

2.1.4 麦・大豆・飼料作物等

2.1.4.1 小麦

① 高温による小麦の減収要因,「北海道における 2010 年猛暑による農作物の被害解析」報告書【委員ご提供情報】

1. 執筆者（公表年）	西尾善太、伊藤美環子、田引正、中司啓二、長澤幸一、山内宏昭、広田知良（2011 年）
2. 掲載紙	北海道農業研究センター研究資料、69、 15-21
3. 対象品目	秋まき小麦（収量、登熟日数、稈長）
4. 対象地域	北海道
5. 予測手法の概要	予測期間：－
	空間解像度：－
	気候モデル：－
	排出シナリオ：－
	適応策の検討：－
	予測手法：回帰式（生産力検定試験の生育調査、収量調査の結果を解析）
北海道の代表的な秋まき小麦品種「ホクシン」および「キタノカオリ」を対象として、1997～2010 年のまでの 14 年間の生産力検定試験結果について、生育温度が秋まき小麦の収量構成要素に与える影響を解析した。解析内容は以下の 3 点である。 ①夏季の気温と小麦の収量構成要素の関係 ②春季の気温と小麦の収量構成要素の関係 ③春季と夏季の気温の相関関係	
6. 影響の概要	
将来影響予測は行われていない。 【夏季の気温とコムギの収量構成要素の関係】 小麦の出穂から成熟までの登熟期間の平均気温と、登熟日数の間には、強い負の相関関係が見られ（ホクシン $r = -0.87$ ($n=14$, $P<0.01$)、キタノカオリ $r = -0.87$ ($n=14$, $P<0.01$))（図 23）、登熟期間の平均気温と千粒重の間にも、強い負の相関関係が見られた（ホクシン $r = -0.81$ ($n=14$, $P<0.01$)、キタノカオリ $r = -0.82$ ($n=14$, $P<0.01$))（図 24）。一方、登熟日数と千粒重の間には、強い正の相関が見られた（ホクシン $r=0.74$ ($n=14$, $P<0.01$)、キタノカオリ $r=0.72$ ($n=14$, $P<0.01$))（図 25）。「ホクシン」、「キタノカオリ」ともに、登熟期間の平均気温が 1°C 上昇すると、登熟期間は約 2.6 日短縮し、千粒重は、「ホクシン」が約 2.2g、「キタノカオリ」が約 1.9g 減少した。登熟日数が 1 日短縮すると、千粒重は、「ホクシン」が約 0.62g、「キタノカオリ」が約 0.56g 減少した。1997～2010 年の十勝地方の秋まき小麦の 10a あたりの収量（製品単収）は、十勝地方中央部に位置する帯広市の	

7～8月の平均気温と有意な負の相関を示した（図 26）。

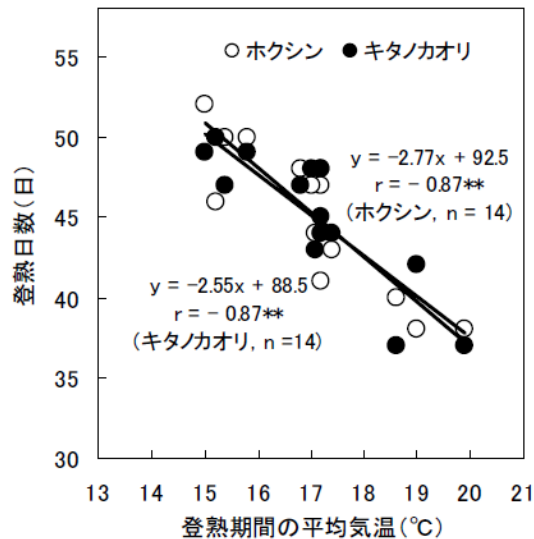


図 23. 秋まき小麦品種「ホクシン」と「キタノカオリ」の登熟期間の平均気温と登熟日数の関係（1997～2010 年 北農研芽室研究拠点）（** $P < 0.01$ ）

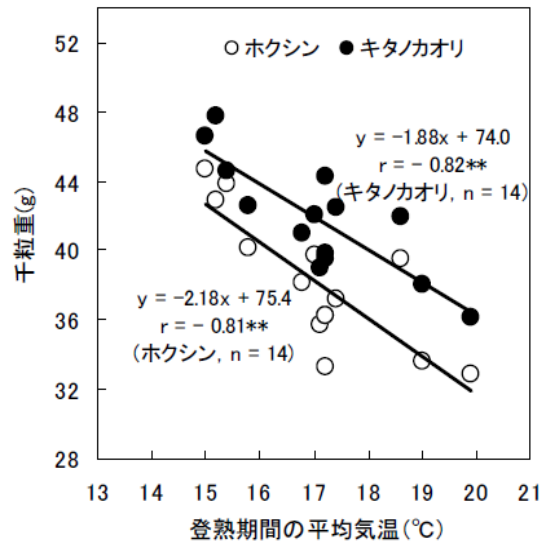


図 24. 秋まき小麦品種「ホクシン」と「キタノカオリ」の登熟期間の平均気温と千粒重の関係（1997～2010 年 北農研芽室研究拠点）（** $P < 0.01$ ）

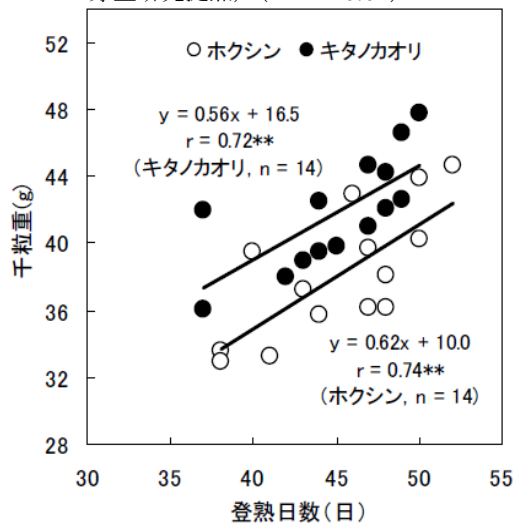


図 25. 秋まき小麦品種「ホクシン」と「キタノカオリ」の登熟日数と千粒重の関係（1997～2010 年 北農研芽室研究拠点）（** $P < 0.01$ ）

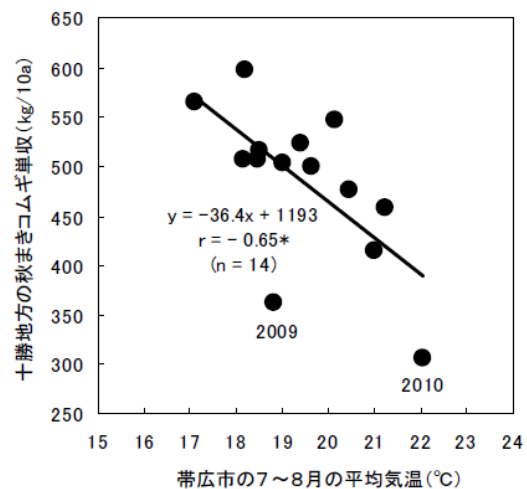


図 26. 帯広市の 7～8 月の平均気温と十勝地方の秋まき小麦の製品単収の関係（1997～2010 年）（* $P < 0.05$ ）

【春季の気温とコムギの収量構成要素の関係】

4 月中旬の平均気温と「ホクシン」の稈長間に有意な負の相関が見られ（ $r = -0.62$ （ $n=14$ 、 $P < 0.05$ ））（図 27）、4 月下旬の平均気温と「キタノカオリ」の穂数間に有意な負の相関が見られた（ $r = -0.60$ （ $n=14$ 、 $P < 0.05$ ））（図 28）。また、5 月下旬の平均気温と穂長の間には、両品種とも有意な負の相関が見られ、気温が 1°C 上昇すると、穂長は、「ホクシン」

が約 2.6mm、「キタノカオリ」が約 4.3mm 減少した(ホクシン $r = -0.68$ ($n=14$, $P<0.01$)), キタノカオリ $r = -0.83$ ($n=14$, $P<0.01$)) (図 29)。

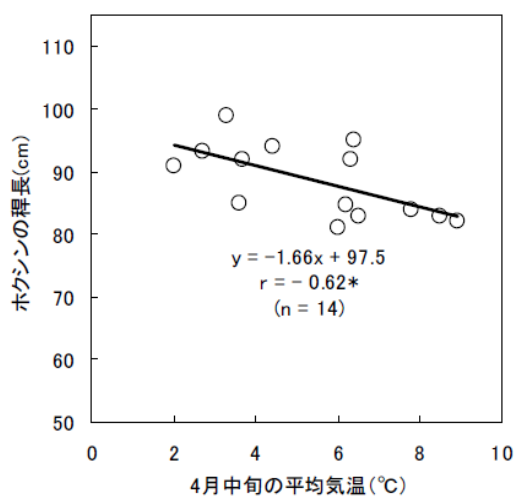


図 27. 4 月中旬の平均気温と秋まき小麦品種「ホクシン」の稈長の関係 (1997～2010 年 北農研芽室研究拠点) (* $P<0.05$)

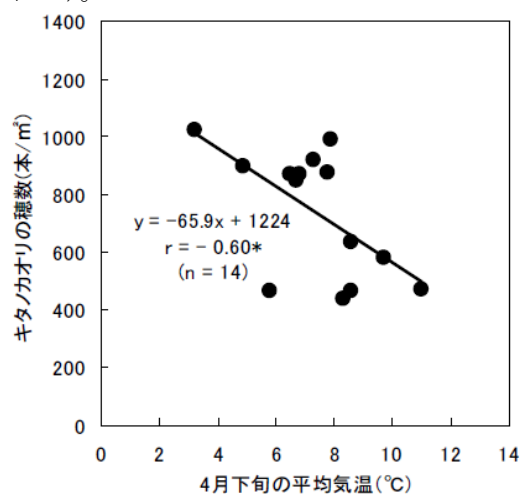


図 28. 4 月下旬の平均気温と秋まき小麦品種「キタノカオリ」の穂数の関係 (1997～2010 年 北農研芽室研究拠点) (* $P<0.05$)

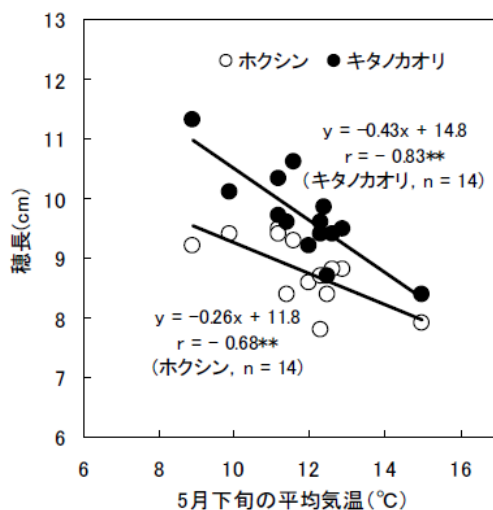


図 29. 5 月下旬の平均気温と秋まき小麦品種「ホクシン」および「キタノカオリ」の穂長の関係 (1997～2010 年 北農研芽室研究拠点) (** $P<0.01$)

【春季と夏季の気温の相関関係】

1997～2010 年の 14 年間の月別の平均気温の相関解析の結果の概要を示す。4 月の平均気温と、秋まき小麦の登熟期間の平均気温との間には、有意な負の相関が見られた ($r = -0.61$ ($n=14$, $P<0.05$)) (図 30)。3 月の平均気温と 6 月の平均気温 ($r = -0.69$ ($n=14$, $P<0.01$)) (図 31)、および 4 月の平均気温と 8 月の平均気温 ($r = -0.83$ ($n=14$, $P<0.01$)) (図 32)の間にも、それぞれ有意な負の相関が見られた。一方、1 月と 2 月、8 月と 9 月の気温の間には、それぞれ有意な正の相関が見られた ($r=0.72$ ($n=14$, $P<0.01$); $r=0.73$ ($n=14$, $P<0.01$))。

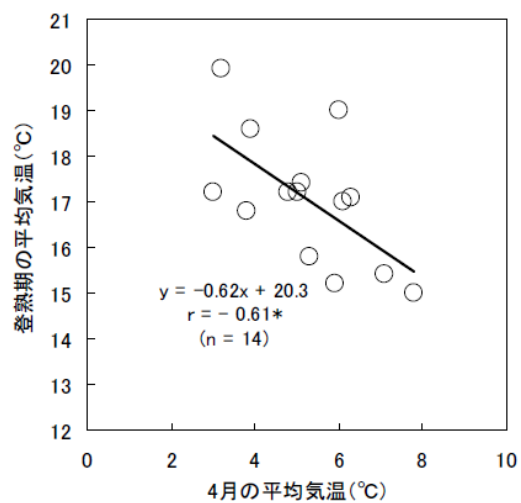


図 30. 4 月の平均気温と秋まき小麦の登熟期間の平均気温の関係 (1997~2010 年) (* $P < 0.05$)

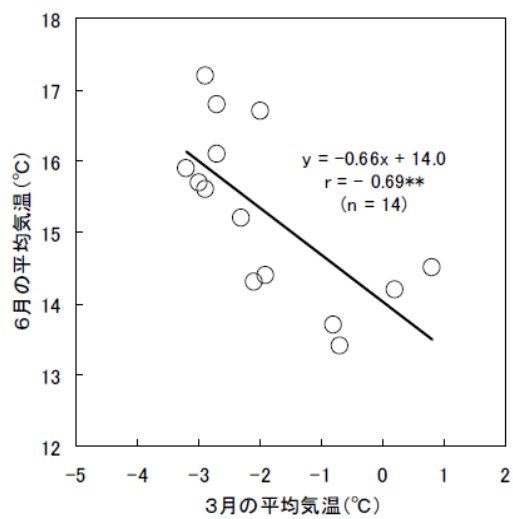


図 31. 3 月と 6 月の平均気温の関係 (1997~2010 年) (** $P < 0.01$)

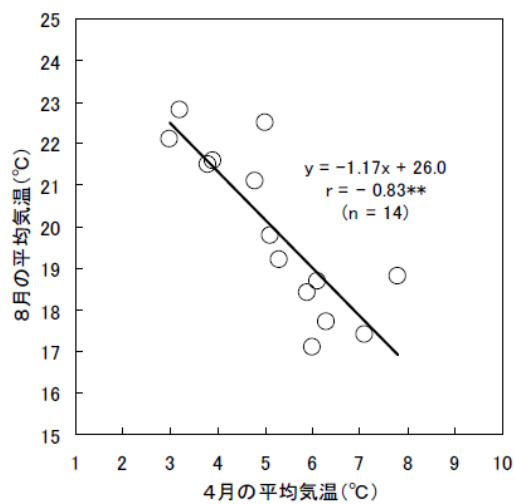


図 32. 4 月と 8 月の平均気温の関係 (1997~2010 年) (** $P < 0.01$)

② 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

＜秋まき小麦について＞

1. 執筆者（公表年）	地方独立行政法人北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場編（2011 年）
2. 掲載紙	北海道立総合研究機構農業試験場資料 第 39 号
3. 対象品目	秋まき小麦「ホクシン」（収量）、「きたほなみ」（播種時期）
4. 対象地域	北海道
5. 予測手法の概要	予測期間：現在（1981-2000 年）、2030 年代
	空間解像度：道内9箇所（倶知安、岩見沢、滝川、名寄、富良野、網走、訓子布、芽室、大樹）
	気候モデル ³³ ：CCSR、CGCM1
	排出シナリオ：IS92a
	適応策の検討：あり
予測手法：作物モデル「WOFOST」	
WOFOST は、ヨーロッパで開発された作物モデルであり、気象データ及び土壌タイプに基づく生育シミュレーションが行える。なお、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・提示されている。 各地点のポテンシャル子実収量（水分制限なし;PY1）、土壌水分別の水分ストレス（不足、過剰）を考慮した収量ならびに期間降雨量についてシミュレーションを行った。 また、気候変動下にある 2030 年代における播種適期については、今後の基幹品種となる「きたほなみ」で WOFOST による検討を行った。	
6. 影響の概要	
【収量】 2030 年代では、春季以降の気温上昇及び日射量の低下により、ポテンシャル収量(PY1)は全域において低下した。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。前者の例として十勝中部の芽室を、後者の例として上川北部の名寄を示す。 芽室は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％）に伴い、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（図 33）。	

³³ 計算には、これら GCM の結果を日本付近の二次メッシュ（10km 四方）に展開した「気候変化メッシュデータ日本」（Yokozawa et al., 2003）を使用している。

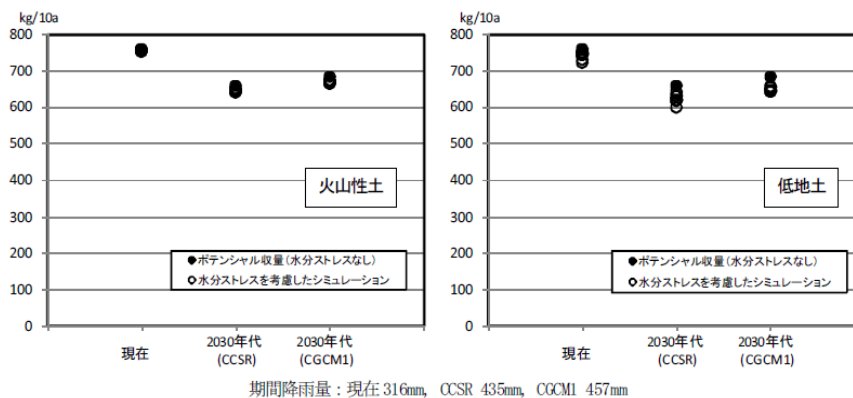


図 33. 芽室における各年代の収量シミュレーション

名寄は、現在、特に水分ストレスの高い地域であり、低地土では有効土壌 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（図 34）。

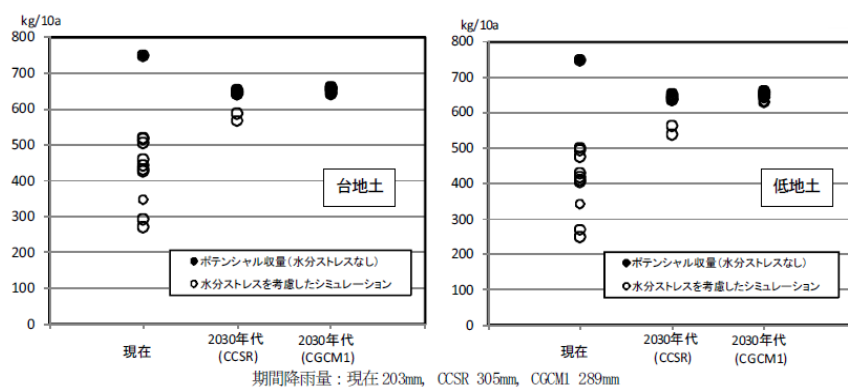


図 34. 名寄における各年代の収量シミュレーション

【適応策の検討】

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（表 7）。

表 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	(9/26 ~ 9/30)		(9/20 ~ 9/24)	
2030年代(CGCM1)	9/18 ~	9/26	9/26 ~	10/4	9/19 ~	9/27	9/27 ~	10/11	9/23 ~	10/6
							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日を過ぎても日平均気温3℃以上の日は積算に加えて算出した。

2.1.4.2 大豆

① 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

<大豆について>

1. 執筆者（公表年）	地方独立行政法人北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場編（2011 年）
2. 掲載紙	北海道立総合研究機構農業試験場資料 第 39 号
3. 対象品目	大豆 ³⁴ （生育、収量、品質、栽培適地）
4. 対象地域	北海道
5. 予測手法の概要	予測期間：現在（1981-2000 年）、2030 年代
	空間解像度：市町村レベル、1km メッシュ
	気候モデル ³⁵ ：CCSR、CGCM1
	排出シナリオ：IS92a
	適応策の検討：あり ³⁶
	予測手法：発育指数（生育（開花期））、積算日平均気温と登熟期間中の気温特性により計算（生育（成熟期））、回帰式（収量）
【生育期節等の推定】 ・開花期：発育指数（Developmental Index；DVI）を用いた。 $DVI（発育指数）= \sum DVR$ $DVR（発育速度）= 1/G[1+EXP\{-A \times (T-Th)\}]$ G、A、Th は品種固有のパラメータ。 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の 1/2 になる温度 ・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。 【子実重の予測】 子実重と気象条件の解析結果から得た、以下の収量予測式を用いて予測した。 ユキホマレ：$Y = -0.915(x - 19.4)^2 + 39.0$（$R^2 = 0.3182$） トヨムスメ：$Y = -1.047(x - 19.8)^2 + 41.0$（$R^2 = 0.5877$） 【栽培適地（栽培地帯区分）】	

³⁴ ユキホマレとトヨムスメの二品種を対象とした。

³⁵ 計算には、これら GCM の結果を日本付近の二次メッシュ（10km 四方）に展開した「気候変化メッシュデータ日本」（Yokozawa et al., 2003）を使用している。

³⁶ 2030 年代の予測結果に基づき、中生～晩生品種導入による収量・品質の確保、病害虫への対応が挙げられている。

現在の栽培地帯区分は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³⁷に区分されている。GCMにより予測された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。

6. 影響の概要

【生育期節の予測】

主要地点の開花期、成熟期の結果を「ユキホマレ」については図 35、図 36 に、「トヨムスメ」については図 37、図 38 に示す。

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。

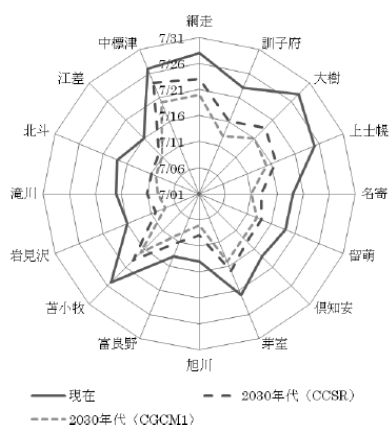


図 35. ユキホマレの開花期予測
播種日は5月20日として予測した

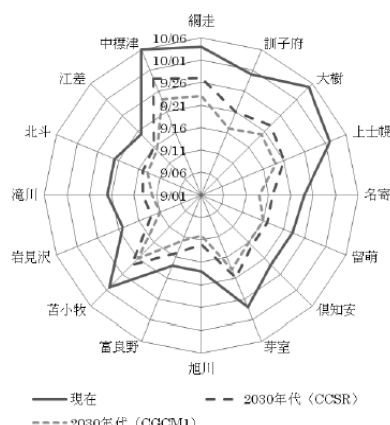


図 36. ユキホマレの成熟期予測
播種日は5月20日として予測した

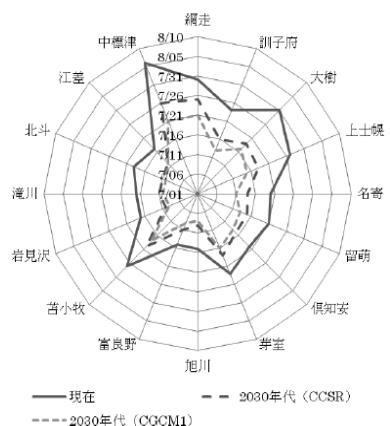


図 37. トヨムスメの開花期予測
播種日は5月20日として予測した

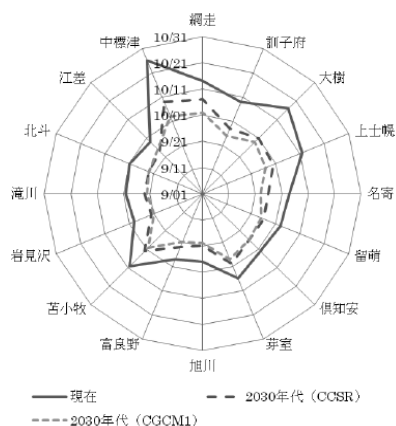


図 38. トヨムスメの成熟期予測
播種日は5月20日として予測した

【子実中の予測】

予測結果を図 39 に示す。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

³⁷地帯区分のランクが大きくなるほど、6～9月の積算気温が高く、また無霜期間が長くなる。

可能性が示唆された。一方で、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」は減収傾向となり、中生品種の選定が必要と考えられた。

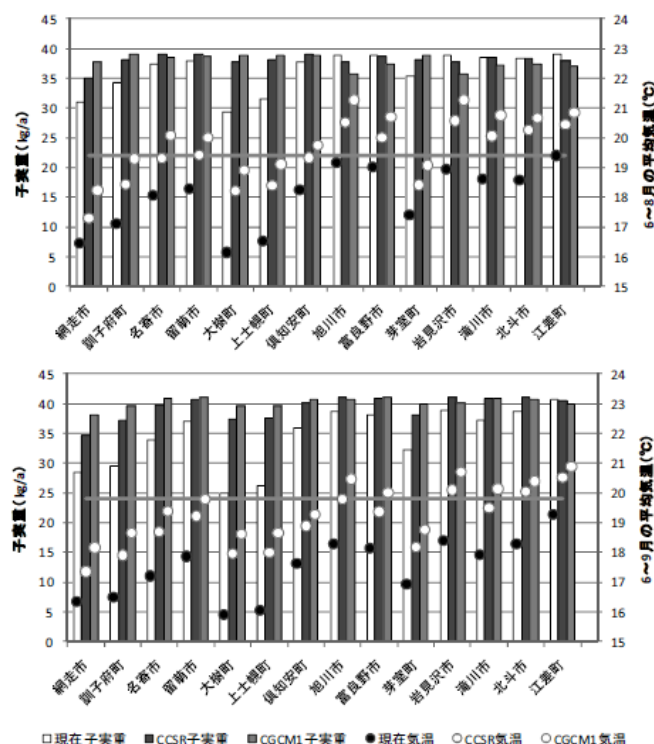


図 39. 子実重の将来予測：(上) ユキホマレ、(下) トヨムスメ

【栽培適地（栽培地帯区分）】

地帯区分の変化の予測結果を表 8 に示す。全ての地点で地帯区分が 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。

表 8. 温暖化に伴う地帯区分の変化

現代(アメダス平年値)							CCSR2030年代							CGCM12030年代						
地帯区分	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。

② ダイズ品種の発育モデルの作成と気温上昇が発育速度に及ぼす影響の広域推定

【委託プロ研究者ご提供情報】

1. 執筆者（公表年）	中野聡史、熊谷悦史、島田信二、鮫島良次、大野宏之、本間香貴、白岩立彦（2015 年）
2. 掲載紙	日本作物学会紀事（Jpn.J.Crop Sci.） 84(4): 408-417
3. 対象品目	ダイズ品種「リュウホウ」「エンレイ」「フクユタカ」 （開花期、子実肥大期）
4. 対象地域	東北（リュウホウ）、関東東海（エンレイ）、九州（フクユタカ）
5. 予測手法の概要	予測期間：－
	空間解像度：－
	気候モデル：－
	排出シナリオ：－（日平均気温 $38+3^{\circ}\text{C}$ を想定）
	適応策の検討：なし
	予測手法：発育モデル（DVR モデル）

【開花期（R2）と子実肥大始期（R5）の推計】

発育指数（DVI）を用いて以下の通り設定した³⁹。

出芽期（VE）：DVI=0.0、開花期（R2）：DVI=1.0、子実肥大始期（R5）：DVI=1.2

※出芽日はリュウホウ、エンレイで 6/15、フクユタカで 7/15 とした。

DVI は以下の式で示される発育速度（DVR）を積算することで求めた。

DVR モデル： $DVR = 1/G \times (1 - \exp\{B(L - L_c)\}) / (1 + \exp\{-A(T - T_h)\})$

T、L は変数であり、G、Th、Lc、A はパラメータである。

T：日平均気温（日最高気温と日最低気温の算術平均値）（℃）、L：日長時間（時間）

G：各発育相の最小日数（日）、Th：ある日長下で DVR が 1/2 になる温度（℃）

Lc：発育が進む限界日長（時間）、A：気温に対する係数、B：日長に対する係数

パラメータは、VE～R2 と R2～R5 のそれぞれの期間ごとに決定した（表 9）。

表 9. 出芽期(VE)～開花期(R2)および開花期(R2)～子実肥大期(R5)の発育パラメータ

品種	VE-R2					R2-R5				
	G (日)	T _h (℃)	L _c (時間)	A	B	G (日)	T _h (℃)	L _c (時間)	A	B
リュウホウ	27.89	18.14	16.76	0.590	0.676	9.08	16.17	16.29	0.206	0.050
エンレイ	25.05	17.80	15.63	0.398	1.071	11.29	19.68	15.26	0.737	0.080
フクユタカ	30.68	14.09	15.36	0.257	0.830	12.05	16.94	14.33	0.448	0.080

³⁸ 気象データはメッシュ農業気象データ（大野宏之 2014. メッシュ農業気象データ利用マニュアル. 中央農研研究資料 9: 1-77.）を使用した。

³⁹ なお、R1 は開花始、R3 は莢伸長初期、R4 は莢伸長期である。

6. 影響の概要

通常時の日平均気温+3℃を想定することで、気温上昇による生育期間の変化を推計した（図 40）。リュウホウとエンレイは同様の傾向を示した。具体的には、R2 は関東および北陸の平野部で 2～4 日早まり、より寒冷的な東北や山間部で 5～7 日以上早まる結果となった。一方で、R2～R5 の期間はほぼ変わらない地点が多く、結果的に R5 も R2 と同程度となった。

フクユタカの R2 は気温上昇を想定した場合でも、山間部以外ではほぼ変化がなく、また、R2～R5 の期間および R5 到達日もほぼ変わらない地点が多い結果となった。

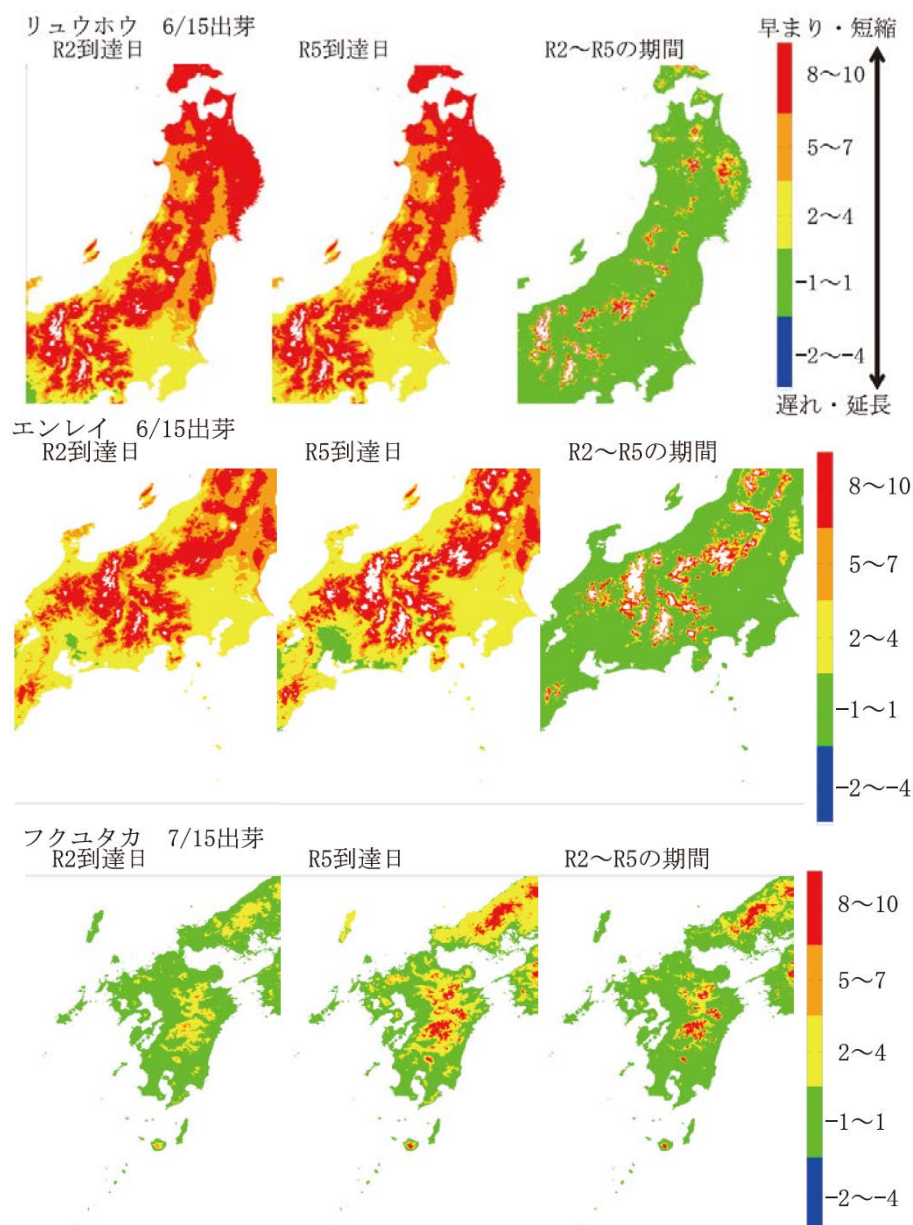


図 40. 気温+3℃を想定した場合の開花期（R2）、子実肥大始期（R5）までの早まり（日数）および R2～R5 の期間短縮（日数）の推定結果。1980～2013 年の 34 年分の平均値

2.1.4.3 小豆

① 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

<小豆について>

1. 執筆者（公表年）	地方独立行政法人北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場編（2011 年）
2. 掲載紙	北海道立総合研究機構農業試験場資料 第 39 号
3. 対象品目	小豆（生育期節、収量、品質）
4. 対象地域	北海道
5. 予測手法の概要	予測期間：現在（1971-2000 年）、2030 年代
	空間解像度：市町村レベル
	気候モデル ⁴⁰ ：CCSR、CGCM1
	排出シナリオ：IS92a
	適応策の検討：なし ⁴¹
予測手法：DVR 法（生育期節）、回帰式（子実重（収量））、回帰式（品質） 【生育期節】 DVR ほうにより、生育期節は以下式で予測できる。 $DVR = (1 - \exp(b \times (\text{日平均気温} - c))) / a$ ここで a、b はパラメータであり、出芽始、開花始、成熟期について決定した推定式は以下である。 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) $DVR(M2) = (1 - \exp(-0.0445813 \times (X - 5.44225))) / 33.4536$ ①～③のいずれにおいても、1)式に播種日からの日平均気温を代入し順次累積し、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。 【子実重（収量）】 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）に回帰	

⁴⁰ 計算には、これら GCM の結果を日本付近の二次メッシュ（10km 四方）に展開した「気候変化メッシュデータ日本」（Yokozawa et al., 2003）を使用している。

⁴¹ 予測結果を基に、栽培による対策、品種による対策、生産地の移動による対策が挙げられている。

式を導き、温暖化気候データを代入して予測を行った。

石狩・空知（岩見沢）： $Y = -5.10(X - 19.47)^2 + 202.7$ （ $R^2 = 0.1116$ ）

上川・留萌（旭川）： $Y = -18.37(X - 19.66)^2 + 205.0$ （ $R^2 = 0.3930$ ）

後志（倶知安）： $Y = -23.27(X - 18.77)^2 + 236.3$ （ $R^2 = 0.4541$ ）

渡島・桧山（大野）： $Y = -11.87(X - 19.66)^2 + 200.1$ （ $R^2 = 0.7154$ ）

胆振（苫小牧）： $Y = -9.59(X - 18.88)^2 + 236.9$ （ $R^2 = 0.6551$ ）

十勝（芽室）： $Y = -17.18(X - 19.11)^2 + 276.9$ （ $R^2 = 0.8325$ ）

オホーツク（境野）： $Y = -11.14(X - 19.09)^2 + 251.6$ （ $R^2 = 0.7020$ ）

【品質】

登熟期間の平均気温（X）から百粒重⁴²（Y）を推定する以下の式を用いた。

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

また、登熟期間の平均気温（X）と流通規格内歩留（4.7mm 篩⁴³目上率）（Y）の以下の関係から将来の流通規格内歩留について推計を行った。

$Y = -0.9978X^2 + 33.378X - 182.51$ （ $R^2 = 0.5133$ ）

6. 影響の概要

【生育期節】

播種期を現在並とすると、開花期と成熟期⁴⁴は、CCSR では現在より 7～10 日（表 10）、CGCM1 では 9～12 日程度早まり（表 11）、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。

⁴² 豆 100 粒の重さ

⁴³ 篩（フルイ）

⁴⁴ 表中の生育日数の現代との差ではないことに留意。

表 10. 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(℃)	6-9月平均 気温(℃)
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 11. 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(℃)	6-9月平均 気温(℃)
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。

【子実重 (収量)】

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・

桧山地域では、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（表 12）。CGCM1でも各地域の収量傾向は同様で、全道としては11%増収すると予測された（表 12）。

表 12. 2009 年の作付面積下での地域別収量の予測

地 域	2009年	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 (%)
	作付面積 (ha)	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。

【品質】

推定式を用いると、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。

登熟期間の気温が 18.8℃を超えると流通企画内歩留は 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 58）。

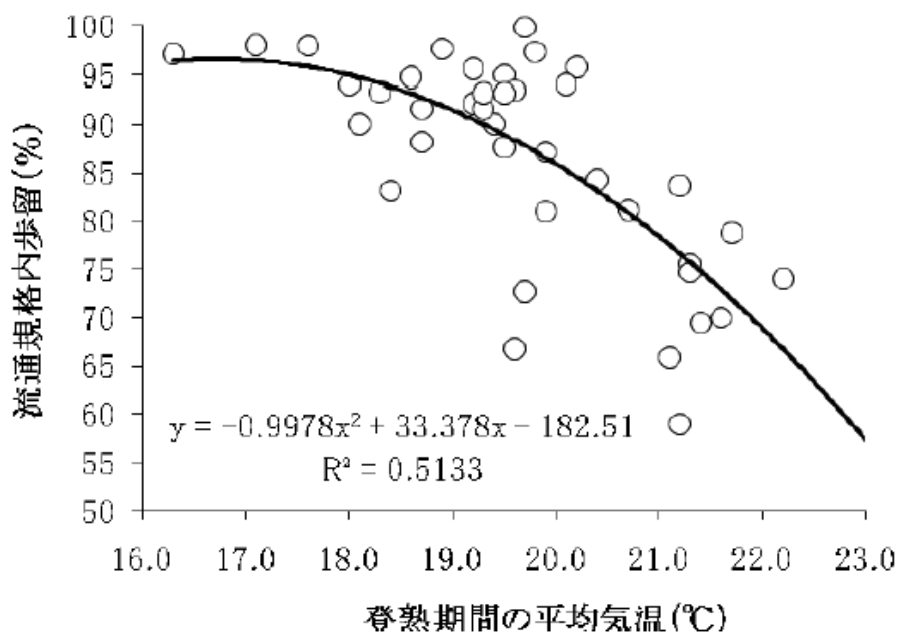


図 41. 小豆の登熟期間の気温と流通規格内歩留の関係

(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)

2.1.4.4 バレイショ

① 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

＜バレイショについて＞

1. 執筆者（公表年）	地方独立行政法人北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場編（2011 年）
2. 掲載紙	北海道立総合研究機構農業試験場資料 第 39 号
3. 対象品目	バレイショ（収量（上いも収量、でん粉収量）、品質（でん粉価）、生育ステージ、疫病の初発期）
4. 対象地域	北海道（芽室、長沼、比布、境野）
5. 予測手法の概要	予測期間：現在（1990 年～2009 年）、2030 年代
	空間解像度：芽室、長沼、比布、境野の四地点
	気候モデル：CCSR
	排出シナリオ：IS92a
	適応策の検討：なし ⁴⁵
	予測手法：回帰式を基にした定性評価（収量、でん粉収量、でん粉価）（式は未記載） 作物モデル「WOFOST」（収量、生育ステージ） ジャガイモ疫病発生予察システム（FLABS）（疫病の初発期）
【収量、でん粉収量、でん粉価】 月平均気温と収量、でん粉収量、でん粉価の相関を検討した。 【収量及び生育ステージ】 日単位で作物生育、乾物生産等をシミュレーションする WOFOST を用いて、気温および日射量から予測をする。また異常高温となった 2010 年についても合わせて解析を行う。 【生育ステージ】 有効積算温度を用いて計算する。生育ステージごとの生育有効温度の設定を表 13 に、生育ステージ別の有効積算温度の設定を表 14 に示す。	

⁴⁵ 品種育成として、でん粉価に影響を受けにくい品種、現在よりもでん粉価の高い品種、気候要因の変動に対して収量が安定している品種、湿度や土壌水分等のストレスにより生じる生理障害（中心空洞、褐色心腐）が発生しづらい品種の栽培が挙げられている。また栽培技術として、培土断面を大きくする（土の断熱効果により塊茎近傍の地温変動を緩和する）ことが挙げられている。

表 13. バレイショ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 14. バレイショ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)

【ポテンシャル収量】

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。

【ジャガイモ疫病の初発期予測】

FLABS 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計算。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 に達した時を危険期到達とし、初発期を予測するものである（表 15）。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 CCSR による予想上昇程度を加えたもの）で予測を行った。

表 15. 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℃	1	2	2	3
11.7～15℃	0	1	2	2
7.2～11.6℃	0	0	1	1

6. 影響の概要

【収量、でん粉収量、でん粉価】

検討の結果、月平均気温と収量、でん粉収量、でん粉価の相関関係はいずれも負であった。そのため、気温が高まるとこれらの指標がいずれも低下すると予想される。従って、温暖化傾向はバレイショの収量・品質を低下させると推測されるが、相関係数が高くないため、低下の程度を予測することは困難であった。

【収量及び生育ステージ】

2030 年代および 2010 年に対する予測結果を表 16 に示す。なお、表中の括弧内の値は、2001 年の定期作況報告における平年値である。最大可能収量（以下、収量）は 2030 年代において、現在と比較し減少すると予測された。

気温のみを考慮した計算結果と気温と日射の両方を考慮した計算結果を比較した場合、2030 年代において後者の方が、収量の低下が大きくなった。このことから 2030 年代の収量低下の主因は日射量の減少にあると推定された。

表 16. WOFOST によるバレイショ生育予測結果

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
		気温					62	95
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
		気温					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)

【ジャガイモ疫病の初発期予測】

2008 年における疫病の危険期到達期は 6 月 20 日であったが、温暖化後では、6 月 16 日と 4 日早く危険期に達した（表 17）。

表 17. 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				

2.1.4.5 飼料用作物

① 地球温暖化が牧草の地域区分と生産量に及ぼす影響

1. 執筆者（公表年）	佐々木寛幸、神山和則、須山哲男、福山正隆（2003 年）
2. 掲載紙	畜産草地研究所研究報告 4：33-47.
3. 対象品目	牧草（地帯区分、生産量）
4. 対象地域	全国
5. 予測手法の概要	予測期間：100 年後（2090 年）
	空間解像度：二次メッシュ（地帯区分）、都道府県（生産量）
	気候モデル ⁴⁶ ：CSIRO-Mk2、ECHAM4、CCSR、CGCM1
	排出シナリオ ⁴⁶ ：IS92a
	適応策の検討：なし ⁴⁷
予測手法：予測手法：将来気温変化に基づく栽培適地区分を予測。牧草型の面積に生産量を乗じて予測。	

現在と 100 年後における寒地型牧草⁴⁸と暖地型牧草⁴⁹の栽培適地区区分図から、寒地型牧草地帯、暖地型牧草地帯、両者とも栽培困難な夏枯れ地帯の 3 分類による地帯区分図を作成し、地帯区分の変化及び生産量の変化を予測した。解析の流れを図 42 に示す。

なお、寒地型・暖地型牧草の気温条件等については、記載なし。

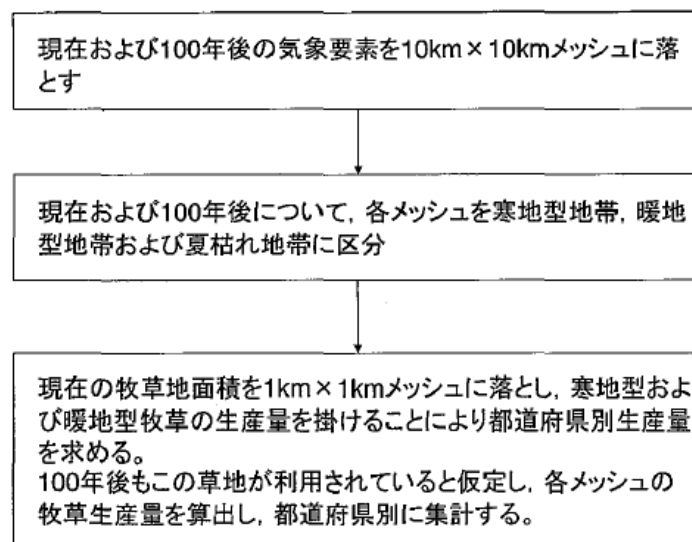


図 42. 解析の流れ

⁴⁶ 論文の中で実際に利用された気候データは、農業環境技術研究所が作成した「局地気候変化シナリオ」である。一方で、本シナリオの詳細な記載は本文中にないため、「農林水産省 近年の気候変動の状況と気候変動が農作物の生育等に及ぼす影響に関する資料集（平成 14 年 4 月）」表Ⅲ.2.1 及び表Ⅲ.2.2

（http://www.maff.go.jp/j/kanbo/kihyo03/gityo/g_kiko_hendo/eikyo/pdf/zenyo_1.pdf）から引用した。

⁴⁷ 直接の適応策の検討は行っていないが、寒冷地型から暖地型牧草への草種変更について触れられている。

⁴⁸ 寒地型牧草の中で比較的耐暑性の高いトールフェスクが栽培可能な地域

⁴⁹ バヒアグラスが栽培可能な地域

6. 影響の概要

【地帯区分】

各地帯区分間の境界が北上する（図 43）。二次メッシュ数の割合の変化は以下の通り。

現在 : 寒地型 66%、夏枯れ 10%、暖地型 24%

100 年後 : 寒地型 41%（現在の 0.61 倍）、夏枯れ 6%（現在の 0.62 倍）、
暖地型 53%（現在の 2.21 倍）

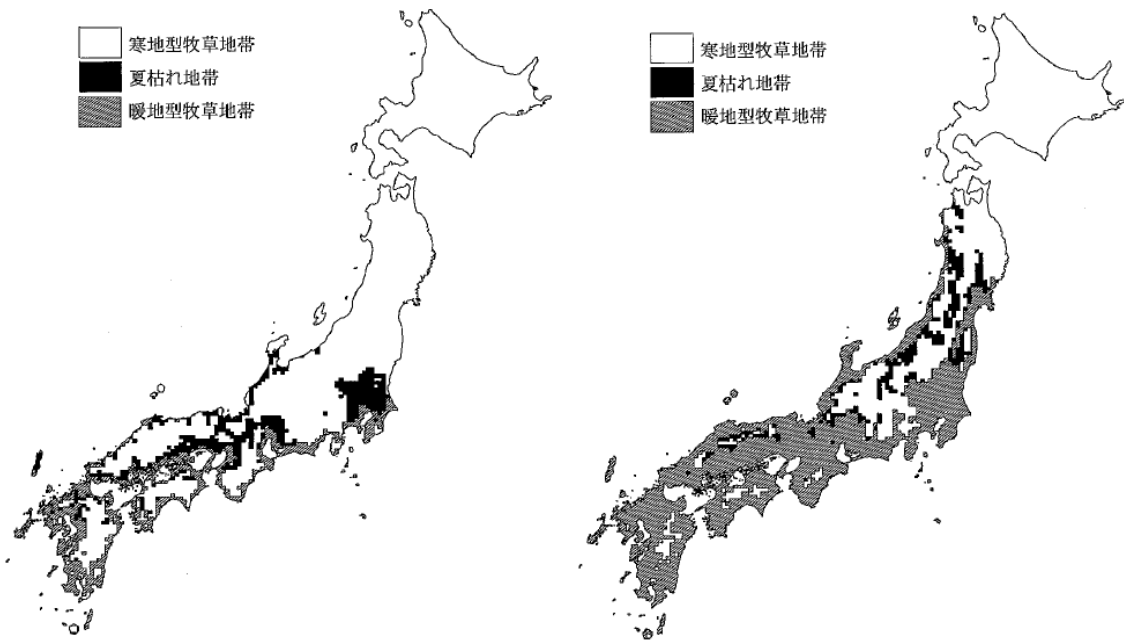


図 43. 牧草生産区分：現在（左図）、100 年後（右図）
（屋久島以南は暖地型牧草地帯）

【生産量】

基本的に、温暖化によってもその地帯区分が変動しなければ寒地型牧草地帯では大幅に増収となり、暖地型牧草も増収となるため、ほとんどの都道府県で増収となる。しかし、現在の寒地型地帯のかなりの面積が夏枯れ地帯となる県⁵⁰では、暖地型牧草の増加分を含めても、牧草全体の生産量が減少する。乾物生産量をわが国全体で合計すると、温暖化により寒地型牧草では 1.4 倍、暖地型牧草では 4.6 倍、両者を合わせた牧草全体では 1.5 倍の生産量となる。

⁵⁰ 文献では山形県のみが該当する。

② Future risk of the maize orange leafhopper, *Cicadulina bipunctata*, and maize wallaby ear symptom in temperate Japan 【委員ご提供情報】

1. 執筆者（公表年）	K.Matsukura, K.Yoshida, S. Kumashiro, M. Matsumura (2016 年)
2. 掲載紙	Popul Ecol (2016) 58: 241. doi:10.1007/s10144-015-0535-9
3. 対象品目	フタテンチビヨコバイ ⁵¹ （存在可能性、ワラビー萎縮症）
4. 対象地域	全国
5. 予測手法の概要	予測期間：2020 年、2040 年、2060 年、2080 年、2100 年
	空間解像度：1km メッシュ
	気候モデル：MIROC3.2_HIRES
	排出シナリオ：— ⁵²
	適応策の検討：なし
	予測手法：回帰式（存在可能性） 回帰式（ワラビー萎縮症発生可能性）

【存在可能性】

フタテンチビヨコバイの存在可能性の回帰式は以下の通り（図 44）。なお、 T_{cum} が 120 以下の場合に、存在する（存在可能性 5%以上）と設定した。

$$P_{dist} = (1 + \exp(0.05T_{cum} - 3.07))^{-1}$$

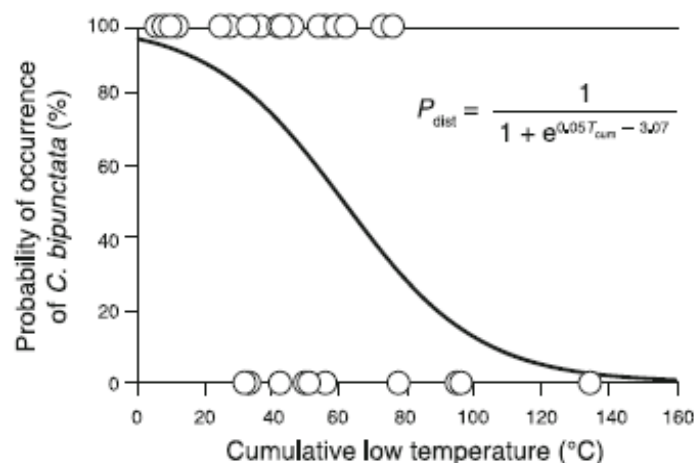


図 44. 日本におけるフタテンチビヨコバイの発生分布と 11 月から 3 月の 5℃以下の累積日低温の関係

存在可能性 (P_{dist}) は累積日低温 (T_{cum}) により与えられる式によって計算できる。図中の円は、現在の分布（不在： $P_{dist}=0$ 、存在： $P_{dist}=100$ ）を示す。また、累積日低温データは Nominal 回帰分析 ($n=35$) を用いた。

⁵¹ *Cicadulina bipunctata*

⁵² [Okada et al.,\(2009\)](#)で作成されたデータを用いているが、当該文献では SRES A1B、A2 を用いている。調査対象文献においてどちらのシナリオを用いたかは未記載。

ここで P_{dist} : フタテンチビヨコバイの存在可能性、 T_{cum} : 11 月から 3 月までの 5°C 以下の累積日低温⁵³。

累積日低温 : $H = \Sigma (h_{\text{AS}} + h_{\text{DS}})$

h_{AS} (5:00-13:00 の気温) : $K \leq T_l$ の時、 $h_{\text{AS}} = 0$

$T_l < K \leq T_h$ の時、 $h_{\text{AS}} = 8/24 * 1/2 * (K - T_l)^2 / (T_h - T_l)$

$K > T_l$ かつ $K > T_h$ の時、 $h_{\text{AS}} = 8/24 * 1/2 * (2K - T_h - T_l)$

h_{DS} (13:00-翌日 5:00 の気温) : $K \leq T_{\text{ln}}$ の時、 $h_{\text{DS}} = 0$

$T_{\text{ln}} < K \leq T_h$ の時、 $h_{\text{DS}} = 16/24 * 1/2 * (K - T_{\text{ln}})^2 / (T_h - T_{\text{ln}})$

$K > T_{\text{ln}}$ かつ $K > T_h$ の時、 $h_{\text{DS}} = 16/24 * 1/2 * (2K - T_h - T_{\text{ln}})$

ここで、 K : 閾値 (5°C)、 T_l : 日最低気温、 T_h : 日最高気温、 T_{ln} : 翌日の日最低気温

【ワラビー萎縮症発生可能性】

回帰式は以下の通り。

$N(t) = N_0 \times \exp(rt)$

$N_0 = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 * \ln(T_{12}) + \alpha_2 * \ln(T_2) + \alpha_3 * \ln(P_w))$

$r = \exp(\beta_0 + \beta_1 * \ln(T_7) + \beta_2 * \ln(N_0))$

ここで、 $N(t)$: t 日目におけるフタテンチビヨコバイの成虫密度

t : 7/1 からの数

($t=1$ は 7/2、 $t=61$ は 8/31 である)

N_0 : フタテンチビヨコバイの初期密度

r : 内的自然増加率⁵⁴。

T_2 、 T_7 、 T_{12} : 各々 2 月、7 月、12 月の月平均気温

P_w : 12 月から 3 月までの合計降水量

切片 (α_0 、 β_0) および係数 (α_1 、 α_2 、 α_3 、 β_1 、 β_2) はそれぞれ (0.333、-0.191)、(3.307、2.486、-0.088、 -1.943×10^{-3} 、 1.009×10^{-2}) である。⁵⁵

なお、存在可能性が 5% 以上の場合、以下の条件にてワラビー萎縮症の発生可能性を定義。

8/1 時点で、 $N(t) < 21$: ワラビー萎縮症は未発生、 $21 \leq N(t) < 74$: 感染しやすい品種にてワラビー萎縮症が発生、 $74 \leq N(t)$: 耐性がある品種でさえワラビー萎縮症が発生。

6. 影響の概要

【存在可能性】

フタテンチビヨコバイの存在可能性の範囲は、特に 2060 年代以降、九州、四国、本州の南

⁵³ Cumulative daily low temperature

⁵⁴ 個体群生態学において、その生物が潜在的にもっている最大の繁殖増加率。

⁵⁵ 文献中に α_{0-3} 及び β_{0-2} の値の記載はなく、引用の Matsukura et al., (2012) Estimation of climatic factors relating to occurrence of the maize orange leafhopper, *Cicadulina bipunctata*. Popul Ecol 54:397-403 から記載

部において北方へと拡大した（表 18）。

表 18. 気候変動予測に基づく将来のフタテンチビヨコバイの潜在存在地域割合

Region ^a	Surface (km ²) ^b	Percentage of region in which <i>C. bipunctata</i> can potentially colonize ^c				
		2020	2040	2060	2080	2100
Hokkaido	88,258	0.0	0.0	0.0	1.3	7.1 ^d
Northern Honshu	126,319	1.1	8.7	24.7	51.9 ^d	73.0 ^d
Southern Honshu	110,361	18.0	43.3	64.4 ^d	72.0 ^d	85.4 ^d
Shikoku	19,563	40.6	66.1	83.3 ^d	86.5 ^d	95.8 ^d
Kyushu	46,570	69.0	87.1	94.8 ^d	96.5 ^d	98.9 ^d

a : 本州は北緯 36°C を境に二つ分割

b : 各地域の 1km メッシュの数と同値

c : 存在可能性は、120 日度 (degree days) の閾値および 11 月から 3 月までの 5°C 以下の累積低温によって判断される

d : フタテンチビヨコバイが越冬可能な地域の割合は、2020 年から 2100 年の予測よりも有意に高い (残留分析 $\alpha = 0.05$)

【ワラビー萎縮症発生可能性】

ワラビー萎縮症の激化が予測された。現在、ワラビー萎縮症に耐性がある飼料用トウモロコシの有用性は、2020 年代には九州南部で、2060 年代では九州、四国、本州南西部において低減するであろう（図 45）。

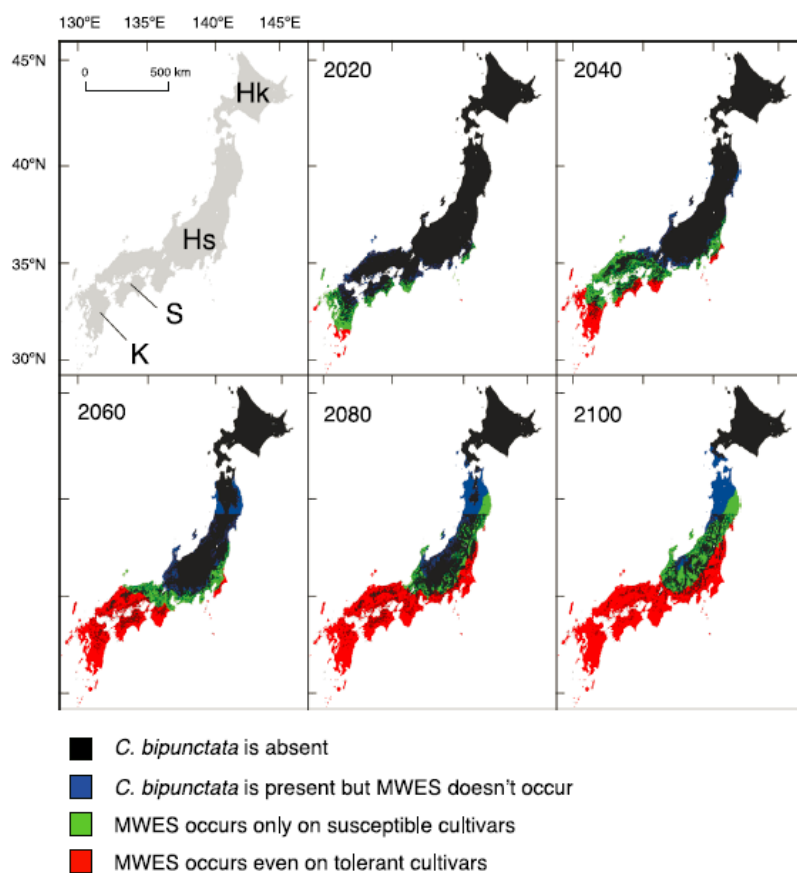


図 45. フタテンチビヨコバイとワラビー萎縮症の発生予測地図

③ 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

＜牧草について＞

1. 執筆者（公表年）	地方独立行政法人北海道立総合研究機構農業研究本部中央農業試験場編（2011 年）
2. 掲載紙	北海道立総合研究機構農業試験場資料 第 39 号
3. 対象品目	牧草 ⁵⁶ （出穂期、収量）
4. 対象地域	北海道
5. 予測手法の概要	予測期間：現在（1981-2000 年）、2030 年代
	空間解像度：市町村レベル
	気候モデル：CCSR、CGCM1
	排出シナリオ：IS92a
	適応策の検討：なし ⁵⁷
	予測手法：ノンパラメトリック DVR 法（出穂期） 蒸発散量と水利用効率の関係を利用（収量）
【ノンパラメトリック DVR（Developmental Rate）法】 作物の生育予測法の一つ。ここではチモシー1 番草の出穂期を予測する。 ①DVR の概要。発育ステージを萌芽期に 0、出穂期に 1 となる発育指数（DVR）の積算値として表現する。実際の計算には、地域別パラメータ（日平均気温および日照時間と DVR との関係）を用いた。 ②萌芽期を日平均気温が冬季以降に初めて 5℃以上となった期日とした。 【蒸発散量と水利用効率の関係を利用した収量予測】 ①1 番草および 2 番草の水利用効率を各々 40kg 10a⁻¹ cm⁻¹、20kg 10a⁻¹ cm⁻¹ に設定。 ②生育期間を設定（図 46） ③蒸発散量を以下の式で計算。 $ET = (0.0135 \times T + 0.24) \times Rs / L$ ここで ET：蒸発散量（cm d⁻¹）、T：日平均気温（℃）、Rs：日射量（J cm⁻² d⁻¹）、L：蒸発潜熱（2499－2.5×T、単位：J cm⁻³） ④③にて現在および 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、①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。ただし、①の水利用効率に	

⁵⁶ 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、チモシー草地）とし、対象品種は普及面積が最大の早生とする。

⁵⁷ 予測結果に基づく技術的対応方向として、晩生品種の導入による収量確保、草地の整備基盤、病害虫への対応が挙げられている。

より推定される収量はポテンシャル収量に近い⁵⁸と考えられるため、予測については収量の絶対値よりも現在から 2030 年代への変化傾向を中心に論ずる。

地点	年代	4月			5月			6月			7月			8月			(旬)
		上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下	
八雲	現在																
	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 46. 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。年二回刈り。早生品種を想定。

6. 影響の概要

【DVR 法による 1 番草出穂期の予測】

2030 年代のチモシー 1 番草の萌芽期は CCSR、CGCM1 のいずれの場合でも、全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 47）。

2030 年代のチモシー 1 番草の出穂期は萌芽期と同様に、全ての地点で現在より 8～20 日（平均 13 日）早まると推定された（図 48）。

なお、1 番草の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と推察された。

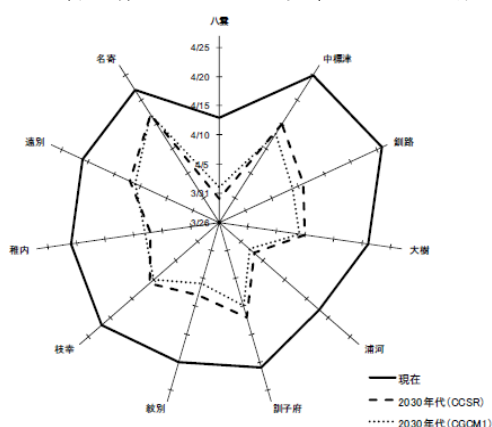


図 47. チモシー 1 番草萌芽期の変化

早生品種「センボク」の場合。軸の単位は月/日

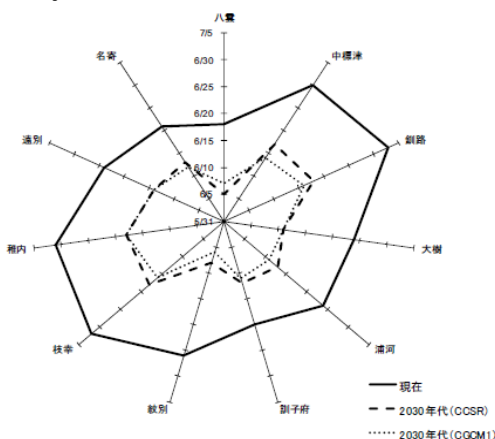


図 48. チモシー 1 番草出穂期の変化

早生品種「センボク」の場合。軸の単位は月/日

⁵⁸ ①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により推定される収量はポテンシャル収量に近いと考えられる。

【蒸発散量と水利用効率の関係を利用した収量予測】

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 割に留まる（図 49）。気温上昇のみを考慮した場合は、現在と同等かわずかに増収する（図 50）。

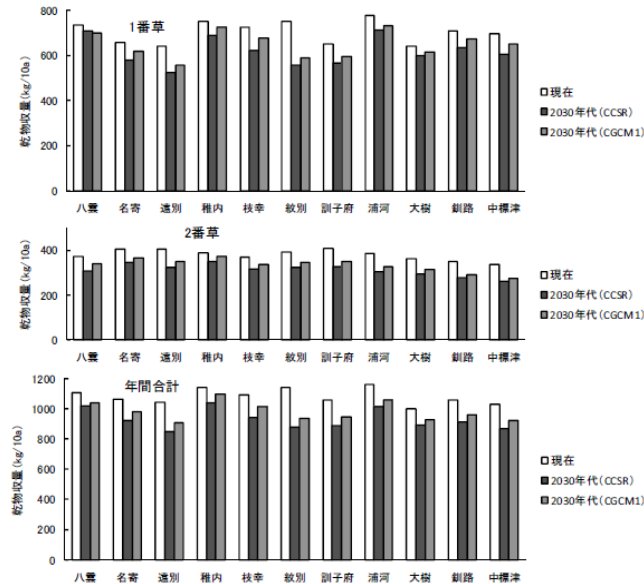


図 49. 温暖化が道内各地のチモシー草地の収量に及ぼす影響（その 1）

平均気温、日射量は将来の値を使用。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。

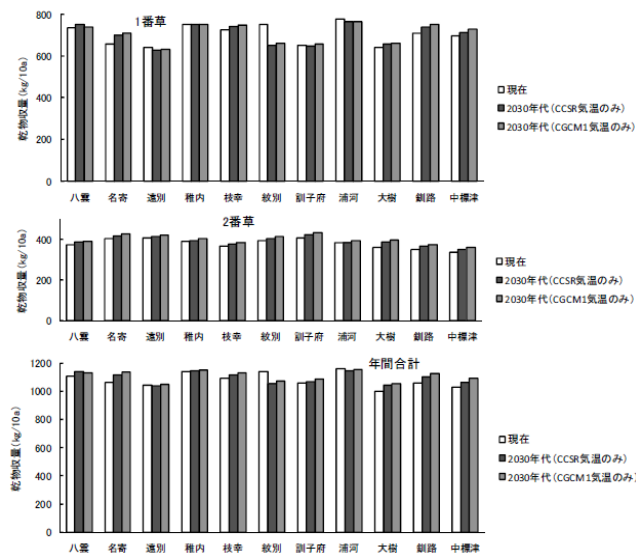


図 50. 温暖化が道内各地のチモシー草地の収量に及ぼす影響（その 2）

平均気温は将来の値を使用。ただし日射量は現在と同じとした。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 気候変動に対応したサイレージ用トウモロコシの二期作栽培技術＜関東地域版＞

【委託プロ研究者ご提供情報】

1. 執筆者(公表年)	農研機構畜産研究部門（2017 年）
2. 掲載紙	農研機構畜産研究部門技術リポート 18 号
3. 対象品目	飼料用トウモロコシ（栽培適地、収量）
4. 対象地域	関東
5. 予測手法の概要	予測期間： 現在（1981～2010 年）、2031～2050 年、2081～2100 年
	空間解像度： 1km メッシュ
	気候モデル： MRI-CGCM3（現在はメッシュ気候値 2010 を使用）
	排出シナリオ： RCP4.5
	適応策の検討： 飼料用トウモロコシの二期作
	予測手法： 10℃基準有効積算温度 ⁵⁹ による適地区分の設定（栽培適地） ニューラルネットワークによる収量予測モデル ⁶⁰ （収量）

【栽培適地】

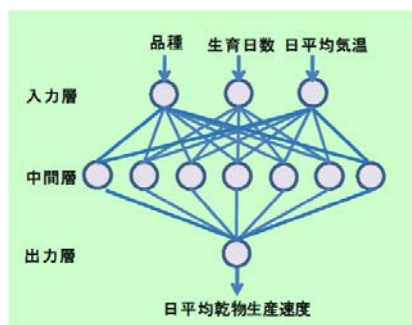
二期作の栽培適地の適地区分を、10℃基準有効積算温度に基づき表 2 の通り設定した⁶¹。

表 19. 10℃基準有効積算温度に基づく二期作適地区分の設定

適地区分	10℃基準有効積算温度
非農耕地	—
栽培不適地	2200℃未満
栽培限界地	2200～2300℃
栽培適地	2300℃以上

【収量】

ニューラルネットワークモデル（図 51）を構築し、年間合計乾物収量の変化予測を行った。なお、入力層は「品種」「播種日から収穫日までの生育日数」「生育期間の日平均気温」の 3 要素（説明変数）、中間層は 7 セル、出力層の値（目的変数）は日平均乾物生産速度とした。



⁵⁹ 日平均気温から 10℃を引いた値を 1 日の有効温度とし、計算対象とする期間の有効温度を合計した値

⁶⁰ 脳神経系の情報伝達システムを参考に開発された数学モデルである。膨大な量の非線形のデータの中から、要因間の複雑な関係を発見する際に適している。なお、具体的な推計式等については未記載。

⁶¹ なお、起算開始日に関する情報については記載されていない。

図 51.ニューラルネットワークによる収量予測モデル（模式図）

6. 影響の概要

【栽培適地】

二期作の栽培適地が拡大し、今世紀の末ごろには関東地域の低標高地のほとんどが二期作栽培適地となることが予測された（図 52）。

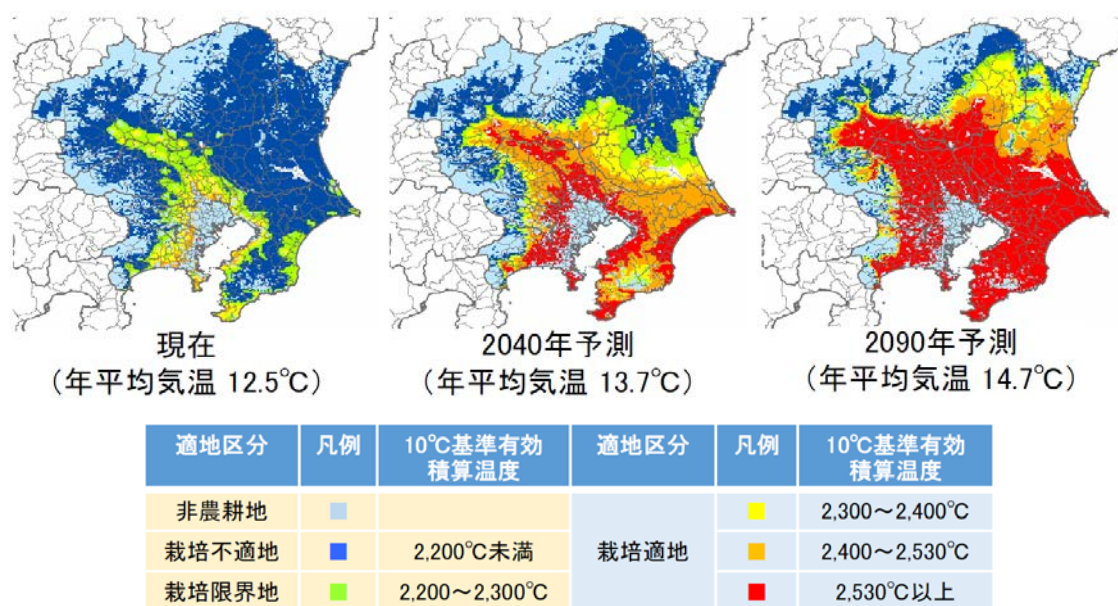


図 52. 現在から 2040 年及び 2090 年までのトウモロコシ二期作栽培適地の変化予測

現在は 1981～2010 年の 30 年平年値。2040 年及び 2090 年の予測値は 2031～2050 年及び 2081～2100 年の 20 年間の予測値の平均。10℃基準有効積算温度が 2300℃以上で 1 作目、2 作目ともに乾物率 25%以上、2530℃以上で 1 作目、2 作目ともに乾物率 30%以上となる。なお、1 作目と 2 作目の間隔を 7 日、有効積算温度を 100℃と仮定して加算している。

【収量】

温暖化に伴い年間合計乾物収量は増加することが予測された（図 53）。また、収量予測結果により、トウモロコシ二期作は今後の温暖化を活用できる栽培技術であることが明らかになった。

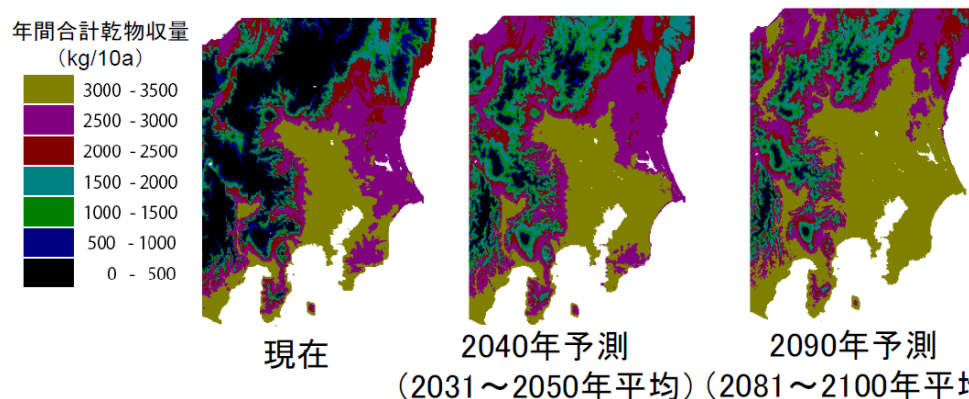


図 53. 関東地域におけるトウモロコシ二期作の年間合計乾物収量の変化予測

1 作目の品種は「KD500」、2 作目の品種は「なつむすめ」

⑤ 温暖化が寒地型牧草生産におよぼす影響のモデルによる評価

【委託プロ研究者ご提供情報】

1. 執筆者(公表年)	樽見恵理奈、築城幹典、森昭憲 (2018 年)
2. 掲載紙	システム農学、34(1) : 7-15
3. 対象品目	寒地型牧草 (オーチャードグラス) (乾物収量)
4. 対象地域	岩手県
5. 予測手法の概要	予測期間 : -
	空間解像度 : 1km メッシュ
	気候モデル : -
	排出シナリオ : - (平均気温 +3°C を想定)
	適応策の検討 : 草地更新サイクルの変更、窒素施肥量の増加
	予測手法 : 牧草乾物収量推定モデル
【牧草乾物収量推定モデル】 牧草乾物収量は式 (1) により、式 (2) ~ 式 (4) の積を求めることで推定した。 式 (2) ~ 式 (4) は牧草乾物収量に独立に影響すると仮定された指数関数である。 $y = y_1 \times y_2 \times y_3 \cdots \cdots \cdots \text{式 (1)}$ $y_1 = 7736 \times \{1 - \exp(-0.01668 \times N)\} \cdots \cdots \cdots \text{式 (2)}$ $y_2 = (3.906 \times 10^{-12}) \times T^{14.87} \times \exp(-0.935T) \cdots \cdots \text{式 (3)}^{62}$ $y_3 = \exp\{(-1.002 \times 10^{-3}) \times (x - 2) \times T^{1.968}\} \cdots \cdots \text{式 (4)}^{63}$ y : 牧草年間乾物収量 (kgMD/ha)、y₁ : 窒素施肥量による年間乾物収量 y₂ : 生育期間平均気温による牧草年間乾物収量の最大値を 1 とする相対値 y₃ : 草地更新後年数による牧草年間乾物収量の最大値を 1 とする相対値 N : 窒素施肥量 (kgN/ha)、x : 草地更新後年数 (2 年目以降) T : 生育期間平均気温 (°C)	
6. 影響の概要	
【予測収量】 草地更新後 2 年目における、生育期間平均気温と窒素施肥量を変えた場合の乾物収量の予測結果を図 54 に示す。平均気温 16°C、窒素施肥量が 400kgN/ha で最大収量となった。 窒素施肥量が 150kgN/ha の時の、生育期間平均気温と草地更新後年数を変えた場合の乾物収量の予測結果を図 55 に示す。平均気温が 16°C、草地更新後 2 年目で最大収量となる。	

⁶² 本研究では、y₂ 算出のための二次関数についても検討を行っている。結果として、幅広い気温帯を取り扱うことのできる指数関数を採用した。

⁶³ 本研究では、y₃ 算出のための二次関数についても検討を行っている。赤池情報量規準 (AIC) を用いた関数比較を行い、よりよい結果を示した指数関数を採用した。

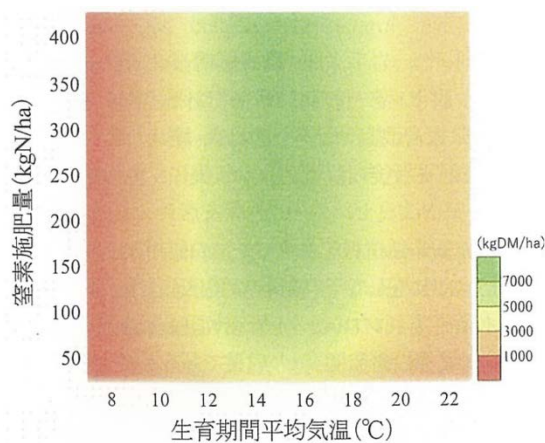


図 54. 生育期間平均気温と窒素施肥量を変えた場合の乾物収量
(草地更新後 2 年目)

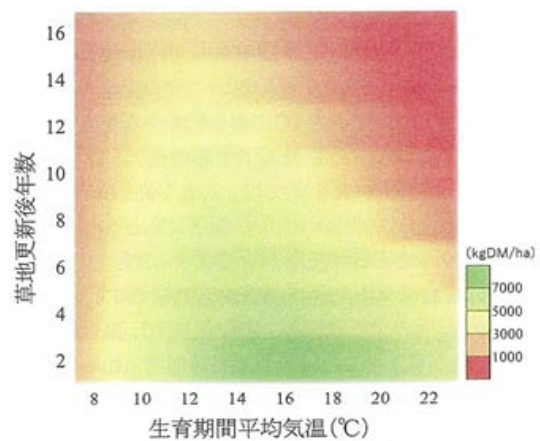


図 55. 生育期間平均気温と草地更新後年数変えた場合の乾物収量
(窒素施肥量 150kgN/ha)

岩手県における現在の平均気温および生育期間の気温が現在よりも 3℃上昇した際の乾物収量の予測結果を図 56 に示した。いずれの気温においても更新後次第に収量は減少した。また、同じ草地更新後年数で比較すると、気温が高くなるほど収量の高い地帯の分布が北上した。

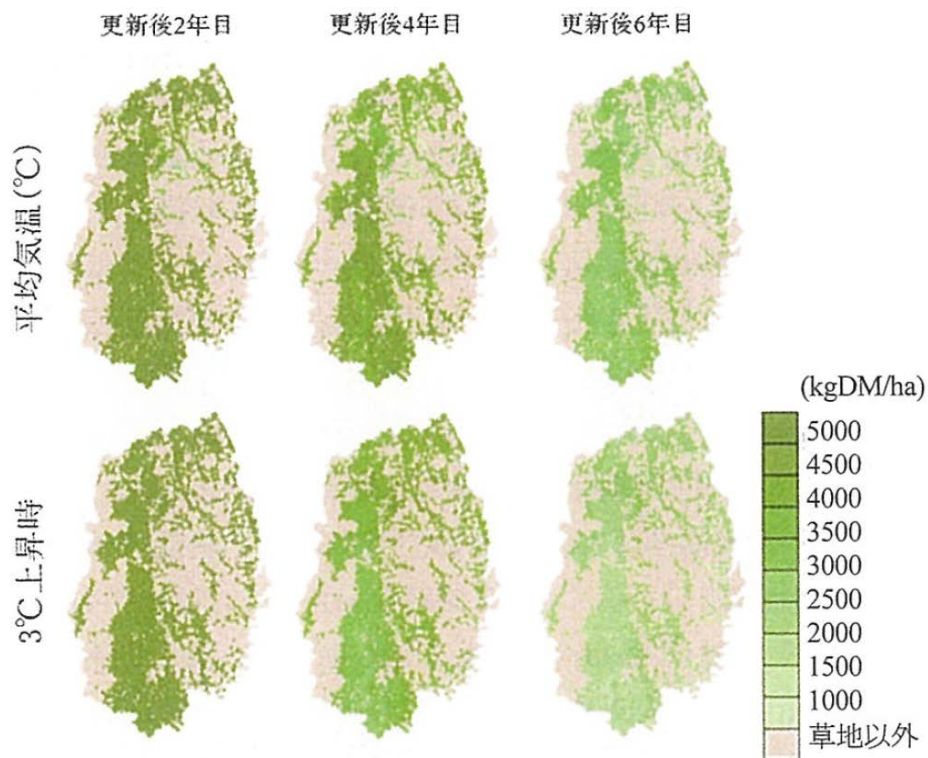


図 56. 岩手県における温暖化後の乾物収量の予測結果 (kgDM/ha)
(窒素施肥量 150kgN/ha)

【適応策の検討】

牧草乾物収量推定モデルを用いて、温暖化条件下の岩手県において乾物収量を維持するための適応策（草地更新サイクルおよび窒素施肥）を検討した。

1. 草地更新サイクル

現在の草地更新後 10 年間の平均収量を目標収量として、温暖化条件下で目標収量を確保するための草地更新サイクルを求めた。結果、生育期間平均気温が 1℃、2℃、3℃上昇時の草地更新サイクルは、それぞれ 9、8 および 7 年で行う必要があるという結果になった。岩手県では、気温が高くなるほど夏枯れの発生による収量低下が顕著に生じ、収量を維持するためには草地更新サイクルを短縮する必要があると考えられる。

2. 窒素施肥

窒素施肥量 150kgN/ha の時の 10 年間の平均収量を目標収量として、温暖化条件下で目標収量を確保するための窒素施肥量を求めた。結果、生育期間平均気温が 1℃上昇時のみ、窒素施肥量を 180kgN/ha に増加させることで収量を維持できたが、それ以外の条件では 500kgN/ha 以上が必要となり、現実的な値とはならなかった。