

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H05622

研究課題名(和文)北極ツンドラ生態系における土壌CO<sub>2</sub>フラックスの冬期の動態解明と年間の高精度推定研究課題名(英文)Clarification of winter dynamics of soil CO<sub>2</sub> fluxes in the Arctic tundra ecosystem and their estimation throughout the year.

研究代表者

内田 雅己 (Masaki, Uchida)

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,660,000円

研究成果の概要(和文)：北極ツンドラ生態系の土壌中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度の通年観測を行い、冬期、土壌温度が氷点下になっているにも関わらず、CO<sub>2</sub>濃度はダイナミックに変化していた。その要因として Rain-on-Snow(ROS)イベントの関与が本研究で始めて明らかになった。土壌からのCO<sub>2</sub>放出に与える rain-on-snow の影響を評価したところ、2016年から2017年にかけての冬期の場合、CO<sub>2</sub>放出量を1割上昇させていると推定された。年間の土壌CO<sub>2</sub>フラックスの高精度推定のため、本研究により新たにモデルを構築したが、ROSや融雪時期のフラックス推定には新たなCO<sub>2</sub>動態メカニズムを組み込む必要性が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、土壌中の二酸化炭素濃度は、土壌が凍結している冬期において、大きく変動していることを初めて明らかにした。その変動の要因として、マイナスの温度域からプラスの温度域にまで上昇する急激な温度変化が考えられた。この温度変化の際には降雨が見られるため、北極域ではRain-on-Snow(ROS)イベントとして知られている。このROSイベントにより、地表面に氷の層が形成され、トナカイがエサを食べられなくなることが問題となっている。本研究において、ROSが土壌からのCO<sub>2</sub>放出量を増加させることが示唆されたことから、炭素循環の視点からも重要なイベントであることを本研究で初めて示すことができた。

研究成果の概要(英文)：We conducted year-round observations of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentrations in the soil in a high Arctic tundra ecosystem and found that CO<sub>2</sub> concentrations changed dynamically during the winter, even though the soil was freezing. The involvement of Rain-on-Snow (ROS) events on soil CO<sub>2</sub> concentration was revealed for the first time in this study. The impact of rain-on-snow on CO<sub>2</sub> flux from the soil was estimated to be increased CO<sub>2</sub> emissions by 10% in the case of the winter season from 2016 to 2017. A new model was constructed by this study for an estimation of annual soil CO<sub>2</sub> flux. It became clear that new mechanisms of CO<sub>2</sub> dynamics need to be incorporated into the model to improve soil CO<sub>2</sub> flux estimation.

研究分野：生態学

キーワード：極地

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

北極域は最終氷期以降、寒冷のため生産量が少ないものの、微生物による分解も遅いため、土壌中には  $280 \times 10^{15} \text{g}$  もの有機炭素が蓄積されている (McGuire et al. 1995)。この有機炭素が温暖化による微生物活性の上昇により分解されて温室効果ガスである二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) が大量に放出され、そのことがさらなる温暖化を引き起こすことが懸念されている (Mark et al. 2004)。その一方で、北極域の土壌圏から放出される  $\text{CO}_2$  (土壌  $\text{CO}_2$  フラックス) の観測においては、冬期間の低温での観測が困難なことや微生物活動が休止していると考えられていたことから、近年までほとんど行われてこなかった (Christensen et al. 1998)。しかしながら、最近の測定機器やバッテリーの高性能化により、冬期の土壌  $\text{CO}_2$  フラックスの測定が可能となり始めた。その結果、冬期期間中でも土壌  $\text{CO}_2$  フラックスは検出され、土壌呼吸量を積算すると最大で年間の3割にも達するという報告も出始めた (Elberling 2007)。生態系純生産量が少ない北極では、冬期の土壌呼吸量次第で炭素収支が大きく変化する可能性があるため、精度の高い測定が求められる。しかしながら、現在行われている冬期の土壌  $\text{CO}_2$  フラックス測定の多くは、商用電源が無い場所で実施されるため、一時的な測定値を用いて期間全体を推定するのがほとんどである。そのため、推定誤差が大きく、変動要因についても不明な点が多い。さらに近年、異常気象により、冬期にも関わらず気温が  $0$  度以上となり雨の降る現象が観測され始めている。降水は地表面で氷の層を形成することが知られている。この氷の層は土壌からの  $\text{CO}_2$  放出を妨げる可能性がある。本申請課題は冬期に土壌中の  $\text{CO}_2$  濃度を連続的に測定することで、土壌中の  $\text{CO}_2$  濃度の通年測定を目指す。この試みは北極域においては初めて実施される画期的な観測である。

### 2. 研究の目的

北極陸上生態系の土壌表面から放出される二酸化炭素 (土壌  $\text{CO}_2$  フラックス) は、温暖化によって地球規模の炭素循環に正のフィードバックを引き起こす重要因子の一つと考えられている (Luo 2007)。しかしながら、年放出量の推定精度は未だに低い。その理由として、一年の半分以上を占める冬期に土壌  $\text{CO}_2$  フラックスの連続測定を行うことが困難なためである。本申請課題では、国際共同研究をバックグラウンドに、冬期を含めた土壌中の  $\text{CO}_2$  濃度の連続観測を北極域で初めて実施する。さらに、リターバックを用いた野外実験と室内実験による土壌培養のデータと組み合わせ、土壌  $\text{CO}_2$  フラックスを高精度に推定するためのモデルを構築する。

### 3. 研究の方法

ノルウェー・スバル諸島・ニーオルスン (北緯  $78.9$  度、東経  $11.8$  度) の Bayelva に機器を設置した。この場所は、中央部が盛り上がるタイプの構造土により構成されており、構造土の辺縁部には、カギハイゴケ、イワダレゴケ、フトヒモゴケなどの蘚類やキョクチャナギ、ジンヨウスイバ、チョウノスケソウなどの維管束植物が見られた。一方、中央部は植物の侵入は認め

られず、裸地もしくはバイオリジカルソイルクラストに覆われていた。トナカイやホッキョクグマによる機器の損壊やケーブルの破断を避けるため、野外に設置する機器については1993年に設置された10m四方の木製の柵内とした。

2016年夏期にバイサラ社製のCO<sub>2</sub>センサーを地表面、地表面から5cm、10cm、20cmおよび50cmの深さにセットした。その際、CO<sub>2</sub>センサーをセットした同じ層位に温度センサーも埋設した。土壌水分センサーについては、5cm、20cmおよび50cmの深さにセットした。一方、地上の気象についてもバイサラ社の総合気象センサーを設置し、気温、気圧、風向、風速および降雨の観測を行った。全てのセンサーはキャンベル社のデータロガーに接続し、データを保存した。データの記録間隔は1時間毎とした。土壌からのCO<sub>2</sub>放出速度とその温度依存性を明らかにするために、現地の土壌を採取して日本に持ち帰ったのち、低温インキュベーターで温度を一定にした状態で、-7 ~ +15 の範囲におけるCO<sub>2</sub>放出速度を測定した。

土壌CO<sub>2</sub>フラックスを推定するためのモデル式は鉛直1次元拡散モデルを構築した。パーティクルフィルターで複雑な時間発展システムを解析した。

#### 4. 研究成果

調査地の地表面温度の季節変化を図1に示す。2016年7月の測定開始時には10前後を示した。8月に入ると下降傾向となり、8月下旬から時折氷点下となり始めた。10月まではプラスとマイナスを行き来していたが、11月に入るとマイナスの温度が連続するようになった。2016年12月、2017年1月と2月に温度が上昇し、0もしくは0近くまで上昇する 때가認められた。2月に0となつて以降は雪解け時期である6月までマイナスの温度を維持した。

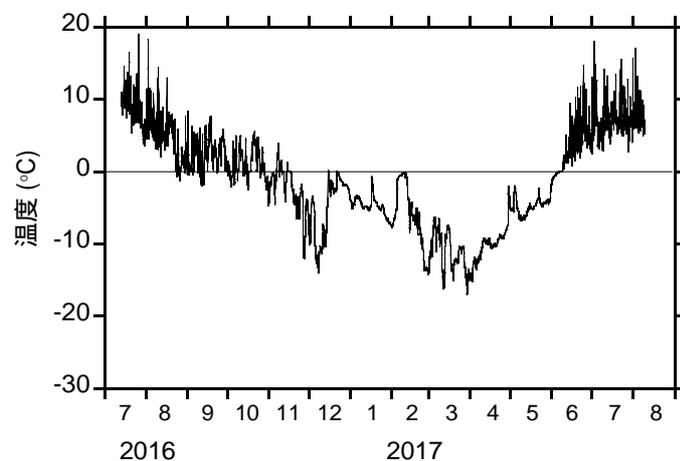


図1. 地表面温度の季節変化

地表面におけるCO<sub>2</sub>濃度の変化を図2に示す。夏の期間は400ppmを維持していた。2016年11月の凍結融解が生じていた際にCO<sub>2</sub>濃度が一時的に高くなる事が認められた。その後、再びCO<sub>2</sub>濃度は安定していたが、12月の地表面温度の上昇した際に、地表面のCO<sub>2</sub>

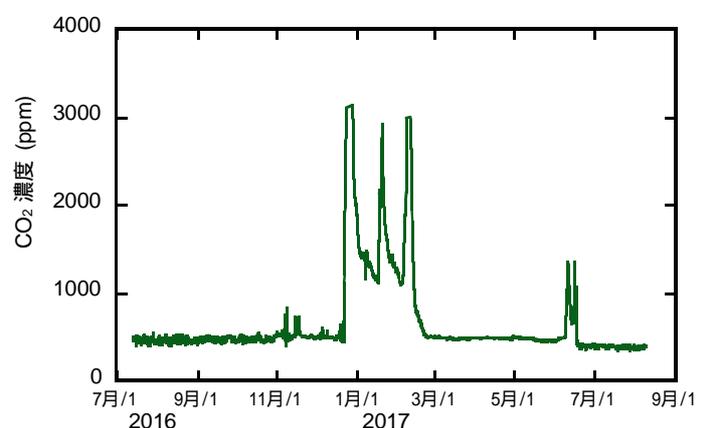


図2. 地表面におけるCO<sub>2</sub>濃度の変化

濃度は急激に上昇し、CO<sub>2</sub> センサーの検出限界である 3000ppm を上回った。同様の CO<sub>2</sub> 濃度の変化は、2017 年 1 月と 2 月にも認められた。その後は雪解け時期まで CO<sub>2</sub> 濃度に大きな変化は認められなかった。深い層（20cm 深）では異なった CO<sub>2</sub> 濃度の動きが認められた（図 3）。2016 年 7 月における CO<sub>2</sub> 濃度は地表面付近よりも高濃度であり、時には 1000ppm を

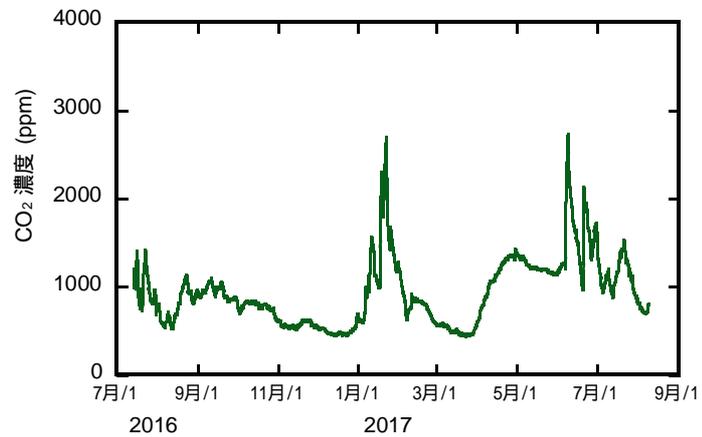


図 3 . 20cm 深における CO<sub>2</sub> 濃度の変化

超えていた。8 月以降の CO<sub>2</sub> 濃度は下降傾向となったが、12 月末頃から CO<sub>2</sub> 濃度は上昇に転じ、2017 年 1 月には 2000ppm を超えた。その後 3 月過ぎまでは CO<sub>2</sub> 濃度は低下する傾向が認められたものの、再度上昇に転じ、雪解け時期には再び 2000ppm を超える CO<sub>2</sub> 濃度が認められた。本研究では各土壌層の CO<sub>2</sub> 濃度の変化を捉えているが、土壌温度が氷点下となる冬期期間中において、CO<sub>2</sub> 濃度がダイナミックに変動することを始めて捉えることに成功した。地表面の CO<sub>2</sub> 濃度については、冬期期間中に急激な上昇が 3 回認められたが、その時は地表面温度が急激に上昇したときといずれも重なっていた。さらに、温度上昇の際に降雪では無く、降雨が認められた。実際、地表面の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇と、地表面の温度との間には正の相関が認められた。氷点下の温度域において、土壌呼吸速度の温度依存性は高くなることが報告され(Morgner et al. 2010)、また、土壌微生物や蘚苔類などにおいても、氷点下で活性のあることが報告されている(Longton 1988、Clein and Shimel 1995)。このため、氷点下での温度の上昇においても、土壌微生物や蘚苔類からの CO<sub>2</sub> 放出され、この CO<sub>2</sub> 濃度の急激な上昇に寄与している可能性がある。一方で、20cm 深については、2017 年 1 月に CO<sub>2</sub> 濃度の急激な上昇が生じた際に、土壌温度の上昇は認められるたが、その変化はそれほど大きくなかった。このことは、土壌中の CO<sub>2</sub> 濃度の変化に、生物による CO<sub>2</sub> 放出以外に、土壌層内での CO<sub>2</sub> の移動が生じている可能性も考えられた。積雪期間中の氷点下の気温がプラスの温度となる急激な温度上昇の際には、降雨も認められており、rain-on-snow という現象として呼ばれている。この現象により、地表面に氷の層が形成される。トナカイはこの氷の層の形成により、エサへのアクセスが困難になることが指摘されている(Serreze et al. 2021)。本研究では、積雪や rain-on-snow による氷の層の影響を考慮できていないため、土壌表面から大気圏へ実際に放出される量は少なくなる可能性がある。一方、融雪期については、土壌中の CO<sub>2</sub> 濃度の上昇が認められ、それに基づいて計算された CO<sub>2</sub> フラックスはかなり高い値を示した。しかしながら、融雪時期の土壌には雪の融解により水が連続的に供給され、水で飽和し、その水が移動している状態である。このことは大気中への CO<sub>2</sub> 放出に影響している可能性がある。

今回新たに確認された、冬期、土壌温度が氷点下になっているにもかかわらず、CO<sub>2</sub> 濃度がダイナミックに変化していること、その要因として rain-on-snow の関与の可能性が本研究で始めて明らかになった。室内実験で得られた温度 - 呼吸曲線と現地で観測した土壌温度から、土壌か

らの CO<sub>2</sub> 放出に与える rain-on-snow の影響を評価したところ、2016 年から 2017 年にかけて冬期の場合は、CO<sub>2</sub> 放出量を 1 割上昇させていた可能性が明らかとなった。このことや野外における CO<sub>2</sub> 濃度の変化の結果から、rain-on-snow は冬期の土壌中の CO<sub>2</sub> 動態に影響を及ぼしていることも今回の研究で始めて明らかとなった。

冬期の土壌からの CO<sub>2</sub> 放出については、その存在は指摘されているが、冬期を通して測定するのは困難なため、研究例は著しく乏しい。本研究では、夏期の CO<sub>2</sub> 放出量は、年間の 6-8 割程度と推定された。しかしながら、今回構築したモデルでは冬期の rain-on-snow および積雪の融解時期における CO<sub>2</sub> 濃度の変動を再現することが困難だった。この原因として、現時点で組み込んでいないものの、CO<sub>2</sub> フラックスに影響するメカニズムの存在が考えられる。今後も研究を継続・発展させ、新たな現象が明らかとなった冬期の土壌炭素動態を解明する必要がある。

## 引用文献

- Christensen TR, Jonasson S, Michelsen A, Callaghan TV, Havström M (1998) Environmental controls on soil respiration in the Eurasian and Greenlandic Arctic, *J. Geophys. Res.*, 103: 29015- 29021.
- Clein JS, Schimel JP 1995 Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 1231-1234.
- Elberling B (2007) Annual soil CO<sub>2</sub> effluxes in the High Arctic: The role of snow thickness and vegetation type. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 646-654.
- Longton RE (1988) *Biology of polar bryophytes and lichens*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Luo Y (2007) Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 38: 683-712.
- Mack M, Schuur E, Bret-Harte M et al. (2004) Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization. *Nature* 431: 440-443.
- McGuire AD, Melillo JM, Kicklighter DW, Joyce LA (1995) Equilibrium responses of soil carbon to climate change: Empirical and process-based estimates. *Journal of Biogeography*, 22: 785-796.
- Morgner E, Elberling B, Strebel D, Cooper EJ (2010) The importance of winter in annual ecosystem respiration in the High Arctic: effects of snow depth in two vegetation types. *Polar Research* 29: 58-74.
- Serreze MC et al. (2021) Arctic rain on snow events: bridging observations to understand environmental and livelihood impacts. *Environ. Res. Lett.* 16 105009.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hirawake Toru, Uchida Masaki, Abe Hiroto, Alabia Irene D., Hoshino Tamotsu, Masumoto Shota, Mori Akira S., Nishioka Jun, Nishizawa Bungo, Ooki Atsushi, Takahashi Akinori, Tanabe Yukiko, Tojo Motoaki, Tsuji Masaharu, Ueno Hiromichi, Waga Hisatomo, Watanabe Yuuki Y., Yamaguchi Atsushi, Yamashita Youhei	4. 巻 27
2. 論文標題 Response of Arctic biodiversity and ecosystem to environmental changes: Findings from the ArCS project	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100533 ~ 100533
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2020.100533	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Masumoto Shota, Tojo Motoaki, Imura Satoshi, Herrero Maria Luz, Uchida Masaki	4. 巻 41
2. 論文標題 Occurrence pattern of the parasitic fungus Rhytisma polare (Ascomycota) on the polar willow (Salix polaris) under limited water conditions in a high-Arctic semi-desert	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polar Biology	6. 最初と最後の頁 1105 ~ 1110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00300-018-2269-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Yoshitake Shinpei, Uchida Masaki, Imura Yasuo, Ohtsuka Toshiyuki, Nakatsubo Takayuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Soil microbial succession along a chronosequence on a High Arctic glacier foreland, Ny-Alesund, Svalbard: 10 years' change	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 59 ~ 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2018.03.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Masumoto Shota, Uchida Masaki, Tojo Motoaki, Herrero Maria Luz, Mori Akira S., Imura Satoshi	4. 巻 186
2. 論文標題 The effect of tar spot pathogen on host plant carbon balance and its possible consequences on a tundra ecosystem	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Oecologia	6. 最初と最後の頁 843 ~ 853
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00442-017-4037-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Inoue T., Kudoh S., Uchida M., Tanabe Y., Inoue M., Kanda H.	4. 巻 40
2. 論文標題 Factors affecting water availability for high Arctic lichens.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Polar Biology	6. 最初と最後の頁 853-862
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00300-016-2010-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Uchida M., Muraoka H., Nakatsubo T.	4. 巻 39
2. 論文標題 Sensitivity analysis of ecosystem CO2 exchange to climate change in High Arctic tundra using an ecological process-based model	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Polar Biology	6. 最初と最後の頁 251-265
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00300-015-1777-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Yonemura, S, Uchida, M, Kishimoto-Mo, A, Oura, N
2. 発表標題 CO2 emission resulting from rain-on-snow events amounts to 10% of yearly soil CO2 emission in Ny-Alesund
3. 学会等名 The 12th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林健太郎・田邊優貴子・小野圭介・浅野真希・服部祥平・内田雅己・早津雅仁
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yonemura S., Kishimoto-Mo, A.W., Oura N., Uchida M.
2. 発表標題 Soil respiration rates of seasonally frozen soils in Ny-Alesund.
3. 学会等名 The 10th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Uchida, M., Yonemura, S., Sakurai, G., Kishimoto-Mo, A.W., Boike J.
2. 発表標題 Seasonal change of CO2 concentration in soil layers throughout the year on Svalbard, high-Arctic Norway; model construction and first evaluation
3. 学会等名 The 9th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Uchida, M.
2. 発表標題 Simulation of ecosystem carbon cycle in Ny-Alesund, Norwegian High Arctic under environmental change.
3. 学会等名 ArcticNet Arctic Scientific Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Uchida, M.
2. 発表標題 Introduction of Japanese activities in Ny-Alesund.
3. 学会等名 Ny-Alesund Terrestrial Flagship Program workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nakatsubo T., Uchida M.
2. 発表標題 Ecosystem carbon cycle in Brogger Peninsula, Ny-Alesund, Svalbard.
3. 学会等名 Svalbard Science Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Boike J., Chadburn S., Cannone N., Schulz A., Biskaborn B., Maturilli M., Uchida M., Westermann S.
2. 発表標題 The Bayleva high Arctic permafrost long-term observation site: an opportunity for join international research on permafrost, atmosphere, ecology and snow.
3. 学会等名 Svalbard Science Conference 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Uchida M., Yonemura S., Kishimoto M.W.A., Sakurai G., Boike J.
2. 発表標題 Preliminary report for measurements of soil CO2 concentrations throughout the year at Ny-Alesund.
3. 学会等名 Svalbard Science Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Uchida M., Yonemura S., Kishimoto-Mo A. W., Sakurai G., Boike J.
2. 発表標題 Preliminary report for measurements of CO2 concentration in soil layers throughout the year on Svalbard, high-Arctic Norway.
3. 学会等名 The 8th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Uchida
2. 発表標題 Estimation of soil respiration throughout a year
3. 学会等名 Ny-Alesund Science Managers Committee (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>高緯度北極ツンドラ生態系に及ぼす気候変動の影響  <a href="https://www.researchinsvalbard.no/project/6256">https://www.researchinsvalbard.no/project/6256</a>          リサーチマップ  <a href="https://researchmap.jp/m_uchida">https://researchmap.jp/m_uchida</a>          研究調査等の紹介  <a href="https://www.instagram.com/mu_arctic/">https://www.instagram.com/mu_arctic/</a>          国立極地研究所陸上生物研究チーム  <a href="http://polaris.nipr.ac.jp/~penguin/Terrestrial/index.php">http://polaris.nipr.ac.jp/~penguin/Terrestrial/index.php</a>          高緯度北極ツンドラ生態系に及ぼす気候変動の影響  <a href="https://www.researchinsvalbard.no/project/6256">https://www.researchinsvalbard.no/project/6256</a>          リサーチマップ  <a href="https://researchmap.jp/m_uchida">https://researchmap.jp/m_uchida</a>          生物圏研究グループ 陸上生物研究チーム  <a href="http://polaris.nipr.ac.jp/~penguin/Terrestrial/index.php">http://polaris.nipr.ac.jp/~penguin/Terrestrial/index.php</a>          北極圏科学観測ディレクトリー  <a href="http://www.nipr.ac.jp/aerc/document/directory.html">http://www.nipr.ac.jp/aerc/document/directory.html</a>          Research map  <a href="http://researchmap.jp/m_uchida">http://researchmap.jp/m_uchida</a>          国立極地研究所生物圏研究グループ 陸上生物研究チーム  <a href="http://polaris.nipr.ac.jp/~penguin/Terrestrial/index.php">http://polaris.nipr.ac.jp/~penguin/Terrestrial/index.php</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	米村 正一郎 (Yonemura Seiichiro) (20354128)	県立広島大学・生物資源科学部・教授  (25406)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------