

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 6月 5日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21310015

研究課題名（和文）北極土壌圏温暖化に伴う凍土融解と土壌微生物による化石炭素の分解促進に関する研究

研究課題名（英文）Study on fossil carbon dioxide release from soil in Arctic tundra ecosystem associated with global warming.

研究代表者

内田 雅己 (UCHIDA MASAKI)

国立極地研究所・研究教育系・助教

研究者番号：70370096

研究成果の概要（和文）：

ノルウェー北極のツンドラ生態系で土壌ガス中の¹⁴C年代を分析した結果、深さ30-40cmでは3000-7000年BPと推定された。先行研究で地質時代に生成された土壌有機炭素（化石炭素）が土壌微生物の細胞膜成分中に存在していることが明らかとなったが、本研究により、微生物の呼吸によって化石炭素はガス化し、土壌呼吸として放出されている可能性が明らかとなった。また、培養土壌から放出されるCO₂の温度依存性を考慮すると、化石炭素が全有機炭素の大部分を占める層位においても温度の上昇は化石炭素の分解を促進する可能性のあることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

To clarify possibility of fossil carbon decomposition in soil in Arctic tundra ecosystem, we collected soil gas CO₂ and determined its date in Spitsbergen Island, High Arctic Norway. Soil gas CO₂ collected from 30-40 cm depth from soil surface was dated on the age of 3,000-7,000 year BP. Our results suggested that CO₂ derived from fossil carbon contributes soil respiration and decomposition rate of the fossil carbon may be accelerated if soil temperature increase.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
2010年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：物質循環

1. 研究開始当初の背景

近年の北極海氷の急激な減少などは、目に見える温暖化現象として認知されている。陸域では積雪面積の減少が報告されており（Forster et al., 2007）、気温上昇に伴う氷河の後

退や永久凍土層の融解、生態系への様々な影響が懸念されている。特に土壌圏への影響に目を向けると、将来、土壌中に蓄積している炭素は気候変動により減少し、温暖化を加速させる正のフィードバックを起こすと予想

されている(Forster et al., 2007)。しかし、この予測には大きな不確実性がともなっており、土壌圏における炭素動態を解明することは、温暖化の将来予測における不確実性を小さくする重要な課題の一つとなっている。現在、土壌圏の炭素蓄積の多くは、北極・高緯度地域に集中し、その炭素量は、700 億トンにもなり、人為的に排出される年間炭素量のおよそ 10 倍である。これらの炭素は、地質時代を通じて長期間に渡って堆積した大量の化石化した有機炭素を含む凍土から構成されている。これらの有機炭素を大量に含んだ地層の多くは、これまでの安定した気候のもとでは氷河・氷床に覆われ、永久凍土という低温かつ嫌氣的な状態で、過去 1 万年の温暖な間氷期であっても長期に安定に存在してきた。しかし、今世紀末の温暖化による気温上昇は、最大 6.5°C にも達すると試算されており(IPCC, 2007)、このような急激な温暖化は、気候変動に脆弱な炭素リザーバーを容易に不安定化させ、温暖化を加速させる正のフィードバックを引き起こすトリガーとなりうる懸念される。しかしながら、凍土中の有機炭素の総量や組成といった、基礎的なデータすら未だ正確な把握が難しいなか、凍土の融解にともなう化石化した有機炭素の動態に関する知見は無い。

温暖化がこれらの土壌圏炭素リザーバーにもたらす影響の一つのシナリオは、温暖化の進行に伴い、これらまで比較的安定に存在してきた土壌有機物が、酸化・湿潤環境に曝された結果、容易に分解されてしまい、正のフィードバック効果をもたらすことであろう。低温条件下での微生物による有機物分解は、難分解性の有機物ほど、温度変化に対して敏感である(温度依存性が高い)との報告もあり(Davidson & Janssens, 2006)、高緯度域土壌圏炭素蓄積量の変化とそのメカニズムについて詳細な研究が急務とされている。

2. 研究の目的

地質時代に生成した土壌有機炭素(化石炭素)は、凍土中に大量に蓄積されている。このような環境は、北極高緯度域土壌圏において一般的であり、最近急速に温暖化の影響を受けつつある。特に冬季の気温上昇は、凍土層の崩壊を引き起こし、土壌呼吸量の増加という形で表れている。本課題では、先行研究で得られた微生物による化石炭素の資化に関する証拠を踏まえ、化石炭素の分解に関する情報の取得を目指す。加えて、化石炭素が多く含まれる土壌層における温度依存性についても検討し、化石炭素分解量の変動についても考察する。

3. 研究の方法

本研究は、北極海スバル諸島スピ

ツベルゲン島ニーオルスンで行った。ニーオルスンの西側には、東ブレッガー氷河がある。この氷河は、1936 年以降は後退していることが航空写真により明らかとなっており、近年は年 10m 以上の速度で後退していることが観測されている。本研究では、この東ブレッガー氷河後退域のツンドラ生態系を調査対象地に選定した。

深度ごとに土壌を採取したのち、土壌有機炭素、ブラックカーボン、放射性炭素、安定同位体比分析に基づく土壌有機炭素の分析を行い、それぞれの空間分布に関するキャラクターゼーションを行った。さらに深さ 20cm までについては、クローンライブラリー法を用いて微生物相を調査した。

土壌から放出されている二酸化炭素(CO₂)に含まれる炭素の起源としては、動植物バイオマス由来の有機炭素や土壌内化石炭素由来が考えられる。本研究では、土壌内 CO₂ の同位体分析を行い、CO₂ に含まれる炭素の年代測定を行った。

4. 研究成果

土壌表層から 60cm までの深さにおける全有機炭素量、有機炭素の生成年代、ブラックカーボン量、および全有機炭素量とブラックカーボンのδ13C 値の結果を図 1 に示した。全有機炭素量は 10cm 深で最も高くなった。40cm 以深では、全有機炭素量含有率は減少したものの、検出可能なレベルだった。炭素年代は、表層付近でも数千年以前という結果が得られ、深さ 40cm では 3 万年ほど前に生成された有機物であることが示唆された。ブラックカーボンは、30cm 以深で割合が低くなったものの、値の大きな変動は認められなかった。全有機炭素とブラックカーボンのδ13C 値は、全有機炭素が低めの値を示したものの、深さに対する挙動は類似していた。

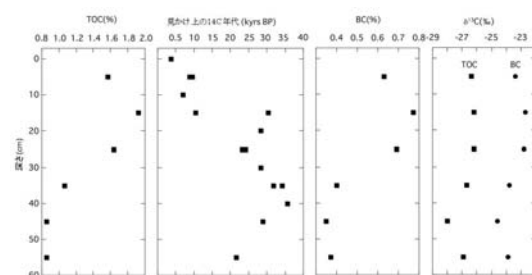


図 1. 各土壌深度における全有機炭素量(TOC)、¹⁴C年代、ブラックカーボン量(BC)およびδ13C値

土壌有機炭素中に占める化石炭素の割合を推定した結果(図 2)、表層土壌においても 50%以上は化石炭素に占められていることが推察された。30cm 以深では全有機炭素中の 9 割以上が化石炭素であると推定され、本

地域においては、化石炭素は有機炭素の重要な構成要素であることが明らかとなった。

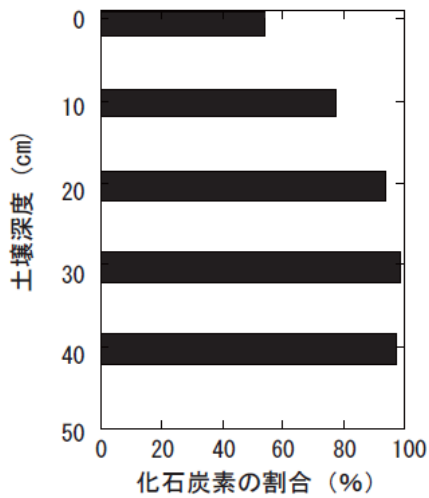


図 2. 各土壌深度の有機炭素に占める化石炭素の割合

30cm 深と 40cm 深において採取した土壌内 CO₂ の濃度、¹⁴C 年代、 $\delta^{13}C$ 値の結果を図 3 に示した。土壌内 CO₂ の起源としては、土壌微生物による土壌有機物の分解と植物の根呼吸があげられる。本調査地点では、植物体の根のほとんどは表層 10cm 以浅までに存在していることを現地調査から確認している。したがって、土壌 10cm 以深の CO₂ の起源は主に微生物呼吸によるものと考えられる。永久凍土の融解による凍土から脱ガスした CO₂ の寄与も考えられるが、本観測を行った 8 月はすでに融解層の発達小さい時期であることから、脱ガスの影響は大きくないと考えられる。土壌内 CO₂ の濃度と $\delta^{13}C$ 値は、30cm 深において、3.6%~5.4%、-16.1‰~-15.5‰、40cm 深において、3.9%~4.1%、-17.6‰~-15.6‰であった。一方、土壌内 CO₂ の ¹⁴C 年代は、3000-7000 年 (30cm 深)、3000-6000 年 (40cm 深) と古く、化石炭素の微生物による分解が示唆された。すなわち、本結果は地質年代から土壌に隔離・蓄積されてきた炭素が現在大気に放出されていることを示している。

化石炭素の存在形態の一つとして、難分解性のブラックカーボンが考えられる。ブラックカーボンの起源となる化学種としては、有機物の燃焼により生成される charcoal や soot のような難分解性の炭素系物質と火成作用などの地質過程で生成されるグラファイト様炭素系物質が考えられる。図 1 に見られるように、ブラックカーボンは表層から 60cm 深まで 0.7%~0.4% とその割合に大きな変動は見られなかった。ブラックカーボン量/全有機炭素量は約 40% 前後であり、この割合は、北東部北太平洋ワシントンマージンの大陸

棚から海盆にかけて得られた結果 (ブラックカーボン量/全有機炭素量: 2%~6%) と比べ大きい。ブラックカーボンの $\delta^{13}C$ 値は、-22.7‰~-23.9‰であった。これは、東部北太平洋ワシントンマージンでのグラファイト様炭素系物質由来ブラックカーボンの $\delta^{13}C$ 値 (-19‰~-24‰) と整合的だった。本サイトの土壌生成には、氷河作用による風化作用の影響が大きいと予想されるので、燃焼起源のグラファイト様炭素系物質というよりは、地質過程で生成されるグラファイト様炭素系物質の寄与が高いのではないかと考えられる。このことは、本サイトのグラファイト様炭素系物質の ¹⁴C が測定できれば明らかにできる。地表面下 20cm の層位については、先行研究により、海生の貝化石が含まれていたことが明らかとなっている。本研究では、この層の 90% 以上の有機炭素は化石炭素からなることが明らかとなった (図 2)。この層の微生物相を調査した結果、原核生物では、バクテロイデス門、ベータプロテオバクテリア門、デルタプロテオバクテリア門、ニトロスピラ門、真核生物では子のう菌や担子菌などが多く検出された。これらの中に化石炭素を分解する微生物が含まれている可能性もあるが、本サイトが海底もしくは海岸付近だった頃に堆積した微生物の遺伝子も検出している可能性があるため、今後さらに詳細に調査する必要がある。

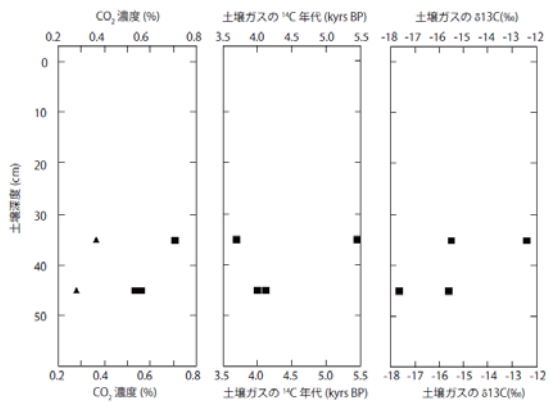


図 3. 30cm および 40cm 深における土壌ガスに含まれる CO₂ 濃度、¹⁴C 年代および $\delta^{13}C$

本サイトにおける土壌呼吸速度は、地表面下 1cm の土壌温度との間に、比較的高い正の相関が確認されている (Bekku et al., 2004)。これは土壌表層付近の CO₂ 放出が土壌呼吸速度に大きく寄与していることを示唆している。土壌の重量あたりの呼吸速度は、土壌深層になるにつれて有機炭素量が減少するために、同じ温度では小さくなる。しかしながら、土壌深層でも CO₂ 放出は認められたことや、実際に土壌深層のガス中には、生成年代の古い炭素を含んだ CO₂ が今回新たに確認さ

れたことから、化石炭素の分解にともない、これまでに考慮されてこなかった新たなCO₂のソースの存在が確認された。

鉱質土壌表面、10cm 深および 20cm 深の土壌から放出されるCO₂の温度依存性を調査した結果、土壌深度が深くなるにつれて土壌呼吸速度の温度依存性は若干ではあるものの高くなる傾向が認められた。土壌圏が温暖化する場合は、土壌深度が増すに従って温暖化の影響は小さくなる。しかしながら、土壌呼吸速度は温度変化に対してより敏感に応答する可能性があるため、土壌圏の温暖化は、化石炭素の分解を促進させる可能性が考えられた。

スピッツベルゲン島のロングイヤーピンでは、1990年代後半から特に冬期の気温の上昇が観測されている。本サイトにおいても、冬期の土壌温度は上昇傾向にあることが認められている。近年、氷点下においても土壌からのCO₂放出は報告されていることから、今後は、氷点下における化石炭素の分解やその温度依存性についても明らかにする必要がある。

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 6 件)

- ① 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* 123, 79-85, 2010, DOI: 10.1007/s10265-009-0260-6, 査読有り
- ② 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* 186: 451-460, 2010, DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03180.x, 査読有り
- 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* 29: 385-390, 2010, DOI: 10.1111/j.1751-8369.2010.00170.x, 査読有り
- ④ 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* 34: 667-673, 2011, DOI: 10.1007/s00300-010-0922-9, 査読有り

- ⑤ Inoue T., Kudoh S., Inoue M., Uchida M., Kanda H. Three lecideoid lichens new to Svalbard, Norway. *Polar Science* 4: 588-592, 2011, DOI: 10.1016/j.polar.2010.10.001, 査読有り
- ⑥ 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* 5: 391-397, 2011, doi:10.1016/j.polar.2011.03.002, 査読有り

[学会発表] (計 32 件)

- ① 菅尚子, 内田雅己, 小泉博, 神田啓史
Winter CO₂ efflux from snow surface on the high Arctic glacier foreland, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月19日, 千葉幕張メッセ
- ② 内田雅己, 村岡裕由, 神田啓史, 中坪孝之,
The impact of climatic warming on the ecosystem carbon cycle of a high Arctic glacier foreland II: long-term simulation, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月19日, 千葉幕張メッセ
- ③ 井上武史, 工藤栄, 内田雅己, 神田啓史,
Photosynthetic characteristics of lichens growing in a high arctic glacier foreland, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月19日, 千葉幕張メッセ
- ④ 近藤美由紀, 内田昌男, 内田雅己, 大塚俊之, 吉竹晋平, 小泉博, 中坪孝之, Isotopic Signatures of Soil Organic Carbon in a Successional Glacier Foreland in Ny-Ålesund, Svalbard, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月19日, 千葉幕張メッセ
- ⑤ 吉竹晋平, 内田雅己, 小泉博, 神田啓史, 中坪孝之, Contribution of biological soil crusts to the terrestrial carbon cycle in a High Arctic glacier foreland in Ny-Alesund, Svalbard, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 2009 年 5 月 19 日, 千葉幕張メッセ
- ⑥ 内田昌男, 内田雅己, 近藤美由紀, 柴田康

- 行, Evidence of Heterotrophic Microbial Decomposition of Soil Ancient Carbon in the Glacier Retreat, Svalbard, Norway Arctic, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 2009年5月19日, 千葉幕張メッセ
- ⑦ Uchida M., Yoshitake S., Nakatsubo T. and Kanda H., Effect of temperature and ecosystem development on substrates utilization pattern by soil microorganisms on Ellesmere Island, High Arctic Canada, 10th SCAR International Biology Symposium, 2009年7月30-31日, 北海道大学
- ⑧ Nakatsubo T., Uchida M., Muraoka H., Yoshitake S., Ohtsuka T., Koizumi H., Hiroshi Kanda, Succession and carbon cycle in a polar terrestrial ecosystem, 10th SCAR International Biology Symposium, 2009年7月30-31日, 北海道大学
- ⑨ Inoue T., Kudoh S., Uchida M., Kanda H., Photosynthetic characteristics of lichens growing on a glacier foreland, in Ny-Ålesund, Spitsbergen, Norway, 10th SCAR International Biology Symposium, 2009年7月30-31日, 北海道大学
- ⑩ Masumoto S., Uchida M., Tojo M., Kanda H., Imura S., Effect of tar spot disease on photosynthetic activity of *Salix polaris* in Spitsbergen Island Norway, 地球惑星科学連合2010年大会, 2010年5月27日, 千葉, 幕張メッセ
- ⑪ Kishimoto A., Hayashi K., Motohka T., Uchida M., Nakatsubo T., Kanda H., Greenhouse gas fluxes in relation to vegetation coverage on a glacier foreland in the high Arctic, Ny-Ålesund, 地球惑星科学連合2010年大会, 2010年5月27日, 千葉, 幕張メッセ
- ⑫ Yoshitake S., Uchida M., Muraoka H., Koizumi H., Nakatsubo T., Changes in net primary production along primary succession on a High Arctic glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard, 地球惑星科学連合2010年大会, 2010年5月27日, 千葉, 幕張メッセ
- ⑬ Motohka T., Uchida M., Kishimoto A., Hayashi K., Muraoka H., Noda H., Nakatsubo T., Nasahara K.N., Satellite remote sensing of snow cover dynamics in Svalbard, Norwegian Arctic, 地球惑星科学連合2010年大会, 2010年5月27日, 千葉, 幕張メッセ
- ⑭ Masumoto S., Uchida M., Tojo M., Imura S., Effect of tar spot on photosynthetic activity of polar willow in Ny-Ålesund, Svalbard, 第32回極域生物シンポジウム, 2010年12月1日, 東京都, 国立極地研究所
- ⑮ Yoshitake S., Uchida M., Ohtsuka T., Kanda H., Koizumi H., Nakatsubo T., Relationship between vegetation development and carbon storage on a glacier foreland in the High Arctic, Ny-Ålesund, Svalbard, 第32回極域生物シンポジウム, 2010年12月1日, 東京都, 国立極地研究所
- ⑯ Kan N., Uchida M., Yoshitake S., Koizumi H., Kanda H., Imura S., CO₂ emission from plant litter and subsurface soil under low temperatures in Ny-Ålesund, Svalbard, 第32回極域生物シンポジウム, 2010年12月1日, 東京都, 国立極地研究所
- ⑰ Osono T., Ueno T., Uchida M., Kanda H., Abundance and diversity of fungi in relation to chemical changes in Arctic moss profiles. Second International Symposium on the Arctic Research, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ⑱ Kishimoto A., Hayashi K., Motohka T., Uchida M., Nakatsubo T., 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, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ⑲ Yoshitake S., Uchida M., Ohtsuka T., Kanda H., Koizumi H., 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, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ⑳ Uchida M., Yoshitake S., Nakatsubo T., Kanda H., Soil respiration in a glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard, Second International Symposium on the Arctic Research, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ㉑ Hayashi K., Hayatsu M., Morimoto S., Kishimoto A., Motohka T., Uchida M.

- Nakatsubo T., Features of nitrification and denitrification of an Arctic soil in Ny-Ålesund, Svalbard., Second International Symposium on the Arctic Research, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ②② Tanabe Y., Uchida M., Photosynthetic characteristics of vascular plants under primary succession stages in a high Arctic glacier foreland, Svalbard, Second International Symposium on the Arctic Research, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ②③ Nakatsubo T., Muraoka H., Uchida M., Sensitivity of ecosystem carbon flow to climate change in a high Arctic glacier foreland, Second International Symposium on the Arctic Research, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ②④ Masumoto S., Uchida M., Tojo M., Imura S., Effect of tar spot disease on photosynthesis of *Salix polaris* in Ny-Ålesund, Norwegian high Arctic, Second International Symposium on the Arctic Research, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ②⑤ Uchida M., Uchida M., Utsumi M., Kondo M., Takahashi Y., Shibata Y., The heterotrophic respiration using old carbon in Arctic soil: insights from compound-specific radiocarbon analysis, Second International Symposium on the Arctic Research, 2010年12月7日, 東京, 一ツ橋記念講堂
- ②⑥ 内田雅己, 吉竹晋平, 小泉博, 神田啓史, 中坪孝之, Photosynthetic characteristics and net production of biological soil crusts on a glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard, Science Symposium of Arctic Science Summit Week 2011, 2011年3月29日, COEX, ソウル, 韓国
- ②⑦ Kondo M., Uchida M., Uchida M., Ootsuka T., Yoshitake S., Kanda H., Koizumi H., Nakatsubo T., Shibata Y., Isotopic signatures of soil organic carbon and its relation to vegetation in a successional glacier foreland in Ny-Ålesund, Svalbard, 10th Ny-Ålesund Seminar 25 October, 2011, Kjeller, Norway
- ②⑧ Uchida M., Kondo M., Uchida M., Takahashi Y., Utsumi M., Kumata H., Shibata Y., Evidence of Heterotrophic Microbial Decomposition of Preaged Carbon in Arctic soil; Insights from molecular level natural radiocarbon analysis of phospholipid fatty acids (PLFAs), 10th Ny-Ålesund Seminar 25 October, 2011, Kjeller, Norway
- ②⑨ Uchida M., Nakatsubo T., Nitrogen isotope variability in plant species on glacier foreland in the High Arctic, 第33回極域生物シンポジウム, 2011年11月18日, 東京都, 国立極地研究所
- ③⑩ Kan N., Uchida M., Imura S., Mycoflora of plant litter collecting in winter in Ny-Ålesund, Svalbard, 第33回極域生物シンポジウム, 2011年11月18日, 東京都, 国立極地研究所
- ③⑪ Inoue T., Kudoh S., Uchida M., Tanabe., Kosugi M., Inoue M., Kanda H., Photosynthetic responses to water and light on Arctic lichens and their photobionts, The 5th EAFES International Congress, 2012年3月18日, 滋賀, 龍谷大学
- ③⑫ 内田雅己, 北極における生態学研究, 日本生態学会第59回大会, 2012年3月17日, 滋賀, 龍谷大学

[その他]
ホームページ等

<http://www.nipr.ac.jp/soran/pin.php?nid=70370096>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 雅己 (UCHIDA MASAKI)
国立極地研究所・研究教育系・助教
研究者番号：70370096

(2) 研究分担者

内田 昌男 (UCHIDA MASAO)
独立行政法人国立環境研究所・化学環境研究領域・主任研究員
研究者番号：50344289

(3) 連携研究者

近藤 美由紀 (KONDO MIYUKI)
独立行政法人国立環境研究所・化学環境研究領域・NIES ポスドクフェロー
研究者番号：30467211
(H21-22:研究分担者)