

学 位 論 文 題 名

森林における物質・エネルギー交換過程の
評価手法の高度化に関する研究

学位論文内容の要旨

進行する地球温暖化に伴う急速な気象環境の変化は、陸域生態系に深刻な影響を及ぼすと考えられている。2007 年刊行予定の IPCC 第 4 次報告書の Working group II では、Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability と題打ち、生態系への直接的・間接的影響を大きく取り上げて執筆が進められている。大気乱流によって上下方向に輸送される物質・エネルギー量を表す乱流フラックスの測定は、植物を主体とする陸域生態系と大気環境の相互影響を解明するための強力な評価手段である。近年、乱流変動量を直接評価する渦相関(EC)法を採用した乱流フラックス観測が広く実施されるようになり、陸域生態系の炭素循環の解明を目的として、CO₂ フラックスの長期連続観測が広範囲に行われている。

しかし、直接的に乱流フラックスを評価する EC 法においても精度的な問題が存在することが、主に森林に設立されたフラックスサイトにおいて多く報告されている。それを端的に表しているのが、熱フラックスと地表面が正味吸収する放射エネルギーが整合しない状態、すなわちエネルギーインバランス問題である。エネルギー収支の整合は、フラックス測定における妥当性の指標の一つであり、インバランスが生じている場合は、乱流フラックスの測定値に何らかのバイアスが生じていると考えられる。近年、数値シミュレーションによって、林冠上に組織的乱流構造(TOS)が発達し、単一のタワーで測定された乱流変動量のみからはフラックスを全て捉えきれず、このことがインバランスの原因となることが示唆された。この説明が正しいなら、空間的に平均されたフラックスを評価するためには、複数点でのフラックス観測から空間平均値を求めるか、より空間的な平均値が得られる乱流計測装置を適用する必要がある。しかし、前者の実施にはコストや立地の制限など困難な問題も多い。

本研究では、従来の観測システムに比べ、より広い空間平均値の取得が期待できるシンチロメータを林冠上に適用し、エネルギーインバランスの主要な原因と考えられる林冠上の組織的な乱流輸送機構を実証的に明らかにした。また、シンチロメータの適用によって空間代表性の高い乱流フラックスを得ることができ、インバランスが大幅に緩和されることを示した。さらに、EC 法によって観測された CO₂ フラックスをシンチロメータ法を活用して補正する方法を開発した。

1. シンチロメータは、大気の屈折率変動によってもたらされる光強度のゆらぎ(シンチレーション)を測定し、乱流運動エネルギー(TKE)および温度変動の消散率を出力する計測装置である。出力された消散率から、それぞれ運動量フラックス(摩擦速度 u_*)および伝熱によるフラックス(顕熱フラックス H)を計算することができる。シンチロメータでは、測定光路を長く(50~250m)設定することができるため、EC 法に比べて広い空間の平均的な乱流信号が取得できることが期待されている。しかし、この手法を森林

に適用した例はこれまで報告されておらず、林冠上でのシンチレーションの特性が明らかになっていなかった。そこで、長野県北佐久郡のダケカンバを主体とする落葉広葉樹林(平均樹高 18m)内に 86m 間隔で設置した 2 つのタワー(高さ 28m)の上端において、2002 年から 2005 年の間、小開口シンチロメータ(DBSAS)と渦相関(EC)システムを併用した乱流観測を実施し、DBSAS の適用性について検討した。

2. エネルギーインバランスの主な原因と考えられる組織的乱流構造(TOS)の存在を確かめるために、EC 法による 2 つのタワーのフラックス観測値を比較したところ、両者に明確な偏差が認められた。また、タワー間の熱フラックスの偏差が大きいほど、両タワーで平均したエネルギーインバランスが大きくなった。このことは TOS の存在の状況的な証拠といえる。DBSAS は、乱流運動エネルギー(TKE)および温度変動の消散率から u^* および H を算出する際に様々な仮定を要する。そこで、直接的な検討を行うために、EC システムによる観測値から TKE および温度変動の消散率を算出し、DBSAS の出力値と比較した。その結果、DBSAS と EC システムで得られた消散率の比は、大気の相対乱流強度に対して漸近的に変化し、相対乱流強度が小さな状況で DBSAS による消散率は EC による値を大きく上回ることがわかった。また、温度変動の消散率および算出した H の双方において、DBSAS 法の結果は EC 法の結果を上回る傾向があり、シンチロメータ法を適用することでエネルギーインバランスを緩和できることが明らかとなった。この結果は、観測される乱流フラックスの起源領域(ソースエリア)が広いほど温度変動の消散率が空間平均されて値が大きくなり、 H の過小評価が修正されることが示している。
3. DBSAS 法と EC 法による乱流フラックス(u^* および H)の比が、両者による乱流運動エネルギー(TKE) および温度変動消散率の比に比例することを利用して、EC 法による u^* および H を DBSAS 法による広いソースエリアの空間平均値に補正する手法を開発した。補正係数に相当する消散率比は、相対乱流強度および DBSAS 法と EC 法のソースエリア比を変数とする経験関数で表現した。DBSAS 法と EC 法による観測値の差異が、主にソースエリアの違いと組織的乱流構造(TOS)によってもたらされると考えられるため、同様のアナロジーを潜熱フラックス(λE)にも適用し、 λE に対する補正法を開発した。こうして補正した H および λE によって、エネルギーインバランスが大幅に緩和され、より広域に空間平均された熱フラックスを評価することが可能になった。
4. 潜熱フラックス λE と同様の手順を用いて、 CO_2 フラックスについても DBSAS に相当する広域空間平均値への補正を施し、森林の炭素収支の面から DBSAS 補正の効果および妥当性を検討した。EC 法の結果から推定した最大光合成量が、個葉の光-光合成特性と葉面積の鉛直分布から計算した値を大きく下回るのに対し、補正值は計算値に近づくことがわかった。また、EC 法の結果から推定した群落呼吸量が、チャンバー法による土壌呼吸量を下回ることが多く、植物地上部の呼吸量を考慮すると矛盾が生じた。一方、DBSAS 補正によって夜間の CO_2 フラックス(CO_2 放出量)が上方修正され、補正を施した群落呼吸量は、生態学的手法によって求めた群落呼吸量と整合した。DBSAS 補正によって、 CO_2 の吸収と放出がともに変化することで炭素収支が変化し、正味の CO_2 吸収量を表す生態系純生産量(NEP)が増加する結果となった。

本論文で開発したフラックスの補正法は、簡易なタワーを臨時に増設し、シンチロメータを併用して補正のための経験関数を求めることで、既存の単一タワーのフラックスサイトにも適用可能である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 平 野 高 司

副 査 教 授 浦 野 慎 一

副 査 教 授 小 池 孝 良

副 査 主任研究官 渡 辺 力 (森林総合研究所)

学 位 論 文 題 名

森林における物質・エネルギー交換過程の 評価手法の高度化に関する研究

本論文は5章からなり、図54、表2、引用文献98を含む114ページの和文論文で、参考論文9編が添えられている。

大気乱流によって鉛直輸送される物質・エネルギー量を表す乱流フラックスの測定は、陸域生態系と大気環境の相互作用を明らかにするための有効な評価手段である。近年、陸域生態系の炭素収支の解明を目的として、渦相関法によるCO₂フラックスの長期連続観測が様々な陸域生態系において行われるようになった。しかし、直接的に乱流フラックスを評価する渦相関法においても、乱流熱フラックスと地表面が吸収する放射エネルギーが釣り合わない状態、すなわちエネルギーインバランスなどの問題が存在することが、主に森林のタワーサイトで多く報告されている。エネルギー収支の整合は、フラックス測定における妥当性の指標の一つであり、インバランスが生じている場合は、乱流フラックスの測定値に何らかのバイアスが生じていると考えられる。数値シミュレーションの結果から、林冠上に組織的乱流構造が発達し、単一のタワーでの測定のみでは空間平均のフラックスを正しく捉えきれず、このことがインバランスの原因となることが示唆された。したがって、フラックスの空間代表値を得るには、複数点でのフラックス観測から平均値を求めるか、より空間的な平均値が得られる計測装置を用いる必要がある。本研究は、広い空間平均値が測定できるシンチロメータを初めて森林に適用し、エネルギーインバランスの主因と考えられる林冠上の組織的な乱流輸送機構を実証的に明らかにするとともに、シンチロメータの適用により、インバランスの解消、および渦相関法によって観測されたCO₂フラックスの補正法の開発を目的としている。

シンチロメータは、大気の屈折率変動によって生じる光強度のゆらぎ(シンチレーション)を測定し、乱流運動エネルギーと温度変動の消散率を出力する計測装置である。これらの消散率から、それぞれ運動量フラックスおよび顕熱フラックスを計算することができる。シンチロメータは、測定光路が長い(50~250m)ため、渦相関法に比べて広い空間の平均的な乱

流フラックスを測定することができるが、森林に適用された例はなく、林冠上でのシンチレーションの特性は不明であった。そこで、長野県の落葉広葉樹林（平均樹高 18 m）に 86 m 間隔で設置した 2 基のタワー（高さ 28 m）上端で、2002～2005 年に小開口シンチロメータと渦相関システムを併用した乱流観測を実施した。その結果、シンチロメータ法による顕熱フラックスは渦相関法の結果を上回る傾向が認められた。この傾向は乱流強度が弱いときに特に顕著であり、シンチロメータ法を適用することでエネルギーインバランスを緩和できることが明らかとなった。このことは、観測される乱流フラックスの起源領域（ソースエリア）が広いほど温度変動の消散率が空間平均されて値が大きくなり、顕熱フラックスの過小評価が修正されることを示している。

シンチロメータ法と渦相関法による乱流フラックスの比が、両者による乱流運動エネルギーと温度変動消散率の比にそれぞれ比例することを利用して、渦相関法による運動量フラックスと顕熱フラックスを広い空間の平均値に補正する手法を開発した。補正係数に相当する消散率比は、相対乱流強度とソースエリア比を変数とする経験関数で表現した。また、同様の手法を適用して、潜熱フラックスに対する補正法を開発した。こうした補正により、エネルギーインバランスが大幅に緩和され、より広域に空間平均された熱フラックスを評価することが可能になった。潜熱フラックスと同様の手順により、 CO_2 フラックスを補正する方法を開発した。チャンバー法によって測定した光合成速度と土壌呼吸速度から計算した正味生態系生産量（NEP）と、補正した CO_2 フラックスから求めた NEP を比較すると、両者は良く一致し、 CO_2 フラックスの過小評価を解消することができた。

以上のように、本論文は広い空間平均値を取得できるシンチロメータを森林に適用し、その実用性を世界で初めて明らかにするとともに、林冠上の組織的な乱流輸送機構を実証的に明らかにした。また、シンチロメータを利用した補正により、渦相関法で生じるエネルギーインバランスが大幅に緩和されることを示した。さらに、渦相関法によって観測された CO_2 フラックスをシンチロメータ法によって補正する方法を開発し、その有効性を検証した。本論文で開発したフラックス補正法は、簡易なタワーを臨時に増設し、シンチロメータを併用して経験関数を求めることで、既存の単一タワーのフラックスサイトにも適用可能であり、汎用性の高いものであると考えられる。よって、審査員一同は中屋耕が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。