

温暖化条件下の積雪・土壌凍結地帯の長期変動傾向の予測と農業に及ぼす影響評価

(4) 温暖化条件下における農業や農地環境に与える影響評価

独立行政法人 農業環境技術研究所

大気環境研究領域

井上 聡

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・岩田幸良

平成17～19年度合計予算額	5,791千円
(うち、平成19年度 当初予算額)	1,650千円)

[要旨]

北海道・道東地方の温暖化時における積雪・土壌凍結深の予測を行った。気象庁予測シナリオに基づく最新の温暖化予測値では、道東地方では降積雪が増加したのち減少する。すなわち、将来の温暖化時に一般的に言われているように積雪深が気温上昇と共に単調に減少するとは必ずしもいえない。これは、気温が上昇しても、冬の気温は依然として相当期間、氷点下以下にあり、ただちに降積雪の減少に関与しないためである。さらに、温暖化予測値の気温と積雪情報を用いて、土壌凍結深モデルにより将来予測を行ったところ、2031年～2050年の近未来では、断熱作用のある積雪深が増加するので、土壌凍結深は大きく減少し、土壌凍結を生じない状態になる。その後2081年～2100年では、気温上昇より積雪深が減少するため、2031年～2050年時と較べると、土壌凍結深はやや増加する、ただし、現在の土壌凍結深と較べると減少する。これらの予測結果と現状の観測結果を比較すると、予測は現象トレンドの延長上にある、あるいはむしろ現象が予測を上回る速度で進行していると解釈できる。土壌凍結深の減少は、農業生産の向上に関しては正の効果がある反面、土壌凍結で抑制されていた雑草（野良イモ）の発生や、融雪水の地下浸透の増加に伴う農業由来の地下水汚染へのリスクの増大等、農業環境への負の影響も現れた。これに対する適応策として、作物の適地分布の見直しと越冬作物の育種戦略の変更の検討を提言した。また、生産現場では土壌凍結深減少に伴う野良イモ発生の問題に対して、一部の農家で除雪（雪割り）による土壌凍結深促進が実行されている。この技術は農閑期の冬に自然の寒冷資源の利用により、無農薬で野良イモ防除の大幅な効率・省力化を実現している。さらに、課題1で開発した土壌凍結深モデルを応用し、野良イモ防除に有効でかつ、土壌凍結促進が作物や農地に悪影響を残さないことを両立する土壌凍結深制御技術へと発展させて、これまで不可能とされていた大規模土地利用型農業での環境制御が実現可能になる見通しを得た。これらの適応対策は気候変動を契機に、従来の農業技術の延長上とは異なる新しい発想の農業技術が開発され始めたことを示す。

[キーワード] 地球温暖化、SRES 排出シナリオ A2 条件、降積雪変動、農業への影響、適応対策技術

1. はじめに

北海道・道東に位置する十勝、根室、釧路地方は国内の畑地面積の20% 草地面積では40%を占める、我が国を代表する農業地帯である。十勝平野では畑作、根釧台地では牧草生産および畜産

が主な産業である。地球温暖化にともなって、これらの地域の農業がどのように影響を受けるかを予測することは、日本農業の将来像を知る上で極めて重要である。IPCC 報告等¹⁾では、寒冷気候帯の農業は、温暖化により当面は生産力の増加が望めると楽観的である。しかし、地球温暖化によってもたらされる気温上昇をはじめとする気候変動は、農地環境や農業生態系に様々な影響を与え、それらは相互に関連し合い複合的な影響が生じるため、寒冷気候帯の農業地域は必ずしも楽観的な変化が生じるとは限らない。

そこで、温暖化が進行しつつある現在において、過去からどのような変化が生じているか、現状を的確に把握するために、道東地方の農業現場で地道に蓄積されているデータを収集し、統合的なデータベースを構築することが重要である。また、同時に当該農地において気象や土壌物理性の精密観測を行って現象のメカニズムを解明し、気候変動に対する応答を再現しうるモデルを構築することが必要である。得られたデータベースを解析し、モデルによって現象を表現する。さらに地球温暖化時の予測気候値をモデルに入力し、将来予測することによって、温暖化時の影響評価を行なうことが出来る。これらによって得られる知見は、北海道にとどまらず、ロシア・中央アジア、北米大陸に広がる寒冷気候帯の農業地域に広く適用可能である。

2. 研究目的

本サブ課題は、道東地方での温暖化時の土壌凍結深の変動予測と農業に及ぼす影響評価を目的とする。道東地方は厳寒であるため、断熱効果を持つ積雪が少ない場合には土壌凍結が発達する。土壌凍結が発達するかどうかにより、土壌物理性および農地の生態系が大きく影響を受けるため、この評価は極めて重要である。過去の知見から、20 cm 程度の積雪の有無によって土壌凍結の発達が影響を受けることが知られている。本サブ課題は、北海道・道東地方における地球温暖化時の気温と積雪深を予測し、サブ課題1で開発された土壌凍結深推定モデルを用いて、温暖化時の土壌凍結深予測を行う。さらに、得られた土壌凍結深の動向予測を踏まえて、温暖化条件下の積雪・土壌凍結の変動が農業や農地環境への影響について正(品種選択枝の拡大や収量増等)と負(農地環境へ悪影響等)の両面を評価する。

3. 研究方法

(1) 温暖化時の土壌凍結深予測手法の開発

Inoue and Yokoyama²⁾の手法を用いて、将来の気温と降水量を入力し、月降雪深・最深積雪・堆積環境を計算し、全国および道東地方についての推移を調べた。将来の気温と降水量は、SRES 排出シナリオ A2 条件において「気象庁／気象研気候統一シナリオ Ver.2 日本域 2 次メッシュバージョン(暫定版)」によって計算された将来の月平均気温と月降水量(西森らによって日本付近についてメッシュ展開された)を使用した。空間分解能が高いこと、国内の研究機関によって計算されたため日本について比較的信頼できると思われること、等から将来の気候に本データを使用した。なお SRES 排出シナリオ A2 条件とは、緩やかに世界経済が成長し、地域的経済発展が中心となる多元的な将来を想定している。

Inoue and Yokoyama²⁾の手法の概要は以下の通りである。1.月降水量と月平均気温を用いて降雨と降雪に分離する。2.降雪については、後述する捕捉率補正を行う。3.得られた降雪の相当水量を密度で除して、降雪深に変換する。4.月平均気温から積雪の堆積環境を推定する。5.堆積環境ごとに冬季降雪深

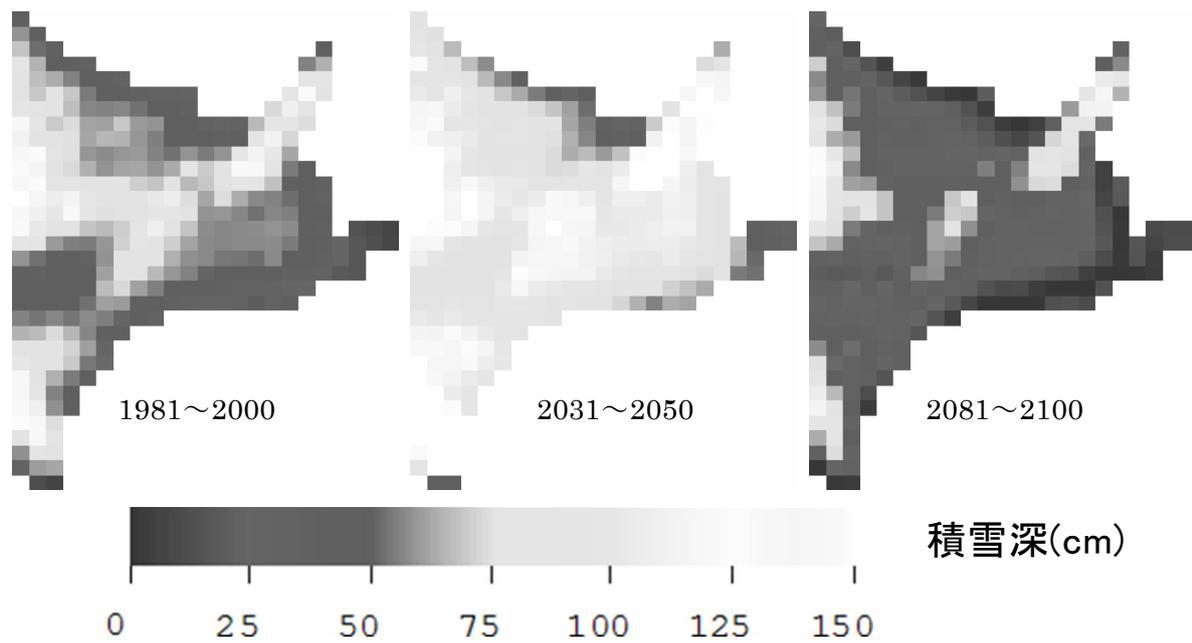


図1 道東の最深積雪の推移

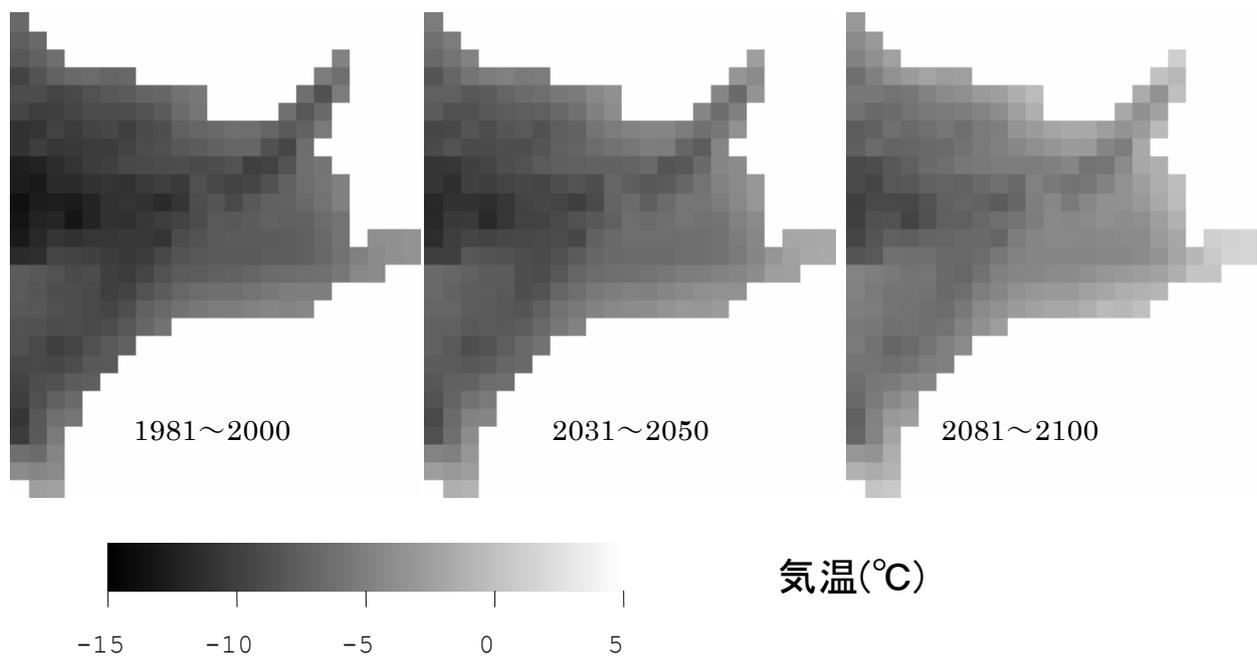


図2 道東の1月平均気温の推移

から、最深積雪を推定する。

月別値から日別値への時間的補間には、3次スプライン補間を用いた。気温は、各月の中心日に月平均気温を通るとした。時系列は「月別値」で得られた同じ気候値が2年間続くと仮定し、その時系列の1年目の11月から2年目の5月までを使用した。積雪深は、1年目10月末以前を零とした。11月30日、12月5日、10日、15日、20日、25日、30日の各積雪深は、11月平均気温、11月降水量、11月降雪深、

12月平均気温、12月降水量、12月降雪深の十勝地方の気象観測値の重回帰式から推定した。1月、2月、3月の最大積雪深は、十勝地方の過去の最頻発生日に生じるとした。さらに、3月9日以降は、積雪層の圧密や融解によって積雪深が減少するとし、その日積雪深減少量は、気温と前日の積雪深の重回帰式によって推定した。消雪後の積雪深は零とした。

以上の方法によって得られた日平均気温、日積雪深、さらに月平均気温の年平均値(年平均気温)を、土壌凍結深推定モデル⁴⁾⁵⁾に入力し、土壌凍結深を面的に推定した。対象範囲は北緯42度25分～43度15分、東経142度52.5分～143度37.5分であり、空間分解能は国土数値情報2次メッシュ形式の一辺約10kmである。

(2) 温暖化条件下の積雪・土壌凍結条件の変動が農業に及ぼす影響評価

1) 北海道・道東地方の冬の気候は少雪厳寒であるため、土が凍る“土壌凍結地帯”として知られている。土が深く凍ると、①冬の凍結期間が長くなり、春以降の作物生育期間が短くなる。②作物の越冬に厳しい冬の農地環境になる。③凍結土壌は水を通しにくいいため、雪融けの水が地表面に溜まりやすく、越冬作物の湿害や土壌浸食を受けやすく、農作業の開始が遅れる等の問題があり、土壌凍結はどちらかといえば農業には“負”の要素と考えられていた。また、実際、越冬作物である小麦や永年性作物である牧草には根が浮き上がる凍上や冬枯れ障害が発生し、その結果、生産が不安定となるため、品種の選択肢も制約されていた。ところが、1980年代後半以降の近年の20年間は北海道開拓以来前例のない土壌凍結深の顕著な減少を生じており、農業への影響も現れ始めている。これは、いわゆる“土の温暖化”を生じていると表現して良い。ここでは、北海道・道東地方で生じている土壌凍結深の減少の農業に及ぼす影響を、プラスの影響およびマイナスの影響の両面から報告する。

2) 一方、2006/07年の記録的な暖冬となり、厳冬期である12月下旬に通常は降雪になるところが雨になるという、例年では生じない現象となった。2007年の帯広の1月の月平均気温は-5.4℃であり、平年値-7.7℃と較べると2℃以上高く、2081-2100年の温暖化時の気温に相当する。したがって、将来の温暖化条件の現象を先取りした現象ともいえる。そこで、この暖冬の年に農地にどのような変化が生じ、また農業にどのような影響を生じたかを報告する。

3) 1)と2)で明らかにされた農業への影響について今回の環境省プロジェクトで明らかになった科学的知見と組み合わせ、現象を改めて解釈し、さらにここ将来の温暖化時における処方箋あるいは対策技術、課題について提言を行う。

4. 結果と考察

(1) 温暖化時の土壌凍結深予測手法の開発

まず、温暖化時の予測値として、道東の最深積雪の推移を図1に示す。左から、1981年から2000年の平均値(以後、現在と呼ぶ)、2031年から2050年の平均値(以後、近未来)、2081年から2100年(以後、将来)の平均値であり、年々変動ではなく20年間の平均的な気候変化を表す。「気象庁/気象研気候統一シナリオ Ver.2 日本域2次メッシュバージョン(暫定版)」では、十勝平野において現在は積雪が少ないが、近未来には積雪が大きく増加する可能性があることが分かった。そして、その後の将来、再び積雪深が少なくなると予測されている。

一方、気温は単調に増加が予測されている。例として、図2に各時期の1月平均気温の分布を示す。芽室町に相当するメッシュ（北緯42度54分東経143度03分付近）の場合、最大土壌凍結深は、現在0.17m、近未来0m、将来0.08mであった（図3）。

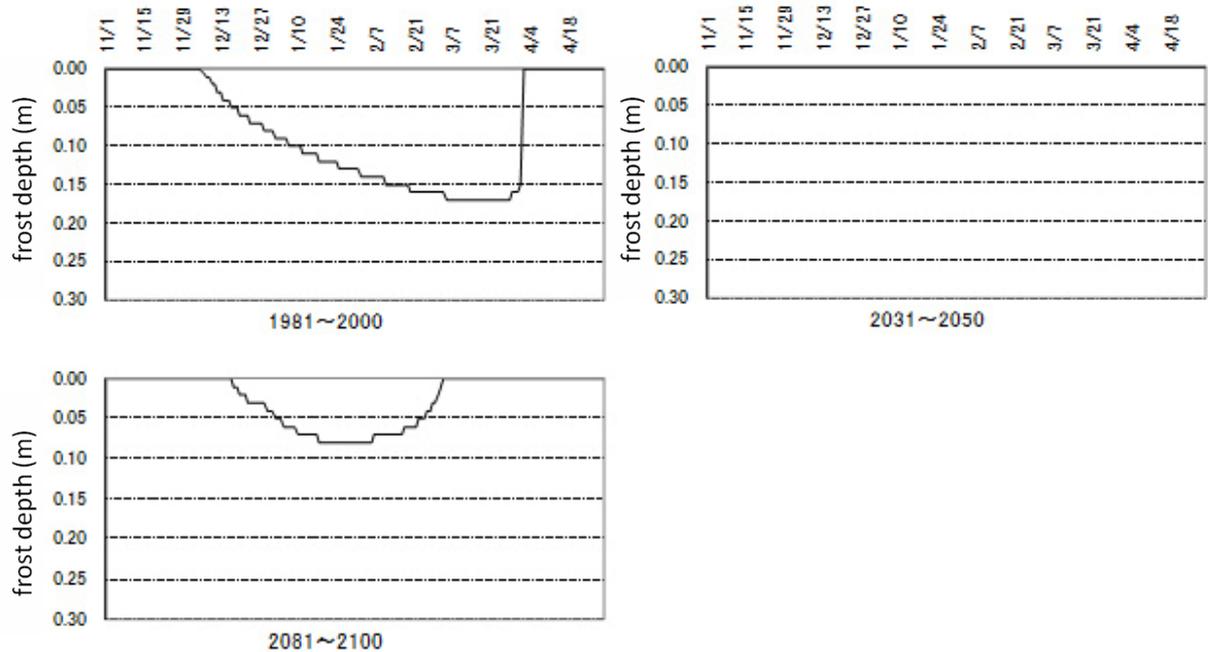


図3 芽室町の土壌凍結深推定値の推移

芽室町複数地点における1987年から2000年の最大土壌凍結深の平均値は0.21mであり、統計期間は異なるが「現在」の0.17mは推定値として妥当であったと判断できる（図4）。

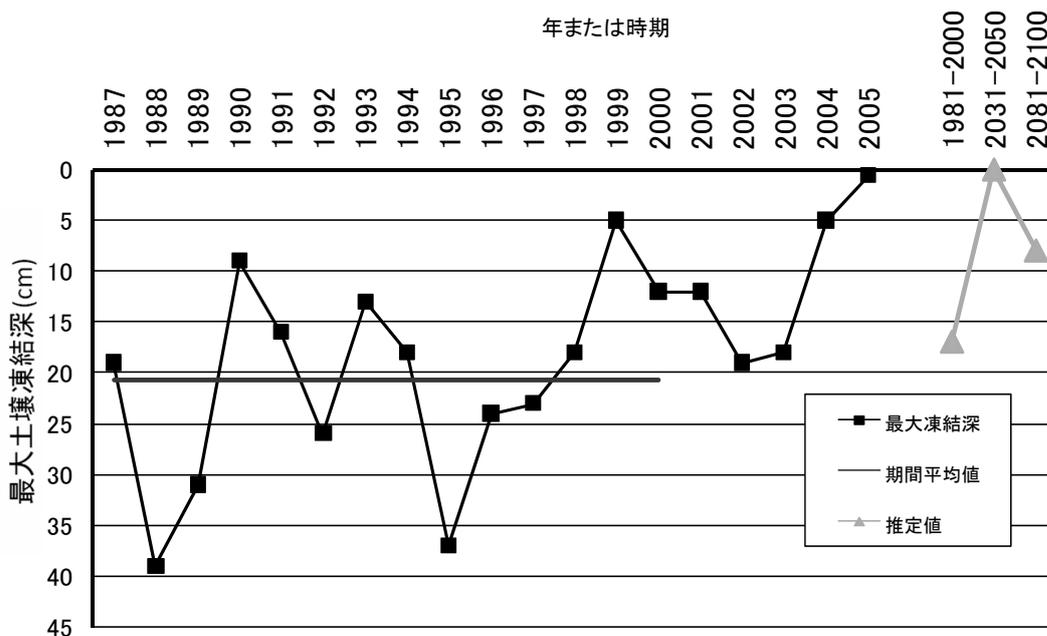


図4 芽室町の最大土壌凍結深の推移(左:実測値、右:推定値)

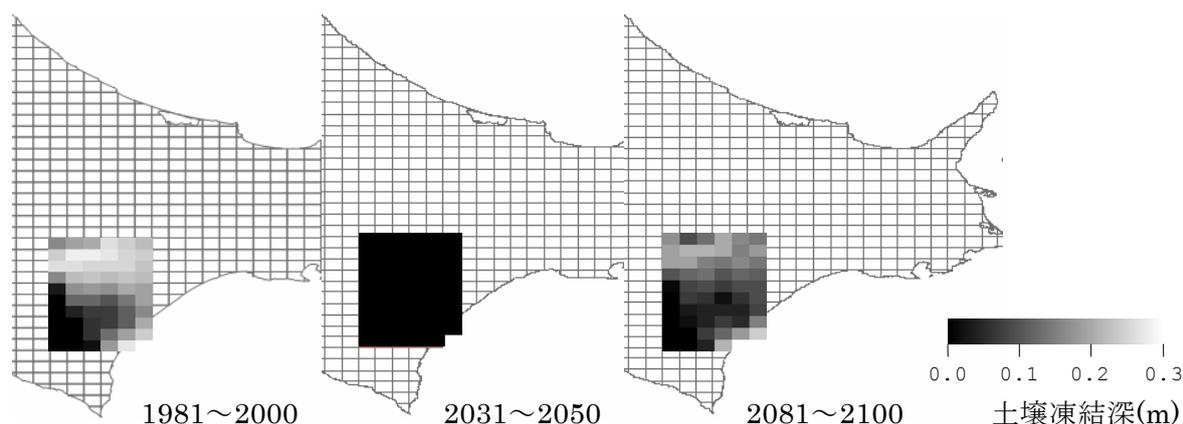


図5 土壤凍結深の推移

芽室町と同様に面的に予測した土壤凍結深の推定結果を図5に示す。現在対象地域内で、最大0.28m、最小0m、平均0.16mである土壤凍結深は、近未来には平均0mと全く土壤凍結しなくなり、将来には、最大0.30m、最小0m、平均0.10mと再び土壤凍結するが、平均凍結深は現在より小さくなる。

土壤凍結は、発生する現在に対して、近未来には全く発生しなくなると予測された。これは、先に示した積雪深（最深積雪）の増加によると考えられる。積雪深の増加は、冬季降水量の増加による。過去の研究事例から、約20cm以下の積雪深において、土壤凍結が促進することが分かっている。本課題で用いた予測値では、これを大きく超える積雪深が推定されており、積雪層の十分な断熱効果によって土壤は凍結しなくなったと推定される。一方、将来は、再び土壤凍結が生じると予測された。これは、積雪深が土壤凍結する量まで、再び減少するためである。しかし、現在と比較すると、土壤凍結深は小さい。これは、温暖化による気温上昇によって、大気からの冷却効果が弱まるためと考えられる。

以上から、本課題での土壤凍結深の温暖化影響として、減少傾向が確認された。これらの予測結果と過去から現在にかけての推移を比較すると、現在、すでに初冬における積雪深の増加による土壤凍結深の減少傾向が続いており³⁾、また、2006/07年の冬は、初冬における高温で積雪が消雪したため、土壤凍結の発達が悪く助長される現象を観測した。したがって予測は現象トレンドの延長上にあるといえるか、むしろ現象は予測結果を先取りあるいは予測を上回る速度で進行していると解釈できる。

また、気候変化とは別に、年々の気象状況によっても、土壤凍結深は年々変動する。降水時の気温が大幅に上昇すれば降水形態が雨になるため、その後の低温によっては土壤凍結が発達する可能性もある。したがって、今後の課題として、土壤凍結深の年々変動予測が重要である。

(2) 温暖化条件下の積雪・土壤凍結条件の変動が農業に及ぼす影響評価

(A) 土壤凍結深の減少が農業に与える正の効果について

(a) 課題(2)での除雪区・対照区の観測結果に加え、2001年から行った長期観測サイトのデータを解析することにより、凍結層が発達した過去には融雪期に融雪水の浸透が大きく抑制され、平地では融雪後の地表湛水による春作業の遅れや秋撒き小麦の湿害、傾斜地では表面流出による土壤侵食や肥料成

分の農地の外への流出、河川流量の増加の原因になっていたと考えられる。一方、凍結層が浅くなった近年では融雪期に凍結層が存在しても、それが融雪水の浸透の遅延にほとんど寄与しないため、過去に比べて土壤凍結地帯に特有のこれらの問題は、かなり緩和されていると考えて良い。

(b) 適地分布の変化に伴う越冬作物の生産性向上の可能性

近年の土壤凍結深の減少は、冬期間の地中温度上昇とこれに伴い越冬作物にとっては寒さの厳しい冬の農地環境が緩和されることを意味し、作物の生育環境には正の効果をもたらすことが期待される。特に草種の選択肢が限られていた永年性作物である牧草について、栽培適地が大きく変化しつつあるとみられる。その中でも土壤凍結地帯では不適とされたアルファルファ栽培について、越冬性向上に向けた品種改良の取り組みと十勝地方における現地実証により、土壤凍結地帯である道東地方においても栽培可能性が高まった



図 6 アルファルファ越冬試験風景(北海道農業研究センター十勝地方芽室拠点)写真中心からやや右側の枯れている牧草は海外の非耐寒性品種

ことを示し⁷⁾(図 6)、さらに土壤凍結深の減少により、栽培可能適地が拡大しつつある兆候がある。我が国の輸入粗飼料の約半分がアルファルファであり、北海道内全体でも 1 万 ha 規模の栽培面積であるが、我が国の 40%で 30 万 ha の草地面積を有し、これまで栽培不適地とされていた道東地方で本格的に導入された場合の飼料自給率向上にもたらす効果は大きいと考えられる。

(c) 十勝地方の代表的な輸出産品である長イモの収穫体系に関して⁸⁾

農協からの聞き取り調査によれば、近年、十勝地方では、長イモの作付けが増加している。長イモは、我が国の数少ない輸出農産物の代表的なものである。この長イモの収穫体系は秋に収穫する「秋堀り」と越冬後、春に収穫する「春堀り」の二つに分類される。ただし、春堀りは、土壤凍結が深いと越冬中に凍害を被り、商品価値が大きく下がることになる。近年十勝地方でも土壤凍結深が浅くなってきたため、特に、十勝地方の中西部の帯広や芽室では春堀りが可能となってきている。秋と春に収穫が分けられるため、貯蔵施設の規模が小さくてすむというメリットが出てきている。

(B) 土壤凍結深の減少が農業に与える負の影響について

寒冷地では、温暖化により農業生産力の向上が望めるという楽観的な見方がある。実際、上記に挙げた土壤凍結深減少に伴う正の兆候は起きている。しかし、一方で、土壤凍結で抑制されて

いた雑草や雑草に伴う病虫害の発生、融雪水の地下浸透の増加に伴う農業由来の地下水汚染へのリスクの増大等、当初の想定外の農業環境への負の影響が現れはじめた。このことに関する以下の事例を報告する。

(a) ジャガイモ収穫後畑で生じている雑草化した野良イモの問題^{9,10,11)}

道東・十勝地方は、国内有数の畑作地帯で全農地面積は25万1千ha、その内飼料作物を除いた畑作面積は13万3千haと全農地面積の半分以上を占める。主要畑作物は小麦、豆類、テンサイ、ジャガイモで、この4品目を主体に輪作体系を組む畑作経営である。ジャガイモは北海道を代表する畑作物であるが、その中でも十勝地方は、生産量が全国の30%以上、北海道の40%以上を占める我が国を代表する大生産地帯である。農家1戸当たりの平均作付面積は約27haであり、じゃがいもの作付面積平均は5haと国内では大規模土地利用型農業を展開している。現在、この地方で生じている特筆すべき現象として、ジャガイモ収穫跡畑において、



図7 土壤凍結深の減少が農業に及ぼす影響例(北海道・十勝地方) 野良イモの発生例

下: 列状に植わっているのは豆、その間に野良イモ

左上: ビート畑での野良イモ

右上: 小麦畑の野良イモ(いずれも丸印で囲んだところ)

て、前年度の収穫時にこぼれた小イモが翌年に芽を出し雑草化する「野良イモ」の多発を生じている(図7)。これは、かつては厳しい冬の土壤凍結環境で凍死したイモが、土壤凍結深が浅くなることで越冬可能になり、雑草化する現象である。野良イモの発生数は多いところでは、2万株/1haに達する¹³⁾。野良イモは、1) 雑草化し後作の生育を阻害する。2) アブラムシを誘引し、ウィルスを媒介させる。また、ジャガイモシストセンチュウの発生源になる等病虫害発生要因となる。3) 後作物の畑で別品種のジャガイモを植えた場合には異品種混入の危険で流通上のリスクを生じる、等の問題がある。そのため、除草が不可欠であるが、現状では農薬処理も効果的ではなく、人力処理が主な対策であるため、数十時間/1haの除草時間を要し、1戸当たり平均5haのじゃがいも面積を有する当地では、新たな深刻な労働負担となった。さらに、農作業従事者が少ない生産者は期間雇用で対応している場合もあるが、i) 野良イモの萌芽のタイミングは種芋の位置により時間差があり、抜き取り作業を繰り返す必要がある。また、ii) 手取り除草を実施しても、塊茎が土中に残れば再び野良イモとなる危険性があり、重労働の割には改善効果が上がらないこともある。

(b) 土壤凍結深の変動が農地の水・物質循環に与える影響

課題2で最大土壤凍結が20cm程度までしか発達しない状況では、融雪期に凍結層が存在しても融雪

水の土壌中への浸透が抑制されないことが明らかとなった。そのため、近年の土壌凍結深減少条件下では、多量の融雪水が土壌中に浸透する箇所が多くなっていると考えられる。したがって、農地の肥料成分などの物質移動も大きく影響を受け、凍結が30-40cm以上と深い場合は、農地に残っていた肥料成分が、最大凍結深20cm以下では融雪期に溶脱して地下深部へ速やかに浸透すると考えられ、農業由来の地下水汚染の危険性が高まる可能性がある。つまり、土壌凍結深減少による融雪水の浸透形態の変化に伴い、農地の施肥管理の変更を検討する必要があると考える。

(c) 2006/07年の記録的暖冬からの温暖化影響の考察－越冬作物の凍害の発生－

例年なら厳冬期であり、降水は平年なら、降雪となるはずの、2006年12月27日に帯広では最高気温が4.5℃、翌日の28日は最高気温が6.3℃となった。また一日中、氷点下を上回ったため降雪ではなく降雨を生じ、両日で合計降雨量29.5mmとなった。この高い気温と降雨により、十勝地方の多くの畑で積雪はほぼ消雪した。この後、数日間、気温が再び氷点下に下がり断熱材となる積雪がなくなったため、土壌凍結は発達し、北海道農研芽室拠点の観測地点では近年の10年では比較的深い26cmを記



図8 2006-07年冬季に凍害を受けた十勝地方の小麦畑
(線で囲んだ箇所が被害を受けている)

録した。年明け後の2007年1月6-7日は最高気温が1.0-3.0℃であり、この時もみぞれ交じりの多量の降水(68.5mm)となった。この気温と降水、また発達した土壌凍結によって不凍水層が形成されていたことから雨水と融雪水は圃場表面に滞水し、その後の低温によって氷結する箇所が多く発生した。この時、氷結した中に閉じこめられた小麦や牧草は、その後枯死し凍害が発生していることが確認された(図8)。この現象はIce Encasementと呼ばれ、氷の中に封じこめられた小麦や牧草などの作物は酸素不足のため呼吸代謝系に異常が生じ、枯死に至る。⁸⁾

温暖化によって30年後の十勝では凍結深が浅くなることが予測されており、そのような状況下では凍結層が融雪水の浸透を抑制することは無いと考えてよい。しかし、そこに至る過程あるいは温暖化における将来予測(2081-2100年想定)では、2006/07年のように一時的な気温上昇で断熱作用のある積雪が消失することにより、土壌凍結が逆に発達して、凍結層が融雪水の浸透を抑制する可能性がある。暖冬に伴う氷結、凍害については課題2の土壌凍結深変動と水移動に関する知見のさらなる蓄積と現場への知見の応用が必要となる。

(C) 土壌凍結深の減少に対する適応対策技術について

冬の気候条件が少雪厳寒で土壌凍結が発達していた北海道・道東地方では、初冬における積雪深が増加する時期が前進してきており、土壌凍結深が減少傾向にある気候条件に変わりつつある。

さらに、温暖化予測でも土壌凍結深は長期的には減少傾向にある。この気候変動条件に対して考えられる研究・技術開発の方向性を示す。

(a) 気候条件の変化に伴う育種戦略の見直し

この地域はこれまで少雪厳寒であったため越冬作物である小麦や牧草の品種育成でも植物体が氷点下の低温による凍結に耐える耐凍性の性質の強い品種育成が重視されてきた。しかし、積雪に覆われる時期が早くなってきているため、今後は越年生作物が積雪下で越冬する能力の高い耐雪性の強い品種の導入あるいは育成の検討等、育種戦略の再考時期に来ていると考えられる。また、積雪地域では長期間積雪下（0℃、暗黒条件）で越冬することになり、凍温には曝されないうが、越冬作物をことごとく犯す雪腐病が蔓延するため、雪腐病抵抗性を持つ品種の導入または育成も合わせて検討が必要となると考えられる。

(b) 適地分布の見直し

近年の気候変動条件の下で土壌凍結深の減少傾向が今後も続くとすれば、従来の適地区分が大きく変わることが示唆される。そのため、この地域における越冬作物の新品種の導入と安定生産のために、これまでの気象情報（例えばアメダスや農業気象メッシュ気象情報）では提供されていない土壌凍結深の地域分布に基づく新たな適地判定の情報が必要であり、現場からも、重要な課題として強く求められている状況である。また、当地は牧草など複数年栽培を続ける作物も多いので、平均的な気象・気候条件ばかりでなく異常気象が起きる頻度がどの程度になるかを評価・予測する指標作りも重要である。

(c) 土壌凍結促進さらには土壌凍結深制御による大規模土地利用型農業で可能な環境制御・適応対策技術の開発

上記の a), b) はどちらか言えば中長期的な対策事項といえる。一方で道東地方は、現実ですでに土壌凍結深の減少が生じ、例えば上記で挙げた雑草化した野良イモの問題が発生している。これに対して生産現場の一部では気候変動（土壌凍結深変動）に対する農業での適応事例が見られるようになった。この事例を紹介しつつ、現在、私達もこの問題に対応している気候変動を契機とした新しい適応開発・大型環境制御技術を取り上げる¹²⁾¹³⁾。

土壌凍結深の減少に伴う野良イモの大発生に関する問題に対して、一部の農家では、冬期間に断熱作用の



図9 土壌凍結深減少影響に対する農業の適応対策事例
野良イモ退治のための雪割り(除雪)して土壌凍結促進を行っている畑(十勝地方)

ある雪を地表から除去する除雪（雪割りとも呼ばれる）や、断熱効果を低減できる圧雪を作業機械で行う土壌凍結促進による野良イモの凍死処理の試行を始め（図 9）、実際に効果を挙げはじめた⁸⁹⁾。この畑での除雪や圧雪は、十勝の農家の間で 2003/04 年と 2004/05 年の凍らなかった冬を契機に広がりはじめています。つまり、土壌が凍らなくなる新たな事態により、一部の農家は土壌凍結の正の効果（例えば、イモの野良生え防除効果）に気が付いたのである。雪と氷で閉ざされた農閑期の冬に農地管理をすることで、1) 除草による作業時間が手取りの人力の場合は、数十時間/ha 要していたのが、作業競合の生じない冬の農閑期に作業機械による農地の除雪で、わずか 1-2 時間/ha の作業になり、大幅な効率化と省力化を実現し、2) しかも土壌凍結の活用により、無農薬による雑草（野良イモ）防除技術を可能とし、大面積処理が可能である点でも、除雪・圧雪による土壌凍結促進は優れた方法である。

ただし、この一部の農家で始められた土壌凍結促進による野良イモ凍死処理の効果は認められるもの、現状では農家の勘と経験の作業のため、1) 凍結促進の行き過ぎで農地への悪影響を与える例（播種期の遅延や春先以降の作物の生育抑制など）や、逆に、2) 凍結促進不足により野良イモ防除効果を十分に発揮しない例も見られる。そこで、この現場の問題にも対応し、課題 1 で開発した土壌凍結深推定モデルを基に、積雪管理により凍結深を制御することにより、科学的に野良イモ防除に有効かつ、土壌凍結促進が作物や農地に悪影響を残さないことを両立できる野良イモ対策技術が確立できる見通しを得た。土壌凍結と野良イモの関係については、現地調査から土壌凍結深が 20cm 程度では野良イモは多く発生するが、土壌凍結深が 40cm より深くなると野良イモ発生数は大きく低減する（図 10）。この知見等に課題 1 で開発した土壌凍結深推定モデルを組み合わせることで、農家の勘と経験に頼った現在の試行技術が、科学的な方法に基づく野良イモの発生予察、除雪や圧雪の作業必要性の判断、あるいは必要な場合に、実

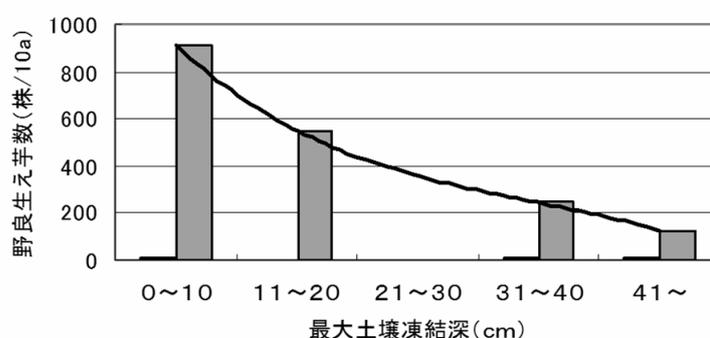


図 10 最大土壌凍結深と野良イモ数の関係(n=27)（十勝地方の農家畑での調査）

注 野良イモ数は最大土壌凍結深の範囲の中での平均値（2006 年7-8月 十勝農協連、北海道農研による合同調査データ **凍結深 21-30 cm の範囲はデータがない）

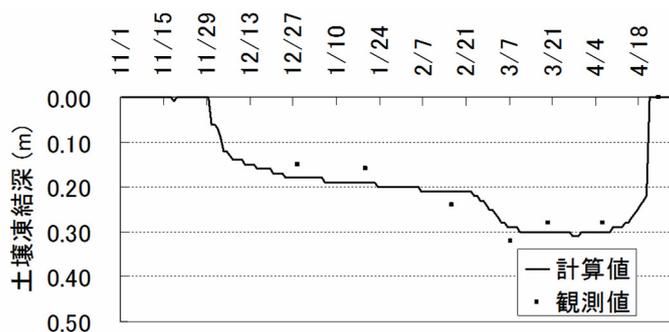


図 11 土壌凍結深比較
（十勝農協連試験圃場 除雪処理区）

図 11 除雪試験（雪割り）での土壌凍結深モデルの検証例（十勝農協連との共同研究）

気象データは アメダスを使用、ただし除雪期間の積雪深は実測値

施のタイミングや期間を判定できる技術となる（図 11）。

言うまでもなく、農業と気象は密接に関わっている。しかし、大規模土地利用型農業では天気任せにするしかなく、人為的な環境制御は不可能とされてきた。しかし、本プロジェクトの成果の応用による研究・技術開発は、大面積処理が可能な作業機械による除雪や圧雪等の雪の管理による土壤凍結深制御を通して、これまで不可能とされていた大規模土地利用型農業での環境制御が実現可能になることを意味する。これは野良イモ対策技術だけに留まらない。例えば、課題 2 で示したように、土壤凍結深の変動は土壤中の水・物質移動にも大きな影響を与えるため、この土壤凍結深制御技術は、農業由来の地下水汚染のリスクを軽減する環境保全技術へ発展する可能性を持つ。

つまり、世界の寒冷気候帯の南端にあり、気候変動の影響が現れやすい北海道・道東地方でのこれらの適応対策の動きは、気候変動を契機にこれまでの技術の延長上ではなかった新しい発想の農業技術が世界に先駆けて誕生し始めたことを示す。

5. 本研究により得られた成果

(1) 北海道・道東地方の温暖化時における積雪・土壤凍結深の予測を行った。気象庁予測シナリオに基づく最新の温暖化予測値では、従来の予測結果と異なり、道東地方では降積雪が増加したのち減少することが推定された。すなわち、北海道・道東地方では、将来の温暖化時に積雪深が単調に減少することは必ずしもいえないと予測された。これは、気温が上昇しても、冬の気温は依然として相当期間、氷点下以下にあり、降積雪の減少に関与しないためである。

(2) 温暖化予測値の気温と積雪情報を課題 1 で開発した土壤凍結深モデル^{4,5)}を用いて、土壤凍結深の将来予測を行ったところ、2031 年～2050 年にかけては、断熱作用のある積雪深が増加するので、結果として土壤凍結深は大きく減少し、土壤凍結を生じない状態となる。その後、2081 年～2100 年では、気温上昇より積雪深が減少するため、2031 年～2050 年時と較べると土壤凍結深はやや増加すること予測される。ただし、現在の土壤凍結深と較べると減少すると予測される。

これらの予測結果と過去から現在にかけての結果と比較すると、現在、すでに初冬における積雪深の増加による土壤凍結深の減少傾向が続いており、また、2006/07 年の冬は、初冬における高温で積雪が消雪したため、土壤凍結の発達が却って助長される現象を観測した。したがって予測は現象トレンドの延長上にあるといえるか、むしろ現象は予測結果を先取りあるいは予測を上回る速度で進行していると解釈できる。

(3) 道東地方における土壤凍結深の減少が農業に与える影響について正負の両面から事例に基づき検討した。

- 1) 農業への正の影響としては、土壤凍結深の減少に伴う冬の厳しい気象条件の緩和から、越冬作物の作物生育環境には好影響があると考えられ、今後、品種の選択肢が拡大できる可能性があると考えられた。特に、現在起きつつある現象として、土壤凍結地帯では不適とされたアルファルファ栽培の栽培可能適地が拡大しつつある。
- 2) 農業への負の影響としては、土壤凍結深の減少は、土壤凍結で抑制されていた雑草（野良

- イモ)の発生やこれに伴う病虫害の発生の危険性の増大や、融雪水の地下浸透の増加に伴う農業由来の地下水汚染へのリスクの増大等、当初の想定外の農業環境へ影響が現れはじめた。
- 3) また、2006/07年の冬に生じた暖冬から温暖化(気温上昇)は積雪層の消失を生じることで凍結深の増加を却って助長し、雨水と融雪水は圃場表面に滞水し、その後の低温によって氷結することで越冬作物に凍害をもたらすことと、温暖化時には今後このような現象が増加する可能性がある。
- 4) 気候変動に伴う土壌凍結深の減少に対する対策として、以下のような方策が考えられる。
- ① 温暖化予測を踏まえた気候学的手法に基づいて適地分布を見直す。
 - ② 越冬作物の育種戦略の変更、特に耐凍性品種から耐雪性品種育成への検討を行う。
 - ③ 土壌凍結深減少に伴う野良イモ発生の問題に対しては、生産現場では除雪(雪割り)による土壌凍結深促進による対応が一部の農家ですでに実行されている。
 - ④ さらに、本プロジェクトで開発した土壌凍結深推定モデルを基に、積雪管理により凍結深を制御することにより、科学的に野良イモ防除に有効かつ土壌凍結促進が作物や農地に悪影響を残さないことを両立できる対策技術が確立できる見通しを得た。

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) Inoue, S. and K. Yokoyama. Estimates of snowfall depth, maximum snow depth, and snow pack conditions in Japan by using five global warming predicted data. *Journal of Agricultural Meteorology*, **59**, 227-236. (2003)
- 3) Hirota, T., Y. Iwata, M. Hayashi, S. Suzuki, T. Hamasaki, R. Sameshima, and I. Takayabu: Decreasing soil-frost depth and its relation to climate change in Tokachi, Hokkaido, Japan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. **84**, 821-833. (2006)
- 4) Hirota, T., J.W. Pomeroy, R.J. Granger, and C.P. Maule. 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. (2002)
- 5) Nemoto, M., T. Hirota and Y. Iwata: Application of the extended force-restore model to estimate soil-frost depth in the Tokachi region of Hokkaido, Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* (2008) (accepted).
- 6) Iwata, Y., M. Hayashi, and T. Hirota: Comparison of snowmelt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover. *Vadose Zone Journal*. **7**, 79-86 (2008)
- 7) 北海道農業研究センター ; アルファルファを導入した畑地型酪農営農システムの確立. 北海道農研プロジェクト研究成果シリーズ **No.1** 159pp. (2004)
- 8) 白旗雅樹、十勝の農業に与える土壌凍結の影響、十勝の野良イモ発生の実態と除雪による野良

イモ処理、日本農業気象学会北海道支部大会 2007 年度大会要旨集、7-12.(2007)

- 9) 廣田知良 冬期に行う野良イモ処理, 社団法人 北海道農業改良普及協会 農家の友 12 月号 102-103(2006)
- 10) 廣田知良 農業共済新聞 (北海道版) 2007年11月14日 冬期に行う野良イモ処理)
- 11) 前塚研二、十勝の野良イモ発生の実態と除雪による野良イモ処理、日本農業気象学会北海道支部大会 2007 年度大会要旨集、13-18.(2007)
- 12) 廣田知良、岩田幸良、鈴木伸治：作物の生育方法について（雪の管理による土壌凍結深制御）、特開 2007-236290, 平成 18 年 3 月 9 日
- 13) 廣田知良、白木一英、前塚研二、根本学、岩田幸良、濱寄孝弘、鮫島良次：土壌凍結を活用した冬期の野良イモ対策 日本農業気象学会全国大会 2008 年度講演要旨,79,(2008)

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表(学術誌)

- ① 井上聡、川島茂人、横山宏太郎：雪氷, 68, 2, 115-122 (2006)
“メッシュ気候値 2000 による温暖化時の最大積雪深予測値の検証”
- ② Inoue, S, T. Hirota, Y.Iwata, K. Suzuki, M. Nemoto, *Journal of Agricultural Meteorology* (accepted),(2008)
“Comparison of solid precipitation data by using 4 method in Tokachi plain.”

(2) 口頭発表

- ① 井上聡, 廣田知良, 岩田幸良, 水文水資源学会2005年研究発表会(2005)
「十勝平野における12月積雪期間の推定。」
- ② 井上聡, 川島茂人, 横山宏太郎, 日本農業気象学会2006年春季大会(2006)
「メッシュ気候値2000による温暖化時の最大積雪深予測値の検証。」
- ③ 井上聡, 廣田知良, 岩田幸良, 農業環境工学関連学会2006年合同大会(2006)
「十勝地方での降雪量観測。」
- ④ 井上聡, 廣田知良, 岩田幸良, 2006年度日本雪氷学会全国大会(2006)
「3種類の降水量計による冬季比較観測。」
- ⑤ INOUE Satoshi: 75th Western Snow Conference (2007)
「Estimates of snowfall depth, maximum snow depth, and snow pack conditions in Japan by using five global warming predicted data」
- ⑥ 井上聡, 廣田知良, 岩田幸良, 鈴木和良, 農業環境工学関連学会2007年合同大会(2007)
「真の降水量の計測」
- ⑦ 井上聡, 廣田知良, 岩田幸良, 根本学, 林正貴, 長谷川周一, 日本農業気象学会 2008 年度全国大会研究発表(2008)「十勝平野における温暖化時の土壌凍結深予測」
- ⑧ Inoue, S, T. Hirota, Y.Iwata, K. Suzuki, M. Nemoto, 農業気象国際シンポジウム ISAM2008

(2008) 「COMPARISON OF SOLID PRECIPITATION DATA BY USING 4 METHODS IN TOKACHI PLAIN」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

横山宏太郎, 井上聡, 温暖化による降積雪変動, 月刊 海洋, 海洋出版, 46, 131-139 (2007).

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

ここで得られた研究成果は農家や農業関係機関（道立農試、農協、農業改良普及センター等）と密接な連携を取り、現地調査や十勝農協連主催の協議会、学会等を通して成果を迅速に伝える等、農業現場へ大きく貢献している。