

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K21335

研究課題名（和文）森林の下層土壌における有機物動態が二酸化炭素放出に与える影響の解明

研究課題名（英文）Effects of soil organic matter dynamics on carbon dioxide emissions from forest subsoils

研究代表者

阿部 有希子（Abe, Yukiko）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・博士研究員

研究者番号：50966041

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：森林土壌は巨大な炭素貯蔵庫であるとともに炭素放出源でもあるため、その放出過程の解明は地球温暖化の進行を予測する上で必要不可欠である。とりわけ、下層土壌における炭素動態は未解明である。本研究では、母材の異なる森林土壌を用いて、土壌から放出される二酸化炭素量に対する下層土壌の寄与割合や下層土壌における有機物の分解過程を明らかにすることを目的とした。本研究により、土壌タイプによらず、下層土壌から無視できない量の二酸化炭素が放出されていることを明らかにした。また、下層土壌から放出された二酸化炭素の放射性炭素（ $^{14}\text{C}$ ）同位体比より、1960年代以降に固定・供給された有機物が分解されていることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動に伴う炭素収支を評価するために、土壌の炭素動態を正確に評価することが求められている。これまで実施された土壌炭素循環研究の多くは、表層土壌を対象としているが、森林土壌に蓄積されている炭素のおよそ半分は下層土壌に蓄積されている。本研究の成果は、気候変動下での土壌炭素動態を予測する際に下層土壌を考慮する必要があることを示しており、土壌炭素動態のメカニズムの解明やモデルの精緻化に繋がるものである。

研究成果の概要（英文）：Forest soils are a large carbon reservoir and carbon release source. Therefore, elucidation of the carbon release process is essential for predicting future climate change. Especially, carbon dynamics in subsoil remains largely unknown. The aim of this study was to determine the contribution of the subsoil to the amount of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) emitted from soil and the decomposition process of soil organic matter (SOM) in the subsoil for forest soils with different parent materials. The results showed that regardless of soil type, a nonnegligible amount of  $\text{CO}_2$  was found to be emitted from the forest subsoil. In addition, radiocarbon analysis showed that the majority of the  $\text{CO}_2$  emitted from the subsoil was from the decomposition of SOM fixed since 1960s.

研究分野：土壌炭素循環

キーワード：下層土壌 火山灰土壌 土壌有機物 微生物呼吸 放射性炭素 プライミング効果

## 1. 研究開始当初の背景

森林土壌は巨大な炭素貯蔵庫であるとともに炭素放出源でもあるため、その放出過程の解明は地球温暖化の進行を予測する上で必要不可欠である。土壌に蓄積された有機物は微生物によって分解され、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)として大気中に放出されている(微生物呼吸)。森林土壌には微生物に分解されやすい有機物や分解されにくい状態で長く留まる有機物も存在しており、土壌有機物の分解特性は極めて多様である。微生物呼吸によって放出されるCO<sub>2</sub>はこの多様な有機物の分解によるものであるが、有機物の分解特性を定量的に把握する有効な研究手法は乏しく、微生物呼吸の起源や変動要因については未解明な点が多い。微生物呼吸は土壌から放出される炭素量の半分以上を占めており、地球規模の炭素循環に大きく寄与している。したがって、将来の気候変動に伴う炭素収支を評価するためには、土壌有機物の分解過程を明らかにすることが不可欠である。

森林土壌に蓄積されている炭素のうち、半分以上が下層土壌(深さ30cm以深)に存在することが明らかになってきている。下層土壌の有機物は微生物に分解されにくく、比較的安定した状態にあると考えられてきたため、従来の炭素動態研究では表層30cmまでを対象とすることが多く、モデルによる予測でも土壌有機物や土壌環境の鉛直分布は考慮されないことが多い。一方で近年、下層土壌においても微生物が分解できる有機物が存在し、下層土壌がこれまで考えられていたよりも炭素循環に大きく寄与している可能性が指摘されている。さらに、新たな有機物の供給によって、微生物に分解されにくい状態の有機物の分解が促進されることも報告されている。しかし、土壌に蓄積された炭素がどの深さで、どの程度分解され、CO<sub>2</sub>として放出されているのか、また、下層土壌におけるCO<sub>2</sub>放出は土壌によらず普遍的な現象なのか、については明らかになっていない。そのため、森林土壌からの炭素放出量を正確に把握するためには、下層土壌における炭素放出特性を定量的に評価する必要がある。

下層土壌には直接的な有機物の供給が少なく、表層土壌から溶出した可溶性有機物が蓄積していると考えられる。可溶性有機物を補足する能力は火山灰土壌で大きいため、母材の異なる下層土壌では、有機物の存在状態や分解特性が異なり、微生物呼吸への寄与も異なることが想定される。この土壌特性の違いに着目して研究を行うことは、表層から下層土壌における有機物の分解過程の詳細のみならず、下層土壌の炭素貯留・放出能を理解する上で有用であると考えた。

## 2. 研究の目的

森林土壌からの炭素放出メカニズムの解明に向けて、有機物の分解特性が異なると考えられる火山灰土壌と非火山灰土壌を用いて、微生物呼吸に対する下層土壌の寄与割合や下層土壌における有機物の分解過程を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 深さ別の炭素放出量と下層土壌の寄与割合

調査は、東京大学秩父演習林(CHI)、京都大学北海道研究林(HSB)、生態水文学研究所赤津研究林(AKZ)、広島大学付属幼稚園管理林(HIR)の国内4つの調査地において行った。CHIとHSBは火山灰、AKZとHIRは花崗岩を母材とする土壌である。2022年6月と8月に各調査地において、4つのプロットを設置し、各プロットの4か所からコアサンプラーを用いて鉞質土壌を深さ別(0-10、10-25、30-45、45-60cm)に採取した。ただし、深さ25-30cmは採取時に攪乱の恐れがあるため除外した。採取した土壌は冷蔵状態で研究室に持ち帰り、4mmの篩に通して根や礫などを取り除いた。土壌は各プロットで深さごとに混合したため、各調査地で計16個(4プロット×4深度)の土壌試料数であった。調整した土壌は温度20°Cで培養し、ガスクロマトグラフィーを用いて培養容器内のCO<sub>2</sub>濃度を定期的に測定することで、その濃度増加よりCO<sub>2</sub>放出量を評価した。各調査地において作成した土壌断面から、100mlの採土円筒を用いて土壌を採取し、容積重を測定した。容積重の値を基に、各深さの単位面積あたりのCO<sub>2</sub>放出量を算出した。深さ25-30cmのCO<sub>2</sub>放出量は深さ10-25cmの値を基に推定した。さらに、分解された土壌有機物の起源を明らかにするために、培養期間中に放出されたCO<sub>2</sub>の放射性炭素(<sup>14</sup>C)同位体分析を行った。

### (2) 土壌への新たな有機物供給に対する土壌有機物の分解応答

2023年6~8月の期間に2022年と同様の調査地のプロットにおいて調査を行った。各調査地において、コアサンプラーを用いて鉞質土壌の深さ0-10cmと40-60cmを採取した。採取した土壌は冷蔵状態で研究室に持ち帰り、根や礫などを取り除いた。土壌はいずれの調査地においても最大容水量の64%に調整後、最大容水量の1%の水または<sup>13</sup>Cでラベルされたスクロース(IAEA-C6)溶液(土壌炭素量の1%の炭素量)を添加し、20°Cと30°Cで培養した。培養期間中のCO<sub>2</sub>濃度はガスクロマトグラフィーで定期的に測定した。さらにスクロース添加後の有機物

の分解過程を評価するために培養容器内のガスを定期的に採取し、CO<sub>2</sub> の安定炭素同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) を測定した。測定した  $\delta^{13}\text{C}$  値を基にスクロース添加後の土壌有機物由来の炭素放出量を算出し、スクロース添加による土壌有機物の分解応答を評価した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 深さ別の CO<sub>2</sub> 放出量と下層土壌の寄与率

深さ別の土壌の培養実験によって、培養後 5 日間の深さ別の CO<sub>2</sub> 放出量の積算値は深さ 0-10 cm では HSB が他の調査地に比べて高い傾向を示したが、他の深さでは調査地間の差は認められないことがわかった (図 1)。深さ 0-60 cm の CO<sub>2</sub> 放出量に対する各深さの寄与率を求めたところ、表層 0-10 cm が最も高く、深くなるほど低下した (図 1)。深さ 30-45、45-60 cm の CO<sub>2</sub> 放出量には調査地間の差が認められず、下層土壌 (30-60 cm) からの CO<sub>2</sub> 放出量は全体の 5.4 ~ 22.9% を占めており、下層土壌からも CO<sub>2</sub> が放出されることが確認された。

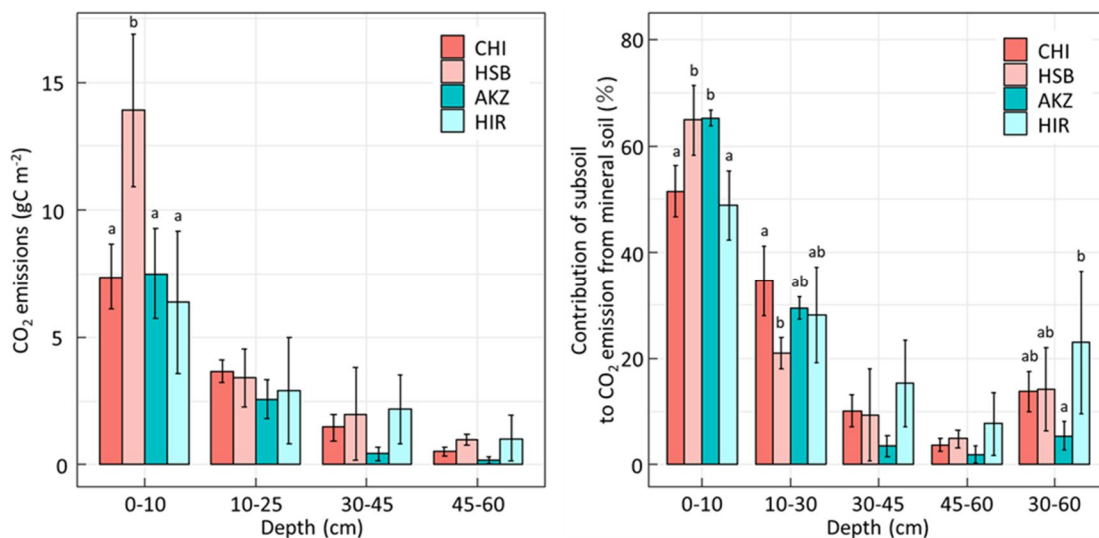


図 1. 培養後 5 日間の各深さの炭素放出量の積算値 (左) と深さ 0-60cm の CO<sub>2</sub> 放出量に対する各深さの寄与率 (右)

##### (2) 有機物分解によって放出された CO<sub>2</sub> の <sup>14</sup>C 同位体比

土壌から放出された CO<sub>2</sub> の  $\Delta^{14}\text{C}$  値はいずれの調査地においても深くなるほど低下した (図 2)。深さ 45 cm より上部の全ての土壌層で  $\Delta^{14}\text{C}$  が正の値であり、AKZ では深さ 45-60 cm においても正の値 (10.2‰) を示した。このことから 1960 年代の核実験以降に光合成によって大気から固定された有機物が分解されていることが明らかになった。また、CHI と HIR の深さ 45-60 cm からの CO<sub>2</sub> の  $\Delta^{14}\text{C}$  はわずかに負の値 (-9.8‰ と -3.8‰) を示したことから、最近の炭素と古い炭素が混在していることが示唆された。

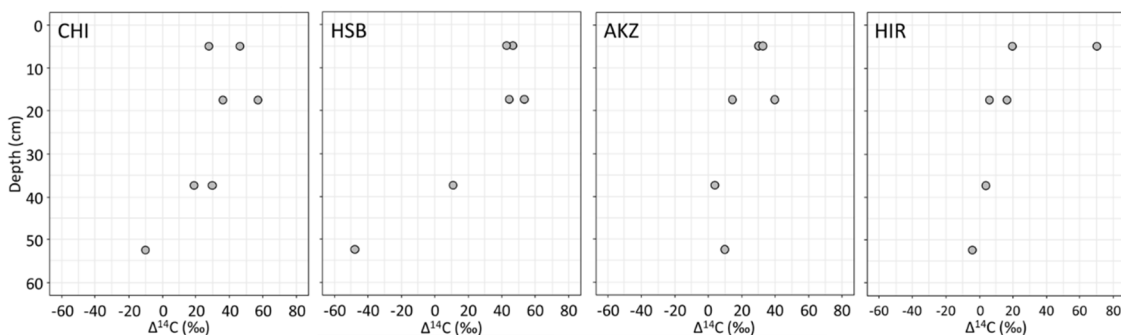


図 2. 各深さから放出された CO<sub>2</sub> の  $\Delta^{14}\text{C}$  値

##### (3) スクロース添加による土壌有機物の分解応答

CO<sub>2</sub> の  $\delta^{13}\text{C}$  を測定することによってスクロース由来の CO<sub>2</sub> の割合を算出し、元々土壌に蓄積されていた有機物の分解応答のみを評価した。20 °C で培養した場合、表層土壌では 103 ~ 129% 分解が促進されたのに対し、HIR 以外の下層土壌では分解が 154 ~ 164% 促進された (図 3)。30 °C においても CHI と HSB の下層土壌で分解が有意に促進されたが、AKZ と HIR ではいずれの深さにおいても分解が抑制された。温度の違いに関わらず火山灰土壌では下層土壌の方がスクロース添加によって有機物分解が促進されることが明らかになった。しかし、AKZ で温度によって分解応答が異なった要因については明らかではないため、さらに分析を進める必要がある。

また、培養後 90 日目の土壌炭素量をスクロース添加量と炭素放出量の値を基に算出した場合、ほとんどの土壌においてスクロースを添加した方がコントロールに比べて表層で 0.30 ~ 1.25%、下層で 0.51 ~ 1.36% 高くなる傾向を示した。土壌への新たな有機物の供給は土壌有機物の分解を促進するが、供給された有機物は全て分解されずに一部は土壌中に残存するため、土壌炭素量が増加した可能性が示唆された。

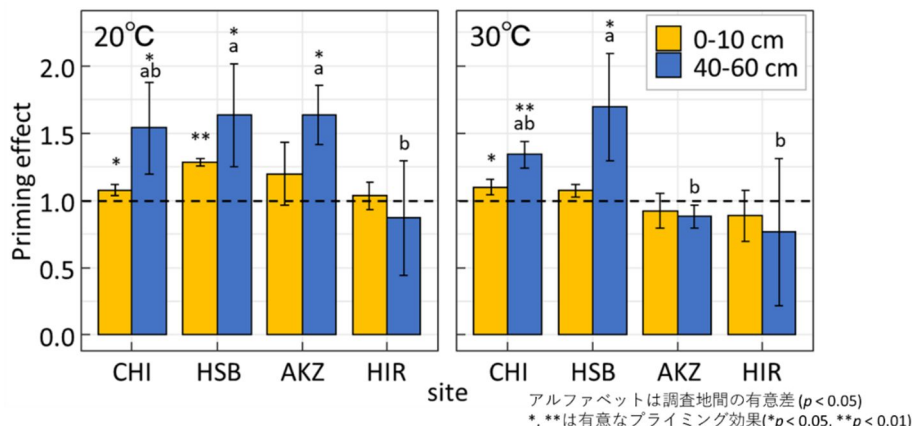


図 3. スクロース添加後に 20°C と 30°C で培養した場合の土壌有機物の分解応答

#### (4) まとめ

気候変動に伴う炭素収支を評価するために、陸域最大の炭素貯蔵庫である土壌における炭素動態を正確に評価することが必要不可欠である。これまでの研究では表層土壌に着目されることが多かったが、本研究で得られた成果は土壌の違いに関わらず下層土壌が炭素循環に大きく寄与していることを示している。さらに、下層土壌においても比較的若い炭素が有機物分解によって CO<sub>2</sub> として放出されていること、火山灰を母材とする土壌の下層では新たな有機物の供給によって分解が促進されるが、土壌炭素量は増加することが明らかになった。下層土壌における炭素循環メカニズムの詳細や炭素収支に関しては今後さらに検証する必要があるが、下層土壌における炭素循環は、地球上の炭素収支を正確に評価するために必要不可欠なプロセスであることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 阿部 有希子, 中山 理智, 安藤 麻里子, 小嵐 淳
2. 発表標題 母材の異なる森林土壌におけるプライミング効果
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 中山 理智, 阿部 有希子, 安藤 麻里子, 小嵐 淳
2. 発表標題 土壌タイプの異なる森林における下層土壌の窒素無機化速度
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 阿部有希子、中山理智、丹下健、安藤麻里子、小嵐淳
2. 発表標題 森林土壌の母材の違いが下層土壌の微生物呼吸量に与える影響
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023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
---------	---------