

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19510020

研究課題名 (和文) 渦相関フラックス測定に伴う熱収支インバランス現象の解明

研究課題名 (英文) Mechanism of the energy balance non-closure associated with eddy covariance fluxes

研究代表者

渡辺 力 (WATANABE TSUTOMU)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：60353918

研究成果の概要 (和文)：渦相関法と呼ばれる最も正確な測定手法を用いても、地表面から大気に放出される熱量が過小評価されるという現象が、世界各国の観測地点で問題となっている。過去に得られた観測データの分析から、この現象は、特に日射が強く風が弱い時によく発生することが明らかとなった。数値流体シミュレーションによる解析の結果、渦相関法による 1 地点観測では、空間スケールの非常に大きな対流に伴う上下方向への熱輸送量を計測することができず、結果として熱放出量が過小評価となることが確認された。

研究成果の概要 (英文)：Undermeasure of the sensible and latent heat fluxes by the eddy covariance method is a world-wide common problem among the flux-monitoring tower sites. Analysis of a dataset from a broadleaf forest site in Kawagoe (Japan) revealed that significant undermeasure tended to occur under the condition of large net radiation and low wind speed. Numerical fluid dynamics simulations run for such conditions indicated that a single-point eddy-covariance measurement does not capture the flux's low-frequency components associated with quasi-stationary convections of spatial scale as large as the boundary layer depth, and thus underestimates the total flux. Observed dissimilarity between temperature's and water-vapor's low-frequency fluctuations supports this idea because it is consistent with the simulation results showing that hot and dry air entrained at the top of the boundary layer reaches the height of flux measurements (near the bottom of the boundary layer) owing to the large-scale convection and causes out-of-phase fluctuations of low frequencies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：フラックス、渦相関法、熱収支、インバランス、タワー観測、数値流体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

1990年代以降、京都議定書の締結を背景に、森林等の陸上生態系における二酸化炭素や熱および水蒸気の吸収・放出量を測定するための「タワー観測」（地上に設置された気象観測タワーに各種の計測器を取り付けて行う観測）が、日本を含む世界各国の400ヶ所以上もの地点において進められている。これらの観測においては、熱や物質の「フラックス」（単位時間・単位地表面積あたりの吸収・放出量）を微気象学的に測定する「渦相関法」が用いられている。この測定法は、現在のところ最も正確とされる手法であり、ほぼすべての観測地点において採用され、既に多くの測定結果が報告されている。

ところが、データが蓄積されるにしたがい、この測定法に重大な問題があることが明らかになってきた。つまり、渦相関法を用いると、本来閉じるはずの「熱収支」（たとえば森林を1つの系と見なすとき、系への熱入力＝系内の熱貯留＋系外への熱出力、となるはず）が閉じないのである。しかも、全世界の大多数の観測地点で同じ問題が生じており、いずれの地点においても系外への熱出力（大気への熱放出量と水分蒸発に伴う潜熱放出量の和）が系統的に10～30%も過小評価されている。これが「熱収支インバランス現象」である。

この問題を軽視できない理由の一つは、全く同じ手法によって測定されている二酸化炭素の吸収・放出量についても、既存の測定データに同種の問題が潜在する可能性があるということである。つまり、森林等の陸上生態系による二酸化炭素の吸収量や放出量がそれぞれ過小評価されている可能性があり、これらのデータに基づいて陸域炭素収支などを算出すると、その結果には大きなバイアスが含まれる可能性がある。

2. 研究の目的

上の背景を踏まえ、本研究では、熱収支インバランス現象のメカニズムを明らかにすること、および同現象が生じる際の気象条件や大気境界層内の流れ場の特徴を明らかにすることを目的とする。それにより、これまでに蓄積された観測データに対する再解析の方向性を提示したい。

3. 研究の方法

(1) 観測データ解析

独立行政法人森林総合研究所が1995年に設置した川越森林気象試験地（平坦な落葉広葉樹林）において過去に取得されたタワー観測のデータを解析し、熱収支インバランス現象が生じていた事例における気象条件や乱

流変動の特性を明らかにする。同試験地では、設置以降2002年まで連続した観測が行われた。経常的には、森林熱収支の長期モニタリングを目的とした計測手法（バンドパス渦相関法：水蒸気フラックスを応答特性は低い長期安定性にすぐれた測器で測定する方法）を用いた観測が行われたが、応答特性のよい水蒸気センサーを用いた渦相関法による短期集中観測も数回行われている。本研究では後者の観測データを解析に用いる。観測サイトの森林状態や測定項目等の詳細については、森林総合研究所フラックス観測ネットワークのホームページ

(<http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/>)を参照されたい。

(2) 数値シミュレーション

大気乱流を詳細に再現できる数値計算手法であるLarge Eddy Simulation (LES)を用い、水平方向に一樣な地表面状態を仮定した理想的条件における大気境界層内の流れ場をシミュレートする。その結果から、現実の屋外観測では容易に得ることができない、流れ場（乱流や対流）の3次元構造を把握し、熱収支インバランス現象との関係を検討する。本研究では、空間スケールの異なる次の2つのシミュレーションを実行した。

① 森林群落スケールのLES

森林群落内外の詳細な乱流構造が、渦相関法によるフラックス計測に及ぼす影響を明らかにするためのシミュレーション。計算領域の大きさは、主流方向に76.8h（hは森林群落の高さ）、主流と直交する水平方向に38.4h、高さ方向に8hであり、計算格子の間隔は0.1hである。大気安定度は中立とし、一定の気圧傾度を外力として与えることにより領域内の流れを駆動した。

② 大気境界層スケールのLES

大気境界層内の対流など、より大きな空間スケールをもつ流れ場が、フラックス計測に及ぼす影響を明らかにするためのシミュレーション。計算領域の大きさは、水平方向に3km×3km、高さ方向に2kmであり、格子間隔は10mである。水平一樣な初期状態（境界層高度：500m、一般風なし）を設定し、地表面から一定の熱フラックス（100 Wm⁻¹）を与えることにより、領域内の流れを駆動する。これらの基本条件は変えずに、地表面からの蒸発量（水蒸気フラックス）が異なる4ケース（蒸発量＝0、2、5、10 mm d⁻¹）のシミュレーションを行った。いずれも、地表面からの熱フラックスおよび水蒸気フラックスは、水平方向に一樣かつ時間的に一定とした。

なお、本研究で用いたLESのコード（プログラム）は、いずれも独自に開発したものである。

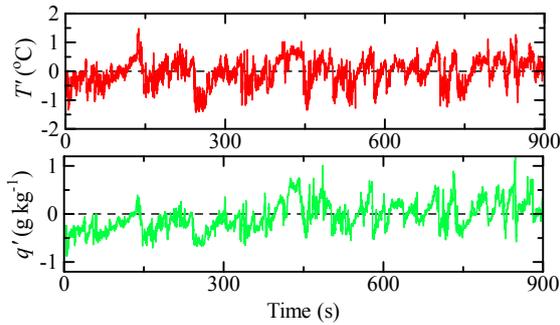


図 1. 川越森林気象試験地の観測タワーで計測された乱流時系列の例
 上図: 気温変動、下図: 比湿 (水蒸気量) 変動
 (1997年8月10日 10:30-10:45)

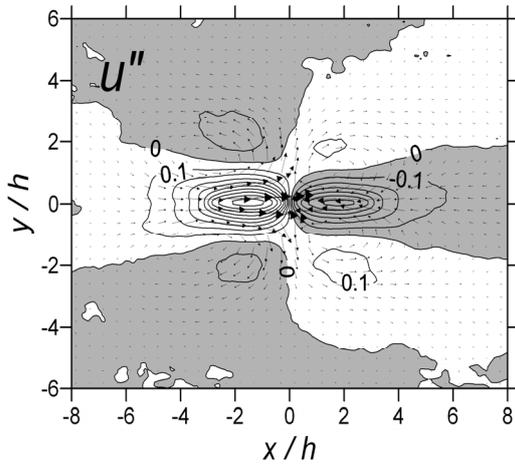


図 2. 群落上の乱流場において卓越する組織構造の平均像 (群落上端高度における水平断面図)
 ベクトルは水平風速を、コンターは主流風速の大きさをそれぞれ表し、いずれも同一高度の水平面内における平均値からの偏差を示す。(横軸: 主流風向に沿う水平距離を群落高で規格化したもの; 縦軸: 主流風向と直交する水平距離を群落高で規格化したもの; 主流風向は左から右)

4. 研究成果

(1) 群落上の組織的乱流構造の影響

タワー観測によって取得された乱流時系列データにおいては、平均風速が十分に強い場合には、気温・水蒸気濃度・二酸化炭素濃度などのスカラー量が、時間とともに緩やかに上昇 (下降) した後に急激に下降 (上昇) するという鋸歯状の変動パターンを示すことが多い (図 1)。これは、森林群落上の流れ場において特異的に発達する組織的な乱流構造が、時おり測定地点を通過し、それと同時に森林群落内部の空気と外部の空気とが大きく入れ替えられていることを示すものである。このような現象によって森林-大気間のフラックスの大部分が形成される。つまり、空間的に代表性のあるフラックスを正し

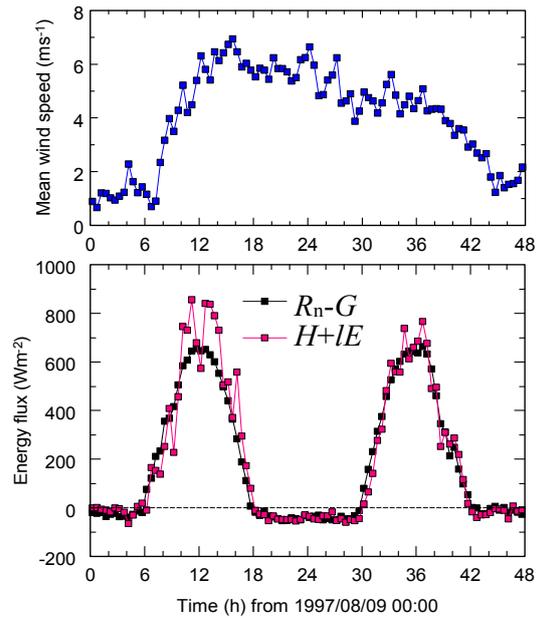


図 3. 風が十分に強い場合の観測結果

上図: 平均風速

下図: 熱収支

R_n-G : 系への熱入力-系内の熱貯留

$H+IE$: 系外への熱出力

く計測するためには、こうした組織的乱流構造による混合に伴う輸送量 (上下方向への) を適切にサンプリングする必要がある。

このことを踏まえ、森林群落スケールの LES の結果から、組織的乱流の空間構造の平均像を求めたところ、長さスケールが群落高の 10 倍程度の大きさを持ち、流れに沿って細長く伸びた形をもつことが明らかとなった (図 2)。森林群落上の乱流構造の発達メカニズムを解明する上で重要な知見が得られたといえる。しかし、風速が十分に強い場合には、この程度の大きさの乱流構造の影響は、渦相関法の一般的な平均時間 (30 分) の間に十分にサンプリングされる。したがって、群落上の乱流に特有な組織的乱流構造の存在が熱収支インバランス現象の直接的な原因ではないと考えられる。実際の観測事例においても、風が十分に強く、スカラー量の時系列に鋸歯状の変動パターンが数多く観測された時間帯には、熱収支インバランスの程度が比較的小さいか、むしろフラックスが過大になる場合もあることが確認された (図 3)。

(2) 境界層スケールの流れ構造の影響

① 観測データ解析の結果

顕著な熱収支インバランス現象が起きるのは、主に春～夏季の日中で、日射量が大きく風が比較的弱い時間帯であった (図 4 にその一例を示す)。このような条件の時には、水蒸気密度の乱流時系列において、時間スケールの長い顕著な変動がしばしば見られる。

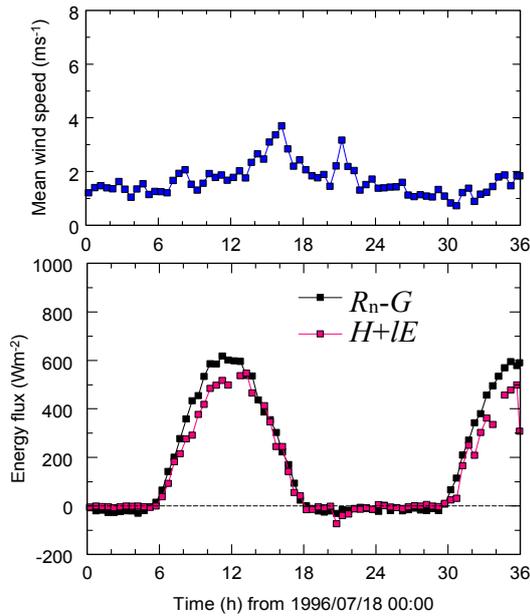


図 4. 図 3 と同じ (ただし、風が弱い場合の例)

図 5 にその典型的な一例を示すが、同図から分かる通り、水蒸気量の細かい (短周期の) 変動は温度変動と相似的である。しかし、長時間のトレンドを比べると、温度はほぼ横ばいであるのに対し、水蒸気量は減少傾向を示している。さらに、図中に縦の破線で示した 700 秒付近と 1270 秒付近のように、水蒸気量は階段状に低下するが、温度には同様な変化が顕著には見られないといった特徴が確認される。また、ここに示していない他の事例においても、温度が上昇傾向を示すのに対して水蒸気量は減少傾向を示すなど、時間スケールの長い (長周期の) 変動成分が相似的でないケースが多く見られた。

② LES による検討結果

上記の、日射量が大きく風が比較的弱い状況に相当する条件を設定し、大気境界層スケールの LES を行った結果、次のことが明らかとなった。まず、このような状況下では、大気境界層内にセル状の対流構造が形成され、それによってスカラー量が上下方向へ輸送される (図 6)。セル構造の持続時間は、一般的な渦相関法の平均時間よりも長く、空間的な位置もあまり変化しない。そのため、ある 1 地点での時間平均に基づく渦相関法では、空間的に広がりをもつセル構造全体による輸送量をとらえることができず、結果としてフラックスの大きさを過小に評価する傾向となる。この傾向は平均時間が短いほど顕著に現れる (図 7)。また、このように活発な対流が生じると、強い上昇速度をもつ空気塊が境界層の上端を突き抜けて対流圏下部に侵入し、その補償流として対流圏下部の空気塊が境界層内に下降する、いわゆるエントレインメントが活発に起こる。こうして境界層内

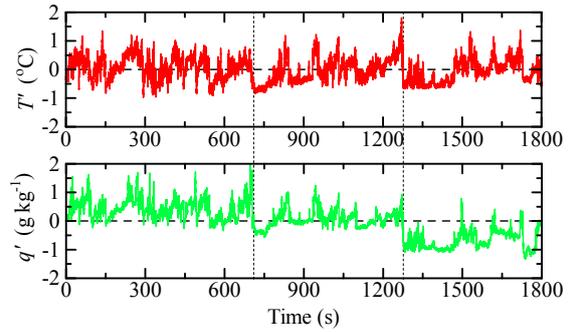


図 5. 日射が強く風が比較的弱い時に計測された乱流時系列の例

上図: 気温変動、下図: 比湿変動

縦の破線で示した時刻に、比湿が階段状に低下しているが、気温にはそのような変化がない。

(1996 年 7 月 18 日 11:00–11:30)

に取り込まれた高温乾燥空気 (一般に対流圏下部は境界層内よりも温位が高く水蒸気量が少ない) は、セル状対流構造内部のゆっくりとした下降流によって地表面付近にまで到達する。このため、地表面近傍の気温や水蒸気量の変動には、地表面によって加熱された高温空気が細かい上昇流となって立ち上ることに起因する空間スケールの小さな成分と、格段に大きな (境界層高度と同程度の) 空間スケールをもつ対流セル構造によってもたらされるエントレインメント起源の成分の両者が含まれることになる。前者は、蒸発量が極端に小さくない限り、同位相で変動する (高温時には水蒸気量も多い) が、その上に、後者による逆位相の変動が重ねられる。結果として、時間スケールの長い変動成分については、温度変動と水蒸気変動の相関が低下することになる (図 8)。

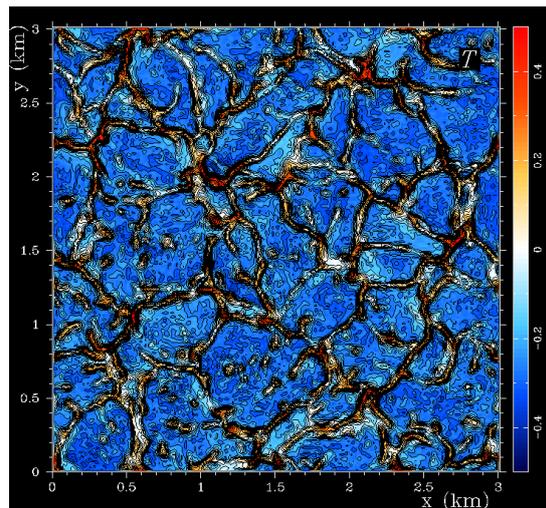


図 6. LES によって計算された、ある一瞬間における気温偏差の水平面分布 (高度 35m)

高温部 (赤) と低温部 (青) がそれぞれ上昇流と下降流が存在する領域に対応すると考えてよい。

(スケールの単位は $^{\circ}\text{C}$)

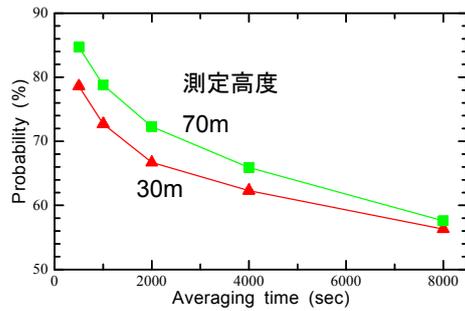


図 7. 渦相関法によるフラックス測定値が過小評価になる確率と平均時間の関係 (LES によるシミュレーション)

③ まとめ

以上より、仮に地表面状態が水平様な理想的条件であったとしても、1 地点での時間平均に基づく渦相関法を用いる限り、日射量が大きく平均風速が小さい条件のときには、境界層高度と同程度の空間スケールをもつ対流構造による熱・水蒸気輸送量を把握することができないため、熱収支インバランス現象が生じる可能性が高いことが明らかとなった。また、そうした条件のときには、エントレインメントによって境界層内へ流入する乾燥空気の影響が地表面付近にまで及ぶため、温度変動と相似的でない、時間スケールの長い(長周期の)水蒸気変動が観測される可能性が高いと考えられる。

二酸化炭素についても、輸送方向が上下反対である以外は、基本的には水蒸気と同様な挙動をする(境界層内の対流・乱流によって受動的に輸送される)ため、熱収支インバランス現象が生じている場合には、二酸化炭素フラックスもその絶対値が過小評価されている可能性が高いであろう。今後、二酸化炭素の乱流時系列と温度や水蒸気のそれとの相関関係を何らかの指標として用いるなど、フラックスの過小評価の程度を定量化する手法を開発し、既存の観測データを見直す必要があると思われる。

(3) 副次的な研究成果

本研究で用いた森林群落スケールの LES モデルに、粒子状物質の移流拡散過程を取り入れたモデルを開発した。このモデルを用いることにより、大気汚染物質の森林への沈着、植物花粉の飛散、散布農薬の沈着や飛散など、植物群落内外の風による粒子状物質の輸送過程を詳細に再現することが可能である。植物群落上空の 1 地点から、粒径(重さ)の異なる粒子を散布する数値実験を行ったところ、粒径による到達可能距離の違いや植物への付着量の空間分布など、定性的に現実の拡散状況と一致する結果が得られた。

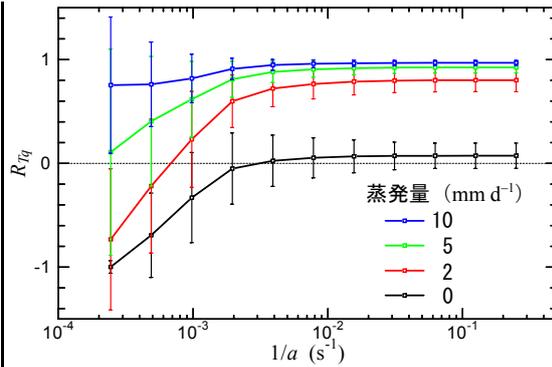


図 8. 直交 Haar ウェーブレット変換による、気温変動と水蒸気変動のコヒーレンススペクトル(時間スケールごとの相関係数) (LES によるシミュレーション)

時間スケールの長い(横軸の値が小さい)変動成分ほど気温と水蒸気量の相関が低いことや、蒸発量が小さいときほど両者の相関が低いことが分かる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Watanabe, T., 2009: LES study on the structure of coherent eddies inducing predominant perturbations in velocities in the roughness sublayer over plant canopies. Journal of the Meteorological Society of Japan, 査読有, Vol. 87, 39-56.
- ② 溝口康子, 2009: 林床における CO₂ 放出フラックスの変動特性に関する研究. 森林総合研究所報告, 査読有, Vol. 8, No. 1, 1-50.
- ③ Mizoguchi, Y., A. Miyata, Y. Ohtani, R. Hirata and S. Yuta, 2009: A review of tower flux observation sites in Asia. Journal of Forest Research, 査読有, Vol. 14, 1-9.
- ④ 渡辺力, 2008: 植物群落内外の流れの LES. 気象研究ノート, 査読無, 219 巻, 37-54.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 渡辺力, 日中の接地層におけるスカラー相似性を崩す要因?, 低温研共同研究集会「様々な土地被覆の大気境界層過程に関する研究集会」, 2009 年 3 月 17 日, 札幌.
- ② 渡辺力, 植生-大気相互作用の観測とモデリングにおける問題, 第 6 回水文・水資源学会セミナー, 2008 年 7 月 3 日, 東京.
- ③ 渡辺力, フラックス輸送に寄与する渦の姿と観測上の問題点, 風に関するシンポ

ジウム, 2007年6月21日, 東京.

- ④ 渡辺力・井上君夫, 2007: 農薬ドリフト研究へのLESの利用, 日本農業気象学会北海道支部大会, 2007年11月28日, 帯広.

[その他]

- ① 渡辺力, 森林と気候のかかわり, 第25回気象講座「新しい気象」(札幌市青少年科学館・日本気象学会北海道支部共催の市民向け講座), 2007年7月31日, 札幌.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 力 (WATANABE TSUTOMU)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 60353918

(2) 研究分担者

溝口 康子 (MIZOGUCHI YASUKO)
独立行政法人 森林総合研究所・北海道支所・主任研究員
研究者番号: 90353870
(H19→H20: 連携研究者)