

# 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,  $\rho$  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  $100 \text{Wm}^{-2}$  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.

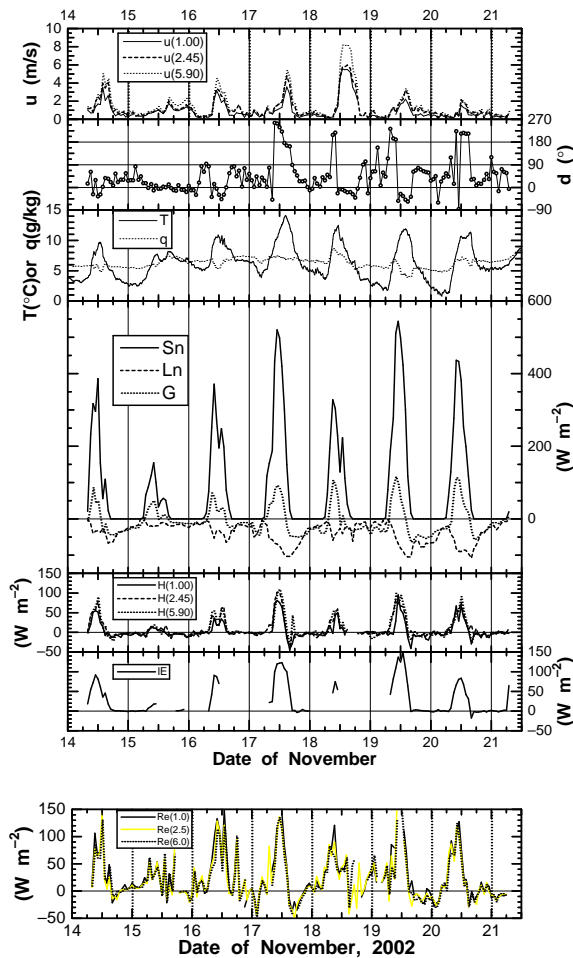


図 1: CAPS2002 で観測された C4 サイトの気象状況と熱収支各項の時系列。最上段: 主風向の平均風速  $u$ , 2 段目: 風向  $d$ , 3 段目: 気温  $T$ ・比湿  $q$ , 4 段目: 正味短波放射量  $S_n$ ・正味長波放射量  $L_n$ ・地中伝導熱  $G$ , 5 段目: 顕熱輸送量 (3 高度)  $H$ , 6 段目: 潜熱輸送量  $lE$ , 最下段: 熱収支残差 (3 高度)  $S_n + L_n - G - H - lE$ 。

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  $700 \text{ W m}^{-2}$  であったので、場所によって正味短波放射量が最大  $70 \text{ W m}^{-2}$  異なる。地表面温度の水平分布は熱赤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。

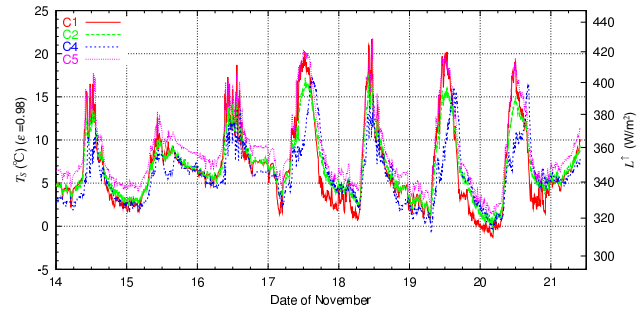


図 2: CAPS2002 で赤外放射計で観測された各サイトごとの地表面温度時系列。右縦軸は対応する赤外放射量。

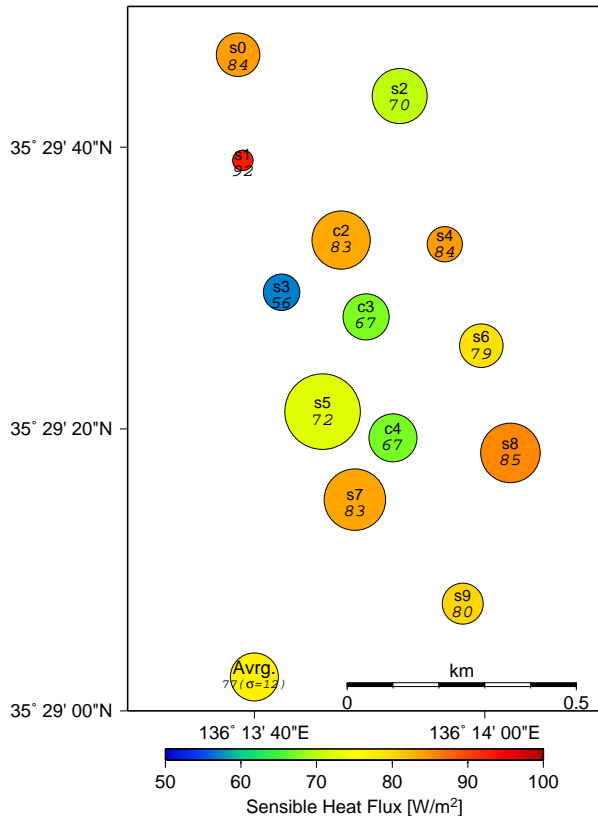


図 3: セスナ機からの熱赤画像撮影が行われた日の日中平均顕熱輸送量分布。11 月 17, 19, 20 日, 9~15 時のデータを使用。円内の色は平均顕熱輸送量に、円の半径は顕熱輸送量のばらつき (全サイト平均からの偏差の標準偏差) に対応する。左下に全サイトの平均値を表す。

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、そのまま土壤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 $200 \times 100\text{m}$ 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 $50\text{Wm}^{-2}$ 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 $50\text{Wm}^{-2}$ 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

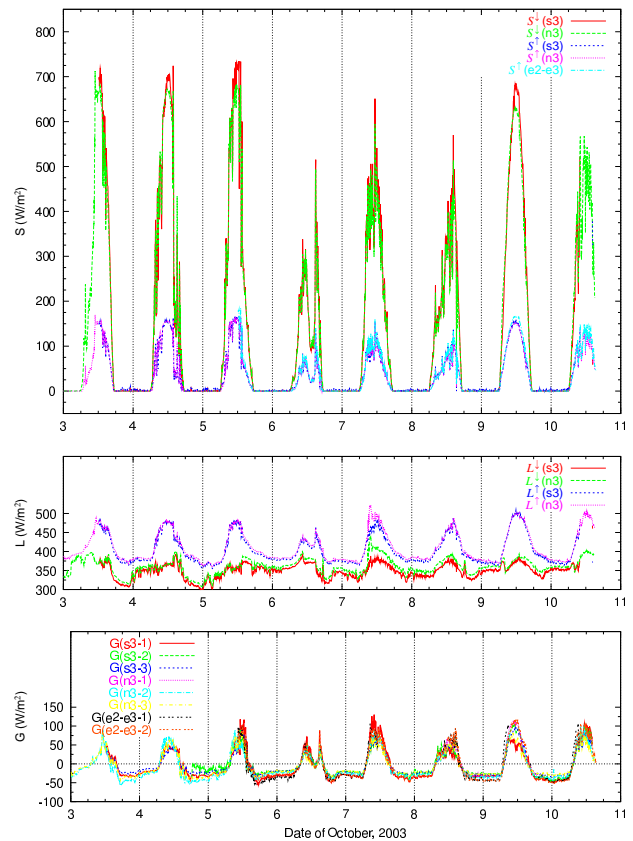


図4: CAPS2003で観測された放射量と地中伝導熱の時系列．上段: 短波放射量, 中段: 長波放射量, 下段: 地中伝導熱．ただし, 上向き放射量は短波・長波ともに上向きを正とする．

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

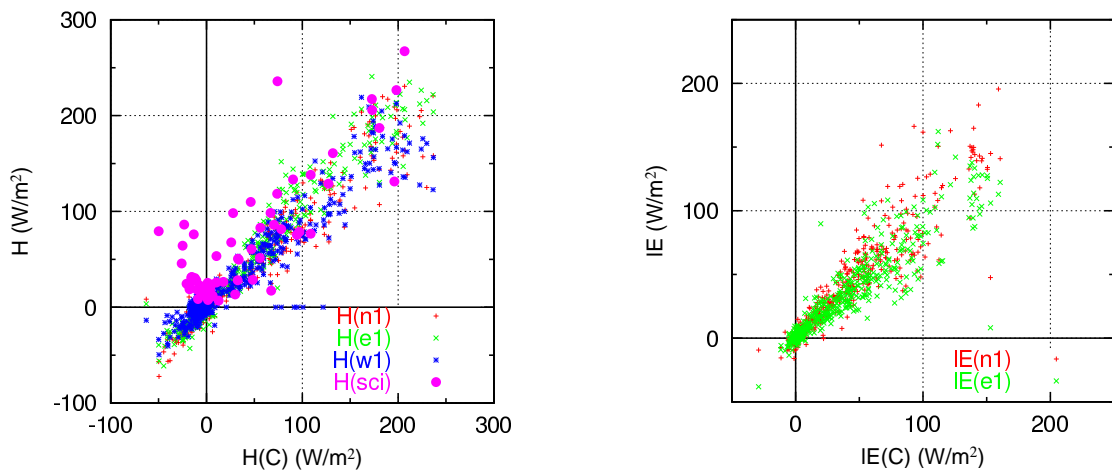


図5: CAPS2003で観測された乱流熱フラックスのサイト間比較．左図: 顕熱輸送量(ただし, sciはシンチロメータのため絶対値), 右図: 潜熱輸送量．

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

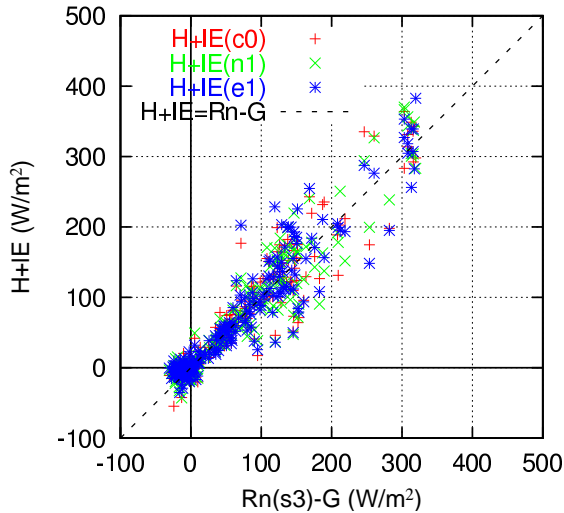


図 6: CAPS2003 で観測された熱収支.  $R_n$  は S3 サイトのデータを使用.

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<sup>-2</sup> 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.