

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

広田知良

農研機構北海道農業研究センター

Impact of climate change on agro-environment and an adaptation practice in a cold region

Tomoyoshi Hirota

NARO Hokkaido Agricultural Research Center (NARO/HARC), Japan

1. はじめに

2010年度の日本農業気象学会学術賞を頂き、大変光栄に存じます。私の研究に対して評価を頂いた先生方、会員の皆様、そして、これまで一緒に研究・仕事をして頂いた方々、支えて頂いた方々に心から感謝を申し上げます。1991年の秋に札幌市の羊ヶ丘にある北海道農業試験場(現農研機構北海道農業研究センター)で農業気象分野の研究を初めてからの私の研究を要約すると、寒地の農耕地の微気象、特に地温、土壌水分、土壌凍結の観測およびモデル開発により長期動態把握を実施、これらの基礎的成果を応用・発展させて、寒地での気候変動・温暖化が農業に及ぼす影響を明らかにして、具体的な適応対策例を示したことを考えています。特に、現在、北海道・十勝地方の冬に盛んに実施されるようになった野良イモ防除のための雪割りととの出会いが非常に大きな出来事となりました。初めて雪割りに出会ったときのこれまで経験したことのない大きな感動を今でも忘れることはできません。私のこれまでの基礎研究の成果と経験が、この雪割りにすべて活かされました。ここでは若手の基礎研究時代から現場への実用化・普及に至るまで、私の研究がどのように着想されて、どのような過程で展開したのか(図1)を述べていきます。

2. 気候変動・温暖化影響対策研究 に至るまでの基礎研究

2.1 空間微分から時間微分・時間積分への方程式の 導出

物理的根拠に基づき、かつ新たな着想・アイデア

<http://www.agrmet.jp/sk/2013/F-1.pdf>

2013年8月9日 掲載

Copyright 2013, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

を盛り込んだ数学的な誘導・論理展開によって、モデリングをする研究は私が好むスタイルで、若手の時代から現在まで取り組んでいるものです。このモデリング研究で簡易で実用的な地温・土壌凍結深推定モデルを開発しました。方程式の導出はオリジナルの Force-Restore (FRM) 法の特徴である地中熱流量の空間微分から時間微分化といった時空間視点の転換の発想をさらに掘り下げました。地球の自転と公転に伴う周期性に関わる日変化と年変化の類似性と相違性(日平均地温は深さ依存性があるのに対して年平均地温は深さにあまり依存しない)に着目し、この自然の性質を巧みに活かして式を展開しました。つまり、元々は地表面温度の簡易推定法であった FRM を地表面からある厚さをもった層の日平均地温の簡易推定法へ展開(広田ら, 1995)、さらには、地中温度の日平均値の季節変化を計算できる extended FRM (eFRM) と名付けた方程式へと拡張しました(Hirota *et al.* 2002)。この展開は、数学的に一貫した論理で導いて物理的かつ簡潔性もある、科学性と美しさを両方備えた式と自負しています。さらに、開発した eFRM 方程式を熱伝導方程式の下部境界条件に設定することによって、初期境界条件の設定を容易にする計算方法を考案しました(Hirota *et al.* 2002)。地中熱流量を測定する際に浅層の地温鉛直分布と熱流板の測定を組み合わせる観測手法がありますが(たとえば、広田ら, 1999)、考えてみますと、eFRM を熱伝導方程式の下部境界条件に用いるアイデアはこの地中熱流量の測定における熱流板の役割と類似しています。しかも、プログラムにすると簡単なコードとなり、より効率的な計算が可能となりました。また、方程式から計算される地温の値は時間積分の結果です。これは、入力データに誤差があってもランダム誤差であれば、出力値は日々の誤差をキャンセルして、正確な出力を可能にします。このモデルの長所の詳細な把握は、実用上のメリットの理解を深める

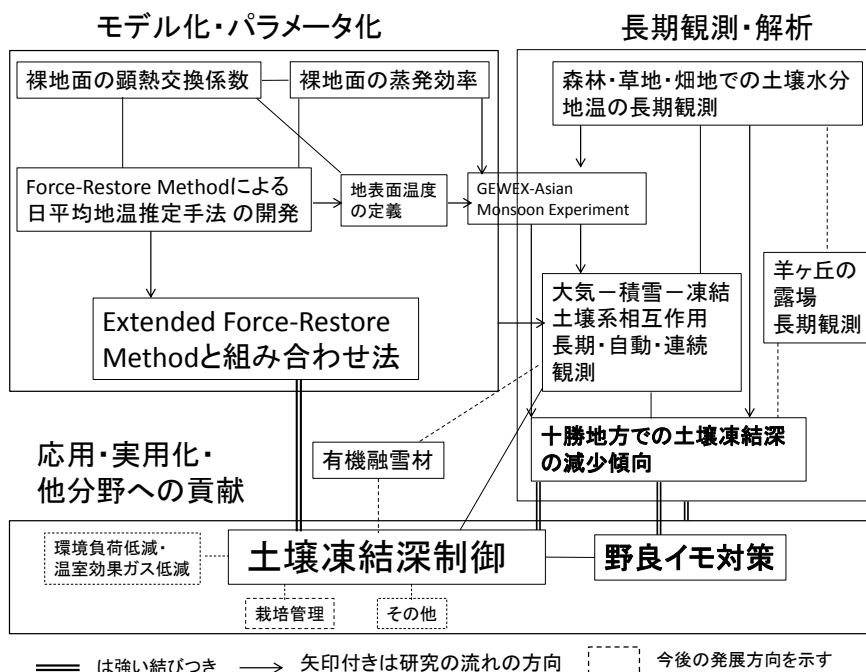


図1 受賞に至るまでの研究の流れ

ことにもつながり、研究の応用・実用化の展開への土台ともなりました。

この研究は、北海道とカナダのサスカチュワンで実施しましたが、研究のきっかけは、農業上の応用を意識した実用的な動機からではなく、ある専門書の説明に対する疑問点から着想したものです。つまり、主に自分の頭脳を使った理論的な研究です。この専門書は北海道に赴任する前の、つくばの農業環境技術研究所(農環研)における研修時代に実施した輪講ゼミを通して知りました。農環研は専門書や文献が自由に手に入り、専門的な勉強をするには恵まれた環境でした。基礎研究には、このようなアカデミックな雰囲気の下で専門家同士、切磋琢磨する雰囲気の重要性を感じた時代でした。

2.2 裸地面の地表面温度の定義, 地表面の熱収支, 熱・水交換過程のパラメータ化

2.2.1 地表面温度の定義

開発した方程式では地温計算の下部境界条件や初期条件の設定は上述のように容易になりました。一方で方程式の上部境界条件は地表面の熱・水蒸気の流れを示す熱収支式を組み込んでいたので、次はこれをいかに解くかが課題でした。この地表面の熱収支を組み合わせる際は顕熱輸送量と潜熱輸送量(蒸発量)については気象学ではバルク法を用いることが一

般的です。この顕熱・潜熱輸送量を求める、あるいは地面から大気への長波放射量を求める際に地表面温度が必要です。つまり、地表面の熱収支を求めることは地表面温度を求めること、とも言えます。しかし、この地表面温度を観測から正確に求めようとしても、日中時には、特に土壌が乾燥してきた場合には地表面付近は急激な温度勾配を生じ、また、同一の土壌でも物理性の違いによって面的にも値が大きくばらつくため、この正確な測定は簡単ではありません。後に私の研究の対象となった積雪表面でも同様です。ここで、“地表面とは何か”について、改めて自分なりに考えました。その結果、地表面温度の定義を Force-Restore 法(FRM)のパラメータから見いだしました。地表面付近の急激な温度勾配や空間的なばらつきが大きくなる場合のある地表面温度も日平均値では、温度勾配が緩やかになり、ばらつきも小さくなります。この地表面温度に対する地表面とみなせる表層の厚さや地表面温度の面的な代表性を表現する地表面温度の定義が開発したモデルの無次元パラメータ(広田・福本, 1996 ; Hirota *et al.* 2002)から説明できるのです。すなわち、地表面とみなせる表層の厚さや面的な代表性は土壌の熱的性質と変動周期の関数である制動深さに影響を受けると定義できます。つまり方程式を導く過程のパラメー

タから観測事実やデータの解釈を説明できる理論的な地表面温度の定義を見いだしました。元々、地表面温度を簡易推定するために開発された FRM の手法を地表面からある厚さをもった層の日平均地温の簡易推定法へ拡張したモデリングの研究から地表面の定義を考えることはある意味自然な流れでした。1 日内の時間単位の測定での、地表面温度の観測をガラス温度計や熱電対やサーミスタなどで土と接触して正しく測定したい場合、特に乾燥した地表面では、地表面付近の温度勾配が急激なため、mm 単位以下の地表面すれすれのところで測定することが必要ですが、日平均値の地表面温度を知りたい場合は、この地表面の厚さが約 19.1 倍となります。つまり、前者を 1 mm とすると後者の日平均値の場合は約 2 cm 程度となり、対象とする時間スケールによって地表からの厚さは異なることになります。ちなみに、地温の年平均値では、地表から深さ m の値まで深さに依存せずほぼ一定の値となりますので、年平均値に対する地表面温度を定義する地表の厚さは少なくとも数 m 程度オーダーあると考えることもできます。

2.2.2 裸地面の顕熱の交換係数のパラメータ化

地表面温度に対する地表面の厚さの定義と同時に、バルク法による裸地面の顕熱と潜熱輸送量のパラメータ化についても、独自の視点で研究に取り組みました。顕熱の交換係数あるいはバルク係数を観測からパラメータ化する際に、本来原則的には数十分程度の短時間のフラックス観測値や気象データ(気温、地表面温度、風速)に基づいて決定するべきですが、熱収支観測のデータを用いて日平均値の値に基づく場合、短時間平均値に基づく場合の両者を比較したところ、ほぼ同等のパラメータ化の結果が得られました(広田・福本, 1996)。この結果は、顕熱のパラメータ化の際に地表面温度について、観測が容易ではない地表面すれすれに設置する必要がなく比較的観測が容易になる深さ 1~2 cm 程度での地温の観測値から求めても良いことを意味します。さらに、日平均の値から求めても良いのであれば、地表面が十分に湿潤の条件の時は、熱収支式からフラックス観測値を用いなくても日平均値の気象データ(放射、風速、地温(深さ 1~2 cm 程度)、気温、湿度)の観測値から求めても良いことを示します。この結果と短時間のフラックス観測値から求めてパラメータ化した結果の両者を用いて日平均顕熱輸送量の推定結果を比べて検証したところ、推定精度もそれほど遜色はありませんでした(広田・福本, 1996)。最終的に顕熱の交換係数がフラックス観測値を用いなくても一般的な気象観測値から、しかも地表面温度も観測が比

較的容易な 1~2 cm 程度でもよく、実用的なメリットのある手法となりました。さらに、顕熱の交換係数は日々の風速を用いなくても、対象とする場所の平均的な値が求めることができれば、日平均地温や数十日程度の熱収支をある程度精度良く求めることができることも、理論的考察とデータ解析から示しました(Hirota *et al.* 2001)。これは、時間積分で求めているので、日々の誤差は多少あってもランダム誤差であれば期間の平均あるいは積算をすると日々の誤差をキャンセルすることを改めて確認した結果と言えます。比較のための既往の文献値を整理すると、農地のような土地利用条件では平均的な顕熱の交換係数は 0.01 前後の値が代表的でした(廣田, 1999)。風速分布やバルク係数を面的に正確に求めることは容易ではありませんが、農地の裸地面の日平均地温、積算蒸発量を求めるにあたっては、このような観点で入力データやパラメータの扱いを整理していきました。これらの研究成果は、後ほど展開する農地における実利用に踏み切る判断材料の一つとなりました。

2.2.3 裸地面の蒸発効率のパラメータ化

バルク法により裸地面からの蒸発量を推定する場合、表層の土壤水分量と密接に関係する蒸発効率は最も重要なパラメータです(福本・広田, 1994)。土壤水分量は一般に測定されていませんし、表層の土壤水分量となると測定はさらに容易ではありません。また、測定されていない土壤水分量を他の気象データから推定しようとするとも土壤毎に各種土壤物理パラメータの値の整備が必要となり、任意の地点での農地での精度の良い推定は容易ではなくなります。しかし、日平均地温を 1°C 以内の精度で推定したい場合は、日々の土壤水分量から蒸発効率を求め、熱収支を解いてから地温を求める必要がなく数日から数十日以上の上の平均的な土壤の乾湿状態あるいは降水量の条件を反映した蒸発効率の期間平均値を与えることで十分でした(広田ら, 1995)。また、この期間の地温が精度良く推定できているならば、熱収支、あるいはこの期間の積算蒸発量も精度良く推定できています。そこで、日平均地温、数日以上の上の積算蒸発量を精度良く求めるための蒸発効率のパラメータ化の手法を考えました(Hirota and Fukumoto, 2009)。その際、降水量と可能蒸発量から計算できる先行降雨指数が土壤水分変動と類似の変動パターンを再現することがわかりました。したがって、土壤水分データを用いることができなくても、先行降雨指数が土壤の湿潤状態を判定できる効果的な指標となります。この先行降雨指数により蒸発効率を土壤の湿潤状態に応じた適切な推定期間に分類することで、蒸発効

率は先行降雨指数によって分類された期間の下での日平均地温の推定値と観測値の差の二乗値の合計値が最小になるように推定して求める方法を考えました。また、10日から数ヶ月平均の蒸発効率については、土壌水分量の代わりに降水量と可能蒸発量の比からパラメータ化できることも示しました。

以上のこれらの裸地面の地温推定、熱収支パラメータ化研究の過程では、観測とは何か、モデル開発とは何か？そして、観測とモデル・理論の両面を進めるための陸面-大気相互作用の体系的理解のための観測とはどのようにすべきかの研究手法論についても徹底的に考える機会となりました(たとえば、広田, 1999a)。また、基礎的なパラメータ化の研究は、当時、農業上への応用に直ちに結びつける意識はあまり強くありませんでしたが、これらの研究は土壌凍結深制御の開発へ向けて後にすべて活かされることになりました。

2.2.4 土壌水分・地温の長期観測、基礎研究時代に培われた視点

1) 札幌市羊ヶ丘における森林、草地、畑地(麦畑)と様々な植生条件における冬季の積雪環境下も含めてのヒートプローブ法による土壌水分、地温の数年以上の長期に渡る連続観測を実施しました(Hirota and Kasubuchi, 1996)。この観測・解析から、季節変化から年々変動のような長期変動および一見作物の生育とは無関係にみえる冬の農閑期も含めた視点で捉える見方とそのための観測方法論の問題意識が形成されました(広田, 1998, 1999a)。

2) 気象学・水文学の分野でアジアモンスーン地域の熱と水の循環を明らかにするために計画・実施された GAME (GEWEX-Asian Monsoon Experiment) プロジェクトは、私が展開していた長期動態把握とモデル開発の方向とも一致するところがあり、参画の機会を与えて頂きました。寒地の北海道とは異なる気候帯の熱帯タイでの研究を実施(Hirota, 2001)、農学とは異なる分野の理学・工学分野との交流、東アジアモンスーンの切り口を通して、現象をローカルばかりでなく大陸スケールやグローバルとの関連で現象を捉え関連づける事などの視点と視野の広がりを学びました(広田, 1995, 1999b)。

3) 羊ヶ丘で土壌水分の観測をしていた時期から GAME が立ち上がった時期の 1990 年代を振り返ると、土壌水分測定が進展が果たした役割に気づかれます。土壌水分の測定はこの頃から、ようやく気温や放射等の他の観測項目と同様に非破壊、時間単位でかつ長期間の観測が可能になりました。これは、この後の研究手法や研究展開にも大きく影響を与えました。前述の熱伝導率と土壌水分相関関係を利用

したヒートプローブ法が非破壊連続自動観測を可能にしましたが、さらに TDR (Time Domain Reflectometry) 法の普及はこの意味では決定的でした(たとえば、広田, 2000)。この観測の自動連続化と長期化での可能性の拡大の意義をその後の研究で意識することになりました。

2.2 の研究は、2.1 の主に自分独力の頭脳による理論的な研究とは異なり、共同研究者や異分野研究者との交流、さらには羊ヶ丘における様々な地表面状態における野外観測を四季や年々を通して、後の気候変動・温暖化影響・対策技術開発研究を実施する基礎的な力が養われたと考えています。また、振り返ると研究予算が不足していたのが逆に幸いして、創意工夫の余地が大きく与えられ、かつ北農研の他の研究室、森林総研北海道支所や北大農業物理、北大低温研、東北大、農環研の観測地等を訪問し、観測機材を借りるばかりでなく観測ノウハウもご教授頂く貴重な機会を得ることができました。GAME を通しても乱流観測や地表面の熱収支の様々な観測手法の長短所を比較検討して勉強できました。これらの経験を通して観測には大学や研究室による様々な流儀があることを知りました。これは、もし当時予算が潤沢な確立した研究室で過ごしていたら得にくかった経験かもしれません。観測ばかりでなく、学会では多くの先生、先輩方から多くの研究上のアドバイスを、ご指導を頂いた時期でもあります。私の博士論文はこれらの研究が骨格となりました(広田, 1999)。

2.3 大気-積雪-凍結土壌系の相互作用の研究への展開

21 世紀に入ってから、これらの成果、経験と、さらにカナダでの在外研究の経験を加え(広田, 2001)、土壌凍結地帯である北海道・十勝地方を研究対象として芽室研究拠点で大気-積雪-凍結土壌系の相互作用を総合的に高時間分解能でかつ長期的にも容易に測定できる自動観測システムを構築しました(Hirota *et al.* 2005)。この目的は「積雪・土壌凍結地帯の農地における気象・水文・土壌凍結過程の動態」を詳細・総合的に解明することです。観測のコンセプトとしては、気象・水文・土壌の観測を体系的に実施、特に積雪水文・土壌凍結要素の観測は主に手動のため、データ取得が一般に数日間隔以上と時間分解能が粗く断片的であったので、これを自動でかつ時間単位の高時間分解能で連続観測が可能システムの構築に特に力を入れました。これは前述の TDR 法による土壌水分観測の進展を念頭において、さらに土壌凍結状態の把握にも用いて、大気-積雪-凍結土壌の相互作用の観測体系を作り上げる私人

りの試みでした。かつ GAME プロジェクトから学んだ当時の熱・水収支の観測体系のコンセプトから学んだものを自分なりに発展させたものでもありました。

この観測システムに共同研究者による、凍らないテンシオメータと呼ばれる凍土層下層の水ポテンシャルを長期に測定できる手法の開発 (Iwata and Hirota, 2005a,b) が加わり、構築した観測システムは非常に特徴のあるシステムになりました。この観測システムから凍結土壌の下層の土壌水分の動態が土壌凍結深の変化ひいては積雪深の変化と密接に関連すること、融雪期には土壌凍結層が存在しても融雪水は土壌へ速やかに浸透して、凍結土壌が融解する過程で融雪水は土壌中へ重力水で流れることが明らかになりました (Iwata and Hirota, 2005a; Iwata *et al.* 2008; Iwata *et al.* 2010a)。このように、積雪・土壌凍結条件での水・熱動態について独自のデータをしかも長期に得られ、新たな知見を多く蓄積できました。そして成果の中で Iwata *et al.* (2008) は米国の掲載学術誌の excellent example に選出され、米国でプレスリリースされました。札幌市羊ヶ丘での積雪下の非凍結条件での長期観測 (Hirota and Kasubuchi, 1996) と比べて、凍結している条件での両者の動態の大きな差には驚きました。土壌凍結条件下での水移動は積雪の有無による凍土発達消長に大きく連動し、あたかも土壌凍結深の変動に制御されている水分動態だったのです。この独自の観測データの蓄積は、後に展開する土壌凍結深制御の着想の下地を作っていたことにもなりました。

同時にこの頃、大気-雪面の相互作用についても研究を実施、雪面の熱収支-乱流の集中観測を実施しました (Hayashi *et al.* 2005)。雪面の顕熱と潜熱のバルク係数を同定するなど、雪面の熱収支パラメータの整備が進みました。また、十勝地方での融雪期の雪面の熱収支は、雪面へのエネルギーの入力は正味放射が主で、雪面への顕熱輸送量の大部分が雪面の潜熱損失(蒸発量)に費やされており、結局、融雪は正味放射に強く支配されていました。このことから、北海道のような寒地での融雪促進は太陽光をより吸収できる融雪材散布の有効性を再確認しました。また、農地の雪面からの蒸発は一般にかなり小さいのですが、北日本の平地部の雪面ではこれまで報告例のなかった、 2.2 mm d^{-1} とかなり高い蒸発量が条件によっては生じることを観測しました。高い蒸発量は、山脈の斜面を吹き下ろす、暖かく乾燥した北西風であるフェーンが昼夜 1 日中続くことによって生じており、このフェーン現象は北海道の東あるいは北東の海洋上で非常に発達した爆弾低気圧による

ことを明らかにしました (Hayashi *et al.* 2005)。近年、爆弾低気圧の発達による暴風雪が生じる頻度が増えているように感じています。これも気候変動の影響により頻度が増す可能性のある現象を先駆けて観測した例なのかもしれません。さらに、雪面の熱収支とパラメータ化、およびこれまでの裸地面での研究蓄積を活かして、観測データに基づいて一年を通しての熱・水収支の季節変化を明らかにしました (Hirota *et al.* 2009)。

21 世紀を迎えてから、この時期の研究環境は大きく変化する時代でもありました。若手研究者は大学院卒の増加によるオーバードクターの増加に伴い就職が困難になる問題が徐々に深刻化しつつありました。国立の研究機関は独立行政法人化して、成果がより問われることになり、他方で、これまで国研の研究者では、制約のあった競争的資金に自由に応募が可能にもなりました。21 世紀をはさんで私はカナダでの長期在外研究を経験しましたが (広田, 2001)、すでにカナダで起きていた研究世界の状況は、日本の研究環境の変化を予感させるものでした。このような研究環境をめぐる状況の変化で私が当時、心がけた事は自分がやりたいことは自ら手を挙げて意志を示し、さらに競争的資金の獲得に努力し、多少なりとも若手に研究ができる機会を提供することではないかと考えたことです。そのため、大気-積雪-凍結土壌の相互作用の観測は、共同研究の場の提供も意識を強く向けました。場を提供し、共同研究者の得意とする手法を組み合わせ、研究展開の拡張をさらに図ることができます。また、ポスドク研究者が自主的に研究を実施できる環境を整えられます。

しかし、事はそう簡単にはうまくいかず、しばらくの間、競争的資金の獲得は困難で、連戦連敗が続きました。この大気-積雪-凍結土壌の相互作用の観測は、まずは上記の北農研の共同研究者による凍らないテンシオメータの開発から始め、JSPS の外国人長期招へい研究プログラムで得た機会を活かした乱流観測の研究へと進みました。やがて、この研究開始の数年後に環境省地球環境保全試験費や環境省環境研究総合推進費等のプロジェクト研究費を獲得することができ、若手ポスドク研究者とも共同研究が可能になりました。競争的資金獲得後は 1) 除雪により土壌凍結深を発達させた区と自然積雪状態の対照区から異なる土壌凍結深で諸現象を比較できる試験区を設置、2) 温室効果ガスのモニタリングも加え、3) さらに観測地点も十勝ばかりでなく気候帯の札幌と異なる場所も設置等研究展開を拡張し、その結果、水移動や熱収支ばかりでなくポスドクを中心とした共同研究者により N_2O や CO_2 の温室効果ガスの研究

にも成果が出ました(たとえば, Iwata *et al.* 2010b; Iwata *et al.* 2011; Yanai *et al.* 2011; Ohkubo *et al.* 2011; Ohkubo *et al.* 2012; Yazaki *et al.* 2013; 岩田ら, 2013)。現在, 芽室研究拠点は気象庁気象研究所や JAMSTEC, 各大学との共同研究の場にもなっています。これまでは観測研究が主でしたが, 今後は, 詳細・総合的なデータセットからモデル研究にも発展できると考えています。

連戦連敗であった競争的資金獲得の要因について 3.1 でもう少し考察します。また, この頃は当時の時代の流れの中で自分なりに中堅研究者はどのようにあるべきか考えていた時期でもありました(広田, 2003a)。当時, 考えたことは 10 年経過した今でも基本的には変わっていません。

2.4 気象観測露場

私の勤務する札幌市羊ヶ丘の北海道農業研究センターでは気象観測業務を行っています。この気象観測は農業気象分野における基本業務です。この羊ヶ丘の観測期間は諸先輩から引き継ぎ, 2015 年には観測 50 年を迎えます。私は最も長い 20 年以上関わっています。この気象観測露場の気温解析で, 800 ha 以上の広大な農地がある羊ヶ丘のような都市化影響の僅少な地点では, 気温の長期上昇程度が気象庁の観測している温暖化の影響を受けにくいとされている観測地点より低いことを明らかにし, 農地における長期気象観測の重要性を示しました(Sameshima *et al.* 2007)。また, この露場の気象観測データを蓄積は北農研内の多くの他分野の研究の基礎データとして提供しているばかりでなく, 世界の積雪の堆積消長を予測する積雪モデルの比較研究である Snow Models Intercomparison Project 研究にも, 森林総合研究所北海道支所の森林での観測データとの比較を実施することで, 国際的な研究貢献もできました(Rutter *et al.* 2009)。このプロジェクト参加の経緯も, 気象観測露場での基礎データの蓄積は無論ですが, 土壌水分, 地温に加えて積雪深も長期に羊ヶ丘の森林・草地・畑地の経験があったこと(Hirota and Kasubuchi, 1996), これを踏まえて 2003 年に札幌で開催された国際地球物理学連合 IUGG で大気大循環モデルでの陸面植生モデルの一つである SSiB (Simplified Simple Biosphere) モデルの開発者と森林と開けた草地や農地で融雪速度の違いについての議論(広田, 2003b), 同じく IUGG に参加していたカナダの長期在外研究時代に知り合った研究者を通して, 共同研究・論文化のお誘いを受けたことが経緯です。また, 森林総研北海道支所とのつながりや大気-積雪-凍結土壌での JAMSTEC の共同研究者が窓口となる等, いろいろな縁が重なってできたも

のです。

私はこれまで, 北海道において羊ヶ丘で 2 回, 十勝の芽室とオホーツクの紋別の気象観測露場の設置に関わりました。当たり前のように利用者に提供されている露場の気象観測データですが, 基本的な気象要素の観測でもデータの精度を長期に渡って安定的な継続は決して簡単ではありません。農業研究機関における気象観測露場とはどのようにあるべきか, 長期にデータの品質を保ち, 欠測なく安定的にデータを取得し続けるシステムと仕組み作りは今でも常に私の問題意識にある課題です。

2.5 有機融雪材

白い雪に黒い粉粒をまいて雪を黒くして太陽光の吸収を高めて農地の雪を早く融かすことができる融雪材散布は農業気象分野が現場に貢献し, 普及した誇るべき農業技術の一つです。十勝で土壌凍結の観測に取りかかった頃, この融雪材について, 多雪地帯の札幌での試験を持ちかけられました。当初は, すでに古くから確立した技術に今更, 新しい研究課題を設定できるかと, かなり消極的な考えもありました。しかし, きちんと話を伺ってみると, 工業廃材利用が主であった融雪材の材料を, 農林水産系廃棄物を利活用して有機農業でも使える融雪材の開発を目的に環境負荷低減を意識した新しい視点がありました(広田ら, 2008)。問題意識を改めて, 試験を実施して論文執筆に取りかかった時, さらに思わぬことに気がつきました。農地に散布する融雪材という英語が見当たらなかったのです。正確に言うと, 農業気象用語辞典などでは日本人が英訳したであろう語はあるのですが, 一方で, 英語を母語とする native は用いていないようで, インターネットで検索をかけても英語圏のサイトで農業用の融雪材の語は見つからず, 北米の知人を通して調べても見つけることができませんでした。つまり, このことが意味することは, 融雪材散布は今でも日本独自の農業技術であろうということです。冬の雪に覆われている時から農地管理を実施する技術は国際的観点からも独自性があることに気づかされました。そこで英文の要約を記載するときに改めて融雪材の英訳も試み, 英語が堪能で日本の農業にも通じている北米で活躍している日本人研究者と相談して, 融雪材を agricultural snow melting agent と英訳しました。頭に agricultural をつけることで, 道路に散布する融雪剤(この場合は材ではなく剤であることに注意)と明確に区別して農地に散布しても安全な意図を持たせました(広田ら, 2008)。

融雪材を工業廃材等の代わりに農林水産廃棄物を用いることで有機農業への利活用ばかりでなく, こ

の研究は土壌炭素蓄積の効果が高い資材であるバイオ炭の農地への有効利用、ひいては農地の炭素固定、温室効果ガス緩和策にも寄与の可能性を共同研究者の研究を通して、しばらくしてから気づきました。共同研究者の試算では、有機融雪材で散布する量は炭素換算にすると意外と大きな値になります。有機融雪材の利用が広まれば、融雪促進による生産性の向上と温室効果ガス緩和につながる環境負荷低減を両立できる有効な手法となりうるのではと考えています。

また、融雪材関係の文献をレビューしているときに、雪氷学分野で著名な“雪は天からの贈り物”の名言でも知られている中谷宇吉郎が融雪材について自身の設立した農業物理研究所での研究を通して深く関与していたこと、そればかりでなく物理学の農業への導入という重要なコンセプトを融雪材の例を通して説明していることを知りました(広田・岩田, 2012)。このレビューを通して、さらには中谷の考え方を通して農業気象学とは何かを深く考える機会になりました。

当初は古いと考えた研究テーマでもやってみれば、いろいろな勉強や発見の機会を得られることを強く感じた次第です。

3. 土壌凍結深制御—気候変動適応策の開発—

3.1 十勝地方における土壌凍結深の減少

十勝で2001年から自らのコンセプトを実現した観測を始め、長期に自動にデータ取得する観測システムも順調に蓄積されてきた頃の事です。私の研究目的の一つは、自ら開発したモデルの土壌凍結地帯での検証でした(Nemoto *et al.* 2008)。ところが当地は断熱作用のある雪が早く積もるようになり、土壌凍結が発達してもせいぜい20 cm程度ということが続き、当初の想定と異なる観測結果が続きました。さらに、2003-04年と2004-05年の冬は土が全く凍らず、土壌の状態はいわゆる多雪地帯と同じようになりました。土壌凍結の研究のために十勝で観測を実施しているのに、土があまり凍らない条件で観測を続けていたのです。私が聞いていた土壌凍結地帯の十勝のイメージとは異なる印象を感じるほどでした。一方で、共同研究者からその頃、1986年から北海道農業センターの芽室拠点で業務科が継続していたメチレンブルー凍結深計による土壌凍結深の観測データを送ってもらい、近年、土壌凍結深が減少している傾向があることに共同研究者と共に気がつきました。この現象が果たして局所的な現象であるか否か、なんか方法でわからないかと探っていたところ、北農研だけでなく、近くの農協でも土壌凍結深を長期

に観測をしていることを知り、データも入手できて調べたところ、やはり同様に減少傾向でした。ここで、発想を変え、土壌凍結そのものの研究ではなく土壌凍結深の変動(減少)に焦点を向けた新たな研究方針を着想しました。さらに、土壌凍結深の観測開始以前も含めて長期変動傾向を調べるため、気象データからより長期に土壌凍結指数を計算したところ、近年の土壌凍結深の減少傾向は、十勝地方の平野部全体で広く生じている現象であり、かつ1980年代後半以降の近年の20年で、はじめて生じている傾向であることを突き止めました。そして土壌凍結深の長期変動傾向がデータ解析によって明確に認識した頃、流水の接岸でも有名な紋別で当時の北農研の紋別試験地での気象観測露場の設置に関わり、出張していたときの事です。流水の接岸の長期データがホテルの大浴場に展示してあり、このデータを風呂上がりにリラックスした気分で眺めていると、十勝地方の土壌凍結深の長期変動傾向と似ていると気づきました。つまり流水のデータも1980年代後半から顕著な減少傾向を示していたのです。このとき、さらに北陸地方の雪(特に沿岸平野部)も近年減少していることを思い出し、出張先のホテルからインターネットで気象データにアクセスして調べ、また、紋別試験地でも同僚とも確認したところ、やはり1980年代の後半からでした。つまり、十勝地方の土壌凍結深の近年の減少は、ローカルな現象ではなく、北陸の降雪やオホーツクの流水の減少と同様に、1980年代後半以降の冬型の勢力が弱まる時期と一致すること等の気候学的要因を解明することで、気候変動の問題と認識しました。このような我が国の典型的な冬の雪氷現象の顕著な変化は日本の冬の気候が1980年代後半以降大きく変わっていることを示すものです(Hirota *et al.* 2006)。ここで扱っている土壌凍結、オホーツクの沿岸部の流水、北陸の雪の減少傾向のデータは現実の観測事実です。すなわち、現実の気候変動を具体的に示しています。扱っている空間スケールも試験場内試験データから研究機関で測定されていた長期データ、そして地域の農協のデータ、さらには国内の他の地域の異なる雪氷データから東アジアモンスーンスケールの現象と位置づけて、point data → local scale → synoptic scale → continental scale と様々な空間スケールで関連づけているのも特徴です。元々のモデル的思考法に羊ヶ丘で問題意識を高めた長期動態把握とGEWEX/GAMEで得た様々な時空間スケールで捉える視点が重なる中で展開された研究でもあります。また、土壌凍結そのものの研究ではなく土壌凍結深の変動(減少)への視点の転換により、これまで連戦連敗だったプロジェ

クト応募について、環境省の地球環境保全研究試験費や環境研究総合推進費等の競争的資金の獲得につながったのかもしれませんが。

3.2 野良イモ

そのころ、十勝地方では土壌凍結深の減少に伴い、農業では深刻な問題を生じていました。土壌凍結深の減少に伴い、従来は見られなかった野良イモの問題が顕在化したことです。十勝地方は全国最大のばれいしょの生産地帯で、生産量は我が国の3割を占めます。十勝のばれいしょ畑では機械収穫できなかった小イモが畑地に残りますが、従来は土壌凍結によって凍死していた小イモが、土壌凍結深の減少に伴い、越冬可能となり雑草化する野良イモの多発が深刻化してきたのです(たとえば、広田, 2008; 広田, 2009; 広田, 2013)。収穫後に畑に小イモは1ヘクタール当たり数万から数十万個残り、越冬後、多いところで野良イモとして2万株以上発生します。雑草化した野良イモは、畑地の肥料分を収奪し、輪作地帯である当地の後作物の生育を阻害するだけでなく、病害虫の温床、異品種イモの混入要因にもなります。つまり、気候変動が我が国を代表する大規模畑作地帯である十勝農業に大きな負のダメージを与えていたのです。このような野良イモの除草を多くの農家は人力で対応せざるを得ませんでした。十勝は1戸当たりの畑面積が数十ヘクタール以上にも及ぶ大規模畑作地帯であり、イモ畑でも数ヘクタール規模あります。広い畑での野良イモの防除は重労働で、農繁期に多大な時間を要します。野良イモの防除作業は1ヘクタール当たり、30-70時間も要します。また、除草剤による防除もなされていますが、必ずしも十分な防除効果を挙げていません。

現在、私はこれらの経過を次のように整理しています。十勝は広い畑で作物をたくさんとり効率良く、作業を進めるために大規模な機械化を進めています。また、畑の水はけを良くする土地改良を進めています。排水性の改良で、作物の生育環境も改善しますし、また、作業機械も大雨の後でも比較的すぐに作業に入りやすくなり作物の生産性向上に寄与します。すなわち、機械化と排水性改良は近代農業の生産向上に大きく貢献しました。しかし、これは野良イモの発生の観点から考えても、畑に多くのイモを残し、しかも好都合な生育環境につながります。それでも、土壌凍結が深ければ野良イモは生じないのですが、土壌凍結深の減少という気候変動が決定的な要因となって、畑に残ったイモの越冬が容易となり、野良イモの大発生となりました。

また、これまで、寒地における冬の厳しい寒さの気象条件は夏の作物の生育の場とは無関係と考えら

れ、厳しい寒さの意義や効果は注目されていませんでした。しかし、十勝地方で土壌凍結深減少に伴って生じた野良イモの問題は、厳しい寒さが夏の作物の生育の場に大きな影響を及ぼすことを示しています。このような見方ができるようになったのは、若手時代での羊ヶ丘での土壌水分・地温観測を通して冬の農閑期も含めて捉える視点が形成されていたことも要因かと考えています。

3.3 雪割り

一方で、野良イモの問題に対して一部の農家は自ら創意工夫をはじめました。断熱作用のある雪を地表から除去するトラクター等の作業機械を用いた除雪等による土壌凍結を促進させての野良イモの凍死処理、すなわち雪割りです。私がはじめて、雪割りの現場を見たときの衝撃、感動、そして様々な着想の一瞬での様々なひらめきの連続は今でも私の頭の中で鮮明に焼き付いています。まず、感動したのは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(たとえば、イモの野良生え防除効果)に気づき、さらに実際に現場で試みていたことです。しかも、雪と氷で閉ざされた農閑期の冬に自然の寒冷資源を上手に利用した農地管理をすることで無農薬による除草の実現につながっていました。さらに注目すべきは雪割り作業の合理性です。雪割りとは積雪がある畑においてトラクターやブルドーザ等により雪をかきわけて土壌を露出させる作業のことをいいます。つまり、畑を全面除雪するのはなく、単に雪をかき分けるだけなので、この作業から畑には列上に土が露出する部分と雪山の箇所ができることとなります。土が露出している箇所は、断熱作用のある雪が除去されるため、冬の寒い期間に土壌凍結が進みます(たとえば、Hirota *et al.* 2011: 矢崎ら, 2012)。畑の雪を全面的に除去するのではないので、除雪した雪の置き場の確保の必要はなく、畑に残る雪の総量は変わりません。作業時間を測定すると1ヘクタールでわずか30分以内でした。土壌を全面に凍らせるには、少なくとも2度の作業が要りますので、計約1時間となります。夏場の人手によるつらく長い農作業が冬の農閑期のわずかな時間の機械作業により画期的な大幅な作業の省力化となるのです(たとえば、広田, 2008; 広田, 2009)。

3.4 土壌凍結深制御

同時に雪割りの現状の問題点も瞬時に把握すると共に、これを解決するため、あるいは研究を深化させて、技術を広げるための新たな着想も次々と湧いてきました。十勝地方は、かつては土壌凍結が深くなると融凍の遅れが圃場排水に影響を及ぼし、春作業に支障を来す問題があります。野良イモ防除はこ

のまま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、逆に雪割りを実施したにもかかわらず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事例もでていました。つまり科学的要因説明が不十分のため、技術の適用性が不安定になり、このことは、普及センター、農協等の雪割りの指導が及び腰にならざるを得ず、結局、経験のない農家取り組みへの障害ともなり、技術の普及に支障を来していました。そこで、この問題の解決のために、最適な土壤凍結深を設定して、これを制御する着想に至り、以下の研究と行動を実施しました。

3.4.1 目標凍結深さ critical depth の設定

土壤凍結深制御に際しては、予め制御の目標となる凍結深を設定することが重要です。これを求める方法として、まず、考えられるのは異なる土壤凍結深の深さを設定した試験区を設けて実験的に求める方法です。例えば、私たちの研究グループは前述の大気-積雪-凍結土壌の相互作用の複数年に渡る観測結果と、異なる土壤凍結深条件における融雪水の土壤浸透量を試験観測から、土壤凍結深が 20 cm 以下に浅くなると、融雪水は土壤深部に速やかに浸透すること、土壤凍結深が 20 cm を超えると融雪水の土壤浸透は抑制されることを明らかにしました (Iwata *et al.* 2008, 2010a, b, 岩田ら, 2011)。この場合、融雪水の土壤浸透の観点では土壤凍結深の critical depth (閾値深さ) は 20 cm 前後となります。この critical depth (閾値深さ) は野良イモ防除でも重要です。すなわち、土壤凍結深が何 cm 以上になると野良イモは凍死するかを明らかにすることです。これを求める方法としては、先ほど同様に異なる土壤条件下における試験や畑での観測から野良イモ凍死条件を求めることはできます。別の手法としては、制御の目標となる閾値温度 (critical temperature) を設定してから目標とする最適な土壤凍結深を設定する方法も着想しました。つまり、科学的に求められた閾値温度と圃場での地温分布と組み合わせることで、圃場での閾値深さの情報に変換して示すことです。野良イモ凍死については、凍死温度と地温の深さ別分布が与えられることで、地中のどの深さまで野良イモが凍死しているかの情報が得られます。あるいは、閾値深さと土壤凍結深も密接な関係があるので、野良イモ凍死温度から閾値深さ (野良イモ凍死深さ)、そして土壤凍結深との関係を求める方法もあります。閾値温度が決まれば、与えられた気象と土壤条件下において、地温・土壤凍結深推定モデルの数値計算 (たとえば, Hirota *et al.* 2002) から閾値深さや閾値深

さと土壤凍結深の関係を演繹的に導けます (Hirota *et al.* 2011)。このように閾値深さを閾値温度から決めることができるのなら、必ずしも異なる凍結深の試験区を設定して圃場で実験的に求める必要はなくなり、温度条件から論理的にパラメータを決めることができます。このような考え方で、野良イモ防除の場合は、閾値温度、すなわち野良イモ凍死温度は -3°C 以下であること、畑での調査から残ったイモの多くが秋に畑を耕起しなければ 15 cm 以内であったので (たとえば, 矢崎ら, 2012; Yazaki *et al.* 2013)、深さ 15 cm を -3°C 以下にするには、土壤凍結深を目安とすると除雪条件下では 30 cm 以上が必要なことを明らかにできました。

野良イモ凍死条件以外でも、このような手法によって土壤凍結とある要素の関係について温度から実験的に求めることができれば、この種の閾値深さの同定作業はより容易になるのではと考えています。地温・土壤凍結深モデルの導出では地中熱流量の式を空間微分から時間微分化に変換することがモデリングの鍵となりましたが、ここでは、critical temperature (閾値温度) から critical depth (閾値深さ) と新たな物理パラメータの変換導出の創造が肝となります。

3.4.2 断熱作用のある積雪を活用した大規模農地でも適用できる土壤凍結深制御

さらに、これまでのモデルとパラメータ化の研究蓄積を注ぎ込み、土壤凍結深をモデルで気温と積雪深データから推定・予測しながら凍結深を最適な深さに制御することにより、科学的に野良イモ防除に有効でかつ、土壤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最適な土壤凍結深にコントロールできる土壤凍結深制御手法を着想しました。雪は小さな氷の粒と空気で構成されていて優れた断熱作用を有する素材でもあります。氷点下条件では雪に覆われた土壤は雪の除去 (除雪) により土壤凍結は発達し、逆に深さ 20 cm 以上の積雪により土壤凍結の発達が抑制されます。したがって、氷点下条件下では積雪深を操作することで土壤凍結深を変化させることができます。さらに、気温と積雪深を入力値とする地温・土壤凍結深を推定する数値モデル (たとえば, Hirota *et al.* 2002) を用いることで除雪と堆積の時期と期間の調節で、最大凍結深を数 cm 以内の誤差で制御可能なことも示しました (Hirota *et al.* 2011)。除雪による土壤露出期間の気温は、日々の観測値ではなく期間の平滑化値あるいはこの値に $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲の値を与えてもモデルは最大凍結深を数 cm 以内の誤差で推定できます。これは先にも述べた地温や土壤凍結深の推定が時間積分を計算しており、

日々の変動がある程度平滑化した形で計算しても結果的に出力値に大きな違いを生じない性質があることにもよります。このことは、入力値として、観測値のみならず気象庁の数値予報モデルでの予測データ(1週間先までの気温や降水などの予測値や2週間先までの平均気温確率予報値)を用いて、数日から十数日先の凍結深を予測しながら制御できる可能性があることも示します。しかも日々の予測値はあまり正確でなくても、数日間程度の平均値での予測値の精度があれば十分です。対象とする凍結深、温度、深さの閾値の情報と地温推定モデルを用いた積雪深の操作を組み合わせることで最適な土壤凍結を数値計算で計算しながら最適な状態に制御できることになるので、これを土壤凍結深制御と呼ぶことにしました。例えば、閾値深さの土壤凍結深が30 cmであれば、この30 cmを実現するために、与えられた気象条件と積雪深の操作によって数値モデルで予測しながら制御することです。野良イモ防除の場合、土壤凍結を深くすると、野良イモ防除には好都合ですが、一方で凍結を深くさせすぎると、融凍が遅れることで春先の農作業に支障を来すことがあります。このような場合では最適な土壤凍結深を30 cm~40 cmの範囲内に設定し、凍結深制御によってこれを実現します(Hirota *et al.* 2011; Yazaki *et al.* 2013)。

土壤凍結深制御により、農家の勘と経験に頼った技術が、科学的な方法に基づく野良イモの対策技術となります。土壤凍結深制御の適用の際に再び雪割りの長所を活かしました。雪割りを改めて簡単に述べると圃場内で雪を列条に作業機械でかき分けて、土を露出して凍結を促進させる方法です。圃場を除雪幅単位でストライプ状に分割して、交互にタイミングをずらした前・後期の除雪を実施します。このトラクター等の作業機械で除雪することによって土壤露出部と断熱作用のある雪山部を交互に列条にする作業は、結果的に凍結促進と抑制を同時に実施していることとなります。すなわち、雪割りは土壤凍結深制御に適した合理的作業体系なのです。特に、後期の雪割り作業開始は後半の土壤凍結促進開始ばかりでなく前期雪割り土壤凍結促進の終了でもあり、これを意識的に作業実施することは凍結深を制御していることとなります。すなわち、見かけ上は、農家の雪割り作業はそのまま、雪割りのタイミングに入ると除雪を実施している期間(土壤の露出期間)をモデル計算により意志決定に科学の成果を込めて実施するのが土壤凍結深制御なのです。また、雪割りを土壤凍結深制御という考え方で捉えることで、後期の雪割りの後で、再降雪がなく、土壤露出期間が長くなりすぎる時は、雪山を崩し土壤露出部分を

雪で再び覆う、「割戻し」によって、過剰な凍結促進を抑制できる制御手段も創案できました

土壤凍結深制御の適用条件は、与えられた気象条件、閾値温度あるいは閾値深さ(目標土壤凍結深)で決まります。野良イモ防除の例では、凍死温度が -3°C とすると、深さ10 cmの野良イモの凍死には、十勝地方芽室の平年の気象条件では最寒期(1月中下旬)で、土壤凍結深制御のための除雪による土壤露出期間は10日を要すると推定できます。温暖化シナリオ条件において21世紀末想定(2050年)の気温が現在より $+3^{\circ}\text{C}$ 上昇したと仮定した場合は、土壤の露出期間も3日増えて、13日間が必要となると推定できます。また、冬期間、雪割りによって土壤凍結深30 cmを実現するためには、12—2月の平均気温が -5°C 以下の地域が気候学的な適用条件であることも示せます(Hirota *et al.* 2011)。さらに、このような結果に基づき後期の雪割り作業を平年の目安はいつになるのか、暖冬年ならいつまでに実施すれば良いか等、具体的な雪割り作業スケジュールを決定する雪割り晩限も計算できます(矢崎ら, 2012)。すなわち、土壤凍結深制御は物理的な考え方に基づく手法なので、与えられた諸条件下において、予め適用条件も演繹的に明らかにできるのも大きな特徴です。そして、土壤凍結深制御は何か資材を用いるものではなく、また、特別な機械や新たな施設設備を必要としていません。寒さと雪の自然資源(気象資源)のみを活用して実現します。余談ではありますが、土壤凍結深制御の科学の基礎は地表面の熱収支や土壤の熱伝導の物理学を基礎とした数学ともいえます。すなわち、野良イモ防除という除草作業の安定化を農業ではなく、物理と数学により達成している農業技術という言い方もできます。これは、中谷宇吉郎が目指していた農業物理に基づく農業技術の実現とも自負しています(広田・岩田, 2012)。

言うまでもなく、農業と気象は密接に関わっています。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困難とされてきました。一方、雪割りは短時間(1回1ha 辺り30分以内)で終了します。この迅速な作業速度は、制御の考えと組み合わせることで大面積での環境制御への着想に自然と至ります。つまり、ここで取り組まれている現場技術と私達の研究・技術開発は、大面積処理が可能な作業機械による土壤凍結深制御を通して、大規模土地利用型農業での環境制御の実現を意味するのです。

さらに土壤凍結深制御の可能性は野良イモ対策技術だけに留まりません。私達はこの土壤凍結深制御の可能性についても研究しており、水・物質動態や

土壌中のガスおよび温室効果ガス放出への影響など様々な面からの成果を出し始めています(Iwata *et al.* 2010b; Yanai *et al.* 2011; Iwata *et al.* 2013)。また、農家からは雪割りの後の畑は土壌物性も改善、播種精度の向上と発芽の均一化、その後の畑の管理も容易になり、ひいては作物の収量や出来にも好影響をもたらすとも言われています。まさに、大規模農地でありながら精密な農業を実施できることを支援する手法に発展できるのです。土壌凍結深制御は野良イモ対策ばかりでなく、今後の様々な発展の可能性があると確信します。

3.5 技術の普及

そして、この研究の普及技術への展開です。野良イモ対策についての雪割りを経験のない農家でも雪割りを容易に実施できるような技術開発に取り組みました。十勝管内の農協 24 団体の連合である十勝農業協同組合連合会(十勝農協連)との連携協力を深めて行きました。十勝農協連とは、現場の実態の情報交換、各農協が観測していた土壌凍結深のデータの提供、十勝管内全体での現地農家での野良イモの実態調査、土壌凍結深推定モデルの現地の畑における検証、雪割りー土壌凍結深制御の試験実施など、多くの試験・調査を実施しました。また、十勝農協連は、私がこのプロジェクト予算獲得をなかなか実現しないときに、十勝農業にすぐにでも必要な技術としていち早く評価して頂き、予算獲得を待たずに自らの資金を投入して土壌凍結深制御による野良イモ対策の情報システムの構築にも着手しました。これらの研究・調査をベースに、道総研十勝農業試験場も加わり、年月を経て農水省の実用開発事業において土壌凍結深制御手法による野良イモ対策技術の確立への研究・技術開発のプロジェクトへと展開しました。最終的に、土壌凍結深制御による野良イモ対策技術は、十勝農試により技術指針マニュアルを作成すると共に、十勝農協連により、十勝の農協 24 団体および農家へインターネットにより配信される農業気象情報システムとして普及技術となりました(広田, 2012)。つまり、モデル研究、および大気ー陸面の相互作用に関する基礎的研究、長期観測、気候学的な解析が結実された形で普及技術となったのです。また、簡潔な方程式の構造による効率の良い計算が可能にしたメリットが IT による迅速な情報発信受信にも役立ちました。このプロジェクトにおける農家圃場による現地実証(Yazaki *et al.* 2013)を通して得られた経験・ノウハウが新たな気象情報を用いた対策技術開発などの次への発展につながると考えています。また、システムの確立後、利用が広がれば、十勝は大規模農地からさらに十勝全体の地域スケール

での環境制御の実現へ発展することにもなります。十勝農試が加わることで、北海道の普及関係機関との連携も強化され、詳細な地域の情報や他地域への普及展開がより図られやすくなったと考えています。野良イモ対策は基礎研究と現場対応が同時進行で進んだことで、様々な紆余曲折があったにも関わらず、早い段階から現場で試行されたこともあり、研究着手から 10 年を待たずに、数年オーダーの期間で実用化・普及に進んだのは比較的迅速な研究技術開発であったと考えています。

これらの研究は、十勝という大規模畑作で先進的な高い水準の農家の方々との交流からも大いに触発されました。また、冬の積雪があるときから農地を管理する日本独自の技術がさらに生まれたことも示しています。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・十勝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ものです。

そして、研究の進展と共に野良イモと雪割りの言葉も広くメディアでも報道されるようになりました。背景には、我が国での G8 サミットである北海道洞爺湖サミットが開催された 2008 年前後は、主要テーマが地球温暖化となったこともあり、地元メディアでは温暖化に関するトピックを求めていることもあります。私はこのメディア対応にも自分なりに力を入れました。力が入った理由は、雪割りに初めて出会った感動とその意義、あるいは農業から出てきた素晴らしい知恵と工夫を、雪割り未経験の農家の方へ伝えることばかりでなく、農業とは関係の無い広く一般の方々にも知らせて共有できる大きなチャンスが来たという想いからでした。また当時は温暖化の緩和策や適応策はこれからの課題だと言われているときに、地元の日本のしかも北海道で、すでに世の中にはまだ知られていない素晴らしい先例を伝えたいという先走った気持ちもありました。農家の方からは雪割りを語っている時の私は、当事者の農家以上に力が入り過ぎていて、からかわれました。学術的なばれいしよの野良生えのような言い方ではなく、メディアに対しては親しみのある語感となる野良イモを意識的に使いました。野良イモのネーミングは、元々は農家がすでに使っていた呼び方ですが、野良イモの語感はその響きが野良イヌとも似ており、野良イモ退治は野良イヌ退治とも連想させてどこなくユーモラスな響きも与えます。この作戦は当り、メディアでは野良イモの呼び方で統一されるようになり、野良イモの語は一般市民にまでも多少なりとも知られたようです。メディア報道は、また

取材に協力して頂いた農家や畑の映像が加わることで研究と現場の両面の内容が伝わることで説得力も増したと感じています。この中で札幌テレビが制作し、私たちの研究も複数回取り上げて頂いた「シリーズそこにある地球温暖化」は、2009年度、第46回ギャラクシー賞(放送批評懇談会主催)において報道活動部門の優秀賞を受賞しました。ギャラクシー賞はウィキペディアによれば「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」と言われています。その後、野良イモの問題はテレビ、新聞等の全国の主要メディアにも取り上げられました。そして、2011年になると農業技術としての「雪割り」の語が広がりはじめ、2011年の1月に地元北海道では北海道新聞と十勝毎日新聞の2紙に農家の雪割り作業の紹介が1面で、2月には報道番組ばかりでなくNHKのさわやか自然百景でも「北海道 十勝平野 冬」で取り上げられました。このことは、雪割りの農業技術が一般社会に認識され出されているように感じています。

北農研サイエンスカフェでも講演の機会を頂きました。この時は雪割りによる野良イモ対策の素晴らしさについて、農家のお父さんによる冬の機械作業による雪割りによる土壤凍結制御の作業が農家のお母さんの夏場のつらい野良イモ抜き取り作業から解放し、夫婦や家族の幸せにもつながる意義を強調し、「凍るほど深まる愛」という秀逸な講演タイトルがサイエンスカフェの協力者とともにできました。

「野良イモ」そして農業技術の成果として「雪割り」の語が一般に認識されだしたことは、今回の受賞と共に、感慨深いものがあります。新発見や創造には新たな用語も生まれます。掲載した論文(Hirota *et al.* 2011)では *Yukiwari* (snow plowing) と意訳して英文論文でも新用語にしました。雪割りは柔道の技ありと



図2 空からの雪割り風景(北海道・十勝地方)

語感が似ていますし、2回で一本や技術の達成といった内容にも類似性があります。柔道の *Wazaari* が国際用語として定着したように *Yukiwari* が将来、日本で独自に開発された技術が国際的にも技術としてまた用語として広がることを期待しています。さらに論文では研究者による科学的創造発見の意味もこめて、土壤凍結深制御を英語で *Soil frost control* と名付けました。

野良イモ、雪割り、土壤凍結深制御研究では現場の畑からテーマが着想され、多くの生産者、生産現場関係者とのご支援もあり実用化・普及にまで至りました。また、この成果は方程式の導出過程で美しさも備えた式と自負しましたが、さらに技術の結果としての雪割りが作り上げた冬の畑の風景にも独特の美しさを与えているとも感じています(図2)。

私の研究はある専門書をきっかけとしての理論的・基礎的な一つの方程式の導出から始まりましたが、研究室での議論、試験場内の野外データ、現場の畑でのデータ、異分野、生産者の方との交流を経て発展し、成果は生産現場に、そして成果の意義は一般社会へも伝わりはじめたと感じています。

4. 謝 辞

本研究に関わった以下、名前を列記して深謝いたします。本研究の中核的な共同研究者としては、福本昌人博士(現農研機構農業農村工学研究所)、粕淵辰昭博士(山形大学名誉教授)、John Pomeroy 博士(現カナダ、サスカチュワン大)、林正貴博士(カナダ、カルガリー大)、そして、本共同研究を通して博士論文を取得、大きく成長した岩田幸良博士(現農研機構農業農村工学研究所)。職場内外での先輩、同僚、後輩からのご指導、ご協力頂いた方々として、農研機構北海道農業研究センター(北農研)では山田一茂博士、鮫島良次博士、濱寄孝弘氏、村松兼生氏、城岡竜一博士(現 JAMSTEC)、井上聡博士、古賀伸久博士(現農林水産省)、永田修博士、小南靖弘博士(現農研機構中央農試北陸拠点)、白木一英氏、ポスドク研究員として環境省や農水省のプロジェクトで大きく貢献した鈴木伸治博士(現東京農大)、根本学博士、柳井洋介博士(現農研機構野茶研)、矢崎友嗣博士(現湿原研究所)、大久保晋治郎博士、中川進平博士、山田雅仁博士、当時学生として一緒に研究した下田星児博士(北農研)、ご助言を頂いた職場の先輩、同僚として信濃卓郎博士(現農研機構東北農研)、横田聡博士、横山和成博士(現農研機構中央農研)、松本直幸博士、山縣真人博士、小川茂男博士(現農研機構本部)、干場信司博士(現酪農学園大学)。カナダ在外研究では、Charles Maule 博士(カナダ、サスカチュワ

ン大), Raoul Granger 博士(カナダ, 国立水文研究所), 在外研究へ向けてお世話頂いた方として, 石井吉之博士(北大低温研), 浦野慎一博士(北大名誉教授)。土壌凍結, 環境省プロ, 農水省実用開発事業では長谷川周一名誉教授(北大), 荒木和哉氏, 岩崎暁生氏, 梶山努氏, 高宮泰宏(以上, 道総研十勝農試), 鈴木剛氏, 白旗雅樹氏(以上現道総研中央農試), 前塚研二氏 澤崎明弘氏, 梶孝幸氏, 鱈場尊氏, 山中功氏(以上十勝農協連), 牧野司氏(道総研根釧農試), 平野高司博士(北大), 杉本敦子博士(北大), 及川武久名誉教授(筑波大), 鶴田治雄博士, 河合崇欣博士, 小野雅司博士(以上環境省プログラムオフィサー(PO)), 大野清春博士(農水省実用開発事業 PO), 三木直倫博士(酪農学園大), 竹中秀行氏, 奥村正敏氏(以上道総研), 尾藤光一氏(農家), 道場琢也氏(芽室農協), 梶真澄氏(農家), 藤森博之氏(元農家 現DGC 総研), Mr. Greg Jorde and Ms. Junko Jorde ご夫妻(カナダ農家), 岡嶋勲氏(札幌テレビ), 関坂典生氏(十勝毎日新聞)。

その他, 貴重な御指導, アドバイスを頂いた方として, 清野裕博士(農環研), 青木正敏博士(東京農工大), 川島茂人博士(京大), 横沢正幸博士(農環研), 高藪出博士, 青木輝夫博士(気象庁気象研究所)佐竹徹夫博士, 水落勁美博士, 新田恒雄博士, 森元幸博士(以上北農研), 小林和彦博士(東大), 原菌芳信博士(アラスカ大), 平田竜一博士(国立環境研), 岡田益己博士(岩手大), 小沢聖博士(現明治大), 近藤純正名誉教授(東北大), 渡辺力博士(北大低温研), 松島大博士(現千葉工業大), 中井裕一郎博士(森林総研), 鈴木和良博士(JAMSTEC), 佐藤威博士(防災科学技術研究所), 兒玉祐二博士(現国立極地研究所), 秋田谷英次博士(北大低温研), 菊池晃二博士(帯広畜産大), 小松輝行博士(東京農大), 長谷川益男氏, 田中弘康氏, 但野俊秋名誉教授(北大), 大村纂名誉教授(スイス連邦工科大), GAME プロジェクト関係で有益な助言や機会を与えて頂いた方々として, 安成哲三博士(名古屋大), 沖大幹博士(東大), 砂田憲吾名誉教授(山梨大), 小池俊雄博士(東大), 杉田倫明博士(筑波大), 上野健一博士(筑波大), 松山洋博士(首都大学東京), 福嶋義宏博士(現鳥取環境大), 江守正多博士(国立環境研究所), 檜山哲哉博士(現総合地球環境学研), 奈佐原(西田)顕郎博士(筑波大), 戸田求博士(現広島大)。また, 土壌凍結深制御手法の実用化にあたってご尽力, ご協力頂いた方として, 横山慎司氏(アグリウエザー), 大島巖氏, 小松麻美氏(以上日本気象協会), 菅野洋光博士(農研機構東北農研), 前田修平博士, 宮脇祥一郎氏 野津原昭二氏, 大澤和裕氏(以上気象庁)。研究支援では, 西岡國雄

氏, 柳谷修自氏, 山崎真氏, 吉田孝二氏, 加藤勇嗣氏, 横地泰宏氏, 藤原政光氏, 小川英明氏, 深谷貴志氏, 猿渡孝博氏, 柴田和洋氏, 阿部勝繁氏, 平尾隆幸氏, 平井則宏氏, 高橋悟氏, 中村誠二氏, 小田嶋和之氏, 佐藤義一氏(以上, 北農研), Mr. Dell Bayne(カナダ, 国立水文研究所), 寄崎哲弘氏, 田中浩二氏, 郷司尚之氏, 飛田雄二氏(クリマテック), 山岸充氏(早坂理工), 梅谷知弘氏, 加藤隆幸氏, 藤田親亮氏(以上太陽計器), 石丸民之永氏(新潟電機)。研究補助や講演でのご協力では, 山岡美恵子氏, 山川雪子氏, 成田美穂氏, 菊地幸氏, 相馬しずか氏, 高杉恵美子氏, 矢ヶ崎富美氏, 得字久子氏, 江村智子氏, 村田竜一氏, 中村博志氏, 柴垣誠氏(以上北農研), 岸本綾乃氏(北大)。農業気象研究を始める端緒となった九州大学在籍時あるいは博士論文でのご指導して頂いた方として, 鈴木義則名誉教授, 黒田正治名誉教授, 中野芳輔名誉教授, 小林哲夫博士, 脇水健二氏, 林静夫博士, 北野雅治博士, 森牧人博士(現高知大)。

最後に, 研究を支えてくれた亡き妻の廣田倫代と息子の廣田遼の家族。以上の方々に, 深く感謝の意を表します。

受賞に関連する論文リスト

- 福本昌人, 広田知良, 1994: 表層土壌水分が裸地面熱収支に与える影響, 水文・水資源学会誌, **7**, 393-401.
- 広田知良, 福本昌人, 城岡竜一, 村松謙生, 1995: Force-Restore モデルによる日平均地温の推定, 農業気象, **51**, 269-277.
- Hirota, T. and Kasubuchi, T., 1996: Soil moisture observations under different vegetations in a boreal humid climate. *J. Jpn. Soc. Hydrol. Water. Resour. Res.*, **9**, 233-239.
- 広田知良, 福本昌人, 1996: 裸地面の地表面温度についての考察およびルーチン気象観測データからの日平均顕熱輸送量の推定. 水文・水資源学会誌, **9**, 395-403.
- 廣田知良, 1999a: 農耕地における地温, 土壌水分, 熱収支の長期動態把握に関する基礎的研究. 北海道農業試験場研究報告, 169, 87-145.
- Hirota, T., 2001: Estimation of seasonal and annual evaporation using agrometeorological data of Thai meteorological department by the heat budget models. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **79**, 1B, 365-371.
- Hirota, T., Fukumoto, M., Shirooka, R. and Yamada K., 2001: Estimation of the cumulative sensible heat flux and its daily mean soil temperature on a bare soil without wind speed data. *J. Jpn. Soc. Hydrol. Water. Resour.*

- Res.*, **14**, 289–297.
- Hirota, T., Pomeroy, J.W., Granger, R.J. and Maule, C.P., 2002: An extension of the force-restore method to estimating soil temperature at depth and evaluation for frozen soils under snow. *J. Geophys. Res.*, **107**, D24, 4767, 10.1029/2001JD001280.
- Iwata, Y. and Hirota, T., 2005a: Monitoring over-winter soil water dynamics in a freezing and snow covered environment using a thermally insulated tensiometer. *Hydrol. Processes*. **19**, 3013–3019.
- Hirota, T., Iwata, Y., Hamasaki, T., Sameshima, R. and Hayashi, M., 2005: Micrometeorological conditions and the thermal and moisture characteristics of seasonally frozen soil in eastern Hokkaido. *J. Agric. Meteorol.*, **60**(5), 673–676.
- Iwata, Y. and Hirota, T., 2005b: Development of tensiometer for monitoring soil-water dynamics in freezing and snow covered environment. *J. Agric. Meteorol.*, **60**(5), 1065–1068.
- Hayashi, M., Hirota, T., Iwata, Y. and Takayabu, I., 2005: Snowmelt energy balance and its relation to foehn events in Tokachi, Japan. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **83**, 783–798.
- 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. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **84**, 821–833.
- Sameshima, R., Hirota, T., Hamasaki, T. and Suzuki, S., 2007: Temperature trend in Hitsujigaoka, Sapporo, in 40 years from 1966 to 2005. *J. Agric. Meteorol.*, **63**, 95–102.
- Iwata, Y., Hayashi, M., Hirota, T., 2008: Comparison of snowmelt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover. *Vadose Zone J.*, **7**, 79–86.
- Nemoto, M., Hirota, T. and Iwata, Y., 2008: Application of the extended force-restore model to estimate soil-frost depth in the Tokachi region of Hokkaido, Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **64**, 177–183.
- 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.
- Iwata, Y., Hayashi, M. and Hirota, T., 2008: Effects of thick snow cover on water and energy fluxes in frozen field. *J. Agric. Meteorol.*, **64**, 301–309.
- Hirota, T., Iwata, Y., Nemoto, M., Hamasaki, T., Sameshima, R. and Hayashi, M., 2009: Seasonal and annual water balance of agricultural land in Tokachi, Hokkaido, Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **65**, 69–76.
- Rutter, N., Essery, R., Pomeroy, J., Altimir, N., Andreadis, K., Baker, I., Barr, A., Bartlett, P., Boone, A., Deng, H., Douville, H., Dutra, E., Elder, K., Ellis, C., Feng, X., Gelfan, A., Goodbody, A., Gusev, Y., Gustafsson, D., Hellstrom, R., Hirabayashi, Y., Hirota, T., Jonas, T., Koren, V., Kuragina, A., Lettenmaier, D., Li, W-P, Martin, E., Nasanova, O., Pumpanen, J., Pyles, R., Samuelsson, P., Sandells, M., Schadler, G., Shmakin, A., Smirnova, T., Stahli, M., Stockli, R., Strasser, U., Su, H., Suzuki, K., Takata, K., Tanaka, K., Thompson, E., Vesala, T., Viterbo, P., Wiltshire, A., Xia, K., Xue, Y. and Yamazaki, T., 2009: Evaluation of forest snow processes models (SnowMIP2). *J. Geophys. Res.*, **114**, D06111, doi:10.1029/2008JD011063.
- Hirota, T. and Fukumoto, M., 2009: Estimation of surface moisture availability on bare soil from meteorological and surface soil temperature measurement and its parameterization without soil moisture. *J. Agric. Meteorol.*, **65**, 375–386.
- Iwata, Y., Hirota, T., Suzuki, S., Hasegawa, S. and Hayashi, M., 2010a: Effects of frozen soil and snow cover on cold-season soil water dynamics in Tokachi, Japan. *Hydrol. Processes*, **24**, 1755–1765.
- Iwata, Y., Hayashi, M., Suzuki, S., Hirota, T. and Hasegawa, S., 2010b: Effects of snowcover on soil freezing, water movement and snowmelt infiltration. *Water Resour. Res.*, **46**, W09504, doi: 10.1029/2009WR008070.
- 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 under snow cover manipulation experiments. *Soil Bio. Bioche.*, **43**, 1779–1786.
- 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 the thin frozen soil layer in northern Japan. *J. Hydrol.*, **401**, 165–176.
- 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. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change.*, **16**, 791–802.
- Ohkubo, S., Yanai, Y., Nagata, O., Iwata, Y. and Hirota, T., 2011: Influences of snow cover and soil-frost on ground surface flux and soil gas concentration of CO₂ in an agricultural land in northern Japan. *J. Agric. Meteorol.*, **67**, 151–162.
- 岩田幸良, 長谷川周一, 鈴木伸治, 根本学, 廣田知良, 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. *土壌の物理性*. **117**,

11-22

- Iwata, Y., Hirota, T., Suzuki, T. and Kuwao, K., 2012: Comparison of soil frost and thaw depths measured using frost tubes and other methods. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **71**, 111-117.
- 矢崎友嗣, 広田知良, 鈴木剛, 白旗雅樹, 岩田幸良, 井上聡, 臼木一英, 2012: 北海道の気候条件から見た土壌凍結深制御による野良イモ防除の作業日程. *生物と気象*, **12**, 12-20. <http://dx.doi.org/10.2480/cib.12.12>
- Ohkubo, S., Iwata, Y. and Hirota, T., 2012: Influences on CO₂ flux by snow-cover, soil-frost and other meteorological elements over agricultural land. *Agr. Forest Meteorol.*, **165**, 25-34.
- Iwata, Y., Yazaki, T., Suzuki, S. and Hirota, T., 2013: Water and nitrate movements in an agricultural field having different soil frost depths: Field experiments and numerical simulation. *Ann. Glaciol.*, **54**(62), 157-165.
- Yazaki, T., Iwata, Y., Hirota, T., Kominami, Y., Kawakata, T., Yoshida, T., Yanai, Y., and Inoue, S., 2013: Influences of winter climatic conditions on the relation between annual mean soil and air temperatures from central to northern Japan. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **85**, 217-224.
- 岩田幸良, 桑尾和伸, 広田知良, 長谷川周一, 2013: 凍結形態の異なる土壌への融雪水の浸透. *雪氷*, **75**, 111-123.
- Yazaki, T., Hirota, T., Iwata, Y., Inoue, S., Usuki, K., Suzuki, T., Shirahata, M., Iwasaki, A., Kajiyama, T., Araki, K., Takamiya, Y., and Maezuka, K. 2013: Effective killing of volunteer potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers with soil frost control using agrometeorological information—an adaptive countermeasure to the climate change utilizing climate resources in a cold region. *Agr. Forest Meteorol.*, (accepted)

受賞に関連する総説, 著書, 解説等のリスト

- 広田知良, 1995: 第2回 GEWEX/GAME 国際会議出席報告, *農業気象*, **51**, 285-288.
- 広田知良, 1998: 羊ヶ丘にて, *水文・水資源学会賞受賞記念論文*, *水文・水資源学会誌*, **11**, 9-10.
- 広田知良, 1999a: 陸面過程の研究に必要な観測フィールド条件とは—札幌市羊ヶ丘でのフィールド環境と研究の紹介を通して—*気象研究ノート「陸面過程」*. 日本気象学会, 195, 7-11.
- 広田知良, 1999b: 第3回 GEWEX 国際会議(第4回 GAME 国際研究集会との共催)参加報告 *農業気象*, **55**, 347-350.
- 広田知良, 2000: 地中温度, 土壌水分. 身近な気象・気候調査の基礎, 古今書院, 28-44.
- 広田知良, 2001: カナダ・サスカチュワン大学在外研究記, *生物と気象*, **1**, 173-181.
- 広田知良, 福本昌人, 渡辺力, 2001: 地中熱流量と水体・森林貯熱量, *気象研究ノート「地表面フラックス測定法」*, 日本気象学会, 199, 141-151.
- 広田知良, 2003a: 「発想のたまご—中堅研究者に聞くⅢ—」研究者の年齢と創造力の関係, そして中堅研究者の役割について. *水文・水資源学会誌*, **16**, 666.
- 広田知良, 2003b: シンポジウム報告 第23回国際測地学・地球学連合(IUGG)札幌総会
4. 森林内外では雪はどちらが早く融けるか?—JWH01 Snow processes of theセッションの個人的体験から—*雪氷*, **65**, 467-469.
- 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.
- 広田知良, 2009: 大規模土地利用型農業で実現したバッシブ制御—土壌凍結を活用した野良イモ防除—, *生物と気象* **9**: A-3.
- 広田知良 2012: 第1章3 十勝での異変 農業への影響と気候変動適応策. 日本農業気象学会北海道支部編, 北海道の気象と農業, 北海道新聞社, pp27-31.
- 広田知良・岩田幸良, 2012: 第3章 COLUMN 農業物理研究所. 日本農業気象学会北海道支部編, 北海道の気象と農業, 北海道新聞社, pp184-188.
- 広田知良, 2013: 北海道・道東・十勝地方における野良イモの問題と対策技術・土壌凍結深制御手法の開発, *農業および園芸* **88**, 790-794.