

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：82105

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K15292

研究課題名（和文）環境考古学を応用した永久凍土の炭素動態復元と温暖化影響の検証

研究課題名（英文）Reconstructing organic matter accumulation in permafrost soils using environmental archeology

研究代表者

藤井 一至 (Fujii, Kazumichi)

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等

研究者番号：60594265

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：カナダ永久凍土地帯のクロトウヒ林において、過去200年間の凍土マウンドの発達速度を年輪解析によって推定した。この結果、現在の温暖化がマウンドの発達を促進する一方で、長期的に温暖化が継続されればマウンドが崩壊することが示された。リターバッグ試験から、地衣類リターの分解速度が最も遅く、マウンドにおける地衣類の生産量がマウンドの土壤炭素蓄積量に重要であることが示された。温暖化影響については、短期的な温暖化であれば地衣類リター生産量の増加によって土壤炭素蓄積量は増加しうるが、温暖化によってマウンドが崩壊した場合には、維管束植物のリター供給が増加し、土壤炭素蓄積量が低下することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果には、永久凍土に対する温暖化影響が単純なシナリオではないことを解明した学術的価値がある。永久凍土の分布に関する研究成果を踏まえて、文科省に対して「高等学校地理科目の土壤教育内容の更新に関する提案書」（ペドロジー学会）を提出し、高校地理の教科書内容を学指導要領の改訂と合わせて修正するように要請した。また、「研究の森から」（「季刊 森林総研」、藤井一至、森林総研発行）、「酔っ払いの森の生態学」（「極地」、藤井一至、2019、極地研究所発行）として、永久凍土に対する温暖化影響を一般向けに解説した。

研究成果の概要（英文）：In black spruce forest-tundra on continuous permafrost zone, hummock formation over the past 200 years was successfully reconstructed. The results showed that recent warming promotes hummock formation, while future warming risks inducing collapse of hummocks. The litter-bag tests showed that decomposition of moss litters were slower than the vascular plant litters and that moss litters contribute to accumulation of soil organic matters. Short-term warming can increase soil organic matter storage due to an increase in moss production, but collapse of hummocks due to long-term warming can increase more labile vascular litter inputs and decrease soil organic matter storage.

研究分野：土壤生態学

キーワード：永久凍土 土壤有機物 気候変動 北極圏 年輪解析

## 1. 研究開始当初の背景

北極圏は地球温暖化に伴う気温変動幅が最も大きい地域であり、温暖化に対する陸域生態系の応答を予測する上で重要である。多くの気候モデルでは、温暖化によって土壌有機物の分解が促進するフィードバック(温暖化の加速)を予測している。地球全体の土壌炭素のうち30%が永久凍土に蓄積しており、凍土融解に伴う有機物の代謝回転・炭素蓄積量の変動をモデル・現場レベルの両面から検証することは喫緊の課題である。土壌炭素蓄積量の変動予測には Century、Roth-C モデルが用いられるが、現場データに裏打ちされた、凍土に適用可能な炭素動態モデルの構築が必要である。

カナダ永久凍土地帯では有機物が分厚く堆積すると凍土層が融けにくくなり、発達したマウンドの傾斜によってクロトウヒが傾く“酔っ払いの森”が発達する。申請者は凍土マウンドの発達の歴史が、傾いた樹木の年輪に歪みとして記録されていることを発見した(図1)。ここから過去200年間の凍土マウンド発達過程を復元できると着想を得た。堆積有機物の放射性炭素年代と総合化することで有機物の堆積過程を復元できれば、土壌炭素動態モデルの妥当性の検証、温暖化影響の予測が可能となる。

## 2. 研究の目的

北極圏の温暖化は永久凍土の有機物分解を加速すると予測されているが、凍土への直接的な影響を示す現場データは少ない。申請者はカナダ永久凍土地帯のクロトウヒ林において、有機物の堆積によって凍土マウンドが発達し、傾いた木の年輪に歪みとして記録されることを発見し、凍土マウンドの発達、有機物(土壌炭素)の蓄積過程を復元することを着想した。本研究では、過去200年間の凍土マウンドの発達速度を推定し、温暖化に伴う土壌炭素蓄積量の変動を予測することで、凍土の炭素貯留機能に対する温暖化影響を定量的に検証した。

## 3. 研究の方法

永久凍土地帯の南縁に位置するカナダ北西準州イヌビク近郊のクロトウヒ林50マウンドを対象とした。あて材形成の最大となる地上30cmの高さで樹木の円盤を採取し、偏向成長比(円盤の最大直径と平均直径の比)、各年の年輪の歪み(年輪幅の最大値と平均値の比)、凍土マウンドのサイズ(マウンド上部・下部から凍土面までの深度の比)を測定した。また、土壌の仮比重、土壌炭素濃度、深度から土壌炭素蓄積量を算出した。現地での地衣類、蘚苔類、維管束植物(クロトウヒ根)のリターバッグ試験によって得た分解速度定数を一次反応式にあてはめ、温暖化に伴って異なる植生変化・火災頻度シナリオにおける土壌炭素蓄積量への温暖化影響を検証した。

## 4. 研究成果

(1)【凹凸地形面の高い土壌炭素蓄積機能】カナダ永久凍土地帯のクロトウヒ林では直径1~2メートルのマウンドが点在する凹凸地形面が形成され、樹木が直立できない「酔っ払いの森」が分布する(図1)。本研究では、凹凸地形面は平坦な地形面よりも有機物の堆積量が多く、高い炭素貯留能を持つことを発見した。凹凸地形面の発達には、粘土質土壌と浅い凍土面(<50センチメートル)を有することが重要となることを解明した。



図1. 酔っ払いの森(a)と凹凸地形面(b)および土壌断面(c)。クロトウヒが傾いて育つ地面には凹凸が形成され(a, b)、マウンドには分厚く有機物が堆積する(c)。

(2)【年輪解析による凹凸地形面の発達過程の復元に成功】年輪の歪み(あて材形成)が起こる条件として、クロトウヒが粘土質土壌と浅い凍土面(<50センチメートル)のマウンド周縁部に生育することであることを特定した。マウンドの発達程度とあて材形成が同調することを利用し、過去200年間の凍土マウンドの発達過程を復元する手法を開発した(図2)。

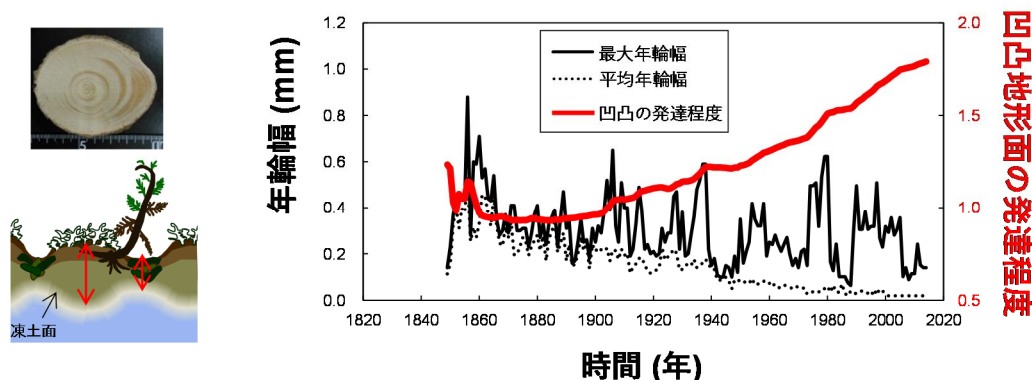


図2. クロトウヒの年輪と凹凸地形面の発達過程。年輪成長が偏る年があり、徐々に凹凸(マウンド)の形成とあて材形成が大きくなる。

(3)【凹凸地形面の土壌炭素蓄積過程の復元に成功】リターバッグ試験から、地衣類リターの分解速度が最も遅く、凹凸地形面における地衣類の生産量がマウンドの土壌炭素蓄積量に重要であることが示された。有機物分解実験の分解速度パラメータを用い、火災200年周期で堆積有機物の半分が焼失すると仮定した土壌炭素蓄積モデルによって、凹凸地形面の炭素蓄積量の増加分をうまく予測することができた。温暖化によって維管束植物の割合が増加するシナリオ、火災の頻度が増加するシナリオいずれも土壌炭素蓄積量の減少を引き起こすと予測された。

(4)【遠隔地の永久凍土地帯の温暖化影響の将来予測】短期的な温暖化であれば地衣類リター生産量の増加によって土壌炭素蓄積量は増加するが、温暖化によってマウンドが崩壊した場合には、蘚苔類や地衣類リターが減少し、土壌炭素蓄積量が低下することが示唆された。凹凸地形面の形成は温暖年に活発であり、年平均気温の増加し始めた1960年以降、堆積有機物層の発達と凹凸地形面の発達が加速していた(図3)。ただし、今後さらに温暖化が進み、凹凸地形面の条件となる浅い永久凍土面が消失すると、凹凸地形面が崩壊し、分解しやすい維管束植物のリター供給が増加することで堆積有機物の減少を招くことが予想された。また、温暖化影響は凹凸地形面の発達する粘土質土壌で砂質土壌よりも大きいことが推定された。

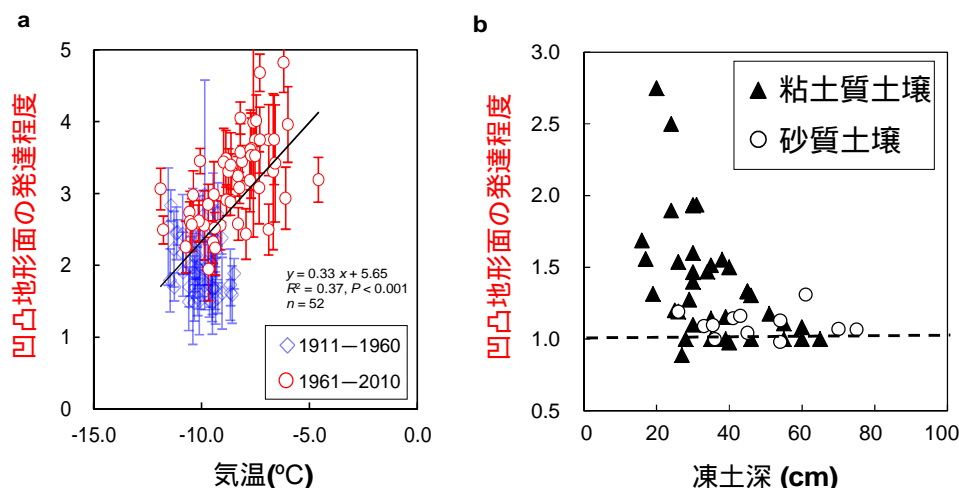


図3. 凹凸地形面の発達程度と気温の関係(a)と凍土深の関係(b)。温暖化とともに凹凸(マウンド)が大きくなるが(a)、凍土深50cm以上では活発化しない(b)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kazumichi Fujii, Yojiro Matsuura, Akira Osawa	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Effects of hummocky microrelief on organic carbon stocks of permafrost-affected soils in the forest-tundra of northwest Canada	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Pedologist	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 Kazumichi Fujii, Chie Hayakawa, Yoshiyuki Inagaki, Kenji Ono	4. 巻 333
2. 論文標題 Sorption reduces the biodegradation rates of multivalent organic acids in volcanic soils rich in short-range order minerals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geoderma	6. 最初と最後の頁 188-199.
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 Kazumichi Fujii, Takahiro Yamada, Chie Hayakawa, Asami Nakanishi, Shinya Funakawa	4. 巻 126
2. 論文標題 Another bottleneck for N mineralization in temperate forest soils: Arginine metabolism in microorganisms	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soil Biology and Biochemistry	6. 最初と最後の頁 22-30
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 FUJII Kazumichi, SHIBATA Makoto, KITAJIMA Kaoru, ICHIE Tomoaki, KITAYAMA Kanehiro, Benjamin L. Turner	4. 巻 33
2. 論文標題 Plant-soil interactions maintain biodiversity and functions of tropical forest ecosystems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Ecological Research	6. 最初と最後の頁 149-160
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11284-017-1511-y	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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kazumichi Fujii, Yoshiyuki Inagaki, Yojiro Matsuura, Akira Osawa
2. 発表標題 Urea uptake by drunken trees in hummocky soils on permafrost
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumichi Fujii, Warsudi, Sukartiningsih, Takeshi Toma
2. 発表標題 Effects of land use change on soil acidification and organic matter storage in tropical forests
3. 学会等名 World Congress of Soil Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazumichi Fujii, Daisuke Kabeya, Kyotaro Noguchi, Qingmin Han
2. 発表標題 International symposium on Nitrogen cycling and its environmental impacts in East Asia 2018 Seasonal variation in soil microbial biomass and mineralization activity in a beech forest.
3. 学会等名 NARO-MARCO International symposium on Nitrogen cycling and its environmental impacts in East Asia 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井一至、安江恒、松浦陽次郎、大澤晃
2. 発表標題 Warming permafrost accelerates development of soil hummocks and drunken forest
3. 学会等名 ISAR5 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井一至、安江恒、松浦陽次郎、大澤晃
2. 発表標題 年輪を用いた酔っ払いクロトウヒ林と凍土マウンドの発達過程の復元
3. 学会等名 日本ペドロロジー学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤井一至
2. 発表標題 Effects of flooding on iron solubilization in soils
3. 学会等名 JPGU
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 藤井一至	4. 発行年 2019年
2. 出版社 光文社	5. 総ページ数 224
3. 書名 土 地球最後のナゾ 100億人を養う土壌を求めて	

1. 著者名 藤井一至文筆、柴田英昭編	4. 発行年 2018年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 240
3. 書名 森林と土壌(森林科学シリーズ第7巻)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

藤井一至ホームページ  
<https://sites.google.com/site/fkazumichi/>  
藤井一至のホームページ  
<https://sites.google.com/site/fkazumichi/>

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