Ⅴ．飼料作物に対する影響

１．牧草

１）目的

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

２）方法

（１）気象要因と収量の関係解析

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

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

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

（２）DVR 法による１番草出穂期の予測

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

①対象地点

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

②ノンパラメトリック DVR 法の概要

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

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

③萌芽期の設定

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

④供試気象データ

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

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

可照時間は各地点の緯度と暦日から求めた。

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

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

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

[2] TYはチモシー（ノサップまたはセンポク），RCはアカクローバ（ハミドリ，ホクセキまたはサッポロ）．年間施肥量（N-P_2O_5-K_2O，kg/10a）は，天北では16-6-15（TY）または12-10-18（TY・RC），根釧では17-8-17（TY）または10-12-22（TY・RC）．いずれの草地とも更新後2または3年目．天北のTYは2003～2009年，TY・RCは1990～2002年のデータ．根釧のTYは2003～2009年，TY・RCは1989～2006年のデータ

（3）蒸発散量と水利用効率を利用した収量予測

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

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

①対象地点

出穂期予測と同じ11地点とした。

②水利用効率の設定

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

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

③生育期間の設定

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

④蒸発散量の推定

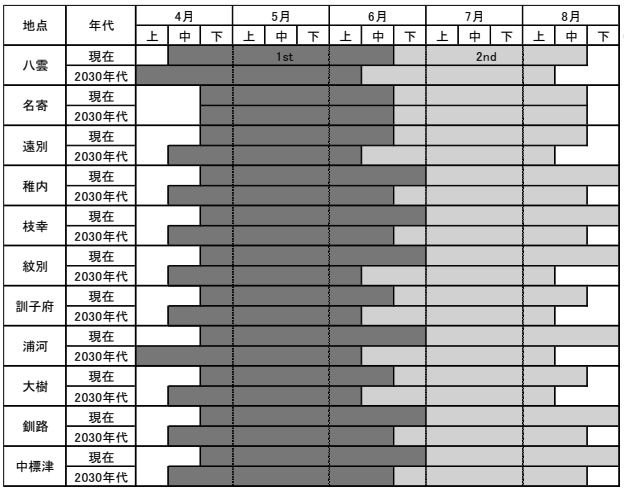
蒸発散量は日平均気温と日射量を用いた以下の式で求めた[3)]。

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

ここで，ET：蒸発散量（cm d^{-1}），T：日平均気温（℃），Rs：日射量（J cm^{-2} d^{-1}），L：蒸発潜熱（2499－2.5×T，単位：J cm^{-3}）である。

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

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



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

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

⑤収量の推定

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

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

3）結果および考察

（1）気象要因と収量の関係解析

①1番草のCGRと気象要素との関係

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

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

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

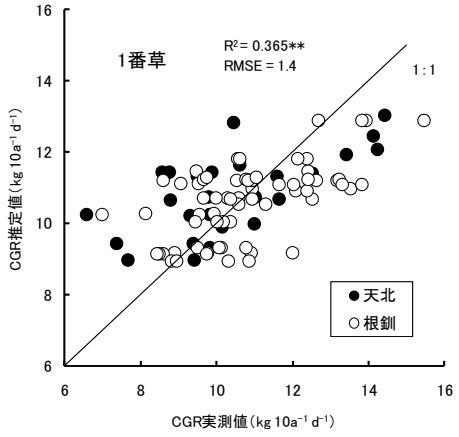
注）相関係数はいずれも1%水準で有意.

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

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

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

ここで，CGR：1 番草の平均乾物生産速度（kg $10a^{-1}$ d^{-1}），T_{11-40}：萌芽後 11 日目～40 日目までの平均気温（℃），P_{11-60}：萌芽後 11 日目～60 日目までの平均日降水量（mm d^{-1}）。



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

重回帰式は以下の通り．$CGR = 0.544 \times T_{11-40} - 0.345 \times P_{11-60} + 6.89$．ここで，CGR：1 番草の平均乾物生産速度（kg $10a^{-1}$ d^{-1}），T_{11-40}：萌芽後 11 日目～40 日目までの平均気温（℃），P_{11-60}：萌芽後 11 日目～60 日目までの平均日降水量（mm d^{-1}）．

説明変数として選択された期間は，平均気温，降水量ともに，CGR と最も強い単相関を示した期間と合致した（表Ⅴ－1－2）。各説明変数の CGR に対する偏相関係数は T_{11-40} が 0.507，P_{11-60} が−0.470 でともに 1%水準で有意であったが，得られた重回帰式の決定係数は 0.365 と小さく，CGR 推定値と実測値も良い対応を示さなかった（図Ⅴ－1－2）ことから，本式による 1 番草収量の推定は困難と考えられた。

②2 番草の CGR と気象要素との関係

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

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

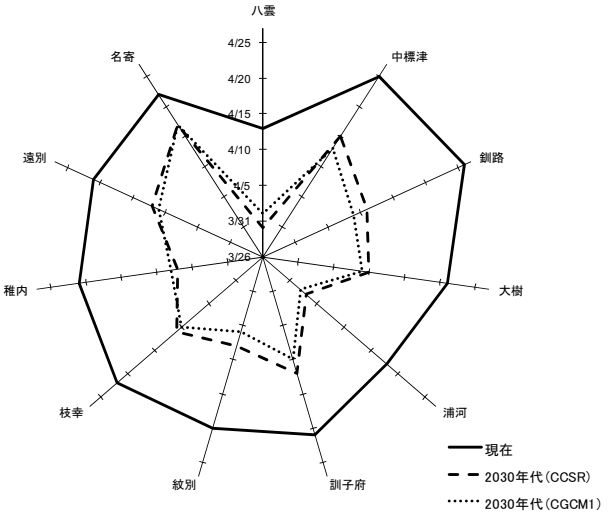
（２）DVR 法による 1 番草出穂期の予測

①萌芽期の変化

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

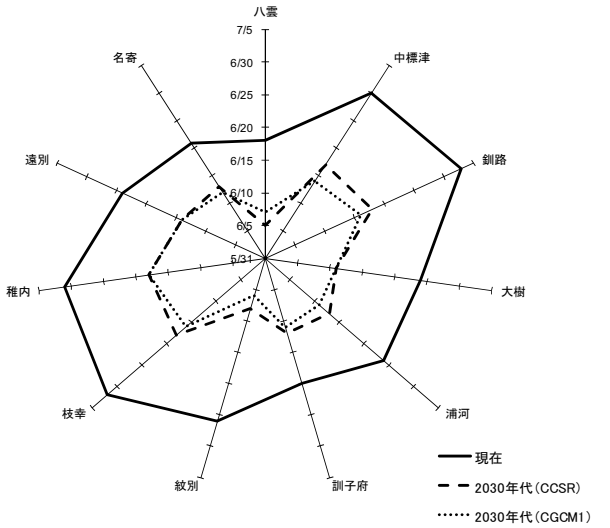
②出穂期および 1 番草生育日数の変化

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



図Ⅴ－1－3　温暖化に伴うチモシー1番草萌芽期の変化

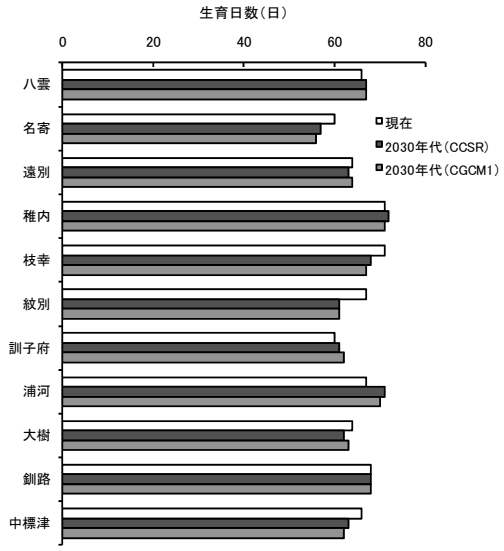
早生品種「センポク」の場合．軸の単位は月/日．



図Ⅴ－1－4　温暖化に伴うチモシー1 番草出穂期の変化

早生品種「センポク」の場合．軸の単位は月/日．

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



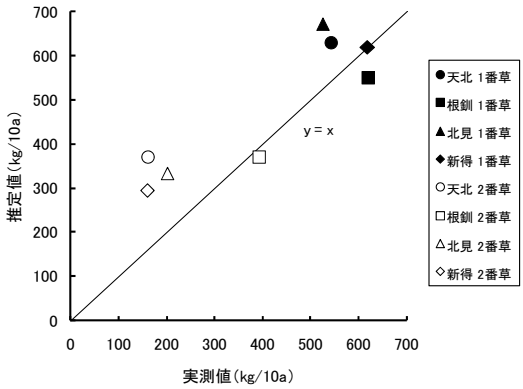
図Ⅴ－1－5　温暖化に伴うチモシー1番草生育日数（萌芽期から出穂期まで）の変化

早生品種「センポク」の場合．

（3）蒸発散量と水利用効率を利用した収量予測

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

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



図Ⅴ－1－6　チモシー乾物収量の実測値と推定値との関係（2010 年）

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

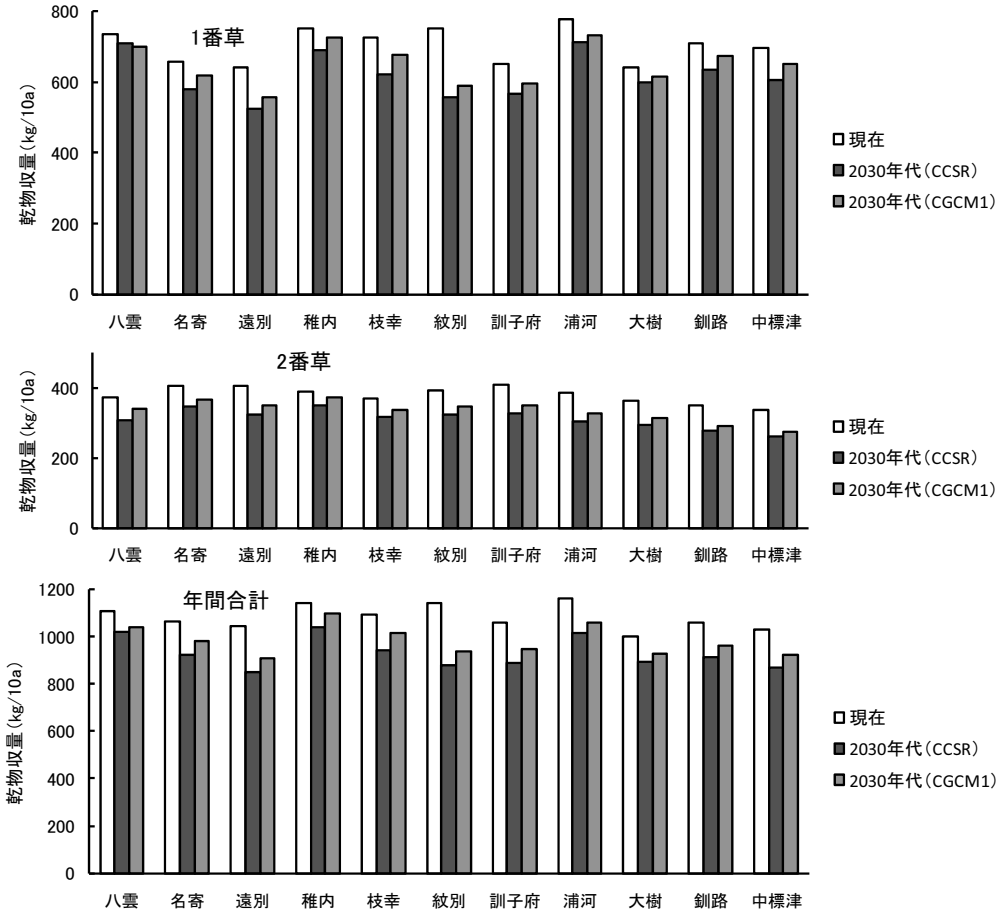
2030 年代のチモシー1 番草収量は，すべての地点で現在（640～780 kg/10a）から 4～26%低下し，530～730 kg/10a 程度に減少すると予測された（図Ⅴ－1－7）。地点別にみると，紋別での減少が著しかったが，これはこの地点のみ2030年代の1番草生育日数が現在よりも短縮されることが影響している。2 番草収量は，絶対値は小さいものの,1 番草と同様にすべての地点で現在よりも 8～22%減少すると見込まれる。このような 1，2 番草の動向を反映し，2030 年代の年間合計収量は現在（1000～1160kg/10a)の 8～9 割程度にとどまるものと推定された。なお,収量レベ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

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

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

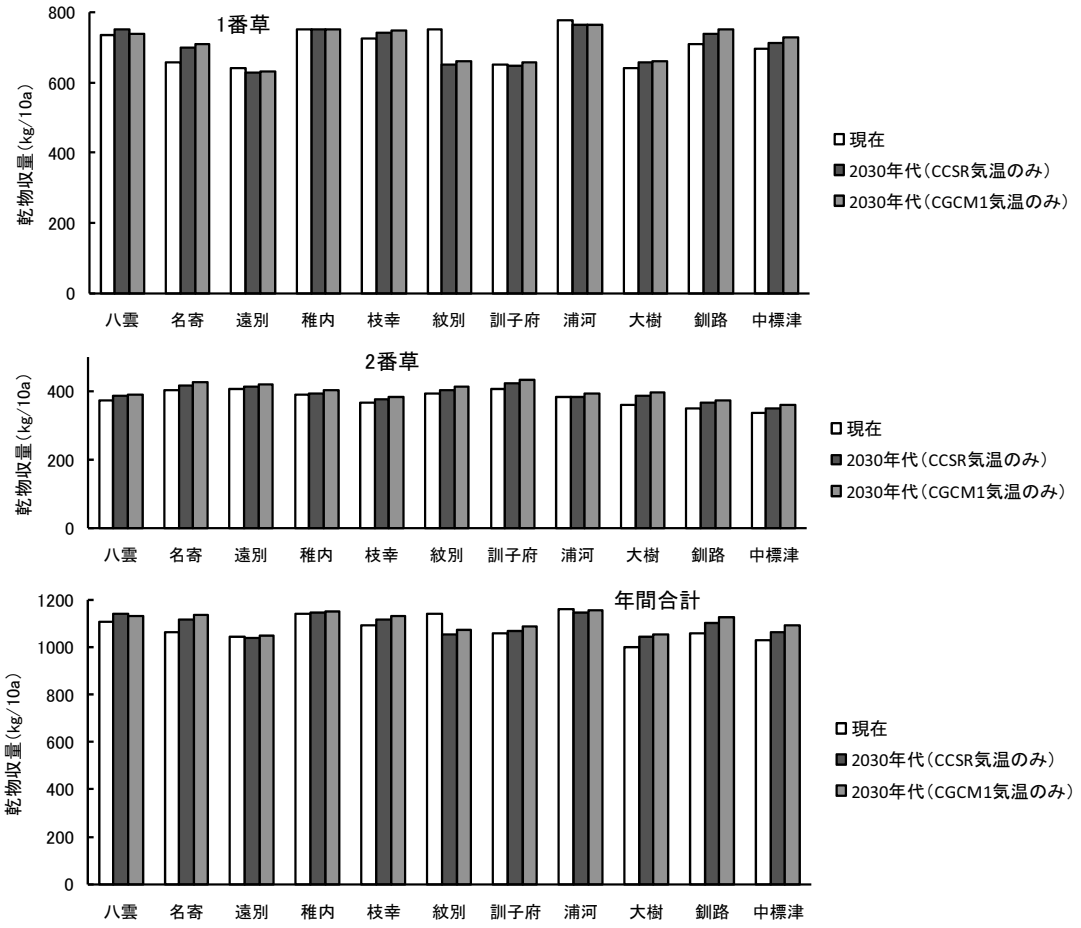
ただし，このような収量に対する日射量の寄与は，チモシー生育と日射量との相関は判然としないとする本節第 2 項の結果と矛盾する面が残されている。したがって，本節での収量推定結果は参考程度にとどめておく必要があろう。

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



図Ⅴ－1－7　温暖化が道内各地のチモシー草地の収量に及ぼす影響（その 1）

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



図Ⅴ－1－8　温暖化が道内各地のチモシー草地の収量に及ぼす影響（その 2）

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

4）2030 年代の予測に基づく技術的対応方向

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

（1）晩生品種の導入による収量確保

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

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

したがって，将来の飼料自給率を少なくとも現在並に維持するには，刈り取り回数の増加による草量確保が一つの方法として挙げられる。しかし，栄養価や嗜好性が 1 番草より劣るとの理由で 2 番草の積極的な利用が進んでいない実態[4]や，秋期に生育する 3 番草は一般に低収であることを考慮すると，刈り取り回数の増加による対応は労力とコストの兼ね合いから現実には困難と思われる。

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

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

（2）草地の基盤整備

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

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

（3）病害虫への対応

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

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

5）まとめ

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

（2）1 番草の生育期は，現在より萌芽期が 5～17 日（平均 12 日），出穂期が 8～20 日（平均 13 日）早まると見込まれ，出穂期は現在のオーチャードグラス（早生または中生）並となる。1 番草の生育日数には大きな変化はない。

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

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

6）引用文献

1) 堀江武ら.”イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究(1)”. 日作紀. 55（別 1），214-215（1986）.

2) 三枝俊哉ら.”北海道根釧地方における 2 次元ノンパラメトリック DVR 法によるチモシー1 番草の出穂期予測メッシュ図”. 日草誌. 40，171-178（1994）.

3) 中辻敏朗.”北海道北部重粘土草地の牧草生産性に対する低水分ストレスの影響評価に関する研究”.道立農試報告. 119，1-53（2008）.

4) 北海道農政部.”天北地方における 2 番草の利用・飼料成分等の実態からみた問題点とその改善策”. 平成 21 年普及奨励ならびに指導参考事項. 2009. p.132-133.

5) 木曽誠二ら.”北海道根釧地方における出穂期の異なるチモシー3 品種の生育経過と窒素施肥反応”. 日草誌. 38，251-258（1992）.

6) 大原益博ら.”数種寒地型牧草の 1 番草の生育に伴う in vitro 乾物消化率，粗蛋白質含量および収量の推移”. 日草誌. 29，161-168（1983）.

7) 北海道農政部.”北海道の採草地における牧草生産の現状と課題”. 平成 12 年普及奨励ならびに指導参考事項. 2000. p.162-167.

8) 中央農試他.”異常高温・多雨等が農畜産物に及ぼす影響と今後の対策”. 道立農試資料. 31，1-167（2000）.

9) 三木直倫・高尾欽弥.”草地地帯における細密土壌区分図の作成とその利用”. ペドロジスト. 31，2-13（1987）.

10) 三木直倫ら.”天北地方鉱質重粘土草地の水分供給からみた収量規制要因とその改善策”. 土肥誌. 61，526-530（1990）.

（中辻 敏朗）

２．飼料用とうもろこし

１）目的

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

２）方法

（１）気象要因と収量の関係解析

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

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

表Ⅴ－2－1　気象要素（気温）の概要

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

※1 生産期間(播種～収穫)中の1日当たり平均。
※2 H18､H21年データは低温多雨による極端な初期生育遅れにより除外。

表Ⅴ－2－2　解析に用いた生育データ等の概要

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

（２）温暖化に伴う収量変化

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

①一次回帰式による収量予測

前節の解析により，各場・各品種ごとに得られた生産期間中の平均気温と乾物生産量との一次回帰式（表Ⅴ－2－3）から，将来（2030年代）の飼料用とうもろこしの収量を推定した。

表Ⅴ－2－3　気温と乾物生産量の一次回帰式

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

※1 y:乾物生産量、x:生産期間中の平均気温
※2 *は5％水準で、**は1％水準で有意である

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

表Ⅴ－2－4　将来(2030年代)の平均気温予測値

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

※１　アメダスポイント2000年平年値から算出した積算気温との差
※２　アメダスポイント2000年平年値における5-9月平均気温との差

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

②品種変更による収量予測

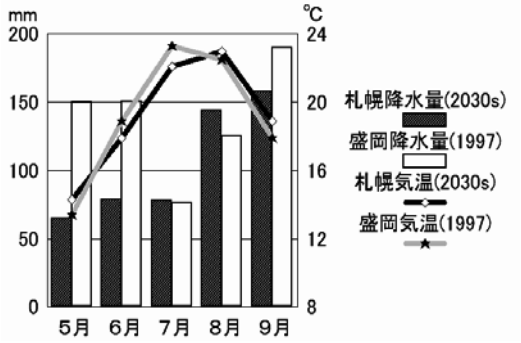
生産期間や積算気温の変動に対応した品種変更に伴う収量予測については，積算気温が概ね平年並かやや高い2005年（平成17年）における各試験場の品種比較試験結果から各熟期の標準品種収量（２試験場の平均値）を算出し検討した（表Ⅴ－2－5)。

表Ｖ－2－5　標準品種の平均収量（2005年）

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

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

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



図Ｖ－2－1　2030年代札幌の予想気象と1997年盛岡の気象経過

表Ｖ－2－6　2030年代の暫定収量予測値

	品種名	熟期	乾物収量 (kg/10a)	平均収量 (kg/10a)
札幌の栽培品種（1997年の値）	3845	中晩	1890	1968
	DK474	晩早	2045	
＊2030年代、札幌で作付可能と仮定した品種の収量				
(1997年、盛岡で栽培した品種の値を暫定使用)	セシリア	中生	2393	2317
	G4742	晩生	2241	

３）結果

（１）気象要因と収量の関係解析

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

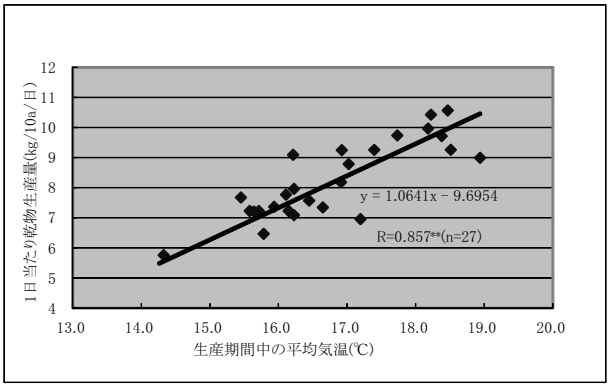
表Ｖ－2－7　各収量項目と気象要素との相関係数

地域	品種	収量項目	生産期間中の気象要素※1 平均気温	平均降水	平均日照
畜試	ワセホマレ (n=27)	乾物生産量	0.857 **	−0.341 ns	0.276 ns
		雌穂乾物重	0.768 **	−0.266 ns	0.347 ns
		播種～絹糸の日数	−0.859 **	0.302 ns	−0.149 ns
十勝	ヘイゲンミノリ (n=18)	乾物生産量	0.474 *	−0.340 ns	0.244 ns
		雌穂乾物重	0.537 *	−0.318 ns	0.265 ns
		播種～絹糸の日数	−0.818 **	0.442 ns	−0.465 ns
	ダイヘイゲン (n=18)	乾物生産量	0.432 ns	−0.376 ns	0.282 ns
		雌穂乾物重	0.384 ns	−0.265 ns	0.280 ns
		播種～絹糸の日数	−0.820 **	0.453 ns	−0.487 *
北見	ダイヘイゲン (n=12)	乾物生産量	0.789 **	−0.191 ns	−0.095 ns
		雌穂乾物重	0.803 **	−0.087 ns	0.083 ns
		播種～絹糸の日数	−0.773 **	0.120 ns	0.265 ns
根釧	ぱぴりか (n=8)	乾物生産量	0.914 **	−0.664 ns	0.831 *
		雌穂乾物重	0.669 ns	−0.575 ns	0.940 **
		播種～絹糸の日数	−0.950 **	0.619 ns	−0.632 ns

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

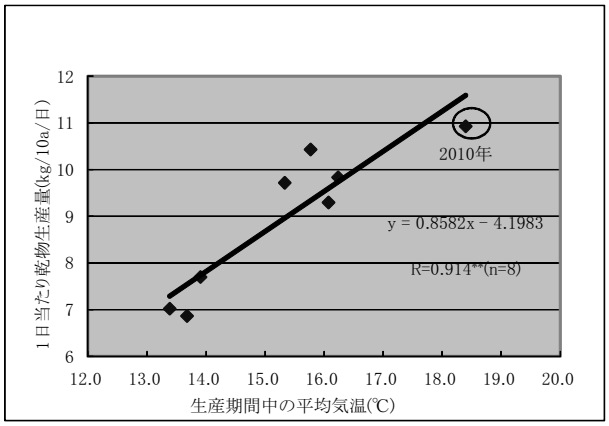
このことから，１日当たりの乾物生産量は生産期間中の平均気温と相関が高く，一方で降水量や日照時間との相関は根釧地域を除いて小さいことが明らかとなった。

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



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

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



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

（２）温暖化に伴う収量変化収量予測

①一次回帰式による収量予測

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

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

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

※1　現行の北海道向け品種では増収しないと仮定。
※2　地域の作付面積割合を考慮して算出。

②品種変更による収量予測

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

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

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

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

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

４）技術的対応方向

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

（１）とうもろこし播種の早期化

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

（２）適正な施肥と雑草防除の実施

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

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

（３）適期収穫の実施

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

（４）飼料給与技術の改善

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

（５）気温条件に適合した品種の開発

北海道の飼料用とうもろこし品種群の第一の育種目標であった耐冷性の向上に加えて，昇温傾向に対応した生育持続性を有する品種の開発が重要となる。

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

５）まとめ

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

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

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

（寺見 裕）