

# 筑波大学 陸域環境研究センター報告

第 13 号  
2012

筑波大学陸域環境研究センター

2012年11月



## 序

『陸域環境研究センター報告 第13号』をお届けします。本号が最終号となります。と申しますのは、陸域環境研究センターは平成24年12月1日に新設される「アイソトープ環境動態研究センター」に合流し、平成24年度で閉組することになったためです。昭和50年4月に「水理実験センター」として設立され、平成12年4月に「陸域環境研究センター」に改組・拡充された本センターは、独立したセンターとしての歴史に終止符を打ちます。そこで本号では、平成23年度の活動報告に加えて、陸域環境研究センターとしての13年間にわたる研究教育活動を総括いたします。中期計画に対応する第一期（平成12～15年度）、第二期（平成16～21年度）、第三期（平成22～23年度）に分けて、また主な研究課題ごとに、小規模な研究センターが取り組んできた多彩な活動を取りまとめました。

平成23年度には、概算要求事項「特別経費」による「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5年計画の2年目を迎えました。本事業を中核に据えて、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推進しました。具体的には、中部地方の各観測ステーションでの気象・水文や地形変動に関するモニタリング、各地での水・物質循環に関する調査・分析、岩盤破壊・侵食に関する実験研究に精力的に取り組ましました。また、連携の中核機関として、各種資料のデータベース化、連携機構のホームページの維持・管理、学内3センターの研究交流会の企画・実施を行いました。3大学合同の年次報告会（信州大学）も小規模な学会並みの充実した会となりました。

センターの特色を生かした基礎教育・研究、科学研究費や外部資金等による国内外共同研究・国際連携事業も推進しました。科研費（研究代表者）を新規で4件獲得し、陸域環境の基盤研究を推進しました。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件実施しました。

教育に関しては、学群生3名、院生11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。センター施設を利用した授業も13科目で計46回実施されました。また、全国各地の高校生を対象とする施設見学・体験学習を4校（計197名）、「次世代環境教育カリキュラム」の試行実践を市内小中学校で実施するなど、高大連携や社会貢献にも積極的に協力しました。

人事面では、若月泰孝助教が6月1日付けで着任しました。同助教は、文部科学省が新規に開始した「スーパーテニユア制度」にも採択されました。また、鈴木智恵子研究員が7月1日から産前・産後および育児休業を取得し、宋 苑瑞研究員が平成24年2月1日付けで着任し、若狭 幸特任助教が2月16日から産前・産後休業を取得し、岩上 翔特任助教が3月31日付けで退職しました。施設面では、新規のセキュリティシステムの導入、震災対策のための物品整理と設備の固定、水理実験棟内床面の段差の解消等により、安全性を強化しました。また、研究スペース確保のため、機械室やデータ収録室の改造と研究室化を進めました。

アイソトープ環境動態研究センターへの合流後は、東日本大震災以来、最大の社会問題となった「放射線の環境への影響」に焦点を当てた研究にも重点的に取り組むことになります。これまでに当センターが手がけてきた気象・水文観測や水理実験を柱とする陸域環境動態の基礎研究を活かして、大気中や水域での放射線の拡散予測を始めとする、喫緊の社会的要請の高い研究課題に挑戦いたします。今後も、心機一転、新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24年11月

陸域環境研究センター長 松 岡 憲 知



## 陸域環境研究センターのあゆみ



夏の熱収支・水収支観測圃場と観測タワー.  
(2004年8月1日)



冬の観測圃場.  
(2012年1月24日)



科学技術週間一般公開(大型水路).  
(2007年4月21日)



実験観察会  
(池田宏先生最終講義).  
(2005年3月5日)



タイ王国 Srinakharinwirot 大学の公式訪問。(2012年3月29日)





第3回モンゴルの陸域環境変化に関する国際会議.  
(2004年11月10日)



チベット高原に設置された,  
GAME-AAN プロジェクトのMS3637 サイト.  
(2010年8月3日)



RAISE プロジェクトでの航空機観測 (モンゴル).  
(2003年10月2日)



RAISE プロジェクトによって、モンゴル半乾燥  
草原のヘルレンバヤンウランに設置された、  
自動水・熱・炭素収支観測システム.  
(2011年3月22日)



モンゴル半乾燥草原における大口径シンクロ  
メータによる顕熱フラックスの広域観測.  
(2003年8月22日)





川上演習林における観測機器設置。  
参加者：若狭特任助教，脇山研究員，渡邊，山岸，  
石川（地形分野），牧野（水文分野）。  
（2011年12月15日）



国際協力イニシアティブ事業における  
中国・太行山観測所の見学。  
（2006年10月）



国際協力イニシアティブ事業における  
尾白川（山梨県）での水質調査実習。  
（2007年11月）



沖縄粟国島での気象観測。  
（上）地上気象測器。（下）ラジオゾンデの放球。  
参加者：若月助教，岡田研究員，井澤，  
高橋，野澤，渡邊（大気分野）。  
（2012年5月15日）



スイスでの地形学野外実験（地球学類）で  
氷河を観察する。松岡センター長担当。  
（2012年7月22日）





池田宏先生退職記念祝賀会にて。  
(2005年3月4日)



及川武久先生ご退職にあたって。  
(2006年3月3日)



田中正センター長ご退職にあたって。  
(2010年3月30日)



木村富士夫先生ご退任。  
(2010年3月30日)



センター会の風景。センター報告の口絵の  
デザインについて相談中。  
(2012年9月4日)



# 期 別 総 括

|                   |                 |    |
|-------------------|-----------------|----|
| 第 1 期 (2000–2003) | 浅沼 順            | 7  |
| 第 2 期 (2004–2009) | 田中 正・山中 勤       | 11 |
| 第 3 期 (2010–2011) | 松岡 憲知・浅沼 順・山中 勤 | 19 |



## 期別総括：第 1 期（2000—2003）

Summary of the 1st Period (2000—2003)

浅沼 順\*

Jun ASANUMA\*

### I はじめに

2000 年 4 月に、水理実験センターを改組・拡充して、陸域環境研究センターが発足した。10 年の時限付きの学内研究センターとして、定められた期間中に成果を出すことが求められることとなったことから、予定されていたスタッフの陣容が揃った 2001 年 9 月には、第 1 期中期計画を策定することとなった。（第 1 表）

研究計画には、改組の趣旨に添って、比較的小

さなスケールでの素過程研究としての「1. 陸域および流域における物質・エネルギー循環に関する基礎研究」と、後述する GAME などの国際プロジェクトに関連したより大規模スケールでの研究である「2. アジア域における物質・エネルギー循環に関する研究」に、まとめることとした。後者は、その後、当センターの教員を含めた地球科学系の杉田倫明講師を中心としたグループが、科学技術科学技術振興事業団（JST）の戦略的創造研究推進事業（CREST）の領域「水の循環系モ

第 1 表 第 1 期中期計画の概要

| 基本方針                                                                                                                                                                                                                         |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 陸域環境研究センターでは、陸域環境に関わる基盤研究としてセンターの保有する流水実験施設および熱収支・水収支実験施設を活用した実験的・観測的研究を推進する。とくに土壌・植生・大気間の水・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。さらに全球および大陸規模の気候変動に関わる研究としてアジア大陸における陸面過程に関する研究を推進する。上記の研究を遂行するにあたり、これらの実験および観測に密着した数値モデルの研究も併せて推進する。 |  |
| 研究推進計画                                                                                                                                                                                                                       |  |
| [1] 陸域および流域における物質・エネルギー循環に関する基礎研究                                                                                                                                                                                            |  |
| 1.1 陸域環境研究センターの保有する実験施設を活用した研究                                                                                                                                                                                               |  |
| 1.1a 地表物質移動に及ぼす植生の影響に関する実験的研究                                                                                                                                                                                                |  |
| 1.1b 大気境界層内における熱・物質輸送に関する研究                                                                                                                                                                                                  |  |
| 1.1c 草原生態系の微気象生態学的解析                                                                                                                                                                                                         |  |
| 1.2 流域を対象とした研究                                                                                                                                                                                                               |  |
| 1.2a 山から海への地表物質の流出過程および地形形成プロセスに及ぼす生物の影響評価                                                                                                                                                                                   |  |
| 1.2b 水文プロセスと生物地球化学プロセスの統合化に関する研究                                                                                                                                                                                             |  |
| 1.2c カラム大気の大気熱・水蒸気量の変動観測手法の研究                                                                                                                                                                                                |  |
| [2] アジア域における物質・エネルギー循環に関する研究                                                                                                                                                                                                 |  |
| [3] 乾燥地域における降水過程とその変動予測に関する研究                                                                                                                                                                                                |  |
| [4] 陸域環境に関わる学際的研究計画の立案                                                                                                                                                                                                       |  |

\* 筑波大学陸域環境研究センター

デリングと利用システム」(2001–2006) に提出したプロポーザルが採択されたため、その活動の成果を中心にまとめた。また、すでに計画立案当時、木村教授が、総合地球環境学研究所 (RIHN) のプロジェクトの 1 つである「乾燥地域の農業生産システムに及ぼす地球温暖化の影響」に分担として加わることが見込まれたことから、この研究計画を「3. 乾燥地域における降水過程とその変動予測に関する研究」として、加えることとした。また、様々な競争的研究資金の獲得を目指すこととしていたため、この活動を「4. 陸域環境に関わる学際的研究計画の立案」として、中期計画に加えた。

## II GAME–AAN および GAME 国内事務局

GAME (GEWEX Asian Monsoon Experiment, 1996–2002) は GEWEX (Global Energy and Water cycle Experiment) 傘下のアジアにおける国際プログラムであり、アジアモンスーンの全球のエネルギー・水循環に果たす役割の解明と、モンスーンと地域水資源の予測精度の向上を目的とした。GAME–AAN (Asian AWS (Automatic Weather Station) Network) プロジェクトは、大陸スケール・季節スケールにおける運動量、熱、放射フラックスと土壌水分の観測を実施し、GAME の各地域班をサポートすることを目的とした、GAME のサブプログラムである。

GAME–AAN の第 1 フェーズ (1996–2001) においては、1999 年までは、前身である水理実験センターを中心に実施され、観測システムのアジア各地への設置を完了した。陸域環境研究センターに改組後、第 2 期 (2002–2004) が開始され、すでに設置されている観測サイトを用いた長期モニタリング期間として位置づけられている。この間、第 1 期の総括として、国際ワークショップ (International Workshop on GAME–AAN/Radiation) を、2001 年 3 月 7–9 日にタイ

のプーケットにおいて開催した。約 100 名の参加者があり、40 件の口頭発表が行われた他、当時、渦相関法によるフラックス観測の本質的な課題とされた、エネルギークロージャー問題 (いわゆる、インバランス問題) に関する討議が行われた。この他、各観測サイトのデータを集めてデータベースを作成し、さらにデータを CD あるいは DVD として出版するなど (Sugita *et al.*, 2005 など)、陸域環境研究センターは、GAME–AAN の中心となるセンターとしての役割を果たした。

また、陸域環境研究センターは、GAME の第 2 期 (2002–2004) の国内事務局として、GAME の研究成果とりまとめにおいて重要な役割を果たした。

## III CREST–RAISE

RAISE (The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia) は、科学技術科学技術振興事業団 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) の領域「水の循環系モデリングと利用システム」(2001–2006) における採択プロジェクトであり、代表は杉田倫明助教授 (地球科学系、当時) であり 5 年間に研究期間とした。北東アジアの乾燥・半乾燥地域を対象として、この地域における水循環と生物・大気圏の相互作用の観測とモデル化による把握と将来予測を通じて、望ましい水利用システムの提案がプロジェクトの目的である (杉田, 2003)。

RAISE には、センターの教員および関連する教員の多くが参加した。木村教授が気象グループ、浅沼講師が大気境界層グループの、それぞれのグループリーダーとしてプロジェクトの中心的な役割を担うとともに、また山中講師が事務局を担当、また田中教授も水文グループの中核的な研究を担うなど、センター教員の多くがプロジェクトにおいて中心的な役割を担った。

2003年には現地モンゴルのヘルレン川流域で集中観測が行われ、多くの観測データが収集された他、研究期間中には、毎年、モンゴル側のカウンターパートや関連プロジェクトと共同して、国際ワークショップが開催され、そのプロシーディングは、本センターのセンター報告別冊として出版された。

#### IV 地球研プロジェクト

総合地球環境学研究所（RIHN）のプロジェクトの1つである「乾燥地域の農業生産システムに及ぼす地球温暖化の影響」(2002–2006, リーダー渡辺紹裕：地球研教授)は、乾燥地域の農業生産システムにおける、現在の土・水管理の問題の構造を整理し、予想される地球規模の温暖化や気候変動が農業生産システムに及ぼす影響と適応を、土・水管理の視点から予測・評価することを目的とした。この中で、トルコを中心とした地域を対象とした温暖化予測の、領域気候モデルを用いたダウンスケールを行うため、当センターの木村教授が分担者としてプロジェクトに参加した。プロジェクトの前半にあたる第1期は、改造したメソモデル RAMS を用いて、対象地域の現在気候の再現計算などを行った（木村, 2004）。

#### V 陸域環境に関わる 学際的研究計画の立案

10年時限の研究センターとして、短期間に所定の成果を上げる手段として、センターを中心として大型の競争的研究資金による研究プロジェクトを立案し立ち上げ、遂行することを、センターの中心的な研究戦略として位置づけた。まずは、平成16年度より開始される21世紀COEプログラム「革新的な学術分野」に応募するため、前年秋より、センター教員と関連学科・専攻の教員を含めたワーキンググループを立ち上げて議論を開

始し、数ヶ月の議論の後、プロポーザルをまとめた。このプロポーザルは、学内選考と学内調整を経た後、「アジア陸域環境と人間活動の調和推進」（代表、木村富士男教授）と題した拠点プログラム提案として、本学の他の4つの拠点プログラムとともに、日本学術振興会に提出された。また、平成16年度科学技術振興調整費に「アジア陸域環境・災害監視と高度実務者養成」（代表、田中正教授）の提案書を提出した。いずれの提案も採択には至らなかったが、センターを挙げてのこのような取り組みは、改組後に目指したプロジェクト推進型の研究センターへの第一歩として、貴重な取り組みであったと考えられる。

#### VI おわりに

以上のように、陸域環境研究センターへの改組直後の第1期は、CRESTや地球研のプロジェクトを始めとした、様々な競争的資金プロジェクトの主要分担グループとなり、プロジェクト推進型の研究センターとしての順調なスタートを切ったといえよう。また、それぞれのプロジェクトは、所定の成果を創出したことも特筆できる。

特にRAISEプロジェクトは、前述の通り、センターの教員の多くがプロジェクトの遂行の中心的な役割を担ったのみならず、その研究活動はセンターの集中的な研究アクティビティーとなり、集約性の高い研究成果を得ることができた。

その一方で、これらのプロジェクトは、あくまでセンター外、あるいは学外の研究者がPI（研究リーダー）となっているプロジェクトであり、センターの教員はあくまで分担者で、これらのプロジェクトをセンターの中心的事業として位置づけることが、名実いずれにおいてもできなかった。

RAISEが2006年に終了した後、観測拠点や現地研究者との共同研究体制などの資産は、UNESCOの資金の援助を受けたUNESCO-

CHAIR と、日本学術会議内の MAHASRI 小委員会の枠組下での研究活動に、受け継がれた（第2期総括参照，山中・田中，2012）。しかしこれらの活動も，結果的には大型競争的資金プロジェクトに昇華させるには至らなかった。

このような結果として，センターの教員をリーダーとする競争的資金プロジェクトを獲得できなかったことは，「選択と集中」が進みつつある中において，研究センターとしては致命的であったと考えられる。

センターの教員を PI とした，21 世紀 COE や科学技術振興事業団（JST）の CREST や SATREPS などの諸プログラムや，科学技術振興調整費などの大型競争的研究資金獲得への努力は，第1期のみならず第3期に至るまで引き続き行われたが，いずれも獲得には至らなかった。これは，本センターのみならず筑波大学全体にとっても，大きな課題であることは否めない。しかしながら，若手教員・研究者の教育という観点や，人員配置という観点からも，長期的な戦略の中で

の対策を考えなければならなかったことは事実であろう。

## 参考文献

- 杉田倫明（2003）：北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明：RAISE Project の概要．筑波大学陸域環境研究センター報告，**3**，147–156.
- 木村富士男（2004）：乾燥地域における降水過程とその変動予測に関する研究（地球研プロジェクト），陸域環境研究センター中期計画中間報告書，42–44.
- Sugita, M., Nohara, D., Miyazaki, S., Yamanaka, T., Kimura, F. and Yasunari, T. (2005): GAME Asian Automatic Weather Station Network (AAN) Data Set Ver.3.0 (through year 2002), GAME CD-ROM & DVD PUBLICATIONS, No. 13. available at <http://aan.suiri.tsukuba.ac.jp>.

## 期別総括：第2期（2004—2009）

Summary of the 2st Period (2004—2009)

田中 正\*・山中 勤\*\*

Tadashi TANAKA\* and Tsutomu YAMANAKA\*\*

### I はじめに

2004（平成16）年4月に施行された国立大学の法人化に伴い、陸域環境研究センターは学内共同教育研究施設として、生命環境科学研究科の関連センターに位置付けられた。また、筑波大学が法人化後6年ごとに中期目標・中期計画を策定するようになったことを受けて、10年時限の前半5年を目途として策定した本センターの中期計画を見直し、2004～2009年度の6年間を第2期とし

て「陸域環境研究センター第2期中期計画」を定めた（第1表）。

本中期計画では、第1期中期計画で掲げた基本方針を踏襲しつつ、水・物質・エネルギー循環に関する基礎研究の拡充や第1期に開始されたプロジェクト研究の発展を重視した。第2期6年間に本センター事業に関連して発表された研究論文数は、国際誌（査読つき）107編、国内誌（査読つき）32編、センター報告等に掲載されたその他の論文（査読なし）139編、著書（分担執筆等を含む）

第1表 第2期中期計画の概要

| 基本方針                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 陸域環境研究センターでは、陸域環境に関わる基盤研究としてセンターの保有する大型水路実験施設および熱収支・水収支実験施設を活用した実験的・観測的研究を推進する。とくに、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。さらに全球および大陸規模の気候変動に関わる研究として、アジア大陸における陸面過程に関する研究を推進する。上記の研究を遂行するにあたり、これらの実験および観測に密着した数値モデルの研究も併せて推進する。                                                      |
| 研究推進計画                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| [1] 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<br>1.1 環境変化に対する地表物質移動機構の応答特性に関する実験的研究<br>1.2 大気境界層内における熱・物質輸送に関する研究<br>1.3 草原生態系の微気象生態学的解析<br>1.4 地球温暖化に伴う植生の変化が流域水循環に及ぼす影響に関する研究<br>1.5 陸域における水蒸気輸送と降水の変動予測に関する研究<br>1.6 環境同位体を用いた水・物質循環トレーシング<br>[2] アジア域における物質・エネルギー循環に関する研究<br>[3] 乾燥地域における降水過程とその変動予測に関する研究<br>[4] 陸域環境に関わる学際的・国際的研究計画の立案 |

\* 筑波大学国際部（前 陸域環境研究センター長）

\*\* 筑波大学陸域環境研究センター

14 件であった。また、博士論文 10 件、修士論文 46 件、卒業論文 49 件が本センター事業に関連して作成された。この期間における科学研究費等の競争的外部資金の獲得総額は、代表・分担を含め 7 億円以上に及んでいる。

当該期間中の研究成果については、陸域環境研究センター第 2 期中期計画報告書として 2010 年 3 月に取り纏めがなされているが、以下に主な教育研究活動を総括する。

## II 主な教育研究活動

### 1. ポスト RAISE プロジェクト

2001 年 12 月に開始された科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (CREST)「北東アジアの植生変遷域の水循環と生物、大気圏の相互作用の解明」(通称 RAISE プロジェクト)が 2006 年度末に終了した。得られた研究成果は *Journal of Hydrology* の RAISE 特集号 (Volume 333, Issue 1, 2007 年発行)をはじめとする国際学術誌等において発表されている。また、一般向けのハイライトが日本語・英語・モンゴル語の 3 カ国語で取り纏められ、陸域環境研究センター報告第 8 号別冊「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用—RAISE プロジェクトで何が分かったか—」(RAISE 研究チーム, 2007)として刊行された。また、得られた観測データはデータベース化され、4 枚組 DVD (Sugita *et al.*, 2007)として本センターから刊行した。

RAISE プロジェクトを通じて築き上げた気象水文観測ネットワークやモンゴル国政府・研究機関との協力体制は、北東アジア植生変遷域における研究をさらに発展させてゆく上で貴重な資産と言える。こうした資産を有効に活用しながらさらなる研究の進展を図るため、2007 年 1 月 25、26 日の 2 日間にわたり「北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスとその相互作用に関するワークショップ」が本センター主催で開催さ

れた。そのプロシーディングス (陸域環境研究センター, 2007) は陸域環境研究センター報告第 7 号別冊 No. 2 として刊行されている。

このワークショップで提案された方向性を踏まえ、またモンスーンアジア水文気候研究計画 (MAHASRI) などとも連携しながらモンゴル国におけるモニタリングは継続され、試験地は統合地球エネルギー・水循環観測プロジェクト (CEOP) のリファレンスサイトの一つに位置付けられている。

### 2. 文部科学省特別教育研究経費によるプロジェクト

本センターが有する研究施設を有効活用しながら第 2 期中期計画に示した基礎研究を課題横断的に推進するため、特別教育研究経費 (研究推進) の概算要求を行い、本センター独自の戦略的研究プロジェクト「地球温暖化に伴う植生の変化が地下水涵養機構に与える影響に関する研究」を 2005 年度にスタートさせた (2005 ~ 2009 年度の配分額は 36,768 千円)。

2005 年 11 月に、このプロジェクトに関連した国際ワークショップ「International Workshop on Research Progress and Current Issues of Unsaturation Processes in Vadose Zone」(Tanaka, 2005) を本センター主催で開催した。また、ワークショップ「環境循環系診断のための同位体トレーサー技術: 環境システムの代謝機能を構造的に診る」を 2005 年 12 月に主催し、その成果を陸域環境研究センター電子モノグラフ No. 2 (山中, 2006) として取り纏めた。

これら本センター独自の活動に加えて、地球環境研究総合推進費「地域気候変動シナリオ作成のための都市効果の評価」、あるいは総合地球環境学研究所研究プロジェクト「都市の地下環境に残る人間活動の影響」などとも連携しつつ、気候変動や地表改変が地下水涵養に及ぼす影響について多面的な研究が展開された。

本プロジェクトは第3期中期計画の開始年度にあたる2010年度まで継続されたが、第2期の締めくくりとして2009年度末（2010年3月）の本センター年次報告会において研究成果の概要を報告した。その詳細については、本報告の課題別総括を参照されたい。

### 3. 文部科学省「国際協力イニシアティブ」

2006年8月に取り纏められた文部科学省国際教育協力懇談会報告において、大学の知的国際貢献、特に高等教育分野における国際協力の推進が提唱され、教育協力拠点形成事業「国際協力イニシアティブ」の公募が開始された。本センターでは、前述のRAISEプロジェクトなど開発途上国における国際共同研究を通じて間接的に相手国研究者のキャパシティービルディングに貢献してきた。そうした経験を土台として、2006～2008年度の3年間に4件の調査研究プロジェクトを受託した（第2表）。

事業の実施にあたり、本センター内に学外委員を含む水・環境関連国際教育協力調査委員会を組織し、中国・モンゴル・インドネシア・タイ・チュニジアの五カ国を対象として知的援助ニーズに関するアンケート調査を実施した。また、文部科学省大臣官房国際課を通じて我が国の全大学を

対象とした知的援助リソースの調査も行った。本センターで開発した知的援助リソース・ニーズマッチングシステムは、その後、水・環境分野のみならず農林水産・保健医療・教育の各分野においても採用された。

上記の調査結果に基づいて、水資源・環境・自然災害分野における教育協力モデルの最適化とその実践検証が行われ、最終的な成果産物として2編の和文報告書、1編の英文報告書、3種の教材CDを刊行した（水・環境関連国際教育協力調査委員会、2008, 2009；Investigative Committee on Intellectual Resources and Needs Related to Water/ Environmental Issues, 2007, 2008a, 2008b, 2008c）。

### 4. 日本学術振興会二国間共同研究

日本学術振興会から研究経費の配分を受け、平成2007～2009年度の3年間にわたってインドネシアとの共同研究「湿潤熱帯地域における持続可能な水資源開発のための流域管理」を実施した。本プロジェクトは、日本とインドネシアの研究者との連携による科学的な調査活動をもとに、湿潤熱帯地域における持続可能な水資源開発のための流域管理に必要な環境診断手法・統治手法の開発・検証を目的としたものである。特に、急速な人口増加とそれに伴う土地利用の変化が流域の水循環システムに与える影響に焦点を当てるとともに、持続可能な水資源開発のための流域管理に必要な人材育成と合意形成に関する方法論とそのシナリオについて検討を行った。

2007年は「Integrated Watershed Management」、2008年は「Water Governance」、そして2009年は「Capacity Building」をそれぞれ主要テーマとして、3回にわたる国際ワークショップを本センターの主催・共催で開催した。その一部は陸域環境研究センター報告第8号別冊No.2（Tanaka, 2008a）として纏められており、本プロジェクトの最終報告書は同報告第10号別

第2表 文部科学省教育協力拠点形成事業「国際協力イニシアティブ」における本センターの受託事業

| 受託年度 | 事業名                                                      |
|------|----------------------------------------------------------|
| 2006 | 「循環を基調とした水・環境問題解決のためのキャパシティー構築：高度実務者養成に関するリソース・ニーズマッピング」 |
| 2007 | 「知的援助リソース・ニーズデータベースにもとづく水資源・環境・災害教育協力モデルの最適化とその検証」       |
| 2007 | 「水・環境分野における知的援助リソースデータベースの拡充とインタラクティブマッチングWebシステムの開発」    |
| 2008 | 「水資源・環境・災害教育協力モデルの最適化：インドネシアおよびモンゴルを対象とした実践検証」           |

冊 No. 1 (Tanaka *et al.*, 2010) として刊行された。

## 5. ユネスコチェア

ユネスコ本部、モンゴル科学アカデミー地生態学研究所および本学の3者間協定により、「UNESCO Chair on Sustainable Groundwater Management in Mongolia」(モンゴル国における持続可能な地下水管理に関するユネスコ冠講座)が設置され、2008～2009年の2年間にわたって本センターはその中核機関としての役割を担った。

本Chairは、水資源の90%を地下水に依存しているモンゴル国において、地下水資源の適正な管理に向けた大学教育および高度実務者教育を行うとともに、地下水のモニタリングシステムの構築とデータベース化の手法確立を目的としたもので、RAISEプロジェクトを契機として始められたモンゴルでの地下水研究を発展させる形で実施された。

本Chairにおいては、現地でのセミナーやトレーニングコースを実施するとともに、2回にわたって地下水管理に関する国際シンポジウムを開催した。これら一連の活動はユネスコのTechnical Reportとして纏められ(Tanaka and Janchivdorj, 2008, 2009)、国際シンポジウムのプロシーディングスはユネスコ北京事務所と本センターにより共同出版された(Tanaka *et al.*, 2009a, 2009b)。

## 6. 国際交流事業

上記のユネスコ関連事業として、アジア・ユネスコ文化センター(ACCU)からの委託による2007年ユネスコ青年交流信託基金事業大学生交流プログラム(派遣)「持続可能な地下水資源管理を目指して：モンゴルにおけるUNESCO Chairを通じて」が実施された。本プログラムの目的は、世界の飲料水源の60～80%を占める地下水を持続可能な資源として管理するために、地下水

資源が逼迫しているモンゴルと中国での体験を通じて、その問題点を日本の大学生に考えさせることである。また、ユネスコ北京事務所が東アジアにおいて展開している「持続可能な発展」に係わる各種のユネスコ事業を通じて、国際貢献や国際交流のあり方を理解させるとともに、同年代の学生とのコミュニケーションを通じて、国際人としての素養を身につけさせることである。こうした意図を持って、本学の学群生および大学院生14名を2週間にわたって両国に派遣した。本プログラムの活動内容はTanaka (2008b)によって報告されており、参加者の体験記も取り纏められている(田中, 2008)。

また翌2008年には、同委託事業の継続(受入れ)として、「持続可能な地下水資源管理を目指して：日本における公害改善対策活動を通じて」が実施された。日本における公害改善対策活動を通じて持続可能な水資源管理のあり方を考えさせることを目的として、モンゴルと中国から学部生、大学院生、若手研究者・技術者、引率教員・研究者を合わせて総勢24名を2週間にわたって招へいし、環境省をはじめとする官公庁ならびにユネスコ関連機関や熊本大学等を訪問した。本プログラムの活動内容はTsuji-mura and Tanaka (2009)に取り纏められている。

以上のユネスコ関連交流事業のほか、本センターが中核となって本学生命環境科学研究科と中国科学院地理科学・資源研究所との間で国際交流協定が締結された。この協定を土台として、2008年からは中国6大学・1研究所(北京大学、清華大学、北京師範大学、中国農業大学、中国地質大学、中国科学院研究生院、中国科学院地理科学・資源研究所)と本学によって日中大学院生フォーラムが毎年開催されることとなった。本センターでは、来日した大学院生に研究施設の紹介を行うなどし、その後国家公派研究生項目奨学金制度(通称：高水平制度)による3名の留学生受け入れに繋がっている。

## 7. 研究施設更新

本センターの前身である水理実験センターが1975年に発足して以来長い歳月が経過し、研究施設の老朽化が第2期の大きな懸案事項であった。

2005年度には仮設水路実験棟と工作棟の建築強度が不足している事態が明らかとなり、安全性の面から使用禁止の措置を取らざるを得ない状況となった。そこで、平成18年度営繕事業経費によって水理実験棟・工作棟の取設（新営）を行い、また同学群教育用設備整備費によって可傾型水理実験水路の全面的改修を実施した。さらに、平成19年度マスタープラン対応設備経費によって二次元造波水路の更新を行った。これらの設備改修・更新によって格段に精度の高い実験が可能となり、他大学との共同実験も開始されるようになった。

一方、熱収支・水収支観測圃場に関しては前述の特別教育研究経費を使用して、ほぼ30年ぶりとなる設備の一斉更新を数年にわたって計画的に実施した。また、これまでに取得された観測データの品質管理を改めて同一基準で行い、その結果を2006年7月に陸域環境研究センター報告第7号別冊「TERC熱収支・水収支観測データベース図表集」(渡来ほか、2006)として発行した。また、RA経費などを活用しながら過去のフラックスデータに見られるバイアスの補正法を検討し、研究学園都市の発展が本センター圃場における観測値にどのような影響を及ぼしてきたかを詳細に調べることができるようになった。2008年度には「CEOP第2期つくばリファレンスサイト」が立ち上げられ、つくば地域の大学および研究機関が所有する水収支・熱収支観測データを一つの地域観測データとしてまとめ、全世界に向けて発信されることとなった。

## 8. 三大学連携事業

陸域環境研究の中核拠点形成に向けて、本学営

平高原実験センターおよび農林技術センターと連携しながら概算要求の準備に着手した。2008年9月には概算要求事項としての大学間連携を念頭に、信州大学との合同ワークショップ「地球温暖化センサーとしての本州中部高地における環境変動の解明」を本センターが中心となって開催した。また、2009年1月には第2回合同ワークショップを信州大学で開催した。これらのワークショップを通じて中部山岳地域における研究課題が整理されるとともに、関係者間の情報共有が飛躍的に促進され、大学間連携事業の素地が形成された。また、岐阜大学が新たに加わり、三大学連携の体制が整えられた。

2009年度には、平成22年度概算要求事項特別経費（プロジェクト分）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」の申請を行い、2010～2014年度の5年間にわたる継続事業として採択の内示を受けるに至った。2010年2月には第3回となる合同ワークショップを開催し、重点課題の洗い出しや研究体制の具体化を図った。

以上の通り、第2期における企画・準備活動が実を結び、第3期初年度から本格的な研究プロジェクトがスタートした。そこでの活動概要と成果については第3期の期別報告を参照されたい。

## III まとめ

第2期では、第1期で立ち上げられた研究プロジェクトの総括を行いながら、新たな研究・教育プロジェクトを多岐にわたって展開した。その多くは、先行プロジェクトにおいて蓄積された人的・物的資産を活用したものであり、学内外あるいは国内外の研究者と密接に連携しつつ推進された。また、数多くの刊行物（第1図）を発行し、学界および一般社会への研究成果の還元を図った。すなわち、研究・教育・社会貢献のあらゆる



第1図 第2期における主な刊行物

面で、国内のみならず国際的にも中核拠点として一定の役割を果たせたものと考えられる。また、本センタースタッフが直接の代表者として獲得した外部資金は中規模にとどまったものの、組織としては必要十分な資金を獲得して設備の改修・一斉更新を実現できた。さらには、研究拠点としての機能拡充を果たすため、3大学連携による新規プロジェクトの立ち上げに成功した。以上の点が、第2期における主要な活動の成果と言えよう。

#### 参考文献

- 田中 正編 (2008): 2007年 ACCU 大学生交流プログラム「持続可能な地下水資源管理を目指して: モンゴルにおける UNESCO Chair を通じて」体験記. 16pp.
- 水・環境関連国際教育協力調査委員会 (2008):

水資源・環境・災害教育協力モデル ―中国を対象とした最適化と実践検証―. 筑波大学 陸域環境研究センター, 36pp.

水・環境関連国際教育協力調査委員会 (2009): 水資源・環境・災害教育協力モデル ―インドネシアおよびモンゴルを対象とした最適化と実践検証―. 筑波大学 陸域環境研究センター, 54pp.

山中 勤編 (2006): 環境循環系診断のための同位体トレーサー技術. 筑波大学陸域環境研究センター電子モノグラフ, No. 2, 68pp.

陸域環境研究センター (2007): 北東アジア植生変遷域における大気・水・生態プロセスとその相互作用に関するワークショッププロシーディング. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 7 (別冊 2), 57pp.

RAISE 研究チーム (2007): 北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用―

- RAISE プロジェクトで何が分かったかー。  
筑波大学陸域環境研究センター報告, **8** (別冊), 116pp.
- 渡来 靖・藪崎志穂・山中 勤 (2006): TERC 熱収支・水収支観測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), 97pp.
- Investigative Committee on Intellectual Resources and Needs Related to Water/ Environmental Issues (2007): *"On-the-Job Training Program for Water Resources Problem in China" Teaching Material CD*. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba.
- Investigative Committee on Intellectual Resources and Needs Related to Water/ Environmental Issues (2008a): *"On-the-Job Training Program for Water Resources Problem in Indonesia" Teaching Material CD*. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba.
- Investigative Committee on Intellectual Resources and Needs Related to Water/ Environmental Issues (2008b): *"On-the-Job Training Program for Water Resources Problem in Mongolia" Teaching Material CD*. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba.
- Investigative Committee on Intellectual Resources and Needs Related to Water/ Environmental Issues (2008c): *IRENe in the Field of Water and Environment*. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, 24pp.
- Sugita, M., Asanuma, J., Tsujimura, M., Mariko, S., Lu, M., Kimura, F., Azzaya D. and Adyasuren, Ts. (2007): *RAISE Database*. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, 4 DVDs.
- Tanaka, T. ed. (2005): *Proceedings of International Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose Zone*. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, 64pp.
- Tanaka, T. ed. (2008a): *Proceedings of International Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region*. Bull. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, **8** (Suppl. 2), 78pp.
- Tanaka, T. ed. (2008b): *For the Sustainable Groundwater Resources Management: Through the UNESCO Chair in Mongolia*. ACCU 2007 University Student Exchange Programme, Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, 176pp. + Annex + CD-ROM.
- Tanaka, T. and Janchivdorj, L. (2008): *Technical Report of UNESCO Chair on Sustainable Groundwater Management in Mongolia, 2008*. 37pp.
- Tanaka, T. and Janchivdorj, L. (2009): *Technical Report of UNESCO Chair on Sustainable Groundwater Management in Mongolia, 2009*. 33pp.
- Tanaka, T., Jayakumar, R. and Erdenechimeg, B. eds. (2009a): *Proceedings of UNESCO Chair Workshop on Sustainable groundwater Management in Arid and Semi-arid Regions*. IHP VII Technical Document in Hydrology, No.1, UNESCO Office Beijing 2009, Document No.CN/2009/SC/RP/3, UNESCO Office Beijing and Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, 64pp.
- Tanaka, T., Jayakumar, R. and Tsujimura, M. eds. (2009b): *Proceedings of UNESCO Chair Workshop on International Strategy*

- for Sustainable Groundwater Management: Transboundary Aquifers and Integrated Management*. IHP VII Technical Document in Hydrology, No.2, UNESCO Office Beijing 2009, Document No.CN/2009/SC/RP/5, UNESCO Office Beijing and Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, 107pp.
- Tsujimura, M. and Tanaka, T. eds. (2009): *For the Sustainable Groundwater Resources Management: Through the Japanese Activities on Countermeasures for the Remediation of Public Hazards*. Report of ACCU 2008 Student Exchange Programme, Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, 85pp. + Annex + CD-ROM.
- Tanaka, T., Pawattan, H. and Yamanaka, T. eds. (2010): *Final Report of JSPS-DGHE Joint Research Project "Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region"*. Bull. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba, **10 (Suppl.)**, 106pp.

## 期別総括：第3期（2010–2011）

Summary of the 3st Period (2010–2011)

松岡 憲知\*・浅沼 順\*・山中 勤\*

Norikazu MATSUOKA\*, Jun ASANUMA\* and Tsutomu YAMANAKA\*

### I はじめに

2004～2009年度の第2期終了後、2010～2015年度の6年間の第3期として、新たに「陸域環境研究センター第3期中期計画」を定めた（第1表）。本中期計画では、第2期までの基本方針や実施事業を踏襲しつつ、特に気候変動に関わる研究に重点を置き、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

することを目標に掲げた。また、実験・観測研究に数値モデル研究を融合させることにより、環境変動の広域的な解析や将来予測にも重点を置くこととした。特に、「地球環境再生プログラム」において、陸域環境研究センターは、中部山岳地域の環境変動に関する大学間連携事業の中核拠点として、事業全体を主導・調整する役割を果たしている。また、アジア太平洋地球変動研究ネットワークからの研究費を得て、国際プロジェクト

第1表 第3期中期計画の概要

| 基本方針                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 陸域環境研究センターでは、陸域環境に関わる基盤研究としてセンターの保有する大型水路実験施設および熱収支・水収支実験施設を活用した実験的・観測的研究を推進する。とくに、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。さらに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。上記の研究を遂行するにあたり、これらの実験および観測に密着した数値モデルの研究も併せて推進する。                                                               |
| 研究推進計画                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| [1] 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<br>1.1 山岳域における地形プロセスに関する研究<br>1.2 物質移動機構と地形発達に関する水理実験<br>1.3 地表面と大気間の熱・水・二酸化炭素の交換に関する研究<br>1.4 トレーサーインフォマティクスによる水・物質循環系の解明<br>[2] 大学間連携研究<br>2.1 地球環境再生プログラム<br>[3] 陸域環境に関わる学際的・国際的研究<br>3.1 アジアの乾燥・半乾燥域における陸面・生態モデルの相互比較に関する国際共同研究<br>3.2 国際連携・国際研究計画の立案<br>[4] 社会貢献<br>4.1 環境サイエンスインタプリターの養成と次世代環境教育の推進 |

\* 筑波大学陸域環境研究センター

「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（ADMIP）」を推進している。海外における環境研究の対象地域はさらに寒冷地域へと拡大し、地球規模での環境変動研究が展開している。さらに啓蒙活動として、次世代環境教育の推進、とくにつくば市の小中学生を対象とする環境教育プログラムの開発と実践に貢献している。

第3期の2年経過時点において、本センター事業に関連して発表された研究論文数は、国際誌（査読つき）23編、国内誌（査読つき）7編、センター報告等に掲載されたその他の論文（査読なし）11編、著書（分担執筆等を含む）4件であった。また、博士論文2件、修士論文5件、卒業論文10件が本センター事業に関連して作成された。この期間における科学研究費等の競争的外部資金の獲得総額は、代表・分担を含め1.5億円以上に及んでいる。

当該期間における主な教育研究活動を以下に総括する。

## II 第2期からの継続事業

### 1. 文部科学省特別教育研究

特別教育研究経費（研究推進）に基づく戦略的研究プロジェクト「地球温暖化に伴う植生の変化が地下水涵養機構に与える影響に関する研究」が2010年度に最終年度を迎えた（2010年度の配分額は6,150千円、6年間の総額は51,018千円）。

最終年度は、新たな環境同位体分析技術を導入し、数値モデルと分析を融合させた研究を展開するとともに、地球温暖化に伴う植生の変化が陸域の水循環に及ぼす影響について「生態水文科学」の視点から総括を行った。また、本事業を今後地球規模で展開することを見通して、「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2010年度末の年次報告会（2011年3月11日開催）で企画した。アジア永久凍土帯を南北横断方向に課題を探る会であっ

たが、このシンポジウムの開催中に東日本大震災が発生し、中断されたのが心残りとなった。

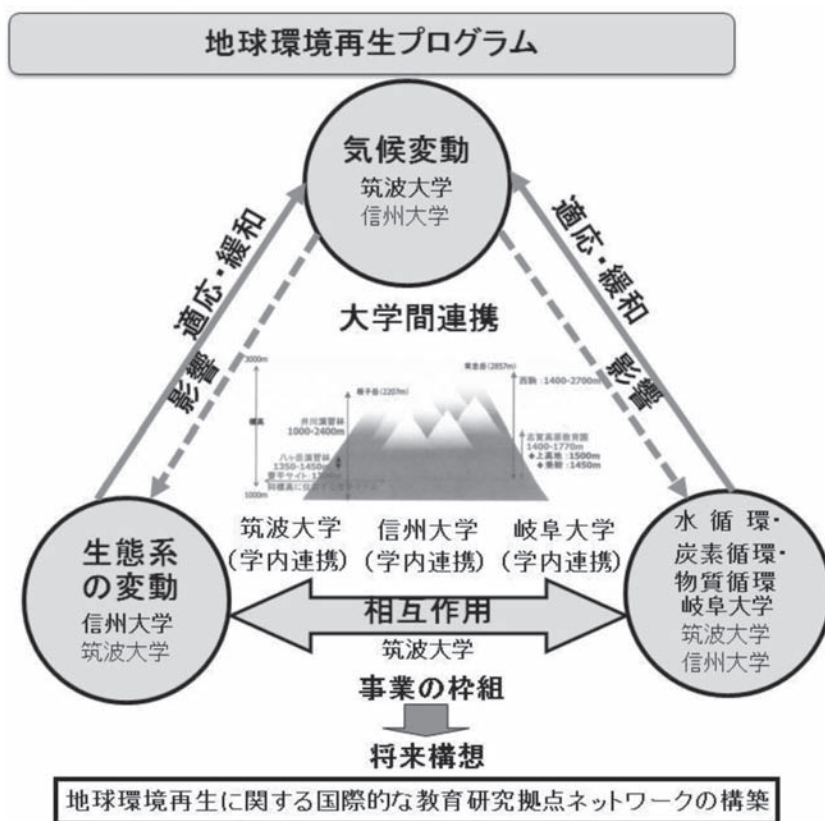
## III 地球環境再生プログラム

### 1. 概説

第2期の総括で述べたように、2008年度より計画を進めた3大学連携事業は、2010年度から5年間の文部科学省特別教育研究経費（研究推進）に採択され、第3期の開始とともに始動した。事業名は「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—」であり、筑波大（陸域環境研究センター・菅平高原実験センター・農林技術センター）・信州大（山岳科学総合研究所）・岐阜大（流域圏科学研究センター）の3大学・5研究組織の連携事業として始まった。

本事業は「気候変動が早期に検出できる中部山岳地域を対象として、気候変動の監視・復元・予測、水循環・物質循環・炭素循環および生態系の変動解明とその将来予測を行い、地域空間スケールにおける温暖化適応・緩和策、生物多様性の保全策、防災対策に係わる総合研究を推進する」こととする。具体的には、各研究施設が保有する観測ステーションを拠点化し、3大学の学際的研究体制の中で、気候変動の監視・復元・予測、水循環・物質循環・炭素循環変動の観測・分析・予測、生態系変動の実験・分析・予測を行うという計画である。そのアウトプットとして、気候変動が水資源・生物資源・森林資源・農業資源に及ぼす影響、下流域や地域人間社会に及ぼす影響を明らかにし、地域スケールにおける温暖化適応・緩和策、生物多様性の保全策、防災対策を立案することをめざしている（第1図）。

陸域環境研究センターは、主として気候変動の監視・予測、水循環・炭素循環の変動と将来予測、土砂輸送に係わる物質循環の変動と将来予測、水循環と生態系変動の相互作用に関する課題



第1図 「地球環境再生プログラム」における大学間連携

を分担している（第2表）。

## 2. 2010年度活動概要

初年度は、事業を実施するためのコンソーシアム（中部山岳地域環境変動研究機構：以下、JALPSと称する）を設立した。陸域環境研究センター内に事務局を置き、JALPSのホームページを開設し、連携機関間の情報交換や外部への情報発信を推進している（第2図）。JALPSでは、研究手法の統一化と責任体制の確立を図り、以下の研究活動を開始した。

3大学が中部山岳地域に有する観測ステーション（志賀高原、菅平、八ヶ岳、南アルプス、井川、諏訪湖、乗鞍、高山、西駒）の拠点化を行った。大学間共同ステーションで温暖化実験を開始する

とともに、筑波大学で管理する既存・新規の4ステーションにおける気象・水文・土砂輸送等に関する観測システムを構築した。各ステーションの既存資料をデータベース化するためのシステム構築にも着手した。また中部山岳地域の広範囲で水・地形・土壌・植生に関わる調査や試料採取を行うとともに、環境同位体トレーサーの分析を開始した。

3大学の合同事業として、研究会議（4月・菅平高原実験センター）、運営委員会（4月・東京）、キックオフミーティング（6月・信州大／諏訪）、共同ステーションの設置（8月・西駒：第3図A）、共同ステーションでの野外研究会（10月・信州大／伊那）、生物多様性条約締約国会議（COP10）への出展（10月・名古屋）、年次研究

第2表 「地球環境再生プログラム」に関する陸域環境研究センターの主な担当事業・観測項目

| 研究グループ           | 担当事業・観測項目   | 対象地域        | 主な担当教員・研究員 |
|------------------|-------------|-------------|------------|
| 気候変動研究グループ       | 気象データアーカイブ  | 中部全域        | 上野*・若月・鈴木  |
|                  | 気象・積雪観測     | 菅平          | 上野*        |
|                  | 地域スケール気候変化  | 中部全域        | 若月         |
|                  | 積雪分布        | 中部全域        | 鈴木・木村*     |
|                  | 古気候変動       | 中部全域        | 植田*        |
| 水循環・物質循環変動研究グループ | 融雪出水観測      | 八ヶ岳, 伊那, 高山 | 脇山         |
|                  | 降水同位体マッピング  | 中部全域        | 山中・脇山      |
|                  | 永久凍土観測      | 富士山         | 池田*        |
|                  | 岩盤崩壊・土砂移動観測 | 南アルプス       | 松岡・西井*     |
|                  | 凍上・土壌侵食観測   | 八ヶ岳         | 若狭・脇山      |
|                  | 湿地帯の水質分析    | 菅平          | 岩上         |
|                  | 岩盤河川の侵食実験   | 水理実験施設      | 関口         |
|                  |             |             |            |

\* 協力教員, 他センター教員・研究員。



第2図 「地球環境再生プログラム」のホームページと出版物 (年次研究報告会の発表要旨集)

報告会（12月・筑波大）を実施した（第3表）。3大学合計で64名の教員・研究員、院生を合わせると100名以上が構成員となり、筑波大学からも約40名がプロジェクトに参加し、強固な研究組織が築かれた。特に若手研究者が多く加わることにより、研究対象や観測内容が当初計画よりも格段に充実した。本事業は新聞等で報道され、地域住民の関心も高まった。陸域環境研究センターが企画・運営した年次研究報告会には81名の参加と63件の研究発表があり、充実した報告集が出版された（第2図；中部山岳地域環境変動研究機構、2010）。

### 3. 2011年度活動概要

3大学間の連携研究として、菅平ステーションに新たな温暖化実験区の設置、各観測地域を対象とした航空レーザ測量の実施、既存の気象資料、空中写真や地上写真のデータベース化を進めた。筑波大学では、大学間連携研究課題を公募し、重点研究支援も行った。

陸域環境研究センターでは、昨年度設置した各

観測拠点から、気象データ、水文データ、土砂輸送データを収集し、解析を進めた。広範囲の調査地域を対象に水質調査や土壌試料採取を継続した。実験室では、水・土壌の同位体分析や、岩石破壊や河川変動のシミュレーション実験を進めた。

3大学の合同事業として、上記の研究に加えて、運営委員会（4月・東京）、共同ステーションでの野外研究会（6月・井川演習林、8月・岐阜大／高山試験地）、合同野外実習（10月・志賀高原）、年次研究報告会（12月・信州大／松本：第3図B）を実施した（第3表）。研究機構の構成員は、3大学合計で77名の教員・研究員、院生を合わせると120名以上に増加し、筑波大学からも約50名がプロジェクトに参加し、研究組織が強化された。各大学の観測拠点を利用した大学間連携研究がより発展するとともに、新課題もスタートし、研究対象や観測内容が一層充実した。野外研究会や観測・調査の連携により、研究の学際性が強化された。年次研究報告会には125名の参加（前年比65%増）と103件の研究発表（前

第3表 「地球環境再生プログラム（中部山岳地域環境変動研究機構）」の主な行事

| 年度   | 月日            | 行事名 <sup>1</sup> （参加者数等 <sup>2</sup> ）       | 会場・場所                 |
|------|---------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| 2010 | 2010.4.23-24  | 中部山岳連携事業研究会議（27名／4名）                         | 菅平高原実験センター            |
|      | 2010.4.28     | 機構運営委員会（9名／1名）                               | 筑波大学東京リエゾンオフィス        |
|      | 2010.6.12-13  | 3大学連携キックオフミーティング（約50名／1名）                    | 信州大学山地水環境教育研究センター     |
|      | 2010.10.16-17 | 研究会議・エクスカーション（25名／4名）                        | 信州大学南箕輪キャンパス・西駒ステーション |
|      | 2010.10.18-19 | 生物多様性条約締約国会議（COP10）出展                        | 名古屋国際会議場              |
| 2011 | 2010.12.17-18 | 機構年次報告会・機構運営委員会（107名／8名）                     | 筑波大学総合研究棟A            |
|      | 2011.4.28     | 機構運営委員会（16名／2名）                              | 筑波大学東京リエゾンオフィス        |
|      | 2011.6.5-6    | 水循環・物質循環変動RGフィールドミーティング（6名／1名）               | 筑波大学井川演習林             |
|      | 2011.8.2-3    | 炭素循環変動RGフィールドミーティング（25名／1名）                  | 岐阜大学高山試験地             |
|      | 2011.11.28    | 筑波大学中部山岳連携研究交流会（32名／7名）                      | 陸域環境研究センター            |
| 2012 | 2011.12.16-17 | 機構年次報告会・機構運営委員会（125名／8名）                     | 信州大学松本キャンパス           |
|      | 2012.4.20     | 機構運営委員会（21名／3名）                              | 信州大学松本キャンパス           |
|      | 2012.5.20     | 日本地球惑星科学連合大会「中部山岳地域の自然環境変動」セッション開催（発表44件／5件） | 幕張メッセ国際会議場            |
|      | 2012.9.15-16  | フィールドミーティング・生命環境学群連携実習                       | 筑波大学八ヶ岳・川上演習林ほか       |
|      | 2012.12.13-14 | 機構年次報告会・機構運営委員会（予定）                          | 高山市民文化会館              |

<sup>1</sup> 当センターの教職員が参加・貢献した行事のみを示す。

<sup>2</sup> 人数の括弧内は（全参加者数／当センター教職員の参加者数）を示す。



第3図 中部山岳地域環境変動機構の研究会風景  
(A) 2010年度研究会議・巡検（信州大学西駒ステーション：2011年10月17日）。  
(B) 2011年度機構年次報告会（信州大学松本キャンパス：2011年12月16日）。

年比 61% 増）があり，小規模な学会に近い会となり，さらに充実した報告集が出版された（第2図；中部山岳地域環境変動研究機構，2011）。2年間の研究成果を広く学界に紹介するために，2012年5月開催の日本地球惑星科学連合大会において「中部山岳地域の自然環境変動」セッションを提案し，44件の発表がエントリーされた。本セッションに基づいて，地学雑誌（東京地学協会）の特集号が企画され，編集が進んでいる。

#### IV 第3期におけるその他の主要な事業・活動

##### 1. アジアの乾燥・半乾燥域における陸面・生態モデルの相互比較に関する国際共同研究

陸面モデルと生態モデルとは，それぞれ，全球気候モデルなどの大気モデルにおいて，陸面での熱・水交換プロセス，生態系の炭素交換プロセスを表現するサブモデルである。これらのモデルは，プロセスを表現する数値モデルに，観測値を用いたキャリブレーションを適用することによって初めて，実際の現象の再現性を獲得することができる。よって，乾燥地域のような，これまで観測値が得られてこなかったような，気候帯や地表面被覆においては，再現性がモデルによって大きく異なるため，モデル間の相互比較によってモデルの精度評価が必要である。

主に第1期に実施された RAISE プロジェクトの後継となる研究活動は，日本学術会議の環境学委員会・地球惑星科学委員会の下，IGBP-WCRP 合同 MAHASRI（モンスーンアジア水文気候研究計画）小委員会の下で小規模に行われた。この活動を一つの契機として，2010年7月より Asia Dryland Model Intercomparison Project (ADMIP) が開始された。

2009年7月に中国長春において開催された第2回 MAIRS（Monsoon Asia Integrated Regional Study）の International Workshop on Asian Dryland Study において，中国科学院の Congbin Fu 教授より提唱され，浅沼とコロラド州立大学の Dennis Ojima 教授が共同議長として，プロジェクトを立ち上げた。主な資金源として，APN（Asia-Pacific Network for Global Change Research），中国科学院の推進する MAIRS，日本の科学研究費などの支援を受け，MAIRS や MAHASRI の国際プロジェクトのサブプログラムとして位置づけられるに至った。

まず，2010年7月に中国北京において，日・

中・米・韓・豪・蒙などを中心とした研究者を集めたキックオフ会議が開催され、プロジェクトの推進計画を承認し、モデル比較の対象地としてモンゴルと中国東北部の2地点を選択した。続いて、データ準備作業が行われた後、2011年7月に中国蘭州にて第2回国際ワークショップが開かれ、モデル比較研究の端緒が開かれた。さらに同年12月には、札幌においてデータ準備会合が開かれた後、2012年には、第3回国際ワークショップが米国コロラドにて開かれ、これまでの研究成果が確認された。この時点で、世界中の代表的な陸面モデル・生態モデルより約15モデルが参加している。得られた研究成果は、近日中に国際学術誌に投稿することが予定されている。

## 2. 地球寒冷圏の地表変動研究

海外を対象とする陸域環境研究に関して、第2期まではアジアの乾燥地域や湿潤熱帯地域を中心に取り組んできたが、第3期では北極圏や中緯度高山地域など「地球寒冷圏」にも展開した。気候温暖化が氷河や永久凍土の融解に直結する寒冷圏では、地表環境への影響が急速に表れる。そのため、気候の年々変動や長期変動に対する地表環境の応答について早急に評価する必要がある。2007～2009年の国際極年を契機として、地球規模での観測網が整備され、環境評価が重点的に進められている（IPY Joint Committee, 2011）。

2010～2011年度は、特に北極圏スバルバル諸島（ノルウェー）を対象として、気温・地温・積雪等の気象条件（第4図）と各種周氷河地形（岩石氷河・氷楔多角形土・淘汰円形土・ハンモック土等）の動態の関係に関する観測を集中的に実施した（例えば、Watanabe *et al.*, 2012）。対象地域では、特に最近20年間の温暖化の傾向が顕著である。我々が観測を開始した2005年以降も永久凍土（3 m以深）の温暖化傾向が見られた。ただし、積雪深の年々変動が大きいために、気温に対する永久凍土地温の応答性は非直線的となって



第4図 北極圏スバルバル（北緯78°）の観測ステーション  
気温、地温、積雪深、地表変位、地中の変形を観測している。2009年4月26日撮影。

いる。

## 3. 次世代環境教育カリキュラムの作成と試行実践

2009年につくば市が策定した「つくば環境スタイル行動計画」では、「環境教育」が「交通体系」「田園空間」「実験タウン」と並ぶ取り組みの柱と位置づけられた。そして、5年以内に実施する重要施策として「小中学校における環境教育カリキュラムの作成」が掲げられ、筑波大学とつくば市教育委員会が実施コアとなってこれを進めることとなった。そこで、本センター教員が幹事となり、本学教員のほか教育委員会・小中学校教員・市民団体等の協力を得ながら次世代環境教育ワーキンググループを組織し、つくば市立小中学校における環境教育の現状、現職教員の環境教育に対する意識、さらには国内外での環境教育のトレンドに関する包括的な調査結果にもとづいてカリキュラム構成を検討し、具体的な単元計画案を作成した（筑波大学次世代環境教育ワーキンググループ, 2011）。また、これをもとにPPT教材や

ECO 健康診断カルテ等を整備し、本センターの Web サーバー上で公開した。2010 年度には 6 校、2011 年度には 9 校において出前授業を含む試行実践を行い、カリキュラムの改善を図った。このカリキュラムの特徴を端的に表現すれば、「万人のための環境教育」ということになる。すなわち、熱心な環境保全活動家を育成するためだけでなく、単なる教養として環境の理解を深めるだけでもない、次世代を担う全ての子ども達が自分達の意味で望ましい未来の環境を創り上げるために必要な教育と言える。単元計画は、小学校～中学校の各学年における個々の単元が全体として調和的・有機的に結びつくようにデザインされており、その中核となるコア単元と、それを取り巻く多様なサテライト単元の 2 種類で構成されている（第 5 図）。

本カリキュラムはその後、つくば市独自の教科

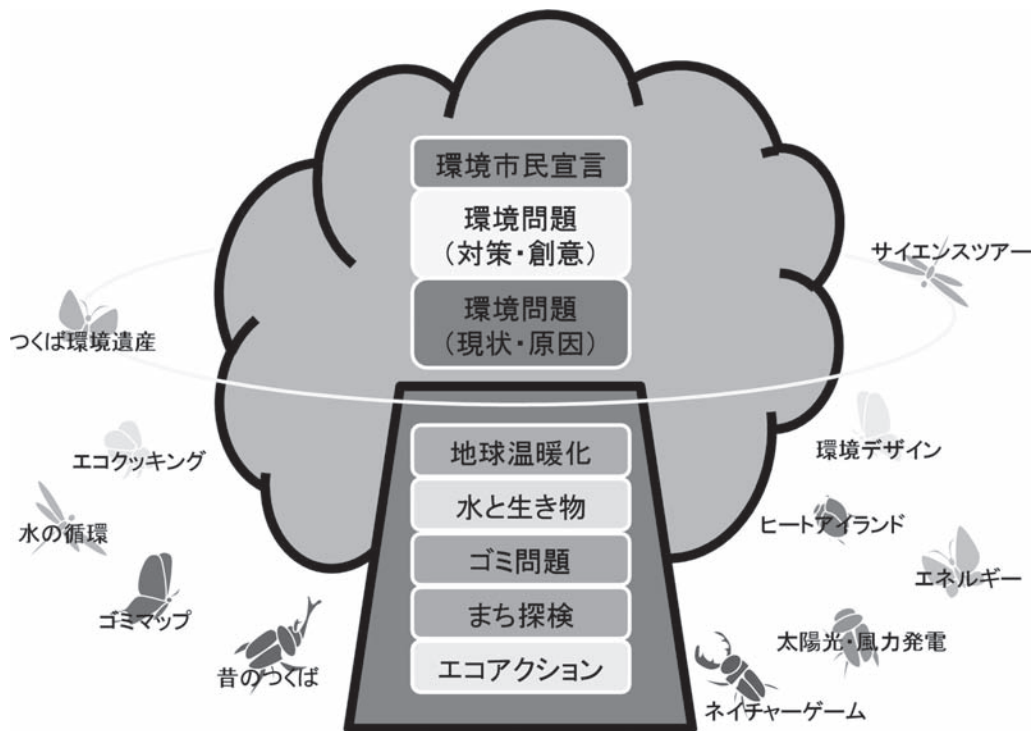
として新設された「つくばスタイル科」の一部として再編され、2012 年度より全ての小中学校に導入されている。

#### 4. 研究施設更新

熱収支・水収支観測圃場に関しては、大規模な設備更新はなく、測器類の更新と検定、定期メンテナンスと草刈りを実施して機能の維持・強化を図っている。観測データは概ね順調に供給されている。

大型水路では、ポンプ用電源、砂礫循環設備、測定台車、実験棟屋根部分の不具合に関して更新・撤去・補修等で対処した。しかし、耐震補強工事と屋根の全面的補修が課題として残される。水理実験棟に関しては新規設備の導入や排水設備改修を行ったが、実験装置の収容力が限界に近づいている。

センター研究棟に関しては、設備の老朽化とス



第 5 図 次世代環境教育カリキュラムの構成（単元計画 Ver. 2）

スタッフ（研究員・研究支援員）や常駐学生の増加に伴う緊急な改修が必要となった。2010 年度には、通信関連の工事、個別冷房化、机・椅子・棚の更新、耐震固定工事を実施した。2011 年度には、セキュリティシステムの導入、研究室、サーバ室、機械室等の仕様替えのための工事を実施して、研究スペースの増加と居住性の向上に務めた。以上により、研究環境はかなり改善された。研究棟実験室には環境トレーサー分析機器類一式を導入し、分析機器の運用を開始した。

## V まとめ

第3期では、第2期に企画・申請した大学間連携研究に関して文部科学省特別研究経費を獲得し、センター一丸となって中部山岳地域の環境変動研究を重点的に推進してきた。同時に、海外での陸域環境研究を拡張する一方で、環境教育プログラムを開発して地域に貢献するなど、多彩な活動を展開した。各教員・研究員はそれぞれ科学研究費や財団等の助成金を獲得し、様々な課題の基盤研究に取り組んだ。若手のスタッフや常駐学生が増加して組織全体が若返り、研究が活性化するとともに、センター内部での研究会や他組織との連携・交流事業が格段に進んだ点は特筆される。第2期に築かれた研究・教育・社会貢献の中核

拠点としての機能が、より一層強化された時期であったといえよう。

## 参考文献

- 中部山岳地域環境変動研究機構（2010）：「地球環境再生プログラム」2010 年度年次研究報告会発表要旨集，81pp.
- 中部山岳地域環境変動研究機構（2011）：「地球環境再生プログラム」2011 年度年次研究報告会発表要旨集，128pp.
- 筑波大学次世代環境教育ワーキンググループ（2011）：つくば次世代環境教育カリキュラムの作成と試行実践—中間報告書—。筑波大学陸域環境研究センター，84pp.
- IPY Joint Committee (2011): Understanding Earth's Polar Challenges: International Polar Year 2007-2008. University of the Arctic, Rovaniemi, Finland /CCI Press, Edmonton, Alberta, Canada, 695pp.
- Watanabe, T., Matsuoka, N. and Christiansen, H.H. (2012): Mudboil and ice-wedge dynamics investigated by electrical resistivity tomography, ground temperatures and surface movements in Svalbard. *Geografiska Annaler*, in press.



## 課題別総括：水路実験

### Summary of Studies on Flume Experiments

関口 智寛\*

Tomohiro SEKIGUCHI\*

#### I はじめに

陸域環境研究センターでは、前身の水理実験センター時代より、大型水路実験施設をはじめとする水理実験施設を用いて地形変動・土砂輸送過程の実験的研究、実験手法開発を行ってきた。陸域環境研究センターへの改組後、水理実験棟が新設され（2007年）、二次現造波水路の更新（2008年）、二方向振動板装置（2008年、第1図）および造波機付き小型循環水路の導入（2009年）など浅海プロセス実験に対応した設備が強化・拡張された。これにより、河川・斜面プロセス実験を中心とした研究から浅海プロセス実験を含めた多角的な研究への移行が進んだ。

近年、土木工学分野を中心に、堆積物輸送の流体力学と粒状体動力学の視点からさまざまな地球表層地形の形成過程と動態を考察する「モルフォダイナミクス」が盛んになっている。一方、地質学分野では堆積系の大規模オートジェネシスと非平衡応答の理解に根差した新しい成因論的層序学「オート層序学」が誕生した。また、これらを基に地形と地層の形成過程を統合的かつ包括的に解明する力学ベースの新しい地層学枠組み「ストラトダイナミクス」の開拓を進める国際的な動きがある。このような流れを受け、本センターではこれらの関連グループと連携をとりながら研究を進

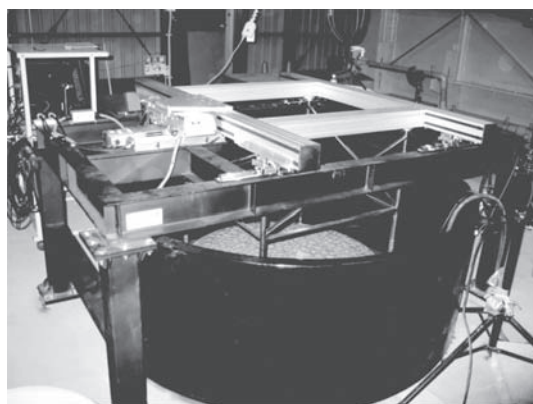
めてきた。

以下、本稿では本センター水理実験施設を活用した研究を中心に、水路実験研究の成果について①河川プロセスに関する研究、②浅海ベッドフォームに関する研究、③浅海プロセスと地層形成に関する研究に分けて概説する。

#### II 河川プロセスに関する研究

##### 1. 河川形状に対する植生の影響

河床に存在する植生は、底面粗度を増加させて河川流に影響を及ぼすほか、根系の発達により砂礫を保持するなど、河道形状に影響を及ぼし得る



第1図 二方向振動板装置（関口, 2008）

\* 筑波大学陸域環境研究センター

ことが指摘されている。目代ほか（2003）は、その実証として、大型水路内の河床に植生を繁茂させて通水実験をおこなった。それにより、植生が河川流に影響し、結果的に河道形状に影響すること、および堆積物の平面的分級に影響することを確認した（第2図）。この研究について、国際講演会「河畔植生が網状流河道の形状に及ぼす影響」を開催し、同様の実験を行っていたミネソタ大学のグループと情報交換した。

## 2. 岩盤河川の侵食

岩盤河川においては、侵食作用により地形変化が起き、環境変動の痕跡が刻み込まれる。岩盤侵食の素過程の理解を深めるため、滝つぼを形成する小型水路実験を行った（井口，2008；井口・関口，2008；井口，2010）。その結果、河川水内の碎屑物粒子の有無により侵食速度が大きく異なることを確認した。特に細粒碎屑物が含まれる場合、

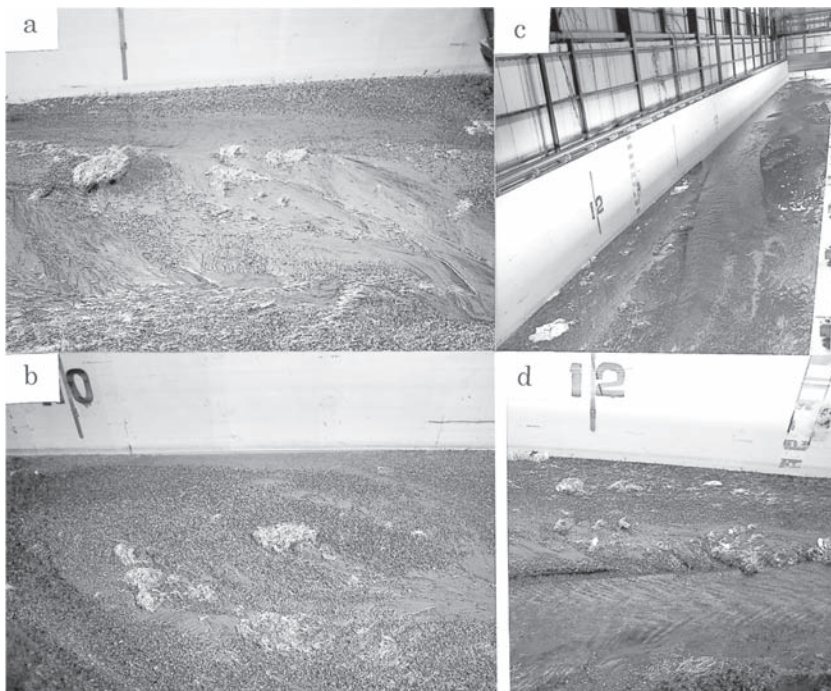
滝つぼ周辺のみが侵食を受け、水の作用角が碎屑物粒子の侵食への寄与に影響することが示唆された。

## 3. 河床礫の磨耗

河床礫のサイズは河川の縦断形に影響すると考えられているなど、河川地形を支配する重要な要因の一つである。河床礫のサイズに影響する磨耗作用については、回転ドラムなどを用いた実験が一般的であり、河床礫の流下そのものによる磨耗に関する実験事例は乏しい。新井（2009）は大型水路を用いた河床礫の流下実験を行い、河床礫の磨耗速度が河床礫の形状と流下様式に強く依存することを示した。

## III 浅海ベッドフォームに関する研究

ベッドフォームとは非固結堆積物に、一方向



第2図 植生影響下で形成された河道（目代ほか，2003）

流、波浪（振動流）、風といった流体運動が作用して形成される地表形状の総称である。ベッドフォームは、流体運動、土砂輸送に影響するほか、地層中の堆積構造から過去の水理環境を読み解くための鍵となる。このため、特に、安定な流体運動下で形成される定常ベッドフォームについて、流体運動や堆積物の特性との関係が古くから議論されており、一方向流や一次元振動流がつくるベッドフォームの理解が深められてきた。本センターにおいては、複合流や干渉波下の二次元振動流など、既往研究では扱われてない複雑な流体場、および流体運動条件の変化に対応したベッドフォームの遷移に注目し、モルフォダイナミクスの観点に立って、ベッドフォーム研究を進めてきた。

### 1. 複合流下における定常ベッドフォーム

浅海域においては、沿岸流、離岸流、潮流、海流、吹送流、堆積物重力流といった一方向流が存在し、それらが波浪に生起する振動流と共存して複合流をなすのが一般的である。このため、浅海域のベッドフォームの特性を理解し、底面粗度を適切に予測するためには、純粋な振動流によるベッドフォームだけではなく、複合流ベッドフォームの特性を明らかにする必要がある。

複合流実験は、装置上の制約により、一方向流と振動流（波浪）の進行方向が平行な条件で行われることが多い。そのような複合流下では、ベッドフォームの断面形状が一方向流と振動流の強度比に依存することが既往実験により指摘されているが、実験データの蓄積は不十分であり、さらなる研究が求められている。造波機付き小型循環水路を用いた当センターの短周期複合流研究では、一方向流・振動流強度比による断面形変化の程度が波浪周期に依存することを明らかにし（Sekiguchi and Yokokawa, 2008）、複合流ベッドフォームの粒径依存性について検討した（沼田, 2010）。また、複合流ベッドフォーム上の渦流の

特徴について計測した（Takagawa *et al.*, 2010）。さらに、イリノイ大学バン・テ・チョウ研究所の大型複合流トンネルを用いて中周期複合流実験を行い、ベッドフォームの特性を明らかにした（Yokokawa *et al.*, 2009；Perillo *et al.*, 2010；Yokokawa *et al.*, 2011）。

これに対し、Lacy *et al.* (2007) は、当センターの大型水路内に振動板装置を設置することで、一方向流に対して砂床を任意の角度で振動させることを可能にし、一方向流と振動流が斜行する複合流実験を行った。この研究により、複合流リップルのオリエンテーションが、振動流向とベッドフォームの移動方向に強く依存していることを明らかにするなど、複合流ベッドフォームの理解が深められた。

### 2. 重複波下における定常ベッドフォーム

天然の波浪は複数の波浪成分の重ね合わせからなり、各波浪成分の進行方向、周期、波高が異なる場合、底面付近には複雑な水平軌跡を描く振動流が発生する。そのような複雑な振動流は、ある種の規則的三次元リップルの形成に寄与する可能性が指摘されているものの、その実証に適した実験機器が存在しなかった。そこで本センターでは、新たに二方向振動板装置（関口, 2008；第1図）を開発し、複雑な振動流によるベッドフォームのアナログ・シミュレーションをおこなった。これにより、二次元振動流と三次元定常リップルの関係が明らかにされつつある（関口, 2011b；Sekiguchi, 2011）。また、二次元造波水路を用いて、入射波と反射波が $180^\circ$ をなす部分重複波下のベッドフォームについて検討し、各所に出現する振動流リップルがそれらの直上の振動流条件と整合的であることを確認した（Yamaguchi *et al.*, 2007；Yamaguchi and Sekiguchi, 2011）。

### 3. ベッドフォームの遷移に関する研究

自然界において水理条件は変化し続けるため、

ベッドフォームは定常状態から別の定常状態へと断続的に遷移を繰り返す。つまり、ベッドフォームは常に定常状態にあるわけではなく、ベッドフォームを動的に理解するためにはベッドフォーム遷移の研究が不可欠である。この研究では、アロジェニックな観点に立ち、水理条件の変化に対応したリップル遷移について研究した。それにより、ベッドフォームのサイズの増加と減少のプロセスが異なり、それらの過程において遷移前のリップルと流れ場、堆積物特性を反映した特徴的な遷移ベッドフォームが見られることを示した (Sekiguchi and Sunamura, 2005; Sekiguchi, 2009; 関口, 2011a; Sekiguchi, 2012; 新井, 2012)。特に新井 (2012) では、二方向振動板装置を用いて振動流の方向変化による三次元遷移リップルの形成条件を明らかにした。また、堆積構造中の遷移ベッドフォームの痕跡に注目することで、過去の水理条件の変動をとらえられる可能性を指摘した (Sekiguchi, 2005)。

#### IV 浅海プロセスと地層形成に関する研究

地形変動には、外的条件の変動に対する地形の応答 (アロジェニックな変動) と、外的条件が一定にもかかわらず系内の緒作用が変化して生じる変動 (オートジェニックな変動) の2種類に大別され、自然界の地形変動はこれらが組み合わせとして解釈できる。このため、地層に記録される地形変動の履歴を適切に解明するためには、アロ

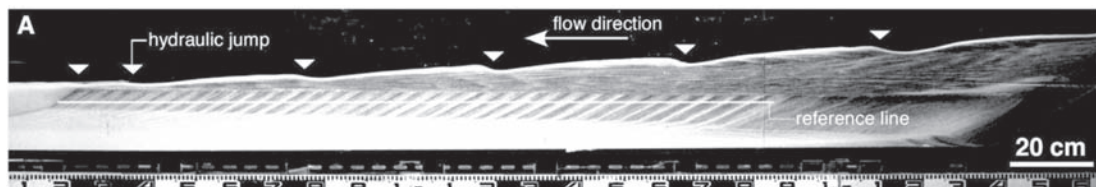
ジェニックな変動、オートジェニックな変動双方への理解が不可欠である。本センターにおいては、浅海域における地形・地層形成プロセスの解明 (岡崎ほか, 2004; 竹上, 2010) と合わせ、地形変動と地層形成に関する研究を進めた。

##### 1. 急激な相対的海水準変動に対する浅海堆積相のアロジェニックな応答

波浪卓越型海岸の沿岸域では、営力変動に対するアロジェニックな地形応答によって、前浜、上・下部外浜に特徴的な構造を示す堆積相が形成される。海岸の前進により形成される一連の堆積シーケンスは、過去の相対的海水準変動の履歴を反映した浅海堆積相の空間分布を示すと考えられており、相対的海水準変動の復元が試みられている。山口・関口 (2012) は、パラメータを単純化した造波水路実験により、急激な相対的海水準低下が浅海堆積相にどのように記録されるかを検討した。結果、急激な相対的海水準変動は、前浜相－上部外浜相境界の高度変化として記録されるのに対し、上部外浜相－下部外浜相境界には明瞭には記録されない場合があることを示した。

##### 2. デルタ前置層に見られるオートジェニックな変動

デルタ前置層にはしばしば周期的な粒径変動が見られ、それらは潮汐や周期的なイベント発生などに関連づけてアロジェニックに解釈されることが多い。しかし、Muto *et al.* (2012) は、外的条



第3図 サイクリック・ステップの遡上により形成されたデルタ前置層の周期的粒径変化 (Muto *et al.*, 2012)

件を小型水路実験により、サイクリック・ステップの発生・遡上という一連のオートジェニックな地形ダイナミクスによっても、デルタ前置層の粒径変動が形成されうること明らかにした（第3図）。このような地形ダイナミクスと地層形成ダイナミクスの関連性は、ストラトダイナミクスの観点の重要性を改めて示したものと見える。

## V まとめ

モルフォダイナミクス、オート層序学と、それらを融合させたストラトダイナミクスの研究において、モデル実験はその中核をなす。本センターにおける一連の実験的研究はこれらの研究分野の発展に一定の役割を果たし、本センター水理実験施設がストラトダイナミクスという新研究分野の確立を目指す国際的な流れの中で、中核実験拠点の一つとなりうることを示した。今後、水理実験施設を利用した研究をさらに発展させ、関連分野のトランスディスプリナリな実験拠点となることを期待したい。

## 参考文献

- 新井賢造（2009）：大型水路を用いた人口岩石の摩耗実験。筑波大学卒業論文，39p.
- 新井賢造（2012）：振動流の方向変化によるリップル遷移に関する振動板実験。筑波大学修士論文，39p.
- 井口達也（2008）：滝つぼ形成実験：流量・落差の影響。筑波大学卒業論文，42p.
- 井口達也（2010）：滝つぼ形成実験：細粒研磨材・流量の影響。筑波大学修士論文，55p.
- 井口達也・関口智寛（2008）：人工岩石を用いた滝つぼ形成実験に関する予察的報告。筑波大学陸域環境研究センター報告，**9**，43–48.
- 岡崎浩子・池田 宏・目代邦康・飯島英夫（2004）：更新統ギルバート型三角州前置層の形成過程推定のための基礎実験。筑波大学陸域環境研究センター報告，**5**，41–50.
- 関口智寛（2008）：二方向振動板装置の開発。筑波大学陸域環境研究センター報告，**9**，25–28.
- 関口智寛（2011a）：ウェーブリップルの遷移過程。地質学雑誌，**117**，141–147.
- 関口智寛（2011b）：浅海域の多角形リップル地質学雑誌，**117**，VI.
- 竹上 秀（2010）：デルタの発達における波浪の影響。筑波大学卒業論文，60p.
- 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。筑波大学卒業論文，65p.
- 目代邦康・池田宏・飯島英夫・小松陽介・斎藤健一（2003）：河床形状に及ぼす植生の影響に関する大型水路実験。筑波大学陸域環境研究センター報告，**4**，129–134.
- 山口直文・関口智寛（2012）：造波水路実験で形成された前浜一上・下部外浜相の空間分布。日本堆積学会，北海道大学。
- Muto, T., Yamagishi, C., Sekiguchi, T., Yokokawa, M. and Parker, G. (2012): The hydraulic autogenesis of distinct cyclicity in delta forest bedding: flume experiments. *Journal of Sedimentary Research*, **82**, 545–558.
- Perillo, M. M., Yokokawa, M., Sekiguchi, T., Takagawa, T., Hasegawa, Y., Pedocchi, F., Garcia, M. H., and Best J. (2010): Bedform morphology under combined flows. The American Association of Petroleum Geologists 2010 Annual Convention & Exhibition.
- Sekiguchi, T. (2005): Ripples with secondary crests as a possible indicator of palaeo-wave direction: a laboratory experiment. *Journal of the Geological Society of Japan*, **111**, 182–186.
- Sekiguchi T. (2006): A dataset of wave-flume experiments of the threshold for ripple formation on beds with perturbations.

- Bulletine of the Environmental Research Center the University of Tsukuba*, **7**, 125–133.
- 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.
- Sekiguchi T. (2011): Ripples under two-dimensional oscillatory flow: a two-directional oscillatory-bed experiment. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, **43(5)**, 433.
- Sekiguchi T. (2012): Dataset of a Wave-Flume Experiments of the Ripple Deformation. *Bulletine of the Environmental Research Center the University of Tsukuba*, **12**, 41–53.
- 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.
- Sekiguchi, T. and Yokokawa, M. (2008): Effects of wave period on combined-flow bedforms a flume experiment. *Marine and River Dune Dynamics III*, 281–284.
- Takagawa, T., Yokokawa, M., Sekiguchi, T., and Azuma, R. (2010): Vorticity distributions over combined-flow ripples. 18th International Sedimentological Congress, Mendoza.
- Yamaguchi, N., Sekiguchi, T. and Masuda, F. (2007): Cross-shore ripple variations under laboratory partially standing waves: a possible clue to paleo-wavelength. *Journal of Sedimentological Society of Japan*, **64**, 15–19.
- Yamaguchi, N. and Sekiguchi, T. (2011): Ripples under laboratory partially standing waves. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, **43(5)**, 433.
- Yokokawa, M., Sekiguchi, T., Takagawa, T., Perillo, M. M., Hasegawa, Y., Pedocchi, F., Garcia, M. H. and Best, J. (2009): Bedform morphology under combined flows with a 6-second oscillation period. Paper presented at American Geophysics Union 2009 Fall Meeting, San Francisco, USA.
- Yokokawa, M., Sekiguchi, T., Takagawa, T., Perillo, M.M., Garcia, M.H., and Best J., Pedocchi, F. (2011): Bedform morphology and their sedimentary structures under combined flows with 4- and 6-second oscillation periods. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, **43(5)**, 498.

## 課題別総括：水収支・熱収支観測圃場

### Summary of Studies on Heat and Water Balance Experimental Field

浅沼 順\*

Jun ASANUMA\*

#### I 総 括

前身の水理実験センターの発足当時から定常的な観測を実施してきた、陸域環境研究センターの水収支・熱収支観測圃場（以下、圃場）は、2000年を過ぎると、センサーやデータ収録システムの老朽化が特に目立つようになった。インターネットやパーソナルコンピュータの普及に伴って、自動化・デジタル化による省力化が可能となるなど諸条件が整ったことから、観測・公開システムとセンサーの、陸域センター発足以来最大規模の更新が、2003年からほぼ5年の月日をかけて実施された。

まず2003年には、データ収録および公開を行うシステム（たとえば、森・新村，1999）の入れ替えが行われ、データのデジタル化から公開・アーカイブに至るまでの完全な電子化が行われた（浅沼ほか，2004）。また、これ以降の度重なる更新を経て、圃場内の一般観測者間のデータロガー間の通信（樋口ほか，1999）が有線同軸ケーブルから無線LANに変更されている。

これとともに、長らく交換されてこなかった、様々な観測センサーの総入れ替えが、2005–2008年の複数年度に渡って行われた（第1図）。これらにはセンター運営費の他、数々の競争的資金などの予算が用いられている。これと並行して、

15年にわたって蓄積された圃場ルーティン観測データを整理してとりまとめる作業も行われた。

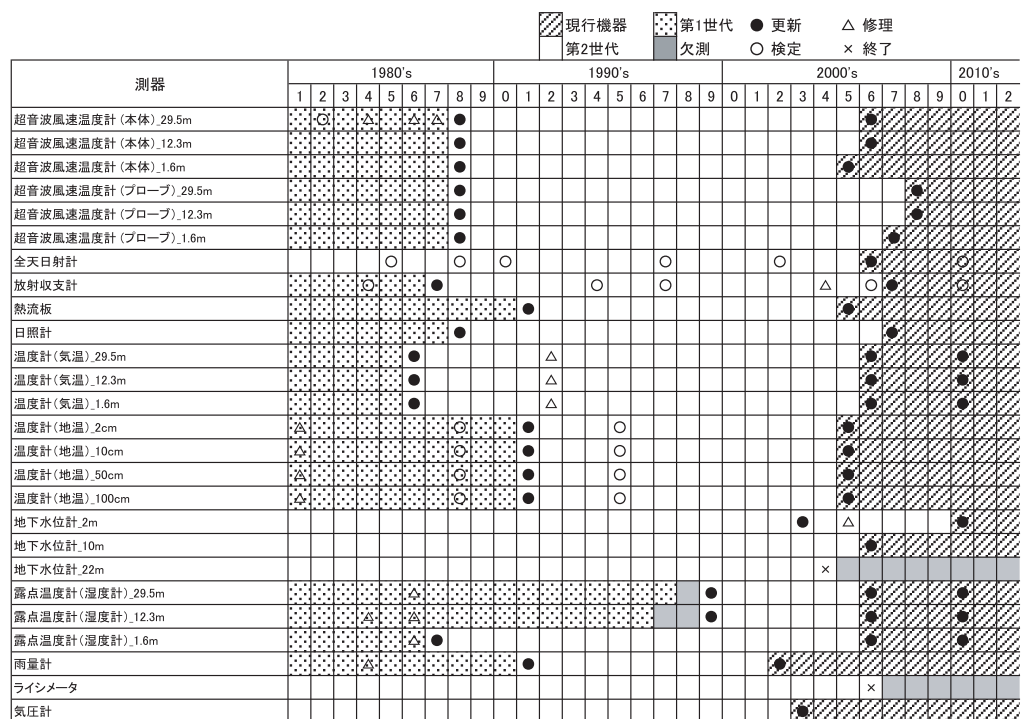
15年間のデータの品質管理を行ってデータを整理して図化するとともに、観測に関する細かな情報を解説して冊子として出版した（渡来ほか，2006）。これらは1989年（水理実験センター報告第13号別冊，1989）以来の15年ぶりの作業である。

以上のようなルーティン観測の整備と並行して、圃場において多くの観測研究が行われた。1990年代からのGAMEなどに代表される大陸規模熱・水収支研究に加え、植生を対象とした研究が集中的に行われた。例えば、炭素収支や植物生態に関する研究（例えば、下田ほか，2003；横山・及川，2002など）、植生の衛星リモートセンシング（例えば、樋口ほか，2000；西田・樋口，2001など）や安定同位体を用いた研究（たとえば、飯塚ほか，2004など）である。

#### 参考文献

- 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。陸域環境研究センター報告，**5**，157–174。
- 森 牧人・新村典子（1999）：水理実験センター

\* 筑波大学陸域環境研究センター



第 1 図 水収支・熱収支観測圃場におけるルーティン観測機器更新履歴 (山中, 2012)

水文・気象データのホームページ上における  
グラフ化の試み. 水理実験センター報告, **24**,  
129–133.

樋口篤志・杉田倫明・飯田真一 (1999): 筑波大  
学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場  
における新・特別観測用データ収録システム  
について. 水理実験センター報告, **24**, 135–  
141.

渡来 靖・藪崎志穂・山中 勤 (2006): TERC  
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. 陸域環境研究  
センター報告, **7** (別冊), 97p.

樋口篤志・西田顕郎・飯田真一・新村典子・近  
藤昭彦 (2000): PGLIERC (Preliminary  
GLobal Imager experiment at Environmental  
Research Center): その概要について. 日本  
水文科学会誌, **30**, 81–91.

横山智子・及川武久 (2002): 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, 陸域環境  
研究センター報告, **2**, 37–39.

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, 陸域環境研究センター  
報告, **1**, 1–10.

下田星児・莫 文紅・村山昌平・高村近子・及川  
武久 (2003): 大気炭素安定同位体比による  
C3/C4 混生草原生態系 CO<sub>2</sub> 交換特性の解析,  
陸域環境研究センター報告, **4**, 11–17.

飯塚幸子・山中 勤・田中 正 (2004): 安定同  
位体分析のための植物体からの水の抽出につ  
いて—ポット試験による検討—, 陸域環境研  
究センター報告, **5**, 81–86.

## 課題別総括：流域水循環過程

### Summary of Studies on Catchment Hydrological Processes

田中 正<sup>\*</sup>・山中 勤<sup>\*\*</sup>

Tadashi TANAKA<sup>\*</sup> and Tsutomu YAMANAKA<sup>\*\*</sup>

#### I はじめに

陸域環境研究センターの前身である水理実験センターでは、蒸発散・不飽和浸透・地下水涵養等の諸過程に関するプロットスケールの研究が主に熱収支・水収支観測圃場を利用して推進されたが、2000（平成12）年の改組にあたり、流域スケールのエネルギー・物質循環研究を強化することとした。そこで、熱収支・水収支観測圃場のほかに、隣接するアカマツ林や農林技術センター川上演習林の試験流域なども利用しながら、水文素過程と流域水循環過程を結び付ける様々な観測研究が展開された。こうした研究は、国際的な学術動向と歩調を合わせる形で、生物地球化学あるいは生態水文学といった新しい学際研究領域へと発展した。主たる成果は、McDonell and Tanaka (2001) や Levia *et al.* (2011) などの成書に既に取り纏められているが、本稿では本センターで行われた研究を中心にその概要を総括する。

#### II 流域規模の水質形成過程

本センター発足に先立つ2000年2月に開催された日米科学セミナー「森林流域の水文・生物地球化学に関する合同セミナー」において、日米に

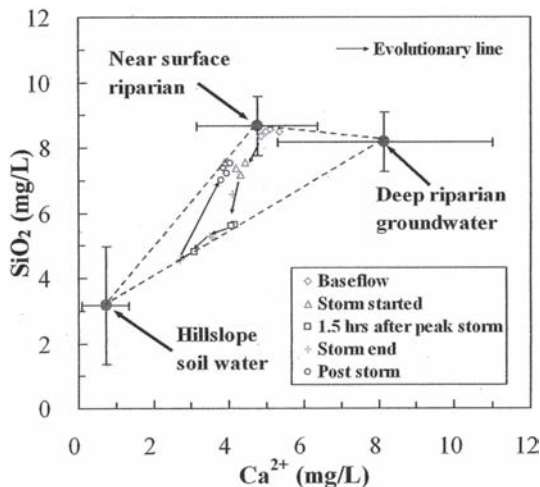
おける気候・地形・地質といった自然条件の違いが流域からの水流出プロセスや窒素動態に及ぼす影響が指摘され、特に我が国では急峻な地形による水文物理過程や地下水の挙動が重要であることが示された。また、水質変化に際して森林～河川移行帯である河畔域が重要であることや流路内での水質変換プロセスの重要性も討議された。

こうした流れを受けて、川上試験流域において河畔域の地中水が渓流水の水質形成過程に果たす役割に関する研究が行われた。この研究では、5.2 haの一次流域を調査対象として密な観測網が敷かれ、約1年間にわたって採取された降水・渓流水・土壌水・地下水等のサンプルについて、一般水質分析ならびに溶存有機炭素分析などが実施された。その結果、降雨流出および融雪流出の双方において、河畔域の浅い地下水と斜面土壌水が渓流水の水質形成に重要な役割を果たしていることが明らかにされるとともに、斜面土壌水の流動経路とその成分濃度は、河畔域に存在する地下水によってリセットされることなく溪流に流出するという新たな知見が得られた (Subagyono and Tanaka, 2002, 2003a, 2003b, 2004, 2005; Subagyono *et al.*, 2002, 2003, 2005; 第1図)。

また、これに関連して沖積扇状地 (Chikirbene *et al.*, 2009) や沿岸帯水層 (Jelassi *et al.*, 2011)、

<sup>\*</sup> 筑波大学国際部（前 陸域環境研究センター長）

<sup>\*\*</sup> 筑波大学陸域環境研究センター



第1図 川上演習林における渓流水の三成分混合モデル解析結果 (Subagyono and Tanaka, 2003b)

さらには中国華北平原 (唐ほか, 2002), スーダン北東ガッシュ沖積盆地 (Bireir, 2002), モンゴル東部ヘルレン川流域 (Tsumimura *et al.*, 2007) などにおいても地下水の水質進化や河川との交流関係に関する研究が実施され, 気候・地形・地質条件による水質形成過程の差異が改めて浮き彫りとされた。

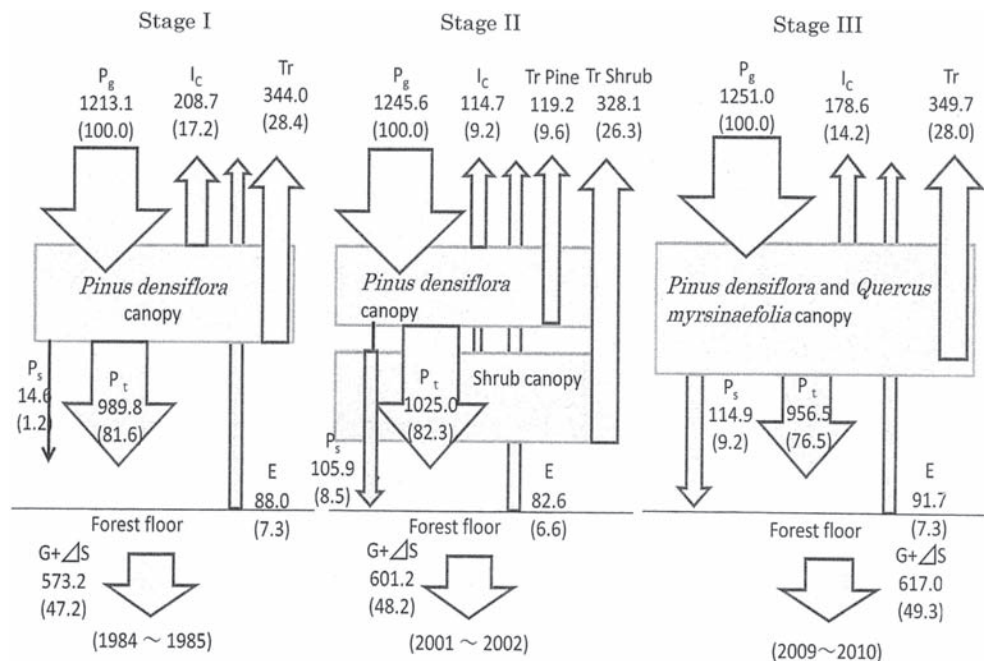
### III 植生遷移が流域水循環に及ぼす影響

酸性雨・富栄養化・硝酸性窒素汚染などの水質に関わる諸問題が人間活動の弊害として注目される一方, 人間活動に起因する地球温暖化が引き起こす(であろう)流域水循環の変化もまた喫緊の課題である。そこで本センターでは, 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」(平成17～22年度)を重点的に実施した。

本研究課題では, 陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林地を対象として, 植生遷移に関する調査が詳細に実施された。対象林地では1985年以降, 二次林であるアカマツの衰退が著しく,

これに替わってシラカシやヒサカキといった常緑広葉樹林へと, 植生遷移が急速に進んでいることが明らかにされた (Iida *et al.*, 2005a)。この植生遷移に伴う蒸散と降雨遮断プロセスの変化に関する研究 (Iida *et al.*, 2004a) や樹幹流発生の変化に関する研究 (Iida *et al.*, 2004b) が行われ, 植生遷移に伴って林地の水収支を構成する要素間に量的変化が生じていることが明らかにされた。これらの研究結果を受け, 本研究課題では樹幹流の浸透プロセスに焦点を当てた研究が数多く実施され, その実態が明らかにされた (Tanaka *et al.*, 2004; Iida *et al.*, 2005b, 2005c; 松本, 2007)。また, 樹種の違いによる樹幹流の差異が土壌水のポテンシャル分布に及ぼす影響や降下浸透, 地下水涵養プロセスに与える影響に関する研究が精力的に行われた (角張, 2004; Tanaka *et al.*, 2005a, 2005b, 2006, 2008)。これらの研究の延長として, 樹種の違いが不飽和帯における水質分布に与える影響についての研究も実施され (Kakubari, 2007; 宮澤, 2007), 樹種の違いによる無機イオン濃度の差異とともに, 樹幹流量の差異が不飽和帯の水質分布に大きな影響を与えていることが明らかにされた (Tanaka *et al.*, 2009)。さらに, 単木スケールの水収支評価や20年以上の時間スケールにわたる林分水収支の年代間比較(第2図)を通じて, 樹種ごとに地下水涵養の時空間構造が異なり, 個体数の変化も複雑であるものの, 林分スケールとして見た場合には地下水涵養量がほぼ一定に保たれるという一種のホメオスタシス(恒常性)が見出された (Hayashi, 2012)。こうした知見は, 近年世界の潮流になりつつある「生態水文学」に新たな局面を開くものと言える。

なお, 本課題と密接に関係する不飽和プロセスに関しては, 本センターの主催で “International Workshop on Research Progress and Current Issues of Unsaturation Processes in Vadose Zone” を開催し, 国内外における研究動向について議論を深めた (Tanaka, 2005)。



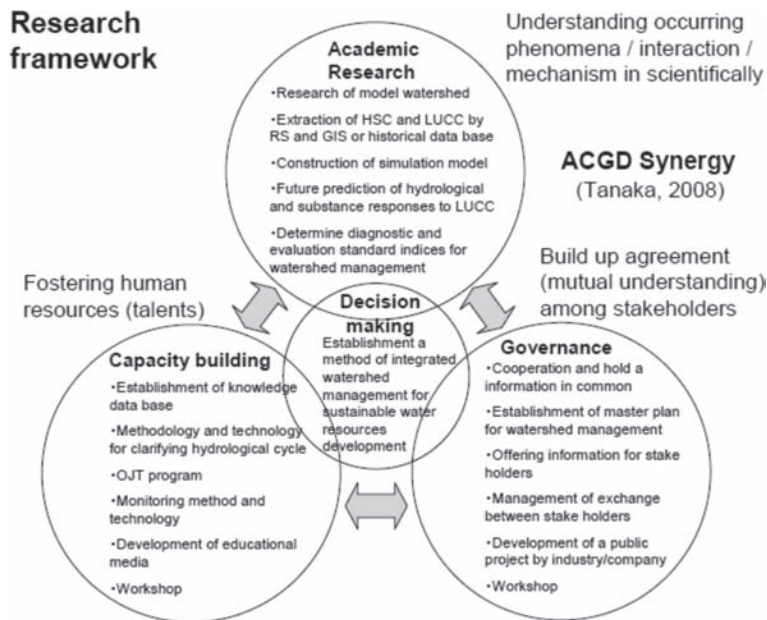
第 2 図 陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林における植生遷移ステージごとの水収支 (Hayashi, 2012)

また、地球温暖化影響の別の側面として、冬季降水量の変化が土壤凍結深を左右し、その結果土壤  $CO_2$  濃度が夏季以上に上昇することがあることなどを、農林技術センター川上演習林における長期観測によって明らかにした (濱田・田中, 2010)。この研究は、2011 年に水文・水資源学会論文賞を受賞している。

#### IV 湿潤熱帯地域における流域管理

湿潤気候下に位置し、かつ火山国でもあるインドネシアは、熱帯と温帯の差はあるものの、水文学的に我が国との共通点が少なくない。このため、我が国の知見を近年発展の著しいインドネシアに適用し、両国の自然的・文化的差異を踏まえながら持続可能な流域管理に応用することは極めて意義深い。そこで、日本学術振興会から研究経費の配分を受け、平成 2007 ~ 2009 年度の 3 年間

にわたってインドネシアとの共同研究「湿潤熱帯地域における持続可能な水資源開発のための流域管理」を実施した。そこでは、老朽化の著しい観測施設の更新・維持とともに、リモートセンシング・GIS・同位体トレーサー・数値シミュレーションといった様々な手法が駆使され、首都・ジャカルタを貫通するチリウン川流域における水・物質循環特性と人間活動との関わりが明らかとされた (Tanaka, 2008 ; Tanaka *et al.*, 2010)。また、「Integrated Watershed Management」(2007 年)、「Water Governance」(2008 年)、ならびに「Capacity Building」(2009 年)といったテーマを設定して国際ワークショップを本センターの主催・共催で開催し、急速な人口増加とそれに伴う土地利用の変化が流域の水循環システムに与える影響に焦点を当てながら、持続可能な水資源開発のための流域管理に必要な合意形成や人材育成に関して具体的な方策の検討が行われた (第 3 図)。



第3図 インドネシアにおける持続可能な流域管理に向けたフレームワーク (Tanaka *et al.*, 2010)

## V まとめ

本センター発足当時、気候変動予測を主目的とする数値モデルの開発と検証が急務とされていたが、検証用の野外観測データは圧倒的に不足していた。そのような中であって、プロットスケールから流域スケールの水循環過程を、野外観測をベースとして詳細に取り扱う本課題は、時宜に合ったものと言える。一方、この10年余の間に物理的な水文学と化学・生物学との融合が進むと同時に、流域管理といった社会科学との接点が急速に拡大した。本センターでは、数多くのワークショップを開催して国際的な研究動向をいち早く察知するとともに、期別総括で紹介された数々の国際貢献・社会貢献活動を通じて、社会的に要請のある科学的知見の提供を心掛けてきた。国際的に開かれた研究環境と時代の要請に対する柔軟性は、健全な学問の発達に不可欠と言える。その点において本センターは、当該課題において一定

の役割を果たしたと言ってよいのではないだろうか。

## 参考文献

- 角張順一 (2004): 樹種の違いが地下水涵養プロセスに及ぼす影響. 筑波大学卒業論文, 54p.
- 唐 常源・近藤昭彦・嶋田 純・新藤静夫・佐倉保夫・田中 正・陳 建耀・沈 彦俊・宋 献方 (2002): 中国, 河北平原の地下水における硝酸態窒素汚染の現状について. 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, 223-228.
- 濱田洋平・田中 正 (2010): 中部山岳地域における土壌凍結および冬季土壌CO<sub>2</sub>濃度の年々変動とそれに及ぼす気象条件の影響. 水文・水資源学会誌, **23**, 398-407.
- 松本 剛 (2007): 樹幹流の浸透範囲の時空間分布について. 筑波大学卒業論文, 42p.

- 宮澤隆則 (2007): 樹種の違いが樹幹流の無機水質成分に及ぼす影響. 筑波大学卒業論文, 43p.
- Bireir, F. E. A. (2002): A study on the hydrogeological characteristics and the geochemical evolution of groundwater in Gash alluvial basin, semi-arid area, north east Sudan. Ph.D Thesis, University of Tsukuba, 200p.
- Chikirbene, A., Tsujimura, M., Charef, A. and Tanaka, T. (2009): Hydro-geochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer: Case of Kurokawa aquifer, Tochigi prefecture, Japan. *Desalination*, **246**, 485–495, doi: 10.1016/j.desal.2008.04.057.
- Hayashi, A. (2012): Effects of vegetation succession on forest water balance at single-tree and forest-stand scales. Ph.D. Thesis, University of Tsukuba, 140p.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2004a): The change of transpiration and interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. In Sidle, R.C. *et al.* eds. *Forest and Water in Warm, Humid Asia*, DPRI, Kyoto Univ., 41–44.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2004b): Change of stemflow generation due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **30**, 15–20.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2005a): Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Jour. Hydrol.*, **315**, 154–166.
- Iida, S., Kakubari, J. and Tanaka, T. (2005b): “Litter marks” indicating infiltration area of stemflow-induced water. *Tsukuba Geoenviron. Sci.*, **1**, 27–31.
- Iida, S., Suzuki, A. and Tanaka, T. (2005c): Infiltration area of stemflow-induced water around Formosa Sweet Gum and Japanese Zelkova. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 21–24.
- 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.
- Kakubari, J. (2007): Effect of vegetation species difference on percolation and soil solution processes. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 70p.
- Levia, D.F., Carlyle-moses, D. and Tanaka, T. (2011): *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*(Ecological Studies). Springer-Verlag, 740p.
- McDonnell, J.J. and Tanaka, T. eds. (2001): *Hydrology and Biogeochemistry of Forested Catchments*. John Wiley & Sons, 400p.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2002): The role of riparian zone in controlling stream water chemistry in Kawakami forested headwater catchment. 筑波大学分析センター報告 2001, 29–34.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2003a): Subsurface hydrologic flowpaths and biogeochemical controls of  $\text{NO}_3^-$  transport in Kawakami forested headwater catchment, central Japan. IUGG 2003, Abstract B, B344.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2003b): Transport of dissolved silica in Kawakami forested headwater catchment: implication for tracing flow pathway. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ.*

- Tsukuba*, **29**, 11–16.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2004): Subsurface hydrologic flowpaths and NO<sub>3</sub>- transport in Kawakami forested headwater catchment, central Japan. *Sci. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, Sec. A, **25**, 1–16.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2005): The role of slope and soil thickness on dynamic of soil water and its chemistry in hillslope area. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 45–50.
- Subagyono, K., Tanaka, T. and Hamada, Y. (2002): The importance of near surface riparian on storm runoff generation and stream chemistry in Kawakami forested headwater catchment. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **3**, 75–88.
- Subagyono, K., Tanaka, T. and Hamada, Y. (2003): Spatial controls on the episodic stream water chemistry in Kawakami forested headwater catchment, central Japan: the role of solute flushing., *Proc. 1st Int. Conf. Hydrol. and Water Resour. in Asia Pacific Region, APHW 2003*, **1**, 444–450.
- Subagyono, K., Tanaka, T., Hamada, Y. and Tsujimura, M. (2005): Defining hydrochemical evolution of streamflow through flowpath dynamics in Kawakami headwater catchment, central Japan. *Hydrol. Process.*, **19**, 1939–1965.
- Tanaka, T. ed. (2005): *Proceedings of International Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose Zone*. TERC, Univ. of Tsukuba, 64pp.
- Tanaka, T. ed. (2008): *Proceedings of International Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region*. *Bull. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba*, **8(Suppl. 2)**, 78p.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, J. and Hamada, Y. (2004): Evidence of infiltration phenomena due to the stemflow-induced water. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **30**, 9–14.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, S. and Hamada, Y. (2005a): The role of stemflow inputs in infiltration/percolation and groundwater recharge processes in a forested catchment. *Hydrology, Ecology and Water Resources, Int. Conf. Headwater Control VI*, CD-ROM, 9p.
- Tanaka, T., Kakubari, J., Iida, S. and Hamada, Y. (2005b): Effect of succession from Japanese red pine to evergreen oak on unsaturation process in a vadose zone. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 51–54.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, J. and Hamada, Y. (2006): Effect of forest stands succession on groundwater recharge process due to global warming. *Proc. Int. Conf. on Hydrology and Ecology: The Groundwater/Ecology Connection, Czech Association of Hydrogeologist*, 87–90.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, J. and Hamada, Y. (2008): Effect of forest stand and succession from conifer trees to broad-leaved evergreen trees on infiltration and groundwater recharge processes. *IAHS Publ.*, **321**, 54–60.
- Tanaka, T., Kakubari, J., Hamada, Y. and Iida, S. (2009): Effect of plant species on distribution of water quality in a vadose zone. *Proc. 2nd Int. Multidisciplinary Conf. on Hydrol. and Ecology: Ecosystems Interfacing with*

*Groundwater and Surface Water*, 49–52.

Tanaka, T., Pawittan, H. and Yamanaka, T. eds.  
(2010): Final Report of JSPS-DGHE Joint  
Research Project "Integrated Watershed  
Management for Sustainable Water Use in  
a Humid Tropical Region". *Bull. Terrestrial  
Environment Research Center, Univ. of*

*Tsukuba*, **10(Suppl.)**, 106p.

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



## 課題別総括：環境同位体トレーサー

### Summary of Studies Using Environmental Isotope Tracers

山中 勤\*

Tsutomu YAMANAKA\*

#### Ⅰ はじめに

陸域環境研究センターでは、熱収支・水収支観測圃場等の施設を活用しながら地表面—大気間の水・熱・物質交換過程に関する研究を行うとともに、全球・大陸規模の気候変動に関わる陸域環境変動の研究を実施してきた。その際、時空間スケールの異なる上記二つの研究を繋ぐツールとして、実験・観測に密着した数値モデルを用いた研究も併せて推進された。しかしながら、物理的手法による観測データのみで数値モデルの検証を行うには限界があり、多面的な検証手段が必要とされる。天然に存在する同位体（環境同位体）等をトレーサー（追跡子）とするアプローチは、それ単独でもマルチスケールの現象解明に有用であるばかりでなく、より高度な数値モデルの検証手段としても効果的である。そこで本センターでは、第2期中期計画における「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」の一つとして「環境同位体を用いた水・物質循環トレーシング」を加え、学内外の研究者と協力しながら推進してきた。

2005年12月には本センター主催で「環境循環系診断のための同位体トレーサー技術：環境システムの代謝機能を構造的に診る」と題したワークショップを開催し、これまでに実用化されてきた

各種技術を総覧しながら新たな展開の可能性を探った。そこでの発表論文10編は本センター電子モノグラフ No. 2（山中, 2006）として取り纏められている。また、学外の研究者と共同で既往研究のレビューを行い、今後の研究指針を提示した（檜山ほか, 2008）。

環境同位体トレーサー技術は、地球化学・水文科学・大気科学・生態学等の様々な研究領域において高度化が図られてきたが、近年になって、この技術と地理情報システム・数値モデルとを効果的に結びつける Isoscape アプローチが提案され、科学捜査など新たな方面での応用の道が開けつつある。こうした学術動向を見据えながら、第3期中期計画では「トレーサーインフォマティクスによる水・物質循環系の解明」を研究推進課題の一つに掲げて、同位体トレーサー技術と情報技術の融合ならびにその応用範囲の拡充と汎用性の検証、既存理論・手法の高度化・精緻化等が図られた。

本稿では、こうした一連の研究を①水文気象学、②生態水文学、③地下水水文学、④流域水文学および⑤ Isoscape の5領域に大別し、その成果の概要を記すこととする。

---

\* 筑波大学陸域環境研究センター

## II 水文気象学

### 1. 降水同位体を用いた研究

Yamanaka *et al.* (2004b, 2007c) は、大気水循環過程に関する基礎研究として、東アジア（中国およびモンゴル）における降水の同位体変動をモニタリングし、降水の原料となる水蒸気の起源や大気中の水輸送経路との関連性を検討した。その結果、アジアモンスーンの進行に伴って中国・華北平原に降水をもたらす水蒸気の起源海域が南シナ海から東シナ海あるいは黄海へと北上すること、またモンゴル南東部においてもモンスーン循環の影響を受けて中国・華南地域で蒸発した水蒸気が到達している可能性があることが明らかにされた。

また、若本（2004）は降水同位体組成の変動を高い時空間分解能でモニタリングし、メソ $\gamma$ ~ $\beta$ スケールにおける同位体組成の空間分布パターンが起源の異なる水蒸気塊の混合を反映している可能性があることを指摘している。なおこの研究は、降水セル内の同位体変動をラグランジュ的に追跡しながら解析するという意欲的な目標も併せ持っていたが、残念ながらその点では観測対象領域の広さや解像度の点でなお不十分であり、今後の研究が待たれるところである。

### 2. 大気水蒸気同位体を用いた研究

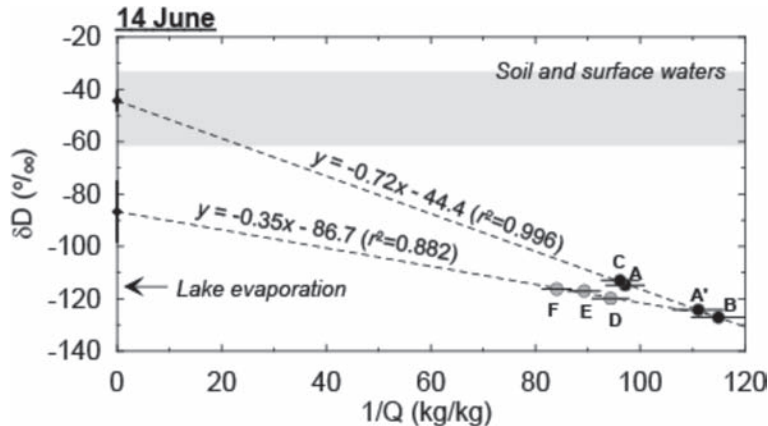
一方、従来のような降水の同位体組成を用いた研究に加えて、水蒸気同位体組成の実測も様々な条件下で試みられた。清水（2005）は関東平野における水蒸気同位体組成の空間分布を様々な空間スケールで明らかにし、マイクロスケールでは水蒸気の同位体組成はほぼ均質とみなせるものの、森林キャノピーの内外では有意に異なることを見出した（清水・山中, 2005）。Tsujimura *et al.* (2007) はモンゴルにおいて、地上観測と航空機観測を同期させることにより、大気境界層における水蒸気同位体組成の鉛直分布を明らかにし

た。綱川（2004）は陸域環境研究センターの草地圃場において水蒸気同位体組成の季節変化をモニタリングし、日中はほぼ常に地表面に近いほど水蒸気の $\delta$ 値が高くなることを確認している。

以上のような基礎研究の成果に基づいて、水蒸気の供給源を同定し混合率を定量化する手法が開発され、霞ヶ浦起源の水蒸気が周辺地域の下層大気水蒸気に占める割合が推定された（Yamanaka and Shimizu, 2007；第1図）。また、同位体データによって校正された領域気候モデルを用いて、モンゴルの降水の起源や地域別寄与率を推定する試みもなされた（Sato *et al.*, 2007）。これらの研究はいずれも、降水の発生・維持において、ローカル起源の水蒸気よりもむしろ外部起源水蒸気の寄与が大きいことを示唆しており、外部起源水蒸気の変動によって陸域の水循環が受動的に応答するという別のアプローチによる研究結果（Yamanaka *et al.*, 2007a, b）と整合している。こうした知見は、乾燥・半乾燥地域における干ばつの特性（鈴木, 2004；鈴木・山中, 2004）を理解するうえで有益なものである。

### 3. サンプリング手法の改良

降水や水蒸気の同位体組成を測定する場合、サンプリングの方法によっては甚大な誤差がもたらされる。そこで、同位体分析に最適なサンプリング手法の検討も行われた。若本・山中（2004）は、降雨イベント内での同位体組成変動をモニタリングする際に降水分取器内部で生じる蒸発濃縮の影響を検討し、これを回避するには予め分取器内にオイルを添加しておく必要があること、またパラフィンオイルよりもシリコンオイルのほうが効果的であることを示した。綱川・山中（2005）はcryogenic法によって大気水蒸気を採取する際の誤差を検討し、水素安定同位体については汎用凝結トラップと液体窒素を使用することで正確な分析値が得られることを実証した。その後、トラップ内にビーズを充填することで雪片の流出を防げ



第1図 つくば地域 (A ~ C) および霞ヶ浦周辺地域 (D ~ F) 計6地点における大気水蒸気の水素安定同位体組成 ( $\delta D$ ) と混合比の逆数の関係 (Yamanaka and Shimizu, 2007). A' のみ高度 30 m, 他は 1 m での測定値. 2本の回帰直線の交点はバックグラウンド大気の状態を表わすと考えられ, それぞれの y 切片はローカル起源 (湖面蒸発および陸域蒸発散) 水蒸気の  $\delta D$  を反映する. このダイアグラムから, 霞ヶ浦からの蒸発によって供給された水蒸気の寄与率が 16 ( $\pm 4$ ) % と推定された.

ば, 酸素安定同位体についても十分な精度が得られることが明らかとされ, 後述する蒸発散研究で多用された.

#### 4. 基礎理論の再検討

こうした手法面での改良に加えて, 同位体水文学の基礎理論を再検討し, 詳細な野外観測によって検証する試みもなされた. 恩田 (2006) は水面蒸発時の同位体分別を記述する Craig-Gordon モデルを野外条件下で検証すべく, 牛久沼に湖上観測システムを構築してモニタリングを行った. Shimizu (2007) はその結果を受けて, 動的同位体分別係数の新たなパラメタリゼーションスキームを提案した. Onda (2008) はそのスキームを用いた湖沼水収支推定法を開発し, 物理的手法による水収支観測値と比較したところ, 豪雨時を除いて両者の間には良好な一致が認められた. このことは, 動的同位体分別のパラメタリゼーションスキームの妥当性を示すと同時に, 同位体トレーサーを用いた湖沼水収支推定手法の有効性を強く支持している.

## II 生態水文学

### 1. 根系吸水域の推定

根系による吸水過程では同位体分別は生じないため, 土壌水と植物体内水の同位体組成を照合することにより吸水深度を特定することができる. また, 複数種の植物の吸水深度を比較することで, 植物種ごとの水利用戦略を明らかにすることができる (Yamanaka, 2009). こうした原理にもとづいて, まず植物体内水の同位体分析に関する技術的問題が検討され (飯塚ほか, 2004), 引き続き様々な種の水利用戦略とその環境条件との関連性に関する研究がなされた.

まず, 本センターに隣接するアカマツ林を対象とした研究により, 我が国のような温帯湿潤気候下にあっても共存植物種間で水資源の使い分け (水源分化) が生じていることが明らかにされた (飯塚, 2004; Yamanaka *et al.*, 2004a). すなわち, 先駆種のアカマツは深層 (80 cm 以深) から吸水するのに対し, 侵入種のシラカシは表層 (40 cm 以浅) からの吸水が多く, 下層植生であ

るアズマネザサは両者の中間的な深度帯から主に吸水していた。アカマツの根系はシラカシよりも深部に及ぶとはいえ、表層で最も多い分布傾向に大きな差異は無い（山中ほか、2005）。当該林分はアカマツの衰退によって水収支構成が変化してきていることが明らかにされており（Hayashi, 2012）、そうした植生遷移の進行に伴って植物種間の水獲得競争が激化し、これを緩和するために水源分化が図られたことが示唆される（山中ほか、2006）。そこで、松尾（2006）は筑波大学農林技術センターのアカマツ単純林を対象として同様の研究を行い、種間競合がない場合はアカマツも比較的浅い深度 40 cm 程度での吸水が主であることを見出した。

しかしながら、Matsuo（2008）による筑波大学菅平高原実験センターのアカマツ林での研究では、侵入種の存在にもかかわらずアカマツは深度 40 cm 程度を中心に吸水しており、表層水源に依存する下層植生のクマイザサとほぼ完全に競合してしまっていることが明らかとなった。また、浅根性のヤマナラシやズミがアカマツよりも深層から吸水している傾向も見出され、競争相手との生態学的優劣関係によって弱者の側が水源を変更するという仮説が導き出された。

上述の研究では、吸水域の代表深度に焦点が当てられ、その空間構造については詳しい検討がなされてこなかったが、その後正規分布型吸水密度プロファイルを逆解析によって推定するアルゴリズムを開発し、様々な試験サイトの比較研究によってその有用性を確認するとともに、上述の仮説の妥当性を実証した（Yamanaka *et al.*, 2008；木村、2010；第 2 図）。この手法は、より複雑な吸水域構造にも対応できるようにさらなる修正が加えられ、かつ推定結果の信頼性を保証するため数値シミュレーション手法による推定結果との比較が試みられた（木村、2012）。しかしながら、両者の間には必ずしも良好な一致は認められなかった。その原因は現在のところ未だ確定できて

いないが、目視によって測定される根系分布と吸水に寄与しているアクティブな根系分布の間に差異がある可能性が示唆されている。この点については、今後さらに多様な地理条件・植生条件のもとでの観測データを蓄積する必要がある。

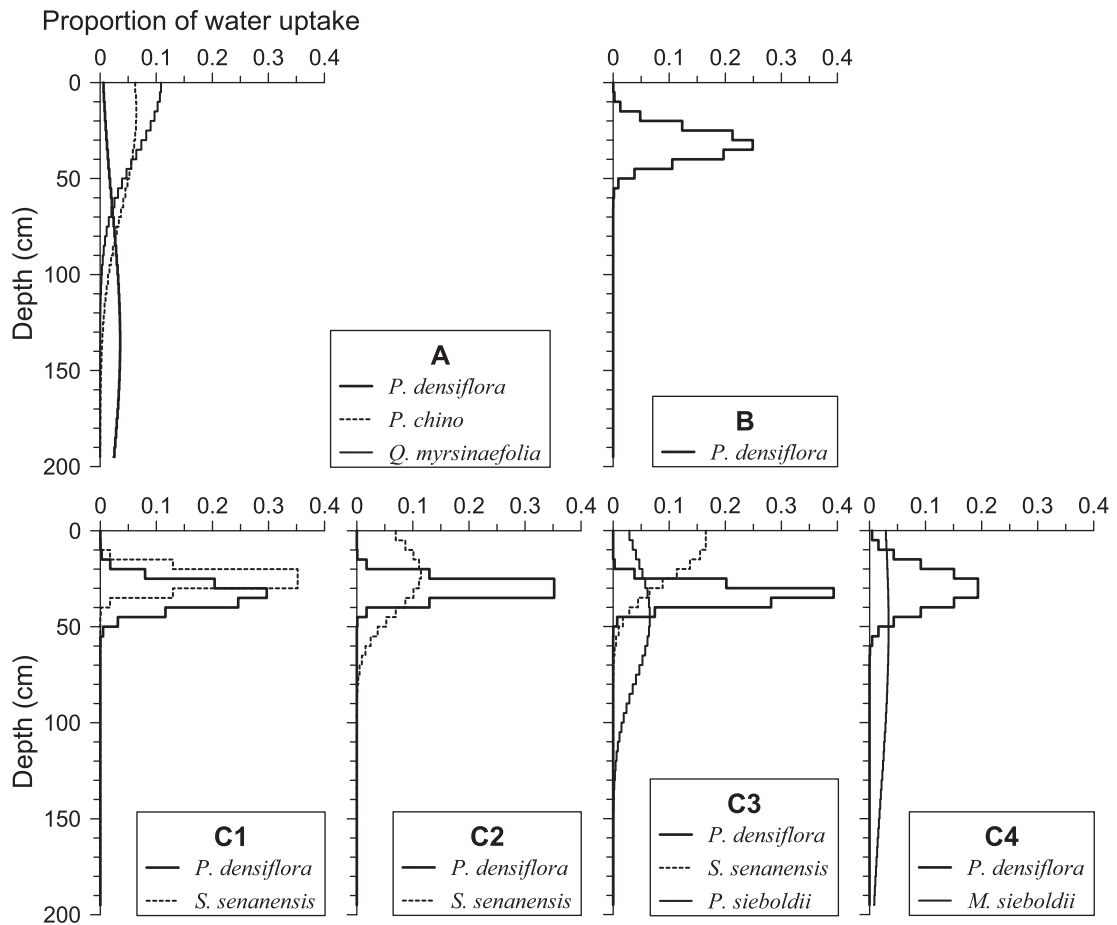
## 2. 蒸発散の成分分離

降水量から蒸発散量を差し引いた水量を水資源賦存量というが、農作物や自然植生からの蒸散によって失われる水は農業生産活動あるいは人間社会にとって好適な環境の維持に必要なコストであると考えられる。一方、土壤面蒸発によって失われる水は、気候緩和機能に寄与しているとはいえ不可欠な要素ではない。このような観点から、河川水や地下水といったいわゆる水資源をブルーウォーター、蒸散によって消費される水をグリーンウォーター、土壤面蒸発によって無駄に失われる水をホワイトウォーターと呼んで区別するようになってきている（Yamanaka, 2009）。

蒸発散量に占める蒸発・蒸散の割合を物理的計測手段で求めることは容易でない。チャンパー法や茎熱収支法などを用いてそれぞれを独立して測定したとしても、測定値の空間的代表性が低いためである。一方、同位体トレーサー手法による蒸発散の成分分離は群落平均的な値が得られるため、近年の適用事例が急増している。

本センターの草地圃場を対象とした Yamanaka and Tsunakawa（2007）によれば、植生成長に伴う蒸散割合（＝蒸散量／蒸発散量）の変化は LAI（葉面積指数）の関数として近似することができ、LAI が 1 を超えるような状態では蒸散が圧倒的となる。また、有効放射エネルギーに占める潜熱フラックスの割合と蒸散割合が高い相関を有するという結果も得られている。一方、モンゴルのステップ草原における蒸散割合は 0.35 ～ 0.59 程度の低い値をとる（Tsujimura *et al.*, 2007）。

ところで、上述の研究では蒸散水の同位体組成が根系で吸収された水のそれに等しいと仮定され



第2図 正規分布型の根系吸水域を仮定した同位体トレーサーによる吸水密度プロファイルの逆推定結果 (Yamanaka *et al.*, 2008). Aは陸域環境研究センター, Bは農林技術センター, C1～C4は菅平高原実験センターである. アカマツ (*Pinus densiflora*) の吸水深度はAのみ1 m以深に及んでいるが, その他では深度40 cm付近を中心としている.

ているが, 近年この仮定に対する疑義が提出されている. 例えば, 蒸散活動の日変化のために葉内水の同位体組成が定常状態に至っていない場合, 葉に流入する水の同位体組成と蒸散する水の同位体組成には若干の差異が生ずる. また, 仮に定常状態に至っていたとしても蒸発サイトの同位体組成と個葉全体の平均的な同位体組成が異なっている可能性もある (これをペクレ効果という). そこで, 土壌-植物-大気連続系における熱・水収支モデル (Wang and Yamanaka, 2012) に同位体過程を組み込んだ新たなモデルを開発し, 豊富

な同位体実測データをもとにこれらの問題点を再検討した. その結果, 蒸散・蒸発比の日変化を詳細に解析する場合には非定常状態およびペクレ効果を考慮する必要があるものの, 正午付近のデータで蒸散・蒸発比の季節変化を把握する場合には従来の簡略化されたモデルでも比較的良好な結果が得られることが判明しつつある. こうした研究は, 蒸発散の成分分離という観点のみならず, 同位体トレーサーによって大気大循環モデルや地域気候モデルの陸面スキームを検証するうえでも重要な知見を提供する.

### III 地下水水文学

#### 1. 地下水涵養源の寄与率評価

地下水の涵養高度の推定や流動系区分を目的とした同位体トレーサー研究は古くから行われているが、その多くは定性的な議論に留まるものであった。そこで本センターでは、地下水と地表水の交流が活発な扇状地を対象として、複数の地下水涵養源からの寄与率を定量的に評価する研究を展開した。まず、栃木県那須扇状地扇央部を対象として、地下水涵養に対する降水・河川水・田面水の寄与率を同位体トレーサー手法で評価した(涌井, 2005; 涌井・山中, 2006)。その結果、扇央部で完全に伏流する蛇尾川の近傍では河川水の寄与が5割以上を占め、また箒川近傍でも一定の寄与が認められた。一方、河川から離れた地点では降水の寄与が多く、田面水の寄与はさほど顕著ではなかった。透水性の高い砂礫で覆われた扇状地では、一般に水田からの浸漏が地下水涵養に果たす役割が大きいと考えられている。上述の結果はそういった認識と異なるものであるが、扇頂から扇央にかけては水田の分布が局所的であり、そのため顕著な田面水の寄与が検出できなかったものと解釈された。そこで、前田(2007)は扇端部を含めた研究を行い、田面水の寄与率が扇端部で高くなる傾向を確認した。しかし、扇端部では涵養よりも流出が卓越し、地下水の鉛直流動成分は上向きになりやすいため、他の扇状地で指摘されているほど顕著な田面水の寄与はやはり認められなかった。

Liu and Yamanaka (2012) は同様の手法を足尾山地と関東平野の境界に位置する足利地域に適用し、河川起源の地下水が右岸(南岸)側に広がっていることや、向斜構造が認められる地域では山体岩盤地下水の寄与が他と比較して高いことを見出している(第3図)。

こうした寄与率評価は同位体測定値の年間平均を用いて行われたが、水フラックスおよび同位体

組成は季節変化するため、それにより無視できない誤差がもたらされている可能性も考えられた。

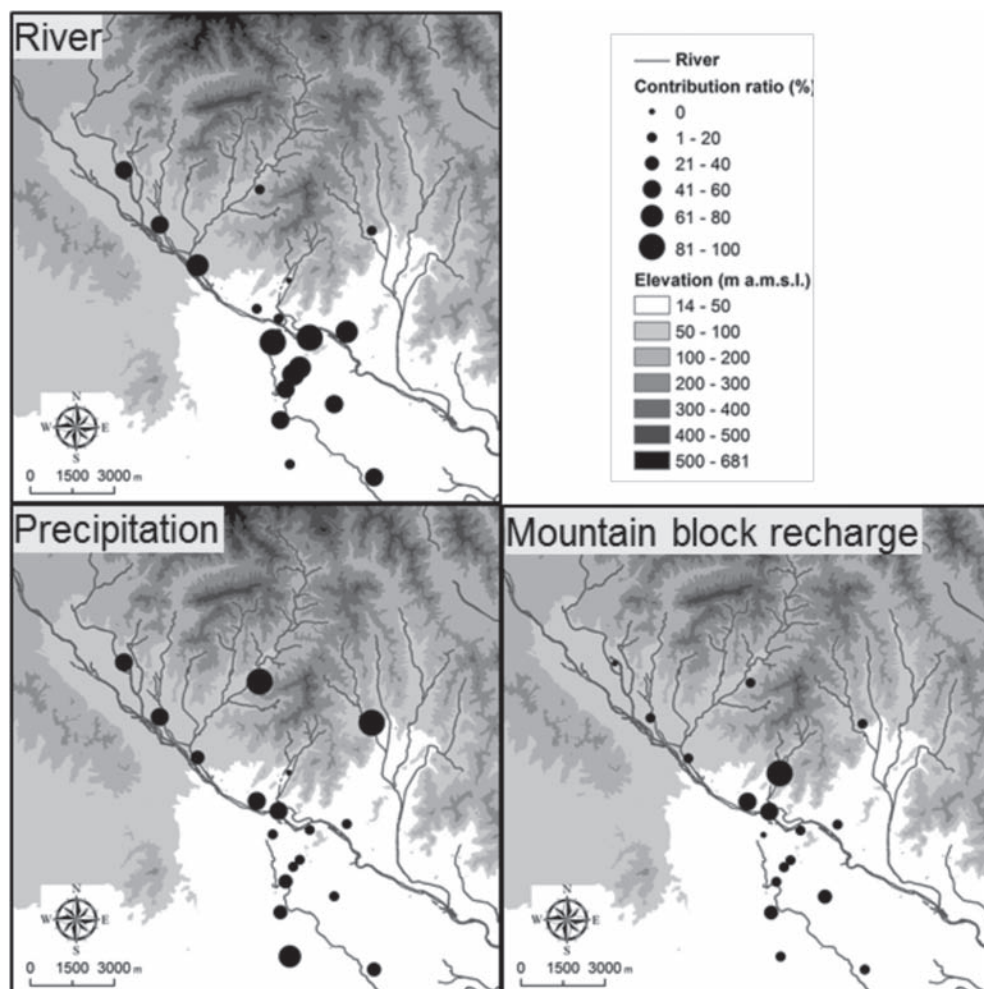
そこで、比較的単純な数値モデルを構築して順問題的に地下水涵養源の寄与率評価を行い、同位体トレーサーによる逆推定結果と比較したところ、両者の間には良好な一致が認められた(Wakui, 2007; Yamanaka and Wakui, 2009)。Liu (2012) は、汎用3次元地下水流動・溶質輸送モデルと同位体トレーサーを併用し、同様の結果を得ている。また、複数の地域を対象とした比較研究により、地下水-河川相互作用の時空間構造、ならびにその地理・地質条件との関係を明らかにした。

#### 2. 過剰揚水の影響評価

地下水の過剰な汲み上げは地下水位の低下と地盤沈下を引き起こす。かつて我が国においても東京や大阪でこのような問題が生じ、条例による揚水規制などにより現在では沈静化しているが、発展著しいアジアのメガシティでは同様の現象が繰り返し起こっている。こうした問題に対処するうえで、広域的な地下水流動系が過剰揚水によっていかなる攪乱を受けてきたかを正確に把握する必要がある。

Yamanaka *et al.* (2011b) は、水の安定同位体と塩素イオンをトレーサーとしてタイ王国・バンコク首都圏の地下水流動系を描き出し、過剰揚水が今なお続いている東西の工業地域一帯で顕著な攪乱が生じていることを明らかにした。また、かつて首都圏中心部で行われていた揚水活動により、表層の塩水もしくは汽水が下位帯水層に引き込まれたものの、その後東西の大規模な水位降下円錐の狭間に位置することで郊外からの地下水流入が生じにくくなっていることを見出した。

三木田(2009)は、そうした過剰揚水が誘発涵養を引き起こしたか否かを数値シミュレーションによって検討した。その結果、過剰揚水によって首都圏一帯で地下水涵養速度が増加し、その増加率は特にバンコク粘土層が薄くなる北西部で大き



第3図 同位体トレーサー手法によって推定された栃木県足利地域の浅層地下水に対する河川水・降水・山体岩盤地下水の寄与率分布 (Liu and Yamanaka, 2012)。渡瀬川が北西から南東に向けて流れており、中流部南岸側に河川水寄与率の高い領域が広がっている。図の中央付近は向斜構造になっており、そこでのみ山体岩盤地下水の寄与が僅かに高い。

いことが明らかとなった。また一方で、自然状態で涵養が生じる山地－平野境界領域においても誘発涵養が生じるものの、首都圏と比較して時間遅れを伴っており、また揚水活動の鈍化に伴う涵養速度の減少もまた緩やかであることが示された (Mikita *et al.*, 2011)。

Yamanaka *et al.* (2011a) は同一の数値モデルを用いて、こうした誘発涵養によって地下水の入

れ替えがどの程度進んだかを解析した。計算結果によれば、最上位の帯水層では 50% 以上の地下水が入れ替わった場所がある一方で、帯水層全体でみると入れ替え率は 1% に満たなかった。これは、バンコク首都圏の深度 600 m 以上におよぶ帯水層群の地下水貯留量が莫大であるためである。こうしたシミュレーション結果の妥当性は、炭素・水素の放射性同位体を用いて確認された。

上述のシミュレーションによれば、バンコク首都圏の全帯水層の平均滞留時間は 1950 年代前半では約 5 万年であり、その後揚水活動によって 2 ～ 3 千年に短縮されたと推定される。しかしながら、依然として古い地下水が多く残存している。このため、地下水の安定同位体組成の 3 次元的分布状況は海進・海退を含む氷期－間氷期スケールの地下水流動変化を反映しているはずである。そこで Mikita (2011) は、海水の混入によって生じる密度流を考慮した 2800 年間の数値シミュレーションを実施し、この地域の降水としては異常に低い  $\delta$  値を持つ地下水が、山岳部で涵養されたものではなく、氷期に涵養されたものであることを示した。また、首都圏中心部の中位帯水層で見られる相対的に高い  $\delta$  値を持つ地下水が、海進時に粘土層中に封入された海水が揚水活動に伴う粘土層の収縮によって絞り出されたものであると結論付けた。

以上の研究は、東京・大阪・ソウル・台北・バンコク・ジャカルタ・マニラの 7 都市を対象とした総合地球環境学研究所の共同プロジェクトの一環として行われ、その成果は成書 (山中, 2011a, b) に取り纏められている。アジアの都市域は地下水の利用とそれに伴う弊害といった点で同じような問題を抱えていながらも、地理・地質条件の違いによってその特徴は異なり、それに合わせた対策が必要である。ここで紹介した数値シミュレーションと同位体トレーサーの融合研究は、そうしたオーダーメードの対策を講ずる際の汎用ツールに成りえる。例えば、Jelassi (2011) は小田原地域における地下水利用が沿岸帯水層への塩水侵入に及ぼす影響を解析するにあたって同様の手法を適用し、内陸部における揚水活動が距離的に離れた沿岸部での水平塩水侵入を助長することを明らかにしており、今後の地下水管理の在り方に新たな一石を投じた。

### 3. 湧水のキャプチャーゾーン推定

近年、都市化の進行による湧水の水量低下や水質悪化が各地において報告されており、つくば市においても同様の傾向が認められる (大森, 2010)。地下水が地表に湧き出でる湧水は、かけがえのない親水空間として特に都市住民の間で保全意識が強いが、保全すべき空間を正確に認識するためには、そのキャプチャーゾーンを明らかにする必要がある。

加納 (2011) は、非定常 3 次元地下水流動モデルと溶質輸送モデルを用いて、後方粒子追跡によってつくば市内の崖線湧水のキャプチャーゾーン推定を行った。その際、モデルによって再現された地下水流動系の信頼性を確認するために、同位体トレーサー手法を併用した。推定されたキャプチャーゾーンは、同位体組成の時間変動特性からみて概ね妥当と考えられたが、シミュレーションと同位体トレーサー手法それぞれ単独で求めた滞留時間推定値は必ずしも一致しなかった。これは、同位体組成の時間変動の振幅を用いて滞留時間を推定するアルゴリズムに問題があると考えられる。そこで、Yamanaka and Wakui (2009) や Liu (2012) と同様に、同位体トレーサーを数値シミュレーションに組み込んで検証を行う予定である。また、崖線湧水のほか、山麓湧水などの他の湧水タイプについてもこの手法を適用し、キャプチャーゾーンの構造や滞留時間にどのような差異があるかについても現在検討中である。

## IV 流域水文学

### 1. 流域通過時間の推定

滞留時間という専門用語は、水の年齢とほぼ同義であったり、ある系を通過するまでの時間という意味であったりと、複数の定義が存在するが、流域における水・物質循環を考える場合、流域に降水が与えられてから河川としてある地点を通過するまでに要する時間、すなわち catchment

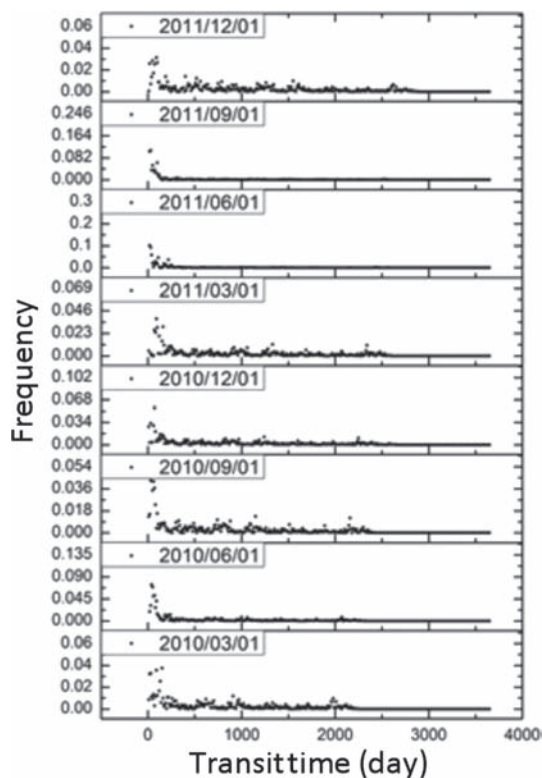
transit time が重要である。ここでは混乱を防ぐため、流域通過時間と呼ぶ。この値は、同一の地点であっても個々の水分子によって異なり、また時間的にも一定とは限らない。しかしながら、既往の研究では比較的単純な仮定に基づいてその平均値だけを問題とすることが多かった。

Ma *et al.* (2012) は、流出解析に用いられるタンクモデルと同位体トレーサーを併用することにより、流域通過時間の頻度分布を明らかにすると同時に、(ある地点の全水分子に対する) 平均通過時間の時間変動を推定するアルゴリズムを開発し、富士川流域に適用した。その結果、流域通過時間分布関数は従来仮定されてきた指数関数型と移流分散方程式の解析解の中間的な特徴を有し、かつ降水量の変動に応じて季節変化することが示された(第4図)。しかしながら、タンクモデルは集中パラメータ型的水文モデルであるため、地形や土地利用の空間的不均質性を十分に考慮できていない。そこで現在は、分布型水文モデルを用いて同様の解析を試みるとともに、同位体トレーサーのみを用いる簡便な流域通過時間推定手法の改良を図っている。

## 2. 土地利用変化による水・物質循環影響評価

総合的な流域管理の視点において、都市化をはじめとする土地利用の変化が流域の水・物質循環に及ぼす影響を把握することは重要な課題の一つである。

大城(2010)はつくばエクスプレス開通に伴う都市化が著しい牛久沼流域を対象として、GISを用いて河川水質と小集水域の土地利用の関係を解析し、水田以外の農用地が卓越する地域で特に硝酸態窒素濃度が高く、森林が卓越する地域では逆に濃度が低い傾向を見出した。沼倉(2011)は定期的な水質測定に加えて流量観測を実施し、同様に土地利用と窒素負荷量の間にも高い関係性があることを明らかにした。これらの結果を踏まえ、Ohshiro(2012)は分布型水文モデルを構築し、



第4図 同位体トレーサーで校正されたタンクモデルによる富士川流域における流域通過時間分布の推定結果(Ma *et al.*, 2012). 対象とする季節によって分布形状が若干変化している。

河川流量と窒素負荷量の実測値によって校正・検証を行った。その結果、肥料等によるインプットの推定に不確定性が大きい窒素負荷量の再現性には若干の課題が残されたものの、河川流量に関しては良好な再現性が確認された。また、土地利用／土地被覆の変化に対する窒素負荷量の感度分析から、上流域における農用地への施肥の影響が最も大きいことが示された。さらに、都市化シナリオのもとでの窒素負荷量の将来予測を行った結果、農用地から住宅地への転換は河川の窒素負荷量の減少をもたらし、牛久沼の水質改善に寄与する可能性を指摘した。上述のように、モデルの信頼性については未だ不十分な点が残されているが、今後同位体トレーサーと融合させることによ

り予測精度の向上が期待できる。

同様のアプローチは、森林が水・土砂流出に及ぼす影響を評価・予測する際にも有効である。三好（2012）は北関東のスギ・ヒノキ人工林流域を対象として、強度間伐の影響を評価するための前段階として水・物質収支の季節変化を明らかにしたが、間伐影響と季節変化・年々変動を分離するのは容易でない。そこで今後は、数値モデルと同位体トレーサーを融合させたアプローチによってこれらを合理的に分離し、間伐のみの影響評価を試みる予定である。

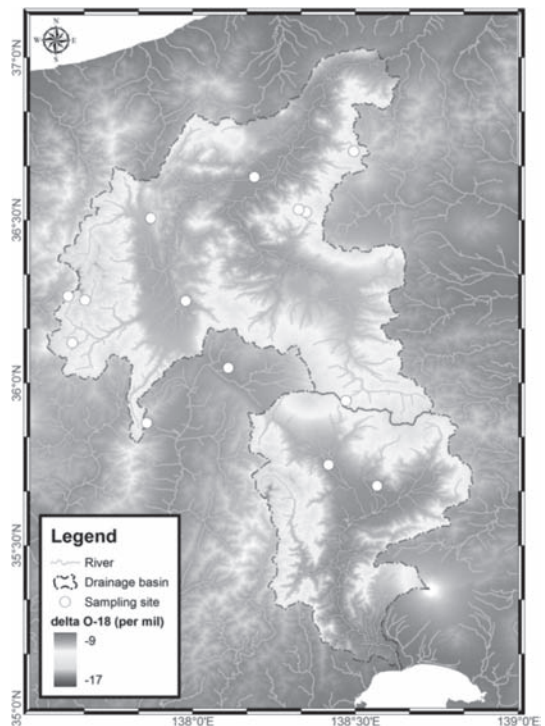
## V Isoscape

Isoscape とは、isotope と landscape を組み合わせた造語であり、様々な物質の同位体組成の地理的変動パターンを意味する。すなわち Isoscape アプローチとは、点として得られた同位体観測データをもとに時空間変動を支配する物理過程や統計学的・地球統計学的関係などを経験的あるいは理論的にモデル化することで空間内挿や時間発展の予測を行い、その背後にある物質の移動を追跡・復元するものである。よくキャリブレートされた Isoscape モデルは、地質学的・生物学的素材の起源に関する“指紋”を取るのに用いることができ、元素分析や濃度測定だけでは簡単に得ることのできない情報をもたらしてくれる。例えば、動物や人間の体組織や骨を構成する水素・酸素の同位体組成は、飲用水の同位体組成に大きく左右されることから、渡り鳥の移住行動や人間の旅行履歴を復元することが原理的には可能である。また、農産物の産地偽装や違法物質の供給源を解き明かすなど、科学捜査分野でも実際に応用されつつある。

我が国においては、降水や陸水の同位体組成の空間分布に関する研究が既に行われているが、山がちな国土であるにもかかわらず高標高域の観測データが不足している現状にある。そこで本セン

ターでは、農林技術センター八ヶ岳演習林、菅平高原実験センター、ならびに信州大学や岐阜大学とも連携しながら中部山岳地域における降水同位体モニタリングを開始し（脇山ほか，2012），降水同位体マップを作成した（牧野，2011；丸山，2011；牧野ほか，2012；第5図）。また併せて河川水・土壌水の同位体組成の多点観測を定期的に行い，降水同位体マップの精度評価や流域水循環の特性把握に利用している。さらに長野県・山梨県の水道供給事業者の協力を得ながら，上水道原水の同位体マップを作成中であり，水道水の涵養標高推定などに利用する予定である。また，調査対象地域を日本海側にまでで拡大し，温暖化が融雪出水に及ぼす影響の解明にも着手している。

こうした研究の主目的は、トレーサビリティの向上によって淡水資源の安全保障強化を図るこ



第5図 単相関モデルを用いて作成された千曲川・富士川流域における降水同位体マップ（牧野ほか，2012）。

とにあるが、isoscape アプローチは今後も予期せぬ分野で画期的な応用へと発展する可能性が高く、そうした事態に備えて情報基盤を整備しておくという観点も重要である。

## VI まとめ

水の循環とそれに伴って輸送される物質の循環は、異なる時空間スケールをもつ様々なプロセスで構成されている。環境同位体トレーサーは特定の時空間スケールに制約されることなく、応用範囲が極めて広い。しかも、複数のスケールの現象を同一のツールで理解することにより、スケール間の相互作用を正確に捉えることができるメリットがある。また、大気科学や生態学、あるいは社会科学といった既存学問領域を超えた利用が進んでおり、学際領域研究において特に強みを発揮する。しかし一方で、物理的な裏付けが不十分なままに同位体情報を誤って解釈してしまうと、荒唐無稽な結論を導いてしまう危険性もある。第3期中期計画で掲げられた同位体トレーサー技術と数値シミュレーション等情報技術の融合はそうした欠点を補完し、より信頼性の高い研究成果を上げることには寄与するはずである。本稿で紹介した研究事例は、そのことを部分的ながらも立証している。

本センターが中心となってこれまでに行われた研究は、大気水輸送・降水・蒸発・蒸散・根系吸水・地下水涵養・湧水・不圧地下水流動・被圧地下水流動・河川流出など、水文循環のほぼ全てを網羅しており、トレーサー水文学の体系化に一定の寄与を果たせたものと考えられる。今後は、放射性物質の環境拡散などの問題も含め、社会に実装できる画期的な環境診断技術を確立するため、国内外の研究者と共同しながら Isoscape アプローチをさらに発展・深化させてゆくことが肝要であろう。

## 参考文献

- 飯塚幸子 (2004): 同位体トレーサーを用いた植物の土壌水利用戦略の研究. 筑波大学卒業論文, 42p.
- 飯塚幸子・山中 勤・田中 正 (2004): 安定同位体分析のための植物体からの水の抽出について—ポット試験による検討—. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 5, 81–86.
- 大城慶彦 (2010): 牛久沼流域における河川水質の空間分布と土地利用の関係. 筑波大学卒業論文, 48p.
- 大森 浩 (2010): つくば市における湧水の湧出量と水質の時間変動特性. 筑波大学卒業論文, 36p.
- 恩田 真 (2006): 水面蒸発フラックスの同位体組成に関する観測的研究: Craig-Gordon モデルの野外検証. 筑波大学卒業論文, 41p.
- 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. 筑波大学卒業論文, 63p.
- 木村健夫 (2010): 植物根系における吸水深度の選択を規定する要因について. 筑波大学卒業論文, 56p.
- 木村建夫 (2012): 樹木の吸水深度推定手法に関する比較研究. 筑波大学修士論文, 94p.
- 清水亮介 (2005): 水蒸気同位体組成の空間分布特性とそのスケール依存性. 筑波大学卒業論文, 56p.
- 清水亮介・山中 勤 (2005): 微気象学的スケールにおける大気水蒸気同位体組成の空間構造. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 6, 3–9.
- 鈴木和美 (2004): モンゴルを対象とした Palmer Drought Severity Index (PDSI) の適用可能性. 筑波大学卒業論文, 44p.
- 鈴木和美・山中 勤 (2004): Palmer Drought Severity Index (PDSI) を用いたモンゴルの旱魃の解析. 筑波大学陸域環境研究センター

- 報告, **5**, 3–12.
- 綱川明芳 (2004): 草地上の大気水蒸気および蒸発散フラックスの同位体組成. 筑波大学卒業論文, 39p.
- 綱川明芳・山中 勤 (2005): 安定同位体分析のための大気水蒸気サンプリング手法の信頼性. 水文・水資源学会誌, **18**, 306–309.
- 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. 筑波大学卒業論文, 37p.
- 檜山哲哉・阿部 理・栗田直幸・藤田耕史・池田健一・橋本重将・辻村真貴・山中 勤 (2008): 水の酸素・水素安定同位体を用いた地球水循環研究と今後の展望. 水文・水資源学会誌, **21**, 158–176.
- 前田明大 (2007): 栃木県那須扇状地における水田灌漑が地下水涵養に果たす役割. 筑波大学卒業論文, 82p.
- 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. 筑波大学卒業論文, 55p.
- 牧野裕紀・脇山義史・山中 勤・鈴木啓助 (2012): 中部山岳地域における降水同位体マッピングとその検証. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, AHW28-11.
- 松尾大悟 (2006): アカマツの水利用様式に関する同位体生態水文学的研究: アカマツ単純林における事例. 筑波大学卒業論文, 35p.
- 丸山浩輔 (2011): 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. 筑波大学卒業論文, 42p.
- 三木田 慎 (2009): タイ国バンコク首都圏における揚水活動に伴う深層地下水涵養過程の数値解析. 筑波大学卒業論文, 69p.
- 三好史哉 (2012): スギ・ヒノキ人工林流域における水・物質収支～季節変化と間伐影響に着目して～. 筑波大学卒業論文, 47p.
- 山中 勤 編 (2006): 環境循環系診断のための同位体トレーサー技術. 電子モノグラフ No.2, 筑波大学陸域環境研究センター, 68p.
- 山中 勤 (2011a): 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.
- 山中 勤 (2011b): 第 3 章 地下水涵養. 「地下水流動－モンスーンアジアの資源と循環」(谷口真人 編), 共立出版, 45–64.
- 山中 勤・松尾大悟・矢野 翠・角張順一・飯田真一・涌井久司・清水亮介・田中 正 (2005): 遷移過程のアカマツ二次林における植物種間の根系分布の差異. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **6**, 39–44.
- 山中 勤・飯塚幸子・田中 正 (2006): 共存植物種間の水源分化: 同位体生態水文学的アプローチ. 水文・水資源学会誌, **19**, 458–464.
- 若本実希 (2004): 高分解能モニタリングによる降水システムの同位体水文学的研究. 筑波大学卒業論文, 50p.
- 若本実希・山中 勤 (2004): 降水分取器内部での蒸発に伴う試水の同位体濃縮について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 73–79.
- 脇山義史・牧野裕紀・山中 勤・鈴木啓助 (2012): 中部山岳地域における降水安定同位体組成の時空間変動特性. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, AHW28-05.
- 涌井久司 (2005): 安定同位体組成からみた那須扇状地の地下水－地表水相互作用. 筑波大学卒業論文, 54p.
- 涌井久司・山中 勤 (2006): 安定同位体組成からみた那須扇状地扇央部における地下水涵養源とその地域性. 地下水学会誌, **48**, 263–277.
- Hayashi, A. (2012): Effects of Vegetation Succession on Forest Water Balance at Single-tree and Forest-stand Scales. Ph. D. Thesis, University of Tsukuba, 140p.

- Jelassi, H. (2011): Hydrogeochemical and numerical simulation approaches to reveal mechanisms regulating groundwater quality in the coastal aquifer of Odawara region, Japan. Ph. D. Thesis, University of Tsukuba, 132p.
- Liu, Y. (2012): Spatiotemporal structure of the groundwater-river interaction at mountain-plain transitional landscapes. Ph. D. Thesis, University of Tsukuba, 176p.
- Liu, Y. and Yamanaka, T. (2012): Tracing groundwater recharge sources in a mountain-plain transitional area using stable isotopes and hydrochemistry. *Journal of Hydrology*, 464–465, 116–126.
- Ma, W., Yamanaka, T., Wakiyama, Y. and Makino, Y. (2012): Estimation of catchment transit time in Fuji River basin by using an improved lumped model. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, AHW28-12.
- Matsuo, D. (2008): Influence of competition among co-occurring plants on water use of Japanese red pine. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 84p.
- Mikita, M. (2011): Numerical Experiments on the Origin of Groundwaters with Extreme Isotopic Composition in the Bangkok Basin, Thailand. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 72p.
- 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*, 25, 2726–2733.
- Ohshiro, Y. (2012): Influence of Land Use and Land Cover on River Water Quality and Nutrient Loads: a Case of the Watershed of Lake Ushiku-numa. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 134p.
- Onda, M. (2008): Estimation of lake water balance using environmental tracers. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 69p.
- Sato, T., Tsujimura, M., Yamanaka, T., Iwasaki, H., Sugimoto, A., Sugita, M., Kimura, F., Davaa, G., Oyunbaatar, D. (2007): Water sources in semiarid northeast Asia as revealed by field observations and isotope transport model. *Journal of Geophysical Research*, 112, D17112, doi:10.1029/2006JD008321.
- Shimizu, R. (2007): Isotopic composition of lake origin vapor and its mixing with regional atmospheric vapor. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 83p.
- Tsujimura, M., Sasaki, L., Yamanaka, T., Sugimoto, A., Li, S-G., Matsushima, D., Kotani, A. and Saandar, M. (2007): Vertical distribution of stable isotopic composition in atmospheric water vapor and subsurface water in grassland and forest sites, eastern Mongolia. *Journal of Hydrology*, 333, 35–46.
- Yamanaka, T. (2009): Interdisciplinary perspectives on hydrological cycle in arid zones. *Annals of Arid Zone*, 48, 341–357.
- Yamanaka, T. and Shimizu, R. (2007): Spatial distribution of deuterium in atmospheric water vapor: diagnosing sources and the mixing of atmospheric moisture. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 3162–3169.
- Yamanaka, T. and Tsunakawa, A. (2007): Isotopic signature of evapotranspiration flux and its use for partitioning evaporation/transpiration components. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, 3, 11–21.
- Yamanaka, T. and Wakui, H. (2009): Intensive

- groundwater-surface water interaction in an alluvial fan: assessment using a numerical model and isotopic tracer. Taniguchi, M., Burnett, W.C., Fukushima, Y., Haigh, M. and Umezawa, Y. (Eds.): *From Headwaters to the Ocean: Hydrological Changes and Watershed Management*, Taylor and Francis, 321–327.
- Yamanaka, T., Iizuka, S. and Tanaka, T. (2004a): An isotope-ecohydrological study on water use strategy of plants in a suburban secondary forest. *EOS Trans. AGU*, **85(28)**, West. Pac. Geophys. Meet. Suppl., Abstract B12A-05.
- Yamanaka, T., Shimada, J., Hamada, Y., Tanaka, T., Yang, Y., Wanjun, Z. and Chunsheng, H. (2004b): Hydrogen and oxygen isotopes in precipitation in a northern part of the North China Plain: Climatology and inter-storm variability. *Hydrological Processes*, **18**, 2211–2222.
- Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D. and Ganbold, T. (2007a): Characteristics and controlling factors of regional-scale surface soil moisture variability over semi-arid grassland in Mongolia. *Journal of Meteorological Society of Japan*, **85A**, 261–270.
- Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D. and Ganbold, T. (2007b): Summertime soil hydrological cycle and surface energy balance on the Mongolian steppe. *Journal of Arid Environments*, **69**, 65–79.
- Yamanaka, T., Tsujimura, M., Oyunbaatar, D. and Davaa, G. (2007c): Isotopic variation of precipitation over eastern Mongolia and its implication for the atmospheric water cycle. *Journal of Hydrology*, **333**, 21–34.
- Yamanaka, T., Matsuo, D. and Hirota, M. (2008): Application of normal distribution model to estimate root water uptake profile by an isotopic approach. Paper presented at American Geophysics Union 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 15–19 December.
- Yamanaka, T., Mikita, M., Lorphensri, O., Shimada, J., Kagabu, M., Ikawa, R., Nakamura, T. and Tsujimura, M. (2011a): Anthropogenic changes in a confined groundwater flow system in the Bangkok Basin, Thailand, part II: how much water has been renewed? *Hydrological Processes*, **25**, 2734–2741.
- Yamanaka, T., Shimada, J., Tsujimura, M., Lorphensriand, O., Mikita, M., Hagihara, A. and Onodera, S. (2011b): Tracing a confined groundwater flow system under the pressure of excessive groundwater use in the Lower Central Plain, Thailand. *Hydrological Processes*, **25**, 2654–2664.
- Wakui, H. (2007): Numerical simulation on isotopic changes in groundwater in the Nasu fan, Tochigi Prefecture. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 73p.
- Wang, P. and Yamanaka, T. (2012): Application of a two-source numerical model to partitioning evapotranspiration and its controls in a temperate grassland ecosystem. *Agricultural Water Management*, submitted.

## 課題別総括：メソ気象モデル

### Summary of Studies on Mesoscale Atmospheric Modeling

若月 泰孝<sup>\*</sup>・木村 富士男<sup>\*\*</sup>・佐藤 友徳<sup>\*\*\*</sup>・足立 幸穂<sup>\*\*\*\*</sup>・鈴木 智恵子<sup>\*</sup>

Yasutaka WAKAZUKI<sup>\*</sup>, Fujio KIMURA<sup>\*\*</sup>, Tomonori SATO<sup>\*\*\*</sup>,  
Sachiho ADACHI<sup>\*\*\*\*</sup> and Chieko SUZUKI<sup>\*</sup>

#### 1 はじめに

大気循環における陸面の影響や降水過程に関する研究は、陸域環境研究センターにおいてとても重要なテーマとなっている。そこで用いられる研究手法は、メソ気象モデルもしくは領域大気モデルと呼ばれる数値計算ツールを用いた、大規模数値シミュレーションである。陸域環境研究センターは、木村を中心に、TERC (Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba) -RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) という領域大気モデル (メソ気象モデル) を開発し、山谷風などの局地循環 (Okamura and Kimura, 2003 など)、土地利用分布に起因する局地循環に関する研究 (Lee and Kimura, 2001 など)、冬季降雪 (Yoshikane and Kimura, 2008 など) や梅雨 (Yoshikane and Kimura, 2003, 2005 など) などの降水を含む大気循環、黄砂 (Adachi *et al.*, 2007 など) などの現象に関する研究に応用してきた。他にも NCAR (National Center for Atmospheric Research) -MM5 (Mesoscale Model version 5) を用いた研

究も推進してきた (Kang and Kimura, 2003)。また、近年広く世界中で利用されるようになってきた WRF (Weather Research and Forecasting Model) を導入して、将来の気候予測を含む領域気候研究を推進してきた (Sato *et al.*, 2007d など)。さらに、若月がセンター教員として着任した 2010 年以降は WRF や CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) などの領域大気モデルを研究ツールとして利用しており、領域大気研究の発展に大いに貢献してきた。以下、これまで行なってきたメソ気象モデルに関連した研究の推移をまとめる。

TERC-RAMS は、アメリカのコロラド州立大 (CSU) で開発されていた RAMS を Pielke 氏 (CSU) を通して提供を受け、木村が独自に開発していた LCM (Local Circulation Model) のノウハウを結合して開発した領域大気モデルである。TERC-RAMS の開発において、対流や放射過程など、雲物理過程を除くほとんどすべての物理過程でオリジナルの RAMS から書き換えを行った (Yoshikane *et al.*, 2001 ; Adachi *et al.*, 2009)。具体的には、地上気温の外挿気温、上部境界および

<sup>\*</sup> 筑波大学陸域環境研究センター

<sup>\*\*</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構・筑波大学名誉教授

<sup>\*\*\*</sup> 北海道大学大学院地球環境科学研究院

<sup>\*\*\*\*</sup> 独立行政法人海洋研究開発機構

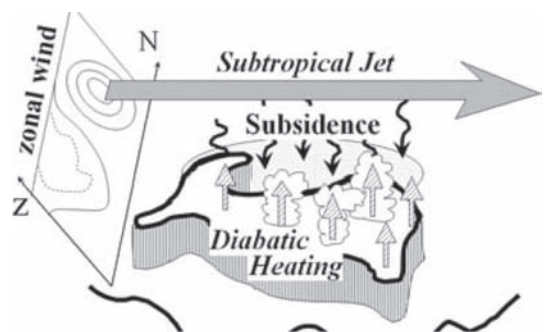
接続境界条件、圧縮出力フォーマットなどの書き換えが行われたことになる。中でも、地表面スキームに都市モデルを導入してモザイク都市を扱えるようにしたことにより大きな成果が得られた(Inoue and Kimura, 2007 ; Adachi *et al.*, 2012)。

TERC-RAMS を用いた大気現象の研究では、日中の谷風循環に伴う山岳への水蒸気輸送の過程が理想化された2次元実験によって明らかとなり、GPS (Global Positioning System) やラジオゾンデによって観測された大気中の水蒸気量の日変化をよく説明することが分かった(Sato and Kimura, 2003, Sasaki *et al.*, 2003, Fujita *et al.*, 2006)。日中に山岳へ、夕方から夜間にかけて山麓へと運ばれる水蒸気は、大気中～下層の安定度を変化させることから、東南アジア(Sasaki *et al.*, 2004 ; Wu *et al.*, 2003) や関東地方(Sato and Kimura, 2005a) で観測された降水の日周期の要因のひとつとされている。また、寒候期の気象については、Kawase *et al.* (2005) が太平洋沖に発生する筋状雲の形成メカニズムを調べた。TERC-RAMS を用いて、山岳を除去した実験や海陸の温度差を小さくする実験など様々な感度実験を駆使することで、四国の山岳の風下で発生する雲だけでなく、海陸の熱コントラストに起因して発生する筋状雲も存在することが分かった。さらに、Kawase *et al.* (2006) は、数値実験によって再現された海上の下層収束線を、伊豆諸島に点するGPS観測網によってとらえることに成功した。TERC-RAMS は、境界条件として特殊な条件のデータを与えることで、気候形成のメカニズム研究にも大きく貢献してきた。帯状平均した大気場が偏西風ジェットの季節的な特徴を良く表現している特性を利用して、Yoshikane *et al.* (2001) は梅雨前線の形成には、海陸コントラストと帯状平均の構造が重要であることを示した。同様の実験により、Sato and Kimura (2005b, 2007a) はチベット高原による夏の非断熱加熱と偏西風ジェットがインドモンスーンの急激なオン

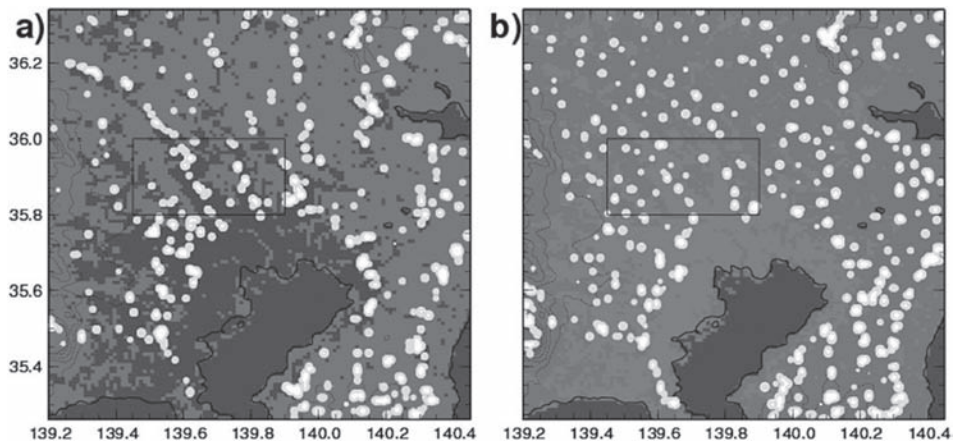
セットや北東アジアの乾燥気候の形成に重要であることを示した(第1図)。

一方、TERC-RAMS は大気現象の理解だけでなく、大気陸面相互作用の研究にも応用され、特筆すべき成果を得ることができた。Inoue and Kimura (2004) による衛星データ解析から明らかになった、都市の分布に沿って周辺よりも雲の出現頻度が高くなる現象について、そのメカニズムをモデル実験から明らかにした(Inoue and Kimura, 2007 ; 第2図)。その感度解析の結果、都市の顕熱フラックスが郊外よりも大きい時にその特徴をよく再現し、都市では顕熱フラックスが大きいために、郊外より混合層高さが高くなり、サーマルが持ち上げ凝結高度に達しやすいことが明らかになった。また、周辺の郊外では都市での強いサーマルの補償下降流が広範囲に卓越しているために、サーマルや雲の発生が抑制されていることが示された。

北東アジア乾燥地域の研究では、黄河流域の灌漑地域とその周囲の砂漠との間で、雲の発生頻度や日周期に大きな違いがあることが静止気象衛星の解析によって明らかになった(Sato *et al.*, 2007b)。Kawase *et al.* (2008) はこれについて数値実験を行い、両地域の顕熱フラックスの差によって湖陸風に似た明瞭な局地循環が発生し、それが雲の分布を決定していることを示した。中国



第1図 北東アジアの乾燥地域における沈降流の形成メカニズム。(Sato and Kimura (2005b) の Fig. 7 より引用)



第2図 RAMSによって再現された積雲。(a) 再現実験, (b) 都市なし実験。(a)の濃い灰色領域は都市の分布を示す。(Inoue and Kimura (2007) の Fig. 2 を一部改変)

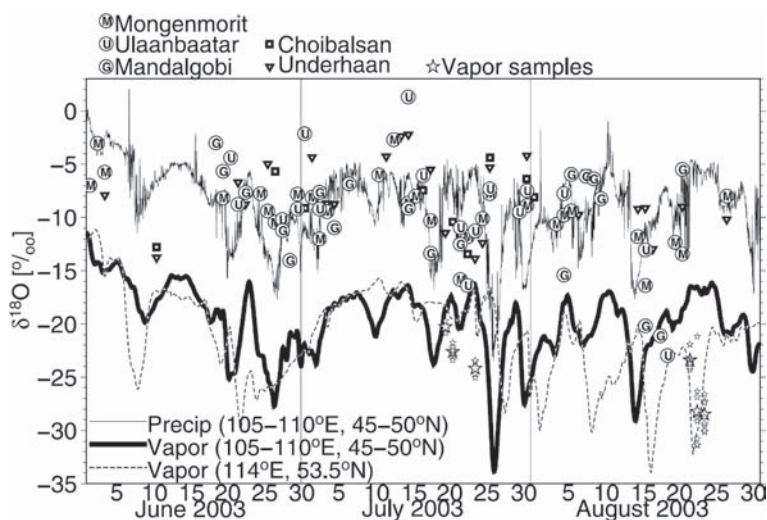
北部の砂漠地帯では、低気圧活動が活発な春季を中心にダストストームが発生し、黄砂として社会的に様々な問題をもたらすだけでなく、全球規模の気候にも影響を及ぼしていることを示した。Aoki *et al.* (2005) はダストの主要な発生源であるタクラマカン砂漠を対象地域としてダストストーム発生時の気象条件を3つのタイプに分類した。その中でも寒冷前線の通過に伴って発生するダストストームでは、観測データがほとんどない砂漠でも TERC-RAMS が威力を発揮し、局地的な前線構造の侵入がダストストームの発生をもたらしているという重要な発見をした。Aoki *et al.* (2005) の分類では、前線の通過に伴ってダストストームが徐々に拡大していく特徴があったが、Tsunematsu *et al.* (2005) はタクラマカン砂漠の複数の観測点や人工衛星で確認された同時多発的なダスト発生イベントを調べた。2004年3月26日の事例は、砂漠の広い範囲でほぼ同時刻にダストストームが確認され、その発生の様子はライダーでも観測された。TERC-RAMSによる実験の結果、接地逆転層の消滅が広域的なダストの発生を生じていたことが分かった。つまり、夜間に上空には強風域が侵入していても、安定な接地

逆転層が発達することによって、大気下層は上空の強風の影響を受けなかったと解釈された。ところが、日の出後に逆転層が崩壊すると運動量の鉛直輸送が活発に行われて、広範囲で一斉に風速が強まりダストが発生する。平成13年より陸域環境研究センターを中心に実施された戦略的創造研究推進事業「北東アジア植生変遷域の水循環と生物・大気圏の相互作用の解明 (RAISE; The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia)」では、気象学だけでなく水文や植物生態の分野にも TERC-RAMS の実験データが活用された。モンゴル東部で展開された観測では、ユーラシア大陸内部の乾燥地域で初めて降水と水蒸気中の酸素・水素安定同位体の集中観測が行われた。TERC-RAMS を用いた同位体輸送のシミュレーションによって、ストームの通過時に大気中の酸素安定同位体比が急激に低下していることが明らかになった (Sato *et al.*, 2007c)。これは、同位体比の小さい低温位気塊の移流が低気圧の後面に顕著であるに整合している。また、モンゴルへの水蒸気起源を調べたトレーサモデルの結果、平均的なモンゴルへの水蒸気輸送は中・高緯度の陸

地で再循環した水がほとんどであることや、アジアモンスーン起源の水は擾乱が通過する際に一時的に取り込まれていることが分かった。さらにモンゴルの周辺で蒸発散した水蒸気は、夏季平均すると可降水量のおよそ3分の1程度に相当しており、集中観測で推定された見積もりとも一致していることが確認された（第3図）。このようにTERC-RAMSは観測が得られにくい地域でのメソ気象の理解を目指した研究に大いに貢献した。

一方、これらのTERC-RAMSなどの大気モデルを、特定の境界条件の下で長期計算することによって、領域スケールの気候情報を把握することができるようになってきた（Kimura and Yoshikane, 2001, 足立・木村, 2010 など）。以後、長期積分を目的とした領域大気モデルは領域気候モデルと呼ぶこととする。領域気候モデルによる数値実験は、GCM（General Circulation Model）や客観解析データなど粗い解像度のデータを特定地域に対して詳細化する実験に相当するので、これをダウンスケーリング実験と呼ぶ。この際、領域気候モデルの初期値や境界値として一般的に用

いられる再解析データに、全球気候モデルによって予測された将来の気候変化の差分を上乗せすることで、簡易的かつ近似的に温暖化予測のダウンスケーリング実験を行うことができる（擬似温暖化手法）。Sato *et al.* (2007d) は、この擬似温暖化実験手法をモンゴルの気候予測に適用し、GCMによる誤差の影響が小さいことやアンサンブル実験にも適用可能であることを指摘した。受託研究環境省環境研究総合推進費戦略的研究プロジェクトS-5「地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究」では、「温暖化予測評価のためのマルチモデルアンサンブルとダウンスケーリングの研究（テーマリーダー：気象庁気象研究所 高数出）」に参画し、TERC-RAMS及びWRFを用いた日本域の領域気候ダウンスケール実験を実施した。空間解像度20 kmで1985年から2004年までの20年間についてJRA25/JCDASを境界値に与えた現在気候再現実験を行った。その結果、TERC-RAMSでは冬季に低温傾向、夏季に高温傾向を持つが多くの地域でバイアスは1℃以内と



第3図 モンゴル東部において観測された降水中および水蒸気中の酸素安定同位体比（マーク）とモデルで再現された同位体比の時間変化（線）。（Sato *et al.* (2007c) の Fig. 5 より引用）

なること、降水は四国九州沖縄で夏季に顕著な降水量過少のバイアスがあり、観測に比べて 1/2 程度になることがわかった。一方、WRF の場合、冬季の北海道東北を中心とした低温バイアスと夏季の関東における高温バイアスを除き、広い範囲で気温のバイアスは 0.5℃以内となることがわかった。また、降水量は年間を通して過大評価し、特に冬季の東北北海道で 2 倍程度になることがわかった。このことから、降水についてはバイアスがあるものの、気温については気候モデルとして十分な性能があることが示された。さらにこの結果は、気象庁気象研究所の NHRCM (Non-Hydrostatic Regional Climate Model) と防災科学技術研究所の RAMS による同様の設定で行われたダウンスケール結果と比較を行うことで不確実性の評価にも活用された (Ishizaki *et al.*, 2012; Iizumi *et al.*, 2011)。

さらに本課題では、「空間詳細な地域気候変動シナリオ作成のための都市効果の評価」も行なった。都市キャノピーモデルを組み込んだ高解像度領域気候モデル TERC-RAMS を用いて、2070 年代までの首都圏の将来気温変化を対象に、温室効果ガスによる気候変化と都市化の影響を評価した (Adachi *et al.*, 2012)。関東地方における今後 70 年間の温暖化による気温上昇は平均で約 2.0℃と予測され、2070 年代までの今後 70 年間の都市化による気温上昇は約 0.5℃と見積もられた。この昇温量は全球規模の気候変化による昇温量よりも小さいものの、都心における過去から将来までの都市化による昇温量が 1.5℃であることを考慮すると、2070 年代 8 月のヒートアイランド強度は約 2℃であり、将来の温暖化による昇温に匹敵する。これにより、東京のような発展した都市域では、ヒートアイランドの緩和が将来の温暖化の適応策となりうることを示した。

地球環境再生プログラム「中部山岳地域大学間連携事業 (筑波・信州・岐阜大学)」では、高解像度の領域気候実験を、WRF を用いて現在実施

中である。高解像度の気候実験結果は、観測が粗な中部山岳地域における環境把握に大きな役割を果たすと期待されている。特定年の再現シミュレーションでは、解像度 2 km の実験結果で再現された高地の積雪深が、観測とよく対応していることがわかった (若月, 2011)。また、将来的には、人為起源の温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化によって、中部山岳域の環境がどのように変化するかというテーマで将来気候予測実験を実施する計画がある。さらに、若月のテニユアトラック普及・定着事業では、WRF による実験だけでなく、名古屋大学の坪木和久氏が開発した領域大気モデル CReSS を用いたシミュレーションも実施している。CReSS は、気候把握を目的とする長期シミュレーションで利用するのではなく、主に降水過程が重要な役割を果たす豪雨の再現実験を行っている。豪雨災害における予測可能性についての総合的研究を実施することで、減災に寄与する情報の創出を目指している。CReSS による地域短時間気象予測システムを開発し、準リアルタイムでの予測を行えるようになった。2012 年沖縄で実施した梅雨前線帯の降水システムの総合観測では、地上気象測器、ラジオゾンデ、マルチパラメータレーダで主に積乱雲の観測を行った。そこで観測された現象は、CReSS による再現シミュレーションと比較しつつ、豪雨現象の理解に向けた解析が行われている。この時観測された梅雨前線帯のメソ  $\beta$  スケール弧状降水システムについて、データ解析と再現シミュレーションによるメカニズムの解明を目指している。また、同じ環境場で観測された複数の孤立積乱雲の比較では、シングルセル型とマルチセル型がほぼ同時に存在しており、理想化した数値シミュレーションによって発生要因や発達要因の違いについて研究している。さらに、CReSS は、2012 年 5 月 6 日につくばで発生した竜巻の現象理解、2011 年 3 月の福島第一原発の事故における放射性物質拡散に関わる研究でも利用され、あらゆる気象災害研究

に威力を発揮している。

本報告を作成するにあたり、木村の指導した筑波大学の多くの卒業生に資料提供や助言をいただいた。その一員である川瀬氏（海洋研究開発機構）には、本報告の修正と確認をしていただいた。筑波大学陸域環境研究センターのメソ気象モデル研究に携わった全ての方々に深く感謝するものである。

## 参考文献

- 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.
- 若月泰孝（2011）：中部山岳域の地域気候変化予測に向けた課題と準備状況。中部山岳地域大学間連携事業 2011 年度年次研究報告会。
- Adachi, S., Kimura, F., Sugata, S., Hayasaki, M. and Wakamatsu, S. (2007): Dust transport along a cold front: A case study of a cyclone observed on 19-20 April 2000 in Northeast Asia. *J. Japan Soc. Atmos. Environ.*, **42**, 327–338.
- Adachi, S. A., Kimura, F. and Tanaka, M. (2009): Reproducibility of Past 20 Years Climate using Dynamical Downscaling Method and Future Prediction of Snow Cover in Winter. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **10**, 51–60.
- Adachi, S. A., Kimura, F., Kusaka, H., Inoue, T. and Ueda, H. (2012): Comparison of the Impact of Global Climate Changes and Urbanization on Summertime Future Climate in the Tokyo Metropolitan Area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**(8), 1441–1454, doi:10.1175/JAMC-D-11-0137.1.
- Aoki, I., Kurosaki, Y., Osada, R., Sato, T. and Kimura, F. (2005): Dust storms generated by mesoscale cold fronts in the Tarim Basin, Northwest China. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(3), L06807, doi:10.1029/2004GL021776.
- Fujita, M., Sasaki, T. and Kimura, F. (2006): A Dramatic Daytime Decrease in Water Vapor over Coastal Thailand, *SOLA*, **2**, 49–52.
- Iizumi, T., Nishimori, M., Dairaku, K., Adachi, S. A. and Yokozawa, M. (2011): Evaluation and intercomparison of downscaled daily precipitation indices over Japan in present-day climate: Strengths and weaknesses of dynamical and bias correction-type statistical downscaling methods, *J. Geophys. Res.*, **116**, D01111, doi:10.1029/2010JD014513
- Inoue, T. and Kimura, F. (2004): Urban effects on low-level clouds around the Tokyo metropolitan area on clear summer days, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L05103, doi:10.1029/2003GL018908.
- Inoue, T. and Kimura, F. (2007): Numerical experiments on fair-weather clouds forming over the urban area in northern Tokyo, *SOLA*, **3**, 125–128.
- Ishizaki, N. N., Takayabu, I., Oh'izumi, M., Sasaki, H., Dairaku, K., Iizuka, S., Kimura, F., Kusaka, H., Adachi, S. A., Kurihara, K., Murazaki, K. and Tanaka, K. (2012): Improved performance of simulated Japanese climate with a multi-model ensemble. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**(2), 235–254, doi:10.2151/jmsj.2012-206.
- Kang, S. D. and Kimura, F. (2003): Effect of Tropical SST on the Northwest Pacific Subtropical Anticyclone. Part I: Linear Rossby Wave Propagation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 1225–1242.
- Kawase, H., Sato, T. and Kimura, F. (2005): Numerical experiments on cloud streets

- in the lee of island arcs during cold-air outbreaks. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14823, doi:10.1029/2005GL023256.
- Kawase, H., Takeuchi, Y., Sato, T. and Kimura, F. (2006): Precipitable water around orographically induced convergence line. *SOLA*, **2**, 25–28.
- Kawase, H., Yoshikane, T., Hara, M., Kimura, F., Sato, T. and Ohsawa, S. (2008): Impact of extensive irrigation on the formation of cumulus clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L01806, doi:10.1029/2007GL032435.
- Kimura, F. and Yoshikane, T. (2001): Effects of Soil Moisture of the Asian Continent upon the Baiu Front. Present and Future of Modeling Global Environmental Change, (ed. T. Matsuno and H. Kida), 101–110.
- Lee, S. H. and Kimura, F. (2001): Comparative studies in the local circulation induced by land-use and by topography. *Boundary-Layer Meteorology*, **101**, 157–182.
- Okamura, O. and Kimura, F. (2003): Behavior of GPS-derived precipitable water vapor in the mountain lee after the passage of a cold front. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1746, doi:10.1029/2003GL017572.
- Sasaki, T., Wu, P., Kimura, F., Yoshikane, T. and Liu, J. (2003): Drastic Evening Increase in Precipitable Water Vapor over the Southeastern Tibetan Plateau. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 1273–1281.
- Sasaki, T., Wu, P., Mori, S., Hamada, J.-I., Tauhid, Y. I., Yamanaka, M. D., Sribimawati, T., Yoshikane, T. and Kimura, F. (2004) : Vertical moisture transport above the mixed layer around the mountains in western Sumatra. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L019730, doi:10.1029/2004GL019730.
- Sato, T. and Kimura, F. (2003): A two-dimensional numerical study on diurnal cycle of mountain lee precipitation. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1992–2003.
- Sato, T. and Kimura, F. (2005a): Diurnal cycle of Convective Instability around the Central Mountains in Japan during the Warm Season. *J. Atmos. Sci.*, **62**(5), 1626–1636.
- Sato, T. and Kimura, F. (2005b): Impact of diabatic heating over the Tibetan plateau on subsidence over Northeast Asian arid region. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(3), L05809, doi:10.1029/2004GL022089.
- Sato, T. and Kimura, F. (2007a): How does the Tibetan Plateau affect the transition of Indian monsoon rainfall? *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2006–2015.
- Sato, T., Kimura, F. and Hasegawa, A. S. (2007b): Vegetation and topographic control of cloud activity over arid/semiarid Asia. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24109, doi: 10.1029/2006JD008129.
- Sato, T., Tsujimura, M., Yamanaka, T. Iwasaki, H., Sugimoto, A., Sugita, M., Kimura, F., Davaa, G. and Oyunbaatar, D. (2007c): Water sources in semi-arid Northeast Asia as revealed by field observations and isotope transport model. *J. Geophys. Res.* **112**, D17112, doi:10.1029/2006JD008321.
- Sato, T., Kimura, F. and Kitoh, A. (2007d): Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *J. Hydrol.*, **333**, 144–154, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.07.023.
- Tsunematsu, N., Sato, T., Kimura, F., Kai, K., Kurosaki, Y., Nagai, T., Zhou, H. and Mikami, M. (2005): Extensive dust outbreaks following the morning inversion breakup in the Taklimakan Desert. *J. Geophys. Res.*, **110**,

- D21207, doi:10.1029/2005JD005994.
- Yoshikane, T., Kimura, F. and Emori, S. (2001): Numerical study on the Baiu Front genesis by heating contrast between land and ocean. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 671–686.
- Yoshikane, T. and Kimura, F. (2003): Formation Mechanism of the Simulated SPCZ and Baiu front using a Regional Climate Model. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 2612–2632.
- Yoshikane, T. and Kimura, F. (2005): Climatic features of the water vapor transport around east Asia and rainfall over Japan in June and September. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18712, doi:10.1029/2005GL023665.
- Yoshikane, T. and Kimura, F. (2008): Formation Mechanism of an Intensified Cold Air Mass in the Middle Troposphere over East Siberia in December 2005 Using a Regional Climate Model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 773–785.
- Wu, P., Hamada, J., Mori, S., Tauhid, Y. I., Yamanaka, M. D. and Kimura, F. (2003): Diurnal Variation of Precipitable Water over a Mountainous Area in Sumatra Island. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1107–1115.

## 熱収支・水収支観測資料 － 2011 年 －

Observational Data of Heat Balance and Water Balance in 2011

鈴木 智恵子\*・岩上 翔\*・若月 泰孝\*・山中 勤\*

Chieko SUZUKI\*, Sho IWAGAMI\*, Yasutaka WAKAZUKI\* 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 160 m 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、2011 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 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。2011 年は 1 月 18 日に行った。3 月 11 日には東北地方太平洋沖地震が発生し、地温と地下水位、気圧以外の項目は数日間欠測となった。電源の安定供給など確認後、順次観測を再開したが、ホームページでのリアルタイムデータ公開は数ヶ月間断続的

となった。10 月 15, 16 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。2011 年は 8 月 1 日と 12 月 6 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

本資料の風向は、観測用鉄塔の高度 29.5 m 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、風向のデータは 16 方位に変換し、風向別頻度としてまとめた。この際、風速が 0.2 m/s 以下であれば静穏(calm)と判定した。

#### 2. 風速 : Wind Speed

本資料の風速は、観測用鉄塔に取り付け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

\* 筑波大学陸域環境研究センター

波風速温度計が観測用鉄塔の南東およ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° から 213° のときは南東側の値を、0° から 33° および 213° から 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 年以降は、主風向の成分として北成分が強くなる秋に南東側から北西側へ、南成分が強くなる春に北西側から南東側へと高度 1.6 m の風速計を年 2 回付けかえている。2011 年は 4 月 20 日に南東側へ移動させ、12 月 7 日に北西側へ移動させた。

### 3. 運動量フラックス : Momentum Flux

運動量フラックスは、2. と同じ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、垂直風速の変動成分 から得られる 2 つの変動量の積の平均 の日平均値である。上向きを正としており、単位は  $\text{m}^2/\text{s}^2$  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。

測定高度は地表面から 1.6 m および 29.5 m、観測の詳細は、2. で記述したものと同様である。

### 4. 顕熱フラックス : Sensible Heat Flux

顕熱フラックスは、2. と同じ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 の日平均値である。上向きを正としており単位は  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}/\text{s}$  である。測定高度および欠測処理は運動量フラックスと同様である。詳しくは齊藤・浅沼 (2004) を参照されたい。

測定高度は地表面から 1.6 m および 29.5 m、観測の詳細は、2. で記述したものと同様である。

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

全天短波放射量 (全天日射量) は、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  $\text{W}/\text{m}^2$  である。

### 6. 正味放射量 : Net Radiation

正味放射量は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  $\text{W}/\text{m}^2$  である。

### 7. 地中熱流量 : Soil Heat Flux

地中熱流量は、地中に埋めた熱電対式地中熱流板 (CPR-PHF-01, クリマテック) によって得られた値の日平均値で、測定深度は地表面から 2 cm である。単位は  $\text{W}/\text{m}^2$  である。

### 8. 日照時間 : Sunshine Duration

日照時間は、研究棟の屋上に設置した回転式日照計 (MS-091, 英弘精機) によって得られた値の日積算値で、単位は分である。

### 9. 気温 : Air Temperature

気温は、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値の日平均値である。温湿度計は、2011 年 3 月 29 日と 4 月 7 日に後継機種 (CVS-HMP155D, クリマテック) への交換が行われた。測定高度は地表面から 1.6 m、12.3 m および 29.5 m、単位は  $^{\circ}\text{C}$  である。

### 10. 地温 : Soil Temperature

地温は、地中に埋めた直径 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) によって得られた値の日平均値である。測定深度は地表面から 2 cm (ST-1)、10 cm (ST-2)、50 cm (ST-3) および 100 cm (ST-4) であり、単位は  $^{\circ}\text{C}$  である。センサーは深度 1 m の穴の側壁に地表面と平行に挿入し、埋土した。

#### 11. 地下水位 : Ground Water Level

地下水位は、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 ~ 9 m) と新 2.0 m 深 (GW-4, 同 0.5 ~ 2 m) の 2 種類である。GW-4 はほとんどの時期で水面が 2 m よりも低くなっており、欠測としている。

GW-2 は、8 月 1 日の草刈りにともなうセンサーケーブル断線のため欠測が発生したが、8 月 9 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

露点温度は、観測用鉄塔の北東側に取り付けた通風式温湿度計 (CVS-HMP45D, 4 月 7 日以降は CVS-HMP155D, 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。測定高度は気温と同様で、単位は℃である。露点温度  $T_d$  [℃] は、温湿度センサーの温度  $T$  [℃]・相対湿度  $RH$  [%] から、以下のように求める。

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

ここで、 $e$  は水蒸気圧 [hPa] であり、

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

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

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

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

各高度の相対湿度センサーは、3 月 29 日と 4 月 7 日に温湿度計の後継機種 (CVS-HMP155D, クリマテック) への交換が行われた。

#### 13. 降水量 : Precipitation

降水量は、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) によって得られた値の日積算値で、単位は mm (水深換算) である。

#### 14. 気圧 : Atmospheric Pressure

気圧は、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) によって得られた値の日平均値で、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 2011 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 TERC 熱収支・水収支データベース (<http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/databasehtml/database/>) に保管されている。2003 年 5 月 1 日以降は、10 秒平均値 (あるいは瞬時値) および 30 分平均値も保管してある。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.

鈴木智恵子・岩上 翔・山中 勤 (2011): 熱収支・水収支観測資料－2010 年－。筑波大学陸域環境研究センター報告, **12**, 55-80.

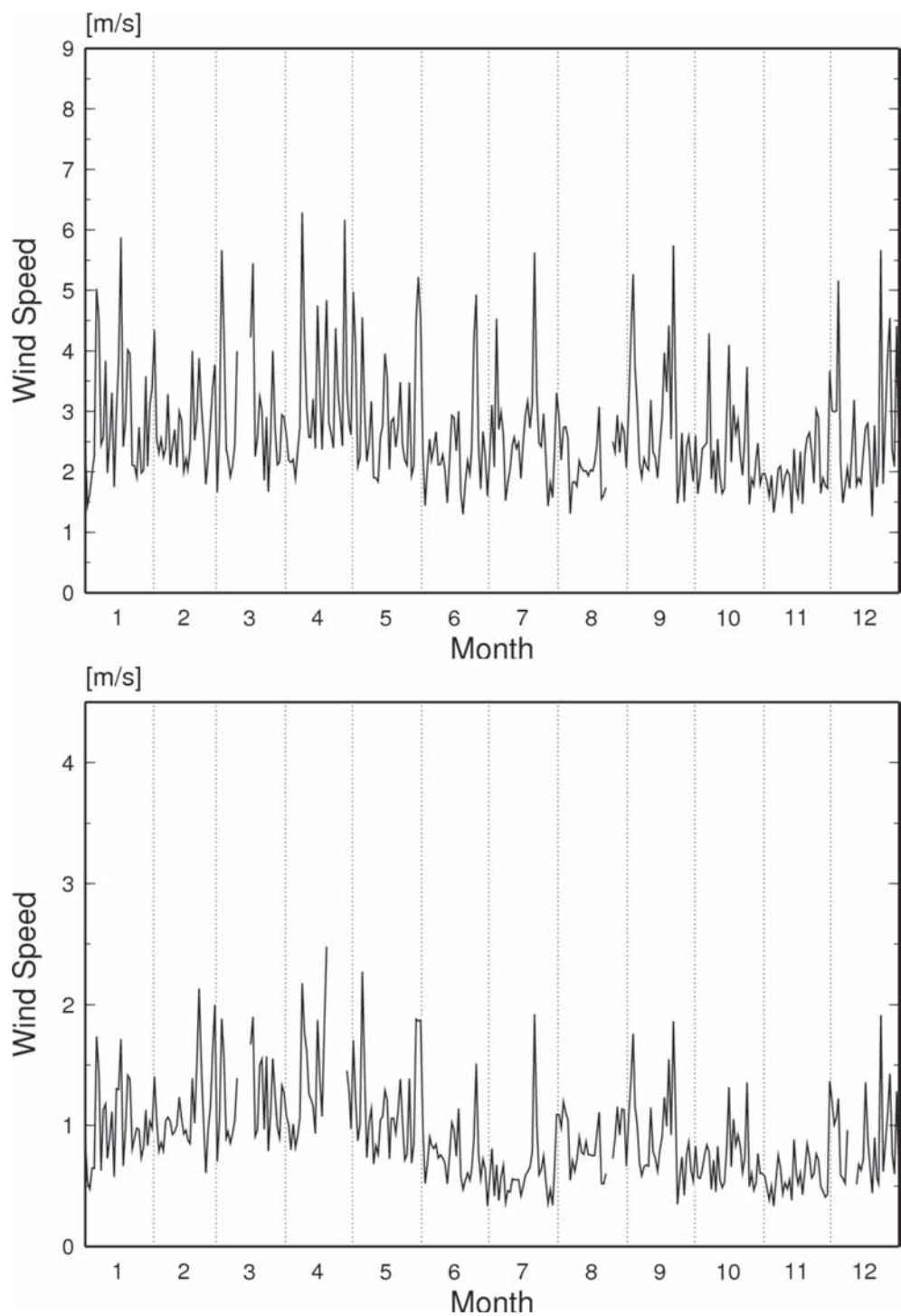
鳥谷 均・川村隆一・嶋田 純・谷口真人・西本貴久 (1989): 気象日報作成装置新システムについて。筑波大学水理実験センター報告, **13**, 147-158.

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.

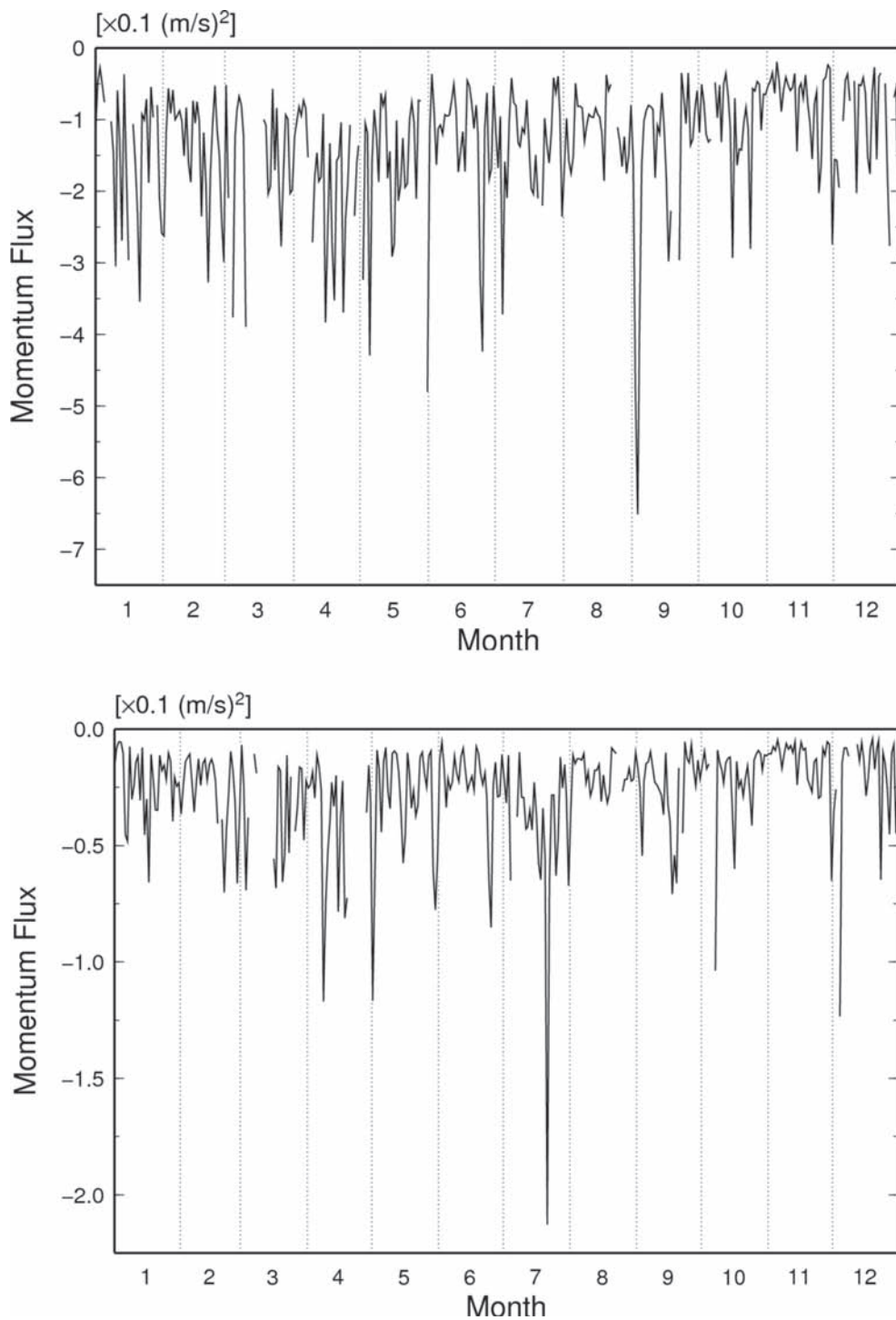
## 気象・水文表

### 表の見方

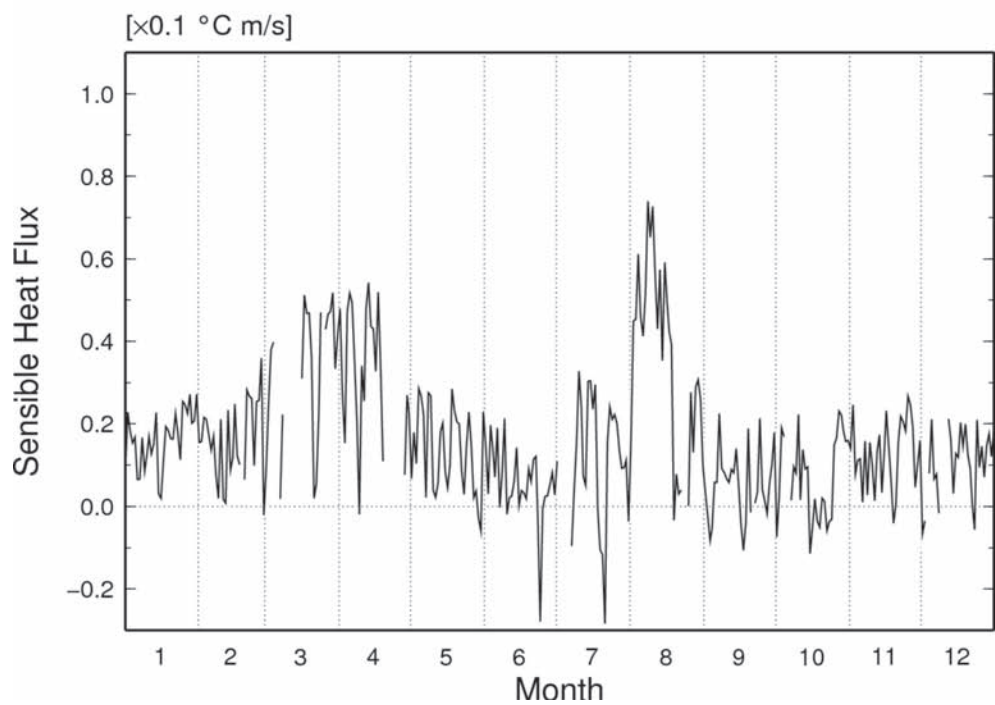
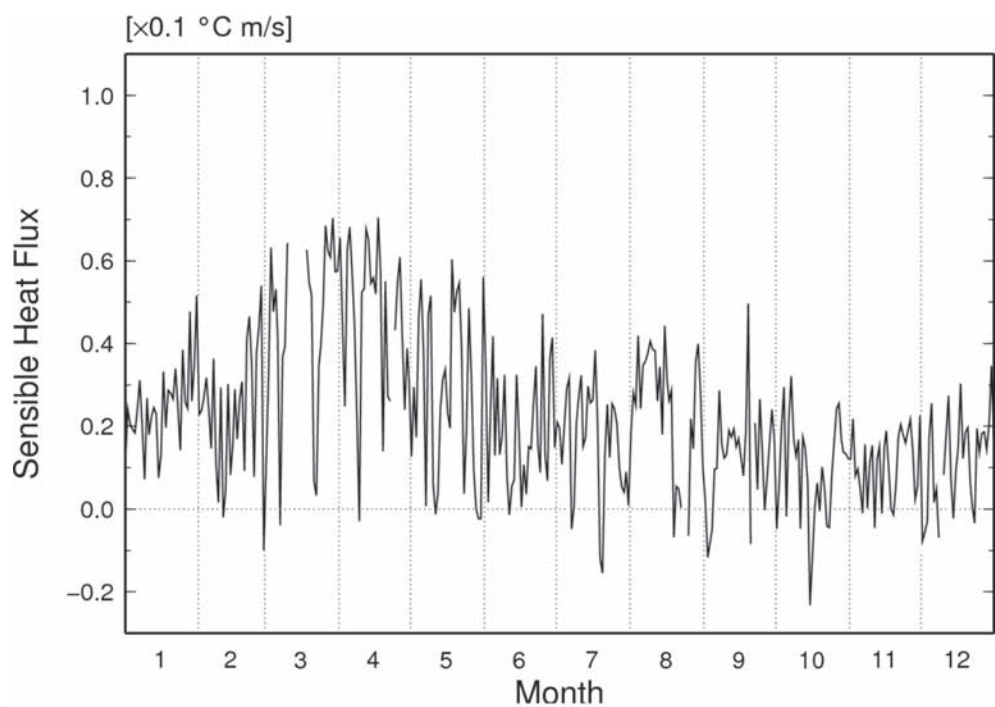
- (1) ITEM は観測要素, INSTRUMENT は観測測器を示す.
- (2) UNIT に関して, MONTHLY FREQUENCY は月毎の頻度を示す.
- (3) 表の横軸は月, 縦軸は日である.
- (4) 1 日 24 データ中 (データ識別 160), 20 個未満の日は欠測「\*\*\*」,  
データが 20 個以上 24 個未満は準完全値「\*」とする.  
「・・・」は対応する日がないことを示す.
- (5) CALM は静穏, NO DATA は欠測頻度を示す.
- (6) MEAN は月平均値, TOTAL は月積算値を示す.



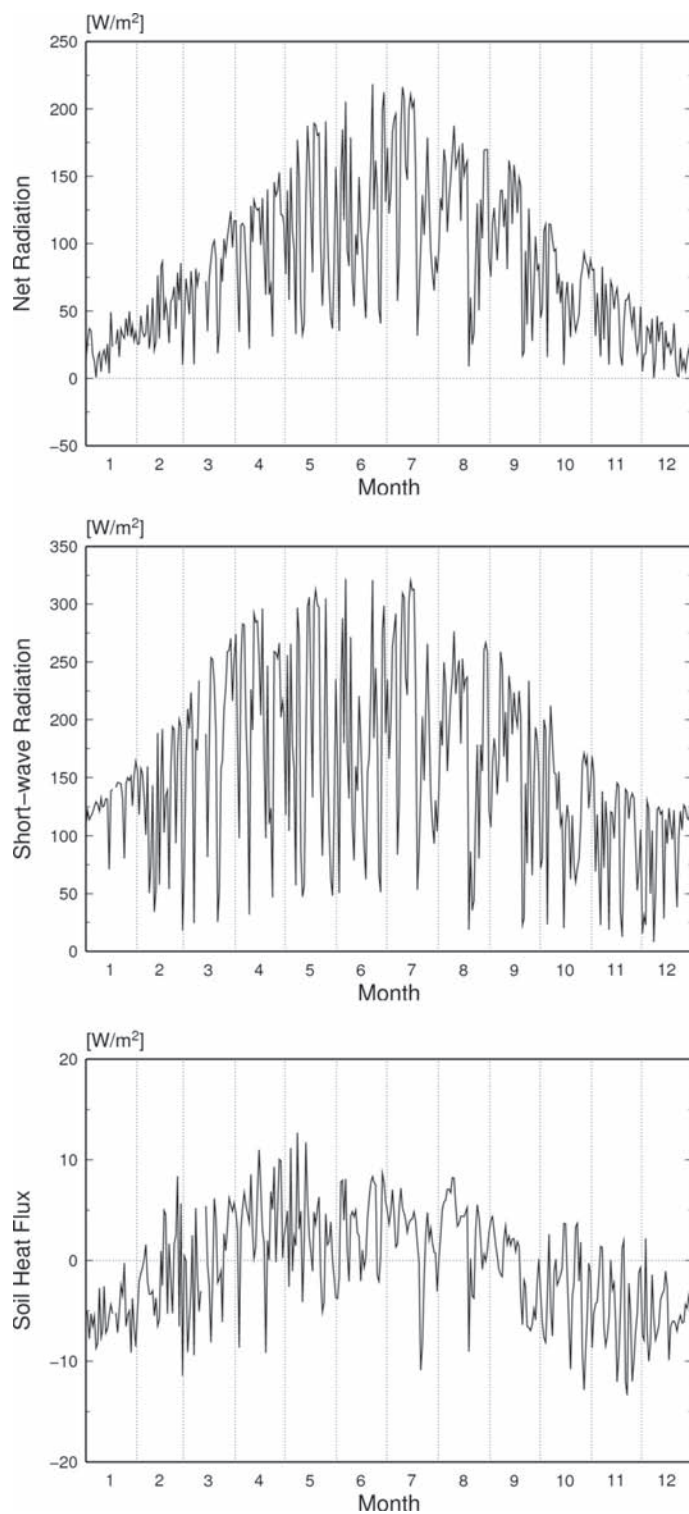
第 1 図 測定高度 29.5 m（上図），および 1.6 m（下図）における風速の日平均値の季節変化



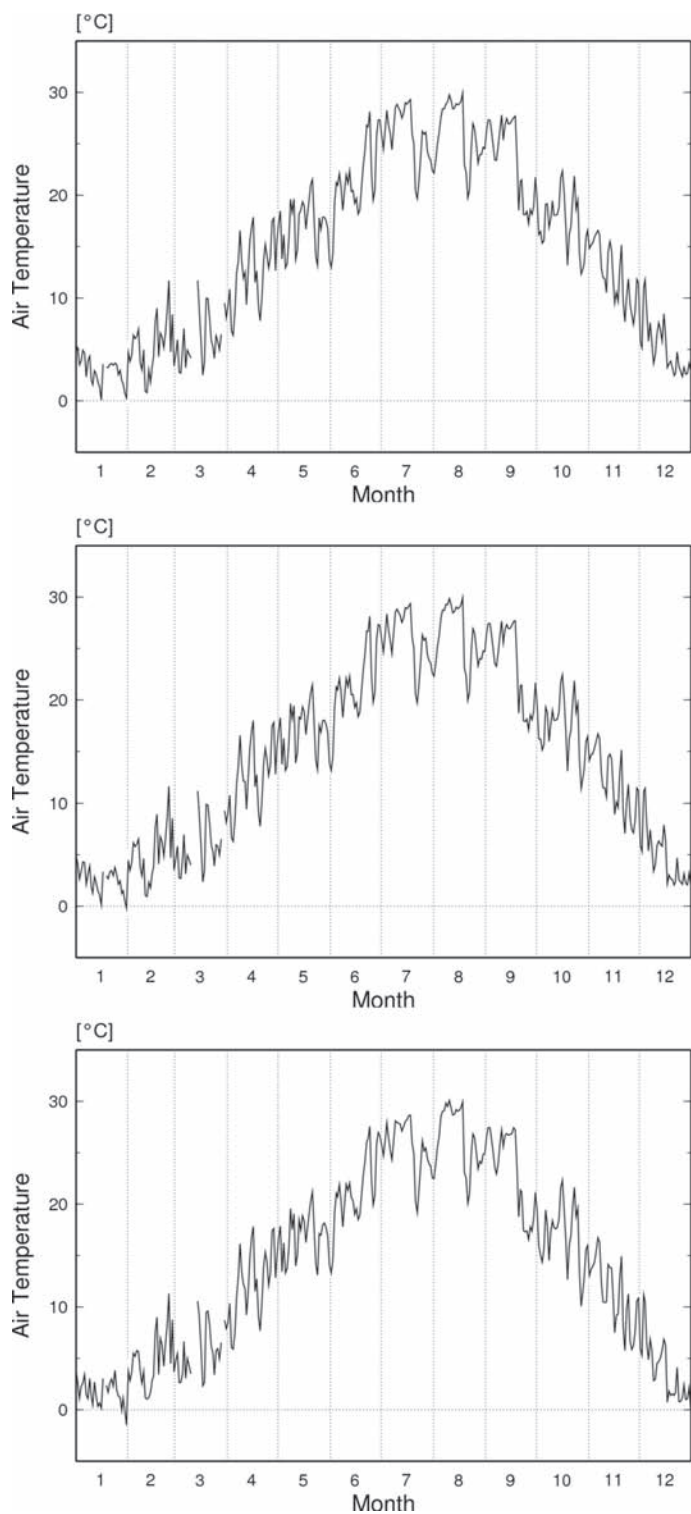
第2図 測定高度 29.5 m（上図），および 1.6 m（下図）における運動量フラックスの日平均値の季節変化



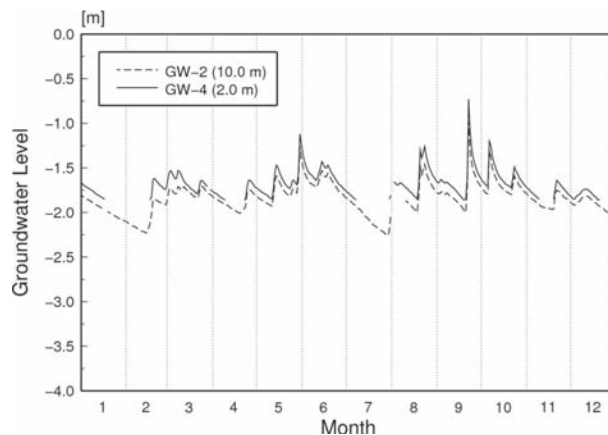
第3図 測定高度 29.5 m（上図），および 1.6 m（下図）における顕熱フラックスの日平均値の季節変化



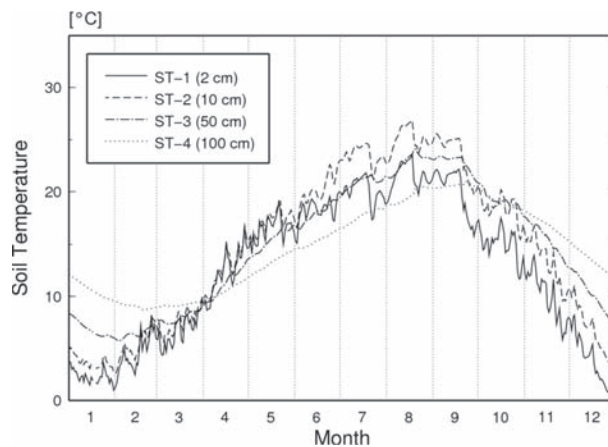
第4図 正味放射量（上図），全天短波放射量（中図），および地中熱流量（下図）の日平均値の季節変化



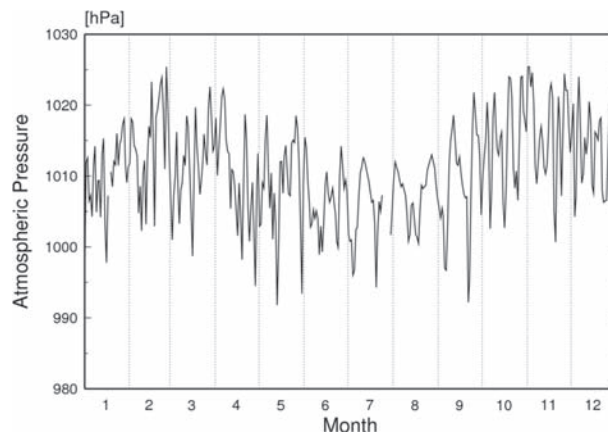
第 5 図 測定高度 29.5 m (上図), 12.3 m (中図), および 1.6 m (下図) における気温の日平均値の季節変化



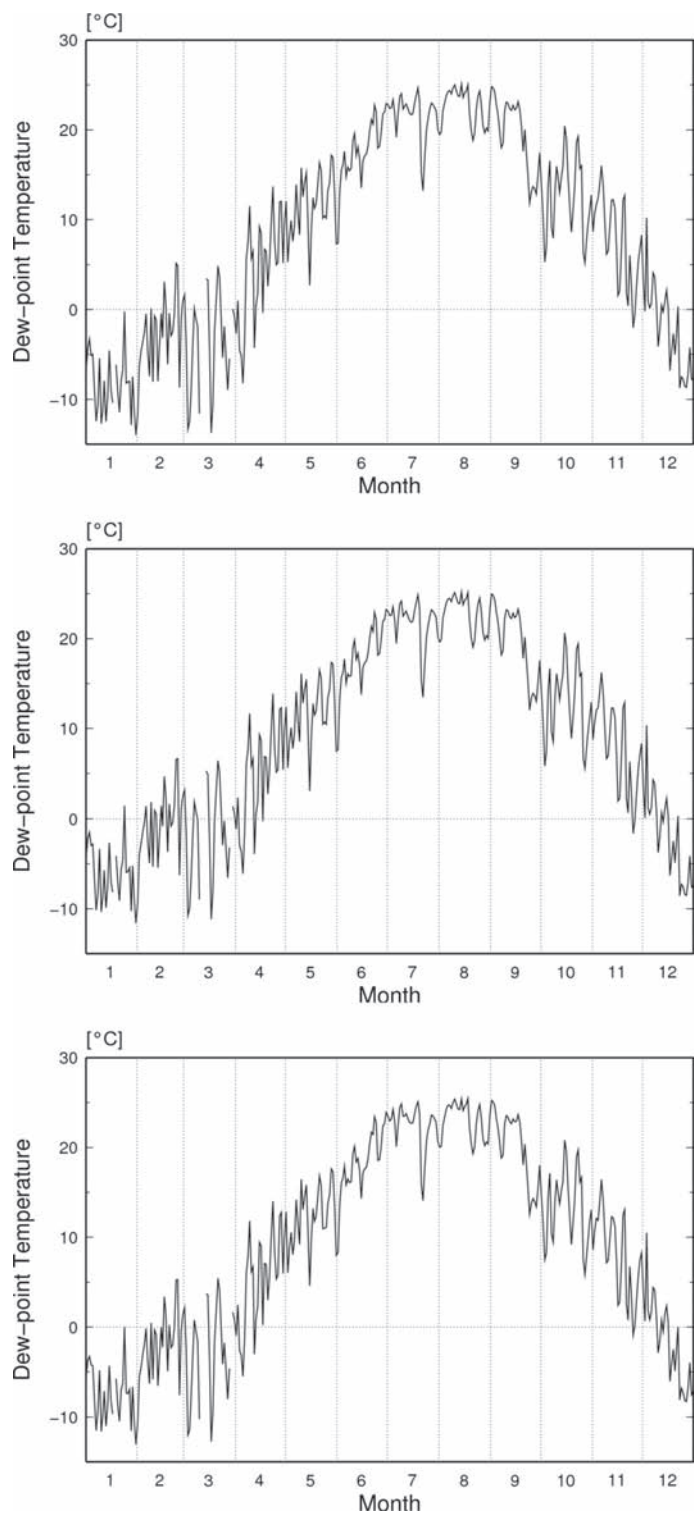
第6図 2 深度（10 m，新 2.0 m）の観測井における地下水位の日平均値の季節変化



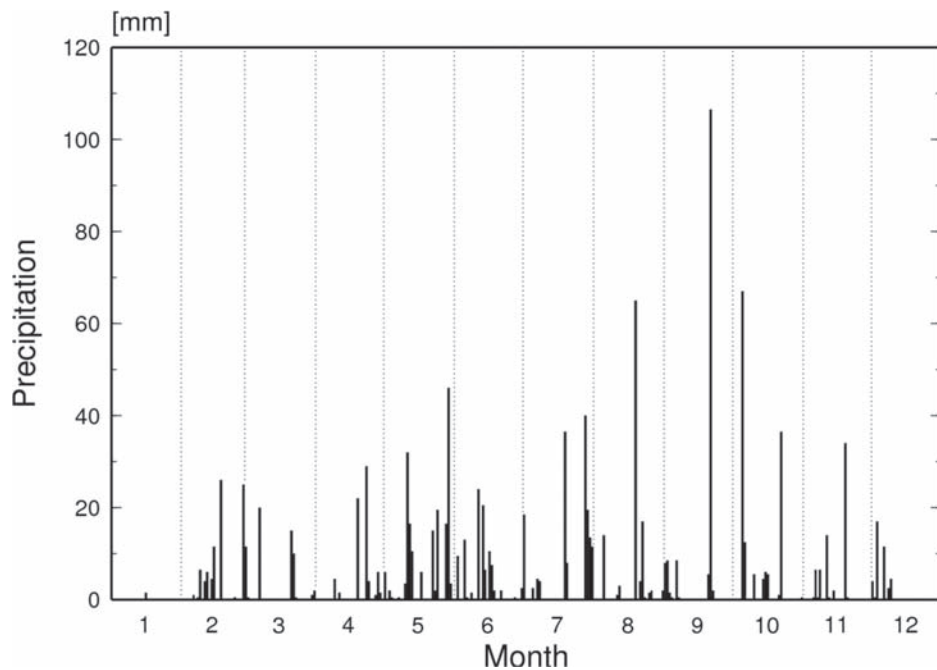
第7図 4 深度（2 cm，10 cm，50 cm，100 cm）における地温の日平均値の季節変化



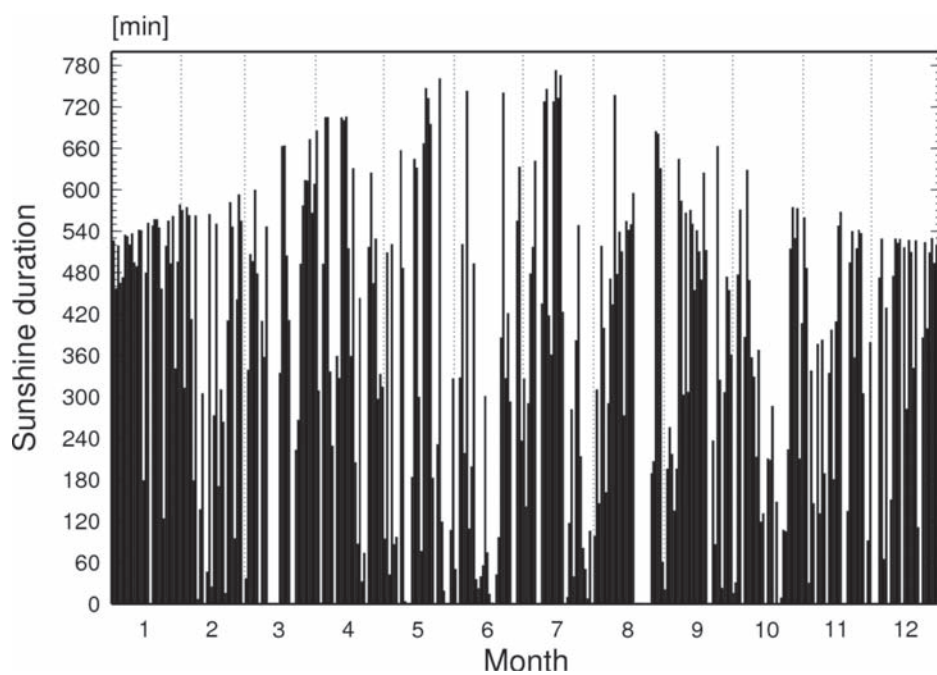
第8図 気圧の日平均値の季節変化



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



第 10 図 日降水量の季節変化



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 2011

| MONTH   | 1   | 2  | 3  | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  |
|---------|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| N       | 24  | 16 | 26 | 12  | 31  | 9   | 20  | 17  | 21  | 28  | 21  | 27  |
| NNE     | 17  | 28 | 17 | 15  | 16  | 13  | 18  | 24  | 10  | 32  | 13  | 16  |
| NE      | 23  | 46 | 39 | 34  | 44  | 37  | 61  | 52  | 33  | 82  | 23  | 54  |
| ENE     | 45  | 83 | 74 | 96  | 146 | 114 | 75  | 172 | 115 | 131 | 95  | 57  |
| E       | 33  | 57 | 73 | 91  | 118 | 142 | 67  | 114 | 124 | 78  | 85  | 41  |
| ESE     | 21  | 32 | 19 | 43  | 39  | 70  | 67  | 47  | 74  | 33  | 53  | 18  |
| SE      | 12  | 20 | 13 | 31  | 28  | 53  | 24  | 23  | 50  | 27  | 16  | 14  |
| SSE     | 16  | 20 | 16 | 38  | 33  | 44  | 33  | 35  | 55  | 13  | 16  | 8   |
| S       | 9   | 12 | 20 | 48  | 55  | 63  | 94  | 41  | 43  | 22  | 11  | 11  |
| SSW     | 18  | 22 | 22 | 111 | 76  | 59  | 141 | 39  | 72  | 41  | 17  | 8   |
| SW      | 20  | 12 | 17 | 32  | 25  | 34  | 36  | 19  | 18  | 19  | 12  | 24  |
| WSW     | 38  | 19 | 24 | 28  | 20  | 13  | 16  | 25  | 17  | 22  | 24  | 36  |
| W       | 97  | 42 | 55 | 24  | 19  | 11  | 21  | 15  | 11  | 22  | 49  | 76  |
| WNW     | 192 | 84 | 96 | 47  | 27  | 17  | 17  | 21  | 11  | 53  | 118 | 159 |
| NW      | 126 | 97 | 75 | 46  | 29  | 25  | 30  | 37  | 42  | 90  | 110 | 140 |
| NNW     | 53  | 82 | 63 | 24  | 38  | 16  | 24  | 33  | 24  | 51  | 57  | 53  |
| NO DATA |     |    | 95 |     |     |     |     | 30  |     |     |     | 2   |

ITEM WIND SPEED (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)  
 UNIT (m/s)  
 YEAR 2011

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

ITEM WIND SPEED (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)  
 UNIT (m/s)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1   | 2   | 3     | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12    |
|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 1     | 2.4 | 4.3 | 1.7   | 2.6 | 5.0 | 2.3 | 2.3 | 2.9 | 3.1 | 2.6 | 2.0 | 3.0   |
| 2     | 1.4 | 2.5 | 2.7   | 2.2 | 4.1 | 1.4 | 3.1 | 2.2 | 4.2 | 1.6 | 1.8 | 3.0   |
| 3     | 1.6 | 2.3 | 5.7   | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 5.3 | 1.9 | 1.6 | 3.0   |
| 4     | 2.0 | 2.5 | 4.3   | 2.2 | 2.2 | 2.5 | 4.5 | 2.7 | 3.7 | 2.4 | 1.9 | 5.2   |
| 5     | 2.3 | 2.2 | 2.4   | 1.9 | 4.6 | 2.2 | 2.7 | 2.6 | 3.1 | 2.4 | 1.3 | 2.1   |
| 6     | 5.0 | 2.4 | 2.2   | 2.3 | 3.0 | 2.4 | 3.0 | 1.3 | 2.2 | 2.5 | 1.6 | 1.5   |
| 7     | 4.5 | 3.3 | 1.9   | 2.8 | 2.2 | 2.7 | 2.6 | 1.8 | 1.9 | 4.3 | 2.0 | * 1.8 |
| 8     | 2.4 | 2.1 | 2.1   | 6.3 | 2.5 | 2.1 | 1.5 | 1.8 | 2.2 | 1.9 | 2.1 | 2.1   |
| 9     | 2.6 | 2.4 | 2.4   | 4.2 | 3.2 | 2.1 | 1.8 | 1.8 | 2.1 | 2.4 | 1.7 | 1.7   |
| 10    | 3.8 | 2.7 | 4.0   | 3.1 | 1.9 | 2.3 | 2.0 | 2.2 | 2.0 | 1.6 | 1.9 | 2.3   |
| 11    | 2.0 | 2.1 | ***   | 2.6 | 1.9 | 2.0 | 2.4 | 2.1 | 3.2 | 2.5 | 2.0 | 3.2   |
| 12    | 2.5 | 3.0 | ***   | 2.6 | 1.8 | 1.5 | 2.6 | 2.0 | 2.3 | 1.9 | 1.9 | 1.8   |
| 13    | 3.3 | 2.9 | ***   | 3.2 | 2.6 | 2.2 | 2.4 | 2.0 | 2.2 | 1.6 | 1.3 | 1.9   |
| 14    | 1.7 | 2.0 | ***   | 2.4 | 2.8 | 2.9 | 2.5 | 1.9 | 1.9 | 1.7 | 2.4 | 1.8   |
| 15    | 3.0 | 2.2 | ***   | 4.7 | 4.0 | 2.9 | 1.9 | 2.0 | 2.4 | 2.9 | 1.7 | 2.3   |
| 16    | 3.8 | 2.0 | 4.2   | 3.4 | 3.6 | 2.3 | 2.5 | 2.0 | 2.9 | 4.1 | 1.6 | 2.7   |
| 17    | 5.9 | 2.4 | 5.4   | 2.4 | 2.0 | 3.0 | 2.9 | 2.1 | 4.0 | 2.2 | 2.3 | 2.8   |
| 18    | 2.4 | 4.0 | 2.3   | 3.6 | 2.8 | 1.6 | 3.2 | 2.4 | 3.3 | 3.1 | 1.5 | 2.2   |
| 19    | 2.8 | 2.5 | 2.6   | 4.8 | 2.9 | 1.3 | 2.7 | 3.1 | 4.4 | 2.6 | 2.3 | 1.3   |
| 20    | 4.0 | 2.9 | 3.2   | 2.8 | 2.4 | 1.8 | 3.1 | 1.6 | 2.5 | 2.9 | 2.6 | 2.8   |
| 21    | 3.9 | 3.9 | 3.0   | 2.6 | 2.7 | 2.2 | 5.6 | 1.6 | 5.7 | 2.3 | 2.7 | 1.7   |
| 22    | 2.1 | 3.1 | 1.9   | 2.4 | 3.5 | 2.0 | 3.3 | 1.7 | 3.7 | 1.9 | 2.3 | 2.1   |
| 23    | 2.1 | 2.6 | 2.9   | 4.4 | 2.4 | 2.4 | 2.5 | *** | 1.5 | 2.6 | 1.8 | 5.7   |
| 24    | 1.9 | 1.8 | 1.7   | 3.4 | 2.2 | 4.2 | 2.4 | *** | 1.8 | 3.7 | 3.0 | 1.8   |
| 25    | 2.7 | 2.2 | 2.5   | 2.9 | 2.1 | 4.9 | 3.0 | 2.5 | 2.6 | 1.5 | 2.9 | 2.9   |
| 26    | 2.0 | 2.8 | 4.0   | 2.4 | 3.5 | 2.5 | 2.3 | 2.3 | 1.5 | 1.9 | 1.6 | 3.9   |
| 27    | 2.0 | 3.4 | 2.7   | 6.2 | 1.9 | 1.7 | 1.4 | 2.9 | 2.4 | 1.8 | 1.9 | 4.5   |
| 28    | 3.6 | 3.8 | 2.1   | 3.4 | 2.1 | 2.7 | 1.8 | 2.3 | 2.6 | 2.2 | 1.8 | 2.4   |
| 29    | 2.1 | *** | * 2.2 | 2.8 | 4.5 | 2.3 | 1.6 | 2.8 | 2.2 | 2.5 | 1.7 | 2.1   |
| 30    | 3.1 | *** | 2.9   | 2.6 | 5.2 | 1.6 | 2.3 | 2.7 | 1.8 | 1.8 | 3.7 | 4.4   |
| 31    | 3.4 | *** | 2.9   | *** | 4.5 | *** | 3.3 | 2.1 | *** | 2.0 | *** | 2.2   |
| MEAN  | 2.9 | 2.7 | 2.9   | 3.2 | 3.0 | 2.3 | 2.6 | 2.2 | 2.8 | 2.4 | 2.0 | 2.6   |

ITEM MOMENTUM FLUX (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)  
 UNIT  $\times 0.1 \text{ (m/s)}^2$   
 YEAR 2011

| MONTH | 1      | 2        | 3        | 4        | 5      | 6      | 7        | 8      | 9      | 10       | 11     | 12       |
|-------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|----------|
| 1     | -0.163 | -0.366   | -0.068   | -0.253   | -1.166 | -0.129 | * -0.214 | -0.345 | -0.169 | -0.156   | -0.105 | * -0.356 |
| 2     | -0.081 | -0.245   | * -0.244 | -0.238   | -0.629 | -0.057 | * -0.317 | -0.111 | -0.254 | -0.096   | -0.107 | -0.259   |
| 3     | -0.055 | -0.140   | * -0.692 | -0.183   | -0.090 | -0.162 | * -0.113 | -0.149 | -0.544 | -0.171   | -0.075 | ***      |
| 4     | -0.056 | -0.122   | * -0.381 | -0.296   | -0.172 | -0.335 | -0.650   | -0.128 | -0.225 | -0.150   | -0.091 | -1.234   |
| 5     | -0.105 | -0.106   | ***      | -0.110   | -0.443 | -0.211 | ***      | -0.128 | -0.148 | ***      | -0.046 | -0.146   |
| 6     | -0.453 | -0.226   | ***      | -0.164   | -0.143 | -0.256 | ***      | -0.133 | -0.140 | ***      | -0.095 | -0.081   |
| 7     | -0.481 | -0.357   | -0.106   | -0.265   | -0.078 | -0.226 | -0.376   | -0.105 | -0.098 | -1.037   | -0.169 | * -0.081 |
| 8     | -0.075 | -0.230   | -0.190   | -1.170   | -0.266 | -0.116 | -0.100   | -0.233 | -0.164 | -0.090   | -0.107 | -0.116   |
| 9     | -0.302 | -0.128   | ***      | -0.751   | -0.342 | -0.190 | -0.292   | -0.184 | -0.229 | -0.145   | -0.062 | ***      |
| 10    | -0.241 | -0.241   | -0.381   | -0.527   | -0.105 | -0.225 | -0.294   | -0.287 | -0.240 | -0.178   | -0.086 | ***      |
| 11    | -0.142 | -0.149   | ***      | -0.390   | -0.094 | -0.119 | -0.429   | -0.252 | -0.260 | -0.232   | -0.071 | ***      |
| 12    | -0.117 | -0.129   | ***      | -0.228   | -0.107 | -0.083 | -0.420   | -0.177 | -0.283 | -0.145   | -0.101 | -0.066   |
| 13    | -0.306 | * -0.221 | ***      | -0.331   | -0.187 | -0.179 | -0.349   | -0.176 | -0.367 | -0.125   | -0.055 | -0.139   |
| 14    | -0.079 | * -0.152 | ***      | -0.199   | -0.348 | -0.262 | -0.434   | -0.151 | -0.101 | -0.120   | -0.240 | -0.059   |
| 15    | -0.453 | * -0.130 | ***      | -0.784   | -0.575 | -0.231 | -0.229   | -0.311 | -0.320 | * -0.349 | -0.106 | -0.134   |
| 16    | -0.300 | * -0.154 | -0.556   | -0.394   | -0.454 | -0.203 | -0.368   | -0.197 | -0.400 | * -0.600 | -0.057 | -0.286   |
| 17    | -0.658 | -0.221   | -0.683   | -0.224   | -0.101 | -0.263 | -0.576   | -0.263 | -0.709 | -0.139   | -0.090 | -0.213   |
| 18    | -0.108 | -0.405   | -0.162   | -0.812   | -0.177 | -0.075 | -0.646   | -0.317 | -0.541 | -0.250   | -0.083 | -0.080   |
| 19    | -0.214 | ***      | -0.179   | -0.726   | -0.340 | -0.103 | -0.339   | -0.273 | -0.662 | -0.222   | -0.215 | -0.042   |
| 20    | -0.346 | -0.388   | -0.657   | ***      | -0.264 | -0.191 | -0.555   | -0.080 | -0.167 | -0.288   | -0.241 | -0.172   |
| 21    | -0.349 | -0.701   | -0.538   | ***      | -0.373 | -0.238 | -2.128   | -0.094 | ***    | -0.210   | -0.270 | -0.081   |
| 22    | -0.113 | -0.434   | -0.112   | ***      | -0.329 | -0.188 | -0.646   | -0.105 | -0.447 | * -0.157 | -0.140 | -0.048   |
| 23    | -0.179 | -0.284   | -0.531   | ***      | -0.120 | -0.286 | -0.284   | ***    | -0.054 | -0.268   | -0.128 | -0.647   |
| 24    | -0.155 | -0.095   | * -0.204 | ***      | -0.099 | -0.639 | -0.284   | ***    | -0.127 | -0.414   | -0.296 | -0.102   |
| 25    | -0.217 | -0.177   | ***      | ***      | -0.190 | -0.851 | -0.630   | -0.268 | -0.144 | -0.133   | -0.288 | -0.148   |
| 26    | -0.104 | -0.312   | -0.439   | ***      | -0.249 | -0.239 | -0.465   | -0.215 | -0.066 | -0.107   | -0.083 | -0.257   |
| 27    | -0.136 | -0.662   | -0.339   | ***      | -0.114 | -0.142 | -0.120   | -0.216 | -0.172 | -0.092   | -0.112 | -0.452   |
| 28    | -0.395 | -0.386   | -0.163   | * -0.359 | -0.094 | -0.291 | -0.253   | -0.169 | -0.244 | -0.107   | -0.054 | -0.103   |
| 29    | -0.207 | ***      | * -0.171 | -0.155   | -0.608 | -0.286 | -0.152   | -0.223 | -0.133 | -0.176   | -0.065 | -0.066   |
| 30    | -0.245 | ***      | -0.476   | -0.295   | -0.777 | -0.109 | -0.291   | -0.215 | -0.213 | -0.110   | -0.650 | -0.448   |
| 31    | -0.231 | ***      | -0.222   | ***      | -0.559 | ***    | -0.674   | -0.100 | ***    | -0.114   | ***    | -0.074   |
| MEAN  | -0.228 | -0.265   | -0.341   | -0.402   | -0.310 | -0.229 | -0.436   | -0.193 | -0.263 | -0.220   | -0.143 | -0.218   |

ITEM MOMENTUM FLUX (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)  
 UNIT  $\times 0.1 \text{ (m/s)}^2$   
 YEAR 2011

| MONTH | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7      | 8        | 9        | 10       | 11       | 12       |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1     | -1.175   | * -2.625 | -0.517   | -1.234   | ***      | -1.165   | -1.195 | -1.663   | -1.593   | -1.184   | -0.534   | * -1.557 |
| 2     | -0.485   | -1.183   | -2.095   | -1.023   | * -3.240 | -0.363   | -1.673 | -0.980   | * -4.846 | -0.508   | -0.468   | -1.571   |
| 3     | -0.276   | -0.561   | ***      | -0.820   | -1.049   | -0.898   | -0.959 | -1.577   | * -6.514 | -0.767   | -0.346   | * -1.950 |
| 4     | -0.504   | -0.910   | * -3.761 | -0.942   | -1.188   | -1.633   | -3.720 | -1.753   | -3.924   | -1.206   | -0.630   | ***      |
| 5     | -0.758   | -0.588   | -1.242   | -0.730   | -4.296   | -1.128   | -1.588 | -1.514   | -1.629   | -1.310   | -0.194   | -1.018   |
| 6     | ***      | -1.000   | -0.883   | -0.845   | -1.612   | -1.076   | -2.092 | -0.493   | -1.016   | -1.273   | -0.454   | -0.449   |
| 7     | ***      | * -0.944 | -0.674   | -1.526   | -0.862   | -1.202   | -1.000 | -0.813   | -0.878   | ***      | -0.890   | * -0.363 |
| 8     | -1.025   | -0.875   | -0.796   | ***      | -1.221   | -0.934   | -0.420 | -0.815   | -0.800   | -0.484   | -0.586   | -0.739   |
| 9     | -1.461   | -1.021   | -1.223   | * -2.714 | -1.866   | -0.947   | -0.761 | -0.839   | -0.817   | -0.977   | -0.405   | ***      |
| 10    | -3.049   | -1.507   | * -3.894 | -1.798   | -0.633   | -0.940   | -0.809 | -1.309   | -0.858   | -0.519   | -0.515   | -0.464   |
| 11    | -0.596   | * -0.832 | ***      | -1.465   | -0.809   | * -0.736 | -1.334 | -1.082   | -1.812   | -1.310   | -0.596   | -2.027   |
| 12    | -1.278   | -1.609   | ***      | -1.863   | * -0.657 | -0.507   | -1.376 | -0.928   | -1.082   | -0.511   | -0.552   | -0.510   |
| 13    | * -2.686 | * -1.872 | ***      | -1.809   | -1.820   | -0.868   | -1.116 | -0.961   | -1.193   | -0.354   | -0.359   | -0.527   |
| 14    | -0.369   | -0.736   | ***      | -0.919   | -1.443   | -1.733   | -1.186 | -0.969   | -0.624   | -0.664   | -1.445   | -0.415   |
| 15    | -1.736   | -1.048   | ***      | -3.834   | -2.910   | -1.449   | -0.728 | -0.838   | -1.108   | * -1.113 | -0.555   | -0.635   |
| 16    | * -2.963 | -0.753   | ***      | -2.562   | -2.740   | -1.171   | -1.329 | -0.930   | -1.821   | * -2.931 | -0.491   | -1.523   |
| 17    | ***      | -1.019   | ***      | -1.330   | -1.014   | -1.722   | -1.960 | -0.964   | -2.979   | -0.703   | -0.697   | * -1.758 |
| 18    | -1.062   | * -2.348 | -1.000   | -2.749   | -2.131   | -0.459   | -2.040 | -1.194   | -2.276   | -1.639   | -0.374   | -0.621   |
| 19    | -1.597   | -1.182   | -1.074   | * -3.524 | -1.911   | -0.530   | -1.495 | -1.855   | ***      | -1.414   | * -0.771 | -0.271   |
| 20    | * -2.312 | -1.915   | -2.036   | -1.578   | -1.256   | -0.775   | -2.098 | -0.374   | -1.428   | -1.428   | -1.047   | -1.556   |
| 21    | -3.546   | -3.274   | -1.932   | -1.516   | -1.945   | -1.124   | ***    | * -0.593 | ***      | -1.049   | -1.553   | -0.399   |
| 22    | -0.922   | -1.724   | -0.568   | -1.035   | * -1.894 | -0.797   | -2.201 | -0.506   | -2.962   | -0.829   | -0.781   | -0.348   |
| 23    | -1.005   | -1.059   | -1.705   | -3.696   | -1.007   | -1.214   | -0.979 | ***      | -0.351   | -1.130   | -0.610   | ***      |
| 24    | -0.710   | -0.525   | -0.839   | -2.366   | * -0.754 | -3.231   | -1.357 | ***      | -0.691   | -2.809   | -2.027   | -0.495   |
| 25    | * -1.884 | -1.153   | -1.884   | -1.895   | -1.029   | -4.237   | -1.607 | -1.109   | -1.056   | -0.566   | -1.634   | -1.763   |
| 26    | -0.543   | -1.503   | * -2.771 | -1.078   | -2.109   | -1.136   | -1.182 | -1.312   | -0.352   | -0.601   | -0.452   | -2.760   |
| 27    | -0.968   | -2.399   | -1.778   | ***      | -0.732   | -0.623   | -0.413 | -1.659   | -1.357   | -0.470   | -0.412   | ***      |
| 28    | ***      | -2.987   | -0.932   | -2.341   | -0.736   | -1.832   | -0.626 | -1.237   | -1.278   | -0.505   | -0.237   | -0.688   |
| 29    | -0.801   | ...      | * -0.991 | -1.604   | ***      | -1.688   | -0.393 | -1.749   | -0.851   | -1.153   | -0.288   | -0.554   |
| 30    | -2.084   | ...      | -2.030   | -1.361   | ***      | -0.527   | -0.921 | -1.492   | -0.593   | -0.642   | -2.743   | * -2.934 |
| 31    | -2.585   | ...      | -1.984   | ...      | -4.800   | ...      | -2.356 | -0.794   | ...      | -0.653   | ...      | -0.511   |
| MEAN  | -1.421   | -1.398   | -1.592   | -1.791   | -1.702   | -1.221   | -1.364 | -1.114   | -1.667   | -1.023   | -0.755   | -1.052   |

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)  
 UNIT  $\times 0.1 \text{ (}^\circ\text{C m/s)}$   
 YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2       | 3       | 4       | 5      | 6      | 7       | 8      | 9      | 10       | 11     | 12       |
|-------|-------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|----------|--------|----------|
| 1     | 0.087 | 0.155   | 0.092   | 0.479   | 0.068  | 0.146  | * 0.110 | 0.164  | 0.035  | -0.073   | 0.140  | * -0.070 |
| 2     | 0.229 | 0.157   | * 0.250 | 0.271   | 0.180  | 0.031  | ***     | 0.449  | -0.024 | 0.023    | 0.246  | -0.035   |
| 3     | 0.182 | 0.216   | * 0.380 | 0.154   | 0.104  | 0.197  | ***     | 0.454  | -0.083 | 0.190    | 0.078  | ***      |
| 4     | 0.154 | 0.211   | * 0.400 | 0.472   | 0.286  | 0.133  | ***     | 0.611  | -0.053 | 0.169    | 0.111  | 0.081    |
| 5     | 0.168 | 0.173   | ***     | 0.517   | 0.268  | 0.071  | ***     | 0.460  | 0.058  | ***      | 0.115  | 0.211    |
| 6     | 0.065 | 0.136   | ***     | 0.493   | 0.224  | 0.191  | ***     | 0.413  | 0.058  | ***      | 0.010  | 0.067    |
| 7     | 0.066 | 0.170   | 0.019   | 0.356   | 0.022  | -0.002 | -0.096  | 0.516  | 0.225  | 0.015    | 0.158  | * 0.080  |
| 8     | 0.167 | 0.076   | 0.222   | 0.207   | 0.275  | 0.080  | 0.038   | 0.739  | 0.091  | 0.097    | 0.028  | -0.016   |
| 9     | 0.085 | 0.019   | ***     | -0.019  | 0.269  | 0.214  | 0.151   | 0.651  | 0.083  | 0.080    | 0.155  | ***      |
| 10    | 0.127 | 0.211   | 0.412   | 0.341   | 0.040  | -0.018 | 0.328   | 0.726  | 0.068  | 0.222    | 0.100  | ***      |
| 11    | 0.169 | 0.018   | ***     | 0.256   | 0.022  | 0.020  | 0.244   | 0.564  | 0.058  | 0.017    | 0.013  | ***      |
| 12    | 0.127 | 0.008   | ***     | 0.480   | 0.056  | 0.026  | 0.073   | 0.431  | 0.090  | 0.137    | 0.132  | 0.213    |
| 13    | 0.152 | * 0.230 | ***     | 0.543   | 0.181  | 0.063  | 0.051   | 0.574  | 0.081  | 0.091    | 0.174  | 0.159    |
| 14    | 0.227 | * 0.090 | ***     | 0.436   | 0.201  | 0.142  | 0.303   | 0.354  | 0.139  | 0.095    | 0.034  | 0.031    |
| 15    | 0.030 | * 0.120 | ***     | 0.430   | 0.084  | 0.002  | 0.304   | 0.591  | 0.051  | * -0.110 | 0.136  | 0.128    |
| 16    | 0.020 | * 0.250 | 0.310   | 0.328   | 0.045  | 0.039  | 0.235   | 0.492  | -0.044 | * -0.050 | 0.232  | 0.119    |
| 17    | 0.111 | 0.122   | 0.512   | 0.519   | 0.101  | 0.032  | 0.295   | 0.425  | -0.106 | 0.018    | 0.148  | 0.203    |
| 18    | 0.193 | 0.102   | 0.468   | 0.343   | 0.285  | 0.018  | -0.005  | 0.392  | -0.040 | -0.035   | 0.063  | 0.145    |
| 19    | 0.184 | ***     | 0.469   | 0.110   | 0.233  | 0.091  | -0.105  | -0.034 | 0.188  | -0.051   | -0.041 | 0.200    |
| 20    | 0.164 | 0.065   | 0.359   | ***     | 0.205  | 0.060  | -0.117  | 0.078  | -0.015 | 0.020    | 0.005  | 0.126    |
| 21    | 0.163 | 0.282   | 0.020   | ***     | 0.200  | 0.114  | -0.283  | 0.030  | ***    | 0.012    | 0.155  | 0.091    |
| 22    | 0.225 | 0.268   | 0.054   | ***     | 0.086  | 0.122  | 0.151   | 0.040  | 0.008  | * -0.060 | 0.218  | 0.007    |
| 23    | 0.177 | 0.261   | 0.229   | ***     | 0.029  | -0.033 | 0.242   | ***    | 0.035  | -0.037   | 0.205  | -0.056   |
| 24    | 0.113 | 0.099   | * 0.470 | ***     | 0.145  | -0.279 | 0.211   | ***    | 0.213  | -0.031   | 0.183  | 0.210    |
| 25    | 0.254 | 0.255   | ***     | ***     | 0.228  | -0.006 | 0.223   | 0.001  | 0.042  | 0.149    | 0.267  | 0.095    |
| 26    | 0.246 | 0.256   | 0.429   | ***     | 0.149  | 0.024  | 0.201   | 0.276  | 0.014  | 0.166    | 0.248  | 0.146    |
| 27    | 0.225 | 0.359   | 0.465   | ***     | 0.021  | 0.025  | 0.134   | 0.130  | -0.018 | 0.231    | 0.193  | 0.071    |
| 28    | 0.272 | -0.022  | 0.472   | * 0.080 | 0.038  | 0.053  | 0.092   | 0.289  | 0.056  | 0.222    | 0.047  | 0.147    |
| 29    | 0.201 | ...     | * 0.520 | 0.270   | -0.028 | 0.082  | 0.094   | 0.307  | 0.102  | 0.184    | 0.101  | 0.176    |
| 30    | 0.207 | ...     | 0.334   | 0.228   | -0.059 | 0.028  | 0.112   | 0.261  | 0.180  | 0.157    | 0.159  | 0.121    |
| 31    | 0.272 | ...     | 0.414   | ...     | 0.230  | ...    | -0.037  | 0.098  | ...    | 0.159    | ...    | 0.184    |
| MEAN  | 0.163 | 0.159   | 0.332   | 0.331   | 0.135  | 0.055  | 0.113   | 0.362  | 0.051  | 0.069    | 0.127  | 0.105    |

ITEM SENSIBLE HEAT FLUX (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SONIC ANEMOMETER-THERMOMETER (DA-650, TR-61A)  
 UNIT x 0.1 (°C m/s)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2        | 3       | 4        | 5        | 6        | 7      | 8       | 9      | 10       | 11       | 12       |
|-------|-------|----------|---------|----------|----------|----------|--------|---------|--------|----------|----------|----------|
| 1     | 0.112 | 0.229    | 0.110   | 0.655    | * 0.130  | 0.340    | 0.210  | 0.184   | 0.017  | -0.048   | 0.120    | * -0.080 |
| 2     | 0.241 | 0.238    | 0.325   | 0.455    | 0.295    | 0.016    | 0.196  | 0.281   | -0.116 | 0.057    | 0.218    | -0.056   |
| 3     | 0.206 | 0.271    | 0.632   | 0.248    | 0.173    | 0.245    | 0.108  | 0.251   | -0.079 | 0.199    | 0.080    | * -0.030 |
| 4     | 0.192 | 0.317    | 0.476   | 0.625    | 0.463    | 0.417    | 0.204  | 0.418   | -0.050 | 0.295    | 0.096    | * 0.170  |
| 5     | 0.185 | 0.240    | 0.532   | 0.681    | 0.555    | 0.130    | 0.292  | 0.243   | 0.096  | -0.018   | 0.050    | 0.255    |
| 6     | 0.242 | 0.147    | 0.412   | 0.574    | 0.383    | 0.316    | 0.316  | 0.347   | 0.098  | 0.215    | -0.009   | 0.017    |
| 7     | 0.311 | 0.364    | -0.039  | 0.445    | 0.007    | 0.131    | -0.048 | 0.357   | 0.287  | 0.321    | 0.156    | * 0.050  |
| 8     | 0.201 | 0.112    | 0.367   | 0.222    | 0.472    | 0.177    | 0.004  | 0.376   | 0.158  | 0.170    | 0.002    | -0.069   |
| 9     | 0.072 | 0.016    | 0.393   | * -0.030 | 0.515    | 0.324    | 0.208  | 0.406   | 0.124  | 0.128    | 0.115    | ***      |
| 10    | 0.269 | 0.293    | 0.643   | 0.525    | 0.061    | 0.079    | 0.274  | 0.386   | 0.132  | 0.168    | 0.154    | 0.082    |
| 11    | 0.180 | * -0.020 | ***     | * 0.530  | -0.013   | * -0.010 | 0.323  | 0.383   | 0.190  | -0.047   | -0.045   | 0.178    |
| 12    | 0.222 | 0.045    | ***     | 0.676    | * 0.040  | 0.054    | 0.151  | 0.261   | 0.174  | 0.173    | 0.120    | 0.274    |
| 13    | 0.245 | 0.302    | ***     | 0.652    | 0.243    | 0.071    | 0.174  | 0.344   | 0.194  | 0.147    | 0.152    | 0.072    |
| 14    | 0.230 | 0.083    | ***     | 0.546    | 0.313    | 0.324    | 0.298  | 0.181   | 0.150  | 0.067    | -0.010   | -0.023   |
| 15    | 0.075 | 0.158    | ***     | 0.559    | 0.337    | 0.181    | 0.256  | 0.443   | 0.171  | * -0.230 | 0.151    | 0.088    |
| 16    | 0.131 | 0.289    | 0.571   | 0.520    | 0.233    | 0.004    | 0.264  | 0.312   | 0.125  | * -0.110 | 0.188    | 0.149    |
| 17    | 0.332 | 0.169    | ***     | 0.705    | 0.196    | 0.107    | 0.383  | 0.263   | 0.080  | 0.007    | 0.099    | 0.303    |
| 18    | 0.196 | 0.266    | 0.626   | 0.575    | 0.603    | 0.036    | 0.201  | 0.287   | 0.189  | 0.062    | 0.000    | 0.122    |
| 19    | 0.286 | 0.308    | 0.547   | 0.140    | 0.476    | 0.152    | -0.119 | -0.067  | 0.497  | -0.005   | * -0.010 | 0.185    |
| 20    | 0.280 | 0.092    | 0.517   | 0.551    | 0.526    | 0.146    | -0.154 | 0.055   | -0.084 | 0.102    | 0.055    | 0.197    |
| 21    | 0.265 | 0.412    | 0.066   | 0.272    | 0.546    | 0.256    | 0.129  | * 0.050 | ***    | 0.052    | 0.174    | 0.064    |
| 22    | 0.340 | 0.465    | 0.033   | 0.261    | 0.386    | 0.345    | 0.253  | 0.004   | 0.207  | -0.042   | 0.204    | 0.011    |
| 23    | 0.247 | 0.352    | 0.347   | ***      | 0.038    | 0.157    | 0.125  | ***     | 0.048  | -0.044   | 0.180    | * -0.030 |
| 24    | 0.142 | 0.078    | 0.390   | 0.433    | * 0.190  | 0.089    | 0.255  | ***     | 0.266  | 0.078    | 0.160    | 0.195    |
| 25    | 0.385 | 0.377    | 0.495   | 0.544    | 0.485    | 0.471    | 0.242  | -0.064  | 0.140  | 0.163    | 0.189    | 0.136    |
| 26    | 0.260 | 0.440    | 0.684   | 0.609    | 0.326    | 0.129    | 0.205  | 0.218   | -0.003 | 0.243    | 0.217    | 0.183    |
| 27    | 0.243 | 0.540    | 0.623   | * 0.420  | 0.099    | 0.069    | 0.100  | 0.146   | 0.075  | 0.255    | 0.143    | 0.186    |
| 28    | 0.477 | -0.100   | 0.608   | 0.241    | 0.001    | 0.366    | 0.053  | 0.356   | 0.159  | 0.167    | 0.023    | 0.144    |
| 29    | 0.261 | ***      | * 0.700 | 0.389    | * -0.020 | 0.414    | 0.041  | 0.399   | 0.241  | 0.138    | 0.055    | 0.204    |
| 30    | 0.348 | ***      | 0.574   | 0.312    | -0.023   | 0.148    | 0.089  | 0.282   | 0.169  | 0.134    | 0.226    | * 0.350  |
| 31    | 0.516 | ***      | 0.575   | ***      | 0.561    | ***      | 0.007  | 0.098   | ***    | 0.122    | ***      | 0.157    |
| MEAN  | 0.248 | 0.232    | 0.472   | 0.434    | 0.277    | 0.189    | 0.163  | 0.248   | 0.126  | 0.094    | 0.108    | 0.116    |

ITEM SHORT-WAVE RADIATION (1.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PYRANOMETER (GORCZYNSKI TYPE) (MS-43F; MS-402F since Mar 20, 2006)  
 UNIT (W/m²)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2     | 3       | 4     | 5     | 6     | 7     | 8       | 9     | 10    | 11    | 12    |
|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | 108.7 | 155.6 | 71.8    | 274.2 | 118.1 | 158.8 | 234.7 | * 139.1 | 107.2 | 72.0  | 168.4 | 15.5  |
| 2     | 121.6 | 118.3 | 166.1   | 185.2 | 255.7 | 50.5  | 166.2 | 199.0   | 160.1 | 80.1  | 152.9 | 31.0  |
| 3     | 113.9 | 157.7 | 209.5   | 98.1  | 104.4 | 229.7 | 198.4 | 177.5   | 183.9 | 200.0 | 69.0  | 22.8  |
| 4     | 117.2 | 153.1 | 192.2   | 248.2 | 265.8 | 288.0 | 262.6 | 249.7   | 172.5 | 190.6 | 118.3 | 130.5 |
| 5     | 120.1 | 132.6 | 223.4   | 283.1 | 177.8 | 179.7 | 277.0 | 228.8   | 135.9 | 23.3  | 73.2  | 123.3 |
| 6     | 125.5 | 101.0 | 193.5   | 282.0 | 157.5 | 321.9 | 291.6 | 155.6   | 162.3 | 166.8 | 22.8  | 49.9  |
| 7     | 129.5 | 159.7 | 24.5    | 198.9 | 57.2  | 171.2 | 83.7  | 189.2   | 258.7 | 212.0 | 138.5 | 104.8 |
| 8     | 127.3 | 50.6  | 183.3   | 154.9 | 297.1 | 132.0 | 129.0 | 219.6   | 247.7 | 180.1 | 72.2  | 8.1   |
| 9     | 121.4 | 74.8  | 173.6   | 31.9  | 272.1 | 271.4 | 256.5 | 237.5   | 168.0 | 154.2 | 130.1 | 48.9  |
| 10    | 132.8 | 143.5 | 233.9   | 226.0 | 87.7  | 110.3 | 309.5 | 276.4   | 206.5 | 152.8 | 105.2 | 122.9 |
| 11    | 125.0 | 34.2  | ***     | 191.2 | 47.4  | 78.7  | 306.0 | 222.6   | 146.2 | 122.7 | 18.7  | 124.9 |
| 12    | 125.9 | 53.2  | ***     | 291.9 | 56.3  | 159.6 | 237.4 | 240.8   | 238.1 | 154.7 | 120.7 | 118.7 |
| 13    | 132.1 | 188.3 | ***     | 284.5 | 179.5 | 139.1 | 221.3 | 251.5   | 223.9 | 109.2 | 119.3 | 121.4 |
| 14    | 131.4 | 57.7  | 187.5   | 285.5 | 297.9 | 220.4 | 302.3 | 179.3   | 187.3 | 116.7 | 97.8  | 28.2  |
| 15    | 71.0  | 149.7 | 81.7    | 254.1 | 305.9 | 181.7 | 320.3 | 252.7   | 223.8 | 20.1  | 130.5 | 114.0 |
| 16    | 138.7 | 191.8 | 180.0   | 203.7 | 221.4 | 135.4 | 312.0 | 226.8   | 204.0 | 108.1 | 145.2 | 93.4  |
| 17    | 140.3 | 103.0 | 253.7   | 296.3 | 133.4 | 90.5  | 312.9 | 234.4   | 194.6 | 126.7 | 143.0 | 123.8 |
| 18    | ***   | 134.2 | 252.2   | 170.0 | 299.4 | 62.4  | 228.1 | 236.8   | 224.9 | 113.3 | 34.4  | 108.9 |
| 19    | 142.0 | 139.4 | 230.9   | 98.1  | 312.4 | 154.3 | 53.4  | 18.8    | 202.8 | 62.7  | 12.4  | 96.9  |
| 20    | 145.4 | 54.0  | 189.4   | 246.6 | 299.5 | 167.4 | 87.3  | 86.5    | 22.8  | 117.9 | 80.0  | 122.3 |
| 21    | 145.3 | 156.9 | 25.7    | 110.7 | 297.2 | 229.8 | 140.4 | 35.5    | 28.8  | 74.6  | 140.4 | 69.8  |
| 22    | 144.3 | 193.9 | 53.1    | 124.0 | 144.3 | 320.9 | 202.6 | 44.1    | 145.1 | 60.0  | 138.0 | 38.3  |
| 23    | 132.1 | 191.4 | 158.0   | 46.6  | 82.7  | 183.9 | 147.5 | 119.3   | 76.1  | 71.9  | 114.7 | 99.1  |
| 24    | 80.6  | 93.7  | 164.1   | 259.1 | 151.9 | 244.8 | 209.9 | 178.1   | 233.6 | 80.2  | 131.9 | 121.4 |
| 25    | 144.5 | 169.7 | 208.6   | 258.0 | 305.0 | 193.0 | 265.6 | 80.4    | 148.5 | 110.8 | 136.7 | 105.3 |
| 26    | 149.8 | 200.0 | 227.6   | 253.2 | 175.0 | 66.4  | 193.3 | 178.4   | 66.1  | 162.2 | 132.3 | 126.6 |
| 27    | 147.2 | 193.6 | 258.6   | 266.3 | 104.6 | 51.4  | 134.1 | 155.4   | 144.2 | 170.8 | 93.6  | 124.0 |
| 28    | 151.0 | 18.2  | 260.2   | 202.0 | 62.9  | 276.2 | 109.1 | 260.1   | 193.3 | 161.2 | 52.7  | 115.4 |
| 29    | 125.9 | ***   | * 270.3 | 216.2 | 48.2  | 298.7 | 93.4  | 266.5   | 181.8 | 167.6 | 72.1  | 113.9 |
| 30    | 151.6 | ***   | 216.4   | 205.0 | 119.1 | 188.5 | 130.6 | 257.9   | 151.9 | 124.1 | 105.3 | 125.0 |
| 31    | 163.9 | ***   | 250.9   | ***   | 235.2 | ***   | 103.7 | 122.4   | ***   | 142.0 | ***   | 122.1 |
| MEAN  | 130.2 | 127.5 | 183.6   | 208.2 | 183.0 | 178.6 | 203.9 | 184.5   | 168.0 | 122.9 | 102.3 | 92.6  |

ITEM NET RADIATION (1.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT NET RADIOMETER (MIDDLETON TYPE) (CN-11)  
 UNIT (W/m<sup>2</sup>)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1      | 2    | 3       | 4     | 5     | 6     | 7     | 8      | 9     | 10    | 11   | 12   |
|-------|--------|------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|------|------|
| 1     | 12.9   | 25.2 | 43.6    | 116.9 | 77.4  | 109.7 | 171.2 | * 96.5 | 75.5  | 44.8  | 80.2 | 5.2  |
| 2     | 27.7   | 25.7 | 74.0    | 75.7  | 139.5 | 35.3  | 122.3 | 133.9  | 114.7 | 52.3  | 81.0 | 17.5 |
| 3     | 37.1   | 46.6 | 62.3    | 34.4  | 58.2  | 151.6 | 138.3 | 124.7  | 126.5 | 109.5 | 31.4 | 18.3 |
| 4     | 35.2   | 34.9 | 47.6    | 113.5 | 156.2 | 184.8 | 182.2 | 170.1  | 109.8 | 114.3 | 63.4 | 38.2 |
| 5     | 17.8   | 30.9 | 79.6    | 115.1 | 109.2 | 117.2 | 192.2 | 159.5  | 87.7  | 16.0  | 42.1 | 35.5 |
| 6     | 12.7   | 33.5 | 65.9    | 112.4 | 95.9  | 205.2 | 196.4 | 108.8  | 113.1 | 114.6 | 16.1 | 25.7 |
| 7     | 0.7    | 54.4 | 10.5    | 85.5  | 33.0  | 94.5  | 57.6  | 132.2  | 139.3 | 114.2 | 82.7 | 44.3 |
| 8     | 15.1   | 22.0 | 81.5    | 62.8  | 177.0 | 83.3  | 89.2  | 148.7  | 139.5 | 102.6 | 28.8 | 0.2  |
| 9     | 19.3   | 33.8 | 69.2    | 22.0  | 150.1 | 178.9 | 184.8 | 168.1  | 112.3 | 94.5  | 70.3 | 13.6 |
| 10    | 5.0    | 59.8 | 78.5    | 128.1 | 55.4  | 73.7  | 216.2 | 187.6  | 133.3 | 96.0  | 49.4 | 46.2 |
| 11    | * 17.3 | 21.0 | ***     | 101.2 | 32.6  | 53.5  | 207.7 | 156.9  | 81.0  | 62.8  | 10.2 | 27.2 |
| 12    | 21.1   | 27.6 | ***     | 132.2 | 40.2  | 106.8 | 158.2 | 163.1  | 161.7 | 77.7  | 72.2 | 40.7 |
| 13    | 12.4   | 76.3 | ***     | 127.1 | 129.9 | 91.8  | 147.2 | 169.7  | 153.5 | 55.9  | 67.5 | 41.5 |
| 14    | 25.4   | 29.6 | 72.0    | 124.7 | 187.6 | 149.5 | 199.1 | 116.9  | 114.6 | 72.2  | 51.6 | 6.2  |
| 15    | 3.8    | 83.1 | 35.0    | 126.2 | 160.9 | 112.6 | 210.6 | 174.5  | 158.6 | 9.9   | 62.4 | 35.3 |
| 16    | 49.2   | 86.6 | 74.9    | 99.1  | 122.7 | 92.9  | 201.0 | 151.1  | 144.3 | 58.4  | 66.8 | 23.2 |
| 17    | 23.4   | 43.3 | 87.4    | 133.7 | 78.7  | 63.4  | 205.8 | 157.3  | 122.8 | 71.6  | 51.4 | 26.1 |
| 18    | ***    | 57.5 | 98.4    | 93.0  | 189.2 | 44.4  | 154.8 | 161.3  | 148.8 | 52.7  | 17.4 | 17.9 |
| 19    | 25.6   | 46.6 | 102.2   | 61.9  | 188.0 | 101.6 | 31.8  | 8.7    | 142.8 | 30.6  | 9.5  | 22.0 |
| 20    | 36.3   | 26.1 | 89.2    | 140.2 | 180.2 | 118.9 | 63.2  | 60.0   | 16.8  | 70.4  | 39.3 | 40.7 |
| 21    | 15.9   | 57.0 | 18.7    | 62.1  | 181.9 | 161.3 | 96.0  | 25.1   | 19.9  | 46.0  | 58.0 | 12.9 |
| 22    | 36.9   | 59.8 | 35.3    | 69.4  | 99.4  | 218.2 | 135.9 | 33.8   | 94.6  | 35.0  | 58.2 | 2.7  |
| 23    | 32.0   | 68.0 | 89.1    | 30.9  | 54.1  | 125.3 | 106.5 | 86.9   | 40.0  | 40.9  | 62.3 | 1.3  |
| 24    | 29.8   | 36.8 | 71.7    | 145.6 | 90.5  | 161.6 | 136.0 | 129.6  | 125.9 | 47.2  | 48.7 | 22.5 |
| 25    | 44.6   | 78.5 | 103.6   | 135.6 | 190.7 | 139.4 | 178.8 | 50.6   | 83.8  | 73.7  | 38.5 | 7.0  |
| 26    | 31.6   | 57.9 | 92.3    | 139.0 | 110.2 | 50.9  | 127.5 | 132.7  | 27.7  | 81.6  | 53.3 | 13.5 |
| 27    | 49.8   | 85.6 | 104.4   | 152.8 | 70.2  | 40.7  | 93.6  | 104.1  | 67.7  | 93.3  | 31.4 | 5.4  |
| 28    | 30.7   | 10.0 | 114.2   | 121.5 | 45.0  | 199.3 | 77.3  | 168.9  | 105.3 | 85.7  | 19.0 | 15.5 |
| 29    | 39.2   | ***  | * 123.9 | 121.1 | 36.9  | 212.1 | 65.2  | 169.6  | 80.7  | 84.5  | 27.3 | 21.9 |
| 30    | 27.7   | ***  | 97.1    | 114.2 | 85.7  | 131.3 | 90.6  | 169.8  | 84.1  | 76.0  | 53.4 | 15.4 |
| 31    | 34.5   | ***  | 117.0   | ***   | 156.7 | ***   | 78.4  | 89.2   | ***   | 88.0  | ***  | 19.1 |
| MEAN  | 25.7   | 47.1 | 76.4    | 103.3 | 112.4 | 120.3 | 139.2 | 126.1  | 104.2 | 70.1  | 48.1 | 21.4 |

ITEM SOIL HEAT FLUX (0.02 m DEPTH)  
 INSTRUMENT SOIL HEAT FLUX METER (GPR-PHF-01)  
 UNIT (W/m<sup>2</sup>)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1    | 2     | 3     | 4    | 5    | 6    | 7     | 8     | 9    | 10    | 11    | 12    |
|-------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1     | -4.9 | -5.0  | 0.5   | 4.7  | 3.4  | -3.8 | 4.8   | * 0.1 | 4.0  | -3.4  | -8.7  | -7.4  |
| 2     | -5.3 | -2.0  | 0.0   | 2.9  | 4.9  | -1.7 | 3.6   | 2.4   | 4.4  | -6.2  | -5.2  | -7.9  |
| 3     | -7.8 | -1.3  | -9.1  | -8.6 | -2.6 | 7.8  | 4.9   | 5.0   | 2.9  | -7.7  | -4.3  | 2.2   |
| 4     | -5.3 | -0.8  | -6.1  | 3.3  | 11.2 | 8.0  | 7.0   | 5.8   | 1.7  | -8.1  | -4.1  | -6.8  |
| 5     | -6.5 | 0.2   | -2.8  | 5.2  | -1.1 | 4.0  | 4.6   | 6.0   | 0.5  | -3.6  | -1.7  | -10.0 |
| 6     | -5.5 | 1.5   | 2.5   | 6.7  | 2.4  | 8.1  | 1.3   | 7.0   | -0.8 | 2.6   | 1.4   | -8.2  |
| 7     | -8.7 | -2.1  | -9.4  | 5.5  | 1.5  | 0.9  | 1.6   | 7.1   | -1.3 | -4.7  | 1.3   | -1.4  |
| 8     | -8.2 | -3.3  | 5.2   | 4.7  | 12.7 | -2.1 | 5.2   | 6.7   | -1.6 | -7.5  | -6.6  | -5.7  |
| 9     | -2.7 | -3.3  | -1.5  | 3.7  | 3.1  | 4.4  | 7.2   | 8.2   | 2.0  | -1.2  | -8.5  | -7.9  |
| 10    | -7.7 | -3.0  | -5.0  | 8.5  | 4.9  | 4.9  | 5.2   | 8.2   | 3.4  | 0.1   | -7.5  | -7.2  |
| 11    | -7.0 | -5.5  | -3.0  | 2.7  | -4.1 | 4.4  | 4.7   | 5.4   | 1.6  | -2.4  | -5.7  | -6.5  |
| 12    | -2.6 | -3.7  | ***   | 0.2  | 2.0  | 5.0  | 4.0   | 3.4   | 2.4  | -2.0  | 0.1   | -3.9  |
| 13    | -7.2 | -6.5  | ***   | 1.3  | 11.7 | 2.7  | 2.8   | 3.7   | 1.5  | -1.4  | -2.9  | -3.3  |
| 14    | -6.8 | -5.8  | 5.4   | 6.6  | 5.9  | 2.5  | 3.7   | 4.4   | 2.1  | -0.8  | -2.2  | -3.0  |
| 15    | -5.4 | 0.9   | -0.4  | 11.0 | 2.4  | -2.0 | 4.0   | 4.4   | 2.2  | 3.7   | -6.3  | -1.1  |
| 16    | -4.4 | -2.5  | -2.4  | 7.1  | 0.8  | 1.0  | 4.1   | 4.4   | 0.9  | 3.7   | -12.0 | -2.6  |
| 17    | -5.3 | 5.0   | -8.1  | 3.1  | -1.0 | -0.7 | 4.8   | 4.7   | 1.9  | -1.5  | -9.4  | -9.9  |
| 18    | ***  | 4.5   | -2.1  | 1.7  | 4.8  | 0.2  | 3.9   | 5.3   | 1.4  | -6.1  | -4.9  | -6.6  |
| 19    | -5.2 | -5.3  | 6.2   | -9.2 | 3.6  | 4.2  | 1.6   | -9.0  | -3.5 | -10.8 | 1.2   | -6.1  |
| 20    | -7.2 | 1.7   | 4.2   | 2.0  | 5.1  | 6.2  | -0.2  | 0.2   | -6.4 | -3.6  | 2.0   | -6.0  |
| 21    | -5.1 | -2.0  | -2.2  | 0.0  | 6.3  | 7.7  | -10.9 | -3.5  | -2.0 | -2.3  | -12.1 | -6.4  |
| 22    | -2.5 | -5.2  | -1.8  | 6.8  | -1.5 | 8.4  | -8.3  | -3.7  | -2.5 | 3.3   | -13.4 | -7.0  |
| 23    | -3.5 | 1.6   | -1.0  | 5.0  | -5.1 | 7.8  | -1.9  | 3.0   | -6.5 | 3.7   | -2.3  | -6.0  |
| 24    | -0.3 | 2.5   | -6.1  | 9.3  | -4.2 | 7.5  | 2.6   | 5.6   | -6.7 | -2.0  | -5.2  | -5.4  |
| 25    | -6.5 | 8.4   | 2.7   | -0.2 | 4.6  | -1.5 | 4.8   | 4.3   | -7.0 | 1.8   | -12.0 | -6.2  |
| 26    | -5.4 | -6.5  | 1.0   | 5.0  | 1.6  | -2.0 | 2.1   | 2.1   | -6.3 | -9.3  | -9.9  | -6.1  |
| 27    | -5.0 | 5.7   | 3.2   | 10.0 | 1.9  | 0.5  | 3.2   | -0.9  | -4.8 | -12.8 | -7.1  | -4.4  |
| 28    | -9.1 | -11.4 | 6.2   | 9.9  | 3.8  | 8.6  | 1.7   | 0.6   | -5.9 | -8.7  | -5.2  | -4.7  |
| 29    | -3.8 | ***   | * 5.5 | 0.2  | 0.1  | 7.8  | 0.8   | 0.0   | -2.1 | -5.7  | -1.2  | -3.5  |
| 30    | -6.5 | ***   | 4.9   | 2.3  | -1.7 | 5.8  | 0.7   | 1.1   | 0.2  | -0.3  | -0.7  | -4.6  |
| 31    | -8.5 | ***   | 5.7   | ***  | -3.7 | ***  | -3.0  | 2.7   | ***  | -1.2  | ***   | -5.3  |
| MEAN  | -5.7 | -1.5  | -0.3  | 3.7  | 2.4  | 3.5  | 2.3   | 3.1   | -0.8 | -3.1  | -5.1  | -5.4  |

ITEM SUNSHINE DURATION (9.0m HEIGHT)  
 INSTRUMENT SUNSHINE-RECORDER (MS-091)  
 UNIT (min)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2     | 3       | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12      |
|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 1     | 364.0 | 570.5 | 37.5    | 686.0 | 94.5  | 50.5  | 327.0 | 98.5  | 21.0  | 16.0  | 560.0 | 0.0     |
| 2     | 526.5 | 313.0 | 339.5   | 309.0 | 509.0 | 0.0   | 141.5 | 310.5 | 196.0 | 31.5  | 486.5 | 0.0     |
| 3     | 457.5 | 574.5 | 507.0   | 2.0   | 42.5  | 328.0 | 290.5 | 146.0 | 256.0 | 477.5 | 31.0  | 0.0     |
| 4     | 519.0 | 563.5 | 496.5   | 492.5 | 521.5 | 521.0 | 479.0 | 518.5 | 217.0 | 571.5 | 338.0 | * 472.5 |
| 5     | 465.5 | 412.5 | 600.0   | 705.0 | 87.0  | 219.0 | 517.5 | 400.0 | 135.5 | 0.0   | 146.0 | 529.5   |
| 6     | 473.0 | 179.5 | 478.5   | 705.0 | 97.5  | 743.5 | 642.0 | 162.0 | 196.0 | 386.5 | 0.0   | 65.5    |
| 7     | 534.5 | 562.5 | 1.0     | 336.5 | 0.0   | 109.0 | 0.5   | 291.0 | 644.5 | 628.5 | 376.5 | 429.0   |
| 8     | 532.5 | 7.5   | 410.0   | 229.0 | 657.5 | 199.5 | 0.0   | 471.5 | 584.0 | 469.0 | 131.5 | 0.0     |
| 9     | 520.5 | 137.0 | 358.0   | 0.0   | 486.5 | 493.0 | 435.5 | 434.0 | 303.5 | 357.0 | 383.0 | 151.5   |
| 10    | 536.5 | 305.0 | 546.5   | 359.5 | 4.0   | 36.0  | 728.0 | 737.5 | 567.0 | 329.0 | 189.0 | 475.5   |
| 11    | 495.0 | 0.0   | ***     | 327.5 | 0.0   | 22.5  | 746.0 | 478.0 | 307.5 | 213.5 | 0.0   | 529.5   |
| 12    | 489.0 | 47.0  | ***     | 704.5 | 0.0   | 40.0  | 418.0 | 539.5 | 570.5 | 368.0 | 334.5 | 523.0   |
| 13    | 542.0 | 564.5 | ***     | 700.5 | 184.0 | 56.0  | 361.0 | 511.0 | 551.0 | 119.5 | 397.0 | 528.5   |
| 14    | 541.5 | 25.0  | ***     | 706.0 | 644.5 | 301.5 | 728.0 | 273.5 | 454.5 | 131.5 | 180.5 | 0.0     |
| 15    | 179.5 | 273.5 | ***     | 515.5 | 632.0 | 75.0  | 773.5 | 555.0 | 541.0 | 0.0   | 409.0 | 516.5   |
| 16    | 480.0 | 551.0 | 335.0   | 359.5 | 300.0 | 15.0  | 733.0 | 542.0 | 511.0 | 211.0 | 548.0 | 283.0   |
| 17    | 552.0 | 170.5 | 663.5   | 631.0 | 76.5  | 2.0   | 766.0 | 550.0 | 470.0 | 208.5 | 568.0 | 527.0   |
| 18    | ***   | 310.5 | 664.0   | 205.0 | 667.5 | 0.0   | 423.5 | 595.5 | 624.5 | 287.0 | 0.0   | 510.0   |
| 19    | 548.0 | 264.0 | 504.5   | 87.5  | 747.5 | 43.0  | 0.0   | 0.0   | 512.5 | 0.0   | 0.0   | 342.0   |
| 20    | 557.5 | 16.0  | 411.5   | 443.5 | 732.5 | 96.5  | 10.0  | 1.0   | 0.0   | 148.0 | 134.5 | 526.5   |
| 21    | 557.5 | 411.0 | 0.0     | 32.5  | 695.5 | 386.0 | 117.0 | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 495.0 | 111.0   |
| 22    | 545.5 | 582.0 | 0.0     | 74.0  | 182.5 | 740.5 | 282.0 | 0.0   | 236.5 | 9.0   | 540.0 | 0.0     |
| 23    | 456.5 | 546.5 | 223.5   | 0.0   | 0.0   | 327.5 | 40.0  | ***   | 87.0  | 107.5 | 357.5 | 386.0   |
| 24    | 124.0 | 95.5  | 266.5   | 517.5 | 231.5 | 421.0 | 382.0 | ***   | 663.5 | 105.0 | 515.5 | 524.0   |
| 25    | 518.5 | 441.5 | 492.5   | 624.5 | 761.5 | 293.5 | 548.5 | 0.5   | 324.5 | 224.0 | 542.0 | 399.5   |
| 26    | 555.5 | 593.0 | 577.0   | 464.5 | 119.5 | 0.0   | 214.0 | 189.5 | 23.5  | 515.0 | 537.0 | 509.5   |
| 27    | 493.0 | 555.5 | 614.0   | 529.0 | 19.5  | 0.0   | 81.5  | 207.0 | 306.5 | 574.5 | 305.0 | 530.0   |
| 28    | 562.0 | 0.0   | 613.0   | 297.5 | 0.0   | 555.5 | 50.5  | 684.5 | 474.0 | 530.0 | 0.0   | 494.0   |
| 29    | 341.5 | ***   | * 673.5 | 333.0 | 0.0   | 633.5 | 8.0   | 681.5 | 455.0 | 573.0 | 92.0  | 520.0   |
| 30    | 496.0 | ***   | 566.5   | 315.0 | 107.5 | 236.5 | 106.0 | 631.0 | 361.0 | 210.5 | 379.5 | 532.5   |
| 31    | 578.5 | ***   | 608.5   | ***   | 326.5 | ***   | 2.0   | 61.0  | ***   | 406.5 | ***   | 530.0   |
| MEAN  | 484.8 | 324.0 | 422.6   | 389.8 | 288.0 | 231.5 | 333.9 | 347.2 | 353.2 | 264.8 | 299.2 | 353.1   |

ITEM AIR TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (CVS-HMP45D; CVS-HMP155D, since Apr. 7, 2011)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 1     | 3.7  | 3.8  | 4.8  | 8.5  | 16.7 | 13.3 | 25.7 | * 22.5 | 26.6 | 19.3 | 13.0 | 5.9  |
| 2     | 2.7  | 2.8  | 5.5  | 10.3 | 17.9 | 14.6 | 24.7 | 23.9   | 27.5 | 16.0 | 13.7 | 5.3  |
| 3     | 1.1  | 3.6  | 2.6  | 6.1  | 13.4 | 19.2 | 26.2 | 25.5   | 27.4 | 15.0 | 14.0 | 11.2 |
| 4     | 2.3  | 5.5  | 2.6  | 5.9  | 16.2 | 21.1 | 28.0 | 26.5   | 26.4 | 14.4 | 14.4 | 10.5 |
| 5     | 2.6  | 5.2  | 3.5  | 7.4  | 13.3 | 20.7 | 26.4 | 28.5   | 25.2 | 15.6 | 15.4 | 6.4  |
| 6     | 3.4  | 5.8  | 6.6  | 10.9 | 13.7 | 21.9 | 25.2 | 29.0   | 23.6 | 19.4 | 16.8 | 4.9  |
| 7     | 1.5  | 5.6  | 3.1  | 12.9 | 15.7 | 20.3 | 24.3 | 29.1   | 22.9 | 17.9 | 16.3 | 6.9  |
| 8     | 1.0  | 3.7  | 5.0  | 16.1 | 19.6 | 17.8 | 26.2 | 29.8   | 23.9 | 14.6 | 12.4 | 5.7  |
| 9     | 3.0  | 2.6  | 4.3  | 13.4 | 17.5 | 20.0 | 28.1 | 29.5   | 25.8 | 17.4 | 10.5 | 2.8  |
| 10    | 1.3  | 3.8  | 3.5  | 12.2 | 19.1 | 22.0 | 27.9 | 30.1   | 27.2 | 18.4 | 10.4 | 3.0  |
| 11    | 0.4  | 1.2  | ***  | 11.7 | 14.0 | 21.3 | 27.9 | 29.4   | 25.6 | 17.7 | 10.5 | 4.5  |
| 12    | 2.7  | 1.0  | ***  | 9.2  | 15.0 | 22.1 | 27.8 | 28.7   | 26.7 | 17.6 | 14.1 | 4.7  |
| 13    | 1.3  | 1.2  | ***  | 11.5 | 18.5 | 20.6 | 27.1 | 28.7   | 26.9 | 17.7 | 13.8 | 5.1  |
| 14    | 0.3  | 1.7  | 10.6 | 14.8 | 17.5 | 20.3 | 27.5 | 29.2   | 26.7 | 18.5 | 13.8 | 5.8  |
| 15    | 0.7  | 2.9  | 9.0  | 16.8 | 18.9 | 19.0 | 28.0 | 29.0   | 26.8 | 21.6 | 10.7 | 6.9  |
| 16    | 0.1  | 3.2  | 6.0  | 17.8 | 18.4 | 19.6 | 28.2 | 29.2   | 26.8 | 22.3 | 7.5  | 6.3  |
| 17    | 3.0  | 7.5  | 2.3  | 11.5 | 16.3 | 18.5 | 28.6 | 29.4   | 27.4 | 19.5 | 9.2  | 0.7  |
| 18    | ***  | 9.0  | 2.7  | 12.7 | 17.5 | 18.9 | 28.7 | 30.0   | 27.2 | 16.6 | 9.3  | 1.8  |
| 19    | 2.4  | 3.4  | 9.5  | 9.1  | 19.0 | 20.9 | 25.9 | 23.1   | 23.5 | 12.7 | 12.9 | 1.4  |
| 20    | 1.7  | 7.0  | 9.6  | 7.7  | 20.3 | 22.8 | 24.9 | 22.6   | 18.8 | 16.0 | 14.9 | 1.6  |
| 21    | 2.6  | 6.3  | 8.2  | 10.4 | 21.2 | 24.2 | 20.3 | 20.1   | 21.4 | 17.0 | 8.0  | 1.4  |
| 22    | 3.0  | 4.2  | 6.2  | 13.9 | 17.7 | 26.1 | 19.2 | 20.9   | 21.1 | 19.8 | 5.8  | 1.7  |
| 23    | 2.3  | 6.4  | 5.5  | 15.3 | 14.2 | 26.4 | 21.4 | 24.9   | 17.4 | 21.6 | 9.8  | 4.1  |
| 24    | 3.8  | 8.3  | 3.4  | 14.3 | 13.1 | 27.6 | 23.8 | 26.8   | 17.3 | 18.8 | 11.3 | 0.8  |
| 25    | 1.9  | 11.3 | 5.7  | 12.1 | 17.1 | 22.3 | 26.2 | 26.5   | 17.4 | 19.6 | 6.7  | 0.8  |
| 26    | 1.3  | 4.5  | 5.9  | 13.3 | 16.9 | 19.9 | 25.2 | 25.0   | 16.6 | 13.2 | 5.9  | 1.1  |
| 27    | 1.2  | 8.8  | 4.9  | 17.4 | 18.0 | 20.9 | 25.4 | 23.4   | 17.8 | 10.1 | 6.2  | 2.4  |
| 28    | -0.1 | 3.6  | 6.5  | 17.7 | 18.2 | 25.9 | 24.4 | 24.2   | 17.4 | 11.6 | 7.6  | 1.0  |
| 29    | 1.1  | ***  | ***  | 12.8 | 17.7 | 26.9 | 23.9 | 24.0   | 18.6 | 12.9 | 10.6 | 1.0  |
| 30    | -0.1 | ***  | 8.7  | 14.7 | 16.9 | 26.6 | 23.8 | 24.9   | 21.2 | 15.6 | 10.8 | 2.2  |
| 31    | -1.5 | ***  | 7.9  | ***  | 14.0 | ***  | 22.6 | 24.9   | ***  | 16.0 | ***  | -0.1 |
| MEAN  | 1.7  | 4.8  | 5.7  | 12.3 | 16.9 | 21.4 | 25.6 | 26.4   | 23.3 | 16.9 | 11.2 | 3.8  |

ITEM AIR TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (CVS-HMP45D; CVS-HMP155D, SINCE APR. 7, 2011)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 1     | 4.9  | 4.5  | 4.6  | 9.1  | 17.1 | 13.2 | 25.8 | * 22.3 | 26.5 | 19.5 | 14.1 | 5.9  |
| 2     | 4.1  | 3.5  | 5.8  | 10.8 | 18.3 | 14.5 | 24.6 | 23.6   | 27.4 | 16.2 | 14.7 | 5.3  |
| 3     | 2.6  | 4.2  | 2.7  | 6.7  | 13.7 | 19.3 | 26.4 | 25.1   | 27.4 | 16.2 | 14.8 | 11.2 |
| 4     | 3.4  | 6.2  | 2.7  | 6.3  | 16.3 | 21.3 | 28.4 | 26.2   | 26.5 | 15.1 | 15.3 | 11.5 |
| 5     | 4.3  | 5.8  | 4.6  | 8.3  | 13.1 | 21.0 | 26.8 | 27.9   | 25.1 | 15.7 | 16.0 | 7.8  |
| 6     | 4.2  | 6.0  | 7.0  | 11.8 | 13.5 | 22.1 | 25.8 | 28.8   | 23.5 | 19.3 | 16.7 | 5.3  |
| 7     | 2.1  | 6.5  | 3.1  | 13.5 | 15.7 | 20.8 | 24.5 | 28.7   | 23.3 | 18.8 | 16.3 | 7.4  |
| 8     | 3.1  | 3.7  | 5.0  | 16.5 | 19.6 | 18.3 | 26.6 | 29.3   | 24.6 | 16.0 | 12.8 | 5.7  |
| 9     | 3.9  | 2.9  | 4.6  | 13.6 | 18.2 | 20.3 | 28.6 | 29.2   | 26.2 | 17.7 | 11.5 | 3.4  |
| 10    | 1.8  | 4.6  | 4.0  | 12.1 | 19.4 | 22.1 | 28.8 | 29.9   | 27.7 | 19.0 | 11.5 | 4.0  |
| 11    | 1.3  | 1.0  | ***  | 12.1 | 13.9 | 21.3 | 28.5 | 29.3   | 25.5 | 18.0 | 10.6 | 5.9  |
| 12    | 2.9  | 0.9  | ***  | 9.4  | 14.8 | 22.3 | 28.2 | 28.5   | 26.9 | 18.0 | 14.5 | 6.3  |
| 13    | 2.3  | 2.3  | ***  | 12.4 | 18.3 | 20.5 | 27.5 | 28.6   | 27.3 | 18.1 | 14.7 | 6.0  |
| 14    | 1.5  | 1.8  | 11.2 | 15.4 | 18.1 | 20.5 | 28.0 | 29.0   | 26.9 | 18.8 | 14.2 | 5.8  |
| 15    | 1.1  | 3.2  | 8.8  | 17.0 | 19.3 | 19.3 | 29.0 | 28.9   | 27.0 | 21.7 | 11.4 | 7.9  |
| 16    | 0.1  | 3.8  | 5.8  | 18.0 | 18.9 | 19.7 | 28.9 | 29.0   | 27.2 | 22.4 | 9.0  | 6.5  |
| 17    | 3.3  | 7.6  | 2.4  | 11.6 | 16.6 | 18.4 | 29.2 | 29.2   | 27.6 | 20.2 | 10.1 | 2.2  |
| 18    | ***  | 8.9  | 3.5  | 12.7 | 17.9 | 18.8 | 29.3 | 30.0   | 27.7 | 17.0 | 9.6  | 3.0  |
| 19    | 3.0  | 4.1  | 9.9  | 9.2  | 19.4 | 20.9 | 26.1 | 23.1   | 23.6 | 13.1 | 12.9 | 2.7  |
| 20    | 2.7  | 6.8  | 9.8  | 7.8  | 20.7 | 23.0 | 25.1 | 22.4   | 18.7 | 16.2 | 15.1 | 2.6  |
| 21    | 3.3  | 6.2  | 8.1  | 10.1 | 21.5 | 24.4 | 20.5 | 19.9   | 21.4 | 17.1 | 9.1  | 2.1  |
| 22    | 3.5  | 4.9  | 6.0  | 13.7 | 17.8 | 26.7 | 19.7 | 20.7   | 21.4 | 19.7 | 7.1  | 2.4  |
| 23    | 3.0  | 6.5  | 5.3  | 15.3 | 14.2 | 26.7 | 21.5 | 24.7   | 18.0 | 21.9 | 10.1 | 4.7  |
| 24    | 3.8  | 8.7  | 3.9  | 14.2 | 13.2 | 28.1 | 23.8 | 26.9   | 17.9 | 18.8 | 11.8 | 2.6  |
| 25    | 3.1  | 11.7 | 6.0  | 12.6 | 17.5 | 22.3 | 26.3 | 26.5   | 18.1 | 19.7 | 8.8  | 2.4  |
| 26    | 2.1  | 4.7  | 5.8  | 13.7 | 16.8 | 19.8 | 25.8 | 25.0   | 17.1 | 14.1 | 7.5  | 2.1  |
| 27    | 2.5  | 8.6  | 5.0  | 17.4 | 18.0 | 20.7 | 26.0 | 23.3   | 18.5 | 11.4 | 7.1  | 3.2  |
| 28    | 1.2  | 3.5  | 6.5  | 17.8 | 18.0 | 25.9 | 24.3 | 24.0   | 18.1 | 12.4 | 8.4  | 2.2  |
| 29    | 1.5  | ***  | ***  | 12.8 | 17.6 | 27.3 | 23.8 | 24.0   | 18.9 | 13.4 | 11.5 | 2.1  |
| 30    | 0.5  | ***  | 9.3  | 15.3 | 16.8 | 27.2 | 23.6 | 24.8   | 21.7 | 15.9 | 11.2 | 3.2  |
| 31    | -0.2 | ***  | 8.1  | ***  | 13.9 | ***  | 22.6 | 24.7   | ***  | 16.5 | ***  | 2.0  |
| MEAN  | 2.6  | 5.1  | 5.9  | 12.6 | 17.0 | 21.6 | 25.9 | 26.2   | 23.6 | 17.4 | 11.9 | 4.7  |

ITEM AIR TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (CVS-HMP45D; CVS-HMP155D, SINCE APR. 7, 2011)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1   | 2    | 3    | 4      | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|-----|------|------|--------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 1     | 5.4 | 4.8  | 4.5  | 9.3    | 17.3 | 13.0 | 25.7 | * 22.1 | 26.4 | 19.5 | 14.8 | 5.8  |
| 2     | 5.2 | 3.8  | 5.9  | 10.9   | 18.5 | 14.3 | 24.5 | 23.4   | 27.3 | 16.2 | 15.2 | 5.2  |
| 3     | 3.5 | 4.4  | 2.8  | 6.8    | 13.8 | 19.3 | 26.3 | 24.9   | 27.3 | 16.4 | 15.4 | 11.1 |
| 4     | 3.9 | 6.4  | 2.7  | 6.4    | 16.2 | 21.2 | 28.3 | 26.1   | 26.4 | 15.3 | 15.9 | 11.8 |
| 5     | 4.9 | 6.1  | 5.1  | 8.6    | 12.9 | 21.0 | 26.8 | 27.5   | 24.9 | 15.6 | 16.3 | 8.6  |
| 6     | 4.7 | 6.3  | 7.0  | 12.4   | 13.3 | 22.1 | 26.0 | 28.4   | 23.4 | 19.1 | 16.6 | 5.8  |
| 7     | 2.3 | 7.0  | 3.2  | * 13.5 | 15.7 | 20.8 | 24.4 | 28.4   | 23.4 | 19.2 | 16.1 | 7.6  |
| 8     | 3.9 | 3.7  | 4.9  | 16.6   | 19.6 | 18.5 | 26.5 | 28.9   | 24.8 | 16.9 | 12.9 | 5.6  |
| 9     | 4.3 | 3.0  | 4.6  | 13.6   | 18.3 | 20.4 | 28.5 | 29.1   | 26.3 | 17.8 | 12.0 | 3.6  |
| 10    | 2.0 | 5.0  | 4.2  | 12.0   | 19.6 | 22.0 | 28.8 | 29.8   | 27.8 | 19.5 | 11.9 | 4.5  |
| 11    | 1.6 | 0.9  | ***  | 12.5   | 13.7 | 21.2 | 28.4 | 29.2   | 25.4 | 18.1 | 10.5 | 6.5  |
| 12    | 2.9 | 0.8  | ***  | 9.4    | 14.7 | 22.4 | 28.2 | 28.4   | 26.9 | 18.1 | 14.5 | 7.6  |
| 13    | 2.6 | 3.1  | ***  | 12.7   | 18.2 | 20.4 | 27.5 | 28.5   | 27.5 | 18.2 | 15.5 | 6.9  |
| 14    | 1.8 | 1.8  | 11.7 | 15.5   | 18.5 | 20.5 | 28.0 | 28.9   | 26.9 | 18.8 | 14.6 | 5.8  |
| 15    | 1.4 | 3.4  | 8.8  | 16.9   | 19.3 | 19.2 | 29.0 | 28.8   | 27.0 | 21.7 | 11.6 | 8.4  |
| 16    | 0.1 | 4.2  | 5.8  | 17.9   | 19.0 | 19.7 | 28.8 | 28.9   | 27.2 | 22.4 | 9.5  | 6.4  |
| 17    | 3.6 | 7.7  | 2.5  | 11.5   | 16.7 | 18.2 | 29.1 | 29.1   | 27.5 | 20.3 | 10.6 | 3.2  |
| 18    | *** | 9.0  | 3.8  | 12.6   | 18.0 | 18.6 | 29.3 | 30.0   | 27.7 | 17.0 | 9.7  | 3.6  |
| 19    | 3.2 | 4.3  | 10.0 | 9.2    | 19.5 | 20.8 | 25.9 | 23.0   | 23.7 | 13.2 | 12.9 | 3.9  |
| 20    | 3.2 | 6.6  | 10.0 | 7.8    | 21.0 | 22.9 | 25.0 | 22.3   | 18.5 | 16.2 | 15.2 | 3.2  |
| 21    | 3.6 | 6.2  | 8.0  | 9.9    | 21.5 | 24.4 | 20.4 | 19.7   | 21.4 | 17.0 | 9.6  | 2.5  |
| 22    | 3.6 | 5.2  | 5.9  | 13.6   | 17.8 | 26.8 | 19.7 | 20.5   | 21.5 | 19.6 | 7.7  | 2.7  |
| 23    | 3.5 | 6.6  | 5.2  | 15.2   | 14.1 | 26.7 | 21.3 | 24.5   | 18.1 | 21.9 | 10.1 | 4.8  |
| 24    | 3.7 | 8.9  | 4.2  | 14.1   | 13.2 | 28.1 | 23.7 | 27.0   | 18.1 | 18.6 | 11.9 | 3.4  |
| 25    | 3.5 | 11.7 | 6.3  | 12.9   | 17.8 | 22.2 | 26.2 | 26.4   | 18.4 | 19.5 | 9.5  | 2.9  |
| 26    | 2.5 | 4.8  | 5.8  | 14.0   | 16.7 | 19.5 | 25.9 | 25.0   | 17.2 | 14.3 | 8.4  | 2.4  |
| 27    | 3.0 | 8.4  | 5.0  | 17.5   | 17.9 | 20.5 | 26.1 | 23.1   | 18.6 | 12.3 | 7.4  | 3.3  |
| 28    | 2.0 | 3.4  | 6.5  | 17.7   | 17.9 | 25.8 | 24.2 | 23.9   | 18.1 | 12.8 | 8.8  | 2.6  |
| 29    | 1.7 | ***  | ***  | 12.7   | 17.5 | 27.3 | 23.6 | 24.0   | 18.9 | 13.4 | 11.8 | 2.7  |
| 30    | 0.7 | ***  | 9.5  | 15.5   | 16.7 | 27.3 | 23.5 | 24.7   | 21.8 | 15.9 | 11.4 | 3.7  |
| 31    | 0.3 | ***  | 8.1  | ***    | 13.7 | ***  | 22.4 | 24.5   | ***  | 16.6 | ***  | 2.9  |
| MEAN  | 2.9 | 5.3  | 6.0  | 12.6   | 17.0 | 21.5 | 25.9 | 26.1   | 23.6 | 17.5 | 12.3 | 5.1  |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.02 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1   | 2   | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12  |
|-------|-----|-----|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|-----|
| 1     | 3.7 | 1.3 | 5.8   | 9.2  | 14.7 | 15.3 | 19.9 | * 18.9 | 21.7 | 17.3 | 12.1 | 7.8 |
| 2     | 3.7 | 1.7 | 6.8   | 9.6  | 15.4 | 15.1 | 19.7 | 19.2   | 22.0 | 16.4 | 11.7 | 6.8 |
| 3     | 3.0 | 2.6 | 4.8   | 8.6  | 14.1 | 17.0 | 19.8 | 19.7   | 22.1 | 15.7 | 12.4 | 8.0 |
| 4     | 3.2 | 3.3 | 4.4   | 8.8  | 16.0 | 17.9 | 20.5 | 20.3   | 22.0 | 14.5 | 12.0 | 8.2 |
| 5     | 2.8 | 3.6 | 4.4   | 8.9  | 15.0 | 18.2 | 20.6 | 20.7   | 21.7 | 14.6 | 12.1 | 6.3 |
| 6     | 2.8 | 4.2 | 5.6   | 10.0 | 14.8 | 18.9 | 19.9 | 21.2   | 21.1 | 15.4 | 13.4 | 5.3 |
| 7     | 2.2 | 4.9 | 4.7   | 10.7 | 14.9 | 18.6 | 19.4 | 21.7   | 20.9 | 15.6 | 13.9 | 6.5 |
| 8     | 1.8 | 3.8 | 5.9   | 11.2 | 17.2 | 17.4 | 19.9 | 21.9   | 20.6 | 14.0 | 12.9 | 6.0 |
| 9     | 2.3 | 4.0 | 5.9   | 11.2 | 16.7 | 17.8 | 20.8 | 22.3   | 20.8 | 14.8 | 11.3 | 5.5 |
| 10    | 2.4 | 3.5 | 5.4   | 12.5 | 16.9 | 18.5 | 21.2 | 22.8   | 21.6 | 15.6 | 11.0 | 4.2 |
| 11    | 1.8 | 3.6 | 5.0   | 12.1 | 15.9 | 19.1 | 21.1 | 22.9   | 21.7 | 15.2 | 10.4 | 4.1 |
| 12    | 2.6 | 3.3 | 5.4   | 12.0 | 15.3 | 19.3 | 21.3 | 22.8   | 21.7 | 15.6 | 11.7 | 4.1 |
| 13    | 2.2 | 2.9 | 7.2   | 11.5 | 17.2 | 19.0 | 21.1 | 22.7   | 21.8 | 15.6 | 11.4 | 4.2 |
| 14    | 1.8 | 2.4 | 7.5   | 12.6 | 17.5 | 18.9 | 21.2 | 23.0   | 21.8 | 15.5 | 11.5 | 4.4 |
| 15    | 1.5 | 3.6 | 7.8   | 13.7 | 17.3 | 18.4 | 21.4 | 23.1   | 22.0 | 16.6 | 11.2 | 4.9 |
| 16    | 2.3 | 3.4 | 7.8   | 15.3 | 16.8 | 17.8 | 21.5 | 23.2   | 21.8 | 17.5 | 9.1  | 5.4 |
| 17    | 1.9 | 4.9 | 5.8   | 13.8 | 16.6 | 17.8 | 21.7 | 23.3   | 22.1 | 16.9 | 8.5  | 3.5 |
| 18    | *** | 7.1 | 5.5   | 13.5 | 17.1 | 17.7 | 21.8 | 23.5   | 22.2 | 16.1 | 8.9  | 2.6 |
| 19    | 1.7 | 4.8 | 7.6   | 11.9 | 17.5 | 18.3 | 21.4 | 21.0   | 21.3 | 14.2 | 9.9  | 2.8 |
| 20    | 1.6 | 5.6 | 8.2   | 11.1 | 18.2 | 18.8 | 20.6 | 20.6   | 19.4 | 14.4 | 11.7 | 2.3 |
| 21    | 1.9 | 6.0 | 8.3   | 11.5 | 19.0 | 18.7 | 18.6 | 20.5   | 18.2 | 14.4 | 9.3  | 2.0 |
| 22    | 2.3 | 4.7 | 7.4   | 12.9 | 18.2 | 18.5 | 17.3 | 19.7   | 18.9 | 15.2 | 7.3  | 2.1 |
| 23    | 2.2 | 5.4 | 7.8   | 13.3 | 16.3 | 19.0 | 17.4 | 20.6   | 18.0 | 16.2 | 8.1  | 1.9 |
| 24    | 3.6 | 6.5 | 6.9   | 15.0 | 15.0 | 19.5 | 18.7 | 21.4   | 17.2 | 15.9 | 8.8  | 1.6 |
| 25    | 3.0 | 8.2 | 6.7   | 13.7 | 16.1 | 18.6 | 19.7 | 21.9   | 16.8 | 16.1 | 7.0  | 1.1 |
| 26    | 2.4 | 6.7 | 7.8   | 13.7 | 16.8 | 17.3 | 19.9 | 21.8   | 16.4 | 15.0 | 5.8  | 0.8 |
| 27    | 2.3 | 7.3 | 7.1   | 14.9 | 17.0 | 17.2 | 20.1 | 21.2   | 16.7 | 12.3 | 6.5  | 0.9 |
| 28    | 1.6 | 5.9 | 8.5   | 16.8 | 17.0 | 18.6 | 19.9 | 20.9   | 15.8 | 11.7 | 6.4  | 1.0 |
| 29    | 2.1 | *** | * 8.6 | 15.0 | 17.0 | 19.6 | 19.6 | 20.8   | 16.4 | 11.8 | 7.7  | 1.0 |
| 30    | 1.7 | *** | 8.8   | 14.6 | 16.5 | 20.0 | 19.4 | 20.9   | 17.0 | 12.9 | 8.0  | 1.0 |
| 31    | 1.0 | *** | 9.7   | ***  | 16.1 | ***  | 18.8 | 21.2   | ***  | 13.8 | ***  | 0.6 |
| MEAN  | 2.3 | 4.5 | 6.7   | 12.3 | 16.5 | 18.2 | 20.1 | 21.5   | 20.1 | 15.0 | 10.1 | 3.8 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.10 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1   | 2   | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|-----|-----|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 1     | 5.1 | 2.6 | 6.8   | 9.8  | 15.4 | 16.8 | 23.1 | * 22.6 | 25.1 | 20.7 | 15.9 | 10.8 |
| 2     | 5.1 | 2.8 | 7.5   | 10.1 | 15.8 | 16.5 | 23.0 | 22.7   | 25.4 | 20.0 | 15.3 | 10.0 |
| 3     | 4.7 | 3.5 | 6.5   | 9.9  | 15.2 | 17.6 | 23.0 | 23.1   | 25.6 | 19.4 | 15.6 | 10.4 |
| 4     | 4.6 | 4.1 | 5.8   | 9.5  | 16.0 | 18.6 | 23.5 | 23.6   | 25.5 | 18.3 | 15.3 | 11.0 |
| 5     | 4.4 | 4.4 | 5.6   | 9.5  | 15.9 | 19.1 | 23.8 | 24.2   | 25.3 | 18.1 | 15.3 | 9.7  |
| 6     | 4.3 | 4.9 | 6.3   | 10.3 | 15.5 | 19.6 | 23.4 | 24.6   | 24.9 | 18.4 | 16.2 | 8.7  |
| 7     | 4.0 | 5.5 | 6.2   | 10.9 | 15.6 | 19.8 | 22.9 | 25.0   | 24.6 | 18.9 | 16.7 | 9.1  |
| 8     | 3.6 | 5.0 | 6.3   | 11.5 | 16.9 | 18.9 | 23.2 | 25.3   | 24.3 | 17.7 | 16.3 | 9.0  |
| 9     | 3.6 | 5.0 | 6.8   | 11.6 | 17.0 | 18.9 | 23.9 | 25.6   | 24.3 | 17.9 | 15.0 | 8.6  |
| 10    | 3.9 | 4.6 | 6.5   | 12.4 | 17.2 | 19.5 | 24.2 | 26.1   | 24.8 | 18.6 | 14.5 | 7.5  |
| 11    | 3.4 | 4.8 | 6.1   | 12.5 | 16.9 | 20.0 | 24.2 | 26.4   | 24.9 | 18.4 | 14.0 | 7.2  |
| 12    | 3.7 | 4.5 | 6.3   | 12.5 | 16.2 | 20.2 | 24.4 | 26.3   | 24.9 | 18.6 | 14.6 | 7.0  |
| 13    | 3.7 | 4.2 | 7.5   | 12.1 | 17.4 | 20.2 | 24.2 | 26.2   | 25.0 | 18.6 | 14.6 | 7.0  |
| 14    | 3.4 | 3.9 | 7.9   | 12.7 | 18.0 | 20.2 | 24.2 | 26.4   | 25.0 | 18.5 | 14.6 | 7.1  |
| 15    | 3.1 | 4.4 | 8.5   | 13.6 | 17.9 | 19.9 | 24.3 | 26.5   | 25.1 | 19.4 | 14.5 | 7.4  |
| 16    | 3.5 | 4.5 | 8.5   | 15.0 | 17.5 | 19.4 | 24.4 | 26.6   | 25.0 | 20.2 | 13.1 | 7.9  |
| 17    | 3.3 | 5.3 | 7.3   | 14.2 | 17.5 | 19.5 | 24.5 | 26.7   | 25.1 | 20.0 | 12.3 | 6.9  |
| 18    | *** | 7.3 | 6.7   | 14.0 | 17.6 | 19.3 | 24.7 | 26.9   | 25.2 | 19.4 | 12.2 | 5.9  |
| 19    | 3.1 | 6.1 | 7.8   | 13.2 | 18.0 | 19.6 | 24.6 | 25.1   | 24.7 | 18.0 | 12.7 | 5.8  |
| 20    | 3.1 | 6.3 | 8.6   | 12.1 | 18.5 | 20.1 | 24.5 | 24.4   | 23.4 | 17.8 | 14.2 | 5.4  |
| 21    | 3.2 | 6.7 | 9.1   | 12.4 | 19.1 | 20.9 | 23.1 | 24.4   | 22.1 | 17.8 | 13.0 | 5.1  |
| 22    | 3.4 | 6.0 | 8.5   | 13.2 | 19.1 | 21.5 | 21.6 | 23.7   | 22.5 | 18.4 | 11.4 | 5.0  |
| 23    | 3.5 | 6.2 | 8.6   | 13.8 | 17.7 | 22.1 | 21.2 | 24.1   | 21.9 | 19.3 | 11.2 | 4.8  |
| 24    | 4.3 | 7.0 | 8.1   | 15.1 | 16.6 | 22.6 | 21.9 | 24.7   | 21.1 | 19.3 | 11.9 | 4.5  |
| 25    | 4.3 | 8.1 | 7.7   | 14.5 | 16.9 | 22.3 | 22.7 | 25.3   | 20.7 | 19.3 | 10.8 | 4.2  |
| 26    | 3.7 | 7.8 | 8.5   | 14.3 | 17.6 | 21.1 | 23.0 | 25.3   | 20.2 | 18.8 | 9.6  | 3.8  |
| 27    | 3.6 | 7.7 | 8.0   | 15.0 | 17.8 | 20.8 | 23.1 | 25.0   | 20.3 | 16.7 | 9.7  | 3.7  |
| 28    | 3.3 | 7.5 | 8.9   | 16.7 | 17.9 | 21.5 | 23.4 | 24.6   | 19.7 | 15.7 | 9.6  | 3.8  |
| 29    | 3.3 | *** | * 9.2 | 15.9 | 18.2 | 22.5 | 23.4 | 24.5   | 19.9 | 15.5 | 10.4 | 3.7  |
| 30    | 3.2 | *** | 9.4   | 15.3 | 17.9 | 22.9 | 23.3 | 24.4   | 20.3 | 16.1 | 10.6 | 3.7  |
| 31    | 2.7 | *** | 10.1  | ***  | 17.5 | ***  | 22.9 | 24.6   | ***  | 16.9 | ***  | 3.4  |
| MEAN  | 3.7 | 5.4 | 7.6   | 12.8 | 17.2 | 20.1 | 23.5 | 25.0   | 23.6 | 18.4 | 13.4 | 6.7  |

ITEM SOIL TEMPERATURE (0.50 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1   | 2   | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|-----|-----|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 1     | 8.4 | 5.9 | 7.8   | 9.1  | 13.6 | 16.7 | 19.5 | * 21.5 | 23.1 | 20.8 | 17.6 | 12.7 |
| 2     | 8.3 | 5.8 | 7.7   | 9.3  | 13.7 | 16.6 | 19.7 | 21.4   | 23.1 | 20.8 | 17.5 | 12.7 |
| 3     | 8.2 | 5.7 | 7.7   | 9.4  | 13.8 | 16.4 | 19.9 | 21.3   | 23.3 | 20.7 | 17.3 | 12.5 |
| 4     | 8.1 | 5.7 | 7.7   | 9.5  | 13.9 | 16.4 | 20.0 | 21.4   | 23.3 | 20.5 | 17.1 | 12.4 |
| 5     | 7.9 | 5.8 | 7.6   | 9.5  | 14.0 | 16.6 | 20.2 | 21.5   | 23.4 | 20.2 | 17.0 | 12.4 |
| 6     | 7.8 | 5.9 | 7.4   | 9.5  | 14.1 | 16.8 | 20.4 | 21.6   | 23.4 | 19.7 | 16.8 | 12.2 |
| 7     | 7.7 | 6.1 | 7.4   | 9.7  | 14.2 | 17.0 | 20.5 | 21.8   | 23.4 | 19.5 | 16.8 | 11.9 |
| 8     | 7.6 | 6.2 | 7.3   | 9.8  | 14.2 | 17.2 | 20.5 | 22.0   | 23.3 | 19.4 | 16.8 | 11.7 |
| 9     | 7.4 | 6.4 | 7.3   | 10.1 | 14.4 | 17.3 | 20.6 | 22.2   | 23.2 | 19.3 | 16.8 | 11.6 |
| 10    | 7.2 | 6.4 | 7.4   | 10.3 | 14.6 | 17.3 | 20.7 | 22.4   | 23.1 | 19.2 | 16.7 | 11.4 |
| 11    | 7.1 | 6.4 | 7.4   | 10.5 | 14.8 | 17.5 | 20.8 | 22.7   | 23.1 | 19.1 | 16.4 | 11.1 |
| 12    | 7.0 | 6.4 | 7.4   | 10.7 | 15.0 | 17.6 | 21.0 | 22.9   | 23.2 | 19.1 | 16.2 | 10.8 |
| 13    | 6.9 | 6.4 | 7.4   | 10.9 | 15.1 | 17.9 | 21.1 | 23.0   | 23.2 | 19.0 | 16.0 | 10.5 |
| 14    | 6.9 | 6.3 | 7.5   | 11.0 | 15.2 | 18.0 | 21.2 | 23.2   | 23.2 | 19.0 | 15.9 | 10.3 |
| 15    | 6.8 | 6.2 | 7.7   | 11.1 | 15.4 | 18.1 | 21.2 | 23.3   | 23.2 | 19.0 | 15.8 | 10.1 |
| 16    | 6.6 | 6.1 | 7.9   | 11.4 | 15.6 | 18.2 | 21.3 | 23.4   | 23.3 | 19.0 | 15.7 | 10.0 |
| 17    | 6.6 | 6.1 | 8.1   | 11.7 | 15.7 | 18.2 | 21.3 | 23.6   | 23.3 | 19.1 | 15.5 | 10.0 |
| 18    | *** | 6.2 | 8.1   | 12.0 | 15.7 | 18.2 | 21.4 | 23.7   | 23.3 | 19.2 | 15.2 | 9.9  |
| 19    | 6.4 | 6.5 | 8.0   | 12.1 | 15.8 | 18.1 | 21.4 | 24.0   | 23.3 | 19.2 | 14.9 | 9.6  |
| 20    | 6.3 | 6.7 | 8.1   | 12.2 | 15.9 | 18.1 | 21.5 | 24.1   | 23.3 | 19.1 | 14.6 | 9.4  |
| 21    | 6.2 | 6.8 | 8.3   | 12.1 | 16.1 | 18.2 | 21.6 | 23.8   | 23.0 | 18.9 | 14.6 | 9.2  |
| 22    | 6.2 | 6.9 | 8.5   | 12.1 | 16.3 | 18.4 | 21.5 | 23.7   | 22.6 | 18.7 | 14.6 | 8.9  |
| 23    | 6.2 | 6.9 | 8.5   | 12.1 | 16.5 | 18.6 | 21.3 | 23.5   | 22.5 | 18.6 | 14.3 | 8.7  |
| 24    | 6.2 | 7.0 | 8.6   | 12.3 | 16.5 | 18.8 | 21.0 | 23.3   | 22.3 | 18.7 | 14.1 | 8.6  |
| 25    | 6.2 | 7.1 | 8.6   | 12.6 | 16.3 | 19.1 | 20.9 | 23.2   | 22.1 | 18.8 | 13.9 | 8.4  |
| 26    | 6.3 | 7.4 | 8.5   | 12.7 | 16.2 | 19.2 | 20.9 | 23.3   | 21.8 | 18.8 | 13.7 | 8.1  |
| 27    | 6.3 | 7.6 | 8.6   | 12.8 | 16.3 | 19.2 | 21.0 | 23.3   | 21.6 | 18.8 | 13.4 | 7.9  |
| 28    | 6.2 | 7.7 | 8.6   | 13.0 | 16.3 | 19.2 | 21.0 | 23.3   | 21.3 | 18.6 | 13.1 | 7.7  |
| 29    | 6.2 | *** | * 8.7 | 13.3 | 16.5 | 19.2 | 21.1 | 23.2   | 21.1 | 18.2 | 12.9 | 7.5  |
| 30    | 6.1 | *** | 8.8   | 13.5 | 16.7 | 19.4 | 21.4 | 23.2   | 20.9 | 17.9 | 12.7 | 7.4  |
| 31    | 6.0 | *** | 9.0   | ***  | 16.7 | ***  | 21.5 | 23.1   | ***  | 17.7 | ***  | 7.3  |
| MEAN  | 6.9 | 6.5 | 8.0   | 11.2 | 15.3 | 17.9 | 20.9 | 22.8   | 22.8 | 19.2 | 15.5 | 10.1 |

ITEM SOIL TEMPERATURE (1.00 m DEPTH)  
 INSTRUMENT PT RESISTANCE THERMOMETER (C-PTG-10)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

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

ITEM GROUND WATER LEVEL (10.0 m DEPTH)  
INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE)(M86H-10 since Apr 22, 2009)  
UNIT (m)  
YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2     | 3       | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | -1.80 | -2.10 | -1.81   | -1.83 | -1.82 | -1.49 | -1.84 | ***   | -1.79 | -1.73 | -1.80 | -1.90 |
| 2     | -1.82 | -2.12 | -1.74   | -1.84 | -1.84 | -1.55 | -1.85 | ***   | -1.79 | -1.75 | -1.82 | -1.91 |
| 3     | -1.83 | -2.13 | -1.73   | -1.85 | -1.85 | -1.59 | -1.87 | ***   | -1.77 | -1.77 | -1.83 | -1.92 |
| 4     | -1.84 | -2.14 | -1.75   | -1.86 | -1.86 | -1.62 | -1.88 | ***   | -1.77 | -1.79 | -1.85 | -1.90 |
| 5     | -1.85 | -2.15 | -1.78   | -1.87 | -1.87 | -1.65 | -1.90 | ***   | -1.78 | -1.79 | -1.86 | -1.89 |
| 6     | -1.86 | -2.16 | -1.79   | -1.88 | -1.88 | -1.67 | -1.91 | ***   | -1.80 | -1.30 | -1.87 | -1.88 |
| 7     | -1.87 | -2.16 | -1.79   | -1.89 | -1.89 | -1.68 | -1.93 | ***   | -1.78 | -1.40 | -1.89 | -1.87 |
| 8     | -1.88 | -2.18 | -1.71   | -1.90 | -1.90 | -1.69 | -1.94 | ***   | -1.79 | -1.50 | -1.90 | -1.84 |
| 9     | -1.89 | -2.19 | -1.72   | -1.91 | -1.91 | -1.70 | -1.96 | ***   | -1.81 | -1.56 | -1.91 | -1.83 |
| 10    | -1.90 | -2.20 | -1.75   | -1.92 | -1.92 | -1.72 | -1.97 | -1.87 | -1.82 | -1.60 | -1.93 | -1.82 |
| 11    | -1.91 | -2.21 | -1.74   | -1.92 | -1.93 | -1.70 | -1.99 | -1.88 | -1.83 | -1.63 | -1.94 | -1.82 |
| 12    | -1.92 | -2.21 | -1.71   | -1.94 | -1.81 | -1.65 | -2.01 | -1.90 | -1.85 | -1.66 | -1.94 | -1.82 |
| 13    | -1.93 | -2.22 | -1.73   | -1.95 | -1.64 | -1.58 | -2.03 | -1.91 | -1.86 | -1.69 | -1.95 | -1.83 |
| 14    | -1.94 | -2.23 | -1.75   | -1.96 | -1.59 | -1.53 | -2.05 | -1.93 | -1.88 | -1.71 | -1.95 | -1.85 |
| 15    | -1.95 | -2.22 | -1.76   | -1.97 | -1.62 | -1.56 | -2.06 | -1.95 | -1.90 | -1.73 | -1.95 | -1.86 |
| 16    | -1.96 | -2.18 | -1.78   | -1.98 | -1.66 | -1.60 | -2.08 | -1.96 | -1.91 | -1.74 | -1.96 | -1.87 |
| 17    | -1.97 | -2.12 | -1.79   | -1.99 | -1.69 | -1.60 | -2.10 | -1.98 | -1.93 | -1.76 | -1.96 | -1.89 |
| 18    | ***   | -2.01 | -1.81   | -2.00 | -1.72 | -1.56 | -2.12 | -2.00 | -1.96 | -1.77 | -1.97 | -1.90 |
| 19    | -1.99 | -1.86 | -1.82   | -2.01 | -1.75 | -1.59 | -2.14 | -1.82 | -1.98 | -1.78 | -1.96 | -1.92 |
| 20    | -2.00 | -1.85 | -1.83   | -2.00 | -1.77 | -1.62 | -2.15 | -1.49 | -2.00 | -1.79 | -1.79 | -1.93 |
| 21    | -2.01 | -1.86 | -1.84   | -1.98 | -1.79 | -1.65 | -2.16 | -1.59 | -1.67 | -1.80 | -1.75 | -1.94 |
| 22    | -2.02 | -1.87 | -1.81   | -1.96 | -1.80 | -1.68 | -2.18 | -1.52 | -0.98 | -1.69 | -1.76 | -1.95 |
| 23    | -2.03 | -1.88 | -1.73   | -1.93 | -1.82 | -1.70 | -2.19 | -1.46 | -1.30 | -1.59 | -1.77 | -1.96 |
| 24    | -2.04 | -1.89 | -1.71   | -1.78 | -1.80 | -1.72 | -2.20 | -1.54 | -1.44 | -1.63 | -1.79 | -1.98 |
| 25    | -2.05 | -1.89 | -1.71   | -1.75 | -1.74 | -1.75 | -2.21 | -1.60 | -1.52 | -1.65 | -1.81 | -1.99 |
| 26    | -2.06 | -1.91 | -1.73   | -1.75 | -1.74 | -1.77 | -2.22 | -1.64 | -1.57 | -1.69 | -1.83 | -2.00 |
| 27    | -2.07 | -1.91 | -1.76   | -1.76 | -1.76 | -1.78 | -2.24 | -1.67 | -1.61 | -1.71 | -1.84 | -2.01 |
| 28    | -2.08 | -1.91 | -1.77   | -1.78 | -1.78 | -1.79 | -2.25 | -1.70 | -1.65 | -1.73 | -1.85 | -2.02 |
| 29    | -2.08 | ***   | * -1.79 | -1.80 | -1.62 | -1.81 | -2.26 | -1.73 | -1.68 | -1.75 | -1.87 | -2.03 |
| 30    | -2.09 | ***   | -1.80   | -1.82 | -1.26 | -1.83 | -2.21 | -1.75 | -1.70 | -1.77 | -1.88 | -2.05 |
| 31    | -2.10 | ***   | -1.81   | ***   | -1.40 | ***   | -2.03 | -1.77 | ***   | -1.78 | ***   | -2.06 |
| MEAN  | -1.96 | -2.06 | -1.77   | -1.89 | -1.76 | -1.66 | -2.06 | -1.76 | -1.74 | -1.69 | -1.87 | -1.92 |

ITEM GROUND WATER LEVEL (NEW; 2.0 m DEPTH)  
INSTRUMENT WATER LEVEL GAUGE (PRESSURE TRANSDUCER TYPE)  
UNIT (m)  
YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1     | -1.67 | ***   | -1.62 | -1.77 | -1.73 | -1.35 | -1.77 | ***   | -1.67 | -1.64 | -1.73 | -1.83 |
| 2     | -1.68 | ***   | -1.55 | -1.78 | -1.74 | -1.43 | -1.78 | -1.66 | -1.66 | -1.66 | -1.74 | -1.85 |
| 3     | -1.70 | ***   | -1.53 | -1.79 | -1.76 | -1.48 | -1.80 | -1.67 | -1.63 | -1.68 | -1.76 | -1.85 |
| 4     | -1.71 | ***   | -1.56 | -1.80 | -1.77 | -1.52 | -1.81 | -1.69 | -1.64 | -1.70 | -1.78 | -1.83 |
| 5     | -1.72 | ***   | -1.60 | -1.82 | -1.78 | -1.55 | -1.83 | -1.69 | -1.66 | -1.70 | -1.79 | -1.81 |
| 6     | -1.73 | ***   | -1.62 | -1.83 | -1.79 | -1.57 | -1.84 | -1.67 | -1.67 | -1.20 | -1.81 | -1.80 |
| 7     | -1.74 | ***   | -1.62 | -1.84 | -1.80 | -1.58 | -1.86 | -1.67 | -1.66 | -1.25 | -1.82 | -1.79 |
| 8     | -1.75 | ***   | -1.53 | -1.85 | -1.81 | -1.60 | ***   | -1.69 | -1.67 | -1.37 | -1.84 | -1.76 |
| 9     | -1.76 | ***   | -1.54 | -1.86 | -1.83 | -1.62 | ***   | -1.70 | -1.69 | -1.44 | -1.85 | -1.75 |
| 10    | -1.78 | ***   | -1.57 | ***   | -1.84 | -1.64 | ***   | -1.72 | -1.70 | -1.49 | ***   | -1.74 |
| 11    | -1.79 | ***   | -1.61 | ***   | -1.85 | -1.62 | ***   | -1.73 | -1.72 | -1.53 | ***   | -1.74 |
| 12    | -1.80 | ***   | -1.65 | ***   | -1.73 | -1.56 | ***   | -1.75 | -1.73 | -1.57 | ***   | -1.74 |
| 13    | -1.81 | ***   | -1.67 | ***   | -1.53 | -1.50 | ***   | -1.77 | -1.75 | -1.60 | ***   | -1.76 |
| 14    | -1.82 | ***   | -1.69 | ***   | -1.47 | -1.43 | ***   | -1.78 | -1.77 | -1.62 | ***   | -1.77 |
| 15    | -1.83 | ***   | -1.70 | ***   | -1.50 | -1.46 | ***   | -1.80 | -1.79 | -1.64 | ***   | -1.79 |
| 16    | -1.84 | ***   | -1.72 | ***   | -1.55 | -1.50 | ***   | -1.82 | -1.81 | -1.66 | ***   | -1.81 |
| 17    | -1.85 | -1.86 | -1.74 | ***   | -1.59 | -1.50 | ***   | -1.83 | -1.83 | -1.68 | ***   | -1.82 |
| 18    | ***   | -1.82 | -1.75 | ***   | -1.62 | -1.47 | ***   | -1.85 | -1.85 | -1.69 | ***   | -1.84 |
| 19    | ***   | -1.63 | -1.76 | ***   | -1.65 | -1.50 | ***   | -1.70 | -1.86 | -1.70 | -1.85 | -1.86 |
| 20    | ***   | -1.62 | -1.78 | ***   | -1.68 | -1.54 | ***   | -1.30 | -1.85 | -1.71 | -1.72 | -1.85 |
| 21    | ***   | -1.64 | -1.79 | ***   | -1.70 | -1.57 | ***   | -1.39 | -1.58 | -1.72 | -1.64 | ***   |
| 22    | ***   | -1.66 | -1.75 | -1.86 | -1.72 | -1.59 | ***   | -1.33 | -0.73 | -1.62 | -1.66 | ***   |
| 23    | ***   | -1.68 | -1.66 | -1.85 | -1.73 | -1.62 | ***   | -1.26 | -1.09 | -1.49 | -1.68 | ***   |
| 24    | ***   | -1.70 | -1.64 | -1.71 | -1.71 | -1.64 | ***   | -1.36 | -1.27 | -1.53 | -1.70 | ***   |
| 25    | ***   | -1.71 | -1.65 | -1.64 | -1.64 | -1.67 | ***   | -1.43 | -1.38 | -1.56 | -1.72 | ***   |
| 26    | ***   | -1.73 | -1.67 | -1.64 | -1.64 | -1.69 | ***   | -1.49 | -1.45 | -1.60 | -1.74 | ***   |
| 27    | ***   | -1.74 | -1.69 | -1.66 | -1.67 | -1.70 | ***   | -1.53 | -1.50 | -1.63 | -1.76 | ***   |
| 28    | ***   | -1.73 | -1.71 | -1.68 | -1.69 | -1.72 | ***   | -1.57 | -1.55 | -1.65 | -1.78 | ***   |
| 29    | ***   | ***   | ***   | -1.71 | -1.55 | -1.74 | ***   | -1.60 | -1.58 | -1.67 | -1.80 | ***   |
| 30    | ***   | ***   | -1.74 | -1.72 | -1.12 | -1.75 | -1.85 | -1.62 | -1.61 | -1.69 | -1.81 | ***   |
| 31    | ***   | ***   | -1.76 | ***   | -1.24 | ***   | -1.81 | -1.65 | ***   | -1.71 | ***   | ***   |
| MEAN  | -1.76 | -1.71 | -1.66 | -1.77 | -1.66 | -1.57 | -1.82 | -1.62 | -1.61 | -1.59 | -1.76 | -1.80 |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (1.6 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT HUMIDITY AND TEMPERATURE PROBE (CVS-HMP45D; CVS-HMP155D, SINCE APR. 7, 2011)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2     | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 1     | -5.6  | -10.7 | 2.2   | -0.9 | 12.9 | 8.3  | 23.5 | * 20.0 | 25.2 | 14.6 | 8.6  | 3.9  |
| 2     | -3.7  | -5.5  | -2.4  | 2.5  | 6.0  | 13.7 | 22.9 | 20.1   | 25.1 | 11.6 | 10.8 | 0.7  |
| 3     | -3.2  | -4.5  | -12.0 | -2.6 | 8.8  | 16.0 | 23.2 | 22.5   | 24.6 | 7.5  | 12.1 | 10.5 |
| 4     | -4.2  | -3.1  | -11.5 | -3.1 | 10.6 | 16.7 | 24.3 | 23.4   | 23.4 | 8.3  | 11.9 | 1.9  |
| 5     | -4.3  | -1.9  | -7.3  | -5.5 | 8.1  | 17.9 | 22.9 | 24.3   | 22.2 | 14.6 | 14.0 | 0.8  |
| 6     | -8.2  | -0.1  | -3.7  | -1.3 | 9.8  | 15.8 | 20.1 | 24.7   | 20.7 | 17.1 | 16.4 | 1.7  |
| 7     | -11.5 | -3.9  | 0.8   | 5.9  | 14.2 | 16.5 | 22.5 | 24.7   | 18.8 | 10.4 | 14.2 | 4.4  |
| 8     | -9.4  | -6.3  | -0.5  | 7.8  | 11.6 | 16.1 | 24.4 | 24.3   | 19.1 | 9.4  | 10.4 | 4.1  |
| 9     | -4.8  | 0.5   | -1.6  | 11.8 | 9.2  | 16.2 | 24.8 | 25.0   | 22.6 | 13.8 | 7.2  | 1.1  |
| 10    | -11.6 | -5.8  | -10.2 | 6.1  | 16.5 | 19.3 | 23.5 | 25.4   | 23.5 | 16.4 | 7.4  | -2.9 |
| 11    | -10.1 | -0.3  | ***   | 6.7  | 13.1 | 20.1 | 23.5 | 24.8   | 23.4 | 15.1 | 9.8  | -1.6 |
| 12    | -7.1  | -0.8  | ***   | -3.0 | 14.5 | 18.4 | 23.8 | 24.3   | 22.9 | 13.7 | 12.3 | 0.8  |
| 13    | -11.0 | -6.5  | ***   | 1.0  | 15.8 | 18.8 | 23.2 | 24.2   | 22.6 | 15.2 | 12.1 | -0.5 |
| 14    | -8.8  | -3.0  | 3.7   | 2.3  | 10.6 | 17.5 | 22.8 | 25.4   | 23.2 | 16.2 | 11.2 | 1.5  |
| 15    | -4.3  | 0.0   | 3.6   | 9.5  | 4.6  | 14.3 | 22.7 | 24.1   | 22.9 | 20.8 | 7.2  | 2.4  |
| 16    | -8.3  | -2.2  | -3.3  | 9.0  | 10.0 | 17.2 | 22.8 | 24.6   | 22.9 | 19.6 | 2.4  | 0.5  |
| 17    | -9.7  | 3.4   | -12.8 | 0.2  | 13.2 | 17.6 | 23.7 | 24.8   | 23.7 | 15.6 | 2.8  | -6.0 |
| 18    | ***   | 1.3   | -9.5  | 7.1  | 11.8 | 17.8 | 24.6 | 25.5   | 22.8 | 12.3 | 6.8  | -4.1 |
| 19    | -5.7  | -4.9  | -1.5  | 7.0  | 12.3 | 18.8 | 25.1 | 22.2   | 20.7 | 9.2  | 12.5 | -2.5 |
| 20    | -8.7  | 0.2   | 1.8   | 3.0  | 14.5 | 20.5 | 23.7 | 20.4   | 18.1 | 11.7 | 13.1 | -4.9 |
| 21    | -10.5 | -2.3  | 5.4   | 5.7  | 16.8 | 21.7 | 15.9 | 19.3   | 20.4 | 14.4 | 2.6  | -2.1 |
| 22    | -6.9  | -2.0  | 4.1   | 10.1 | 15.8 | 21.4 | 14.1 | 20.0   | 18.3 | 19.0 | 0.8  | 0.0  |
| 23    | -6.3  | 0.0   | -0.6  | 14.0 | 10.9 | 23.5 | 17.6 | 22.7   | 15.7 | 19.7 | 6.7  | -8.1 |
| 24    | 0.0   | 5.2   | -4.1  | 8.4  | 11.0 | 22.8 | 20.6 | 24.1   | 12.5 | 16.1 | 3.4  | -6.8 |
| 25    | -7.3  | 5.3   | -1.8  | 5.4  | 11.1 | 18.6 | 22.0 | 24.8   | 13.7 | 16.7 | -0.9 | -7.3 |
| 26    | -7.4  | -7.6  | -4.8  | 5.8  | 13.8 | 18.6 | 22.6 | 23.2   | 14.3 | 7.5  | 0.2  | -8.2 |
| 27    | -6.9  | -0.4  | -8.0  | 12.3 | 14.7 | 20.1 | 23.6 | 20.9   | 14.0 | 5.8  | 2.9  | -8.3 |
| 28    | -11.6 | 1.4   | -4.6  | 12.8 | 17.6 | 22.4 | 23.5 | 20.2   | 13.4 | 7.9  | 5.6  | -6.6 |
| 29    | -6.7  | ...   | ***   | 6.0  | 17.3 | 22.7 | 23.1 | 20.6   | 15.5 | 9.6  | 7.5  | -4.0 |
| 30    | -10.6 | ...   | 1.6   | 9.7  | 13.4 | 23.9 | 22.8 | 20.4   | 18.0 | 11.7 | 8.3  | -7.5 |
| 31    | -13.0 | ...   | 0.8   | ...  | 8.0  | ...  | 20.7 | 23.4   | ...  | 13.1 | ...  | -7.1 |
| MEAN  | -7.6  | -2.0  | -2.8  | 5.1  | 12.2 | 18.4 | 22.4 | 23.0   | 20.1 | 13.4 | 8.0  | -1.7 |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (12.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT HUMIDITY AND TEMPERATURE PROBE (CVS-HMP45D; CVS-HMP155D, SINCE APR. 7, 2011)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2    | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 1     | -4.4  | -9.3 | 3.2   | -1.2 | 12.4 | 7.6  | 23.1 | * 19.6 | 25.0 | 14.1 | 8.8  | 3.5  |
| 2     | -2.2  | -3.9 | -1.5  | 2.4  | 5.6  | 13.3 | 22.6 | 19.9   | 24.8 | 10.7 | 10.8 | 0.1  |
| 3     | -1.5  | -2.8 | -10.8 | -3.0 | 8.4  | 15.7 | 22.6 | 22.3   | 24.3 | 5.8  | 12.0 | 10.3 |
| 4     | -3.0  | -1.5 | -10.0 | -3.6 | 10.1 | 16.3 | 23.5 | 23.2   | 23.1 | 7.4  | 12.3 | 1.3  |
| 5     | -2.8  | -0.4 | -6.2  | -6.1 | 7.8  | 17.8 | 22.1 | 24.0   | 22.0 | 14.2 | 14.1 | 0.5  |
| 6     | -6.8  | 1.4  | -2.3  | -1.5 | 9.5  | 15.0 | 19.5 | 24.4   | 20.2 | 16.7 | 16.2 | 1.2  |
| 7     | -10.1 | -2.6 | 1.9   | 5.9  | 14.1 | 16.1 | 22.0 | 24.5   | 18.2 | 9.6  | 13.9 | 4.3  |
| 8     | -8.3  | -4.9 | 0.8   | 7.7  | 10.9 | 15.8 | 23.9 | 24.1   | 18.6 | 8.5  | 10.1 | 3.9  |
| 9     | -3.4  | 1.9  | -0.1  | 11.7 | 8.6  | 15.9 | 24.2 | 24.8   | 22.2 | 13.3 | 6.6  | 0.9  |
| 10    | -10.3 | -5.3 | -8.9  | 5.8  | 16.1 | 19.0 | 22.5 | 25.1   | 23.2 | 16.1 | 7.0  | -3.7 |
| 11    | -8.9  | 0.9  | ***   | 6.6  | 12.8 | 19.8 | 22.8 | 24.5   | 23.1 | 14.9 | 9.5  | -2.0 |
| 12    | -5.7  | 0.6  | ***   | -3.9 | 14.3 | 17.6 | 23.1 | 24.0   | 22.4 | 13.2 | 12.3 | 0.7  |
| 13    | -9.9  | -5.4 | ***   | 0.6  | 15.5 | 18.4 | 22.5 | 23.9   | 22.3 | 14.8 | 12.3 | -0.3 |
| 14    | -7.6  | -1.7 | 5.2   | 1.9  | 9.9  | 17.1 | 22.0 | 25.2   | 22.8 | 16.1 | 11.2 | 1.1  |
| 15    | -2.7  | 1.4  | 4.9   | 9.3  | 3.1  | 13.8 | 21.8 | 23.8   | 22.4 | 20.6 | 6.9  | 2.3  |
| 16    | -7.0  | -0.8 | -2.1  | 8.6  | 9.3  | 16.8 | 22.0 | 24.3   | 22.6 | 19.3 | 2.0  | 0.3  |
| 17    | -8.2  | 4.7  | -11.2 | -0.3 | 12.8 | 17.3 | 23.1 | 24.4   | 23.3 | 15.0 | 2.3  | -6.3 |
| 18    | ***   | 2.4  | -8.1  | 6.9  | 11.5 | 17.5 | 24.0 | 25.1   | 22.4 | 11.7 | 6.6  | -4.4 |
| 19    | -4.1  | -3.7 | -0.1  | 6.8  | 11.9 | 18.4 | 24.9 | 22.0   | 20.5 | 8.9  | 12.3 | -2.5 |
| 20    | -7.0  | 1.6  | 3.2   | 2.8  | 14.0 | 20.1 | 23.3 | 20.1   | 17.8 | 11.3 | 12.9 | -4.9 |
| 21    | -9.1  | -0.8 | 6.4   | 5.5  | 16.5 | 21.4 | 15.3 | 19.1   | 20.2 | 14.1 | 2.2  | -2.2 |
| 22    | -5.6  | -0.4 | 5.0   | 9.8  | 15.6 | 20.8 | 13.5 | 19.8   | 17.9 | 18.8 | 0.7  | 0.4  |
| 23    | -4.6  | 1.5  | 0.5   | 13.9 | 10.5 | 23.0 | 17.0 | 22.5   | 15.4 | 19.4 | 6.3  | -8.5 |
| 24    | 1.5   | 6.6  | -2.9  | 7.9  | 10.7 | 22.2 | 20.1 | 23.9   | 12.1 | 15.8 | 2.8  | -7.3 |
| 25    | -6.0  | 6.6  | -0.2  | 5.1  | 10.5 | 18.2 | 21.4 | 24.5   | 13.4 | 16.2 | -1.6 | -7.5 |
| 26    | -5.9  | -6.3 | -3.4  | 5.4  | 13.5 | 18.4 | 22.5 | 23.0   | 13.9 | 6.7  | -0.2 | -8.4 |
| 27    | -5.4  | 1.1  | -6.5  | 12.1 | 14.3 | 19.9 | 23.2 | 20.6   | 13.7 | 5.6  | 2.7  | -8.5 |
| 28    | -10.3 | 2.5  | -3.2  | 12.3 | 17.4 | 21.9 | 23.0 | 19.8   | 13.0 | 7.8  | 5.5  | -6.9 |
| 29    | -5.2  | ...  | ***   | 5.4  | 17.1 | 22.1 | 22.7 | 20.4   | 15.2 | 9.5  | 7.1  | -4.1 |
| 30    | -9.1  | ...  | 1.4   | 9.6  | 13.0 | 23.2 | 22.3 | 20.0   | 17.6 | 11.2 | 8.4  | -7.6 |
| 31    | -11.6 | ...  | 0.5   | ...  | 7.5  | ...  | 20.3 | 23.1   | ...  | 12.9 | ...  | -7.5 |
| MEAN  | -6.2  | -0.6 | -1.7  | 4.8  | 11.8 | 18.0 | 21.8 | 22.8   | 19.8 | 12.9 | 7.8  | -2.0 |

ITEM DEW-POINT TEMPERATURE (29.5 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT HUMIDITY AND TEMPERATURE PROBE (CVS-HMP45D; CVS-HMP155D, SINCE APR. 7, 2011)  
 UNIT (°C)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1     | 2     | 3     | 4     | 5    | 6    | 7    | 8      | 9     | 10   | 11   | 12   |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|--------|-------|------|------|------|
| 1     | -6.8  | -11.8 | 1.7   | -2.7  | 12.1 | 7.4  | 22.9 | * 19.5 | 24.8  | 13.8 | 8.7  | 3.2  |
| 2     | -4.4  | -6.2  | -3.8  | 1.0   | 5.3  | 13.1 | 22.4 | 19.7   | 24.7  | 10.4 | 10.7 | -0.2 |
| 3     | -3.3  | -4.7  | -13.3 | -4.5  | 8.1  | 15.5 | 22.5 | 22.1   | 24.1  | 5.3  | 11.7 | 10.2 |
| 4     | -5.1  | -3.7  | -12.5 | -5.1  | 9.9  | 16.2 | 23.4 | 23.0   | 22.9  | 7.1  | 12.4 | 1.0  |
| 5     | -5.0  | -2.5  | -8.7  | -8.2  | 7.6  | 17.6 | 21.9 | 23.8   | 21.8  | 13.9 | 14.0 | 0.2  |
| 6     | -9.0  | -0.5  | -4.4  | -3.4  | 9.3  | 14.8 | 19.2 | 24.3   | 19.9  | 16.5 | 16.0 | 0.6  |
| 7     | -12.5 | -4.7  | 0.1   | * 5.6 | 13.9 | 15.9 | 21.8 | 24.4   | 18.0  | 9.2  | 13.8 | 4.1  |
| 8     | -10.6 | -7.4  | -1.1  | 7.5   | 10.7 | 15.4 | 23.7 | 24.0   | 18.5  | 8.0  | 9.9  | 3.6  |
| 9     | -5.4  | 0.1   | -1.9  | 11.5  | 8.3  | 15.7 | 24.0 | 24.7   | 22.1  | 12.9 | 6.2  | 0.6  |
| 10    | -12.7 | -8.0  | -11.6 | 5.7   | 15.8 | 18.8 | 22.3 | 25.0   | 23.1  | 15.9 | 6.5  | -4.1 |
| 11    | -11.4 | -0.7  | ***   | 6.5   | 12.6 | 19.6 | 22.7 | 24.3   | 23.0  | 14.9 | 9.3  | -2.3 |
| 12    | -8.0  | -1.2  | ***   | -4.3  | 14.1 | 17.1 | 22.9 | 23.8   | 22.3  | 13.0 | 12.2 | 0.5  |
| 13    | -12.5 | -8.0  | ***   | 0.4   | 15.2 | 18.1 | 22.4 | 23.7   | 22.2  | 14.7 | 12.2 | -0.3 |
| 14    | -9.9  | -3.8  | 3.4   | 1.8   | 9.5  | 16.9 | 21.9 | 25.1   | 22.7  | 16.0 | 11.2 | 0.9  |
| 15    | -4.6  | -0.4  | 3.3   | 9.2   | 2.7  | 13.5 | 21.7 | 23.6   | 22.2  | 20.4 | 6.5  | 2.1  |
| 16    | -9.0  | -3.1  | -4.1  | 8.5   | 9.1  | 16.6 | 21.8 | 24.2   | 22.4  | 19.1 | 1.6  | 0.2  |
| 17    | -10.4 | 3.1   | -13.8 | -0.4  | 12.4 | 17.1 | 23.0 | 24.3   | 23.1  | 14.7 | 2.1  | -6.8 |
| 18    | ***   | 0.4   | -10.6 | 6.7   | 11.3 | 17.3 | 23.9 | 25.0   | 22.2  | 11.5 | 6.3  | -4.6 |
| 19    | -6.1  | -6.1  | -2.3  | 6.5   | 11.7 | 18.2 | 24.7 | 21.8   | 20.4  | 8.6  | 12.2 | -2.7 |
| 20    | -9.1  | -0.4  | 1.1   | 2.6   | 13.9 | 20.0 | 23.1 | 19.9   | 17.6  | 11.1 | 12.7 | -5.0 |
| 21    | -11.4 | -2.9  | 4.9   | 5.3   | 16.4 | 21.2 | 15.1 | 18.8   | 20.0  | 13.9 | 1.8  | -2.3 |
| 22    | -7.8  | -2.5  | 3.5   | 9.7   | 15.5 | 20.6 | 13.3 | 19.6   | 17.6  | 18.6 | 0.4  | 0.3  |
| 23    | -6.8  | -0.4  | -1.5  | 13.7  | 10.2 | 22.7 | 16.8 | 22.3   | 15.1  | 19.3 | 6.0  | -8.7 |
| 24    | -0.2  | 5.1   | -5.4  | 7.6   | 10.4 | 22.0 | 20.0 | 23.7   | 11.8  | 15.7 | 2.5  | -7.5 |
| 25    | -8.2  | 4.8   | -1.9  | 5.0   | 10.1 | 18.0 | 21.2 | 24.3   | 13.1  | 16.0 | -2.0 | -7.7 |
| 26    | -8.0  | -8.7  | -5.5  | 5.2   | 13.3 | 18.2 | 22.3 | 22.8   | 13.7  | 6.4  | -0.5 | -8.5 |
| 27    | -8.0  | -1.1  | -9.0  | 12.0  | 14.0 | 19.7 | 23.0 | 20.4   | -13.5 | 5.2  | 2.5  | -8.7 |
| 28    | -12.9 | 1.0   | -5.5  | 12.0  | 17.2 | 21.8 | 22.8 | 19.6   | -12.8 | 7.7  | 5.3  | -7.0 |
| 29    | -7.5  | ***   | ***   | 5.2   | 16.9 | 22.0 | 22.4 | 20.2   | 15.0  | 9.5  | 6.8  | -4.2 |
| 30    | -11.4 | ***   | 0.0   | 9.4   | 12.8 | 22.9 | 22.1 | 19.9   | 17.5  | 10.9 | 8.3  | -7.8 |
| 31    | -14.0 | ***   | -0.8  | ***   | 7.3  | ***  | 20.1 | 22.9   | ***   | 12.8 | ***  | -7.7 |
| MEAN  | -8.4  | -2.7  | -3.7  | 4.3   | 11.5 | 17.8 | 21.6 | 22.6   | 19.6  | 12.7 | 7.6  | -2.2 |

ITEM PRECIPITATION (0.3 m HEIGHT)  
 INSTRUMENT RAIN GAUGE (TRIPPING BUCKET TYPE) (B-011-00)  
 UNIT (mm)  
 YEAR 2011

| MONTH | 1   | 2    | 3     | 4    | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11   | 12   |
|-------|-----|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 1     | 0.0 | 0.0  | 11.5  | 0.0  | 6.0   | 0.0   | 18.5  | * 0.0 | 8.0   | 0.0   | 0.0  | 4.0  |
| 2     | 0.0 | 0.0  | 0.5   | 0.0  | 0.0   | 9.5   | 0.0   | 0.0   | 8.5   | 0.0   | 0.0  | 0.5  |
| 3     | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 2.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 1.5   | 0.0   | 0.0  | 17.0 |
| 4     | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.5   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 5     | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 13.0  | 2.5   | 14.0  | 0.0   | 67.0  | 0.5  | 0.0  |
| 6     | 0.0 | 1.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.5   | 0.0   | 0.0   | 8.5   | 12.5  | 6.5  | 11.5 |
| 7     | 0.0 | 0.0  | 20.0  | 0.0  | 0.5   | 0.0   | 4.5   | 0.0   | 0.5   | 0.0   | 0.5  | 0.0  |
| 8     | 0.0 | 0.5  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 1.5   | 4.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 6.5  | 2.5  |
| 9     | 0.0 | 6.5  | 0.0   | 4.5  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 4.5  |
| 10    | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 3.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 5.5   | 0.0  | 0.0  |
| 11    | 0.0 | 4.0  | 0.0   | 1.5  | 32.0  | 24.0  | 0.0   | 1.0   | 0.0   | 0.0   | 14.0 | 0.0  |
| 12    | 0.0 | 6.0  | 0.0   | 0.0  | 16.5  | 0.0   | 0.0   | 3.0   | 0.0   | 0.0   | 0.5  | 0.0  |
| 13    | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 10.5  | 20.5  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 14    | 0.0 | 4.5  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 6.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 4.5   | 2.0  | 0.0  |
| 15    | 0.0 | 11.5 | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 6.0   | 0.0  | 0.0  |
| 16    | 1.5 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 10.5  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 5.5   | 0.0  | 0.0  |
| 17    | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 6.0   | 7.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 18    | *** | 26.0 | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 2.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 19    | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 22.0 | 0.0   | 0.0   | 36.5  | 65.0  | 0.0   | 0.0   | 34.0 | 0.0  |
| 20    | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 8.0   | 0.0   | 5.5   | 0.0   | 0.5  | 0.0  |
| 21    | 0.0 | 0.0  | 15.0  | 0.0  | 0.0   | 2.0   | 0.0   | 4.0   | 106.5 | 1.0   | 0.0  | 0.0  |
| 22    | 0.0 | 0.0  | 10.0  | 0.0  | 15.0  | 0.0   | 0.0   | 17.0  | 2.0   | 36.5  | 0.0  | 0.0  |
| 23    | 0.0 | 0.0  | 0.5   | 29.0 | 2.0   | 0.0   | 0.0   | 0.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 24    | 0.0 | 0.5  | 0.0   | 4.0  | 19.5  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 25    | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 1.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 26    | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 2.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 27    | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 1.0  | 0.0   | 0.5   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 28    | 0.0 | 25.0 | 0.0   | 6.0  | 16.5  | 0.0   | 40.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 29    | 0.0 | ***  | * 0.0 | 1.5  | 46.0  | 0.0   | 19.5  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 30    | 0.0 | ***  | 1.0   | 0.0  | 3.5   | 2.5   | 13.5  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0  | 0.0  |
| 31    | 0.0 | ***  | 2.0   | ***  | 0.0   | ***   | 11.5  | 2.0   | ***   | 0.5   | ***  | 0.0  |
| TOTAL | 1.5 | 85.5 | 60.5  | 69.5 | 180.0 | 100.5 | 158.5 | 110.0 | 141.5 | 139.0 | 65.0 | 40.0 |

ITEM           ATMOSPHERIC PRESSURE (1.5 m HEIGHT)  
INSTRUMENT   BAROMETER (PTB210)  
UNIT           (hPa)  
YEAR          2011

| MONTH | 1    | 2    | 3      | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-------|------|------|--------|------|------|------|------|--------|------|------|------|------|
| 1     | 996  | 1012 | 1006   | 1018 | 1003 | 1015 | 1002 | * 1010 | 1005 | 1010 | 1025 | 1016 |
| 2     | 1012 | 1018 | 1001   | 1010 | 1003 | 1014 | 1001 | 1012   | 1004 | 1013 | 1025 | 1020 |
| 3     | 1013 | 1018 | 1007   | 1014 | 1009 | 1009 | 1001 | 1011   | 1006 | 1015 | 1023 | 1004 |
| 4     | 1007 | 1014 | 1010   | 1017 | 1008 | 1006 | 996  | 1011   | 1004 | 1020 | 1025 | 1007 |
| 5     | 1007 | 1014 | 1016   | 1021 | 1015 | 1003 | 997  | 1009   | 997  | 1016 | 1020 | 1018 |
| 6     | 1004 | 1013 | 1009   | 1022 | 1019 | 1003 | 1002 | 1008   | 997  | 1003 | 1011 | 1024 |
| 7     | 1011 | 1005 | 1003   | 1021 | 1011 | 1005 | 1003 | 1009   | 1003 | 1008 | 1009 | 1017 |
| 8     | 1014 | 1009 | 1008   | 1015 | 1005 | 1004 | 1007 | 1008   | 1012 | 1018 | 1012 | 1009 |
| 9     | 1005 | 1002 | 1009   | 1013 | 1010 | 1005 | 1010 | 1007   | 1015 | 1022 | 1015 | 1010 |
| 10    | 1009 | 1010 | 1013   | 1013 | 1001 | 1004 | 1011 | 1005   | 1017 | 1016 | 1017 | 1015 |
| 11    | 1009 | 1012 | 1011   | 1005 | 1008 | 999  | 1013 | 1001   | 1019 | 1014 | 1015 | 1013 |
| 12    | 1004 | 1003 | 1019   | 1011 | 1003 | 1003 | 1012 | 1002   | 1015 | 1013 | 1011 | 1015 |
| 13    | 1013 | 1013 | 1017   | 1011 | 992  | 999  | 1011 | 1006   | 1012 | 1015 | 1010 | 1020 |
| 14    | 1015 | 1017 | 1011   | 1009 | 1000 | 1003 | 1010 | 1006   | 1012 | 1016 | 1012 | 1018 |
| 15    | 1003 | 1015 | 1005   | 1005 | 1012 | 1009 | 1009 | 1004   | 1013 | 1007 | 1016 | 1009 |
| 16    | 998  | 1023 | 999    | 1002 | 1012 | 1011 | 1008 | 1002   | 1010 | 1003 | 1022 | 1008 |
| 17    | 1007 | 1016 | 1010   | 1009 | 1008 | 1008 | 1006 | 1001   | 1009 | 1008 | 1023 | 1016 |
| 18    | ***  | 1003 | 1020   | 1005 | 1013 | 1006 | 1007 | 1001   | 1008 | 1017 | 1021 | 1016 |
| 19    | 1011 | 1018 | 1014   | 998  | 1014 | 1007 | 1003 | 1005   | 1007 | 1024 | 1005 | 1015 |
| 20    | 1009 | 1019 | 1011   | 1009 | 1011 | 1008 | 994  | 1009   | 1007 | 1024 | 1001 | 1018 |
| 21    | 1012 | 1021 | 1007   | 1019 | 1007 | 1006 | 1002 | 1008   | 992  | 1021 | 1014 | 1018 |
| 22    | 1012 | 1023 | 1010   | 1015 | 1007 | 1005 | 1006 | 1008   | 995  | 1011 | 1021 | 1008 |
| 23    | 1016 | 1024 | 1012   | 1006 | 1015 | 1001 | 1005 | 1009   | 1007 | 1008 | 1016 | 1006 |
| 24    | 1012 | 1019 | 1016   | 1001 | 1015 | 1000 | 1007 | 1011   | 1016 | 1011 | 1007 | 1007 |
| 25    | 1014 | 1011 | 1013   | 1005 | 1015 | 1010 | ***  | 1012   | 1022 | 1007 | 1016 | 1007 |
| 26    | 1015 | 1025 | 1012   | 1009 | 1018 | 1014 | ***  | 1012   | 1019 | 1015 | 1024 | 1013 |
| 27    | 1017 | 1020 | 1020   | 1002 | 1017 | 1011 | ***  | * 1013 | 1016 | 1024 | 1022 | 1020 |
| 28    | 1018 | 1013 | 1023   | 995  | 1012 | 1008 | ***  | 1012   | 1016 | 1024 | 1022 | 1022 |
| 29    | 1012 | ...  | * 1018 | 1009 | 1004 | 1010 | ***  | 1011   | 1013 | 1019 | 1017 | 1016 |
| 30    | 1009 | ...  | 1013   | 1013 | 993  | 1008 | 1002 | 1009   | 1004 | 1018 | 1013 | 1016 |
| 31    | 1011 | ...  | 1014   | ...  | 1009 | ...  | 1005 | 1007   | ...  | 1016 | ...  | 1020 |
| MEAN  | 1010 | 1015 | 1012   | 1010 | 1009 | 1007 | 1005 | 1008   | 1009 | 1015 | 1016 | 1014 |

## 2011 年度 陸域環境研究センターセミナーの記録

2011.9.22 第 113 回セミナー 参加者 12 名

Dr. Michael Krautblatter (the University of Bonn: ドイツ ボン大学)

“Rock slope failure and climate change in the European Alps”

(ヨーロッパアルプスにおける気候変化と岩盤斜面の崩壊)

アルプスにおいては、気候変化の影響が氷河の縮小というかたちで誰の目にも明らかに表れている。そこでは山岳永久凍土の昇温も進行しており、その影響が永久凍土の変形（岩石氷河の動きを支配する作用）や、岩盤の不安定化に影響を及ぼすのではないかと考えられ、近年、精力的に調査がなされている。

とくに岩盤の不安定化の結果は、落石や崩壊の発生規模や頻度の増加として表れると考えられているが、そのような現象のモニタリングは容易ではない。その中で発表者は、非常に大規模な土砂トラップを用いた落石の現地観測を実施し、小スケールの落石観測の量的検討結果と、堆積物を利用した大スケール（時間的には数百～数千年）の岩盤削剥量のギャップを埋める中スケールのプロセスの一端を明らかにした。そのプロセスは降雨に伴う岩盤内凹部からの土砂の二次移動であった。調査地のアルプス北部では、近年、低気圧の侵入経路のパターンに変化が見られ、それに伴う降雨イベントの増加が、岩壁からの土砂生産が活発になったようにみせる原因ではないか、と考えている。

第二に、岩盤内の凍結融解を、二次元電気探査と弾性波探査によって、詳細にモニタリングしていることを紹介した。岩石試料の室内実験結果を現地観測結果に組み合わせることで、急峻な高山環境下の凍結融解の面的な広がりをより正確にモニタリングできた。今後、凍結融解状況の時間変化の理解が進むだけでなく、岩盤の熱的状況を著しく変化させる岩盤内への水の浸透現象などの研究が進むと考えている。（文責・池田 敦）

2012.1.20 第 114 回セミナー 参加者 17 名

坂部綾香（京都大学大学院農学研究科森林水文学研究室）

「簡易渦集積法を用いた温帯ヒノキ林およびアラスカ域クロトウヒ林樹冠上におけるメタンフラックスの観測」

メタンは、 $\text{CO}_2$  に次ぐ温室効果ガスである。森林は大部分が酸化的土壌から成るため、メタンの吸収源であると考えられてきた。しかし、アジアモンスーン気候に位置する森林、アラスカなどの永久凍土上に生育する森林などでは土壌水分の変動性が大きいいため、メタンフラックスは、放出側にも変動性を持つことが予想される。メタン濃度計の制約により、森林群落スケールのメタンフラックスの測定例はほとんどないため、その実態はあまり明らかになっていない。近年、レーザー分光技術の発達により、Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS) 式の高精度メタン濃度計が利用され始めた。TDLS 式メタン濃度計において、応答速度と精度はトレードオフの関係にある。そのため、濃度計の応答速度への要求を緩和した

簡易渦集積法を用いることによって、滋賀県南部に位置するヒノキ林とアラスカ中央部に位置するクロトウヒ林樹冠上でメタンフラックスを測定し、広域な森林を対象としたメタンフラックスの実態を明らかにすることを目的とした。その結果、温帯ヒノキ林におけるメタンフラックスは放出と吸収が長周期で切り替わる季節変化を示した。また、アラスカ域クロトウヒ林では、観測期間を通してメタンの放出が観測された。本研究によって、森林が群落スケールでメタンの放出源となりうることを明らかにした。

#### 岩田拓記（アラスカ大学国際北極圏研究センター）

##### 「アラスカ火災跡地での FPAR と植生特性の季節変化」

FPAR (fraction of absorbed photosynthetically active radiation) は炭素・水循環モデリングにおいて重要な生物物理学的パラメータであり、NASA より全球の陸域に対する FPAR データ（以下、MODIS FPAR）が提供されている。しかしながら、火災跡地では MODIS FPAR が過大評価されているという報告例があり、さらなる検証が必要とされている。また、火災後の植生の回復とともに、FPAR がどのように変化していくかを理解することは、広域の二酸化炭素を推定する上で重要である。本研究では、アラスカの火災後 1 年目と 6 年目の火災跡で放射量、植被率、植生指数、LAI の季節変化を測定し、FPAR の季節変化、FPAR と植生指数の関係を調べた。その結果、本研究の測定場所である火災跡でも、MODIS FPAR が過大評価になっていることが明らかになった。また、火災跡での FPAR を推定する上では、NDVI よりも EVI の方が優れている可能性が示唆された。

#### 2012.1.27 第 115 回セミナー 参加者 15 名

Dr. Celine Schneider (University of Reims Champagne Ardenne : フランス ランス大学)

“Properties and salt weathering susceptibility of natural and reconstituted stones of the Orval Abbey (Belgium)”

(ベルギー・オルヴァル修道院を構成する自然・人工岩石の諸性質と塩類風化特性)

中世に建造されたオルヴァル修道院（ベルギー）は、ビール醸造所としても名高い歴史ある石造建造物で、幾度も破壊と再建が繰り返されてきた。そのため、地元産の自然岩石（石灰岩）からなる古い壁面と最近修復された人工岩石からなる新しい壁面が混在する。後者の方が風化の進行（特に塩類風化）が深刻で、硫酸ナトリウムの析出にともなう破碎が顕著である。この風化の原因について、岩石・鉱物学的な観点（SEM, XRD, XRF, 空隙特性等）から調べた。その結果、人工岩石は自然岩石の破片とセメントで構成され、自然岩石と空隙率は同等であるが、空隙径とセメント組織の点で塩類風化を受けやすいことが判明した。（文責・松岡憲知）

#### 2012.2.6 第 116 回セミナー 参加者 12 名

蔵治光一郎（東京大学大学院農学生命科学研究科付属演習林生態水文学研究所所長）

「長良川河口堰検証プロジェクトチームについて」

2011 年の統一地方選挙で、長良川河口堰の開門調査を共同マニフェストとして掲げた、

名古屋市の川村たかし市長と愛知県大村秀章知事が誕生した。愛知県は、河口堰の適切な運用を検討するため、長良川河口堰検証プロジェクトチームを設置、その下部組織として具体的な検討を行う専門委員会を設置した。講演者は、この専門委員会に河川技術の専門家として参加した。講演では、この専門委員会の審議の経過についての報告が行われるとともに、適切な流域管理とはどのような観点に基づいて行われるべきであるのか、海外の事例も紹介しながら、議論が行われた。(文責・浅沼 順)

## 2012.2.14 第 117 回セミナー 参加者 9 名

若月泰孝(筑波大学 陸域環境研究センター)

### 「短時間降雨予測に関する基礎研究」

昨今マスコミを通じてゲリラ豪雨などと呼ばれるようになった局地的短時間豪雨は、中小規模河川の氾濫や内水氾濫を引き起こし、交通や通信などに被害をもたらす。これらは、単一もしくは複数の小スケール(数十 km 程度)の発達した積乱雲によってもたらされる。積乱雲は大規模な前線などに伴い発生する場合、大まかな発生や構造を大気モデルに適切な初期値を与えたシミュレーションで予測することが可能になる。しかし、スケールの小さな積乱雲が不規則に発生するような状況で、その発生を予測することは極めて困難である。不規則な振る舞いは、気象庁の降水ナウキャストで用いられているレーダエコーの時間外挿による予測では十分に扱えない。一方、大気モデルによるシミュレーションでは、個々の積乱雲の構造を初期状態に組み込めていない上、初期値作成計算に時間を要するため十分なリードタイムを取ることができない。モデル計算時間は、将来的な計算機の性能向上によって解決できる見込みがあるが、初期値作成法は研究する必要がある。本研究は、モデルを用いた降水ナウキャストのための初期値作成法開発を念頭に置いた基礎研究と位置づけられる。

まず、予測もしくは解析によって得られる大気場の成層の状態から、適当な初期収束を与えて理想的な積雲対流の数値実験を行う。初期収束を様々な大きさと強度や時間スケールの異なる積雲対流が生成される。この進化する積雲対流の構造は、与える収束の大きさと大気の変数として捉えることができる。また、この積雲対流をその大気場における擬似的な観測積雲対流と考える。ナッジング手法によるデータ同化で、積雲対流の位置調整が可能であることがわかった。

次に観測から得られる複雑なレーダエコー画像から、積雲対流セルを抽出しトレースすることを検討した。セルの抽出は、Gaussian 型のエコーを仮定すると、シングルおよびマルチセル構造の積雲対流を抽出することができた。しかし、これをトレースすることは非常に難しい。そこで、抽出とトレースを同時に行うために、レーダエコーの形とその進化を扱える 3 次元(平面 + 時間)の簡易モデルの検討を行なった。しかし、実観測エコーをそのモデルに適応する場合、変数の自由度が変化するという大きな問題を含んでいることがわかった。このモデルに対する当てはめ問題は今後の課題として残った。

2012.2.28 第 118 回セミナー 参加者 4 名

宋 苑瑞（筑波大学 陸域環境研究センター）

「微生物による岩石風化」

風化は大きく物理的風化，化学的風化，生物的風化に分けることができる．ここでは生物的風化，その中でも微生物（特に，バクテリア）による岩石の風化について説明する．バクテリアは鉱物の溶解速度を促進する．しかし，多くの研究ではバクテリアと鉱物の反応速度を上げるために粉末状の鉱物を用いる．バクテリアにより鉱物の表面がどのように変化するかを見極めるためには個体の鉱物や岩石の使用が望ましい．そこで普遍的な土壌細菌である *Bacillus subtilis* と花崗岩を用いて 30 日間の室内実験を行った．その結果，バクテリアは花崗岩の表面に複数の穴をより多く形成させることが分かった．花崗岩の表面に形成された穴の数はバクテリア無の条件の花崗岩に比べて 3.7 倍多く，その面積は 4.7 倍広がった．花崗岩の中でも最もバクテリアによる風化を受けやすい鉱物は斜長石で，特にカルシウムの濃度が高い所により多くの穴の形成が確認された．バクテリアは鉱物の表面に吸着し有機酸を分泌し，鉱物の表面を溶解させていると考えられる．

## 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、2011年4月から2012年9月までの間に学術誌及び学会等で発表された論文と、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

- Ebihara, T. and Mizutani, K. (2011) : Study on Doppler Shift Correction for Underwater Acoustic Communication using Orthogonal Signal Division Multiplexing. *Japanese Journal of Applied Physics*, **50** (7), Issue 2, 07HG06\_1-8.
- Ichii, K., Kondo, M., Lee, Y.-H., Wang, S.-Q., Kim, J., Ueyama, M., Lim, H.-J., Shi, H., Suzuki, T., Ito, A., Kwon, H., Ju, W., Huang, M., Sasai, T., Asanuma, J., Han, S., Hirano, T., Hirata, R., Kato, T., Li, S.-G., Li, Y.-N., Maeda, T., Miyata, A., Matsuura, Y., Murayama, S., Nakai, Y., Ohta, T., Saitoh, T., Saigusa, N., Takagi, K., Tang, Y.-H., Wang, H.-M., Yu, G.-R., Zhang, Y.-P. and Zhao, F.-H. (2012) : Site-level model-data synthesis of terrestrial carbon fluxes in the CarboEastAsia eddy-covariance observation network: toward future modeling efforts. *Journal of Forest Research*, 1-8. Springer Japan.
- Kaihitsu, I., Koike, T., Fujii, H., Yamanaka, T., Dambaravjaa, O., Dorgorsren, A. and Shiraki, K. (2012) : Validation of the soil moisture measurement algorithm of AMSR-E. *Remote Sensing and Hydrology*, IAHS Publ. **352**, 38-41.
- Khatun, R., Ohta, T., Kotani, A., Asanuma, J., Gamo, M., Han, S., Hirano, T., Nakai, Y., Saigusa, N., Takagi, K., Wang, H. and Yoshifuji, N. (2011) : Spatial variations in evapotranspiration over East Asian forest sites. I. Evapotranspiration and decoupling coefficient. *Hydrological Research Letters*, **5**, 83-87.
- Khatun, R., Ohta, T., Kotani, A., Asanuma, J., Gamo, M., Han, S., Hirano, T., Nakai, Y., Saigusa, N., Takagi, K., Wang, H. and Yoshifuji, N. (2011) : Spatial variations in evapotranspiration over East Asian forest sites. II. Surface conductance and aerodynamic conductance. *Hydrological Research Letters*, **5**, 88-92.
- Kumar, P., Iwagami, S., Yaping, L., Mikita, M., Tanaka, T. and Yamanaka, T. (2011) : Multivariate approach for surface water quality mapping with special reference to nitrate enrichment in Sugadaira, Nagano Prefecture (Japan). *The Environmentalist*, **31**, 358-363.
- Liu, Y. and Yamanaka, T. (2012) : Tracing groundwater recharge sources in a mountain-plain transitional area using stable isotopes and hydrochemistry. *Journal of Hydrology*, 464-465, 116-126.
- Liu, Y., Zhou, X., Fang, B., Zhou, H. and Yamanaka, T. (2012) : A preliminary analysis of the formation of travertine and travertine cones in the Jifei hot spring, Yunnan, China.

- Environmental Earth Sciences*, **66**, 1887–1896.
- Muto, T., Yamagishi, C., Sekiguchi, T., Yokokawa, M. and Parker, G. (2012) : The hydraulic autogenesis of distinct cyclicity in delta forest bedding: flume experiments. *Journal of Sedimentary Research*, **82**, 545–558.
- Nishii, R. and Matsuoka, N. (2012) : Kinematics of an alpine retrogressive rockslide in the Japanese Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.3298.
- Nishii, R., Matsuoka, N., Daimaru, H. and Yasuda, M. (2012). Precursors and triggers of an alpine rockslide in Japan: the 2004 partial collapse during a snow-melting period. *Landslides*, DOI: 10.1007/s10346-012-0353-5.
- Suzuki, R., Kobayashi, H., Delbart, N., Asanuma, J. and Hiyama, T. (2011) : NDVI responses to the forest canopy and floor from spring to summer observed by airborne spectrometer in eastern Siberia. *Remote Sensing of Environment*, **115** (12), 3615–3624.
- Wakasa, S. A., Nishimura, S., Shimizu, H. and Matsukura, Y. (2012) : Does lightning destroy rocks?: Results from a laboratory lightning experiment using an impulse high-current generator. *Geomorphology*, 161–162 : 110–114.
- Wang, P., Yamanaka, T. and Qiu, G. Y. (2012) : Causes of decreased reference evapotranspiration and pan evaporation in the Jinghe River catchment, northern China. *The Environmentalist*, **32**, 1–10.
- Watanabe, T., Matsuoka, N. and Christiansen, H. H. (2012) : Controls on patterned ground variability at a continuous permafrost site, Central Spitsbergen. In: Hinkel, K.M. ed., *Tenth International Conference on Permafrost. Vol. 1 : International Contributions*. The Northern Publisher, Salekhard, Russia, 431–436.
- Watanabe, T., Matsuoka, N. and Christiansen, H. H. (2012) : Mudboil and ice-wedge dynamics investigated by electrical resistivity tomography, ground temperatures and surface movements in Svalbard. *Geografiska Annaler*, DOI: 10.1111/j.1468-0459.2012.00470.x.
- Yamanaka, T. (2009) : Interdisciplinary perspectives on hydrological cycle in arid zones. *Annals of Arid Zone*, **48**, 341–357. (2011 年発行)
- Yamanaka, T., Wakiyama, Y. and Suzuki, K. (2012) : Is snowmelt runoff timing in the Japanese Alps region shifting toward earlier in the year? *Hydrological Research Letters*, **6**, 87–91.
- 査読付国内誌
- 松岡憲知・池田 敦 (2012): 周氷河地形プロセス研究最前線. 地学雑誌, **121** (2), 269–305.
- 茂木貴弘・水谷孝一・海老原 格 (2011): 地表付近における気温分布計測のための音響センサネットワークユニット. 土木学会論文集 A2 (応用力学), **67** (2), (応用力学論文集 Vol. 14), I\_31–I\_38.
- 目代邦康・池田 宏・飯島英夫・柚洞一央 (2011): 落石による岩盤侵食様式の検討. 地理学論集, **86**, 108–114.
- 著書
- 松岡憲知 (2012): 動き易きこと山の如し—北岳・間ノ岳—. 小泉武栄編「図説 日本の山 自然が素晴らしい山 50 選」, 朝倉書店, 116–119.
- 山中 勤 (2011): 第 3 章 地下水涵養. 「地下水流動—モンスーンアジアの資源と循環」(谷口真

人 編), 共立出版, 45-64.

山中 勤 (2011): 第3章 水文. 「地球学調査・解析の基礎」(上野健一・久田健一郎 編), 古今書院, 23-38.

若狭 幸 (2011): 第4章1節 地形図と空中写真. 「地球学調査・解析の基礎」(上野健一・久田健一郎 編) 古今書院, 39-44.

Sato, T., Sugita, M., Yamanaka, T., Tsujimura, M. and Ishii, R. (2013): Water dynamics within the soil-vegetation-atmosphere system in a steppe region covered by shrubs and herbaceous plants. N. Yamamura, N. Fujita and A. Maekawa (Eds.): "The Mongolian Ecosystem Network: Environmental Issues Under Climate and Social Changes", Springer, 43-63.

#### その他研究論文

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 (2011): 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, **12**, 5-12.

佐藤昌人・八反地 剛・若狭 幸 (2011): 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—. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **12**, 21-29.

関口智寛 (2011): リップル変形に関する二次元造波水路実験データ. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **12**, 41-53.

村上和隆・奈佐原顕郎・秋津朋子・本岡 毅・永井 信 (2011): 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. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **12**, 13-19.

山中 勤・恩田裕一 (2011): 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. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **12**, 31-40.

#### 博士論文

Hayashi, Atsushi (2012): Effects of Vegetation Succession on Forest Water Balance at Single-tree and Forest-stand Scales. 140p. (筑波大学大学院地球環境科学専攻)

Jelassi, Henda (2012): Hydrogeochemical and Numerical Simulation Approaches to Reveal Mechanisms Regulating Groundwater Quality in the Coastal Aquifer of Odawara Region, Japan. 132p. (筑波大学大学院地球環境科学専攻)

Liu, Yaping (2012): Spatiotemporal structure of the groundwater-river interaction at mountain-plain transitional landscapes. 176p. (筑波大学大学院生命環境科学専攻)

#### 修士論文

新井賢造 (2012): 振動流の方向変化によるリップル遷移に関する振動板実験. 39p. (筑波大学大学院地球科学専攻)

大城慶彦 (2012): Influence of Land Use and Land Cover on River Water Quality and Nutrient Loads: a Case of the Watershed of Lake Ushiku-numa. 134p. (筑波大学大学院地球科学専攻)

木村建夫 (2012): 樹木の吸水深度推定手法に関する比較研究. 94p. (筑波大学大学院環境科学専攻)

#### 卒業論文

三好史哉 (2012): スギ・ヒノキ人工林流域における水・物質収支～季節変化と間伐影響に着目して. 47p. (筑波大学生命環境学群地球学類)

# 2011（平成 23）年度 陸域環境研究センター施設利用状況

（2012 年 3 月 31 日現在）

|                            | 教育関係                    |            | 研究関係                |       |
|----------------------------|-------------------------|------------|---------------------|-------|
| 学<br>群                     | 大気科学実験（地球学類）            | 20 名 × 9 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   |
|                            | 生物圏地球科学実験（地球学類）         | 8 名 × 2 回  | 地球学類                | 2 名   |
|                            | 地球環境システム学実験（地球学類）       | 12 名 × 1 回 |                     |       |
|                            | 堆積プロセス学、地形プロセス実験Ⅱ（地球学類） | 15 名 × 8 回 | 実験利用者               |       |
|                            | 地形プロセス学実験Ⅲ（地球学類）        | 15 名 × 1 回 | 地球学類                | 1 名   |
|                            | 大気陸面過程論、気象観測実習（地球学類）    | 10 名 × 2 回 |                     |       |
|                            | フレッシュマンセミナー（地球学類）       | 65 名 × 1 回 |                     |       |
|                            | 理科教師になるための生物・地学実験（地球学類） | 10 名 × 1 回 |                     |       |
|                            | 生態学実験・基礎生物学実験（生物学類）     | 40 名 × 2 回 |                     |       |
|                            | 水理学実験（生物資源学類）           | 10 名 × 1 回 |                     |       |
|                            | 環境工学基礎実験（生物資源学類）        | 30 名 × 1 回 |                     |       |
|                            | 合計（延）数                  | 798 名      | 合計（延）数              | 4 名   |
| 大<br>学<br>院                | 地域調査法（教育研究科）            | 20 名 × 9 回 | 論文研究利用者             |       |
|                            |                         |            | 生命環境科学研究科           | 11 名  |
|                            |                         |            | 実験利用者               |       |
|                            |                         |            | システム情報工学研究科         | 1 名   |
|                            |                         |            | 生命環境科学研究科           | 7 名   |
|                            | 合計（延）数                  | 180 名      | 合計（延）数              | 19 名  |
| 教<br>職<br>員                | 学生の指導                   | 70 名       | 次世代環境教育 WG          | 10 名  |
|                            |                         |            | 研究関係                |       |
|                            |                         |            | システム情報工学研究科         | 1 名   |
|                            |                         |            | 生命環境科学研究科           | 2 名   |
|                            | 合計（延）数                  | 70 名       | 合計（延）数              | 13 名  |
| 他<br>大<br>学<br>等           | 夏休み自由研究お助け隊             | 7 名 × 1 回  | 産業技術総合研究所           | 1 名   |
|                            |                         |            | 千葉大学環境リモートセンシングセンター | 1 名   |
|                            |                         |            | シェフィールド大学           | 3 名   |
|                            |                         |            | にこネットつくば定例会         | 80 名  |
|                            |                         |            | リモセン虎の穴研究会          | 578 名 |
|                            | 合計（延）数                  | 7 名        | 合計（延）数              | 663 名 |
| 見<br>学<br>・<br>そ<br>の<br>他 | 研究会・年次報告会               | 2 回 参加者    | 68 名                |       |
|                            | セミナー                    | 6 回 参加者    | 69 名                |       |
|                            | 機器の利用                   |            | 1 名                 |       |
|                            | データの利用                  |            | 4 名                 |       |
|                            | 見学者                     |            |                     |       |
|                            | 国内                      |            | 279 名               |       |
|                            | 国外                      |            | 2 名                 |       |
|                            |                         |            | 合計（延）数              | 423 名 |
| 利用者合計                      |                         |            | 2,177 名             |       |

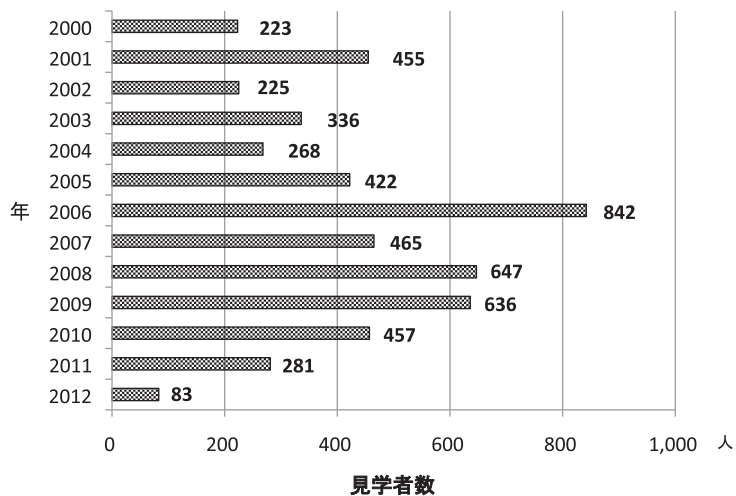
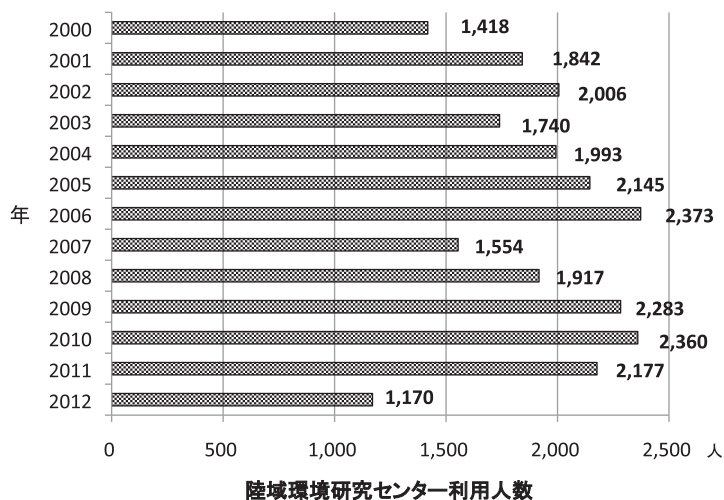
# 2012（平成 24）年度 陸域環境研究センター施設利用状況

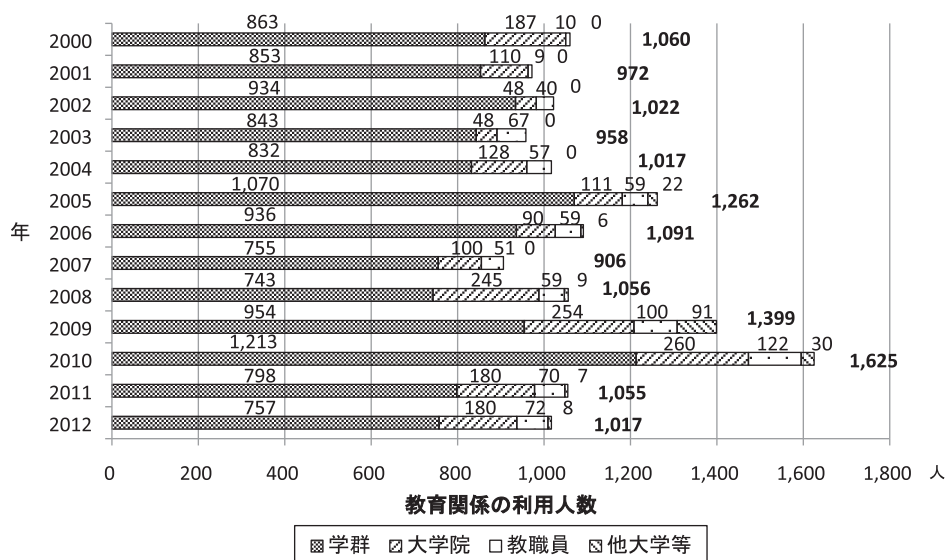
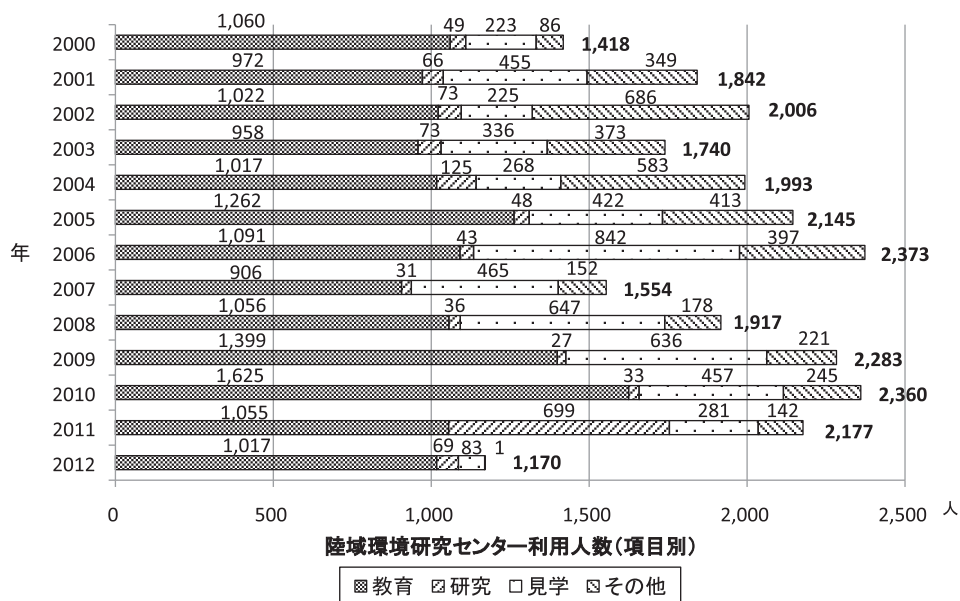
（2012 年 11 月 1 日現在）

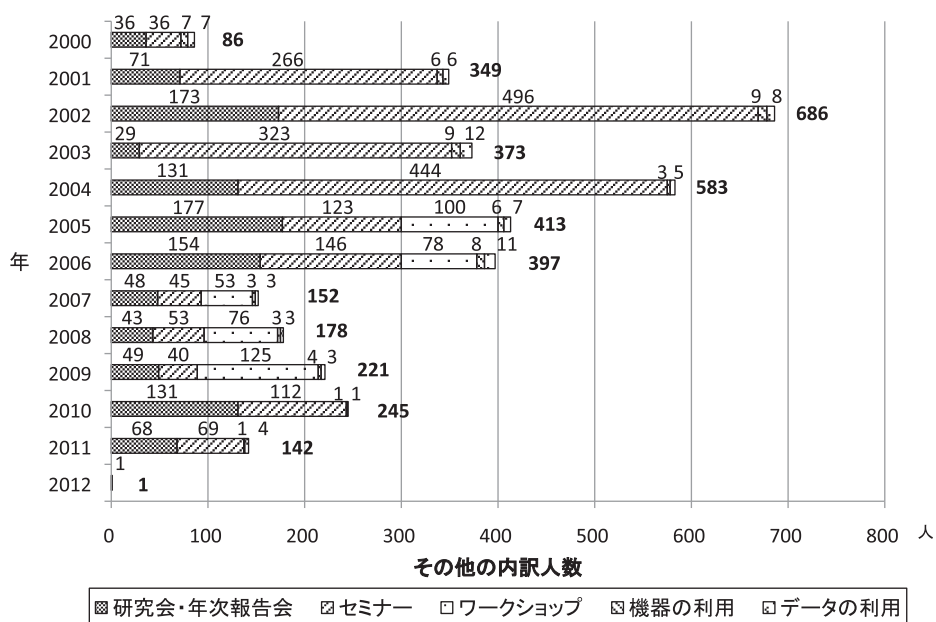
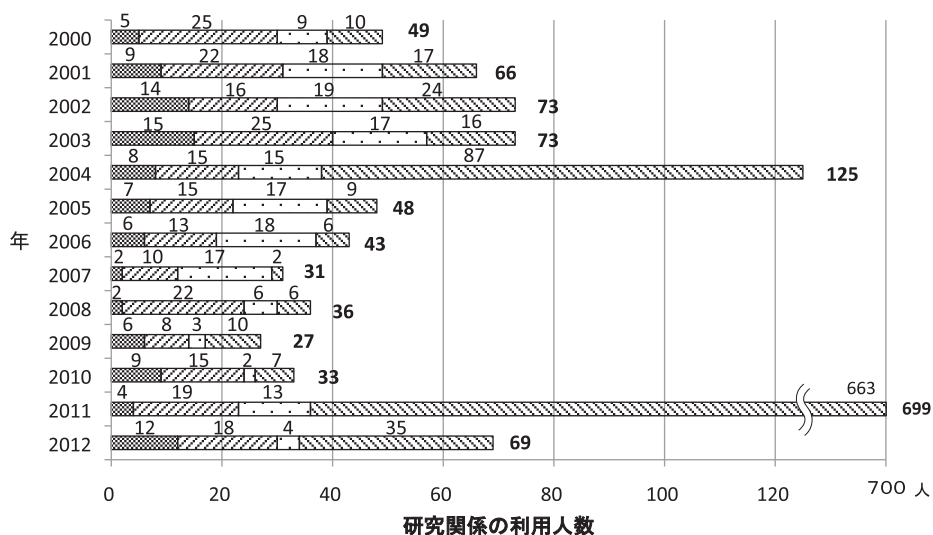
| 教育関係   |                         |            |             | 研究関係 |      |
|--------|-------------------------|------------|-------------|------|------|
| 学群     | 大気科学実験（地球学類）            | 20 名× 9 回  | 卒業研究利用者     |      |      |
|        | 水文科学実験・講義（地球学類）         | 30 名× 11 回 | 地球学類        |      | 10 名 |
|        | 理科教師になるための生物・地学実験（地球学類） | 11 名× 1 回  |             |      |      |
|        | 水理学実験（生物資源学類）           | 11 名× 4 回  |             |      |      |
|        | 環境工学基礎実験（生物資源学類）        | 22 名× 1 回  | 実験利用者       |      |      |
|        | 地球学類フレッシュマンセミナー         | 65 名× 1 回  | 地球学類        |      | 2 名  |
|        | 水文科学分野フェシユマンセミナー        | 25 名× 1 回  |             |      |      |
|        | 生物圏地球科学実験               | 8 名× 4 回   |             |      |      |
|        | 理科教育実験                  | 10 名× 4 回  |             |      |      |
|        | 地球環境システム学実験             | 8 名× 1 回   |             |      |      |
| 合計（延）数 |                         | 757 名      | 合計（延）数 12 名 |      |      |
| 大学院    | 地域調査法（教育研究科）            | 20 名× 9 回  | 論文研究利用者     |      |      |
|        |                         |            | 生命環境科学研究科   |      | 10 名 |
|        |                         |            | 実験利用者       |      | 8 名  |
| 合計（延）数 |                         | 180 名      | 合計（延）数 18 名 |      |      |
| 教職員    | 学生の指導                   | 72 名       | 研究関係        |      |      |
|        |                         |            | システム情報工学研究科 |      | 1 名  |
|        |                         |            | 生命環境科学研究科   |      | 2 名  |
|        |                         |            | (株)ソニック     |      | 1 名  |
| 合計（延）数 |                         | 72 名       | 合計（延）数 4 名  |      |      |
| 他大学等   | 夏休み自由研究お助け隊             | 8 名× 1 回   | リモセン虎の穴研究会  |      | 17 名 |
|        |                         |            | 竜巻被害調査研究    |      | 15 名 |
|        |                         |            | JICA 研修     |      | 3 名  |
| 合計（延）数 |                         | 8 名        | 合計（延）数 35 名 |      |      |
| 見学・その他 | 研究会・年次報告会               | 0 回        | 参加者         | 0 名  |      |
|        | セミナー                    | 0 回        | 参加者         | 0 名  |      |
|        | 機器の利用                   |            |             | 0 名  |      |
|        | データの利用                  |            |             | 1 名  |      |
|        | 見学者                     |            |             |      |      |
|        | 国内                      |            |             | 83 名 |      |
|        | 国外                      |            |             | 0 名  |      |
|        |                         |            | 合計（延）数 84 名 |      |      |
| 利用者合計  |                         |            | 1,170 名     |      |      |

# 2000（平成 12）年度～2012（平成 24）年度 陸域環境研究センター施設利用状況

（2012 年 11 月 1 日現在）







## 2011（平成 23）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 |                                                            |
| 2011. 4.28                | 若狭特任助教，笹川科学研究助成「研究奨励の会」(東京)                                |
| 2011. 4.28                | 松岡センター長・脇山研究員，中部山岳機構運営委員会（東京）                              |
| 2011. 5.18                | 浅沼教授，日本気象学会春季大会（東京）                                        |
| 2011. 5.21                | 浅沼教授，日本食生活学会 第 42 回大会，主題講演（関東学院大）                          |
| 2011. 5.23, 25            | 浅沼教授，日本地球惑星科学連合 2011 年大会（東京）                               |
| 2011. 6.8–10              | 浅沼教授，モンゴル国水文気象局（モンゴル国ウランバートル）                              |
| 2011. 6.28                | 鈴木研究員，海洋研究開発機構横浜研究所                                        |
| 2011. 6.29–7.5            | 若月助教，IUGG（オーストラリア メルボルン）                                   |
| 2011. 7.3–7               | 浅沼教授，アジア学術会議（モンゴル国ウランバートル）                                 |
| 2011. 7.12–15             | 浅沼教授，第 2 回 ADMIP 国際ワークショップ（中国蘭州）                           |
| 2011. 7.21–23             | 松岡センター長，国際第四紀学会（スイス ベルン）                                   |
| 2011. 8.3–8               | 浅沼教授，モンゴル国水文気象局（モンゴル国ウランバートル）                              |
| 2011. 8.29–30             | 浅沼教授，水文・水資源学会（京都大学防災研究所）                                   |
| 2011. 9.1–2               | 松岡センター長，日本地形学連合（金沢大学）                                      |
| 2011. 9.13–15             | 浅沼教授，アジアの環境持続性に関する国際会議（国立京都国際会館）                           |
| 2011. 10.8–9              | 脇山研究員，2011 年度日本水文科学会学術大会（北海道大学）                            |
| 2011. 10.9–13             | 関口講師，アメリカ地質学会（アメリカ ミネアポリス）                                 |
| 2011. 10.23–28            | 若月助教，WCRP Open Canforence（アメリカ デンバー）                       |
| 2011. 11.2–5              | 若狭特任助教，秋田大学                                                |
| 2011. 11.15               | 浅沼教授，気象学会秋季大会（名古屋大学）                                       |
| 2011. 11.15–18            | 若月助教，気象学会秋季大会（名古屋大学）                                       |
| 2011. 11.24               | 山中准教授，土浦土木事務所                                              |
| 2011. 11.30–12.2          | 浅沼教授，ADMIP データワーキンググループミーティング（北海道大学）                       |
| 2011. 12.2–3              | 松岡センター長，凍土研究会（北海道大学）                                       |
| 2011. 12.15               | 若月助教，共同研究集会（名古屋大学）                                         |
| 2011. 12.16–17            | 松岡センター長・浅沼教授・山中准教授・関口講師・若月助教・岩上特任助教，中部山岳連携機構年次報告会（信州大学理学部） |
| 2011. 12.19               | 浅沼教授，第 5 回ベルモントフォーラムに向けての国内ワークショップ（海洋開発研究機構 東京本部）          |
| 2011. 12.22               | 浅沼教授，土壌水分 WS（広島大学東京キャンパス）                                  |
| 2011. 12.22–24            | 関口講師，日本堆積学会（長崎大学）                                          |
| 2012. 1.12–13             | 浅沼教授，総合地球環境学研究所 講演                                         |
| 2012. 3.5–8               | 浅沼教授・若月助教（3.6–7），土木学会 水工学講演会（愛媛大学）                         |
| 2012. 3.16–17             | 松岡センター長，凍土研究会（北海道大学）                                       |

| 年 月 日          | 記 事                                                                                      |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2012. 3.21–24  | 若月助教, 沖縄 観測のための調査 (神戸市)                                                                  |
| 2012. 3.27–29  | 宋研究員, 首都大学東京                                                                             |
| 2012. 4.3      | 若月助教, 「最新型偏波レーダーとビデオゾンデの同期集中観測と水災害軽減に向けた総合的基礎研究」に関する研究集会 (京都大学防災研究所)                     |
| 2012. 4.20     | 山中准教授, 次世代環境教育出前授業 (沼崎小学校)                                                               |
| 2012. 4.20–21  | 松岡センター長・脇山研究員, 中部山岳地域環境変動研究機構運営委員会 (長野 信州大)                                              |
| 2012. 4.21     | 山中准教授, CREST プロジェクトミーティング (筑波大大塚キャンパス)                                                   |
| 2012. 5.9      | 若月助教, 計算科学連携研究プロジェクト成果報告シンポジウム (名古屋大学)                                                   |
| 2012. 5.20–25  | 松岡センター長・浅沼教授・山中准教授・鈴木研究員・脇山研究員, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (千葉 幕張メッセ)                           |
| 2012. 5.27–28  | 浅沼教授・若月助教, 日本気象学会春季大会 (つくば国際会議場)                                                         |
| 2012. 6.21     | 山中准教授, 次世代環境教育出前授業 (大曾根小学校)                                                              |
| 2012. 6.23     | 山中准教授, G 空間エクスポ (パシフィコ横浜)                                                                |
| 2012. 6.27     | 若月助教, 2012 年度若手フェスティバル (筑波大学)                                                            |
| 2012. 7.3      | 山中准教授, 次世代環境教育出前授業 (高山中学校)                                                               |
| 2012. 7.16     | 山中准教授, つくば市節電シール表彰式 (つくば市サイエンスインフォメーションセンター)                                             |
| 2012. 9.2–3    | 脇山研究員, 大規模崩壊地「赤崩」現地観察会 & ミニ研究集会筑波大学井川演習林                                                 |
| 2012. 9.7      | 山中准教授, 次世代環境教育出前授業 (竹園東中学校)                                                              |
| 2012. 9.15–16  | 松岡センター長・脇山研究員, 中部山岳地域環境変動研究機構フィールドミーティング (長野 八ヶ岳・川上演習林)                                  |
| 2012. 9.20     | 山中准教授, The 3rd International Conference on Forest & Water in a Changing Environment (福岡) |
| 2012. 9.24     | 山中准教授, 次世代環境教育出前授業 (手代木中学校)                                                              |
| 2012. 9.26–28  | 浅沼教授・山中准教授, 水文・水資源学会 2012 年度研究発表会 (広島)                                                   |
| 2012. 10.3     | 若月助教, 日本気象学会秋季大会 (北海道大学)                                                                 |
| 2012. 10.27–28 | 脇山研究員, 日本水文科学会 2012 年度学術大会 (神奈川県温泉地学研究所)                                                 |

## 2. フィールド調査

|               |                                                                          |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2011. 4.13    | 山中准教授, 栃木県足利周辺 (同地域で 6.2 にも実施)                                           |
| 2011. 4.27–28 | 山中准教授, 八ヶ岳演習林周辺                                                          |
| 2011. 5.22–27 | 脇山研究員, 菅平高原実験センター 八ヶ岳演習林                                                 |
| 2011. 6.5–6   | 脇山研究員, 井川演習林                                                             |
| 2011. 6.12–14 | 松岡センター長, 南アルプス (同地域で 7.9–11, 8.18–19, 9.10–11, 9.16–18, 10.29–30 にも定期観測) |
| 2011. 6.22–24 | 脇山研究員, 八ヶ岳・川上演習林, 岐阜大学高山試験地                                              |

| 年 月 日            | 記 事                                                        |
|------------------|------------------------------------------------------------|
| 2011. 6.29-30    | 山中准教授・脇山研究員，菅平高原実験センター，八ヶ岳演習林                              |
| 2011. 7.3-7      | 脇山研究員，信州大学手良沢山ステーション八ヶ岳演習林                                 |
| 2011. 7.6        | 山中准教授，東京農工大学 FM 唐沢山（同地域での調査を 11.6, 2012.3.12 にも実施）         |
| 2011. 7.23-27    | 若狭特任助教，新潟県佐渡市                                              |
| 2011. 7.24-8.16  | 松岡センター長，スイス，ノルウェー                                          |
| 2011. 7.26       | 山中准教授，三浦半島                                                 |
| 2011. 7.26-27    | 脇山研究員，菅平高原実験センター 八ヶ岳演習林                                    |
| 2011. 7.28       | 山中准教授，足利市                                                  |
| 2011. 7.31-8.13  | 山中准教授，ブラジル                                                 |
| 2011. 8.1-3      | 脇山研究員，八ヶ岳・川上演習林，岐阜大学高山試験地                                  |
| 2011. 8.1-8      | 浅沼教授，モンゴル ウランバートル周辺                                        |
| 2011. 8.17-20    | 岩上特任助教，愛媛県西条市周辺                                            |
| 2011. 8.29-31    | 脇山研究員，八ヶ岳・川上演習林                                            |
| 2011. 8.30-9.2   | 岩上特任助教，菅平高原実験センター                                          |
| 2011. 9.8        | 山中准教授，山梨県富士川流域                                             |
| 2011. 9.22-25    | 山中准教授，沖縄                                                   |
| 2011. 9.28       | 山中准教授，足利市                                                  |
| 2011. 10.1-2     | 脇山研究員，菅平高原実験センター，八ヶ岳演習林                                    |
| 2011. 10.4-7     | 山中准教授，三浦半島                                                 |
| 2011. 10.23-27   | 脇山研究員，菅平高原実験センター，八ヶ岳演習林，甲府                                 |
| 2011. 10.26-27   | 山中准教授，山梨県富士川流域                                             |
| 2011. 11.11-13   | 若狭特任助教，熊本県阿蘇・天草周辺                                          |
| 2011. 11.26-27   | 山中准教授，福島県松川浦                                               |
| 2011. 11.27-30   | 関口講師，下田市，伊東市                                               |
| 2011. 11.30-12.5 | 脇山研究員，菅平高原実験センター，八ヶ岳演習林，甲府                                 |
| 2011. 12.14-17   | 若狭特任助教・脇山研究員，川上演習林，信州大学理学部                                 |
| 2011. 12.26-27   | 山中准教授，甲府市，菅平高原実験センターなど                                     |
| 2012. 1.5-6      | 脇山研究員，千曲市，高山試験地，川上演習林                                      |
| 2012. 1.12-17    | 脇山研究員，八ヶ岳・川上演習林，菅平実験センター等（同地域での調査を 1.30-2.3, 2.14-17 にも実施） |
| 2012. 2.29-3.5   | 脇山研究員，高山試験地など                                              |
| 2012. 3.3-4      | 山中准教授，山梨県駒場浄水場など                                           |
| 2012. 3.19-22    | 脇山研究員，菅平高原実験センターなど                                         |
| 2012. 3.23-28    | 浅沼教授，モンゴル ウランバートル周辺                                        |
| 2012. 3.29       | 山中准教授，山梨県甲府市                                               |
| 2012. 4.2-4      | 脇山研究員，岐阜大学高山試験地，川上演習林                                      |

| 年 月 日           | 記 事                                                    |
|-----------------|--------------------------------------------------------|
| 2012. 4.14-15   | 松岡センター長, 三宅島                                           |
| 2012. 4.25      | 山中准教授, 山梨                                              |
| 2012. 4.25-26   | 脇山研究員, 川上演習林 (同地域での調査を 6.27-28, 8.9-10, 8.31-9.1 にも実施) |
| 2012. 5.6-7     | 若月助教, つくば市竜巻被害調査, つくば市                                 |
| 2012. 5.13-23   | 若月助教, 沖縄梅雨期気象観測, 沖縄県粟国村 (同地域での調査を 5.30-6.17 にも実施)      |
| 2012. 6.1-4     | 脇山研究員, 川上演習林, 長野・山梨県 (同地域での調査を 7.28-29, 9.27-29 にも実施)  |
| 2012. 6.16      | 山中准教授, 筑波山                                             |
| 2012. 6.23-25   | 松岡センター長, 南アルプス (同地域で 7.5-6, 8.17-18, 10.5-7 にも定期観測)    |
| 2012. 7.19-8.11 | 松岡センター長, スイス, ノルウェー                                    |
| 2012. 7.23-25   | 山中准教授, 新潟・富山                                           |
| 2012. 8.4-8     | 浅沼教授, モンゴル, ウランバートル, ヘルレンバヤンウラン周辺                      |
| 2012. 8.4-13    | 山中准教授, ブラジル                                            |
| 2012. 8.27-31   | 浅沼教授, 東京大学生態水文学研究所                                     |
| 2012. 9.5       | 脇山研究員, 長野・山梨県                                          |
| 2012. 9.8-15    | 浅沼教授, モンゴル マンダルゴビ ヘルレンバヤンウラン周辺                         |

### 3. 着任・昇任

|            |               |
|------------|---------------|
| 2011. 4.16 | 村上理映研究支援推進員採用 |
| 2011. 6.1  | 若月泰孝助教着任      |
| 2012. 2.1  | 宋苑瑞非常勤研究員着任   |
| 2012. 6.1  | 金森陽子研究支援推進員採用 |

### 4. セミナー等の開催

|             |                                                                                                                                                                                |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2011. 9.22  | 第 113 回センターセミナー, Dr. Michael Krautblatter (ドイツ ボン大学) "Rock slope failure and climate change in the European Alps" (参加者 12 名)                                                   |
| 2011. 11.28 | 筑波大学中部山岳連携研究発表会 (参加者 31 名)                                                                                                                                                     |
| 2012. 1.20  | 第 114 回センターセミナー, 坂部 綾香 (京都大学大学院農学研究科森林水文学研究室)「簡易渦集積法を用いた温帯ヒノキ林およびアラスカ域クロトウヒ林樹冠上におけるメタンフラックスの観測」, 岩田 拓記 (アラスカ大学国際北極圏研究センター)「アラスカ火災跡地での FPAR と植生特性の季節変化」(参加者 17 名)               |
| 2012. 1.27  | 第 115 回センターセミナー, Dr. Celine Schneider (フランス ランス大学) "Properties and salt weathering susceptibility of natural and reconstituted stones of the Orval Abbey (Belgium)" (参加者 15 名) |
| 2012. 2.6   | 第 116 回センターセミナー, 蔵治 光一郎 (東京大学大学院農学生命科学研究科付属演習林生態水文学研究所)「長良川河口堰検証プロジェクトチームについて」(参加者 12 名)                                                                                       |

| 年 月 日      | 記 事                                                                                                             |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2012. 2.14 | 第 117 回センターセミナー，若月 泰孝（陸域環境研究センター）「短時間降雨予測に関する基礎研究」(参加者 9 名)                                                     |
| 2012. 2.28 | 第 118 回センターセミナー，宋 苑瑞（陸域環境研究センター）「微生物による岩石風化」(参加者 4 名)                                                           |
| 2012. 3.9  | 平成 23 年度陸域環境研究センター年次研究報告会（特別講演「陸域環境研究の課題」講演者に村岡 裕由氏（岐阜大学流域圏科学研究センター）と田中 賢治氏（京都大学防災研究所水資源環境研究センター）を招聘）(参加者 36 名) |

## 5. 見学受け入れ

|             |                                      |
|-------------|--------------------------------------|
| 2011. 5.23  | 群馬県立沼田女子高校 見学（21 名）                  |
| 2011. 6.27  | 埼玉県立松山高校普通科・理数科 2 年生 見学（79 名，教員 3 名） |
| 2011. 8.22  | 埼玉県立熊谷高校普通科 3 年生 見学（53 名，教員 3 名）     |
| 2011. 8.23  | 台湾醒吾技術学校 見学（教員 2 名）                  |
| 2011. 8.26  | 神奈川県立座間高校普通科 2 年生 見学（38 名，教員 2 名）    |
| 2011. 10.26 | 筑波大学生物学類 1 年生 見学（82 名）               |
| 2012. 4.20  | 茨城県私立茨城高校普通科（3 年生 41 名，教員 2 名）       |
| 2012. 5.8   | 千葉県立匝瑳高校理数科（2 年生 41 名，教員 1 名）        |
| 2012. 5.10  | 茨城県私立茗溪学園高校（3 年生 2 名）                |

## 6. その他

|             |                              |
|-------------|------------------------------|
| 2011. 6.22  | 平成 23 年度第 1 回陸域環境研究センター運営委員会 |
| 2011. 8.1-5 | 圃場整備（草刈）                     |
| 2011. 12.6  | 圃場整備（草刈）                     |
| 2011. 12    | 「陸域環境研究センター報告第 12 号」発行       |
| 2012. 1.11  | 平成 23 年度第 2 回陸域環境研究センター運営委員会 |
| 2012. 6.28  | 平成 24 年度第 1 回陸域環境研究センター運営委員会 |
| 2012. 8.7-8 | 圃場整備（草刈）                     |
| 2012. 9.25  | 平成 24 年度第 2 回陸域環境研究センター運営委員会 |

## 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@suiiri.tsukuba.ac.jp](mailto:jimu@suiiri.tsukuba.ac.jp)

# BULLETIN OF THE TERRESTRIAL ENVIRONMENT RESEARCH CENTER THE UNIVERSITY OF TSUKUBA

---

No.13

November

2012

---

## Contents

|                                                                       |                                                                                              |     |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Foreword .....                                                        | Norikazu MATSUOKA .....                                                                      | 1   |
| Photo gallery .....                                                   |                                                                                              | 3   |
| Summary of the 1st Period (2000–2003) .....                           | Jun ASANUMA .....                                                                            | 7   |
| Summary of the 2nd Period (2004–2009) .....                           | Tadashi TANAKA and Tsutomu YAMANAKA .....                                                    | 11  |
| Summary of the 3rd Period (2010–2011) .....                           | Norikazu MATSUOKA,<br>Jun ASANUMA and Tsutomu YAMANAKA .....                                 | 19  |
| Summary of Studies on Flume Experiments .....                         | Tomohiro SEKIGUCHI .....                                                                     | 29  |
| Summary of Studies on Heat and Water Balance Experimental Field ..... | Jun ASANUMA .....                                                                            | 35  |
| Summary of Studies on Catchment Hydrological Processes<br>.....       | Tadashi TANAKA and Tsutomu YAMANAKA .....                                                    | 37  |
| Summary of Studies Using Environmental Isotope Tracers .....          | Tsutomu YAMANAKA .....                                                                       | 45  |
| Summary of Studies on Mesoscale Atmospheric Modeling .....            | Yasutaka WAKAZUKI,<br>Fujio KIMURA, Tomonori SATO,<br>Sachiho ADACHI and Chieko SUZUKI ..... | 59  |
| Observational Data of Heat Balance and Water Balance in 2011<br>..... | Chieko SUZUKI, Sho IWAGAMI,<br>Yasutaka WAKAZUKI and Tsutomu YAMANAKA .....                  | 67  |
| Records of TERC seminar .....                                         |                                                                                              | 93  |
| List of Publications .....                                            |                                                                                              | 97  |
| Miscellaneous .....                                                   |                                                                                              | 100 |

---



---

---

## 筑波大学陸域環境研究センター報告

第13号

2012年11月発行

編集発行 筑波大学陸域環境研究センター

茨城県つくば市天王台1-1-1

〒305-8577 電話 029-853-2532

FAX 029-853-2530

e-mail [jimu@sui.tsukuba.ac.jp](mailto:jimu@sui.tsukuba.ac.jp)

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

© 筑波大学陸域環境研究センター, 2012

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

---

---

## 目 次

|                             |               |     |
|-----------------------------|---------------|-----|
| 序 .....                     | 松 岡 憲 知 ..... | 1   |
| 口 絵 .....                   |               | 3   |
| <b>期別総括</b>                 |               |     |
| 第1期 (2000–2003) .....       | 浅 沼 順 .....   | 7   |
| 第2期 (2004–2009) .....       | 田 中 正 .....   | 11  |
| 第3期 (2010–2011) .....       | 山 中 憲 知 ..... | 19  |
|                             | 松 浅 順         |     |
|                             | 山 中 勤         |     |
| <b>課題別総括</b>                |               |     |
| 水路実験 .....                  | 関 口 智 寛 ..... | 29  |
| 水収支・熱収支観測圃場 .....           | 浅 沼 順 .....   | 35  |
| 流域水循環過程 .....               | 田 中 正 .....   | 37  |
|                             | 山 中 勤         |     |
| 環境同位体トレーサー .....            | 山 中 勤 .....   | 45  |
| メソ気象モデル .....               | 若 月 泰 孝 ..... | 59  |
|                             | 木 村 富士男       |     |
|                             | 佐 藤 友 徳       |     |
|                             | 足 立 幸 穂       |     |
|                             | 鈴 木 智恵子       |     |
| <b>資 料</b>                  |               |     |
| 熱収支・水収支観測資料 – 2011年 – ..... | 鈴 木 智恵子 ..... | 67  |
|                             | 岩 上 翔         |     |
|                             | 若 月 泰 孝       |     |
|                             | 山 中 勤         |     |
| セミナーの記録 .....               |               | 93  |
| 論文リスト .....                 |               | 97  |
| 施設利用状況 .....                |               | 100 |
| 主な行事 .....                  |               | 105 |
| 著作権について .....               |               | 110 |

