第１章　緒　　論

第１節　背景と目的

北海道のスケールメリットを活かした環境調和型の土地利用型酪農を推進するためには，飼料生産基盤である草地の単位面積当たり収量（単収）を高め，飼料自給率の向上を図ることが不可欠である[26]。また，土地利用型酪農では，良質の粗飼料（牧草）を乳牛に給与して乳量を高める方が，購入濃厚飼料の多給に依存するよりも収益性の高い経営ができると指摘されている[49]。それゆえ，酪農経営における飼料自給率の向上は，環境との調和および収益性向上の両面から重要な課題と言える。それにも関わらず，近年，北海道の草地の単収に大きな変化はない。本研究が対象とする大規模草地型酪農地域の北海道北部も例外ではなく，当地域の単収はここ10数年の間，生草重として１ha当たり30～35 t程度で停滞している[22]。

この原因として，収穫適期から逸脱した粗放な刈り取りや，草地の草種構成等に見合わない不適切な施肥管理などの影響が指摘されている[26]。これに加え，すでに多くの研究によって明らかなように，夏期間の降雨量が少なく保水性の小さな重粘土が分布する北海道北部に特有の問題として，低水分ストレスの影響[21, 35, 52, 53, 54, 57, 62]も無視できない。

すなわち，北海道北部の５～９月（牧草の主要生育期間）の降雨量は440～500 mm程度で，同じ草地型酪農地域である北海道東部（中標津町，670 mm）の約7割と少ない（表１－１）。また，降雨量と牧草蒸発散量との量的関係に基づいて定義した乾燥期間[35]に該当する日数も，全般に道東よりも多く，特に５～８月に乾燥しやすい傾向がある（図１－１）。

一方，草地の基盤となる土壌は，灰色台地土や褐色森林土を典型とする重粘土[24]が草地面積の約5割を占めており[28]，これらの土壌は全般に，腐植含量が少なく細粒質で，保水性および透水性に乏しいという特性を持っている。また，小河川沿いに分布する狭小な低地土も細粒質のものが多く，北海道北部に分布するこれら主要土壌の有効水分孔隙量は，北海道東部の黒ボク土の４～７割程度に過ぎない（表１－２）。このような降雨特性と土壌条件とを反映し，強度の低水分ストレス（干ばつ）により牧草収量が低下する年次[52]は，２～４年に１度の頻度で発生している（表１－１）。以上のように，北海道北部の水分環境は牧草生育にとって極めて厳しい条件にある。

このような状況を改善すべく，重粘土の水分環境や物理的特性[24, 33, 34, 37, 53]と，それらが牧草生育に及ぼす影響[21, 35, 37, 52, 53, 54, 57, 69]について，数多くの研究が行われてきた。しかし，これらの研究は，水分環境を人為的に制御

表１－１　北海道北部の降雨特性
（1980～2000年のアメダスデータより）

	北海道北部		北海道東部
	浜頓別	豊富	中標津
降雨量[1]（mm）	499	438	670
干ばつ年の出現頻度[2]	4年に1度	2～3年に1度	－

[1] ５～９月の積算値.
[2] 上記降雨量が400 mm未満の年次の出現頻度．北海道北部にのみ適用.

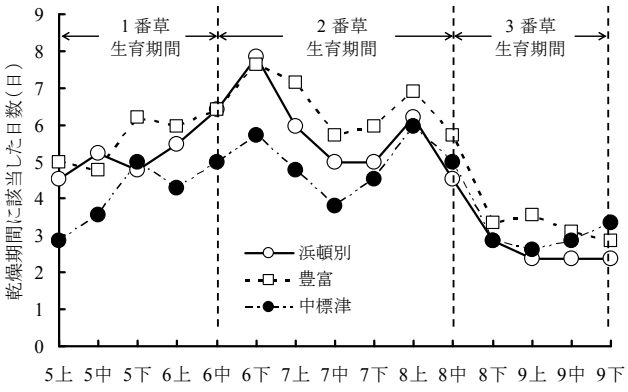

図１－１　乾燥期間に該当した日数の時期別推移
1980～2000年の平均値．各番草の生育期間はオーチャードグラスの場合．横軸の数字は月，上・中・下は旬．乾燥期間は積算降雨量が積算蒸発散量（日蒸発散量を２mmと仮定）の½以下となる連続期間（岩間ら[35]による）.

表１－２　北海道北部に分布する主要土壌の有効水分孔隙量

土　壌	孔隙量（$cm^3\ cm^{-3}$）
褐色森林土（n = 160）	0.185 ± 0.055 b
灰色台地土（n = 105）	0.158 ± 0.049 c
褐色低地土（n = 14）	0.195 ± 0.038 abc
灰色低地土（n = 48）	0.223 ± 0.058 a
黒ボク土（北海道東部）	0.344

マトリックポテンシャルで-30～-16000 cmに相当する孔隙量（５～15 cm土層）．黒ボク土は三枝[74]より引用．黒ボク土以外については平均値±標準偏差で表示．異なるアルファベット間に有意差あり（Tukey-KramerのHSD検定）.

することの困難さから，水分環境と牧草生育との関係を降雨条件や土壌条件が異なる複数年次の調査によって解析した，事例研究にとどまっているものが多い。一般に作物は，低水分ストレスを被るとその影響が後々まで甚大となるような，ある特定の生育時期を有する[16, 50, 97]。これは牧草でも同様と考えられるが，前述の研究では，この点についての検討はほとんど行われていない。そのため，任意の降雨パターンや土壌水分条件に対して，牧草がどの程度の低水分ストレスを受けるかといった予測や評価が困難となっている。

また，一連の研究では，水分環境として特に降雨量と土壌の保水性に着目しているが，牧草の低水分ストレスに影響する環境要因はこれだけではない。気象条件では気温，日射量などが，また土壌条件では透水性も重要である。さらに根系分布のような牧草側の要因も，低水分ストレスの発生に影響することが想定される。そして，これらの要因が互いに密接に関連し合って，牧草の生育に影響を与えている。

このような複数の要因が牧草の低水分ストレスに及ぼす影響を，総合的かつ定量的に評価することができれば，任意の低水分ストレス条件下の牧草生育を予測でき，特に強度の低水分ストレスと考えられる干ばつ時の被害軽減策の開発や導入等に有効である。また，現状における対策だけでなく，地球温暖化による将来の気候変動への対応にも応用できる。限りある貴重な水資源を有効活用しながら，北海道北部の牧草生産性を，現在はもちろん，将来に渡って向上させるためには，牧草生育に及ぼす低水分ストレスの影響を適正に評価する手法の開発が必要不可欠である。

以上の背景に基づき，本研究では，北海道北部の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ことを目的とした。そこで，まず，重粘土草地の乾燥期における土壌水分動態を，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した。次いで，北海道の重要草種であるオーチャードグラス（*Dactylis glomerata* L.）の各番草について，水分供給時期と牧草の生育・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牧草生育に及ぼす影響を明確にした。そして，これらの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牧草の乾物生産予測モデルを開発し，その妥当性を検証した。最後に，開発したモデルを活用し，将来の地球温暖化によって北海道北部の牧草生産量が現状からどのように変化するかを，特に低水分ストレスの影響に重点をおいて考察した。

第２節　既往の研究

北海道農牧地土壌分類２次案[23]によれば，北海道北部（宗谷支庁管内）の耕地面積の52％は，酸性褐色森林土（農耕地土壌分類第３次改訂版[67]では褐色森林土），疑似グライ土（同灰色台地土），およびグライ台地土（同グライ台地土）で占められている[28]。本地域のこれらの土壌は，全般に粘性が強く，下層土が緻密で，保水性および通気性に乏しいその特徴から重粘土[80]と呼ばれ，火山性土[45, 95]，泥炭土[99]と並んで北海道の特殊土壌に位置付けられてきた。

重粘土の水分環境や物理的性質については，それらの特性や緻密土層の成因等を土壌生成過程と関連づけて考察したペドロジー的[24, 37, 76]研究や，劣悪な水分環境と物理性を改善するために有効な各種方策（暗きょ排水，耕うん法，客土，かんがい等）の効果を検討したエダホロジー的[33, 34, 35, 37, 59]研究など，幅広い視点から多くの報告がある。これらの一連の研究により，重粘土の劣悪な物理性が広く認識されるとともに，重粘土の基本的な土地改良法として暗きょ排水や心土破砕などによる排水改良や深耕による下層土改良が有効で，テンサイ，バレイショなどの根菜類や飼料用トウモロコシの生育改善に効果をもたらすことが明らかとなった[37]。その反面，重粘土は保水性に乏しい[37, 52, 54]ため，主要根群域が浅い（０～20 cm程度）牧草[69]では，排水性の改良がむしろ乾燥期の干ばつを助長する危険性も指摘されている[33]。また，心土破砕等によって膨軟化した下層土も施工後の年数経過とともに再び緻密化し，粗孔隙も急激に減少する[100]など，重粘土の不良な物理的性質の根本的改良には，まだ多くの問題が残されている。一方，三木・高尾[53]は，微地形により褐色森林土，灰色台地土，グライ台地土等の種種の土壌が出現する北海道浜頓別町ポンニタチナイ地区について縮尺の大きな細密土壌区分図（5000分の1）を作成し，立地土壌の特性に適した草地管理法（集約的もしくは粗放的管理の適否，耐干性と耐湿性からみた適草種の導入など）の重要性を指摘している。これは，土地改良の意義を否定するものではないが，根本的改良が困難な重粘土に対する現実的な対応策の一つとして評価できる。

このような重粘土に立地する草地の牧草収量は，降雨量の影響を強く受ける。宝示戸ら[21]は，６月下旬～７月中旬の日平均降雨量が２mmを下回ると低水分ストレスによって同期間の牧草生育が停滞することを示した。また，三木ら[52]は，オーチャードグラスの１，２番草収量

が生育期間中の降雨量と正の相関を示すことを見いだした。一方，土壌の保水性も牧草収量に強く関与しており，窒素増肥による増収程度は保水性が大きいほど高まること[57]，乾燥年（5～9月の降雨量が400 mm未満）には保水性に乏しい灰色台地土草地の収量が保水性に優れる草地よりも明らかに少ないこと[52]，またその収量低下程度は更新後10年以上の経年化草地で大きいこと[52]などが認められている。これに対し，収量の土壌間差はむしろ湿潤年に明瞭で，乾燥による収量低下程度に土壌間差はないとする報告[35]もあり，見解が分かれている。

低水分ストレスを軽減するための耕種的技術も検討されてきた。灰色台地土はその劣悪な砕土性のため浅い耕起にとどまりがちであるが，プラウを用いた普通耕起（深さ25 cm）は，ロータリーのみによる浅耕起（同5 cm）よりも乾燥年において多収を示す[37]。これは普通耕起では作土層と下層土間の毛管伝導性が高まり，牧草が下層土の水分を効率よく吸収できたためと説明されている。同じく灰色台地土に対し，草地更新時に深耕（深さ40 cm）とともに堆きゅう肥を施用（150 t ha^{-1}）すると，下層土へ根が伸長し，乾燥年の収量低下の緩和に効果的であるとされている[54]。一方，低水分ストレスの直接的回避方法として，米国[7]，カナダ[39]，オランダ[38]等の諸外国で研究が盛んな，かん水法についての検討も若干行われ[36,101]，主要根群域が浅い草地では1日当たり2 mm程度の少量かん水が適当であること[36]，かん水が乳牛スラリーの施用効果を向上させることなどが報告されている[101]。ただし，畑・園芸作物[50,97]のように，生育期間中の特定の時期における水分供給が収量や品質に与える影響は検討されておらず，牧草に対する低水分ストレスの影響評価は未だ十分とは言えない。

牧草の低水分ストレスは，降雨量・気温・日射量等の気象条件，保水性・透水性等の土壌条件や，根張りのような牧草側の要因が複合的に作用して生じる。このような多くの要因が低水分ストレスにどのように影響しているかを定量的に表現するには，複数の要因を包括的に取り扱う手法であるモデル化が有効である[11,58]。低水分ストレスの影響を考慮した作物生育モデルは，一般畑作物では多数開発されており，それらを用いて低水分ストレスが各種作物の生育や収量に与える影響などが検討されている[6,72,91,92]。たとえば，志賀[91]は，オランダで開発された作物モデルWOFOSTを北海道の秋播きコムギに適用し，低水分ストレスの影響を考慮したポテンシャル収量に基づいて，安定生産に必要な土壌の保水力と有効土層深を算出した。また，Feddes et al.[6]は，土壌水分動態と作物生育を統合したモデルSWACROを用いて，バレイショ収量におよぼす土壌圧密の影響を，蒸発散量や土壌水分動態と関連づけて解析している。一方，草地を対象とした研究[38]は少なく，国内では，佐久間[81]が草地の水・熱収支モデルを活用して，蒸発散量と要水量から牧草収量を推定した例が見られる程度である。ただし，このモデルは，草地の水・熱収支解析を本来の目的としているため，5～9月にかけての3回の生育期について要水量をいずれも同一の値としているなど収量予測に関しては改良すべき点が多い。低水分ストレスの影響を適切に組み込んだ牧草生育モデルの開発が望まれる。

第２章　供試材料および試験方法

第１節　供試材料

１．供試圃場の土壌

本研究の多くは，北海道枝幸郡浜頓別町（北緯45度７分，東経142度22分）の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）および，浜頓別町の南東約140 kmに位置する紋別市小向（北緯44度18分，東経143度24分）の農林水産省北海道農業試験場畑作研究センター遺伝資源利用研究室紋別分室（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紋別試験地）の各試験圃場で実施した。牧草生育期間（５～９月）の平均気温の平年値は浜頓別町と紋別市でともに13.９℃，同期間の降雨量はそれぞれ468 mm，449 mmで，大差はない。いずれの地域も，寒冷な気象条件のため，草地を基盤とした酪農が主要な農業形態となっている。

両圃場の土壌は，農耕地土壌分類第3次改訂版[67]によれば，天北農業試験場が台地褐色森林土，北海道農業試験場が普通灰色台地土に，またSoil　Taxonomy[94]では，各々Typic　Dystrochrepts，Typic　Epiaquultsに分類される（表２－１）。

２．供試草地とその管理法

本研究で用いた草地は，オーチャードグラスの単播採草地（品種：キタミドリ，播種量25 kg ha^{-1}，散播）である。供試草地の更新後経過年数は試験により異なるので，試験方法で後述する。刈り取りは本地域での適期である６月上～中旬，８月上～中旬，９月中～下旬の年３回とし，それぞれを１番草，２番草，３番草と呼ぶ。施肥は北海道施肥ガイド[27]に準じて行い，１，２および３番草のそれぞれに対して，1 ha当たりN，P_2O_5，K_2Oで各々60，20～30，60 kgを単肥（尿素，過リン酸石灰，硫酸カリウム）の組合せ，もしくは高度化成肥料で与えた。

第２節　試験方法

１．本研究全般に共通する方法

１）牧草の採取法

牧草の刈り取り高さは地際より３cmとし，これより上を地上部として採取した。採取した牧草は70℃で48時間以上通風乾燥して地上部乾物重を求め，その一部を粉砕して分析に供した。

２）土壌の採取法

撹乱試料はステンレス製採土器で，また不撹乱試料は100 mL容採土管で採取した。

３）牧草および土壌の分析方法

⑴　牧草分析法

牧草の全窒素は，硫酸－過酸化水素法[56]で分解した後，水蒸気蒸留法で定量した。

⑵　土壌分析法

飽和透水係数は不撹乱試料を毛管飽和した後，変水位法[5]により測定した。マトリックポテンシャルと体積水分率との関係（水分保持特性）は，同試料を用いて，−60 cm以上は砂柱法[5]，−60～−6000 cmは加圧板法[5]，−6000～−16000 cmは遠心法[4]で求めた。仮比重は同試料を105℃で乾燥して算出した。

含水比は炉乾法で求め，含水比に仮比重を乗じて体積水分率を得た。粒径組成はピペット法で，pH（H_2O）はガラス電極法で，無機態窒素は10％塩化カリウム溶液で抽出後，デバルタ合金を加えた水蒸気蒸留法で求めた。有効態リン酸はブレイNo.２法で，また交換性カリウムは１N酢酸アンモニウム溶液（pH　7.0）で抽出後，炎光法で測定した。なお，粒径組成および化学性の分析には２mm篩を通した風乾細土を用いた。

表２－１　試験圃場の土壌断面形態

土壌名	層位	深さ（cm）	腐植	土性	土色	構造	斑紋	硬度（mm）	粘着性	可塑性
台地褐色森林土	Ap	0～20	含む	CL	7.5YR4/3	中度，粒状	なし	17	中	強
	B	20～35	含む	CL	7.5YR4/3	中度，亜角塊状	なし	21	中	強
	BC	35～62	あり	LiC	7.5YR4/6	弱度，角塊状	なし	23	強	強
	C	62～100+	あり	LiC	10YR5/6	弱度，角塊状	なし	24	強	強
普通灰色台地土	Ap	0～15	富む	LiC	7.5YR3/3	弱度，粒状	なし	15	強	強
	Bg	15～45	あり	HC	10YR5/2	弱度，亜角塊状	雲状あり	20	強	強
	Cg1	45～90	あり	HC	10YR6/2	壁状	雲状・膜状含む	22	強	極強
	Cg2	90～100+	あり	HC	10YR7/1	壁状	雲状・膜状含む	23	強	極強

２．第３章「重粘土草地の土壌水分動態」の試験方法

第３章では，重粘土草地の乾燥期における土壌水分動態の特徴を，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ことを目的とし，1993年５～９月にかけて以下の試験を実施した。

１）供試草地

天北農業試験場試験圃場の更新後６年目のオーチャードグラス草地と，北海道農業試験場畑作研究センター試験圃場の更新後３年目の同草地を用いた。

２）調査項目とその方法

⑴　土壌水分

ほぼ１週間に１回の頻度で深さ40 cmまでを10 cmごとに採土し，体積水分率を求めた。また，テンシオメータを深さ30～150 cmまで20 cm間隔で７深度に埋設して，土壌のマトリックポテンシャルを２～７日おきに測定し，別途測定した水分保持特性を用いて必要に応じてマトリックポテンシャルを体積水分率に換算した。また，マトリックポテンシャルが０cmとなる深さを地下停滞水位とした。

根圏土層とした深さ60 cmまでの土壌水分量は，採土法とテンシオメータ法を併用して算出した。すなわち，夏期間の著しい乾燥によりテンシオメータの測定限界を超える土層および同メータを埋設していない表層（天北農業試験場では０～20 cm，北海道農業試験場では０～40 cm）については採土法で，またそれ以深の土層についてはテンシオメータ法で体積水分率を求め，深さ60 cmまでを積算して根圏土層の土壌水分量とした（水頭表示）。また，根圏土層の土壌水分量のうちマトリックポテンシャル−30～−16000 cm間に保持されている水分量を同土層の有効水分量とした。

⑵　草地の蒸発散量

蒸発散量は，佐久間ら[77]の方法に準じて熱収支法で推定した。草地における熱収支式は以下のように表される。

$$Rn = H + LE + G \qquad (2-1)$$

ここで，Rn：純放射量，H：顕熱伝達量，LE：潜熱伝達量，G：地中熱流量である（単位はいずれも$cal\ cm^{-2}\ h^{-1}$）。これらの熱収支項のうち，Rnを放射収支計（英光精機製CN−11型，地表面から高さ180 cmに設置）で，Gを熱流計（同製CN−81型，地表面から深さ３cmに埋設）で測定した。潜熱伝達量LE（蒸発散に消費される熱量）は実測できないため，ボーエン比（β）を用いて間接的に求めた。すなわち，βは，

$$\beta = H / LE \qquad (2-2)$$

と表されるので，（２－２）式を（２－１）式に代入すれば，LEは次式で得られる。

$$LE = (Rn - G) / (1 + \beta) \qquad (2-3)$$

蒸発散量ET（$cm\ h^{-1}$）は，LEを水の蒸発潜熱（$597.3 - 0.6 \times T$：$cal\ cm^{-3}$）で除して（２－４）式のように算出し，その24時間積算値を日蒸発散量とした。ここで，Tは気温（℃）である。

$$ET = LE / (597.3 - 0.6 \times T) \qquad (2-4)$$

なお，（２－３）式のβは，（２－５）式より近似的に求めることができる。

$$\beta \fallingdotseq 0.5 \times (T_1 - T_2) / (e_1 - e_2) \qquad (2-5)$$

ここで，T_1：高さ180cm の気温（℃），T_2：高さ40 cmの気温（℃），e_1：高さ180 cmの水蒸気圧（mmHg），e_2：高さ40 cmの水蒸気圧（mmHg）である。それぞれの高さにおける気温と水蒸気圧は，自作の熱電対式通風乾湿計を用いて測定した。

⑶　根圏土層と下層土間の水フラックス

根圏土層と下層土間の水フラックスは，水収支法[4]により，以下の手順で求めた。水フラックスの算出法にはいくつかの方法が提案されている[14]が，本研究では水フラックスの季節的推移の傾向を把握するのに適した水収支法を採用した。

根圏土層の水収支は任意の期間Δtについて，次式のように表される。

$$\Delta S / \Delta t = R - ET - D \qquad (2-6)$$

ここで，R：降雨量，ET：蒸発散量，ΔS：根圏土層の土壌水分変化量，D：根圏土層と下層土間の水フラックスで，単位はいずれもmmである。符号はRとETが正，ΔSは増加の時が正，減少の時は負である。またDは上向き（下層土から根圏土層への水の流入）で負，下向き（根圏土層から下層土への水の流出）で正である。地表面流去水は対象圃場が平坦であったので考慮しなかった。

（２－６）式の各項のうち，ETおよびΔSは前述の方法で得た。Rには天北農業試験場では浜頓別町のアメダスデータを，北海道農業試験場では畑作研究センター露場の観測値を用いた。Dは（２－６）式にET，RおよびΔSを代入し，差し引き計算により求めた。以上の水収支計算は，採土法による土壌水分の測定間隔に合わせてほぼ１週間ごとに行った。

３．第４章第１節「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」の試験方法

一般に，作物は，低水分ストレスを受けるとその影響が後々の生育にまで及ぶような，ある特定の生育時期を有する[16,50,97]ことが知られている。しかし，牧草ではこ

のことに関する研究事例がほとんど見あたらない。そこで，第4章第1節では，オーチャードグラスの1番草を対象に，生育時期別の低水分ストレスが牧草生育に及ぼす影響を明らかにするため，以下の試験を実施した。

１）ポット試験

⑴　供試牧草

融雪直後の更新後3年目の草地からオーチャードグラスを採取し，根部を水洗後，枯葉を除去して1個体1茎とした。これらのうち草丈が10 cm，葉数3枚程度の個体を選び，天北農業試験場試験圃場の褐色森林土を3.6 kg（乾土として）充填した1/5000 aワグネルポットに10個体ずつ移植した。土壌の土性は埴壌土（CL），pH（H_2O）は5.9，無機態N，有効態P_2O_5および交換性K_2O含量は各々 0.07，0.47，0.15 g kg^{-1}である。移植した個体の定着を促す程度に少量かん水しながら数日間ガラス室内で生育させた後，間引いてポット当たり8個体として試験に用いた。施肥は，後述する水分供給処理の開始時に行い，N，P_2O_5，K_2Oとしてポット当たりいずれも0.5 gを，硫酸アンモニウム，過リン酸石灰，硫酸カリウムで与えた。

⑵　水分供給処理

天北農業試験場の無加温ガラス室内で以下の水分供給処理を行った。1番草生育期間（1997年5月6日～6月5日の30日間）を生育相に基づき10日ごとの3つの期間（Ⅰ期，Ⅱ期，Ⅲ期）に分け，それぞれの期間のかん水の有無を組み合わせた7水準の処理区（4反復）を設定した（図２－１）。各期間の長さを均等に設定したのは，このような試験事例がほとんど見あたらないため，最も単純な期間設定が望ましいと考えたからである（以降の試験においても同様）。なお，オーチャードグラスの生育期としては，Ⅰ期は萌芽期～伸長期，Ⅱ期は伸長期～節間伸長期，Ⅲ期は出穂期に該当する。

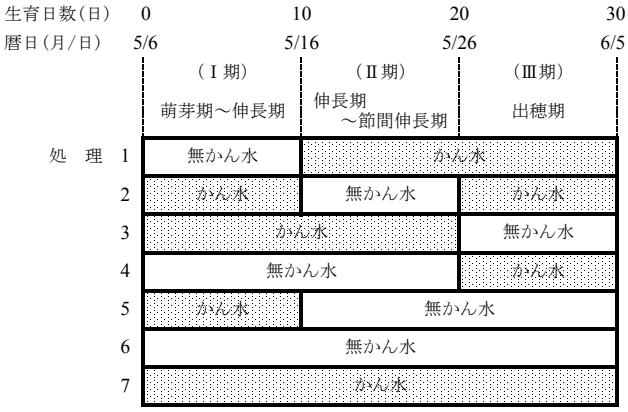

図２－１　1番草に対する水分供給処理の概要（ポット試験，1997年）

処理1は萌芽期～伸長期を，処理2は伸長期～節間伸長期を，処理3は出穂期をそれぞれ無かん水とし，その他の期間はかん水する区である。処理4および5は，それぞれ萌芽期～節間伸長期，伸長期～出穂期のように連続する2期間を無かん水とし，その他はかん水する区で，処理6は全期間無かん水，処理7は全期間かん水する区である。かん水期間中には，毎朝ポットにじょうろで水道水を潤沢に与えた。

⑶　調査項目

Ⅰ，ⅡおよびⅢ期の終了時に，有穂茎（穂ばらみ茎と出穂茎）とそれ以外の伸長茎とに分けて茎数を計測するとともに，地上部乾物重と地上部窒素含有量を調査した。1茎重は地上部乾物重を全茎数で除して算出した。

２）雨よけハウス圃場試験

⑴　供試草地

天北農業試験場試験圃場の更新後3年目のオーチャードグラス草地に，間口6.3 m×長さ24 mの雨よけビニルハウスを設置し，降雨を遮断して試験に用いた。ハウスの両間口は全面吹き抜けとし，側面のビニルも地面からハウス肩部まで除去して，ハウス内の温度上昇をできるだけ防ぐようにした。また，ハウスのビニルは試験開始の10日前から張り，土壌が適度に乾燥した状態から試験を開始できるように留意した。

土壌の土性は埴壌土（CL），pH（H_2O）は　6.0，無機態N，有効態P_2O_5および交換性K_2O含量はそれぞれ0.009，0.53，0.14 g kg^{-1}であった（いずれも0～5 cm土層）。施肥は後述する水分供給処理開始時に行い，その量は本章第1節－2に示したように，1 ha当たりN，P_2O_5，K_2Oで各々 60，20，60 kgとし，それぞれを尿素，過リン酸石灰，硫酸カリウムで与えた。草地更新後から試験に供するまでの期間は，北海道施肥ガイド[27]に準じた年3回刈りの均一栽培とした。

⑵　水分供給処理

1番草の生育期間（1995年5月8日～6月13日の36日間）を2つの期間（Ⅰ期，Ⅱ期）に分け，4水準の水分供給処理を設定した（図２－２）。オーチャードグラスの生育期では，Ⅰ期は萌芽期～伸長期，Ⅱ期は節間伸長期～出穂期に該当する。

処理1は萌芽期～伸長期を，処理2は節間伸長期～出穂期を無かん水とし，その他はかん水する処理である。処理3は全期間無かん水，また処理4は全期間かん水する区である。1区面積は3 m^2（2 m×1.5 m）とし，3反復の乱塊法で処理区を配置した。

試験期間中の水分管理は次のように行った。各処理区

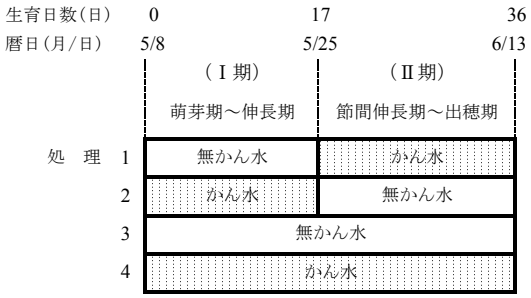

図２－２　１番草に対する水分供給処理の概要
（圃場試験，1995年）

の土壌深度15 cmに埋設したテンシオメータで土壌のマトリックポテンシャルを毎朝モニタリングし，かん水期間中にはその値が−30～−100 cmになるように，土日を除く毎日10～20 mm程度の水道水を散水ノズルでかん水した。なお，各処理区の境界に水分の横移動を防ぐような仕組みは設けなかったが，試験期間中の観察によれば，ある処理区へのかん水の影響が隣接する区にまで及ぶことはなかった。

⑶　調査項目

ポット試験（本節－３－１）－（３））と同様に，ⅠおよびⅡ期の終了時に，0.25 m^2（0.5 m×0.5 m）のコドラートを用いて有穂茎（穂ばらみ茎と出穂茎）とそれ以外の伸長茎とに分けて茎数を計測するとともに，地上部乾物重と地上部窒素含有量を調査した。１茎重は地上部乾物重を全茎数で除して算出した。

４．第４章第２節「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」の試験方法

第４章第２節では，生育や収量に対する水分環境の影響が１番草よりも顕著に現れやすく[21,55]，かん水による増収効果も大きい[101]とされるオーチャードグラスの２および３番草を対象に，生育時期別の低水分ストレスが牧草生育に及ぼす影響を明らかにするため，１番草に対する試験と同様の試験を実施した。

１）２番草に対する試験

⑴　供試草地

１番草に対する雨よけハウス圃場試験（本節－３－２）－（１））と同様である。ハウスのビニルは試験開始の10日前から張り，土壌が適度に乾燥した状態から試験を開始できるように留意した。

⑵　水分供給処理

２番草の生育期間（1995年６月15日～８月11日の57日間）を３つの期間（Ⅰ期，Ⅱ期，Ⅲ期）に分け，７水準の水分供給処理を設定した（図２－３）。原田[10]が示したオーチャードグラスの生育期によれば，Ⅰ期は従属再生長期～独立再生長移行期，Ⅱ期は伸長期～充実期，Ⅲ期は葉身屈折始期～刈取り期に該当する。

処理１は従属再生長期～独立再生長移行期を，処理２は伸長期～充実期を，処理３は葉身屈折始期～刈取り期を無かん水とし，その他の期間はかん水する区である。処理４および５は，それぞれ従属再生長期～充実期，伸長期～刈取り期のように連続した２期間を無かん水とし，その他はかん水する区とした。処理６は全期間無かん水，処理７は全期間かん水する区である。１区面積は３m^2（２m×1.5 m）もしくは４m^2（２m×２m）とし，３反復の乱塊法で処理区を配置した。試験期間中の水分管理は，１番草に対する雨よけハウス圃場試験（本節－３－２）－（２））と同様である。

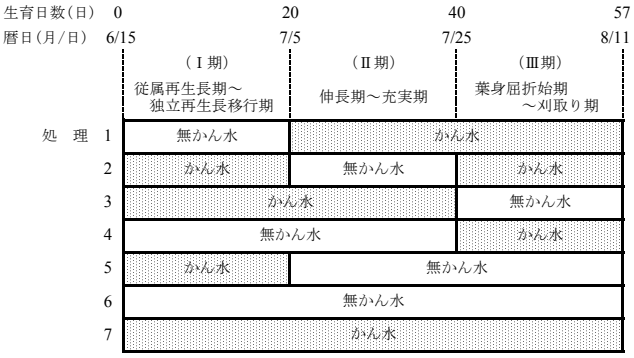

図２－３　２番草に対する水分供給処理の概要
（圃場試験，1995年）

⑶　調査項目

Ⅰ，ⅡおよびⅢ期の終了時に，0.25 m^2（0.5 m×0.5 m）のコドラートを用いて全茎数を計測するとともに，地上部乾物重および地上部窒素含有量を調査した。1茎重は地上部乾物重を全茎数で除して算出した。

２）３番草に対する試験

⑴　供試草地

天北農業試験場試験圃場の更新後２年目のオーチャードグラス草地を供試した。その他は，１番草に対する雨よけハウス圃場試験（本節－３－２）－（１））と同様である。ハウスのビニルは試験開始の10日前から張り，土壌が適度に乾燥した状態から試験を開始できるように留意した。

⑵　水分供給処理

３番草の生育期間（1994年８月15日～９月26日の42日間）を４つの期間（Ⅰ期，Ⅱ期，Ⅲ期，Ⅳ期）に分け，６水準の水分供給処理を設定した（図２－４）。原田[10]のオーチャードグラスの生育期では，Ⅰ期は従属再生長

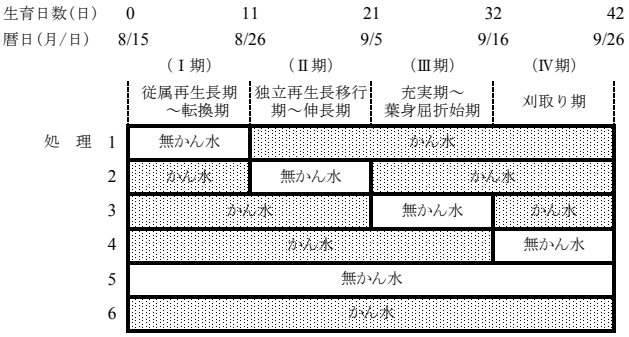

図２－４　3番草に対する水分供給処理の概要
（圃場試験，1994年）

期～転換期，Ⅱ期は独立再生長移行期～伸長期，Ⅲ期は充実期～葉身屈折始期，Ⅳ期は刈取り期に該当する。

処理1は従属再生長期～転換期を，処理2は独立再生長移行期～伸長期を，処理3は充実期～葉身屈折始期を，処理4は刈取り期を無かん水とし，その他の期間はかん水する区である。処理5は全期間無かん水，処理6は全期間かん水する区である。1区面積は3 m^2（2 m×1.5 m）または5 m^2（2.5 m×2 m）とし，3反復の乱塊法で処理区を配置した。試験期間中の水分管理は，1番草に対する雨よけハウス圃場試験（本節－３－２）－（２））と同様である。

⑶　調査項目

Ⅰ，Ⅱ，ⅢおよびⅣ期の終了時に，2番草に対する試験（本節－４－１）－（３））と同様の調査を行った。

５．統計解析手法

第4章における試験終了時の地上部乾物重，茎数および1茎重については，統計解析ソフトJMP ver. 5.1（SAS Institute Inc.）を用いて，分散分析を行うとともに，処理間差が有意な場合は最小有意差法で有意差を求めた。

第３章　重粘土草地の土壌水分動態
－乾燥期における根圏土層と下層土間の水フラックス－

第１節　はじめに

土壌の保水性は，根圏土層に保持される有効水分量で評価されることが多い[31, 41]。しかし，根圏土層はそれ以深の土層である下層土と連続しているため，根圏土層の水分が減少すると両土層間に水ポテンシャル勾配が生じ，下層土から根圏土層へ上向きの水フラックスが発生する。したがって，作物に対する土壌の水分供給能の評価には，根圏土層の保水性だけでなく，根圏土層と下層土間の水フラックスも考慮する必要がある。特に，根圏土層の保水性が乏しい重粘土では，下層土からの水フラックスが牧草生育に大きな意義を持つ可能性が考えられる。

根圏土層と下層土間の水フラックスに関する既往の研究には，大型植栽カラム実験[40, 90]やモデルシミュレーション[2, 43, 93]によるものがあるが，これらでは圃場での検証が十分なされていない。一方，圃場での水フラックスを水収支法やフラックス法で推定した例[14, 37, 78]では，測定期間が１ヶ月程度と短く，早春から晩秋まで長期間利用される草地を対象とした報告は少ない。

そこで本章では，重粘土草地の乾燥期における土壌水分動態を，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する[61]。

第２節　試験圃場の特徴

１．牧草収量

試験を実施した1993年の年間乾物収量は，天北農業試験場試験圃場（これ以降は褐色森林土と呼ぶ）が950 g m^{-2}（１，２，３番草が各々 285，375，290 g m^{-2}），北海道農業試験場試験圃場（同じく灰色台地土）が1030 g m^{-2}（同450，350，230 g m^{-2}）で，両草地に大差はなかった。この収量は，当地域の農家の平均収量（700 g m^{-2}程度）よりも高く，また北海道施肥ガイドの目標収量（900～1000 g m^{-2}）と同レベルであった。

２．土壌の物理性

供試草地土壌の主要な物理性を表３－１に示した。灰色台地土は，褐色森林土に比べて易有効水分に相当するマトリックポテンシャル−30～−500 cmの孔隙が少なく，−500 cm以下の孔隙が多い。水頭に換算した深さ60 cmまでの有効水分孔隙（−30～−16000 cm）は，褐色森林土が95 mmで，灰色台地土の86 mmよりもやや多かった。飽和透水係数は両土壌で大差なかったが，仮比重は灰色台地土が褐色森林土より大きかった。

なお，本試験における根圏土層は，土壌断面調査時に根の存在が確認された深さ60 cmまでとし，60 cm以深を

表３－１　供試草地土壌の主な物理性

土壌	土層 (cm)	各マトリックポテンシャルにおける体積水分率（cm^3 cm^{-3}） -1 cm	-30	-160	-500	-6300	-16000
褐色森林土	0～20	0.539	0.411	0.337	0.312	0.247	0.213
	20～40	0.659	0.518	0.471	0.450	0.400	0.349
	40～60	0.543	0.481	0.467	0.456	0.412	0.375
灰色台地土	0～20	0.484	0.371	0.355	0.341	0.246	0.184
	20～40	0.462	0.388	0.373	0.364	0.269	0.201
	40～60	0.434	0.404	0.402	0.398	0.365	0.346

土壌	土層 (cm)	孔隙量(cm^3 cm^{-3}) -30～-500 cm	-500～-6300	-6300～-16000	有効水分孔隙[1] (mm)	仮比重[2] (g cm^{-3})	飽和透水係数[2] (cm s^{-1})
褐色森林土	0～20	0.099	0.065	0.034	95	1.01	10^{-3}
	20～40	0.068	0.050	0.051		0.97	10^{-4}
	40～60	0.025	0.044	0.037		1.30	10^{-4}
灰色台地土	0～20	0.030	0.095	0.062	86	1.15	10^{-3}
	20～40	0.024	0.095	0.068		1.21	10^{-4}
	40～60	0.006	0.033	0.019		1.56	10^{-5}

[1]マトリックポテンシャルで−30～−16000 cm相当．[2]測定深度は上から順に10，30，50 cm．

下層土とした。

第３節　結　果

１．褐色森林土

１）降雨量，土壌水分量および蒸発散量

降雨量は，試験開始～６月下旬および８月中旬以降には10～60 mm程度の期間がしばしば見られたが，７月上旬～８月上旬は合計13 mmと少なかった（表３－２）。試験期間の積算降雨量は257 mmで，平年値の55％と少なかった。

蒸発散量は，５月の0.05～0.12 cm d^{-1}から次第に増加して，８月上旬に0.24 cm d^{-1}と最大になった後，漸減する傾向を示した（表３－２）。

根圏土層の有効水分量は，降雨量や蒸発散量とおおむね対応しながら推移した（表３－３）。すなわち，降雨が少なく蒸発散量が比較的大きかった7月中旬～８月上旬は35 mm前後で全有効水分量の約40％と少なかったが，これ以外の期間では多かった。

２）根圏土層と下層土間の水フラックス

根圏土層と下層土間の水フラックスは，降雨量または根圏土層の有効水分量が多かった試験開始時～７月上旬には下向き（根圏土層からの水の流出）が主体であった（表３－２）。特に，６月下旬～７月上旬の下向きフラックスの平均値は0.21 cm d^{-1}と大きかった。これに対し，降雨量と根圏土層の有効水分量が少なくなった７月中旬～８月上旬には，フラックスが上向き（根圏土層への水の流入）に転じ，下層土から根圏土層への水分供給が認められた。７月中旬～８月上旬の上向きフラックスの平均値は0.10 cm d^{-1}で，同期間の蒸発散量の55％にも達した。これ以降は，８月下旬の一時期を除き，下向きフラックスが支配的であった。

表３－２　褐色森林土における水収支

期間	日数（日）	R[1)] (mm)	ΔS[2)] (mm)	ET[3)] (mm)	D[4)] (mm)	av-ET[5)] (cm d^{-1})	av-D[6)] (cm d^{-1})		ETに対するDの割合[7)] (%)	
5/10-5/16	7	0	-20	3.8	16.2	0.05	0.23			
5/17-5/23	7	5	2	5.0	-2.0	0.07	-0.03		40	
5/24-5/30	7	28	16	8.5	3.5	0.12	0.05			
5/31-6/6	7	4	-6	6.3	3.7	0.09	0.05			
6/7-6/20	14	35	18	17.8	-0.8	0.13	-0.01		4	
6/21-6/29	9	17	-2	8.7	10.3	0.10	0.11	0.21		
6/30-7/8	9	0	-42	14.0	28.0	0.16	0.31			
7/9-7/11	3	0	-9	3.5	5.5	0.12	0.18			
7/12-7/20	9	5	3	11.6	-9.6	0.13	-0.11	-0.10	83	55
7/21-7/28	8	1	-6	15.7	-8.7	0.20	-0.11		55	
7/29-8/1	4	7	8	4.4	-5.4	0.11	-0.14		123	
8/2-8/8	7	0	-14	17.1	-3.1	0.24	-0.04		18	
8/9-8/18	10	57	34	14.1	8.9	0.14	0.09			
8/19-8/23	5	0	-9	7.2	1.8	0.14	0.04			
8/24-8/31	8	49	52	16.7	-19.7	0.21	-0.25		118	
9/1-9/6	6	12	-28	9.1	30.9	0.15	0.52			
9/7-9/12	6	0	-14	4.8	9.2	0.08	0.15			
9/13-9/19	7	6	-11	9.2	7.8	0.13	0.11			
9/20-9/26	7	31	23	8.3	-0.3	0.12	0.00		4	
合計または平均[8)]	140	257	-5	185.8	76.2	0.13	0.05			

[1)]降雨量，[2)]根圏土層の土壌水分変化量（増加で正，減少で負），[3)]蒸発散量，[4)]根圏土層と下層土間の水フラックス（下向きで正，上向きで負），[5)]ETの日平均値，[6)]Dの日平均値，[7)]Dが上向きの場合のみ算出，[8)]av-ETおよびav-Dについては平均，その他は合計.

３）下層土のマトリックポテンシャルの動態

下層土（深さ60～150 cm）の水分動態を把握するため，マトリックポテンシャル等値線の推移を図３－１に示した。下層土から根圏土層へ上向きの水フラックスが生じた７月中旬～８月上旬には，マトリックポテンシャル−100, −300, −600 cmの等値線がそれぞれ徐々に下降し，下層土の水分が減少していく様子が認められた。逆に，下向きフラックスが支配的であった試験開始～７月上旬および９月の下層土は湿潤で，ポテンシャルは−100 cm以上を示すことが多かった。このように，下層土のマトリックポテンシャル等値線の変化は，根圏土層と下層土間の水フラックスの動態を反映していた。

２．灰色台地土

１）降雨量，土壌水分量および蒸発散量

降雨量は，６月中旬～下旬に合計111 mmと特に多かった（表３－４）。７月のそれは19 mmと少なく，その後再び増加した。試験期間の積算降雨量は，平年値の70％である316 mmで，褐色森林土の257 mmよりもやや多かった。

蒸発散量は全般に褐色森林土よりも大きく，0.09～0.30 cm d^{-1}の範囲であった（表３－４）。蒸発散量の季節的な推移に一定の傾向は認められなかった。

根圏土層の有効水分量は降雨量にほぼ対応して推移した（表３－３）。すなわち，６月中旬～下旬の多雨で70 mm前後へ急増した後，少雨の７月～８月上旬には全有効水分量の20％である20 mm程度にまで減少し，８月中旬以降も降雨量の多少におおむね対応しながら増減を繰り返した。

表３－３　褐色森林土および灰色台地土における根圏土層の土壌水分量（S）および有効水分量（Sa）の推移

褐色森林土			灰色台地土		
日付	S[1)] (mm)	Sa[2)] (mm)	日付	S[1)] (mm)	Sa[2)] (mm)
5/10	284	76.2	5/11	249	57.0
5/17	264	57.0	5/18	224	31.9
5/24	266	58.7	5/25	218	27.4
5/31	282	71.9	6/1	214	28.2
6/7	276	69.0	6/8	219	32.5
6/21	294	84.7	6/15	196	15.3
6/30	292	84.0	6/22	262	69.8
7/9	250	43.0	6/29	266	73.8
7/12	241	36.4	7/5	236	43.5
7/21	244	36.8	7/14	211	24.8
7/29	238	36.4	7/19	216	30.0
8/2	245	37.1	7/27	215	28.6
8/9	232	35.8	8/3	208	22.0
8/19	266	58.2	8/13	204	18.0
8/24	257	50.0	8/17	226	40.2
9/1	309	86.1	8/23	212	25.7
9/7	281	73.2	8/31	234	48.1
9/13	267	59.6	9/14	209	22.9
9/20	256	48.2	9/22	190	14.2
9/27	279	71.6	9/27	211	24.9
平均	266	58.7	平均	221	33.9
SD[3)]	21	17.7	SD[3)]	20	16.8

[1)]根圏土層（0～60 cm）の土壌水分量，[2)]根圏土層の有効水分量（マトリックポテンシャル−30～−16000 cm間），[3)]標準偏差.

２）根圏土層と下層土間の水フラックス

降雨量や根圏土層の有効水分量が多かった試験開始～７月上旬には，根圏土層と下層土間に下向きフラックスが多く発生した（表３－４）。６月上旬～７月上旬の下向きフラックスの平均値は0.19 cm d^{-1}で，褐色森林土と同程度であった。上向きフラックスは，根圏土層の有効水分量が少なくなった７月上旬～８月上旬に認められた。この期間の上向きフラックスの平均値は0.04 cm d^{-1}で，同期間の蒸発散量の20％に相当し，いずれも褐色森林土の半分以下であった。一方，８月中旬以降のフラックスは，褐色森林土とはやや異なり，絶対値が大きくなるとともに向きも頻繁に変化する傾向を示した。

３）下層土のマトリックポテンシャルの動態および地下停滞水位

灰色台地土の下層土には，褐色森林土では認められなかった地下停滞水が存在した（図３－２）。停滞水位（マトリックポテンシャル０cmの等値線）は，６月中旬に深さ100 cm付近まで低下した後，急激に上昇した。７月中旬以降は停滞水位が徐々に低下するとともに，水位の上部の土層にマトリックポテンシャル−30, −100, −300 cmの等値線が出現し，下層土の水分が減少していく様子がう

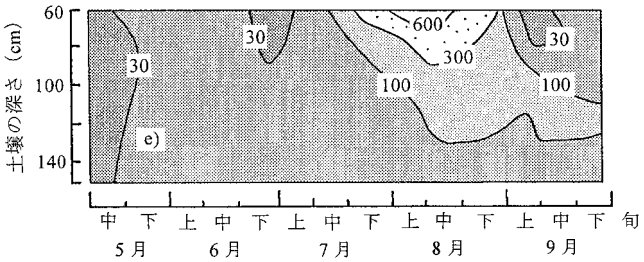

図３－１　褐色森林土における下層土のマトリックポテンシャル等値線の推移
数値の単位は−cm.

かがわれた。

このような停滞水位の低下と水フラックスとの関係を，下層土から根圏土層へ上向きフラックスが続いた7月上旬～8月上旬についてみると（図3－3b），上向きフラックスが持続する（フラックス積算値が小さくなる）につれて，停滞水位が低下する傾向が明らかに認められた。しかし，同じく停滞水位が低下しつつあった5月中旬～6月中旬および9月では，フラックスと停滞水位との間に上述したような関係は示されなかった（図3－3a，c）。

表3－4　灰色台地土における水収支

期間	日数（日）	R[1)] (mm)	ΔS[2)] (mm)	ET[3)] (mm)	D[4)] (mm)	av-ET[5)] (cm d^{-1})	av-D[6)] (cm d^{-1})		ETに対するDの割合[7)] (%)	
5/11-5/17	7	1	-25	9.8	16.2	0.14	0.23			
5/18-5/24	7	5	-6	15.2	-4.2	0.22	-0.06		28	
5/25-5/31	7	14	-4	14.1	3.9	0.20	0.06			
6/1-6/7	7	9	5	11.0	-7.0	0.16	-0.10		64	
6/8-6/14	7	5	-23	14.3	13.7	0.20	0.20			
6/15-6/21	7	87	66	9.3	11.7	0.13	0.17	0.19		
6/22-6/28	7	24	4	10.7	9.3	0.15	0.13			
6/29-7/4	6	1	-30	15.2	15.8	0.25	0.26			
7/5-7/13	9	0	-25	27.0	-2.0	0.30	-0.02		7	
7/14-7/18	5	4	5	5.3	-6.3	0.11	-0.13	-0.04	119	20
7/19-7/26	8	13	-1	14.2	-0.2	0.18	0.00		1	
7/27-8/2	7	2	-7	12.5	-3.5	0.18	-0.05		28	
8/3-8/12	10	15	-4	欠測	―	―	―			
8/13-8/16	4	15	22	3.7	-10.7	0.09	-0.27		289	
8/17-8/22	6	6	-14	9.1	10.9	0.15	0.18			
8/23-8/30	8	28	22	17.1	-11.1	0.21	-0.14		65	
8/31-9/13	14	15	-25	31.7	8.3	0.23	0.06			
9/14-9/21	8	13	-19	13.8	18.2	0.17	0.23			
9/22-9/27	6	59	21	10.3	27.7	0.17	0.46			
合計または平均[8)]	140	316	-38	244.3	90.7	0.17	0.06			

[1)]降雨量，[2)]根圏土層の土壌水分変化量（増加で正，減少で負），[3)]蒸発散量，[4)]根圏土層と下層土間の水フラックス（下向きで正，上向きで負），[5)]ETの日平均値，[6)]Dの日平均値，[7)]Dが上向きの場合のみ算出，[8)]av-ETおよびav-Dについては平均，その他は合計.

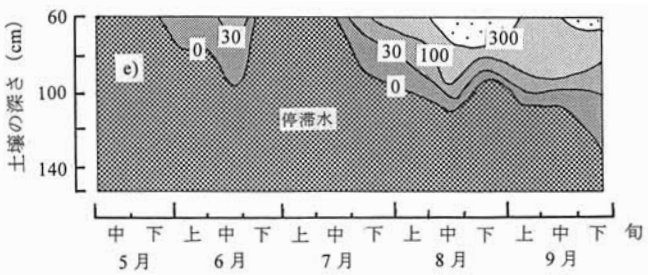

図3－2　灰色台地土における下層土のマトリックポテンシャル等値線の推移
数値の単位は-cm.

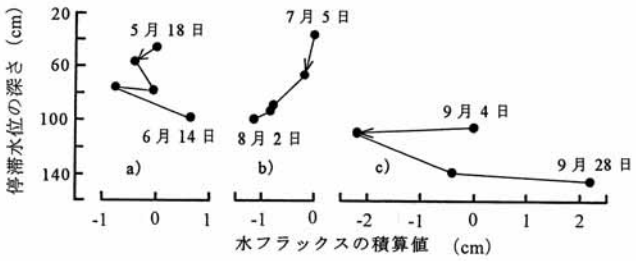

図3－3　灰色台地土における根圏土層と下層土間の水フラックスの積算値と地下停滞水位との関係
a）5月18日～6月14日，b）7月5日～8月2日，c）9月4日～9月28日．水フラックスの符号は表3－2, 3－4と同じ．図中の矢印は暦日の経過方向を示す.

第４節　考　察

一般に，根圏土層と下層土間の水フラックスの向きや大きさは，降雨量や土壌水分量などの影響を強く受ける[14,37,78]。本試験における水フラックスの変化も，降雨量と根圏土層の有効水分量の季節的な推移とほぼ対応していた。すなわち，褐色森林土と灰色台地土のいずれの草地でも，降雨量や根圏土層の有効水分量が多い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，両者またはいずれかが少ない乾燥期には下層土から根圏土層への上向きフラックスが多く発生する傾向にあった（表３－２，３－３，３－４）。

このうち，乾燥期における上向きフラックスの大きさは，褐色森林土で0.10 cm d^{-1}（７月中旬～８月上旬），灰色台地土で0.04 cm d^{-1}（７月上旬～８月上旬）程度と見積もられた。乾燥期の上向きフラックスの値としては，重粘土草地などで0.04，0.05 cm d^{-1} [37,78]，また淡色黒ボク土のダイズ畑では0.10 cm d^{-1} [14] が示されている。また，湿潤期の下向きフラックスは0.19～0.21 cm d^{-1}（６月上旬～７月上旬）と推定されたが，これも草地では0.19 cm d^{-1} [78] の値が報告されている。以上のように，フラックス推定値が既往の値とほぼ一致していることから，水収支法で推定した本試験の水フラックス値は，おおむね妥当なものであろう。

根圏土層と下層土間の水フラックスのなかでも，上向きフラックスは，乾燥条件下での一般畑作物の生育にとって重要な水分供給源である[14]。このことは牧草でも同様と考えられる。例えば，更新年次や肥培管理，降雨量などの条件がほぼ同一の場合，乾燥年の灰色台地土草地の収量は褐色森林土よりも明らかに低いことが認められている[52]。この灰色台地土の低収要因としては，これまで主に，根圏土層の有効水分量が少ないことが挙げられてきた[52]。しかし，本試験結果からは，新たな低収要因として，下層土から根圏土層への上向きフラックスも小さいことが指摘できる。すなわち，本試験によれば，褐色森林土の乾燥期の上向きフラックスは0.10 cm d^{-1}で，この時の蒸発散量の55％であった（表３－２）のに対し，灰色台地土では0.04 cm d^{-1}と小さく，蒸発散量に占める割合も20％に過ぎなかった（表３－４）。したがって，一般に灰色台地土の草地が乾燥年に低収となるのは，根圏土層の有効水分量が少ないことに加えて，下層土からの水分供給にも乏しく，褐色森林土よりも容易に低水分条件に陥りやすいためと理解することができる。

図３－１，３－２に示したように，両草地の下層土（60 cm以深）は上向きの水フラックスの発生に伴って乾いていき，下層土に貯留されている水分が上向きフラックスの供給源となっていることが確認された。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ていった（図３－３b）。これは，この上向きフラックスが主に停滞水に由来することを示唆しており，灰色台地土では乾燥期の水供給源として地下停滞水も重要であった。ただし，上向きフラックスと停滞水位との間には，上述のような一定の関係が認められない期間もあった（５月中旬～６月中旬および９月，図３－３a，c）。５月中旬～６月中旬における原因は判然としない。９月については，地下停滞水位が深いことによる水位上昇・低下の時間的な遅れなどが影響していると推察される。

本試験では測定反復がないため差の有意性についての言及は困難であるが，灰色台地土での上向きフラックスは褐色森林土のそれよりも小さく，両者には土壌間差があると考えられた。上向きフラックスが発生した期間（７月上・中旬～８月上旬）の下層土のマトリックポテンシャルは，褐色森林土，灰色台地土ともにおおむね−100 cm以上のことが多かった（図３－１，図３－２）。岩間[33]は，このような高いマトリックポテンシャルでは，灰色台地土の不飽和透水係数が褐色森林土よりも1オーダー程度小さいことを示している。したがって，本試験では下層土の不飽和透水係数を測定していないため断定はできないものの，本試験における両土壌の上向きフラックスの差異は，主に，水分供給源である下層土の透水性の違いに起因しているのであろう。

以上のことから，灰色台地土の乾燥期の上向き水フラックスは褐色森林土よりも小さいこと，上向きフラックスの供給源としては両土壌とも下層土が，また灰色台地土では地下停滞水も重要であることが明らかとなった。さらに，本試験結果と牧草収量の土壌間差に関する既往の知見とを合わせて考えると，根圏土層の保水性に乏しい重粘土においては，乾燥期の上向きフラックスの大きさは同期の牧草生育を規制する重要な要因の一つであると指摘された。

第５節　まとめ

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。

第４章　牧草生育に対する低水分ストレスの影響

第１節　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

１．はじめに

前章では，重粘土草地の水分動態を解析し，乾燥期には根圏土層の有効水分が速やかに減少すること，またその時，下層土から根圏土層への上向き水フラックスが牧草生育の重要な規制要因となることなどを推察した。本章では，重粘土のこのような不良な水分環境が牧草生育にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とした。

一般に，作物は，低水分ストレスを受けるとその影響が後々の生育や収量にまで及ぶような，ある特定の生育時期を有する[16, 50, 97]。しかし，牧草ではこのことについての研究事例がほとんど見あたらない。

本節では，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（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１番草の生育に及ぼす影響を明らかにする[63]。

2．結果

1）ポット試験

試験終了時の地上部乾物重（DM）の大きさは，処理 1 ≒ 2 ≒ 3 ≒ 7 ＞ 5 ＞ 4 ≒ 6 の順であった（表４－１）。すなわち，３つの水分供給処理期間のうちどれか１つのみを無かん水とした処理１，２，３（各々，萌芽期～伸長期，伸長期～節間伸長期，出穂期を無かん水）では試験終了時のDMに対する影響は判然とせず，これらの処理区のDMは全期間かん水した処理７とほぼ同等であった。これに対し，連続して2つ以上の期間を無かん水とした処理４，５，６（各々，萌芽期～節間伸長期，伸長期～出穂期，全期間を無かん水）のDMは，全期間かん水した処理７よりも有意に低く，なかでも萌芽期～節間伸長期を無かん水とした処理４，６は著しく低収であった。このことは，オーチャードグラスの１番草生育に対しては，萌芽期から節間伸長期までの水分供給が重要であることを示唆している。

表４－１　水分供給時期が１番草の地上部乾物重の推移に及ぼす影響（ポット試験）

生育日数 および生育期	0 (5/6)	萌芽期 ～伸長期	10 (5/16)	伸長期～ 節間伸長期	20 (5/26)	出穂期	30 (6/5)
処理 1	0.23	→	0.44	→	1.94	→	5.16 abc
2	0.23	→	0.63	→	2.14	→	6.17 a
3	0.23	→	0.63	→	2.65	→	5.45 abc
4	0.23	→	0.44	→	1.52	→	3.10 d
5	0.23	→	0.63	→	2.14	→	4.38 c
6	0.23	→	0.44	→	1.52	→	1.91 d
7	0.23	→	0.63	→	2.65	→	5.85 ab

単位はg ポット$^{-1}$．カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．30日目（6／5）のデータについては異なるアルファベット間に有意差あり（5%水準）．

表４－２　水分供給時期が１番草の茎数の推移および試験終了時の1 茎重におよぼす影響（ポット試験）

生育日数 および生育期	0 (5/6)	萌芽期 ～伸長期	10 (5/16)	伸長期～ 節間伸長期	20 (5/26)	出穂期	30(6/5)			
							有穂茎	伸長茎	合計	1茎重
処理 1	9	→	9	→	22	→	6 ab	32 abc	38 ab	139 a
2	9	→	12	→	26	→	8 a	28 bc	36 ab	190 a
3	9	→	12	→	30	→	6 ab	37 ab	43 a	133 a
4	9	→	9	→	10	→	7 ab	11 d	18 c	184 a
5	9	→	12	→	26	→	7 ab	24 c	31 b	145 a
6	9	→	9	→	10	→	5 ab	6 d	11 c	182 a
7	9	→	12	→	30	→	4 b	43 a	47 a	127 a

カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．30日目（6／5）のデータについては有穂茎と伸長茎に分けて表示し（その他は全茎数），異なるアルファベット間に有意差あり（5%水準）．茎数および1茎重の単位はそれぞれ本 ポット$^{-1}$，mg 本$^{-1}$．

表４－３　水分供給時期が１番草の地上部窒素含有量の推移におよぼす影響（ポット試験）

生育日数 および生育期	0 (5/6)	萌芽期 ～伸長期	10 (5/16)	伸長期～ 節間伸長期	20 (5/26)	出穂期	30 (6/5)
処理 1	11	→	20	→	101	→	230
2	11	→	38	→	106	→	244
3	11	→	38	→	133	→	220
4	11	→	20	→	55	→	126
5	11	→	38	→	106	→	154
6	11	→	20	→	55	→	54
7	11	→	38	→	133	→	282

単位はmg ポット$^{-1}$．カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．

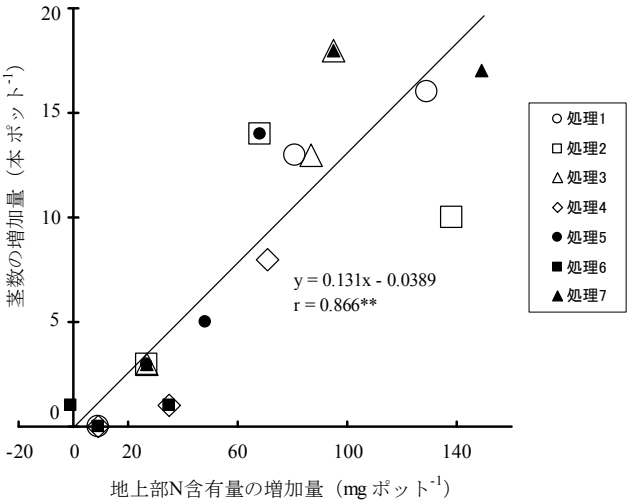

図４－１　１番草における各水分供給処理期間中の地上部窒素（N）含有量の増加量と茎数増加量との関係（ポット試験）

茎数の推移および試験終了時の１茎重を表４－２に示した。試験終了時の全茎数は11～47本 ポット$^{-1}$，１茎重は127～190 mg 本$^{-1}$の範囲であり，茎数に有意な処理間差が認められた。特に，低収であった処理４，５，６の伸長茎数および全茎数は，全期間かん水の処理７に比べて有意に少なかった。さらに，全茎数とDMの間には強い正の相関も認められた（r＝0.939，p＜0.01，n＝7）ことから，処理４，５，６でのDMの低下は，主に茎数の減少により引き起こされたものと理解できる。

地上部N含有量の推移を低収であった処理４，５，６および全期間かん水した処理７についてみると，萌芽期～伸長期の増加はいずれの処理区ともわずかであった（表４－３）。続く伸長期～出穂期にかけては，全期間かん水した処理7が急速に増加したのに対し，全期間無かん水の処理６は著しく低いままであり，また処理４，５は増加傾向を示すものの処理７には及ばなかった。

このような地上部N含有量の推移（増加量）は茎数の増加量と極めて良い対応関係を示し（図４－１），オーチャードグラスのN吸収が少ない期間には茎数の増加も抑制されることが認められた。茎数増加の抑制程度は，萌芽期～節間伸長期が無かん水の処理４と，全期間無かん水の処理６で顕著であった（表４－２）。特に処理４は，萌芽期～節間伸長期を無かん水としたことの影響が続く出穂期にまで及び，出穂期における茎数の増加は極わずかであった。なお，試験終了時のDMに対する水分供給時期の影響が判然としなかった処理１，２，３の地上部N含有量および茎数の推移は，全期間かん水の処理７とほぼ同様であった（表４－２，４－３）。

２）圃場試験

萌芽期～伸長期または節間伸長期～出穂期のそれぞれ

表４－４　水分供給時期が１番草の地上部乾物重の推移におよぼす影響（圃場試験）

生育日数 および生育期	0 (5/8)	萌芽期 ～伸長期	17 (5/25)	節間伸長期 ～出穂期	36 (6/13)
処理 1	45	→	175	→	409 ± 19 ab
2	45	→	182	→	398 ± 13 ab
3	45	→	175	→	377 ± 36 b
4	45	→	182	→	429 ± 25 a

単位はg m^{-2}．カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．36日目（６／13）のデータについては平均値±標準偏差で，異なるアルファベット間に有意差あり（５％水準）．０日目（５／８）および17日目（５／25）については平均値．

を無かん水とした処理１，２の試験終了時のDMは，全期間かん水した処理４と同等であった（表４－４）。さらに，全期間無かん水とした処理３のDMでさえ，処理４よりわずかに少ない程度であった。

茎数と１茎重をみると（表４－５），試験終了時の有穂茎数，伸長茎数および全茎数に処理間差はなかった。一方，１茎重は処理２および３が全期間かん水した処理4より有意に小さかった。

また，地上部N含有量はいずれの処理においても萌芽期～伸長期に増加したが，その後の節間伸長期～出穂期における変化は小さく（表４－６），水分供給時期の違いは，DMと同様，地上部のN吸収に対しても大きな影響を与えることはなかった。茎数の推移にも明確な処理間差は認めにくく，全般的にはいずれの処理区も萌芽期～伸長期に増加し節間伸長期～出穂期に減少するというパターンを示した（表４－５）。ただし，地上部N含有量の増加量と茎数増加量との間には有意な正の相関が認められ（図４－２），ポット試験と同様，圃場条件においても分げつ（茎基部から発生する側芽）の消長にはオーチャードグラスのN吸収が強く関与していることが示された。

以上のように，圃場条件下でのDM，N吸収および茎数に対する水分供給時期の影響は，ポット試験の場合ほど顕著には認められなかった。

表４－５　水分供給時期が１番草の茎数の推移および試験終了時の１茎重におよぼす影響（圃場試験）

生育日数および生育期	0 (5/8)	萌芽期～伸長期	17 (5/25)	節間伸長期～出穂期	36(6/13) 有穂茎	伸長茎	合計	1茎重
処理 1	3729	→	4028	→	282 a	2706 a	2988 ± 156 a	137 ± 1 ab
2	3729	→	4360	→	304 a	2870 a	3174 ± 598 a	128 ± 20 b
3	3729	→	4028	→	273 a	2957 a	3231 ± 164 a	117 ± 12 b
4	3729	→	4360	→	301 a	2389 a	2690 ± 269 a	160 ± 16 a

カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．36日目（６／13）の有穂茎と伸長茎の合計および１茎重については平均値±標準偏差で，異なるアルファベット間に有意差あり（５％水準）．０日目（５／８）および17日目（５／25）については全茎数の平均値．茎数および1茎重の単位はそれぞれ本 m^{-2}，mg 本$^{-1}$．

表４－６　水分供給時期が１番草の地上部窒素含有量の推移におよぼす影響（圃場試験）

生育日数および生育期	0 (5/8)	萌芽期～伸長期	17 (5/25)	節間伸長期～出穂期	36 (6/13)
処理 1	2.5	→	4.6	→	5.4
2	2.5	→	5.0	→	4.9
3	2.5	→	4.6	→	4.7
4	2.5	→	5.0	→	5.0

単位はg m^{-2}．カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．

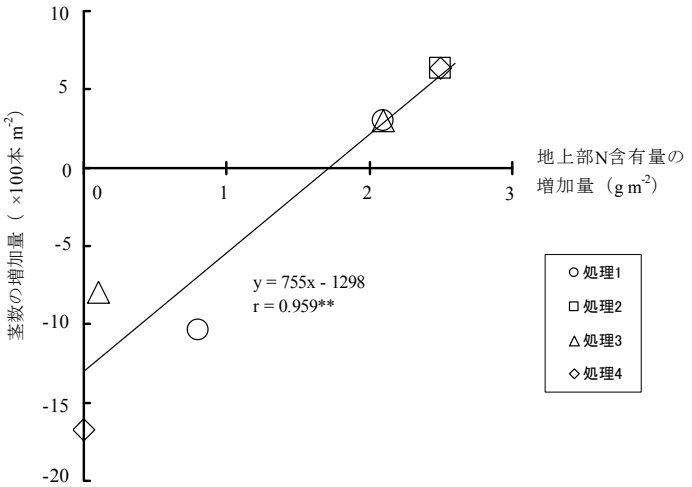

図４－２　１番草における各水分供給処理期間中の地上部窒素（N）含有量の増加量と茎数増加量との関係（圃場試験）

３．考　察

ポット試験によれば，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日間で，この期間に水分を供給しないとDMと茎数の低下が著しいことが認められた（表４－１，４－２）。したがって，収量構成要素からみると，上記処理での収量低下の原因は，主に茎数の減少にあると考えられる。一般に，オーチャードグラスの１番草は既存分げつ（前年の最終番草を構成した分げつ）と秋発生分げつ（最終番草の刈り取り後に発生した分げつ）を主体に構成される[75]が，これらの分げつは，茎基部の貯蔵養分や施肥されたNを利用して迅速な再生が可能である[89]。そのため，圃場栽培条件では，１番草生育期間のできるだけ早い時期からNを吸収させて，効率良く１茎重を増加させることが多収をもたらすと指摘されている[75]。これに対し，ポット栽培条件では，分げつの発生部位である茎基部まで光が十分に到達するので，発生した小分げつは途中で枯死せずに生育を続ける[48]。このため，ポット条件下の収量は，１茎重よりも茎数に規制されることが多く，本試験でもこれと同様の結果が認められた（表４－２）。

ポット試験結果の図４－１から明らかなように，オーチャードグラスのN吸収と茎数の増加は極めて良い対応関係を示していた。すなわち，水分が供給された期間には，一般に認められるように[47, 85]，オーチャードグラスのN吸収とともに分げつの発生が促進されて茎数は増加した。反対に，無かん水期間にはN吸収が抑制され，その期間の茎数増加も停滞した。したがって，これらの推移からすると，ポット試験において，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DMの低下が著しかった理由の一つは，水分供給の停止によりオーチャードグラスのN吸収が抑制されるとともに分げつの発生も停滞し，試験終了時までに茎数が十分量確保されなかったためと説明できる。ただし，この場合，同じ20日間であっても，伸長期～出穂期の水分供給を制限した処理５よりも，萌芽期～節間伸長期を制限した処理4の方がDMの低下は大きかった（表４－１）。この理由は次のように考えられる。処理５では，水分供給を停止したことによるN吸収および茎数増加の抑制程度は，伸長期～節間伸長期で小さく，出穂期に大きかった（図４－３）。つまり，処理５では，萌芽期～伸長期に供給した水分の影響が次の伸長期～節間伸長期まで多少とも持続していたと思われる。これに対し，処理４では，最終生育期間である出穂期にだけ水分供給を行ったので，処理5の時のような残効は存在し得ない（図４－３）。両処理区のDMの差には，以上のような水分供給処理に付随する水分環境の違いが関係しているのであろう。いずれにしても上記の結果は，再生初期における円滑なN吸収が，その期間だけでなくその後の生育にとっても極めて重要な意義を持つことを示している。

なお，ポット試験では，３つの水分供給処理期間のうち１つの期間だけを無かん水とした場合（処理１～３），その期間および試験終了時のDMの低下はわずかであった（表４－１）。これは，10日間程度の水分供給停止では，生育への影響が小さかったか，たとえ影響があっても試験終了時まで持続するほどではなかったためと考えられる。このことは，処理１～３の地上部N含有量の推移や試験終了時における全茎数が全期間かん水した処理７のそれと大差がなかったことからも理解される（表４－２，４－３）。

以上のポット試験に関する考察より，オーチャードグラスの１番草生育に対しては，萌芽期から節間伸長期までの20日間程度の水分供給が重要であると指摘できる。

ところが，圃場試験においては，DMに対する水分供給時期の影響は判然とせず，全期間水分供給を行った処理４に比べて，水分供給を停止した各処理区の収量低下

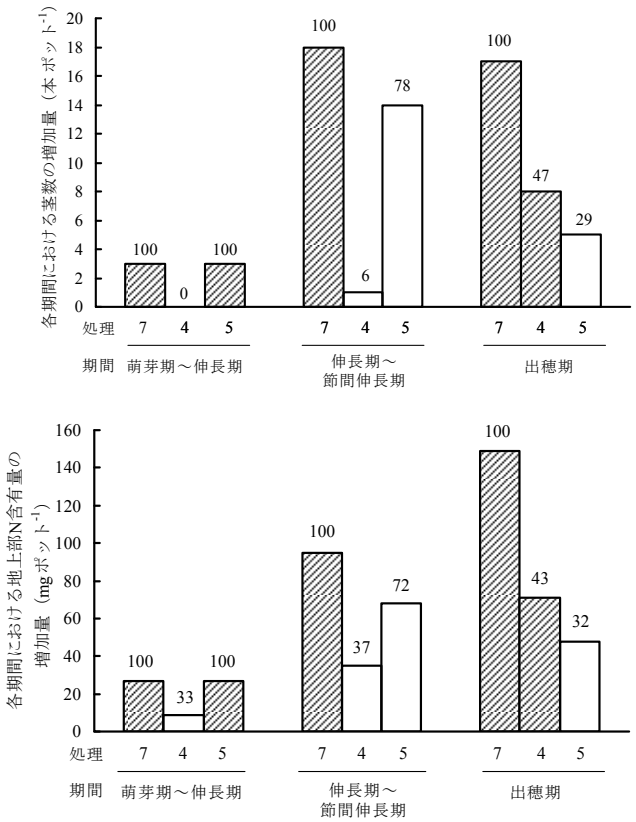

図４－３　水分供給時期と地上部窒素（N）含有量増加量および茎数増加量との関係（ポット試験，処理４，５，７のみ表示）

網掛はかん水期間を意味する．図中の数字はそれぞれの期間について処理７を100としたときの指数．

はほとんどないか，わずかに認められる程度であった（表４－４）。

この理由として，土壌に貯留されていた融雪水の寄与が大きいと考えられる。平年の融雪期が４月中～下旬である北海道北部では，本圃場試験を開始した５月上旬の土壌は有効水分（マトリックポテンシャルで−30～16000 cmに相当）でほぼ満たされていると見なせる[37]。前節および既報[61]によれば，供試土壌の根圏土層（深さ60 cmまで）が保持できる有効水分量は95 mm，当地域におけるオーチャードグラスの1番草生育期間の平均日蒸発散量は2.0 mm程度であるから，95 mmの有効水分量はおよそ48日間の蒸発散量に相当する。すなわち，試験開始時の土壌には，本試験の１番草生育期間（36日間）に必要な水分量がすでに存在していたと試算される。このように，融雪水に由来する土壌水分が豊富であったので，水分供給を制限した場合でも，オーチャードグラスの1番草生育に重要と考えられた萌芽期から節間伸長期にかけてはもちろん，生育の全期間を通して極端な水分不足に陥ることがなかったと思われる。このため，圃場試験では水分供給時期の影響が明瞭に表れにくかったのであろう。このことは，北海道北部では１番草生育期間中に干ばつ害は発生しにくいとの指摘[25]とも一致する。

以上より，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。

第２節　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

１．はじめに

前節では，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は萌芽期から節間伸長期までの20日間程度であり，この期間に低水分ストレスを受けると，オーチャードグラスのN吸収が抑制されて分げつの発生および伸長が停滞し，著しい減収を引き起こすことを明らかにした。ただし，北海道北部では，この期間の土壌には多量の融雪水が貯留されているため，低水分ストレスが１番草生育の制限因子となる可能性は実際には小さいと推察された。

これに対し，６月中旬～８月上旬と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２番草および３番草については，生育や収量に対する水分環境の影響が１番草よりも顕著に現れやすく[21,55]，かん水による増収効果も大きい[101]とされている。この理由として，２番草では，融雪水由来の土壌水分が１番草ですでに消費されているうえ生育期間中の降雨量が少ない[21,55]こと，また３番草では，２番草生育期間中の土壌の乾燥状態が３番草生育初期にまで持ち越されやすいこと[101]などが指摘されている。

そこで，本節では，前節と同様に，オーチャードグラスの２番草および３番草を対象に，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２および３番草の生育に及ぼす影響を明らかにする[64]。

２．結果

１）２番草に対する水分供給時期

試験終了時における各処理区のDMは，処理２≒３≒５≒７≧１＞４≒６の順であった（表４－７）。すなわち，全期間かん水した処理７よりも低収であったのは，従属再生長期～独立再生長移行期が無かん水の処理１，従属再生長期～充実期を無かん水とした処理４および全期間無かん水の処理６で，処理４，６と処理7との差は有意であった。処理１は無かん水とした従属再生長期～独立再生長移行期にかけてのDM増加の抑制が顕著で，水分を供給したそれ以降には全期間かん水の処理7並かそ

表４－７　水分供給時期が２番草の地上部乾物重の推移におよぼす影響

生育日数および生育期	0 (6/15)	従属再生長期～独立再生長移行期	20 (7/5)	伸長期～充実期	40 (7/25)	葉身屈折始期～刈取り期	57 (8/11)
処理 1	0	→	65	→	209	→	245 ± 38 b
2	0	→	157	→	258	→	277 ± 28 ab
3	0	→	157	→	249	→	309 ± 54 a
4	0	→	65	→	118	→	178 ± 30 c
5	0	→	157	→	258	→	297 ± 14 ab
6	0	→	65	→	118	→	173 ± 12 c
7	0	→	157	→	249	→	291 ± 39 ab

単位はg m^{-2}．カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．57日目（８／11）のデータについては平均値±標準偏差で，異なるアルファベット間に有意差あり（５％水準）．０日目（６／15），20日目（７／５）および40日目（７／25）については平均値．

表４－８　水分供給時期が２番草の地上部窒素含有量の推移におよぼす影響

生育日数 および生育期	0 (6/15)	従属再生長期～独立再生長移行期	20 (7/5)	伸長期～充実期	40 (7/25)	葉身屈折始期～刈取り期	57 (8/11)
処理１	0.0	→	1.7	→	4.4	→	3.7
2	0.0	→	5.3	→	4.0	→	3.7
3	0.0	→	5.3	→	4.1	→	4.3
4	0.0	→	1.7	→	2.3	→	4.2
5	0.0	→	5.3	→	4.0	→	4.3
6	0.0	→	1.7	→	2.3	→	3.4
7	0.0	→	5.3	→	4.1	→	4.1

単位は$g\ m^{-2}$．カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．

れ以上の生育を示したものの，初期の生育抑制を試験終了時までに回復することはできなかった。処理４，６も処理１と同様に，無かん水処理による生育停滞が明らかであった。これに対し，生育中～後期にあたる伸長期～刈取り期を無かん水とした時（処理５）や，伸長期～充実期および葉身屈折始期～刈取り期のうちいずれかを無かん水とした場合（処理２，３）の試験終了時のDMやその推移は全期間かん水した処理7と同様であった。

これらの結果は，オーチャードグラスの２番草生育に対する重要な水分供給時期が，従属再生長期から独立再生長移行期までであることを示している。

低収であった処理１，４，６および全期間かん水した処理７の地上部N含有量の推移をみると，試験終了時のN含有量は3.4～4.2 $g\ m^{-2}$の範囲で処理による差は小さかったが，生育期間中の推移には処理間差がうかがわれた（表４－８）。すなわち，全期間かん水した処理７は，従属再生長期～独立再生長移行期に急増し，その後漸減する傾向を示したのに対し，処理１では従属再生長期～独立再生長移行期，また処理４では従属再生長期～充実期と，いずれも無かん水期間中のN含有量の増加が強く抑制された。しかし，処理１，４とも，それ以降水分が供給されると旺盛なN吸収を示した。全期間無かん水とした処理６のN含有量の増加は，生育期間を通して緩慢であった。なお，処理２，３，５の地上部N含有量の推移は処理７とほぼ同様であった。

茎数の増減は地上部N含有量の変化と良く対応し，オーチャードグラスのN吸収が抑制されると茎数の増加が鈍化，もしくは茎数が減少することが多かった（図４－４）。試験終了時の茎数は，処理１が全期間かん水の処理７よりも有意に大きかったのを除けば，残りの６つの処理間に有意差は認められず（表４－９），茎数とDMとの間の相関も低かった（図４－５）。

これに対し試験終了時の１茎重は，処理１，４，６が全期間かん水の処理７よりも有意に小さく，なかでも特に低収であった処理４および６では80 mg 本$^{-1}$前後で対照区の½程度に過ぎなかった（表４－９）。さらに，１茎重はDMとの間に強い正の相関を示した（図４－５）ことから，本試験での処理１，４，６におけるDMの低下は，主に１茎重の減少に起因していたと言える。

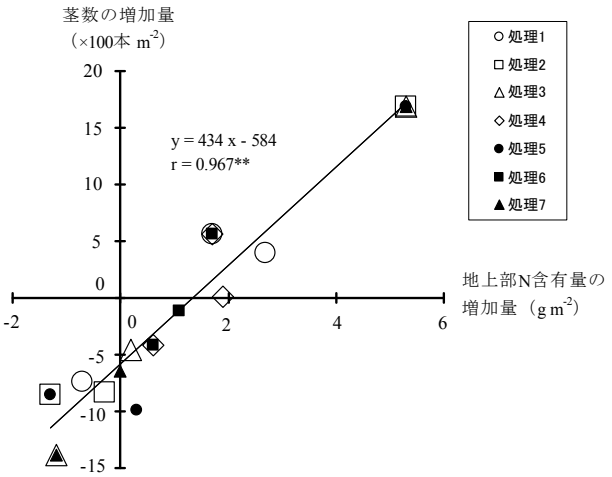

図４－４　２番草における各水分供給処理期間中の地上部窒素（N）含有量の増加量と茎数増加量との関係

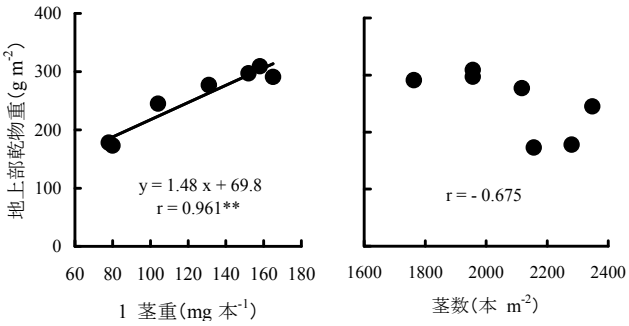

図４－５　２番草における１茎重および茎数と地上部乾物重との関係（試験終了時）

表４－９　水分供給時期が２番草の茎数の推移および試験終了時の１茎重におよぼす影響

生育日数および生育期	0 (6/15)	従属再生長期～独立再生長移行期	20 (7/5)	伸長期～充実期	40 (7/25)	葉身屈折始期～刈取り期	57(8/11) 茎数	57(8/11) 1茎重
処理 1	2117	→	2684	→	3085	→	2348 ± 213 a	104 ± 25 bc
2	2117	→	3800	→	2949	→	2117 ± 185 ab	131 ± 7 ab
3	2117	→	3800	→	2412	→	1956 ± 330 ab	158 ± 3 a
4	2117	→	2684	→	2269	→	2280 ± 476 ab	78 ± 24 c
5	2117	→	3800	→	2949	→	1956 ± 239 ab	152 ± 20 a
6	2117	→	2684	→	2269	→	2156 ± 282 ab	80 ± 17 c
7	2117	→	3800	→	2412	→	1763 ± 268 b	165 ± 17 a

カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．57日目（８／11）のデータについては平均値±標準偏差で，異なるアルファベット間に有意差あり（５％水準）．０日目（６／15），20日目（７／５）および40日目（７／25）については茎数の平均値．茎数および1茎重の単位はそれぞれ本 m^{-2}，mg 本$^{-1}$．

２）３番草に対する水分供給時期

試験終了時のDMが全期間かん水した処理６を下回ったのは，従属再生長期～転換期を無かん水とした処理１および全期間無かん水の処理５で，処理５は処理６との差が有意であった（表４－10）。処理１は無かん水とした従属再生長期～転換期におけるDM増加の抑制が著しく，水分を供給したそれ以降は処理６並かそれ以上の生育を示したが，初期の生育抑制を試験終了時までに回復することはできなかった。処理２は無かん水とした独立再生長移行期～伸長期には生育がやや抑制されたが，続く充実期～刈取り期には全期間かん水した処理６以上の生育を示し，最終的なDMは処理６に匹敵した。また，処理３，４では無かん水とした期間（各々充実期～葉身屈折始期，刈取り期）と最終的なDMのいずれに対しても，無かん水処理の影響はほとんど認められなかった。

以上の結果は，オーチャードグラスの３番草生育に対しては，従属再生長期から転換期にかけての水分供給が重要であることを意味している。

次に，各処理区の地上部N含有量の推移をみると，処理２，３，４，６では，従属再生長期～伸長期にかけてのN吸収が旺盛で，それ以降の吸収は，かん水の有無に関係なくいずれの処理区ともわずかであった（表４－11）。一方，低収であった処理１では，無かん水とした従属再生長期～転換期のN吸収が著しく抑制されていた。しかし，水分を供給した独立再生長移行期～伸長期に顕著な吸収を示した結果，試験終了時のN含有量は全期間かん水した処理６に匹敵するほどであった。また，全期間無かん水とした処理５のN吸収は，いずれの時期でも上記４処理（２，３，４，６）より劣っていた。なお，処理５の刈取り期におけるN含有量の増大は，一部の試験区内

表４－10　水分供給時期が３番草の地上部乾物重の推移におよぼす影響

生育日数および生育期	0 (8/15)	従属再生長期～転換期	11 (8/26)	独立再生長移行期～伸長期	21 (9/5)	充実期～葉身屈折始期	32 (9/16)	刈取り期	42 (9/26)
処理 1	0	→	49	→	134	→	181	→	208 ± 44 b
2	0	→	104	→	168	→	220	→	276 ± 7 a
3	0	→	104	→	189	→	268	→	262 ± 36 ab
4	0	→	104	→	189	→	254	→	262 ± 44 ab
5	0	→	49	→	82	→	98	→	146 ± 28 c
6	0	→	104	→	189	→	254	→	252 ± 20 ab

単位はg m^{-2}．カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．42日目（９／26）のデータ
については平均値±標準偏差で，異なるアルファベット間に有意差あり（５％水準）．０日目（８／15），11日目（８／26），21日目（９／５）および32日目（９／16）については平均値．

表４－11　水分供給時期が３番草の地上部窒素含有量の推移におよぼす影響

生育日数および生育期	0 (8/15)	従属再生長期～転換期	11 (8/26)	独立再生長移行期～伸長期	21 (9/5)	充実期～葉身屈折始期	32 (9/16)	刈取り期	42 (9/26)
処理 1	0.0	→	1.5	→	4.9	→	5.2	→	5.3
2	0.0	→	4.6	→	5.1	→	5.2	→	6.1
3	0.0	→	4.6	→	6.0	→	6.3	→	5.8
4	0.0	→	4.6	→	6.0	→	6.2	→	6.3
5	0.0	→	1.5	→	2.2	→	2.5	→	4.2
6	0.0	→	4.6	→	6.0	→	6.2	→	5.8

単位はg m^{-2}．カッコ内は暦日．網掛はかん水期間で，その他は無かん水期間．

への雨水の浸入で土壌が一時的に湿潤になったためであった。

茎数の増減は，2番草と同様に，地上部N含有量の変化と良く対応し，オーチャードグラスのN吸収が抑制されると茎数の増加が鈍化，もしくは茎数が減少する傾向が示された（図４－６）。このことを反映し，茎数はいずれの処理区においても従属再生長期～伸長期に増加し，それ以降の充実期～刈取り期にかけて漸減する傾向にあった（表４－12）。その結果，試験終了時の茎数は処理５が処理６より有意に少なかったのを除けば，その他の処理間に有意差はなかった。これに対し，試験終了時の１茎重には明らかな処理間差が認められ（表４－12），またDMは茎数よりも１茎重との間に有意な正の相関を示した（図４－７）。したがって，３番草のDMも２番草と同様に，１茎重の影響を強く受けていたと言える。

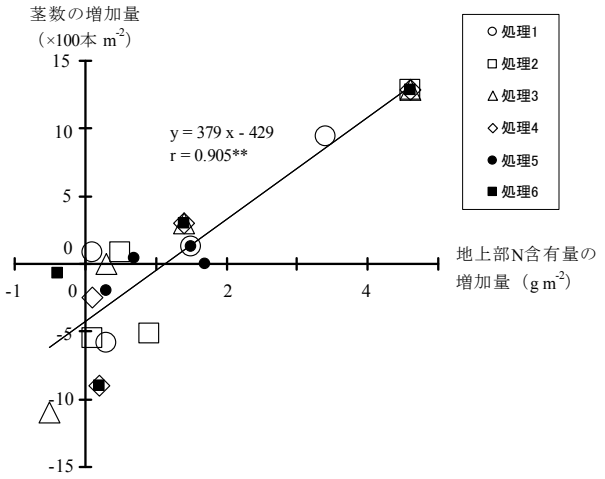

図４－６　３番草における各水分供給処理期間中の地上部窒素（N）含有量の増加量と茎数増加量との関係

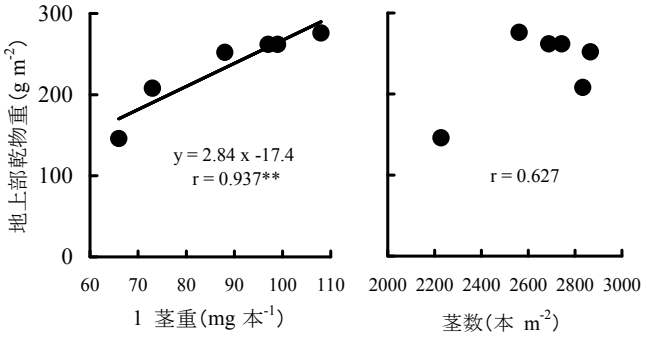

図４－７　３番草における１茎重および茎数と地上部乾物重との関係（試験終了時）

３．考　察

２番草試験の結果によれば，オーチャードグラスの２番草生育に重要な水分供給時期は従属再生長期から独立再生長移行期までの20日間程度であり，この期間に水分供給を行わないと明らかに低収となることが認められた（表４－７）。また，試験終了時の収量構成要素から判断すると，収量低下の原因は主に１茎重の減少にあると考えられた（図４－５）。

一般に，オーチャードグラスの２番草を構成する分げつは，１番草収穫時に生長点が刈取られず２番草へ持ち越された分げつ（以下，既存分げつと呼ぶ）と，２番草生育期間中に発生した幼分げつである[44, 75]。このうち幼分げつは，群落の繁茂に伴う分げつ間の相互遮へいなどにより生育途中で枯死脱落することが多い[85]。このため，２番草刈取り時の収量は主に既存分げつの１茎重に依存すると報告されている[32, 44, 75]。本試験ではこれらの指摘と同様のことが認められた。すなわち，生育期間中いずれの処理区においても幼分げつの発生と脱落を示唆する茎数の一時的な増加と減少がみられ（表４－９），また試験終了時の収量は先の報告[32, 44, 75]と同じく１茎重に強く依存していた（図４－５）。したがって，本節の２番草収量は，その大部分が既存分げつで構成されていたと推察される。

この既存分げつは，１番草収穫時に生長点が刈取られていないため，茎基部の貯蔵養分や施肥Nを利用して迅速な再生が可能である[46, 86, 89]。再生時のオーチャードグラスのN吸収が円滑に進めば葉のN含有率が上昇し光合

表４－12　水分供給時期が３番草の茎数の推移および試験終了時の１茎重におよぼす影響

生育日数および生育期	0 (8/15)	従属再生長期～転換期	11 (8/26)	独立再生長移行期～伸長期	21 (9/5)	充実期～葉身屈折始期	32 (9/16)	刈取り期	42 (9/26) 茎数	42 (9/26) 1茎重
処理 1	2251	→	2380	→	3327	→	2744	→	2833 ± 296 a	73 ± 12 bc
2	2251	→	3535	→	3624	→	3072	→	2561 ± 38 ab	108 ± 4 a
3	2251	→	3535	→	3837	→	3841	→	2743 ± 503 a	99 ± 30 a
4	2251	→	3535	→	3837	→	2935	→	2688 ± 198 ab	97 ± 12 ab
5	2251	→	2380	→	2419	→	2224	→	2228 ± 140 b	66 ± 10 c
6	2251	→	3535	→	3837	→	2935	→	2865 ± 67 a	88 ± 5 abc

カッコ内は暦日．網掛けはかん水期間で，その他は無かん水期間．42日目（９／26）のデータについては平均値±標準偏差で，異なるアルファベット間に有意差あり（５％水準）．０日目（８／15），11日目（８／26），21日目（９／５）および32日目（９／16）については茎数の平均値．茎数および１茎重の単位はそれぞれ本 m^{-2}，mg 本$^{-1}$．

成能も高まる[98]ので，再生した分げつの伸長が助長されて1茎重は増加するだろう。このため，2番草収量の確保には，生育期間のできるだけ早い時期からオーチャードグラスにNを吸収させ，既存分げつの伸長期間を長くして1茎重を大きくすることが重要と指摘できる。

当然，表4－8，4－9から理解されるように，オーチャードグラスの円滑なN吸収と既存分げつの伸長期間確保には，水分供給時期が深く関わっている。例えば，従属再生長期～充実期を無かん水とした処理4と全期間かん水した処理7のN含有量を比較すると，最終的には同程度であったが，従属再生長期～充実期（無かん水とした期間）までは処理4の方が明らかに少なかった（表4－8）。これは処理4では既存分げつの伸長が水分供給のあった葉身屈折始期～刈取り期に旺盛であったことを意味し，結果的に1茎重の増大する期間が対照区よりも短かったことを示唆している。これに対し，生育中～後期にあたる伸長期～刈取り期を無かん水とした処理5や，伸長期～充実期または葉身屈折始期～刈取り期のそれぞれを無かん水とした処理2，3のN含有量とDMの推移は全期間かん水の処理7と類似していた（表4－7，4－8）ので，これらの処理では1茎重を大きくする期間は処理7と大差がなかったと推察される。

以上のことから，2番草試験において生育初期である従属再生長期～独立再生長移行期に水分供給を行わないと低収を示したのは，この期間の水分供給の停止により，オーチャードグラスのN吸収が阻害されて既存分げつの再生が迅速かつ円滑に進まず，2番草収量の制限因子である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できる。

一方，3番草試験からは，オーチャードグラスの3番草生育に対する重要な水分供給時期は従属再生長期から転換期に該当する10日間程度であり，収量の確保には生育初期の水分供給が大切と考えられた（表4－10）。

坂本[75]によれば，3番草刈取り時の収量を構成する分げつの主体も，2番草の場合と同じく，前番草から持ち越された既存分げつであるという。実際，3番草の茎数とN含有量の推移やこれらの水分供給時期に対する反応（表4－11，4－12，図4－6）および，収量と収量構成要素との関係（図4－7）は，ともに2番草試験の結果と良く類似していた。また，オーチャードグラスは通常，秋期の低温・短日条件で新しい分げつを多数発生させる[32]ことが知られているが，北海道北部でのこの時期は3番草の刈取り以降に当たる[75]ため，この新分げつは3番草には含まれない。したがって，本試験の3番草を構成した分げつは，2番草の時と同じく，刈取り後の迅速な再生が可能な既存分げつであったと推察される。それゆえ，前述の2番草の場合と同様の理由により，3番草に対しても生育初期の水分供給が重要という結果が得られたのであろう。

以上をまとめると，オーチャードグラスの2および3番草生育に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ことが明らかとなった。

第3節　まとめ

北海道の重要草種であるオーチャードグラスの各番草について，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各番草の生育に及ぼす影響を明らかにした。

1）1番草では，萌芽期から節間伸長期までの約20日間の水分供給を制限すると，その収量は著しく低下した。

2）この理由は，同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，1番草収量を形成する分げつの増大期間が十分確保できなかったためと考えられた。

3）ただし，北海道北部では，1番草の萌芽期から節間伸長期には土壌に多量の融雪水が貯留されているため，低水分ストレスが1番草生育の制限因子となる可能性は実際には小さいと推察された。

4）一方，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，また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，収量は顕著に低下した。

5）2および3番草における低収の原因は，これら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茎重を増大させる期間が十分確保できなかったためであった。

6）以上から，オーチャードグラスの1，2および3番草生育に対する重要な水分供給時期は，1番草が萌芽期から節間伸長期までの20日間，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，3番草が従属再生長期から転換期までの10日間程度であり，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ことが明らかとなった。