

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：25406

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04314

研究課題名（和文）永久凍土融解に伴うGHGsガス放出動態の定量化と生物地球化学メカニズムの解明

研究課題名（英文）Measurements of GHG emissions and biogeochemical mechanisms of permafrost soils

研究代表者

米村 正一郎（Yonemura, Seiichiro）

県立広島大学・生物資源科学部・教授

研究者番号：20354128

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：ガス交換量測定システムを用いてアラスカ（ツンドラ、湿地、タイガ林）で採取された活動層土壌・永久凍土層土壌の二酸化炭素およびメタンのガス交換量を測定した。測定システムとしてはガス交換量測定システムを改良して用いた。もともと凍土内に蓄積したとされる二酸化炭素は、凍土を融解させることで求めたが、融解後の二酸化炭素の放出量に比べると小さかった。メタンについては、もともと凍土内に蓄積したとされる分しか定量的に求めることが出来なかった。二酸化炭素放出量は温度が高いほど放出量が多かったが、負温度でも放出量が検出され、温度依存性は、正温度でよりも負温度の方がずっと大きかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

凍土の融解は地球環境変化に伴う大きな人類の関心事であり、精緻なガス交換量測定システムを用いて、そのガス交換特性を調べたことは、学術的および社会的意義が大きい。一般的には、凍土に大量のガスが蓄えられていると考えられがちであるが、初期蓄積量は小さいことは重要な意義である。また、得られたデータを学術的に公開することで、地球環境を予測する基礎データになる。

研究成果の概要（英文）：CO₂ and CH₄ gas exchanges of soil taken at active and permafrost soil layers in tundra, wetland, and taiga forest ecosystems in Alaska were measured by automatic system to continuously measure soil gas exchange. The system to measure soil gas exchange was improved in view of chamber material and temperature control procedures. The stocked CO₂ was much less than the amount of CO₂ released afterwards after thawing processes. CH₄ emission was observed only during the thawing processes, showing no production in soil during the experiment. CO₂ emissions were higher with increases in temperature. CO₂ emissions were observed even in the negative temperature ranges. Temperature dependence of the CO₂ emissions were more in the negative temperature ranges than in the positive temperature ranges.

研究分野：環境科学

キーワード：二酸化炭素 メタン 凍土 ガス交換量 連続測定

1. 研究開始当初の背景

(1) 極域凍土研究の重要性: 人類最大の危機である地球温暖化の進行は高緯度で顕著であり、北極の平均気温は過去 100 年間で世界平均上昇率の約 2 倍の速度で上昇しており極域生態系は過去 13 万年の中で最も大きな影響を受けている。そのため、北半球陸上面積の 1/4 といった広大な面積を占めている凍土が急激に融解している。そして、凍土が融解することにより、大量に温室効果ガスが大気中に放出され温暖化を加速化することが危惧されている。そのため、凍土融解前後での凍土ガス交換過程を解明することが極めて重要である。

凍土ガス交換研究に関する現在の学術的背景: 極域凍土からの温室効果ガス放出(凍土有機物分解)の報告例は多くはないが、凍土からの温室効果ガス放出は CO₂, CH₄ の寄与が大きいとされている。重要なポイントとして以下に代表的な報告を示す。いずれの研究者も共通して述べているように、閉鎖チャンパー法でのガス交換量測定では測定中に基質量が変化してしまう問題があるため計測手法に大きな課題を残しており、報告値の過少評価を注意点としてあげている。まさにこのポイントが、本研究提案の中心テーマであり、最新の計測手法によるガス交換測定により、長年のこの問題をブレイクスルーする可能性を秘めている。

(2) CO₂ 放出(有機物分解に関して): 凍土の有機物は分解しやすく、地球温暖化に伴う急激な消失が危惧される。また、年代の新しい有機物(浅層にある)程、易分解性有機物が多く、有機物分解速度が大きい傾向があり、難分解性有機物の CO₂ 放出の温度依存性は、易分解性有機物の CO₂ 放出より大きい。また、負温度条件下でも凍土はガス交換を行っている。-39 度でも土壌微生物は活動している。また、負温度の CO₂ の放出の温度依存性は、正温度に比べて極めて大きい。

(3) CH₄ 放出に関して: 凍土からの CH₄ 放出は、好気状態よりも嫌気状態の方がはるかに多い。また、活動層の方がメタン生成菌の数が多く、メタン放出量が多い。また、永久凍土層融解に伴いメタン生成菌の数が急激に増大するとの報告もある。

2. 研究の目的

アラスカ凍土の南北のツンドラ生態系・北方林生態系の活動層及び永久凍土層の凍土のガス交換特性、微生物が分解する有機物を、融解前・後について実験的に解明することを第1目標とする。

凍土融解後の変化を調べるため、(植生からの有機物供給を想定して)各種有機物および無機態窒素添加で凍土の各種特性(ガス交換量と微生物が分解する有機物)がどう変化するかを解明することを第2目標とする。

実験サンプルを厳選し 1-2 年程度の長期培養実験を行い、ガス交換動態と微生物が分解する有機物がどう変化するかを解明することを第3目標とする。

そして、これらのガス交換量と微生物が分解した有機物の結果を取りまとめ、凍土融解時の物質循環インパクトを予測する生物地球化学モデルを改良するための非常に重要なデータに資することを目的とする。

3. 研究の方法

ガス交換量測定システム(図1)が本研究の主となる研究ツールのため、まず、大学への移設を初年度の終わり方から行い始めた。移設前のシステム(Yonemura et al., 2019)から移設後のシステム(米村ら, 2023)ではさらに拡張・方法論の高度化を行った。そして、米村ら(2023)にまとめた。

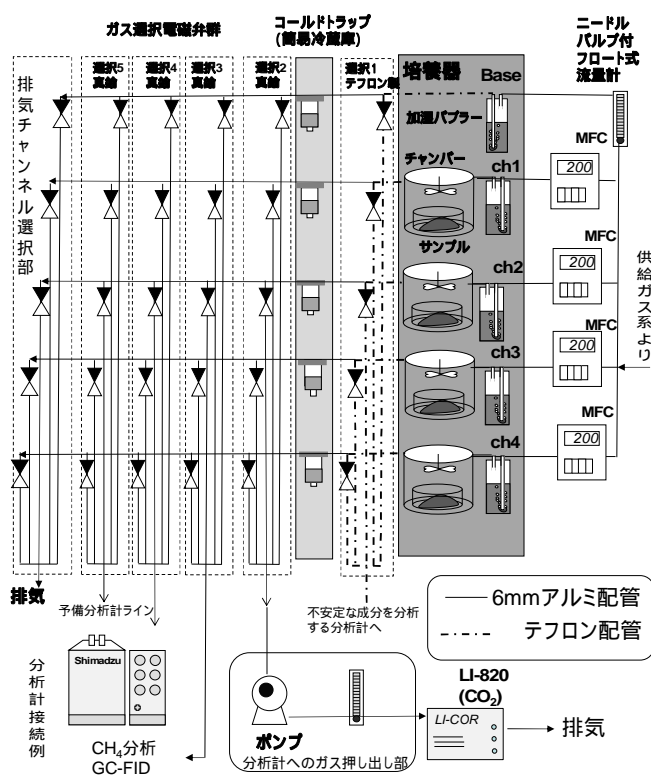


図1 土壌ガス交換量測定システム

凍土における実験

アラスカで採取されたツンドラ、湿地、タイガ林土壌をガス交換量測定システムに入れて、凍土を融解させずガス交換量測定を行った。その後、凍土を融解させて、ガス交換量を調べた。データを取得した。土壌量としては、数十gから100g程度である。温度変化は、-20、-10、-5、-1、1、5、15として変化させた。温度を変化させるときは、6時間で基本制御したが、融解させる場合は、融解熱の関係で時間がかかるため、半日から1日程度の時間をかけた。また、負温度、正温度で、反復的に温度を変化させて放出量のドリフトが把握できるようにした。

また、対象用として、融解後の凍土を用いて、閉鎖式チャンバー法にて、CO₂の放出速度を求めた。

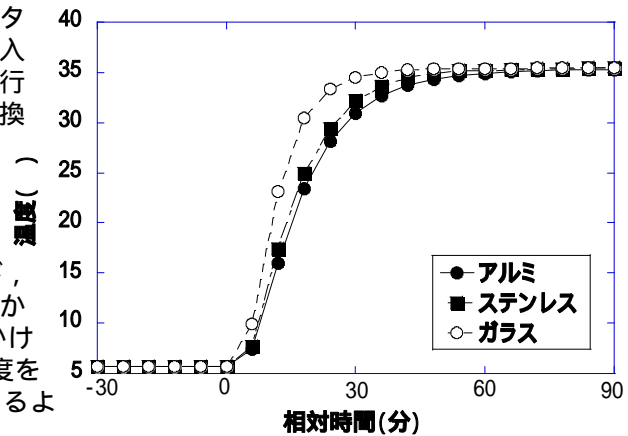


図2 チャンバー材質による温度特性

4. 研究成果

ガス交換量測定システムの改良と特性

チャンバーの材質は、分析対象とするガス種および実験目的によって異なる。ガラスは比較的多くのガス種に最適な部材であるが、壊れやすい欠点を持っている。そのため、アルミ・鉄製・ガラスのチャンバー（センサー社、特注）を比較した。

チャンバーの外のインキュベータ内部の上部・下部の温度がチャンバー内部の温度よりも早く応答している。これはチャンバーの熱伝導が空気と違うためであるため、チャンバー内部温度は応答が遅れるためである。チャンバーによる温度制御のスピードは、それぞれのチャンバー材質の熱伝導率の違いから起きたと考えられる。以上のデータから、温度を変えた実験を行う場合に1時間半より後のデータからガス交換量を計算していけばよいことがわかる。今回温度の応答性がガラスより悪かったため、金属製のチャンバーの実験性能は悪いこととなる。今後、再度チャンバーを作成する際には、ガラスにするか、金属の厚みを薄くすることにより外部との熱伝導性能を高めるなどの工夫を行う。

チャンバーの素材によって、温度特性の違いが出てきてしまったが、次に考えられるのが、培養機の温度制御によって、温度応答性の悪さをカバーすることである。インキュベータの温度制御時に、超過温度制御を行うことで、サンプルの温度制御を高速で行えるようにした（図3a）。チャンバーの温度は場所によって異なるが、5-10分程度の超過温度時間により、温度制御を早めることが出来た。これにより、かなりの実験時間の短縮が可能である（例えば、1温度段階3時間など）。なお、テフロンチャンバーはガラス・金属などに比べて、形状を安定化させるために、チャンバーの材質厚を1cm程度と厚くする必要があり、熱伝導率が小さくなってしまったため、この超過温度設定もかなり難しい（図3b）。

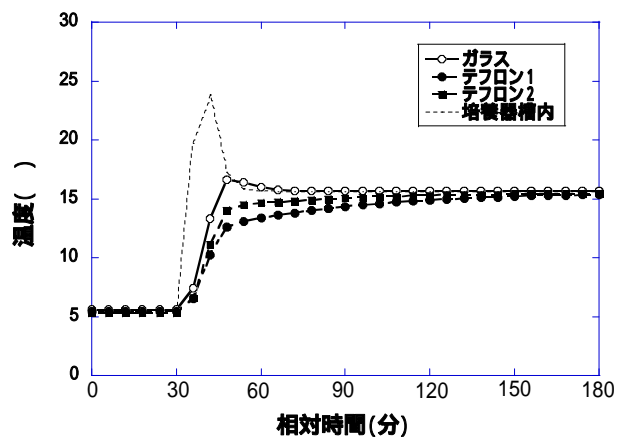
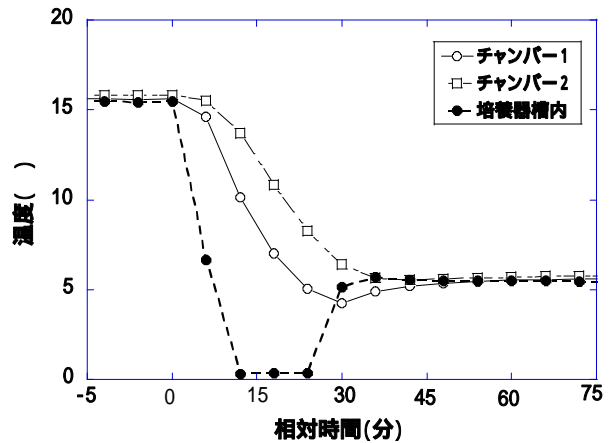


図3 温度制御特性の改良

凍土のCO₂放出交換特性

凍土の各種特性について、表1に示す。土壌の種類は、ツンドラ、湿地、タイガ林に分けて、平均化した。ツンドラでは、活動層、永久凍土層で分けて記述した。現在論文作成に向けて準備中であるが、湿地、タイガ林については、体系的な説明がまだ出来ていないので省略した。炭素・

表 1 1 土壌からの CO₂ 放出特性

| 土壌の種類 | 炭素含量 | 炭素含量 | C/N | CO ₂ 貯留量 ($\mu\text{mol g}^{-1}$) | CO ₂ 放出量 ($\mu\text{gC g}^{-1} \text{d}^{-1}$) | | | |
|----------|-------|------|-------|---|--|-------|-------|-------|
| | | | | | -1 °C | 1 °C | 5 °C | 15 °C |
| ツンドラグループ | | | | | | | | |
| 活動層 | 6.62 | 0.30 | 27.11 | 7.1 | 5.6 | 5.3 | 7.6 | 19.2 |
| 永久凍土層 | 8.48 | 0.43 | 23.02 | 64.1 | 8.5 | 15.5 | 21.0 | 48.1 |
| 平均 | 7.55 | 0.37 | 25.06 | 35.6 | 7.1 | 10.4 | 14.3 | 33.7 |
| 湿地 | | | | | | | | |
| 平均 | 36.33 | 1.55 | 25.03 | 42.8 | 13.5 | 12.1 | 15.8 | 29.9 |
| タイガ林 | | | | | | | | |
| 平均 | 10.78 | 0.45 | 17.44 | 3.9 | 3.01 | 17.55 | 26.28 | 61.90 |

表 1 2 土壌からの CO₂ 放出特性

| 土壌の種類 | 土壌炭素分解率 (% year ⁻¹) | | | | E_a (kJ) | | Q_{10} | |
|----------|------------------------------------|------|-------|-------|---------------|-------|----------|------|
| | -1 °C | 1 °C | 5 °C | 15 °C | - | + | - | + |
| ツンドラグループ | | | | | | | | |
| 活動層 | 3.1 | 3.1 | 4.4 | 10.8 | 156.3 | 63.2 | 14.0 | 2.7 |
| 永久凍土層 | 4.0 | 6.5 | 8.9 | 20.5 | 139.7 | 50.7 | 11.1 | 2.2 |
| 平均 | 3.5 | 4.8 | 6.7 | 15.6 | 148.0 | 57.0 | 12.5 | 2.5 |
| 湿地 | | | | | | | | |
| 平均 | 1.3 | 1.3 | 1.7 | 3.1 | 220.2 | 45.4 | 73.6 | 2.1 |
| タイガ林 | | | | | | | | |
| 平均 | 3.21 | 9.40 | 16.85 | 50.00 | 244.75 | 80.46 | 90.96 | 3.74 |

窒素含量 (%) については、湿地で大きく、ツンドラで少ない傾向にあった。

ガス交換量測定上で、凍土融解の際にどの程度、CO₂ 放出があったかであるが、融解後の CO₂ 放出量を考えると、放出量は大きくはなかったといえる。すなわち、凍土内の気相に閉じ込められている CO₂ 量よりも凍土融解後の土壌微生物による有機物分解に伴う CO₂ の方がはるかに重要であると考えられる。なお、ツンドラでの活動層および永久凍土層での CO₂ 貯留量は、永久凍土層の方が大きかったが、活動層は毎年、融解し CO₂ が放出されることを考えると当然のことである。永久凍土層でより多くの貯留量が見られたが、凍結状態でも長年にわたる凍結により貯留されたものと考えられるが、凍結状態での土壌のガス拡散係数にも依存するものであると考えられる。

CO₂ 放出量は、負温度・正温度であっても、温度とともに放出量は増加した。負温度でどこまで放出量が見られたかであるが、-5 °C でも CO₂ の放出量が殆どのサンプルで見られた。そのため、温度特性を調べることが出来た。しかしながら、負温度 (-1 °C 以下) では、土壌空隙中に貯留分があるため、土壌有機物分解という観点からは正確な表現が出来ていないとは考えられる。方法的に、融解後に再び土壌を凍結させてからの温度依存性しか求めることが出来ない。

温度特性としては、負温度の方が温度依存性が大きかった。これは Mikan et al. (2002) などの温度依存性と整合性があった。正温度での依存性も過去の文献からすると妥当な値であった。

閉鎖チャンバー法でのデータでも同様な CO₂ 放出および正温度での低い温度依存性が得られた。ただし、ガス交換量測定システムの実験結果よりもばらつきが大きかった。

¹⁴C 同位体を用いた凍土分解における有機炭素の選択的分解評価

凍土分解における有機炭素の選択的分解評価のため、培養の前後において ¹⁴C 濃度を測定し、分解された有機物について調べた (Uchida et al., 2023)。培養は、密閉法により行った。一般に凍土の有機炭素には、凍土が形成されるまで、様々な年代の有機炭素が蓄積することになる。その時間は、季節融解層である活動層から凍土層に移る時間に相当する。一般にアラスカ北極海沿岸のツンドラ土壌では、30cm 程度である。ツンドラ 40cm 深の年代は、50-60 年、表層には暑い有機層 (泥炭) が存在しているため、活動層における土壌層位の厚さは、その分薄くなっている。今回、異なる場所で採取されたツンドラ 2 土壌について、密閉法 (658 日間) の培養前と後の ¹⁴C 濃度は、ツンドラ土壌 A (Q10=1.86) では、 $\Delta^{14}\text{C}$ (見かけの年代) は、-636‰ (8183 yrs. BP) と -692‰ (9539 yrs BP)、とツンドラ B 土壌 (Q10=2.27) の $\Delta^{14}\text{C}$ (見かけの年代) は、それぞれ -202‰ (1870 yrs. BP) と -310‰ (3049 yrs. BP) となった。いずれのサンプルにおいても、 $\Delta^{14}\text{C}$ 濃度の低下が見られ、見かけの年代も古くなる傾向があった。すなわち、ツンドラ土壌では、温度の上昇により、相対的に若い (新しい) 有機炭素フラクションが選択的に分解したのと考えら

られた。今回の実験では、データ数が少なく、さらに実験が必要であるが、より年代的に新しい炭素成分が選択的に分解を受けているということは、温度変化に対してより感度が高いことが示された。このことは、またより高い Q10 値(1.87 と 2.27)の結果からも支持された。

凍土の CH₄ 放出特性

CH₄ の放出については、湿地土壌を中心とする一部の土壌の土壌融解時のみに放出が見られた(図4)。サンプルによって、放出は見られなかったが、見られた場合でも放出量のばらつきが大きく、かつ放出量が収まるには1週間程度かかるものもあった(図4b)。メタン放出は完全条件にして、通常の土壌では、多くの土壌で、数週間程度かかるが、本研究で用いた土壌でも同様なことが予想されると考えられる。今後、水文条件と関係した研究が必要である。

なお、CH₄ と同じ還元性のガスということで、同時に CO および H₂ の放出量の測定を行ったが、融解時に放出量が観察されたサンプルもあった。CO については、融解後も継続的に温度に依存した放出量がみられたサンプルがあった。

まとめ：

本研究では、研究成果で概略を示したように凍土のガス交換特性が見られており、十分なデータが得られている。再構築・強化されたガス交換量測定システムは、国内外でも無二なものであり、さらに極域の凍土研究等への適用が期待される。

なお、研究期間当初にコロナ禍の影響を受けたこと、また、同時に大学への移動をおこなったため、研究開始に多大な影響を受けた。機材の移動でさえ禁止されていたため、当初は、機材の再構成でさえまならなかった。また、分担者の出張がコロナ禍のために大幅に遅れ、それにもなって実サンプルを用いた実験が大きく遅れ、有機物添加実験までには至らなかった。

引用文献

- Mikan CJ, Schimel JP, Doyle AP, 2002: Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. *Soil Biology & Biochemistry* **34**, 1785-1795.
- Yonemura S, Uchida M, Iwahana G, Kim Y, Yoshikawa K 2019: Technical advances in measuring greenhouse gas emissions from thawing permafrost soils in the laboratory. *Polar Science* **19**, 137-145.
- 米村正一郎, 岩戸悠磨, 田端爽一, 小野啓介, 西村誠一 2023: 汎用的ガス交換量測定システムの開発：ハード面について. *生物資源科学雑誌* (県立広島大学 生物資源科学部) **15**, 1-20.
- Uchida M, Mantoku K, Kobayashi T, Shibata Y, 2023: Ultra small mass AMS ¹⁴C sample preparation and analyses at NIES-TERRA AMS facility. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, **536** (2023) 144-153.

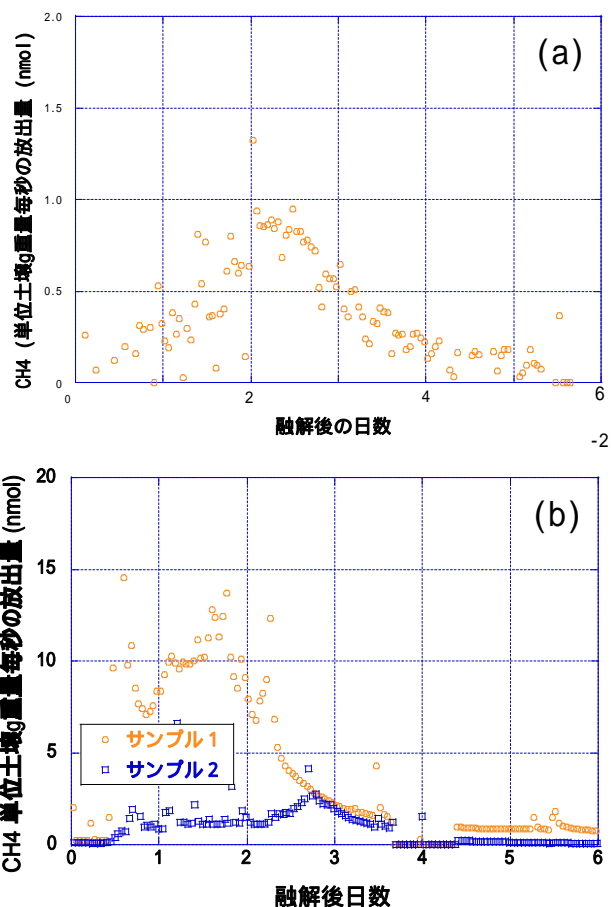


図4 融解時に土壌からCH₄の放出が見られた例(ツンドラ, 湿地土壌)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 米村正一郎, 岩戸悠磨, 田端爽一, 小野啓介, 西村誠一 | 4. 巻 15 |
| 2. 論文標題 汎用的ガス交換量測定システムの開発: ハード面について | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 生物資源科学雑誌 (県立広島大学 生物資源科学部 紀要) | 6. 最初と最後の頁 1-20 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 Masao, Mantoku Kanako, Kumata Hidetoshi, Kaneyasu Naoki, Handa Daishi, Arakaki Takemitsu, Kobayashi Toshiyuki, Hatakeyama Shiro, Shibata Yasuyuki, Kawamura Kimitaka | 4. 巻 538 |
| 2. 論文標題 Source apportionment of black carbon aerosols by isotopes (^{14}C and ^{13}C) and Bayesian modeling from two remote islands in east Asian outflow region | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms | 6. 最初と最後の頁 64 ~ 74 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2023.02.002 | 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 Masao, Mantoku Kanako, Kobayashi Toshiyuki, Kawamura Kimitaka, Shibata Yasuyuki | 4. 巻 536 |
| 2. 論文標題 Ultra small mass AMS ^{14}C sample preparation and analyses at NIES-TERRA AMS facility | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms | 6. 最初と最後の頁 144 ~ 153 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2022.12.028 | 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 ABE Takahiro, IWAHANA Go, SONE Toshio, UCHIDA Masao | 4. 巻 84 |
| 2. 論文標題 合成開口レーダによる大雪山系における季節的凍土融解に伴う地表面変位量分布 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Japanese Society of Snow and Ice | 6. 最初と最後の頁 13 ~ 27 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5331/seppyo.84.1_13 | 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 Yokohata Tokuta, Iwahana Go, Sone Toshio, Saito Kazuyuki, Ishizaki Noriko N., Kubo Takahiro, Oguma Hiroyuki, Uchida Masao | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Projections of surface air temperature required to sustain permafrost and importance of adaptation to climate change in the Daisetsu Mountains, Japan | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 15518 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-94222-4 | 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2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Uchida M., Mantoku K., Kobayashi T. |
| 2. 発表標題 Improvements for ultra-microscale radiocarbon measurements at NIES-TERRA |
| 3. 学会等名 The 15th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 田端爽一・内田雅己・藤嶽暢英・原田浩幸・米村正一郎 |
| 2. 発表標題 北極域土壌における腐植酸の分解 |
| 3. 学会等名 日本土壌肥料学会2023年度愛媛大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 | 内田 昌男 (Uchida Masao) (50344289) | 国立研究開発法人国立環境研究所・地球システム領域・主幹 研究員 (82101) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 | 小野 圭介 (Ono Keisuke) (20549555) | 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境研究部門・上級研究員 (82111) | |

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 |
|---------|---------|
| | |