

# 二酸化炭素のフラックスと勾配の関係

猪原幸子 (岡山大学大学院自然科学研究科)

岩田 徹・三浦健志 (岡山大学環境理工学部)

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、熱フラックスの長期的観測に基づいた炭素収支、水収支、熱収支の正確な把握が求められている (Yamamoto, 1999; Harazono *et al.*, 2003)。我々は、1998年12月から日本の一般的な耕作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通年的な特徴を把握するための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、降雨時にはオープンパス型の二酸化炭素・水蒸気センサは作動不能である。長期観測では、測定センサの保守管理に留意すると共に、複数の観測手法を併用させておき、データの品質確保と欠測値の補てんに備えておくことが大切である。

二酸化炭素変動計が開発されて以来 (Ohtaki and Matsui, 1982; Ohtaki, 1984)、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密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 (Monji *et al.*, 2002; Ohtaki, 1985)。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、二酸化炭素の2高度間の密度差の情報と組み合わせて傾度法によってフラックスを推定することができる (Harazono *et al.*, 1996; Miyata, 2001)。我々は、渦相関法による欠測を少なくするために、この新しい考えによる傾度法を併用することを考え、2002年夏季に集中観測を実施した。二酸化炭素のフラックスと勾配の関係に基づいた傾度法の実用性を検討したので報告する。

## 二酸化炭素フラックスに関する基本式

渦相関法による二酸化炭素フラックスは、次式で表される (Webb *et al.*, 1980)。

$$\overline{wc} = \overline{w'c'} + \overline{w} \overline{c} \quad (1)$$

ここで、 $w$ は鉛直風速成分、 $c$ は二酸化炭素密度である。 $\overline{\quad}$ は時間平均を示し、 $'$ は平均からの偏差である。Webb *et al.* (1980)は、乾燥空気の鉛直フラックスはゼロと仮定して、(1)式の $\overline{w}$ を求めた。

$$\overline{w\rho_a} = \overline{w'\rho_a'} + \overline{w} \overline{\rho_a} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\rho_a$ は乾燥空気の密度である。鉛直風速成分 $\overline{w}$ を測定できるパラメーターで置き換え、(1)式に代入する。

$$\overline{wc} = \overline{w'c'} - (\overline{c/\rho_a}) \overline{w'\rho_a'} \quad (3)$$

$$= \overline{w'c'} + A\overline{w'q'} + B\overline{w'T'} \quad (3')$$

1項    2項    3項

(3')式の右辺各項の意味は次の通りである。

- 1項：渦相関センサーによって測定した生の二酸化炭素フラックス。二酸化炭素密度と鉛直風速の乱流変動成分から求める。本報では $F_c(\text{eddy})$ と表す。
- 2項：潜熱フラックスが寄与する二酸化炭素フラックス。係数は、 $A = (m_a/m_q)(\overline{c/\rho_a})$ である。ただし、 $m_a$ と $m_q$ は乾燥空気と水蒸気の分子量である。
- 3項：顕熱フラックスが寄与する二酸化炭素フラックス。係数は、 $B = [1 + (\overline{q/\rho_a})(m_a/m_q)](\overline{c/T})$ である。ただし、 $q$ と $T$ は水蒸気密度と絶対温度である。

渦相関法で欠測となった二酸化炭素フラックスを傾度法で補完する2通りの方法を述べる。二酸化炭素の無次元勾配 $\phi_c$ を利用する方法と二酸化炭素の混合比 $(\overline{c/\rho_a})$ を利用する方法である。

- a) 二酸化炭素の無次元勾配 $\phi_c$ を利用する方法  
二酸化炭素の無次元勾配 $\phi_c$ は、次の(4)式で定義さ

れている (Monji, 2003)。

$$\phi_c = -(kz u_* / \overline{w'c'}) d\bar{c}/dz \quad (4)$$

$$= k u_* (\bar{c}_1 - \bar{c}_2) / [\overline{w'c'} \ln(z_2/z_1)] \quad (4')$$

乱流変動成分による二酸化炭素のフラックス項,  $\overline{w'c'}$ , は (3')式の右辺第1項の  $\overline{w'c'}$  と同じものである。ここでは,  $\overline{w'c'} = F_c(\text{eddy})$  と置く。また,  $k$  はカルマン定数 (0.4),  $u_*$  は摩擦速度,  $z$  は測定高度である。この測定高度  $z$  は植物群落の零面変位  $d$  を考慮して  $z-d$  と記すべきであるが, 簡単のために本論文では  $z$  としている。また, 添え字 1 と 2 は測定高度で, 本研究では, 地上1.3mと3.9mを意味している。(4')式を求めるには, 二酸化炭素密度の鉛直分布が対数則に従うと仮定し,  $d\bar{c}/dz = (\bar{c}_1 - \bar{c}_2) / [z \ln(z_2/z_1)]$ ,  $z = (z_1 z_2)^{1/2}$  としている。

Dyer and Hicks (1970) は, 大気成層の不安定度が強くなってもこの微係数近似の誤差を0.5%以下としている。

仮定はあるが, 渦相関法で  $u_*$  と二酸化炭素フラックス  $\overline{w'c'}$ , 2高度における二酸化炭素密度  $\bar{c}_1$  と  $\bar{c}_2$  を測定すれば, (4)式によって  $\phi_c$  を求めることができる。もし, いろいろな気象条件下で  $\phi_c$  を求め, その安定度依存の関数形が確定できれば, 逆に考えて,  $u_*$  と  $\phi_c$  関数, 2高度の二酸化炭素密度  $\bar{c}_1$  と  $\bar{c}_2$  の情報から二酸化炭素の乱流変動によるフラックス ( $\overline{w'c'}$ ) を推定することができる。二酸化炭素密度差の情報を利用するので, この方法で得られる二酸化炭素フラックスを  $F_c(\text{aero})$  と書く。実際には,  $F_c(\text{aero})$  が高さによらないとして, (4)式を積分して得た次の関係式を利用して  $F_c(\text{aero})$  を求めることになる。

$$F_c(\text{aero}) = k u_* (\bar{c}_2 - \bar{c}_1) / f(\zeta) \quad (5)$$

ここで,  $\zeta = z/L (= -kz(g/T)\overline{w'T}/u_*^3)$  は Monin-Obukhov の安定度パラメーターであり,  $g$  は重力の加速度,  $T$  は温度である。また, 後述するように,  $f(\zeta)$  は  $\phi_c$  の安定度依存性によって決まる関数である。

#### b) 二酸化炭素の混合比 ( $\bar{c}/\rho_a$ ) を利用する方法

(3)式に混合長理論の関係,  $c' = -l\partial\bar{c}/\partial z$ ,  $\rho_a' = -l\partial\rho_a/\partial z$  を代入する。ここで,  $l$  は混合距離である。

$$\begin{aligned} \overline{wc} &= -\overline{w'l} \partial\bar{c}/\partial z + (\bar{c}/\rho_a) \overline{w'l} \partial\rho_a/\partial z \\ &= -(\overline{w'l}) \rho_a \{ \partial(\bar{c}/\rho_a) / \partial z \} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし,  $\overline{w'l}$  は拡散係数である。2高度間の二酸化炭素の混合比の差を測定し, 拡散係数を乗ずると二酸化炭素のトータルフラックス  $\overline{wc}$  を直接求めることができる (Webb et al., 1980)。

### 観測場所とデータ選抜

#### 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) の水稲圃場で実施した (図1)。八浜農場は約300m×300m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月の水稲の平均草高は1mであった。地上1.65mに設置した超音波風速温度計 (Kaijo Co., DA-600-3T) で風速変動と気温変動を, CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>Oアナライザー (Li-Cor Co.Ltd., LI-7500) で二酸化炭素密度変動と水蒸気密度変動を測定した。これらの測定器の信号を10Hzでサンプリングし, ハードディスクに記録した。データ解析時には, (1)風速計の傾斜補正と風向方向への座標変換, (2)横風補正, (3)直線回帰によるトレンド除去, (4)二酸化炭素フラックスはWebb et al. (1980) 補正項の計算を行った。フラックス等の統計量は30分間の平均値として算出した。

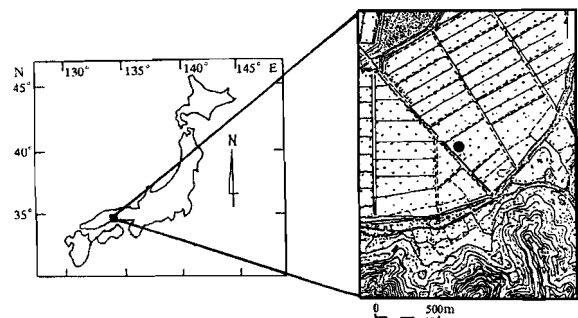


図1 岡山大学農学部八浜農場 (●) とその周辺地形図

渦相関法センサーから約5m離れた地点に観測塔を立て, 地上1.3mと3.9mにおける温度と相対湿度をVaisala製のセンサー (HMP45A) で測定し, 二酸化炭素密度を高分解能CO<sub>2</sub>アナライザー (Li-Cor

Co.Ltd., LI-6252) で測定した。LI-6252は絶対値測定モードで使用した。

2 高度から試料空気を吸引し、過塩素酸マグネシウムを充填したカラムを通過させて除湿する。3 方電磁弁を使って3分毎に除湿された試料空気の流路を切り替え、交互にLI-6252の測定セルに導入した。ガス流路の切り替え直後の2分間のLI-6252の信号は、試料空気のサンプリング回路内のガス置換に必要な信号と考えて無視し、最後の1分間の信号の平均値を読み取った。読み取り値5個を平均して二酸化炭素の30分平均密度とした。

## 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 $0.05\text{ms}^{-1}$ 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の相似則によると、二酸化炭素の標準偏差 $\sigma_c$ を摩擦濃度 $c_* (= -\overline{w'c'}/u_*)$ で無次元化すると、 $\sigma_c/c_*$ が安定度パラメーターの普遍関数 $G_c$ と表される。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 ( $\zeta > 0$ ) 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、二酸化炭素の密度変動が小さく、測定限界レベルの信号を扱うことになり、意味のある議論とならない恐れがある。

b) 水稻の生育が著しい8月～9月には、群落上の大気が不安定成層 ( $\zeta \leq 0$ ) を示すのは7時頃から14時頃までで、残りの時間帯は安定成層 ( $\zeta \geq 0$ ) となっている。また、二酸化炭素は6時過ぎから18時頃まで鉛直下向に輸送され、その他の時間帯は鉛直上向に輸送されている。安定成層時にもかかわらず、14

時～19時の間は $G_c \geq 0$ であり、20時～翌朝6時の間は $G_c \leq 0$ である。同じような状況は不安定時にも発生することがある。浮力と風のシアの項から決まるMonin-Obukhovの安定度パラメーター $\zeta$ を指標にして、それとは別の要因の影響も受ける二酸化炭素の変動特性をまとめる場合には、この種の問題は避けられない。逆に、我々は、Monin-Obukhov相似則に不確かさが生じている14時～19時の時間帯で、熱と二酸化炭素の変動特性がどのような相違を示すのかに注目している。もう少しデータを集めて、相似性に関する成果をまとめたいと思っている。今回は安定成層時 ( $\zeta \geq 0$ ) に $G_c \geq 0$ となるデータ、不安定成層時 ( $\zeta \leq 0$ ) に $G_c \leq 0$ となるデータは削除した。

以上、1), 2)の選抜方法をクリアしたのは、全データ576個の約63%, 362個であった。これらのデータを使って二酸化炭素の無次元勾配の関数形を求めた。

## 結果と考察

### 1) 二酸化炭素の無次元勾配 $\phi_c$

2002年9月の晴天時に得られた二酸化炭素の無次元勾配 $\phi_c$ の値を図2に示す。図の横軸は安定度パラメータ $\zeta$ 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。大気的不安定成層が強くなるにつれて $\phi_c$ は小さくなり、図中の実線 $\phi_c = (1 - 8\zeta)^{-1/2}$ で近似できる。他方、安定成層の時には、プロット点の乱れが大きいだが、 $\phi_c = 1 + 5\zeta$ で近似できると考えた。近似した関数形を下にまとめておく。

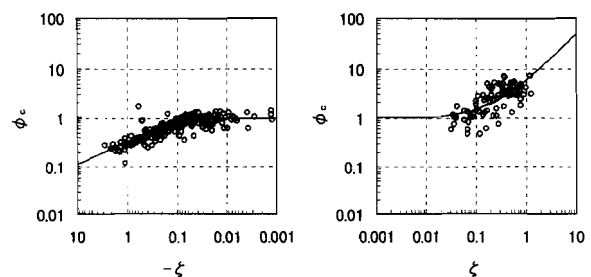


図2 二酸化炭素無次元勾配 $\phi_c$ の安定度依存性

$$\text{不安定成層 } (\zeta < 0) : \phi_c = (1 - 8\zeta)^{-1/2} \quad (7)$$

$$\text{安定成層 } (\zeta \geq 0) : \phi_c = 1 + 5\zeta \quad (8)$$

$\phi_c$ に関しては、Monji *et al.* (2002) の報告があるだけである。彼等は、 $\phi_c$ をBusinger *et al.* (1971) が温度の無次元勾配に対して提案している関係式( $\phi_h$ )と比較し、不安定成層状態では両者は一致するが、安定成層状態では両者の不一致が大きいことを示している。 $\phi_c$ に関する文献値がないので、Brutsaert (1982) にまとめられている温度と水蒸気の無次元勾配 $\phi_h$ と $\phi_q$ の関数形と比較してみる。一般的には、 $\phi_h$ と $\phi_q$ 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、Aは約1であり、Bは8と16の2系統に分かれる傾向がある。今回我々が示した関数形は、Businger *et al.* (1971) の $\phi_h = 0.84(1 - 7.9\zeta)^{-1/2}$ とSmedman-Högström and Högström (1973) の $\phi_q = (1 - 9\zeta)^{-1/2}$ と似ている。安定成層時の報告例は少ないが、C=1, D=5~7である。このような既出の $\phi_h$ と $\phi_q$ の特徴と比較すれば、今回得られた $\phi_c$ は、 $\phi_h$ や $\phi_q$ と同じような安定度依存性を示しているように思える。これは二酸化炭素の乱流変動特性が、水蒸気や温度の変動特性と似ているというOhtaki (1985) の報告とも整合している。

## 2) 傾度法と渦相関法による二酸化炭素フラックス

### a) 二酸化炭素の無次元勾配 $\phi_c$ を利用する方法

(7), (8)式で与えられた $\phi_c$ の関数形を(4)式に代入し、二酸化炭素フラックスが高さによらず一定であると仮定して積分すれば、(5)式の分母 $f(\zeta)$ の関数形が求まり、 $F_c(aero)$ を計算することができる。 $f(\zeta)$ の関数形は大気層の安定度によって、以下の式で与えられる。

$$f(\zeta) = \ln \left| \frac{(\sqrt{1-8\zeta_2}-1)(\sqrt{1-8\zeta_1}+1)}{(\sqrt{1-8\zeta_2}+1)(\sqrt{1-8\zeta_1}-1)} \right| \quad \zeta < 0 \quad (9)$$

$$f(\zeta) = \ln \left( \frac{\zeta_2}{\zeta_1} \right) + 5(\zeta_2 - \zeta_1) \quad \zeta \geq 0 \quad (10)$$

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。 $\pm 20\%$ の誤差を許せば、(7), (8)式に基づいた傾度法を実用にすることができる。

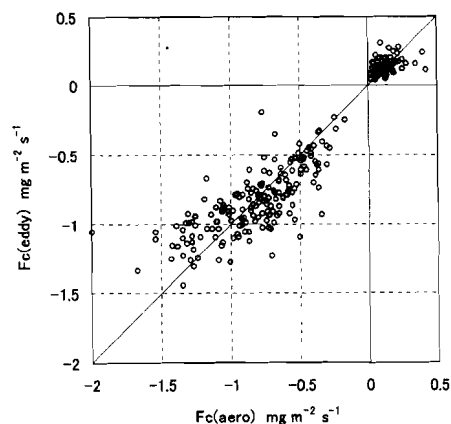


図3  $F_c(aero)$ と $F_c(eddy)$ との比較

上の結果は、(3)式の右辺第1項の $F_c(eddy)$ が欠測となった時、(5)式の $F_c(aero)$ 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。例として、2002年9月26日~30日(DOY:269日~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法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 $-0.3 \sim 0.3 \text{ mgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の値を示している。降雨時の値の正確さを検証することはできないが、今回の結果は、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~6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である。もちろん、Webb *et al.* (1980) が提案した補正項を含む二酸化炭素のトータルフラックス( $\overline{wc}$ )を把握するには、(3)式の右辺第2項と第3項の値を測定しておく必要がある。残念ながら、雨天日には渦相関法で潜熱を測定することが困難なので、上と同じ要領で、傾度法で潜熱と顕熱を求めて右辺第2項と第3項の値を推定することになる。9月27日~28日の降雨期に、傾度法で推定した右辺第2項と第3項の和は $-0.1 \sim 0.1 \text{ mgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で

あった。雨天時には $\overline{w'c'}$ 項も顕熱と潜熱フラックスによる補正項も小さいのが現実である。したがって、雨天日には、顕熱と潜熱フラックスによる補正項の割合が $\overline{w'c'}$ 項に対して大きくなることもあるが、トータルな二酸化炭素フラックス値が小さいので、 $F_c(aero)$ だけの補完でも深刻な影響は無いと考えられる。

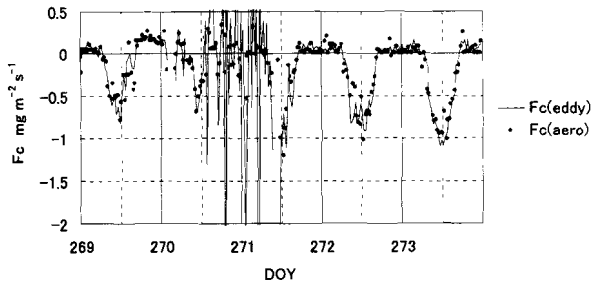


図4  $F_c(aero)$ と $F_c(eddy)$ の日変化

b) 二酸化炭素の混合比 $(\overline{c/\rho_a})$ を利用する方法

(6)式を適用すると、二酸化炭素の混合比の勾配と拡散係数の情報から二酸化炭素のトータルフラックス $(\overline{wc})$ を求めることができる (Webb *et al.*, 1980)。問題は二酸化炭素の混合比に対する拡散係数 $\overline{w'l}$ が不明なことである。試行として、今回は中立成層近似の条件下で許される拡散係数を使用する。すなわち、拡散係数は測定高度 $z$ 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と考える ( $\overline{w'l} = k u_* z$ )。比例定数 $k$ はカルマン定数である。渦相関法と二酸化炭素の混合比を使用した方法とで計算した二酸化炭素フラックスの関係を図5に示す。データは、図3に示したデータの中から不安定な大気成層時のものを選んでプロットした。また、図中の直線は1:1の関係を示している。両測定法による値の相関係数は0.78であるが、乱れは大きい。特に、 $-\overline{wc}$ が $0.5 \sim 1 \text{ mgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲の値の乱れが大きい。水稲群落上では不安定成層が発達しにくく、Monin-Obukhov安定度パラメーターが $-0.5 \leq \zeta \leq 0$ である期間のデータが多いが、上述の乱れが大きい値は、中程度の不安定性 ( $-2 \leq \zeta \leq -0.5$ )を示す時間帯に測定されたものが多い。もし、使用した拡散係数が $k u_* z / \phi_c$ の形で安定度補正できると仮定すれば、混合比を使った二酸化炭素フラックス値が2~3倍されることになり、両測定法によるフラックスの一致性が改善されることになる。二

酸化炭素の混合比からフラックスを測定する方法は理論的に明快であり、実用性にも優れているので、今後検討すべき測定法である。

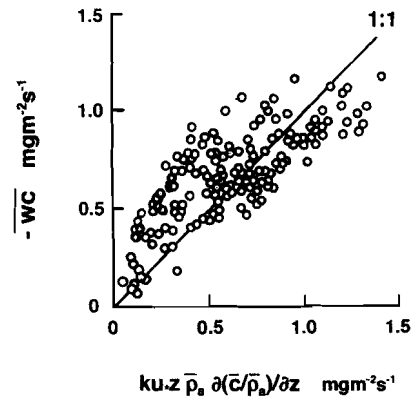


図5  $-\overline{wc}$ と $(\overline{w'l}) \rho_a \{d(\overline{c/\rho_a})/dz\}$ の関係

まとめ

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。得られた成果は以下の通りである。

二酸化炭素の無次元勾配は以下の関数で表現できる。

$$\text{不安定成層 } (\zeta < 0) : \phi_c = (1 - 8\zeta)^{-1/2} \quad (7)$$

$$\text{安定成層 } (\zeta \geq 0) : \phi_c = 1 + 5\zeta \quad (8)$$

晴天と曇天時には、渦相関センサーで測定した $F_c(eddy)$ と傾度法で推定した $F_c(aero)$ は一致する。降雨時においても、 $F_c(aero)$ は有意なフラックスを提供する可能性がある。

二酸化炭素のトータルフラックス $(\overline{wc})$ を把握するには、Webb *et al.* (1980) が指摘した顕熱と潜熱による補正項を別途測定しておく必要がある。実際には、雨天日の顕熱と潜熱フラックスは小さいので、上の補正項の影響は小さい。

二酸化炭素の混合比を利用してトータルフラックス $(\overline{wc})$ を測定する傾度法の有用性を調べた。拡散係数の定量化と2高度での二酸化炭素の混合比の精密測定について見通しがつけば、この傾度法による二酸化炭素フラックスの実用化は可能であることがわかった。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金（13308027）を用いて行われた。快く農場の使用を許可して下さった岡山大学農学部八浜農場の多田正人主任に感謝します。

## 参考文献

- Brutsaert, W., 1982: *Evaporation into the atmosphere*, D. Reidel Pub. Co., London : England, 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, 181-189.
- Dyer, A. J. and Hicks, B. B., 1970: Flux-gradient relationships in the constant flux layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 96, 715-721.
- Harazono, Y., Hirano, T., Saigusa, N., Ohtani, Y., Miyata, A., Ohtaki, E. and Monji, N., 2003: Roles of long-term flux observations as the global change study and the current topics. *J. Agric. Meteorol.* 59, 69-80. (in Japanese with English abstract)
- Harazono, Y., Monji, N., Miyata, A., Kita, K., Hamotani, K., Uchida, Y., Yoshimoto, M., Sano, T., Fujihara, M., Isobe, S. and Ogawa, T., 1996 : Development of measurement methods for trace gas fluxes in the surface boundary layer and a basic examination of the flux evaluation. *Bull. Nat. Inst. Agro-Environ. Sci.*, 13, 166-226. (in Japanese with English summary)
- Miyata, A., 2001: Observational study on methane exchange between wetland ecosystems and the atmosphere, *Bull. Nat. Inst. Agro-Environ. Sci.*, 19, 61-183.
- Monji, N., 2003: *Plants and micrometeorology -Turbulence and fluxes in plant atmosphere-*, Osaka Municipal Univ. Press, pp.140. (in Japanese)
- Monji, N., Hamotani, K., Tosa, R., Fukagawa, T., Yabuki, K., Hirano, T., Jintana, V., Piriyaota, S., Nishimiya, A. and Iwasaki, M., 2002: CO<sub>2</sub> and water vapor flux evaluations by modified gradient methods over a mangrove forest. *J. Agric. Meteorol.*, 58, 63-69.
- Ohtaki, E., 1984: Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. *Boundary-Layer Meteorol.* 29, 85-107.
- Ohtaki, E., 1985: On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields. *Boundary-Layer Meteorol.* 32, 25-37.
- Ohtaki, E. and Matsui, T., 1982: Infrared device for simultaneous measurement of fluctuations of atmospheric carbon dioxide and water vapor. *Boundary-Layer Meteorol.* 24, 109-119.
- Ohtaki, E. and Seo, T., 1974: Measurement of gradient 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, 65-77.
- Smedman-Högström, A. S. and Högström, U., 1973: The marsta micro-meteorological field project. Profile measurement system and some preliminary data. *Boundary-Layer Meteorol.* 5, 259-273.
- Webb, E. K., Pearman, G. I. and Leuning, R., 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 106, 85-100.
- Yamamoto, S., 1999: CO<sub>2</sub> flux network based on tower measurements in forest ecosystems. *Tenki*, 46, 15-20. (in Japanese)