土壌凍結深制御技術による畑地の生産性向上

誌名	北農
ISSN	00183490
著者名	小野寺,政行 須田,達也 荒木,英晴 木村,篤 草野,裕子 下田,星児 小南,靖弘 広田,知良 中辻,敏朗
発行元	北海道農事試験場北農會
巻/号	86巻2号
掲載ページ	p. 122-130
発行年月	2019年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

＜試験成績＞

土壌凍結深制御技術による畑地の生産性向上

小野寺政行*1　須田　達也*2　荒木　英晴*3　木村　篤*4　草野　裕子*5
下田　星児*6　小南　靖弘*6　広田　知良*6　中辻　敏朗*7

要　旨

雪踏みは雪割りと同じく，土壌凍結を促進でき，野良イモ防除に有効である。雪踏みは雪割りに比べ使用機が安価で共同利用しやすいが，積雪が深い場合や傾斜地などでの実施にやや難があるため，立地条件や作付体系等を考慮して凍結深制御手法を選択する。雪踏み，雪割りに関わらず，土壌凍結深30cmを目標に制御すると，土壌物理性の改善や窒素溶脱抑制を介して圃場の生産性は向上する。土壌凍結深推定計算システムは汎用性を高め，広域で活用できるように改良した。

1．はじめに

道東などの寒冷かつ積雪の少ない地域では，雪による断熱作用が働かず，冬季に土壌凍結が発達する。しかし，十勝やオホーツク地域では，1980年代後半以降，土壌凍結が発達する前の初冬の積雪量が増加していることから，土壌凍結が発達しにくくなり凍結深が減少している（Hirota et al. 2006；中辻ら2016）。それに伴い，ばれいしょ跡地では野良イモ（収穫時に取り残した小イモが土壌凍結により死滅せず翌年野良生えしたもの）が増加するようになった。野良イモは後作物の生育阻害や土壌病害虫の拡大などが問題となるため抜き取るが，この作業が大きな負担になっている（広田2008；前塚2008）。そこで野良イモ対策として，「雪割り（トラクタ等に装着したV羽根で圃場の雪を列状に除雪する方法）」により土壌凍結深を制御（目標凍結深は30cm）して野良イモを防除する技術と雪割りによる凍結深制御を支援する土壌凍結深推定計算システムが開発され（Hirota et al. 2011；Yazaki et al. 2013），十勝地域を中心に広く普及している。

一方，土壌凍結が融解後の砕土性や孔隙分布等の土壌物理性に影響を及ぼすことは古くから知られてきたが（長沢，梅田1985），凍結を人為的に制御するという発想はこれまでなかった。このような中，オホーツク地域ではたまねぎ畑を中心に，透水性や春耕時の砕土性の向上，融雪水の下方浸透低減による土壌窒素の溶脱抑制（Iwata et al. 2013, 2018；Yanai et al. 2017）などの土壌理化学性の改善を目的として，主に「雪踏み（トラクタに装着したタイヤローラー等で圃場全面の雪を圧雪する方法）」による土壌凍結深制御が生産者の一部で試みられ，この取り組みが増えつつある。しかし，凍結が土壌理化学性に与える効果と作物の生産性に与える効果とを関連付けた科学的知見はなく，土壌凍結深制御が作物生産にプラスの効果を発揮するための諸条件，効果発現に最適な凍結深の解明が強く望まれている。また，オホーツク地域で導入事例の多い雪踏みは，十勝地域で

Improvement of crop yield by soil freezing depth control in the field of cold regions of Hokkaido

*1 道総研北見農業試験場（現道総研道南農業試験場）
Masayuki ONODERA
*2 道総研十勝農業試験場（現道総研中央農業試験場）
Tatsuya SUDA
*3 網走農業改良普及センター本所（現十勝農業改良普及センター十勝北部支所）　Hideharu ARAKI
*4 網走農業改良普及センター美幌支所
Atsushi KIMURA
*5 網走農業改良普及センター本所（現上川農業改良普及センター富良野支所）　Yuko KUSANO
*6 農研機構北海道農業研究センター
Seiji SIMODA, Yasuhiro KOMINAMI,
Tomoyoshi HIROTA
*7 道総研北見農業試験場　Toshiro NAKATSUJI

普及している雪割りで懸念される越冬中小麦への物理的損傷リスクが小さいため，越冬中秋まき小麦圃場での野良イモ対策として期待されているが，本土壌凍結深制御手法の特性および活用法に関する情報はほとんどない。

そこで，雪踏みの特性および活用法を明らかにし，土壌凍結深制御が畑地の土壌理化学性改善やそれに伴う作物生産性向上に有効なことを示すとともに，既存の野良イモ防除用の土壌凍結深推定計算システムを汎用的で広域に活用できるように改良したので報告する。

2．試験方法

1）供試圃場の概要と土壌凍結深制御処理

2014年初冬～2015年早春（以下，14/15年と略記），15/16年，16/17年の3シーズンにわたり，北見農業試験場の黒ボク土と低地土の各1筆，十勝農業試験場の黒ボク土1筆，およびオホーツク・十勝地域の10市町村の現地圃場25筆，計28筆において試験を実施した。現地圃場の内訳は訓子府町の黒ボク土5筆，低地土4筆，泥炭土1筆，美幌町の黒ボク土4筆，低地土1筆，芽室町の黒ボク土2筆，豊頃町の低地土2筆，上士幌町，音更町，帯広市の黒ボク土各1筆，中札内村，鹿追町，更別村の低地土各1筆である。

土壌凍結深制御処理は，雪割り，雪踏み，除雪の単用もしくは併用により，これら手法の実施時期や実施後の寒気暴露期間を適宜調節することで土壌凍結深を30cmまたは45cmを目安に2～4水準（無制御区を含む）設定した。土壌凍結深は，0.03%メチレンブルー溶液を用いた凍結深度計（北海道立総合研究機構農業研究本部2012），もしくはオーガーで採土して凍結深度を計測する採土法（Iwata et al. 2012）で測定し，凍結深制御の参考とした。

雪割りおよび雪踏みの作業手順は次の通りである。雪割りは，トラクタなどに装着したV羽根で除雪を行うが，一度に圃場全面の雪を除去できないため，まずV羽根の作業幅に合わせて一定間隔で列状に雪を割り広げて地表面を露出させる。次に寒気に曝された谷（露出）部の土壌が所定の深さまで凍結した後，雪山の部分を割り広げて谷部と雪山部を交代させ圃場全面を凍結させる。雪割り作業は厳寒期（日平均気温－5℃以下が連続する期間）を中心に2回の実施を基本となるが，雪割り後，凍結深が目標に到達する前に新たな降雪があった場合は谷部の追加除雪が必要である。本試験では延べ2～4回の作業で凍結深30cmに概ね達した。

雪踏みでは，トラクタに装着したタイヤローラーを用いて圃場全面を一度の作業で圧雪する。圧雪作業は積雪深が浅い初冬から開始し，凍結深が目標に到達する前に新たな降雪があった場合は繰り返し行う。本試験では2～5回の作業で凍結深30cmに概ね達した。なお，雪踏みによる土壌凍結促進の原理は，積雪層を圧縮することで雪密度が大きくなり，雪の熱伝導率が高まる結果，寒気が土壌に伝わりやすくなり，土壌凍結が促進される。

2）雪踏みによる土壌凍結深制御

雪踏みによる土壌凍結深制御の野良イモ低減効果を検討するとともに，雪踏みと雪割りによる土壌凍結深制御の土壌理化学性などに及ぼす影響を比較した。

野良イモ低減効果は，現地のばれいしょ後作の秋まき小麦作付け圃場5筆，同大豆作付け圃場1筆，同たまねぎ連作圃場1筆において野良イモ発生量を調査した。

両手法の土壌理化学性などに及ぼす影響の比較は，訓子府町の現地圃場2筆（低地土，泥炭土）において15/16年，16/17年の2シーズンにわたり，雪踏み区と雪割り区を設置して，土壌理化学性などに及ぼす影響を調査した。

また，両手法の長所・短所を作業性，機種特性，凍結深制御性の観点から検討するため，現地試験の生産者から聞き取り調査などを行い，両手法の特性を整理した。

3）土壌凍結深制御が土壌理化学性に与える効果

前述の各圃場において，土壌凍結深制御が砕土

性と透水性の向上，窒素溶脱抑制に与える効果などを検討するため，①冬季から春耕時までの積雪深・凍結深・地温・土壌水分の推移，②前年11月と融雪後の0～60cm土層の無機態窒素量，③春耕前後の砕土率（20mm以下の土塊割合），④収穫跡地の畑地浸入能（シリンダーインテークレート法）などを調査した。

4）土壌凍結深制御が作物生産性に与える効果

農試試験において，土壌凍結深制御が作物の生産性向上に与える効果を物理性改善効果並びに窒素溶脱抑制効果と関連づけて検討した。北見農試では黒ボク土圃場にてんさい（直播栽培），低地土圃場にたまねぎ（移植栽培），十勝農試では大豆およびスイートコーンを供試し，各作物の生育量および窒素吸収量の推移，収量，品質などを3シーズン（14/15～16/17年）にわたり調査した。農試試験における肥培管理は土壌凍結深制御区（以下，凍結制御区）と無制御区で北海道施肥ガイド（北海道農政部2015）に準じた標準施肥量を共通施肥した。

現地試験では，14/15年は5筆，15/16年は9筆，16/17年は7筆において大豆，てんさい（移植栽培），ばれいしょ（生食用），たまねぎ（移植栽培），にんじん（晩春まき）など農試試験で供試していない作物を加えて農試試験と同様の検証を行うとともに，本技術導入時の留意点などを検討した。いずれの現地試験も農家慣行の肥培管理で試験を実施した。そのため，一部の圃場では窒素施肥量が標準施肥量よりも多い事例があった。調査項目は農試試験と同様である。

5）土壌凍結深推定計算システムの改良

十勝地域で運用中の野良イモ防除用の土壌凍結深推定計算システムに雪踏み（圧雪）条件での凍結深推定機能を追加し，広域に活用できるシステムに改良するため，上記試験で得られた結果を，既存のシステムにフィードバックし，改良を進めた。

3．結果と考察

1）雪踏みによる土壌凍結深制御

(1)　雪踏みによる土壌凍結深制御の野良イモ低減効果

既往の報告（Yazaki et al. 2013）では，雪割り手法を用いて土壌凍結深を30cmに制御すると，野良イモ発生量を無制御区対比5％程度にまで低減できるとされている。本試験でも，最大土壌凍結深（以下，最大凍結深と略記）を30cm以上に制御した圃場の雪踏み区の野良イモ発生量は，無制御区対比0.1％にまで減少できた（**表1**）。よって，雪踏みによる土壌凍結深制御は，野良イモ防除に必要な最大凍結深30cmを達成できれば，雪割りの場合と同等の野良イモ低減効果を有することが明らかとなった。

表1　雪踏みによる土壌凍結深制御の野良イモ低減効果（現地試験）

凍結深区分	試験区	最大凍結深 (cm)	野良イモ発生量 (株/10a)	(対比)
30cm未満	無制御	7(±5)	3,305(±1,486)	100%
(n＝4)	雪踏み	26(±3)	741(±　723)	22%
30cm以上	無制御	9(±4)	5,431(±4,841)	100%
(n＝3)	雪踏み	34(±5)	4(±8　)	0.1%

注）凍結深区分は，雪踏み区の最大凍結深で区分した。

(2)　土壌凍結深制御手法が土壌に及ぼす影響

雪割りと雪踏みによる土壌凍結深制御を比較した結果，同程度の凍結深達成に要する施工回数はほぼ同等で，3回程度の施工でともに最大凍結深25cm程度に達した（**表2**）。

最大凍結深がほぼ同等の両区において，融雪，春の地温および作土水分の推移，融雪後の残存無機態窒素，春耕期の砕土性および畑地浸入能で評価した透水性に及ぼす影響を比較したところ，いずれの項目も両区の間には有意な差が認められなかった。

このことから，最大凍結深を同等に制御した場合は，土壌凍結深制御手法に関わらず，後述する土壌理化学性や作物生産性に与える効果には大差ないことが示唆された。

表2　雪割りおよび雪踏みによる土壌凍結深制御が土壌に及ぼす影響（現地試験）

項目			雪割り区 前期	雪割り区 後期	雪踏み区
作業回数（延べ数）			3.5		3.0
最大土壌凍結深(cm)			25.3	22.3	25.0
融雪日(月/日)			3/31		3/30
春の地温の推移(℃)	地中深15cm	3/25	0.3	0.3	0.3
		3/30	1.2	0.9	0.6
		4/5	4.6	4.9	4.5
		4/10	4.7	5.1	4.5
	地中深30cm	3/25	1.0	0.9	0.8
		3/30	1.6	1.1	1.0
		4/5	4.0	3.9	3.3
		4/10	4.8	5.0	4.4
作土（0～20cm土層）水分の推移(%)		4/5	30		31
		4/7～8	28		29
		4/11	27		27
融雪後の残存無機態窒素（0～40cm土層，kg/10a）			6.6		10.4
砕土率(%)	春耕前		71		74
	播種床造成後		88		84
畑地浸入能(I_b値，mm/h)			262		317

注1）訓子府町2筆（低地土，泥炭土）における15/16年，16/17年の平均値を示す。
注2）雪割り区は前期と後期に分けて列状に除雪を行う。一部のデータはそれぞれの時期別除雪エリアで調査した結果を示した。
注3）雪割り区と雪踏み区の間にはいずれの項目も有意差（Tukey多重比較検定）は認められない。

(3)　雪割りと雪踏みの特性

ここでは，前項の結果や生産者からの聞き取りなどに基づき，雪踏みと雪割りの長所・短所を作業性，機種特性，凍結深制御性の観点から検討し，**表3**に整理した。

雪割りの主な長所としては，積雪深や立地条件に対する適応性の高さが挙げられる。すなわち，雪割りは積雪深が15cm以上で，かつ平均気温－5℃以下の日が連続することが作業開始日の目安とされているが，積雪が50cmを超える場合でも作業は可能である。また，除けた雪は圃場内に列状に保存されるので，雪割り後の積雪が少ない場合は雪を割り戻すことで，これ以上凍結が深く入らないように制御できる。さらに，雪踏みに比べると立地条件による制約が少ない。

一方，雪踏みの主な長所としては，①作業時に土壌との接触がないため，土壌を練り返すなどの悪影響が少ない，②越冬中秋まき小麦への物理的損傷リスクが小さい，③タイヤローラーは価格が安く，トラクタとの接続に制約が少なく，共同利

表3　雪割りと雪踏みの特性

項目		雪割り（V羽根）	雪踏み（タイヤローラー）
作業性	開始の目安	予想平均気温－5℃以下が連続し，積雪深15cm以上（12月下旬頃～）	根雪以降，積雪深15cm以上（12月上旬頃～）
	回数	前期・後期の2回＋降雪後の追加除雪数回	最低2～3回＋凍結・積雪状況に応じて数回
	時間	一度の処理面積が雪踏みの半分 （聞き取りによる平均値0.6hr/ha）	走行スピードは速い （聞き取りによる平均値0.7hr/ha）
	土壌への影響	土壌が凍結していない場合は，練り返しのリスクがある 事前に雪踏みを行うと回避できる	左記のリスクは雪割りより小さい
	積雪深に対する適応性	1回に作業できる積雪深が雪踏みより深い	1回に作業できる積雪深が雪割りより浅い（最大30cm程度）
	圃場適応性	秋まき小麦圃場では越冬中小麦への物理的損傷リスクが大きいため適さない	左記のリスクは小さい 傾斜地ではやや難がある
機種特性	価格	V羽根　＞　タイヤローラー	
	作業幅	専用機：2～3.5m	～4m強
	汎用性	フロント3点リンク式は汎用性が高い フロントローダー式は，接続部がローダー別に対応しているため共同利用ができない 比較的高馬力のトラクタが必要	けん引式，直装式とも汎用性は高い 共同利用する事例多い 麦踏みにも活用できる
	作業上の留意点	V羽根の角度により作業性が劣る場合がある 雪割り専用機種が望ましい	積雪深が深い場合は，トラクタの馬力とタイヤローラーの作業幅が影響し，作業性が劣る場合がある
凍結深制御性		前期と後期で深さに差が出る場合がある 凍結深を深く（40cm以上）入れられる 過剰凍結は割り戻しで防げる	凍結深の深さを均一にできる 凍結深は最大40cm程度まで ただし，積雪が少ない地域，年次では過剰凍結を制御できない
その他	融雪材散布	雪山が障害となり均一に散布できない場合がある	圧雪されている層があるため，融雪材散布機が走行しやすい
	導入の容易さ	機種の汎用性が低く，共同利用がしにくいので，小中規模の農家では導入しにくい	汎用性が高く，共同利用しやすいので，導入しやすい

用しやすい，④融雪材散布時に圧雪されている層があるため，散布機が走行しやすいなどのメリットがある。なお，積雪深が深い条件では，油圧でタイヤローラーを持ち上げ可能な直装式の方が雪の抱え込みを少なくでき作業性に優れる。

このように両手法にはそれぞれ長所と短所があり，立地条件や作付体系等を考慮した凍結深制御手法の選択がポイントとなる。

2）土壌凍結深制御が土壌理化学性に与える効果

(1)　砕土性

土壌凍結深制御が翌春の砕土性に与える効果について検討した結果を**図1**に示した。凍結制御区の最大凍結深の平均値±標準偏差は，黒ボク土で30±7 cm，低地土・泥炭土で31±7 cmであった。このときの凍結制御区の春耕前および播種床造成後の砕土率は，いずれの土壌も無制御区に比べ有意に高かった（図1）。特に，春耕前の無制御区の砕土率が低かった粘質な低地土圃場（作土の粘土含量60%）においては，播種床造成の仕上げにロータリハローによる耕耘を2回行っているが，凍結制御区ではロータリハロー1回目で無制御区の2回目と同等の砕土率80%以上に達しており，複数回行う耕耘作業の一部を省略可能であった（データ省略）。

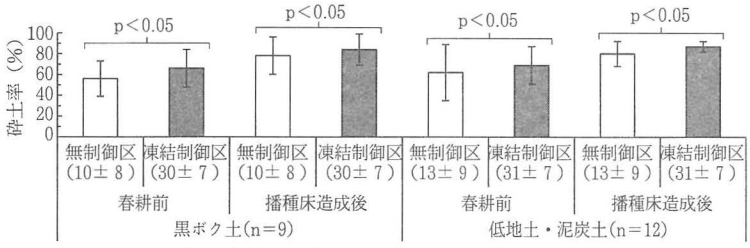

図1　土壌凍結深制御による砕土性向上効果（現地試験）

注1）エラーバーは標準偏差を示す。図中のp値はt検定によるペア間の有意差判定結果である。
注2）試験区名下の括弧内の数値は最大凍結深（cm）の平均値±標準偏差を示す。
注3）播種床造成作業は，スプリングハロー等による砕土後，ロータリハローによる整地が基本パターンである。

したがって，土壌凍結深制御による砕土性向上は，土壌の種類を問わず，最大凍結深が30cm程度で効果が得られ，播種床造成でロータリハローによる耕耘作業を2回以上要する粘質土壌では耕耘回数削減の可能性も示唆された。

(2)　透水性（畑地浸入能）

土壌凍結深制御が透水性に与える効果について畑地浸入能を指標として検討した結果を**図2**に示した。凍結制御区の最大凍結深の平均値±標準偏差は，黒ボク土で35±9 cm，低地土・泥炭土で32±8 cmであった。このときの凍結制御区の畑地浸入能（Ib値）の土壌別平均値は，低地土・泥炭土では無制御区に比べ有意に高かった。

これらのことから，土壌凍結深制御による透水性向上は，少なくとも低地土や泥炭土において土壌凍結深が30cm程度で効果が得られる可能性が示唆された。

(3)　窒素溶脱抑制

土壌凍結深制御が越冬後の窒素溶脱抑制に与える効果について検討した結果を**図3**に示した。越冬後の無機態窒素残存率は，最大凍結深が深くなるに伴って概ね高まった。ただし，その増加程度は土壌の種類で異なり，また最大凍結深40cm以上ではむしろ残存率の低下を招く可能性があった。すなわち，黒ボク土ではいずれの年次も凍結が深くなると残存率が高まることが多かったが，低地土や泥炭土では

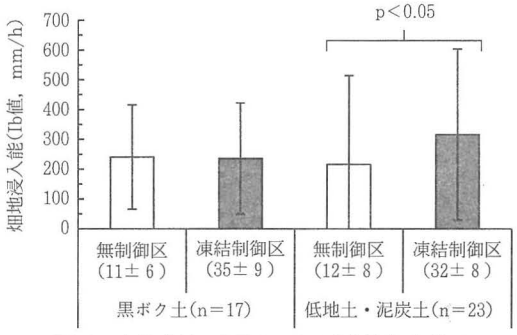

図2　土壌凍結深制御による透水性向上効果（農試・現地試験）

注1）エラーバーは標準偏差を示す。図中のp値はt検定によるペア間の有意差判定結果である。
注2）試験区名下の括弧内の数値は最大凍結深（cm）の平均値±標準偏差を示す。

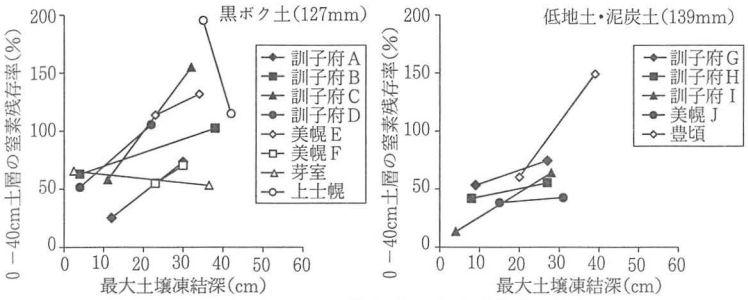

図3　土壌凍結深と越冬後の窒素残存率の関係
（現地試験，15/16年の結果のみ抜粋）

注1）窒素残存率(%)＝融雪後の残存無機態窒素量(kg/10a)/前年11月の無機態窒素量(kg/10a)×100
注2）各グラフのタイトルに示した括弧内の数値は，無制御区の積雪水量の平均値を示す。
注3）各圃場における無制御区と凍結制御区のデータを線で結んで表示。

積雪水量（すなわち浸透水量）の多い年次で増加程度が小さかった（データ省略）。また，残存率が低下した圃場では，最大凍結深が40cm以上と深いことで，凍結層の消失遅延が大量の融雪水の滞水を招き，その後の気温上昇による凍結層の消失で大量の滞水が一気に浸透したことが低下の一因と考えられる。

なお，窒素残存率が100%を超えるデータが散見されるが，これは冬季間に無機化した下層土の窒素が，凍結に伴う水の上方移動により，0～40cm土層へ移動したためと考えられた。同様の結果はYanaiら（2017）の報告にもみられる。

以上のことから，土壌凍結深制御による窒素溶脱抑制は，凍結深40cm程度までは深く凍結させるほど効果が大きい傾向にあった。また，これまで述べた土壌理化学性改善効果が共通して得られる最大凍結深は30～40cmの範囲にあることが示唆された。

3）土壌凍結深制御が作物生産性に与える効果

(1)　各作物に対する生産性向上効果（農試試験）

農試試験において，土壌凍結深制御が作物生産性に与える効果を土壌理化学性改善と関連付けて検討した。その結果，凍結制御区では20～40cm土層の固相率や容積重の低下（膨軟化），易有効水容量の増加（保水性向上）などの物理性が改善する傾向がみられ，融雪後の残存無機態窒素の増加に伴い多収となる傾向がみられることから，土壌物理性の改善と窒素溶脱抑制効果の両者が作用して生産性が向上するものと考えられた（データ省略）。そのため，砕土性や透水性，保水性の向上等の土壌物理性の改善と窒素溶脱抑制効果が共通して発現する最大凍結深30～40cmの場合に，大豆，スイートコーン，たまねぎはいずれも生産性が向上した（**表4**）。ただし，4月下旬に播種した直播てんさいでは，

表4　土壌凍結深制御が作物生産性に与える効果

圃場区分	作物	窒素施肥量(kg/10a)	試験区	最大凍結深(cm)	融雪後無機態窒素(kg/10a)	収量(kg/10a)	平均	同左比(最小-最大)
農試	大豆	1.8±0.0	無制御	8±4	3.7±0.7	368	100	
	(n=3)		凍結制御	38±11	7.3±2.5	404**	110	(106-116)
	てんさい(直播栽培)	18.0±0.0	無制御	11±8	5.8±4.2	1,027	100	
	(n=3)		凍結制御	32±3	6.8±3.4	1,017	99	(93-109)
	スイートコーン	12.0±0.0	無制御	8±4	3.7±0.7	1,204	100	
	(n=3)		凍結制御	38±11	7.3±2.5	1,309*	109	(105-110)
	たまねぎ(移植栽培)	13.0±1.7	無制御	11±9	3.2±0.2	6,267	100	
	(n=3)		凍結制御	36±2	4.0±0.7	6,800*	109	(102-113)
現地	大豆	1.6	無制御	5	2.6	322	100	
	(n=1)		凍結制御	38	4.4	337	105	
	てんさい(移植栽培)	19.8±0.4	無制御	19±9	5.2±2.5	1,346	100	
	(n=2)		凍結制御	32±3	9.8±8.3	1,518**	113	(111-114)
	たまねぎ(移植栽培)	19.8±4.1	無制御	11±6	5.8±0.7	7,028	100	
	(n=3)		凍結制御	33±2	6.3±0.4	7,259*	103	(100-108)
	にんじん(晩春まき)	10.3±0.0	無制御	23±0	3.4±0.4	5,129	100	
	(n=2)		凍結制御	33±3	4.4±0.5	5,842*	114	(112-116)
	ばれいしょ（生食用）	4.7	無制御	4	3.6	3,851	100	
	(n=1)		凍結制御	38	5.1	4,115	107	

注1）農試試験地は短期除雪による凍結制御区の3カ年の平均値±標準偏差を示す。現地試験地は凍結制御区の最大凍結深が30～40cmの圃場の結果について平均値±標準偏差を示す。
注2）*，**は無制御区とのペア間においてそれぞれ5%，1%水準で有意差（Dunnett多重検定）のあることを示す。
注3）残存無機態窒素はてんさいが融雪後の0～60cm土層，その他の作物が同0～40cmの値である。
注4）収量は大豆，スイートコーンが総収量，てんさいが糖量，たまねぎ・にんじん・ばれいしょが規格内収量である。
なお，大豆の総収量は水分15%換算値で示した。

春の天候が不順な年次で地温上昇の遅延が影響し減収傾向を示すなど，生産性向上効果は不安定であった。

(2)　現地実証と留意点の抽出（現地試験）

前述の検討により，土壌凍結深制御による土壌理化学性改善を介した作物生産性向上効果は土壌凍結深が30～40cmで得られることが明らかになったことから，土壌の種類や窒素肥沃度の異なる現地試験において，この向上効果を未検討作物も加えて検証した。

その結果，最大凍結深を30～40cmの範囲に制御した圃場の凍結制御区では，たまねぎの一部圃場を除くといずれの作物も多収であった（**表4**）。

たまねぎでは生産性向上効果が小さい圃場がみられたが，これは農家慣行の窒素施肥量で栽培した圃場で窒素肥沃度に基づく標準施肥量よりも10kg/10a以上多肥であったこと，低地土圃場で積雪水量が多い年次に窒素溶脱抑制効果が小さかったことが影響したためと考えられた。

現地試験では，多肥と凍結深制御による窒素溶脱抑制効果が相まって窒素供給が過剰となる場合があり，ばれいしょではでん粉価の低下，てんさいでは根中糖分の低下傾向などの品質の低下が確認される場合や，たまねぎでは軟腐病が助長された例があった（データ省略）。

以上のことから，窒素溶脱抑制に影響する積雪量の違や窒素施肥量の多寡が効果の発現程度を左右したものの，各種作物ともに最大凍結深を30～40cmに制御すると生産性向上効果が得られることが実証された。

4）土壌凍結深推定計算システムの改良

本試験では，既存の雪割りによる野良イモ防除用として開発された土壌凍結深推定計算システム（Yazaki et al. 2013）をベースにして，小南ら（2015）が改良した積雪深分布推定モデルを組み込み推定精度の向上を図り，雪踏み（圧雪）条件で凍結深を推定できるシステムに改良した。加えて，対象地域を十勝地域のみから全道一円に拡大した。新システムによるオホーツク地域における雪踏み（圧雪）条件下での土壌凍結深推定値は実測値と比較的良好な対応を示した（**図4**）。このことから新システムによる土壌凍結深推定値は実用レベルに達していることが確認された。

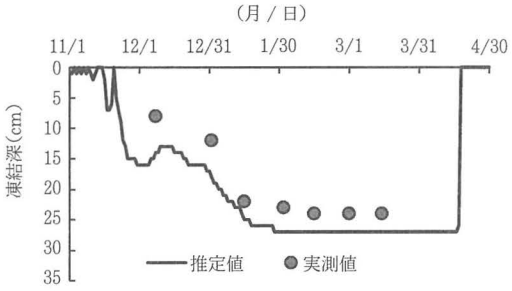

図4　雪踏み条件での土壌凍結深推定計算システムによる推定値と観測値の関係
（16/17年，訓子府町黒ボク土圃場）

4．総合考察

1）土壌凍結深制御による土壌理化学性改善と生産性向上のための目標凍結深

土壌理化学性改善効果と生産性向上効果が共通して得られる最大凍結深は30～40cmの範囲にあることが示唆された。ただし，凍結深を深くすると融雪後の地温上昇と土壌の乾きの遅れを助長すること，また現実的な凍結深制御の精度幅は±数cmであること，さらに過剰凍結による融雪水の滞水などの弊害を防ぐことから，土壌凍結深は30cmを目標に制御する。この深さは野良イモ防除と環境への窒素負荷低減（融雪水の浸透比と硝酸態窒素残存率の関係から）の観点から最適最大凍結深（28～33cm）を導いたYanaiら（2017）の報告とも一致する。

2）土壌凍結深制御に対応した窒素施肥

土壌凍結深を制御し窒素溶脱を抑制させることは，環境への窒素負荷低減の観点からも有効である。しかし，現地試験では，多肥と凍結深制御による窒素溶脱抑制効果が相まって窒素供給が過剰となり，生産性向上効果が発現しにくいだけでなく，ばれいしょでん粉価，てんさい根中糖分などの品質低下や軟腐病助長などの弊害を招く恐れが

あった。これらの現象は，窒素施肥量の適正化で回避でき，これは環境への更なる窒素負荷低減にも繋がる。したがって，土壌凍結深制御技術の導入にあたっては北海道施肥ガイドを参考にして土壌の窒素肥沃度に応じた適正量を施肥する。

3）土壌凍結深制御技術の適用地域

本技術の適用可能地域は，既往の報告（Hirota et al. 2011）と同様に，12～2月の平均気温が－5℃以下の地域が該当する。ただし，十勝・オホーツクよりも積雪量の多い地域では窒素溶脱抑制効果が小さくなり，生産性向上効果が発現しにくい可能性があることから，今後は適用地域を拡大する上で多雪地域での検証が必要である。

4）土壌凍結深制御による各種作物の生産性向上効果と適用範囲

土壌凍結深制御による作物の生産性向上効果は，前述の土壌物理性改善と窒素溶脱抑制効果を介して得られる。そのため，作物の種類を問わず，共通してこの効果が期待できる。ただし，直播栽培てんさいのように4月下旬頃に播種する作物では，天候不順条件において土壌凍結深制御による地温上昇の遅れというマイナスの作用がプラスの効果を相殺する場合があり，生産性向上に対する安定的な効果を期待できないことから，野良イモ防除として行う。播種期が直播栽培てんさいよりも更に早い春まき小麦などの作物では，融雪後の土壌の乾きの遅れにより適期に播種できなくなる恐れがあるため本技術は適さない。

5）土壌凍結深推定計算システムの活用

土壌凍結深を制御する上で，凍結深の推移を把握することが重要となる。土壌凍結深の測定法には，凍結深度計を埋設して観測する方法などがある。この方法は観測時の実測値を得るには適しているが，土壌凍結深の見込みは天気予報等の気象情報と経験則から予想するしかない。これに対し，前述の改良した土壌凍結深推定計算システム（http://www.agw.jp/site_2015/hokuno_mesh/select.php）は，Google Mapを利用しながら圃場の位置情報（緯度経度）を登録し，土壌凍結深制御処理（雪割り，雪踏み）の実績（実施日等）を入力することで，農研機構北海道農業研究センター提供の気象データに基づき土壌凍結深・地温・気温・積雪深の推移や平年値に基づいた土壌凍結深の予測値を得ることができる。このシステムを活用することで，圃場で観測しなくても土壌凍結深が把握できるとともに，勘に頼らず予測値から土壌凍結深制御処理の計画が立てられることから，土壌凍結深のより正確な制御が可能となる。

謝　辞

本試験を実施するにあたり，多大なるご協力をいただいた生産者の方々に，改めて厚く御礼申し上げる。また，本稿を執筆するにあたりご校閲を賜った北海道立総合研究機構道南農業試験場長加藤淳博士，中央農業試験場農業環境部中本洋部長に深く感謝の意を表す。

文　献

1) Hirota T., Iwata Y., Hayashi M., Suzuki S., HamasakiT.,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
2) 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. 16, 791-802.
3) 北海道農政部（2015）：Ⅲ畑作物・Ⅳ園芸作物．北海道施肥ガイド2015．p35-195．北海道農業改良普及協会，北海道．
4) 北海道立総合研究機構農業研究本部（2012）：凍結深度．土壌・作物栄養診断のための分析法2012．p52.
5) Iwata Y., Hirota T., Suzuki T., Kuwao K. (2012): Comparison of soil frost and thaw depths measured using frost tubes and other methods. Cold Regions Science and Technology. 71, 111-117.
6) Iwata Y., Yazaki T., Suzuki S., 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, 157-165.

7) Iwata Y., Yanai Y., Yazaki Y., Hirota T. (2018). Effects of a snow-compaction treatment on soil freezing, snowmelt runoff, and soil nitrate movement: A field-scale paired-plot experiment. Journal of Hydrology. 567, 280-289

8) 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．60, 39-44.

9) 小南靖弘，広田知良，井上 聡，大野宏之（2015）：メッシュ農業気象データのための積雪水量推定モデル．雪氷．77, 233-246.

10) 長沢徹明，梅田安治（1985）．土壌の凍結・融解．アーバンクボタ．24, 26-29. https://www.kubota.co.jp/siryou/pr/urban/pdf/24/pdf/24_3.pdf

11) 中辻敏朗，荒木英晴，広田知良（2016）：積算寒度から推定した近年のオホーツク地域の土壌凍結深．土肥要旨集．62, 247

12) Yazaki T., Hirota T., Iwata Y., Inoue S., Usuki K., Suzuki T., Shirahata M., Iwasaki A., Kajiyama.T, Araki K., Takamiya Y., Maezuka K.. (2013) : Effective killing of volunteer potato (Solanum tuberosum L.) tubers by soil frost control using agrometeorological information An adaptive countermeasure to climate change in a cold region. Agricultural and Forest Meteorology. 182, 91-100

13) Yanai Y., Iwata Y., Hirota T. (2017): Optimum soil frost depth to alleviate climate change effects in cold region agriculture. Scientific Reports. 7,44860. https://www.nature.com/articles/srep44860