

課題名	A-0807 気候変動に対する寒地農業環境の脆弱性評価と積雪・土壌凍結制御による適応策の開発
課題代表者名	廣田知良(独立行政法人 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 寒地温暖化研究チーム)
研究実施期間	平成20～22年度
累計予算額	90,055千円(うち22年度 31,955千円) 予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) 寒地の農業環境における温暖化影響に対する脆弱性の評価と適応対策技術の開発</p> <p>1) 寒地の農業環境における温暖化影響に対する脆弱性の評価 独立行政法人 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</p> <p>2) 寒地の農業環境における温暖化影響に対する適応対策技術の開発 独立行政法人 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</p> <p>(2) 異なる積雪・土壌凍結条件下の土壌中の硝酸態窒素を含む陰イオン移動の定量的評価 北海道大学 農学研究院 環境資源学部門</p>
研究概要	<p>1. はじめに。</p> <p>温室効果ガス濃度の増大に伴う温暖化等の地球規模の気候変動は農業にも大きな影響を与えており、その適応・緩和対策が強く求められている。世界の約1/4の農地は冬に雪と氷に覆われる寒地にある。寒冷地では一般に、温暖化により農地利用可能面積が広がり、農業生産力の増加が期待されている。一方、我が国を代表する農業地帯であり、寒冷地の南限に位置するために気候変動の影響を受けやすい北海道・道東地域では、北海道開拓以来前例のない土壌凍結深の顕著な減少により、野良イモと呼ばれる雑草の発生等、農業環境への想定外の負の影響が現れはじめている。また、土壌凍結深が浅くなることで融雪水の浸透量が増加し、農地の肥料成分が地下水を汚染するリスクが増大している可能性が指摘されている。さらに、北海道の道東地域や北米、北欧の土壌凍結地帯では温室効果ガスである一酸化二窒素の融雪・融解期の大量放出が確認されている。これらの現象は、寒冷地帯において気候変動に対する適切な対応を取らなければ、農業由来の環境負荷が増大する懸念があることを示している。気候変動に対する寒冷地の農業生産性の確保と農業由来の環境負荷の軽減を両立するために、これらの脆弱性を適切かつ早急に評価し、さらに、この知見に基づいて対策技術を開発する必要がある。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究では、気候変動に伴う積雪・土壌凍結期間中の農地の水・熱・物質循環の変化が寒地の農業環境に与える影響について、その実態と要因の解明を行う。特に、融雪期以降に集中して大量放出することが知られる温室効果ガスの一酸化二窒素の発生と大気への放出、ならびに土壌凍結深の近年の減少に伴い地下水汚染のリスクが高まっている土壌中の硝酸態窒素の動態の解明を中心に取り組み、寒冷地農業環境の気候変動・温暖化影響に対する脆弱性を評価する。そして、ここで得られた知見を活かし、我が国の営農技術として実施されている積雪・土壌凍結管理技術により、環境負荷を低減する技術を農業生産性と両立させつつ、寒冷地農業における温暖化影響に対する適応・緩和策を開発することを目的とする。</p> <p>3. 研究の方法</p> <p>(1) 寒地の農業環境における温暖化影響に対する脆弱性の評価と適応対策技術の開発</p> <p>1) 野外観測の概要</p> <p>北海道を代表する二つの気候区分帯にある北海道・道東地域十勝地区：芽室(42° 53' N, 143° 04' E；北海道農業研究センター芽室拠点：少雪地帯)と北海道・道央地域石狩地区：札幌(43° 0' N, 141° 24' E；北海道農業研究センター羊ヶ丘：多雪地帯)に観測サイトを設置した。冬期モンスーンの影響と地形的な要因により、札幌に比べ芽室の方が冬期の気温が低く、降雪量が少ない。土壌は両サイト共に我が国に代表的な火山灰を母材とする黒ボク土である。両観測サイトにおいて、除雪処理により土壌凍結を発達させた区(除雪区；SR)、融雪材を散布して消雪日を早める区(融雪区；SM)、溶質移動を測定する区(溶質移動区；ST)、自然積雪状態を維持した対照区(C0)を設けた。各試験区で一酸化二窒素の放出速度、土壌ガス濃度、土壌水分と肥料成分の移動、微気象要素の観測を、2008年11月</p>

から2010年10月の2年間（一部2011年3月まで継続）にわたって実施した。以下に、観測システムの概要と各観測項目の詳細を述べる。

## 2) 温室効果ガス計測手法の開発およびネットワーク型モニタリングシステムの構築

温室効果ガスの観測手法について、寒冷地での土壌-大気間のガスフラックスと土壌中の温室効果ガスを体系的に観測でき、以下の特徴を有するモニタリングシステムを構築した。

- ① 手動でのクローズドチャンバー法による観測に加えて、厳寒条件下で動作可能な自動開閉チャンバーに自動ガス採取装置を組み合わせ、地表面ガスフラックスを測定した。プログラム制御機能を持つデータロガーによって自動チャンバーシステムの一連の動作を自動制御するシステムを新規に構築し、融雪期以降の一酸化二窒素大量放出時期において昼夜を含め最大2時間間隔の高頻度ガスフラックス観測が可能となった。さらに、二酸化炭素について、2009年から札幌試験区でガス濃度計測センサーと自動開閉式チャンバーを組み合わせた高頻度連続フラックス観測を実施した。

- ② 地表面からのガス放出と併せて、土壌中でのガス生成過程の観測を積雪・土壌凍結融解条件下で実施するため、厳寒条件でも確実なサンプリングが可能なシリコンチューブを用いた拡散チャンバー型土壌ガス採取法を新たに開発・導入した。また、土壌中での一酸化二窒素生成部位だけでなく生成要因を特定するため、酸素濃度センサーを拡散チャンバーにつけて土壌ガス中の酸素濃度の自動連続計測を実施した。また、二酸化炭素について、2009年から札幌試験区においてセンサーベースのガス濃度の連続観測を実施した。

- ③ 積雪・土壌凍結条件の農地における土壌水分移動を定量的に評価するため、土壌水分プロファイルをTDR(Time domain reflectometry)土壌水分計により測定した。また、深層への融雪水の浸透量を評価するため、テンシオメータを下層に埋設し、ダルシーの法則により対象土層下端の水フラックスを計算した。
- ④ 土壌凍結層の熱的環境を調べるため、地温プロファイルを熱電対により測定した。0℃以下の地点を土壌が凍結していると判断し、地温プロファイルから土壌凍結深を推定した。深さ0.02 mに地中熱流板を埋設し、地中熱流量を測定した。
- ⑤ 積雪環境を調べるため、降水量を溢水式降水量計により、積雪深を超音波積雪深計により測定した。また、1週間に2度、採雪管により積雪水量を測定した。
- ⑥ 上記の観測に加えて、微気象観測も実施し、本研究では測定項目数が300を超える大規模な観測体系となった。このような複数サイト・多試験区から得られる膨大なデータの処理を効率化するため、「観測運用-データ回収-データバックアップ-作図」を自動化できる体系的なネットワーク観測システムを構築した。これにより、データ取得の省力化とトラブルの早期発見、積雪管理(除雪・融雪材散布)の時期の判断、プロジェクトメンバー間のデータ共有の迅速化を実現した(図1)。

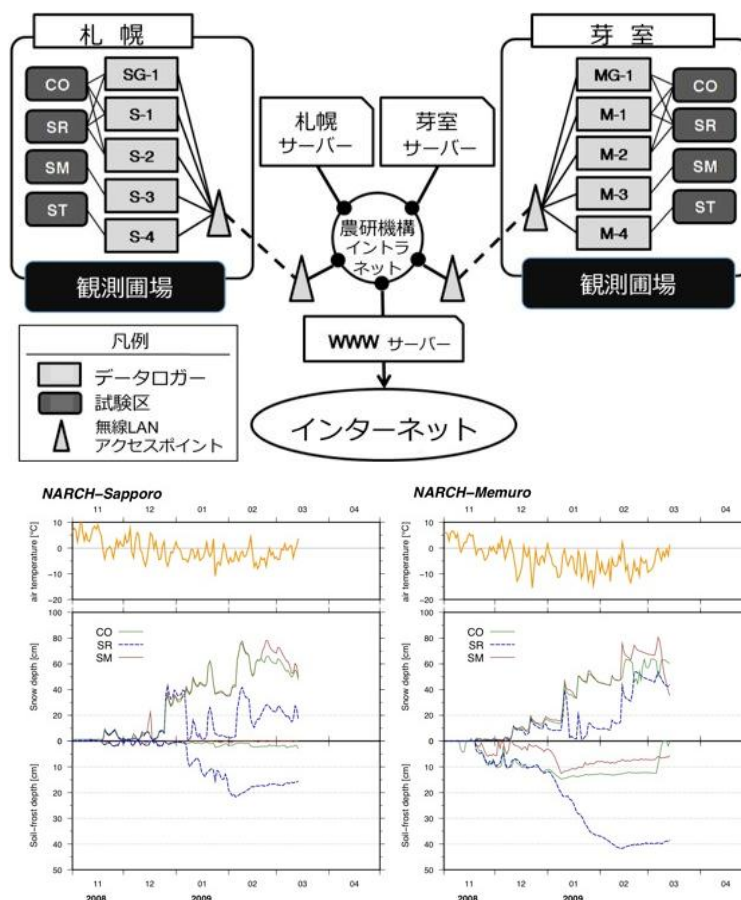


図1 観測システム全体のネットワーク概念図、および日別値の図例(2009年3月17日時点の物)。左は札幌サイト、右は芽室サイト上段は気温、中段は積雪深、下段は土壌凍結深を示す。積雪深と土壌凍結深は対照区(CO)、除雪区(SR)、融雪材散布区(SM)についてそれぞれプロットされている。1日1回自動更新

### 3) 積雪管理・土壌凍結深制御による寒冷地農業における温暖化適応策の開発

北海道の十勝地方では、降雪時期の早期化で土壌凍結深の減少を生じ、収穫後の畑に残った小イモが凍死せず越冬して、翌年に芽を出し雑草化する「野良イモ」の多発が問題化している。この問題に対して、一部の農家では、冬期間に雪を地表から除去することによる土壌凍結促進で野良イモの凍死処理を試みはじめた。一方、土壌凍結の発達は、温室効果ガスの放出量の増加による環境負荷の増加や逆に融雪水の浸透抑制による地下水汚染の防止といった環境負荷低減につながる可能性がある。そこで本研究では、積雪深を操作することで土壌凍結深を調節できることや、土壌凍結深の変化に伴い土壌水分動態も変化することに着目し、積雪を管理することで、農業の生産性を維持し、かつ環境負荷も軽減できるような最適な土壌凍結状態に制御する技術の開発を着想した。この土壌凍結深制御技術の具体的な手法を提示し、上記試験区データを用いた検証を行った。さらに、土壌凍結深制御による環境負荷低減効果について、特に土壌凍結深の減少による融雪水の地下浸透量の増加に伴う地下水汚染リスクの軽減と、温室効果ガスである一酸化二窒素の融雪期以降における大量放出の軽減について、野良イモ防除との両立の観点も含めて考察した。

### 4) 土壌凍結深制御と木炭融雪材散布のLCA評価

温室効果ガス排出量については、LCA（ライフサイクルアセスメント）を実施し、積雪・土壌凍結管理技術の地球温暖化に及ぼす影響を総合的に評価した。土壌由来の二酸化炭素排出量は純生物相生産量として評価した。この指標は、純生態系生産量と系外からの炭素投入量との差であるが、本研究では、無作付け条件下での観測であるため、純生態系生産量は有機物分解呼吸量（二酸化炭素放出量観測値）と等しく、CO、SR区では系外からの炭素投入がないために、CO、SR区の純生物相生産量は、有機物分解呼吸量と等しくなる。SM区では、融雪材（粗粒木炭）からの炭素投入があるため、SM区の純生物相生産量は、有機物分解呼吸量と融雪材からの炭素投入量の差となる。土壌由来の一酸化二窒素排出量は、各観測サイトで得られた年間発生量を利用した。化石燃料消費に由来する二酸化炭素排出量は、十勝地方で一般的なバレイショ栽培体系における化石燃料消費量から算出した二酸化炭素排出量をCO区の二酸化炭素排出量として、また除雪および融雪材散布における二酸化炭素排出量は、それぞれ除雪、融雪材散布に伴う二酸化炭素排出量を上乘せすることで、化石燃料消費由来二酸化炭素排出量を評価した。地球温暖化ポテンシャル（温室効果ガスの地球温暖化に対する効果を示す指標で、二酸化炭素の効果に対する相対的な値）を用いて、すべてのガスの排出量を二酸化炭素排出量として評価した。

## (2) 異なる積雪・土壌凍結条件下の土壌中の硝酸態窒素を含む陰イオン移動の定量的評価

### 1) 黒ボク土の陰イオン吸着による硝酸イオンの移動遅延

黒ボク土の下層土は陰イオンを吸着するため、硝酸イオン ( $\text{NO}_3^-$ ) の移動は水移動に比べて遅延する。この特徴を定量的に表すために、芽室を含む9種の黒ボク土および札幌下層土（非黒ボク土）を対象に、 $\text{NO}_3^-$ の吸着等温線から分配係数を求めた。一方、カラム試験により $\text{NO}_3^-$ の流出試験を行い、移流分散方程式を解くことにより、 $\text{NO}_3^-$ の遅延係数を求めた。

### 2) 土壌の電気伝導度のモニタリングから土壌溶液中の $\text{NO}_3^-$ 濃度を推定する手法の確立

冬期・融雪期を含む畑の $\text{NO}_3^-$ の挙動をモニターするため、畑に埋設したTDRによる土壌の誘電率と電気伝導度のデータをもとに、土壌溶液の $\text{NO}_3^-$ 濃度を推定する。このためには、土壌の電気伝導度 (ECa) から土壌溶液の電気伝導度 (ECw) を推定し、さらにECwから $\text{NO}_3^-$ 濃度を推定しなければならない。そこで、 $\text{KNO}_3$ の濃度を5段階に、土壌水分を飽和から圧力水頭で-200 cmの範囲に変化させたカラム試験の結果を用いて、ECaからECwを推定するためのモデルを作った。さらに、札幌および芽室の溶質移動区 (ST区) において層位別に素焼カップを用いて採取した水の電気伝導度と $\text{NO}_3^-$ 濃度を回帰直線で近似した。

### 3) 土壌凍結深の違いが $\text{NO}_3^-$ の溶脱に与える影響の評価

北海道農業研究センター芽室研究拠点の試験圃場において、2009年9月から2010年8月に、慣行の施肥体系に準じて小麦を栽培した。この圃場において、冬期に圧雪して土壌凍結を発達させる試験区と、自然積雪状態で土壌凍結深が浅い対照区を設置し、両試験区において、秋（土壌凍結前）と春先（消雪後）に土壌サンプリングをおこない、 $\text{NO}_3^-$ の鉛直分布を調査した。また、同研究拠点の1 ha程度の圃場を2つに分割し、片方を圧雪して土壌凍結深を発達させ、片方を自然積雪状態で管理した。秋に畑に残留する窒素を模擬するため、硫酸アンモニウム  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  を散布し、両試験区の秋と春先の $\text{NO}_3^-$ の鉛直分布を比較した。

十勝地方更別村において、夏作としてバレイショを栽培し、後作にコムギもしくはマメの栽培を

予定している畑を2008-2009年、2009-2010年とも2箇所選定し、凍結前と融雪後のNO<sub>3</sub>の深さ別濃度分布から、除雪処理がNO<sub>3</sub>の溶脱に与える影響を調べた。マメの栽培を予定している畑は除雪処理を行ったために凍結深が深く、隣接するコムギ畑は除雪を行っていないため凍結深が浅い。コムギ畑ではバレイショ収穫後に施肥を行っており、マメ栽培予定の畑では施肥を行っていないため、除雪処理が硝酸溶脱に与える影響は凍結前と融雪後のNO<sub>3</sub>濃度分布の相違から判定した。

#### 4. 結果及び考察

(1) 寒地の農業環境における温暖化影響に対する脆弱性の評価と適応対策技術の開発

1) 積雪・土壤凍結条件と融雪期の土壤水分移動の関係

プロジェクト実施期間中の土壤凍結深と融雪期の融雪水量、融雪水の土壤への浸透量を表1に示す。札幌よりも寒冷な芽室では、除雪をすることで土壤凍結深が0.4～0.5 mになった。土壤凍結深が深かった芽室の除雪区では、融雪期における融雪水量に対する融雪水の浸透量の割合（浸透割合）が低く、融雪水の浸透が極めて抑制されたことが明らかになった。土壤凍結深が芽室よりも浅かった札幌でも、対照区に比べて除雪区で浸透割合が小さく、除雪区で融雪水の浸透が抑制された。対照区については、融雪期直前の土壤凍結深が0.05～0.1 mだった芽室でも、ほとんどすべての融雪水が土壤に浸透した。

上記の2年間の観測に加え、先行して芽室で行われた3年間の観測データから、土壤凍結深が0.2 mまでは、土壤凍結層が融雪水の浸透を抑制することはないが、土壤凍結深が0.2 mよりも深くなると、土壤凍結深が増加するほど融雪水量に対する融雪水の土壤への浸透量の割合が低下することが明らかになった（図2）。土壤凍結

深の増加により透水に寄与する間隙の連続性が氷で切断される確率が上昇することで、融雪水の浸透割合が減少することを、概念的な間隙構造モデルの解析により明らかにした。札幌の除雪区では、2008-09年の融雪期直前の凍結深は2009-10年よりも浅かったにもかかわらず（それぞれ、0.13 mと0.25 m）、2008-09年の方が翌年よりも浸透割合が小さかった（表1）。2008-09年は、厳冬期の1月と2月に一時的に気温が0℃以上に上昇し、降雨が発生した。これと同様に、厳冬期の12月に降雨がみられた芽室の2007-08年の対照区でも、土壤凍結深と浸透割合の関係は、厳冬期に降雨がなかったその他の年の関係とは異なり、土壤凍結深が0.1 m台と比較的浅いにもかかわらず、融雪水の浸透が極めて抑制された（図2）。厳冬期の地中熱流量の解析から、これらの年には降雨後に気温が低下し、多量の雨水が地表面付近で凍結したことが示された。このことから、厳冬期の降雨により凍結層の氷の量が増えることで、土壤凍結深が浅くても融雪水の浸透が抑制されたと考えられた。雨水が表層付近で多量に凍結するためには、降雨後に気温の急激な低下以外に、積雪層が浅い必要があることが、気温、積雪深、雪密度と地中熱流量の関係を解析することで明らかになった。

#### 2) 農地における積雪・土壤凍結期間の温室効果ガス放出機構の解明

① 土壤凍結深の違いが一酸化二窒素の排出に及ぼす影響

土壤凍結深が発達すると一酸化二窒素の土壤から大気への放出は助長され、凍結の発達した除雪区SRでは、消雪後にスパイク状の顕著な放出速度の変化を観測した。このことは、二酸化炭素の放出速度が春から夏にかけて高くなり夏から秋にかけて低くなるといった気温の変化に準じているのと全く対照的であった。除雪区の冬期（11月から4月）の一酸化二窒素の年間放出量に対する寄

表1 融雪期における融雪期直前の土壤凍結深と、総融雪水量と総浸透量の比較

		凍結深 (m)	浸透量 (mm)	融雪水量 (mm)	浸透量/融雪水量
札幌	2008-09年 対照区	0	168	219	0.77
	2008-09年 除雪区	0.13	41	90	0.46
	2009-10年 対照区	0	169	198	0.85
	2009-10年 除雪区	0.25	8	12	0.67
芽室	2008-09年 対照区	0	140	168	0.83
	2008-09年 対照区	0.10	183	206	0.89
	2008-09年 除雪区	0.39	84	155	0.54
	2009-10年 対照区	0.05	190	190	1.00
芽室	2009-10年 除雪区	0.48	13	35	0.37
	2009-10年 融雪区	0.02	176	190	0.93

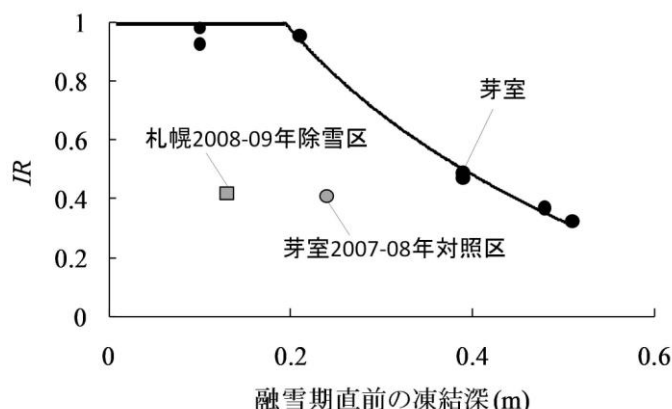


図2 試験圃場における浸透割合（IR；融雪期における融雪水の浸透量を融雪水量で除した値）と融雪期直前の土壤凍結深の関係



与率は、70%以上であった。一方、二酸化窒素は冬期の寄与率は6~18%であった。したがって、土壤凍結が発達する寒冷な気候帯では一酸化二窒素の年間放出量を評価する上では冬期評価は非常に重要である（図3）。11月から4月の半年間の積算ガス排出量と土壤凍結の関係は、2008-09年単独だけでなく2009-10年の観測結果を含めても年最大土壤凍結深と有意な正の相関（ $P < 0.01$ ）を得た。一方で、11月から4月の半年間における二酸化炭素排出量と年最大凍結深との間には有意な相関関係は認められなかった。

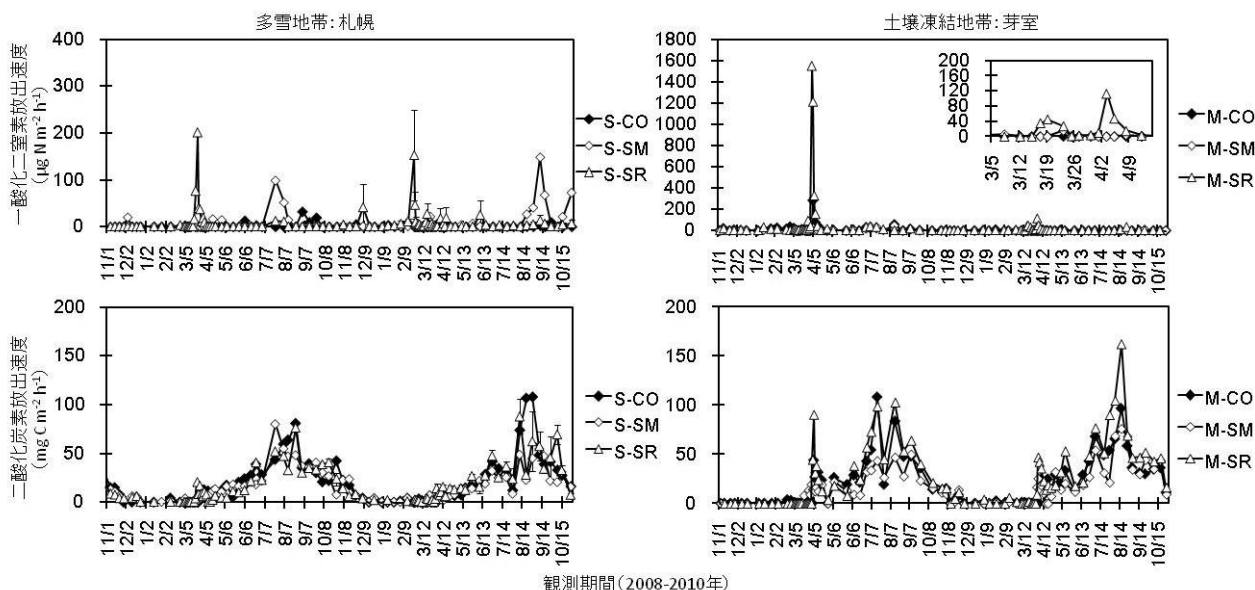


図3 クローズドチャンバー法（マニュアル）で測定された土壤からのガス放出速度  
CO：対照区、SM：融雪材散布区、SR：除雪区

② 土壤中の一酸化二窒素の生成動態・要因解明  
土壤が融解するときの一酸化二窒素の短期・集中的な大量放出のメカニズムは以下のように説明できる。1)で示したように、土壤凍結深が0.2 mよりも深くなると、i)融雪水量の土壤への浸透が抑制され、地表面が湛水条件になることで、ii) 大気との通気性が阻害されて、融凍期に土壤ガス中の酸素分圧の低下が生じ（図4）、iii) かつ地温が0℃近辺で微生物活動が可能な温度条件において、酸素から硝酸イオンに呼吸基質を選択す

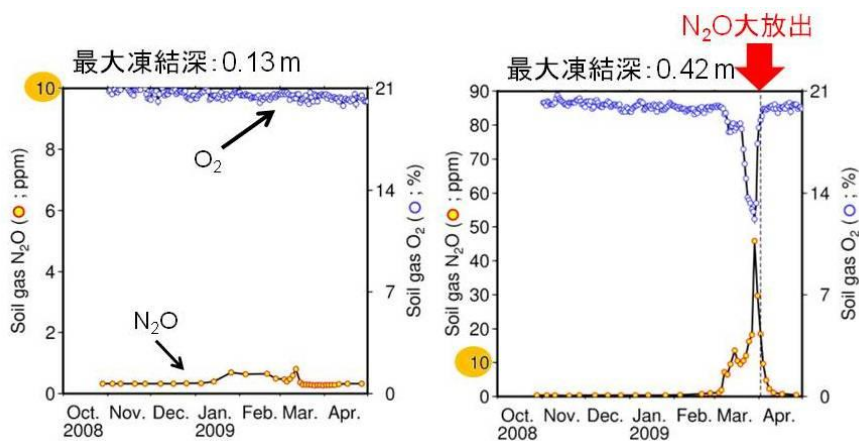


図4 土壤ガス中N<sub>2</sub>O濃度の上昇とO<sub>2</sub>濃度の関連（0.1 m深）  
地表面からN<sub>2</sub>Oが排出される前に土壤ガス中N<sub>2</sub>O濃度が上昇しO<sub>2</sub>濃度が低下（右図）、土壤凍結が浅いとそのような変化なし（左図）

る脱窒により一酸化二窒素の生成を促し表層土壤中に蓄積が大きく進むため、iv) 消雪後に湛水がなくなるのと同時に大量放出が引き起こされる。

ただし、一酸化二窒素の放出量と土壤凍結深の強い関係は認められるものの、両者の関係には大きな年次間差がみられた。2009年11月から2010年10月までの観測では、芽室の除雪区で前年より土壤凍結は発達したが（表1）、芽室除雪区の最大放出速度は前年の最大値の7%と非常に小さかった（図3）。土壤ガス中の一酸化二窒素濃度についても、2009年3月より2010年3月の方が低い傾向にあった。

2009年の一酸化二窒素が大量生成・放出された時は融雪・融凍期に地面が積雪に覆われ、表層0.1 mの地温は0°C近辺であったのに対し、2010年は裸地状態でかつ平年より気温が低く、地温も-4~-1°C程度と低く推移した。したがって、一酸化二窒素の生成強度は土壤凍結深ばかりでなく、融雪・融凍期の地温からも微生物活動をとおして影響を受けていると考えられた。以上から、寒冷地での一酸化二窒素の大量生成・放出の機構は図5のようにまとめられる。

3) クローズドチャンパーと二酸化炭素センサーを利用したガスフラックス高頻度観測

積雪および土壤凍結を伴う期間は、地温が低いため潜在的な地表面二酸化炭素放出量は小さく、積雪層および土壤凍結層は土壤から大気への二酸化炭素ガス拡散を抑制し、地表面放出はほとんど見られなかった。一方、融雪や消雪に伴いガス拡散を抑制していた積雪層・土壤凍結層が無くなると、従来の温度依存式で見積もられる量以上の地表面放出量が観測された。また、同じ土壤凍結深でも、厳冬期の一時的な気温上昇による降雨の後の気温の急低下等で土壤中に存在する氷の量が増えると、土壤凍結層のガス拡散を抑制する強度は強くなった。

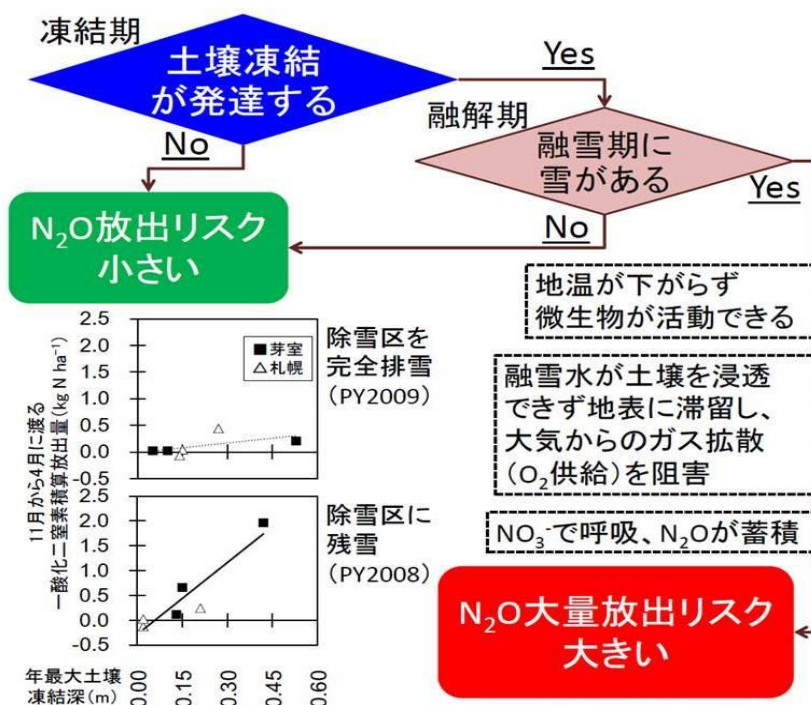


図5 寒冷地における一酸化二窒素の大量生成・放出機構

4) 土壤凍結深制御の検証

日平均気温と積雪深を入力データとして、地温、土壤凍結深を予測する数値モデルを用い、農地の雪の人為的管理(除雪、再集積)をおこなうことで最適な土壤凍結の深さに制御する土壤凍結深制御手法を開発した。本手法を積雪操作試験区で検証し、土壤凍結深を数cm以内の精度で制御が可能であることを示した(図6)。本手法と、雪割りと呼ばれるトラクターやブルドーザ等の作業機械で行う雪の除雪・再集積作業により、農地において効率的かつ大規模に土壤凍結深の制御を行うことができる。したがって、土壤凍結深制御手法により、これまで実施困難とされていた大規模農地での環境制御の実現が可能であることが示された。

(2) 異なる積雪・土壤凍結条件下の土壤中の硝酸態窒素を含む陰イオン移動の定量的評価

1) 黒ボク土の陰イオン吸着による硝酸イオンの移動の遅延

陰イオンの吸着を表す指標である、芽室下層土の分配係数は0.76 L kg<sup>-1</sup>であり、冬期の下層土の平均体積含水率の0.45を使うと、下層土に流入した

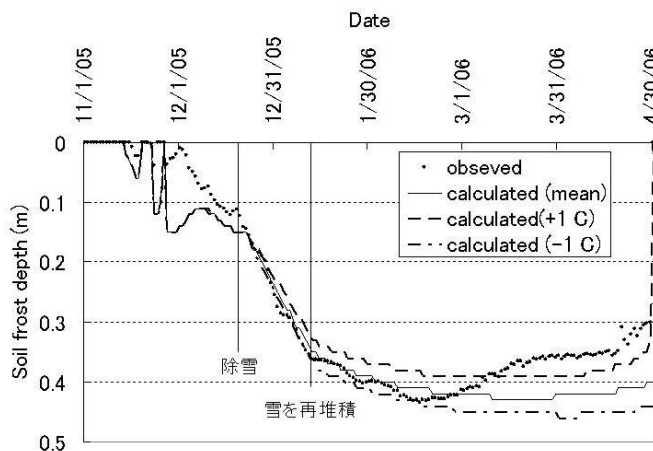


図6 土壤凍結深制御の検証結果例(芽室)

\*除雪実施の12月19日まではモデルに観測値を入力。以降の気温は予測を想定：平年値、および平年値 ±1°Cを入力。

NO<sub>3</sub>量の55%は土粒子に吸着されていることになる。本研究で得た、日本国内の代表的な火山灰土壌の分配係数は、0.29~1.57 L kg<sup>-1</sup>であり、黒ボク土下層土の体積含水率の範囲を0.4~0.7 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>とすると、本研究の分配係数の範囲から、一般的に黒ボク土下層土ではNO<sub>3</sub>の約2.5~8割程度が固相に吸着して存在していると推定される。遅延係数(R)は分配係数(K<sub>d</sub>)と乾燥密度(ρ<sub>b</sub>)および体積含水率(θ)を用いると以下のように表せる。

$$R=1+\left(\frac{\rho_b}{\theta}\right)K_d \quad (1)$$

溶質の移動量に対する水の移動量の割合である遅延係数の値は、供試土壌の最小値が1.28、最大値が3.15であった。このうち、芽室の遅延係数は2.17であり、この場合、下層土において水が0.1 m進むとき、NO<sub>3</sub>は0.046 m移動することになる。今回実験に用いた黒ボク土全てを対象にすると、黒ボク土下層土では、水が1 m進む際に、NO<sub>3</sub>は約0.8 mから0.3 m程度しか移動しないと見積もられた。NO<sub>3</sub>吸着データから得た分配係数と、移流分散方程式から推定した遅延係数との関係は、以下の1次式で表された(r = 0.98, p < 0.00001)。

$$R=1+1.45K_d \quad (2)$$

式(2)は、式(1)と同等の関数型である。直線の勾配は、式(1)からρ<sub>b</sub>/θに相当することがわかる。今回の実験では、ρ<sub>b</sub>は現場の乾燥密度にあわせて試験カラムに充填しており、ρ<sub>b</sub>、θとも土壌により異なるが、遅延係数Rと分配係数K<sub>d</sub>の関係が直線で近似できた。黒ボク土の遅延係数が第一近似として、式(2)で表せたことから、この式が広く黒ボク土のNO<sub>3</sub>移動の遅延を予測するのに適応出来る可能性がある。

2) 土壌の電気伝導度のモニタリングから土壌溶液中のNO<sub>3</sub>濃度を推定する手法の確立  
土壌の電気伝導度(ECa)と土壌溶液の電気伝導度(ECw)の関係は、土壌溶液の電気伝導度が0.1~0.9 dS m<sup>-1</sup>、土壌水分が飽和から圧力水頭で-200 cmまでの範囲において、札幌、芽室の各層ともに(3)式で近似することができた。

$$EC_a=(a\theta+b)EC_w+c \quad (3)$$

ここで、a, b, cは土層によって異なる定数である。また、電気伝導度は温度変化の影響を強く受けるため、圃場で得られた電気伝導度の値は、室内実験により求めた温度と電気伝導度との関係をもとに、全て20℃に変換して表した。畑において素焼カップで採取した溶液の主要陰イオンは、NO<sub>3</sub>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>であった。このうちCl<sup>-</sup>とSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は観測期間を通してほぼ一定であり、1.37~1.64 mmol L<sup>-1</sup>の範囲にあり、芽室Ap層ではさらに低かった。このことは、NO<sub>3</sub>濃度の予測精度は他の陰イオン濃度に依存し、NO<sub>3</sub>濃度が低いと予測精度が落ちることを示している。

TDRによる土壌溶液のNO<sub>3</sub>濃度は、土壌水分が大きく低下する0.1 m深を除いて連続的にモニターすることができた。図7に各深さのNO<sub>3</sub>濃度をもとに、深さ0.1~0.7 mまでに存在するNO<sub>3</sub>-Nを計算した結果を示す。2年間の対象期間に散布したKNO<sub>3</sub>は345 kg ha<sup>-1</sup>であった。実験終了時に含まれていた

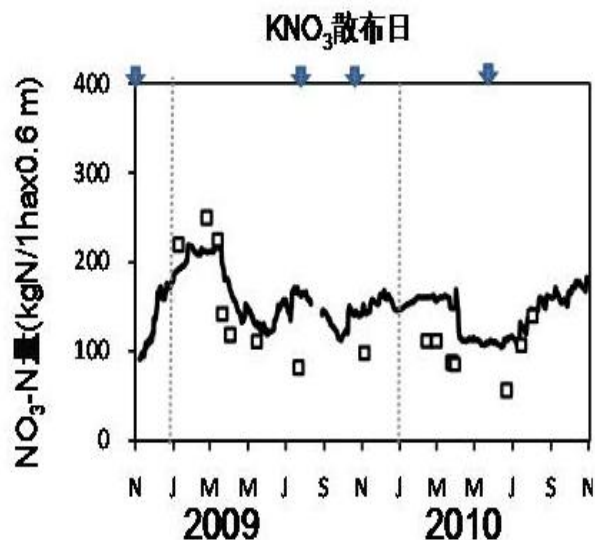


図7 札幌のNO<sub>3</sub>-N存在量の経時変化  
実線がTDRから推定したNO<sub>3</sub>-N量であり、□が素焼カップによる採水データから計算したNO<sub>3</sub>-N量(凍結深0.05 m)。



$\text{NO}_3\text{-N}$ の差は開始時よりも約100 kg多いことから、2年間に溶脱した $\text{NO}_3\text{-N}$ は約250 kgと考えられた。また、図7は凍結深が浅い(0.05 m)の観測例であるが、3月から4月の融雪期に $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱が著しいことが分かる。

### 3) 土壤凍結深の違いが実際の農家圃場の $\text{NO}_3$ の溶脱に与える影響の評価

隣接した場所で除雪処理の有無がある農家の畑を対象に、初冬と融雪後の硝酸態窒素の深さ別の濃度を調査した結果、残渣や土壤凍結深の空間的なバラツキが大きかったため、除雪の有無による凍結深の違いが $\text{NO}_3$ の溶脱に与える影響ははっきりとしなかった。一方、北海道農業研究センター芽室研究拠点の試験区内に設置した、自然積雪状態の対照区と圧雪により土壤凍結深を増加させた試験区、および小麦畑の秋と春先の硝酸態窒素の鉛直分布を比較したところ、土壤凍結深の増加に伴って $\text{NO}_3\text{-N}$ の溶脱が抑制されることが確認された(図8、図9)。

#### (3) 環境負荷軽減と生産性を両立させるための積雪・土壤凍結管理技術

##### 1) 環境負荷低減と野良イモ防除を両立する最適土壤凍結深の導出

融雪水の土壤への浸透、硝酸態窒素、温室効果ガス一酸化二窒素の成果を土壤凍結深との関係で改めて整理すると、凍結深が0.2 m以下であると融雪水は土壤へ速やかに浸透するが、これより深くなると浸透の抑制がされる(図5)。融雪水が速やかに浸透することで、春先の畑の乾燥が速やかになり春先の農作業の開始を早めるが、土壤中の硝酸態窒素は土壤に残存する割合が小さくなり、地下水汚染のリスクを増すことになる。凍結深がそれ以上に深くなると硝酸態窒素の表層土壤(作土)への残存割合は高くなる(図8、図9)。温室効果ガスの一酸化二窒素は、凍結深と正の強い相関関係にある(図5)。これらのことを総合的にまとめると図10となる。野良イモの防除は凍結深0.3 m以上で有効であることと、作土に硝酸態窒素をなるべく残せば地下水汚染が軽減されるので、この両者を優先して考え、かつ過度の凍結による農作業遅れや温室効果ガスによる大気への環境負荷をできるだけ抑制する、環境負荷軽減と農業生産性を両立する最適な土壤凍結深は0.3 m台程度が妥当であると結論した。

土壤凍結深制御により、土壤凍結深は最適な深さに数cm以内の精度で制御が可能で、そして雪割りの手法を用いることで大規模農地でも効率良く容易に土壤凍結深制御が実行できることから、農業生産の維持向上と環境負荷低減を両立する土壤凍結深を0.3 m程度の深さに制御することは、十勝地方、あるいは十勝地方と類似の気候条件では、農業現場で実行可能である。すでに、十勝地方では野良イモ防除の効果が発揮されるように雪割りを実施しており、さらに土壤凍結深制御により、最適土壤凍結深0.3 m程度を達成することで、生産性の確保と環境負荷の低減の両立を実現している可能性が高い。

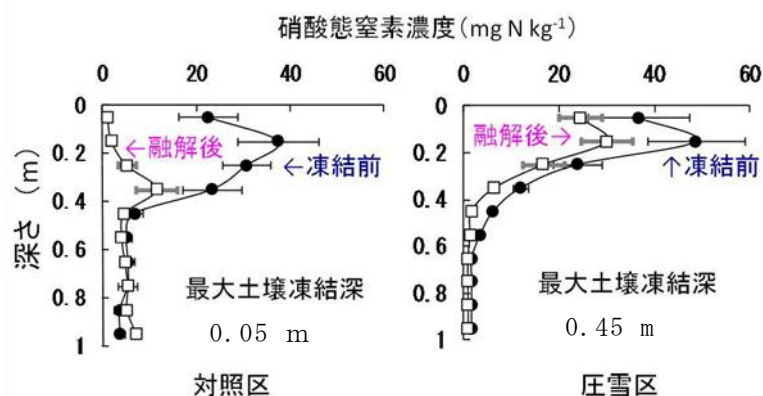


図8 北海道農業研究センター芽室研究拠点の裸地圃場における対照区と圧雪処理により土壤凍結深を深くした試験区の秋(凍結前)と春(融解後)に採取した土壤の $\text{NO}_3\text{-N}$ の鉛直分布. 図中のエラーバーは標準誤差(n=6)を意味する。

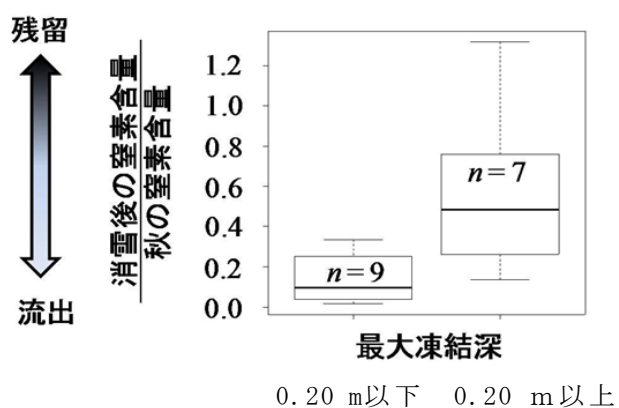


図9 北海道農業研究センター芽室研究拠点小麦生育試験圃場における土壤凍結深と深さ0~0.40 mの土層に残留した $\text{NO}_3$ の関係. 図中のエラーバーの上下は、最大値・最小値を、箱中の横線は平均値を、箱の上下端は第3・第1四分位点を表す。



2) 土壤凍結深制御と融雪材散布のLCA評価  
 雪割りの農作業により燃料消費に伴う二酸化炭素および凍結深増加に伴う一酸化二窒素の放出量は増加する。しかし、十勝地方の火山性土壤では、土壤から放出される二酸化炭素の寄与は80%以上と極めて大きく、農業活動全体の温室化ガス排出量に対する雪割りによる燃料消費に伴う二酸化炭素と凍結深増加に伴う一酸化二窒素の発生量の増加の寄与は小さい。従って、雪割りによって最適凍結深である0.3 mに凍結深を到達させたとしても、地球温暖化への影響は小さいと結論づけられた。また、木炭を用いた融雪材散布は土壤炭素蓄積効果が大きく、散布量を2 Mg ha<sup>-1</sup>とすれば土壤からの年間温室効果ガス排出量にほぼ相当する。したがって本手法は融雪促進による生産性の向上と環境負荷低減を両立できる手法であると結論できる。

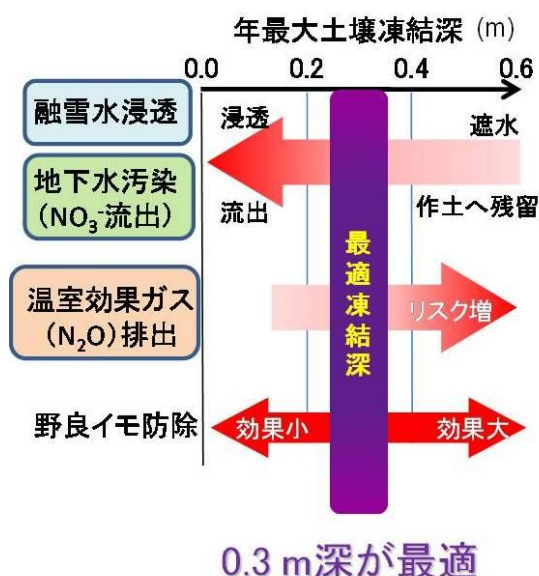


図10 環境負荷低減と農業生産性を両立する最適土壤凍結深。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

1) 積雪・土壤凍結条件と融雪期の土壤水分移動の定量的関係を明らかにした。一般に土壤凍結深が0.2 mまでは、土壤凍結層が融雪水の浸透を抑制することはないが、土壤凍結深がこれよりも深くなると、土壤凍結深が増加するほど融雪水量に対する融雪水の土壤への浸透量の割合が低下した。ただし、厳冬期に一時的な気温の急上昇で降雨が生じて積雪層を一時的に消失した場合は、通常の年と異なり、その後の気温の低下で多量の雨水が地表面付近で凍結することで凍結深が0.1 m台と比較的浅くても、融雪水の浸透が極めて抑制されることも明らかになった。

2) 土壤凍結深の発達条件では、一酸化二窒素の土壤から大気への放出は助長され、消雪後にスパイク状の顕著な放出速度の変化を観測した。年間放出量に対するこの消雪後の大量放出の寄与率は、70%以上であった。このことは、二酸化炭素の放出速度が春から夏にかけて高くなり夏から秋にかけて低くなるといった気温の変化に準じ、冬期の寄与率が年間の6~18%であったのとは対照的であった。土壤凍結が発達する寒冷な気候帯では一酸化二窒素の年間放出量を評価する上では冬期評価は非常に重要であることが示された。

3) 土壤の凍結融解条件において一酸化二窒素が短期・集中的に大量放出するメカニズムを明らかにした。土壤凍結層の発達条件では、融雪水が地表に湛水して、大気との通気性が阻害されることで、融凍期に土壤ガス中の酸素分圧の低下が生じ、微生物が酸素から硝酸イオンに呼吸基質を選択する脱窒により一酸化二窒素が大量に土壤中に蓄積され、消雪後に湛水がなくなるのと同時に大量に大気に放出される。また、土壤中で一酸化二窒素が大量に生成されるためには、融雪融凍期に地温が0°C近辺まで上昇する必要があると考えられた。

4) 凍結土壤条件下での融雪水の浸透量および土壤中の硝酸態窒素動態の溶脱量の定量的関係を明らかにした。最大土壤凍結深が0.2 m以下で融雪水は土壤に速やかに浸透し、土壤中の硝酸態窒素はほとんど残存しないが、最大土壤凍結深がこの深さを越えると顕著に融雪水の浸透が抑制され、土壤中の硝酸態窒素の残存割合が高くなる。

5) 雪割り(農地の除雪と再集積)の作業を数値モデルにより予測することで、最適な土壤凍結深に制御する手法を開発した。本手法は、北海道・十勝地方で普及を始めた野良イモ防除への適用に加えて、土壤中の硝酸態窒素の溶脱による地下水汚染の環境負荷を低減する技術へと拡張でき、野良イモ防除効果と環境負荷低減を両立させる最適土壤凍結深は0.3 m台程度であることを明らかにした。土壤凍結深制御手法は、これまで実施困難とされていた大規模農地での環境制御を実現する。またLCA評価により、十勝地方の典型的な土壤である火山性土では、雪割りによって最適凍結深である0.3 mに凍結深を到達させたとしても、地球温暖化への影響は小さいと結論づけられた。

6) 積雪地帯で広く実施されている融雪促進のための雪面黒化法による融雪材散布を、木炭を用いて実施すると、畑土壤からの年間温室効果ガス排出相当量の難分解性炭素を土壤へ投入可能であることがわかった。

7) 黒ボク土の陰イオン吸着による移動遅延のメカニズムを解明し、吸着等温線のみから遅延係数を推定する一般式を得た。

8) 地球環境モニタリングに貢献できる以下の観測手法を開発・構築した。

①厳寒かつ地表面が湛水となる悪条件でも確実なガスサンプリングが可能なシリコンチューブを用いた拡散チャンバー型土壌ガス採取法を開発した。②圃場における硝酸態窒素濃度をTDR(Time domain reflectometry)で得られる土壌の電気伝導度をもとに推定する手法を確立した。③複数サイト・多試験区での大気-積雪-土壌凍結観測から得られる膨大なデータの処理を効率化するため、「観測運用-データ回収-データバックアップ-作図」を自動化できる体系的なネットワーク型観測システムを構築した。

## (2) 環境政策への貢献

1) 融雪・融凍期における一酸化二窒素の大量放出は、世界各地で観測されていたものの、現象自体があまり認知されておらず、現状としてIPCC第4次評価報告書でも取り上げられていない。したがって、今回得られた知見は温室効果ガス緩和策に貢献できるものである。

2) 本研究で提示した雪割り・土壌凍結深制御手法は、プロジェクト実施期間中に北海道・十勝地方においては農業現場で普及が進みはじめ、さらに国内では一般社会への認知も広がり始める段階となった。冬の農地の雪氷管理は我が国特有の地域農業技術であり、雪割り・土壌凍結深制御およびバイオ炭を用いた融雪材散布は我が国発として世界の寒冷地に発信できる気候変動適応・緩和策である。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：廣田知良

1965年生まれ、九州大学農学部卒業、農学博士、現在独立行政法人 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 寒地温暖化研究チーム チーム長

主要参画研究者

(1)1) 廣田知良 (同上)

2) 古賀伸久

1969年生まれ、九州大学農学部卒業、現在、独立行政法人 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 寒地温暖化研究チーム 主任研究員

3) 永田修

1966年生まれ、北海道大学農学部卒業、現在、独立行政法人 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 寒地温暖化研究チーム 主任研究員

4) 岩田幸良

1971年生まれ、東京農業大学農学部卒業、現在、独立行政法人 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 寒地温暖化研究チーム 主任研究員

(2) 長谷川周一

1948年生まれ、東京農工大学農学部卒業、農業環境技術研究所室長、現在、北海道大学教授

## 7. 成果発表状況

(1) 査読付き論文

1) 柳井洋介, 常田岳志: 土と微生物, 63, 26-31 (2009)

“ガス透過性膜を用いた土壌ガス採取による土壌微生物活性の原位置計測の可能性”

2) T. Hirota and M. Fukumoto: Journal of Agricultural Meteorology, 65, 375-386 (2009)

“Estimation of surface moisture availability on bare soil from meteorological and surface soil temperature measurement and its parameterization without soil moisture”

3) Y. Iwata, T. Hirota, S. Suzuki, S. Hasegawa and M. Hayashi: Hydrological Processes, 24, 1755-1765 DOI:10.1002/hyp.7621 (2010)

“Effects of frozen soil and snow cover on cold-season soil water dynamics in Tokachi, Japan”

4) Y. Iwata, M. Hayashi, S. Suzuki, T. Hirota and S. Hasegawa: Water Resources Research, 46, W09504, doi:10.1029/2009WR008070 (2010)

“Effects of snowcover on soil freezing, water movement and snowmelt infiltration”

5) Y. Iwata, M. Nemoto, S. Hasegawa, Y. Yanai, K. Kuwano and T. Hirota: Journal of Hydrology, 401, 165-176 (2011)

“Influence of rain, air temperature, and snow cover on subsequent spring-snowmelt infiltration into the thin frozen soil layer in northern Japan”

- 6) Y. Yanai, T. Hirota, Y. Iwata, M. Nemoto, O. Nagata and N. Koga: Soil Biology and Biochemistry, doi:10.1016/j.soilbio.2010.06.009 (2011)  
“Accumulation of nitrous oxide and depletion of oxygen in seasonally froze soils in northern Japan under snow cover manipulation experiments”
- 7) 岩田幸良：北海道農業研究センター報告, 194, 1-101 (2011)  
“火山灰土における積雪・土壌凍結期間の水移動”
- 8) 岩田幸良, 長谷川周一, 鈴木伸治, 根本学, 廣田知良：土壌の物理性, 117, 11-22 (2011)  
“土壌凍結深や地温が融雪期における融雪水の深層への浸透に与える影響”
- 9) S. Ohkubo, Y. Yanai, O. Nagata, Y. Iwata and T. Hirota: Journal of Agricultural Meteorology, (2011) in press.  
“Influences of snow cover and soil-frost on ground surface flux and soil gas concentration of CO<sub>2</sub> in an agricultural land in northern Japan”
- 10) 田村和杏, 中原治, 田中正一, 加藤英考, 長谷川周一: 日本土壌肥料学雑誌, 82, 114-122 (2011)  
“見かけの塩吸収によるアロフェン質黒ボク土下層土の硝酸イオン吸着と移動遅延”
- 11) S. Suzuki, T. Hirota and Y. Iwata: Japan Agricultural Research Quarterly, (2011) in press  
“Experimental study on sample size for laboratory calibration tests of commercial dielectric soil water sensors”
- 12) T. Hirota, K. Usuki, M. Hayashi, M. Nemoto, Y. Iwata, Y. Yanai, T. Yazaki and S. Inoue : Mitigation and Adaptation of Strategies for Global Change, DOI: 10.1007/s11027-011-9296-8 (2011)  
“Soil frost control: agricultural adaptation to climate variability in a cold region of Japan”