

博士論文審査報告書

論 文 題 目

冷温帯コナラ林における土壌圏炭素放出

— 土壌生物呼吸・根呼吸の環境応答性から解く土壌呼吸の季節・年変動 —

Soil carbon efflux in a cool-temperate forest dominated by
Quercus serrata

— Seasonal and inter-annual variations in soil respiration caused by responses
of heterotrophic and root respirations to environmental factors —

申 請 者

友常	満利
Mitsutoshi	TOMOTSUNE

生命理工学専攻 環境生態学研究

2014 年 2 月

森林生態系は地球温暖化を引き起こす二酸化炭素 (CO₂) を吸収する役割を担っている。その生態系の炭素収支には、地上部植物体の光合成や呼吸により吸収・放出される CO₂ のほかに、土壌表面から放出される CO₂ (土壌呼吸) が大きな影響を与えている (Giardina and Ryan 2000)。本研究では、土壌圏炭素の動態を把握し、森林生態系の炭素収支にそれらが与える影響を評価するために、中部山岳地域の冷温帯コナラ林を例として主に 3 つの研究を行った。

第 1 章では序論として、地球温暖化と炭素循環の関係、森林生態系における炭素循環研究の動向、そして本博士論文の意義・目的について述べている。IPCC の第 5 次報告書 (2013) では、世界の平均気温が約 30 年で約 0.85°C (±0.65 ~ 1.06°C) 上昇していることが報告されている。温室効果ガスの CO₂ を構成する炭素は、大気・海洋・陸域に貯蔵され、これらを様々な形態で循環している。今後の環境変化を予測するためには、これらの炭素動態を把握し、そのメカニズムを明らかにすることが重要である。

陸域の森林・草原生態系は、大気中の CO₂ を固定する役割を担っている。特に森林は陸域の 30% を占めるほか、草原に比べて高い炭素固定能力を有する (Whittaker et al. 1974)。森林生態系内の炭素循環においては、特に土壌呼吸が大きな割合を占めているが、その動態の把握が困難であった。これは土壌呼吸が 2 つの要素 (土壌生物呼吸と根呼吸) から成り、各呼吸が環境要因に対して異なる強度で応答していることが原因の 1 つである。したがって、土壌呼吸の変動を予測するうえでは、土壌呼吸からこれらを分離し、各呼吸の環境応答性を明らかにすることが重要である。

そこで本研究では、まず①土壌呼吸の分離方法の比較・検討を行い、次にこれらの手法を用いて②土壌生物呼吸・根呼吸の変動とその要因を明らかにした。さらに、土壌呼吸放出過程の解明に向けた新たな解析手法の開発として、③MRI を用いた土壌構造の非破壊計測を行った。これらの研究から、冷温帯コナラ林における土壌圏炭素動態のメカニズムについて議論した。

第 2 章では異なる 3 手法を用いた土壌呼吸の分離について述べている。これまで様々な手法で分離が試みられてきたが、手法による推定値の差が大きく、同一環境下での手法の比較が求められていた。本章では、比較的高い頻度で利用されてきた①トレンチ法、②回帰法、③サンプリング法を用いて土壌呼吸の分離を行い、推定された根呼吸の寄与率の比較・検討を行った。測定の結果、トレンチ法での寄与率の平均値は、23% (-16 ~ 46%) で、土壌生物呼吸・根呼吸量はともに夏に高く、冬に低い明瞭な季節変化を示した。一方、他の 2 手法では複数の問題点が確認された。回帰法での寄与率の平均値は 11% (-19 ~ 61%) であったが、土壌呼吸と根バイオマスの相関が低く、土壌生物呼吸量が土壌呼吸量よりも高く推定される月が認められた。サンプリング法での寄与率の平均値は 115% (20 ~ 393%) と、他の 2 手法に比べ根呼吸量が大きく推定され、土壌呼吸量を超える傾向が見られた。これらの結果から、森林生態系においては、トレンチ法が土壌呼吸の分離に適する方法であることが示唆された。

第 3 章では土壌生物呼吸と根呼吸の変動とその要因について述べている。これまでの研究では、野外環境下で長期にわたり土壌呼吸を分離し、各呼吸の変動要因を明らかにした例はほとんどない。また、これらの同一環境に対する応答性が異なる場合、推定される土壌呼吸に対する土壌生物呼吸の寄与率は大きく変動し、結果的に森林生態系の炭素収支の推定に大きな影響を与えることが予想された。本章では、各呼吸の変動要因を明らかにし、土壌呼吸に対する土壌生物呼吸の寄与率の変化が森林生態系の炭素収支に与える影響を評価するために、トレンチ法と多項回帰式を用いて、各呼吸量の季節変化と年変化を推定した。その結果、土壌温度や土壌水分量に対して土壌生物呼吸と根呼吸は異なる応答を示した。土壌温度の上昇とともに各呼吸量は上昇したが、その応答性は根呼吸の方が土壌生物呼吸よりも高かった。一方、土壌水分量の上昇に伴い、土壌生物呼吸は減少したのに対して、根呼吸は上昇した。結果的に、土壌生物呼吸の土壌呼吸に対する寄与率は、土壌温度および土壌水分量の上昇に伴い減少した。また、本研究において土壌生物呼吸の年寄与率は大きな季節変化（60～100%）を示し、2010年の土壌生物呼吸量は $1.56 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と推定された。もしこれらの季節変化を考慮しなかった場合、推定される呼吸量は 1.50 から $2.51 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ となり、季節変化を考慮した場合に対して大きな誤差を生じた。さらに、土壌生物呼吸の寄与率の推定に土壌水分量を考慮しなかった場合、推定される土壌生物呼吸量は $2.01 \text{ kgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ となり、こちらも土壌水分量を考慮した場合に対して大きな誤差を生じた。したがって、森林生態系においてより正確な土壌生物呼吸量や森林の炭素収支を推定するためには、土壌生物呼吸の寄与率が明確な季節性を示すこと、さらに土壌温度だけでなく土壌水分量の影響を強く受けることを考慮することの重要性が示唆された。

第 4 章では土壌呼吸放出過程の解明のための新たな手法の開発として、MRIを用いた土壌構造の非破壊計測について述べている。これまで各呼吸の変動は、土壌温度や土壌水分量によって説明されてきた。しかしこれらの変動には、土壌有機物や根の空間配置や、土壌微生物や根の活性に影響を与える土壌空隙や水分の存在状態など、土壌の内部構造も大きく影響していると考えられる。本章では小型 MRI を用いて、土壌の内部構造の可視化を試み、土壌構造の特性を調査した。MRI の分析には、コナラ林（落葉広葉樹）の土壌の他に、特性が大きく異なると予想されたアカマツ林（常緑針葉樹）の土壌を用いた。これらの結果、MRI は土壌有機物に含まれる水分を検出し、土壌有機物と土壌空隙を分離することが可能であることが示された。また、土壌の構成物である葉や枝、根などが、土壌表層から下層へ向かうにつれて、団粒構造を伴う分解物に変化する様子が確認された。これらの変化にともない、土壌空隙は減少し、保水性は上昇した。また、その変化はコナラ林の方がアカマツ林よりも大きかった。したがって MRI は、森林土壌の構造を非破壊的に *in situ* で観測し、その物理性の変化を解明するための新手法となる可能性が示されるとともに、土壌呼吸の放出メカニズムを理解するうえで有効な手法であると考えられた。

第 5 章では、総合考察として本研究で得られた結果から、①冷温帯コナラ林における土壌呼吸の季節・経年変化とその特徴、②土壌呼吸の空間的不均一性、③今後の土壌圏炭素動態に関する研究の展望の 3 点について述べている。

冷温帯コナラ林において、土壌温度は夏に高く冬に低い長期的な変化を示す一方、土壌水分量は降雨により上昇する短期的な変化を繰り返した。各呼吸は、ともに長期的には土壌温度、短期的には土壌水分量の影響を受けて変動した。特に土壌生物呼吸は高い土壌温度と低い土壌水分量で高い呼吸量を示し、地温の上昇や土壌水分量の低下といった気候変動が起きた場合 (IPCC 2013)、土壌圏炭素は CO₂ として大気中により多く放出されると考えられた。

森林生態系における土壌呼吸は、高い時空間的不均一性を示すことが知られている。本研究の結果、土壌呼吸を構成する各呼吸は、環境要因に対して異なる応答性を示した。したがって、同一林分でも土壌圏の土壌生物の組成や根の分布の違いが、土壌呼吸の空間的不均一性を生み出す 1 つの原因になっていると考えられた。また、MRI を用いて明らかにされた土壌の内部構造が、土壌中の CO₂ 濃度や土壌呼吸速度に影響を与える可能性が見出された。したがって土壌中の環境の変化、土壌生物呼吸と根呼吸の環境応答性、土壌構造、土壌呼吸速度の 4 つの関係を明らかにすることが、土壌呼吸の時間的不均一性を解くポイントになると考えられた。

本研究の結果は、測定や推定方法によって土壌呼吸量の値が大きく変動し、結果的に森林生態系の炭素収支に大きな影響を与えることを示している。また、土壌生物呼吸や根呼吸は 1 日の中でも大きく変動し、降雨や積雪といったイベントに対しても異なる応答を示すと考えられた。したがって、これまでの断続的な測定から連続的な測定に切り替え、詳細なタイムスケールでの各呼吸量と環境要因との対応関係を明らかにすることが、より精度の高い土壌呼吸量の推定、さらに土壌圏炭素動態の理解に重要である。

以上のように本論文では、冷温帯落葉広葉樹林における土壌呼吸の変動を土壌生物呼吸と根呼吸に分離し、それぞれの環境要因との応答性から明らかにした他、土壌圏の非破壊計測技術としての MRI の有用性を示した。これらの成果は、土壌圏の炭素放出メカニズムの理解に新しい知見を与え、将来の気候変動による森林生態系の炭素収支の変化のより正確な評価のために、大きく貢献することが期待される。また今後は、詳細なタイムスケールでの土壌圏炭素動態の把握と MRI の実践的な手法への改良によって、さらなる放出メカニズムの理解が期待される。よって本論文は、博士(理学)の学位論文として相応しいものであると認める。

2014 年 2 月

(主査) 早稲田大学教授	理学博士 (早稲田大学)	小泉 博
早稲田大学教授	理学博士 (早稲田大学)	中村 正久
早稲田大学教授	理学博士 (東京大学)	園池 公毅