

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。

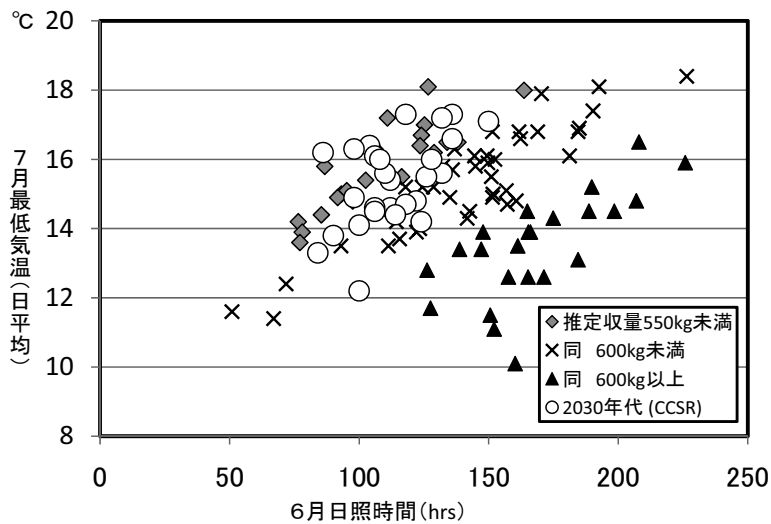


図 IV-1-1 「ホクシン」推定収量別にみた6月日照時間と7月日最低気温の関係

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%)にともない、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。

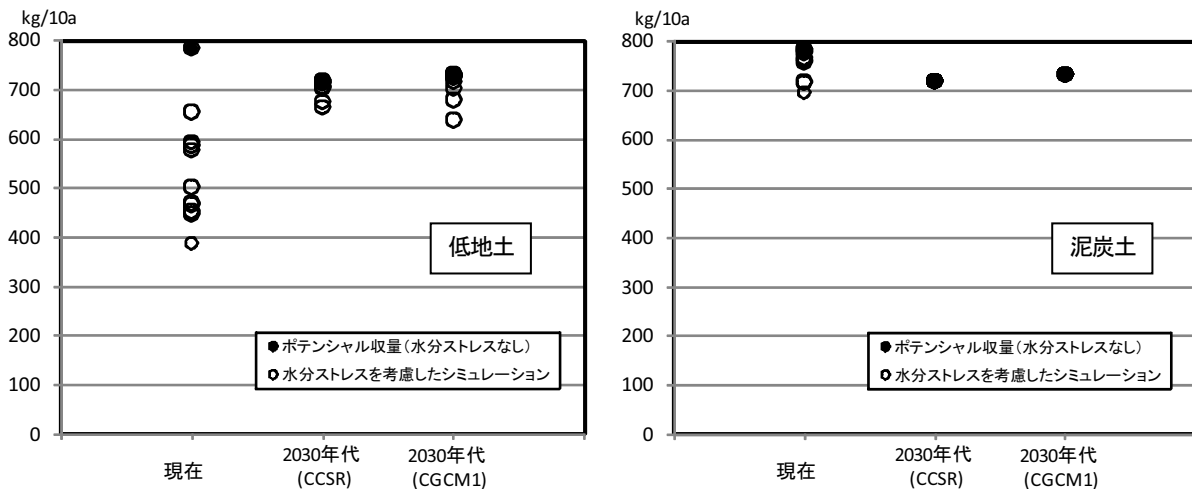


図 IV-1-2 岩見沢における各年代の収量シミュレーション

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。

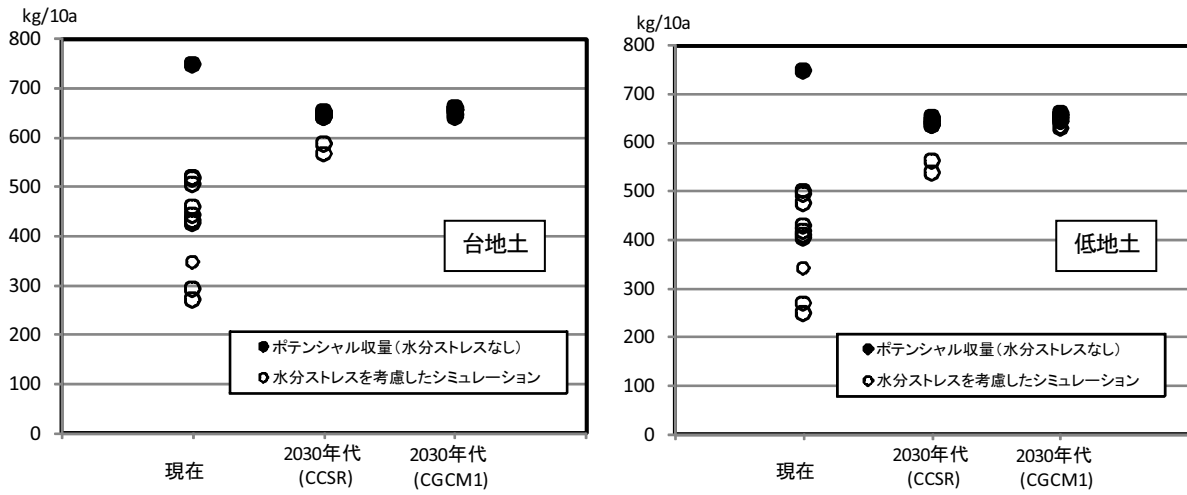


図 IV-1-3 名寄における各年代の収量シミュレーション

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

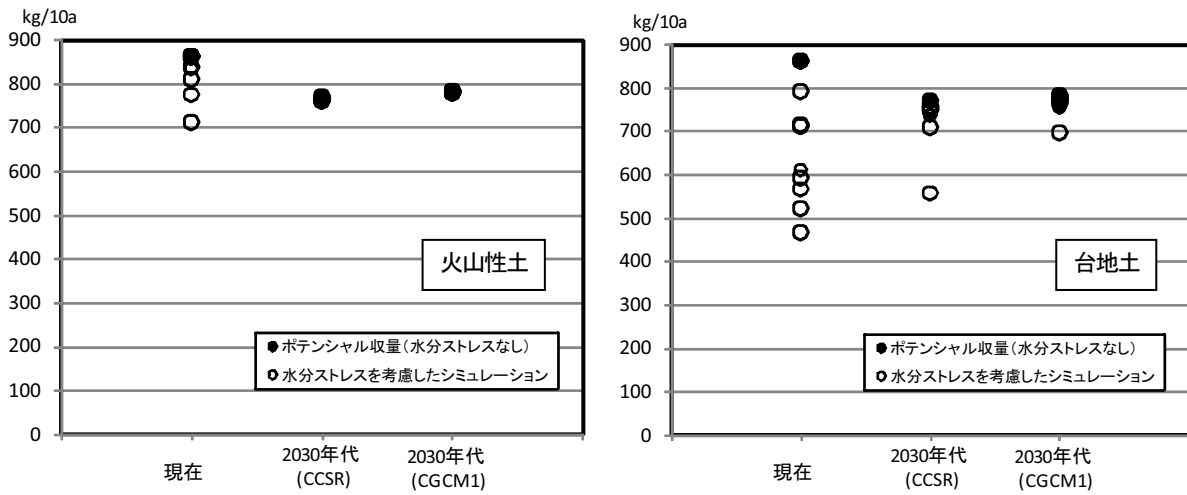


図 IV-1-4 網走における各年代の収量シミュレーション

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

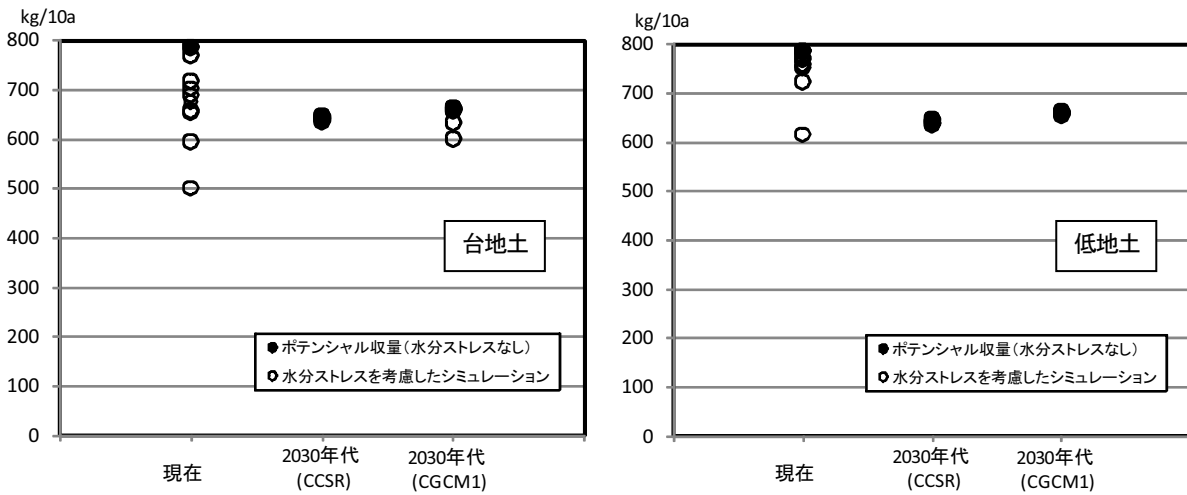


図 IV-1-5 訓子府における各年代の収量シミュレーション

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

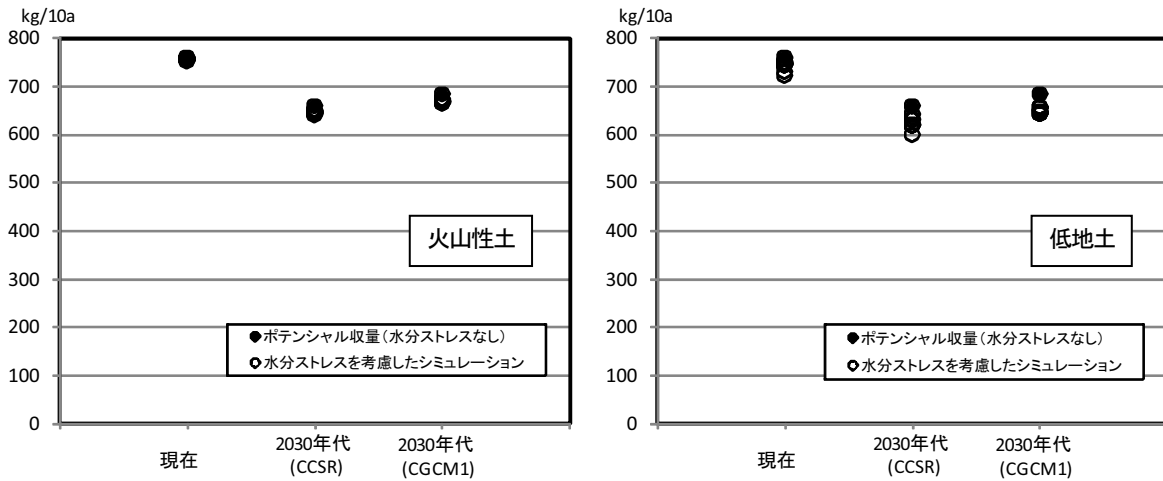


図 IV-1-6 芽室における各年代の収量シミュレーション

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。

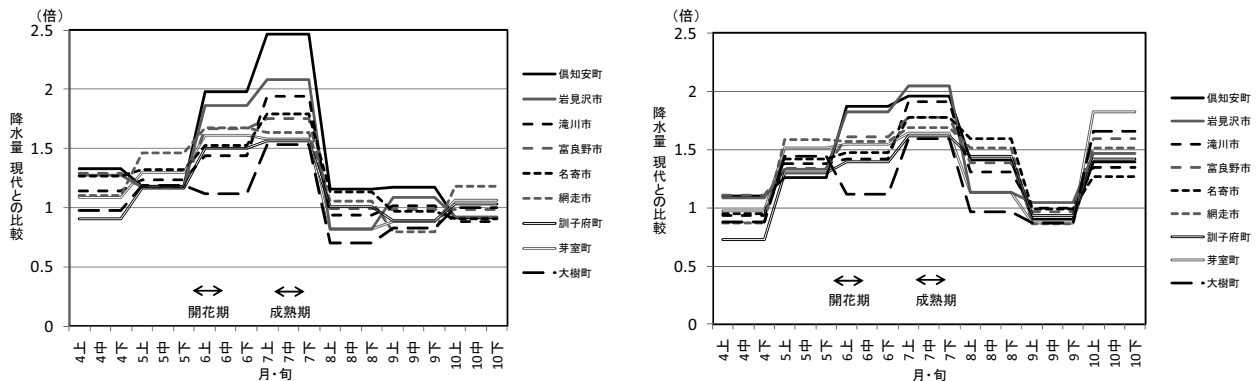


図 IV-1-7 各地における 2030 年代の現在に対する降水量比 左図：CCSR 右図：CGCM1

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っ

たが、干ばつ傾向が強く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

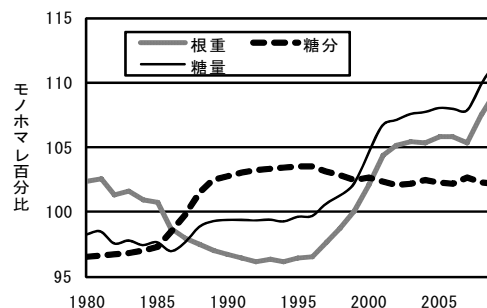
各気象要因と根重、根中糖分との関係を月別で見ると(付表IV-2-1)、根重については6月の平均気温、最高気温がそれぞれ $r = 0.550^*$ 、 $r = 0.580^{**}$ (*: 5%水準, **: 1%水準で有意, 以下同様)で正の相関が、根中糖分については8月及び9月の平均気温、最高気温、最低気温と負の相関が有意であった($r = -0.465^* \sim -0.882^{**}$)。

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

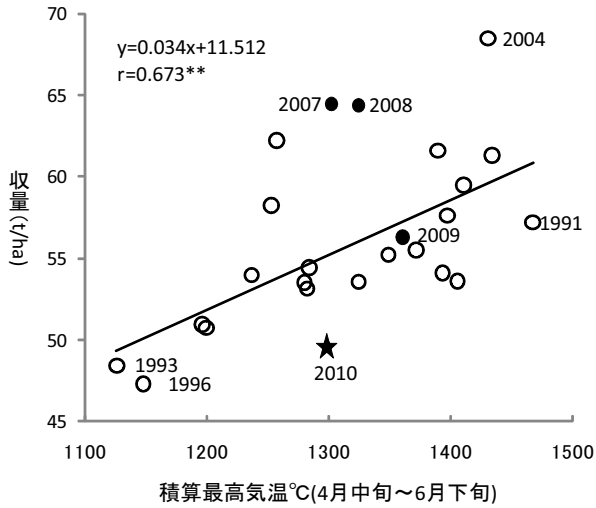
各品種が北海道優良品種に認定された際の「モノホマレ」に対する百分比を品種の作付面積で加重平均した値は(図IV-2-1)、糖分取引以前の1985年までは根重が102程度、根中糖分が97程度であった。その後、1989年頃までに糖分取引制度に対応した品種となり、その結果、根重が96程度と少なくなったが、根中糖分は102程度となり、中間型、糖分型の品種が普及したことを示している。その後、作付品種は変化したが、根中糖分は102～103とほとんど変わらず、根重は徐々に増加して、2002年に105程度、2009年で109となった。



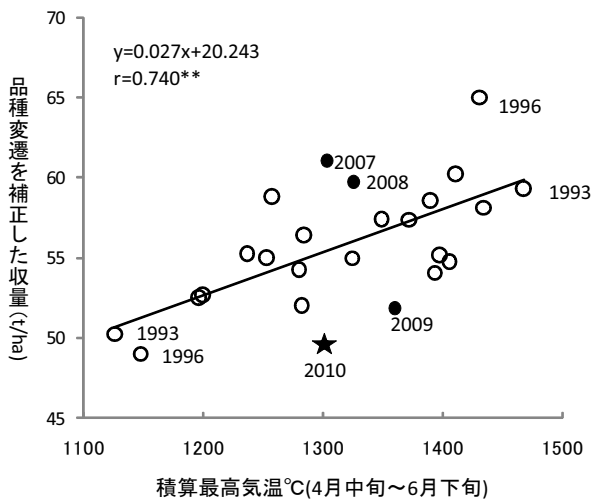
図IV-2-1 品種変遷による根重、根中糖分、糖量の推移

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

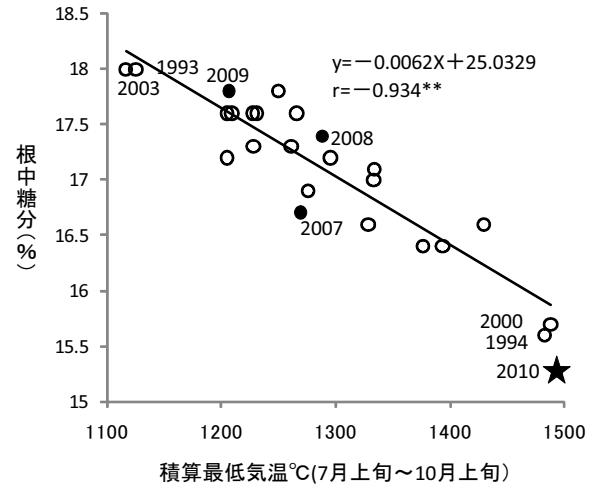
次に、実数値及び図IV-2-1に示した値から算出した補正値を用いて回帰式を作成した。その結果、根重、根中糖分ともに補正値を用いて計算することによって、若干、相関が高まる傾向にあったが、その差は小さく、今後の検討は実数値で計算した回帰式を基に行うこととした(図IV-2-2~5)。



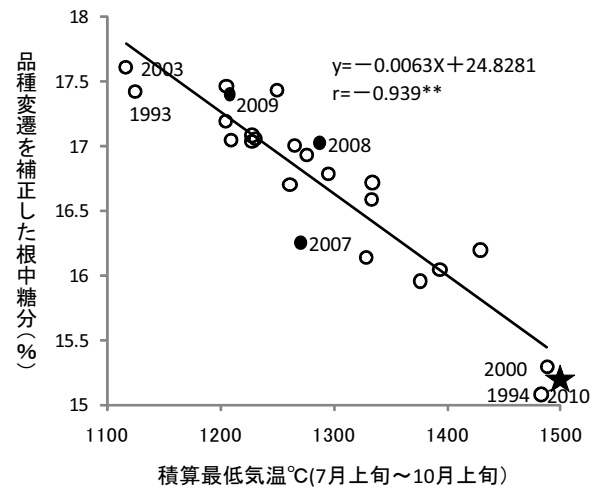
図IV-2-2 春先の気温と根重(実数)の関係



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

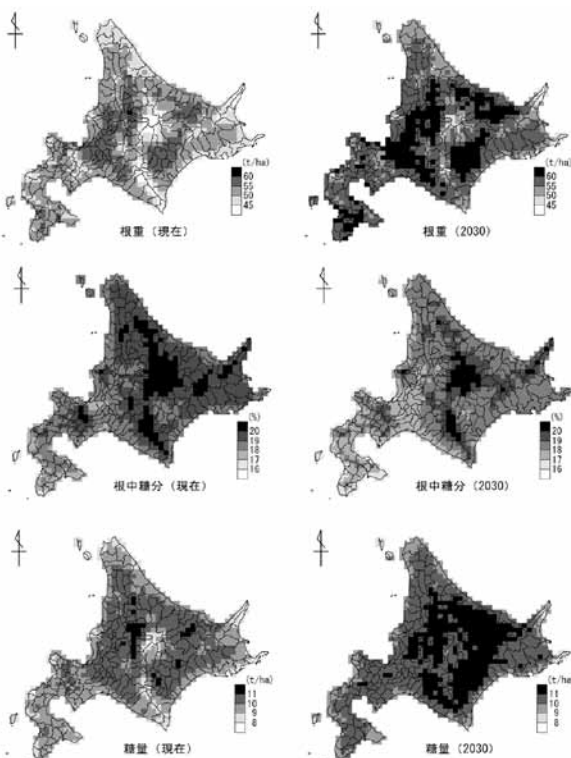


図IV-2-5 夏期~秋期の気温と根中糖分(補正値)の関係

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

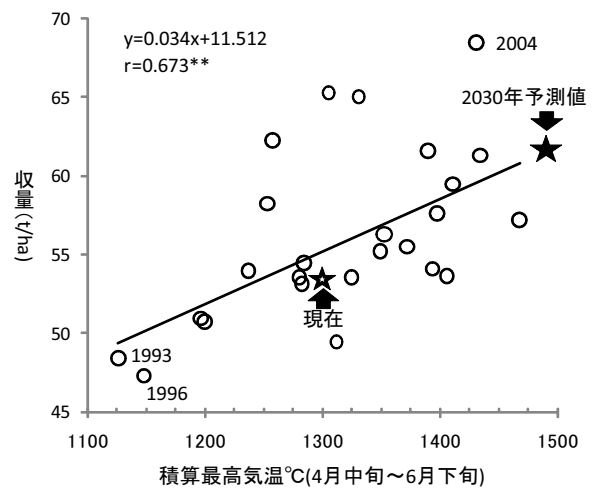
央地域が特に低くなる予測となった。そのため、糖量では概ね、十勝、網走、道北地域で現在の10～11t/haから2030年代に11t/ha以上と増収するが、道央地域では現在と同程度の10～11t/haであった。

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)。

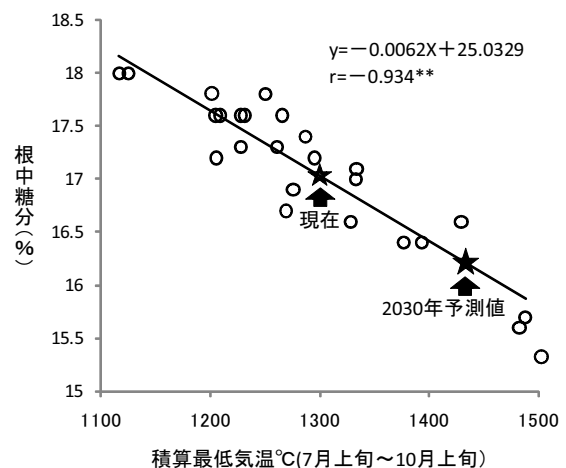
表IV-2-3 てんさいにおける2030年代の予測値

	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

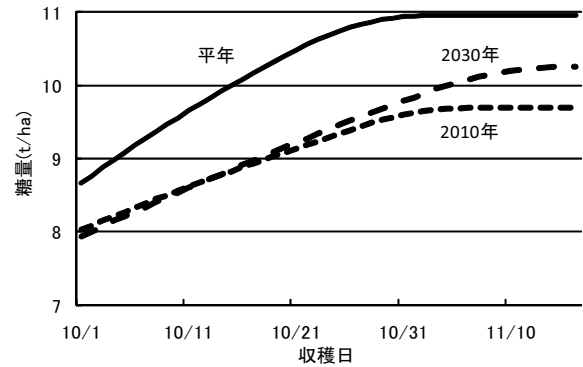
入力設定		計算結果								
地点	年代	気象要素	播種期	出芽	肥大開始	肥大停止	生育日数	最大LAI	糖量 t/ha	糖量現在比
芽室	現在	平年値	4/25	5/7	7/9	11/3	180	5.0	11.0	100
	2010	気温	4/25	5/9	7/4	11/7	182	3.0	9.4	85
		気温・日射	4/25	5/9	7/4	11/7	182	3.1	9.7	88
	2030	気温	4/25	5/4	7/2	11/16	196	4.6	11.5	105
		気温・日射	4/25	5/4	7/2	11/16	196	3.1	10.1	92
	CCSR	気温	4/20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

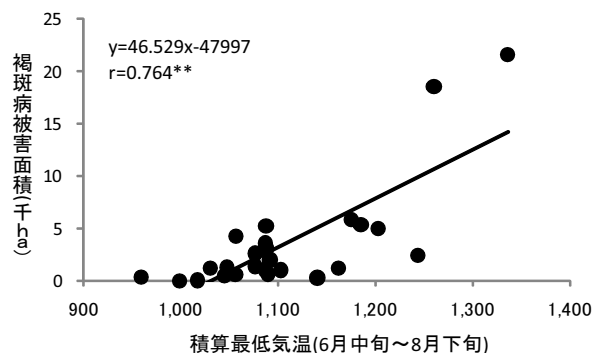
設定は表IV-2-9と同様。2010年および2030年は気温と日射を考慮した。また、2030年は播種期を4月20日とした。

(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。

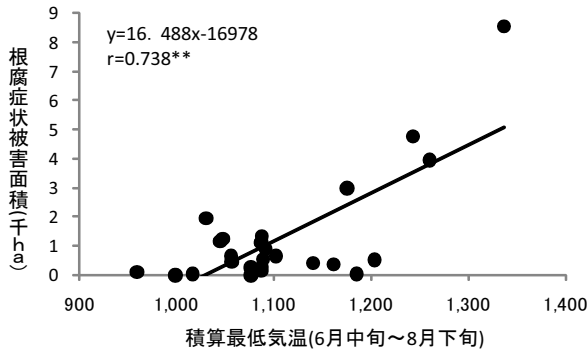
対策としては、1次病斑をなるべく早い時期に見つけて薬剤散布を行う事が重要で、2010年においては8月上旬に本病害に対して効果のある薬剤を散布したか否かによって、その後の地上部の枯死状況が異なっていたことが現地圃場で確認されている。しかし、本病害については、発生事例が少なく、研究事例も少ないことから、今後、品種間差や薬剤防除方法などの検討を進めていく必要がある。

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。

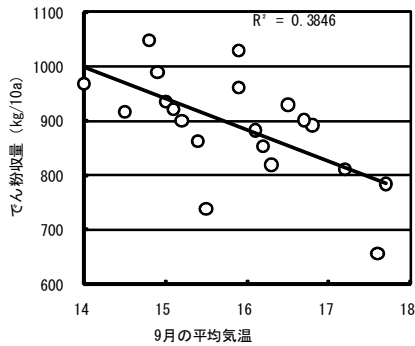
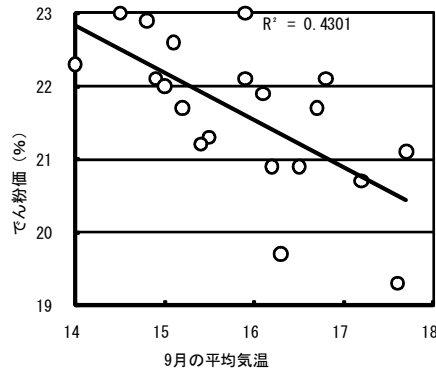
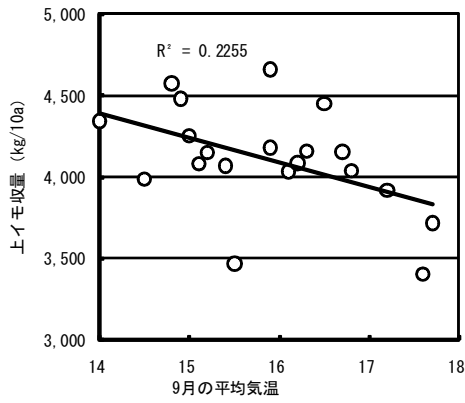
十勝農試における「コナフブキ」・「農林1号」の収量、でん粉価と、降水量、日照時間との相関を検討した(表IV-3-5)。有意な相関が認められたのは、6月の降水量と「農林1号」のでん粉価、7月の日照時間と「コナフブキ」の収量のみであり、明確な関連は認められなかった。

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

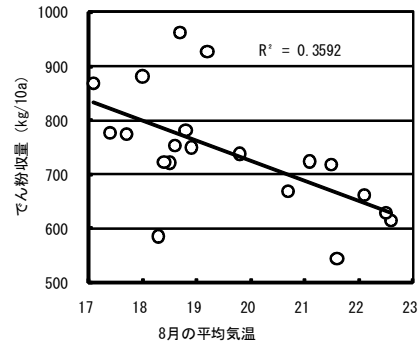
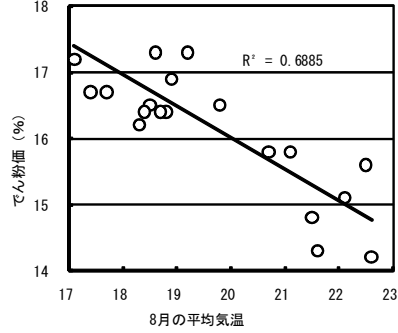
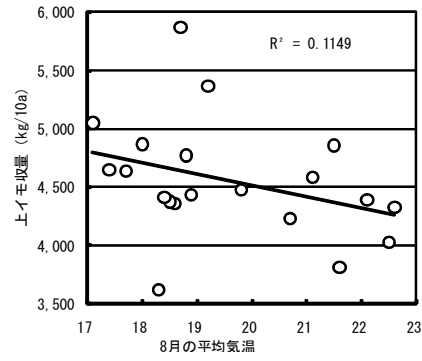
	降水量				日照時間			
	コナフブキ		農林1号		コナフブキ		農林1号	
	収量	でん粉価	収量	でん粉価	収量	でん粉価	収量	でん粉価
5月	-0.06	-0.32	-0.13	-0.24	5月 -0.21	-0.04	0.17	-0.03
6月	0.31	0.29	0.15	0.52	6月 -0.23	-0.04	0.09	-0.26
7月	-0.27	0.25	0.06	0.23	7月 0.58	-0.08	0.31	-0.01
8月	0.13	0.04	-0.20	0.22	8月 0.23	-0.12	0.04	-0.37
9月	-0.22	-0.37	-0.18	-0.28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

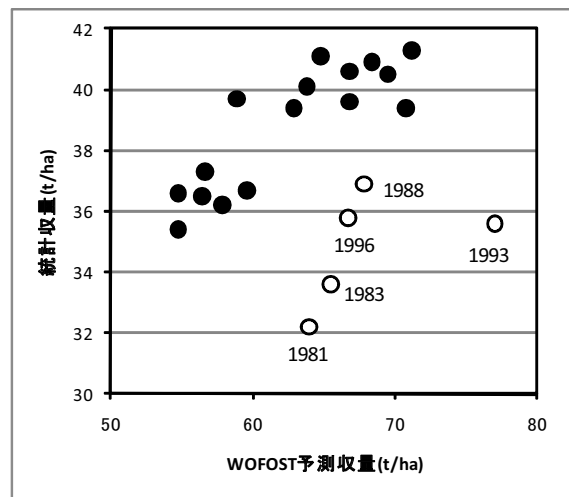
表IV-3-6に、「平成15年夏季の低温とその後の気象が農作物に及ぼした影響に関する調査報告書」(農業試験場資料33号)で検討した平均気温と収量、でん粉価との関連を示した。多収年であった2002, 2003年は初期生育に相当する時期(概ね6月まで)の気温が高く夏季の気温が低かったことが多収の要因であるとしている。1993, 1996年は夏季の気温は低かったが、初期生育に相当する時期の気温が低かったため多収にならなかったとしている(湿害の影響もあり)。年間を通じて気温が高かった1990, 1994, 2000年の収量平年比は98, 97, 97と平年を下回った。でん粉価に関しては、夏季の気温が高い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	5/9	5/31	9/9	101	50	77
	2030 CCSR	気温	5/9	5/27	9/18	114	61	94
		気温・日射	5/9	5/27	9/18	114	55	85
	2030 CCSR	気温	5/1	5/21	9/13	115	62	95
気温・日射		5/1	5/21	9/13	115	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	5/13	6/2	9/14	104	53	76
	2030 CCSR	気温	5/13	5/31	9/27	119	65	93
		気温・日射	5/13	5/31	9/27	119	59	84
	2030 CCSR	気温	4/30	5/21	9/18	120	67	96
気温・日射		4/30	5/21	9/18	120	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。

$$DVI（発育指数）= \sum DVR$$

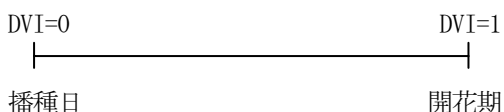
$$DVR（発育速度）= 1/G [1 + \text{EXP} \{-A \times (T - Th)\}]$$

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



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期予測式のパラメーター

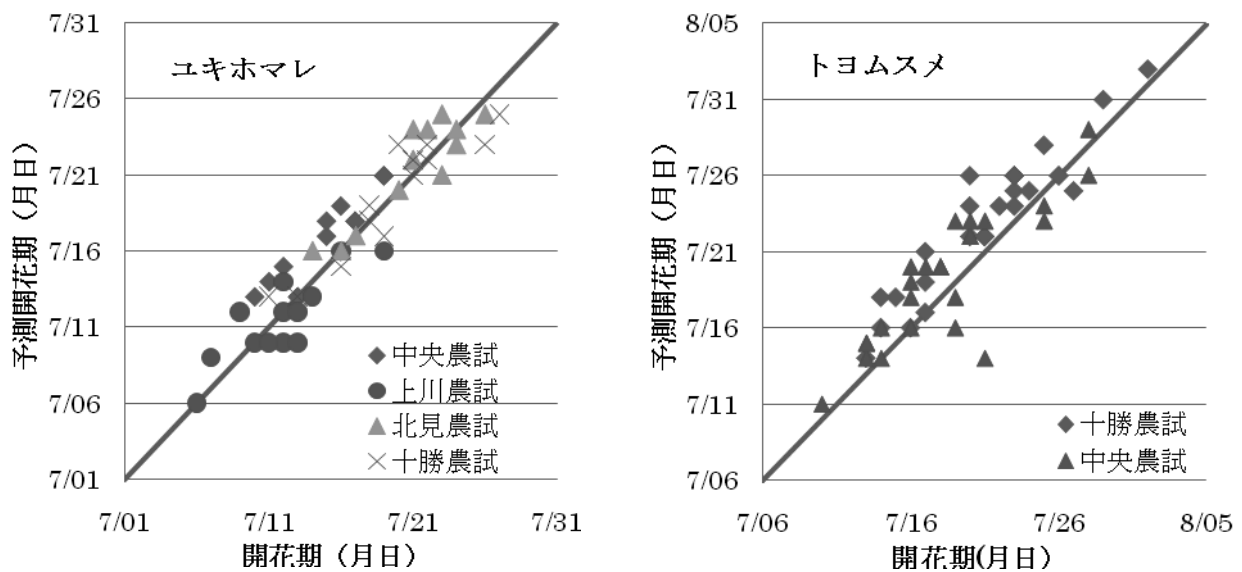
品種		ユキホマレ	トヨムスメ
パラメーター	A	0.174661249	0.281102701
	Th	16.87417049	13.97634961
	G	26.24617419	36.16643637
平均誤差（日）		1.38	2.10
相関係数（R）		0.9416	0.9024

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

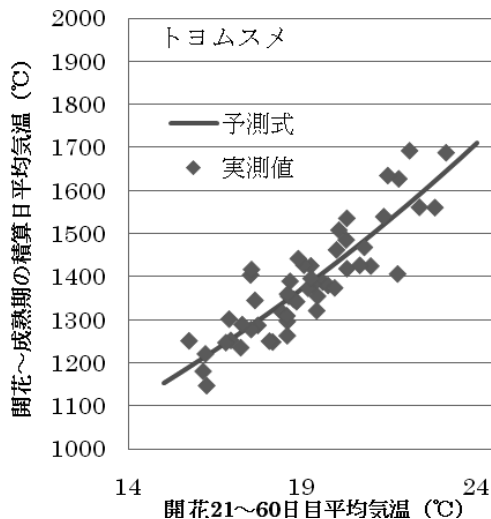
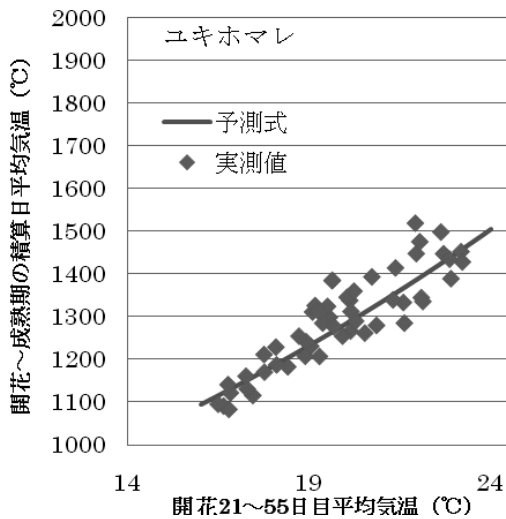
開花～成熟期の積算日平均気温は「ユキホマレ」では開花21～55日目、「トヨムスメ」では開花21～60日目の平均気温と相関が高く(図IV-4-2)、この関係から成熟期の予測が可能であった。すなわち、開花期～成熟期積算日平均気温は以下の式で表される。

$$\text{「ユキホマレ」 } e^{(開花期後21\sim55日目の平均気温+160.0)/25.15}$$

$$\text{「トヨムスメ」 } e^{(開花期後21\sim60日目の平均気温+145.6)/22.78}$$

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。

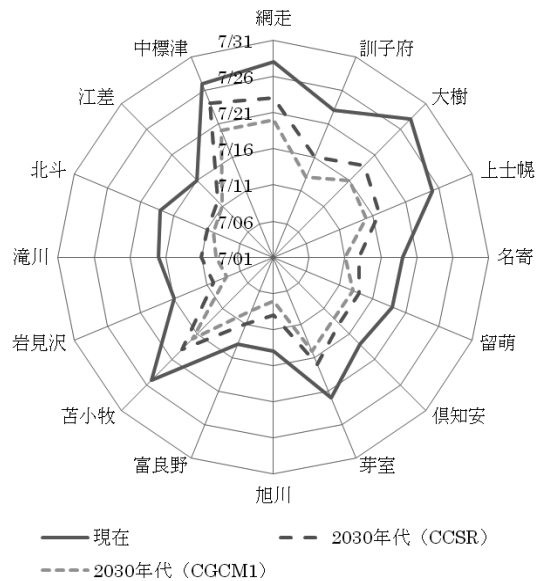


図IV-4-2 「ユキホマレ」「トヨムスメ」の開花後の平均気温と開花～登熟期積算日平均気温の関係

③2030年代の生育期節の予測

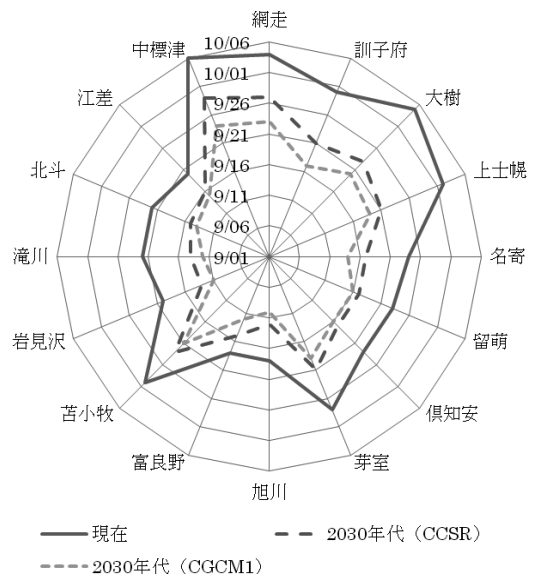
ここまでの検討により、開花期、成熟期が精度良く予測できることが明らかとなったので、播種期を5月20日、1971～2000年のアメダス平均気温を現在値とし、CCSRおよびCGCM1の2030年予測気温を用いて主要地点の開花期、成熟期の予測を行った。

「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

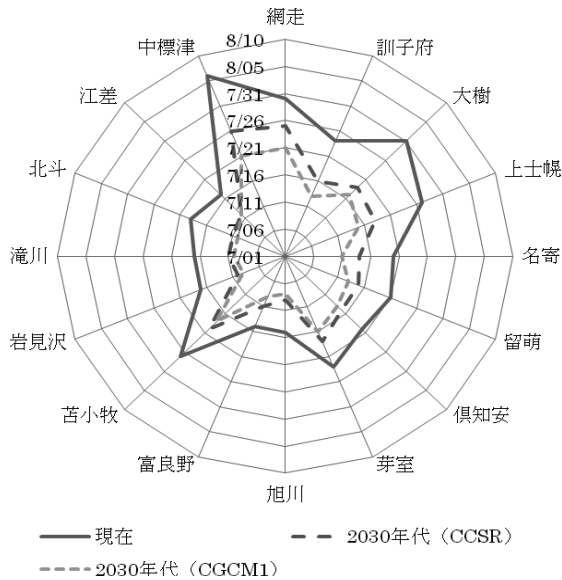
播種期は5月20日として予測した。



図IV-4-4 「ユキホマレ」の成熟期予測

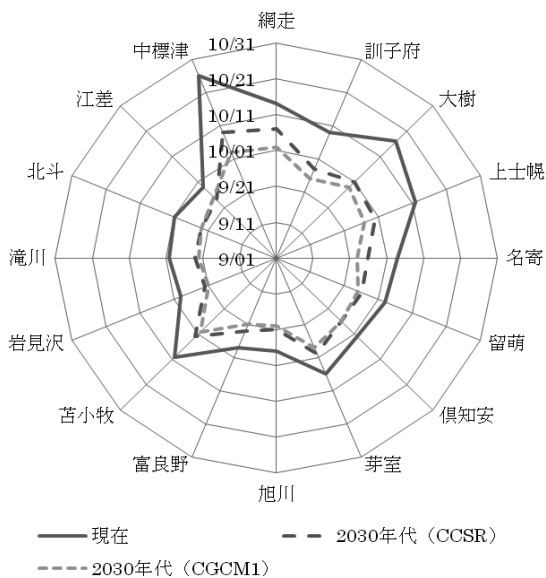
播種期は5月20日として予測した。

「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

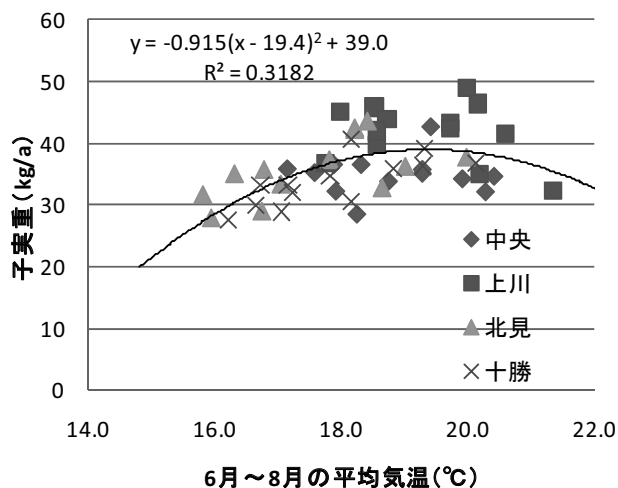
	6~8月			播種~開花期	開花期~成熟期	播種~成熟期
	平均気温	最高気温	最低気温	積算気温	積算気温	積算気温
子実重	0.447 ***	0.589 ***	0.239	-0.219	0.500 ***	0.463 ***
百粒重	0.305 *	0.216	0.390 **	-0.293 *	0.570 ***	0.511 ***
着莢数	0.328 *	0.530 ***	0.047	-0.013	0.359 **	0.394 **
一莢内粒数	0.473 *	0.315	0.495 *	-0.177	0.263	0.217

注) 4場 n=52, ただし一莢内粒数は2場(十勝, 中央) n=26

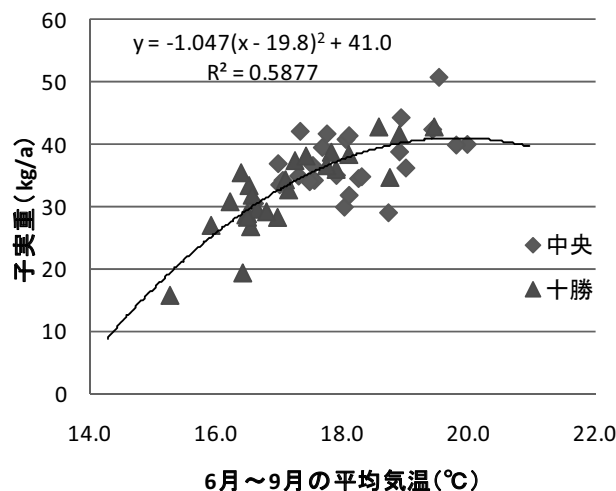
表IV-4-7 「トヨムスメ」の収量構成要素と気象要素との相関

	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。

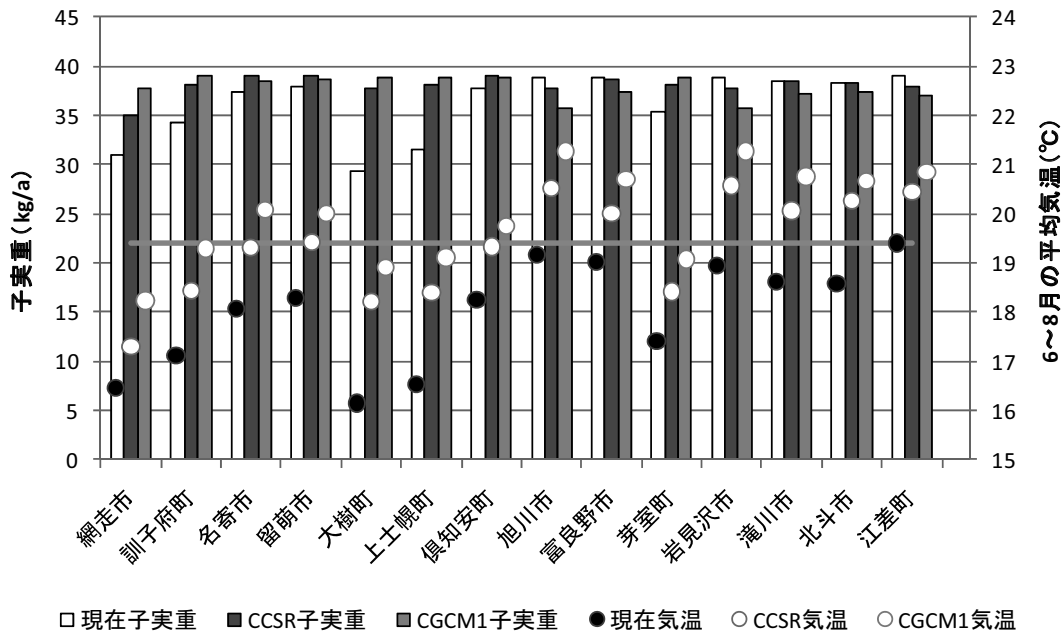
「ユキホマレ」では, 網走市, 訓子府町, 大樹町, 上士幌町, 芽室町で増収し, そのほかの地点では同等または減収の傾向であった(図IV-4-9)。予測式における最大収量は, 6~8月の平均気温が19.4°Cの時であり, 上記5市町村以外は, 2030年代の予測平均気温がこの温度を超えていた。

「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°Cの時であり, 旭川市, 岩見沢

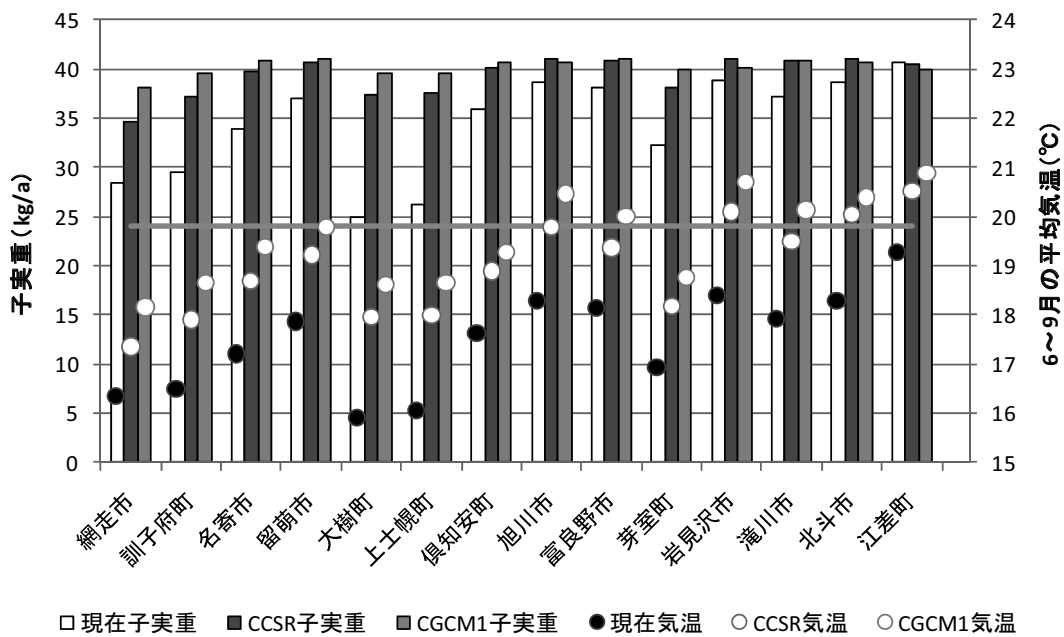
市, 北斗市, 江差町では2030年代の予測平均気温がこの温度を超えている。予想される気温の上昇範囲内では, 中生品種は増収するものの, 一部地域では収量が頭打ちとなる可能性が示唆された。

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°C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。

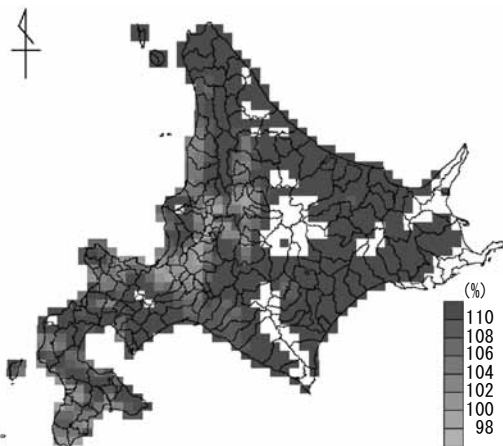
メッシュ気候値2000およびCCSRの2030年代の気温から, 「ユキホマレ」収量推定マップを作成(図IV-4-11)したところ, 道央, 道南を除いて増収が予測され, 全道平均収量は365kg/10aと現在より16%の増収が推定された。



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、耐湿性に劣るといった欠点もある。

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 **	-0.812 **	-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

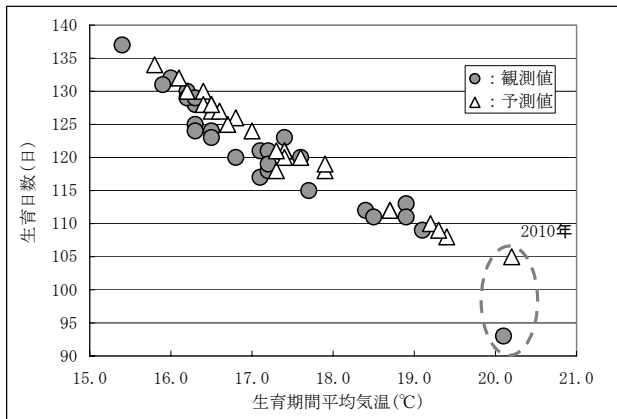
(2) 生育期節の予測

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

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

※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) :

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

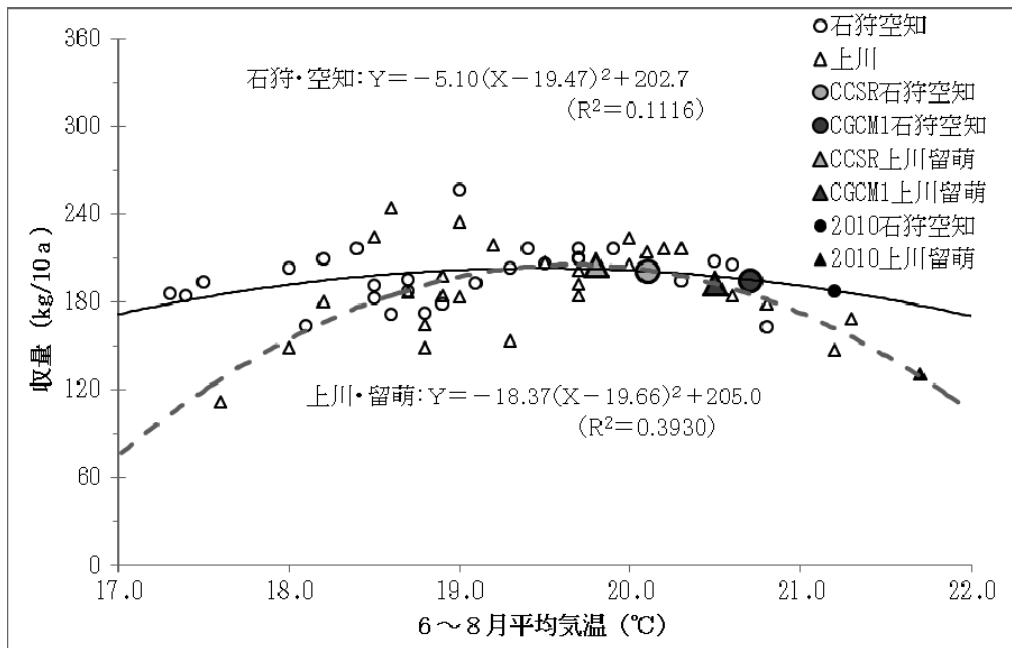
オホーツク(境野) :

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

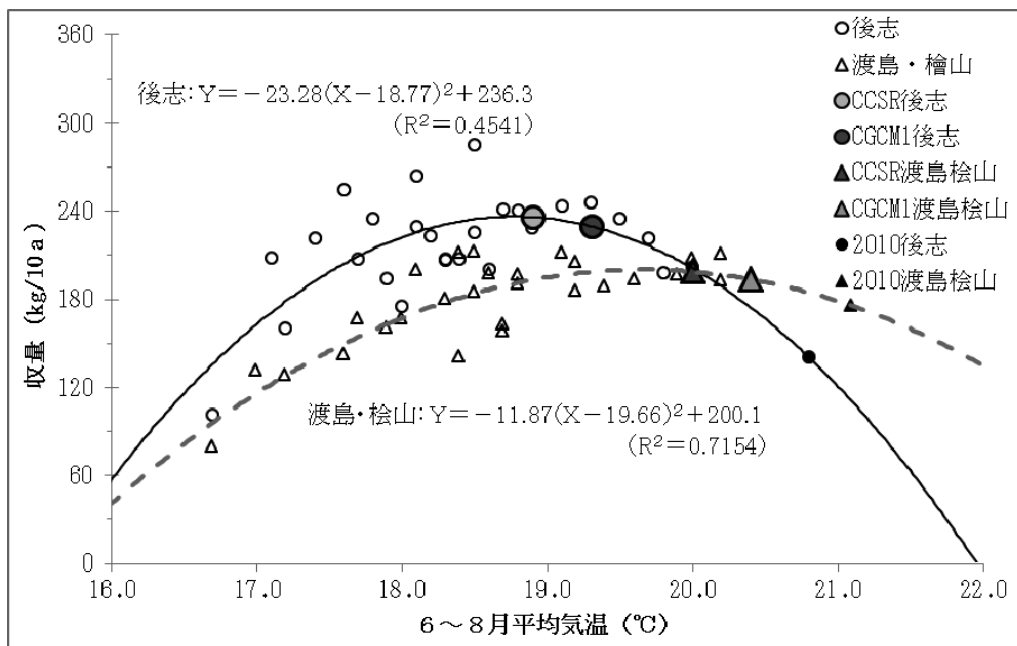
これらの回帰式を用いて、現在と 2030 年代の気象条件での収量を推定すると、石狩・空知地域では現在の 201kg/10a から CCSR では 196kg/10a, CGCM1 では 186kg/10a と減収し、上川地域では 201kg/10a からそれ

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。

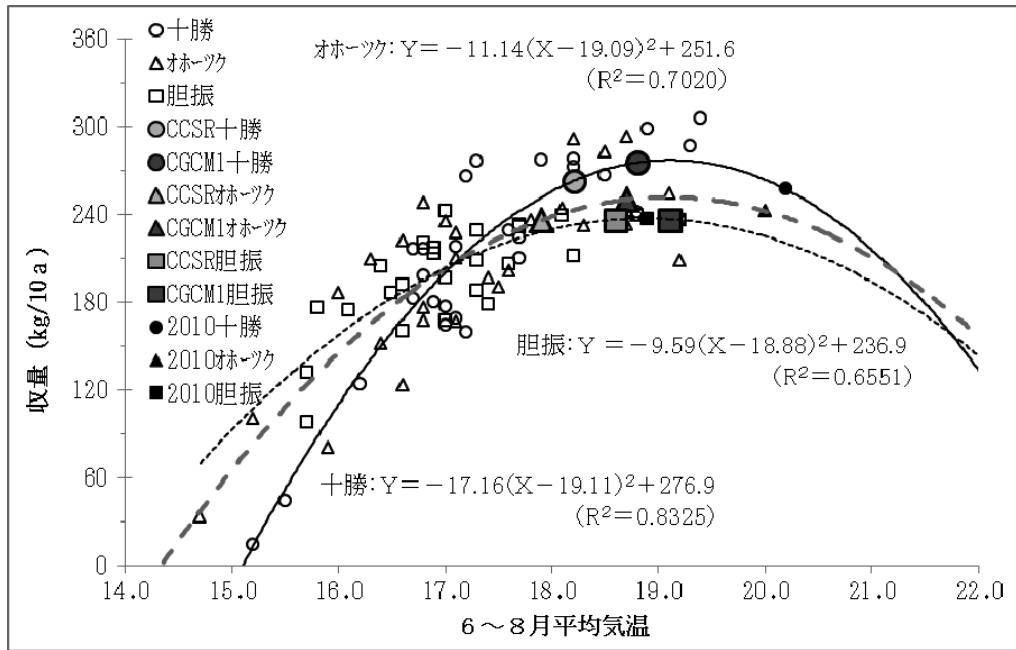
このように石狩・空知, 上川・留萌の道央から道北では減収し、後志, 渡島・檜山の道南では同水準で、胆振, 十勝, オホーツクの道東では増収が見込まれる(表IV-5-8)。



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。

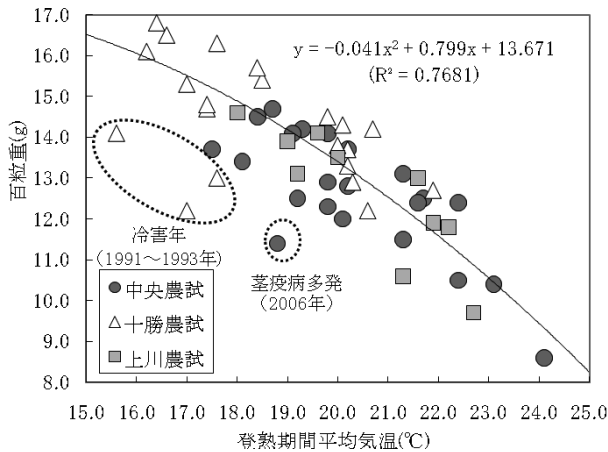
表IV-5-9 2009年の作付面積下での地域別収量の予測

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。



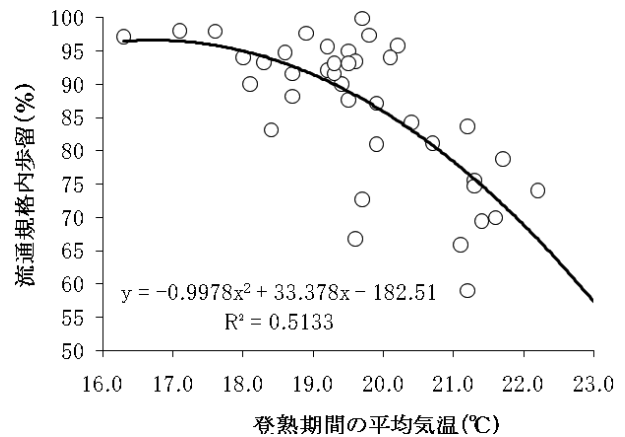
図IV-5-5 小豆の登熟期間の気温と百粒重の関係（1989～2009年中央農試、十勝農試、上川農試）

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：

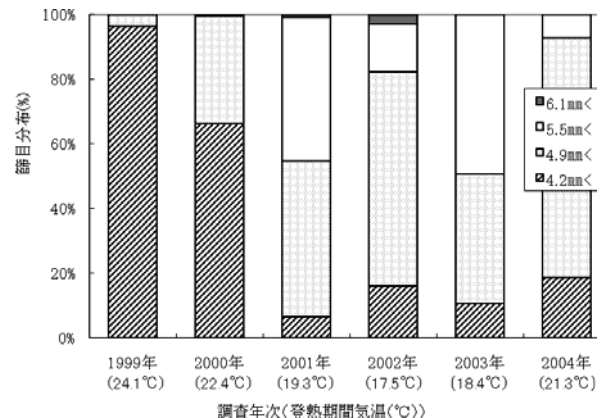
$$Y = -0.041X^2 + 0.799X + 13.671 \quad (R^2 = 0.7681)$$

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）の関係を見た（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「エリモショウズ」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、エリモショウズ）

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)