

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26302002

研究課題名(和文)北極永久凍土融解による土壌炭素分解の実態解明とそのダイナミクスに関する調査研究

研究課題名(英文) Observation for evaluation of soil organic carbon decomposition and response of carbon dynamics in the Arctic terrestrial ecosystem to permafrost thaw.

研究代表者

近藤 美由紀 (Kondo, Miyuki)

国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測研究センター・研究員

研究者番号：30467211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人為的な攪乱によって約70年に渡って疑似的な温暖化環境に曝されてきた北米アラスカ州の永久凍土のモニタリングサイトを利用し、土壌分析と室内での凍土培養実験を行い、長・中期的な温暖化環境下での土壌炭素動態の変化に関する実測データを取得した。人為的攪乱によって永久凍土融解がより進行し、植生が変化している場所では、微生物分解によるCO₂放出量が増加する傾向が見られる一方で、植物から土壌への炭素供給が増加し、土壌有機炭素の年代が若くなる傾向が見られた。これらの結果は、永久凍土融解の進行に伴う温室効果ガス放出の増加が懸念される北極高緯度地域の土壌炭素動態を把握するために重要なデータとなる。

研究成果の概要(英文)：The dynamics of carbon preserved within permafrost in Sub-Arctic and Arctic is important implications for the current and future carbon cycle with global warming. However, little is known on the microbial decomposability of permafrost organic mater and CO₂ emission once permafrost thaws, and response of carbon dynamics in the Arctic terrestrial ecosystem to permafrost thaw. We conducted field observation and soil chemical analysis at the Permafrost Experimental Station, which was established in 1945, Alaska. We also conducted soil incubations using flow-through-chamber technique in order to assess the inherent decomposability of soil organic matter under aerobic condition at a temperature from -15 to 15 C. We observed that both C input to soil and CO₂ emission were accelerated at the completely disturbed site, where the surface vegetation and he organic material was removed. This suggests that soil carbon dynamics may be directly linked to surface vegetation at the Arctic region.

研究分野：同位体生態学

キーワード：極域 気候変動 凍土融解 物質循環 放射性炭素

1. 研究開始当初の背景

北極高緯度域に広がる永久凍土（陸域面積の9-12%）中には、~1700 PgC の炭素が蓄積しており、陸域最大の炭素ストックである。2013年9月末に発表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書(AR5)では、北極高緯度域における急激な温暖化による永久凍土の温度上昇と融解の進行が報告された。また、21世紀末までに、北半球の永久凍土面積は、37~81%減少すると予測されている(AR5 Chapter12.4.6)。凍土融解は有機物の分解を促進させ、この結果として大量の温室効果ガス(CO₂ と CH₄)を放出させることが懸念される。しかし、既存の温暖化予測モデルでは、永久凍土からの炭素排出経路は含まれておらず、温暖化に対するフィードバック効果は考慮されていない。このため、温暖化予測結果を大幅に変更させる要因の1つとして危惧されている。一方、凍土融解による総炭素放出量は、既存のモデル間で将来予測結果の違いは大きく、温暖化に対する正のフィードバック効果がどの程度なのか、未だ統一した見解が得られていない。この原因は、融解速度や空間的不均一性の問題から永久凍土融解のダイナミクスが正確にとらえられていないことに加え、凍土融解後の土壤炭素動態が解明されていないことにある。永久凍土融解後の土壤炭素動態は、将来の温暖化影響予測において、重要な鍵となっている。

2. 研究の目的

本研究では、米国アラスカ州にて1946年に人為的に凍土環境を攪乱し、その後70年間温暖化環境下に曝されてきた永久凍土モニタリングサイト(Douglas et al.2008)を利用して、その期間の土壤炭素動態及び炭素収支の変化を放射性炭素同位体(¹⁴C)から計測する。また、室内での土壤培養実験を実施し、凍土土壤からのCO₂の放出量を計測し、有機炭素分解における温度依存性(Q₁₀)を試算し、北極土壤の特徴である、凍土融解や凍結を含む低温下における土壤有機炭素の分解を検討した。

3. 研究の方法

アラスカ州フェアバンクスで実施されている永久凍土の長期温暖化影響モニタリングサイトで、分析および土壤培養で使用する凍土コア採取と植生調査を実施した。このサイトでは、1946年に人為的に植生や有機物層を除去させ、これらの保温効果を無くすことで土壤を温暖化させている。未攪乱の対照区とし、除去作業した処理区を温暖区とし、調査を実施した。

2015年の3月に、エンジン付きの永久凍土採取用コアラ(直径5cm)を用いて、凍土コア試料を採取した。採取した試料は、凍結したまま持ち帰り、実験室で分割し、各種分析を行った。コア試料は、1~2cm毎に分割し、根などの植物体を取り除き、無機炭素を酸により除去し、炭素・窒素含有率、および¹⁴C

分析を行った。

また、現地の地温に合わせた培養実験を行うため、既存の通気法の培養システムを改良し、-20℃から+15℃までの温度範囲の土壤培養を行った。一般に微生物呼吸と温度との関係(温度依存性)は、Q₁₀値(温度が10℃上昇したときの呼吸速度の変化率)が、指標に用いられている。Q₁₀値は、土壤呼吸の季節変化の観測に基づき経験的に試算されることが多いが、北極域に関しては、通年及び遠隔地での観測インフラの構築が難しく、観測期間が特に夏季に限定される。このため、10℃以上の地温変化の下での観測は難しく、Q₁₀値の算出が困難な状態ある。そこで、採取した凍土コア試料を用いた室内培養実験からQ₁₀値の算出を行った。凍結した場合の土壤呼吸量の変化をより詳細に調べるため、6つの温度設定を設け、20℃→-15℃→-10℃→-5℃→-3℃→-1℃→-3℃→-5℃→-10℃→-15℃→-20℃で温度制御し、培養を行った。加えて、土壤が融解している条件での温度特性がどうなるかを調べるため、プラスの温度域で5つの温度設定を設けて培養を行った。この場合は、+1℃→+3℃→+5℃→+10℃→+15℃→+10℃→+5℃→+3℃→+1℃で温度制御し、培養を行った。今回の実験では、温度制御は7時間毎に実施した。凍土試料をガラス製のチャンバー(内径95mm,内高95mm)入れ、水蒸気とCO₂を除去した空気をマスフローコントローラで一定流量に制御し通気させた。各チャンバーからの空気を赤外線ガス分析装置(LI-820, LI-COR社)で分析し、ベースとなるチャンバー供給空気との濃度差を求めることによりCO₂ガスの発生量とQ₁₀を求めた。

4. 研究成果

対照区は、ブラックスプルースが優占する典型的な北方林であった。樹木密度は1aあたり76本(n=3)、胸上直径は平均で4.8cmであった。枯死木は1aあたり平均で22本であった。一方、攪乱程度が比較的小さい(植生除去のみ)温暖化区は、ブラックスプルースとホワイトスプルースが優占し、林床にはツツジ科とヤナギが侵入していた。樹木密度は1aあたり125本(n=3)、胸上直径は平均で4.4cmであった。スプルースのみでは、樹木密度は1aあたり84本、胸上直径は平均で5.7cmであった。この区では、枯死木はほとんど見られなかった。植生を除去することで、約70年間で永久凍土が3.6m融解した温暖化区のほうが密度、直径ともに対照区を上回っており、植物の生育が活発になり植物バイオマスへの炭素固定量が増加傾向にあると推測される。

また、植生と有機物層を除去することで、永久凍土の融解がより進んだ区では、面積の異なる4つのコドラート(10m×10m, 8m×8m, 7m×7m, 5m×5m)で植生調査を行った。これらの区では、ポプラ、カンバ、ヤナギ、ツツジが優占し、一部にスプルースの進入も見ら

れた。1aあたりに換算すると、樹木密度は平均で 275 本であった。胸上直径の平均値は、ポプラが 6.88cm、カンバが 1.14cm、ヤナギが 1.39cm、スプリースが 1.54cm であった。

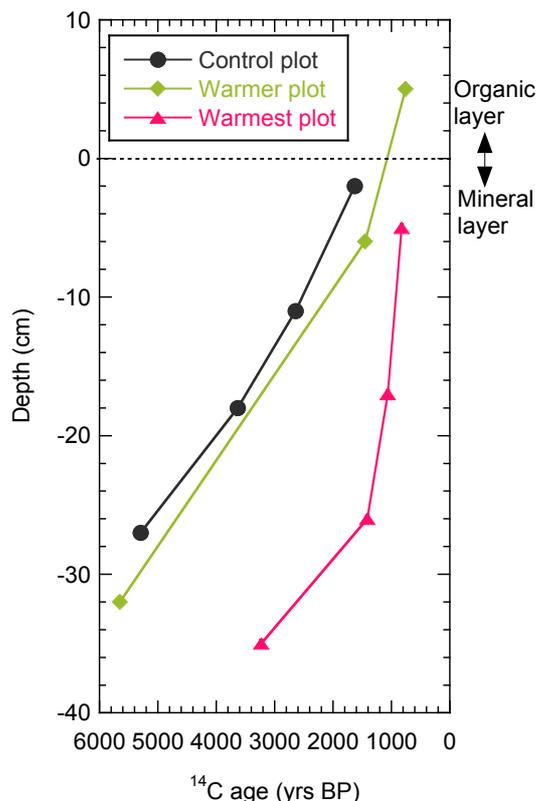


図1 対照区および温暖化区における鉍物土壌の¹⁴C年代の鉛直プロファイル

2015年の3月に、深さ1mまでの凍土コア試料を採取した。有機物層の下に存在する鉍物土壌の¹⁴C分析の結果から、植生と有機物層を除去することで永久凍土の融解がより進んだ区で、鉍物土壌の見かけの年代がより若く、ターンオーバータイム（回転速度）が速くなる傾向が見られた（図1）。

対照区と植生のみを除去した温暖化区では、コケを主体とする有機物層が発達している。その厚さは、対照区では30cmを越え、植生を除去した温暖化区では18cm程度であった。また、植生と有機物層を除去することで、永久凍土の融解がより進んだ区は、有機物層が厚さ3-5cm弱であった。鉍物土壌においては、表層30cmまでの仮比重、炭素含有率に明確な傾向が見られなかったが、¹⁴C年代については顕著な差が確認された（図1）。有機物層の直下にある鉍物土壌の¹⁴C年代は温暖化実験が始まった1946年よりも古い年代を示し、対照区で1630±30 yrs BP、温暖化区では、植生除去のみの区で1065±20 yrs BP、有機物層と植生除去区で825±20 yrs BP年であった。永久凍土の融解がより進んだ区で、鉍物土壌の見かけの年代がより若くなる傾向は、深度が深くなるほど顕著になっていた。これは、細根等を介して現存する植物から新しい炭素が鉍物土壌中に供給され、全炭

素に占める新しい炭素の割合が高くなることで、見かけの年代がより若くなったことが理由の1つとして考えられる。この結果から、植生が変化するほどの温暖化とそれに伴う凍土融解起きる場合には、地上部の植物バイオマスだけでなく、鉍物土壌への炭素動態にも影響を与える可能性が示唆された。

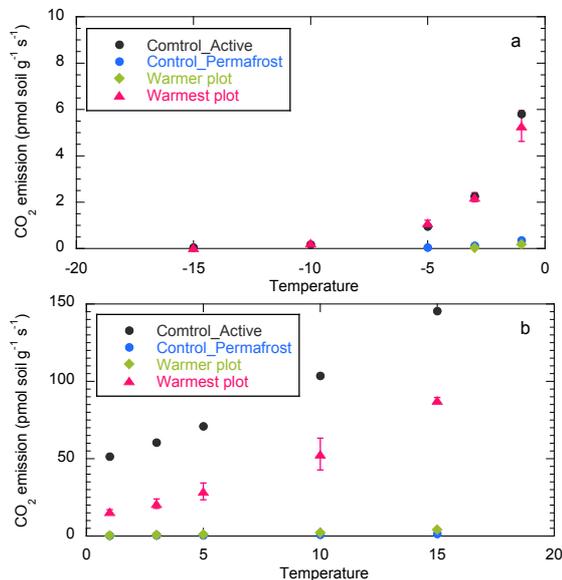


図2 凍土の培養実験から得られた、-15°Cから0°C (a) と0°Cから+15°C (b)でのCO₂放出速度

凍土コア試料を室内で培養した結果から、凍土融解が最も進んだ区(Warmest plot)で、土壌有機物分解の活性化を示す結果が得られた（図2）。また、今回、土壌有機物の分解は、0°C以下の低温域から確認された。今回培養に用いた土壌の粒形組成は、シルト含有率が比較的高く、土性区分がCLにあたるものであった。粒形が細かいほど、0°C以下でも完全凍結しない不凍結水の存在することが言われている。今回、0°C以下でも完全凍結しておらず、-5°Cでも微生物の活動があった可能性がある。

培養実験に用いたコア試料の炭素含有率は、温暖化区は、植生除去のみの区(Warmer plot)が1.8%、有機物層と植生を除去した区(Warmest plot)で2.0%、対照区の活動層と永久凍土でそれぞれ39%と0.8%であった。温暖化区のうち、より永久凍土融解が進んでいる区(Warmest plot)では、炭素含有率が2.0%程度であるものの、対照区の活動層（有機物層）の同程度から半分程度のCO₂放出が確認された（表1）。また、Q₁₀は、0°C以下で30.8、0°C以上で3.5と計算された。一方、有機物層のみ除去をした区(Warmer plot)では、CO₂放出速度は低い、Q₁₀は0°C以上の温度範囲で6.0となり、温度依存性が高かった（表1）。

今回の培養実験は、通気式方式での測定を負～正温度に渡って行っているため、基質依存性が小さいデータが直接的に得られてい

る。このようなデータは、永久凍土の広がる北極高緯度域の土壤に関しては文献値がなく、大変貴重なデータとなり得る。特に、永久凍土融解と関係する低温域のデータは、これまでプラスの温度範囲で言われていた Q_{10} 値とは異なるため、 CO_2 放出のメカニズムの含め、今後さらなる検討が必要である。また、サイト間での CO_2 放出速度や Q_{10} 値の違いは、従来言われていた土壤有機炭素含有率の傾向と必ずしも一致していない。近年指摘されている、微生物が使いやすい易分解性の有機物が供給されることで有機物分解の活性化が起きる、プライミング効果の可能性も考えられる。今後、分解基質となる有機物の質に加えて、土性の違い、また植生との関係も検討していく必要がある。

表 1 CO_2 放出速度と温度依存性 (Q_{10})

Layer		CO ₂ emission				Q ₁₀	
		-1° C	1° C	5° C	15° C	-	+
		(μgC g ⁻¹ d ⁻¹)					
Contral Plot	Active	6.0	53.3	73.6	150.9	34.0	2.20
	Permafrost	0.4	0.3	0.5	1.5	208.1	3.20
Warmer plot	Active	0.2	0.3	1.0	4.3	-	6.04
Warmest plot	Active	5.5	16.3	30.0	91.0	30.8	3.53

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

- ① Kondo M., Uchida, M., Yonemura S., Iwahana G., Kim Y., Fujitake N., Enomoto H., Tanabe K., Yoshikawa K., CO_2 emission from permafrost soils of Alaska under the freezing/ thawing condition. Goldschmidt 2016, 2016 年 6 月 30 日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)
- ② 近藤美由紀、大塚俊之、米村正一郎、吉川謙二、田邊潔、内田昌男、自然レベル放射性炭素同位体を用いた北極永久凍土融解に伴う土壤炭素分解の実態解明、日本生態学会第 63 回全国大会、2016 年 3 月 24 日、仙台国際センター(宮城県・仙台市)
- ③ Yonemura S., Uchida M., Kondo M., Iwahana G., Utsumi M., Yoshikawa K., Hinzman L., The rate of permafrost CO_2 and methane release under aerobic and anaerobic conditions using a specially designed lower temperature controlled incubation system and its potential effects on warming climate. Arctic Science Summit Week 2015, 2015 年 4 月 23 日~2015 年 4 月 30 日、富山国際会議場(富山県・富山市)
- ④ Kondo M., Uchida M., Utsumi M., Iwahana G., Yoshikawa K., Iwata H., Harazono Y., Nakai T., Tanabe K., Shibata Y., Quantifying rates of soil organic carbon accumulation in black spruce and tundra ecosystems in Alaska using radiocarbon. The Thirteenth of the AMS, 2014 年 8 月 26 日, Aix en Provence (France)
- ⑤ 米村正一郎、内田昌男、近藤美由紀、自動

測定システムによるアラスカ凍土コアサンプルの各種微量ガス交換量測定、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 30 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

- ⑥ 近藤美由紀、内田昌男、内海真生、岩花剛、吉川謙二、岩田拓記、原菌芳信、中井太郎、田邊潔、柴田康行、放射性炭素同位体を用いたアラスカ永久凍土における土壤有機炭素収支の推定、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 30 日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤美由紀 (KONDO, Miyuki)

国立研究開発法人国立環境研究所・環境計測研究センター・研究員

研究者番号：30467211

(2) 研究分担者

大塚俊之 (OHTSUKA, Toshiyuki)

国立大学法人岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授

研究者番号：90272351

米村 正一郎 (YONEMURA, Seiichiro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・大気環境領域・上席研究員

研究者番号：20354128