

熱収支フラックス比法による気体フラックスの測定 Measurement of gas fluxes using the energy balance flux ratio method

○小谷廣通*, 北川泰之*, 丹下裕介*, 山口真吾*

ODANI Hiromichi, KITAGAWA Yasuyuki, TANGE Yuusuke, YAMAGUCHI Singo

1.はじめに

農地一大気間における CO₂ および H₂O フラックスの測定は、作物の生育とその環境を把握するときに不可欠である。また、CO₂ および CH₄ フラックスの測定は、農地が地球環境に及ぼす影響を解明するときに不可欠である。

小谷ら(2001)は微気象学的方法の一つとして、潜熱フラックス(水蒸気フラックス)を測定する熱収支フラックス比法を提案した。本報告ではこの熱収支フラックス比法を拡張して、CO₂ や CH₄ などの気体フラックスを推定する方法を水田において検討した。

2.熱収支フラックス比法による潜熱フラックスの測定

潜熱フラックス $LF_{H_2O,f}$ (Wm⁻²) は、次のフラックス比法によって算定される。

$$LF_{H_2O,f} = LH_s \frac{\rho_{w1}/\rho_{a1} - \rho_{w2}/\rho_{a2}}{C_p(T_{a1} - T_{a2})} \quad (1)$$

ここに、 L は蒸発潜熱 (Jkg⁻¹)、 $F_{H_2O,f}$ は水蒸気フラックス (kgm⁻²s⁻¹)、 H_s は渦相関法によって測定した顕熱フラックス (Wm⁻²)、 ρ_w は水蒸気密度 (kgm⁻³)、 ρ_a は乾燥空気密度 (kgm⁻³)、 ρ_{w1}/ρ_{a1} は混合比、 C_p は空気の定圧比熱 (JK⁻¹kg⁻¹) および T_a は気温 (°C) である。また、添え字 1、2 は 2 高度 (z_1, z_2) を表す。

次に、熱収支式が検討される。純放射量 R_n (Wm⁻²)、地中熱伝導量 G (Wm⁻²) および湛水の貯留熱変化量 ΔS (Wm⁻²) の和 ($R_n - G - \Delta S$) は、通常 $LF_{H_2O,f}$ と H_s の和とは一致しない。そこで p 、 q および r を導入し、より正確な潜熱フラックス $LF_{H_2O,ef}$ が次式から推定される。

$$LF_{H_2O,ef} = p \cdot R_n - q \cdot G - r \cdot \Delta S - H_s \quad (2)$$

p 、 q および r の値は比較的大きな温度差と混合比差のデータを用いて決定される。

3.気体フラックスの推定への拡張

(1) 式の $LF_{H_2O,f}$ の代わりに (2) 式の $LF_{H_2O,ef}$ を用いることは、 $LF_{H_2O,ef}$ が次の 2 式から得られたと考えることができる。

$$H_s = -D\rho_a C_p \frac{T_{a1} - T_{a2} + \Delta T}{z_1 - z_2} \quad (3)$$

$$LF_{H_2O,ef} = -LD\rho_a \frac{\rho_{w1}/\rho_{a1} - \rho_{w2}/\rho_{a2} + \Delta\rho}{z_1 - z_2} \quad (4)$$

ここに、 ΔT は温度差の補正量、 $\Delta\rho$ は混合比差の補正量、 D は補正温度差と補正混合比差に対応して定まる乱流拡散係数である。

(3) および (4) 式には未知量が 3 つ含まれるため、温度の標準偏差 σ_{T_a} と相対湿度 RH の標準偏差 σ_{RH} との間に $\sigma_{RH} = a \cdot \sigma_{T_a}$ の関係 (a : 定数) を仮定し、 ΔT は誤差伝播の法則を用いて求めることにする。 ρ_w および ρ_a は実験式等を用いて T_a および RH から算定できるので、温度差および混合比差の標準偏差 ($\sigma_{\Delta T}$ および $\sigma_{\Delta\rho}$) は σ_{T_a} の関数で与えられることになる。したがって、 $|\Delta T/\Delta\rho|$ の最確値は $\sigma_{\Delta T}/\sigma_{\Delta\rho}$ として求めることができ、これと (3) および (4) 式とから ΔT が算定できる。

残念ながら温度差と混合比差が小さいとき、上の方法では異常な D が算定される場合がある。そこで、比較的大きな温度差と混合比差のデータを用い、 D と渦相関法によって得られた摩擦速度 u_* (ms⁻¹) との間の次の関係を求める。

$$D = b \cdot u_* \quad (5)$$

ここに、 b は定数である。ただし、 b は草丈とセンサの測定高に依存するので、生育期間を短期間に分けて定めることにする。(5) 式から D を求め、次式から CO₂ や CH₄ などの気体フラックスが算定できる。

* 滋賀県立大学環境科学部 School of environmental science, University of Shiga Prefecture

キーワード: 水田、CO₂・CH₄ フラックス、熱収支フラックス比法

$$F_{g,ef} = -D\rho_a \frac{\rho_{g1}/\rho_{a1} - \rho_{g2}/\rho_{a2}}{z_1 - z_2} \quad (6)$$

ここに、 g は気体の種類を表し、 ρ_g は気体の濃度(kgm^{-3})である。ただし、 ρ_a は補正温度を用いて算定される。

4.測定方法

滋賀県立大学圃場実験施設内の水稻植被上において、渦相関法による顕熱フラックスおよび摩擦速度、温・湿度分布(3 高度)、純放射量、地中熱伝導量、2 高度の CO_2 と CH_4 濃度、PPFD および日射量を測定した。また、測定は 2009 年 6 月 19 日～9 月 24 日(移植日：6 月 16 日)に行った。平均化時間は 30 分とした。

5.結果と考察

5.1 $LF_{H_2O,f} + H_s$ と $R_n - G$ の関係

両者の間には相関係数が 0.94 と良好な比例関係が得られた。

5.2 D と u_* の関係

測定期間を 5 つに分け D と u_* との関係を求めた。図 1 は 7/29-8/29 の期間における $D-u_*$ 関係を示している。両者の間には良好な比例関係が得られた。

5.3 日射量と日 CO_2 交換量の関係

測定期間中 10 日はほぼ終日のデータが得られた。図 2 は日射量と日 CO_2 交換量との関係を示している。両者の間で良好な比例関係が得られた。

5.4 $\text{CO}_2 \cdot \text{CH}_4$ フラックスの測定結果と従来の結果との比較

図 3 は測定例として、9 月 9 日における CO_2 フラックス(F_{CO_2})と CH_4 フラックス(F_{CH_4})および PPFD の 30 分平均値の時間的変化を示している。 F_{CO_2} の絶対値と PPFD の時間的変化とは同様の变化傾向を示した。 F_{CH_4} は時間的変化が激しいことがわかるが、従来の測定結果と大差なかった。

水稻植被上の CO_2 フラックスについては、従来、日中で $-2.0 \sim 0 \text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、夜間で $0 \sim 1.0 \text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度の範囲の値が報告されている。本研究の F_{CO_2} は、日中で $-1.70 \sim 0 \text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、夜間で $0 \sim 0.97 \text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲であり、きわめて良好な結果が得られた。また、従来生育期間中

の日 CO_2 交換量については、 $0 \sim 30 \text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 程度の範囲の値が報告されている。本研究では $0 \sim 34.2 \text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ の範囲の値が測定され(図 2 参照)、妥当な結果が得られた。

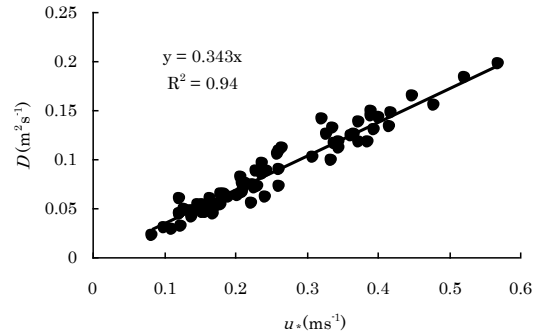


図1 D と u_* の関係 (7/29/09-8/29/09)

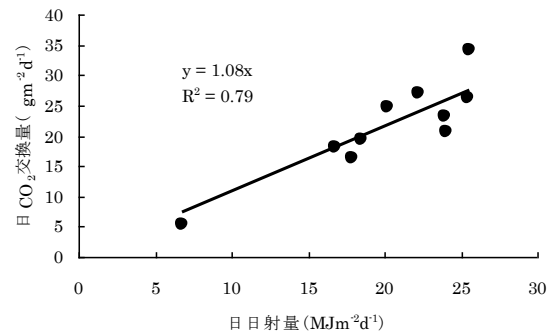


図2 日射量と日 CO_2 交換量との関係

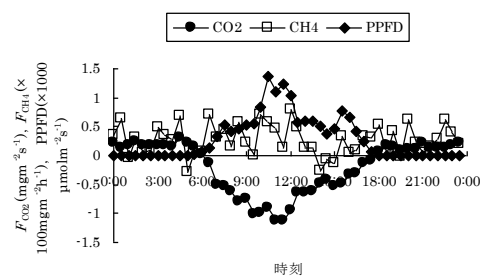


図3 CO_2 フラックス (F_{CO_2}), CH_4 フラックス (F_{CH_4}) および PPFD の時間的変化 (9/9/09)

6.おわりに

以上の測定結果とその考察から、熱収支フラックス比法によって CO_2 および CH_4 フラックスの妥当な測定値が得られると考えられる。ここで示した熱収支フラックス比法は、例えば N_2O フラックスの測定にも適用できるものである。