

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)

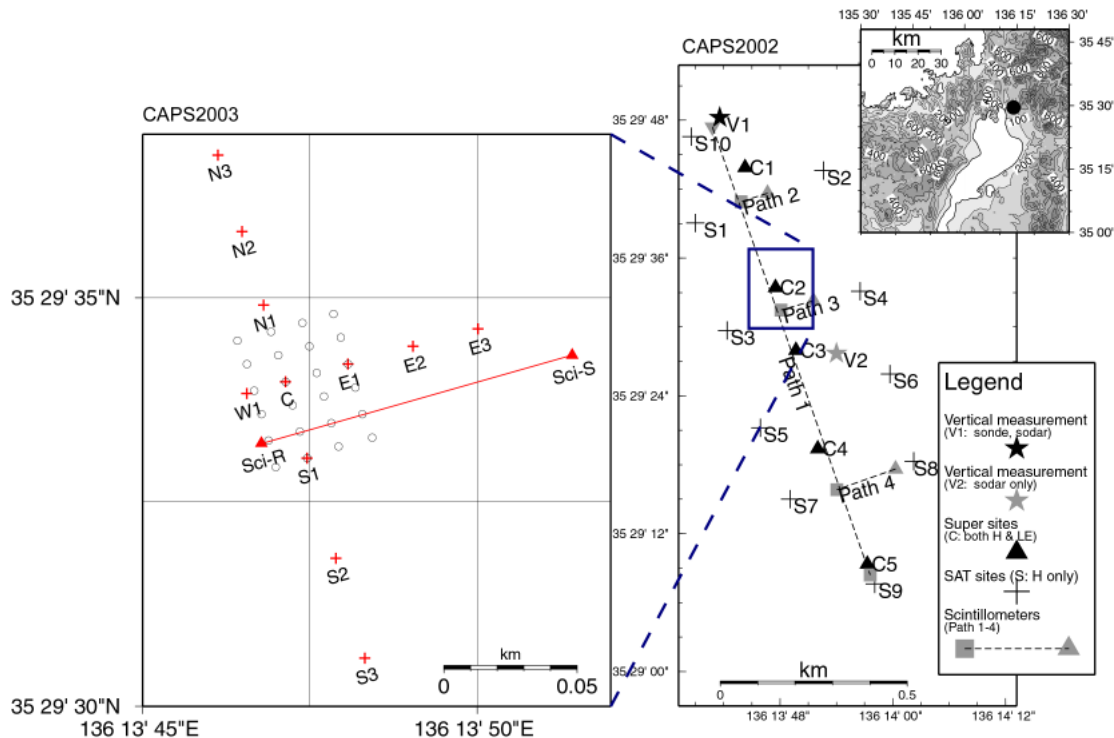


図1: CAPS2002,2003乱流観測機材の配置図。右図: CAPS2002の観測機材配置図 (詳細は玉川氏の報告参照), 左図: CAPS2003の配置図 (ただし地上乱流計測機のみ); * : シンティロメータ送受信機; + : SAT設置箇所; N3・C・S3: 鉛直3点測定点; C・S1・N1・E1・W1: 水蒸気変動測定点, ○: 熱電対設置箇所。

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 ではセサ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 “均質な地表面上下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) 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。