

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H05790

研究課題名(和文) 凍土融解深の異なる永久凍土林における地下部炭素動態の定量評価と制御要因の解明

研究課題名(英文) Belowground carbon dynamics in permafrost forests with different active layer depths

研究代表者

野口 享太郎 (Noguchi, Kyotaro)

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：70353802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：アラスカ内陸部の北東向き斜面上のクロトウヒ林においてリターフォール量と細根成長量を測定した結果、夏季に凍土の融ける深さが大きい斜面上部ほどリターフォール量が大きかったのに対し、細根成長量の斜面位置間における違いは小さかった。この結果は、凍土の融けにくい斜面下部ほど、地下部への同化産物分配が大きいことを示唆している。一方、クロトウヒの細根成長量は斜面上部ほど大きかったが、逆にツツジ科低木などの下層植生の細根成長量は斜面下部ほど大きかった。これらの結果は、夏季の凍土融解が小さい永久凍土林では、地下部への炭素供給において下層植生が重要な役割を担うことを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

永久凍土林は凍結した土壤に莫大な量の炭素を蓄積しており、地球の炭素動態を理解する上で極めて重要な生態系だが、永久凍土林の炭素動態については不明な点が多い。本研究では、夏季に融解する凍土の深さが小さいほど、地下部への同化産物分配が大きくなることを明らかにした。また、凍土の融解が小さい林分ではツツジ科低木などの下層植生の細根成長量が大きく、地下部への炭素供給において重要な役割を担うと考えられた。これらの結果は、今後、緯度や地形により異なる、あるいは温暖化などの影響により変化する永久凍土上の森林の炭素動態を評価する上で、重要な知見と言える。

研究成果の概要(英文)：In permafrost black spruce stands on a north facing slope in Interior Alaska, litterfall production rates and fine root growth rates were examined. Our results showed that litterfall production rates were greater at upper slope, where active layer depth was greater than at lower slope. On the other hand, fine root growth rates were similar among the plots across the slope positions, suggesting that allocation to fine roots was greater at lower slope than at upper slope. Fine root growth rates of black spruce trees were greater at upper slope than at lower slope, whereas those of understory plants were greater at lower slope in contrast. These results indicated that contribution of understory plants to fine root growth was greater than that of black spruce trees at lower slope, where active layer depths were shallower. Taken together, this study suggest that understory plants play a key role in belowground carbon dynamics at environments with shallower active layer depths.

研究分野：森林生態学

キーワード：細根成長 クロトウヒ 下層植生 斜面位置 活動層 林床藓類

1. 研究開始当初の背景

北方林は熱帯林と温帯林の合計に匹敵する量の炭素を蓄積すると試算されているが (Dixon et al. 1994)、その面積の 20%以上が永久凍土上にある (Osawa and Zyryanova 2010)。永久凍土上の森林 (永久凍土林) では、凍結した土壌中に莫大な量の炭素が蓄積しているが、永久凍土林の分布する周極域では他の地域よりも温暖化が速く進行しているため、今後、永久凍土林が温室効果ガスの大きな排出源になる可能性も指摘されている (Schuur et al. 2008)。しかし、これらの永久凍土林の炭素動態については、未だ不明な点が多い。永久凍土は樹木の生育にとって極めて厳しい環境だが、中央シベリアではカラマツ (*Larix gmelinii*、*L. cajanderi*) 林が、アラスカ内陸部とカナダ北西部ではクロトウヒ (*Picea mariana*) 林が永久凍土上に成立する (Osawa and Zyryanova 2010)。これまでの研究から、これらの永久凍土林では、地下部への現存量分配が極めて大きいことや、細根生産量が純一次生産量の 50%以上を占めることなどが報告されており (Kajimoto et al. 1999、Ruess et al. 2003、Noguchi et al. 2012)。これらの研究は、根系の動態が永久凍土林の炭素動態において、重要な役割を担うことを示唆している。一方、永久凍土の性質は、その分布する地域や斜面方位、斜面位置により異なることが知られている。例えば、不連続永久凍土地帯であるアラスカ内陸部では、永久凍土は北向き斜面や低湿地に分布するが、夏季に融解する永久凍土の表層部分 (活動層) の厚さは、斜面上部ほど大きく、斜面下部ほど小さい傾向にある。しかし、このような永久凍土環境の違いが、そこに成立する森林の根系動態におよぼす影響については、これまで報告されてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では、アラスカ内陸部において斜面位置の異なるクロトウヒ林分の細根成長量を明らかにし、異なる永久凍土環境がクロトウヒ林の地下部への炭素の流れにおよぼす影響を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 調査地

本研究では、アラスカ大学カリブーポーカークリーク試験地 (65°08'N、147°30'W) の北東向き斜面に成立した約 100 年生クロトウヒ林を調査地とし、斜面上部 (標高 360 m)、中部 (同 330 m)、下部 (同 260 m) の 3 か所に 14 m × 14 m のプロットを設置した (以後、プロット名を NE360、NE330、NE260 と記載する)。

NE360、NE330、NE260 における活動層 (夏季に融解する永久凍土の表層部分) の深さは、それぞれ約 113 cm、63 cm、74 cm、地表から鉱質土層までの有機物層の深さは、約 34 cm、42 cm、42 cm であった。すべてのプロットで林床は蘚類や地衣類に被覆されており、NE360、NE330、NE260 におけるフェザーモス類 (*Pleurozium schreberi*、*Hylocomium splendens* など) の被覆率は約 89%、81%、41%、ミズゴケ類 (*Sphagnum* spp.) の被覆率は約 2%、16%、38% であった。

また、毎木調査を行った結果、立木密度 (樹高 130 cm 以上) は NE360、NE330、NE260 でそれぞれ約 8660 本/ha、9220 本/ha、5420 本/ha、平均胸高直径は約 5.1 cm、2.9 cm、2.7 cm、平均樹高は約 7.1 m、4.5 m、3.0 m であった。

Noguchi et al. (2012) のアロメトリー式を使って胸高直径データから求めたクロトウヒの地上部現存量は、NE360、NE330、NE260 でそれぞれ約 5.96 kg/m²、2.08 kg/m²、1.11 kg/m² で、直接刈り取るにより求めた下層植生 (ツツジ科低木など) の地上部現存量は、約 43 g/m²、145 g/m²、142 g/m² であった (Noguchi et al. 2021)。

(2) 細根成長量

イングロースコア法により細根成長量を測定した。2017 年 9 月に直径 3.2 cm、長さ 30 cm、穴径 2 mm のプラスチックメッシュ円筒 (イングロースコア) を埋設し、2 年後の 2019 年 9 月に回収した。イングロースコア内の環境を周囲と類似したものにするために、本研究では、調査地の周辺で採取して根を取り除いたフェザーモス類の枯死部分またはミズゴケ類の枯死部分をコア内の生育培地として使用した (ミズゴケ類は NE330、NE260 のみ)。回収したイングロースコアから洗い出した細根をクロトウヒと下層植生のものに分別し、それらの乾燥重量を埋設期間中の細根成長量として求めた。

(3) 細根形質

イングロースコア法により得られた細根の画像をスキャナー (GT-980X、Epson) で取得し、根系画像解析ソフトウェア (WinRhizo Pro、Regent) を用いて、細根の直径、比根長 (単位重量当たりの長さ、m/g)、組織密度 (単位体積当たりの重さ、g/cm³) を求めた。

(4) リターフォール量

2016年9月に20cm×27cmのリタートラップを設置した。2017年9月、2018年8月、2019年9月にトラップ内のリターフォールを回収し、クロトウヒと下層植生の器官別に分別した後、乾燥重量を測定して設置期間中のリターフォール量として求めた。

4. 研究成果

(1) 異なる斜面位置におけるリターフォール量

リターフォール量は約 35 - 175 g/m²/year で、地上部現存量と同様に活動層の深い斜面上部ほど大きかった(図1)。得られたリターフォールの内訳を見ると、クロトウヒの葉リターが全体の 35 - 48%、下層植生の葉リターが全体の 5 - 23%であったが、クロトウヒの葉リター量は斜面上部ほど大きく、下層植生の葉リター量は斜面中部 (NE330) において、他の2プロットよりも有意に大きかった。これらの結果は、クロトウヒの地上部生産量が活動層の浅い斜面下部で抑制されるのに対し、下層植生の地上部生産が、それ以外の要因にも大きく影響を受けることを示唆している。

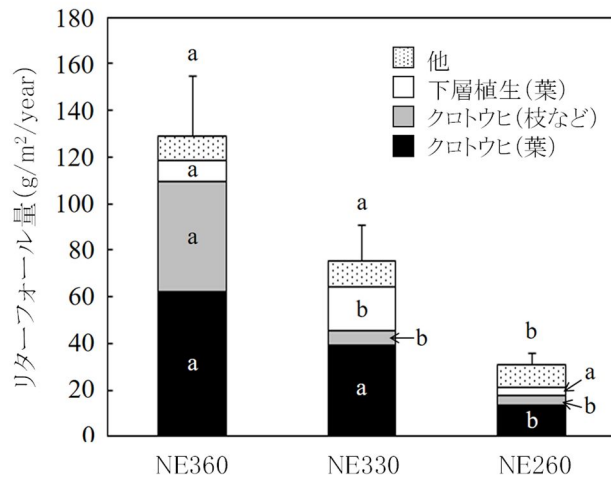


図1 .斜面上部 (NE360)、中部 (NE330)、下部 (NE260) におけるリターフォール量 (平均 + 標準誤差, N=7-8). 異なるアルファベットは、各器官においてプロット間で有意な差があることを示す (Tukey-Kramer HSD test). (Noguchi et al. 2021 を改変)

(2) 異なる斜面位置における細根成長量

地上部現存量やリターフォール量が斜面上部ほど大きかったのに対し、枯死フェザーモス内における細根成長量は 46.3 - 54.0 g/m²/year であり、プロット間の違いは小さかった (図2)。しかし、細根成長量をクロトウヒと下層植生で分けて見ると、クロトウヒの細根成長量が斜面上部ほど大きかったのに対し、下層植生の細根成長量は斜面下部ほど大きかった。つまり、斜面下部では下層植生の細根成長量が全体に占める割合が大きく、NE260 では 60% 以上を占めることが明らかになった。

一方、枯死ミズゴケを生育培地にした場合、クロトウヒ、下層植生の細根成長量は 14.7 - 17.2 g/m²/year、43.8 - 57.0 g/m²/year、その合計量は 58.5 - 74.2 g/m²/year であったが、いずれもプロット間で有意差は無かった (NE330 と NE260 のみ)。

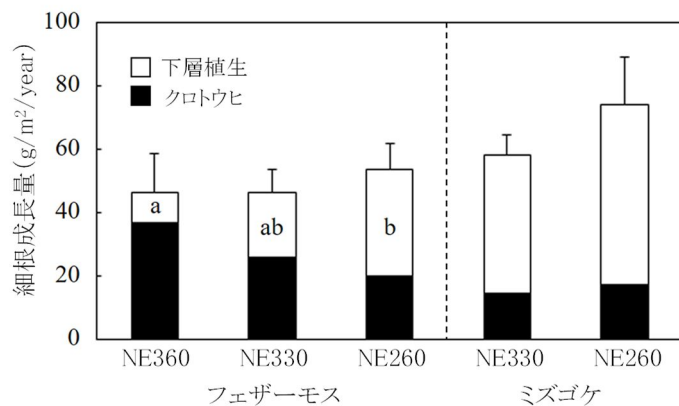


図2 .斜面上部 (NE360)、中部 (NE330)、下部 (NE260) における細根成長量 (平均 + 標準誤差, N=9). 左側が枯死フェザーモス内、右側が枯死ミズゴケ内における細根成長量。異なるアルファベットはプロット間で有意な差があることを示す (Tukey-Kramer HSD test). (Noguchi et al. 2021 を改変)

(3) 細根成長量に対する林床藓類の影響

斜面中部 (NE330) と下部 (NE260) において、枯死フェザーモス内および枯死ミズゴケ内の細根成長量を比較した結果、ミズゴケ内における下層植生の細根成長量が大きい傾向にあり、NE330 では、その差が統計的に有意であった (One-way ANOVA, P=0.001)。クロトウヒの細根成長量と細根成長量全体 (クロトウヒと下層植生の合計量) に対する林床藓類の影響は小さかった。

(4) クロトウヒと下層植生の細根形質の違い

クロトウヒと下層植生では細根の直径に大きな違いがあり、クロトウヒの細根の平均直径が 0.28 - 0.29 mm だったのに対し、下層植生では約 3 分の 1 の 0.09 - 0.11 mm であった。この直径

の違いを反映して、下層植生の比根長はクロトウヒよりも大きく、それぞれ 217 - 325 m/g、42 - 50 m/g であった。細根組織密度には樹種による大きな違いは見られず、約 0.29 - 0.37 g/cm³ であった。

(5) 異なる永久凍土環境における地下部への炭素の流れ

森林における地下部への主要な炭素供給源はリターフォールと細根であると考えられている。上記のように本研究では、リターフォール量が活動層の深い斜面上部で大きかったのに対し、細根成長量には斜面位置による大きな違いは見られなかった。つまり、この結果は、斜面下部ほど細根への同化産物分配が大きいことを示している。一般的に細根の寿命は数カ月から長くても数年と短く、新たに成長した細根の多くが枯死有機物として地下部に供給されると考えられるため、本研究の結果は、活動層の浅い斜面下部ほど地下部への炭素供給における細根の寄与が大きいことを示している。この傾向は特に下層植生において顕著で、クロトウヒの細根成長量/リターフォール量の比が NE360 で 0.59、NE260 で 1.41 だったのに対し、下層植生では NE360 で 1.08、NE260 では 12.38 であった。さらに、細根形質の解析から、ツツジ科低木など下層植生の細根はクロトウヒと比べて直径が非常に小さいことが明らかになった。この結果は、下層植生の細根の寿命がクロトウヒよりも短く、短い時間で枯死有機物として地下部に供給される可能性を示唆している。以上のように、本研究の結果から、活動層の浅い斜面下部では、ツツジ科低木などの下層植生の細根が、地下部への炭素供給源として重要と考えられた。したがって、今後、温暖化などの気候変動が永久凍土林の炭素動態に及ぼす影響を評価するには、ツツジ科低木など下層植生の細根動態について、より良く理解する必要があると考えられる。

引用文献

- Dixon RK, Brown S, Houghton RA, Solomon AM, Trexler MC, Wisniewski TJ (1994) Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Kajimoto T, Matsuura Y, Sofronov MA, Volokitina AV, Mori S, Osawa A, Abaimov AP (1999) Above- and belowground biomass and net primary productivity of a *Larix gmelinii* stand near Tura, central Siberia. *Tree Physiology* 19: 815-822.
- Noguchi K, Dannoura M, Jomura M, Awazuhara-Noguchi M, Matsuura Y (2012) High belowground allocation in an upland black spruce (*Picea mariana*) stand in Interior Alaska. *Polar Science* 6: 133-141.
- Noguchi K, Matsuura Y, Morishita T, Toriyama J, Kim Y (2021) Fine root growth of black spruce trees and understory plants in a permafrost forest along a north-facing slope in Interior Alaska. *Frontiers in Plant Science* 12: 769710
- Osawa A, Zyryanova OA (2010) Introduction, *In* Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Springer, pp. 3-15.
- Ruess RW, Hendrick RL, Burton AJ, Pregitzer KS, Sveinbjornsson B, Allen MF, Maurer GE (2003) Coupling fine root dynamics with ecosystem carbon cycling in black spruce forests of Interior Alaska. *Ecological Monographs* 73: 643-662.
- Schuur EAG, Bockheim J, Canadell JG, Euskirchen E, Field CB, Goryachkin SV, Hagemann S, Kuhry P, Lafleur PM, Lee H (2008) Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *BioScience* 58: 701-714.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kyotaro Noguchi, Yojiro Matsuura, Tomoaki Morishita, Jumpei Toriyama, Yongwon Kim	4. 巻 12
2. 論文標題 Fine Root Growth of Black Spruce Trees and Understory Plants in a Permafrost Forest Along a North-Facing Slope in Interior Alaska	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 769710
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2021.769710	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 野口享太郎、松浦陽次郎、森下智陽、鳥山淳平、Kim Yongwon
2. 発表標題 アラスカ内陸部の斜面位置の異なるクロトウヒ林における細根動態
3. 学会等名 第131回日本森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kyotaro Noguchi, Yojiro Matsuura, Tomoaki Morishita, Yongwon Kim, Junpei Toriyama
2. 発表標題 Fine root production rates in a black spruce stand in interior Alaska underlain with permafrost
3. 学会等名 7th International Symposium on Physiological Processes in Roots of Woody Plants（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野口享太郎、松浦陽次郎、森下智陽、鳥山淳平、Yongwon Kim
2. 発表標題 アラスカ内陸部の永久凍土林におけるクロトウヒ および下層植生の細根生産量
3. 学会等名 第129回日本森林学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野口享太郎、松浦陽次郎、森下智陽、鳥山順平、Kim Yongwon
2. 発表標題 アラスカ内陸部の永久凍土クロトウヒ林におけるクロトウヒと下層植生の細根成長
3. 学会等名 第54回根研究集会
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
研究 分担者	森下 智陽 (Morishita Tomoaki) (90391185)	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 (82105)	

	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
連携 研究者	松浦 陽次郎 (Matsuura Yojiro) (20353857)	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 (82105)	
連携 研究者	鳥山 淳平 (Toriyama Jumpei) (00582743)	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 (82105)	

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