

## 鉛直風標準偏差の普遍関数を用いた顕熱フラックス 測定エラーの補正

Correction of Sensible Heat Flux Measurement Errors  
Using a Universal Function of Standard Deviation of  
Vertical Wind Velocity

岩田 拓記\*・杉田 倫明\*\*

Hiroki IWATA\* and Michiaki SUGITA\*\*

### I はじめに

地表面における熱収支は、その土地の微気象や、より大きな大気循環に影響を及ぼす。その熱収支の変化は、降雨や植生の活動状態などのような自然現象に影響されるほか、人為的な土地利用の改変によっても変化する。後者が自然環境へ与える影響は長期間に及ぶことが多い。人為的な土地利用変化は、人間の生活様式を反映している。都市化によって生じる農地から住宅地への変化はその典型的な例である。つくば市でも研究学園都市建設法の制定以来、人口が増加しており、2005年10月の調査によれば、20万人を越えたと発表されている（つくば市役所ホームページ参照）。それに伴い、つくば市では住宅化が進んでいる。このようなことから、地表面での熱収支を監視し、土地利用変化が熱収支に与える影響を評価することは、地球環境を研究する上で必要である。

筑波大学陸域環境研究センター(TERC)では、1981年8月より連続して気象観測を実施している。その中の超音波風速計(SAT)によって測

定された顕熱フラックスを用いることにより、周辺の土地利用の変化が熱収支に与える影響を評価することができる可能性がある。TERCのようにSATを用いて20年以上も連続測定をしている観測所は稀であり、貴重なデータを収録していると言える。この長期データを解析した研究例として桜ほか(1999)や福田(1998)がある。これらの研究では、1994年から顕熱フラックスが急激に上昇していることが指摘された。しかし、この顕熱フラックスの急激な上昇は、土地利用の変化のみでは説明できないほど大きく、その他の要因については明確にされてこなかった。一方、運動量フラックスは、1994年4月以前のデータに過小評価が見られることがわかっており、その原因は観測システム内の信号増幅器の設定エラーによる鉛直風速信号の回路内での飽和である可能性が指摘されている(田・杉田, 1996)。本稿では、その鉛直風速信号の飽和が顕熱フラックスの過小評価の原因でもあることを報告する。

本研究の目的は、顕熱フラックスの過小評価の程度を推定できる指標を見つけて、その指標を用

\* 筑波大学生命環境科学研究科

\*\* 筑波大学地球科学系

第1表 TERC 気象観測のうち本研究で用いている主な測定要素とその測定高度

測定要素	測定高度
風向	30.5 m
風速 <sup>a</sup>	29.5 m
運動量フラックス <sup>a</sup>	29.5 m
顕熱フラックス <sup>a</sup>	29.5 m
全短波放射	1.5 m
気温、露点温度	29.5 m
降水量、気圧	地上

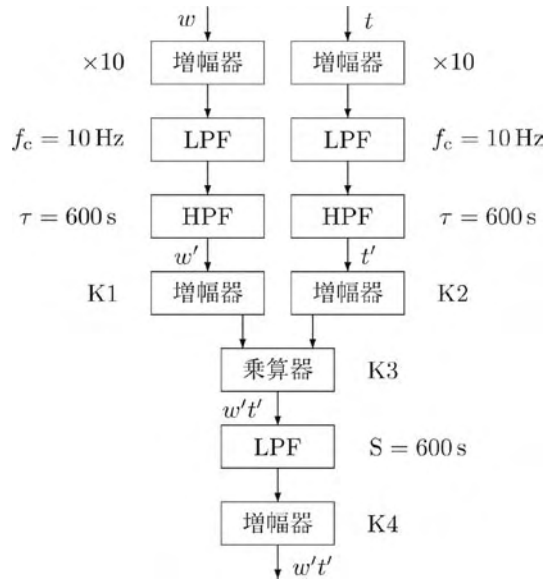
<sup>a</sup> 南東 (123 度) の向き。ただし、1997 年 7 月 31 日以降は下の高度に設置してあった SAT を北西 (303 度) の向き、29.5 m に移動し、常時 2 方向で測定している。

いて過小評価を補正する式を得ることである。顕熱フラックスを補正することによって、TERC 周辺の土地利用の変化が熱収支に与える影響を正確に評価することができる。

## II 観測システム

TERC では、1981 年の観測開始より 2003 年 4 月までアナログ演算器で構成された観測システム（以下、アナログ観測システムと称する）によりデータ収録を行っていた。2003 年 4 月以降は浅沼ほか (2004) で説明されているデジタル観測システムに移行している。第 1 表に本研究で主に用いる測定要素とその測定高度を記す。本研究で補正を行う顕熱フラックスは高度 29.5 m の SAT (Kaijo 社、DAT-300) によって測定された値である。以下では、顕熱フラックスの過小評価が起こっていた期間 (1981 年の観測開始時から 1994 年 7 月 7 日まで) にデータ収録を行っていたアナログ観測システムのフラックス算出方法を説明する。

過相関法によるフラックスの算出は、フラックスメータと呼ばれるアナログ回路 (光田ほか、1973; 第 1 図) を用いて行われていた。このアナログ回路は増幅器、ローパスフィルター (LPF)、ハイパスフィルター (HPF)、乗算器から構成されている。SAT から出力される鉛直風速 ( $w$ )、



第 1 図 フラックスメータの回路図  
 $w$  は鉛直風速信号、 $t$  は温度信号、プライム (') はそれぞれの変動成分、そして、 $w't'$  は鉛直風速変動と温度変動の積を示す。LPF: ローパスフィルター (ノイズ除去、および平均化)、HPF: ハイパスフィルター (変動成分の取り出し)、 $f_c$ : 遮断周波数、 $\tau$ : 遮断時間、 $S$ : 平均化時間、 $K1 \cdot K2 \cdot K3 \cdot K4$ : 増幅器・乗算器の可変倍率

温度 ( $t$ ) が信号 ( $\pm 1V$ ) としてフラックスメータへ入力される。そこで、まず、増幅器 (10 倍) を通過後、ローパスフィルター (LPF) とハイパスフィルター (HPF) から構成されるバンドパスフィルターによって 10 分間の移動平均からの変動が出力される (鉛直風速の変動成分  $w'$ 、温度の変動成分  $t'$ )。そして、増幅器を通過後、乗算器によって掛け合わされ鉛直風速変動と温度変動との積 ( $w't'$ ) が得られる。この信号を LPF により 10 分間の移動平均とし、増幅をかけた後に出力される。さらに、その出力信号をデジタル的に 1 時間平均した結果、共分散である  $\overline{w't'}$  が記録されていた (鳥谷ほか、1989)。フラックス観測において現在では多くの場合なされる SAT の座標変換や横風補正等は施されていない。

フラックスメータの増幅器の倍率は、最初の増幅器の倍率 ( $\times 10$ ) を除き、変更可能であり、

第2表 増幅器・乗算器の倍率設定

	観測開始から 1994年7月7日	1994年7月7日 から現在
K1	10	1
K2	10	10
K3	1	10
K4	5	5

K1, K2は倍率1, 2, 5, 10より, K3は倍率1, 10より, K4は倍率1, 5より選択可能である。電気回路としては, 増幅した結果として生じる電圧値が仕様上で $\pm 10$  Vまで対応でき, それ以上になると回路が飽和して正しい値が出力されなくなる。実際には, 信号電圧が $\pm 11 - \pm 12$  V程度までは問題無く動き,  $\pm 15$  V (回路の動作電圧) に達したところで完全に飽和する (カイジョーソニック, 林孝明, 私信, 2004)。第2表に1994年7月7日以前とそれ以降の増幅器・乗算器の倍率設定を示す。1994年以前の顕熱フラックスの過小評価は鉛直風速の信号がHPFの後の増幅器(K1)によって飽和していたことが原因であると考えられる。このことから, SATからの信号を分岐し, 1994年以前の倍率設定でのアナログ測定システムによる測定と信号飽和の影響を受けていない生データの記録を同時に行い, 得られたデータから顕熱フラックスの過小評価の程度とそれを説明する指標を見つけることを試みた。

### III 過小評価の推定と補正方法

フラックスの過小評価を推定するために, 上述のアナログ測定システムでの測定とLabview (National Instruments社製) を用いたデジタル測定 (浅沼ほか, 2004) を並行して行った。測定を行った期間は冬季で, 2005年11月26日から2006年1月30日までの約2ヵ月間である。アナログ測定は, 過去の過小評価を含む測定を再現するために, 増幅器の設定を誤っていた期間の設定とした。一方, Labviewでのデジタル測定は

フラックスメータの手前で信号を分岐しているため, 信号の飽和が生じていないデータを記録することができる。サンプリング周期は10 Hzである。デジタルデータからのフラックス計算は上述したようなフラックスメータのアナログ演算を模して行った。デジタルデータから計算したフラックス ( $\overline{w't'_a}$ ) を真値とし, フラックスメータから得られたフラックス ( $\overline{w't'_a}$ ) の真値に対する比を過小評価の割合とした。過去に生じていた過小評価の原因が鉛直風速信号の飽和であると予想されることから, その標準偏差 ( $\sigma_w$ ) を用いて過小評価を推定することができると考えられる。よって, デジタルデータから計算される  $\sigma_w$  を過小評価の指標として, フラックスの過小評価を表す式  $f$  を得た。式  $f$  の関数形は任意である。

$$f(\sigma_w) = \frac{\overline{w't'_a}}{w't'_d} \quad (1)$$

なお,  $\sigma_w$  もフラックス計算と同様に10分間の移動平均からの偏差を変動成分とし, その標準偏差として計算されている。式(1)の過小評価を表す式を得る際には, データの精度を保証するために, 以下の制限によりデータを選択した。1) 1時間の平均風向がSATの開口部を中心にした120度以内であること。2)  $\overline{w't'_a}$  と  $\overline{w't'_d}$  の絶対値が  $0.01 \text{ Kms}^{-1}$  以上であること。3) 水平風速 ( $u$ ),  $w$ , 温度 ( $t$ ) の尖度 ( $K$ ) が  $2 \leq K \leq 5$  であること。4) 運動量フラックスと顕熱フラックスの定常性ファクター (SF; Foken and Wichura, 1996) が  $0.7 \leq \text{SF} \leq 1.3$  であること。5) 吹上角度が  $\pm 10$  度以内であること。6) 降雨イベントが起こっていないこと。本研究の観測時には, SATが29.5 mの高度に南東と北西向きに設置されていたため, 風向に応じてデータを使用した。

アナログ測定においては  $\sigma_w$  の記録は残されていないことから, フラックス補正の適用にあたっては,  $\sigma_w$  を推定する必要がある。本研究では, 摩擦速度  $u_*$  ( $\equiv \sqrt{-\overline{w'u'}}$ ) と大気安定度パラメー

タ  $\zeta$  (式 2) から, 接地層で成立する普遍関数 (式 3) を用いて,  $\sigma_w$  を算出した (Kaimal and Finnigan, 1994).

$$\zeta = \frac{z - d_0}{L} = - \frac{k \frac{g}{T_v} (z - d_0) \overline{w't'}}{u_*^3} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \begin{cases} 1.25 (1 + 3|\zeta|)^{1/3} & \zeta < 0 \\ 1.25 (1 + 0.2|\zeta|) & \zeta > 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで,  $z$  は測定高度,  $d_0$  はゼロ面変位,  $L$  はオブコフ長,  $k$  はカルマン定数 ( $=0.4$ ),  $g$  は重力加速度,  $T_v$  は仮温度である. ゼロ面変位は TERC 周辺の平均的な値 (4.0 m) を用いた (Hiyama *et al.*, 1996). ここで, 問題となるのが,  $u_*$  と  $\zeta$  はアナログ測定の記録から算出可能であるが, それぞれが鉛直風速信号の飽和の影響を受けているということである. そこで, まず,  $u_*$  を別の方法から推定することを考えた. 大気安定度誤差の影響については, 「結果と考察」の節で述べる.

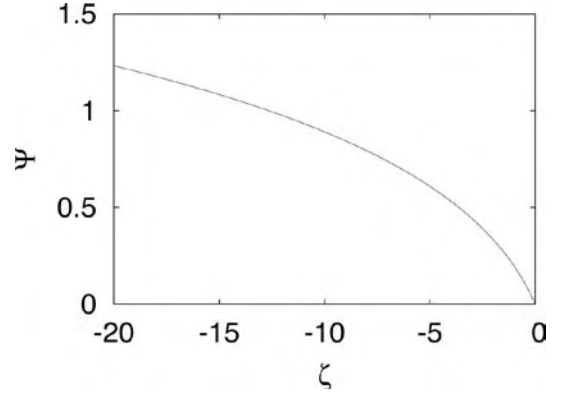
$u_*$  を求める方法には, 渦相関法の他にバルク法がある. バルク法では, 粗度長  $z_0$  と  $d_0$  が既知であれば, 測定された接地層内 1 高度の風速と大気安定度から  $u_*$  を算出することが可能である. バルク式は以下の式で表される.

$$u_* = \frac{kU}{\ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right) - \Psi(\zeta)} \quad (4)$$

ここで,  $U$  はタワー上部 (29.5 m) での風速,  $\Psi$  は大気安定度補正関数である.

$$\Psi(\zeta) = 2 \ln \left( \frac{1+x}{2} \right) + \ln \left( \frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

ここで,  $x = (1 - 16\zeta)^{1/4}$  である. ただし, 夜間は接地層の高さが SAT の測定高度 (29.5 m) 以下になる場合があり, その時はバルク式による  $u_*$  の算出ができない. よって, 本研究では, このバルク式による  $u_*$  の推定は, 日中のデータに対してのみ行う. この制限により, 本研究では顕熱



第 2 図 大気安定度補正関数

フラックスの補正を, 昼間のデータに対してのみ行った. 式 4 において,  $u_*$  は右辺の大気安定度補正関数内にも現れるため,  $u_*$  は以下のように再帰的に計算される. 1) まず, 第一回目の計算において, 中立成層を仮定して (すなわち,  $\Psi=0$ ), 式 4 から  $u_*$  を求める. 2) これより得られる  $u_*$  と測定された顕熱フラックス (このフラックスは過小評価を含んでいる) を用いて, 大気安定度を計算し (式 2), 再び, 式 4 から  $u_*$  を計算する. 3) この 2 の計算を繰り返す, 結果が十分に収束 (計算される  $u_*$  の変化が 0.0001 以下とした) 時の値を最終的に求めた. この際に, 過小評価を含んだ顕熱フラックスを用いているが, 大気安定度補正関数  $\Psi$  は, 中立近くを除いては, 大気安定度によって大きく変化しない (第 2 図) ので, 大気安定度 (すなわち, 顕熱フラックス) の誤差が計算結果である  $u_*$  に与える影響は比較的小さい. 式 4 から  $u_*$  を計算する際に, 重要なパラメータが  $z_0$  である. 本研究では, デジタルデータから計算された, それぞれ真値である  $U$ ,  $u_*$ , 顕熱フラックスを用いて, 式 4 から風向毎に  $z_0$  を求めた. その結果を第 3 表に示す. 過去のデータに適用する際には, この  $z_0$  の正確な推定が  $u_*$  の計算に影響し, それが最終的に顕熱フラックスの補正にも影響する. これについては, 「結果と考察」の節でその影響について考察をする.

第3表 本研究の観測時における粗度長  $z_0$

風向	$z_0$ (m)
北 (33° 以下, 303° 以上)	1.16
東 (33° から 123°)	0.82
南 (123° から 213°)	1.02
西 (213° から 303°)	1.04

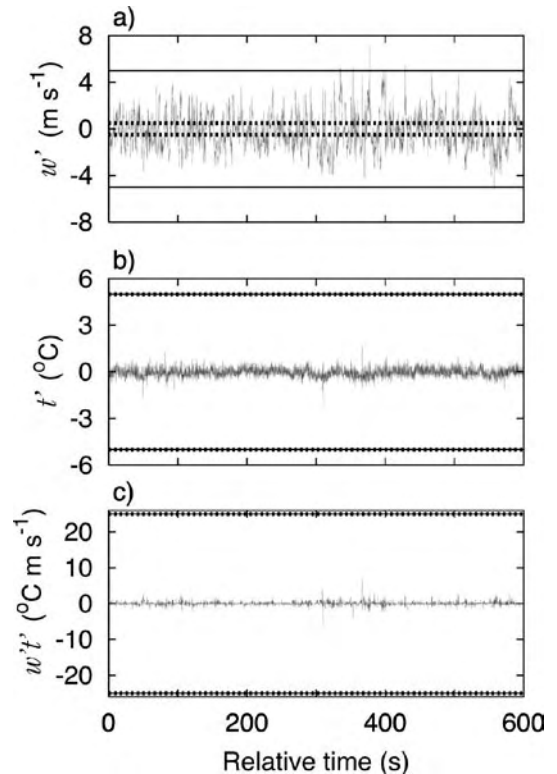
#### IV 結果と考察

##### 1. 鉛直風速信号の回路内での飽和

顕熱フラックスの過小評価の原因が、鉛直風速信号の回路内での飽和であることを確認するために、顕熱フラックスの過小評価が起きている時のデジタルデータを調べた。その一部を第3図に示す。 $t'$ および $w't'$ に係わる倍率設定は1994年7月7日以前も以降も問題が無く、回路の飽和が起きていないことが分かる。一方、 $w'$ の信号処理途中の増幅器の倍率  $K1$  に関しては、1994年7月7日以前の設定値 ( $K1=10$ ) では大きすぎ、回路内で信号が飽和してしまっている。これが原因となり、この期間の $\overline{w't'}$ が過小評価されたと考えられる。また、風速が大きい場合には、1994年7月7日以降の設定値 ( $K1=1$ ) においても $w'$ 信号が飽和している可能性がある。なお、各ブロック毎に回路内で飽和が起こらない鉛直風速  $w$  と温度  $t$  の入力値を第4表に示す。

##### 2. 顕熱フラックスの過小評価

第4図では $\overline{w't'_a}$ と $\overline{w't'_d}$ との比（すなわち、顕熱フラックスの過小評価の割合）を $\sigma_w$ に対してプロットしている。ただし、データ選択の制限（2；フラックスの絶対値が $0.01 \text{ Kms}^{-1}$ 以上）により、 $\sigma_w$ が小さい時のデータは除外されている。 $\sigma_w$ が大きくなるにしたがい、フラックスの過小評価は最初に急激に減少し、 $\sigma_w$ が $0.7 \text{ ms}^{-1}$ を越えたあたりからは緩やかな減少を示した。 $\sigma_w$ が $1.5 \text{ ms}^{-1}$ を越えたところでは、 $\overline{w't'_a}$ は真値である $\overline{w't'_d}$ の20%程度になっている。このように、フラックスの過小評価が $\sigma_w$ によってよく表されて

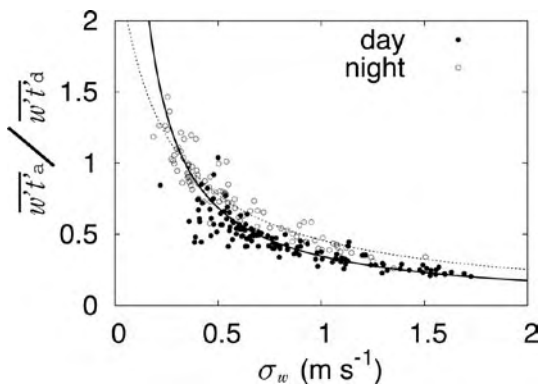


第3図 a) 鉛直風速  $w'$ , b) 温度  $t'$ , c) 鉛直風速と温度の積  $w't'$  の時間変化  
薄い実線がそれぞれの変動、濃い実線が1994年7月7日からの倍率設定で回路が飽和に達する値、点線が1994年7月7日までの倍率設定で回路が飽和に達する値である

いることから、 $\sigma_w$ をフラックスの過小評価を表す指標として用いることができる。昼間と夜間でわけてデータを見てみると、夜間の顕熱フラックスの方が昼間に比べて過小評価の割合が小さいことがわかる。これは、温度と鉛直風速との相関に関係していると考えられる。観測期間中の典型的な相関係数は、昼間と夜間に対して、それぞれ0.4と-0.2であった。この相違により、昼間の顕熱フラックスの方が、鉛直風速信号の飽和の影響をより大きく受けているようである。本研究では、昼間のみのデータを補正するため、昼間の顕熱フラックスの過小評価を表す式  $f$  が必要である。第4図を見ると、昼間の過小評価の大部分が

第4表 1994年7月7日以前と以降の倍率設定でのフラックスメータ各ブロックにおける最大許容信号値  
各ブロック通過後に10 Vになる信号が記載されている。例えば、K4通過後に回路が飽和しないためには、 $\overline{w't'} < 5 \text{ } ^\circ\text{C ms}^{-1}$ である必要がある

設定 入力	1994年7月7日以前 K1=10, K2=10, K3=1, K4=5 x: 鉛直風速 1 V=5 ms <sup>-1</sup> y: 温度 1 V=50℃	1994年7月7日以降 K1=1, K2=10, K3=10, K4=5 x: 鉛直風速 1 V=5 ms <sup>-1</sup> y: 温度 1 V=50℃
(1) 最初の増幅器 (x10) の後	x: 10 V=5 ms <sup>-1</sup> y: 10 V=50℃	x: 10 V=5 ms <sup>-1</sup> y: 10 V=50℃
(2) 増幅器 (K1, K2) の後	x: 10 V=0.5 ms <sup>-1</sup> y: 10 V=5℃	x: 10 V=5 ms <sup>-1</sup> y: 10 V=5℃
(3) 乗算器 (K3) の後	xy: 10 V=25℃ms <sup>-1</sup>	xy: 10 V=25℃ms <sup>-1</sup>
(3) 増幅器 (K4) の後	xy: 10 V=5℃ms <sup>-1</sup>	xy: 10 V=5℃ms <sup>-1</sup>



第4図 顕熱フラックスの過小評価と鉛直風標準偏差 $\sigma_w$ の関係。実線が昼間のデータに対する補正式、破線が夜間のデータに対する補正式を示す

0.8 以下であることから、外挿をさけるために以下のように式 $f$ を得た。1) まず、夜間のデータに対して回帰式を得た。式の関数形としては、方程式 $y=a/((x-b)+a)$ を選択し、非線型最小二乗法によりパラメータ $a$ と $b$ を決定した。パラメータ $b$ は顕熱フラックスの過小評価が無くなる時の $\sigma_w$ の値を表している。2) 昼間の過小評価がなくなる $\sigma_w$ の値を夜間の値と同じであると仮定し、パラメータ $b$ を固定して、昼間のデータから同様に回帰式のパラメータを得た（第5表）。得られた補正式を以下に示す。

第5表 非線型最小二乗法によって得られた関数型 $y=a/((x-b)+a)$ のパラメータ値、標準誤差、有意水準。夜間と昼間のデータ数は、それぞれ94と134である

	係数	推定	標準誤差	有意水準
夜間	$a$	0.56	0.030	$2.0 \times 10^{-16}$
	$b$	0.34	0.007	$2.0 \times 10^{-16}$
昼間	$a$	0.35	0.016	$2.0 \times 10^{-16}$
	$b$	0.34 <sup>b</sup>		

<sup>b</sup> 夜間の $b$ と同一。

$$\overline{w't'}_d = \frac{1}{f(\sigma_w)} \overline{w't'}_a$$

$$f(\sigma_w) = \begin{cases} \frac{0.35}{(\sigma_w - 0.34) + 0.35} & \sigma_w \geq 0.34 \\ 1 & \sigma_w < 0.34 \end{cases} \quad (6)$$

$\sigma_w$ が $0.34 \text{ ms}^{-1}$ 以下ではアナログ測定によるフラックス $\overline{w't'}_a$ が真値を表していると仮定した。実際には、 $\sigma_w$ が $0.34 \text{ ms}^{-1}$ 以下ではフラックスの絶対値が小さいために、フラックス比が1にはならず値がばらついてしまうが、これはフラックスの絶対値が小さいことに起因する計算の不安定さの結果である。顕熱フラックスの過小評価は、 $\sigma_w$ が $0.7 \text{ ms}^{-1}$ 以上では比較的良好に式6の近くに分布しているが、 $\sigma_w$ が $0.7 \text{ ms}^{-1}$ 以下ではばらつきが大きくなっている。これが顕熱フラッ

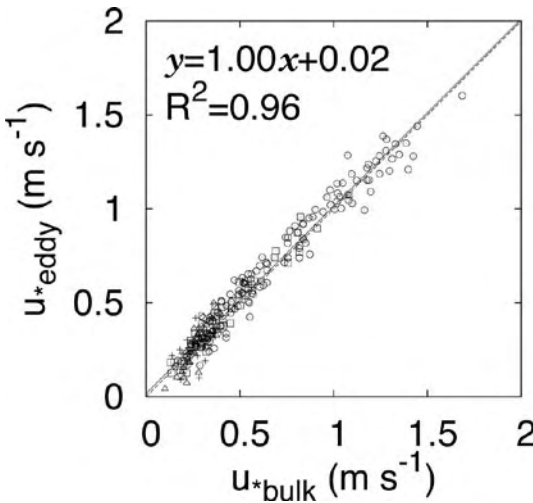
クスに与える影響は、顕熱フラックスの大きさによって異なることが考えられる。すなわち、顕熱フラックスの値が小さければ、最終的な補正にはあまり影響しないが、顕熱フラックスが大きければ影響も大きい。

### 3. 鉛直風速の標準偏差

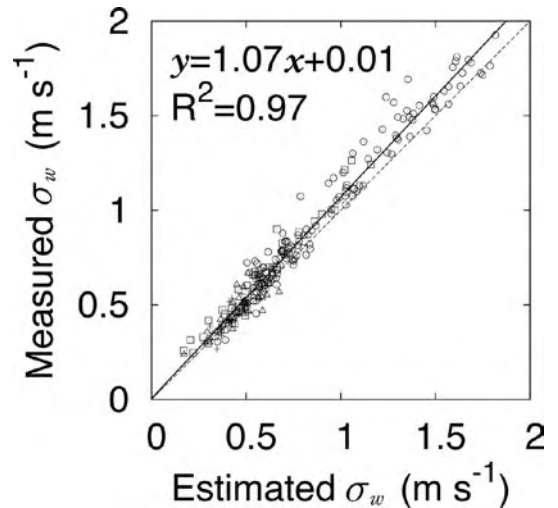
以上の解析により、顕熱フラックスの過小評価を見積もる上で、 $\sigma_w$ の有効性が示された。しかしながら、過去の観測では $\sigma_w$ の記録が残されていない。よって、以下では「過小評価の推定」の節で述べた $\sigma_w$ の推定方法の有効性とその精度について調べる。鉛直風速標準偏差の接地層普遍関数（式3）から $\sigma_w$ を算出するためには、 $u_*$ と $\zeta$ が必要である。そこで、式4のバルク式を用いた再帰的計算によって $u_*$ を算出した。 $z_0$ は第3表に示されている値を用いた。第5図はそのバルク法によって計算した摩擦速度 $u_{*bulk}$ と渦相関法によって計算した摩擦速度 $u_{*eddy}$ の比較である。回帰直線の傾きはほぼ1に等しい。両者がよく一致していることから、 $z_0$ の値が正確にわかっている

場合には、バルク式から $u_*$ を精度よく求めることができると言える。計算において過小評価を含んだ顕熱フラックス $\overline{w't'_a}$ を用いているが、得られる $u_*$ の値には大きく影響していない。その理由は、上述したように、強い不安定時には大気安定度補正関数 $\Psi$ が大気安定度に大きく依存しないからである。

次に、バルク法によって得られた $u_{*bulk}$ を用いて、式3から $\sigma_w$ を求めた。推定された $\sigma_w$ と測定された $\sigma_w$ の比較が第6図で示されている。回帰直線の傾きは1.07となり、推定された $\sigma_w$ が過小評価されている結果となった。この原因は、式3を適用する際に過小評価された顕熱フラックスである $\overline{w't'_a}$ から $\zeta$ を算出していることである。これより、不安定度（ $-\zeta$ ）が実際より小さく計算され、結果的に $\sigma_w$ の過小評価につながっている。特に、 $\sigma_w$ が1.0以上の時に、絶対値としての過小評価が大きい。しかしながら、第4図からわかるように、 $\sigma_w$ が1.0以上の時はフラックスの過小評価の割合が $\sigma_w$ に対して大きくは変化しないことから、顕熱フラックスの補正への影響は緩和されると考えられる。



第5図 バルク法で求めた摩擦速度 $u_{*bulk}$ と渦相関法で求めた摩擦速度 $u_{*eddy}$ の比較。  
□：北，+：東，△：南，○：西。実線は回帰直線を示す



第6図 推定された鉛直風標準偏差と測定された鉛直風標準偏差の比較。□：北，+：東，△：南，○：西。実線は回帰直線を示す

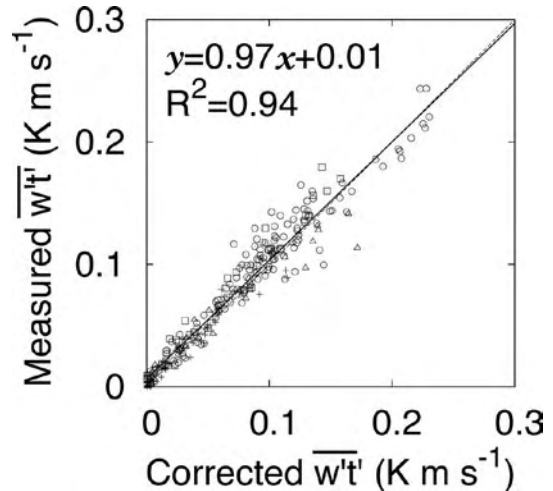
#### 4. 顕熱フラックスの補正

第7図は補正が施された顕熱フラックスとデジタルデータから渦相関法によって計算された顕熱フラックスの比較である。回帰直線の傾きは0.97であり、1にとっても近い。 $\sigma_w$ の推定時には過小評価が見られたが、上述した理由により、顕熱フラックスの補正には大きくは影響していない。顕熱フラックスが0.1から0.2の間で誤差が大きくなっているのは、補正式（式6）の精度が $\sigma_w$ が $0.7 \text{ ms}^{-1}$ 以下の範囲に対して不十分であることが原因だと考えられる。顕熱フラックスの値が大きく、補正式と実際のフラックスの過小評価の差が大きくなるという条件が重なった時に、顕熱フラックスの誤差が大きくなる。

#### 5. 過去のデータ補正時の精度の評価

以上は、正しい $z_0$ が既知であるという前提のもとでの結果である。過去のデータにおいては、 $z_0$ の推定記録が残されていることは稀であり、何らかの方法で推定しなければならない。その $z_0$ の推定が過大、もしくは過小評価されていた場合には、顕熱フラックスの補正にも影響を与える。よって、本研究で観測されたデータを用いて、 $z_0$ を第3表に示した値から変化させて、顕熱フラックスの補正を行った。それにより、 $z_0$ の推定誤差が結果である顕熱フラックスの補正に与える影響を評価した。第6表は $z_0$ を0.5倍から2倍に変化させた時の顕熱フラックス補正の結果を示している。RMSEはデジタルデータから計算された顕熱フラックスと補正が施された顕熱フラックス間の平均二乗誤差、傾き・切片は両フラックスに線形回帰を行った結果である。結果より、 $z_0$ が0.5倍から1.5倍の誤差を持つ場合には、顕熱フラックスの補正にも $\pm 15\%$ 程度の誤差が生じるようである。

第8図は過去の顕熱フラックスデータに補正を適用した結果を示している。顕熱フラックスは1時間平均値であり、昼間の南風の時のみを示して



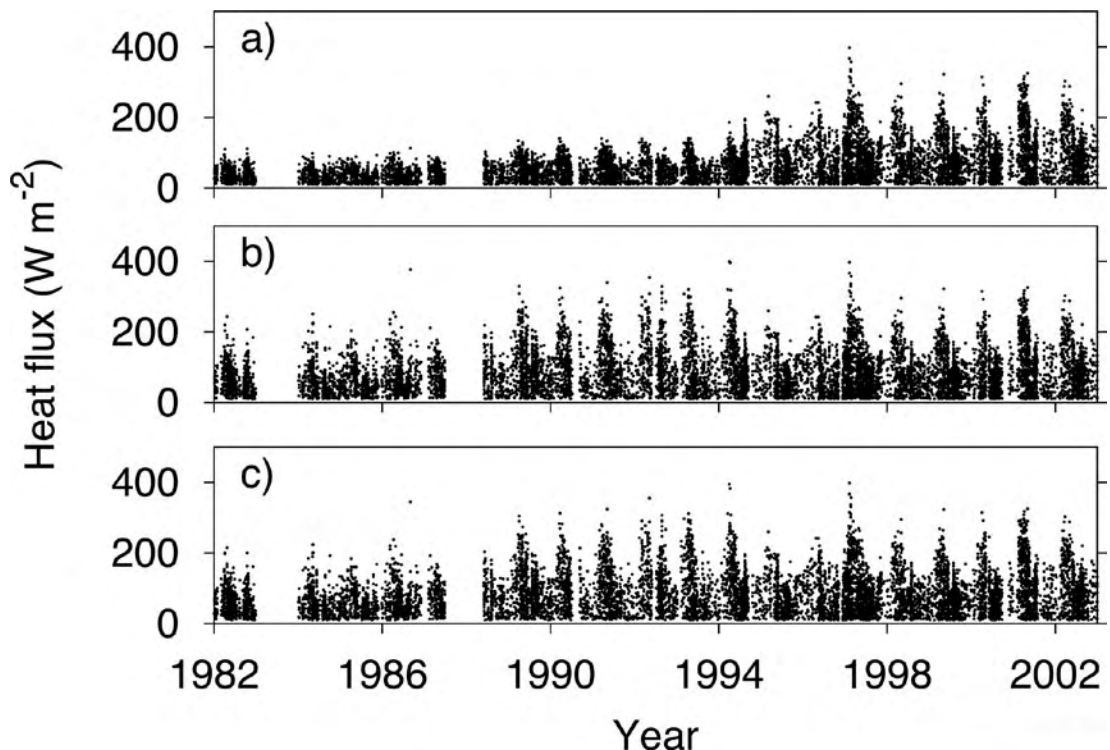
第7図 補正された顕熱フラックスと測定された顕熱フラックスの比較。□：北，+：東，△：南，○：西。実線は回帰直線を示す

第6表  $z_0$ の推定誤差が顕熱フラックスの補正結果に及ぼす影響

$z_0$	RMSE	傾き	切片
$0.5z_0$	$3.40 \times 10^{-4}$	1.11	0.005
$0.75z_0$	$2.24 \times 10^{-4}$	1.03	0.005
$z_0$	$1.82 \times 10^{-4}$	0.97	0.006
$1.25z_0$	$1.97 \times 10^{-4}$	0.91	0.007
$1.5z_0$	$2.61 \times 10^{-4}$	0.86	0.008
$2z_0$	$5.05 \times 10^{-4}$	0.78	0.009

いる。第8図a)は補正前の顕熱フラックスを示しており、1994年以前の顕熱フラックスが極端に小さく、1998年以降と比べると半分以下になっている。第8図b)とc)は異なる $z_0$ の推定を用いて補正を行った結果である。前者では、本研究の観測時に得られた $z_0$ (=1.02)を過去すべての期間に対して適用しており、後者では1992年の $z_0$ (0.80: Hiyama *et al.*, 1996)と本研究で得られた $z_0$ とを線形で内外挿した $z_0$ の値を用いている。第8図b)では、一定の $z_0$ が用いられているため、第8図c)よりも補正量が大きくなっている。過去の $z_0$ の値は正確には分らないが、その推定が実際の $z_0$ の0.5倍から1.5倍の範囲であると仮





第 8 図 南風時，昼間のみを選択した 1 時間平均の顕熱フラックスの経年変化. a) 補正前. b) 2005 年時の粗度長  $z_0$  を過去に適用. c) 1992, 2005 年の粗度長  $z_0$  を線形内外挿して補正

定すると，顕熱フラックスも  $\pm 15\%$  以内の精度で得られていると言える．この補正の正確さは，過去の  $z_0$  の推定の正確さに依存していることに注意をする必要である．

最後に，タワーを通して吹いてきた風に対して以上の補正方法が適用できるかを調べた．風がタワーを通して吹いている場合は，タワーの影響が観測値に反映されていると考えられる．過去の観測においては，SAT が南東方向（123 度）にしか設置されていないため，そのような状況での補正方法の適用性を調べた．そのために，風向と逆向きに設置されている SAT で測定されたデータを用いて顕熱フラックスの補正を行い，その結果を風向向きに設置されている SAT で測定された真値の顕熱フラックスと比較を行った．その結果，顕熱フラックス間の RMSE は， $1.89 \times 10^{-4}$  で，

回帰直線の傾きと切片は，それぞれ 0.97 と 0.007 であった．これらの値は，タワーを通して吹いていない場合の結果とほぼ同じである（第 6 表）．このことから，本研究の補正方法はタワーを通して吹いてくる風に対しても有効であると言える．

## V まとめ

陸域環境研究センター (TERC) では，1981 年より連続して気象観測を行っているが，フラックスメータ内の増幅器の設定エラーにより，顕熱フラックスが過小評価されていたことが最近になって判明した．よって，本研究では，過小評価された顕熱フラックスを再現し，同時に過小評価を受けていないデータをデジタル測定することにより，顕熱フラックスの過小評価の割合とそれを補

正する方法を得た。その結果と考察を以下にまとめる。この方法では、 $u_*$  をバルク法から求める必要があるので、昼間のデータのみに適用を限定した。

1. 顕熱フラックスの過小評価が起こっている時のデジタルデータを調べることで、過小評価の原因が鉛直風速  $w'$  の回路内飽和であることを確認した。また、1994 年 7 月 7 日以降においても、風速が大きい場合には  $w'$  信号の飽和が発生している可能性があり、今後その影響を調べる必要がある。
2. 顕熱フラックスの過小評価は、鉛直風速の標準偏差  $\sigma_w$  によって表すことができ、 $\sigma_w$  が増加するにつれて急激に過小評価は大きくなり、 $\sigma_w$  が  $0.7 \text{ ms}^{-1}$  を越えたあたりからは過小評価は緩やかに大きくなった。過小評価を表す式は、 $\sigma_w$  が  $0.7 \text{ ms}^{-1}$  以上では、比較的データと一致しているが、 $0.7 \text{ ms}^{-1}$  以下ではフラックスの過小評価を正確に表さない場合もある。その際に、実際の顕熱フラックスが大きいと絶対値としての誤差も大きくなる。
3.  $\sigma_w$  を残された過去のデータから推定するために、まず、摩擦速度  $u_*$  をバルク式から得た。この  $u_*$  の推定は、粗度長  $z_0$  が正確に分かっていることを条件として、バルク式から正確に求めることができる。そして、接地層での普遍関数を用いて  $\sigma_w$  を推定した。この時、過小評価を受けた顕熱フラックスを用いて大気安定度を計算しているため、推定された  $\sigma_w$  は、特に  $\sigma_w$  が 1 以上で過小評価が大きくなった（約 7%）。しかし、 $\sigma_w$  が 1 以上の時は、フラックスの過小評価が  $\sigma_w$  に対して大きくは変化しないので、フラックスの補正に及ぼす影響は小さい。

4. 本研究で得た補正方法によって過小評価されている顕熱フラックスの補正が可能である。しかし、この補正の精度は  $u_*$  を求める際の  $z_0$  の推定精度に依存している。 $z_0$  の推定が実際の  $z_0$  の 0.5 倍から 1.5 倍の範囲である場合には、顕熱フラックスを  $\pm 15\%$  以内で補正することができる。
5. 本研究での補正方法は、風がタワーを通して吹いている時のデータにも適用可能である。

## 文献

- 浅沼 順・野原大輔・原 政之・寄崎哲弘 (2004): 第 3 世代気象・水文観測データ収集・公開システムについて。筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 157-174.
- 桜 久美子・新村典子・木村富士男 (1999): 長期データを用いた草原の熱収支の変動について。筑波大学水理実験センター報告, **24**, 97-106.
- 田 少奮・杉田倫明 (1996): 熱収支・水収支観測資料－1994 年・1995 年－。筑波大学水理実験センター報告, **21**, 61-115.
- 鳥谷 均・川村隆一・嶋田 純・谷口真人・西本 貴久 (1989): 気象日報作成装置新システムについて。筑波大学水理実験センター報告, **13**, 147-158.
- 福田友紀子 (1998): 広域の地表面被覆変化が熱収支に与える影響。筑波大学第一学群自然科学類卒業研究論文, 52p.
- 光田 寧・花房龍男・藤谷徳之助 (1973): 乱流輸送量の実時間測定法について。京都大学防災研究所年報, **16B**, 305-317.
- Foken, T. and Wichura, B. (1996): Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agri. For. Meteorol.*, **78**, 83-105.

Hiyama, T., Sugita, M. and Kotoda, K. (1996):  
Regional roughness parameters and  
momentum fluxes over a complex area, *J.*  
*Appl. Meteorol.*, **35**, 2179-2190.

Kaimal, J. and Finnigan, J. J. (1994): *Atmospheric*

*Boundary Layer Flow*, Oxford Univ. Press,  
New York, 289p.

(2006 年 8 月 14 日受付, 2006 年 9 月 20 日受理)