

筑波大学

陸域環境研究センター報告

第12号
2011

| | | |
|--|--|----|
| 序 | 松岡憲知 | 1 |
| 口絵 | | 2 |
| 報文 | | |
| 草原の季節変動と年々変動に関するデジタルカメラを用いた 長期連続自動観測 | 秋津朋子 奈佐原顕郎 野田響毅 本岡和隆 村上和隆 土田聡信 永井信 | 5 |
| 衛星センサの分光仕様が草原の植生指数観測に与える影響 | 村上和隆 奈佐原顕郎 秋津朋子 本岡和隆 永井信 | 13 |
| 塩類風化に関する一実験 - 風化による強度低下と岩石物性 - | 佐藤昌人 八反地剛 若狭幸 | 21 |
| 研究ノート | | |
| 波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた水同位体 分析計の測定精度について | 山中勤 恩田裕一 | 31 |
| リップル変形に関する二次元造波水路実験データ | 関口智寛 | 41 |
| 資料 | | |
| 熱収支・水収支観測資料 - 2010年 - | 鈴木智恵子 岩上翔 山中勤 | 55 |

(目次-つづく)

筑波大学陸域環境研究センター

2011年12月

(目次-つづき)

| | |
|---------------|----|
| セミナーの記録 | 81 |
| 論文リスト | 87 |
| その他 | 91 |

序

『陸域環境研究センター報告 第12号』をお届けします。本号では、新たな試みとして、前年度の研究教育活動の一部を口絵写真で紹介いたします。お楽しみいただければ幸いです。本号でとりまとめを行った平成22年度は、第三期中期計画が始動するとともに、2件の研究プロジェクトがそれぞれ最終年度・初年度を迎え、センターの主力プロジェクトが入れ替わる節目の年でした。年度の終わりには、東日本大震災を経験し、築後30年を超えるセンターの施設も多少の被害を受けました。

第三期中期計画では、「陸域および流域における水・物質・エネルギー循環に関する基礎研究および土壌・植生・大気間の水・エネルギーフラックスと二酸化炭素などの物質交換に関する観測および研究を実施する」、「気候変動に関わる研究として、中部山岳地域の環境変動やアジア大陸における陸面過程に関する研究を推進する」の二点を重点施策として制定しました。平成22年度は、この中期計画に沿ってセンターの特色を生かした基礎教育・研究を推進するとともに、外部資金等による国内外共同研究・国際連携事業を推進してきました。

教育に関しては、学群生9名、院生15名がセンターを利用して、卒業論文・修士論文・博士論文を作成しました。また高大連携の一環として14件の高校生対象の体験学習に加えて、国内外の研究者や大学院生、市民など数多くのセンター見学者を受け入れて、環境研究の啓蒙に努めました。さらに、つくば市との協同で小中学生を対象とする「次世代環境教育」を企画し、開発した環境教育プログラムを市内の6校で実践いたしました。

研究面においては、概算要求事項特別教育研究経費による「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」の最終年度として、同位体分析技術を導入し、数値モデルと分析技術の融合する研究を重点的に推進しました。平成22年7月には、アジア太平洋地球変動研究ネットワークの支援により、中国北京において「アジア乾燥地における陸面モデル相互比較プロジェクト」のキックオフ・ミーティングを開催し、日米中韓等による国際連携プロジェクトが始動しました。また、平成23年3月11日のセンター年次報告会では「アジア

永久凍土帯における温暖化と地下水循環系変動」と題するミニシンポジウムを実施し、今後の研究展開について議論する予定でしたが、開催中に大震災が発生し、中止を余儀なくされたのが心残りとなりました。

また、平成22年度の概算要求事項「特別経費」として「地球環境再生プログラム－中部山岳地域の環境変動の解明から環境資源再生をめざす大学間連携事業－」が始動しました。本事業では、菅平高原実験センターおよび農林技術センターとの学内連携、筑波・信州・岐阜の3大学の大学間連携による学際的研究を5年計画（～平成26年度）で実行します。初年度は、3大学合同で運営委員会（4月）、キックオフ・ミーティング（6月）、フィールド研究会（10月）、年次報告会（12月）を開催するとともに、中部山岳における積雪や水の同位体の分布、および岩盤破壊・崩壊・河川侵食等の地形プロセスに関する大学間共同研究やセンター独自の研究を立ち上げました。

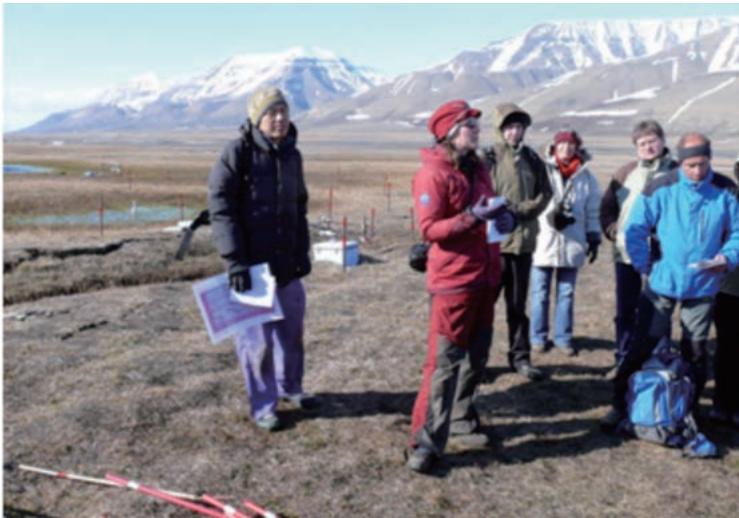
センターのスタッフの勉強会と学内外との研究交流を目的とする「センターセミナー」も計9回実施しました。最近着任した教員・研究員による話題提供のほか、最前線で活躍する若手研究者を招いて、大気・水・地形・生態等の広い分野にわたる話題提供をいただきました。

人事面では、松岡憲知センター長が4月1日付け、仲澤美智男専門職員の異動に伴い松田由男専門職員が7月1日付け、地球環境再生プログラムを担当する脇山義史研究員が9月1日付けで着任しました。また、浅沼 順准教授が10月1日付けで教授に昇任しました。施設面では、老朽化した建物や施設の修理や改善、スタッフや学生、大型機器の増加によって手狭になった研究スペースの整備、建物のセキュリティの強化に重点的に取り組みました。

今後も、陸域環境研究センターとしての中長期の将来構想を明確に定めて、教育研究活動をなお一層推進する所存です。関係各位には、さらなるご指導ご助言を賜れば幸いです。

平成23年11月

陸域環境研究センター長 松岡 憲知



2010年6月15日
欧州永久凍土会議：
北極圏スバルバールで開催された
第3回欧州永久凍土会議の巡検で、
氷楔多角形土観測地を案内する松
岡センター長。（ルーマニアのペト
ル・ウルダ氏提供）

2011年7月14日
甘肅省蘭州中山橋から夕日の黄河
を望む。
チベット高原に源流を発する黄河
は、黄土高原から大量の土砂を運
びながら流れる。水はチョコレート
色だった。



2010年8月21日
間ノ岳落石観測：
中部山岳環境変動プロジェクトの新観測サイ
トに加わった南アルプス間ノ岳の崩壊地で落
石観測を開始。岩盤の剥離・土砂生産量・亀
裂変位・岩盤温度の観測，インターバルカメ
ラによる撮影，3Dレーザー扫描仪による
形状変化測量を実施。



2010年10月20日
木曾駒ヶ岳で岩盤の帯磁率を測定する若狭助教。



2010年10月28日
見学に訪れた高校生に、水路実験棟で雨量計の説明。



2010年10月17日
信州大学農学部附属 AFC 西駒ステーションで行われた「地球環境再生プログラム」フィールドエクササイズ。

- (上) 西駒ステーション山頂部 (標高 2672 m)
- (中) 温暖化実験地の観測機器
- (下) 演習林流域への登山



2010年5月21日
本センターが主導する次世代環境教育の一環として吾妻中学校にて出前授業を行う山中准教授。



2010年7月26日
秋田県北秋田市森吉のトウド沢のポットホールの径を測定する共同研究者（秋田県高校教諭：栗山知士氏）。



中部山岳地域の冬
 (上) 2011年1月31日 大明神の滝（菅平高原実験センター）
 (中) 2011年2月2日 川上演習林堀北沢流域（農林技術センター八ヶ岳・川上演習林）
 (下) 2011年3月7日 TKYフラックスタワー最上部の観測機器（岐阜大学流域圏科学研究センター）

2010年5月19日
 (中) 1976年に設立された流砂実験用の世界最大級の実験用水路（幅4m、深さ2m、長さ160m）と、(下) 水路下流に流れ込む水。

草原の季節変動と年々変動に関する デジタルカメラを用いた長期連続自動観測

Long-term Observation of Seasonal and Yearly Variation of Grassland by
an Automatic Digital Camera

秋津 朋子*・奈佐原 顕郎*・野田 響*・本岡 毅**・
村上 和隆*・土田 聡***・永井 信****

Tomoko AKITSU*, Kenlo Nishida NASAHARA*, Hibiki NODA*, Takeshi MOTOHKA**,
Kazutaka MURAKAMI*, Satoshi TSUCHIDA*** and Shin NAGAI****

I はじめに

筑波大学陸域環境研究センター(以降, TERCと記述)内にある草原の円形圃場では, 地表面と大気との熱・水・炭素フラックスの収支を高精度に評価するために, 微気象観測が長期連続的に行われている(小谷・杉田, 2003; 渡来ほか, 2006; <http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/databasehtml/database>). 植物は, 蒸発散・光合成・生態系呼吸等を通してこれらのフラックスに寄与するため, 植生の現存量や種組成の把握が重要である. さらに, 植物は季節の移り変わりにともなう生物活動や状態の変化をみせることから, 植生の季節・経年的な変化(フェノロジー)を長期連続的に毎日観測することは重要な課題のひとつとなる(Baldocchi *et al.*, 2005). しかしながら, TERCでは, バイオマス(現存量), 草丈, 葉面積指数(LAI), 写真, 草原の構成種やその分布に関する調査は不定期に行われるに留まって

いる(西田・樋口, 2000; 横山・及川, 2001; 井栴ほか, 2002; 莫ほか, 2003; 濱田, 2008). そこで我々はデジタルカメラを用いて草原を毎日自動撮影することによって, 過去7年間にわたる草原の季節・経年的な変動を調査した. 本研究の目的は, TERCにおける基礎観測データのひとつとして, 微気象観測データに加えて, 草原のフェノロジー画像を新たに提供することである.

II 方法

1. 対象場所と解析期間

本研究の対象は, TERC内(北緯36度05分, 東経140度06分, 海拔27m)にある草原の円形圃場(直径160m)の中心にある実験観測塔から南へ24m離れた場所である(第1図-a). 1982年から2001年の年平均気温は14.1℃, 年平均降水量は1207mmである(莫ほか, 2003). 主な構成種は, C₃植物であるセイタカアワダチ

* 筑波大学大学院・生命環境科学研究科

** 宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター

*** 産業技術総合研究所・情報技術研究部門

**** 海洋研究開発機構・地球環境変動領域

ソウ (*Solidago altissima*), ヨモギ (*Artemisia princeps*), メドハギ (*Lespedeza cuneata*) と, C4 植物であるチガヤ (*Imperata cylindrica*), メリケンカルカヤ (*Audropogon virginicus*), ススキ (*Miscanthus sinensis*) である (井桁ほか, 2002). その他, クズ (*Pueraria lobata*) が生育している.

解析期間は 2004 年から 2010 年までの 7 年間である. この圃場全体では, 2004 年には DOY = 350 日ごろに 1 回, それ以外の年は, DOY = 180 ~ 210 日ごろ (夏) と DOY = 290 ~ 325 日ごろ (秋) にかけて計 2 回, 草刈が行われた. DOY は 1 月 1 日を 1 日目としたときの通算日である. ただし, 2008 年には対象場所付近における草刈は夏と秋ともに行われなかった.

2. 観測データ

草原のフェノロジーを観測するために, 鉄骨構造物 (通称: ヤグラ) の上部, 高さ 2.9 m の位置に, 以下の部品から構成されるカメラシステム (automatic digital fisheye camera: ADFC; 土田ほか, 2005) を鉛直下向きに設置した (第 1 図 - b と c).

- デジタルカメラ (Nikon 製 COOLPIX4500)
- 魚眼レンズ (Nikon 製 FC-E8)
- 防水ケース (早坂理工製 SPC31A)

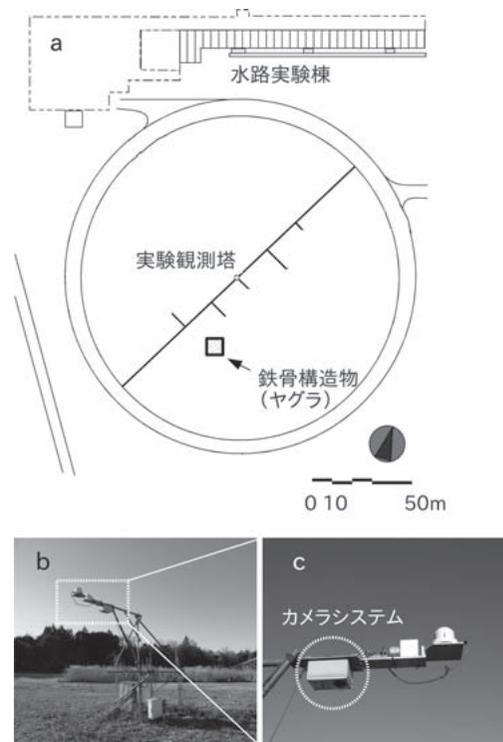
デジタルカメラはフリーソフトである Photopc (<http://photopc.sourceforge.net/>) を用いて, ヤグラ基部に設置した物置内の PC (OS: Windows 2000) で制御した. 毎日, 日中 (7:30 から 16:30 まで) 90 分毎に計 7 回撮影した. ホワイトバランスは曇り, 露出はオート, 画像解像度は 2272 × 1074 ピクセルに各々設定した. 画像は JPEG 形式で保存した. 画像のフットプリントはヤグラを中心とする半径約 10 m の円内であった. 本研究では, 太陽の入射角による影響をできる限り避けるために, 正午に撮影した画像もしくは, 正午に最も近い時刻に撮影された画像を使用

した. 欠測や画像の品質が悪いものについてはそれに近い別の時刻に撮影された写真を使用した. 本研究では, 画像の余白を切り取り, さらに 600 × 600 ピクセルに縮小したものを使用した.

画像データは Phenological Eyes Network (PEN; 土田ほか, 2005) によって取得管理され, インターネット上で公開されている (<http://www.pheno-eye.org>).

3. 解析方法

はじめに, 毎日の画像を目視観察し, クズ, ススキ, セイタカアワダチソウのフェノロジーやイベント (積雪・出芽・展葉・出穂・開花・地上部の枯死・草刈等) を判別した. さらに, 画像解析範囲内で 3 割以上の面積を占めた種を主な構成種



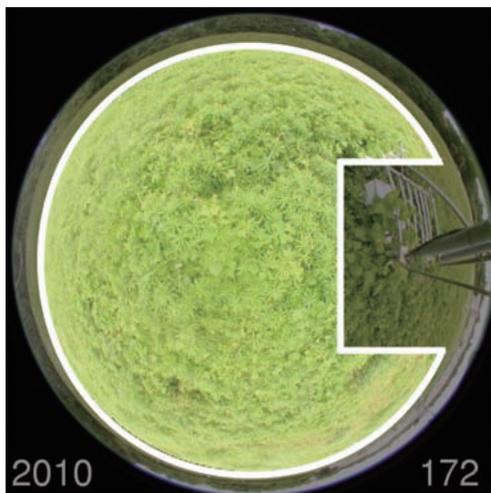
第 1 図 対象場所
a: 鉄骨構造物 (通称ヤグラ) の位置, b: ヤグラ, c: カメラシステム

とした。

つぎに、上述の目視観察の結果と、カメラ画像から抽出した赤・緑・青のデジタルナンバー (RGB 値) の時系列変化の対応関係を調査することによって、RGB 値に着目した解析手法 (e.g., Richardson *et al.*, 2007) の有用性を検討した。本研究では、Green excess index (2G_RBi : Woebbecke *et al.*, 1995 ; Richardson *et al.*, 2007) を用いて時系列的に季節・経年変化を調査した。2G_RBi は展葉や落葉のフェノロジーを RGB の個々の値よりも高精度に検出することが可能な指標である。さらには、2G_RBi 値から展葉日とピーク日を検出し、その経年変化を調査した。2G_RBi 値は式 (1) で定義される。

$$2G_RBi = (G-R) + (G-B) \quad (1)$$

本研究では、圃場周辺の樹木の写り込みやヤグラの影響を避けるために、第 2 図の太線で囲まれるエリアを解析対象とし、その範囲内における 2G_RBi の平均値を毎日求めた。各年において、2G_RBi が初めて 50 を上回った日を展葉日と定義した。



第 2 図 画像解析範囲

III 結果

目視観察の結果を第 1 表に示す。観測を行った年における全体的な傾向は次のようであった：DOY = 110 ~ 125 日ごろ出芽、DOY = 125 ~ 145 日ごろ、地表面は草本で完全に被覆された。DOY = 175 ~ 230 日ごろ、クズがキャノピー上部に出現した。ただし、2009、2010 年は生育期初めからクズが出現した。夏の草刈を行わなかった年 (2004、2008 年) を除き、夏の草刈から約 20 日後に、残された根や地下茎から新たなシュートが出芽し、さらに、10 ~ 15 日後に地面は草本で完全に再被覆された。DOY = 260 ~ 270 日ごろ、ススキが出穂した。DOY = 270 ~ 300 日ごろ、セイタカワダチソウが開花した。DOY = 290 ~ 330 日ごろ、クズの地上部が枯死した。

2G_RBi 値の季節変化パターンを第 3 図に示す。観測を行った年における全体的な傾向は次のようであった：DOY = 1 ~ 110 日ごろ、ほぼ一定の値 (= 0) を示した。DOY = 110 日から 150 日にかけて増加した。夏の草刈を行わなかった年 (2004、2008 年) を除き、夏の草刈直後に、0 まで急激に減少した。2G_RBi は、その約 10 日後から増加しはじめ、その後さらに、約 20 日間に渡り増加しつづけて、草刈から 30 ~ 35 日後には草刈前の水準まで回復した。秋の草刈を行った年 (2005、2006、2007、2009、2010 年) では、草刈直後に、0 まで急激に減少した。それ以外の年 (2004、2008 年) では、DOY = 250 日から 350 日にかけて徐々に 0 まで減少した。

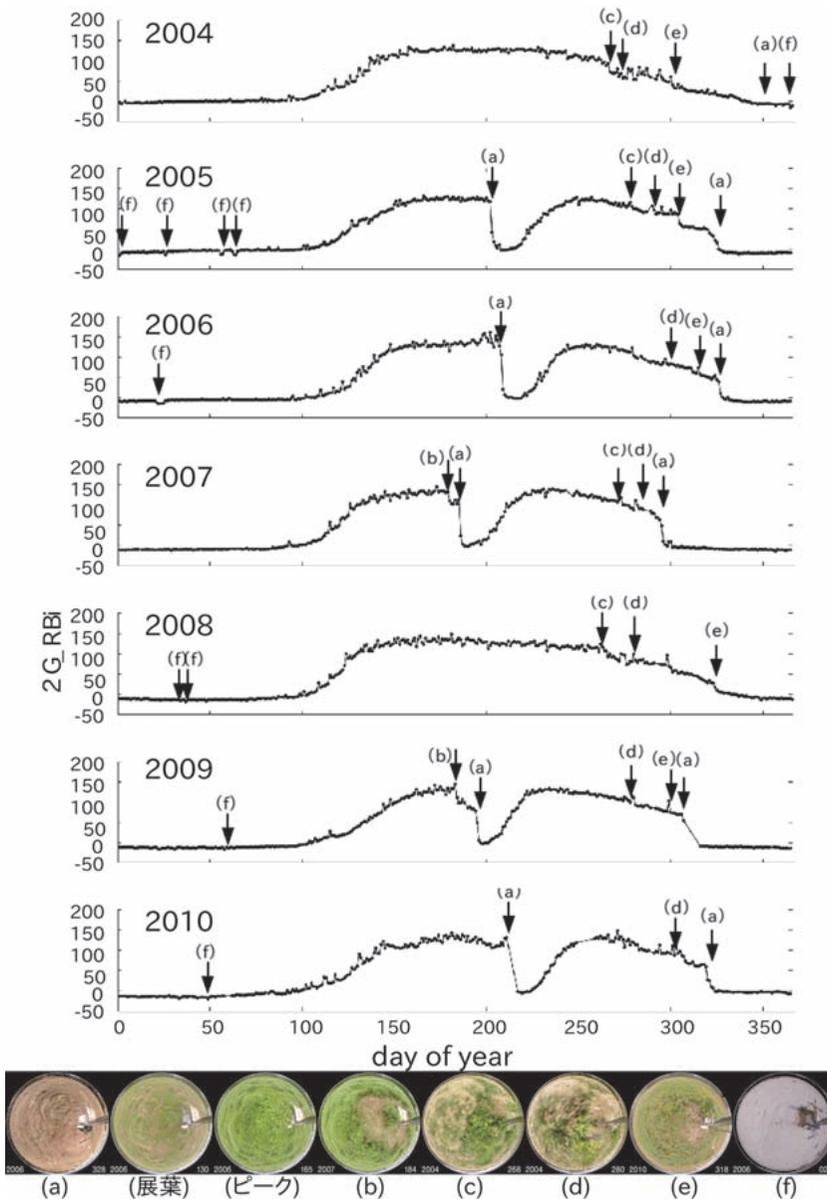
2G_RBi 値によって検出した展葉日とピーク日を目視観察による出芽日と共に第 2 表に示す。2G_RBi 値によって検出した展葉日は、2007 年が最も早い DOY = 115 日、2009 年が最も遅い DOY = 133 日であった。ピーク日は、2008 年が最も早い DOY = 140 日、2009 年が最も遅い DOY = 160 日であった。平均的な展葉日は DOY = 124 日でピーク日は DOY = 150 日であった。

第1表 目視観察による草原のフェノロジー

| 年 | DOY | 出来事 | 主な構成種 | 年 | DOY | 出来事 | 主な構成種 |
|---------|--------------|--------------|---------|--------------|--------------|-------------|---------|
| 2004 | 3-4 | 欠測 | | 2007 | 113 | 出芽 | |
| | 110 | 出芽 | | | 126 | 草本により地表面全体が | M, S |
| | 137 | 草本により地表面全体が | M, S | | | ほぼ覆われた | |
| | | ほぼ覆われた | | | 175 | クズ上面に出現 | M, S |
| | 230 | クズ出現 | | | 180 | ヤグラ直近の草刈 | |
| | 257 | ススキ出穂 | | | 186 | 全面草刈 | |
| | 267 | セイタカアワダチソウ開花 | | | 206 | 出芽 | |
| | 291 | 欠測 | | | 219 | 草本により地表面全体が | M, S, P |
| | 302 | クズ地上部枯死 | | | | ほぼ覆われた | |
| | 351 | ヤグラ直近の草刈 | | | 245-246 | 欠測 | |
| 352 | 全面草刈 | | 273 | ススキ出穂 | | | |
| 363 | ヤグラ直近の草刈 | | 286-287 | 欠測 | | | |
| 365 | 積雪 | | 290 | セイタカアワダチソウ開花 | | | |
| 1 | 積雪 | | 291 | ヤグラ直近の草刈 | | | |
| 26 | 積雪 | | 296 | 全面草刈 | | | |
| 56-57 | 積雪 | | 34 | 積雪 | | | |
| 61 | 積雪 | | 37 | 積雪 | | | |
| 63-64 | 積雪 | | 115 | 出芽 | | | |
| 119 | 出芽 | | 124 | 草本により地表面全体が | M, S | | |
| 145 | 草本により地表面全体が | M, S | | ほぼ覆われた | | | |
| | ほぼ覆われた | | 2008 | 189 | クズ出現 | | |
| 184 | クズ出現 | M, S | | 198 | ヤグラ周辺部を残して草刈 | | |
| 203 | 全面草刈 | | | 258 | ススキ出穂 | | |
| 204 | ヤグラ直近の草刈 | | | 279 | セイタカアワダチソウ開花 | | |
| 224 | 出芽 | | | 301 | ヤグラ周辺部を残して草刈 | | |
| 241 | 草本により地表面全体が | M, S, P | | 324 | クズ地上部枯死 | | |
| | ほぼ覆われた | | | 58 | 積雪 | | |
| 277 | ススキ出穂 | | | 115 | 出芽 | | |
| 289 | 欠測 | | | 144 | 草本により地表面全体が | S, P | |
| 293 | セイタカアワダチソウ開花 | | | | ほぼ覆われた | | |
| 305 | クズ地上部枯死 | | 184 | ヤグラ直近の草刈 | | | |
| 324 | ヤグラ直近の草刈 | | 189 | 欠測 | | | |
| 326 | 全面草刈 | | 196 | 全面草刈 | | | |
| 21-25 | 積雪 | | 212 | 出芽 | | | |
| 126 | 出芽 | | 219 | 草本により地表面全体が | | | |
| 139 | 草本により地表面全体が | M, S | | ほぼ覆われた | | | |
| | ほぼ覆われた | | 278 | セイタカアワダチソウ開花 | | | |
| 179 | クズ上面に出現 | M, S | 289 | クズ地上部枯死 (一部) | | | |
| 192-207 | クズがカメラ画面を覆う | | 290-291 | 欠測 | | | |
| 208 | ヤグラ直近の草刈 | | 292 | ヤグラ周辺部を残して草刈 | | | |
| 209 | 全面草刈 | | 298 | クズ地上部枯死 | S | | |
| 228 | 出芽 | | 308-316 | 欠測、この間に全面草刈 | | | |
| 242 | 草本により地表面全体が | M, S, P | 49 | 積雪 | | | |
| | ほぼ覆われた | | 60-61 | 欠測 | | | |
| 283 | 欠測 | | 81 | 欠測 | | | |
| 284 | カメラ西方の植物が枯死 | | 110 | 出芽 | | | |
| 287 | 欠測 | | 135 | 草本により地表面全体が | S, P | | |
| 299 | セイタカアワダチソウ開花 | | | ほぼ覆われた | | | |
| 312 | クズ地上部枯死 | M, S | 2010 | 212-216 | 欠測、この間に全面草刈 | | |
| 326 | ヤグラ直近の草刈 | | | 231 | 出芽 | | |
| 327 | 全面草刈 | | | 240 | 草本により地表面全体が | S, P | |
| | | | | | ほぼ覆われた | | |
| | | | | 250-257 | 欠測 | | |
| | | | | 301 | セイタカアワダチソウ開花 | | |
| | | | | 310 | クズ地上部枯死 | S | |
| | | | | 320 | 全面草刈 | | |

注) DOY は 1 月 1 日を 1 日目としたときの通算日である。
 主な構成種欄の M, S, P は、下の植物種を表す。

M : ススキ
 S : セイタカアワダチソウ
 P : クズ



第3図 Green excess Index (2G_RBi) の季節変化とその典型的な画像
 (a): 草刈, (b): ヤグラ周辺部の草刈, (c): ススキ出穂, (d): セイ
 タカアワダチソウ開花, (e): クズ地上部枯死, (f): 積雪

IV 考察

本研究の結果, (1) デジタルカメラによるフェ
 ノロジー観測は, 年毎によって異なる草原のフェ

ノロジーや, 主な構成種の違いを詳細に記録可能
 なこと, (2) 画像を数値時系列化することによっ
 て, 展葉・草刈・枯死のフェノロジーを定量的に
 検出可能なことが明らかになった.

第2表 目視観察による出芽日と2G_RBi値によって検出した展葉／ピーク日

| Year | 目視観察 | | 2G_RBi | |
|------|--------|--------|--------|--|
| | 出芽日 | 展葉日 | ピーク日 | |
| 2004 | 110 | 118 | 155 | |
| 2005 | 119 | 126 | 155 | |
| 2006 | 126 | 130 | 150 | |
| 2007 | 113 | 115 | 145 | |
| 2008 | 115 | 120 | 140 | |
| 2009 | 115 | 133 | 160 | |
| 2010 | 110 | 127 | 145 | |
| 平均 | 115.43 | 124.14 | 150.00 | |
| 標準偏差 | 5.62 | 6.62 | 7.07 | |

注) 1月1日を1日目としたときの通算日で表す。

年毎に異なる草原のフェノロジーや主な構成種の分布の違いの原因としては、気温・降水量・日射量等の気象要因の経年変化のみならず、草刈に起因した草地の光環境の変化が考えられる。Stewart *et al.* (2009) は、半自然草原における刈り取りや火入れなどの攪乱は、草原から森林植生への遷移の進行を止めるだけでなく、リターを取り除いて地表面近くの光環境を明るくすることによって、草原を構成する植物の成長を促しているのであろうと述べている。本圃場では、秋の草刈が行われなかった翌年にはススキの出現が目立たなくなったが、セイタカワダチソウやクズは、その影響を受けなかった(第1表)。これらは発芽に対する光特性や生活型の種ごとの違いによるものであろう。草刈による前年のリターの除去が翌年の光環境の改善を促し、この結果、ススキの新芽の成長が促進されていたと考えられる。これに対してセイタカワダチソウは、直立的に生育するために、秋の草刈が行われずに前年のリターで地表面が覆われた状態で春を迎えても、早期に前年のリターよりも高い位置に葉をつけることが可能であるため、また、つる性植物であるクズは、前年のリター残存の有無に関わらず、セイタカワダチソウ等の高茎草本を利用して生育中期以降に最も光環境が良いキャノピー上部に出現する生活型であるために、前年のリター残存は、生育の

重大な制限因子にはならなかったと考えられる。

RGB値に着目した解析手法によって展葉・草刈を検出可能な事実は、これらのイベントを多地点で経年的に評価可能であることを示唆する。Graham *et al.* (2010) や Ide and Oguma (2010) は、森林生態系において上述の手法の有用性を報告している。また、本圃場と同様な半自然草原は、かつて国土面積の10%を占めていたが、近年では農地開発や植生遷移、植林の結果、2~3%程度まで減少していることが報告されている(小路, 2003; Stewart *et al.*, 2009)。一方で、半自然草原は、二次林と並び、多くの動植物の生息地(ハビタット)として、重要な生態系として位置づけられている(環境省, 2007)。今後我々は、熱・水・炭素フラックスと併せて、草原を構成する植物のフェノロジーを多地点で自動撮影し、その結果得られた画像をRGB解析することによって、草原の物理的・生物学的環境に関する統合的な理解を促進させることが可能となるであろう。本研究では、カメラによる目視観察とRGB値を利用した2G_RBi値の季節変化パターンがほぼ一致することが示された。さらに、2G_RBi値の解析では目視観察では判別することが困難なピーク日を示すことができた。しかしながら、目視観察の出芽日と2G_RBi値の展葉日には違いが生じた(第2表)。2G_RBi値の展葉日はその閾値によって変動する。このように、この手法は展葉日として定義する閾値をいくつにするべきかという問題を有している。また、2G_RBi値の解析からは、年毎によって異なる草原の構成種の違いや、個々の草本に固有なフェノロジーを検出することはできなかった。この原因としては、草本は森林とは異なり、小さな個体がランダムに分布するため、仮に対象範囲を限定したとしても、そこに存在する複数の個体の平均的なフェノロジーを2G_RBi値がとらえてしまうためと考えられる。従って我々は、RGB解析に全てを委ねるのではなく、フェノロジー画像の目視観察も併用することが、

草原のフェノロジーを高精度に観測するために重要であると考えている。

今後我々は、TERCでの草原フェノロジー観測を継続的に行うだけではなく、本研究と同一の観測システムが導入されている筑波大学菅平高原実験センター内の草原での観測結果 (<http://www.pheno-eye.org>) との比較を行い、地理的・気象的な生息環境と、草原の構成種やそのフェノロジーの対応関係について、普遍性や特異性を調査する予定である。

謝辞

本研究を行うに当たり、生命環境科学研究科の田中健太郎氏、川戸渉氏、陸域環境研究センターの各氏には、長期連続観測に関するご協力を頂きました。Phenological Eyes Network (PEN) の皆様には、データ取得管理に関するご協力を頂きました。本研究は、環境省地球環境研究総合推進費「21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究」(環境省)、日中韓フォーサイト事業「東アジア陸上生態系炭素動態－気候変動の相互作用解明を目指した研究教育拠点の構築」(日本学術振興会)、GCOM-CRA「総合的な陸域生態系情報の開発」(宇宙航空研究開発機構)によるご支援を頂きました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 井樹史彦・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.
- 環境省 (2007): 「第三次生物多様性国家戦略」環境省自然環境局自然環境計画課, 277p. (<http://www.biodic.go.jp/nbsap.html>).
- 小路 敦 (2003): 草地と景観生態学 野草地保全に向けた景観生態学的取り組み。日本草地学会誌, **48** (6), 557-563.
- 小谷亜由美・杉田倫明 (2003): 陸域環境研究センター気象観測塔における広域熱・水蒸気・CO₂フラックスの測定。筑波大学陸域環境研究センター報告, **4**, 103-108.
- 土田 聡・西田顕郎・岩男弘毅・川戸 渉・小熊宏之・岩崎 晃 (2005): Phenological Eyes Network - 衛星による地球環境観測のための地上検証ネットワーク。日本リモートセンシング学会誌, **25** (3), 282-288.
- 西田顕郎・樋口篤志 (2000): リモートセンシング実験でみられた水理実験センター圃場の草地植生の季節変化。筑波大学陸域環境研究センター報告, **1**, 1-10.
- 濱田洋平 (2008): ススキ株の空間構造とその季節変化。筑波大学陸域環境研究センター報告, **9**, 29-34.
- 莫文紅・井樹史彦・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。筑波大陸域環境研究センター報告, **4**, 109-117.
- 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。筑波大陸域環境研究センター報告, **2**, 37-39.
- 渡来 靖・藪崎志穂・山中 勤 (2006): TERCの熱収支・水収支観測データベース図表集1981年8月～2005年12月。筑波大陸域環境研究センター報告, **7** (別冊), 97p.
- Baldocchi, D. D., Black, T. A., Curtis, P. S., Falge, E., Fuentes, J. D., Granier, A., Gu, L., Knohl, A., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Wilson, K., Wofsy, S., Xu, L. and Yamamoto, S. (2005): Predicting the onset of net carbon uptake by deciduous forests with soil

- temperature and climate data: a synthesis of FLUXNET data. *International Journal of Biometeorology*, **49**, 377-387.
- Graham, E. A., Riordan, E. C., Yuen, E. M., Estrin, D. and Rundel, P. W. (2010): Public internet-connected cameras used as a cross-continental ground-based plant phenology monitoring system. *Global Change Biology*, **16 (11)**, 3014-3023.
- Ide, R. and Oguma, H. (2010): Use of digital cameras for phenological observations. *Ecological Informatics*, **5 (5)**, 339-347.
- Richardson, A. D., Jenkins, J. P., Braswell, B. H., Hollinger, D. Y., Ollinger, S. V. and Smith, M.L. (2007): Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleafforest. *Oecologia*, **152**, 323-334.
- Stewart, J. R., Toma, Y., Fernández, F. G., Nishiwaki, A., Yamada, T. and Bollero, G. (2009): The ecology and agronomy of *Miscanthus sinensis*, a species important to bioenergy crop development, in its native range in Japan: a review, *Global Change Biology Bioenergy*, **1 (2)**, 126-153.
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Vonbargen, K. and Mortensen, D. A. (1995): Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, **38**, 259-269.
- (2011年1月28日受付, 2011年10月31日受理)

衛星センサの分光仕様が草原の植生指数観測に与える影響

Changes of Vegetation Indices due to Spectral Specifications of Satellite Sensors in a Grassland

村上 和隆*・奈佐原 顕郎*・秋津 朋子*・本岡 毅**・永井 信***

Kazutaka MURAKAMI*, Kenlo Nishida NASAHARA*,
Tomoko AKITSU*, Takeshi MOTOHKA** and Shin NAGAI***

1 はじめに

地球規模での水・炭素収支を高精度に評価するためには、地球上で約 20% を占め (Lieth, 1978), 気象や人間活動の影響を受けやすい草原生態系の季節・経年変化を長期連続的かつ広域的に観測することが重要な課題のひとつである (安成, 2003)。この課題を解決するためには、衛星リモートセンシング観測で得られた NDVI (Normalized Difference Vegetation Index; Tucker, 1979)・EVI (Enhanced Vegetation Index; Huete *et al.*, 2002)・GRVI (Green and Red ratio Vegetation Index; Falkowski *et al.*, 2005; Motohka *et al.*, 2010) 等の植生指数を用いた解析が有益である (西田・樋口, 2001; 近藤・開発, 2003; Iwasaki 2006; Higuchi *et al.*, 2007)。これらの植生指数は、2011 年の現在まで約 10 年間に渡り、米国の Terra 衛星と Aqua 衛星に搭載された MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) センサ等によって地球上で毎日データが取得されている。これらの衛星センサによる観測が終了した後も、日本の GCOM-C 衛星に搭載される SGLI (Second

Generation Global Imager) センサ等によって継続的にデータが取得される見込みである。しかし、Kobayashi *et al.* (2007) は、シベリアのカラマツ林において、波長応答仕様 (センサ仕様) が異なる複数の衛星センサ間での分光反射率や植生指数の絶対値や、それらの季節変化パターンに違いがみられることを報告している。数十年にわたる長期連続的に草原の展葉や落葉等の植物季節 (フェノロジー) を調査する場合、センサ仕様が異なる複数の衛星で得られた植生指数を時系列化する必要がある。しかし、センサ仕様が異なってしまうと植生指数の絶対値が同一であったとしても、異なった植生状態を捉えてしまう可能性がある。このように同一の基準で植生状態を捉えられないことが原因で、フェノロジーを誤って評価してしまう可能性がある。そこで我々は、筑波大学陸域環境センター (TERC) にある草原圃場において、MODIS と SGLI センサの仕様の違いが植生指数を用いた草原のフェノロジー観測に及ぼす影響を調査した。草原の分光放射観測を毎日行い、雲被覆・大気・衛星の観測条件等に起因したノイズが無く、センサ仕様の違いが大きく影響する条件下で比較を行った。

* 筑波大学大学院・生命環境科学研究科

** 宇宙航空研究開発機構・地球観測研究センター

*** 海洋研究開発機構・地球環境変動領域

II 方法

1. 対象地と解析期間

本研究では、TERC内（北緯36度05分，東経140度06分，海拔27m）にある円形圃場の中心にある実験観測塔から南へ24m離れた場所にある草原を解析対象地とした（秋津ほか，投稿中）．1982年から2001年の気象条件は，年平均気温が14.1℃，年平均降水量が1207mmであった（莫ほか，2003）．草原の主要構成種は， C_3 植物であるセイタカアワダチソウ（*Solidago altissima*），ヨモギ（*Artemisia princeps*），メドハギ（*Lespedeza cuneata*）と， C_4 植物であるチガヤ（*Imperata cylindrica*），メリケンカルカヤ（*Audropogon virginicus*），ススキ（*Miscanthus sinensis*）である（井柁ほか，2002）．これらの植生は，最繁茂期に高さ1.5m程まで成長する．

解析期間は，2009年1月1日から同年12月31日までの一年間とした．また，7月14日（DOY = 195）と11月4日（DOY = 308）に圃場全体で草刈が行われた．

2. 観測データ

草原の植生指数を観測するために，鉄骨構造物（ヤグラ）の上部，高さ2.9mの位置に，以下の部品から構成される分光放射観測システム

（Hemi-Spherical Spectro-Radiometer：HSSR；土田ほか，2005；Motohka *et al.*, 2010）を設置した．

－分光放射計（英弘精機製MS700）

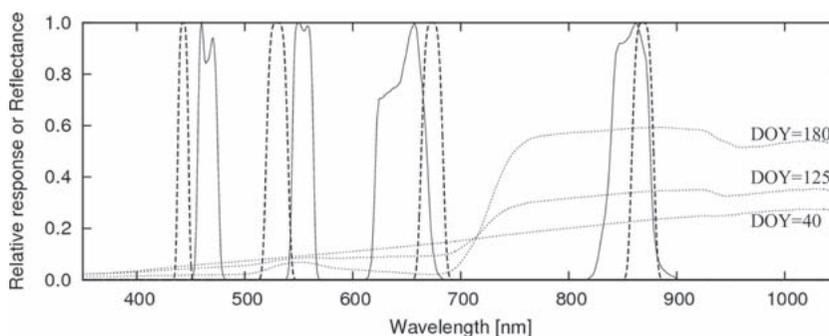
－回転装置（早坂理工製CHS-AR）

分光放射計は，ヤグラ基部に設置した物置内のパーソナルコンピュータで制御し，毎日，日中に10分間隔で草本群落の分光反射率を計測した．

詳しくは，Motohka *et al.*（2010）を参照されたい．本研究では，太陽の入射角による影響をできる限り避けるために，10：00から14：00までのデータを平均して解析に使用した．また，データの欠測がDOY = 308から316，337，342から365の間で見られた．

3. 解析方法

はじめに，第1図で示されるMODISとSGLIの波長応答仕様（<http://modis.gsfc.nasa.gov/>；http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/）に基づいて，日別の青（ R_{Blue} ），緑（ R_{Green} ），赤（ R_{red} ），近赤外（ R_{NIR} ）の分光反射率を求めた．次に，求められた分光反射率を用いて，式（1）から（3）で定義される植生指数NDVI及び，EVI，GRVI（Tucker，1979；Huete *et al.*, 2002；Falkowski *et al.*, 2005；Motohka *et al.*, 2010）をそれぞれ求めた．



第1図 MODIS（実線）及びSGLI（破線）の波長応答仕様と，DOY = 40, 125, 180に得られた草原群落表面における分光反射スペクトル（点線）を示す．

$$\text{NDVI} = (R_{\text{NIR}} - R_{\text{Red}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{Red}}) \quad (1)$$

$$\text{EVI} = G \times (R_{\text{NIR}} - R_{\text{Red}}) / (R_{\text{NIR}} + C_1 \times R_{\text{Red}} - C_2 \times R_{\text{NIR}} + L) \quad (2)$$

$$\text{GRVI} = (R_{\text{Green}} - R_{\text{Red}}) / (R_{\text{Green}} + R_{\text{Red}}) \quad (3)$$

ただし、 $G = 2.5, C_1 = 6, C_2 = 7.5, L = 1$ である。

III 結果

第2図にMODISとSGLIのセンサ仕様で得られた分光反射率の季節変化パターンを示した。また、 $R_{\text{Blue}}, R_{\text{Green}}, R_{\text{Red}}, R_{\text{NIR}}$ のDOY = 100, 180, 197, 230, 310における前後2日間の平均値を第1表に示した。DOY = 140から197と220から310(植生繁茂期間)にかけて、SGLIセンサ仕様の R_{Green} がMODISセンサ仕様より0.01程度低かった。これに対して、DOY = 0から100及び、198から202, 310から365(無植生期間)にかけて、SGLIセンサ仕様の R_{Blue} と R_{Green} がMODISセンサ仕様より0.007程度低く、 R_{Red} では、0.009程度高かった。 R_{NIR} は、二つのセンサ間で違いがほとんど見られなかった。DOY = 195及び、DOY = 310において、各分光反射率に急激な変化が見られた。

第3図にMODISとSGLIのセンサ仕様で得られた植生指数の季節変化パターンを示した。また、NDVI, EVI, GRVIのDOY = 100, 180, 197,

230, 310における前後2日間の平均値を第2表に示した。夏の刈り取り(DOY = 195)の前後を見ると、各植生指数はDOY = 184から徐々に変化し、DOY = 195を過ぎると急激に変化している。また、DOY = 310において各植生指標が無植生期間と同程度になるまで急激に減少した。SGLIとMODISのセンサ仕様の違いは、無植生期間でのNDVI, EVI, GRVIで、それぞれ0.03, 0.02, 0.08程度SGLIセンサ仕様の方が低く現れた。これに対して、植生繁茂期間では、NDVIとEVIにおいて、0.02程度、SGLIセンサ仕様の方が高くなった。どの植生指数においても、値を取る幅がMODISセンサ仕様よりもSGLIセンサ仕様の方が10%前後大きくなることが示された。

IV 考察

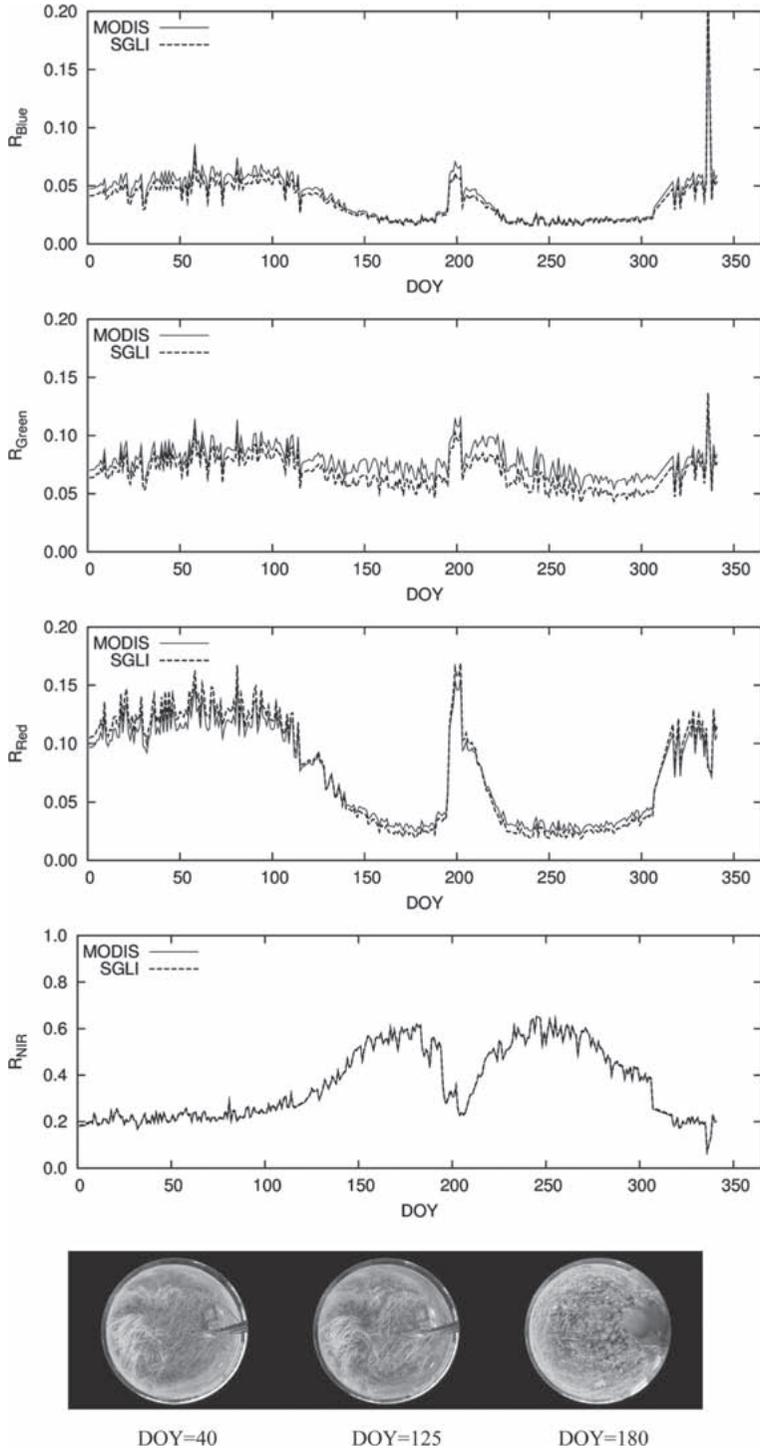
本研究の結果、MODISとSGLIのセンサ間では、 R_{Green} の定義に起因した分光反射率の違いが見られるにもかかわらず、無植生期間と植生指数が飽和した期間を除いて、植生指数の絶対値には大きな差が見られないことが明らかになった。無植生期間と植生指数が飽和した期間を含めると、NDVI, EVI, GRVIのいずれにおいても、MODISよりSGLIの方が、値のとりうる範囲(レンジ)が大きいが、年間を通じた植生指数の変化のパターンはよく似ていた。この結果は、MODISセ

第1表 DOY = 100, 180, 197, 230, 310におけるMODIS(上段)とSGLI(下段)の分光放射率(青, 緑, 赤, 近赤外)の値

| | DOY | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| | 100 | 180 | 197 | 230 | 310 |
| R_{Blue} | 0.06 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 0.05 |
| | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | 0.04 |
| R_{Green} | 0.09 | 0.07 | 0.10 | 0.07 | 0.07 |
| | 0.08 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | 0.06 |
| R_{Red} | 0.12 | 0.03 | 0.12 | 0.03 | 0.09 |
| | 0.12 | 0.02 | 0.13 | 0.02 | 0.10 |
| R_{NIR} | 0.25 | 0.57 | 0.28 | 0.50 | 0.20 |
| | 0.25 | 0.58 | 0.30 | 0.49 | 0.20 |

第2表 DOY = 100, 180, 197, 230, 310におけるMODIS(上段)とSGLI(下段)の植生指数(NDVI, EVI, GRVI)の前後2日間の平均値

| | DOY | | | | |
|------|-------|------|-------|------|-------|
| | 100 | 180 | 197 | 230 | 310 |
| NDVI | 0.36 | 0.90 | 0.40 | 0.88 | 0.36 |
| | 0.33 | 0.92 | 0.40 | 0.90 | 0.34 |
| EVI | 0.22 | 0.85 | 0.26 | 0.75 | 0.18 |
| | 0.20 | 0.88 | 0.25 | 0.77 | 0.17 |
| GRVI | -0.11 | 0.41 | -0.12 | 0.40 | -0.14 |
| | -0.20 | 0.42 | -0.19 | 0.39 | -0.22 |



第2図 MODIS (実線) 及び SGLI (破線) の波長応答仕様をもとに地上分光放射観測で得られた草原群落表面における分光反射率 (R_{Blue} , R_{Green} , R_{Red} , R_{NIR}) の季節変化パターン. 図下部に典型的な草原群落の画像を示す.

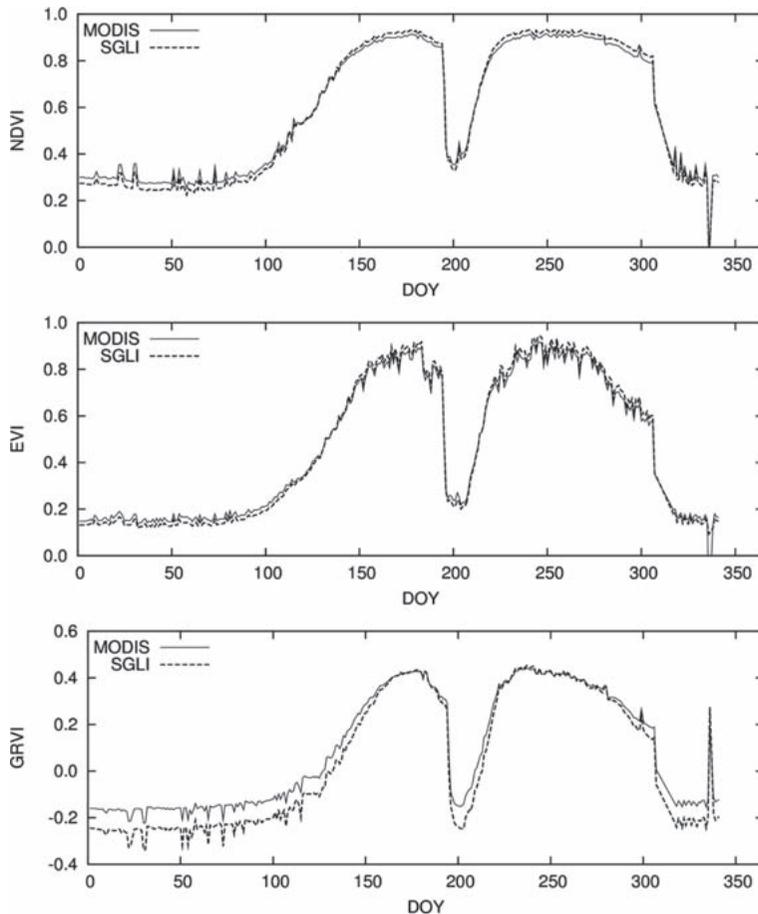
ンサで得られた植生指数を対象とした草原の展葉や落葉のタイミングの基準 (e.g., Motohka *et al.*, 2010) を多少調整すれば, SGLI センサで得られた植生指数に対しても適用可能であることを示唆する.

夏の刈り取り (DOY = 195) の前後を見ると, 植生指数はヤグラ直近の刈り取り (DOY = 184) から徐々に変化し, 圃場全体の刈り取り (DOY = 195) で急激に変化している (第3図). この結果より, 植生指数により短期間の間に行われた大小二つの刈り取りを捉える事が可能であると示唆された. その後, DOY = 230 あたりで各植生

指数が刈り取り以前と同程度まで回復している.

しかし, 夏の刈り取りが中止されていた 2004 年以前の研究結果では, バイオマス, LAI (Leaf Area Index) の最大値がともに 8 月以降に現れていたが (莫ほか, 2003), 本研究で解析した 2009 年では夏の刈り取りが行われたため各植生指数がピークを迎えていない可能性がある. また, 刈り取りによって草原の植生種が変化している可能性がある. 以上より, 植生指数が同程度であってもバイオマスが回復したとは言えず, これらを推定する場合には複数年に渡る解析が必要である.

GCOM-C/SGLI センサによる地球観測は,



第3図 MODIS (実線) 及び SGLI (破線) の波長応答仕様をもとに地上分光放射観測で得られた植生指数 (NDVI, EVI, GRVI) の季節変化パターンを示す.

2014年より13年間に渡る長期連続観測ミッションが計画されているため (http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/), 我々は過去約10年に渡るMODIS センサの観測と併せて約25年に渡り, 植生指数による草原のフェノロジーの経年変化を広域的に評価することが可能となるであろう. しかしながら, 衛星観測で得られた植生指数は, 大気補正や幾何補正等の手法によって, それらの絶対値に変化が生じる可能性がある. したがって, 地上データと衛星データとを併せて検証を行うことが必要である. また, 本研究は1サイトのみにおける検証であるため, 本研究の結果に関する普遍性が得られるかどうかを多地点の草原サイトで調査する必要がある.

謝辞

筑波大学大学院生命環境科学研究科の田中健太郎氏, 川戸渉氏, 陸域環境研究センターの各氏には, 長期連続観測に関するご協力を頂きました. Phenological Eyes Network (PEN) の皆様には, データ取得管理に関するご協力を頂きました. 本研究は, 環境省地球環境研究総合推進費「21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究」(環境省), 日中韓フォーサイト事業「東アジア陸上生態系炭素動態 - 気候変動の相互作用解明を目指した研究教育拠点の構築」(日本学術振興会), GCOM-C RA 「総合的な陸域生態系情報の開発」(宇宙航空研究開発機構) によるご支援を頂きました. 記して御礼申し上げます.

参考文献

秋津朋子・奈佐原顕郎・野田 響・本岡 毅・村上和隆・土田 聡・永井 信: 草原の季節変動と年々変動に関するデジタルカメラを用いた長期連続自動観測. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 投稿中.

井柵史彦・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.

近藤昭彦・開発一郎 (2003): モンゴルにおける植生変動と気候変動の関係に関する予察的研究. 砂漠研究, **13** (2), 147-151.

土田 聡・西田顕郎・岩男弘毅・川戸 渉・小熊宏之・岩崎 晃 (2005): Phenological Eyes Network - 衛星による地球環境観測のための地上検証ネットワーク. 日本リモートセンシング学会誌, **25** (3), 282-288.

西田顕郎・樋口篤志 (2001): リモートセンシング実験でみられた水理実験センターの圃場の草地植生の季節変化. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **1**, 1-10.

莫 文紅・井柵史彦・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. 筑波大陸域環境研究センター報告, **4**, 109-117.

安成哲三 (2003): モンゴル草原はどう維持されてきたか?: 生態気候システム学的序説. 科学, **73** (5), 555-558.

Falkowski, M. J., Gessler, P. E., Morgan, P., Hudak, A. T. and Smith, A. M. S. (2005): Characterizing and mapping forest fire fuels using ASTER imagery and gradient modeling. *Forest Ecology and Management*, **217**, 129-146.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. and Ferreira, L. G. (2002): Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, **83**, 195-213.

Higuchi, A., Hiyama, T., Fukuta, Y., Suzuki, R.

- and Fukushima, Y. (2007): The behaviour of a surface temperature/vegetation index (TVX) matrix derived from 10-day composite AVHRR images over monsoon Asia. *Hydrological Processes*, **21(9)**, 1157-1166.
- Iwasaki, H. (2006): Impact of interannual variability of meteorological parameters on vegetation activity over Mongolia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **84(4)**, 745-762.
- Kobayashi, H., Suzuki, R. and Kobayashi, S. (2007): Reflectance seasonality and its relation to the canopy leaf area index in an eastern Siberian larch forest: Multi-satellite data and radiative transfer analyses. *Remote Sensing of Environment*, **106**, 238-252.
- Lieth, H.F.H. (1978): *Patterns of Primary Productivity in the Biosphere*. Hutchinson Ross, Stroudsburg, 342p.
- Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H. and Tsuchida, S. (2010): Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. *Remote Sensing*, **2**, 2369-2387.
- Tucker, C. J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **8**, 127-150.
- (2011年2月9日受付, 2011年10月26日受理)

塩類風化に関する一実験 —風化による強度低下と岩石物性—

The Effect of Rock Properties on Rock Strength Change
by Salt Weathering: A Laboratory Experiment

佐藤 昌人*・八反地 剛**・若狭 幸***

Masato SATO*, Tsuyoshi HATTANJI** and Sachi WAKASA***

1 はじめに

塩類風化は多くの地形の形成に重要な役割を果たしている。タフォニや cavernous weathering (Bradley *et al.*, 1978; Matsukura and Matsuoka, 1991; Matsukura and Kanai, 1988 など), 台座岩 (Chapman, 1980), 波食棚 (Bryan and Stephens, 1993) などを形成する際の主要因の一つとして, 塩類風化が挙げられている。特に乾燥地域 (Goudie and Day, 1980; Goudie and Viles, 2007) や海岸周辺地域 (Mottershead, 1989), 南極地域では, 岩屑の生産にも貢献している。また, 地形変化だけでなく, 塩類風化による建築物や石造文化財などの劣化が社会問題となっている (Gouri *et al.*, 1990; Kamh, 2005 など)。

これまで, 多くのフィールド調査や室内実験によって塩類風化に関する研究が重ねられてきた。Goudie and Viles (1997) は, 用いた岩石, 実験の手順・条件によって差異はあるが, 室内実験において, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , MgSO_4 は塩類風化に対する影響力が大きく, NaCl , CaSO_4 は効果が小さいということを報告している。しかし, 野外での調査結果からは, NaCl , CaSO_4 は塩類風化に

有効な塩であることが示されている (高橋ほか, 1993; Clarke, 1994 など)。一方, Matsukura and Matsuoka (1996) は, タフォニの成長速度と岩石の間隙径分布, 強度の関係から, 引張強度が低く, 小さな間隙を多く持つ岩石ほど風化しやすいことを示した。山田ほか (2005) は, 物性の異なる 7 種類の岩石と Na_2SO_4 の飽和水溶液を用いて塩類風化実験を行い, 塩類風化によって試料の弾性波速度が低下すること, 岩石中に含まれる小間隙が多く, 引張強度が小さい岩石ほど, 弾性波速度の低下が著しいことを示した。

塩類風化が最も強く作用するのは, 乾燥と湿潤の変化が激しい岩石表面であると考えられる。したがって, 岩石表面の強度変化を把握することは, 塩類風化による地形変化を予測するうえで重要である。山本ほか (2005) は間隙率の異なる青島砂岩を用いて塩類風化実験を行い, 間隙率が大きい岩石ほど, 表面強度の低下が著しいことを報告した。しかし, 他の岩石における表面強度の変化, 岩石物性との関係についてはこれまで議論されていない。そこで本研究では, 7 種類の岩石と, 2 種類の塩溶液 (Na_2SO_4 , NaCl) を用いて塩類風化実験を行い, 同時に表面強度の変化を測定し

* 筑波大学生命環境科学研究科大学院生

** 筑波大学生命環境科学研究科

*** 筑波大学 陸域環境研究センター

た。その結果をもとに、塩類風化による表面強度の低下と岩石物性の関係について若干の考察を行う。

II 実験

1. 実験に使用した岩石と塩溶液

7種類の岩石（花崗岩2種（稲田花崗岩，真壁花崗岩），凝灰岩2種（大谷凝灰岩，白河熔結凝灰岩），砂岩2種（青島砂岩，多胡砂岩），流紋岩1種（新島黒雲母流紋岩）を一辺5cmの立方体状に整形し，乾燥炉で十分に乾燥させたものを用いて実験を行った。以下これらの岩石を，産地名を用いて，稲田石，真壁石，大谷石，白河石，青島石，多胡石，新島石と略称する。実験開始前の各岩石物性値を第1表に示す。L値はPROCEQ S. A.社製のエコーチップ硬さ試験機（D型）（以下，エコーチップ）を用いて，単打法で測定した岩石表面の強度の指標である。詳しい測定方法については後述する。塩溶液滲入率は，試料の全間隙体積に対して，実際に間隙に塩溶液が滲入した割合を示す値である。算出は以下の手順で行った，試料を24時間塩溶液に浸したのち，溶液から引き上げて試料表面の塩溶液を軽く拭き取った後，重量を測定した。測定した重量と塩溶液の密度から試料に滲入した塩溶液の体積を算出し，塩溶液が試料の全間隙に占める割合を計算した。塩溶液滲

入率 I_R が大きいほど，試料の間隙に対する滲入した塩溶液の体積の割合が大きく， I_R が1であれば，試料のすべての間隙に塩溶液が滲入していることを示す。

実験には硫酸ナトリウムと塩化ナトリウムの飽和水溶液（20℃における溶解度は，硫酸ナトリウムが25.5 wt%，塩化ナトリウムが26.4 wt%）を用いた。また，塩類風化以外の風化，主に乾湿風化の影響を評価するため，蒸留水を用いた実験も同時に行った。

2. 実験方法

従来，塩類風化の室内実験には，大きく分けて二つの方法が用いられてきた。一つは，立方体状の試料を塩溶液に完全に浸したのちに，溶液から引き出し，乾燥させる方法である（Goudie, 1974；Robinson and Williams, 2000など）。もう一つは，角柱状の試料下部を塩溶液に浸し，試料上部を乾燥させる方法である（Goudie, 1986；山田・松倉, 2001など）。前者の方法では，乾燥と湿潤を交互に繰り返し，実験の進行はサイクル数で表現される。この実験方法では，実験途中における試料の物性を測定できるため，実験の各段階における物性，風化速度の変化を捉えることができる。これに対して，後者の方法では，実験の開始時と終了時の比較はできるが，実験途中の変化が捉えられない。本実験では，実験進行に伴う物

第1表 実験に用いた岩石の物性値（一部，山田他，2005表4および表6より抜粋）

| 間隙率 n [%] | かさ密度 γ_d [g/cm ³] | 真比重 γ_s [g/cm ³] | 引張強度 S_t (MPa) | 初期エコー チップ 反発値 L_0 | 塩溶液 滲入率 (Na ₂ SO ₄) | 塩溶液 滲入率 (NaCl) | 間隙径分布 | | | | | |
|-------------------|---|--|---------------------|---------------------------|--|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|
| | | | | | | | V_{total} (mm ³ /g) | V_1 (mm ³ /g) | V_2 (mm ³ /g) | V_3 (mm ³ /g) | V_4 (mm ³ /g) | |
| 稲田花崗岩 | 1.1 | 2.59 | 2.62 | 7.82 | 831.6 | 0.53 | 0.47 | 19.4 | 5.2 | 2.6 | 10.4 | 1.3 |
| 真壁花崗岩 | 1.1 | 2.61 | 2.64 | 9.00 | 863.8 | 0.85 | 0.80 | 33.9 | 7.8 | 5.2 | 18.3 | 2.6 |
| 大谷凝灰岩 | 36.8 | 1.47 | 2.33 | 1.37 | 421.0 | 0.89 | 0.72 | 335.3 | 20.7 | 46.9 | 96.6 | 171.1 |
| 白河熔結 凝灰岩 | 15.5 | 2.19 | 2.59 | 4.38 | 613.3 | 0.92 | 0.82 | 380.6 | 8.6 | 73.1 | 236.5 | 62.4 |
| 新島黒雲母 流紋岩 | 43.5 | 1.33 | 2.36 | 0.46 | 268.4 | - | - | 261.8 | 214.2 | 36.9 | 8.3 | 2.4 |
| 青島砂岩 | 6.7 | 2.51 | 2.69 | 5.75 | 540.5 | 1 | 1 | 181.8 | 7.5 | 10.0 | 119.5 | 44.8 |
| 多胡砂岩 | 25.6 | 1.94 | 2.61 | 3.35 | 256.9 | 0.67 | 0.60 | 434.7 | 35.9 | 272.2 | 83.2 | 43.5 |

性の変化を捉えるため、前者の方法を用いた。

風化実験は以下の手順で行った。また、実験は室温（およそ 25℃、水温は 18℃から 21℃の範囲）で行った。

- (1) 試料を各溶液に 24 時間浸す。
- (2) それぞれの溶液から取り出した試料を 75℃で 48 時間炉乾燥させる。
- (3) 試料を炉から取り出し、室温になるまで冷ました後、蒸留水に 24 時間浸し、試料から塩を取り除く。
- (4) 蒸留水から取り出した試料を 75℃で 48 時間炉乾燥させる。
- (5) 炉乾燥した試料の重量 W_n とエコーチップ反発値 L_n を測定する (n はサイクル数を表す)。

(1) ~ (5) を 1 サイクルとし、各試料の風化の程度合わせて、9 ~ 20 サイクルの実験を行った。重量の測定は試料をメッシュ 2 mm の篩にのせた状態で行い、篩から抜け落ちたものを風化による欠損とみなし、篩上に残った試料の重量を測定した。

エコーチップは反発硬度試験機の一つであり、球状のテストチップ (D 型では直径 3 mm) を有するインパクトボディが、一定の力で試料表面を打撃する際の打撃速度と反発速度から、試料の硬さの指標 L を求める。一般に試料が硬くなれば、 L の値は大きくなる。反発硬度試験機の一つにシュミットロックハンマーがあるが、エコーチップ (D 型) は測定時の打撃エネルギーが 11 N・mm と、シュミットロックハンマーの 200 分の 1 程度ときわめて小さく、ほぼ非破壊で試料表面の強度を測定できる (青木・松倉, 2004)。Aoki and Matsukura (2007) は、単打法と連打法の二つの測定方法を提案している。岩石表面の強度を評価するため、本実験では単打法を用いた。具体的には、1 点を 1 回ずつ、10 点で打撃を行い、10 点の算術平均を L 値として算出した。ただし、実験の進行に伴い、岩石表面が風化により

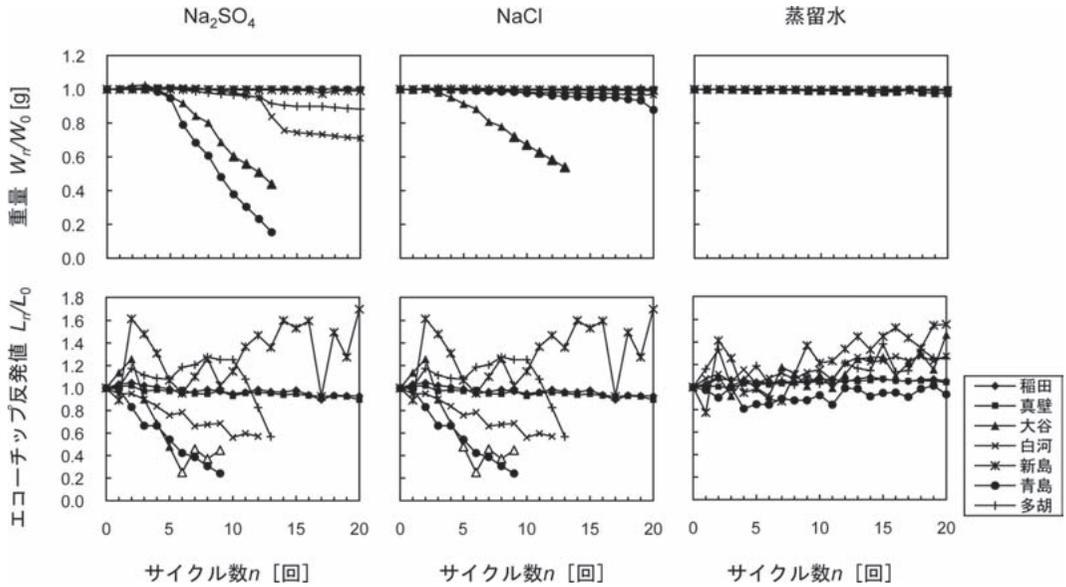
破壊され、10 点での計測が困難になった場合は、5 点での打撃を行い、平均値を算出した。川崎ほか (2000) は、試料の厚さが 3 cm 以下になると L 値が一定値を示さなくなることを報告しているため、本実験では、試料の厚さが 3 cm 以下になるまで測定を行った。

III 結果および考察

1. 試料の変化

実験の進行に伴う試料の質量と L 値の変化を第 1 図に示す。ただし、値は初期値からの変化率で示した。硫酸ナトリウムを用いた実験では砂岩 2 種と凝灰岩 2 種、塩化ナトリウムを用いた実験では大谷石と青島石の重量が明瞭に減少している。どの溶液を用いた実験でも花崗岩 2 種と新島石の重量は変化せず、また、蒸留水を用いた実験では、どの岩石にも重量の変化はみられなかった。したがって、重量の変化については、塩溶液を用いた実験には塩類風化以外の風化作用 (乾湿風化など) の影響は含まれていないと判断した。一方、 L 値は、試料ごとにバラつきがあるものの、塩溶液を用いた実験では減少する傾向を示し、蒸留水を用いた実験ではわずかに増加する傾向を示した。ただし、新島石を用いた実験では、試料の凹凸により、 L 値を正確に測定することができなかつたため、以下の議論から除外する。塩溶液を用いた実験と比較すると、従来、塩類風化による変化が起きていないとされてきた花崗岩において、20 サイクル経過後の L_n/L_0 に差が生じており、塩類風化によって試料表面の強度が低下したことが示唆される (Goudie and Viles, 1997; 山田ほか, 2005 など)。ただし、蒸留水を用いた実験において、 L 値が上昇する傾向を示した原因は明らかではない。以下、塩溶液を用いた実験における変化は塩類風化によるものとして、議論を行う。

風化による破壊の様子は用いた塩溶液によって



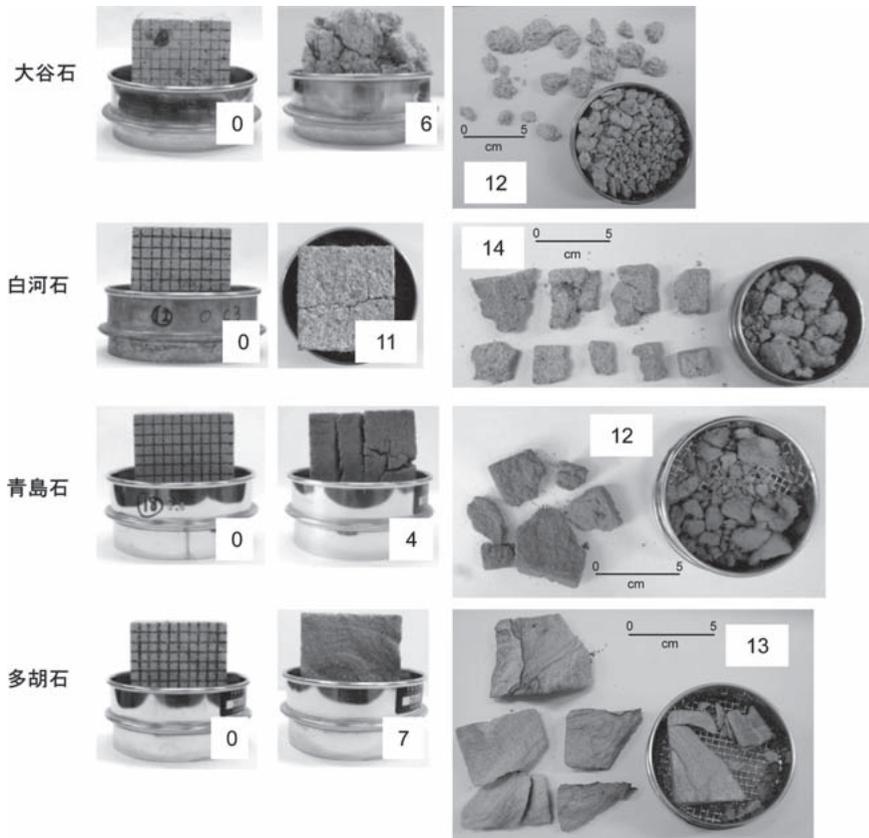
第1図 重量とエコチップ反発値の変化（ただし、白抜きは5点測定の平均値を示す。）

異なり，硫酸ナトリウムを用いた実験では，実験が進むにつれて試料全体に多数のクラックが網状に生じ，ある段階で複数のブロックに分解した（第2図）．一方，塩化ナトリウムを用いた実験では，主に試料表面から1～2mm径の小片が剥離するように破壊した．また，クラックが生じても，クラックが試料内部まで伸張して試料が破壊するには至らなかった（第3図）．重量の減少は，前者の方が著しい．試料への塩溶液滲入率を比較すると，どの岩石でも硫酸ナトリウムの方が滲入率は大きな値を示しており，試料内部に多くの塩溶液が浸透している（第1表）．それぞれの塩溶液の溶解度はほぼ同じであることから，硫酸ナトリウムの方が乾燥時に岩石中で析出する塩の量が多く，破壊過程に違いが生じた可能性が挙げられる．

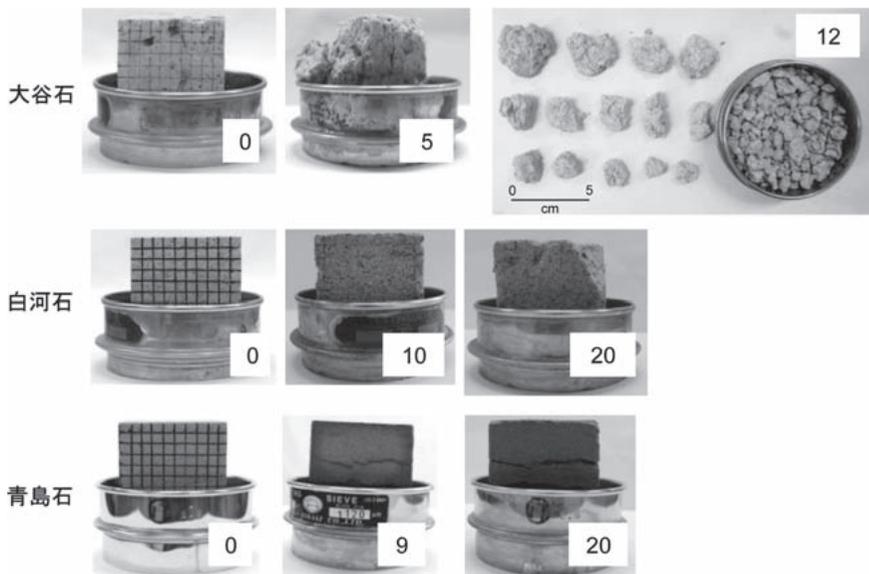
2. 重量とL値の関係

実験開始直後の数サイクルでは試料の重量はほとんど変化せず，数サイクル経過後，一定のペースで減少する傾向がみられた（第1図）．一

方，L値は実験開始直後から低下する傾向がみられる．そこで重量変化率 W_n/W_0 と反発値変化率 L_n/L_0 の関係を第4図に示した．どちらの塩溶液を用いた実験でも， W_n/W_0 が1に近い領域では L_n/L_0 も高い値を示す．しかし， L_n/L_0 がある値よりも低い（硫酸ナトリウムを用いた実験では L_n/L_0 が0.5～0.6以下，塩化ナトリウムでは0.8以下）領域では W_n/W_0 が低い値を示している．これらの結果から，風化による試料の変化は以下のように説明される．実験開始直後，試料表面は強度が高い状態にあり，重量は一定に保たれる．その後，風化が進行して試料表面の強度が初期値に対して一定の割合を下回ると，塩の析出時に試料が破壊し，重量が減少し始める．ここで，硫酸ナトリウムを用いた実験で重量の減少がみられた白河石，多胡石は，第4図では重量が変化していないように見える．しかし，これは試料が破壊してL値の測定が行えなくなったためで，実際には白河石，多胡石ともに， L_n/L_0 が0.5～0.6以下になると試料が破壊し，重量が減少している．山本ほか（2005）は青島砂岩を用いた風化実験の結果，



第2図 硫酸ナトリウム溶液を用いた実験における試料の様子（数字はサイクル数）



第3図 塩化ナトリウム溶液を用いた実験における試料の様子（数字はサイクル数）

同様の現象を報告している。本実験の結果は、この関係が岩石の種類によらないものであることを示している。

3. 風化速度と岩石物性

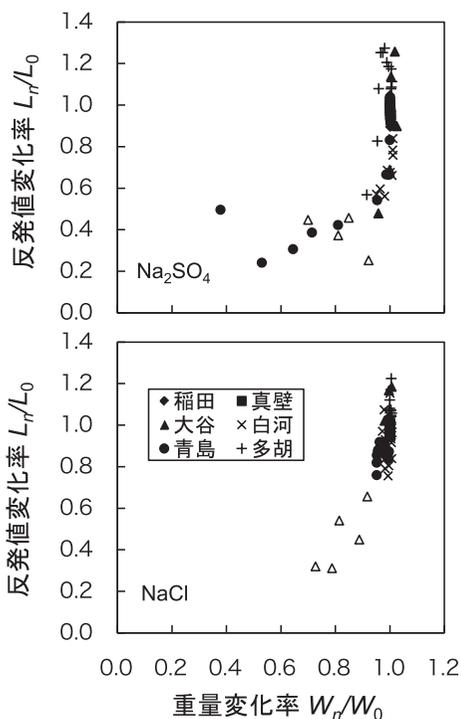
塩類風化速度の指標として、過去の多くの実験では試料の重量減少量を用いている (Goudie, 1993 など)。一方、山田ほか (2005) はサイクル

ごとに P 波速度を測定し、その変化を塩類風化速度の指標としている。本研究では、表面強度、すなわち L 値の変化を塩類風化速度の指標として用いる。サイクル毎の反発値変化率 L_n/L_0 を、サイクル数 n を用いて以下の (1) 式で近似した。

$$L_n/L_0 = 1 - C \cdot n \quad (1)$$

ここで表面強度低下率 C は L 値の低下率を表す係数で、値が大きいほど風化が速いことを示す。実験条件ごとに求めた C を第 2 表に示す。ただし、多胡石については、硫酸ナトリウムを用いた実験では、他の試料とは異なり、 L_n/L_0 が 10 サイクル目以降に急激に変化している (第 1 図)。したがって、(1) 式では表面強度の変化を表すことができないため、計算から除外した。間隙率 n と表面強度低下率 C の関係を第 5 図に示す。また、山本 (2005) は間隙率が異なる青島石を用いた実験の結果、 L 値の変化から算出した塩類風化速度が岩石の間隙率と比例関係にあることを示した。しかし、複数の種類の岩石を用いた本実験では、間隙率が大きい岩石ほど C が大きくなる傾向はみられるが、あまり明瞭ではない。

Matsukura and Matsuoka (1996) は、塩類風化によって形成したとされるタフォニの成長速度が、岩石物性から計算される Weathering Susceptibility Index (WSI : 易風化指数) に比例することを示した。同様の目的から、本実験で得られた塩類風化速度についても、 WSI との比較を行う。 WSI は以下の (2) 式で計算される。



第 4 図 重量変化率と反発値変化率 (ただし、白抜きは 5 点測定の実験値を示す。)

第 2 表 表面強度低下率 C と易風化指数 WSI

| | 表面強度低下率 C | | 易風化指数 WSI | | 滲入率を考慮した易風化指数 WSI' | |
|---------|----------------|----------------|----------------|--------|-------------------------|--------|
| | Na_2SO_4 | $NaCl$ | Na_2SO_4 | $NaCl$ | Na_2SO_4 | $NaCl$ |
| 稲田花崗岩 | 0.0033 (0.579) | 0.0004 (0.049) | 0.014 | 0.012 | 0.007 | 0.006 |
| 真壁花崗岩 | 0.0043 (0.791) | 0.0013 (0.002) | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |
| 大谷凝灰岩 | 0.0764 (0.683) | 0.0698 (0.739) | 2.931 | 2.495 | 2.420 | 1.678 |
| 白河熔結凝灰岩 | 0.0390 (0.950) | 0.0083 (0.010) | 0.283 | 0.241 | 0.236 | 0.180 |
| 青島砂岩 | 0.0881 (0.977) | 0.0103 (0.414) | 0.094 | 0.080 | 0.094 | 0.080 |
| 多胡砂岩 | — | -0.0048(0.103) | 0.116 | 0.099 | 0.072 | 0.055 |

$$WSI = \frac{P}{St} \quad (2)$$

分母の St は岩石の引張強度を、分子の P は岩石内部で発生する結晶圧を示している。したがって、 WSI が大きくなるほど、塩類風化作用が強く作用することを示す。結晶圧 P は以下の (3)、(4) 式から求めることができる。

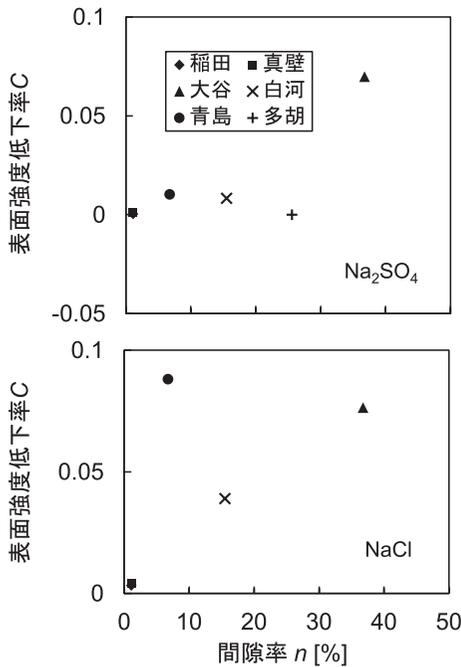
$$P = \sum_{i=1}^4 p_i V_i \gamma_d \quad (3)$$

$$P = \frac{4\sigma}{d} \quad (4)$$

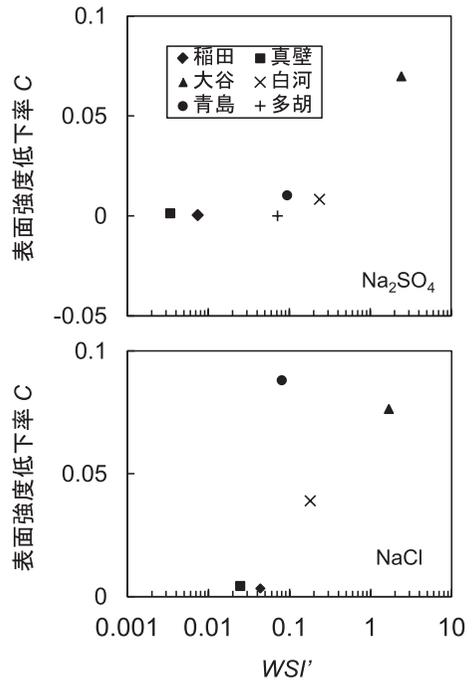
ここで、 p は結晶圧 (MPa)、 d_1, d_2, d_3, d_4 は間隙径分布を大間隙 ($10^{1.5} \mu\text{m}$ から $10^{0.5} \mu\text{m}$)、中間隙 ($10^{0.5} \mu\text{m}$ から $10^{-0.5} \mu\text{m}$)、小間隙 ($10^{-0.5} \mu\text{m}$ から $10^{-1.5} \mu\text{m}$)、極小間隙 ($10^{-1.5} \mu\text{m}$ から $10^{-2.5} \mu\text{m}$) に 4 区分した際の各区分の間隙径の代表値 ($d_1 = 10 \mu\text{m}$, $d_2 = 1 \mu\text{m}$, $d_3 = 0.1 \mu\text{m}$, $d_4 = 0.01 \mu\text{m}$) である。 V_1, V_2, V_3, V_4 は岩石の単位体積重量当たりの、各間隙区間に含まれる間隙の総容量 ($\text{mm}^3/$

g)、 γ_d は岩石のかさ密度 (g/mm^3)、 σ は塩溶液の表面張力 (N/mm) である。表面張力 σ は溶液の種類によって異なる。各間隙区間の間隙径総容量 V_i 、引張強度 St は山田ほか (2005) の値 (表 2) を用いた。また、表面張力の値は Navarro and Doehine (1999) の値 (硫酸ナトリウム: $\sigma = 8.35 \times 10^{-3} \text{N}/\text{mm}$, 塩化ナトリウム: $\sigma = 7.66 \times 10^{-3} \text{N}/\text{mm}$) を用いた。 WSI は、岩石のすべての間隙に塩溶液が滲入し、乾燥時にはすべての間隙で結晶圧が発生することを想定している。しかし、第 1 表の塩溶液滲入率からもわかるように岩石中のすべての間隙に塩溶液が滲入するわけではない。したがって、実際に滲入した塩溶液が間隙中で結晶圧を発生させることになる。山田ほか (2005) は、以下の (5) 式のように WSI を変形し、 WSI' として用いている。

$$WSI' = I_R \times \frac{P}{St} \quad (5)$$



第 5 図 試料の間隙率 n と表面強度低下率 C



第 6 図 試料の易風化指数 WSI' と表面強度低下率 C

ここで、 I_R は塩溶液滲入率である。そこで本実験においても WSI' を計算し、表面強度低下率 C の関係を第6図に示した。 WSI' が0.1程度よりも大きくなると C の値が急激に大きくなっており、塩類風化による破壊には閾値が存在する可能性が示唆される。

V まとめ

本研究では、岩石物性が異なる7種類の岩石を用いて、塩類風化実験を行い、エコーチップ硬さ試験機によって測定した岩石表面の強度変化と岩石物性の関係について検討した。結果は以下のとおりである：

- (1) 過去の研究においては塩類風化による変化が認められなかった花崗岩において、岩石表面の強度が低下している可能性が示唆された。
- (2) 新鮮時の測定値に対して、エコーチップ反発値が一定の割合を下回ると、岩石試料の重量が減少する。この関係は、重量の減少が起きた大谷凝灰岩、白河熔結凝灰岩、青島砂岩、多胡砂岩に共通してみられた。岩石の種類によらず閾となる割合が一定であることから、塩類風化による岩石表面の構造変化は岩石の種類に依らないことを示唆される。本実験の結果からは、用いた塩溶液により閾となる値が異なるようにもみえるが、これについてはさらに検討が必要であろう。
- (3) エコーチップ反発値 L を指標とした塩類風化速度 C は、易風化指数 WSI が大きい岩石ほど、大きな値を示した。この結果は、小さい間隙を多くもち、引張強度が小さい岩石ほど塩類風化を受けやすいという従来の見解を支持するものである。

今後、塩類風化により試料が破壊される際、岩石の表面状態はどのような状態であるのか、具体

的に確かめることが必要であろう。

謝辞

本研究を進めるにあたり、大東文化大学経営学部の青木久准教授からは、多くの貴重な意見を賜りました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 青木 久・松倉公憲 (2004): エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察, 地形, **25**, 267-276.
- 川崎 了・谷本親伯・小泉和広・石川正基 (2000): 簡易反発硬度試験による岩質材料の物性評価手法の開発－試験条件の影響と基本特性に関する調査－, 応用地質, **41**, 244-248.
- 高橋健一・松倉公憲・鈴木隆介 (1993): 海水飛沫帯における砂岩の侵蝕速度－日南海岸・青島の弥生橋橋脚の侵蝕形状－, 地形, **14**, 143-164.
- 山田 剛・松倉公憲 (2001): 凝灰岩の柱状試料を用いた塩類風化に関する予察の実験, 筑波大学陸域環境センター報告, **2**, 19-23.
- 山田 剛・青木 久・高橋 学・松倉公憲 (2005): 塩類風化速度に与える岩石物性の影響に関する一実験, 応用地質, **46**, 72-78.
- 山本まりえ・青木 久・松倉公憲 (2005): 青島砂岩の塩類風化速度に与える間隙率の影響に関する一実験, 筑波大学陸域環境センター報告, **6**, 23-31.
- Aoki, H. and Matsukura, Y. (2007): A new technique for non-destructive field measurement of rock-surface strength: an application of the Equotip hardness tester to weathering studies. *Earth Surface Process and Landforms*, **32**, 1759-1769.

- Bradley, W. C., Hutton, J. T. and Twidale, C. R. (1978): Role of salts in development of granitic tafoni, South Australia. *Journal of Geology*, **86**, 647-654.
- Bryan, W. B. and Stephens, R. S. (1993): Coastal bench formation at Hanauma Bay, Oahu, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin*, **105**, 377-386.
- Chapman, R. W. (1980): Salt weathering by sodium chloride in the Saudi Arabian desert. *American Journal of Science*, **280**, 116-129.
- Clarke, J. D. A. (1974): *Geomorphology of the Kambalda region, Western Australia. Australian Journal of Earth Science*, **41**, 229-239.
- Goudie, A. S. (1974): Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical process. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, **21**, 1-12.
- Goudie, A. S. (1986): Laboratory simulation of 'The wick effect' in salt weathering of rock. *Earth Surface Process and Landforms*, **11**, 275-285.
- Goudie, A. S. (1993): Salt weathering simulation using a single-immersion technique. *Earth Surface Process and Landforms*, **18**, 369-376.
- Goudie, A. S. and Day, M. J. (1980): disintegration of fan sediments in Death Valley, California, by salt weathering. *Physical Geography*, **1**, 126-137.
- Goudie, A. S. and Viles, H. A. (1997): *Salt Weathering Hazards*. John Wiley & Sons, 241p.
- Goudie, A. S. and Viles, H. A. (2007): Rapid salt weathering in Coastal Namib desert: Implications for landscape development. *Geomorphology*, **85**, 49-62.
- Gouri, K. L., Chowdhury, A. N., Kulshreshta, N. P. and Punuru, A. R. (1990): Geologic features and durability of limestones at the Sphinx. *Environmental Geology*, **16**, 57-62.
- Kamh, G. M. E. (2005): The impact of landslides and salt weathering on Roman structures at high latitudes—Conway Castle, Great Britain: a case study. *Environmental Geology*, **48**, 238-254.
- Matsukura, Y. and Kanai, H. (1988): Salt fretting in the valley cliff of the Asama volcano region, Japan. *Earth Surface Process and Landforms*, **13**, 85-90.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1991): Rates of tafoni weathering on uplifted shore platforms in Nojima-zaki, Boso peninsula, Japan. *Earth Surface Process and Landforms*, **16**, 51-56.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996): The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband*, **106**, 57-72.
- Mottershead, D. N. (1989): Rates and patterns of bedrock denudation by coastal salt spray weathering: a seven-year record. *Earth Surface Process and Landforms*, **14**, 383-398.
- Navarro, C. R. and Doehne, E. (1999): Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Process and Landforms*, **24**, 191-209.
- Robinson, D. A. and Williams R. B. G. (2000): Experimental weathering of sandstone by combinations of salts. *Earth Surface Process and Landforms*, **25**, 1309-1315.

(2011年8月3日受付, 2011年10月27日受理)

波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた 水同位体分析計の測定精度について

On Measurement Accuracy of Liquid Water Isotope Analyzer Based on Wavelength-Scanned
Cavity Ring-Down Spectroscopy (WS-CRDS)

山中 勤*・恩田 裕一**

Tsutomu YAMANAKA* and Yuichi ONDA**

I はじめに

従来、水試料の安定同位体分析に用いられる標準的手法は質量分析法であったが、近年になって吸収分光法の一つである波長可変半導体レーザー吸収分光法 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy; TDLAS) が普及しつつある。この手法は、Kerstel *et al.* (1999) によって初めて水同位体比分析に適用され (芳村, 2009), その後、水蒸気同位体比の航空機観測 (例えば, Webster and Heymsfield, 2003) や野外長期モニタリング (例えば, Lee *et al.*, 2005, 2006, 2007) などに用いられてきた。現在では、精度の向上やメンテナンスの容易化を図るために様々な技術開発がなされ、複数のメーカーで製品化されている。波長スキャンキャビティリングダウン分光法 (Wavelength-Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy; WS-CRDS) は、そうした技術の中で最も有望視されているものの一つであり、複雑な前処理なしに高精度な同位体分析が可能であるとされている (例えば, Gupta *et al.*, 2009)。しかしながら、我が国での使用例は未だ少なく、機器の特性に関する知見の蓄積は十分とは言いがたい。そこで本報告では、WS-CRDS を用いた液体

水同位体分析計 (L1102-i, Picarro, CA, USA) の測定精度を検討し、また使用上の留意点等を概括する。

II WS-CRDS の概要

1. 測定原理

水蒸気をはじめとする気体分子は、近赤外の波長領域にそれぞれ固有の吸収線を持つ。したがって、各吸収線に波長調整されたレーザー光が気体中を通過する際の減衰の程度を測定することにより、各種気体のモル濃度を知ることができる。水の酸素あるいは水素安定同位体分析の場合、 H_2^{16}O と H_2^{18}O あるいは H_2^{16}O と HD^{16}O のモル濃度が得られれば、次式によって同位体比を算出できる ([] はモル濃度を意味する)。

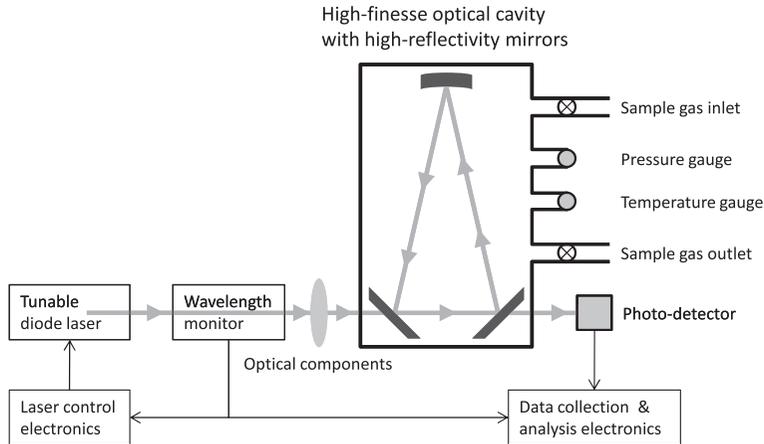
$$R_{18\text{O}} = [\text{H}_2^{18}\text{O}] / [\text{H}_2^{16}\text{O}]$$

$$R_D = [\text{HD}^{16}\text{O}] / [\text{H}_2^{16}\text{O}]$$

キャビティリングダウン分光法 (CRDS) では、測定対象となる気体を導入した光学キャビティ内においてレーザー光の減衰が測定される。この方式では、小容積の光学キャビティ内に3枚の反射鏡を配することでレーザー光を繰り返し反射さ

* 筑波大学陸域環境研究センター

** 筑波大学大学院生命環境科学研究科

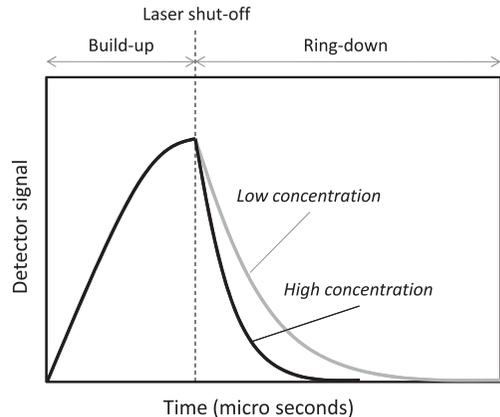


第1図 キャビティリングダウン分光法 (CRDS) システムの概要図

せ、光路長を拡大する (第1図)。キャビティ内へのレーザー光の照射を停止した際、反射鏡間を循環する透過光の強度は気体分子による吸収・散乱によって徐々に減衰してゆくが、このとき気体濃度が高いほど減衰も速くなる (第2図)。したがって、減衰の時定数を測定することで気体濃度を算出することが可能となる。光路長を長くするほど吸収・散乱の僅かな違いを拡大できるため、測定感度は向上する (Crosson, 2009)。本研究で使用した Picarro 社製 CRDS システムの光路長は実に 20 km 以上に及ぶ。

また、TDLAS を含む一般的な吸収分光法は入射光強度と透過光強度の比から吸光度を求めるが、CRDS は透過光強度のみを測定し、その減衰速度を評価するため、光源の劣化やノイズによる入射光強度の変動の影響を受けにくく、かつ広範な減衰速度をカバーできることからダイナミックレンジを広く取れるという利点がある (Berden *et al.*, 2000)。

本研究で使用した同位体分析計は、上述の CRDS 方式をベースとした WS-CRDS 方式が採用されている。この方式では、キャビティ内の温度と圧力を高い精度で一定に維持する改良が施されており、また照射するレーザー光の波長を常時モ



第2図 光学キャビティー内の透過光の変化を表す模式図

ニターして微調整することにより出力値のドリフトが抑制される。このため、より安定した高精度での測定が可能とされている。

2. システムと分析手順

本研究で使用した同位体分析計は、WS-CRDS システムを搭載した測定部と Windows PC を内蔵した制御部のほか、ディスプレイ、オートサンプラー、ペーパライザー (試料蒸発装置)、真空ポンプなどで構成されている。オートサンプラーには 2 ml のセプタム付きガラスバイアルを最大

で 108 本セットすることができ、容量 5 μl または 10 μl のマイクロシリンジによって 1.8 μl の液体水がセプトム付きのペーパーライザーに注入される。この際、試料注入に先立ってマイクロシリンジの共洗いが数回行われる。ペーパーライザーの内部温度は 140 $^{\circ}\text{C}$ に維持され、気化した水蒸気は温度 80 $^{\circ}\text{C}$ に設定された光学キャビティに導入される。このとき、ペーパーライザー内に残された水蒸気は真空ポンプで排除される。キャビティ内の水蒸気濃度が安定すると減衰の時定数の測定が 3 分程度のあいだ繰り返して行われ、その後キャビティ内部は 0.02 MPa 程度の窒素ガスフローでパージされる。こうした試料注入からパージ完了までのプロセスは 1 サイクルあたり約 9 分であるが、1 試料あたり 5 回の反復測定をメーカーでは推奨しているため、これに従えば 1 試料の分析に約 45 分を要することになる。ただし、酸素と水素の安定同位体比は同時に測定される。測定試料数や試料注入量、1 試料あたりの反復測定回数、および共洗い回数などは、オートサンプラーのキーパッドを用いて変更可能である。

測定結果は標準試料 (V-SMOW) からの千分率偏差である δ 値として出力され、csv 形式のファイルに記録される。質量分析計とは異なり、初期のキャリブレーション設定値の有効性が持続するため、ワーキングスタンダード試料の測定は必須ではない (ただし、メーカーでは測定値の信

頼性を確認するため 1 回/日以上でのワーキングスタンダードの測定を推奨している)。

III 研究方法

先行研究での指摘やメーカー・ユーザーからの情報により、以下の諸点に関する検討が必要と考えられた。

- ① 安定化のための所要時間
- ② 繰り返し測定時の精度
- ③ 時間補正の必要性
- ④ セプトム付きバイアルキャップの再利用影響
- ⑤ メモリー効果と必要反復測定回数
- ⑥ 絶対精度
- ⑦ 長期安定性

そこで本研究では、第 1 表に示す 8 通りの試験 Run を実施した。Run 1 ~ 3 は全て測定試料として筑波大学陸域環境研究センターの水道水を精製した超純水 (TPW) を用いたが、安定化のための所要時間を把握するため起動から測定開始までの時間が異なる。Run 4 も同様に TPW のみを用いたが、繰り返し測定時の精度と時間補正の必要性を確認するために 50 本の連続測定を行った。ただし、途中でマイクロシリンジが折れ曲がってしまったため、本稿では前半の 30 本の測定結果のみを示す。Run 5 と Run 6 はセプトム付きバイアルキャップを再利用した場合の測定値へ

第 1 表 試験 Run の概要

| No. | Date | Sample measured | Total number of samples | Stabilization time |
|-------|--------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| Run 1 | 2010.4.1 | TPW | 5 | 1 hr |
| Run 2 | 2010.4.2 | TPW | 5 | 3.5 hr |
| Run 3 | 2010.4.3 | TPW | 5 | 48 hr |
| Run 4 | 2010.4.9-10 | TPW | 50 | > 3 hr |
| Run 5 | 2010.4.5-6 | TPW | 20 | > 3 hr |
| Run 6 | 2010.4.6-7 | TPW | 20 | > 3 hr |
| Run 7 | 2010.4.8 | TPW, FSW | 12 | > 3 hr |
| Run 8 | 2010.4.13-14 | TPW, V-SMOW2, SLAP2, GISP | 27 | > 3 hr |

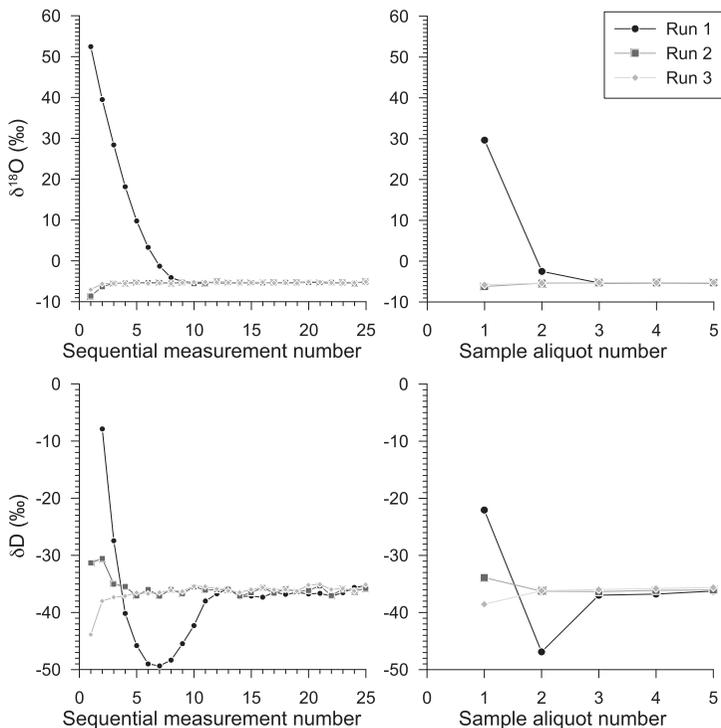
TPW: Tsukuba Pure Water, FSW: Fuji Snow melt Water, V-SMOW2: Vienna Standard Mean Ocean Water 2 distributed by IAEA (International Atomic Energy Agency), SLAP: Standard Light Antarctic Precipitation 2 distributed by IAEA, GISP: Greenland Ice Sheet Precipitation water distributed by IAEA

IV 結果と考察

の影響を調べるためのもので、Run 5 で用いたセブタム付きキャップおよびバイアルに封入されたサンプルをそのまま翌日に再測定したのが Run 6 である。Run 7 はサンプルごとに同位体組成が異なる場合のメモリー効果を確認するためのもので、TPW と富士山頂の融雪水 (FSW) を交互に測定した。Run 8 では、TPW とともに国際原子力機関 (IAEA) が頒布している国際標準試料 (VSMOW2, SLAP2) および参照試料 (GISP) の測定を行い、絶対精度の検討を行った。以上の試験 Run を経たのち各ユーザーによる本格的な研究目的の運転に移行したが、その際に出力の長期安定性を確認するため TPW の測定 (原則として各 Run の 2 番目・3 番目および最後に配置) を継続して行った。本稿では機器導入後 1 年間 (のべ 72 Run) のモニタリング結果を示す。

1. 安定化のための所要時間

第 3 図に、Run 1～3 における測定結果を示す。いずれの Run においても最初の数回の測定値はばらつきが大きく、1 本目のサンプルについては 5 回の測定の平均値であっても無視できない誤差が生じた。また、起動後 1 時間で測定を開始した Run 1 では、2 本目のサンプルの測定時にも出力値が安定していない。これらを除いた他のサンプルについては、5 回の測定値のばらつきは小さく、その標準偏差は $\delta^{18}\text{O}$ で 0.06～0.14‰、 δD で 0.3～0.7‰であった。したがって、起動後 50 分程度でキャビティ温度が 80 度に達すれば測定そのものは可能となるが、出力が安定するまでには少なくとも 2～3 時間かかり、かつ 1 本目のサンプルの測定結果は採用しない方がよいと言える。



第 3 図 Run 1～3 における酸素 (上段) および水素 (下段) の安定同位体比測定結果
左列は個々の測定値、右列はサンプルごとの 5 回平均値。

2. 繰り返し測定時の精度と時間補正の必要性

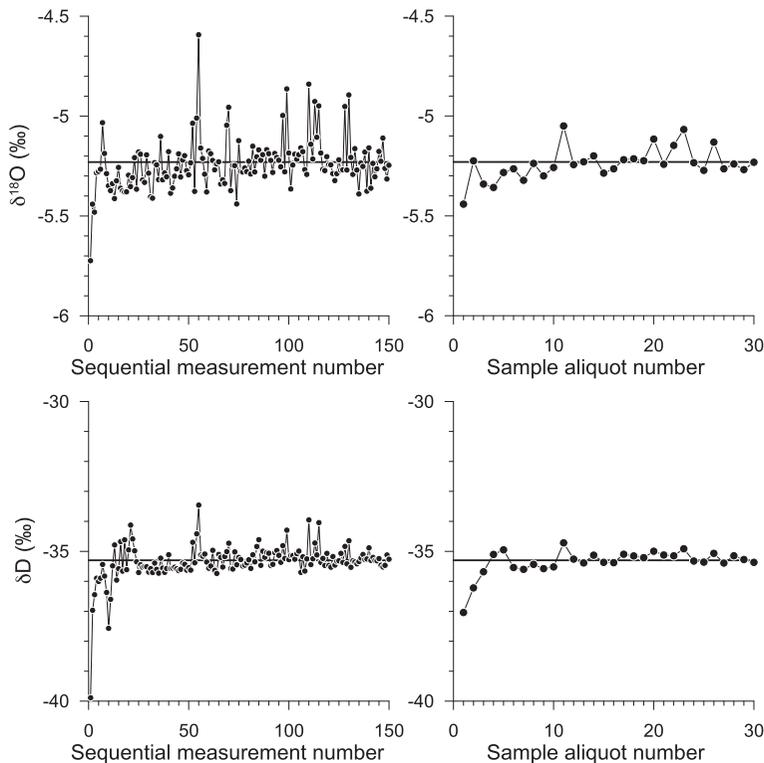
第4図に、Run 4における30サンプル（ただし全てTPW）の連続測定結果を示す。前述のように、最初のサンプルの測定値は明らかに過小評価されているが、それ以外の測定値については概ね一定の値を示している。各サンプルの測定値（5回平均値）の全体平均は $\delta^{18}\text{O}$ で -5.23‰ 、 δD で -35.3‰ であった。また、標準偏差（=繰り返し精度 repeatability）は $\delta^{18}\text{O}$ で 0.07‰ 、 δD で 0.3‰ であった。

しかしながら、個々の測定にはスパイク状の異常値が見られることがあり、そのような場合は5回の平均値であっても無視できない誤差となる。このような傾向は水素よりも酸素においてより顕

著である。したがって、5回の測定値の標準偏差が規定値を超えるような場合は、外れ値を除外して平均を求め直すか、あるいは再測定を行うなどの対処が必要である。

第4図では、個々の測定値あるいはサンプルごとの平均値のいずれにおいても、時間経過にとまう一方的な上昇/低下トレンドは認められない。質量分析計ではスタンダード試料気体の同位体組成が時間とともに変化するため、測定開始後の時間を加味して測定値を補正する必要があるが、WS-CRDSの場合には（少なくとも24時間程度の期間では）時間による補正は不要であると判断できる。

なお、前述のように、Run 4では50本の連続



第4図 Run 4における酸素（上段）および水素（下段）の安定同位体比測定結果
左列は個々の測定値、右列はサンプルごとの5回平均値。太実線はRun全体の平均値（ $\delta^{18}\text{O} = -5.23\text{‰}$ 、 $\delta\text{D} = -35.3\text{‰}$ ）を示す。

測定を行ったが、途中でマイクロシリンジが折れ曲がり、その後正常な測定値が得られなくなった。メーカーからの情報によれば、およそ1500回 (= 300 サンプル) がマイクロシリンジの耐用回数の目安となるが、使用状況や水質（濃度が高く溶質が析出しやすい場合は摩擦が大きくなる）によってはより早く利用不可になる場合もある。Run 4は積算測定回数が1000回 (= 200 サンプル) 程度の時であったが、その後の経過から判断すると、測定終了後の清掃が不十分であった可能性が高い。1回のRunにおける測定サンプル数が多くなると途中でシリンジがつまりやすくなる点には注意が必要であろう。

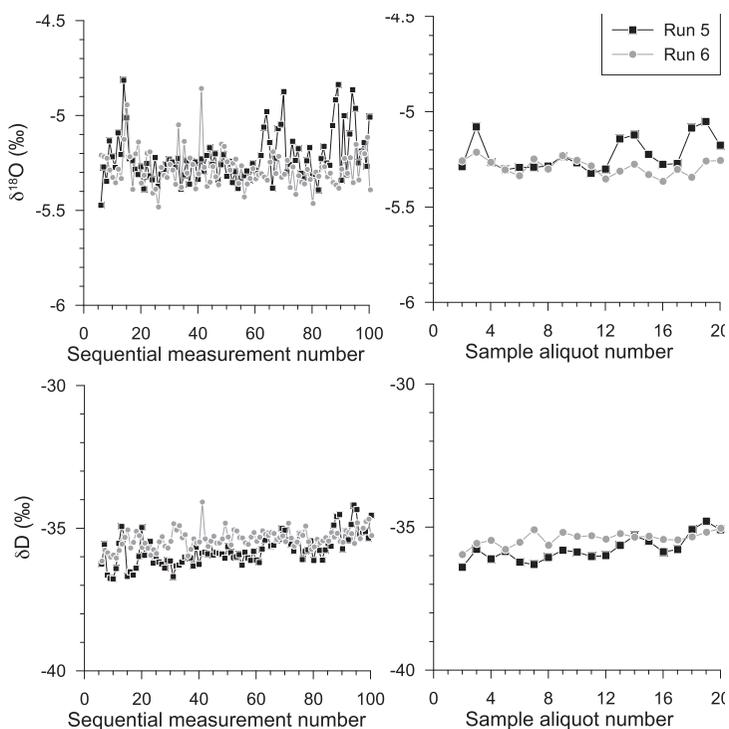
3. セプタム付きバイアルキャップの再利用影響

Run 5 と Run 6 の測定結果の比較を第5図に示

す。両者の測定値の差は概ね $\delta^{18}\text{O}$ で0.1%以内、 δD で1%以内である。したがって、セプタム付きバイアルキャップを再利用したり、測定終了後のサンプルをバイアルに封入したまま保管して再測定に供したりすることも可能であると言える。しかしながら、セプタム付きバイアルキャップの単価は45円とさほど高くないため、原則としては再利用せず、再測定に備えて短期間保管した場合にのみ用いるのが安全であると思われる。

4. メモリー効果と必要反復測定回数

Run 7における測定結果を第6図に示す。酸素の場合は各5回の測定の中で一方的なドリフトは見られず、先に測定したサンプルのメモリー効果は無視できる。一方、水素の場合、相対的に δ 値の高いTPWのあとにFSWを測定した場合は初



第5図 Run 5・6における酸素（上段）および水素（下段）の安定同位体比測定結果
左列は個々の測定値、右列はサンプルごとの5回平均値。

期の測定値が過大評価され、逆の場合は過小評価されており、メモリー効果が認められる。しかしながら、メモリー効果が特に顕著であるのは5回の測定のうち最初の1回であり、残りの4回の変化は1%程度以内でランダム誤差と同程度である。

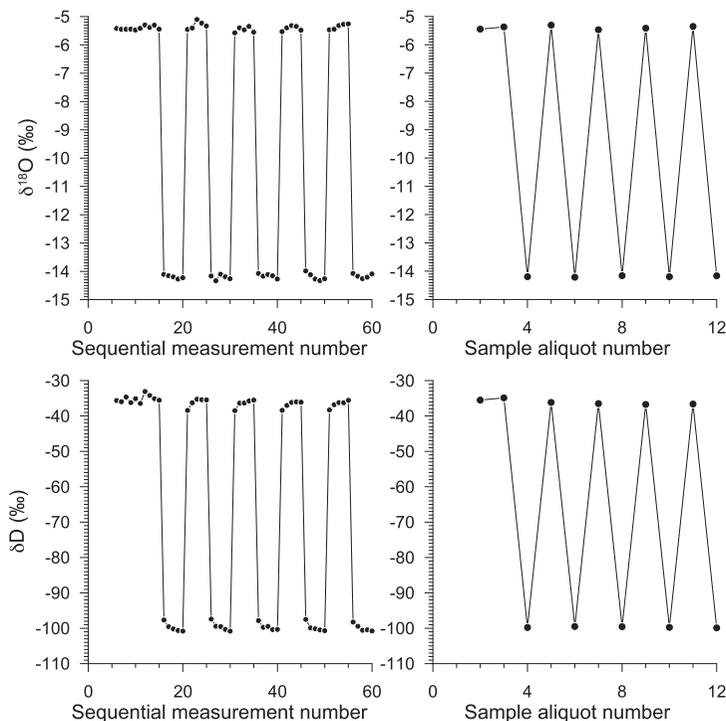
メモリー効果を極力排除したい場合には後半の測定値のみを用いるのも一案であるが、ランダムな誤差を軽減するにはある程度の数の測定値を平均化する必要がある。かといって、反復測定回数の増加は測定に要する時間を増大させ、一定時間内に処理できるサンプル数を減少させてしまう。したがって、1サンプルあたり5回の反復測定を行い、最初の1回を除いて平均化処理を行うのが最も妥当であると考えられる。ただし、隣接したサンプルの同位体組成が著しく異なる場合にはメモリー効果が無視できないこともある点には注意

を要する。

5. 絶対精度

Run 8 における国際標準試料の測定結果を第2表に示す。残念なことにこのRunでは、ペーパライザーのセプタムの劣化と共洗い後の試料を吸収させる排水ポート内のグラスウールの不足により、測定値のばらつきが他のRunと比較して極端に大きいことが後から判明した。このため、厳密な比較は意味をなさないが、概ね良好な測定結果が得られていることは確認できる。

なお、ペーパライザーのセプタムの耐用回数はマイクロシリンジと同様におよそ1500回（=300サンプル）とされているが、使用状況によってはより少なくなるケースもある。排水ポート内のグラスウールが不足していたり偏っていたりし



第6図 Run 7における酸素（上段）および水素（下段）の安定同位体比測定結果
左列は個々の測定値、右列はサンプルごとの5回平均値。

第2表 Run 8 における測定結果 (5 サンプルの平均) と IAEA による参照値

| | VSMOW2 | | SLAP2 | | GISP | |
|-----------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | δD (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | δD (‰) | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | δD (‰) |
| Reference value | 0 | 0 | -55.50 | -427.5 | -24.76 | -189.5 |
| This study | -0.02 | -0.82 | -54.47 | -432.6 | -24.45 | -192.1 |

た場合は、シリンジ先端外側にサンプルが残留するためか、パーパラライザーのセプタムの劣化が影響しやすいようである。

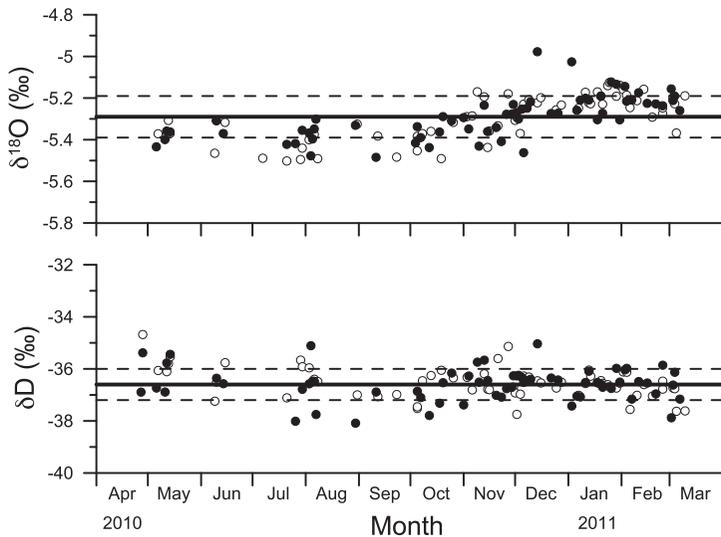
6. 長期安定性

第7図に長期モニタリング結果を示す。ここで、各サンプルの値は5回の測定値の最初を除いた4回分の平均値とし、標準偏差が $\delta^{18}\text{O}$ で0.1‰、 δD で1‰を超えた場合は除外した。酸素・水素ともに、各サンプルの測定値は概ね一定しているが、若干の長期的ドリフトが認められる。しかし、その原因は現在のところ不明である。

各 Run で3番目に配置された TPW (2番目お

よび最後に配置された TPW よりも測定値の信頼性が高いと期待される) の全体平均は $\delta^{18}\text{O}$ で-5.29‰、 δD で-36.6‰であり、標準偏差 (=再現精度 reproducibility) は $\delta^{18}\text{O}$ で0.10‰、 δD で0.6‰であった (第3表)。前述のように、Run 4 における全体平均±標準偏差は $\delta^{18}\text{O}$ で-5.23 ± 0.07‰、 δD で-35.3 ± 0.3‰であった。両者を比較すると、 δD は繰り返し測定における誤差よりも長期的なドリフトによる誤差が2倍大きく、逆に $\delta^{18}\text{O}$ は繰り返し精度と再現精度の差が小さいことが分かる。

各 Run の3番目に配置された TPW をワーキングスタンダードとして取り扱い、原点を固定し



第7図 長期モニタリングにおける $\delta^{18}\text{O}$ (上段) および δD (下段) の経日変動

黒丸は各 Run で3番目に配置された TPW、白丸は最後に配置された TPW の測定値を示す。また、太実線は期間全体の平均値 ($\delta^{18}\text{O} = -5.29\text{‰}$, $\delta\text{D} = -36.6\text{‰}$)、破線は平均値±標準偏差 ($\delta^{18}\text{O} = 0.10\text{‰}$, $\delta\text{D} = 0.6\text{‰}$) を示す。

第3表 長期モニタリングにおける TPW 測定値の平均と標準偏差
 TPW は各 Run の 3 番目と最後に配置されたサンプルをそれぞれ個別に集計し、最後のサンプルについては補正後の数値も併せて示す。

| TPW | $\delta^{18}\text{O}$ (‰) | | δD (‰) | |
|---------------------------|---------------------------|------|----------------------|------|
| | mean | s.d. | mean | s.d. |
| 3rd sample | -5.29 | 0.10 | -36.6 | 0.6 |
| Last sample (uncorrected) | -5.29 | 0.10 | -36.5 | 0.6 |
| Last sample (corrected) | -5.30 | 0.07 | -36.5 | 0.9 |

た一点補正を行うことで出力値のドリフトを軽減することは可能かもしれない。しかしながら、このような手法で最後に配置された TPW の測定値を補正したところ、未補正の値と比較して $\delta^{18}\text{O}$ の再現精度は若干向上したものの、 δD のそれはやや悪化した（第3表）。また、全体平均はほとんど変化しなかった。以上の結果から、補正の効果は限定的であり、逆に新たな誤差をもたらすリスクもあると言える。

いずれにしても、本測定機器による再現精度は一般的な同位体比質量分析計の再現精度（ $\delta^{18}\text{O}$ で 0.1‰、 δD で 1‰）と比較して全く遜色ない。しかしながら、95% 確率の測定誤差（ $= \pm 2\sigma$; σ は標準偏差）は $\delta^{18}\text{O}$ で $\pm 0.2\%$ 、 δD で $\pm 1.2\%$ 程度となり、研究対象によっては S/N 比（シグナル／ノイズ比）が小さく有意な議論が困難となる可能性もある。したがって、長期ドリフトの原因究明を含め、精度向上に向けたさらなる研究が必要であろう。

V まとめ

筑波大学陸域環境研究センターに導入された WS-CRDS 方式の液体水同位体分析計の測定精度を初期の試験運転ならびに 1 年間の長期モニタリングによって検討した。その結果と機器使用上の留意点は、以下のように纏められる。

(1) 多数ユーザーによるのべ 72 Run における再現精度は $\delta^{18}\text{O}$ で 0.10‰、 δD で 0.6‰であった。一方、同じ Run における同一サンプル

の繰り返し測定精度は $\delta^{18}\text{O}$ で 0.07‰、 δD で 0.3‰であった。

- (2) 起動後数時間は出力が安定せず、また起動後の時間の長さに関わらず最初のサンプルの測定値は信頼性が低い。したがって、少なくとも起動後 2～3 時間の安定化時間が必要であり、かつ 1 本目にはダミーサンプルを配置するなどしてその測定結果は採用しない方がよい
- (3) メーカーが推奨するように 1 サンプルあたり 5 回の測定が必要であり、メモリー効果を排除するため最初の測定値を除く 4 回分の平均値を各サンプルの測定値とするのが良い。また、4 回分の測定値の標準偏差が規定値（例えば、 $\delta^{18}\text{O}$ で 0.1‰、 δD で 1‰）を超える場合には外れ値を除外するか、再測定を行う必要がある。
- (4) 同一 Run 内での測定値のドリフトはほぼ無視できるレベルであり、時間補正の必要はない。しかし、最大本数（108 本）を一度に分析する場合は 3 日以上かかるため、必ずしも時間補正が不要とは限らず、また分析途中でマイクロシリッジやペーパーライザーのセプタムに支障が出るリスクも高くなる。
- (5) セプタム付きバイアルキャップは再利用しても顕著な精度悪化は認められない。このため、分析後のサンプルをバイアルに封入した状態で短期間保管し、そのまま再分析に供することは可能である。しかしながら、保管期間の限界については未検討であるた

め、原則としてはバイアルキャップの再利用は推奨されない。

- (6) 時期によって測定値がやや過大あるいは過小に評価されるなど、若干の長期的ドリフトが認められる。その原因は不明であり、ワーキングスタンダードによる補正も十分とは言い難い。この点について、さらに調査を進める必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、三洋貿易株式会社の横井正治氏には使用機器の操作方法や特性について様々なご教示をいただいた。また、筑波大学陸域環境研究センターの佐橋由起子氏には分析補助やデータ整理等でご協力いただき、脇山義史博士からは本研究ノートの草稿に関して貴重なコメントを頂戴した。本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業（CREST）「荒廃人工林の管理により流量増加と河川環境の改善を図る革新的な技術の開発」(代表：恩田裕一)、ならびに文部科学省特別教育研究経費「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」[中部山岳地域の環境変動の解明から環境資源の再生をめざす大学間連携事業]から研究経費の補助を受けて行われた。ここに記し、御礼申し上げる。

参考文献

芳村 圭 (2009): 気象・気候と水の安定同位体比との関わり。「気象学における水安定同位体比の利用」(芳村 圭・一柳錦平・杉本敦子編, 気象研究ノート, **220**), 日本気象学会, 61-76.

Berden, G., Peeters, R. and Meijer, G. (2000): Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications. *International Reviews in Physical Chemistry*, **19**, 565-607.

Crosson, E. R. (2009): A cavity ring-down analyzer for measuring atmospheric levels of methane, carbon dioxide, and water vapor. *Applied Physics B*, **92**, 403-408.

Gupta, P., Noone, D., Galewsky, J., Sweeney, C. and Vaughn, B. H. (2009): Demonstration of high-precision continuous measurements of water vapor isotopologues in laboratory and remote field deployments using wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy (WS-CRDS) technology. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **23**, 2534-2542.

Kerstel, E. R. Th, van Trigt, R., Dam, N., Reuss, J. and Meijer, H. A. J. (1999): Simultaneous determination of the $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$, and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope abundance ratios in water by means of laser spectrometry. *Analytical Chemistry*, **71**, 5297-5303.

Lee, X., Sargent, S., Smith, R. and Tanner, B. (2005): In-situ measurement of the water vapour $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratio for atmospheric and ecological applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **22**, 555-565.

Lee, X., Smith, R. and Williams, J. (2006): Water vapour $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratio in surface air in New England, USA. *Tellus*, **58B**, 293-304.

Lee, X., Kim, K. and Smith, R. (2007): Temporal variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ signal of the whole-canopy transpiration in a temperate forest. *Global Biogeochemical Cycles*, **21**, GB3103, DOI:10.1029/2006GB002871.

Webster, C. R. and Heymsfield, A. J. (2003): Water isotope ratios D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ in and out of clouds map dehydration pathways. *Science*, **302**, 1742-1745.

(2011年9月5日受付, 2011年10月11日受理)

リップル変形に関する二次元造波水路実験データ

Dataset of a Wave-Flume Experiments of the Ripple Deformation

関口 智寛*

Tomohiro SEKIGUCHI*

Introduction

Wave-formed ripples abundantly develop in shallow-water environment, where sandy sediments are moved by wave-induced oscillatory flow. Development of ripples increases bed roughness, and affects bottom-boundary-layer hydraulics and sediment transport in coastal environments. Ripples acquire equilibrium form under steady oscillatory-flow conditions. The numerous laboratory studies have examined relationship among ripple geometry, and oscillatory-flow and bottom sediment conditions in order to predict bed roughness (e.g., Nielsen, 1979).

In the natural coastal environments, however, the near-bottom oscillatory-flow conditions, i.e., wave conditions, continuously change, and thus size and shape of ripples are continually modified responding to the changes in the hydraulic conditions (e.g., Traykovski *et al.*, 1999). Some experimental studies have examined the ripple deformation processes responding to changes in hydraulic conditions in detail (Shulyak, 1963; Lofquist, 1978; Hansen *et al.*, 2001a,b; Sekiguchi, 2003, 2009; Bundgaard *et al.*, 2004; Davis *et al.*, 2004; Sekiguchi and Sunamura, 2004, 2005; Smith

and Sleath, 2005; Testik *et al.*, 2005; Doucette and O'Donoghue, 2006). Sekiguchi (2003, 2009) and Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005) showed that some characteristic ripple patterns ephemerally occur during deformation into new equilibrium state depending on (1) ratio of orbital diameter' d_0' to preexisting ripples spacing' λ_i , (2) degree of asymmetry in oscillatory flow, and (3) sediment grain size. Recently, a brief review by Sekiguchi (2011) conceptually suggested a phasediagram of characteristic ripple due to ripple deformation using λ_e/λ_i in place of d_0/λ_i , where λ_e denotes spacing of equilibrium ripples under given hydraulic conditions.

The purpose of this report is to summarize the total dataset of the ripple-deformation experiments by Sekiguchi (2003, 2009) and Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005), and analyze the dataset based on Sekiguchi's (2011) concept.

Laboratory experiment

The wave-flume experiments by Sekiguchi (2003, 2009) and Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005) examined deformation processes of artificially made preexisting 2D ripples under

* 筑波大学陸域環境研究センター

wave-induced oscillatory flow. A wave flume used in the experiments was 14 m long, 25 cm wide, and 50 cm deep. A piston-type wave generator was fitted at one end of the flume, and a fixed slope of 1/20 was installed at the other end to decrease the energy of the reflected waves. A movable bed 3 m long, 25 cm wide, and 3 cm high and composed of mono-sized sand was placed in the horizontal portion of the flume. Well-sorted

quartz sands of three different grain sizes were prepared as bed materials: the median diameters of the grains, D , were 0.10, 0.20, and 0.38 mm (Table 1). The density of sediments, ρ_s , was 2.65 g/cm³. Almost mono-sized 2D ripples were formed manually on the bed and served as the initial boundary condition of the experiment; they were called the original ripples. The original ripple spacing, λ_i , and height, η_i , were in the range of 2.1

Table 1 The total experimental dataset of Sekiguchi (2003, 2009) and Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005).

| Run No. | Grain diameter | Original ripple length | Original ripple height | Ripple index | Water depth | Wave period | Wave length | Wave height | Orbital diameter | Mobility number | Relative water depth | Final ripple length | | | Remarks |
|----------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|---------|
| | D , mm | λ_i , cm | η_i , cm | λ_i/η_i | h , cm | T , sec | L , cm | H , cm | d_o , cm | ψ | kh | λ_e , cm | d_0/λ_i | λ_e/λ_i | |
| 0.10-001 | 0.1 | 3.2 | 0.5 | 6.3 | 25 | 0.9 | 112 | 5.1 | 3.1 | 7.2 | 1.40 | 3.1 | 1.0 | 1.0 | SSC |
| 0.10-002 | 0.1 | 6.2 | 1.0 | 6.3 | 25 | 0.9 | 112 | 3.0 | 3.5 | 9.0 | 1.40 | 3.5 | 0.6 | 0.6 | DSC |
| 0.10-003 | 0.1 | 3.3 | 0.5 | 6.1 | 25 | 1.3 | 183 | 5.6 | 9.3 | 31.3 | 0.86 | 9.7 | 2.8 | 3.0 | 3D |
| 0.10-004 | 0.1 | 2.1 | 0.4 | 5.5 | 25 | 1.3 | 183 | 7.5 | 9.6 | 33.4 | 0.86 | 10.1 | 4.6 | 4.8 | 3D |
| 0.10-005 | 0.1 | 5.0 | 0.8 | 6.2 | 25 | 1.3 | 183 | 5.3 | 9.7 | 34.2 | 0.86 | 10.2 | 1.9 | 2.0 | NSD |
| 0.10-006 | 0.1 | 2.6 | 0.5 | 5.4 | 25 | 1.5 | 217 | 5.3 | 10.7 | 31.2 | 0.72 | 11.2 | 4.1 | 4.3 | RR |
| 0.10-007 | 0.1 | 3.2 | 0.6 | 5.8 | 25 | 1.5 | 217 | 5.8 | 13.2 | 47.3 | 0.72 | 13.9 | 4.1 | 4.3 | RR |
| 0.10-008 | 0.1 | 5.4 | 0.8 | 6.4 | 25 | 1.5 | 217 | 4.5 | 14.0 | 52.9 | 0.72 | 14.7 | 2.6 | 2.7 | 3D |
| 0.10-009 | 0.1 | 3.2 | 0.5 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 5.9 | 7.8 | 9.2 | 0.52 | 7.9 | 2.4 | 2.5 | 3D |
| 0.10-010 | 0.1 | 2.6 | 0.4 | 6.7 | 25 | 2.0 | 300 | 4.4 | 12.4 | 23.5 | 0.52 | 12.9 | 4.8 | 5.0 | 3D |
| 0.10-011 | 0.1 | 5.0 | 0.8 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 6.6 | 12.5 | 23.8 | 0.52 | 13.0 | 2.5 | 2.6 | 3D |
| 0.10-012 | 0.1 | 2.9 | 0.4 | 6.7 | 25 | 2.0 | 300 | 5.8 | 12.6 | 24.2 | 0.52 | 13.1 | 4.3 | 4.5 | RR |
| 0.10-013 | 0.1 | 3.4 | 0.5 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 4.3 | 17.1 | 44.9 | 0.52 | 18.1 | 5.0 | 5.3 | RR |
| 0.10-014 | 0.1 | 5.0 | 0.9 | 5.5 | 25 | 2.0 | 300 | 5.0 | 21.7 | 71.9 | 0.52 | 23.0 | 4.3 | 4.6 | 3D |
| 0.10-015 | 0.1 | 3.3 | 0.5 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 5.0 | 22.1 | 74.4 | 0.52 | 23.4 | 6.7 | 7.1 | RR |
| 0.10-016 | 0.1 | 5.1 | 0.8 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 4.5 | 22.5 | 77.5 | 0.52 | 23.9 | 4.4 | 4.7 | 3D |
| 0.10-017 | 0.1 | 2.8 | 0.4 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 5.9 | 23.3 | 82.6 | 0.52 | 24.7 | 8.3 | 8.8 | RR |
| 0.10-018 | 0.1 | 6.7 | 1.2 | 5.7 | 25 | 2.5 | 381 | 4.3 | 8.1 | 6.5 | 0.41 | 8.2 | 1.2 | 1.2 | SSC |
| 0.10-019 | 0.1 | 3.1 | 0.5 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 7.7 | 13.1 | 11.6 | 0.34 | 13.4 | 4.2 | 4.3 | 3D |
| 0.10-020 | 0.1 | 3.4 | 0.5 | 6.2 | 25 | 3.0 | 461 | 7.9 | 18.1 | 22.3 | 0.34 | 18.9 | 5.3 | 5.5 | RR |
| 0.10-021 | 0.1 | 2.7 | 0.4 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 8.3 | 19.1 | 24.8 | 0.34 | 19.9 | 7.1 | 7.4 | RR |
| 0.10-022 | 0.1 | 5.2 | 0.8 | 6.5 | 25 | 3.0 | 461 | 9.2 | 21.9 | 32.4 | 0.34 | 22.9 | 4.2 | 4.4 | RR |
| 0.10-023 | 0.1 | 3.3 | 0.5 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 7.1 | 22.3 | 33.7 | 0.34 | 23.4 | 6.8 | 7.1 | RR |
| 0.10-024 | 0.1 | 2.6 | 0.4 | 6.4 | 25 | 3.0 | 461 | 11.1 | 23.3 | 36.8 | 0.34 | 24.5 | 9.0 | 9.4 | 3D |
| 0.10-025 | 0.1 | 10.0 | 1.5 | 6.5 | 25 | 3.5 | 540 | 3.4 | 14.8 | 10.8 | 0.29 | 15.1 | 1.5 | 1.5 | DSC |
| 0.10-026 | 0.1 | 3.2 | 0.5 | 6.3 | 25 | 4.0 | 620 | 5.9 | 13.3 | 6.7 | 0.25 | 13.4 | 4.1 | 4.2 | 3D |
| 0.10-027 | 0.1 | 2.6 | 0.4 | 6.1 | 25 | 4.0 | 620 | 9.1 | 17.2 | 11.2 | 0.25 | 17.6 | 6.6 | 6.8 | 3D |
| 0.10-028 | 0.1 | 3.2 | 0.5 | 6.3 | 25 | 4.0 | 620 | 7.9 | 17.4 | 11.5 | 0.25 | 17.8 | 5.4 | 5.6 | RR |
| 0.10-029 | 0.1 | 5.5 | 0.9 | 6.3 | 25 | 4.0 | 620 | 11.1 | 17.6 | 11.8 | 0.25 | 18.0 | 3.2 | 3.3 | RR |
| 0.10-030 | 0.1 | 2.5 | 0.4 | 6.8 | 25 | 4.0 | 620 | 8.3 | 23.4 | 20.9 | 0.25 | 24.3 | 9.4 | 9.7 | 3D |
| 0.10-031 | 0.1 | 3.4 | 0.4 | 8.5 | 25 | 4.0 | 620 | 8.3 | 23.4 | 20.9 | 0.25 | 24.3 | 6.9 | 7.2 | RR |
| 0.10-032 | 0.1 | 5.3 | 0.9 | 6.2 | 25 | 4.0 | 620 | 9.1 | 23.6 | 21.3 | 0.25 | 24.5 | 4.5 | 4.6 | RR |
| 0.10-033 | 0.1 | 3.7 | 0.4 | 8.4 | 25 | 4.0 | 620 | 7.7 | 27.9 | 29.7 | 0.25 | 29.2 | 7.5 | 7.9 | RR |
| 0.20-001 | 0.2 | 3.3 | 0.6 | 5.5 | 25 | 0.8 | 93 | 5.6 | 2.1 | 2.2 | 1.69 | 2.1 | 0.7 | 0.6 | DSC |
| 0.20-002 | 0.2 | 6.9 | 1.0 | 6.8 | 25 | 0.8 | 93 | 6.3 | 2.4 | 2.8 | 1.69 | 2.4 | 0.4 | 0.3 | DSC |
| 0.20-003 | 0.2 | 2.7 | 0.5 | 5.4 | 25 | 0.9 | 112 | 6.7 | 3.5 | 4.6 | 1.40 | 3.5 | 1.3 | 1.3 | NSD |

| Run No. | Grain diameter | Original ripple length | Original ripple height | Ripple index | Water depth | Wave period | Wave length | Wave height | Orbital diameter | Mobility number | Relative water depth | Final ripple length | | | | Remarks |
|----------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-----|-----|-----|---------|
| | D , mm | λ_i , cm | η_i , cm | λ_i/η_i | h , cm | T , sec | L , cm | H , cm | d_o , cm | ψ | kh | λ_e , cm | | | | |
| 0.20-004 | 0.2 | 7.0 | 1.0 | 6.7 | 25 | 0.9 | 112 | 6.9 | 3.6 | 4.9 | 1.40 | 3.6 | 0.5 | 0.5 | DSC | |
| 0.20-005 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 25 | 1.0 | 130 | 2.7 | 1.7 | 0.9 | 1.21 | 1.6 | 0.5 | 0.4 | DSC | |
| 0.20-006 | 0.2 | 3.4 | 0.6 | 6.1 | 25 | 1.0 | 130 | 4.5 | 3.0 | 2.7 | 1.21 | 2.9 | 0.9 | 0.8 | SSC | |
| 0.20-007 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 4.5 | 3.0 | 2.7 | 1.21 | 2.9 | 0.8 | 0.8 | BP | |
| 0.20-008 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 25 | 1.0 | 130 | 4.5 | 3.0 | 2.7 | 1.21 | 2.9 | 0.8 | 0.8 | SSC | |
| 0.20-009 | 0.2 | 3.5 | 0.5 | 6.7 | 25 | 1.0 | 130 | 4.7 | 3.1 | 2.9 | 1.21 | 3.0 | 0.9 | 0.9 | BP | |
| 0.20-010 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 4.7 | 3.1 | 2.9 | 1.21 | 3.0 | 0.9 | 0.8 | BP | |
| 0.20-011 | 0.2 | 3.4 | 0.5 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 4.9 | 3.2 | 3.2 | 1.21 | 3.2 | 0.9 | 0.9 | BP | |
| 0.20-012 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 5.8 | 25 | 1.0 | 130 | 5.5 | 3.6 | 4.0 | 1.21 | 3.6 | 1.0 | 1.0 | BP | |
| 0.20-013 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 1.0 | 130 | 5.5 | 3.6 | 4.0 | 1.21 | 3.6 | 1.0 | 1.0 | SSC | |
| 0.20-014 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 5.5 | 3.6 | 4.0 | 1.21 | 3.6 | 1.0 | 1.0 | BP | |
| 0.20-015 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 5.5 | 3.6 | 4.0 | 1.21 | 3.6 | 1.0 | 1.0 | BP | |
| 0.20-016 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.1 | 25 | 1.0 | 130 | 7.6 | 5.0 | 7.5 | 1.21 | 5.0 | 1.4 | 1.4 | NSD | |
| 0.20-017 | 0.2 | 3.7 | 0.6 | 6.5 | 25 | 1.0 | 130 | 7.8 | 5.1 | 8.0 | 1.21 | 5.2 | 1.4 | 1.4 | NSD | |
| 0.20-018 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 8.1 | 5.3 | 8.6 | 1.21 | 5.4 | 1.5 | 1.5 | NSD | |
| 0.20-019 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 8.1 | 5.3 | 8.6 | 1.21 | 5.4 | 1.5 | 1.5 | NSD | |
| 0.20-020 | 0.2 | 5.0 | 0.8 | 6.2 | 25 | 1.0 | 130 | 4.5 | 3.0 | 2.7 | 1.21 | 2.9 | 0.6 | 0.6 | DSC | |
| 0.20-021 | 0.2 | 4.8 | 0.6 | 8.5 | 25 | 1.0 | 130 | 8.8 | 5.8 | 10.1 | 1.21 | 5.9 | 1.2 | 1.2 | NSD | |
| 0.20-022 | 0.2 | 4.7 | 0.6 | 8.4 | 25 | 1.0 | 130 | 11.9 | 7.8 | 18.7 | 1.21 | 8.1 | 1.6 | 1.7 | NSD | |
| 0.20-023 | 0.2 | 7.0 | 1.2 | 5.7 | 25 | 1.0 | 130 | 5.8 | 3.8 | 4.4 | 1.21 | 3.8 | 0.5 | 0.5 | DSC | |
| 0.20-024 | 0.2 | 7.6 | 1.2 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 6.7 | 4.4 | 5.9 | 1.21 | 4.4 | 0.6 | 0.6 | DSC | |
| 0.20-025 | 0.2 | 7.4 | 1.1 | 6.6 | 25 | 1.0 | 130 | 6.9 | 4.5 | 6.2 | 1.21 | 4.5 | 0.6 | 0.6 | DSC | |
| 0.20-026 | 0.2 | 7.5 | 1.2 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 6.9 | 4.5 | 6.2 | 1.21 | 4.5 | 0.6 | 0.6 | DSC | |
| 0.20-027 | 0.2 | 6.7 | 1.2 | 5.9 | 25 | 1.0 | 130 | 8.4 | 5.5 | 9.3 | 1.21 | 5.6 | 0.8 | 0.8 | DSC | |
| 0.20-028 | 0.2 | 8.5 | 1.3 | 6.5 | 25 | 1.0 | 130 | 5.0 | 3.3 | 3.2 | 1.21 | 3.2 | 0.4 | 0.4 | DSC | |
| 0.20-029 | 0.2 | 8.4 | 1.3 | 6.4 | 25 | 1.0 | 130 | 5.0 | 3.3 | 3.3 | 1.21 | 3.2 | 0.4 | 0.4 | DSC | |
| 0.20-030 | 0.2 | 8.4 | 1.5 | 5.5 | 25 | 1.0 | 130 | 6.8 | 4.5 | 6.1 | 1.21 | 4.5 | 0.5 | 0.5 | DSC | |
| 0.20-031 | 0.2 | 8.4 | 1.4 | 5.9 | 25 | 1.0 | 130 | 8.1 | 5.3 | 8.7 | 1.21 | 5.4 | 0.6 | 0.6 | DSC | |
| 0.20-032 | 0.2 | 8.4 | 1.3 | 6.5 | 25 | 1.0 | 130 | 12.2 | 8.0 | 19.5 | 1.21 | 8.3 | 1.0 | 1.0 | SSC | |
| 0.20-033 | 0.2 | 8.7 | 1.4 | 6.2 | 25 | 1.0 | 130 | 12.2 | 8.0 | 19.5 | 1.21 | 8.3 | 0.9 | 1.0 | SSC | |
| 0.20-034 | 0.2 | 8.8 | 1.4 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 12.2 | 8.0 | 19.5 | 1.21 | 8.3 | 0.9 | 0.9 | SSC | |
| 0.20-035 | 0.2 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 1.0 | 130 | 6.3 | 4.1 | 5.2 | 1.21 | 4.1 | 0.3 | 0.3 | DSC | |
| 0.20-036 | 0.2 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 1.0 | 130 | 7.9 | 5.2 | 8.2 | 1.21 | 5.3 | 0.3 | 0.4 | DSC | |
| 0.20-037 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 1.2 | 166 | 10.9 | 9.9 | 20.8 | 0.95 | 10.3 | 2.8 | 2.9 | 3D | |
| 0.20-038 | 0.2 | 4.1 | 0.6 | 6.8 | 25 | 1.2 | 166 | 4.7 | 4.2 | 3.8 | 0.95 | 4.2 | 1.0 | 1.0 | NSD | |
| 0.20-039 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 1.3 | 183 | 8.7 | 9.0 | 14.6 | 0.86 | 9.3 | 2.6 | 2.7 | 3D | |
| 0.20-040 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 1.3 | 183 | 10.0 | 10.3 | 19.1 | 0.86 | 10.7 | 2.9 | 3.0 | 3D | |
| 0.20-041 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 1.3 | 183 | 10.8 | 11.1 | 22.3 | 0.86 | 11.6 | 3.2 | 3.3 | 3D | |
| 0.20-042 | 0.2 | 6.5 | 1.2 | 5.5 | 25 | 1.3 | 183 | 10.6 | 10.9 | 21.5 | 0.86 | 11.3 | 1.7 | 1.7 | NSD | |
| 0.20-043 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 1.5 | 217 | 4.4 | 5.5 | 4.1 | 0.72 | 5.5 | 1.6 | 1.6 | 3D | |
| 0.20-044 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.5 | 25 | 1.5 | 217 | 5.6 | 7.0 | 6.7 | 0.72 | 7.1 | 1.9 | 2.0 | 3D | |
| 0.20-045 | 0.2 | 3.3 | 0.5 | 6.2 | 25 | 1.5 | 217 | 5.8 | 7.4 | 7.3 | 0.72 | 7.5 | 2.2 | 2.3 | 3D | |
| 0.20-046 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 25 | 1.5 | 217 | 6.6 | 8.4 | 9.5 | 0.72 | 8.5 | 2.3 | 2.4 | 3D | |
| 0.20-047 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.3 | 25 | 1.5 | 217 | 7.6 | 9.6 | 12.5 | 0.72 | 9.8 | 2.7 | 2.8 | 3D | |
| 0.20-048 | 0.2 | 3.4 | 0.5 | 6.4 | 25 | 1.5 | 217 | 9.0 | 11.4 | 17.7 | 0.72 | 11.8 | 3.4 | 3.5 | RR | |
| 0.20-049 | 0.2 | 3.4 | 0.6 | 6.0 | 25 | 1.5 | 217 | 9.4 | 11.9 | 19.1 | 0.72 | 12.3 | 3.5 | 3.6 | RR | |
| 0.20-050 | 0.2 | 3.8 | 0.6 | 6.5 | 25 | 1.5 | 217 | 10.4 | 13.2 | 23.6 | 0.72 | 13.7 | 3.5 | 3.6 | RR | |
| 0.20-051 | 0.2 | 3.8 | 0.6 | 6.1 | 25 | 1.5 | 217 | 11.8 | 15.0 | 30.4 | 0.72 | 15.7 | 3.9 | 4.1 | RR | |
| 0.20-052 | 0.2 | 6.0 | 1.3 | 4.7 | 25 | 1.5 | 217 | 4.8 | 6.1 | 5.0 | 0.72 | 6.1 | 1.0 | 1.0 | SSC | |
| 0.20-053 | 0.2 | 6.0 | 0.9 | 6.4 | 25 | 1.5 | 217 | 8.3 | 10.5 | 14.9 | 0.72 | 10.8 | 1.7 | 1.8 | NSD | |
| 0.20-054 | 0.2 | 5.8 | 1.0 | 6.0 | 25 | 1.5 | 217 | 10.5 | 13.3 | 23.9 | 0.72 | 13.8 | 2.3 | 2.4 | 3D | |
| 0.20-055 | 0.2 | 7.2 | 1.1 | 6.8 | 25 | 1.5 | 217 | 5.4 | 6.8 | 6.3 | 0.72 | 6.8 | 0.9 | 1.0 | SSC | |
| 0.20-056 | 0.2 | 7.2 | 1.1 | 6.4 | 25 | 1.5 | 217 | 7.5 | 9.5 | 12.3 | 0.72 | 9.8 | 1.3 | 1.4 | SSC | |

| Run No. | Grain diameter | Original ripple length | Original ripple height | Ripple index | Water depth | Wave period | Wave length | Wave height | Orbital diameter | Mobility number | Relative water depth | Final ripple length | d_0/λ_i | λ_c/λ_i | Remarks |
|----------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|---------|
| | D , mm | λ_i , cm | η_i , cm | λ_i/η_i | h , cm | T , sec | L , cm | H , cm | d_0 , cm | ψ | kh | λ_c , cm | | | |
| 0.20-057 | 0.2 | 8.2 | 1.4 | 5.7 | 25 | 1.5 | 217 | 3.9 | 4.9 | 3.2 | 0.72 | 4.8 | 0.6 | 0.6 | DSC |
| 0.20-058 | 0.2 | 7.8 | 1.1 | 7.0 | 25 | 1.5 | 217 | 4.0 | 5.1 | 3.5 | 0.72 | 5.0 | 0.7 | 0.6 | RC |
| 0.20-059 | 0.2 | 8.2 | 1.5 | 5.5 | 25 | 1.5 | 217 | 5.6 | 7.1 | 6.9 | 0.72 | 7.2 | 0.9 | 0.9 | SSC |
| 0.20-060 | 0.2 | 8.2 | 1.3 | 6.1 | 25 | 1.5 | 217 | 6.9 | 8.7 | 10.3 | 0.72 | 8.9 | 1.1 | 1.1 | SSC |
| 0.20-061 | 0.2 | 8.2 | 1.3 | 6.3 | 25 | 1.5 | 217 | 7.2 | 9.1 | 11.3 | 0.72 | 9.4 | 1.1 | 1.1 | SSC |
| 0.20-062 | 0.2 | 8.2 | 1.4 | 6.1 | 25 | 1.5 | 217 | 8.4 | 10.7 | 15.4 | 0.72 | 11.0 | 1.3 | 1.3 | SSC |
| 0.20-063 | 0.2 | 8.0 | 1.4 | 5.7 | 25 | 1.5 | 217 | 10.7 | 13.5 | 24.8 | 0.72 | 14.1 | 1.7 | 1.8 | NSD |
| 0.20-064 | 0.2 | 8.3 | 1.5 | 5.7 | 25 | 1.5 | 217 | 11.2 | 14.2 | 27.2 | 0.72 | 14.8 | 1.7 | 1.8 | NSD |
| 0.20-065 | 0.2 | 9.8 | 1.5 | 6.8 | 25 | 1.5 | 217 | 5.3 | 6.7 | 6.0 | 0.72 | 6.7 | 0.7 | 0.7 | DSC |
| 0.20-066 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 25 | 1.5 | 217 | 7.5 | 9.5 | 12.3 | 0.72 | 9.8 | 1.0 | 1.0 | SSC |
| 0.20-067 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 25 | 1.5 | 217 | 10.5 | 13.3 | 24.1 | 0.72 | 13.9 | 1.3 | 1.4 | SSC |
| 0.20-068 | 0.2 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 1.5 | 217 | 4.0 | 5.1 | 3.5 | 0.72 | 5.0 | 0.3 | 0.3 | DSC |
| 0.20-069 | 0.2 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 1.5 | 217 | 8.1 | 10.2 | 14.2 | 0.72 | 10.5 | 0.7 | 0.7 | DSC |
| 0.20-070 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 3.4 | 6.2 | 2.9 | 0.52 | 6.1 | 1.8 | 1.7 | 3D |
| 0.20-071 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 3.7 | 6.7 | 3.4 | 0.52 | 6.6 | 1.8 | 1.8 | NSD |
| 0.20-072 | 0.2 | 3.9 | 0.6 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 3.7 | 6.7 | 3.4 | 0.52 | 6.6 | 1.7 | 1.7 | 3D |
| 0.20-073 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 4.1 | 7.5 | 4.3 | 0.52 | 7.4 | 2.1 | 2.1 | 3D |
| 0.20-074 | 0.2 | 3.9 | 0.6 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 5.5 | 9.9 | 7.5 | 0.52 | 10.1 | 2.5 | 2.6 | 3D |
| 0.20-075 | 0.2 | 3.4 | 0.6 | 6.1 | 25 | 2.0 | 300 | 5.6 | 10.2 | 8.0 | 0.52 | 10.4 | 3.0 | 3.0 | 3D |
| 0.20-076 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 6.6 | 12.0 | 11.1 | 0.52 | 12.3 | 3.4 | 3.5 | RR |
| 0.20-077 | 0.2 | 4.2 | 0.7 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 7.1 | 13.0 | 12.8 | 0.52 | 13.3 | 3.1 | 3.2 | 3D |
| 0.20-078 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 7.6 | 13.8 | 14.5 | 0.52 | 14.2 | 3.9 | 4.0 | RR |
| 0.20-079 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 8.4 | 15.2 | 17.7 | 0.52 | 15.8 | 4.3 | 4.4 | RR |
| 0.20-080 | 0.2 | 3.8 | 0.6 | 6.1 | 25 | 2.0 | 300 | 8.4 | 15.3 | 17.9 | 0.52 | 15.9 | 4.0 | 4.2 | RR |
| 0.20-081 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 9.4 | 17.1 | 22.4 | 0.52 | 17.8 | 4.8 | 5.0 | RR |
| 0.20-082 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 9.4 | 17.1 | 22.4 | 0.52 | 17.8 | 4.8 | 4.9 | RR |
| 0.20-083 | 0.2 | 3.8 | 0.6 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 11.1 | 20.2 | 31.0 | 0.52 | 21.1 | 5.3 | 5.5 | RR |
| 0.20-084 | 0.2 | 5.0 | 0.8 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 3.7 | 6.7 | 3.4 | 0.52 | 6.6 | 1.3 | 1.3 | NSD |
| 0.20-085 | 0.2 | 6.0 | 0.9 | 6.9 | 25 | 2.0 | 300 | 4.3 | 7.8 | 4.6 | 0.52 | 7.7 | 1.3 | 1.3 | RC |
| 0.20-086 | 0.2 | 5.6 | 0.9 | 5.9 | 25 | 2.0 | 300 | 5.1 | 9.3 | 6.6 | 0.52 | 9.4 | 1.7 | 1.7 | NSD |
| 0.20-087 | 0.2 | 6.0 | 0.9 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 6.3 | 11.5 | 10.1 | 0.52 | 11.7 | 1.9 | 2.0 | NSD |
| 0.20-088 | 0.2 | 6.2 | 1.0 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 11.4 | 20.7 | 32.7 | 0.52 | 21.7 | 3.3 | 3.5 | 3D |
| 0.20-089 | 0.2 | 6.1 | 1.0 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 11.9 | 21.7 | 36.0 | 0.52 | 22.8 | 3.6 | 3.7 | RR |
| 0.20-090 | 0.2 | 7.2 | 1.2 | 5.9 | 25 | 2.0 | 300 | 4.4 | 8.0 | 4.9 | 0.52 | 8.0 | 1.1 | 1.1 | RC |
| 0.20-091 | 0.2 | 6.6 | 1.0 | 6.7 | 25 | 2.0 | 300 | 4.8 | 8.8 | 5.9 | 0.52 | 8.8 | 1.3 | 1.3 | RC |
| 0.20-092 | 0.2 | 6.9 | 1.8 | 3.8 | 25 | 2.0 | 300 | 5.6 | 10.2 | 8.0 | 0.52 | 10.4 | 1.5 | 1.5 | RC |
| 0.20-093 | 0.2 | 7.1 | 1.1 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 5.7 | 10.4 | 8.3 | 0.52 | 10.6 | 1.5 | 1.5 | RC |
| 0.20-094 | 0.2 | 6.9 | 1.2 | 6.0 | 25 | 2.0 | 300 | 7.0 | 12.8 | 12.4 | 0.52 | 13.1 | 1.9 | 1.9 | NSD |
| 0.20-095 | 0.2 | 7.3 | 1.2 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 11.9 | 21.7 | 36.0 | 0.52 | 22.8 | 3.0 | 3.1 | 3D |
| 0.20-096 | 0.2 | 8.2 | 1.3 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 3.4 | 6.2 | 2.9 | 0.52 | 6.1 | 0.8 | 0.7 | RC |
| 0.20-097 | 0.2 | 8.3 | 1.3 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 4.4 | 8.0 | 4.9 | 0.52 | 8.0 | 1.0 | 1.0 | RC |
| 0.20-098 | 0.2 | 8.5 | 1.3 | 6.7 | 25 | 2.0 | 300 | 5.3 | 9.7 | 7.1 | 0.52 | 9.8 | 1.1 | 1.1 | RC |
| 0.20-099 | 0.2 | 8.4 | 1.5 | 5.8 | 25 | 2.0 | 300 | 5.8 | 10.5 | 8.4 | 0.52 | 10.7 | 1.2 | 1.3 | RC |
| 0.20-100 | 0.2 | 8.5 | 1.3 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 6.7 | 12.2 | 11.4 | 0.52 | 12.5 | 1.4 | 1.5 | RC |
| 0.20-101 | 0.2 | 7.9 | 1.3 | 6.1 | 25 | 2.0 | 300 | 6.9 | 12.5 | 11.9 | 0.52 | 12.8 | 1.6 | 1.6 | NSD |
| 0.20-102 | 0.2 | 8.2 | 1.3 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 8.0 | 14.6 | 16.3 | 0.52 | 15.1 | 1.8 | 1.8 | NSD |
| 0.20-103 | 0.2 | 10.0 | 1.2 | 8.4 | 25 | 2.0 | 300 | 4.6 | 8.3 | 5.3 | 0.52 | 8.3 | 0.8 | 0.8 | RC |
| 0.20-104 | 0.2 | 9.9 | 1.5 | 6.7 | 25 | 2.0 | 300 | 6.5 | 11.9 | 10.7 | 0.52 | 12.1 | 1.2 | 1.2 | RC |
| 0.20-105 | 0.2 | 10.2 | 1.7 | 6.1 | 25 | 2.0 | 300 | 8.7 | 15.8 | 19.0 | 0.52 | 16.4 | 1.5 | 1.6 | RC |
| 0.20-106 | 0.2 | 15.0 | 2.1 | 7.1 | 25 | 2.0 | 300 | 4.2 | 7.7 | 4.5 | 0.52 | 7.6 | 0.5 | 0.5 | RC |
| 0.20-107 | 0.2 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 6.4 | 11.7 | 10.4 | 0.52 | 11.9 | 0.8 | 0.8 | RC |
| 0.20-108 | 0.2 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 6.5 | 11.9 | 10.7 | 0.52 | 12.1 | 0.8 | 0.8 | RC |
| 0.20-109 | 0.2 | 15.0 | 2.2 | 6.9 | 25 | 2.0 | 300 | 9.0 | 16.3 | 20.3 | 0.52 | 17.0 | 1.1 | 1.1 | RC |

| Run No. | Grain diameter | Original ripple length | Original ripple height | Ripple index | Water depth | Wave period | Wave length | Wave height | Orbital diameter | Mobility number | Relative water depth | Final ripple length | | | | Remarks |
|----------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-----|-----|-----|---------|
| | D , mm | λ_i , cm | η_i , cm | λ_i/η_i | h , cm | T , sec | L , cm | H , cm | d_0 , cm | ψ | kh | λ_e , cm | | | | |
| 0.20-110 | 0.2 | 5.2 | 0.8 | 6.5 | 25 | 2.5 | 381 | 9.8 | 23.1 | 26.0 | 0.41 | 24.1 | 4.4 | 4.6 | RR | |
| 0.20-111 | 0.2 | 5.2 | 0.8 | 6.5 | 25 | 2.5 | 381 | 9.8 | 23.1 | 26.0 | 0.41 | 24.1 | 4.4 | 4.6 | RR | |
| 0.20-112 | 0.2 | 8.2 | 0.6 | 14.5 | 25 | 2.5 | 381 | 9.8 | 23.1 | 26.0 | 0.41 | 24.1 | 2.8 | 2.9 | NSD | |
| 0.20-113 | 0.2 | 3.7 | 0.6 | 6.4 | 25 | 3.0 | 461 | 3.2 | 9.1 | 2.8 | 0.34 | 8.9 | 2.4 | 2.4 | 3D | |
| 0.20-114 | 0.2 | 3.3 | 0.6 | 5.5 | 25 | 3.0 | 461 | 4.9 | 14.0 | 6.6 | 0.34 | 14.1 | 4.2 | 4.3 | RR | |
| 0.20-115 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 3.0 | 461 | 6.9 | 19.7 | 13.2 | 0.34 | 20.3 | 5.6 | 5.8 | RR | |
| 0.20-116 | 0.2 | 3.5 | 0.6 | 6.2 | 25 | 3.0 | 461 | 8.3 | 23.7 | 19.1 | 0.34 | 24.6 | 6.8 | 7.0 | RR | |
| 0.20-117 | 0.2 | 6.2 | 1.0 | 6.5 | 25 | 3.0 | 461 | 6.6 | 19.0 | 12.2 | 0.34 | 19.5 | 3.1 | 3.1 | 3D | |
| 0.20-118 | 0.2 | 5.8 | 1.0 | 5.9 | 25 | 3.0 | 461 | 7.0 | 20.0 | 13.6 | 0.34 | 20.6 | 3.4 | 3.5 | 3D | |
| 0.20-119 | 0.2 | 6.2 | 1.1 | 5.9 | 25 | 3.0 | 461 | 8.5 | 24.5 | 20.3 | 0.34 | 25.4 | 3.9 | 4.1 | 3D | |
| 0.20-120 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.0 | 25 | 3.0 | 461 | 11.1 | 31.9 | 34.6 | 0.34 | 33.5 | 5.3 | 5.6 | 3D | |
| 0.20-121 | 0.2 | 6.6 | 1.2 | 5.8 | 25 | 3.0 | 461 | 6.9 | 19.7 | 13.2 | 0.34 | 20.3 | 3.0 | 3.1 | 3D | |
| 0.20-122 | 0.2 | 7.8 | 1.2 | 6.4 | 25 | 3.0 | 461 | 3.0 | 8.6 | 2.5 | 0.34 | 8.4 | 1.1 | 1.1 | RC | |
| 0.20-123 | 0.2 | 8.0 | 1.3 | 6.2 | 25 | 3.0 | 461 | 4.5 | 12.9 | 5.7 | 0.34 | 13.0 | 1.6 | 1.6 | RC | |
| 0.20-124 | 0.2 | 8.0 | 1.4 | 5.6 | 25 | 3.0 | 461 | 7.5 | 21.4 | 15.6 | 0.34 | 22.1 | 2.7 | 2.8 | 3D | |
| 0.20-125 | 0.2 | 7.8 | 1.2 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 8.4 | 24.0 | 19.6 | 0.34 | 24.9 | 3.1 | 3.2 | 3D | |
| 0.20-126 | 0.2 | 9.8 | 1.5 | 6.6 | 25 | 3.0 | 461 | 3.2 | 9.2 | 2.9 | 0.34 | 9.0 | 0.9 | 0.9 | RC | |
| 0.20-127 | 0.2 | 10.2 | 1.3 | 7.6 | 25 | 3.0 | 461 | 4.7 | 13.5 | 6.2 | 0.34 | 13.6 | 1.3 | 1.3 | RC | |
| 0.20-128 | 0.2 | 12.2 | 1.7 | 7.4 | 25 | 3.0 | 461 | 4.9 | 14.1 | 6.7 | 0.34 | 14.2 | 1.2 | 1.2 | RC | |
| 0.20-129 | 0.2 | 9.8 | 1.5 | 6.8 | 25 | 3.0 | 461 | 6.8 | 19.6 | 13.0 | 0.34 | 20.1 | 2.0 | 2.1 | RC | |
| 0.20-130 | 0.2 | 9.8 | 1.5 | 6.8 | 25 | 3.0 | 461 | 8.7 | 24.9 | 21.0 | 0.34 | 25.9 | 2.5 | 2.6 | RC | |
| 0.20-131 | 0.2 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 3.0 | 461 | 8.1 | 23.3 | 18.4 | 0.34 | 24.1 | 1.6 | 1.6 | RC | |
| 0.20-132 | 0.2 | 15.0 | 2.4 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 6.5 | 18.7 | 11.9 | 0.34 | 19.2 | 1.2 | 1.3 | RC | |
| 0.20-133 | 0.2 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 3.0 | 461 | 4.7 | 13.4 | 6.1 | 0.34 | 13.5 | 0.9 | 0.9 | RC | |
| 0.20-134 | 0.2 | 6.2 | 1.0 | 6.3 | 25 | 4.0 | 620 | 7.4 | 28.9 | 15.9 | 0.25 | 29.8 | 4.7 | 4.8 | RR | |
| 0.20-135 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 1.0 | 137 | 5.3 | 2.9 | 2.5 | 1.37 | 2.8 | 0.5 | 0.5 | DSC | |
| 0.20-136 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 1.0 | 137 | 8.6 | 4.7 | 6.6 | 1.37 | 4.7 | 0.8 | 0.8 | SSC | |
| 0.20-137 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 1.5 | 234 | 5.9 | 6.5 | 5.8 | 0.81 | 6.6 | 1.1 | 1.1 | SSC | |
| 0.20-138 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 1.5 | 234 | 8.6 | 9.6 | 12.5 | 0.81 | 9.9 | 1.6 | 1.6 | NSD | |
| 0.20-139 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 2.0 | 326 | 4.2 | 6.9 | 3.6 | 0.58 | 6.8 | 1.1 | 1.1 | RC | |
| 0.20-140 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 2.0 | 326 | 6.5 | 10.6 | 8.6 | 0.58 | 10.8 | 1.8 | 1.8 | NSD | |
| 0.20-141 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 2.0 | 326 | 9.3 | 15.2 | 17.6 | 0.58 | 15.7 | 2.5 | 2.6 | 3D | |
| 0.20-142 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 3.0 | 503 | 5.3 | 13.8 | 6.5 | 0.37 | 13.9 | 2.3 | 2.3 | NSD | |
| 0.20-143 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 3.0 | 503 | 7.0 | 18.2 | 11.3 | 0.37 | 18.7 | 3.0 | 3.1 | 3D | |
| 0.20-144 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 1.0 | 137 | 5.3 | 2.8 | 2.5 | 1.37 | 2.8 | 0.3 | 0.3 | DSC | |
| 0.20-145 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 1.0 | 137 | 8.4 | 4.5 | 6.3 | 1.37 | 4.6 | 0.5 | 0.5 | DSC | |
| 0.20-146 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 1.5 | 234 | 5.5 | 6.1 | 5.1 | 0.81 | 6.2 | 0.6 | 0.6 | DSC | |
| 0.20-147 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 1.5 | 234 | 8.2 | 9.2 | 11.4 | 0.81 | 9.4 | 0.9 | 0.9 | SSC | |
| 0.20-148 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 2.0 | 326 | 4.1 | 6.6 | 3.3 | 0.58 | 6.5 | 0.7 | 0.7 | RC | |
| 0.20-149 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 2.0 | 326 | 6.7 | 10.9 | 9.0 | 0.58 | 11.1 | 1.1 | 1.1 | RC | |
| 0.20-150 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 2.0 | 326 | 9.1 | 14.9 | 16.9 | 0.58 | 15.4 | 1.5 | 1.5 | RC | |
| 0.20-151 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 3.0 | 503 | 5.0 | 13.0 | 5.8 | 0.37 | 13.1 | 1.3 | 1.3 | SSC | |
| 0.20-152 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 30 | 3.0 | 503 | 6.9 | 18.0 | 11.0 | 0.37 | 18.4 | 1.8 | 1.8 | RC | |
| 0.20-153 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 1.0 | 109 | 5.3 | 5.4 | 8.8 | 0.86 | 5.5 | 0.9 | 0.9 | SSC | |
| 0.20-154 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 1.5 | 174 | 4.0 | 7.0 | 6.7 | 0.54 | 7.1 | 1.2 | 1.2 | RC | |
| 0.20-155 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 1.5 | 174 | 6.2 | 10.8 | 15.8 | 0.54 | 11.1 | 1.8 | 1.9 | NSD | |
| 0.20-156 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 2.0 | 236 | 3.6 | 8.7 | 5.7 | 0.40 | 8.7 | 1.4 | 1.5 | NSD | |
| 0.20-157 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 2.0 | 236 | 5.7 | 13.8 | 14.5 | 0.40 | 14.2 | 2.3 | 2.4 | 3D | |
| 0.20-158 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 3.0 | 360 | 3.3 | 12.3 | 5.1 | 0.26 | 12.3 | 2.0 | 2.0 | RC | |
| 0.20-159 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 3.0 | 360 | 4.0 | 15.1 | 7.7 | 0.26 | 15.3 | 2.5 | 2.6 | NSD | |
| 0.20-160 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 3.0 | 360 | 5.7 | 21.5 | 15.7 | 0.26 | 22.2 | 3.6 | 3.7 | 3D | |
| 0.20-161 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 15 | 1.0 | 109 | 5.0 | 5.1 | 8.0 | 0.86 | 5.2 | 0.5 | 0.5 | DSC | |
| 0.20-162 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 15 | 1.5 | 174 | 4.2 | 7.4 | 7.4 | 0.54 | 7.5 | 0.7 | 0.7 | RC | |

| Run No. | Grain diameter | Original ripple length | Original ripple height | Ripple index | Water depth | Wave period | Wave length | Wave height | Orbital diameter | Mobility number | Relative water depth | Final ripple length | | | Remarks |
|----------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|---------|
| | D , mm | λ_i , cm | η_i , cm | λ_i/η_i | h , cm | T , sec | L , cm | H , cm | d_0 , cm | ψ | kh | λ_e , cm | d_0/λ_i | λ_e/λ_i | |
| 0.20-163 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 15 | 1.5 | 174 | 6.3 | 11.1 | 16.6 | 0.54 | 11.4 | 1.1 | 1.1 | RC |
| 0.20-164 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 15 | 2.0 | 236 | 3.5 | 8.5 | 5.6 | 0.40 | 8.6 | 0.9 | 0.9 | RC |
| 0.20-165 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 15 | 2.0 | 236 | 5.8 | 14.0 | 15.1 | 0.40 | 14.5 | 1.4 | 1.4 | RC |
| 0.20-166 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 15 | 3.0 | 360 | 3.8 | 14.3 | 7.0 | 0.26 | 14.5 | 1.4 | 1.4 | RC |
| 0.20-167 | 0.2 | 10.0 | 1.5 | 6.9 | 15 | 3.0 | 360 | 6.0 | 22.6 | 17.4 | 0.26 | 23.4 | 2.3 | 2.3 | RC |
| 0.20-168 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 7 | 1.0 | 79 | 2.8 | 4.7 | 6.7 | 0.56 | 4.7 | 1.3 | 1.3 | NSD |
| 0.20-169 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 7 | 1.5 | 122 | 1.7 | 4.6 | 2.9 | 0.36 | 4.5 | 1.3 | 1.3 | RC |
| 0.20-170 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 7 | 1.5 | 122 | 2.7 | 7.2 | 7.0 | 0.36 | 7.2 | 2.0 | 2.0 | RC |
| 0.20-171 | 0.2 | 3.6 | 0.6 | 6.4 | 7 | 2.0 | 164 | 2.5 | 9.0 | 6.2 | 0.27 | 9.1 | 2.5 | 2.5 | RC |
| 0.20-172 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 7 | 1.0 | 79 | 3.0 | 5.1 | 8.0 | 0.56 | 5.2 | 0.9 | 0.9 | SSC |
| 0.20-173 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 7 | 1.5 | 122 | 1.6 | 4.3 | 2.5 | 0.36 | 4.2 | 0.7 | 0.7 | RC |
| 0.20-174 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 7 | 2.0 | 164 | 2.6 | 9.4 | 6.7 | 0.27 | 9.5 | 1.6 | 1.6 | RC |
| 0.20-175 | 0.2 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 7 | 3.0 | 247 | 2.1 | 11.5 | 4.5 | 0.18 | 11.4 | 1.9 | 1.9 | RC |
| 0.38-001 | 0.38 | 4.4 | 0.7 | 6.2 | 25 | 1.0 | 130 | 6.6 | 4.3 | 3.0 | 1.21 | 4.3 | 1.0 | 1.0 | SSC |
| 0.38-002 | 0.38 | 4.1 | 0.6 | 6.5 | 25 | 1.0 | 130 | 7.5 | 4.9 | 3.9 | 1.21 | 4.9 | 1.2 | 1.2 | BP |
| 0.38-003 | 0.38 | 4.1 | 0.7 | 6.2 | 25 | 1.0 | 130 | 8.7 | 5.7 | 5.3 | 1.21 | 5.7 | 1.4 | 1.4 | NSD |
| 0.38-004 | 0.38 | 6.5 | 1.0 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 6.6 | 4.3 | 3.0 | 1.21 | 4.2 | 0.7 | 0.7 | NSD |
| 0.38-005 | 0.38 | 6.6 | 0.8 | 8.4 | 25 | 1.0 | 130 | 8.1 | 5.3 | 4.6 | 1.21 | 5.3 | 0.8 | 0.8 | DSC |
| 0.38-006 | 0.38 | 6.5 | 1.0 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 8.6 | 5.7 | 5.1 | 1.21 | 5.7 | 0.9 | 0.9 | DSC |
| 0.38-007 | 0.38 | 5.9 | 0.9 | 6.4 | 25 | 1.0 | 130 | 8.2 | 5.4 | 4.7 | 1.21 | 5.4 | 0.9 | 0.9 | BP |
| 0.38-008 | 0.38 | 7.3 | 1.1 | 6.6 | 25 | 1.0 | 130 | 8.4 | 5.5 | 4.8 | 1.21 | 5.5 | 0.8 | 0.8 | DSC |
| 0.38-009 | 0.38 | 8.5 | 1.4 | 6.2 | 25 | 1.0 | 130 | 6.6 | 4.3 | 3.0 | 1.21 | 4.2 | 0.5 | 0.5 | BP |
| 0.38-010 | 0.38 | 9.1 | 1.5 | 6.2 | 25 | 1.0 | 130 | 8.1 | 5.3 | 4.6 | 1.21 | 5.3 | 0.6 | 0.6 | DSC |
| 0.38-011 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.1 | 25 | 1.0 | 130 | 8.5 | 5.6 | 5.0 | 1.21 | 5.6 | 0.6 | 0.6 | DSC |
| 0.38-012 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.3 | 25 | 1.0 | 130 | 6.8 | 4.5 | 3.2 | 1.21 | 4.4 | 0.4 | 0.4 | DSC |
| 0.38-013 | 0.38 | 12.7 | 1.5 | 8.5 | 25 | 1.0 | 130 | 8.7 | 5.7 | 5.3 | 1.21 | 5.7 | 0.5 | 0.5 | DSC |
| 0.38-014 | 0.38 | 15.0 | 2.3 | 6.6 | 25 | 1.0 | 130 | 8.4 | 5.5 | 4.9 | 1.21 | 5.5 | 0.4 | 0.4 | DSC |
| 0.38-015 | 0.38 | 6.1 | 1.0 | 6.2 | 25 | 1.2 | 166 | 9.1 | 8.3 | 7.7 | 0.95 | 8.4 | 1.4 | 1.4 | NSD |
| 0.38-016 | 0.38 | 6.8 | 1.1 | 6.3 | 25 | 1.2 | 166 | 9.4 | 8.6 | 8.2 | 0.95 | 8.7 | 1.3 | 1.3 | NSD |
| 0.38-017 | 0.38 | 8.2 | 1.3 | 6.5 | 25 | 1.2 | 166 | 9.4 | 8.6 | 8.2 | 0.95 | 8.7 | 1.0 | 1.1 | SSC |
| 0.38-018 | 0.38 | 11.4 | 1.7 | 6.5 | 25 | 1.2 | 166 | 9.3 | 8.4 | 8.0 | 0.95 | 8.6 | 0.7 | 0.8 | DSC |
| 0.38-019 | 0.38 | 4.3 | 0.7 | 6.3 | 25 | 1.3 | 183 | 10.2 | 10.5 | 10.5 | 0.86 | 10.7 | 2.4 | 2.5 | 3D |
| 0.38-020 | 0.38 | 4.0 | 0.6 | 6.4 | 25 | 1.5 | 217 | 5.2 | 6.5 | 3.0 | 0.72 | 6.4 | 1.6 | 1.6 | NSD |
| 0.38-021 | 0.38 | 4.0 | 0.6 | 6.6 | 25 | 1.5 | 217 | 8.4 | 10.6 | 8.0 | 0.72 | 10.8 | 2.6 | 2.7 | 3D |
| 0.38-022 | 0.38 | 4.1 | 0.7 | 5.9 | 25 | 1.5 | 217 | 9.4 | 11.9 | 10.2 | 0.72 | 12.2 | 2.9 | 3.0 | 3D |
| 0.38-023 | 0.38 | 4.4 | 0.7 | 6.5 | 25 | 1.5 | 217 | 10.9 | 13.8 | 13.7 | 0.72 | 14.2 | 3.1 | 3.2 | 3D |
| 0.38-024 | 0.38 | 6.3 | 1.0 | 6.3 | 25 | 1.5 | 217 | 5.8 | 7.3 | 3.8 | 0.72 | 7.2 | 1.2 | 1.2 | RC |
| 0.38-025 | 0.38 | 5.9 | 1.0 | 6.0 | 25 | 1.5 | 217 | 6.9 | 8.7 | 5.4 | 0.72 | 8.7 | 1.5 | 1.5 | NSD |
| 0.38-026 | 0.38 | 6.6 | 0.8 | 8.5 | 25 | 1.5 | 217 | 9.0 | 11.4 | 9.2 | 0.72 | 11.6 | 1.7 | 1.7 | NSD |
| 0.38-027 | 0.38 | 6.6 | 1.1 | 6.2 | 25 | 1.5 | 217 | 10.7 | 13.5 | 13.0 | 0.72 | 13.9 | 2.0 | 2.1 | 3D |
| 0.38-028 | 0.38 | 8.5 | 1.6 | 5.5 | 25 | 1.5 | 217 | 5.8 | 7.3 | 3.8 | 0.72 | 7.2 | 0.9 | 0.9 | SSC |
| 0.38-029 | 0.38 | 8.3 | 1.3 | 6.2 | 25 | 1.5 | 217 | 7.3 | 9.3 | 6.1 | 0.72 | 9.3 | 1.1 | 1.1 | SSC |
| 0.38-030 | 0.38 | 7.8 | 1.3 | 6.2 | 25 | 1.5 | 217 | 7.3 | 9.2 | 6.0 | 0.72 | 9.3 | 1.2 | 1.2 | SSC |
| 0.38-031 | 0.38 | 8.3 | 1.3 | 6.2 | 25 | 1.5 | 217 | 9.0 | 11.4 | 9.2 | 0.72 | 11.6 | 1.4 | 1.4 | SSC |
| 0.38-032 | 0.38 | 7.8 | 1.2 | 6.3 | 25 | 1.5 | 217 | 8.7 | 11.0 | 8.6 | 0.72 | 11.2 | 1.4 | 1.4 | SSC |
| 0.38-033 | 0.38 | 7.5 | 1.4 | 5.5 | 25 | 1.5 | 217 | 9.6 | 12.1 | 10.5 | 0.72 | 12.4 | 1.6 | 1.7 | NSD |
| 0.38-034 | 0.38 | 10.0 | 1.7 | 5.9 | 25 | 1.5 | 217 | 5.5 | 6.9 | 3.4 | 0.72 | 6.8 | 0.7 | 0.7 | RC |
| 0.38-035 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.7 | 25 | 1.5 | 217 | 8.5 | 10.8 | 8.3 | 0.72 | 11.0 | 1.1 | 1.1 | RC |
| 0.38-036 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.3 | 25 | 1.5 | 217 | 10.8 | 13.6 | 13.3 | 0.72 | 14.0 | 1.4 | 1.4 | NSD |
| 0.38-037 | 0.38 | 11.1 | 1.8 | 6.1 | 25 | 1.5 | 217 | 11.8 | 14.9 | 15.9 | 0.72 | 15.4 | 1.3 | 1.4 | NSD |
| 0.38-038 | 0.38 | 12.4 | 2.0 | 6.3 | 25 | 1.5 | 217 | 6.8 | 8.6 | 5.3 | 0.72 | 8.6 | 0.7 | 0.7 | RC |
| 0.38-039 | 0.38 | 13.0 | 2.3 | 5.7 | 25 | 1.5 | 217 | 11.6 | 14.7 | 15.5 | 0.72 | 15.2 | 1.1 | 1.2 | NSD |
| 0.38-040 | 0.38 | 15.0 | 2.6 | 5.9 | 25 | 1.5 | 217 | 5.4 | 6.8 | 3.3 | 0.72 | 6.7 | 0.5 | 0.4 | RC |

| Run No. | Grain diameter | Original ripple length | Original ripple height | Ripple index | Water depth | Wave period | Wave length | Wave height | Orbital diameter | Mobility number | Relative water depth | Final ripple length | | | | Remarks |
|----------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-----|-----|-----|---------|
| | D , mm | λ_i , cm | η_i , cm | λ_i/η_i | h , cm | T , sec | L , cm | H , cm | d_o , cm | ψ | kh | λ_e , cm | | | | |
| 0.38-041 | 0.38 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 1.5 | 217 | 8.1 | 10.2 | 7.5 | 0.72 | 10.3 | 0.7 | 0.7 | RC | |
| 0.38-042 | 0.38 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 1.5 | 217 | 10.9 | 13.8 | 13.5 | 0.72 | 14.2 | 0.9 | 0.9 | RC | |
| 0.38-043 | 0.38 | 7.3 | 1.2 | 5.9 | 25 | 1.8 | 267 | 4.7 | 7.5 | 2.8 | 0.59 | 7.4 | 1.0 | 1.0 | RC | |
| 0.38-044 | 0.38 | 4.7 | 0.8 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 6.9 | 12.5 | 6.3 | 0.52 | 12.6 | 2.7 | 2.7 | 3D | |
| 0.38-045 | 0.38 | 4.0 | 0.6 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 9.5 | 17.2 | 11.9 | 0.52 | 17.7 | 4.3 | 4.4 | 3D | |
| 0.38-046 | 0.38 | 4.0 | 0.7 | 5.9 | 25 | 2.0 | 300 | 10.5 | 19.2 | 14.7 | 0.52 | 19.7 | 4.8 | 4.9 | 3D | |
| 0.38-047 | 0.38 | 4.0 | 0.6 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 12.3 | 22.3 | 20.1 | 0.52 | 23.2 | 5.6 | 5.8 | 3D | |
| 0.38-048 | 0.38 | 6.0 | 0.9 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 4.7 | 8.5 | 2.9 | 0.52 | 8.3 | 1.4 | 1.4 | RC | |
| 0.38-049 | 0.38 | 6.3 | 1.0 | 6.1 | 25 | 2.0 | 300 | 9.5 | 17.2 | 11.9 | 0.52 | 17.7 | 2.7 | 2.8 | 3D | |
| 0.38-050 | 0.38 | 7.4 | 1.2 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 4.4 | 7.9 | 2.5 | 0.52 | 7.7 | 1.1 | 1.0 | RC | |
| 0.38-051 | 0.38 | 7.4 | 1.1 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 4.4 | 8.0 | 2.6 | 0.52 | 7.8 | 1.1 | 1.1 | RC | |
| 0.38-052 | 0.38 | 7.7 | 1.2 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 5.2 | 9.4 | 3.5 | 0.52 | 9.3 | 1.2 | 1.2 | RC | |
| 0.38-053 | 0.38 | 7.7 | 1.3 | 5.9 | 25 | 2.0 | 300 | 6.6 | 12.0 | 5.8 | 0.52 | 12.1 | 1.6 | 1.6 | RC | |
| 0.38-054 | 0.38 | 8.3 | 1.2 | 6.8 | 25 | 2.0 | 300 | 7.8 | 14.1 | 8.0 | 0.52 | 14.4 | 1.7 | 1.7 | RC | |
| 0.38-055 | 0.38 | 8.2 | 1.3 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 9.0 | 16.4 | 10.8 | 0.52 | 16.8 | 2.0 | 2.0 | NSD | |
| 0.38-056 | 0.38 | 8.2 | 1.3 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 9.0 | 16.4 | 10.8 | 0.52 | 16.8 | 2.0 | 2.0 | NSD | |
| 0.38-057 | 0.38 | 8.6 | 1.3 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 4.4 | 7.9 | 2.5 | 0.52 | 7.7 | 0.9 | 0.9 | RC | |
| 0.38-058 | 0.38 | 9.1 | 1.4 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 5.2 | 9.4 | 3.5 | 0.52 | 9.3 | 1.0 | 1.0 | RC | |
| 0.38-059 | 0.38 | 9.2 | 1.5 | 6.0 | 25 | 2.0 | 300 | 8.2 | 14.9 | 8.9 | 0.52 | 15.1 | 1.6 | 1.6 | NSD | |
| 0.38-060 | 0.38 | 9.1 | 1.4 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 12.4 | 22.5 | 20.4 | 0.52 | 23.4 | 2.5 | 2.6 | NSD | |
| 0.38-061 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 4.1 | 7.5 | 2.2 | 0.52 | 7.2 | 0.7 | 0.7 | RC | |
| 0.38-062 | 0.38 | 10.0 | 1.8 | 5.5 | 25 | 2.0 | 300 | 6.2 | 11.2 | 5.1 | 0.52 | 11.2 | 1.1 | 1.1 | RC | |
| 0.38-063 | 0.38 | 9.9 | 1.6 | 6.1 | 25 | 2.0 | 300 | 8.9 | 16.2 | 10.6 | 0.52 | 16.6 | 1.6 | 1.7 | NSD | |
| 0.38-064 | 0.38 | 10.0 | 1.9 | 5.4 | 25 | 2.0 | 300 | 9.1 | 16.6 | 11.1 | 0.52 | 17.0 | 1.7 | 1.7 | RC | |
| 0.38-065 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 11.8 | 21.4 | 18.5 | 0.52 | 22.2 | 2.1 | 2.2 | NSD | |
| 0.38-066 | 0.38 | 12.9 | 1.5 | 8.4 | 25 | 2.0 | 300 | 8.4 | 15.3 | 9.4 | 0.52 | 15.6 | 1.2 | 1.2 | RC | |
| 0.38-067 | 0.38 | 13.4 | 2.1 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 5.6 | 10.1 | 4.1 | 0.52 | 10.1 | 0.8 | 0.8 | RC | |
| 0.38-068 | 0.38 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 2.0 | 300 | 4.2 | 7.7 | 2.4 | 0.52 | 7.4 | 0.5 | 0.5 | RC | |
| 0.38-069 | 0.38 | 15.0 | 2.4 | 6.2 | 25 | 2.0 | 300 | 6.4 | 11.7 | 5.5 | 0.52 | 11.7 | 0.8 | 0.8 | RC | |
| 0.38-070 | 0.38 | 15.0 | 2.4 | 6.3 | 25 | 2.0 | 300 | 8.6 | 15.7 | 9.9 | 0.52 | 16.0 | 1.0 | 1.1 | RC | |
| 0.38-071 | 0.38 | 15.0 | 2.4 | 6.4 | 25 | 2.0 | 300 | 11.3 | 20.5 | 16.9 | 0.52 | 21.2 | 1.4 | 1.4 | RC | |
| 0.38-072 | 0.38 | 7.3 | 1.2 | 6.3 | 25 | 2.5 | 381 | 5.1 | 11.9 | 3.6 | 0.41 | 11.8 | 1.6 | 1.6 | RC | |
| 0.38-073 | 0.38 | 9.1 | 1.5 | 6.3 | 25 | 2.5 | 381 | 5.1 | 11.9 | 3.6 | 0.41 | 11.8 | 1.3 | 1.3 | RC | |
| 0.38-074 | 0.38 | 4.5 | 0.7 | 6.8 | 25 | 3.0 | 461 | 6.9 | 19.7 | 6.9 | 0.34 | 19.9 | 4.4 | 4.4 | 3D | |
| 0.38-075 | 0.38 | 4.4 | 0.7 | 6.5 | 25 | 3.0 | 461 | 7.0 | 20.0 | 7.1 | 0.34 | 20.2 | 4.5 | 4.6 | 3D | |
| 0.38-076 | 0.38 | 3.8 | 0.7 | 5.7 | 25 | 3.0 | 461 | 8.3 | 23.9 | 10.2 | 0.34 | 24.4 | 6.3 | 6.4 | 3D | |
| 0.38-077 | 0.38 | 4.0 | 0.7 | 5.5 | 25 | 3.0 | 461 | 10.6 | 30.5 | 16.6 | 0.34 | 31.5 | 7.6 | 7.9 | 3D | |
| 0.38-078 | 0.38 | 3.8 | 0.6 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 12.0 | 34.5 | 21.3 | 0.34 | 35.9 | 9.1 | 9.4 | 3D | |
| 0.38-079 | 0.38 | 6.4 | 1.0 | 6.5 | 25 | 3.0 | 461 | 5.0 | 14.4 | 3.7 | 0.34 | 14.2 | 2.2 | 2.2 | RC | |
| 0.38-080 | 0.38 | 6.0 | 0.9 | 6.4 | 25 | 3.0 | 461 | 6.8 | 19.6 | 6.8 | 0.34 | 19.8 | 3.3 | 3.3 | 3D | |
| 0.38-081 | 0.38 | 6.0 | 1.1 | 5.5 | 25 | 3.0 | 461 | 9.8 | 28.1 | 14.0 | 0.34 | 28.9 | 4.7 | 4.8 | 3D | |
| 0.38-082 | 0.38 | 8.4 | 1.4 | 6.2 | 25 | 3.0 | 461 | 9.7 | 27.8 | 13.8 | 0.34 | 28.6 | 3.3 | 3.4 | 3D | |
| 0.38-083 | 0.38 | 9.6 | 1.5 | 6.5 | 25 | 3.0 | 461 | 6.9 | 19.7 | 6.9 | 0.34 | 19.9 | 2.1 | 2.1 | RC | |
| 0.38-084 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.4 | 25 | 3.0 | 461 | 4.4 | 12.7 | 2.9 | 0.34 | 12.4 | 1.3 | 1.2 | RC | |
| 0.38-085 | 0.38 | 10.9 | 1.7 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 4.9 | 14.1 | 3.5 | 0.34 | 13.9 | 1.3 | 1.3 | RC | |
| 0.38-086 | 0.38 | 10.0 | 1.7 | 5.8 | 25 | 3.0 | 461 | 8.4 | 24.2 | 10.4 | 0.34 | 24.7 | 2.4 | 2.5 | NSD | |
| 0.38-087 | 0.38 | 12.5 | 2.0 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 6.9 | 19.9 | 7.0 | 0.34 | 20.1 | 1.6 | 1.6 | RC | |
| 0.38-088 | 0.38 | 12.5 | 2.0 | 6.2 | 25 | 3.0 | 461 | 12.2 | 35.0 | 21.8 | 0.34 | 36.3 | 2.8 | 2.9 | NSD | |
| 0.38-089 | 0.38 | 15.0 | 2.7 | 5.5 | 25 | 3.0 | 461 | 4.9 | 14.1 | 3.5 | 0.34 | 13.9 | 0.9 | 0.9 | RC | |
| 0.38-090 | 0.38 | 15.0 | 2.5 | 5.9 | 25 | 3.0 | 461 | 7.1 | 20.4 | 7.4 | 0.34 | 20.7 | 1.4 | 1.4 | RC | |
| 0.38-091 | 0.38 | 15.0 | 2.3 | 6.5 | 25 | 3.0 | 461 | 8.5 | 24.3 | 10.6 | 0.34 | 24.9 | 1.6 | 1.7 | RC | |
| 0.38-092 | 0.38 | 15.0 | 2.4 | 6.3 | 25 | 3.0 | 461 | 9.6 | 27.6 | 13.6 | 0.34 | 28.4 | 1.8 | 1.9 | RC | |
| 0.38-093 | 0.38 | 6.0 | 1.1 | 5.4 | 15 | 1.0 | 109 | 5.0 | 5.1 | 4.1 | 0.86 | 5.0 | 0.8 | 0.8 | DSC | |

| Run No. | Grain diameter | Original ripple length | Original ripple height | Ripple index | Water depth | Wave period | Wave length | Wave height | Orbital diameter | Mobility number | Relative water depth | Final ripple length | | | Remarks |
|----------|----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------------|---------|
| | D , mm | λ_i , cm | η_i , cm | λ_i/η_i | h , cm | T , sec | L , cm | H , cm | d_0 , cm | ψ | kh | λ_c , cm | d_0/λ_i | λ_c/λ_i | |
| 0.38-094 | 0.38 | 6.0 | 0.9 | 6.4 | 15 | 1.5 | 174 | 4.3 | 7.5 | 4.0 | 0.54 | 7.4 | 1.2 | 1.2 | RC |
| 0.38-095 | 0.38 | 6.0 | 0.9 | 6.5 | 15 | 1.5 | 174 | 6.2 | 10.8 | 8.3 | 0.54 | 11.0 | 1.8 | 1.8 | 3D |
| 0.38-096 | 0.38 | 6.0 | 1.0 | 6.1 | 15 | 2.0 | 236 | 3.7 | 9.0 | 3.3 | 0.40 | 8.9 | 1.5 | 1.5 | RC |
| 0.38-097 | 0.38 | 6.0 | 0.9 | 6.7 | 15 | 2.0 | 236 | 6.0 | 14.7 | 8.6 | 0.40 | 14.9 | 2.4 | 2.5 | NSD |
| 0.38-098 | 0.38 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 15 | 3.0 | 360 | 4.1 | 15.5 | 4.3 | 0.26 | 15.4 | 2.6 | 2.6 | NSD |
| 0.38-099 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.5 | 15 | 1.0 | 109 | 4.1 | 4.2 | 2.8 | 0.86 | 4.1 | 0.4 | 0.4 | DSC |
| 0.38-100 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.5 | 15 | 1.0 | 109 | 4.8 | 4.9 | 3.8 | 0.86 | 4.8 | 0.5 | 0.5 | DSC |
| 0.38-101 | 0.38 | 10.0 | 1.7 | 5.9 | 15 | 1.5 | 174 | 4.3 | 7.5 | 4.0 | 0.54 | 7.4 | 0.7 | 0.7 | RC |
| 0.38-102 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.5 | 15 | 1.5 | 174 | 6.5 | 11.4 | 9.3 | 0.54 | 11.6 | 1.1 | 1.2 | RC |
| 0.38-103 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.5 | 15 | 2.0 | 236 | 3.5 | 8.5 | 2.9 | 0.40 | 8.4 | 0.9 | 0.8 | RC |
| 0.38-104 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.2 | 15 | 2.0 | 236 | 6.0 | 14.7 | 8.6 | 0.40 | 14.9 | 1.5 | 1.5 | RC |
| 0.38-105 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.1 | 15 | 3.0 | 360 | 4.5 | 17.0 | 5.1 | 0.26 | 17.0 | 1.7 | 1.7 | RC |
| 0.38-106 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.3 | 15 | 3.0 | 360 | 6.3 | 23.6 | 9.9 | 0.26 | 24.1 | 2.4 | 2.4 | RC |
| 0.38-107 | 0.38 | 6.0 | 0.9 | 6.7 | 30 | 1.0 | 137 | 8.9 | 4.8 | 3.7 | 1.37 | 4.7 | 0.8 | 0.8 | DSC |
| 0.38-108 | 0.38 | 6.0 | 0.9 | 6.8 | 30 | 1.5 | 234 | 5.8 | 6.4 | 2.9 | 0.81 | 6.3 | 1.1 | 1.0 | SSC |
| 0.38-109 | 0.38 | 6.0 | 0.9 | 6.3 | 30 | 1.5 | 234 | 9.0 | 10.1 | 7.2 | 0.81 | 10.2 | 1.7 | 1.7 | NSD |
| 0.38-110 | 0.38 | 6.0 | 1.0 | 6.3 | 30 | 2.0 | 326 | 4.5 | 7.4 | 2.2 | 0.58 | 7.1 | 1.2 | 1.2 | RC |
| 0.38-111 | 0.38 | 6.0 | 1.0 | 6.1 | 30 | 2.0 | 326 | 9.0 | 14.7 | 8.7 | 0.58 | 15.0 | 2.5 | 2.5 | 3D |
| 0.38-112 | 0.38 | 6.0 | 1.0 | 5.8 | 30 | 3.0 | 503 | 4.9 | 12.8 | 2.9 | 0.37 | 12.5 | 2.1 | 2.1 | NSD |
| 0.38-113 | 0.38 | 6.0 | 1.3 | 4.7 | 30 | 3.0 | 503 | 6.7 | 17.3 | 5.4 | 0.37 | 17.4 | 2.9 | 2.9 | 3D |
| 0.38-114 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.4 | 30 | 1.0 | 137 | 8.7 | 4.7 | 3.6 | 1.37 | 4.6 | 0.5 | 0.5 | DSC |
| 0.38-115 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.5 | 30 | 1.5 | 234 | 6.4 | 7.1 | 3.6 | 0.81 | 7.0 | 0.7 | 0.7 | RC |
| 0.38-116 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.5 | 30 | 1.5 | 234 | 8.6 | 9.6 | 6.6 | 0.81 | 9.7 | 1.0 | 1.0 | RC |
| 0.38-117 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.5 | 30 | 2.0 | 326 | 4.5 | 7.3 | 2.1 | 0.58 | 7.0 | 0.7 | 0.7 | RC |
| 0.38-118 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.8 | 30 | 2.0 | 326 | 7.0 | 11.4 | 5.3 | 0.58 | 11.5 | 1.1 | 1.1 | RC |
| 0.38-119 | 0.38 | 10.0 | 1.5 | 6.7 | 30 | 2.0 | 326 | 9.2 | 15.0 | 9.0 | 0.58 | 15.2 | 1.5 | 1.5 | RC |
| 0.38-120 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.3 | 30 | 3.0 | 503 | 4.9 | 12.8 | 2.9 | 0.37 | 12.5 | 1.3 | 1.3 | RC |
| 0.38-121 | 0.38 | 10.0 | 1.6 | 6.4 | 30 | 3.0 | 503 | 6.9 | 18.0 | 5.8 | 0.37 | 18.1 | 1.8 | 1.8 | RC |

BR: barrel-type ripples, DSC: ripples with double secondary crests, NSD: no significant deformation, RC: round-crested ripples, RR: rhombic-type ripples, SSC: ripples with a single secondary crest, and 3D: irregular three-dimensional ripples.

$\leq \lambda_i \leq 15.0$ cm and $0.3 \leq \eta_i \leq 2.4$ cm, and the ripple index, $RI (= \lambda_i/\eta_i)$, was in the range $3.8 \leq RI \leq 8.5$ (Table 1). The ripple size was varied according to the experimental run.

The original ripples were deformed under the action of waves that had the following hydraulic conditions: $7 \leq h \leq 30$ cm, $0.8 \leq T \leq 4.0$ s, and $2.7 \leq H \leq 12.4$ cm, where h , T , and H denote the water depth, wave period, and wave height, respectively (Table 1). The direction of wave propagation was perpendicular to the crest of the original ripples. Through each run, the hydraulic conditions were kept constant. The ripple deformation process was examined in 329 experimental runs with

different combinations of D , λ_i , h , T , and H . The top and oblique-top views of the process of ripple deformation were photographed with digital cameras at a certain interval of time.

Characteristic transitional ripple form during deformation

Sekiguchi (2003, 2009) and Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005) reported the following 4 types of disinctive transitional ripples, which ephemerally occur during ripple deformation: (1) ripples with secondary crests, (2) barrel-type ripples, (3) round-crested ripples, and (4) rhombic-

type ripples. When the above characteristic transient ripples did not occur, the original ripples show (5) no significant modification but slight increase in ripple spacing by “slide (Smith and Sleath, 2005)” or (6) deformation into larger 2D ripples through ephemeral occurrence of irregular 3D ripples (Sekiguchi, 2003; Sekiguchi and Sunamura, 2004, 2005).

1) Ripples with secondary crests (SSC, Fig. 1a; DSC, Fig. 1b)

This type of ripple has a single (SSC, Fig. 1a) or double (DSC, Fig. 1b) small crests, called as secondary crests in Evans (1943), in each trough. Ripples with secondary crests occur during deformation from original ripples into those with smaller ripples under relatively symmetrical flow field. The number of secondary crest in a trough depends on the ratio of the horizontal scale of vortexes to the original ripple spacing the ratio of the horizontal scale of vortexes, d_v , to the original ripple length, λ_i : single for $0.35 \leq d_v/\lambda_i \leq 0.5$, and double for $d_v/\lambda_i \leq 0.35$ (Sekiguchi, 2005).

2) Barrel-type ripples (BR, Fig. 1c)

BR was named for its barrel-like plan shape, and occur during deformation from the original ripples into smaller ones. Barrel-type ripples have short secondary crests in a staggered arrangement, and wide bridges connecting the original ripple crests form between short secondary crests. The ripple spacing in the non-bridge areas is larger than that in each bridge portion to form a bulge.

3) Round-crested ripples (RC, Figs. 1d and e)

The crest of this type of ripples is rounded, and their trough is rounded or angular. Their

profile is generally asymmetrical; but, it looks like symmetrical when their trough is angular. RC develop without significant changes in the initial ripple spacing. If a secondary crest occurs in their trough, they modified into angular-crested

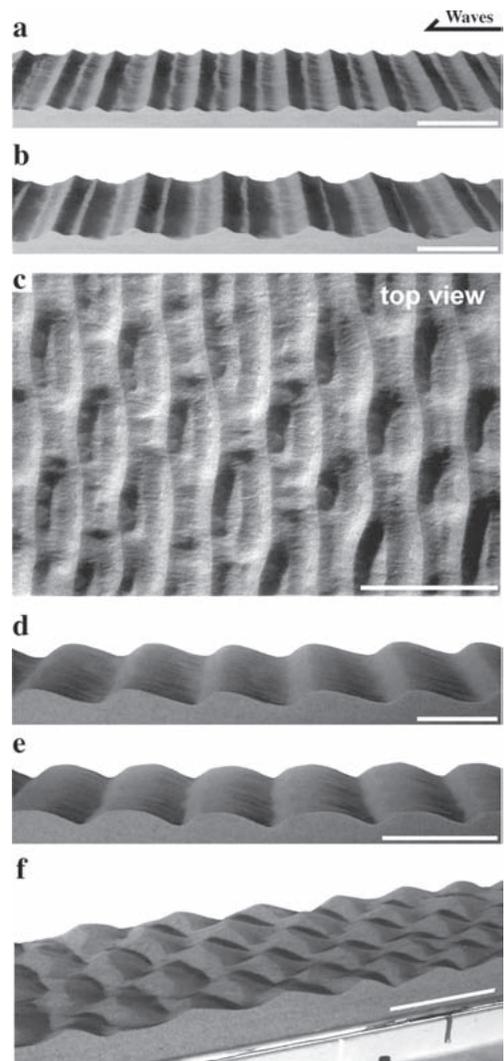


Fig. 1 Characteristic transient ripples, which ephemerally occur during ripple modification: (a) ripples with a single secondary crest (SSC), (b) those with double secondary crests (DSC), (c) barrel-type ripples (BR), (d, e) round-crested ripples (RC), and (f) rhombic-type ripples (RR). Scale bar shows 10 cm.

asymmetrical ripples whose spacing is smaller than that of the initial ripples.

4) Rhombic-type ripples (RR, Fig. 1f)

RR were characterized by similar-sized mounds arranged in a rhombic pattern. The rhombic ripples emerged during a process in which the original ripples developed into larger ones. After the occurrence of RR, the mounds merged each other and ripples with a sinuous or bifurcated crest line developed.

Physical basis of analysis

The present test analyze the conditions for occurrence of four types of transitional ripples considering: λ_e/λ_i , degree of asymmetry in oscillatory flow, and D based on Sekiguchi's (2011) concept. Because data of Sekiguchi (2003, 2009) and Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005) lack λ_e , the present report employs Nielsen's (1979) formula, which is widely used in wave ripple study, in order to predict λ_e from hydraulic and sediment properties. Nielsen's formula for regular waves is given as:

$$\frac{\lambda}{d_0/2} = 2.2 - 3.45\psi^{0.34}$$

where ψ is mobility number. Mobility number, a simplified Shield's parameter for oscillatory flow neglecting wave friction factor, is given by:

$$\psi = \frac{\rho u_s^2}{(\rho_s - \rho)gD}$$

where u_b is maximum near-bed velocity of oscillatory flow, g is gravity acceleration, and ρ is density of fluid, i.e., $\rho = 1$ for water. Linear wave theory (Wiegel, 1964; Komar, 1998) gives:

$$u_b = \frac{\pi d_0}{T} = \frac{\pi H}{T \sinh kh}$$

where k is wave number ($= 2\pi/L$; L is wavelength of surface wave). Again, linear wave theory gives:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kh$$

The Nielsen's formula suggests that spacing of ripples, which strongly depend on orbital diameter, is also affected by the mobility of sediment grains.

Sekiguchi (2003, 2009) and Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005), which did not directly measure near-bed flow velocity, employed the relative water depth, kh , as an indicator of the degree of asymmetry in oscillatory flow. The degree of flow asymmetry increases as kh -value decreases.

Results and Discussion

Under relatively symmetrical oscillatory flow, i.e., for $kh > 0.7$, the original ripples were stable when $1 \leq \lambda_e/\lambda_i \leq 1.5$ and they were modified into smaller ripples through development of secondary crests when $\lambda_e/\lambda_i \leq 1$ (Fig. 2). These results suggest that ripples are more sensitive to the decrease in λ_e/λ_i value than its increase. The slight decrease in λ_e/λ_i causes "split (Smith and Sleath, 2005)" trough formation of secondary crests and subsequent "merge (Smith and Sleath, 2005)," and thus original ripples are completely reconstructed into new equivalent ripples (Sekiguchi, 2011). On the other hand, the original ones are almost maintained with the slight increase in λ_e/λ_i value. As the flow field

became more asymmetrical, i.e., with decreasing kh value, the higher λ_e/λ_i value tends to be required to maintain the original ripples, and RC develop with the smaller λ_e/λ_i value (Figs. 2b and c); however, in the present report, it's not known exactly why.

It is found that the development of RC and RR depended on sediment grain diameter (Fig. 2); RC did not form in the series of experiment with the finer sediment (Fig. 2a), and the RR did not occur with the coarser sediment (Fig. 2c). This may attributed to the higher responsivity of finer suspended sediment grains to the slightest fluid motion. Sekiguchi and Sunamura (2005) showed that RC developed with the coarser sediment when the vortices over offshore-dipped flanks of ripples was weak and flattened under asymmetric flow field, and the vortices could not move sediment grains on and suspended over the offshore flank. When the sediment was finer, the weak offshore vortices could move the sediment grains and secondary crest could develop in place of RC. Sekiguchi (2009) suggested that the development of RR caused by the three dimensionality in fluid motion due to interaction between preexisting ripples and oscillatory flow. The coarser sediment grains may not sufficiently respond to the fluid motion perpendicular to wave propagation, and this would hinder the formation of regularly patterned RR.

Conclusions

The total dataset of Sekiguchi (2003, 2009) and Sekiguchi and Sunamura (2004, 2005) are summarized and analyzed based on Sekiguchi's (2011) concept. The analysis suggested that:

1. Ripples sensitively respond to the decrease in

λ_e/λ_i value, but are relatively insensitive to its increase.

2. The responsivity of sediment grains to

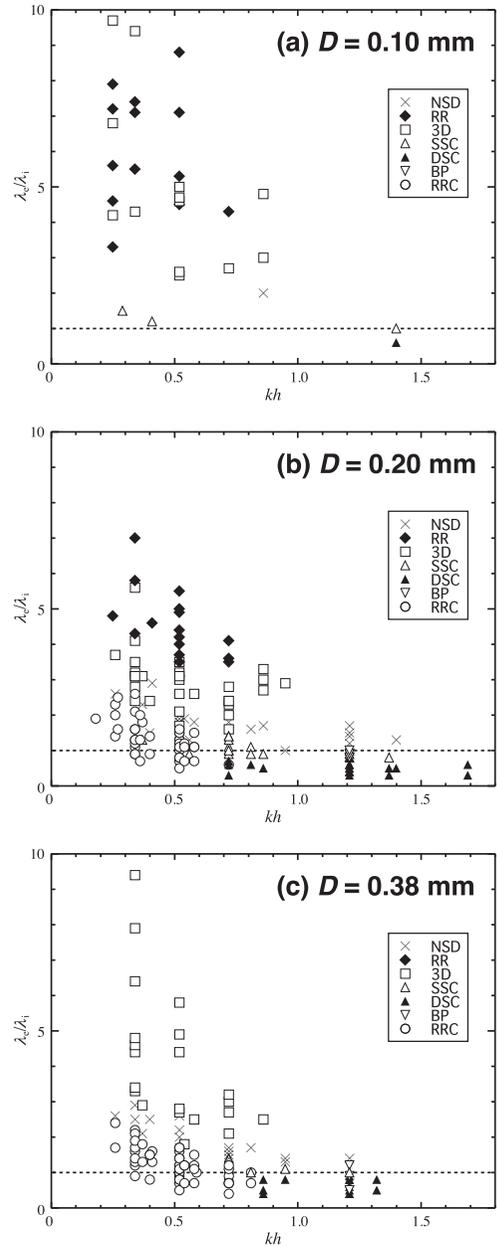


Fig. 2 The relationship between kh and λ_e/λ_i for the occurrence of distinctive transient ripples: (a) $D = 0.10$ mm, (b) $D = 0.20$ mm, and (c) $D = 0.38$ mm.

slight fluid motion may affect the formation of distinctive transient ripples.

References

- Bundgaard, F., Scheibye-Knudsen, K., Bohr, T. and Sams T. (2004): Pattern formation of underwater sand ripples with a skewed drive. *Physical Review*, **E70**, 066207.
- Davis, J.P., Walker, D.J., Townsend, M. and Young, I.R. (2004): Wave-fomed sediment ripples: Transient analysis of ripple spectral development. *Journal of Geophysical Research*, **109**, C07020, DOI: 10.1029/2004JC002307.
- Doucette, J.S. and O'Donoghue T. (2006): Response of sand ripples to change in oscillatory flow. *Sedimentology*, **53**, 581-596.
- Evans, O.F. (1943): Effect of change of wave size on the size and shape of ripple marks. *Journal of Sedimentary Petrology*, **13**, 35-39.
- Hansen, J.L., van Hecke, M., Haaning, A., Ellegaard, C., Andersen, K.H., Bohr, T. and Sams, T. (2001a): Instabilities in sand ripples. *Nature*, **410**, 324.
- Hansen, J.L., van Hecke, M., Andersen, K.H., Bohr, T., Haaning, A. and Sams, T. (2001b): The stability balloon for two-dimensional vortex ripple patterns. *Physical Review Letter*, **E87**, 20430.
- Komar, P.D. (1998): *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall Press, Upper Saddle River, New Jersey, 544 p.
- Nielsen, P. (1979): *Some basic concepts of wave sediment transport*. Instil. Hydrodyn. Hydraul. Engrg. (ISVA), Series Pap. 20, Technical University of Denmark, 160 p.
- Lofquist, K.E.B. (1978): Sand ripple growth in an oscillatory-flow water tunnel. *Technical Paper 78-5. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center: Washington, DC*, 101 p.
- Sekiguchi, T. (2003): A wave-flume study of ripple marks: their initiation and deformation. Ph D thesis, Department of Earth and Space sciences, Osaka University, 199 p.
- Sekiguchi, T. (2005): Ripples with secondary crests as a possible indicator of palaeo-wave direction: a laboratory experiment. *Journal of Geological Society of Japan*, **111**, 182-186.
- Sekiguchi, T. (2009): Transient 3D-patterned ripples appear during deformation of a 2D ripple field under wave-induced oscillatory flow. *Earth Surface Processes and Landforms*. **34**, 839-847, DOI: 10.1002/esp.1774.
- Sekiguchi, T. (2011): A brief review of transition processes of wave ripples. *Journal of Geological Society of Japan*, **117**, 141-147.
- Sekiguchi, T. and Sunamura, T. (2004): A laboratory study of formative conditions for characteristic ripple patterns associated with a change in wave conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, **29**, 1431-1435.
- Sekiguchi, T. and Sunamura, T. (2005): Development of characteristic ripple patterns in response to the change in wave conditions: a laboratory experiment. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **26**, 29-45.
- Shulyak, B.A. (1963): Periodic bottom structures of wave flow. *Deep-Sea Research*, **10**, 488-497.
- Smith, D. and Sleath, J.F.A. (2005): Transient ripples in oscillatory flows. *Continental Shelf Research*, **25**, 485-501, DOI: 10.1016/j-csr.2004.10.012.
- Testik, F.Y., Voropayev, S.I. and Fernando, H.J.S. (2005): Adjustment of sand ripples under

changing water waves. *Physics of Fluids*, **17**, 072104.

Traykovski, P., Hay, A.E., Irish, J.D. and Lynch, J.F. (1999): Geometry, migration, and evolution of wave orbital ripples at LEO-15. *Journal of Geophysical Research*, **104C**, 1505-1524.

Wiegel, R. L. (1964): *Oceanographical Engineering*, Prentice Hall Press, Englewood Cliffs, New Jersey, 532 p.

(2011年9月12日受付, 2011年9月27日受理)

熱収支・水収支観測資料 - 2010年 -

Observational Data of Heat Balance and Water Balance
- 2010 -

鈴木 智恵子*・岩上 翔*・山中 勤*

Chieko SUZUKI*, Sho IWAGAMI* 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、2010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。2010年は1月8日(超音波風速温度計は、11月29~30日)に行われた。7月25日に落雷が発生し、7月29日まで全項目が欠測となった。また、10月

16, 17日の日中は全学停電のため、予備電源に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回実施している。2010年は8月2~3日と11月15~16日に行われた。

II 観測要素および観測測器の説明

1. 風向: Wind Direction

観測用鉄塔の高度29.5m南東側に設置された、超音波風速温度計(本体DA-650, プローブTR-61A, カイジョーソニック)によって測定されている。値は正時の10分間平均値である。

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

なお、2010年7月25日に発生した落雷のため、地上29.5mの南東側に設置された超音波風速温度計で計測された風向、風速、運動量フラックス、顕熱フラックスは欠測が続いた。8月20日に新しい本体基盤とケーブル接続部への交換が行われ、復旧した。

* 筑波大学陸域環境研究センター

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

また, 1997 年から主風向の成分として北成分が強くなる秋に高度 1.6 m の南東側のものを北西側に, 逆に南成分が強くなる春に北西側のものを南東側に付けかえる作業を行っている。2010 年は 4 月 13 日に北西のもの(高度 1.6 m)を南東に移動させ, 11 月 26 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 $\times 0.1 \text{ }^\circ\text{C} \cdot$

m/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(MF-402F, 英弘精機)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(CN-11, 英弘精機)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(CPR-PHF-01, クリマテック)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(MS-091, 英弘精機)によって得られた日積算値で, 単位は分である。

9. 気温 : Air Temperature

観測用鉄塔の北東側に取り付けた通風式温湿度計(CVS-HMP45D, クリマテック)の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。

高度 12.3 m の気温は, 2010 年 10 月 14 日に発生した温湿度計不具合のため欠測が続いたが, 2010 年 12 月 10 日に同型の新しいセンサーへの交換が行われて復旧した。

10. 地温 : Soil Temperature

直径 10 mm, 長さ 15 cm の防水型白金抵抗温度計 (C-PTG-10, クリマテック) 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 °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

水圧式水位計によって測定された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。測定深度は, 10.0 m 深 (GW-2, スクリーン深度は 8.0 ~ 9.0 m) と新 2.0 m 深 (GW-4, 同 0.5 ~ 2.0 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。

2010 年 7 月 25 日に発生した落雷のため GW-2 は欠測が続いたが, 2010 年 8 月 27 日に同型の新しいセンサー (M86H-10, メテオ電子) への交換が行われた。

12. 露点温度 : Dew-point Temperature

観測用鉄塔の北東側に取り付けた通風式温湿度計 (CVS-HMP45D, クリマテック) の静電容量式高分子膜センサーによって得られた相対湿度より算出された日平均値である。単位は °C, 測定高度は気温と同様である。露点温度 T_d [°C] は新温湿度センサーの温度 T [°C]・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。

高度 12.3 m の露点温度は, 2010 年 10 月 14 日に発生した温湿度計不具合のため欠測が続いたが, 2010 年 12 月 10 日に同型の新しいセンサーへの交換が行われて復旧した。

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 (WB0013-05, 横河電子機器) によって得られた日積算値で, 単位は mm (水深換算) 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) 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, 2006 など), 水理実験センター報告及び陸域環境研究センター報告に掲載されている「熱収支・水収支観測資料」の 2010 年分のものである。

これらの観測値のさらに高度な利用を望まれる研究者に対しては, 1 時間平均値あるいは積算値が, 陸域環境研究センターのホームページ (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/>) の熱収支・水収支観測 (圃場日報) データベース (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/hojyo/database.html>) に

保管されている。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。

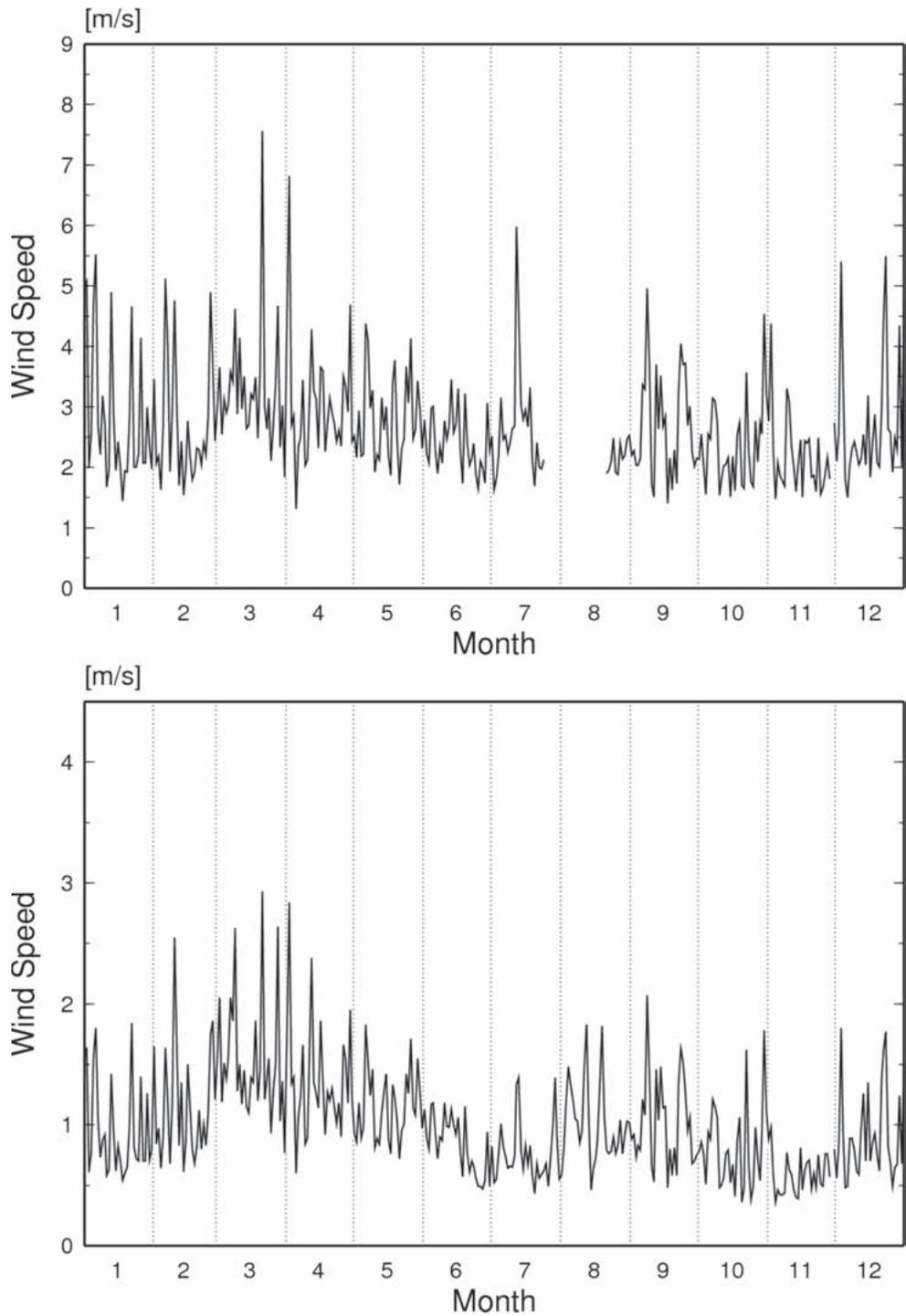
文献

- 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.
- 大庭雅道・濱田洋平・山中 勤(2009): 熱収支・水収支観測資料－2008年－。筑波大学陸域環境研究センター報告, **10**, 83-108.
- 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(2006): 熱収支・水収支観測資料－2005年－。筑波大学陸域環境研究センター報告, **7**, 99-124.

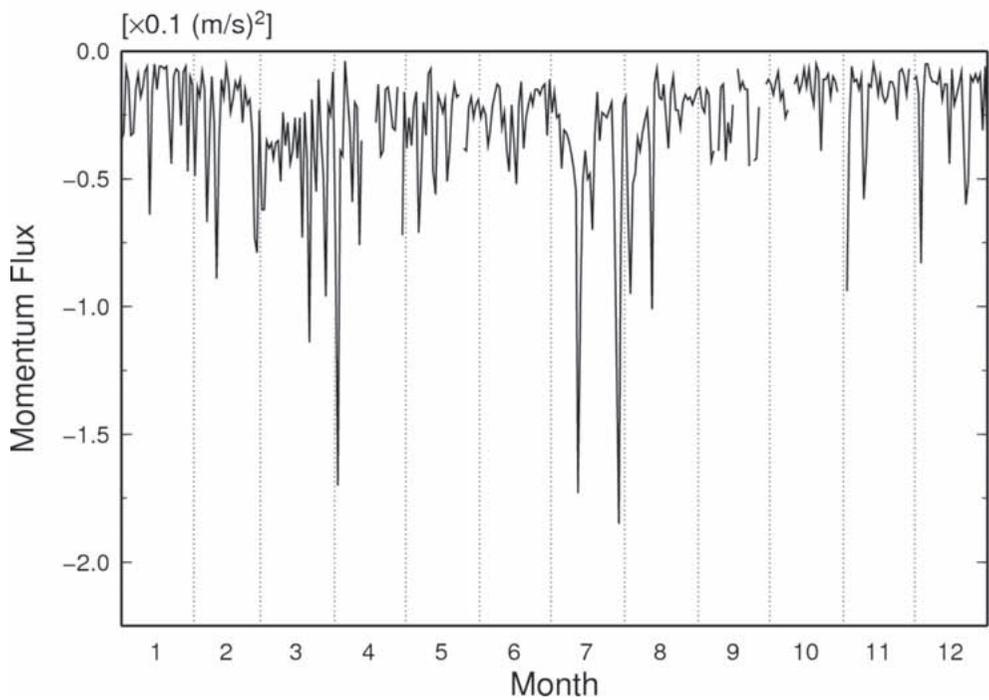
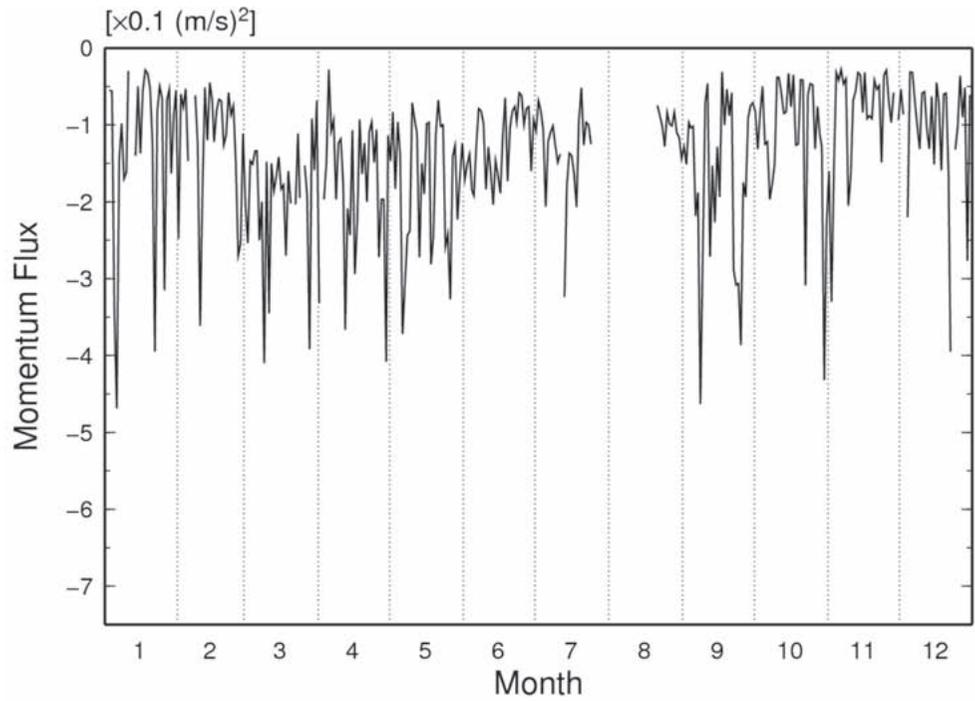
気象・水文表

表の見方

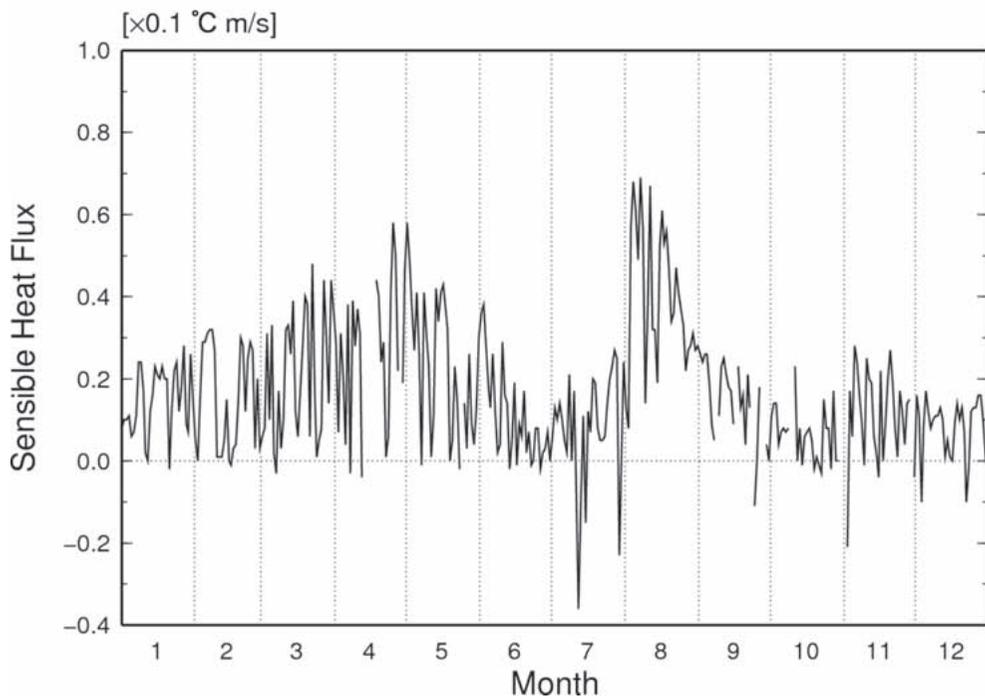
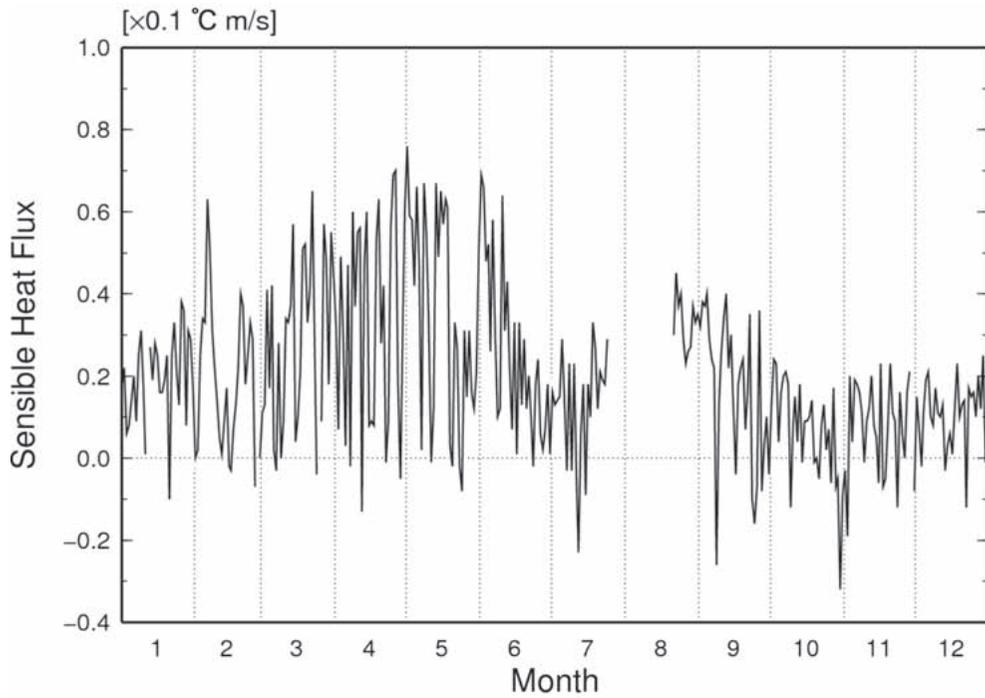
- (1) ITEM は観測要素, INSTRUMENT は観測測器を示す.
- (2) UNIT に関して, MONTHLY FREQUENCY は月毎の頻度を示す.
- (3) 表の横軸は月, 縦軸は日である.
- (4) 1日24データ中(データ識別160), 20個未満の日は欠測「***」,
データが20個以上24個未満は準完全値「*」とする.
「・・・」は対応する日がないことを示す.
- (5) CALM は静穏, NO DATA は欠測頻度を示す.
- (6) MEAN は月平均値, TOTAL は月積算値を示す.



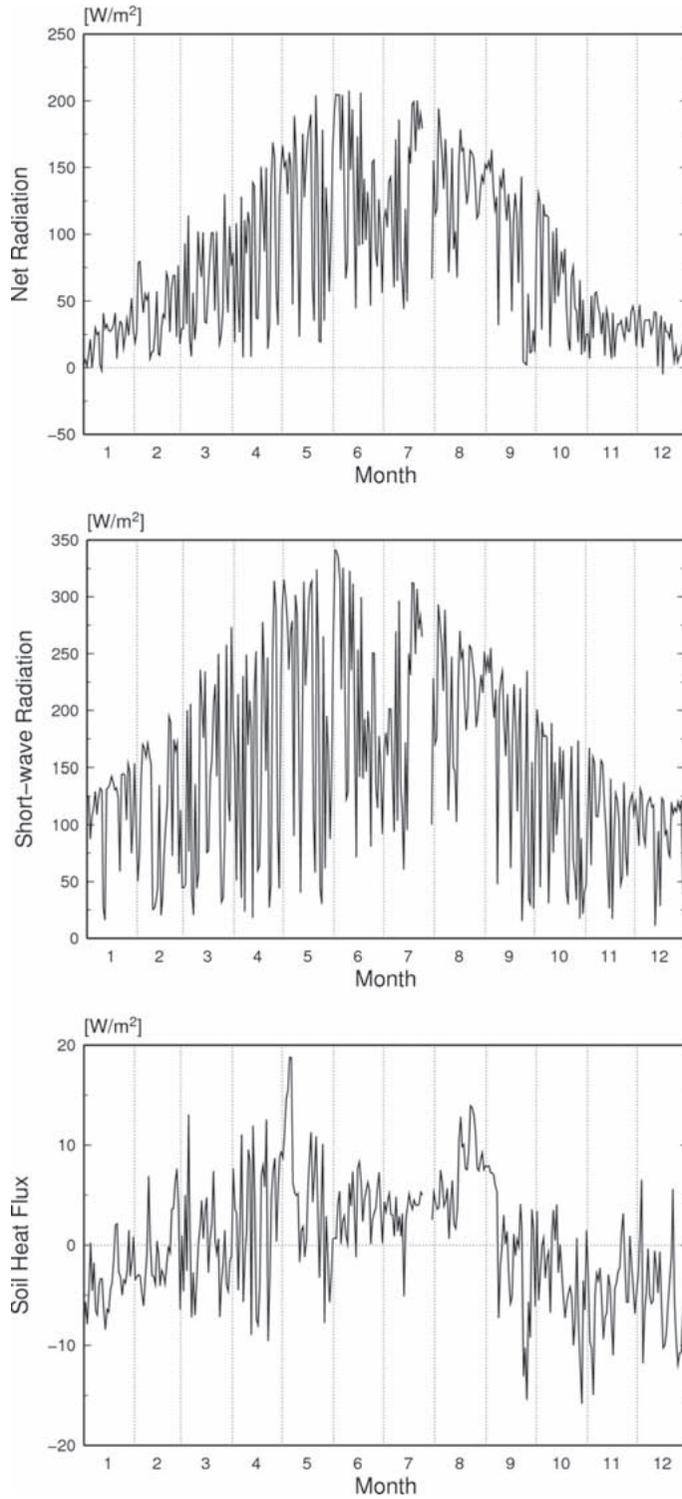
第1図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における風速の日平均値の季節変化



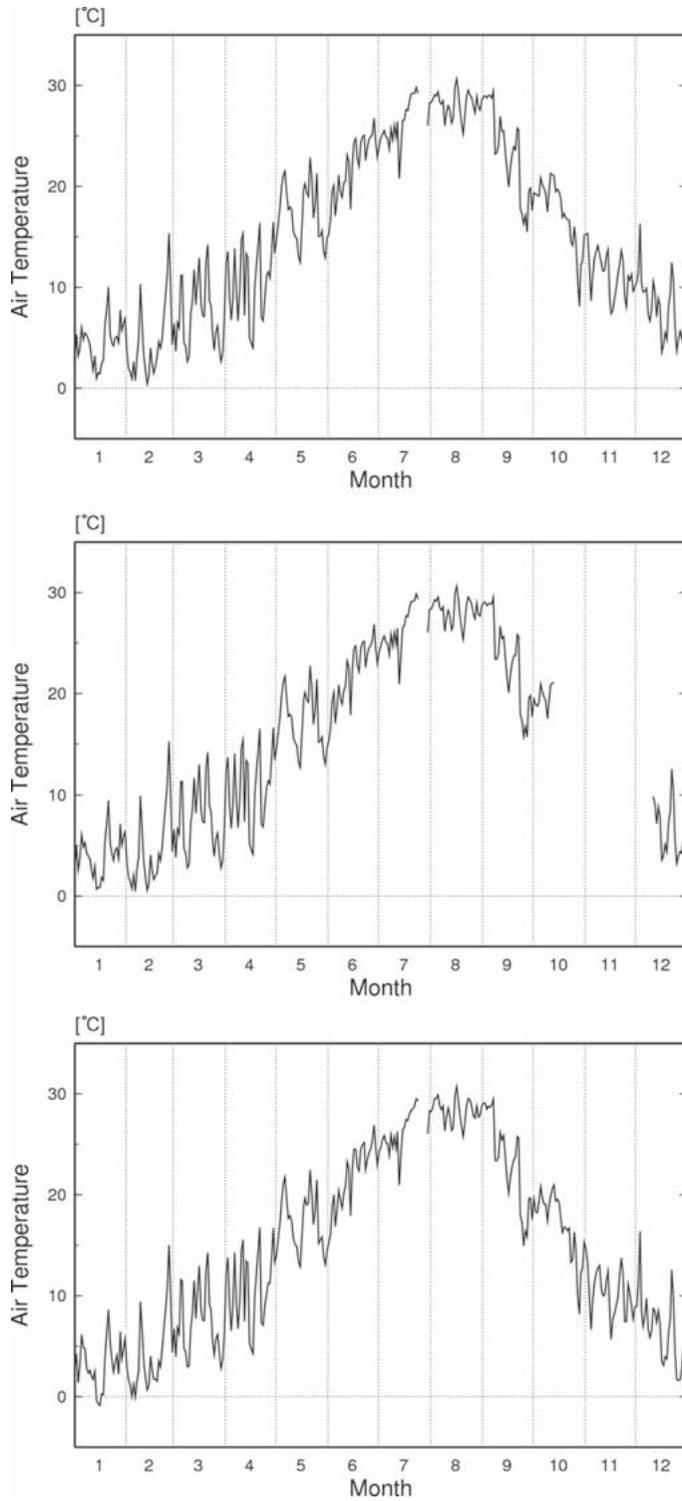
第2図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における運動量フラックスの日平均値の季節変化



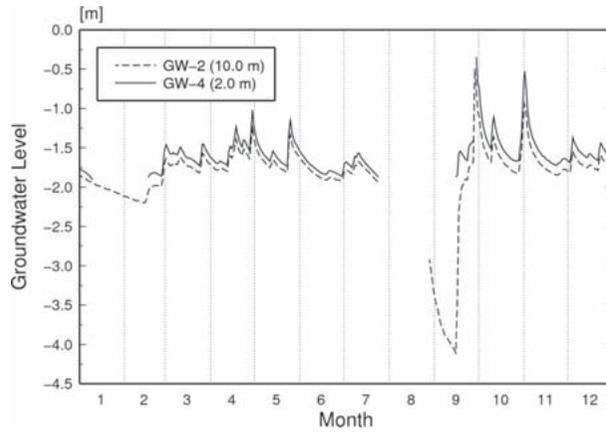
第3図 測定高度 29.5 m (上図), および 1.6 m (下図) における顕熱フラックスの日平均値の季節変化



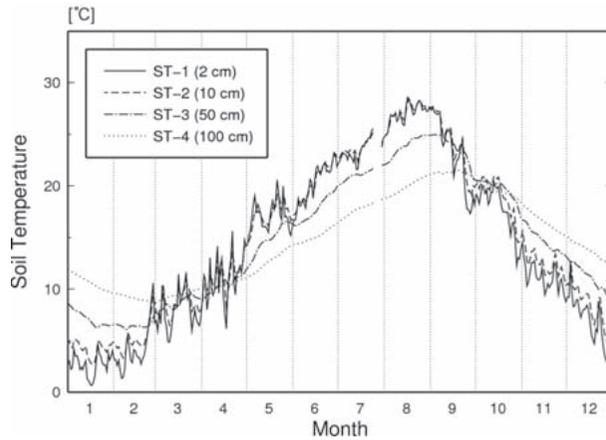
第4図 正味放射量（上図），全天短波放射量（中図），および地中熱流量（下図）の日平均値の季節変化



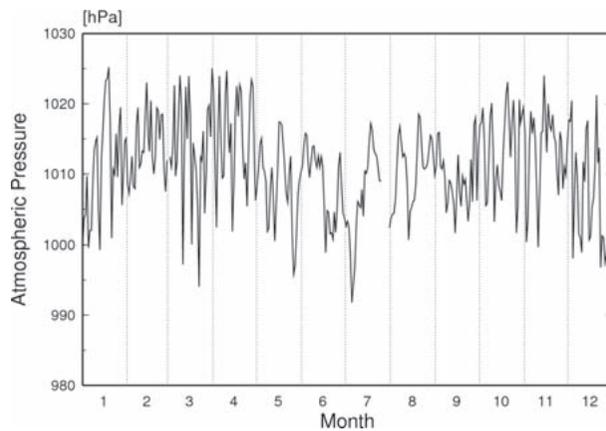
第5図 測定高度 29.5 m (上図), 12.3 m (中図), および 1.6 m (下図) における気温の日平均値の季節変化



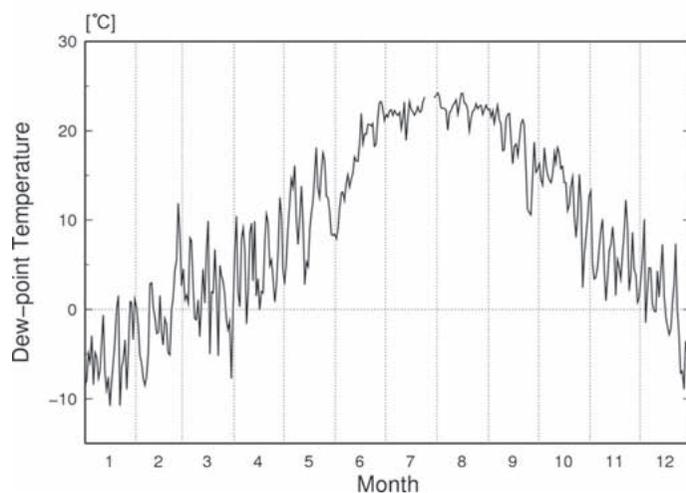
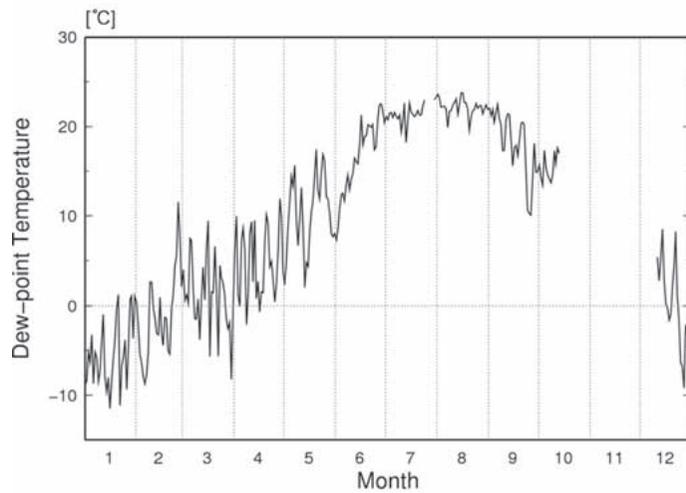
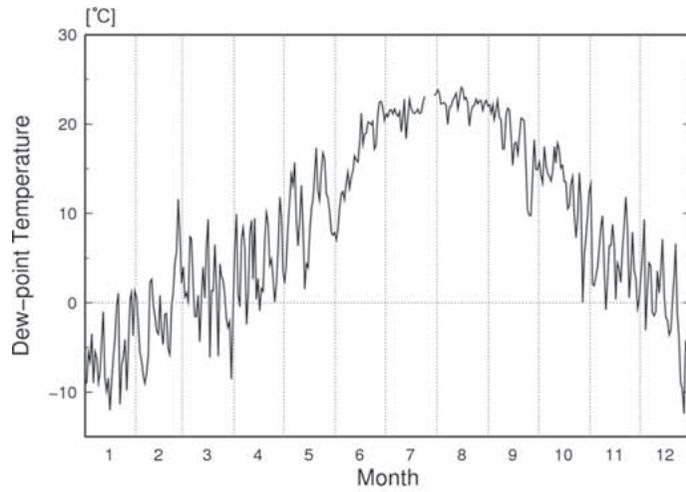
第6図 2 深度（10.0 m，新 2.0 m）の観測井における地下水位の日平均値の季節変化



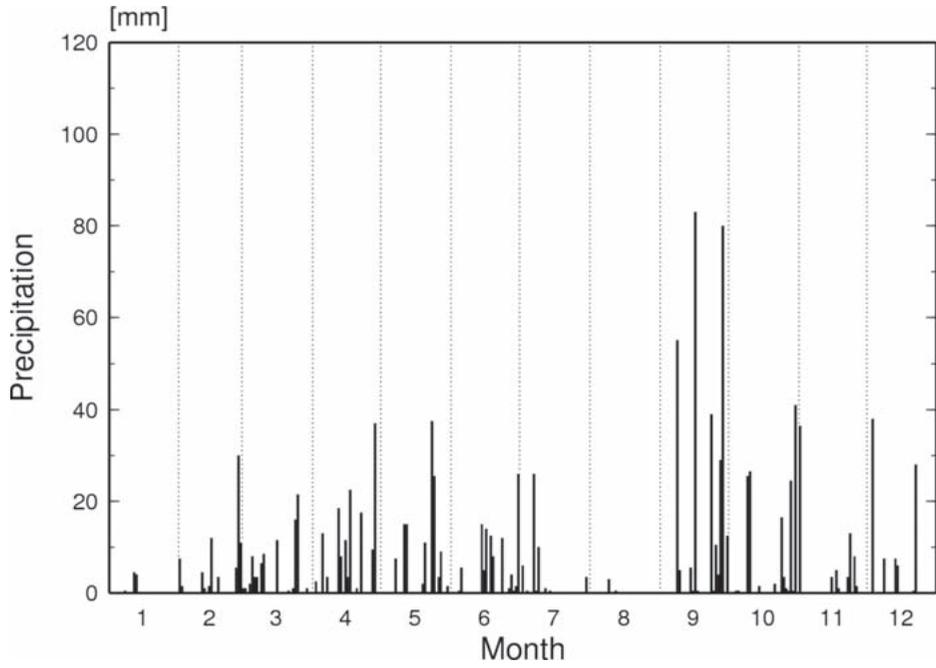
第7図 4 深度（2 cm，10 cm，50 cm，100 cm）における地温の日平均値の季節変化



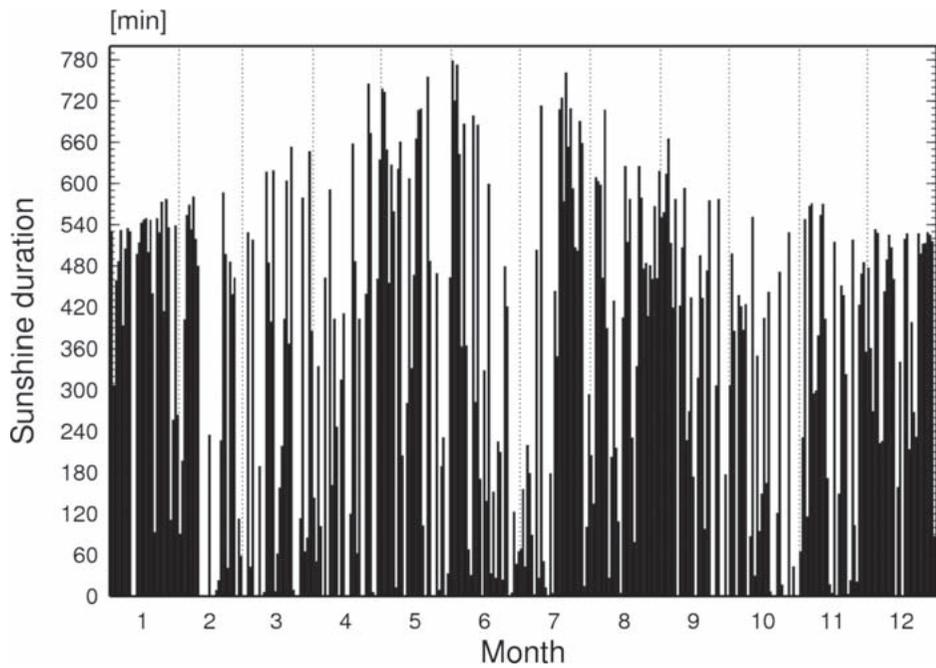
第8図 気圧の日平均値の季節変化



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



第 10 図 日降水量の季節変化



第 11 図 日照時間の日積算値の季節変化

ITEM WIND DIRECTION (29.5m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)
 UNIT MONTHLY FREQUENCY
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N | 20 | 30 | 17 | 13 | 9 | 22 | 5 | 2 | 40 | 29 | 23 | 14 |
| NNE | 8 | 17 | 17 | 21 | 8 | 12 | 7 | 2 | 43 | 63 | 25 | 15 |
| NE | 11 | 66 | 73 | 56 | 31 | 37 | 17 | 4 | 53 | 125 | 32 | 41 |
| ENE | 49 | 128 | 155 | 113 | 132 | 101 | 55 | 26 | 148 | 143 | 53 | 58 |
| E | 46 | 50 | 83 | 141 | 123 | 160 | 111 | 76 | 96 | 82 | 40 | 38 |
| ESE | 18 | 30 | 39 | 35 | 62 | 86 | 66 | 32 | 44 | 26 | 33 | 20 |
| SE | 16 | 14 | 18 | 20 | 23 | 26 | 19 | 14 | 17 | 13 | 9 | 10 |
| SSE | 10 | 14 | 18 | 24 | 30 | 33 | 37 | 6 | 28 | 7 | 15 | 9 |
| S | 9 | 16 | 28 | 21 | 69 | 56 | 49 | 23 | 30 | 2 | 13 | 4 |
| SSW | 18 | 44 | 45 | 57 | 98 | 60 | 99 | 49 | 48 | 5 | 12 | 22 |
| SW | 27 | 20 | 26 | 19 | 18 | 31 | 32 | 17 | 33 | 3 | 21 | 41 |
| WSW | 61 | 25 | 20 | 21 | 23 | 20 | 18 | 10 | 23 | 14 | 37 | 69 |
| W | 104 | 33 | 33 | 19 | 31 | 18 | 26 | 9 | 20 | 14 | 60 | 120 |
| WNW | 171 | 71 | 52 | 42 | 39 | 17 | 21 | 2 | 28 | 47 | 128 | 137 |
| NW | 125 | 72 | 79 | 67 | 26 | 31 | 14 | 1 | 37 | 107 | 141 | 96 |
| NNW | 51 | 41 | 41 | 51 | 22 | 10 | 19 | 0 | 32 | 64 | 65 | 50 |
| NO DATA | | 1 | | | | | 149 | 471 | | | 13 | |

ITEM WIND SPEED (1.6 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)
 UNIT (m/s)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-------|-----|
| 1 | 1.5 | 1.6 | 1.5 | 1.8 | 0.9 | 1.1 | 0.8 | 0.6 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.6 |
| 2 | 1.6 | * 0.8 | 2.0 | 2.8 | 0.9 | 0.9 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 1.0 | 0.8 |
| 3 | 0.6 | 1.0 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 0.8 | 0.6 | 1.2 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 1.8 |
| 4 | 0.8 | 0.6 | 1.5 | 1.4 | 0.9 | 1.2 | 0.8 | 1.5 | 0.8 | 0.5 | 0.4 | 1.0 |
| 5 | 1.6 | 0.9 | 1.4 | 0.6 | 1.0 | 1.2 | 1.0 | 1.3 | 0.8 | 0.9 | 0.5 | 0.5 |
| 6 | 1.8 | 1.6 | 1.5 | 1.1 | 1.8 | 0.9 | 0.8 | 1.2 | 1.2 | 0.9 | 0.4 | 0.5 |
| 7 | 1.0 | 1.2 | 2.1 | 1.2 | 1.5 | 0.7 | 0.7 | 1.0 | 1.1 | 1.2 | 0.4 | 0.9 |
| 8 | 0.7 | 0.7 | 1.9 | 1.7 | 1.2 | 0.9 | 0.6 | 1.0 | 2.1 | 1.1 | 0.4 | 0.9 |
| 9 | 0.9 | 1.2 | 2.6 | 0.8 | 1.5 | 0.9 | 0.7 | 0.8 | 1.4 | 1.1 | 0.8 | 0.8 |
| 10 | 0.9 | 2.6 | 1.3 | 0.9 | 0.8 | 1.2 | 0.7 | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| 11 | 0.6 | 1.7 | 1.5 | 1.7 | 0.9 | 1.0 | 0.7 | 1.5 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| 12 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 2.4 | 0.8 | 1.0 | 1.3 | 1.8 | 1.5 | 0.6 | 0.5 | 1.0 |
| 13 | 1.4 | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.1 | 1.1 | 1.4 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.4 | 1.3 |
| 14 | 1.0 | 0.6 | 1.1 | 1.3 | 1.3 | 1.0 | 0.8 | 0.5 | 1.5 | 0.8 | 0.4 | 0.7 |
| 15 | 0.6 | 0.9 | 1.1 | 1.1 | 1.4 | 0.9 | 0.6 | 0.6 | 1.1 | 0.5 | 0.8 | 1.4 |
| 16 | 0.8 | 1.5 | 1.4 | 1.9 | 0.9 | 1.1 | 0.8 | 0.7 | 1.2 | 0.7 | 0.5 | 0.7 |
| 17 | 0.7 | 1.1 | 1.3 | 1.3 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.9 | 0.5 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
| 18 | 0.5 | 0.8 | 1.9 | 0.9 | 1.3 | 0.6 | 0.8 | 1.3 | 0.8 | 0.9 | 0.7 | 0.9 |
| 19 | 0.6 | 0.7 | 1.2 | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 0.6 | 1.8 | 0.6 | 1.1 | 0.7 | 0.7 |
| 20 | 0.7 | 0.8 | 1.5 | 1.2 | 1.0 | 0.8 | 0.4 | 1.1 | 0.8 | 0.4 | 0.5 | 0.6 |
| 21 | 1.0 | 1.1 | 2.9 | 1.3 | 0.7 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 0.5 | 0.6 | 1.4 |
| 22 | 1.8 | 0.8 | 1.2 | 1.2 | 1.0 | 0.7 | 0.6 | 0.8 | 1.3 | 1.6 | 0.5 | 1.6 |
| 23 | 0.8 | 1.0 | 1.4 | 1.0 | 1.0 | 0.7 | 0.6 | 0.8 | 1.6 | 0.7 | 0.7 | 1.8 |
| 24 | 0.7 | 0.8 | 1.6 | 1.2 | 1.4 | 0.6 | 0.6 | 0.9 | 1.5 | 0.4 | 0.5 | 0.8 |
| 25 | 0.7 | 1.1 | 0.9 | 0.9 | 1.3 | 0.5 | 0.7 | 0.8 | 1.3 | 0.5 | * 0.5 | 0.7 |
| 26 | 1.4 | 1.7 | 1.3 | 1.7 | 1.7 | 0.5 | 0.5 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 0.8 | 0.5 |
| 27 | 0.7 | 1.9 | 1.5 | 1.5 | 1.1 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.1 | 0.7 | 0.8 | 0.6 |
| 28 | 0.7 | 1.2 | 2.6 | 1.2 | 1.1 | 0.5 | 1.0 | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |
| 29 | 1.3 | - - - | 1.0 | 1.9 | 1.6 | 0.9 | 1.4 | 0.9 | 0.7 | 0.9 | *** | 1.2 |
| 30 | 0.7 | - - - | 1.4 | 1.2 | 1.3 | 0.5 | 0.9 | 1.0 | 0.7 | 1.8 | * 0.8 | 0.7 |
| 31 | 0.8 | - - - | 0.8 | - - - | 1.0 | - - - | 0.6 | 1.0 | - - - | 1.1 | - - - | 1.5 |
| MEAN | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.4 | 1.1 | 0.8 | 0.8 | 1.0 | 1.0 | 0.8 | 0.6 | 0.9 |

ITEM WIND SPEED (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)
 UNIT (m/s)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-------|-----|
| 1 | 5.0 | * 3.5 | 3.0 | 4.6 | 2.5 | 2.8 | 2.5 | *** | 2.2 | 2.1 | 2.8 | 2.1 |
| 2 | 5.1 | 2.1 | 3.7 | 6.8 | 2.2 | 2.2 | 1.6 | *** | 2.3 | 2.5 | 4.4 | 2.6 |
| 3 | 2.0 | 2.2 | 2.5 | 2.7 | 2.9 | 2.1 | 1.8 | *** | 2.0 | 2.0 | 2.3 | 5.4 |
| 4 | 2.6 | 1.6 | 3.1 | 2.8 | 2.2 | 3.0 | 2.2 | *** | 2.0 | 1.6 | 1.5 | 3.5 |
| 5 | 4.7 | 2.7 | 2.9 | 1.3 | 2.2 | 3.0 | 3.2 | *** | 2.1 | 2.5 | 2.1 | 1.8 |
| 6 | 5.5 | 5.1 | 3.0 | 2.3 | 4.4 | 2.3 | 2.5 | *** | 3.4 | 2.5 | 1.8 | 1.5 |
| 7 | 2.7 | 4.1 | 3.6 | 2.5 | 4.1 | 1.9 | 2.5 | *** | 3.3 | 3.1 | 1.8 | 2.0 |
| 8 | 2.2 | 1.9 | 3.4 | 3.4 | 3.0 | 2.4 | 2.2 | *** | 5.0 | 3.1 | 1.7 | 2.3 |
| 9 | 3.2 | 2.9 | 4.6 | 2.0 | 3.3 | 2.1 | 2.4 | *** | 3.7 | 2.7 | 3.3 | 2.4 |
| 10 | 2.7 | 4.8 | 2.9 | 2.1 | 1.9 | 2.8 | 2.6 | *** | 1.7 | 1.5 | 3.1 | 2.2 |
| 11 | 1.7 | 3.0 | 4.1 | 3.2 | 2.2 | 2.5 | 2.7 | *** | 1.5 | 1.8 | 2.4 | 2.0 |
| 12 | 2.0 | 1.7 | 3.0 | 4.3 | 2.1 | 2.7 | 6.0 | *** | 3.7 | 2.0 | 2.0 | 2.1 |
| 13 | 4.9 | 2.4 | 3.5 | 3.3 | 3.2 | 3.4 | 4.5 | *** | 2.6 | 2.1 | 1.6 | 2.5 |
| 14 | 2.9 | 1.5 | 2.6 | 3.1 | 2.6 | 2.6 | 3.0 | *** | 3.5 | 2.2 | 2.1 | 2.0 |
| 15 | 1.9 | 2.0 | 2.7 | 2.3 | 3.0 | 2.7 | 2.8 | *** | 2.7 | 1.5 | 2.4 | 3.2 |
| 16 | 2.4 | 2.8 | 3.2 | 3.7 | 2.2 | 3.3 | 3.0 | *** | 2.8 | 2.2 | 1.5 | 1.8 |
| 17 | 2.0 | 2.2 | 3.1 | 3.6 | 1.9 | 2.3 | 2.7 | *** | 1.4 | 1.6 | 2.4 | 2.4 |
| 18 | 1.4 | 1.8 | 3.5 | 2.3 | 3.4 | 1.7 | 3.3 | *** | 2.2 | 2.5 | 2.4 | 2.9 |
| 19 | 1.9 | 1.9 | 2.5 | 2.7 | 3.8 | 3.2 | 2.1 | *** | 1.6 | 2.7 | 2.5 | 2.1 |
| 20 | 1.9 | 2.3 | 3.6 | 3.1 | 2.5 | 2.4 | 1.7 | *** | 2.3 | 1.7 | 1.8 | 2.0 |
| 21 | 2.8 | 2.3 | 7.6 | 2.9 | 1.7 | 2.0 | 2.4 | 1.9 | 1.7 | 1.7 | 1.9 | 3.0 |
| 22 | 4.7 | 2.0 | 3.0 | 2.7 | 2.3 | 2.2 | 2.0 | 1.9 | 3.2 | 3.6 | 1.6 | 4.4 |
| 23 | 2.0 | 2.4 | 2.6 | 2.4 | 2.5 | 2.4 | 2.0 | 2.1 | 4.0 | 2.3 | 2.5 | 5.5 |
| 24 | 2.0 | 2.2 | 3.1 | 2.6 | 3.7 | 1.9 | 2.1 | 2.5 | 3.7 | 1.8 | 1.5 | 2.6 |
| 25 | 2.2 | 2.8 | 2.1 | 2.3 | 3.1 | 1.6 | *** | 1.9 | 3.7 | 1.7 | 1.7 | 2.6 |
| 26 | 4.1 | 4.9 | 2.7 | 3.5 | 4.1 | 2.1 | *** | 1.9 | 2.7 | 2.8 | 1.9 | 1.9 |
| 27 | 2.1 | 3.7 | 3.4 | 3.3 | 2.5 | 2.0 | *** | 2.4 | 3.0 | 2.1 | 2.2 | 2.5 |
| 28 | 2.1 | 2.4 | 4.7 | 2.9 | 2.6 | 1.7 | *** | 2.1 | 2.3 | 2.7 | 1.8 | 2.3 |
| 29 | 3.0 | · · · | 2.3 | 4.7 | 3.4 | 3.1 | *** | 2.2 | 2.0 | 2.6 | *** | 4.3 |
| 30 | 2.3 | · · · | 3.0 | 2.4 | 3.0 | 2.3 | *** | 2.5 | 2.1 | 4.5 | * 2.7 | 2.0 |
| 31 | 2.0 | · · · | 1.8 | · · · | 2.3 | · · · | *** | 2.5 | · · · | 3.2 | · · · | 4.8 |
| MEAN | 2.8 | 2.7 | 3.3 | 3.1 | 2.8 | 2.4 | 2.7 | 2.2 | 2.7 | 2.4 | 2.2 | 2.7 |

ITEM MOMENTUM FLUX (1.6 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)
 UNIT x 0.1 (m/s)²
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| 1 | -0.351 | * -0.485 | -0.619 | -0.737 | -0.383 | -0.261 | -0.243 | -0.184 | -0.141 | -0.129 | *** | -0.097 |
| 2 | -0.322 | * -0.141 | -0.622 | -1.697 | -0.256 | -0.220 | -0.157 | -0.629 | -0.220 | -0.169 | -0.941 | -0.174 |
| 3 | -0.073 | -0.178 | -0.348 | -0.389 | -0.372 | -0.248 | -0.264 | -0.949 | -0.243 | -0.115 | -0.279 | -0.832 |
| 4 | -0.124 | -0.079 | -0.381 | -0.408 | -0.213 | -0.372 | -0.246 | -0.525 | -0.153 | -0.085 | -0.058 | -0.213 |
| 5 | -0.327 | -0.147 | -0.358 | -0.042 | -0.156 | -0.316 | -0.457 | -0.481 | -0.166 | -0.194 | -0.118 | -0.054 |
| 6 | -0.317 | -0.675 | -0.419 | -0.182 | -0.707 | -0.223 | -0.315 | -0.341 | -0.426 | -0.163 | -0.106 | -0.055 |
| 7 | -0.152 | -0.343 | -0.362 | -0.303 | -0.489 | -0.169 | * -0.322 | -0.395 | -0.393 | -0.258 | -0.149 | -0.098 |
| 8 | -0.088 | -0.098 | -0.349 | -0.592 | -0.201 | -0.132 | -0.350 | -0.321 | *** | -0.227 | -0.104 | -0.125 |
| 9 | -0.179 | * -0.282 | -0.508 | -0.200 | -0.329 | -0.138 | * -0.400 | -0.266 | -0.389 | *** | -0.579 | -0.119 |
| 10 | -0.145 | -0.894 | * -0.238 | -0.219 | -0.093 | -0.297 | -0.458 | -0.233 | -0.137 | *** | -0.408 | -0.132 |
| 11 | -0.079 | -0.374 | * -0.368 | -0.757 | -0.072 | -0.235 | -0.550 | -0.385 | -0.133 | -0.128 | -0.134 | -0.083 |
| 12 | -0.057 | -0.107 | -0.279 | -0.353 | -0.473 | -0.385 | -1.729 | -1.015 | -0.434 | -0.104 | -0.144 | -0.187 |
| 13 | * -0.638 | -0.182 | -0.436 | *** | -0.559 | -0.465 | -0.994 | -0.128 | -0.276 | -0.159 | -0.051 | -0.127 |
| 14 | -0.158 | -0.065 | -0.393 | -0.470 | -0.168 | * -0.205 | -0.515 | -0.075 | -0.361 | -0.127 | -0.096 | -0.126 |
| 15 | -0.051 | -0.131 | -0.257 | *** | -0.205 | -0.359 | -0.389 | -0.177 | -0.212 | -0.065 | -0.168 | -0.435 |
| 16 | -0.151 | -0.238 | -0.424 | -0.221 | -0.239 | -0.521 | -0.502 | -0.188 | *** | -0.136 | * -0.099 | -0.066 |
| 17 | -0.058 | -0.187 | -0.256 | *** | -0.194 | -0.210 | -0.482 | -0.135 | -0.072 | -0.074 | -0.173 | -0.212 |
| 18 | -0.056 | -0.124 | -0.726 | -0.284 | -0.510 | * -0.125 | -0.703 | -0.262 | -0.150 | -0.164 | -0.205 | -0.169 |
| 19 | -0.074 | -0.146 | * -0.244 | -0.131 | -0.388 | * -0.378 | -0.333 | -0.384 | -0.116 | -0.211 | -0.177 | -0.126 |
| 20 | -0.062 | -0.111 | -0.417 | -0.413 | -0.206 | -0.262 | -0.160 | -0.164 | -0.147 | -0.054 | -0.123 | -0.076 |
| 21 | -0.238 | -0.277 | -1.144 | -0.388 | -0.127 | -0.212 | -0.354 | -0.104 | -0.154 | -0.077 | -0.120 | -0.382 |
| 22 | -0.436 | -0.149 | -0.195 | -0.152 | -0.182 | -0.168 | -0.244 | -0.230 | -0.451 | -0.395 | -0.146 | -0.597 |
| 23 | -0.096 | -0.212 | -0.420 | -0.142 | -0.170 | -0.207 | -0.254 | -0.234 | *** | -0.115 | -0.274 | -0.512 |
| 24 | -0.068 | -0.188 | -0.554 | -0.209 | *** | -0.152 | -0.257 | -0.303 | * -0.429 | -0.106 | -0.082 | -0.099 |
| 25 | -0.080 | -0.318 | * -0.106 | -0.302 | -0.383 | -0.146 | * -0.232 | -0.199 | * -0.425 | -0.090 | * -0.071 | -0.119 |
| 26 | -0.293 | -0.734 | -0.344 | -0.309 | -0.392 | -0.168 | -0.198 | -0.170 | -0.219 | -0.184 | -0.097 | -0.089 |
| 27 | -0.084 | * -0.792 | -0.490 | * -0.144 | * -0.216 | -0.136 | -0.536 | -0.187 | *** | -0.098 | -0.166 | -0.116 |
| 28 | -0.063 | -0.229 | -0.959 | *** | -0.177 | -0.128 | -1.179 | -0.177 | *** | -0.118 | -0.069 | -0.093 |
| 29 | -0.468 | · · · | -0.208 | -0.724 | -0.258 | -0.327 | -1.853 | -0.209 | -0.128 | -0.158 | *** | -0.310 |
| 30 | -0.104 | · · · | -0.245 | -0.159 | -0.214 | -0.115 | * -0.757 | -0.182 | * -0.110 | *** | * -0.106 | -0.055 |
| 31 | -0.132 | · · · | -0.080 | · · · | -0.188 | · · · | -0.210 | -0.150 | · · · | -0.248 | · · · | -0.384 |
| MEAN | -0.178 | -0.282 | -0.411 | -0.382 | -0.284 | -0.243 | -0.505 | -0.303 | -0.243 | -0.148 | -0.187 | -0.202 |

ITEM MOMENTUM FLUX (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)
 UNIT x 0.1 (m/s)²
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | *** | * -2.476 | -2.035 | * -3.321 | -1.470 | -1.724 | -1.083 | *** | -1.278 | -0.825 | -1.599 | -0.540 |
| 2 | *** | -0.602 | -2.537 | *** | -0.832 | -1.521 | -0.694 | *** | -1.512 | -1.307 | * -3.296 | -0.858 |
| 3 | -0.554 | -0.773 | -1.465 | -1.974 | -1.834 | -1.380 | -0.824 | *** | -0.975 | -0.851 | -1.582 | *** |
| 4 | -0.564 | -0.532 | * -1.508 | -1.494 | -0.960 | -1.852 | -1.071 | *** | -1.038 | -0.496 | -0.317 | -2.198 |
| 5 | * -3.415 | -1.467 | * -1.343 | -0.279 | -1.384 | -1.920 | -2.058 | *** | -1.016 | -1.251 | -0.417 | -0.305 |
| 6 | * -4.692 | *** | -1.340 | -1.078 | -3.717 | -1.266 | -1.217 | *** | -2.180 | -1.217 | -0.280 | -0.318 |
| 7 | -1.457 | *** | -2.502 | -0.937 | -3.063 | -0.787 | -1.097 | *** | -1.883 | -1.967 | -0.472 | -0.692 |
| 8 | -0.984 | -0.618 | -1.999 | -1.965 | -2.442 | -0.822 | -1.010 | *** | * -4.625 | -1.768 | -0.402 | -1.011 |
| 9 | * -1.701 | * -1.267 | -4.101 | -1.240 | -2.376 | -0.978 | -1.272 | *** | -2.667 | -1.507 | * -2.053 | -1.306 |
| 10 | -1.619 | -3.615 | * -1.480 | -1.177 | -0.712 | -1.841 | -1.487 | *** | -0.723 | -0.385 | -1.655 | -0.592 |
| 11 | -0.304 | -1.804 | -3.449 | * -1.801 | * -0.931 | -1.289 | * -1.376 | *** | -0.465 | -0.383 | -0.682 | -0.570 |
| 12 | -0.555 | * -0.513 | -1.497 | * -3.663 | * -1.105 | -1.621 | *** | *** | -2.714 | -0.594 | -0.560 | -1.055 |
| 13 | *** | -1.204 | -1.856 | * -2.089 | -2.722 | -2.040 | -3.238 | *** | -1.534 | -0.850 | -0.323 | -1.311 |
| 14 | -1.401 | -0.448 | -1.666 | -2.429 | -1.500 | * -1.457 | -1.795 | *** | -2.271 | -0.831 | -0.352 | * -0.633 |
| 15 | -0.496 | -0.684 | -1.415 | -1.075 | -1.898 | -1.663 | -1.369 | *** | -1.286 | -0.331 | -0.836 | -1.512 |
| 16 | -1.374 | -1.223 | * -1.838 | * -2.944 | -0.988 | -1.892 | -1.402 | *** | * -1.943 | -0.756 | -0.316 | -0.454 |
| 17 | -0.555 | -0.815 | -1.784 | -2.258 | -0.967 | -1.151 | -1.638 | *** | -0.312 | -0.349 | * -0.918 | -0.725 |
| 18 | -0.294 | * -0.671 | -2.703 | -0.927 | -2.813 | * -0.653 | -2.066 | *** | -0.999 | -1.263 | -0.884 | * -1.592 |
| 19 | -0.327 | -0.691 | * -1.596 | -1.644 | -2.449 | * -1.726 | -0.929 | *** | -0.544 | -1.253 | -0.920 | -0.604 |
| 20 | -0.505 | -1.263 | * -2.023 | * -1.243 | * -1.134 | -1.042 | -0.516 | *** | -0.881 | -0.412 | -0.421 | -0.589 |
| 21 | -1.201 | -1.133 | *** | -2.002 | -0.685 | -0.818 | -1.261 | -0.748 | -0.584 | -0.425 | -0.539 | -1.671 |
| 22 | * -3.949 | -0.580 | -2.028 | * -1.090 | -1.021 | -0.757 | -0.969 | -0.878 | -2.894 | -3.094 | -0.495 | * -3.948 |
| 23 | -0.842 | -0.873 | -1.114 | * -0.964 | * -0.998 | -0.959 | -1.005 | -1.023 | -3.080 | -0.611 | * -1.493 | *** |
| 24 | -0.502 | -0.748 | * -1.951 | -1.491 | -2.594 | -0.585 | -1.252 | -1.276 | * -3.059 | -0.456 | -0.354 | -1.318 |
| 25 | -0.648 | -1.480 | *** | -1.064 | -2.425 | -0.618 | *** | -0.842 | * -3.855 | * -0.485 | -0.286 | -1.025 |
| 26 | * -3.154 | * -2.704 | -1.528 | -2.724 | -3.268 | -0.996 | *** | -0.986 | -1.751 | -1.313 | -0.696 | -0.358 |
| 27 | -0.677 | * -2.542 | -1.920 | -1.970 | -1.409 | -0.972 | *** | -1.014 | * -1.939 | -0.760 | -0.973 | -0.896 |
| 28 | -0.539 | -1.113 | -3.916 | * -1.965 | -1.268 | -0.756 | *** | -0.839 | -0.907 | -1.141 | -0.582 | -0.523 |
| 29 | -1.634 | . . . | -0.917 | * -4.078 | -2.234 | -1.602 | *** | -1.104 | -0.746 | -1.288 | *** | * -2.774 |
| 30 | -0.902 | . . . | -1.587 | -1.141 | -1.673 | -0.926 | *** | -1.160 | -0.708 | -4.321 | * -0.943 | -0.608 |
| 31 | -0.546 | . . . | -0.690 | . . . | -1.241 | . . . | *** | -1.443 | . . . | -2.258 | . . . | *** |
| MEAN | -1.290 | -1.225 | -1.924 | -1.794 | -1.746 | -1.248 | -1.332 | -1.028 | -1.679 | -1.121 | -0.850 | -1.071 |

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (1.6 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)
 UNIT x 0.1 (°C m/s)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-------|----------|--------|----------|--------|
| 1 | 0.083 | * 0.050 | 0.058 | 0.286 | 0.577 | 0.363 | 0.057 | 0.127 | 0.260 | 0.105 | *** | 0.159 |
| 2 | 0.098 | * 0.000 | 0.081 | 0.068 | 0.491 | 0.381 | 0.129 | 0.084 | 0.238 | 0.139 | -0.209 | 0.109 |
| 3 | 0.099 | 0.156 | 0.308 | 0.306 | 0.373 | 0.276 | 0.098 | 0.568 | 0.262 | 0.144 | 0.174 | -0.100 |
| 4 | 0.108 | 0.287 | 0.104 | 0.208 | 0.270 | 0.181 | 0.142 | 0.684 | 0.261 | 0.041 | 0.062 | 0.078 |
| 5 | 0.058 | 0.289 | 0.328 | 0.045 | 0.408 | 0.134 | 0.095 | 0.614 | 0.186 | 0.069 | 0.278 | 0.175 |
| 6 | 0.066 | 0.311 | 0.018 | 0.378 | 0.260 | 0.261 | 0.054 | 0.487 | 0.086 | 0.080 | 0.235 | 0.119 |
| 7 | 0.111 | 0.317 | -0.031 | -0.029 | -0.013 | 0.124 | * 0.020 | 0.693 | 0.045 | 0.073 | 0.160 | 0.078 |
| 8 | 0.244 | 0.320 | 0.167 | 0.388 | 0.410 | 0.016 | 0.207 | 0.573 | *** | 0.083 | 0.093 | 0.099 |
| 9 | 0.240 | * 0.270 | 0.029 | 0.284 | 0.315 | 0.045 | * 0.000 | 0.144 | 0.109 | *** | -0.011 | 0.112 |
| 10 | 0.165 | 0.012 | * 0.100 | 0.373 | 0.230 | 0.292 | 0.165 | 0.372 | 0.229 | *** | 0.247 | 0.107 |
| 11 | 0.021 | 0.006 | * 0.320 | 0.308 | 0.015 | 0.165 | -0.097 | 0.670 | 0.246 | 0.231 | 0.197 | 0.134 |
| 12 | 0.002 | 0.008 | 0.326 | -0.040 | 0.105 | 0.145 | -0.360 | 0.317 | 0.211 | 0.001 | 0.192 | 0.102 |
| 13 | * 0.120 | 0.054 | 0.260 | *** | 0.421 | -0.021 | -0.099 | 0.318 | 0.182 | 0.084 | 0.063 | 0.010 |
| 14 | 0.159 | 0.147 | 0.388 | 0.451 | 0.342 | * 0.050 | 0.109 | 0.192 | 0.171 | -0.010 | 0.017 | 0.054 |
| 15 | 0.227 | -0.002 | 0.117 | *** | 0.412 | 0.192 | -0.153 | 0.524 | 0.087 | 0.064 | -0.044 | 0.006 |
| 16 | 0.214 | -0.012 | 0.057 | 0.053 | 0.427 | -0.015 | 0.115 | 0.614 | *** | 0.068 | * 0.220 | -0.004 |
| 17 | 0.200 | 0.030 | 0.175 | *** | 0.366 | 0.089 | 0.066 | 0.534 | 0.225 | 0.082 | 0.004 | 0.089 |
| 18 | 0.231 | 0.044 | 0.276 | 0.443 | 0.318 | * 0.060 | 0.199 | 0.557 | 0.131 | 0.051 | 0.094 | 0.142 |
| 19 | 0.198 | 0.144 | * 0.400 | 0.399 | -0.003 | * 0.170 | 0.195 | 0.473 | 0.158 | -0.020 | 0.203 | 0.105 |
| 20 | 0.199 | 0.302 | 0.377 | 0.241 | 0.055 | 0.019 | 0.080 | 0.342 | 0.035 | 0.009 | 0.273 | 0.132 |
| 21 | -0.023 | 0.284 | 0.057 | 0.285 | 0.228 | 0.074 | 0.049 | 0.356 | 0.206 | -0.014 | 0.192 | 0.068 |
| 22 | 0.126 | 0.124 | 0.485 | 0.011 | 0.148 | -0.014 | 0.048 | 0.472 | 0.130 | -0.025 | 0.081 | -0.100 |
| 23 | 0.220 | 0.248 | 0.170 | 0.061 | -0.022 | -0.002 | 0.063 | 0.411 | *** | 0.147 | 0.008 | -0.024 |
| 24 | 0.243 | 0.289 | 0.007 | 0.408 | *** | 0.081 | 0.135 | 0.370 | * -0.110 | 0.082 | 0.171 | 0.121 |
| 25 | 0.123 | 0.267 | * 0.050 | 0.578 | 0.139 | 0.085 | * 0.200 | 0.329 | * 0.000 | 0.084 | * 0.120 | 0.133 |
| 26 | 0.180 | 0.032 | 0.084 | 0.504 | 0.030 | -0.021 | 0.230 | 0.219 | 0.176 | -0.024 | 0.038 | 0.129 |
| 27 | 0.284 | * 0.200 | 0.438 | * 0.220 | * 0.260 | 0.020 | 0.270 | 0.270 | *** | 0.173 | 0.141 | 0.157 |
| 28 | 0.088 | 0.031 | 0.300 | *** | 0.090 | 0.034 | 0.246 | 0.279 | *** | 0.004 | 0.153 | 0.157 |
| 29 | 0.071 | . . . | 0.144 | 0.188 | 0.040 | 0.068 | -0.230 | 0.315 | 0.040 | 0.004 | *** | 0.098 |
| 30 | 0.264 | . . . | 0.441 | 0.463 | 0.131 | -0.004 | * -0.010 | 0.271 | * 0.000 | *** | * -0.040 | 0.013 |
| 31 | 0.150 | . . . | 0.368 | . . . | 0.299 | . . . | 0.242 | 0.275 | . . . | -0.049 | . . . | 0.050 |
| MEAN | 0.148 | 0.150 | 0.206 | 0.264 | 0.237 | 0.108 | 0.073 | 0.402 | 0.143 | 0.060 | 0.111 | 0.081 |

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)
 UNIT x 0.1 (°C m/s)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---------|---------|----------|----------|----------|---------|--------|-------|----------|---------|----------|----------|
| 1 | 0.173 | * 0.000 | 0.110 | 0.332 | 0.757 | 0.687 | 0.163 | *** | 0.323 | 0.125 | -0.030 | 0.147 |
| 2 | 0.218 | 0.016 | 0.127 | 0.075 | 0.585 | 0.662 | 0.132 | *** | 0.384 | 0.241 | -0.187 | 0.073 |
| 3 | 0.055 | 0.251 | 0.405 | 0.486 | 0.579 | 0.480 | 0.136 | *** | 0.367 | 0.229 | 0.196 | * -0.020 |
| 4 | 0.082 | 0.339 | * 0.170 | 0.309 | 0.418 | 0.520 | 0.155 | *** | 0.403 | 0.042 | 0.040 | 0.109 |
| 5 | 0.139 | 0.333 | * 0.420 | 0.032 | 0.656 | 0.262 | 0.288 | *** | 0.286 | 0.156 | 0.193 | 0.190 |
| 6 | 0.197 | * 0.630 | 0.016 | 0.469 | 0.475 | 0.582 | 0.136 | *** | 0.245 | 0.198 | 0.181 | 0.212 |
| 7 | 0.090 | 0.515 | -0.034 | -0.017 | 0.017 | 0.303 | -0.029 | *** | 0.222 | 0.211 | 0.160 | 0.096 |
| 8 | 0.247 | 0.310 | 0.284 | 0.596 | 0.673 | 0.097 | 0.235 | *** | -0.256 | 0.180 | 0.112 | 0.079 |
| 9 | 0.310 | * 0.220 | 0.005 | 0.371 | 0.548 | 0.117 | -0.033 | *** | 0.134 | -0.118 | * -0.010 | 0.167 |
| 10 | 0.168 | 0.135 | * 0.090 | 0.553 | 0.321 | 0.638 | 0.232 | *** | 0.264 | 0.081 | 0.091 | 0.114 |
| 11 | 0.006 | 0.051 | 0.342 | 0.559 | * -0.010 | 0.314 | -0.051 | *** | 0.341 | 0.146 | 0.119 | 0.100 |
| 12 | *** | * 0.010 | 0.331 | * -0.130 | 0.119 | 0.434 | -0.229 | *** | 0.402 | 0.044 | 0.199 | 0.125 |
| 13 | * 0.270 | 0.092 | 0.373 | * 0.470 | 0.671 | 0.220 | 0.059 | *** | 0.216 | 0.183 | 0.084 | -0.032 |
| 14 | 0.188 | 0.173 | 0.568 | 0.596 | 0.488 | * 0.070 | 0.185 | *** | 0.301 | -0.015 | 0.046 | * 0.030 |
| 15 | 0.275 | -0.016 | 0.037 | 0.080 | 0.652 | 0.332 | -0.089 | *** | 0.121 | 0.089 | -0.058 | 0.057 |
| 16 | 0.248 | -0.026 | * 0.100 | * 0.090 | 0.573 | 0.007 | 0.180 | *** | * -0.040 | 0.094 | 0.228 | 0.012 |
| 17 | 0.161 | 0.073 | 0.210 | 0.084 | 0.634 | 0.326 | 0.105 | *** | 0.183 | 0.098 | * -0.070 | 0.120 |
| 18 | 0.164 | * 0.130 | 0.510 | 0.527 | 0.613 | * 0.130 | 0.331 | *** | 0.220 | 0.140 | -0.046 | 0.231 |
| 19 | 0.192 | 0.218 | * 0.520 | 0.633 | 0.025 | * 0.290 | 0.274 | *** | 0.239 | -0.008 | 0.075 | 0.096 |
| 20 | 0.251 | 0.400 | 0.327 | 0.285 | * -0.020 | 0.123 | 0.117 | *** | 0.073 | 0.003 | 0.232 | 0.128 |
| 21 | -0.097 | 0.369 | 0.405 | 0.420 | 0.330 | 0.197 | 0.214 | 0.296 | 0.167 | -0.052 | 0.112 | 0.136 |
| 22 | 0.253 | 0.184 | 0.649 | * -0.010 | 0.270 | 0.091 | 0.193 | 0.448 | 0.354 | 0.079 | 0.087 | -0.116 |
| 23 | 0.334 | 0.253 | 0.256 | * 0.090 | * -0.020 | -0.022 | 0.180 | 0.369 | -0.100 | 0.132 | -0.118 | 0.173 |
| 24 | 0.214 | 0.333 | * -0.040 | 0.561 | -0.081 | 0.178 | 0.288 | 0.396 | -0.160 | 0.022 | 0.161 | 0.155 |
| 25 | 0.133 | 0.294 | *** | 0.695 | 0.308 | 0.238 | *** | 0.293 | -0.070 | * 0.070 | 0.057 | 0.159 |
| 26 | 0.378 | -0.069 | 0.090 | 0.698 | 0.149 | 0.059 | *** | 0.233 | 0.361 | -0.061 | 0.003 | 0.098 |
| 27 | 0.363 | *** | 0.567 | 0.177 | 0.313 | 0.021 | *** | 0.261 | * -0.080 | 0.172 | 0.161 | 0.205 |
| 28 | 0.076 | -0.003 | 0.480 | * -0.050 | 0.160 | 0.074 | *** | 0.272 | 0.033 | -0.070 | 0.208 | 0.118 |
| 29 | 0.309 | - . . | 0.183 | 0.329 | 0.117 | 0.183 | *** | 0.372 | 0.100 | -0.052 | *** | 0.254 |
| 30 | 0.290 | - . . | 0.546 | 0.599 | 0.212 | 0.007 | *** | 0.333 | -0.044 | -0.320 | * -0.080 | -0.007 |
| 31 | 0.175 | - . . | 0.451 | - . . | 0.514 | - . . | *** | 0.354 | - . . | -0.095 | - . . | 0.224 |
| MEAN | 0.196 | 0.193 | 0.284 | 0.330 | 0.357 | 0.254 | 0.132 | 0.330 | 0.166 | 0.063 | 0.074 | 0.111 |

ITEM SHORT-WAVE RADIATION (1.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT PYRANOMETER (GORCZYNSKI TYPE) (MS-43F; MS-402F since Mar 20, 2006)
 UNIT (W/m²)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 126.1 | 50.6 | 44.7 | 156.7 | 315.3 | 341.1 | 166.1 | 170.3 | 234.4 | 156.5 | 46.9 | 120.3 |
| 2 | 124.9 | 74.0 | 47.5 | 51.1 | 301.4 | 339.8 | 180.1 | 175.9 | 246.3 | 200.9 | 108.5 | 104.8 |
| 3 | 87.4 | 140.5 | 200.2 | 214.3 | 280.4 | 333.4 | 160.4 | 293.0 | 233.0 | 182.5 | 167.1 | 81.7 |
| 4 | 107.6 | 170.2 | 76.6 | 105.9 | 236.0 | 314.0 | 201.2 | 275.9 | 254.5 | 45.1 | 64.4 | 131.6 |
| 5 | 114.5 | 166.8 | 205.6 | 35.7 | 269.4 | 218.8 | 201.3 | 258.4 | 214.9 | 189.7 | 159.3 | 126.1 |
| 6 | 129.2 | 158.9 | 37.9 | 230.2 | 278.9 | 325.5 | 144.0 | 217.0 | 193.3 | 177.1 | 154.4 | 90.1 |
| 7 | 108.9 | 170.8 | 20.6 | 23.5 | 90.1 | 243.5 | 93.9 | 288.6 | 218.6 | 178.0 | 107.8 | 82.2 |
| 8 | 124.1 | 160.8 | 135.6 | 249.0 | 301.5 | 122.9 | 269.4 | 227.8 | 47.8 | 176.9 | 107.0 | 115.3 |
| 9 | 132.1 | 152.6 | 44.0 | 169.8 | 284.7 | 128.8 | 103.4 | 112.9 | 210.7 | 30.8 | 123.5 | 120.5 |
| 10 | 129.9 | 25.5 | 57.9 | 208.5 | 181.4 | 323.0 | 296.7 | 171.1 | 225.9 | 94.9 | 156.0 | 123.9 |
| 11 | 27.3 | 26.3 | 235.7 | 185.2 | 40.4 | 235.2 | 133.4 | 247.2 | 234.2 | 188.8 | 152.8 | 115.4 |
| 12 | 16.1 | 32.9 | 208.4 | 18.2 | 171.8 | 311.4 | 114.8 | 150.4 | 187.4 | 75.5 | 117.4 | 117.2 |
| 13 | 130.9 | 44.8 | 175.9 | 216.6 | 313.3 | 193.6 | 60.7 | 146.6 | 159.8 | 154.7 | 95.8 | 11.2 |
| 14 | 132.7 | 134.8 | 234.1 | 251.9 | 222.2 | 71.1 | 171.8 | 102.5 | 214.5 | 91.0 | 59.5 | 53.6 |
| 15 | 135.7 | 20.4 | 75.5 | 59.7 | 257.1 | 253.5 | 95.2 | 224.4 | 163.5 | 115.2 | 26.5 | 94.1 |
| 16 | 142.5 | 32.4 | 77.2 | 63.5 | 297.1 | 142.0 | 250.2 | 270.2 | 62.1 | 168.1 | 140.4 | 28.6 |
| 17 | 137.7 | 72.5 | 142.4 | 125.1 | 310.6 | 299.6 | 231.4 | 246.3 | 171.5 | 122.5 | 17.2 | 123.4 |
| 18 | 130.8 | 98.7 | 155.8 | 277.7 | 313.9 | 140.6 | 312.5 | 252.0 | 223.2 | 164.7 | 89.3 | 120.9 |
| 19 | 132.5 | 119.3 | 204.2 | 231.9 | 107.4 | 192.4 | 311.8 | 210.4 | 187.5 | 88.0 | 127.8 | 91.2 |
| 20 | 124.0 | 194.7 | 223.0 | 146.9 | 57.9 | 146.0 | 249.8 | 182.6 | 111.8 | 41.6 | 121.2 | 94.7 |
| 21 | 58.9 | 189.3 | 142.6 | 246.4 | 324.1 | 199.4 | 306.8 | 203.1 | 188.5 | 30.0 | 103.7 | 75.9 |
| 22 | 144.1 | 72.7 | 249.8 | 27.1 | 247.2 | 178.0 | 271.3 | 257.0 | 219.7 | 120.4 | 46.9 | 72.1 |
| 23 | 144.6 | 174.3 | 92.5 | 47.0 | 43.3 | 80.9 | 283.2 | 254.3 | 15.6 | 168.2 | 54.6 | 119.8 |
| 24 | 143.9 | 164.5 | 31.9 | 248.0 | 30.4 | 250.6 | 265.0 | 240.2 | 65.3 | 69.4 | 137.2 | 109.5 |
| 25 | 104.6 | 171.8 | 35.5 | 314.1 | 265.2 | 250.2 | *** | 225.9 | 123.5 | 58.1 | 76.8 | 115.0 |
| 26 | 153.0 | 57.1 | 93.6 | 289.8 | 61.6 | 134.1 | *** | 185.2 | 234.9 | 33.9 | 55.0 | 111.3 |
| 27 | 145.6 | 113.0 | 257.8 | 100.2 | 195.0 | 114.7 | *** | * 196.3 | 35.0 | 173.4 | 113.9 | 120.3 |
| 28 | 74.9 | 44.5 | 123.4 | 44.0 | 160.8 | 177.3 | *** | 216.4 | 30.3 | 17.5 | 121.9 | 113.1 |
| 29 | 96.8 | - . . | 102.9 | 225.5 | 87.4 | 143.8 | *** | 231.2 | 154.6 | 88.1 | 127.1 | 121.2 |
| 30 | 153.3 | - . . | 273.4 | 289.6 | 153.1 | 91.8 | 99.9 | 215.6 | 26.3 | 21.7 | 108.7 | 38.9 |
| 31 | 101.2 | - . . | 188.0 | - . . | 269.0 | - . . | 228.3 | 251.9 | - . . | 40.4 | - . . | 117.4 |
| MEAN | 116.6 | 108.4 | 135.3 | 161.8 | 208.6 | 209.9 | 200.1 | 216.1 | 163.0 | 111.7 | 103.0 | 98.8 |

ITEM NET RADIATION (1.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT NET RADIOMETER (MIDLTON TYPE) (CN-11)
 UNIT (W/m²)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|-------|-------|------|
| 1 | 1.9 | 18.5 | 29.1 | 86.2 | 166.5 | 192.4 | 112.0 | 114.7 | 149.0 | 103.7 | 25.5 | 35.6 |
| 2 | 6.0 | 26.4 | 29.2 | 19.1 | 150.4 | 204.7 | 117.8 | 119.2 | 154.7 | 130.6 | 6.6 | 46.9 |
| 3 | 0.9 | 78.7 | 92.9 | 108.3 | 154.3 | 204.3 | 105.2 | 193.9 | 148.0 | 123.1 | 54.1 | 23.9 |
| 4 | 10.6 | 79.5 | 32.8 | 51.0 | 129.9 | 204.6 | 139.8 | 176.5 | 163.4 | 28.4 | 22.1 | 15.0 |
| 5 | 21.4 | 55.8 | 114.1 | 26.4 | 161.2 | 147.9 | 142.7 | 160.2 | 133.8 | 122.5 | 55.3 | 34.9 |
| 6 | -0.1 | 41.4 | 21.5 | 128.0 | 150.1 | 204.2 | 100.6 | 133.9 | 118.2 | 113.7 | 56.7 | 35.7 |
| 7 | 12.6 | 55.3 | 8.6 | 7.7 | 47.4 | 144.3 | 60.3 | 171.2 | 127.9 | 114.1 | 46.0 | 35.6 |
| 8 | 29.7 | 50.8 | 56.0 | 110.5 | 188.7 | 66.9 | 170.9 | 140.4 | 32.0 | 112.6 | 40.2 | 36.1 |
| 9 | 24.7 | 55.2 | 20.9 | 85.7 | 162.6 | 78.9 | 65.0 | 71.5 | 141.5 | 15.7 | 24.9 | 25.3 |
| 10 | 26.5 | 6.7 | 34.2 | 116.8 | 105.6 | 207.5 | 185.8 | 109.2 | 135.5 | 60.5 | 41.1 | 29.8 |
| 11 | 1.8 | 11.5 | 102.1 | 106.8 | 23.2 | 148.1 | 80.9 | 164.6 | 149.4 | 101.8 | 9.1 | 41.8 |
| 12 | -2.3 | 12.1 | 78.6 | 8.1 | 106.2 | 193.4 | 69.4 | 88.9 | 125.8 | 48.5 | 43.4 | 41.2 |
| 13 | 40.8 | 26.1 | 67.9 | 138.8 | 175.3 | 120.5 | 44.1 | 102.2 | 110.2 | 104.7 | 36.2 | 1.1 |
| 14 | 29.3 | 57.3 | 101.2 | 135.9 | 127.7 | 44.4 | 118.9 | 67.4 | 130.3 | 53.4 | 20.0 | 27.3 |
| 15 | 32.5 | 10.3 | 34.6 | 37.6 | 155.3 | 173.2 | 49.8 | 150.6 | 109.3 | 68.6 | 6.8 | 39.0 |
| 16 | 27.9 | 9.3 | 33.6 | 36.8 | 173.3 | 91.4 | 165.2 | 178.7 | 42.3 | 87.1 | 41.0 | -5.0 |
| 17 | 27.2 | 29.8 | 59.3 | 75.6 | 182.7 | 205.9 | 153.0 | 162.6 | 109.8 | 70.5 | 8.3 | 34.4 |
| 18 | 28.5 | 40.0 | 82.1 | 150.4 | 189.6 | 92.5 | 197.6 | 164.3 | 130.7 | 89.0 | 26.6 | 26.9 |
| 19 | 32.3 | 37.3 | 101.0 | 121.3 | 63.3 | 141.5 | 199.3 | 141.4 | 114.3 | 45.0 | 32.8 | 26.4 |
| 20 | 41.0 | 70.7 | 101.0 | 87.2 | 35.4 | 95.8 | 162.3 | 122.7 | 63.7 | 21.4 | 32.4 | 22.0 |
| 21 | 6.7 | 65.9 | 42.9 | 149.7 | 204.0 | 131.7 | 200.2 | 133.0 | 117.1 | 12.8 | 35.2 | 33.0 |
| 22 | 26.1 | 26.8 | 101.7 | 14.3 | 156.7 | 110.4 | 178.2 | 162.8 | 143.3 | 68.4 | 26.8 | 17.0 |
| 23 | 34.6 | 59.1 | 51.1 | 31.1 | 19.7 | 46.5 | 190.5 | 160.8 | 4.8 | 75.6 | 21.4 | 4.5 |
| 24 | 33.1 | 69.0 | 18.1 | 139.6 | 19.2 | 153.7 | 179.3 | 157.2 | 3.2 | 45.2 | 37.9 | 15.5 |
| 25 | 14.5 | 69.0 | 24.7 | 168.7 | 178.2 | 155.6 | *** | 139.3 | 2.0 | 42.0 | 27.5 | 4.1 |
| 26 | 23.5 | 22.9 | 43.8 | 158.0 | 35.2 | 86.9 | *** | 112.1 | 55.2 | 19.2 | 27.2 | 8.9 |
| 27 | 36.3 | 76.6 | 130.0 | 59.8 | 135.1 | 75.7 | *** | * 114.9 | 11.2 | 65.5 | 42.4 | 9.9 |
| 28 | 24.3 | 17.9 | 69.7 | 32.1 | 106.7 | 126.2 | *** | 132.7 | 12.1 | 9.7 | 45.9 | 17.8 |
| 29 | 36.6 | - - - | 41.3 | 127.3 | 56.9 | 101.1 | *** | 143.8 | * 27.9 | 50.7 | 39.3 | 8.8 |
| 30 | 52.0 | - - - | 105.9 | 148.9 | 96.5 | 56.1 | 66.5 | 138.8 | 11.5 | 11.8 | 16.2 | -8.7 |
| 31 | 28.7 | - - - | 76.3 | - - - | 161.2 | - - - | 155.3 | 152.4 | - - - | 25.1 | - - - | 16.3 |
| MEAN | 22.9 | 42.1 | 61.5 | 88.9 | 123.2 | 133.6 | 131.2 | 138.1 | 92.6 | 65.8 | 31.6 | 22.6 |

ITEM SOIL HEAT FLUX (0.02 m DEPTH)
 INSTRUMENT SOIL HEAT FLUX METER (GPR-PHF-01)
 UNIT (W/m²)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | -8.1 | -3.4 | 1.0 | 7.7 | 8.7 | 0.7 | 4.4 | 4.2 | 7.8 | 3.4 | -3.4 | -2.7 |
| 2 | -5.7 | -3.1 | -4.6 | 3.7 | 11.2 | 0.7 | 3.3 | 3.6 | 7.9 | -5.5 | -9.7 | 0.9 |
| 3 | -7.9 | -3.0 | 5.0 | 3.2 | 14.6 | 4.1 | 4.4 | 3.8 | 7.2 | -2.9 | -10.3 | 6.5 |
| 4 | -4.6 | -3.1 | -2.6 | -4.5 | 15.5 | 5.4 | 5.2 | 7.5 | 7.2 | -0.1 | -15.0 | -11.8 |
| 5 | 0.2 | -4.9 | 13.0 | 2.4 | 18.8 | 0.1 | 3.1 | 6.2 | 7.0 | 0.8 | -5.0 | -6.6 |
| 6 | -4.6 | -6.1 | 1.7 | 11.0 | 18.8 | 2.3 | 3.0 | 3.9 | 5.9 | -3.3 | -2.8 | -4.7 |
| 7 | -1.8 | -3.2 | -7.2 | -5.7 | 6.1 | 2.9 | 0.9 | 4.4 | 5.4 | -1.3 | -3.6 | -0.3 |
| 8 | -6.5 | -0.8 | -2.7 | -0.9 | 5.3 | 1.0 | 4.8 | 5.7 | -7.3 | -0.6 | -3.2 | -5.0 |
| 9 | -7.0 | 6.9 | -7.0 | 1.3 | 5.0 | 0.1 | 1.4 | 0.7 | -2.1 | -6.7 | -5.5 | -5.8 |
| 10 | -4.0 | 0.1 | -3.7 | 9.5 | 5.2 | 6.2 | 2.9 | 4.3 | -0.1 | 1.3 | -9.4 | -5.6 |
| 11 | -3.4 | -3.0 | 0.1 | 8.4 | -1.6 | 3.9 | 0.9 | 6.5 | 3.0 | 3.5 | -7.2 | -0.6 |
| 12 | -3.3 | -3.1 | 1.7 | -9.0 | 1.4 | 7.3 | 3.2 | 2.1 | 0.1 | 0.5 | -6.8 | -2.4 |
| 13 | -6.4 | -3.9 | 4.5 | 11.9 | 1.9 | 3.7 | -5.1 | 1.7 | 1.4 | 4.1 | -3.0 | -4.8 |
| 14 | -8.4 | 0.4 | 0.7 | 4.9 | -1.2 | -1.2 | 2.4 | 3.6 | -2.8 | -2.7 | -4.2 | -0.7 |
| 15 | -6.4 | -1.0 | 3.3 | -7.4 | 0.4 | 7.7 | 3.8 | 10.6 | -5.8 | 0.1 | -8.0 | -5.7 |
| 16 | -6.7 | -4.1 | 4.8 | -7.9 | 5.9 | 8.3 | 5.1 | 12.8 | -5.2 | -2.6 | -11.0 | -10.3 |
| 17 | -4.4 | -2.5 | -2.7 | -4.1 | 9.1 | 6.5 | 4.1 | 9.8 | 1.1 | -5.3 | -4.3 | -10.0 |
| 18 | -3.7 | -3.0 | 0.6 | 7.0 | 11.3 | 2.4 | 3.6 | 10.1 | -1.0 | -7.3 | -3.7 | -8.6 |
| 19 | -1.4 | -3.9 | 2.1 | 8.0 | 4.3 | 4.6 | 4.5 | 7.7 | 0.6 | -5.6 | -2.6 | -5.7 |
| 20 | 2.0 | -1.8 | 7.4 | 5.8 | 7.1 | 5.3 | 4.0 | 7.5 | -0.2 | -4.8 | -2.2 | -3.4 |
| 21 | 2.1 | -0.2 | 0.4 | 12.5 | 10.9 | 6.3 | 4.0 | 9.5 | 4.1 | -4.2 | 1.3 | -1.0 |
| 22 | -2.8 | -0.8 | -0.9 | -9.6 | 3.7 | 5.5 | 4.1 | 13.9 | 1.8 | -5.2 | 3.2 | 5.6 |
| 23 | -3.1 | 3.6 | 0.6 | -3.3 | -3.2 | 0.1 | 5.3 | 13.7 | -13.1 | -10.0 | -1.7 | -5.7 |
| 24 | -5.0 | 3.7 | -7.2 | 4.9 | 3.7 | 2.6 | 5.0 | 13.0 | -10.2 | -7.4 | -5.7 | -9.4 |
| 25 | -3.4 | 6.2 | -3.6 | 7.4 | 10.1 | 3.2 | *** | 11.3 | -15.4 | 0.7 | -5.7 | -11.9 |
| 26 | -3.8 | 7.6 | -1.8 | 8.7 | -7.8 | 3.7 | *** | 7.7 | -5.7 | -8.0 | 0.9 | -10.8 |
| 27 | -2.5 | 3.8 | 1.5 | 0.4 | 2.9 | 5.8 | *** | * 7.4 | -9.2 | -12.0 | -2.0 | -10.7 |
| 28 | 1.5 | -6.4 | -3.9 | 5.9 | -1.3 | 7.3 | *** | 8.5 | 3.6 | -15.8 | -4.2 | -7.0 |
| 29 | -3.1 | - - - | -4.6 | 8.9 | -5.7 | 3.3 | *** | 9.2 | 1.6 | -3.5 | -6.8 | -5.1 |
| 30 | -1.5 | - - - | -1.6 | 9.3 | -3.1 | 0.2 | 2.5 | 7.5 | -6.1 | -6.5 | -4.8 | -10.7 |
| 31 | 0.9 | - - - | -1.1 | - - - | 0.6 | - - - | 5.3 | 8.0 | - - - | 1.5 | - - - | -3.6 |
| MEAN | -3.6 | -1.0 | -0.2 | 3.0 | 5.1 | 3.7 | 3.3 | 7.3 | -0.6 | -3.4 | -4.8 | -5.1 |

ITEM SUNSHINE DURATION (9.0m HEIGHT)
 INSTRUMENT SUNSHINE-RECORDER (MS-091)
 UNIT (min)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 533.0 | 91.0 | 0.0 | 143.5 | 738.0 | 779.0 | 69.0 | 205.0 | 551.0 | 307.5 | 65.5 | 477.5 |
| 2 | 529.0 | 197.0 | 0.0 | 51.0 | 733.5 | * 720.5 | 156.0 | 135.0 | 558.0 | 498.0 | 231.5 | 361.5 |
| 3 | 307.0 | 402.0 | 528.5 | 335.0 | 649.5 | 772.5 | 43.5 | 608.5 | 614.0 | 385.0 | 548.0 | 269.5 |
| 4 | 459.0 | 554.0 | 42.5 | 102.0 | 455.5 | 642.5 | 220.0 | 603.5 | 665.5 | 0.0 | 116.0 | 533.0 |
| 5 | 486.5 | 568.5 | 518.0 | 0.0 | 627.0 | 362.5 | 179.5 | 598.0 | 513.0 | 437.0 | 567.5 | 528.0 |
| 6 | 532.0 | 533.5 | 0.0 | 462.5 | 559.5 | 687.0 | 89.0 | 462.5 | 419.5 | 421.0 | 571.0 | 222.5 |
| 7 | 393.0 | 580.5 | 0.0 | 0.0 | 12.5 | 364.0 | 2.5 | 707.5 | 577.5 | 387.0 | 295.5 | 226.0 |
| 8 | 505.5 | 519.5 | 189.0 | 591.5 | 621.0 | 68.0 | 503.5 | 389.5 | 0.0 | 424.0 | 299.0 | 443.0 |
| 9 | 534.5 | 480.0 | 0.0 | 162.0 | 660.5 | 31.0 | 27.0 | 27.0 | 422.0 | 0.0 | 379.0 | 489.5 |
| 10 | 530.0 | 0.0 | 6.0 | 403.0 | 204.5 | 699.0 | 713.5 | 202.5 | 506.5 | 87.5 | 554.0 | 525.5 |
| 11 | 0.0 | 0.0 | 616.5 | 246.5 | 0.0 | 283.0 | 50.5 | 429.5 | 593.5 | 551.5 | 570.0 | 506.5 |
| 12 | 0.0 | 0.0 | 484.5 | 0.0 | 281.5 | 685.5 | 12.5 | 216.0 | 227.5 | 30.0 | 403.0 | 460.5 |
| 13 | 497.0 | 0.0 | 399.0 | 315.5 | 607.5 | 171.0 | 0.0 | 108.5 | 269.0 | 350.0 | 172.0 | 0.0 |
| 14 | 514.0 | 234.5 | 618.5 | 410.5 | 332.0 | 0.0 | 179.0 | 4.5 | 434.0 | 94.5 | 17.0 | 158.5 |
| 15 | 542.5 | 0.0 | 7.0 | 0.0 | 466.5 | 328.5 | 4.5 | 404.5 | 174.0 | 149.5 | 4.5 | 341.5 |
| 16 | 547.5 | 0.0 | 62.0 | 0.0 | 665.5 | 138.5 | 443.5 | 625.0 | 0.5 | 404.0 | 514.5 | 0.0 |
| 17 | 549.5 | 8.5 | 158.0 | 120.0 | 706.5 | 599.5 | 349.0 | 514.5 | 318.0 | 164.5 | 0.0 | 519.0 |
| 18 | 500.0 | 23.5 | 219.0 | 658.0 | 708.5 | 33.0 | 708.0 | 577.0 | 495.5 | 442.0 | 149.5 | 527.5 |
| 19 | 546.5 | 226.5 | 403.0 | 487.0 | 102.5 | 152.0 | 724.5 | 231.0 | 433.5 | 6.5 | 451.5 | 214.0 |
| 20 | 440.0 | 586.5 | 604.0 | 63.0 | 0.0 | 26.5 | 574.0 | 78.5 | 98.0 | 0.0 | 437.5 | 398.0 |
| 21 | 93.0 | 497.5 | 366.5 | 403.0 | 755.5 | 225.0 | 761.5 | 334.5 | 473.0 | 0.0 | 323.5 | 268.0 |
| 22 | 549.0 | 41.0 | 653.5 | 0.0 | 487.5 | 210.0 | 653.5 | 625.5 | 575.5 | 121.0 | 3.5 | 232.0 |
| 23 | 528.5 | 486.0 | 9.5 | 0.0 | 0.0 | 24.0 | 709.5 | 579.5 | 0.0 | 471.5 | 23.5 | 527.5 |
| 24 | 573.5 | 438.5 | 0.0 | 439.5 | 0.0 | 479.5 | 592.5 | 476.0 | 0.0 | 16.5 | 518.0 | 498.0 |
| 25 | 414.0 | 462.5 | 0.0 | 745.5 | 469.5 | 420.5 | 507.0 | 484.0 | 306.5 | 0.5 | 103.5 | 512.0 |
| 26 | 577.5 | 1.5 | 113.0 | 673.0 | 9.0 | 0.0 | 502.0 | 406.5 | 577.5 | 1.0 | 21.5 | 513.5 |
| 27 | 536.0 | 112.5 | 579.5 | 6.0 | 189.5 | 5.0 | 691.0 | 480.5 | 0.0 | 528.5 | 423.5 | 528.5 |
| 28 | 111.0 | 59.0 | 65.0 | 0.0 | 231.5 | 123.0 | 658.5 | 460.5 | 0.0 | 0.0 | 468.5 | 525.0 |
| 29 | 256.5 | · · · | 85.0 | 461.5 | 0.0 | 47.5 | 15.0 | 567.0 | 177.5 | 43.5 | 485.0 | 516.0 |
| 30 | 538.5 | · · · | 647.0 | 634.5 | 33.5 | 65.0 | 100.5 | 462.0 | 0.0 | 0.0 | 356.0 | 87.5 |
| 31 | 264.0 | · · · | 385.0 | · · · | 463.5 | · · · | 294.0 | 618.0 | · · · | 0.0 | · · · | 475.5 |
| MEAN | 431.9 | 253.7 | 250.3 | 263.8 | 379.7 | 304.8 | 339.8 | 407.2 | 332.7 | 203.9 | 302.4 | 383.4 |

ITEM AIR TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (CVS-HMP45D)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | 2.6 | 3.0 | 6.8 | 12.1 | 14.0 | 15.3 | 24.4 | 28.2 | 29.1 | 19.6 | 14.6 | 8.9 |
| 2 | 4.2 | 1.7 | 4.0 | 13.8 | 15.6 | 16.1 | 24.6 | 28.7 | 29.0 | 18.3 | 13.3 | 11.1 |
| 3 | 1.4 | 1.1 | 6.9 | 9.1 | 17.0 | 18.8 | 25.5 | 29.5 | 28.5 | 18.2 | 10.0 | 16.4 |
| 4 | 3.1 | 0.0 | 6.2 | 6.5 | 19.3 | 20.0 | 25.9 | 29.5 | 28.8 | 19.3 | 6.6 | 8.7 |
| 5 | 6.1 | 1.2 | 11.6 | 9.1 | 21.0 | 16.9 | 25.1 | 29.9 | 28.7 | 20.8 | 9.6 | 6.9 |
| 6 | 4.8 | -0.1 | 11.5 | 14.2 | 21.7 | 18.3 | 25.1 | 28.8 | 28.9 | 19.7 | 11.3 | 7.9 |
| 7 | 4.7 | 1.5 | 4.8 | 9.5 | 19.6 | 20.4 | 23.9 | 28.4 | 29.5 | 19.0 | 12.2 | 9.7 |
| 8 | 2.8 | 2.6 | 4.4 | 6.7 | 17.6 | 19.5 | 25.9 | 28.8 | 23.4 | 19.0 | 12.8 | 6.7 |
| 9 | 2.3 | 9.4 | 2.9 | 9.2 | 17.9 | 18.7 | 24.7 | 26.3 | 23.4 | 17.4 | 13.0 | 5.9 |
| 10 | 2.6 | 6.6 | 3.0 | 14.5 | 17.4 | 20.1 | 25.7 | 27.6 | 23.7 | 19.0 | 10.7 | 6.5 |
| 11 | 2.0 | 3.4 | 6.7 | 15.5 | 15.6 | 20.8 | 24.5 | 28.6 | 26.2 | 19.8 | 10.0 | 8.7 |
| 12 | 1.7 | 1.9 | 8.3 | 7.5 | 15.0 | 23.3 | 26.3 | 27.8 | 25.4 | 20.5 | 10.0 | 8.5 |
| 13 | 2.5 | 0.7 | 11.5 | 13.4 | 14.9 | 22.6 | 21.0 | 26.4 | 25.9 | 21.0 | 11.4 | 7.3 |
| 14 | -0.3 | 1.1 | 7.7 | 13.2 | 13.4 | 18.0 | 23.8 | 26.6 | 23.8 | 19.4 | 12.4 | 8.5 |
| 15 | -0.7 | 4.0 | 10.5 | 5.2 | 12.9 | 22.5 | 26.4 | 29.8 | 21.6 | 19.6 | 8.5 | 7.2 |
| 16 | -0.9 | 2.8 | 13.0 | 4.7 | 15.9 | 24.5 | 26.7 | 30.7 | 20.2 | 19.2 | 5.7 | 3.5 |
| 17 | 0.3 | 1.7 | 8.7 | 4.3 | 18.8 | 24.5 | 27.5 | 29.6 | 21.8 | 17.7 | 7.7 | 3.1 |
| 18 | 0.2 | 1.8 | 7.6 | 9.8 | 19.7 | 22.8 | 27.3 | 28.1 | 22.8 | 16.3 | 8.2 | 4.0 |
| 19 | 4.0 | 1.5 | 7.5 | 12.2 | 19.0 | 22.4 | 28.0 | 26.8 | 23.4 | 16.8 | 9.1 | 3.7 |
| 20 | 6.3 | 3.5 | 12.6 | 14.3 | 19.2 | 24.5 | 28.3 | 25.8 | 23.8 | 16.7 | 9.8 | 6.4 |
| 21 | 8.6 | 2.9 | 14.2 | 16.8 | 22.4 | 24.9 | 28.5 | 27.1 | 25.8 | 16.4 | 12.0 | 7.7 |
| 22 | 5.4 | 4.6 | 9.1 | 7.3 | 20.2 | 25.2 | 28.8 | 28.8 | 25.6 | 16.7 | 13.7 | 12.5 |
| 23 | 3.7 | 6.8 | 8.5 | 7.0 | 17.0 | 22.5 | 29.5 | 29.6 | 18.0 | 13.3 | 12.1 | 9.8 |
| 24 | 2.4 | 8.6 | 5.6 | 9.0 | 18.5 | 23.5 | 29.3 | 29.4 | 17.3 | 13.6 | 7.4 | 4.3 |
| 25 | 3.4 | 10.7 | 4.1 | 10.2 | 21.5 | 24.1 | *** | 28.8 | 14.9 | 16.3 | 7.5 | 1.7 |
| 26 | 4.1 | 15.0 | 5.7 | 11.3 | 15.2 | 24.6 | *** | 27.8 | 16.4 | 14.3 | 11.2 | 1.6 |
| 27 | 2.2 | 10.0 | 6.2 | 11.2 | 15.5 | 25.4 | *** | * 27.6 | 15.8 | 9.8 | 10.2 | 1.7 |
| 28 | 6.4 | 4.4 | 4.4 | 13.8 | 15.8 | 26.9 | *** | 28.8 | 19.6 | 8.2 | 9.0 | 2.8 |
| 29 | 3.7 | · · · | 2.8 | 16.7 | 13.9 | 24.6 | *** | 27.7 | 19.7 | 12.2 | 7.7 | 5.4 |
| 30 | 4.7 | · · · | 3.7 | 13.3 | 13.1 | 22.9 | 26.0 | 27.9 | 17.5 | 12.7 | 8.9 | 0.3 |
| 31 | 5.8 | · · · | 6.3 | · · · | 14.4 | · · · | 28.3 | 28.8 | · · · | 15.3 | · · · | 3.6 |
| MEAN | 3.2 | 4.0 | 7.3 | 10.7 | 17.2 | 21.8 | 26.2 | 28.3 | 23.3 | 17.0 | 10.2 | 6.5 |

ITEM AIR TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (CVS-HMP45D)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | 2.6 | 3.4 | 6.6 | 12.3 | 14.5 | 15.3 | 24.2 | 28.4 | 29.0 | 19.5 | *** | *** |
| 2 | 5.0 | 1.9 | 3.8 | 13.7 | 16.0 | 16.6 | 24.8 | 28.7 | 29.0 | 18.9 | *** | *** |
| 3 | 2.6 | 1.5 | 6.7 | 9.1 | 17.5 | 19.2 | 25.3 | 29.3 | 28.7 | 18.7 | *** | *** |
| 4 | 3.7 | 0.7 | 6.1 | 6.7 | 19.7 | 20.1 | 25.7 | 29.1 | 28.9 | 19.2 | *** | *** |
| 5 | 6.1 | 2.1 | 11.3 | 8.9 | 21.1 | 17.0 | 25.0 | 29.6 | 28.9 | 20.9 | *** | *** |
| 6 | 4.8 | 0.5 | 11.3 | 14.0 | 21.7 | 18.5 | 24.9 | 28.5 | 28.8 | 20.1 | *** | *** |
| 7 | 5.3 | 2.7 | 4.7 | 9.8 | 19.5 | 20.8 | 23.8 | 28.2 | 29.5 | 19.6 | *** | *** |
| 8 | 4.2 | 3.9 | 4.3 | 6.8 | 17.7 | 19.5 | 25.8 | 28.6 | 23.4 | 19.3 | *** | *** |
| 9 | 4.0 | 9.9 | 2.8 | 9.5 | 17.9 | 18.9 | 24.7 | 26.1 | 23.4 | 17.5 | *** | *** |
| 10 | 3.6 | 6.4 | 3.1 | 14.6 | 17.6 | 20.2 | 26.1 | 27.4 | 24.0 | 19.4 | *** | *** |
| 11 | 2.6 | 3.3 | 7.2 | 15.4 | 15.6 | 20.7 | 24.8 | 28.2 | 26.7 | 20.9 | *** | 9.8 |
| 12 | 1.7 | 1.8 | 8.6 | 7.4 | 15.1 | 23.2 | 26.5 | 27.7 | 25.4 | 21.0 | *** | 9.1 |
| 13 | 2.9 | 0.6 | 11.7 | 13.4 | 14.9 | 22.6 | 20.9 | 26.3 | 25.7 | 21.1 | *** | 7.2 |
| 14 | 0.7 | 1.2 | 8.2 | 13.1 | 13.2 | 17.9 | 23.6 | 26.8 | 23.6 | *** | *** | 8.8 |
| 15 | 0.9 | 4.1 | 10.7 | 5.1 | 12.7 | 22.3 | 26.6 | 29.9 | 21.6 | *** | *** | 7.8 |
| 16 | 0.8 | 2.7 | 13.0 | 4.6 | 16.0 | 24.5 | 26.7 | 30.6 | 20.1 | *** | *** | 3.6 |
| 17 | 1.9 | 1.6 | 8.5 | 4.1 | 19.3 | 24.7 | 27.7 | 29.7 | 21.8 | *** | *** | 4.0 |
| 18 | 1.5 | 2.0 | 7.4 | 9.8 | 20.1 | 22.8 | 27.6 | 27.9 | 23.0 | *** | *** | 5.1 |
| 19 | 5.5 | 2.3 | 7.3 | 12.3 | 19.4 | 22.1 | 28.5 | 26.5 | 23.7 | *** | *** | 4.4 |
| 20 | 7.1 | 4.2 | 12.7 | 14.1 | 19.1 | 24.4 | 29.1 | 25.4 | 23.7 | *** | *** | 7.3 |
| 21 | 9.5 | 3.5 | 14.2 | 16.5 | 22.7 | 25.0 | 29.1 | 27.0 | 25.8 | *** | *** | 8.4 |
| 22 | 5.3 | 4.8 | 8.9 | 7.2 | 20.6 | 25.2 | 29.2 | 28.8 | 25.6 | *** | *** | 12.5 |
| 23 | 4.2 | 7.1 | 8.3 | 6.8 | 17.0 | 22.6 | 29.9 | 29.6 | 17.9 | *** | *** | 10.5 |
| 24 | 3.5 | 9.0 | 5.6 | 8.9 | 18.4 | 23.8 | 29.4 | 29.2 | 17.3 | *** | *** | 5.4 |
| 25 | 4.6 | 11.0 | 4.0 | 10.7 | 21.4 | 24.5 | *** | 28.9 | 15.7 | *** | *** | 3.2 |
| 26 | 4.8 | 15.2 | 5.7 | 11.4 | 15.2 | 24.8 | *** | 27.9 | 16.7 | *** | *** | 4.0 |
| 27 | 3.7 | 9.8 | 6.2 | 11.1 | 15.2 | 25.2 | *** | * 27.4 | 15.7 | *** | *** | 4.4 |
| 28 | 7.1 | 4.4 | 4.1 | 13.7 | 15.7 | 26.9 | *** | 29.0 | 19.5 | *** | *** | 4.2 |
| 29 | 5.0 | - - - | 2.8 | 16.6 | 13.7 | 24.5 | *** | 27.8 | 19.8 | *** | *** | 5.8 |
| 30 | 5.9 | - - - | 3.5 | 13.4 | 13.0 | 22.9 | *** | 27.7 | 17.6 | *** | *** | 1.1 |
| 31 | 6.4 | - - - | 6.8 | - - - | 14.6 | - - - | 28.4 | 28.7 | - - - | *** | - - - | 3.6 |
| MEAN | 4.1 | 4.3 | 7.3 | 10.7 | 17.3 | 21.9 | 26.3 | 28.2 | 23.4 | 19.7 | *** | 6.2 |

ITEM AIR TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (CVS-HMP45D)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | 2.6 | 3.7 | 6.4 | 12.4 | 14.8 | 15.3 | 24.0 | 28.3 | 28.9 | 19.4 | 15.3 | 10.5 |
| 2 | 5.3 | 2.0 | 3.7 | 13.5 | 16.2 | 16.8 | 24.8 | 28.6 | 29.0 | 19.2 | 15.4 | 11.4 |
| 3 | 3.2 | 1.6 | 6.5 | 9.0 | 17.8 | 19.6 | 25.2 | 29.1 | 28.8 | 19.1 | 12.2 | 16.3 |
| 4 | 3.9 | 1.0 | 6.0 | 6.8 | 19.9 | 20.1 | 25.5 | 28.9 | 29.0 | 19.0 | 8.7 | 10.6 |
| 5 | 6.0 | 2.6 | 11.1 | 8.8 | 21.0 | 17.1 | 24.9 | 29.4 | 29.0 | 20.9 | 11.1 | 9.5 |
| 6 | 4.8 | 0.8 | 11.2 | 13.8 | 21.5 | 18.6 | 24.8 | 28.4 | 28.7 | 20.2 | 12.9 | 9.6 |
| 7 | 5.5 | 3.1 | 4.5 | 9.9 | 19.4 | 21.1 | 23.7 | 28.1 | 29.4 | 19.8 | 13.5 | 9.9 |
| 8 | 5.3 | 5.0 | 4.2 | 6.7 | 17.7 | 19.4 | 25.7 | 28.4 | 23.2 | 19.3 | 14.1 | 7.3 |
| 9 | 4.9 | 10.3 | 2.6 | 9.5 | 18.0 | 18.9 | 24.6 | 26.0 | 23.3 | 17.5 | 13.2 | 6.7 |
| 10 | 4.2 | 6.3 | 3.1 | 14.7 | 17.6 | 20.3 | 26.0 | 27.3 | 24.1 | 19.7 | 12.4 | 7.8 |
| 11 | 3.1 | 3.2 | 7.4 | 15.3 | 15.5 | 20.5 | 24.9 | 28.0 | 26.9 | 21.3 | 11.6 | 10.5 |
| 12 | 1.8 | 1.7 | 8.7 | 7.2 | 15.0 | 23.1 | 26.4 | 27.6 | 25.4 | 21.2 | 11.7 | 9.5 |
| 13 | 3.2 | 0.4 | 11.7 | 13.3 | 14.8 | 22.4 | 20.8 | 26.3 | 25.5 | 21.1 | 13.1 | 7.1 |
| 14 | 1.0 | 1.2 | 8.3 | 13.0 | 13.0 | 17.7 | 23.5 | 26.7 | 23.5 | 19.4 | 13.8 | 8.9 |
| 15 | 1.5 | 4.0 | 10.8 | 5.0 | 12.5 | 22.1 | 26.5 | 29.9 | 21.7 | 19.8 | 8.8 | 8.1 |
| 16 | 1.4 | 2.6 | 12.9 | 4.5 | 16.0 | 24.4 | 26.6 | 30.6 | 19.9 | 19.5 | 7.4 | 3.6 |
| 17 | 2.4 | 1.5 | 8.4 | 4.0 | 19.7 | 24.7 | 27.6 | 29.7 | 21.9 | 18.8 | 7.7 | 4.3 |
| 18 | 2.8 | 2.2 | 7.2 | 9.8 | 20.3 | 22.7 | 27.5 | 27.8 | 23.2 | 16.9 | 8.9 | 5.5 |
| 19 | 6.3 | 3.2 | 7.1 | 12.2 | 19.4 | 22.0 | 28.4 | 26.3 | 23.9 | 17.3 | 9.9 | 4.8 |
| 20 | 7.8 | 4.6 | 12.7 | 14.0 | 19.0 | 24.3 | 29.2 | 25.2 | 23.6 | 16.9 | 11.3 | 8.2 |
| 21 | 10.0 | 4.0 | 14.2 | 16.4 | 22.8 | 24.9 | 29.2 | 27.0 | 25.8 | 16.7 | 12.3 | 9.4 |
| 22 | 5.3 | 4.9 | 8.6 | 7.0 | 20.8 | 25.1 | 29.2 | 28.9 | 25.6 | 16.6 | 13.6 | 12.5 |
| 23 | 4.5 | 7.2 | 8.1 | 6.6 | 16.8 | 22.6 | 29.8 | 29.6 | 17.8 | 14.5 | 12.6 | 10.8 |
| 24 | 4.2 | 9.2 | 5.6 | 8.9 | 18.2 | 23.8 | 29.2 | 29.1 | 17.3 | 14.1 | 9.1 | 6.1 |
| 25 | 5.0 | 11.3 | 3.8 | 11.2 | 21.3 | 24.6 | *** | 28.8 | 16.3 | 16.0 | 8.1 | 3.7 |
| 26 | 5.1 | 15.3 | 5.6 | 11.5 | 15.1 | 24.9 | *** | 27.9 | 17.2 | 14.2 | 11.1 | 4.9 |
| 27 | 4.5 | 9.6 | 6.2 | 10.9 | 15.1 | 25.1 | *** | * 27.3 | 15.5 | 10.6 | 10.7 | 5.7 |
| 28 | 7.7 | 4.3 | 3.9 | 13.5 | 15.6 | 26.7 | *** | 28.9 | 19.5 | 8.1 | 11.3 | 4.9 |
| 29 | 5.8 | - - - | 2.7 | 16.5 | 13.6 | 24.4 | *** | 27.9 | 19.8 | 12.2 | 9.6 | 6.0 |
| 30 | 6.4 | - - - | 3.4 | 13.3 | 12.9 | 22.9 | 26.0 | 27.5 | 17.6 | 12.6 | 10.0 | 1.5 |
| 31 | 6.9 | - - - | 7.0 | - - - | 14.9 | - - - | 28.3 | 28.5 | - - - | 15.1 | - - - | 3.6 |
| MEAN | 4.6 | 4.5 | 7.2 | 10.6 | 17.3 | 21.9 | 26.2 | 28.1 | 23.4 | 17.3 | 11.4 | 7.7 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.02 m DEPTH)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | 2.7 | 3.1 | 7.0 | 9.1 | 14.2 | 16.7 | 22.2 | 24.8 | 27.3 | 19.2 | 14.5 | 9.3 |
| 2 | 3.0 | 3.2 | 5.9 | 11.4 | 15.2 | 16.7 | 22.5 | 24.9 | 27.6 | 18.9 | 13.1 | 9.2 |
| 3 | 2.2 | 2.6 | 7.8 | 10.9 | 15.6 | 17.5 | 22.9 | 25.2 | 27.1 | 18.3 | 12.2 | 12.5 |
| 4 | 2.4 | 3.1 | 6.6 | 8.0 | 16.8 | 18.7 | 23.2 | 26.3 | 27.1 | 19.1 | 10.3 | 9.9 |
| 5 | 4.2 | 2.0 | 10.3 | 9.1 | 18.2 | 18.0 | 23.1 | 26.9 | 26.9 | 20.1 | 10.7 | 8.3 |
| 6 | 3.5 | 1.3 | 10.2 | 13.0 | 19.1 | 18.1 | 23.0 | 26.8 | 27.0 | 19.8 | 11.5 | 8.4 |
| 7 | 3.6 | 1.4 | 7.1 | 9.9 | 17.7 | 18.6 | 22.5 | 26.8 | 26.9 | 19.2 | 12.6 | 8.9 |
| 8 | 3.1 | 2.2 | 6.4 | 9.4 | 18.2 | 18.4 | 23.2 | 27.1 | 24.5 | 19.7 | 12.5 | 9.0 |
| 9 | 2.2 | 4.6 | 4.9 | 9.9 | 17.7 | 17.9 | 22.9 | 26.2 | 23.9 | 18.2 | 12.7 | 7.9 |
| 10 | 2.4 | 5.5 | 4.9 | 12.4 | 17.2 | 19.0 | 22.7 | 26.5 | 24.3 | 18.5 | 11.3 | 7.2 |
| 11 | 2.2 | 4.3 | 5.7 | 14.1 | 16.0 | 19.6 | 22.3 | 27.3 | 25.2 | 19.4 | 10.9 | 7.8 |
| 12 | 2.6 | 3.1 | 7.1 | 9.6 | 16.0 | 20.6 | 23.0 | 26.5 | 25.3 | 19.4 | 10.9 | 8.0 |
| 13 | 3.0 | 2.9 | 8.5 | 12.2 | 16.1 | 20.3 | 21.6 | 25.9 | 25.5 | 20.4 | 11.1 | 8.1 |
| 14 | 1.3 | 4.1 | 8.5 | 13.0 | 15.9 | 18.8 | 21.6 | 25.9 | 24.9 | 19.9 | 12.0 | 8.4 |
| 15 | 1.1 | 4.0 | 8.3 | 9.5 | 15.5 | 20.4 | 22.9 | 27.6 | 23.5 | 19.8 | 10.6 | 8.1 |
| 16 | 0.8 | 3.6 | 11.4 | 7.6 | 16.9 | 21.7 | 23.4 | 28.6 | 20.9 | 19.9 | 9.4 | 6.9 |
| 17 | 0.7 | 3.4 | 8.6 | 6.2 | 17.9 | 21.9 | 23.9 | 28.5 | 21.8 | 18.9 | 9.9 | 5.6 |
| 18 | 0.9 | 3.3 | 9.0 | 10.1 | 18.6 | 21.3 | 23.8 | 28.0 | 22.4 | 18.0 | 10.5 | 5.1 |
| 19 | 1.5 | 2.7 | 9.7 | 11.8 | 17.7 | 21.1 | 24.3 | 27.4 | 22.6 | 17.5 | 10.1 | 4.7 |
| 20 | 3.1 | 3.2 | 10.5 | 12.9 | 18.5 | 21.7 | 24.4 | 26.9 | 23.2 | 17.5 | 10.4 | 6.1 |
| 21 | 4.6 | 3.5 | 11.6 | 15.6 | 20.6 | 22.1 | 24.7 | 27.0 | 23.9 | 17.4 | 10.7 | 5.8 |
| 22 | 3.8 | 4.3 | 9.0 | 10.6 | 19.2 | 22.3 | 24.6 | 27.7 | 24.4 | 17.5 | 12.4 | 8.8 |
| 23 | 3.5 | 5.4 | 9.4 | 9.4 | 17.2 | 21.4 | 25.3 | 28.1 | 20.9 | 16.3 | 12.5 | 7.9 |
| 24 | 2.8 | 6.6 | 7.7 | 11.6 | 16.7 | 21.5 | 25.6 | 28.3 | 18.9 | 15.2 | 11.0 | 5.8 |
| 25 | 2.6 | 7.6 | 5.9 | 11.6 | 20.0 | 21.3 | *** | 28.1 | 17.7 | 16.4 | 9.5 | 4.5 |
| 26 | 2.7 | 9.2 | 7.1 | 12.2 | 17.0 | 21.5 | *** | 27.3 | 17.7 | 16.5 | 10.7 | 3.5 |
| 27 | 2.0 | 10.6 | 7.9 | 11.5 | 17.1 | 22.4 | *** | * 27.4 | 17.3 | 14.8 | 11.0 | 3.0 |
| 28 | 3.7 | 6.7 | 7.1 | 12.7 | 16.8 | 23.2 | *** | 27.5 | 17.7 | 12.3 | 10.1 | 2.9 |
| 29 | 3.1 | • • • | 6.7 | 14.8 | 15.6 | 22.9 | *** | 27.2 | 19.0 | 13.0 | 9.2 | 3.9 |
| 30 | 3.5 | • • • | 6.4 | 14.3 | 15.2 | 21.9 | 23.8 | 27.3 | 18.1 | 12.9 | 8.7 | 2.7 |
| 31 | 4.0 | • • • | 7.2 | • • • | 16.0 | • • • | 24.6 | 27.5 | • • • | 13.8 | • • • | 3.3 |
| MEAN | 2.7 | 4.2 | 7.9 | 11.1 | 17.1 | 20.3 | 23.4 | 27.0 | 23.1 | 17.7 | 11.1 | 6.8 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.10 m DEPTH)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | 5.0 | 4.8 | 7.8 | 8.7 | 14.3 | 17.2 | 22.6 | 24.8 | 27.6 | 20.1 | 15.6 | 10.5 |
| 2 | 4.9 | 4.6 | 7.5 | 10.7 | 14.6 | 17.3 | 22.8 | 25.0 | 27.7 | 20.3 | 14.8 | 10.4 |
| 3 | 4.5 | 4.3 | 7.7 | 10.6 | 15.0 | 17.7 | 23.1 | 25.1 | 27.4 | 19.7 | 14.1 | 12.7 |
| 4 | 4.3 | 4.4 | 7.8 | 9.7 | 15.7 | 18.4 | 23.4 | 25.8 | 27.4 | 20.2 | 12.7 | 11.7 |
| 5 | 5.1 | 4.0 | 8.8 | 9.6 | 16.6 | 18.5 | 23.4 | 26.5 | 27.2 | 20.9 | 12.3 | 10.1 |
| 6 | 5.1 | 3.6 | 10.0 | 11.3 | 17.6 | 18.3 | 23.3 | 26.8 | 27.2 | 20.9 | 12.9 | 9.9 |
| 7 | 5.0 | 3.3 | 8.9 | 11.3 | 17.4 | 18.7 | 23.2 | 26.8 | 27.2 | 20.4 | 13.6 | 10.1 |
| 8 | 4.9 | 3.5 | 7.8 | 10.3 | 17.6 | 18.8 | 23.3 | 27.1 | 25.8 | 20.6 | 13.7 | 10.4 |
| 9 | 4.3 | 4.4 | 7.2 | 10.3 | 17.4 | 18.5 | 23.5 | 26.8 | 24.8 | 19.7 | 13.9 | 9.6 |
| 10 | 4.2 | 5.8 | 6.5 | 11.3 | 17.1 | 18.8 | 23.3 | 26.7 | 24.9 | 19.6 | 13.1 | 9.0 |
| 11 | 4.0 | 5.5 | 6.6 | 12.9 | 16.8 | 19.4 | 23.2 | 27.1 | 25.3 | 20.2 | 12.6 | 9.0 |
| 12 | 4.2 | 4.7 | 7.3 | 11.7 | 16.4 | 19.9 | 23.4 | 27.1 | 25.7 | 20.3 | 12.4 | 9.3 |
| 13 | 4.5 | 4.5 | 8.2 | 11.2 | 16.3 | 20.1 | 23.0 | 26.5 | 25.7 | 21.0 | 12.3 | 9.5 |
| 14 | 3.6 | 4.8 | 8.7 | 12.7 | 16.4 | 19.6 | 22.4 | 26.3 | 25.6 | 20.9 | 13.0 | 9.5 |
| 15 | 3.2 | 5.1 | 8.6 | 11.5 | 16.1 | 19.8 | 23.1 | 27.2 | 24.6 | 20.7 | 12.2 | 9.5 |
| 16 | 2.9 | 5.1 | 10.4 | 10.0 | 16.5 | 21.1 | 23.5 | 28.1 | 22.5 | 20.9 | 11.3 | 8.7 |
| 17 | 2.7 | 4.8 | 9.6 | 8.3 | 17.2 | 21.5 | 23.9 | 28.5 | 22.7 | 20.1 | 11.4 | 7.6 |
| 18 | 2.7 | 4.7 | 9.5 | 9.5 | 17.9 | 21.5 | 23.9 | 28.2 | 23.3 | 19.4 | 11.7 | 7.0 |
| 19 | 2.9 | 4.4 | 9.7 | 11.0 | 17.8 | 21.3 | 24.1 | 27.9 | 23.3 | 18.9 | 11.4 | 6.5 |
| 20 | 3.7 | 4.4 | 10.0 | 12.2 | 18.0 | 21.7 | 24.3 | 27.5 | 23.8 | 18.8 | 11.6 | 7.3 |
| 21 | 4.9 | 4.6 | 11.3 | 13.6 | 19.2 | 22.0 | 24.5 | 27.3 | 24.1 | 18.6 | 11.7 | 7.2 |
| 22 | 4.9 | 5.1 | 10.0 | 12.7 | 19.3 | 22.2 | 24.5 | 27.7 | 24.6 | 18.6 | 12.8 | 9.2 |
| 23 | 4.6 | 5.5 | 10.0 | 11.0 | 18.4 | 22.0 | 24.9 | 28.0 | 23.1 | 17.9 | 13.4 | 9.1 |
| 24 | 4.4 | 6.4 | 9.6 | 11.5 | 17.5 | 21.8 | 25.2 | 28.2 | 21.1 | 16.9 | 12.5 | 7.7 |
| 25 | 4.1 | 7.1 | 7.8 | 11.7 | 19.0 | 21.7 | *** | 28.2 | 20.2 | 17.3 | 11.3 | 6.6 |
| 26 | 4.1 | 8.2 | 8.1 | 12.2 | 18.7 | 21.8 | *** | 27.7 | 19.5 | 17.8 | 11.8 | 5.6 |
| 27 | 3.9 | 10.0 | 8.4 | 12.3 | 17.8 | 22.3 | *** | * 27.7 | 19.5 | 16.6 | 12.1 | 5.1 |
| 28 | 4.4 | 8.5 | 8.5 | 12.7 | 17.8 | 22.9 | *** | 27.7 | 18.9 | 14.8 | 11.5 | 4.8 |
| 29 | 4.6 | • • • | 8.1 | 14.1 | 17.3 | 23.1 | *** | 27.5 | 20.0 | 14.5 | 10.9 | 5.3 |
| 30 | 4.6 | • • • | 7.6 | 14.2 | 16.7 | 22.7 | 24.1 | 27.5 | 19.9 | 14.6 | 10.3 | 4.7 |
| 31 | 4.8 | • • • | 8.0 | • • • | 16.7 | • • • | 24.5 | 27.7 | • • • | 14.8 | • • • | 4.7 |
| MEAN | 4.2 | 5.2 | 8.6 | 11.3 | 17.1 | 20.3 | 23.6 | 27.1 | 24.0 | 18.9 | 12.5 | 8.3 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.50 m DEPTH)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-----|-------|-----|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | 8.6 | 6.5 | 7.9 | 8.9 | 12.0 | 16.2 | 20.1 | 22.1 | 24.9 | 20.5 | 16.7 | 13.0 |
| 2 | 8.5 | 6.6 | 7.9 | 9.0 | 12.2 | 16.2 | 20.2 | 22.1 | 24.9 | 20.5 | 16.6 | 12.8 |
| 3 | 8.3 | 6.6 | 7.9 | 9.2 | 12.4 | 16.2 | 20.2 | 22.2 | 25.0 | 20.5 | 16.6 | 12.6 |
| 4 | 8.1 | 6.5 | 7.9 | 9.4 | 12.6 | 16.2 | 20.3 | 22.3 | 25.0 | 20.4 | 16.4 | 12.6 |
| 5 | 8.0 | 6.5 | 8.0 | 9.5 | 12.9 | 16.3 | 20.4 | 22.5 | 25.0 | 20.4 | 16.1 | 12.7 |
| 6 | 7.9 | 6.4 | 8.1 | 9.6 | 13.2 | 16.4 | 20.6 | 22.7 | 24.9 | 20.4 | 15.8 | 12.5 |
| 7 | 7.9 | 6.3 | 8.4 | 9.8 | 13.6 | 16.5 | 20.8 | 23.0 | 24.9 | 20.5 | 15.6 | 12.4 |
| 8 | 7.8 | 6.2 | 8.5 | 10.0 | 13.9 | 16.6 | 20.9 | 23.2 | 24.9 | 20.4 | 15.5 | 12.2 |
| 9 | 7.7 | 6.1 | 8.5 | 10.0 | 14.1 | 16.7 | 20.9 | 23.4 | 24.8 | 20.4 | 15.4 | 12.2 |
| 10 | 7.6 | 6.1 | 8.4 | 10.1 | 14.4 | 16.8 | 21.0 | 23.5 | 24.6 | 20.3 | 15.4 | 12.0 |
| 11 | 7.5 | 6.3 | 8.2 | 10.2 | 14.5 | 16.8 | 21.1 | 23.6 | 24.4 | 20.1 | 15.3 | 11.8 |
| 12 | 7.4 | 6.4 | 8.0 | 10.5 | 14.6 | 16.9 | 21.1 | 23.7 | 24.3 | 20.1 | 15.1 | 11.6 |
| 13 | 7.3 | 6.4 | 8.0 | 10.7 | 14.7 | 17.1 | 21.1 | 23.8 | 24.3 | 20.1 | 14.9 | 11.5 |
| 14 | 7.2 | 6.4 | 8.1 | 10.7 | 14.7 | 17.3 | 21.1 | 23.9 | 24.3 | 20.2 | 14.8 | 11.4 |
| 15 | 7.1 | 6.4 | 8.3 | 10.9 | 14.8 | 17.4 | 21.0 | 23.8 | 24.2 | 20.2 | 14.7 | 11.4 |
| 16 | 6.9 | 6.4 | 8.4 | 11.0 | 14.8 | 17.5 | 21.0 | 23.9 | 24.1 | 20.2 | 14.6 | 11.3 |
| 17 | 6.7 | 6.4 | 8.7 | 10.8 | 14.8 | 17.7 | 21.1 | 24.1 | 23.7 | 20.2 | 14.4 | 11.2 |
| 18 | 6.6 | 6.4 | 8.9 | 10.4 | 14.9 | 18.0 | 21.2 | 24.4 | 23.5 | 20.2 | 14.2 | 10.9 |
| 19 | 6.4 | 6.4 | 9.0 | 10.2 | 15.1 | 18.3 | 21.3 | 24.6 | 23.3 | 20.0 | 14.0 | 10.6 |
| 20 | 6.3 | 6.3 | 9.1 | 10.3 | 15.3 | 18.5 | 21.3 | 24.6 | 23.2 | 19.8 | 13.9 | 10.4 |
| 21 | 6.3 | 6.3 | 9.2 | 10.6 | 15.4 | 18.6 | 21.4 | 24.7 | 23.2 | 19.7 | 13.7 | 10.2 |
| 22 | 6.4 | 6.3 | 9.5 | 10.9 | 15.7 | 18.8 | 21.5 | 24.6 | 23.2 | 19.5 | 13.7 | 10.0 |
| 23 | 6.5 | 6.3 | 9.6 | 11.2 | 16.0 | 19.0 | 21.6 | 24.7 | 23.3 | 19.4 | 13.7 | 10.0 |
| 24 | 6.6 | 6.4 | 9.6 | 11.2 | 16.4 | 19.1 | 21.7 | 24.7 | 23.2 | 19.2 | 13.8 | 10.1 |
| 25 | 6.6 | 6.6 | 9.6 | 11.1 | 16.4 | 19.2 | *** | 24.8 | 22.7 | 18.9 | 13.8 | 10.1 |
| 26 | 6.5 | 6.8 | 9.4 | 11.2 | 16.5 | 19.3 | *** | 24.9 | 22.3 | 18.7 | 13.6 | 9.9 |
| 27 | 6.5 | 7.2 | 9.2 | 11.3 | 16.6 | 19.3 | *** | * 24.9 | 21.8 | 18.6 | 13.5 | 9.6 |
| 28 | 6.5 | 7.6 | 9.2 | 11.4 | 16.5 | 19.5 | *** | 24.9 | 21.1 | 18.4 | 13.4 | 9.3 |
| 29 | 6.4 | - - - | 9.1 | 11.6 | 16.5 | 19.6 | *** | 24.9 | 20.7 | 17.9 | 13.3 | 9.0 |
| 30 | 6.5 | - - - | 9.1 | 11.8 | 16.4 | 19.9 | 22.0 | 24.9 | 20.6 | 17.4 | 13.2 | 8.8 |
| 31 | 6.5 | - - - | 9.0 | - - - | 16.3 | - - - | 22.0 | 24.9 | - - - | 17.0 | - - - | 8.6 |
| MEAN | 7.1 | 6.5 | 8.7 | 10.4 | 14.8 | 17.7 | 21.0 | 23.9 | 23.7 | 19.7 | 14.7 | 11.0 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (1.00 m DEPTH)
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

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

ITEM GROUND WATER LEVEL (10.0 m DEPTH)
 INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE) (M86H-10 since Apr 22, 2009)
 UNIT (m)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | -1.85 | -2.12 | -1.64 | -1.72 | -1.45 | -1.64 | -1.79 | *** | -3.45 | -1.11 | -0.94 | -1.81 |
| 2 | -1.86 | -2.12 | -1.68 | -1.73 | -1.51 | -1.67 | -1.78 | *** | -3.52 | -1.28 | -1.05 | -1.82 |
| 3 | -1.87 | -2.13 | -1.71 | -1.76 | -1.56 | -1.69 | -1.79 | *** | -3.59 | -1.40 | -1.27 | -1.64 |
| 4 | -1.89 | -2.14 | -1.73 | -1.78 | -1.60 | -1.71 | -1.80 | *** | -3.68 | -1.48 | -1.40 | -1.54 |
| 5 | -1.89 | -2.15 | -1.72 | -1.78 | -1.63 | -1.73 | -1.82 | *** | -3.75 | -1.54 | -1.47 | -1.59 |
| 6 | -1.91 | -2.15 | -1.69 | -1.78 | -1.65 | -1.75 | -1.83 | *** | -3.80 | -1.58 | -1.53 | -1.63 |
| 7 | -1.92 | -2.16 | -1.71 | -1.76 | -1.67 | -1.79 | -1.77 | *** | -3.85 | -1.63 | -1.57 | -1.65 |
| 8 | * -1.93 | -2.17 | -1.71 | -1.76 | -1.69 | -1.79 | -1.72 | *** | -3.91 | -1.66 | -1.60 | -1.68 |
| 9 | -1.93 | -2.17 | -1.71 | -1.77 | -1.72 | -1.81 | -1.73 | *** | -3.92 | -1.68 | -1.63 | -1.70 |
| 10 | -1.94 | -2.17 | -1.65 | -1.78 | -1.74 | -1.82 | -1.68 | *** | -3.94 | -1.42 | -1.66 | -1.71 |
| 11 | -1.95 | -2.18 | -1.62 | -1.79 | -1.75 | -1.84 | -1.68 | *** | -3.98 | -1.36 | -1.69 | -1.72 |
| 12 | -1.97 | -2.18 | -1.65 | -1.80 | -1.71 | -1.85 | -1.70 | *** | -4.01 | -1.46 | -1.71 | -1.74 |
| 13 | -1.98 | -2.19 | -1.67 | -1.64 | -1.65 | -1.86 | -1.73 | *** | -4.04 | -1.52 | -1.73 | -1.75 |
| 14 | -1.98 | -2.20 | -1.71 | -1.60 | -1.67 | -1.87 | -1.74 | *** | -4.07 | -1.57 | -1.75 | -1.75 |
| 15 | -1.99 | -2.19 | -1.73 | -1.63 | -1.70 | -1.89 | -1.76 | *** | -4.11 | -1.61 | -1.76 | -1.72 |
| 16 | -1.99 | -2.14 | -1.73 | -1.59 | -1.73 | -1.89 | -1.78 | *** | -3.41 | -1.64 | -1.78 | -1.72 |
| 17 | -2.00 | -2.06 | -1.74 | -1.48 | -1.74 | -1.90 | -1.80 | *** | -2.31 | -1.67 | -1.79 | -1.73 |
| 18 | -2.01 | -2.01 | -1.74 | -1.39 | -1.76 | -1.91 | -1.82 | *** | -2.12 | -1.70 | -1.80 | -1.75 |
| 19 | -2.02 | -1.99 | -1.76 | -1.48 | -1.77 | -1.91 | -1.84 | *** | -2.00 | -1.72 | -1.81 | -1.77 |
| 20 | -2.03 | -1.99 | -1.77 | -1.53 | -1.78 | -1.89 | -1.86 | *** | -1.97 | -1.73 | -1.82 | -1.77 |
| 21 | -2.03 | -1.98 | -1.77 | -1.57 | -1.79 | -1.88 | -1.88 | *** | -1.90 | -1.75 | -1.83 | -1.79 |
| 22 | -2.04 | -1.98 | -1.80 | -1.60 | -1.81 | -1.88 | -1.90 | *** | -1.90 | -1.77 | -1.84 | -1.66 |
| 23 | -2.05 | -1.98 | -1.81 | -1.52 | -1.81 | -1.89 | -1.92 | *** | -1.91 | -1.79 | -1.85 | -1.59 |
| 24 | -2.06 | -1.98 | -1.82 | -1.53 | -1.43 | -1.89 | -1.94 | *** | -1.76 | -1.80 | -1.84 | -1.63 |
| 25 | -2.06 | -1.99 | -1.74 | -1.57 | -1.33 | -1.90 | *** | *** | -1.73 | -1.81 | -1.83 | -1.66 |
| 26 | -2.07 | -1.99 | -1.57 | -1.60 | -1.44 | -1.91 | *** | *** | -1.71 | -1.82 | -1.81 | -1.68 |
| 27 | -2.08 | -1.87 | -1.59 | -1.64 | -1.50 | -1.91 | *** | *** | -1.68 | -1.83 | -1.78 | -1.71 |
| 28 | -2.08 | -1.70 | -1.63 | -1.44 | -1.54 | -1.92 | *** | -2.92 | -0.49 | -1.81 | -1.77 | -1.73 |
| 29 | -2.09 | . . . | -1.66 | -1.22 | -1.56 | -1.92 | *** | -3.06 | -0.72 | -1.66 | -1.78 | -1.75 |
| 30 | -2.11 | . . . | -1.69 | -1.36 | -1.59 | -1.89 | *** | -3.20 | -1.03 | -1.53 | -1.79 | -1.77 |
| 31 | -2.12 | . . . | -1.71 | . . . | -1.61 | . . . | *** | -3.34 | . . . | -1.19 | . . . | -1.78 |
| MEAN | -1.99 | -2.07 | -1.71 | -1.62 | -1.64 | -1.84 | -1.79 | -3.13 | -2.81 | -1.60 | -1.66 | -1.71 |

ITEM GROUND WATER LEVEL (NEW; 2.0 m DEPTH)
 INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE)
 UNIT (m)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 1 | -1.77 | *** | -1.46 | -1.63 | -1.31 | -1.56 | -1.69 | *** | *** | -0.76 | -0.52 | -1.67 |
| 2 | -1.78 | *** | -1.50 | -1.65 | -1.39 | -1.59 | -1.68 | *** | *** | -0.99 | -0.71 | -1.69 |
| 3 | -1.79 | *** | -1.55 | -1.67 | -1.45 | -1.61 | -1.70 | *** | *** | -1.15 | -1.00 | -1.53 |
| 4 | -1.80 | *** | -1.58 | -1.69 | -1.49 | -1.64 | -1.71 | *** | *** | -1.25 | -1.18 | -1.37 |
| 5 | -1.81 | *** | -1.58 | -1.70 | -1.53 | -1.66 | -1.73 | *** | *** | -1.33 | -1.27 | -1.43 |
| 6 | -1.83 | *** | -1.56 | -1.69 | -1.56 | -1.68 | -1.75 | *** | *** | -1.39 | -1.35 | -1.47 |
| 7 | -1.84 | *** | -1.58 | -1.67 | -1.59 | -1.70 | -1.69 | *** | *** | -1.44 | -1.40 | -1.50 |
| 8 | -1.86 | *** | -1.58 | -1.68 | -1.61 | -1.72 | -1.61 | *** | *** | -1.48 | -1.44 | -1.54 |
| 9 | -1.89 | *** | -1.59 | -1.69 | -1.63 | -1.73 | -1.62 | *** | *** | -1.51 | -1.48 | -1.55 |
| 10 | -1.90 | *** | -1.53 | -1.70 | -1.65 | -1.75 | -1.57 | *** | *** | -1.20 | -1.52 | -1.57 |
| 11 | *** | *** | -1.49 | -1.71 | -1.67 | -1.76 | -1.57 | *** | *** | -1.11 | -1.55 | -1.59 |
| 12 | *** | *** | -1.53 | -1.72 | -1.61 | -1.78 | -1.61 | *** | *** | -1.23 | -1.57 | -1.60 |
| 13 | *** | *** | -1.56 | -1.55 | -1.54 | -1.79 | -1.64 | *** | *** | -1.31 | -1.60 | -1.62 |
| 14 | *** | *** | -1.60 | -1.48 | -1.57 | -1.81 | -1.66 | *** | *** | -1.38 | -1.61 | -1.62 |
| 15 | *** | *** | -1.62 | -1.51 | -1.60 | -1.82 | -1.69 | *** | -1.87 | -1.43 | -1.63 | -1.58 |
| 16 | *** | *** | -1.63 | -1.47 | -1.63 | -1.83 | -1.71 | *** | -1.85 | -1.47 | -1.65 | -1.58 |
| 17 | *** | -1.88 | -1.63 | -1.36 | -1.65 | -1.83 | -1.73 | *** | -1.57 | -1.51 | -1.66 | -1.60 |
| 18 | *** | -1.84 | -1.64 | -1.23 | -1.67 | -1.84 | -1.75 | *** | -1.54 | -1.54 | -1.67 | -1.62 |
| 19 | *** | -1.83 | -1.65 | -1.33 | -1.69 | -1.83 | -1.77 | *** | -1.57 | -1.56 | -1.69 | -1.64 |
| 20 | *** | -1.82 | -1.66 | -1.40 | -1.70 | -1.80 | -1.79 | *** | -1.60 | -1.59 | -1.70 | -1.65 |
| 21 | *** | -1.82 | -1.68 | -1.46 | -1.71 | -1.79 | -1.81 | *** | -1.63 | -1.60 | -1.71 | -1.66 |
| 22 | *** | -1.82 | -1.70 | -1.49 | -1.73 | -1.80 | -1.83 | *** | -1.65 | -1.63 | -1.72 | -1.54 |
| 23 | *** | -1.83 | -1.71 | -1.40 | -1.73 | -1.80 | -1.85 | *** | -1.66 | -1.64 | -1.72 | -1.44 |
| 24 | *** | -1.84 | -1.73 | -1.41 | -1.31 | -1.81 | -1.87 | *** | -1.49 | -1.66 | -1.70 | -1.47 |
| 25 | *** | -1.85 | -1.64 | -1.46 | -1.15 | -1.82 | *** | *** | -1.45 | -1.66 | -1.69 | -1.51 |
| 26 | *** | -1.86 | -1.45 | -1.50 | -1.29 | -1.83 | *** | *** | -1.44 | -1.67 | -1.67 | -1.54 |
| 27 | *** | -1.74 | -1.46 | -1.53 | -1.38 | -1.84 | *** | *** | -1.41 | -1.67 | -1.64 | -1.57 |
| 28 | *** | -1.53 | -1.51 | -1.32 | -1.43 | -1.85 | *** | *** | *** | -1.66 | -1.64 | -1.59 |
| 29 | *** | . . . | -1.55 | -1.02 | -1.46 | -1.86 | *** | *** | -0.35 | -1.50 | -1.64 | -1.61 |
| 30 | *** | . . . | -1.58 | -1.20 | -1.49 | -1.81 | *** | *** | -0.66 | -1.34 | -1.66 | -1.63 |
| 31 | *** | . . . | -1.61 | . . . | -1.53 | . . . | *** | *** | . . . | -0.89 | . . . | -1.65 |
| MEAN | -1.83 | -1.81 | -1.58 | -1.51 | -1.54 | -1.76 | -1.71 | *** | -1.45 | -1.40 | -1.50 | -1.57 |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)
 INSTRUMENT HUMIDITY AND TEMPERATURE PROBE (CVS-HMP45D)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | -8.6 | 0.3 | 4.6 | 6.5 | 2.8 | 7.9 | 21.8 | 24.3 | 22.5 | 16.4 | 13.3 | 3.7 |
| 2 | -7.9 | -1.7 | 1.0 | 10.4 | 5.3 | 9.1 | 21.5 | 23.8 | 21.5 | 14.5 | 5.2 | 5.9 |
| 3 | -4.9 | -5.1 | 1.6 | 1.8 | 9.1 | 11.5 | 22.2 | 22.6 | 22.3 | 13.9 | 3.4 | 10.1 |
| 4 | -5.9 | -6.0 | 0.7 | 0.3 | 11.8 | 13.1 | 22.3 | 22.5 | 20.9 | 18.1 | 3.6 | -1.5 |
| 5 | -3.0 | -7.7 | 8.0 | 7.9 | 14.6 | 13.1 | 21.7 | 22.5 | 21.9 | 16.1 | 4.7 | 1.9 |
| 6 | -8.5 | -8.5 | 7.7 | 9.1 | 13.6 | 12.2 | 22.3 | 22.3 | 22.8 | 15.0 | 6.9 | 4.6 |
| 7 | -4.8 | -7.5 | 2.9 | 6.4 | 16.1 | 14.0 | 21.9 | 20.1 | 21.3 | 14.5 | 8.9 | 4.6 |
| 8 | -5.4 | -4.9 | -1.0 | -1.6 | 10.1 | 15.1 | 21.7 | 22.0 | 20.8 | 14.2 | 10.1 | 0.6 |
| 9 | -7.7 | 2.9 | -1.2 | 2.1 | 7.3 | 13.7 | 22.1 | 22.3 | 17.8 | 15.3 | 4.6 | -0.1 |
| 10 | -6.7 | 2.9 | 1.0 | 8.6 | 10.3 | 14.6 | 20.2 | 22.8 | 17.9 | 17.6 | 1.0 | -0.3 |
| 11 | -3.9 | 0.2 | -3.0 | 9.6 | 13.8 | 15.2 | 21.5 | 23.1 | 21.3 | 16.4 | 3.6 | 4.3 |
| 12 | -0.6 | -0.9 | 1.0 | 3.2 | 9.4 | 17.1 | 23.2 | 23.5 | 21.8 | 18.1 | 6.6 | 1.4 |
| 13 | -7.1 | -2.7 | 4.5 | 9.9 | 2.8 | 16.6 | 18.9 | 21.9 | 21.9 | 17.5 | 7.3 | 4.0 |
| 14 | -9.0 | -2.6 | 0.7 | 1.5 | 5.3 | 16.6 | 21.2 | 23.0 | 19.0 | 15.7 | 9.2 | 7.3 |
| 15 | -7.6 | 1.5 | 6.5 | 3.5 | 4.8 | 18.6 | 23.3 | 24.2 | 16.3 | 16.0 | 6.6 | 1.6 |
| 16 | -10.8 | -2.4 | 9.9 | -0.1 | 9.1 | 21.9 | 22.3 | 24.1 | 18.3 | 14.2 | 1.6 | -0.9 |
| 17 | -8.1 | -4.0 | -5.0 | 2.0 | 10.9 | 18.6 | 22.2 | 23.1 | 18.5 | 14.2 | 5.6 | -1.9 |
| 18 | -5.9 | -1.0 | 2.0 | 1.8 | 12.0 | 19.7 | 21.8 | 23.0 | 17.2 | 11.0 | 4.8 | -2.8 |
| 19 | -3.5 | -1.6 | 1.8 | 7.2 | 14.7 | 19.6 | 22.1 | 22.4 | 19.1 | 11.7 | 3.4 | -2.2 |
| 20 | 0.0 | -4.8 | 6.7 | 10.6 | 18.1 | 20.8 | 22.7 | 20.0 | 20.8 | 13.8 | 6.1 | 0.9 |
| 21 | 1.5 | -5.1 | 2.0 | 9.6 | 13.7 | 20.7 | 22.1 | 21.4 | 21.2 | 14.8 | 8.5 | 3.0 |
| 22 | -10.8 | -0.2 | -5.2 | 4.9 | 12.5 | 20.5 | 22.2 | 22.2 | 20.7 | 10.5 | 12.2 | 7.4 |
| 23 | -6.5 | 1.4 | 4.9 | 5.6 | 15.3 | 20.8 | 23.2 | 22.3 | 16.0 | 8.1 | 9.3 | 0.1 |
| 24 | -5.6 | 4.4 | 3.9 | 3.4 | 17.5 | 18.3 | 23.8 | 23.0 | 11.2 | 10.4 | 2.1 | -2.7 |
| 25 | -3.4 | 5.4 | 3.2 | 0.8 | 16.7 | 18.5 | *** | 22.5 | 10.9 | 15.1 | 3.9 | -7.1 |
| 26 | -8.9 | 11.9 | 1.8 | 2.8 | 12.7 | 21.5 | *** | 22.8 | 10.6 | 12.0 | 8.6 | -6.9 |
| 27 | -4.6 | 8.1 | -1.1 | 6.8 | 12.5 | 23.2 | *** | * 22.8 | 14.6 | 2.4 | 4.5 | -8.9 |
| 28 | 0.9 | 2.6 | -2.3 | 12.5 | 10.9 | 23.3 | *** | 21.8 | 18.7 | 6.3 | 3.8 | -3.6 |
| 29 | 0.8 | · · · | -1.3 | 10.4 | 8.4 | 22.5 | *** | 22.4 | 15.3 | 7.9 | 0.8 | -4.9 |
| 30 | -3.4 | · · · | -7.7 | 4.6 | 8.2 | 21.1 | 23.7 | 22.9 | 15.7 | 10.0 | 1.3 | -3.3 |
| 31 | 1.2 | · · · | -0.2 | · · · | 8.5 | · · · | 23.9 | 22.4 | · · · | 12.7 | · · · | -5.4 |
| MEAN | -5.1 | -0.9 | 1.6 | 5.4 | 10.9 | 17.3 | 22.1 | 22.6 | 18.6 | 13.4 | 5.7 | 0.3 |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)
 INSTRUMENT HUMIDITY AND TEMPERATURE PROBE (CVS-HMP45D)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | -8.9 | 0.4 | 4.0 | 6.3 | 2.3 | 7.3 | 21.1 | 23.6 | 22.1 | 15.7 | *** | *** |
| 2 | -8.4 | -2.1 | 0.6 | 10.0 | 4.7 | 8.7 | 20.7 | 23.3 | 21.2 | 14.3 | *** | *** |
| 3 | -5.2 | -5.4 | 1.2 | 1.2 | 8.7 | 11.0 | 21.5 | 22.2 | 21.9 | 13.4 | *** | *** |
| 4 | -6.3 | -6.3 | 0.3 | -0.1 | 11.4 | 12.4 | 21.5 | 22.2 | 20.5 | 17.3 | *** | *** |
| 5 | -3.3 | -7.9 | 7.5 | 7.2 | 14.4 | 12.5 | 21.0 | 22.3 | 21.5 | 15.4 | *** | *** |
| 6 | -8.7 | -8.7 | 7.3 | 8.6 | 13.3 | 11.7 | 21.6 | 22.0 | 22.5 | 14.6 | *** | *** |
| 7 | -5.2 | -7.7 | 2.4 | 6.1 | 15.6 | 13.4 | 21.1 | 19.9 | 20.9 | 14.1 | *** | *** |
| 8 | -5.8 | -5.3 | -1.4 | -2.1 | 9.6 | 14.6 | 20.9 | 21.7 | 20.2 | 13.7 | *** | *** |
| 9 | -8.5 | 2.7 | -1.5 | 1.5 | 6.7 | 12.9 | 21.3 | 21.8 | 17.3 | 14.7 | *** | *** |
| 10 | -7.2 | 2.6 | 0.8 | 8.1 | 9.8 | 14.1 | 19.3 | 22.4 | 17.3 | 17.3 | *** | *** |
| 11 | -4.2 | -0.3 | -3.8 | 9.4 | 13.2 | 14.7 | 20.8 | 22.7 | 20.7 | 15.8 | *** | 5.4 |
| 12 | -1.0 | -1.4 | 0.8 | 2.7 | 8.6 | 16.5 | 22.6 | 23.1 | 21.4 | 17.6 | *** | 2.8 |
| 13 | -7.9 | -3.1 | 4.2 | 9.5 | 2.1 | 16.1 | 18.2 | 21.4 | 21.3 | 17.0 | *** | 5.1 |
| 14 | -9.6 | -3.3 | 0.7 | 0.8 | 4.8 | 15.8 | 20.4 | 22.6 | 18.6 | *** | *** | 8.5 |
| 15 | -8.0 | 0.9 | 6.2 | 2.8 | 4.3 | 17.9 | 22.6 | 23.8 | 15.6 | *** | *** | 2.9 |
| 16 | -11.5 | -2.9 | 9.5 | -0.7 | 8.5 | 21.3 | 21.6 | 23.8 | 17.6 | *** | *** | 0.2 |
| 17 | -8.5 | -4.4 | -5.7 | 1.6 | 10.5 | 17.9 | 21.4 | 22.7 | 17.9 | *** | *** | -0.2 |
| 18 | -6.0 | -1.3 | 1.6 | 1.5 | 11.6 | 18.9 | 21.1 | 22.6 | 16.7 | *** | *** | -1.6 |
| 19 | -3.7 | -1.4 | 1.5 | 6.9 | 14.2 | 19.0 | 21.3 | 22.0 | 18.5 | *** | *** | -0.9 |
| 20 | -0.3 | -5.1 | 6.6 | 10.1 | 17.4 | 20.2 | 21.8 | 19.6 | 20.3 | *** | *** | 2.4 |
| 21 | 1.2 | -5.4 | 1.5 | 9.1 | 13.0 | 20.1 | 21.3 | 21.0 | 20.5 | *** | *** | 4.6 |
| 22 | -11.1 | -0.5 | -5.6 | 4.3 | 11.9 | 19.9 | 21.3 | 21.8 | 20.2 | *** | *** | 8.2 |
| 23 | -6.8 | 1.2 | 4.4 | 4.9 | 14.7 | 20.2 | 22.3 | 21.9 | 15.4 | *** | *** | 1.1 |
| 24 | -5.8 | 4.3 | 3.2 | 2.9 | 16.9 | 17.4 | 22.9 | 22.6 | 10.7 | *** | *** | -1.5 |
| 25 | -3.8 | 5.5 | 2.6 | 0.5 | 16.2 | 17.7 | *** | 22.0 | 10.3 | *** | *** | -6.3 |
| 26 | -9.3 | 11.5 | 1.3 | 2.5 | 12.2 | 20.9 | *** | 22.3 | 10.1 | *** | *** | -6.7 |
| 27 | -4.6 | 7.5 | -1.5 | 6.3 | 11.8 | 22.4 | *** | * 22.4 | 14.0 | *** | *** | -9.2 |
| 28 | 0.7 | 2.2 | -2.6 | 11.9 | 10.3 | 22.5 | *** | 21.4 | 18.1 | *** | *** | -2.1 |
| 29 | 1.1 | · · · | -1.8 | 9.8 | 8.0 | 21.8 | *** | 22.0 | 14.9 | *** | *** | -3.5 |
| 30 | -3.7 | · · · | -8.2 | 4.1 | 7.7 | 20.4 | 23.0 | 22.4 | 14.9 | *** | *** | -1.7 |
| 31 | 1.1 | · · · | -0.6 | · · · | 8.0 | · · · | 23.2 | 21.9 | · · · | *** | · · · | -4.1 |
| MEAN | -5.5 | -1.2 | 1.1 | 4.9 | 10.4 | 16.7 | 21.4 | 22.2 | 18.1 | 15.5 | *** | 0.2 |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)
 INSTRUMENT HUMIDITY AND TEMPERATURE PROBE (CVS-HMP45D)
 UNIT (°C)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|-------|
| 1 | -9.2 | 0.6 | 4.0 | 6.1 | 2.1 | 7.0 | 21.1 | 23.8 | 22.2 | 15.8 | 13.3 | 3.2 |
| 2 | -8.9 | -2.2 | 0.6 | 9.9 | 4.4 | 8.5 | 20.8 | 23.4 | 21.2 | 14.3 | 2.1 | 5.5 |
| 3 | -5.5 | -5.6 | 1.1 | 0.9 | 8.5 | 10.8 | 21.5 | 22.2 | 22.2 | 13.4 | 1.9 | 9.3 |
| 4 | -6.7 | -6.5 | 0.1 | -0.4 | 11.2 | 12.2 | 21.6 | 22.4 | 20.5 | 17.5 | 3.0 | -3.1 |
| 5 | -3.5 | -8.1 | 7.4 | 7.0 | 14.4 | 12.5 | 21.1 | 22.4 | 21.5 | 15.3 | 3.9 | 1.3 |
| 6 | -9.0 | -9.0 | 7.2 | 8.4 | 13.2 | 11.5 | 21.7 | 22.1 | 22.7 | 14.4 | 6.0 | 4.5 |
| 7 | -5.5 | -7.9 | 2.4 | 6.0 | 15.7 | 13.3 | 21.2 | 20.0 | 20.8 | 14.1 | 8.5 | 4.1 |
| 8 | -6.2 | -6.0 | -1.5 | -2.4 | 9.2 | 14.6 | 20.8 | 21.9 | 20.5 | 13.6 | 9.7 | -1.1 |
| 9 | -9.0 | 2.3 | -1.6 | 1.0 | 6.4 | 12.8 | 21.4 | 22.0 | 17.2 | 14.8 | 3.8 | -1.5 |
| 10 | -7.6 | 2.6 | 0.8 | 7.9 | 9.4 | 14.0 | 19.1 | 22.7 | 17.2 | 17.5 | -0.8 | -1.1 |
| 11 | -4.6 | -0.3 | -4.3 | 9.2 | 13.1 | 14.7 | 20.9 | 23.0 | 20.9 | 15.6 | 2.7 | 3.6 |
| 12 | -1.0 | -1.6 | 0.6 | 2.6 | 8.2 | 16.4 | 22.8 | 23.5 | 21.8 | 17.9 | 6.4 | 1.1 |
| 13 | -8.3 | -3.1 | 4.0 | 9.4 | 1.5 | 16.0 | 18.4 | 21.7 | 21.6 | 17.1 | 6.4 | 3.4 |
| 14 | -9.9 | -3.5 | 0.5 | 0.4 | 4.4 | 15.8 | 20.5 | 22.9 | 18.7 | 15.1 | 8.8 | 7.1 |
| 15 | -8.5 | 0.8 | 6.2 | 2.7 | 3.9 | 17.8 | 22.8 | 24.1 | 15.4 | 15.4 | 6.2 | 1.0 |
| 16 | -12.0 | -3.1 | 9.4 | -0.9 | 8.2 | 21.2 | 21.7 | 23.9 | 17.8 | 13.6 | 0.4 | -1.7 |
| 17 | -8.8 | -4.7 | -6.1 | 1.6 | 10.5 | 17.8 | 21.3 | 22.8 | 18.0 | 13.5 | 4.5 | -2.0 |
| 18 | -6.2 | -1.3 | 1.4 | 1.3 | 11.4 | 18.9 | 21.2 | 23.0 | 16.6 | 10.5 | 3.8 | -3.6 |
| 19 | -4.0 | -1.2 | 1.3 | 6.8 | 14.0 | 19.0 | 21.3 | 22.4 | 18.7 | 10.8 | 2.3 | -3.0 |
| 20 | -0.4 | -5.1 | 6.5 | 10.1 | 17.3 | 20.3 | 21.7 | 19.8 | 20.6 | 13.2 | 6.0 | 0.4 |
| 21 | 1.1 | -5.8 | 1.2 | 8.9 | 12.6 | 20.1 | 21.2 | 21.3 | 20.5 | 14.1 | 8.5 | 3.0 |
| 22 | -11.4 | -0.6 | -6.0 | 4.2 | 11.4 | 19.9 | 21.3 | 22.0 | 20.4 | 9.8 | 11.8 | 6.6 |
| 23 | -7.0 | 1.2 | 4.4 | 4.9 | 14.7 | 20.3 | 22.3 | 22.1 | 15.7 | 7.3 | 8.3 | -1.1 |
| 24 | -6.0 | 4.4 | 3.0 | 2.7 | 16.8 | 17.2 | 23.1 | 22.8 | 10.3 | 9.5 | 0.6 | -3.9 |
| 25 | -4.1 | 5.8 | 2.5 | 0.1 | 16.0 | 17.7 | *** | 22.3 | 9.8 | 14.5 | 3.5 | -8.9 |
| 26 | -9.8 | 11.6 | 1.0 | 2.3 | 12.2 | 21.1 | *** | 22.6 | 9.7 | 11.3 | 7.9 | -9.6 |
| 27 | -4.8 | 7.4 | -1.8 | 6.1 | 11.8 | 22.5 | *** | * 22.6 | 14.0 | 0.0 | 3.6 | -12.4 |
| 28 | 0.4 | 2.2 | -2.8 | 11.8 | 10.1 | 22.5 | *** | 21.5 | 18.2 | 5.5 | 2.7 | -4.3 |
| 29 | 1.1 | . . . | -2.1 | 9.5 | 7.9 | 21.8 | *** | 22.3 | 14.9 | 7.1 | -0.7 | -5.6 |
| 30 | -3.7 | . . . | -8.6 | 3.9 | 7.5 | 20.4 | 23.2 | 22.6 | 14.9 | 9.5 | 0.4 | -3.6 |
| 31 | 1.3 | . . . | -1.0 | . . . | 7.9 | . . . | 23.3 | 22.0 | . . . | 12.3 | . . . | -5.9 |
| MEAN | -5.7 | -1.3 | 1.0 | 4.7 | 10.2 | 16.6 | 21.4 | 22.4 | 18.1 | 12.7 | 4.9 | -0.6 |

ITEM PRECIPITATION (0.3 m HEIGHT)
 INSTRUMENT RAIN GAUGE (TRIPPING BUCKET TYPE) (B-011-00)
 UNIT (mm)
 YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|-----|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1 | 0.0 | 7.5 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 36.5 | 0.0 |
| 2 | 0.0 | 1.5 | 1.0 | 2.5 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 38.0 |
| 4 | 0.0 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 8.0 | 13.0 | 0.0 | 5.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 |
| 6 | 0.0 | 0.0 | 3.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 3.5 | 3.5 | 7.5 | 0.0 | 26.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 8 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 55.0 | 0.0 | 0.0 | 7.5 |
| 9 | 0.0 | 0.0 | 6.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 10.0 | 3.0 | 5.0 | 25.5 | 0.0 | 0.0 |
| 10 | 0.0 | 0.0 | 8.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 26.5 | 0.0 | 0.0 |
| 11 | 0.0 | 4.5 | 0.0 | 0.0 | 15.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 12 | 4.5 | 1.0 | 0.0 | 18.5 | 15.0 | 0.0 | 1.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 13 | 4.0 | 0.0 | 0.0 | 8.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 7.5 |
| 14 | 0.0 | 1.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 15.0 | 0.5 | 0.0 | 5.5 | 1.5 | 0.0 | 6.0 |
| 15 | 0.0 | 12.0 | 0.0 | 11.5 | 0.0 | 5.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 3.5 | 0.0 |
| 16 | 0.0 | 0.0 | 11.5 | 3.5 | 0.0 | 14.0 | 0.0 | 0.0 | 83.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 17 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 22.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 5.0 | 0.0 |
| 18 | 0.0 | 3.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 12.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 0.0 |
| 19 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.0 | 8.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 20 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 11.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 21 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 0.5 |
| 22 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 17.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.5 | 28.0 |
| 23 | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 0.0 | 37.5 | 12.0 | 0.0 | 0.0 | 39.0 | 0.0 | 13.0 | 0.0 |
| 24 | 0.0 | 0.0 | 16.0 | 0.0 | 25.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 16.5 | 0.0 | 0.0 |
| 25 | 0.0 | 0.0 | 21.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | *** | 0.0 | 10.5 | 3.5 | 8.0 | 0.0 |
| 26 | 0.0 | 5.5 | 0.0 | 0.0 | 3.5 | 1.0 | *** | 0.0 | 4.0 | 1.0 | 1.5 | 0.0 |
| 27 | 0.0 | 30.0 | 0.0 | 9.5 | 9.0 | 4.0 | *** | * 0.0 | 29.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 |
| 28 | 0.0 | 11.0 | 0.0 | 37.0 | 0.0 | 0.5 | *** | 0.0 | 80.0 | 24.5 | 0.0 | 0.0 |
| 29 | 0.0 | . . . | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 1.5 | *** | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.0 |
| 30 | 0.0 | . . . | 0.0 | 0.0 | 1.5 | 26.0 | 3.5 | 0.0 | 12.5 | 41.0 | 0.0 | 0.0 |
| 31 | 0.0 | . . . | 0.0 | . . . | 0.0 | . . . | 0.0 | 0.0 | . . . | 0.0 | . . . | 0.0 |
| TOTAL | 9.0 | 78.0 | 85.5 | 148.0 | 127.5 | 105.5 | 48.0 | 3.5 | 325.0 | 144.0 | 72.0 | 87.5 |

ITEM ATMOSPHERIC PRESSURE (1.5 m HEIGHT)
INSTRUMENT BAROMETER (PTB210)
UNIT (hPa)
YEAR 2010

| MONTH | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|-------|------|-------|------|
| 1 | 1000 | 1009 | 1012 | 1012 | 1011 | 1014 | 1003 | 1004 | 1016 | 1017 | 1000 | 1018 |
| 2 | 1004 | 1007 | 1011 | 1003 | 1014 | 1016 | 1002 | 1004 | 1016 | 1019 | 1004 | 1020 |
| 3 | 1004 | 1009 | 1014 | 1016 | 1015 | 1015 | 999 | 1006 | 1011 | 1015 | 1014 | 998 |
| 4 | 1010 | 1012 | 1023 | 1024 | 1011 | 1012 | 992 | 1011 | 1011 | 1006 | 1019 | 1007 |
| 5 | 1000 | 1008 | 1010 | 1015 | 1010 | 1009 | 994 | 1015 | 1012 | 1006 | 1016 | 1013 |
| 6 | 1002 | 1008 | 1012 | 1009 | 1009 | 1012 | 997 | 1017 | 1009 | 1012 | 1018 | 1009 |
| 7 | 1002 | 1017 | 1019 | 1010 | 1002 | 1014 | 1003 | 1014 | 1005 | 1018 | 1015 | 1002 |
| 8 | 1009 | 1019 | 1024 | 1021 | 1002 | 1014 | 1006 | 1012 | 1006 | 1020 | 1008 | 1001 |
| 9 | 1013 | 1011 | 1020 | 1025 | 1008 | 1012 | 1006 | 1013 | 1009 | 1014 | 1000 | 999 |
| 10 | 1015 | 1011 | 997 | 1016 | 1011 | 1011 | 1005 | 1012 | 1009 | 1003 | 1007 | 1012 |
| 11 | 1015 | 1013 | 1014 | 1013 | 1007 | 1013 | 1008 | 1009 | 1007 | 1009 | 1016 | 1009 |
| 12 | 1005 | 1013 | 1022 | 1017 | 1001 | 1011 | 1004 | 1001 | 1006 | 1011 | 1016 | 1016 |
| 13 | 999 | 1019 | 1015 | 1002 | 1005 | 1013 | 1010 | 1005 | 1002 | 1008 | 1024 | 1018 |
| 14 | 1012 | 1023 | 1024 | 1009 | 1011 | 1011 | 1010 | 1005 | 1007 | 1008 | 1018 | 1001 |
| 15 | 1016 | 1015 | 1018 | 1018 | 1017 | 1005 | 1011 | 1006 | 1013 | 1006 | 1013 | 1001 |
| 16 | 1021 | 1013 | 1000 | 1023 | 1017 | 999 | 1014 | 1006 | 1007 | 1013 | 1020 | 1005 |
| 17 | 1023 | 1020 | 1014 | 1018 | 1017 | 1005 | 1017 | 1008 | 1005 | 1017 | 1017 | 1007 |
| 18 | 1024 | 1012 | 1013 | 1023 | 1014 | 1004 | 1016 | 1013 | 1010 | 1021 | 1016 | 1011 |
| 19 | 1025 | 1010 | 1010 | 1022 | 1011 | 1002 | 1014 | 1019 | 1008 | 1023 | 1018 | 1021 |
| 20 | 1017 | 1012 | 1005 | 1014 | 1007 | 1002 | 1013 | 1018 | 1009 | 1018 | 1015 | 1012 |
| 21 | 1001 | 1019 | 994 | 1009 | 1006 | 1001 | 1013 | 1014 | 1006 | 1012 | 1014 | 1014 |
| 22 | 1011 | 1019 | 1012 | 1012 | 1010 | 1005 | 1011 | 1011 | 1003 | 1017 | 1010 | 997 |
| 23 | 1010 | 1015 | 1012 | 1005 | 1012 | 1002 | 1009 | 1011 | 1006 | 1021 | 1007 | 1001 |
| 24 | 1016 | 1018 | 1016 | 1013 | 1002 | 1005 | 1009 | 1011 | 1012 | 1015 | 1016 | 1001 |
| 25 | 1010 | 1018 | 1004 | 1021 | 996 | 1011 | *** | 1011 | 1006 | 1002 | 1015 | 997 |
| 26 | 1017 | 1010 | 1010 | 1023 | 997 | 1013 | *** | 1014 | 1017 | 1005 | 1008 | 999 |
| 27 | 1019 | 1008 | 1019 | 1022 | 1002 | 1008 | *** | * 1015 | 1018 | 1021 | 1011 | 1002 |
| 28 | 1006 | 1012 | 1020 | 1012 | 1007 | 1004 | *** | 1015 | 1006 | 1017 | 1010 | 1003 |
| 29 | 1009 | - - - | 1015 | 1006 | 1009 | 1004 | *** | 1013 | 1014 | 1018 | 1014 | 1001 |
| 30 | 1015 | - - - | 1025 | 1008 | 1010 | 1003 | 1002 | 1010 | 1017 | 1020 | 1018 | 1003 |
| 31 | 1015 | - - - | 1022 | - - - | 1011 | - - - | 1004 | 1011 | - - - | 1016 | - - - | 989 |
| MEAN | 1011 | 1014 | 1014 | 1015 | 1008 | 1008 | 1007 | 1011 | 1009 | 1014 | 1013 | 1006 |

2010 年度 陸域環境研究センターセミナーの記録

2010.5.11 第 104 回セミナー 参加者 11 名

岩上 翔（筑波大学 陸域環境研究センター）

「火山岩からなる山地源流域の降雨流出過程における基盤岩地下水の役割」

降雨流出過程の研究においては、降雨時に斜面に貯留されていた水が流出する際の素早い応答を引き起こすプロセスの解明に重点が置かれ、岩盤内の水流についても考慮されるようになった。しかし、基盤岩内の地下水について直接観測した例は少なく、本研究は基盤岩地下水の役割について浸透から流出までの一連のプロセスを水質とポテンシャルの両面から明らかにすることを目的として行った。

研究対象地域は、九州熊本県宇城市不知火町の源流域である。流域内に深度 25 m, 60 m, 120 m の観測井を設置し、水文観測に加え採水を行って水質の分析を行った。降水・土壌水・基盤岩地下水を 3 成分とした成分分離を行った結果、流出水中の各成分の割合はイベント中に変化し、またイベントの規模によっても異なることが示された。またポテンシャルの結果と照らし合わせてみると、土壌水・基盤岩地下水の流出においては斜面下部における地下水位の位置が重要になると考えられた。

2010.6.29 第 105 回セミナー 参加者 11 名

鈴木智恵子（筑波大学 陸域環境研究センター）

「2007 年 8 月の中部山岳域を対象としたダウンスケールモデリングの基礎実験」

前半、自己紹介を兼ねて、これまで行ってきた研究を簡単に紹介する。その後、中部山岳地域を対象として領域気候モデル（WRF ver 3.1）による力学的ダウンスケールを試みた結果を紹介する。

山岳域における積雪の将来予測を目標としているが、検証用となる冬季の地上観測データが限られることに加えて、地形の影響を受けた降雪積雪現象の局所性、地域性の問題も無視できない。そこで、まずは夏季の現在気候の再現実験を行っている。

今回の基礎実験では顕著な高温を記録した 2007 年 8 月を取り上げ、異なる領域境界条件に対して同じ初期値を与える計算を、27 km, 9 km, 3 km の 3 段ネスティングで行い、結果を比較した。気温と風の水平分布などから、詳細な地形を反映した海陸風循環がみられた。一方降水量を調べると、時別値が観測値と比較して過大なだけでなく、降水イベントの回数も多い結果となった。これらの特徴は、計算領域の条件を変えても共通してみられた。

2010.7.20 第 106 回セミナー 参加者 11 名

松岡憲知（筑波大学 陸域環境研究センター）

「国際極年（2007-2008）期間における周水河研究の進展」

6月に世界最北の大学（78°N）で開催された「欧州永久凍土会議」での発表内容を中心に、

会議や巡検の様子も含めて紹介する。国際極年の期間中、国際永久凍土学会主導で、高緯度陸域を中心に地球規模の地温観測網を展開し、温暖化に伴う永久凍土の広域変動を把握・予測するプロジェクトが進められた。同時に、永久凍土変動がさらに周氷河地形の変動に与える影響を調べる研究も進展した。後者に関して、技術や研究対象に、次のような特色と進歩が見られた。

①観測技術：永久凍土帯の指標地形である多角形土、岩石氷河、ソリフラクション・シートのプロセス研究では、高解像度での地形変化、気象・水文要素の総合的な観測により、地形変化発生の詳細な条件がわかるようになった。

②探査技術：地中の可視化技術、特に地下レーダによる氷体や氷層の検出と形状把握や夏期融解層の含水率変化、CT スキャンによる永久凍土コアの構造分析と含水率の測定など、地下細部の状況理解が進んだ。

③永久凍土融解に伴う侵食の激化：気候温暖化に伴って、地中に氷塊ないし含水率の高い層がある地盤で「融解スランプ」が頻発している。特に、河岸、湖岸、海岸など水塊や波による基部侵食を受ける場所での多発が問題になっている。

④南極から火星へ：近年の火星探査船搭載カメラの解像度向上、高緯度多角形土地帯での着陸船の活動により、火星表面の周氷河地形に関する情報が格段に増えた。特に、地形・凍土・表層物質における地球の南極内陸山地との共通点が、数多く指摘されている。

今後は、中緯度高山地域を含めた周氷河地形変動の広域観測網の展開、気候指標としての周氷河現象の高精度化等が望まれる。

2010.8.30 第 107 回セミナー 参加者 18 名

池田 敦（信州大学 山岳科学総合研究所）

「岩石氷河の研究とその後の山岳永久凍土研究の展開」

山岳永久凍土帯の指標地形である岩石氷河について、発表者が行った研究のうち、とくに注目を集めた 2 例について概説し、さらに 2008 年から開始した富士山の永久凍土調査について紹介した。

急峻な高山帯には岩石氷河と呼ばれる角礫に覆われた舌状の地形が発達する。岩石氷河は地中の氷層（永久凍土層）の変形によって、年間数 cm ～数 m の地表面流速を伴い発達する地形である。1990 年代後半から岩石氷河の流速の年々変化や季節変化が、永久凍土層内の温度変化と関連付けられて議論されてきた。とくに近年の温暖化を反映し岩石氷河が加速していることが注目されている。発表者らはスイスアルプスにおいて、永久凍土層が融点にあって地温の季節変化がない岩石氷河を発見し、そこで地表面流速の年々変化と、永久凍土層の変形の季節変化を観測した。融雪期に変形が急加速し、冬季に緩やかに減速するパターンが繰り返され、そのような現象を説明するために、永久凍土中に水が浸透し斜面が急激に不安定化するモデルを提示した。

日本第 4 位の高峰である間ノ岳周辺において、化石化（永久凍土が完全に融解）した岩石氷河の停止時期を示す年代試料の採取に成功した。得られた年代値は晩氷期末から完新世初頭（約 1 万年前）であり、晩氷期には一帯が永久凍土環境下にあったことが明らかになった。

同様の地形は日本アルプス各地に存在するが、晩氷期の氷河地形と誤認されていることが多く、今後、従来の古環境復元を見直す必要があることを指摘した。

富士山では 1970 年代初頭の研究によって永久凍土が存在するとされたが、その後、研究が進展していない。現在、発表者らの調査によって、積雪による冬季の寒気遮断と夏季の降雨による熱伝達が富士山において永久凍土の発達を抑制していることが明らかになりつつある。2010 年 8 月には、山頂稜線部で深さ約 10 m の観測孔掘削に成功し、今後は永久凍土の地温が直接観測できる見通しが立った。

2010.10.12 第 108 回セミナー 参加者 9 名

若狭 幸（筑波大学 陸域環境研究センター）

「山岳地域における岩盤の風化・侵食に関するいくつかの研究例」

地表面に露出した岩盤は、物理・化学的に風化・侵食される。そのプロセスやその結果の産物などは、地形や地形プロセス、他の環境要素に影響をもたらす。はじめに、これまで調査したチャート、花崗岩、石灰岩質の露出岩盤地形における研究例を簡単に紹介する。次に、中部山岳連携事業の中の研究の一端として近頃開始した、山頂部で見られる落雷による岩盤破壊現象の研究について紹介する。雷のエネルギーは強大で、大きな被害をもたらすことで知られている。山頂部は周囲より標高が高いため落雷することが多く、中部山岳地域などでは、落雷で破壊されたとされる雷岩が存在する。また、熊本県には雷によって空いた穴であると紹介されたナマ地形も存在している。本研究は落雷の地表面への影響やその規模や頻度、地球温暖化との関係について解明することを目的に、室内に設置された落雷発生装置を用いて、落雷の規模と破壊される岩石の物性や状態の関係を調べている。本セミナーではその途中経過と、今後の方針について紹介する。

2010.11.24 第 109 回セミナー 参加者 9 名

脇山義史（筑波大学 陸域環境研究センター）

「ヒノキ人工林における土壌侵食

－信州大学農学部附属 AFC 手良沢山ステーションにおける研究事例－」

本セミナーでは、発表者が信州大学農学部附属 AFC 手良沢山ステーションで行ったヒノキ人工林の土壌侵食に関する研究 2 件を紹介する。

国土の 3 分の 2 が森林で覆われたわが国では、管理放棄された人工林の荒廃が問題視されてきた。中でも、ヒノキ人工林では林床が裸地化しやすく、土壌侵食が進行しやすいことが知られている。土壌侵食の進行は、河川水質の悪化、土壌の生産性低下や土壌物理性悪化の原因となると考えられており、近年求められている森林の有する多面的な機能を維持・活用のためにも、適切な管理が求められている。

ヒノキ人工林では、雨滴による表層土壌の剥離と輸送が主要な侵食プロセスと考えられている。また、土壌侵食に関する既往研究では、表面流の発生によって、土壌の剥離量が増減することが報告されている。しかし、ヒノキ人工林における雨滴侵食と表面流の関係を明らかとした研究はない。そこで、本研究では林齢の異なるヒノキ人工林において、雨滴エネルギー

ギーと土砂剥離量を観測し、土砂剥離・表面流の時間変動を調べ、林分間での比較を行った。これら一連の調査の結果、ヒノキ人工林ではヒノキの加齢にともない林内雨の雨滴エネルギーが大きくなること、表面流の発生によって土砂剥離が助長されることがわかった。

また、上述のように管理放棄ヒノキ人工林では土壌侵食の加速が土壌の性質を変化させると考えられてきた。しかし、表層における土砂の剥離などの物理的な現象がいかにして土壌の性質を変化させるか、そのプロセスについて調べた研究は少ない。本研究では、土壌侵食が土壌内部にあたえる影響を明らかにすることを目的として、広葉樹林とヒノキ人工林で土壌中の CO₂ 濃度および土壌浸透水の水質の日変動を調べ、比較を行った。その結果、ヒノキ人工林では、広葉樹林に比べ、土壌中の CO₂ 濃度が高く、土壌浸透中の硝酸濃度が高いことがわかった。また、ヒノキ人工林で土壌 CO₂ 濃度が高い原因について、降雨中の雨滴衝撃により Soil seal が形成され、大気とのガス交換が阻害されたためであるという可能性が示唆された。

2010.12.21 第 110 回セミナー 参加者 10 名

齋藤 琢（岐阜大学 流域圏科学研究センター）

「山岳域の森林生態系における炭素・水・熱循環研究」

岐阜県高山市の山岳地域を対象に 2005 年から継続的に行っている炭素・水・熱循環研究の紹介を行った。とくに、気象～水文～生態学視点で、生態系の環境応答、観測の推定精度、観測の簡略化に関する次のようないくつかのトピックについて概説した。①タワーフラックス観測データを用いた常緑針葉樹林における生態系の環境応答、②流域スケールの炭素・水・熱循環推定のための生態系モデルの検証・最適化、③急斜面地におけるタワーフラックス観測の観測精度、④森林における光合成・呼吸に伴う貯熱量、⑤葉面積指数の推定精度、⑥タワーフラックス観測を基にした炭素収支評価における CO₂ 貯留変化量の影響、⑦植生指標を用いた生態系光合成能力の評価。

2010.12.22 第 111 回セミナー 参加者 18 名

若月泰孝（海洋研究開発機構）

「降水の地域・領域気候変化予測に関する研究」

降水量の地域・領域スケールの気候変化予測に関する研究を紹介した。2002 年から 5 年間行われた共生プロジェクトで、非静力領域気候モデルによる気候変化予測シミュレーションが実施され、梅雨期の強雨化が予測された。同時に降水の極値の増加も予測された。時間雨量と日雨量では変化比の特徴が異なっており、時間雨量では成層不安定化に対応した広域の増加となっていたが、日雨量の極値は循環場の変化に関連して西日本太平洋岸に局在化した増加傾向が見られた。しかし、この予測は気象研究所の全球気候モデル（GCM）による予測の詳細化結果に過ぎないため、現実の予測精度については不確実性が残る。

そこで、複数の GCM による気候予測結果を用いた領域スケールの確率論的気候変化予測手法を開発している。統計モデルによる予測と領域気候モデルによる予測の両方を開発しており、開発の途中経過を紹介した。統計モデルでは、短時間雨量の確率分布関数の母数目的

変数とし、GCM の格子情報を説明変数とする重回帰モデルを構築している。その際、全く新しい確率分布関数を開発した。これは、層状性降水と対流性降水が同一母集団として扱えないことを考慮し、指数分布と Weibull 分布を混合して作成したものである。ただし、重回帰モデルの完成度はまだ高くないため今後の開発が期待される。この統計手法は計算が軽いいため、全ての GCM について詳細化計算が行えるため、それを用いて確率論的予測に結びつけることができると期待される。一方、領域気候モデルによる予測では、GCM の気候差分情報のみを用いる気候差分ダウンスケーリング法を開発している。GCM の平均気候差分と年々変動の気候変化分を客観解析に上乘せし、それを領域気候モデルの側面境界条件に用いる。この時、複数の GCM を詳細化の前に統計解析する。統計情報をもった気候差分を用いることで、全ての GCM を少ない実験数でカバーすることが可能になる。これも今後の発展が期待される手法開発となる。

大久保晋治郎（北海道農業研究センター）

「温帯林、熱帯林、寒冷農地における CO₂ ガス交換」

温帯林、熱帯林、寒冷農地それぞれにおいて大気との CO₂ 交換量を測定し、その他微気象観測も同時に行った。生態系呼吸による大気への放出量と光合成による吸収量のバランスで、森林—大気間の CO₂ 交換量が決定するわけだが、温帯林においてその日変動幅は夏に大きく冬に小さくなる季節変化を持ち、森林空間内の貯留変化量の変動幅も夏期に最大となった。生態系呼吸を構成する土壌や葉群の呼吸量は温度との強い相関をもち、幹からの呼吸に関しては肥大期に大きな呼吸量を示した。樹高が高く CO₂ のシンク/ソースが大きい熱帯林の貯留変化量は温帯林のものよりも大きく、正味の CO₂ 交換量を見積もる上で、その重要性が明らかになった。また、傾斜地に位置する温帯林において樹冠上で観測された CO₂ 交換量と、チャンバーを用いて直接測定した生態系総呼吸量を比較すると大気混合効率が低い夜間に両者の差が大きくなった。このことより生態系呼吸により放出された CO₂ が樹冠上から出て行かず（あるいは森林空間内にとどまらず）移流により流域外に運ばれている可能性が示唆された。

寒冷地における裸地圃場において地表面からの CO₂ 放出量をチャンバー法を用いて観測した結果、その放出量は一般に報告されているように地温に依存した。外気との断熱の役割を果たす積雪層を伴う冬期において地温は 0℃ に保たれ、除雪を行い土壌凍結を促進した区では地温は氷点下を記録したが、いずれにおいても地表面放出がほとんど観測されなかった。土壌凍結が発達した区では地中の CO₂ 濃度が上昇し、土壌凍結層の大気へのガス拡散の阻害が示唆された。

2011.15 第 112 回セミナー 参加者 15 名

川瀬宏明（国立環境研究所）

「種々の人間活動が雲・降水・水循環に及ぼす影響

～地表面改変，エアロゾル，温室効果ガスの効果～

近年、温室効果ガスの増加による地球温暖化が注目されている。IPCC 第四次報告書では、

近年の急速な気温上昇は人為的な温室効果ガスの増加による地球温暖化の表れであり、将来にさらなる気温上昇をもたらすことが指摘されている。また、地球温暖化は気温上昇だけでなく、降水にも影響を及ぼすと言われている。最近の研究によると、地球温暖化は現在降水の多い地域で降水量を増加させ、少ない地域では降水量を減少させると言われている。これはつまり、干ばつや洪水の頻度が増加しうることを示唆している。

しかし、降水に変化をもたらす人為的要因は、温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化だけではない。例えば、産業や農業活動によって大気中に排出される微粒子（エアロゾル）、都市化や農業、植林による土地改変なども、降水に影響を及ぼすといわれている。エアロゾルは、太陽からの放射を吸収・散乱することで地表に届く放射量を減少させ、さらに雲粒の核としても働くことで、雲や降水を変化させる。一方土地改変は、局所的な気象状態を変化させることが指摘される。例えば、緑地を開拓した都市や乾燥域の灌漑地などの異なる土地利用が隣接する地域では、局所的な大気の循環が励起され、雲の発生や降水の発生に影響を及ぼす。

このように、地球温暖化をはじめとした人為的要因による降水の変化は、将来の水循環の変化を考える上で重要な不確定要素となる。本発表では、人間活動が引き起こす「温室効果ガスの増加」、「エアロゾルの増加」、「土地利用改変」の3つに着目して、それぞれが雲・降水・水循環の変化に及ぼす影響を、時空間スケールを意識しながらお話しする。

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、2010年4月から2011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

査読付国際誌

- Hosono, T., Siringan, F., Yamanaka, T., Umezawa, Y., Onodera, S., Nakano, T. and Taniguchi, M. (2010): Application of multi-isotope ratios to study the source and quality of urban groundwater in Metro Manila, Philippines. *Applied Geochemistry*, **25**, 900-909.
- Iwagami, S., Tsujimura, M., Onda, Y., Shimada, J. and Tanaka, T. (2010): Role of Bedrock Groundwater in the Rainfall-Runoff Process in a Small Headwater Catchment Underlain by Volcanic Rock. *Hydrological Processes*, **24**, 2771-2783.
- Kim, M.S., and Sakai, N. (2010): Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface. *Landslides*, **7**, 351-357.
- Kogure, T. and Matsukura, Y. (2010): Critical notch depths for failure of coastal limestone cliffs: Case study at Kuro-shima Island, Okinawa, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, **35**, 1044-1056.
- Kon, A., Mizutani, K. and Wakatsuki, N. (2010): Noncontact measurement of humidity and temperature using airborne ultrasound. *Japanese Journal of Applied Physics*, **49(4)**, 046601_1-5.
- Liu, S., Li, S.G., Yu, G.R., Asanuma, J., Sugita, M., Zhang, L.M., Hu, Z.M. and Wei, Y.F. (2010): Seasonal and interannual variations in water vapor exchange and surface water balance over a grazed steppe in central Mongolia. *Agricultural Water Management*, **97**, 857-864, DOI: 10.1016/j.agwat.2010.01.016.
- Matsuoka, N. (2010): Solifluction and mudflow on a limestone periglacial slope in the Swiss Alps: 14 years of monitoring. *Permafrost and Periglacial Processes*, **21**, 219-240.
- Matsuoka, N. (2011): Climate and material controls on periglacial processes: Toward improving periglacial climate indicators. *Quaternary Research*, **75**, 356-365.
- Mikita, M., Yamanaka, T. and Lorphensri, O. (2011): Anthropogenic changes in a confined groundwater flow system in the Bangkok Basin, Thailand, part I: was groundwater-recharge enhanced? *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.8013.
- Minamide, A., Wakatsuki, N. and Mizutani, K. (2010): Optimal transducer arrangement for temperature distribution measurement in arbitrary convex-shaped space by acoustic computerized tomography. *Japanese Journal of Applied Physics*, **49(7)**, 07HC07_1-5.
- Nishii, R. and Matsuoka, N. (2010): Monitoring rapid head scarp movement in an alpine rockslide. *Engineering Geology*, **115**, 49-57.
- Wakatsuki, N., Kinjo, S., Takarada, J. and Mizutani, K. (2010): Precise wireless triggering system for anemometers with long-baseline acoustic

- probes. *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**(7), 07HC14_1-4.
- Wakiyama, Y., Onda, Y., Mizugaki, S., Asai, H. and Hiramatsu, S. (2010): Soil erosion rates on forested mountain hillslopes estimated using ^{137}Cs and ^{210}Pb . *Geoderma*, **159**, 39-52.
- Wakiyama, Y., Onda, Y., Nanko, K., Mizugaki, S., Kim, Y., Kitahara, H. and Ono, H. (2010): Estimation of temporal variation in splash detachment in two Japanese cypress plantations of contrasting age. *Earth Surface Processes and Landforms*, **35** (9), 993-1005, DOI: 10.1002/esp.1844.
- Yamanaka, T., Shimada, J., Tsujimura, M., Lorphensri, O., Mikita, M., Hagihara, A. and Onodera, S. (2011): Tracing a confined groundwater flow system under the pressure of excessive groundwater use in the Lower Central Plain, Thailand. *Hydrological Processes*, **25** (17), 2654-2664, DOI: 10.1002/hyp.8007.
- Yamanaka, T., Mikita, M., Lorphensri, O., Shimada, J., Kagabu, M., Ikawa, R., Nakamura, T. and Tsujimura, M. (2011): Anthropogenic changes in a confined groundwater flow system in the Bangkok Basin, Thailand, part II: how much water has been renewed? *Hydrological Processes*, **25** (17), 2734-2741, DOI: 10.1002/hyp.8014.
- Zhang, F.M., Ju, W.M., Chen, J.M., Wang, S. Q., Yu, G.R., Li, Y. N., Han, S.J. and Asanuma, J. (2010): Study on evapotranspiration in east asia using the BEPS ecological model. *Journal of Natural Resources*, **25**, 1596-1606. (in Chinese with English abstract)
- 査読付国内誌
関口智寛 (2011): ウェーブリップルの遷移過程. *地質学雑誌*, **117** (3), 141-147.
- 松岡憲知・池田 敦 (2011): スイスアルプスの周水河環境と地形変動 - 15年間の観測の総括と展望 -. *地学雑誌*, **120**, 502-535.
- 原 政之・日下博幸・木村富士男・若月泰孝 (2010): 気候変動が首都圏の都市気候に及ぼす影響 - 冬季を対象として -. *ながれ*, **29**, 353-361.
- Jelassi, H., Tanaka, T., Yamanaka, T. and Bedir, M. (2011): Geochemical processes regulating groundwater quality in coastal aquifer in Odawara region, Kanagawa Prefecture, Japan. *水文・水資源学会誌*, **24**, 37-49.
- 著書
山中 勤 (2011): 第6章3節 バンコク首都圏の水環境と水問題. 「アジアの都市と水環境」(谷口真人・吉越昭久・金子慎治 編), 古今書院, 167-178.
- その他研究論文
足立幸穂・木村富士男 (2010): 近年の関東域における高温化傾向の要因分析. *気候影響・利用研究会会報*, **28**, 5-13.
- 岩上 翔・田中 正・呉羽正昭・兼子 純・三木田慎 (2010): 菅沼湿原における地表水の硝酸濃度と土地利用の関係. *筑波大学陸域環境研究センター報告*, **11**, 11-19.
- 関口智寛 (2011): 浅海域の多角形リップル. *地質学雑誌*, **117** (3), VI.
- 八反地剛・秋山沙苗・松倉公憲 (2010): 阿武隈山地の野外風化実験サイトにおける風化環境. *筑波大学陸域環境研究センター報告*, **11**, 21-27.
- 林 敦史・田中 正 (2010): 筑波大学陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林における

樹種構成の長期変化について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **11**, 3-9.

村上雅則・木村富士男 (2010): 可搬型簡易自作強制通風式気温計作成マニュアル. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **11**, 29-33.

Christiansen, H.H., Matsuoka, N. and Watanabe, T. (2010): Ice wedge process research in Adventdalen. In Behthling, I. (ed.), *Field Guide for Excursions, EUCOP III Svalbard, Norway, 13-18 June 2010*, Geological Survey of Norway, Trondheim, 44-62.

Iida, S. and Tanaka, T. (2010): Effect of the span length of Granier-type thermal dissipation probes on sap flux density measurements. *Annals of Forest Science*, **67**, 408.

Matsuoka, N. (2010): Monitoring permafrost and periglacial processes in Svalbard. In IPY 2007- 2008 Japanese National Committee (ed.), *Japanese Research Activities in IPY 2007-2008*, The Science Council of Japan, 10-11.

修士論文

中道丈史 (2011): バルク式を用いた単層型熱収支モデルの推定精度の検証. 78p. (岡山大学大学院環境学研究科)

MIKITA, Makoto (2011): Numerical Experiments on the Origin of Groundwaters with Extreme Isotopic Composition in the Bangkok Basin, Thailand. 63p. (筑波大学大学院生命環境科学研究科)

卒業論文

小池百合子 (2011): バックトラジェクトリー解析を用いたモンゴル旱魃発生要因の推定. 81p. (筑波大学生命環境学群地球学類)

加納正也 (2011): 筑波台地崖線における湧水のキャプチャーゾーンの推定. 63p. (筑波大学生命環境学群地球学類)

角 夏香 (2011): ソリフラクション・ロウブの発達プロセス-スイス・アルプスにおける観察と室内実験-. 82p. (筑波大学第一学群自然学類)

沼倉智紀 (2011): 土地利用・土地被覆が河川の物質負荷量に及ぼす影響の評価-牛久沼流入河川の事例-. 37p. (筑波大学生命環境学群地球学類)

沼田慎吾 (2011): 極細粒砂を用いた複合流ベッドフォーム実験. 65p. (筑波大学生命環境学群地球学類)

板東啓二 (2011): 簡易手法による顕熱・潜熱フラックスの予測. 46p. (岡山大学環境理工学部)

牧野裕紀 (2011): 千曲川流域における天然水の水素・酸素安定同位体マップの作成. 55 p. (筑波大学生命環境学群地球学類)

丸山浩輔: 富士川流域における天然水の水素・酸素安定同位体マップの作成. 42p. (筑波大学生命環境学群地球学類)

茂木貴弘 (2011): 散布型センシンググリッドの構成とその応用に関する研究. 16p. (筑波大学理工学群工学システム学類)

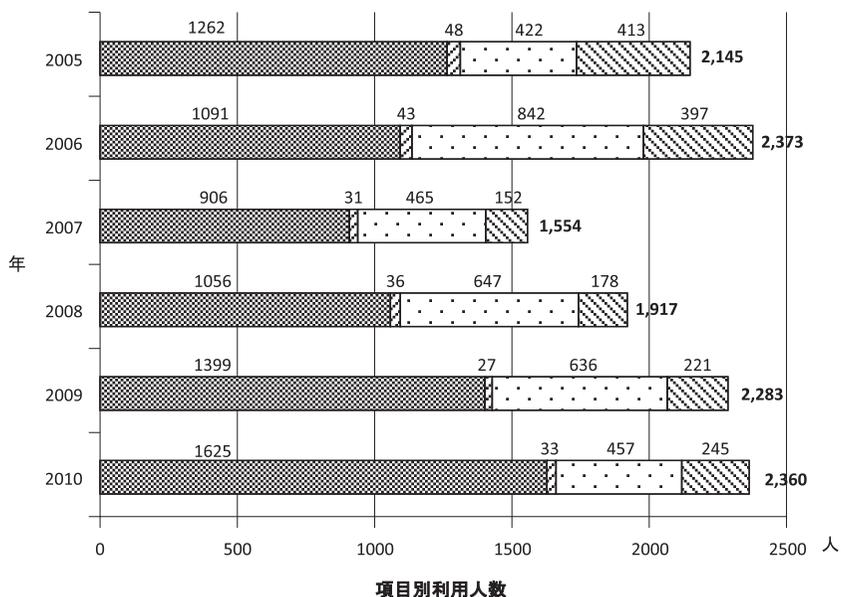
2010（平成 22）年度 陸域環境研究センター施設利用状況

(2011 年 3 月 31 日現在)

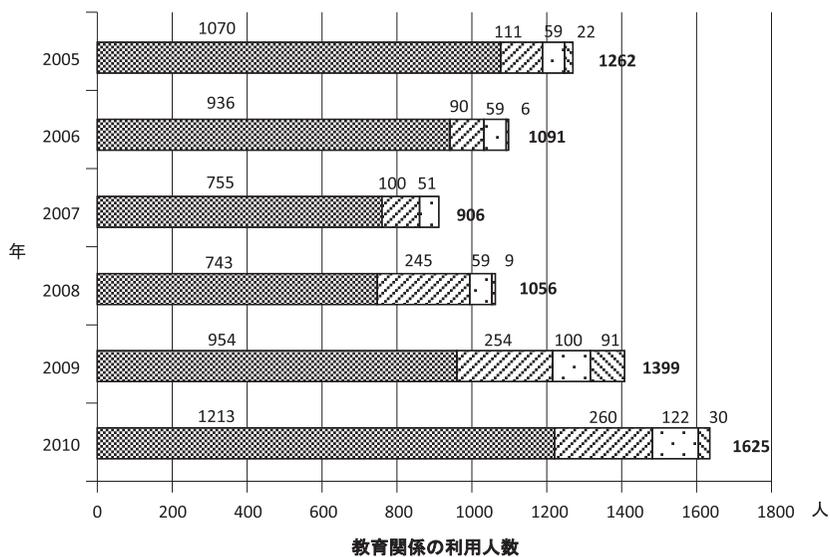
| | 教育関係 | | 研究関係 | |
|----------------------------|-----------------------|------------|---------------------|-------|
| 学 群 | 大気科学実験（地球学類） | 20 名× 18 回 | 卒業研究利用者 | |
| | 水文科学実験・講義（地球学類） | 30 名× 8 回 | 自然学類 | 1 名 |
| | 計測工学実験（生物資源学類） | 25 名× 1 回 | 地球学類 | 6 名 |
| | 堆積プロセス学・同実験Ⅱ（地球学類） | 15 名× 10 回 | 生物学類 | 1 名 |
| | 水理学実験（生物資源学類） | 10 名× 5 回 | システム学類 | 1 名 |
| | 大気科学野外実験（地球学類） | 20 名× 2 回 | | |
| | 生態学実験（生物学類） | 19 名× 6 回 | | |
| | 地球学類新入生オリエンテーション | 65 名× 2 回 | | |
| | 基礎生物学実験（生物学類） | 50 名× 2 回 | | |
| | 地球環境システム学実験（地球学類） | 4 名× 1 回 | | |
| | 合計（延）数 | 1,213 名 | 合計（延）数 | 9 名 |
| 大 学 院 | 地域調査法（教育研究科） | 20 名× 9 回 | 生命環境科学研究科 | 14 名 |
| | 魅力ある理科教師になるための生物・地学実験 | 10 名× 1 回 | システム情報工学研究科 | 1 名 |
| | 循環環境学実習（生命環境科学研究科） | 25 名× 2 回 | | |
| | 大気陸面過程論 | 20 名× 1 回 | | |
| | 合計（延）数 | 260 名 | 合計（延）数 | 15 名 |
| 教 職 員 | 学生の指導 | 122 名 | 生命環境科学研究科 | 1 名 |
| | | | 産学リエゾン共同研究センター | 1 名 |
| | 合計（延）数 | 122 名 | 合計（延）数 | 2 名 |
| 他 大 学 等 | 夏の学校（日本地形学連合） | 30 名× 1 回 | 法政大学デザアイン工学部 | 1 名 |
| | | | 千葉大学環境リモートセンシングセンター | 1 名 |
| | | | 産業技術総合研究所 | 1 名 |
| | | | フジテレビジョン | 1 名 |
| | | | 夏休み自由研究お助け隊 | 3 名 |
| | 合計（延）数 | 30 名 | 合計（延）数 | 7 名 |
| 見 学 ・ そ の 他 | 研究会・年次報告会 | 2 回 参加者 | 131 名 | |
| | セミナー | 9 回 参加者 | 112 名 | |
| | 機器の利用 | | 1 名 | |
| | データの利用 | | 1 名 | |
| | 見学者 | | | |
| | 国内 | | 422 名 | |
| 国外 | | 35 名 | | |
| | | | 合計（延）数 | 702 名 |
| 利用者合計 | | | 2,360 名 | |

2005（平成17）年度～2010（平成22）年度 陸域環境研究センター施設利用状況

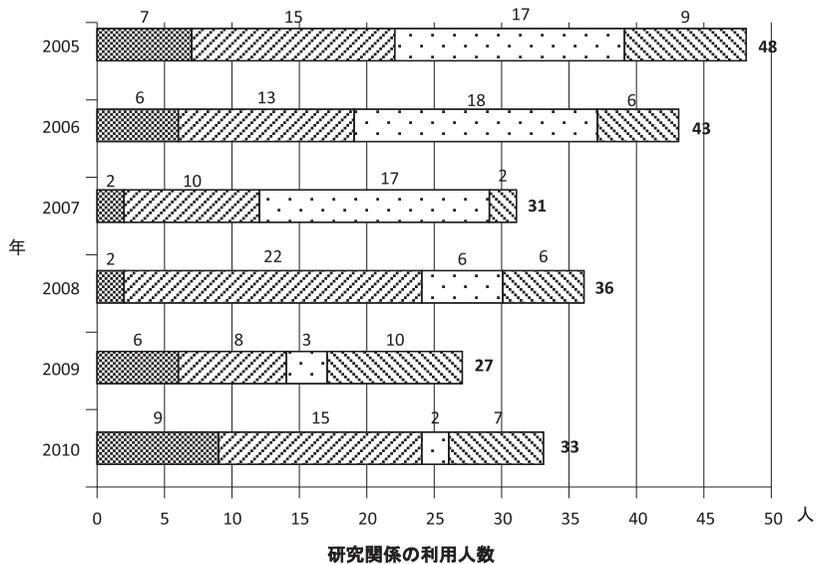
（2011年3月31日現在）



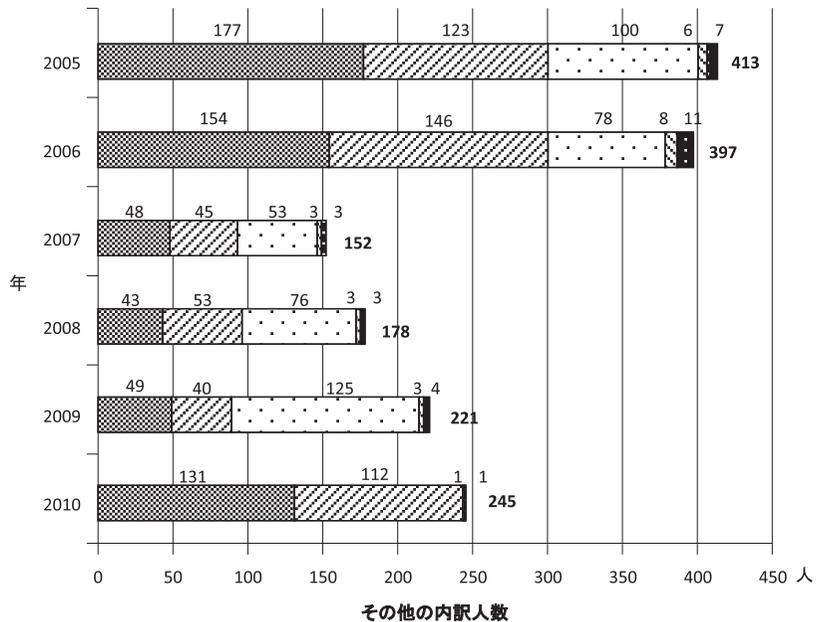
■教育関係 ■研究関係 □見学 ■その他



■学群 ■大学院 □教職員 ■他大学等



学群 大学院 教職員 他大学等



研究会・年次報告会 セミナー ワークショップ 機器の利用 データの利用

2010（平成22）年度 主な行事

| 年 月 日 | 記 事 |
|---------------------------|---|
| 1. 学会及び会議等の参加，共同研究，環境教育など | |
| 2010. 5.15-16 | 若狭準研究員，仙台市戦災復興記念館にて「東北地理学会」に参加 |
| 2010. 6. 9-11 | 浅沼教授，東京大学生産技術研究所にて「モンスーンアジアデータワークショップ」への参加 |
| 2010. 6.11-20 | 松岡センター長，ノルウェー スバルバル大学（The University Centre in Svalbard）にて「第3回ヨーロッパ永久凍土会議（3rd European Conference on Permafrost）」に参加（組織委員，基調講演，ポスター発表，巡検案内） |
| 2010. 6.22-25 | 浅沼教授，東京大学生産技術研究所にて「社会へ貢献する地球システム科学としての水文学シンポジウム」への参加 |
| 2010. 7.13-14 | 浅沼教授，中国北京にて「アジア乾燥地における陸面モデル相互比較プロジェクト（Asian Dryland Model Intercomparison Project）」キックオフミーティングに参加（プロジェクトリーダーとして） |
| 2010. 8. 4-13 | 松岡センター長，ノルウェー スバルバル大学にて「周氷河気候指標の高精度化」に関する共同研究（High resolution indicators of periglacial climate in Svalbard, Arctic） |
| 2010. 8.20-27 | 関口講師，アメリカ イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校にて「複合流下におけるベッドフォーム」に関する共同研究（Experiment of bedforms under combined flow in University of Illinois at Urbana Champaign） |
| 2010. 5.21 | 山中准教授，つくば市立吾妻中学校にて地球環境に関する出前授業 |
| 2010. 8.23- 9.30 | スペイン マドリード・コンプルテンセ大学（Universidad Complutense de Madrid）より Dr. Luis Miguel Tanarro を招聘（「山岳永久凍土の衰退における気温・地温・標高・太陽放射・積雪期間の影響」に関する研究） |
| 2010.10. 2- 3 | 山中准教授，筑波大学にて「2010年度日本水文学会学術大会」に参加（大会実行委員，研究発表） |
| 2010.10.14-15 | 浅沼教授，モンゴル ウランバートルにて「水分野の持続可能性に関するモンゴル・日本共同ワークショップ」参加 |
| 2010.11. 9 | 山中准教授，名古屋大学にて「第20回 International Hydrological Programme (IHP) Training Course」に参加（講師） |
| 2010.11.10 | 山中准教授，つくば市立高崎中学校にて地球環境に関する出前授業 |
| 2010.11.13-14 | 若狭準研究員，立正大学にて「日本地形学連合秋季大会」に参加（口頭発表） |
| 2010.11.18 | 山中准教授・鈴木研究員，つくば市立谷田部中学校にて地球環境に関する出前授業 |
| 2010.12.12 | 山中准教授，筑波大学にて「第4回つくば3Eフォーラム会議」に参加（事務局，ポスター発表） |
| 2010.12.17-18 | 中部山岳地域環境変動研究機構 2010年度年次研究報告会（出席者81名） |
| 2010.12.22 | 山中准教授，総合地球環境学研究所にて「地下環境プロジェクト」成果報告会に参加 |
| 2011. 1.13 | 山中准教授，つくば市立二の宮小学校にて地球環境に関する出前授業 |
| 2011. 1.20 | 浅沼教授，広島大学東京オフィスにて「アジア干ばつワークショップ」への参加 |

| 年 月 日 | 記 事 |
|---------------|---|
| 2011. 2.22-23 | 浅沼教授, ブルーウェーブイン浅草にて「東アジア陸域生態系における炭素削減計画定量化のための日中韓研究ネットワーク (CarboEast Asia) ワークショップ 2011」参加 |
| 2011. 2.24 | 浅沼教授, 筑波大学にて「モンゴルにおける持続可能な地下水管理に関するユネスコ・チェアワークショップ」参加 |
| 2011. 3. 2 | 浅沼教授, 国立環境研究所にて「東アジア地域における地球温暖化と放牧が草原の炭素循環と生物多様性に及ぼす影響」会議において発表 |
| 2011. 3. 4 | 浅沼教授, 山梨大学にて「山梨大学国際シンポジウム 2011 アジア地域における流域総合水管理に関するシンポジウム」参加 |
| 2011. 3.11 | 平成 22 年度陸域環境研究センター年次研究報告会 (ミニシンポジウム「アジア永久凍土帯における温暖化と地下水循環系変動」開催: 三陸沖地震のため中断)(参加者 24 名). シンポジウム講演者に石川 守氏 (北海道大准教授) と朴 昊澤氏 (海洋研究開発機構) を招聘 |

2. フィールド調査

| | |
|----------------|--|
| 2010. 5. 6 | 山中准教授, 栃木県佐野市にて間伐が流域水循環に及ぼす影響に関するフィールド調査 |
| 2010. 5.16 | 山中准教授, 栃木県那須野ヶ原にて河川-地下水相互作用に関するフィールド調査 |
| 2010. 5.28-30 | 松岡センター長, 南アルプスにて「中部山岳の地形変動と土砂生産」に関するフィールド調査 (同地域での調査を 7.18-19, 8.19-22, 9.4-5, 10.18-19, 11.6-7 にも継続実施) |
| 2010. 6.13 | 山中准教授, 茨城県つくば市にて湧水に関するフィールド調査 |
| 2010. 6.19-21 | 若狭準研究員, 鳥取市用瀬町のポットホルの調査 |
| 2010. 7.22-8.3 | 松岡センター長, スイス アルプス山脈にて「山岳永久凍土と周氷河プロセス」のフィールド調査 (Mountain permafrost and periglacial processes in the Alps) と, 地形学野外実験 B の指導 (学群生 10 名, TA 1 名, 現地研究者 1 名) |
| 2010. 7.27-28 | 山中准教授, 神奈川県温泉地学研究所との共同研究として, 箱根周辺における植物水同位体組成の空間分布特性に関するフィールド調査および技術指導 (10.27 にも実施) |
| 2010. 8. 3 | 若狭準研究員, 栃木県鹿沼市足尾山地における山地源流域の勾配調査 (八反地剛講師との共同研究) (8.24 にも実施) |
| 2010. 8. 3-4 | 浅沼教授, モンゴル国水文気象局にてモンゴル半乾燥草原における水収支の研究に関する打ち合わせ及び調査 |
| 2010. 8. 4 | 山中准教授, 栃木県佐野市にて植物の吸水深度に関するフィールド調査 |
| 2010. 8.23-28 | 山中准教授, 千曲川・富士川両流域にて降水・土壌水・河川水の同位体マッピングに関するフィールド調査 |
| 2010. 9.26-29 | 山中准教授, 栃木県足利市にて河川-地下水相互作用に関するフィールド調査 |
| 2010.10.16-18 | 松岡センター長・若狭準研究員・脇山研究員, 信州大学農学部 (伊那キャンパス) および西駒ステーションにて中部山岳地域環境変動研究機構のフィールドミーティングに参加 若狭準研究員, 長野県駒ヶ根市, 木曾駒ヶ岳における岩盤の帯磁率調査 |
| 2010.11.25 | 山中准教授, 栃木県足利市にて河川-地下水相互作用に関するフィールド調査 (2011. 1.27 にも実施) |

| 年 月 日 | 記 事 |
|--------------------|---|
| 3. 着任・昇任 | |
| 2010. 4. 1 | 松岡憲知センター長着任 |
| 2010. 7. 1 | 松田由雄専門職員着任 |
| 2010. 9. 1 | 脇山義史研究員着任 |
| 2010.10. 1 | 浅沼 順教授昇任 |
| 4. セミナー等の開催 | |
| 2010. 5.11 | 第 104 回センターセミナー, 岩上 翔準研究員「火山岩からなる山地源流域の降雨流出過程における基盤岩地下水の役割」(参加者 11 名) |
| 2010. 6.29 | 第 105 回センターセミナー, 鈴木智恵子研究員「2007 年 8 月の中部山岳域を対象としたダウンスケールモデリングの基礎実験」(参加者 11 名) |
| 2010. 7.20 | 第 106 回センターセミナー, 松岡憲知センター長「国際極年 (2007-2008) 期間における周氷河研究の進展」(参加者 11 名) |
| 2010. 8.30 | 第 107 回センターセミナー, 池田 敦 (信州大学 山岳科学総合研究所)「岩石氷河の研究とその後の山岳永久凍土研究の展開」(参加者 18 名) |
| 2010.10.12 | 第 108 回センターセミナー, 若狭 幸準研究員「山岳地域における岩盤の風化・侵食に関するいくつかの研究例」(参加者 9 名) |
| 2010.11.24 | 第 109 回センターセミナー, 脇山義史研究員「ヒノキ人工林における土壌侵食-信州大学農学部附属 AFC 手良沢山ステーションにおける研究事例-」(参加者 9 名) |
| 2010.12.21 | 第 110 回センターセミナー, 斎藤 琢 (岐阜大・流域圏科学研究センター)「山岳域の森林生態系における炭素・水・熱循環研究」(参加者 10 名) |
| 2010.12.22 | 第 111 回センターセミナー, 若月泰孝 (海洋研究開発機構)「降水の地域・領域気候変化予測に関する研究」, 大久保晋治郎 (北海道農業研究センター)「温帯林, 熱帯林, 寒冷農地における CO ₂ ガス交換」(参加者 18 名) |
| 2011. 1. 5 | 第 112 回センターセミナー, 川瀬宏明 (国立環境研究所)「人間活動が雲・降水に及ぼす影響」(参加者 15 名) |
| 5. 見学受け入れ | |
| 2010. 4.18 | 科学技術週間・センターの一般公開 |
| 2010. 5.13 | 筑波大学附属高校見学 (2 年生 1 名) |
| 2010. 6.15 | 大宮開成高校見学 (2 年生・教員 36 名) |
| 2010. 7. 2 | 茨城県立藤代高校普通科見学 (2 年生 30 名, 教員 1 名) |
| 2010. 7. 9 | 茗溪学園高校交換留学生見学 (学生・教員 16 名) |
| 2010. 7.15 | 県民大学 (茨城県県南障害学習センター) 見学 (社会人約 40 名) |
| 2010. 7.23 | オランダ デルフト工科大学 (Technische Universiteit Delft) 見学 (大学院生修士 13 名, 教員 3 名) |
| 2010. 7.29 | 平成 22 年度大学説明会学内施設見学 (学生・保護者 X 名) |
| 2010. 8.26 | 早稲田大学附属本庄高校見学 (1 年生 3 名) |
| 2010.10. 5 | 兵庫県立姫路東高校見学 (1 年生・2 年生・教員 8 名) |

| 年 月 日 | 記 事 |
|---------------|--|
| 2010.10. 6 | 島根県立出雲高校見学（2年生 40名, 教員 5名） |
| 2010.10.13 | 島根県立三刀屋高校見学（2年生・教員 27名） |
| 2010.10.14 | 栃木県立真岡高校見学（2年生 32名, 教員 2名） |
| 2010.10.21 | 香川県立三本松高校見学（1年生・教員 19名） |
| 2010.11.10 | 富山県立八尾高校見学（2年生・教員 33名） |
| 2010.11.11 | 栃木県立栃木高校見学（2年生・教員 42名） |
| 2010.11.12 | 群馬県立桐生高校見学（1年生・教員 44名） |
| 2011. 2.22 | ユネスコ・チェア ワークショップ参加者見学（8名） |
| 2011. 3. 3 | モンゴル科学院植物研究所, 中国科学院西北高原生物研究所, 北京大学見学（5名） |
| 6. その他 | |
| 2010. 7. 6 | 平成 22 年度陸域環境研究センター運営委員会 |
| 2010. 7.26 | 学生部屋整備 |
| 2010. 8. 2- 4 | 圃場整備（草刈） |
| 2010.11.15 | 圃場整備（草刈） |
| 2010.12. | 「陸域環境研究センター報告第 11 号」発行 |

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

F A X：029-853-2530

e-mail: jimu@suiri.tsukuba.ac.jp

筑波大学陸域環境研究センター報告

第12号

2011年12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@suiri.tsukuba.ac.jp
<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/>

© 筑波大学陸域環境研究センター, 2011

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.12

December

2011

Contents

| | | |
|---|---|----|
| Foreword | Norikazu MATSUOKA | 1 |
| Photo gallery | | 2 |
| Long-term Observation of Seasonal and Yearly Variation of Grassland by an Automatic Digital Camera | Tomoko AKITSU, Kenlo Nishida NASAHARA, Hibiki NODA, Takeshi MOTOHKA, Kazutaka MURAKAMI, Satoshi TSUCHIDA and Shin NAGAI | 5 |
| Changes of Vegetation Indices due to Spectral Specifications of Satellite Sensors in a Grassland | Kazutaka MURAKAMI, Kenlo Nishida NASAHARA, Tomoko AKITSU, Takeshi MOTOHKA and Shin NAGAI | 13 |
| The Effect of Rock Properties on Rock Strength Change by Salt Weathering: A Laboratory Experiment | Masato SATO, Tsuyoshi HATTANJI and Sachi WAKASA | 21 |
| On Measurement Accuracy of Liquid Water Isotope Analyzer Based on Wavelength-Scanned Cavity Ring-Down Spectroscopy (WS-CRDS) | Tsutomu YAMANAKA and Yuichi ONDA | 31 |
| Dataset of a Wave-Flume Experiments of the Ripple Deformation | Tomohiro SEKIGUCHI | 41 |
| Observational Data of Heat Balance and Water Balance -2010- | Chieko SUZUKI, Sho IWAGAMI and Tsutomu YAMANAKA | 55 |
| Lecture Summaries | | 81 |
| List of Publications | | 87 |
| Miscellaneous | | 91 |



Copyright © Terrestrial Environment Research Center,
The University of Tsukuba, Ibaraki 305-8577 JAPAN, 2011