第５章　低水分ストレスの影響を組み込んだ牧草の乾物生産予測モデルの開発とその活用

第１節　モデルの開発

１．はじめに

第３章では，重粘土草地の土壌水分動態を解析し，下層土から根圏土層への水分供給が乾燥期の牧草生育に重要な意義を持つことを，また第４章では，低水分ストレスを受けるとその影響が後の収量にまで及ぶような特定の生育時期を，オーチャードグラスの各番草について明らかにした。

本節では，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を定量的に評価する手法を開発するため，第３，４章で得られた知見および既往の成果を統合して，土壌水分条件を重要な要因とする低水分ストレスの影響を組み込んだオーチャードグラスの乾物生産予測モデルを開発し，その妥当性を検証する[62]。

２．乾物生産予測モデルの開発

１）モデルの概要

乾物生産にかかわる水移動過程に着目し，①降雨の土壌への浸入と土層間での水の再分配，②土層へ再分配された水分の牧草根による吸収，③牧草根の吸水に対応した乾物生産の３つの過程を数式で表してモデル化した。

本モデルでは，それぞれのプロセスを①「土壌中の水移動」，②「根の吸水」，③「乾物生産」の３つのサブモデルとして記述した（図５－１）。実際の計算はそれぞれのサブモデルが密接に関連しながら進められる。各サブモデル中の数式にはいずれも土壌水分条件を変数として組み込み，低水分ストレスの影響がモデル全体に反映されるようにした。なお，本モデルでは，十分な施肥が行われ，養分条件が牧草生育の制限因子とならないような草地を対象とする。

モデルへの主な入力項目は以下の通りである（図５－１）。気象データとして日降雨量・日平均気温・日照時間，土壌物理性の特性値としてマトリックポテンシャルと体積水分率および透水係数との関係，牧草の特性値として根系分布である。これらをモデルへ入力すると，深さ別の土壌水分量，蒸発散量，牧草乾物重の経日変化が出力される。

以下に，各サブモデルの内容を述べる。

２）サブモデルの内容

⑴　土壌中の水移動サブモデル

このサブモデルでは，深さ別の土壌水分量を計算する。一般に土壌水分量は深さにより異なるため，土壌を厚さ５cmの土層に分割し，それぞれの５cm土層内の水分含量を均一と見なした（図５－１）。土層は上から順に，第１層，第２層，・・・とし，根圏土層の最下端を第N層，シミュレーション対象土層の最下端を第Z層と

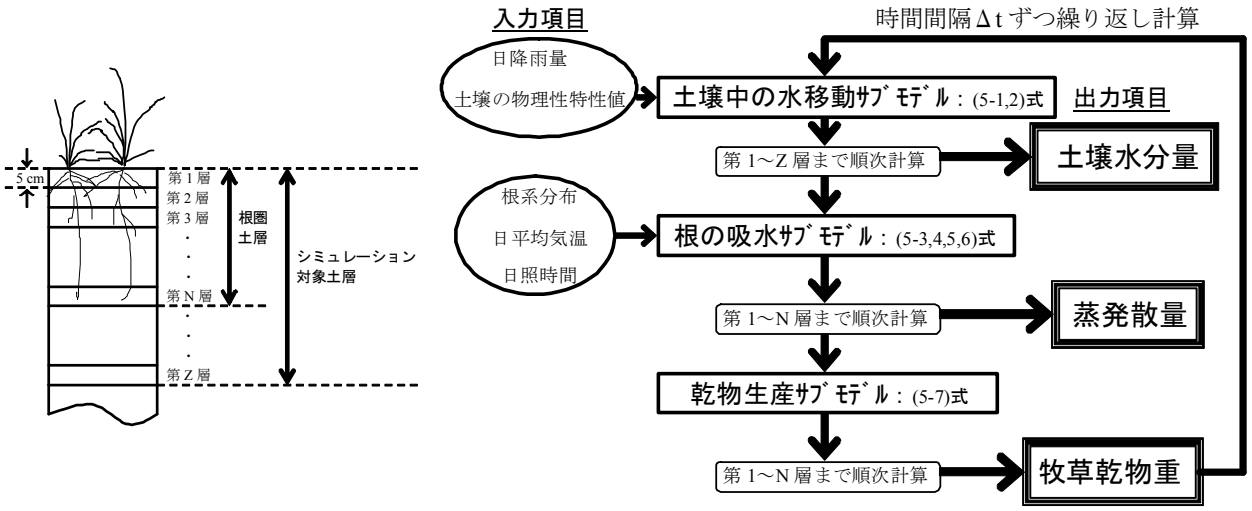

図５－１　牧草の乾物生産予測モデルの概念図

第N層は根圏土層の最下端土層，第Z層はシミュレーション対象土層の最下端土層で，本モデルではそれぞれ60 cm，100 cmとした．図中の数式の番号は本文を参照．

呼ぶ。

各土層の土壌水分量は，乙間ら[70]の方法に準じ，差分近似式を用いて以下のように求めた。時刻 j における第 i 層（i≧1）の体積水分率W(i, j)（$cm^3\ cm^{-3}$）は，各土層での水収支に基づき，次のように表される。

$$W(i, j)=W(i, j-1) + \{F(i-1, j)-F(i, j)\} \times \Delta t /5 \quad (5-1)$$

ここで，F(i, j)：時刻 j における第 i 層から第(i+1)層への水フラックス（$cm\ d^{-1}$），Δt：時間間隔（d）である。数値 5 は土層の厚さ（cm）を意味し，これで右辺第 2 項を除することで単位変換を行っている。なお，i =1のとき,（5－1）式には第 0 層から第 1 層への水フラックスF(0, j)が現れるが，F(0, j)は時刻 j における降雨強度（$cm\ d^{-1}$）に等しいとする。

（5－1）式における水フラックスF(i, j)は，鉛直下向きを正として，次のダルシー則から求めた。

$$F(i, j)=-K(i, j)\times[\{H(i+1, j)-H(i, j)\} / 5-1] \quad (5-2)$$

ここで，K(i, j)：時刻 j における第 i 層と第（i+1）層の境界での透水係数（$cm\ d^{-1}$），H(i, j)：時刻 j における第 i 層のマトリックポテンシャル（cm）である。K(i, j)は第 i 層および第（i+1）層の透水係数の調和平均[68]として与えた。

なお，第 3 章で検討した根圏土層と下層土間の水フラックスの影響をモデルに取り込むため,（5－1）式の計算は第Z層まで行い，根圏土層以深の下層土の水分動態もシミュレーションの対象とした（図 5－1）。また同章の灰色台地土で示唆された地下停滞水から根圏土層への水供給については，停滞水位の変動と水供給量との関係が必ずしも明瞭でなく（図 3－3 a，c）その原因も判然としなかったため，モデルへの取り込みは困難と判断し，停滞水の動態はモデル化の対象から除外した。

⑵　根の吸水サブモデル

このサブモデルでは，各土層の根の吸水量を求める。一般に，根の吸水量は土壌水分の減少（マトリックポテンシャルの減少）とともに低下することが知られている[12]。そこで，時刻 j における第 i 層の根の吸水量S(i, j)（$cm^3\ cm^{-3}$）を以下のように表した

$$S(i, j) = MAXS(i, j) \times A(i, j) \quad (5-3)$$

ここで，MAXS(i, j)：時刻 j における第 i 層の根の最大吸水量（$cm^3\ cm^{-3}$），A(i, j)：土壌水分による根の吸水量の補正係数（0～1 の値：無次元）である。

補正係数 A(i, j) は，各土層のマトリックポテンシャルの関数として図 5－2 のように設定した。すなわち，マトリックポテンシャルが生長阻害水分点とされる−1000 cm以上のとき 1，永久しおれ点とされる−16000 cmのとき 0 とし，−1000～−16000 cmの範囲では土壌水分の低下により吸水量が直線的に抑制され，最終的には吸水が停止するとした。ここで設定した数値は本モデル独自のものである。

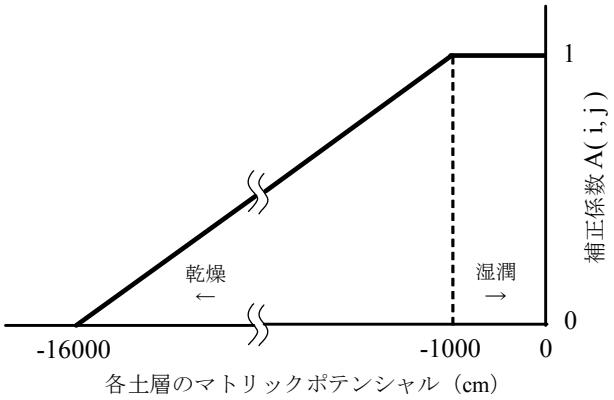

図５－２　根の吸水量の補正係数A (i, j)とマトリックポテンシャルとの関係

A (i, j)は第i 層の時刻j における補正係数で無次元.

（5－3）式における第 i 層の根の最大吸水量MAXS（i, j）は，de Jong and Kabat [38]の方法に準じて，次式のように可能日蒸発散量（蒸散量＋土壌面蒸発量）を各土層に割り振って与えた。これは，草地では土壌面蒸発量が極めて小さいため，蒸散量≒蒸発散量と見なせる[79]からである。

$$MAXS(i, j) = PET \times B(j) \times SMEP(i) \times \Delta t / 5 \quad (5-4)$$

ここで，PET：可能日蒸発散速度（$cm\ d^{-1}$），B(j)：時刻 j におけるPETの補正係数（0.25～1 の値：無次元），SMEP(i)：根圏土層全体からの吸水量に対する第 i 層での吸水量割合（無次元），Δtと数値 5 は（5－1）式と同様である。次に（5－4）式右辺の各項の算出法を示す。

①PET：可能日蒸発散速度

PETは，一般に利用されている簡易な次式[20,87]から求めた。

$$PET = 0.0075 \times (1.8\times T+32) \times Rs / L \quad (5-5)$$

ここで，T：日平均気温（℃），Rs：日射量（$J\ cm^{-2}\ d^{-1}$），L：蒸発の潜熱（2499－2.5×T：$J\ cm^{-3}$）である。Rsは，大槻ら[71]の方法に従って，次式のように日照時間から推定した。

$$Rs = Ra\times(a+b\times n / N) \quad (5-6)$$

ここで，Ra：大気外日射量（$J\ cm^{-2}\ d^{-1}$），n：日照時間（h），N：可照時間（h），aおよびb：回帰係数である。なお，a，bの値は大槻ら[71]を参考にa = 0.20，b = 0.51とし，RaおよびNは対象とする地点の緯度等から算出した。

②B(j)：PETの補正係数

B(j)は牧草乾物重の関数として図５－３のように与えた。可能日蒸発散速度であるPETとは，植物の現存量が十分で，かつ土壌水分が潤沢なときの日蒸発散速度と定義されている[66]。このため，牧草の生育量が少ない時，つまり植物の現存量が十分でない期間には，実際の蒸発散速度はPETよりも小さくなる[78]。このときの植物現存量はRitchie[73]によれば葉面積指数でおよそ３程度であり，これを牧草の乾物重に換算すると150 g m^{-2}前後に相当する[38]。そこで本モデルでは，牧草乾物重が150 g m^{-2}より多いときには十分な現存量と考えてB(j)を１とし，これより少ない時はB(j)を1以下とした。なお，牧草乾物重が０g m^{-2}の時（刈り取り直後）のB(j)を０としなかったのは，草地では刈り取り直後にも牧草の茎基部からの蒸発散があるためである。このときのB(j)はde Jong and Kabat[38]の値を参考に0.25と設定した。以上のような補正係数をPETに乗ずることにより，日蒸発散速度を制限するようにした。

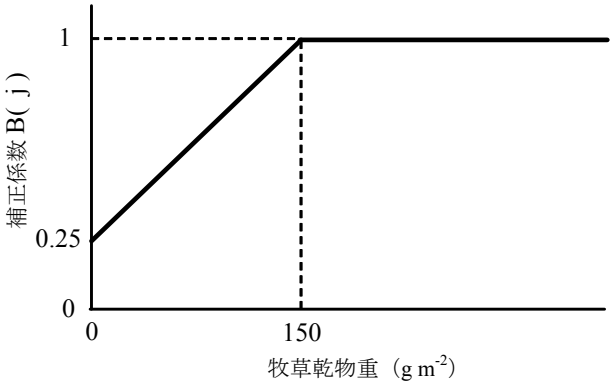

図５－３　可能日蒸発散速度の補正係数B(j)と牧草乾物重との関係

B(j)は時刻 j における補正係数で無次元.

③SMEP(i)：根圏土層全体からの吸水量に対する第i層での吸水量割合

本モデルでは，SMEP(i)は根量に依存すると仮定し，次のように定義した。すなわち，一般に牧草根は表層に多く分布し深さとともに急激に減少する[69]ため，牧草根量を土壌深度の増加とともに減少するような関数で相対値として表し，根圏土層中の全根量に対する第 i 層の根量の比をSMEP(i)とした。相対根量を表す関数には，土壌深度を x（cm），相対根量を y（無次元）として，y = 1 /（1+kx）を用いた（図５－４）。この関数式は本モデルで独自に設定したものである。kは任意の正の定数で，この値が大きいほど土壌深度の増加に伴う根量の減少が急激となる。なお，本モデルでは牧草根の分布に関する既往の文献[37,69]を参考にして k の値を1/3とした。

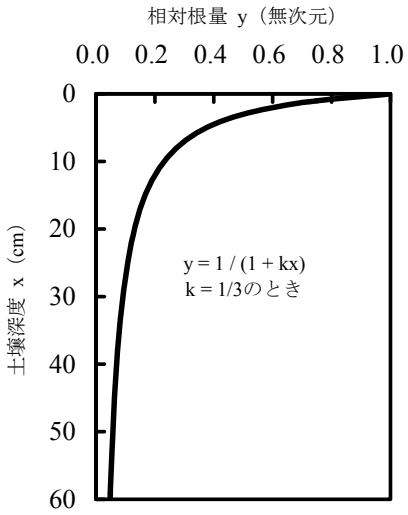

図５－４　モデルで用いた土壌深度と相対根量との関係

本モデルではk＝1／3 のとき，0 ～20 cm，20～40 cm，40～60 cmの各土層からの吸水割合は，およそ５ ： ２ ： １となる.

⑶　乾物生産サブモデル

このサブモデルでは，乾物生産量を牧草の水利用効率と根の吸水サブモデルで求めた根の吸水量とから算出する。すなわち，（乾物生産量）＝（根の吸水量）×（水利用効率）とした。一般に，水利用効率は環境条件の影響を受けにくく一定とされることが多い[81]。しかし，例えばイネの水利用効率については，土壌水分条件などによってほとんど変化しないとの報告[1,42]に対し，水分の低下に連れていったん大きくなった後に小さくなるとの指摘[30]もある。牧草に関しては，Stout et al.[96]がトールフェスク（*Festuca arundinacea* Schreb.）の水利用効率は土壌水分が多いと大きくなることを示唆している。また，著者らが北海道北部の重粘土に生育するオーチャードグラスについて調査したところ，土壌水分の低下につれて，水利用効率も低下する傾向が認められた[60]。

そこで，本モデルでは著者らの結果[60]を採用し，水利用効率は土壌水分条件で変化するとして，乾物生産量を以下のように定義した。

$$DM(i, j) = 5 \times S(i, j) \times MAXWUE \times C(i, j) \quad (5-7)$$

ここで，DM(i, j)：時刻 j における第 i 層の吸水による乾物生産量（g m^{-2}），S(i, j)：時刻 j における第 i 層の根の吸水量（cm^3 cm^{-3}），MAXWUE：牧草の最大水利用効率（g m^{-2} cm^{-1}），C(i, j)：土壌水分によるMAXWUEの補正係数（０～１：無次元）である。数値５は土層の厚さ（cm）で，S(i, j)の単位を変換するために乗じている。今回対象としたオーチャードグラスのMAXWUEは，北海道北部での試験例[29]を参考にして，１，２，３番草についてそ

れぞれ50，35，40 g m^{-2} cm^{-1}とした。

MAXWUEの補正係数C(i, j)は，根の吸水量の補正係数A(i, j)と同様に，各土層のマトリックポテンシャルの関数として本モデル独自に図５－５のように設定した。すなわち，補正係数 C(i, j) を，マトリックポテンシャルが−3000 cm以上で1，−16000 cmのとき 0 とし，−3000〜−16000 cmの範囲では土壌水分の減少につれて水利用効率が直線的に低下するようにした。ただし，前章の試験によって明らかとなった，乾物生産に対して低水分ストレスの影響が敏感に現れる各番草の再生初期（一律に20日間とした）については,−3000 cmより多水分であっても水利用効率が低下し始めるようにするために, C(i, j)をA(i, j)と同じく−1000 cm以下で 1 より小さくなるとした。

（５－３）式,（５－７）式および図５－２，５－５から理解されるように，本モデルの主な特徴は，土壌水分の減少に伴う乾物生産量の減少が，補正係数A(i, j)による根の吸水量の減少と，補正係数C(i, j)による水利用効率の低下との双方により引き起こされるとした点にある。

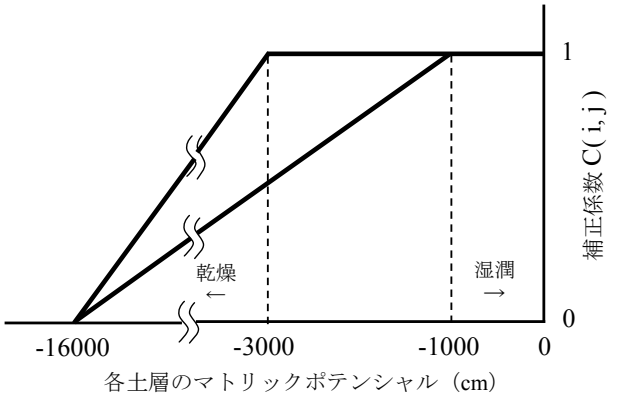

図５－５　最大水利用効率の補正係数C (i, j)とマトリックポテンシャルとの関係

C(i, j)は第 i 層の時刻 j における補正係数で無次元．各番草の再生初期20日間についてはマトリックポテンシャルが−1000 cm以下で，その他の期間については−3000 cm以下でC(i, j)が 1 より小さくなると設定.

３．シミュレーション

開発したモデルが牧草の乾物生産に対する低水分ストレスの影響を適切に表現しているかどうかを検討するため，気象および土壌条件の異なる２つの草地について，1992年から1994年，特に干ばつ年であった1993年を中心にシミュレーションを行った。

１）対象草地と実測値

対象草地は，第３章で供試した，天北農業試験場内の褐色森林土に立地するオーチャードグラス草地（更新後６年目）と，北海道農業試験場畑作研究センター内の灰色台地土に立地する同草地（同３年目）である。北海道施肥ガイド[27] に従って十分な施肥を行っているため，モデルの前提条件（養分条件が牧草生育の制限因子になっていない）を満たしていると判断した。

モデル検証のための実測値には，1992〜1994年の３カ年の牧草乾物重，土壌水分量および蒸発散量のデータを用いた。調査方法は以下の通りである。牧草乾物重は，各番草の再生初期から収穫期までほぼ１週間に１回の頻度で１m^2を刈り取って求めた（ただし1994年は収穫期のみ調査）。このとき，同地点の土壌を深さ60 cmまで10 cmごとに採土して土壌水分量を測定し，20 cm土層ごとに平均値を算出した。また，これに隣接する地点で深さ70および90 cmに埋設したテンシオメータによりマトリックポテンシャルを測定して表５－１により土壌水分量に換算し，各々を60〜80 cmおよび80〜100 cm土層の水分量とした。牧草乾物重と土壌水分の測定はいずれも４反復で行った。蒸発散量は第２章第２節－２－２）－（２）に述べた方法で，生育期間を通じて連続的に測定した。

調査年次のうち1993年は，牧草生育期間（５〜９月）の降雨量が褐色森林土で平年の55％（257 mm），灰色台地土で同70％（316 mm）といずれの草地でも少なく，明らかな干ばつ年であった。一方，1992，1994年の同期間の降雨量は，褐色森林土と灰色台地土でそれぞれ平年の119〜136％（557〜638 mm），135〜143％（606〜644 mm）で，両年とも湿潤であった。

２）計算条件

⑴　土壌の物理性

土壌水分量のシミュレーション対象土層（図５－１）は，第３章で明らかとなった乾燥期の牧草生育に対する下層土の寄与を考慮し，深さ100 cmまでとした。根圏土層深については後述する。マトリックポテンシャルと体積水分率の関係は表５－１の通りである。マトリックポテンシャルと透水係数との関係は実測値がなかったので，岩間[37] が類似土壌について示した値を参考に，Gardner[8] の経験式に従いマトリックポテンシャルの累乗関数で与えた（表５－２）。

⑵　根圏土層と根系分布

根圏土層（図５－１）は，土壌断面調査時（1991年９月）に根の存在が確認された深さ60 cmまでとした。また，断面調査時の根系分布の観察から，相対根量を表す関数の k の値には類似土壌での牧草根の分布に関する文献値[37, 69] が適用可能と判断し，k= 1/3 とした（図５－４）。この場合，0 〜20 cm，20〜40 cm，40〜60 cm土層からの吸水割合はおよそ５：２：１となる。

表５－１　マトリックポテンシャルと体積水分率（$cm^3\ cm^{-3}$）の関係

土壌	土層（cm）	マトリックポテンシャル（cm） -1	-60	-160	-500	-1600	-6300	-16000
褐色森林土	0～20	0.539	0.368	0.337	0.312	0.294	0.247	0.213
	20～40	0.659	0.489	0.471	0.450	0.429	0.400	0.349
	40～60	0.543	0.473	0.467	0.456	0.443	0.412	0.375
	60～80	0.571	0.513	0.510	0.504	0.496	0.465	0.433
	80～100	0.589	0.525	0.521	0.513	0.505	0.469	0.435
灰色台地土	0～20	0.484	0.371	0.355	0.341	0.315	0.246	0.184
	20～40	0.462	0.384	0.373	0.364	0.351	0.269	0.201
	40～100	0.434	0.403	0.402	0.398	0.391	0.365	0.346

表５－２　マトリックポテンシャルと透水係数の関係

土壌	土層（cm）	透水係数（$cm\ d^{-1}$）
褐色森林土	0～20	$1.57\times10^{2}\times h^{-1.5}$
	20～40	$8.81\times10^{0}\times h^{-1.5}$
	40～100	$4.68\times10^{1}\times h^{-1.5}$
灰色台地土	0～20	$8.64\times10^{1}\times h^{-1.5}$
	20～40	$8.64\times10^{0}\times h^{-1.5}$
	40～100	$8.64\times10^{-1}\times h^{-1.2}$

h：マトリックポテンシャルの絶対値（cm）

⑶　気象データ

日降雨量，日平均気温および日照時間には，褐色森林土では浜頓別町のアメダスデータを，灰色台地土では北海道農業試験場畑作研究センター露場での観測値を使用した。日降雨は１日の間に平均して起こると仮定し，１日の降雨量を時間間隔Δtで割り振って計算に用いた。

３）計算手順

まず，土壌中の水移動サブモデル（（５－１），（５－２）式）で各土層の土壌水分量を求める（図５－１）。各土層の体積水分率の初期値（５月１日の値）は，この時期が北海道北部では融雪直後にあたるため，マトリックポテンシャルで−60 cm（おおむね圃場容水量）の値とした。下部境界条件としては，シミュレーション期間中の最下端土層（第Z層，深さ95～100 cm）付近の体積水分率の実測値（平均値±標準偏差）が，褐色森林土で0.528±0.011 $cm^3\ cm^{-3}$（n=19），灰色台地土で0.418±0.016 $cm^3\ cm^{-3}$（n=21）と変動が小さくかつ初期値に近かった（表５－１）ことから，乙間ら[70]に準じ，第Z層の水分量は初期値のまま一定とした。次に，根の吸水サブモデル（（５－３）～（５－６）式）により，土壌水分量と気象データおよび根系分布に対応した吸水量を各土層について計算する。これらの吸水量を根圏土層で積算したものが蒸発散量である。引き続き，乾物生産サブモデル（（５－７）式）により，各土層の吸水量および水分量に基づいて乾物生産量を土層ごとに計算し，これらを根圏土層で積算して全乾物生産量を求める。最後に，各土層の水分量から吸水量を差し引いて，次の時刻の土壌水分量を求める。以上の計算を，初期値から時間間隔Δtずつ時刻を進めて繰り返し，土壌水分量，蒸発散量，牧草乾物重の経日変化パターンを得た。なお，シミュレーションの前に予備計算を行ったところ，時間間隔Δtを大きくすると計算結果が発散することがあった。試行錯誤の結果，Δtには0.01 dが適当であったので，この値を用いることにした。

４．結　果

干ばつ年であった1993年のシミュレーション結果を，図５－６（褐色森林土）および図５－７（灰色台地土）に実測値とともに示した。

牧草乾物重の推定値は，褐色森林土，灰色台地土の１，２，３番草とも，実測値の推移とおおむね対応していた（図５－６a，図５－７a）。しかし，灰色台地土の１および３番草の最終的な乾物重や褐色森林土の３番草の８月下旬～９月中旬のように，推定値と実測値の間に明らかな差異が認められることもあった。土壌水分の減少に伴う根の吸水量の低下（A(i, j)が1以下），または根の吸水量と水利用効率の双方の低下（A(i, j)とC(i, j)がともに１以下）により乾物生産が抑制された期間（図５－６，図５－７のそれぞれ破線および実線の期間）は，褐色森林土では主に２番草生育後期の７月中旬～８月中旬，灰色台地土では１番草生育後期から２番草生育初期の５月下旬～６月下旬および２番草生育後期以降の７月中旬～９月下旬であった。このように，低水分ストレスで乾物生産が抑制された期間は灰色台地土の方が長かったものの，年間合計の推定牧草乾物重は褐色森林土が958 $g\ m^{-2}$，灰

色台地土が996 g m^{-2}で両者に大差はなかった。この一因として，灰色台地土における可能日蒸発散速度（PET，5－5式）が褐色森林土よりも全般に大きかったことが考えられる。

蒸発散量の推定値は，牧草乾物重と同様に，実測値の推移とほぼ対応していた（図5－6b，図5－7b）。ただし，いずれの草地も，2および3番草の再生初期に相当する6月中～下旬および8月中～下旬は，推定値が実測

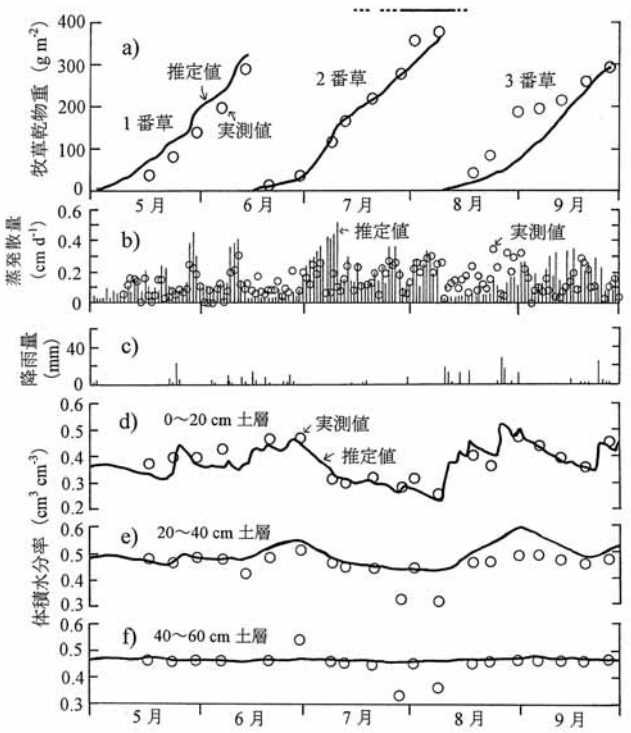

図5－6　干ばつ年の褐色森林土におけるモデルの推定値と実測値との比較

1993年，オーチャードグラス草地，年3回刈り．
a：牧草乾物重，b：蒸発散量，c：降雨量，d～f：体積水分率（d：0～20 cm土層の平均値，e：同20～40 cm，f：同40～60 cm）．
最上部の破線は根の吸水量の補正係数A(i, j)が，また実線はA(i, j)および最大水利用効率の補正係数C(i, j)が1以下となった期間を意味する．

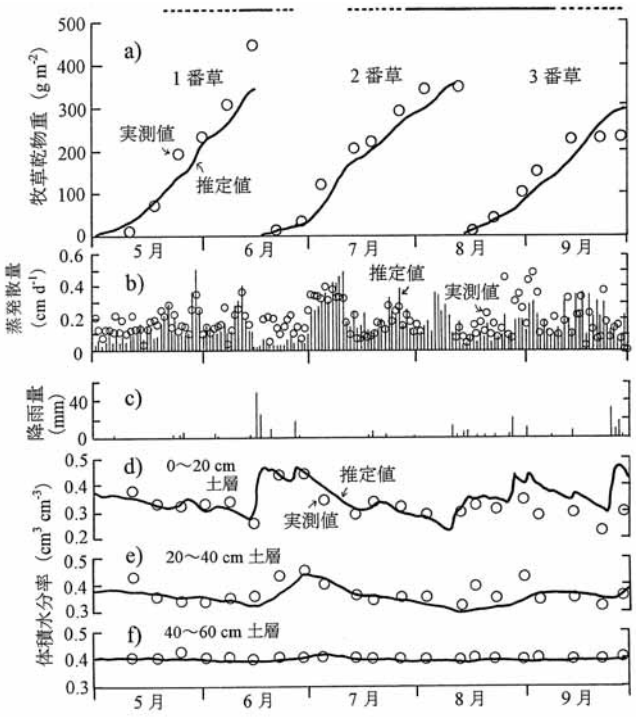

図5－7　干ばつ年の灰色台地土におけるモデルの推定値と実測値との比較

1993年，オーチャードグラス草地，年3回刈り．
a：牧草乾物重，b：蒸発散量，c：降雨量，d～f：体積水分率（d：0～20 cm土層の平均値，e：同20～40 cm，f：同40～60 cm）．
最上部の破線は根の吸水量の補正係数A(i, j)が，また実線はA(i, j)および最大水利用効率の補正係数C(i, j)が1以下となった期間を意味する．

表5－3　60 cm以深土層の体積水分率の推定値と実測値との比較（1993年）

褐色森林土							灰色台地土						
日付	60～80 cm土層			80～100 cm土層			日付	60～80 cm土層			80～100 cm土層		
	推定値	実測値	Δ[1]	推定値	実測値	Δ[1]		推定値	実測値	Δ[1]	推定値	実測値	Δ[1]
5/17	0.511	0.528	-0.017	0.525	0.532	-0.007	5/11	0.403	0.434	-0.031	0.403	0.434	-0.031
5/24	0.511	0.514	-0.003	0.525	0.528	-0.003	5/18	0.402	0.434	-0.032	0.403	0.434	-0.031
5/31	0.512	0.535	-0.023	0.525	0.569	-0.044	5/25	0.401	0.434	-0.033	0.403	0.434	-0.031
6/7	0.512	0.515	-0.003	0.525	0.528	-0.003	6/1	0.400	0.411	-0.011	0.403	0.434	-0.031
6/21	0.513	0.513	0.000	0.525	0.525	0.000	6/8	0.399	0.403	-0.004	0.403	0.434	-0.031
6/30	0.513	0.558	-0.045	0.525	0.534	-0.009	6/15	0.399	0.403	-0.004	0.402	0.404	-0.002
7/9	0.512	0.521	-0.009	0.525	0.534	-0.009	6/22	0.399	0.403	-0.004	0.403	0.404	-0.001
7/13	0.511	0.513	-0.002	0.525	0.531	-0.006	6/29	0.401	0.430	-0.029	0.403	0.434	-0.031
7/21	0.511	0.509	0.002	0.524	0.524	0.000	7/5	0.404	0.432	-0.028	0.403	0.434	-0.031
7/29	0.511	0.509	0.002	0.524	0.523	0.001	7/14	0.402	0.434	-0.032	0.403	0.434	-0.031
8/2	0.511	0.504	0.007	0.524	0.520	0.004	7/19	0.401	0.430	-0.029	0.403	0.434	-0.031
8/9	0.510	0.503	0.007	0.524	0.517	0.007	7/27	0.400	0.403	-0.003	0.403	0.404	-0.001
8/19	0.512	0.506	0.006	0.525	0.520	0.005	8/3	0.399	0.402	-0.003	0.403	0.402	0.001
8/24	0.513	0.508	0.005	0.525	0.520	0.005	8/13	0.398	0.399	-0.001	0.402	0.404	-0.002
9/1	0.513	0.513	0.000	0.525	0.527	-0.002	8/17	0.398	0.398	0.000	0.402	0.404	-0.002
9/7	0.515	0.518	-0.003	0.526	0.528	-0.002	8/23	0.399	0.399	0.000	0.402	0.403	-0.001
9/13	0.513	0.516	-0.003	0.525	0.529	-0.004	8/31	0.399	0.401	-0.002	0.402	0.434	-0.032
9/20	0.513	0.512	0.001	0.525	0.524	0.001	9/4	0.398	0.401	-0.003	0.401	0.402	-0.001
9/27	0.512	0.510	0.002	0.525	0.523	0.002	9/14	0.398	0.401	-0.003	0.402	0.404	-0.002
							9/22	0.399	0.402	-0.003	0.403	0.404	-0.001
							9/28	0.399	0.403	-0.004	0.403	0.405	-0.002
平均	0.512	0.516	-0.004	0.525	0.528	-0.003	平均	0.400	0.412	-0.012	0.403	0.418	-0.015
SD[2]	0.001	0.013	0.013	0.001	0.011	0.011	SD[2]	0.002	0.015	0.013	0.001	0.016	0.015

[1] 実測値－推定値，[2] 標準偏差．

値を下回る傾向を示した。

土壌水分量の推定値は5 cm土層ごとに算出したが，実測値との比較のために，20 cm土層ごとの平均値を示した（図５－６d～f，図５－７d～f）。褐色森林土の20～40 cm土層の８月以降および灰色台地土の０～20cm土層の９月以降で推定値が実測値を上回ったのを除けば，両草地のいずれの土層深度でも，推定値と実測値は比較的良く一致した。また，60 cm以深の土層も同様に実測値との対応は良好であった（表５－３）。

モデルが干ばつ年だけでなく湿潤年にも適合するかどうかを検討するため，両草地について，湿潤年を含む1992～1994年の３カ年の牧草乾物重の推定値と実測値の関係を図５－８に示した。推定値（y）と実測値（x）の間には，土壌の種類と年次に関係なく，$y = 0.906x + 3.19$（$R^2 = 0.880$）の関係が認められた。すなわち，推定値は実測値を10％程度下回っていたものの，両値の間には極めて高い直線性が示された。

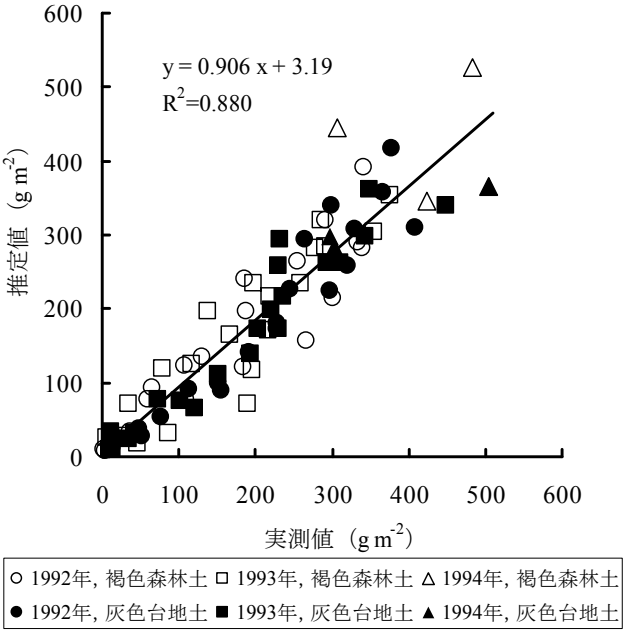

図５－８　３ヵ年にわたる牧草乾物重の推定値と実測値との関係
各番草の生育途中のデータも含む．1993年は干ばつ年．

５．考　察

モデルでは，低水分ストレスによる乾物生産量の低下を，根の吸水量と水利用効率の双方の減少によって表現した。この考え方の妥当性を以下に考察する。

土壌水分が減少してある値を下回ると根の吸水量も減少することは，一般に良く知られている[3,9]。根の吸水量が減少し始める土壌水分レベルは日射量や大気の温湿度などで変化しやすい[3]が，マトリックポテンシャルで−1000～−10000 cmの範囲であることが多い[9]。本モデルでは，この限界値として−1000 cmを採用した（図５－２）。

シミュレーションの結果を見ると，根の吸水量の積算値である蒸発散量，および根の吸水量の影響が強く反映される深度別の土壌水分量の推定値は，褐色森林土，灰色台地土ともに実測値の推移とほぼ一致していた（図５－６d～f，図５－７d～f）。このように，モデルの推定値と実測値が良く適合したことから判断すると，根の吸水量が減少し始める土壌水分としてモデルに与えたマトリックポテンシャル−1000 cmという限界値は，本モデルではおおむね適切であったと考えられる。この限界値は，既往の報告[9]で示された範囲内では最も多水分であるが，古くから水分恒数として使われてきた生育阻害水分点に該当するうえ，長谷川[13]が提案した正常な植物生育を維持するための土壌水分の下限値とも一致しており，ほぼ妥当な値であろう。さらに，試験期間を通じてこの限界値を一定にしたにも関わらず，モデルによる蒸発散量および土壌水分量の推定値と実測値との間に大差が認められなかったことから，根の吸水量が低下する土壌水分レベルとした−1000 cmという値は，本モデルにおいては日射量や大気の温湿度等の外的要因の影響を受けにくいということも示唆された。

なお，褐色森林土，灰色台地土ともに，２および３番草の再生初期に当たる６月中～下旬，８月中～下旬の蒸発散量の推定値は実測値を下回る傾向を示した（図５－６b，図５－７b）。これらの期間は牧草の乾物重が150 g m^{-2}以下で（図５－６a，図５－７a），可能蒸発散速度の補正係数B(j)（図５－３）の影響が及ぶ期間と合致する。したがって，この期間の実測値と推定値の不一致は，B(j)と牧草乾物重との関係を各番草の生理・形態の違い（例えば出穂茎の有無など）に関係なくいずれの番草にも共通としたことや単純な直線関数で与えたことなど，B(j)の設定に起因している可能性が考えられる。

一方，本モデルに取り入れたもう１つの考え方，すなわち土壌水分の減少に伴って水利用効率が低下することについては，本章第１節２－２）－（３）「乾物生産モデル」においてすでに述べたように，見解が別れている。しかし，シミュレーションによる牧草乾物重の推定値は，両草地のいずれの番草とも実測値とおおむね一致していた（図５－６a，５－７a）。なかでも水利用効率の低下により乾物生産が抑制されるとした期間（図５－６，図５－７の最上段の実線）が比較的長かった灰色台地土の２，３番草の推定値は，３番草の最終的な値を除けば，実測値の推移と良く対応していた（図５－７a）。また，同期間の短かった褐色森林土でも，この期間を含む２番

草の推定値は実測値と良く合致していた（図５－６a）。このようにモデルによる牧草乾物重の推定値が実測値と良く一致したという事実は，土壌水分の減少に伴って水利用効率が低下するという考え方が，少なくとも本モデルにおいては妥当であったことを示している。

以上の考察により，本モデルに取り入れた２つの考え方は，牧草の乾物生産に対する低水分ストレスの影響を表現するのに適当であったと考えられる。しかも，図５－８に示したように，モデルが干ばつ年だけでなく湿潤年にも十分適合したことから判断すると，本モデルは比較的広い範囲の土壌水分条件に対して適用できる汎用性の高いモデルであると指摘できる。

最後に，本モデルの問題点をいくつか挙げておく。まず，モデルで考慮しなかった重要な作物側の要因として，根の生長がある。多年生作物である牧草は，刈り取りによる分げつの発生・伸長に伴って新しい根が発生するとともに，古い根は枯死・脱落する[69]が，モデルでは新しい根の発生と古い根の枯死・脱落の程度は同じと考えた。つまり，シミュレーションの対象とした期間中は，見かけ上，根量や根系分布に変化はない（図５－４）としたうえで，各土層の吸水割合を根量に比例すると仮定している。次に，モデルの適用対象が主に重粘土であることを考慮すると，土壌中の水移動サブモデルの（５－１）式で，第０層から第１層への水フラックスを降雨強度に等しいとした仮定にも問題が残されている。すなわち，透水性の小さい重粘土[61]の場合，降雨強度が大きいと一時的に地表面湛水が発生する可能性がある。しかし，モデルはこの現象に対応できていない。また，根の吸水量および最大水利用効率の補正係数（A(i, j)，C(i, j)）と土壌水分との関係には，現時点では単純な直線関数を想定しているが（図５－２，５－５），より適切な他の関数型（例えば対数関数など）が存在する可能性も否定できない。さらに，水利用効率が減少し始める土壌水分レベルとして与えたマトリックポテンシャル−3000 cmという限界値は，今のところ試行錯誤により設定した値であり，作物生理学的な根拠が不十分である。灰色台地土の１および３番草の最終的な乾物重や褐色森林土の３番草の生育途中，または褐色森林土の８月以降の20～40 cm土層や灰色台地土の９月以降の０～20 cm土層水分のように，一部の期間でみられた牧草乾物重や土壌水分量の推定値と実測値との差異は，これらの問題点に起因している可能性が考えられる。今後モデルの予測精度をさらに向上させるためには，先に述べた可能蒸発散速度の補正係数B(j)も含め，これらの問題点の再検討と改良が必要であろう。

以上を総括すると，低水分ストレス，すなわち土壌水分の減少による乾物生産量の低下を吸水量と水利用効率の双方の減少によって表現した本モデルは，牧草乾物重，蒸発散量および土壌水分量の実測値をおおむね良く再現でき，牧草の乾物生産に対する低水分ストレスの影響をほぼ適切に表していると結論される。

第２節　地球温暖化による牧草の乾物生産量変化に及ぼす低水分ストレスの影響評価

１．はじめに

大気中二酸化炭素濃度の上昇を主因とする地球温暖化現象がわが国の農業生産におよぼす影響については，イネ，コムギ，トウモロコシなどの穀物類を中心に，気候変動予測値と作物生育モデルを組み合わせたシミュレーションによる研究が行われている[88, 103]。それらの結果を概観すると，用いた気候変化シナリオや作物生育モデルが異なるため予測値に大きな幅があるものの，いずれの作物もおおむね北日本では増収し西日本では減収する傾向が示されている。また，これらの変化への対策として，栽培品種の変更，作期の移動，かんがいシステムの導入などの効果についても検討が行われ[88]，対策技術の開発を今から進めておくことが重要と指摘されている。

一方，地球温暖化がわが国の飼料作物生産に与える影響に関する報告は少なく，佐々木ら[84]が３種の寒地型牧草について100年後の乾物生産量を日本全土にわたって推定した例がある程度である。これによると，いずれの草種についても夏期の高温で生育が停滞する「夏枯れ地帯」が北上・拡大するが，栽培適地での生産量は全般に増加すると推定され，なかでも北海道では大幅な増収が見込まれている。しかし，この予測は，主に気温，日射量，二酸化炭素濃度といった気象要因から推定したもので，土壌水分や降雨量などの水分環境の影響は十分に考慮されていない。一般に，気温の上昇とともに乾物生産量が増加すれば水消費量（蒸散量）も増大する。したがって，保水性に乏しい重粘土が広く分布する北海道北部では，温暖化気候での降雨量が現在と大差ない場合には，気温上昇に伴う牧草生産量の増加，すなわち水消費量の増大により土壌水分の減少が一層進行し，牧草生育に対する低水分ストレスの影響が現在よりも一層強まる可能性が懸念される。

そこで本節では，水分特性が異なる３種類の土壌に生育するオーチャードグラスを想定し，地球温暖化に伴う乾物生産量の変化とそれに及ぼす低水分ストレスの影響を，前節で開発したモデルを活用して検討する[65]。なお，本モデルには乾物生産に及ぼす二酸化炭素濃度の影響は

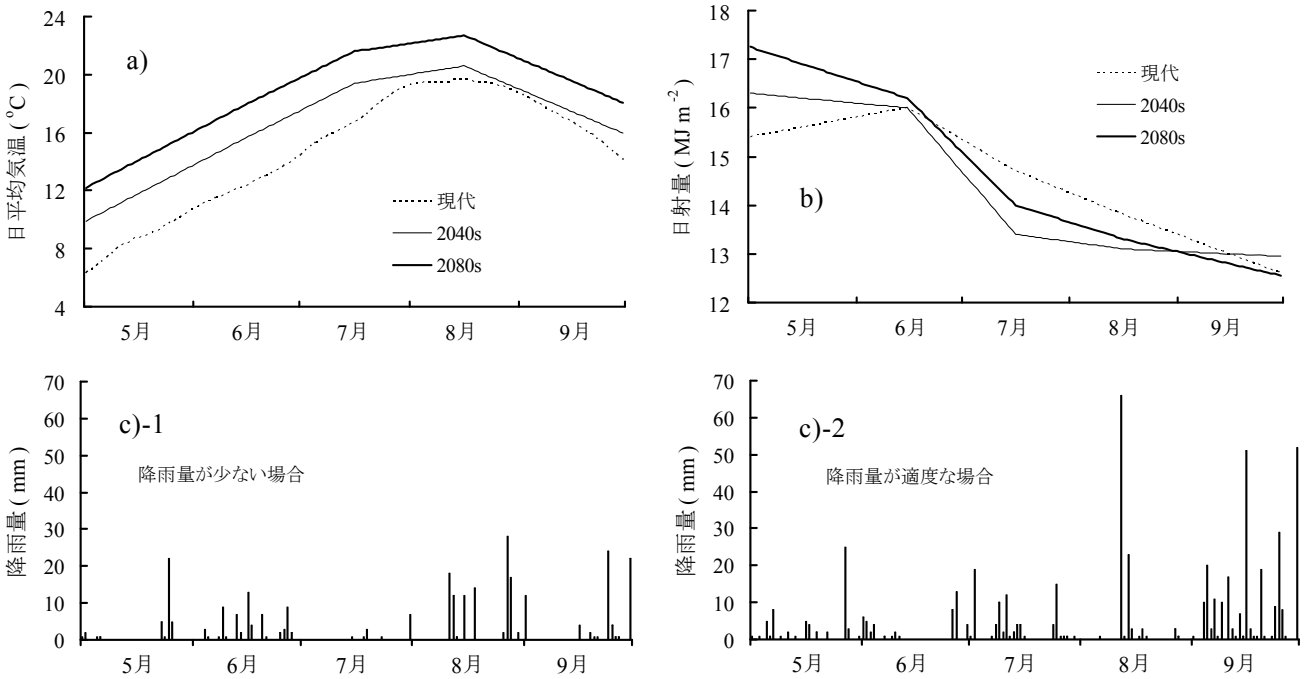

図５－９　シミュレーションに用いた温暖化気候データ
a：日平均気温，b：日射量，c：降雨量（1：少ない場合，2：適度な場合）．c-1は浜頓別町の1993年における，またc-2は同1992年における実測値である．2040s，2080sは各々 2040年代，2080年代を意味する．

組み込まれていない。そのため，ここでは，二酸化炭素濃度上昇が乾物生産に与える直接的な影響[83]については考慮せず，温暖化による気候変動を気温と日射量の変化のみと見なし，これらがオーチャードグラスの乾物生産量の変化に及ぼす影響を低水分ストレスとの関係に着目しながら考察することとする。

２．シミュレーションの条件

１）温暖化気候データ

⑴　日平均気温および日射量

将来の日平均気温および日射量の予測データには，Yokozawa et al.[104]の「気候変化メッシュデータ（日本）」を用いた。これは，IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル）が示した温室効果ガス排出シナリオIS92aに基づき，４つの全球気候モデルで計算した将来の気候変化予測値を日本付近のメッシュデータに再構築したものである。対象となっている気候要素は，平均気温，最低気温，最高気温，降雨量，日射量の５項目で，2000年から2099年まで10年毎に各要素の月別平均値（降雨量は月積算値）が年代ごと（10年間）の平均値として，日本全土の緯度経度を網羅して示されている。

本節では2040年代および2080年代の予測値を利用した。すなわち，オーチャードグラスの生育期間（５～９月）について，本研究が対象とする北海道北部地域（北緯44度30分以北）の全メッシュデータを平均して月別平均値を求めた後，その月別平均値を直線で回帰して毎日の値を推定し，これを同地域における両年代の日平均気温と日射量の予測値とした（図５－９a，b）。対照となる現代の値には，対象地域の現状を的確に表していると考えられる稚内地方気象台の観測による稚内市（北緯45度25分，東経141度41分）の平年値（1971～2000年の平均値）を用いた（図５－９a，b）。図５－９によれば，日平均気温は５～９月まで常に2080年代＞2040年代＞現代であるが，８月以降は2040年代と現代の差が縮まる傾向にある。日射量は，５～６月は2080年代＞2040年代＞現代で，それ以降は９月を除き現代＞2080年代＞2040年代と予測されている。

⑵　降雨量

降雨量データには，本章の前節で示した浜頓別町の1992および1993年における実測値を用いることとした（図５－９c-1，c-2）。将来の降雨量に現代の値を用いた理由は，Yokozawa et al.[104]の「気候変化メッシュデータ（日本）」では降雨量が月積算値で与えられていて日降雨量の入力が必要な本モデルでは直接利用できなかったこと，また同メッシュデータ[104]では温暖化に伴う降雨量の変化は北海道地域では小さいと予測されていることなどから，現代の値を温暖化気候にも適用可能と判断したためである。1993年の降雨量（５～９月）は平年値の55％（257 mm）と少なかったのに対し，1992年は同119％（557

mm）と平年並みであったので，1993年を降雨量が少ない場合，1992年を降雨量が適度な場合と見なした。なお，北海道北部の年間降水量は1100 mm程度で，このうちの300～400 mmは長期積雪期間（11月下旬～４月中旬）の降雪が占めている。

２）土壌条件

粒径の異なる３種類の土壌を想定した。すなわち，粗粒質（粘土含量15％以下），中粒質（同15～45％），細粒質（同45％以上）の３種類とし，それぞれの水分保持特性は，天北農業試験場が過去に実施した北海道北部地域１市４町の地力増進対策土壌調査での測定データ（n＝411），および北海道の農耕地土壌の水分保持特性に関する資料[31]をもとに，図５－10aのように設定した。また，透水係数は，長谷川[15]，岩間[37]の値などを参考に，Gardner[8]の経験式に従って以下のようなマトリックポテンシャルの累乗関数で与えた（図５－10b）。粗粒質：$K=1.3\times10^{3}\times h^{-2.1}$，中粒質：$K=4.4\times10^{1}\times h^{-1.6}$，細粒質：$K=2.0\times10^{0}\times h^{-1.1}$。ここで，K：透水係数（cm d^{-1}），h：マトリックポテンシャルの絶対値（cm）である。

３）気候条件と土壌条件の組み合わせ

以上の気候条件（図５－９）と土壌条件（図５－10）を次のように組み合わせ，合計18のケースについてシミュレーションを行った：日平均気温と日射量３水準（現代，2040年代，2080年代）×降雨量２水準（少，適度）×土壌の種類３水準（粗粒質，中粒質，細粒質）。なお，最大水利用効率，根系分布に関する入力値およびモデルの計算手順等は前節に示した図５－１，５－４と同様である。

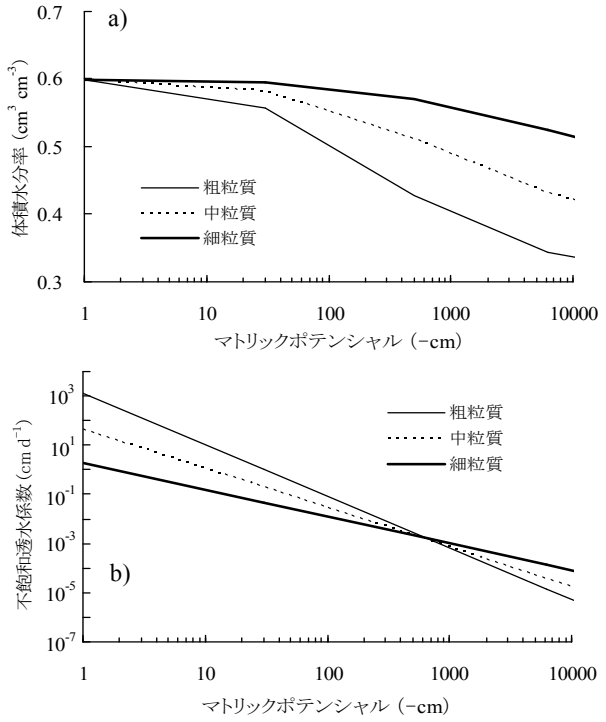

図５－10　シミュレーションに用いた各土壌（粗粒質，中粒質，細粒質）のマトリックポテンシャルと体積水分率（a）または不飽和透水係数（b）との関係

３．結　果

１）牧草乾物重と蒸発散量

牧草乾物重と蒸発散量の推定値をそれぞれ図５－11，５－12に示した。

粗粒質および中粒質土壌の１番草の乾物重は，降雨量の多少にかかわらず温暖化により顕著に増加し，2040年

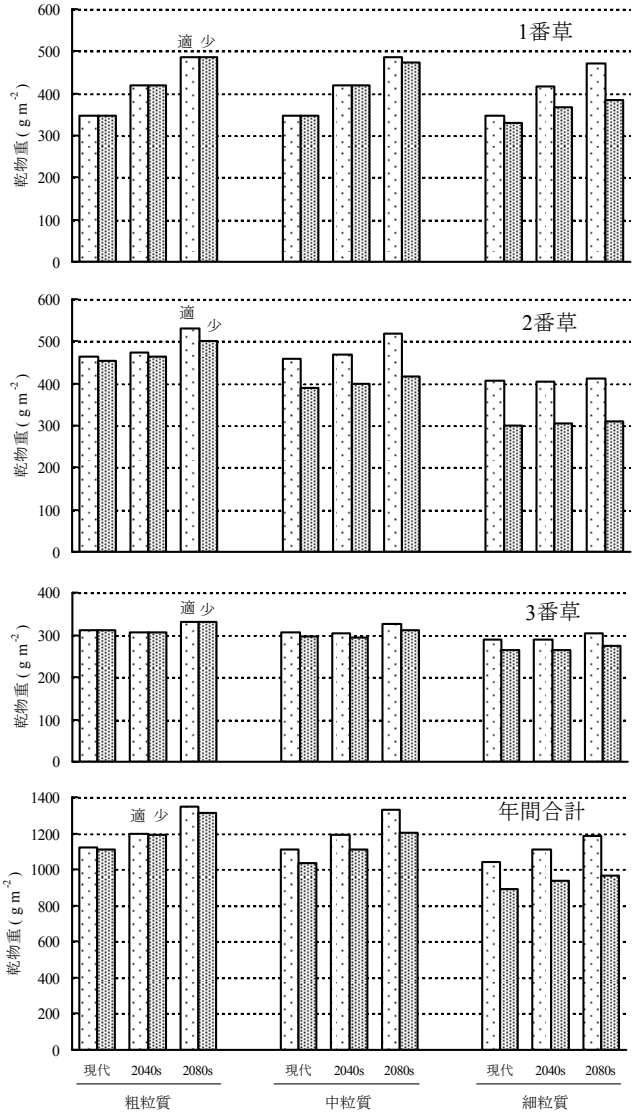

図５－11　土壌の種類と降雨量が温暖化による牧草生産量の変化に及ぼす影響

牧草はオーチャードグラス.「適」は降雨量が適度な場合,「少」は降雨量が少ない場合を，また2040s，2080sは各々 2040年代，2080年代を意味する.

代には現代（約350 g m^{-2}）の1.21倍，2080年代には1.37～1.40倍の生産量が見込まれた（図５－11）。これに対し細粒質土壌では，降雨量が適度であればいずれの年代でも他の２つの土壌とほぼ同等の乾物重を示したが，降雨量が少ない場合は年代の進行，すなわち温暖化に伴う乾物重の増加は小さくなり，2040年代では現代の1.12倍，2080年代でも1.17倍の生産量にとどまると推定された。

前節に示した５－７式から理解されるように，本モデルにおける乾物生産量は根の吸水量，つまり蒸発散量の影響を強く受けている。このため，上述の１番草乾物重の動向は，蒸発散量の推移と良く対応していた。すなわち，粗粒質および中粒質土壌の１番草生育期間における蒸発散量は，降雨量の多寡を問わずいずれの年代でも，牧草の再生開始とともに５月中～下旬まで急増した後，微増する傾向を示し，その大きさは乾物重と同じく，生育期間を通して2080年代＞2040年代＞現代の順序であった（図５－12）。一方，細粒質土壌では，降雨量が適度であれば中粒質土壌の降雨量が少ない時と同様の経日変化を示したが，降雨量が少ない場合には，５月下旬のピーク後に2040および2080年代で低下や変動が認められ，これが細粒質土壌の2040および2080年代で乾物生産量の伸びが劣った一因と推察される。

一方，２番草では，温暖化の進行に伴う乾物重の増大が１番草の時よりも全般に鈍化し，この傾向は土壌が細粒であるほど，また降雨量が少ない場合により顕著であった（図５－11）。すなわち，粗粒質土壌では，現代から2040年代にかけての増加はわずかであったものの，2080年代には現代比1.10～1.14倍の生産量が見込まれ，このような乾物重の変化に対する降雨量の影響は比較的小さかった。これに対し中粒質土壌では，降雨量が適度な場合にはいずれの年代でも粗粒質土壌とほぼ同等の乾物重が期待されたが，降雨量が少ないと乾物重自体が減少するとともに，温暖化の進行に伴う増加もわずかであった。さらに細粒質土壌では，降雨量が適度な場合でも乾物重は400 g m^{-2}程度，降雨量が少ない時のそれは300 g m^{-2}程度と，他の２つの土壌よりも明らかに少なく，温暖化の進行に伴う変化も降水条件を問わずほとんど認められなかった。

このように温暖化に伴う２番草乾物重の変化が土壌の種類や降雨量の影響を顕著に受ける直接的な理由は，１番草時と同じく，蒸発散量の違いでほぼ説明できた。例えば，粗粒質土壌の２番草生育期間における蒸発散量は，降雨量の多少を問わず，牧草再生開始時から2080年代＞2040年代＞現代の順序を保ちつつ増大し７月上旬にピークを示したのち横ばいもしくはやや減少したが，

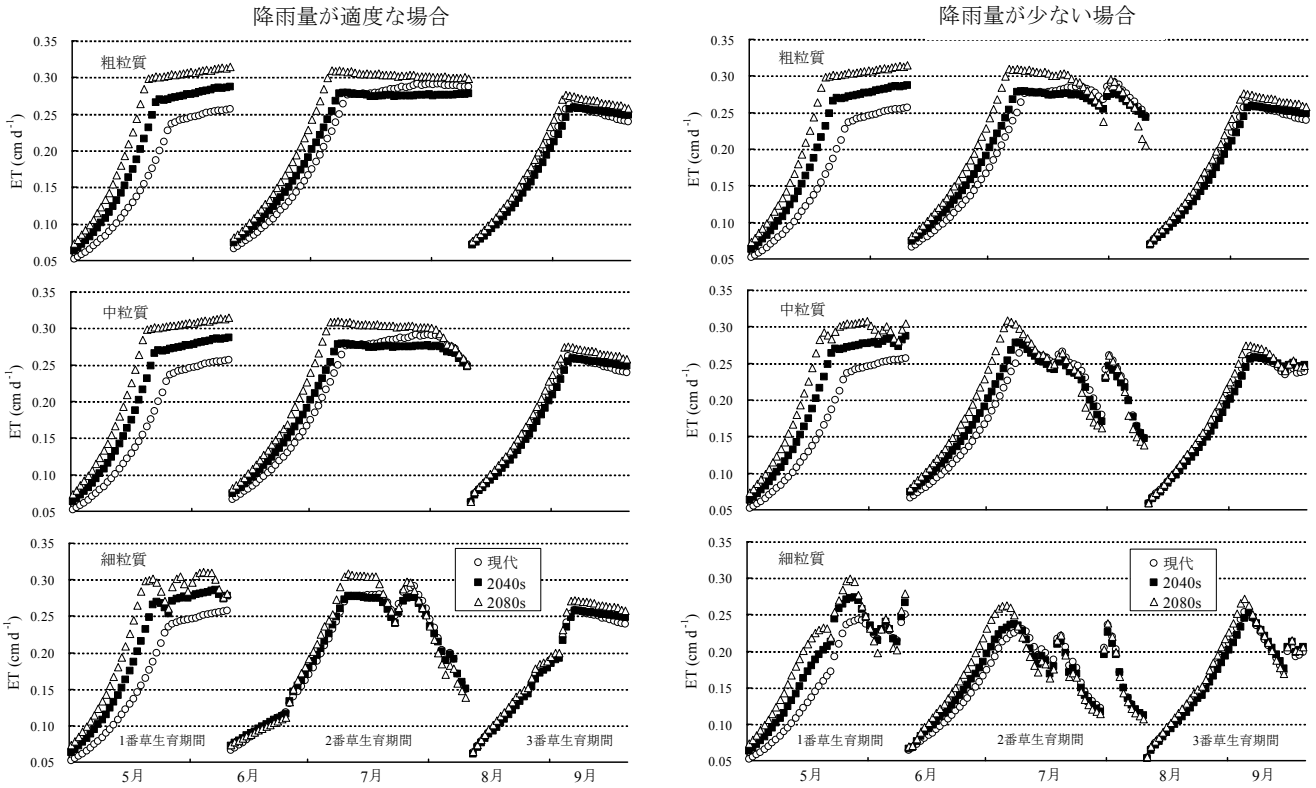

図５－12　土壌の種類と降雨量が温暖化気候条件下の蒸発散量（ET）の経時的推移に及ぼす影響

牧草はオーチャードグラス．2040s，2080sは各々2040年代，2080年代を意味する．

ピーク後はむしろ2040年代が現代を下回ることが多く（図５－12），このことが粗粒質土壌で現代から2040年代にかけての乾物重増加が小さくなった一因と推察される。これに対し，中粒質土壌の蒸発散量は，降雨量が適度であれば粗粒質土壌と同様の推移を示すが，降雨量が少ないと７月上旬のピーク後に大幅な低下と変動が認められるとともに年代間差が不明瞭となり，それが乾物重自体の減少と温暖化に伴う乾物重増加の抑制を導いていたと見られる。さらに細粒質土壌では，降雨量が適度でも７月上旬のピーク後の蒸発散量の急激な低下が著しく，降雨量が少ない場合の蒸発散量は他の２土壌よりも全般に0.05～0.1 cm d^{-1}程度小さかった。また，いずれの降雨条件においてもピーク後の蒸発散量の年代間差は判然としなかった。細粒質土壌でのこのような蒸発散量の傾向は，同土壌において乾物重が全般に少なく，また温暖化による変化がほとんど認められなかったことと良く対応していた。

３番草の乾物重は，いずれの土壌でも260～330 g m^{-2}と１，２番草より少なく，温暖化の進行に伴う変化やその変化におよぼす降雨量の影響もわずかであった（図５－11）。これを反映するように，３番草生育期間の蒸発散量は，１および２番草生育期間よりも全般に小さかった（図５－12）。また，年代による差もほとんど認められず，降雨条件に関係なくいずれの土壌でも牧草再生開始時から増加し９月上旬にピークを示したのち減少する推移を示した（図５－12）。

各番草を合わせた年間合計乾物重は，主に１番草および２番草の双方の動向を強く反映していた。各土壌における2040および2080年代の年間合計乾物重を対現代比で示すと，粗粒質土壌ではそれぞれ1.07，1.19倍，中粒質土壌では1.07，1.18倍，細粒質土壌では1.06，1.11倍程度であった。全般に，土壌が細粒になるほど，生育中～後期の蒸発散量の顕著な低下や変動によって乾物重が減少するとともに，蒸発散量の年代間差の縮小により温暖化に伴う乾物重の増大は鈍化する傾向を示した。また，このような傾向は降雨量が少ない場合により顕著に認め

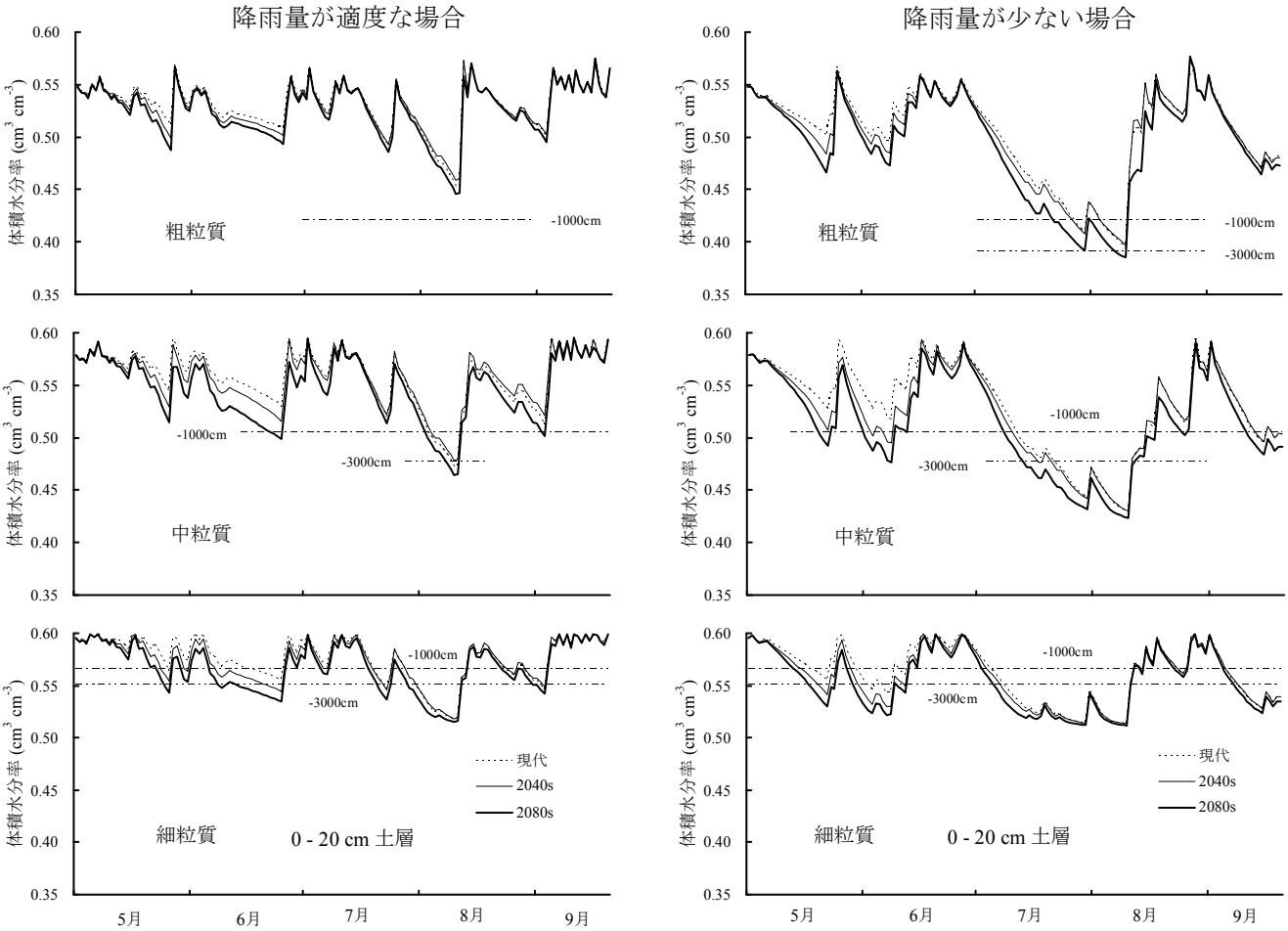

図５－13　土壌の種類と降雨量が温暖化気候条件下の土壌水分量（０～20 cm土層）の経時的推移に及ぼす影響

牧草はオーチャードグラス. 2040s, 2080sは各々 2040年代, 2080年代を意味する．図中の一点または二点破線はそれぞれマトリックポテンシャル−1000 cm, −3000 cm相当の体積水分率を示す.

られた。

２）土壌水分量

深さ０～20cm土層の土壌水分量（体積水分率）の推定結果を，マトリックポテンシャル−1000および−3000 cmに相当する体積水分率とともに図５－13に示した。マトリックポテンシャル−1000および−3000 cmは，本節で使用したモデルにおいて根の吸水量の補正係数A(i, j)と牧草の最大水利用効率の補正係数C(i, j)がそれぞれ１以下となり始める臨界値として設定した水分レベルである（図５－２，５－５）。すなわち，本モデルでは，−1000 cmを下回ると根の吸水量（蒸発散量）の低下により，また−3000 cmを下回ると根の吸水量に加え水利用効率の低下により，いずれも乾物生産が抑制される（低水分ストレスが発現する）ようになっている。

粗粒質土壌における深さ０～20 cmの土壌水分量は，

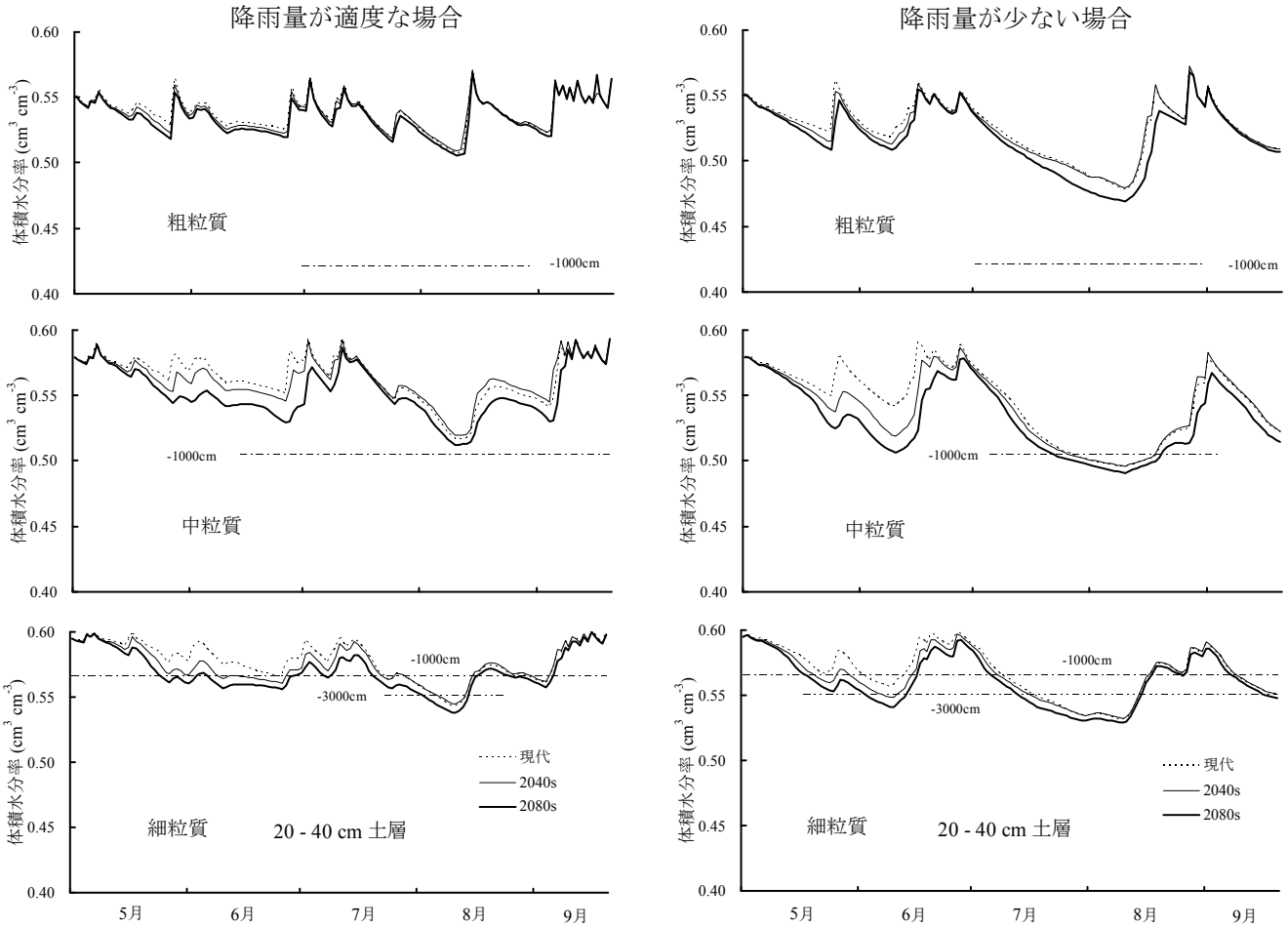

図５－14　土壌の種類と降雨量が温暖化気候条件下の土壌水分量（20～40 cm土層）の経時的推移に及ぼす影響

牧草はオーチャードグラス. 2040s, 2080sは各々 2040年代, 2080年代を意味する．図中の一点または二点破線はそれぞれマトリックポテンシャル−1000 cm, −3000 cm相当の体積水分率を示す.

表５－４　シミュレーション期間における土壌水分量推定値（深さ０～20 cm）の平均値および変動幅

	降雨量が適度な場合			降雨量が少ない場合		
	粗粒質	中粒質	細粒質	粗粒質	中粒質	細粒質
現代	0.530 ± 0.023 a	0.558 ± 0.027 a	0.576 ± 0.021 a	0.504 ± 0.043 a	0.529 ± 0.043 a	0.561 ± 0.027 a
2040s	0.529 ± 0.023 a	0.556 ± 0.026 a	0.573 ± 0.021 a	0.501 ± 0.044 a	0.524 ± 0.043 ab	0.558 ± 0.026 ab
2080s	0.525 ± 0.025 a	0.546 ± 0.030 b	0.567 ± 0.023 b	0.492 ± 0.048 a	0.513 ± 0.045 b	0.553 ± 0.027 b
変動幅	0.446～0.575	0.464～0.595	0.515～0.600	0.385～0.576	0.424～0.595	0.512～0.599

毎日の値を反復と見なして平均値±標準偏差で表示（n＝143，単位はcm^3cm^{-3}）．それぞれの土壌について異なるアルファベット間に有意差あり（５％水準）．変動幅は最小値～最大値.

降雨量の多寡に関係なく，0.39～0.58 cm^3cm^{-3}の範囲内で現代＞2040年代＞2080年代の順序を維持しながら増加と減少を繰り返して推移したが，シミュレーション期間の土壌水分量平均値に有意な年代間差は認められなかった（表５－４）。マトリックポテンシャルが−1000 cm以下となる期間，すなわち蒸発散量の低下により乾物生産が抑制される期間は，降雨量が少ない場合の７月下旬～８月上旬（２番草生育期間中）だけで，この場合でも−3000 cmを下回ることはほとんどなかった。

中粒質土壌では，水分量の変動範囲は0.42～0.60 cm^3cm^{-3}で粗粒質土壌とやや異なるものの推移の動向は粗粒質土壌に良く類似し，その大きさは現代＞2040年代＞2080年代の順序であった。シミュレーション期間の土壌水分量平均値はいずれの降雨条件でも現代と2080年代との差が有意で（表５－４），水分量の年代間差は粗粒質土壌よりも明瞭であった。マトリックポテンシャルが−1000 cm以下となるのは，降雨量が少ない条件では，2040および2080年代の５，６月の一部とすべての年代の７月上旬～８月中旬にかけてで，なかでも２番草生育期間中に該当する７月中旬～８月上旬には，いずれの年代でもマトリックポテンシャルが継続的に−3000 cmを下回り，低水分ストレスの発現が顕著であった。これに対し，降雨量が適度な条件では，−1000 cm以下となる期間は主に８月上旬の一部のみで，−3000 cmを下回ることもほとんどみられなかった。

細粒質土壌では，推移の動向は他の２土壌と同様であったが，その変動幅は0.51～0.60 cm^3cm^{-3}と狭く，水分保持特性の土壌間差（図５－10a）が反映されていた。土壌水分量の年代による差異は，降雨量の多少に関係なく５～６月に主に認められ，おおむね，現代＞2040年代＞2080年代の順であり，土壌水分量平均値では現代と2080年代との差が有意であった（表５－４）。マトリックポテンシャルが−1000または−3000 cm以下となる状況は，降雨量が適度な場合においても粗粒質または中粒質土壌より極めて頻繁に認められ，低水分ストレスの影響が全期間を通して他の２土壌よりも明瞭にうかがわれた。このような傾向は降雨量が少ない場合により顕著であった。

図５－14には深さ20～40 cm土層での推定結果を示した。本モデルでは土層が深くなるほど根の吸水量も減少するとしているため，先に示した０～20 cm土層に比べると，水分量の変動幅は小さく，マトリックポテンシャルが−1000または−3000 cmを下回る頻度も低かったが，水分量の推移はいずれの年代でも０～20 cm土層のそれらに良く似た様相を示した。

３）土壌水分量からみた低水分ストレスの発現頻度

低水分ストレスの発現状況を牧草の生育期間（１，２，

表５－５　土壌水分量（0～20 cm土層を対象）の減少により根の吸水量や水利用効率が減少した日数の牧草生育期間別発現頻度（単位：%）

降雨量	土壌	年代	ケースA 牧草生育期間 1番草	ケースA 牧草生育期間 2番草	ケースA 牧草生育期間 3番草	ケースB 牧草生育期間 1番草	ケースB 牧草生育期間 2番草	ケースB 牧草生育期間 3番草
適度	粗粒質	現代	0	0	0	0	0	0
		2040s	0	0	0	0	0	0
		2080s	0	0	0	0	0	0
	中粒質	現代	0	11	2	0	2	2
		2040s	0	11	2	0	0	0
		2080s	0	20	5	0	5	2
	細粒質	現代	2	46	29	0	20	7
		2040s	20	59	29	0	30	5
		2080s	29	66	37	12	49	12
少	粗粒質	現代	0	20	0	0	0	0
		2040s	0	18	0	0	0	0
		2080s	0	26	0	0	7	0
	中粒質	現代	0	49	27	0	33	0
		2040s	7	52	27	0	38	0
		2080s	20	56	44	2	48	2
	細粒質	現代	39	64	49	12	54	32
		2040s	56	66	46	29	56	29
		2080s	61	67	54	49	59	34

ケースA：マトリックポテンシャルが−1000 cm以下となり根の吸水量の補正係数A(i, j)が１以下となる期間，ケースB：マトリックポテンシャルが−3000 cm以下となりA(i, j)と最大水利用効率の補正係数C(i, j)がともに１以下となる期間．ケースBはケースAに含まれている．2040sは2040年代，2080sは2080年代．

3番草）ごとに把握するため，土壌水分変動が最も著しい0～20 cm土層を指標とし，マトリックポテンシャルが−1000 cm以下となって根の吸水量が低下した期間（ケースA，図5－2）と，同ポテンシャルが−3000 cm以下となって根の吸水量と水利用効率の双方が低下した期間（ケースB，図5－5），のそれぞれの発現頻度（当該番草生育期間中にケースAまたはBに該当した日数／当該番草生育日数×100，単位：%）を表5－5に示した。まず，ケースA（土壌水分量の減少により根の吸水量が低下した期間）について検討する。

1番草生育期間における発現頻度をみると，粗粒質および中粒質土壌では降雨条件を問わずほぼすべての年代で10%以下と低かった。細粒質土壌での頻度は粗粒質および中粒質土壌より高いことが多く，2080年代には降雨量が適度な場合で29%，降雨量が少ない条件では61%にまで上昇するなど，温暖化の進行とともに頻度が増加し，低水分ストレスの発現が強まる傾向にあった。

2番草生育期間では，発現頻度の土壌間差が1番草時よりも明瞭で，頻度におよぼす降雨量の影響も顕著であった。すなわち，粗粒質土壌では，降雨量が適度であればいずれの年代でも0%であったが，降雨量が少なくなると18～26%へと高まった。中粒質土壌では，降雨量が適度な場合はすべての年代で11～20%だったのに対し，降雨量が少なくなると49～56%へ急増した。細粒質土壌では，降雨量が適度または少ない場合でそれぞれ46%以上，64%以上と極めて高く，降水条件に関わらずどの年代でもその生育期間の大半が低水分ストレス状態にあったことがうかがわれた。また，温暖化の進行に伴う頻度の増加は，降雨量が適度な場合には中粒質および細粒質土壌で，また降雨量が少ない条件ではすべての土壌で認められた。

3番草生育期間における発現頻度は，2番草時の各条件での値に比べ10～30ポイント程度低いことが多く低水分ストレスの発現はやや緩和されたものの，頻度分布の様相は2番草時のそれと良く似ていた。

ケースBはケースAに内包されているため，その発現頻度の分布パターンはケースAに類似していた。ただし，10%以下の低い期間を除けば，ケースAよりも10～40ポイントほど低い頻度を示すことが多かった。

4．考　察

オーチャードグラスを想定した牧草乾物重のシミュレーション結果によれば，地球温暖化による乾物生産量の変化は牧草の生育期間によって異なる傾向を示し，温暖化の進行に伴って最も顕著な増収が予想されたのは1番草であった（図5－11）。特に，粗粒質および中粒質土壌では，1番草生育期間の土壌水分条件が生育の制限因子となりにくい（表5－5）ため，温暖化の進行に伴う蒸発散量の増大（図5－12）とそれに起因する増収が顕著であり，増収におよぼす降雨量の影響もほとんど認められなかった。一方，細粒質土壌では，降雨量が少ない場合には，温暖化の進行に伴う増収度合いがやや鈍化する傾向を示した。

これらのことには，北海道に特有な早春時の土壌水分条件が影響していると考えられる。平年の融雪期が4月下旬である北海道北部では，1番草生育開始時（5月上旬）の土壌の有効水分孔隙（マトリックポテンシャルで−60～−16000 cm）は，融雪水でほぼ満たされていると見なすことができる[37, 63]。そのため，本節では，シミュレーションでの土壌水分量の初期値をマトリックポテンシャルで−60 cm時の値（圃場容水量）とした。このとき，想定した3種の土壌の根圏土層（深さ60 cmまで[61]）に保持される有効水分量を図5－10aから計算すると，粗粒質，中粒質，細粒質土壌でそれぞれ140，100，55 mmと見積もられる。一方，1番草生育期間中の牧草の蒸発散量は温暖化によって増大した場合でも最大0.30 cm d^{-1}程度（図5－12）であるから，粗粒質，中粒質，細粒質土壌の有効水分量140，100，55 mmは，それぞれ少なくとも47，33，18日間の蒸発散量に相当する。つまり，粗粒質および中粒質土壌では，温暖化が進行した場合でも，1番草生育期間（40日間）に必要な水分量を融雪水だけでほぼ充足できると試算される。これに対し，細粒質土壌の場合，融雪水由来の水分量では生育期間の約半分しか補償できない。さらに，細粒質土壌の透水係数（図5－10b）は，マトリックポテンシャル−700 cm以上では粗粒質および中粒質土壌よりも低く，また−700 cm以下では逆に高いものの透水係数自体が小さいため，第3章の灰色台地土の例で指摘したように下層土から根圏土層への水分フラックスに多くは期待できない。そのため，細粒質土壌では降雨による水補給が十分でない場合には，温暖化に伴う牧草の蒸発散量の増大に適応できず，軽度の低水分ストレスによる増収度合いの鈍化が生じたと考えられる。

上記の推察は，細粒質土壌の2040および2080年代の蒸発散量が少雨条件で1番草生育期間後半に現代を下回ったこと（図5－12）や，1番草生育期間における低水分ストレスの発現頻度が少雨条件の細粒質土壌で温暖化が進むほど高くなったこと（表5－5）などからも裏付けられる。

以上のように，1番草については，細粒質土壌のよう

な保水性かつ透水性の小さな土壌で降雨量が少ない場合を除けば，温暖化気候下での牧草生育に対する低水分ストレスの影響は概ね小さく，温暖化によって現代比1.2～1.4倍程度の乾物生産量が期待できると予測された（図５－11）。

これに対し２番草では，温暖化による乾物生産量の変化の様相は土壌の種類や降雨量によって大きく異なり，土壌が細粒になるほど乾物生産量自体が減少するとともに，温暖化に伴う乾物生産量の増大も鈍化する傾向が認められた（図５－11）。また，その傾向は降雨量が少ない場合に著しかった。

このような乾物生産量の変動は，蒸発散量の推移（図５－12）や低水分ストレスの発現頻度（表５－５）とほぼ対応していた。すなわち，２番草生育期間の蒸発散量は，降雨量が少なくかつ土壌が細粒になるほど7月上旬のピーク後の低下が明瞭であり（図５－12），この低下が乾物生産量減少の一因と推察された。また，温暖化による乾物生産量増大程度の鈍化については，温暖化の進行に伴う低水分ストレス発現頻度の増加が，先と同じく降雨量が少なくかつ土壌が細粒であるほど顕著であった（表５－５）ことが直接的な要因と考えられる。

先述した通り，２番草が再生を始める６月中旬には，融雪水由来の土壌水分の大半が１番草によりすでに消費されている。そのため，図５－13および図５－14からも分かるように，２番草再生初期（６月中旬）における土壌水分は早春時よりも少ない場合が多く，その量は１番草の乾物生産量（水消費量），土壌の水分特性（保水性と透水性），降雨量などに強く依存することになる。一方，牧草生育の面からは，前章で示したように，２番草再生初期（20日間程度）の土壌水分条件はオーチャードグラスの生育に重大な影響を及ぼし，同期間の低水分ストレスは乾物生産量の著しい低下をもたらす[64]。それゆえ，土壌が細粒質で保水性および透水性が小さくまた降雨量が少ないような場合には，温暖化に伴う１番草の増収，すなわち水消費量の増大が，かえって２番草の再生初期や生育期間全般での低水分ストレスの発現頻度を高め，このことが蒸発散量の抑制に起因する乾物生産量の減少および温暖化による乾物生産量増大程度の鈍化を引き起こしたものと理解される。

このように，２番草は，温暖化気候下での乾物生産量に対する低水分ストレスの影響が現代以上に強く懸念される生育期間であり，前番草である１番草の乾物生産量，土壌の水分特性および降雨量などの条件次第では，温暖化によっても蒸発散量が増大せず，増収が期待できない場合もあることが明らかとなった。

一方，８月中旬から９月中旬を生育期間とする３番草では，乾物生産量がいずれの土壌でも１，２番草よりも少なく，温暖化の進行に伴う変化やその変化におよぼす降雨量の影響も小さかった。この理由として，低水分ストレスの発現頻度は２番草時と同様に降雨量が少なくかつ土壌が細粒になるほど高かったが（表５－５），この時期の気温の低下（図５－９a）に伴う乾物生産量の抑制の方が優位で，低水分ストレスの影響がさほど大きく現れなかったことが推察される。さらに，本報で用いた温暖化気候データでは，８月中旬以降の気温や日射量の年代間差が比較的小さめに予測されている（図５－９a，b）ことも影響しているだろう。

年間合計乾物生産量は，主に１番草と２番草の動向を反映し，全般に土壌が細粒になるほど減少する傾向にあったが，降雨量の多寡や土壌条件を問わず，温暖化の進行に連れて増加した。ただし，最も増加した場合でも現代比1.2倍（2080年代，粗粒質土壌。約1300 g m^{-2}）程度と予測され，先述の佐々木ら[84]が100年後の北海道のオーチャードグラス生産量について推定した同1.5倍程度より小さかった。

佐々木らの予測は，主に気温，日射量，二酸化炭素濃度といった気象要因から推定したもので，土壌水分や降雨量等の水分環境の影響は十分検討されていない。一方，本節では，温暖化による気候変動を気温と日射量の変化と見なし，二酸化炭素濃度の上昇が乾物生産に及ぼす影響は考慮していない。しかし，同濃度上昇による牧草の光合成速度増加率は気温が高いほど大きい[83]とされていることから，同濃度上昇の影響を本節の結果に加味すると，乾物生産量（水消費量）がより増大する方向に進むと予想され，低水分ストレスの影響は一層強まると考えられる。ただし，二酸化炭素濃度の上昇は気孔開度の減少による蒸散量の低下を介して作物の水利用効率を上昇させる[102]との報告もあり，低水分ストレスの影響が強まらないまま乾物生産量が増加する可能性も残されている。いずれにしても，今後は，二酸化炭素濃度上昇の直接的な影響や，気温の上昇に伴う生育期（萌芽期や出穂期など），根系および土壌養分供給量の変化等も組み込んだ新たなモデル開発によって，より精度の高い予測が必要であろう。

以上の考察を総括すると，地球温暖化に伴う牧草乾物生産量の変化予測においては，気温や二酸化炭素濃度上昇の影響に加え，降雨量の多少や土壌水分特性の違い等に起因する低水分ストレスの影響も考慮することが重要であると結論される。

第３節　まとめ

１．低水分ストレスの影響を組み込んだ牧草の乾物生産予測モデルの開発

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を定量的に評価する手法を開発するため，土壌水分条件を重要な要因とする低水分ストレスの影響を組み込んだオーチャードグラスの乾物生産予測モデルを開発し，その妥当性を検証した。

1）モデルは,「土壌中の水移動」,「根の吸水」,「乾物生産」を表す3つのサブモデルから構成され，すべての計算は，厚さ5 cmの土層を単位として行われる。

2）土壌中の水移動サブモデルでは，ポテンシャル勾配に基づいて土層間の水フラックスを求めた後，各土層における水収支式から土壌水分量（マトリックポテンシャル）を決定する。

3）根の吸水サブモデルでは，各土層の根の吸水量を求める。根の吸水量は各土層のマトリックポテンシャルが0 ～−1000 cmの範囲では最大吸水量に等しいが，−1000～−16000 cmでは土壌水分の低下に伴い直線的に減少するとした。

4）乾物生産サブモデルでは，牧草の水利用効率と根の吸水量との積により乾物生産量を求める。牧草の水利用効率は土壌水分条件で変化するとし，各土層のマトリックポテンシャルが0 ～−3000 cmでは最大水利用効率に等しいが，−3000～−16000 cmの範囲では，土壌水分の低下につれて直線的に減少するとした。

5）褐色森林土および灰色台地土のオーチャードグラス草地の干ばつ年におけるシミュレーションでは，牧草乾物重，深さ別土壌水分量および蒸発散量の推定値の推移は，両草地とも実測値とおおむね対応していた。また，干ばつ年と湿潤年を含む3カ年にわたる牧草乾物重の推定値も，実測値とほぼ一致していた。

6）以上から，土壌水分の減少による乾物生産量の低下を吸水量と水利用効率の双方の減少によって表現した本モデルは，牧草の乾物生産に対する低水分ストレスの影響をほぼ適切に表し，低水分ストレス強度の定量的評価に利用できると結論された。

２．地球温暖化による牧草の乾物生産量変化に及ぼす低水分ストレスの影響評価

水分特性が異なる3種類の土壌に生育するオーチャードグラスを想定し，北海道北部における将来の地球温暖化による気温上昇に伴う乾物生産量の変化とそれに及ぼす低水分ストレスの影響を，前述のモデルを用いて検討した。

1）1番草では，細粒質土壌のように保水性が小さく，かつ降雨量が少ない場合を除けば，牧草生育に対する低水分ストレスの影響は概ね小さく，気温上昇により蒸発散量が増大し，現代比1.2～1.4倍程度の乾物生産量が期待された。このことには土壌に豊富に存在する融雪水が貢献していると推察された。

2）これに対し2番草では，牧草生育に対する低水分ストレスの影響が気温の上昇に伴い強まることが懸念され，土壌の保水性および透水性が小さい場合や降雨量が少ない条件では，気温が上昇しても蒸発散量は増大せず，増収はほとんど期待できないと予測された。この一因として，気温上昇による1番草の増収，すなわち水消費量の増大が，かえって2番草の再生初期や生育期間全般での低水分ストレスの発現頻度を高める可能性がうかがわれた。

3）3番草では，乾物生産量がいずれの土壌でも1，2番草よりも少なく，気温上昇に伴う乾物生産量の変化やそれにおよぼす降雨量の影響も小さかった。

4）年間合計乾物生産量は，主に1番草と2番草の動向を反映し，全般に土壌が細粒になるほど減少する傾向にあったが，降雨量の多寡や土壌条件を問わず，気温の上昇に伴い増加した。しかし，最も増加した場合でも，現代比1.2倍程度と予測され，気象条件のみから推定した既報での予測値（同1.5倍）よりも小さかった。

5）以上のことから，地球温暖化による気温の上昇に伴う牧草乾物生産量の変化予測においては，降雨量の多少や土壌水分特性の違い等に起因する低水分ストレスの影響も考慮することが重要と考えられた。

第６章　総合論議および結論

日本有数の大規模草地型酪農地域である北海道北部は，牧草の主要生育期間（５～８月）の降雨量が300 mm程度と少なく，草地面積の約５割は保水性に乏しい重粘土に立地している。そのため，当地域の牧草生育は降雨量や土壌の保水性の影響を受け易く，２～４年に１度の頻度で水不足（低水分ストレス）の被害をこうむるなど，比較的保水性に優れた火山性土に立脚する北海道東部の同酪農地域とは環境条件が大きく異なる。

本研究では，このような重粘土草地に対する低水分ストレスの被害を軽減・回避する方策の効率的導入等に資するため，牧草生産性に対する低水分ストレスの影響を定量的に評価する手法を開発しようとした。

まず第３章では，重粘土草地の土壌水分動態を，これまであまり着目されてこなかった下層土（60 cm以深）と根圏土層（０～60 cm）間の水フラックスに焦点をおいて検討した。その結果，湿潤期には根圏土層から下層土への下向きフラックスが支配的であるが，乾燥期にはフラックスが上向きに転じて根圏土層へ水分が供給されるなど，両土層間のダイナミックなフラックス動態が明らかとなった。また，上向きのフラックスは，褐色森林土よりも灰色台地土の方が小さく，この違いが干ばつ年に見られる灰色台地土草地での低収[52]に関与していると考えられた。さらに，上向きフラックスの給源としては褐色森林土では下層土が，また灰色台地土では下層土に加え地下停滞水が重要な役割を担うことも推察され，湿害の発生要因と見なされることが多かった灰色台地土の停滞水が，少なくとも草地においては必ずしも負の側面だけを持つものではないことが示唆された。このことは，主要根群域が浅い牧草では排水改良による停滞水の排除が乾燥期の干ばつを助長する危険性がある[33]との報告に合致していた。

草地は造成後耕起せずに長年にわたって利用され，この間の施肥はすべて土壌表面に施される。このため，草地表層には施肥養分や枯死茎葉根等に由来する有機物が蓄積し，牧草の根はこの肥沃な表層（０～15 cm程度）に集中しやすい[51]。それゆえ，この表層を牧草に対する主要な養水分供給層と見なし，その理化学性の維持・改善などに力点を置いた研究が盛んに行われてきた[51]。その一方，下層土に対する関心は低いままであった。実際，下層土の改良には大型機械力と多額のコストを要するため，特に低コストでの管理が求められる草地においては今のところ現実的でない面があるのは事実である。しかし，干ばつ年における牧草収量の低下が下層土や停滞水からの水供給に関与しているという上述の推察は，下層土の水分環境改善や下層土への根の伸長促進等によって牧草生産性のさらなる向上が期待できることを示唆しており，コスト面を考慮した新たな下層土改良技術の開発の余地があると言える。

第４章では，前章で明らかにした重粘土草地の土壌水分動態を踏まえつつ，低水分ストレスが牧草生育に及ぼす影響を具体的に検討した。すなわち，北海道の重要草種であるオーチャードグラスを対象に，降雨遮断条件で特定の生育時期だけに水分を供給して，水分供給時期と牧草のN吸収および収量構成要素との関係を検討し，生育時期別の低水分ストレスが各番草の生育に及ぼす影響を明らかにした。牧草のN吸収に注目したのは，Nがイネ科牧草の分げつ発生や収量構成要素に特に強く寄与する養分[46, 75, 85]と指摘されているためである。その結果，５月上旬～６月上旬，６月中旬～８月上旬，８月中旬～９月下旬を各生育期間とするオーチャードグラスの１，２，３番草のいずれにおいても，その収量確保に重要な水分供給時期は再生開始から10～20日間程度の再生初期であり，この期間に低水分ストレスを受けると顕著な低収をまねくことが明らかとなった。その理由は，この期間の水分供給を制限することにより，オーチャードグラスのN吸収が抑制され，N吸収によって促進される分げつの再生[98]が迅速かつ円滑に進まず，各番草収量に強く影響する１茎重を十分に増大させる期間が確保できなかったためと説明された。これは，栄養生長期から生殖生長期を経て形成される穀実を収穫物とするイネやコムギなどと異なり，栄養生長期の途上，あるいは栄養生長期と生殖生長期が並列進行の途上で茎葉全体を収穫する牧草[75]の場合，生育期間のできるだけ早い時期からNを吸収させて茎葉部のN含有率を上昇させ，個体の光合成能を高める[98]ことが収量の確保につながることを意味しており，またその実現には水分環境が重要な因子として関与していることを示している。

水分環境が牧草生育へ及ぼす影響に関するこれまでの研究は，第１章で指摘したように，水分環境を制御することの難しさゆえに事例研究にとどまっているものや，現実的な低水分ストレス回避技術としての効率的かん水法を検討したものが主流であった。これらの研

究[21, 35, 52, 53, 54, 57, 101]の多くは，土壌水分量または水分供給量（降雨量，かん水量）と牧草生育との関係に焦点を置いており，良好な生育のために牧草が特に水分を必要とする時期に関してはほとんど未検討であったことを考えると，本研究でオーチャードグラスの各番草についてそのような時期を特定できたことは，新しい知見として評価できる。

続く第5章の前段では，第3，4章で明らかとなった重粘土草地の土壌水分動態および牧草生育に対する低水分ストレスの影響と既往の知見とを統合し，土壌水分条件を重要な要因とする低水分ストレスの影響を組み込んだ牧草（オーチャードグラス）の乾物生産予測モデルを開発した。本モデルの特徴は，低水分ストレス（土壌水分の減少）による乾物生産量の低下を，根の吸水量（蒸発散量）および牧草の水利用効率（単位吸水量当たりの乾物生産量）の双方の低下により表現していることにある。干ばつ年における牧草乾物重および土壌水分量の推定値は，実測値とおおむね合致した。なかでも，水利用効率の低下により乾物生産が抑制されると推定された期間が比較的長かった灰色台地土草地の2，3番草に対する推定値は，実測値の推移を良く再現できていた。しかも，モデルによる牧草乾物重推定値が，干ばつ年だけでなく降雨量が平年並みかやや多かった複数の年次においても実測値に良く適合したことから，本モデルは，低水分領域だけでなく，広範な土壌水分条件に対応可能な汎用性を持つと考えられた。

本モデルは，主要な入力項目が日降雨量，日平均気温，日照時間，土壌の保水性・透水性，根系分布を表す特性値，と比較的少なく，また演算過程でのパラメータも極力少なくした簡潔なモデルである。そのため，十分な施肥により養分条件が牧草生育の制限因子とならないことを前提条件とするなどの問題点もいくつか残されている。しかし，作物生育に影響する様々な諸要因を取り込んだ複雑なモデルが，どのような場面でも常に有効であるとは限らない。鮫島[82]は，モデルの実用的応用を考えるならば，対象とする地域等を限定してその範囲内での作物の挙動を的確に推定できる単純化されたモデルが使いやすく有効である，と指摘している。この意味では，北海道北部地域を対象とした簡潔な本モデルが同地域の牧草生産に対する低水分ストレスの影響をほぼ適切に表現し得たことは，同ストレスの被害軽減・回避策の効率的導入等に資するという実用面での貢献を目指す本研究において，極めて意義あることと言える。

これを受けて，第5章の後段では，開発したモデルを活用し，将来の地球温暖化による北海道北部のオーチャードグラス生産量の変化を低水分ストレスの影響に焦点をおいて検討した。その理由は，温暖化に伴う牧草生産量の増加，すなわち水消費量（蒸発散量）の増大によって，土壌水分の減少が一層進行し，牧草生育に対する低水分ストレスの影響が現在よりも強まることが懸念されるためである。その結果，融雪由来の土壌水分が潤沢な期間に生育する1番草への低水分ストレスの影響は小さく，温暖化によって蒸発散量が増大するため，現代比1.2～1.4倍の収量が期待された。これに対し2番草では，温暖化による1番草の増収（水消費量の増大）が，かえって2番草の収量に強く影響する再生初期での低水分ストレスの発生頻度を高めるため，温暖化の進行とともに同ストレスの影響は強まり，土壌の水分特性や降雨量などの条件次第では，温暖化による増収がほとんど期待できない場合もあると予測された。年間合計収量は，降水量の多寡や土壌条件を問わず，温暖化の進行に伴い増加すると見込まれたが，最も増加した場合でも，現代の1.2倍程度と予測され，気温や日射量等の気象条件のみから推定した既報[84]での予測値（1.5倍）よりも少なかった。温暖化に伴う牧草生産量の変化については，本州を中心に夏期間の高温で生育が停滞する「夏枯れ地帯」の拡大による生産量の低下[84]が主に懸念されてきた。これに対し本結果は，温暖化による牧草生産量増加の制限因子として，温度上昇によって顕在化する低水分ストレスの観点を加えることの重要性を指摘するものである。

このように，温暖化に伴う北海道北部の牧草（オーチャードグラス）生産量の変化を低水分ストレスの影響と関連づけてみると，その予測結果は楽観視できるものではなかった。将来強まると予想された低水分ストレスの影響の緩和策を，今から考えておく必要がある。その一つとして，堆きゅう肥の施用[53, 55]やそれと深耕との組合せ[54]などによる土壌の保水性改善があげられる。これらの方法は，重粘土草地の有効水分量の増大にまでは至らないものの，粗孔隙量を増加させる効果を持つ[53, 54, 55]。一方，粗孔隙量の増加は，根張りを促進する[17, 54]だけでなく，粗孔隙に隣接する土塊と水との接触機会を増やして結果的に土壌の水分保持能を改善する効果を示す[18]と指摘されている。ただし，重粘土では，いったん形成された粗孔隙も経年化に連れて減少しやすい[100]ため，粗孔隙の維持に留意した新たな草地管理法の検討が喫緊の課題として残されている。

これに対し，牧草側からの対応としては，三木・高尾[53]がすでに指摘したように，深根性で耐干性に優れたマメ科牧草アルファルファのより積極的な導入が有効と

考えられる。アルファルファは粗タンパク質含量が高く高栄養で，家畜の嗜好性も良く，マメ科牧草の中では収量性と永続性に優れる特徴を持つ[19]。また，その窒素固定能を利用すれば，イネ科牧草との混播により低コスト高位安定生産も期待される。温暖化気候下においても，飼料自給率を高めた環境調和型の土地利用型酪農が北海道酪農の基本であることは言うまでもない。それゆえ，低水分ストレスの影響を受けにくいと考えられるアルファルファのこれまで以上の有効利用は，飼料自給率の向上，すなわち単収の維持・向上の観点から重視すべき対策の一つであろう。

以上，本研究では，北海道北部の重粘土草地の土壌水分動態を根圏土層と下層土間の水フラックスに焦点をおいて解明するとともに，生育時期別の低水分ストレスが北海道の重要草種であるオーチャードグラスの生育に及ぼす影響を明らかにした。そして，これらの知見と既往の成果等を統合して，低水分ストレスの影響を組み込んだ牧草の乾物生産予測モデルを開発し，モデルの妥当性と有効性を現在の気象および将来の温暖化気候条件下で検証することにより，本モデルを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手法として確立した。

第7章　要　　約

本研究は，北海道北部の重粘土草地に対する低水分ストレスの被害を軽減・回避する方策の効率的導入等に資するため，牧草生産性に対する低水分ストレスの影響を定量的に評価する手法を開発することを目的とした。得られた結果は以下の通りである。

1．重粘土草地の土壌水分動態

褐色森林土および灰色台地土に立地するオーチャードグラス草地において，乾燥期の土壌水分動態を，特に根圏土層と下層土間の水フラックスに着目しながら明らかにするとともに，乾燥期の牧草生育に対する下層土から根圏土層への水分供給の意義を考察した。

1）根圏土層（0～60 cm）の有効水分が多い湿潤期には，根圏土層から下層土（60 cm以深）への下向きの水フラックスが多く発生し，その値は褐色森林土で0.21 cm d^{-1}，灰色台地土で0.19 cm d^{-1}と見積もられた。

2）これに対し，根圏土層の有効水分が減少する乾燥期には，下層土から根圏土層への上向きの水フラックスが認められ，根圏土層へ水分供給が行われた。その推定値は，灰色台地土が0.04 cm d^{-1}（蒸発散量の20%）で，褐色森林土の0.10 cm d^{-1}（同55%）より小さかった。上向きフラックスの土壌間差は，主に下層土の透水性の差異に起因すると考えられた。

3）両土壌の下層土のマトリックポテンシャルは，上向き水フラックスの発生に伴って小さくなった。また，地下停滞水が存在した灰色台地土では，7月上旬～8月上旬の上向きフラックス発生期間に停滞水位が次第に低下した。

4）上向きフラックスの水供給源としては，褐色森林土では下層土が，灰色台地土では下層土と地下停滞水が重要であった。また，下層土から根圏土層への上向きの水フラックスの大きさは，乾燥期の牧草生育を規制する重要な要因の一つと推察された。

2．オーチャードグラスの1番草生育に対する水分供給時期の影響

北海道の重要草種であるオーチャードグラスの1番草を対象に，降雨遮断条件で特定の時期に水分を供給して，水分供給時期と牧草の窒素吸収および収量構成要素との関係を検討し，生育時期別の低水分ストレスが1番草生育に及ぼす影響を明確にした。

1）ポット試験では，萌芽期から節間伸長期までの20日間に水分供給を行わないと，オーチャードグラスの収量が著しく低下することが認められた。

2）その理由は，この期間の水分供給を制限することにより，オーチャードグラスの窒素吸収が抑制されて分げつの発生が停滞し，ポット栽培条件での収量に強く影響する茎数が試験終了時までに十分量確保されなかったためと考えられた。

3）一方，雨よけハウスを用いた圃場試験では，水分供給時期がオーチャードグラスの生育に及ぼす影響は，ポット試験に比べ判然としなかった。これは，融雪水に由来する水分が土壌に豊富に存在していたためと推測された。

4）以上から，オーチャードグラスの1番草生育にとって重要な水分供給時期は，萌芽期から節間伸長期までの20日間程度で，この期間に低水分ストレスを受けると顕著な低収をまねくことが明らかとなった。

3．オーチャードグラスの2番草および3番草生育に対する水分供給時期の影響

前項と同様の方法により，生育時期別の低水分ストレスがオーチャードグラスの2番草および3番草生育に及ぼす影響を明らかにした。

1）2番草では，従属再生長期から独立再生長移行期までの約20日間水分供給を行わないと，収量は顕著に低下した。

2）3番草では，従属再生長期から転換期までの約10日間の水分供給を制限した場合，収量の低下が明らかであった。

3）これらの原因は，いずれの番草についても次のように考えられた。すなわち，この期間の水分供給を停止することにより，オーチャードグラスの窒素吸収が阻害されて分げつの再生が迅速かつ円滑に進まず，2および3番草収量に強く影響する1茎重を十分に増大させる期間が確保できなかったためであった。

4）以上から，オーチャードグラスの2および3番草生育に対する重要な水分供給時期は，2番草が従属再生長期から独立再生長移行期までの20日間程度，3番草が従属再生長期から転換期までの10日間程度で，これらの期間に低水分ストレスを受けると顕著な低収を示すと結論された。

４．低水分ストレスの影響を組み込んだ牧草の乾物生産予測モデルの開発

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を定量的に評価する手法を開発するため，土壌水分条件を重要な要因とする低水分ストレスの影響を組み込んだオーチャードグラスの乾物生産予測モデルを開発し，その妥当性を検証した。

1）モデルは,「土壌中の水移動」,「根の吸水」,「乾物生産」を表す3つのサブモデルから構成され，すべての計算は，厚さ5 cmの土層を単位として行われる。

2）土壌中の水移動サブモデルでは，ポテンシャル勾配に基づいて土層間の水フラックスを求めた後，各土層における水収支式から土壌水分量（マトリックポテンシャル）を決定する。

3）根の吸水サブモデルでは，各土層の根の吸水量を求める。根の吸水量は各土層のマトリックポテンシャルが0 ～−1000 cmの範囲では最大吸水量に等しいが，−1000～−16000 cmでは土壌水分の低下に伴い直線的に減少するとした。

4）乾物生産サブモデルでは，牧草の水利用効率と根の吸水量との積により乾物生産量を求める。牧草の水利用効率は土壌水分条件で変化するとし，各土層のマトリックポテンシャルが0 ～−3000 cmでは最大水利用効率に等しいが，−3000～−16000 cmの範囲では，土壌水分の低下につれて直線的に減少するとした。

5）褐色森林土および灰色台地土のオーチャードグラス草地の干ばつ年におけるシミュレーションでは，牧草乾物重，深さ別土壌水分量および蒸発散量の推定値の推移は，両草地とも実測値とおおむね対応していた。また，干ばつ年と湿潤年を含む3カ年にわたる牧草乾物重の推定値も，実測値とほぼ一致していた。

6）以上から，土壌水分の減少による乾物生産量の低下を吸水量と水利用効率の双方の減少によって表現した本モデルは，牧草の乾物生産に対する低水分ストレスの影響をほぼ適切に表し，低水分ストレス強度の定量的評価に利用できると結論された。

５．地球温暖化による牧草の乾物生産量変化に及ぼす低水分ストレスの影響評価

水分特性が異なる3種類の土壌に生育するオーチャードグラスを想定し，北海道北部における将来の地球温暖化による気温上昇に伴う乾物生産量の変化とそれに及ぼす低水分ストレスの影響を，前述のモデルを用いて検討した。

1）1番草では，細粒質土壌のように保水性が小さく，かつ降雨量が少ない場合を除けば，牧草生育に対する低水分ストレスの影響は概ね小さく，気温上昇により蒸発散量が増大し，現代比1.2～1.4倍程度の乾物生産量が期待された。このことには土壌に豊富に存在する融雪水が貢献していると推察された。

2）これに対し2番草では，牧草生育に対する低水分ストレスの影響が気温の上昇に伴い強まることが懸念され，土壌の保水性および透水性が小さい場合や降雨量が少ない条件では，気温が上昇しても蒸発散量は増大せず，増収はほとんど期待できないと予測された。この一因として，気温上昇による1番草の増収，すなわち水消費量の増大が，かえって2番草の再生初期や生育期間全般での低水分ストレスの発現頻度を高める可能性がうかがわれた。

3）3番草では，乾物生産量がいずれの土壌でも1，2番草よりも少なく，気温上昇に伴う乾物生産量の変化やそれにおよぼす降雨量の影響も小さかった。

4）年間合計乾物生産量は，主に1番草と2番草の動向を反映し，全般に土壌が細粒になるほど減少する傾向にあったが，降雨量の多寡や土壌条件を問わず，気温の上昇に伴い増加した。しかし，最も増加した場合でも，現代比1.2倍程度と予測され，気象条件のみから推定した既報での予測値（同1.5倍）よりも小さかった。

5）以上のことから，地球温暖化による気温の上昇に伴う牧草乾物生産量の変化予測においては，降雨量の多少や土壌水分特性の違い等に起因する低水分ストレスの影響も考慮することが重要と考えられた。

６．結　論

本研究では，北海道北部の重粘土草地の土壌水分動態を根圏土層と下層土間の水フラックスに焦点をおいて解明するとともに，生育時期別の低水分ストレスが北海道の重要草種であるオーチャードグラスの生育に及ぼす影響を明らかにした。そして，これらの知見と既往の成果等を統合して，低水分ストレスの影響を組み込んだ牧草の乾物生産予測モデルを開発し，モデルの妥当性と有効性を現在の気象および将来の温暖化気候条件下で検証することにより，本モデルを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手法として確立した。

引　用　文　献

1）足立文彦・小葉田亨・有本雅幸・今木正：水稲水利用効率の地域・年度間比較　第2報　島根県下3地域間・2品種間の比較，日作紀，65，173～180（1996）

2）Brandyk, T. and Wesseling, J. G. : Steady state capillary rise in some soil profiles, Z. Pflanzenernaehr. Bodenk., 148, 54～65（1985）

3）Denmead, O. T. and Shaw, R. H. : Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agron. J., 54, 385～390（1962）

4）土壌物理性測定法委員会：土壌物理性測定法, p. 150～154，p. 222～224，養賢堂，東京（1982）

5）土壌環境分析法編集委員会：土壌環境分析法，p. 52～54，p. 54～56，p. 66～69，博友社，東京（1997）

6）Feddes, R. A., de Graaf, M., Bouma, J. and van Loon, C. D : Simulation of water use and production of potatoes as affected by soil compaction. Potato Res., 31, 225～239,（1988）

7）Feldhake, C.M., Glenn, D.M., Edwards, W.M. and Peterson, D.L. : Quantifying drought for humid, temperate pastures using the Crop Water Stress Index (CWSI). New Zealand J. Agric. Res., 40, 17～23（1997）

8）Gardner, W. R. : Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Sci., 85, 228～232（1958）

9）Gardner, W. R. : Soil properties and efficient water use : An overview ; in Limitations of efficient water use in crop production, ed. H. M. Taylor, W. R. Jordan and T. R. Sinclair, p.45～64, Am. Soc. Agron., Madison, U.S.A.（1983）

10）原田勇：牧草の栄養と施肥，p. 89，養賢堂，東京（1979）

11）長谷川浩：圃場試験における土壌ー作物系包括的シミュレーションモデル（1），農業および園芸，73，79～82（1998）

12）長谷川周一：陸稲の土壌水分吸収モデル，土壌の物理性，44，14～22（1981）

13）長谷川周一：作物の水・酸素要求に対する土壌の供給力，土壌の物理性，69，55～66（1994a）

14）Hasegawa, S., Osozawa, S. and Ueno, H. : Measurement of soil water flux in Andisols at a depth below a root zone of about 1 meter, Soil Sci. Plant Nutr., 40, 137～147（1994b）

15）長谷川周一：畑作土の-0. 1MPa以下の透水係数の値，土肥誌，70，194～197（1999）

16）畑地かんがい試験研究会：北海道における畑地かんがいの手引き，p. 1～174（1997）

17）波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫：重粘性土壌における根群分布に対する粒団間粗孔隙の意義，土肥誌，58，209～216（1987）

18）波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫：シミュレーションモデルによる亀裂内水分流の解析，2）数値例，土肥誌，55，351～356（1984）

19）東田修司：天北地方における重粘土草地の土壌微生物活性と牧草生産，道立農試報告，80，1～123（1993）

20）廣田知良・福本昌人：アメダスデータによる可能蒸発量の推定に関する考察，1994年度日本農業気象学会北海道支部大会講演要旨集，20～21（1994）

21）宝示戸雅之・坂本宣崇・高尾欽弥：天北地方のオーチャードグラス主体草地における気象要因と乾物生産，北農，48，1～10（1981）

22）北海道：平成17年度北海道農業・農村統計表，p. 58～59（2006）

23）北海道土壌分類委員会：北海道の農耕地土壌分類（第2次案），道立農試資料，10，1～89（1979）

24）北海道開発局農林水産部：重粘土構造分類調査報告書，p. 1～195（1967）

25）北海道農政部：オーチャードグラス採草地に対するかん水指針，平成11年度普及奨励事項並びに指導参考事項，p. 255～257（1999）

26）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　Ⅰ　収量及び栄養価の現状，平成12年普及奨励事項並びに指導参考事項，p. 162～164（2000）

27）北海道農政部：北海道施施肥ガイド，p. 1～242（2002）

28）北海道立中央農業試験場：北海道土壌区一覧，道立農試資料，21，1～123（1993）

29）北海道立天北農業試験場：平成5年度農林水産省指定草地土壌試験成績書，p. 3～5（1994）

30）石井龍一編：植物生産生理学，水ストレスと作物の光合成・生長，p. 117，朝倉書店，東京（1994）

31）石渡輝夫・小林信也・斉藤万之助・佐久間敏雄：北

海道の農耕地土壌の孔隙分布特性とその分布図，土肥誌，64，685～689（1993）
32）伊東睦泰・大野泰弘・遠山修自：オーチャードグラス草地における時期別分げつの発生・消長とその草地生産にはたす役割，日草誌，34，247～256（1989）
33）岩間秀矩：疑似グライ土の水分環境と排水の特徴，ペドロジスト，24，144～156（1980）
34）岩間秀矩・塩崎尚郎：重粘土における畑地の水収支，土壌の物理性，45，39～47（1982）
35）岩間秀矩・渡辺治郎・小川和夫：寒冷地域における重粘土草地の灌漑（Ⅰ），農土誌，51，197～203（1983a）
36）岩間秀矩・渡辺治郎・小川和夫：寒冷地域における重粘土草地の灌漑（Ⅱ），農土誌，51，485～493（1983b）
37）岩間秀矩：北海道北部に分布する重粘土の物理性不良要因とその改良，北農研報，150，91～198（1988）
38）de Jong, R. and Kabat, P. : Modeling water balance and grass production. Soil Sci. Soc. Am. J., 54, 1725～1732（1990）
39）de Jong, R. and Bootsma, A. : Estimates of water deficits and surpluses during the growing season in Ontario using the SWATRE model. Can. J. Soil Sci., 77, 285～294（1997）
40）木原康孝・丸山利輔・千家正照・西出勤：土壌水の動態と毛管補給の理論的考察，農土論集，155，61～67（1991）
41）木下彰：土壌の水分特性と水管理，北農研資料，1，55～80（1973）
42）Kobata, T., Okuno, T. and Yamamoto, T. : Contribution of capacity for soil water extraction and water use efficiency to maintenance of dry matter production in rice subjected to drought. Jpn. J. Crop Sci., 65, 652～662（1996）
43）河野広・白谷栄作・グィエン　クァン　キム：畑地用水計画における根群域への上向き補給水量について，農土論集，175，9～15（1995）
44）熊井清雄：牧草の季節生産性の機作ならびにその調整技術に関する研究，草地試研報，5，137～265（1974）
45）前田隆・相馬尅之：日本の特殊土壌（その4），農土誌，51，1049～1055（1983）
46）前野休明・江原　薫：牧草の再生に関する生理・生態学的研究（第11報），牧草の再生に及ぼす窒素追肥の影響，日草誌，16，141～144（1970）
47）丸山純孝：施肥量および栽植密度を異にしたオーチャードグラスの分けつ生産，東北大農研報，24，15～54（1972）
48）丸山純孝：Orchardgrassの分けつに関する研究　第1報，帯畜大研報，7，618～627（1973）
49）松中照夫・小関純一・松代平治・赤城仰哉・西陰研治：草地の牧草生産力が飼料給与，牛乳生産に及ぼす影響，道立農試集報，50，34～42（1983）
50）Matsunaka, T., Takeuchi, H. and Miyawaki, T. : Optimum irrigation period for grain production in spring wheat. Soil Sci. Plant Nutr., 38, 269～279（1992）
51）三木直倫・佐藤辰四郎：草地における表面施肥，施肥位置と栽培技術，日本土壌肥料学会編，50～91（1982）
52）三木直倫・高尾欽弥・西宗昭：天北地方重粘土草地の生産力と気象，土壌水分特性の関係，道立農試集報，54，21～30（1986）
53）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）
54）三木直倫・東田修司・宝示戸雅之・山神正弘・西宗昭・高尾欽弥：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）
55）三木直倫：寒冷地における草地土壌の有機物並びに窒素の経年的動態とそれに基づく窒素施肥管理法に関する研究，道立農試報告，79，1～98（1993）
56）水野直治・南松雄：硫酸－過酸化水素による農作物中N, K, Mg, Ca, Fe, Mn定量のための迅速前処理法，土肥誌，51，418～420（1980）
57）中辻敏朗・三木直倫・松原一實：気象・土壌水分特性からみた草地の生産力可能性分級（第1報），北草研報，24，162～165（1990）
58）中辻敏朗：草地の水収支・乾物生産モデルを構築するために解決すべき問題点，土壌の物理性，72，47～53（1995）
59）Nakatsuji, T. Matsunaka, T. and Kiso, S. : The approach to improve the grassland productivity on heavy clay soil with a large amount of barnyard manure, in Proceedings of international workshop on environmentally friendly management of farm animal waste, ed. T. Matsunaka, p.127～131, Sapporo（1998）
60）中辻敏朗・木曽誠二：オーチャードグラスの水利用効率に対する土壌水分の影響，土肥要旨集，45，6（1999）
61）中辻敏朗・松中照夫・木曽誠二：重粘土草地の乾燥期における根圏土層と下層土間の水フラックス，土肥誌，72，18～24（2001）
62）中辻敏朗・松中照夫・木曽誠二：低水分ストレスの影響を組み込んだ牧草の乾物生産予測モデル，土肥

誌，73，1～9（2002a）
63）中辻敏朗・松中照夫・木曽誠二：オーチャードグラスの1番草生育に重要な水分供給時期，土肥誌，73，397～402（2002b）
64）中辻敏朗・松中照夫・木曽誠二：オーチャードグラスの2番草および3番草生育に重要な水分供給重点期，土肥誌，76，169～174（2005）
65）Nakatsuji, T. and Kiso, S. : Evaluating the change in orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) production associated with global warming in Northern Hokkaido, Japan: Effect of low water stress resulting from a decrease in soil water. Soil Sci. Plant Nutr. , in press.
66）日本農業気象学会用語編集委員会編：農業気象用語解説集，p. 96，日本農業気象学会，東京（1986）
67）農耕地土壌分類委員会：農耕地土壌分類第3次改訂版，農環研資料，17，p. 1～79（1995）
68）岡太郎・角屋睦：裸地斜面域における雨水の浸入と地下水流出（2），京大防災研年報，17B，523～533（1974）
69）大崎亥佐雄・奥村純一・関口久雄：根圏土壌の理化学性が牧草生育に及ぼす影響（第2報），道立農試集報，32，35～44（1975）
70）乙間末広・久保井徹：ほ場における土壌水分分布予測モデルとシミュレーション，土肥誌，55，499～506（1984）
71）大槻恭一・三野徹・丸山利輔：気候資料から推定したわが国の蒸発散量，農土論集，112，25～32（1984）
72）Ragab, R., Beese, F. and Ehlers, W. : A soil water balance and dry matter production model :Ⅱ. Dry matter production of oat. Agron. J., 82, 157～161（1990）
73）Ritchie, J. T. : Efficient water use in crop production : Discussion on the generality of relations between biomass production and evapotranspiration ; in Limitations of efficient water use in crop production, ed. H. M. Taylor, W. R. Jordan and T. R. Sinclair, p.29～44, Am. Soc. Agron., Madison, U.S.A.（1983）
74）三枝俊哉：北海道根釧地方の火山性土における草地土壌の肥沃度に対応した施肥管理に関する研究，道立農試報告，89，1～76（1996）
75）坂本宣崇：高緯度積雪地帯におけるオーチャードグラスの周年管理に関する栄養生理的研究，道立農試報告，48，1～58（1984）
76）佐久間敏雄：重粘性土壌の生成過程における物理的因子の役割，近代農業における土壌肥料の研究，第4集，土肥学会編，13～26（1973）
77）佐久間敏雄・小林信也・吉田亨：畑地における水分および熱の動態（第1報），土肥誌，46，507～513（1975a）
78）佐久間敏雄・小林信也・吉田亨：畑地における水分および熱の動態（第2報），土肥誌，46，514～520（1975b）
79）佐久間敏雄：水・熱収支モデルとそれによる2・3の数値実験，水田転換畑における養水分環境の計算モデルに関する研究，北海道大学農学部，11～33（1982）
80）佐久間敏雄・赤沢傳：日本の特殊土壌（その8），農土誌，52，233～239（1984）
81）佐久間敏雄：農耕地の土地評価における土壌物理性および物理的手法の重要性，土壌の物理性，69，49～54（1994）
82）鮫島良次：気象と作物生産のかかわり，北海道の農業気象，51，1～6（1999）
83）Sasaki, H., Fukuyama, M., Suyama, T., Onoue, T. and Shoji, A.:Photosynthesis of Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) in a high concentration of CO2. Grassland Sci., 47, 412～414（2001）
84）佐々木寛幸・神山和則・須山哲男・福山正隆：牧草の地帯区分に及ぼす地球温暖化の影響　1.　寒地型牧草の栽培適地と生産量の変動予測，日草誌，49，23～27（2003）
85）佐藤庚・西村格・伊東睦泰：草地の密度維持に関する生態生理学的研究（第5報），単一クローンで作ったオーチャードグラス草地における栽植密度，窒素施肥量，刈取り回数が分けつの消長および収量に及ぼす影響，日草誌，13，128～142（1967）
86）佐藤庚：寒地型イネ科4草種の出穂期における生産構造の比較，日草誌，19，208～214（1973）
87）清野豁：気候的植物生産モデルと土壌物理性　－土壌水分の気候学的推定の試み－，土壌の物理性，61，11～18（1990）
88）清野豁：気候温暖化が我が国の穀物生産に及ぼす影響，農業気象，51，131～138（1995）
89）関塚清蔵：イネ科牧草類の生育過程と栽培理論［2］，畜産の研究，12，8～12（1958）
90）千家正照・木原康孝・西村直正・西出勤・丸山利輔：土壌水の動態と毛管補給の実験的研究，農土論集，155，53～59（1991）
91）志賀弘行：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（2003）
92）Sinclair, T. R. : Water and nitrogen limitations in soybean grain production Ⅰ. Model development. Field Crop. Res., 15, 125～141（1986）
93）凌祥之・黒田正治・中野芳輔：畑地の水消費と土壌

中の上向き水分フラックスの解析，農土論集，188，9～16（1997）

94）Soil Survey Staff : Keys to soil taxonomy, 6th ed., p.1～524, Pocahontas Press, Inc., Blacksburg, Virginia, USA（1994）

95）相馬尅之・足立忠司・前田隆：日本の特殊土壌（その3），農土誌，51，959～966（1983）

96）Stout, W. L., Jung, G. A. and Shaffer, J. A. : Effect of soil and nitrogen on water use efficiency of tall fescue and switchgrass under humid conditions. Soil Sci. Soc. Am. J., 52, 429～434（1988）

97）竹内晴信・松中照夫・市川信雄・宮脇忠：網走地域における主要畑作物に対するかん水指針，土肥誌，67，430～434（1996）

98）舘野宏司・飯田克実：イネ科牧草，野生およびマメ科牧草の光合成に及ぼす葉内窒素濃度の影響，日草誌，27，357～363（1982）

99）梅田安治：日本の特殊土壌（その9），農土誌，52，323～328（1984）

100）渡辺治郎・古山三郎・片山雅弘：重粘性土壌における下層土撹乱の効果，土肥要旨集，36，106（1990）

101）渡辺治郎・古山三郎・石田博・片山雅弘：灰色台地土草地における灌水とその肥培管理，北農試研報，157，55～76（1992）

102）Wittwer, S. H. :Rising atmospheric CO_2 and crop productivity, HortScience, 18, 667～673（1983）

103）横沢正幸：地球温暖化が農林生態系に及ぼす影響 3．大気CO_2濃度，温度および水分環境の変化と作物の応答，土肥誌，74，229～236（2003a）

104）Yokozawa, M., Goto, S., Hayashi, Y. and Seino, H. :Mesh climate change data for evaluating climate change impacts in Japan under gradually increasing atmospheric CO_2 concentration, J. Agric. Meteorol., 59, 117～130（2003b）

謝　　辞

本研究をとりまとめるに当たり，北海道大学大学院農学研究院教授　波多野隆介博士には終始懇切なる御指導をいただき，さらに本稿の御校閲を賜った。北海道大学大学院農学研究院教授　長谷川周一博士，同　浦野慎一博士には本稿の御校閲を賜り，有益なご助言をいただいた。また，北海道大学名誉教授　佐久間敏雄博士には，土壌学研究者としての端緒を与えていただくとともに，折に触れて御激励を賜った。

本研究は，北海道立天北農業試験場（現北海道立上川農業試験場天北支場）で行われた農林水産省指定試験事業での研究成績を中心にとりまとめたものである。同事業の運営に当たり，農林水産省農林水産技術会議事務局の関係各位には多大なるご支援をいただいた。この間，天北農業試験場長として在任された，斎藤亘博士，大崎亥佐雄氏，菊地晃二博士（現ズコーシャ），古山芳廣博士（現ホクレン），所和暢博士には，研究途上で御指導と御激励をいただいた。

天北農業試験場土壌肥料科長であった松原一實氏，松中照夫博士（現酪農学園大学教授），木曽誠二博士（現中央農業試験場環境保全部長）には，終始変わらぬ懇切なご指導をいただくとともに，研究遂行に特段の便宜を図っていただいた。天北農業試験場土壌肥料科研究職員であった熊谷秀行氏（現道南農業試験場場長），三木直倫博士（現根釧農業試験場研究部長），小宮山誠一氏（現原子力環境センター農業研究科長），大塚省吾氏（現上川農業試験場天北支場）には，示唆に富む有益な論議を共にしていただいた。

根釧農業試験場土壌肥料科長であった能代昌雄氏（現北海道サンアグロ），同科研究職員であった寶示戸雅之博士（現農業・食品産業技術総合研究機構畜産草地研究所資源循環・溶脱低減草地サブチーム長），三枝俊哉博士（現根釧農業試験場草地環境科長），松本武彦氏（現中央農業試験場企画情報室），酒井治氏（現根釧農業試験場草地環境科），甲田裕幸氏（現根釧農業試験場技術普及部主査）には，研究途上で終始変わらぬ御激励をいただいた。

また，農林水産省北海道農業試験場（現農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター）草地地力研究室長であった早川嘉彦博士，同室研究員の金澤健二博士には，折に触れて研究遂行上の貴重なご助言をいただいた。

さらに，北海道開発局稚内開発建設部農業開発課の関係各位には，第 4 章の試験実施に多大なるご支援をいただいた。

最後に，本研究のとりまとめにあたっては，中央農業試験場環境保全部の関係各位に絶大なるご支援，ご協力をいただいた。

以上の諸氏に心より感謝の意を表する。

Evaluation of the Influence of Low Water Stress due to the Decrease in Soil Water on Grassland Productivity on Heavy Clay Soils in Northern Hokkaido, Japan

Toshiro Nakatsuji

Summary

Large-scale grasslands farming is being developed in Northern Hokkaido, Japan, where precipitation from May to August, the essential period for grass growth, is as low as 300 mm approximately; with half of the grassland located on heavy clay soils with poor water retention characteristics. Therefore, grasslands in this area often suffer from the damage caused by low water stress due to the decrease in soil water. The water environment is recognized as one of the important factors affecting the grass production in this area. The purpose of this study is to develop the method for evaluating the influence of low water stress on grassland productivity on heavy clay soils in Northern Hokkaido, Japan. The results obtained were summarized as follows:

1. Soil water regimes in grasslands on heavy clay soils during a dry period

Soil water flux between the root zone and subsoil in grasslands (orchardgrass, *Dactylis glomerata* L.) on heavy clay soils, Terrace Brown Forest Soil (Bf, Typic Dystrochrepts) and Haplic Gray Upland Soil (GrU, Typic Epiaquults), was investigated using a water balance method in order to analyze the role of the upward soil water flux in grass growth during a dry period. The downward soil water flux from the root zone (0 to 60 cm) to the subsoil (below 60 cm) showed an average rate of 0.21 cm d^{-1} for Bf and 0.19 cm d^{-1} for GrU during the wet period when the available soil moisture content was high. On the contrary, the upward soil water flux from the subsoil appeared and water was supplied to the root zone throughout the dry period when the available soil moisture content was low. The average upward flux for GrU was estimated at 0.04 cm d^{-1} (20% of the evapotranspiration) and the values for GrU were smaller than those for Bf, 0.10 cm d^{-1} (55%). The difference in the upward soil water flux between Bf and GrU was due to the difference in the unsaturated conductivity between the subsoils. The matric potential of the subsoils for both Bf and GrU decreased during the period when the upward flux occurred. Stagnant water level in GrU also gradually decreased during a period of month from early July, along with the appearance of the upward flux. Soil water in the subsoil was important as a source of upward flux for both Bf and GrU and especially stagnant water was also important for GrU. The presence of the upward flux in grasslands on heavy clay soils seemed to be one of the significant factors which control grass growth under drought conditions.

2. Effective water supply for dry matter production of orchardgrass during the first growing period

In order to evaluate the influence of low water stress on dry matter production (DMP) of orchardgrass during the first growing period, the effect of water supply in orchardgrass on growth was examined by analyzing the relation between the nitrogen uptake by orchardgrass and the yield components. The lack of water supply from the sprouting stage to the internode elongation stage (a period of about 20 days) resulted in a remarkable decrease in the yield of plants in pot experiments. These findings were ascribed to the fact that the number of tillers per pot, which strongly affected the yield in the pot experiment, could not increase sufficiently throughout the experimental period, because the lack of water supply restricted nitrogen absorption by orchardgrass and then delayed the production of tillers. Compared with the results of the pot experiment, the effect of water supply on the growth of orchardgrass under field conditions was not appreciable, probably because of the presence of a large amount of water stored in soil, which was derived from melted snow. The results obtained here showed that the optimum water supply for DMP of orchardgrass during the first growing period extended from the sprouting stage to the internode elongation stage, namely during a period of about 20 days.

3. Effective water supply for dry matter production of orchardgrass in the second and the third growing period

In order to evaluate the influence of low water stress on DMP of orchardgrass during the second and the third growing period respectively, the effect of water supply in orchardgrass on growth was examined by analyzing the relation between the nitrogen uptake by orchardgrass and the yield components. For the second growing period of orchardgrass, the lack of water supply in the early stage, which was a period of about 20 days after the time of the first cutting, resulted in a remarkable decrease in the yield of grass. For the third growing period, the yield of orchardgrass obviously decreased when water was not supplied in the early stage which was about 10 days after the time of the second cutting. These findings were ascribed to the fact that the weight per tiller, which strongly affected the both yields of the second and the third cutting, could not increase sufficiently throughout the experimental periods, because the lack of water supply restricted nitrogen absorption by orchardgrass and then delayed the regrowth of tillers. The results obtained here showed that the optimum water supply for DMP of orchardgrass during the second and the third growing period was below respectively; a) the second growing period: the early stage (about 20 d after the time of the first cutting), b) the third growing period: the early stage (about 10 d after the time of the second cutting).

4. Model for dry matter production of grass under water stress conditions

A model for DMP of orchardgrass under water stress conditions was developed to predict the degree of drought damage to grasslands. The model was applied to field studies conducted on Bf and GrU during a drought year. The performance of the model was evaluated by comparing the simulated values with the experimental data. The model consisted of three submodels for calculating the water flow, water uptake by roots and DMP, respectively. A soil layer, 5 cm thick, was used as a unit for the calculations in the model. In the water flow submodel, the water flux among the layers was calculated according to the potential gradient and then the water content of each layer was estimated based on the water balance. The water uptake submodel enabled to calculate the amount of water uptake from each soil layer, and the amount of uptake was assumed to be restricted by the matric potential of the layer. The amount of water uptake from each layer was assumed to be maximum when the matric potential of the layer ranged between 0 and -1000 cm, but for values between -1000 and -16000 cm, the amount of uptake was assumed to decrease linearly with the reduction of the matric potential. In the DMP submodel, the DMP was described as the product of the amount of water uptake and water use efficiency. The water use efficiency was assumed to vary with the water content. Namely it was assumed that the water use efficiency was maximum when the values of the matric potential of each layer ranged between 0 and -3000 cm, while in the range of -3000 to -16000 cm, the efficiency was assumed to decrease linearly with the decrease of the matric potential. The model was applied to field studies conducted on Bf and GrU during a drought year. The simulated values of grass dry weight, soil water content profile and evapotranspiration rate for both soils showed a good agreement with the experimental data. Additionally, the estimated grass dry weight over three years including both drought and wet years also reasonably agreed with the measured data. From the results above, it was concluded that the model, in which the decrease of DMP along with the decrease of soil water was due to the reduction of both water uptake by roots and water use efficiency, could reasonably simulate the effect of water stress on dry matter production of grass and could contribute to predict the degree of drought damage to grasslands.

5. Evaluating the change in grass production associated with global warming and resulting low water stress

The impact of global warming on changes in DMP of an orchardgrass located on three soils (coarse, medium, and fine textured) in Northern Hokkaido, Japan, was estimated. The influence of low water stress due to the decrease in soil water on a change in impact was evaluated, through simulations by using a climate change scenario and the previously validated grass growth model described above. The effect of low water stress on the growth during the first grass growing period (early May-early June) due to global warming would not be so intensive that the DMP would be expected to increase (1.2-1.4 times of the present), except for fine textured soil in low precipitation. On the other hand, for the second grass growing period (mid June-early August), the effect of low water stress on growth would intensify over the years. An increase in DMP could be barely expected in the case of low precipitation and finer textured soil. The changes in DMP during the third grass growing period (mid August-mid September) with global warming and the influence of the amount of precipitation on these changes were negligible. The total DMP from the three cutting periods increased with global warming regardless of the soil texture and the amount of precipitation, although the finer the

soil texture, the lower the total weights were. However, the maximum ratio of the total DMP in the future due to global warming to the present was about 1.2 times at most. This ratio was smaller than the previously reported value, estimated solely based on weather conditions over 100 years. It can be concluded that when we evaluate the change in grass production associated with global warming, it would be important to take not only the effect of the increase in temperature and atmospheric CO_2 concentration into account but also the effect of the occurrence of low water stress due to the decrease in soil water, depending on the amount of precipitation, or soil water retention characteristics.

6. Conclusion

1) Soil water regimes in grasslands (orchardgrass) on heavy clay soils in Northern Hokkaido, Japan, were elucidated focusing on the soil water flux between the root zone and subsoil.
2) The influence of low water stress due to the decrease in soil water on DMP of orchardgrass was determined through analyzing the relation between the nitrogen uptake by the grass and the yield components.
3) A model for DMP of orchardgrass under low water stress conditions was developed by integrating the results obtained from the experiments above and a lot of previous contributions associated with low water stress.
4) The performance of the model was evaluated by applying the model not only to field studies conducted on heavy clay soils in a drought year but also to conditions under global warming in future, and then the validity and the availability of the model were demonstrated.
5) From these results, the developed model was proposed as the method for evaluating the influence of low water stress on grassland productivity on heavy clay soils in Northern Hokkaido, Japan.

ISSN　0367-6048
北海道立農業試験場報告　第119号

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

著　者　　中　辻　敏　朗

平成20年３月31日　発行
発行者　北海道立中央農業試験場
069-1395　北海道夕張郡長沼町東６線北15号
印刷所　北海道印刷企画株式会社

ISSN 0367－6048

REPORT

OF

HOKKAIDO PREFECTURAL AGRICULTURAL

EXPERIMENT STATION

No. 119

Evaluation of the Influence of Low Water Stress due to the Decrease in Soil Water on Grassland Productivity on Heavy Clay Soils in Northern Hokkaido, Japan

---

by

Toshiro Nakatsuji

Published by

Hokkaido Central Agricultural

Experiment Station

Naganuma, Hokkaido, 069-1395 Japan

March 2008