

# 陸域環境研究センター気象観測塔における 広域 熱・水蒸気・CO<sub>2</sub>フラックスの測定

Measurement of Regional Fluxes of Heat, Water Vapor  
and CO<sub>2</sub> at the TERC Meteorological Tower

小谷 亜由美\*・杉田 倫明\*\*

Ayumi KOTANI\* and Michiaki SUGITA\*\*

## はじめに

地域の気候や水循環を規定する要因の一つに、地表面と大気間の熱・水フラックスがあげられる。また、二酸化炭素をはじめとする微量気体のフラックスも地球温暖化問題を背景として注目されている。このような地表面フラックスの測定は様々な地域で行われ、農耕地や森林、裸地などでの詳細な研究が蓄積されている。しかしとくに日本の中小規模の都市では、都市的土地利用と農村的土地利用が共存しており、様々な地表被覆が混在している。そして、個々の地表被覆での地表面フラックスの影響を受けた広域地表面のフラックスが、地域の気候や水循環を検討するうえで重要になる。

このような多様な地表被覆が混在する地域の広域フラックスを検討するため、筑波大学陸域環境研究センターの気象観測塔 29.5 m 高度において、熱・水蒸気フラックスの測定を行った。この高度での熱フラックスの測定値は、直下の地表面だけでなく風下側地表面の複数の土地被覆の影響を受けたものである (Sugita *et al.*, 1997)。本稿では、観測塔における測定方法と測定結果を報告する。

## 測定方法

筑波大学陸域環境研究センター (以下、TERC) 熱収支・水収支実験圃場内にある気象観測鉄塔 (以下、観測塔) の 29.5 m の高さでルーチン観測に使用されている超音波風速温度計 (カイジョー, DAT-300) と、今回の観測のために設置したオープンパス型赤外線ガス変動計 (Data Design Group, OP2) を用いて、3 次元風速成分と気温、水蒸気量、二酸化炭素濃度の変動を測定した。測定期間は 2002 年 4 月から 2003 年 1 月である。長雨の期間にはセンサーを取り外して観測を停止した。

超音波風速温度計のプロープ (TR-61A) は、水平風速軸が 120 度交差のものである。正面に対して半時計回りに 120 度の位置に赤外線ガス変動計を設置したところ、鉛直風プロープ軸と赤外線パスの距離は 38 cm となった (第 1 図)。観測期間内の卓越風向を考慮して、2002 年 4 月から 11 月までは南東向き、2002 年 12 月から 2003 年 1 月までは北西向きのアームに設置されている超音波風速温度計を用い、これに合わせて赤外線ガス変動計を再設置した。設置後は、2 週間に 1 度程度で同センサーの光源および受光部のガラス窓を洗浄した。

\* 筑波大学生命環境科学研究科

\*\* 筑波大学地球科学系

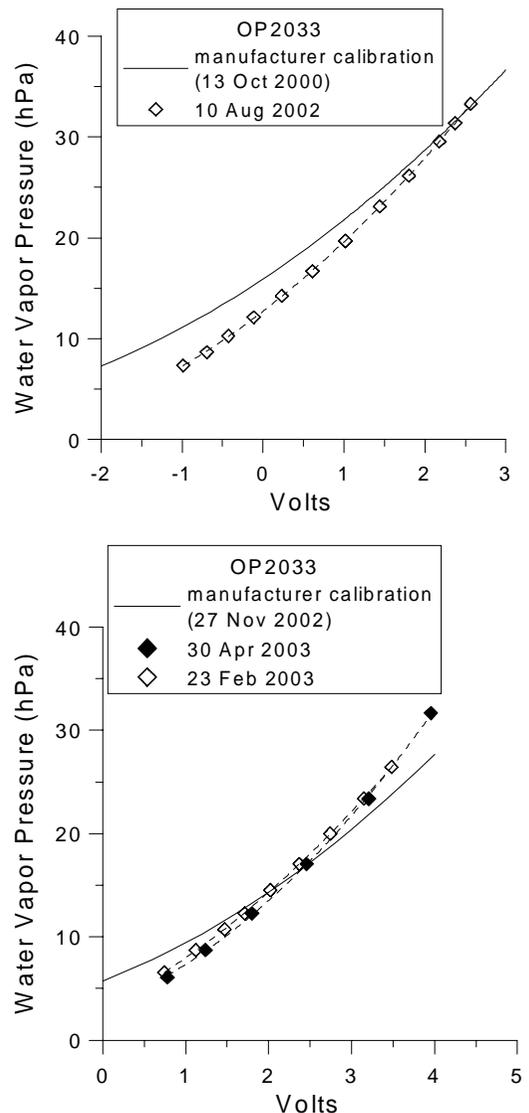


第1図 センサー設置部  
超音波風速温度計(右)の後方より撮影

赤外線ガス変動計への電量供給のため、観測塔地上部から 100 V 電源を高度 30 m まで延長した。センサーは 12 VDC 電源 (1.4 A 17 W) を要するので、100 VAC を 12 VDC に変換してセンサーに供給した。出力信号は水蒸気、CO<sub>2</sub> とともに ±5 VDC であり、それぞれの信号線とグラウンド線を TERC 研究棟内まで延長して A/D 変換機を介して PC で収録した。観測塔のセンサーから A/D 変換機までは約 300 m の距離であるが、この間の電圧低下は最大で 1 mV オーダであった。

超音波風速温度計の信号(風速 3 成分, 温度)は、TERC ルーチン観測システムにより、TERC 研究棟内にある超音波風速温度計本体で 1 時間単位で処理されている。今回はルーチン用計算前のデータを、アナログ出力で取得し A/D 変換機を介して PC で収録した。使用した A/D 変換機 (National Instruments PCI 6034E) は、16 bit 解像度、シングルエンド 16 チャンネル入力 PC の PCI カードスロットに設置が可能である。PC での収録には、Windows98 上で計測制御ソフトウェア Lab View (National Instruments) を用いた(宮崎ほか, 2001)。この際のサンプリング間隔は 20 Hz とし、これにより風速 3 成分と温度、水蒸気の時系列データを得た。

また、赤外線ガス変動計に対して、観測期間の前後に室内での校正を行った。水蒸気の供給には露点発生器 (LI-610, LICOR) を、CO<sub>2</sub> では標準ガス (300, 450, 600 ppm) を用いた。両気体の濃度ゼロ点には N<sub>2</sub> ガスを使用した。水蒸気についての結果(センサー出力電圧と水蒸気量の関係)を第 2 図に示す。ただし、観測期間中にセンサーの修理を行っており、別図で示した。時間の経過とともに



第2図 赤外線ガス変動計 校正結果(水蒸気)  
実線はメーカーによる変換式(2002年11月に修理)

に曲線の傾きは大きくなり、感度が落ちていることがわかる。小野ほか(2003)は、同機種の感度とゼロ点出力が時間経過とともに変動することを示しているが、今回用いた個体も同様の傾向を示した。2002年8月に行った校正の結果、校正前の式では日中の潜熱が1.2割の過小評価、顕熱が0.1割の過大評価であった(第3図)。顕熱にも影響しているのは、下記第4式により顕熱計算値に対して水蒸気補正を行っているためである。

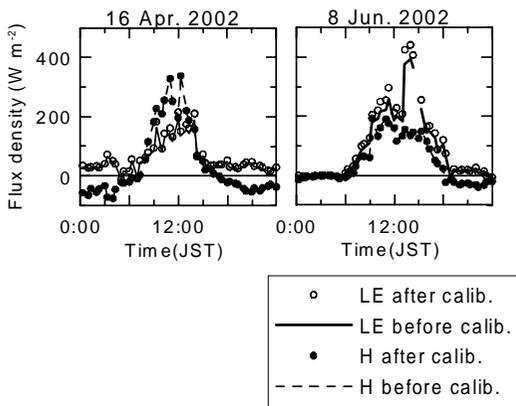
### データ処理

20 Hz サンプリングで収録した生データに対して、29分51秒(35820データ)ごとに計算を行った。フラックスの算出には渦相関法を用いた。鉛直風速  $w$  とスカラー量  $T, q, \rho_c$  の共分散から顕熱  $H$ 、潜熱  $LE$ 、 $CO_2$  フラックス  $F_c$  が次式で与えられる。

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

$$LE = \rho l \overline{w'q'} \quad (2)$$

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} \quad (3)$$



第3図 水蒸気校正前後のフラックス比較  
実線・破線はメーカーによる変換式、白丸・黒丸は校正後の変換式を用いて計算

ここで、 $\rho$  : 空気密度 ( $kg\ m^{-3}$ )、 $C_p$  : 等圧比熱 ( $1005\ J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ )、 $l$  : 水の蒸発の潜熱 ( $J\ kg^{-1}$ )、 $w$  : 鉛直風速 ( $m\ sec^{-1}$ )、 $T$  : 気温 ( $K$ )、 $q$  : 比湿 ( $kg\ kg^{-1}$ )、 $\rho_c$  :  $CO_2$  密度 ( $mg\ m^{-3}$ ) で、バー ( ) は平均化時間の平均値、プライム ( ' ) は平均値からの変動量を表す。

フラックス計算の前に、風速3成分についての座標変換を行った。まず水平風速について120度交差座標系を直交座標系に変換し、 $x$ 軸を主風向とする水平回転の後に、平均鉛直風速をゼロにする座標回転(Kaimal and Finnigan, 1994)を、30分データごとに施した。

超音波風速温度計で出力される温度は、音仮温度であるため、水蒸気補正を行った。

$$T = T_{sv} (1 - 0.514q) \quad (4)$$

ここで、 $T_{sv}$  : 計測される音仮温度 ( $K$ )、 $q$  : 比湿 ( $kg\ kg^{-1}$ ) である。

これらのデータを用いて、渦相関法によりフラックスを計算した。水蒸気、 $CO_2$  フラックスについては、空気密度変動の影響を除くためWPL補正を行った(Webb *et al.*, 1980)。

使用した超音波風速温度計の測定範囲風向は、正面中心軸から $\pm 45^\circ$ である。同型のプローブについてGrand and Watkins(1989)は、プローブ自体による障害があらわれない有効風向を正面中心軸から $\pm 30^\circ$ としている。ここでは、タワーの影響を考慮して、 $\pm 45^\circ$ を有効風向とした。

渦相関法により計算されたスカラー量フラックスは、鉛直風速とスカラーセンサー間の距離やその軸と風向との関係、測定高度、大気安定度により過小評価される。Lee and Black (1994)はこれらを変数としてフラックスの減衰を次式で表した。

$$H(r) = H(0) \exp\left[-\beta\left(\delta, \frac{z_m}{L}\right)\left(\frac{r}{z_m}\right)^{4/3}\right] \quad (5)$$

$$\beta\left(\delta, \frac{z_m}{L}\right) = \alpha(\delta)\left(1 - 16\frac{z_m}{L}\right)^{-1/2}\left(1 - \frac{z_m}{L}\right)^{1/3} \quad (6)$$

$$\alpha(\delta) = 1.18(\cos^2 \delta + 2.4 \sin^2 \delta)^{2/3} \quad (7)$$

ここで、 $r$ : 大きさ  $r$ , 風向 からなる位置ベクトル,  $H(r)$ : 距離  $r$  離れたプローブ (鉛直風速とスカラーセンサー) により算出されるフラックス,  $\sigma$ : 2つのプローブ並びの方向を0とした風向,  $z_m$ : 地面修正量  $d$  からの測定高度,  $L$ : オブコフ長である. 超音波風速温度計と赤外線ガス変動計間の距離 (水平方向 0.38 m) と測定高度 29.5 m (地面修正量は Hiyama *et al.* (1996) で得られた 6.5 m) についてのフラックス過小評価率  $H(r)/H(0)$  は 1%弱となった. これにより, センサー間距離による過小評価は無視できると判断した.

### 測定結果

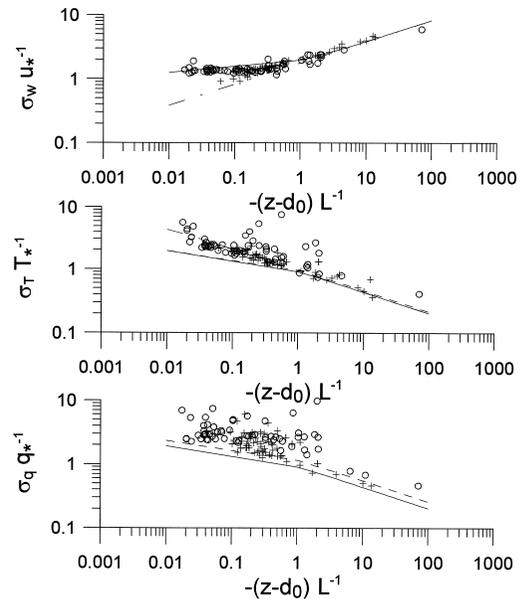
風速鉛直成分  $w$ , 気温  $T$ , 比湿  $q$ , の無次元化標準偏差 (乱流強度)  $\sigma_w u_*^{-1}$ ,  $\sigma_T T_*^{-1}$ ,  $\sigma_q q_*^{-1}$  と大気安定度との関係を第4図に示す. ここで  $w$ ,  $T$ ,  $q$  はそれぞれ鉛直風速, 気温, 比湿の標準偏差であり,  $u_*$  は摩擦速度,  $T_* = -\overline{w'\theta'}/u_*$ ,  $q_* = -\overline{w'q'}/u_*$  である. 大気安定度は  $-z/L$  ( $d$ : 地面修正量,  $L$ : オブコフ長) で表し, 不安定条件下のデータのみを示している.

4月から6月のデータは,  $\sigma_q q_*^{-1}$  のばらつきが大きいのが Liu *et al.* (1998) などの結果と同様の傾向となった. 一方, 12月と1月のデータは  $\sigma_T T_*^{-1}$ ,  $\sigma_q q_*^{-1}$  が大きくなっており, 物理量の変動に対して輸送量が小さいことが原因している. 裸地などの乾燥地表面での比湿変動が相似則に乗らないことは Tamagawa (1996) などにも示されているが, 植生地を含む地表面でも冬季には同様の結果となった.

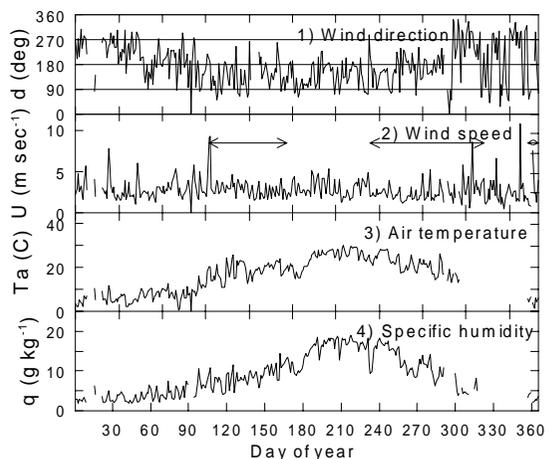
29.5 m での気象要素と顕熱, 潜熱フラックスの日中平均値と TERC 圃場での降水量の季節変化を第5, 6図に示す. 季節の推移および降水に应答した季節変化が表れている.

また, 顕熱, 潜熱,  $\text{CO}_2$  フラックスの日変化を第7図, 第8図に示す. ここで, TERC 構内の観測圃場 (新村ほか, 2002), アカマツ林 (Iida, 2003),

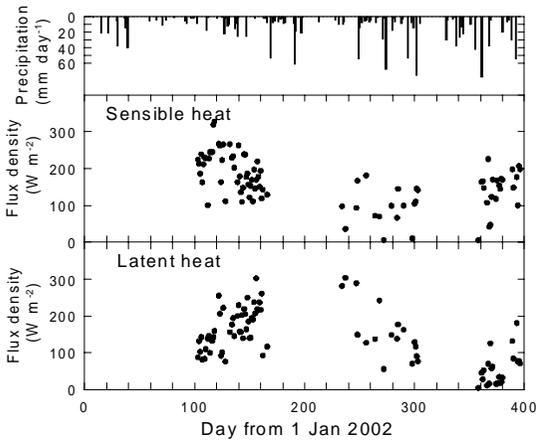
研究棟屋上 (小谷, 2003) における地表面熱フラックスの測定値も合わせて図示した. これについて小谷 (2003) では, 周辺地域の代表的な土地被覆における顕熱, 潜熱フラックスの空間平均値と 29.5 m でのフラックスとの比較を行い, 観測塔での測定値が代表する空間スケールを検討している.



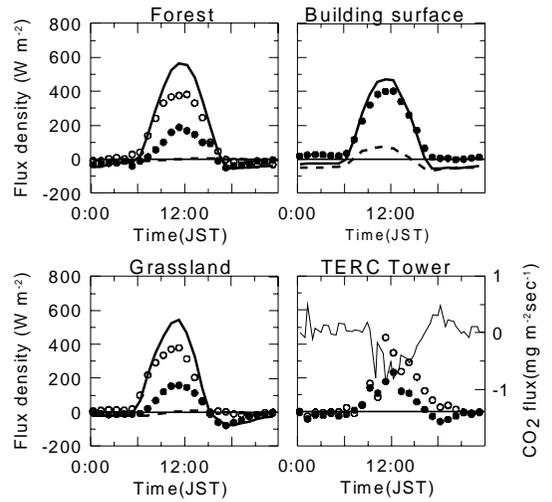
第4図 風速・スカラー量の乱流強度と大気安定度の関係上から, 鉛直速度  $w$ , 気温  $T$ , 比湿  $q$  の乱流強度を示し, + は 5 - 6 月,  $\circ$  は 12 - 1 月の値である. 実線は Panofsky and Dutton (1984), 破線は Liu *et al.* (1998) により得られた曲線



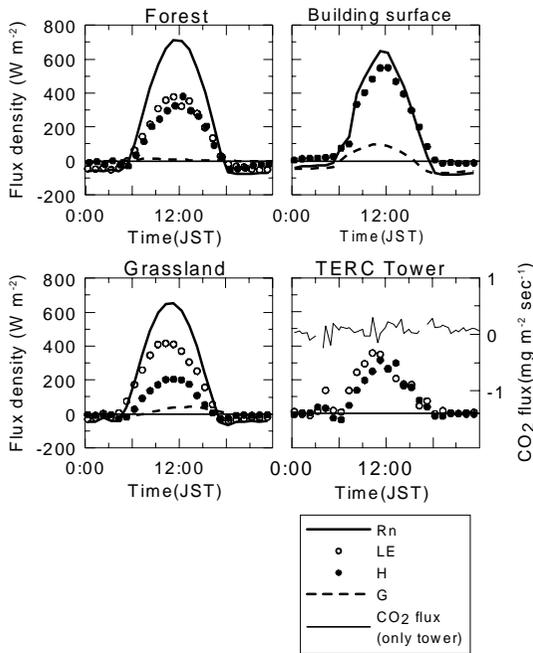
第5図 風向, 風速, 気温, 比湿の季節変化 (29.5 m)



第6図 降水量，顕熱，潜熱フラックスの季節変化 (29.5 m) 降水量は TERC 圃場での測定値



第8図 地表面熱，CO<sub>2</sub> フラックスの日変化(2002年10月13日) 第7図と同じ



第7図 地表面熱，CO<sub>2</sub> フラックスの日変化(2002年5月2日)

TERC 内の林地，建物屋上，草地と観測塔 29.5 m の図であり，正味放射量(太実線)，潜熱(○)，顕熱(---)，地中熱流量(破線)，CO<sub>2</sub> フラックス(細実線，観測塔のみ)の日変化を示す。

おわりに

観測塔 29.5 m に TERC により設置されている超音波風速温度計に赤外線ガス変動計を併設し，熱，水蒸気および二酸化炭素フラックスの測定を行った。このうち熱フラックスは TERC による常時測定項目でデータが蓄積されており，今回の測定結果を用いて対象期間を拡張した広域フラックスの解析が可能であると期待できる。

謝辞

本観測を実施するに際して，筑波大学陸域環境研究センター浅沼 順先生，野原大輔氏，新村典子氏(現：東京理科大学理学部)にご指導，ご協力頂きました。また，学内プロジェクト(A)「草原生態系接境界面を介した熱輸送・炭素交換過程に関する微気象学および生態学的解析」(代表：及川武久先生)にデータ収録システムを使用させていただきました。

## 文献

- 小野圭介・宮田 明・齊藤 誠・原園芳信 (2003):  
Open-path IRGA の校正と機種間比較 . 日本気象  
学会春季大会予稿集 , 239p .
- 小谷亜由美 (2003) : 多様な土地利用形態が混在す  
る地域における広域スケールの熱収支 . 筑波  
大学修士課程環境科学研究科修士論文 .
- 新村典子・黒川智恵・浅沼 順 (2002) : 熱収支・  
水収支観測資料 - 2001 年 - . 筑波大学陸域環  
境研究センター報告 , **3** , 121-146 .
- 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 , No.199, 201-234 .
- Grand, A. L. M. and Watkins, R. D. (1989) : Errors in  
turbulence measurements with a sonic anemometer.  
*Boundary-Layer Meteorology*, **46**, 181-194.
- Hiyama, T., Sugita, M. and Kotoda, K. (1996) : Regional  
roughness parameters and momentum fluxes over  
complex area. *Journal of Applied Meteorology*, **35**,  
2179-2190.
- Iida, S. (2002) : Change of water balance in Japanese  
red pine forest under the successional process.  
*Doctoral. Thesis, University of Tsukuba.*
- Kaimal, J. C. and Finnigan, J. J. (1994) : *Atmospheric  
boundary layer flow - Their structure and  
measurement.* Oxford University Press, New York,  
289p.
- Lee, X. and Black, A. (1994) : Relating eddy correlation  
sensible heat flux to horizontal sensor separation in  
the unstable atmospheric surface layer. *Journal of  
Geophysical Research*, **99** (D9), 18545-18553.
- Liu, X., Tsukamoto, O. Oikawa, T. and Ohtaki, E.  
(1998) : A study of correlations of scalar quantities  
in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer  
Meteorology*, **87**, 499-508.
- Panofsky, H. A. and Dutton, J. A. (1984) : *Atmospheric  
Turbulence - Models and methods for Engineering  
Applications.* John Wiley and Sons, New York, 397p.
- Sugita, M., Hiyama, T. and Kayane, I. (1997) : How  
regional are the fluxes obtained from lower  
atmospheric boundary layer data?. *Water Resource  
Research*, **33**, 1437-1445.
- Tamagawa, I. (1996) : Turbulent characteristics and bulk  
transfer coefficients over the desert in the HEIFE  
area. *Boundary-Layer Meteorology*, **77**, 1-20.
- Webb, E. K., Pearman, G. I. and Leuning, R. (1980) :  
Correction of flux measurement for density effects  
of heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal  
of the Royal Meteorological Society*, **106**, 85-100.

(2003年6月2日受付, 2003年7月24日受理)