

傾度法と渦相関法で測定した二酸化炭素フラックスの比較

猪原幸子* 岩田 徹** 大滝英治**

CO₂ Fluxes Measured by Eddy Correlation and Aerodynamic Techniques

Sachiko INOHARA*, Toru IWATA** and Eiji OHTAKI**

(Received November 25, 2003)

To elucidate the seasonal and inter-annual variation of CO₂ exchanges between the atmosphere and cultivated field in Japan, the CO₂ flux has been measured by the eddy correlation technique at the experimental farm of Agricultural Faculty, Okayama University since December in 1998. The CO₂ sensor, however, does not work under rainy conditions. The improved aerodynamic technique was developed and used to cover CO₂ flux data which were not collected. This technique gives reasonable CO₂ fluxes even in rainy days. The reliability of the technique was also confirmed by comparing CO₂ fluxes with those measured by the eddy correlation technique using data in fine weather conditions.

Key words: CO₂ flux, Eddy correlation technique, Aerodynamic techniques, Dimensionless profile

1 はじめに

近年, 大気中の二酸化炭素濃度の増加と地球温暖化問題を背景として, 各種陸上生態系-大気間の二酸化炭素, 水蒸気, 熱等のフラックスをネットワーク化した測定が盛んに実施されている(山本, 1999). 我々も Asiaflux ネットワークの一員として, 1998年12月から日本の一般的な農業形態をとっている岡山大学農学部附属農場を利用して, 耕作地における二酸化炭素と水蒸気フラックスの長期観測を実施している.

フラックス観測は主として渦相関法に基づいているが, センサーの動作不安定による欠測が避けられない. 特に, 降雨等の場合にはセンサーの使用環境が元の状態に復するまで, 長時間にわたって欠測になることがある.

最近, 渦相関法によるフラックスデータと2高度間の二酸化炭素濃度差のデータを組み合わせると, 二酸化炭素の無次元勾配量が評価できるようになってきた(例えば, Ohtaki, 1985; 原菌他, 1996; Monji et al., 2002). この無次元勾配の安定度依存の関数形を確立することができれば, 新しい測定原理に基づいて二酸化炭素フラックスを推

定することができる. しかし, 現状では無次元二酸化炭素に関する系統だった研究は行われていない. そこで, 我々は(1)二酸化炭素の無次元勾配の安定度依存性を確立すること, (2)渦相関法と無次元勾配の考えを利用した改良型の傾度法による二酸化炭素フラックスの比較を行い, 傾度法の妥当性とその適用性を検討する.

2 二酸化炭素フラックスに関する基本式

2.1 渦相関法

乱流変動成分による二酸化炭素フラックス $F_c(\text{eddy})$ は, 鉛直風速成分 w' と二酸化炭素変動成分 c' を掛け合わせて直接的に求めることができる.

$$F_c(\text{eddy}) = \overline{w'c'} \quad (1)$$

(1)式に基づく測定方式は渦相関法と呼ばれ, 使用するパラメータに仮定が含まれていないので, 現時点で最も進化した測定法である.

2.2 傾度法

傾度法による二酸化炭素フラックス $F_c(\text{aero})$ は, 渦拡散係数 K_c と二酸化炭素勾配 $\partial c/\partial z$ の積で与えられる.

*岡山大学大学院自然科学研究科環境システム学専攻

**岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科

$$F_c(aero) = -K_c \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2)$$

K_c の値は測定が困難である. そこで従来は, (1) K_c は測定高度 z で代表される渦の大きさと摩擦速度 u^* で代表される渦速度との積に比例する ($K_c = ku^*z$, k はカルマン定数), (2) 大気は中立成層に近い条件を満たし, 風速や二酸化炭素濃度の鉛直分布が対数法則に従うと仮定し, 2 高度で測定した風速 u と二酸化炭素濃度 c からフラックスを推定している.

$$F_c(aero) = k^2 \frac{(u_2 - u_1)(c_1 - c_2)}{[\ln(z_2/z_1)]^2} \quad (3)$$

しかし, この方法でフラックスを見積もるときには, 観測地形が均一で平坦なことが要求される. また, 風速が弱く熱のほとんどが対流で輸送されるようになると, 測定誤差が大きくなるなどの欠点がある.

その後, 応答の速い超音波風速計と二酸化炭素変動計が開発され, 運動量と二酸化炭素フラックスが渦相関法で直接測定できるようになってきた. この状況変化を受けて, 二酸化炭素フラックスと勾配を関係付ける無次元勾配量が測定可能となり, 従来の傾度法の欠点を克服する測定方法が検討されてきた(例えば, Miyata, 2001).

次に改良傾度法の測定原理を紹介する. 二酸化炭素の無次元勾配 ϕ_c は次式で定義されている.

$$\phi_c = -\frac{kzu^* \partial c}{w'c' \partial z} = -\frac{ku^*}{w'c'} \frac{c_2 - c_1}{\ln(z_2/z_1)} \quad (4)$$

ただし, (4)式を求めるには, 二酸化炭素濃度の鉛直分布が対数法則に従うと仮定し, $\partial c/\partial z = (c_2 - c_1)/[z \ln(z_2/z_1)]$ としている. 仮定はあるが, 渦相関法で摩擦速度 (u^*) と二酸化炭素フラックス $F_c(eddy)$ を測定し, 同時に 2 高度における二酸化炭素濃度 c_1 と c_2 を測定して ϕ_c を求めることになる. いろいろな気象条件下で ϕ_c を求め, その安定度依存の関数形を確立する. そうすると, (4)式を変形して, u^* と ϕ_c , そして 2 高度の二酸化炭素濃度 c_1 と c_2 の情報から二酸化炭素フラックスを推定することができる. これが改良型傾度法の測定原理である. 二酸化炭素濃度差の情報を利用するので, 得られた二酸化炭素フラックスを $F_c(aero)$ と書く.

$$F_c(aero) = -\frac{ku^*z \partial c}{\phi_c \partial z} \quad (5)$$

(5)式を適用して $F_c(aero)$ を求めるには ϕ_c の関数形の確立が必須条件である. しかし現実には, 温度や水蒸気の無次元勾配 ϕ_h と ϕ_q と風速の無次元勾配 ϕ_m の安定度依存の関数形に関しては多くの文献があるが(例えば, Dyer, 1965; Dyer and Hicks, 1970), ϕ_c に関するまとまった報告はない. 今回我々は, まず ϕ_c の安定度依存の関数形を確立し, そしてその関数形を利用して(5)式によって $F_c(aero)$ を推定した.

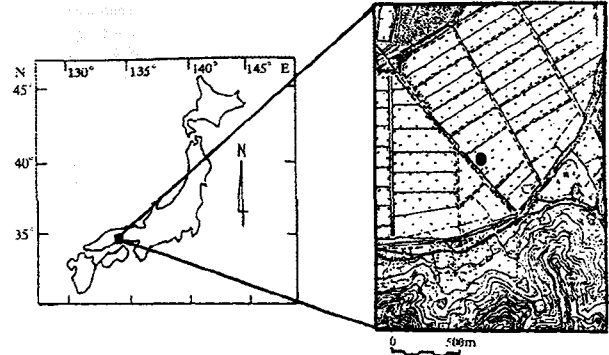


図-1 八浜農場(●印)周辺地形図

3 観測場所とデータ選抜

3.1 観測場所

観測は岡山県玉野市八浜町の児島湾干拓地にある八浜農場(34°32'N, 133°56'E)で実施した(図 1). 八浜農場は約 300×300m² の広さを有しており, 周辺も同様の農耕地である. 主風向に対する最短の吹走距離は約 500m である. 解析対象期間である 2002 年 9 月の水稻の平均草高は 1m であった. 風速変動と気温変動, 二酸化炭素濃度変動, 水蒸気変動は地上 1.65m で測定した. また, 地上 1.3m と 3.9m における二酸化炭素濃度を測定した. これらの気象要素の信号は 10Hz でサンプリングし, ハードディスクに記録した. フラックス等の統計量は 30 分間平均データを使って算出した.

3.2 データ選抜

今回, 我々は二酸化炭素の無次元勾配の計算に使用するデータを下の 2 段階で選抜した.

1) 摩擦速度を利用した選抜

Miyata(2001)は, 傾度法と渦相関法で求めたフラックスを比較し, 摩擦速度 u^* が 0.05ms⁻¹ 未満の場合にフラックスが大きく異なることを指摘している. 我々も Miyata に従い, $u^* < 0.05\text{ms}^{-1}$ の場合のデータを排除した.

2) Monin-Obukhov の相似則を利用した選抜

Monin-Obukhov の相似則は, 接地層における風速や気温についての統計量を F とし, Monin-Obukhov の基本的なパラメータの中で F と同じ次元をもつ量を F^* とすれば, 次の関係が成り立つ.

$$\frac{F}{F^*} = G(\zeta)$$

つまり, 無次元化された気象要素は, 無次元な安定度パラメータ ζ の普遍関数で表現することができる. ここで $\zeta = z/L$ であり, L は Monin-Obukhov の長さである. 例えば, 二酸化炭素の標準偏差 σ_c は摩擦濃度 c^* を導入し無次元化すると, ζ の普遍関数となる. 簡単のため, これ以

降 $G_c = \sigma_c / c^*$ とおく。この G_c の値を利用して、2種類のデータ選抜を行った。

- a) $|G_c|$ は不安定成層時($\zeta < 0$)には $\zeta^{-1/3}$ に比例して減少し(Ohtaki, 1985), 安定成層時($\zeta \geq 0$)には $\zeta^{1/3}$ に比例して増加することが分かっている。この経験則に従っている $|G_c| \leq 10$ のデータを選抜した。逆に $|G_c| > 10$ の場合には、二酸化炭素の濃度変動が小さく、測定限界レベルの信号を扱うことになり、意味のある議論とされない恐れがある。
- b) 水稲群落上では、灌漑水の影響により二酸化炭素と、安定度パラメータ ζ に影響を与える気温の勾配の型が異なる場合がある。例えば、安定成層時($\zeta \geq 0$)に $G_c \geq 0$ となるデータは、二酸化炭素が昼間型の勾配をとり、気温は夜間型の勾配をとっている。一方、不安定成層時($\zeta < 0$)で $G_c < 0$ の場合には、上と逆の型の勾配となっている。このような現象が起こっているデータは削除した。

以上、1), 2)のデータ選抜をクリアしたのは、全データの約63%である。

4 結果と考察

4.1 二酸化炭素の無次元勾配 ϕ_c

2002年9月の晴天時に得られた ϕ_c の値を図2に示す。図の横軸は安定度パラメータ ζ である。大気が中立成層とみなせる領域($|\zeta| < 0.05$)では $\phi_c = 1$ である。大気不安定成層が強くなると($-\zeta > 0.1$), 図中の実線で示された $\phi_c = (1 - 8\zeta)^{-1/2}$ で近似できる。一方、大気が安定成層($\zeta \geq 0$)の時には、不安定成層時に比べてプロット点の乱れが大きい、 $\phi_c = 1 + 5\zeta$ で近似できる。系統的な観測に

よる初めての ϕ_c 関数形であるので、まとめて表示しておく。

$$\text{大気が不安定成層の場合} (\zeta < 0) : \phi_c = (1 - 8\zeta)^{-1/2}$$

$$\text{大気が安定成層の場合} (\zeta \geq 0) : \phi_c = 1 + 5\zeta$$

ϕ_c に関する文献値がないので、竹内・近藤(1981)とBrutsaert(1982)にまとめられている温度と水蒸気の無次元勾配 ϕ_h と ϕ_q の関数形と比較しておく。一般的には、 ϕ_h と ϕ_q の関数形は不安定成層時には $\phi = A(1 - B\zeta)^{-1/2}$, 安定成層時には $\phi = C + D\zeta$ の形で表現される。不安定成層の場合には、 B は8と16の2系統に分かれるようである。今回我々が示した関数形は、Businger et al. (1971)の $\phi_h = 0.74(1 - 9\zeta)^{-1/2}$ とSmedman-Högström and Högström (1973)の $\phi_q = (1 - 9\zeta)^{-1/2}$ とよく似ている。安定成層時の報告例は少ないが、 $C=1, D=5\sim7$ であり、 ϕ_c は ϕ_h や ϕ_q と同じ関数形を持つことを示唆している。

4.2 二酸化炭素フラックス

4.1節で ϕ_c の関数形を決定したが、この関数形を(5)式に代入すると、 $F_c(aero)$ が求まる。 $\zeta = z/L$ (L は定数)として(5)式を積分すると次のようになる。

$$F_c(aero) = -\frac{ku^*(c_2 - c_1)}{f(\zeta)} \tag{6}$$

分母の $f(\zeta)$ は接地層の安定度によって、以下の式で与えられる。

$\zeta < 0$ のとき:

$$f(\zeta) = \ln \left(\frac{(\sqrt{1 - 8\zeta_2} - 1)(\sqrt{1 - 8\zeta_1} + 1)}{(\sqrt{1 - 8\zeta_2} + 1)(\sqrt{1 - 8\zeta_1} - 1)} \right)$$

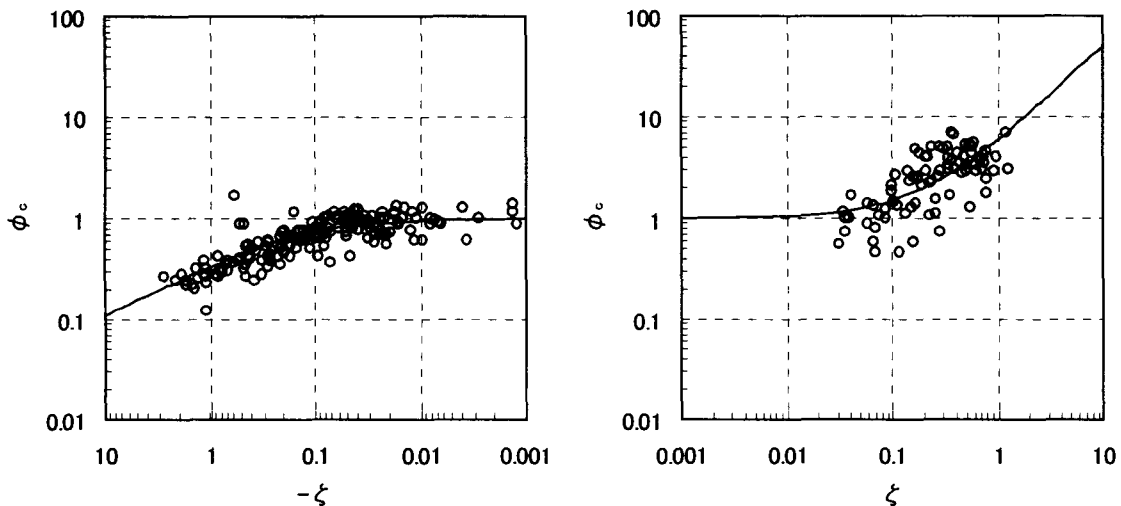


図-2 二酸化炭素の無次元勾配 ϕ_c と Monin-Obukhov の安定度パラメータ ζ の関係
 実線の関数形: $\phi_c = (1 - 8\zeta)^{-1/2}$ ($\zeta < 0$), $\phi_c = 1 + 5\zeta$ ($\zeta \geq 0$)

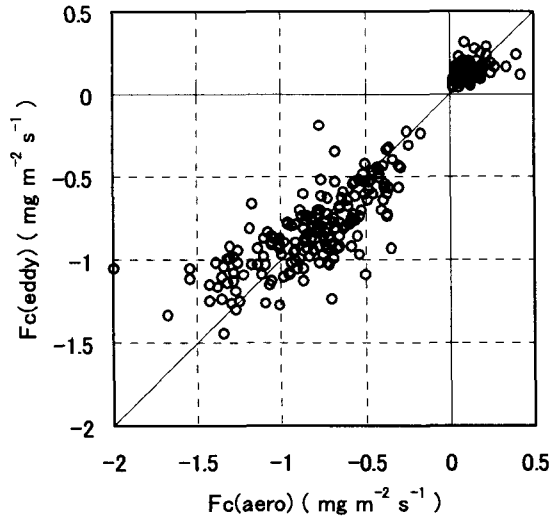


図-3 $F_c(eddy)$ と $F_c(aero)$ の関係
実線は1:1を示す。

$\zeta \geq 0$ のとき:

$$f(\zeta) = \ln\left(\frac{\zeta_2}{\zeta_1}\right) + 5(\zeta_2 - \zeta_1)$$

2002年9月の快晴日のデータを使って計算した $F_c(aero)$ と渦相関センサーで測定した $F_c(eddy)$ の値を図3に示す。プロットされた値は乱れているが、1:1の線の周辺に分布している。±20%の誤差を許せば、傾度法も実用に供することができるようである。

上の結果は、渦相関法で二酸化炭素フラックスが欠測となった時、傾度法によってそれらの値を補完することが可能であることを意味している。そのような例として、2002年9月26-30日(DOY:269-273日)の $F_c(aero)$ と $F_c(eddy)$ の日変化を図4に示す。9月27日13時頃から翌28日の7時頃まで連続した降雨があった。9月26日と29日は曇

天で、9月30日は晴天であった。曇天と晴天日には、 $F_c(aero)$ と $F_c(eddy)$ の値はよく一致している。しかし、降雨日には、二酸化炭素の渦相関センサーは正常作動できず、 $F_c(eddy)$ は大きく乱れ、測定不能を示している。これに対し、 $F_c(aero)$ は値は小さいが、二酸化炭素が昼間は下向き、夜間は上向きに輸送されていることを示している。降雨時の $F_c(aero)$ の値の正確さを検証することはできないが、降雨時には二酸化炭素が水稻群落内外で等濃度になり、フラックスが小さくなるという以前の観測結果と矛盾しない(Ohtaki and Seo, 1974)。現在、二酸化炭素フラックスの測定は渦相関法に基づいているが、センサーの動作不安定による欠測が避けられない。特に5月~7月の梅雨期に欠測が多く、水稻生育初期の二酸化炭素フラックスの議論に苦慮することがある。今回提案した傾度法は、渦相関法による欠測を少なくするための有力な方法となるだろう。

5 まとめ

水稻の生育期間における、二酸化炭素の無次元勾配を測定し、傾度法と渦相関法による二酸化炭素フラックスの比較を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 二酸化炭素の無次元勾配は以下の関数で表現できる。

$$\text{不安定成層時}(\zeta < 0): \phi_c = (1 - 8\zeta)^{-1/2}$$

$$\text{安定成層時}(\zeta \geq 0): \phi_c = 1 + 5\zeta$$

- 2) 晴天と曇天時には、渦相関センサーで測定した $F_c(eddy)$ と傾度法により推定した $F_c(aero)$ は一致する。
- 3) 降雨時においても、 $F_c(aero)$ は有意なフラックスのデータを提供する可能性がある。

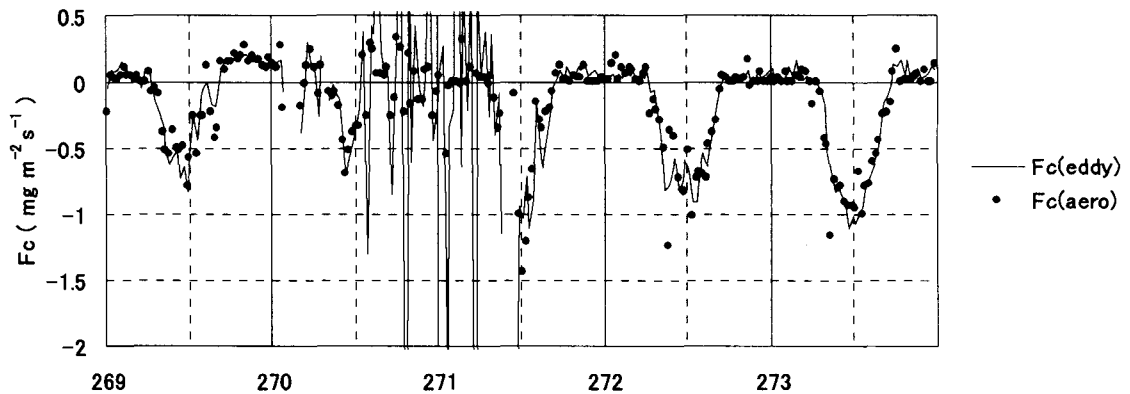


図-4 2002年9月26-30日(DOY:269-273日)におけるCO₂フラックス(F_c)の日変化
27・28日は降雨、26・29日は曇天、30日は晴天。

謝辞：本研究をまとめるに当たり，貴重なデータを提供して下さった岡山大学環境理工学部三浦健志教授に心より感謝いたします。また，快く農場の使用を許可して下さった岡山大学農学部附属八浜農場の多田正人主任に感謝いたします。

山本晋 (1999)：日本/アジアの CO₂ フラックス測定ネット
—森林生態系の吸収能の解明をめざして—，燃料及燃焼，
66, pp.163-169

参考文献

- Brutsaert, W. (1982) : *Evaporation into the atmosphere*, D. Reidel Pub. Com., London : England, p.57-112
- Businger, J. A., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., and Bradley, E. F. (1971) : Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **28**, pp.181-189
- Dyer, A. J. (1965) : The flux-gradient relation for turbulent heat transfer in the lower atmosphere, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **91**, pp.151-157
- Dyer, A. J. and Hicks, B. B. (1970) : Flux-gradient relationships in the constant flux layer, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **96**, pp.715-721
- 原菌芳信, 文字信貴, 宮田明, 北和之, 鱧谷憲, 内田洋平, 吉本真由美, 佐野琢己, 藤原正智, 磯部誠之, 小川利紘 (1996) : 接地境界層における大気微量気体のフラックス測定法と評価法, *農業環境技術研究所報告*, **13**, pp.166-226
- Miyata, A. (2001) : Observational Study on Methane Exchange between Wetland Ecosystems and the Atmosphere, *Bull. Natl. Inst. Agro-Environ. Sci.*, **19**, pp.61-183
- Moniji, N., Hamotani, K., Tosa, R., Flukagawa, T., Yabuki, K., Hirano, T., Jintana, V., Piriyaota, S., Nishimiya, A. and Iwasaki, M. (2002) : CO₂ and Water Vapor Flux Evaluations by Modified Gradient Methods over a Mangrove Forest, *J. Agric. Meteor.*, **58**, pp.63-69
- Ohtaki, E. (1985) : On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields, *Boundary-Layer Meteor.*, **32**, pp.25-37
- Ohtaki, E. and Seo, T. (1974) : Measurement of radiant of carbon dioxide and estimation of its flux over a paddy field (2) observation at Hachihama in 1969, *Ber. Ohara Inst. Landw. Biol. Okayama Univ. Bd.*, **16**, pp.65-77
- Smedman-Högström Ann-Sofi and Högström, Ulf (1973) : The marsta micro-meteorological field project. Profile measurement system and some preliminary data, *Boundary-Layer Meteor.*, **5**, pp.259-273
- 竹内清秀, 近藤純正 (1981) : 大気科学講座 1. 地表面に近い大気, 東京大学出版会, p.20-25