

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2019～2021

課題番号：19KT0041

研究課題名(和文)凍土層トラップによる大気降下窒素の作物吸収の促進

研究課題名(英文) Nitrogen deposition from atmosphere to agro-ecosystems by soil frost trapping

研究代表者

下田 星児 (Shimoda, Seiji)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・北海道農業研究センター・上級研究員

研究者番号：80425587

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：北海道において、冬期間の大気降下窒素の調査を行うとともに、凍土層の形成が作物の生育に与える影響を評価した。1) 雪を圧縮し凍土層を発達させる「雪踏み」と呼ばれる方法により、凍土層の形成過程が異なる試験区を作成した。凍土層は、小麦では生育遅らせるが、牧草のチモシー種では生育を早める、生産性を高める効果が見られた。2) 積雪は、休耕地において速やかな地上部表層の分解に貢献し、土壤炭素量を一定に保つことに寄与しており、積雪の無い地域と異なる物質動態を示した。3) 農業地域の積雪中の硝酸・アンモニウムイオン動態は、人間活動を反映していることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

越冬作物を栽培する積雪地域は世界でも限られ、凍土層を農資源として利用する発想はこれまで無かった。積雪中の化学物質と作物生育への影響は、寒冷地における物質動態の評価としても農業資源の有効利用として新規性が高く、北海道東部の生産者が実施している「雪踏み」を用いることで、試験研究から農地への研究結果の社会実装の促進に近く、広域の検証も可能で、普遍的結果の創出が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We investigated atmospheric nitrogen during winter and soil nitrogen after winter in Hokkaido, Japan to evaluate the effect of frost formation on nitrogen pool and crop growth. 1) We tested plots with different soil frost formation processes using a method called "Yuki-fumi" in which snow is compacted to develop a frost layer. The soil freezing slightly delayed the winter wheat growth, but accelerated the growth of timothy grasses. 2) Snow cover contributed to rapid decomposition of the above-ground litter in snowy areas where cultivation had ceased, 3) The nitrate and ammonium ions in snowpack in a agricultural area indicated that agricultural nitrogen pool is influenced by agricultural activities.

研究分野：農業気象生態

キーワード：生態系制御 積雪 越冬作物 アンモニア態窒素 硝酸態窒素 雪腐病 休耕地 土壤炭素

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

窒素分子(N₂)は非常に安定な気体として大気の約 80%を占めるが、それを直接利用できる生物は限られる。このため、窒素原子 N を含む硝酸及びアンモニウムイオンなどの化合物(以下窒素)は植物の成長に大きく影響することから、窒素降水量の増加は植物の一次生産力に影響するとした前例研究は多い。森林生態系では、窒素降下により土壌有機物の微生物による分解促進や、富栄養の森林における流域スケールでの地下水へ硝酸態窒素の増加など環境分野の研究が主である。一方、農地生態系で評価した研究はほとんど無い。海外では、越冬作物を栽培する積雪地域は極僅かであるため、凍土層を農資源として利用する発想は無い。

2. 研究の目的

雪踏みという独自の技術を使い凍土層を作成し、融雪水中の化学物質を滞留させることで、低投入型の物質動態を可能にする。越冬作物における凍土層の効果について、生育の促進効果と低温に伴う生育抑制効果に着目して明らかにする。また、休耕地のような、不耕起の農地における物質動態に与える影響も明らかにする。大気中に放出された反応性窒素は、雨や雪と共に、エアロゾルやガスの形で地上に降下する。植物への影響が懸念されるが、森林は地上部が大きく、調査の不確実性が高いため明瞭な結果が無く、農地生態系では、少量の降雨は迅速に蒸発し、多量の降雨は地下水や河川に流出するため影響がないとされる。しかし、雪の場合の結果は明らかではなく、越冬作物への影響も懸念される。一方、雪は正の効果として、積雪中の窒素を中心とした化学成分の農業利用に有用な可能性もある。凍土層の作成が、越冬作物の生育に与える影響を検証する。また、積雪が土壌炭素窒素変動に与える影響について、休耕地を対象として評価する。

3. 研究の方法

(1) 雪踏みは作業タイミングで凍土層の形成過程が異なる点 (Shimoda and Hirota, 2018)を利用し、実験圃場に複数の深さの凍土層を作成する実験を行った。農研機構北海道農業研究センター芽室研究拠点の圃場において、凍土層の形成が生育に与える影響や、物質動態に与える影響を示す。牧草は、チモシー・オーチャード・ペレニアルライグラスを3品種ずつ、検討した。生育は、越冬から1番草の収穫となる出穂までを調査し、複数の波長帯の反射率を測定し、収穫時のバイオマス量・茎数・窒素吸収量等を計測した。農業機械(トラクターとタイヤローラー等)により積雪を鎮圧する方法(雪踏み)と除雪を行うことで、凍土層を作成した(写真1)。



写真 1. 圃場における雪踏み作業 (北農研芽室研究拠点)

(2) 小麦は2品種の生育の検討を行った。実験圃場に加え、道内17か所において凍土層を作成し自然積雪区と比較する実験を行った。

(3) 異なる管理履歴を持つ休耕地(写真2)において、土壌や地表面の枯死有機物(リター)の炭素窒素量を調査し、凍土の効果や、積雪が有機物動態に与える影響を明らかにした。年に1度、春に土壌採取を行い、軽分画と重分画に分ける処理を行った。



写真 2. 休耕6年後の試験区(写真は放棄区)

(4) 北海道内の広域推定による積雪中窒素量把握のため、1988年から4年ごとに北海道全体を網羅するようにおおよそ60地点での調査結果(山口, 2021)についての評価を行った。また、北海道農業研究センター芽室研究拠点の圃場試験地に定点を設置し、積雪期間に週1回の積雪採取を行い、農業地域における降雪中の化学物質量を測定し、農業や土壌環境への影響を評価した。

4. 研究成果

(1) 牧草における凍土層の影響: 2018/19年は、ここ20年で最も積雪量が少ない年だった。雪踏みと除雪の処理を行ったが、積雪量が少ない状態で処理を行ったため、想定したような処理区間の土壌環境の差を、設定できなかった。深さ5cmの期間最低地温は、いずれの区においても-5以下まで低下した。2021年も帯広測候所では観測史上初めて12月中に積雪を記録しない年となり、いずれの区においても深さ5cmの期間最低地温は-9.0を記録した(図1)。アメダス地点芽室の積雪日数から、2019年から3か年は、近年のうち積雪期間が短い期間であることが分かる。積雪処理による効果は限定的となるが、冬期間の最低地温には差が生じた。2019年の出穂開始日は、自然積雪に比べ雪踏み区で遅いが、他の2年は2日以内の差だった(図2上)。乾物重は、すべての年で、ペレニアルライグラスでは、自然積雪と除雪区で明瞭な差が生じた一

方、チモシーではほとんど差が生じなかった（図2下）。小麦では、出穂開始等の生育速度に影響を与える最も大きな要素は地温であり、小麦では雪踏み処理により生育が1-2日遅れることが報告されている(Shimoda and Hirota, 2018)が、牧草の生育には大きな影響を与えないことが分かった。融雪後の地温傾向は、処理区間の差が生じておらず、融雪時の土壌水分も明瞭な処理区差は無いため、滞水による生育の停滞が原因ではない。ペレニアルライグラスでは、冬期間の最低地温の低さにより、生育遅れが生じたと考えられる。小麦では、融雪材を散布して融雪を早めることで、出穂開始が早まる(Shimoda and Hamasaki, 2021)ため、除雪区でも生育を促進する効果が期待されたが、除雪区では地温の上昇時期を早めることは出来たが、生育の促進には繋がらなかった。春の地温上昇効果より、冬の低温が生育に与える影響の方が大きかった。土壌凍結が深い場合に、土壌中の硝酸態窒素が高まるが、低温による生育低下が大きいため、窒素吸収量はむしろ小さく、有効に利用することができなかった。

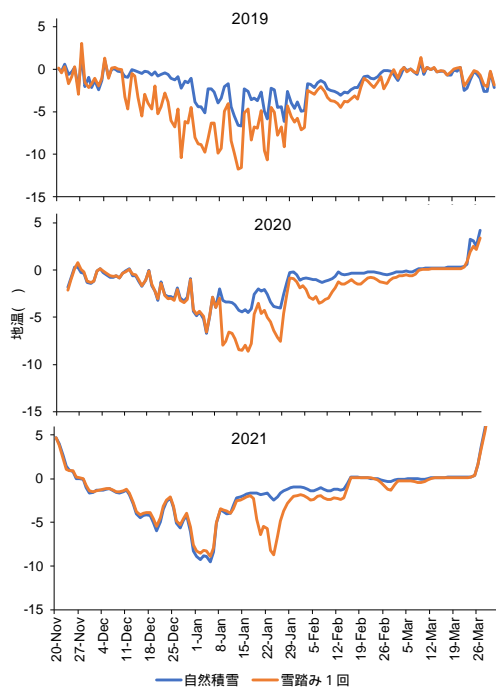


図1. 牧草における処理区ごとの深さ5cm地温

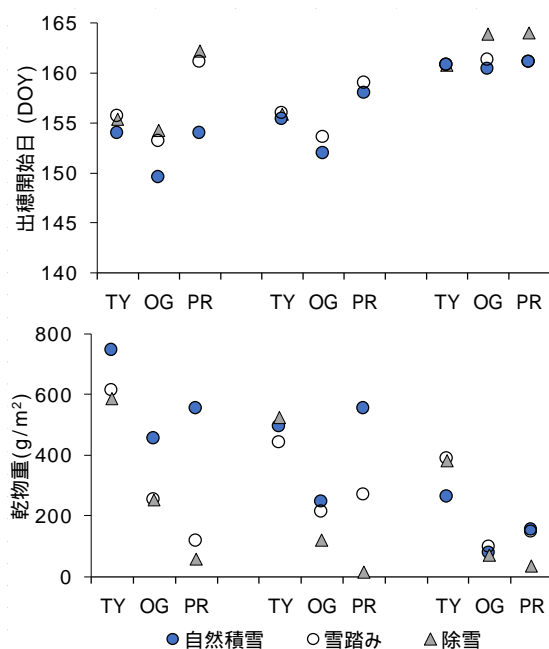


図2. 牧草試験区における自然積雪・雪踏み1回区・除雪区のチモシー(TY)・オーチャード(OG)・ペレニアルライグラス(PR)の平均出穂開始日(上)と乾物重(下)

(2) 小麦における凍土層の影響：道内17か所の小麦圃場で行った、雪踏み試験の結果をとりまとめた。最低地温と最大土壌凍結には直線的な正の相関があるが、過去の除雪により地温をさせた場合と比較して、土壌凍結深に対し、地温の低下が緩やかであることが分かった。土壌凍結深30cm時の深さ15cmの地温は-3とされているが、雪踏み時には、1.5程度高い値を示した(図3)。知見で得られている小麦の生育は、雪踏み区と自然積雪区で明瞭な差が無く、低温による生育の遅れは限定的で、最終収量には影響を与えないことが明らかになった(図4)。土壌NO₃⁻は、雪踏み区と自然積雪区で明瞭な差が見られなかった(Shimoda et al., 2021)。

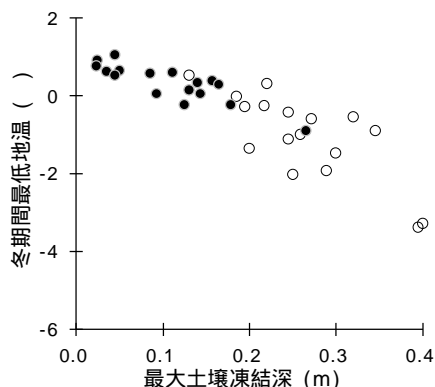


図3. 最大土壌凍結深と最低地温の関係
●は自然積雪区、○は雪踏み区

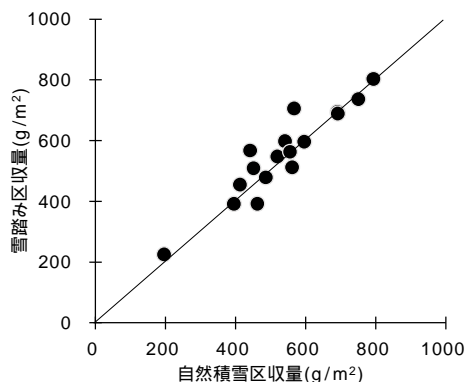


図4. 自然積雪区と雪踏み区の収量の比較

(3) 寒冷地の休耕地における土壌炭素窒素動態：農地利用の変化に関する多くの研究は、世界各地の水不足や土壌肥沃度の低さによる低生産性地域に主に焦点を当てており、冷涼で湿潤な気候の下における、農地の放棄による炭素・窒素動態については、ほとんど知られていない。北海道農業研究センター芽室研究拠点（芽室）における休耕地の連続試験の結果を、日本の温暖地の広島県福山市の西日本農業研究センター（福山）で行った休耕地試験(Shimoda, 2017)の結果と対比した(Shimoda, 2022)。福山では、休耕初年度から植生のバイオマス炭素量は 300 gC m^{-2} を超えるが、芽室は、休耕後3年まで 100 gC m^{-2} 程度と小さい。福山は5年後も同程度のバイオマス炭素量を示すが、芽室は4年目から徐々に木本が侵入し、5年目には 500 gC m^{-2} を超えた。北海道は、多年性草本が入りやすく、積雪地帯で、冬期間にリターが分解されやすい事との関連が示唆される。積雪は、リターから土壌への炭素蓄積に寄与し、北海道のような寒冷な気候条件下での植物と土壌の相互作用に影響を与える。特に、積雪下での安定した地表面温度は、雪腐病菌のような低温においても活動可能な菌類による植物残渣の分解を促進するため、新しい植物残渣の化学変化に継続的に寄与すると考えられる。土壌炭素変化量（初期土壌炭素量から測定年の土壌炭素量を引いた値）の時間変化は、2年目に負の値を示した。芽室では、実験2年目に負、実験3年目から正となり、福山では実験期間中ずっと負であった（図5）。耕作放棄地の初期段階における土壌炭素の損失は、福山よりも芽室の方が少なかった。実験2年目の土壌炭素の減少量は、芽室で -50 gC m^{-2} 、福山で -349 gC m^{-2} で最も多く、その後、徐々に増加した。福山では実験期間中、土壌炭素変化量は負であったが、芽室ではプラスとなり 119 gC m^{-2} に達した。土壌炭素の経時変化では、実験4年目に有意な増加が見られ、芽室では 14.3 gN m^{-2} に達し、土壌窒素が保持されていることが示された。福山の窒素変化量は、 $-2.4 \sim -0.6 \text{ gN m}^{-2}$ の範囲で大きな変化はなかった。芽室では、窒素が速やかに土壌に蓄積し、初期条件と比較して正となる点が福山と大きく異なり、地上部バイオマス量の変化にも影響した可能性がある。これら結果は、北海道の芽室のような冷涼な地域では、休耕が土壌炭素・窒素の保持・蓄積に寄与し、炭素・窒素プールを維持可能であることが示唆される。今回は、土地利用変化後6年目までの結果をとりまとめた(Shimoda, 2022)が、長期の休耕・耕作放棄では、炭素動態は更に変化することが想定される(Shimoda and Wagai, 2020)ため、調査地点の継続調査を行う必要があるだろう。

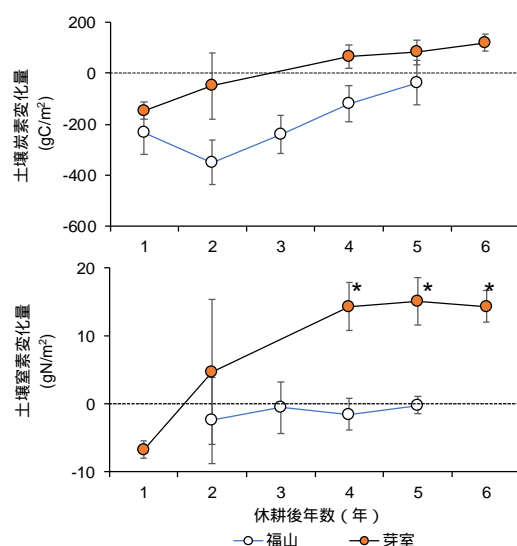


図5. 休耕後の土壌炭素・窒素の変化量

*は初期状態から有意(p<0.05)な増加を示す

(4) 積雪中の硝酸・アンモニウムイオン動態：積雪中の硝酸・アンモニウムイオン動態に着目し、過去の積雪化学分析の結果をまとめた（図6）。 NO_3^- 濃度は日本海側（JS）及び内陸部（IL）で高い傾向にあり、時系列では1988～2000年は $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ 前後で大きな変化はないが、それ以降は2008年の $20 \mu\text{mol L}^{-1}$ まで増加し、2012年以降は減少傾向である。 NH_4^+ 濃度は1996年にやや減少したあとは2008年に増加したが、 NO_3^- と比べると変化は小さい。冬季の主風向は北西であることから、JSとILでの NO_3^- 蓄積量の主な増減要因は中国などから輸送される大気汚染物質である可能性が高い。一方、本研究で測定した芽室は、濃度及び沈着量の小さな太平洋側(PO)に位置し、積雪中窒素量は NH_4^+ では 4.9 mmol m^{-2} 、 NO_3^- は 2.4 mmol m^{-2} であった。これは上述の積雪調査結果での芽室周辺における推測量と比較して、 NH_4^+ は3-5倍、 NO_3^- は2倍程度多かった。この理由として、積雪調査は越境汚染の影響把握を目的として、調査地点が地域排出源からの汚染を避けるよう設定されている。しかし芽室は、周辺の営農や市街地の排出の影響を受けているため積雪調査結果より多い結果になったと考えられる。このことから、農業地域の積雪中窒素蓄積量は従来の推定値よりも多く、その把握には測定地点を増やす必要があることが明らかとなった。さらに、積雪調査で課題であった積雪水量の推定精度は、農研機構気象メッシュを用いることで大きく改善され、より空間解像度の細かな積雪水量および窒素沈着量の検討が可能となった。この手法により、今後集水域ごとの検討など新たなテーマへ取り組むことが可能となった。年次変動から、窒素として最も蓄積量が多かったのは2012年で、その後減少傾向だったが、2021年の調査から再び増加傾向にあることが分かり（未公表データ）、越境大気由来の窒素の寄与が示唆された。

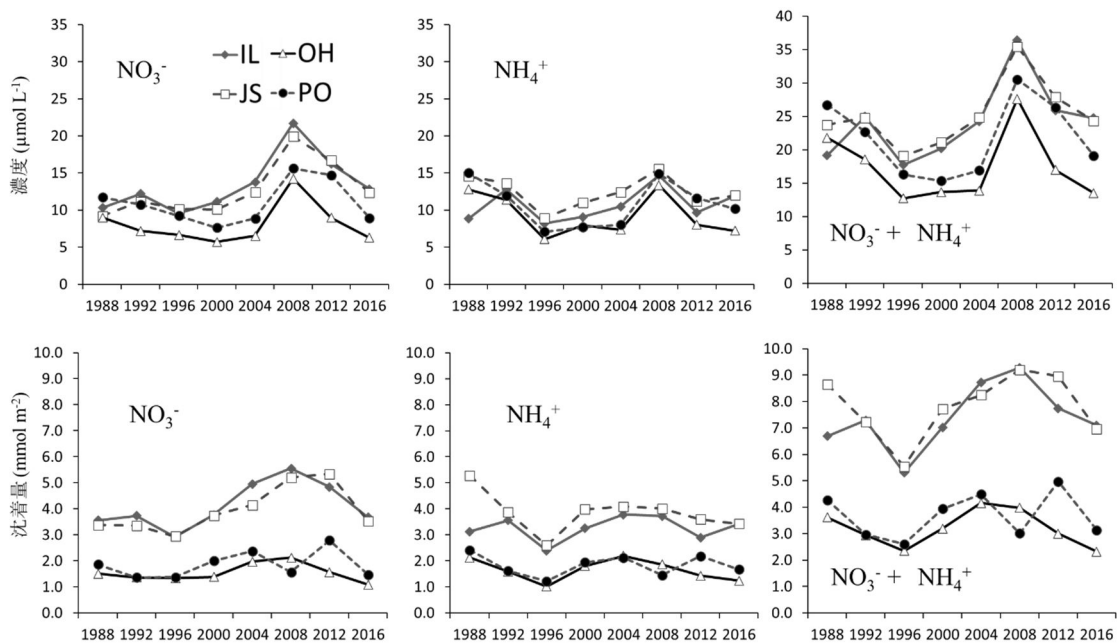


図 6 . 各地域の積雪中の硝酸・アンモニウムイオン平均濃度と平均蓄積量

地域特性を把握するため、日本海側 (JS)、オホーツク海側 (OH)、太平洋側 (PO) 及び内陸部 (IL) の 4 地域に区分した

(5) まとめ: 簡易な積雪管理により凍土層を作成し、越冬作物の生育への化学成分の吸収を促進する効果は予想より少なかったが、春の地温変化による正の効果より、冬期間の低温が生育に与える負の影響の方が強い点を整理できた。調査を行った 2019 年からの 3 年間で、これまでより少雪であったため、期待した効果が得られなかった可能性もあり、多雪地域での利用可能性についても検討する必要があるだろう。北海道のような積雪地帯の休耕地では、冬期間にリターが分解されるため、多年性草本が入りやすく、土壤炭素蓄積を促進する可能性がある。今後、休耕地等への土地利用変動時に応じた生態系の利用と保護に繋げたい。積雪中の硝酸・アンモニウムイオン動態の分析から、農業地帯の積雪中には従来の推測よりも数倍多い窒素が含まれていることが確認された。また、それは積雪後に沈着したアンモニアなどと考えられた。この知見を活かし、雪踏みなど、すでに実用化されている凍土層形成作業や春季の融雪剤散布において、積雪中の窒素、特にアンモニウムの動態を考慮することで、積雪中窒素を利用できると考えられる。これは河川、湖沼の富栄養化を防ぐ観点からも重要であり、農業現場での実践が望ましい。

<引用文献>

- Shimoda, S. (2017). Plant-derived carbon and nitrogen addition due to mowing in the early stages of post-agricultural succession. *Ecological Engineering*, 98, 24–31.
- Shimoda, S., & Hirota, T. (2018). Planned snow compaction approach (yuki-fumi) contributes toward balancing wheat yield and the frost-kill of unharvested potato tubers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 361–369.
- Shimoda, S., & Wagai, R. (2020). Ecosystem Dynamics After Abandonment of Rice Paddy Fields: Does Alien Plant Invasion Enhance Carbon Storage?. *Ecosystems*, 23(3), 617–629.
- Shimoda, S., & Hamasaki, T. (2021). Potential benefits of promoting snowmelt by artificial snow blacking on the growth of winter wheat and their dependence upon regional climate. *International Journal of Biometeorology*, 65, 223–233.
- Shimoda, S., Onodera, M., Okumura, O., Araki, H., Kimura, A., Chiba, K., Kusano, Y., Hoshi, H., Tamura, S., Suda, T., Kominami, Y., Nakatsuji, T., Hirota, T., (2021). Effects of snow compaction ‘yuki-fumi’ on soil frost depth and volunteer potato control in potato–wheat rotation system in Hokkaido. *Plant Production Science*, 24, 186–197.
- 山口高志 2021. 北海道積雪中の硝酸・アンモニウムイオン動態の経時変化, 北海道の農業気象, 73, 5–12.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3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 Shimoda Seiji, Onodera Masayuki, Okumura Osamu, Araki Hideharu, Kimura Atsushi, Chiba Kentarou, Kusano Yuko, Hoshi Harumitsu, Tamura Shiho, Suda Tatsuya, Kominami Yasuhiro, Nakatsuji Toshiro, Hirota Tomoyoshi	4. 巻 24
2. 論文標題 Effects of snow compaction 'yuki-fumi' on soil frost depth and volunteer potato control in potato/wheat rotation system in Hokkaido	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Production Science	6. 最初と最後の頁 186 ~ 197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/1343943X.2020.1828950	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 Shimoda Seiji, Hamasaki Takahiro	4. 巻 65
2. 論文標題 Potential benefits of promoting snowmelt by artificial snow blacking on the growth of winter wheat and their dependence upon regional climate	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Biometeorology	6. 最初と最後の頁 223 ~ 233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00484-020-02024-6	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 -

1. 著者名 Shimoda Seiji	4. 巻 38
2. 論文標題 Soil carbon balance after temporal cessation of cultivation under cool and subtropical humid climate in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soil Use and Management	6. 最初と最後の頁 331 ~ 340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/sum.12722	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 山口高志	4. 巻 73
2. 論文標題 北海道積雪中の硝酸・アンモニウムイオン動態の経時変化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 北海道の農業気象	6. 最初と最後の頁 5 ~ 12
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 無
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5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 下田星児・寺沢洋平
2. 発表標題 雪踏みによる秋播き小麦の雪腐病物理的防除の可能性
3. 学会等名 第251回日本作物学会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下田星児・寺沢洋平
2. 発表標題 小麦雪腐病の物理的防除を可能にする気象条件と雪踏み方法
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下田星児
2. 発表標題 寒地気象を生かす十勝型SDGs農業の実現
3. 学会等名 スクラム十勝（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下田星児・山口高志
2. 発表標題 数年間の休耕に伴う炭素窒素動態の変化と植生遷移の影響 北海道東部と西日本の比較
3. 学会等名 日本土壌肥料学会北海道支部会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下田星児
2. 発表標題 林地の農地化や耕作放棄から見る炭素蓄積量
3. 学会等名 第16回ムギ類研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 下田星児	4. 発行年 2021年
2. 出版社 北農会	5. 総ページ数 180
3. 書名 北海道農業と土壌肥料2021（第2章 気候変動に対応した農業技術）	

〔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	山口 高志 (Yamaguchi Takashi) (90462316)	地方独立行政法人北海道立総合研究機構・産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所・研究主査 (80122)	

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
---------	---------