

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2012～2016

課題番号：24405009

研究課題名(和文) 高緯度北極における土壌炭素の放出・流出プロセスの広域評価と将来予測

研究課題名(英文) Large-scale assessment and prediction of emission/efflux processes of soil carbon in the High Arctic

研究代表者

中坪 孝之 (NAKATSUBO, Takayuki)

広島大学・生物圏科学研究科・教授

研究者番号：10198137

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)：本研究は、高緯度北極を対象に、現地における生態系からの土壌炭素の放出・流出プロセスの調査と、衛星リモートセンシングおよび炭素循環モデルとを組み合わせることで、生態系からの炭素放出・流出を広域かつ長期的に評価・予測することを目指したものである。調査対象地域はスピッツベルゲン島のブレッガー半島で、衛星画像の解析により主要な植生の面積を求めた。現地調査は、これまで情報がほとんどない湿地生態系を中心に行い、有機炭素蓄積速度、CO<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub>フラックス、水による炭素流出量を測定した。これらの結果をもとに、調査地における炭素動態全体の評価を行った。

研究成果の概要(英文)：This study aims to clarify the emission and efflux processes of soil carbon in the High Arctic and to predict changes in the processes in a wide-scale by using an ecosystem carbon cycle model and remote sensing techniques. The area of major vegetation types in the study area (Brogger Peninsula, Svalbard) was quantified by analyzing a satellite image. Field studies were conducted mainly in peatlands for which data of carbon cycle were scarce. Apparent rates of C accumulation in a peatland, estimated based on the <sup>14</sup>C age and amount of peat in the active layer, were calculated to be 9.0-19.2 gC m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>. The measurements of CO<sub>2</sub> fluxes and model analyses revealed that the peatland was an active place of carbon sequestration. The analysis of DOC in the stream water showed that a significant proportion of the fixed C was lost from the peatland. Based on these results, we evaluated the whole carbon dynamics in the study area and constructed a prediction model.

研究分野：生態系生態学

キーワード：高緯度北極 炭素循環 湿地 モデル解析 リモートセンシング 炭素放出・流出

### 1. 研究開始当初の背景

北極域では全地球平均の2倍の速度で温暖化が進行しており、氷床・氷河の急激な減少など、急激な環境変化が観測されている。その影響として最も懸念されているのが、凍土を含む土壤中に蓄積されている有機炭素の放出による正のフィードバック効果である。亜寒帯林から低緯度北極にかけての土壤に大量の炭素があることは以前から知られていたが、近年は高緯度北極にも大きな炭素ストックが存在することが明らかにされている。このため、高緯度北極における温暖化の影響、特に土壤有機炭素の放出・流出に対する影響を広域かつ長期的に評価することが急務となっているが、高緯度北極の炭素動態に関する研究は少なく、凍土や深層土壤中に蓄積されている炭素の動態や流水を通じた土壤炭素の流亡過程についての研究はほとんど手がつけられていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、高緯度北極の陸域生態系からの有機炭素の放出・流出プロセスを定量的に調査し、衛星リモートセンシングと炭素循環モデルとを組み合わせることで、生態系からの炭素放出・流出を広域かつ長期的に評価することを目的とした。

一般に高緯度北極では植物バイオマスは少ないが、点在する湿原には桁違いのバイオマスと炭素ストックがあると予想される。これらの場所では常に水の流入、流出があるため、CO<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>のフラックスだけでなく、水を介した炭素の移動も考えられる。このため、本研究では湿原からの炭素放出・流出過程の評価を重点課題の一つに位置付けた。

調査対象地域をスピッツベルゲン島のブレッガー半島(北緯79度、東経12度)とし、以下の3項目について研究を遂行した。

- ・現地観測による炭素放出・流出速度の測定とその変動要因の解明
- ・室内実験、分析による有機炭素の起源とその動態の解明
- ・モデル解析と衛星リモートセンシングによる炭素放出・流出量の広域評価と将来予測

### 3. 研究の方法

(1) ブレッガー半島の北西に位置する湿地(Stuphallet)に調査ポイントを設け、センサー付きデータロガー(平成24年度購入)を設置して、土壤温度、水温、水量・水位の連続測定を行った。

(2) 湿地における有機物の蓄積量および蓄積速度の推定を行うために、ピートの活動層部分のコアサンプルを層別に採取した。ピートの<sup>14</sup>C年代測定と炭素量から見かけの炭素蓄積速度を推定した。

(3) 湿地における温室効果ガスの発生吸収量を調べるため、閉鎖チャンバー法での測定を

行うとともに、酸化還元電位の測定を行った。さらに、湿地のコケ群落下の土壤を日本に持ち帰り、ガス交換量の測定を行った。また、還元状態でのメタン発生を調べるため、窒素ガス条件下での実験も実施した。

(4) 湿地に優占する5種のコケ類を採取し、室内で光、温度条件を変化させながら赤外線ガス分析計を用いて光合成・呼吸特性を調べた。生育期間中コケ類は常に湿っていたため、水の影響は小さいと仮定し、光-光合成、温度-光合成および温度-呼吸の関係式を求めたのち、野外環境データを関係式に入力し、純生産量を推定した。

(5) 湿地からの炭素の流出量を明らかにする目的で、約1週間間隔で河川水の採取を行った。その際、可溶性と非可溶性物質を分別するために、GF/Fフィルターでサンプルを濾過した。溶存有機炭素(DOC)量は濾液をTOC計に供することで、また、DOCの中の難分解性成分(難分解性DOC、いわゆる溶存腐植物質)はDAX-8樹脂バッチ吸着法に従って定量した。

### 4. 研究成果

(1) 調査を行ったStuphalletでは*Calliergon richardsonii*をはじめとするコケ類が優占していた。8月初旬に測定したコケの褐色部とピートを含む活動層の厚さは平均約28cmであった。活動層の厚さが場所により異なっていたために、採取できた深さは異なるものの、5-9 kg m<sup>-2</sup>の炭素が活動層に蓄積されていた。一部のサンプルについて炭素年代の測定を行ったところ、活動層最下部のピートの年代は81-701 cal yr BPと推定され、これらの値と活動層の炭素蓄積量から求めた見かけの炭素蓄積速度は9.0-19.2 gC m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>となった。この値は、本地域の他の植生タイプについて報告されている生態系純生産量、純一次生産量と同レベルかそれ以上であり、湿地生態系が本地域の炭素シーケストレーションに重要な役割を果たしていることが示された。

(2) 湿地における温室効果ガスフラックス測定の結果、二酸化炭素については、7月の測定期間中はコケにより固定される量が分解による放出量を上回っていたため、炭素の吸収源となっていることが明らかとなった。二酸化炭素フラックスの空間変動は、地形や水位よりも、コケ表面付近の温度や水分、コケの現存量に影響されていた。一方、メタンや亜酸化窒素フラックスについては空間的不均一性が高く、環境要因との関係性ははっきりしなかった。また、日本に持ち帰った土壤サンプルについて、窒素ガス条件下でメタン発生を調べたが、メタン発生は確認できなかった。調査を行った湿地Stuphalletにおける無雪期間のCO<sub>2</sub>フラックス収支をモデルを構

築して推定したところ、1 m<sup>2</sup>あたり 132 g の炭素が固定されていると推定された。

(3) 湿地に優占するコケ類の光合成速度は 7-8 で最大となり、温度が高くなると減少する傾向が認められた。光合成・呼吸特性と現地環境条件をもとに 5 種の純生産量を推定したところ、1 m<sup>2</sup>あたり 73-217 gC と種によって大きく異なったが、平均すると 1 m<sup>2</sup>あたり 128 gC と CO<sub>2</sub> フラックスの推定値と近い値が得られた。湿地のコケの生産量は氷河後退後の乾燥した立地のコケの生産量の数倍高い値であったが、これは乾燥地では降水時以外はコケの含水率が著しく低下して光合成速度が極めて小さくなるのに対して、湿地のコケには水分が常に供給されて高い光合成活性を維持できるためと考えられた。

(4) 融雪期 6 月 4 週目から降雪期 8 月 3 週目にかけて、Stuphallet においてピート試料ならびに水試料の採取を行い、各水試料の DOC 量と難分解性 DOC 量を測定した。湿地から流出する水量は雪解け時期に多く、その後減少する傾向が認められた。非可溶性物質量の季節的な変化は認められなかった。河川下流ほど溶存炭素中の難分解成分比が上昇することから、湿地から溶出する炭素はより難分解性であること、また、融雪期から高温期に向かうほど溶存炭素濃度は減少するが、難分解性成分比が増加することから湿地凍土の融解に由来する溶存炭素はより難分解性であることが推察された。また、難分解性の溶存炭素と各種溶存元素の関係を調べたところ、コバルト、臭素、リンとの相関関係が認められた。現地に設置した流量計のモニタリングデータを併せて、湿地帯から海域に流出する DOC 総量の概算をおこなった。その結果、DOC の流出量は生物呼吸量やバイオマス固定量と遜色ないレベルで重要なマスを示すことが明らかになった。さらに、水試料中の 50% 近くが難分解性 DOC 量であることがわかった。

(5) 上記の結果をもとに、湿地生態系における炭素フローを改良したモデルを元に推定した。その結果、湿地では氷河後退跡地の生態系に比べはるかに多くの炭素が固定されるが、その一部は流水により系から失われていることが明らかとなった。一方、メタンとしての放出は炭素量としては無視できる程度と推定された。年間の炭素固定量は、炭素年代と蓄積量から求めた見かけの炭素蓄積量よりはるかに大きかったが、この理由としては、融雪時期の炭素流出量が含まれていないこと、温暖化等により現在の生産量が高くなっていることなどが考えられる。

(7) 衛星画像解析によりブレッガー半島全体の湿地面積は約 147ha と推定された。氷河後退直後の立地など生産力が低い場所が大半を占めることを考慮すると、湿地生態系が当

地域の炭素シーケストレーションに大きな役割を果たし、周辺海域への炭素の供給源としても重要な役割を果たしていると推測された。

(8) 本研究を実施することにより高緯度北極湿地生態系の炭素フローの概要を明らかにすることができた。流量計のトラブルで融雪期の流量データが欠損したため、炭素流出量の推定精度には改善の余地があるが、湿地から無視できない量の有機炭素が流出することを示せたことは大きな成果といえる。広域予測については、最終年度終了に間に合わなかったが、予測に必要な情報はほぼ得られており、より精度の高いモデルもできているので、早急に進める予定である。この研究を通じて、チェコをはじめとする海外の研究者と本研究を発展させた国際共同研究を開始することで合意できた。今後は国際的な研究ネットワークのもとで、より広範な研究に発展させていきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Inoue T., Kudoh S., Uchida M., Tanabe Y., Inoue M., Kanda H. (2017) Factors affecting water availability for high Arctic lichens. *Polar Biology* 40(4): 853-862. DOI: 10.1007/s00300-016-2010-2 査読有

Hayashi K., Shimomura Y., Morimoto S., Uchida M., Nakatsubo T., Hayatsu M. (2016) Characteristics of ammonia oxidation potentials and ammonia oxidizers in mineral soil under *Salix polaris*-moss vegetation in Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Biology* 39(4): 725-741. DOI: 10.1007/s00300-015-1829-2 査読有

Uchida M., Muraoka H., Nakatsubo T. (2016) Sensitivity analysis of ecosystem CO<sub>2</sub> exchange to climate change in a High Arctic tundra using an ecological process-based model. *Polar Biology* 39(2): 251-265. DOI: 10.1007/s00300-015-1777-x 査読有

Osono T., Mori S.A., Uchida M., Kanada H. (2016) Accumulation of carbon and nitrogen in vegetation and soils of deglaciated area in Ellesmere Island, high-Arctic Canada. *Polar Science* 10: 288-296. DOI: 10.1016/j.polar.2016.03.003 査読有

Nakatsubo T., Uchida M., Sasaki A., Kondo M., Yoshitake S., Kanda H. (2015)

Carbon accumulation rate of peatland in the High Arctic, Svalbard: Implications for carbon sequestration. *Polar Science* 9: 267-275.

DOI: 10.1016/j.polar.2014.12.002 査読有

Hayashi K., Cooper, E.J., Loonen, M.J.J.E., Kishimoto-Mo A.W., Motohka T., Uchida M., Nakatsubo T. (2014) Potential of Svalbard reindeer winter droppings for emission/absorption of methane and nitrous oxide during summer. *Polar Science* 8: 196-206.

DOI: 10.1016/j.polar.2013.11.002 査読有

Inoue T., Kudoh S., Uchida M., Tanabe Y., Inoue M., Kanda H. (2014) Effects of substrate differences on water availability for Arctic lichens during the snow-free summers in the High Arctic glacier foreland. *Polar Science* 8: 397-412

DOI: 10.1016/j.polar.2014.09.003 査読有

[学会発表](計 38 件)

Inoue T., Kudoh S., Uchida M., Tanabe Y., Inoue M., Kanda H., Factors affecting water availability for high Arctic lichens, The Seventh Symposium on Polar Science, 29 November 2016, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa-shi)

Uchida M., Kanda H., Masumoto S., Nakatsubo T., Photosynthetic characteristics of five moss species in a moss tundra on Svalbard, The Seventh Symposium on Polar Science, 2 December 2016, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa-shi)

Uetake J., Tanabe Y., Kosugi M., Uchida M., Bacterial community change between glacier and glacier foreland around Austre Brøggerbreen, Svalbard, The Seventh Symposium on Polar Science, 2 December 2016, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa-shi)

Nakatsubo T., Ecosystem carbon cycle in Brøgger Peninsula, Svalbard: a 20-year study, The Seventh Symposium on Polar Science, 2 Dec 2016, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa-shi) 招待講演

Nakatsubo T., Hirota M., Kishimoto-Mo A.W., Oura N., Yonemura S., Fujitake N., Sonoda H., Iimura Y., Uchida M., Carbon dynamics of moss tundra in the High Arctic, Svalbard. Polar Ecology Conference 2016, 19 Sep 2016, Ceske Budejovice (Czech

Republic)

大浦典子, 岸本文紅, 米村正一郎, 廣田充, 飯村康夫, 内田雅己, 増本翔太, 中坪孝之, 高緯度北極湿原における  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  フラックスの空間および季節変動, 第 63 回日本生態学会大会, 2016 年 3 月 24 日, 仙台国際センター (宮城県・仙台市)

内田雅己, 廣田充, 岸本(莫)文紅, 神田啓史, 大浦典子, 飯村康夫, 中坪孝之 北極ツンドラ湿地生態系における生態系純生産量の推定, 第 63 回日本生態学会大会, 2016 年 3 月 24 日, 仙台国際センター (宮城県・仙台市)

林健太郎, 田邊優貴子, 小野圭介, Maarten JJE Loonen, 内田雅己, 早津雅仁, 高緯度北極ミツユピカモメ営巣崖の崖錐土壌の高い硝化・脱窒能, 第 63 回日本生態学会大会, 2016 年 3 月 24 日, 仙台国際センター (宮城県・仙台市)

増本翔太, 内田雅己, 東條元昭, 伊村智, 植物病原菌 *Rhizoctonia solani* がキョクチャナギの光合成生産に与える影響, 第 63 回日本生態学会大会, 2016 年 3 月 24 日, 仙台国際センター (宮城県・仙台市)

関川清広, 村岡裕由, 内田雅己, 高緯度北極ツンドラ生態系・スピッツベルゲンに優占する維管束植物の葉形質と光合成特性, 第 63 回日本生態学会大会, 2016 年 3 月 24 日, 仙台国際センター (宮城県・仙台市)

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-Alesund, Ny-Alesund Seminar, 22-23 September 2015, Tromso (Norway)

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, 2015 年 3 月 21 日, 鹿児島大学 (鹿児島県・鹿児島市)

内田雅己, 増本翔太, 神田啓史, 中坪孝之, 北極ツンドラ湿地生態系におけるコケの光合成, 第 62 回日本生態学会, 2015 年 3 月 21 日, 鹿児島大学 (鹿児島県・鹿児島市)

園田碧, 藤嶽暢英, 廣田充, 内田雅己, 中坪孝之, 高緯度北極の湿原生態系における溶存有機物の特性, 第 62 回日本生態学会, 2015 年 3 月 19 日, 鹿児島大学 (鹿児島県・鹿児島市)

Uchida M., Muraoka H., Nakatsubo T., Sensitivity of ecosystem carbon cycle to climate change in a Norwegian High Arctic, Arctic Change 2014, 9-10 December 2014, Ottawa (Canada)

Sekikawa S., Muraoka H., Uchida M., Photosynthetic responses to ambient CO<sub>2</sub> of three dominant species in Ny-Ålesund, The Fifth Symposium on Polar Science, 3 December 2014, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa-shi)

Inoue T., Kudoh S., Uchida M., Tanabe Y., Inoue M., Kanda H., Effects of substrate differences on water availability for Arctic lichens during the snow-free summers in the High Arctic glacier foreland, The Fifth Symposium on Polar Science, 3 December 2014, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa-shi)

Masumoto S., Uchida M., Tojo M., Imura S., The effect on carbon balance of *Salix polaris* by tar spot fungi in Ny-Ålesund, Norway, The Fifth Symposium on Polar Science, 3 December 2014, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa-shi)

Hirota M., Imura Y., Kishimoto A.M., Oura N., Uchida M., Nakatsubo T., CO<sub>2</sub> fluxes at community level & CO<sub>2</sub> uptake ability in a moss tundra in Ny-Ålesund, Norway, The Fifth Symposium on Polar Science, 3 December 2014, National Institute of Polar Research (Tokyo, Tachikawa-shi)

Uchida M., Hirota M., Imura Y., Kishimoto A.M., Oura N., Nakatsubo T., Spatial variability of CO<sub>2</sub> flux at moss tundra in Ny-Ålesund, Norway, Polar Ecology Conference 2014, 23 September 2014, Ceske Budejovice (Czech Republic)

②① 吉竹晋平, 内田雅己, 大塚俊之, 中坪孝之, 高緯度北極ニールスンの氷河後退域における土壌微生物群集の遷移, 第 61 回日本生態学会, 2014 年 3 月 17 日, 広島国際会議場 (広島県・広島市)

②② 廣田充, 飯村康夫, 岸本文紅, 大浦典子, 内田雅己, 中坪孝之, 高緯度北極湿原における大気-湿原間 CO<sub>2</sub> フラックスの空間変動, 第 61 回日本生態学会, 2014 年 3 月 17 日, 広島国際会議場 (広島県・広島市)

②③ 杉本敦子, 内田雅己, 松浦陽次郎, 太田岳史, 檜山哲也, 石川守, 佐々木正史, 大澤晃, 鈴木力英, 山崎剛, 斉藤和之, Park Hontaek, 伊勢武史, 環北極陸域システムの変動と気候への影響: 観測の現状と今後の展開, 第 4 回極域科学シンポジウム, 2013 年 11 月 12 - 15 日, 国立極地研究所 (東京都・立川市)

②④ 内田雅己, 米村正一郎, 森山明敬, 岸本(莫)文紅, 川島茂人, 高緯度北極土壌における CO<sub>2</sub> 放出の温度および湿度応答特性, 第 4 回極域科学シンポジウム, 2013 年 11 月 12 日 - 15 日, 国立極地研究所 (東京都・立川市)

②⑤ 廣田充, 飯村康夫, 岸本(莫)文紅, 大浦典子, 内田雅己, 中坪孝之, 高緯度北極湿原における CO<sub>2</sub> 吸収機能に関する研究, 第 11 回環境研究シンポジウム 2013 年 11 月 13 日, 一橋大学一橋講堂 (東京都・千代田区)

②⑥ Tanabe Y., Uchida M., Photosynthetic characteristics of vascular plants under primary succession stages in a High Arctic glacier foreland, Svalbard, 11<sup>th</sup> Ny-Ålesund Science Managers Committee Seminar, 9 -11 October 2013, Rome (Italy)

②⑦ Uchida M., Introduction of a new project: Study of carbon cycling at moss tundra, 11<sup>th</sup> Ny-Ålesund Science Managers Committee Seminar, 9 -11 October 2013, Rome (Italy)

②⑧ Uchida M., Response of ecosystem carbon cycle to climate change in a glacier foreland of the High Arctic, Third International Symposium on the Arctic Research, 15 January 2013, Miraikan (Tokyo, Koto-ku)

②⑨ Nakatsubo T., Response of ecosystem carbon cycle to climate change in a High Arctic glacier foreland, Norway-Japan Business and Technology Forum, 2 November 2012, Hotel New Otani (Tokyo, Chiyoda-ku) 招待講演

③⑩ Uchida M., Succession and carbon cycle in a high Arctic tundra ecosystem. 2012 Polar Ecology Conference, 1 Oct 2012, Prague (Czech Republic)

〔図書〕(計 2 件)

中坪孝之・内田雅己, 国立極地研究所, 陸域生態系観測, 北極ニールスン基地開設 25 周年と将来展望, 2017, 47-50

中坪孝之, 丸善出版, 沙漠 (砂漠), ツンドラ, 荒原, 日本植物学会編 植物学の百科

6．研究組織

(1)研究代表者

中坪 孝之 (NAKATSUBO TAKAYUKI)  
広島大学・大学院生物圏科学研究科・教授  
研究者番号：10198137

(2)研究分担者

内田 雅己 (UCHIDA MASAKI)  
国立極地研究所・国際北極環境研究センター・准教授  
研究者番号：70370096

佐々木 晶子 (SASAKI AKIKO)  
広島大学・大学院生物圏科学研究科・助教  
研究者番号：10535470  
[平成24-27年度分担]

(3)連携研究者

大浦 典子 (OURA NORIKO)  
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企画管理部企画連携室交流チーム・チーム長  
研究者番号：50354022

岸本 文紅 (KISHIMOTO AYAKA)  
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・上級研究員  
研究者番号：60334033

廣田 充 (HIROTA MITSURU)  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号：90391151

藤嶽 暢英 (FUJITAKE NOBUHIDE)  
神戸大学・農学研究科・教授  
研究者番号：50243332

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・農業環境変動研究センター気候変動対応研究領域・主席研究員  
研究者番号：20354128