

令和 6 年 5 月 4 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02303

研究課題名(和文) 局地的豪雨の頻発と融雪早期化に対応した積雪樹園地における低負荷土壌管理技術の構築

研究課題名(英文) Construction of low-load soil management techniques in snow-covered orchards to cope with frequent occurrence of localized heavy rain and an early snowmelt

研究代表者

遠藤 明 (Endo, Akira)

弘前大学・農学生命科学部・教授

研究者番号：70450278

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、近未来の積雪寒冷地でのリンゴ生産において「生産面と環境面の双方の観点から推奨できる土壌管理技術は如何にあるべきか？」という学術的な「問い」に対して、農地環境工学の視点から総合的に最適解を導出することを目的に、積雪寒冷地の青森県内の各土壌統群のリンゴ園地を対象に、施肥試験区と無施肥試験区の土壌環境を把握することで、特に、近年の気候変動に起因する極端な気象条件に応じた、最適な施肥時期を判断する基準を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、リンゴの生育期間・休眠期間を問わず通年で園地土壌水の採取・成分分析を行うことで、積雪寒冷地のリンゴ園地の環境に与える複雑なインパクトを解明した点において学術的に意義深いと考えられる。また、近年の気候変動に起因し、今後生起し得る極端な気象条件を勘案した、リンゴの生産面と環境面の双方の観点から推奨できる施肥体系を再構築する判断材料・指標を提供できたことから、本研究成果の社会的な意義は大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study addresses the academic question of "What soil management technology should be recommended from both production and environmental perspectives?" for apple production in snowy and cold regions in the near future. With the aim of deriving a comprehensive optimal solution from the perspective of agricultural land engineering, principal investigator aimed to understand the soil environment in fertilized and non-fertilized test plots at apple orchards in each soil group in Aomori Prefecture, a cold and snowy region. By doing so, principal investigator examined criteria for determining the optimal timing of fertilization, especially in response to extreme weather conditions caused by recent climate change.

研究分野：農地環境工学

キーワード：積雪寒冷地 樹園地 窒素循環 土壌管理 土壌水質分析

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、2016年5月から現在まで、積雪寒冷地である青森県津軽地域のリンゴ園土壌水のイオン種や土壌水分量の特徴を解明するために、リンゴ樹体の休眠期を含めて通年にわたり定量・観測している。これまで観測を継続してきた青森県津軽地域のリンゴ園地では、1日に100mmを超える極度な降水条件に晒されたことがない。今後、気候変動の継続に伴って局地的集中豪雨が多発する予想を鑑みると、春先の融雪浸透水による肥料成分の溶脱のみに焦点を当てるだけではなく、梅雨時期～台風接近時期ないし秋雨前線が日本列島に差し掛かる時期の豪雨に起因する、浸入強度が大きな浸透をとまなう肥料成分の溶脱挙動を注視する必要があると考えている。その理由は、近年から頻発している局地的集中豪雨は当地域の樹園地が未だ経験したことがなく、園地が極度の豪雨に晒された時の環境への複雑なインパクトを推定できないため、生産者が、極度の溶脱を恐れて過剰な施肥にいたると考えられるためである。

2. 研究の目的

本研究の目的は上記の研究開始当初の背景を受けて、消雪が約1ヶ月早まることによる発芽時期・樹体の養分吸収開始時期の早期化、および局地的集中豪雨の多発といった、気候変動の継続により容易に起こり得る、これら2つの事象が積雪寒冷地のリンゴ園地の物質循環に対してどのような影響を及ぼすのかを解明することにある(図1)。そして、積雪寒冷地における近未来のリンゴ栽培において、生産面と環境面の双方の観点から推奨できる土壌管理技術は如何にあるべきなのか?という学術的「問い」に対して、申請者の専門分野である農地環境工学の視点から最適解を総合的に導くことで、当該専門分野の学術研究を飛躍的に発展させるとともに、本研究成果をリンゴ生産環境の改善・技術分野に還元することを目標にした。近年、気候変動の急速な進行にともなって[1]局地的集中豪雨の多発(溶脱の顕著化)と[2]積雪量の減少と消雪の早期化(発芽・樹体養分吸収開始の早期化)が予想されている。本研究では、近未来の積雪寒冷地でのリンゴ生産において「生産面と環境面の双方の観点から推奨できる土壌管理技術は如何にあるべきか?」という学術的な「問い」に対して、農地環境工学の視点から総合的に最適解を導出する。具体的には、2021～2023年度にわたり、積雪寒冷地の青森県内の各土壌統群のリンゴ園地を対象に、施用する肥料の種類と施肥時期を変えた連用試験区を設定し、土壌水分・土壌EC・地温を連続的に観測しつつ、生育期間・休眠期間を問わず通年でリンゴ園土壌間隙水の採取と成分分析を行う。そして、地道な観測・分析結果の蓄積を継続し、対象リンゴ園地における無機態窒素の溶脱特性を把握することで、環境に与える複雑なインパクトを解明する。最終的には今後予想される地球規模の環境変動に対応した持続可能な果樹生産活動を確実に推進するための新たな土壌管理技術を提案することを目指し研究を行った。

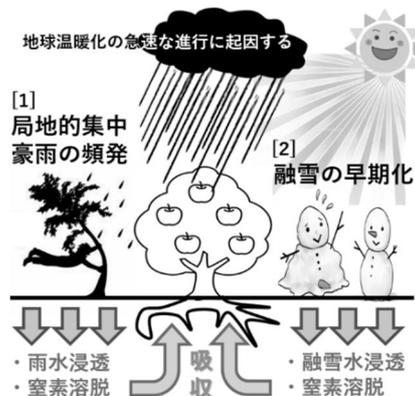


図1 近年の積雪寒冷地のリンゴ園における「2つの事象」と窒素溶脱・吸収

3. 研究の方法

3 種類の土壌統群(1)青森県藤崎町内の褐色低地土、(2)青森県鶴田町内の黒ボク土、(3)青森県弘前市内の褐色森林土)を代表とする暗渠排水設備が無いリンゴ園地において、それぞれ、(a)生産者がこれまでどおりに園地を管理する対照区に相当の春施肥条件(2021年4月～2024年10月)、(b)岩手県や長野県などで適用している秋肥を施した秋施肥条件(2024年10月～継続)のもと、任意の深度における体積含水率、電気伝導度および地温を同時測定する計測器を用いた土壌環境観測(遠藤, 2021a; Endo, 2022)と、土壌水採取管を用いて採取した土壌水のイオン種分析(Endo et al., 2018; 遠藤, 2021b)を生育期間・休眠期間を問わず通年にわたり月1～2回の頻度で実施した。なお、積雪期間中は各調査リンゴ園の積雪を採取した。また、無機態窒素の吸着挙動を把握するために、土壌水採取管の埋設深度から攪乱土壌を採取し吸着試験を行った。さらに、融雪浸透水に起因する秋施肥由来の窒素溶脱挙動を検討するために数値モデルの作成し、砂丘未熟土の大規模畑作圃場における実測値(遠藤ら, 2018)をもとに検証した(Endo, 投稿中)。土壌水、積雪融雪水および吸着試験試料液のイオン分析では、2021年8月以前はイオンクロマトグラフ分析装置(ICS-90, Dionex)を、それ以降は本助成事業により購入したイオンクロマトグラフ分析装置(Aquion, Thermo Fisher)を用いた。

4. 研究成果

調査対象リンゴ園の定点観測地が3カ所あるため、本報告書では上記(2)に該当の黒ボク土のリンゴ園地を対象に成果を報告する。図2に土壌水質の深度別の経月変化を示す。同図の印は春の窒素施肥(毎年4月下旬～5月中旬)、印は秋肥(2023年11月)である。全期間における NH_4^+ 濃度の平均値は0.42 mg/Lであった。窒素施肥に起因する地表面付近での NH_4^+ 濃度の増加や、

硝化に起因する濃度減少は認められなかった。このことは、施肥・硝化と採水のタイミングとにラグが生じたためと考えられる。2018～2019年における融雪期間の NO_2^- の挙動に着目すると、平均で2.8 mg/Lの高濃度で推移した。一方、2019～2020年の融雪期間では平均で0.07 mg/Lの低濃度で推移した。 NO_3^- の挙動は、窒素施肥後の NO_3^- 濃度の増加、および溶脱に伴う濃度減少の推移が明瞭に認められた。窒素施肥後において、深さ z 方向の濃度勾配および経過時間 t に対する濃度変化が大きい領域の中央を縦断する直線（任意の時刻に最大濃度が出現する深さを結んだ直線）に着目すると、1 mの深さを溶脱するに要する期間（ $\Delta t/\Delta z$ ）は100～180 days/mであった。深度4～64 cmにおける NO_3^- の挙動に着目すると、リンゴの生育期終盤の10～11月頃から融雪期中盤の1月頃までの3～4カ月間においては、5 mg/Lを下回る低濃度で推移した。この期間のリンゴ樹は休眠しており、樹根からの養分吸収がないと考えられる。したがって、このことは、温暖積雪域特有の降雨・融雪に起因する浸透水によって NO_3^- が溶脱されたことが理由と考えられる。一方、融雪期中盤～基肥前までの3カ月程度の期間では、全層にわたり NO_3^- 濃度の増加が認められ、融雪期終盤では最大で16.9 mg/Lに至った。各年の積雪融雪水の最大 NO_3^- 濃度に着目すると、その範囲は2.5～4.6 mg/Lであった。このため、融雪浸透水中に含まれる NO_3^- は土壌水の NO_3^- 濃度の増加に寄与する窒素供給源と考えられる。遠藤（2021b）は褐色森林土のリンゴ園において土壌水質の長期観測を行った結果、 NO_3^- -N移動の遅延を確認し、その遅延係数 R は体積含水率 θ が最大のときに約1.56であることを報告している。一方、本報告対象とした黒ボク土リンゴ園地においては、深度100 cmにおいて最大 $\theta=0.75$ 、乾燥密度 $\rho_d=0.6\text{g/cm}^3$ 、吸着等温線の勾配（分配係数） $K_d=0.8$ より、 $R=1.64$ と算出された。このことから、 NO_3^- -Nの溶脱リスクは、褐色森林土のよりも黒ボク土のリンゴ園地で小さいことが示された。以上のことから、黒ボク土のリンゴ園地の場合、青森県が示したガイドラインの標準窒素施肥量（15.0 kgN/10a）の約1/4に相当する3.6 kgN/10a（2017～2021年の施肥量相当）に減肥すれば、深度1 mにおける年間最大 NO_3^- -N濃度を10 mg/L以下に抑制できることが示唆された。2021年以降において NO_3^- -Nが低い傾向は、研究助成期間中の2021～2023年に減肥を継続したことが原因と考えられ、特に、40 cm以深においては $\text{NO}_3^- < 20\text{ mg/L}$ の環境が維持された。したがって、当調査リンゴ園地においては、毎年の減肥の効果と深度1 mの NO_3^- -N吸着能力の高さの相乗効果により、地下水の NO_3^- -N濃度を10 mg/L以下に抑制可能であることが示された。2022年8月上旬には4日間で285 mmの豪雨が生じた。この豪雨は、リンゴ園地がこれまで経験してこなかった極度の大雨である。この豪雨生起時においては、土層全体で土壌水の NO_3^- 濃度が低かったため明瞭な溶脱傾向は認められなかったものの、その後、60 cm以深において NO_2^- 濃度が積雪期の直前まで高く推移する特異的な傾向が認められた。また、2023年12月～2024年2月において当調査地域は少雪に見舞われた。このため、当該積雪・融雪期間中には、例年よりも気温が高く降雨が生じたことから、2月下旬～3月上旬に融雪が一挙に進まず、断続的に融雪浸透が進んだ。このため、2023年11月に施用した秋肥由来の窒素が融雪期間中に約60 cm深まで溶脱した。このことは、暖冬が予想される秋口の施肥は、翌春にかけて地下水汚染を引き起こしかねないことを示唆している。研究助成期間は2024年3月で終了したものの、当該深度に集積している NO_3^- -Nがどのように挙動するのかを注視する必要がある。このため、今後も引き続き、3カ所の定点リンゴ園地において観測を継続していく。また、秋施肥由来の窒素溶脱挙動を検討するために数理モデルの検証が完了（Endo, 2024）したことを受け、以上の研究成果を論文として発表していく予定である。

〔参考文献〕

Endo et al. (2018): Geoderma, 319, 24-33.; 遠藤ら (2018): 農業農村工学会論文集, 307, I_255-I_263.; 遠藤 (2021a): 農業農村工学会論文集, 313, I_243-I_250.; 遠藤 (2021b): 農業農村工学会論文集, 313, I_251-I_258.; Endo (2022): Comput. Electron. Agric. 201, 107327.; Endo (2024): Heliyon, 10, e30545.

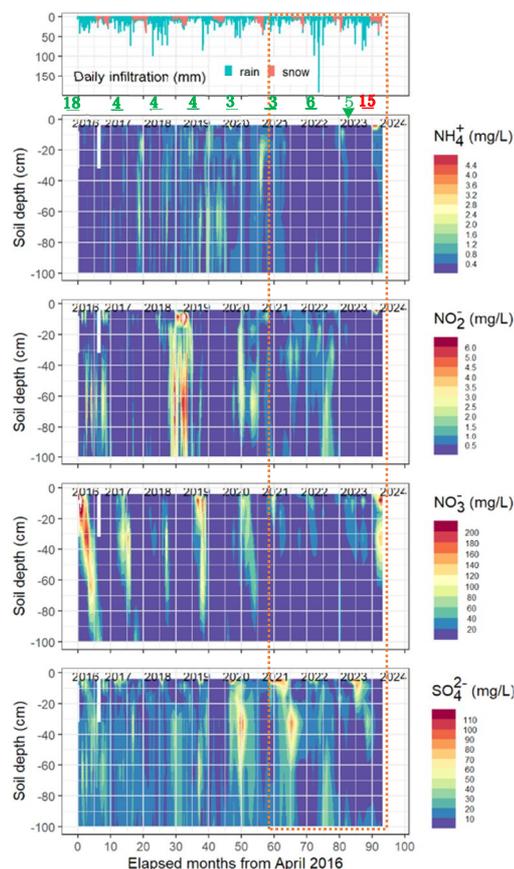


図2 土壌水の無機態窒素と硫酸イオン濃度の等値線図（およびはそれぞれ春肥と秋肥[kgN/10a]、**オレンジ枠**は研究助成期間）

深度100 cmにおいては、最大 $\theta=0.75$ 、乾燥密度 $\rho_d=0.6\text{g/cm}^3$ 、吸着等温線の勾配（分配係数） $K_d=0.8$ より、 $R=1.64$ と算出された。このことから、 NO_3^- -Nの溶脱リスクは、褐色森林土のよりも黒ボク土のリンゴ園地で小さいことが示された。以上のことから、黒ボク土のリンゴ園地の場合、青森県が示したガイドラインの標準窒素施肥量（15.0 kgN/10a）の約1/4に相当する3.6 kgN/10a（2017～2021年の施肥量相当）に減肥すれば、深度1 mにおける年間最大 NO_3^- -N濃度を10 mg/L以下に抑制できることが示唆された。2021年以降において NO_3^- -Nが低い傾向は、研究助成期間中の2021～2023年に減肥を継続したことが原因と考えられ、特に、40 cm以深においては $\text{NO}_3^- < 20\text{ mg/L}$ の環境が維持された。したがって、当調査リンゴ園地においては、毎年の減肥の効果と深度1 mの NO_3^- -N吸着能力の高さの相乗効果により、地下水の NO_3^- -N濃度を10 mg/L以下に抑制可能であることが示された。2022年8月上旬には4日間で285 mmの豪雨が生じた。この豪雨は、リンゴ園地がこれまで経験してこなかった極度の大雨である。この豪雨生起時においては、土層全体で土壌水の NO_3^- 濃度が低かったため明瞭な溶脱傾向は認められなかったものの、その後、60 cm以深において NO_2^- 濃度が積雪期の直前まで高く推移する特異的な傾向が認められた。また、2023年12月～2024年2月において当調査地域は少雪に見舞われた。このため、当該積雪・融雪期間中には、例年よりも気温が高く降雨が生じたことから、2月下旬～3月上旬に融雪が一挙に進まず、断続的に融雪浸透が進んだ。このため、2023年11月に施用した秋肥由来の窒素が融雪期間中に約60 cm深まで溶脱した。このことは、暖冬が予想される秋口の施肥は、翌春にかけて地下水汚染を引き起こしかねないことを示唆している。研究助成期間は2024年3月で終了したものの、当該深度に集積している NO_3^- -Nがどのように挙動するのかを注視する必要がある。このため、今後も引き続き、3カ所の定点リンゴ園地において観測を継続していく。また、秋施肥由来の窒素溶脱挙動を検討するために数理モデルの検証が完了（Endo, 2024）したことを受け、以上の研究成果を論文として発表していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Akira Endo	4. 巻 10
2. 論文標題 Dune soil nitrogen leaching for Chinese-yam cultivation: Impact of microbe-decomposable slow-release fertilizer	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e30545-e30545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.heliyon.2024.e30545	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Endo Akira	4. 巻 201
2. 論文標題 Soil water and solute transport in an Andosol apple orchard including the dormancy period in a snowy cold region	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Computers and Electronics in Agriculture	6. 最初と最後の頁 107327 ~ 107327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compag.2022.107327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 遠藤 明	4. 巻 89
2. 論文標題 積雪寒冷地の礫質褐色森林土のリンゴ園における土壌環境の周年変化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_243 ~ I_250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.89.I_243	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 遠藤 明	4. 巻 89
2. 論文標題 積雪寒冷地のリンゴ園地における休眠期間を含めた年間土壌間隙水質の特徴	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_251 ~ I_258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.89.I_251	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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 遠藤 明, 加藤千尋, 伊藤大雄, 青山正和
2. 発表標題 高温・高CO2環境下におけるリンゴ樹群落ハウス土壌環境の経年変化の特徴
3. 学会等名 2023年度 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 遠藤 明
2. 発表標題 礫質褐色森林土のリンゴ園地における土壌水分・EC・地温の周年変化の特徴
3. 学会等名 2021年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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