

渦相関法顕熱フラックス測定による蒸発散量推定

Estimating evapotranspiration rate using sensible heat flux measured with eddy correlation method

○登尾浩助*, 小宮秀治郎**, 片野健太郎*

Kosuke NOBORIO*, Shujiro KOMIYA**, and Kentaro KATANO**

はじめに

地球規模での時間的、空間的な降雨パターンや気温の変動が報告されている。このような条件下では、作物生産に利用できる水の偏在化が顕著になっている。特に乾燥地における灌漑農業にあつては、効果的な水利用が必須となっている。従来、一回の灌漑用水量は、FAO 基準に従って蒸発皿からの蒸発量に特定の作物に対する係数を考慮して決定している。しかし、この方法では実際の蒸発散量とは異なる場合が想定されるので、より直接的な蒸発散量の把握が必要である。植物キャノピーにおける熱収支から、微気象学的方法によって簡易にしかも高精度に蒸発散量を推定する方法を提案し、評価した結果を報告する。

理論

植物キャノピーにおける熱収支式は次のように表される(van Bavel and Hillel, 1976)。

$$R_n + LE + H + G = 0 \quad (1)$$

ここに、 R_n , LE , H , G はそれぞれ純放射量、潜熱輸送量、顕熱輸送量、地中熱流量(W/m^2)である。(1)式中の H は、近年多用されている 3 次元超音波風速計と極細熱電対を使った渦相関法を使うと比較的簡易にしかも精度良く測定が可能である(Pond et al, 1971)。

$$H = -\rho C_p \overline{w'T'} \quad (2)$$

ここに、 ρC_p は大気の体積熱容量($J/m^3/K$)、 w' は鉛直方向平均風速からの変動量(m/s)、 T' は平均気温からの変動(K)である。また、 $w'T'$ 上のバー印は時間平均を表し、本研究では $0.1s$ とした。通常、 R_n と G は原位置において、それぞれ純放射計と熱流板を使って測定されるので、もし H が既知ならば、 LE は(1)式の残余項として、

$$LE = -(R_n + G) - H \quad (3)$$

と表される。本研究で提案した(3)式を評価する為に、標準的なボーエン比法を用いた。

ボーエン比法は野外において LE 、即ち蒸発散速度(E)を求めるために一般に広く普及している従来法である。ボーエン比 β は、(3)式の H と LE の比として(4)式のように定義され、測定した 2 高度間の気温と水蒸気密度の差によって求めることができる(Campbell, 1977)。

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{\rho C_p (T_1 - T_2)}{L(\rho_{v1} - \rho_{v2})} \quad (4)$$

ここに、 ρC_p は大気の体積熱容量($J/m^3/K$)、 T_1 と T_2 は 2 高度で測定した気温(K)、 L は水の蒸発潜熱(J/kg)、 ρ_{v1} と ρ_{v2} は気温と同一高度で測定した水蒸気密度(kg/m^3)である。(4)式から

* 明治大学 Meiji University, ** 明治大学大学院 Graduate School of Agriculture, Meiji University キーワード：熱収支式，純放射量，地中熱流量

β を決定したら、 LE は (3)式に(4)式の定義を代入して、次のように求められる。

$$LE = -\frac{R_n + G}{1 + \beta} \quad (6)$$

ここに、 E は蒸発散速度($\text{kg/m}^2/\text{s}$)である。

実験方法

実験は、2009年夏に神奈川県平塚市の水稲が作付けされている営農水田 (35.362769° N, 139.338073° E) で行った。顕熱輸送量 (H) は、地表面高さ 2 m に設置した 3 次元超音波風速計 (CYG-81000, R.M. Young)と極細 E 型熱電対(直径 0.0762mm)を使って渦相関法(2式)で測定した。超音波風速計による風速と熱電対による気温は、データロガー(CR1000, Campbell Scientific)を使って 10 Hz で測定し、10 分毎に記録した。

ボーエン比(4式)は、地表面高さ 1.5 m と 2.5 m に設置した気温・湿度計(HMP-45A, Vaisala, Inc.)を使って決定した。気温と湿度は、データロガー(CR23X, Campbell Scientific)を使って 1 秒毎に測定し、10 分間隔で記録した。純放射量は純放射計 (Q-7, Campbell Scientific) を使い、地中熱流量は熱流板 (PHF-02, PREDE CO., LTD.)を使って 1 秒毎に測定し、10 分間隔で記録した。測定と記録にはデータロガー(CR23X)を使った。

実験結果

測定した入力エネルギー(R_n+G)とボーエン比法で推定した消費エネルギー($LE+H$)を比較すると、(1)式の熱収支を良く満足している (Fig. 1)。

ボーエン比法による LE (6式)と渦相関法による H から求めた LE (3式)を比較すると、有為な線形関係が得られた(Fig. 2)。ボーエン比法による LE の方が、幾分大きい値であることが分かったが、原因は今後の研究を待つ必要がある。

謝辞：本研究の一部は、2009年度文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業（事業番号：S0901028）の助成により行った。

文献

Campbell GS. *An introduction to environmental bio- physics*. Springer-Verlag, New York; 1977.

Pond S, Phelps GT, Paquin JE, McBean G, Stewart RW. Measurements of the turbulent fluxes of momentum, moisture, and sensible heat over the ocean. *J. Atmosperic Sci.* 1971;28:901-917.

Van Bavel CHM, Hillel DI. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat. *Agric Meteorol* 1976;17:453-476.

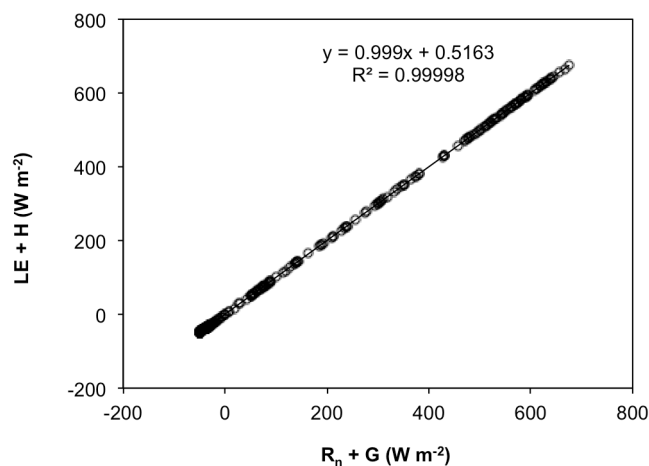


Fig. 1. 熱収支式の入力エネルギー (R_n+G) と消費エネルギー ($LE+H$) の比較

Fig. 1. Comparison of input energy and consumed energy in the energy balance equation.

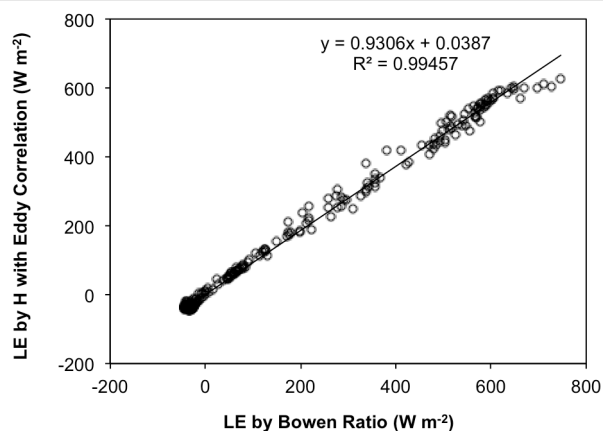


Fig. 2. ボーエン比法と渦相関法により求めた潜熱輸送量 LE の比較

Fig. 2. Comparison of latent heat flux, LE , obtained by the Bowen ratio method and the eddy correlation method.