

北海道立総合研究機構農業試験場資料 第39号
Misc. Pub. of Hokkaido Agri. Exp. Stn.
No. 39, p.1-96, October 2011

北海道立総合研究機構農業試験場資料 第39号

Miscellaneous Publication of Hokkaido Research Organization

Agricultural Experiment Stations

No. 39, October 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

Report on Research Program for Evaluating the Impact of Global
Warming on the Changes in Agricultural Productivity in Hokkaido
for the decades 2030s

平成23年10月

北海道立総合研究機構
農業研究本部 中央農業試験場

Hokkaido Research Organization
Agricultural Research Department Central Agricultural Experiment Station
(Naganuma, Hokkaido, Japan 069-1395)

発刊のことば

北海道立総合研究機構農業研究本部では、現在、林業・工業分野を専門とする道総研内の他研究本部と共同で、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（平成21～25年）」を実施している。本研究は、近年の地球温暖化による気候変動や農林業従事者の減少に伴う生産基盤の脆弱化に対応するため、農作物の気象反応予測と温暖化適応策の提示、炭素固定能の高い木材生産・利用システムの構築、道内農林バイオマス資源の特性把握と環境・経済性評価を行い、持続的な北海道農林業の発展に寄与しようとするものである。

本資料は、この戦略研究のうち、平成21～22年度を研究期間とする小課題「気候変動が道内主要作物に及ぼす影響の予測」の成果をとりまとめたものである。本成果は「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）」として、平成22年度北海道農業試験会議（成績会議）において指導参考事項に採択され、普及に移されている。資料には、この指導参考事項の内容に新たな解析も加え、小課題全体の成果を記載した。

本資料が、今後の温暖化対応研究の新展開と、各種適応技術導入・実践の一助となれば幸いである。

平成23年10月

北海道立総合研究機構 農業研究本部
中央農業試験場 場長 竹田 芳彦

研究の全体構成・実施体制

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（平成 21～25 年）」は、持続的な北海道農林業の維持・発展に資するため、農業・林業・工業分野を専門とする道総研の各試験研究機関が密接に連携しながら、下記の課題構成で実施中である（カッコ内は担当機関）。

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」

1. 気象変動が道内主要作物に及ぼす影響の予測（農業試験場，畜産試験場）
2. 炭素固定能の高い木材生産システムの確立
 - 1) 炭素固定能の高い品種の選抜と増殖技術の改善
（林業試験場，林産試験場）
 - 2) 炭素固定向上を図る育林システムの確立
（林業試験場，林産試験場，北海道大学）
3. 農林バイオマス資源の特性評価と有効利用策の検討
 - 1) 新規資源作物の特性評価と栽培法
（農業試験場，畜産試験場，雪印種苗株式会社）
 - 2) 林地残材の経済的集荷可能量評価
（林業試験場，林産試験場，株式会社イワクラ）
 - 3) 各種バイオマスのエタノール発酵特性の検討（工業試験場）
 - 4) バイオマス利用における環境・経済性評価
（農業試験場，林業試験場，林産試験場）
 - 5) 農林バイオマス資源の有効利用策の検討
（同上）

本資料は、このうち平成 21～22 年度を研究期間とする小課題 1. 「気象変動が道内主要作物に及ぼす影響の予測」の研究成果をとりまとめたものである。

本小課題の実施にあたっては、中央農試，十勝農試，畜試の各実務担当者による日頃の意見交換に加え、毎年 2～3 回、課題関係者全員による設計・成績検討会などを開催し、研究の進捗状況や成果の見通し等について論議を重ねてきた。

また、下記 2 名の方々には、戦略研究の専門委員として、研究の遂行に当たって適切なご指導、ご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

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 研究支援センター長

山縣 真人 氏

独立行政法人 森林総合研究所 北海道支所 地域研究監 佐々木 尚三 氏

研究成果の概要

1. 目的

地球温暖化が道内の水稻、畑作物および飼料作物の生育や収量、品質等に及ぼす影響を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提示する。

2. 研究方法

1) 温暖化気候データの整備：既往の温暖化気候予測データ（Yokozawa et al., 2003）を活用し、2030年代の気象要素データを整備。

2) 水稻・畑作物・飼料作物に対する影響予測

- ・ねらい：地球温暖化が道内の水稻、畑作物（小麦，てんさい，ばれいしょ，大豆，小豆），飼料作物（牧草，飼料用とうもろこし）の生育・収量等に及ぼす影響を予測する。
- ・方法：定期作況，奨励品種決定現地調査などのデータ等を用いて，生育と気象要素との関係をモデル化し，1)の温暖化気候データをあてはめて2030年代の状況を予測。

3. 成果の概要

1) 2030年代の気候データ（気候モデル：CCSR/NIES）によれば，月平均気温は現在（1971～2000年を統計期間とする平年値）から1.3～2.9℃（平均2.0℃）上昇。5～9月は平均1.8℃昇温し，日射量は現在の0.85倍に減少。年降水量は現在の1.2倍で，6，7月に多雨傾向となる。これに基づき，2030年代の各作物の状況を予測した。

2) 水稻（表1）：安全出穂期間が大幅に拡大し遅延型冷害の発生は減少するが，冷害危険期の昇温程度は小さく障害型冷害のリスクは依然として大きい。登熟環境からみた収量性は現在並かやや増加する。登熟期間の昇温で産米のアミロース含有率が低下し良食味化が期待される。タンパク質含有率はわずかに低下する。

表1 温暖化による水稻の安全出穂期間，冷害危険期の平均気温，食味関連項目の変化（きらら397，成苗）

地点	年代	安全出穂期間 ¹⁾	Δ同左 ²⁾	冷害危険期の平均気温 ³⁾ (°C)	Δ同左 ²⁾	タンパク ⁴⁾ (%)	Δ同左 ²⁾	アミロース ⁵⁾ (%)	Δ同左 ²⁾
旭川市	現在	7/23～8/6(14日)	+13	20.6	+0.2	7.5	-0.1	21.0	-0.6
	2030年代	7/15～8/11(27日)		20.8		7.4		20.4	
岩見沢市	現在	7/27～8/12(16日)	+20	20.5	+0.6	7.5	-0.1	20.9	-0.9
	2030年代	7/16～8/21(36日)		21.1		7.4		20.0	
北斗市	現在	7/30～8/17(18日)	+25	20.5	+0.2	7.4	±0	20.7	-1.1
	2030年代	7/18～8/30(43日)		20.7		7.4		19.6	

¹⁾ 早限出穂期～晩限出穂期でカッコ内はその日数。早限出穂期は出穂前24日以降30日間の平均気温が20℃に達する日。出穂晩限期は出穂後40日間の日平均気温積算値が750℃となる日。

²⁾ 左の項目の2030年代と現在の差。プラスは現在よりも増加，マイナスは減少。

³⁾ 現在および2030年代の気象はそれぞれ地点近傍アメダス平年値およびCCSR/NIES。旭川市についてはデータがなかったので比布町のデータで代用。

⁴⁾ 精米タンパク質含有率 = $0.0000425(x-849)^2 + 7.4$ (丹野, 2010)により推定。x: 出穂後40日間の積算日平均気温(°C)。

⁵⁾ 精米アミロース含有率 = $-0.0137x + 31.776$ (丹野, 2010)により推定。xは同上。

3) 秋まき小麦（図1）：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～成熟期の降水量の増大により，水分ストレスが緩和される一方で倒伏や

穂発芽の増加が懸念される。播種適期は6～10日遅くなる。

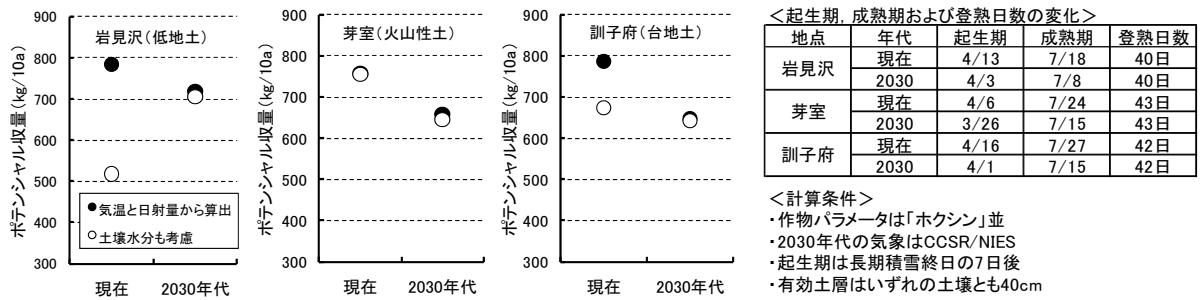


図1 作物モデル WOFOST による 2030 年代の秋まき小麦の生育予測（対象品種「ホクシン」）

4) てんさい (図2) : 生育期間が現在並であれば、気温の上昇により収量 (根重) は増大する (現在平均 56 t/ha→62 t/ha) が、根中糖分は低下する (同 17%→16%)。高温病害の初発が早まり発生量も多くなる。

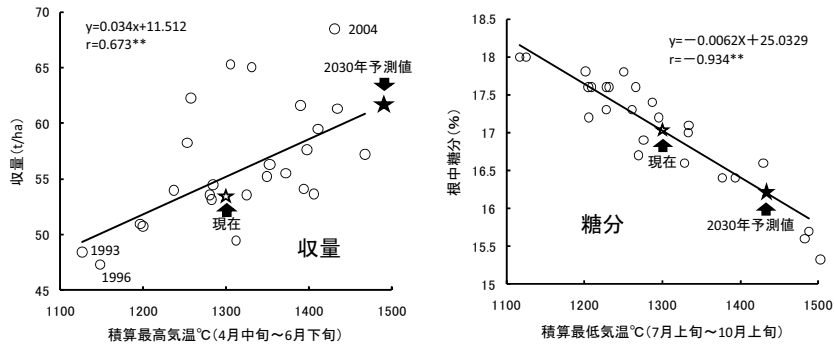


図2 気温とてんさい根重、根中糖分との関係 (全道平均)
 気温は各地区を代表するアメダスデータを作付面積で加重平均して算出。収量および糖分は全道平均値。図中の矢印は現在と 2030 年代 (CCSR/NIES) の位置付け。

5) ばれいしょ : 収量は現在より約 15%減少し、減収要因は気温の上昇よりも日射量の減少にある。気温上昇に伴って植付期を前進させても収量の変化は小さいが、紅丸相当の熟期でも収穫期は9月中旬まで早まる。

6) 大豆 (図3) : 播種期を現在並とすると開花期、成熟期は6～9日程度早まる。「道産豆類地帯別栽培指針」での地帯区分は、現在よりも熟期の遅い品種が栽培可能となる方向に1～2ランクシフトし、安定栽培地域が拡大する。熟期が「やや早」の「ユキホマレ」の収量は現在の6～8月平均気温が18℃以下の地域では増収するが、それ以上では減収するため、気温上昇により増収が期待できる中生品種の選定が必要となる。

7) 小豆 : 開花期と成熟期は7～10日早まり、栽培可能地域が根室管内にまで拡大する。主産地の十勝・オホーツクで増収、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。

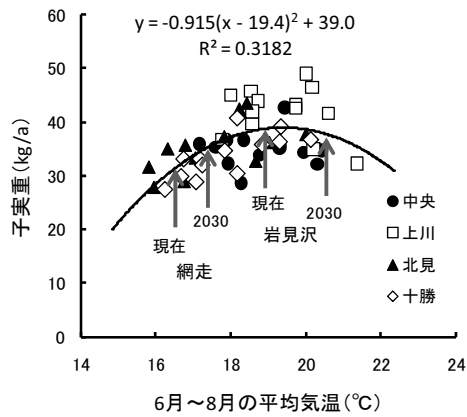


図3 大豆「ユキホマレ」子実重と6～8月の日平均気温との関係
 中央、上川、北見、十勝農試における1998～2010年の奨励品種決定基本調査データによる。図中の矢印は網走および岩見沢の現在と2030年代(CCSR/NIES)の位置付け。

8) 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。年間収量は気温上昇にも関わらず日射量の減少で現在の8～9割にとどまり、気温の影響のみを考慮すると現在と同等かわずかに増加する。

9) 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。

10) 技術的対応方向としては、品種開発・導入における各種病害抵抗性および耐障害性の強化が望まれ、高温・湿潤環境への対応の一方で、当面は従来通り耐冷性の強化も必要である。また、作期の拡大・移動・短縮等に応じた栽培技術の見直し（播種・移植適期・収穫期の変更，施肥体系の再構築，栽培地帯区分の変更），病虫害発生の変化への対応，湿害対策などを図る必要がある。

4. 成果の活用面と留意点

- (1) 道内農業分野における温暖化対応等に活用する。
- (2) 2030年代の気温の年次変動幅は現在並と仮定した。
- (3) 作物生育に対する二酸化炭素濃度上昇の直接的な影響は考慮していない。

5. 本資料の掲載内容

本資料のI～VII章にはこれらの成果内容を詳述した。

編集委員長

中央農業試験場 農業環境部長 志賀弘行

編集幹事

中央農業試験場 農業環境部 主査（土壌生態）中辻敏朗

執筆担当者（所属は課題担当時）

中央農業試験場 農業環境部 主査（土壌生態）中辻敏朗

中央農業試験場 生産研究部 研究主幹 丹野久

十勝農業試験場 研究部 主査（大豆） 三好智明

十勝農業試験場 研究部 主査（小豆菜豆） 佐藤仁

十勝農業試験場 研究部 主査（栽培システム） 梶山努

十勝農業試験場 研究部 主査（生産環境） 谷藤健

十勝農業試験場 研究部 研究主査 松永浩

畜産試験場 基盤研究部 主査（草地飼料） 寺見裕

北海道立総合研究機構農業試験場資料 第39号

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

志賀弘行・中辻敏朗 編

目 次

I. 背景と目的	1
II. 温暖化気候データの整備	2
III. 水稻に対する影響	7
IV. 畑作物に対する影響	
1. 秋まき小麦	23
2. てんさい	32
3. ばれいしょ	40
4. 大豆	46
5. 小豆	55
V. 飼料作物に対する影響	
1. 牧草	64
2. 飼料用とうもろこし	71
VI. 2030年代に向けた対応方向	75
VII. 要約	78
VIII. 参考資料	79
Summary	94

I. 背景と目的

2007年に公表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第4次報告書は、地球温暖化は確実に起こっているとし、その原因は人間活動による温室効果ガスの排出増加にあると断定している。これを裏付けるように、我が国の年平均気温は過去100年で1.10℃上昇し、特に1990年以降、高温となる年が頻出している。このような高温傾向が農業生産に及ぼす影響を全国的に調査した報告では、水稻の高温障害、果樹果実の着色不良、各種作物に対する病害虫の多発などが各地で認められ、このまま温暖化が進行すると、我が国の農業に深刻な影響を及ぼすことが危惧されている（農林水産省、2007）。

一方、途上国における人口増加や所得水準向上に伴う食料需要の増加、バイオ燃料向け穀物生産の増大などを背景とする、世界的な食料需要の逼迫は深刻な問題となっている。これに地球温暖化による気象災害の激化や水資源の制約などが加わった場合、6割の食料を輸入に頼るわが国は、食料安全保障の面で極めて脆弱な状況に陥る可能性が高い。

このような情勢の下、我が国の食料供給を支える本道農業の役割は今後その重要性を一層増すと見込まれるが、これには地球温暖化に対する適切な対応策を講じることが前提となる。しかし、温暖化が道内農業に及ぼす具体的な影響については、これまでほとんど検討されていない。特に、各種基幹作物の生産量や品質の変化、栽培適地の移動（または拡大・縮小）などは、北海道全体または地域の営農に多大な影響を及ぼすと予想される。そのため、20～30年後の近未来に予測される状況を、農業者だけでなく農業関連産業に対しても早急に示し、対応策確立に向けた動きを加速させる必要がある。

以上の背景から、本研究では、地球温暖化が本道の基幹作物である水稻、畑作物および飼料作物の生育や収量、品質などの変化に及ぼす影響を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提示する。

なお、本研究では、地球温暖化を気温や降水量などの気象要素の変化と見なし、作物生育に対する二酸化炭素濃度上昇の直接的な影響は考慮していない。

II. 温暖化気候データの整備

本章では、既往の温暖化気候予測データを活用し、Ⅲ～Ⅴ章での各種作物への影響予測に用いる将来の各種気象要素データを整備する。また、栽培適地区分や播種・移植適期等の判断基準となる晩霜日、初霜日、長期積雪終日、将来どの程度変化するかを推定する。

1. 各種気象要素データの整備

1) 目的

既往の温暖化気候予測データを活用し、Ⅲ～Ⅴ章での各種作物への影響予測に用いる将来の各種気象要素データを整備する。

2) 方法

(1) 用いた温暖化気候データ

本成績で用いた既往の温暖化気候データは、Yokozawa et al.¹⁾による「気候変化メッシュデータ日本 (Mesh Climate Change Data of Japan)」である。これは、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) が策定した温室効果ガス排出シナリオ IS92a に基づき、4つの全球気候モデル (CCSR/NIES, CGCM1, ECHAM4/OPYC3, CSIRO-Mk2) で計算した世界の気候予測値を、日本付近の2次メッシュ (一辺約10 km 四方) に展開したものである。温室効果ガス排出シナリオ IS92a は、IPCC が1992年に発表したもので、大気中の二酸化炭素濃度は1990年以降、年率1%複利で増加すると見積もられている²⁾。

本データに収められている気象要素は、平均気温、最低気温、最高気温、降水量、日射量で、2000年から2099年まで10年ごとに、10年間の月別平均値 (降水量は月別積算値) が示されている。

(2) 現在の気候データ

対照となる現在の気候データには、「メッシュ気候値2000³⁾」を用いた。これは気象官署とアメダスによる1971～2000年 (30年間) の観測値に基づく月別平年値を、地形因子 (緯度、経度、標高、勾配) との統計的關係に基づいて3次メッシュ (一辺約1 km 四方) 化したもので、対象となる気象要素は「気候変化メッシュデータ日本」と同様である。気温の推定には、都市化の影響も因子 (人工被覆率) として考慮されている。

ここでは、上述の「気候変化メッシュデータ日本」と比較するため、2次メッシュに含まれる3次メッシュデータをすべて平均し、2次メッシュ化して利用した。

(3) 整備・検討方法

本成績では、現実味のある近未来として2030年代 (2030～2039年) を対象とし、上述の4つのモデルによる予測値のなかから、IPCC第4次報告書や気象庁による

地球温暖化情報第6巻⁴⁾での将来予測に比較的近い、CCSR/NIES (以下、CCSRと略記) およびCGCM1による予測値を用いることとした。そして、これら2つのモデルによる全メッシュデータから道内に該当する935メッシュデータを抽出した後、現在の値である2次メッシュ化した「メッシュ気候値2000」と比較し、CCSRおよびCGCM1による予測値の特徴を検討した。なお、2030年代を対象としたのは、2030年程度までの大気中の二酸化炭素濃度は排出シナリオにほとんど依存しない⁵⁾こと、また農林水産省による温暖化適応策工程表⁶⁾においては2030年を各種取り組みの目標基準年としていることなどに基づく。

一方、Ⅲ～Ⅴ章での各種作物への影響予測においては、月別の気象データだけでなく、旬別値と日別値が必要な場合がある。そこで、「北海道施肥ガイド2010」の地帯区分を考慮して選定した27市町村 (本章第2節の対象地点を参照) については、対象市町村の重心直近のメッシュデータを当該市町村のデータとし、これらを旬別および日別値に変換した。すなわち、旬別値については月別値を中旬の、また日別値については月別値を当該月の15日の値とし、これらの月別値を線形補間して、現在と2030年代の双方について、旬または日別値を推定した。

なお、CCSR、CGCM1ともに各気象要素の変動幅については示していないので、次章以降で変動幅の考慮が必要な場合は、現在の年次変動幅 (標準偏差等) をそのまま2030年代に適用することとする。

3) 結果

(1) CCSRによる予測値の特徴

CCSRによる月別気象要素予測値を道内935メッシュの平均値として図Ⅱ-1に示した。

月平均気温は現在よりも1.3～2.9℃上昇する (年平均2.0℃) が、昇温程度は秋・冬季の10～4月が1.5～2.9℃ (平均2.1℃) なのに対し、作物の主要生育期間である5～9月は1.3～2.7℃ (平均1.8℃) とやや小さい傾向にある。

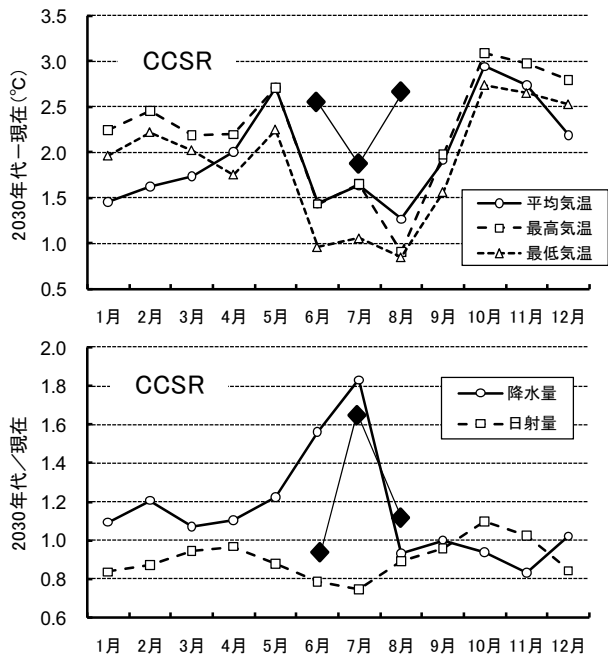
降水量は現在比0.8～1.8倍 (年平均1.2倍) と変化幅が大きく、特に6、7月にそれぞれ現在比1.6、1.8倍の多雨が予測されている。

日射量は年間を通して現在比0.7～1.1倍であるが、5～9月は平均0.9倍で、作物の主要生育期間の日射量は現在をやや下回ると見込まれている。

各気象要素の道内分布を付図Ⅱ-1～3に示した。5～9月の日射量は東部の方が現在に対する減少比がやや大きい傾向にある他は、際だった地域的特徴は認められない。

これらの月平均気温および降水量予測値と、6～8月にかけて記録的な高温、多雨となった2010年における実測

値(道内7ヶ所の气象台観測値の平均)とを比較すると、2010年の気温は予測値を0.2~1.4℃上回り、7月および8月の降水量は予測値に近かった。このように、2030年代予測値は、すでに現在の気象変動の範囲内にあり、未知の領域ではない。



図Ⅱ-1 CCSRによる2030年代の気象要素予測値と現在との比較

道内935メッシュの平均値。ただし、図中のひし形(◆)は2010年6~8月の月平均気温の年平均差(上), および同降水量の年平均比(下)で、札幌、旭川、稚内、網走、釧路、室蘭、函館の平均値。

(2) CGCM1による予測値の特徴

CGCM1による月別気象要素予測値を道内935メッシュの平均値として図Ⅱ-2に示した。

月平均気温は現在よりも1.6~2.8℃上昇する(年平均2.2℃)。昇温程度は秋・冬季の10~4月が1.6~2.8℃(平均2.2℃), 5~9月が2.0~2.6℃(平均2.3℃)と季節間差は小さく、CCSRによる予測値よりも6~8月が0.7~0.8℃高く見積もられている。

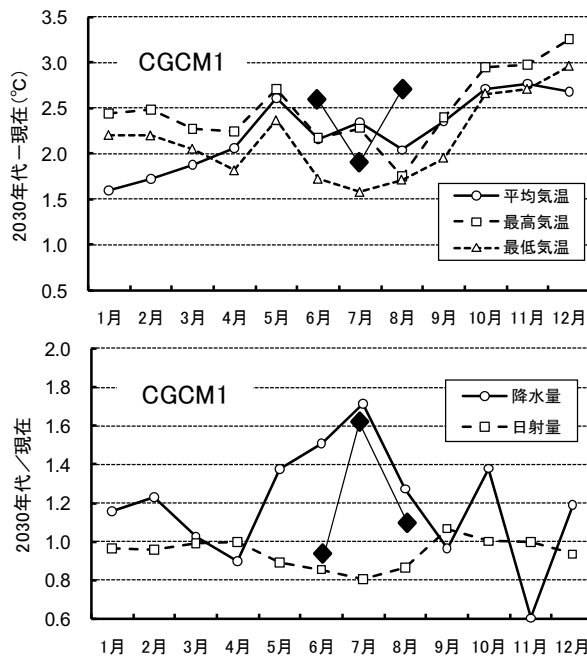
降水量は現在比0.6~1.7倍(平均1.2倍)と変化幅が大きく、特に5, 6, 7および10月に現在比1.4~1.7倍の降水量が予測されており、これはCCSRと類似している。

日射量はCCSRによる予測値と同様に、年間を通して現在比0.8~1.1倍であるが、5~8月は現在をやや下回る(0.8~0.9倍)と見込まれている。

各気象要素の道内分布(付図Ⅱ-4~6)をみると、4~8月の昇温程度は東部がやや大きい他は、特筆すべき

地域の特徴は認められない。

CCSRの場合と同様に、これらの月平均気温および降水量予測値と2010年6~8月の実測値とを比較すると、7月の気温は予測値よりも-0.5℃低かったが、6および8月はそれぞれ0.4, 0.7℃高く、また、7, 8月の降水量は予測値に極めて近かった。CGCM1による予測値も将来予測として十分に現実味があると判断される。



図Ⅱ-2 CGCM1による2030年代の気象要素予測値と現在との比較

道内935メッシュの平均値。ただし、図中のひし形(◆)は2010年6~8月の月平均気温の年平均差(上), および同降水量の年平均比(下)で、札幌、旭川、稚内、網走、釧路、室蘭、函館の平均値。

4) 既往の予測値との比較

以上の予測値を「日本の気候変動とその影響⁵⁾」における予測と比較する。

本報告では、IPCCのSRESA2, A1BおよびB1シナリオ⁷⁾に基づき、21世紀末(2090~2099年)の日本の気象を以下のように予測している(いずれも1980~1999年を基準として)。①年平均気温は2.1~4.0℃上昇するが、2030年まではシナリオに依らず約1.0℃上昇(10年あたり約0.2℃上昇)、②昇温幅は夏季よりも冬季に大きく、地域的には高緯度で大きい、③降水量はいずれのシナリオでも年平均5%程度増加し、100mm以上の大雨の日数が増加、④北海道の降雪量は増加。

本報告の予測年代が今世紀末なので、CCSRおよびCGCM1と直接的な比較は困難であるが、少なくとも2030年代の年平均気温については、CCSRおよびCGCM1による

予測値の方が1.0～1.2℃高い。また、降水量や降雪量においてもCCSRおよびCGCM1の方がやや過大予測とみられる。

2. 温暖化に伴う晩霜日、初霜日および長期積雪終日の変化

1) 目的

前節で整備した2030年代の気象データを活用し、作物の栽培適地区分や播種・移植適期等の判断基準として重要な、晩霜日、初霜日、長期積雪終日(消雪日)が温暖化によりどの程度変化するかを明らかにする。

2) 方法

(1) 対象地点

「北海道施肥ガイド2010」における地帯区分を考慮し、以下の27市町村を対象とした。札幌市、北斗市、八雲町、江差町、倶知安町、島牧村、岩見沢市、滝川市、旭川市、富良野市、名寄市、留萌市、遠別町、稚内市、枝幸町、紋別市、網走市、訓子府町、壮瞥町、苫小牧市、浦河町、平取町、大樹町、芽室町、上士幌町、釧路市、中標津町

(2) 晩霜日と初霜日の推定

一般に、晩霜日、初霜日は平均気温や最低気温と強く関連することが知られている。そこで、道内の気象官署14箇所(札幌、倶知安、岩見沢、旭川、帯広、函館、江差、留萌、稚内、紋別、網走、苫小牧、浦河、釧路)における晩霜、初霜日の平年起日と平均気温および最低気温平年値との関係(付表Ⅱ-1)に基づき、晩霜日および初霜日を、内陸部と沿岸部に分けて、以下のように最低気温から推定することとした。

晩霜日：最低気温が、内陸部では5.1℃以下、沿岸部では4.1℃以下となる日

初霜日：最低気温が、内陸部では5.5℃以下、沿岸部では4.5℃以下となる日

(3) 長期積雪終日の判定

長期積雪の終日を気象要素から推定するため、道内の気象官署13箇所(札幌、倶知安、岩見沢、旭川、帯広、函館、江差、留萌、稚内、紋別、網走、浦河、釧路)における長期積雪終日の平年起日を目的変数、12～2月の降水量平年値および1～3月の平均気温平年値を説明変数とする重回帰分析(ステップワイズ法)を行い、以下の関係式($R^2 = 0.820$)を得た。本式による推定値と観測値とのRMSエラーは6日であり、本式で長期積雪終日をおおむね推定できると判断した(付図Ⅱ-7)。

長期積雪終日(3月1日から数えた日数) = $0.0803 \times$
(12～2月の積算降水量, mm) $- 0.245 \times$ (3月の積算平均気温, °C) $+ 0.585$ (式1)

(4) 供試気象データ

現在の気象データには、対象地点近傍の気象官署またはアメダスの平年値を用いた。

2030年代の気象データには、先に整備したCCSRおよびCGCM1による予測値(月別値、日別値)を利用した。ただし、これらは約10km四方を平均化した面データであり、気象官署やアメダスのような点データとは空間スケールが異なるので直接比較ができない。そこで、各市町村の重心直近のメッシュについて、CCSRまたはCGCM1による2030年代予測値と現在の「メッシュ気候値2000」との差(降水量の場合は比)を求めた後、これを各市町村の気象官署またはアメダスデータに加算し(比の場合は乗じ)、当該地点の2030年代の値として用いた。

3) 結果

(1) 晩霜日、初霜日、無霜期間の変化

温暖化に伴う晩霜日、初霜日、無霜期間の変化を図Ⅱ-3-(a)～(c)に示した。

2030年代の晩霜日は、CCSRおよびCGCM1のいずれの場合でも、すべての地点で現在よりも4～18日(平均値：全道13日、内陸部12日、沿岸部14日)ほど早まると推定され、その程度に地域的な偏りは認められなかった(図Ⅱ-3-a)。

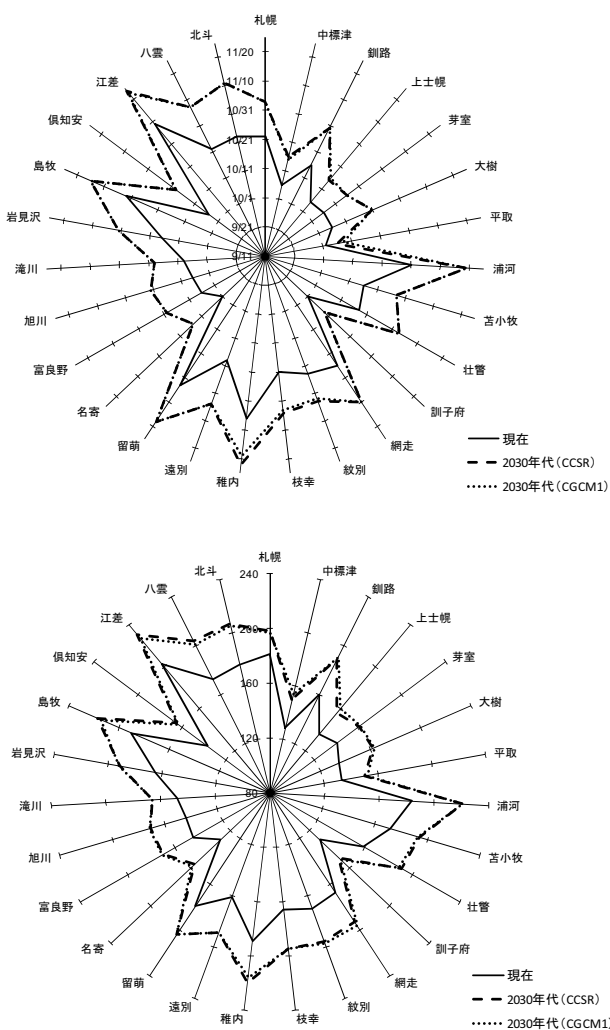
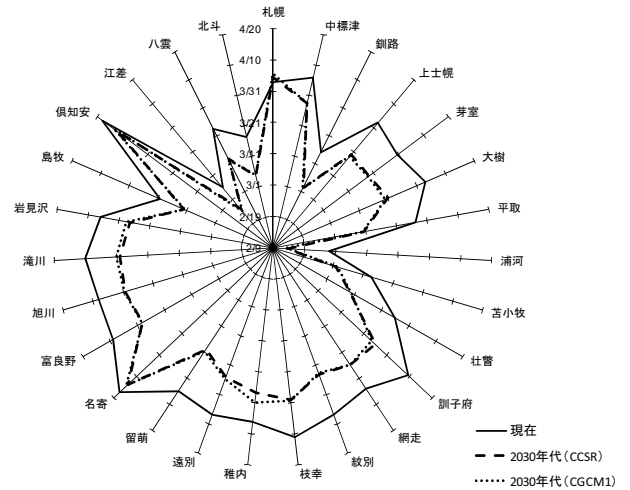
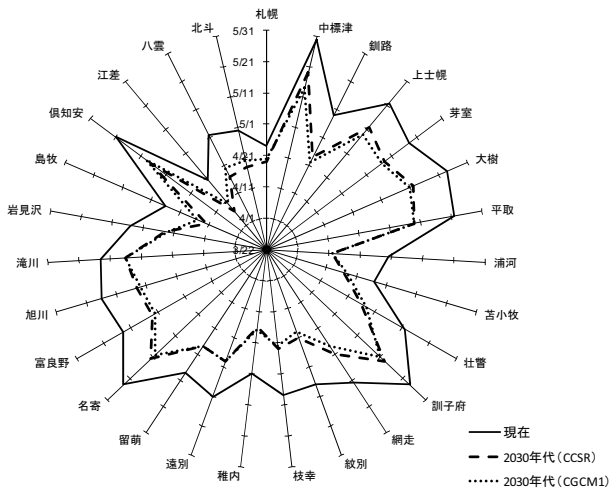
一方、2030年代の初霜日は、CCSRおよびCGCM1のいずれの場合でも、すべての地点で4～19日(平均値：全道13日、内陸部12日、沿岸部15日)遅くなり、沿岸部の方が内陸部よりも遅延程度はわずかに大きかった(図Ⅱ-3-b)。

このような晩霜日、初霜日の変化により、2030年代の無霜期間は現在よりも16～37日ほど長くなり、現在の129～203日(平均値：全道159日、内陸部143日、沿岸部175日)から149～231日(平均値：全道185日、内陸部166日、沿岸部204日)にまで増大すると推定された(図Ⅱ-3-c)。

(2) 長期積雪終日の変化

温暖化に伴う長期積雪終日の変化を図Ⅱ-4に示した。

2030年代の長期積雪終日は、札幌を除くすべての地点で、現在よりも3～17日(全道平均で11日)ほど早まり、最も早い浦河で現在の2月27日から2月13日へ、また最も遅い倶知安でも4月18日から4月12日にまで早まると推定された。2030年代の1～3月の降水量は概して現在よりも多く見積もられているにもかかわらず長期積雪終日が全般的に早まるのは、3月の気温上昇の影響が融雪に強く寄与しているためと推察される。



図Ⅱ-3 温暖化に伴う道内各地の(a)晩霜日, (b)初霜日および(c)無霜期間の変化

(a), (b)の軸の単位は月/日, (c)の軸の単位は日。晩霜日は最低気温が内陸部では5.1℃以下, 沿岸部では4.1℃以下となる日, 初霜日は最低気温が内陸部では5.5℃以下, 沿岸部では4.5℃以下となる日とした。

図Ⅱ-4 温暖化に伴う道内各地の長期積雪終日の変化軸の単位は月/日。

3. 要約

1) 既往の温暖化気候予測データを活用して, 各種作物への影響予測に用いる2030年代の各種気象要素予測値を2セット(CCSRおよびCGCM1)整備するとともに, 栽培適地区分や播種・移植適期等の判断基準となる晩霜日, 初霜日, 長期積雪終日の変化を推定した。その全道的な傾向は以下の通りである。

2) CCSRによる予測値: 月平均気温は現在よりも年平均で2.0℃上昇し, 昇温程度は10~4月が平均2.1℃, 5~9月は平均1.8℃である。年間降水量は現在の1.2倍で, 6および7月に多雨傾向にある。5~9月の日射量は現在の0.85倍と少ない。

3) CGCM1による予測値: 月平均気温は現在よりも年平均で2.2℃上昇する。昇温程度の季節間差は小さく, CCSRによる予測値よりも6~8月が0.7~0.8℃高い。年間降水量は現在の1.2倍で月変動はCCSRと類似している。日射量はCCSRと同様である。

4) 2030年代の晩霜日は, 現在よりも4~18日(平均値: 全道13日, 内陸部12日, 沿岸部14日)早まる。初霜日は4~19日(平均値: 全道13日, 内陸部12日, 沿岸部15日)遅れる。その結果, 無霜期間は現在よりも16~37日長くなる。

5) 2030年代の長期積雪終日は, 多くの地域で現在よりも3~17日(全道平均で11日)早まる。

4. 引用文献

1) Yokozawa, M., Goto S., Hayashi Y. and Seino, H. "Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing

- atmospheric CO₂ concentration". J. Agric. Meteorol., 59, 117-130 (2003) .
- 2) IPCC. "Climate change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-technical Analyses". Watson, R.T., Zinyowera, M.C. and Moss, R.H. ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1996. 878p.
- 3) 気象庁." メッシュ気候値2000 解説". 2002.
http://data.sokki.jmbc.or.jp/cdrom/mesh_climatic_data/documents/kaisetsu_pdf/kaisetsu_.pdf (2011 年 5 月)
- 4) 気象庁." 地球温暖化予測情報第 6 巻". 2005.
<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/GWP/Vol6/index.html> (2011 年 5 月)
- 5) 文部科学省・気象庁・環境省." 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」". 2009.
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep091009/full.pdf> (2011 年 5 月)
- 6) 農林水産省." 品目別地球温暖化適応策工程表". 2007.
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/pdf/ondanka_tekiou_koutei.pdf (2011 年 5 月)
- 7) IPCC. "IPCC Special Report on Emissions Scenarios". 2000.
<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf> (2011 年 5 月)

(中辻 敏朗)

Ⅲ. 水稻に対する影響

1. 目的

地球温暖化が水稻の生育・収量、品質や冷害発生リスクなどに及ぼす影響を予測する。

2. 方法

1) 気象要因と生育・収量等の関係解析

中央農試（岩見沢市）、上川農試（旭川市、比布町）、道南農試（北斗市）における1985～2008年の水稻奨励品種決定基本調査（「きらら397」）での生育、収量、収量構成要素と同年次5～9月の気象データ（平均気温、最高気温、最低気温、日照時間）との関係を解析した。気象データには対象地点最寄りのアメダスデータを利用した。

2) 温暖化気候データによる生育・収量等の予測

(1) 移植日と出穂期の変化

水稻の移植日や出穂期は気温の影響を受けて変動することから、温暖化に伴うこれらの変化を検討する。

①対象地点

水稻優良品種地帯別作付指標における地帯区分(1～18)を考慮し、各地帯の代表地点として以下の18市町村を対象とした。江差町、北斗市、ニセコ町、共和町、伊達市、厚真町、恵庭市、長沼町、新篠津村、岩見沢市、深川市、雨竜町、小平町、士別市（士別）、旭川市、中富良野町、名寄市（風連）、北見市。

②対象品種

「きらら397」（中生品種、穂ばらみ期耐冷性「やや強」）。苗の種類は中苗と成苗。

③限界移植日、早限出穂期、晩限出穂期の推定

これらについては現行の作付指標策定時等に用いられている以下の方法（図Ⅲ-1）で推定した。

限界移植日：移植以降5日間の日最高最低平均気温が、中苗マットの場合は12.0℃、成苗ポットの場合は11.5℃となる日。

早限出穂期：出穂前24日以降30日間の日最高最低平均気温の平均値が20℃に達する日。これは、穂ばらみ期耐冷性やや強の品種（例えば「きらら397」）で稔実歩合を80%確保するのに必要な気温を得る初日となる。

晩限出穂期：出穂後40日間の日最高最低平均気温の積算値で750℃以上が確保できる日。これは千粒重が平均値より4分値偏差小さくなる時期で、軽い登熟不良を想定している。

安全出穂期間：両限界出穂期（早限出穂期と晩限

出穂期）の間の期間。

④出穂期の推定

堀江・中川（1990）に従い、DVR法を用いて気温から出穂期を推定した。DVR法では水稻の生育期を出芽時に0、幼穂形成期に1、出穂期に2の値をとるような発育指数DVIで表し、これを以下の1日当たり発育速度DVRの積算値として表現する。

$$DVI = \sum DVR$$

$$DVR = 1 / (1 + \exp(-A(T - Th))) / G$$

ここで、T：日平均気温、A、Th、Gは品種固有のパラメータで、ここでは「きらら397」についての既報値（表Ⅲ-1）を用いた。また、計算開始日となる移植日は、現在および2030年代とも一律に5月25日とした。

表Ⅲ-1 「きらら397」の発育速度パラメータ

パラメータ	移植～ 幼穂形成期	幼穂形成期 ～出穂期
A	0.2861	0.2983
Th	17.07	15.85
G	28.95	20.93
中苗移植時DVI	0.3258	
成苗移植時DVI	0.4344	

中央農試・上川農試（1997）による。

⑤気候データ

表Ⅲ-2 北海道および東北北部地域における現在と2030年代の5～9月の日平均積算気温

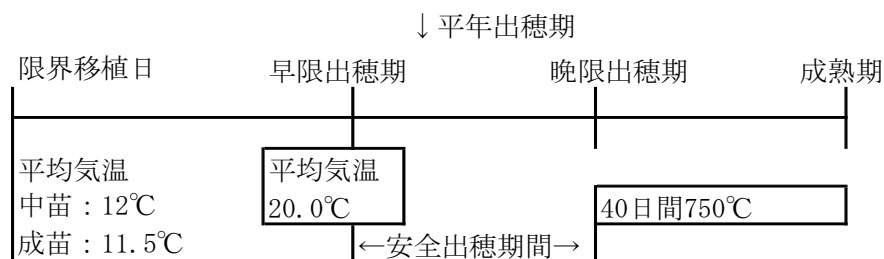
県道 名	市町名	気象 種別	5～9月 日平均積算 気温（℃）
北海道	旭川市	現在	2512
北海道	旭川市	CCSR	2695
北海道	旭川市	CGCM1	2784
北海道	岩見沢市	現在	2542
北海道	岩見沢市	CCSR	2761
北海道	岩見沢市	CGCM1	2838
北海道	江差町	現在	2654
北海道	江差町	CCSR	2869
北海道	江差町	CGCM1	2891
青森	十和田市	現在	2722
青森	黒石市	現在	2850
岩手	雫石町	現在	2807
岩手	北上市	現在	2983
秋田	大館市	現在	2901

北海道はアメダスメッシュ、東北地域はアメダスポイントデータによる。

現在の気象データには約1km四方を平均化した3次メッシュ化されたアメダス平年値を、2030年代の気象データにはII章で整備したCCSRおよびCGCM1による予測値を用いた。ただし、CCSRおよびCGCM1データは約10 km四方を平均化した2次メッシュデータであり、3次メッシュ化されたアメダス平年値とは空間スケールが異なるので直接比較ができない。そこで、対象地点とした市町村の重心直近の2次メッシュについて、2030年代予測値と現在の「メッシュ気候値2000」の2次メッシュ平均値との差を求めた後、その差を3次メッシュ化されたアメダス平年値に加算し、これを当該地点の2030年代の値として用いた。5～9月の日平均積算気温からみると、現在の道内

主要稲作地帯の2030年代の気温は、現在の青森県に近似している（表III-2）。

なお、限界移植日、早限出穂期、晩限出穂期の算出には、通常、日最高最低平均気温を用いているが、同気温はアメダス平均気温のような多数回測定値を総て平均した平均気温に比べ、7月をピークに高く5月半ばと9月半ばでほぼ同じとなり、それ以降と以前では低くなることが知られている。そこで、早限出穂期の算出にはアメダス平均気温に0.5℃を加えた値を、限界移植日と晩限出穂期についてはアメダス平均気温をそのまま用いることとした。



図III-1 限界移植日、限界出穂期（早限出穂期、晩限出穂期）および安全出穂期間の関係

(2) 食味関連形質の変化

米の食味に強く影響するアミロース含有率および蛋白質含有率は、水稻生育期間中の気温と密接な関係を有することから、温暖化によるこれら形質の変化を検討する。

①対象地点、対象品種および気象データ

(1)と同様。

②アミロース含有率および蛋白質含有率の推定

以下の式（丹野，2010）から推定した。

$$\text{アミロース含有率 (\%)} = -0.0137x + 31.776$$

$$\text{蛋白質含有率 (\%)} = 0.0000425(x - 849)^2 + 7.38$$

ここで、 x は出穂後40日間の日平均積算気温（登熟気温，℃）である。本式は1991～2006年にかけて道内うるち米作付地域の22ヶ所で実施した「きらら397」の栽培試験データ236点から得たものである（付図III-1）。また出穂期には（1）-④の方法で算出した推定値を与えた。

(3) 穂ばらみ期（冷害危険期）の気温変動からみた冷害発生リスク

穂ばらみ期の低温は、不稔籾の発生を助長し、障害型冷害を引き起こすことから、温暖化による穂ばらみ期の気温変化を推定し、冷害発生リスクを検討する。

①対象地点

士別市、比布町（以上、上川地域）、深川市、岩見沢市（以上、空知地域）、厚真町（胆振地域）、北斗市（渡島地域）の6地点。

②対象品種

(1)と同様。

③穂ばらみ期の推定

(1) - ④の方法でDVIを推定し、この値が1.4～1.7となる期間を穂ばらみ期とした²⁾。

④穂ばらみ期平均気温の算出

対象地点最寄りの過去23ヵ年（1978～2000年）のアメダスデータを用いて各年次の穂ばらみ期の平均気温を算出し、その頻度分布を得た。次いでこのアメダスデータに（1）-⑤と同様の方法で得た2030年代と現在との気温差を加算して2030年代の穂ばらみ期を推定するとともに、同期間の平均気温を求め、その頻度分布の変化を検討した。

(4) 収量性

①対象地点および気象データ

(1)と同様。

②評価方法

以下の2つの方法による。

ア) 方法A

村田 (1964) ⁴⁾ を参考に、出穂前10日以降40日間の平均気温が25℃以下である9つの道県について、過去15年間 (1994～2008年) の道県別の平均収量⁵⁾ と同期間の平均気温および日射量との関係から求めた以下の式を用いた (付図Ⅲ-3)。

$$y = s(3.335 - 0.0415(t - 22.8)^2)$$

ここで、y : 収量 (kg/10a), s : 出穂前10日以降40日間の平均日射量 (W/m²), t : 出穂前10日以降40日間の平均気温 (℃) である。

イ) 方法B (気候登熟量示数)

内島 (1983) ⁶⁾ を参考に、日本全国の水稲奨励品種決定試験成績データを用いて林ら⁷⁾ が算出した以下の式を用いた。

$$y = s(1.28 - 0.0192(21.9 - t)^2)$$

ここで、y : 気候登熟量示数 (kg/10a), s : 出穂後40日間の積算日射量 (MJ/m²), t : 出穂後40日間の平均気温 (℃) である。この式は、供試データの中で同一のtに対してy/sが最も高いデータのみにも適合するように算出していることから、潜在的な収量性を示すと考えられる。

なお、いずれの方法においても、出穂期には(1)～④の方法で算出した推定値を与えた。

(5) 直播栽培における出穂期

一般に、北海道の直播栽培水稲は移植栽培よりも出穂期が遅く、登熟気温も低くなるため、収量や品質が不安定になりやすい。温暖化はこのような直播栽培の不安定性を緩和する可能性をもつことから、温暖化に伴う直播水稲の出穂期の変化を検討する。

①対象地点および気象データ

(1)と同様。2030年代の風速、日照時間は現在と同じと仮定した。

②対象品種

「ゆきまる」(早生), 「きらら397」(中生)

③算出法

水稲直播マップ作成方法^{8, 9)} を参考に、以下に示す簡易有効気温 θ (℃) を用いて出穂期を推定した。

$$\theta = (a - b) / (1 + T_{\text{mean}}/c)^b + d$$

ここで、T_{mean} : 日平均気温 (℃), a=55.89942, b=-4.165141, c=21.84576, d=0.9107297。

また、T_{mean}は以下の式で求めた。

$$T_{\text{mean}} = (2.3 + 0.86Th + 0.55S - 1.49W + T_{\text{min}}) / 2.$$

ここで、Th : 日最高気温, S : 日照時間, W : 日平均風速, T_{min} : 日最低気温。

播種翌日から出穂期までに要する簡易有効気温の積算値は、「ゆきまる」では1031℃, 「きらら397」では1111℃と報告されている^{8, 9)} ので、播種以降の毎日の簡易有効気温を求め、その積算値が上記の値に達した日を各品種の出穂期とした。なお、播種日は水稲直播マップと同じく5月10日とした。

3. 結果と考察

1) 気象要因と生育・収量等の関係解析

(1) 各試験場別に見た気象と水稲収量との関係

各場における収量と6～9月の平均気温, 最高気温, 最低気温および日照時間との相関は、道南農試では7月の気温と有意な関係 (r=0.624**~0.694**, いずれもn=24, 以下同じ) が認められたが、中央農試及び上川農試では判然としなかった (表Ⅲ-3)。

表Ⅲ-3 収量と月別気温 (平均、最高、最低) および日照時間との相関係数 (1985～2008年)

試験場名	気象要素	5月	6月	7月	8月	9月
中央農試 (n=24)	平均気温	0.150	0.368	0.335	0.266	0.221
	最高気温	0.068	0.371	0.317	0.268	0.304
	最低気温	0.287	0.283	0.381	0.243	0.090
	日照時間	-0.088	0.113	-0.174	0.239	0.141
上川農試 (n=24)	平均気温	-0.093	-0.066	0.317	0.003	0.154
	最高気温	-0.151	-0.122	0.174	-0.008	0.140
	最低気温	-0.029	0.048	0.330	-0.001	0.078
	日照時間	0.009	-0.091	-0.078	0.063	0.083
道南農試 (n=24)	平均気温	0.047	0.009	0.660 **	0.382	0.295
	最高気温	-0.085	0.095	0.624 **	0.332	0.333
	最低気温	0.158	-0.136	0.694 **	0.405 *	0.239
	日照時間	-0.037	0.175	0.009	-0.030	0.116
3場 (n=72)	平均気温	0.061	0.210	0.558 **	0.158	-0.135
	最高気温	0.133	0.339 **	0.591 **	0.269 *	0.064
	最低気温	-0.080	-0.056	0.386 **	0.035	-0.188
	日照時間	-0.007	0.170	0.109	0.117	0.097

*, **: 各々5%, 1%水準で有意。

(2) 収量, 収量構成要素と月別平均気温との関係

各場における収量と収量構成要素との相関は、上

川農試及び道南農試では登熟歩合と有意な関係 (r=0.664**~0.903**, n=24, 以下同じ) が認められ

たが、中央農試ではいずれの収量構成要素とも有意な関係は認められなかった。各場における収量構成要素と6～9月の月平均気温との相関は、全ての農試で千粒重と7月の平均気温との間に有意な関係が認められた ($r=0.475^{**} \sim 0.517^{**}$)。また道南農試では登熟歩合と7月の平均気温との間に有意な関係が認められ ($r=0.555^{**}$)、7月の気温による不稔の発生が登熟歩合に影響していることが推察された (表Ⅲ-4)。

以上のことから、収量に対して、7月の気温の影響が最も大きく、それは不稔歩合と千粒重に影響すること、また収量を月別気象値から精度良く推定することは困難と思われた。

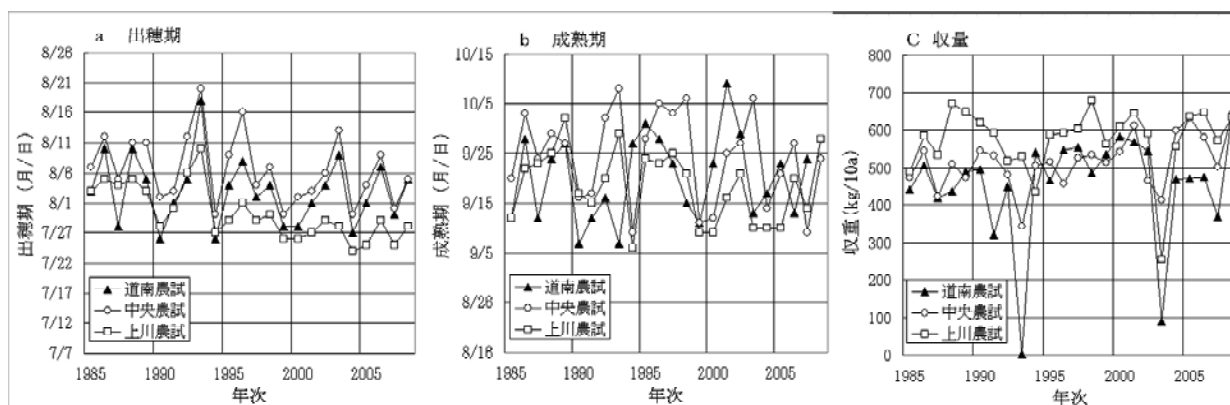
(3) 月別気温と生育・収量の経年変化

上川農試、中央農試および道南農試での6～9月の最低、平均、最高気温の経年変化を検討したところ、いずれの試験地と月においても、この24年間に明らかかな年次変化の傾向は認められず、夏季の気温に昇温傾向は認められなかった (図省略)。さらに、「きらら397」の出穂期、成熟期、収量および収量構成要素についても、上川農試では、出穂期の早期化と総粒数減少に伴う登熟歩合の向上の傾向がみられるが、その他の試験地や形質では、明らかかな年次変化の傾向は認められなかった (図Ⅲ-2, 図Ⅲ-3)。このように、近年の24年間に限定すれば、水稻の作柄に影響が大きい夏季の気温および水稻の生育に年次による一定の傾向は認められなかった。

表Ⅲ-4 収量構成要素と収量および月別平均気温との相関係数 (1985～2008年)

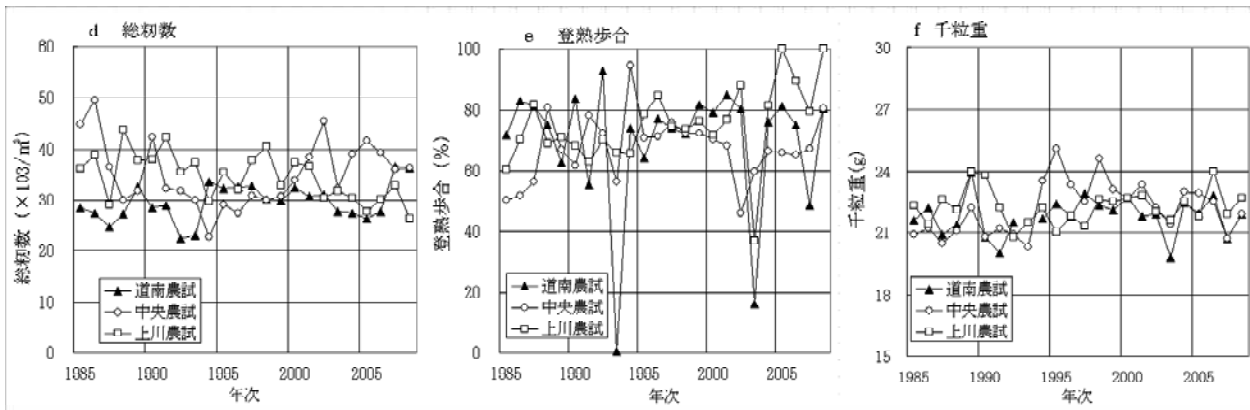
試験場名	構成要素	収量	5月	6月	7月	8月	9月
中央農試 (n=24)	穂数	0.324	0.005	0.329	-0.193	0.074	-0.037
	1穂粒数	0.061	0.008	-0.261	-0.046	0.008	-0.170
	総粒数	0.305	0.040	0.086	-0.189	0.090	-0.186
	登熟歩合	0.348	0.036	0.256	0.351	0.195	0.354
	千粒重	0.395	0.189	-0.227	0.479 *	0.014	0.220
上川農試 (n=24)	穂数	-0.044	0.224	-0.021	-0.266	-0.061	-0.128
	1穂粒数	0.284	0.069	-0.064	-0.027	0.110	-0.085
	総粒数	0.276	0.175	-0.066	-0.153	0.096	-0.123
	登熟歩合	0.664 **	-0.289	0.012	0.303	-0.158	0.127
	千粒重	0.366	0.297	-0.039	0.517 **	0.405 *	0.532 **
道南農試 (n=24)	穂数	0.032	0.000	0.059	0.002	-0.011	0.183
	1穂粒数	0.601 **	0.232	0.028	0.470 *	0.268	0.248
	総粒数	0.503 *	0.182	0.086	0.381	0.223	0.383
	登熟歩合	0.903 **	0.004	0.086	0.555 **	0.352	0.181
	千粒重	0.703 **	-0.112	-0.382	0.475 *	0.375	0.107
3場 (n=72)	穂数	0.310 **	0.098	0.320 **	0.074	-0.042	-0.361 **
	1穂粒数	0.199	0.089	-0.151	0.062	0.130	0.109
	総粒数	0.420 **	0.158	0.162	0.114	0.085	-0.230
	登熟歩合	0.734 **	-0.077	0.140	0.446 **	0.122	0.034
	千粒重	0.515 **	0.159	-0.122	0.509 **	0.207	0.061

*, **: 各々5%, 1%水準で有意。



図Ⅲ-2 1985～2008年における「きらら397」の出穂期、成熟期および収量の推移

年次との相関係数は、道南農試、中央農試、上川農試でそれぞれ、出穂期が $r=0.134, 0.313, 0.721^{**}$ 、成熟期が $r=0.166, 0.179, 0.269$ 、収量が $r=0.116, 0.449^*, 0.037$ (いずれも $n=24$)。



図Ⅲ-3 1985～2008年における「きらら397」の収量構成要素の推移

年次との相関係数は、道南農試、中央農試、上川農試でそれぞれ、総粒数が $r=0.395^*$ 、 0.016 、 -0.582^{**} 、登熟歩合が $r=-0.058$ 、 0.147 、 0.452^* 、千粒重が $r=0.062$ 、 0.346 、 0.073 （いずれも $n=24$ ）。

2) 温暖化気候データによる生育・収量等の予測

苗ともに、CCSRおよびCGCM1でそれぞれ18地帯平均で14、13日早まり、現在の5月19～22日が5月5～9

(1) 限界移植日の変化

日程度になると予測された（表Ⅲ-5）。

2030年代の限界移植日（移植早限）は、中苗、成

表Ⅲ-5 現在および2030年代における水稻の中苗、成苗の限界移植日

地帯 番号	地域	市町村名	現在		CCSR			CGCM1				
			中苗	成苗	中苗	差異	成苗	差異	中苗	差異	成苗	差異
1	檜山	江差町	5/20	5/16	5/4	16	4/30	16	5/7	16	5/4	12
2	渡島	北斗市	5/22	5/18	5/2	20	4/29	19	5/5	20	5/2	16
3	後志	ニセコ町	5/22	5/19	5/8	14	5/6	13	5/10	14	5/8	11
4	後志	共和町	5/20	5/16	5/4	16	4/30	16	5/6	16	5/3	13
5	胆振	伊達市	5/22	5/18	5/5	17	5/2	16	5/7	17	5/4	14
6	胆振	厚真町	5/27	5/23	5/11	16	5/7	16	5/12	16	5/9	14
7	石狩	恵庭市	5/22	5/19	5/9	13	5/6	13	5/10	13	5/7	12
8	石狩	長沼町	5/20	5/17	5/6	14	5/4	13	5/7	14	5/4	13
9	石狩	新篠津村	5/23	5/20	5/9	14	5/7	13	5/10	14	5/7	13
10	空知	岩見沢市	5/21	5/17	5/7	14	5/5	12	5/7	14	5/4	13
11	空知	深川市	5/20	5/17	5/7	13	5/4	13	5/6	13	5/4	13
12	空知	雨竜町	5/20	5/18	5/9	11	5/6	12	5/8	11	5/6	12
13	留萌	小平町	5/24	5/21	5/11	13	5/9	12	5/11	13	5/9	12
14	上川	士別市士別	5/24	5/21	5/12	12	5/9	12	5/11	12	5/9	12
15	上川	旭川市	5/20	5/18	5/9	11	5/6	12	5/8	11	5/6	12
16	上川	中富良野町	5/19	5/16	5/7	12	5/5	11	5/7	12	5/4	12
17	上川	名寄市風連	5/27	5/24	5/14	13	5/11	13	5/13	13	5/10	14
18	網走	北見市	5/26	5/23	5/12	14	5/9	14	5/9	14	5/7	16
平均			5/22	5/19	5/8	14	5/5	14	5/9	14	5/6	13
参考	宗谷	中頓別	6/2	5/30	5/20	13	5/16	14	5/18	13	5/15	15
参考	釧路	弟子屈町	6/14	6/9	5/30	15	5/24	16	5/23	15	5/19	21
参考	根室	中標津	6/16	6/9	5/29	18	5/24	16	5/22	18	5/18	22

現在の気象データは各市町村の代表的な稲作地のアメダスマッシュポイント。差異は現在との差異。

(2) 出穂期の変化

早限および晩限出穂期を18地帯の平均値で見ると、CCSRでは現在に比べ早限が10日早く、晩限が9日遅くなり、その結果、安全出穂期間は13日から32日へと19日長くなる（表Ⅲ-6）。また、CGCM1では早限と晩限がさらに3～4日それぞれ早いか遅くな

り、安全出穂期間は38日とより長くなる。

地域的な特徴をみると、北海道の稲作地域でも最も気象条件が厳しい北見市では、CCSRで安全出穂期間が14日であり、これは現在での旭川市と恵庭市に相当する。また、CGCM1では北見市は26日となり、現在で最も長い江差町の29日を除けば、現在のいず

れの市町村よりも長くなる。

出穂期は、18地帯の平均で中苗、成苗とも現在に比べCCSRで6~7日、CGCM1では9日早くなる。最も遅い北見市でもCCSRで現在の岩見沢市やニセコ町並となり、CGCM1ではさらに現在のどの地帯よりも早くなる。なお、これらの試算はすべて移植日を5月25日とした場合であるが、前述の表Ⅲ-5の結果を勘案し、5月10日を移植日として出穂日を推定したところ、さらに5日早くなると見積もられた(表Ⅲ-7)。

(3) 食味関連形質の変化

すでに指摘したように、2030年代には現在より出穂期が6~9日早まり、また同一暦日でも気温が上昇するため、登熟気温は65~108℃高くなる。そのため、登熟気温と負の相関を持つ精米アミロース含有率は低下し、18地帯平均で現在よりも0.9~1.5%低くなる。精米蛋白質含有率については850℃前後に最低となる二次関数の関係が認められており、成苗で0.2、中苗で0.3%低くなる(表Ⅲ-8)。

一方、2030年代の出穂期を地帯を問わず8月1日ま

たは10日と一律に仮定すると、8月1日の場合の両含有率は、出穂期を任意とした時の予測結果とほぼ同じである。しかし、出穂期が8月10日と遅くなると両含有率は高まり、とくにアミロース含有率でその程度が大きく、登熟気温の増大によるアミロース含有率低減効果は小さくなる(表Ⅲ-9)。このことは、将来においても、食味向上には早期出穂と出穂期の変動幅縮減が重要であることを示唆している。

さらに、出穂期の連続的な変化が両含有率に与える影響(図Ⅲ-4)をみると、2030年代のアミロース含有率は、出穂期が遅くなるに伴い現在と平行して高まるが、現在よりも常に低い値で推移する。蛋白質含有率は出穂期が早いと現在よりも高まる場合もあるが、7月末以降の出穂であれば現在よりも低下する。すなわち、2030年代では7月末以降のいずれの出穂期においても現在より良食味化が見込まれ、また同期間では出穂が早いほど良食味が期待できる。

表Ⅲ-6 現在および2030年代における限界出穂期、安全出穂期および出穂期推定

地帯 番号	地域 市町村名	現在					CCSR									
		限界出穂期		安全 出穂 期間	出穂期		限界出穂期		安全		同左 出穂 期間	同左 差異	出穂期			
		早限 出穂	晚限 出穂		中苗	成苗	早限 出穂	同左 差異	晚限 出穂	同左 差異			中苗	同左 差異	成苗	同左 差異
1	檜山 江差町	7/23	8/21	29	8/5	8/1	7/15	8	9/2	12	49	20	7/31	5	7/27	5
2	渡島 北斗市	7/30	8/17	18	8/9	8/5	7/18	12	8/30	13	43	25	8/1	8	7/28	8
3	後志 ニセコ町	7/27	8/8	12	8/7	8/3	7/17	10	8/11	3	25	13	7/31	7	7/27	7
4	後志 共和町	7/24	8/14	21	8/6	8/1	7/16	8	8/25	11	40	19	7/31	6	7/27	5
5	胆振 伊達市	7/30	8/15	16	8/10	8/5	7/18	12	8/28	13	41	25	8/1	9	7/28	8
6	胆振 厚真町	8/7	8/7	0	8/13	8/9	7/24	14	8/19	12	26	26	8/5	8	8/1	8
7	石狩 恵庭市	7/28	8/11	14	8/8	8/4	7/20	8	8/20	9	31	17	8/2	6	7/29	6
8	石狩 長沼町	7/28	8/12	15	8/8	8/3	7/17	11	8/21	9	35	20	8/1	7	7/27	7
9	石狩 新篠津村	7/30	8/9	10	8/9	8/4	7/19	11	8/20	11	32	22	8/2	7	7/29	6
10	空知 岩見沢市	7/27	8/12	16	8/7	8/3	7/16	11	8/21	9	36	20	7/31	7	7/27	7
11	空知 深川市	7/19	8/10	22	8/8	8/4	7/10	9	8/21	11	42	20	8/1	7	7/28	7
12	空知 雨竜町	7/24	8/8	15	8/5	8/1	7/16	8	8/15	7	30	15	7/31	5	7/27	5
13	留萌 小平町	7/29	8/8	10	8/11	8/5	7/23	6	8/16	8	24	14	8/5	6	7/31	5
14	上川 士別市士別	7/28	8/3	6	8/8	8/3	7/19	9	8/10	7	22	16	8/2	6	7/29	5
15	上川 旭川市	7/23	8/6	14	8/5	7/31	7/15	8	8/11	5	27	13	7/30	6	7/26	5
16	上川 中富良野町	7/22	8/7	16	8/4	7/31	7/14	8	8/13	6	30	14	7/30	5	7/25	6
17	上川 名寄市風連	7/29	8/2	4	8/9	8/5	7/19	10	8/11	9	23	19	8/3	6	7/29	7
18	網走 北見市	8/5	8/3	-2	8/13	8/9	7/27	9	8/10	7	14	16	8/7	6	8/2	7
平均		7/28	8/10	13	8/8	8/4	7/18	10	8/19	9	32	19	8/2	7	7/28	6
参考	宗谷 中頓別	-	7/28	-	8/21	8/16	8/3	-	8/7	10	4	-	8/12	9	8/7	9
参考	釧路 弟子屈町	-	-	-	9/4	8/29	-	-	7/29	-	-	-	8/23	12	8/15	14
参考	根室 中標津	-	-	-	9/4	8/28	-	-	7/29	-	-	-	8/23	12	8/18	10

限界出穂期と出穂期は月日、安全出穂期間は日。現在の気象は、各市町村の代表的稲作地のアメダスメッシュポイントのデータ。同左差異は現在の値との差異(日)。移植日は5月25日。

表Ⅲ-6 続き

地帯 番号	地域	市町村名	CGCM1									
			限界出穂期				安全 同左		出穂期			
			早限 出穂	同左 差異	晩限 出穂	同左 差異	出穂 期間	同左 差異	中苗 差異	同左	成苗	同左 差異
1	檜山	江差町	7/14	9	9/3	13	51	22	7/30	6	7/26	6
2	渡島	北斗市	7/16	14	8/31	14	46	28	7/31	9	7/27	9
3	後志	ニセコ町	7/15	12	8/12	4	28	16	7/30	8	7/26	8
4	後志	共和町	7/14	10	8/27	13	44	23	7/30	7	7/26	6
5	胆振	伊達市	7/16	14	8/29	14	44	28	7/31	10	7/27	9
6	胆振	厚真町	7/21	17	8/21	14	31	31	8/3	10	7/30	10
7	石狩	恵庭市	7/17	11	8/22	11	36	22	8/1	7	7/27	8
8	石狩	長沼町	7/14	14	8/23	11	40	25	7/29	10	7/25	9
9	石狩	新篠津村	7/15	15	8/22	13	38	28	7/31	9	7/26	9
10	空知	岩見沢市	7/11	16	8/23	11	43	27	7/28	10	7/24	10
11	空知	深川市	7/4	15	8/24	14	51	29	7/29	10	7/24	11
12	空知	雨竜町	7/10	14	8/18	10	39	24	7/28	8	7/24	8
13	留萌	小平町	7/19	10	8/20	12	32	22	8/2	9	7/29	7
14	上川	士別市士別	7/13	15	8/15	12	33	27	7/29	10	7/25	9
15	上川	旭川市	7/9	14	8/15	9	37	23	7/27	9	7/23	8
16	上川	中富良野町	7/8	14	8/16	9	39	23	7/26	9	7/23	8
17	上川	名寄市風連	7/13	16	8/15	13	33	29	7/30	10	7/26	10
18	網走	北見市	7/20	16	8/15	12	26	28	8/2	11	7/29	11
平均			7/14	14	8/21	12	38	25	7/30	9	7/26	9
参考	宗谷	中頓別	7/27	-	8/13	16	17	-	8/7	14	8/3	13
参考	釧路	弟子屈町	8/5	-	8/8	-	3	-	8/13	22	8/9	20
参考	根室	中標津	8/10	-	8/11	-	1	-	8/16	19	8/11	17

2010年での比布町（旭川市近隣）と岩見沢市における早限出穂期：6/26，6/29，晩限出穂期：8/18，8/24，中苗と成苗の推定出穂期：7/25と7/21，7/28と7/24。

表Ⅲ-7 移植日の前進が2030年代の出穂期に及ぼす影響（月/日）

地域	市町村名	現在		CCSR				CGCM1			
		5/25移植		5/25移植		5/10移植		5/25移植		5/10移植	
		中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗
渡島	北斗市	8/9	8/5	8/1	7/28	7/26	7/22	7/31	7/27	7/26	7/22
空知	岩見沢市	8/7	8/3	7/31	7/27	7/26	7/22	7/28	7/24	7/23	7/19
上川	旭川市	8/5	7/31	7/30	7/26	7/25	7/21	7/27	7/23	7/22	7/18
網走	北見市	8/13	8/9	8/7	8/2	8/2	7/29	8/2	7/29	7/29	7/24
平均		8/9	8/4	8/2	7/29	7/28	7/24	7/30	7/26	7/25	7/21

表Ⅲ-6を参照。

表Ⅲ-8 現在および2030年代における精米アミロース含有率(%)と蛋白質含有率(%)の推定値

地帯 地域 市町村名 番号	現在						CCSR											
	中苗			成苗			中苗						成苗					
	登熟 気温 ℃	アミ ロース 含有 率	蛋白 含有 率	登熟 気温 ℃	アミ ロース 含有 率	蛋白 含有 率	登熟 気温 ℃	同左 差異	アミ ロース 含有 率	同左 差異	蛋白 含有 率	同左 差異	登熟 気温 ℃	同左 差異	アミ ロース 含有 率	同左 差異	蛋白 含有 率	同左 差異
1 檜山 江差町	840	20.3	7.4	854	20.1	7.4	901	61	19.4	-0.8	7.5	0.1	907	53	19.4	-0.7	7.5	0.1
2 渡島 北斗市	795	20.9	7.5	812	20.7	7.4	884	89	19.7	-1.2	7.4	-0.1	890	78	19.6	-1.1	7.4	0.0
3 後志 ニセコ町	759	21.4	7.7	781	21.1	7.6	828	69	20.4	-0.9	7.4	-0.3	848	67	20.2	-0.9	7.4	-0.2
4 後志 共和町	802	20.8	7.4	824	20.5	7.4	876	74	19.8	-1.0	7.4	-0.1	884	60	19.7	-0.8	7.4	0.0
5 胆振 伊達市	781	21.1	7.6	802	20.8	7.4	870	89	19.9	-1.2	7.4	-0.2	878	76	19.7	-1.0	7.4	-0.1
6 胆振 厚真町	720	21.9	8.1	742	21.6	7.8	818	98	20.6	-1.3	7.4	-0.7	830	88	20.4	-1.2	7.4	-0.5
7 石狩 恵庭市	771	21.2	7.6	790	21.0	7.5	842	71	20.2	-1.0	7.4	-0.3	853	63	20.1	-0.9	7.4	-0.1
8 石狩 長沼町	772	21.2	7.6	795	20.9	7.5	848	76	20.2	-1.0	7.4	-0.3	861	66	20.0	-0.9	7.4	-0.1
9 石狩 新篠津村	753	21.5	7.7	778	21.1	7.6	836	83	20.3	-1.1	7.4	-0.4	848	70	20.2	-1.0	7.4	-0.2
10 空知 岩見沢市	777	21.1	7.6	795	20.9	7.5	849	72	20.1	-1.0	7.4	-0.2	859	64	20.0	-0.9	7.4	-0.1
11 空知 深川市	795	20.9	7.5	813	20.6	7.4	878	83	19.7	-1.1	7.4	-0.1	885	72	19.7	-1.0	7.4	0.0
12 空知 雨竜町	768	21.3	7.6	788	21.0	7.5	829	61	20.4	-0.8	7.4	-0.3	842	54	20.2	-0.7	7.4	-0.2
13 留萌 小平町	737	21.7	7.9	769	21.2	7.6	801	64	20.8	-0.9	7.5	-0.4	819	50	20.6	-0.7	7.4	-0.2
14 上川 士別市	723	21.9	8.0	752	21.5	7.8	794	71	20.9	-1.0	7.5	-0.5	810	58	20.7	-0.8	7.4	-0.3
15 上川 旭川市	758	21.4	7.7	784	21.0	7.5	816	58	20.6	-0.8	7.4	-0.3	831	47	20.4	-0.6	7.4	-0.2
16 上川 中富良野町	769	21.2	7.6	790	21.0	7.5	829	60	20.4	-0.8	7.4	-0.3	847	57	20.2	-0.8	7.4	-0.1
17 上川 名寄市	713	22.0	8.1	738	21.7	7.9	793	80	20.9	-1.1	7.5	-0.7	813	75	20.6	-1.0	7.4	-0.5
18 網走 北見市	697	22.2	8.3	721	21.9	8.1	765	68	21.3	-0.9	7.7	-0.7	784	63	21.0	-0.9	7.5	-0.5
平均	763	21.3	7.7	785	21.0	7.6	837	74	20.3	-1.0	7.4	-0.3	849	65	20.1	-0.9	7.4	-0.2

登熟気温による精米のアミロース含有率と蛋白含有率の推定式は、丹野(2010)による。現在の気象は各市町村の代表的な稲作地のアメダスメッシュのデータ。登熟気温は出穂後40日間の日平均積算気温。同左差異は現在値との差異。移植日は5月25日。出穂日は表Ⅲ-6を参照。

地帯 地域 市町村名 番号	CGCM1													
	中苗							成苗						
	登熟 気温 ℃	同左 差異	アミ ロース 含有 率	同左 差異	蛋白 含有 率	同左 差異	登熟 気温 ℃	同左 差異	アミ ロース 含有 率	同左 差異	蛋白 含有 率	同左 差異		
1 檜山 江差町	922	82	19.1	-1.1	7.6	0.2	926	72	19.1	-1.0	7.6	0.2		
2 渡島 北斗市	904	109	19.4	-1.5	7.5	0.0	910	98	19.3	-1.3	7.5	0.1		
3 後志 ニセコ町	851	92	20.1	-1.3	7.4	-0.3	871	90	19.8	-1.2	7.4	-0.2		
4 後志 共和町	899	97	19.5	-1.3	7.5	0.0	907	83	19.4	-1.1	7.5	0.1		
5 胆振 伊達市	891	110	19.6	-1.5	7.4	-0.1	898	96	19.5	-1.3	7.5	0.0		
6 胆振 厚真町	845	125	20.2	-1.7	7.4	-0.7	857	115	20.0	-1.6	7.4	-0.5		
7 石狩 恵庭市	866	95	19.9	-1.3	7.4	-0.2	879	89	19.7	-1.2	7.4	-0.1		
8 石狩 長沼町	878	106	19.7	-1.5	7.4	-0.2	887	92	19.6	-1.3	7.4	-0.1		
9 石狩 新篠津村	864	111	19.9	-1.5	7.4	-0.4	877	99	19.8	-1.4	7.4	-0.2		
10 空知 岩見沢市	885	108	19.7	-1.5	7.4	-0.2	893	98	19.5	-1.3	7.4	0.0		
11 空知 深川市	914	119	19.3	-1.6	7.5	0.1	922	109	19.1	-1.5	7.6	0.2		
12 空知 雨竜町	870	102	19.9	-1.4	7.4	-0.3	882	94	19.7	-1.3	7.4	-0.1		
13 留萌 小平町	843	106	20.2	-1.5	7.4	-0.5	855	86	20.1	-1.2	7.4	-0.3		
14 上川 士別市	842	119	20.2	-1.6	7.4	-0.7	855	103	20.1	-1.4	7.4	-0.4		
15 上川 旭川市	859	101	20.0	-1.4	7.4	-0.4	871	87	19.8	-1.2	7.4	-0.2		
16 上川 中富良野町	875	106	19.8	-1.5	7.4	-0.2	883	93	19.7	-1.3	7.4	-0.1		
17 上川 名寄市	841	128	20.3	-1.8	7.4	-0.8	855	117	20.1	-1.6	7.4	-0.5		
18 網走 北見市	817	120	20.6	-1.6	7.4	-0.9	831	110	20.4	-1.5	7.4	-0.7		
平均	870	108	19.9	-1.5	7.4	-0.3	881	96	19.7	-1.3	7.4	-0.2		

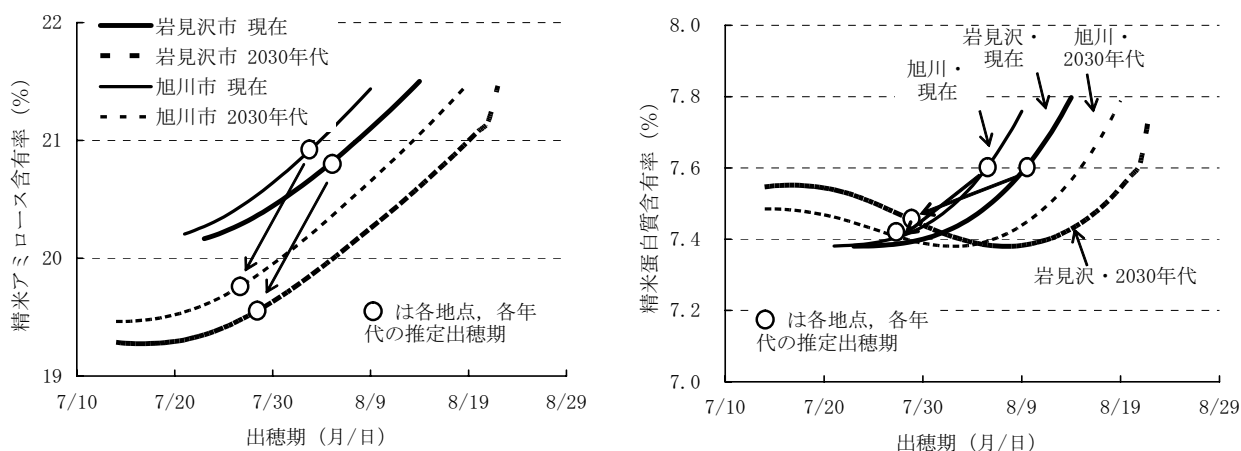
2010年の比布町(旭川市近隣)、岩見沢市における登熟気温(℃)はそれぞれ中苗:915, 947, 成苗:906, 943, アミロース含有率(%)は中苗:19.2, 18.8, 成苗:19.4, 18.9, 蛋白含有率(%)は中苗:7.5, 7.8, 成苗:7.5, 7.7。

表Ⅲ-9 出穂期の変動が2030年代の精米アミロース含有率および蛋白質含有率に及ぼす影響

地域 市町村名	現在				CCSR				CGCM1			
	出穂期	登熟気温	アミロース含有率	蛋白質含有率	出穂期	登熟気温	アミロース含有率	蛋白質含有率	出穂期	登熟気温	アミロース含有率	蛋白質含有率
	月日	℃	率%	%	月日	℃	率%	%	月日	℃	率%	%
渡島 北斗市	8/7	804	20.8	7.5	7/30	887	19.7	7.4	7/29	907	19.4	7.5
空知 岩見沢市	8/5	786	21.0	7.6	7/29	854	20.1	7.4	7/26	889	19.6	7.4
上川 旭川市	8/3	771	21.2	7.6	7/28	824	20.5	7.4	7/25	865	19.9	7.4
網走 北見市	8/11	709	22.1	8.2	8/5	775	21.2	7.6	7/31	824	20.5	7.4
平均	8/7	768	21.3	7.7	7/31	835	20.4	7.5	7/28	871	19.9	7.4

地域 市町村名	CCSR 8/1出穂			CCSR 8/10出穂			CGCM1 8/1出穂			CGCM1 8/10出穂		
	登熟気温	アミロース含有率	蛋白質含有率	登熟気温	アミロース含有率	蛋白質含有率	登熟気温	アミロース含有率	蛋白質含有率	登熟気温	アミロース含有率	蛋白質含有率
	℃	率%	%	℃	率%	%	℃	率%	%	℃	率%	%
渡島 北斗市	884	19.7	7.4	856	20.0	7.4	901	19.4	7.5	870	19.9	7.4
空知 岩見沢市	846	20.2	7.4	809	20.7	7.4	873	19.8	7.4	833	20.4	7.4
上川 旭川市	808	20.7	7.4	761	21.4	7.7	838	20.3	7.4	788	21.0	7.5
網走 北見市	787	21.0	7.5	753	21.5	7.7	821	20.5	7.4	777	21.1	7.6
平均	831	20.4	7.4	795	20.9	7.6	858	20.0	7.4	817	20.6	7.5

登熟気温による精米のアミロース含有率と蛋白質含有率の推定式は、丹野（2010）による。現在の気象は各市町村の代表的な稲作地のアメダスメッシュのデータ。登熟気温は出穂後40日間の日平均積算気温。同左差異は現在値との差異。表上段は表Ⅲ-8の中苗と成苗の平均（移植日5/25）。表下段は出穂日を8/1と8/10に想定して算出した。

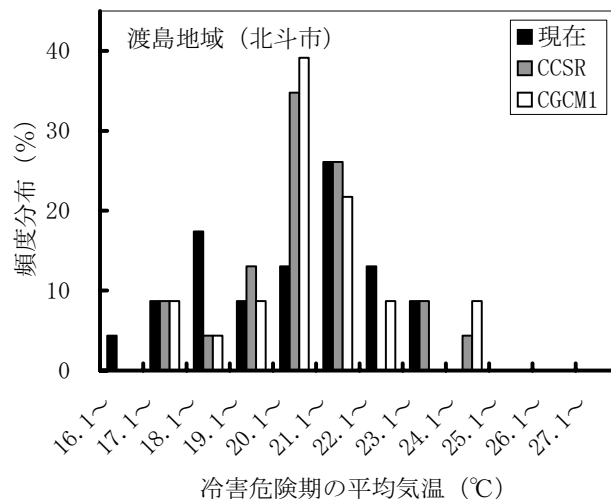
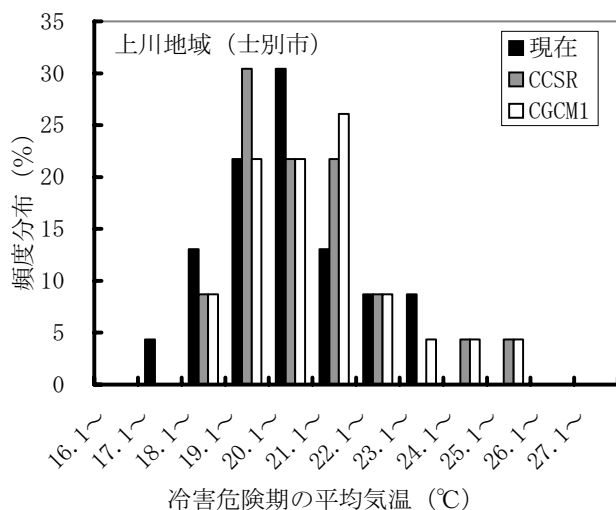


図Ⅲ-4 安全出穂期間における出穂日と精米アミロース含有率および蛋白質含有率との関係
(岩見沢市, 旭川市) 2030年代の気象はCCSR.

(4) 穂ばらみ期（冷害危険期）の気温変動からみた冷害発生リスク

2030年代の冷害危険期の平均気温は、6地域を平均すると、CCSRでは中苗、成苗とも0.2℃、CGCM1では中苗で0.3℃、成苗で0.5℃現在よりも上昇する(表

Ⅲ-10)。これは図Ⅱ-1, 2に示した7月の道内平均の昇温程度よりも小さい。この理由は、5~6月の気温上昇により水稻の生育が早まり、冷害危険期の暦日が現在よりも早い時期へシフトするためである。



図Ⅲ-5 上川地域（士別市）と渡島地域（北斗市）における冷害危険期の平均気温の頻度分布

成苗の場合。気温はアメダスポイント。1978～2000年の各年次の気温が現在から2030年代の予測気温まで上昇すると仮定して算出。

2030年代の各地域の気温頻度分布を見ると、上川および空知地域では全般に現在よりも高い領域に分布するが、胆振および渡島地域ではその傾向は明瞭ではない（図Ⅲ-5、データの一部省略）。このことは、不稔発生の危険性が特に高まる同気温19°C、18.5°C以下の年次の分布比率からも裏付けられる（表Ⅲ-10）。これら胆振および渡島地域は「やませ」の流入により7月の気温変動が大きい地域であり、その影響は2030年代でも小さくならないと思われる。いずれにしても、不稔発生の懸念がある気温に遭遇する可能性は検討対象とした全地域で認められることから、障害型冷害発生リスクは2030年代でも残ると考えられる。

（5）収量性

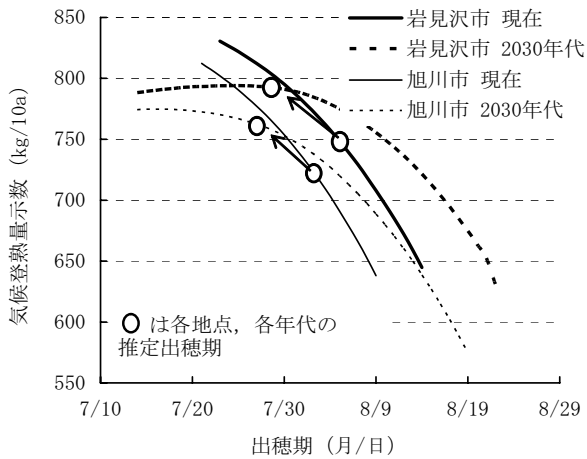
方法Aによる2030年代の推定収量は、とくにCCSRにおいて8～9月の日射量が低下することがマイナスに働くが、同期の平均気温が1.3～1.8°C上昇するため、全道平均では現在比98～101%とほぼ現在と変わらない（表Ⅲ-11）。

一方、潜在的収量性を表すと考えられる方法Bによる気象登熟量示数⁷⁾は、出穂後40日間における日射量がやや減少するが、同平均気温が同示数の最適気温に近くなるため、現在比107～110%へと増収する（表Ⅲ-12）。

表Ⅲ-10 現在（1978から2000年まで、23年間）と2030年代における冷害危険期の平均気温の平均値、および不稔発生の危険性が高い冷害危険期の平均気温19°C以下と18.5°C以下の年次の比率（%）

項目	気温の種別	苗種	士別市	比布町	深川市	岩見沢市	厚真町	北斗市	平均
平均気温	現在	中苗	21.3	21.4	21.4	21.6	21.0	21.5	21.4
		成苗	20.8	20.6	20.5	20.5	20.6	20.5	20.6
	CCSR	中苗	21.5	21.5	21.6	21.7	21.6	21.4	21.6
		成苗	20.9	20.8	21.0	21.1	20.5	20.7	20.8
	CGCM1	中苗	21.7	21.7	21.8	21.9	21.6	21.4	21.7
		成苗	21.1	21.2	21.4	21.6	20.6	20.8	21.1
19°C以下の年次	現在	中苗	22	9	4	17	9	4	10.9
		成苗	17	26	13	17	22	30	21.0
	CCSR	中苗	9	0	4	4	9	9	5.8
		成苗	9	9	0	4	13	13	8.0
	CGCM1	中苗	4	4	0	4	9	9	5.1
		成苗	9	0	0	0	9	13	5.1
18.5°C以下の年次	現在	中苗	17	0	0	0	4	4	4.3
		成苗	13	9	9	9	13	17	11.6
	CCSR	中苗	0	0	0	0	4	9	2.2
		成苗	4	4	0	4	13	13	6.5
	CGCM1	中苗	0	0	0	0	4	9	2.2
		成苗	4	0	0	0	4	13	3.6

図Ⅲ-5の脚注参照



図Ⅲ-6 安全出穂期間における出穂日と気候登熟量示数の関係（岩見沢市，旭川市）

2030年代の気象はCCSR。

また、先述の食味関連形質での検討と同様に、出穂期の変動が収量性に及ぼす影響を解析したところ、出穂期が遅い8月10日の場合は、方法A，方法B

それぞれで現在比94～98，98～104%と低く見積もられた（表Ⅲ-13，表Ⅲ-14）。

さらに、出穂期の連続的な変化が気象登熟量示数に与える影響を見ると、2030年代には出穂期の遅延化に対する示数の低下が現在よりも緩やかとなり、収量性は全般に安定化の方向へ向かうと見込まれる（図Ⅲ-6）。

（6）直播栽培における出穂期

直播栽培の現在の出穂期は、18地帯の平均でみると、晩限出穂期よりも早生で3日，中生で7日遅く，登熟条件からみると直播栽培は厳しい現況にある（表Ⅲ-15）。ただし、一般に直播では移植栽培よりも登熟期間が短くなるため，晩限出穂期よりも3日遅い地帯でも適応地帯としている^{8, 9)}。

一方、2030年代では出穂期が現在より9～13日早まるため，晩限出穂期よりも早生品種で16～21日，中生品種では12～17日早く出穂期に達する。そのため，早生品種に加え中生品種の直播栽培が安定的に全道で可能となると推察される。

表Ⅲ-11 方法Aによる現在および2030年代の収量推定値

地帯市町村 番号名	現在				CCSR				CGCM1									
	出穂 期	出穂前10日以降40日間		推定 収量	出穂 期	出穂前10日以降40日間		推定 収量	同左 現在の 比	出穂 期	出穂前10日以降40日間		推定 収量	同左 現在の 比				
		平均 気温 ℃	日射 量W /m ²			平均 気温 ℃	同左 現在 量W /m ²				同左 現在 量W /m ²	平均 気温 ℃			同左 現在 量W /m ²			
1 江差町	8/3	21.7	178	570	7/29	22.6	0.9	161	-17.4	522	92	7/28	23.0	1.3	166	-1.1	537	94
2 北斗市	8/7	20.9	168	521	7/30	22.3	1.4	148	-19.7	480	92	7/29	22.7	1.8	153	-1.3	496	95
3 ニセコ町	8/5	20.4	175	527	7/29	21.8	1.4	163	-11.6	524	99	7/28	22.2	1.8	170	-0.4	550	104
4 共和町	8/4	21.1	188	587	7/29	22.3	1.2	172	-15.0	558	95	7/28	22.7	1.6	178	-0.8	579	98
5 伊達市	8/8	20.6	172	527	7/30	22.1	1.5	162	-10.4	523	99	7/29	22.5	1.9	164	-0.7	533	101
6 厚真町	8/11	19.5	170	478	8/3	21.1	1.6	156	-13.9	490	102	8/1	21.7	2.2	157	-1.1	504	105
7 恵庭市	8/6	20.5	175	531	7/31	21.6	1.1	162	-12.7	517	97	7/30	22.1	1.6	164	-0.9	531	100
8 長沼町	8/6	20.5	177	538	7/30	21.7	1.2	167	-10.4	533	99	7/27	22.3	1.8	170	-0.6	551	102
9 新篠津村	8/7	20.1	179	530	7/31	21.5	1.4	172	-6.9	549	104	7/29	22.1	2.0	175	-0.4	564	106
10 岩見沢市	8/5	20.5	179	545	7/29	21.7	1.2	174	-5.8	556	102	7/26	22.4	1.9	174	-0.5	563	103
11 深川市	8/1	21.0	188	585	7/26	22.4	1.4	171	-16.2	555	95	7/23	23.1	2.1	174	-1.2	563	96
12 雨竜町	8/3	20.5	186	566	7/29	21.5	1.0	168	-18.5	534	94	7/26	22.3	1.8	170	-1.4	551	97
13 小平町	8/8	20.0	186	546	8/3	20.9	0.9	171	-15.0	532	97	7/31	21.8	1.8	175	-1.0	561	103
14 士別市士別	8/6	19.7	184	526	7/31	20.8	1.1	168	-16.2	518	98	7/27	21.7	2.0	170	-1.2	545	103
15 旭川市	8/3	20.3	185	555	7/28	21.3	1.0	178	-6.9	563	101	7/25	22.1	1.8	181	-0.4	583	105
16 中富良野町	8/2	20.6	188	573	7/28	21.5	0.9	167	-20.8	530	93	7/25	22.4	1.8	168	-1.7	544	95
17 名寄市風連	8/7	19.5	179	504	8/1	20.8	1.3	168	-11.6	518	103	7/28	21.8	2.3	170	-0.8	546	108
18 北見市	8/11	19.1	182	489	8/5	20.1	1.0	162	-19.7	479	98	7/31	21.2	2.1	162	-1.7	510	104
平均	8/6	20.4	180	539	7/30	21.6	1.2	166	-13.8	527	98	7/28	22.2	1.9	169	-1.0	545	101

収量の推定は以下の式による。y：収量，s：出穂前10日以降40日間の日射量，t：同期間の平均気温， $y=s(3.335-0.0415(t-22.8)^2)$ 。出穂期は表Ⅲ-6の中苗と成苗の平均。

表Ⅲ-12 方法Bによる現在および2030年代の収量推定値（気候登熟量示数）

地帯市町村 番号 名	現在				CCSR						CGCM1							
	出穂	出穂後40日間		気候	出穂	出穂後40日間の		気候	同左	出穂	出穂後40日間の		気候	同左				
	期	平均	日射	登熟量	期	平均	同左	日射	同左	登熟量	現在	期	平均	同左	日射	同左	登熟量	現在
	月日	気温 ℃	量MJ /m ²	示数 kg/10a	月日	気温 ℃	差異	量MJ /m ²	差異	kg/10a	比%	月日	気温 ℃	差異	量MJ /m ²	差異	kg/10a	比%
1 江差町	8/3	21.2	587	745	7/29	22.6	1.4	562	-25.0	714	96	7/28	23.1	1.9	564	-23	706	95
2 北斗市	8/7	20.1	549	668	7/30	22.2	2.1	519	-30.0	664	99	7/29	22.7	2.6	522	-27	662	99
3 ニセコ町	8/5	19.3	567	649	7/29	21.0	1.7	563	-4.0	711	109	7/28	21.5	2.3	579	12	740	114
4 共和町	8/4	20.3	607	748	7/29	22.0	1.7	588	-19.0	753	101	7/28	22.6	2.3	603	-4	767	102
5 伊達市	8/8	19.8	571	682	7/30	21.9	2.1	570	-1.0	730	107	7/29	22.4	2.6	570	-1	727	107
6 厚真町	8/11	18.3	560	576	8/3	20.6	2.3	544	-16.0	679	118	8/1	21.3	3.0	547	-13	696	121
7 恵庭市	8/6	19.5	574	672	7/31	21.2	1.7	557	-17.0	708	105	7/30	21.8	2.3	562	-12	719	107
8 長沼町	8/6	19.6	581	684	7/30	21.4	1.8	572	-9.0	729	107	7/27	22.1	2.5	579	-2	741	108
9 新篠津村	8/7	19.1	589	668	7/31	21.1	1.9	589	0.0	746	112	7/29	21.8	2.6	594	5	760	114
10 岩見沢市	8/5	19.7	588	695	7/29	21.4	1.7	590	2.0	752	108	7/26	22.2	2.6	594	6	759	109
11 深川市	8/1	20.1	607	739	7/26	22.0	1.9	580	-27.0	742	100	7/23	23.0	2.9	587	-20	739	100
12 雨竜町	8/3	19.5	604	704	7/29	20.9	1.4	567	-37.0	715	102	7/26	21.9	2.5	574	-30	735	104
13 小平町	8/8	18.8	603	662	8/3	20.3	1.4	570	-33.0	700	106	7/31	21.2	2.4	591	-12	751	113
14 士別市士別	8/6	18.4	592	621	7/31	20.1	1.6	560	-32.0	680	109	7/27	21.2	2.8	573	-19	728	117
15 旭川市	8/3	19.3	596	684	7/28	20.6	1.3	595	-1.0	742	108	7/25	21.6	2.4	604	8	772	113
16 中富良野町	8/2	19.5	607	709	7/28	21.0	1.5	565	-42.0	713	101	7/25	22.0	2.5	571	-36	731	103
17 名寄市風連	8/7	18.1	575	580	8/1	20.1	1.9	560	-15.0	681	117	7/28	21.2	3.1	572	-3	727	125
18 北見市	8/11	17.7	579	547	8/5	19.4	1.6	541	-38.0	626	114	7/31	20.6	2.9	555	-24	692	126
平均	8/6	19.3	585	669	7/30	21.1	1.7	566	-19.1	710	107	7/28	21.9	2.5	575	-11	731	110

気候登熟量示数は林ら（2001）による。 $y/s=1.28-0.0192(21.9-t)^2$ 、 y ：気候登熟量示数、 s ：出穂後40日間の積算日射量(J)、 t ：出穂後40日間の平均気温（℃）。出穂期は表Ⅲ-6の中苗と成苗の平均。現在差異は現在の値との差異。

表Ⅲ-13 出穂期の変動が2030年代の収量に及ぼす影響（方法A）

地域 市町村名	現在				CCSR				CGCM1			
	出穂	出穂前10日		推定	出穂	出穂前10日		推定	出穂	出穂前10日		推定
	期	平均	日射	収量	期	平均	日射	収量	期	平均	日射	収量
		気温	量		気温	量		気温	量	気温	量	
		℃	w/日		℃	w/日		℃	w/日		w/日	
渡島 北斗市	8/7	20.9	168	521	7/30	22.3	148	480	7/29	22.7	153	496
空知 岩見沢市	8/5	20.5	179	545	7/29	21.7	174	556	7/26	22.4	174	563
上川 旭川市	8/3	20.3	185	555	7/28	21.3	178	563	7/25	22.1	181	583
網走 北見市	8/11	19.1	182	489	8/5	20.1	162	479	7/31	21.2	162	510
平均	8/7	20.2	179	528	7/31	21.4	166	520	7/28	22.1	168	538

地域 市町村名	CCSR 8/1出穂			CCSR 8/10出穂			CGCM1 8/1出穂			CGCM1 8/10出穂		
	出穂前10日		推定	出穂前10日		推定	出穂前10日		推定	出穂前10日		推定
	以降40日間		収量	以降40日間		収量	以降40日間		収量	以降40日間		収量
	平均	日射	kg/	平均	日射	kg/	平均	日射	kg/	平均	日射	kg/
	気温	量	10a	気温	量	10a	気温	量	10a	気温	量	10a
	℃	w/日		℃	w/日		℃	w/日		℃	w/日	
渡島 北斗市	22.3	149	487	22.2	150	490	22.8	152	495	22.6	150	492
空知 岩見沢市	21.7	172	555	21.3	170	539	22.4	172	563	22.0	171	556
上川 旭川市	21.1	176	552	20.4	170	509	21.9	177	573	21.2	171	540
網走 北見市	20.3	163	484	19.8	160	452	21.2	162	511	20.7	161	492
平均	21.4	165	519	20.9	163	497	22.1	166	536	21.6	163	520

収量の推定式は表Ⅲ-11の脚注を参照、表上段は表Ⅲ-11と同じ（移植日5/25）。表下段は出穂日を8/1と8/10に想定して算出した。

表Ⅲ－14 出穂期の変動が2030年代の収量（気象登熱量示数）に及ぼす影響（方法B）

地域 市町村名	現在				CCSR				CGCM1			
	出穂 期 月日	出穂後40日間		気候 登熱量 示数 kg/10a	出穂 期 月日	出穂後40日間		気候 登熱量 示数 kg/10a	出穂 期 月日	出穂後40日間		気候 登熱量 示数 kg/10a
		平均	積算			平均	積算			平均	積算	
		気温 ℃	日射量 J/m ²			気温 ℃	日射量 J/m ²			気温 ℃	日射量 J/m ²	
渡島 北斗市	8/7	20.1	549	668	7/30	22.2	519	664	7/29	22.7	522	662
空知 岩見沢市	8/5	19.7	588	695	7/29	21.4	590	752	7/26	22.2	594	759
上川 旭川市	8/3	19.3	596	684	7/28	20.6	595	742	7/25	21.6	604	772
網走 北見市	8/11	17.7	579	547	8/5	19.4	541	626	7/31	20.6	555	692
平均	8/7	19.2	578	649	7/31	20.9	561	696	7/28	21.8	569	721

地域 市町村名	CCSR 8/1出穂			CCSR 8/10出穂			CGCM1 8/1出穂			CGCM1 8/10出穂		
	出穂後40日間		気候 登熱量 示数 kg/10a	出穂後40日間		気候 登熱量 示数 kg/10a	出穂後40日間		気候 登熱量 示数 kg/10a	出穂後40日間		気候 登熱量 示数 kg/10a
	平均	積算		平均	積算		平均	積算		平均	積算	
	気温 ℃	日射量 J/m ²		気温 ℃	日射量 J/m ²		気温 ℃	日射量 J/m ²		気温 ℃	日射量 J/m ²	
渡島 北斗市	22.1	518	663	21.4	510	650	22.5	521	663	21.8	517	662
空知 岩見沢市	21.2	586	744	20.2	564	692	21.8	589	754	20.8	579	728
上川 旭川市	20.2	583	714	19.0	549	616	21.0	590	745	19.7	568	674
網走 北見市	19.7	549	651	18.8	528	580	20.5	555	690	19.6	547	642
平均	20.8	559	693	19.9	538	634	21.5	564	713	20.5	553	677

気候登熱量示数の算出は表Ⅲ－12の脚注を参照，表上段は表Ⅲ－12と同じ（移植日5/25）。表下段は出穂日を8/1と8/10に想定して算出した。

表Ⅲ－15 現在および2030年代における直播栽培の出穂期

栽培 指標 市町村名 地帯 番号	現在						CCSR						CGCM1						
	推定出穂期 (月日)			晩限 出穂 期 (月日)	推定出穂期 (月日)			晩限 出穂 期 (月日)	推定出穂期 (月日)			晩限 出穂 期 (月日)	推定出穂期 (月日)			晩限 出穂 期 (月日)			
	早生	晩限	中生		早生	現在	晩限		早生	現在	晩限		早生	現在	晩限				
	品種	差異	品種		差異	品種	差異		品種	差異	品種		差異	品種	差異				
1 江差町	8/8	13	8/12	9	8/21	8/1	7	32	8/4	8	29	9/2	7/31	8	34	8/4	8	30	9/3
2 北斗市	8/13	4	8/18	-1	8/17	8/2	11	28	8/6	12	24	8/30	8/1	12	30	8/5	13	26	8/31
5 伊達市	8/12	3	8/17	-2	8/15	8/1	11	27	8/5	12	23	8/28	7/31	12	29	8/4	13	25	8/29
6 厚真町	8/21	-14	8/26	-19	8/7	8/10	11	9	8/14	12	5	8/19	8/8	13	13	8/12	14	9	8/21
7 恵庭市	8/20	-9	8/25	-14	8/11	8/11	9	9	8/15	10	5	8/20	8/9	11	13	8/13	12	9	8/22
8 長沼町	8/14	-2	8/18	-6	8/12	8/4	10	17	8/8	10	13	8/21	8/2	12	21	8/6	12	17	8/23
9 新篠津村	8/18	-9	8/22	-13	8/9	8/7	11	13	8/12	10	8	8/20	8/5	13	17	8/9	13	13	8/22
10 岩見沢市	8/12	0	8/17	-5	8/12	8/3	9	18	8/7	10	14	8/21	7/30	13	24	8/3	14	20	8/23
11 深川市	8/9	1	8/14	-4	8/10	7/30	10	22	8/3	11	18	8/21	7/27	13	28	7/31	14	24	8/24
13 小平町	8/9	-1	8/14	-6	8/8	8/3	6	13	8/7	7	9	8/16	7/31	9	20	8/4	10	16	8/20
14 和寒町	8/7	-4	8/12	-9	8/3	7/30	8	11	8/3	9	7	8/10	7/26	12	20	7/30	13	16	8/15
15 比布町	8/8	-2	8/12	-6	8/6	7/31	8	11	8/4	8	7	8/11	7/27	12	19	7/31	12	15	8/15
16 富良野市	8/6	1	8/10	-3	8/7	7/29	8	15	8/2	8	11	8/13	7/26	11	21	7/30	11	17	8/16
17 名寄市	8/15	-13	8/20	-18	8/2	8/5	10	6	8/10	10	1	8/11	8/1	14	14	8/5	15	10	8/15
18 北見市	8/13	-10	8/17	-14	8/3	8/4	9	6	8/9	8	1	8/10	7/30	14	16	8/3	14	12	8/15
平均	8/12	-3	8/17	-7	8/10	8/3	9	16	8/7	10	12	8/19	7/31	12	21	8/4	13	17	8/22

早生品種「ゆきまる」、中生品種「きらら397」。播種日は現行直播マップ[®]で使用している5月10日。気象はアメダスポイントデータによる。ただし、晩限出穂期において和寒町は士別市、比布町は旭川市、富良野市は中富良野町、名寄市は名寄市風連の表Ⅲ－6の値を使用。晩限差異は晩限出穂期との差異で、現在差異は現在の出穂期との差異。2010年の気温での比布町と岩見沢市における推定出穂期：7/27、8/3、晩限出穂期：8/18、8/24（中生品種「きらら397」）。

(7) その他の障害

①登熟期の高温による白未熟粒発生に伴う品質低下
近年、西南暖地を中心に白未熟粒の多発による品質低下が問題となっている。これまでの報告^{10) 11)}から、出穂後20日間の平均気温が26～27℃をこえると検査等級が低下するまで同発生率が高くなる。本試験の2030年代の予測気象の中でも登熟気温がより高くなるCGCM1(表Ⅲ-8)では、出穂後20日間の平均気温は、江差町：23.3、北斗市：23.0、深川市：23.5、旭川市：22.5℃であり、26℃よりも低い。以上のことから、2030年代の平均的気象条件において、白未熟粒の発生による検査等級の低下が生じる危険性は低いと考えられる。

②高温による障害不稔

高温による不稔発生をみると、稲の感受性は穂ばらみ期よりも開花期で顕著に高い¹²⁾。また、過去の報告から、明確な高温障害が生じるのは35℃前後である¹³⁾。2030年代での予測気温でも出穂期頃の気温がより高くなるCGCM1でみると、開花期に相当すると思われる出穂期以降7日間での最高気温の最高値は、江差町：26.1、北斗市：27.0、深川市：27.5、旭川市：27.6℃であり、35℃以上の気温が発生する危険性は極めて低いと考えられる。

③いもち病の多発発生

2030年代には現在に比べ春季の気温が上昇するため、いもち病の初発が早まることが考えられる。また、いもち病の発生適温は20～25℃とされ、日照不足による稲体の軟弱化、降雨によるいもち病菌の発芽・侵入に必要な水滴の供給がその発生を助長する¹⁴⁾。2030年代には、夏季においても平均気温25℃以下の範囲での気温上昇とともに、日射量の減少や降雨量の増加が見込まれていることから、いもち病の発生増加は避けられないと思われる。

4. 2030年代の予測に基づく技術的対応方向

1) 作付品種の耐冷性および熟期

2030年代では限界移植日と早限出穂期が早まり晩限出穂期が遅くなることにより、現在よりも生育期間を長くできるため、遅延型冷害の危険性は小さくなる。一方、春季の気温上昇のため水稻の生育が促進されることは、同一熟期の品種でみると生育期の前進により、冷害危険期の平均気温は7月の気温上昇ほど上がらず、障害不稔発生の危険性は残る。さらに、今回は考慮に含めていないが、将来的に夏季の気象変動が現状より増大するとの見方もあることから、今後も障害型耐冷性向上の重要性は変わら

ないと考えられる。

また、潜在的な収量性は高まると予想されるが、実際に一定収量を得るためには、出穂期までの栄養成長期に必要な籾数を確保しなければならない。例えば、本試験で6、7月の月別気温と収量との間に一定の相関関係が得られなかったことは、これらの年次には高温により生育が促進され㎡当たり籾数が十分確保されないまま登熟して低収となった年次や、低温で生育が遅れて㎡当たり籾数が多くなり登熟がぎりぎり間で間に合い多収となった年次など、多様な収量成立事例が含まれるためと考えられる。以上のことから、2030年代までの期間も含めて、現行の品種については作付けの地帯区分を気候変化に合わせて見直すとともに、生育期間が大きく延長する地帯については、一定の収量を安定して得られる出穂期を見出し、その熟期を備えた品種を育成する必要がある。

例えば、前述のように北海道の稲作主要産地の2030年代の気温(5月～9月の日平均積算気温)は、青森県に相当する(表Ⅲ-1)。その移植から出穂期までの期間は、北海道で5月24日～8月2日、青森県で5月18日～8月7日であり、青森県は移植期が6日早く、出穂期が5日遅い。登熟期間に大きな差異がないとすれば、生育期間は青森県が11日長いことになり、一つの参考事例となる(表Ⅲ-16)。

表Ⅲ-16 北海道と東北各地域における水稻栽培の作業期節と出穂期(月日)

県道名	播種日	移植日	出穂期	刈取期
北海道	4/20	5/24	8/2	9/29
青森	4/12	5/18	8/7	10/3
岩手	4/15	5/15	8/8	10/5
宮城	4/8	5/7	8/6	10/1
秋田	4/18	5/18	8/6	10/2
山形	4/19	5/17	8/7	9/30
福島	4/16	5/14	8/12	10/7

1994～2008年の平均。農林水産省大臣官房統計部編(1995～2009)による。

一方、これまで北海道の水稻育種は精米アミロース含有率と精米蛋白質含有率の低下に目標をおいて行い、主にアミロース含有率を低下させることにより良食味化を成し遂げ¹⁵⁾、蛋白質含有率の低下程度は大きくはなかった。一般に、出穂期が遅い品種ほど登熟気温が低下しアミロース含有率は高くなるが、蛋白質含有率は低下することが認められている¹⁶⁾。また、アミロース含有率を育種により低下させ

ることは比較的容易である。以上のことから、現在の中生品種よりも熟期が遅くアミロース含有率が低い品種を作付けすることにより、さらに低蛋白化による食味向上を図れる可能性がある。

2) 育苗法、施肥対応

これまで北海道では、安定生産と良食味米生産のため初期生育を促進することが重要とされた。そのため、基準の栽植密度を遵守し、苗では稚苗、中苗より成苗と葉令が進み、施肥法では側条施肥など初期生育を促進する方法が奨励されている。しかし、栽植密度を高く維持することおよび葉令の進んだ苗を使用することは、必要な箱枚数は増え後者はさらに育苗期間が長くなることから、育苗の労力とコストが農家にとり負担である。また、春季の気温上昇により、葉令が進んだ苗では育苗ハウスでの高温により早期異常出穂を起こす危険性が高まる。

さらに、生育期間が長い条件では、初期生育の促進により栄養成長期の途中まで肥料成分の大半を吸収してしまい、肥料切れを生じる可能性が高まることから、分施や緩効性肥料の利用場面が増えると推測される。一方、東北地域でも青森県、次いで秋田県では、その他の地域と異なり稚苗よりも中苗と成苗が多く¹⁷⁾、2030年代の北海道でも初期生育の重要性は変わらないと思われるが、気象が変わることに対する現在の技術体系の検証が必要と思われる。

3) いもち耐病性の強化

いもち病の発生増加に対する防除法については、東北地域、その中でも前述したように5～9月の積算気温からみれば青森県で行われている対策を実施すれば対応可能と思われる。しかし、いもち病の発生には日射量や降雨量も影響することから、それらの違いによりいもち病発生がどう変わるか留意が必要である。一方、近年は農薬散布量を少なくすることが社会から求められていることから、それに対応した防除法も合わせて検討するとともに、いもち耐病性が強い品種を育成し普及させる必要がある。

4) その他

将来的に融雪の促進により5月の河川流量が減少することが予測されており¹⁸⁾、地域によっては、かんがい用水確保の面で制約が生じる可能性を見込んでおく必要がある。

5. まとめ

1) 1985～2008年の24ヵ年の成績では、収量に対して7月の気温の影響が最も大きく、不稔歩合と千粒重に影響した。しかし、それらの程度は大きくなく、収量を月別気象値から推定・予測することは困難で

あった。

2) 気温と生育・収量の経年変化みると、この24年間だけでは、夏の気温に昇温傾向は認められず、また北海道の水稻生育の変化に一定の傾向はなかった。

3) 2030年代には限界移植日（移植早限）が、水稻栽培18地帯の平均で現在より13～14日早まる。また、安全出穂期間が現在の13日から32～38日に拡大し、とくに晩限出穂期が遅くなり遅延型冷害の発生が少なくなる。従来作期が短いため作柄が安定しなかった地域ではより安定化する。また、登熟気温が高くなるため精米アミロース含有率が低下し良食味化する。精米蛋白質含有率もやや低下する。

4) 障害不稔発生に関係する冷害危険期の平均気温は少し高くなるに過ぎないため、冷害発生の危険性は残る。これは水稻の生育、すなわち冷害危険期の暦日が現在よりも早まることによる。一方、不稔発生をもたらすような低温域の出現頻度は上川地域と空知地域では減じるが、胆振地域や渡島地域では明確ではなく、地域間で差異が見られる。

5) 出穂前10日から40日間の気象から見た推定収量は、気温が上昇し最適気温に近づくが日射量が減少するため、現在対比で98～101%である。一方、潜在収量性を示す気候登熱量示数は、登熟気温が適温に近づくため107～110%と高くなる。

6) 直播栽培では、生育が早まり出穂期が早くなり晩限出穂期も遅くなることにより、早生品種に加え中生品種の直播も全道で安定的に行える。

6. 引用文献

- 1) 堀江武，中川博視．“イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究”．日作紀．59，687-695（1990）．
- 2) 北海道立中央農業試験場，上川農業試験場．“水稻の発育ステージおよび不稔歩合の推定法”．平成8年度北海道農業試験会議（成績会議）資料．1-35．（1997）．
- 3) 丹野久．“寒地のうるち米における精米蛋白質含有率とアミロース含有率の年次間と地域間の差異およびその発生要因”．日作紀．79，50-57（2010）．
- 4) 村田吉男．“わが国の水稻収量の地域性に及ぼす日射と温度の影響について”．日作紀．33，59-63（1964）．
- 5) 農林水産省大臣官房統計部編．“全国農業地域別・都道府県別累年統計表（平成6年産～20年産）水稻”．平成6～20年産作物統計（普通作物・飼料作物・工芸農作物）．農林統計協会，東京都，1995～2009．

- 6) 内島立郎. “北海道, 東北地方における水稲の安全作季に関する農業気象学的研究”. 農技研報 A. 31, 23-113 (1983).
- 7) 林陽生, 石郷岡康史, 横沢正幸, 鳥谷均, 後藤慎吉. “温暖化が日本の水稲栽培の潜在的特性に及ぼすインパクト”. 地球環境. 6 (2), 141-148 (2001).
- 8) 北海道立中央農業試験場, 上川農業試験場. “落水出芽法を用いた水稲直播栽培の安定多収技術”. 平成15年度北海道農業試験会議 (成績会議) 資料. 1-47 (2004).
- 9) 丹野久, 田中英彦, 佐々木亮, 古原洋, 三浦周. “寒地水稲の湛水土中直播栽培における簡易有効積算気温による品種選定”. 日作紀. 76, 591-599 (2007).
- 10) 若松謙一, 佐々木修, 上菌一郎, 田中明男. “暖地水稲の登熟期間の高温が玄米品質に及ぼす影響”. 日作紀. 76, 71-78 (2007).
- 11) 森田敏. “イネの高温登熟障害の克服に向けて”. 日作紀. 77, 1-12 (2008).
- 12) 西山岩男. “イネの高温障害”. イネの冷害生理学. 北海道大学図書刊行会, 札幌市, 1985, 246-258.
- 13) 松井勤. “開花期の高温によるイネ (*Oryza sativa* L.) の不稔”. 日作紀. 78, 303-311 (2009).
- 14) 大畑貫一. “いもち病”. 稲の病害—診断・生態・防除—. 全国農村教育協会, 東京都, 1989, 295-356.
- 15) 平山裕治. “北海道における水稲良食味品種の開発”. 日本水稲品質・食味研究会記念講演要旨集. 2-5 (2009).
- 16) 菊地治己. “イネの胚乳成分に関する育種学的研究”. 北海道立農試報. 68, 1-68 (1988).
- 17) 藤井薫. “寒地 (東北・太平洋側) の育苗様式”. 農文協編, 稲作大百科IV 栽培様式/管理の実際. 農山漁村文化協会, 東京都, 1990, 25-38.
- 18) 井上聡, 横山宏太郎, 大野宏之, 川島茂人. “地球温暖化にともなう国内の降雪量減少の河川への影響”. 地球環境. 6, 259-266 (2001).

(丹野 久)

IV. 畑作物に対する影響

1. 秋まき小麦

1) 目的

地球温暖化による気候変動が秋まき小麦の生育や収量性等に及ぼす影響を予測する。

2) 方法

(1) 気象要因と収量の関係解析

21年間(1990～2010年(収穫年))の中央農試(長沼町), 上川農試(比布町, 1993年まで士別市), 十勝農試(芽室町), 北見農試(訓子府町)における奨励品種決定基本調査の「ホクシン」収量および収量構成要素と, 同年次の5～7月気象(直近アメダス観測データ(平均気温, 最高気温, 最低気温, 降水量, 日照時間))との関係を検討した。

(2) 作物モデル「WOFOST」による収量変動予測

「WOFOST」は, ヨーロッパで開発された作物モデルで, 気象データおよび土壌タイプに基づく生育シミュレーションが行える。本モデルは本道の秋まき小麦に適用可能なプログラムとして改良・提示¹⁾されており, 温暖化気候データに基づく収量予測に有効なツールと判断した。

①気象データ設定

ア) 使用気象データ

現在:「メッシュ気候値2000(気象庁, 2002)」

2030年代:CCSRおよびCGCM1

これら気象データ設定地点から主要箇所²⁾の現在および2030年代予測気候データを, 作物モデル「WOFOST」に以下の通り設定した。

イ) 対象地点

倶知安, 岩見沢, 滝川, 名寄, 富良野, 網走, 訓子府, 芽室, 大樹 計9カ所

ウ) 気象設定項目

最低気温(°C), 最高気温(°C), 日射量(MJ/m²/日), 水蒸気圧(hPa), 風速(m/秒), 降水量(mm/月), 降水日数(日/月)。

気温, 日射量, 水蒸気圧および風速は月平均値である。また, 上記設定項目のうち気象データにない以下の項目については, 次に示す方法でそれぞれ推定した。

水蒸気圧: 志賀¹⁾の推定式を用いた。

水蒸気圧(hPa) = $-0.364 + 6.37 \cdot 10^{7.5 \cdot \frac{\text{最低気温} - \text{最低気温} + 237.3}{1000}}$

風速(月平均値): 志賀¹⁾により設定済みの地点(倶知安, 岩見沢, 滝川, 網走, 訓子府(境野), 芽室)については, 設定年(1981～2001)から2001年を除く20年間の平均値を現在の数値として採用した。その他の地点について

は当該市町アメダスから同期間の平均値を用いた。なお, 2030年代についても同じ数値を設定した。

降水日数(月別): 集計方法は風速と同じ。ただし, アメダスデータには「降水日数」の項目はないので, 降水が記録された日数を月別に集計した。

② 計算開始日設定および生育・収量予測

各設定地点における計算開始日(起生期)は, 志賀¹⁾と同様, 融雪日に7日を加えた日とした(表IV-1-1)。

なお, 2030年代の融雪日には, II章で示された長期積雪終日を充てた。計算開始日の設定および上記気象設定により, 気象モデル別に以下の項目の予測値が算出される。

ア) 水分制限を考慮しないポテンシャル収量(PY1)に関する項目

開花期, 成熟期(計算終了日・登熟日数は成熟期－開花期から算出), 地上部乾物重, 子実重(=PY1)

イ) 水分ストレス(不足, 過剰)を考慮したポテンシャル収量に関する項目

期間(起生期～成熟期)降雨量, 地上部乾物重, 子実重, 対PY1収量比, 水分不足日数, 水分過剰日数

土壌タイプは地点ごとに代表的な2タイプを設定し(表IV-1-1), 有効土層深は各いずれの土壌についても40cmとした。ただし, 水分不足ストレスが特に強いと想定される名寄, 富良野の低地土については30cmとした。WOFOSTでは生育シミュレーションを日単位で行うが, その際に日別降水量をWOFOSTの組み込み機能により, 月別降水量および降水日数から自動生成し, ランダムに発生した10通りの日別降水量パターンによる生育シミュレーション結果を集計した。なお, 水分ストレス要因として地下水位および地表滞水の影響は設定していない。

表 IV-1-1 シミュレーションの対象地点および土壌タイプ

地点	起生期(積雪終+7日)			シミュレーションに用いた土壌タイプ			
	現在	2030代 (CCSR)	2030代 (CGCM1)	火山性土	台地土	低地土	泥炭土
倶知安	4/25	4/19	4/20	○	○		
岩見沢	4/13	4/3	4/4			○	○
滝川	4/17	4/6	4/7		○	○	
名寄	4/24	4/20	4/21		○	○	
富良野	4/16	4/5	4/5		○	○	
網走	4/11	4/1	4/1	○	○		
訓子府	4/16	4/1	3/31		○	○	
芽室	4/6	3/26	3/25	○		○	
大樹	4/10	3/28	3/27	○	○		

各土壌における有効土層深は40cm(名寄・富良野低地土は30cm)とした。

3) 結果および考察

(1) 気象要因と収量の関係解析

農試別および全場における「ホクシン」収量と5~7月の平均気象データとの相関を表IV-1-2に示す。農試別では、収量と気象要素の係数に明らかな傾向は見られず、4場込みで6月最高気温($r=0.222^*$)および日照時間($r=0.266^*$)などと5%水準で有意な相関が認められたのみであった。さらに、収量構成要素と収量、各月平均気温との相関をみた(表IV-1-3)ところ、十勝農試を除き穂長が収量と有意な相関を示し($r=0.520^* \sim 0.580^{**}$)、十勝農試では容積重が収量との相関が高かった($r=0.617^{**}$)。4場込みでは穂長($r=0.478^{**}$)、容積重

($r=0.336^{**}$)のほか穂数($r=0.314^{**}$)も収量と有意な相関を示した。穂長は中央・上川農試では5月以降の気温との相関は低かったのに対して、十勝・北見農試、4場込みでは5月の平均気温と有意な負の相関を示した($r=-0.268^* \sim -0.634^{**}$)。一方、容積重は収量との相関が高かった十勝農試においても気温との有意な相関は認められず、4場込みで7月平均気温と有意な負の相関を示すのみ($r=-0.223^*$)であった。

これらのことから、収量および収量構成要素と各月の気象要素(特に気温)との間には明瞭な関連性を見出すことはできなかった。

表 IV-1-2 各地における気象要素と収量との相関係数(1990~2010年(収穫年次))

気象要素		5月	6月	7月
中央農試 (n=21)	平均気温	0.039	0.187	-0.331
	最高気温	0.119	0.309	-0.260
	最低気温	-0.028	0.040	-0.047
	降水量	-0.136	0.263	-0.343
	日照時間	0.048	0.356	0.115
上川農試 (n=21)	平均気温	-0.011	0.078	-0.116
	最高気温	-0.007	0.197	0.033
	最低気温	0.030	-0.129	-0.169
	降水量	-0.032	-0.511 *	-0.205
	日照時間	-0.252	0.026	-0.086
十勝農試 (n=21)	平均気温	0.024	-0.083	-0.228
	最高気温	0.064	0.017	-0.184
	最低気温	-0.010	-0.346	-0.045
	降水量	-0.421	-0.025	-0.208
	日照時間	0.079	0.269	0.009
北見農試 (n=21)	平均気温	-0.130	0.183	-0.272
	最高気温	0.014	0.256	-0.179
	最低気温	-0.331	-0.043	-0.266
	降水量	-0.349	0.080	-0.311
	日照時間	-0.042	0.355	0.167
4場 (n=84)	平均気温	-0.022	0.137	-0.155
	最高気温	0.051	0.222 *	-0.060
	最低気温	-0.080	-0.051	-0.123
	降水量	-0.233 *	-0.057	-0.206
	日照時間	-0.038	0.266 *	0.122

*: $P<0.05$

表 IV-1-3 収量構成要素と収量ならびに月別平均気温との相関係数 (1990~2010年(収穫年次))

構成要素		収量	5月	6月	7月
中央農試 (n=21)	穂数	0.381	0.027	0.250	0.054
	穂長	0.580 **	0.098	0.120	-0.046
	千粒重	-0.062	-0.025	-0.342	-0.328
	容積重	0.426	0.100	0.418	0.068
上川農試 (n=21)	穂数	0.469 *	0.112	0.326	0.053
	穂長	0.555 **	-0.268	0.141	-0.109
	千粒重	0.325	0.105	-0.403	-0.048
	容積重	0.088	0.000	-0.183	-0.219
十勝農試 (n=21)	穂数	0.091	-0.321	-0.099	-0.277
	穂長	0.187	-0.438 *	0.330	0.004
	千粒重	0.106	0.102	-0.578 **	-0.439 *
	容積重	0.617 **	0.350	0.264	-0.131
北見農試 (n=21)	穂数	0.366	-0.012	0.016	0.019
	穂長	0.520 *	-0.634 **	0.165	-0.387
	千粒重	0.224	0.481 *	-0.011	-0.267
	容積重	0.414	0.278	0.157	-0.138
4場 (n=84)	穂数	0.314 **	-0.167	-0.059	-0.177
	穂長	0.478 **	-0.268 *	0.206	-0.056
	千粒重	0.138	0.248 *	-0.182	-0.120
	容積重	0.336 **	0.071	0.006	-0.223 *

*: P<0.05, **: P<0.01

以上の結果から、個別の気象要素の影響を収量との単相関の比較から解析することは困難と考えられた。そこで、各気象要素(月別)を説明変数、収量を目的変数とした重回帰分析(ステップワイズ法)を行い、F値2以上を基準として収量に対する寄与が大きい気象要素の抽出を試みた(表 IV-1-4)。その結果、農試別ではやや傾向は異なるものの、4場込みでは「6月日照時間」、「7月最低気温」が選択され、いずれも収量と有意な偏相関係数を示し、決定係数は0.160と低い有意な重回帰式が得られた。このことから、秋まき小麦に関しては、出

穂・開花期前後の日照時間は長く、それ以降の気温は高く推移しないことが収量向上の要因になっていると推察された。1998~2008年(産年)の全道各市町村の「ホクシン」収量(北海道農林水産統計年報より、n=823)とこれら気象要素との関係においても(表 IV-1-5)、7月最低気温と全道の収量との間には有意な負の相関が認められ、地域別でも相関係数の大小に差はあるがいずれも有意な負の相関を示した。6月日照時間については、全道での傾向は明瞭でなかったものの、地域によって有意な正の相関が認められた。

表 IV-1-4 各気象要素を説明変数、収量を目的変数とした重回帰分析(ステップワイズ法)

	選択された 気象要素	F値	収量との 偏相関係数	重回帰式の 決定係数
中央農試(n=21)	6月日照時間	7.069	0.531 *	0.366 *
	7月最低気温	6.797	-0.524 *	
上川農試(n=21)	6月降水量	9.003	-0.577 **	0.342 *
	7月平均気温	2.228	-0.332	
十勝農試(n=21)	5月降水量	4.417	-0.444 *	0.293 *
	6月最低気温	2.936	-0.374	
北見農試(n=21)	6月日照時間	3.466	0.402	0.242
	7月最低気温	2.756	-0.364	
4場(n=84)	6月日照時間	11.346	0.351 **	0.160 **
	7月最低気温	8.618	-0.310 **	

ステップワイズにおける変数(気象要素)選択はF値2以上とした。

* P<0.05, **: P<0.01

表 IV-1-5 選択された気象要素と市町村別「ホクシン」収量との相関係数 (1998~2008 年(産年))

	全道 (n=823)	石狩・空知 (n=226)	後志 (n=41)	上川・留萌 (n=166)	十勝 (n=172)	網走 (n=149)
6月日照時間	0.050	0.266 **	0.105	0.198 *	0.308 **	0.057
7月最低気温	-0.516 **	-0.604 **	-0.627 **	-0.329 **	-0.197 **	-0.278 **

* P<0.05, **: P<0.01

II章の温暖化気候データセットにおける、現在に対する2030年代の各地点の平均比較では、6月日射量が0.80倍(CCSR), 0.87倍(CGCM1), 7月最低気温がプラス1.16°C(CCSR), 1.64°C(CGCM1)となっている。この2点の気象要素のみに着目した場合、いずれも収量の上ではマイナス方向への変化である。図IV-1-1では、表IV-1-4で求めた4農試込みの重回帰式(収量 = 6月日照時間×0.910

-7月最低気温×16.658+698.004)により21年間の各農試「ホクシン」推定収量を算出し、収量レベル別に6月日照時間と7月最低気温との関係をプロットした。収量レベル別に分布は明瞭に区分され、2030年代気候モデル(CCSR)を重ねたところ、概ね低収域に近い分布を示したことから、「ホクシン」においては、将来的には収量ポテンシャルの低下が推測された。

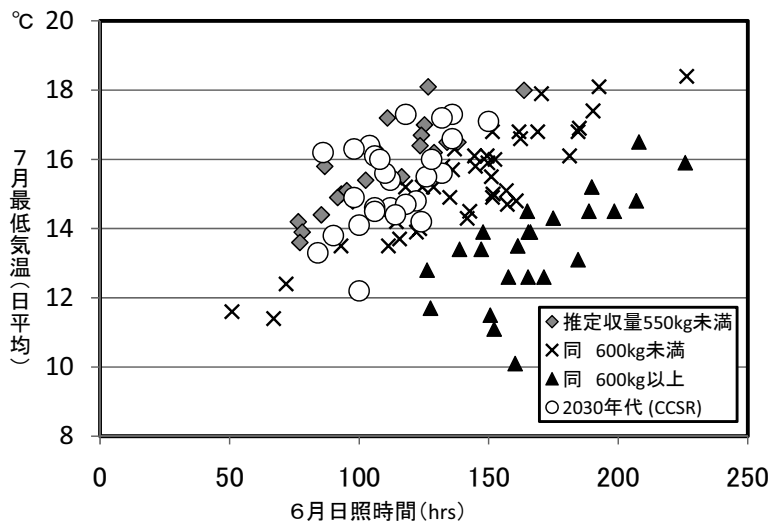


図 IV-1-1 「ホクシン」推定収量別にみた6月日照時間と7月最低気温の関係

過去21年間の各農試について、表IV-1-4における4場込み重回帰式により得られた「ホクシン」推定収量レベル別に当該年・場所のこれら気象要素をプロットし、さらに2030年代気象モデル(CCSR)設定地点の気候データを重ねた。

(2) 作物モデル「WOFOST」による収量変動予測

各地点のポテンシャル子実収量(水分制限なし, PY1), 土壌別の水分ストレス(不足, 過剰)を考慮した収量, ならびに期間降雨量を図IV-1-2~6に示した。なお, これらのシミュレーションに関連する詳細なデータは付表IV-1-1に別途示した。各地点における概要は以下の通りであった。

① 倶知安 (=羊蹄山麓)

2030年代のPY1は現在比88ないし93%程度に低下した。水分不足ストレスが比較的少ない火山性土においてはシミュレーション収量がもともとPY1に近く, PY1低下分

がそのまま減収と試算された。台地土においては, 降水量増加に伴い水分不足の影響が低下し, PY1の96~97%程度までの増収が見積もられたことから, 現在に比べ土壌タイプによる収量差が大幅に縮小した。

② 岩見沢 (=石狩, 空知中南部, 図IV-1-2)

PY1は, 現在に対して2030年代予測は92~93%程度に低下した。しかし, 土壌タイプ別に水分ストレスを考慮したシミュレーションにおいては, 現在の低地土でPY1比65%と低収であるのに対し, 2030年代では97~98%と大きく増加したことから, 2030年代は現在より約200kg/10aの増収と試算された。泥炭土では① 倶知安

などの火山灰土と同様、シミュレーション収量がもともとPY1に近いが、2030年代は降水量の増加に伴い水分不足日数がカウントされなかったことから、PY1比ほぼ100%と試算された。

③ 滝川 (=空知中北部)

台地土は① 倶知安, 低地土は② 岩見沢 とほぼ同様の傾向を示した。すなわち、PY1としては減収するものの、水分不足ストレスの大幅な減少により実収量はPY1の90%~100%弱程度に見積もられ、100~200kg程度の増収と試算された。

④ 名寄 (=上川北部, 図 IV-1-3)

現在、特に水分不足ストレスの高い地域であり、低地土では有効土層30cmとして試算したが、2030年代の期間降雨量は現在のほぼ1.5倍であったことから、他地域と同様、PY1は低下するものの、そのレベルに近づく大幅な増収と試算された。

⑤ 富良野 (=上川南部)

傾向は④ 名寄 とほぼ同じであった。

⑥ 網走 (=斜網地域, 図 IV-1-4)

現在におけるPY1は863kg/10aときわめて高かったが、他地域と同様、2030年代のPY1は90%程度まで低下した。

火山性土ではPY1低下分が減収となり、台地土では他地域と同じく、降雨量の増加によりPY1レベルに近い収量が試算された。

⑦ 訓子府 (=北見地域, 図 IV-1-5)

水分ストレスが小さく、台地土, 低地土において現在でも他地域と異なり比較的高収と算出された地域であるが、2030年代はPY1低下の影響を受け、収量試算は現在並(台地土)もしくは100kg/10a前後の減収(低地土)となった。

⑧ 芽室 (=十勝中部, 図 IV-1-6)

現在においても比較的降水量が多く、土壌によらずPY1に近い高収傾向と算出された地域であるが、2030年代のPY1低下(87~90%)にとともに、火山性土のみならず低地土でも現在比84~89%程度的大幅な減収と試算された。

⑨ 大樹 (=十勝南部)

傾向は⑧ 芽室 とほぼ同じであった。

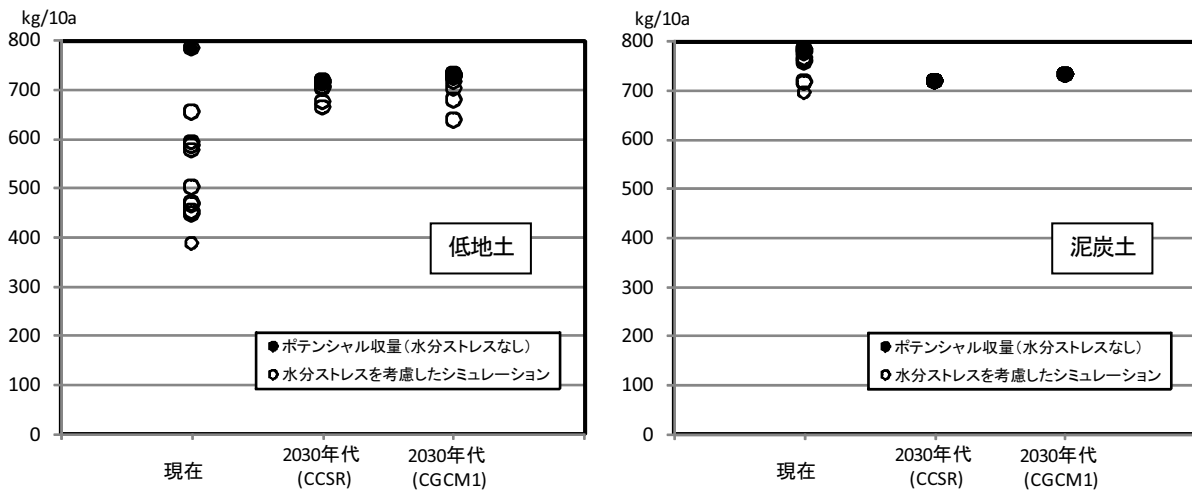


図 IV-1-2 岩見沢における各年代の収量シミュレーション

期間降雨量：現在 224mm, CCSR 300mm, CGCM1 295mm

シミュレーションの各プロット (○) は、WOFOST が月別降水量および降水日数に基づきランダムに発生させた日別降水量パターンから算出した 10 通りの結果を示す。図IV-1-3~6 についても同じ。

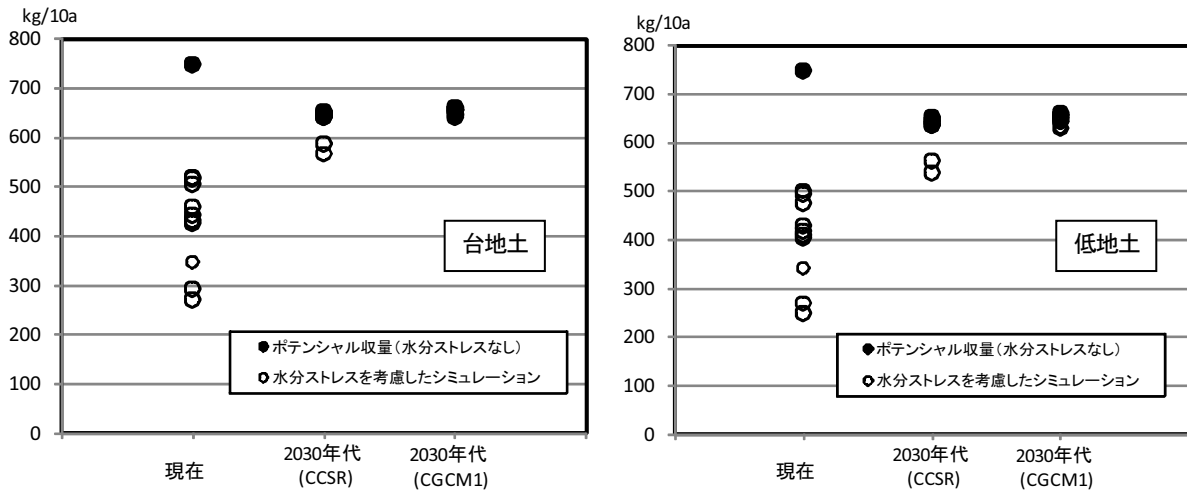


図 IV-1-3 名寄における各年代の収量シミュレーション

期間降雨量：現在 203mm, CCSR 305mm, CGCM1 289mm

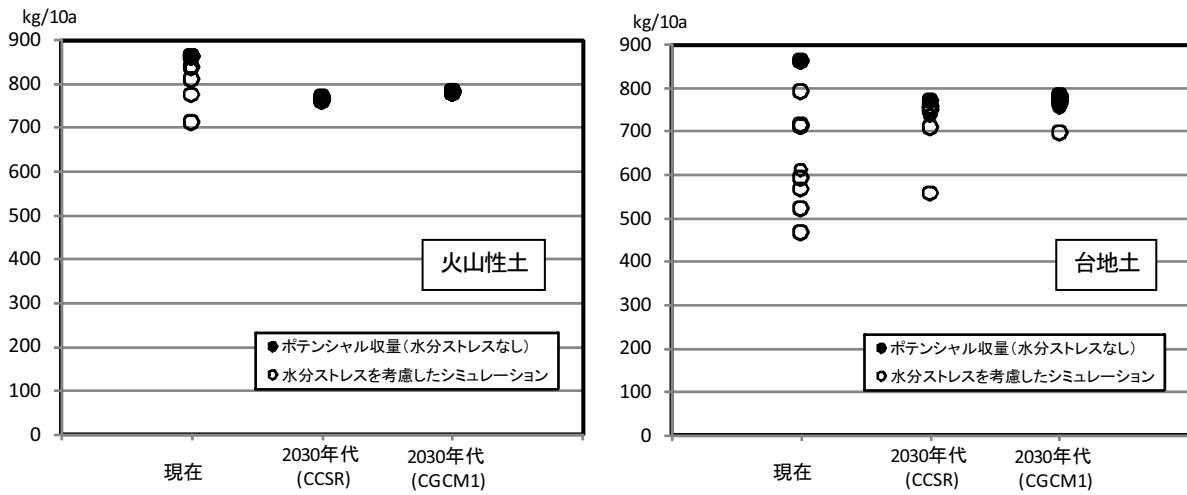


図 IV-1-4 網走における各年代の収量シミュレーション

期間降雨量：現在 236mm, CCSR 345mm, CGCM1 316mm

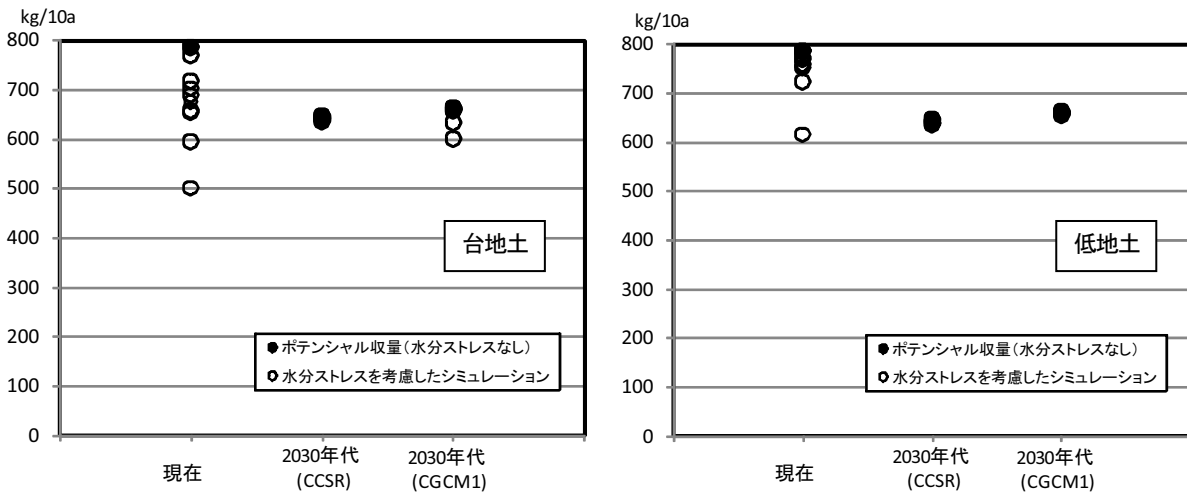


図 IV-1-5 訓子府における各年代の収量シミュレーション

期間降雨量：現在 202mm, CCSR 250mm, CGCM1 241mm

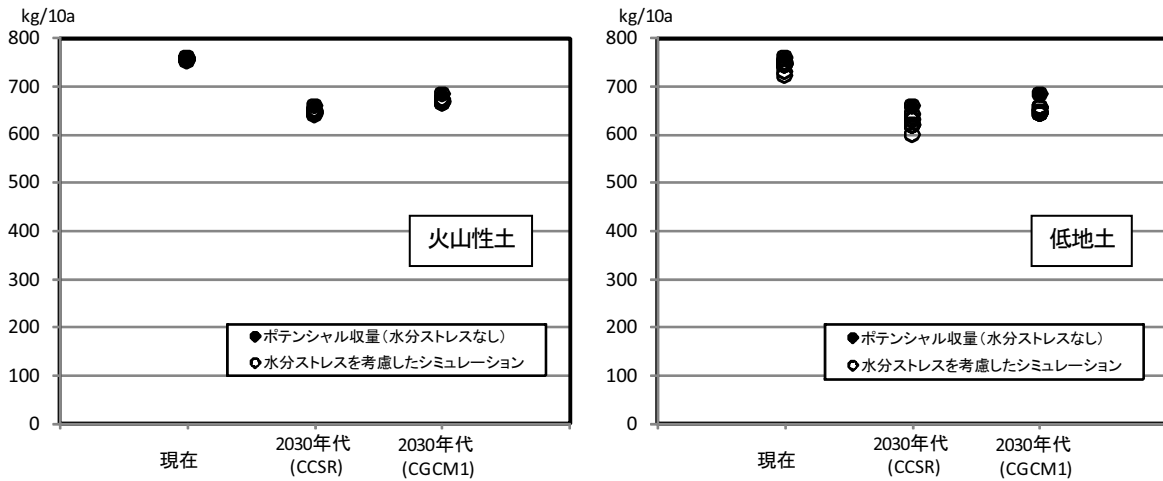


図 IV-1-6 芽室における各年代の収量シミュレーション

期間降雨量：現在 316mm, CCSR 435mm, CGCM1 457mm

2030年代予測気候では、CCSR および CGCM1 のいずれにおいても、現在（1971～2000年平年値）に比べ春季以降の気温の上昇、降水量の増加および日射量の低下が見込まれ、これらを WOFOST に当てはめた結果、全地域において PY1（水分不足を考慮しないポテンシャル収量）は現在よりも減少した。

さらに水分ストレス（不足・過剰）を考慮した収量を土壌タイプごとに求めたところ、水分不足ストレスが少ない道東の火山性土では PY1 に近いレベルは維持し続けたものの、PY1 そのものの低下にともない現在よりも低収になると見積もられた。特に十勝においては、土壌タイプによらず現在比 11～19%の減収と試算された。一方、上川北・南部など現在において水分不足ストレスを強く受ける地域においては、2030年代は PY1 こそ低下するものの、降雨量の増加により収量は増加した。

ただし、現在から 2030 年代の降雨量の変化として、開花～成熟に至る 6、7 月の増加が特に顕著であり（図

IV-1-7）、特に WOFOST シミュレーションにおいて成熟期～収穫期に重なる 2030 年代 7 月中下旬は、全ての地点で現在比 1.5～2 倍と高い降雨量が予測されている。これにより、倒伏のリスクが増すとともに、現在の熟期の品種では穂発芽、低アミロのリスクも大幅に増加する。さらに、本シミュレーションでは降水パターンから水分過剰（根への酸素供給不足）日数は算出したものの、地下水水位や地表滞水等は考慮していないことから、降雨増による生育・収量へのマイナス影響が低く評価された可能性がある。この点は、同じ気象条件で水分過剰ストレスを考慮しないシミュレーションに対する収量比が 98～100%と、ほとんど差がなかった（データ省略）ことから確認された。以上より、本シミュレーション結果は「湿害が生じない程度の排水が確保されていることに加え、倒伏、穂発芽等の影響もごく軽微である」ことが前提であり、実際に試算レベルの収量に到達するには障害が多いと考えられた。

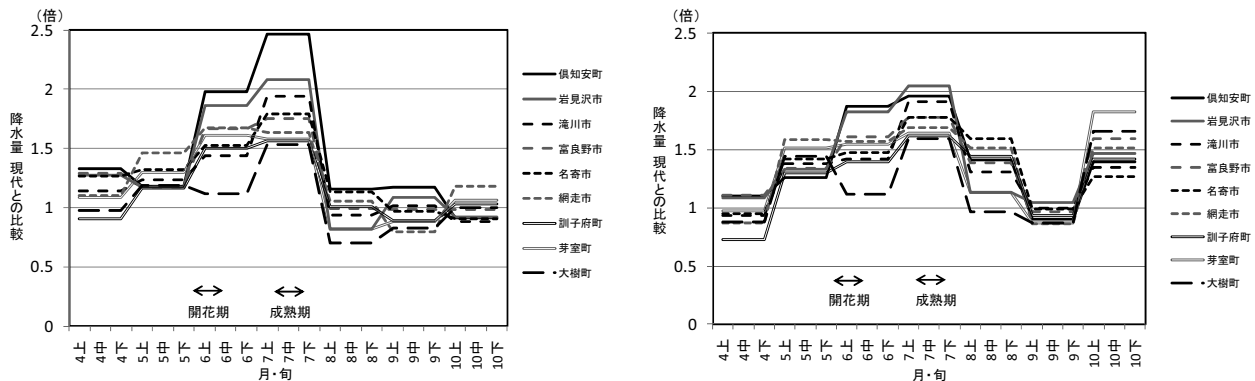


図 IV-1-7 各地における 2030 年代の現在に対する降水量比 左図：CCSR 右図：CGCM1

各図の開花期および成熟期の範囲は、各気候パターンにおける WOFOST シミュレーションによる生育予測

このシミュレーションは、「ホクシン」と同等の特性をもつ品種の作付を前提としており、上述の環境において同品種の栽培は困難である。しかしながら、2010年代初頭は「きたほなみ」が基幹品種として見込まれており、特に耐穂発芽性におけるランクアップが実現した。今後は、品種開発面では各種湿害・雨害耐性のさらなる向上が必須となるほか、適正熟期の見直しの可能性もある。栽培面では特に排水不良圃場における改良促進が課題となる。

なお、2010年夏季の気象は高温・多雨で推移しており、2030年代予測気象と類似している。この条件下での生育および病害虫被害の状況は、将来の安定生産維持に向けて実現すべきレベルを示唆すると考えられた。収量面について、秋まき小麦奨励試験を実施している4農試に近接するシミュレーション地点で2010年のアメダス気候データ（上川農試は比布を追加して設定）に基づくシミュレーションを行ったところ（表IV-1-6）、岩見沢（中央農試）、訓子府（北見農試）の「ホクシン」実収量は予測値に比較的近かったが、比布（上川農試）、芽室（十勝農試）は予測よりかなり低収であった。

道内の2010年産小麦については、春季の低温による生育遅延、開花期以降の異常高温に起因すると思われる細麦傾向が報告されている。2010年気象から予測された各地点の登熟日数は、2030年代（CCSR）と比較しても4日以上、特に芽室では7日と大幅に短縮した。さらに芽

室での実際の「ホクシン」の登熟期間は予測日数よりさらに4日短い32日間であり、多雨傾向ではあったものの子実の形成において効果的ではなく、登熟環境は極めて過酷であったことが推察された。芽室の場合、6月および7月の日平均気温は現在気象モデルの14.3℃、18.2℃に対して2030年代予測（CCSR）では15.1℃、19.4℃だが、2010年は17.2℃、20.4℃とさらに上回った。今後温暖化が進行した場合、2010年のような突出した高温年が一定の頻度で出現することが想定される。

近年でこの気象に類似するのは2004年であるが（同16.8℃、19.9℃）、同年の十勝農試における子実重は549kg/10aと平年比96%を維持した。2004年は2010年とは成熟期の差はわずかであった（1日早）が、出穂期（8日早）と千粒重（+3.6g）の差が大きく、同様の夏季高温ではあっても、出穂以降の登熟日数が確保されていたことにより、収量性や子実の充実へのダメージは抑制されたと考えられた。突出した高温年においても安定生産を維持するためにはこの点が特に重要であることを示すものであり、将来的に予測される積雪期間の短縮、晩霜期の前進にも合わせた生育確保の方策（播性の改変、起生期以降の速やかな養分吸収など）を今後検討していく必要がある。

表IV-1-6 秋まき小麦生育シミュレーションにおける「ホクシン」の2010年と2030年代の比較

シミュレーション地点	土壌条件等	気象モデル	起生期 (計算開始日)	開花期	成熟期 (計算終了日)	登熟日数	期間降雨量 (mm)	子実重 (kg/10a)
岩見沢	低地土(40cm)	2030代(CCSR)	4/3	5/29	7/8	40	300±25	705±19
		2010年(アメダス)	4/15	6/7 (6/8)	7/13 (7/16)	36 (38)	262±29 (299)	553±101 (594)
比布	低地土(40cm)	2030代(CCSR)	3/30	5/24	7/2	39	288±37	688±21
		2010年(アメダス)	(4/19)	6/10 (6/10)	7/14 (7/14)	34 (34)	316±19 (244)	599±54 (462)
訓子府	台地土(40cm)	2030代(CCSR)	4/1	6/3	7/15	42	250±24	642±3
		2010年(アメダス)	(4/18)	6/14 (6/13)	7/21 (7/20)	37 (37)	246±26 (281)	622±56 (577)
芽室	火山性土(40cm)	2030代(CCSR)	3/26	6/2	7/15	43	435±49	645±3
		2010年(アメダス)	(4/16)	6/13 (6/16)	7/19 (7/18)	36 (32)	344±22 (356)	679±1 (471)

()内は各地点直近の農試(岩見沢:中央農試、訓子府:北見農試、芽室:十勝農試、比布:上川農試)における実測値(生育期節・収量は奨励試験「ホクシン」の値)を示す。

比布の2030年代気象モデル(CCSR)は旭川を用いた。

(3) 2030年代の播種適期

WOFOSTによるシミュレーションの計算開始日は、適期に播種しかつ健全な状態で越冬したことを前提とする起生期であり、播種から越冬の条件については考慮していない。温暖化によりこれらの条件も変化することから、2030年代の播種適期について、今後の基幹品種となる「きたほなみ」で検討した。2008年に示された同品種の栽培法（「めん用秋まき小麦「きたほなみ」の高品質安定

栽培法」（平成20年普及推進事項）によれば、播種適期は、道央・道北では日平均気温が3℃以上となる11月15日までの積算気温が520～640℃となる日（5.5～6.5葉期）、道東では同じく390～580℃（4～6葉期）となる日であり、これによる播種適期は1997～2006年平年値に基づいている（道東は、最寒年でも390℃を確保できた日、最暖年でも580℃を超えない日を考慮しており、平年値に基づく期間よりも前後に各4.5日短い）が、これを2030

年代予測気候データにスライドさせた播種適期は表 IV-1-7 のとおりである。その結果、播種適期は現在より 6~10 日遅くなり、中でも道東の播種晩限は、最寒年を考慮した期日との比較では 11~13 日の大幅な遅れとなった。なお、2030 年代では算出方法を現在と変更し、11 月 15 日を起点とせず日平均気温 3℃以上の日はすべて積算に加えた。これは、2030 年代気候データでは 11 月 20

~30 日まで日平均 3℃以上の日が連続するため、現在と同様に 11 月 15 日を起点とするのは不相当と判断したことによる。秋季のこの気象傾向はまた根雪始期の後退も意味しており、春季の融雪の前進とも合わせ、雪腐病被害のリスクを低減させる一方、凍害のリスクが増加する可能性も示唆していることから、実際の播種適期については、こうした要因も加味して決定する必要がある。

表 IV-1-7 現在および 2030 年代の播種適期（「きたほなみ」）

	倶知安		岩見沢		旭川		網走		芽室	
	始期	終期	始期	終期	始期	終期	始期	終期	始期	終期
現代	9/12 ~	9/19	9/16 ~	9/24	9/11 ~	9/19	9/21 ~	10/4	9/15 ~	9/28
2030年代(CCSR)	9/18 ~	9/26	9/26 ~	10/4	9/19 ~	9/27	9/27 ~	10/11	9/23 ~	10/6
2030年代(CGCM1)	9/18 ~	9/26	9/26 ~	10/4	9/19 ~	9/27	9/28 ~	10/11	9/23 ~	10/7

* 現代の播種適期は、「めん用秋まき小麦「きたほなみ」の高品質安定栽培法」(平成20年普及推進事項)による、1997~2006年の平均気温平年値に基づく期日。()内は、この10年間の最暖年で580℃を超えない日~最寒年で390℃を確保した日を考慮した期日(道東のみ)。

** 2030年代の播種適期は、11月15日を過ぎて日平均気温3℃以上の日は積算に加えて算出した。

4) 要 約

(1) 収量および収量構成要素に対する月別各気象要素の影響については明瞭な傾向は認められなかったが、重回帰分析により、収量に対する 6 月の日照時間(正相関)と 7 月の最低気温(負相関)の寄与が示唆された。これにより、2030 年代の予測気候データからは「ホクシン」収量ポテンシャルの低下が推測された。

(2) 作物モデル「WOFOST」を用いて 2030 年代の収量変動を評価したところ、春季以降の気温上昇および日射量の低下により、ポテンシャル収量(PY1)は全地域において低下した。

(3) 一方、水分ストレスを考慮した収量は、現在において水分不足が比較的少ない地点においては減収となつ

たが、干ばつ傾向が強くと PY1 比で低収の地点においては降水量の増加により増収と試算された。

(4) 2030 年代においては各地点とも、登熟期間の降水量は現在比で大幅な増加が予測され、これにより水分不足による減収が軽減される試算となったものの、雨害・湿害(倒伏、赤かび病、穂発芽等)のリスクを考慮すると「ホクシン」と同等の特性では栽培は困難な環境であり、これらに対する耐性の向上がより一層重要となると考えられた。

(5) 2030 年代には、秋まき小麦の播種適期は現在に比べ大幅に遅れると予測された。特に道東における播種晩限の遅れが顕著であった。

5) 引用文献

1) 志賀弘行 2003. 作物モデルを活用した秋まき小麦の収量変動評価・予測法. 土肥誌, 74, 835-838.

(谷藤 健)

2. てんさい

1) 目的

地球温暖化がてんさいの生育や収量に及ぼす影響を予測する。

2) 方法

(1) 気象要因と収量(根重)・品質(根中糖分)の関係解析

過去のデータを活用し、気象要因が収量や根中糖分に及ぼす影響を解析する。

①収量, 根中糖分データ

てんさいは他の作物より品種の置き換わりが早く、地域によって品種の変遷に違いがある。また、圃場の排水性の影響などの気象要因以外が収量、根中糖分に強く影響を与える。したがって、限られた地点での気象と収量の解析からは、地球温暖化がてんさいの生育や収量に及ぼす影響の評価は困難と判断し、てんさい生産者の全道平均値を用いて解析した。また、解析に用いた年次は、各製糖工場が根中糖分の測定を開始した糖分取引制度移行後の1986年から2006年を用いた。なお、解析した期間中の直播作付け割合は5%以下であることから、移植栽培、直播栽培を区別せずに解析を行うこととした。

②気象データ

1986年から2006年までの全道8カ所の製糖工場を代表するアメダス地点10カ所の気象データを、各製糖工場における作付面積に基づき加重平均して、てんさいにおける全道平均気象データとした。なお、欠測値については、1旬で4日以上欠測がある場合は近隣のアメダスデータを使用した。3日以内の場合は気温については補正せずに1旬の数値とし、降水量は近隣のアメダスデータの値を使用した。

アメダス地点：道南・道央地区(倶知安、島松の単純平均)、道北地区(士別、美瑛の単純平均)、網走地区(美幌、斜里、北見)、十勝地区(芽室、鹿追、本別)

(2) 温暖化気候データによる収量と根中糖分の予測

上記(1)の解析結果に基づき、収量および根中糖分と相関が最も高かった気象要因(根重:4月中旬~6月下旬の積算最高気温、根中糖分:7月上旬~10月上旬の積算最低気温)との回帰式を作成し、これに第II章で整備した温暖化気候データを入力して、2030年代の収量と根中糖分を予測した。なお、2030年代の気象データについては、第II章で整備したCCSRおよびCGCM1と現在との差(全道935メッシュ平均

値)を上記(1)②の全道平均気象データの1986~2000年平均値に加算した値として用いた。

1986年から2009年までに作付けされた品種は51品種あり、品種の変遷がてんさいの収量、根中糖分に与える影響を除くため、収量及び根中糖分は次の方法で計算した補正值と実数値の2つの値から回帰式を作成した。

品種変遷の影響を除くための補正は、1980年以降作付けされた品種の収量性を北海道優良品種認定時の「モノホマレ」に対する百分比にして、その品種の作付面積で加重平均してその年の収量、根中糖分を算出し、その値を実数値に除して品種変遷の影響を除いた補正収量及び補正根中糖分とした。

(3) 温暖化に伴う生育期間の変化

2030年代においては融雪日、晩霜日の早期化及び初霜日の遅延化に伴い、てんさいの生育期間の延長が想定される。そこで、作物モデル「WOFOST」を用いて生育期間の長期化に伴う収量の変化を予測し、その対応を検討した。

①概要及び供試気象データ

作物生育および乾物生産等を日単位でシミュレーションする「WOFOST」を用いて、現在および2030年代の気温および日射量から、生育ステージおよび収量の変化を予測した。また、異常高温年となった2010年についても合わせて解析を行った。なお、移植栽培、直播栽培で生育期間の変化に伴う反応に差はないと想定して、本シミュレーションは直播栽培で解析し、対象地点は芽室とした。

気象データについてはアメダス芽室を用いた。現在の気象データとしてアメダス月別平年値、2030年代の気象データには、II章で整備したCCSRによる予測値を用いた。ただし、CCSRデータは約10km四方を平均化した面データであり、アメダスの点データとは空間スケールが異なるので直接比較ができない。そこで、CCSRと現在の「メッシュ気候値2000」の2次メッシュ平均値の差(日射量については比率)を求めた後、その差を対象地点アメダス平年値に加算(日射量については乗算)し、これを当該地点の2030年代の値として用いた。

②生育ステージ計算の設定

WOFOSTでは、生育ステージの計算に有効積算温度を用いる。月別の気象データは日別展開され計算に用いられる。生育有効温度は、WOFOSTにおけるてんさいの既定値をそのまま使用して、日最高最低平均気温から換算した(表IV-2-1)。

表IV-2-1 てんさいの生育有効温度の設定

生育ステージ	日最高最低 平均気温(T)		有効温度
植付～出芽	$T \leq 3^{\circ}\text{C}$		0
	$3 < T < 20^{\circ}\text{C}$		T-3
	$20^{\circ}\text{C} \leq T$		17
出芽～収穫	$T \leq 3^{\circ}\text{C}$		0
	$3 < T < 21^{\circ}\text{C}$		T-3
	$21^{\circ}\text{C} \leq T$		18

注1) WOFOSTの既定値を使用

生育ステージ・熟期別有効積算温度の設定を表IV-2-2に示す。出芽期は、表IV-2-2で求めた日別の有効温度の播種からの積算値が55度を越えた日とし、出芽期からの有効積算温度が650度を越えた日から収穫部位への同化産物の分配が始まるものとした。これらはWOFOSTにおけるてんさいのドイツ、オランダ、英国等の地域を想定した既定値を参考に設定し、出芽までの積算温度を実態に合うように規定値の90℃から55℃に調整した。

計算開始日となる播種期の現在の値は、4月25日とした。芽室における播種期の平均気温平年値は7.1℃である。2030年代の播種期は、現在と同様および気温上昇に伴って現在の播種期と同じ気温の日(4月20日)まで前進した場合の二通りを設定した。

表IV-2-2 てんさいの生育ステージ別有効積算温度の設定

生育ステージ	有効積算温度	
	既定値	今回の設定
播種～出芽	90	55
出芽～肥大開始	650	650

注1) 既定値はドイツ、オランダ、英国向けの設定

2) 播種～出芽の有効積算温度を日数が実態に合うよう調整

③ポテンシャル収量の算出

WOFOSTによる収量は乾物で算出されるため、収穫部位乾物重を0.7倍して糖量とした。この係数(0.7)は過去の十勝農試成績より算出した。ここでの糖量は、入力した気温と日射量の条件下で得られる最大可能量であり、湿害、干ばつおよび病虫害による減収は考慮していない。

(4) 病虫害の発生と気象要因との関係およびその対策

温暖化に伴い各種病虫害の発生状況が変動すると推察されることから、過去のデータを活用し、気象条件がてんさいの主要病虫害の発生に及ぼす影響を解析するとともに、技術的な対応策を検討した。

3) 結果および考察

(1) 気象要因と収量(根重)・品質(根中糖分)の関係解析

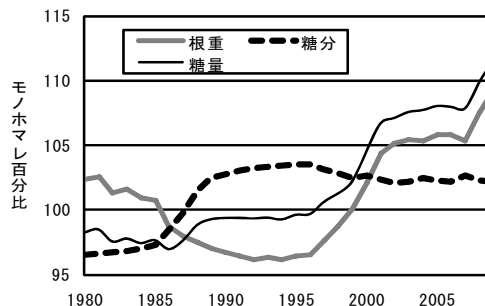
各気象要因と根重、根中糖分との関係を月別で見ると(付表IV-2-1)、根重については6月の平均気温、最高気温がそれぞれ $r = 0.550^*$ 、 $r = 0.580^{**}$ (*: 5%水準, **: 1%水準で有意, 以下同様)で正の相関が、根中糖分については8月及び9月の平均気温、最高気温、最低気温と負の相関が有意であった($r = -0.465^* \sim -0.882^{**}$)。

次に1旬を単位として各期間の相関を調べた結果、根重では4月中旬から6月下旬の積算最高気温と正の相関($r = 0.673^{**}$)が、根中糖分については7月上旬から10月上旬の積算最低気温と負の相関($r = -0.934^{**}$)が、それぞれ最も強く認められた。一方、降水量と日照時間との関係については、気温ほど相関関係は高くなく、その影響は判然としなかった。

以上のことから、てんさいについては、春から初夏(4月中旬～6月上旬)が温暖化すると多収となり、夏季～秋季(7月上旬～10月上旬)が温暖化すると根中糖分が低下すると考えられた。

(2) 温暖化気候データによる収量と根中糖分の予測

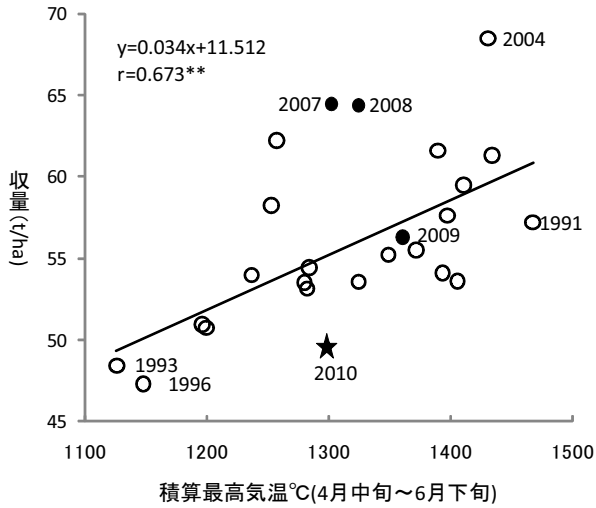
各品種が北海道優良品種に認定された際の「モノホマレ」に対する百分比を品種の作付面積で加重平均した値は(図IV-2-1)、糖分取引以前の1985年までは根重が102程度、根中糖分が97程度であった。その後、1989年頃までに糖分取引制度に対応した品種となり、その結果、根重が96程度と少なくなったが、根中糖分は102程度となり、中間型、糖分型の品種が普及したことを示している。その後、作付品種は変化したが、根中糖分は102～103とほとんど変わらず、根重は徐々に増加して、2002年に105程度、2009年で109となった。



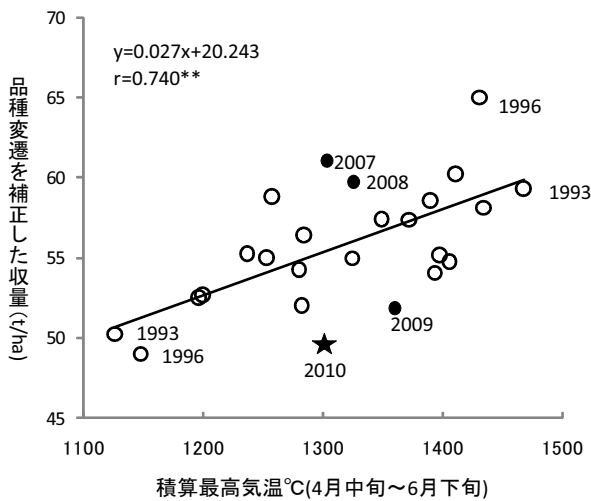
図IV-2-1 品種変遷による根重、根中糖分、糖量の推移

各年次における作付品種の収量性を「モノホマレ」に対する百分比から作付面積で加重平均

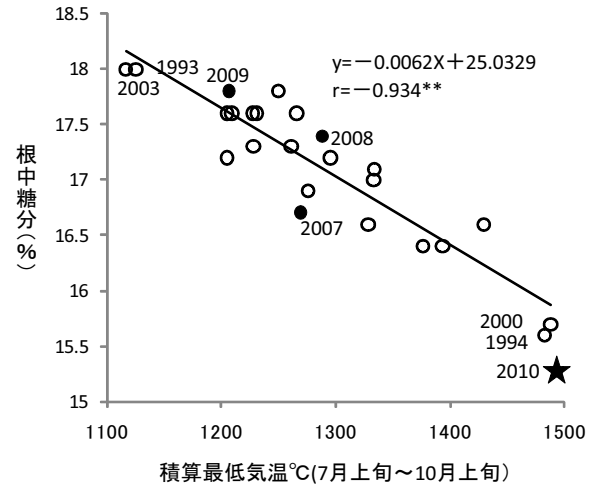
次に、実数値及び図IV-2-1に示した値から算出した補正値を用いて回帰式を作成した。その結果、根重、根中糖分ともに補正値を用いて計算することによって、若干、相関が高まる傾向にあったが、その差は小さく、今後の検討は実数値で計算した回帰式を基に行うこととした(図IV-2-2~5)。



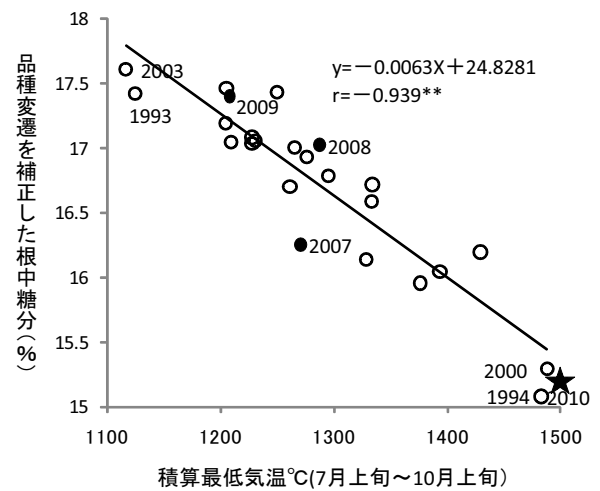
図IV-2-2 春先の気温と根重(実数)の関係



図IV-2-3 春先の気温と根重(補正値)の関係



図IV-2-4 夏期~秋期の気温と根中糖分(実数)の関係

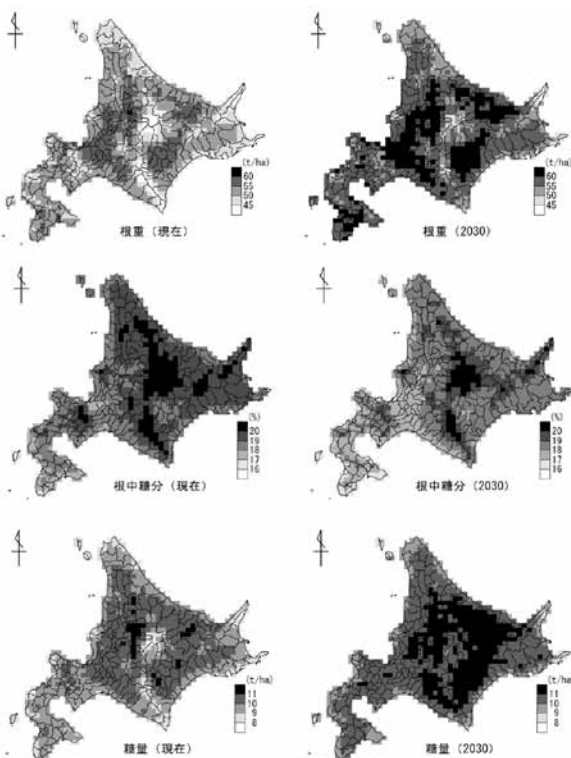


図IV-2-5 夏期~秋期の気温と根中糖分(補正値)の関係

実数値より算出した回帰式は次の通りであり、この回帰式から、2030年代の生育期間は現在と同様と仮定し、第II章で整備した気候データを用いて、道内の935メッシュについて根重、根中糖分、糖量を推定し、現在から2030年代への変化の様相を図IV-2-6に示した。

根重： $0.034 \times (\text{4月中旬} \sim \text{6月下旬の積算最高気温}) + 11.512$ ($r=0.673^{**}$)

根中糖分： $-0.0062 \times (\text{7月上旬} \sim \text{10月上旬の積算最低気温}) + 25.0329$ ($r=-0.934^{**}$)



図IV-2-6 現在と2030年代におけるてんさい根重・根中糖分・糖量

それぞれ下記の計算式により算出した。なお、道内の全メッシュについて表示しているため、てんさい作付のない地域も含まれている。2030年代の気象はCCSRによる。
 根重： $0.034 \times (\text{4月中旬} \sim \text{6月下旬の積算最高気温}) + 11.512$
 根中糖分： $-0.0062 \times (\text{7月上旬} \sim \text{10月上旬の積算最低気温}) + 25.0329$
 糖量：根重 \times 根中糖分

その結果、根重は全道各地で増収する予測となり、現在の根重が55～60t/ha程度である十勝、網走地域の各中央部や道央、道北地域の空知、上川支庁管内で2030年代には60t/ha以上になると予測された。根中糖分は全道各地で現在より低下すると予測されたが、現在でも十勝、網走地域より根中糖分が低い道

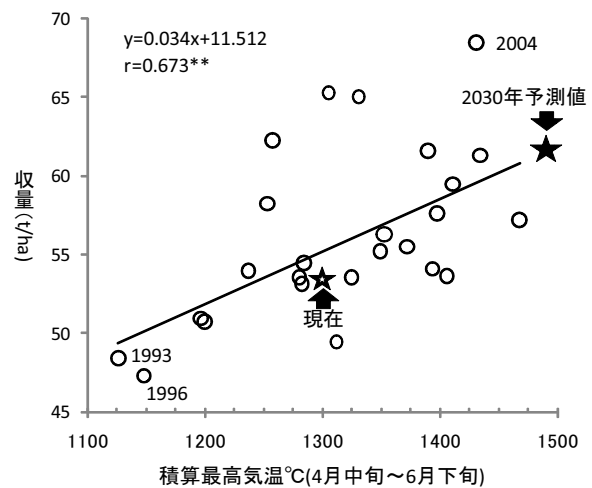
央地域が特に低くなる予測となった。そのため、糖量では概ね、十勝、網走、道北地域で現在の10～11t/haから2030年代に11t/ha以上と増収するが、道央地域では現在と同程度の10～11t/haであった。

次に全道平均でみるため、前述の回帰式に2030年代の気象データ(CCSR, CGCM1)を入力して算出した結果、現在(1986～2000年平均)と比較して、根重が55.7t/haから61.6～62.2t/haに増収し、根中糖分が17.0%から15.8～16.2%に低下し、糖量としては9.46t/haから9.73～10.1t/haへと増加すると推定された(表IV-2-3, 図IV-2-7, 8)。

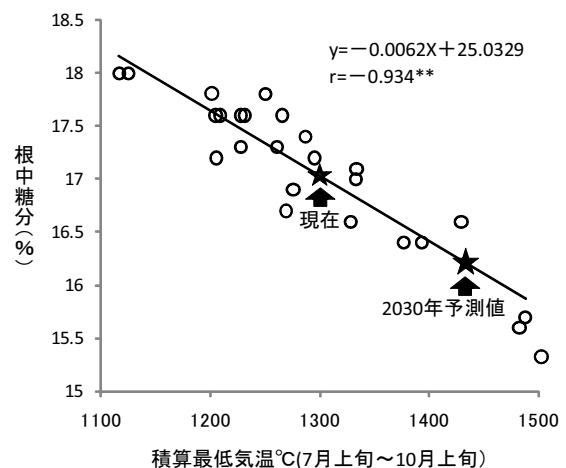
表IV-2-3 てんさいにおける2030年代の予測値

	根重 予測値 (t/ha)	根中糖分 予測値 (%)	糖量 予測値 (t/ha)	備考	
				積算最高 気温(°C) 4月中旬～ 6月下旬	積算最低 気温(°C) 7月上旬～ 10月上旬
現在(1986-2000年)	55.67	17.0	9.46	1299	1298
CCSRによる予測値	62.21	16.2	10.08	1491	1429
CGCM1による予測値	61.59	15.8	9.73	1473	1486

注) 糖量：根重 \times 根中糖分



図IV-2-7 2030年代の根重予測値



図IV-2-8 2030年代の根中糖分予測値

現在：1986～2000年の平均値，2030年代：CCSRより算出

(3) 温暖化に伴う生育期間の変化

生育予測の結果を表IV-2-4に示す。現在(平年)における生育日数(出芽から肥大停止までの日数)は180日、最大可能収量としての糖量(以下、単に糖量)は11.0t/haと推定された。

異常高温年となった2010年における生育日数は182日となり、計算上は平年並みであったが、最大LAIは平年を大きく下回った。気温および日射量から求めた糖量は、9.7t/haとなり、平年(現在)比では88%に相当した。要因解析のために気温を2010年、日射量を平年値とした場合の糖量現在比は85%となり、2010年における減収要因は気温の上昇が主因であり、日射量の寄与は小さいものと推定された。

表IV-2-4 WOFOSTによる直播てんさいの生育予測結果

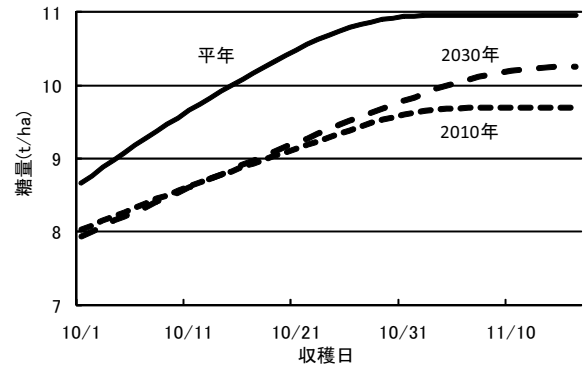
入力設定		計算結果								
地点	年代	気象要素	播種期	出芽	肥大開始	肥大停止	生育日数	最大LAI	糖量 t/ha	糖量現在比
芽室	現在	平年値	4/25	5/7	7/9	11/3	180	5.0	11.0	100
	2010	気温	4/25	5/9	7/4	11/7	182	3.0	9.4	85
		気温・日射	4/25	5/9	7/4	11/7	182	3.1	9.7	88
	2030	気温	4/25	5/4	7/2	11/16	196	4.6	11.5	105
		気温・日射	4/25	5/4	7/2	11/16	196	3.1	10.1	92
	CCSR	気温	4/20	5/1	7/1	11/16	199	4.9	11.5	105
	気温・日射	4/20	5/1	7/1	11/16	199	3.3	10.3	94	

播種期は4/25または2030年代の気温上昇に合わせて前進(4/20)のいずれかを設定
生育日数は出芽から肥大停止まで
平年値は2000年のもの、気象要素が「気温」のみの場合の日射量は平年値を仮定

2030年代において、播種期を現在と同様とした場合の生育日数は196日となり、現在より16日長くなった。糖量現在比は92%と推定された。一方、気温の変化のみを考慮した場合の糖量現在比は105%となり、2030年代における減収要因は気温の上昇ではなく、日射量の減少にあると推定された。

2030年代において、播種期を気温の上昇分だけ前進させた場合の生育日数は199日、糖量現在比は94%となった。播種期の前進が5日程度の範囲では、生育および糖量への影響は限定的であった。

生育予測値における収穫日と糖量の関係を図IV-2-11に示す。2030年には最大糖量に達する時期が11月上旬にずれこむと予想され、10月下旬前後に収穫を行った場合の糖量現在比は表IV-2-4に示す値よりさらに低下する可能性がある。したがって、現行の10月上旬中旬から開始している収穫開始時期の遅延化が必要である。



図IV-2-11 収穫日と糖量の関係 (WOFOSTによる予測)

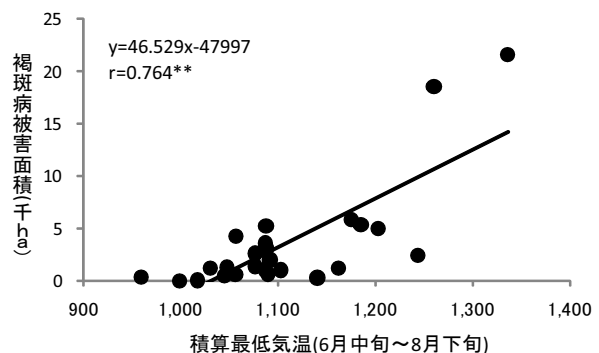
設定は表IV-2-9と同様。2010年および2030年は気温と日射を考慮した。また、2030年は播種期を4月20日とした。

(4) 病害虫の発生と気象要因との関係およびその対策

① 褐斑病

テンサイ褐斑病は、全道各地で発生し、薬剤防除回数が最も多い重要病害である。7月中旬頃から下位葉に小さな褐色の斑点を生じ、後に拡大して数mmの円形病斑となる。その後、8月中～下旬に急速にまん延し、激しいときには葉全面が褐変して枯死する。成葉の大部分が枯死すると新葉を再生するため、収量、根中糖分が著しく減少する。また、枯死に至らなくても9月上旬に大型の病斑が確認される程度発生すると減収することが知られている。

過去25カ年のテンサイ褐斑病の年次別発生状況を見ると、高温年である2000、2010年に多発し、被害面積(発生程度中以上(発病度で26以上)の発生面積)が作付面積の1/4以上を占めた(付表IV-2-2)。



図IV-2-9 テンサイ褐斑病の被害面積と積算最低気温(6月中旬～8月下旬)の関係

前述のIV-2-1)における気象データを用いてテンサイ褐斑病の被害面積との関係を検討した結果、

6月中旬～8月下旬の積算最低気温が最も相関が高かった(図IV-2-9, $r=0.764^{**}$)。干ばつ気味に経過した1999年のように積算最低気温が高くても、被害面積が少ない年次も認められるが、温暖化に加えて、防除開始時期である7月が多雨になる傾向があり、適期防除が困難になることが想定されることから、今後の気象変動に伴い、本病が発生しやすくなると考えられる。

テンサイ褐斑病の発生は、収量より根中糖分に大きな影響を及ぼすことが知られているが、「てん菜の低糖分要因とその対策」(2001年3月、てん菜低糖分解析検討会)では、2000年は褐斑病の多発により、全道平均で根中糖分が0.23～0.58%の範囲内で低下したものと推察している。また、同報告書の2000年の薬剤散布実態調査の結果、各地における薬剤散布実態から少発生グループの特徴をまとめると、ア)散布開始時期が早く、イ)病原菌の細胞膜形成に必要なエルゴステロールの生合成を阻害する殺菌剤(EBI剤)の初回散布は7月下旬～8月上旬、EBI剤の最終散布は8月下旬～9月上旬に実施している例が多い、ウ)散布間隔は、多発生グループと比べると極端に長くなく、これに連動して散布回数は多い傾向にあった。このことから、薬剤による病害虫防除を成功させるためには、適切な散布方法と病害虫の発生に応じた適切な散布タイミング(散布時期と回数)が重要であるとしている。

また、褐斑病抵抗性“強”の品種における薬剤散布回数は、抵抗性“弱”品種より1～3回程度減らすことが可能であり、激発年でも各種薬剤の散布間隔は「てんさいの主要病害虫に対するモニタリング手法の開発」(1996年指導参考事項)に示された残効期間を目安に行えるとしている(2001年指導参考事項)。近年は褐斑病抵抗性品種の作付が増えてきている状況にあるが(褐斑病抵抗性“やや強”以上の品種の2009年作付割合44%)、2010年に多発したことから、今後、抵抗性品種の利用だけではなく、初発時期の予測法を確立して効率的な予防的散布方法の検討や、圃場の排水性の影響を受けない無人への活用などの総合的な防除体系の構築が重要である。

②葉腐病

テンサイ葉腐病は、各地で散発するが、これまで、十勝、胆振、後志支庁で多発して問題になることがあった。7月中旬頃に初発し、8月上旬～9月中旬にかけてまん延し、激しいときには主脈が侵されて、葉はそこから折れて、やがて枯死する。テンサイ褐斑病と同様に、成葉の大部分が枯死すると新葉

を再生するため、収量、根中糖分が著しく減少すると考えられる。

葉腐病に関しては、病害虫発生予察事業の調査項目となっていないことから、市町村の現況調査や農試定点調査によるデータがない。しかし、褐斑病が多発した2000、2010年の十勝地域や道央地域では、本病の多発圃場が散見された。本病の病斑は、古くなると褐色となり、褐斑病による枯死部分と一見すると類似するので、発生を見逃していた圃場もあるものと思われる。

本病も褐斑病と同様、高温性の病害であり、特に夜温が高かった2000、2010年は、早期初発とともに、その後のまん延にも好適な条件が続いた。また、2000年では9月に入ってから高温多雨傾向が続いたため、現地では、例年発病が収束するこの時期においても病勢が衰えなかった例が観察されていることから、今後の気象変動に伴い、発生が顕著化する可能性がある。

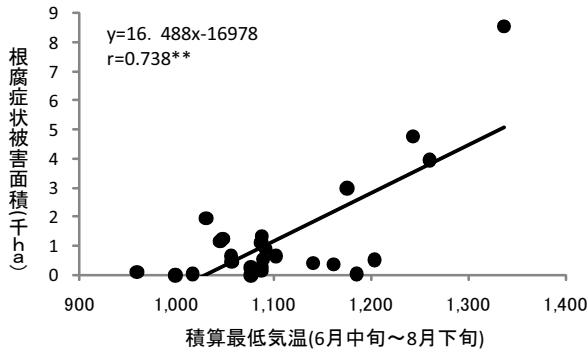
対策としては、1次病斑をなるべく早い時期に見つけて薬剤散布を行う事が重要で、2010年においては8月上旬に本病害に対して効果のある薬剤を散布したか否かによって、その後の地上部の枯死状況が異なっていたことが現地圃場で確認されている。しかし、本病害については、発生事例が少なく、研究事例も少ないことから、今後、品種間差や薬剤防除方法などの検討を進めていく必要がある。

③根腐症状(根腐病、黒根病)

てんさいの根部腐敗については、主にテンサイ根腐病、テンサイ黒根病と生理的な腐敗によって生じる。テンサイ根腐病は、全道各地で発生するが、年次によって異なり、さらに局地的である。6月下旬頃に初発し、7月下旬～8月中旬にかけてまん延し、葉柄基部もしくは冠部(クラウン)が腐敗するので、収穫前から本病の発生が確認できる。発生個体は根が肥大してから腐敗することが多いので、近隣株からの補償作用が少なく、直接収量に影響する。また、テンサイ黒根病も全道各地で発生するが、排水不良条件で発生しやすい。6月下旬頃には感染しているが、地上部から発病確認は難しく、地上部の黄化や夏期の高温時における萎凋症状で確認される程度である。内部腐敗を生じると減収し、テンサイ根腐病と同様に、近隣株からの補償作用が少なく、直接収量に影響する。

過去25カ年のテンサイ根腐病(黒根病含む)の年次別発生状況を見ると、高温年である1999、2000、2010年に多発し、特に2010年は被害面積(発生程度中以上(発病度で26以上)の発生面積)が作付面積の

13%を占めた(付表IV-2-3)。多発した3カ年とも、黒根病による根部腐敗も調査対象として混在しているとみられる。黒根病の発生に関しては、1999年に製糖工場を中心に詳しく調べられており、この年の根腐症状に関しては黒根病が主要因であり、発生には地域差が極めて大きく認められ、道央、道南、道北および十勝東部で発生が多かった。



図IV-2-10 テンサイ根腐病(黒根病含む)の被害面積と積算最低気温(6月中旬～8月下旬)の関係

前述のIV-2-1)における気象データを用いてテンサイ根腐病(テンサイ黒根病含む)の被害面積との関係を検討した結果、褐斑病と同様に6月中旬～8月下旬の積算最低気温が最も相関が高かった(図IV-2-10, $r=0.738^{**}$)。降水量との有意な相関は認められなかったが、これまで夏季に高温多雨の条件下で根腐症状の発生が多いことから、今後の気象変動に伴い、テンサイ根腐病・黒根病による根腐症状が発生しやすくなると考えられる。

テンサイ根腐病の対策としては、薬剤防除の他に、近年、抵抗性の強い品種が開発、導入されていることから、抵抗性品種の作付けが有効である。また、葉柄基部が土壌に接触するようになると発生を助長することから、中耕作業時に株元に土がよりすぎないように調整することが重要である。

テンサイ黒根病の対策としては、排水対策が最も重要で、前年秋の心土破砕、明渠、暗渠などの基盤整備が大切である。また、少～中発生条件下では、抵抗性品種の導入による防除効果が、本病の防除対策として最も効果が高く安定しており、防除対策の基本となり、薬剤処理については、抵抗性の劣る品種を栽培する場合に腐敗株率の低下に有効となる事が明らかとなっている(2004年指導参考事項)。現在、作付けされている品種については黒根病抵抗性が“中”程度の品種となり、過去の品種と比較して黒根病に対して罹病しにくくなっている。しかし、2010

年には過去25年で黒根病を含む根腐症状が最も多発したことから、今後、更なる抵抗性品種の開発、導入が重要であり、また、排水対策、薬剤防除を組み合わせた総合的な防除体系の構築が必要である。

④害虫

てんさいに被害を及ぼす害虫としてヨトウガがあげられる。本害虫は、通常年2回の発生で、蛹態で越冬した個体が6月上旬に羽化し、羽化数日後には産卵が始まる。卵期間約10日でふ化しててんさいを食害する。第2世代の幼虫は8月下旬から10月上旬にまで加害して蛹化するが、加害の盛期は9月下旬頃である。

ヨトウガの発生状況を第1回と第2回に分けて調査を開始した1990年(平成2年)以降では、ヨトウガ(第1回)の発生は2000年が最も多発した(付表IV-2-4)。

「てん菜の低糖分要因とその対策」(2001年3月、てん菜低糖分解析検討会)によれば、多発の原因は、前年の第2世代の産卵が多めだったこと、第1世代産卵期の6月中～下旬が好天に経過したこともあり、死亡虫率が低かったことなどが原因と考えられるが、詳しい理由については不明である。ただし、食害程度の増加は、高温経過のため、幼虫の摂食行動が活発であったことから急速に増加したとしている。また、ヨトウガ(第2回)の発生は2000年、2010年に多発している(付表IV-2-5)。両年とも、夏期が高温年であったことから、前年度の産卵数や第1世代の発生量の影響もあるが、高温に経過することにより、発生量の増加や摂食行動の活発化によって被害が増えることが想定される。本害虫については、第1、2世代ともに幼虫の被害株率50%を目安に茎葉散布することにより、それぞれ1回の薬剤防除で防除可能であるが(1998年指導参考事項)、幼虫の摂食行動が活発化して要防除水準がかわることが想定されることから、散布開始時期や回数を検討する必要があると思われる。

更に、2010年については、道内各地で南方からの飛来性害虫であるシロオビノメイガが発生し、著しい食害を受けた圃場も散見された。現在、てん菜で本害虫に登録のある薬剤はない。

以上のことから、今後の気象変動に伴い、てんさいの害虫被害はヨトウガにおける食害程度の増加やこれまで発生が認められなかった害虫による被害が想定され、害虫に対する新たな薬剤防除体系の構築が必要となる。

以上のことから、病害の発生については、初発が早まり、発生量も多くなり、害虫については食害量

の増加やこれまで発生が認められなかった新たな害虫被害が想定される。また、7月が多雨になることが予想され、薬剤の適期防除が困難になることから、病害抵抗性品種の作付と排水対策の実施を推進するとともに、薬剤散布スケジュールの見直し等の薬剤散布方法の検討が必要である。

4) 要約

温暖化により、てんさいの収量（根重）は増えるが、夏季以降の高温により根中糖分が大きく低下す

る。また、最大糖量に達する時期が11月上旬にずれこむと予想され、現行の10月上中旬から開始している収穫開始時期の遅延化が必要である。褐斑病、葉腐病、根腐病、黒根病などの病害の発生については、初発が早まり、発生量も多くなり、ヨトウガについては食害量の増加が想定される。そのため、病害抵抗性を有する高糖性品種の作付と排水対策の実施を推進するとともに、薬剤散布スケジュールの見直し等の薬剤散布方法の検討が必要と考えられた。

(梶山 努)

3. ばれいしよ

1) 目的

各場の作況データ等を用いて、気象条件（主に平均気温）と収量・でん粉価、でん粉収量の関係を解析するとともに、温暖化がこれらに及ぼす影響を予測する。

2) 方法

(1) 気象要因と収量等の関係解析

供試年：1990～2009年の20年

供試品種：十勝農試は「農林1号」「コナフブキ」「男爵薯」、中央・上川・北見農試は「男爵薯」

検討項目：作況調査データの上いも収量、でん粉価、でん粉収量（いも収量×でん粉価/100で算出）。

気象データ：アメダス芽室、アメダス長沼、アメダス比布、アメダス境野。

(2) 作物モデル「WOFOST」による生育予測

①概要

作物生育および乾物生産等を日単位でシミュレーションする「WOFOST」を用いて、現在および2030年代の気温および日射量から、生育ステージおよび収量の変化を予測する。また、異常高温年となった2010年についても合わせて解析を行う。

②対象地点

十勝農試（芽室）および北見農試（訓子府）

③供試気象データ

十勝農試についてはアメダス芽室、北見農試についてはアメダス境野の観測値を用いた。現在の気象データとしてアメダス月別平年値、2030年代の気象データには、II章で整備したCCSRによる予測値を用いた。ただし、CCSRデータは約10 km四方を平均化した面データであり、アメダスの点データとは空間スケールが異なるので直接比較ができない。そこで、CCSRと現在の「メッシュ気候値2000」の2次メッシュ平均値の差（日射量については比率）を求めた後、その差を対象地点アメダス平年値に加算（日射量については乗算）し、これを当該地点の2030年代の値として用いた。

④生育ステージ計算の設定

WOFOSTでは、生育ステージの計算に有効積算温度を用いる。月別の気象データは日別展開され計算に用いられる。生育有効温度は、WOFOSTにおけるばれいしよの既定値をそのまま使用して、日最高最低平均気温から換算した（表IV-3-1）。生育ステージ・熟期別有効積算温度の設定を表IV-3-2に示す。萌芽期は、表IV-3-1で求めた日別の有効温度の植付

からの積算値が170℃を越えた日とし、萌芽期からの有効積算温度が150℃を越えた日から塊茎への同化産物の分配が始まるものとした。これらはWOFOSTにおけるばれいしよの既定値である。塊茎肥大開始から枯凋期に至るまでの有効積算温度の設定は、WOFOSTでは、ばれいしよの熟期別に数段階の設定が用意されている。ここでは、「紅丸」の熟期に相当する有効積算温度として、十勝農試の作況データを参考に、1675℃を設定した。

計算開始日となる植付期の現在の値は、作況平年値を参考に芽室では5月9日、訓子府では5月13日とした。植付期の平均気温平年値は芽室および訓子府では、それぞれ9.8℃および9.5℃となる。2030年代の植付期は、現在と同様および気温上昇に伴って現在の植付期と同じ気温の日まで前進した場合の二通りを設定した。

表IV-3-1 ばれいしよにおける生育有効温度の設定

生育ステージ	日最高最低平均気温(T)	有効温度
植付～萌芽	$T \leq 3^{\circ}\text{C}$	0
	$3 < T < 18^{\circ}\text{C}$	T-3
	$18^{\circ}\text{C} \leq T$	15
萌芽～枯凋	$T \leq 2^{\circ}\text{C}$	0
	$2 < T < 30^{\circ}\text{C}$	T-2
	$30^{\circ}\text{C} \leq T$	28

WOFOSTの既定値をそのまま使用

表IV-3-2 ばれいしよの生育ステージ別有効積算温度の設定

生育ステージ	有効積算温度(度)
植付～萌芽	170
萌芽～塊茎肥大開始	150
塊茎肥大開始～生育停止	1675

南フランス用の設定を使用（熟期は紅丸相当）

⑤ポテンシャル収量の算出

WOFOSTによる収量（塊茎の全重）は乾物で算出されるため、乾物率を20%と仮定して、生重に換算した。ここでの収量は、入力した気温と日射量の条件下で得られる最大可能収量であり、湿害、干ばつおよび病虫害による減収は考慮していない。

(3) ジャガイモ疫病の初発期予測

ジャガイモ疫病発生予察システム（FLABS：中央農試、1991）における発病好適基準から、2030年代における初発期の変化を考察した。

FLABSは萌芽日以降の日平均気温、降水量により感染好適指数を割り当て、累積値が21に達したとき

を危険期到達とし、初発日を予測するものである(表IV-3-8)。表の条件にあるように気温が高く、降水量が多くなると好適指数の値が大きくなり、危険期到達日が早くなって、疫病の発生は早まるものと予測される(表以外にも例外の条件がある)。

表IV-3-8 気温・降水量と好適指数

その日の平均気温	前5日間の降水量の合計			
	5~10mm	11~20mm	21~25mm	26mm以上
15.1~26.5°C	1	2	2	3
11.7~15°C	0	1	2	2
7.2~11.6°C	0	0	1	1

3) 結果および考察

(1) 気象要因と収量等の関係解析

十勝農試の「コナフブキ」および「農林1号」の収量、でん粉価、でん粉収量と月別の平均気温との相関を検討した結果、両品種ではほぼ同様の傾向が認められた(表IV-3-3)。すなわち、収量と気温との間には全般に低い負の相関が認められ、「コナフブキ」では9月の気温と収量との間に $r=-0.475^*$ の有意な相関が認められた。でん粉価においては気温と有意な負の相関が認められる事例が多く、特に生育後半の8・9月で相関係数が高かった。でん粉収量においても、特に生育後半の8月あるいは9月の気温と負の有意な相関が認められている。また、両品種とも気温が高いと生育期間(植え付けから枯凋までの日数)が短くなる傾向であった。

表IV-3-3 十勝農試の「コナフブキ」、「農林1号」における気温と収量等との関係

	コナフブキ(n=20)				農林1号(n=20)			
	収量	でん粉価	でん粉収量	植付-枯凋間の日数	収量	でん粉価	でん粉収量	植付-枯凋間の日数
でん粉価	0.489				0.410			
でん粉収量	0.929	0.776			0.924	0.726		
平	5月 0.035	-0.188	-0.055	-0.494	-0.035	-0.174	-0.094	-0.651
	6月 0.074	0.009	0.051	-0.425	-0.173	-0.362	-0.290	-0.304
	7月 -0.250	-0.438	-0.366	-0.169	-0.257	-0.337	-0.320	-0.161
	8月 -0.322	-0.620	-0.495	-0.529	-0.339	-0.830	-0.599	-0.445
	9月 -0.475	-0.656	-0.620	-0.570	-0.101	-0.656	-0.352	-0.294
均	5-6月 0.068	-0.108	-0.001	-0.523	-0.131	-0.336	-0.242	-0.587
	5-7月 -0.082	-0.316	-0.196	-0.618	-0.237	-0.436	-0.355	-0.532
	5-8月 -0.209	-0.514	-0.370	-0.578	-0.326	-0.696	-0.532	-0.585
	5-9月 -0.285	-0.584	-0.455	-0.393	-0.299	-0.739	-0.530	-0.562
気	6-7月 -0.130	-0.305	-0.227	-0.542	-0.293	-0.472	-0.414	-0.310
	6-8月 -0.261	-0.537	-0.418	-0.504	-0.374	-0.759	-0.595	-0.443
	6-9月 -0.336	-0.607	-0.501	-0.472	-0.330	-0.787	-0.574	-0.436
温	7-8月 -0.373	-0.692	-0.562	-0.438	-0.388	-0.782	-0.609	-0.408
	7-9月 -0.436	-0.738	-0.626	-0.454	-0.329	-0.807	-0.578	-0.406
	8-9月 -0.406	-0.679	-0.580	-0.454	-0.270	-0.821	-0.545	-0.418

注) 数字下の二重線は1%水準で有意、一重線は5%水準で有意。

「男爵薯」における収量、でん粉価、でん粉収量と月別の平均気温との相関は、「コナフブキ」・「農林1号」の場合よりも全般に低かったが、気温とでん粉価との間に負の有意な相関が認められている(表IV-3-4)。

表IV-3-4 「男爵薯」における気温と収量等との関係

	十勝農試(n=20)				4場(n=80)		
	収量	でん粉価	でん粉収量	植付-枯凋間の日数	収量	でん粉価	でん粉収量
でん粉価	-0.048				-0.108		
でん粉収量	0.899	0.393			0.922	0.281	
平	5月 -0.260	0.035	-0.223	-0.520	-0.070	-0.137	-0.117
	6月 -0.023	-0.350	-0.180	-0.257	0.270	-0.333	0.136
	7月 -0.187	-0.296	-0.287	-0.109	0.033	-0.407	-0.114
	8月 -0.157	-0.523	-0.380	-0.344	0.004	-0.315	-0.108
均	5-6月 -0.172	-0.202	-0.249	-0.478	0.138	-0.301	0.021
	5-7月 -0.231	-0.312	-0.343	-0.421	0.113	-0.413	-0.041
	5-8月 -0.237	-0.465	-0.421	-0.460	0.082	-0.426	-0.075
気	6-7月 -0.148	-0.435	-0.319	-0.243	0.185	-0.461	0.010
	6-8月 -0.180	-0.566	-0.413	-0.345	0.120	-0.449	-0.047
	7-8月 -0.219	-0.541	-0.434	-0.306	0.020	-0.424	-0.132

注) 数字下の二重線は1%水準で有意、一重線は5%水準で有意。

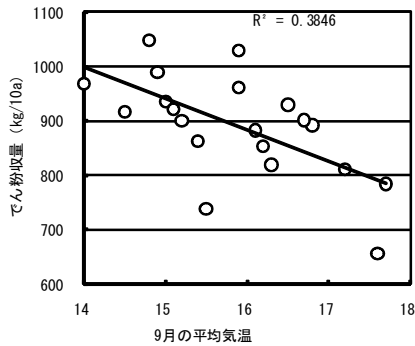
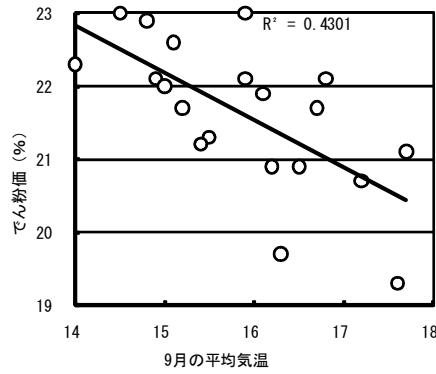
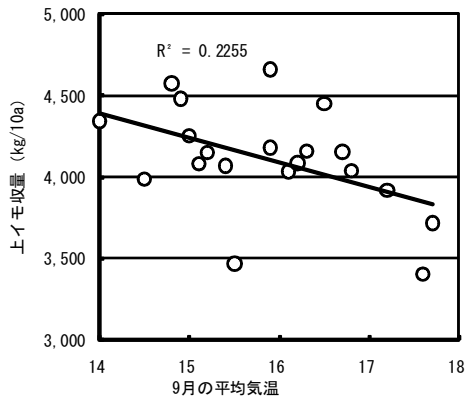
十勝農試における「コナフブキ」・「農林1号」の収量、でん粉価と、降水量、日照時間との相関を検討した(表IV-3-5)。有意な相関が認められたのは、6月の降水量と「農林1号」のでん粉価、7月の日照時間と「コナフブキ」の収量のみであり、明確な関連は認められなかった。

表IV-3-5 十勝農試における降水量、日照時間と収量等との関係

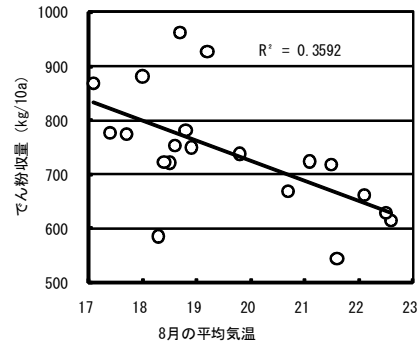
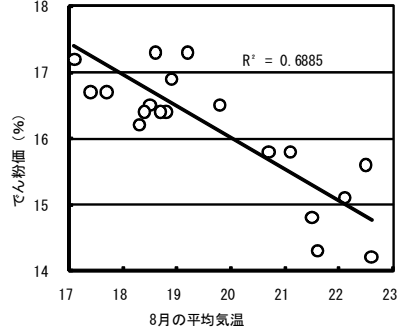
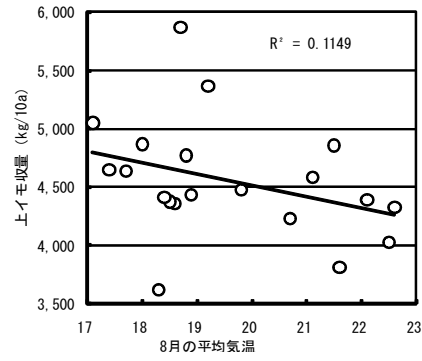
	降水量				日照時間			
	コナフブキ		農林1号		コナフブキ		農林1号	
	収量	でん粉価	収量	でん粉価	収量	でん粉価	収量	でん粉価
5月	-0.06	-0.32	-0.13	-0.24	5月 -0.21	-0.04	0.17	-0.03
6月	0.31	0.29	0.15	0.52	6月 -0.23	-0.04	0.09	-0.26
7月	-0.27	0.25	0.06	0.23	7月 0.58	-0.08	0.31	-0.01
8月	0.13	0.04	-0.20	0.22	8月 0.23	-0.12	0.04	-0.37
9月	-0.22	-0.37	-0.18	-0.28	9月 0.10	0.36	0.41	0.30

注) 数字下の二重線は1%水準で有意、一重線は5%水準で有意。

十勝農試の「コナフブキ」については9月の平均気温と、「農林1号」では8月の平均気温と収量、でん粉価、でん粉収量との関係を図IV-3-1、IV-3-2に示した。いずれの場合も相関係数は負で、気温が高まると収量、でん粉価、でん粉収量のいずれも低下すると予想される。したがって、今後の温暖化傾向はばれいしよの収量・品質を低下させると推測されるが、散布図のバラツキが大きい(相関係数がそれほど高くない)ため、低下程度を予測することは困難であった。



図IV-3-1 十勝農試の「コナフブキ」における9月の平均気温と上イモ収量・でん粉価・でん粉収量との関係



図IV-3-2 十勝農試の「農林1号」における8月の平均気温と上イモ収量・でん粉価・でん粉収量との関係

表IV-3-6 各年次における旬別平均気温の年格差と収量及びでん粉価

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
5月上	-2.6	1.0	0.2	-2.7	-2.5	-1.0	0.9	-3.1	0.4	0.9	0.8	1.0	-2.4	2.7	1.6
5月中	-0.6	1.4	1.7	0.4	-0.2	-0.1	2.6	-5.4	-1.8	2.1	-1.8	0.0	2.8	-0.6	-1.8
5月下	-0.2	2.0	2.0	-0.2	-1.2	2.5	-0.7	1.1	-3.4	0.2	0.6	2.6	-1.0	0.3	-0.4
6月上	-2.3	1.7	1.6	-2.6	-3.5	0.6	-0.3	-1.4	-4.3	-2.8	2.1	0.3	1.5	4.0	0.6
6月中	-1.5	4.3	3.8	-1.0	0.0	0.6	-0.6	-0.4	0.5	-0.3	2.7	2.1	-0.7	-1.1	2.1
6月下	-1.2	2.5	3.3	1.0	-2.3	-0.5	-1.1	-1.3	3.1	-0.1	0.3	1.2	2.7	-3.6	-0.4
7月上	0.4	0.7	0.2	1.9	0.2	0.3	0.7	-1.9	2.0	1.4	-1.9	2.5	-0.7	-0.9	-3.3
7月中	0.5	1.5	-1.7	0.2	-0.9	3.9	2.4	3.3	1.5	-1.5	1.6	3.2	0.7	1.0	-3.5
7月下	3.8	0.3	-0.4	0.4	-4.9	2.4	2.2	0.4	2.2	-0.6	3.5	1.1	-1.4	-0.7	-4.4
8月上	2.6	0.6	-4.4	-3.4	-5.9	5.8	-3.3	-3.0	1.3	-1.8	5.9	2.9	-4.5	-1.7	0.9
8月中	0.1	0.9	-1.2	-2	-1.6	1.8	-1.3	0.7	-6.1	-0.6	3.3	1.8	-0.4	-2.7	-2.2
8月下	2.0	1.4	0.1	1.2	1.3	0.9	-0.3	-2.0	-2.4	0.5	0.5	2.0	-0.6	-1.7	-1.1
9月上	1.7	2.7	1.8	-1.5	-2.7	3.2	-1.3	-2.6	0.0	0.8	2.8	-0.3	-1.4	0.7	-1.7
9月中	1.1	0.7	0.0	-0.9	0.8	2.1	-1.3	1.4	-1.5	2.0	1.2	1.2	-0.1	-0.8	0.1
9月下	0.7	-0.2	0.0	-0.2	0.1	1.3	1.6	0.7	-0.6	2.1	1.9	0.2	-2.7	1.1	-1.2
10月上	-0.9	1.2	1.4	0.0	-0.2	2.3	-1.9	-0.2	-0.6	0.2	-0.6	1.2	-1.6	2.2	-1.6
10月中	1.7	2.2	2	0.0	-1.8	0.4	3.1	-1.2	-1.8	2.8	-1.5	-2.0	1.2	-0.1	-0.7
10月下	1.2	1.2	-0.1	2	1.8	-0.1	1.9	0.4	-1.4	1.0	2.1	-0.4	-1.0	-1.8	1.0
収量(kg/10a)	3720	3790	3870	3940	3560	3750	3930	3500	4050	4030	3840	3770	4000	4150	4120
年比(%)	96	98	100	102	92	97	102	90	105	104	99	97	103	107	107
でん粉価(%)	16.2	17.4	18.5	18.0	18.9	16.1	17.3	16.7	18.0	17.3	16.6	16.1	18.1	17.2	17.7

注：薄い網掛けは平年より1℃以上高い 濃い網掛けは平年より1℃以上低い
 収量は統計事務所発表の十勝支庁の収量 年比は15年間の平均値との対比
 でん粉価は十勝農試作況4品種(男爵薯・トヨシロ・農林1号・コナフブキ)の平均

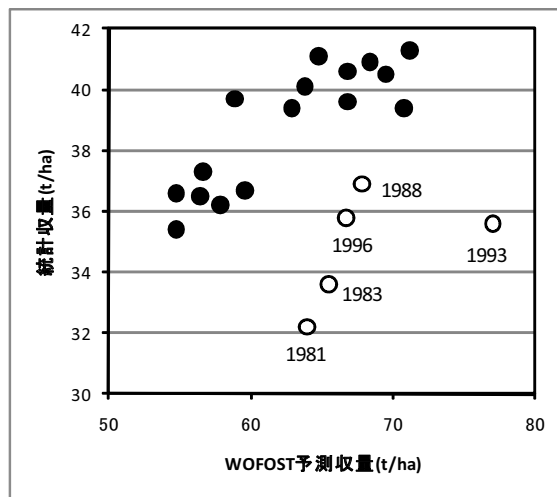
表IV-3-6に、「平成15年夏季の低温とその後の気象が農作物に及ぼした影響に関する調査報告書」(農業試験場資料33号)で検討した平均気温と収量、でん粉価との関連を示した。多収年であった2002, 2003年は初期生育に相当する時期(概ね6月まで)の気温が高く夏季の気温が低かったことが多収の要因であるとしている。1993, 1996年は夏季の気温は低かったが、初期生育に相当する時期の気温が低かったため多収にはならなかったとしている(湿害の影響もあり)。年間を通じて気温が高かった1990, 1994, 2000年の収量平年比は98, 97, 97と平年を下回った。でん粉価に関しては、夏季の気温が高い1994, 1999, 2000年で低く、夏季の気温が低い1991, 1992, 1993, 1997年で高く、夏季の気温の影響が大きいことが示されている。

以上ばれいしよに対する高温の影響は、初期生育の時期では収量にプラスの影響を与える場合もあるが、おおむね収量、でん粉価に対してマイナスの影響があるものと考えられた。

2010年の気象は、初期生育に当たる6月上旬まで低温に経過し、初期生育が遅れたところにその後の高温が影響したため収量の低下程度は大きく、十勝農試の作況では3品種(「男爵薯」、「トヨシロ」、「コナフブキ」)平均で平年比81%であった。でん粉価については、予測にあるように8月、9月の気温が高かったことから0.6~1.2%低下した。

(2) 作物モデル「WOFOST」による生育予測

生育予測に先立ち、WOFOSTの予測収量の妥当性を検証するため、アメダス芽室における1981~2001年の気象データから推定した最大可能収量(以下、単に収量)を市町村統計における芽室町のばれいしよ収量と対比した結果を図IV-3-3に示す。計算の対象とした21年中16年(図中の黒丸)では、予測収量と統計収量の傾向は概ね一致していた。予測収量に対して統計収量が大きく下回った5カ年(図中の白丸)には、8月の記録的豪雨(1981年)、冷湿害年(1983年, 1993年, 1996年)などが含まれる。なお、ここでの収量予測は「紅丸」並の熟期を仮定して行ったが、より早い熟期を仮定した場合にも、予測収量のレベルは低くなるがほぼ同様の傾向が得られる。



図IV-3-3 芽室町における予測収量と実際の収量の関係

1981年~2001年、気象はアメダス芽室、統計収量は芽室町、計算上の植付期は5月9日とした。図中の白丸は冷湿害年などである。

2030年代および2010年に対する生育予測の結果を表IV-3-7に示す。有効積算温度による生育ステージの予測を平年気象に対して行った結果を、2001年の定期作況報告における平年値(表中のカッコ内の値)と比較すると、訓子府における枯凋期(生育停止)が実測より6日遅れたほかは、概ね良く適合していた。平年における生育日数(萌芽期から生育停止までの日数)は芽室および訓子府でそれぞれ122日および130日、最大可能収量(以下、単に収量)はそれぞれ65t/ha および70t/ha と推定された。

異常高温年となった2010年における生育日数は芽室および訓子府でそれぞれ101日および104日となり、平年より21日および26日の短縮が推定された。2010年における気温・日射量から求めた収量は、50t/ha および53t/ha となり、平年(現在)比では77%および76%に相当した。要因解析のために気温を2010年、日射量を平年値とした場合の収量現在比は77%および79%となり、2010年における減収要因は気温の上昇による生育日数の短縮が主因であり、日射量の寄与は小さいものと推定された。

2030年代において、植付期を現在と同様とした場合の生育日数は、芽室および訓子府でそれぞれ114日および119日、収量現在比は85%および84%と推定された。気温の変化のみを考慮した場合の収量現在比は94%および93%となり、2030年代における収量低下の主因は日射量の減少にあると推定された。

2030年代において、植付期を気温の上昇分だけ前進させた場合の生育日数は、芽室および訓子府で11

5日および120日となり、植付期を現在同様とした場合よりも1日長くなった。また、収量現在比についても85%および86%と訓子府では若干の改善が予想された。

2030年代において、植付期を気温の上昇分だけ前進させた場合の枯凋期は芽室では9月13日、訓子府では9月18日まで早まると推定された。

秋まき小麦の播種晩限が道東で現在より11日～13日遅くなることを考慮すると、秋まき小麦の前作として利用できるばれいしょの熟期の選択肢が広がる事が予想される。

表IV-3-7 WOFOST によるばれいしょ生育予測結果

入力設定				計算結果				
地点	年代	気象要素	植付期	萌芽期	生育停止	生育日数	収量 t/ha	収量 現在比
芽室	現在	平年値	5/9 (5/10)	5/30 (5/27)	9/29 (9/27)	122	65	100
	2010	気温	5/9	5/31	9/9	101	50	77
		気温・日射					50	77
	2030 CCSR	気温	5/9	5/27	9/18	114	61	94
		気温・日射					55	85
	2030 CCSR	気温	5/1	5/21	9/13	115	62	95
気温・日射						55	85	
訓子府 (境野)	現在	平年値	5/13 (5/13)	6/4 (6/1)	10/12 (10/6)	130	70	100
	2010	気温	5/13	6/2	9/14	104	55	79
		気温・日射					53	76
	2030 CCSR	気温	5/13	5/31	9/27	119	65	93
		気温・日射					59	84
	2030 CCSR	気温	4/30	5/21	9/18	120	67	96
気温・日射						60	86	

植付日は各農試平年または2030年代の気温上昇に合わせて前進のいずれかを設定
生育日数は萌芽期から生育停止まで
平年値は2000年のもの、気象要素が「気温」のみの場合の日射量は平年値を仮定
訓子府の気象データは、アメダス境野で代用
収量(塊茎全重)は、乾物重での計算結果を乾物率20%と仮定して生重に換算
カッコ内は、2001年における作況平年値(生育停止の欄には枯凋期を記載)

(3) ジャガイモ疫病の初発期予測

一例として芽室町での2008年の気象条件と、温暖化した場合の気象条件(2008年の気象条件に旬別のCSSRによる予想上昇程度を加えたもの)で予測をおこなった。その結果2008年の危険期到達期は6月20日であったのに対し、温暖化後では6月16日と4日早く危険期に到達した(表IV-3-9)。

表IV-3-9 好適指数積算値の予測値

	5/31	6/1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2008年	0	0	0	0	0	0	1	3	5	7	9
温暖化後	0	1	1	1	1	1	2	5	8	11	14

	6/11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2008年	11	11	12	13	14	15	16	18	20	22
温暖化後	17	17	18	19	20	21				

初発後の病害の罹病程度は、降水量がやや増加することから高くなることも考えられるが、一方気温が高くなり疫病菌の生育適温より高くなることも考えられ、一概に高くなるとはいえない。疫病の初発時期が早くなってもそれに合わせて防除を行えば、

防除回数が増え防除コストの上昇の可能性はあるが、被害は防げると考えられ、疫病の被害としてはあまり変わらないと考えられる。

その他病害としては、高温多湿で発病が助長される軟腐病の発生が多くなる可能性がある。また、九州のように高温の地帯で発生している青枯病も、現在北海道での発生は少ないが、高温多湿条件で発病が増えるため、今後発生が増えるかもしれない。

4) 温暖化に対する対応策

温暖化によってばれいしょに対しては、収量およびでん粉価の低下等の影響があると考えられる。対応策として、品種育成の面では以下のような特性を有することが必要となると考えられる。

(1) 用途にもよるが、でん粉価の最低ラインが設定されている加工用の用途、またでん粉原料用でもでん粉価が低下することは工場での製造コストに悪影響を与えることから、今後の気象変動によりでん粉価に影響を受けにくい品種、又は現在よりでん粉価の高い品種。

(2) 気温の上昇のみでなく、年次による変動も大きくなると考えられることから、気象要因の変動に対して収量の安定している品種(「紅丸」は年次安定性が高いことが知られている)。

(3) 年内での気象の変動も大きくなると考えられることから、温度、土壌水分の大きな変動によるストレスが大きくなり、中心空洞、褐色心腐等の生理障害が増えると予想される。このためこれら生理障害の発生しづらい品種。

栽培技術の面では以下のような事項が考えられる。

(1) ばれいしょの栽培では培土作業が行われており、土の断熱効果により塊茎近傍の地温の変動を緩和している。培土断面を大きくすることにより、この効果が大きくなるようにする。

5) まとめ

(1) 平均気温が馬鈴しょの生育に与える影響を検討したところ、収量・でん粉価とは負の相関関係にあり、気温が高くなると収量・でん粉価は低下すると推測される。

(2) WOFOSTによる最大可能収量の予測値は、極端な冷湿害年を除いて、過去の統計収量の変動とよく対応していた。

(3) 記録的な高温年であった2010年における気温・日射量から求めた収量は、平年(現在)比で約77%となり、減収の主因は高温による生育日数の短縮

と推定された。

(4) 2030年代の収量現在比は約85%と予測され、減収要因は気温の上昇よりも日射量の減少にあると推定された。気温上昇に伴って植付期を前進させても収量現在比はほとんど変化しない。

(5) 2030年代には、「紅丸」相当の熟期であって

も植付期を前進させることで生育停止日は9月中旬まで早まり、秋まき小麦の前作として利用できるばれいしょの熟期の選択肢が広がる。

(6) FLABS による2030年代の疫病初発日は、現在に比べ早まると予想された。

(松永 浩)

4. 大豆

1) 目的

地球温暖化が大豆の生育、収量、品質、栽培適地などの変化に及ぼす影響を予測する。

2) 方法

(1) 気象要因と生育・収量等の関係解析

熟期がやや早の「ユキホマレ」については、1998～2010年の十勝農試（芽室町）、中央農試（長沼町）、上川農試（比布町）、北見農試（訓子府町）における奨励品種決定基本調査、熟期が中生の「トヨムスメ」については、1985～2010年の十勝農試、中央農試における奨励品種決定基本調査の生育、収量、収量構成要素のデータを使用した。

気象データは対象各年次における6～9月のアメダス気象観測データ（平均気温、最高気温、最低気温、日照時間、降水量）を使用した。

(2) 気温による生育期節等の推定

生育予測は、岩手県における大豆の生育予測¹⁾を参考に行った。

①開花期

開花期予測には、堀江らの発育指数（Developmental index, DVI）を用いた。

$$DVI（発育指数）= \sum DVR$$

$$DVR（発育速度）= 1/G [1 + EXP \{-A \times (T - Th)\}]$$

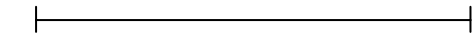
注）G, A, Thは品種固有のパラメーターであり、以下のような意味がある。

G: 当該品種の播種～開花までの最小日数

A: 温度係数 T: 日平均気温

Th: ある日長条件下での発育速度が最大値の1/2になる温度

$$DVI=0 \qquad \qquad \qquad DVI=1$$



播種日

開花期

②成熟期

開花～成熟期の積算日平均気温と登熟期間中の気温特性により成熟期を予測した。

(3) 子実重の予測

(1)の子実重と気象条件との関係解析結果から収量予測回帰式を導き、これに第II章で整備した温暖化気候データ（CCSR, CGCM1）を入力し、2030年代の子実重を予測した。

(4) 2010年の高温年との比較

夏季に記録的高温となった2010年の生育期節や収量実測値と(2)および(3)の方法による同年の予測値とを比較した。

3) 結果および考察

(1) 気象要因と生育・収量等の関係解析

「ユキホマレ」「トヨムスメ」の6月～9月の各気象要素と開花期、成熟期、主茎長、着莢数、一莢内粒数、百粒重、子実重との単相関係数を表IV-4-1に示す。

開花期および成熟期は、両品種とも6～9月の気温と有意な負の相関が認められた。また、成熟期は8月の日照時間と有意な負の相関が認められたが、相関係数は高くはなかった。

主茎長は、「ユキホマレ」では6月、「トヨムスメ」では7月の日照時間と有意な正の相関が認められたが、相関係数は高くはなかった。

着莢数は、「ユキホマレ」では6～8月の最高気温と有意な正の相関が認められ、「トヨムスメ」では6～9月の気温のほか、日照時間との有意な相関が認められた。

一莢内粒数は、両品種とも開花期に当たる7月の気温と正の相関が認められた。

百粒重は、登熟期間に当たる9月の気温と有意な相関が認められた。

子実重は、「ユキホマレ」では6～8月、「トヨムスメ」では6～9月の気温と有意な相関が認められた。

(2) 気温による生育期節等の推定

①開花期の予測精度

DVIによる開花期予測は、両品種とも比較的精度が高く誤差も概ね3日程度と小さかった（図IV-4-1）。ただし、DVIは本来出芽期を予測の開始時期とするが、土壌条件の違い等により出芽期の予測が不可能であり、播種期を予測の開始時期としたため、播種時の土壌水分、気温により誤差が生じる可能性がある。また、日長を考慮した予測を行っていないため、早播及び晩播では誤差が生じると考えられる。なお、計算に用いたパラメータは表IV-4-2のとおりである。

表IV-4-2 「ユキホマレ」, 「トヨムスメ」の発育指数による開花予測式のパラメーター

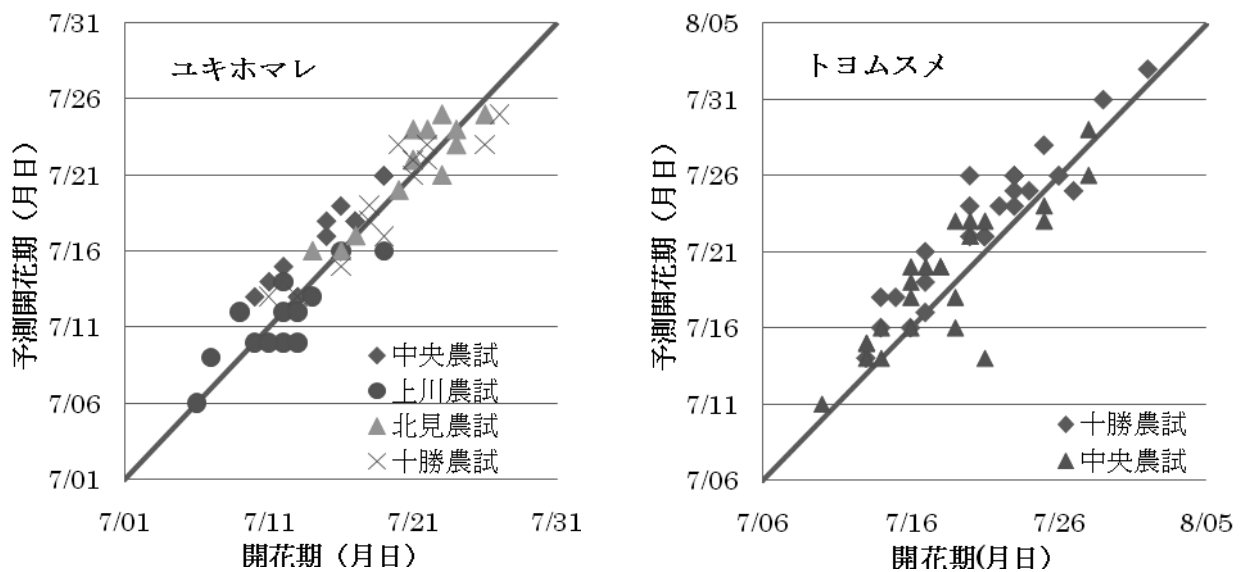
品種		ユキホマレ	トヨムスメ
パラメーター	A	0.174661249	0.281102701
	Th	16.87417049	13.97634961
	G	26.24617419	36.16643637
平均誤差（日）		1.38	2.10
相関係数（R）		0.9416	0.9024

表Ⅳ-4-1 主要形質と気象要素との単相関係数

形質	気象要素	ユキホマレ				トヨムスメ			
		6月	7月	8月	9月	6月	7月	8月	9月
開花期	平均気温	-0.818 ***	-0.733 ***	-0.570 ***	-0.344 *	-0.725 ***	-0.573 ***	-0.346 *	-0.420 **
	最高気温	-0.664 ***	-0.725 ***	-0.589 ***	-0.418 **	-0.541 ***	-0.478 ***	-0.268	-0.410 **
	最低気温	-0.350 *	-0.640 ***	-0.468 ***	-0.358 **	-0.636 ***	-0.579 ***	-0.357 **	-0.428 **
	日照時間	-0.428 **	-0.147	-0.459 ***	0.078	-0.165	0.119	-0.049	0.067
	降水量	0.058	-0.174	-0.085	0.026	0.341 *	-0.264	0.021	0.051
成熟期	平均気温	-0.653 ***	-0.783 ***	-0.629 ***	-0.540 ***	-0.646 ***	-0.461 ***	-0.428 **	-0.458 ***
	最高気温	-0.479 ***	-0.678 ***	-0.606 ***	-0.605 ***	-0.528 ***	-0.434 **	-0.410 **	-0.586 ***
	最低気温	-0.331 *	-0.746 ***	-0.550 ***	-0.454 ***	-0.596 ***	-0.442 **	-0.368 **	-0.327 *
	日照時間	-0.278 *	-0.028	-0.492 ***	-0.171	-0.215	-0.103	-0.300 *	-0.239
	降水量	-0.033	-0.231	0.076	0.216	0.218	-0.253	0.260	0.297 *
主茎長	平均気温	0.188	0.122	-0.079	-0.077	0.129	0.135	-0.059	0.081
	最高気温	0.283 *	0.142	-0.011	0.090	0.136	0.094	-0.019	0.266
	最低気温	-0.184	0.080	-0.145	-0.144	0.055	0.146	-0.086	0.043
	日照時間	0.417 **	0.026	0.032	0.120	-0.145	-0.376 **	-0.218	-0.080
	降水量	0.106	0.206	-0.063	0.093	0.274 *	0.334 *	-0.145	-0.168
着莢数	平均気温	0.488 ***	0.161	0.182	-0.134	0.377 **	0.532 ***	0.527 ***	0.491 ***
	最高気温	0.541 ***	0.423 **	0.361 **	0.101	0.239	0.474 ***	0.437 **	0.551 ***
	最低気温	0.217	-0.094	-0.026	-0.239	0.449 ***	0.556 ***	0.534 ***	0.395 **
	日照時間	0.059	0.374 **	0.259	-0.047	0.309 *	0.279 *	0.466 ***	0.351 *
	降水量	-0.099	0.005	0.106	0.024	-0.331 *	0.055	-0.109	-0.121
一莢内 粒数	平均気温	0.298	0.513 **	0.325	0.049	0.057	0.512 ***	0.301 *	0.257
	最高気温	0.040	0.411 *	0.286	-0.039	-0.101	0.400 **	0.160	0.056
	最低気温	0.400 *	0.503 **	0.337	0.226	0.192	0.540 ***	0.382 **	0.390 **
	日照時間	0.047	0.201	0.432 *	-0.191	0.232	0.276 *	0.214	-0.042
	降水量	-0.111	0.206	0.123	0.028	-0.227	-0.104	0.244	0.179
百粒重	平均気温	0.301 *	0.150	0.290 *	0.372 **	0.431 **	-0.001	0.266	0.371 **
	最高気温	0.190	0.091	0.238	0.316 *	0.299 *	-0.096	0.207	0.478 ***
	最低気温	0.313 *	0.235	0.324 *	0.330 *	0.435 **	0.110	0.313 *	0.266
	日照時間	0.248	-0.071	0.027	0.035	0.027	-0.273 *	-0.145	0.130
	降水量	-0.010	-0.086	0.202	-0.052	0.026	0.224	-0.073	-0.317 *
子実重	平均気温	0.490 ***	0.315 *	0.306 *	0.089	0.416 **	0.627 ***	0.547 ***	0.575 ***
	最高気温	0.489 ***	0.572 ***	0.424 **	0.272	0.277 *	0.563 ***	0.462 ***	0.603 ***
	最低気温	0.364 **	0.030	0.131	-0.096	0.438 **	0.648 ***	0.553 ***	0.525 ***
	日照時間	0.012	0.489 ***	0.277 *	0.029	0.240	0.016	0.269	0.134
	降水量	-0.190	-0.160	0.184	-0.132	-0.236	0.169	-0.035	-0.082

注) ユキホマレは4場 n=52, ただし一莢内粒数は2場 (十勝, 中央) n=26

トヨムスメは2場 (十勝, 中央) n=52, *, **, ***は各々5%, 1%, 0.1%水準で有意



図Ⅳ-4-1 「ユキホマレ」「トヨムスメ」の発育指数による開花予測精度

②成熟期の予測精度

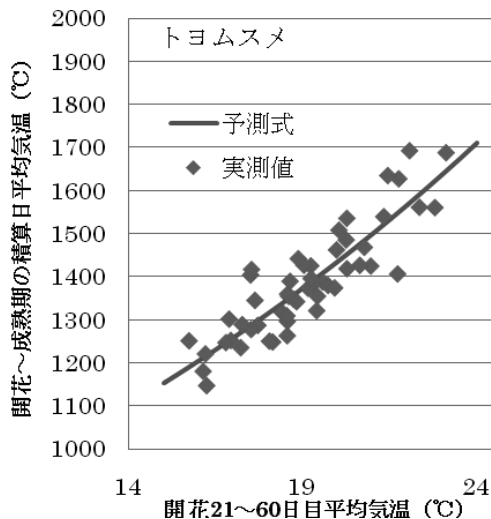
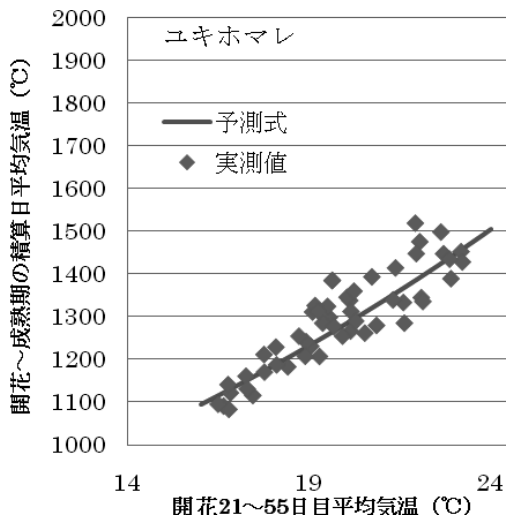
開花～成熟期の積算日平均気温は「ユキホマレ」では開花21～55日目、「トヨムスメ」では開花21～60日目の平均気温と相関が高く(図IV-4-2)、この関係から成熟期の予測が可能であった。すなわち、開花期～成熟期積算日平均気温は以下の式で表される。

$$\text{「ユキホマレ」 } e^{(\text{開花期後21～55日目の平均気温}+160.0)/25.15}$$

$$\text{「トヨムスメ」 } e^{(\text{開花期後21～60日目の平均気温}+145.6)/22.78}$$

推定の平均誤差および決定係数(R²)は「ユキホマレ」が42.3℃および0.7896, 「トヨムスメ」が46.8℃および0.7779であった。

このような関係式が得られる理由は、登熟中期までに種皮の形成がほぼ完了し、その後内容物が蓄積される²⁾ことと関係していると思われる。

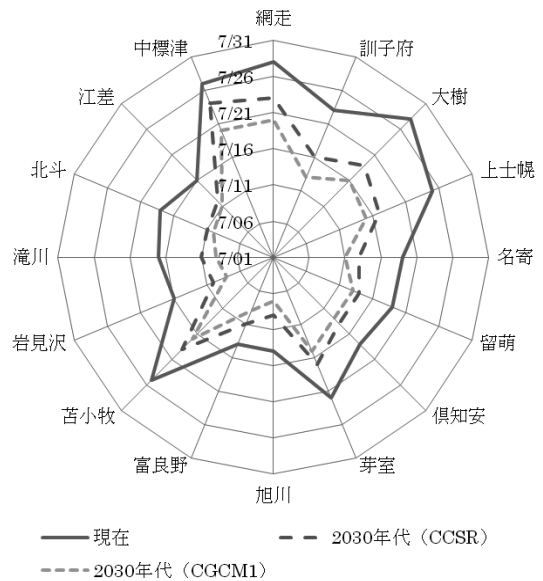


図IV-4-2 「ユキホマレ」「トヨムスメ」の開花後の平均気温と開花～登熟期積算日平均気温の関係

③2030年代の生育期節の予測

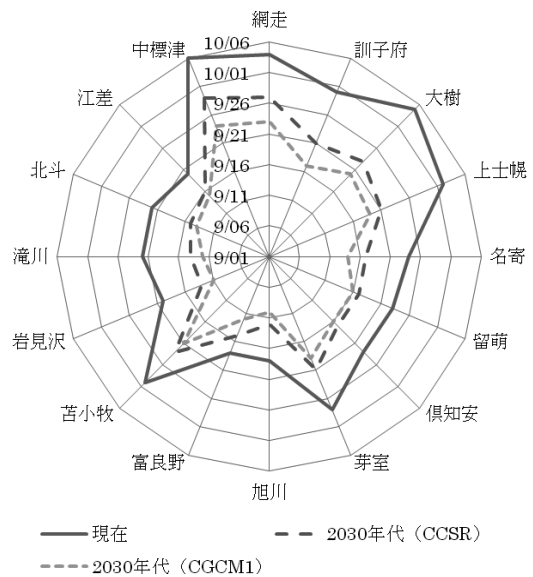
ここまでの検討により、開花期、成熟期が精度良く予測できることが明らかとなったので、播種期を5月20日、1971～2000年のアメダス平均気温を現在値とし、CCSRおよびCGCM1の2030年予測気温を用いて主要地点の開花期、成熟期の予測を行った。

「ユキホマレ」では、現在の開花期が7/14～28日であったのに対しCCSRでは7/9～24日と平均5.7日(3～9日)早くなり、CGCM1では7/7～20日と平均7.8日(5～12日)早くなった(図IV-4-3)。また、現在の成熟期が9/18～10/6日であったのに対し、CCSRで9/12～29日と平均7.3日(3～12日)、CGCM1で9/10～24日と平均9.8日(6～15日)早くなった(図IV-4-4)。



図IV-4-3 「ユキホマレ」の開花期予測

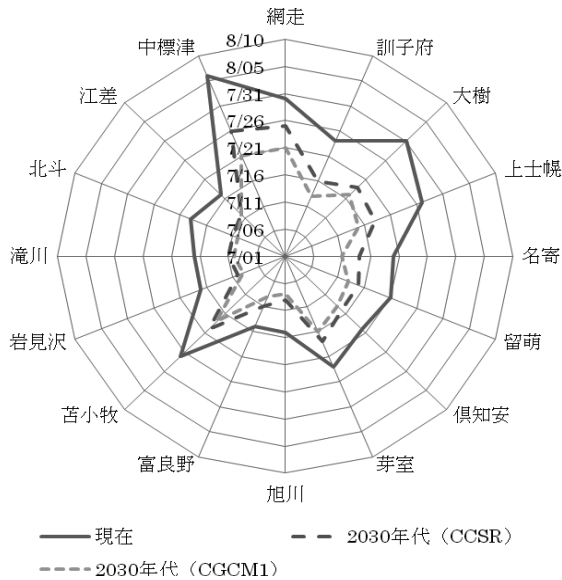
播種期は5月20日として予測した。



図IV-4-4 「ユキホマレ」の成熟期予測

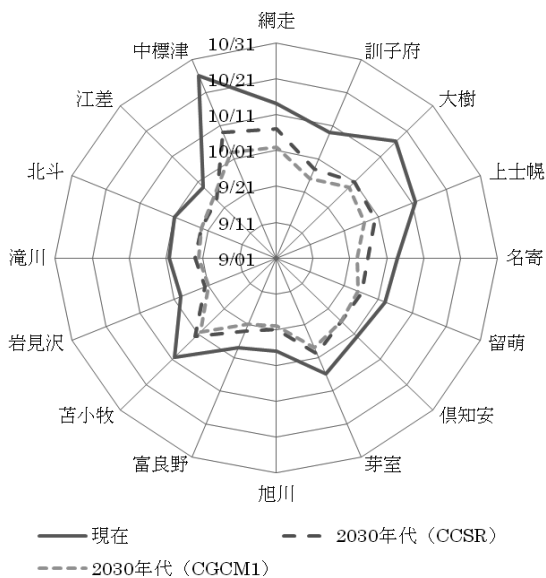
播種期は5月20日として予測した。

「トヨムスメ」では、現在の開花期が7/15～8/6日であったのに対し、CCSRでは7/9～26日と平均7.0日（4～12日）早くなり、CGCM1では7/8～21日と平均9.2日（6～16日）早くなった（図IV-4-5）。また、現在の成熟期が9/27～10/26日であったのに対し、CCSRでは9/21～10/9と平均8.7日（5～17日）、CGCM1では9/20～10/3と平均10.9日（6～23日）早くなった（図IV-4-6）。



図IV-4-5 「トヨムスメ」の開花期予測

播種期は5月20日として予測した。



図IV-4-6 「トヨムスメ」の成熟期予測

播種期は5月20日として予測した。

2030年代の開花期、成熟期を現在と比較すると、2030年の網走市の開花期・成熟期が現在の芽室町の開花期・成熟期と、2030年の大樹町、上士幌町の開花期・成熟期が現在の岩見沢市、滝川市の開花期・成熟期とほぼ同等

であった。また、2030年の「トヨムスメ」の成熟期が現在の「ユキホマレ」の成熟期とほぼ同等となり、やや早品種栽培地帯が中生品種栽培地帯に変化することが予想された。

また、岩手県で開発された開花期、成熟期の生育予測式に、5月20日を播種日として北斗市の2030年予測気温を代入したところ、岩手県の主要品種「ナンブシロメ」の開花期が7月27～28日、成熟期が10月13日と予測された。日長を考慮しない条件ではあるが、道南地域で東北地方の品種が栽培できる可能性が示唆された。

大豆栽培地帯区分設定時の播種期のアンケート調査結果とメッシュ気候値2000の旬別データを比較すると、旬平均気温が10℃を超えた頃に播種期が設定されていた（表IV-4-3）。2030年の旬平均気温が10℃を超える時期を抽出すると、多くの地域で現在より1旬早まる結果となり、播種期が10日程度早くなる可能性が示された。

表IV-4-3 播種時期の旬別平均気温

市町村名	メッシュ気候値2000			2030年CCSR			2030年CGCM1		
	5上	5中	5下	5上	5中	5下	5上	5中	5下
北斗市	8.2	9.8	11.2	11.0	12.9	13.8	10.4	12.2	13.4
江差町	9.1	10.6	12.1	11.6	13.3	14.1	10.9	12.5	13.7
倶知安町	7.7	9.7	11.3	10.0	12.3	13.3	9.4	11.6	13.0
岩見沢市	9.2	11.2	12.7	11.6	13.9	15.0	11.6	13.8	15.2
滝川市	9.0	11.1	12.7	11.2	13.6	14.8	11.3	13.6	15.0
旭川市	9.0	11.2	12.8	11.2	13.7	14.9	11.3	13.7	15.2
富良野市	8.2	10.3	11.9	10.2	12.6	13.7	10.2	12.6	13.9
名寄市	7.7	9.9	11.5	9.7	12.1	13.4	9.9	12.3	13.8
留萌市	8.1	10.0	11.5	10.2	12.4	13.5	10.1	12.2	13.5
網走市	7.8	9.7	10.9	9.7	11.6	12.4	10.1	11.9	13.0
訓子府町	7.8	9.8	11.2	10.2	12.3	13.3	10.4	12.6	13.8
苦小牧市	8.2	9.9	11.2	10.4	12.3	13.2	10.0	11.9	13.2
大樹町	7.9	9.8	10.9	10.3	12.4	13.3	10.3	12.3	13.5
芽室町	8.6	10.7	11.9	10.3	12.4	13.3	10.2	12.3	13.5
上士幌町	4.9	6.9	8.4	7.5	9.7	10.8	7.6	9.8	11.1
中標津町	6.4	8.2	9.4	8.8	10.8	11.8	9.2	11.2	12.4

注)メッシュ気候値2000の網掛けは大豆栽培地帯区分設定時のアンケート調査における播種時期。CCSR、CGCM1の網掛けは旬平均気温が10℃を超える時期。

④栽培地帯区分の変化

現在の大豆栽培地帯区分は、6月から9月の積算平均気温及び無霜期間を主に、開花期前後の低温による障害、登熟期の霜害および収穫時期の降水確率を考慮してI～VI地帯に分類されている（表IV-4-4）。CCSRおよびCGCM1で予想された6～9月の積算平均気温、無霜期間、7月の平均気温を現在の各地点の値と比較し2030年代の地帯区分と播種可能時期を推定したところ、全ての地点で地帯区分が1～2ランク上がり、現在、大豆の栽培がなく予測上も栽培が困難な中標津町が2030年代では現在のI地帯と同様の気象条件となり、大豆栽培が可能になると考えられた。また、現在のV、VI地帯については6月から9月の積算気温が2500℃前後となり、無霜期間も170～200日以上とかなり長くなることから、新たな区分

の設定が必要となり、全道的な栽培地帯区分の見直しが必要と考えられた(表IV-4-5)。

表IV-4-4 現行の大豆栽培地帯区分

地帯区分	該当地域	熟期	地域の概況	積算気温(6-9)及び無霜期間
I	網走(中央部を除く), 上川北部の一部, 宗谷南部の一部	早生 やや早	夏季の気温が低く, 無霜期間が短い。	2000℃前後 125~130日
II	十勝(中央部を除く), 網走中央部, 上川中北部, 留萌, 後志の羊蹄山麓	やや早~ 中生	夏季の気温がやや低く, 無霜期間が135日前後とやや短い。	2000℃前後(上川, 留萌地方は2000~2100℃) 130~140日
III	十勝中央部, 上川中南部, 日高, 後志(羊蹄山麓を除く)	中生	夏季の気温が中程度で, 積算気温(6-9月)は2100℃前後。無霜期間は地域により差があるが140~150日のところが多い。	2100~2200℃ 135~150日
IV	空知, 石狩, 胆振東部と西部, 渡島北部	中生~ やや晩	夏季の気温がやや高く, 無霜期間はおよそ150日以上とやや長い。	2100~2200℃ 150~160日
V	檜山北部, 渡島南部	やや晩~ 晩生	夏季の気温が高く, 積算気温は2200℃前後, 無霜期間は160日以上と長い。	2200℃ 160日以上
VI	檜山南部	晩生	夏季の積算気温は2300℃前後と最も高く, 無霜期間も165日以上と長い。	2300℃ 165日以上

道産豆類地帯別栽培指針(1994年 北海道農政部)による。

熟期の表記はだいたい審査基準の見直し(2004年)にあわせ変更した。

表IV-4-5 温暖化に伴う地帯区分の変化

地帯区分	現代(アメダス平年値)						CCSR2030年代						CGCM12030年代								
	6~9月積算	7月平均	晩霜	初霜	無霜期間	播種時期	区分6~9月予測	7月積算	7月平均	晩霜	初霜	無霜期間	播種時期	区分6~9月予測	7月積算	7月平均	晩霜	初霜	無霜期間	播種時期	
網走市	I	1993	17.1	5/12	10/26	167	5下	II	2118	18.0	5/01	11/10	193	5中	II	2216	19.0	4/28	11/10	196	5上
訓子府町	I	2014	17.9	5/24	10/01	130	5下	II	2184	19.2	5/13	10/09	149	5上	III	2276	20.1	5/11	10/09	151	5上
名寄市	II	2100	19.1	5/24	10/06	130	5下	IV	2282	20.4	5/12	10/20	156	5中	IV	2366	21.2	5/10	10/20	158	5中
留萌市	II	2180	19.2	5/08	11/03	179	5中	IV	2345	20.4	4/28	11/18	204	5中	IV	2413	21.0	4/28	11/18	204	5上
大樹町	II	1940	16.7	5/24	10/06	135	5下	IV	2191	18.9	5/12	10/21	162	5上	IV	2271	19.6	5/11	10/21	163	5上
上士幌町	II	1959	17.2	5/22	10/05	136	6上	IV	2197	19.1	5/12	10/15	156	5下	IV	2276	19.8	5/09	10/16	160	5下
倶知安町	II	2150	19.3	5/21	10/05	137	5下	IV	2304	20.4	5/07	10/19	165	5上	IV	2351	20.8	5/09	10/19	163	5中
旭川市	III	2231	20.2	5/16	10/07	144	5中	V	2415	21.6	5/04	10/22	171	5上	V	2497	22.4	5/03	10/22	172	5上
富良野市	III	2215	20.0	5/14	10/06	145	5中	V	2363	20.9	5/03	10/20	170	5上	V	2440	21.7	5/02	10/20	171	5上
芽室町	III	2066	18.0	5/18	10/06	141	5中	V	2217	19.1	5/08	10/16	161	5上	V	2289	19.8	5/07	10/16	162	5上
岩見沢市	IV	2244	19.9	5/05	10/17	165	5中	VI	2451	21.6	4/24	11/01	191	5上	VI	2526	22.4	4/23	11/01	192	5上
滝川市	IV	2186	19.5	5/14	10/09	148	5中	VI	2379	21.1	5/06	10/19	166	5上	VI	2456	21.8	5/06	10/19	166	5上
北斗市	V	2233	19.1	4/30	10/23	176	5下	?	2445	20.9	4/18	11/11	207	5上	?	2488	21.3	4/20	11/11	205	5上
江差	VI	2352	20.0	5/16	10/07	144	5中	?	2504	20.9	5/04	10/22	171	5上	?	2547	21.4	5/03	10/22	172	5上
苫小牧市		2091	17.7	4/27	10/16	172	5下	III	2273	19.2	4/17	10/28	194	5上	III	2331	19.8	4/18	10/28	193	5上
中標津		1845	15.6	5/30	10/06	129	6上	I	2061	17.4	5/19	10/16	150	5中	I	2168	18.4	5/14	10/15	154	5中

注) 播種時期は旬の平均気温が10℃を上回ったときとした。

(3) 子実重の予測

表IV-4-1に示したように, 子実重は「ユキホマレ」では6~8月, 「トヨムスメ」では6~9月の各月の気温と有意な相関が認められたことから, 各々の期間内の平均および播種~開花~成熟の積算気温と子実重および収量構成要素の相関を検討した。その結果, 子実重は「ユキホマレ」では6~8月の最高気温(表IV-4-6), 「トヨムスメ」では6~9月の平均気温(表IV-4-7)と最も強い相関を示した。子実重予測式については, 気象予測データの関係から, 「ユキホマレ」については6~8月, 「トヨ

ムスメ」については6~9月の平均気温を用いることとし, 子実重との回帰式を求めると以下のとおりであった(図IV-4-7, 8)。

ユキホマレ

$$Y = -0.915(x - 19.4)^2 + 39.0 \quad (R^2 = 0.3182)$$

トヨムスメ

$$Y = -1.047(x - 19.8)^2 + 41.0 \quad (R^2 = 0.5877)$$

表IV-4-6 「ユキホマレ」の収量構成要素と気象要素との相関

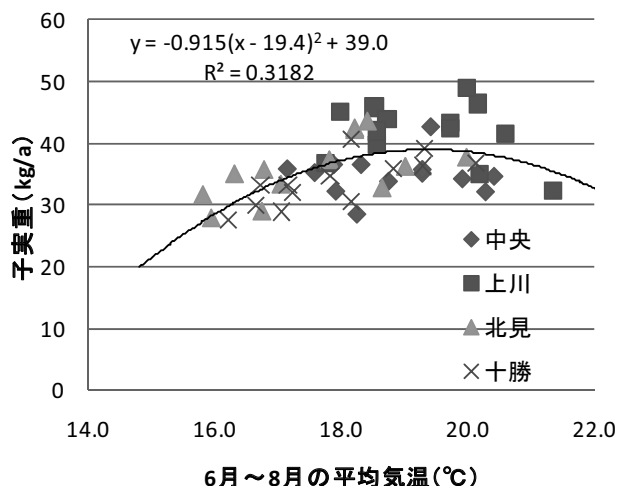
	6~8月			播種~開花期	開花期~成熟期	播種~成熟期
	平均気温	最高気温	最低気温	積算気温	積算気温	積算気温
子実重	0.447 ***	0.589 ***	0.239	-0.219	0.500 ***	0.463 ***
百粒重	0.305 *	0.216	0.390 **	-0.293 *	0.570 ***	0.511 ***
着莢数	0.328 *	0.530 ***	0.047	-0.013	0.359 **	0.394 **
一莢内粒数	0.473 *	0.315	0.495 *	-0.177	0.263	0.217

注) 4場 n=52, ただし一莢内粒数は2場 (十勝, 中央) n=26

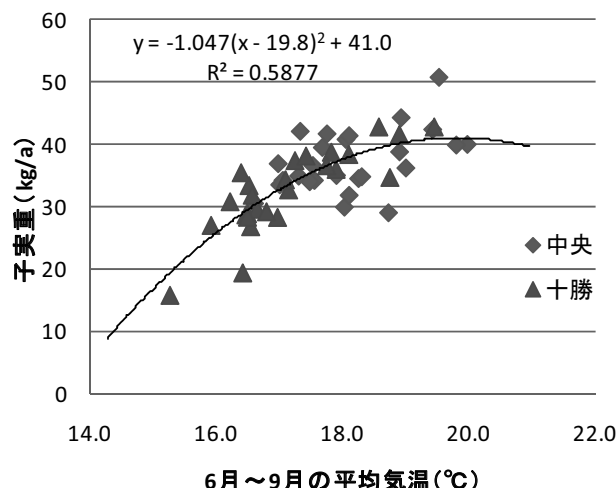
表IV-4-7 「トヨムスメ」の収量構成要素と気象要素との相関

	6~9月			播種~開花期	開花期~成熟期	播種~成熟期
	平均気温	最高気温	最低気温	積算気温	積算気温	積算気温
子実重	0.733 ***	0.660 ***	0.691 ***	-0.623 ***	0.631 ***	0.297 *
百粒重	0.345 *	0.299 *	0.350 *	-0.653 ***	0.378 **	-0.002
着莢数	0.656 ***	0.590 ***	0.621 ***	-0.354 *	0.457 ***	0.277 *
一莢内粒数	0.393 **	0.183	0.483 ***	-0.073	0.428 **	0.424 **

注) 2場 (十勝, 中央) n=52



図IV-4-7 「ユキホマレ」子実重と 6~8 月の平均日平均気温の関係



図IV-4-8 「トヨムスメ」子実重と 6~9 月の平均日平均気温の関係

この予測式に主要地点の現在の平均気温 (アメダス平年値), CCSR, CGCM1 による 2030 年代の予測平均気温を代入し, 将来の子実重を予測した。

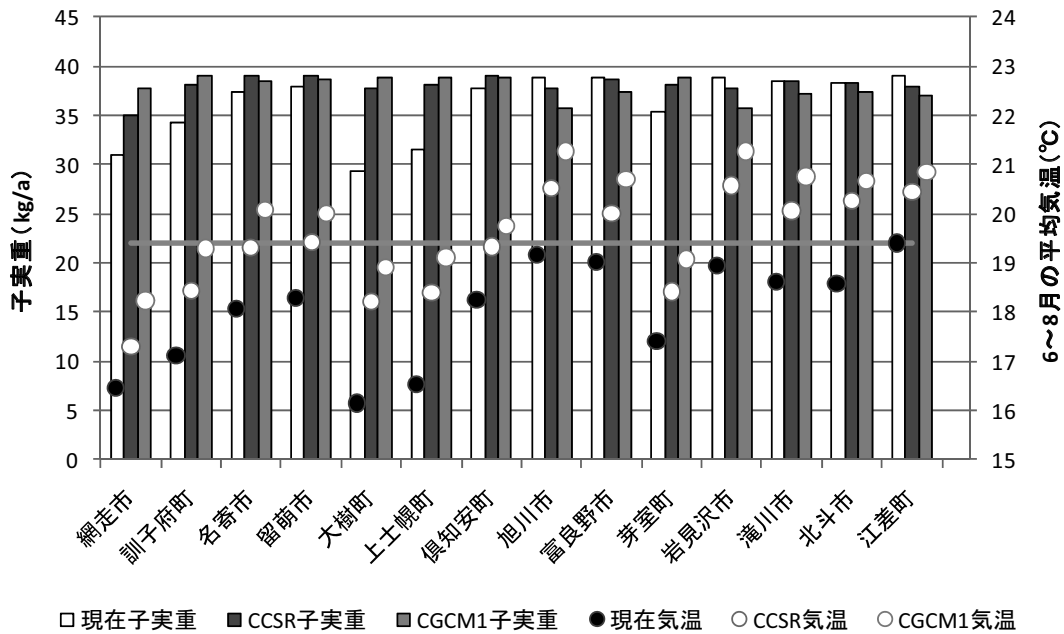
「ユキホマレ」では, 網走市, 訓子府町, 大樹町, 上士幌町, 芽室町で増収し, そのほかの地点では同等または減収の傾向であった (図IV-4-9)。予測式における最大収量は, 6~8 月の平均気温が 19.4℃の時であり, 上記 5 市町村以外は, 2030 年代の予測平均気温がこの温度を超えていた。

「トヨムスメ」では岩見沢市, 江差町では現在と同等の子実重であるが, そのほかの地点では, 5~35%の増収となった (図IV-4-10)。予測式における最大収量は, 6~9 月の平均気温が 19.8℃の時であり, 旭川市, 岩見沢

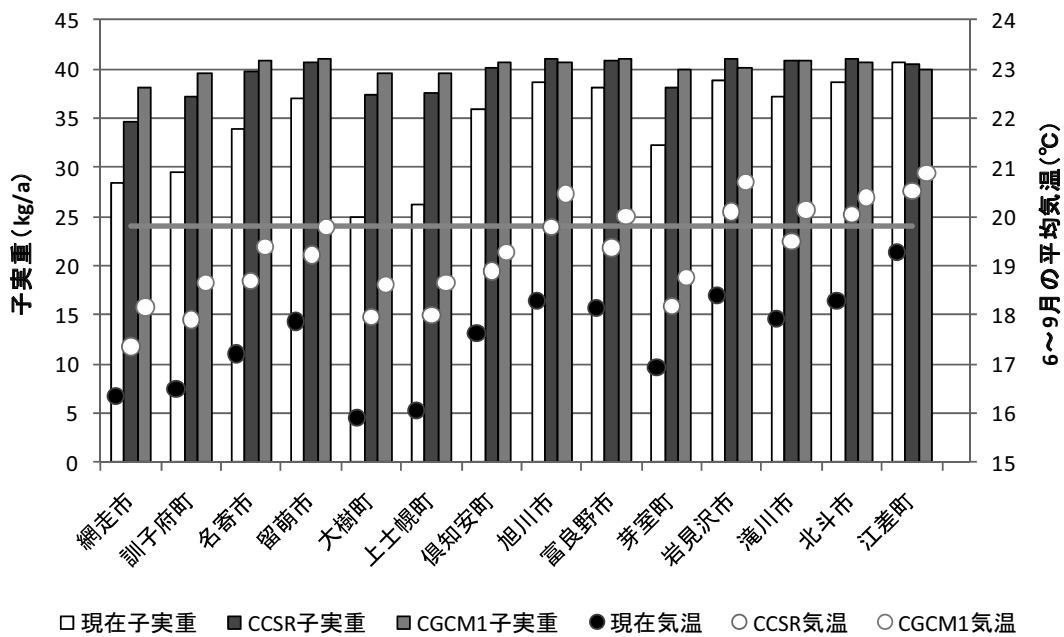
市, 北斗市, 江差町では 2030 年代の予測平均気温がこの温度を超えている。予想される気温の上昇範囲内では, 中生品種は増収するものの, 一部地域では収量が頭打ちとなる可能性が示唆された。

現在道内各地で栽培されている「ユキホマレ」は, 現在の 6~8 月の平均気温が 18℃以下の地点では温暖化により増収が期待できるが, そのほかの地域では増収が期待できる中生品種への品種変更が必要と考えられた。

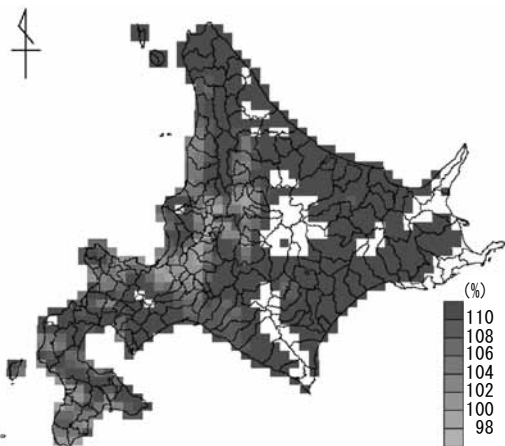
メッシュ気候値 2000 および CCSR の 2030 年代の気温から, 「ユキホマレ」収量推定マップを作成 (図IV-4-11) したところ, 道央, 道南を除いて増収が予測され, 全道平均収量は 365kg/10a と現在より 16%の増収が推定された。



図IV-4-9 「ユキホマレ」子実重の将来予測



図IV-4-10 「トヨムスメ」子実重の将来予測



図IV-4-11 2030年代の大豆「ユキホマレ」収量推定マップ (現在比%)

収量 (kg/10a) = $-9.15 \times (6\sim8 \text{ 月の平均気温} - 19.4)^2 + 390$, により算出. 現在および2030年代の気温はメッシュ気候値2000およびCCSR. マップでは, 現在の収量が200 kg/10a未滿のメッシュは除外(大豆作付実績のない地域を含む).

(4) 2010年の高温年との比較

2010年の6～9月の平均気温は、CCSRおよびCGCM1で予測された平均気温並か高く経過した。「ユキホマレ」、「トヨムスメ」について、本年の成績と予測値を比較(表IV-4-8, 9)すると、開花期については両品種とも3日以内の範囲であったが、成熟期は予測値が4～10日遅かった。成熟期は、日照や降雨により数日変化すること

が経験的にわかっている。「ユキホマレ」では、各場所とも予測値より6～10日早く成熟期に達しており、登熟期間が短く子実重も予想より少なくなったと考えられる。中生の「トヨムスメ」も同様に予測値より4～7日早く成熟期に達しているが、子実重はほぼ予測値どおりと考えられる。

表IV-4-8 2010年の生育・収量と予測値(ユキホマレ)

場所	播種期 (月日)	開花期 (月日)	成熟期 (月日)	子実重 (kg/a)	予測開花期 (月日)	予測成熟期 (月日)	6～8月 平均気温	予測 子実重
中央	5/21	7/10	9/13	32.2	7/13(+3)	9/20(+7)	20.3	38.2(119)
上川	5/18	7/06	9/09	32.7	7/06(0)	9/15(+6)	21.4	35.3(108)
北見	5/24	7/14	9/15	37.7	7/16(+2)	9/25(+10)	20.0	38.6(102)
十勝	5/19	7/11	9/13	36.7	7/13(+2)	9/20(+7)	20.2	38.4(105)

注) ()は観測値との差または比

表IV-4-9 2010年の生育・収量と予測値(トヨムスメ)

場所	播種期 (月日)	開花期 (月日)	成熟期 (月日)	子実重 (kg/a)	予測開花期 (月日)	予測成熟期 (月日)	6～9月 平均気温	予測 子実重
十勝	5/19	7/14	9/28	42.7	7/16(+2)	10/02(+4)	19.5	40.9(96)
中央	5/21	7/13	9/24	39.9	7/15(+2)	10/01(+7)	19.8	41.0(103)

注) ()は観測値との差または比

4) 2030年代の予測に基づく技術的対応方向

これまで述べてきた2030年代の予測に基づき、将来想定される問題点と技術的対応方向を以下に考察する。

(1) 中生～晩生品種導入による収量・品質の確保

現在、道南を除くI～IV地帯ではやや早の「ユキホマレ」の作付けが多く、III, IV地帯の一部で中生の「トヨムスメ」「トヨハルカ」が作付けされている。収量予測では、「ユキホマレ」はオホーツクと十勝で増収すると見られたが、そのほかの地点では減収傾向にあったこと、また、中生の「トヨムスメ」は多くの地点で増収が見込まれたこと、2030年代には現在の地帯区分が1～2ランク上がると予想されたことから、2030年代には各地で中生品種の栽培が中心になると考えられる。しかし、現在の「ユキホマレ」並の機械収穫適性、複合障害抵抗性を持った中生品種は「トヨハルカ」のみで、耐湿性に劣るという欠点もある。

品質面では、2010年に発生した、しわ粒、裂皮粒の多発による落等が心配される。「トヨムスメ」では開花19～33日後が高温となることで裂皮が激発することが報告されており³⁾、「トヨムスメ」では裂皮のリスクが非常に高くなると考えられる。裂皮粒の発生については品種間差が認められることから、中生～晩生で、複合障害抵

抗性、機械収穫適性に優れた、高温下でも品質低下の少ない品種の開発が必要である。

(2) 病虫害への対応

本年の高温条件で、十勝農試場内では菌核病の発生が多かった。菌核病は高温・多湿時に発生しやすく、蔓延すると収穫皆無となる心配がある。また、道内では紫斑病は道南地方で時折発生が認められる程度であったが、本年の高温条件で道南地方では発生が非常に多かった。これら病害は温暖化により拡大する可能性があるため注意が必要である。

虫害では、本年の高温条件で食葉性害虫、カメムシの発生が多く、また、ここ数年マメシクイガの被害が増える傾向にあり、温暖化により被害が頻発する可能性がある。

このような病虫害に対しては、適切な防除対策が基本となるが、各種病虫害抵抗性品種の育成など、品種開発による長期的な取り組みも必要となろう。

5) まとめ

(1) 6月～9月の各気象要素と「ユキホマレ」「トヨムスメ」の開花期、成熟期、主茎長、着莢数、一莢内粒数、百粒重、子実重の相関解析を行った結果、開花期および

成熟期は、両品種とも6～9月の気温と有意な負の相関が認められた。着莢数は、「ユキホマレ」では6～8月の最高気温と、「トヨムスメ」では6～9月の気温と有意な正の相関が認められ、百粒重は両品種とも9月の気温と有意な正の相関が認められた。子実重は、「ユキホマレ」では6～8月、「トヨムスメ」では6～9月の気温と有意な正の相関が認められた。

(2) 開花期、成熟期は日平均気温から精度良く予測でき、2030年代には開花期・成熟期は7～10日程度早まると予想された。大豆栽培地帯区分は全ての地点で1～2ランク上がり、中標津町でも大豆栽培が可能と考えられた。また、道南地域では東北地方の品種が栽培できる可能性が示唆された。

(3) 「ユキホマレ」については6～8月、「トヨムスメ」については6～9月の平均気温を用いることにより子実重の予測が可能であった(二次回帰式で決定係数は「ユキホマレ」が0.318、「トヨムスメ」が0.588)。2030年

代においては、やや早の「ユキホマレ」は現在の6～8月の平均気温が18℃以下の地点で、中生の「トヨムスメ」ではほとんどの地点で増収する可能性が示唆された。現在の6～8月の平均気温が18℃以上の地点では、「ユキホマレ」は減収傾向であり、中生品種の選定が必要と考えられた。

6) 引用文献

- 1) 高橋智宏, 作山一夫. “岩手県における大豆の生育予測と作期策定, 1. 大豆の生育予測”. 日作東北支部報. 41, 41-42 (1998)
- 2) 高橋亨, 伊藤美和, 鈴木武. “大豆百粒重の生長関数からみた低下要因”. 東北農業研究. 44, 117-118 (1991)
- 3) 鴻坂扶美子, 大西志全, 田中義則. “開花期以降の気象条件からみたダイズ裂皮発生要因”. 日本育種学会・日本作物学会北海道談話会会報. 48, 97-98 (2007)

(三好 智明)

5. 小豆

1) 目的

温暖化に伴う生育期節の変動を予測するとともに、生育期間の気温から収量・品質の変動を予測する推定式を求め、2030年代における北海道の小豆生産量を予測する。

2) 方法

(1) 気象要因と生育・収量等の関係解析

小豆の生育と気象要因との関係を解析するため、十勝農業試験場における作況データより生育期節（播種期、出芽始、開花始、成熟期）、収量（子実重 (kg/10a)）、主茎長、収量構成要素（着莢数、一莢内粒数、百粒重）とアメダス芽室における気象データとの相関について検討をおこなった。

品種：「エリモシヨウズ」（北海道の普通小豆基幹品種）

生育データ：1989～2010年（22年間）の十勝農試作況データ

気象データ：1989～2010年（22年間）アメダス芽室の平均気温、最高気温、最低気温、降水量

(2) 生育期節の予測

村田（1998）によれば、小豆の生育期節はDVR法により、次式で予測することができる。

$$DVR = (1 - \exp(b \times (\text{日平均気温} - c))) / a$$

本式に、1982～2009年の十勝農試における生産力検定試験（品種「エリモシヨウズ」）での生育期節データと気象データを入力し、シンプレックス法によりパラメータa、bを決定し、以下のような出芽始、開花始、成熟期の推定式を得た（X：日平均気温）。

①出芽始：

$$1) DVR (B1) = (1 - \exp(-0.0025060 \times (X - 3.2613000))) / 0.1689790$$

$$2) DVR (B2) = (1 - \exp(-0.1619660 \times (X - 5.7038900))) / 4.6241900$$

②開花始

$$1) DVR (F1) = (1 - \exp(-0.1298900 \times (X - 9.6795700))) / 24.1444000$$

$$2) DVR (F2) = (1 - \exp(-0.0712693 \times (X - 7.8864600))) / 3.1916600$$

③成熟期：

$$1) DVR (M1) = (1 - \exp(-0.0781348 \times (X - 2.83455))) / 26.5272$$

$$2) DVR (M2) = (1 - \exp(-0.0445813 \times (X - 5.44225))) / 33.4536$$

出芽始、開花始、成熟期のいずれの計算においても、まず1)式に播種日からの日平均気温を代入して順次累積し、累積値が1となった日付から2)式を用いて再度順

次累積し、2)式による累積値が1となった日をそれぞれの生育期節とする。

(3) 子実重の予測

地区別（石狩・空知、上川・留萌、後志、渡島・桧山、胆振、十勝、オホーツク）に小豆収量と生育期間の気象から回帰式を導き、これに第II章で整備した温暖化気候データ（CCSR、CGCM1）を代入して、2030年代の子実重の予測を行なった。

子実重：農林水産統計1983～2009年の27年間、石狩・空知、上川・留萌、後志、渡島・桧山、胆振、十勝、オホーツクの8か所

生育期間の気温：1983～2009年6～9月におけるアメダス地点の日平均気温。石狩・空知：岩見沢、上川・留萌：旭川、後志：倶知安、渡島・桧山：北斗、胆振：苫小牧、十勝：芽室、オホーツク：境野

(4) 品質の予測

小豆では、登熟期間が高温であると粒大が小さくなり、小豆の規格内歩留が低下することが知られている。そこで登熟期間（開花始～成熟期）の平均気温から百粒重を推定し、粒大の低下と規格内歩留の低下を予測する。

百粒重：中央農試（長沼町）、上川農試（比布町）、十勝農試（芽室町）における1989～2009年の生産力検定試験、および育成系統地域適応性検定試験の「エリモシヨウズ」の百粒重。

規格内歩留：2006～2009年における全道の生産力検定試験、地域適応性検定試験、奨励品種決定現地調査等の「エリモシヨウズ」について、4.9mm篩上に残る粗玄子実重の割合（%）

気象データ：各試験地近傍のアメダス地点から開花期～成熟期間の日平均気温の平均値を登熟期間の平均気温とした。

開花期の予測：出芽始、成熟期の予測同様、1982～2009年の十勝農試生産力検定試験の「エリモシヨウズ」の開花始とアメダス芽室の日平均気温から推定式を求め、算出した。

3) 結果

(1) 気象要因と生育・収量等の関係解析

1989～2010年の22年間における収量と気象要素の関係について、各月、期間および生育に合わせた期間の平均気温、最高気温、最低気温の関係を検討した。いずれも有意な相関は認められなかったが、6月および6～9月の降水量と収量に負の相関がみられた（表IV-5-1）。一方、同時期の十勝地域における収量（1989～2009年）と気象要因の関係において、月別では8月、9月の気温

との相関が高く、6月～8月あるいは6月～9月の平均気温との相関が最も高かった（表IV-5-2）。

表IV-5-1 十勝農試作況収量と生育期間の気象要素との相関（1989～2010年）

気象要素	6月	7月	8月	9月	6-7月	6-8月	6-9月
平均気温	0.147	0.010	0.109	0.014	0.082	0.013	0.000
最高気温	0.182	0.030	0.202	0.185	0.108	0.034	0.010
最低気温	0.073	0.039	0.010	0.158	0.064	0.045	0.017
降水量	-0.434 *	-0.304	-0.374	-0.263	-0.055	-0.336	-0.458 *

※生育：播種～成熟期、開花迄：播種～開花始、登熟：開花始～成熟期、開花±14：開花始前後14日間を示す。
※*、**：各々5%、1%水準で有意

表IV-5-2 十勝地域の収量と生育期間中の気象要素との相関（1989～2010年）

気象要素	6月	7月	8月	9月
平均気温	0.480 *	0.528 *	0.636 **	0.644 **
最高気温	0.475 *	0.492 *	0.561 **	0.706 **
最低気温	0.492 *	0.492 *	0.617 **	0.403
降水量	-0.457 *	-0.234	-0.384	-0.216

気象要素	6-7月	6-8月	6-9月	7-8月	7-9月	8-9月
平均気温	0.693 **	0.812 **	0.828 **	0.746 **	0.779 **	0.693 **
最高気温	0.653 **	0.737 **	0.809 **	0.673 **	0.790 **	0.711 **
最低気温	0.721 **	0.826 **	0.766 **	0.714 **	0.666 **	0.569 **
降水量	-0.155	-0.442 *	-0.488 *	-0.215	-0.308	-0.149

※*、**：各々5%、1%水準で有意

生育期間中における各時期の平均気温と生育期間や収量構成要素との相関についてみると、生育期間および登熟日数は6～8月、6～9月の平均気温との相関がかなり高く、播種期～開花始日数は6～7月の平均気温との相関がかなり高かった（表IV-5-3）。

収量構成要素については、主茎長は6月の気温との相関が高く、着莢数、一莢内粒数は相関のみられた項目はなかった。一方、百粒重は6～9月、7～8月、8～9月、全生育期間の平均気温との高い負の相関があり、とくに登熟期間の気温と高い負の相関がみられた（表IV-5-3）。

表IV-5-3 十勝農試作況における生育各期間、収量構成要素と生育期間中の平均気温との相関（1989～2010年）

構成要素等	6月	7月	8月	9月	6-7月	6-8月	6-9月
生育期間	-0.591 **	-0.637 **	-0.755 **	-0.784 **	-0.812 **	-0.920 **	-0.920 **
開花迄日数	-0.616 **	-0.735 **	-	-	-	-	-
登熟日数	-0.437 *	-0.410	-0.866 **	-0.824 **	-0.562 **	-0.562 **	-0.818 **
総重	0.533 *	0.147	0.214	0.257	0.439 **	0.390	0.383
主茎長	0.584 **	0.153	0.409	0.292	0.475 *	0.475 *	0.527 *
着莢数	0.456 *	0.115	0.471 *	0.374	0.365	0.365 *	0.474 *
一莢内粒数	0.071	0.129	0.155	0.183	0.042	0.042	0.105
百粒重	-0.249	-0.127	-0.695 **	-0.507 *	-0.252	-0.252	-0.530 **

※生育：播種～成熟期、開花迄：播種～開花始、登熟：開花始～成熟期、開花±14：開花始前後14日間を示す。
※*、**：各々5%、1%水準で有意

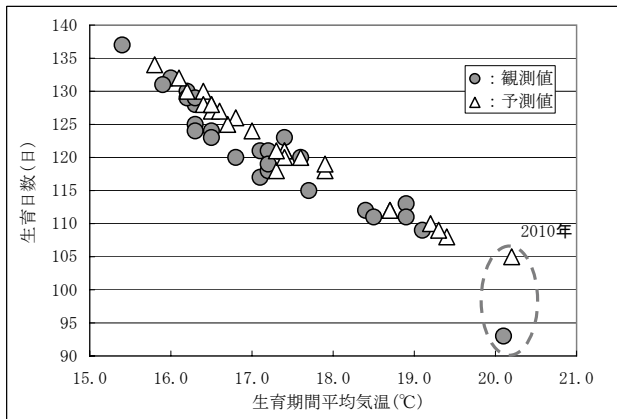
(2) 生育期節の予測

開花始、成熟期の予測式を用いて播種期からそれぞれの日付を推定すると、表IV-5-4のようになる。開花始と成熟期について予測値と観測値と比べると、高い確率でおよそ3日以内の誤差で予測することができた（図IV-5-1）。観測値との誤差3日以内の年次は、開花始は全体の92%、成熟期は84%であった。

表IV-5-4 DVI を用いた小豆の開花始と成熟期の予測値と観測値（十勝農試）

年次 (西暦)	観測値				予測値				誤差(日)		
	播種期 (月日)	開花始 (月日)	成熟期 (月日)	生育期間 (日)	平均 気温(°C)	開花始 (月日)	成熟期 (月日)	生育日数 (日)	平均 気温(°C)	開花始	成熟期
1982	5.25	8.02	9.18	117	17.1	7.27	9.22	121	17.4	6	-4
1985	5.27	7.31	9.24	121	17.1	8.02	9.21	118	17.3	-2	3
1986	5.26	8.08	9.27	125	16.3	8.03	9.29	127	16.5	5	-2
1987	5.22	7.27	9.22	124	16.3	7.27	9.26	128	16.5	0	-4
1988	5.24	8.02	10.02	132	16.0	8.02	9.30	130	16.2	0	2
1989	5.23	7.28	9.17	118	17.2	8.01	9.20	121	17.4	-4	-3
1990	5.24	7.22	9.12	112	18.4	7.20	9.12	112	18.7	2	0
1991	5.23	7.25	9.20	121	17.2	7.22	9.19	120	17.4	3	1
1992	5.22	7.30	9.29	131	15.9	7.29	9.30	132	16.1	1	-1
1994	5.24	7.24	9.09	109	19.1	7.23	9.08	108	19.4	1	1
1995	5.26	7.27	9.26	124	16.5	7.27	9.28	126	16.8	0	-2
1996	5.27	7.30	9.26	123	16.5	7.30	9.28	125	16.7	0	-2
1997	5.26	7.26	10.02	130	16.2	7.26	10.02	130	16.4	0	0
1998	5.26	7.27	9.22	120	16.8	7.28	9.26	124	17.0	-1	-4
1999	5.24	7.26	9.13	113	18.9	7.24	9.10	110	19.2	2	3
2000	5.24	7.16	9.11	111	18.9	7.19	9.09	109	19.3	-3	2
2001	5.23	7.24	9.27	128	16.3	7.23	9.26	127	16.6	1	1
2002	5.24	7.26	9.29	129	16.2	7.29	9.28	128	16.4	-3	1
2003	5.23	8.01	10.06	137	15.4	8.01	10.03	134	15.8	0	3
2004	5.25	7.20	9.12	111	18.5	7.21	9.13	112	18.7	-1	-1
2005	5.24	7.25	9.15	115	17.7	7.26	9.18	118	17.9	-1	-3
2006	5.23	7.27	9.22	123	17.4	7.30	9.19	120	17.6	-3	3
2007	5.24	7.26	9.20	120	17.6	7.26	9.19	119	17.9	0	1
2008	5.28	7.27	9.23	119	17.2	7.28	9.25	121	17.3	-1	-2
2009	5.22	7.28	9.27	129	16.3	7.29	9.26	128	16.5	-1	1
2010	5.31	7.19	8.31	93	20.1	7.21	9.12	105	20.2	-2	-12

※1983、1993年は霜害により成熟期に未達、1984年は干ばつによる異常値として排除した。



図IV-5-1 小豆成熟期の予測値と観測値の差 (1982～2010年十勝農試)

次にこれらの式を用いて、現在 (1971～2000年) と2030年代について、日平均気温から道内15か所の開花始および成熟期を算出し、その生育期間および登熟期間の平均気温を推定した (表IV-5-5, 6, 7)。ただし、播種期はいずれも現在の播種適期とされる5月20日を想定した。

CCSRによる予測では、成熟期は現在よりも5日～19日、またCGCM1による予測では、現在よりも8日～23日早まった。地域別では、大樹町、上士幌町など現在の6～9月の気温が低い地域において成熟期の前進化が著しかった。中標津町は現在では小豆の栽培がなく、推定上も成熟期が10月8日となり、初霜日 (10月7日) に近く、成熟期前に霜害に遭遇する確率が高く栽培が困難であるが、2030年代には成熟期が9月中旬となり、初霜が遅くなることとあいまって十分栽培可能と推定された。

表IV-5-5 現在 (1971 - 2000年) の小豆生育予測

場所	開花期 (月日)	成熟期 (月日)	生育日数 (日)	登熟平均 気温(°C)	6-9月平均 気温(°C)
北斗市	7.19	9.10	112	20.7	18.3
倶知安町	7.21	9.13	115	19.8	17.6
岩見沢市	7.18	9.09	111	20.7	18.4
滝川市	7.18	9.10	112	20.1	17.9
旭川市	7.16	9.08	110	20.5	18.3
富良野市	7.16	9.08	110	20.4	18.2
名寄市	7.20	9.15	117	19.1	17.2
留萌市	7.21	9.12	114	20.2	17.9
網走市	7.31	9.24	126	18.1	16.3
訓子府町	7.25	9.21	123	18.0	16.5
苫小牧市	7.28	9.18	120	19.5	17.1
大樹町	7.31	9.28	130	17.1	15.9
芽室町	7.23	9.18	120	18.7	16.9
上士幌町	7.28	9.26	128	17.1	16.1
中標津町	8.08	10.08	140	15.6	15.1
平均値	7.24	9.17	119	19.0	17.2

※播種日を5月20日と想定した場合。

表IV-5-6 2030年代 (CCSR) の小豆生育予測

場所	開花期 (月日)	成熟期 (月日)	生育日数 (日)	現代と の差	登熟平均 気温(°C)	6-9月平均 気温(°C)
北斗市	7.12	9.02	104	8	22.3	20.0
倶知安町	7.16	9.06	108	7	21.3	18.9
岩見沢市	7.10	9.01	103	8	22.4	20.1
滝川市	7.13	9.02	104	8	22.6	19.5
旭川市	7.11	8.31	102	8	21.1	19.8
富良野市	7.13	9.03	105	5	21.7	19.4
名寄市	7.15	9.07	109	8	20.8	18.7
留萌市	7.16	9.05	107	7	21.6	19.2
網走市	7.26	9.16	118	8	19.5	17.4
訓子府町	7.17	9.10	112	11	19.8	17.9
苫小牧市	7.20	9.11	113	7	21.0	18.6
大樹町	7.20	9.12	114	16	20.1	18.0
芽室町	7.19	9.10	112	8	20.3	18.2
上士幌町	7.19	9.11	113	15	20.1	18.0
中標津町	7.26	9.19	121	19	18.8	16.9
平均値	7.17	9.08	110	10	20.9	18.7

※播種日を5月20日と想定した場合。

表IV-5-7 2030年代 (CGCM1) の小豆生育予測

場所	開花期 (月日)	成熟期 (月日)	生育日数 (日)	現代と の差	登熟平均 気温(°C)	6-9月平均 気温(°C)
北斗市	7.12	9.02	104	8	22.8	20.4
倶知安町	7.15	9.04	106	9	21.8	19.3
岩見沢市	7.09	8.29	100	11	23.2	20.7
滝川市	7.11	8.31	102	10	21.7	20.1
旭川市	7.09	8.29	100	10	22.9	20.5
富良野市	7.11	8.31	102	8	22.5	20.0
名寄市	7.13	9.02	104	13	21.8	19.4
留萌市	7.15	9.03	105	9	22.2	19.8
網走市	7.21	9.13	115	11	20.4	18.2
訓子府町	7.15	9.06	108	15	20.8	18.7
苫小牧市	7.19	9.07	109	11	21.7	19.1
大樹町	7.18	9.08	110	20	20.9	18.6
芽室町	7.17	9.07	109	11	21.0	18.8
上士幌町	7.16	9.07	109	19	21.0	18.7
中標津町	7.21	9.15	117	23	19.8	17.8
平均値	7.15	9.05	107	13	21.6	19.3

※播種日を5月20日と想定した場合。

(3) 子実重の予測

小豆の地域収量 (Y) は生育期間の平均気温 (X) の2次式で表わすことができる (村田ら, 1987)。そこで、石狩・空知、上川・留萌、後志、渡島・檜山、胆振、十勝、オホーツクの7か所について1983～2009年 (27年間) の6～8月の平均気温と地区平均子実重の関係を解析したところ、以下の回帰式が得られた (図IV-5-2, 3, 4)。

石狩・空知 (岩見沢) :

$$Y = -5.10 (X - 19.47)^2 + 202.7 \quad (R^2 = 0.1116)$$

上川・留萌 (旭川) :

$$Y = -18.37 (X - 19.66)^2 + 205.0 \quad (R^2 = 0.3930)$$

後志 (倶知安) :

$$Y = -23.27 (X - 18.77)^2 + 236.3 \quad (R^2 = 0.4541)$$

渡島・檜山 (大野) :

$$Y = -11.87(X - 19.66)^2 + 200.1 \quad (R^2 = 0.7154)$$

胆振(苫小牧) :

$$Y = -9.59(X - 18.88)^2 + 236.9 \quad (R^2 = 0.6551)$$

十勝(芽室) :

$$Y = -17.18(X - 19.11)^2 + 276.9 \quad (R^2 = 0.8325)$$

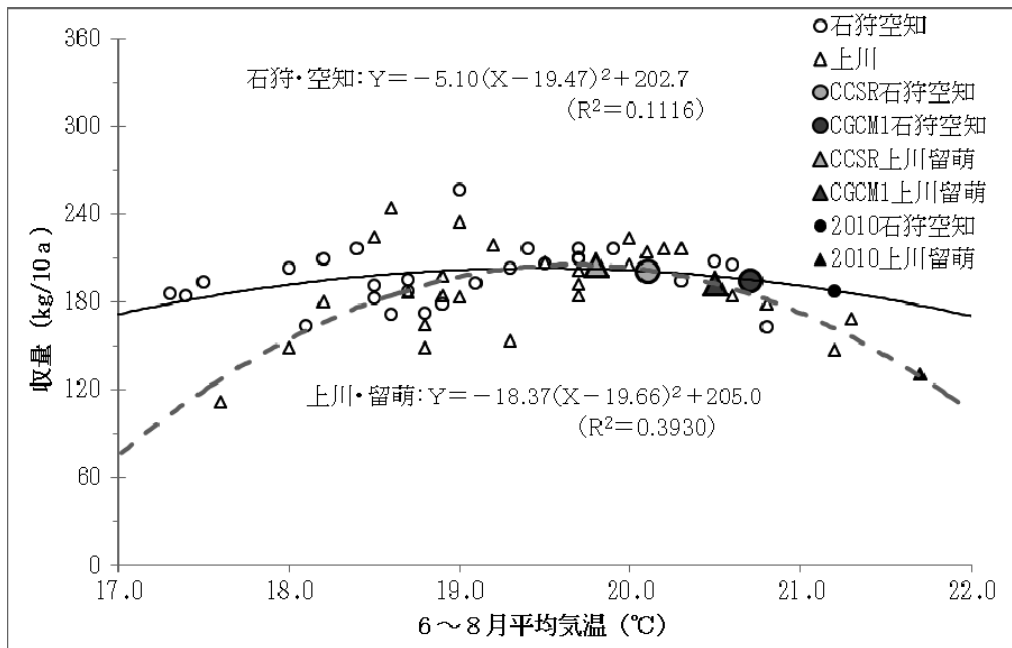
オホーツク(境野) :

$$Y = -11.14(X - 19.09)^2 + 251.6 \quad (R^2 = 0.7020)$$

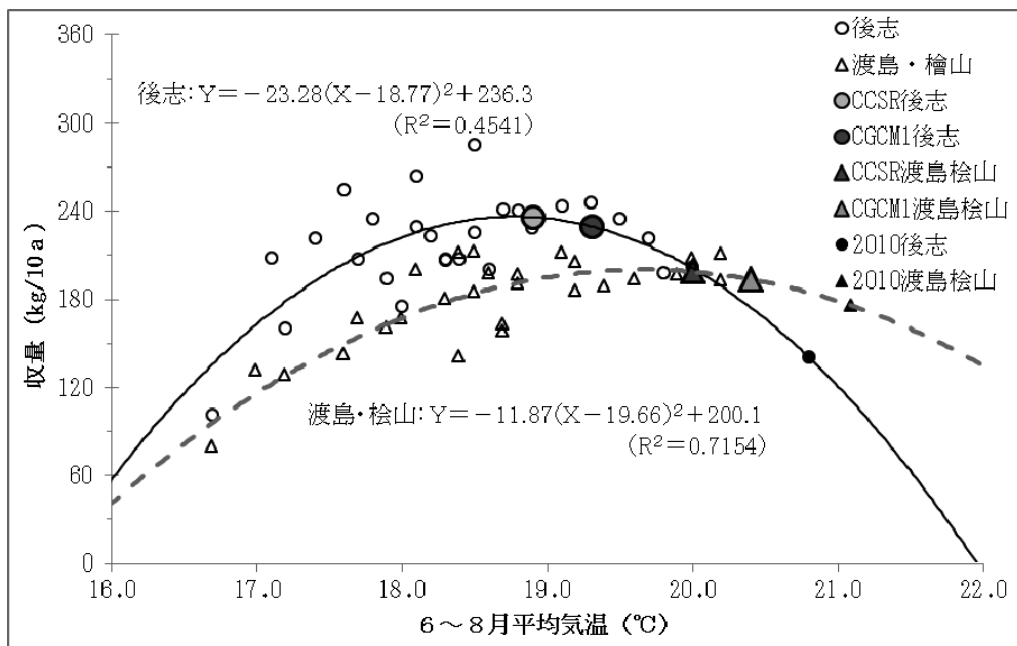
これらの回帰式を用いて、現在と 2030 年代の気象条件での収量を推定すると、石狩・空知地域では現在の 201kg/10a から CCSR では 196kg/10a, CGCM1 では 186kg/10a と減収し、上川地域では 201kg/10a からそれ

ぞれ 192kg/10a, 156kg/10a と減収する。また、後志地域では 231kg/10a から 230kg/10a, 212kg/10a, 渡島・檜山地域では 187kg/10a から 195kg/10a, 187kg/10a と現在とほぼ同等の収量となる。一方、胆振地域では 210kg/10a から 236kg/10a, 236kg/10a と増収し、十勝地域では 226kg/10a から 268kg/10a, 277kg/10a に、オホーツク地域では 208kg/10a から 246kg/10a, 251kg/10a に増収する。

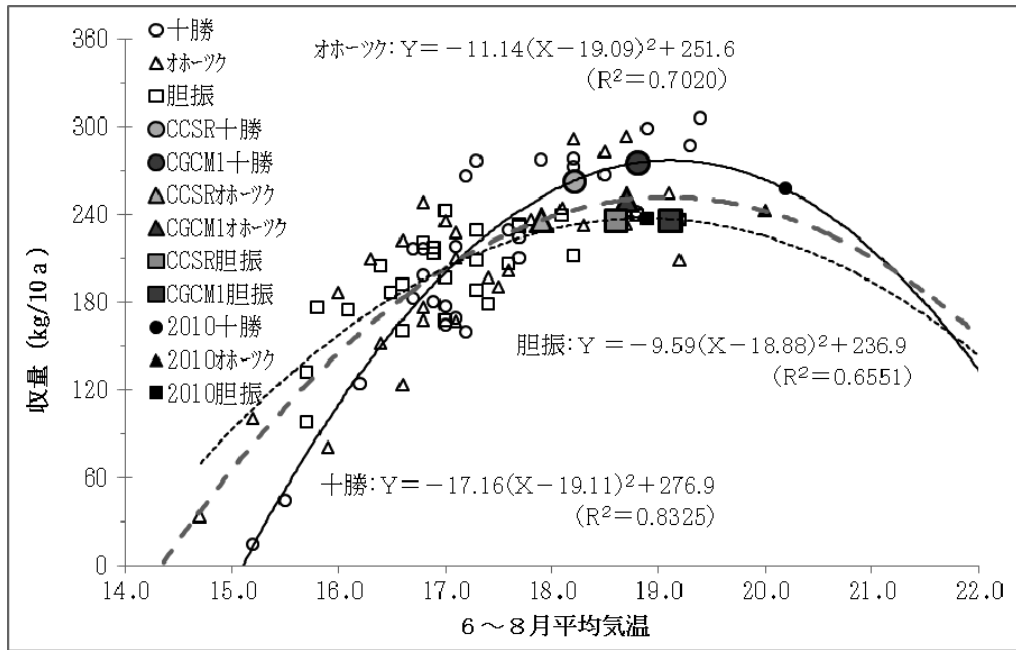
このように石狩・空知, 上川・留萌の道央から道北では減収し、後志, 渡島・檜山の道南では同水準で、胆振, 十勝, オホーツクの道東では増収が見込まれる(表IV-5-8)。



図IV-5-2 6~8月平均気温による小豆の地区平均収量の予測式(1983~2009年, 石狩・空知, 上川・留萌)



図IV-5-3 6~8月平均気温による小豆の地区平均収量の予測式(1983~2009年, 後志, 渡島・檜山)



図IV-5-4 6～8月平均気温による小豆の地区平均収量の予測式（1983～2009年，胆振，十勝，オホーツク）

表IV-5-8 6～8月の平均気温による2030年代の各地域の収量予測

地域	アメダス地点	現在（1971-2000年）		2030年代（CCSRモデル）		2030年代（CGCM1モデル）	
		6-8月平均気温（℃）	地域収量（kg/10a）	6-8月平均気温（℃）	地域収量（kg/10a）	6-8月平均気温（℃）	地域収量（kg/10a）
石狩・空知	岩見沢	18.9	201	20.6	196	21.3	186
上川・留萌	旭川	19.2	201	20.5	192	21.3	156
後志	倶知安	18.3	231	19.3	230	19.8	212
渡島・檜山	大野	18.6	187	20.3	195	20.7	187
胆振	苫小牧	17.2	210	18.6	236	19.1	236
十勝	芽室	17.4	226	18.4	268	19.1	277
オホーツク	幌野	17.1	208	18.4	246	19.3	251

2009年における全道各地の小豆栽培面積を用いて2030年代の全道小豆生産量をこれらの式から予測すると、表IV-5-9のようになる。すなわち、CCSRによる予測では、石狩・空知および上川では現在に比べやや低収となり、後志、渡島・檜山では現在並からやや多収となり、胆振、十勝、オホーツクでは多収となる。全道では

およそ12%程度増収する。一方、CGCM1による予測では、石狩・空知、上川地域では明らかに減収し、後志、渡島・檜山地域では現在並～やや減収し、十勝、胆振、オホーツクでは多収となり、全道的には11%程度増収すると予想される。

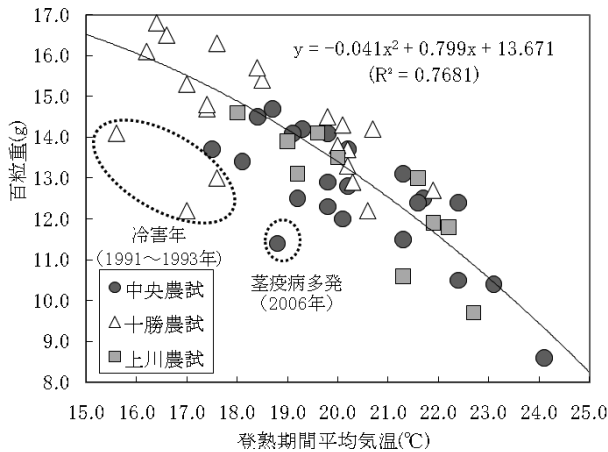
表IV-5-9 2009年の作付面積下での地域別収量の予測

地域	2009年作付面積（ha）	現在（1971～2000年）		2030年代（CCSRモデル）		期間対比（%）	2030年代（CGCM1モデル）		期間対比（%）
		地域収量（kg/10a）	生産量（t）	地域収量（kg/10a）	生産量（t）		地域収量（kg/10a）	生産量（t）	
石狩・空知	2,058	201	4,137	196	4,034	98	186	3,828	93
上川・留萌	2,903	201	5,835	192	5,574	96	156	4,529	78
後志	2,032	231	4,694	230	4,674	100	212	4,308	92
渡島・檜山	882	187	1,649	195	1,720	104	187	1,649	100
胆振	1,426	210	2,995	236	3,365	112	236	3,365	112
十勝	12,523	226	28,302	268	33,562	119	277	34,689	123
オホーツク	1,357	208	2,823	246	3,338	118	251	3,406	121
全道	23,181	218	50,435	243	56,267	112	241	55,774	111

※期間対比は、各々現在に対する2030年代予測値での地域収量の割合を示す。

(4) 品質の推定

1989～2009年の中央農試、上川農試、十勝農試の作況データ（上川農試は2001～2009年）について、場所・年次における百粒重と登熟期間の気温との関係を見ると、登熟期間の気温が高くなるにしたがって百粒重は低下し、低下の割合も大きくなっていった（図IV-5-5）。この中で十勝農試の3カ年と中央農試の1カ年はこの傾向から外れるが、いずれも冷害により登熟後期に十分な気温がなく、未熟粒が多かった事例や茎疫病の多発生により登熟期間が短くなった事例である。



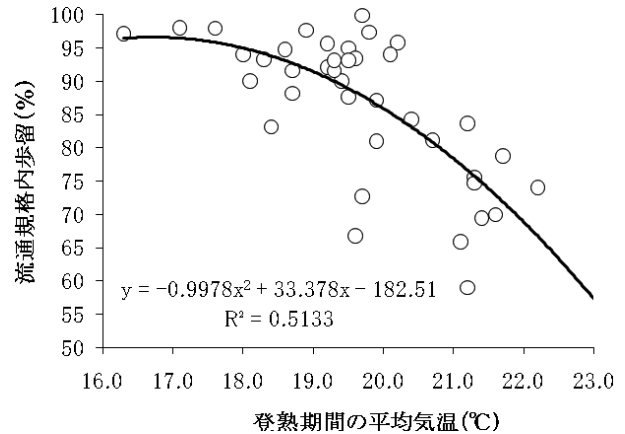
図IV-5-5 小豆の登熟期間の気温と百粒重の関係（1989～2009年中央農試、十勝農試、上川農試）

生育異常年を除くこれら39点のデータを用いて、登熟期間の平均気温（X）から百粒重（Y）を推定する以下の式を得た。

百粒重推定式：

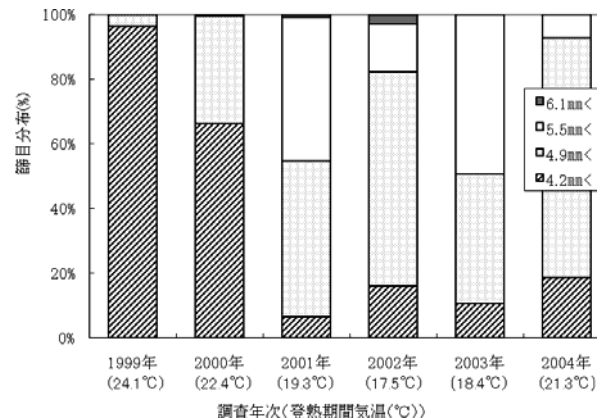
$$Y = -0.041X^2 + 0.799X + 13.671 \quad (R^2 = 0.7681)$$

また、登熟期間の気温と流通規格内歩留の関係を調べるため、2006～2009年の十勝農試生産力検定試験、上川農試、中央農試、道南農試の地域適応性検定試験、全道10か所のべ41試験における登熟期間の平均気温と流通規格内歩留（4.7mm篩目上率）の関係のみた（図IV-5-6）。登熟期間の気温が18.8℃を超えると流通規格内歩留は90%程度となり、21.0℃を超えるとおよそ80%以下に規格内歩留が低下する。



図IV-5-6 小豆の登熟期間の気温と流通規格内歩留の関係（2006～2009年生検、地域適応性検定試験および奨励品種決定現地調査）

中央農試における1999～2004年の6年間の「エリモシヨウズ」の粒度分布を調べると、登熟期間の気温の上昇により小さい規格の子実割合が多くなり、とくに登熟期間が21℃以上の事例では流通規格内歩留（4.2mm篩目上）に満たない子実の割合が著しく増えた（図IV-5-7）。



図IV-5-7 登熟期間の気温と篩目分布の関係（中央農試、エリモシヨウズ）

4) 考察

(1) 気象要因と小豆の生育

気象要因と小豆の生育に関しては、生育期間と気温の影響が大きく、気温の上昇により生育期間が短くなる。一方、各地域の収量は、6～8月の平均気温が高くなるにつれ増加するが、18.5～19.5℃以上になると低下する傾向にある。一方、十勝農試では生育期間の気温と収量との間に相関は低く、気温による収量変動は少ない。これは十勝農試が十勝中央部にあり、地域内で比較的温暖な場所に位置しているため収量レベルが高く、この期間（1989～2010年）の気温では低温による低収が少なかった。

たこと、高温の年次では生育量が旺盛で倒伏が発生し、高温条件下でも多収とはなっていないことによるものと思われる。一方、十勝管内では山麓や沿海部など気象条件の厳しい地域もあり、低温年では生育量不足や開花期の着莢障害、生育遅延による霜害などにより低収となり、高温年にはこれら低収要因の影響がなく、生育量が多くなり、多収となる。百粒重が低下するにもかかわらず多収になるのは、着莢数や一莢内粒数の増加が著しく多くなるため、一般に小豆の一莢内粒数の変動は少ないことから、十勝管内の多収要因は着莢数の増加によるものと考えられる。

(2) 温暖化による小豆生育の変化

①成熟期の予測

播種後の日平均気温により開花始と成熟期を推定する式を得た。この式は高い確率でおよそ3日以内の誤差で推定することが可能である。しかし、1984年のように干ばつ発生年では推定値に比べ、かなり成熟期は早くなることがある。2010年も生育期間が推定値よりかなり早くなった(-12日)。2010年は生育期間の気温が観測史上最も高く、高温障害により後期に開花した花が結実しなかったため成熟期が早まり、推定式が当てはまらなかったと考えられる。

この推定式を用いてCCSRとCGCM1による2030年代の道内各地の成熟期を推定したが、8月下旬~9月上旬に成熟する地点が多く、生育期間が5~23日短くなり、とくに冷涼な地域では成熟期の前進が顕著であった。

②収量の予測

各地域の代表地点の日平均気温から地域収量を推定する式を得た。石狩・空知、後志、上川など道央部では比較的決定係数が低いのは、気温以外の要因として土壌の排水不良による湿害や干ばつの発生、短期輪作による病害の発生、収穫前の長雨などによる製品歩留低下などが考えられる。

これら推定式を用いた2030年代の収量予測では、現在に比べ北海道全体の生産量としては増収すると推定された。地域別に見ると石狩・空知、上川のような北海道でも比較的暖かい地域では2030年代では小豆にとっては温暖過ぎ、減収するとみられ、高温年にはかなり減収すると予想される。一方、胆振、十勝、オホーツクでは多収となる。しかし、2030年代の予想は平均的な気象条件を想定しているものであり、冷害の発生は少なくなるものの、温暖化と共に予想される現在ではみられない高温年や高温に伴う干ばつの発生、集中豪雨による湿害などの頻度が多くなる懸念があり、平均的な気象、生育では予想できない災害の発生が収量変動を大きくすることが考えられる。

③品質の予測

登熟期間の温暖化に伴い、百粒重の低下が著しくなることが予想される。2つのモデルを用いた2030年代の登熟期間平均気温の予測(表IV-5-6, 表IV-5-7)では、とくに登熟期間の気温が21℃以上となる上川中央以南の道央・道南地域では「エリモシヨウズ」、「きたのおとめ」、「しゅまり」など中生普通小豆を栽培した場合、普通小豆規格(篩目4.2mm以上)の歩留が低下し、製品収量が低下することが懸念される。加えて、温暖化で粒色が濃くなることが知られており、外観品質が低下することも懸念される。また、成熟期前後の気温が高いため、この時期の長雨により雨害粒が発生する可能性も高くなる。

④その他の障害などの予測

温暖化に伴い小豆で注意すべき病害として、アズキ茎疫病、アズキ萎凋病、アズキ菌核病、アズキ灰色かび病、アズキ茎腐細菌病、アズキさび病、モザイク病(インゲンマメモザイクウイルス、キュウリモザイクウイルス)などがある。6~7月の気温上昇と降水量増加に伴い、排水不良畑ではアズキ茎疫病の発生が増える可能性がある。同様にこれまで上川、空知地域を中心に発生がみられたアズキ萎凋病が他地域に広がる懸念もある。また、温暖化に伴い、小豆の生育が良好になり、繁茂・倒伏するとアズキ菌核病やアズキ灰色かび病の被害が多くなると考えられる。生育期間が全般に温暖化することによりこれまで道央・道南地域に限定されたアズキさび病の被害が道東にも広がる可能性もある。さらにモザイク病は本州を中心に被害がみられるが、生育期の温暖化により道央や道南で発生が広がる可能性もある。

害虫では生育期間温暖化することによりメイガやカメムシによる食虫害や冬の温暖化によるアズキゾウムシなどの貯穀害虫の発生・被害の増加が懸念される。

このように気象が温暖化することにより病虫害が増える可能性があり、対策が必要となると思われる。

(3) 2010年における各地の生育

2010年は小豆の生育期間を通じて高温、多雨であり、CCSRやCGCM1で予測される2030年代以上の高温条件であった。そこで中央農試、上川農試、十勝農試における小豆の生育をみると、表IV-5-10のように、成熟期は推定式による予測に比べ、各試験地ともに早まった。また、百粒重は推定式により算出される百粒重に比べ小さかった。これは開花後期に咲いた花が結実せず、開花初~中期に結実した莢の割合が多くなったためと考えられる。それらの莢は登熟期間の気温がより高い条件で登熟したため、推定される百粒重よりも小さくなった。さらに子実重は各試験地ともに2010年は平年に比べ大きく減収しており、モデルで推定された気温以上に高温となる年ではより減収する可能性も示唆される。2030年代に

においても現在と同等の年次間変動があるとすると、平均値では多収であっても、個々の高温年ではかなり減収す

る年次もあると考えられる。

表IV-5-10 2010年における各農試における小豆の生育

試験地	播種期 (月日)	開花始 (月日)	推定開花始との差 (月日)	成熟期 (月日)	推定成熟期との差 (月日)	生育期間 気温 (°C)	登熟期間 気温 (°C)	主茎長 (cm)	着莢数 (/株)	子実重 (kg/10a)	平年対比 (%)	百粒重 (g)	推定百粒重との差 (%)	流通規格歩留 (%)
中央農試	5.24	7.18	(+1)	8.29	(-8)	19.5	22.4	69.6	52.6	257	79	10.5	(-0.7)	43.4
上川農試	5.24	7.19	(+6)	8.27	(-7)	20.4	22.7	100.0	56.0	267	80	10.6	(-0.3)	74.2
十勝農試	5.31	7.19	(-1)	8.31	(-12)	20.1	22.4	75.3	53.5	239	65	10.8	(-0.4)	87.1

注) 気象データは中央農試：アメダス長沼、上川農試：アメダス比布、十勝農試：アメダス芽室を使用。

5) 2030年代の予測に基づく技術的対応方向

(1) 栽培による対策

温暖化気候下での栽培上の対策については、初霜が遅れることを考慮すると、播種期を遅らせ成熟期を遅くすることで、登熟期間の温度を低くすることが考えられる。小豆では晩霜の早期化により播種期を現在よりも早くした場合、初期生育は現在と変わらず、開花が早まるが、開花以降の登熟期間の気温が高くなり、百粒重の低下がし、減収が予測されることから播種期を早めるメリットは少ないと考えられる。晩播については、すでに用いた成熟予測式を用い、成熟期からDVIを逆算し播種日を予測できる。初霜害を受けないように成熟期を初霜日から15日前に設定すると、表IV-5-11のような播種期を設定できる。これはあくまでも5月下旬播種から導き出された予測式を用いているため、検証が必要である。播種期が遅くなり初期生育が高温条件では、下位節の花芽分化が早くなり分枝が花芽になり予定より早期に開花し、分枝が少なくなることから開花期間が短くなり、早熟化する可能性がある。また、6月下旬以降の播種の場合、短日条件になりつつあることから北海道の品種であっても早期に花芽分化することも考えられ、播種期後退に適した生態型品種の育成が必要となってくる。実際、予測されるような気温経過をたどる東北地方中部では、6月下旬に播種し、8月上旬に開花始、10月中旬に成熟するような品種が栽培されている。

(2) 品種による対策

生育期間中の気温が高くなり、生育期間や登熟期間が短くなることを想定すると、これまでの中生より晩生の品種が必要となってくる。また、登熟期間の気温が高くなることから粒大が大きく、高温登熟条件でも粒色が濃くならない品種が望ましい。平成22年に優良品種となった「きたあすか」は、中生の品種であるが、粒大が大きく、粒色が明るく、このような気象条件下に適した特性を持つ。さらに育成系統には成熟期が“中の晩”の普通小豆で、「エリモショウズ」対比107~120%の多収系統があり、粒大がやや大きく、粒色は明るい。道央や道南

など温暖化の著しい地域では短日要求性を持つ本州型の生態型を持つ品種が必要になってくる可能性もある。

(3) 生産地の移動による対策

温暖化により新たに小豆の栽培に適した地域が出てくる可能性がある。表IV-5-8に示したように、小豆の地域別収量予測では、十勝、オホーツク、胆振での収量が増加すると推定された。気温以外にも日射量や日照時間、土壌条件などの環境が揃うことが必要であるが、これまで小豆栽培が少なかったオホーツクや名寄以北の地域、弟子屈、中標津などは今後温暖化に伴い、豆類の導入が振興される可能性がある。その際、機械化収穫適応性や耐冷性など現在の品種をさらに改良する必要があるが、輪作体系上、豆類の割合が少ない地域であるだけに今後の小豆の安定供給には重要な地域となる可能性がある。

表IV-5-11 初霜前の収穫を前提とした播種期の予測結果

地点	CCSRモデル		CGCM1モデル	
	播種期 (月日)	成熟期 (月日)	播種期 (月日)	成熟期 (月日)
北斗	7.10	10.31	7.11	10.30
倶知安	6.20	10.07	6.21	10.07
岩見沢	7.01	10.17	7.04	10.18
滝川	6.25	10.12	6.27	10.12
旭川	6.25	10.11	6.26	10.11
富良野	6.19	10.05	6.21	10.04
名寄	6.16	10.05	6.20	10.05
留萌	7.06	10.28	7.07	10.29
網走	6.27	10.28	7.01	10.28
訓子府	6.07	9.28	6.10	9.28
苫小牧	7.03	10.27	7.05	10.27
大樹	6.15	10.07	6.19	10.07
芽室	6.11	10.03	6.14	10.04
上士幌	5.27	9.17	6.01	9.19
中標津	6.05	10.03	6.10	10.02

※各モデルの初霜-15日に成熟期となる播種期

6) 要 約

(1) 気象要因が小豆の生育に与える影響を検討したところ、生育日数は生育期間中の気温と負の高い相関がみられた。また、収量構成要素では、百粒重は登熟期間の気温と負の高い相関がみられた。

(2) DVR を用いて出芽始、開花始と成熟期の推定を行ない、開花始については出芽始を推定する2式と開花始を推定する2式の計4式で推定でき、成熟期については2式によりおよそ3日以内の誤差で推定することが可能であった。また、アメダスポイントの日平均気温から地域の収量を予測する式を道内7か所について作成した。決定係数 R^2 は 0.11~0.83 であった。

(3) 播種期を現在並とすると、開花期と成熟期は、CCSR では現在より7~10日、CGCM1 では9~12日程度早まり、栽培可能地域が根室管内にまで拡大する可能性が示唆された。

(4) 収量を推定する式から2030年代の収量を予測したところ、現在に比べCCSRでは、十勝・オホーツク・胆振地域で12~19%の増収、後志・渡島・檜山地域では0~4%の微増、石狩・空知・上川地域では2~4%の減収となり、各地域の作付面積を現在並とすると、全道の生産量は12%の増収と見込まれた。CGCM1でも各地域の収量動向は同様で、北海道全体としては11%増収すると予測された。

(5) 登熟期間の気温から百粒重を推定する式を得た。この式を用いると2030年代には道南、道央の一部で流通規格内歩留の低下が懸念された。

7) 引用文献

- 1) 村田吉平. 北海道における作物育種. (株北海道協同組合通信社. 1998. p. 148~152
- 2) 村田吉平. 我が国におけるマメ類の育種. (株明文書房. 1987. p. 364~373

(佐藤 仁)

V. 飼料作物に対する影響

1. 牧草

1) 目的

本節では、地球温暖化が牧草の生育や収量に及ぼす影響を予測する。なお、対象草地は、道内の主要酪農・畜産地域で栽培面積が最も大きい、チモシー単播およびチモシー・マメ科草混播草地（以下、単にチモシー草地と表記）とし、対象品種は普及面積が最も広い早生とする。

2) 方法

(1) 気象要因と収量の関係解析

過去20年間（1989～2009年）の上川農試天北支場および根釧農試の定期作況圃場における各番草の平均乾物生産速度（以下CGRと略記、CGR＝乾物収量÷生育日数）と平均気温、日射量および降水量との関係を、萌芽または再生開始からの日数を10日ごとに区切って解析した。

供試草地の収量データ等の概要は表V-1-1の通りである。なお、チモシー草地の刈取り回数は年2回の地域が多いので、これ以降の解析対象は1, 2番草に限定した。

また、予備解析の結果、CGRと気象要素との関係は単播草地とマメ科草混播草地で大差なかったため、今後は特に断りのない限り、単播と混播を込みで扱うこととした。

(2) DVR法による1番草出穂期の予測

チモシーの出穂期は温度や日長の影響を受けるため、温暖化に伴って変化すると予想される。そこで、作物の生育予測法の一つであるノンパラメトリックDVR法を用いて、2030年代のチモシー1番草の出穂期を予測する。

①対象地点

道内の主要な牧草栽培地域として、以下の11市町村を対象とした。八雲、名寄、遠別、稚内、枝幸、紋別、訓子府、浦河、大樹、釧路、中標津。

②ノンパラメトリックDVR法の概要

DVR法では、チモシーの発育ステージを、萌芽期に0、出穂期に1の値をとるような発育指数（Developmental Index, DVIと略す）で表し、これを毎日の発育速度（Developmental Rate, DVRと略す）の積算値として表現する¹⁾。チモシー1番草の出穂期予測には、日平均気温と可照時間を用いた2次元ノンパラメトリック法が有効²⁾なことから、ここでは本手法を用いることとした。

実際のDVIの計算には、三枝ら²⁾に基づいて道総研農試で作成された「チモシー1番草出穂期予測システム」における地域別のパラメータ（日平均気温および可照時間とDVRとの関係）を用いた（付図V-1-1）。対象品種は早生の「センボク」である。

③萌芽期の設定

1番草の出穂期予測には、計算の起点となる萌芽期の設定が必要である。ここでは、一般的なイネ科牧草の生育下限温度が約5℃であることから、日平均気温が冬季以降に初めて5℃以上となった期日を萌芽期とした。

④供試気象データ

現在の日平均気温データには、対象地点に気象官署がある場合はその年平均値を、無い場合は地点近傍のアメダス年平均値を用いた。

2030年代の気象データには、II章で整備したCCSRおよびCGCM1による日平均気温予測値を利用した。ただし、これらは約10km四方を平均化した面データであり、気象官署やアメダスのような点データとは空間スケールが異なるので直接比較ができない。そこで、対象地点とした各市町村の重心直近のメッシュについて、CCSRまたはCGCM1による2030年代予測値と現在の「メッシュ気候値2000」との差を求めた後、その差を対象地点の気象官署またはアメダスデータに加算し、これを当該地点の2030年代の値として用いた。

可照時間は各地点の緯度と暦日から求めた。

表V-1-1 気象要因との関係解析に用いた牧草収量データの概要（平均値±標準偏差）

地域 ¹⁾	草地 ²⁾	データ数	萌芽期	刈取日(月/日)			乾物収量(kg/10a)			
				1番草	2番草	3番草	1番草	2番草	3番草	年間合計
天北	TY単播	7	4/23±7	6/22±4	8/14±5	10/6±7	739±96	265±71	186±67	1191±150
	TY・RC混播	19	4/18±6	6/25±5	8/16±5	10/10±5	653±107	336±84	185±38	1175±172
根釧	TY単播	13	4/27±2	6/25±3	8/21±3	-	649±73	272±56	-	921±106
	TY・RC混播	53	4/25±4	6/28±5	8/22±4	-	686±106	349±66	-	1035±137

¹⁾天北は上川農試天北支場、根釧は根釧農試の定期作況圃場の1989～2009年のデータ。土壌は天北では台地褐色森林土、根釧は表層多腐植質黒ボク土。

²⁾TYはチモシー（ノサップまたはセンボク）、RCはアカローバ（ノハミドリ、ホクセキまたはサツポロ）。年間施肥量(N-P₂O₅-K₂O, kg/10a)は、天北では16-6-15(TY)または12-10-18(TY・RC)、根釧では17-8-17(TY)または10-12-22(TY・RC)。いずれの草地とも更新後2または3年目。天北のTYは2003～2009年、TY・RCは1990～2002年のデータ。根釧のTYは2003～2009年、TY・RCは1989～2006年のデータ

(3) 蒸発散量と水利用効率を利用した収量予測

結果および考察で後述するように、気象要素から収量を直接予測することは困難と判断された。一方、中辻³⁾は、気象要素の総合的指標として蒸発散量を用い、これに牧草の水利用効率を乗じて収量を推定し、実測値と概ね良好な対応をみている。

ここでは、まず既往のデータからチモシー草地の水利用効率を求め、次いで2030年代の気象データから求めた蒸発散量にこれを利用して将来の収量を推定した。

①対象地点

出穂期予測と同じ11地点とした。

②水利用効率の設定

方法(1)で用いた牧草収量データと、近傍のアメダスデータから中辻³⁾に従って求めた蒸発散量との関係を検討し、チモシー単播草地、およびチモシー・アカクローバ混播草地の水利用効率を付表V-1-1のように算出した。

水利用効率 (kg 10a⁻¹ cm⁻¹) の平均値は、1番草が単播で44、混播で43、2番草が単播で17、混播で24であった。このように単播および混播草地で水利用効率に大差がなかったことから、本成績では単播と混播の区別なく、一律に、1番草の水利用効率は40 kg 10a⁻¹ cm⁻¹、2番草は20 kg 10a⁻¹ cm⁻¹とすることとした。

③生育期間の設定

後述するが、温暖化によってチモシー草地の萌芽期や出穂期が変化するため、2030年代の各番草生育期間も現在とは異なったものとなる。ここでは、方法(2)による結果に基づき、現在および2030年代における対象地点の各番草生育期間を図V-1-1のように設定した。これによれば、2030年代の生育期は現在よりもおおむね10日早まるが、各番草の生育日数は紋別を除き現在と同様である。なお、設定の前提として、年間刈取り回数は2回とし、1番草は出穂期に、2番草は生育日数60日間で刈り取るものとした。

④蒸発散量の推定

蒸発散量は日平均気温と日射量を用いた以下の式で求めた³⁾。

$$ET = (0.0135 \times T + 0.24) \times Rs / L$$

ここで、ET：蒸発散量 (cm d⁻¹)、T：日平均気温 (°C)、Rs：日射量 (J cm⁻² d⁻¹)、L：蒸発潜熱 (2499-2.5×T、単位：J cm⁻³) である。

現在の気象データには、対象地点に気象官署がある場合はその平年値を、無い場合は地点近傍のアメダス平年値を用いた。また、アメダスで観測していない日射量は日照時間および対象地点の緯度等から推定した。

2030年代の気象データには、II章で整備したCCSRおよびCGCM1による日平均気温および日射量の予測値を利

用した。ただし、これらは約10 km四方を平均化した面データであり、気象官署やアメダスのような点データとは空間スケールが異なるので直接比較ができない。そこで、対象地点とした各市町村の重心直近のメッシュについて、CCSR または CGCM1 による 2030 年代予測値と現在の「メッシュ気候値2000」との差(日射量では比)を求めた後、その差を各市町村の気象官署またはアメダスデータに加算(比の場合は乗算)し、これを当該地点の2030年代の値として用いた。

地点	年代	4月			5月			6月			7月			8月		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
八雲	現在				1st						2nd					
	2030年代															
名寄	現在															
	2030年代															
遠別	現在															
	2030年代															
稚内	現在															
	2030年代															
枝幸	現在															
	2030年代															
紋別	現在															
	2030年代															
訓子府	現在															
	2030年代															
浦河	現在															
	2030年代															
大樹	現在															
	2030年代															
釧路	現在															
	2030年代															
中標津	現在															
	2030年代															

図V-1-1 現在および2030年代におけるチモシー草地1、2番草の生育期間の設定

1番草は出穂期、2番草は生育日数60日で刈取り。年2回刈り。早生品種を想定。

⑤収量の推定

上述の方法で現在および2030年代の1、2番草生育期間の蒸発散量を旬ごとに求めた後、これに先の水利用効率を乗じ、それらを積算して各番草の収量を推定した。

ただし、本節で算出した水利用効率は、適切な肥培管理が行われた更新後2、3年目の高収草地から得られた値であり、水分環境の影響を除けば、この値を用いて推定される収量はいわゆるポテンシャル収量に近いと考えられる。そこで以下では、収量の絶対値よりも、現在から2030年代への変化の傾向を中心に論ずることとする。

3) 結果および考察

(1) 気象要因と収量の関係解析

①1番草のCGRと気象要素との関係

1番草の平均CGRは全般に萌芽後11日目以降の平均気温と有意な正の相関を示すことが多く、天北と根釧を込みにすると、萌芽後11日目~40日目までの平均気温と最も強い相関を有した(表V-1-2)。降水量に関しては、負の相関を示すことが多く、根釧、天北ともに萌芽後11

表V-1-2 1番草の平均CGRと最も強い相関を示した各気象要素の算定期間とその相関係数

地域	気象要素	算定期間	相関係数
天北 (n = 26)	平均気温 (°C)	萌芽後11日目～40日目	0.662
根釧 (n = 66)		萌芽後11日目～60日目	0.513
天北+根釧 (n = 92)		萌芽後11日目～40日目	0.555
天北 (n = 26)	平均日降水量 (mm d ⁻¹)	萌芽後11日目～60日目	-0.454
根釧 (n = 66)		萌芽後11日目～60日目	-0.472
天北+根釧 (n = 92)		萌芽後11日目～60日目	-0.344

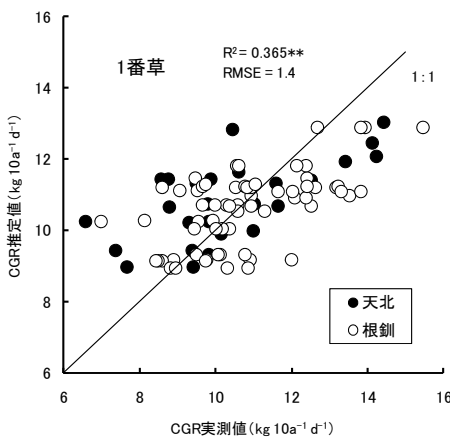
注)相関係数はいずれも1%水準で有意.

日目～60日目の降水量との関係が最も密接であった(表V-1-2)。一方、日射量とCGRとの間には有意な相関はほとんど認められなかった(データ省略)。

以上のように、1番草のCGRは平均気温とは正の、降水量とは負の相関を示す傾向にあった。そこで、CGRを目的変数、10日ごとに区切って算定した平均気温と降水量を説明変数とする重回帰分析(ステップワイズ法)を行い、いずれの期間の平均気温と降水量がCGRに最も強く影響するかを検討したところ、以下の重回帰式を得た(決定係数=0.365**).

$$CGR = 0.544 \times T_{11-40} - 0.345 \times P_{11-60} + 6.89$$

ここで、CGR:1番草の平均乾物生産速度(kg 10a⁻¹ d⁻¹)、T₁₁₋₄₀:萌芽後11日目～40日目までの平均気温(°C)、P₁₁₋₆₀:萌芽後11日目～60日目までの平均日降水量(mm d⁻¹)。



図V-1-2 気象要素を説明変数とした重回帰式による1番草CGRの推定値と実測値との関係

重回帰式は以下の通り。CGR=0.544×T₁₁₋₄₀-0.345×P₁₁₋₆₀+6.89。ここで、CGR:1番草の平均乾物生産速度(kg 10a⁻¹ d⁻¹)、T₁₁₋₄₀:萌芽後11日目～40日目までの平均気温(°C)、P₁₁₋₆₀:萌芽後11日目～60日目までの平均日降水量(mm d⁻¹)。

説明変数として選択された期間は、平均気温、降水量ともに、CGRと最も強い単相関を示した期間と合致した(表V-1-2)。各説明変数のCGRに対する偏相関係数はT₁₁₋₄₀が0.507、P₁₁₋₆₀が-0.470とともに1%水準で有意であったが、得られた重回帰式の決定係数は0.365と小さく、CGR推定値と実測値も良い対応を示さなかった(図V-1-2)ことから、本式による1番草収量の推定は困難と考えられた。

②2番草のCGRと気象要素との関係

2番草の平均CGRは、いずれの気象要素との間にも1番草ほどの強い相関を示さず、平均気温に対して、根釧で0.24～0.39、両地域込みで0.22～0.26程度の相関係数を有する程度であった。

また、日射量および降水量とCGRの間には有意な相関はほとんど認められなかった。このため、2番草収量を気象要素から直接的に推定するのは困難と判断した。

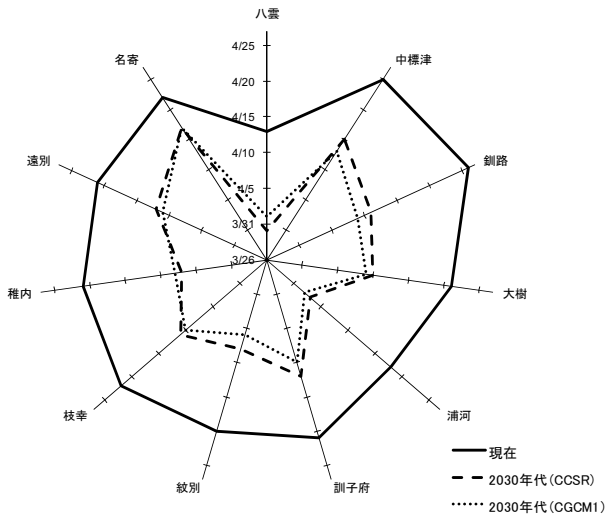
(2) DVR法による1番草出穂期の予測

①萌芽期の変化

2030年代のチモシー1番草の萌芽期は、CCSRおよびCGCM1のいずれの場合でも、すべての地点で現在より5～17日(平均12日)早まると推定された(図V-1-3)。地域的には、名寄や訓子府のような内陸部よりも、釧路や浦河のような沿岸部の方が前進程度はやや大きい傾向にあった。

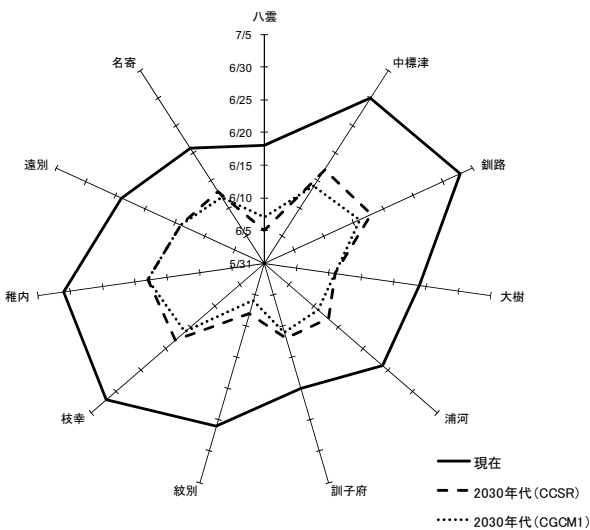
②出穂期および1番草生育日数の変化

2030年代のチモシー1番草の出穂期は、萌芽期と同様、すべての地点で現在よりも8～20日(平均13日)早まると見込まれた。特に、枝幸、紋別、釧路、中標津での出穂期は現在よりも2週以上前進し、現在のオーチャードグラス(早生または中生)の出穂期に該当する6月上旬～6月中旬にまで早まると推定された(図V-1-4)。



図V-1-3 温暖化に伴うチモシー1番草萌芽期の変化

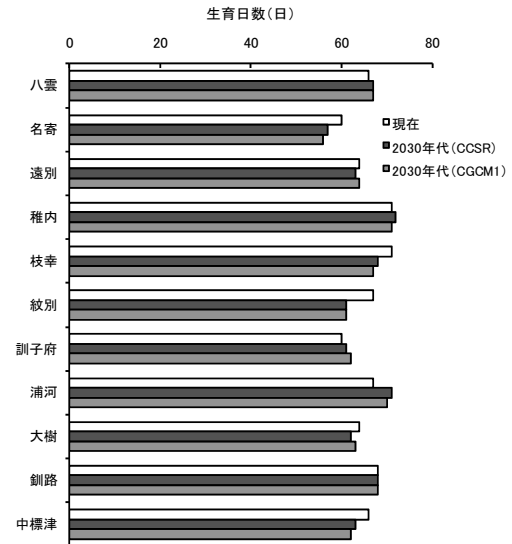
早生品種「センボク」の場合。軸の単位は月/日。



図V-1-4 温暖化に伴うチモシー1番草出穂期の変化

早生品種「センボク」の場合。軸の単位は月/日。

1番草の刈り取り時期を一般的な出穂期とすると、2030年代のチモシー1番草の生育日数（萌芽期から出穂期まで）は、現在より短くなる地点が5ヶ所（名寄-4日、枝幸-4日、紋別-6日、大樹-2日、中標津-4日）、長くなる地点が3ヶ所（八雲+1日、訓子府+2日、浦河+4日）、ほぼ変わらない地点が3ヶ所（遠別、稚内、釧路）であった（図V-1-5）。全地点平均の生育日数は65日で、現在の66日とほとんど変わりがなく、温暖化により1番草の生育期は現在よりも早まるが、一部の地域を除き、萌芽期から出穂期までの生育日数には大きな変化はないものと推察された。



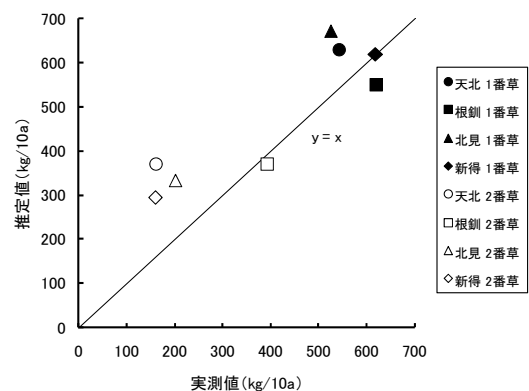
図V-1-5 温暖化に伴うチモシー1番草生育日数（萌芽期から出穂期まで）の変化

早生品種「センボク」の場合。

(3) 蒸発散量と水利用効率を利用した収量予測

はじめに、ここで用いた収量推定手法の妥当性を検証するため、上川農試天北支場、根釧農試、北見農試、畜試の各定期作況圃場における2010年のチモシー収量実測値と本法による推定値との関係を図V-1-6に示す。2番草収量の推定値は実測値よりやや過大となる傾向にあったが、年間収量の大半を占める1番草については両者の対応は概ね良好で、両者間のRMSエラーは119 kg/10aであった。

以上のことから、本手法はチモシー収量の予測法として有効であると判断し、以下の検討を進めた。



図V-1-6 チモシー乾物収量の実測値と推定値との関係（2010年）

実測値は上川農試天北支場、根釧農試、北見農試、畜試の各定期作況圃場における2010年のデータ。

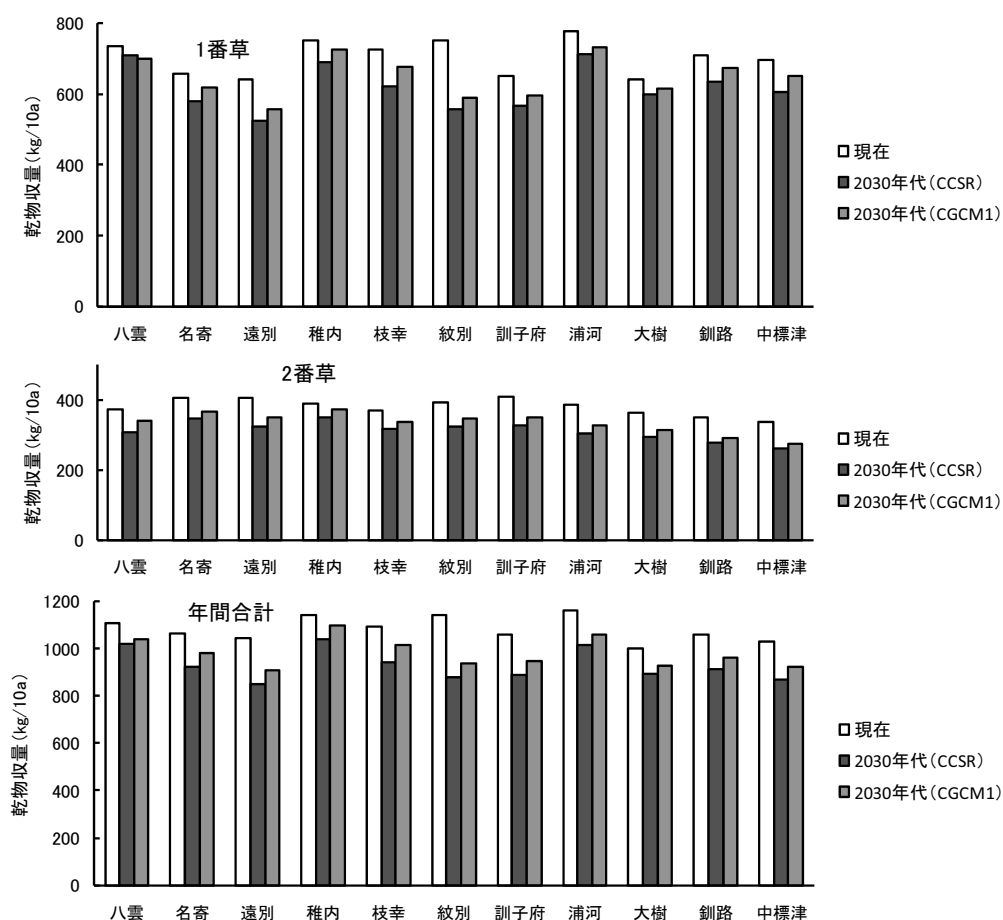
2030年代のチモシー1番草収量は、すべての地点で現在(640~780 kg/10a)から4~26%低下し、530~730 kg/10a程度に減少すると予測された(図V-1-7)。地点別にみると、紋別での減少が著しかったが、これはこの地点のみ2030年代の1番草生育日数が現在よりも短縮されることが影響している。2番草収量は、絶対値は小さいものの、1番草と同様にすべての地点で現在よりも8~22%減少すると見込まれる。このような1,2番草の動向を反映し、2030年代の年間合計収量は現在(1000~1160kg/10a)の8~9割程度にとどまるものと推定された。なお、収量レベルに及ぼす気象シナリオの影響をみると、夏季の昇温程度が高いCGCM1の方がCCSRよりもやや多収傾向にある。

気温が上昇し、かつ生育日数が現在と同様な2030年代のチモシー収量が現在よりも減少することには、主要生育期間である5~8月の日射量が現在比0.8~0.9と少なく見込まれている(図II-1, 2)ことが影響していると考えられる。すなわち、気温の上昇よりも日射量の減少が蒸発散量の低下に強く寄与し、ひいてはチモシー収量の減少をもたらしているとみられる。

そこで、2030年代には平均気温のみが変化し日射量は現在と同じとした場合の収量推定値を図V-1-8に示す。1番草収量は、生育期間が現在より短い紋別を除けば、現在とほとんど変わらない地点が7ヶ所(八雲, 遠別, 稚内, 枝幸, 訓子府, 浦河, 大樹), 増加する地点が3ヶ所(名寄, 釧路, 中標津)であった。2番草は生育日数を一律60日間と設定しているため、2030年代の気温上昇に伴い、やや増収する傾向が認められる。年間合計収量は、紋別と浦河を除き、いずれの地点でも増加したが、増加程度は1~7%であり、大幅な増収は期待できないと予測された。

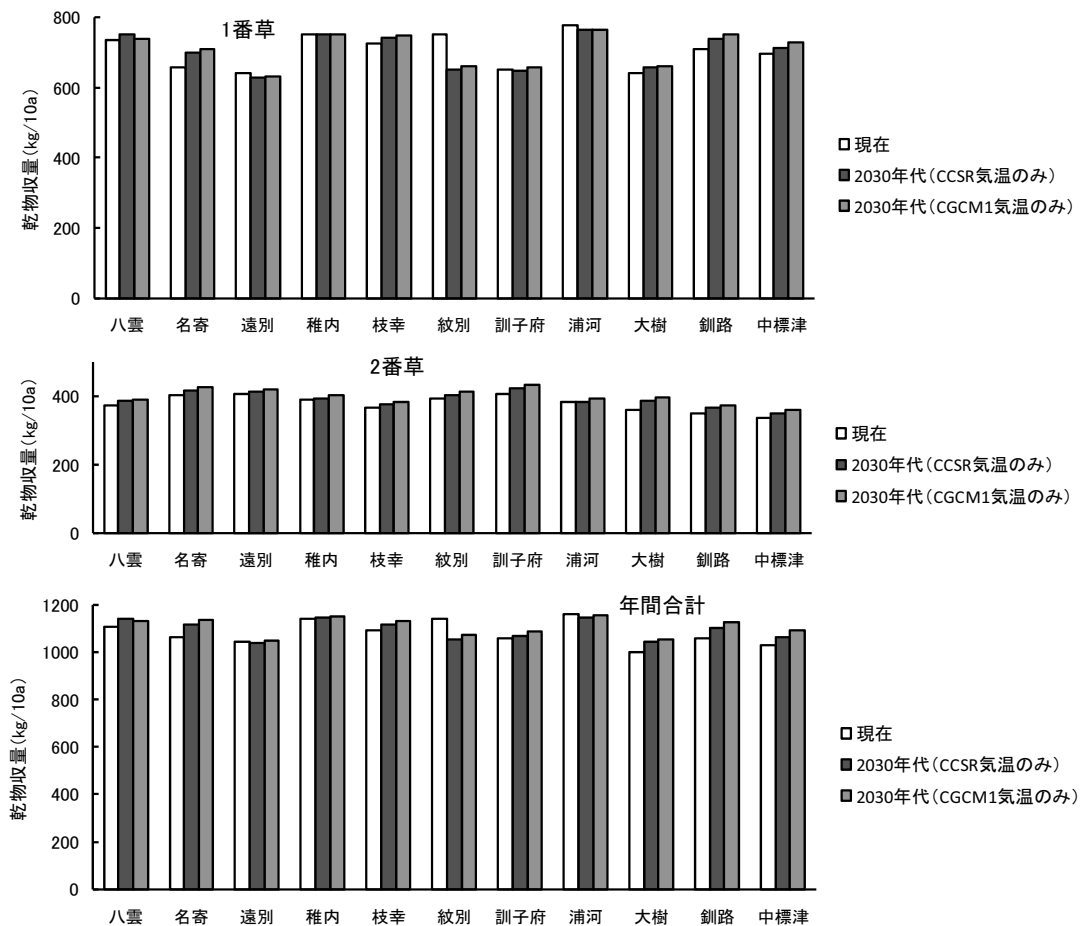
ただし、このような収量に対する日射量の寄与は、チモシー生育と日射量との相関は判然としないとする本節第2項の結果と矛盾する面が残されている。したがって、本節での収量推定結果は参考程度にとどめておく必要がある。

なお、本成績では、凍害や雪腐病害による「冬枯れ」や夏期間の高温で生育が停滞する「夏枯れ」の影響などは考慮しておらず、今後の検討が待たれる。



図V-1-7 温暖化が道内各地のチモシー草地の収量に及ぼす影響(その1)

気象データ(CCSR, CGCM1)については第II章を参照。1番草は出穂期, 2番草は生育日数60日で刈取り。年2回刈り。早生品種を想定。



図V-1-8 温暖化が道内各地のチモシー草地の収量に及ぼす影響（その2）

気象データ（CCSR, CGCM1）については第II章を参照。ただし、2030年代には平均気温のみが変化し、日射量は現在と同じとした場合。1番草は出穂期、2番草は生育日数60日で刈取り、年2回刈り、早生品種を想定。

4) 2030年代の予測に基づく技術的対応方向

これまで述べてきた2030年代の予測に基づき、将来想定される問題点と技術的対応方向を以下に考察する。

(1) 晩生品種の導入による収量確保

2030年代のチモシー1番草の出穂期は、予測対象とした道内の牧草栽培地域のすべてにおいて現在よりも平均13日ほど早まると推定された。このため2番草の生育日数を栄養価を考慮して一律60日とした場合、2番草の刈取りは遅くとも8月中旬までに行われるため、条件によっては、年間刈り取り回数を3回に増やせる地域が出現することとなる。

一方、2030年代のチモシー草地の年間収量は、気温上昇にも関わらず生育期間の日射量の減少によって現在の8~9割程度に減少、もしくは気温上昇の影響のみを考慮した条件でも大幅な増収は見込めない可能性が示唆された。

したがって、将来の飼料自給率を少なくとも現在並に維持するには、刈り取り回数の増加による草量確保が一つの方法として挙げられる。しかし、栄養価や嗜好性が

1番草より劣るとの理由で2番草の積極的な利用が進んでいない実態⁴⁾や、秋期に生育する3番草は一般に低収であることを考慮すると、刈り取り回数の増加による対応は労力とコストの兼ね合いから現実には困難と思われる。

この場合、現状の2回刈りを維持しつつ収量を確保する方法として、チモシー晩生品種の利用が考えられる。一般に、晩生品種は生育適温下での生育期間が長く、早生品種よりも多収を示す⁵⁾ため、収量の確保に有効である。ただし、出穂期の乾物消化率が早生品種より低いという指摘⁶⁾もあることから、晩生品種の導入にあたっては適期収穫の遵守が前提となる。

出穂期の異なる複数品種の導入は、刈り取り適期幅の拡大を通じて草地生産性の向上をもたらすことは周知の事実である。現状の道内チモシー草地は早生品種が8割を占めている⁷⁾が、将来の温暖化に向けて早生品種偏重の実態を再考していくとともに、晩生品種の積極的な導入を促すため、成分育種による品質向上を図っていく必要がある。

(2) 草地の基盤整備

本成績で用いた 2030 年代の気象予測値では、5～7 月にかけて現在の 1.4～1.8 倍の降水量が見込まれている。このため、草地の冠水や長期にわたる表面滞水が生じないよう、暗きょ・明きょ整備などの排水改良を主体とした基盤整備が現在以上に重要となろう。実際、7 月上旬～8 月上旬に多量の降雨が続いた 1999 年には、道北地域の泥炭草地において、大雨後の長期表面滞水を原因とする再生障害により、135 ha が草地更新を余儀なくされた事例が報告されている⁸⁾。また、このような排水改良は、6～7 月にかけて行われる大型機械による 1 番草の収穫作業や飼料調整を適期に短期間で完了するためにも重要である。

一方、増大する降雨を土壤に効率よく貯留できれば、気温上昇で増加する蒸発散をまかなう貴重な水供給源となる。将来の昇温程度や降水量の多寡にもよるが、道北の重粘土草地では温暖化に伴い低水分ストレスの発生頻度が高まるとの報告³⁾もあることから、土壤の保水性を高め、降雨を効率的に貯留できるようにすることが重要である。草地土壤の保水性改善には、堆肥の施用⁹⁾やそれと深耕との組み合わせ¹⁰⁾が有効とされている。特に保水性に乏しい土壤が広く分布する道北地域においては、数少ない更新時を土壤改良の貴重な機会ととらえ、保水性改善策の積極的な導入が求められる。

(3) 病害虫への対応

各種病害は一般に高温、多雨条件で発生拡大が懸念される。「北海道農業における地球温暖化への技術的対応方向」によると、牧草では現在、各種のかび毒産生病害（麦角病、黒かび病）が散発しているに過ぎないが、2030 年代の高温・多雨条件では、これら病害の発生拡大が懸念されている。また、虫害に関しては、アワヨトウの飛来頻度が高まり、被害が頻発する可能性が指摘されている。

このような病虫害に対しては、被害程度に応じた防除対策の適期実施が基本となるが、各種病害抵抗性品種の育成など、品種開発による長期的な取り組みも必要となろう。

5) まとめ

(1) 道内の主要牧草栽培地域 11 市町村を対象に、2030 年代のチモシー草地（早生）の生育・収量を以下のように予測した。

(2) 1 番草の生育期は、現在より萌芽期が 5～17 日（平

均 12 日）、出穂期が 8～20 日（平均 13 日）早まると見込まれ、出穂期は現在のオーチャードグラス（早生または中生）並となる。1 番草の生育日数には大きな変化はない。

(3) 年間収量は、気温上昇にも関わらず生育期間の日射量の減少によって現在の 8～9 割程度にとどまる。気温上昇の影響のみを考慮した場合は、現在と同等かわずかに増収する。

(4) 2030 年代の技術的対応として以下の取り組みが想定される。①晩生品種の利用を中心とした熟期の異なる複数品種の導入による収量確保と成分育種による品質・栄養価の維持（2 回刈りを前提として）、②多雨に備えた草地の排水性改良と保水性改善、③病害虫の発生程度に応じた防除対策の実施と各種病害抵抗性品種の育成。

6) 引用文献

- 1) 堀江武ら。”イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究(1)”. 日作紀. 55 (別 1), 214-215 (1986).
- 2) 三枝俊哉ら.”北海道根釧地方における 2 次元ノンパラメトリック DVR 法によるチモシー 1 番草の出穂期予測メッシュ図”. 日草誌. 40, 171-178 (1994).
- 3) 中辻敏朗.”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”. 道立農試報告. 119, 1-53 (2008).
- 4) 北海道農政部.”天北地方における 2 番草の利用・飼料成分等の実態からみた問題点とその改善策”. 平成 21 年普及奨励ならびに指導参考事項. 2009. p. 132-133.
- 5) 木曾誠二ら.”北海道根釧地方における出穂期の異なるチモシー 3 品種の生育経過と窒素施肥反応”. 日草誌. 38, 251-258 (1992).
- 6) 大原益博ら.”数種寒地型牧草の 1 番草の生育に伴う *in vitro* 乾物消化率, 粗蛋白質含量および収量の推移”. 日草誌. 29, 161-168 (1983).
- 7) 北海道農政部.”北海道の採草地における牧草生産の現状と課題”. 平成 12 年普及奨励ならびに指導参考事項. 2000. p. 162-167.
- 8) 中央農試他.”異常高温・多雨等が農畜産物に及ぼす影響と今後の対策”. 道立農試資料. 31, 1-167 (2000).
- 9) 三木直倫・高尾欽弥.”草地地帯における細密土壌区分図の作成とその利用”. ペドロジスト. 31, 2-13 (1987).
- 10) 三木直倫ら.”天北地方鉾質重粘土草地の水分供給からみた収量規制要因とその改善策”. 土肥誌. 61, 526-530 (1990).

(中辻 敏朗)

2. 飼料用とうもろこし

1) 目的

地球温暖化が飼料用とうもろこし（ホールクローブサイレージ用）の生育や収量に及ぼす影響を予測する。

2) 方法

(1) 気象要因と収量の関係解析

各試験場（畜試、十勝農試、北見農試、根釧農試）における栽培品種の中から比較的栽培年数が長い品種を選定し、その生育・収穫調査データの主要項目（絹糸抽出期、部位別乾物収量）と播種から収穫までの期間（以下「生産期間」という）および5月～9月の試験場の近隣アメダスポイント月別気象データ（表V-2-1、気温、降水量、日照時間の平均値）との関係を解析した。

なお、生育・収穫調査項目から、生産期間中の1日当たり平均乾物生産量（以下、「乾物生産量」、乾物生産量＝総乾物収量÷生産期間の日数）等を算出して解析に用いた（表V-2-2）。

表V-2-1 気象要素（気温）の概要

地域	集計期間	平均	標準	5-9月	標準	5-9月	標準
		気温 ^{※1} (°C)	偏差	積算気温 (°C)	偏差	平均気温 (°C)	偏差
畜試	S56～H19	16.7	±1.2	2426	±137	15.9	±0.9
十勝	S62～H16	16.5	±1.2	2420	±146	15.8	±1.0
北見	H2～H13	16.4	±1.3	2353	±157	15.4	±1.0
根釧 ^{※2}	H13～H22	15.3	±1.7	2186	±162	14.3	±1.1

※1 生産期間（播種～収穫）中の1日当たり平均。

※2 H18、H21年データは低温多雨による極端な初期生育遅れにより除外。

表V-2-2 解析に用いた生育データ等の概要

地域	品種	栽培 年数	総乾物	乾物	播種	絹糸	収穫
			収量 (kg/10a)	生産量 (kg/10a/日)	(月日)	抽出 (月日)	(月日)
畜試	ワセホマレ	27年間	1,063	8.1	5/15	8/3	9/26
十勝	ヘイゲンミナリ	18年間	1,232	9.1	5/11	8/4	9/23
	ダイヘイゲン		1,163	8.6			
北見	ダイヘイゲン	12年間	1,273	9.9	5/19	8/7	9/25
根釧	ばびりか	8年間	1,196	9.0	5/22	8/12	10/3

(2) 温暖化に伴う収量変化

2030年代の飼料用とうもろこしの収量について、前節の解析で得られた一次回帰式から計算する方法（方法①）と品種変更による方法（方法②）との、二つの手法を用いて推定する。

①一次回帰式による収量予測

前節の解析により、各場・各品種ごとに得られた生産期間中の平均気温と乾物生産量との一次回帰式（表V-2-3）から、将来（2030年代）の飼料用と

うもろこしの収量を推定した。

表V-2-3 気温と乾物生産量の一次回帰式

地域	一次回帰式 ^{※1}	相関係数 ^{※2}
畜試	$y = 1.0641x - 9.6954$	0.857 **
十勝	$y = 0.6079x - 0.8762$	0.474 *
北見	$y = 0.8256x - 3.6446$	0.789 **
根釧	$y = 0.8582x - 4.1983$	0.914 **

※1 y:乾物生産量、x:生産期間中の平均気温

※2 *は5%水準で、**は1%水準で有意である

現在の平均気温データには、対象地点近隣のアメダスポイントの平年値を用いた。2030年代の気象データには、II章で整備したCCSRおよびCGCM1による2030年代予測値と現在の「メッシュ気候値2000」との差を対象地点のアメダス平年値に加算し、これを当該地点の2030年代に予想される生産期間中の平均気温として用いた（表V-2-4）。

表V-2-4 将来(2030年代)の平均気温予測値

地域	2030年代予測方法	各月の予測平均気温(°C)					予測積算気温(°C)	差 ^{※1} (°C)	5-9月予測平均気温	差 ^{※2} (°C)
		5月	6月	7月	8月	9月				
札幌市	(CCSR)	14.9	17.1	22.4	22.9	19.6	2967	+205	19.4	+1.3
	(CGCM1)	14.4	17.7	23.0	23.6	19.9	3019	+257	19.7	+1.7
訓子府町	(CCSR)	12.5	15.5	19.4	20.1	16.2	2563	+239	16.8	+1.6
	(CGCM1)	12.8	16.4	20.3	21.0	16.7	2670	+346	17.5	+2.3
芽室町	(CCSR)	12.5	15.2	19.3	20.5	17.4	2599	+196	17.0	+1.3
	(CGCM1)	12.4	15.9	20.0	21.2	17.8	2673	+269	17.5	+1.8
新得町	(CCSR)	13.2	16.0	19.9	21.1	17.4	2682	+269	17.5	+1.8
	(CGCM1)	13.2	16.7	20.6	21.9	17.9	2765	+352	18.1	+2.3
中標津町	(CCSR)	10.9	13.7	17.6	19.3	16.8	2397	+291	15.7	+1.9
	(CGCM1)	11.3	14.8	18.6	20.3	17.4	2522	+416	16.5	+2.7

※1 アメダスポイント2000年平年値から算出した積算気温との差

※2 アメダスポイント2000年平年値における5-9月平均気温との差

なお、II章では、2030年代の晩霜日が現在よりも早まる（平均値：全道13日、内陸部12日、沿岸部14日）と予測されており、全ての地域で播種期は5月上旬になると考えられるため、将来のとうもろこしの生産期間（播種～収穫）は、5-9月農耕期間とほぼ一致すると仮定した。

②品種変更による収量予測

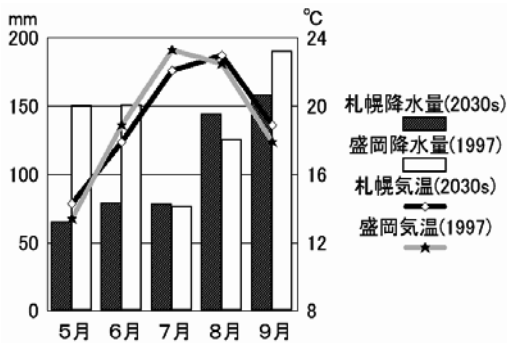
生産期間や積算気温の変動に対応した品種変更に伴う収量予測については、積算気温が概ね平年並かやや高い2005年（平成17年）における各試験場の品種比較試験結果から各熟期の標準品種収量（2試験場の平均値）を算出し検討した（表V-2-5）。

表V-2-5 標準品種の平均収量 (2005年)

5-9月積算		根釧	天北	畜試	北見	十勝	滝川	上川	平均 (kg/ 10a)
気温(°C)	2159	2255	2322	2415	2452	2590	2385		
平年(°C)	2102	2153	2290	2324	2396	2527	2478		
品種	熟期	2005年(H17)の総乾物収量(kg/10a)							
エマ	早早	1299	1329						1314
チベリウス	早中			1626	1819				1723
ネオ85	早晩				1565	1774			1670
TH9861	中早					1843	1791		1817
おおぞら	中中						1672	2245	1959
36B808	中早						1973	2414	2194

また、現在の本州地方並みの気温になると予測される札幌(道央)地域の収量については、現在の北海道向け品種群(中生, 晩生)での増収は困難と考えられたので、II章で整備された2030年代の札幌の予想気象データセットに近似する気象経過(図V-2-1)をたどった1997年の盛岡(岩手県)で栽培された中生と晩生の品種の収量を、2030年代の札幌地域における暫定的な予測値とした(表V-2-6)。

収量および気象データについては、全国の奨励品種決定試験等結果(家畜畜改良センター茨城牧場長野支場データベース)を用いた。



図V-2-1 2030年代札幌の予想気象と1997年盛岡の気象経過

表V-2-6 2030年代の暫定収量予測値

品種名	熟期	乾物収量 (kg/10a)	平均収量 (kg/10a)
札幌の栽培品種 (1997年の値)	3845 DK474	中晩 晩早	1890 2045
*2030年代、札幌で作付可能と仮定した品種の収量			
(1997年、盛岡で栽培した品種の値を暫定使用)	セシリア	中生	2393
	G4742	晩生	2241

3) 結果

(1) 気象要因と収量の関係解析

十勝の1品種を除いて生産期間中の平均気温と乾物生産量は高い正の相関を示した。また、全ての品種において、播種～絹糸抽出までの日数とは有意な負の相関を示した(表V-2-7)。

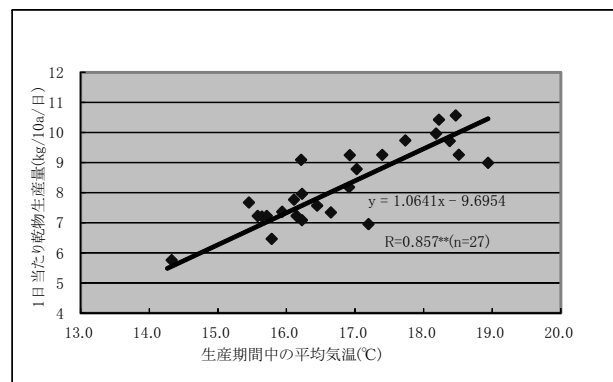
表V-2-7 各収量項目と気象要素との相関係数

地域	品種	収量項目	生産期間中の気象要素 ^{※1}		
			平均気温	平均降水	平均日照
畜試	ワセホマレ (n=27)	乾物生産量	0.857 **	-0.341 ns	0.276 ns
		雌穂乾物重	0.768 **	-0.266 ns	0.347 ns
		播種～絹糸の日数	-0.859 **	0.302 ns	-0.149 ns
十勝	ヘイゲンミ ノ (n=18)	乾物生産量	0.474 *	-0.340 ns	0.244 ns
		雌穂乾物重	0.537 *	-0.318 ns	0.265 ns
		播種～絹糸の日数	-0.818 **	0.442 ns	-0.465 ns
北見	ダイヘイゲ ン (n=12)	乾物生産量	0.432 ns	-0.376 ns	0.282 ns
		雌穂乾物重	0.384 ns	-0.265 ns	0.280 ns
		播種～絹糸の日数	-0.820 **	0.453 ns	-0.487 *
根釧	ばびりか (n=8)	乾物生産量	0.789 **	-0.191 ns	-0.095 ns
		雌穂乾物重	0.803 **	-0.087 ns	0.083 ns
		播種～絹糸の日数	-0.773 **	0.120 ns	0.265 ns

※1 気象要素は1日当たり平均、気温(°C)、降水量(mm/日)、日照時間(hr/日)
*は5%、**は1%水準で有意、nsは有意でない。

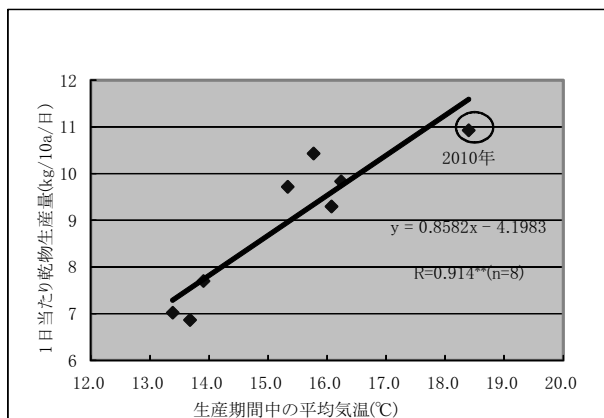
このことから、1日当たりの乾物生産量は生産期間中の平均気温と相関が高く、一方で降水量や日照時間との相関は根釧地域を除いて小さいことが明らかとなった。

よって、飼料用とうもろこしの収量については、生産期間中の平均気温と1日当たりの乾物生産量との一次回帰式によって概ね予測できると判断した(図V-2-2)。



図V-2-2 とうもろこし乾物生産量と平均気温の関係 畜試(S56~H19, 27年間データ)

なお、根釧地域の解析において、将来の気象条件を予想させるような高温年であった本年(2010年)のデータを加えても、有意な相関が得られたことから、一次回帰式による将来予測の妥当性が確認できた(図V-2-3)。



図V-2-3 高温年(2010年)を加味したとうもろこし乾物生産量と平均気温の関係
根釧(H13~H22 ※H18, H21年は除く)

(2) 温暖化に伴う収量変化収量予測

①一次回帰式による収量予測

2030年代の飼料用とうもろこしの収量は、現在の道内向け品種では増収に限界があると考えられた道南・道央地域(増加量0と仮定)を除き、すべての地域で増加(48~350kg/10a)すると見積もられた(表V-2-8)。

表V-2-8 2030年代における飼料用とうもろこしの収量予測(方法①一次回帰式)

地域区分	予測方法	平均気温(°C)	2030年代の予測乾物収量		
			1日当	期間合計	増加量(kg/10a)
道央・道南	(CCSR)	19.4	—	—	0 ^{※1}
	(CGCM1)	19.7	—	—	0 ^{※1}
十勝中部	(CCSR)	17.0	9.5	1280	48
	(CGCM1)	17.5	9.7	1319	87
十勝山麓・沿海	(CCSR)	17.5	9.0	1176	113
	(CGCM1)	18.1	9.5	1251	188
オホーツク網走	(CCSR)	16.8	10.2	1337	274
	(CGCM1)	17.5	10.8	1413	350
根釧・天北	(CCSR)	15.7	9.2	1226	33
	(CGCM1)	16.5	9.9	1319	126
全道 ^{※2}	(CCSR)予測における増加率				+10%
	(CGCM1)予測における増加率				+14%

※1 現行の北海道向け品種では増収しないと仮定。

※2 地域の作付面積割合を考慮して算出。

②品種変更による収量予測

また、品種変更による収量予測においても収量増加(94~524kg/10a)の可能性を示した(表V-2-9)。

表V-2-9 2030年代における飼料用とうもろこしの収量予測(方法②品種置換)

地域区分	現代		2030年代		増加量(kg/10a)
	熟期	品種	熟期	品種	
道央・道南	中中	3845	本州型	セシア	503
	以上	DK475		G4742	196
十勝中部	中早	TH9861	中中	おおぞら	142
			中晩	36B08	377
十勝山麓・沿海	早中	チベリウス	中早	TH9861	94
			中中	おおぞら	236
オホーツク網走	早晩	ネオ85	中中	おおぞら	289
			中晩	36B08	524
根釧・天北	早早	エマ	早晩	ネオ85	356
			中早	TH9861	503
全道	(CCSR)予測における増加率				+14%
	(CGCM1)予測における増加率				+23%

これらの結果を踏まえ、北海道全体で各地域の作付面積を考慮した上で収量増加割合を推定すると、方法①では、+10%(CCSR予測)~14%(CGCM1予測)となり、方法②では、+14%(CCSR予測)~23%(CGCM1予測)となった。

以上のことから、飼料用とうもろこしにおいては、温暖化による気温上昇に伴い収量が増加傾向となり、品種ごとの収量限界に近づいたところで、高温条件により適合した品種を選択することによって収量増加を継続させる可能性があることがわかった。

4) 技術的対応方向

これまで述べてきた2030年代の飼料用とうもろこしの収量予測に基づき、将来予想される問題点と技術上の対応方向は以下のとおりである。

(1) とうもろこし播種の早期化

晩霜日が全道平均で約2週間早まることに対応して、全ての地域で播種作業を5月上旬に終了させることが、生育期間を確保し、期待される収量を得る上で重要となる。播種の早期化に合わせた計画的な耕起作業が求められる。

(2) 適正な施肥と雑草防除の実施

収量増加に対応した適正な施肥量を投入することが重要となる。特に、初期生育における濃度障害と昇温効果による生育速度の上昇による肥料切れ回避のため、追肥が重要である。生産者が実践しやすい省力的な追肥作業の体系化が求められる。

また、高温多雨により雑草の繁茂が懸念されるので、適期防除を励行する必要がある。

（３）適期収穫の実施

生育速度の上昇に応じた収穫適期（黄熟期，乾物率30%前後）の判定を的確に行い，栄養収量が最大となる時期に収穫することが重要となる。特に，記録的な夏季高温となった2010年，一部に見られた枯れ上がりの早期化とすす紋病多発に対応した作業受委託組織の整備など，機動的収穫体系の構築が求められる。また，子実の過熟によるデンプンの消化吸収率の低下が懸念されるため収穫時の破碎処理は必須な技術と考えられる。

（４）飼料給与技術の改善

飼料用とうもろこしの収量増加による給与量の増加は飼料自給率を向上させるが，タンパク質をはじめとする栄養バランスの維持が重要となる。効率的な乳肉生産を行うためには併給する牧草や濃厚飼料のCP（粗タンパク質）レベルの確保が求められる。

（５）気温条件に適合した品種の開発

北海道の飼料用とうもろこし品種群の第一の育種目標であった耐冷性の向上に加えて，昇温傾向に対

応した生育持続性を有する品種の開発が重要となる。

また，気温上昇により雌穂の熟度の進行や乾物重量の増加が期待できることから，子実用とうもろこし栽培（現在，戦略研究課題で試験中）に適した品種の開発も念頭に置いて，現在の本州地域向け遺伝資源の導入なども検討する必要がある。

５）まとめ

（１）各試験場の飼料用とうもろこしの収量データに基づき，2030年代の北海道における飼料用とうもろこしの収量について予測した。

（２）作付面積が現在並とすると，全道の年間収量は，気温上昇により現在から10～14%，昇温程度に合わせた熟期の遅い品種への変更により14～23%程度の増加が見込める。

（３）今後の対応策としては，2030年代の気象条件に対応した栽培・飼料給与技術の実践と新しい視点からの品種開発が求められる。

（寺見 裕）

VI. 2030年代に向けた対応方向

1. 2030年代に想定される変化

前章までの結果に基づき、2030年代（CCSR予測値による）に想定される現在からの変化を作物別に表VI-1にまとめた。

本研究で用いた2030年代の気候データでは、5～9月の月平均気温は現在より1.3～2.7℃上昇し、同期間の日射量は現在比0.8～0.9倍で、6～7月に多雨が予測されている。

表VI-1 2030年代に想定される現在からの変化

作物	生育	収量	品質	病害虫、その他
水稻	①移植可能日や出穂期が早まる。 ②安全出穂期間が長くなり、遅延型冷害リスクは減少。 ③生育の前進により冷害危険期の気温はわずかに高まるに過ぎず、地域によっては障害型冷害（不稔発生）リスクが残る（「きらら397」並の中生種を想定）。	登熟期間の気象条件から推定すると、現在並～やや増収（現在比98～106%）。	登熟気温の増大により、アミロース含有率(%)は0.9ポイント、タンパク質含有率(%)は0.2ポイント低下し、良食味化する（「きらら397」、成苗を想定）。	①直播では、出穂期が早まることにより、全道で中生品種の栽培が可能。 ②いもち病の発生増加。
小麦	①融雪期の前進と春以降の気温上昇で、起生期と成熟期が早まる。 ②登熟期間はほとんど変わらない。	①気温と日射量から推定したポテンシャル収量は8～18%減少（「ホクシン」を想定）。 ②生育後半の降水量増加により水分不足が緩和され、増収する地域もある。	成熟期から収穫期の降水量増加により、倒伏、低アミロ（穂発芽）、赤かび被害のリスクが高まる。	①播種適期は6～10日程度遅くなる（「きたほなみ」対象）。 ②根雪始期の遅れにより、雪腐病は減少し、凍害リスクは増加か？ ③6月以降の降水量増加により赤かび病の発生が高まる。
てんさい	気温と日射量から推定すると、最大糖量に達する日が遅く（生育日数が長）くなり、収穫適期は遅延する。	生育期間の気温から推定すると、 ①根重は12%増加。 ②根中糖分(%)は0.8ポイント低下。 ③糖量（根重×根中糖分）は6%増加。		気温上昇と7月以降の降水量増加により、褐斑病、葉腐病、根腐病、黒根病が多発。
ばれいしょ	萌芽期はほとんど変わらないが、枯凋期が早くなり、生育日数は短くなる。	①日射量の減少により15%程度減収。 ②植付期の前進により生育日数は現在並となるが、減収の回復は見込めない。 （以上は「紅丸」並の中晩～晩生種を想定）	でんぷん価は8～9月の気温上昇により低下。	①高温と6～7月の多雨により疫病の初発が早まる。 ②軟腐病・青枯病の発生が増える？
大豆	①播種期を現在並とすると、開花期と成熟期は6～9日程度早まる（やや早の「ユキホマレ」、中生の「トヨムスメ」を想定）。 ②気温の上昇、無霜期間の延長により、現行の「道産豆類地帯別栽培指針」での地帯区分は1～2ランク上位に移行。	①「ユキホマレ」は、現在の6～8月平均気温が18℃以下の地域では増収、それ以上では減収。 ②「トヨムスメ」は、ほとんどの地域で増収。	裂皮粒やしわ粒の多発による落等。	①菌核病、紫斑病の発生。 ②食葉性害虫、カメムシ、マメシクイガの被害が増大。
小豆	播種期を現在並とすると、開花期と成熟期は7～10日早まり、栽培可能地域が根室管内にまで拡大（中生の早の「エリモシウス」を想定）。	①十勝・オホーツク・胆振では12～19%の増収、後志・渡島・檜山では0～4%の微増、石狩・空知・上川・留萌は2～4%の減収。 ②各地域の作付面積が現在並とすると、道内生産量は12%増加。	登熟期間の気温上昇により、百粒重が減少し、道央・道南の一部で流通規格内歩留が低下。	①各種病害（茎疫病、萎凋病など）の発生拡大。 ②メイガ、カメムシによる食害、アズキゾウムシなどの貯穀害虫による被害の増加？
牧草	①融雪期の前進と気温上昇で、1番草の萌芽期は12日、出穂期は13日早まる。 ②1番草の生育日数は変化なし。 （以上は早生のチモシー単播、チモシー・マメ科草混播草を想定）	①日射量の減少により年間収量は10～20%減少。 ②気温上昇のみを考慮すると、現在と同等かわずかに増収。 （同左、かつ年2回刈り）	適期収穫の遵守により、大きな問題なし。	かび毒産生病害（麦角病、黒かび病）の発生拡大？
飼料用とうもろこし	播種から絹糸抽出期までの期間が短縮。	各地域の作付面積が現在並とすると、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、全道では約10～14%の増収。	過熟による子実デンプンや茎葉繊維の消化吸収率の低下。	すず紋病等の多発？

注1) 2030年代の気象はCCSR予測値による。また気温の年変動幅は現在並と仮定した。

注2) 特に断りがない場合、表中に記載の数値は全道の平均的な値である。

注3) 不確実性が特に高い事項については「？」を付記。

2030年代の生育は、水稻、秋まき小麦、豆類、牧草では、融雪期の前進と春季の気温上昇によって移植可能日や播種期（あるいは起生期や萌芽期）が現在よりも前進し、開花期や成熟期なども全般に早まる傾向にある。しかし、登熟期間や生育日数は現在と大差ない場合が多く、生育期節全体が現在よりも早い時期へシフトすると予想される。ばれいしょ、飼料用とうもろこしについては、気温上昇によって生育日数は現在よりも短縮される傾向にある。

収量性は現在と比べ、水稻では登熟期間の気温上昇と日射量低下が相殺して現在並～やや増収する。冷害リスクについては、遅延型冷害の発生は減少するが、生育ステージの前進により、冷害危険期の気温は現在よりもわずかに高まるに過ぎないため、地域によっては障害型冷害（不稔発生）による収量・品質の低下リスクは依然として残る。小麦では日射量の低下で減収、豆類では品種間差はあるが気温上昇で概ね増収、牧草では日射量の低下で減収、と見積もられる。とうもろこしでは熟期の遅い品種への変更によって増収が可能なのに対し、ばれい

しょでは植付期を早めても日射量の低下により減収すると予想される。てんさいについては、気温上昇による収量（根重）増加の寄与が根中糖分低下に勝り、現在と同程度の生育日数であれば、糖量は現在よりも増加すると予想される。ただし、他作物と異なり、生育日数が現在よりも長くなり、最大糖量に達する日（収穫適期）が現在よりも遅延すると見込まれるため、多収の実現には収穫時期の見直しが必要である。

品質に関しては、水稻でアミロース含有率の低下による良食味化が期待される他は、小麦では成熟期～収穫期の多雨による品質低下が、また豆類では裂皮粒の増加や百粒重の低下などが危惧される。とうもろこしでは過熟による子実でんぷんの消化吸収率の低下が、ばれいしょではでんぷん価の低下が懸念される。

病害虫の発生に関しては、水稻のいもち病、秋まき小麦の赤かび病、てんさいの褐斑病・根腐病などの増加が予想され、そのほかにも高温多雨条件で発生しやすい病害や虫害の発生が懸念される。

表VI-2 2030年代に向けた技術的対応方向

作物	品種開発の方向性	栽培技術の対応方向	病害虫の発生程度に応じた適期防除
水稻	①作期の拡大に伴う適正熟期の見直し ②各種障害抵抗性(耐冷性含む)品種 ③いもち病等の病害虫抵抗性品種	①作期の拡大に伴う栽培技術(各生育期における生育指標含む)の見直し ②地帯別作付指標の見直し ③直播栽培の拡大	
小麦	①耐凍性、耐倒伏性、穂発芽耐性品種 ②赤かび病等の病害抵抗性品種	①播種適期、播種量、起生期以降の施肥体系の見直し ②各生育期における生育指標の見直し ③圃場排水性の確保。	
てんさい	①高糖性品種 ②各種病害抵抗性品種	①作期の拡大による目標収量や収穫適期の見直し ②直播栽培適地拡大への対応	
ばれいしょ	①高温耐性、高でんぷん価品種 ②各種病害抵抗性品種	①植付期の前進による塊茎肥大期の高温の影響緩和 ②培土量の増大による地温変動の緩和	
大豆・小豆	①高温耐性、加工適性に優れた品種 ②各種病害虫抵抗性品種	①栽培地帯区分の見直し ②高品質化のための播種適期の見直し	
牧草	各種病害抵抗性品種	①晩生品種等の導入による収量確保 ②草地の排水性確保と保水性改善	
飼料用とうもろこし	①高温耐性品種 ②本州向け遺伝資源の導入などによる子実用とうもろこし品種	①播種期の前進と生育促進に伴う栽培適地および収穫適期の見直し ②雑草の適期抑制 ③子実用とうもろこし栽培技術の検討	

2. 2030年代に向けた技術的対応方向

以上の予測に基づき、2030年代に向けた技術的対応方向を、品種開発および栽培技術分野に分けて表VI-2にまとめた。

品種開発の方向性としては、高温・湿潤環境下で増加すると予想される各種病害虫に対する抵抗性品種の開発が、本道におけるクリーン農業推進の観点から、これまで以上に重要となる。また、小麦における穂発芽耐性の強化や畑作物全般における湿害耐性の強化が必要である。その一方で、水稲では穂ばらみ期の耐冷性、秋まき小麦では耐凍性のように、寒さに対する耐性の付与も従前通り求められる。また、すべての作物に共通して、高温耐性の付与が次第に重要となる。将来の気候変動については不確実な点も多いことから、今後の気候変動の動向を的確に見極めつつ、長期的な育種目標の設定が必要とされよう。

一方、栽培技術面では、これも全作物に共通して、作

期の拡大・移動・短縮等に応じた栽培技術の見直しが最優先と考えられる。具体的な例を挙げれば、播種・移植適期・収穫期の変更、施肥体系の再構築、栽培地帯区分の変更、各生育期における生育指標の見直しなど多岐にわたる。これについては、今後の作物の気象反応を注意深く観察しながら、各種の予測等も踏まえて、現行の栽培技術をベースとして修正を図り、対応していくのが現実的である。また、病害虫の発生程度に応じた適期防除の励行はもちろん、新たな病害虫の発生への対策も視野に入れた準備が必要である。あわせて、畑作では、今後の降雨変動に対応すべく、圃場の排水改良や保水性改善などの農地の基盤整備がこれまで以上に重要となる。

なお、具体的な対応にあたっては、現行の品種で実施可能な栽培技術分野を優先的に実施しつつ、抜本的な対応である品種開発を同時並行的に進めることが効率的と考えられる。

(中辻 敏朗)

VII. 要約

地球温暖化が道内の水稲、畑作物および飼料作物の生育や収量、品質等に及ぼす影響を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提示した。

1. 2030年代の気候データ(CCSR/NIES)によれば、月平均気温は現在(1971~2000年を統計期間とする平年値)から1.3~2.9℃(平均2.0℃)上昇。5~9月は平均1.8℃上昇し、日射量は現在の0.85倍に減少。年降水量は現在の1.2倍で、6、7月に多雨傾向となる。これに基づき、2030年代の各作物の状況を予測した。

2. 水稲：安全出穂期間が大幅に拡大し遅延型冷害の発生は減少するが、障害型冷害のリスクは依然として大きい。登熟環境からみた収量性は現在並かやや増加する。登熟期間の昇温で産米のアミロース含有率が低下し良食味化が期待される。タンパク質含有率はわずかに低下する。

3. 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~成熟期の降水量の増大により、水分ストレスが緩和される一方で倒伏や穂発芽の増加が懸念される。播種適期は6~10日遅くなる。

4. 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)は増大する(現在平均56 t/ha→62 t/ha)が、根中糖分は低下する(同17%→16%)。高温病害の初発が早まり発生量も多くなる。

5. ばれいしょ：収量は現在より約15%減少し、減収要因は気温の上昇よりも日射量の減少にある。気温上昇に伴って植付期を前進させても収量の変化は小さいが、紅丸相当の熟期でも収穫期は9月中旬まで早まる。

6. 大豆：播種期を現在並とすると開花期、成熟期は6~9日程度早まる。「道産豆類地帯別栽培指針」での地帯区分は現在よりも熟期の遅い品種が栽培可能となる方向に1~2ランクシフトし、安定栽培地域が拡大する。熟期が「やや早」の「ユキホマレ」の収量は現在の6~8月平均気温が18℃以下の地域では増収するが、それ以上では減収するため、気温上昇で増収が期待できる中生品種の選定が必要となる。

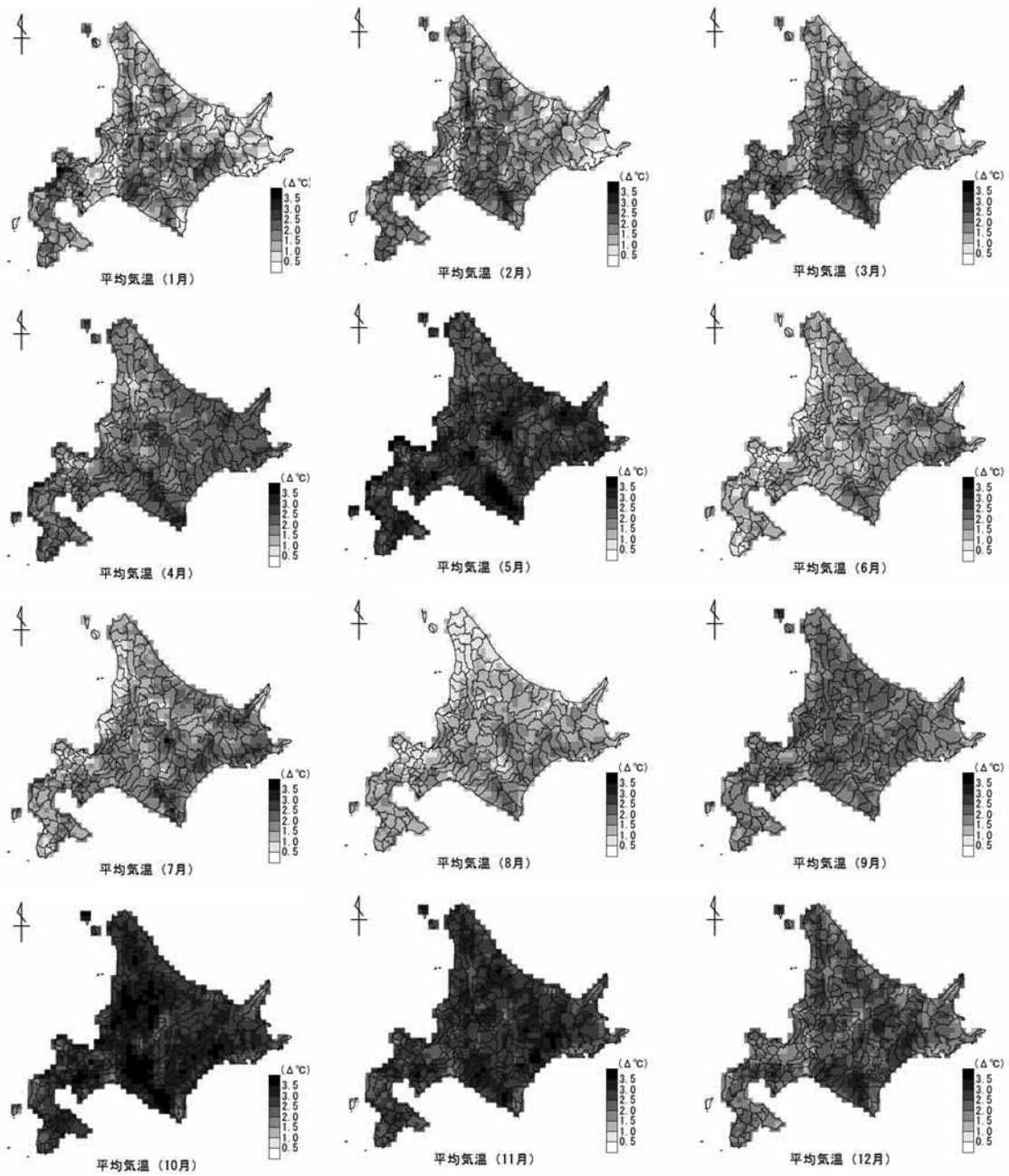
7. 小豆：開花期と成熟期は7~10日早まり、栽培可能地域が根室管内にまで拡大する。主産地の十勝・オホーツクで増収、後志・渡島で微増、上川・空知で減収となり、現状の作付面積で試算すると道内全体では12%の増収となる。登熟期間の昇温で百粒重が低下し、道南、道央の一部で規格内歩留の低下が懸念される。

8. 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。年間収量は気温上昇にも関わらず日射量の減少で現在の8~9割にとどまり、気温の影響のみを考慮すると現在と同等かわずかに増加する。

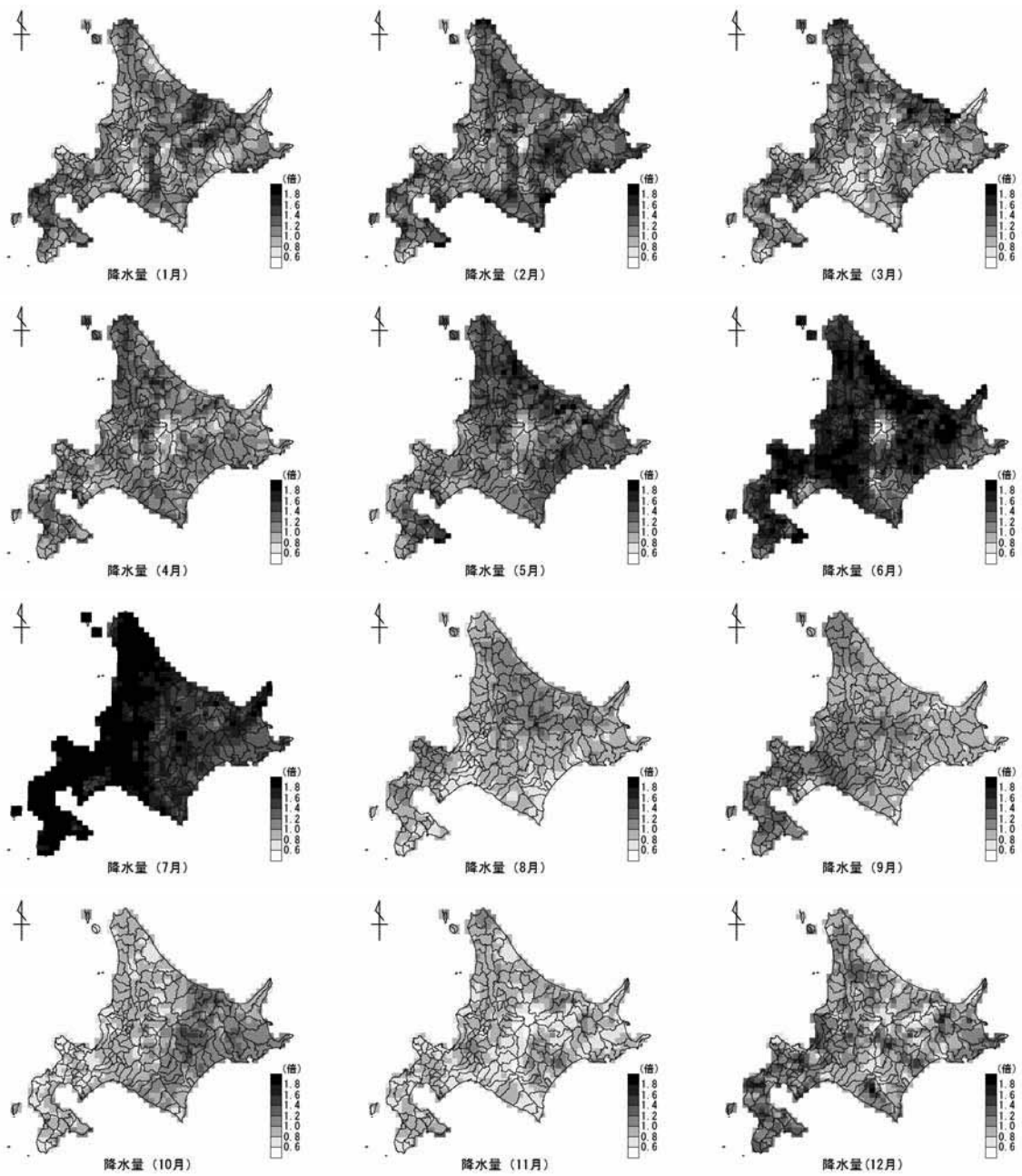
9. 飼料用とうもろこし：現状の作付面積で試算すると、気温の上昇、および昇温程度に合わせた熟期の遅い品種への変更により、全道では10~14%増収する。

10. 技術的対応方向としては、品種開発・導入における各種病害抵抗性および耐障害性の強化が望まれ、高温・湿潤環境への対応の一方で、当面は従来通り耐冷性の強化も必要である。また、作期の拡大・移動・短縮等に応じた栽培技術の見直し(播種・移植適期・収穫期の変更、施肥体系の再構築、栽培地帯区分の変更)、病害虫発生の変化への対応、湿害対策などを図る必要がある。

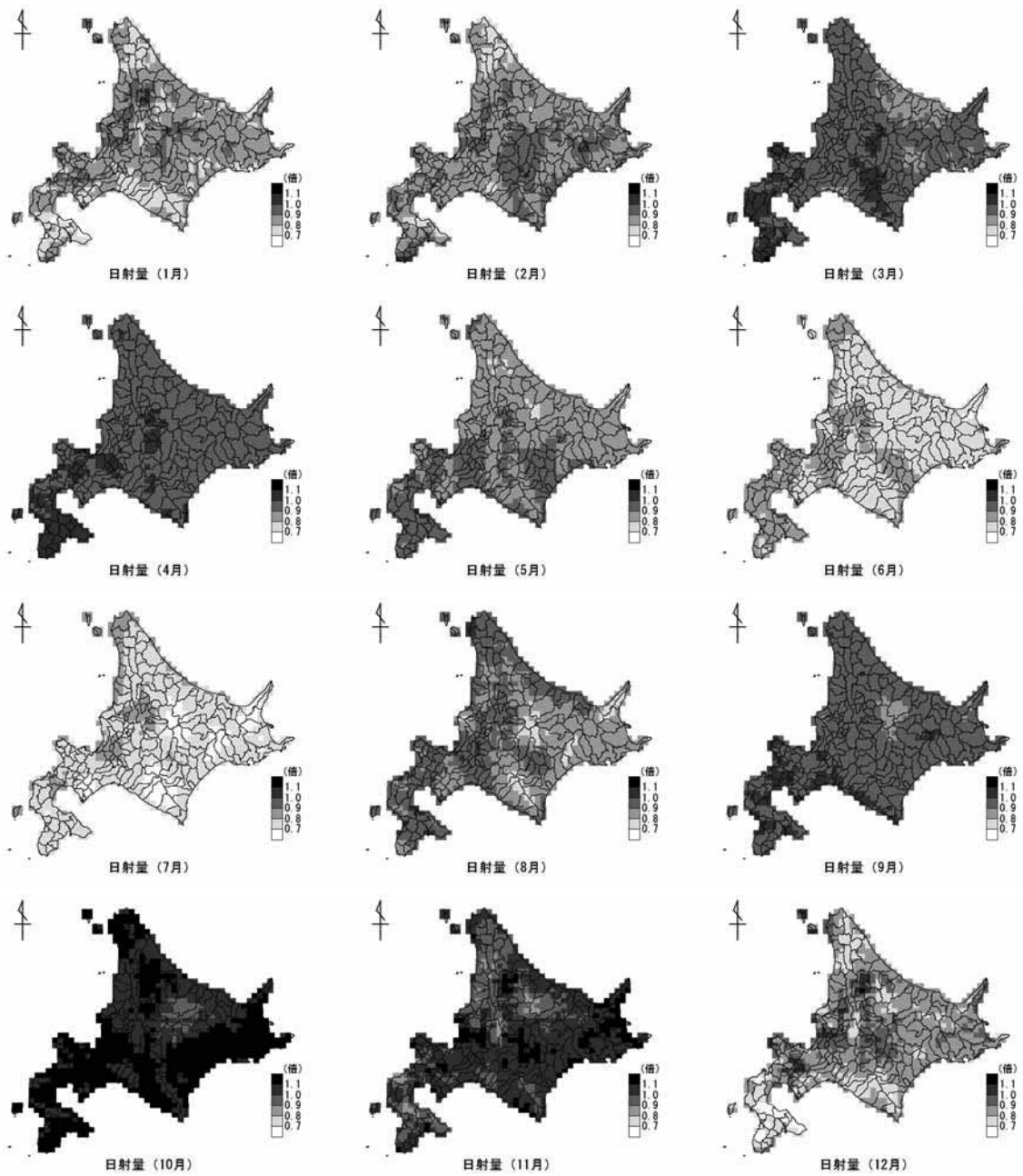
VIII. 参考資料



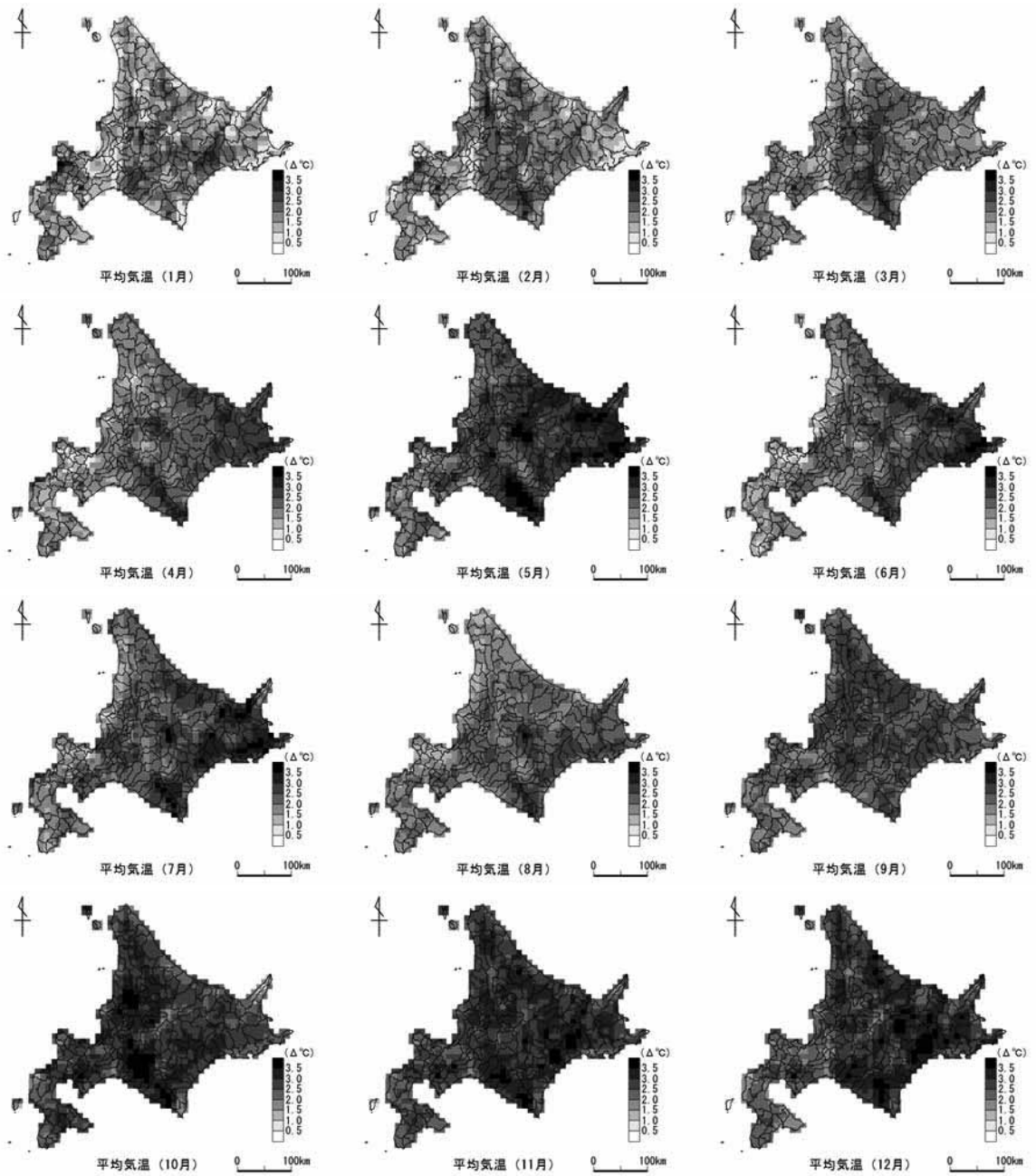
付図Ⅱ-1 CCSRによる2030年代の月平均気温予測値と現在との差(2030年代-現在)



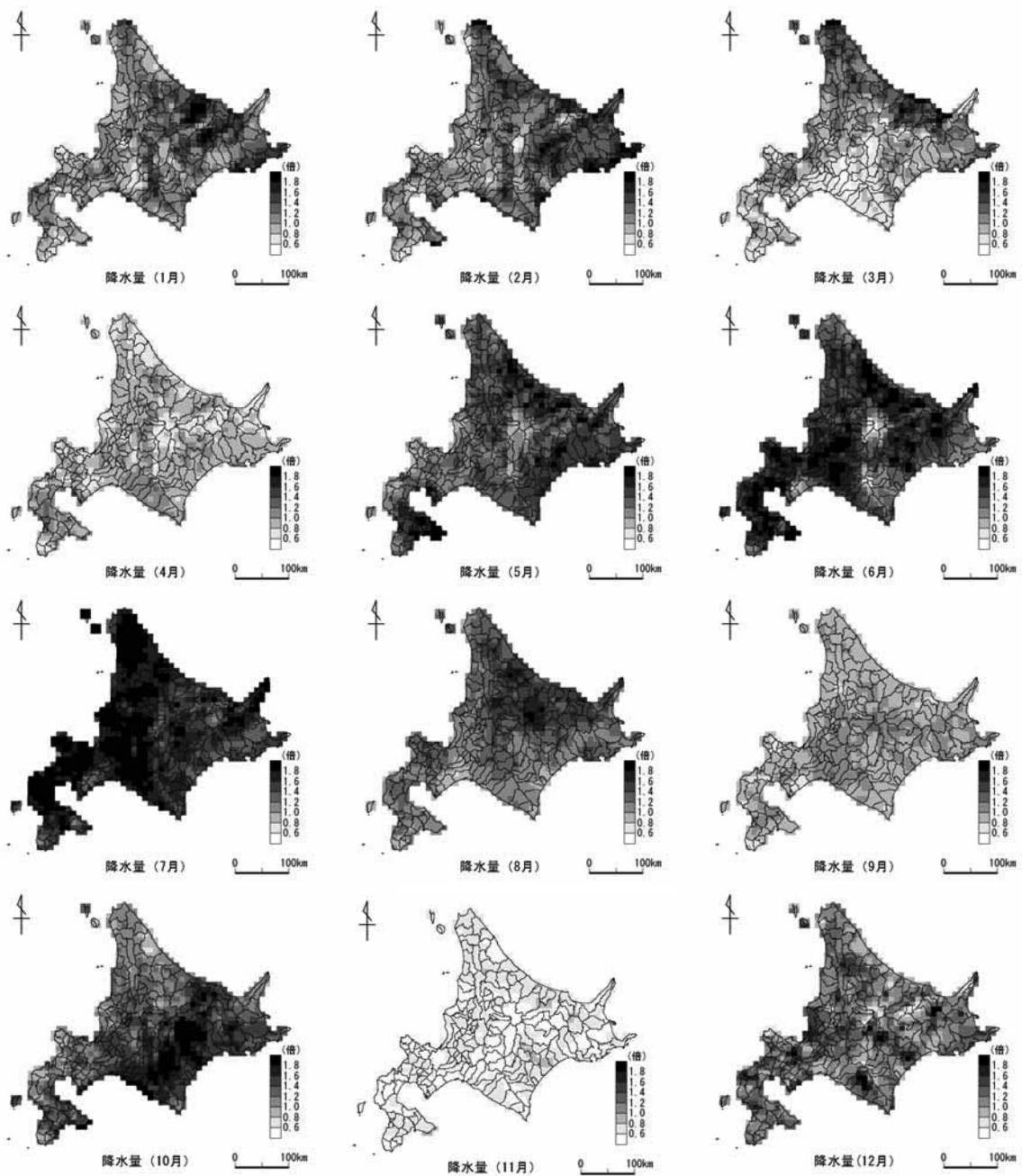
付図Ⅱ-2 CCSRによる2030年代の月降水量予測値と現在との比(2030年代/現在)



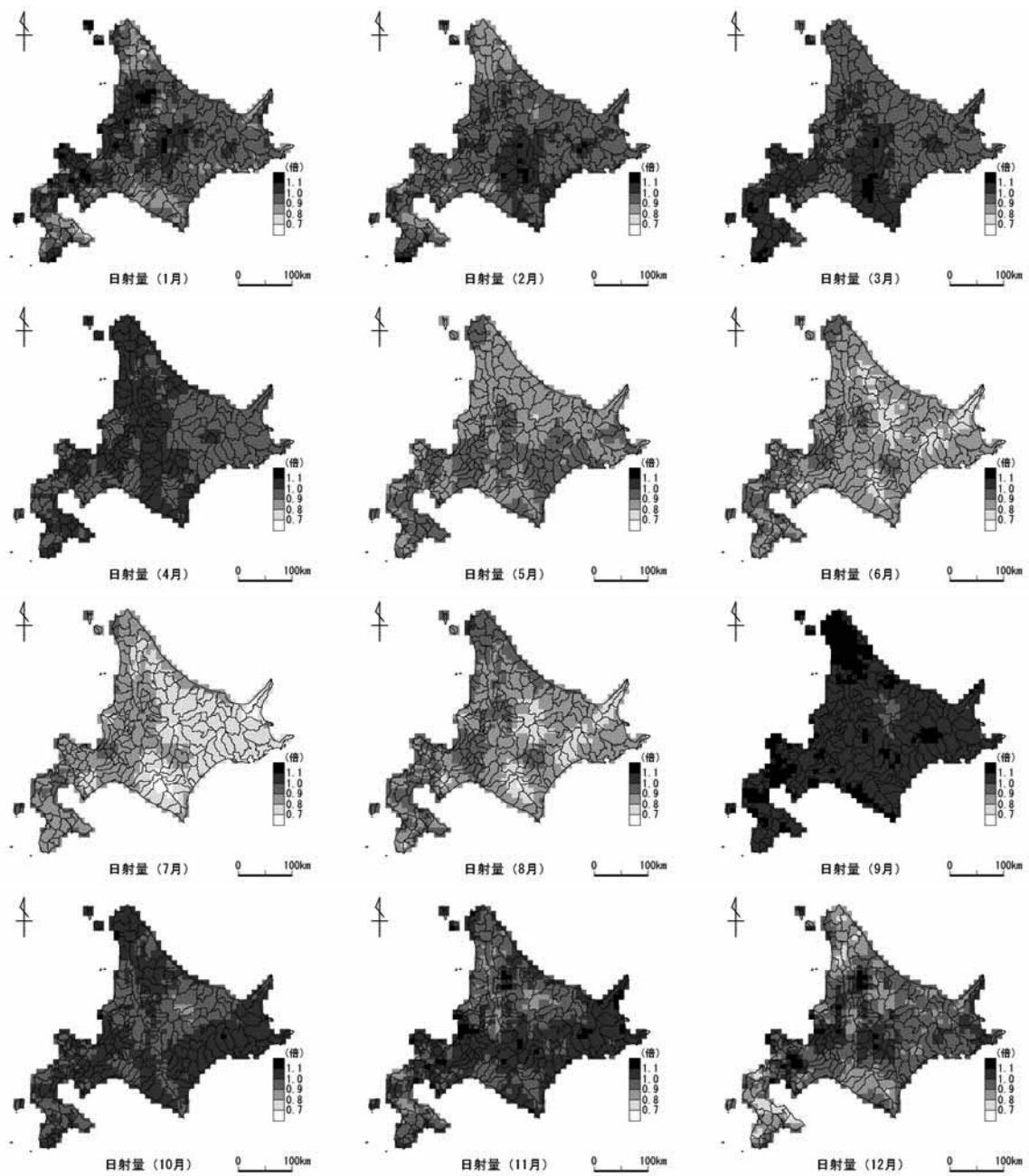
付図Ⅱ-3 CCSRによる2030年代の月平均日射量予測値と現在との比(2030年代/現在)



付図Ⅱ-4 CGCM1による2030年代の月平均気温予測値と現在との差(2030年代-現在)



付図Ⅱ-5 CGCM1による2030年代の月降水量予測値と現在との比(2030年代/現在)

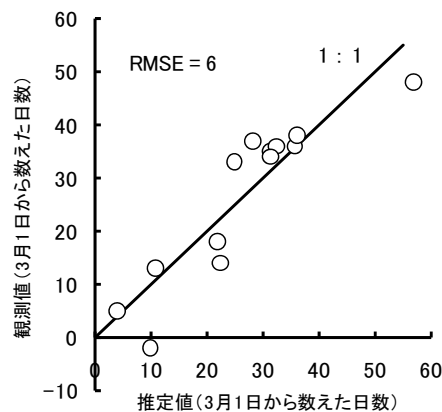


付図Ⅱ-6 CGCM1 による 2030 年代の月平均日射量予測値と現在との比 (2030 年代/現在)

付表Ⅱ-1 晩霜および初霜の平年起日と気温の平年値との関係

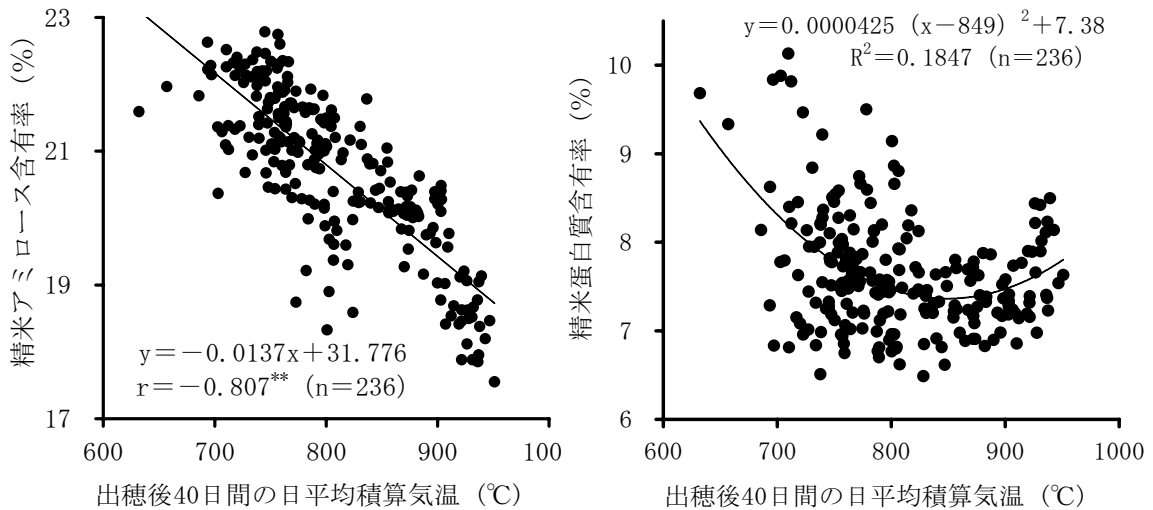
区分	地点	晩霜			初霜			無霜期間 (日)
		起日	同日の気温(°C)		起日	同日の気温(°C)		
			平均	最低		平均	最低	
内陸	札幌	4月24日	8.5	4.3	10月22日	10.0	5.6	181
	倶知安	5月21日	11.2	5.9	10月5日	11.3	5.6	137
	岩見沢	5月5日	9.6	4.4	10月17日	10.0	5.2	165
	旭川	5月16日	11.5	5.2	10月7日	10.6	5.2	144
	帯広	5月16日	11.2	5.5	10月8日	11.3	5.9	145
	平均	-	10.4	5.1	-	10.6	5.5	-
	標準偏差	-	1.3	0.7	-	0.7	0.3	-
沿岸	函館	5月5日	10.0	5.4	10月17日	11.5	6.4	165
	江差	4月20日	7.9	4.4	11月9日	8.2	4.7	203
	留萌	5月8日	9.2	5.2	11月3日	6.9	3.1	179
	稚内	5月1日	6.3	3.6	11月6日	5.6	2.7	189
	紋別	5月7日	8.1	3.9	10月24日	8.2	4.1	170
	網走	5月12日	9.0	4.8	10月26日	8.2	4.3	167
	苫小牧	4月27日	6.5	2.9	10月16日	11.0	5.6	172
	浦河	4月30日	7.0	3.5	10月31日	8.9	4.9	184
	釧路	5月9日	7.1	3.6	10月16日	10.5	5.1	160
	平均	-	7.9	4.1	-	8.8	4.5	-
標準偏差	-	1.3	0.9	-	1.9	1.2	-	

注)起日, 気温のデータはともに気象官署での1971~2000年の観測値に基づく平年値.



付図Ⅱ-7 長期積雪終日の推定値と観測値との比較

推定式は以下の通り. 長期積雪終日(3月1日から数えた日数) = $0.0803 \times (12 \sim 2 \text{月の積算降水量, mm}) - 0.245 \times (3 \text{月の積算平均気温, } ^\circ\text{C}) + 0.585$. 対象地点は札幌, 倶知安, 岩見沢, 旭川, 帯広, 函館, 江差, 留萌, 稚内, 紋別, 網走, 浦河, 釧路. 観測値はこれらの地点での平年値.



付図Ⅲ-1 出穂後40日間の日平均積算気温とアミロース含有率、蛋白質含有率との関係
15カ年、22箇所「きらら397」のデータ³⁾による。

付表Ⅲ-1 上川地域における現在(1978から2000年まで、23年間)および2030年代の冷害危険期における平均気温の頻度分布(%)

平均 気温 (°C)	士別市						比布町					
	現在		CCSR		CGCM1		現在		CCSR		CGCM1	
	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗
16.1~	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17.1~	9	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18.1~	13	13	9	9	4	9	9	26	0	9	4	0
19.1~	4	22	22	30	9	22	13	13	26	26	9	30
20.1~	17	30	17	22	26	22	17	26	17	30	30	26
21.1~	26	13	22	22	26	26	35	13	30	9	26	22
22.1~	9	9	13	9	17	9	9	9	4	22	13	13
23.1~	9	9	4	0	9	4	9	4	9	0	4	0
24.1~	9	0	4	4	0	4	4	4	4	4	9	4
25.1~	4	0	4	4	4	4	4	4	9	0	0	4
26.1~	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	4	0
27.1~	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
平均	21.3	20.8	21.5	20.9	21.7	21.1	21.4	20.6	21.5	20.8	21.7	21.2
最低	17.6	17.8	18.9	18.5	18.9	18.1	25.5	25.2	25.9	24.8	27.0	25.2
最高	25.4	25.5	26.3	25.7	27.7	25.5	19.0	18.3	19.4	18.4	19.0	19.4

気温はアメダスポイント。1978~2000年の各年次の気温が現在から2030年代の予測気温まで上昇すると仮定して算出。

付表Ⅲ-2 空知地域における現在(1978から2000年まで、23年間)および2030年代の冷害危険期における平均気温の頻度分布(%)

平均 気温 (°C)	深川市						岩見沢市					
	現在		CCSR		CGCM1		現在		CCSR		CGCM1	
	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗
16.1~	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17.1~	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
18.1~	4	13	4	0	0	0	17	13	4	4	4	0
19.1~	17	35	9	22	9	9	4	22	9	4	9	13
20.1~	22	22	30	30	30	39	17	26	22	22	13	13
21.1~	30	9	30	35	22	22	22	17	30	35	35	48
22.1~	13	13	9	4	17	17	22	9	13	13	17	17
23.1~	0	4	9	0	13	4	9	4	13	13	9	0
24.1~	13	0	4	9	4	9	9	4	4	4	9	0
25.1~	0	4	0	0	4	0	0	0	4	4	4	9
26.1~	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27.1~	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
平均	21.4	20.5	21.6	21.0	21.8	21.4	21.6	20.5	21.7	21.1	21.9	21.6
最低	19.0	18.2	19.0	19.1	19.5	19.7	18.7	17.7	18.8	18.3	18.7	19.1
最高	24.8	25.1	26.5	24.6	25.9	24.2	24.8	24.3	25.7	24.7	26.0	25.3

付表Ⅲ-1の脚注参照。

付表Ⅲ-3 胆振と渡島地域における現在（1978 から 2000 年まで、23 年間）および 2030 年代の冷害危険期における平均気温の頻度分布（％）

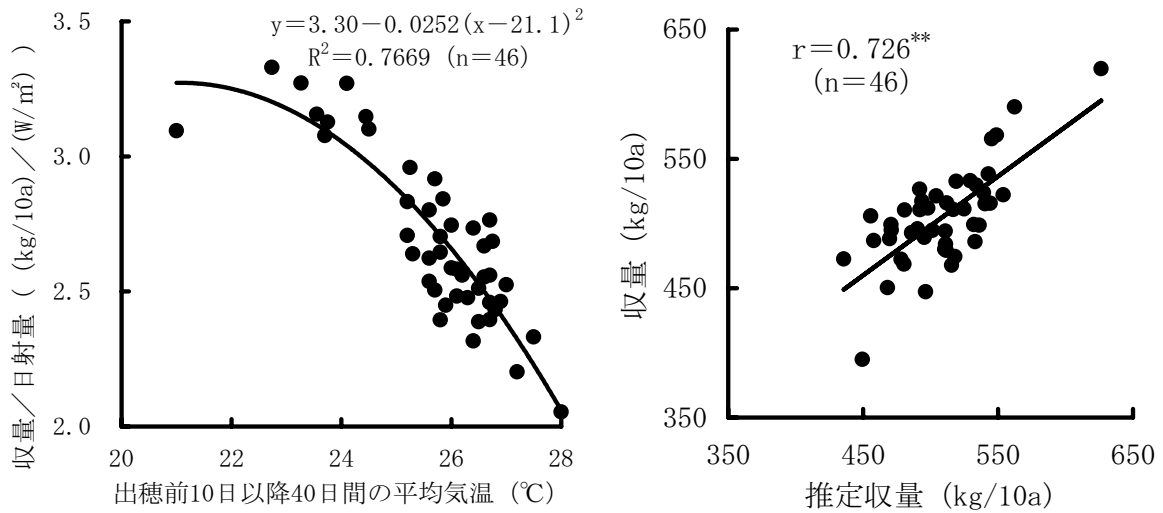
平均 気温 (°C)	厚真町						北斗市					
	現在		CCSR		CGCM1		現在		CCSR		CGCM1	
	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗	中苗	成苗
16.1~	0	4	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
17.1~	4	0	0	9	0	4	4	9	4	9	4	9
18.1~	4	17	9	4	9	4	0	17	4	4	4	4
19.1~	17	0	13	26	9	26	13	9	17	13	22	9
20.1~	22	39	13	35	13	30	17	13	17	35	9	39
21.1~	17	22	17	9	30	22	17	26	22	26	30	22
22.1~	26	17	26	9	22	4	43	13	13	0	9	9
23.1~	9	0	17	0	9	4	4	9	13	9	13	0
24.1~	0	0	4	9	9	4	0	0	0	4	4	9
25.1~	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	4	0
26.1~	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27.1~	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
平均	21.0	20.6	21.6	20.5	21.6	20.6	21.5	20.5	21.4	20.7	21.4	20.8
最低	17.1	16.4	18.3	17.4	18.2	17.8	17.2	17.0	17.4	17.6	17.8	18.0
最高	23.1	22.9	24.2	24.7	24.9	24.4	23.8	23.6	25.3	24.4	25.8	24.7

付表Ⅲ-1の脚注参照。

付表Ⅲ-4 過去 15 年間(1994~2008 年)の道県別の平均収量および出穂前 10 日から 40 日間の平均気温、日射量および推定収量

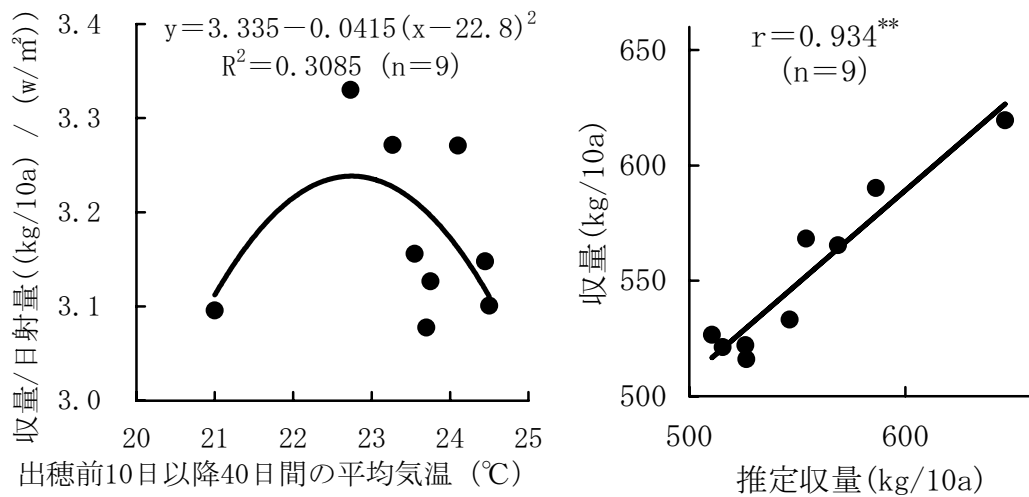
都道府県名	出穂期 月日	収量 kg/10a	出穂前10日以降 40日間における			推定 収量 A	推定 収量 B	都道府県名	出穂期 月日	収量 kg/10a	出穂前10日以降 40日間における			推定 収量 A	推定 収量 B
			平均 気温 °C	日射 量 W/m ²	日射 比						平均 気温 °C	日射 量 W/m ²	日射 比		
北海道	8/2	522	21.0	169	3.1	554	526	三重	7/25	489	26.7	199	2.5	495	—
青森	8/7	568	22.7	171	3.3	549	554	滋賀	8/2	512	26.7	200	2.6	498	—
岩手	8/8	521	23.3	159	3.3	504	516	京都	8/8	506	26.7	183	2.8	456	—
宮城	8/6	516	23.6	164	3.2	512	526	大阪	8/22	479	26.1	193	2.5	511	—
秋田	8/6	565	24.5	182	3.1	545	569	兵庫	8/14	495	26.5	197	2.5	501	—
山形	8/7	590	24.5	188	3.1	562	586	奈良	8/24	499	25.3	189	2.6	536	—
福島	8/12	533	23.8	171	3.1	529	547	和歌山	8/9	480	27.2	218	2.2	510	—
茨城	8/4	510	25.7	175	2.9	481	—	鳥取	8/10	511	26.1	198	2.6	525	—
栃木	8/6	527	24.1	161	3.3	492	511	島根	8/3	499	26.5	209	2.4	532	—
群馬	8/23	488	25.3	165	3.0	470	—	岡山	8/20	517	25.9	182	2.8	494	—
埼玉	8/14	487	26.4	178	2.7	458	—	広島	8/9	516	25.2	191	2.7	544	—
千葉	7/28	524	25.8	198	2.6	539	—	山口	8/14	493	26.9	200	2.5	486	—
東京	8/18	395	25.8	165	2.4	449	—	徳島	8/5	472	28.0	230	2.1	478	—
神奈川	8/14	474	25.6	187	2.5	518	—	香川	8/21	494	26.0	191	2.6	511	—
新潟	8/7	533	26.0	194	2.7	519	—	愛媛	8/17	493	26.6	193	2.6	486	—
富山	8/4	530	25.8	196	2.7	534	—	高知	8/18	447	26.4	193	2.3	496	—
石川	8/2	511	26.8	210	2.4	517	—	福岡	8/24	484	25.6	185	2.6	511	—
福井	7/31	511	27.5	219	2.3	492	—	佐賀	8/26	496	25.6	177	2.8	490	—
山梨	8/13	538	25.2	190	2.8	543	—	長崎	8/23	450	26.7	188	2.4	468	—
長野	8/9	620	23.7	201	3.1	626	646	熊本	8/21	495	27.0	196	2.5	471	—
岐阜	8/19	473	26.8	176	2.7	436	—	大分	8/24	486	25.7	194	2.5	533	—
静岡	8/15	515	26.3	208	2.5	540	—	宮崎	8/24	469	26.2	183	2.6	480	—
愛知	8/18	499	26.6	187	2.7	471	—	鹿児島	8/27	468	25.9	191	2.4	516	—

推定収量Aは付図Ⅲ-2、同Bは付図Ⅲ-3の二次回帰式による。出穂期と収量は農林水産省大臣官房統計部編（1995~2009）、気象データは各都道府県で1~3ヵ所のアメダスポイントによる。



付図Ⅲ-2 各都道府県における出穂前10日以降40日間の平均気温と収量日射量比の関係、および同関係による推定収量と収量との関係

データは付表Ⅲ-4を参照.



付図Ⅲ-3 出穂前10日以降40日間の平均気温が25°C以下の9道県における同平均気温と収量日射量比との関係、および同関係式による推定収量と収量との関係

データは付表Ⅲ-4を参照.

付表IV-1-1 作物モデル「WOFOST」による各年代気象における
秋まき小麦生育シミュレーション

シミュレーション地点	土壌条件等	気象モデル	起生期 (計算 開始日)	開花期	成熟期 (計算 終了日)	登熟 日数	期間 降雨量 (mm)	地上部 乾物重 (kg/10a)	子実重 (kg/10a)	収量比(%、 対PY1)	水分 不足 日数	水分 過剰 日数
倶知安	PY1	現在	4/25	6/19	7/29	40	—	1853	778	—	—	—
		2030代(CCSR)	4/19	6/10	7/20	40	—	1721	687	—	—	—
		2030代(CGCM1)	4/20	6/11	7/20	39	—	1771	724	—	—	—
	火山性土(40cm)	現在					220±13	1788±81	716±80	92.0±10.3	9±7	1±1
		2030代(CCSR)		同上			377±58	1711±7	681±7	99.1±1.0	1±0	4±0
		2030代(CGCM1)					337±47	1763±5	721±5	99.5±0.7	2±1	3±0
	台地土(40cm)	現在						1572±132	510±137	65.5±17.6	24±6	0±0
		2030代(CCSR)		同上			同上	1676±56	657±52	95.6±7.6	2±4	8±2
		2030代(CGCM1)						1721±64	691±57	95.4±7.8	3±4	7±3
岩見沢	PY1	現在	4/13	6/8	7/18	40	—	1795	784	—	—	—
		2030代(CCSR)	4/3	5/29	7/8	40	—	1607	719	—	—	—
		2030代(CGCM1)	4/4	5/29	7/7	39	—	1648	732	—	—	—
	低地土(40cm)	現在					224±26	1511±94	514±84	65.5±10.8	24±7	4±3
		2030代(CCSR)		同上			300±25	1579±21	705±19	97.9±2.7	2±3	6±2
		2030代(CGCM1)					295±23	1613±31	711±30	97.1±4.2	4±5	6±2
	泥炭土(40cm)	現在						1765±32	754±32	96.2±4.1	7±6	0±0
		2030代(CCSR)		同上			同上	1607±0	719±0	100.0±0.0	0±0	0±1
		2030代(CGCM1)						1648±0	732±0	100.0±0.0	0±0	0±0
滝川	PY1	現在	4/17	6/10	7/19	39	—	1744	760	—	—	—
		2030代(CCSR)	4/6	6/1	7/10	39	—	1562	694	—	—	—
		2030代(CGCM1)	4/7	5/31	7/8	38	—	1591	699	—	—	—
	台地土(40cm)	現在					213±23	1430±76	457±68	60.2±8.9	27±5	3±2
		2030代(CCSR)		同上			282±31	1518±43	663±40	95.5±5.7	4±6	6±1
		2030代(CGCM1)					281±40	1511±130	630±126	90.0±18.0	7±9	6±2
	低地土(40cm)	現在						1532±64	557±61	73.3±8.1	23±5	5±2
		2030代(CCSR)		同上			同上	1538±10	685±8	98.7±1.2	1±1	9±2
		2030代(CGCM1)						1539±91	660±89	94.3±12.7	2±5	9±2
名寄	PY1	現在	4/24	6/17	7/26	39	—	1654	748	—	—	—
		2030代(CCSR)	4/20	6/10	7/19	39	—	1548	652	—	—	—
		2030代(CGCM1)	4/21	6/9	7/17	38	—	1590	661	—	—	—
	台地土(40cm)	現在					203±25	1303±105	421±89	56.3±11.9	28±8	2±1
		2030代(CCSR)		同上			305±24	1515±34	631±30	96.8±4.5	2±4	6±2
		2030代(CGCM1)					289±26	1568±22	651±6	98.5±1.0	1±2	5±2
	低地土(30cm)	現在						1268±108	399±88	53.4±11.7	29±8	3±2
		2030代(CCSR)		同上			同上	1498±48	622±39	95.4±6.0	3±5	10±3
		2030代(CGCM1)						1553±30	646±10	97.7±1.5	2±3	8±4
富良野	PY1	現在	4/16	6/14	7/24	40	—	1646	764	—	—	—
		2030代(CCSR)	4/5	6/4	7/15	41	—	1496	690	—	—	—
		2030代(CGCM1)	4/5	6/4	7/14	40	—	1611	715	—	—	—
	台地土(40cm)	現在					231±20	1395±109	532±89	69.6±11.7	23±6	3±1
		2030代(CCSR)		同上			333±23	1466±25	672±22	97.3±3.2	1±2	8±2
		2030代(CGCM1)					315±31	1502±14	693±11	97.9±1.6	1±2	9±2
	低地土(30cm)	現在						1360±111	503±84	65.8±10.9	24±6	3±2
		2030代(CCSR)		同上			同上	1455±33	664±31	96.2±4.5	1±3	11±3
		2030代(CGCM1)						1485±23	683±17	96.6±2.4	2±3	11±2
網走	PY1	現在	4/11	6/14	7/27	43	—	1800	863	—	—	—
		2030代(CCSR)	4/1	6/5	7/19	44	—	1624	771	—	—	—
		2030代(CGCM1)	4/1	6/3	7/16	43	—	1659	783	—	—	—
	火山性土(40cm)	現在					236±13	1763±50	829±50	96.0±5.8	6±6	1±1
		2030代(CCSR)		同上			345±35	1615±3	765±3	99.2±0.3	0±0	4±1
		2030代(CGCM1)					316±39	1654±5	781±2	99.6±0.2	0±0	3±1
	台地土(40cm)	現在						1576±133	655±124	75.9±14.3	19±11	3±1
		2030代(CCSR)		同上			同上	1565±67	727±62	94.3±8.0	3±5	8±2
		2030代(CGCM1)						1629±30	763±25	97.4±3.2	1±3	7±3
訓子府	PY1	現在	4/16	6/15	7/27	42	—	1620	787	—	—	—
		2030代(CCSR)	4/1	6/3	7/15	42	—	1324	648	—	—	—
		2030代(CGCM1)	3/31	6/2	7/13	41	—	1357	664	—	—	—
	台地土(40cm)	現在					202±12	1504±85	674±83	85.7±10.5	14±6	2±1
		2030代(CCSR)		同上			250±24	1314±4	642±3	99.0±0.5	0±0	5±2
		2030代(CGCM1)					241±22	1340±25	651±20	98.1±3.0	1±3	3±1
	低地土(40cm)	現在						1579±53	750±51	95.3±6.5	6±5	3±2
		2030代(CCSR)		同上			同上	1312±4	640±3	98.8±0.5	0±0	8±3
		2030代(CGCM1)						1347±6	659±2	99.2±0.3	0±0	7±2

付表IV-1-1 作物モデル「WOFOST」による各年代気象における
秋まき小麦生育シミュレーション（続き）

シミュレーション地点	土壌条件等	気象モデル	起生期 (計算開始日)	開花期	成熟期 (計算終了日)	登熟 日数	期間 降雨量 (mm)	地上部 乾物重 (kg/10a)	子実重 (kg/10a)	収量比(% 対PY1)	水分 不足 日数	水分 過剰 日数
芽室	PY1	現在	4/6	6/11	7/24	43	—	1543	758	—	—	—
		2030代(CCSR)	3/26	6/2	7/15	43	—	1392	659	—	—	—
		2030代(CGCM1)	3/25	6/2	7/14	42	—	1437	683	—	—	—
	火山性土(40cm)	現在					316±19	1535±3	755±1	99.6±0.2	0±0	4±1
		2030代(CCSR)			同上		435±49	1368±7	645±3	97.9±0.5	0±0	7±2
		2030代(CGCM1)					457±48	1410±8	669±2	97.9±0.4	0±0	8±1
	低地土(40cm)	現在						1502±27	742±9	97.8±1.2	0±0	12±3
		2030代(CCSR)			同上		同上	1323±21	623±11	94.6±1.7	0±0	17±4
		2030代(CGCM1)						1364±18	648±5	94.9±0.8	0±0	18±3
大樹	PY1	現在	4/10	6/15	7/29	44	—	1606	776	—	—	—
		2030代(CCSR)	3/28	6/2	7/15	43	—	1356	636	—	—	—
		2030代(CGCM1)	3/27	6/1	7/13	42	—	1383	652	—	—	—
	火山性土(40cm)	現在					398±18	1584±7	765±6	98.6±0.7	0±0	6±2
		2030代(CCSR)			同上		464±48	1331±7	619±7	97.2±1.1	0±0	8±2
		2030代(CGCM1)					444±36	1355±6	635±8	97.4±1.2	0±0	8±2
	台地土(40cm)	現在						1553±10	747±11	96.3±1.4	1±1	12±2
		2030代(CCSR)			同上		同上	1305±8	604±7	95.0±1.0	0±0	13±3
		2030代(CGCM1)						1322±16	617±16	94.6±2.4	3±2	14±1

PY1: 各地、各年代における水分不足ストレスを考慮しないポテンシャル収量。

期間降雨量: 計算開始日(起生期)～終了日(成熟期)までの累計降雨量。

各地・各土壌における収量、雨量の数値は各年代の設定気象条件に基づく10パターンのシミュレーションの平均値±標準偏差。

土壌条件に付記した数値は有効土層の深さを示す。これにより有効水分量の初期値が設定される。

付表IV-2-1 てんさい根重・根中糖分と気象要因の相関(1986~2006年)

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	最も相関の高い期間と相関係数
【根重】								
平均気温	0.324	0.434	<u>0.550</u>	-0.023	0.035	0.234	0.341	4月中旬～6月下旬 <u>0.647</u>
最高気温	0.316	0.429	<u>0.580</u>	-0.013	0.032	0.421	0.357	4月中旬～6月下旬 <u>0.673</u>
最低気温	0.218	0.320	0.365	-0.027	0.014	0.005	0.361	4月中旬～6月下旬 <u>0.532</u>
降水量	-0.137	-0.268	-0.176	0.155	0.041	-0.142	0.002	5月中旬～6月中旬 -0.420
日照時間	0.205	0.173	0.311	0.089	-0.044	0.261	-0.081	7月中旬 0.409
【根中糖分】								
平均気温	0.230	-0.396	-0.174	-0.553	<u>-0.753</u>	<u>-0.761</u>	-0.224	7月上旬～10月上旬 <u>-0.885</u>
最高気温	0.280	-0.313	-0.147	-0.554	<u>-0.684</u>	<u>-0.465</u>	-0.332	7月上旬～10月中旬 <u>-0.808</u>
最低気温	0.174	-0.370	-0.165	0.524	<u>-0.798</u>	<u>-0.882</u>	-0.144	7月上旬～10月上旬 <u>-0.934</u>
降水量	-0.447	-0.150	0.177	-0.022	0.064	-0.352	0.271	10月下旬 <u>0.533</u>
日照時間	-0.025	-0.267	-0.182	-0.166	-0.280	0.202	-0.349	8月上旬 -0.483

注) 下線5%水準、2重下線1%水準で有意

付表Ⅳ-2-2 テンサイ褐斑病の年次別発生状況

年	被害面積		発生程度別面積 (ha)					積算最低気温 (°C) 6月中旬～8月下旬
	面積 (ha)	率 (%)	無	少	中	多	甚	
1986年	1,229	1.7	60,251	10,620	1,229	0	0	1,031
1987年	1,262	1.8	53,138	17,100	1,208	54	0	1,048
1988年	607	0.8	48,164	23,128	596	11	0	1,056
1989年	1,007	1.4	53,565	17,328	943	64	0	1,103
1990年	5,887	8.2	33,743	32,370	4,876	818	193	1,175
1991年	3,090	4.3	36,931	31,879	2,785	305	0	1,088
1992年	4,268	6.0	32,274	34,058	3,788	368	112	1,057
1993年	367	0.5	45,793	23,940	340	27	0	959
1994年	5,345	7.7	34,141	30,315	5,063	240	42	1,185
1995年	1,988	2.8	38,193	29,819	1,907	68	13	1,092
1996年	3,574	5.1	41,840	24,286	3,435	139	0	1,087
1997年	1,011	1.5	43,174	24,315	998	13	0	1,087
1998年	664	0.9	41,212	28,324	653	11	0	1,090
1999年	2,456	3.5	42,877	24,668	2,003	428	25	1,244
2000年	18,577	26.8	14,344	36,279	12,708	4,795	1,074	1,260
2001年	479	0.7	48,193	17,328	479	0	0	1,045
2002年	39	0.1	53,944	12,617	39	0	0	1,017
2003年	0	0.0	63,345	4,555	0	0	0	999
2004年	293	0.4	60,655	7,052	293	0	0	1,141
2005年	1,192	1.8	56,727	9,581	1,153	39	0	1,162
2006年	5,021	7.5	34,785	27,558	4,180	615	226	1,203
2007年	5,237	7.9	36,129	25,200	4,376	861	0	1,088
2008年	2,622	4.0	41,189	22,159	2,615	7	0	1,077
2009年	1,398	2.2	46,586	16,458	1,398	0	0	1,077
2010年	21,644	33.6	12,549	30,307	16,284	4,800	560	1,336

注)北海道病害虫防除所のまとめに基づき、北海道てん菜協会が各面積を調整して作成した(出典:てん菜糖業年鑑)以下、Ⅳ-2-3～5同様。

付表Ⅳ-2-3 テンサイ根腐病(黒根病含む)の年次別発生状況

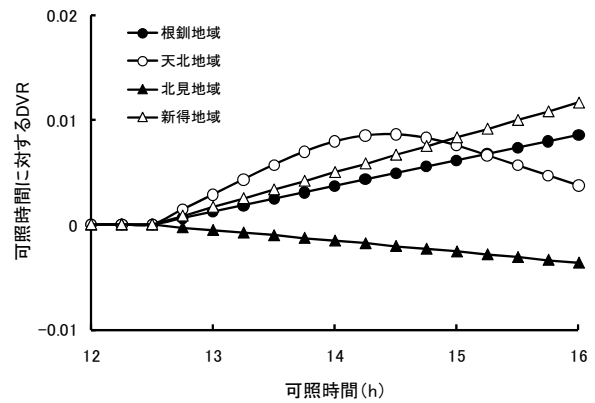
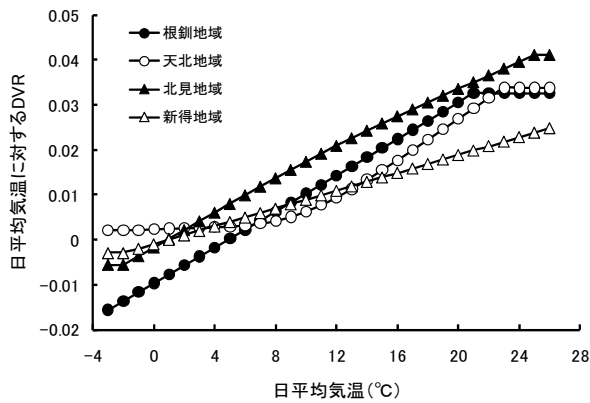
年	被害面積		発生程度別面積 (ha)				
	面積 (ha)	率 (%)	無	少	中	多	甚
1986年	1,951	2.7	64,319	6,010	1,951	0	0
1987年	1,249	1.7	56,958	13,293	1,249	0	0
1988年	651	0.9	58,210	13,039	651	0	0
1989年	647	0.9	56,298	14,955	647	0	0
1990年	2,983	4.1	52,577	16,440	2,850	132	1
1991年	1,332	1.9	60,820	9,748	1,322	10	0
1992年	442	0.6	57,136	13,023	353	87	2
1993年	96	0.1	58,550	11,454	75	21	0
1994年	42	0.1	57,658	12,100	42	0	0
1995年	882	1.3	54,136	13,982	721	130	31
1996年	1,126	1.6	55,728	12,846	761	270	95
1997年	140	0.2	58,421	9,939	116	24	0
1998年	532	0.8	57,427	12,241	485	33	14
1999年	4,766	6.8	52,820	12,415	3,715	904	147
2000年	3,949	5.8	48,536	15,715	3,188	751	10
2001年	1,167	1.8	54,878	9,955	1,099	68	0
2002年	39	0.1	53,944	12,617	39	0	0
2003年	0	0.0	63,345	4,555	0	0	0
2004年	425	0.6	62,923	4,652	425	0	0
2005年	356	0.5	61,907	5,237	356	0	0
2006年	518	0.8	60,761	6,085	518	0	0
2007年	286	0.4	60,170	6,110	286	0	0
2008年	0	0.0	59,674	6,296	0	0	0
2009年	256	0.4	55,976	8,210	256	0	0
2010年	8,553	13.3	35,981	19,966	7,061	1,445	47

付表Ⅳ-2-4 ヨトウガ(第1回)の年次別発生状況

年	被害面積		発生程度別面積 (ha)				
	面積 (ha)	率 (%)	無	少	中	多	甚
1990年	1,380	1.9	43,138	27,482	1,346	34	0
1991年	795	1.1	51,222	19,883	791	4	0
1992年	450	0.6	53,941	16,209	450	0	0
1993年	64	0.1	58,745	11,291	64	0	0
1994年	404	0.6	52,643	16,753	404	0	0
1995年	627	0.9	47,562	20,811	602	25	0
1996年	730	1.0	53,921	15,049	708	22	0
1997年	400	0.6	49,083	19,017	400	0	0
1998年	582	0.8	53,217	16,401	551	31	0
1999年	737	1.1	53,329	15,934	717	20	0
2000年	4,760	6.9	37,191	27,249	3,644	1,103	13
2001年	629	1.0	42,162	23,209	629	0	0
2002年	16	0.0	54,372	12,212	16	0	0
2003年	0	0.0	57,837	10,063	0	0	0
2004年	45	0.1	59,724	8,231	45	0	0
2005年	31	0.0	61,240	6,229	31	0	0
2006年	278	0.4	56,886	10,200	255	23	0
2007年	64	0.1	55,294	11,208	62	2	0
2008年	179	0.3	52,227	13,563	177	2	0
2009年	400	0.6	52,905	11,137	342	58	0
2010年	1,057	1.6	52,003	11,440	979	78	0

付表Ⅳ-2-5 ヨトウガ(第2回)の年次別発生状況

年	被害面積		発生程度別面積 (ha)				
	面積 (ha)	率 (%)	無	少	中	多	甚
1990年	1,540	2.1	47,133	23,327	1,150	346	44
1991年	795	1.1	51,222	19,883	791	4	0
1992年	219	0.3	57,996	12,385	215	4	0
1993年	228	0.3	57,445	12,427	228	0	0
1994年	1,643	2.4	49,618	18,539	1,633	9	1
1995年	1,300	1.9	48,123	19,577	1,208	92	0
1996年	513	0.7	53,217	15,969	491	22	0
1997年	536	0.8	49,454	18,510	536	0	0
1998年	451	0.6	52,903	16,846	451	0	0
1999年	1,963	2.8	45,383	22,655	1,848	105	10
2000年	2,991	4.3	38,977	27,232	2,300	686	5
2001年	93	0.1	52,131	13,776	93	0	0
2002年	43	0.1	54,058	12,499	43	0	0
2003年	0	0.0	59,466	8,434	0	0	0
2004年	94	0.1	61,317	6,589	56	38	0
2005年	130	0.2	60,392	6,978	95	35	0
2006年	850	1.3	53,898	12,616	842	8	0
2007年	15	0.0	57,560	8,991	15	0	0
2008年	64	0.1	54,360	11,546	64	0	0
2009年	344	0.5	54,098	10,000	299	45	0
2010年	3,058	4.7	48,287	13,155	2,779	279	0



付図V-1-1 萌芽期から出穂期における気温および可照時間とDVRとの関係

三枝ら(1994)の報告に基づいて構築されたHR0 agri Intranetの「チモシー1番草出穂期予測システム」の地域別のパラメータで、チモシー「センポク」を対象とする。予測対象地点のうち、八雲、浦河、大樹、釧路、中標津には根釧地域の値を、名寄、遠別、稚内、枝幸には天北地域の値を、紋別には北見地域の値を、訓子府には新得地域の値を適用。

付表V-1-1 算出した牧草の水利用効率¹⁾

(平均値±標準偏差, $\text{kg } 10\text{a}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)

地域 ²⁾	草地 ³⁾	データ数	1番草	2番草
天北	TY単播	7	47 ± 6	16 ± 3
	TY・RC混播	19	38 ± 7	23 ± 5
根釧	TY単播	13	42 ± 8	17 ± 3
	TY・RC混播	53	44 ± 6	24 ± 5
天北		26	41 ± 7	21 ± 6
根釧		66	44 ± 7	23 ± 6
	TY単播	20(7)	44 ± 7	17 ± 3
	TY・RC混播	72(19)	43 ± 7	24 ± 5
全体		92(26)	43 ± 7	22 ± 6

1) 水利用効率 = 乾物収量 ÷ 蒸発散量。

2) 天北は上川農試天北支場の、根釧は根釧農試の各定期作況圃の1989～2009年のデータ。

3) TYはチモシー(ノサップまたはセンポク)、RCはアカクローバ(ハマドリ、ホクセキまたはサッポロ)。年間施肥量(N-P₂O₅-K₂O, kg/10a)は、天北では16-6-15(TY)または12-10-18(TY・RC)、根釧では17-8-17(TY)または10-12-22(TY・RC)。いずれの草地とも更新後2または3年目。

The Impact of Global Warming on Agricultural Productivity in Hokkaido with Adaptation Strategies: Projections for the 2030s

Summary

Hokkaido, which produces twice the food it consumes, plays an important role as a domestic food supplier in Japan. Hokkaido's agricultural community will need to estimate the effects of global warming on changes in agricultural productivity and to take appropriate actions in response to those changes to maintain this position during a time of rising unease about the future of the world's food supply. The goal of this study is to predict the potential impact of climate change and global warming on growth, yields and qualities of paddy rice, upland and forage crops in Hokkaido for the decade of the 2030s, and then to suggest some strategies for adapting to those changes.

Climatic conditions for the 2030s

Yokozawa *et al.* (2003) constructed "mesh climate change data of Japan" for the 2030s, which was used in this study. This dataset provides climatic data around Japan using the predictions of four different atmosphere-ocean general circulation models meshed together based on the IPCC IS92a-type emission scenario (IPCC, 1996) with a resolution of 7.5' in longitude and 5' in latitude or a resolution of about 10 × 10 km. This study primarily used the dataset estimated by the CCSR/NIES model developed in Japan. Based on this data, monthly mean temperatures in Hokkaido for the 2030s will increase by 1.3–2.9°C, or 2.0°C on average, when compared with present climatic normals as reported by the Japan Meteorological Agency and defined by data obtained from 1971–2000. The mean temperature from May to September, the main growing season in Hokkaido, will rise by 1.8°C, but annual mean global radiation will be reduced by 15% when compared with the present. The amount of annual precipitation in 2030s will increase by 20%, showing a large peak in precipitation during June and July.

For Hokkaido as a whole, the predicted productivity of paddy rice, upland and forage crops for the decade of the 2030s is summarized below and is compared with the present day situation, based on these predicted climatic conditions.

Paddy rice

The period of the appropriate heading stage for achieving both good yield and desirable food quality rice will be extended considerably, and then the risk of the occurrence of cool-summer damage caused by delayed growth will decrease. However, the risk of floral impotency may remain in the 2030s, because the critical growing period for spikelet sterility caused by low temperatures will still exist and will only be moved to an earlier date. Potential yield based on the changed weather conditions during the ripening period will be almost same

as the present or will increase slightly. The food quality of rice will be expected to improve because of lower amylose content and slightly lower protein content in grain resulting from a rise in the mean temperature during the ripening period.

Winter wheat

Both the raising (immediately after wintering) and maturing stage of winter wheat will be moved backward because of the early end of the snow cover period and a rise in the mean temperature after wintering. The number of days for ripening will be almost the same as the present. The crop model predicts an 8–18% decrease in potential yield because of a decrease in global radiation after May. The effect of stress caused by insufficient water on yield will decline but the risk of the occurrence of lodging and pre-harvest sprouting will be serious because of an increase in the amount of precipitation from the flowering to maturing stage. The sowing date will be delayed by 6–10 days.

Sugar beets

Sugar beet yield, measured by the weight of roots, will be expected to increase from 56 t/ha at present to 62 t/ha in the 2030s but sugar content of the roots will decrease from 17% at present to 16% in the 2030s because of a rise in temperature during the growing season, if the number of days of growth remains the same as at present. Disease injury which occurs easily at higher temperatures will appear earlier and will cause more serious damage to growth.

Potatoes

Potential potato yield predicted by the crop model will decrease by about 15% from the present, not because of an increase in temperature but mainly caused by a decrease in global radiation. An extended growing season, with an advanced planting date, will not compensate for this decrease in yield. Harvest time for late maturing varieties will be moved backward from the end to the middle of September.

Soybeans

Both flowering and maturing stages in soybeans will move backward by 6–9 calendar days if the sowing date remains unchanged. The current climate zone map for introducing appropriate soybean varieties in Hokkaido is divided into 6 zones. It should be modified, because the zone classification will shift by 1 to 3 ranks toward the warmer class. Yield of the early maturing variety "Yukihomare" will increase in the area where the present mean temperature from June to August is below 18°C. But in the area where the present mean temperature during the same period exceeds 18°C, medium maturing varieties like "Toyomusume" whose yield improves under warmer temperatures should be introduced to offset the decrease in "Yukihomare" yield.

Adzuki beans

The flowering and maturing stage of adzuki beans will be moved backward by 7–10 calendar days, and the growing region for adzuki beans is expected to extend into cold areas like the eastern part of Hokkaido, where dairy farming now dominates. Yield will increase in relatively cool regions such as Tokachi and Ohotsuku, and decrease in warmer regions such as Kamikawa and Sorachi. Consequently, total adzuki beans production in Hokkaido will increase by 12% if the future cultivated area remains the same as at present. However, the size of beans will be smaller because of a rise in temperature during the period of maturation.

Grass

The first grass growing period will not change very much although the heading stage of the grass will be moved backward by 13 days. Annual yield will be reduced by 10–20% because of a decrease in global radiation despite a rise in temperature.

Forage corn

The total amount of forage corn production in Hokkaido will increase by 10–14% if the cultivated area remains the same. Forage corn will not only be affected by the rising temperatures but also by the effect of the change to later maturing varieties depending on how many degrees the temperature rises.

Adaptation strategies towards the 2030s

It is essential to promote the breeding of varieties of paddy rice, upland and forage crops which are both disease resistant and tolerant to various climatic conditions expected to occur frequently with the higher temperatures and wetter summer conditions forecasted the near future. For now, improvement of cool-weather tolerance, especially for paddy rice and winter wheat, is still necessary. As the climate changes some cultivation techniques for paddy rice, upland and forage crops should be modified, while changes will soon be needed in the choices of varieties for the region, sowing and planting dates, harvest time and fertilizer application methods. Effective countermeasures to offset the changes in occurrence of disease injuries, insect pests and to crop damage caused by excessive water in upland fields should be also developed.

北海道立総合研究機構農業試験場資料 第39号

ISSN 2186-1056

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

志賀弘行・中辻敏朗 編

2011年10月31日発行

発行者 北海道立総合研究機構 農業研究本部 中央農業試験場
〒069-1395 北海道夕張郡長沼町東6線北15号

印刷 株式会社 正文舎
