

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

(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

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

寒地温暖化研究チーム 廣田知良・古賀伸久・永田修・岩田幸良

〈研究協力者〉 寒地温暖化研究チーム

根本学

大久保晋治郎

日本学術振興会特別研究員(寒地温暖化研究チーム)

柳井洋介

[要旨] 我が国の営農技術として寒冷地で実施されている積雪・土壌凍結管理技術を活用し、農業の環境に与える負荷の低減と農業生産力の維持・向上を両立する新しい温暖化適応対策技術を開発した。地温、水分、物質移動、農業生態系に影響を与える土壌凍結深は、積雪時期や積雪の深さに強く影響を受ける。この関係を利用し、数値モデルによる地温推定に基づいて、積雪深の人為的管理(除雪と再集積)により土壌凍結深を制御する手法を開発した。本手法を北海道・十勝地方・芽室の圃場試験で検証し、数cm以内の範囲で土壌凍結深が制御可能なことを示した。土壌凍結深制御手法は、雪割りと呼ばれるトラクターやブルドーザー等の作業機械を用いる雪の除雪・再集積により効率的に大規模農地で実現できる。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、この手法は、土壌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にも拡張可能であることを示し、野良イモ防除効果と環境負荷低減を両立させる最適土壌凍結深は0.3 m台程度と結論した。また、十勝地方では、21世紀末での温暖化シナリオ条件においても最適土壌凍結深0.30 mは実現可能と評価できた。海外では、北米の五大湖周辺、黒海からバルト海周辺のロシア西部や北欧の一部が本手法の適用可能地帯と推定された。地球温暖化ポテンシャルを用いて、土壌凍結深制御が地球温暖化(土壌炭素収支、土壌由来の一酸化二窒素放出量、化石燃料や資材消費に伴う二酸化炭素排出量の総量)に及ぼす影響をライフサイクル評価すると、十勝地方の火山性土壌では、除雪は、土壌由来の一酸化二窒素や除雪作業に伴う燃料消費由来二酸化炭素放出量を増加させるが、温室効果ガス排出量全体に及ぼす影響は小さく、土壌凍結深を0.30 mまで発達させても、地球温暖化ポテンシャルを増加させる効果は小さいことがわかった。また、融雪材として木炭を用いることは、畑土壌からの年間温室効果ガス排出量に相当する難分解性炭素を土壌へ投入していることになり、土壌への炭素隔離効果が期待できることがわかった。

[キーワード] 一酸化二窒素、土壌凍結、土壌水分、積雪、適応・緩和策

1. はじめに

大気中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¹⁾。世界の約1/4の農地は冬に雪と凍土に覆われる寒冷地にある。一般的に寒冷地では、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。我が国を代表する農業地帯の北海道は、寒冷地の南限に位置し、温暖化による気候変動の影響が現れやすい地域にあり、実際、大規模農業地帯である北海道・道東地方ではここ20年の間で、北海道開拓以来前例のないほどの土壌凍結深の顕著な減少を経験した²⁾。当地では土壌凍結深の減少により、土壌凍結で抑制されていた雑草の急増³⁾、融雪水の地下浸透の増加⁴⁾に伴う農業肥料由来の地下水汚染へのリスクの増大等、農業環境に対する想定外の負の影響が現れだした。また、課題(1)－1)で述べられているように温室効果ガスである一酸化二窒素の融雪期における大量放出が北海道を含めて世界の寒冷地域で生じている。これらの現象は、寒冷地帯においては気候変動に対する適切な対応を取らなければ、農業が環境に与える負荷が増大する懸念があることを示している。したがって、寒冷地の温暖化影響に対する農業の生産性の確保と環境負荷への軽減を両立する持続型の対策技術の開発を行う必要がある。

2. 研究目的

本研究は、日本独自に発展し、現在農業現場で取り組まれている積雪管理技術を基盤とし、さらに地球温暖化が寒冷地の農業環境に及ぼす影響の実態解明や寒冷地農業環境の脆弱性評価から得られた知見を応用することで、農業生産現場で適用できる農業生産力の維持向上と環境負荷低減を両立する持続型の適応・緩和策の対策技術を開発することを目的とする。

我が国の積雪地帯では、農業生産性の向上を目的として、冬期において農業現場で広く用いられている独自の積雪管理技術が二つある。一つは、近年になって農業現場で用いられ始めた人為的な積雪管理作業(雪割り、積雪の除雪と再集積)であり、土壌凍結深の調節を目的とする⁴⁾⁵⁾。これは、我が国の代表的な大規模畑作地帯である北海道・十勝地方で近年、急速に広がりをはじめている冬期の農業技術であり、私達の研究グループもこの技術開発に関与している。我が国の3割以上のパレイショを生産する北海道・十勝地方では、近年、断熱作用のある積雪深の増加時期が早期化したにことにより、土壌凍結深が顕著な減少傾向にある。土壌凍結深の減少に伴い、当地の農業においては収穫後に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。輪作体系での大規模畑作農業を展開する当地では、野良イモは後作物の生育阻害要因、各種病害虫発生要因、異品種イモの混入要因になり生産者に深刻な被害を与え、農業生産性の大きな低下要因となる。現在、野良イモの防除は、一般に人手による抜き取りが主で、抜き取り作業は1人あたり数十時間/haの労働時間を要する。1戸平均のパレイショの作付け面積が5 haである当地では、合計すると、発生量によっては2～3週間から1ヶ月間の野良イモ防除が必要となる。したがって野良イモの防除は、機械化による大規模農業を展開している当地での新たな労働負担となった。この問題に対して、一部の農家では、冬期間に断熱作用のある雪を地表から除去する除雪(雪割り)等を行い、土壌凍結促進による野良イモの凍死処理を試みはじめている。一方、課題(1)－1)で示したように積雪深を変えることで土壌凍結深が大きく変化し、土壌水分、温室効果ガスである一酸化二窒素の放出量など、土壌中や大気への物質動態も変化することが明らかとなった。そこで本研究では環境負荷の点にも着目し、除雪等の積雪管理を適切に行い、土壌凍結を最適な深さにすることで、雑草防除のみならず、養分保持、温室効果ガス放出の抑制や硝酸態窒素の地下水汚染防止等も実現できる土壌凍結深制御

技術の開発を着想した⁵⁾。

もう一つは、積雪地帯で広く用いられている融雪材散布である⁶⁾⁷⁾。積雪地帯では、農地の消雪が早ければ春の農作業を早く開始できる。このことは作物の生育期間を長く確保することとなり、収量の向上をもたらす。積雪期間が短くなることで、麦や牧草等の越冬作物の雪腐病の被害も軽減される。一般に、積雪深が0.5 m以上の多雪条件では、雪面黒化法による融雪促進が広く実施されている。これは、春先の融雪期に雪面に黒色系の資材を散布して雪面における日射反射率(アルベド)を低下させ、日射吸収量を増やすことで消雪日を早める方法である。この融雪材散布の主目的は融雪促進による作物生育期間拡大による農業生産の向上である。現在、農業現場で用いられている融雪材は融雪促進に対する投資効率の観点から、量産できる安価な資材を原料として求めざるを得ない制約があり、工業残渣を原料として用いたり、安価な加工した原料を用いる場合が多い。この融雪材を高濃度の炭素を含有するバイオ炭の利用を進めることで、土壤炭素蓄積による温暖化緩和に貢献できる可能性がある。

そこで本研究は、我が国の営農技術として寒冷地で実施されている積雪・土壤凍結管理技術を拡張し、温暖化による寒冷地農業の環境負荷低減と農業生産力の維持向上を両立する総合的な適応・緩和策を実現する対策技術を開発することを目的とする。また、LCA(ライフサイクルアセスメント)を実施し、積雪・土壤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する。

3. 研究方法

(1) 土壤凍結深制御試験の検証

積雪は優れた断熱材としての特性があり、積雪の深さがある一定以上の値になると外気温が氷点下を大きく下回っても、土壤凍結の発達を抑制される。北海道・十勝地方の気候条件では積雪深が0.2~0.3 mを上回った時点で土壤凍結が抑制されることが明らかになっており²⁾⁸⁾、断熱材である雪を除去することによって、土壤凍結を再び深めることができる。そして、土壤凍結深がある目的の深さに達したら雪を再び0.2~0.3 m以上堆積することで土壤凍結の発達を抑制する。このようにして積雪深を適切な深さに管理することによって土壤凍結深を制御することができる。最適な土壤凍結深に制御するためには、地温や凍結深を気象データから計算できるモデルを用い、除雪や堆積の時期や期間を数値的に予測する。ここで用いるモデルは、課題担当者が開発した日平均気温と日平均積雪深を入力データとして、土壤凍結深・地温を簡易にかつ精度良く計算できるものである⁹⁾。入力する気象データに、予測する当日までの推定に実観測値を、それ以降については予報値あるいは平年値にある幅をもった値とすることで、ある幅をもった予測値が出力される。凍結深・地温の推定精度の良いモデルを用いることができれば、観測によるモニタリングではなく、モデルによる予測・制御に基づいて対策・作業を実施できることになる。

この土壤凍結深制御数値計算の検証に、本プロジェクトの観測期間の試験結果(2008-10(芽室・札幌 課題(1)-1))および2005-06年の冬から2007-8年までの十勝地方・芽室拠点で行った除雪試験のデータを用いた。除雪と積雪の再集積を特に意図して実施した年が2005-06年で、その他の年は除雪による土壤凍結深の促進は実施したものの人為的な積雪の再集積は実施しなかった。この検証試験では、凍結の有無は、地温の値が0℃以下を凍結と判定した。土壤凍結深モデルは、現場への実用性を考慮して融雪期までの最大土壤凍結深の推定を主目的としたモデル構造と

パラメータ設定が簡略化されたものを用いた^{9) 10)}。モデルに必要な土壌の熱的パラメータは、火山灰土壌における代表的な値を与えた¹⁰⁾。土壌の体積熱容量は非凍結土で $2.3 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ 凍結土で $1.5 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ 、土壌の熱伝導率は非凍結土では $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 凍結土では $0.7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ とした。これらの土壌の熱的パラメータはモデル計算での地温や土壌凍結深の値に敏感であるが、日平均値以上の時間スケールでの推定では、時間単位の日変化の計算と比べると、モデル計算に与える影響は抑えられる⁹⁾。除雪をしているときの積雪深は 0.05 m 以下とした。雪の熱伝導率は十勝地方での自然積雪条件でのモデルの検証で観測値と適合する値である $0.17 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ を用いた。積雪の熱伝導率の値は特に積雪深が $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ 以内の時はモデル計算値に敏感である。一方、積雪深が $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ 以上になると、土壌凍結の発達は抑制されるので、このような条件ではモデルの推定値へ積雪深の違いが及ぼす影響は小さい⁸⁾。除雪(雪割り)による土壌凍結深制御を考える場合は、除雪時に積雪深が数cm以内と非常に薄い状態かあるいは雪を集積して $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ 以上の両極端の場合が主に想定される。したがって、雪の熱伝導率がモデル計算には大きな影響を与えない条件が多いと見込まれる。

(2) 寒冷地における農業生産性と環境負荷低減を両立させる持続型農業へ向けての技術開発

本章における土壌凍結深制御・融雪材の利用に関連する知見および前章の1)の要因説明および脆弱性の評価から得られた知見をもとに、農業現場へ適用策を検討する。検討する項目は、

1) 土壌凍結深制御による環境負荷低減効果については、特に土壌凍結深の減少に伴う融雪水の地下浸透量の増加に伴う肥料成分による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・融解期における大量放出の軽減を中心に、野良イモ防除との両立の観点も含めて検討した。

2) 農業現場では野良イモ防除のための土壌凍結促進処理としてトラクターやブルドーザーで雪をかき分ける雪割りと呼ばれる手法が広く実施されはじめている。広く実施されている雪割りの手法を土壌凍結深制御の立場から評価した。

3) 土壌凍結深制御は寒冷な気象資源を利用する技術であるので、将来の温暖化が進行した条件における土壌凍結深制御の適用範囲を検討した。さらに、国内では普及が進み始めたので海外においてどの地域に適用可能性があるかを調べた。

(3) 土壌凍結深制御と融雪材散布のLCA評価

土壌凍結深制御(除雪)およびバイオ炭(木炭)を用いた融雪材散布が地球温暖化へ及ぼす影響について、土壌由来の二酸化炭素、土壌由来の一酸化二窒素および化石燃料消費に由来する二酸化炭素排出量を対象とする温室効果ガス排出量のLCA評価を行った。土壌由来の二酸化炭素および一酸化二窒素排出量については、2008年11月-2009年10月、2009年11月-2010年10月に札幌および芽室の両サイトで得られた対照区C0、除雪区SR、融雪材散布区SMのフラックス観測結果を評価に用いた。化石燃料消費に由来する二酸化炭素排出量は、十勝地域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C0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、C0区の二酸化炭素排出量に対してそれぞれ除雪、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、SR、SM区の化石燃料消費由来二酸化炭素排出量を算出した。

土壌由来の二酸化炭素排出量は、純生物相生産量（NBP：Net Biome Production）として評価した。この指標は、純生態系生産量（NEP：Net Ecosystem Production）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、NEPは有機物分解呼吸量と等しく、C0、SR区では系外からの炭素投入がないために、C0、SR区のNBP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NBP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。

一般的なバレイショ生産体系におけるトラクター作業（整地、施肥、植え付け、培土、防除、収穫など）における化石燃料（軽油）消費量は、栽培技術資料¹¹⁾から算出した。SR区における除雪は、ブルドーザーによる2回の作業により、1回あたりの化石燃料（軽油）消費量は10 L ha⁻¹とした（ブルドーザー利用での実測値）。SM区におけるスノーモービルによる融雪材散布の化石燃料（ガソリン）消費量は、1.4 L ha⁻¹であった¹¹⁾。軽油およびガソリンの二酸化炭素排出量は、それぞれ2.59、2.32 kg CO₂ L⁻¹とした¹²⁾。

農業資材（肥料、農薬、農業機械）消費に伴う二酸化炭素排出量は、十勝地域のバレイショ生産における資材ごとの産業連関表から計算された排出係数および生産コストから求められた値（0.880 Mg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹）を用いた¹³⁾。SM区では、融雪材として木炭が利用された。バイオ炭の製造工程から排出される二酸化炭素量は、原料の種類、炭化温度、プラントのスケールなどによって異なるが、本研究では、英国の中規模プラント（バイオ炭年産5000 t）での森林系木材（Forestry residue chips）に関する値（44.09 kg CO₂ t⁻¹ char）を用いた¹⁴⁾。融雪材の散布量は、2 Mg ha⁻¹ yr⁻¹であった。その結果、融雪材の製造工程から排出される二酸化炭素排出量は、0.088 Mg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹であった。

一酸化二窒素の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）は、298を用いた¹⁵⁾。

4. 結果・考察

（1）土壌凍結深制御手法の検証

2005-06年の試験区の12月～2月の平均気温は-7.9℃であった。除雪は12月19日～1月13日の期間に実施し、この間の平均気温は-9.9℃であった。これは十勝地方・芽室の1971-2000年の平年値と同等とみなせる気候条件であった。この年は11月末に積雪に覆われ始め、12月18日に積雪深が0.40 mを超えた。自然積雪状態である対照区の最大土壌凍結深は0.11 mであった。この年の試験では除雪区の土壌凍結深を0.40 mと設定した。除雪区では土壌凍結深の12月19日に積雪深が0.40 mを越えたので除雪により土壌凍結を促進し（除雪期間の平均積雪深は0.02 m）、凍結深が0.35 mになったのを確認して1月13日に雪を積んだ。その結果、最大土壌凍結深は0.43 mとなり、設定の凍結深とはわずかに0.03 m異なった程度であり、積雪を適切に管理することで土壌凍結深を制御できることを実証した。さらに、気温と試験区の観測値の積雪深を用いて対照区並びに除雪区の状況をモデルで再現できるかテストした結果、最大凍結深の推定値は0.41 mと観測値の0.43 mを良く再現した。したがって、気象データが正しく入力されていればモデルにより土壌凍結深制御が実現できることがわかった。また、積雪深については12月19日までは気象データ、その後は、除雪時は観測期間の平均値である0.02 m、除雪終了後は対照区の値を用い、気温については平年値、あるいは平年値±1℃で予測した状況を示す(図1)。平年値を入力した場合は、最大土壌凍結深は

0.44 mと予測され、観測値とモデルによる予測値は一致した。平年値+1°Cでは土壤凍結深が、除雪期間の最大土壤凍結深は0.40 mと予測された。平年値-1°Cでは最大土壤凍結深は0.46 mと予測された。これらの結果は、±1°Cの入力の違いがあってもモデルは最大土壤凍結深を±0.04 mの誤

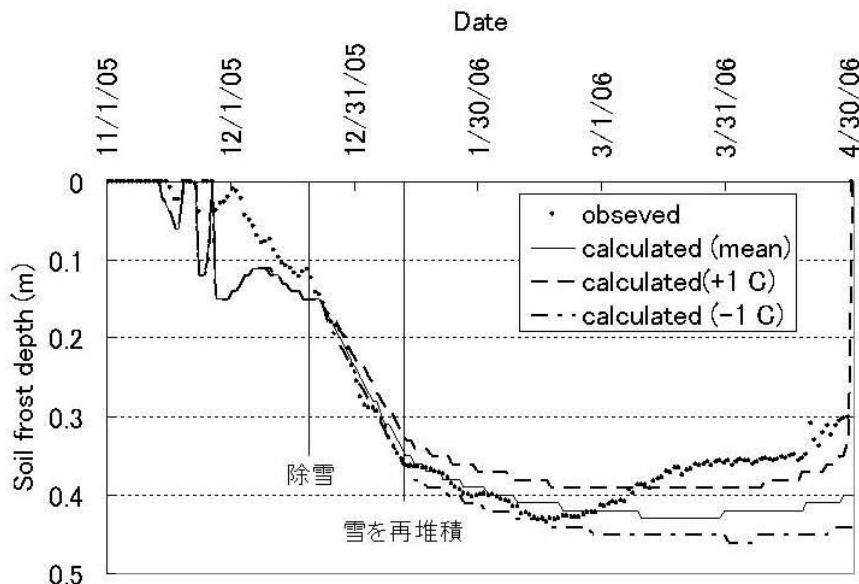


図1 土壤凍結深制御の検証結果

*12月19日まではモデルに観測値を入力

以降は気温は平年値、および平年値±1°Cを入力

積雪深は、除雪期間中は積雪深を0.02 m、 それ以外は対照区の積雪深を入力

差で予測できることを示している。

仮に積雪深を冬期間中、すべて除雪して積雪深を0.00 mとしたとき最大土壤凍結深は0.70 mとなった。自然積雪条件では最大土壤凍結深は0.11 mであったので、2005-06年の気象条件では、モデルからの推定では除雪の期間によって最大土壤凍結深を0.11 mから0.70 mの範囲で設定できることになる。

また、図2に2009-10年までおよび札幌の観測値も含めた5シーズンの冬の最大凍結深のモデルによる計算結果と観測値の比較結果を示す。各年の除雪区の年最大土壤凍結深は0.21~0.53 m、対照区では0.02~0.27 mと異なる土壤凍結深、異なる気象条件であったが、モデルは観測値と推定誤差(二乗平均平方根誤差RMSE)0.052 mで一致した。積雪深の違いが土壤凍結深に及ぼす影響について感度解析を行ったところ、積雪深が浅いときほどその影響は大きく、除雪期間中の積雪深の設定が0.00 mの場合と0.05 mの場合で最大土壤凍結深は0.10 m異なる。したがって、除雪による土壤凍結深の違いは除雪した期間のわずかな積雪深の違いにより大きく影響される。ただし、農家あるいは雪割り業者が除雪作業後に積雪深の確認を比較的容易に行えるので、積雪深の誤差によるモデル推定誤差は解決可能な問題と考えられる。

以上の結果は、積雪にある一定以上の深さ(十勝地方では0.20～0.30 m)があり氷点下の条件では積雪の操作(除雪・再集積)をすることで土壤凍結深を変化させることができることを示している。さらに、数値モデルでもこの現象を再現できることから、与えられた気象条件に応じて、モデルで農地の土壤凍結深を予測しながら農地を管理できることも明らかになった。

(2) 寒冷地における農業生産性と環境負荷低減を両立させる持続型農業へ向けての技術開発

1) 土壤凍結深の違いが農業生産性と環境負荷に与える影響と最適土壤凍結深の導出

土壤凍結深制御による野良イモ防除は、このプロジェクト期間中に普及がかなり進みつつある。ここではさらに、土壤凍結深の違いが農業生産活動およびその環境負荷に及ぼす影響を検討する。本研究の結果では、積雪が変動すれば土壤凍結の発達異なるばかりでなく熱・水・物質動態等の農地環境も大きく変化する。例えば、年最大土壤凍結深が0.20 m以下では融雪期には融雪水が土壤へ容易に浸透することで、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ことができるが、それ以上の土壤凍結深になると融雪水の土壤浸透は抑制され、凍結深が0.40 m以上になると地表面は湛水状態を長く維持して、過湿状態となる(課題(1)-1))。この湛水・過湿条件が長く続くことは、春先の農作業開始の遅れや作物の生育期間の短縮に伴う収量の低下要因につながる。つまり、春先の農作業開始の時期を早め、生育期間の拡大による農業生産の向上の面では、土壤凍結深の増大は負の効果、逆に土壤凍結深の減少は正の効果となる。

野良イモ発生の観点からは、土壤凍結深の減少は野良イモの発生の増大を招く。野良イモ雑草の増大は後作物の生育を阻害し、病虫害の発生源になることから、この点においては凍結深の減少は農業生産性に対しては負の影響を与える。土壤凍結との関係では、年最大土壤凍結深が0.20 mを下回ると野良イモ発生数は増大し、一般に凍結深が0.30 m以上になると発生数は大きく減少する¹⁶⁾。

土壤中の硝酸態窒素の観点からは、本研究課題(2)で明らかにしたように凍結層が0.20～0.30 m以上に発達すると融雪水の土壤浸透が抑制され、土壤中の硝酸態窒素が数割程度残留する。土壤に硝酸態窒素を残留させることにより、春以降の栽培作物へ窒素肥料として有効利用でき、地下水汚染のリスクを低減させる効果となる。この面では凍結深を深くさせることによ

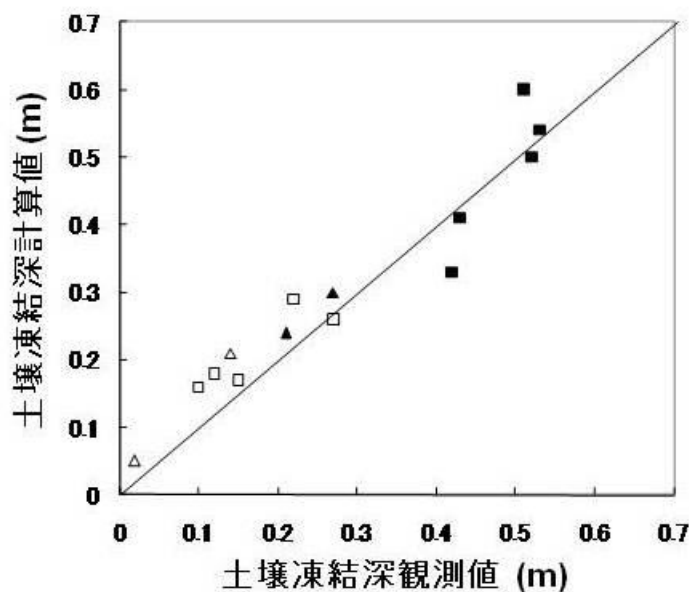


図2 2005-06年～2009-10年の5冬の土壤凍結深制御試験の結果

(最大土壤凍結深の比較 四角印は芽室 三角印は札幌 黒は除雪区 白抜きは対照区)

って環境負荷低減へは正の効果となる。

温室効果ガス発生面では、一般に凍結深が深くなると、融雪水の浸透不良は土壤中に硝酸態窒素を残留させ、さらに通気を阻害する。その結果、土壤中の酸素濃度が低下し、微生物反応(脱窒)を誘導して一酸化二窒素の発生量を増大させる可能性が高まる(課題(1)-1)。しかし、後述するように、十勝地方における火山灰土壌においては、温室効果ガス排出量全体に対する一酸化二窒素排出量増加の寄与は小さく、凍結深の増加が温暖化促進に及ぼす影響は軽微である。

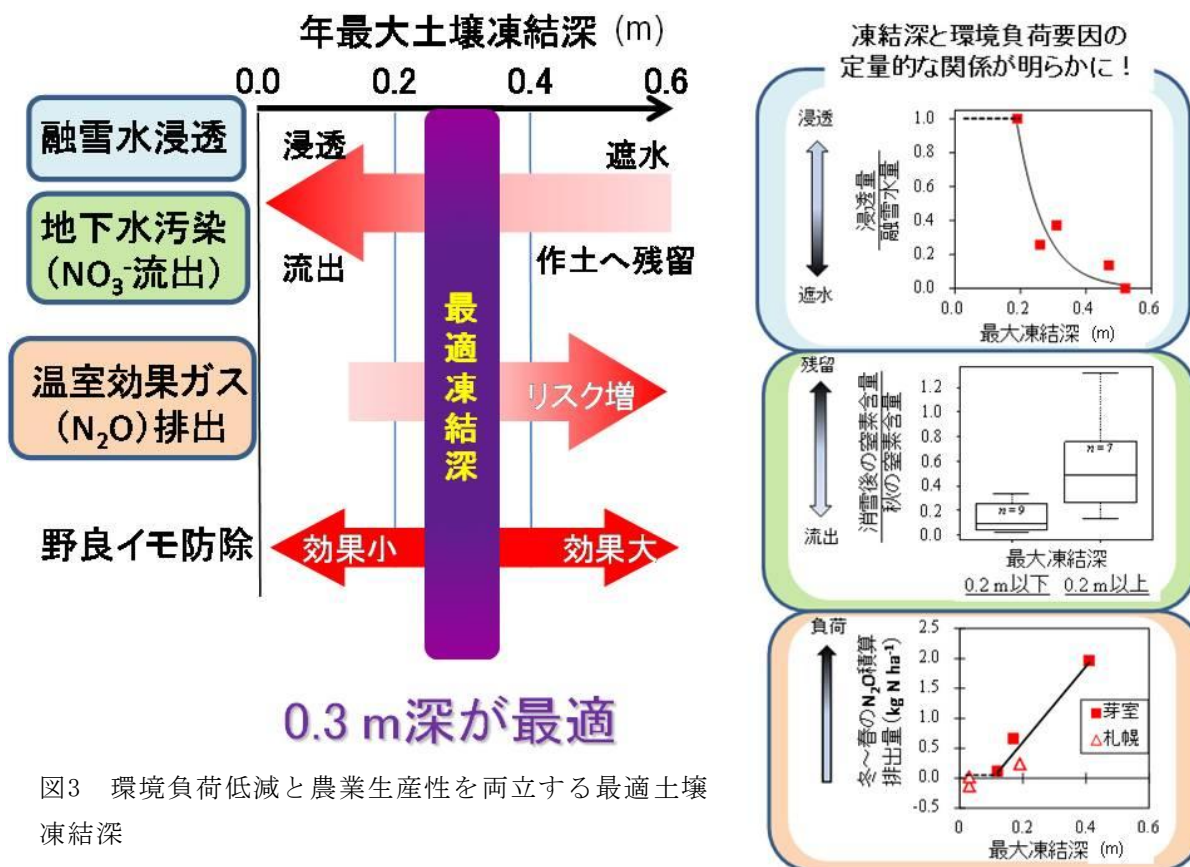


図3 環境負荷低減と農業生産性を両立する最適土壤凍結深

以上の関係を整理すると、図3にまとめられる。つまり、土壤凍結深が深すぎても浅すぎても農業への影響が生産性と環境の様々な面で現れる。環境負荷をできるだけ軽減、すなわち 1) 土壤中の硝酸態窒素をなるべく残存させて地下水汚染を軽減することと 2) 野良イモ防除効果を発揮することを優先して考え、かつ過度の凍結によって春先の農作業開始時期遅らせず、かつ過度の凍結がもたらす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、最適な土壤凍結深は0.30 m程度、深くても0.40 m以内にするのが妥当であると考えることができる。これは本プロジェクトで得た重要な結論である。

2) 農業現場における土壤凍結深制御の立場からの雪割りの評価

実際の農地では、雪割りと呼ぶ方法により除雪と堆積を効率的に行っている(図4)。雪割りとは、トラクターやブルドーザー等の作業機械で雪をかきわける作業であり、一般に積雪深が0.20 m以

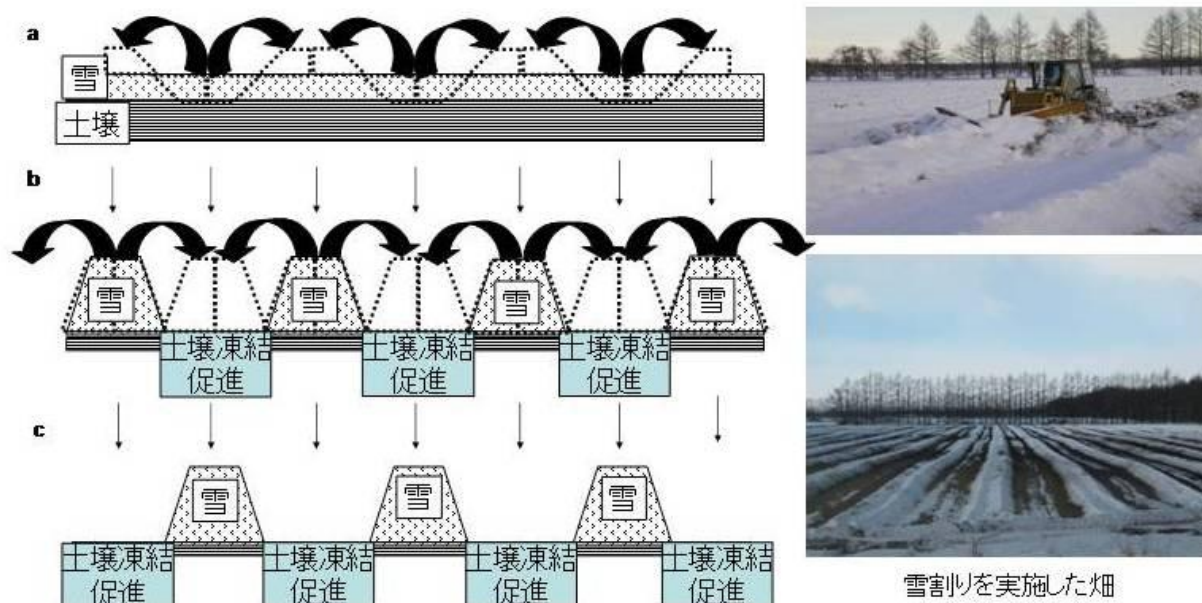


図4 雪割りによる土壌凍結深制御の概念図

- a) 雪割り作業1回目, b) 雪割り1回目終了および2回目の雪割り作業,
c) 雪割り作業2回目終了後

上になり次第行われている。これは、元々は農業現場レベルでは土壌凍結の促進のための除雪のみを意識して行ってきた作業である。雪割りをした後、畑は除雪して土壌が見える部分と、除雪した雪が堆積して山盛りになった部分が列をなす。除雪した列では土壌凍結が進み、雪が山盛りに堆積した箇所では土壌凍結は発達しない。すなわち、畑を全面凍らせるためには少なくとも二度の雪割りの作業が必要である。ある期間、除雪した箇所で土壌凍結が目的の深さに達すると、次に堆積された箇所の雪を作業機械でかきわけると図4のように堆積した部分が除雪され、元々除雪された箇所は雪が堆積されることになる。すなわち、次に新たに除雪された箇所は土壌凍結が促進され、元々除雪されていた箇所では新たに雪が堆積され土壌凍結の発達は抑制される。つまり、雪割りを行うことは、土壌凍結深制御の立場からは、雪の除雪と堆積を並行して行うことであり、土壌凍結深制御を効率的に実施していると評価できる。作業自体は1回につき1 haあたり30分以内で終了する。したがって、雪割りはこれまで実行困難とされていた大規模土地利用型農業においても容易に実施可能な環境制御技術となることを意味する。除雪による土壌凍結促進を効率的に行うためには、降雪がしばらく続かないことが見込まれる時に実施することが望ましい。この点においては、日本海側の降雪日数の多い多雪地帯では、道東地方と違って晴天日が少なく降雪回数が多いため、実施は容易ではないかもしれない。二度の雪割り作業後、土壌を全面に凍らせた後は、二度目の除雪の箇所を再び雪割り等によって雪を堆積させても良いが、現場では通常、そのまま放置されることも少なくない。なぜなら、ある程度の降雪があればそれ以後に土壌凍結はほとんど発達しないためである。あるいは、除雪のタイミング次第では、二度目の除雪箇所が所定の土壌凍結の目的の深さに達した後に気温が上昇し(融雪期を迎えて)土壌凍結が発達しなくなることもある。

また(1)の土壌凍結深制御の検証により、土壌凍結深は最適な深さに数cm以内の精度で予測・

制御が可能なこと、(2)の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0.30 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の実用レベルで実行可能である。十勝地方では野良イモ防除を目的としての雪割りはすでに実践されており、より精密な土壤凍結深制御により、最適土壤凍結深0.30 m程度を達成することで環境負荷低減効果との両立を併せて実現している可能性は高い。

3) 温暖化シナリオにおける土壤凍結深制御の適用性と海外の寒冷地への適用性について

気象庁の温暖化予測シナリオ¹⁷⁾によると、北海道・十勝地方の冬の気温(1月)は21世紀末には(2081-2100)に気温が約3℃上昇すると評価されている。2005-2006年の冬期の気象条件が、平年値と類似であったので、この気候条件を現在の条件として、温暖化進行条件において最適土壤凍結深に相当する0.30 mを実現できる条件を評価した。積雪の条件は雪割りにより除雪を実施することを前提とするので温暖化シナリオによる降水量などの予測値の違いには影響を大きく受けないとし、積雪条件は2005-06年の同じ状況を仮定した。除雪開始も2005-06年の時と同様な時期に開始して除雪期間中の積雪深は0.02 mとした。表1に結果を示す。現在の気候条件では凍結深が0.30

表1 最適土壤凍結深 0.30 mを実現するのに必要な除雪期間(現在と異なる気象条件)

$\Delta T_a=+3^\circ\text{C}$ は北海道・十勝地方における21世紀末の温暖化シナリオに相当

気温変化 ΔT_a (°C)	-4	-3	0	+3	+5
冬季(12-2月)の平均気温	-12	-11	-8	-5	-3
温暖化シナリオ			現在	(2081-2100)	
凍結深 30 cmに達する除雪期間(日)	0	2	10	13	22

mに達するためには、10日必要であるのに対し、2081-2100年頃を想定した+3℃(12-2月の平均気温が-5℃)の条件では13日の除雪期間で達成でき、21世紀末の気候条件でも土壤凍結深制御の実施は十分実施可能と評価できた。+5℃(12-2月の気温が-3℃)の条件になると除雪期間は22日となる。雪割りは少なくとも2回必要なので合計44日となり、実施不可能ではないが除雪期間が長くなることによる降雪による再除雪の頻度のリスクも増え、困難性は増すかもしれない。逆に12-2月の冬の平均気温が-12℃を下回ると除雪を実施しなくても凍結深は0.30 mに達する。このような条件では土壤凍結深制御を実施する必要はない。したがって、土壤凍結深制御の適応に適した気象条件は冬の12-2月の平均気温が-12℃以上-5℃以下の範囲と考えられる。

土壤凍結深制御手法は日本の十勝地方で野良イモ防除の必要性をきっかけに開発されたものであるが、海外でも類似の気候条件において適用可能性は十分に考えられる。気象庁編集による世界気象資料¹⁸⁾から、12-1月の平均気温が-12℃以上-5℃以下の範囲で12-1月の降水量が50 mm以上(冬半ばまでに積雪深が0.20 mあると想定される降水量)の条件で海外における適用可能性を調査した。この結果、アメリカとヨーロッパの寒冷気候帯の一部、例えば、北米の五大湖周辺地域、ヨーロッパでは黒海からバルト海をはさむ地域、すなわち、ウクライナ、ベラルーシ、ロシア西部、リトアニア、ラトビア、エストニア、あるいはスカンジナビア半島にある、ノルウェー、スウェーデン、フィンランドでの適用可能性が考えられた(図5)。

(3) 土壤凍結深制御と融雪材散布のLCA評価

1) 土壤からの二酸化炭素放出量 (純生物相生産量)

CO区およびSR区では、作付け、有機資材投入がないため、NBPは土壤中の有機物分解による二酸化炭素放出量と等しい。芽室よりも、土壤中のpHがやや低く、土壤中の有機物分解量が小さい札幌では、土壤炭素量が大きい(0-0.3mの土壤炭素量: 芽室 $92 \pm 14 \text{ Mg C ha}^{-1}$ 、札幌 $160 \pm 21 \text{ Mg C ha}^{-1}$) という特徴がある。2008-2009年、2009-2010年ともに、芽室サイトでは、除雪によって年間二酸化炭素放出量は増加したが、札幌サイトでは、除雪によって年間二酸化炭素放出量は減少した(表2)。

しかし、除雪に対する二酸化炭素放出量の応答について、芽室と札幌の両サイトにおいて、なぜ差異が生じたか理由ははっきりしない。また、年間放出量に対する冬期(11月~4月)の二酸化炭素放出量の寄与率は、8-17%と小さく、除雪が年間二酸化炭素

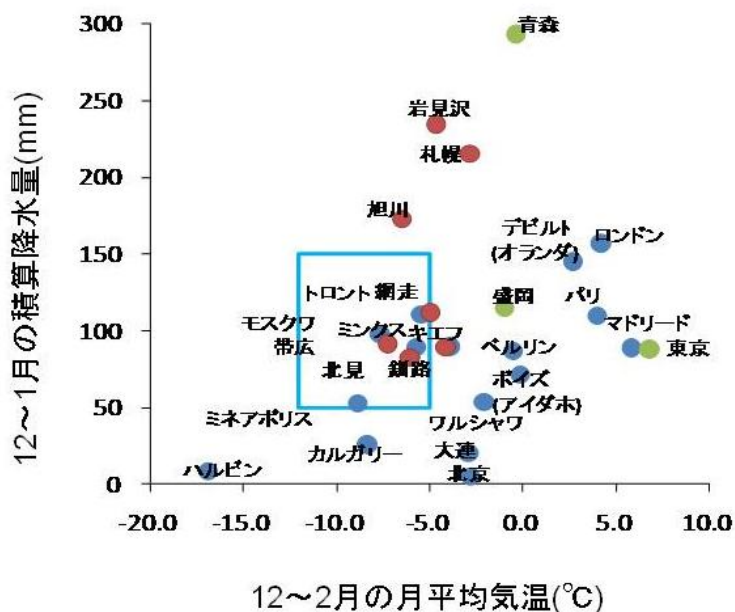


図5 土壤凍結深制御・雪割り適地の範囲
 □で囲んだところは 気温12-2月 -12~-5°C
 降水量 12-1月 50-150 mm

表2 年間CO₂(二酸化炭素)フラックス、純生物相生産量および年間N₂O(一酸化二窒素)フラックス

処理区	観測サイト	観測年	年間CO ₂ フラックス	C投入量(融雪材)	純生物相生産量	年間N ₂ Oフラックス
			(11-10月) Mg C/ha/yr	Mg C/ha/yr	(NBP) Mg C/ha/yr	(11-10月) kg N/ha/yr
対照区	芽室	2008-2009	1.84		-1.84	1.13
		2009-2010	1.97		-1.97	0.04
	札幌	2008-2009	1.73		-1.73	0.07
		2009-2010	2.04		-2.04	0.07
除雪区	芽室	2008-2009	2.27		-2.27	2.32
		2009-2010	2.71		-2.71	0.28
	札幌	2008-2009	1.58		-1.58	0.32
		2009-2010	1.87		-1.87	0.60
融雪区	芽室	2008-2009	1.21	1.50	0.29	0.59
		2009-2010	1.70	1.50	-0.20	0.05
	札幌	2008-2009	1.62	1.50	-0.12	0.60
		2009-2010	1.38	1.50	0.12	0.54
平均値(標準偏差)						
対照区			1.90 (0.12)		-1.90 (0.14)	0.33 (0.54)
除雪区			2.11 (0.49)		-2.11 (0.49)	0.88 (0.97)
融雪区			1.48 (0.22)		0.02 (0.22)	0.45 (0.26)

放出量に及ぼす影響は大きくないと考えられる。したがって、除雪が年間二酸化炭素放出量に及ぼす影響はないとして LCA 評価を行った。

いずれの観測サイト、観測年においても、SM区の年間二酸化炭素放出量はC0区のそれよりも減少した。融雪材として散布した粗粒木炭が土壌中の有機物分解を抑制したとも考えられるが、原因は判然としない。粗粒木炭から $1.50 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の炭素投入¹⁹⁾があったため、SM区のNBPは、 $-0.20 \sim 0.29 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となり、C0区のNBPよりも大幅な増加が認められた。つまり、融雪材として高濃度の炭素を含有するバイオ炭を施用することで、土壌炭素蓄積効果による温暖化緩和に貢献できる。

2) 土壌からの一酸化二窒素放出量

土壌に由来する二酸化炭素の場合と異なり、一酸化二窒素の年間放出量に占める冬期（11月から4月）放出量の割合は58-85 %と高く、年間放出量に及ぼす積雪・土壌凍結深の変動の影響は大きいと考えられる。札幌、芽室両サイトともに、また2008-2009年、2009-2010年の観測期間ともに、いずれの観測事例においても、年間一酸化二窒素放出量は、C0区よりもSR区で高く（ $p = 0.089$, $n = 4$, paired t-test）、除雪による凍結深の増加は一酸化二窒素放出量を増加させる（表2）。C0区およびSR区の年間一酸化窒素放出量（札幌、芽室両サイトの2年間の平均値）は、それぞれ $0.33 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ （ $= 0.153 \text{ Mg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）、 $0.88 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ （ $= 0.412 \text{ Mg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）であり、除雪によって増加する一酸化二窒素排出量は、 $0.259 \text{ Mg CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ と算出された。

一方、融雪材散布が年間一酸化窒素放出量に及ぼす影響は、減少する場合（2008-2009年芽室）、変化しない場合（2009-2010年芽室）、増加する場合（2008-2009年、2009-2010年札幌）があつて判然としなかった。ここでは、融雪材散布による年間一酸化二窒素放出量への影響はないと考えた。

3) 化石燃料消費に伴う二酸化炭素排出量

一般的なバレイショ栽培体系では、トラクター作業から $0.590 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の二酸化炭素排出があり（図6）、これをC0区での化石燃料消費に伴う二酸化炭素排出量とした。除雪および融雪材散布作業から排出される二酸化炭素量は、それぞれ 52 、 $3.3 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であり、SRおよびSM区の化石燃料消費に伴う二酸化炭素排出量は、C0区の排出量に対して、9および0.5 %の増加であった。

4) 資材消費に伴う二酸化炭素排出量

C0、SR区では、農業資材として肥料、農薬、農業機械の消費があり、これに伴う二酸化炭素排出量は $0.880 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ であった（図6）。一方、SM区では、融雪材の製造工程における二酸化炭素排出量（ $0.088 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ）が上乘せされるため、SM区の資材消費由来二酸化炭素排出量は $0.968 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ となった（C0、SR区に対して10 %の増加）。

5) 除雪および融雪材散布の温室効果ガス発生量への影響

自然の積雪状態を再現した場合（C0区）と比較して、除雪では、NBPにおいては差がない一方、土壌からの一酸化二窒素排出量の増加および除雪作業に伴う二酸化炭素排出量では増加が認めら

れた。しかし、3種の排出源を統合してCO₂等価に換算した温室効果ガス排出量の約80%をNBPが占めたことから、土壌からの一酸化二窒素排出量と除雪作業に伴う二酸化炭素排出量の増加分が全体の排出量に与える影響は小さいと考えられた（図6）。

木炭を用いた融雪材散布では、一酸化二窒素放出量への影響はなく、またスノーモービルを用いた融雪材散布作業や融雪材製造工程に起因する二酸化炭素排出量の増加は極めて小さい。その一方で、NBPは大幅に増加した。NBP増加の影響は大きく、温室効果ガス排出量削減効果は極めて大きかった。

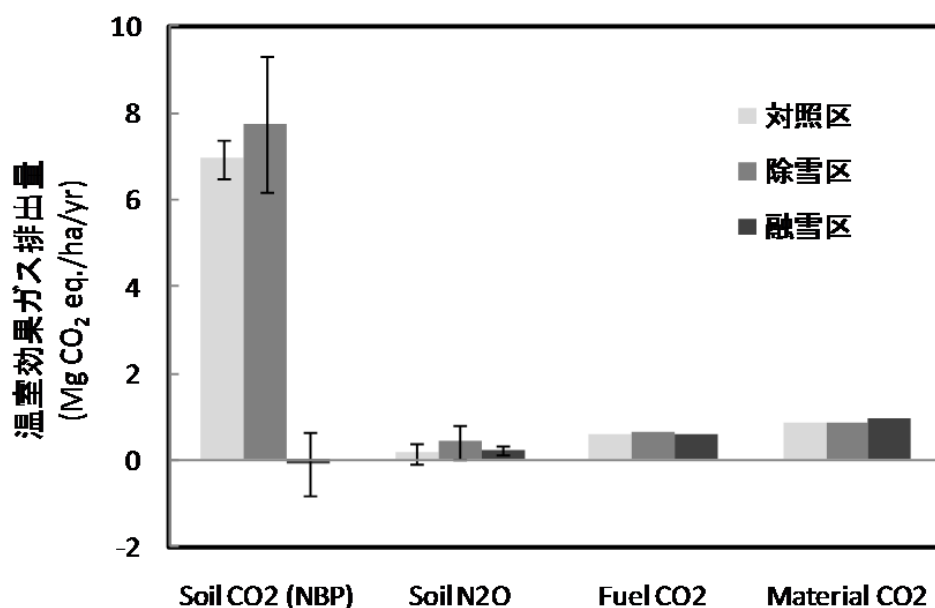


図6 各処理が温室効果ガス排出量（CO₂等価に換算）に及ぼす影響

Soil CO₂ (NBP): 土壌からのCO₂放出量（純生物相生産量）、Soil N₂O: 土壌からのN₂O放出量、Fuel CO₂: 燃料消費由来CO₂排出量、Material CO₂: 資材（融雪材含む）消費由来CO₂排出量

なお、バイオ炭による融雪材利用の現状であるが、農林水産廃棄物を利用した融雪材の開発例があり⁷⁾、さらには北海道の自治体には実利用を始める計画もでてきている²⁰⁾。ただし、バイオ炭による融雪材利用の研究事例は非常に少なく、基礎研究から実用に至るまでの今後のより一層の研究蓄積が求められる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

我が国の営農技術として積雪地帯で実施されている積雪・土壌凍結管理技術を活かすことで、温暖化による寒冷地農業の環境負荷低減と農業生産力の維持向上を両立する総合的な適応・緩和策を実現する対策技術の開発を検討した。この結果、以下のことが明らかとなった。

1) 雪割り（農地の除雪と再集積）の作業を数値モデルでの予測により最適な土壌凍結深さにする土壌凍結深制御手法を開発した。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、土壌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の両者を両立させる最適土壌凍結深は0.30 m程度であることを明らかにした。土壌凍結深制御手法は、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。

2) 土壌凍結深制御と融雪材散布をLCA手法により評価した。十勝地方の典型的な土壌の火山性土での適用では、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負荷は増加するが、全体の排出量に対するこれらの放出量増加寄与は小さく、雪割りのよって最適凍結深である0.30 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。

3) 木炭を用いた融雪材散布は土壌炭素蓄積効果が大きい。すなわち、年間温室効果ガス排出相当量の難分解性炭素を土壌へ投入していることになる。融雪材についてはバイオ炭の利用を進めることで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有効な手法となりうることを明らかにした。

(2) 地球環境政策への貢献

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²¹⁾。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. 引用文献

- 1) IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.
- 2) Hirota, T., Iwata, Y., Hayashi, M., Suzuki, S., Hamasaki, T., Sameshima, R., Takayabu, I., 2006. Decreasing soil-frost depth and its relation to climate change in Tokachi, Hokkaido, Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan, 84, 821-833.
- 3) 広田知良, 2008. 北海道・道東地方の土壌凍結深の減少と農業への影響. 天気, 55, 548-551.
- 4) Iwata, Y., Hayashi, M., Hirota, T., 2008. Comparison of snowmelt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover. Vadose Zone Journal, 7, 79-86.
- 5) 廣田知良, 岩田幸良, 鈴木伸治, 2006. 作物の生育方法について. 日本, 特開2007-236290.
- 6) 村松謙生, 1982. 農耕地の融雪促進技術－現状と問題点－. 農業および園芸, 57, 1297-1300.
- 7) 広田知良, 長谷川益男, 田中弘康, 鈴木伸治, 但野利秋, 2008. 農林水産系廃棄物を利用した融雪材の開発と融雪促進効果の検証. 農業気象, 64, 271-279.

- 8) 土谷富士夫, 1985. 十勝地方における火山灰土壌の凍結、凍上が農地に及ぼす影響に関する研究. 博士論文(北海道大学), 234pp.
- 9) Hirota, T., Pomeroy, J.W., Granger, R.J., Maule, C.P., 2002. An extension of the force-restore method to estimating soil temperature at depth and evaluation for frozen soils under snow. *Journal of Geophysical Research*, 107, D24, 4767 doi: 10.1029/2001JD001280.
- 10) Nemoto, M., Hirota, T., Iwata, Y., 2008. Application of the extended force-restore model to estimate soil-frost depth in the Tokachi region of Hokkaido, Japan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 64, 177-183.
- 11) 北海道農政部, 2005. 北海道農業生産技術体系 (第3版) 農業改良普及協会、札幌
- 12) 日本国温室効果ガスインベントリオフィス, 2008. 日本国温室効果ガスインベントリ報告 (2007) 国立環境研究所、つくば.
- 13) Koga, N., Sawamoto, T., Tsuruta, H., 2006. Life cycle inventory-based analysis of arable land farming systems in Hokkaido, northern Japan. *Soil Science. Plant Nutrition*, 52, 564-574.
- 14) Hammond, J., Shackley, S., Sohi, S., Brownsort, P., 2011. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. *Energy Policy*, 39, 2646-2655.
- 15) Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, in Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 129-234.
- 16) Hirota, T., Usuki, K., Hayashi, M., Nemoto, M., Iwata, Y., Yanai, Y., Yazaki, T., Inoue, S. 2011. Soil frost control: agricultural adaptation to climate variability in a cold region of Japan. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change.*, DOI:10.1007/s11027-011-9296-8.
- 17) Kurihara, K., Ishihara, K., Sakai, H., Fukuyama, Y., Saitou, H., Takayabu, I., Murazaki, K., Yukimoto, S., Noda, A., 2005. Projections of climatic change over Japan due to global warming by high resolution regional climate model in MRI. *SOLA*, 1, 97-100.
- 18) 気象庁, 1999. 世界気象資料(1992-1998), 気象業務支援センター発行, CD-ROM.
- 19) Yanai Y., Hirota T., Iwata Y., Nemoto M., Nagata O., Koga N. (in press) Accumulation of nitrous oxide and depletion of oxygen in seasonally frozen soils in northern Japan- Snow cover manipulation experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, doi: 10.1016/j.soilbio.2010.06.009
- 20) 北海道 栗山町ホームページ, <http://www.town.kuriyama.hokkaido.jp/index.html>
<http://www.town.kuriyama.hokkaido.jp/kouhou/10-09-01/1009.6.9.pdf> (家庭ゴミ炭化処理による融雪材再利用の記載)

- 21) 例えば、8(5)で示すマスコミ等への公表・報道の他に、雪割りの作業風景が、北海道新聞朝刊(2011年1月16日)と十勝毎日新聞(2011年1月18日)の北海道の地元の有力紙において1面記事で紹介され、また、NHKでもさわやか自然百景 北海道 十勝平野 冬(2011年2月6日放映)で紹介された。

7. 国際共同研究等の状況

特になし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

- 1) 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”
- 2) T. Hirota, K. Usuki, M. Hayashi, M. Nemoto, Y. Iwata, Y. Yanai, T. Yazaki and S. Inoue: Mitigation and Adaptation 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”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 広田知良, 2009. 気候変動・温暖化が寒冷地の土壌凍結および土壌水分に与える影響. 2009 土壌水分ワークショップ(Soil Moisture Workshop 2009)論文集 23-1-4.

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 根本学, 廣田知良: 日本農業気象学会北海道・東北支部学会合同大会, 52-53 (2008)
「北海道道東における土壌凍結深の空間分布と経年変動について」
- 2) 広田知良, 根本学, 岩田幸良, 濱寄孝弘: 日本農業気象学会 2009 年度全国大会, 50 (2009)
「北海道・道東地方の土壌凍結深の長期変動傾向」.
- 3) 奥島里美, 岡田益己, 小沢聖, 廣田知良, 干場信司, 蔵田憲次: 日本農業気象学会 2009 年度全国大会 シンポジウム気候変動と農業技術, 220-223 (2009)
「パッシブ農業の視点と技術化」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催(主催のもの)

- 1) 2008年11月25日 函館市産官学交流プラザ 日本農業気象学会北海道・東北支部合同大会シンポジウム 「北日本の気候変動・温暖化と農業影響および今後の研究展望 観客50名」

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞(2008年4月4日 北海道版28面) 環境異変⑤ 凍らぬ土、野良イモ越冬
- 2) 札幌テレビ(STV)(2008年7月9日 どさんこワイド180)「シリーズそこにある地球温暖化」(温暖化と野良イモについて10分ほど紹介)
本放送のシリーズは、2009年度、第46回ギャラクシー賞(放送批評懇談会主催)で、報道活動部門の優秀賞を受賞した。ウィキペディアによればギャラクシー賞は「事実上、日本国内のテレビ番組作りの最高の荣誉となっている」。
- 3) 産経新聞朝刊(2008年12月12日、全国版2面) 生きもの異変 温暖化の足音(45)北の大地に増える野良イモ
- 4) 十勝毎日新聞 (2009年2月14日) 土壤凍結今年は浅め 5-16cm「野良イモ発生増を懸念」
道農業研究センター芽室拠点 雪割りで対策を
- 5) オホーツク新聞(2009年2月19日 1面, 北方圏国際シンポジウム)
- 6) 日本経済新聞(2009年12月6日 全国版、11面) 土壤に異変 温暖化の影
- 7) テレビ東京 ワールドビジネスサテライト (2010年1月11日 大地に忍び寄る異変 6分ほど紹介)
- 8) 朝日新聞(2010年11月12日 18面) いきものがたり Human ×Nature 忍び寄る温暖化 越冬「野良イモ」畑で悪さ

(6) その他

広田知良 2010年度日本農業気象学会 学会賞学術賞受賞
「寒地農業に及ぼす気候変動・温暖化の影響解析・評価と適応対策に関する研究」