

日本農業気象学会 2015 年全国大会オーガナイズドセッション OS-J2 「大気—生態系間のフラックス評価の精度向上を目指した大気境界層内の乱流輸送の理解」の報告

岩田拓記*・小野圭介**・平田竜一***

*信州大学
**農業環境技術研究所
***国立環境研究所

Report on the organized session at the annual meeting 2015 of the Society of Agricultural Meteorology of Japan entitled “Understanding turbulent transfers in the atmospheric boundary layer for improving the flux evaluation between the atmosphere and ecosystems”

* Hiroki IWATA, ** Keisuke ONO, and *** Ryuichi HIRATA

*Shinshu University
**National Institute for Agro-Environmental Sciences
***National Institute of Environmental Studies

1. セッションの主旨

現在、大気—生態系間の熱、水、炭素交換を明らかにするために、FLUXNETをはじめとする世界的な観測網が形成されている (Baldocchi *et al.*, 2001)。この観測網では、標準的な観測手法として渦相関法が用いられている。渦相関法は、大気中の乱流輸送を直接的に測定する手法であり、これまでに乱流輸送スペクトルなどの理解を基に精度向上がなされてきた (Moore, 1986; Horst, 1997; Massman, 2000)。しかしながら、渦相関法は熱収支が閉じないこと (Wilson *et al.*, 2002; Hendricks Franssen *et al.*, 2010; Stoy *et al.*, 2013) や、静穏な夜間のフラックスを過小評価していること (Goulden *et al.*, 1996; van Gorsel *et al.*, 2007) などの解決すべき問題がまだ残されている。このような問題を解決するためには、大気境界層内の乱流輸送の理解をさらに深めるとともに、その理解に基づく測定・解析手法の改良が必要であると考えられる。

前述のような問題の糸口を探ることを目的に、JapanFlux が主催となり日本農業気象学会 2015 年全国大会においてオーガナイズドセッション「大気—生態系間のフラックス評価の精度向上を目指した大気境界層内の乱流輸送の理解」を企画した。大気境界層内の乱流輸送や測定・解析手法の改良に取り組んだ研究発表が集まり、有意義な議論が行われた。以下にセッションの概要と 6 件の研究発表の内容について報告する。

2. 概要

日時：2015 年 3 月 19 日 9:00–11:00

場所：文部科学省研究交流センター 国際会議場

主催：JapanFlux

<http://www.agrmet.jp/sk/2015/D-1.pdf>

2015 年 7 月 2 日 掲載

Copyright 2015, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

オーガナイザー：岩田拓記（信州大学），小野圭介（農業環境技術研究所），平田竜一（国立環境研究所）

講演：

1. 凹凸地表面上の接地境界層乱流構造。稲垣厚至，神田学（東京工業大学）
2. PIV 観測による地表面近傍における乱流構造の検討。森文洋，下山宏，渡辺力（北海道大学）
3. ブナ林の葉群が群落内 CO₂ 貯留の鉛直分布に与える影響。齊藤司，石田祐宣，伊藤大雄（弘前大学）
4. 超音波風速計の補正に関する最近の動向について。中井太郎（名古屋大学）
5. 複雑地形地の森林における座標変換法の選択がフラックス算出値に与える影響について。清水貴範（森林総合研究所）
6. 水田において測定した大気境界層内の低周波輸送の特徴。岩田拓記（信州大学），小野圭介（農業環境技術研究所）

3. 発表内容

大気境界層中の乱流の組織構造は、運動量や熱、ガスの輸送に大きく貢献していると考えられている。稲垣厚至（東京工業大学）は、このような乱流組織構造が接地境界層相似則の中で果たす役割を明らかにするために、野外都市模型において多点同時計測により乱流組織構造の観測を行った。主流方向の風速データに主流方向に直交する方向へのローパスフィルターをかけることにより輸送に寄与するアクティブな変動と輸送に寄与しないインアクティブな変動への分離を行った。このフィルタリングにより、低速ストリーク構造が抽出できること、このストリーク構造が運動量輸送に大きく寄与していることを示した (Inagaki and Kanda, 2010)。また、東京の実都市境界層の数値シミュレーションと実際のドップラーライダーの観測から、両データで高層建物の風下側の同一地点に低速ストリーク構造がみられる傾向を示した。

森文洋（北海道大学）は、平坦な地表面近傍の乱流組織構造を明らかとするために、従来風洞実験などで用いられてきた PIV（Particle Image Velocimetry）測定を野外観測に適用した新しい試みについて発表した。PIV 測定では、大気中に散布したトレーサーをシート状のレーザー光を用いて照射することで可視化し、デジタルビデオカメラで連続記録したその動きから流れ場の速度ベクトルを算出した。PIV 測定の精度検証のために、同時に超音波風速計で測定した速度ベクトルとの比較を行い、PIV データが信頼できるものであることを示した。また、数値シミュレーションや風洞実験でみられるヘアピン渦構造が大気接地層でも観測され、この構造が運動量輸送などに大きく寄与していることを示した。

大気一生態系間の正味交換量を評価するためには、樹冠上での乱流フラックス観測に加えて、樹冠内における貯留量変化を考慮する必要がある。齊藤司（弘前大学）は、白神山地のブナ林に設置されたタワーにおいて CO₂ 濃度プロファイルを連続的に測定し、群落上と群落内の CO₂ 貯留速度を比較した。樹冠形成後の 6 月は、夜間の貯留量増加局面よりも早朝の貯留量減少局面において群落内が群落上より変化速度の絶対値が大きくなった。群落上下の安定度の比較から、夜間は樹冠の冷却により群落内部が不安定となり上下混合が促進されたために、群落内と群落上の貯留速度の差が小さかったという見解が示された。

フラックス観測において用いられる非直交型の超音波風速計は、プローブの水平面に対する風ベクトルの相対的な角度（Attack of angle; AoA）によって測定誤差が生じることが知られている。中井太郎（名古屋大学）は、Gill 社の超音波風速計に対する AoA 誤差の補正方法の開発の経緯（Nakai and Shimoyama, 2012; Nakai *et al.*, 2014）と、近年話題になっている直交型と非直交型の AoA 誤差の差異とその要因について総括し、現段階ではどの超音波風速計が最も信頼できるかを結論づけることは難しく現実的には最も普及しているモデルの利用が後々の対応を容易にするのではないかと私の私見を示した。

渦相関法を用いたフラックス算出は鉛直風速とスカラや水平風速とのコバリエンスを元に行われる。しかし、実際の観測では地形が水平一様でないこと、風が完全に水平には吹かないことなどから、座標変換を施す事により正しい鉛直風速を得る必要がある。特にフラックス観測に理想的とは言えない複雑地形が多い日本のフラックスサイトにおいて、正しい座標変換法を適用することは重要な課題である。清水貴範（森林総合研究所）は、7つの座標変換法（Double rotation 法、2つの平面固定法、4つの吹上角固定法）を複雑地形地の森林で観測されたデータに適用し、座標変換法の選択がフラックス算出値に与える影響を評価した。昨今、複雑地形に最も適した方法と考えられていた Sector-wise planar fit 法（SPF 法、平面固定法の 1 種）だが、他の方法と比較してフラックスの過小評価の傾向があった。また、他の 6 つの方法間の差違は小さかった。結論として、日中は SPF 法以外の方法、特に吹上角固定法である移動平均法もしくは風速成分の移動平均比法を、夜間は SPF 法を推奨した（Shimizu, 2015）。

渦相関法によるフラックス観測では熱収支が閉じないという問題（熱収支インバランス問題）が常に顕在しており、渦相関法により観測されたフラックスは過小評価されているのではないかと指摘がある。その原因の一つとして、エントレインメントやメソスケール循環などの非常に大きな渦による輸送（低周波輸送）を渦相関法では捉えられていない可能性が挙げられているが、観測・理論ともまだ不明瞭な点が多く残っている。岩田拓記（信州大学）は、ウェーブレット解析によって乱流

データを地表面フラックスと非地表面起因の低周波輸送に分離し、さらに GPS ゾンデによる境界層内の気象プロファイルデータを合わせて解析する事により、エントレインメントによる低周波輸送の検出を試みた。その結果、低周波域において、顕熱の輸送が下向き、水蒸気の輸送が上向きとなる現象が検出され、地表面で観測されたフラックスが非地表面起因の現象の影響を受けている可能性が示唆された。

4. おわりに

近年、数値シミュレーションや遠隔観測技術の発達により境界層内の乱流の空間構造が詳細に解析できるようになりつつある（*e.g.*, Watanabe, 2004; Kanda *et al.*, 2004; Drobinski *et al.*, 2004）。しかしながら、そのような乱流構造の情報が実際のフラックス観測手法や評価手法の高度化に活用されているとは言いがたい。今後も引き続き両者のギャップを埋める取り組みが期待される。世界を見回すと生態系フラックス研究は隆盛を極めており、大規模なデータベースを活用して生態系の様々な機能や環境応答が解明されつつある。シングルタワーでの測定では熱収支インバランスがほぼすべてのサイトで生じており、CO₂ フラックスでも同様の過小評価が生じている可能性が危惧されているが、生態系研究を進める上でこの問題は一旦脇においてある状態にある。脇に置いたことを忘れないためにも、このような集会を定期的に開催することは意義があると考えている。今後の生態系フラックス研究の発展のためにも、乱流輸送の理解と生態学的知見を車の両輪とした研究プロジェクトの推進の必要性を最後に強調したい。

引用文献

- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Paw U, K. T., Pilegaard, K., Schmid, H. P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. and Wofsy, S., 2001: FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **82**, 2415–2434.
- Drobinski, P., Carlotti, P., Newsom, R. K., Banta, R. M., Foster, R. C. and Redelsperger, J.-L., 2004: The structure of the near-neutral atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 699–714.
- Goulden, M. L., Munger, J. W., Fan, S. M., Daube, B. C. and Wofsy, S. C., 1996: Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biol.*, **2**, 169–182.
- Hendricks Franssen, H. J., Stöckli, R., Lehner, I., Rotenberg, E. and Seneviratne, S. I., 2010: Energy balance closure of eddy-covariance data: a multisite analysis for European FLUXNET stations. *Agric. For. Meteorol.*, **150**, 1553–1567.
- Horst, T. W., 1997: A simple formula for attenuation of eddy fluxes measured with first-order response scalar sensors. *Boundary-Layer Meteorol.*, **82**, 219–233.
- Inagaki, A. and Kanda, M., 2010: Organized structure of active turbulence over an array of cubes within the logarithmic layer of atmospheric flow. *Boundary-Layer Meteorol.*, **135**, 209–228.
- Kanda, M., Inagaki, A., Letzel, M. O., Raasch, S. and Watanabe, T., 2004: LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.*, **110**, 381–404.
- Massmann, W. J., 2000: A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. *Agric. For.*

- Meteorol.*, **104**, 185–198.
- Moore, C. J., 1986: Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorol.*, **37**, 17–35.
- Nakai, T. and Shimoyama, K., 2012: Ultrasonic anemometer angle of attack errors under turbulent conditions. *Agric. For. Meteorol.*, **162–163**, 14–26.
- Nakai, T., Iwata, H., Harazono, Y. and Ueyama, M., 2014: An inter-comparison between Gill and Campbell sonic anemometers. *Agric. For. Meteorol.*, **195–196**, 123–131.
- Shimizu, T., 2015: Effect of coordinate rotation systems on calculated fluxes over a forest in complex terrain: a comprehensive comparison. *Boundary-Layer Meteorol.*, in press.
- Stoy, P. C., Mauder, M., Foken, T., Marcolla, B., Boegh, E., Ibrom, A., Arain, M. A., Arneth, A., Aurela, M., Bernhofer, C., Cescatti, A., Dellwik, E., Duce, P., Gianelle, D., van Gorsel null, E., Kiely, G., Knohl, A., Margolis, H., McCaughey, H., Merbold, L., Montagnani, L., Papale, D., Reichstein, M., Saunders, M., Serrano-Ortiz, P., Sottocornola, M., Spano, D., Vaccari, F. and Varlagin, A., 2013: A data-driven analysis of energy balance closure across FLUXNET research sites: the role of landscape scale heterogeneity. *Agric. For. Meteorol.*, **171–172**, 137–152.
- van Gorsel, E., Leuning, R., Cleugh, H. A., Keith, H. and Suni, T., 2007: Nocturnal carbon efflux: reconciliation of eddy covariance and chamber measurements using an alternative to the u^* -threshold filtering technique. *Tellus*, **59B**, 397–403.
- Watanabe, T., 2004: Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramp over plant canopies. *Boundary-Layer Meteorol.*, **112**, 307–341.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B. E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R. and Verma, S., 2002: Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.*, **113**, 223–243.