

速報

複雑地形上の森林で算出される CO₂ フラックスと座標変換法との関係について*¹清水貴範*² ・ 玉井幸治*³ ・ 清水 晃*²キーワード：CO₂ フラックス，複雑地形，座標変換法

I. はじめに

森林地に樹冠を超える高度の気象観測タワーを設置して，森林-大気間の熱交換量や物質交換量（フラックス=単位時間・単位面積当たりの交換量）を測定する試みは，世界各地で行われている（Aubinet *et al.*, 2000；Baldocchi *et al.*, 2001；Saigusa *et al.*, 2005）。フラックスは，多くの場合，乱流変動法を用いて計測される。乱流変動法では，地表面が熱・物質輸送に及ぼす作用が広い範囲で一様であることを前提として，測定値を平均値と変動量に分解し，変動量の値からフラックスを算出する。その際，鉛直方向の風速の平均値 $\langle w \rangle$ は0とみなされる（ここで w は鉛直とみなす方向の風速成分， $\langle \rangle$ は時間平均を表す）。しかし，自然環境下での測定では，かなり平坦・一様な地表面上でも $\langle w \rangle = 0$ が成立しないことが多い。座標変換法は，これを補う目的で開発され，現在は森林樹冠上でのフラックス算出の際には，必須の手順となっている。この適用によって，測器の傾き及び地形傾斜によるフラックス算出の不安定性は，ある程度緩和されるものと見込まれている（例えば McMillen, 1988）。座標変換法には，大別して，1）データを集計して平均値を算出する時間（平均化時間：本研究では30分）ごとに $\langle w \rangle = 0$ となる座標変換を行う方法，および，2）数週間～1年程度の観測期間中に取得した風速値の全データについて， $\langle w \rangle = 0$ に最も近づくような平面（あるいは風向毎の吹き上げ・吹き下ろし角度）を設定して変換を行う方法，がある。2）の方法は近年“Planar Fit法”として整理され（Wilczak *et al.*, 2001），これを基に，風向で範囲を区切って座標変換平面を設定する方法なども試行されている（Kosugi *et al.*, 2007；Ono *et al.*, 2008）。このように，座標変換法には現在いくつかの方法が提案されている。しかし，尾根や谷が混在する複雑地形上の森林を対象に，各種の座標変換法がフラックス算出値にどの程度影響を及ぼすか，という点についての定量的な検討は行われていない。一方，我が国の森林の大半は複雑地形上にあり，こうした場所でもタワーを用いた観測データによるフラックス算出が行われている（例えば Kominami *et al.*, 2003；Kosugi *et al.*, 2007）。そこで本研究では，複雑地形上に植栽されたスギ・ヒノ

キ林樹冠上で取得したデータを対象に，各種の座標変換法がCO₂フラックス算出値に与える影響について比較検討した。

II. 観測データ及び検討方法の概要

森林総合研究所九州支所では，九州森林管理局と共同で，1992年より熊本県山鹿市鹿北町に鹿北流域試験地を設定して水文・気象観測を行ってきた（Shimizu *et al.*, 2003）。試験地周辺は尾根-谷が多い複雑地形であり，谷筋から山腹にかけてスギ，尾根付近でヒノキが植栽されているが，パッチ状に常緑広葉樹が繁茂している場所が見られる。今回検討に用いるのは，地上高51mの樹冠上で得られた2007年4月25日-5月30日のデータである。3次元超音波風速温度計（カイジョーソニック，DA-600；TR-61C Probe）とサンプル大気吸引口はそれぞれ15cm離れた場所に設置した。サンプル大気は約7Lmin⁻¹で約60m吸引後，クロードパスH₂O・CO₂アナライザー（LICOR，LI-7000）で分析した。これらの出力データはデータロガー（TEAC，DR-M3b）に10Hzで記録し，30分の平均化時間で集計した。取得した風速データに対しては超音波風速温度計の受感部による風速減衰の補正（Shimizu *et al.*, 1999）を行い，CO₂変動量については密度補正（Webb *et al.*, 1980）を行った。また，サンプル大気吸引の際のCO₂濃度に関する高周波変動の減衰は，理論的な方法に基づいて補正した（Shimizu, 2007）。

本研究で試行する座標変換法は，以下の通りである：

[DR(Double Rotation)法]30分の平均化毎に $\langle w \rangle = 0$ となるように2回転の座標変換を行う（Kaimal and Finnigan, 1994）。

[PF(Planar Fit)法]解析対象期間の超音波風速温度計（SAT）の3成分風速（3次元鉛直座標系で x , y , z 風速とする： z 風速はSATの鉛直軸風速）から独立に算出した30分平均値について，全データを用いて以下の平面を表す式（1）を最も良く成立させるような b_0 , b_1 , b_2 を最小2乗法で求める。

$$f(x, y) = b_0 + b_1x + b_2y = z \quad (1)$$

30分平均風速が (x_0, y_0, z_0) のとき，平面（1）上の点 $(x_0, y_0,$

*¹ Shimizu, T., Tamai, K. and Shimizu, A. : Examination of the relationship between coordinate rotation methods and CO₂ flux estimation measured over a forest canopy on complex terrain.

*² 森林総合研究所九州支所 Kyushu Res. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Kumamoto 860-0862

*³ 森林総合研究所 For. & Forest Prod. Res. Inst., Tsukuba 305-8687

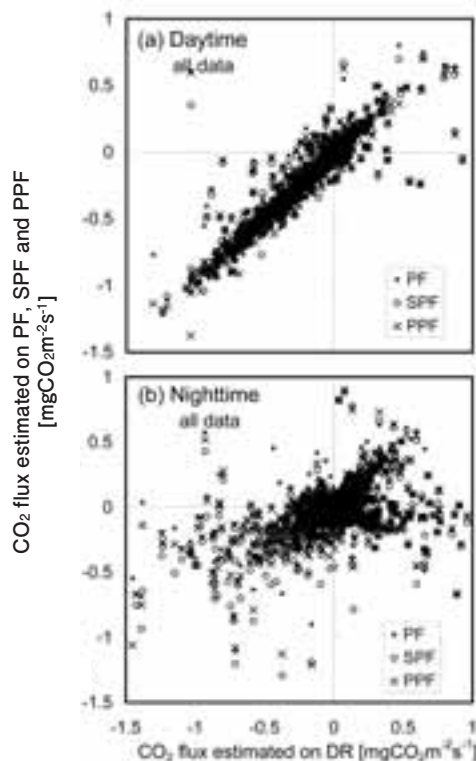


図-1. 座標変換法ごとのCO₂フラックス算出値の比較：(a) 日の出～日の入りの全データ，(b) 夜間の全データ

$f(x_0, y_0)$ からの法線ベクトルに沿ってフラックスが輸送されるように座標変換を行う (Wilczak *et al.*, 2001)。

[SPF (Sectorial Planar Fit) 法] 解析対象期間に得られた x, y, z 風速を風向で分類し、いくつかの風向範囲ごとに PF 法の平面を設定して座標変換を行う。Kosugi *et al.* (2007) は風向ごとに 5 平面を、Ono *et al.* (2008) は 12 平面を設定している。

[PPF (Polynomial Planar Fit) 法] 解析対象期間に得られた x, y, z 風速平均値の全データから、以下の 5 次曲面を表す (2) 式を最も良く成立させるような $b_0, b_{1,k}, b_{2,k}$ を求める ($k = 1 \sim 5$)。

$$g(x, y) = b_0 + \sum_{k=1}^5 b_{1-k} x^k + \sum_{k=1}^5 b_{2-k} y^k = z \quad (2)$$

30分平均風速が (x_0, y_0, z_0) のとき、点 $(x_0, y_0, g(x_0, y_0))$ での曲面 (2) 上の接平面の法線ベクトルに沿ってフラックスが輸送されるように座標変換を行う。

Ⅲ. 結果と考察

図-1 は 4 種類の座標変換法で算出された CO₂ フラックス値を比較したものである。図-1 (a) は日の出～日の入りまでの値、図-1 (b) は夜間の値である。図-1 (a) では各座標変換法による算出値は、多少の散逸はあるものの、総じて大きな差はない。日の出～日の入りの全データを平均した場合の差は、DR 法と SPF 法との間で最も大きい、その差は 2.3% と僅かである。一方、図-1 (b) での夜間の全データの比較結果は大きくばらついている。図-1 (b) は DR 法と他の 3 つの方法を比較しているが、PF 法と PF 法から派生した SPF 法・PPF 法による算出値もあまり重ならず、ばらつきがあることが分かる。ただし、夜間で乱流変動が卓越しない場合の CO₂ フラックスデータは、重力流

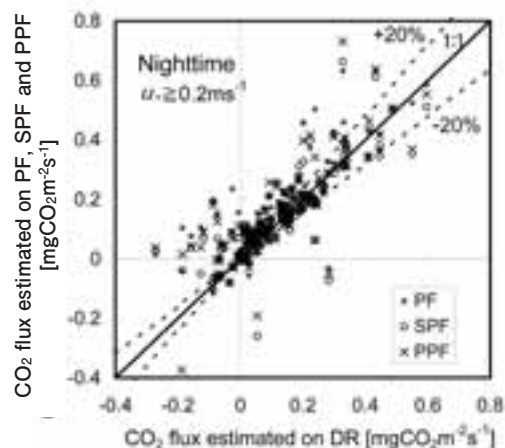


図-2. 座標変換法ごとの夜間 CO₂ フラックス算出値の比較：摩擦速度 $u_* \geq 0.2 \text{ms}^{-1}$ のときのデータのみ表示

の作用などを強く受けるために過小評価となる可能性が高いとされている (Goulden *et al.*, 1996 など研究例多数)。そこで、摩擦速度 u_* を用いて、夜間でも比較的乱流変動が大きいと考えられる際のデータを選別して、さらに比較を行った。図-2 は u_* が 0.2ms^{-1} 以上だったときのデータを用いて比較を行った結果である。比較に用いたデータは全データの約 16% であり、座標変換法によるばらつきは小さくなっているが、その差はまだかなり大きい。 $u_* \geq 0.2 \text{ms}^{-1}$ での CO₂ フラックスの平均値の差は DR 法と PF 法の間で最大となり、PF 法での算出値の平均は DR 法による値に対して 30% 以上大きかった。

以上より、複雑地形上の森林を対象にした座標変換法ごとの CO₂ フラックス算出値の差は夜間のデータで顕著であり、摩擦速度によるデータの選別を行っても無視できない差が生じる可能性が示唆された。今後は、他の期間のデータについて同様な検討を行い、1 年間以上の長期の CO₂ 収支算出値への影響についても定量化する必要がある。

引用文献

- Aubinet, M. *et al.* (2000) *Adv. Ecol. Res.* 30 : 113-175.
 Baldocchi, D. *et al.* (2001) *Bull. Amer. Met. Soc.* 82 : 2415-2434.
 Goulden, M. L. *et al.* (1996) *Glob. Change Biol.* 2 : 169-182.
 Kaimal, J. C. and Finnigan, J. J. (1994) *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*, Oxford Univ. Press, New York, 289 p.
 Kominami, Y. *et al.* (2003) *Tellus B* 55 : 313-321.
 Kosugi, Y. *et al.* (2007) *J. Hydrol.* 337 : 269-283.
 McMillen, R. T. (1988) *Boundary-L. Met.* 43 : 231-245.
 Ono, K. *et al.* (2008) *J. Agr. Met.* 64 : 121-130.
 Saigusa, N. *et al.* (2005) *Agr. For. Met.* 134 : 4-16.
 Shimizu, A. *et al.* (2003) *Hydrol. Proc.* 17 : 3125-3139.
 Shimizu, T. (2007) *Boundary-L. Met.* 122 : 417-438.
 Shimizu, T. *et al.* (1999) *Boundary-L. Met.* 93 : 227-236.
 Webb, E. *et al.* (1980) *Q. J. R. Met. Soc.* 106 : 85-103.
 Wilczak, J. M. *et al.* (2001) *Boundary-L. Met.* 99 : 127-150.

(2008年12月6日受付；2009年1月14日受理)