

# Tsukuba 92: 水文学・境界層気象学における異なるスケール間の関係解明のための共同観測計画

## (1) 地表面から自由大気へのフラックス

杉田倫明<sup>1\*</sup>・上田真也<sup>2</sup>・遠藤伸彦<sup>3</sup>・大手信人<sup>4\*</sup>・沖 大幹<sup>5\*</sup>  
甲斐憲次<sup>1</sup>・榎根 勇<sup>1</sup>・小池俊雄<sup>6\*</sup>・近藤昭彦<sup>7\*</sup>・嶋田 純<sup>1</sup>  
田中 正<sup>1</sup>・辻村真貴<sup>1</sup>・田 少奮<sup>8</sup>・葦沢 浩<sup>2</sup>・原菌芳信<sup>9</sup>  
檜山哲哉<sup>3</sup>・深見和彦<sup>10\*</sup>・安成哲三<sup>1</sup>

**Tsukuba 92: an intensive field campaign to address scale issues in hydrology and boundary layer meteorology**

**(1) fluxes from land surfaces into the atmosphere.**

**Michiaki SUGITA<sup>1\*</sup>, Shinya UEDA<sup>2</sup>, Nobuhiko ENDO<sup>3</sup>, Nobuhito OHTE<sup>4\*</sup>  
Taikan OKI<sup>5\*</sup>, Kenji KAI<sup>1</sup>, Isamu KAYANE<sup>1</sup>, Toshio KOIKE<sup>6\*</sup>  
Akihiko KONDOH<sup>7\*</sup>, Jun SHIMADA<sup>1</sup>, Tadashi TANAKA<sup>1</sup>  
Maki TSUJIMURA<sup>1</sup>, Shao-Fen TIAN<sup>8</sup>, Hiroshi NIRASAWA<sup>2</sup>  
Yoshinobu HARAZONO<sup>9</sup>, Tetsuya HIYAMA<sup>3</sup>, Kazuhiko FUKAMI<sup>10\*</sup>  
and Tetsuzo YASUNARI<sup>1</sup>**

### Abstract

A field campaign was organized and carried out in and around Tsukuba city, Ibaraki Prefecture, for three weeks in the summer of 1992, in order to obtain necessary data sets to study scale issues in hydrology and boundary layer meteorology. Observations and measurements made during the campaign include (i) energy and radiation balance components, soil moisture, and vegetation status data at one or more of the six stations chosen for their different surface covers,

- 
- 1 筑波大学地球科学系 (Institute of Geoscience, University of Tsukuba)
  - 2 気象研究所気象衛星・観測システム研究部 (Meteorological Satellite and Observation System Research Department, Meteorological Research Institute)
  - 3 筑波大学地球科学研究科 (Doctoral Program in Geoscience, University of Tsukuba)
  - 4 京都大学農学部林学科 (Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Kyoto University)
  - 5 東京大学生産技術研究所 (Institute of Industrial Science, University of Tokyo)
  - 6 長岡技術科学大学建設系 (Department of Civil Engineering, Nagaoka University of Technology)
  - 7 東京都立大学理学部地理学科 (Department of Geography, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University)
  - 8 筑波大学水理実験センター (Environmental Research Center, University of Tsukuba)
  - 9 農業環境技術研究所気象管理科 (Division of Agrometeorology, National Institute of Agro-Environmental Sciences)
  - 10 土木研究所河川部水文研究室 (Hydrology Division, River Department, Public Works Research Institute)
- \* 地球環境観測委員会水文過程分科会 (Mission Team on Hydrological Process, Earth Environment Observation Committee)

(ii) atmospheric profilings by means of a tethered balloon, radiosondes, and a lidar, and (iii) remote sensing of the surface by several different sensors aboard different satellite platforms such as NOAA/AVHRR, Landsat/TM, Landsat/MSS, VISSR/GMS, SPOT-2/HRV, MOS-1b/MESSR, MOS-1b/VTIR, MOS-1b/MSR, and ERS-1/AMI, and also by a SAR instrument on an airplane. Some of the initial findings from the data sets obtained from the experiment are presented.

Key words : large scale experiment, ABL, land-atmosphere interaction, remote sensing  
キーワード：大規模野外観測，ABL，大気-陸面相互作用，リモートセンシング

## I. はじめに

水文学の分野でスケールの問題はこれまであまり論じられてこなかった。研究の多くはある大きさの現象のみを対象にしているの、一般的には得られた結果もそのスケールについてのみしかなりたない。そして、結果がより大きな、またはより小さなスケールにそのまま適用できるのかどうか分からなかった。しかしながら、このような問題が最近主に気象学サイドから問われるようになってきた。いわゆるスケールアップ、スケールダウンの可能性の問題である。水文学、境界層気象学の分野でこのような問題そのものを扱うには、様々なスケールでの対象とする現象を同時に観測によりもとめ比較検討する方法と、モデルによるシミュレーションをとおして数値実験的に行なう方法がありえよう。ここでは観測にもとづく研究の試みとして、観測体制が密に整っている筑波地域を対象にして約10の機関、30名ほどの参加者を得て共同の集中観測を実施した。本報では、この観測の概要と得られた結果の一部を述べ、今後のデータ解析の方向づけ、今後行なわれるであろう類似の共同観測計画の立案への一助としたい。なお、観測項目が多岐にわたるため、便宜的に(1)地表面から自由大気へのフラックスの測定と(2)土壌水分の測定の二つに分けた。本報は前者を、沖ほか(1993)は後者を扱うので参照されたい。

このような集中観測では、得られる膨大なデータからなるデータベースを利用することで主目的であるスケールの問題のみでなく、これまで高い精度の観測データが無く解明が不十分な分野、たとえば異なる地表面の熱収支・放射収支の特性の

違いの解明などを明らかにすることも副次的な成果として期待されよう。

## II. 共同観測計画の背景

日本で大がかりな長期にわたる共同観測を短期間に立案、実施するのはおもに予算上の制約から容易ではない。今回の観測では期間、参加者数を中規模に抑えること、そしてすでに動いているプロジェクトを統合する形で行なうことで、計画の立案段階より半年から1年で実際の観測をスタートすることができた。これまでの経緯の概要をまとめると、まずはじめに文部省国際共同研究のひとつとしてIGBP/BAHC (International Geosphere Biosphere Programme/Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle)の日本対応のための研究経費の一部が筑波大グループに交付され、同大学を中心に筑波地域での1992年夏の観測計画の大枠が練られた。一方で、宇宙開発事業団(NASDA)がリモートセンシング技術センター(RESTEC)に委託して設置している地球環境観測委員会内部で今後の衛星搭載センサーの検討のための合成開口レーダー(SAR)の航空機実験が全く独立に同時期、同地域で計画されていることが判明し、同委員会水文過程分科会メンバーを通じてデータ利用の可能性などの打診を行なった。さらに、SARが表層土壌水分の検出に有効であることから、同分科会メンバーのなかでマイクロ波の利用の研究を進めていた東大生産研、長岡技術科学大、土木研究所、京大農学部などのメンバーも主に地表面での観測を行ない航空機、衛星のSARデータとの比較検討を行なうという形で共同観測計画に参加することとなった。さらに、若干の研

究テーマの違いはあるものの、類似のデータが必要でかつ筑波地域内で観測を行っていた気象研、農業環境技術研のメンバーも共同観測に加わることになった。

このような経緯で、IGBP/BAHC 関係の地表面から大気へのフラックスの測定を中心とする研究グループと、地球環境観測委員会水文過程分科会内の表層土壌水分のリモートセンシングによる推定法の確立を目指す研究グループおよびその他のプロジェクトに従事する研究者が共同で観測を行ない、お互いに必要なデータを補完しようという体制が整い観測に臨むこととなった。なお、

IGBP/BAHC 関係の観測は便宜的に Tsukuba Atmospheric Boundary Layer Experiment (TABLE) と呼ばれている (Sugita et al., 1993)。

### III. 野外集中観測の概要

#### 3-1. 観測日時と地域

集中観測は、例年の天気の様子、航空機実験および関係する衛星の飛来日時とのかねあいで、1992年8月4日から8月24日までの3週間の間に行なわれた。対象は、茨城県つくば市を中心とする16km×16kmの地域である (Fig. 1)。観測地域

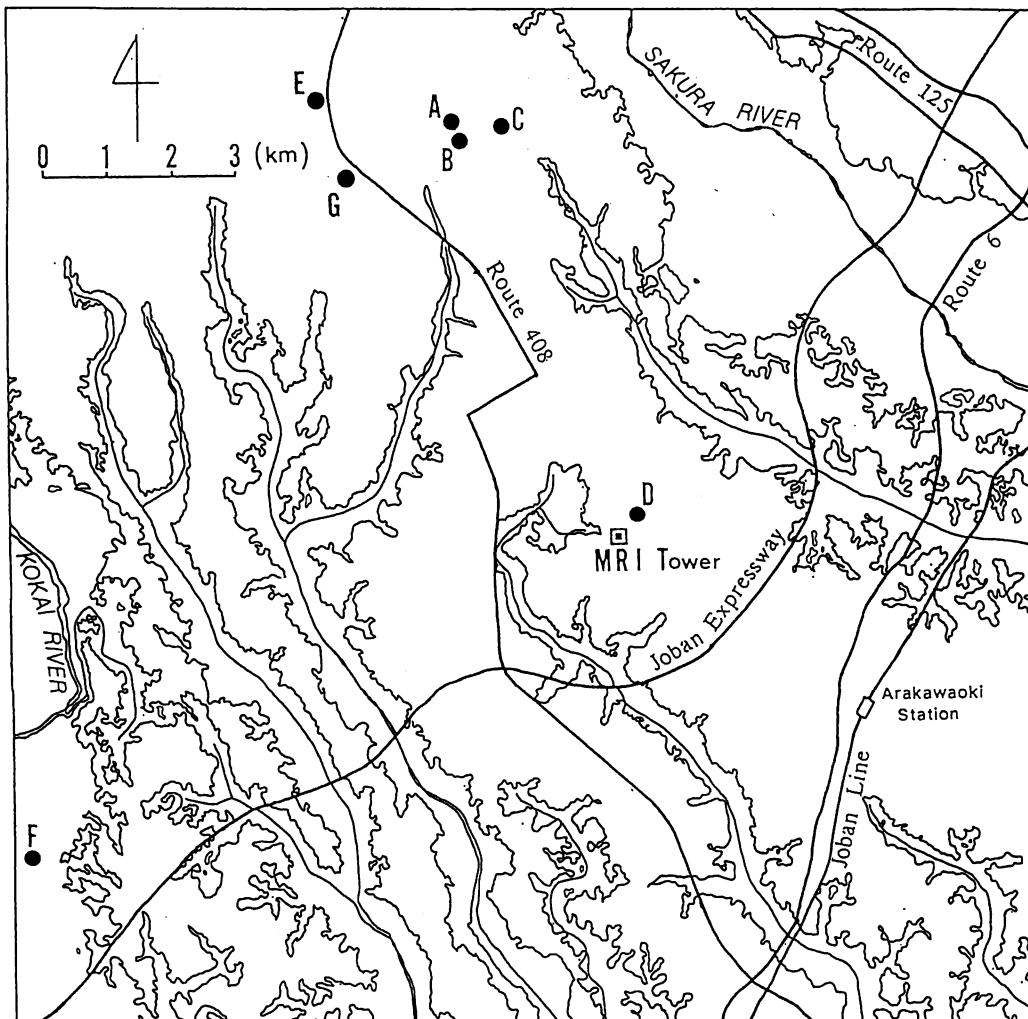


Fig. 1 Experimental area. Symbols A-G denote the names of surface stations (see Table 1); MRI indicates the location of 200-m meteorological tower of Meteorological Research Institute. Also shown in the figure are contour lines of 20m above sea level, major roads and railway, and rivers.

内は北東部分と南西部分の小河川沿いの部分を除き海拔高度20—30m程度の平坦地であり，地表面はアカマツを中心とした林，芝生産を主とする農耕地，雑草類の生える荒れ地，家屋，ビル，駐車場などの都市的な構造物，そして低地の水田などに覆われている。土地利用の詳細は後述の航空写真の解析結果の項を参照のこと。

3—2. 観測項目

観測項目は大きく3つに分類される。すなわち，地表面付近の小スケールの観測，地表から1—2 km程度の上空までの大気境界層内の観測，そして衛星および航空機を利用したリモートセンシ

ングによる比較的大スケールの観測である。以下にそれぞれの観測の概略を述べる。観測地点については Fig. 1 を参照されたい。

地表面付近における観測

筑波周辺の地表面を構成する主たる要素である草地，芝地，アカマツ林，アスファルト面，水田の5つに裸地を加えた6種類の地表面要素について，その放射，熱フラックス，水分量および植生データを求めるために合計7ヶ所の観測地点を設定した (Table 1)。それぞれの地点での観測項目の概要を以下に述べる

(1) 観測点A

Table 1 Summary of the measurements

Station name and symbol (type of surface cover)	Type of measurements				
	Energy Balance	Radiation balance	Surface Temperature	Soil Moisture	Others
ERC, U. Tsukuba A (pasture)	○	○	○	○	-ABL profiling by a tethered balloon, radiosondes, and a Lidar -Soil moisture measurements by microwave remote sensing
ERC, U. Tsukuba B (pine forest)	○	○	○	○	-water potential measurements in SVA system
Parking lot U. Tsukuba (Asphalt)	○	○	○	×	
Aerological Observatory (grass)	○	○	○	×	-ABL measurements by means of 200-m tower
Public Works Res. Institute (grass)	×	△	○	○	
National Agr. Res. Center (rice paddy field)	○	○	○	×	
Public Works Res. Institute (bare soil)	△ (8/14)	×	△	△ (8/11-16)	-Soil moisture measurement by microwave remote sensing

- ERC, ABL, SVA stand for Environmental Research Center, Atmospheric Boundary Layer, and Soil-Vegetation-Atmosphere, respectively.
- Symbols ○, △, and × denote continuous, partial, and no measurements, respectively during the campaign.
- Soil moisture was evaluated either volumetrically or in terms of water potential.
- Radiation balance can be evaluated from the measurements of downward longwave radiation at station D, those of up and downward shortwave radiation at stations A, C, D, and F, and those of surface temperature at A-G or those of upward longwave radiation at station D.

観測は牧草を主とし雑草などに覆われた筑波大  
水理実験センターの観測圃場(直径160m)で行  
なった。ルーチン的に測定されている約30項目の  
データ(鳥谷ほか, 1988)以外に, 風速(0-8  
m, 4高度), 気温, 湿度プロファイル(0-8 m  
8高度), 地表面温度, 下向き長波放射量, 上向き  
短波放射量を集中観測中毎日1時間平均値として  
求めた。これらを組み合わせることにより草地面の  
熱, 放射, 水収支の各項を求められる。

また, 観測圃場内の不攪乱土壌中と圃場内に設  
置してある豊浦標準砂を充填した浸透型ライシ  
メータ内の2ヶ所で地表面付近の土壌水分の深度  
別変化の連続測定を行った。観測項目は, 両地点  
については土壌水分量(ヒートプローブ式水分計,  
深度0-1.5m 8点), ライシメータ内のみにつ  
いては土壌水分ポテンシャル(自記テンシオメ  
タ, 深度0-1.5m 6-8点), 地温(深度0-1.5  
m 6-8点), 土壌内相対湿度(深度0-1.5m  
6-8点)である。さらに, 集中観測として8/  
11-8/18の間, 午前中1回のマイクロ波散乱計  
(4偏波(HH, VV, HV, VH), 3入射角(20, 35,  
50度))によるマイクロ波計測とその前後3つづつ  
の50cc サンプラーによる表層土壌水分の計測, そ  
して必要に応じた地表面放射温度の測定を行なっ  
た。加えて, 後述するE-ERS1通過時(8/14)と  
航空機SAR観測時(8/18および8/19日)には,  
同期した誘電率の測定を行なった。

#### (2) 観測点B

観測点Aの南側に位置するアカマツ林(面積1.7  
ha, 平均樹高13m)内に設置してある14mの観測  
タワーにおいて正味放射量, 1次元超音波風速温  
度計を用いた渦相関法による顕熱フラックス, 上  
向き短波放射量, 樹冠表面温度の30分間平均値を  
集中観測期間中連続で求めた。また, 観測期間中  
の8月10日-12日および18-20日には, 土壌水分  
ポテンシャル, 地温, アカマツの葉柄内水ポテン  
シャルが1時間間隔で観測された。

#### (3) 観測点C

観測点Aの南東約500mに位置する大学構内の  
アスファルト面駐車場において正味放射量, 地中

熱流量, 1次元超音波風速温度計を用いた渦相関  
法による顕熱フラックス, 上向き短波放射量, 表  
面温度, そして気温, 湿度, 風速(0.5m, 1.0mお  
よび2.0mの3高度)の30分間平均値を集中観測  
期間中連続で求めた。なお, 期間中は夏季休業中  
であり駐車場はほぼ空の状態だった。

#### (4) 観測点D

高層気象台放射観測露場における放射収支項の  
ルーチン観測項目の提供を受けた。また同時に気  
温, 湿度(それぞれ0.3, 1.2mの2高度), 地中熱  
流量, 地表面温度の観測を行ないそれぞれの1時  
間平均値を求めた。これらのデータから熱収支フ  
ラックスを算出した。

#### (5) 観測点E

土木研水文観測所敷地内の芝地において, 雨量,  
気温, 湿度, パン蒸発計からの蒸発量, 風向風速,  
日射, 気圧を10分毎に測定した。さらに, 表層土  
壌を50cc サンプラーにより採取することにより,  
表層土壌水分量を日6回測定し, 同時に地表面放  
射温度も測定した。

#### (6) 観測点F

観測地域の南西端近くの地点に位置する水田に  
おいて, 乾湿球温度(80, 160, 510cm), 水温分布  
(-2 cmで6点), 地温(-10cm), 全天日射量,  
上向き短波放射量, 正味放射, 地中熱流量, 風向,  
風速(80, 110, 160, 250, 510cm), 放射温度(スポッ  
ト1, 面平均1点)を10秒間隔でサンプリングし  
30分平均値を求めた。これらから熱収支, 放射収  
支項が算出された。

#### (7) 観測点G

土木研野球グラウンドにおいて8/11-8/18の  
間, Cバンド車載マイクロ波散乱計(4偏波(HH,  
VV, HV, VH), 3入射角(20, 35, 50度))による  
マイクロ波計測ならびにL, C, Xバンドマイク  
ロ波散乱計(原則として5偏波(HH, HV, VV,  
LL, LR), 6入射角(0, 10, 20, 30, 40, 50度))によ  
る1日1回のマイクロ波計測とそれぞれの前後3  
つづつの50cc サンプラーによる表層土壌水分の  
計測, および必要に応じた地表面放射温度の測定  
を行なった。また後述するE-ERS1衛星ならびに

SAR 搭載航空機の通過時(8/14, 8/18, 8/19)にはさらに面的な表層土壌サンプリング, 誘電率測定を行なった。また8/14-15にかけて24時間の熱収支観測を行なった。

#### 大気境界層内の観測

(1) 係留気球などを用いた下部大気境界層観測  
地表面の平均熱フラックスを求めるために, 下部大気境界層の気温, 風速, 湿度のプロファイルの観測を行った。係留気球は地上から上空150m程度までの間において低層で5 m間隔, 高層で10 m間隔で各高度1分間づつの観測を観測点Aをベースに行なった。上昇開始から終了までほぼ1.5時間を要し, 集中観測期間中, 毎日9時から17時の間連続観測を行ったので1日当たり4-5プロファイル, 合計64のプロファイルが得られた。また, 下記のライダーの観測にあわせ2日間夜間のデータもあわせて収集した。

#### (2) ラジオゾンデによる上部境界層の観測

大スケールの地表面, および境界層上端での広域の平均フラックスを求めるために低層ゾンデによる気温, 湿度, 風速の地上約3 kmまでの鉛直プロファイルの測定を行なった。76個のゾンデの放球はA点より行ない, 9-18時の間1日平均3-8回, 総計76回をできるだけ関係する衛星飛来に同期して行なった。

#### (3) 気象研究所200mタワーによる境界層観測データ

気象研究所が所有する200mタワー(花房ほか, 1979)の地上10, 25, 50, 100, 150, 200, 213mの各高度に取り付けられた超音波風速温度計による3成分の風速, 温度データ(0.1秒間隔), 温度計, 湿度計出力(1分平均)を観測期間中連続で収集した。

#### (4) ライダーによる大気境界層の観測

観測期間中の8/19-21の3日間, 可般型ライダーによりおもに夜間の逆転層高度, エアロゾル濃度プロファイルを観測した。

#### リモートセンシングデータ

#### (1) 極軌道衛星からのリモートセンシングデータ

観測期間中の日中の観測値が得られる NOAA-11/AVHRRの晴天日のデータを東大生産研より収集中である。また, 7/21, 8/22日に飛来した Landsat-5, 7/21, 8/24に飛来した MOS-1b, 8/15, 20, 25の SPOT-2の全データ, 8/14に飛来した E-ERS1の SAR データを NASDA/RESTEC を通して収集した。

#### (2) 静止気象衛星データ

観測期間中の晴天日について, 観測地域を中心とした10km程度の範囲をカバーする GMS (VISSR) の可視・赤外データを収集した。

#### (3) SAR 航空機実験データ

8/18および8/19日早朝に NEC と NASDA/RESTEC により実施された航空機搭載の Xバンド HH 偏波 SAR による地表面観測データを収集した。

#### (4) 航空機空中写真の収集

観測地域をカバーする国土地理院の航空機写真(1990年11月撮影)を購入した。

## IV. いくつかの観測結果と今後の解析の方向について

### 4-1. 観測地域の土地利用

国土地理院の空中写真により観測地域の土地利用の調査を行なった。空中写真から読み取った土地利用の様子を地形図上に書き移すことで観測地域の土地利用図を作成した。この図によれば, 16×16kmの観測地域内の約21%がアカマツなどの林であり, 6%が芝生, 29%が耕地などの短い丈の植生地, 23%が水田, 21%が建物, 駐車場などを含むアスファルト面, そして0.6%が水面であった。

### 4-2. 異なる地表面上のローカルスケールのエネルギーフラックス

エネルギーフラックスが地表面の土地利用によりどのように異なるかを調べるために, 観測期間

中に多かった雲量 1-5 程度の晴天日の例として 8 月 17 日を選び、フラックスの日変化を比較した。Fig. 2 から Fig. 6 は E 地点と G 地点を除く 5 ヶ所の熱収支項の日変化を示している。様々な特徴が読み取れるが、正味放射量がアカマツ林で他地点

より多く、結果として顕熱、潜熱フラックスも大きいこと、アスファルト面の顕熱は、正味放射量の値は他地点と大きく変わらないにもかかわらず他より大きいことなどが認められる。

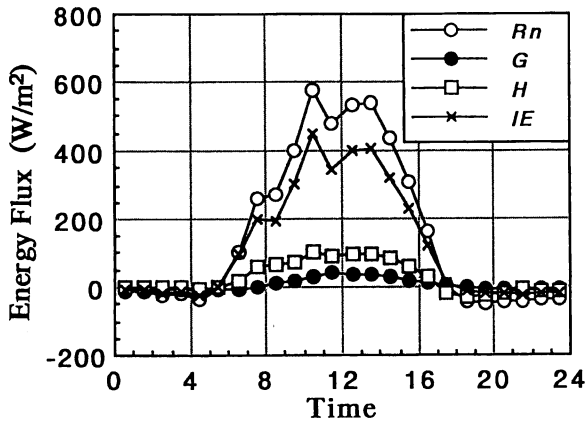


Fig. 2 Diurnal variations of energy balance components measured at station A in a pasture field.  $R_n$  is the net radiation,  $G$  the soil heat flux,  $IE$  the latent heat flux, and  $H$  the sensible heat flux.  $R_n$  and  $G$  were measured by a net radiometer and by a soil heat flux plate, while  $H$  was determined by applying an eddy-correlation method to the temperature and wind data measured by a sonic anemometer-thermometer,  $IE$  was evaluated as  $R_n - G - H$ .

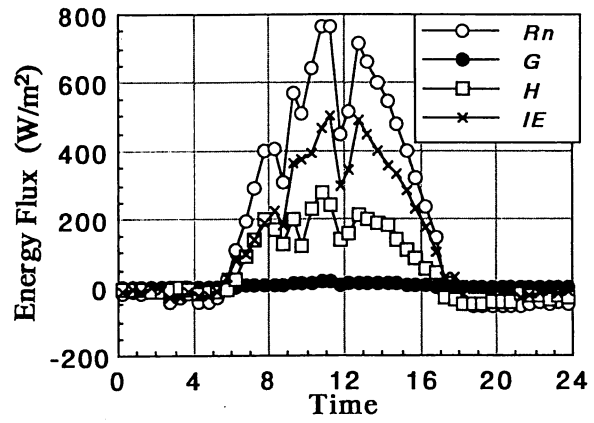


Fig. 3 Same as Fig. 2, but for station B in a pine forest.  $R_n$  was measured by a net radiometer;  $H$  was determined by applying an eddy-correlation method to the temperature and wind data measured by a sonic anemometer-thermometer;  $G$  was estimated as  $0.02 \times R_n$ ; and  $IE$  was evaluated as  $R_n - G - H$ .

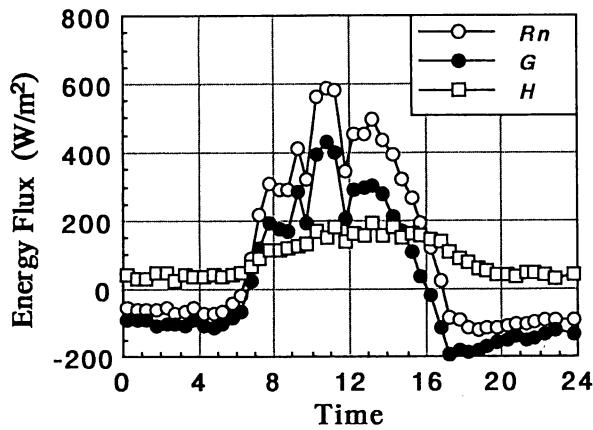


Fig. 4 Same as Fig. 2, but for station C on an asphalt surface.  $R_n$  was measured by a net radiometer;  $H$  was determined by applying the profile equations (1) and (2) to the profiles of temperature and wind speed.  $G$  was evaluated as  $R_n - H$  by assuming the absence of evaporation.

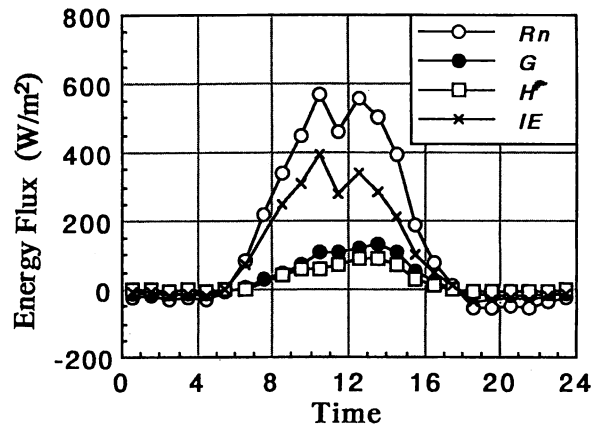


Fig. 5 Same as Fig. 2, but for station D on a grass field.  $R_n$  and  $G$  were measured by a net radiometer and by a soil heat flux plate, while  $H$  and  $IE$  were determined by applying the Bowen ratio method.

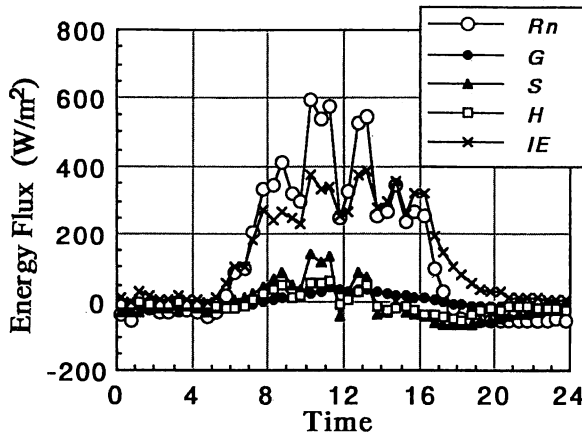


Fig. 6 Same as Fig. 2, but for station F on a rice paddy field.  $Rn$  and  $G$  were measured respectively by a net radiometer and by a soil heat flux plate.  $H$  was determined by applying (1) and (2) to the temperature and wind speed data, while the storage term in water body  $S$  was calculated by measuring water temperature and the depth of water. These values were used to calculate  $IE$  by considering the surface energy balance.

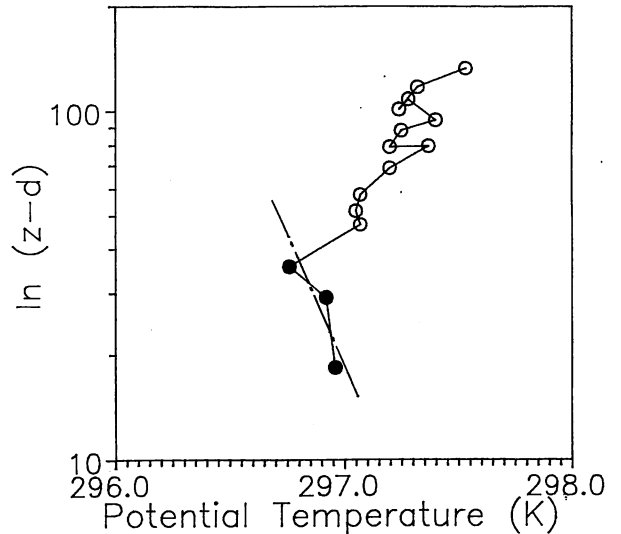


Fig. 7 An example of the potential temperature profile in the lower part of the atmospheric boundary layer. Closed circles represent the points used in the application of (1) to derive regional value of  $H$ . The least squares regression line fitted to these points is also shown in the figure.

#### 4-3. 広域の平均エネルギーフラックスの推定

接地境界層内の温位，風速のプロファイルは，Monin-Obukhov の相似則から導き出される以下のプロファイル式により記述できる (Brutsaert, 1982)。

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{H}{ku_* \rho c_p} \left[ \ln \frac{z_2 - d}{z_1 - d} - \Psi_h \left( \frac{z_2 - d}{L} \right) + \Psi_h \left( \frac{z_1 - d}{L} \right) \right] \quad (1)$$

$$u = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z - d}{z_0} \right) - \Psi_m \left( \frac{z - d}{L} \right) \right] \quad (2)$$

ここで， $\theta$ ：温位， $H$ ：顕熱フラックス， $k$ ：カルマン定数 (=0.4)， $u_*$ ：摩擦速度， $\rho$ ：空気密度， $c_p$ ：空気の定圧比熱， $z$ ：地表面上の高さ， $d$ ：地面修正量， $\Psi$ ：安定度修正関数， $u$ ：風速， $z_0$ ：粗度長， $L$ ：Obukhov 長である。また，添え字の 1 と 2 は測定高度  $z_1, z_2$  での値を， $h, m$  はそれぞれ顕熱，運動量を意味する。これらの式は地表面のフラックス  $H, u_*$  と地表面上接地境界層内の温位，風速の鉛直方向の勾配を関係づけており，こ

れらのプロファイルの実測値を用いることで地表面フラックスを評価するのに用いることができることを示している。さて，係留気球を用いたプロファイルの測定値を用いる場合，接地境界層の高さが 50-100m 程度であるのでそれらに (1)-(2) を適用して得られるフラックスは観測地点の風上側のフェッチ上の平均的な値と考えられる。フェッチの値は中立大気について求めるとほぼ高さの 100 倍のオーダーとなるので，100m で測定したプロファイルは風上側 10km 程度までの範囲の平均値としてとらえることができる。

解析の一例として観測期間中の 8 月 17 日 13 時 25-33 分に測定されたプロファイルから得られる結果を示す。Fig. 7 は，得られたプロファイルを縦軸に  $z-d$  を取って示したものである。ここで， $d, z_0$  の値として那須野・西沢 (1987) が水理実験センターで行なった中立時の風速プロファイル観測から得た  $d=7.19, z_0=0.24m$  を使用した。図から明らかなように接地境界層は 40-50m 程度の高さまででその上は混合層となっていることが分かる。



(1)–(2)式は変形すると  $\theta$  と  $u$  の  $\ln(z-d)$  についての1次式となる。したがって、実際の適用に当たっては接地境界層内の  $\theta$  と  $\ln(z-d)$ , あるいは  $u$  と  $\ln(z-d)$  の組み合わせに1次の回帰式を当てはめ、その回帰係数を評価することで、摩擦速度と顕熱の値が得られる(詳細はたとえば Sugita and Brutsaert, 1990 を参照)。このようにして得られた Fig. 7 の場合の平均顕熱フラックスの値は、 $122\text{W/m}^2$  となった。一方、各地表面ステーションで同時刻に得られたローカルスケールのフラックスの値は、 $99.0$  (A地点),  $193.4$  (B地点),  $180.5$  (C地点),  $105.8$  (D地点),  $69.5$  (F地点)  $\text{W/m}^2$  であった。また、これらの値を4–1で得られた各地表面要素が観測地域に占める面積の割合を用いて加重平均を行なうと、 $129.8\text{W/m}^2$  となった。プロファイルから得られた値は各地点でのローカルフラックスの値の範囲内にあり、加重平均で求めたフラックスとも近い値となった。このことは、ローカルスケールのフラックスの

ケールアップに線型的な方法が適用できる可能性を示しているが、確かな結論を導くには、より多くのプロファイルの解析が必要であろう。

#### 4–4. ラジオゾンデによる大気境界層のプロファイリング

現在解析が進んでいるラジオゾンデによって得られた大気境界層全体および自由大気下部の温位、湿度、風速のプロファイルの一例を Fig. 8 に示す。係留気球ではとらえられなかった境界層上部の詳細なデータが得られているのがわかる。温位プロファイルから、接地境界層が地上50–100m程度までで終っており、その上にはいわゆる混合層が700–800m程度まで発達していることが認められる。また、温位のプロファイルは混合層内ではほぼ一定値をとり、層内で非常に良く混合されていることをうかがわせる。これに対して、比湿のプロファイルは高度と共に減少しており、対照的である。顕熱が地表面から上向きにそして自由

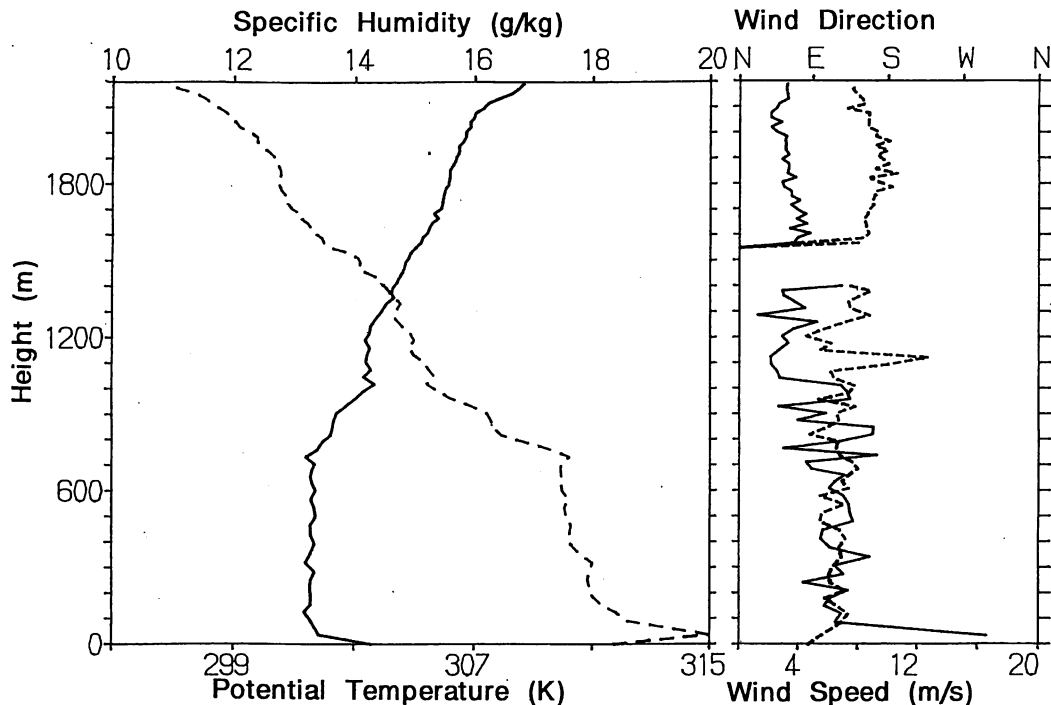


Fig. 8 An example of the profiles of potential temperature (indicated as solid line in the left box), humidity (dashed line in the left box), wind speed (solid line in the right box), and wind direction (dashed line in the right box), as measured by a radiosonde released at 1218 JST on Aug. 17, 1992.

大気から下向きにと上下両方向から供給されるのに対し、水蒸気は地表面から供給され、自由大気へとさらに出ていくという流れを持っている。このことが異なった形のプロファイルを生んだ原因と思われる。そして、このような点が混合層のデータを利用する上で考慮されねばならないだろう。

一般的に、観測高度が高いため、混合層内のデータを利用することで、接地境界層の場合より広い範囲を代表する広域の地表面フラックスを求められる可能性がある。今後、上記のような混合層内部の構造に注意しながら解析が進められる予定である。

## V. おわりに

以上、今回の共同観測の概要と得られた結果の一部を紹介した。それらの結果は複雑な地表面での平均的な物理量を求める難しさ、そして地表面フラックスを面的な平均値として求める一つの方法としての大気境界層内での測定的重要性を示しているように思われる。しかしながら、確かな結論を導き出すには混合層を含むより多くのプロファイル解析とともに、ローカルフラックスをスケールアップするモデルの構築などが必要不可欠であろう。また、解析が進むに連れて明らかになると思われる、リモートセンシングデータから推定される気象・水文等の諸要素の異なるスケール間での関係も重要な問題になろう。

最後に、このような共同の集中観測はこれからの水文学・境界層気象学の研究の方法の一つとしてますます盛んになると思われる(例えば, American Geophysical Union, 1989)。近い将来の問題としては、現在計画のたてられつつある Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) のアジアおよび周辺地域での共同研究計画がある。これから共同研究を立案する上で今回の観測で問題になった点を示しておくのも有用と思われる。

・地表面でのフラックスや土壌水分などの野外での測定は、教科書に記述され確立されているよう

に思われるが、実際にはセンサーの選択、設置の方法など様々な問題があり決して容易なことではなく、誰もが行なえるものではない。そして今回の観測では必ずしも十分な人数が集まらず、1つの研究機関が数個のステーションの維持を行なうようなこともあった。このような綱渡りの方法は、良いデータの取得と言う点からも避けねばならない。そしてそのためにはより多くのこの分野の研究者・技術者養成と言う点から学部・大学院レベルでの野外観測法の授業・実験の充実が必要と思われた。

・様々な衛星のリモートセンシングを一元的に扱う機関がなく、観測時に事前に必要な軌道情報、観測後の解析に必要な様々な情報を入手するのは必ずしも容易ではなかった。今回の場合は、リモートセンシング技術センター地球環境観測委員会の水文過程分科会の活動の一環でもあったため、同センターが管轄する極軌道衛星について様々な便宜を図っていただいた。それにもかかわらず、情報を提供するラインがはっきりしていないためいくつかの行き違いが生じた。他に頻繁に利用される衛星である NOAA シリーズの衛星, GMS については担当機関の全くの好意で提供を受けることになるためますます必要な情報を得にくかった。効率的な研究のためには、サービス機関を設けこれらを一元的にサポートする体制を整備する必要がある。

・共同研究の場合、連絡事務が成功のための大きな鍵となる。今回の場合、比較的中規模であったため個人のボランティア的な活動で何とかすることができた。しかし、規模を大きくした場合、責任のある立場で事務的な扱いが行なえ、かつ必要なスタッフが揃っているような体制を整えなければ、全体のスムーズな研究活動も進まないことは間違いなく言える。

・コミュニケーションの手段として電子メール (e-mail) の利用の普及を図るべきである。多くのことは電話, fax で済ませられるが、例えば申請書を多くの人間が共同で作るような場合、多くのデータの交換が必要な場合など、e-mail があれば相手

方の所有するコンピュータファイルがそのまま取得できるため、パソコンの前に座ってわざわざfaxで送られてきた文章、データを打ち込むような非効率なことをしなくて済む。とくに最近商用ネット(PC-Van, Niftyserve)と大学などのネットワークが実験的ではあるがつながったため、大学などの施設が利用できない人もe-mailを気軽に利用できるようになっており、より一層の利用が望まれる。

### 謝 辞

今回の観測にあたり、高層気象台観測第3課の方々には同気象台観測露場利用に当たりいろいろな便宜を図っていただいた。また、同課が観測している放射収支データの提供を受けた。朝日大学教養部枝川尚資さんにはラジオゾンデ受信機を使用させていただき、技術的な指導をいただいた。筑波大地球科学系の小林守さんには係留気球の利用で便宜を図っていただいた。気象研究所応用気象研究部佐藤純次さんからは、ラジオゾンデ用の自動記録式セオドライトを借用した。気象衛星センターからは気象衛星(GMS)のデータを、リモートセンシング技術センターからは地球環境観測委員会の活動の一環としてNOAA/AVHRR, Landsat, SPOT, E-ERS1のデータを、東大生産技術研究所からNOAA/AVHRRデータの提供をそれぞれ受けた。以上記して感謝致します。

### 文 献

- 沖大幹・上田真也・大手信人・甲斐憲次・榎根勇・小池俊雄・近藤昭彦・嶋田純・杉田倫明・田中正・辻村真貴・田少奮・葦沢浩・原菌芳信・檜山哲哉・深見和彦・安成哲三：Tsukuba 92：水文学・境界層気象学における異なるスケール間の関係解明のための共同観測計画(2)広域土壌水分の推定。水文・水資源学会誌，準備中。
- 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，第13号，147～158。
- 那須野正明・西沢利栄(1987)：観測圃場における風の鉛直分布と空気力学的パラメータについて。筑波大学水理実験センター報告，第11号，117。
- 花房龍男・藤谷徳之助・伴野登・魚津博(1979)：筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設。気象研究所技術報告，第3号，50ページ。
- American Geophysical Union(1989)：Committee on Large-scale experimentation. EOS, 70, 530.
- Brutsaert, W. (1982): *Evaporation into the atmosphere*, D. Reidel Publ. Co., 299p.
- Sugita, M. and Brutsaert, W. (1990): Regional surface fluxes from remotely sensed skin temperature and lower boundary layer measurements. *Wat. Resour. Res.*, 26, 2937～2944.
- Sugita, M., Kayane, I., and Hiyama T. (1993): IGBP/BAHC field experiment to address scale problems in land surface parameterization. *IAHS Pub. No. 212*, 389～396.

(受付 1993年4月15日)

(受理 1993年6月21日)

この論文に対する「討論」を1994年2月28日まで受け付けます。