORT-WAVE RADIATION (1.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT PYRANOMETER (GORCYNSKI TYPE) (MS-43F; MS-402F since Mar 20, 2006)
 UNIT (W/m²)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	98.8	132.0	208.9	184.6	72.5	212.8	153.5	236.0	61.2	55.7	84.8	113.2
2	58.1	161.6	172.8	78.6	202.7	299.9	50.4	203.7	126.6	93.8	27.9	110.3
3	• • •	161.8	111.9	41.5	300.9	287.6	154.8	249.4	176.0	67.3	85.9	32.5
4	101.6	163.3	164.6	137.0	304.5	307.6	***	199.0	215.0	169.4	145.7	113.3
5	126.5	146.1	50.6	271.4	274.2	224.8	279.9	195.7	112.5	185.2	• • •	• • •
6	10.5	140.6	105.7	139.3	40.5	287.3	265.7	281.9	107.7	160.2	46.3	127.6
7	112.0	159.5	187.9	215.8	156.4	157.5	164.5	243.6	95.7	149.5	123.2	120.5
8	128.2	• • •	232.3	223.2	287.6	183.1	145.3	210.6	222.8	45.4	141.8	83.3
9	133.9	113.5	134.5	151.2	269.6	157.3	194.4	263.8	227.4	36.5	105.0	124.3
10	131.0	88.1	175.8	253.7	187.0	103.1	87.2	282.6	100.0	141.0	23.3	121.9
11	128.4	179.9	125.7	198.4	272.1	260.7	56.6	281.2	87.4	181.7	32.1	65.0
12	82.5	172.1	241.2	210.7	291.4	320.4	110.7	245.2	81.5	114.7	156.6	101.6
13	109.6	164.7	237.8	***	125.7	299.5	72.7	215.4	171.4	***	• • •	37.6
14	137.1	20.8	241.0	***	276.4	99.9	57.2	256.8	178.9	***	124.2	• • •
15	134.1	183.0	180.2	***	232.3	249.4	60.3	269.9	204.2	***	• • •	110.7
16	123.4	183.3	184.1	***	269.2	350.8	198.4	267.4	232.4	41.9	95.1	126.5
17	45.1	115.7	157.6	***	76.8	288.1	47.8	217.0	211.1	104.9	82.3	80.3
18	117.0	41.7	247.3	85.1	201.9	224.1	88.6	131.2	95.0	***	140.0	114.8
19	141.6	184.0	244.8	119.8	85.3	294.0	68.3	210.9	130.9	113.3	147.9	66.7
20	41.9	48.7	261.0	232.2	331.5	319.2	184.8	230.8	227.5	158.5	84.1	116.2
21	105.4	186.7	235.7	223.9	329.5	195.1	99.7	260.1	234.3	197.2	• • •	117.7
22	114.2	186.7	203.5	162.7	262.2	41.0	121.2	246.2	204.4	***	142.7	16.7
23	139.8	36.5	246.4	107.5	303.4	322.4	97.7	158.7	83.0	143.5	140.9	64.6
24	99.7	175.8	121.6	106.5	312.9	68.0	309.1	250.4	80.8	166.7	129.6	91.4
25	147.4	184.3	28.7	44.4	43.8	83.4	243.0	208.5	200.5	163.4	131.2	66.9
26	105.2	207.1	245.0	227.8	311.7	118.8	137.6	259.0	173.4	28.6	117.8	110.9
27	144.2	190.4	71.0	282.5	302.5	277.4	263.4	211.0	98.7	12.3	• • •	115.7
28	112.7	175.2	241.4	204.8	329.9	199.3	264.7	145.3	206.1	175.6	53.5	71.3
29	55.0	- - -	246.4	313.9	242.7	90.7	101.2	95.8	45.4	82.3	37.0	30.2
30	153.9	- - -	191.2	302.8	123.6	131.4	72.9	69.2	19.8	115.2	35.8	57.4
31	150.4	- - -	67.0	- - -	112.3	- - -	196.6	68.6	- - -	14.7	- - -	124.9
MEAN	109.6	144.6	179.5	180.8	223.6	215.2	144.9	215.0	147.1	112.2	97.4	90.8

ITEM	NET RADIATION (1.5 m HEIGHT)											
INSTRUMENT	NET RADIOMETER (MIDDLETON TYPE) (CN-11)											
UNIT	(W/m ²)											
YEAR	2007											
MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	***	***	***	90.1	31.5	120.3	96.1	125.6	44.4	34.3	***	34.6
2	. . .	***	***	37.7	112.0	161.6	27.0	110.5	91.6	62.8	***	27.1
3	***	***	***	18.9	142.5	157.6	96.2	137.7	100.6	37.7	***	-10.1
4	***	***	***	64.8	145.5	166.7	***	107.2	124.7	94.6	***	27.2
5	***	***	***	107.0	124.6	111.9	171.7	109.3	66.7	110.2	***	. . .
6	. . .	***	***	61.0	16.5	154.1	147.5	158.4	71.8	73.4	***	28.4
7	***	***	***	95.7	79.4	92.3	85.4	128.6	61.8	68.4	***	34.2
8	***	***	***	107.9	145.7	107.0	80.2	116.8	139.6	20.0	***	18.4
9	***	***	***	77.2	132.6	80.6	108.1	137.5	153.2	16.8	***	18.9
10	***	***	70.3	107.4	93.2	53.7	46.5	163.8	66.7	71.1	***	29.6
11	***	***	43.9	94.5	139.6	153.7	29.9	161.2	63.2	91.5	***	18.7
12	***	***	82.2	89.5	142.0	174.9	64.1	132.8	44.9	65.1	***	35.2
13	***	***	78.1	***	54.1	156.5	46.2	107.9	95.8	***	***	14.4
14	***	***	69.5	***	138.5	50.9	38.6	145.4	115.7	***	***	25.6
15	***	***	66.3	***	109.6	157.6	41.7	159.0	133.7	***	***	26.1
16	***	***	75.8	***	134.6	177.6	122.7	158.9	148.8	16.9	***	17.7
17	20.5	***	60.2	***	29.5	151.3	27.4	146.3	136.7	47.1	***	4.8
18	51.6	***	89.5	39.2	97.2	122.5	55.1	83.2	66.3	***	***	27.3
19	***	***	95.1	61.0	38.2	164.7	38.5	121.7	86.7	56.9	***	9.9
20	***	***	110.7	111.8	179.6	180.2	103.0	139.6	144.7	80.9	***	32.8
21	***	***	91.8	104.8	168.9	116.3	61.3	124.4	143.3	78.6	***	27.0
22	***	***	83.4	77.5	138.4	19.0	76.4	153.9	128.0	***	***	3.2
23	***	12.6	99.0	55.6	156.6	182.7	60.4	95.0	48.2	49.2	***	31.3
24	***	***	48.3	57.6	163.7	27.1	174.8	151.0	49.0	57.2	***	16.9
25	***	***	11.0	26.3	23.1	51.5	140.4	137.5	129.7	70.5	***	3.9
26	***	***	98.7	102.4	163.2	68.6	73.8	172.4	108.1	13.8	***	22.4
27	***	***	21.4	107.6	158.1	162.9	147.6	132.3	63.4	0.4	***	29.5
28	***	***	104.4	93.8	174.8	120.2	148.7	89.4	115.9	70.5	***	21.8
29	***	--	94.1	142.9	125.0	51.0	53.8	66.5	25.9	21.6	***	17.9
30	***	--	87.0	134.2	70.9	82.6	38.9	50.1	9.3	52.4	***	1.5
31	***	--	23.0	--	64.1	--	118.7	42.5	--	57.1	--	24.0
MEAN	36.1	12.6	72.9	82.7	112.7	119.2	84.0	124.7	92.6	54.6	***	20.7

ITEM	SOIL HEAT FLUX (0.02 m DEPTH)											
INSTRUMENT	SOIL HEAT FLUX METER (CPR-PHF-01)											
UNIT	(W/m ²)											
YEAR	2007											
MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-9.6	-5.1	-3.7	11.9	0.7	-0.2	2.3	12.7	-6.1	-4.4	-2.1	-5.5
2	-3.6	-9.2	-2.8	2.0	14.0	6.1	1.8	11.5	-2.5	-2.4	-6.5	-7.7
3	-1.4	-5.9	8.1	-12.5	6.5	7.2	4.0	9.4	-2.2	-4.2	-7.8	-8.2
4	-11.5	-7.3	11.3	-1.9	9.6	6.3	***	8.0	4.1	-1.5	-5.2	-5.5
5	-11.2	-2.9	9.7	-7.8	9.0	2.5	13.3	5.6	4.5	-1.2	-2.1	-11.5
6	-6.7	1.4	-2.6	1.4	-2.4	7.0	10.9	7.6	2.8	-12.5	-3.1	-7.0
7	-7.9	-4.1	-6.0	9.9	6.5	5.4	1.4	4.8	-0.2	-7.1	-8.6	-5.3
8	-9.0	-1.0	-4.9	8.9	7.0	4.5	1.8	6.3	4.5	-4.6	-5.5	-1.3
9	-10.6	4.7	-6.5	3.9	11.1	1.6	5.1	6.3	3.6	-3.7	-2.7	-6.9
10	-7.9	6.0	5.2	-0.1	1.3	-0.7	2.3	6.0	1.0	-7.3	-5.2	-6.4
11	-9.1	-5.9	-4.8	1.4	-2.8	7.5	6.6	6.4	-4.2	-3.7	-2.3	-1.3
12	-5.9	-4.3	-10.6	3.1	1.5	5.9	5.5	6.0	-8.3	-1.8	-10.8	0.0
13	-8.2	-0.3	-4.8	***	0.8	5.3	3.1	4.6	-4.6	***	-6.3	-1.5
14	-11.0	3.6	-4.4	***	0.6	-0.2	-2.3	7.3	2.5	***	-2.8	-8.2
15	-9.5	-2.8	-2.9	***	-1.6	7.3	4.4	9.4	3.4	***	-6.6	-7.8
16	-2.6	-7.6	3.9	***	3.0	2.9	8.3	8.4	5.1	-6.8	-11.6	-10.5
17	-0.8	-3.5	-0.4	***	-2.4	1.9	-5.3	2.0	4.3	-7.1	-10.6	-11.0
18	-0.4	-4.4	-8.0	-6.3	4.6	5.4	0.9	-2.9	-5.2	***	-7.7	-6.9
19	-7.8	0.0	-0.9	-3.5	-2.6	7.3	1.1	3.0	-2.2	-4.1	-9.8	-6.5
20	-7.6	-4.5	6.2	7.1	5.5	9.0	9.7	3.9	-0.5	-2.3	-8.9	-4.7
21	0.1	5.0	5.9	15.4	2.1	4.9	7.0	4.0	-2.2	-14.9	-7.8	-6.3
22	-0.5	1.0	3.9	9.0	7.7	0.1	10.1	-0.3	0.7	***	-11.9	-2.2
23	-8.1	3.3	5.3	-1.4	6.8	6.3	5.3	-0.5	-5.6	-3.5	-9.9	-1.0
24	-4.6	-6.1	7.0	0.5	4.2	-2.8	12.9	2.3	-5.2	-5.7	-8.0	-6.2
25	-7.0	-8.9	6.5	2.2	-1.5	0.0	9.5	2.6	-1.2	0.1	-3.9	-8.5
26	-3.8	-3.6	1.7	2.0	9.9	3.3	5.6	3.9	-6.4	0.5	-3.0	-8.0
27	0.1	1.8	-4.9	-6.3	3.5	7.6	12.0	1.8	-1.1	-4.1	-1.5	-7.2
28	-1.2	-0.7	11.9	-4.0	-3.8	7.0	11.1	0.2	1.7	-0.6	-1.4	1.2
29	-4.8	--	12.5	4.0	-1.0	4.1	1.3	-3.6	-11.3	-3.8	-4.4	8.4
30	-6.5	--	-1.9	4.8	2.1	-1.2	-3.2	-3.7	-9.3	-1.6	-1.1	-6.0
31	-0.1	--	-4.1	--	2.0	--	9.6	-2.5	--	16.7	--	-12.4
MEAN	-5.8	-2.2	0.8	1.7	3.3	4.0	5.2	4.2	-1.3	-3.5	-6.0	-5.5

ITEM SUNSHINE DURATION (9.0m HEIGHT)
INSTRUMENT SUNSHINE-RECORDER
UNIT (min)
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	***	***	***	***	4.5	346.5	59.5	461.5	0	0	193	398.5
2	***	***	***	***	343	607.5	0	386	30	87.5	0	425.5
3	***	***	***	***	713	552	44	501	333.5	0	209.5	82.5
4	***	***	***	***	731	643.5	***	381.5	435	336	487	365
5	***	***	***	***	651.5	400	412	344	59	404	. . .	. . .
6	***	***	***	***	0	549	407	665.5	67.5	475.5	3.5	528.5
7	***	***	***	***	117	124	125	553	101.5	341	339.5	499
8	***	***	***	***	698	156	184.5	355.5	541.5	39.5	520.5	182
9	***	***	***	***	611.5	99.5	33.5	666	509	0	185.5	503
10	***	***	***	***	215	22	0	716.5	18.5	214	0	514.5
11	***	***	***	***	533.5	451	0	741	34	403.5	0.5	207
12	***	***	***	***	691.5	756	43	470	119.5	203.5	576	349.5
13	***	***	***	***	141.5	598.5	0	431.5	262	***	578.5	25
14	***	***	***	***	567	646	2.5	0	560.5	299	***	419.5
15	***	***	***	***	548.5	501	305	0	646	432	. . .	386
16	***	***	***	***	15.5	488	797.5	244.5	661.5	590	. . .	199.5
17	***	***	***	***	57.5	114.5	564.5	0	354	491	164.5	201.5
18	***	***	***	***	0.5	282	269.5	11	81.5	32	***	538.5
19	***	***	***	***	74	25	. . .	0	413.5	143.5	158.5	569.5
20	***	***	***	***	352.5	708	784.5	253	436.5	630.5	356	206
21	***	***	***	***	377	761	260.5	15	656	637.5	589	. . .
22	***	***	***	***	170.5	500.5	0	90	531	496.5	***	556
23	***	***	***	***	0.5	657.5	630	11.5	240	59.5	. . .	549.5
24	***	***	***	***	59.5	696	0.5	671	587.5	0.5	538	535.5
25	***	***	***	***	0	0	0	320	364.5	486.5	460	539
26	***	***	***	***	531.5	691	19	72	519	269	0	385.5
27	***	***	***	***	687	646	511.5	555.5	438	82.5	0	517.5
28	***	***	***	***	388	699.5	218	598	124.5	560	580.5	0
29	***	---	---	---	712	431	0	23.5	24	0	63	0
30	***	---	---	---	729.5	25	4.5	46.5	0	0	242	2.5
31	***	---	---	---	---	33	---	261.5	4.5	---	371	---
MEAN	***	***	***	310.1	430.8	333.6	149.4	429.5	257.4	251.1	288.7	323.8

ITEM AIR TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)
INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)
UNIT (° C)
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2.1	5.5	4.4	15.3	14.6	15.8	22.2	25.9	21.2	17.2	15.2	8.4
2	5.1	3.6	5.0	13.0	17.3	17.9	22.5	28.4	21.8	18.7	14.4	6.6
3	7.2	4.1	9.6	6.3	17.2	19.4	23.0	27.9	22.6	19.0	12.4	5.5
4	3.1	4.2	11.8	6.2	19.9	19.4	***	28.6	25.4	20.1	13.2	6.1
5	2.4	3.4	15.5	6.9	21.2	20.0	22.2	27.5	26.3	20.2	13.9	3.4
6	3.7	7.5	10.5	8.7	16.6	20.8	23.5	27.5	26.4	16.2	14.0	5.3
7	6.2	6.4	6.2	11.8	17.6	21.7	22.4	27.4	25.4	16.8	12.6	5.9
8	6.0	5.1	4.5	12.2	18.1	21.0	21.7	28.0	27.0	17.3	11.9	7.9
9	3.2	7.8	4.8	10.4	20.9	20.4	21.8	28.1	27.0	17.3	13.5	7.4
10	2.6	8.7	8.7	11.3	18.6	18.8	22.1	28.4	25.8	16.3	12.4	5.1
11	2.2	6.7	8.1	10.3	16.3	20.4	23.5	28.0	20.1	17.8	12.9	6.8
12	2.7	6.0	5.1	11.3	16.1	22.2	22.9	27.9	20.3	18.8	13.0	7.5
13	2.7	5.6	6.4	***	17.3	22.6	22.4	28.0	21.1	***	12.4	8.0
14	0.9	8.5	6.7	***	16.0	20.6	20.4	28.9	23.9	***	13.0	6.5
15	2.4	8.0	6.2	***	15.9	22.2	23.1	29.9	26.3	***	12.0	4.3
16	3.8	5.8	6.8	***	16.7	21.6	23.0	30.6	27.5	15.4	8.6	3.6
17	4.3	3.8	5.1	***	15.8	19.4	19.0	27.9	27.7	15.0	6.6	0.9
18	5.3	5.0	3.2	7.7	18.2	21.9	19.6	23.3	23.0	***	9.1	2.5
19	3.6	5.3	5.3	8.8	16.3	23.5	20.6	26.7	19.3	15.8	6.4	2.5
20	1.6	5.1	6.6	12.6	16.6	24.7	23.1	28.3	25.3	16.2	6.7	4.3
21	4.8	7.0	7.2	18.4	15.0	24.2	23.8	28.4	25.1	12.4	6.6	4.1
22	5.2	7.7	8.7	18.3	19.2	21.6	24.5	28.5	25.4	***	4.8	3.8
23	3.7	9.6	8.7	12.0	20.5	23.6	24.0	24.1	21.6	14.9	4.9	5.8
24	3.5	4.6	12.2	11.6	19.0	20.7	24.3	25.2	20.9	13.1	4.3	5.8
25	3.2	2.0	13.9	12.9	17.1	20.4	24.9	26.2	22.5	14.3	7.3	2.3
26	4.7	3.3	12.1	14.7	21.6	22.3	25.4	27.7	19.9	16.7	7.4	1.4
27	7.5	6.1	9.9	12.8	20.4	24.0	25.9	27.7	21.7	16.2	9.3	2.0
28	6.2	7.5	12.7	11.6	14.0	25.0	25.8	26.2	24.5	16.1	9.1	5.5
29	5.3	---	16.1	13.6	15.7	25.4	24.3	23.5	16.7	16.2	8.0	10.7
30	4.0	---	11.6	16.5	17.7	22.2	20.9	22.7	16.4	15.8	8.4	7.2
31	6.9	---	9.9	---	17.2	---	22.2	22.7	---	14.9	---	1.8
MEAN	4.1	5.9	8.5	11.8	17.6	21.5	22.8	27.1	23.4	16.5	10.1	5.1

ITEM AIR TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)
 UNIT (° C)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2.9	5.9	5.6	15.0	14.8	16.1	21.9	25.8	21.1	17.1	15.6	9.3
2	5.5	3.9	5.9	12.8	17.1	18.0	22.4	28.3	21.7	18.7	14.4	8.2
3	7.2	5.2	9.7	6.3	17.4	19.4	22.7	27.8	22.8	19.4	13.1	6.2
4	4.7	5.4	12.2	6.2	20.3	19.4	***	28.5	25.2	20.3	13.5	6.4
5	3.7	4.8	15.4	7.4	21.4	20.2	21.8	27.5	26.2	20.4	14.2	4.6
6	3.9	8.9	10.8	8.7	16.5	21.1	23.1	27.4	26.4	17.7	14.0	6.7
7	6.4	8.1	6.1	11.8	18.0	21.5	22.2	27.5	25.5	17.5	13.5	7.4
8	6.0	6.4	4.8	12.0	18.7	20.9	21.5	28.1	27.1	17.8	12.4	8.4
9	4.2	7.9	5.1	10.5	21.1	20.5	21.4	28.2	27.0	17.3	13.4	7.9
10	3.7	8.6	8.5	11.9	18.6	18.7	21.8	28.7	25.7	17.2	12.3	6.7
11	3.5	6.7	8.1	10.3	16.7	20.2	23.4	28.2	23.1	18.6	12.8	7.3
12	3.2	6.5	5.3	11.4	16.8	22.5	22.7	27.9	20.6	19.1	13.2	7.7
13	3.4	5.9	6.5	***	17.6	22.8	22.2	28.3	21.4	***	13.3	8.1
14	3.0	8.4	6.6	***	16.9	20.7	20.2	29.1	23.9	***	13.5	6.9
15	3.9	8.1	6.7	***	16.4	22.4	23.0	29.9	26.3	***	12.9	5.5
16	4.7	6.2	6.7	***	17.1	22.2	22.8	30.9	27.5	15.5	9.3	4.0
17	4.5	4.4	5.1	***	16.1	19.4	18.8	28.1	27.7	15.8	7.4	2.4
18	6.1	5.2	4.0	7.7	18.9	21.9	19.3	23.1	22.9	***	9.2	3.8
19	4.8	6.1	5.7	8.6	16.7	23.8	20.3	26.8	22.8	15.9	7.0	3.8
20	2.0	5.3	6.5	12.6	17.0	24.6	22.8	28.3	25.8	16.1	7.2	5.5
21	5.1	7.3	7.3	18.2	15.5	24.2	23.6	28.4	25.9	14.4	7.4	5.6
22	5.9	8.4	9.2	18.4	19.5	21.5	24.2	28.6	25.8	***	5.5	4.0
23	5.5	10.0	9.6	11.8	21.2	24.0	23.8	24.1	21.5	15.7	6.0	6.3
24	4.5	5.0	12.4	11.3	19.2	21.1	24.1	25.1	21.2	13.8	5.4	7.0
25	3.9	2.3	14.1	12.8	16.9	20.3	24.6	26.1	23.2	15.0	8.7	4.0
26	5.5	3.8	12.7	14.6	21.8	22.4	25.2	27.7	20.8	16.6	8.3	3.2
27	8.2	6.6	10.3	12.7	20.7	24.1	25.9	27.9	21.8	16.1	9.7	3.4
28	6.8	7.9	12.8	12.3	13.8	24.8	26.2	26.1	24.7	16.5	9.3	5.9
29	5.7	---	16.1	13.8	15.9	25.3	24.3	23.4	16.6	16.9	7.9	10.6
30	5.4	---	11.7	17.7	17.7	22.1	20.8	22.7	16.3	15.9	8.4	7.5
31	7.5	---	10.0	---	17.1	---	22.0	22.6	---	15.1	---	3.5
MEAN	4.9	6.4	8.7	11.9	17.8	21.5	22.6	27.1	23.6	16.9	10.6	6.1

ITEM AIR TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (E-731)
 UNIT (° C)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3.3	6.0	6.2	14.9	14.8	16.2	21.8	25.7	21.0	17.0	15.8	10.2
2	5.7	4.0	6.3	12.7	17.0	18.1	22.3	28.2	21.6	18.6	14.4	9.6
3	7.2	5.4	9.7	6.3	17.6	19.3	22.5	27.7	23.1	19.5	13.6	7.1
4	5.6	5.8	12.4	6.1	20.3	19.3	***	28.4	25.2	20.2	14.0	6.6
5	4.6	5.8	15.3	7.5	21.2	20.3	21.6	27.5	26.1	20.4	14.5	5.3
6	4.1	9.3	10.8	8.7	16.4	21.1	23.0	27.3	26.4	18.4	14.0	7.5
7	6.4	8.9	6.0	11.7	18.0	21.4	22.1	27.5	25.5	17.8	14.1	8.3
8	5.9	7.3	4.9	11.8	18.9	20.8	21.4	28.0	27.0	18.0	13.0	8.8
9	4.6	7.9	5.2	10.4	21.3	20.5	21.3	28.2	26.9	17.3	13.3	7.9
10	4.3	8.6	8.4	12.2	18.5	18.6	21.7	28.9	25.6	17.4	12.2	7.1
11	4.2	6.6	8.1	10.3	16.7	20.1	23.3	28.3	23.0	19.1	12.6	7.5
12	3.4	6.6	5.3	11.4	17.2	22.5	22.6	27.8	20.6	19.2	13.3	7.8
13	3.9	6.0	6.4	***	17.6	22.8	22.0	28.5	21.7	***	14.0	8.0
14	3.9	8.3	6.4	***	17.2	20.6	20.0	29.2	23.9	***	13.7	7.2
15	4.5	8.1	6.7	***	16.7	22.4	22.9	30.0	26.2	***	13.3	6.1
16	5.2	6.3	6.6	***	17.3	22.3	22.7	31.0	27.4	15.4	9.5	4.2
17	4.6	4.7	5.1	***	16.3	19.4	18.6	28.3	27.6	15.9	7.8	3.5
18	6.6	5.3	4.2	7.5	19.2	21.8	19.2	22.9	22.7	***	9.4	4.4
19	5.1	6.4	5.9	8.5	16.9	23.9	20.1	26.8	22.7	16.0	7.1	4.7
20	2.1	5.4	6.4	12.5	17.0	24.4	22.7	28.2	26.1	16.1	7.6	6.1
21	5.1	7.3	7.2	18.0	15.8	24.2	23.5	28.2	26.2	14.9	8.0	6.6
22	6.2	9.1	9.5	18.3	19.5	21.4	24.0	28.5	25.8	***	5.8	4.3
23	6.1	10.1	9.9	11.7	21.5	24.0	23.7	24.0	21.4	16.1	6.3	6.6
24	5.0	5.0	12.4	11.1	19.3	21.2	24.0	25.0	21.2	14.1	6.3	7.8
25	4.5	2.3	14.0	12.6	16.8	20.2	24.5	26.0	23.3	15.6	9.5	5.2
26	6.0	3.9	13.2	14.5	21.7	22.3	25.1	27.6	21.1	16.5	9.2	4.2
27	8.4	6.8	10.3	12.6	20.8	24.1	26.0	27.9	21.8	16.1	10.1	4.2
28	7.0	8.1	12.9	12.5	13.8	24.7	26.4	26.0	24.6	16.9	9.4	6.1
29	5.8	---	16.0	14.0	16.0	25.2	24.4	23.3	16.5	17.7	7.7	10.4
30	6.1	---	11.5	18.3	17.5	22.1	20.7	22.6	16.3	16.1	8.3	7.6
31	7.7	---	10.0	---	17.1	---	21.9	22.5	---	15.3	---	4.1
MEAN	5.3	6.6	8.8	11.8	17.9	21.5	22.5	27.1	23.6	17.1	10.9	6.6

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.02 m DEPTH)
INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)
UNIT (" C)
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2.9	5.1	5.8	14.2	14.5	18.3	22.3	25.5	22.8	19.1	15.6	9.1
2	5.2	3.3	5.7	13.2	17.5	19.3	22.3	26.9	22.8	19.8	15.4	7.5
3	6.4	3.5	8.0	9.6	17.6	20.4	22.9	27.1	22.8	19.7	14.4	6.5
4	4.8	3.3	9.9	9.8	18.7	20.9	***	27.2	24.2	20.2	13.9	7.4
5	3.2	3.2	10.9	9.6	19.4	20.3	23.7	27.1	25.1	20.9	14.8	4.8
6	4.2	5.2	10.6	9.8	17.2	20.7	24.6	27.4	25.2	18.4	15.2	4.9
7	4.3	5.0	7.9	12.4	18.1	21.1	23.5	27.0	24.5	17.6	14.5	5.5
8	3.9	4.3	7.4	14.0	18.5	21.3	22.7	27.2	25.5	18.1	13.0	6.3
9	3.1	6.4	6.5	13.2	19.7	20.5	23.3	27.3	25.7	18.8	13.9	6.5
10	3.1	8.1	8.7	12.6	19.1	19.9	22.8	27.5	25.5	18.3	13.7	5.1
11	2.6	7.0	8.7	12.6	17.6	21.4	23.6	27.4	24.3	17.8	14.0	6.9
12	3.3	5.6	6.4	13.1	17.0	21.9	24.0	27.4	22.2	18.9	12.5	7.0
13	3.1	5.8	6.8	***	17.7	22.1	23.5	26.7	21.4	***	12.3	8.4
14	2.0	7.4	7.0	***	17.4	21.1	22.1	27.4	23.1	***	12.8	6.7
15	1.7	7.7	6.7	***	17.3	22.0	23.0	28.3	24.4	***	12.5	5.5
16	3.2	5.4	8.3	***	17.5	21.5	24.1	29.2	25.3	17.2	10.7	4.1
17	4.1	4.9	7.9	***	16.9	21.1	21.6	28.0	25.7	17.1	9.1	3.0
18	5.6	6.2	6.7	10.3	17.4	21.8	21.6	25.7	24.1	***	9.6	3.3
19	3.6	5.7	6.7	10.4	17.3	22.5	21.8	26.1	23.5	16.7	8.2	3.0
20	2.8	5.4	9.0	12.8	18.1	23.7	23.8	27.0	24.2	17.1	8.9	4.7
21	4.7	7.8	9.6	15.8	17.5	23.3	24.0	27.3	23.4	15.0	8.0	3.7
22	5.7	6.7	9.9	16.1	19.4	22.1	24.9	27.3	23.8	***	6.7	4.3
23	3.7	8.6	9.8	14.6	19.9	23.3	24.9	25.2	23.0	15.8	6.3	6.0
24	4.3	6.9	10.7	13.5	19.9	21.3	26.1	25.9	22.0	15.2	6.0	5.5
25	3.2	4.4	12.6	13.5	18.0	21.3	26.1	26.1	22.7	15.4	7.0	3.6
26	3.3	5.1	12.0	15.1	20.7	21.9	25.8	26.6	21.1	17.0	7.7	3.1
27	5.4	5.9	10.0	13.6	20.4	23.2	26.7	26.4	21.8	16.4	8.6	2.8
28	5.0	7.3	12.7	13.2	18.8	23.9	26.9	26.1	23.3	16.2	9.6	4.2
29	5.4	---	14.4	14.7	18.1	23.8	25.3	24.7	20.6	16.1	8.8	8.9
30	4.0	---	13.2	15.6	18.7	22.8	22.8	24.0	19.0	16.1	9.2	7.9
31	5.1	---	10.1	---	18.6	---	24.0	23.6	---	11.7	---	3.7
MEAN	2.9	5.1	5.8	14.2	14.5	18.3	22.3	25.5	22.8	19.1	15.6	9.1

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.10 m DEPTH)
INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)
UNIT (" C)
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	5.0	5.8	6.6	12.4	14.5	18.3	22.0	24.4	23.8	20.1	16.4	10.2
2	6.0	4.9	6.4	12.8	15.7	18.5	22.1	25.5	23.4	20.4	16.5	9.3
3	6.8	4.7	7.4	11.1	16.3	19.3	22.3	25.9	23.3	20.6	15.8	8.6
4	6.5	4.6	8.7	10.3	17.1	19.9	***	26.1	23.9	20.7	15.1	8.7
5	5.3	4.3	9.8	10.0	17.7	19.8	22.4	26.2	24.7	21.2	15.4	7.5
6	5.4	5.3	10.4	10.2	17.3	19.7	23.3	26.3	25.0	20.2	15.8	7.0
7	5.5	5.7	8.7	11.2	17.2	20.3	23.3	26.2	24.8	19.1	15.7	7.1
8	5.3	5.1	8.1	12.5	17.4	20.4	22.6	26.3	25.1	19.2	14.4	7.4
9	4.9	6.1	7.5	12.7	18.2	20.2	22.7	26.4	25.4	19.5	14.7	7.9
10	4.6	7.4	8.2	12.3	18.5	19.9	22.5	26.5	25.5	19.4	14.7	7.0
11	4.3	7.4	9.0	12.4	17.5	20.2	22.9	26.5	25.0	18.8	14.7	7.6
12	4.5	6.4	7.5	12.5	16.9	20.8	23.3	26.6	23.6	19.4	14.0	7.8
13	4.5	6.3	7.3	***	17.4	21.2	23.1	26.2	22.5	***	13.5	8.8
14	4.0	7.1	7.5	***	17.1	21.0	22.5	26.5	23.2	***	13.6	8.3
15	3.6	7.8	7.2	***	17.2	21.0	22.6	27.0	24.2	***	13.6	7.3
16	4.1	6.6	8.1	***	17.0	21.1	23.4	27.8	24.8	18.4	12.7	6.4
17	4.6	5.9	8.1	***	17.1	20.8	22.4	27.5	25.3	18.2	11.3	5.5
18	5.7	6.6	7.5	11.2	16.9	21.0	21.8	26.2	24.7	***	11.2	5.3
19	5.0	6.2	7.1	10.9	17.3	21.4	21.9	25.8	24.1	17.7	10.5	5.0
20	4.4	6.3	8.2	11.7	17.3	22.3	22.7	26.3	24.3	17.7	10.7	5.8
21	5.0	7.2	8.9	13.6	17.3	22.4	23.3	26.5	23.9	17.0	9.9	5.4
22	5.9	7.0	9.3	14.6	18.2	22.0	23.9	26.7	23.9	***	9.2	5.5
23	5.1	8.1	9.3	14.4	18.7	22.2	24.2	25.5	23.8	16.6	8.7	6.5
24	5.1	7.7	9.9	13.4	19.0	21.7	24.7	25.7	23.0	16.4	8.2	6.6
25	4.6	6.1	11.3	13.3	18.3	21.3	24.9	25.9	23.0	16.1	8.4	5.5
26	4.4	6.0	11.3	14.2	19.1	21.4	25.0	26.1	22.3	17.2	8.9	5.0
27	5.5	6.2	10.6	13.7	19.5	22.1	25.3	26.2	22.3	17.3	9.5	4.6
28	5.5	7.3	11.2	13.5	18.9	22.7	25.6	26.1	23.1	16.6	10.2	4.9
29	6.0	---	12.5	13.8	18.2	23.0	25.1	25.4	22.2	16.8	10.0	7.7
30	5.2	---	12.6	14.6	18.4	22.7	23.6	24.7	20.7	16.7	10.0	8.4
31	5.5	---	11.0	---	18.4	---	23.4	24.2	---	17.1	---	6.0
MEAN	5.1	6.3	8.9	12.5	17.6	21.0	23.3	26.1	23.8	18.4	12.4	6.9

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.50 m DEPTH)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)
 UNIT (° C)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	9.3	7.1	7.7	10.4	12.8	16.8	19.9	22.0	23.4	21.9	17.8	12.5
2	9.1	7.1	7.7	10.6	12.9	16.8	19.9	22.0	23.2	21.6	17.8	12.5
3	8.9	7.1	7.7	10.8	13.1	16.8	19.9	22.1	23.0	21.3	17.7	12.4
4	8.8	7.0	7.7	10.8	13.4	16.9	***	22.2	22.9	21.2	17.5	12.2
5	8.8	6.9	7.9	10.7	13.7	17.1	20.0	22.4	22.8	21.1	17.4	12.1
6	8.6	6.8	8.2	10.6	14.0	17.2	20.0	22.5	22.9	21.1	17.2	11.8
7	8.3	6.8	8.5	10.5	14.4	17.3	20.1	22.6	23.2	21.0	17.1	11.6
8	8.2	6.9	8.6	10.5	14.5	17.4	20.3	22.7	23.3	20.7	17.1	11.3
9	8.1	6.9	8.6	10.7	14.7	17.6	20.3	22.8	23.3	20.5	16.9	11.2
10	8.0	7.0	8.6	10.9	14.9	17.7	20.3	22.9	23.4	20.4	16.7	11.1
11	7.8	7.2	8.6	11.1	15.2	17.7	20.3	23.0	23.4	20.3	16.5	11.0
12	7.7	7.3	8.6	11.2	15.3	17.8	20.4	23.1	23.5	20.1	16.3	10.9
13	7.6	7.4	8.6	***	15.3	17.9	20.5	23.2	23.4	***	16.2	10.8
14	7.5	7.4	8.5	***	15.3	18.1	20.5	23.2	23.1	***	16.0	10.8
15	7.3	7.5	8.4	***	15.4	18.2	20.9	23.2	23.0	***	15.9	10.8
16	7.2	7.6	8.4	***	15.4	18.3	20.9	23.3	23.0	19.7	15.8	10.7
17	7.1	7.7	8.4	***	15.4	18.4	21.0	23.5	23.0	19.5	15.6	10.5
18	7.0	7.6	8.4	11.8	15.5	18.4	20.9	23.6	23.1	***	15.3	10.2
19	7.1	7.5	8.4	11.6	15.5	18.5	20.8	23.6	23.2	19.1	15.0	9.9
20	7.1	7.5	8.3	11.5	15.5	18.6	20.7	23.5	23.1	19.0	14.7	9.7
21	7.1	7.5	8.4	11.4	15.6	18.8	20.7	23.5	23.1	18.8	14.4	9.6
22	7.1	7.5	8.5	11.6	15.6	18.9	20.8	23.6	23.0	***	14.1	9.4
23	7.1	7.6	8.6	11.9	15.8	19.0	20.9	23.6	23.0	18.4	13.8	9.3
24	7.1	7.8	8.8	12.2	15.9	19.1	21.1	23.6	22.9	18.2	13.4	9.3
25	7.1	7.9	9.0	12.3	16.1	19.2	21.2	23.6	22.8	18.0	13.1	9.2
26	7.0	7.8	9.3	12.3	16.3	19.2	21.4	23.6	22.6	17.9	12.9	9.1
27	7.0	7.7	9.5	12.4	16.4	19.2	21.5	23.6	22.5	17.9	12.7	9.0
28	7.0	7.6	9.7	12.5	16.6	19.3	21.7	23.7	22.3	18.0	12.6	8.8
29	7.0	--	9.8	12.6	16.7	19.6	21.8	23.7	22.3	17.9	12.6	8.5
30	7.1	--	10.1	12.6	16.7	19.8	22.0	23.7	22.2	17.9	12.6	8.6
31	7.1	--	10.3	--	16.7	--	22.1	23.6	--	17.8	--	8.8
MEAN	7.7	7.3	8.6	11.4	15.2	18.2	20.8	23.1	23.0	19.6	15.4	10.4

ITEM SOIL TEMPERATURE (1.00 m DEPTH)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)
 UNIT (° C)
 YEAR 2007

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

ITEM GROUND WATER LEVEL (10.0 m DEPTH)
INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE)
UNIT (m)
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-2.04	-2.61	-2.94	-3.30	-2.37	-1.96	-2.36	-1.71	-2.38	-2.08	-1.88	-2.32
2	-2.08	-2.63	-2.93	-3.22	-2.44	-1.94	-2.38	-1.75	-2.42	-2.03	-1.89	-2.32
3	-2.13	-2.65	-2.95	-3.09	-2.42	-1.95	-2.39	-1.78	-2.43	-1.99	-1.93	-2.36
4	-2.19	-2.68	-2.99	-3.06	-2.35	-1.98	***	-1.81	-2.44	-2.00	-1.95	-2.37
5	-2.20	-2.70	-2.97	-3.02	-2.38	-2.00	-2.40	-1.83	-2.45	-2.02	. . .	. . .
6	-2.21	-2.71	-2.97	-2.93	-2.35	-2.03	-2.41	-1.86	-2.46	-2.04	-2.06	-2.41
7	-2.02	-2.71	-3.01	-2.93	-2.33	-2.04	-2.43	-1.88	-2.37	-2.05	-2.08	-2.42
8	-2.09	-2.73	-3.03	-2.89	-2.34	-2.06	-2.45	-1.90	-2.11	-2.08	-2.10	-2.44
9	-2.27	-2.74	-3.08	-2.82	-2.32	-2.08	-2.47	-1.93	-2.06	-2.09	-2.11	-2.44
10	-2.33	-2.76	-3.11	-2.75	-2.29	-2.10	-2.49	-1.96	-2.06	-2.10	-2.15	-2.47
11	-2.35	-2.77	-3.11	-2.65	-2.27	-2.11	-2.50	-1.99	-2.06	-2.10	-2.12	-2.54
12	-2.39	-2.80	-3.13	-2.60	-2.25	-2.13	-2.49	-2.01	-1.86	-2.11	-2.04	-2.53
13	-2.42	-2.80	-3.14	-2.61	-2.26	-2.15	-2.50	-2.04	-1.69	***	-2.03	-2.55
14	-2.43	-2.82	-3.15	-2.63	-2.30	-2.17	-2.49	-2.07	-1.75	***	-2.05	. . .
15	-2.41	-2.79	-3.18	-2.59	-2.26	-2.18	-2.18	-2.09	-1.78	***	-2.08	-2.59
16	-2.42	-2.82	-3.16	-2.51	-2.24	-2.20	-1.81	-2.10	-1.80	-2.22	-2.10	-2.62
17	-2.44	-2.84	-3.20	-2.47	-2.23	-2.21	-1.82	-2.13	-1.84	-2.24	-2.12	-2.64
18	-2.46	-2.84	-3.23	-2.46	-2.20	-2.23	-1.85	-2.14	-1.87	***	-2.14	-2.66
19	-2.48	-2.81	-3.26	-2.49	-2.18	-2.25	-1.86	-2.17	-1.89	-2.29	-2.14	-2.67
20	-2.51	-2.80	-3.24	-2.49	-2.18	-2.27	-1.84	-2.20	-1.92	-2.28	-2.15	-2.71
21	-2.53	-2.80	-3.25	-2.52	-2.21	-2.28	-1.86	-2.23	-1.93	-2.30	-2.16	-2.74
22	-2.54	-2.81	-3.25	-2.41	-2.18	-2.29	-1.88	-2.25	-1.95	***	-2.20	-2.78
23	-2.56	-2.82	-3.26	-2.35	-2.13	-2.29	-1.88	-2.25	-1.96	-2.33	-2.31	-2.75
24	-2.54	-2.84	-3.27	-2.33	-2.12	-2.31	-1.90	-2.25	-1.98	-2.36	-2.37	-2.75
25	-2.56	-2.86	-3.23	-2.34	-2.12	-2.31	-1.92	-2.27	-2.01	-2.38	-2.38	-2.78
26	-2.59	-2.89	-3.21	-2.38	-2.04	-2.32	-1.94	-2.28	-2.02	-2.40	-2.30	-2.81
27	-2.59	-2.90	-3.19	-2.34	-2.02	-2.33	-1.95	-2.30	-2.04	-2.35	-2.31	-2.82
28	-2.60	-2.92	-3.21	-2.35	-2.03	-2.33	-1.97	-2.31	-2.06	-1.85	-2.36	-2.83
29	-2.58	- - -	-3.23	-2.38	-2.04	-2.34	-1.97	-2.35	-2.08	-1.87	-2.31	-2.78
30	-2.59	- - -	-3.26	-2.34	-2.05	-2.35	-1.93	-2.38	-2.10	-1.87	-2.32	-2.63
31	-2.60	- - -	-3.31	- - -	-2.04	- - -	-1.70	-2.38	- - -	-1.90	- - -	-2.57
MEAN	2.39	2.78	3.14	2.64	2.22	2.17	2.13	2.08	2.06	2.13	2.14	2.60

ITEM GROUND WATER LEVEL (NEW: 2.0 m DEPTH)
INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE)
UNIT (m)
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-1.75	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.69	-1.92	-1.91	-1.82	-1.91
2	-1.80	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.77	-1.92	-1.91	-1.87	-1.91
3	-1.85	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.82	-1.92	-1.91	-1.90	-1.91
4	-1.89	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	***	-1.87	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91
5	-1.92	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91	. . .	. . .
6	-1.91	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91	-1.91
7	-1.81	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91	-1.91
8	-1.84	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91	-1.91
9	-1.88	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91	-1.91
10	-1.91	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91	-1.91
11	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91	-1.91
12	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.70	-1.91	-1.84	-1.91
13	-1.93	-1.93	-1.93	***	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.50	***	-1.84	-1.91
14	-1.93	-1.93	-1.93	***	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.64	***	-1.88	. . .
15	-1.93	-1.93	-1.93	***	-1.93	-1.92	-1.81	-1.92	-1.74	***	-1.90	-1.91
16	-1.93	-1.93	-1.93	***	-1.93	-1.92	-1.51	-1.92	-1.81	-1.91	-1.91	-1.91
17	-1.93	-1.93	-1.93	***	-1.93	-1.93	-1.63	-1.92	-1.87	-1.91	-1.91	-1.91
18	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.72	-1.92	-1.91	***	-1.91	-1.91
19	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.79	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91
20	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.85	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91
21	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.89	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91
22	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.91	-1.92	-1.92	***	-1.91	-1.91
23	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91
24	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91
25	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91	-1.91
26	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.91	-1.91
27	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.92	-1.89	-1.91	-1.91
28	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.39	-1.91	-1.91
29	-1.93	- - -	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.92	-1.92	-1.91	-1.55	-1.91	-1.91
30	-1.93	- - -	-1.93	-1.93	-1.93	-1.92	-1.91	-1.92	-1.91	-1.68	-1.91	-1.91
31	-1.93	- - -	-1.93	- - -	-1.92	- - -	-1.69	-1.92	- - -	-1.77	- - -	-1.91
MEAN	1.91	1.93	1.93	1.93	1.93	1.92	1.87	1.90	1.87	1.86	1.90	1.91

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (LiCl DEW CELL) (E-771)
 UNIT (° C)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-2.4	-3.4	-5.2	9.8	11.9	12.3	18.9	21.4	18.3	16.0	13.0	5.6
2	0.9	-9.8	-2.9	8.5	14.6	13.4	21.6	24.1	18.3	16.6	11.8	3.2
3	0.8	-6.1	4.7	5.4	9.1	14.5	20.7	23.7	18.9	16.6	8.1	4.5
4	-1.6	-8.1	8.2	2.8	10.8	14.9	***	24.2	21.8	16.6	8.6	2.7
5	-2.6	-3.2	11.7	-2.3	14.1	14.0	19.5	23.8	24.6	17.2	10.2	-3.5
6	2.7	0.9	5.7	3.6	15.6	15.6	20.1	22.3	24.5	10.9	12.4	-1.8
7	-2.4	-5.3	-7.6	6.7	14.8	17.0	19.2	22.7	23.3	12.7	6.8	1.0
8	-6.1	-3.7	-4.6	8.0	14.0	16.9	17.7	23.5	23.5	16.2	8.2	3.7
9	-6.4	2.3	-1.7	8.2	15.0	16.4	17.5	23.3	23.2	16.3	9.2	-1.4
10	-3.4	6.5	1.6	5.7	15.0	17.2	20.0	23.1	23.7	12.5	11.3	-2.2
11	-4.2	-3.1	0.7	5.7	5.5	17.3	22.6	23.1	21.4	13.3	12.1	3.6
12	-2.8	-4.0	-8.1	6.4	7.2	17.3	21.5	22.7	19.2	14.4	4.5	4.2
13	-4.4	-0.5	-8.5	***	13.7	17.4	21.2	23.6	18.2	***	6.8	6.2
14	-6.1	7.2	-11.2	***	8.3	17.9	19.7	23.8	21.1	***	9.9	-0.1
15	-4.9	-2.4	-7.8	***	10.1	17.5	22.0	25.3	22.2	***	8.4	-0.9
16	-1.1	-7.0	-4.8	***	9.4	12.4	18.3	25.5	23.5	11.6	3.1	-4.7
17	2.3	-1.2	-6.5	***	14.1	15.3	17.3	23.7	24.0	11.8	2.9	-4.0
18	3.2	4.1	-9.4	3.8	12.6	17.4	17.7	20.6	20.0	***	1.3	-0.9
19	-4.0	-0.3	-10.4	3.6	14.4	18.1	18.0	22.3	19.7	11.6	-2.8	-2.3
20	-2.1	1.0	-7.7	6.2	8.1	18.3	19.4	23.3	20.8	13.0	3.6	-0.3
21	0.5	2.7	-1.9	12.7	8.9	20.3	21.7	23.1	20.5	6.5	0.2	-2.2
22	2.0	1.7	3.0	14.0	13.5	20.6	22.5	23.6	21.6	***	-4.9	1.4
23	-3.7	8.1	0.3	9.9	13.7	17.9	22.2	21.3	19.0	10.1	-3.8	4.5
24	-3.3	-5.6	6.7	7.8	12.4	18.9	18.7	21.6	17.2	8.6	0.0	0.9
25	-4.6	-10.2	12.8	12.4	15.9	18.3	20.1	22.6	18.0	10.7	3.0	-1.3
26	-1.8	-5.4	4.1	7.1	13.9	20.1	22.3	22.8	14.1	15.7	3.6	-2.7
27	-0.1	1.0	5.2	-2.8	11.5	20.2	21.0	23.3	18.9	15.3	4.9	-1.6
28	-0.8	-2.8	7.0	8.3	8.8	21.3	21.8	23.1	20.3	11.3	3.1	2.5
29	1.5	--	6.4	4.5	10.5	23.1	22.2	20.2	15.1	14.3	0.5	9.9
30	-1.8	--	4.3	5.9	15.4	20.0	19.4	20.6	15.0	11.9	5.4	3.8
31	0.4	--	4.8	--	15.4	--	19.6	21.0	--	12.0	--	-4.6
MEAN	-1.8	-1.7	-0.4	6.5	12.2	17.4	20.1	22.9	20.3	13.2	5.4	0.8

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (LiCl DEW CELL) (E-771)
 UNIT (° C)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-2.4	-3.6	-5.5	9.6	11.6	12.0	18.3	20.8	17.6	15.3	12.7	5.6
2	0.7	-9.9	-3.0	8.3	14.2	13.0	21.0	23.4	17.6	15.9	11.3	3.5
3	0.6	-6.1	4.4	5.1	8.8	14.1	20.1	23.1	18.4	15.9	7.5	4.6
4	-1.8	-8.6	8.4	2.4	10.4	14.4	***	23.6	21.1	16.1	8.4	2.4
5	-2.3	-3.4	11.6	-2.5	13.8	13.4	19.0	23.3	24.0	16.7	9.9	-3.7
6	2.7	0.8	5.4	3.3	15.3	15.2	19.7	21.7	23.9	10.1	11.8	-1.9
7	-2.7	-5.9	-8.0	6.5	14.7	16.5	18.8	22.2	22.7	12.3	6.2	0.9
8	-6.2	-4.0	-4.4	7.6	14.1	16.4	17.3	22.9	22.9	15.8	8.1	3.6
9	-6.9	2.1	-1.7	7.9	15.0	15.9	17.0	22.7	22.5	15.7	8.9	-1.5
10	-3.5	6.3	1.5	5.8	14.7	16.7	19.4	22.5	23.0	11.8	10.7	-2.7
11	-4.1	-3.3	0.3	5.4	4.6	16.7	22.0	22.5	20.8	12.7	11.6	3.3
12	-3.0	-4.3	-8.4	6.1	6.3	17.0	21.0	22.0	18.8	13.6	4.1	4.1
13	-4.6	-0.4	-8.8	***	13.4	17.0	20.6	23.1	17.7	***	6.5	5.8
14	-6.6	7.0	-11.3	***	7.8	17.3	19.1	23.2	20.5	***	9.8	-0.2
15	-5.1	-2.6	-8.2	***	9.8	16.9	21.5	24.5	21.6	***	8.0	-1.2
16	-1.1	-7.3	-5.0	***	9.1	11.3	17.8	24.6	22.9	11.1	2.8	-4.6
17	2.2	-1.4	-6.9	***	14.1	14.9	16.7	23.0	23.4	11.3	2.8	-4.3
18	3.3	4.0	-9.8	3.3	12.4	16.8	17.1	19.9	19.4	***	1.1	-0.6
19	-4.4	-0.3	-10.7	3.3	14.3	17.6	17.4	21.6	19.1	11.1	-3.4	-2.4
20	-2.3	0.5	-8.1	5.7	7.4	17.6	18.9	22.7	20.3	12.5	3.4	-0.6
21	0.2	2.6	-2.3	12.5	8.5	19.7	21.1	22.5	20.3	5.5	0.2	-2.4
22	1.8	1.9	3.0	13.8	13.1	20.1	21.9	22.9	21.3	***	-5.1	0.6
23	-4.5	7.8	-0.1	9.6	13.4	17.1	21.6	20.5	18.4	9.4	-4.2	4.4
24	-3.9	-6.3	6.6	7.5	12.1	18.4	18.3	20.9	16.5	8.3	-0.3	0.7
25	-4.6	-10.7	12.6	12.1	15.6	17.5	19.6	22.0	16.8	10.7	3.5	-1.7
26	-1.9	-5.6	4.1	6.8	13.2	19.5	21.8	22.1	13.1	15.1	3.4	-2.6
27	-0.4	1.2	4.8	-3.4	10.8	19.8	20.6	22.6	18.2	14.8	4.4	-1.7
28	-0.8	-3.1	7.1	8.4	8.3	20.6	21.1	22.4	19.7	11.0	2.3	2.3
29	1.5	--	6.3	4.0	10.2	22.7	21.7	19.6	14.3	14.3	0.2	9.4
30	-1.3	--	3.9	5.5	15.0	19.6	18.8	19.9	14.4	11.8	4.8	3.2
31	0.3	--	4.5	--	14.9	--	19.0	20.3	--	11.8	--	-5.4
MEAN	-2.0	-1.9	-0.6	6.2	11.8	16.9	19.6	22.2	19.7	12.7	5.0	0.5

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT DEW-POINT HYGROMETER (LIC1 DEW CELL) (E-771)
 UNIT (° C)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-2.5	-3.8	-6.0	9.5	11.4	11.7	18.1	20.6	17.5	15.1	12.4	5.4
2	0.4	-10.1	-3.1	8.2	14.0	12.7	20.9	23.2	17.4	15.6	11.0	3.2
3	0.4	-6.3	4.3	4.8	8.7	13.8	19.9	22.9	18.2	15.5	6.9	4.6
4	-2.2	-9.0	8.4	2.2	10.1	14.2	***	23.5	20.8	15.9	8.1	2.2
5	-2.4	-3.7	11.5	-2.8	13.6	13.2	18.8	23.1	23.8	16.5	9.5	-4.1
6	2.8	0.6	5.2	3.1	15.2	15.0	19.5	21.5	23.8	9.5	11.4	-2.0
7	-3.0	-6.5	-8.2	6.4	14.5	16.3	18.7	22.0	22.5	12.1	5.6	0.7
8	-6.5	-4.3	-4.5	7.4	14.1	16.2	17.0	22.8	22.7	15.6	7.9	3.6
9	-7.3	2.0	-1.8	7.7	14.8	15.7	16.8	22.5	22.3	15.4	8.7	-1.7
10	-3.8	6.3	1.4	5.8	14.4	16.6	19.2	22.4	22.8	11.4	10.4	-3.1
11	-4.3	-3.5	0.1	5.2	3.9	16.5	21.8	22.4	20.6	12.3	11.3	3.0
12	-3.2	-4.5	-8.7	5.9	5.5	16.8	20.8	21.9	18.6	13.2	3.7	4.0
13	-4.8	-0.4	-9.1	***	13.1	16.8	20.5	22.9	17.5	***	6.2	5.6
14	-7.1	6.9	-11.6	***	7.1	17.0	19.0	23.1	20.3	***	9.6	-0.3
15	-5.3	-3.0	-8.5	***	9.5	16.5	21.3	24.3	21.4	***	7.5	-1.5
16	-1.2	-7.6	-5.2	***	8.7	10.8	17.6	24.2	22.6	10.8	2.4	-4.7
17	2.2	-1.7	-7.2	***	13.9	14.7	16.6	22.6	23.2	11.0	2.6	-4.7
18	3.2	4.0	-10.3	3.1	12.2	16.6	16.9	19.7	19.2	***	0.8	-0.7
19	-4.6	-0.5	-11.1	3.1	14.1	17.4	17.3	21.5	18.9	10.7	-3.8	-2.6
20	-2.4	0.3	-8.4	5.4	6.8	17.3	18.7	22.5	20.1	12.2	3.2	-1.1
21	0.0	2.5	-2.5	12.3	8.1	19.5	20.9	22.3	20.1	4.8	0.2	-2.8
22	1.5	2.0	2.7	13.7	12.8	19.9	21.8	22.8	21.1	***	-5.6	0.1
23	-4.9	7.6	-0.5	9.5	13.3	16.8	21.4	20.3	18.3	9.0	-4.7	4.4
24	-4.4	-6.6	6.6	7.4	11.8	18.1	18.2	20.7	16.2	8.1	-0.7	0.4
25	-4.7	-10.9	12.4	12.0	15.5	17.2	19.4	21.8	16.3	10.6	3.5	-2.3
26	-2.1	-5.7	3.7	6.4	12.8	19.2	21.6	21.9	12.6	14.9	2.9	-2.8
27	-0.6	1.3	4.5	-3.9	10.5	19.6	20.5	22.5	18.0	14.7	3.8	-2.0
28	-0.9	-3.4	7.1	8.2	8.1	20.4	20.8	22.3	19.4	10.7	1.7	2.2
29	1.5	--	6.1	3.8	9.9	22.5	21.6	19.4	14.0	14.2	0.0	9.3
30	-1.1	--	3.6	5.3	14.8	19.4	18.6	19.7	14.1	11.7	4.5	2.9
31	0.2	--	4.3	--	14.6	--	18.8	20.1	--	11.6	--	-5.9
MEAN	-2.2	-2.1	-0.8	6.0	11.5	16.6	19.4	22.0	19.5	12.4	4.7	0.3

ITEM PRECIPITATION (0.3 m HEIGHT)
 INSTRUMENT RAIN GAUGE (TRIPPING BUCKET TYPE) (B-011-00)
 UNIT (mm)
 YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.0	0.0	0.0	0.5	***	***	***	0.0	0.0	4.5	3.0	0.0
2	5.0	0.0	0.0	0.0	***	***	***	0.0	0.0	5.5	2.5	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.9	***	***	***	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	4.0	***	***	***	0.0	9.5	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	2.0	0.0	***	***	***	0.0	2.0	0.5	0.0	0.0
6	25.0	0.0	0.5	0.0	***	***	***	0.0	15.5	0.0	3.0	0.0
7	0.5	0.0	0.0	1.5	***	***	***	0.0	29.5	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	1.0	***	***	***	0.0	0.0	2.0	0.0	0.0
9	0.0	4.0	0.0	8.5	***	***	***	0.0	0.0	3.0	1.0	0.0
10	0.0	5.5	0.0	0.0	***	***	***	0.0	3.5	0.0	20.5	0.0
11	0.0	0.0	8.0	4.0	***	***	***	0.0	4.0	0.0	15.5	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	***	***	***	0.0	50.5	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	***	***	***	***	0.0	0.0	***	0.0	9.0
14	0.0	6.0	0.0	***	***	***	***	0.0	0.0	***	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	***	***	***	***	1.5	0.0	***	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	***	***	***	***	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0
17	2.5	0.5	0.0	***	***	***	***	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0
18	0.5	16.5	0.0	***	***	***	***	0.5	0.0	***	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	***	***	***	0.0	0.0	0.0	17.0	0.0	0.0
20	0.0	0.5	0.0	***	***	***	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
21	1.0	0.0	0.0	***	***	***	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	1.5	0.0	0.5	***	***	***	0.5	0.0	0.0	***	0.0	2.0
23	0.0	5.0	0.0	***	***	***	0.0	39.0	0.0	0.0	0.0	10.5
24	0.0	0.0	0.0	***	***	***	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	18.0	***	***	***	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	***	***	***	0.0	0.0	0.0	12.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	***	***	***	0.0	0.0	1.0	82.5	0.0	0.0
28	0.0	0.0	0.0	***	***	***	4.5	0.0	1.0	0.5	0.0	7.5
29	0.0	--	0.0	***	***	***	3.5	0.0	3.5	0.0	0.0	26.5
30	0.0	--	7.0	***	***	***	40.5	0.5	43.5	0.0	0.5	1.0
31	0.0	--	0.0	--	***	--	11.0	0.0	--	0.5	--	0.0
TOTAL	36.0	38.0	36.0	***	***	***	***	44.0	164.0	***	46.0	56.5

ITEM ATMOSPHERIC PRESSURE (1.5 m HEIGHT)
INSTRUMENT BAROMETER (PTB210)
UNIT (hPa)
YEAR 2007

MONTH	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1025	1005	1021	1000	1012	1009	1005	1009	1007	1014	1011	1013
2	1017	1008	1021	1003	1001	1012	1001	1011	1009	1013	1013	1013
3	1018	1011	1020	1006	1006	1013	1000	1008	1008	1017	1017	1009
4	1020	1011	1018	1011	1007	1011	***	1005	1008	1015	1023	1013
5	1023	1019	1005	1020	1006	1008	996	1008	1006	1010	1024	1016
6	1005	1013	997	1021	1001	1006	1000	1012	1000	1013	1015	1016
7	989	1019	1005	1016	997	1007	1001	1013	990	1015	1015	1010
8	1007	1018	1010	1013	1005	1008	1003	1013	1002	1006	1017	1012
9	1018	1008	1018	1014	1008	1007	1004	1011	1005	1008	1017	1013
10	1018	1001	1017	1016	999	1006	1005	1010	1006	1012	1017	1019
11	1020	1004	1000	1016	1001	1009	1002	1010	1009	1012	1006	1015
12	1018	1014	1004	1017	1006	1011	1006	1010	1008	1013	999	1008
13	1013	1020	1006	***	1003	1010	1008	1009	1013	***	1009	1000
14	1018	1005	1011	***	1010	1007	1007	1009	1013	***	1016	1000
15	1021	998	1016	***	1006	998	990	1009	1012	***	1013	1006
16	1019	1012	1015	***	1010	1006	998	1007	1010	1017	1016	1012
17	1014	1018	1014	***	997	1012	1001	1005	1009	1015	1012	1013
18	1013	1004	1014	1014	997	1012	1003	1008	1012	***	1003	1009
19	1020	1010	1014	1013	995	1012	1005	1007	1017	1016	1019	1015
20	1025	1017	1016	1019	1003	1011	1003	1006	1016	1005	1013	1016
21	1023	1016	1020	1014	1011	1006	1002	1004	1016	1010	1013	1021
22	1016	1018	1017	1005	1010	1000	1001	1002	1014	***	1016	1024
23	1017	1008	1017	1005	1008	1003	1003	1009	1016	1017	1020	1012
24	1014	1014	1012	1013	1008	1004	1008	1014	1015	1025	1021	1014
25	1014	1023	997	1003	1000	1001	1008	1013	1008	1024	1022	1024
26	1015	1024	1007	1008	994	1002	1004	1011	1014	1015	1013	1026
27	1009	1019	1009	1017	999	1004	1004	1008	1014	1003	1007	1025
28	1016	1014	1006	1013	1013	1007	1002	1005	1008	1011	1014	1018
29	1015	-- --	1005	1013	1014	1000	1003	1006	1018	1013	1016	998
30	1019	-- --	1003	1014	1005	1000	1006	1006	1016	1017	1016	991
31	1012	-- --	1010	-- --	1003	-- --	1006	1004	-- --	1020	-- --	995
MEAN	1016	1013	1011	1012	1004	1007	1003	1008	1010	1014	1014	1012

2007 年度 陸域環境研究センターセミナーの記録

2007.5.25 第 96 回セミナー 参加者 13 名

若月 強（筑波大学 陸域環境研究センター）

「2003 年台風 10 号により北海道日高地方の泥岩と礫岩地域に発生した斜面崩壊に与える乾湿風化の影響」

2007.11.14 第 97 回セミナー 参加者 12 名

V. Manville（GNS Science, New Zealand）

Learning from Lahars:the 18th March 2007 Break-out from Crater Lake, Ruapehu, New Zealand

2007.11.27 第 98 回セミナー 参加者 10 名

Sempreviva Anna Maria（Institute of Atmospheric Sciences and Climate, National Council of Research, Italy）

The Global Scalar Dissimilarity in the Atmospheric Surface Layer.

Comparison between Case Studies over Homogeneous and Non-homogeneous Surfaces
:Focus on the Influence of the Height of the Boundary Layer and of the Sea Spray

2008.2.15 第 99 回セミナー 参加者 7 名

岩田拓記（筑波大学 陸域環境研究センター）

「大気－陸面間の熱・物質交換－私のこれまでの研究，そしてこれからの研究－」

大庭雅道（筑波大学 陸域環境研究センター）

「ENSO に対する大気の非線形応答がその遷移にもたらす効果」

2003 年台風 10 号により北海道日高地方の泥岩と礫岩地域に発生した斜面崩壊に与える乾湿風化の影響

若月 強*

2003 年 8 月に北海道日高地方で発生した斜面崩壊に対して、地質の異なる 3 地域で斜面崩壊の発生位置、斜面の土層構造および基岩の乾湿風化特性について比較検討した。白亜系上部蝦夷層群の泥岩及びシルト岩地域の基岩は乾湿風化を受けると細粒化するが粘土とはならない。そのため、風化土層の浸透能は高くなり、厚い風化土層が形成され、崩壊深が大きくなった (3.2 – 3.7 m) と思われる。また、次に発生する崩壊は、現在の崩壊面を平行後退させるような形状となることが予想される。一方、中新統元神部層の凝灰質泥岩地域の基岩は乾湿風化を受けると急速に粘土化する。そのため、風化土層の浸透能は低くなり、薄い風化土層しか形成されず、崩壊深が小さくなった (0.4 – 1.2 m) と思われる。このような崩壊は、斜面最下部で繰り返し発生すると予想される。中新統元神部層の礫岩地域では、3 つの地質の中で最も多数の崩壊 (崩壊深 0.7 – 1.2 m) が発生していた。基岩の礫間の膠結物質にはスメクタイトが多く含まれており、風化土層ではこの膠結物質だけが強く風化していた。風化土層は斜面の上部から下部まで極めて薄く、どこからでも崩壊が発生すると考えられる。

* 筑波大学陸域環境研究センター (現：防災科学技術研究所)

Learning from Lahars : the 18th March 2007 Break-out from Crater Lake, Ruapehu, New Zealand

V. Manville*

On 18th March 2007, the refilling summit Crater Lake of Mt. Ruapehu, New Zealand's highest volcano, breached an unstable barrier of tephra emplaced on the rock rim of the crater by volcanic activity 11 years previously. In the ensuing flood, c. 1.3 million m³ of hot acidic water was released in less than 90 minutes, entraining snow, ice, colluvium and older lahar deposits along its flow path to become a hyperconcentrated/non-cohesive debris flow with a peak discharge of c. 2500 m³/s. Owing to the foreseen nature of this event, a collective of New Zealand and international researchers were able to put in place a comprehensive science program to capture maximum scientific benefit from a single discrete lahar.

The science plan comprised a number of complementary components including :

1. Instrumentation of the 155 km long flow path with a diverse range of traditional and experimental sensors in order to capture time-series data on key flow parameters
2. Use of fixed digital still, video and web-cameras to collect visual information at instrumented sites, with additional footage shot by media organizations and members of the public.
3. Mobilization of observer teams to collect time-series lahar samples and visual records at downstream locations.
4. Characterisation and quantification of geomorphic changes caused by the lahar through capture of pre-and post-event, sub-metre resolution topographic and ortho-image data using airborne LiDAR and ground-based TLS and dGPS surveys.
5. Mapping of ephemeral lahar high-water marks using dGPS to determine stage heights, energy slopes, and flow velocities.

6. Traditional forensic field and laboratory sedimentology to study depositional sequences for cross-correlation with instrumental and observational data.
7. Development and calibration of a range of numerical models of lahar behavior.

By combining skills and resources we have captured arguably the most complete dataset on a single lahar anywhere in the world. Multi-parameter time-series data from multiple sites will enable us to analyze the downstream evolution of the flow from its inception as a clear-water discharge from the failing tephra dam, to its maximum discharge and sediment concentration, and then its subsequent attenuation and dilution during its downstream propagation and interaction with the ambient river. This will in turn help improve mitigation and planning approaches for protection of communities from both volcanic and non-volcanic lake break-outs, lahars, debris flows and hyperconcentrated flows in New Zealand and around the world.

* GNS Science, New Zealand

The Global Scalar Dissimilarity in the Atmospheric Surface Layer. Comparison between Case Studies over Homogeneous and Non-homogeneous Surfaces : Focus on the Influence of the Height of the Boundary Layer and of the Sea Spray.

Sempreviva Anna Maria*

Over the last three decades, the temperature (T) -humidity (q) covariance (Tq') in the

atmospheric surface layer (ASL) has received significant attention, partly because of its use in assessing similarities in bulk scalar transfer parameters, electromagnetic wave propagation in a non-ionized atmosphere among others. While these issues all deserve attention, examining the main mechanisms by which the covariance between two scalar fluctuations is produced, maintained, or dissipated is a legitimate fundamental problem in its own right.

Understanding these mechanisms can highlight new dynamical processes modulating the structure of turbulence within the ASL not readily detected by other approaches. In fact, they may even provide blue prints on how to proceed on other practical yet unresolved issues such as the imbalance between available net radiation and the sum of sensible and latent heat fluxes. A number of studies have suggested that dissimilarities in the temperature –humidity covariance is often attributed to one (or more) of the following causes : (i) the active roles of temperature (and humidity) in the production/destruction of turbulent kinetic energy, (ii) advection of heat or moisture (both longitudinally and vertically), (iii) unsteadiness in the outer-layer flow that can impinge on the ASL, (iv) source inhomogeneity at the ground surface, and (v) local entrainment processes from the top of the atmospheric boundary layer (ABL) , (vi) influence of sources and sinks of heat i.e. sea spray or blowing snow in over water and over ice environment respectively. In the upper part of the ABL, the correlation coefficient between heat and water vapour (RTq) is generally negative because of the entrainment of warm yet dry air. Hence, it is conceivable that any observed reductions from unity in RTq within the ASL can be partially explained by this top-down mixing of drier air. Though this latter

argument is intuitive and theoretically appealing, the large distance separating the ASL from the entrainment zone, and the ubiquitous presence of other ‘contaminating’ issues (e.g., averaging times and non-stationarity as in, make this entrainment argument difficult to establish. Since progress on the latter point can benefit from an explicit expression that describes how an anti-correlation between temperature and humidity at some level within the ABL propagates down into the ASL a simplified expression that predicts how much of the dissimilarity in the temperature-humidity covariance within the ASL originates from a boundary condition above the ASL or from source dissimilarities at the ground can be derived using the budget of the covariance between scalars. In this seminar, all above issues will be reviewed and discussed presenting case studies in different atmospheric environments i.e. over the sea, over forests and over iced surface.

* Institute of Atmospheric Sciences and Climate, National Council of Research, Italy

することに成功している。しかしながら、実際の観測結果では warm phase から cold phase への遷移は急速に進むのに対し、cold phase から warm phase への遷移は多くのイベントで停滞する傾向があり (Kessler 2002), 従来の振動子理論だけでは説明が困難であることが知られている (Hasegawa *et al.* 2006)。しかし、現存する気候モデルなどの全球大気海洋結合モデルでは ENSO イベントの頻度が高くなる (AchutaRao and Sperber 2006)・線形的な振動をする (Hannachi *et al.* 2002) など、多くのモデルで修正再充填振動子 (Jin and An 1999) に代表されるような海洋内部の力学に依存してしまう傾向が見られる。ENSO の遷移プロセスの差違に対し、海洋内部の力学的効果に注目した研究はあるものの (An and Jin 2004), Hoerling *et al.* (1997) や Kang and Kug (2001) で述べられているような大気場の応答やその非対称性に注目した研究は少ない。そこで SST 偏差に対する大気 (非断熱加熱) の非線形性が ENSO 自身の遷移プロセスにどのような効果をもたらすかを調べた。

* 筑波大学陸域環境研究センター

ENSO に対する大気の新線形応答が その遷移にもたらす効果

大庭雅道 *

熱帯太平洋上で発生するエルニーニョ・南方振動 (El Nino and Southern Oscillation; ENSO) は、大気の橋を介して地球上の他の地域へ大きく影響する。これまでに、ENSO の経年変動のメカニズムを説明するために、幾つかの振動モデルが考えられてきた。西太平洋振動子 (Weisberg and Wang 1997), 再充填振動子 (Jin 1997a,b) はその理論モデル中でも特に重要な役割を果たすと考えられているものであり、これら振動子理論ではその線形的な発達・衰弱・遷移の振る舞いを説明

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、2007年4月から2008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・春田知実・松四雄騎・前門 晃・松倉公憲 (2007): 石垣島における台座岩の形成条件と形成速度. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **8**, 35-40.
- 飯田真一・角張順一・田中 正・濱田洋平・林敦史 (2008): アカマツ・シラカシ二次林において観測された樹木の吸水深度. 関東森林研究, **59**, 261-264.
- 小長谷瑞木・林 陽生 (2007): アカマツ林の熱的応答の季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **8**, 3-16.
- 田神一美・太田アドリアナ春美・桑沢保夫 (2008): 夏季屋外運動中の熱中症原因としての土壌輻射熱観測. 筑波大学体育科学系紀要第**31**巻, 209-210.
- 田神一美・藤原栄吾・太田 A. 春美 (2007): 「熱環境改善舗装に関する研究」報告書, 技術報 **37**: 3-7 (大林道路株式会社)
- 八反地 剛・松倉公憲 (2007): 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—. 陸域環境研究センター報告, **8**, 41-47.
- 花房龍男・大和佳祐・渡来 靖 (2007): フラット・アレイ型ソーダーについて. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **8**, 27-33.
- 濱田洋平 (2007): PC カメラを用いた土壌のガス拡散係数測定の半自動化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **8**, 49-54.
- 檜山哲哉・阿部 理・栗田直幸・藤田耕史・池田健一・橋本重将・辻村真貴・山中 勤 (2008): 水の酸素・水素安定同位体を用いた地球水循環研究と今後の展望. 水文・水資源学会誌, **21**, 158-176.
- 藪崎志穂・田瀬則雄 (2007): 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. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **8**, 17-26.
- 山中 勤・田中 正・辻村真貴・大倉 博・清水英幸・吉谷純一・嶋田 純・開発一郎・近藤昭彦 (2008): 国際高等教育協力における水問題・環境問題の認知構造: 数量化3類による知的リソース・ニーズマッピング. 水文・水資源学会誌, **21**, 39-49.
- Hirata, R., Saigusa, N., Yamamoto, S., Ohtani, Y., Ide, R., Asanuma, J., Gamo, M., Hirano, T., Kondo, H., Kosugi, Y., Li, S.-G., Nakai, Y., Takagi, K., Tani, M. and Wang, H. (2008): Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across east Asia. *Agri. and Forest Meteo.*, **148**, 761-775, doi: 10.1016/j.agrformet.2007.11.016.
- Inoue, T. and Kimura, F. (2007): Numerical experiments on fair-weather clouds forming over the urban area in northern Tokyo, *SOLA*, **3**, 125-128.
- Lacy, J. R., Rubin, D. M., Ikeda, H., Mokudai, K. and Hanes, D.M. (2007): Bed forms created by simulated waves and currents in a large flume. *J. of Geophysical Research*, **112**, C10018, doi: 10.29/2006JC003942.

- Li, S.-G., Eugster, W., Asanuma, J., Kotani, A., Davaa, G., Oyunbaatar, D. and Sugita, M.(2008): Response of gross ecosystem productivity, light use efficiency, and water use efficiency of Mongolian steppe to seasonal variations in soil moisture. *J. Geophys. Res. -Biogeo.*, **113**, G01019, doi : 10.1029/2006JG000349.
- Saigusa, N., Yamamoto, S., Hirata, R., Ohtani, Y., Ide, R., Asanuma, J., Gamo, M., Hirano, T., Kondo, H., Kosugi, Y., Li, S.-G., Nakai, Y., Takagi, K., Tani, M. and Wang, H.(2008): Temporal and spatial variations in the seasonal patterns of CO₂ flux in boreal, temperate, and tropical forests in east Asia. *Agri. and Forest Meteo.*, **148**, 700-713, doi : 10.1016/j.agrformet.2007.12.006
- Saito, M., Asanuma, J. and Miyata, A.(2007): Dual-scale transport of sensible heat and water vapor over a short canopy under unstable conditions. *Water Resour. Res.*, **43**, ISSN 0043-1397.
- Sato, T. and Kimura, F. (2007): How does the Tibetan Plateau affect the transition of Indian monsoon rainfall? *Monthly Weather Review*, **135**, 2006-2015.
- Sato, T., Kimura, F. and Hasegawa, A. S.(2007): Vegetation and topographic control of cloud activity over arid/semiarid Asia. *Journal of Geophysical. Research. -Atmospheres*, **112**, D24109, doi : 10.1029/2006JD008129.
- Sato, T., Tsujimura, M., Yamanaka, T., Iwasaki, H., Sugimoto, A., Sugita, M., Kimura, F., Davaa, G. and Oyunbaatar, D.(2007): Water sources in semi-arid Northeast Asia as revealed by field observations and isotope transport model. *Journal of Geophysical Research -Atmospheres*, **112**, D17112, doi : 10.1029/2006JD008321.
- Tanaka, T.(2007): Groundwater resources, development and management in the large tectonic sedimentary basin, Japan. Brebbia, C.A. and Kungolos, A.G. eds. *Water Resources Management IV*, WIT Press, 337-344.
- Tanaka, T.(2008): Methodology of integrated watershed management for sustainable resources use. *Proc. Int. Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region, Bull. TERC, Univ. Tsukuba*, **8** Suppl. 2, 12-17.
- Tanaka, T. ed.(2008): Proceedings of International Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region. *Bull. TERC, Univ. Tsukuba*, **8** Suppl. 2, 78p.
- Umezawa, Y., Ishitobi, T., Rungsupha, S., Onodera, S., Yamanaka, T., Yoshimizu, C., Tayasu, I., Nagata, T. and Taniguchi, M.(2007): Fresh groundwater contributions to the nutrient dynamics at shallow subtidal areas adjacent to a mega city, Bangkok. In W. Sanford, C. Langevin, M. Polemio and P. Povinec(eds.): A new focus on groundwater-seawater interactions. IAHS publication **312**, 169-179.
- Yamaguchi, N., Sekiguchi, T. and Masuda, F.(2007): Cross-shore ripple variations under laboratory partially standing waves : a possible clue to paleo-wavelength. *J. Sedimentological. Soc. Japan*, **64**, 15-19.
- Yamanaka, T., Shimada, J., Ikawa, R., Onodera, S., Buapeng, S., Suwanlert, J., Lorphensriand, O. and Taniguchi, M.(2007): Recharge and flow systems of deep groundwater in and around the Bangkok metropolitan area, Thailand :

a preliminary result. Paper presented at the 4th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society, HS05-A0009, CD-ROM.

Yamanaka, T., Shimada, J. and Tsujimura, M.(2008): Tracing deep groundwater underneath the Bangkok metropolitan area. Research Institute for Humanity and Nature Project 2-4 “Human Impacts on Urban Subsurface Environments” *Progress Report 2007*(Taniguchi, M. ed.), Research Institute for Humanity and Nature, 42-45.

Yamanaka, T. and Shimizu, R.(2007): Spatial distribution of deuterium in atmospheric water vapor : diagnosing sources and the mixing of atmospheric moisture. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**, 3162-3169.

Yamanaka, T. and Tsunakawa, A.(2007): Isotopic signature of evapotranspiration flux and its use for partitioning evaporation/ transpiration components. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, **3**, 11-21.

Yamanaka, T. and Wakui, H.(2008): Mixing analysis of groundwater recharge source for better watershed management. *Proceedings of International Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region. Bull. TERC, Univ. of Tsukuba*, **8** Suppl. 2, 75-78.

博士論文

井上忠雄 (2007): Fair-weather cumulus clouds forming over the urban area in northern

Tokyo (東京北部の都市上に生成する晴天積雲). 85p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

修士論文

岸 和央 (2008): 農畜産業起源の硝酸性窒素による地下水汚染. 92p. (筑波大学大学院環境科学研究科)

村上雅則 (2008): アメダスの気温の空間代表性に関する観測的研究. 56p. (筑波大学大学院環境科学研究科)

Hayashi, Atsushi(2008): Influence of Japanese red pine and evergreen oak trees on soil water balance. 79p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

Matsuo, Daigo(2008): Influence of competition among co-occurring plants on water use of Japanese red pine. 84p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

Onda, Makoto(2008): Estimation of lake water balance using environmental tracers. 69p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

卒業論文

井口達也 (2008): 滝つぼ形成実験：流量・落差の影響. 42 p. (筑波大学第一学群自然学類)

上野紗綾子 (2008): 窒素安定同位体比を用いた汚染源の異なる硝酸性窒素による土壌・地下水汚染の解明. 57p. (筑波大学第一学群自然学類)

平成 19 年度陸域環境研究センター施設利用状況

(平成 20 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× 10 回	卒業研究利用者 自然学類	2 名
	気候学・気象学実験（自然学類）	25 名× 9 回		
	水文学実験（自然学類）	16 名× 5 回		
	〃	15 名× 5 回		
	計測工学実験（生物資源学類）	21 名× 1 回		
	水理学実験（生物資源学類）	10 名× 5 回		
	フレッシュマンセミナー（地球学類）	29 名× 1 回		
	体験学習	25 名× 1 回		
		755 名	合計（延）数	2 名
大学院	地域調査法	20 名× 4 回	生命環境科学研究科	6 名
	圃場における簡易気象観測実習	20 名× 1 回	環境科学研究科	3 名
	（環境科学研究科）		システム情報工学研究科	1 名
	合計（延）数	100 名	合計（延）数	10 名
教職員			生命環境科学研究科	16 名
			人間総合科学研究科	1 名
	合計（延）数	0 名	合計（延）数	17 名
他大学等			千葉大学環境リモートセンシング研究センター	1 名
			英弘精機（株）	1 名
	合計（延）数	0 名	合計（延）数	2 名
その他	研究会・年次報告会	1 回 参加者	48 名	
	セミナー	4 回 参加者	45 名	
	ワークショップ	2 回 参加者	23 名（国内）	
			30 名（国内）	
	機器の利用		3 名	
	データの利用		3 名	
	見学者			
	国内		444 名	
	国外		21 名	
	利用者合計		1503 名	

主 な 行 事

年 月 日	記 事
2007. 4. 1	中澤 美智男専門職員着任
2007. 4. 17	群馬県立中央高校見学（42 名）
2007. 4. 21	科学技術週間・センターの一般公開
2007. 4. 27	福島県立いわき光洋高校見学（40 名）
2007. 5. 7	千葉県東京学館高校見学（30 名）
2007. 6. 1	東京都立科学技術高校見学（36 名）
2007. 6. 6	山形県米沢中央高校見学（25 名）
2007. 6. 11	平成 19 年度第 1 回陸域環境研究センター運営委員会
2007. 7. 2	圃場整備（草刈）
2007. 8. 3	自然科学体験学習（25 名）
2007. 8. 23	神奈川県立生田高校見学（37 名） 中国地質大学見学（13 名）
2007. 9. 26	牛久市立神谷小学校見学（131 名）
2007. 9. 28	陸域環境研究センター研究棟トイレ改修工事開始
2007. 10. 1	岩田 拓記準研究員着任 大庭 雅道準研究員着任
2007. 10. 4	島根県立出雲高校見学（45 名）
2007. 10	「陸域環境研究センター報告第 8 号別冊」発行
2007. 10. 22	圃場整備（草刈）
2007. 10. 31	国際ワークショップ開催（総合研究棟 A107）
2007. 11	「陸域環境研究センター報告第 8 号」発行
2007. 11. 26	陸域環境研究センター研究棟トイレ改修工事完了
2007. 12. 17	平成 19 年度第 2 回陸域環境研究センター運営委員会
2008. 1. 25	牛久市立奥野小学校見学（40 名）
2008. 2	「陸域環境研究センター報告第 8 号別冊 no.2」発行
2008. 3. 3	平成 19 年度陸域環境研究センター年次研究報告会
2008. 3. 28	二次元造波水路の完成

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) 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 (http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/) の TERC 熱収支・水収支データベース (http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/TERC/database.html) にアクセスする。 ●月ごとのデータは、(http://hojyo.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/archives/monthly/) 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、(http://hojyo.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/archives/yearly/) 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。

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@suiiri.tsukuba.ac.jp

筑波大学陸域環境研究センター報告

第9号

2008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@suiiri.tsukuba.ac.jp

<http://www.suiiri.tsukuba.ac.jp/>

© 筑波大学陸域環境研究センター，2008

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.9

November

2008

Contents

Foreword.....	Tadashi TANAKA	1
Rillenkarren on Limestone Pinnacles:A Brief Review	Yukinori MATSUKURA	3
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation at South Slope of Mt. Tsukuba	Shiho YABUSAKI , Norio TASE, Maki TSUJIMURA and Yousay HAYASHI	15
Development of a Two-dimensional Oscillatory Bed	Tomohiro SEKIGUCHI	25
Seasonal Change in the Structure of Cespitose <i>Miscanthus sinensis</i>	Yohei HAMADA	29
Observational Method of Wind over the Top of Mt. Tsukuba	Tomohiro YODA, Tatsuo HANAFUSA, Yousay HAYASHI and Yoshihiro YAMATO	35
A Preliminary Experiment of Plunge Pool Formation Using Artificial Rock	Tatsuya IGUCHI and Tomohiro SEKIGUCHI	43
Observational Data of Heat Balance and Water Balance -2007-	Masamichi OHBA and Tsutomu YAMANAKA	49
Lecture		75
Literature List		79
Miscellaneous		83



Copyright © Terrestrial Environment Research Center,
The University of Tsukuba, Ibaraki 305-8577 JAPAN, 2008