

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月14日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20405010

研究課題名（和文） 急速な氷河後退に伴う北極陸上生態系の炭素シーケストレーションの長期変動と将来予測

研究課題名（英文） Long-term change and future prediction of the carbon sequestration in an Arctic terrestrial ecosystem following rapid glacier retreat

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

研究成果の概要（和文）：本研究は、急速な氷河後退が進行している高緯度北極を対象に、炭素循環モデルと衛星リモートセンシング技法とを組み合わせることにより、炭素循環過程、炭素シーケストレーションの時間変化の解明をめざしたものである。スバル諸島ニーオルソンの氷河後退域において、土壌炭素の広域分布、過去から現在までの氷河後退過程、氷河後退域への植物の定着に関する調査を行い、それらの結果をふまえ、炭素循環モデルによる炭素循環・炭素シーケストレーションの将来予測を行った。

研究成果の概要（英文）：This study aims to clarify historical and future changes in carbon cycle and carbon sequestration in the High Arctic terrestrial ecosystem following rapid glacier retreat using a carbon cycle model and remote sensing techniques. We conducted field studies on the distribution of soil organic carbon, processes of glacial retreat and plant colonization on the glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard. Based on these data, response patterns of the carbon cycle and carbon sequestration to future climate change were examined using a carbon cycle model.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
年度			
総計	11,700,000	3,510,000	15,210,000

研究分野：生態学

科研費の分科・細目：生態・環境

キーワード：環境変動、極地、植物、炭素循環モデル、氷河後退、リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

北極域は、地球温暖化の影響を最も強く受けると予測されてきたが、近年、北極域の各地では、予測を上回るスピードで氷床・氷河の減少が報告されている。急速な氷河後退は周囲の生態系に劇的な変化をもたらすと同時に、後退跡地に新たな生態系を構築する機

会を提供する。生態系の誕生プロセスやその動態を把握することは、今後の北極陸上生態系の変化を見極めるために最も重要な項目の一つである。北極域の氷床・氷河の急激な減少は地球観測衛星による観測結果によって明らかにされており、グリーンランドでは夏期における陸地面積が1992年からの10年

間で 17%も増加していることが報告されている。さらに北極域での積雪面積の減少も報告されており、これらの報告を受けて、アルベドの増加や淡水の流れ込みによる気候変動に関する予測研究が進んでいる。一方、氷河後退に伴う生態系変化については、最終氷期から現在にいたる地質学的タイムスケールでの変化については数多くの研究があるが、過去数十年以内の急速な氷河後退の影響についての研究は極めて少なく、炭素循環プロセスに関する研究は皆無とあってよい。

## 2. 研究の目的

急速な氷河後退が進行している高緯度北極を対象に、陸上生態系全体の構造と機能を反映すると考えられる炭素シーケストレーション（生態系が炭素を蓄積する機能）に着目し、炭素循環モデルと衛星リモートセンシング技法とを組み合わせることにより、衛星データが存在する過去から現在までの炭素循環過程、炭素シーケストレーションの時間変化の解明をめざし、さらに今後数 10 年～100 年の変化を予測することを目的とする。このため、炭素循環モデルに使用するデータ取得と精度向上のための現地調査、および衛星データの解析による植生・バイオマスとそれらから推定した土壤炭素の時間的変動の解明を行う。

## 3. 研究の方法

高緯度北極スバル諸島、ニーオルスンの東フレグラー氷河後退域を調査地とし、現地調査を行うとともに、当該地域の衛星データを入手して解析を行った。

(1) 衛星データを用いた広域マッピング解析に用いるため、植物地上部バイオマスの推定および土地被覆分類のアルゴリズム作成・検証のために必要な分光反射率とバイオマス・植生タイプの測定を現地で行った。さらに、氷河後退域の 0.72km<sup>2</sup> の範囲について、有機炭素の分布と植生発達との関係について解析を行った。

(2) 衛星データ (ALOS) と過去の航空写真の解析を行い、過去から現在の氷河末端の位置を特定するとともに、遷移後期の優占種であるキョクチャナギ (*Salix polaris*) の定着速度とその制限要因について検討を行った。

(3) フェノロジーや物質循環に大きな影響を与える要因である消雪時期と積雪開始時期の年変動について、衛星リモートセンシングを用いて調べた。衛星センサ Terra MODIS による地表反射率データを用いて、2000 年から 2009 年までの時系列 NDVI 画像を作成し、それをもとに消雪時期、積雪開始時期を推定した。

(4) 氷河後退直後の主要な植生の一つである

土壤クラスト（シアノバクテリア、藻類、菌類地衣類、コケの原糸体等が絡み合った地表面の群集）を対象に、オープンフローの光合成呼吸測定システムを用いて、光合成および呼吸速度と環境要因との関係を調べ、生産量推定のためのモデルを作成した。

(5) 植生、温度、土壤水分と温室効果ガスフラックスとの関係を明らかにするため、密閉法を用いて生態系呼吸 (CO<sub>2</sub> フラックス)、メタンおよび亜酸化窒素フラックスの現地測定を行った。

(6) これまでの現地調査の結果をもとに主要な炭素フローと炭素プールを含む生態系炭素循環モデルを構築し、炭素シーケストレーションに与える温度、生育期間、降水量および植生の変化の影響について検討した。

## 4. 研究成果

主要な成果は以下のとおりである。

(1) ニーオルスンの三本のライントラセクトに沿った 43 プロットのデータをもとにクラスター解析を行った結果、植生により炭素の分布パターンが異なること、また遷移後期の有機炭素蓄積量は 1.1～7.9 kg C m<sup>-2</sup> で、土壤深層にも起源の古い炭素を含むかなりの量の炭素が存在することが明らかになった。

(2) 現地測定および画像解析から推定した氷河後退速度は年間 10～20m と見積もられ、キョクチャナギ氷河後退後への定着が始まったのは、この 70 年以内であると推定された。さらに、キョクチャナギの侵入の最前線で定着状況を調べた結果、本種の定着は先駆種であるムラサキユキノシタの存在や土壤発達とは無関係で、新規加入個体が非常に少ないことが拡大を制限していることが明らかになった。

(3) 衛星リモートセンシングによる解析により、消雪時期については最大 25 日程度、降雪開始時期は最大 15 日程度の年変動があり、非積雪期間の年変動は最大で 30 日程度におよぶことが明らかになった。また、経年変化には統計的に有意な傾向は認められなかった。

(4) 土壤クラストの光合成、呼吸速度と環境要因との関係を調べた結果、純光合成速度は 0°C 付近では正の値を示すものの、10°C では多くの試料が負の値になる（呼吸消費が光合成生産を上回る）ことが判明し、温暖化の影響を強く受けることが示唆された。

(5) 生態系呼吸 (CO<sub>2</sub> フラックス)、メタンおよび亜酸化窒素フラックスの現地測定を行った。その結果、生態系呼吸はキョクチャナギの被度と正の相関が認められたが、メタンについては植生の有無に関わらず吸収フラックスであった。亜酸化窒素については、植生の発達程度により放出か吸収かが異なっ

おり、植生が発生量と拡散の物理過程に影響していることが示唆された。

#### (6)炭素循環モデル

炭素循環モデルを用いて、氷河後退域の遷移後期を対象に炭素循環に対する気候変動の影響を予測した結果、温度条件は生態系炭素循環に大きく影響するが、降水量の増加の影響は小さいと予測された。また温暖化自体は、生態系純生産 (NEP) にマイナスの影響を与えるが、優占種であるキョクチャナギの着葉期間が延長すれば、NEP を増加させる可能性があることが示唆された。

以上の研究により、高緯度北極で進行中の氷河後退、植物の定着と炭素蓄積に関する実測データが得られ、将来の環境変動が炭素シークエストレーションにどのように影響するかをモデルによって検討することが可能となった。現在、炭素循環モデルとリモートセンシングを組み合わせた広域評価を進めており、それが完成すれば、北極陸上生態系研究全体に大きなインパクトを与えることができると期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. Yoshitake S., Uchida M., Ohtsuka T., Kanda H., Koizumi H. and, Nakatsubo T. Vegetation development and carbon storage on a glacier foreland in the High Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Science*, 査読有 5(3) 391-397, 2011. DOI: 10.1016/j.polar.2011.03.002
2. Fujiyoshi M., Yoshitake S., Watanabe K., Murota K., Tsuchiya Y., Uchida M. and Nakatsubo T. Successional changes in ectomycorrhizal fungi associated with the polar willow *Salix polaris* in a deglaciated area in the High Arctic, Svalbard. *Polar Biology*, 査読有 34, 667-673, 2011. DOI:10.1007/s00300-010-0922-9
3. Nakatsubo T., Fujiyoshi M., Yoshitake S., Koizumi H. and Uchida M. Colonization of the polar willow *Salix polaris* on the early stage of succession after glacier retreat in the High Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Research*, 査読有 29, 385-390, 2010. DOI: 10.1111/j.1751-8369.2010.00170.x
4. Yoshitake S., Uchida M., Koizumi H., Kanda H. and Nakatsubo T. Production of biological soil crusts in the early stage of primary succession on a High Arctic glacier foreland. *New Phytologist*, 査

読有 186, 451-460, 2010. DOI:10.1111/j.1469-8137.2010.03180.x

5. Uchida M., Kishimoto A., Muraoka H., Nakatsubo T., Kanda H. and Koizumi H. Seasonal shift in factors controlling net ecosystem production in a high Arctic terrestrial ecosystem. *Journal of Plant Research*, 査読有 123, 79-85, 2010. DOI 10.1007/s10265-009-0260-6
6. 中坪孝之・内田雅己・村岡裕由・野田響・吉竹晋平・内田昌男 (2008) 気候変動と高緯度北極陸上生態系 —炭素循環過程を中心に—. 総特集北半球高緯度海域における気候変動研究—Ⅲ 月刊地球, 査読無し 30 (5) : 240-250.
7. 内田昌男・内田雅己・熊田英峰・高橋善幸・大塚俊之・内海真生・近藤美由紀・中坪孝之・柴田康行 (2008) 気候変動と高緯度北極土壌圏—土壌有機炭素リザーバーへの温暖化影響. 総特集北半球高緯度海域における気候変動研究—Ⅲ 月刊地球, 査読無し 30 (5) : 216-229.

[学会発表] (計 31 件)

1. 内田雅己・中坪孝之 高緯度北極氷河後退域における植物の窒素安定同位体. 第33回極域生物シンポジウム, 2011年11月18日, 国立極地研究所
2. 和田直也・平尾章・蒲池浩之・内田雅己・中坪孝之 スパールバル諸島ニーオルスの氷河後退域に定着したキョクチャナギの個葉特性. 第33回極域生物シンポジウム, 2011年11月18日, 国立極地研究所
3. Nakatsubo T., Muraoka H. and Uchida M. Sensitivity of ecosystem carbon flow to climate change in a High Arctic glacier foreland. Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2) -Arctic System in a Changing Earth-, 7 December 2010, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo
4. Uchida M., Yoshitake S., Nakatsubo T. and Kanda H. Soil respiration in a glacier foreland in the High Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2) -Arctic System in a Changing Earth-, 7 December 2010, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo
5. Hayashi K., Hayatsu M., Morimoto S., Kishimoto (Mo W.) A., Motohka T., Uchida M. and Nakatsubo T. Features of nitrification and denitrification of an Arctic soil in Ny-Ålesund, Svalbard. Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2) -Arctic System in a Changing Earth-, 7 December 2010,

- Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo
6. Kishimoto (Mo W.) A., Hayashi K., Motohka T., Uchida M., Nakatsubo T. and Kanda H. Exchange of greenhouse gas fluxes in relation to vegetation coverage on a glacier foreland in the High Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2) -Arctic System in a Changing Earth-, 7 December 2010, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo
  7. Yoshitake S., Uchida M., Ohtsuka T., Kanda H., Koizumi H. and Nakatsubo T. Vegetation development and carbon storage on a glacier foreland in the High Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard. Second International Symposium on the Arctic Research (ISAR-2) -Arctic System in a Changing Earth-, 7 December 2010, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo
  8. 吉竹晋平・内田雅己・大塚俊之・神田啓史・小泉 博・中坪孝之 高緯度北極ニーオルスンの氷河後退域における植生発達と炭素貯蔵量の関係. 第32回極域生物シンポジウム, 2010年12月1日, 国立極地研究所
  9. 吉竹晋平・内田雅己・村岡裕由・小泉 博・中坪孝之 高緯度北極スヴァールバル諸島ニーオルスンの氷河後退域における一次遷移に伴う植生タイプ別純一次生産量の変化. 日本地球惑星科学連合2010年大会「北極域の科学」, 2010年5月27日, 幕張メッセ (千葉)
  10. 本岡 毅・内田雅己・岸本 (莫) 文紅・林 健太郎・村岡裕由・野田 響・中坪孝之・奈佐原顕郎 衛星リモートセンシングを用いた北極域スヴァールバル諸島の消雪時期と積雪開始時期の観測. 日本地球惑星科学連合2010年大会「北極域の科学」, 2010年5月27日, 幕張メッセ (千葉)
  11. 岸本 (莫) 文紅・林 健太郎・本岡 毅・内田雅己・中坪孝之・神田啓史 高緯度北極ニーオルスンの氷河後退域における温室効果ガスフラックス交換に及ぼす植生の影響. 日本地球惑星科学連合2010年大会「北極域の科学」, 2010年5月27日, 幕張メッセ (千葉)
  12. 藤吉正明・中坪孝之・室田憲一・吉竹晋平・内田雅己 北極圏氷河後退地におけるキョクチャナギの菌根形成と菌根菌の多様性. 日本生態学会第57回大会 (ESJ57), 2010年3月16日, 東京
  13. Nakatsubo T., Uchida. M., Muraoka H., Yoshitake S., Ohtsuka T., Koizumi H. and Kanda H. Succession and carbon cycle in a polar terrestrial ecosystem. The Xth SCAR International Biology Symposium, 26-31 July 2009, Sapporo
  14. 吉竹晋平・内田雅己・小泉 博・神田啓史・中坪孝之 高緯度北極ニーオルスンの氷河後退域における炭素循環に対する土壌クラストの影響. 日本地球惑星科学連合2009年大会「北極域の科学」, 2009年5月19日, 幕張メッセ (千葉)
  15. 内田雅己・村岡裕由・神田啓史・中坪孝之 高緯度北極氷河後退域の生態系炭素循環に対する温暖化の影響 II: 長期シミュレーション. 地球惑星科学連合2009年大会「北極域の科学」, 2009年5月19日 幕張メッセ (千葉)
  16. 中坪孝之 高緯度地域における菌根共生. 第120回日本森林学会大会シンポジウム 隠れた森の主役「菌根」: 各気候区分における菌根共生, 2009年3月28日, 京都
  17. Kondo M., Uchida M., Uchida M., Ohtsuka T., Yoshitake S., Kanda H., Koizumi H. and Nakatsubo T. Isotopic signatures of soil organic carbon and its relation to vegetation in a successional glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard. Arctic Science Summit Week (ASSW) 2009, 25 March 2009, Bergen, Norway
  18. 内田雅己・吉竹晋平・神田啓史・中坪孝之 高緯度北極における非維管束植物の光合成生産におよぼす温度の影響. 日本植物生理学会第50回大会シンポジウム 地球環境を紡ぐ好冷性生物の光合成—知られざる寒冷域の光合成—, 2009年3月23日, 名古屋
  19. 中坪孝之・藤吉正明・吉竹晋平・内田雅己 高緯度北極氷河後退域の遷移: キョクチャナギはなぜパイオニアになれないのか?. 日本生態学会第56回大会 (ESJ56), 2009年3月18日, 盛岡
  20. Yoshitake S., Uchida M., Koizumi H., Kanda H. and Nakatsubo T. (2009) Photosynthetic characteristics of biological soil crusts and effect of temperature increase in a High Arctic glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard. A3 Foresight program Gifu Sminar and 11th Takayama Seminar, February 2009, Gifu
  21. Uchida M., Yoshitake S., Nakatsubo T. and Kanda H. Effect of temperature on substrates utilization pattern by soil microorganisms on Ellesmere Island, High Arctic Canada. The 31th Symposium on Polar Biology, 4 December 2008, Tokyo
  22. Yoshitake S., Uchida M., Koizumi H., Kanda H. and Nakatsubo T. Photosynthetic characteristics of biological soil crusts in a High Arctic glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard. The 31th Symposium on Polar Biology, 4 December 2008, NIPR, Tokyo

23. Kan N., Uchida M., Koizumi H., Yoshitake S., Nakatsubo T. and Kanda H. CO<sub>2</sub> emission from plant litter during winter on a deglaciated area, Ny-Ålesund, Svalbard. First International Symposium on the Arctic Research (ISAR-1) -Drastic Change under the Global Warming-, 5-6 November 2008, Miraikan, Tokyo
24. Kondo M, Uchida M., Uchida M., Yoshitake S., Ohtsuka T. and Nakatsubo T. Elemental and isotopic signatures of soil organic carbon and its relation to vegetation in a successional glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard. First International Symposium on the Arctic Research (ISAR-1) -Drastic Change under the Global Warming-, 5-6 November 2008, Miraikan, Tokyo
25. Uchida M., Uchida M., Nakatsubo T. and Kanda H. Microbial activity and decomposition characteristics in a raised beach deposit under terrestrial vegetation on the high Arctic deglaciated area. First International Symposium on the Arctic Research (ISAR-1) -Drastic Change under the Global Warming-, 5-6 November 2008, Miraikan, Tokyo
26. Nakatsubo T., Muraoka H. and Uchida M. Response of net ecosystem production to climate change in a high Arctic glacier foreland: a model prediction. First International Symposium on the Arctic Research (ISAR-1) -Drastic Change under the Global Warming-, 5-6 November 2008, Miraikan, Tokyo
27. Kan N., Uchida M., Koizumi H., Yoshitake S., Nakatsubo T. and Kanda H. Estimation of CO<sub>2</sub> emission from plant litter during winter on a deglaciated area, Ny-Ålesund, Svalbard. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2008, 16-20 June 2008, Busan, Korea
28. 中坪孝之・村岡裕由・内田雅己 高緯度北極氷河後退域の生態系炭素循環に対する温暖化の影響. 地球惑星科学連合 2008 年大会「L173 北極域の科学」, 2008 年 5 月 30 日, 幕張メッセ (千葉)
29. 内田雅己・内田昌男・中坪孝之・神田啓史 Soil microbial respiration and decomposition characteristics in a raised beach deposit in the High Arctic. 地球惑星科学連合 2008 年大会「L173 北極域の科学」, 2008 年 5 月 30 日, 幕張メッセ (千葉)
30. 内田昌男・内田雅己・高橋善幸・中坪孝之 Radiocarbon based carbon source identification of soil respiration,

Spitsbergen Island in the Norwegian high Arctic. 地球惑星科学連合 2008 年大会「L173 北極域の科学」, 2008 年 5 月 30 日, 幕張メッセ (千葉)

31. 近藤美由紀・内田昌男・内田雅己・吉竹晋平・大塚俊之・中坪孝之 Elemental and isotopic signatures of soil organic carbon in a successional glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbards. 地球惑星科学連合 2008 年大会「L173 北極域の科学」, 2008 年 5 月 30 日, 幕張メッセ (千葉)

〔図書〕 (計 1 件)

1. 中坪孝之 北海道大学出版会 高緯度北極氷河後退域における遷移. 重定南奈子・露崎史朗 (編) 攪乱と遷移の自然史【「空き地」の植物生態学】, 2008, pp. 219-232.

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.hiroshima-u.ac.jp/gsbs/kenkyu\\_syokai/nakatsubo/index.html](http://www.hiroshima-u.ac.jp/gsbs/kenkyu_syokai/nakatsubo/index.html)

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/tsubo/arctic/arctic.html>

## 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

### (3) 連携研究者

内田 雅己 (UCHIDA MASAKI)

国立極地研究所・研究教育系・准教授  
研究者番号：70370096

(2008年度は分担研究者)

奈佐原 顕郎 (NASAHARA KENROU)

筑波大学・生命環境科学研究科・准教授  
研究者番号：40312813

村岡 裕由 (MURAOKA HIROYUKI)

岐阜大学・流域圏環境研究センター・教授  
研究者番号：20397318

大塚 俊之 (OHTSUKA TOSHIYUKI)

岐阜大学・流域圏環境研究センター・教授  
研究者番号：90272351

岸本 文紅 (KISHIMOTO AYAKA)

(独) 農業環境技術研究所・主任研究員  
研究者番号：60334033

神田 啓史 (KANDA HIROSHI)

国立極地研究所・名誉教授  
研究者番号：70099935

本岡 毅 (MOTOHKA TAKESHI)  
(独) 宇宙航空研究開発機構・研究員  
研究者番号：10625106

林 健太郎 (HAYASHI KENTARO)  
(独) 農業環境技術研究所・主任研究員  
研究者番号：70370294

和田 直也 (WADA NAOYA)  
富山大学・極東地域研究センター・教授  
研究者番号：40272893

平尾 章 (HIRAO AKIRA)  
筑波大学・菅平高原実験センター・研究員  
研究者番号：20447048

(4) 研究協力者

佐々木 晶子 (SASAKI AKIKO)  
広島大学・大学院生物圏科学研究科・助教

藤吉 正明 (FUJIYOSHI MASAOKI)  
東海大学・教養学部・准教授

吉竹 晋平 (YOSHITAKE SHINPEI)  
早稲田大学理工学術院・日本学術振興会特別研究員PD