

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12143

研究課題名（和文）土壌有機炭素モデルで解き明かす、森林伐採に対する土壌中貯留炭素動態の長期応答

研究課題名（英文）Long-term response of soil carbon dynamics to deforestation as revealed by a soil organic carbon model

研究代表者

太田 雅和 (Ota, Masakazu)

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・研究職

研究者番号：00772865

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：森林伐採に対する土壌中炭素循環の応答機構の解明のため、森林内炭素循環モデルを構築し、国内の皆伐・植林サイトに適用した。モデル計算の結果から、それまでCO<sub>2</sub>の吸収源であった当サイトが、皆伐後に放出源となったことが示された。これは皆伐の際に地表と土壌に供給された植物残渣が速やかに分解（CO<sub>2</sub>が放出）されたためであった。植物残渣の大部分は分解・消失したため、土壌中の炭素量とCO<sub>2</sub>放出量の増加は比較的少なかった。皆伐後は下草（ササ）が繁茂したことでCO<sub>2</sub>固定が回復し、4年程度で当サイトがCO<sub>2</sub>の吸収源に戻ることを示された。このように、新規モデルの開発と利用により、森林伐採時の炭素循環予測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化の将来予測には、世界規模で進行する森林伐採に伴う炭素（二酸化炭素（CO<sub>2</sub>））放出量の評価が不可欠であり、このためには森林地上部のみならず、既往研究では困難であった地下部の炭素動態の予測が求められる。本研究は独自開発した数値モデルと野外観測を融合することで、地上植生、表層有機物層、および浅部土壌から深部土壌にわたる炭素動態の予測を可能にし、森林伐採時の伐採区の炭素循環の応答機構の解明に成功した。得られた成果は、全球炭素循環解析のため陸域炭素循環モデルの構築やパラメタライズ、伐採区からの炭素放出量評価に役立てることができ、地球温暖化の将来予測の計算精度向上に資するものである。

研究成果の概要（英文）：To elucidate the response mechanism of soil carbon cycle to deforestation, a forest carbon cycle model was developed and applied to a clear-cutting and afforestation site in Japan. Model calculations showed that this site, which was a sink for atmospheric CO<sub>2</sub>, became a CO<sub>2</sub> source after clear-cutting. This was due to the rapid decomposition and release of CO<sub>2</sub> from the plant residues supplied to the surface and soil during the clear-cutting. Since most of the plant residues were decomposed and lost, the increase in the soil carbon and CO<sub>2</sub> release was relatively small. After the clear-cutting, CO<sub>2</sub> fixation at the site was restored as the undergrowth (sasa) flourished, and the site returned to being a CO<sub>2</sub> sink in about 4 years. Thus, the development and use of a new model successfully predicted the carbon cycle during deforestation.

研究分野：環境科学

キーワード：土壌炭素 森林伐採 モデル 炭素循環 野外観測

### 1. 研究開始当初の背景

近年地球規模で急速に進行する環境攪乱は、これまで均衡を保ってきた全球の炭素循環に変化をもたらし、その結果、地球温暖化がさらに進行することが懸念されている。過去 150 年間の人為起源の二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 放出のうち、土地利用変化に起因するものは 3 割を占め、森林伐採はその主要因とされている。

森林は全球平均では炭素の吸収源 (10 億トン炭素/年) として働いている。一方、東南アジアや南米で盛んな森林伐採により、この吸収量の 3 倍の炭素 (30 億トン炭素/年) が放出されている。そのため、全球炭素循環を正しく予測するには、森林伐採に伴う陸域からの炭素放出量の予測が不可欠である。

森林伐採は地上の植生を一時的に除去する。そのため、光合成による CO<sub>2</sub> 固定を低下させ、これまで炭素の吸収源であった森林 (伐採区) を放出源に変える (図 1)。一般に、伐採区は森林としての再利用や、草原あるいは作地への転用がなされる。そのため、植林された樹木やその他植生の成長に伴い、伐採区の光合成は徐々に回復する。草本植物は数年、樹木は数 10 年で成長するため、数年から数 10 年のうちに伐採区は炭素の吸収源に戻ると考えられてきた。

一方、森林伐採は地下部の炭素動態にも影響を及ぼす。成熟した森林土壌では、リターフォールと根枯死による植物遺体由来の炭素供給と微生物分解による CO<sub>2</sub> 放出が均衡し、一定量の炭素が蓄えられている。伐採後の植生遷移によって土壌への炭素供給量に変化が生じた場合、この土壌中に蓄えられていた炭素が大気へ放出される可能性がある。一般に、土壌炭素の分解は緩やか (数十年) に進行する。このため、本研究は、伐採後に土壌からの CO<sub>2</sub> 放出が継続することで伐採区は従来考えられていたよりも長期にわたって炭素の放出源となるのでは? と考えた。森林では樹木の根が深く伸長するため、表層 (深度およそ 30cm) 以深の土壌に多くの炭素 (5 割超) が貯留されている。故に、前述の問いに答えるには、表層から深部にわたる土壌炭素の動態予測が不可欠である。しかし、既往研究の多くは有機物が密に存在する表層土壌を対象としていること、土壌深部の炭素動態を把握する術が無い、といった問題から、上述の問いについて定量的な評価をもって答えるには至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究は、森林伐採に対する土壌中炭素動態の応答機構の解明と、国内の森林伐採による炭素放出量の評価を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) モデル構築

土壌中の炭素の鉛直輸送を予測する土壌有機炭素循環モデルに、森林内の炭素循環計算過程を導入する。これにより、既往研究にはない、地上植生から深部土壌まで包括的な炭素動態を計算できる森林内炭素循環モデルを構築する。

#### (2) 炭素循環データセット拡充

2003 年に天然林の皆伐とカラマツの植林がなされた、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター天塩 [てしお] 研究林 (北海道天塩郡幌延町) の皆伐・植林サイトを試験地とし、野外連続観測 (気象要素、大気中および地表面 CO<sub>2</sub> フラックス) や植生バイオマス測定の実施、採取土壌の炭素分析を行うことで、当該試験地の森林内炭素循環データセットを拡充する。

#### (3) 伐採区の炭素循環解析

(2) で整備したデータセットを用いて、(1) で構築したモデルのパラメータを決定する。気象要素観測値を入力値としてモデル計算を実行し、皆伐前 (1800 年-2003 年) から皆伐後 (2003 年-2010 年) にわたる皆伐・植林サイトの炭素動態を解析する。

### 4. 研究成果

皆伐・植林サイトでの観測および採取土壌の分析の結果から、炭素関連のデータを蓄積し、様々な解析に利用できる森林内炭素循環データセットの内容を拡充した。モデル構築においては、図 2 に示す様に、森林樹木、下草、表層リターおよび根リターの炭素動態を新規にモデル化し、土壌有機炭素循環モデルに組み込むことで、森林内炭素循環モデルを完成させた。そして、森林内炭素循環データセットの利用により、当モデルをパラメタリゼーション (光合成による CO<sub>2</sub> 取り込み時の樹木内の炭素分配、表層リターの分解速度の温度依存性等を決定) することで、

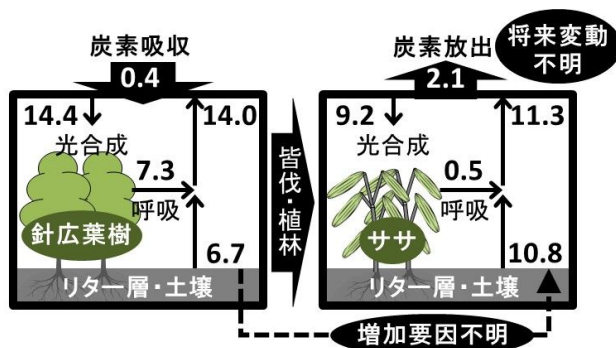


図1 国内林(天塩研究林)の皆伐前と皆伐直後7年間の炭素移行量 (Mg-Cha<sup>-1</sup>yr<sup>-1</sup>). Aguilos et al. (2014) の Fig. 4 を改編.

皆伐・植林サイトの炭素動態を予測可能なものとして確立した。これにより、1.で記した既存研究の問題点（表層土壌のみを対象、土壌深部の炭素動態を把握する術が無い）を解決した。

森林内炭素循環モデルを皆伐・植林サイトに適用し、モデルを検証した。モデル計算は、皆伐前の天然林について、植生（針広混交樹と下草のササ）表層リター層、および土壌中の炭素量（ $\text{kg-C/m}^2$ ）の観測値を概ね再現した。地表面あるいは森林上端における $\text{CO}_2$ フラックス（ $\text{kg-C/m}^2/\text{s}$ ）についても、計算は観測を再現した。以上より、開発したモデルが森林樹木による $\text{CO}_2$ 固定と森林内炭素蓄積を正しく予測できることが示された。

モデル計算の結果から、皆伐・植林に起因する明確な炭素動態の変化が提示された。図3aに示す様に、皆伐・植林サイトでは伐採後（2003年）に $\text{CO}_2$ 生成が倍増した。生成源ごとの $\text{CO}_2$ 放出の計算値（図3b）から、皆伐時に表層リター層に供給された植物残渣と土壌中に取り残された根リターからの $\text{CO}_2$ 放出（微生物分解）が主要因であることが明らかとなった。一方、皆伐後の土壌炭素からの $\text{CO}_2$ 放出の増加分は比較的小さかった（図3b）。これは、皆伐時に供給されたリターの大部分がリター分解の過程で $\text{CO}_2$ として放出され、土壌炭素に移行する割合が少なかったためであった。この様に、当サイトでは、リター分解が皆伐後の主要な $\text{CO}_2$ 放出機構であることがわかった。

更に、伐採後の植生遷移に伴う炭素循環の変化が示された。図3cに示す様に、皆伐前の森林では、針広混交樹（天然林）が主要な $\text{CO}_2$ 固定源であった。皆伐後は、下草（ササ）が速やかに繁茂したことで、下草による $\text{CO}_2$ 固定が支配的となった（図3c）。結果として、皆伐後4年程度（2007年）で当サイトからの $\text{CO}_2$ 放出が認められなくなるが示された（図3aの“森林上端から放出（計算）”がほぼゼロ）。本計算結果は、 $\text{CO}_2$ フラックスの観測値（図3a）を再現しており、当該サイトの皆伐後の炭素動態の推定結果とも一致する。以上のように、開発したモデルの利用により、伐採時の植生遷移に起因する炭素循環の変化の予測に成功した。

今後は、モデル計算を継続し、皆伐・植林サイトの $\text{CO}_2$ 放出・吸収量の長期予測を行う。加えて、森林伐採時の代表的な土地利用変化（森林 草地、森林 耕作など）を模擬した数値実験を行い、伐採後の $\text{CO}_2$ 放出量（100年間ごとの $\text{Mg-C ha}^{-1}$ ）を推定する。この放出量推定値と年代別土地利用転用記録（例：1800及び1900年代に国内森林の0.6及び2.5Mhaが作地へ転用<sup>(6)</sup>）を組み合わせることで、国内の過去の森林伐採による炭素放出量を評価する。

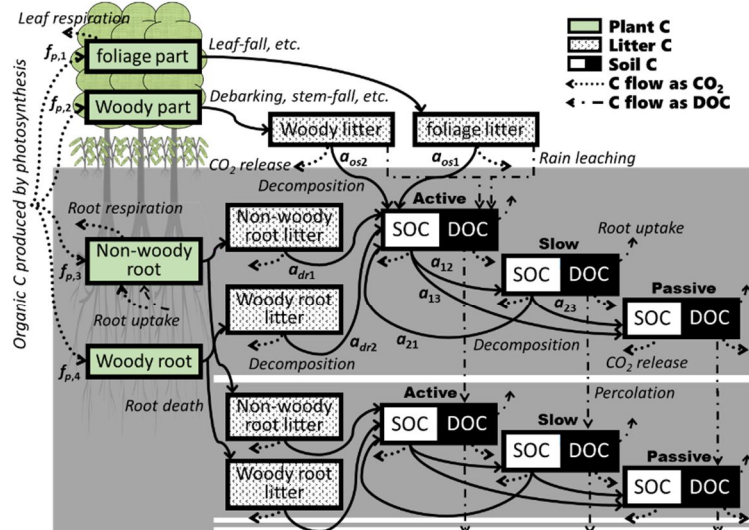


図2 開発した森林内炭素循環モデル。'f'は光合成による $\text{CO}_2$ 取り込み時の炭素分配を表し、'a'は微生物分解の際の後続のプールへの炭素分配を表す。

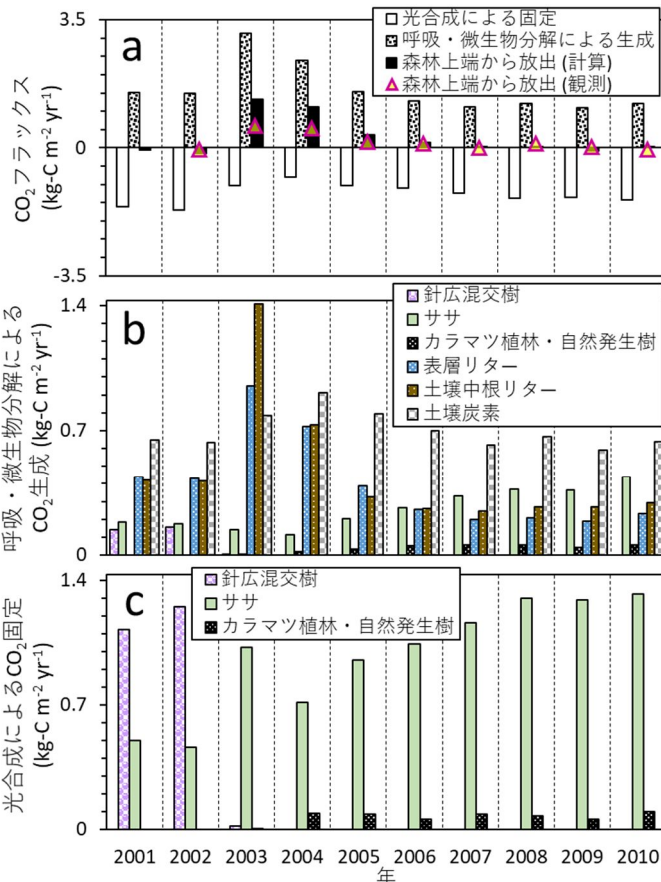


図3  $\text{CO}_2$ フラックスのモデル計算値および観測値（年間値）。2003年3月に皆伐・植林を設定。

< 引用文献 >

Pan, Y. et al., 2011. Science 1201609.  
 Aguilos, M., Takagi, K., Liang, N. et al., 2014. Agric. For. Meteorol. 197, 26-39.  
 Jobbágy, E.G., Jackson, R.B., 2000. Ecol. Appl. 10, 423-436.  
 Ota, M., Nagai, H., Koarashi, J., 2013. J. Geophys. Res. Biogeosci. 118, 1646-1659.  
 Goldewijk, K.K., 2001. Glob. Biogeochem. Cyc. 15, 417-433.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 TAKAGI Kentaro, AGUILOS Maricar, LIANG Naishen, TAKAHASHI Yoshiyuki, SAIGUSA Nobuko, KOIKE Takayoshi, SASA Kaichiro	4. 巻 22
2. 論文標題 Long-term monitoring on the dynamics of ecosystem CO2 balance recovering from a clear-cut harvesting in a cool-temperate forest	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Eurasian Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 49-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14943/EJFR.22.49	査読の有無 無
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 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 高木健太郎、平野高司、孫力飛、梁乃申、高橋善幸、寺本宗正、近藤俊明、小嵐淳、安藤麻里子、石田祐宣、高木正博、市井和仁
2. 発表標題 地温上昇処理が冷温帯植林泥炭地のメタン吸収量に与える影響
3. 学会等名 第69回日本生態学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安藤麻里子、小嵐淳、梁乃申、高木健太郎、近藤俊明、平野高司、寺本宗正、高木正博、石田祐宣、市井和仁、孫力飛、國分陽子、藤田奈津子
2. 発表標題 放射性炭素を利用した微生物呼吸の年代とその影響因子の評価
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小嵐淳、安藤麻里子、梁乃申、近藤俊明、高木健太郎、平野高司、高木正博、石田祐宣、寺本宗正、永野博彦、市井和仁、石塚成宏、平舘俊太郎、伊藤雅之、孫力飛、國分陽子、藤田奈津子
2. 発表標題 放射性炭素で見る土壌炭素動態
3. 学会等名 第70回日本生態学会大会
4. 発表年 2023年



〔図書〕 計1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
研究 分担者	小嵐 淳  (Koarashi Jun)  (30421697)	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・研 究主席  (82110)	
研究 分担者	高木 健太郎  (Takagi Kentaro)  (20322844)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授  (10101)	
研究 分担者	梁 乃申  (Liang Naishen)  (50391173)	国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境研究センター・ 室長  (82101)	

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
---------	---------