



北海道における土壌凍結深制御による肥沃度改善の可能性

吉村元博¹

Possibility of improving soil fertility by soil-frost control in Hokkaido

Motohiro YOSHIMURA¹

壤管理技術の展望を述べる。

Abstract: As one of agricultural character in Hokkaido, it is given that short growing period due to low temperature and snowpack during long winter. In order to improve productivity in cold region, it is necessary that development of soil management technology during snow season. Now, soil-frost control, which is the technique for controlling soil frost depth by adjusting the timing and duration of thick snowcover, is noted because it can affect soil property physically and biochemically such as aggregate destruction and nitrous oxide emission. This article reviews that development and background of soil frost control technology in Hokkaido and previous studies on soil properties through freeze-thaw. Based on that, it is discussed that current situation and prospective research of soil management during snow season in Hokkaido.

Key Words: frozen ground, climate change, soil property, soil management, Hokkaido in Japan

1. はじめに

近年の気候変動に伴い北海道の冬の土壌凍結深に変化が起り、農業にも影響を与えている。その変化に対応するため土壌凍結深制御技術が開発された。他方で土壌が凍結融解することの土壌理化学性や生物性への影響については様々な研究が行われている。これらのことから、凍結融解に伴い土壌中で起きる現象を理解することは、北海道の積雪期間中に土壌理化学性を「制御する」技術につながると考えられる。また筆者は2017年4月から農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センターに所属し、「寒地大規模畑輪作の生産基盤強化によるICTスマート農業システムの実現に向けた技術体系の確立」というテーマで研究を始めた。そのために北海道農業の特徴、現状の課題を調べる中で土壌凍結深制御技術の活用的高度化がそのテーマに貢献しようと思いついた。本稿では北海道で起きている気候変動、土壌凍結深制御技術、土壌凍結に伴う土壌への影響に関する研究を示し、今後の冬の間の土壌凍結深制御を利用した土

2. 北海道の農業

2.1 産業としての農業の構造

北海道は日本全国と比較して農業経営の様子が大きく異なっている。北海道の耕地面積は114.5万haであり、全国の耕地面積の約4分の1を占めている（農水省大臣官房統計部, 2017a）。また北海道の農業就業人口と農業経営体数はそれぞれ93,000人と39,000であり、全国に占める割合はそれぞれ5.2%, 3.1%である（農水省大臣官房統計部, 2017b）。さらに北海道の1農業経営体当たりの経営耕地面積は28.2haである一方全国では2.87haである（農水省大臣官房統計部, 2017b）。これらのことから、北海道の農業は全国と比べて少人数で大規模な経営を行っていることが分かる。

2.2 地理と気候の特徴

日本で最も北に位置する北海道の気候は全国の中でも寒冷で冬に積雪があり作物の生育期間が短いことが容易に想像できるが、北海道の中でも地域によって気温、降水量に違いが見られる。北海道の地理を概説すると、札幌が位置する石狩平野の低地帯を境として、東の胴体部と南西の半島部に大別できる。胴体部の南北方向に山地群が連なり、北部で二列に分岐した山地の間には盆地が並んでいる。東部には知床半島の山々が連なり、その南側には根釧台地が、西側には十勝平野が広がっている。また、南西の半島部にも内浦湾をはさんでいくつもの山々が連なっており、それらの間を縫うように低地帯が分布している（札幌管区气象台, 2017）。北海道内の冬の気温を比較すると、1月の平均気温は地域差が大きく、沿岸部で比較的気温が高く、内陸部の平野や盆地と山岳地帯で厳しい寒さが見られる。続いて積雪量を比較すると、日本海側と山岳地帯で100cmを越える一方でオホーツク海側南部、太平洋側東部、太平洋側西部の内陸では積雪が比較的少ない。これらを踏まえると冬の北海道ではオホーツク海側や内陸部の平野では雪が少なく寒さが厳しく、日本海側沿岸部では多雪で比較的気温が高く、山岳部では多雪かつ寒さが厳しいことが分かる（谷, 2010）。

しかし近年の気候変動によって冬の様子が地域ごとに変わり始めており、農業に大きな影響を与えている例

¹Hokkaido Agricultural Research Center, NARO, Hitsujigaoka 1, Toyohira-ku, Sapporo 062-8555, Japan. Corresponding author: 吉村元博, 農研機構 北海道農業研究センター
2018年4月2日受稿 2018年9月11日受理

がある。シミュレーション試験の結果、北海道の日本海側で今後積雪量の減少が予測されており (Hosaka et al., 2005), 実際に道北日本海側に位置する雨竜郡では近年積雪深の減少が報告されている (Park et al., 2010; Makoto et al., 2014)。それとは逆に、十勝地方では1980年代後半からシベリア高気圧の勢力が弱まっており海面温度の上昇が予測され、このため道東を通過する温帯低気圧が発達することで初冬の積雪量が増加し、積雪が断熱材として働くため土壌凍結深度が減少している (Hirota et al., 2006)。土壌凍結深度の減少に伴い、収穫後も畑に残ったバレイショが越冬し翌春に雑草化して現れるようになった。このように雑草化するバレイショのことを野良イモ (volunteer potatoes) と呼ぶ (Boydston et al., 2006)。十勝地方では野良イモが発生した農家は1 ha 当たり数十時間かけて人力の除草を行っており、平均的な規模のバレイショ農家で数 ha 以上の土地を持っているため非常に過酷な作業となる (Hirota, 2008; 前塚, 2008)。積雪深の変化とそれに伴う土壌凍結深度への影響は同じ北海道でも地域によって異なっている。

2.3 野良イモ退治のための土壌凍結深制御の開発と普及

北海道では土壌凍結深度の制御法が開発され、野良イモ退治に活用されている。具体的には野良イモを凍結枯死させるために冬に圃場で除雪プラウを装着させたトラクターで圃場を走り除雪を行い土壌の凍結深度を増加させる技術である「雪割り」が開発された (Hirota et al., 2011)。万が一雪割りで土壌凍結深が深く入りすぎた場合は、露出した地表に雪を戻すことで凍結の進行を抑えることができる。この雪割りをやる際の懸念として、積雪下に秋まきコムギ等の越冬性作物がある場合、除雪によって根や芽を物理的に傷つける恐れがある。そこでトラクターで圃場の積雪の上を走り圧雪することにより雪の断熱効果を抑え、土壌の凍結深度を増加させる技術である「雪踏み」が開発された。この技術を用いて最大土壌凍結深度を0.3 mに制御した秋まきコムギ圃場では雪踏みを行わない圃場と同等の収量を得られ、最大土壌凍結深度を0.5 mに制御すると茎数が有意に減り減収した (Shimoda et al., 2015)。穂になるコムギの茎数は越冬前茎数によってほぼ決定するため (荒木, 2015), 最大土壌凍結深度を0.5 mに制御したときの茎数の減少は凍上による根への物理ストレスによるものと考えられる。土壌凍結深度を適切に管理することで野良イモの退治のみならず、コムギの凍上による減収リスクを抑える可能性が示唆された。この雪踏みの注意事項として、圧雪しても積雪深を0.3 m以下にできなければ雪の断熱効果を取り除けないため (Hirota et al., 2006), 多雪地帯には適さないことと、土壌凍結深が深く入りすぎた場合に雪を被せて凍結の進行を抑える手段がないことが挙げられる。

土壌凍結深制御の技術を現場の生産者に活用してもらえるように、適用できる気候条件や作業判断支援のための知見の集積が進んでいる。冬の気温と降水量に基づき

土壌凍結深制御による野良イモ防除が実施できるのは、北海道では道東太平洋側内陸部、オホーツク海側が挙げられる (矢崎ら, 2012)。さらに積雪深と気温から土壌凍結深度を予測するシステムが開発されており (Nemoto et al., 2008), 土壌凍結深を任意に制御する技術は北海道の十勝地方とオホーツク地方のバレイショ生産地帯で野良イモを退治するために普及が進んでいる。特に十勝農業協同組合連合会が運営する営農支援システムである「てん蔵」では雪割りの実施日を登録することで土壌凍結深の進行状況を知ることができる。また、オホーツク地方に位置する網走支庁では排水性の悪い灰色台地土が29,000 ha存在し (橋本, 2008), 野良イモ退治の他に土壌凍結による透水性改善効果 (Chamberlain and Gow, 1979) が期待され土壌凍結が利用されている。

土壌凍結深度を増加させることで野良イモを枯死させることができるが、適切な凍結深度に制御できなければ営農上のマイナス面をもたらす。具体的には凍上による越冬作物の根への物理的ダメージ (Tierney et al., 2001; Kreyling et al., 2008) や、融雪期の土壌侵食の促進 (Øygarden, 2003), 春の土壌融解や排水が遅れることによる農業活動の遅れが挙げられる (Yanai et al., 2017)。一方土壌凍結深度が浅いときに融雪水は急速に土壌に浸透し (Iwata et al., 2008; Iwata et al., 2010; Iwata et al., 2011), 表層の残存硝酸態窒素の溶脱による地下水汚染の危険性がある (Iwata et al., 2013)。これらを踏まえ野良イモを枯死させつつ、環境への負荷を抑えた適切な最大土壌凍結深度を検討するため圃場試験が行われた。そして除雪処理の有無を設け、積雪前後の野良イモの枯死率、土壌浸透水量、土壌硝酸態窒素残存率を調べたところ、最大土壌凍結深度は0.28 ~ 0.33 mが適切だと提案された (Yanai et al., 2017)。

3. 土壌凍結に伴う土壌理化学性と肥沃度への影響

ここまでで近年の気候変動により生じた野良イモを退治することをきっかけに始まった土壌凍結深制御技術について述べた。一方で土壌凍結が土壌理化学性に与える影響についての研究は古くから行われている。Edwards and Cresser (1992) は1910年以降報告された凍土に関する基礎的な研究成果の要点および1960 ~ 1990年代の土壌の物理化学反応・生化学反応への凍結融解の影響に関する室内と屋外での試験の成果を総括した。その上で土壌の凍結融解が①土壌生成、②微生物の代謝反応と微生物数、③土壌の理化学的性質と土壌肥沃度、④集水域での水文環境、⑤汚染物質の挙動、に与える影響を調べることが今後重要だろうと指摘した。土壌凍結は土壌理化学性に影響を与えるため、土壌凍結深制御技術は積雪期間中の土壌理化学性を「制御する」技術となりうる。ここでは凍結に伴う土壌物理構造および土壌中における生化学反応への影響の研究を概観する。

3.1 凍結がもたらす物理構造への影響

3.1.1 凍上

凍上は凍土内で形成した氷によって地表面が押し上げられて隆起が起きる現象である。凍上は土壌中の水がその場で凍結して9%体積が膨張するだけでは説明できず、凍結に伴い凍結面が近傍の水を吸い上げアイスレンズを成長させることで起きる(Black and Hardenberg, 1991)。そのためアイスレンズの成長しやすさを示す土壌の凍上性は保水性と透水性に関わる土壌粒子の粒径に大きく依存する。Black and Hardenberg (1991)は粒度調整した土を用いて実験を行い、凍上は平均粒径が小さくなるにつれて増大し、2~5 μm の土粒子を含むものに最大凍上が起こることを示した。一方均質粒径のガラスビーズを用いたアイスレンズの形成実験では、粒径が小さいほど(数 μm)アイスレンズが大きく成長することが示された(Saruya et al., 2013; Saruya et al., 2014a)。これらの研究は小さい粒径の土壌ほど不凍水を保持しやすいという性質(Zent, 2008)と一致している。しかし数 μm の粒子ではアイスレンズの成長が抑制されるという理論予測もあるため(Style and Peppin, 2012; Saruya et al., 2014b)さらなる実験が求められる。凍上による農業への影響として、凍上性の土壌において越冬性作物の根を切断し死滅させる被害が挙げられる(Tierney et al., 2001; Kreyling et al., 2008)。

3.1.2 団粒構造の破壊

団粒構造とはTotsche et al. (2018)の総括によると、岩石堆積物や微生物バイオマスのような鉱物や有機物が約20 μm の構造単位を作り、この構造単位同士が集合してできる構造を指す。団粒構造の中で特に250 μm 未満の大きさのものをマイクロ団粒、それ以上をマクロ団粒と呼ぶ。電子顕微鏡観察によって団粒構造内に非晶質材料で充填される孔隙が観察され(Tiessen et al., 1988)、この中に入った有機物は物理的に分解から保護されることが示唆された。炭素安定同位体を分析し団粒内の炭素がC₃植物由来かC₄植物由来かを比較した試験により、マクロ団粒は土壌中で生成されたばかりの有機態炭素を蓄積し保護することが見出された(Puget et al., 1995)。またマクロ団粒をマイクロ団粒になるように粉碎した前後の無機化量を比較した結果、マクロ団粒は土壌有機態炭素を生分解から保護することおよび、保護する能力は不耕起管理をした場合や粘土含量が高くなるにつれて高まると結論した(Balesdent et al., 2000)。

室内試験で団粒構造を凍結させると団粒構造が破壊され、この影響は水分含量が高いほど大きいことが報告された(Lehrsch et al., 1991; Edwards, 2013)。凍結による構造破壊の入り方は不均一であり、湿った部分では孔隙内の氷の拡大が粒子間の結合を破壊し、乾いた部分では土壌の収縮と結合剤の硬化が起きて団粒構造の安定性が高まる(Lehrsch et al., 1991; Lehrsch et al., 1993)。Oztas and Fayetorbay (2003)は凍結融解サイクルに対する団粒構造の安定性を団粒構造のサイズで比較した。その結果、凍結融解によって1mm以下の団粒構造は1~2

mm、2~4mmのものに比べて壊れやすいことが見出された。これは屋外で除雪を行い土壌凍結深度を深くした試験結果と符合する(Fitzhugh et al., 2001; Ruan and Robertson, 2017)。

3.1.3 透水性と砕土性の向上・融解時の土壌侵食の増加

Xu et al. (2018)は室内で異なる水分含量の土壌に異なる回数の凍結融解処理をした後に物理的性質を調べた。その結果凍結融解は土壌の内部摩擦角を変えないまま、せん断強度と凝集力を低下させ、凍結融解サイクルが増えるにつれてこの影響は大きくなった。またこの影響は5サイクルでほぼ頭打ちになること、およびサイクル数以上に水分条件の影響が大きく水分が高いほど凍結による構造へのダメージが大きいたことが示された。これらのことから土壌の凍結融解はせん断強度を下げることによって砕土性を改善させ、凝集力が低下することによって土壌侵食のリスクを高めることが示唆された。またChamberlain and Gow (1979)は室内実験で凍結融解に伴い土壌の透水性が改善することを指摘した。これは凍結融解を繰り返した土壌の観察を走査型電子顕微鏡で行い、土壌粒子に対する孔隙面積の割合が大きくなった結果(Xu et al., 2018)を支持している。これらの室内試験の結果より土壌を凍結融解処理にかけることで土壌の孔隙が増え、物理性が変わることが示された。屋外では土壌凍結深が深い年の融雪時の表面流去量の増加(Bayard et al., 2005)、融雪期に次層が凍結している圃場で表面流去に伴う多量の土壌侵食(Øygarden, 2003)が観測された。

3.1.4 土壌中の水フラックスの変化

室内試験で凍結融解後の土壌は透水性が向上することは前述したが、屋外圃場での水フラックスを考慮する際は土壌融解が不完全なまま融雪水の浸透が始まることと、凍結による地下から地表向き水フラックスが生じることに留意する必要がある。土壌は凍結すると透水係数が低下し(Watanabe and Flury, 2008)、凍結深度が深い圃場では厚い凍結層が水の流れを塞ぎ融雪時の溶脱が抑えられた(Iwata et al., 2010; Iwata et al., 2013; Yanai et al., 2017)。また地温の低下に伴い不凍水量が減り、これが土壌中で大きな水の負圧を生み出し(Hohmann, 1997; Watanabe et al., 2012)、土壌凍結の進行に伴い凍結面近傍の水が凍結面に向かって吸い上げられる。そのため凍結層は比較的水分含量が高い(Iwata et al., 2011)。圃場試験では除雪を行い最大土壌凍結深度を40cm程度にすることで積雪期間中の地表から40cm深度地点での上向き水フラックス増大と融雪期の下向き水フラックス減少が認められた(Iwata et al., 2013)。融雪水の挙動は水に溶けて移動する表層の残存硝酸態窒素の移動と密接にかかわり、溶脱による地下水汚染の危険性(Iwata et al., 2013)や融雪後の土壌硝酸態窒素濃度に影響する(Yanai et al., 2017)。

3.2 凍結がもたらす生化学反応への影響

3.2.1 植物根の切断

凍上の項で先述したが、凍上もたらす物理的スト

レスにより根が切れてしまうことに起因して植物が死滅し、窒素と炭素の供給源になる (Tierney et al., 2001; Kreyling et al., 2008). 森林や草地では土壌凍結に伴う植物根死骸量は 300 kg ha^{-1} と見積もられ、これはおおよそ 150 kg C ha^{-1} , 5 kg N ha^{-1} に相当する (Tierney et al., 2001; Cleavitt et al., 2008). Tierney et al. (2001) は凍結融解が起きる気候での植物根へのダメージは凍結融解そのものではなく、凍上による物理ストレスによるものだと指摘しており、冬期間の越冬性植物への影響は気候よりも土壌の凍上性の寄与が大きいといえる。

3.2.2 微生物の死滅

微生物バイオマスを ^{14}C で標識した土壌を室内で凍結融解処理にかけ、処理後の二酸化炭素 (CO_2) 排出を調べたところ、65% が微生物バイオマス由来であった (Herrmann and Witter, 2002). また耕地土壌を使った培養試験で融解後の無機化の増加は微生物の溶解由来のアミノ酸窒素を利用していることが示された (DeLuca et al., 1992). 凍結融解に伴う微生物の死滅に由来する炭素と窒素の放出が観測されているが、さらに詳しく見ると凍結融解による微生物への影響は土壌や微生物の種類によって異なっていた。高山やツンドラ地域の土壌は微生物バイオマスに対して凍結融解の影響が見られなかった (Lipson et al., 2000; Grogan et al., 2004) ことや、高山土壌を -9°C 未満にしたときに微生物バイオマスの減少が観察された (Freppaz et al., 2007). また森林生態系では土壌凍結が普段ほとんど入らない表層土壌の凍結は次層の鉱質土壌の凍結と比べて微生物や酵素活性への負の影響が大きいことが観察された (Sorensen et al., 2016). これらの結果は凍結融解が微生物にとって生理学的に大きな負担であり (Schimel et al., 2007), 普段土壌凍結融解サイクルを受けにくい深い層では微生物コミュニティが凍結に適応しておらず凍結融解に反応して死滅あるいは活性の低下が生じたためだと考えられた (Freppaz et al., 2007).

3.2.3 土壌微生物の凍結耐性メカニズム

微生物の凍結融解に対する耐性を持つ微生物を調べるために Walker et al. (2006) は土壌の凍結融解が起きる地域の土壌から調整した混合培養液に対して凍結融解の繰り返し処理を行い希釈平板法で観察したところ、コロニーの多様性や数の減少は見られたが全滅には至らなかった。さらにこの凍結融解繰り返し処理で生き残った株を改めて凍結融解の繰り返し処理にかけたところ、処理を行う前の混合細菌群集と比べてコロニー形成単位が 1,000 倍以上の株が発見された。さらに Walker et al. (2006) は既往の知見として微生物が不凍タンパク質の分泌、細胞膜の脂肪酸組成の変化、多価アルコールの蓄積、低温ショックタンパク質 (cold shock protein) や低温活性酵素 (cold-active enzymes) の生成、といった低温順応・凍結耐性機構が存在することを指摘した。つまり、微生物細胞の中および周辺の水の凍結を防いでいるといえる。

微生物が凍結を防ぐだけではなく、土壌が低温条件下

でも不凍水を存在させ微生物の生存に貢献することも知られている。Panikov et al. (2006) は -39°C の条件下でも土壌からの CO_2 の発生を観測し、微生物が活動していることを見出した。Rivkina et al. (2000) は -10°C までの温度低下では凍土中で酢酸が菌体に取り込まれることを観測した。これらの研究は凍土中の微生物活性と不凍水量の関連を指摘しており、Tilston et al. (2010) は不凍水含量と温度の間に指数関数的な関係があり、不凍水量が約 13% (v v^{-1}) を超えると急に微生物呼吸量が増加することを指摘した。Rivkina et al. (2000) は土壌粒子の表面で不凍水の厚さは -1.5°C では 15 nm, -10°C では 5 nm になると見積もった。またこの薄いフィルム状の液体 (不凍水) が凍土中において土壌粒子と微生物細胞を包むように存在し、不凍水が土壌粒子の表面に連続的に分布していることにより、微生物はその水を利用している可能性がある (Rivkina et al., 2000). Segura et al. (2017) は普段凍結融解を受けている森林土壌に ^{13}C で標識されたセルロースを添加し凍結融解処理を行った培養試験を行った。そこで細菌のリン脂質脂肪酸 (phospholipid fatty acids, (PLFAs)) の経時変化を調べることで -4°C の凍結条件下でも細菌が生育可能かつ増殖できることを示した。ただし、 4°C での培養と比較すると分解速度は非常に小さかった。

以上をまとめると土壌微生物は氷点下の環境でも細胞内やその周囲を凍結から守る機能を持っていることと、土壌中の不凍水が発生するところで生存しているといえる (柳井ら, 2007). そして Segura et al. (2017) が示したように土壌中の生体高分子の分解や増殖を起こしていることもありえる。

3.2.4 一酸化二窒素 (亜酸化窒素, N_2O) の発生

N_2O は成層圏のオゾン層の減少や温室効果を持つためその生成には非常に高い関心が集まっている。 N_2O は微生物による硝化では副生成物として、脱窒では中間生成物として生成される。硝化は比較的好気的な条件で、脱窒は嫌気的な条件で有利になる (Davidson et al., 2000). 微生物反応であるため N_2O は土壌の温度が高い時期に生成量が多くなると推察される。しかし、凍結した土壌が融解する際に大きな N_2O の排出が数多く報告され (Goodroad and Keeney, 1984; Christensen and Tiedje, 1990; Wagner-Riddle and Thurtell, 1998; Teepe et al., 2001; Wolf et al., 2010; Ruan and Robertson, 2017), 冬期間中の N_2O 排出量は 1 年間の 8 割を占めることもあった (Maljanen et al., 2009). さらに冬期間に除雪を行い土壌の凍結融解イベントが多くなると N_2O フラックスがより大きくなることが観測されている (Dörsch et al., 2004; Groffman et al., 2006; Maljanen et al., 2007; Maljanen et al., 2009; Maljanen et al., 2010). この凍結融解に伴う N_2O 排出の主なメカニズムは①壊れた団粒 (Fitzhugh et al., 2001; Ruan and Robertson, 2017) や死滅した微生物 (van Bochove et al., 2000; Herrmann and Witter, 2002) や植物 (Tierney et al., 2001; Kreyling et al., 2008) から放出された有機態炭素が利用され、②過湿条

件において土壌中の酸素濃度が低下し部分嫌気部位が発達したこと (Öquist et al., 2004; Yanai et al., 2011) により、③脱窒反応が誘導されたと考えられる。凍結土壌中での脱窒については化学反応 (化学脱窒 (Christianson and Cho, 1983)) の寄与が調べられたが、ガンマ線を放射し滅菌した土壌では凍結融解後の N_2O 排出が見られなくなった (Röver et al., 1998) ことから、この融解時の N_2O 排出は生化学反応に起因すると認識されている。

4. 土壌凍結を活用した土壌管理法の展望

4.1 凍結深制御技術を用いた土壌理化学性改善の取り組み

土壌凍結深を制御し野良イモを退治する技術は利用が進んでいるため、凍結融解に伴う土壌理化学性への影響を考慮し適切な土壌凍結深度に制御することで農業生産性の向上に寄与することが可能である。既往の凍結深度制御による土壌理化学性を改善する取り組みには凍結深制御による① N_2O 削減と②硝酸残存率の維持が挙げられる。前者について、Yanai et al. (2014) は屋外で除雪を行った区での年間 N_2O 排出量が年次によって大きく異なっており、その要因として地温に注目した。最大土壌凍結深度が 40 cm かつ 10 cm 深度の地温が融雪前の 1 か月間で -1 から 0°C で安定して推移していた年の排出は、最大土壌凍結深度が 50 cm を越えてかつ融雪期に -2°C 前後から急速に地温が上がり正の地温となった年の 8 倍だった。この機構として -1°C から -2°C へ地温が低下する際に水ポテンシャル (マトリックポテンシャルと浸透ポテンシャルの和) が低下し永久しおれ点を下回る可能性を指摘した。平衡状態にある固体と液体の圧力と体積の関係を表す Clausius-Clapeyron の式に基づき、大気圧下で氷と不凍水が共存する条件では土壌のマトリックポテンシャルは温度に依存する (詳しい計算過程は Mizoguchi, 1993 を参照)。そして浸透ポテンシャルを考慮せずに -1°C と -2°C のマトリックポテンシャルを計算するとそれぞれ約 $-1,200$, $-2,400 \text{ J kg}^{-1}$ となる (Spaans and Baker, 1996)。永久しおれ点は $-1,500 \text{ J kg}^{-1}$ であり地温が -1°C から -2°C へ変化する間にこれを下回る。そのためこのときに干ばつ耐性機構を持たない微生物は活性に大きな影響を受けることが考えられる。ここで考慮しなかった浸透ポテンシャルは土壌の溶質濃度に依存するが、土液比 1:5 で測定した電気伝導度が 0.16 dS m^{-1} 以下の条件ではほぼ 0 とみなすことが可能である (鈴木ら, 2014)。さらに -1°C 以上と -2°C 以下で微生物代謝に大きな違いが出たことは異なる温度条件で 120 日間の土壌培養試験を行った結果に支持されている。その試験では -4°C 条件下では窒素代謝微生物数がそれ以上の温度条件と比べて最小であるため N_2O が排出されず、 -1°C では硝酸還元酵素活性はあるものの N_2O 還元酵素活性が抑えられたため N_2O が排出され、 2°C もしくは 5°C のときは硝酸還元酵素活性および N_2O 還元酵素活性の両方があったため N_2O 排出が起き

なかった (Wertz et al., 2013)。つまり N_2O 還元酵素は -1°C で活性が低く、それ以上の温度では高くなり、硝酸還元酵素活性は温度で大きく変わらない。そのため融解過程で N_2O 還元酵素活性だけが抑えられる条件を回避することで N_2O 排出量を低減する可能性がある。後者について、秋まきコムギ圃場において除雪処理の有無を設け、最大土壌凍結深に対する積雪前後の野良イモの枯死率、土壌浸透水量、土壌硝酸態窒素残存率を調べたところ、最大土壌凍結深度は $0.28 \sim 0.33 \text{ m}$ が適切だと提案されたが、融雪前後の硝酸残存率 (融雪後の硝酸態窒素含量を積雪前の硝酸態窒素含量で除した値) は非圧雪区では $0.02 \sim 0.34$ に対し、圧雪区では $0.14 \sim 1.32$ と幅が広いが残存率は高かった (Yanai et al., 2017)。

4.2 空間変動の考慮

凍結融解が土壌理化学性に与える影響を調べた研究は室内実験や屋外試験でも圃場内の一部分から試料を採取したものであり、圃場全体に対する効果を評価するために試料の採取方法や統計学的手法による工夫がされているものの、空間変動の影響を免れていない。北海道の 1 農業経営体当たりの経営耕地面積は全国平均の約 10 倍の 28.2 ha (農水省大臣官房統計部, 2017b) であることはすでに述べたが、その分一部からの試料採取では空間変動による影響が大きくなりやすいことが推測できる。土壌の物理構造上の空間変動としてマクロポアが挙げられる。土壌はひび割れ、植物根、動物が空けた穴のようなマクロポアを含むため、均一な構造であることはまれであり、マクロポアの存在は凍土中の熱や水特性に影響を与えると考えられている (Shirazi et al., 2009; Walvoord and Kurylyk, 2016)。そこで凍結融解に対するマクロポアの効果の知見を得るため、室内の土壌カラム試験でマクロポアを作り、凍結融解に伴う水の動きを調べた研究が行われ、マクロポア内は周囲に比べて凍結と融解が遅れており、融解時はマクロポア内で融けずに残った氷が水の流れをせき止めていた (Watanabe and Kugisaki, 2017)。つまり、現地の圃場にて不均一に現れるマクロポアは土壌中の水と栄養の移動に偏りをもたらす。現地で圃場スケールの空間変動を把握するために、近年はリモートセンシング技術の発達が進んでいる。この技術により、土壌の物理的な性質や有機態炭素や鉄含量や塩分濃度を非破壊でかつ圃場全体の面的な測定が可能になってきている (Mulder et al., 2011)。例えば電磁誘導探査では土壌水分や土性を測定する技術の報告がある (Doolittle and Brevik, 2014; Huang et al., 2017)。凍結による物理構造への影響は土壌の水分含量や粒径に依存するため、圃場の中で水が溜まりやすい場所や粒径が部分的に異なる場所を把握することにより、例えば水が溜まりやすい場所や粒径が小さい場所では土壌凍結深度を抑えて表面流去や土壌侵食を低減させるといった管理が可能になる。また地中レーダー探査によって土壌の凍結深度を面的に測定し、サーミスタで測定した土壌凍結深度と比較した研究がある (Butnor et al., 2014)。その研究では地中レーダーは積雪が 35 cm 未満であれば $8 \sim 10 \text{ cm}$ 以上の土壌

凍結深を検知することができ、その誤差範囲はサーミスタと比較してサイト平均で 1.1 cm 以下で除雪処理がある場合は 5.5 cm の過大評価と -1.5 cm の過小評価が見られた。また地中レーダー探査は凍土の上に静水や湿った雪がある、表土で融解が起きている、積雪が深い等の場合は測定に適さないことも示された。

5. おわりに

北海道における農業の構造の特徴と気候変動が土壌凍結深度に影響して場合によっては野良イモの問題を引き起こしていること、次いで野良イモを退治するために土壌凍結深を制御する技術が開発されて利用と普及のための知見が集まっていることを示した。さらに土壌の凍結融解に伴う物理的構造や微生物の代謝および物質の移動への影響について概観し、それらを踏まえて現在行われている土壌凍結深制御技術の活用事例と発達が進むリモートセンシング技術について紹介した。土壌凍結深制御技術は雪が積もり屋外でできる農作業が限られた時期に人為的かつ機械で大規模に土壌理化学性に影響を与える手段になっている。この技術の活用を高度化させることで気候変動による悪影響を抑えるだけではなく、土壌の理化学性や収量性を改善する可能性がある。またセンシング技術の発達により地理、気象、作付けの種類だけではなく、圃場内の土壌の性質のバラツキを考慮した土壌管理技術開発も期待される。

引用文献

- 荒木英晴 (2015): 北海道の秋まきコムギにおける分けつ性に関する研究 — 第1報 分けつ追跡手法の検討と分けつ出現時期が穂形成・収量に及ぼす影響 —. 日本作物学会紀事, 84 (1): 34–40.
- Balesdent, J., Chenu, C. and Balabane, M. (2000): Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and tillage research*, 53 (3–4): 215–230.
- Bayard, D., Stahli, M., Parriaux, A. and Flühler, H. (2005): The influence of seasonally frozen soil on the snowmelt runoff at two Alpine sites in southern Switzerland. *Journal of Hydrology*, 309 (1–4): 66–84.
- Black, P. and Hardenberg, M.J. (1991): Historical perspectives in frost heave research: The early works of S. Taber and G. Beskow. U.S.A. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Speal Report, 91–23: 9–26, 37–157.
- Boydston, R.A., Seymour, M.D., Brown, C.R. and Alva, A.K. (2006): Freezing behavior of potato (*Solanum tuberosum*) tubers in soil. *American Journal of Potato Research*, 83 (4): 305–315.
- Butnor, J.R., Campbell, J.L., Shanley, J.B. and Zarnoch, S.J. (2014): Measuring soil frost depth in forest ecosystems with ground penetrating radar. *Agricultural and Forest Meteorology*, 192–193: 121–131.
- Chamberlain, E.J. and Gow, A.J. (1979): Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. In: H.L. Jessberger (Ed.), *Developments in Geotechnical Engineering*, pp. 73–92. Elsevier.
- Christensen, S. and Tiedje, J.M. (1990): Brief and vigorous N₂O production by soil at spring thaw. *European Journal of Soil Science*, 41 (1): 1–4.
- Christianson, C. and Cho, C. (1983): Chemical Denitrification of Nitrite in Frozen Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 47 (1): 38–42.
- Cleavitt, N., J. Fahey, T., Groffman, P., Hardy, J., Henry, K. and Driscoll, C. (2008): Effects of soil freezing on fine roots in a northern hardwood forest, 38: 82–91.
- Davidson, E.A., Keller, M., Erickson, H.E., Verchot, L.V. and Veldkamp, E. (2000): Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides: using two functions based on soil nitrogen availability and soil water content, the hole-in-the-pipe model characterizes a large fraction of the observed variation of nitric oxide and nitrous oxide emissions from soils. *AIBS Bulletin*, 50 (8): 667–680.
- DeLuca, T., Keeney, D. and McCarty, G. (1992): Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen. *Biology and Fertility of Soils*, 14 (2): 116–120.
- Doolittle, J.A. and Brevik, E.C. (2014): The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223: 33–45.
- Dörsch, P., Palojarvi, A. and Mommertz, S. (2004): Overwinter greenhouse gas fluxes in two contrasting agricultural habitats. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 70 (2): 117–133.
- Edwards, A and Cresser, M. (1992): Freezing and its effect on chemical and biological properties of soil, pp. 59–79. *Advances in soil science*, Springer.
- Edwards, L.M. (2013): The effects of soil freeze-thaw on soil aggregate breakdown and concomitant sediment flow in Prince Edward Island: A review. *Canadian Journal of Soil Science*, 93 (4): 459–472.
- Fitzhugh, R.D., Driscoll, C.T., Groffman, P.M., Tierney, G.L., Fahey, T.J. and Hardy, J.P. (2001): Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem. *Biogeochemistry*, 56 (2): 215–238.
- Freppaz, M., Williams, B.L., Edwards, A.C., Scalenghe, R. and Zanini, E. (2007): Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability. *Applied Soil Ecology*, 35 (1): 247–255.
- Goodroad, L. and Keeney, D. (1984): Nitrous oxide emissions from soils during thawing. *Canadian Journal of Soil Science*, 64 (2): 187–194.
- Groffman, P.M., Hardy, J.P., Driscoll, C.T. and Fahey, T.J. (2006): Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest. *Global Change Biology*, 12 (9): 1748–1760.
- Grogan, P., Michelsen, A., Ambus, P. and Jonasson, S. (2004): Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics

- in sub-arctic heath tundra mesocosms. *Soil Biology and Biochemistry*, 36 (4): 641–654.
- 橋本 均 (2008): 道立農試資料 北海道土壌区一覧 (改訂版), 37, p. 151.
- Herrmann, A. and Witter, E. (2002): Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 34 (10): 1495–1505.
- Hirota, T. (2008): Decreasing Soil-frost depth in eastern Hokkaido and its impact on agriculture. *Tenki*, 55: 548–551.
- Hirota, T., Iwata, Y., Hayashi, M., Suzuki, S., Hamasaki, T., Sameshima, R. and Takayabu, I. (2006): Decreasing soil-frost depth and its relation to climate change in Tokachi, Hokkaido, Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II* 84 (4): 821–833.
- Hirota, T., Usuki, K., Hayashi, M., Nemoto, M., Iwata, Y., Yanai, Y., Yazaki, T. and Inoue, S. (2011): Soil frost control: agricultural adaptation to climate variability in a cold region of Japan. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16 (7): 791–802.
- Hohmann, M. (1997): Soil freezing — the concept of soil water potential. State of the art. *Cold Regions Science and Technology*, 25 (2): 101–110.
- Hosaka, M., Nohara, D. and Kitoh, A. (2005): Changes in snow cover and snow water equivalent due to global warming simulated by a 20 km-mesh global atmospheric model. *Sola*, 1: 93–96.
- Huang, J., McBratney, A.B., Minasny, B. and Triantafyllis, J. (2017): Monitoring and modelling soil water dynamics using electromagnetic conductivity imaging and the ensemble Kalman filter. *Geoderma*, 285: 76–93.
- Iwata, Y., Hayashi, M. and Hirota, T. (2008): Comparison of snowmelt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover all rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from the publisher. *Vadose Zone Journal*, 7 (1): 79–86.
- Iwata, Y., Hayashi, M., Suzuki, S., Hirota, T. and Hasegawa, S. (2010): Effects of snow cover on soil freezing, water movement, and snowmelt infiltration: A paired plot experiment. *Water Resources Research*, 46 (9), W09504, doi: 10.1029/2009WR008070.
- Iwata, Y., Nemoto, M., Hasegawa, S., Yanai, Y., Kuwao, K. and Hirota, T. (2011): Influence of rain, air temperature, and snow cover on subsequent spring-snowmelt infiltration into thin frozen soil layer in northern Japan. *Journal of Hydrology*, 401 (3–4): 165–176.
- Iwata, Y., Yazaki, T., Suzuki, S. and Hirota, T. (2013): Water and nitrate movements in an agricultural field with different soil frost depths: field experiments and numerical simulation. *Annals of Glaciology*, 54 (62): 157–165.
- Kreyling, J., Beierkuhnlein, C., Pritsch, K., Schlöter, M. and Jentsch, A. (2008): Recurrent soil freeze-thaw cycles enhance grassland productivity. *New Phytol*, 177(4): 938–945.
- Lehrsch, G., Sojka, R., Carter, D. and Jolley, P. (1991): Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 55 (5): 1401–1406.
- Lehrsch, G., Sojka, R. and Jolley, P. (1993): Freezing effects on aggregate stability of soils amended with lime and gypsum. *Catena Supplement*, 24: 115–127
- Lipson, D.A., Schmidt, S.K. and Monson, R.K. (2000): Carbon availability and temperature control the post-snowmelt decline in alpine soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 32 (4): 441–448.
- 前塚研二 (2008): 十勝の野良イモ発生の実態と除雪による野良イモ処理. 北海道の農業気象, pp. 39–44.
- Makoto, K., Kajimoto, T., Koyama, L., Kudo, G., Shibata, H., Yanai, Y. and Cornelissen, J.H.C. (2014): Winter climate change in plant–soil systems: summary of recent findings and future perspectives. *Ecological Research*, 29 (4): 593–606.
- Maljanen, M., Alm, J., Martikainen, P.J. and Repo, T. (2010): Prolongation of soil frost resulting from reduced snow cover increases nitrous oxide emissions from boreal forest soil. *Boreal Environment Research*, 15 (1): 34–42.
- Maljanen, M., Kohonen, A.R., Virkajärvi, P. and Martikainen, P. (2007): Fluxes and production of N₂O, CO₂ and CH₄ in boreal agricultural soil during winter as affected by snow cover. *Tellus, B* 59 (5): 853–859.
- Maljanen, M., Virkajärvi, P., Hytönen, J., Öquist, M., Sparman, T. and Martikainen, P. (2009): Nitrous oxide production in boreal soils with variable organic matter content at low temperature-snow manipulation experiment. *Biogeosciences*, 6 (11): 2461–2473
- Mizoguchi, M. (1993): A derivation of matric potential in frozen soil. *Bulletin of the Faculty of Bioresources, Mie University*, 10: 175–182.
- Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E. and Mayr, T.R. (2011): The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma*, 162 (1–2): 1–19.
- Nemoto, M., Hirota, T. and Iwata, Y. (2008): Application of the extended force-restore model to estimating soil-frost depth in the Tokachi district of Hokkaido, Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 64 (3): 177–183.
- 農水省大臣官房統計部 (2017a): 平成 29 年耕地面積, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/index.html> (2018.4.2 確認).
- 農水省大臣官房統計部 (2017b): 平成 29 年農業構造動態調査結果, <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukou/index.html> (2018.4.1 確認).
- Øygarden, L. (2003): Rill and gully development during an extreme winter runoff event in Norway. *Catena*, 50 (2–4): 217–242.
- Öquist, M.G., Nilsson, M., Sörensson, F., Kasimir-Klemedtsson, Å., Persson, T., Weslien, P. and Klemedtsson, L. (2004): Ni-

- trous oxide production in a forest soil at low temperatures — processes and environmental controls. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 49(3): 371–378.
- Oztaş, T. and Fayetorbay, F. (2003): Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability. *Catena*, 52 (1): 1–8.
- Panikov, N.S., Flanagan, P.W., Oechel, W.C., Mastepanov, M.A. and Christensen, T.R. (2006): Microbial activity in soils frozen to below -39° C. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 (4): 785–794.
- Park, J.-H., Duan, L., Kim, B., Mitchell, M.J. and Shibata, H. (2010): Potential effects of climate change and variability on watershed biogeochemical processes and water quality in Northeast Asia. *Environment International*, 36 (2): 212–225.
- Puget, P., Chenu, C. and Balesdent, J. (1995): Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *European Journal of Soil Science*, 46 (3): 449–459.
- Rivkina, E., Friedmann, E., McKay, C. and Gilichinsky, D. (2000): Metabolic activity of permafrost bacteria below the freezing point. *Applied and Environmental Microbiology*, 66 (8): 3230–3233.
- Röver, M., Heinemeyer, O. and Kaiser, E.-A. (1998): Microbial induced nitrous oxide emissions from an arable soil during winter. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (14): 1859–1865.
- Ruan, L. and Robertson, G.P. (2017): Reduced snow cover increases wintertime nitrous oxide (N_2O) emissions from an agricultural soil in the upper U.S. midwest. *Ecosystems*, 20 (5): 917–927.
- 札幌管区气象台 (2017): 北海道の気候変化【第2版】, p. 2. 札幌管区气象台.
- Saruya, T., Kurita, K. and Rempel, A.W. (2013): Experimental constraints on the kinetics of ice lens initiation and growth. *Physical Review*, E 87 (3), 032404, doi: 10.1103/PhysRevE.87.032404.
- Saruya, T., Kurita, K. and Rempel, A.W. (2014a): Indirect measurement of interfacial melting from macroscopic ice observations. *Physical Review*, E 89 (6), 060401, doi: 10.1103/PhysRevE.89.060401.
- Saruya, T., Rempel, A.W. and Kurita, K. (2014b): Hydrodynamic transitions with changing particle size that control ice lens growth. *The Journal of Physical Chemistry*, B 118 (47): 13420–13426.
- Schimel, J., Balsler, T.C. and Wallenstein, M. (2007): Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology*, 88 (6): 1386–1394.
- Segura, J.H., Nilsson, M.B., Haei, M., Sparrman, T., Mikkola, J.-P., Gräsvik, J., Schleucher, J. and Öquist, M.G. (2017): Microbial mineralization of cellulose in frozen soils. *Nature communications*, 8(1), 1154, doi: 10.1038/s41467-017-01230-y.
- Shimoda, S., Yazaki, T., Nishio, Z., Hamasaki, T. and Hirota, T. (2015): Possible soil frost control by snow compaction on winter wheat fields. *Journal of Agricultural Meteorology*, 71 (4): 276–281.
- Shirazi, T., Allen, D., Quinton, W. and Pomeroy, J. (2009): Estimating soil thaw energy in sub-Alpine tundra at the hillslope scale, Wolf Creek, Yukon Territory, Canada. *Hydrology Research*, 40 (1): 1–18.
- Sorensen, P.O., Templer, P.H. and Finzi, A.C. (2016): Contrasting effects of winter snowpack and soil frost on growing season microbial biomass and enzyme activity in two mixed-hardwood forests. *Biogeochemistry*, 128(1–2): 141–154.
- Spaans, E.J.A. and Baker, J.M. (1996): The soil freezing characteristic: Its measurement and similarity to the soil moisture characteristic. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 13–19.
- Style, R.W. and Peppin, S.S. (2012): The kinetics of ice-lens growth in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, 692: 482–498.
- 鈴木伸治, 葛城拓也, 三井ともみ, 伊藤博武, 岡澤宏 (2014): 凍結をともなう網走地域の農地におけるマトリックポテンシャルの季節変動 — 誘電水ポテンシャルセンサの利用と凍土における浸透ポテンシャルの吟味 —. *土壌の物理性*, 126: 51–62.
- 谷昌幸 (2010): 北海道農業と土壌肥料 2010, pp. 1–13.
- Teepe, R., Brumme, R. and Beese, F. (2001): Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods. *Soil Biology and Biochemistry*, 33 (9): 1269–1275.
- Tierney, G.L., Fahey, T.J., Groffman, P.M., Hardy, J.P., Fitzhugh, R.D. and Driscoll, C.T. (2001): Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 56 (2): 175–190.
- Tiessen, H. and Stewart, J.W.B. (1988): Light and electron microscopy of stained microaggregates: the role of organic matter and microbes in soil aggregation. *Biogeochemistry*, 5(3): 312–322.
- Tilston, E., Sparrman, T. and Öquist, M. (2010): Unfrozen water content moderates temperature dependence of sub-zero microbial respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 (9): 1396–1407.
- Totsche, K.U., Amelung, W., Gerzabek, M.H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., Lehndorff, E., Mikutta, R., Peth, S. and Prechtel, A. (2018): Microaggregates in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 104–136.
- van Bochove, E., Prevost, D. and Pelletier, F. (2000): Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64 (5): 1638–1643.
- Wagner-Riddle, C. and Thurtell, G. (1998): Nitrous oxide emissions from agricultural fields during winter and spring thaw as affected by management practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52 (2–3): 151–163.
- Walker, V.K., Palmer, G.R. and Voordouw, G. (2006): Freezethaw tolerance and clues to the winter survival of a soil community. *Applied and Environmental Microbiology*, 72 (3): 1784–1792.
- Walvoord, M.A. and Kurylyk, B.L. (2016): Hydrologic impacts of thawing permafrost — A review. *Vadose Zone Journal*, 15 (6): 1–20.

- Watanabe, K. and Flury, M. (2008): Capillary bundle model of hydraulic conductivity for frozen soil. *Water Resources Research*, 44 (12), W12402, doi: 10.1029/2008WR007012.
- Watanabe, K. and Kugisaki, Y. (2017): Effect of macropores on soil freezing and thawing with infiltration. *Hydrological Processes*, 31 (2): 270–278.
- Watanabe, K., Takeuchi, M., Osada, Y. and Ibata, K. (2012): Micro-chilled-mirror hygrometer for measuring water potential in relatively dry and partially frozen soils. *Soil Science Society of America Journal*, 76 (6): 1938–1945.
- Wertz, S., Goyer, C., Zebarth, B.J., Burton, D.L., Tatti, E., Chantigny, M.H. and Fillion, M. (2013): Effects of temperatures near the freezing point on N₂O emissions, denitrification and on the abundance and structure of nitrifying and denitrifying soil communities. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 83 (1): 242–254.
- Wolf, B., Zheng, X., Bruggemann, N., Chen, W., Dannenmann, M., Han, X., Sutton, M.A., Wu, H., Yao, Z. and Butterbach-Bahl, K. (2010): Grazing-induced reduction of natural nitrous oxide release from continental steppe. *Nature*, 464 (7290), 881, doi: 10.1038/nature08931.
- Xu, J., Ren, J., Wang, Z., Wang, S. and Yuan, J. (2018): Strength behaviors and meso-structural characters of loess after freeze-thaw. *Cold Regions Science and Technology*, 148: 104–120.
- Yanai, Y., Hirota, T., Iwata, Y., Nemoto, M., Koga, N., Nagata, O. and Ohkubo, S. (2014): Snow cover manipulation in agricultural fields: as an option for mitigating greenhouse gas emissions. *Ecological Research*, 29 (4): 535–545.
- Yanai, Y., Hirota, T., Iwata, Y., Nemoto, M., Nagata, O. and Koga, N. (2011): Accumulation of nitrous oxide and depletion of oxygen in seasonally frozen soils in northern Japan — Snow cover manipulation experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, 43 (9): 1779–1786.
- Yanai, Y., Iwata, Y. and Hirota, T. (2017): Optimum soil frost depth to alleviate climate change effects in cold region agriculture. *Sci Rep* 7, 44860, doi: 10.1038/srep44860.
- 柳井洋介, 豊田剛己, 岡崎正規 (2007): 土壤の凍結融解をめぐる土壤微生物学研究の進展: 凍結融解土壌における亜酸化窒素発生の機構解明と関連して. *土と微生物*, 61(2): 135–146.
- 矢崎友嗣, 広田知良, 鈴木剛, 白旗雅樹, 岩田幸良, 井上聡, 白木一英 (2012): 北海道の気候条件からみた土壤凍結深制御による野良イモ防除の作業日程の検討. *生物と気象*, 12: 12–20.
- Zent, A. (2008): A historical search for habitable ice at the Phoenix landing site. *Icarus*, 196 (2): 385–408.

要 旨

北海道の農業の特徴の1つに、長い冬の低温と積雪に由来する作物の生育期間が短いことが挙げられる。寒冷地農業の生産性を向上させるために、積雪期間中の土壤管理方法の開発を目指しており、現在は物理的構造や生化学反応に影響を与える土壤の凍結に注目している。本稿では北海道における土壤凍結深制御技術の発展の背景および土壤の凍結融解に伴う土壤理化学性への影響に関する既往研究を紹介する。それに基づき北海道での積雪期間中の土壤管理の現状を述べ、今後の展望について論じる。

キーワード：土壤凍結，気候変動，土壤理化学性，土壤管理法，北海道