

学 位 論 文 題 名

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

学位論文内容の要旨

地球温暖化に対する関心が高まるにつれて、温室効果ガスの一つである二酸化炭素の動態に関する研究の進展が期待されている。特に森林は、陸上生態系の中でも炭素の吸収源のみならず貯蔵源としても機能するため、その炭素動態はとくに注目されている。

森林における炭素動態の研究は古くから行われているが、長期間の炭素貯留量の変化や炭素収支を構成する光合成や呼吸量などの各要素の個別研究が、これまでの主な研究対象であった。近年、空間代表性と時間分解能の高いデータを得ることのできる微気象学的手法によって森林の炭素収支が測定されるようになると、この微気象学的手法によって得られる CO₂ フラックスデータと比較可能な質のデータが、炭素収支を構成する各要素に対して求められるようになってきた。本研究では、森林の炭素収支を構成する要素のうち、二酸化炭素放出に占める割合が最も大きいとされる土壌からの二酸化炭素放出量、すなわち林床面 CO₂ 放出フラックスの変動を研究対象とした。

目的

本研究は、まず林床面からの CO₂ 放出フラックス測定手法の開発を行い、つぎに温帯落葉広葉樹林における林床面からの CO₂ 放出フラックス変動特性を解明するという2本の柱からなる。

CO₂ 放出フラックス測定手法の開発

測定手法の開発におけるひとつの主眼は、空間代表性を確保するための多点観測に用いられる小型センサの特性把握と出力値の補正方法の開発である。一般に小型センサは、出力値の精度、応答速度ともに林床面 CO₂ 放出フラックス測定には不十分と考えられていた。本研究では、チャンバ法で多点観測を正確に行うため、応答特性の情報が十分得られていない小型 CO₂ センサ GMD20, GMT222C, GMM222B, GMM222C, GMP343 (VAISALA 製) と LI-820 (LI-COR 製) の出力値の補正方法について検討を行った。対象としたセンサのうち、GMD20, GMM222, GMT222 (いずれも VAISALA 製) は、標準ガスによる較正により誤差を 20ppm 以下に抑える事ができた。また、GMP343 (VAISALA 製) と LI-820 (LI-COR 製) は、前述のセンサより精度は高く、誤差はそれぞれ 8ppm, 5ppm 以下であった。LI-820 を除く対象センサの応答実験の結果から、通気状態の 90% 応答時間は 11s~117s, 最も応答時間が短かったのは GMP343 の通気タイプであった。拡散状態の 90% 応答時間は 66s~304s, 最も応答時間が短かったのは GMD20 の瞬間値、次に防塵フィルタを装着しなかった GMP343 拡散タイプであった。センサ

出力の遅れ時間を考慮せずに、チャンバ密閉法で林床面 CO_2 放出フラックスを測定した場合、測定間隔が短いほど誤差が大きくなると推定された。測定間隔によらず誤差の少ない値を得るため、初期 CO_2 濃度 (C_0) と本研究の応答実験によって得られたセンサタイプ別の係数 (α 、 τ) を用いて、 $C_t = C_0 + (C_{\infty} - C_0) / (1 - \exp(-t/\tau))$ によるセンサ出力値 (C_t) の t 時における補正 (C_t') が行えることを示した。

測定手法に関するもう一つの主眼は、従来の林床面 CO_2 放出フラックス測定法では難しかった、連続測定を行うためのシステムの開発である。自動開閉型のチャンバ 2 台と 1 台の赤外線式 CO_2 アナライザ (IRGA) を用い、チャンバの蓋の開閉、流路変更のための電磁弁の切り替え、データの取得、保存までコンピュータ 1 台を使用して行うことにより、長期連続データの取得が可能となった。チャンバと IRGA 間の空気循環の影響や、測定中のチャンバ密閉による温度環境の変化は、林床面 CO_2 放出フラックスに影響するほど大きくはないと判断した。

林床面からの CO_2 放出フラックス変動特性の解明

開発された自動開閉型チャンバを使用した林床面 CO_2 放出フラックス測定システムを、埼玉県川越市の落葉広葉樹林内に設置し、3 年間の長期観測を行った。時間分解能の高いデータが得られたことにより、フラックスの日変化が地温の日変化傾向と一致しない場合があることと、降雨によってフラックスが一時的に減少あるいは増加する現象とを捉えることができた。また、新しい測定法により長期間の観測データを得られ、強度の土壌乾燥によるフラックス減少を捉えることができた。地温と林床面 CO_2 放出フラックスの関係は指数関数で近似できるが、温度依存性は季節によって変化することを示した。また、対象温度範囲の上昇にともなって、林床面 CO_2 放出フラックスの温度依存性は減少する傾向があるが、季節変化の割合が大きいことがわかった。

林床面 CO_2 放出フラックスと体積含水率との関係について、多点観測のデータを中心に解析を行った。林床面 CO_2 放出フラックスは主に拡散プロセスによって土壌から放出される。したがって、拡散プロセスに重要な拡散係数と土壌内の CO_2 濃度に注目し、体積含水率とフラックスの関係について解析を行った。これまでの野外の観測では、土壌水分の増加によるフラックスの減少と増加の相反する現象が報告されている。この相反する現象の説明として、拡散係数の減少によるフラックスの減少と、土壌内 CO_2 濃度上昇にともなう CO_2 濃度勾配の増加によるフラックスの増加、これら拡散プロセスによるフラックスの増減に加えて CO_2 発生速度の増加の差し引きによって、土壌水分変化がフラックスの増加・減少を決定することを示した。さらに多点観測の結果より、対象地の林床面 CO_2 フラックスの空間的ばらつきが非常に大きいこと、ただし、長期間にわたる測定が行われていることから、地温と林床面 CO_2 フラックスの関係は、空間代表性のある関係式として取り扱いえることを示した。

結論

2000 年から 2002 年の林床からの炭素放出量は平均 $948 \text{ gCm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ と算出され、これは、一般的な温帯落葉広葉樹林の値と矛盾しない範囲であった。温度依存性の季節変化を考慮した林床面 CO_2 放出フラックスのシミュレーション結果は、長期連続測定データから求めた林床からの年間炭素放出量の年々変動は、フラックスの値が大きい夏季の温度変化の影響が大きいことを示唆した。サイト間の比較は、しばしば気温や降水量などの気候値を指標として行われることが多いが、温帯林の林床からの年間炭素放出量の場合、夏季の地温や土壌、植生などが大きく影響していることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丸 谷 知 己

副 査 教 授 中 村 太 士

副 査 教 授 小 池 孝 良

副 査 教 授 平 野 高 司

学 位 論 文 題 名

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

本論文は4章105ページからなり、引用文献131を含む和文原著論文である。また参考文献として、英文2編、和文2編の計4編が添えられている。

近年、温室効果ガスの一つである二酸化炭素の動態に関する研究が進展するのに伴い、空間代表性と時間分解能の高いデータが期待できる微気象学的手法によって、森林の炭素収支が測定されるようになった。また、この炭素収支の構成要素に対しても、炭素収支データと比較可能な高精度のデータが求められている。本研究では、森林の炭素収支構成要素のうち、二酸化炭素放出に占める割合が最も高い土壌からの二酸化炭素放出量、すなわち林床面CO₂放出フラックスに着目し、チャンパー法に基づく独自のフラックス測定方法を開発し、これを用いて温帯落葉広葉樹林における林床面CO₂放出フラックス変動特性を解明することを目的とした。

CO₂放出フラックス測定方法の開発では、まず空間代表性を高めるため多点観測に用いられる小型センサを開発しなければならない。そこで、出力値の精度、応答速度ともに林床面CO₂放出フラックス測定に利用可能と考えられている6種の小型CO₂センサの出力値と応答速度の補正方法を検討した。その結果、うち4種は標準ガスを用いた較正により誤差を20ppm以下に、他の2種はさらに高精度で、それぞれ誤差を8ppm、5ppm以下に抑えることができた。また、応答実験において90%応答時間は、通気状態では1種を除きいずれも11～117秒、拡散状態では66～304秒に収めることができた。一方、チャンパー密閉法ではセンサ出力遅れのため測定間隔が短いほど誤差が大きくなるので、測定間隔に依存せず最少誤差に抑えるため、初期CO₂濃度と応答実験で得られたセンサタイプ別係数を用いてセンサ出力の補正値を求めた。

つぎに、時間分解能の高いデータを得るため、従来困難であった連続測定の可能な林床面CO₂放出フラックス測定法を開発した。これは、2台の自動開閉型のチャンバー（開口部面積 1,200cm²、地上高 13cm、埋設深 3cm）と1台の赤外線CO₂アナライザー（IRGA）を用い、チャンバーの蓋の開閉、流路変更のための電磁弁の切り替え、データの取得・保存を1台のコンピュータで行い、長期連続データの取得をするものである。

このように独自に開発した自動開閉型チャンバーによる林床面CO₂放出フラックス測定システムを埼玉県川越市の落葉広葉樹林内に設置し、3年間の長期観測を行った。その結果、時間分解能の高いデータにより、フラックスと地温の日変化が一致しないケースや、降雨によりフラックスが一時的に増減するケースが捉えられた。また長期観測により、強度の土壤乾燥によるフラックスの減少を捉えることができた。そして、地温と林床面CO₂放出フラックスの関係は指数関数で近似でき、その温度依存性は季節によって変化し、対象温度範囲の上昇にともない減少するが、季節変化の割合は大きいことを示した。また、多点観測データより、拡散係数の減少によるフラックスの減少、土壌内CO₂濃度上昇さらに濃度勾配増加によるフラックスの増加、これにCO₂発生速度の増加を差し引きすることにより、土壌水分変化に伴うフラックスの増減が決定されることを示した。これにより、これまで報告されてきた土壌水分の増加によるフラックスの増加あるいは減少という相反する変化を説明できた。さらに、多点観測データにより、林床面CO₂フラックスの空間的ばらつきは非常に大きい、長期的に見れば地温と林床面CO₂フラックスの関係は空間代表性のある関係式として表現できることを示した。

これより、対象地における2000年から2002年の林床からの炭素放出量は平均 948gCm⁻²yr⁻¹となり、他の温帯落葉広葉樹林と矛盾しない値が示された。また、林床からの年間炭素放出量の経年変動は、温度依存性の季節変化を考慮したシミュレーションより、フラックス値の大きな夏季の温度変化が影響していることが示唆された。さらに、しばしば気温や降水量などの気候値を指標として行われるサイト間での比較は、温帯林の林床からの年間炭素放出量の場合は、夏季の地温や土壌、植生などが大きく影響していることを示した。

以上のように、本論文では、森林土壌からの二酸化炭素放出量、すなわち林床面CO₂放出フラックスの解明のために、空間代表性と時間分解能の高いデータを得る新たな測定方法を開発し、これを用いた長期野外観測により地温と土壌水分に対するフラックスの依存性を解明し、年間炭素放出量予測を可能にしたものである。森林環境保全研究にとってきわめて品質の高い有用な研究であり、関連分野において高い評価を得ている。よって審査員一同は、溝口康子が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。