# 陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場における フラックスデータのシステム間比較と信頼性

Comparison between Systems and Confidence in Observational Data of Momentum and Heat Flux at the Observational Tower in the Heat and Water Balance Experimental Field of Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba.

齊藤 誠\*·浅沼 順\*\*

Makoto SAITO\* and Jun ASANUMA\*\*

# 1 はじめに

筑波大学陸域環境研究センター(以下, TERC) では、センター内の熱収支・水収支観測圃場で継 続的に行っているルーチン観測データを 1981 年 11月分から公開している. 2003年5月からは新 データ収録システムも導入され、従来の60分平 均値以外に30分平均値も追加・公開されている. 現在公開されているフラックスデータは,1981 年からフラックスメータによって継続観測されて いる運動量・熱フラックス 60 分平均値(以下, 旧システム)と、2003年5月から導入された新 **圃場データ収録システムによる運動量・熱フラッ** クス 30・60 分平均値(以下,新システム)の 3 種類である. 長期間に渡って蓄積された TERC のフラックスデータを今後有効に利用していく上 で以下の確認作業が必要であると考えられる. ま ず,両システムのデータを比較し、システム間に 差があるかを確認する必要がある. また, 両シス テム共にフラックス計算値のみを保存しているた め、乱流生データからそれぞれのシステム計算値を再現し比較することにより両システムの信頼性を確認することが必要である。さらに、近年渦相関法に付随した様々な解析手法が提案されており(例えば、Howell and Mahrt、1997; Paw U et al.、2000; Massman、2000)、その点から TERCのデータを見直すことが必要である。本稿は、上記の確認作業についての結果を報告する。

#### Ⅱ データ説明

TERCでは,熱収支・水収支観測圃場内にある 気象観測鉄塔 (高度 30.5 m) の 2 高度に 3 台の超音波風速温度計 (以下, SAT; DA-300, Kaijo, Tokyo)を設置し,3点で運動量・熱フラックスを測定している.測定高度は地表面から 2.2 m (南東向き) および 29.5 m である.高度 29.5 m では 2 台の SAT を北西方向(以下,29.5 m NW)と南東方向(以下,29.5 m SE)にそれぞれ設置している.本稿の比較観測期間では、SAT のデー

<sup>\*</sup> 筑波大学生命環境科学研究科大学院生

<sup>\*\*</sup> 筑波大学陸域環境研究センター

タは研究棟内のデータ収録室で旧システム,新 システム,乱流生データ収録装置用に分岐させ, それぞれのシステムでデータの収録が行われてい た.

旧システムは、ミーンメータ・ベクトルシンセサイザー・フラックスメータ等から構成されているアナログデータ処理装置(AD-801, Kaijo)を用いて、SATの出力値から3方向の風速成分および気温の平均値、ベクトル合成値、共分散等をアナログ的に求める装置である。詳細については光田ほか(1971;1973)、古藤田ほか(1978)を参照されたい。公開されているフラックスは、10 Hzのローパスフィルターと 0.000733 Hz のハイパスフィルターを通し、約600 s の移動平均から算出した共分散を1時間平均値にした値である。

新システムは、データロガー(CR23X, Campbell. Inc., USA) を用いてSATの出力値を 10 Hzの速度で収録し、1800 s と 3600 sの算術平均から算出した共分散の  $30 \cdot 60$  分平均値をそれぞれ算出する。詳細については浅沼ほか(2004)を参照されたい。

乱流生データはデータ収録室で分岐したアナログデータを A/D 変換機 (PCI6034E, National Instruments, Tokyo) を介して PC で収録した. 詳細については浅沼ほか (2004) を参照されたい. データは 1 ランを 30 分区切りとし, 29 分 51 秒間のデータを 20 Hz の速度で収録した.

乱流生データを用いたフラックス計算では,旧・新システムの再現,近年提案された渦相関法解析手法の適用,という 2 点から 3 通りの方法を用いて計算を行った。システム計算値の再現では,旧システムを再現するために前 10 分の移動平均( $n=11820\sim12000$  個)を用いたフラックス 1 時間平均値(以下,RM),新システムを再現するために 60 分算術平均(n=71640 個)を用いたフラックス 1 時間平均値(以下,BA)をそれぞれ算出した。

次に近年提案された渦相関法解析手法につい

て説明する.これは、渦相関法では一般に無視される事が多い時間スケールの長い変動を、定常性仮定を保ちながら取り込むことが出来る計算手法である.まず1時間毎に風速3成分の座標回転(Tanner and Thurtell, 1969)を行い、x軸を主風向へ回転させた.

$$u_1 = u_m \cos \theta + v_m \sin \theta \tag{1}$$

$$v_1 = u_m \sin \theta + v_m \cos \theta \tag{2}$$

$$w_1 = w_m \tag{3}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\overline{v}_m}{\overline{u}_m} \right) \tag{4}$$

ここで、下付文字 m は測定値、1 は  $\bar{v}=0$  にするための座標回転を表す。次に、平均鉛直流がゼロになるように( $\bar{w}=0$ )座標回転を行なう。

$$u_{i} = u_{i}\cos\phi + w_{i}\sin\phi \tag{5}$$

$$v_2 = v_1 \tag{6}$$

$$w_* = -u_* \sin \phi + w_* \cos \phi \tag{7}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\overline{w}_1}{\overline{u}_1} \right)$$
 (8)

1時間毎の風速を $\bar{v} = \bar{w} = 0$ と座標回転させた後で、以下の式からフラックス 1 時間平均値を乱流フラックスとメソスケールフラックスの合計値として算出した(Mahrt et~al., 2001;Finnigan et~al., 2002).

$$\langle \overline{ws} \rangle = \langle \overline{w} \rangle \langle \overline{s} \rangle + \langle \overline{w}' \overline{s}' \rangle + \langle \overline{w}' \overline{s}' \rangle$$
  
 $= \langle \overline{w}' \overline{s}' \rangle + \langle \overline{w}' \overline{s}' \rangle$  (9)

ここで、バー( $^-$ ) は 15 分平均値(n=17910)、括弧(<>)は 1 時間平均値(n=71640)、 $<\bar{w}'s'>$ は 1 時間平均に対する 15 分平均の変動の共分散(メソスケールフラックス)、 $<\bar{w}'s'>$ は共分散 15 分平均の 1 時間平均(乱流フラックス)をそれぞれ表す。これ以降、便宜上上記の計算手法を LF と記す.

解析には,2003年8月から11月の間で一日を通して晴天が続いた21日間(8/10,11,21,22,9/28,29,30,10/1,2,3,4,5,29,30,31,11/2,16,17,18,21,22)のデータを使用した.

旧・新システム共にシステム上の不具合が生 じたために、その対処方法を以下に記す、旧シス テムは2001年から時間遅れが徐々に進行し、本 稿の解析対象期間では実時間に対して1時間以上 の時間遅れが発生していた.このため,遅れ時間 分だけ時間をスライドさせ, さらに線形内挿法に よって毎正時および毎30分のデータを作成した. 次に、旧システムはフラックスメータ内で SAT からの出力電圧にローパスフィルターとハイパス フィルターをかけた後に、各々に任意の倍率値を 設定することが可能な4つの増幅器を通して各フ ラックスを算出している (古藤田ほか, 1978). この倍率設定値が高過ぎると強風時や気温が高 い日には風速や気温の電圧値が飽和に達してし まい、結果としてフラックスが過小評価されるこ とになる. 田・杉田 (1996) では, 旧システム導 入時から使用されていた倍率設定値では電圧値が 飽和する可能性があるとして、1994年7月6日 に倍率設定値の変更を行なった. 当初は, この変 更によって運動量フラックスの過小評価が無くな り、見かけ上運動量フラックスデータが増大する と推測されていた.しかしながら、最近になって 熱フラックスの増加が指摘されており (桜ほか、 1999)、熱フラックスにも過小評価があった可能 性が考えられる. このような理由から、倍率設定 値の変更に伴う影響を確認するために、2003年 9月17日から2004年2月3日の期間で、高度2.2 mのSATの倍率設定値を1994年7月6日以前 の値に変更した. これにより, 高度 2.2 m につい ては2003年9月17日を境にそれ以前を2.2mA. 以降を 2.2 m B と区別した、新システムはロガー 内のプログラム不良により、システム導入時から 2004年3月10日までの30分平均値が使用不能 である. また, 新システム内において SAT 計測 による 120 度交差の水平風速を直交交差に変換す る際に、風速レンジが実際には 25 m s<sup>-1</sup>のとこ ろを誤って 50 m s<sup>-1</sup> に設定されていたことが判 明した(2004年7月7日にプログラム修正). こ のため、運動量フラックス 60 分平均値はホーム ページ上で公開されている値に1/2をかけて使用 した. 鉛直風速については設定ミスが無かったた めに、熱フラックス60分平均値はシステム計算 値をそのまま使用した.

## Ⅲ 結果

#### 1. 旧・新システムの比較

旧システムと新システムの運動量の比較を第 1 図に示す. 高度 2.2 m の運動量フラックスは,新システムが旧システムの約 3 倍の大きさを持っていた. 他の計算値との比較から新システムが異常値を示しているものと考えられる. このことから,前述した新システムの風速レンジ設定ミスとは別の問題があることが推測されるが,現時点では不明である. このため 2.2 m A·B の差異が 2003 f 9 月 17 日に行った旧システムの倍率設定値の変更に伴うものかどうかは不明である. 高度 29.5 m については NW·SE 共に新システムが  $6 \sim 10\%$ 大きかった.

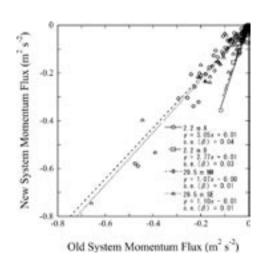
第2図は、旧システムと新システムによって観測された熱フラックスの比較である。2.2 m A の熱フラックスは両システムの値がほぼ一致したのに対し、2.2 m B では若干新システムのフラックスが大きくなった。高度29.5 m では新システ

ムのフラックスが NW・SE 共に 10%以上大きくなった. これは, 2.2 mに比べて 29.5 mの方が周期の長い変動がフラックスに寄与しているために, 時間スケール 10分の変動までしか考慮していない旧システムに対し, 60分の変動まで考慮している新システムのフラックスが大きくなったのではないかと考えられる.

#### 2. 旧システムの再現性の検証

フラックス計算値 RM は、乱流生データから旧システムの計算方法を模倣した計算値である。旧システムと RM の運動量フラックスの比較を第3図に示す。高度 2.2 m では A・B 共に旧システムと RM の値はほぼ一致した。しかし、高度29.5 m では NW・SE 共に RM が5%程度大きくなった。2高度間で違いが生じた一因として、2.2 m に比べて風速が大きい29.5 m で、フラックスメータの倍率設定値の影響により強風時に SATの出力値が飽和に達していた可能性も考えられる。

第4図は旧システムと RM の熱フラックスの 比較である. 2.2 m A を除く各観測点で旧システ

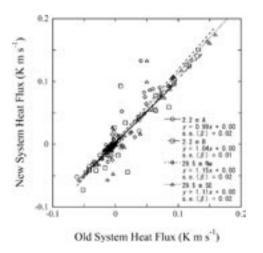


第1図 旧システムと新システムにおける運動量フラックスの比較 図中に各比較に関する回帰直線を記す.s.  $e.(\beta)$  は傾きの標準誤差である.

ムに比べて RM のフラックスが大きくなった. 第4図における大小関係と回帰直線の傾きは、第 2図のそれとほぼ一致している. つまり新システ ムと RM の熱フラックスが、異なる高さにおい て、それぞれほぼ一致していることになる、この ことから、また後で述べるように新システムによ る熱フラックスの記録値は乱流生データから完全 に再現できることを考慮すると、旧システムのみ が他と違いを示しており、また乱流生データから の計算 (RM) でも再現出来ないことになる. 高 度 2.2 m よりも 29.5 m において旧システムが過 小になることから、前述した10分以上の周期の 変動による影響のみでなく、単純ではない要因が 影響を与えている可能性が考えられる。このよう な要因として, フラックスメータの倍率設定値に よるデジタル的な飽和の発生、アナログ回路によ るローパス・ハイパスフィルターの組み合わせが デジタルで完全に再現出来ていないこと, などが 考えられる.

#### 3. 新システムの再現性の検証

乱流生データから新システムを再現できるか確



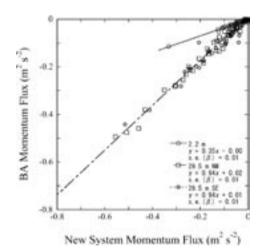
第2図 旧システムと新システムにおける熱フラックスの比較 図中に各比較に関する回帰直線を記す. s. e.  $(\beta)$  は傾きの標準誤差である.

認するために、新システムと BA の運動量フラックスの比較を第 5 図に示す。第 1 図と同様に、高度 2.2 m における新システムの運動量フラックスは異常値を示した。高度 29.5 m では新システムの運動量フラックスが BA に比べて 6%程度大きくなった。

WW William Wil

第3図 旧システムと RM の運動量フラック スの比較 図中に各比較に関する回帰直線を記す。s

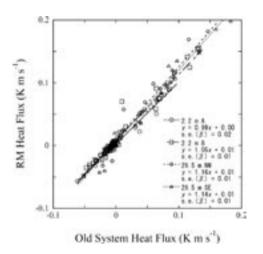
図中に各比較に関する回帰直線を記す. s. e.  $(\beta)$  は傾きの標準誤差である.



第5図 新システムとBAの運動量フラック スの比較

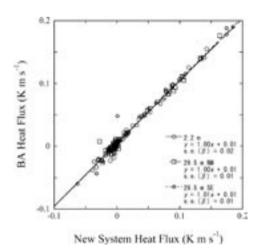
図中に各比較に関する回帰直線を記す. s. e.  $(\beta)$  は傾きの標準誤差である.

第6図は新システムとBAの熱フラックスの比較である.各観測点共に両者のフラックスは非常に良く一致した.新システムの熱フラックスについては再現性・信頼性共に確認されたといえる.熱フラックスにおいてBAから新システムが再現可能なことを考慮すると、第5図の高度29.5 m



第4図 旧システムと RM の熱フラックスの 比較

図中に各比較に関する回帰直線を記す.s. e.(β)は傾きの標準誤差である.



第 6 図 新システムと BA の熱フラックスの 比較

図中に各比較に関する回帰直線を記す. s. e.  $(\beta)$  は傾きの標準誤差である.

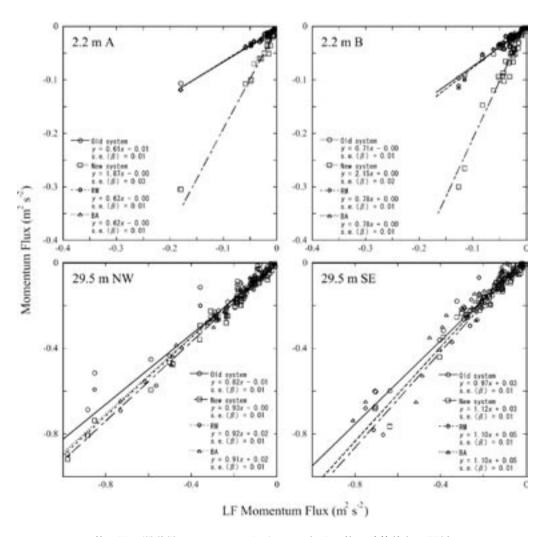
での運動量フラックスの比較において新システムが BA に比べて若干過小になっていることは,運動量フラックスの計算に問題がある可能性を示唆するものである.

# 4. 新しいフラックス計算法との比較

運動量・熱フラックスにおける LF と他の計算値との関係を第7図, 第8図にそれぞれ示す. 測定高度が高くなるほど周期の長い変動が影響してくるために、LFと他の計算値との差は高度2.2

m よりも 29.5 m で明瞭に表れると予想していたが、運動量フラックスについては高度 2.2 m の方が差が大きくなった.

高度 29.5 m に着目すると、NW では LF に対して旧システムが 18%、他の計算値は 10%弱の過小評価であった。これに対し SE では旧システムを除いて 10%前後の過大評価となった。NW と SE では正反対の影響が見られたが、これは風向が大きく関係しているものと思われる。TERCで使用している SAT は、設置上の問題から SAT

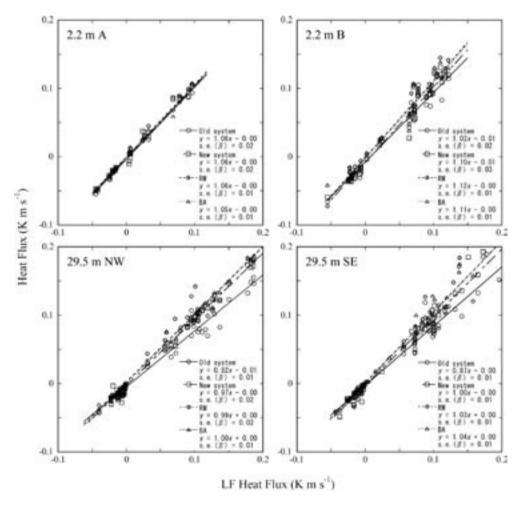


第7図 運動量フラックスにおける LF とその他の計算値との関係 図中に各比較に関する回帰直線を記す. s.e. $(\beta)$ は傾きの標準誤差である.

の開口部が風向側に向いていない場合は障害物の影響で正しい風速を測定することが出来ない. TERC では 8 月までは南東風が卓越しているが,9 月以降になると西~北西風が卓越する. このため本稿の解析対象期間の大部分で 29.5 m SE は風向と逆向きに位置している事になる. この結果,障害物の影響などにより LF に比べて 10%もの違いが発生したと思われる. この問題の詳細については考察の部分で記す. 29.5 m NW の結果を元にまとめると,運動量フラックスの新・旧システム計算値は, LF フラックスと比較して,絶対値

で10~20%程度小さい.

熱フラックスにおける LF と他の計算値との関係を第8図に示す。高度 29.5 m では運動量フラックスほど明瞭な違いは見られず,旧システムを除き,LF と他の計算値が 5%程度以内で一致した。高度 2.2 m では LF の値が他の計算値よりも小さくなる傾向を示した。これは,日中に LF 内のメソスケールフラックス成分が頻繁に(全体の49%)マイナスのフラックス(下向き輸送)を示した結果,他の計算値に比べてフラックスが小さくなったためである。

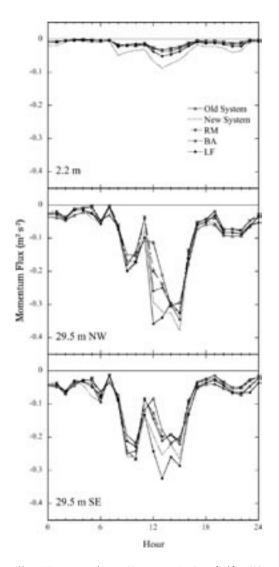


第8図 熱フラックスにおける LF とその他の計算値との関係 図中に各比較に関する回帰直線を記す.  $s.e.(\beta)$  は傾きの標準誤差である.

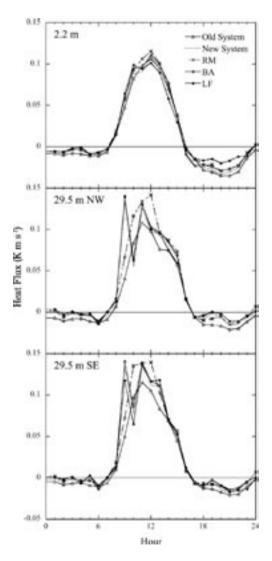
# Ⅳ 考察

以上の結果を詳細に考察するため、運動量・熱フラックスの時間変動を調べてみることにする. 2003 年 11 月 2 日における運動量・熱フラックスの日変動を第 9 図と第 10 図にそれぞれ示す. この日は一日を通して西北西風が卓越しており、正味放射量は正午に最大の 428 W m<sup>-2</sup> を記録した. 高度 2.2 m では各計算値は概ね同じ日変動を示し

たのに対し、29.5 mでは昼間に大きな違いが見られた. 運動量フラックスは日中に LF の絶対値が大きくなる傾向を示した. この原因は、LF を構成する乱流フラックスとメソスケールフラックスそれぞれの成分の中で、後者の影響が無視できない大きさを持っているためであると考えられる. 乱流フラックス成分の値は他の計算値と同程度であったが、メソスケールフラックス成分の値が乱流フラックスの30%程度に達する場合が



第9図 2003 年 11 月 2 日における各種の運動量フラックス日変化



第 10 図 2003 年 11 月 2 日における各種の 熱フラックス日変化

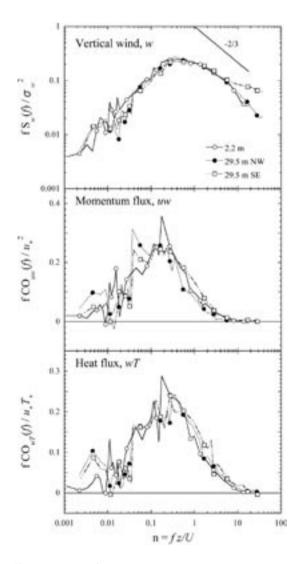
あった.

熱フラックスの日変動は、8時から10時にか けて高度 29.5 m の新システム・BA・LF が激し い変動を示したのに対し旧システム・RM にはそ の傾向が表れなかった。この時間帯は気温の上昇 が激しいために、時間スケールが長くなるほど定 常性を確保することが困難になる。60分算術平 均からの偏差を用いてフラックスを算出する新シ ステムと BA では、データ内の気温トレンドに伴 う非定常性が原因となりフラックスが激しい変動 を示した. LF の変動は、乱流フラックス成分は 旧システムやRMよりも1~2割大きい値であっ たが、メソスケールフラックス成分が乱流フラッ クス成分を上回る大きさであったために、新シス テムやBAと同程度の値を示した.この時間の熱 フラックスのコスペクトルを見てみると、周波数 が 0.001 Hz (16 分強) でもまだ大きなパワーを 持っていた.このため、10分のハイパスフィル ターがかかっている旧システム・RM は、LF 内 の乱流フラックス成分に比べて過小になった.

第 1 表に、北西・南東  $\pm 90$  度の風向で分類した解析対象期間の日中( $9:00\sim15:00$ )の運動量・熱フラックスの値を示す。値は LF に対する割合で表した。ただし、高度 29.5 m では風上側に位置する SAT の LF の値を風下側にも適用した。上述のように、計算方法などに問題があると考えられる新システムの運動量フラックスは除外した。

まず,風下側に設置した SAT の値は風上側に比べて増加する傾向が見られ,その増加率は運動量フラックスで  $10 \sim 20\%$ ,熱フラックスで  $5 \sim 10\%$ であった.この原因を探るために鉛直風速成分のスペクトル解析を行った(第 11 図上).解析に用いたデータは,日中に西北西風が強く吹いた 11 月 17 日の  $10:00 \sim 14:00$  である.風下側に設置されている 29.5 m SE は慣性領域の高周波側で-2/3 乗則に乗らずに減衰が遅くなっている.これは,風上側にある SAT,タワー,SAT の支柱などの障害物によって乱流が生じ,高周波側で乱

流エネルギーが生成されたことが原因だと考えられる。風速の強い時には同様の現象が起こっているものと推測され、このために風下側に設置されている SAT のフラックスが風上側に比べて過大評価されたものと考えられる。運動量・熱フラックスのコスペクトル(第11図中、下)で29.5 m SE と 29.5 m NW を比較すると、運動量・熱フ



第 11 図 2003 年 11 月 17 日 10:00 ~ 14:00 における 各観測点の鉛直風速成分スペクトル(上), 運動量フラックスのコスペクトル(中), 熱フラックスのコスペクトル(下)

ラックス共に、n = 0.3 以上において、29.5 m SE の方がフラックスが大きくなっていることが明瞭である。また、この29.5 m SE と29.5 m NW の差は、運動量フラックスの方が熱フラックスに比べて大きくなっている。この原因は、鉛直風速成分と同様に水平風速成分においても、SAT の支柱やタワーによる乱れの発生が起こったと考えられる。この結果は、風下側の超音波風速計のデータを使用する時に注意が必要であることを意味している。

第1表に戻って風上側のデータのみで検証をすると,運動量フラックスについては各観測点の各計算値が共に LF に比べて  $10 \sim 30\%$ 程度小さい結果となった.熱フラックスについては,高度 2.2 mでは旧システムは LF とほぼ同じ大きさであるのに対し,高度 29.5 mでは約 20%の過小評価であった.同様に,新システムでは  $5 \sim 10\%$ 程度の過小評価であった.相対的に低周波成分が卓越しているため,2.2 mでは無視できた LF のメソスケールフラックス成分の影響が,29.5 mでは無視できない大きさになっているためである.第 11 図中,下に示したように運動量フラックスと熱フラックスのコスペクトルを比較すると,運動量フラックスの方が若干低周波側へ寄っていることがわかる.このため,熱フラックスに比べて運

動量フラックスの方が周期の長い変動の影響を強く受けることとなり、LFにおけるメソスケールフラックス成分の影響が大きくなり、LFに対する過小評価の割合が大きくなったと考えられる.

#### V 結論

筑波大学陸域環境研究センターでルーチン観 測を行っている運動量・熱フラックスについて, 旧・新システムのフラックスと乱流生データか ら算出したフラックスを比較した。旧システム と新システムの比較では、 高度 29.5 m で新シス テムの熱フラックスが明瞭に大きくなった. 運動 量フラックスについては、新システムの計算方法 の有意性が疑われる結果となった. 乱流生データ から旧・新両システムを再現する試みを行ったと ころ, 新システムの熱フラックスはよく再現され たのに対し、旧システムは良い精度で再現するこ とが出来なかった.これは、デシタルデータに移 動平均をかけた計算がアナログフィルターによる 移動平均を完全には再現していないことを示す. さらに, 近年提唱されている周期の長い変動を考 慮した渦相関フラックスの計算方法と当センター の公開データを比較した. これによると, この新 しい計算方法では、旧システムは運動量フラック

第1表 解析対象期間日中  $(9:00 \sim 15:00)$  における, LF の運動量・熱フラックスに対する旧システム・RM・BA のフラックスの割合 29.5 m に関しては風向側 SAT の LF 値を両方に用いた. 括弧 () 内の数字は, LF とそれぞれの値の相関係数を表す.

	Wind direction NW $\pm 90$ degree			SE ±90 degree		
	2.2 m	29.5 m NW	29.5 m SE	2.2 m	29.5 m NW	29.5 m SE
Momentum flux						
Old System	0.84 (0.98)	0.85 (0.98)	1.01 (0.96)	0.76 (0.99)	0.95 (0.95)	0.75 (0.97)
RM	0.81 (0.98)	0.84 (0.99)	1.05 (0.97)	0.70 (1.00)	0.97 (0.97)	0.76 (0.98)
BA	0.81 (0.98)	0.82 (0.99)	1.04 (0.97)	0.71 (1.00)	0.93 (0.97)	0.73 (0.99)
Heat flux						
Old System	0.96 (0.88)	0.78 (0.78)	0.87 (0.78)	1.03 (0.91)	0.84 (0.74)	0.79 (0.82)
New System	1.01 (0.96)	0.93 (0.95)	0.98 (0.91)	1.05 (0.94)	1.01 (0.82)	0.89 (0.85)
RM	1.11 (0.95)	0.99 (0.84)	1.04 (0.84)	1.09 (0.98)	1.04 (0.79)	0.94 (0.89)
BA	1.09 (0.97)	0.98 (0.95)	1.03 (0.92)	1.08 (0.97)	1.04 (0.89)	0.96 (0.97)

スで  $13 \sim 20\%$ , 熱フラックスでは 20%程度の過小評価がある可能性がある。新システムでは熱フラックスで  $5 \sim 10\%$ 程度の過小評価が見られた。今回は短期的に乱流データを取得したが,今後 TERC でフラックス観測を継続していく上で,また,過去のデータを有効に活用するためにも,長期的に乱流生データを取得・解析することが必要だと思われる。

#### 汝献

- 浅沼 順・野原大輔・原 政之・寄崎哲弘 (2004):第3世代気象・水文観察データ収 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.
- 古藤田一雄・佐倉保夫・林 陽生・甲斐憲次 (1978):水理実験センターにおける熱収支・ 水収支観測システムとデータ集録・処理につ いて. 筑波大学水理実験センター報告, 2, 65-89.
- 桜 久美子・新村典子・木村富士男 (1999): 長期データを用いた草地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.
- 光田 寧・花房龍男・藤谷徳之助(1971): 大気 乱流特性の実時間解析について. 京都大学防 災研究所年報, **14A**, 505-511.
- 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, 1-12.
- Finnigan, J. J., Clement, R., Malhi, Y., Leuning, R. and Cleugh, H. A. (2002): A Re-Evaluation of Long-Term Flux Measurement Techniques Part I: Averaging and Coordinate Rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, **107**, 1-48.
- Howell, J. and Mahrt, L. (1997): Multiresolution Flux Decomposition. *Boundary-Layer Meteorology*, **83**, 117-137.
- Mahrt, L., Vickers, D., Sun, J., Jensen, N. O., Jørgensen, H., Pardyjak, E. and Fernando, H. (2001): Determination of the Surface Drag Coefficient. *Boundary-Layer Meteorology*, **99**, 249-276.
- Massman, W. J. (2000): A Simple Method of Estimating Frequency Response Corrections for Eddy Covariance Systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, **104**, 185-198.
- Paw U, K. T., Baldocchi. D., Meyers, T. P., and Wilson, K. B. (2000): Correction of Eddy-Covariance Measurements Incorporating Both Advection Effects and Density Fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, **97**, 487-511.
- Tanner, C. B. and Thurtell, G. W. (1969):

  Anemoclinometer Measurements of Reynolds

  Stress and Heat Transport in the Atmospheric

  Surface Layer. University of Wisconsin
  Technical Report, ECOM-66-G22-F, 82p.

(2004年5月31日受付, 2004年10月4日受理)