

令和元年6月14日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2018

課題番号：26304018

研究課題名(和文) 高緯度北極氷河後退域における硝化特性の遷移とその気候変動応答の解明

研究課題名(英文) Succession and climate-change responses of nitrification properties of soils in a glacier foreland in the European High Arctic

研究代表者

林 健太郎 (Hayashi, Kentaro)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境変動研究センター・ユニット長

研究者番号：70370294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：高緯度北極に位置するスバルバル諸島ニーオルスン近郊において、氷河後退域土壌の硝化特性(アンモニア酸化ポテンシャルおよび硝化微生物フロラ)の実態解明および環境操作応答について調査を行った。高緯度北極の未熟な土壌でも硝化が起きていることを明らかにしつつ、融雪・融水のかく乱やデブリの影響を受けやすい氷河後退域におけるクロノシーケンス法の適用の困難さ、オープントップチャンパーにより0.5℃前後の加温効果が得られることなどの今後の調査に資する情報が得られた。また、海鳥営巣崖下の崖錐土壌がきわめて高く正の温度応答を示す硝化能と脱窒能を有し、現場において一酸化二窒素の放出が起こりうることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

未熟で物質循環が遅いと考えられている高緯度北極の土壌も硝化能を有し、窒素循環の駆動に寄与することが明らかとなった。特に海鳥営巣の影響を受ける有機質土壌はきわめて高い硝化能を示し、また、20℃という現地では起こりがたい高温に対して10℃よりも顕著に高い値を示した。これは、将来の温暖化が高緯度北極土壌の硝化を促進し、窒素循環ひいては生態系の物質循環に大きな影響を及ぼす可能性を示す重要な知見である。

研究成果の概要(英文)：Field survey on nitrification properties (ammonia oxidation potential and flora of ammonia oxidizer) of soils in a glacier foreland was conducted near Ny-Alesund, Svalbard in the European High Arctic. Immature soil in such the High Arctic showed nitrification. Relevant information utilizable for future study was derived, for example, a chronosequence is difficult to be applied such a glacier foreland due to perturbation by melting water and debris, and an open top chamber showed a passive warming effect with an 0.5 deg C increase in the mean soil temperature. Furthermore, talus soils under bird cliffs showed very high nitrification and denitrification potentials with positive temperature responses and in-situ nitrous oxide emissions.

研究分野：生物地球化学

キーワード：硝化 高緯度北極 氷河後退域 窒素循環 陸域 細菌 古細菌 鳥類営巣地

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

寒冷ゆえに生物生産以上に分解の遅いツンドラ土壤には多量の炭素と窒素が有機物として蓄積されている(例えば、全炭素: $3,200 \text{ g C m}^{-2}$, 全窒素: $370 \sim 460 \text{ g N m}^{-2}$)^{1,2)}。有機物分解によるアンモニア態窒素の生成(無機化)は、その速度は遅いものの(例えば、正味無機化速度: $190 \text{ mg N m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ は上記の窒素プールのわずか 0.05%)³⁾、土壤有機物という巨大なプールに留まっていた窒素を、生物が利用しやすい無機窒素として窒素循環に戻す重要な過程である。アンモニア態窒素は、植物の吸収、微生物の同化、および一部の微生物の硝化によって競合的に消費される。硝化はアンモニアの亜硝酸への酸化(アンモニア酸化)および亜硝酸の硝酸への酸化(亜硝酸酸化)の2段階からなる(ただし、アンモニアから硝酸への酸化を行う完全硝化細菌 Comammox が 2015 年に発見された⁴⁾)。硝酸態窒素もまた植物や微生物によって競合的に消費され、別の微生物過程である脱窒により最終的に窒素分子まで還元される。このように、硝化は無機窒素フローを強く支配する過程の一つである。

一部の微生物のみが硝化を行う能力(硝化能)を有するが、硝化能をもつ微生物(硝化微生物)はツンドラ生態系を含む地球上のあらゆる環境に存在する。アンモニア酸化が硝化全体を律速するため⁵⁾、アンモニア酸化を行う硝化微生物が注目される。それは異なる生物ドメインの真正細菌(アンモニア酸化細菌: AOB)と古細菌(アンモニア酸化古細菌: AOA)の双方に存在する。AOA の発見は 2005 年⁶⁾とごく最近のことである。AOB および AOA とともに環境適応性の異なる多様な菌種が次々と発見されており、フロラの全貌は解明の途上である。AOB と AOA はアンモニアを巡って競合する。一般に、AOB は比較的高濃度のアンモニア条件を、AOA は低濃度のアンモニア条件を好む⁷⁾。AOB と AOA のどちらがアンモニア酸化の主役であるのかは世界的な論争となっている。ツンドラ生態系においても、双方が主役⁵⁾、AOA が主役⁸⁾、おそらく AOB が主役⁹⁾、と見解が分かれている。

アンモニア酸化速度の評価には、十分量の基質存在下で得られるアンモニアから亜硝酸の生成速度(アンモニア酸化ポテンシャル, AOP)が広く用いられている。AOP は、温度、土壤水分、pH、および有機物含量などの影響を受ける^{5,9)}。植物にとって、硝化微生物はアンモニア態窒素の競合者であるとともに硝酸態窒素の供給者でもある。予備研究では、下層土壤および植生がよく発達した表層土壤の AOP はそれぞれ 1 および $14 \text{ ng N g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ であり⁹⁾、硝化能は植生の発達とともに増加すると期待される。

ツンドラ生態系では、わずかな無機窒素を巡って強い競合がはたらくことから、窒素フローの変化が微小であっても、植物や微生物の生育、多様性、および種間作用に及ぼす影響は大きいと推定される。高緯度北極では雪氷の著しい減少が報告されている¹⁰⁾。気候変動は温度・水分条件を変化させて硝化に影響し、硝化への影響は他の過程への影響と相まってツンドラ生態系の炭素・窒素循環を大きく攪乱する可能性がある。攪乱が土壤有機物の増加と減少のどちらにはたらくのかにより、気候システムへのフィードバックは正反対となる。すなわち、土壤有機物の増加は大気二酸化炭素の固定を促して気候変動を緩和し、土壤有機物の減少は土壤から大気への二酸化炭素やメタンなどの発生を促して気候変動を助長する。

本研究の対象地であるノルウェー・スバルバル諸島では、特に西部において 20 世紀後半以降の氷河の後退が著しい(例: 東ブレッガー氷河では 2003~2005 年で約 30 m 後退)。氷河の後退により露わになった地表では土壤生成が再開する。その際に、土壤の硝化特性はどのように遷移していくのだろうか。これが本研究の動機であった。

引用文献

- 1) Nakatsubo et al. *J. Plant Res.* 118:173–179 (2005).
- 2) Bardgett et al. *Soil Biol. Biochem.* 39:2129–2137 (2007).
- 3) Rustad et al. *Oecologia* 126:543–562 (2001).
- 4) van Kessel et al. *Nature* 528:555–559 (2015).
- 5) Banerjee and Siciliano. *Appl. Environ. Microbiol.* 78:346–353 (2012).
- 6) Konneke et al. *Nature* 437:543–546 (2005).
- 7) Prosser and Nicol. *Trends Microbiol.* 20:523–531 (2012).
- 8) Alves et al. *ISME J.* 7:1620–1631 (2013).
- 9) Hayashi et al. *Polar Biol.* 39:725–741 (2016).
- 10) IPCC. *WG1 Assessment Report* (2013).

2. 研究の目的

高緯度北極では気候変動に伴うとみられる気象や雪氷の劇的な変化が観測されており、これらがツンドラ生態系に多量に蓄積されている土壤有機物の消長に及ぼす影響の解明が急がれている。本研究では、土壤有機物の動態を左右する窒素過程のうち、無機窒素のフローを強く支配する硝化に着目する。本研究の目的は、高緯度北極の氷河後退域において、環境条件と硝化特性(硝化能、硝化微生物フロラ)との関係、氷河後退時期が異なる複数地点のクロノシーケンスによる硝化特性の遷移速度、さらに、加温処理の組み合わせによる硝化特性の遷移速度の気候変動(特に昇温とこれに付随する乾燥などの環境条件の変化)への応答を解明することである。研究成果はツンドラ生態系の窒素循環への理解を深め、気候変動影響の予測評価にも有用である。

3. 研究の方法

3.1 氷河後退域土壌の硝化能のクロノーシケンス

調査対象は、スバルバル諸島ニーオルスン近郊に位置し、20世紀以降の後退が著しい東ブレッガー氷河の前地とした。現地調査は2015年に実施した。過去の航空写真や衛星画像に基づき、1936、1969、1977、1990、1995、2008、および2015年（調査時）の氷河末端の位置を把握し、各年次の氷河末端に3地点（東、中央、西）を設けて土壌を3連で採取し、表層0~2.5 cmと下層2.5~5 cmに分けてそれぞれコンポジットした。なお、前地は場所によりデブリの石や礫で覆われているため、現地において土壌が存在する場所を探してサンプリングした。得られた土壌を日本に持ち帰り、基質（硫酸アンモニウム）添加による好気振とう培養により10あるいは20における亜硝酸生成速度を求め、各温度のAOPとした。

3.2 氷河後退域土壌の硝化特性の環境変動応答実験

東ブレッガー氷河の前地に国立極地研究所が設けている永久コドラートを利用し、オープントップチャンバー（OTC）を用いた環境操作実験を行った。2014年に現地確認しつつ設置可能性を検討し、サイト1（1969~1977年の間に氷河が後退して露出）およびサイト2（1936~1969年の間に露出）において実験が可能と判断した。もう1つの候補であったサイト3は氷河被覆の履歴がはっきりしないことから対象外とした。なお、新たな調査区を設けるにはニーオルスン観測調整会議（NySMAC）およびスバルバル政府の許可が必要であり、許可を得るには長い時間を要することから、本研究では計画段階から新たな調査区の設定を想定しなかった。本研究初年度の2014年に実験デザインを整え、OTC作成および仮組みなどの準備を進め、2015年7月より現地にて実験を開始した。環境操作区（OTC区）および未処理区（対照区）のそれぞれに4 mmの篩でふるった土壌を良く混和して充填した塩ビ製コアを多数設置し、この一部を地温と土壌体積含水率の連続測定に用いつつ、各区から毎年7月に3個の土壌コアを抜き取って表層（0~2 cm）および下層（2~4 cm）にわけて日本に持ち帰った。初期に土壌を篩ってよく混和した理由は、土壌の質を揃えてAOP、微生物フロラ、および土壌理化学的の経年変化のシグナルの検出力を高めるためである。実験は本研究最終年度の2018年まで順調に進んでおり、2020年7月に最後の土壌コアを回収する計画で実施中である。

3.3 鳥類営巣の影響を受ける土壌の硝化・脱窒特性

夏季にスバルバルを訪れる海鳥は、餌生物を通じて海洋から営巣地への物質フローを作りだす。その結果、営巣地周辺の土壌には海鳥の排せつ物や遺骸に由来する有機物が投入され、窒素循環が盛んであると予想される。そこで、鳥類営巣の影響を受ける土壌の硝化特性および脱窒特性について予備調査を行った。調査対象は、ニーオルスン近郊に位置する海鳥営巣崖2か所（プロムストランド半島BL、ステュファレットST）とした。BLでの調査は2015年7月、STでの調査は2017年7月に行い、営巣崖の下に広がる急斜面（崖錐）において小型密閉チャンバー法により土壌およびガスのサンプルを採取し、硝化・脱窒特性の分析および温室効果ガスである一酸化二窒素（ N_2O ）のフラックス測定を行った。

4. 研究成果

4.1 氷河後退域土壌の硝化能のクロノーシケンス

東ブレッガー氷河前地の各年次の氷河末端におけるAOPを図1に示す。データのばらつきが大きいため、氷河後退後の年数とAOPの間には、次第にAOPが増える傾向を示しつつも有意な相関がみられなかった。表層と下層のAOPには、頻度としては表層のAOPが下層より大きい傾向を示したものの、有意な差がみられなかった。また、培養温度10と20がAOPに与える影響については、10のデータのばらつきが20よりさらに大きく、通常みられる培養温度を上げることによるAOPの増加が顕著でなかった。

このように氷河後退年数、土壌の層位、および培養温度ともにAOPに対して明瞭な効果を示さなかった原因は特定できなかった。ただし、考えうる要因として、氷河後退後の前地が水食を受けやすく土壌が安定的に遷移しにくいこと、水食を受けない前地は多くの場合にデブリに由来する石や礫に覆われており土壌サンプリングを行えず、可能な場所を探してサンプリングせざるを得ないというバイアスがかかること、硝化特性の遷移がその場所の温度・水分の履歴に強く左右されることが挙げられる。最後の仮説については、4.2の実験でも示唆的なデータが得られている。すなわち、融雪・融氷に伴う水流の攪乱およびデブリの影響を受けやすい氷河前地において、物質循環の経年変化の解明にクロノーシケンス法を適用するのは容易ではないと結論される。

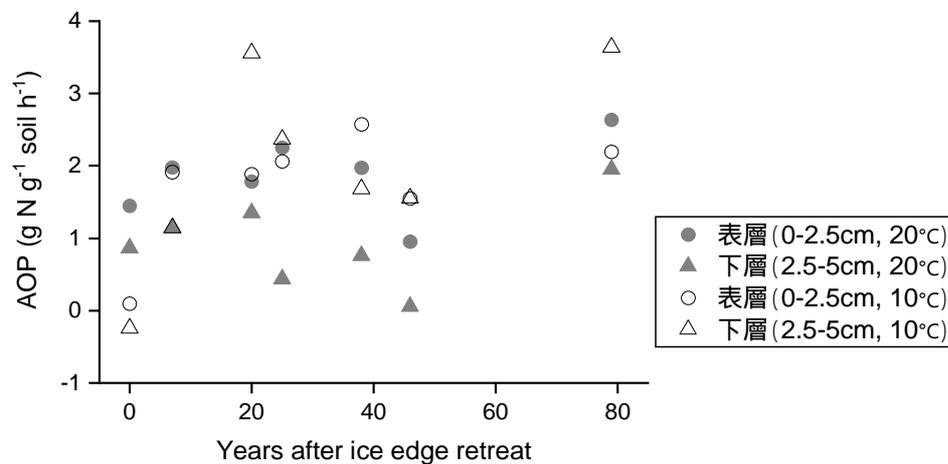


図1 東ブレッガー氷河前地の表層土壌のアンモニア酸化能 (AOP). 横軸は 2015 年に対する氷河後退後年数. 各点につき 3 か所で採取したサンプルの平均値 (標準偏差は省略).

4.2 氷河後退域土壌の硝化特性の環境変動応答実験

OTC を用いた実験状況を図 2 に示す. OTC の 1 枚のパネルは上底 0.24 m, 下底 0.415 m, 高さ 0.3 m であり, 組み上げた OTC は底面積約 0.45 m², 高さ約 0.27 m になる. OTC にはパッシブの加温効果と土壌水分への影響を期待した. OTC は地温に対し, サイト 1 で 0.4~0.5 °C, サイト 2 で 0.5~0.7 °C の加温効果を示し, 特に雪氷に埋もれる冬季に強い効果を示した. また OTC は土壌体積含水率に対し, サイト 1 と 2 とともに最初の 1 年間は土壌水分を高める効果を示したものの, その後は効果が減少し, 3 年目にはむしろ土壌水分を下げる傾向を示した. AOP については実験開始時の均質化により初期サンプルの AOP の値はばらつきが少なかった. その後は増加傾向を示しつつも, 3 年目のサンプルまでの時点では, 経年変化, OTC の効果, および土壌表層 (0~2 cm)・下層 (2~4 cm) の差異とともに有意な変化を示さなかった. 一方, サイト 1 よりもサイト 2 の AOP が高いこと, 培養温度 10 °C よりも培養温度 20 °C の AOP が高いことは統計的に有意であった ($p < 0.05$). 本実験は, 2020 年夏季の土壌コア回収で終了する. その後, 地温, 土壌水分, AOP, および微生物フロアの経年変化を併せて解析し, 得られる知見を学術論文に取りまとめる予定である.



図2 実験に用いたオープントップチャンバー (左) とその設置状況.

4.3 鳥類営巣の影響を受ける土壌の硝化・脱窒特性

鳥類営巣崖下の崖錐土壌は, BL および ST の 2 か所ともにきわめて高い脱窒能を示し, 10 °C よりも 20 °C の脱窒能が顕著に高いという正の温度応答を示した. このことは将来の昇温が現地の脱窒を加速する可能性を示唆する. 一方, 現場における N₂O 発生は調査地 BL でのみ確認された. これは BL の海鳥営巣密度が高く, 土壌の窒素のターンオーバーが速いことの影響が示唆された. 詳細は公表論文 (Hayashi et al. 2018, Scientific Reports 8:17261) に記述した.

硝化特性のうち AOP は脱窒能と同様に崖錐土壌で顕著に高かった. 現在, 硝化微生物フロアの解析を続けており, 結果がまとまり次第, 学術論文に取りまとめる予定である.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Hayashi K, Tanabe Y, Ono K, Loonen MJJE, Asano M, Fujitani H, Tokida T, Uchida M, Hayatsu M, Seabird-affected taluses are denitrification hotspots and potential N₂O emitters in the High Arctic. *Scientific Reports*, 8:17261 (2018) 査読あり

Hayashi K, Shimomura Y, Morimoto S, Uchida M, Nakatsubo T, Hayatsu M, Characteristics of ammonia oxidation potentials and ammonia oxidizers in mineral soil under *Salix polaris*-moss vegetation in Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Biology*, 39, 725–741 (2016) 査読あり

〔学会発表〕(計10件)

林健太郎・田邊優貴子・小野圭介・浅野眞希・服部祥平・内田雅己・早津雅仁, 高緯度北極スバルバルの氷河後退域における土壌硝化能の遷移. 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, 幕張メッセ (2019)

Hayashi K, Tanabe Y, Ono K, Asano M, Hattori S, Uchida M, Hayatsu M, Passive warming experiment on nitrification properties of soils in the foreland of East Brøgger Glacier near Ny-Ålesund, Svalbard. 第9回極域科学シンポジウム, 国立極地研究所 (2019)

早津雅仁・多胡香奈子・王勇・内田雅己・林健太郎, 高緯度北極・スバルバル諸島・ニールスンの海鳥営巣地におけるアンモニア酸化細菌の多様性. 日本微生物生態学会第32回大会, 沖縄コンベンションセンター (2018)

林健太郎・田邊優貴子・小野圭介・Maarten J.J.E. Loonen・浅野眞希・藤谷拓嗣・内田雅己・早津雅仁, 海鳥営巣崖下の崖錐土壌の高い脱窒能: スバルバル諸島ニールスン近郊の事例. 第8回極域科学シンポジウム, 国立極地研究所 (2017)

Hayashi K, Tanabe Y, Ono K, Loonen MJJE, Uchida M, Hayatsu M, Bird rookeries: A hotspot of N₂O emissions in the High Arctic. *Proceedings of International Workshop on N₂O Emissions in Various Ecosystems: Site-Based Research and Global Synthesis*, 20, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan (2017)

Hayashi K, Tanabe Y, Ono K, Loonen MJJE, Uchida M, Tago K, Hayatsu M, Very high nitrification and denitrification potentials of soils on the talus under a kittiwake-cliff in Ny-Ålesund. *Svalbard Science Conference 2017, Book of Abstracts*, 90, Scandic Fornebu, Oslo, Norway (2017)

林健太郎・田邊優貴子・小野圭介・Maarten JJE Loonen・内田雅己・早津雅仁, 高緯度北極ミツコビカモメ営巣崖の崖錐土壌の高い硝化・脱窒能. 第63回日本生態学会仙台大会, 仙台湾際センター (2016)

Hayashi K, Shimomura Y, Morimoto S, Uchida M, Nakatsubo T, Hayatsu M, Ammonia oxidation potentials and ammonia oxidizers of topsoil under moss-polar willow vegetation in Ny-Ålesund. *Ny-Ålesund Seminar*, 32, Tromsø, Norway (2015)

林健太郎・下村有美・森本晶・内田雅己・中坪孝之・早津雅仁, スバルバルのコケ・キョクチャナギ群落土壌の硝化・脱窒能および土壌理化学性との関係. 第62回日本生態学会鹿児島大会, 鹿児島大学 (2015)

林健太郎・下村有美・森本晶・内田雅己・中坪孝之・早津雅仁, スバルバルのツンドラ土壌の硝化・脱窒能および硝化微生物フロア. 第5回極域科学シンポジウム, 国立極地研究所 (2014)

〔図書〕(計1件)

林健太郎, 薫風のトゥーレ. 幻冬舎, 東京, 256p. (2017)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

報道関連情報:

高緯度北極の海鳥営巣崖下の斜面は窒素循環のホットスポット. プレスリリース. 国立極地研究所, 農業・食品産業技術総合研究機構, 2018年12月6日

北極圏に窒素循環ホットスポット. 化学工業日報10面, 2018年12月7日

高緯度地でN₂O発生 海鳥が影, 温暖化加速も. 日本経済新聞朝刊30面サイエンス, 2019年1月6日

ホームページ: 特になし

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：内田 雅己

ローマ字氏名：(UCHIDA, Masaki)

研究協力者氏名：早津 雅仁

ローマ字氏名：(HAYATSU, Masahito)

研究協力者氏名：Maarten J.J.E. Loonen (フローニンゲン大学)

研究協力者氏名：田邊 優貴子

ローマ字氏名：(TANABE, Yukiko)

研究協力者氏名：小野 圭介

ローマ字氏名：(ONO, Keisuke)

研究協力者氏名：藤嶽 暢英

ローマ字氏名：(FUJITAKE, Nobuhide)

研究協力者氏名：浅野 眞希

ローマ字氏名：(ASANO, Maki)

研究協力者氏名：藤谷 博嗣

ローマ字氏名：(FUJITANI, Hirotsugu)

研究協力者氏名：服部 祥平

ローマ字氏名：(HATTORI, Shohei)

研究協力者氏名：白水 貴

ローマ字氏名：(SHIROUZU, Takashi)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。