

異なるフラックス評価手法の比較から見えてきた問題と 明らかになったこと

間野正美¹・安田幸生²・大谷義一³・宮田明¹

¹ 農業環境技術研究所大気環境研究領域

² 森林総合研究所東北支所

³ 森林総合研究所気象環境研究領域

1. はじめに

農業環境工学関連学会 2006 年合同大会にて、フラックス観測研究部会主催のオーガナイズドセッション「異なるフラックス評価手法の比較から見えてきた問題と明らかになったこと」が、2006 年 9 月 12 日に開催された。当日は、オーガナイズドセッションに先立って、フラックス観測(1)～(3)の一般セッションも開催され、1 日を通して、フラックス観測研究に関する発表と討論が行われた。本稿では、オーガナイズドセッション開催の背景を簡単に説明し、セッションで講演された 5 題の講演内容とその質疑応答について報告する。

2. オーガナイズドセッション開催の背景

フラックス観測研究部会は、フラックス観測・評価研究部会の成果（例えば、日本農業気象学会フラックス観測・評価研究部会、2002）を引き継ぎ、フラックスを精度良く評価するための手法を確立することを目的として、2004 年に設立された部会である（日本農業気象学会、2004）。部会主催のオーガナイズドセッションは、農業環境工学関連 7 学会 2005 年合同大会でも開催され、フラックス観測研究の動向や問題の整理と問題解決に向けての取り組みについて議論が行われた（安田ら、2006）。本年のオーガナイズドセッションは、前回の論点（例えば、フラックスデータの検証や測定法の問題）に対する理解を深めるため、「地表面フラックスを異なるセンサや方法を用いて評価した場合に生じる問題点や、比較によってわかってきた事実について討議する」ことを目的として開催された。

3. 講演概要

まず、森林総合研究所の大谷気象環境研究領域長（フラックス観測研究部会代表）が、部会設立の経緯や昨年のオーガナイズドセッションの概要、本年のセッションの趣旨の説明をし、講演題目の紹介を行った後、講演に入った。

以下では、各講演の内容と質疑応答の概要を報告する。

3.1 題目：オープンパス型とクロズドパス型で測定された渦相関フラックスに違いはあるのか？

発表者：小野圭介，平田竜一，宮田明，藤沼康実。

渦相関法による CO₂ フラックスの測定手法は，ガス分析計の方式により，オープンパス型とクロズドパス型に分けられる。この研究では，水田と森林の観測サイトで得られたオープンパス型とクロズドパス型の渦相関法データを詳細に解析し，両者の比較結果をまとめた。ガス分析計の感度の安定性および品質管理後の利用可能データの数では，両手法間の違いは小さかった。周波数補正係数は，クロズドパス型の方がオープンパス型より大きかった。30 分値のフラックスやアンサンブル日変化の比較では，両観測サイトともに，クロズドパス型の CO₂ フラックスの方がオープンパス型より絶対値が大きい傾向であった。オープンパス型は，冬期，植物の光合成活動がゼロに近い期間に，日中の吸収 CO₂ フラックスが観測され（森林サイト），値のばらつきが大きかった（両サイト）。このばらつきは，密度変動の補正項の大きさで説明できる部分が多かった。年間の積算値は，水田サイトは両手法ともほぼ同じ数値であったが，森林サイトではオープンパス型の方がクロズドパス型より吸収量が大きかった。これは，森林サイトの生育期間が長かったことと，冬期の吸収 CO₂ フラックスが顕著であったことが主な原因であった。

通年の純生態系交換量 (NEE) を精度良く推定するには，測定セル内の CO₂ 混合比への変換が可能なクロズドパス型の方が適している（ただし，周波数補正を慎重に適用する必要がある）。オープンパス型は，NEE がゼロに近く，顕熱フラックスが大きい場合に，密度変動補正項の誤差が重なるため，測定値の解釈に注意を払う必要がある。このオープンパス型の問題を解決するために，乾燥空気密度変動を同時に測定できる測器の開発が望まれる。

質疑応答

実際の観測経験から，密度変動の補正項が大きいように感じており，再度，密度変動補正式の見直しが必要ではないかという意見や，ガス分析計の出力信号の遅れ時間をどのように決定しているか，試料空気の吸引速度の変動はどのように補正しているかなど，クロズドパス型特有の解析方法について質問があった。これに対し，遅れ時間は風速とガス分析計の出力信号の相関が最大になるように調節し，更にバンドパスコバリアンス法による周波数補正を適用していること，試料空気の吸引速度はマスフローコントローラにより制御していることの説明がなされた。

3.2 題目：森林 CO₂ フラックス測定における REA 法と渦相関法の比較でわかってきたこと。

発表者：鱧谷憲，西田正，大角宗久。

REA 法は，鉛直風速が上向きと下向きのときに分けてガス濃度を測定し，両者の平均値の差からフラックスを評価する手法である。REA 法の利点として，時間分解能が低いガス分析計でも適用可能で，密度変動補正を必要としない点が挙げられる。この研究では，森林観測サイトにおける，REA 法と渦相関法による CO₂ フラックスの観測結果を比較し，REA 法が持つ特徴を包括的に整理した。紹介された REA 法システムは 2006 年 6 月に構築された，市販ロガーを用いて装置全体を制御し，回線を通して遠隔地からでも制御できるシステムである。システムは，試料空気の吸引速度が測定時間内に変化しないように構築する必要があるが，森林などの背の高い植生で通常風速が弱いときにはポンプなどの高速応答性はあまり必要とされないことがわかった。鉛直風速が上向きと下向きのときの CO₂ の平均濃度の差は 1~2 ppm と僅かであり，濃度差の測定には高い精度が必要であった。REA 法とオープンパス型渦相関法で測定した CO₂ フラックスの時系列は良く一致した。ただし，日積算値では両者で違いがある日も存在した。両者の比較は，今後，長期にわたって行う必要がある。降雨時は，渦相関法ではノイズ状の異常値が多かったのに対し，REA 法では前後の時刻のデータと比較して，妥当なフラックスが多かった。降雨時の REA 法のデータの妥当性は，晴天時も含めた，日射量と CO₂ フラックスの散布図によっても確

認された。これらのことは、渦相関法の欠測値補完に対する REA 法の有効性、降雨時のフラックス測定への REA 法の適用可能性を示している。

質疑応答

REA 法は、計算式中に、観測により決定される定数 b を含む。この b 値は、常に一定かどうかとの質問があった。これに対し、 b 値は約 1 ヶ月ごとに決定し、その期間内は一定としているとの回答がなされた。鉛直風速の測定方法に関して複数の質問があり、議論がなされた。計算に用いる鉛直風速は、前 1000 秒間の平均値であり、随時更新する必要があること、フラックス計算時間内に風向が大きく変化する場合や夜間の低風速時は適切な鉛直風速の決定が難しく、REA 法の測定は困難となることの説明がなされた。

3.3 題目：シンチロメータを用いた森林の空間平均フラックス評価の試み。

発表者：中屋耕。

単一タワーでの渦相関法測定では、フラックスの空間的な評価が困難である。シンチロメータ法は、50~250 m 程度（大口径の場合は数 km）の長距離のパス間の空間平均のフラックス評価が可能であり、渦相関法が持つ難点を克服できる手法として期待されている。この研究では、森林において、DBSAS 型のシンチロメータ法（大気の屈折率変動から構造関数定数を導いてフラックスを推定する）を用いて得られたフラックスと渦相関法の結果を比較した。シンチロメータ法で計算されたフラックスは、渦相関法よりも、摩擦速度は小さく、顕熱フラックスは大きくなる傾向であった。シンチロメータ法によるフラックス評価の不確実性の原因に、林冠上での MOST (Monin-Obukhov 相似則) の成立を前提とした、無次元消散率・ゼロ面変異の決定、フラックスの正負の符号判定が挙げられる。本研究では、シンチロメータの一次出力値である消散率に着目し、シンチロメータ法と渦相関法から求めた消散率の比の特徴を調べた。この消散率比は、風速で無次元化した鉛直風速の標準偏差に従って変化し、大気の機械的な混合が消散率の評価に影響を及ぼしたことがわかった。消散率比には風向依存性も見られ、ソースエリアが大きいほどシンチロメータ法の消散率が大きくなった。消散率比が大きいほど熱収支のインバランスは大きかった。

2 地点の渦相関法データの比較により、広域にわたる組織的な乱流構造の発達が渦相関法の測定に影響を及ぼしていることが示唆された。既存のパスに直交する形で車載型のシンチロメータを設置して測定を行った結果、既存パスの消散率とに違いが見られ、温度の消散率はソースエリアとの関係が異なるパス設定においても見られた。今後は、フラックスの空間構造をより良く把握するため、車載型シンチロメータを用いて様々なサイトで観測を行いたい。

質疑応答

シンチロメータ法で測定可能なフラックスは運動量と熱フラックスであるが、CO₂ フラックス測定とどのように結びつけるのかという質問、シンチロメータ法のフラックスの平均化時間はどの程度かという質問があった。これに対して、シンチロメータ法により得られた結果は、渦相関法の CO₂ フラックスを補正するための有用な情報となること、シンチロメータ法の分散は短時間で安定するので、平均化時間は 3 分程度でも適当であることの回答がなされた。

3.4 題目：半島マレーシア熱帯雨林における樹冠上フラックスの渦相関法による観測と多層モデルによるボトムアップアプローチとの比較。

発表者：高梨聡、小杉緑子、松尾奈緒子、大久保晋治郎、谷誠、三谷智典、Abdul Rahim Nik.

生態系スケールでは渦相関法、個葉スケールではチャンパー法によるフラックスの観測研究が進められているが、両者の中間スケールの観測や実測に基づいて両スケールを結びつける解析を行うことは困難であり、モデル研究を採用する必要がある。この研究では、熱帯雨林における実

測データおよび植物生理学的な理論を背景とした多層モデルを構築し、渦相関法によるフラックスの観測値と比較した。観測サイトは赤道近くに位置しており、気象要素の季節変化は小さかった。このため、渦相関法で測定したフラックスの日変化パターンにも明瞭な季節変化は見られなかった。日中の吸収 CO_2 フラックスは飽差の増大に伴って減少した。観測サイトの摩擦速度 u_* は小さく、 u_* 補正の適用の有無が年間の CO_2 収支に与える影響は大きかった。年間 CO_2 収支の年々変動は小さかった。

森林各層の熱・ CO_2 フラックスを、気孔コンダクタンスと個葉光合成モデルをもとに、土壌呼吸と遮断蒸発、土壌面蒸発モデルを取り入れて評価し、乱流輸送クロージャーモデルを使用して樹冠上フラックスを求めた。各層の日射などの入力環境変数は、群落構造、放射伝達モデルを使用して求めた。顕熱・潜熱フラックスのモデル計算値と渦相関法による実測値は一致しなかった。しかし、有効放射量（純放射量と地中熱流量の差）を、渦相関法で求めたボーエン比に従って分配して得られた顕熱・潜熱フラックスは、モデル計算値と良く一致した。 CO_2 フラックスのモデル計算値は、渦相関法の実測値よりも、夜間の放出量と午後の CO_2 吸収量を大きめに評価した。気孔の開閉メカニズム（気孔がパッチ状に開く効果）を考慮することにより、午後のモデル計算値と実測値が一致した。

質疑応答

気象要素の季節変化は小さいが、比較的乾燥した期間も見られる。この乾燥期においても CO_2 フラックスの日変化パターンが変化しないのはなぜかという質問があり、森林上層の葉は落葉して光合成量が減少するが、その分は下層葉の光合成量の増加により補償されているとの説明がなされた。その他、 CO_2 フラックスの実測値に熱収支の不足分と同程度の過小評価が生じているのではないかと、夜間のモデル計算値の過小評価の原因は何かとの質問がなされた。これに対し、年間 CO_2 収支の吸収量の大きさなどを考慮すると、熱収支の不足分と同程度の過小評価をしている可能性は小さいこと、夜間の過小評価の原因として移流の影響を考えていることの説明がなされた。

3.5 題目：衛星計測と数値モデルを併用した半乾燥域における広域熱収支分布の推定。

発表者：松島大.

広域陸面のフラックス評価は、衛星計測データを用いることにより可能となるが、極軌道衛星の画像撮影は1日数画像であり、フラックスの日・経日変化をとらえにくい。この研究では、衛星計測データと数値モデルを組み合わせ、時間分解能の高い、草原と森林を含む広域陸面のフラックスを評価した。モンゴルの半乾燥域を対称として、MODISとGOES-9の衛星計測データと地上気象データを利用して、熱収支モデル（2層モデル）により輝度温度を求めた。モデルパラメータは、モデル計算値と衛星計測値の輝度温度が一致するようにシンプレックス法を用いて最適化した。モデル検証のため、草原域の地上気象データを用いて得られたフラックスのモデル計算値と渦相関法の実測値を比較した。モデル計算値は、フラックスの日・経日変化を良く表現しており、蒸発効率と同様に、土壌の熱慣性も土壌水分と高い相関関係にあることがわかった。モデルパラメータを空間領域で最適化し、GridスケールとRegionalスケールの熱フラックスを求めた。Gridスケールは4 km、Regionalスケールは広域（草原域か森林域）に対応する。GridおよびRegionalスケールの熱フラックスの推定値を、Plotスケールのフラックスである渦相関法の実測値と比較した。草原では、各スケールのフラックス値は適当な範囲内で一致し、フラックス実測値には代表性があることが示された。森林では、顕熱フラックスはスケール間の一致度は良かったが、観測地が森林の縁辺に設定されたためか潜熱フラックスはGrid、Regionalスケールの方がPlotスケールよりも大きかった。森林の潜熱フラックスのスケール間の不一致の原因を解明するためには、渦相関法の熱収支のインバランス問題も調べる必要がある。また、森林キャノ

ピーのバルク係数について、その領域平均値の季節変化は森林の正規化植生指数の変化と高相関だった。今後、熱慣性と土壌水分の間に高い相関関係があることを利用し、広域の表層土壌水分モニタリングの可能性を探索したい。

質疑応答

衛星計測から推定した日射量と地上観測値の差はどの程度かなどの日射量に関する質問、衛星計測より求めた輝度温度は誤差が大きいと言われているがどのように取り扱っているかなどの輝度温度に関する質問がなされた。これに対し、日射量の推定値と観測値の違いは 2 乗平均平方根誤差 (RMSE) で 100 W m^{-2} 程度 (1 時間平均値) であり、日射量推定には雲の有無の影響が一番大きいこと、輝度温度の算出に際しては大気補正が重要であり、この補正は慎重に適用していること、輝度温度の違いがフラックスの評価値に与える影響が大きいこと等の回答がなされた。

4. おわりに

5 題の講演・質疑応答の後に、総合討論の時間が設けられ、フラックスの品質管理と欠測値補完の関連性や、複雑地形のフラックス測定など、フラックス観測(1)~(3)の一般セッションの内容も含めた議論が行われた。総合討論の個々の内容は、紙面の都合上、割愛するが、ここでは、本オーガナイズドセッションを通じて得られた印象を 2 点述べたい。1 点目は、渦相関法の測定値の検証の重要性である。鱧谷ら以降の 4 つの講演は、渦相関法の測定値を真値とみなして他のフラックス評価手法と比較する内容であった。小野らでは、渦相関法の測定値について、手法間の違いに着目した丁寧な解析が行われたが、フラックス値がどの程度正しいかの検証には言及されなかった。真値とみなされる渦相関法の測定値が、どの程度の信頼性を持つのか、どのような条件下で信頼度が高く (あるいは低く) なるのか、特に森林 (なかでも複雑地形の観測サイト) での検証が必要であると感じた。2 点目は、各フラックス評価手法の観測研究の発展性である。各演題は、フラックス評価手法の測定の妥当性を渦相関法との比較により検証することに重点が置かれた内容であった。この段階の研究は、得られた結果を整理して、内容を収束させる方向に向けなければならないが、その後の各測定法の応用例・取り組むべき課題は多く (例えば、REA 法の CH_4 等の微量ガスへの適用、非均一地表面におけるシンチロメータ法の適用、多層モデルによるチャンバー・渦相関法測定スケール間の現象の理解や熱帯林以外の生態系への適用、衛星計測による広域表層土壌水分の連続評価やモンゴル半乾燥域以外の広域熱収支の評価など)、研究の発展性が高いと感じた。

本セッションには約 60 名の方に参加いただき、講演者との間で、予定時間を超える活発な議論が行われました。紙面をお借りし、講演者ならびに参加者の皆様に心より感謝申し上げます。

References

- 日本農業気象学会, 2004: 本会記事. 生物と気象, **4**, 126.
 日本農業気象学会フラックス観測・評価研究部会, 2002: フラックス観測の最近の進歩. 日本農業気象学会フラックス観測・評価研究部会編, 1-52.
 安田幸生, 間野正美, 大谷義一, 宮田明, 2006: フラックス観測評価の問題と解決へのアプローチ, 一研究動向, 問題の整理とその解決に向けて一. 生物と気象, **6**, 41-44.