

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K20037

研究課題名（和文）森林の根呼吸を維持呼吸と成長呼吸に分離して評価する

研究課題名（英文）Partitioning of fine root respiration into growth and maintenance components

研究代表者

平野 高司（Hirano, Takashi）

北海道大学・農学研究院・教授

研究者番号：20208838

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、北海道の有機質に乏しい土壌に再生した若齢林において、カラマツの根呼吸と細根動態（バイオマス、成長）を同時に測定し、それらの季節変化を明らかにするとともに、重回帰モデルを用いて根呼吸を1）細根の維持呼吸、2）細根の成長（構成）呼吸、および3）太根の呼吸に分離することに成功した。2017～2018年の年間値の例では、根呼吸に占める1）、2）、3）の割合は、それぞれ30、44、26%と推定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた主な成果は、森林の根呼吸を細根の維持呼吸と細根の成長呼吸に分離する手法を開発したことである。この手法は、比較的単純なモデルを用いており、また、それほど高価な機器を必要としない。したがって、森林生態系での物質循環の研究において普及するものと考えられる。さらに、陸域生態系における炭素動態の定量化の精度向上を通じ、地球環境の将来予測に対して多大な貢献となるであろう。

研究成果の概要（英文）：We showed the seasonal variations of root respiration and fine root dynamics, such as biomass and production, of young larch trees by a field experiment conducted in a young forest regenerating on poor soil in Hokkaido, Japan. Using a multiple regression model, the root respiration was partitioned into the respirations for fine root growth (R_g), fine root maintenance (R_m) and coarse root maintenance (R_c). For example, in 2017 to 2018, R_g, R_m and R_c accounted for 30, 44 and 26% of root respiration on an annual basis.

研究分野：農林気象学

キーワード：土壌CO₂フラックス 土壌呼吸 炭素循環 落葉樹林 チャンバー法 重回帰モデル 季節変化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

森林に代表される陸域生態系は地球の炭素循環に大きく関わっており、人為的に排出される CO₂ の約 30% を固定していると見積もられている。そのため、大気 CO₂ 濃度の変化を精度良く予測するには、森林生態系の光合成 (CO₂ 吸収) と呼吸 (CO₂ 放出) の時空間変動や環境応答を正しく理解し、モデルを用いて正味の CO₂ 固定量を計算する必要がある。樹木の光合成については生化学的なモデルが標準的に用いられるが、呼吸は様々な要因によって制限される複雑な過程であるため、標準的なモデル化が難しい状況にある。特に、土壤中に存在して実験が困難である樹木根 (特に細根) の呼吸には未解明な部分が多く残されている。樹木細根は、バイオマス自体は大きくないが機能性が高いため、森林生態系の炭素・養分循環に果たす役割は非常に重要である。森林の土壤呼吸に関する研究の歴史は長く、土壤からの CO₂ 放出量の年間値や季節変化、根呼吸と微生物呼吸 (有機物分解) の分離などに関して多くの報告がある。また、森林生態系の物質生産の観点から細根のターンオーバー (回転率) に関して多くの研究が行われてきた。しかし、土壤呼吸と細根動態 (成長、枯死、分解) をフィールドで同時に測定し、両者を関連付けた研究はほとんどなく、定量的な解析は未だ行われていない。細根の生産量は森林の純一次生産量 (NPP) の 30~70% を占めるため、森林生態系の炭素循環を定量化し、将来予測を行うためには土壤呼吸と細根動態を同じ場所で同時に測定し、両者の関係をモデル化することで、根呼吸を季節変化のパターンや環境応答特性が異なる成長呼吸と維持呼吸に分離することが不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、北海道の落葉樹林において、樹木の根呼吸と細根動態 (バイオマスと成長の季節変化など) を同じ場所で同時に測定し、根呼吸を 1) 細根の維持呼吸、2) 細根の成長 (構成) 呼吸、および 3) 太根の呼吸に分離評価する。また、異なる季節のデータを用いて、細根の維持呼吸と成長呼吸の季節変化 (フェノロジー) や環境応答特性 (温度など) の違いを解析し、モデル化を試みる。自然環境下で細根呼吸を維持呼吸と成長呼吸に分離することは世界で初めての試みであり、開発される方法論および得られる知見は、森林生態系の炭素動態の理解における不確実性を大きく低減し、陸域生態系の炭素収支の推定精度向上に貢献すると期待できる。

3. 研究の方法

北海道苫小牧市の落葉樹林において野外実験を行った。この森林は、2004 年 9 月の台風によって風倒壊したカラマツ植林地の跡地であり、倒壊後に表土が除去された後に主にカラマツが再生し、若齢木が点在している。元々、薄い有機質土壌 (A 層) が火山噴出物 (軽石などの C 層) の上に発達していたが、表土が除去されたため有機質の乏しい C 層がむき出しになっている。埋土種子も除去されたため、草本類を含めた下層植生はほとんど存在しない。そのため、微生物による土壤有機物の分解 (微生物呼吸) の空間分布はほぼ均質である。また、根の密度は、点在する樹木個体から同心円状に変化する。研究サイト内に、2 個のチャンパーカラー (面積 0.5 m × 0.5 m) をペアとするプロットを 20 反復で設置した。樹木個体からの距離が異なる位置 (0.5, 1.0 m) に 10 ずつプロットを設置した。一つのカラー (細根区) で細根の調査を行い、もう一つのカラー (根切区) では周囲に矢板を打ち込み、根切り処理を行った。根切区で測定される土壤 CO₂ フラックスは微生物呼吸のみとなる。一方、細根区の土壤 CO₂ フラックスは土壤呼吸 (根呼吸 + 微生物呼吸) であり、両者の差が根呼吸に相当する。なお、土壤有機物含有量にバラツキがあるため、厳密には 2 つのカラーの微生物呼吸は異なるが、表土除去が行われた結果、微生物呼吸の空間分布は小さい。また、カラー内で行う土壤のコアサンプリングは環境攪乱をとまうが、土壤呼吸に与える影響は非常に小さい。なお、根切りを行うとベース内に枯死根が残り、それらの分解のためしばらくは微生物呼吸が過大評価されることが知られている。そのため、ルートリターバッグ法を用いて枯死根の分解にともなう CO₂ 放出量を推定した。

1) 土壤 CO₂ フラックス (土壤呼吸): 赤外線 CO₂ 分析計 (LI820, Licor 社製) を組み込んだ閉鎖型チャンパーシステムを用いて、各カラーの土壤 CO₂ フラックスを無積雪期間 (4~11 月) に 2~3 週間おきに測定し、1 対のチャンパーの CO₂ フラックスの差と枯死根の分解から根呼吸を算出した。

2) 細根動態: 細根区のカラー内でコアサンプリング法 (バイオマス) とイングロースコア法 (成長) を適用し、細根 (直径 2 mm 以下) の動態を測定した。研究サイトでは細根の分布域が浅いため、調査対象とする土層は表面から 15 cm とした。まず、外径 23 mm のサンプラーで土壤コアを採取し、細根 (生きた根) を分離して乾重 (バイオマス, B_f) を求めた。土壤を採取した穴に土壤のみを入れたイングロースコア (メッシュ素材) を 3 反復でセットした。無積雪期間には約 50 日おきに土壤コアを採取するとともに、イングロースコアの設置と回収を繰り返した。イングロースコアに侵入した細根量から細根の成長速度 (P_f) を求めた。

3) データ解析: 比較的単純な以下の呼吸モデルにしたがって、根呼吸 (R_r) を細根の維持呼吸 (R_m) と成長 (構成) 呼吸 (R_g) に分離した。

$$R_r = R_g + R_m = c \cdot P_f + d \cdot \exp(f \cdot T_s) \cdot (B_f + B_c) \quad (1)$$

ここで、 T_s は地温、 B_c は太根のバイオマス、 c 、 d 、 f は曲線回帰のパラメータである。維持呼吸のみが

温度に対して指数関数的に反応するとした。 f が温度に対する感受性を表す。なお、根呼吸に細根によるイオン（養分）吸収を加える場合もあるため、2019年に樹幹流量（サップフロー）の測定を開始した。土壌中の養分含有量の季節変化が無視できるなら、樹幹流量がイオン吸収量の指標となる。現在、1式に樹幹流量を加えて解析を行っている。

4. 研究成果

主に2017～2018年に得られたデータを用いた解析結果について述べたい。

1) 土壌CO₂フラックス

15回の測定結果を平均すると、樹木から近いプロット(0.5 m)では細根区と根切区でそれぞれ 2.41 ± 1.50 (\pm 標準偏差), $1.51 \pm 1.11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 遠いプロット(1.0 m)では細根区と根切区でそれぞれ 1.69 ± 0.90 , $1.30 \pm 0.70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。また、ルートリターバッグ法の結果、枯死根の分解係数(k)が 0.36 yr^{-1} であった。地温と土壌CO₂フラックスとの有意な関係式(正の指数関数)から冬季の積雪条件での呼吸速度を推定したところ、近くと遠くの細根呼吸は、それぞれ平均で 0.20 , $0.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。同様に年間値を推定すると、根呼吸、微生物呼吸ともに遠くで近くよりも小さく、その比はそれぞれ 0.63 , 0.83 であった。根呼吸の方が微生物呼吸よりも位置による違いが大きかった。

2) 細根動態

細根バイオマスは9月初旬に小さなピークを示した。一方、細根成長は晩春から夏にピークを持つ明瞭な季節変化を示し、冬季にもわずかながら成長を続けることがわかった。冬季の成長速度は、近くと遠くでそれぞれ 0.035 ± 0.018 , $0.043 \pm 0.041 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ であった。成長速度と地温の間には有意な正の指数関係が認められた。また、根呼吸と細根成長の間には有意な正の相関があった。細根バイオマスと細根成長は、ともに近くで遠くよりも有意に大きかった。

3) 根呼吸の分離

以上の測定結果は、1式によって有意($r^2 = 0.59$, $p < 0.001$)に説明することができた。曲線回帰によって得られたパラメータ(c , d , f)は、それぞれ 0.57 ± 0.018 (\pm 標準誤差) g C g DM^{-1} , $0.0021 \pm 0.00087 \text{ g C g DM}^{-1} \text{ d}^{-1}$, $0.054 \pm 0.021 \text{ }^{-1}$ であった。また、パラメータ f から計算した温度係数(Q_{10})は 1.7 であった。これらのパラメータを用いて年間値を計算すると、細根の成長呼吸、細根の維持呼吸、太根の維持呼吸が全根呼吸に占める割合は、近くでそれぞれ 26 , 57 , 11% , 遠くで 34 , 27 , 39% となった。さらに、近くと遠くの結果を加重平均して樹体から $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ の範囲の値を推定すると、細根の成長呼吸、細根の維持呼吸、太根の維持呼吸が全根呼吸に占める割合は、それぞれ 30 , 44 , 26% となった。細根の成長呼吸は細根成長と同様の季節変化を示したが、細根の維持呼吸は地温の季節変化に追従した。根呼吸に対する細根の成長呼吸の割合は、季節によって、また樹体からの位置によって異なった。その割合は、遠くでは寒候季に 0.39 , 暖候季に 0.59 であった。一方、近くでは、それぞれ 0.10 , 0.35 であり、遠くの方が近くよりも細根の成長呼吸の寄与が大きかった。

表土が除去されたカラマツの若齢林という比較的単純な野外条件で実験を行うことで、土壌有機物やリターに由来する微生物呼吸の空間的なばらつきを抑えることができた。また、林床植生がほとんどないことから、カラマツ以外の根呼吸の影響を低減することができた。これらは、根呼吸の推定における不確実性の低下と曲線回帰におけるデータ数の増加につながった。その結果、提案したモデルのパラメータを有意に決定することができ、根呼吸を細根の成長呼吸と維持呼吸に分離することに成功した。今後は、イオン吸収の寄与を加えてモデルの改良を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sun L, Hirano T, Yazaki T, Teramoto M and Liang N	4. 巻 446
2. 論文標題 Fine root dynamics and partitioning of root respiration into growth and maintenance components in cool temperate deciduous and evergreen forests	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plant and Soil	6. 最初と最後の頁 471-486
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11104-019-04343-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cui R, Hirano T, Sun L, Teramoto M and Liang N	4. 巻 77
2. 論文標題 Variation in biomass, production and respiration of fine roots in a young larch forest	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Agricultural Meteorology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Cui R, Hirano T, Sun L, Teramoto M and Liang N
2. 発表標題 Dynamics of soil respiration in a young larch plantation
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Cui R, Hirano T, Sun L, Teramoto M and Liang N
2. 発表標題 Partitioning root respiration into the growth and maintenance components of fine roots in a young larch forest
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Cui R, Hirano T, Sun L, Teramoto M and Liang N
2. 発表標題 Linkage between fine-root dynamics and root respiration in a young deciduous forest in northern Japan
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Cui R, Hirano T, Sun L, Teramoto M and Liang N
2. 発表標題 Temporal and spatial variation of soil CO2/CH4 fluxes in two cool-temperate forests in Japan
3. 学会等名 International Symposium on Agricultural Meteorology 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関