

温暖化フォーラム(北海道)報告

広田知良*・中辻敏朗**・濱寄孝弘*・小沢 聖***・永田 修*・古賀伸久****
 ・井上 聡*・志賀弘行**・岡田益己*****・大政謙次*****

*(独)農研機構北海道農業研究センター生産環境研究領域
 **(地独)北海道立総合研究機構中央農業試験場農業環境部
 *** (独)国際農林水産業研究センター 熱帯・島嶼研究拠点
 **** (独)農研機構北海道農業研究センター畑作研究領域
 *****岩手大学農学部
 *****東京大学大学院農学生命科学研究科

1. はじめに

北海道の温暖化研究において、2010年度、いくつか重要な成果が発表された。北海道立総合研究機構(以下、道総研)では、北海道農業における温暖化影響評価と対応方向を打ち出し、その成果が北海道の農業現場へ伝わり始めた。(独)農研機構北海道農業研究センター(以下、北農研)では、農研機構における水稲温暖化全国連携試験や温室効果緩和策の交付金プロジェクト研究をリーダーとして推進し、また、ヨーロッパでの在外研究等による国際共同研究を実施した。本フォーラムは、これらの北海道発の最新の研究成果を発表すると共に、質疑応答の時間を十分に確保して、現状認識を深め、今後の温暖化研究の方向性を考える場とした。本フォーラムの参加者は62名であった。議論の時間を十分確保したこともあり、参加者間で実りの多い討論ができた。また、このフォーラムの広報は、学会ホームページを通じての控えめのアナウンスであったにも関わらず、農業関係機関のホームページにリンクを張られたことで、大会には研究者ばかりでなく、農家や農業機関の関係者なども参加し、かつ積極的な発言もあった。そこで、講演内容と質疑応答を取りまとめ、北海道農業への温暖化影響や研究の現状を概観できる包括的な資料を提供することを目的として、本報告書を作成した。なお、講演の要旨の取りまとめや質疑応答は、議論がどのように展開されたかわかりやすくするため、報告者の1人である広田独自の判断で、関連するテーマ毎に概観できるよう整理し、質問は

発言順でなく、一部複数の発言を取りまとめて編集した。したがって発言者の意図と異なる可能性があること、そして、「4. おわりに」においても広田の個人的な見解が強く反映されていることを併せて予めお断りする。

2. 開催日程

本研究会は以下の日程で開催した。
 主催：日本農業気象学会
 共催：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
 日時：2011年9月9日(金)午後13:00~18:00
 場所：北海道農業研究センター
 (札幌市豊平区羊ヶ丘1)大会議室
 テーマ 北海道発の温暖化研究の成果
 講演

1. 地球温暖化が道内主要作物に及ぼす影響とその対応方向 —2030年代の予測—
 中辻敏朗(北海道立総合研究機構 農業研究本部 中央農業試験場)
2. 全国連携水田栽培試験による水稲への温暖化影響と適応策の実証的研究
 濱寄孝弘(北海道農研)・小沢 聖(JIRCAS)
3. 農業生産からの温室効果ガス発生量の低減方法の開発
 一水田輪作体系における不耕起栽培を導入した温室効果ガス低減型栽培管理技術の開発—
 永田 修(北海道農研)
4. 北海道農業の温暖化緩和ポテンシャル
 古賀伸久(北海道農研)

<http://www.agrmet.jp/sk/2012/B-1.pdf>

2012年4月24日 掲載

Copyright 2012, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

3. 講演の要旨

3.1 地球温暖化が道内主要作物に及ぼす影響とその対応方向 —2030年代の予測—

温暖化が北海道内の水稲、畑作物および飼料作物の生育や収量、品質などに及ぼす影響について2030年代を対象に予測し、将来想定される課題への技術的対応方向を包括的に提示した(北海道立総合研究機構 農業研究本部 中央農業試験場, 2011)。2030年代の温暖化気候予測データはCCSR/NIESのシナリオをメッシュデータ化したもの(Yokozawa *et al.* 2003)を活用した。この予測によると、2030年代には月平均気温が現在(1971年～2000年での平年値)から1.3～2.9℃(平均2.0℃)上昇する。5～9月は平均1.8℃上昇、日射量は0.85倍に減少する。年降水量は現在の1.2倍で、6～7月に多雨傾向となる。この温暖化予測に基づき、2030年代の各作物の状況を農試の過去の蓄積データを利用し、気象要素から生育期、収量、品質等を予測する予測式を作成し、これらに2030年代の気象データをあてはめ予測した。また、秋まき小麦、てんさい、ばれいしょなどでは既往の作物モデル(例えば、WOFOST (World Food Studies), 2012)も活用した。

成果の概要をまとめると以下の通りになる(参照：北海道立総合研究機構 農業研究本部 中央農業試験場, 2011)。

1) 水稲

- ・生育初期の気温上昇に伴って生育ステージが前進するため、冷害危険期の気温はわずかに高まるに過ぎず、気温の変動が現在並とすると、不稔発生のリスクは現在と変わらない。
- ・直播栽培の作期が長くなり、早生だけでなく中生品種の直播が可能となる。
- ・登熟環境からみた収量性は現在並やや増加、品質は登熟期間の昇温で精米中のアミロース含量が低下し、良食味化が期待される。

2) 畑作物

秋まき小麦

- ・融雪期の早まりと春季以降の昇温で起生期と成熟期は前進するが、登熟日数は現在と大差ない。
- ・収量は5月以降の日射量の減少で現在より8～18%低下する。
- ・開花期以降の降水量増加で水分不足が緩和される地域もあるが、倒伏、赤かび病、穂発芽などの障害回避が前提となる。
- ・播種適期は6～10日遅くなる。

てんさい

- ・生育期間が現在並であれば、気温の上昇により

収量(根重)は現在より12%増加するが、根中糖分は低下する。

- ・高温・多湿で多発が懸念される褐斑病、葉腐病などへの対応や圃場の排水対策が必要となる。
- ・生育期間の延長による収穫適期の見直しも必要である。

ばれいしょ

- ・収量は現在よりも約15%減少する。減収要因は日射量の低下である。
- ・でんぶん価は8～9月の気温上昇で低下する。
- ・高温・多雨で疫病の初発が1週間ほど早まる。高温耐性品種の開発・導入が不可欠である。

大豆

- ・開花期や成熟期は6～9日早まる。
- ・熟期が「やや早」の「ユキホマレ」の収量は現在の6～8月の平均気温が18℃以下の地域では増収するが、それ以上では減収する。減収が予想される地域では中生品種の選定が必要である。
- ・現行の「道産豆類地帯別栽培指針」での地帯区分は見直しが必要である。
- ・品質面では、高温による裂皮、しわ粒の多発が懸念される。

小豆

- ・主産地の十勝・オホーツクでは増収、後志・渡島で微増、上川・空知で減収となり、現状の作付面積で試算すると道内全体では12%の増収となる。登熟期間の昇温で百粒重が低下し、道南、道央の一部で規格内歩留の低下が懸念される。

牧草

- ・1番草の出穂期は13日早まるが、生育日数に大きな変化はない。年間収量は日射量を考慮した場合は、現在の8～9割と推定される。気温のみから推定した場合は現状維持かわずかに増加する。
- ・1番草出穂期の前進で年3回刈りの可能な地域が出現するが、労力的には困難である。
- ・現状の2回刈りで収量を確保するには、晩生品種の利用が有望(適期収穫が前提)である。

飼料用とうもろこし

- ・現状の作付面積で試算すると、気温の上昇、および昇温程度に合わせた熟期の遅い品種への変更により、全道では10～14%増収する。

技術的対応方向

1) 品種開発の方向性

- ・高温耐性品種の開発
- ・各種病害虫に対する抵抗性の付与
- ・畑作物全般における雨害、湿害耐性の強化
- ・将来の気温の変動幅には不確定要素も多いため、

当面は耐冷性、耐凍性などの寒さへの耐性も必要

2) 栽培技術の対応方向

- ・ 播種・移植・収穫適期の変更
- ・ 栽培地帯区分や導入品種(熟期)の見直し
- ・ 生育指標の見直し
- ・ 施肥体系の再構築
- ・ 多雨に備えた排水改良等の農地基盤整備の強化
- ・ 適期防除の励行と新規病害虫への対応を見据えた準備

3.2 全国連携水田栽培試験による水稻への温暖化影響と適応策の実証的研究

水稻栽培への温暖化の影響を全国連携の野外での栽培試験により評価した結果が、北海道での研究例を中心に報告された。全国連携試験とは、南北に長い日本列島の温度差を利用した地域間連携試験によって温暖化影響を評価するものである。例えば、北海道(札幌)の温暖化後の影響を、より高温な東北(盛岡)と連携した栽培試験によって評価を行う。地域間連携試験では、緯度が異なることで温度ばかりでなく日長時間も異なる。そこで、電照による補光で日長を揃えることで、温度上昇の影響を栽培試験から直接評価する手法を開発した(Sameshima *et al.* 2011)。この全国連携試験は北海道(札幌)から東北(盛岡)、関東(つくば)、九州(熊本)に加えて沖縄(石垣)とまさに日本列島を南北横断する形で 2008~2010 年の 3 カ年で実施された。特に沖縄(石垣)が加わることで、非常に幅広い気候帯をカバーできると共に、日本国内の連携ばかりでなく、将来的には東南アジアとの連携もさらなる視野に入ることになる。2010 年は全国的な記録的猛暑であり、札幌の夏季の気温は平年値と比較して 2.2°C 高かった。これは、50 年後から 100 年後の温暖化時に相当し、全国連携試験の手法の妥当性を実証する機会ともなった。これらの試験結果から、50 年後に気温が 2°C 程度上昇したとすると、札幌では現在の東北品種、例えば「あきたこまち」や「ひとめぼれ」の栽培は可能となるが、「コシヒカリ」の栽培は困難と評価した(Nemoto *et al.* 2011a)。また、2010 年の猛暑の事例では、作況指数の累年値との比較により、北海道の現在の品種、例えば「きらら 397」等は高温で収量が頭打ちとなることを示す一方で、札幌(羊ヶ丘)での栽培試験にて、現東北品種「ひとめぼれ」が北海道で初めて十分な登熟に達し、北海道の品種を上回る 630 kg/10a の収量を上げた(Nemoto *et al.* 2011b)。

3.3 農業生産からの温室効果ガス発生量の低減方法の開発(農研機構、北海道農業研究センター、2012)

—水田輪作体系における不耕起栽培を導入した温室効果ガス低減型栽培管理技術の開発—

1970 年代の減反政策を契機に進められた水田転換畑という農業での土地利用形態は、世界の中でも非常にユニークな土地利用形態であり、かつ日本の農地面積で占める割合は大きい。

水田を転換畑にした場合に不耕起栽培を導入するメリットとして、

- ・ 耕起が不要で、燃料の使用が少なく、CO₂ の排出が少ないうえ、土壌への炭素固定が期待される。
- ・ 地耐力があり、降雨後でもすぐに播種作業が出来る。適期に作業できる面積が増えることから、収量増が期待される。

デメリットとしては、

- ・ 地温低下により、初期生育が不安定になる場合がある。
- ・ 湿害を受ける懸念がある。→冠水した場合の発芽不良、茎疫病
- ・ 雑草防除は、除草剤を中心とした対応に偏ること、

が考えられる。そこで、転換畑で春まき小麦と大豆を輪作した場合の 3 カ年の圃場試験にて、不耕起栽培の温室効果ガス削減効果を生産性と併せて評価した。不耕起栽培の導入 1 年目では大豆の収量は慣行の耕起した場合と比べて 90% を下回った結果となったが、導入 2 年目以降は不耕起栽培の収量は慣行と同等以上であった。また作業効率時間は慣行の標準的な耕起をする栽培法と比べて、70% 以下となった。除草の作業負担を増やさずに不耕起栽培を行うには、7 月までの雑草発生密度を約 3 本/m² 以下に出来る圃場であることが必要であり、北海道・空知地方の美唄の 30 の畑での調査事例から、50% 程度の畑がこの条件を満たすことがわかった。土壌水分は観測結果から不耕起栽培の方が慣行の栽培より常に高かった。また圃場での観測結果に基づく LCA 評価から、1) 不耕起栽培で化石燃料由来の温室効果ガス排出量を最大 8% 削減できること、2) 土壌由来の温室効果ガスは CO₂ の寄与が大きく、有機物施用により温室効果ガス排出が削減(吸収増加)であり、また、不耕起でも排出が削減される傾向にあること(Yazaki *et al.* 2011)、3) 残渣施用区の温室効果ガス排出量は、不耕起栽培により 1 年あたり平均 1810 kg CO₂/ha 削減され、これは慣行栽培に比べ 30% の削減になることが明らかとなった。これらの圃場試験より収量、

慣行比 90%以上、除草時間、慣行並みとなる不耕起栽培技術を開発した。この技術を北海道において適用できる栽培可能面積は、水田面積の 13%に相当する 29 千 ha と試算され、この体系を適用した場合、北海道の温室効果ガス削減可能量は、約 52 千 Mg (トン)と試算された。水田作連作と比較した場合、一度、水田を畑にした後の復元田でも初年度は CH₄の排出量が大きく減っており、さらに 6 作のうち水田作 3 作、畑作 3 作で作付けした場合、CH₄の排出量がさらに減少し、転換畑にすることによる N₂O 増加分を併せて考えても水田輪作地からの温室効果ガス排出量は水田連作地と比べて小さい可能性がある。

3.4 北海道農業の温暖化緩和ポテンシャル

講演は、1. 温室効果ガス排出の実態(日本、北海道、北海道農業)、2. CH₄(水田)と N₂O (畑地)の排出削減技術、3. 農地土壌における炭素貯留増加技術(農地の管理による吸収)、4. 北海道農業の温暖化緩和ポテンシャルの見積もりで構成された。北海道は、日本全体の 5.6%の温室効果ガスを排出し、北海道農業は、北海道の温室効果ガス排出量の 13.5%を排出する。乳用牛の多さ、畑地(畑、草地、転換畑)面積の大きさから、北海道農業から排出される温室効果ガス削減(温暖化緩和)のポテンシャルは、①消化管内発酵(CH₄)、②家畜排泄物の管理(CH₄、N₂O)、③農用地の土壌(N₂O)で高いと見込まれる。また、北海道は広大な農地を有することから、④農地の管理による吸収(CO₂)も温暖化緩和のポテンシャルが高いと見込まれる。北海道の水稲作では稲わらの 7 割以上を鋤き込んでおり(北海道農政部、2011)、また、稲わらの水田への投入量と水田からの CH₄ 排出量は比例関係にある(Naser *et al.* 2007)ことから、水田では稲わらの持ち出しによって、温室効果ガス排出量を大きく減らせる可能性が高い(Koga and Tajima, 2011)。畑作では、北海道・十勝地方を例とすると施肥量が標準より多いという実態がある。したがって、作物の要求に適合した窒素量の供給と作物の窒素利用効率を高める施肥法(北海道の大規模畑作地帯では、作条施肥が一般的であるが、例えば、全面施肥よりも作条施肥)や、また新しいタイプの肥料(硝化抑制剤入り肥料、肥効調節型肥料)の利用は N₂O 削減による温暖化緩和技術としての可能性が高い(鶴田, 2000; Akiyama *et al.* 2010)。農地土壌における炭素貯留増加技術としては、1. 保全型耕起法(不耕起栽培、省耕起栽培) 2. (家畜ふん)堆肥の施用、3. 休閑期間の緑肥導入、4. 作物残さ発生量が大きな作物の導入、5. 畑地から草地、放牧地への転換、6. バイオ炭の施用等が考えられる。十勝地方の畑作農業における作物純一次生産量、作物残さや堆肥からの

炭素投入量および土壌炭素貯留量の将来予測結果では、全農地に麦わら牛糞堆肥(20 t/ha/yr)を入れると、現在から 2050 年の期間では慣行の栽培と比べて、将来予測値の不確実性はあるもの+0.219 t C/ha/yr (= 0.803 t CO₂/ha/yr)の割合で土壌炭素貯留量は増加する(Koga *et al.* 2011)。ただし、現在、家畜ふん堆肥の施用が直接、大気中の CO₂ 濃度の低下につながる温暖化緩和効果があるかについて、欧州を中心に疑問も呈せられ議論がなされているところである。最終的に北海道農業の温暖化緩和ポテンシャルの見積もりの試算結果は以下ようになる。1. 作物の要求に適合した窒素量の供給(合成肥料+有機質肥料)では、現状の窒素施肥量から推定される N₂O 発生量は、CO₂相当量に換算すると 233 万 t であり、1 割および 2 割の減肥で、それぞれ 23.3 万 t、46.6 万 t の削減となる。農地の管理による吸収は、堆肥施用、緑肥、バイオ炭などで 1 t CO₂/ha/yr 程度の吸収を達成できる可能性がある。北海道の畑の面積・367,800 ha で 36.8 万 t (CO₂)の吸収となり、畑に草地(飼料作物+牧草)面積を加えると 1,026,200 ha で 103 万 t (CO₂)の吸収となる。また、燃料削減では、例えば省耕起では、4.6 万 t (CO₂)の削減(125 kg CO₂/ha/yr×畑の面積 367,800 ha)となる。窒素施肥量を 2 割削減して、畑+草地で 1 t CO₂/ha/yr の吸収を達成できるとすると全道で 150 万 t の削減となり、現在の北海道全体の排出量である 7,132 万 t CO₂/yr に対して 2%の削減に相当する。

質疑応答

・冷害対応との関連

問：冷害の問題をどのように考えるか？

答：2030 年代の気温の変動幅が現在並みと仮定すると、2030 年代にも冷害リスクは残るので、現状から大きく変わった品種をすぐに導入することにはならない。気候変動の長期的トレンドのなかで選抜していけば、耐暑性を持った品種が選抜されていくのではないかと。また、温度反応では品種の早晩性も大きく関わる。

・夏季の気温上昇程度と降水の予測

問：道総研による北海道の温暖化の想定は、夏の気温の上昇程度は他の季節と比べて低く、雨が増えるとの前提で評価している。実際、2010 年の猛暑の時も夏季の降水量は増えた結果となった。一般的に温暖化予測では降水量の予測結果はモデルによるばらつきが大きく、評価自体が困難であるという見方が支配的である。最近の結果からはどのように評価できるであろうか？

コメント+答え：梅雨明けが延びて多雨となり、太平洋高気圧の強まりはない、と言われているので、そのような状況もあるのではないかと最近の予測データでは、CMIP3(CMIP: Coupled Model Intercomparison Project)では夏季の低温は無かったが、CMIP5では低温も出てきている。モデルや色々な条件が変わってきて、単純な気温上昇ではないといえる。

コメント+答え：8月の気温が上がらないという話に関して、気象庁の気象研の気象予測データでは、北陸地方では気温は上がらず、多雨になるという予測になっていて、リーズナブルである。

コメント：その他、温暖化での水資源の問題もある。水稲については、河川融雪ピーク流量が、代掻き期より早まるなら、検討が必要だ。

・モデル論および温暖化影響評価手法論

問：作物ごとに、モデルや手法が別々である。モデル自体が癖を持っている。WOFOSTでは、温暖化で生育期間が短くなって、収量が減る傾向が現れやすい。一方、過去データからの類推では、暑い年はおおむね日射も多いので収量が増える傾向にある。手法の違いの影響をどう考えるのか？

答え：作物によって気象反応の研究蓄積レベルが違うため、手法を変えざるを得ない。てんさいの例では、気温による回帰モデルとWOFOSTによる予測の両方を行った。WOFOSTで気温だけ考慮した場合は回帰モデルに近い結果となったが、日射量の減少も考慮すると減収した。将来日射が減るかどうかは気温上昇より不確実なので、予測結果を示す際には前提条件をきちんと説明する必要がある。

問：モデルの特性で、登熟量示数とプロセスモデルの違いがあるのではないかと？

答え：最大収量がどう変化するかに関心があったので、登熟量示数をポテンシャル収量と見なして用いた。

コメント+問：両者の違いに意味はあって、プロセスモデルの方が良いと考える。しかし、作物の温度反応関係の蓄積が無ければ、登熟量示数もやむを得ない。

答え：回帰式による将来予測では、予測値が外挿にならないよう留意した。

コメント+問：将来、ビックリすることがモデルで予測ができるか、実際に起きるかどうかの検討が重要だ。

コメント+答えプロセスモデルだと、高温では出穂が早くなる。しかし、実際に水温を上げて試験をすると、出穂期は早まるが、熟期は早まらなかった。地力窒素が出てきたと考えられる。モデルが仮定し

ていないこともある。温暖化適応策として、品種だけではなく、施肥管理も重要だ。

コメント+答え：水稲の食味関連形質の気温反応では、ある温度までは蛋白含有率が下がるが、それより高温だと増える。地力窒素が出てくるためではないか。一方、アミロースは生理反応のみ。高温時の生育期後半の窒素の問題は無視できない。蛋白のように土壌が絡んでくると単純なモデルでは無理で、圃場データに基づく回帰式の方が見落としがないかもしれない。

問：水稲の温暖化影響評価について道総研と北農研の結果は異なる点がある。例えば、道総研は北海道品種の「きらら397」は良くなるかと評価した。北農研は頭打ちになると評価した。もう少し詳しく説明して欲しい。

答え：道総研は登熟量示数での評価であり、温度と日射から見た最大可能収量である。北農研は現在の品種・栽培時期のままだとどうなるか、の栽培試験での評価である。一方で、東北品種の「ひとめぼれ」の収量は高かった。温暖化後も出穂が極端に早まらない程度の日長感応性を持つ品種が出てくれば、増収になると思う。また、道総研側の報告は全国の品種を入れた最大値の評価ということも言えるだろう。

問：2030年代の想定と、より高温の2080年代の想定という違いもあるのではないかと？

答え：栽培試験時の2010年の気象データは、2050年から2100年に相当した。道総研の2030年は、まだ高温がマイルドなので、北農研の結果は一旦良くなってから落ちたところの評価をしている。

コメント：気候登熟量示数とは、稲側の情報ではなく、気候側からの情報ではないか。また、登熟量示数は、十分繁茂した条件での最大収量の評価だが、北農研の試験は、同じ品種であれば温暖化で生育期間が短縮して繁茂量が稼げなくなる影響も見ているのではないかと。

コメント：北海道の温暖化適応策では、延びた作期に応じた熟期の品種を使っていくという発想の他に、熟期が同じなら、延びた作期を作業の分散に活用する、という考え方もある。北海道では、限られた期間での作業のため、どうしても機械装備が過大になってしまうが、これをバラして行うことができる。また、生育ステージを意図的にずらして栽培することで、障害型冷害のリスクも防げる話になる。

問+コメント：道総研の結果については、農業気象の専門ではない研究者が、よくここまでやられたという印象がある。短期間のプロジェクトの中で、モデル的な思考までできていた。

答え：やってみて思ったのは、過去データの蓄積が

重要ということだ。定期作況データや奨励品種決定調査のような昔から取り続けた収量・品質データがあったので、病害や地力窒素の影響を加味した解析ができた。研究の継続と、そのための人の数が大事だと思った。

コメント：具体的な適応策を想定するのは今回の研究のような地域スケールでのメッシュデータが大事だ。アジア・世界規模だと表現できない。実際に、現場に役立つのではないか。

コメント：府県での温暖化影響評価だと難しかったかもしれない。北海道は気象の年々変動が大きくかつオホーツクから道南までの地域間差も大きい。モデルの作成、評価をする上では気象データに幅がある強みがあった。

・温暖化影響評価と異常気象対応について

問い+コメント：確率論的な話にしたほうが良いと思う。幅のある予測が必要。シナリオやモデルの不確実性も考慮すべき。次のステップでは、確率論で考えて欲しい。

答え：道総研では、水稻について、現在の気温の変動幅を仮に将来にもあてはめて検討したところ、冷害リスクは現在とあまり変わらない結果になった。遅い田植えの検討はまだやっていない。

問い：20～30年の平均気温上昇もあれば年々変動もある。温暖化対策と現場対策を分ける必要があるのではないかと道総研として、温暖化と異常気象を分けて考えているのか？異常気象への取り組みは？

答え：同じスタッフで年々変動と長期的トレンドの両方に対応している。温暖化の影響については猛暑だった昨年の事例が参考になる。極端な冷害年などには各種作物の被害解析を行い、道総研資料などの形で公表している。

問い：道総研が今回の「将来の対策」を出す意義は何か？

答え：年々変動と長期的トレンドの違いがある。育種には10年のスパンがかかる。耐病性の耐性をつける遺伝資源の導入をしている。本州で出ている病気で、これから北海道に来そうなので、遺伝資源のないものへの対応は早めを考えなければならない。年々変動で熟期や最適期も変わるため、現在の年々変動下での技術を考える意義もある。

・病虫害対策について

問い：温度～作物反応と虫や病気の反応があり、その2つの整理が必要である。昨年のてんさいは病気でダメだった。病理の専門家が温暖化研究に入ってきて欲しい。様々な条件下での現場の発生率の問題

がある。

答え：温暖化と降雨量の増加で、色々な病気や害虫が発生しやすくなるだろう。猛暑だった昨年のてんさいでは褐斑病が多発した。育種では、日々、耐性獲得に努めた品種改良は実施している。病虫害の発生予測は難しいので、発生した時に対応を考えるのが基本。

問い：てんさいは、防除したのか？

答え：てんさいは褐斑病が出た。2010年は、積算最低気温が約1500℃・糖分は過去最低に近い約15%となった。過去の高温年にも褐斑病が多発し、低糖分となった年があるので、積算最低気温による糖分の回帰モデルは病害の影響も織り込んでいると言える。昨夏は、初発からの進展が早く、多雨のためトラクタが畑に入れなかった。薬はあるが、対応は難しい。圃場排水性向上と耐病性育種が必要と考える。

コメント：北海道、沖縄(石垣)、アフリカ等、地域での高温問題は別々に考えるべきだ。石垣では高温でバッタの被害が大きくなった。昨年の猛暑で北海道での高温影響の様相が見えたことはメリットである。

・降雨と排水性の問題

コメント：将来の降水量が増えるとなると、圃場の排水性向上は今後の大きな課題と思うが、具体的な排水性の目安となるデータが少なく、そういう研究の必要性を感じる。

問い：昨年、暗渠の有無で違いがあったのか？

答え：十勝普及センターの発表では、各種の排水改良対策にそれなりの効果があった。傾斜均平による表面排水改良も効果があった。これは、冬の水たまりによる秋まき小麦の凍害も防ぎ、昨年夏の小豆の生育も良かった。

コメント：表面排水のためのレベラーは、必ずしもうまくいっていない場合もある。表層と2層目が同じ水分だとうまくいくが、2層目に水がたまるとうまくいかない。2層目も大事で、またその指導も大事である。

・小麦栽培について

コメント：3年続きで小麦が不作になった。7月20日からの高温でドライフラワーになってしまった。一方、南の品種は実が入った。東北や関東との情報交換が大事だと思う。「ゆめちから」は、兵庫県たつの市でも作っている品種だが、今年も収穫できた。ここ3年でも耐えた。研究や技術開発は幅広くやって欲しい。

コメント：ミニマムイリゲーション、つまり表層5

cm の好適環境が大事だ。北海道では、乾いてしまって効率が悪い。ごく少量の水やりが大切だと思うので、技術開発が望まれる。

・ 水稲の日長反応および試験方法について

問：試験では日長を合わせたとのことだが、日射量やその変化カーブを合わせなくても良いのか？

答：温暖化後の日射は分からないので、日長を合わせた。気温について、盛岡並みということになる。なお、ランプによる光合成は生じない。

問：北海道品種では日長反応はない。「きらら397」は盛岡では、反応したのか？

答+コメント：反応しなかった。出穂がばらけた。北海道の稲品種は、日長をカウントする遺伝子の一つが壊れていて日長に反応しない、と言われている。札幌と盛岡の日長は 20 分しか違わないが、品種の特性は全く違う。本州の品種には日長反応に強弱がある。「ひとめぼれ」よりも日長反応が弱い品種には“耐冷性最強”という普及品種がまだないが、日長反応が全くない北海道の品種には“最強”がある。今後、高温障害対策として「にこまる」の高温耐性を、北国の品種に容易に載せられるかどうか？やることはいろいろある。

問：北緯 0 度から 45 度の水稲栽培地帯の真ん中に石垣島はある。品種によって出穂は異なり、北のものは早くなり、南のものは遅くなった。熊本での試験はどうか？

答：圃場でも TGC(温度勾配チャンパー)でも出穂の早晚は品種によって異なった。単純に温度が高いほど出穂が早まるわけではなさそう。TGC では水ストレス症状やいもち病等がみられ、TGC そのものの影響が無視できないかもしれない。

・ 温室効果ガス緩和策についての議論

問：雑草は残渣に入るのか？LCA 評価の中で、堆肥からなのでメタン放出量は考慮しているのか？

答：雑草は入っていない。堆肥からのメタンと一酸化二窒素は、カウントしていない。

問：畑地だから、単位面積当たりの削減量が違う。不耕起で有機物が多いから、メタンが多い。水田に戻した場合、どうか？

答：不耕起後の水田は検討していない。示したのは、通常の水田のデータである。

問：転作後 10 年後とかに、水田に戻すと、一気にドバツと出るのではないのか？

答：ここでは 3 年のデータである。そのような長期データはあまりない。

問：夏に戻すのと、冬に戻すのとでは、冬の方が

少ないのか？

答：その差はそれほど大きくはないだろう。

問：残渣について、慣行のすき込みと、不耕起のそのまま載せておく状態では、土壌呼吸量の違いはどのくらいあるのか？

答：有機物の分解は測ってみたが、意外と土壌呼吸によって二酸化炭素が出た。すき込むから多いとは限らず、あまり変わらないかもしれない。土壌炭素自体を見ないと何とも言えない。

問：残渣をのせるのを何年も続けるとどうなるのか？

答：森林のリター層のようになるのではないかとカウントしていない。粗大有機物の評価は難しい。今回は短期の評価であり、5 年以上の不耕起で見ていきたい。

コメント：この研究は、森林での炭素削減にも役立つと思う。

コメント：石垣でも、ライシメータで測っている。土壌中の炭素量がかなり多いので、10 年続けても、トレンドは分かるが収支まで評価するのは無理ではないか。

問：土壌由来の二酸化炭素は、元々は光合成固定されたものではないのか。作物が固定した二酸化炭素も評価しなければならないのでは。そうすると、二酸化炭素は、ほぼニュートラルになり、一酸化二窒素とメタンのみになる。

答：土壌での収支を見ている。

問：畑での収支にはならないのか？

問：マメ科の残渣はどうか？

答：入れている。植物の固定量は、土壌として見ている。

問：残渣の収支は、元々大気だからゼロに戻るだけではないか？

問+コメント：土壌で見るのは、土壌肥料分野的な見方ではないか？

答：生態系で見ると全部だが、温暖化緩和策では、土壌だけ見れば緩和効果の議論ができる。土壌として、増えるか、減るか、だけの話になる。

問+コメント：一切、炭素を入れなければ、百年、二百年経つとゼロになる。有機物を施用するからゼロにならない。加えたものによって変わるはずではないか？

答：IPCC では、1990 年とか基準年があって、そこからの短い年数で評価している。

問：わらを入れないと、メタン放出量が少なくなるが、茨城だとその割合は 2 割程度。その年の稲由来の放出量が多いようだ。今回のデータはわら由来が非常に多いが、北海道の特徴ではないか？

答え：本州では、冬季間に稲わらは酸化的分解をする。北海道では、冬季間の地温が低く、その分解が遅いので、次の水稲栽培期間に多くの CH₄ が発生する。北海道ではすき込んだ稲わらの 40～50% が CH₄ になっている。したがって、稲わら持ち出し効果がある。

問い：稲わらを持ち出すと温暖化ガス排出量が減るが、稲わらの収穫作業時の排出量も含まれているのか？

答え：温室効果ガス排出量の評価に、稲わらの収穫作業も入っている。しかし、全体から見ると微々たるものである。

問い：持ち出した後の稲わらはどうしたら良いのか？

答え：ボイラー燃料として燃やすと良いのではないかと思う。ボイラー燃料として利用できれば、化石燃料の消費を減らすことができ、さらなる CO₂ 削減にもつながる。

問い：この計算では持ち出した稲わらの扱いはどうなっているのか？

答え：何に使うかはやっていない。データはないが、ボイラー燃料を含め、いろいろな使いみちがあるはずだ。

コメント：持ち出して燃やす際の問題点は、火力が小さいということ。低温燃焼だとダイオキシン発生の可能性がある。

答え+コメント：水田の場合、持ち出しは難しい。排水効果も期待して、ほとんどすき込む。いかに排水性が良くなるようにすき込むかが検討事項だ。

答え：持ち出せるところは、焼却する。

コメント+問い：バイオ炭を土壌に入れば、長期的に炭素の隔離はできるが、熱源にすれば化石燃料の消費は減らせる。堆肥については、畑地への施用をしてもしなくても、畜産からは必ず糞が出て、最終的に土壌に戻る。畑の部分だけ見れば、炭素の出入りはあるが、地域全体では、効果があるのかどうか、セットにして考えなければならない。

答え：家畜糞尿については、微妙な問題がある。堆肥施用の温暖化緩和効果については、色々な議論がある。バイオ炭は、化石燃料の節減につながるのであれば、そのまま燃料として燃やすのも良い。

コメント：システムの系をどこまで考えるかによって全く変わってくる。海外から輸入している飼料が多い前沢牛は、飼料を自給すると二酸化炭素は減る。しかし、グローバルに見ると、アメリカで牛肉を作って輸入すれば、日本における排出量は最低になる。系の見方が大事だ。

答え：畜産の計算は難しい。家畜糞尿をどう見るか

も、家畜糞堆肥を畑で使う場合の温室効果ガス排出量評価に重要な問題だ。私の研究では、畑作では、収穫まで、あるいはてんさいであれば製糖工場までと区切っている。

問い+コメント：子供のころから、堆肥化や炭は良いと言われているが、現実の農家では、ますます使われていない。経済効果が出ないからだ。労働効果を考えるとペイしない。現実的に経済効果を出すことを考えないと進んでいかない。地球全体で温室効果ガス削減を考えなければならないが、現実には逆の方向に行っている。

答え+コメント：農水省が、温暖化緩和に効くと判断すれば、推進の可能性もある。経済支援の仕組みも考えて欲しいと思う。自分は科学的なデータを取っていき、国に数値を出すところで貢献していきたい。

コメント：物質循環が大事だ。人間からの排せつを含めて、上手に対応出来る仕組みが良い。稲わらも家畜に食べさせるのが良い。地元での排出物をそこで利用するのが最も良い仕組みではないか。

コメント：同感。海外から持ってくると安くて良いが、循環が壊れる。これから資源・エネルギーが高価になってゆけば、コストを下げる対応の中で、結果的に温暖化も抑制されるのではないかと。

・適応策+緩和策およびその両立に関するコメント

問い+コメント：現在の作物で、温度、降水、日射の変化に対する適応技術があると思う。その他として、新しい作物の導入はあるのか？また、降水が増えることでもあり、緩和策の不耕起は、適応策としてのメリットはあるのか？

答え：新しい作物として道南の厚沢部町では焼酎原料用のサツマイモ栽培に取り組んでいる。また、落花生のような本州の作物の試作に取り組む動きもある。地域のシステムを考えていきたい。

答え：経済効果や収量は、クロボク土では変わらないが、減るところもあり、土壌の種類による。その他、気象要因もあり、有効なところを見極めていきたい。

コメント：マメ科カバークロップを前作して、不耕起を導入すると、窒素施肥量が少なくて済む。不耕起で降水の浸透が増え、水利用効率が高くなることが多い。しかし、不耕起特有の被害として、土壌が耕起より硬いので、石垣では台風の強風でトウモロコシの茎が 2 年連続で折れてしまった。耕起では倒れて被害が少なかった。

コメント：同じ技術でも、地域の環境、経済状態によって効用が大きく異なる。気温の高い熱帯では有

機質の分解が早いので、家畜の糞、堆肥は化学肥料のような効力を示し、温帯圏とは違う技術になってしまう。また、不耕起栽培では、ラウンドアップ耐性トウモロコシを組合わせた技術が南米で普及している。しかし、フィリピンでは、農民がラウンドアップを過剰に利用し雑草をことごとくなくしてしまう。アジア人らしい管理である。これによって土壌侵食がかえって大きな問題になっている。温室効果ガスの削減という意味で、人糞尿利用が見落とされている。JIRCAS の石垣にある拠点では、人尿肥料の研究をしている。脱臭等、技術改良の余地はあるが、世界 70 億人の尿に含まれる窒素は、化学肥料の年間生産の 20%に匹敵し、世界の石油消費の 2%を削減する潜在性がある。マメ科リターも気温が高ければ、化学肥料の窒素と同等に使える。こういうことを見直していかなければならない。

・北海道農業に対する総括

コメント：道総研の今回の結果は、2030 年を想定した大きなプロジェクト研究の一部だ。その中には、温暖化、農家減少、規模拡大もある。2010 年の農業センサスでは、道内で 50 ha 以上の農家は増え、50 ha 以下の農家は減っている。やめた農家の農地を引き継いでいる。化石燃料や肥料はどんどん高価になっている。自給率もどうなるか分からない。そういう背景で、近未来の対応を考える必要がある。温室効果ガスの削減も含めて、いろんなことを考える必要がある。省力、省エネとしての不耕起といったパーツもあると思った。

コメント：肥料や燃料の高騰のため、窒素を減らすのはコストカットのメリットがある。1 つの技術でいろんな効果がある。2030 年、2050 年を考えた時に、そういうことが大切ではないか。

コメント：大面積での不耕起もあるかもしれない。試験圃場は小圃場なので、そういう研究は個々の力では難しい。オール北海道の体制作りが必要と痛感する。

コメント：今の北海道品種を、小さい面積で収量最大にするだけでなく、大きな面積での最適化も考えていきたい。

コメント：2030 年にどうなるのか、個々の作物について検討したが、地域の農業をどうするかを考えていく必要がある。作付体系、栽培システムの提案も必要だ。今回は、5 年間のプロジェクト研究の前 2 年の成果だ。残り 3 年でモデル地域について具体的な提言もしていきたい。多面的な検討をしていきたい。

コメント：大変良い研究だった。20 年のタイムス

ンがちょうど良い。中国黒竜江省では、直播ができるかもしれないと、外国も同じように考えている。アクティブに行きましょう。

・農業気象学会 岡田益己会長講評：温暖化フォーラムは昨年、最初は盛岡で、鹿児島は中止になって、北海道が 2 回目。温暖化は大きな話題になっているので、追い風にしなければならない。気象と農業の関係をつないで、稲、畜産、土壌肥料と一緒にやっていくくらいになればと思う。有意義だった。今後は「観察力」が重要だ。昭和 11 年、軽井沢の荻原さんが、温床に落とした種籾を植えたら早く育った。昭和 17 年に体系化したのが戦争の影響で広く普及しなかった。しかしその後、保温折衷苗代として北国に普及した。また、1980 年の冷害年に、「コシヒカリ」の耐冷性遺伝子に気付いた。そこから「ひとめぼれ」「はえぬき」が生まれた。先日の鹿児島大会では、「温故維新」というフォーラムをやった。施設園芸では、最近、省エネが騒がれているが、30 年前、石油ショックのころに出来上がった技術が見直されている。2030 年に向けて、2050 年に向けて、継続してゆくと進歩がある。施設の研究では、継続しなかった自己反省を含めて、温故知新と研究の継続を提起したい。

4. おわりに

このフォーラムで示されるように、北海道においては温暖化研究が大きく進展した。これには二つの大きな背景があると考えている。一つは温暖化研究が国内的に大きく推進される時代背景にあったことである。農研機構は第 2 期中期計画(2006~2010 年)で全国に温暖化研究チームを発足した。同時期に行政的にも農林水産省は政策として温暖化対策を推進する方向を打ち出した(例えば、農林水産省,2008)。さらに大きな流れとして、北海道において G8 洞爺湖サミットが 2008 年に開催され、かつ主要テーマが地球温暖化であったことである。このサミットが大きな契機となり、北海道でも道として、行政的に温暖化対策が強く推進されることにもなった。このような研究組織の変化と行政的な推進による時代背景の中、農研機構でも本フォーラムにおける濱寄氏、永田氏の講演に代表されるような温暖化対応研究の交付金プロジェクト研究がいくつか立ち上がり、また道総研も温暖化研究のプロジェクトが実施されるに至った。古賀氏についてもこれらのプロジェクト研究が実施されている時期に、IPCC 第 4 次報告と予定されている第 5 次報告での温室効果ガス緩和策関係の Coordinating Lead Author (CLA) であるスコット

ランドのアバディーン大学の Professor Peter Smith の下での在外研究を実施し、ここでの成果も今回の講演の骨子の一つとなっている。

また、もう一つの重要な背景としては 2010 年の夏季高温による農業への影響が深刻であったことである(例えば、北海道農政部, 2011; 広田など, 2011)。北海道で高温の年に深刻な不作になったのは北海道開拓以来初めてであり、これまでよく言われていた温度が低い北海道では暖かくなると農業生産には好都合と言った北海道農業に対する単純な温暖化楽観論に対して警鐘が鳴らされる年となった。このことは温暖化適応の重要性を北海道の農業関係者により強く認識させることになった。この 2010 年の経験は、また、これまでのシミュレーションやチャンバー試験等を中心とした影響評価研究から、圃場での実測に基づく直接的な評価を可能とすることになり、温暖化研究の新たな展開を迎えることにもなった。特に、農業気象の専門家がない道総研は、一方で、定期作況データや奨励品種決定調査等に代表される収量・品質の実測データの長期の蓄積がある。これにプロジェクト最終年度の 2010 年に 21 世紀末時の気候温暖化シナリオにも相当する夏季の高温データが加わることで、これまでのデータの蓄積がさらに活かされ、実測をベースとしたデータの外挿ではない評価が少なからず可能となったことも大きかったであろう。これは、北農研の水稲温暖化全国連携試験でも同様なことが言える。また、道総研の温暖化研究の中心的役割を果たした中辻氏と志賀氏は土壤肥料分野の専門家ではあるが、作物モデル研究の経験もあり(例えば、志賀, 2003; 中辻, 2008)、農業気象分野の研究にも明るく、このような研究実績も温暖化影響評価を実施する上で大きな役割を果たしたと思われる。

最後に本報告者の一人であり、本フォーラムの企画立案をした広田は北農研における 3 人の研究に当時のチーム長として関与し、また道総研についてもプロジェクトの立ち上げから途中の研究経過を知る機会もあった。したがって、これらの時代背景と共に本フォーラムの開催と報告書の取りまとめの際に感慨深いものを個人的に感じた次第である。2006 年に北海道の同じ地で農業気象学会生態プロセス研究部会による「地球温暖化の実態とそれが生態系と農業活動に及ぼす影響」が開催された。この報告書の「4. まとめ」でこの時点での提言がまとめられた(小林など, 2007)。本フォーラムの講演・議論を振り返ると 2006 年の提言からの研究の着実な進展・深化を個人的には強く感じる。現在、この研究会から 5 年以上の年月を経て、北海道では農業における温暖化

研究は 2010 年および本フォーラムを契機に現実への対応により踏み込んだ次の段階に入ったのではないかと考える。

引用文献

- Akiyama, H., Yan, X., Yagi, K., 2010: Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: Meta-analysis. *Glob. Change Biol.*, **16**, 1837-1846.
- 広田知良, 古賀伸久, 岩田幸良, 井上 聡, 根本学, 濱寄孝弘, 2011: 2010 年の気象の特徴と農作物への影響要因: 「北海道における 2010 年猛暑による農作物の被害解析報告書」北海道農業研究センター研究資料**69**, 1-13.
http://cryo.naro.affrc.go.jp/kankobutu/kenkyusiryu/69/01_kisyou2010.pdf (アクセス日:2012 年 2 月 4 日)
- 北海道農政部, 2011: 米に関する資料.
http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/nsk/grp/2011komeni_kanssurushiryu.pdf (アクセス日: 2012 年 2 月 4 日).
- 北海道農政部, 2011: 平成 22 年異常高温・多雨等が農畜産物に与えた影響と今後の対策. 平成 23 年 2 月.
http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ns/gjf/H22IJYOU_KOUON.htm (アクセス日: 2012 年 2 月 4 日)
- 北海道立総合研究機構 農業研究本部 中央農業試験場, 2011: 戦略研究「地球温暖化と生産構造の変化に対応できる北海道農林業の構築—気象変動が道内主要作物に及ぼす影響の予測—」成果集.北海道立総合研究機構農業試験場資料. **39**, 1-96.
<http://www.agri.hro.or.jp/center/kankoubutsu/shiryu.htm> (アクセス日: 2012 年 2 月 4 日)
- 小林和彦, 桑形恒男, 広田知良, 近藤純正, 清水庸, 見延庄士郎, 2007: 「地球温暖化の実態とそれが生態系と農業活動に及ぼす影響」に関する研究会に関する報告. 生物と気象, 7: B-1.
<http://www.soc.nii.ac.jp/agrmet/sk/2007/B-1.pdf> (アクセス日: 2012 年 2 月 12 日).
- Koga, N. and Tajima R., 2011: Assessing energy efficiencies and greenhouse gas emissions under bioethanol-oriented paddy rice production in northern Japan. *J. Environ. Manage.*, **92**, 967-973.
- Koga, N., Smith, P., Yeluripati, J. B., Shirato, Y., Kimura, S. D., Nemoto, M., 2011: Estimating net primary production and annual plant carbon inputs, and modelling future changes in soil carbon stocks in arable farmlands of northern Japan. *Agric. Ecosyst. Environ.*, **144**, 51-60.
- 中辻敏朗, 2008: 北海道北部重粘土草地の牧草生産性に対する低水分ストレスの影響評価に関する研

- 究.道立農試研究報告. **119**, 1-53.
<http://www.agri.hro.or.jp/center/kankoubutsu/houkoku/houkoku6.htm> (アクセス日: 2010年2月4日)
- Naser, H. M., Nagata, O., Tamura, S. and Hatano, R., 2007: Methane emissions from five paddy fields with different amount of rice straw application in central Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **53**, 95-101.
- Nemoto, M., Hamasaki, T., Sameshima, R., Kumagai, E., Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A. and Ozawa, K., 2011a: Assessment of paddy rice heading date under projected climate change conditions for Hokkaido region based on the field experiment. *J. Agric. Meteorol.*, **67**, 275-284.
- Nemoto, M., Hamasaki, T., Shimono, H., 2011b: Extraordinary hot summer in Hokkaido decrease rice yield and satisfy growing of cultivar in Tohoku region "Hitomebore". *J. Agric. Meteorol.*, **67**, 269-274.
- 農研機構北海道農業研究センター, 2012: 農業生産からの温室効果ガス発生量の低減方法の開発, 北海道農研プロジェクト研究成果シリーズ No. 7, 1-53.
<http://cryo.naro.affrc.go.jp/project20seika/no.7/index.html> (アクセス日: 2012年4月7日)
- 農林水産省, 2008: 農林水産省地球温暖化対策総合戦略.
http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/s_ondan/ka/senryaku.html (アクセス日: 2012年2月4日)
- Sameshima, R., Hamasaki, T., Nemoto, M., Kumagai, E., Ohno, H., Wakiyama, Y., Maruyama, A. and Ozawa, K., 2011: Experimental open-field day-length-extension method and estimation of the effective light period using solar altitude. *J. Agric. Meteorol.*, **67**, 307-312.
- 志賀弘行, 2003: 作物モデルを活用した作物収量変動評価・予測法. 土肥誌, **74**, 835-838.
- 鶴田治雄, 2000: 地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生境負荷ガスの発生. 土肥誌, **71**, 554-564.
- Yazaki, T., Nagata, O., Sugito, T., Hamasaki, T. and Tsuji, H., 2011: Nitrous oxide emissions from an Andosol upland field cropped to wheat and soybean with different tillage systems and organic matter applications. *J. Agric. Meteorol.*, **67**, 173-208.
- Yokozawa, M., Goto, S., Hayashi, Y. and Seino, H., 2003: Mesh climate data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO₂ concentration. *J. Agric. Meteorol.*, **59**: 117-130.
- Wageningen UR (University & Research centre), 2012: WOFOST (WORLD FOOD STUDIES).
<http://www.wofost.wur.nl/UK/> (アクセス日: 2012年2月4日).