

琵琶湖プロジェクト 2002 年フラックス面的集中観測
(Catch A Plume by SATs: CAPS) : その概要
Overview of Intensive Field Campaign for Lake-Biwa Project 2002,
“Catch a Plume by SATs: CAPS”.

玉川一郎¹ (岐阜大学流域圏科学研究センター)
Ichiro TAMAGAWA *River Basin Research Center,
Gifu University*

田中賢治 (京都大学防災研究所水資源センター)
Kenji TANAKA *Water Resources Research Center,
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univer-
sity*

石田祐宣 (弘前大学理工学部地球環境学科)
Sachinobu ISHIDA *Department of Earth and Environ-
mental Sciences, Hirosaki University*

樋口篤志 (名古屋大学地球水循環研究センター)
Atsushi HIGUCHI *Hydrospheric Atmospheric Research
Center, Nagoya University*

松島 大 (東北大学大学院理学研究科)
Dai MATSUSHIMA *Graduate School of Science, To-
hoku University*

浅沼 順 (筑波大学陸域環境研究センター)
Jun ASANUMA *Terrestrial Environment Research
Center, University of Tsukuba*

小野圭介 (農業環境技術研究所)
Keisuke Ono *National Institute for Agro-
Environmental Sciences*

多田 毅 (防衛大学校土木工学研究室)
Tsuayoshi TADA *Department of Civil Engineering, Na-
tional Defense Academy*

林 泰一 (京都大学防災研究所災害観測実験セン
ター)
Taichi HAYASHI *Research Center for Disaster Envi-
ronment, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto
University*

石川裕彦 (京都大学防災研究所)
Hirohiko ISHIKAWA *Disaster Prevention Research In-
stitute, Kyoto University*

田中広樹 (名古屋大学地球水循環研究センター)
Hiroki TANAKA *Hydrospheric Atmospheric Research
Center, Nagoya University*

檜山哲哉 (名古屋大学地球水循環研究センター)
Tetsuya HIYAMA *Hydrospheric Atmospheric Research
Center, Nagoya University*

岩田 徹 (岡山大学環境理工学部環境デザイン工
学科)
Toru IWATA *Department of Environmental & Civil
Engineering, Faculty of Environmental Science &
Technology, Okayama University*

田中健路 (熊本大学工学部環境システム工学
科)
Kenji TANAKA *Department of Architecture & Civil
Engineering, Kumamoto University*

中北英一 (京都大学工学研究科環境地球工学専
攻)
Eiichi NAKAKITA *Department of Global Environment
Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto
University*

CAPS 観測グループ² CAPS observation group

The intensive observation, including many turbulence observations distributed in the area, was performed over paddy field in northern Shiga prefecture, Japan in a few weeks in November 2002. Sixteen points of turbulence observation, a radio sonde observation, two SODARs observation, four scintillometers observation and thermal images taken from airplane were done in this campaign. The outline is presented here.

Keywords: turbulence, flux, Biwako project, Flux enthusiast party

⁰連絡先: フラックス野郎&お嬢の会 . E-mail: flux@tama.cive.gifu-u.ac.jp (フラックス野郎&お嬢の会メーリングリスト)

¹岐阜大学流域圏科学研究センター 〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1
River Basin Research Center, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan.

²松浦陽介・朝岡良浩・渡辺浩明 (東北大学), 家本薫 (筑波大学), 鈴木善晴・原耕一郎・清水保・鎌田雅憲 (宇都宮大学), 大石哲 (山梨大学), 民田晴也・山本宗尚・松原卓美・八田由紀子・近藤善美・佐藤暁子 (名古屋大学), 山根悠介・甲山治・石岡賢治・相馬一義・宮田昇平・田中武志・花房大輔・福田大輔 (京都大学), 西村吉弘・伊藤龍也 (福井工業大学), 松井一浩・吉田直矢 (崇城大学)

滋賀県北部の水田地帯で、面的に観測点を配置した乱流観測を含む集中観測が2002年11月に行われた。この観測は、16点の乱流観測・ゾンデ・2点のソーダ・4台のシンティロメータ・航空機からの熱画像計測からなる大規模かつ集中的なものである。ここではその概要を述べる。

キーワード: 乱流, フラックス, 琵琶湖プロジェクト, フラックス野郎&お嬢の会

I. はじめに

乱流の面的集中観測が2002年11月に滋賀県北部の水田地帯で行われた。この観測は、戸田ら(2000)で報告された自発的持ち寄り型プロジェクトである通称「フラックス野郎&お嬢の会」と、現地で継続的に行われて来た「琵琶湖プロジェクト」の合流によって実現した大規模な観測であり、この報告はその第一報である。この研究の最大の特徴は、多数の研究者が自発的に装置や労力などを出し合って観測を行っている点にあり、著者の多さもその特徴に起因する。

さて、今回行われたような小さな領域に多数の計測機を展開するという集中観測は、地上での乱流輸送量(しばしばフラックスと略称される)観測を行っている研究者の間では憧れを持って期待されていた。例えばこの種の地上観測をひろく展開したGAMEのコミュニティでも、集中観測終了後には「expedition型の研究の時代は終わった」、「観測しただけで研究になる時代ではない。多数の計測を組み合わせる必要がある」という認識のもと、衛星観測等と組み合わせる広域モニター型の観測戦略と並んで、人や機材、資金を集中的に小さな領域に投下して、いままでにないデータを取得し、直接観測に基づく飛躍的な研究の進歩を狙ってはどうかという議論がなされていた。

そのような機運の中で、通称「フラックス野郎&お嬢の会」(戸田ら2000)は筑波大学陸域環境研究センターにおける乱流計測機の比較観測から活動を始めた。この活動は、メーリングリスト⁰や、WWWページ(<http://tama.cive.gifu-u.ac.jp/~tama/flux/> など)を多用し、各地に散らばる研究者間で写真や解析途中の結果をも含むデータの共有・公開を通じて、活発な議論を行いながら、まさにバザール方式(Linuxなどのソフト開発で行われる手法)で活動を続けている。

一般に多種かつ多数の計測機を使った観測を行うには、運用上・技術上のさまざまな問題が起こるが、年1回ペースで観測を行っていく中でノウハウを蓄えつつ段階的にそれら乗り越えて来た。2001年までに計測器相互の比較観測を第一課題とする研究フェーズを終了した。その結果(石田ら2004)によると現状で稼働しているさまざまな超音波風速計で測定された顕熱フラックスの機差は10%以内であり、赤外線オープンパス型湿度変動計で測定された潜熱フラックスも新しい世代の計測機を使い、更に検定を行えば機差は小さく、異機種が混在する状況でも多点観測を展開することが可能であることが示された。それを踏まえ、2002年には大気科学・水文学的研究により焦点を合わせるべく、観測場所を変え、琵琶湖プロジェクトの行われている滋賀県北部の高月町で行われることになった。

一方の琵琶湖プロジェクトは「琵琶湖流域の水・熱循環過程解明に向けた総合研究と衛星同期共同観測」を骨子としたオープンプロジェクトであり、1989年以来様々な関係機関のサポートを受けながら継続されてきたものである。全国の各分野からの水文研究者が一同に会して議論し、衛星リモートセンシングやGISなどを使った共同観測・解析を行うことにより、水文学の新たな方向や飛躍をもたらすことを基本的な目的としている(中北・砂田1998, 中北2000)。当初は短期集中型のスポット的な検証観測が主体であったが、1998年度より水田・森林の2地点で、1999年度からは都市、湖面の2地点でも常設熱収支観測システムの運用が始まり、現在も観測を継続している(宮崎ら, 2001)。今回の観測は、この常設熱収支観測の水田サイト周辺の水田地帯を利用して行われた。

小領域で多数の乱流計測機を展開して行う観測は、多くはないが、古くから行われており、有名な例としては、Kaimal and Businger (1970), Kaimal (1974), Wilczak and Tillman (1980)などによる細線温度計

を用いた対流プリュームの観測などがあり、プリュームの特徴などについて現在の対流境界層の教科書に載っているような結果が得られている。近年では、CASES と呼ばれる大規模な観測がアメリカのカンザス州で行われており、この報告と同様に多数の著者による紹介記事 (LeMone ら 2000) によると、ここで紹介するものより、はるかに大規模で広域から階層的にカバーするような領域を設定したプロジェクトである。その 1999 年の集中観測では 5km 四方程度の領域にタワーを含むさまざまな観測点を 20 点程度分布させ、主に夜間の安定層を狙った観測が行われている。

ここでは、CASES 程ではないにせよ前述の経緯で実現に至った非常に多種・多数の計測機を利用した大規模な観測の概要を報告する。焦点を絞った通常の研究論文では、観測の全体像を掲載することは困難であるので、概要の紹介という形で観測の全体像の記述をここに残しておくことは今後の研究にとって有益であり、また、面的集中観測が実現可能であることを示すことは今後のこの種の研究にとって重要な意味があると考えられる。

II. 観測概要

観測の基本コンセプトは、一様に見える地表面上で多数の乱流計測機を設置しその時間空間的分布を把握することである。それは、

- 我々の計っている地表からのフラックスは本当に代表性があるのだろうか？
- フラックスの空間分布は、どうなっているのだろうか？

という素朴な問いや、

- 神田ら (2002) あるいは 渡辺・神田 (2002) で示された大規模な境界層内の対流構造が、はたして本当に地表面付近での観測に影響を及ぼすのか？ 大規模な対流構造は本当にそんなに動かないのか？
- フットプリントやソースエリアと呼ばれるある点でのフラックスの計測値に影響を与える地表面領域 (Schuepp ら 1990, Horst and Weil 1992) で観測対象領域全体を覆えば代表値が得られるのだろうか？
- よく知られている乱流の性質を持つのは、どこまでの空間的あるいは時間的スケールなのか？

などの問いに直接答えるには、単純な地表面状態の場所で面的な観測をすることから始めるべきだとの考えに基づくものである。

観測に選ばれた場所は、標高約 100m の滋賀県伊香郡高月町井口の水田地帯である。ここは、琵琶湖岸の小山と伊吹山地にはさまれた北々西から南々東へ延びる幅約 4km の平地であり、木之本と高月の 2 つの市街地の間に位置する観測地周辺には大規模な市街地はない。観測地の位置を計測機配置とともに図 1 に示す。

本観測地は、琵琶湖プロジェクト常設の水田観測システムが以前から設置されて集中観測も何度か行われており、観測に対する地域の理解が得られ易いこと、地表面状態は水田でかなり均一であること、更に、本州中央部にあり幹線鉄道や高速道路からも近く参加者の往復に便利であることから観測地として適していると考えられた。

現地で稲刈りが終了しており、十分な顕熱フラックスが期待される時期として観測期間を設定した。期間は設置撤収を含めて 2002 年 11 月 9 日から 22 日であり、短期集中型の観測とした。実際問題として、今回のような観測を長期間続けることは人的資源、資金の両面で困難であった。参加者は宿泊リストで数えても

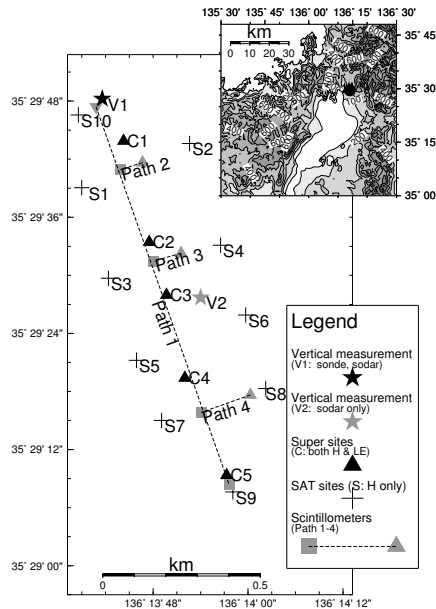


図 1: 周辺地図と計測点配置図

Fig.1 Location of the observation points

47 名に達し、大半の者が勤務や学業の都合で断続的に現地に入った。設置撤収時には多くの人手を要したが、観測継続中は約 10 名で運用を行った。

使用機材は、超音波風速温度計 16 台、赤外線湿度変動計 4 台、シンティロメータ 4 台、ドップラーソーダ 2 台、ラジオゾンデ 1 台であり、収穫後の水田に総延長 3km に及ぶ仮設の電源工事をを行い機器の電源を確保し、多くの観測点では水田内に設置した物置に計測機本体や記録計を収容した。さらに集中観測日には航空機による熱赤外画像の観測も行われた。計測機の配置は図 1 のようになっている。配置は、ほぼ等間隔の格子になるように、乱流観測点を配置し、その中心線上に、計測項目の多い観測点を置くものである。また、ゾンデおよびソーダもこの中心線上に配置し、シンティロメータの内、長距離の観測パス用のものを中心線上に設置した。他のシンティロメータは、中心線と直交する方向に配置し、なるべく観測領域全面を覆うようにした。

行われた計測は、

1. ゾンデおよび 2 台のドップラーソーダによる上空の観測
2. 4 台のシンティロメータによる線上の空間平均値の計測
3. 航空機からの熱画像による地表面状態量の面計測
4. 水蒸気変動計を含む地上での乱流観測といくつかの気象観測
- 4'. 超音波風速温度計のみでの乱流観測

の 5 通りに分類できる。以下、それぞれについて簡単な説明と資料を掲載する。なお、資料中の機器の所属の略称は、最後の表 6 にある。

1. 上空の観測 (ゾンデとドップラーソーダ)

GPS ゾンデによる観測は、図 1 の V1 地点にある滋賀県立伊香高校の千田農場を借りて、期間中 3 時間毎に行われた。放球は観測時刻の 30 分前で、気圧・気温・湿度・風向風速が 2 秒毎に記録され、境界層内および上空の詳細な鉛直構造が観測された。これが今回の観測における唯一の上空の気温・湿度を含む観測データであり、数値実験を含む解析に重要な役割を果たすと期待される。

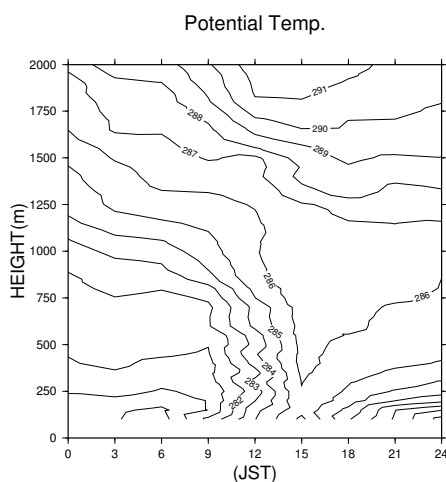


図 2: 2002 年 11 月 17 日のゾンデ観測による温位変化

Fig.2 Potential temperature at November 17, 2002 by radio sonde observation.

観測データの例として 2002 年 11 月 17 日の温位の時間鉛直断面を、図 2 に示す。当日は晴れた日で南からの風が吹く時間が長く、後述の航空機観測も行われたので、今回の観測の中で最も多くのデータが得られた日の一つである。この日は、夜間の冷却で形成されていた下層の冷気が、日の出以降急速に地表の加熱を受け等温位の混合層が形成されていき、800m 程度まで発達した後に、また下層から冷えて安定成層が形成される晴天日の大気境界層の典型的な日変化が観測された。

表 1: ゾンデとドップラーソーダ観測

Table 1 Radio sonde and doppler SODAR observation

地点	種類	型名	所属
V1 (35°29.804'N, 136°13.693'E)	GPS ゾンデ	Vaisala MW15	名大 HyARC
	Dopplar Sodar	Scintec XFAS	名大 HyARC/LAPS
	車載 Dopplar Sodar	DPRI&Kaijo	京大 DPRI
V2 (35°29.462'N, 136°13.900'E)	車載 Dopplar Sodar	DPRI&Kaijo	京大 DPRI

ドップラーソーダは、地上設置型のソーダをゾンデと同じ V1 点に設置し、20 分毎に上空の風速や変動の統計値を記録した。ここでは周囲の人家への騒音問題から夜間の観測は中止された。また車載型のは V2 地点の神社に設置し、1 分毎にデータを記録した。こちらでは、朝の 9 時ごろに通行する車が原因と思われるノイズによってデータの取得率が低下していた。これらから境界層内の風向風速の鉛直分布が得られ、

記録間隔の短い後者からはプリュームなどの対流構造に関する情報も得られるのではないかと期待される。計測地点毎にまとめた表を表 1 に示す。

2. 水平方向の線での観測 (シンティロメータ)

表 2: シンティロメータによる観測
Table 2 Scintillometer observation

地点	位置・パス長種類	型名	所属
	種類	型名	所属
Path1	35°29.79'N, 136°13.68'E, 751 cm (送信機)		
	35°29.14'N, 136°13.96'E, 670 cm (受信機)		
	Path Length: 1232 m		
	scintillometer	Sintec BLS900	筑波大 TERC/RAISE
Path2	~ 11/17		
	35°29.710'N, 136°13.821'E (送信機) 35°29.681'N, 136°13.734'E (受信機)		
	Path Length: 148 m (実測)		
	11/17 ~ 11/18		
	送信機, 受信機詳細位置不明		
	Path Length 112m (実測)		
	11/18~		
	35°29.694'N, 136°13.778'E, 275 cm (送信機) 35°29.682'N, 136°13.731'E, 253 cm (受信機)		
	Path length 70m (実測)		
	平均高 264 cm		
	scintillometer	Sintec SLS20	防衛大
Path3	35°29.539'N, 136°13.859'E, 183 cm 送信機		
	35°29.525'N, 136°13.802'E, 234 cm 受信機		
	平均高 209 cm		
	Path Length: 89 m (~11/17) 100 m (11/17~)(共に実測)		
	scintillometer	Sintec SLS20	防衛大
Path4	35°29.294'N, 136°14.005'E, 216cm (送信機)		
	35°29.267'N, 136°13.901'E, 268 cm (受信機)		
	平均高 242 cm		
	Path Length: 160 m (実測)		
	scintillometer	Sintec SLS40	農環研

シンティロメータ (Scintillometer) は、光の屈折を利用して計測パス中での気温の変動に関わる屈折率の乱流統計量 (C_n^2) を計測する装置である。この量と地表からの顕熱フラックスを結びつけるには Monin-Obukhov の相似則の関係を使う必要があり、相似則の仮定である水平一様定常を利用しているため、仮定が完全に破れている場合には理論的にフラックスと結びつけるのに困難があり、完全に水平一様であれば 1 点での計測と同じものになってしまうわざわざ観測する意味がなくなってしまう。この両極端の間の状態では、パス平均のフラックスに関する値を測定する貴重な計測器であると考えられる。また、直接観測されるパス平均の C_n^2 そのものは貴重な空間平均された乱流統計量であり乱流統計量の分布に関する研究には意義深いと考えられる。今回の観測では、強力な光源を持つ長距離観測用の Sintec BLS900 を領域の長手方向に、他の物を横方向に設置し、(横棒の一本多い) “キ” の字状に領域での値を計測するように配置し

た. 表 2 にそれぞれ位置や状況を示す. Path2 の Sintec SLS20 が何度も位置を変更しているようにどれだけのパス長で安定に観測できるかなど現地での調整作業に手間取るものもあった.

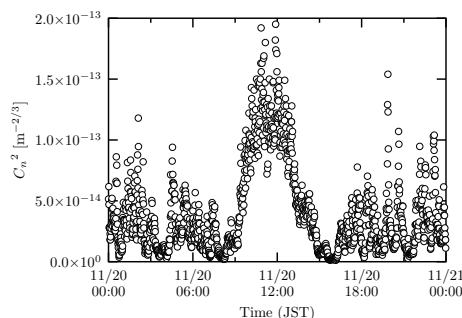


図 3: Path1 に設置された BLS900 での計測結果. 2002 年 11 月 20 日
Fig.3 Observed data by BLS900 on path1 at November 20, 2002.

観測データの例として, Path1 の Sintec BLS900 のデータを図 3 に示す. 昼頃に C_n^2 が大きくなり計測パス内での気温変動の大きいこと, すなわち活発に顕熱の輸送が行われていることをとらえている. 蛇足であるが C_n^2 からでは熱輸送の方向は区別できないので夜間でも正の値を示している.

3. 上空からの地表面状態の観測 (航空機による熱画像観測)

表 3: 航空機による熱画像観測

Table 3. Thermal image observation from an airplane.

観測日時	11/17 午前, 午後 11/19 午後 11/20 午前		
観測項目	熱画像, 気温湿度気圧, 地表ビデオ撮影		
熱画像	Inframetrics MODEL740	東北大	
温湿度計	Vaisala HMP133L	東北大	
気圧計	Vaisala PTB101	東北大	
ビデオカメラ	Panasonic NV-GS5K	東北大	
記録計	Grant SQ1254	京都大 DPRI	
セスナ機		大阪航空	
種類	型名	所属	

観測領域内の地表面の状態を把握するために, セスナ機からの熱赤外画像撮影が行われた. 観測に使用した機材や日時は表 3 の通りである. 航空機は大阪府にある八尾空港を基地として現地に飛来し観測を行った.

観測により図 4 に示すような地表面放射温度の分布図が得られた. この画像は, 観測された輝度温度に対して幾何補正や大気補正などを行った 2002 年 11 月 17 日の 11 時 35 分から 58 分の複数の画像をモザイク状に組み合わせたものである. (2000,1100) 付近の楕円形のパターンが V2 付近にある神社の森にあたる.

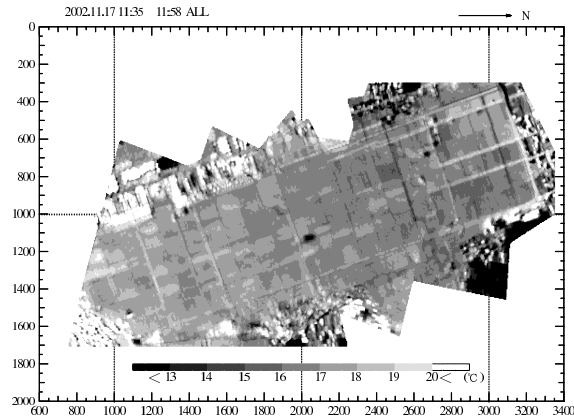


図 4: 航空機からの熱赤外画像 2002 年 11 月 17 日 11 時 58 分
Fig.4 Thermal image at 11:58 JST on November 17, 2002.

ここで観測された地表面温度は、南側から観測した領域の南部がやや温度が高くなっているように見えるなど地表面を観測する方向等の影響を受けているため詳細な解析は今後の課題であるが、画像周縁部に見られる宅地部とは違い水田部は比較的一様な分布を示していることが分かる。それでも温度差は 3K 程度存在しており、水田の区画のパターンが見えることが分かる。水分状態が区画毎に異なっていたのかも知れないが、今回土壌水分量の観測は特に行っていないので現時点では詳細は不明である。

この地表面温度分布が、各地点での乱流観測の結果、特に顕熱フラックスの分布の理解に役立つと期待される。

4. 乱流観測と地上気象観測

中心的な観測として、刈り入れ後の水田に 3m 弱のポールを立てて、乱流計測機を設置した。各計測機および記録計は各参加者の持ち寄りであり、事前の調整の上、現地で組み合わせて使用した。計測機の機種毎に出力形式が違う上に、記録計も既存のものを利用したため記録されたデータ形式がさまざまであり、データファイルの共通形式化の後処理ができたのは 2003 年に入ってからになった。乱流データは 50Hz サンプリングの 1 地点を除き、10Hz でサンプリングされ、記録計によって状況は異なるが、ほぼ連続でデータを取得した。記録計の時刻は電波時計を基準に手作業で毎日合わせたが、特に PC を利用した記録計は時刻の遅れなどの問題があり、最大で 20 秒程度遅れてしまったものもあった。しかし、多くのものは数秒程度のずれでデータが取得でき、観測点の間隔が 100m 程度、風速が数 m/s であることから、 $(\text{数 s}) \times (\text{数 m/s}) < (100\text{m 程度})$ となり、なんとかブリュームなどの移動も捉えられる品質を維持できた。また通常の気象観測や放射量の観測もいくつか行われた。

観測は、3 高度で水蒸気変動も含めて計測し、通常気象要素観測も行われた C4 サイトを中心に、それに準じる C1 ~ C5 のサイトと、超音波風速温度計のみの観測である S1~S9 の簡易乱流計測サイトで行われた。また、琵琶湖プロジェクト常設乱流観測サイトを S10 と呼んだ。それぞれの観測点および計測機の配置を表 4 および表 5 に示す。前述の石田ら 2004 によれば、水蒸気変動の観測で校正が問題となるので、赤外線水蒸気変動計にはそれぞれ容量式の湿度計を近傍に配置し、更にアスマン乾湿計による計測も時々行った。

これらから得られた膨大な乱流観測データを解析することにより、各点でのフラックスを含む乱流統計量

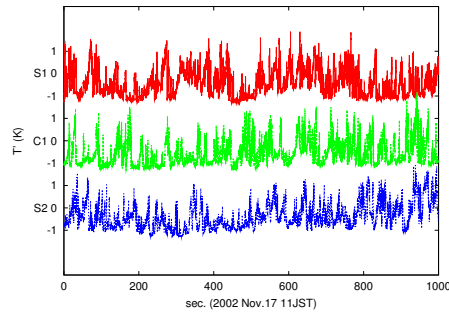


図 5: S1, C1, S2 で観測された気温変動 T' の時系列. 2002 年 11 月 17 日 11 時から 1000 秒間
 Fig.5 1000 second temperature fluctuations at S1, C1 and S2 from 11JST on November 17, 2002.

や, 空間構造などが解析される予定である (石田ら 2003). ここでは, 直接的なデータの例として, S1・C1・S2 の計測線での気温変動量を図 5 に示す. おおよそ 200m の間隔で, 南西から北東へ S1・C1・S2 と計測点が並んでいて, 当時の風向がほぼ南西で風速が地上で 1.3m/s 程度である. もし, プリユームが地上風速でそのまま移動するとすると約 150 秒遅れて, 図中の時系列の線を上から下へ進むことになる. 実際に, 図中にその角度へ補助線を引くと対応すると思われる気温変化パターンを, 例えば S1 の 80 秒付近の気温のピークと C1 の 200 秒付近, S2 の 380 秒付近などというように見ることができる. 今後, 数値実験や, 顕熱フラックス分布などと組み合わせて詳しい解析がされる予定である.

2002, Nov.17, 12h, Sensible Heat (Wm^{-2})

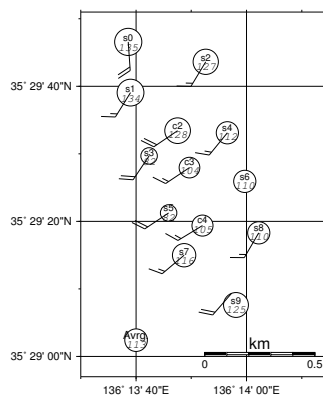


図 6: 顕熱フラックス分布の一例. 円の大きさや円内の数字は顕熱の大きさ (数字の単位は W/m^2) を表し, 円内の文字は観測サイト名を示す. 矢羽根は風向風速を, 長い矢羽根: 1m/s, 短い矢羽根: 0.5m/s 記号の根元が観測点の位置として表す.

Fig.6 Sensible heat flux distribution. The radii of circles and the numbers in them show the amount of heat flux by W/m^2 . The wind barbs show wind direction and speed at the sites indicated by their origins.

また, ある時間間隔で求めた渦相関法による顕熱フラックスは, 図 6 のように分布している. このような

分布が、地表面の違いによるものなのか、単なる統計的な散らばりなのか、対流の構造によるもののかなど、今後の詳しい解析によって明らかにされていく予定である。

III. まとめ

多くの関係者の努力もあって、少なくとも国内では今までに例を見ない集中的な観測を行うことができた。得られたデータは未だ整理中であるが、その総量は 8 G byte を越えている。この膨大なデータを解析することにより、フラックスの代表性やその分布、あるいは大規模構造対流の影響、それを踏まえた数値モデル内での地表面の表現法など、先に述べたようなさまざまな疑問の解決に役立つ結果が得られると思われる。観測は初期解析の結果を踏まえて今後も更に行っていく予定である (2003 年の観測は 10 月に実施された)。

ここで得られたデータは、研究者コミュニティの共有財産としてインターネット上で公開されている。さまざまな情報への窓口はフラックス野郎&お嬢の会の WWW ページ (<http://tama.cive.gifu-u.ac.jp/~tama/flux/>) から、またデータ配布のマスターサイトは ftp://hyarcftp.hyarc.nagoya-u.ac.jp/pub/other_projects/flux_enthu_party/ である。観測に関わったかどうかに関わらず興味を持つ方の解析にも期待したい。

また、この観測に対して資金等の援助を以下のところから受けた。ここに記して感謝を示す。

- 科学研究費補助金基盤研究 (A) 13305033 “琵琶湖プロジェクト” (代表, 中北英一)
- 京都大学防災研究所共同研究 14G-3 “均質な地表面上での不均質なフラックス分布の測定に関する研究” (代表, 樋口篤志)
- 戦略的創造研究水循環領域 “湿潤・乾燥大気境界層の降水システムに与える影響の解明と降水予測精度の向上 (LAPS)” (代表 中村健治 名古屋大学地球水循環研究センター) および “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)” (代表 杉田倫明 筑波大学地球科学系)
- 他に各研究者所属機関

本活動は、水文・水資源学会研究グループ “大気境界層における乱流フラックス観測研究会” の活動でもある。

最後に観測場所を提供して頂いた滋賀県伊香郡高月町井口地区の皆さんと滋賀県立伊香高校に感謝を示して概要の報告を終える。

参考文献

- Horst, T. and Weil, J. (1992): Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **59**, pp.279–296.
- 石田祐宣・樋口篤志他 (2003): 複数の乱流計測機を用いた乱流熱輸送量空間分布観測の概要 —琵琶湖プロジェクト 2002 年集中観測 (CAPS)—, 日本気象学会 2003 年度春季大会講演予稿集 P.238,
- 石田祐宣・松島大・樋口篤志・檜山哲哉・戸田求・浅沼順・玉川一郎・宮崎真・田中賢治・杉田倫明・永井秀幸・田中久則・飯田真一・小林菜花子 (2004): 2001 年筑波大学陸域環境センター (TERC) における乱流計測機集中観測: 機器比較と校正による誤差の解析, 水文・水資源学会誌, **17**, (印刷中).
- Kaimal, J.C. (1974): Translation speed of convective plumes in the atmospheric surface layer. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, **100**, pp.46–52.

- Kaimal, J.C. and Businger, J.A. (1970): Case studies of a convective plumes in the atmosphere and a dust devil. *J. Appl. Meteor.*, **2**, pp.156–164.
- 神田 学・渡辺 カ・マルコス オリバー レッツェル・ジークフリート ラッシュ(2002): LES による熱収支インバランス問題に対する検討 (第 1 報) 大気境界層スケールの対流構造の影響, *水文・水資源学会誌*, **15-3**, pp.243–252.
- LeMone, M.A., Grossmann, R.R.L., Coulter, R.L., Wesley, M.L., Klazura, G.E., Poulos, G.S., Blumen, W., Lundquist, J.K., Cuenca, R.H., Kelly, S.F., Brandes, E.A., Oncley, S.P., McMillen, R.T. and Hicks, B.B. (2000) Land-Atmosphere interaction research, early results, and opportunities in the Walnut river watershed in southeast Kansas: CASES and ABL, *Bull. Amr. Meteorol. Soc.*, **81**, pp.757–779.
- 宮崎真・杉田倫明・安成哲三・鈴木力英・石川裕彦・田中賢治・山本晋 (2001): 各種プロジェクトにおけるフラックス測定, *気象研究ノート*, **199**, pp.201–234.
- 中北英一・砂田憲吾 (1998): 琵琶湖プロジェクトについて, *水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ*, pp.1–12
- 中北英一 (2000): 琵琶湖プロジェクト-琵琶湖流域の水・熱循環過程解明の取り組み-, *水文・水資源学会誌*, **13-6**, pp.429–438.
- Schuepp, P., Leclerc, M., MacPherson, J. and Desjardins, R. (1990): Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteor.*, **50**, pp.355–373.
- 戸田求, 玉川一郎, 宮崎真, 松島大, 後藤順也, 宮本格 (2000): 乱流フラックス集中観測 - フラックス野郎の会 -, *水文・水資源学会誌*, **13-5**, pp.396–405.
- 渡辺カ・神田学 (2002): LES による熱収支インバランス問題に対する検討 (第 2 報) 水平一様な植生キャノピー層を含む中立接地境界層における検討, *水文・水資源学会誌*, **15-3**, pp.253–263.
- Wilczak, J.M. and Tillman, J.E. (1980): The three dimensional structure of convection in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **37**, pp.2424–2443.

表 4: 定点観測, 乱流観測に水蒸気変動を含む, あるいは他の気象要素の観測も行った地点.
Table 4. Turbulence observation points with measurement of humidity and/or other items.

地点	位置, 高度, 風速計の向き	種類	型名	所属
C1	35°29.731'N, 136°13.738'E, 245cm, 西へ 5°(SAT) 165 cm (Humicap 吸入口) 120cm(アルベド計) 地中熱流板(地表面直下)	超音波風速温度計	GILL 1210R3	名大 HyARC
		赤外線湿度 CO ₂ 計	Li-Cor LI-7500	名大 HyARC
		記録計	ハイドロテック Hdat16 + PC	名大 HyARC
		アルベド計	Kipp&Zonen CM-7B	名大 HyARC
		長波放射計	Eppleylab PIR	名大 HyARC
		温湿度計	Vaisala HMP45A	名大 HyARC
		放射温度計	Everest 4000-4ZL	名大 HyARC
		地中熱流板	REBS PHF-1	名大 HyARC
		記録計	Cambell CR10X	名大 HyARC
		C2	35°29.557'N, 136°13.792'E 281cm, 西へ 14° (SAT UV), 250cm(SAT W, AH-300)	超音波風速温度計
赤外線湿度計	Kaijo AH-300			東北大
温湿度計	Vaisala HMP-133L			東北大
記録計	Keyence NR-1000			東北大
記録計	Keyence NR-1000			東北大
C3	35°29.466'N, 136°13.828'E, 246cm , 西へ 14.5°(SAT) 35°29.471'N, 136°13.822'E, 143cm (放射)	超音波風速温度計	Metek USA-1	防衛大
		記録計	PC-base logger	防衛大
		4成分放射計	EKO MR-40	防衛大
		地中熱流計	EKO MF-81	防衛大
		記録計	EKO SOLAC-V	防衛大
C4	35°29.323'N, 136°13.867' E, 590cm 西へ 13° (上 SAT), 245cm 西へ 10°(SAT), 100cm 西へ 17.5° (SAT) 35°29.339'N, 136°13.878'E, 140 cm (放射)	超音波風速温度計 (590cm)	Kaijo DA-600(TR-62A)	農環研
		超音波風速温度計 (245cm)	Kaijo DA-600(TR-61A)	京大 DPRI
		超音波風速温度計 (100cm)	Kaijo DA-600(TR-62TZ)	岡山大
		赤外線湿度 CO ₂ 計 (245cm)	Li-Cor LI-7500	京大 DPRI
		記録計	Keyence NR-1000	弘前大
		日射計 (2台)	EKO MS-42	京大 DPRI
		赤外放射計 (2台)	EKO MS-200	京大 DPRI
		温湿度計 (2.5m)	Vaisala HMP35A	京大 DPRI
		温湿度計 (0.6m)	Vaisala HMP35A	京大 DPRI
		地中熱流計 (-5mm)	REBS PHF-1	京大 DPRI
		記録計	Grant SQ1254	京大 DPRI
C5	35°29.156'N, 136°13.955'E, 235cm 東へ 0.5°(SAT) 地中熱流板 -0.5cm (2台とも)	超音波風速温度計	Gill 1210R3	農環研
		赤外線湿度 CO ₂ 計	Li-Cor LI-7500	農環研
		記録計	TEAC DR-M3a	農環研
		放射収支計	EKO MR-40	農環研
		地中熱流板 2枚	EKO MF-81	農環研
		記録計	Cambell CR10X	農環研

表 5: 乱流観測のみのサイト, ほとんどの地点は水蒸気観測も無い.

Table 5. Turbulence observation sites, almost all points of which has no humidity obervation.

地点	位置, 高度, 風速計の向き	種類	型名	所属
S1	35°29.651'N, 136°13.650'E, 251cm, 東へ 3° (SAT)	超音波風速温度計	Kaijo DA-600(TR-61A)	名大 HyARC
		記録計	TEAC DR-M3b	名大 HyARC
S2	35°29.727'N, 136°13.877'E, 254 cm, 東へ 1.5° (SAT)	超音波風速温度計	Young-81000	名大 HyARC
		記録計	田中 (広) 作収録ソフト+PC	名大 HyARC
S3	35°29.495'N, 136°13.706'E, 274 cm, 東へ 6° (SAT)	超音波風速温度計	Kaijo SAT-550	京大 DPRI
		記録計	Keyence NR-1000	京大 DPRI
S4	35°29.552'N, 136°13.942'E, 270 cm, 西へ 4° (SAT u,v) 238 cm (SAT, W),	超音波風速温度計	Kaijo PA-600	京大 DPRI
		記録計	Hyper-terminal+PC	京大 DPRI
S5	35°29.354'N, 136°13.765'E, 246 cm 西へ 14°(SAT)	超音波風速温度計	Kaijo SAT-550	筑波大 TERC
		記録計	National Instruments DAQ Card-AI-16XE-50 +LABView+PC	筑波大 TERC
S6	35°29.432'N, 136°13.995'E, 253 cm, 東へ 3°(SAT)	超音波風速温度計	Kaijo DA-600(TR-61A)	京大 DPRI
		記録計	TEAC DR-M3	名大 HyARC
S7	35°29.250'N, 136°13.812'E, 245 cm, 西へ 21.5° (SAT)	超音波風速温度計	Kaijo DA-600(TR-61A)	京大 DPRI
		記録計	National Instruments DACPad MIO-16XE-50+LABView+PC	京大 DPRI
S8	35°29.305'N, 136°14.037'N, 247 cm (SAT, W) 東へ 5° (SAT)	超音波風速温度計	Kaijo DA-600(TR-61A)	京大 DPRI
		記録計	National Instruments DACPad MIO-16XE-50 +LABView+PC	京大 DPRI
S9	35°29.127'N, 136°13.968'E, 247 cm (SAT)	I 成分超音波風速温度計	Kaijo DA600(TR-41)	東北大
		記録計	National Instruments DAQ Card-700 +LABView+PC	岡山大/筑波大 TERC/東北大
S10	35°29.776'N 136°13.643'E, 230cm (琵琶湖プロジェクト乱流常設サイト)	超音波風速温度計	DA-600(TR-61A)	京大 DPRI
		赤外線温度 CO ₂ 計 記録計	Advanet E009B National Instruments DAQ Card-AI-16XE-50 + LABView + PC	京大 DPRI 京大 DPRI

表 6: 所属略称

Abbreviations

名大 HyARC	名古屋大学地球水循環研究センター
京大 DPRI	京都大学防災研究所
筑波大 TERC	筑波大学陸域環境研究センター
LAPS	Lower Atmosphere and Precipitation Study (プロジェクト名)
RAISE	The Rangelands Atmosphere-Hydrosphere-Biosphere Interaction Study Experiment in Northeastern Asia (プロジェクト名)

1. 航空機による地表面放射温度観測とフットプリント解析

1.1 地表面放射温度観測

集中観測領域内で測定された各観測点の顕熱フラックスについて、そのフラックス値の実現にどの程度の範囲の地表面が寄与しているかを明らかにすることを目的として、航空機による地表面放射温度観測とフットプリント解析を行った。ここで、フットプリントとは地表面のある点において発生した乱流フラックスの、測定点におけるフラックス値に対する寄与率として定義されるものである。測定時の条件に応じたフラックス寄与率の分布を推定することにより、測定点でのフラックス値の実現に寄与している地表面の範囲を推定できる。一方、地表面放射温度観測によって集中観測領域における地表面温度の水平分布が明らかになるので、各フラックス測定点における顕熱フラックス値とそのフラックス値の実現に実質的に寄与している範囲内の地表面温度との関連を推定することができる。これが、本章における観測と解析のねらいである。

航空機による地表面放射温度観測の概要を表1に示す。実際の観測において、航空機（セスナ）に赤外線カメラ（サーモグラフィ）を搭載し、航空機の側窓から地表面の熱赤外域の波長における静止画像を撮影した。1回の撮影で集中観測領域全域を撮影することはできなかったため、領域の周囲を航空機で周回して、部分画像を合成する

ことで領域全体の地表面温度分布を得た（図1）。航空機は大阪府の八尾空港を拠点として集中観測領域との間を往復した。所要時間は八尾空港と集中観測領域との間の往復に約1時間40分、観測に約20分であった。一連の観測は期間中に4回行われた。以下では、そのうち最も条件が良かった11月17日午前中に行われた例について記述する。

異なる地点から撮影された熱赤外画像を合成するには、各画像ごとに異なる幾何的な特性、大気中の吸収物質（水蒸気など）による温度変化、撮影面の日当たりの良い部分が多いか少ないかなどの相違を補正する必要がある。そこで、撮影された各画像について次のような補正を行った。

- ・幾何補正：各画像について一点からの透視図法的な画像を鉛直上方から正射した画像に変換する。
- ・器差補正：赤外線カメラと基準温度計の温度目盛りの差の補正。
- ・大気補正：航空機上で測定された地表面放射温度を、大気中の吸収物質で変化させられた分だけ補正し、地表面における値に変換する。
- ・射出率補正：地表面の射出率（放射率・黒体度）が1ではないことによって、放射温度が真の地表面温度と異なった分を補正する。
- ・測定角補正：放射温度は測定天底角に応じて、地表面の射出率の違いや幾何構造による影響で変化するため、これを補正する。

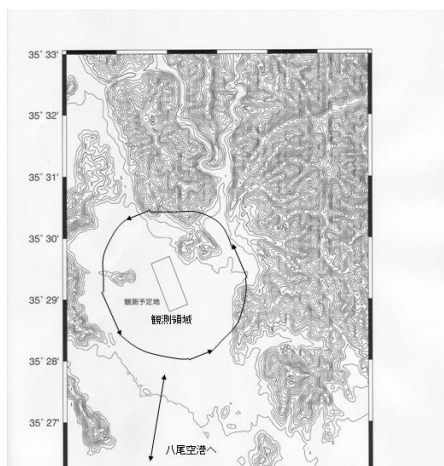


図1 集中観測領域と熱赤外画像撮影時の航空機の航路

表1 航空機による地表面放射温度観測の概要

日時	2002年11月17日11時35~58分 2002年11月17日14時29~52分 2002年11月19日13時01~25分 2002年11月20日11時20~36分
赤外線カメラの機種	Inframetrics MODEL 740
航空機の機種	セスナ C-172
測定天底角	60度
測定高度	約1350m
画素数	たて198×横256
温度範囲	0~50
階調数	256

・画像間補正：各静止画像について、主に測定方位角と直達日射の入射角の関係に応じた平均的な温度の相違が生じるので、これを補正する。

(1) 幾何補正

上空から真下への撮影以外では、地表面の形をゆがめて撮影してしまうので、上空から正射した図に直すために幾何補正を行う。本研究で用いた方法は、画像中心の測定角（天底角と方位角）と他の画素の画像中心からのずれだけを考慮した簡単なものである。レンズ等による画像のひずみは考慮していない。飛行機の座標 (x_a, y_a, z_a) から測定角 $(\theta_a + \theta', \phi_a + \phi')$ で測定した地点の地図上の座標 $(x, y, 0)$ との対応は式(1)のように表される。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_a \sec(\theta_a + \theta') \tan \phi' \\ z_a \tan(\theta_a + \theta') \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi_a & \sin \phi_a \\ -\sin \phi_a & \cos \phi_a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\theta_a, \theta', \phi_a, \phi'$ は画像中心における天底角とその画像中心からのずれ、画像中心における方位角とその画像中心からのずれである。実際には θ', ϕ' を画像上の位置から読みとり、 $x_a, y_a, z_a, \theta_a, \phi_a$ の5つを未知パラメータとして、

シンプレックス法（奥村，1986）により最適化した。この最適化のために、基準点として主に道路の交差点など赤外画像からも判読しやすいところを決め、25,000分の1地形図から位置を判読した。一つの画像に含まれる基準点の数は少ないときで7,8点、多いときで30点以上になった。

11月17日午前においては15面の赤外画像について、各画像につき8~15点の基準点を使用して各パラメータの最適化を行った。その結果、飛行高度や測定天底角はほとんど変わっていないはずだが画像によってはばらつきが見られるなど、若干のパラメータでは誤差が大きかった。具体的には測定高度が1500~2000m(平均1800m)、測定天底角が33~50度(平均43度)の範囲にあった。これらのパラメータについて、幾何補正の際に全画像についての平均値等はいずれも、各画像についてのパラメータ値をそのまま用いた。図2に航空機から撮影した赤外画像の原画像と幾何補正後の画像の一例を示す。今回の観測では測定天底角が60度大きいため、カメラから見て横長の画像であっても実際には奥行きの高い領域を撮影している。今後の飛行ではGPSを搭載して飛行高度を既知パラメータとするなど、未知パラメータの数を減らしたほうがよいと考えられる。それから、この結果を用いても画像ごとに当てはめ誤差による若干のずれが生じるので一部の図については若干平行移動させている。移動距離は30m以内である。

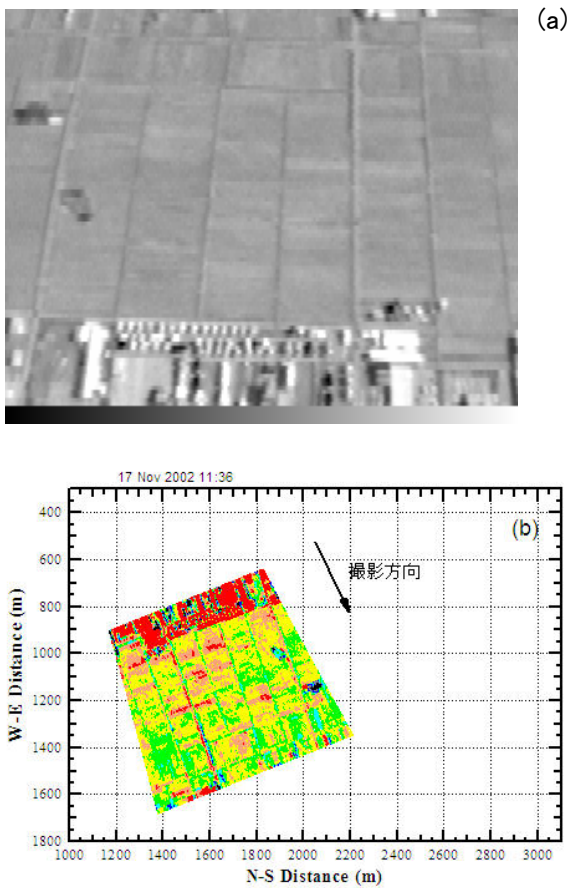


図2 航空機から撮影した赤外画像の例。(a) 原画像と (b) と幾何補正後に水平面座標に投影した画像。

(2) 器差補正

一般に放射温度計（赤外線カメラを含む）が表示する放射温度は機器によって一般に実際の放射温度と若干の誤差がある。器差補正とはその差を補正するものである。器差補正には疑似黒体壺を用いた。これは疑似的に空洞放射を測定できるような形状および塗装がなされた金属製の容器である。容器の内部には数リットルの水を蓄えられるようになっており、基準温度計で計測された温度と放射温度計の指示値を比較することによって、器差補正值を検定できるものである。今回の測定で1年以内に行った検定による器差補正值は、放射温度計の測定値が12以下では+1.5、測定値が15以上では+1.7であった。その間は線型内挿によって補正值を得た。

(3) 大気補正・射出率補正

大気中の吸収物質によって地表面から射出された熱赤外放射の大きさは地表面から離れるほど地表面における値から変化している。原因となる吸収物質は主に水蒸気と二酸化炭素であり、窓領域と呼ばれる波長域でも光路長が数百メートルより長くなると、その差は無視できなくなる。航空機観測のように地表面近くで観測が行えない場合、大気補正を行わない、または大気補正の精度が落ちると、放射温度の精度の良い測定は困難になる。

一方、地表面は必ずしも黒体として熱赤外放射を射出しているわけではない。その射出率は黒体に近いため、測定値の精度を気にしない、低層雲による曇天の場合など、射出率を必ずしも気にしなくてよい場合もあるが、一般に放射温度測定値の精度が要求される場合は射出率を考慮した放射温度測定値の補正が必要である。本研究ではMODTRAN3 Ver1.5により大気補正と射出率補正を同時に行った。MODTRAN3は米国空軍地球物理学研究所(AFGLまたはAFRL)により開発・頒布されている放射計算プログラムで、世界中で広く使われているプログラムの一つである(Berk et al., 1989)。最新の規格はMODTRAN4であり、<http://www2.bc.edu/~sullivanab/soft/modtran4.html> からアクセス可能である。ただし、使用には若干の宣誓事項の応諾と料金が必要になる。

本研究では、雲無し、地表面射出率 0.98 を設

定した。また、大気の気温・湿度・気圧の鉛直分布には11月17日11時30分に現地で放球されたラジオゾンデのデータを使用した。補正值（放射温度に加算する値）は多くの測定値が含まれる10~20の範囲では2~4であり、放射温度が高いほど減衰される放射量が大きくなるために補正量は大きくなる。また、測定天底角が大きいほど光路長が長くなるために補正量は大きくなる。

(4) 測定角補正

今回の観測では測定角（天底角）が大きくなるほど田んぼの放射温度が低い値になる傾向が見られた。この傾向の原因について、集中観測領域では既に刈り入れが終わっていて、田んぼはわらを敷き詰められるか丈の短い切り株が残されているか状態だったので、植生キャノピーの表面温度に鉛直分布があったためとは考えにくい。そこで、原因は水面と同様に田んぼの面の射出率が天底角が大きくなるほど小さくなっているためと考えられる(Matsushima and Kondo, 1997)。しかし、天底角と射出率の関数関係を求めることができなかったため、前述のように射出率は一定とし、測定データの測定天底角に対する傾向によって測定角補正量を求めた。測定角の基準は天底角60度とした。具体的な補正值は次の通りである。すなわち、天底角50度以下では-0.7、天底角50度以上では測定角を θ 度として、（補正值[]） $= (\theta - 60) / 15$ とした。

(5) 画像間補正（特に測定方位角補正）

今回の観測では、集中観測領域全体の地表面温度分布図を構成するのに、部分的な画像を合成して行わざるを得なかった。このため、約20分程度をかけて行った一連の撮影中に直達日射等の条件が変化して、温度画像の条件が整わない可能性がある。今回の観測では、航空機を集中観測領域を周回させて撮影したために、測定方位角による変化が大きかった。具体的には、直達日射が照射されている面を多く見える方位角と、影の部分がよく見える方位角とで、各画像の放射温度の平均値で2程度の差を生じた。これを単純に合成して全体の地表面温度分布図を作成すると、観測領域内の場所ごとの地表面温度の相違よりも、測定方位角による変化のほうが卓越してしまう。そこで次のようにして測定方位角による温度差を

補正した。まず、一連の観測における各画像の測定方位を4方位(東,西,南,北)に分ける,次に,4方位で共通して撮影されている部分を抽出し,各方位間の平均温度差を計算する(6通りの温度差が計算される),この平均温度差に基づいて各画像の温度の補正を行う。11月17日午前の観測の例では,各方位間の温度差は次のようになった:北-南2.3,北-西1.4,西-南1.1,北-東1.3,東-南1.2,東-西0.6(ただし「北」は北向きに撮影したこと,「北-西」は北向きと西向きの温度差を示す)。上の結果では,各方位間の温度差はバランスしていない。例えば,北-南は2.3であるが,北-西と西-南の和は2.5である。そこで,北-南の2.3を基準として北-西と西-南および北-東と東-南は比例配分するようにしてバランスさせた。その結果,各方位間の温度差は次のようになった:北-南

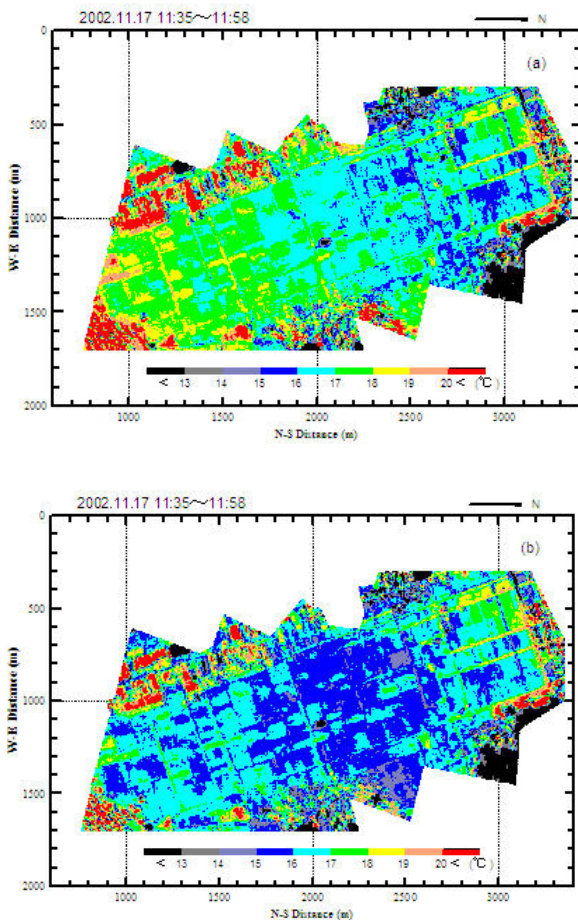


図3 (a) 画像間補正前と (b) 画像間補正後の集中観測領域における地表面放射温度分布図。

2.3,北-西1.3,西-南1.0,北-東1.2,東-南1.1,東-西0.1。東向きに撮影した画像の放射温度を基準値として,上記の温度差に従って補正を行った。図3には画像間補正を行う前後の地表面放射温度分布図を示した。特に領域の南部で直達光の照射面を過剰に撮影していた部分が補正されていることが分かる。

1.2 顕熱フラックスのフットプリント解析

乱流フラックスのフットプリント (footprint) $\phi(x, y, z)$ とは点 $(0, 0, z)$ において測定された乱流フラックス値 $F(0, 0, z)$ の実現に寄与した地表面のフラックス源 $Q(x, y, 0)$ の比として次のように定義される。

$$\phi(x, y, z) = \frac{F(0, 0, z)}{Q(x, y, 0)} \quad (2)$$

ただし, 各変数の次元は, $F(0, 0, z)$ の次元を dl^2t^{-1} (l は長さ, t は時間の次元) とすると, $Q(0, 0, z)$ の次元は dt^{-1} , $\phi(x, y, z)$ の次元は l^{-2}

と表される (Horst and Weil, 1992; Kormann and Meixner, 2001)。式(2)によると, フットプリント $\phi(x, y, z)$ はフラックスの点源 $Q(x, y, 0)$ が測定点 $(0, 0, z)$ におけるフラックスに影響する程度を示していることが分かる。

フラックスのフットプリントは通常 $0 < \phi < 1$ で定義される。したがって, $F \neq 0$ かつ $Q \neq 0$ であり, フラックスの測定高度を $z = z_m$ と固定する

と, ϕ が連続関数であればある点 (x, y, z_m) においてピークを持つことは容易に推定できる。この点におけるフットプリントを $\phi_{\max}(x_{\max}, y_{\max}, z_m)$ とする。さらに, ϕ は測定点から離れるほど連続的に0に収束するものと考えられるので, ピーク点 $(x_{\max}, y_{\max}, z_m)$ を含み,

ある大きさ $\phi_0 (\leq \phi_{\max})$ の等値線で囲まれる領域 Ω を定義することができる。領域 Ω に含まれるフットプリントの積分値とフットプリント全体の積分値との比を P とすると,

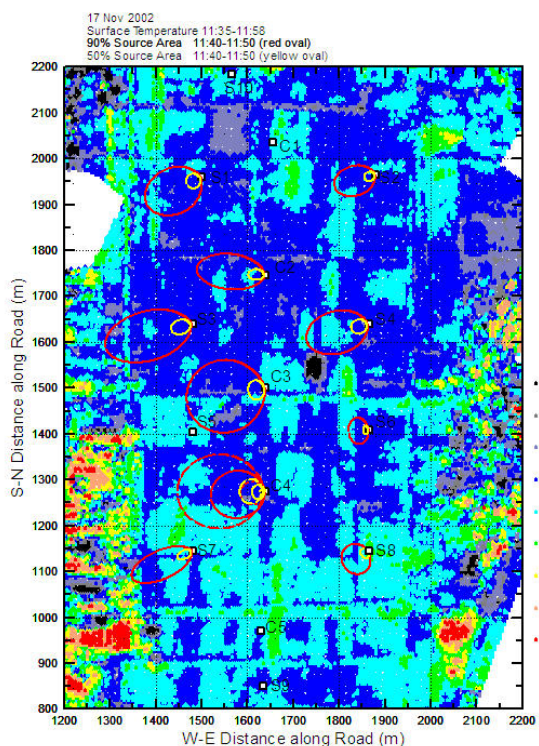
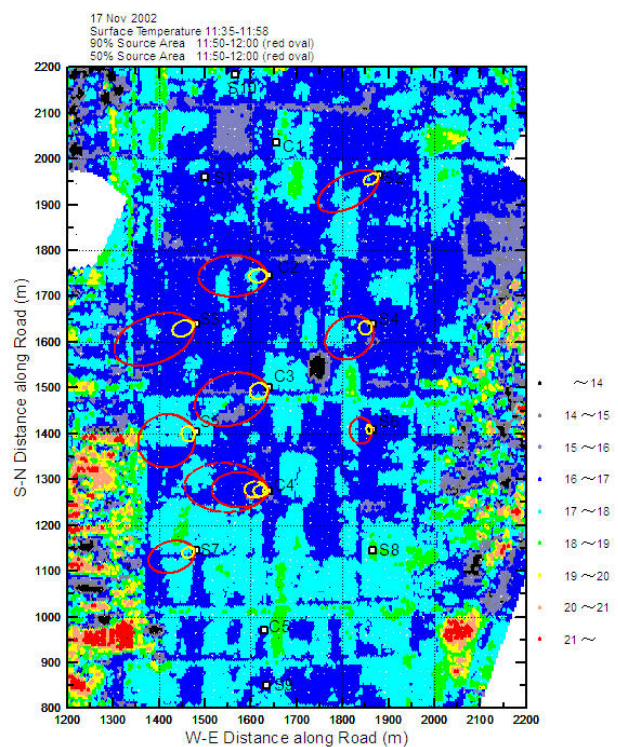
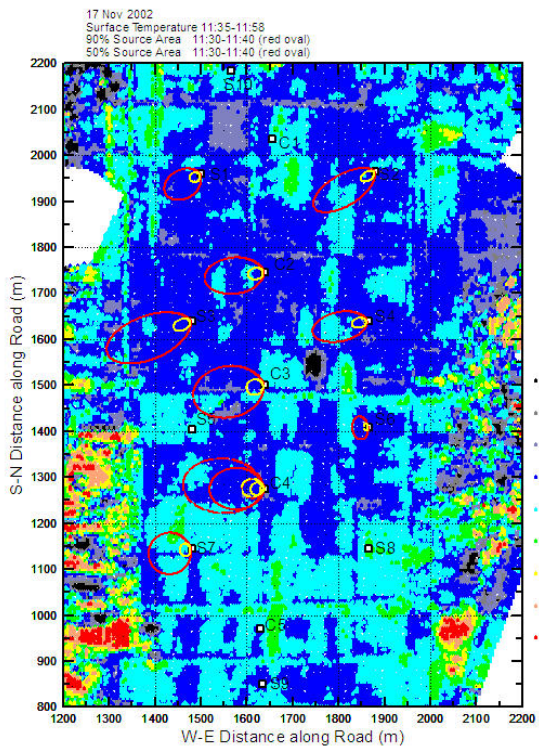


図 4(a)

図 4(c)

図 4(b)

図 4 集中観測領域における地表面温度分布と各乱流観測点における KM による顕熱フラックス寄与域の分布．赤線は 90%寄与域の外縁，黄線は 50%寄与域の外縁を示す．C4 においては測定高度の異なる複数の寄与域を同時に示した．90%, 50%寄与域とも小さい破線は測定高度 1.0m の場合，大きい破線は測定高度 6m の場合，実線は測定高度 2.45m の場合を示す．座標軸は図 2, 3 と異なり，道路に沿っている．フラックス寄与域の推定対象とした時間帯は，(a) 11 時 30 ~ 40 分，(b) 11 時 40 ~ 50 分，(c) 11 時 50 ~ 12 時 0 分．

$$P = \frac{\iint_{\Omega} \phi(x', y', z_m) dx' dy'}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(x', y', z_m) dx' dy'} \quad (3)$$

P は $0 \leq P \leq 1$ の値を取り得る．このとき，この領域 Ω を測定点 $(0, 0, z_m)$ に対するフラックス寄与域 (source area) と称し， P は Ω の寄与率を表す．例えば， $P = 0.5$ なら，領域 Ω はフラックス測定点 $(0, 0, z_m)$ に対する 50%寄与域であると言える (Schmid, 1994) .

地表面放射温度観測によって集中観測領域に

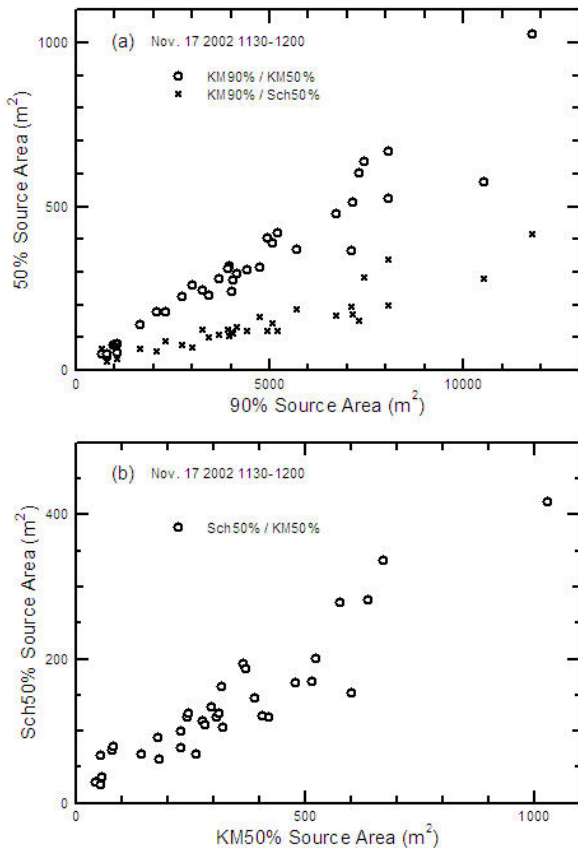


図 5 フラックス寄与域の面積の比較．
 (a)KM90%寄与域と KM50%および Sch50%寄与域との比較，
 (b)KM50%寄与域と Sch50%寄与域との比較．

おける地表面温度の水平分布が明らかになり，またフットプリント解析により地表面温度測定時の顕熱フラックス値に寄与する地表面の範囲が推定される．このため，各測定点における顕熱フラックス値とフラックス寄与域内の地表面温度との関連を推定することができる．以上が，解析的なフットプリントモデルの基本的な部分である．具体的なフットプリントやフラックス寄与域を推定するための方法を研究したものはこれまでにいくつかあるが，本研究では，このうち Kormann and Meixner(2001)(以下 KM)と Schmid (1994)(以下 Sch)を用いて，両者によるフラックス寄与域を比較検討することにした．KMは Horst and Weil(1992)などと同様に統計的に定常な水平移流 - 鉛直拡散の平衡を仮定した解析的なモデルである．しかし，風速や拡散係数の鉛直分布を表すのにモニン・オブコフの相似則の代わりにベ

キ乗則を用い，解析的な計算がしやすいように工夫してある．ベキ乗則の指数は安定度や地表面粗度と密接に対応しているが，KMでは数値シミュレーションによってオブコフ長と地表面粗度と指数との対応を示している．一方，Schモデルは50%フラックス寄与域のパラメタリゼーションを提示している．このパラメタリゼーションは Gryning et al.(1987)による接地境界層の拡散モデルを数値的に解くことによって得られたものである．いずれのモデルも，主風向とその風速，摩擦速度，オブコフ長，測定高度，地表面粗度，主風向に直交する風速成分の標準偏差をパラメータとして必要とする．

具体的な事例には，前節と同じく2002年11月17日午前のデータを用いる．対象とした乱流測定点は C2, C3, C4, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8 の11点である．対象とした時間帯は地表面放射温度が測定された時間帯を含む11時30分から12時0分まで30分間で，この時間帯を3等分した10分平均値ごとに各乱流測定点 footprint 解析を適用した．ただし，データ品質等の都合のため，S8については11時30分からの20分間，S5については11時50分からの10分間，S8については11時40分からの10分間のみ解析を行った．解析対象時間帯における集中観測領域での大まかな気象条件は，風向が西南西，風速 2 ms^{-1} ，気温 11 ，天気はほぼ快晴であった．また，乱流統計量の概要は，摩擦速度 $0.1 \sim 0.3 \text{ ms}^{-1}$ ，摩擦温度 $0.2 \sim 1$ ，オブコフ長 $0.5 \sim 30 \text{ m}$ ，地表面粗度 1.7 cm ，主風向に直交する風速成分の標準偏差 $0.4 \sim 1.2 \text{ ms}^{-1}$ であり，地点によりかなりばらついていた．顕熱の測定高度は地点によりややばらつきがあるものの， $2.4 \sim 2.7 \text{ m}$ の間に収まっていた．

図4に補正済み地表面温度分布とともに，各乱流測定点における KM によるフラックス寄与域を図示した．KMでは任意の比率 P によるフラックス寄与域を比較的簡単に計算できるが，ここでは90%と50%寄与域(以下それぞれ KM90%，KM50%)を同時に示した．図4に示されるように，KM50%は KM90%に比べて，測定点に近いごく小さい領域を占めるに過ぎない．また，フラックス寄与域の定義からも明らかだが，KM50%は KM90%の部分集合

になっている。フラックス寄与域の面積は KM90%では 500~12,000 m², KM50%では 50~1,000 m² と乱流測定点や時間帯によって大きく異なっている。しかし、同一地点・時間帯についてはその比はほぼ一定であり、KM50%は KM90%の約 7%である(図 5a)。なお、フラックス寄与域の外縁の等値線におけるフットプリントの大きさ φ_0 は KM50%

の場合は $\varphi_0 / \varphi_{\max} = 0.003 \sim 0.006$ 程度、KM90%

の場合は $\varphi_0 / \varphi_{\max} = 0.15 \sim 0.19$ 程度であった。

気象条件は各地点でほぼ同様だったが、乱流統計量は各地点でかなりばらついていたために、それがフラックス寄与域の大きさや形に反映していることが図から読みとれる。一般に、大気の静的安定度が安定に行くほど、主風向に直交する風速成分の標準偏差が大きいほど、そして地表面粗度が大きいほどフラックス寄与域は大きくなる。例えば、C3 と S6 のフラックス寄与域は両地点間があまり離れていないにもかかわらず大きさや形が大きく異なっている。これは C3 に比べて S6 のほうがオブコフ長が小さい(不安定が強い)ために測定点のごく近傍の影響しか受けにくく、また主風向に直交する風速成分の標準偏差がやはり小さいために、直交方向から影響を受けにくくなっているためである。解析対象の条件では、各測定点について、比較的大きな KM90%でも相互の重なりは見られなかった。これは、オブコフ長が小さいことから推察されるように、日射量の大きい日中で、風速が弱かったために、不安定が強かったためと推定される。

乱流測定点 C4 では他の地点と異なり、3 高度(1.0m, 2.45m, 6m)で顕熱の測定を行った。そこで、各高度に対するフラックス寄与域を推定し、図 4 に図示した。11 時 40 分の例では、測定高度 6m に対する KM50%と測定高度 1.0m に対する KM90%がほぼ重なっており、測定高度によってフラックス寄与域が大幅に変化することが見て取れる。

次に、図 5(b)における Sch の 50%寄与域(Sch50%)と KM50%の面積比に注目すると、前者は後者寄りの小さくその比は約 4 割である。KM90%と比較すると、その比はわずか 3%しかない(図

5a)。このように、フットプリントモデルが異なると、同じ比率の寄与域の面積が大きく異なることが分かった。フラックス寄与域の面積はこのようにモデルによって、および比率 P の値で大きく異なっているが、寄与域内の平均地表面温度は面積ほどには異なっていない。11 月 17 日午前の例では、KM90%と KM50%の平均地表面温度を比較すると、両者の絶対値は 16~17 程度で、大きく異なっても温度差は 0.6 程度であり、多くの場合は 0.3 以内に収まっている。当時の気温が 11 程度であることを考慮すると、この程度の温度差では顕熱フラックス値に大きな影響は与えないと考えられる。これは顕熱フラックスの測定値に寄与する主要な部分が KM50%の範囲内にあるため、その範囲外で KM90%域内の寄与は相対的に小さいためである。また、フラックス寄与域内で地表面温度があまりばらついた分布をしていなかったことも原因の一つと考えられる。

謝辞

航空機観測に際しては、航空機のチャーター、運航、機内での機材の設置等について、大阪航空株式会社と東邦航空株式会社にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- Berk, A., L. S. Bernstein, D. C. Robertson, 1989: MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122.
- Gryning, S. E., A. A. M. Holstag, J. S. Irwin, and B. Sivertsen, 1987: Applied dispersion modelling based on meteorological scaling parameters, Atmos. Environ., 21, 79-89.
- Horst, T. W. and J. C. Weil, 1992: Footprint estimation for scalar flux measurements within the atmospheric surface layer, Bound.-Layer Meteorol., 59, 279-296.
- Kormann, R. and F. X. Meixner, 2001: An analytical footprint model for non-neutral stratification, Bound.-Layer Meteorol., 99, 207-224.
- Matsushima, D. and J. Kondo, 1997: A proper method for estimating sensible heat flux above

a horizontal-homogeneous vegetation canopy using radiometric surface observations, *J. Appl. Meteorol.*, 36, 1696-1711.

奥村晴彦, 1986: パソコンによるデータ解析入門, 技術評論社.

Schmid, H. P., 1994: Source areas for scalars and scalar fluxes, *Bound.-Layer Meteorol.*, 67, 293-318.

CAPS2002 におけるシンクロメータ観測報告

浅沼 順 (筑波大学陸域環境研究センター)

家本 薫 (筑波大学環境科学研究科)

多田 毅 (防衛大学校建設環境工学科)

小野圭介 (農業環境技術研究所)

石田祐宣(弘前大学理工学部地球環境学科)

1. はじめに

シンクロメータは、大気乱流中に光線を透過させ、その受光強度を計測して大気中の屈折率の構造関数を計測する計測器である。屈折率の変動は、大気乱流中の密度変動によってもたらされることから温度変動と密接なつながりを持つため、屈折率の構造関数から温度の構造関数を求めることができ、そこから顕熱フラックスなどを求めることが可能である。タワーに設置した超音波風速計が点における時間レイノルズ平均の観測であるのに対し、シンクロメータは発光器と受光器間のパス上での空間レイノルズ平均の観測であることから、ソースエリアの広いフラックス観測が可能なこと、また空間平均であることから非定常性に関わる問題を気にする必要が無いことなどから、空間代表性の強い地表面フラックスの観測が可能で測器として、近年、注目を集めている (De Bruin, 2002 など)。

本報告では、CAPS2002 におけるシンクロメータ観測の概要報告と、初期的な観測結果を紹介する。

2. 観測概要

4 台のシンクロメータを用いた多重シンクロメータ観測を CAP2002 期間中に行った。主な目的は、空間平均フラックス計測機器としてのシンクロメータの有効性の確認とその特性の把握である。

用いたシンクロメータは、防衛大学建設環境工学科所蔵の Scintec 社製 SLS20 2 台、農業環境技術研究所所蔵の同じく Scintec 社製 SLS40 1 台、そして筑波大学陸域環境研究センター所蔵の Scintec 社製 BLS900 1 台の計 4 台である。SLS20 と SLS40 は、ともに 50-250m のパス間で波長 670nm 赤色レーザービームによる計測から内部スケールと屈折率の構造係数を求める方式である。二つの計測値があることから、解析により顕熱フラックスと運動量フラックスが計測されることが、特徴である。

また BLS900 は 500-5000m のパス間で、LED 発光による波長 880nm の赤外光の計測により屈折率の構造係数を計測する。直径 15cm の LED ディスクによる発光で光線の広がりも大きいため、パス間の距離を長く取ることができることが特徴である。

CAPS2002 におけるシンクロメータ観測の詳細を表 1、表 2 にまとめた。

3. 初期解析結果

筑波大学陸域環境研究センター所蔵の BLS900 による初期的な解析結果を紹介する。

顕熱フラックスの計算手順は、Green and Hayashi(1998)に習い、以下の通りに行った (家本, 2003)。

1) 以下の式を用いて、屈折率の構造係数から温度の構造係数を計算する。

$$C_n^2 = C_T^2 \left(0.78 \times 10^{-6} \frac{\bar{P}}{\bar{T}^2} \right)^2 \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^2$$

2) モニンオブコフ相似則を用いて、顕熱フラックスを計算する。以下の式を用いて繰り返し計算を行った。

$$f(\xi) = \frac{z^{2/3} C_T^2}{T^{*2}} = 4.9(1 + 7|\xi|)^{-2/3} \quad (\xi \leq 0)$$

ここで、

$$\xi = \frac{-z \kappa g H \left(1 + \frac{0.07}{\beta} \right)}{u^{*3} \rho C_p \bar{T}}$$

はオブコフ長さ、また

$$T^* = \frac{H}{\rho C_p u^*}$$

は温度のスケールである。ここで、摩擦速度 u^* 、気温 T は、渦相関法による観測 (C4,5.9m) を、また気圧は S10 における観測値を用いた。

以上のようにして求めた顕熱フラックスを 30 分平均したものを、渦相関法(C4)による顕熱フラックスと比較したものが図 1 (11 月 19 日) および図 2 (11 月 20 日) である。両日ともに、シンチロメータによる顕熱フラックス測定値が、渦相関法によるフラッ

クスを大きく上回っていることが分かる。シンチロメータによる顕熱フラックスのパス長さへの依存を調べたのは、図 3 である。RAISE プロジェクトによるモンゴルでの観測、農業環境技術研究所真瀬圃場における観測 (家本, 2002) を併せて表示してある。このように、今のところ明らかなパス長さに対する依存性を示しており、原因は調査中である。

謝辞

琵琶湖プロジェクト代表の京都大学防災研 田中賢治氏および名古屋大学地球水循環研究センター樋口篤氏に謝意を表す。また、CAPS 観測における共同観測者の皆さんに謝意を表す。また、使用機材のうち、筑波大学所蔵のシンチロメータは、科学技術振興機構による RAISE プロジェクトの備品である。

参考文献

- H. De Bruin, 2002: Introduction: Renaissance of Scintillometry, *Boun. Layer Meteo.*, 105(1), pp1-4
- 家本薫, 2003: 「大口径シンチロメータを用いた収穫後の水田における顕熱フラックスの測定」、平成 14 年度筑波大学自然科学類卒業論

表 1 観測詳細 (防衛大 A、防衛大 B)

項目	詳細
観測責任者：	多田毅 (防衛大)
設置器械：	Scintec SLS20 (Surface Layer Scintillimeter)
観測期間：	2002/11/17 11:01 - 11/21 3:22
設置場所：	東西パス 1 番目 (S1-S2 線上)
設置高度：	2.64m
パス間長さ：	148m (11/17 11:01 - 16:17), 112m (11/17 17:14 - 11/18 14:44) 70m (11/18 16:08 - 11/19 12:36), 78m (11/19 12:44 - 11/21 3:22)
データ内訳：	屈折率変動の構造関数定数 C_n^2 , 内部スケール l_0 , 温度変動の構造関数定数 C_T^2 , エネルギー消散率 ϵ , 顕熱フラックス, 運動フラックス
サンプリング間隔：	1 分間
特記事項：	断続的に多数の欠測期間あり
観測責任者：	多田毅 (防衛大)
設置器械：	Scintec SLS20 (Surface Layer Scintillimeter)
観測期間：	2002/11/13 12:14 - 11/21 8:40
設置場所：	東西パス 2 番目 (S3-S4 線上)
設置高度：	2.09m
パス間長さ：	75m (11/13 12:14 - 14:32), 89m (11/13 14:41 - 11/17 15:09) 100m (11/17 15:52 - 11/21 8:40)
データ内訳：	屈折率変動の構造関数定数 C_n^2 , 内部スケール l_0 , 温度変動の構造関数定数 C_T^2 , エネルギー消散率 ϵ , 顕熱フラックス, 運動フラックス
サンプリング間隔：	1 分間
特記事項：	断続的に多数の欠測期間あり

表 2 観測詳細 (農環研、筑波大)

項目	詳細
観測責任者：	小野圭介 (農業環境技術研究所)
設置器械：	Scintec, SLS40, Surface Layer Scintillometer.
観測期間：	2002 年 11 月 12 日から 2002 年 11 月 21 日
設置場所：	SinW-E(3) Transmitter (N 35°29.104')(E 136°14.178') Receiver (N 35°29.077')(E 136°14.074')
設置高度：	2.42m (Transmitter 高度と Receiver 高度の中間)
パス間長さ：	160m (実測)
データ内訳：	気圧, 温度, パス長さ, 高さ, siglogX (Beam1 の輝度振幅の対数の標準偏差), siglogY (Beam2 の〃), logCor (Beam1 と Beam2 の輝度振幅の対数の相関係数), Nok (測定エラーにならなかったデータの割合), C_n^2 (屈折率変動の構造パラメータ), l_0 (屈折率のインナースケール), C_T^2 (温度変動の構造パラメータ), ϵ (消散率), H (顕熱フラックス), M (運動量フラックス), MOL (オブコフ長),
サンプリング間隔：	1000Hz or 917Hz
平均時間：	1 分
特記事項：	11 月 13 日 14 時 30 分まではビーム強度が規定値に達していないので注意.

表3 観測詳細 (農環研、筑波大)

項目	詳細
観測責任者 :	浅沼順
設置機械 :	Scintec BLS900
観測期間 :	2002/11/16,18,19,20
設置場所 :	V1-C5 V1 : Transmitter (35° 29'36N, 136° 13' 51E) C5 : Receiver (35° 28' 57N, 136° 14' 08E)
設置高度 :	V1 : Transmitter=751cm、C5 : Receiver=670cm
パス間長さ :	1232m
データ内訳 :	beta [X,Y の 2 チャンネルの平均], C_n^2 (屈折率の構造係数), Ct2(温度の構造係数),H(顕熱フラックス), r0(Fried diameter (m)), クロス風速 (cross wind (m/s)), エラーコード, <X> [channel X の平均], <Y> [channel Y の平均], sigX [channel X の標準偏差], sigY [channel Y の標準偏差], correlation [X と Y の共分散], Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, nok [発信パルス数と受信パルス数], エラーコード
サンプリング間隔 :	Transmitter のパルスは 125Hz
平均時間 :	1 分間 ただし顕熱フラックスの算出は 30 分間
特記事項 :	測器が稼動した全期間は 2002/11/13 10:00 ~ 11/21 8:45 15 日までは降雨のため、また 17 日は受信機の設置不良から欠測

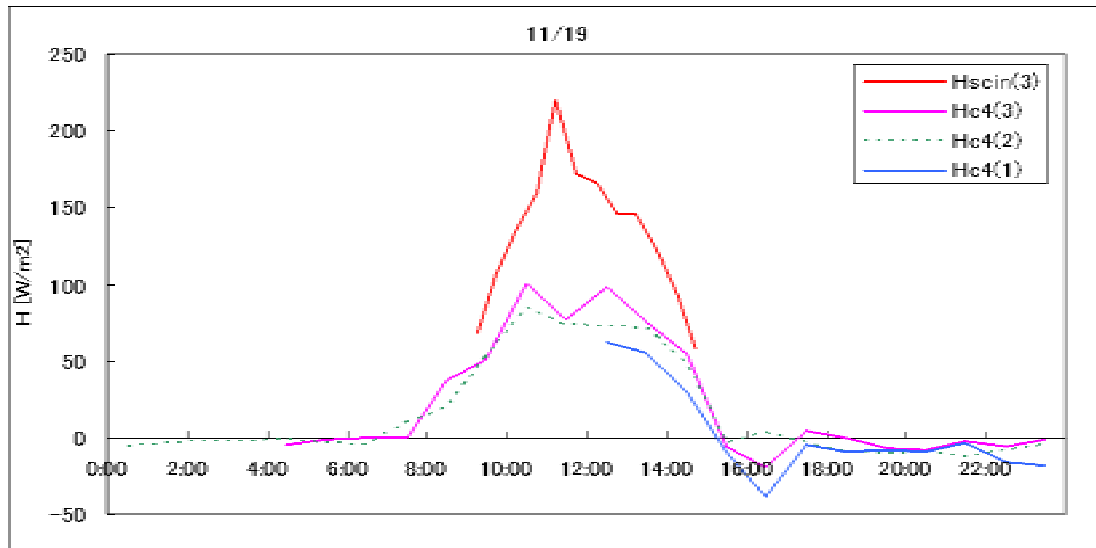


図1 : 11月19日におけるシンチロメータによる顕熱フラックス(Hscin)と渦相関法による顕熱フラックス(Hc4)の比較。

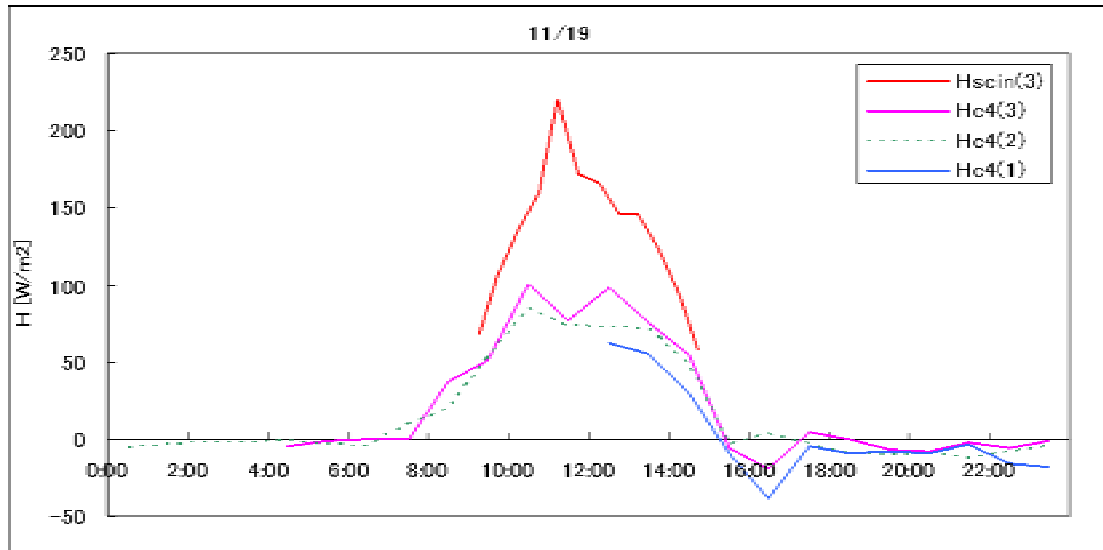


図 2 : 図 1 に同じ。ただし、11 月 20 日について。

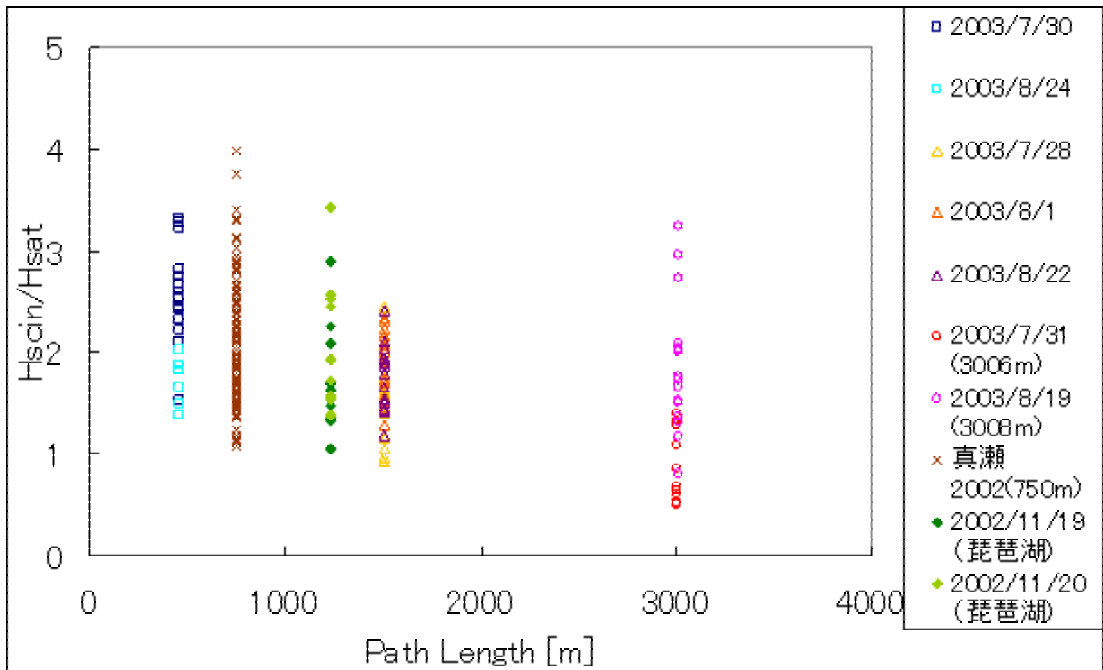


図 3 : 渦相関法による顕熱フラックスで無次元化したシンチロメータによる顕熱フラックスの、パス長さに対する依存。地点の記述の無いものは、**RAISE** プロジェクトによるモンゴルでの観測。真瀬は、農業環境技術研究所の観測圃場 (家本,2002 参照)。

CAPS2002 地上乱流観測にあたっての問題点

石田祐宣 (弘大・理工学部 地球環境学科), 樋口篤志 (名大・地球水循環研究センター), 田中賢治 (京大・防災研 水資源研究センター), 玉川一郎 (岐大・流域圏科学研究センター)

1 はじめに

観測には問題発生や失敗がつきものであるが、これを今後観測をよりスムーズにするため、さらには失敗を起こさないために記録して蓄積おくことは重要である。ここでは、CAPS2002 の観測時に問題になった点を記し、次の年の観測 (CAPS2003) に活かされたものと、今後の課題として残されたものについて項目ごとにまとめる。

2 地上乱流観測機材の集約

本プロジェクトは、先に玉川氏が触れているように研究者が自発的に観測機材や労力を出し合って観測を行ってきた。よって様々な機種 of 計測機を用いて観測することになるが、必ずしも機材の所有者が現場にいるとは限らない。機種の違いにより取り扱い方法が異なり、また記録計が独立しているため様々な機種 of 取り扱いに精通している者でなければセッティングや問題が発生したときの修正は困難を極める。前者 (セッティング) に関してはマニュアルがあれば問題ないが、後者 (観測中に発生する不具合) は発見さえも難しい場合がある。

実際に観測期間中経験した問題点を列記する。

データロガー 1 ファイルもしくは 1 記録媒体への記録が終了しなければデータの Quality Check ができない。つまり問題の発見が遅れる。

⇒ 各機材に対してオシロスコープがあればベストであるが現実的には不可能に近いので、生出力値や生波形データを簡単にモニターできるデータロガーの使用が望ましい。CAPS2003 ではそのようなデータロガーをできるだけ揃えた。(一方で残念ながらその様なデータロガーに高品質のものは少ない)

超音波風速温度計 風速の水平成分 u, v や温度 T に関しては、その出力平均値を求めればおおよそ計測機が正常に機能しているかがわかる。しかし風速の鉛直成分 w はその平均値がほぼ 0 である。例えば故障や断線などで出力が 0 で、さらにそこにノイズが乗っている状況では単に平均値や波形を眺めただけでは問題が発見できない。一方で w は本プロジェクトの第 1 の目的である鉛直フラックスを求めるのに不可欠な観測項目である。

⇒ データロガーの問題とも関係するが、事前に顕熱フラックス $\overline{w'T'}$ をはじめとする 2 次程度の乱流統計量を各 run に対して計算できるように準備しておく必要がある。特に顕熱フラックスは、天候状態で大体の傾向は予測でき、また今回の観測のように多数のサイトがある場合、サイト間の

比較を行えばチェックが楽になる。CAPS2003 では、サイト数が多いので処理に手間取ったが $\overline{w'T'}$ のみを現地であるべくチェックするよう心掛けた。計算の際は、ロガーの各チャンネルのチェックであることより、通常フラックスを正確に求めるための座標回転や各種補正を行わないべきである。

赤外線オープンパス湿度変動計 最新の計測機であれば出力が水蒸気密度の絶対値であり、時定数が長く信頼性のある容量式湿度計を隣接させておけばチェックが比較的容易であるが、旧式の湿度変動計で highpass filter が掛けられた出力の計測機は、上記 w の場合と同じ問題を抱える。

⇒ 超音波風速温度計の項に記載した方法とほぼ同様の処理が必要である。すなわち、水蒸気フラックス $\overline{w'q'}$ の計算がチェックに重要である。CAPS2003 では、極力水蒸気密度の絶対値が出力できる型の計測機を集め、容量式湿度計の出力との平均値比較及び $\overline{w'q'}$ の計算を現地で行った。

3 データロガーの時刻遅れ

CAPS2002 では、地上乱流計測機の水平設置間隔を 100~200m とし、領域全体が 500×1,500m であった。常時観測とは異なり集中観測だったため観測データを 1ヶ所に集める設計は断念し、各サイトに記録計を設置することにした。

Plume 等乱流構造を追尾する場合には時刻情報が重要となるため、各サイトのデータロガーの時刻が統一されている必要がある。そこで、現場に滞在する者が電波時計を基準に各データロガーの時刻を修正する方法をとった。一方頻繁に時刻あわせを行うと、修正を行った時刻のデータが含まれる部分が無効になってしまうため、主に航空機観測を行う集中日直前のみロガーの時刻修正を行い、他の日はロガーの時刻ずれ (遅れ, 進み) の記録をし、データ処理時に時刻補正を行うこととした。

各サイトのデータロガーの時刻ずれを図 1 と表 1 に示した。途中データが不連続になっている部分は、時刻のずれを修正した箇所である。最も時刻ずれの少ないデータロガーは TEAC 社製のもので、PC 等を必要としないスタンドアロンのタイプであった。PC を必要とするタイプのもののうち、特に PC の時計を使って時刻を記録するタイプのものは直接 PC の時計精度が影響しずれが大きくなった。なお、各サイトで用いたデータロガーは玉川氏の報告を参照されたい。

観測期間中の最大平均風速はおおよそ 8(m/s) で北北西の風であった。サイト間の水平距離は短いところで 100m 程度であり、plume や乱流組織構造がこの速度で流されていたとすると、最速でサイト間を約 12s で通

過することになり、多くのサイトで時刻補正を必ず施さなければならないことがわかる。この点はデータ処理の際十分注意しなければならない。CAPS2003では、より細かい構造を見る目的のためサイト間の水平距離は20~30mであったので、計測機が集中する中心部ではサイトが異なっても極力同一の多チャンネルデータロガーを使用した。よって中心部では上記のような時刻ずれの補正の心配はなくなった。

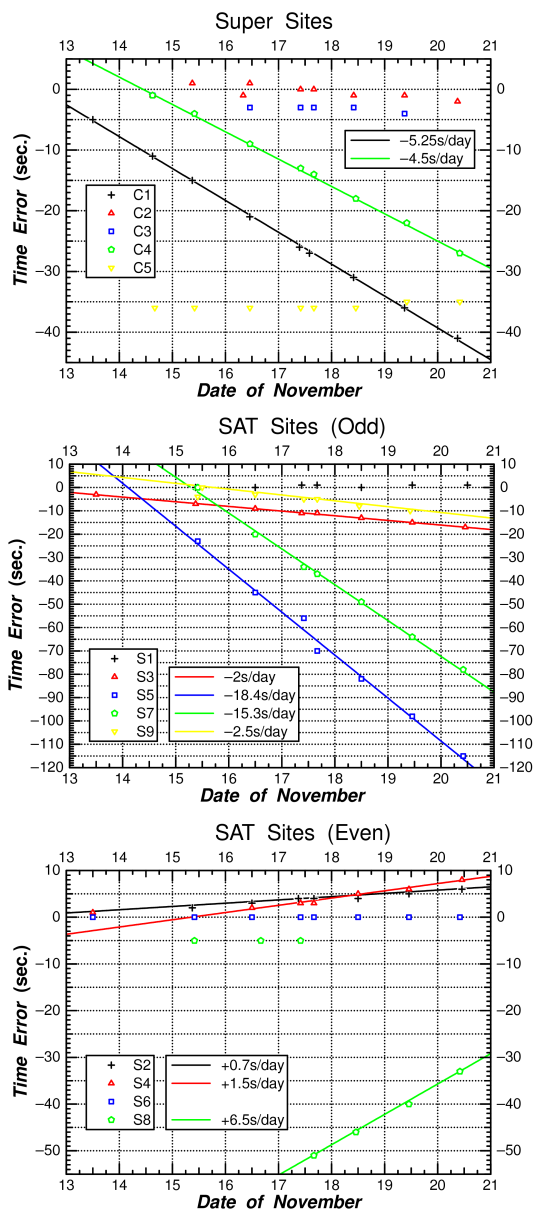


図 1: 各サイトのデータロガー時刻ずれ時系列。負の値は時刻遅れを表す。上段: スーパーサイト, 中段: SAT サイト (奇数列/西寄り), 下段: 同 (偶数列/東寄り)

4 現在までに行われた Quality Check

前に指摘したように観測現場での Quality Check には限界がある。現在までに分かっている超音波風速温度計データ中の回復不能な異常値の情報を表 1 に記した。

表 1: 各サイトの時刻ずれ傾向とデータ品質。負の値は遅れを表す。西・中央・東の列ごとに区分し、各列で上段側が北側に位置する。

サイト	時刻ずれ (trend, Max.)	品質等備考
西の列		
S10	N/A	常設
S1	< +1s/day, +1s	59 分記録 (+1 分書込)
S3	-2s/day, -17s	
S5	-18.4s/day, -115s	50Hz data あり
S7	-15.3s/day, -78s	
中央の列		
C1	-5.25s/day, -41s	w に異常
C2	±2s/day, -10s	
C3	< -1s/day, -3s	
C4	-4.5s/day, -27s	
C5	< -1s/day, -36s	w に異常, 59 分記録 (+1 分書込)
S9	-2.5s/day, -10s	鉛直 1 成分
東の列		
S2	+0.7s/day, +6s	
S4	+1.5s/day, +8s	
S6	< ±1s/day, < ±1s	v に異常
S8	+6.5s/day, -51s	u に時々異常

今回の観測では、現場でデータの異常を発見することが困難であった。風速の鉛直成分 w が異常であったサイトでは、 w の信号が来ておらずデータが平均的に 0 を示していた。連続観測を基本としていたため、測定を継続しながらデータの回収を行う必要があったが、データの回収中にデータが保存されている PC の時計が狂ってしまうことが良くあり、データの回収は多くても 1 日 1 回程度であった。このことを教訓とし、CAPS2003 では観測の焦点を日中に絞り可能なサイトでは夕方には必ずデータを回収し、 $\overline{w^2 T^2}$ を計算することで計測機の異常をチェックするよう心掛けた。

5 共通データフォーマット

観測で使用したデータロガーは多岐にわたっているため、データロガーへの出力フォーマットは全く異なっている。そこで、各サイトのデータを一括して処理しやすくするため、共通のデータフォーマットを定めた。その際多くの環境で受け入れやすくするため、下記を原則とした。

- アスキー形式
- データの区切りは空白文字としてなるべく列の先頭を合わせる
- どのサイトでも測定されている項目を若い列に並べる
- ftp 等による download を想定し、データを Zip 形式で圧縮する

このことで、比較的多くの者が使用と思われる MS-Excel を Windows OS 上で使用する環境でも処理が可能であり、一方で C や Fortran を Unix OS 上で使用する環境にも適応できる。

上記に加え、時系列処理をしやすくするためにデータの時間間隔を 0.1s に統一し、ファイル名やデータの配列を次のようにした。

ファイル名 “サイト名”_YYMMDDhh.dat (YY:年,
MM:月, DD:日, hh:時)

1 列目 当日 0:00:00.0 からの通し番号

2 列目 mmss.s (時刻情報; 分秒)

3-6 列目 SAT データ; u, v, w (m/s), T ()
C4 サイトのみ高度が 3 点あるので, 7-10,11-14 列
目は同様に繰り返される

その後の列 水蒸気変動計データ; a (g/m³)

これを基本とし, 各サイトのデータディレクトリには
データの記述方法を記載した Readme.txt ファイルを
置いた .

6 おわりに

ここでは, CAPS2002 の観測で問題となった点につ
いてまとめた . 特に, サイトごとのデータロガーが独立
していて時刻の同期が取れないという状況は観測実施
以前に分かっていたことで, 予定通り電波時計を用い
た時刻チェックや修正を人海戦術で行った . その結果,
データロガーに時刻のずれが確認できたものの, ほと
んどが線形的なずれであり, 後からの補正の必要はあ
るが大きな問題にはならないと思われる . 今後 plume
等の乱流の動的構造をみるような処理の際にはこの補
正に注意を払うべきである .

CReSS を用いた境界層過程の再現実験

玉川一郎（岐阜大学流域圏科学研究センター）、CAPS 観測グループ¹

はじめに

自由参加的研究組織フラックス野郎の会と琵琶湖プロジェクト、防災研共同研究など多数の協力で2002年11月と2003年10月に、滋賀県伊香郡高月町井口の水田地帯で乱流計測器を面的に配置した画期的な観測が行われた。これにより、今まで無かった100mあるいは10mオーダの水平解像度をもつ乱流データが得られた。

この観測の問題意識の一つに水平一様な地表面状態で、どれほど不均一な顕熱・潜熱フラックスが生じるか、というものがある。神田ら(2002)の数値計算では、大規模な境界層内の対流構造が、非常にゆっくりとしか移動しないために、同じ地表面条件であっても、計測される乱流フラックスは、場所場所で大きく異なることが示された。このようなことを実際の観測から見てみようということである。

一方、数値気象モデルはどんどん解像度を上げており、実際の地上観測の対象である数10mのスケールに近付いて来ており、今後、領域平均値のみでなく小スケールの現象そのものの再現性も問題となっていくことが予想される。例えば、上記、対流構造は雲の出現にも重要であろうし、各点での観測値の再現性も求められるであろう。

そこで、CAPSの観測データと、雲解像非静力学数値気象モデル CReSS による再現実験および観測値との直接の比較検討を開始した。ここでは、試行的な結果について報告する。

CReSS

CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) は、名古屋大学地球水循環研究センターの坪木和久氏と財団法人高度情報科学技術研究機構の神原篤志氏により開発された数値モデルであり、非静力学完全圧縮系の力学方程式に雲の微物理過程を組み込んだもので、乱流クロージャはLESになっている。陸地は、熱伝導方程式を多層モデルで解き、地表面は粗度(z_0)、アルベド(α)、蒸発散効率(β)の3つのパラメータで表されている。

ここでは、CReSS Ver.2.0 を用い、雲物理過程無し、乱流クロージャ 1.5 次 TKE、10cm 4 層の陸面で計算した。水平一様、周期境界条件の計算を行った。格子は、水平方向に 40m 格子を 50 層 (2km)、鉛直方向には最下層 10m で 80 層取って 1600m までの領域を覆った。

地表面は、 $z_0 = 0.017\text{m}$ (石田の計算による)、 $\alpha = 0.2$ 、 $\beta = 0.2$ と、ほぼ実測に合わせた。計算対象は 2002 年

11月17日とし、初期条件には同日9JSTのゾンデデータから主観的に乱れを取り除いたものを使用した。(図1)

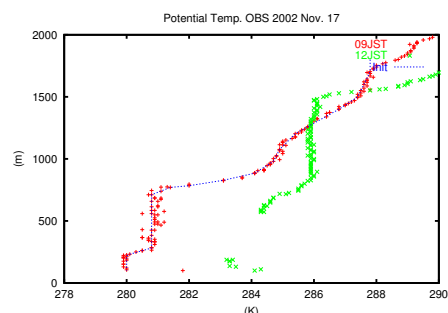


図1. 09,12JSTにおける温位の観測値と、計算に用いた初期値

結果

図2に、CReSSで計算された温位のプロファイルを示す。初期状態では、200~300m付近と800m付近に強い安定成層が見られ2段のinversion capとなっている。計算では2時間後には下の安定層が無くなり対流は800m付近にまで届いて境界層全体を加熱している。観測値(図1)では、800m付近の安定層は12JSTでも残っているが、その上でも1200m付近を境に上200mくらいを加熱、下を冷却している。また、境界層全体の加熱量も4K程度と計算の2倍程大きい。

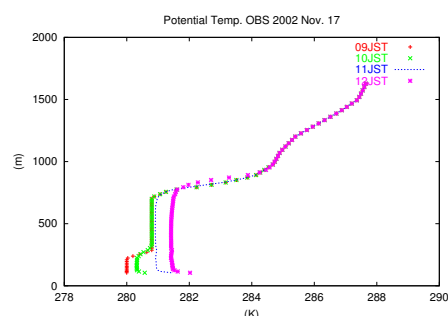


図2. CReSSによる温位の計算値(水平平均値)

初期値に見られる最下層の冷気層は周辺の山と関係があると思われ、また、風向の変化により暖気が移流して来ている可能性も考えられ、水平一様周期境界の計算条件の枠外でさまざまな現象が起こっていることを考えると、本計算はある程度の再現に成功していると言えるのではないだろうか。

¹メンバーは他の報告を参照

この計算は格子程度以下のスケールを LES で計算し、それ以上の現象を解像して計算するので、境界層内の対流構造は直接計算される。地表面からシート状に上方へ延びる高温上昇流域とその間の下降流域、あるいは境界層上端より上でのオーバーシュートと見られる低温かつ上昇する気塊などが計算されている。

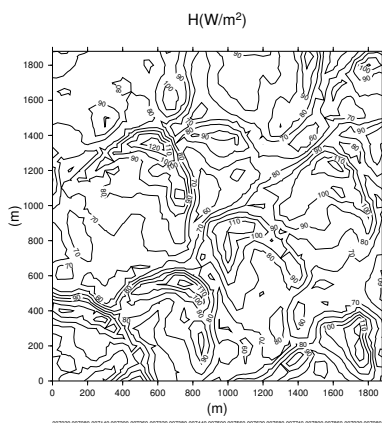


図 3. CReSS による 7000 秒から 3000 秒間の地表面での顕熱フラックスの平均値

境界層内の対流構造は、地上の風速等を場所毎に変化させ、地表面での熱収支に影響を与える。図 3 は、計算開始後 7000~10000 秒で時間平均した地表での顕熱フラックスである。3000 秒にわたる平均を施しても、瞬間値と大差ない大きさの不均一性が見られ、各点での顕熱フラックスは 60W/m^2 から 120W/m^2 と 2 倍程度違っている。確かに、神田ら (2002) と同様の状況が計算されていることが分かる。

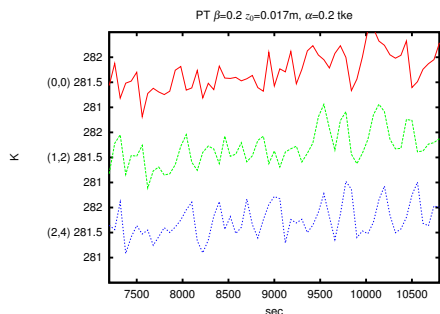


図 4. CReSS による点 (0,0), (1,2), (2,4) での、温位の時系列 (60 秒ごと)

しかし、対流構造は完全に静止しているのではなく移動している。図 4 は、計算上の風 (247 度、 0.35m/s) に沿った 3 点での温位の時系列 (60 秒サンプリング) であるが、各点で見てもこのようにプリュームの通過が見られる。地点間の距離約 90m を風速で割ると 250 秒となるが、図ではもう少し速く (例えば 8000 秒付近のピークなど) 伝播しているように見えるが、変形が激しい。

それに対して、実測による図 4 では、南西の風 1.3m/s と計算よりも大きな風速を持ち、計測機間隔約 200m を考慮すると、ほぼ 150 秒遅れで現象が伝わる。S1 の 80 秒付近、C1 の 200 秒付近、S2 の 380 秒付近などに見られるようにプリュームが風速程度の速度で通過している様子が見えるが、これも変形が激しい。なお、気温振幅自身は計算と同程度である。

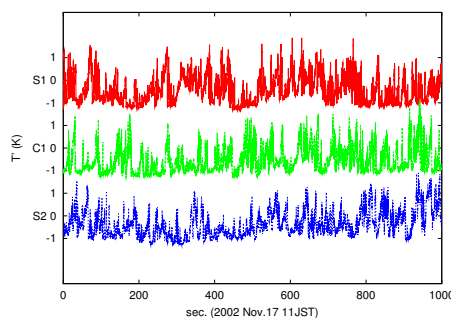


図 5. CAPS2002 観測での風向に沿った観測点の気温時系列このように、違いがあるとは言え、定性的には良く似た状況が再現されている。現時点では、基本的な風速場、あるいは境界層構造の再現が完全ではないので、あまり詳しく調べることができない。

まとめ

今回の CReSS による水平一様周期境界条件での再現実験では、神田 (2002) に見られたような境界層内の対流構造に起因する顕熱などの地表面フラックスの不均一性が見られた。その大きさは 2 倍程度に及ぶ。また、プリュームの移動も見られるが、移動速度は地表風よりもかなり速くなっている。一方、観測では、顕熱の不均一性はこの程度ではあるが、一部は水田の水分状態に起因すると考えられ、モデル実験の方が差が大きくなっている。また、プリュームの移動は地表風速度である。これらの違いを詳しく検討することによりモデルの問題点の検討、および計算結果を利用した 3 次元解析が行える可能性がある。

しかし、図 1、2 に見られる境界層構造の違いや、地表の風速の再現性など、まだまだ詰めなければならない問題が多い。地表面パラメータをいくつか変えて実験したが、上記の問題は変化せず、今回の計算 (水平一様周期境界) の枠外の問題があるようである。朝の冷気湖の形成や湖陸風の侵入なども考慮できるように、計算領域を拡大するか他のモデルから境界条件を与えての実験が必要であろうと考えられる。

参考文献

神田 学・渡辺 力・マルコス オリバー レッツェル・ジークフリート ラッシュ (2002): LES による熱収支インバランス問題に対する検討 (第 1 報) 大気境界層スケールの対流構造の影響, 水文・水資源学会誌, 15-3, pp.243-252.

CAPS2003の概要

石田祐宣¹, 田中賢治², 玉川一郎³, 樋口篤志⁴,
 藤吉康志⁵, 小野圭介⁶, 檜山哲哉⁴, 林 泰一⁷, 石川裕彦⁸, 中北英一⁹, 他 CAPS2003 参加メンバー†
 (1: 弘大・理工学部地球環境学科), (2: 京大・防災研水資源研究センター), (3: 岐大・流域圏科学研究センター),
 (4: 名大・地球水循環研究センター), (5: 北大・低温科学研究所), (6: 農業環境技術研究所),
 (7: 京大・防災研災害観測実験センター), (8: 京大・防災研大気災害研究部門), (9: 京大・工学研究科都市環境工学専攻)

1 はじめに

「フラックス野郎&お嬢の会」と「琵琶湖プロジェクト」による合同集中観測が2002年11月に滋賀県北部の水田地帯で行われ、乱流計測機、特に超音波風速温度計 (Sonic Anemometer-Thermometer) によってブリュームの動態を捕らえようという目的から、CAPS(Catch A Plume by SATs) と名付けられた (玉川氏の報告参照)。2003年10月にも同じ目的、同じ場所で細かい構造を調査するため追加集中観測を行った。両者を区別するため観測年をつけそれぞれCAPS2002, CAPS2003と呼ぶこととする。

より広義のCAPSの目的は、多数の観測機材を組み合わせ広域に展開することで、大気境界層内の乱流組織構造を把握することである。2002,2003年の観測の大きな違いは、図1に示すように地上の乱流観測機材の配置にある。CAPS2002では、現場の水田が連続している領域全体 (南北1500m × 東西500m) を覆うように地上乱流計測機を水平方向におよそ100m程度の間隔で配置した。一方CAPS2003では、さらに細かいス

ケールを解像できるようにCAPS2002観測領域の中心付近 (南北200m × 東西100m) に20~40m間隔で計測機を配置した。時期を隔てているが、両年の観測により10mスケールから1kmスケールの集中観測が行え、1点観測から、近年の人工衛星によるリモートセンシングや局地気象モデルの解像度までを連続的に把握することを目指した。

また、CAPS2003では2002年の観測で問題になった点の解決も試みられた。問題点は別報 (CAPS2002地上乱流観測にあたっての問題点) に挙げたが、特に64チャンネルロガーを用意することで、複数のサイトの乱流データを完全な時刻同期の元で記録できた点が大きな進歩であった。

この観測で、もう一つの焦点は熱収支インバランス問題の原因解明である。熱収支インバランス問題は、放

†山下和也 (北大), 荒澤良平 (弘大), 松島大 (東北大), 浅沼順・斉藤誠 (筑大), 宮崎真 (東大), 小林菜花子・山本宗尚・山本鉦・高橋仁 (名大), 相馬一義・宮田昇平・諸橋真琴・渡辺裕司・萬和明・村田文絵・手嶋あかり・堅田元喜 (京大), 岩田徹・野尻淳司・伊野部京子 (岡大)

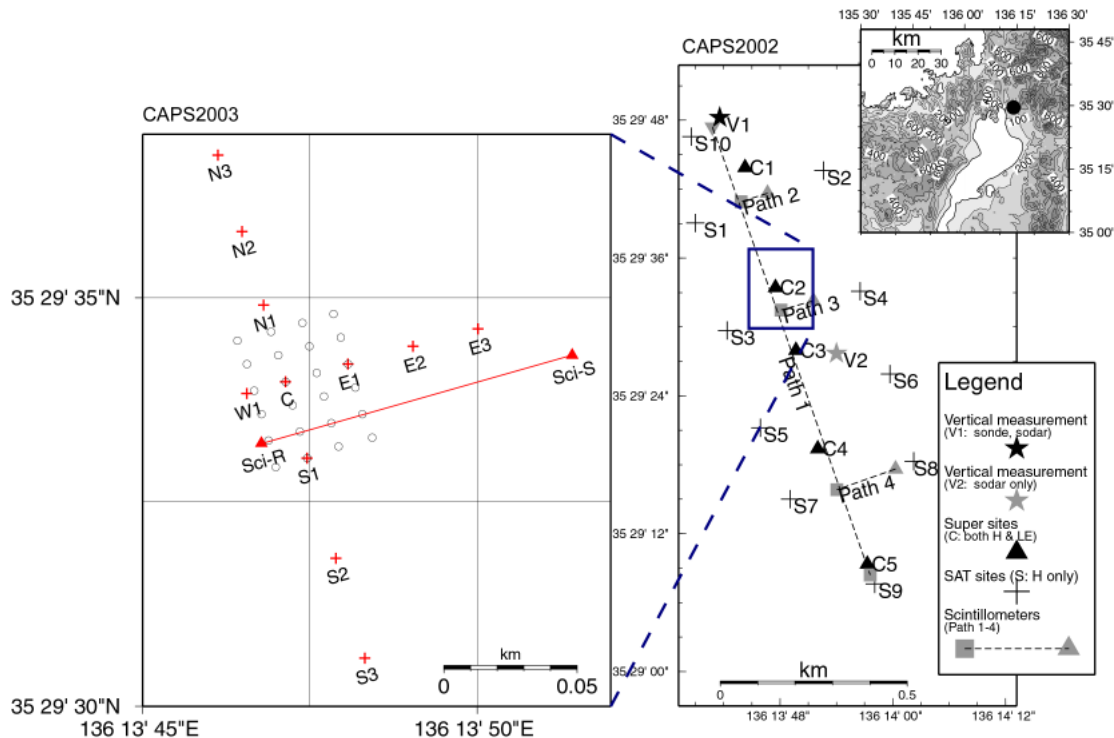


図1: CAPS2002,2003乱流観測機材の配置図。右図: CAPS2002の観測機材配置図 (詳細は玉川氏の報告参照), 左図: CAPS2003の配置図 (ただし地上乱流計測機のみ); * : シンティロメータ送受信機; + : SAT設置箇所; N3・C・S3: 鉛直3点測定点; C・S1・N1・E1・W1: 水蒸気変動測定点, ○: 熱電対設置箇所。

射収支と地中伝導熱の和よりも乱流観測による顕熱・潜熱フラックスが小さく観測されてしまう現象を指す。仮に大規模対流構造が実際にあるならば、この問題は観測で顕在化するはずである。両年とも稲刈り後ではあるが、同じ「水田」というカテゴリーの領域内で多点観測を行っており、サイトごとの乱流フラックスに違いがどれほど見られるのか、また単に多点のデータの平均を取れば熱収支は閉じるのかがわかる。また、CAPS2002では各観測点のフットプリント(計測されるフラックスの地表面寄と領域)は完全に独立しており、田の違いによるフラックスの違いが見えるはずである。CAPS2003では1枚の田に複数の計測機が配置されており、条件によってはフットプリントが重なり、より同一の地表面状態でのフラックスのムラが確認できるはずである。

CAPS2003では、ドップラーライダーという比較的新しい観測機材も導入した。ライダーは送信したパルスレーザーが大気中のエアロゾルで散乱される強度を測定することで、エアロゾル濃度の空間分布を把握するために開発された計測機である。ドップラーライダーは、さらに散乱体であるエアロゾルの動きを測定することで、風速の空間分布を高解像度で観測することができる機材である。ライダーは正確に雲の分布や雲底高度も測定できることから、今回の観測では大気境界層で発達したプリユームがどのように積雲の形成に関係しているのかを調べることが可能である。

ここでは解析目的は現在広い分野で注目されている点のみを挙げたが、これだけ狭い領域において総合的な気象観測を行っているのでデータは広く公開し、様々な研究目的で解析されることを筆者らは強く望む。

2 観測の概要

集中観測は2002年と同じ琵琶湖北東岸の水田地帯において、稲刈り直後の2003年10月1~10日に行われた。観測期間が前年に比べ1ヶ月ほど早いのは、より強い顕熱フラックスを期待したためである。観測期間を通してほとんど降水はなく、前半は日中5m/sを越える北よりの風が吹く日が続く、後半はほぼ2m/s以下の南風で日中非常に不安定となり、幅広い条件のデータが取得できた。

観測項目は次の通りに分類できる。

- GPSゾンデ、ドップラーソーダ・ライダーによる上空の観測
- 超音波風速温度計、赤外線水蒸気変動計、シンティロメータによる地上乱流観測
- 乱流フラックス以外の熱収支各項の観測
- 放射温度計と土壌水分計による地表面状態観測

それぞれについてこれより簡単に説明する。

2.1 上空の観測

GPSゾンデとドップラーソーダに関しては、CAPS2002と同じ機材を用い同じ設定で観測を行ったものは説明を省略する。北大低温研から新たに加わったドップラーソーダは、上空1方向のみ高度1kmまで風向風速のプロファイルを測定した。ドップラーライダーは、分解能25m、最大探知距離2km(状況によって上空の雲を捉える8km)のモードで主に20分間隔で観測を行った。この観測に付随して、凝縮核(CN)カウンター(TSI, Model 3007)、オプティカルパーティクルカウンター、微気圧計(KONA, KADEC-U Model II)、雲の動きを追うためのビデオカメラ、自然通風の温湿度計(HOBO, H08-032-08(26台), H08-030-08(温度計のみ10台)); 独立した250m×150mの範囲に36点)による観測も行った。以上の項目のうち主要なものを地点別に表1に示す。

表1: ゾンデ、ドップラーソーダ・ライダー観測機材。

地点	種類	型名	所属
V1	GPSゾンデ*	Vaisala MW15	名大 HyARC
	Dopplar Sodar	REMTEC PA1-NT	北大 低温研
	Dopplar Lidar	三菱電機 LR-02A	北大 低温研
V2	Dopplar Sodar	DPRI&Kaijo	京大 DPRI

* 10月3~6日のみ

2.2 地上乱流観測

CAPS2002に比べ細かいスケールの構造に焦点を当て、図1に示したように約100m×200mの領域に畦に平行した十字arrayを作り11点の各観測点を設けた。畦の方向が東西南北の座標系から若干ずれているため、配置もそれに沿った形で傾いている。畦から少し離す制約があるため、各サイト間の距離は不規則となり15~40mとなっている。サイト名は、十字の交差する中心点をCとして各方位とCから数えた順番を組み合わせて名付けた。

超音波風速温度計(SAT)計17台は、各サイトの地上2.5mの高さに1台ずつ、北端(N3)・中心(C)・南端(S3)には鉛直3高度(1.25, 2.5, 5m)に設置した。水蒸気変動の細かい構造も見ると、中心部の地点(C,N1,S1,W1,E1)には赤外線水蒸気変動計を高度2.5mのSATに隣接させた。

地上10m未満といった地表面の影響を強く受ける高度では、プリユームのような乱流組織の動きを把握するためには、細かい時間変動が多い風速の鉛直成分wよりは比較の変動の大きい気温Tの分布を短い周期で測定することが好ましい。そのため、本観測では中心部周辺でさらに細かく格子を切り(東西方向12.5m間隔4点×南北方向10m間隔6点=24点)地上1.25mに細線熱電対(銅-コンスタンタン40μm線)も設置した。中心サイトCの南北に隣接する点では湿球の細線熱電対も設置した。これら中心部(C,N1,S1,W1,E1,熱電対)の計測データは、時刻ずれがないよう同一の64チャンネルデータロガーを用い10Hzで記録を行った。

表 2: 地上乱流観測点の計測機材。(SAT: 超音波風速温度計, IRGA: 赤外線水蒸気変動計, Humicap: IRGA 校正用温度湿度計, ** それぞれ同一の記録計, #10月7日9時撤去, ##10月7日11時からS1で計測, ###鉛直1成分)

地点	位置, 高度, 風速計の向き		所属
	種類	型名	
N3	35°29.612'N, 136°13.769'E, 127.6cm, 西へ 22.9° 251cm, 東へ 201.0° 500cm, 西へ 9.0°		
	SAT(127.6cm)	Kaijo DA-600(TR-62AX)	農環研
	SAT(251cm)	Kaijo SAT-550	京大 DPRI
	SAT(500cm)	Kaijo DA-600(TR-61A)	京大 DPRI
	記録計	Keyence NR-1000	京大 DPRI
N2	35°29.597'N, 136°13.775'E, N3 との距離: 30m 250cm, 西へ 105.4°		
	SAT	Campbel CSAT3	東大
	記録計	Keyence NR-1000	東大
N1	35°29.582'N, 136°13.780'E, N2 との距離: 30m 255cm, 西へ 58°		
	SAT	Kaijo DA-600(TR-62AX)	農環研
	IRGA	Li-Cor LI-7500	農環研
	記録計	Keyence NR-1000(64ch)*	京大 DPRI
C	35°29.566'N, 136°13.786'E, N1 との距離: 30m 125cm, 西へ 11.6° 256cm, 西へ 12.5° 506cm, 東へ 187.0°		
	SAT(125cm)	Kaijo DA-600(TR-62AX)	農環研
	SAT(256cm)	Kaijo DA-600(TR-61A)	京大 DPRI
	SAT(506cm)	Kaijo DA-600(TR-61B)	京大 DPRI
	IRGA(256cm)	Li-Cor LI-7500	京大 DPRI
	記録計	Keyence NR-1000(64ch)*	京大 DPRI
	記録計	TEAC DR-M3a(125,256cm のみ 50Hz)	農環研
S1	35°29.551'N, 136°13.791'E, C との距離: 30m 251cm, 西へ 85.5° / 東へ 10.0° (10/17, 11:00 ~)		
	SAT	Gill 1210R3#	名大 HyARC
	IRGA	Li-Cor LI-7500#	名大 HyARC
	記録計	Keyence NR-1000(64ch)*	京大 DPRI
S2	35°29.530'N, 136°13.798'E, S1 との距離: 40m 234cm(w成分), 西へ 0.5°		
	SAT	Kaijo PA-600	京大 DPRI
	記録計	Hyper-terminal+PC	京大 DPRI
S3	35°29.510'N, 136°13.805'E, S2 との距離: 40m 127cm, 西へ 10.6° 256cm, 西へ 92.1° 500cm, 西へ 93.6°		
	SAT(127cm)	Kaijo DA-600(TR-62AX)##	農環研
	SAT(256cm)	Gill 1210R3#	名大 HyARC
	SAT(500cm)	Gill 1210R3#	名大 HyARC
	記録計	Keyence NR-1000	東北大
	記録計	TEAC DR-M3a(127cm のみ 50Hz)	農環研
W1	35°29.564'N, 136°13.776'E, C との距離: 15m 250cm, 西へ 184.8°		
	SAT	Kaijo SAT-550	岡山大
	IRGA	Advanet E009B	岡山大
	Humicap	Vaisala HMP45A(強制通風筒)	農環研
	記録計	Keyence NR-1000(64ch)*	京大 DPRI
E1	35°29.570'N, 136°13.801'E, C との距離: 25m 247cm, 西へ 14.0°		
	SAT	Kaijo DA-600(TR-61A)	京大 DPRI
	IRGA	Li-Cor LI-7500	京大 DPRI
	Humicap	Vaisala HMP45A(強制通風筒)	農環研
	記録計	Keyence NR-1000(64ch)*	京大 DPRI
E2	35°29.573'N, 136°13.817'E, E1 との距離: 25m 254cm, 西へ 188.5°		
	SAT	Kaijo SAT-550	筑波大 TERC
	記録計	Keyence NR-1000**	弘前大
E3	35°29.577'N, 136°13.834'E, E1 との距離: 25m 246cm, 西へ 13.6°		
	SAT	Kaijo DA-600(TR-41)###	東北大
	記録計	Keyence NR-1000**	弘前大
Sci	送信側 (S): 35°29.572'N, 136°13.857'E 受信側 (R): 35°29.554'N, 136°13.780'E Path Length: 112m, Mean Height: 250cm		
	Scintillometer	Sintec SLS40	農環研
	記録計	PC	農環研

他に W1-E3 のラインに平行して南側にシンチロメータも設置し、この直線上の平均顕熱フラックスを 1 分間隔で測定した。使用した機材の一覧を表 2 にまとめた。

2.3 熱収支各項の観測

観測領域は、N3-N2, N1-C-S1-W1, S2-S3, E1, E2, E3 それぞれが設置された 6 枚の田にまたがっている。水平一様の地表面を仮定しているが、熱収支インバランスを考察する際に田毎の熱収支各項の違いがどの程度あるのかを調べるため、上記のうち N3, S3, E2 が含まれる 4 枚の田で放射収支と地中伝導熱の測定を行った。特に地中伝導熱の測定に使用した熱流板は局所性を拾いやすい構造のため、各サイトに 3 台ずつ埋設した。また乱流観測とは別に、Bowen 比法で顕熱・潜熱フラックスを推定するために容量式温湿度計を N3, S3 両サイトで鉛直 2 高度に設置した。(C が含まれる田は常設観測点がある。) データは 2 秒間隔で取得されたデータを 5 分間で平均し記録した。また、集中観測直後にこれらの機材は相互比較校正を行った。

各サイトに設置された観測機材一覧を表 3 に示す。

表 3: 放射収支, 地中伝導熱, Bowen 比測定用観測機材。*10月6日 17:19~17:34, **同日 17:39~17:49 に上下交換。# 自然通風筒, ## 強制通風筒使用。

地点	種類	型名	所属
N3	4成分放射計	Kipp&Zonen CNR1	農環研
	赤外放射計 (L^\uparrow)	EKO MS-201	京大 DPRI
	熱流板	EKO MF-81(3台)	農環研
	温湿度計 (210cm)	Vaisala HMP45A#	京大 DPRI
	温湿度計 (97cm)	Vaisala HMP45A#	京大 DPRI
	温湿度計 (比較用)*	Vaisala HMP45D#	京大 DPRI
	記録計	Campbell CR10X	農環研
S3	4成分放射計	EKO MR-40	農環研
	赤外放射計 (L^\uparrow)	EKO MS-201	京大 DPRI
	熱流板	REBS HFT-3(2台)	京大 DPRI
	熱流板	EKO MF-81	京大 DPRI
	温湿度計 (205cm)	Vaisala HMP133##	東北大
	温湿度計 (80cm)	Vaisala HMP45D##	農環研
	温湿度計 (比較用)**	Vaisala HMP45D##	農環研
	記録計	Campbell CR10X	農環研
E2	純放射計	EKO MF-11	岡山大
	赤外放射計 (L^\uparrow)	Eppley PIR	京大 DPRI
	日射計 (S^\uparrow)	Kipp&Zonen CM-21	弘前大
	熱流板	EKO MF-81(2台)	京大 DPRI
	記録計	Campbell CR10X	弘前大
C	熱流板	EKO MF-81(2台)	農環研
	温湿度計 (比較用)	Vaisala HMP133##	東北大
	記録計	ログ電子 LGC1A	京大 DPRI

2.4 地表面状態の観測

地表面状態の一様性を見る上で地表面温度や土壌水分の分布を把握するのは重要なことである。CAPS2002ではセスナ機からの熱赤外画像撮影により、5m 解像度で地表面温度分布を測定した。本観測では観測領域が狭かったため、地上で放射温度計を使った地表面温度の測定と、CAPS2002で実施できなかった土壌水分の測定を 10月4~10日に行った。

地表面温度の測定は、測定係と記録係の 2 名ペアを組み、地上乱流観測を行っている全ての田で実施した。測定は 1 枚の田で 40 点ずつ、1 日 1~6 セット日中に

行った。1 セットの観測の所要時間はおよそ 90 分であった。土壌水分の測定も 2 名以上が必要で、放射収支・地中伝導熱の測定を行っている N3, S3, C の田に計 8ヶ所の測定用の穴を開け、0-15, 15-30cm の 2 深度それぞれについて夕方に (日によっては朝も) 行った。測定点は穴を開けると水が若干抜けやすくなり、表層で乾燥が進む傾向が見られたので、実際にはこの点を考慮する必要がある。最終日の 10 日には、S3 の田において 20ヶ所の新しい穴を開け、同時に地表面温度と土壌水分を日中継続的に測定した。

これらのデータはマニュアル計測されており、現段階では整理途上で公開に至っていない。表 4 に測定機材を示す。

表 4: 地表面温度, 土壌水分の計測機。

種類	型名	所属
放射温度計	MINOLTA 505	京大 DPRI
放射温度計	CHINO IR-AHOT	京大 DPRI
土壌水分計	Environmental Sensors	
	Moisture Point MP-917	京大 DPRI

3 まとめ

CAPS2003 では前年に引き続き大規模で総合的な大気境界層の集中観測を行った。本観測の焦点は、より細かい 10~100m スケールの構造の把握にある。加えて新たに導入されたドップラーライダーにより、エアロゾルによる境界層内における対流構造の可視化と、それに励起される積雲との関係解明が期待できる。

両年の観測データは合計すると 16Gbyte とさらに膨大な量に達した。データは我々メンバーだけでなく、広く大気境界層を興味対象とする研究者に公開している。データサーバは、ftp://hyarcftp.hyarc.nagoya-u.ac.jp/pub/other_projects/flux_enthu_party/ である。これらのデータを解析することにより、10m~1km の幅広いスケールの対流構造の解明が進むものと期待される。

謝辞

今回の京都大学防災研究所共同研究 (14G-3 “均質な地表面上的不均質なフラックス分布の測定に関する研究”、代表: 樋口篤志) と “大気境界層における乱流フラックス観測研究会” (水文・水資源学会研究グループ) の支援により、集中観測参加者コミュニティの土台が形成できた。また、観測サイトは “琵琶湖プロジェクト” (科学研究費補助金基盤研究 (A) 13305033, 代表: 中北栄一) によって保守が維持されている観測常設地点およびその周辺を使わせていただいた。

またこれらに加えて、戦略的創造研究水循環領域 “湿润・乾燥大気境界層の降水システムに与える影響の解明と降水予測性度の向上 (LAPS)” (代表: 中村健治 名古屋大学水循環研究センター), “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)” (代表: 杉田倫明 筑波大学地球科学系) をはじめとして、集中観測参加者の所属機関からは資金や観測機材の支援を受けた。

最後に、観測サイト周辺の滋賀県伊香郡高月町井口地区の皆さんと土地を借用した滋賀県立伊香高校に感謝します。

CAPS2002/2003で観測された地表面熱収支の特徴

石田祐宣 (弘大・理工学部地球環境学科), 田中賢治 (京大・防災研水資源研究センター), 小野圭介 (農業環境技術研究所), 玉川一郎 (岐大・流域圏科学研究センター), 樋口篤志 (名大・地球水循環研究センター)

1 はじめに

今日では気象学, 水文学, 農学など幅広い分野の研究者が様々な地表面において熱収支観測を行っている. 熱収支とは, 地表面への入力エネルギーである正味の放射量 R_n (短波・長波放射の正味入力量) と出力エネルギーである地中伝導熱 G , 地表面から大気への乱流熱フラックス (顕熱+潜熱輸送量: $H+lE$) の釣り合いのことで, これら各項の測定を熱収支観測という. しかし現実には, 熱収支観測を行うと入力と出力の熱エネルギーが一致しないインバランスの事例が少なからず報告されている. そしてその事例のほとんどでは乱流熱フラックスの過小評価 ($R_n+G > H+lE$) という結果になっている. 現時点でその原因は,

1. 乱流計測機自体の問題
2. 地表面の水平一様性, もしくはフットプリント (乱流フラックスの寄与する地表面) 特異性の問題
3. 大規模対流組織構造によるフラックスの不均一性の問題
4. 傾斜地など地形要因の局地循環の影響

などが挙げられている. 石田ら (2004) ではこの中の 1. の課題に取り組み, 乱流計測機による機差は正しい校正を行えば 10%以内に抑えることができるため, 特定の計測機がもたらす誤差要因は見当たらないという結論に至った.

CAPS では, 平坦で一様均質な地表面として稲刈り後の水田で乱流観測を行ったが, 多点の熱収支観測の結果から, はたして観測領域は「熱的に」も均一であったか確認することが可能である. よってここでは, 先に挙げた 2. の問題点について考え, CAPS2002, 2003 それぞれで観測された熱収支各項と熱収支の均衡の度合について解析を行う.

2 熱収支各項の観測

観測機材の詳細については, CAPS2002, 2003 それぞれの概要報告に書かれているのでここでは割愛し, 熱収支各項の測定方法について以下で簡単に説明する. なお, 後程紹介する熱収支の結果は全て 1 時間平均値を使用した.

2.1 下向き短波放射量 S^\downarrow ・長波放射量 L^\downarrow

CAPS では, これらの各項をそれぞれ日射計, 赤外放射計により直接測定を行った. 特に局地性の強い激しい気象現象が起こらない限り, 基本的に地表面状態とは独立し 1km 程度の距離を隔ててもこれらの放射量が異なることは無い.

2.2 上向き短波放射量 S^\uparrow ・長波放射量 L^\uparrow

これらの項もまた下向き放射量と同様に直接測定された. ただし, 上向きの放射量はアルベドと地表面温度に依存しており, サイトによってどの程度違いが現れるか注意が必要である. CAPS2002 で行われたセスナ機からの日中の熱赤外画像によれば, 観測領域内で 3 程度の地表面温度差が確認されている.

2.3 地中伝導熱 G

地中伝導熱 G は熱流板を用いて測定した. 熱流板は浅い地中に埋設し, センサー板の表裏の温度差を測定することで透過する熱流量を測定する計測機であるが, センサー板と地中を透過する熱量が等しいという仮定が置かれている. また, 地表に近い範囲では温度ムラが大きいため, その局所性や埋め方の違いが測定に影響を与える欠点がある. 今回の観測では, 1 つのサイトにつき 2, 3 枚のセンサーを埋設した.

2.4 乱流熱フラックス

— 顕熱輸送量 H ・潜熱輸送量 lE —

CAPS の中でも重要観測項目である. 超音波風速温度計と赤外線水蒸気変動計を組み合わせると, 渦相関法 (式 1, 2) により直接測定を行った.

$$H = c_p \rho \overline{w'T'} \quad (1)$$

$$lE = \overline{lw'a'} \quad (2)$$

ここで, c_p は定圧比熱, ρ は空気の密度, l は単位質量あたりの蒸発の潜熱, w' は風速の鉛直変動成分, T' は気温の変動成分, a' は水蒸気密度の変動成分を表す. 風速は CAPS2002 の S9, CAPS2003 の E3 を除き 3 成分測定されており, これらのデータでは $\overline{w'} = 0$ となるような座標回転後の鉛直成分 w を計算に用いている. また水蒸気密度 a は, 水蒸気変動計と同じ高さに設置した静電容量式湿度計により, 石田ら (2004) と同じ方法で平均値を用いて簡易校正した値を用いた.

3 結果

3.1 CAPS2002

C4 サイトで測定された結果を図 1 に示す. 最下段を見ると, 熱収支は閉じておらず日中最大 100 Wm^{-2} 程度熱が余っている. C4 サイトは全観測サイトの中では比較的湿潤な地表面状態で, 熱赤外画像によればこの周辺は低温な領域になっているため, 乱流熱輸送量が小さめの値になっているのではないかと考えられる.

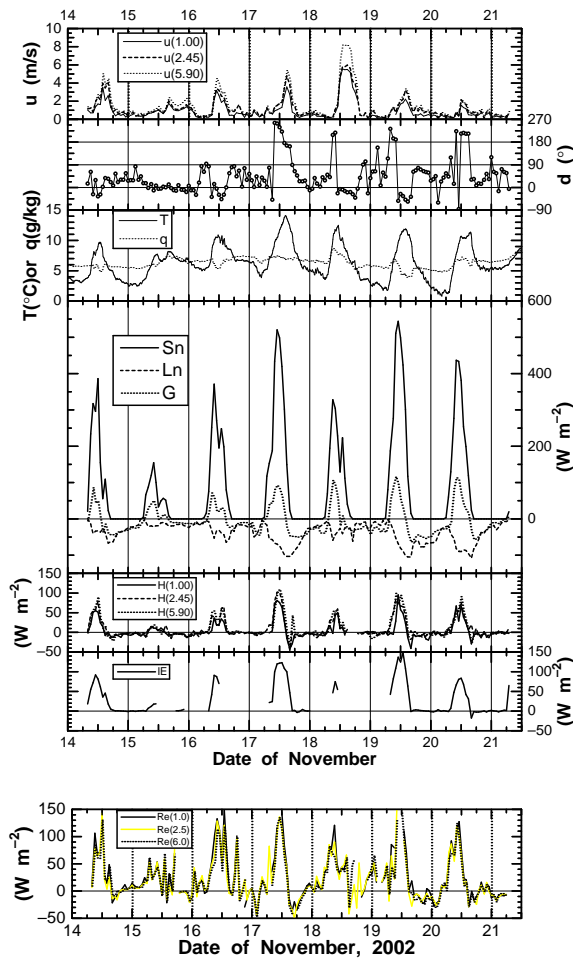


図 1: CAPS2002 で観測された C4 サイトの気象状況と熱収支各項の時系列。最上段: 主風向の平均風速 u , 2 段目: 風向 d , 3 段目: 気温 T ・比湿 q , 4 段目: 正味短波放射量 S_n ・正味長波放射量 L_n ・地中伝導熱 G , 5 段目: 顕熱輸送量 (3 高度) H , 6 段目: 潜熱輸送量 lE , 最下段: 熱収支残差 (3 高度) $S_n + L_n - G - H - lE$ 。

表 1: CAPS2002 のサイト別アルベド。

サイト	アルベド
C1	20.0%
C2	15.8%
C4	10.3%
C5	19.3%

観測領域内の地表面状態の違いは、上記のみならず他の観測項目からも見出されている。測定されたサイトごとのアルベドを表 1 にまとめた。サイトによって最大 10% アルベドが違うことがわかる。観測期間中の最大下向き日射量は約 700 W m^{-2} であったので、場所によって正味短波放射量が最大 70 W m^{-2} 異なる。地表面温度の水平分布は熱赤外画像により明瞭になっているが、時間変化の違いは図 2 に示した地表面温度 T_s

で良くわかる。特に C4 サイトは、日中地表面温度が若干低いという特徴以外に晴天時 (11 月 17, 19, 20 日) の最高温度の到達時刻に遅れが見られる。これは、C4 サイトの土壌が相対的に湿潤だったためと考えられる。

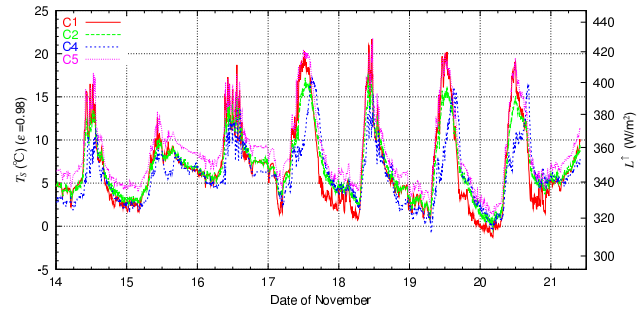


図 2: CAPS2002 で赤外放射計で観測された各サイトごとの地表面温度時系列。右縦軸は対応する赤外放射量。

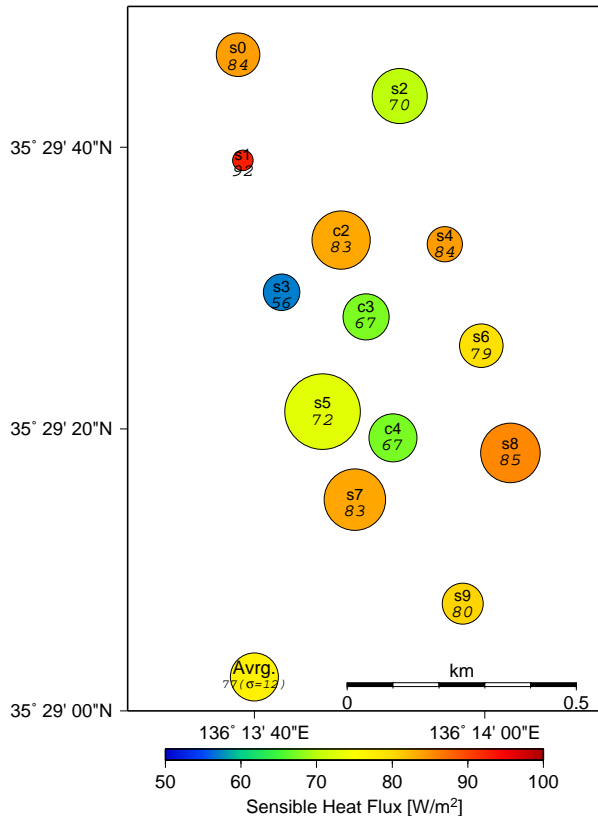


図 3: セスナ機からの熱赤外画像撮影が行われた日の日中平均顕熱輸送量分布。11 月 17, 19, 20 日, 9~15 時のデータを使用。円内の色は平均顕熱輸送量に、円の半径は顕熱輸送量のばらつき (全サイト平均からの偏差の標準偏差) に対応する。左下に全サイトの平均値を表す。

観測領域一帯はおよそ $1,500 \times 500 \text{ m}$ の水田地帯であっ

たが、これらの結果は地表面状態にある程度の違いが存在したことを示唆している。この違いは大きいものではないが、地表面状態の違いを反映している可能性がある。観測期間中、現場付近を観察すると休耕田や転作による畑も若干見られた。また、熱赤外画像に見られた地表面温度の水平分布は、そのまま土壌の湿潤度に関係しているように見えた。図3には、晴天に恵まれた日中(9~15時)の平均顕熱輸送量の分布を示した。この図から、観測領域内に顕熱輸送量のムラも存在することが確認できる。現在の解析段階ではこれ以上の考察は行えないが、今後はこの地表面状態の違いがどの程度サイトごとの乱流熱フラックスの違いを生じる要因になっているのか、また熱収支のインバランスの要因にどの程度なりうるのか、さらに解析を進める必要がある。

3.2 CAPS2003

CAPS2003の地上乱流観測の領域は200×100mで、2002年に比べ約1/10の狭い領域で観測を行った。放射収支と地中伝導熱の時間変化の様子を図4に示す。観測期間は、2002年と比べて約1ヶ月早い時期に行ったので、正味の日射量が晴天時に約 50Wm^{-2} 大きくなっていた。地表面温度も2002年には最高で20だったが30以上を観測した(図省略)。

反射日射量や上向き長波放射量はサイトによって際立った差異が見られず、CAPS2003の観測領域内では地表面状態も大体均一であることが確かめられた。この中では、地中伝導熱が比較的局所的な影響を受けて差が生じ、サイト間に大きい時には 50Wm^{-2} 程度の差が見られた。

次に、図5に示すように中心部(C, N1, S1, W1, E1)で測定された乱流熱フラックスのサイト間比較を行った。顕熱輸送量・潜熱輸送量ともに1時間平均値ではデータがばらつくが、サイト間に系統的な大きな差は見られなかった。現段階では中心部のみのデータであ

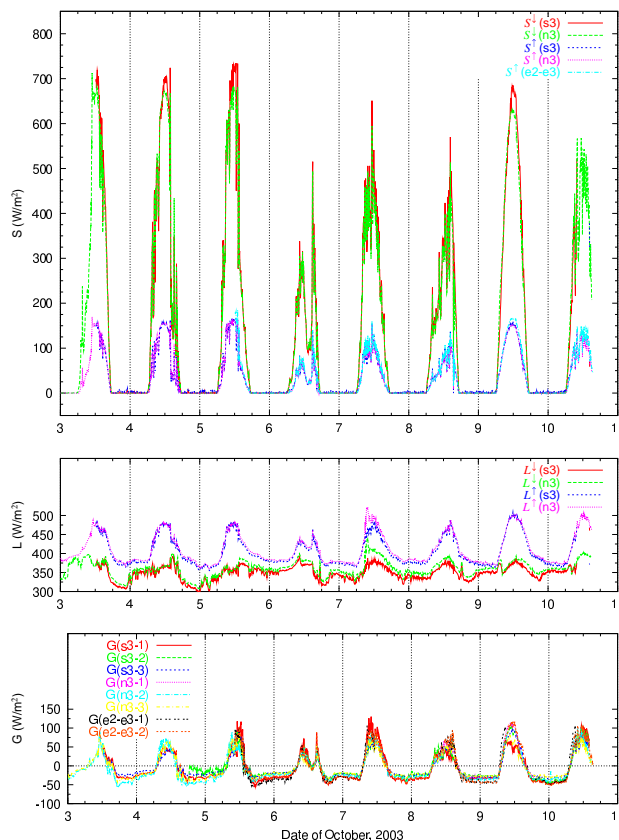


図4: CAPS2003で観測された放射量と地中伝導熱の時系列。上段: 短波放射量, 中段: 長波放射量, 下段: 地中伝導熱。ただし, 上向き放射量は短波・長波とも上向きを正とする。

るが、今後他のサイトについても検証を行う。

CAPS2002では、晴天時の最大値は顕熱輸送量が

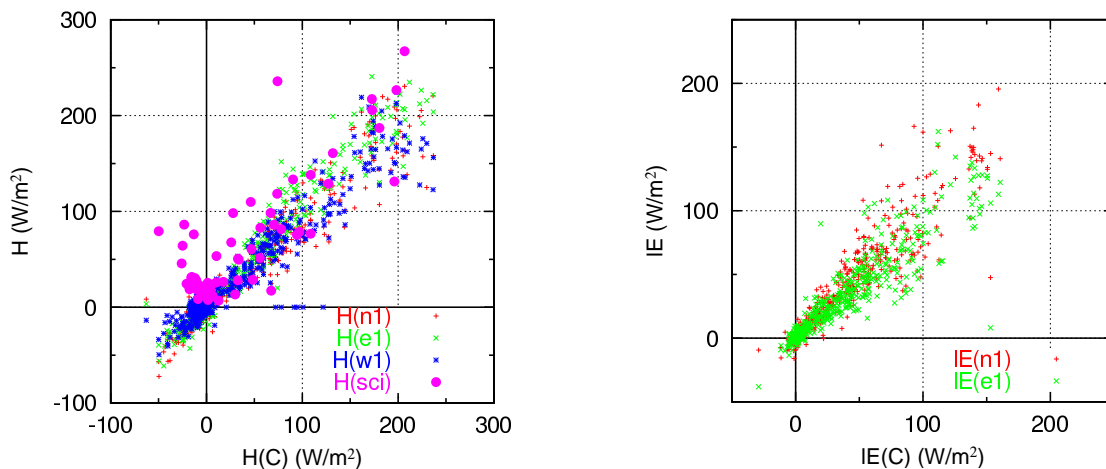


図5: CAPS2003で観測された乱流熱フラックスのサイト間比較。左図: 顕熱輸送量(ただし, sciはシンチロメータのため絶対値), 右図: 潜熱輸送量。

100Wm⁻² で、潜熱輸送量がそれを上回る 150Wm⁻² であったが (図 1), CAPS2003 では顕熱輸送量の最大値が倍の 200Wm⁻² で、潜熱輸送量の 150Wm⁻² を上回っており、地表面が乾燥していることを表している。

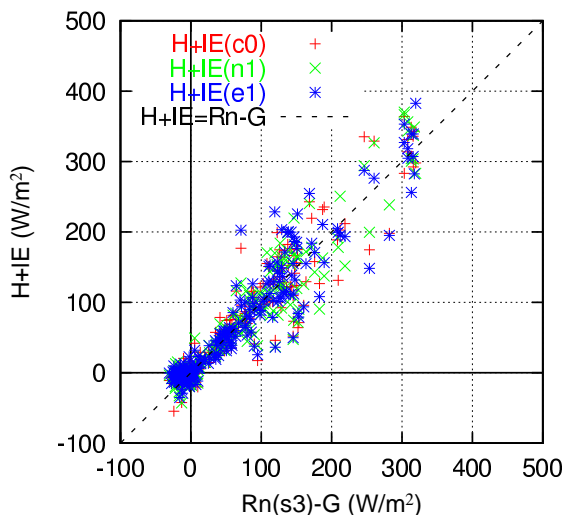


図 6: CAPS2003 で観測された熱収支. R_n は S3 サイトのデータを使用.

各項にサイト間の差が見られなかったので、熱収支に残余項が残らないか確認したものが図 6 である。地中伝導熱に関しては熱流板を埋設した場所によって差が出たため、有効なデータ全てを平均した値を用いた。この図を見て分かる通り、

$$R_n - G = H + lE \quad (3)$$

の関係がほぼ成り立っている。つまり CAPS2003 では熱収支が閉じていた。

4 まとめ

以上 CAPS2002,2003 両年で観測されたデータを元に、熱収支の特徴と独立に測定された各項の収支がどの程度閉じるかを調べた。その結果、CAPS2002 では田ごとの違いが明瞭に出ており、特に熱収支の多くの項を左右する地表面温度に関しては、水平分布のみならず時間変化も場所によっては異なることがわかった。1 点で測定された熱収支は最大で 100Wm⁻² 残差があったが、このことが原因であるかどうかは、今後さらなる解析が必要である。一方、CAPS2003 では CAPS2002 に比べて狭い領域で観測を行ったため、サイトによる違いがほとんど見られなかった。また、熱収支各項をサイトごとではなく、複数のサイトの値を平均して各項を求めたところほぼその収支は閉じることがわかった。

この報告で用いたデータは測定されたものの一部でしかない。CAPS2002 では熱赤外画像による地表面温度の分布と顕熱輸送量分布の関係、CAPS2003 ではマ

ニユアル計測された地表面温度や土壌水分量の分布と顕熱・潜熱輸送量の関係や、渦相関法とは独立して測定されたボーエン比と今回の結果の比較など、いろいろな側面から正確な熱収支把握へのアプローチが望まれる。

参考文献

石田祐宣・松島大・樋口篤志・檜山哲哉・戸田求・浅沼順・玉川一郎・宮崎真・田中賢治・杉田倫明・永井秀幸・田中久則・飯田真一・小林菜花子 (2004): 2001 年筑波大学陸域環境研究センター (TERC) における乱流計測機集中観測: 機器比較と校正による誤差の解析, 水文・水資源学会誌, 17, pp.43-60.

CAPS2003 の熱電対観測網によるプリューム移動追跡の試み

石田祐宣・荒澤良平 (弘大・理工学部地球環境学科), 他 CAPS2003 観測参加者[†]

1 はじめに

晴天で大気が不安定なとき、地表から大気への熱輸送は組織的な対流によることが様々な観測や数値モデルによって指摘されている。特に上下に長い対流構造を維持し続けるものはプリュームと呼ばれている。強不安定時には、たとえ水平一様な地表面であっても地表からの熱輸送に局所性が強くなる。よって、このプリュームの構造や動態を把握することはとても重要である。

過去の研究において、大気境界層中におけるプリュームの輸送の様子を観測するために、時間応答の良い温度計を鉛直または水平方向に並列に設置し、気温変動の測定が行われてきた。これまでの観測結果から、プリュームの移動速度はその高度における風速よりも速く移動することがわかってきている。しかし、移動速度と風速の関係は、Davidson (1974) は風速の約 2 倍、Wilczak & Tillman (1980) は地上 4m の風速の 1~1.3 倍、CAPS2002 の玉川氏の報告では地上約 2.5m の風速と同程度というようにその特徴は観測例によってまちまちであった。そこで、本研究では CAPS2003 観測期間中に地表面に近い地上 1.25m の高度における気温変化を密に測定することによって、水平方向のプリュームの移動速度を求め、その時間における観測高度の風速や地上 5m の風速、安定度との関係を調べた。

2 熱電対の配置と使用データ

CAPS2003 観測期間中、特に乱流計測機が集中して設置された水田において、畦道に平行に格子状になるように水田の中に熱電対センサーを設置した。配列は南北方向 10.0m ごとに 6 点ずつ、東西方向 12.5m ごとに 4 点ずつの合計 24 地点である (図 1)。観測サイトの水田の並びは南北方向から西に約 16° ずれているので、以後観測地点の東西・南北方向はそれぞれ反時計回りに 16° ずつずらした方向を呼ぶことにする。本研究では、東方向に x 座標、南方向に y 座標をとり、北西端の観測点を(1,1)、北東端を(4,1)、南西端を(1,6)、南東端を(4,6)と呼ぶ。

本研究では乱流構造を温度計測によって把握するため、時間応答性の良いセンサーが必要となる。そこで温度測定は時間応答性の良い銅-コンスタンタン熱電対細線を用いた。今回の観測では、データロガーから観測地点まで被覆された 0.65mm の太線を敷設し、各格子点において地上 1.25m の高さに固定して、先端部において太線に

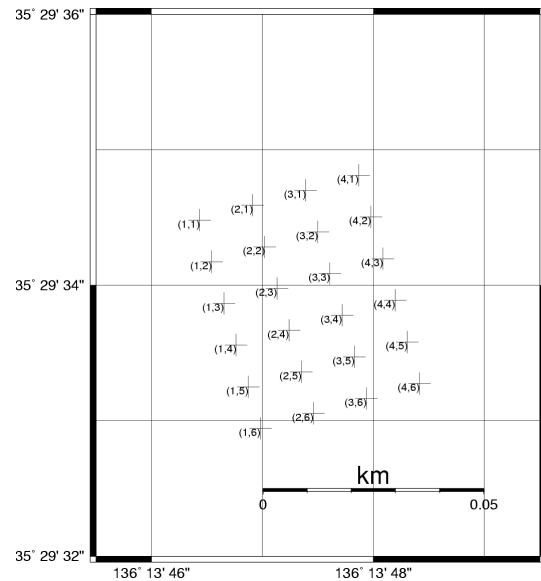


図 1: 熱電対の配置。

40 μ m の細線を結線した。気温データは 0.1°C 単位で 2003 年 10 月 3 日 17 時から同年 10 月 10 日 17 時にかけて 10Hz 間隔で連続測定された。また地上乱流計測の C サイトは格子点 (2,3) と同一の地点で、解析には設置された超音波風速温度計で測定された地上 1.25m、5.00m における風向・風速データも併せて使用した。

3 解析方法

はじめに、解析対象の基準点を(2,4)と定め、その他の格子点を通るような風向 (八方位) を考え、その方位角を求めた。そしてそれぞれの方位角において前後 5° の範囲内となる平均風向時の気温データを選別した。その中から欠損不良データを除いた合計 30 時間分のデータを解析に使用した。

乱流組織は変形しながら移動するため、移動速度を求めるには気温変動の生データを風上から風下へ並べ、観測点間の距離を目立った変動部分(谷にいわれるランプ構造など)の時間差で除する方法が望ましい。過去の研究ではコヒーレンスによる解析も行われている。本解析では比較的簡単な方法として、測定点ごとの気温変動のラグ相関をとり、測定点間の距離を相関が最も高いタイムラグで割り、移動速度を求める。

気温変動は幅広い周波数帯を持つので、閾値にラグ相関を取っても相関係数が低くなる可能性がある。変動の卓越周波数は大気の安定度と密接に関係しており、大気が不安定であるほど卓越周波数は小さく(変動周期が短く)なることが知られている。そこで、ラグ相関を取る前

[†]参加者は他の報告を参照

に気温変動のスペクトル解析を行い、スペクトルのピークが3～5分周期(約 0.005Hz)を閾値として高周波側か低周波側かによって、相関を取るデータブロックを10分間か60分間かに分けた。

3 結果

10分間データブロックを用いたラグ相関結果の一例を図2に示す。この時間帯では南西から風が吹いていたので、対象となるデータは風上側から順に(1,5)、(2,4)、(3,3)、(4,2)の4地点の気温データが使用されている。ラグ相関がピークとなるときの相関はすべての観測点において0.99以上の非常に高い相関となっている。このデータでは、ラグ相関のピークが平均5.67sごとに現れている。地点間の距離は16mであったのでプルームの移動速度は2.34m/sと推定される。

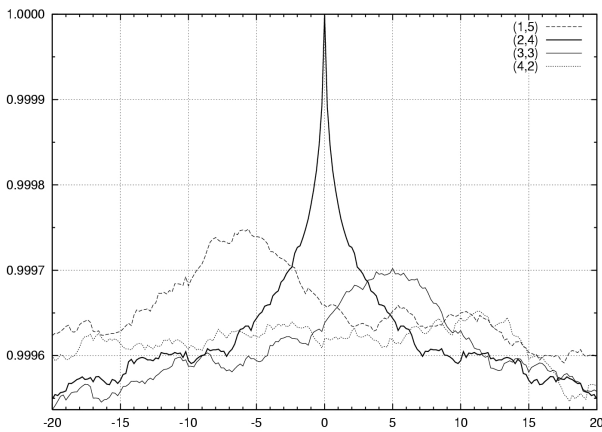


図2：地点間ラグ相関の一例（2003年10月7日14:20～14:30を基準として）。横軸：ラグ(sec.)，縦軸：ラグ相関係数。

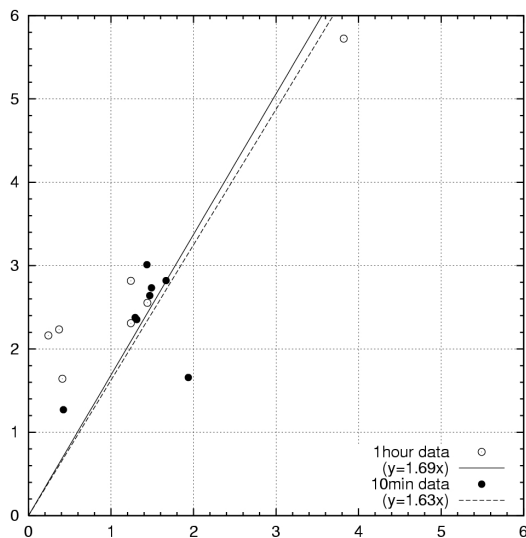


図3：地上1.25mにおけるプルームの移動速度と風速の関係。横軸：風速(m/s)，縦軸：移動速度(m/s)

このように明瞭にピークが確認できた不安定時のデータは10分間データブロックが8セット、60分間では7セットのみが残った。このように求めたプルームの移動速度と同高度の風速とを比較した(図3)。1つのデータを除く全てで同高度の平均風速を上回っており、データブロックの時間の違いはほとんど見られず移動速度の対風速比は約1.7であった。ただし、0.5m/s以下の弱風時には風速とは独立になる傾向が見られた。同様に地上5mの風速と比較したところ、移動速度対風速比は約1.1倍であったので、ほぼ地上5mの風速と同程度の速度でプルームは移動しているといえる(図省略)。

Wilczak & Tillman (1980)では、移動速度対風速比と安定度との関連性を調べているが、安定度によってこの比が変わることはなかった。この傾向は今回のデータでも確認され調和的な結果である(図省略)。

4 まとめと今後

本研究ではプルームの移動速度を調べるため、地上で格子状に熱電対を展開し、得られた気温データのラグ相関を求めた。その結果、

- 地上1.25mのプルームの移動速度は同高度の風速の約1.7倍、地上5mの風速と同程度
- Wilczak & Tillman (1980)と同様に安定度とは無関係

ということがわかった。

今回の解析では、単純なラグ相関によってプルームの追跡を行ったが、生データによる確認は一部でしか行っておらず全てのデータで確認する必要がある。また、CAPS2003では地上2.5mに多数の超音波風速温度計が15～40m間隔で11点、地上5mには90～110m間隔で3点設置されている。そのみならず、ドップラーソーダ・ライダーの観測も行われているので総合的にこれらのデータを解析して立体構造を把握することが今後の課題である。

参考文献

Davidson, D. S. (1974): The translation velocity of convective plumes, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **101**, pp.131–141.

Wilczak, J. M. and J. E. Tillman (1980): The three-dimensional structure of convection in the atmospheric surface layer, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **37**, pp.2424–2443.

CAPS2003 ドップラーライダーによる観測

山下 和也(北大院 地球環境), 藤吉 康志(北大 低温研), 他 CAPS2003 参加者

1. はじめに

混合層内で形成される積雲は、大気 - 陸面相互作用の重要な要素である。その発達・消滅過程の解明にあたり、積雲の下に位置する境界層も含めた三次元構造を観測する必要があるが、従来の測器では不可能であった。そこで我々は先に、高速走査型の三次元ドップラーライダーを導入した。このドップラーライダーは、高速走査可能なミラーを通して、エアロゾルを散乱体とするパルスレーザーを送信し、散乱波の強度と、ドップラーシフトを検出することで、上空のエアロゾル密度分布や、風向風速の三次元分布を計測できる装置である。今回、CAPS2003 観測サイトにドップラーライダーを設置し、乱流観測と並行して観測を行った。観測期間中に発生した晴天積雲について、その形成の過程の可視化を行った結果を報告する。

2. 観測概要

ドップラーライダー設置場所は、滋賀県高月町の伊香高校千田農場(北緯35度29分36秒、東経136度14分53秒)である。ドップラーライダーの送信波長は、1.5 μm 帯である。最大レンジピンは 80 であり、今回は主に、分解能 25m、探知距離幅 2kmの観測を行った。スキャナのスキャン方法により、二つの観測モードがある。一つは、仰角を一定にして、方位角方向に 360 度回転させる、PPI(Plan Position Indicator)スキャンであり、もう一方は、方位角を一定にして、仰角方向に 180 度回転させ、鉛直断面を得る RHI(Range Height Indicator)スキャンである。今回の観測では、主に 20 分を一単位として観測スケジュールを組んだ。観測の一単位の内容を以下に示す。

- 仰角 1 度の PPI スキャンを連続 2 回
- 仰角 3 度、5 度、20 度の PPI スキャンをそれぞれ一回づつ
- 方位角 150 - 330 度、170 - 350 度、190-10 度、210-30 度の RHI スキャンをそれぞれ一回づつ

スキャンスピードは、4.5deg/s とした。すなわち一回の PPI スキャンは約 80 秒、RHI スキャンは、約 40 秒で完了する。またドップラーライダーから 450m 以内の範囲は計測が出来ない。よって観測領域は、ドップラーライダーからの距離が 450m ~ 2450mの範囲である。表 1 に、観測期間中、昼間の時間帯で、データが正常に取得できた日時を示す。

表 1 ドップラーライダー観測日時

2003年	観測時間帯 (JST)
10月2日	全時間帯 ()
10月3日	1354 ~
10月4日	1409 ~ 1413, 1540 ~
10月6日	0830 ~ 1208(), 1640 ~
10月8日	1434 ~
10月9日	1334 ~

印の時間帯は変則的なスケジュールを含む。

3. 結果と考察

図 1 に、10月4日 16時 17 分の散乱光 a)S/N 比、及び b)ドップラー速度の鉛直断面を示す。方位角 210 - 30 度の断面であり、図 1 の右側が 210 度である。ドップラー速度は、ドップラーライダーから遠ざかる向きを正としている。この時間帯、観測地点付近は晴れで、目視により積雲が確認できた。図 1 a)を見ると、高度 1.4km 付近に積雲による強い散乱領域がある。積雲の中に最も強い散乱強度の領域(高度 1.4km)と、その下方の 100m 程度の幅にやや弱い散乱領域(図 1 a 中矢印 1)が存在しているのが分かる。さらに図中の矢印 2, 2' で示した各部分は、エアロゾルによる散乱領域であり、上昇流が存在し、エアロゾル濃度の高い下方の空気が積雲に向かって輸送されている過程と考えられる。

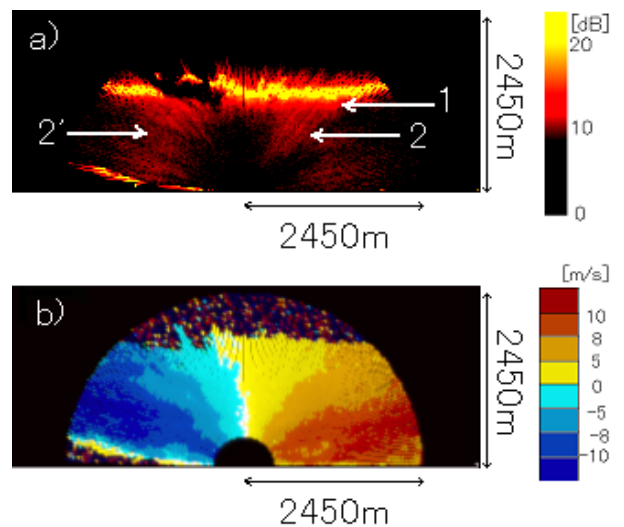


図 1 ドップラーライダーで観測した積雲
a)S/N 比 b)ドップラー速度
(10月4日 16時 17分 210-30度 鉛直断面)

CAPS 2002/2003 データ公開，および今後の研究の方向性

樋口 篤志¹・玉川 一郎²・石田 祐宣³・田中 賢治⁴

(1: 名大・地球水循環研究センター)，(2: 岐大・流域圏科学研究センター)，
(3: 弘大・理工学部地球環境学科)，(4: 京大・防災研水資源研究センター)

1. はじめに

ここでは，CAPS2002/2003 の集中観測で取得されたデータのアーカイブ状況とデータ公開に向けての状況について記載する．観測の概要・各 components で得られた初期成果についてはここでは触れない．また，論文等では記載できない状況についても簡潔に記載する．

2. データ公開

データ公開，あるいは公開に耐えうるデータセット作成に関してのポリシーは以下のとおりである：

- 基本的に CAPS2002/2003 で得られたデータは全て公開する．
- データ公開用の PC-UNIX (Linux)¹ を用意し，そこにデータを収容する．level0 (生データ) から共通 data format (石田氏による解説を参照) に変換されたデータセットを level1 データと定義し，別 directory に置き，処理が終了したことを示した．
- データ処理に関しては，UNIX に詳しい研究者間で原則として，データ公開用の PC-UNIX で処理を施すか，各自の計算機で処理が終了したデータを転送した．
- 乱流データに関しては，standard data (level1 とほぼ同義) を別の場所に置き，さらに readme file を同 directory に置いた．
- backup も兼ねて mirror server² (こちらは http base で公開) を岐阜大に設定し，データ更新がなされた際には mirroring をかける処置を施した．
- standard data に関しては名古屋大学地球水循環研究センター official な ftp server³ に移動し，処理が完全に終了し，誰でも使用可能な状態となったことを内外に示した．

これらの処理は，段階的に行われたというより，数回の core member の出張 (言いかえれば缶詰状態にすることによって) 一気に実現した，と記載した方が表現としてはより正確である．この点は記載しておく必要がある．topdown 的な project ではある種業務として行われる処理が，bottom up 的な本研究のアプローチでは逆に forcing は各研究者の置かれている事情に大きく依存し，様々な業務に忙殺される 30 代の研究者では，こうした形 (一ヶ所に集中し，一気に処理をする) でしかデータ整理ができにくい現状が見え隠れする．

2.1. CAPS2002 データアーカイブ

2004 年 4 月現在，ほぼ全ての観測項目の quality check [QC] は終了し，level0 (生データ) および level1 (QC 終了後の物理量に変換された値)，および standard dataset (共通の data format に統一されたデータセット) が既にアーカイブ済である．ただし，これらのデータセットも観測終了後速やかに QC が行われたわけではなく，前述したように主要メンバーを名古屋大学あるいは京都大学へ出張で呼ぶことにより，集中的にデータ変換大会，および解析大会 (解析を行わない限り，必要な情報付記は行いがたい) を行った結果であることをここに付記しておく．

2.2. CAPS2003 データアーカイブ

同じく 2004 年 4 月現在，多くのデータ，特に同一ロガーで記録された観測要素は物理量換算が行われ，時刻ズレの問題も発生せず非常に良好なデータセットが構築されつつある状況にある．ただし，手つかずのデータ，特に移動観測で取得された表面温度・土壌水分量に関しては多くが未だに紙ベースの状態で保管されている．

2.3. データ公開にむけての活動

CAPS2002/2003 で得られたデータ量が短期観測としては膨大 (CAPS2002 では level0 データで約 8GB) であり，anonymous ftp server で zip で圧縮されていても気楽に全てのデータを download し，全ての期間のデータの解析を行う，という環境ではない研究者も多いと思われる．また，乱流データをより多くの研究者あるいは学部の演習 level でも扱えるようになるためにも，統一されたデータ形式のデータをデータセットとして配布することは乱流研究に興味を持つ学生の拡大につながる．

以上の背景から，本報告の第一著者を代表とした科学研究費・データベース申請を 2004 年度に行った．計画としては 2 年計画であり，初年度にこれまでにデータベース化されていない計測項目 (特に CAPS2003 で実施された移動観測データのデジタル化) を重点的に行い，2 年度にデータを CD-ROM/DVD-ROM セット (この際に 2001 年に実施された TERC 乱流計測機比較観測実験で得られたデータも含む予定である) とし，関係機関および気象学会・水文・水資源学会研究集会で配布する予定であった．

残念ながら，本申請は採択されなかったが，各自のファンドを利用して，この一連の観測で得られたデータの配布を考える必要がある．ともすれば埋もれがちなこうしたデータ公開は欧米では当然の行為であり，こうした活動に対しての日本の science community のより深い理解を期待する．

3. 今後の研究の方向性

CAPS2002/2003 の一旦の取りまとめとして，2004 年 2 月 21 日に京都大学防災研究所水資源研究センター演習室にて研究集会を実施した．年度末，かつ土曜日であるにもかかわらず，多くの関係者が参加した．当初の予定時間を大幅に超過し，活発な意見交換がなされた．以下の方向性はその中の議論で得られた内容をこの報告稿の第一著者である樋口が個人的にまとめたメモを基に書き換えたものである．一部誤解があると思われるが，大筋としては参加者の合意は得られたもの，と理解している．

3.1. CAPS2002/2003 データを使った研究の方向性

短期的な視点で見た場合，以下の項目が target となるであろう：

- 乱流自身の構造に関して

(構造関数等：items: SAT, Scintilometer, Sodar)

それぞれの計測機が捉えることができる水平・鉛直スケールが異なることを逆手にとった解析が可能であると思われる．

- Plume detection

(CAPS2003 での熱電対網で初期成果が出た。
items: SAT, 熱電対網, DPR1 Sodar)
SAT データに関しては限られた期間の生データを見ている
のみである。

本来のこの観測の目的 (*Catch A Plume by SATs*) を考
えたとこの研究の方向性が本流であるともいえる。他の研究
分野との共同研究が必要か? 乱流データを音声に変換して、
音を流して聴覚で判断する等の音響工学分野との共同研究も
視野に入れる必要があるのかもしれない。単に plume を機
械的に定義し、一般風に流すのみでも移動が見える可能性も
CAPS2003 での水平スケールでは有り得る。

・CAPS2002 で見られた顕熱分布のパラツキ

渡辺・神田 (2002) の結果を観測で追従した。
ただし、その逆 (観測結果を model で示した) は程遠い
CAPS2003 では熱収支が良く閉じていたことを考えると、
(乱流計測よりも大きな) 大規模場の影響と、有効エネルギー
(Rn-G) の空間的なパラツキが本質的に顕熱のパラツキを決
定していると言う可能性も否定できない。CAPS2002 では
航空機観測による表面温度計測も実施されており、この解析
結果が重要な意味を持つと思われる。また、CAPS2003 で
は CAPS2002 の反省点を踏まえ、表面温度土壌水分量の移
動観測を実施しており、それらのデータを有効に使うために
両者の寄与率、といった parameter を提供できる可能性を
持っている。

他にも高空間分解能衛星データ (e.g., IKONOS) を使った
解析という可能性も研究集会中に意見として出されており、
使用できる衛星データがどの程度存在するのか、調べる必
要がある。

3.2. 中期的に見た研究の方向性

・計測手法・フラックス計算方法の改良

これは永遠に努力が必要であろう。ただし、SAT に関し
ては既にある意味枯れた計測機とも言え、水蒸気/CO₂ 変動
計に関しても最新の測器を使用すればそれほど大きな問題が
発生しない (石田ほか, 2004) 点を考慮すれば、なんらかの観
測技術上のブレークスルーが必要である。ただし、短期的な
成果を求めたがる現在の大学・研究所の運営方針を考えると
暗然たる気持ちになるのは我々ばかりではあるまい。

計算手法の改良に関しても、多くの try and error が必
要とされる。国際誌に掲載された手法を使う、というだけ
では本質的には上記ブレークスルーにはつながらず、CAPS
oriented な originality が少なくとも近接分野の研究者から
期待されているのは明らかであり、我々は hardware のみならず、
algorithm あるいは補正法に関しても多くの期待、言
いかえれば要求を求められている点を肝に命じるべきである。

・CO₂/エアロゾル/雲 (ABL) につなげる

研究の志向性としては、ここに書かずとも既にその方向
に向かっていることは確実である。CO₂ に関しては FLUX
NET に代表されるように、global に正確な NPP を計測 (こ
の内容に関しては小野氏による解説がこの報告に含まれる)
し、地球温暖化に対しての植物・生態系の応答、衛星による
global monitoring の validation data としての役割を果た
している。

エアロゾル/雲 (ABL) とのリンクは、大気が連続体であ
ること、また、下層からの水蒸気供給は常に ABL を通じて
行われることから、同じく当然の指向である。ただしその方

向性は地域によって異なり、例えば安定成層下での ABL の
振舞に特化しつつある欧州と、CBL に focus をあてるプロ
ジェクトが多く見られる日本、という見方ができる。その際
に、雲生成に重要な役割を占めるエアロゾルに注目が集めら
れることも志向としては正統的な経路であると言える。様々
な思惑、条件が重なったとはいえ、CAPS2003 に北大低温研
の藤吉教授の雲・降水研究グループが参加したことは、偶然
ではないと考えるべきであろう。ただし、両者 (この場合エ
アロゾル研究者も含めて 3 者) の共通認識を深める努力が必
要不可欠であり、例えば entrainment という専門用語ひとつ
をとってみても、雲・降水システム研究者と ABL 研究者で示
す向きはまったく逆である (対象が自由大気であるか、ABL
であるかの違い)。こうした共通認識の積み上げが今後さらに
必要となる。特にこの研究グループが担わなければいけない
事象として、“plume” という専門用語が示すスケール (時間・
空間スケール) を Stull の教科書以降の成果を踏まえ、より鮮
明かつ明確に再定義する必要があるのではないだろうか?

・数値モデルでの再現

これが最も charenging である。一見すると、Dynamic
LES に代表されるような複雑条件化での最適な計算手法、
およびその計算解像度に目を奪われがちであるが、sub-grid
scale での現象はなんらかの形 (explicit or implicit) で pa
rameterize する必要がある。究極的につめていけば、分子粘
性スケールの手前までは grid 化するか (10 年経てば実現で
きる、という楽観論は置いておき) 我々の知見をうまく pa
rameterization させなくてはならない。前述したように現在
はモデル研究が先行しているように見えるが、この観測結果
をモデルでは再現しておらず (再現しているのは、顕熱分布
がランダムに動く、と言う点のみである)、真の意味での再
現実験とは言えない。

第一著者である樋口がモデルに明るくないため、どう攻め
ていけば良いのか? という点に関しては、正直言って良くわ
からない、というのが実状である。ただし、数値実験である
程度の再現性が得られなければ、物理現象としての乱流過程、
とくに大気-陸面 (海面) 相互作用を真の意味で理解したと
は言えず、モデル研究を行う研究者、これはユーザーではな
く、開発・改良を施すことができる研究者による発展を期待
したい。

4. おわりに

成行き上、こうした文章の取りまとめの苦手な人間でかつ
乱流研究の専門家ではない樋口がこうした文章を書くことにな
るとは思いもよらなかった。しかし、完全な専門ではない
からこそ、かえって素人的に見えてくる現象・問題点もあり、
その部分を素直に書いてみたつもりである。内容に関してい
たらない点は遠慮なく指摘していただければ幸いである。

引用文献

石田祐宣ほか (2004): 水文・水資源学会誌, 17, 43-60.
渡辺力・神田学 (2002): 水文・水資源学会誌, 15, 396-405.

¹ftp://higu.hyarc.nagoya-u.ac.jp/pub/datasets/
²http://tama.cive.gifu-u.ac.jp/~tama/CompTURB/2002-
mirror
http://tama.cive.gifu-u.ac.jp/~tama/CompTURB/2003

³ftp://hyarcftp.hyarc.nagoya-u.ac.jp/pub/other_projects/
flux_enthu_party/

FLUXNET が寄せるCAPS への期待

小野圭介 (農業環境技術研究所), CAPS 観測グループ

1. FLUXNET からの要請

生態系と大気間の水蒸気や CO₂ 交換量が時間的、空間的にどのように変化しているのかを知るために、チャンパー法や微気象学的手法が広く用いられている。CO₂ フラックスの測定においては、Open-path IRGA (Infra Red Gas Analyzer) のプロトタイプが1980年代に実用化されて以降、微気象学的手法の一つである渦相関法が主流となり現在に至っている。渦相関法のチャンパー法に対するメリットは、時間分解能が高いこと、sink-source の空間的なばらつきをある程度平均化できること、測定自身が環境に及ぼす影響が小さいことが挙げられる。また、同じ微気象学的手法である傾度法や熱収支ボーエン比法に比べ、用いる仮定が少ないため、より直接的にフラックスを計測することができると言われてきた。確かにこれらは間違いではない。しかし、FLUXNET が目指している年間のCO₂ 純交換量 (NEE, Net Ecosystem CO₂ Exchange) を推定するに当たって、現在の渦相関法の測定・計算方法やその精度は十分だろうか。

植物群落上の渦相関システム (群落下貯留量評価も含む) で測定される NEE は、光合成と呼吸との差し引きの結果である。したがって、わずかな測定誤差が NEE の符号 (吸収 放出 or 放出 吸収) を変えてしまうことも十分にありうる。ところが、残念ながら、現在広く使われている測器とデータ処理をもってしても、わずかではない大きさの測定誤差が含まれていることはどうも確からしい。また、ここで扱う問題とは別に、測定データの品質管理と棄却データの補間の方法によって、年間 NEE が -185 から 245 gCm⁻²year⁻¹ の幅を持つ例も報告されている (Anthoni et al, 2004)。

FLUXNET 関係者は、これらの誤差を小さくすることや、その大きさを見積もることに苦心しているが、彼ら自身が長期連続測定 (EUROFLUX では 3 年以上が推奨されていた) に従事しているため、それらを解決する時間的な余裕を持ちあわせていないのが現状である。ただ、現在指摘されている問題点の多くは、その解決のために必ずしも長期連続測定が必要なわけではない。理想的な条件下における数日から数週間の集中的な測定によって新たな解決策を提言できる可能性は十分にある。CAPS2002/2003 では CO₂ フラックスの測定は行われなかったが、スカラーが鉛直風速と別のセンサーで測定されるシステムが内包する問題は、潜熱フラックスでも確認することができるので、今後の解析によって、新たに問題提起を行い、具体的な解決策を提案することも十分に可能である。乱流の専門家も集う本研究グループに対して、FLUXNET が寄せる期待は決して小さくない。

以下に、CAPS2002/2003 形式の観測やそこで得られたデー

タから新たな知見が得られそうな例として、フラックス (コスペクトル) の高周波域におけるパワーの減衰について、その不確実性と NEE に及ぼす影響を紹介する。

2. コスペクトル高周波域の減衰が NEE に及ぼす影響について

鉛直風速とスカラー量との covariance がフラックスに相当するというのが渦相関法の基本原理である。ただし、鉛直風速とスカラーが無限小の volume で同時に測定されること、フラックスに寄与する周波数帯において測定システムが十分なレスポンスと安定性を保持していることが暗黙に仮定されている。しかし、実際の測定でこのような条件が満たされることはない。SAT も IRGA も測定部に volume を持ち、両者は物理的に離れているので、同じ変動を同時にサンプルできない。また、両者で反応速度や遅れ時間が異なる場合もある。これらはいずれも、low-pass filter としてシステム全体の時定数を大きくし、covariance を過小評価する方向に働く。例えば、単純に鉛直風速とスカラーの信号が 1 サンプルずれることによって、フラックスが平均で 7% 過小評価される (顕熱フラックスの場合、図 1)。Closed-path 方式の測定システムでは、考慮すべき low-pass filter がさらに増える。

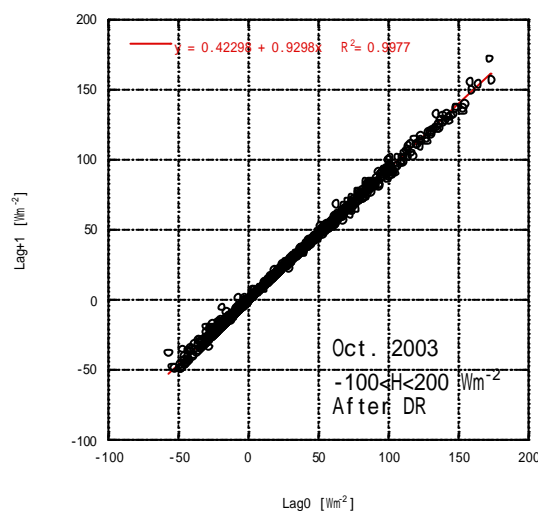


図 1 鉛直風速時系列に対して温度時系列を 1 つ遅らせて計算した顕熱フラックス。

横軸は遅らせずに計算した顕熱フラックス 2003 年 10 月のつづき市内水田 (このときは裸地) で測定された。サンプリングは 10Hz。測定高度は約 3m。安定度でスクリーニングはしていない。

これらの low-pass filter の伝達関数が求めれば、測定されたコスペクトルを伝達関数で除することによって減衰前のコスペクトルを復元することができる。Moore (1986) は、測定されたコスペクトルの代わりに Kansas Experiment で求められた関数形を用いたが、測定場所のコスペクトルが必ずしもこの関数形と相似である保証はないので、平均化時間内の代表的なコスペクトルを個々に求めてそれを用いる方がより正確である。Horst (1997), Massman (2000) も、基本的には Moore (1986) を踏襲している。いずれにしても、これらの方法でコスペクトルを復元するためには、個々の、もしくはシステム全体の伝達関数を推定しなければならない。これらの文献では、理論的、実験的に求められた伝達関数が明らかにされているが、実測データでの検証は行われていない。他の研究 (とくに closed-path 型において) でも、個々の伝達関数の積み上げによって減衰量を正確に説明できた例はほとんどない。よって、これまで実証されることがなかった個々の伝達関数の妥当性を検討することには大きな意味があり、さまざまな測器をそろえることができる本研究グループなら、実験的な観測を行い、これらについて新たな知見を得られる可能性が高い。

Low-pass filter は、CO₂ フラックスの測定を通して必然的に NEE の見積もりにも影響を及ぼす。しかし、影響の与え方は、顕熱、潜熱フラックスのように単純な過小評価とはならない可能性がある。なぜなら、NEE は昼夜で符号が逆転する CO₂ フラックスの積算であり、一般的に、コスペクトルがより高周波側にシフトする日中に減衰が顕著になると考えられるからだ。Moncrieff et al (1996) では、low-pass filter のような selective systematic error が 10% 含まれた NEE を 44 日間積算することによって、誤差は 2% に増大することが示されている。

さらに、open-path 方式で測定された CO₂ フラックスには、いわゆる WPL 補正 (Webb et al, 1980) が必須であるが、この補正には水蒸気フラックスと顕熱フラックスの両方が必要になる。水蒸気フラックスは WPL 補正適用後の値でなければならないので、水蒸気フラックスに対する伝達関数が正しく評価されていないと CO₂ フラックスまで影響を及ぼすことになる。さらに悪いことに、大気中の CO₂ 濃度が、乾燥空気の濃度、水蒸気の濃度に比べて小さいので、補正項が測定された CO₂ フラックスと同じオーダーになることも珍しくない。Closed-path 方式では、これまで WPL 補正は必要ないとされてきたが (Aubinet, 2000)、最近では水蒸気フラックスに関する補正項は見積もる必要があるという見解が一般的になりつつある。

NEE の見積もりには他にも不確定な部分が多く残されており、生態学にとどまらず、温暖化対策という政治的な領域から求められている精度に対して、FLUXNET の観測が十分に込められているとは言い難い。本研究グループには、open-path、closed-path の両方式で CO₂ フラックスの測定経験が豊富な研究者もいるので、今後の方向性として、伝達関数の再評価を

含めた渦相関 CO₂ フラックスの高精度化と年間 NEE への影響評価については外すことができないように思われる。

† <http://www.daac.ornl.gov/FLUXNET/>

引用文献

- Anthoni et al, 2004. Agric. For. Meteorol. 121.
Aubinet et al, 2000. Adv. Ecol. Res. 30.
Horst, 1997. B-L M. 82.
Massman, 2000. Agric. For. Meteorol. 104.
Moncrieff et al, 1996. Global Change Biology 2.
Moore, 1986. B-L M. 37.
Webb et al, 1980. Quart. J. Roy Meteorol. Soc. 106.