

水田における乱流フラックスならびに光合成フラックスの推定

東北大学工学部	学生会員	○古谷 龍一
東北大学大学院	学生会員	坂井 七海
University of Phayao	非会員	PIMSIRI Suwannapat
東北大学大学院	学生会員	近 将史
東北大学大学院	正会員	小森 大輔
農学環境変動研究センター	非会員	金 元植

1. はじめに

生物圏の水・CO₂循環は、気候変動に関する研究において重要であり、蒸散量や純生態系交換（NEE）を把握するために植物生理応答に関して、細胞レベルのミクロスケールから全球レベルのマクロスケールまで広範囲で観測・実験や数値実験が進められている。

Baldocchi and Vogel (1996)¹⁾は広葉樹林上の蒸発散・CO₂フラックスについて解析した。また、Scanlon and Sahu (2008)²⁾は、植物由来のフラックス（蒸散フラックスと光合成フラックス）は逆相関であり、非植物由来のフラックス（蒸発フラックスと土壌呼吸フラックス）は順相関であるという仮定と、水利用効率は植物のCO₂摂取量に対する水損失であるという定義のもと、フラックスを分離する手法である Flux Variance Similarity partitioning method (FVS 法) を提示した。一方、FVS 法において水田のような湛水され土壌呼吸フラックスがない地表面上での乱流フラックスの分離推定方法は確立されていない。そこで本研究は水田を対象とし、湛水時におけるフラックスの分離手法の開発を目的とした。

2. 対象地域

対象地点はタイのスコタイ県の水田にある観測タワー（北緯 17°03'51"，東経 99°42'15"）である。観測点の地上高さは7mであり、観測点にて10Hz周期で風速、気温、水蒸気濃度、水位およびCO₂濃度を観測した。観測期間は2006年1月から2007年12月である。

3. 手法

3.1. フラックスの算出

渦相関法を用いてフラックスを算出した。鉛直風速を w 、空気密度を d とすると、濃度 C の物質が単位面積、単位時間あたりに鉛直上向きに輸送される量 F は下式によって表される。

$$F = \overline{w(dC)} = d \overline{(wC)} = d \overline{w'C'} \quad (1)$$

ここで、 $'$ は偏差を表し、上線は平均を表す。(1)式の C に水蒸気濃度及びCO₂濃度を代入することで潜熱フラックス及びCO₂フラックスを算出した。

3.2. 解析期間の決定

観測した水位データから水田の湛水状況を確認し、湛水している期間を対象として解析を行った。

3.3. FVS 法

FVS 法では潜熱・CO₂フラックスについて、気孔によるプロセスである蒸散と光合成は逆相関であり、そうでない蒸発と土壌呼吸は順相関であることが仮定されている。

$$\overline{w'q'} = \overline{w'q'_t} + \overline{w'q'_e} \quad (2)$$

$$\overline{w'c'} = \overline{w'c'_p} + \overline{w'c'_r} \quad (3)$$

$$\rho_{q'_t, c'_p} = -1 \quad (4)$$

$$\rho_{q'_e, c'_r} = +1 \quad (5)$$

$$\rho_{q'_t, q'_e} = -\rho_{c'_p, c'_r} \quad (6)$$

w' : 鉛直風速の偏差, q' : H₂O 濃度, c' : CO₂ 濃度,
 q'_t : 蒸散による CO₂ 濃度, q'_e : 蒸散による CO₂ 濃度
 c'_p : 蒸散による CO₂ 濃度, c'_r : 蒸散による CO₂ 濃度
 ρ : 相関係数

次に、水利用効率(WUE)は植物のCO₂摂取量に対する水損失であるという定義のもと、下式が得られる。

$$WUE = \frac{\overline{w'c'_p}}{\overline{w'q'_t}} = \frac{\overline{w'c'_p} 1 + \tilde{q}_+}{\overline{w'q'_t} 1 + \tilde{c}_+} \quad (\tilde{q} = \frac{\overline{w'q'_e}}{\overline{w'q'_t}}, \tilde{c} = \frac{\overline{w'c'_r}}{\overline{w'c'_p}}) \quad (7)$$

$$\sigma^2_{c'_p} = -WUE^2 \sigma^2_{q'_t} \quad (8)$$

WUE : 水利用効率, σ : 標準偏差

また、CO₂とH₂Oの相関係数は下式にて与えられる。

$$\rho_{q', c'} = \frac{1}{\sigma_c \sigma_q} (-\sigma_{c_p} \sigma_{q_t} + \rho_{q_e, c_p} \sigma_{c_p} \sigma_{q_e} + \rho_{q_t, c_r} \sigma_{c_r} \sigma_{q_t} + \sigma_{c_r} \sigma_{q_e}) \quad (9)$$

(9)式に(6)式および(8)式を代入し、(10)式を得られる。

$$\rho_{q', c'} = \frac{1}{\sigma_c \sigma_q} \left\{ \frac{\sigma_{c_p}^2}{WUE} + \rho_{c_p, c'_r} \sigma_{c_p} \sigma_{c_r} \left(\frac{1}{WUE} + \frac{\overline{w'q'_e}}{\overline{w'q'_t}} \right) + \sigma_{c_r}^2 \frac{\overline{w'q'_e}}{\overline{w'q'_t}} \right\} \quad (10)$$

(7)式と(10)式の連立で、各分離フラックスを算出する。

3.4. 湛水に適応したフラックス分離法

水田における湛水時は土壌呼吸が発生しないため、湛水時の土壌呼吸をないものと定義した($c'_r = 0$)。(7)式および(10)式は以下のように書き換えられた。

キーワード 渦相関法, 蒸散, 光合成, Flux Variance Similarity partitioning 法, 水田

連絡先: 〒980-8579 宮城県仙台市荒巻字青葉 6-6-06 東北大学工学研究科土木工学専攻 水環境システム学研究室

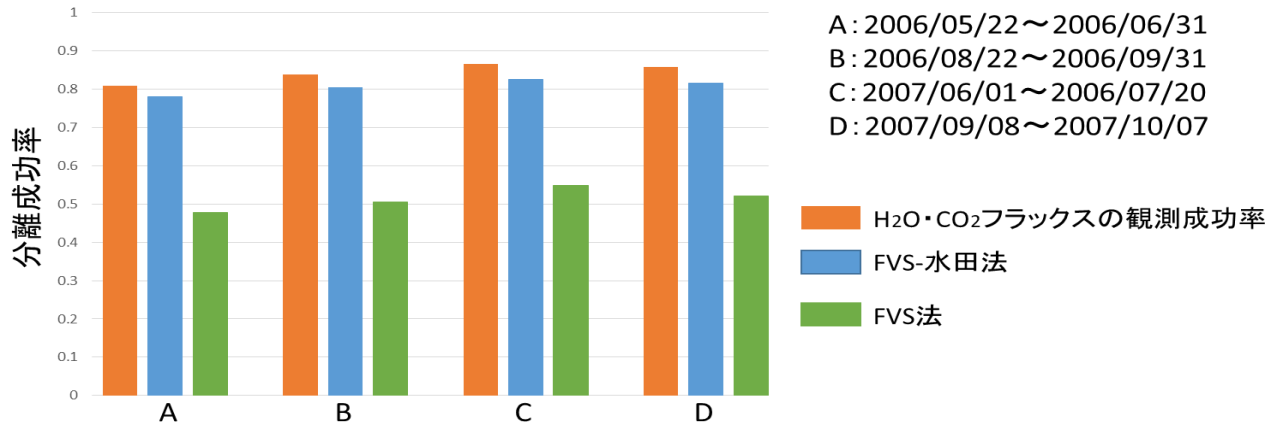


図 1. フラックスの分離成功率

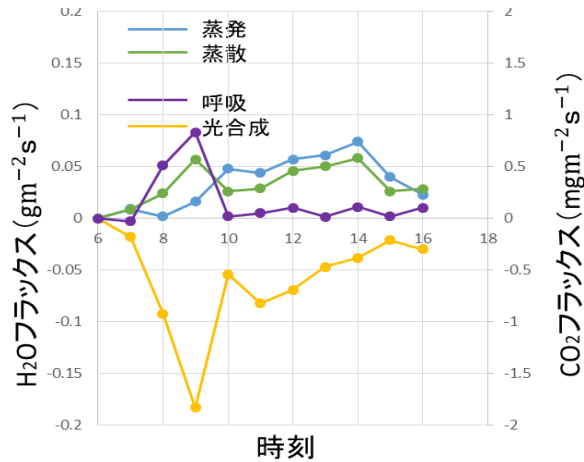


図 2-1. FVS 法による分離

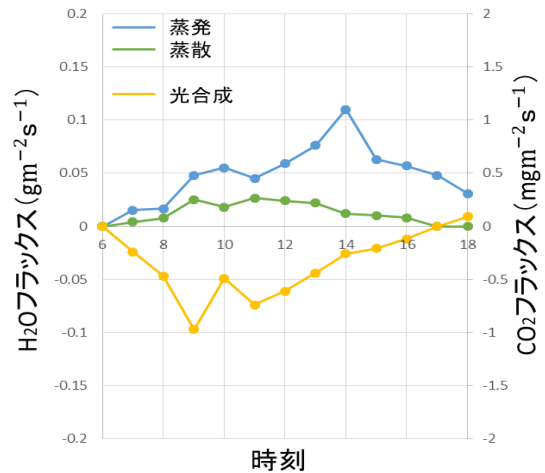


図 2-2. FVS-水田法による分離

$$WUE = \frac{\overline{w'c'}}{\overline{w'q'}} \cdot (1 + \tilde{q}) \quad (11)$$

$$\rho_{q',c'}^{obs} = -\frac{\sigma_c}{\sigma_q} \cdot \frac{1}{WUE} \quad (12)$$

(11)式と(12)式の連立で、分離フラックスを算出した。以下、本研究による分離法をFVS-水田法と表す。

4. フラックス分離の結果

フラックス分離の結果は図 1 のようになった。H₂O および CO₂ フラックスの観測が行われている場合、FVS-水田法による分離はほとんどの場合において成功した。一方、従来の FVS 法による分離は成功率が著しく低かった。これは後者において土壌呼吸が行われているという誤った仮定の下で計算が行われているため、計算が収束しない可能性が高いためであると考えられる。

また、2007 年 9 月 18 日の結果において Scanlon and Sahu (2008)による分離結果および本研究における分離結果はそれぞれ図 2-1、2-2 のようになった。特筆すべき点は図 2-1 において 11 時から 14 時にかけて蒸散フラックスと光合成フラックスが逆相関の関係となっていない点である。これは、水利用効率は植物の CO₂ 摂取量に対する水損失であるという定義に反している。また、9 時において光合成フラックスを過大評価した。一方で本研究による分離法では、土壌呼吸が 0 である

という適切な定義がなされているため、9 時における光合成の過大評価が無くなり、また光合成と蒸散のピークが一致しているといった結果が示された。

5. まとめ

湛水期の水田において、従来の方法ではフラックスを適切な分離が行えないため、本研究では仮定のひとつを変更した ($\rho_{q_e, c_r} = +1 \rightarrow c_r = 0$)。結果としてフラックスの分離成功率が向上し、光合成と蒸散のピーク時が一致するなど尤もらしい結果が得られた。今後、FVS-水田法においても分離が行えない場合に関して、その原因を解析し、FVS 法ならびに FVS-水田法の適用範囲を明らかにしていくことが重要である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(15K20858, 代表：小森大輔)の助成を受けたものである。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) Baldocchi D.D. and C.Vogel: A comparative study of water vapor, energy and CO₂ flux densities above and below a temperate broadleaf and a boreal pine forest. Tree Physiology, 16, page 5-16, 2002
- 2) T.M.Scanlon and P.Sahu: On the correlation structure of water vapor and carbon dioxide in the atmospheric surface layer: A basis for flux partitioning: Water Resource Research, 44(10), W10418, 2008