

乱流フラックス観測値を用いた植物生理メカニズムの解明

東北大学大学院 学生会員 ○坂井 七海

University of Phayao 非会員 PIMSIRI Swannapat

東北大学大学院 正会員 小森 大輔

1. はじめに

気候変動が生態系に及ぼす影響や、生態系が地球環境に与える影響を考える上で、生物圏の水・CO₂ フラックスの挙動を把握することは重要である。陸域生態系では陸と大気の間で光合成や呼吸、土壌呼吸によってCO₂の交換が行われている。中でも植物の光合成による二酸化炭素固定はグローバルな炭素循環において主要なフローの一つであり、蒸発散量やCO₂収支といった観点から植物が大気に与える影響について研究が進められている¹⁾²⁾。

フラックス観測は、理論上均一地表面で行わなければならないという制約がある。そのため多くは畑や水田、草原など一つの土地利用で形成されている均一地表面上で実施されている。しかし、現実の多くの地表面は不均一である。不均一地表面の例として、様々な樹種から構成されている森林、森林や畑が混在している区域や、道路やビルが混在する都市などが挙げられる。このように多くの地表面は不均一であるため、不均一地表面がフラックスに与える影響を明らかにすることは重要である。Kim *et al.*³⁾はフラックスの変動係数を用いて、地表面の不均一性を評価できる可能性を示した。

本研究では、潜熱、CO₂フラックスを気孔由来の蒸散、光合成フラックスと、非気孔由来の蒸発、土壌呼吸フラックスに分離し、気孔由来フラックスの不確実性評価を行うことで、植物群落がフラックスに与える影響を解明し、群落スケールでの植物生理メカニズムを理解することを目的とした。

2. データセット

対象地点はタイのスコータイ県に位置する水田地帯（北緯17° 03' 51”，東経99° 42' 15”）である。観測地点の地上高さ7mにおいて10Hz周期でxyz方向の風速、気温、CO₂濃度及びH₂O濃度を観測した。観測期間は2004年7月から2009年3月である。観測タワーでは毎時で周辺写真データ、30分毎に水位なども観測している。観測地点の水田は天水田であるため、降雨による湛水状態によって4つの生育段階に分けられる。イネの生育段階を図1に示す。苗代期と生殖成長期は湛水しており、栄養成長期、熟成期は湛水していない。本研究では、フラックスタワーで1時間毎に撮影した写真データで植物の有無を確認し、同タワーで観測した水位データをもとに湛水時期を判断し、生育段階を決定した。

3. 手法

3.1. フラックスの時空間不確実性の算出

観測値からフラックスを算出するために、渦相関法を用いた。またKim *et al.*³⁾によって示された、変動係数 ϕ を用いて、フラックス値の時空間不確実性評価を行った。

$$\phi = \frac{\sigma_{wC}}{|F|} \tag{1}$$

σ_{wC} は鉛直風速 w と物質濃度 C の標準偏差で F はフラックス値である。 ϕ が小さいほど時空間不確実性が小さい。気象の定常性が崩れたときや、ソースエリアの地表面が不均一であるとき、時空間不確実性が大きくなる。



図1 イネの生育段階



図2 水田キャノピーの観測フラックス

3.2. 潜熱・CO2 フラックスの分離

潜熱・CO2 フラックスを気孔プロセスの蒸散と光合成、非気孔プロセスの蒸発と土壌呼吸に分類する^{4) 5)}。フラックス分離には2つの定義を前提とする。第一に、潜熱・CO2 フラックスは気孔プロセスと非気孔プロセスに分けることができる。

$$F_q = F_{qt} + F_{qe} \quad (1a)$$

$$\overline{w'q'} = \overline{w'q'_t} + \overline{w'q'_e} \quad (1b)$$

$$F_c = F_{cp} + F_{cr} \quad (2a)$$

$$\overline{w'c'} = \overline{w'c'_p} + \overline{w'c'_r} \quad (2b)$$

w' : 鉛直風速の偏差
 q' : H2O濃度
 c' : CO2濃度
 q'_t : 蒸散によるH2O濃度
 q'_e : 蒸発によるH2O濃度
 c'_p : 光合成によるH2O濃度
 c'_r : 土壌呼吸によるH2O濃度

$$q' = q'_t + q'_e \quad (3)$$

$$c' = c'_p + c'_r \quad (4)$$

第二に水利効率(WUE)は、植物のCO2摂取量に対する水損失であると定義する。

$$WUE = \frac{\overline{w'c'_p}}{\overline{w'q'_t}} \quad (5)$$

$$F_c = WUE(\overline{w'q'_t}) + \overline{w'c'_r} \quad (6)$$

$$WUE = \frac{c'_p}{q'_t} \quad (7a)$$

$$c'_p = WUEq'_t \quad (7b)$$

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

ここで Scanlon and Sahu⁴⁾ が提唱した近似式を用いて、

$$\rho_{q'_t, q'_c} \equiv \frac{\overline{q'_t q'_c}}{\sigma_{q'_t} \sigma_{q'_c}} \cong \frac{\rho_{w', q'_e}}{\rho_{w', q'_t}} = \frac{\overline{w'q'_e} \sigma_{q'_t}}{\overline{w'q'_t} \sigma_{q'_e}} \quad (9)$$

$$\rho_{c'_p, c'_r} \equiv \frac{\overline{c'_p c'_r}}{\sigma_{c'_p} \sigma_{c'_r}} + \frac{\rho_{w', c'_r}}{\rho_{w', c'_p}} = \frac{\overline{w'c'_r} \sigma_{c'_p}}{\overline{w'c'_p} \sigma_{c'_r}} \quad (10)$$

一つ目の定義より各フラックスの物理メカニズムは以下のように表すことができる。

$$\rho_{q'_t, c'_p} = -1 \quad (11)$$

$$\rho_{q'_e, c'_r} = +1 \quad (12)$$

$$\rho_{q'_t, q'_e} = -\rho_{c'_p, c'_r} \quad (13)$$

また、Luigi et al., 2014⁵⁾ が \tilde{q} と \tilde{c} を

$$\tilde{q} = \frac{\overline{w'q'_e}}{\overline{w'q'_t}}, \tilde{c} = \frac{\overline{w'c'_r}}{\overline{w'c'_p}} \quad (14)$$

と定義し、

$$\frac{\tilde{q}^2}{\rho_{c'_p, c'_r}^2} + 2\tilde{q} + 1 - \left(\frac{\sigma_{q'} WUE}{\sigma_{c'_p}} \right) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\tilde{c}^2}{\rho_{c'_p, c'_r}^2} + 2\tilde{c} + 1 - \left(\frac{\sigma_{c'}}{\sigma_{c'_p}} \right)^2 = 0 \quad (16)$$

とした。ゆえに WUE は

$$WUE = \frac{\overline{w'c'_p}}{\overline{w'q'_t}} = \frac{\overline{w'c'} \frac{1+\tilde{q}}{1+\tilde{c}}}{\overline{w'q'} \frac{1+\tilde{q}}{1+\tilde{c}}} \quad (17)$$

となる。また次の式をニュートン法を用いて解き、各フラックスを算出することができる。

$$\rho_{q', c'}^{obs} = \frac{1}{\sigma_{c'} \sigma_{q'}} \left\{ \frac{\sigma_{c'_p}^2}{WUE} + \rho_{c'_p, c'_r} \sigma_{c'_p} \sigma_{c'_r} \left(\frac{1}{WUE} + \frac{\overline{w'q'_e}}{\overline{w'c'_r}} \right) + \sigma_{c'_r}^2 \frac{\overline{w'q'_e}}{\overline{w'c'_r}} \right\} \quad (18)$$

$\sigma_{q'}$: H2O濃度の標準偏差(g m⁻³)

$\sigma_{c'}$: CO2濃度の標準偏差(mg m⁻³)

$\overline{w'q'}$: H2Oフラックス(g m⁻² s⁻¹)

$\overline{w'c'}$: CO2フラックス(g m⁻² s⁻¹)

$q'c'$: H2O濃度とCO2濃度の渦相関

4. 結果・考察

図2にフラックス分離の結果を示す。特にCO2フラックスにおいて植物の成長に伴ってフラックスの変動係数も大きくなっていった。これは、植物の成長に伴って植物の個体差が大きくなっていると言える。また、湛水していない栄養成長期と熟成期において、日中に光合成フラックスが低下していることがわかる（光合成が活発になるとCO2フラックスは負になる）。これは、植物の昼寝現象が起きていると言える。植物の昼寝現象とは、日中に気孔が開き蒸散が盛んに行われると、根からの吸水が追いつかなくなり、植物体内の水分量が低下してしまい、気孔を閉じる現象である。気孔が閉じてしまうため、光合成が停止し、光合成フラックスが低下したと言える。

5. 結論

本研究で以下の結論を得た。

- 1) 植物の成長に伴ってフラックスの変動係数が増加した。これは植物の個体差の影響であると考察した。
- 2) 湛水していない期間は日中に光合成フラックスが低下した。植物の昼寝現象が観測されたと考察した。

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 volume 16, page 5-16, 1996
- 2) 伊藤昭彦, 野口航: 植物の呼吸と地球環境変動, モデルの観点から: 光合成研究 24(1), 39-45, 2014
- 3) Wonsik Kim, Daisuke Komori, Jaeil Cho: The characteristic of fractional uncertainty on eddy covariance measurement: J. Agric. Meteorol. 67 (3): 163-171, 2011
- 4) 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
- 5) Luigi P., Gianfranco R., Domenico V.: Towards a Flux-Partitioning Procedure Based on the Direct Use of High-Frequency Eddy-Covariance Data: Boundary-Layer Meteorology, 153(2), 327-337, 2014