

第I章 緒 言

第1節 背景と目的

北海道における草地型酪農は1950年代後半より政策的に押し進められ、以来、急速な外延的規模拡大の方向で発展してきた。その結果、北海道の草地面積は今や約50万 ha に達し全耕地面積の約42%を占めるに至っている。しかし、現在の酪農経営は牛乳の生産調整に加え乳価の引き下げなど厳しい情勢下に置かれ、生産コストの低減が強く求められている。この生産コストの低減は総生産額の40~50%を占める飼料費（購入飼料費、自給飼料生産費）を如何に低減し、かつ効率化するかが大きな問題とされている。

しかしながら、北海道における草地の生産性は年間合計の生草収量で3~3.5 t/10 a（天北地方では2.8~3.3 t/10 a）で最近停滞したままである。この草地生産性の停滞には造成または更新草地の経年化に伴う牧草収量の低下が大きく関与している。天北地方では、これによる不足を補うため傾斜地、泥炭地などの未利用土地資源の草地化による面積拡大を推進している。しかし、耕地の外延的拡張のみでは対処できないだけでなく、また経年化に伴う草地生産性の低下と草地面積の拡大は農作業機の利用効率の低下と良質粗飼料の安定確保にも大きな問題を残している。このことが自給粗飼料生産費の増大と草地型酪農といわれるにもかかわらず購入濃厚飼料への依存度を高める原因となっている。加えて、天北地方の草地の多くは疑似グライ土を代表とする土壌物理性の劣悪な細粒質鉍質土^{46,51,99,101)}に立地し、気象変動に伴う草地生産性の激しい年次変動^{44,52,76)}が上述した問題をさらに顕在化せしめている。したがって、造成または更新草地の牧草生産力を高めるとともに、草地の経年化に伴う生産力の低下をいかに回避し、かつ草地の利用年限を延長することが良質な自給粗飼料の安定確保のために不可欠な問題である。

以上のような背景に基づいて草地の生産力を維持・向上させるための土壌肥料的研究として現在までに、①草地造成時の施肥管理^{30,89,90,106)}、②草地維持管理段階の牧草の栄養生理的特性と施肥の関係^{27,41,63,66,100)}、③土壌理化学性の変化と草地生産力の関係^{31,81,87,88,105)}、および④草地植生の変遷とその維持に関する問題^{68,84,121)}が主に検討されてきた。

一方、草地土壌では造成-維持管理-更新の過程でリン酸および石灰、苦土など無機養分が漸次富化され、これら養分の草地生産力に対する制限要因としての影響は徐々に低下する⁸⁹⁾。他方、カリについては、天北地方の鉍質土はそれの天然供給力に優れた特性を持つ²⁸⁾とされるが牧草の収奪量が多いため、生育量に見あった十分な施肥が必要である⁷²⁾。

これに対して、窒素は①造成時における未耕地の粗腐植に由来する供給、②維持管理段階における牧草茎葉残渣など有機物に由来する供給、③更新時における旧草地表層蓄積有機物に由来する供給、④草地酪農系内で生産される厩肥、液状厩肥の還元、⑤化学肥料の施用による窒素供給等に大別され、①~③による窒素供給量は草地の各段階（造成または更新および維持段階）で異なるとともに草地生産性の制限因子として最大の影響力を持つ。したがって、草地の維持管理段階における経年的な生産力の変動を施肥によって制御するためには、肥料窒素の動態とともに上述した草地生態系内で循環する有機物の還元-分解-蓄積過程を通じた土壌窒素の有効化および有機物循環、草地更新時の旧草地表層蓄積有機物および施用厩肥に由来する土壌からの窒素吸収の経年変化を把握する必要がある。

以上の考察に基づいて、本研究では、草地の経年過程における牧草収量の変遷について、天北地方の基幹草種の1つであるオーチャードグラス主体の採草地を対象に、まず第1に草地の経年化に伴う収量変化を明らかにし、経年草地の収量変動

に及ぼす土壌化学性と気象要因の影響を、草地系内で循環する枯死茎葉、枯死根等の有機物の循環と肥料窒素の動態および利用率との関係で検討した。ついでこれら経年草地の収量変動を改善する技術対策について検討し、最後に草地の経年化過程における土壌からの窒素吸収量の変化に対応した化学肥料窒素の施肥管理法の確立を試みた。

第2節 既往の研究

草地は一度造成された後、数年から10数年の長期間にわたってそのままの状態を利用され、この期間の施肥は全て表面施肥である。したがって、リン酸など施肥成分および枯死茎葉、枯死根などの有機物は草地の表面もしくは表層に蓄積し、草地表層土壌の養分供給能は経年的に増大すると考えられる^{54,74,103}。それにもかかわらず草地の生産性は造成2～3年目を頂点としてそれ以降経年的に低下することが指摘されている^{67,91,122}。

1) 経年草地における生産性低下の要因

経年草地の生産性低下には次のような要因が関与していることが指摘されている。①土壌化学的要因：化学肥料に随伴する酸性根の溶脱とそれに伴う交換性塩基類の流亡によって引き起こされる表層土壌の酸性化^{45,67,74}とアルミニウムイオンなど有害成分の溶出^{45,74}、牧草のリン酸吸収の阻害^{43,45,74}、微生物活性の低下³⁹、蓄積養分の肥効低下^{73,81}、②土壌理学的要因：農作業機、放牧家畜などの踏圧による土壌の堅密化と、通気透水性の悪化^{87,88,105}、③草地の植生的要因：混播マメ科牧草の消滅^{68,84,121}、草地の施肥管理および利用管理の拙劣さによる地下茎牧草の侵入など植生の悪化^{68,121}。

一方、草地では毎年還元される牧草の枯死茎葉と枯死根の一部が分解され、土壌からの窒素吸収源になるとともに分解残渣は経年的に草地表層に蓄積する。有機物の草地表層への蓄積量は草地の利用形態^{9,10}、草種および混播マメ科牧草の有無によって異なるが、窒素施肥量による変化は小さい^{9,10}。年間の窒素蓄積量は100～144kg/haであり、放牧草地における粒径0.25mm以上の有機物の

蓄積量は造成3～4年目までに急増することが認められている²²。さらに、草地の有機物蓄積には還元される有機物のC/N比¹¹⁸、牧草根と微生物の酸素に関する競合などが要因として関与していると考えられている¹¹⁹。

また、有機物の蓄積によって永年草地ではルートマットが形成され^{31,81,105}、これによって土壌環境が悪化する^{32,81,105}との指摘もある。しかしこれら経年もしくは永年草地の有機物蓄積と草地生産性の関係に関する知見は、混播マメ科草の消滅および施肥反応の鈍い地下茎草種の侵入など草地の植生変遷も含めた包括的所見であり、有機物蓄積それ自体と草地生産性の関係は必ずしも明確ではない。他方、牧草茎葉部の肥料窒素利用率は40～60%程度に達し^{3,4,5,16,17,59,113}、脱窒、揮散による肥料窒素の損失は5～9%^{16,97}、流亡による損失は窒素吸収量に見あった施肥水準^{4,5,24}および牧草生育が不良な時期における施肥^{25,119}を除いた条件であれば2～8%程度であり^{3,4,16,17,24,117}、草地における肥料窒素の損失は少ない。また牧草の株、根および土壌に保持された施肥窒素は3～4年で茎葉部に吸収移行し、草地系内で循環することが指摘されている^{8,95,117}。しかし造成後の経過年数が異なる草地での肥料窒素の動態、利用率に関する研究は少ない。

したがって、草地生産性の経年変化は蓄積有機物量およびその組成と肥料窒素の動態およびその利用率を同一気象および植生条件で検討する必要がある。

2) 土壌からの窒素吸収量の経年変化と草地生産性

土壌からの窒素吸収量を知ることは、適切な窒素施肥管理を実施するために作物栽培上、極めて重要な問題である。

土壌からの窒素吸収量の評価法は、①化学的抽出法、②短期間培養法、③作物による窒素吸収法、④回帰式による吸収量推定法、⑤アイソトープ法、⑥作物分析法、に分類される⁶。このうち①、②については種々な測定法が提案されている⁷。

しかし、草地では造成前および更新前の蓄積有機物、造成時の施用厩肥、維持管理段階の枯死茎

葉・枯死根などの有機物，混播マメ科草の移譲窒素および表面施用される厩肥などの有機質窒素吸収源が多様であり，かつそれらの吸収量が多く，その量の経年変化も大きいと考えられる。したがって，土壌からの窒素吸収量を評価するためには，①，②のような簡易法の草地への適応性と，上述した有機物に由来する窒素吸収の経年変化を査定し，それに基づいて適正な窒素施用量を算出する方法の両面から検討する必要がある。

まず，草地造成時の土壌からの窒素吸収は自然生態系で蓄積した粗腐植量に規制され，その発現は地下水の影響を受けた土壌で大きいこと，またその持続性は比較的短時間であると報告されている⁹⁰⁾。

草地更新時の土壌からの窒素吸収量は造成当年、2、3年目でそれぞれ2.7～6.5kg，1.6～4.1kg，1.9～3.2kg/10a程度であり，何れの報告も造成当年の吸収量が多いことを指摘している^{12,96)}。また，草地更新時の土壌からの窒素吸収量は更新対象草地の経過年数，利用形態および立地土壌によって異なる¹¹⁸⁾。

施用有機物の分解は積算地温に支配され，分解の難易性は有機物のC/N比，リグニン含有率などによって影響される³⁶⁾。渡辺，小川¹¹⁶⁾は施用後3カ年の厩肥窒素分解率が褐色森林土Ⅱ，灰色

台地土Ⅱ>褐色低地土>灰色台地土Ⅰの関係にあり，これには土壌の窒素肥沃度と水分状態が関与するとした。また，根釧地方の火山性土についての試験結果^{33,86)}によれば，基肥施用厩肥の残効が認められるのは造成後2年目程度までであり，さらに同一施用量条件では表面分施>基肥施用の関係であるとされている。しかし，土壌の物理性が劣悪で，しかも夏期間の降水量が不足しやすい地帯での厩肥施用法，施用効果の持続性，それからの窒素吸収量の経年変化についての情報は充分でない。

イネ・マメ混播草地は収量性，家畜生産性および窒素経済性などの面で多くの利点が指摘されている。一方，混播マメ科牧草として広く用いられているラジノクローバは耐陰性^{35,41)}，耐旱性^{11,18)}が小さいことからイネ科牧草との競合に弱く，適正なマメ科率の維持が困難とされ，混播草地に対する窒素施肥管理の面から多くの研究が実施されてきた^{13,62,90)}。しかし土壌からの窒素吸収が旺盛な造成当初の段階における窒素施肥管理についての知見はなお不十分である。とりわけ夏期間の降水量が少ない天北地方では土壌の乾湿³⁷⁾，降水量の年次変動によってマメ科率が変動する⁷⁰⁾ため，これを考慮した窒素施肥管理が重要な問題である。

第II章 草地の経年化に伴う牧草収量と有機物蓄積の関係

第1節 牧草収量の経年変化

草地の収量は造成2, 3年目で最も高く、以降、漸次低下することは広く指摘されている^{67,91,122})。しかし、これら造成後の経年化に伴う牧草収量の変化に関する知見は、植生の変遷および厩肥など自給有機物による土壌からの窒素吸収の経年変化も含めた包括的な結果であり、これらの影響を除いた条件での草地の経年化に伴う収量変化は不明な点が多い。そこで、本節ではオーチャードグラス主体採草地を対象に草地の経年化に伴う収量変化とそれをもたらす要因について検討した。

実験1 同一草地における牧草収量の経年変化

目的：同一草地を長期間管理し、牧草収量に及ぼす草地の経過年数と気象変動の影響を明らかにする。

実験方法

北海道立天北農業試験場圃場（枝幸郡浜頓別町、酸性褐色森林土⁴⁷）：埴壤土、塩基交換容量24 me/100g、以下の試験も特記しない限り同試験圃場で行った）で1973年造成のオーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地を供試し、造成2年目より年間窒素施肥量9kgと18kg/10aの2水準で1984年までの11年間、処理を継続した。施肥は

表1. 各番草収量と気象要素の相関係数

処理 気象要素	N 9 kg 施肥区				N 18 kg 施肥区			
	1	2	3番草	年間合計	1	2	3番草	年間合計
降水量	0.655**	0.746**	0.267	0.570*	0.869**	0.804**	0.444	0.721**
気温	0.099	0.049	-0.057	0.001	-0.091	0.203	-0.091	-0.049
日照時間	-0.171	-0.614*	-0.284	-0.444	-0.192	-0.524*	-0.231	-0.519*

各気象要素は生育期間の積算値、n=11年間、15試料 * 5%, ** 1%水準で有意

窒素：硫酸、リン酸 (10kg/10a/年間)：過石、カリ (18kg/10a/年間)：硫加で年3回均等配分とし、早春、1, 2番草刈り取り後に行った。刈り取りは1番草：6月上旬～中旬、2番草：8月上旬～中旬、3番草：9月下旬の3回行った。なお1981年より試験区を2分し、pH改善区（炭カル200kg/10aを表面散布）と無改善区を設置した。

実験結果

牧草収量は年次間の気象変動、とりわけ降水量の多少で変動し、1, 2番草収量は当該番草生育期間の降水量によって明らかに支配されていた。しかし、降水量の牧草収量に及ぼす影響は窒素18kg施肥区>同9kg施肥区の関係にあり、とりわけ窒素9kg施肥区の1番草収量と降水量の相関係数は小さかった（表1）。

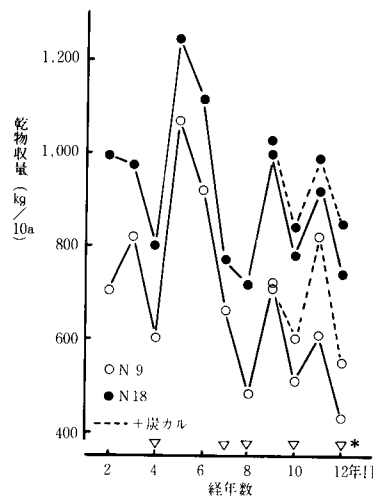


図1. 草地の経年化に伴う牧草収量の変化 (1974~'84)

*降水量 (4月下旬～9月中旬) で400mm以下の年次を示した。

一方、牧草収量の経年変化（図1）は降水量の年次変動の影響を受け変動が大きいものの窒素9kg施肥区、18kg施肥区ともに草地の経年変化に伴って低下する傾向を示し、この傾向は窒素9kg施肥区>同18kg施肥区の関係が伺われた。また、表層土壌のpH改善効果はいずれの施肥水準でも明らかに認められ、草地の経年変化に伴う収量低下には表層土壌の酸性化の影響も存在することが示唆された。

実験2 同一気象における経年草地の牧草収量、窒素吸収量の変化

目的：造成後の経過年数が異なる草地の収量を同一年で比較し、草地の経年変化に伴う収量変化とその要因を明らかにする。

実験方法

1977年から1989年まで順次造成した11種のオーチャードグラス単播草地を供試した。草地造成は土壌pH6.5に改善するに必要な量の炭カルを施用してローターベーターで耕起・砕土後オーチャードグラス（キタミドリ）種子2.5kg/10aを播種した。基肥は窒素、リン酸、カリそれぞれ4, 20, 4kg/10aを草地化成と焼成リン酸質肥料で施用した。

実験処理は造成2年目より年間窒素施肥量12kg（以下窒素12kg施肥区と略記）と18kg/10a（以下窒素18kg施肥区と略記）の2水準とし、4反復で実施した。施肥は窒素：尿素、リン酸（10kg/10a/年間）：過石、カリ（窒素の1.2倍量）：硫加で年3回均等配分とし、早春、1, 2番草刈り取り後に行った。刈り取りは1番草：6月上旬、2番草：8月上旬、3番草：9月下旬の3回行った。以下、この施肥配分、刈り取り時期を標準管理とし、特記しない限りこれに準じて行った。

3番草刈り取り後、越冬前までの地上部生育量は25×25cmの枠で深さ5cm程度掘り取り、茎数、分けつ数を調査した。採取したオーチャードグラス茎基部は茎基部に存在する枯死茎葉を分離後、乾物重を測定した。

なお、分離された枯死茎葉は地表面に存在するそれと合わせて枯死茎葉量とし、さらに枯死茎葉

を分離した25×25cmの表層土層は4分割し、それぞれの試料を水中で土砂を分離した後、枯死した茎基部に存在する根を枯死根、それ以外を生きた根として採取した。さらに分離された表層土壌は水洗篩別法¹¹⁵⁾により、それに含まれる植物遺体を5段階の粒径に分画して有機物存在量を測定した。分離した枯死茎葉、枯死根、生きた根および表層土壌中の蓄積有機物などの試料および測定結果は次節以降の実験および考察に供した。

分析用試料は70℃、48時間通風乾燥後粉碎して調整した。全窒素はケルダール法または水野ら⁷⁷⁾の方法により分解、蒸留して測定した。

表層土壌の窒素無機化量は100cc採土管で表層0～5cmを採取し、培養温度5, 10, 15, 20, 30℃の5水準、圃場容水量の水分条件（以後、この水分条件を標準培養条件と略記する）で30日間培養し、培養前後の無機態窒素含量の差から算出した。無機態窒素は10%塩化カリウム液で抽出後、蒸留法により測定した。

実験結果

1) 収量の経年変化

実験1で、牧草収量の経年変化には草地の経過年数、表層土壌の酸性化および降水量の年次変動による影響が混在し、牧草収量に対する経年変化自体の影響が判然としなかった。そこで、本実験では1977年～'89年にかけて造成した経過年数の異なる草地の収量を同一年で比較した。実験は1983年から'90年の8ヵ年にわたって実施し、集計した結果を表2に示した。なお、集計したデータ数は造成2年目の草地で1983～'90年までの8例、造成3, 4年目草地で同15例、造成5, 6年目草地で同11例、造成7, 8年目草地および9年目以上の草地で同9例である。

① 年間合計収量

表層土壌のpH環境を適正に維持した草地（以下、単に草地と略記）における牧草の年間合計収量は窒素12kg施肥区で造成9年目以上の経年草地が僅かに低下する傾向を示したが、有意差はなかった。しかし、窒素18kg施肥区では、造成9年目以上の経年草地であっても平均収量の低下は極め

表2. 草地の経年化に伴う収量変化* (kg/10a)

N用量	草地 番草	2年目	3,4年目	5,6年目	7,8年目	9年目以上
		(n=8)	(n=15)	(n=11)	(n=9)	(n=9)
N12kg 施肥区	年間合計	764±43 ^a	638±34 ^b	634±42 ^b	630±29 ^b	619±42 ^b
	1番草	294±43 ^a	232±30 ^b	230±31 ^b	220±17 ^b	191±34 ^c
	2々	260±35 ^a	222±22 ^b	218±19 ^b	227±26 ^b	227±25 ^b
	3々	210±52	184±43	186±51	183±46	199±49
N18kg 施肥区	年間合計	960±70 ^a	833±50 ^b	811±39 ^b	839±35 ^b	832±52 ^b
	1番草	353±52 ^a	302±41 ^b	297±40 ^b	294±28 ^b	281±35 ^b
	2々	333±27 ^a	286±18 ^b	277±24 ^b	298±14 ^b	298±26 ^b
	3々	274±54	244±49	237±59	247±39	253±54

*平均値±標準偏差で表示した a, b, c: 異文字間に5%水準で有意差あり

て小さかった。また、いずれの窒素施肥区でも、造成2年目草地の年間合計収量はそれ以降のそれより明らかに高かった。

② 番草別収量の経年変化

窒素12kg施肥区における1番草の平均収量は草地の経年化に伴い低下する傾向を示し、造成9年目以上の草地のそれは造成3, 4年目の草地の82%であった。また、窒素18kg施肥区における1番草平均収量の経年化に伴う低下は窒素12kg施肥区より緩慢であり、造成9年目以上の草地であっても3, 4年目草地の93%程度の平均収量を示した。

一方、2, 3番草の平均収量は1番草収量が劣った造成9年目以上の経年草地であっても3, 4

年目草地に比べて必ずしも低収とならなかった。

以上の収量調査結果から、造成3年目草地を基準とした8年間の年間および1番草の収量指数を算出して経年数別に図2に示した。年間合計の収量指数はいずれの窒素施肥水準でも造成12年目以降の草地で低下する傾向を示したが、窒素12kg施肥区で低下程度が大きかった(図2a)。また窒素12kg施肥区の1番草収量は造成7年目以降に低下しはじめ、造成9年目以降その低下が明らかとなった(図2b)。しかし、窒素18kg施肥区の収量変化は窒素12kg施肥区より小さく、より安定していた(図2a, b)。

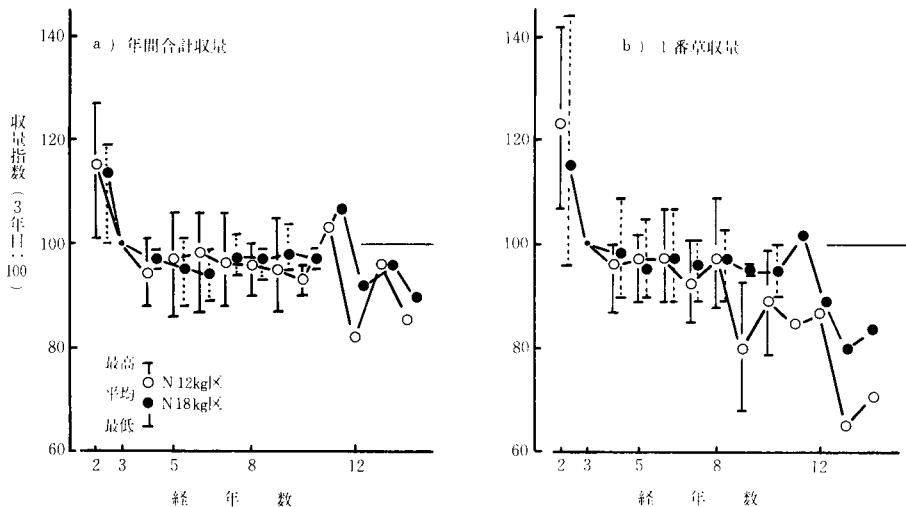


図2. 草地の経年化に伴う牧草収量の変化(1983~'90年)

③ 肥料窒素の増施肥反応

窒素施肥量の増施による牧草収量の増収割合は(図3, 表3), 1番草で草地の経年化に伴い増大し, 経年数別に集計すると造成9年目以上の草地: $145 > 7$, 8年目の草地: $136 \geq 3, 4$, 5, 6年目の草地: $130 \sim 132 > 2$ 年目の草地: 120%の順であった。しかし, 2, 3番草収量に対する窒素増肥効果は127~137%の範囲にあり, 草地の経年数とは無関係であった。

以上のことから, 造成後9年以上経過した草地の低窒素施肥条件(12kg/10a/年間)における年間収量が3, 4年目草地より劣る原因は, 1番草収量が3, 4年目草地のそれより劣るためであると指摘できる。また, 肥料窒素が十分供給された条件(18kg/10a/年間)では経年化に伴う1番草収量の低下は小さく, 造成後長期間(少なくとも造成10年程度)にわたって3, 4年目草地とはほぼ同等の収量が維持された。

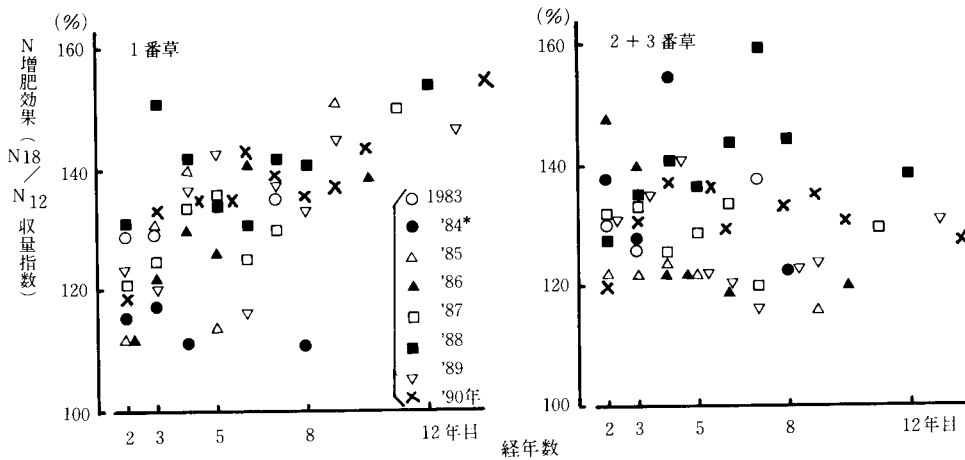


図3. 経年草地の窒素増肥に対する番草別収量反応

*1984年: 1番草生育期間(4月下旬~6月上旬)の降水量が44mmと少なかった

表3. 経年草地の窒素増肥に対する収量反応* (1983~'90年)

草 地 番 草	経 年 数				
	2年目	3,4年目	5,6年目	7,8年目	9年目以上
1	120 ± 7	130 ± 10	132 ± 10	136 ± 4	145 ± 8
2	128 ± 9	129 ± 8	127 ± 9	132 ± 12	131 ± 9
3	131 ± 13	134 ± 13	129 ± 7	137 ± 9	127 ± 4
年間合計	125 ± 6	131 ± 8	128 ± 7	133 ± 9	135 ± 4

* N18/N12収量指数, 8ヵ年の平均値, 平均値±標準偏差で表示した(%)

2) 窒素吸収量の経年変化

草地の経年化に伴う牧草茎葉部の窒素吸収量の変化(表4)は牧草収量の経年変化と同様の傾向にあり, 造成2年目草地ではいずれの窒素施肥区

でも明らかに多かった。また造成9年目以上の経年草地では1番草の窒素吸収量が3, 4年目草地の81%(窒素12kg施肥区), 93%(同18kg施肥区)と窒素12kg施肥区で明らかに劣った。これに対し,

表4. 草地の経年化に伴う窒素吸収量の変化* (kg/10a)

N用量	草地		2年目	3,4年目	5,6年目	7,8年目	9年目以上
	番草	N	(n=8)	(n=15)	(n=11)	(n=9)	(n=9)
N12kg 施肥区	年間合計		13.6±0.7 ^a	11.6±1.2 ^b	11.3±1.3 ^b	11.3±1.2 ^b	11.1±1.2 ^b
	1番草		5.2±0.7 ^a	4.3±0.5 ^b	4.1±0.5 ^b	4.0±1.2 ^b	3.5±0.6 ^c
	2ヶ		4.0±0.4 ^a	3.4±0.6 ^b	3.4±0.6 ^b	3.4±0.7 ^b	3.6±0.6
	3ヶ		4.4±1.0	3.9±0.9	3.8±1.0	3.9±0.8	4.0±0.9
N18kg 施肥区	年間合計		18.1±1.1 ^a	16.1±1.4 ^b	15.0±1.3 ^b	15.5±1.1 ^b	15.7±1.5 ^b
	1番草		6.7±0.7 ^a	6.0±0.8 ^b	5.8±0.6 ^b	5.6±0.4 ^b	5.6±0.7 ^b
	2ヶ		5.3±0.5 ^a	4.7±0.6 ^b	4.3±0.7 ^b	4.6±0.8 ^b	4.8±0.7
	3ヶ		6.1±1.2	5.4±1.1	4.9±1.0	5.3±0.6	5.3±1.0

*平均値±標準偏差で表示した a, b, c : 異文字間に5%水準で有意差あり

2,3番草の窒素吸収量は3,4年目草地と同等の窒素吸収量を示した。したがって、年間合計の窒素吸収量では造成2年目草地で多いことを除いて、3,4年目以降の草地間差は小さかった。

3) 越冬前の生育量に及ぼす草地経年数の影響 経年数の異なる草地の3番草刈り取り後から越

冬直前までの生育量を分けつ発生量、地上部窒素増加量などで比較した結果を表5に示した。分けつを有する主茎数は調査年次で異なるものの草地の経年数間では大差なく、1985年では1,300本以上、また1986年では2,000本/m²以上存在した。これに対し、1葉以上の分けつ数は造成1年目草地で990~1,190本/m²と最も多く、2,3年目草地

表5. 経年数の異なる草地の3番草刈り取り時および越冬前の形質

時期	項目	調査年次 草地 N	1985年				1986年			
			1年目	2,3年目	4~6年目	9年目以上	1年目	2,3年目	4~6年目	9年目以上
			3番草刈り取り時 (9月下旬)	地上部乾物重*	12	184	74	68	72	48
		18	-	-	-	-	-	97	103	95
	N含有率(%)	12	1.67	1.20	1.34	1.19	2.50	1.10	1.13	1.10
		18	-	-	-	-	-	1.16	1.18	1.17
	N蓄積量(g/m ²)	12	1.4	0.9	0.9	0.9	1.2	1.0	1.1	1.0
		18	-	-	-	-	-	1.1	1.2	1.1
越冬時 (11月上旬)	主茎数(本/m ²)	12	1,800	1,520	1,370	1,280	2,230	2,390	2,540	2,400
		18	-	-	-	-	-	2,490	2,600	2,700
	分けつ数(本/m ²)	12	1,190	490	370	190	990	290	200	140
		18	-	-	-	-	-	390	240	230
	分けつ/主茎比	12	0.66	0.32	0.27	0.15	0.44	0.12	0.08	0.06
		18	-	-	-	-	-	0.16	0.10	0.08
	地上部N増加量**	12	1.1	0.8	0.8	0.6	2.2	0.9	0.7	0.6
		18	-	-	-	-	-	1.3	0.9	1.0

*g/m² ** 3番草刈り取り時から越冬時までの増加量 (g/m²)

：290～490本，4～6年目草地：200～370本，9年目以上草地：140～190本/m²と草地の経年化に伴って減少した。また，主茎1本当たりの分げつ発生量（分げつ/主茎比）は，分げつ数と同様に草地の経年化に伴い低下し，さらに3番草刈り取り後から越冬時までの地上部窒素保持量の増加量も減少した。

一方，窒素18kg施肥区の越冬前生育量は何れの形質でも窒素12kg施肥区のそれより上回った。これを草地の経年数で比較すると，分げつ数，地上部窒素保持量の増加量はそれぞれ2,3年目>4～6年目=9年目以上草地の順であったが，経年数の影響は窒素12kg施肥区草地のそれより小さかった。また3番草刈り取り時の地上部重，株部の窒素濃度および窒素保持量には草地の経年数間で差異がなかった。なお，越冬前生育の形質のうち分げつ/主茎比は翌春1番草収量と密接な関係（図4）を示した。

したがって，以上のような越冬前生育量の経年草地間の差異は3番草刈り取り後から越冬時までの土壌からの窒素吸収量が草地の経年数間で異なっていることに起因する可能性が高い。表6に示

すように，低温条件下における表層土壌の窒素無機化量は経過年数が長くなるにつれて明らかに低下し，概算された3番草刈り取り後から越冬時までの表層土壌の無機化窒素量も草地の経年化に伴い低下した。

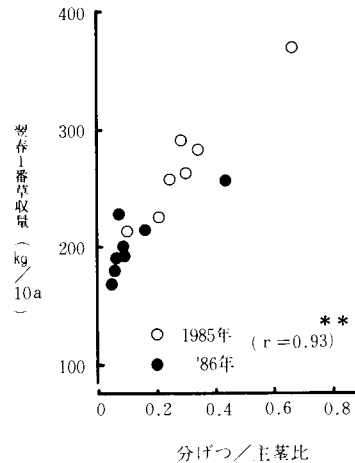


図4. 越冬前の牧草形質（分げつ/主茎比）と翌春1番草収量の関係(N12kgIX)

表6. 表層土壌（0～5cm）の窒素無機化量と温度の関係

草地	項目 温度	N無機化量(mg/100g乾土)					無機化N量*(kg/10a)
		5	10	15	20	30℃	9月下旬～10月下旬
	1年目	0.2	0.7	1.5	2.6	5.7	0.6
	2 "	0.1	0.2	0.8	1.5	3.6	0.3
経年数	3 "	-0.2	0.1	0.7	1.1	4.2	0.3
	4 "	-0.2	0	0.4	1.0	3.6	0.2
	6 "	-0.5	-0.1	0.3	0.8	4.4	<0.1
	10 "	-0.3	-0.1	0.3	1.2	5.7	<0.1

*概算した9月下旬から10月下旬までの無機化N量

第2節 経年数の異なる草地の肥料窒素利用率

前章で明らかにしたように造成9年目以上の経年草地の収量は3,4年目草地より低下するが，これは1番草収量が劣ることが主原因であった。また，古い経年草地の越冬前生育量は造成2,3年目

草地より劣っており，これには3番草刈り取り後越冬時までに無機化された土壌窒素の多少が関与していると推定した。

本節では草地の経年化に伴う収量の変化を肥料窒素の利用率，土壌からの窒素吸収量の面から検討した。

実験1 経年数の異なる草地の肥料窒素の利用率

目的：化学肥料で施用された窒素の牧草による利用率の草地造成後の経過年数による違いを明らかにする。

実験方法

1984, '83, '82, '81年および'77年造成のオーチャードグラス主体草地を供試し、1985年に試験を行った。

肥料窒素の利用率は窒素12kg施肥区の一部に75×75cm区画で重窒素標識硫酸(2.0 atom%)を施し、その吸収と体内各部位に対する分配を測定した。なお、実験は4反復で実施した。茎葉部試料は重窒素施用区画の中央部50×50cmの地際より5cm以上部分を刈り取った。また、株、根部および地表面枯死茎葉は中央部25×25cmを深さ5cmで掘り取り、株部(地際より5cm部分)と地表面枯死茎葉を採取した後、表層土層を水洗し根部試料を採取した。採取した試料は70℃、48時間通風乾

燥後、粉碎して分析試料とした。重窒素分析は茎葉部および株部については発光分析法⁷⁸⁾、根部および地表面枯死茎葉については質量分析法⁷⁸⁾によった。

実験結果

1) 肥料窒素の利用率と給源別窒素吸収量

年間の乾物収量(表7.)は造成3年目の草地を基準にすると2年目草地で124%と明らかに高く、4年目草地92%、5年目草地106%、9年目草地87%と草地の経年化に伴ってやや低下する傾向を示し、茎葉部窒素吸収量についても同様であった。一方、硫酸由来肥料窒素の利用率は2年目草地の49%から9年目草地の37%と草地の経年化に伴って明らかに低下した。これに対し、土壌からの窒素吸収量は5年目草地と2年目草地が8.8~9.2kg/10aと高く、他の草地では6.9~7.4kg/10aの範囲にあり、草地の経年化による大きな変化は認

表7. 年間合計の収量と窒素吸収構成

項目	草地				
	2	3	4	5	9年目
収量	822 ^a	662 ^b	608 ^c	699 ^b	575 ^c
N吸収量(kg/10a)	14.7	12.3	12.2	14.1	11.8
肥料N*	5.9 ^a	5.4 ^b	5.0 ^c	4.9 ^c	4.4 ^d
土壌N	8.8	6.9	7.2	9.2	7.4
肥料N利用率(%)	49.2	45.0	41.7	40.8	37.0
土壌N/N吸収量(%)	59.9	56.1	59.0	65.2	62.7

* (NH₄)₂SO₄肥料由来

a, b, c, d: 異文字間に5%水準で有意差あり

Lsd(5%) = 収量: 44kg, 肥料N: 0.34kg/10a

表8. 番草別の収量と窒素吸収構成

項目	1番草					2番草					3番草				
	2	3	4	5	9年目	2	3	4	5	9年目	2	3	4	5	9年目
収量	306	219	210	260	149	253	210	199	220	216	260	233	199	219	210
N吸収量(kg/10a)	5.40	3.72	3.84	4.45	2.80	4.58	3.89	3.92	4.62	4.41	4.76	4.71	4.40	4.99	4.60
肥料N*	2.07	1.67	1.77	1.71	1.29	1.86	1.75	1.64	1.63	1.66	2.02	1.97	1.58	1.58	1.49
土壌N	3.33	2.05	2.07	2.74	1.51	2.72	2.14	2.28	2.99	2.75	2.74	2.74	2.82	3.41	3.11
肥料N利用率(%)	51.7	41.8	44.3	42.6	32.3	46.6	43.7	41.1	40.8	41.6	50.6	49.4	39.5	39.6	37.3
土壌N/N吸収量(%)	61.7	55.1	53.9	61.6	53.9	59.4	55.0	58.2	64.7	62.4	57.6	58.2	64.9	68.3	67.6

* (NH₄)₂SO₄肥料由来 Lsd(5%) = 収量~1番草: 37, 2番草: 19, 3番草: 17kg/10a

肥料N~1番草: 0.28, 2番草: 0.15, 3番草: 0.14kg/10a

土壌N~1番草: 0.39, 2番草: 0.22, 3番草: 0.24kg/10a

表9. 経年数の異なる草地の土壌からの窒素吸収量* (kg/10 a)

草地	生育期間	1 番草時	2 番草時	3 番草時	越冬時	年間合計	翌春 1 番草 収 量
		440(9.8)**	850(15.5)	840(18.7)	380(9.5)	2,510	
	2 年目	1.99(134)***	2.18(128)	2.28(95)	0.81(103)	7.26(114)	283
経	3 ヶ	1.49(100)	1.79(100)	2.41(100)	0.79(100)	6.39(100)	263
年	4 ヶ	1.40(94)	1.73(102)	2.50(104)	0.91(115)	6.54(102)	290
数	5 ヶ	1.90(128)	2.55(150)	3.28(136)	0.69(89)	8.42(132)	258
	9 ヶ	0.96(64)	2.38(140)	3.08(128)	0.60(76)	7.02(110)	224

* 1 番草時：1 番草刈り取り茎葉・株N量－(早春時地上部N量＋肥料N吸収量(茎葉・株))

2 番草時：2 番草刈り取り茎葉・株N量－(1 番草刈り取り時N量＋肥料N吸収量(茎葉・株))

3 番草時：3 番草刈り取り茎葉・株N量－(2 番草刈り取り時N量＋肥料N吸収量(茎葉・株))

越冬前：越冬時(10月31日)茎葉・株N量－3 番草刈り取り時株N量

** 各生育期間の積算地温℃(平均地温℃)

*** () は3年目草地に対する指数を示す

められなかった。

次に番草別の肥料窒素の利用率および給源別の窒素吸収量を表8に示した。1番草の肥料窒素利用率は草地の経年化に伴い低下したが、2,3番草のそれは2,3年目草地でそれぞれ44～47%、49～51%と高いものの、4年目以上の草地ではそれぞれ41～42%、37～40%で大差なかった。また、1番草の土壌からの窒素吸収量は1.5～3.3kg/10aの範囲にあり2年目草地で高く9年目草地で低かった。しかし、2,3番草の土壌からの窒素吸収量は2年目草地で2.7kg/10aと差がなかったが、3年目以上の経年草地はそれぞれ2番草2.1～3.0kg、3番草2.7～3.6kg/10aと3番草と比較的多かった。

したがって、草地の経年化に伴う収量変化の要因を番草別に整理すると以下のようである。①1番草収量は経年化に伴って肥料窒素の利用率と土壌からの窒素吸収量が低下するため、9年目草地で低い。②2,3番草は造成4年目以上の経年草地で肥料窒素の利用率が低いものの土壌からの窒素吸収量が多くなるため、9年目草地でも3年目草地と同程度の収量を示す。③年間合計収量は1番草収量の経年変化の影響を反映して3年目草地より9年目草地が低い。

一方、土壌からの窒素吸収量の季節変化を早春

時および各番草刈り取り時の茎葉と株部窒素量から算出し表9に示した。また各番草生育期間の積算地温(10cm地温から算出)、翌春の1番草収量も併記した。各番草生育期間の土壌からの窒素吸収量は積算地温と密接な関係にあり、3番草時>2番草時>1番草時>越冬前生育時の順であった。土壌からの窒素吸収量の地温依存性は、9年目草地で顕著であり、越冬前生育時、1番草時など低地温期の土壌窒素吸収量が2,3年目草地のそれより劣り、逆に2,3番草生育時など地温の高い期間は3年目草地の土壌窒素吸収量を上回った。つまり、古い経年草地は低温時の土壌からの窒素吸収量が2,3年目草地のそれより劣ることが明らかになった。

2) 肥料窒素の収支

オーチャードグラス主体採草地の1年間における肥料窒素の収支を表10に示した。茎葉部の肥料窒素利用率は37～49%平均43%であり、この部分が収穫に伴って草地外に持ち出された。これに対し、牧草の株部に8～10%、根部(0～5cm)に9～11%合計20%程度が保持され、また地表面枯死茎葉に4～9%が含有され草地内に残置された。この株部、根部の肥料窒素保持率には草地の経年数の違いが認められないが、地表面枯死茎葉の肥

表10. 経年草地における肥料窒素の牧草体部位に対する分配

草地・項目 部位	2年目		3年目		4年目		5年目		9年目	
	量*	割合**	量	割合	量	割合	量	割合	量	割合
茎葉	5.95	46.6	5.39	44.9	4.99	41.6	4.92	41.0	4.44	37.0
株	1.24	10.3	1.16	9.7	1.17	9.7	0.96	8.0	0.98	8.1
根	1.22	10.2	1.11	9.3	1.11	9.3	1.30	10.8	1.32	11.0
牧草体合計	8.41	70.1	7.66	63.8	7.27	60.6	7.18	59.8	6.74	56.2
枯死茎葉	0.54	4.5	0.83	6.9	0.94	7.8	1.01	8.4	1.00	8.4
合計	8.95	74.6	8.49	70.7	8.21	68.4	8.19	68.2	7.74	64.6

* g/m² ** %

料窒素含有量は造成4年目以上の草地>2,3年目草地の関係があった。

地表面枯死茎葉も含めた肥料窒素の回収率は2年目草地の75%から9年目草地の65%であった。

実験2 施肥窒素利用率に及ぼす生育期間の温度の影響

目的：生育期間の温度条件が経年草地の牧草生育、肥料窒素利用率および土壌窒素吸収量に及ぼす影響を確認する。

実験方法

① 肥料窒素利用率および土壌からの窒素吸収量に及ぼす温度の影響：1984, '83, '81, '77年造成草地とこれら草地と同様の施肥条件（窒素12kg/10a施肥区）で管理されているオーチャードグラス主体の1974年造成草地（それぞれ造成後2, 3, 5, 9, 12年目に相当する）を供試した。1985年早春時（4月24日）に1/5,000aの無底ステンレスポットでポット当りオーチャードグラスの株2~4個体を含むように作土層（0~25cm土層）を無攪乱状態で採取し、高温区：昼間18℃、夜間10℃平均14℃と低温区：昼間13℃、夜間7℃平均10℃の2水準で28日間、人工気象室を用いて牧草を生育させた。

施肥は窒素5g/m²相当量を重窒素標識硫酸（10.0atom%）で施し、リン酸、カリはリン酸第1カリと塩化カリで窒素と等量施した。また第1回目刈り取り後、温度条件を同一（平均18℃）

として28日間無窒素条件で生育させ、肥料窒素の残効を調査した。

実験終了後、牧草の株部および地表面枯死茎葉を採取したのち、0~5cm土層を水洗篩別法によって根部および5段階の粒径別の有機物（2mm以上、2~1, 1~0.5, 0.5~0.25, 0.25~0.1mm）を採取した。採取した試料は70℃、48時間通風乾燥後、重窒素を分析し肥料窒素の存在量を調査した。なお、重窒素の分析は発光分析法によった。

② 温度の違いによる経年草地の肥料窒素増肥効果：1984, '81, '77年造成のそれぞれ造成後3, 6, 10年目草地（窒素12kg/10a施肥区）を供試し、1985年と同様に不攪乱状態のポット試料を採取した。施肥窒素3, 5, 8g/m²相当量を施し、1985年の実験と同様な条件で牧草を生育させ肥料窒素の増肥効果を調べた。

なお、1985, '86年の両実験とも牧草生育期間の水管理は1日1~2回圃場含水量の水分条件に蒸留水を用いて調節した。

実験結果

1) 生育期間の温度が牧草の肥料窒素利用率に及ぼす影響

牧草生育期間の温度が経年数の異なる草地の牧草収量、肥料由来窒素および土壌由来窒素の吸収量に及ぼす影響を表11に示した。

2番草生育期間の温度水準に近い高温区での造成9, 12年目草地の収量は3年目草地の94~97%と僅かに劣る程度であった。しかし、1番草生育

期間の温度水準と近い低温条件下における造成9、12年目草地の収量は3年目草地の71~77%と明らかに劣った。すなわち低温の影響の指標となる低温区/高温区収量指数は造成2、3年目草地が93~96%であるのに対し、造成9、12年目草地は73~76%と古い経年草地の方が大きかった。

一方、肥料窒素の利用率は3年目草地に比べ2年目草地で高く、5年目草地で低い傾向で認められるが、造成9、12年目草地の高温区では3年目

草地と大差なかった。これに対し、低温区では3年目草地に比べて造成9、12年目草地の方が低かった。さらに、造成9、12年目草地の土壌窒素吸収量は高温区では3年目草地と大差ないが、低温区では3年目草地の78~83%と劣った。

次に、第1回刈り取り後、生育期間の温度条件を一定(平均18℃)にして肥料窒素の残効を調査した。前処理が低温区で十分に肥料窒素が利用されなかった造成9、12年目草地での残効が大きく、

表11. 経年数の異なる草地の肥料窒素利用に及ぼす生育温度の影響(ポット試験)

処理・項目 草地	期間*	高温条件(14℃)				低温条件(10℃)				低温/高温×100		
		収量 (g/ポット)	N吸収量 (mg/ポット)	肥料	土壌	収量 (g/ポット)	N吸収量 (mg/ポット)	肥料	土壌	収量	肥料	土壌 (%)
経年数	2	129	135	116	148	121	125	120	127	93	103	101
	3	(6.9)**	(126)	(52.9)	(73.4)	(6.6)	(138)	(52.4)	(85.9)	96	99	117
	5	102	108	87	123	96	100	85	109	90	97	103
	9	97	104	97	109	77	82	83	82	76	85	87
	12	94	103	96	108	71	77	78	77	73	81	83
残効	2	116	107	87	114	138	113	96	118	123	118	114
	3	(1.7)**	(34)	(8.5)	(25.9)	(1.8)	(37)	(9.1)	(28.3)	104	107	109
	5	115	121	93	130	122	128	90	140	110	104	117
	9	102	108	87	115	123	125	109	131	125	134	125
	12	106	116	92	124	141	135	112	143	127	131	125

* 生育期間：施肥時~温度2水準，肥料N 5 g/m²相当量を施肥

残効~温度一定(平均18℃)，-N条件

** ()実数値，他は3年目を基準とした指数で表示した

表12. 肥料窒素の牧草体および蓄積有機物による回収率 (%)

処理	部位 草地	牧草体			粒径別蓄積有機物				全体 合計
		茎葉部*	株・根	合計	2mm 以上	2~ 0.5	0.5~ 0.1mm	合計	
高温 区 (14℃)	3年目	61.4	14.5	75.9	5.4	0.6	0.6	6.6	82.5
	5 "	53.8	10.9	64.7	7.1	0.8	0.6	8.3	73.0
	9 "	58.7	11.6	70.3	8.6	0.9	1.7	11.2	81.5
低温 区 (10℃)	3年目	61.6	14.5	76.1	6.4	0.7	0.5	7.6	83.7
	5 "	52.5	12.4	64.9	7.6	0.7	0.9	9.2	74.1
	9 "	53.6	14.6	68.2	9.4	0.8	2.1	12.3	80.5

*施肥時と残効時の合計値

(ポット試験：1985年)

3年目草地に対し109～112%の残効が認められた。また、土壌由来窒素吸収量は前処理が低温で、吸収量が少なかった造成9、12年目草地では3年目草地より大きかった。

第2回目刈り取り後、表層に蓄積した有機物を粒徑別に分画し、それぞれの有機物に含有される肥料窒素量を測定した結果を表12に示した。

3年目草地の蓄積有機物による肥料窒素保持量は生育期間の温度条件での差異が認められなかった。これに対し、9年目草地でのそれは牧草の肥料窒素利用率が低かった低温区が表層土壌に含まれる2mm以上画分および0.5mm以下の有機物で高温区より高かった。したがって、牧草体(茎葉部、株+根部合計)の吸収した肥料窒素と蓄積有機物の保持するそれを合計した肥料窒素量は温度処理

間で差がなく、また3年目草地と9年目草地の差は小さかった。

2) 牧草生育期間の温度が牧草に対する肥料窒素の増施効果に及ぼす影響

生育期間の温度条件と牧草に対する肥料窒素の増施効果の関係を表13に示した。肥料窒素の増施が牧草収量に及ぼす影響はいずれの温度処理でも高いが、低温区におけるそれは造成10年目草地>造成6年目草地>造成3年目草地の順であった。また、低温条件での造成10年目草地の収量は高温条件のそれに対し窒素3g/m²区で53%と明らかに低収であったが、窒素8g/m²区では80%まで回復した。

表13. 経年草地の収量及び窒素施肥反応に及ぼす温度の影響(1986年)

温度処理	草地			3年目			6年目			10年目		
	N用量*			3	5	8	3	5	8	3	5	8
高温区(14℃)収量**	6.2	7.6	8.4	5.6	7.7	8.8	6.0	6.7	7.6			
低温区(10℃)収量**	5.3	6.7	8.0	4.3	5.4	7.3	3.2	4.8	6.1			
低温/高温収量指数***	85	88	95	77	70	83	53	72	80			

* gN/m² ** 乾物 g/ポット *** %

(ポット試験)

第3節 草地の経年化に伴う表層蓄積有機物の変化

草地の経年化に伴う土壌化学性、養分状態の一般的变化の特徴は① 表層土壌の酸性化^{45,67,74)}、② 有効態リン酸、カリなど無機成分の富化^{74,103)}および③ 牧草の枯死茎葉、根などの有機物の供給による土壌有機物の富化^{9,10,22,54,74)}などである。

前節では牧草が吸収する窒素のうち土壌由来窒素の割合が56～65%を占め、牧草収量に対する土壌由来の窒素吸収の寄与率が極めて大きいことを指摘した。

そこで本節では草地の主要な土壌からの窒素吸収源の1つである草地表面および表層土壌に還元される有機物量とその分解過程、経年化に伴う蓄

積量の変化および蓄積した有機物の化学的内容について検討した。

実験1 草地内の有機物還元量と分解過程

目的：草地系内での還元有機物による窒素の循環量を把握する。

実験方法

有機物還元量はオーチャードグラス主体草地で1982年から'84年までの3カ年間、チモシー主体草地で1985年から'87年までの3カ年間調査した。調査面積は25×25cm、深さ5cmの掘り取り法により4反復で実施した。なお、根量調査の土層深を0～5cmとしたのは0～15cmに存在する根量の80～90%が0～5cm土層内に含まれるためである⁸⁸⁾。

越冬中の地上部枯死茎葉量とそれに含有する窒

素量は越冬前後の乾物重と窒素保持量の差から算出し、各刈取り時の枯死茎葉量は刈り取りにより生長点を失って再び伸長しない茎葉（例えば出穂茎基部）を枯死茎葉量とし、その窒素含有率から窒素量を求めた。

地下部枯死根量はオーチャードグラスでは0～5 cm土層内に存在する枯死根蓄積量を測定し、その経年変化と地下部有機物の分解過程の実験に記すオーチャードグラス根部の分解率から推定し、チモシーでは1番草刈り取り時に褐変化する根量を枯死根量として、その窒素含有率から地下部窒素還元量を算出した。

地上部還元有機物の分解過程はオーチャードグラスの地際より5 cmの茎基部残渣（表14）を18メッシュのサランネットで作成した袋（5×10cm）に乾物2.5g充填し、1977年造成草地の地表面に

固定、設置した。分解率は設置後1～2ヵ月間隔で28ヵ月まで経時的に乾物重、全炭素（チューリン法で測定）および全窒素含有率を測定し、設置前試料との差から算出した。設置時期は1981年6月下旬、8月中旬、10月上旬の3回に行った。設置草地に対する施肥および刈り取り管理は前節までと同様である。

地下部有機物の分解過程はガラス繊維濾紙法⁶⁴⁾によりオーチャードグラス根部0.5gを用い、1985年の5、6、8月および10月の4時期に耕起碎土した褐色森林土の深さ10cmに4反復で埋設し、1985、'86、'87年のそれぞれ11月に掘り出した。埋設期間は1～29ヵ月である。分解率は掘り出した試料の乾物重、全炭素、全窒素を測定し、埋設前試料との差から算出した。なお、根の分解実験は無作付け、無肥料条件とした。

表14. 供試有機物残渣の成分含有率と設置時期

成分・時期 種類	成分含有率 (%)			設置時期 (年.月.日)
	T-C	T-N	C/N	
1 番草残渣	44.1	0.513	80.1	1981, 6.25
2 〃	38.5	1.504	25.6	8.15
3 〃	42.0	1.283	32.7	10.1
地下部残渣	41.0	0.775	52.9	1985, 5, 6, 8, 10月

実験結果

1) 草地の有機物還元量

草地の枯死茎葉還元量は年間合計乾物収量および番草別乾物収量と密接な関係が認められた（図5）。

年間乾物収量が700～900kg/10a水準のオーチャードグラス、チモシー主体採草地における有機物および窒素還元量を表15に示した。オーチャードグラス主体草地の地上部枯死茎葉量は番草間の変動が少なく窒素12kg施肥区で46～71kg/10a、同18kg施肥区で59～93kg/10a程度であり、年間合計の枯死茎葉量は230～280kg/10a程度であった。これに対し、チモシー主体草地の地上部枯死茎葉量は1番草刈り取り時の還元量が200～250kg/10aと最も多く、ついで越冬中、2番草刈り取

り時の順であり、年間の枯死茎葉量は320～380kg/10a程度であった。

一方、0～5cm土層内における地下部還元量の推定では、オーチャードグラス根の世代交替が判然としないことが問題として残った。そこで、図6に示す枯死根蓄積量の経年変化と次項に示す図7より得られる根の分解率と積算地温の関係式（ $D=0.65T^{0.52}$ ）を用いて、1年間当たりの積算地温から求めた年平均分解率を推定し、これから年間の枯死根量を求めた。その結果は100～120kg/10a程度であった。またチモシー草地の枯死根量は1番草刈り取り時の黒褐色に変化した根量から算出した結果、160～180kg/10a程度であった。

オーチャードグラス主体草地における枯死茎葉

と枯死根の還元に伴う窒素の還元量は越冬期間中が最も多く1.4~2.0kg/10a程度、各刈り取り時の窒素量が0.5~0.8kg/10a、枯死根に伴う窒素量が1.0kg/10a前後、年間合計では4~5kg/10a

程度と推定された。またチモシー主体草地の窒素還元量はオーチャードグラス主体草地のそれより少なく3~4kg/10a程度と推定された。

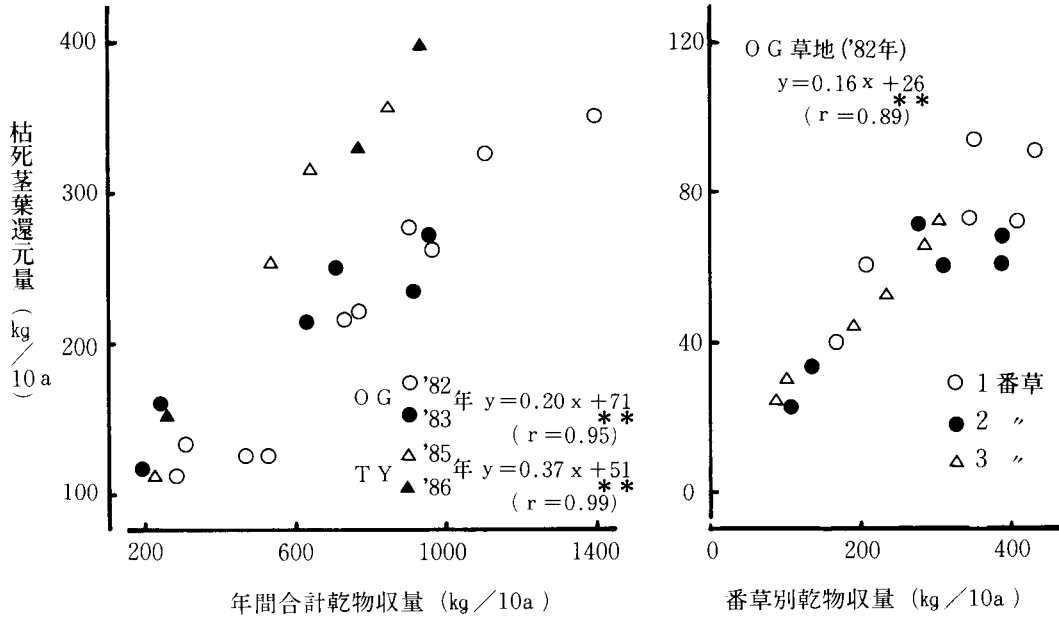


図5. 枯死茎還元量と牧草収量の関係
OG:オーチャードグラス、TY:チモシー

表15. イネ科主体草地*の有機物と窒素還元量 (kg/10a)

草種 項目	オーチャードグラス				チモシー			
	有機物		N		有機物		N	
部位 施肥N	12	18	12	18	10	15	10	15
越冬中	71	93	1.41	1.96	60	70	0.75	0.86
1番草時	57	64	0.68	0.76	205	247	0.80	1.27
2 "	46	59	0.55	0.72	49	67	0.18	0.21
3 "	54	63	0.65	0.76	-	-	-	-
地上部合計	228	279	3.29	4.20	314	384	1.73	2.34
地下部	100~120**		0.90~1.08**		160	180	1.39	1.60
合計	338	390	4.29	5.20	474	565	3.12	3.94

*年間乾物収量700~900kg/10a水準の草地を対象 **推定値

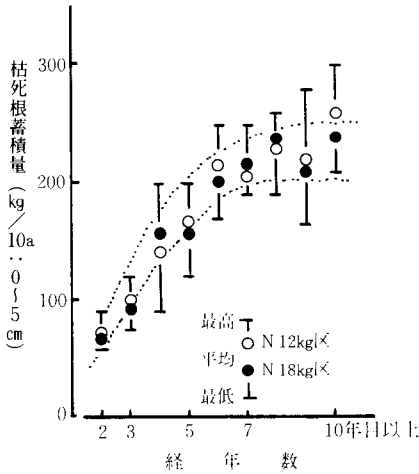


図6. 表層0~5cm土層内の枯死根蓄積量の経年変化
(図中破線は根の分解率から求めた推定枯死根の蓄積曲線を示す)

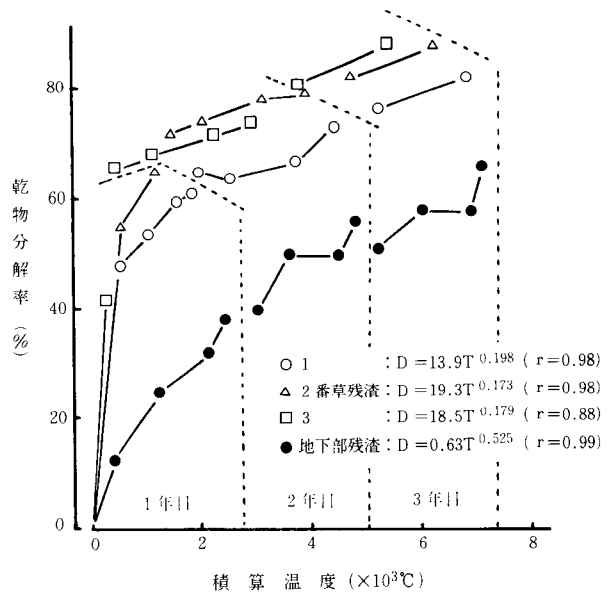


図7. 牧草刈り取り時残渣(茎基部枯死茎葉)、地下部残渣の分解率と積算温度の関係

2) 還元有機物の分解過程

還元される各番草刈り取り時の茎葉残渣および根部残渣の乾物分解率は積算気温および地温と密接な関係にあり、分解率(図7)は $D = a T^b$ (D:分解率, T:積算温度, a, b:定数)の近似式で表現された。また、分解率は残渣のC/N比によっても影響され、2, 3番草残渣(C/N比26~33) > 1番草残渣(C/N比80) > 地下部残渣(C/N比53)の順であった。還元1年目では地上部残渣が平均56%(1, 2, 3番草残渣それぞれ59, 65, 42%), 地下部残渣が平均27%であった。還元2, 3年目までには地上部残渣がそれぞれ平均75, 87%, また地下部残渣でそれぞれ平均49, 58%が分解消失していた。

有機物が含有する窒素の消失率(図8)は還元有機物残渣のC/N比で大きく異なり、1番草残渣は1年目に約23%消失したが、その後はほとんど消失が進まず3年目に至っても40%程度にとどまった。また、消失途中で窒素の無機化よりも有

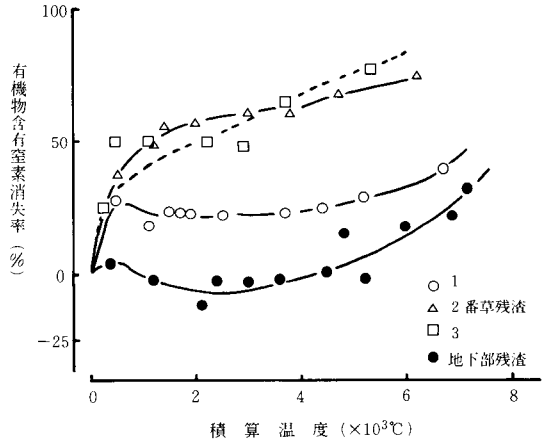


図8. 牧草刈り取り時残渣(茎基部枯死茎葉)、地下部残渣の含有する窒素の消失率と積算温度の関係

機化が優占する状態になったことが認められた。これに対しC/N比が小さい2, 3番草残渣の窒素消失率は1年目でそれぞれ48, 25%, 3年目では75~78%であった。また地下部含有窒素の消失

率は極めて低く、1年目では窒素の有機化が主体であり、2年目で3%、3年目で18%程度であった。なお、地上部還元有機物における2年目の含有窒素の消失率が停滞した原因は2年目の牧草生育期間の降水量が300mmと平年値460mmより明らかに少なかったためと考えられる。

実験3 有機物蓄積量の経年変化

目的：草地の経年化における有機物の蓄積量とその組成的变化を明らかにする。

実験方法

有機物蓄積量の経年変化は1983、'81、'77年および同一施肥条件である'75年造成のオーチャードグラス主体草地を対象に1984年から'89年までの6ヵ年間、草地の1部から25×25cm、深さ5cm、4反復の掘り取りによって調査した。すなわち、オーチャードグラス茎基部および地表面の枯死茎葉を採取後、0～5cmの表層土層を分割し、分割

した試料を水洗篩別法により枯死根を主体とする粒径2mm以上および2～1、1～0.5、0.5～0.25、0.25～0.1mmの5段階に分画して蓄積量を測定した。なお蓄積有機物量は粗灰分を除いた乾物量で示した。

蓄積有機物の化学組成はWAKSMANの近似分析法¹⁰⁹⁾に準拠して分析した。

また各粒径画分の窒素無機化特性は1986年造成草地の蓄積有機物量の少ない5～15cm土壌(水pH6.0)を用い、乾土当たり有機物炭素として0.5%を添加し、30℃の標準培養条件で検討した。

実験結果

1) 有機物蓄積量の経年変化

粒径0.1mm以上の有機物蓄積量およびそれに含有される炭素と窒素量に及ぼす窒素施肥量の影響はほとんど認められなかった(表16)。したがって、これからは窒素12kg施肥区の測定結果を示す。

表16. 窒素施肥量の違いによる蓄積有機物量(kg/10a, 1986年調査)

経年数	施肥N 項目	N12kg施肥区				N18kg施肥区			
		有機物	C	N	C/N	有機物	C	N	C/N
2年目		496	219	8.1	27.0	454	201	7.4	27.2
4 "		678	300	12.1	24.8	696	308	12.0	25.7
6 "		866	383	16.6	23.1	791	352	14.9	23.6
10 "		1,155	531	22.5	23.6	1,082	498	21.4	23.3

粒径0.1mm以上の有機物蓄積量は測定年次間の変動があるものの草地の経年化に伴い顕著に増加し、その量は造成5年目で0.6t/10a、10年目で1.0t/10a程度に達した。これら蓄積有機物に含有される窒素量は有機物蓄積量と同様な傾向を示し、造成5年目で13kg/10a、造成10年目で20kg/10a程度に達した(図9a)。また窒素蓄積量(Y)と草地の経年数(X)との関係は $Y = a \ln X + b$ によって近似され、その回帰係数aは調査年次間6.7～11.3(8.5±1.9, 平均±標準偏差)の変動を示した。さらに粗大画分(C/N比25～30以上)の粒径0.1mm以上の有機物に占める割合は造成後経年的に低下し、分解の進んだ細粒

画分のそれは経年的に増加した(図9b)。

一方、この蓄積有機物の粒径別内容は草地の経年数によって明らかに異なっていた(図10)。すなわち、地表面および茎基部に存在する枯死茎葉量は造成7～8年目まで増加し、その極大値は約300kg/10a程度でそれ以降は減少した。また表層0～5cm土層内の枯死根を主体とする粒径2mm以上画分の蓄積量は経年的に増加するが、造成10年目以降の増加量は少なく、その極大値は約250kg/10a程度であった。これに対し、粒径1mm以下の細粒画分の蓄積量は草地の経年化に伴い直線的に増加し、1年当たりの増加量は0.25～0.1mm>0.5～0.25mm>1～0.5mm>1～2mm画分

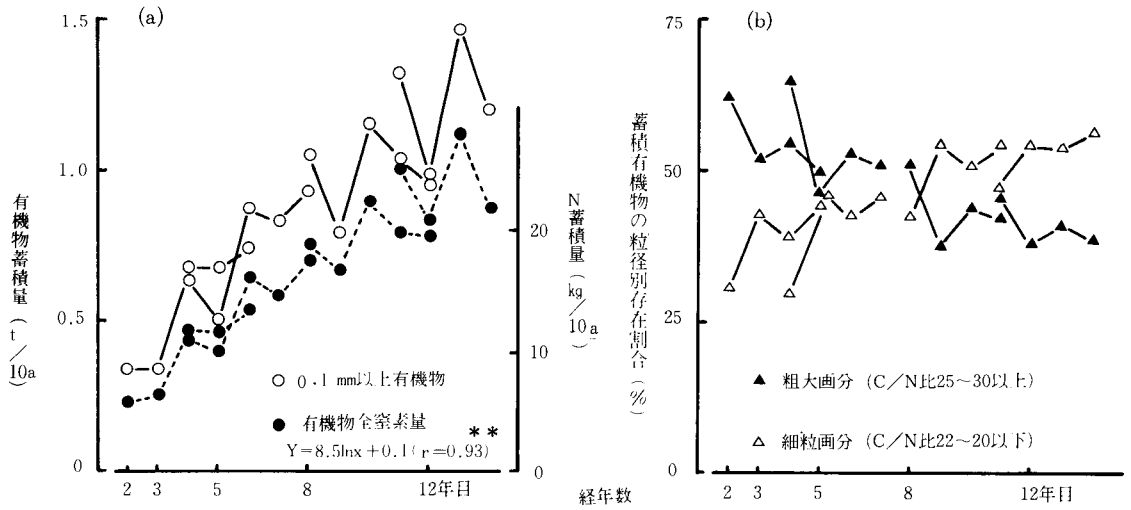


図9. 蓄積有機物量および窒素量の経年変化(a)と粒径別有機物の存在割合(b)

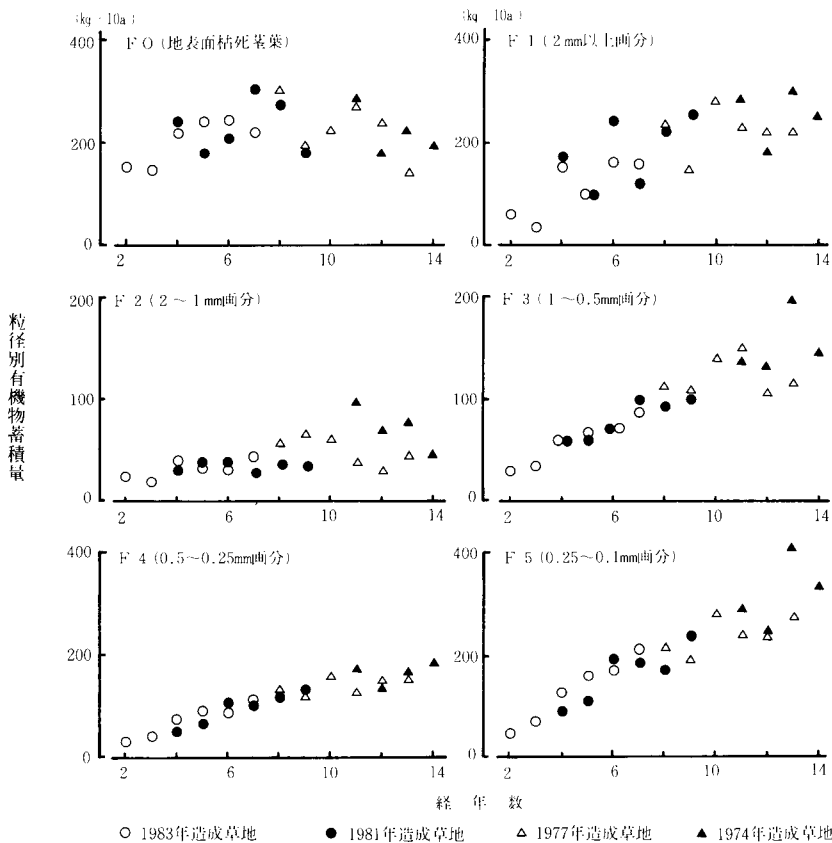


図10. 草地の経年化に伴う粒径別有機物蓄積量の変化(1984~'89年調査)

の順で、粒径の細かい画分ほど多かった。

2) 蓄積有機物の化学組成

粒径別有機物の化学組成を草地の経年数で比較した結果を図11, 12に示した。地表面枯死茎葉のC/N比は草地造成後一旦低下したが、以降経年化に伴い高まった。また、粒径2mm以上画分のC/N比は草地の経年化に伴い明らかに高まった。しかし粒径1mm以下の細粒画分のC/N比は草地

経年数に関係なく20前後ではほぼ一定であった(図11)。

一方、地表面枯死茎葉を除く粒径2mm以上、1~0.5mmおよび0.25~0.1mm画分のセルロース、ヘミセルロースの強熱減量に対する存在割合は草地の経年化に伴い増加した。しかし、熱水抽出有機物の存在割合はほぼ一定であり、リグニンのそれは各粒径画分で異なる様相を示した(図12)。

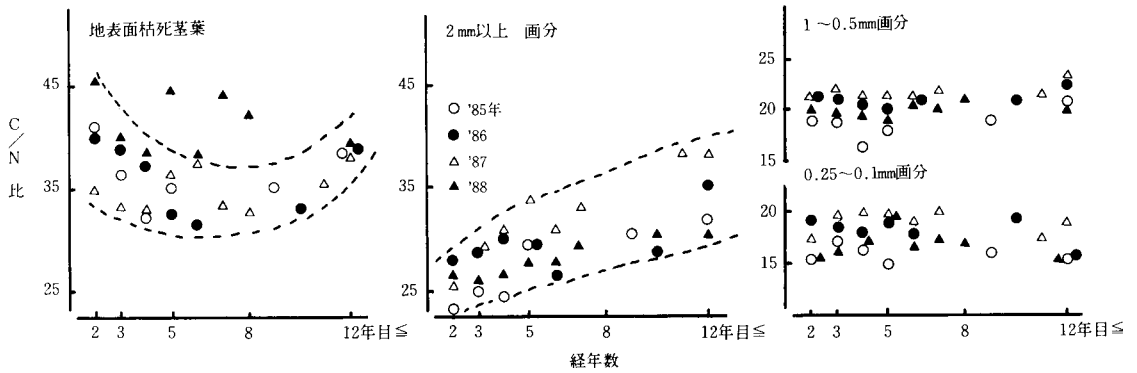


図11. 粒径別表層蓄積有機物のC/N比(1985~'88年)

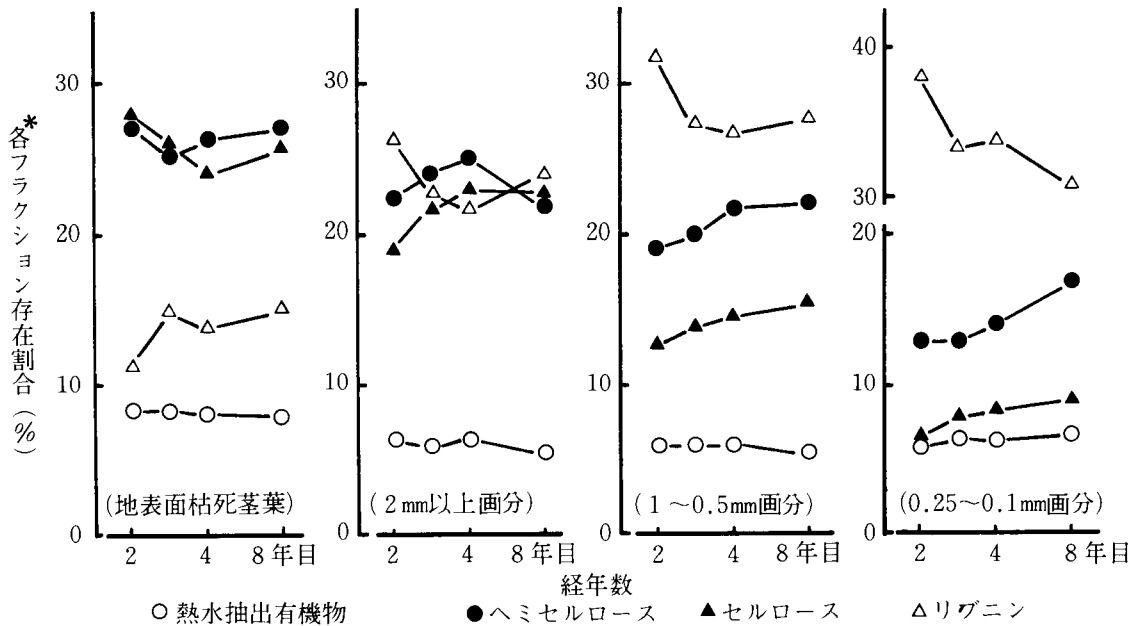


図12. 粒径別有機物の化学組成(*灼熱減量に対する割合)

3) 蓄積有機物の窒素無機化特性

粒径別有機物の含有する窒素の無機化量 (図13) は粒径が細くなるにつれ増加するが、地表面枯死茎葉および表層0~5cm土層内の粒径2mm以上画分は明らかな有機化を示した。また、古い経年草地に蓄積する地表面枯死茎葉および粒径2mm以上画分の窒素有機化量は造成2, 3年目草

地のそれらより大きく逆に窒素無機化を示す粒径1~0.5mmおよび0.25~0.1mm画分の無機化量は古い経年草地で少ない傾向を示した。この結果は、古い経年草地に蓄積する有機物は造成2, 3年目草地のそれらと物理的に同一な粒径の有機物であっても化学組成は異なることと一致する。

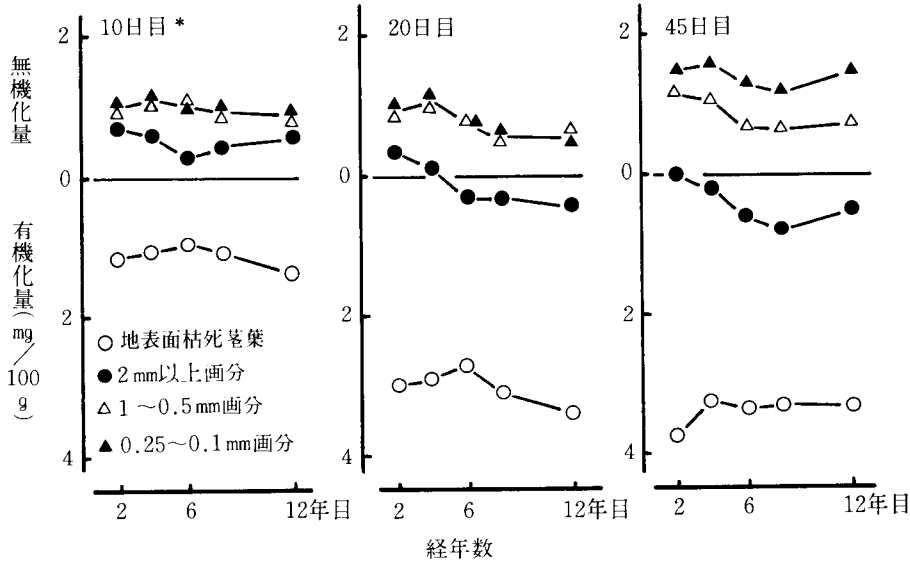


図13. 粒径別蓄積有機物の窒素無機化、有機化量 (mg/100g:原土無機Nとの差,*培養日数)

実験4 有機物蓄積量の異なる経年草地表層土壌の窒素無機化、有機化に及ぼす温度の影響

目的：経年数の異なる草地表層土壌の窒素無機化に及ぼす温度の影響を明らかにする。

実験方法

1) 表層土壌の微生物活性と炭素・窒素無機化に及ぼす影響

造成後2, 3, 5, 8, 12年目草地の表層土壌(0~5cm)と5~15cmの土壌を温度2水準(15, 30℃)の標準培養条件で培養し、尿素分解活性および培養期間中に無機化される炭素と窒素量を測定した。すなわち、尿素分解活性⁹⁴⁾は碎土した生土(乾土10g相当)に分解基質として3%尿素

液1mlを添加し、12時間培養後10%塩化カリウム液で未分解の尿素を抽出、測定し、乾土100gの24時間当たりの分解活性とした。また炭素、窒素無機化量は乾土10g相当の碎土した生土を500mlスチロールビンに採取し、発生する炭酸ガスを田辺の方法¹⁵⁾で、無機化される窒素を原土の無機態窒素との差で測定した。

2) 表層土壌の窒素無機化特性

造成3, 5, 10年目草地の表層土壌(0~5cm)の風乾土を用い温度水準4段階(10, 15, 20, 30℃)で長期間(200日間)標準培養条件で培養し、経時的に窒素無機化量を測定して、杉原ら¹⁰⁸⁾の窒素無機化モデルを適用してモデルの当

てはめ、可分解性窒素量、反応速度定数および活性化エネルギーを求めた。

3) 表層土壌の窒素有機化特性

造成3年目と9年目草地の表層土壌(0~5cm:風乾土)に硫酸態窒素5mg/100g乾土相当を添加し、温度水準3段階(10, 17, 25℃)の標準培養条件で培養した後、経時的に添加窒素の有機化量(窒素添加区の無機態窒素-無添加区無機態窒素-添加窒素量)添加窒素量を測定した。

実験結果

1) 表層土壌の微生物活性と炭素、窒素無機化に及ぼす温度の影響

0~5cm, 5~15cm土壌の微生物活性(尿素分解活性, 炭素無機化量)は草地が経年化しても低下せず、また培養温度の影響(15℃/30℃指数)も草地の経年数に関係なく一定であった(表17)。

これに対し、表層土壌の窒素無機化量に及ぼす培養温度の影響は草地の経年数によって異なり、恒温培養条件における造成8, 12年目草地の表層土壌の窒素無機化量がやや多く、かつ低温(15℃/30℃指数)の影響が草地の経年化に伴い増大した。したがって15℃培養条件における無機化された炭素と窒素の比率は草地の経年化に伴い顕著に増加した。

表17. 経年草地の層位別微生物活性, 炭素, 窒素無機化量に及ぼす培養温度の影響

項目	温度	層位 草地	0~5cm土壌					5~15cm土壌				
			2	3	5	8	12年目	2	3	5	8	12年目
尿素分解 活性 (mg/100g)	15	15	141	167	161	171	162	135	138	162	151	125
	30	30	221	226	235	262	218	206	191	217	235	171
	15/30*	15/30*	64	74	69	65	74	66	72	74	64	73
CO ₂ -C 無機化量 (mg/100g)	15	15	45.3	59.3	62.8	83.0	96.3	44.4	31.8	38.5	34.8	38.4
	30	30	79.7	89.7	98.1	124.2	144.8	67.9	56.7	57.5	52.7	51.8
	15/30	15/30	57	66	64	67	67	65	56	67	66	74
N 無機化量 (mg/100g)	15	15	4.00	3.67	4.20	4.00	3.59	3.11	2.37	2.25	1.71	1.90
	30	30	6.98	6.77	8.24	8.33	9.46	5.59	4.58	4.12	2.95	2.91
	15/30	15/30	57	56	51	48	38	56	52	55	58	65
無機化され たCとNの比	15	15	12.1	12.4	15.0	20.8	26.8	14.3	13.4	17.1	20.4	20.2
	30	30	11.4	13.2	11.9	14.9	15.3	11.2	15.8	15.0	20.5	26.8

*15℃/30℃指数(%)

(1988年4月23日採取土壌)

表18. 経年草地表層土壌の窒素無機化特性* (風乾土培養法による)

成分 特性値	分解の早い部分(N1)			分解の遅い部分(N2)		
	No 1	K 1	Ea 1	No 2	K 2	Ea 2
3年目	5.9±0.4	0.12±0.02	13,400±1,500	28.4±1.5	0.003±0.0003	14,300±400
5ヶ	5.3±0.6	0.09±0.02	16,000±2,600	44.6±3.9	0.002±0.0004	15,600±500
10ヶ	3.7±1.1	0.25±0.16	23,700±9,500	38.5±1.2	0.005±0.0004	17,000±500

*無機化モデル: $No 1 [1 - \exp(-K 1 \cdot T)] + No 2 [1 - \exp(-K 2 \cdot T)]$

No: 易分解性窒素含量 (mg/100g乾土), K: 20℃の速度定数 (mg/100g乾土/日)

Ea: 活性化エネルギー (Cal/mol)

2) 表層土壌の窒素無機化特性

杉原らの窒素無機化モデルは単純型、単純並行型、有機化・無機化並行型の3種の基本型に区分されている¹⁰⁸⁾。これらの基本型に当てはめた経年数の異なる表層土壌の窒素無機化特性は、分解の早い画分と分解の遅い画分の2つの構成成分を持つ単純並行型に適合した(表18)。

分解の早い画分の易分解性窒素含量は3年目>5年目>10年目草地と経年化に伴い低下した。また、この画分の活性化エネルギーは誤差が大きいものの草地の経年化に伴い増加する傾向にあった。これに対し、分解の遅い画分の易分解性窒素含量は分解の早い画分のそれより多く、5年目>10年目>3年目の草地の順であり、この画分の活性化エネルギーも経年化に伴い増加した。

このことは古い経年草地における表層土壌からの窒素の無機化は地温が高まらなると旺盛にならず、地温が低い状態でのそれは草地の経年化に伴い低下することを示す。

3) 表層土壌における肥料窒素の有機化とその再無機化に及ぼす温度の影響

差し引き法による表層土壌における肥料窒素の有機化量はいずれの温度条件でも9年目草地>3年目草地の関係にあった。しかし、低温条件では3年目草地が培養30日程度で有機化された窒素の再無機化が完了するのに対し、9年目草地では50日に至っても有機化された窒素の再無機化は認め

られなかった。したがって、有機化された窒素の再無機化が完了する積算培養温度は3年目草地ではいずれの温度水準でも約350℃、9年目草地では17,25℃の温度条件で500℃程度が必要であった(図14)。

第4節 草地の窒素収支

前章で草地は枯死茎葉、枯死根など有機物由来窒素として年間4~5 kg/10 aが還元され、そのうち年間約2 kg/10 aが表層に蓄積し、草地の経年化に伴い有機物含有窒素量は顕著に増加することを指摘した。

一方、草地における作土層全体の土壌窒素量が経年的に増加する^{9,10,54)}か否か^{7,60)}かについて両論があり判然としなない。また、我国では草地における土壌窒素の経年変化に関する長期的な検討はほとんど行われていない。

本節では草地の経年過程における土壌窒素量の変化と、肥料窒素も含めた窒素収支について検討した。

実験方法

土壌窒素含量の経年変化は第1節実験2に示した経年草地を用い1984~'90年(1984年:1977~'84年までに造成した5種、'86年:1977~'86年までに造成した7種、'88, '90年:1977~'88年までに造成した9種)まで隔年で4回調査した。土壌

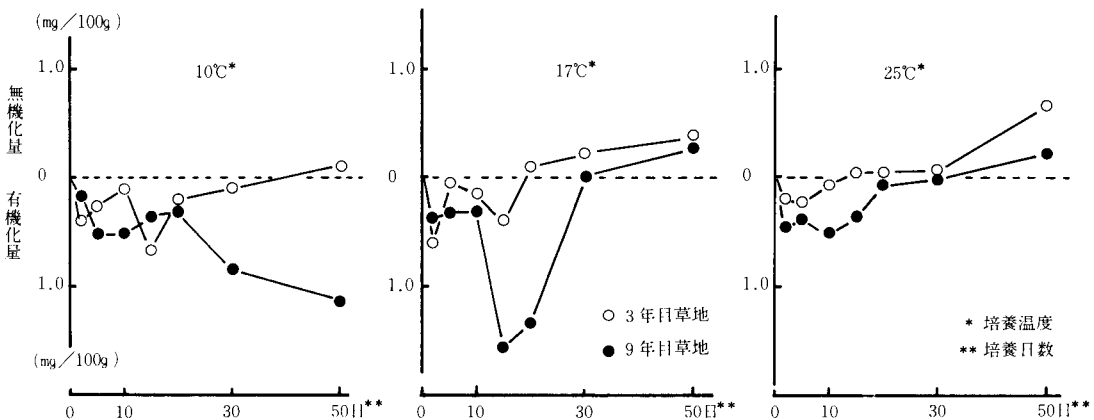


図14. 経年数の異なる草地表層土壌(0~5cm)の窒素有機化一再無機化に及ぼす温度の影響

は窒素12kg施肥区と18kg施肥区のそれぞれ反復毎に4ヵ所直径2.5cmの採土器で0~2cm, 2~5cm, 5~15cmの3層を採取し、風乾後砕土した2mm以下の試料を用い、全窒素と熱水抽出性窒素(110℃, 1時間, オートクレーブ抽出)を測定した。また1987, '88年には表層0~5cmと5~15cmの中央部を100cc採土管で採取し、30℃の標準培養条件で30日間培養し窒素無機化量を測定した。

牧草株部と根部の窒素保持量および枯死茎葉と枯死根の含有窒素量は1986~'88年の3ヵ年にわたって調査した。調査方法は前節までと同様である。

実験結果

1) 全窒素含有量の経年変化

造成当年から12年目までの供試草地の全窒素含有量を層位別、窒素施肥量別に平均して表19に示した。0~2cm土層の全窒素含有量は造成当年草地の217mg/100g乾土に対し造成6, 7年目草地では268~280mg(造成当年に対する指数124~129%), 造成10年目以上草地では348~362mg(同指数160~167%)と顕著に増加した。これに対して2~5cm, 5~15cm土層の全窒素含有量の経年変化は小さかったが, 5~15cm土層の全窒素含有量は造成6, 7年程度まで漸減し, 以降190

表19. 全窒素含有量の経年変化 (mg/100g乾土: 平均値±標準偏差)

項目	施肥N	草地 (筆数) 層位(cm)	経年数					
			造成当年 (3)	2,3年目 (7)	4,5年目 (7)	6,7年目 (5)	8,9年目 (4)	10年目以上 (4)
全窒素 含量	N	0~2	217±2	232±10	256±14	268±8	325±26	348±53
	12	2~5	215±4	207±6	201±11	201±11	201±6	205±4
	kg	5~15	215±3	202±4	196±5	190±9	190±6	190±12
含 量	N	0~2	217±2	238±10	250±12	280±15	310±31	362±52
	18	2~5	215±4	204±8	200±6	198±9	200±11	200±10
	kg	5~15	215±3	203±8	198±4	195±6	197±7	195±7
土 壤 重 量 (t/10a)		0~2	20.0	20.5	19.5	18.2	17.3	16.5
		2~5	33.0	33.5	34.5	35.0	35.0	35.0
		5~15	105	110	110	110	110	110

~200mg/100g乾土でほぼ一定していた。

次に表19に付記した土壤重量で面積当たりの全窒素量を算出し、造成当年の草地のそれに対する増減量を求め図15に示した。0~2cm土層の全窒素量は何れの窒素施肥区でも経年化に伴い増加し、造成10年目草地で造成当年の草地より10kg N/10a程度増加した。また、2~5cm土層の全窒素量は造成4~6年目程度まで減少し、それ以降漸増し、造成10年目では造成当年の全窒素量とほぼ同水準までに回復した。これに対し、5~15cm土層の全窒素量は造成6~7年目程度(窒素12kg施肥区)、8年目程度(同18kg施肥区)まで減少し、

それ以降は造成当年の草地より15~18kg N/10a程度少ない窒素量で推移した。

したがって、0~15cm土層全体の全窒素量は造成当年のそれに対し造成4~6年目までにかけて7~10kg N/10a程度まで減少するが、以降増加して造成10年目で3kg(窒素18kg施肥区)~5kg N/10a(同12kg施肥区)の減少量まで回復した。

次に、牧草株基部に存在する枯死茎葉および枯死根を主体とする粒径2mm以上画分など粗大有機物に含有される窒素量(図16)は造成3~4年目の4~5kg N/10a程度まで急激に増加し、以降漸増した。この枯死茎葉および枯死根に含有され

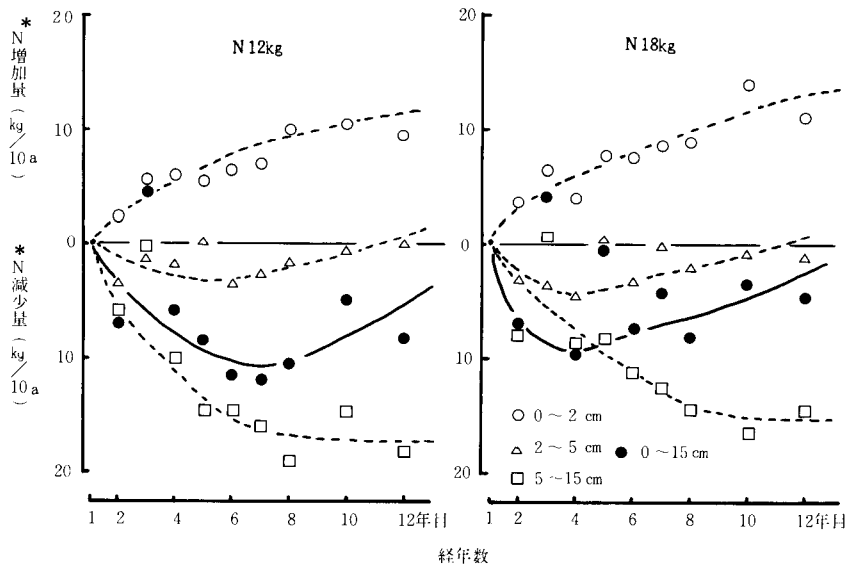


図15. 草地の経年化に伴う土層別全窒素量と作土層全体の全窒素量
* (造成当年の窒素量を基準とした増減量で示した)

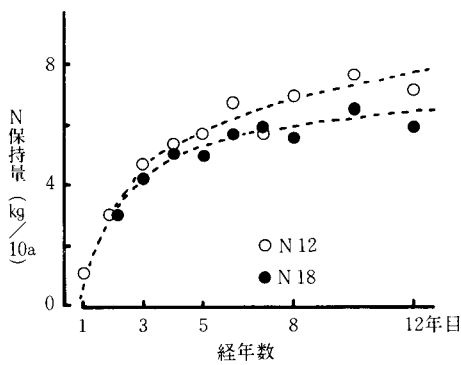


図16. 地表面枯死茎葉および2 mm以上画分 (0~5 cm土層内) に保持された窒素量 (1986~'88年平均)

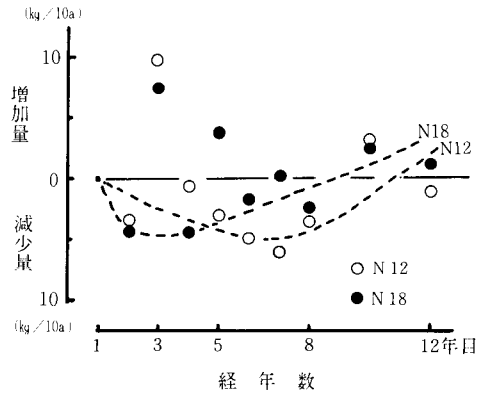


図17. 粗大有機物の保持する窒素量を含た 0~15cm土層の土壤全窒素増減量 (造成当年との差: kg/10a)

る窒素量を既掲図15に示した0~15cm土層の全窒素増減量に加算した土壤窒素量 (図17) は窒素12kg施肥区で造成当年より造成6~7年目で5 kg N/10a程度まで減少し、それ以降増加して、造

成10年目程度で造成当年の土壤窒素量に回復した。また、窒素18kg施肥区では造成7~8年以降、造成当年の土壤窒素量に回復した。すなわち、オーチャードグラス主体採草地の土壤窒素水準は造成

後一時的に減少するが、造成7~10年目程度で造成当年の状態に回復し、概ね収支は保たれていた。

2) オーチャードグラス主体採草地における肥料-土壤窒素収支

1) で得られた土壤窒素量、枯死茎葉・枯死根など粗大有機物の含有窒素量を基に、オーチャードグラスの茎葉部窒素吸収量と株・根部窒素保有量から草地の経年数別の化学肥料で施肥された窒素と土壤窒素の収支を概算した。

オーチャードグラスの株および根部が保持する窒素量の経年推移を図18に示した。株部の窒素量は造成当年が比較的多い(2.6kg N / 10 a)ことを除いて2年目以降の草地では窒素12kg施肥区: 1.7~1.9kg, 平均1.8kg N / 10 a, 同18kg施肥区: 2.0~2.4kg, 平均2.2kg N / 10 a とほぼ一定であった。また根部の窒素量は造成6~7年目の3 kg N / 10 a 程度まで急増し、それ以降の増加量は僅かであった。したがって牧草の株および根部が保持する窒素量は造成当年の3.5kg N / 10 a が

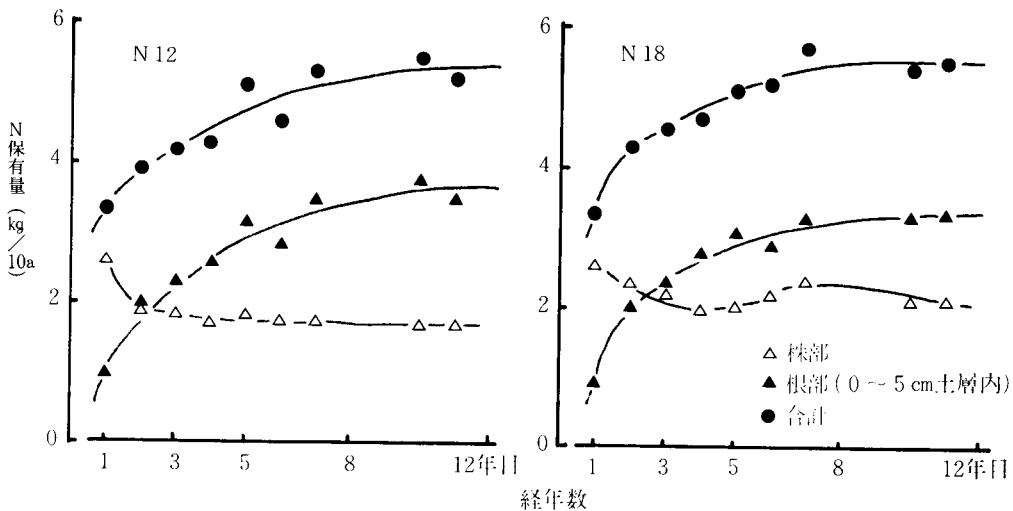


図18. 草地の経年化に伴う牧草体(株部,根部)窒素保有量の変化*
*(越冬時調査,1986,'87年平均)

表20. 経年草地の肥料・土壤窒素収支 (kg/10 a)

項目	草地 経年数	N12kg施肥区					N18kg施肥区						
		2	4	6	8	10	12年目	2	4	6	8	10	12年目
A. 肥料N施肥総量		12	36	60	84	108	132	18	54	90	126	162	198
B. 牧草N吸収総量		13.5	36.9	60.0	82.1	104.3	125.9	18.6	51.4	83.2	116.6	147.8	178.8
株・根N保持量*		0.6	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	0.8	1.3	1.7	2.0	2.3	2.5
合計 (C)		14.1	38.1	61.6	84.0	106.4	128.2	19.4	52.7	84.9	118.6	150.1	181.3
B/A×100**		113	103	100	98	97	95	103	95	92	93	91	90
D. 土壤N持出し量(C-A)		2.1	2.1	1.6	0	-1.4	-3.8	1.4	-1.3	-5.1	-7.4	-11.9	-16.7
E. 粗大有機物N*		2.9	4.8	6.0	6.8	7.5	8.0	2.7	4.4	5.3	6.0	6.5	6.9
F. 0~15cm土壤N増減量*		-6.6	-5.7	-11.5	-10.3	-4.4	-8.3	-7.2	-9.5	-7.0	-8.0	-3.3	-4.6
G. 土壤N増減量(E+F)		-3.7	-0.9	-5.5	-3.5	+3.4	-0.3	-4.5	-5.1	-1.7	-2.0	+3.2	+2.5
収 支 (G-D)		-1.6	+1.2	-3.9	-3.5	+1.7	-4.1	-3.1	-6.4	-6.8	-9.4	-8.7	-14.4

* 造成当年との差から算出した ** 見かけ上の肥料窒素利用率 (%)

ら造成5,6年目の5 kg N /10 a 程度まで増加し、以降ほぼ一定となった。

次に草地経年数別の肥料—土壌窒素収支を表20に示した。牧草茎葉部の窒素吸収総量は施肥した肥料窒素総量の95~113%, 平均100% (窒素12kg施肥区), 90~103%, 平均94% (同18kg施肥区)であり, 利用年限の長い草地ほど見掛けの肥料窒素回収率は低下した。この茎葉部窒素吸収総量に株および根部の窒素保持量を加算し肥料窒素総量を減じた見掛けの土壌窒素持ち出し量は造成2~4年目まで1.4~2.1kg N /10 a と比較的多く, 造成6~8年目以降は負の値になり, 土壌窒素を富化させる方向にあった。このことは0~15cm土層の全窒素量に枯死茎葉および枯死根など粗大有機物の含有窒素量を加算した土壌窒素量が造成後一旦減少し, 造成10年目以降の草地で造成当年の草地の土壌窒素量とほぼ等しい水準に回復したと概ね一致する。

以上の試算から, 肥料—土壌窒素の収支は窒素12kg施肥区で2~4 kg N, 同18kg施肥区で3~14kg N /10 a の窒素が行方不明と概算された。この行方不明量を肥料窒素の損失量とすると, それは窒素12kg施肥区で3~13%, 平均6%程度, 同

18kg施肥区で5~17%, 平均9%程度であった。

3) 土壌の易分解性窒素含有量とその経年変化

草地の経年化に伴う熱水抽出性窒素含有量の変化を全窒素含有量と同様の方法で調査し表21に示した。熱水抽出性窒素含有量は全窒素含有量と同様な経年変化を示し, 0~2cm土層では急激に増加, 5~15cm土層では造成6, 7年目まで漸減し, それ以降一定で推移した。また面積当たりの熱水抽出性窒素量は各土層別では含有量と同様な変化を示すが, 0~15cm土層全体の窒素量は造成後の経過年数に関係なく9~10kg N /10 a でほぼ一定であった。

一方, 生土培養法によって無機化される土壌窒素量 (図19) は0~5cm土層で造成後一旦減少するが, 造成3年目より急激に増加し造成12年目草地では3年目草地の2倍量に達した。これに対し, 5~15cm土層の無機化窒素量は造成後経年的に減少し, 造成12年目草地では造成当年の半量以下に減少した。しかし, 0~15cm土層全体の無機化窒素量は造成当年と2年目草地で比較的多いものの造成3年目以降の草地では4 kg N /10 a 付近ではほぼ一定であった

表21. 草地の経年化に伴う熱水抽出性窒素含有量と量 (面積当たり) の変化

項目	草地 層位 (cm)	経年数									
		1	2	3	4	5	6	7	8	10	12年目
含有量 (mg/100g)	0~2	6.8	7.7	8.7	9.6	10.3	10.2	9.1	12.9	15.7	14.3
	2~5	6.5	6.0	6.1	5.9	6.0	5.6	4.8	5.3	5.6	6.0
	5~15	6.3	5.7	5.6	5.5	5.7	5.1	4.7	5.0	5.0	5.0
N量 (kg/10a)	0~2	1.4	1.6	1.8	1.9	2.0	1.9	1.6	2.2	2.7	2.4
	2~5	2.1	2.0	2.0	2.0	2.1	2.0	1.7	1.9	2.0	2.1
	5~15	6.6	6.3	6.2	6.1	6.3	5.6	5.2	5.5	5.5	5.5
合計		10.1	9.9	10.0	10.0	10.3	9.5	8.5	9.6	10.1	9.9

第5節 考察

北地地方では降水量の年次変動が頗る大きく, オーチャードグラス草地の収量は生育期間の降水量に支配されて変動する (表1, 図1)。したがって牧草収量の経年変化を知るためには同一年で経年数の異なるオーチャードグラス主体採草地の

収量を比較する必要がある。

1) 牧草収量の経年変化

毎年, 順次草地造成を行い, 土壌条件を一定に維持し, 同一年で経年草地の牧草収量を比較した結果は以下のように要約できる。

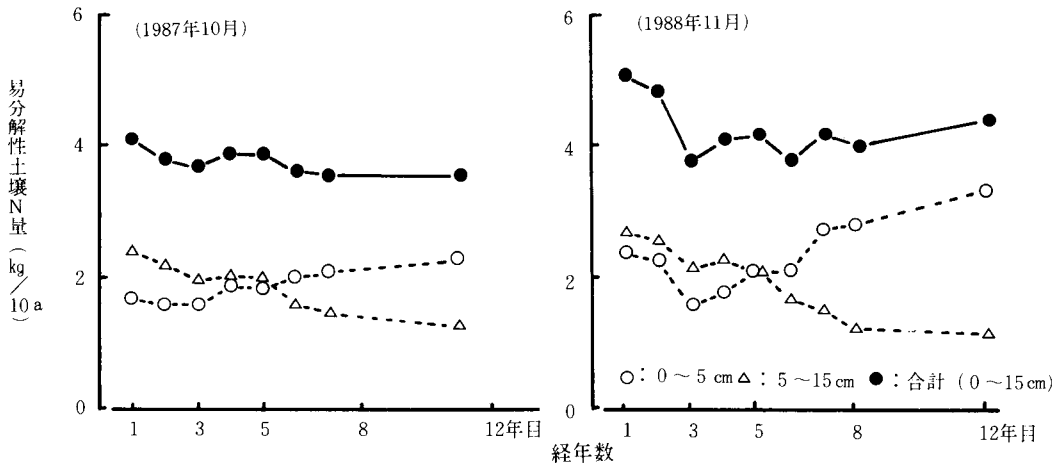


図19. 草地の経年化に伴う易分解性土壌窒素量*の土層別変化
*(生土培養法)

1) 年間合計収量は、①肥料窒素が十分供給されている条件 (年間18kg/10a施肥) では草地が経年化しても低下しなかった。②肥料窒素が少ない条件 (年間窒素12kg/10a施肥) では造成9~10年目以降漸減した (図2)。

2) 番草別収量では、①1番草収量は造成9年目以降低下し、その低下程度は窒素12kg施肥区 > 同18kg施肥区であった。②2, 3番草収量は造成9年目以上の古い経年草地であっても3, 4年目草地と同等かそれ以上の収量を示した。③3番草刈り取り後越冬時までの生育量は草地の経年化に伴って低下した。

以上に得られた結果を基に牧草収量の経年変化を肥料窒素利用率および蓄積有機物の分解との関連で論議する。

まず、窒素12kg施肥区の年間合計収量が造成9~10年目以降の草地で低下する主因は1番草収量が3, 4年目草地より顕著に劣るためであった (表2, 図2b)。

この1番草収量は前年越冬時における牧草の分けつ発生量、分けつ/主茎比と密接に関連し、越冬時における分けつ/主茎比の大きい草地が1番草収量は高い (図4)。つまり前年3番草刈り取り後から越冬時までの生育量が1番草収量を決定

する最も大きな要因であると推定された。このことは前年秋の窒素施肥によってオーチャードグラスの1番草収量が顕著に増加すること^{63,100})によっても支持される。また、3番草刈り取り時の株部窒素濃度および保持量には草地の経年数間に差異が認められないこと (表5) から、草地の経年数による越冬時生育量の差異は基本的に3番草刈り取り後越冬時までの土壌からの窒素吸収量に支配されていたと考えることができる。

一方、2, 3番草収量は造成9年目以上の古い経年草地で3, 4年目草地と同等かそれ以上であり、必ずしも草地の経年化に伴って低下する現象は認められなかった。

以上の現象を重窒素標識硫酸によるトレーサー法で解析した。牧草の肥料窒素利用率は草地の経年化に伴って低下したが、土壌由来の窒素吸収量は造成2年目草地で多かったものの、3年目以降は経年数による大きな差異は認められなかった (表7)。さらに、これを番草別にみると1番草の肥料窒素利用率は草地の経年化に伴って低下した。しかし、2, 3番草時のそれは2, 3年目草地でやや高いものの4年目以降の草地間では大差なかった (表8)。また、土壌由来の窒素吸収量は番草間で異なり、地温の低い1番草および3番

草刈り取り後越冬までの生育期間については草地の経年化に伴って減少するが、逆に地温の高い2, 3番草生育期間のそれは、5年目以上の経年草地の方が3年目草地より明らかに高かった(表9)。

このことは、草地における肥料窒素の肥効、土壌からの窒素吸収量は経年化に伴って必ずしも低下するのではなく、これら経年草地の収量を支配する要因が番草間で異なることを示している。つまり草地の経年化に伴う1番草の収量低下は肥料窒素の利用率が低く、土壌からの窒素吸収量が劣ることに、逆に2, 3番草時の9年目以降の草地の収量が高い理由は肥料窒素の利用率が2, 3年目草地のそれより低いものの、それ以上に土壌からの窒素吸収量が地温の上昇に伴って増加するためと考えられる。

さらに、3番草刈り取り以後越冬時までの生育期間には再び地温が低下するため古い経年草地の土壌からの窒素吸収量が2, 3年目草地より低下し、これが越冬前生育量を不良にして翌春1番草収量に継承される(表5, 9)という一連の肥料窒素利用率-土壌からの窒素吸収量と地温の関連図式が成立するものと考えられる。このことは経年数の異なる草地を用い、牧草生育期間の温度条件を人為的に変えて肥料窒素の利用率と土壌からの窒素吸収量を検討した試験でも追認された(表11)。

これらの関連図式は、造成9~10年目以上の古い経年草地では地温の上昇、下降を反映して変動する土壌からの窒素吸収量の変動量以上の窒素を肥料の形で牧草に供給すること(窒素18kg/10a施肥条件)によって1番草の収量低下が小さくなるとともに、経年草地の年間合計収量も安定したこと(表2, 図2a, b)からも支持される。

以上の結果は、草地植生が良好で施肥反応の高い草種で構成されている場合、肥料窒素の増施によって草地の経年化に伴う収量低下を回避できること^{79,91)}、さらに肥料窒素が少ない条件では造成3~7年目にかけて収量低下を引き起こすが、十分な肥料窒素が供給されれば経年化に伴う収量低下が起こらないとする指摘⁴⁹⁾とも一致する。

一方、経年草地の土壌からの窒素吸収量は化学

肥料以外の吸収源(例えば厩肥、マメ科草の窒素移譲)がない条件では、牧草の株、根に吸収された肥料窒素の再利用、および枯死茎葉・根と土壌有機物に保持された肥料窒素(表10)の再循環量によって規制される。

年間乾物収量700~900kg/10a水準のオーチャードグラス主体草地では、有機物還元量は340~390kg、窒素のそれは4~5kg/10a、同じくチモシー主体草地ではそれぞれ有機物480~560kg、窒素3~4kg N/10a程度と推定された(表15)。そのうち平均約50%が1年間で分解消失し、残りの部分は有機物で100kg、窒素で2kg N/10a程度が毎年草地表層(0~5cm)に蓄積した(図9a)。

なお、枯死根による有機物還元量はオーチャードグラスで年間100~120kg、チモシーで年間160~180kg/10a程度と推定された。CLARK⁸⁾、DAHLMAN¹⁴⁾はプレリー草地で生根量の20~25%が枯死するとし、DAHLMANらによれば年間130kg/10a程度、PARTON⁹²⁾によれば根の回転率が年間30%で190kg/10a・年程度の枯死根が存在すると推定している。

他方、蓄積する有機物の内容は草地の経年数によって異なり(図11, 12)、量的に多い地表面枯死茎葉および枯死根を主体とする粒径2mm以上画分のC/N比は、前者では造成後一旦低下したのち造成6~7年目より上昇し、後者では造成後経年的に上昇した(図11)。また、物理分画したいずれの画分でもヘミセルロース、セルロースなど可分解性画分の存在割合が高まった(図12)。

次に、これらの蓄積有機物の化学組成の草地経年数による差異と牧草の肥料窒素利用率および土壌からの窒素吸収量に及ぼす温度の影響を関連づけて考察を加える。

まず供試した草地表層の土壌微生物活性と炭素無機化量に及ぼす低温の影響(低温/高温指数)は経年数にかかわらずほぼ一定であった。ところが土壌の窒素無機化量に及ぼす低温の影響は草地の経年化に伴って増大し、無機化された部分の炭素と窒素の比も古い経年草地ほど高い値を示した。(表17)。

このことは古い経年草地に蓄積する有機物のC/N比が高いこと(図11)、ヘミセルロース、セルロースなど可分解性炭素の存在割合が高いこと(図12)を考慮すると、有機物分解の律速因子である無機態窒素の有機化が優占し、相対的に土壤からの窒素無機化量が減少するものと考えられる。さらに、草地表層土壤の窒素無機化特性から窒素無機化可能量は草地の経年化に伴い増大する活性化エネルギーも増大した(表18)。すなわち、古い経年草地ほど土壤からの窒素吸収に及ぼす温度(地温)の影響が大きく、低温条件における窒素無機化量は減少することを示している。

一方、 K_{Al} ら⁵⁷⁾、鳥山ら¹¹²⁾が指摘したように、肥料窒素の有機化に及ぼす温度の影響は小さい。古い経年草地の表層土壤における肥料窒素の有機化量は新しい草地のそれに比べいづれの温度水準でも明らかに多く、また有機化された肥料窒素の再無機化が遅かった(図14)。

以上を総合して考えると草地は長期間不耕起のまま利用されるため、牧草収量を規制する肥料窒素の利用率および土壤からの窒素吸収量が経年化に伴って変化する。すなわち、草地経年化に伴って有機物蓄積→蓄積有機物の化学的組成変化(C/N比の上昇、ヘミセルロース、セルロースなど可分解性炭素源含有率の上昇)→活性化エネルギーの増大(窒素無機化能および有機化窒素の再無機化能の低下)→土壤窒素の無機化および肥料窒素の有機化の季節変化の増大という変化が起こる。これらによって牧草の窒素吸収が影響を受け、生育が前述した要約のように変化すると考えられる。

したがって、草地の牧草収量の経年的な安定化を図るためには窒素が牧草生育の律速因子とならないように供給する必要がある、その適量は天北地方のオーチャードグラス主体草地では年間窒素施肥量18kg/10a程度であった。それより施肥量が少ない条件では、収量の経年的な低下が起こり、

その年次変動も大きくなる。このような経年変化を小さくするためには秋施肥または早春時の肥料窒素の増施が必要であると結論できる。

2) 草地の経年化に伴う肥料窒素の収支

草地は経年化に伴って枯死茎葉や枯死根が表層に集中的に還元されるために、草地の粗大有機物量と土壤窒素量は経年的に増大する^{9,10,54)}。しかし、イネ科草種単播の条件では土壤窒素の経年的増加は認められないとも指摘されている⁷⁾。また、放牧草地の有機物量は造成後約5年目までは減少し、約15年でもとの蓄積量にもどると推定されている⁶¹⁾。

本試験で得られた結果は後者の指摘を支持する。すなわち、草地は経年化に伴い0~2cm土層の全窒素は顕著に増加するが、逆に5~15cm土層の全窒素は造成6~8年目まで減少し、0~15cm土層では概ね一定であった(表19, 図15)。このことは熱水抽出性窒素量や生土培養法による窒素無機化量でも確認された(表21, 図19)。

一方、牧草が吸収した窒素総量は施肥された肥料窒素総量の90~113%であり、特に造成初期には土壤窒素の持ち出しを示した。さらに0~15cm土層の全窒素量と株、根および粗大有機物(地表枯死茎葉と枯死根を主体とする0~5cm土層の粒径2mm以上有機物)などを加算した窒素の行方不明量は施肥された肥料窒素の約6~9%程度であった(表20)。

以上のことから、イネ科主体草地では施肥された肥料窒素と牧草が吸収した窒素はほぼ等量であり、牧草の生育量に見合う窒素施肥量であれば施肥された肥料窒素の損失は極めて小さいとの指摘^{4,5,16,17,24)}と一致する。

また、草地は経年化に伴い表層土壤の窒素無機化能が増大し、作土層下部の土壤窒素無機化能は低下する。

第Ⅲ章 草地の収量規制要因とその改善

第1節 草地表層土壌の酸性化による蓄積有機物の分解と牧草生育

草地表層土壌の pH 環境を適正に維持した草地における牧草収量の経年変化は窒素施肥量が十分な条件（年間窒素施肥量18kg N / 10 a）であれば極めて小さいことを指摘した。

一方、草地の表層土壌は経年的に酸性化することが指摘され^{45,67,74}、このような条件では牧草生育に有害な土壌成分（アルミニウムイオン等）の活性化によるリン酸吸収の阻害^{43,45,74}および微生物活性³⁹の低下など土壌環境が悪化して牧草収量が低下する。さらに、表層土壌の酸性化は前章で論じた有機物循環を抑制し、これが肥料窒素の肥効低下、土壌からの窒素吸収量の低下にも関与していると考えられる。

本節では表層土壌の酸性化が還元有機物の分解と土壌窒素の無機化に及ぼす影響を検討した。ついで有機物循環、肥料窒素の利用効率および土壌からの窒素吸収量の観点から収量低下の要因を整理した。

実験1 酸性化草地における有機物分解と表層土壌の窒素無機化量の変化

目的：表層土壌の経年的酸性化が草地系内還元有機物の分解と表層土壌の窒素無機化に及ぼす影響を明らかにする。

実験方法

酸性化草地における還元有機物の分解は、1977年造成の2種の草地（表層土壌 pH を良好に維持した草地とそれが酸性化した草地：以下それぞれ標準草地、酸性化草地と略記する、表22）を用いて検討した。すなわち、オーチャードグラスの茎基部残渣（地際から5cm程度の株部）を18メッシュのサランネットで作成した袋（大きさ5×10cm）に乾物2.5gを充填し、草地表面（株間）に固定した（4反復）。設置後1～2ヵ月間隔で経時的に乾物重、炭素および窒素含有率を測定した。

表層土壌の pH が種々に変化した草地における蓄積有機物の測定は、1975年造成のオーチャードグラス主体草地で施用する窒素質肥料の形態の違いによって表層土壌の pH が異なる処理区の蓄積有機物量、窒素含有率を前章と同様の測定法で調査した。また、熱水抽出法（赤塚らの方法²）で得られる表層土壌の易分解性有機物の C/N 比についても検討した。

表層土壌の窒素無機化特性は風乾土10gをグーチるつばに2反復で採取し、0.01M塩化カルシウム液による洗浄培養法⁵⁸と、飽和水酸化カルシウム液を添加する洗浄培養法⁶⁹（培養温度30℃、pF 1.8相当の水分条件）を用い検討した。

表22. 供試草地表層土壌の化学性と蓄積有機物量

項目	pH (H ₂ O)	交換性塩基*			Bray 2 P ₂ O ₅ *	粒径別有機物量 (g/100cm ²)			
		CaO	MgO	K ₂ O		1 mm以上	1～0.25	0.25～0.1	
標準草地	0～2	5.88	222	14.3	19.5	48.5	3.41	1.14	2.71
酸性化草地	2～5	6.28	255	11.0	7.0	5.3	(47)**	(16)	(37)
標準草地	0～2	5.20	118	7.3	11.8	70.0	4.46	2.04	1.49
酸性化草地	2～5	6.01	212	7.8	5.6	7.4	(55)	(26)	(19)

* mg/100g 乾土 ** 粒径別分布割合 (%)

実験結果

1) 還元有機物の分解・蓄積に及ぼす表層土壌 pH の影響

表層土壌が酸性化した草地における還元有機物の分解(表23)は標準草地のそれに対し、乾物分解率で1,2年目95%, 3年目93%とやや劣った。窒素消失率は1,2年目では標準草地と大差ないが、3年目では89%と劣った。さらに、酸性化草地における分解途中での有機物残渣の炭素含有率は標準草地のそれに比べ高く推移し、逆に窒素含有率は低かった。この結果、酸性化草地における分解残渣のC/N比は標準草地のそれに比べ高く、かつ、分解が進むほど両者の差は拡大した。

一方、表層土壌のpHが異なる草地(造成6年目草地)の有機物蓄積量(表24)は酸性化が進行していない草地の1,058 g/m²に対し、酸性化の著しい草地では1,350 g/m²と増加した。さらに粒

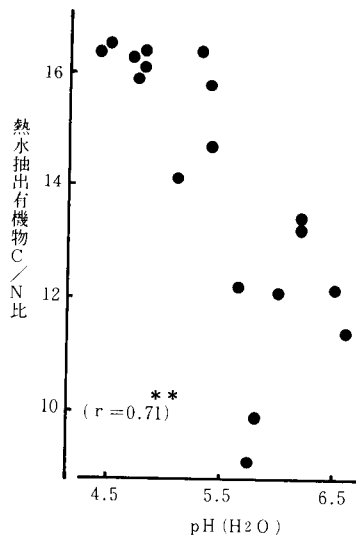


図20. 表層土壌の熱水抽出有機物のC/N比とpHの関係(0~2cm土壌)

表23. 還元有機物の分解に及ぼす表層土壌 pH の影響

項目	年次 草地*	1年目		2年目		3年目	
		標準 (5.88)	酸性化** (5.20)	標準 (5.75)	酸性化 (4.95)	標準 (5.50)	酸性化 (4.80)
含有率 (%)	C	42.2	102	40.2	103	38.2	105
	N	1.61	96	2.24	87	2.49	84
	C/N	29.5	110	19.7	120	16.3	126
分解率 (%)	乾物	55.5	95	75.3	95	86.5	93
	N	31.9	100	44.5	103	64.0	89

* () は各年次の表層土壌 pH (H₂O) を示す **酸性化草地の値は標準草地に対する指数で示す

表24. 表層土壌 pH の違いによる有機物と窒素蓄積量(造成6年目草地)

pH*	項目 画分**	有機物量 (g/m ²)				同左分布割合 (%)			N蓄積量 (g/m ²)	同左分布割合 (%)		
		1	2	3	合計	1	2	3		1	2	3
5.75		429	137	492	1,058	40.6	12.9	46.5	15.1	42.4	15.8	41.6
5.65		508	157	455	1,120	45.4	14.0	40.7	18.3	48.8	16.9	34.3
5.05		600	188	376	1,164	51.5	16.1	32.3	17.4	48.1	21.5	30.5
4.80		745	195	329	1,269	58.7	16.4	25.9	19.7	56.9	19.2	24.0
4.40		736	249	365	1,350	54.6	18.4	27.0	23.2	56.5	21.1	22.4

* 0~2cm, H₂O pH ** 1:地表面枯死茎葉+2mm以上, 2:1~0.5mm, 3:0.25~0.1mm

径別有機物の分布割合は、表層土壌の pH が5.5以上の草地で、地表面枯死茎葉と粒径2mm以上画分の含量が粒径0.1mm以上の有機物に占める割合が41~45%であるのに対し、pH が5.0以下の草地のそれは55~59%と高かった。

蓄積有機物が含有する窒素量は表層土壌の酸性化に伴い15.1g/m²から23.2g/m²と154%に増加し、しかも地表面枯死茎葉および粒径2mm以上画分など粗大有機物に含有される窒素の分布割合が高かった。

他方、熱水抽出有機物のC/N比(図20)、は表層土壌のpHが低い草地で高く、pHと負の相関関係($r = -0.71$)が認められた。

以上の結果は、草地表層土壌の酸性化によって牧草の枯死茎葉および枯死根など還元有機物の分解が抑制されていることを示す。

2) 表層土壌のpHと窒素無機化量の関係

土壌pHを変化させない0.01M塩化カルシウム

液の洗浄培養法による測定結果(図21)によれば、窒素無機化量は酸性化草地の表層土壌で少なく、表層土壌のpHと窒素無機化量の間には正の相関関係($r = 0.83$)が認められた。これに対し、土壌pHを上昇させる飽和水酸化カルシウムを添加した洗浄培養法の窒素無機化量は土壌pHに関係なく、ほぼ一定の値を示した。すなわち、pHの上昇に伴う表層土壌の窒素無機化量の増加割合(飽和水酸化カルシウム添加法/0.01M塩化カルシウム法)は酸性化草地の表層土壌で著しく大きかった。

以上の結果から、草地表層土壌の窒素無機化量に影響する土壌pHの臨界点は概ね5.5(水pH)付近であり、それ以上ではpH上昇による効果が小さい。したがって、窒素循環からみた草地表層土壌のpHは概ね5.5以上に維持する必要があると判断できる。

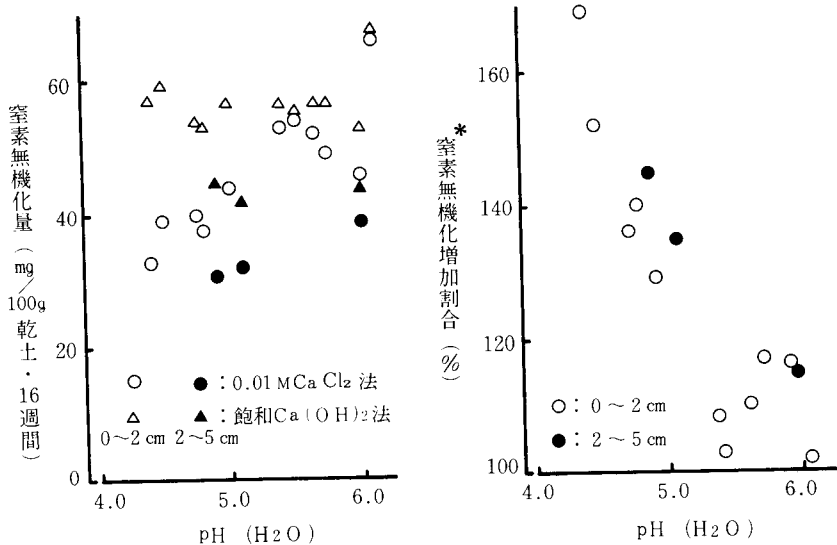


図21. 表層土壌の窒素無機化量に及ぼすpHの影響
*(飽和Ca(OH)₂法/0.01M CaCl₂法×100)

実験2 酸性化草地における肥料窒素の利用率と土壌からの窒素吸収量

目的：酸性化草地における牧草収量の変化を肥料窒素の利用率と土壌からの窒素吸収量の面で検討する。

実験方法

1977年造成のオーチャードグラス主体草地を供試して尿素の施用によって表層土壌のpHを高く維持した草地と、硫酸の施用によって表層土壌を酸性化させた2種の草地(実験1と同一草地)を準備し、それぞれについて窒素用量試験を1981、'82年の2ヵ年実施した。

窒素施肥は年間施肥量で0.9, 18kg/10aで2種の草地ともに硫酸を用いて早春、1, 2番草刈り取り後の年間3回均等分施とした。窒素9kg施肥区内の75×75cm区画に重窒素標識硫酸(2.0atom%、窒素3.15g/m²/刈り取り毎)を施用して肥料窒素の利用率を検討した。分析試料は茎葉部については区画中央部の50×50cmから、また株、根および地表面枯死茎葉については25×25cmから深さ10cmで採取し、前章第2節実験1と同様に調整した。なお、重窒素濃度の分析は質量分析法によった。

肥料窒素の土壌中での動態は50×50cm区画に微粉碎硫酸を施した後、経時的に0~5cm土壌を採取して追跡した。なお、無機態窒素は生土を用い

1N硫酸カリウム液抽出法により、また有機態窒素は風乾土を用い、リン酸緩衝液(pH7.0)抽出法⁴⁰⁾により抽出される全窒素から無機態窒素(NH₄-N)を差し引いて求めた。

実験結果

1) 牧草収量と養分吸収量の変化

酸性化草地の牧草収量(表25)は標準草地のそれより低かったが、標準草地に対する収量指数は窒素18kg区:96%>同9kg区:88%>同0kg区:76%の順で低下し、窒素施肥量の少ない処理ほど表層土壌の酸性化の影響を強く受けた。さらに、酸性化草地における牧草生育の特徴として1番草時の出穂茎数が標準草地の76~86%と顕著に少ないことが注目された。また、酸性化草地における牧草の窒素吸収量は収量と同様の傾向を示し、窒素施肥量の少ない処理ほど酸性化の影響を強く受けた。これに対し、酸性化草地のリン酸吸収量は標準草地の80~83%であり、収量および窒素吸収量の傾向と異なった。

2) 肥料窒素の利用率と給源別窒素吸収量

標準草地の茎葉部による肥料窒素利用率(表26)は1番草:56%>2番草:51%>3番草:42%の順で大きかった。これに対し、酸性化草地の肥料窒素利用率は1番草で54%と標準草地と差はなかったが、2,3番草ではそれぞれ43,27%で

表25. 表層土壌pHが異なる経年草地の窒素施肥反応

草地	年次	項目 施肥N*	乾物収量*				1番草時 出穂茎数**	成分吸収量*	
			1番草	2番草	3番草	合計		N	P ₂ O ₅
標準 草地 (pH 5.9)	1981	9	329	225	168	722	-	14.1	5.8
		0	150	67	40	257	263	4.5	2.8
	1982	9	290	255	168	713	421	14.1	5.6
		18	374	330	252	956	418	20.8	7.2
*** 酸性化草地 (pH 5.2)	1981	9	87	111	85	94	-	88	88
		0	77	77	71	76	86	76	80
	1982	9	97	86	78	88	83	81	80
		18	93	101	93	96	75	92	83

*kg/10a, **本/m², ***酸性化草地は標準草地に対する指数で示した

表26. 表層土壌 pH が異なる経年草地の肥料窒素利用率(%：1981, '82年平均)

項目	部位	1 番 草		2 番 草		3 番 草		年間合計	
		標 準	酸性化	標 準	酸性化	標 準	酸性化	標 準	酸性化
利用率 (%)	茎葉	56.3	54.2	50.6	43.2	42.4	27.0	49.7	41.5
	株	5.9	6.4	8.2	5.5	9.6	7.6	7.8	6.5
	根	14.2	14.6	12.6	10.7	11.1	8.3	12.6	11.2
	合計	76.4	75.2	71.4	59.4	63.1	42.9	70.1	59.2
枯死茎葉N保持率*		6.7	8.0	11.7	13.7	13.2	11.0	10.5	10.9
全 体		83.1	83.2	83.1	73.1	74.6	56.9	80.6	70.1

* 地表面および茎基部の枯死茎葉による肥料窒素保持率

表27. 表層土壌 pH が異なる経年草地の給源別窒素吸収量(茎葉部, kg/10 a)

草地 番草	項目	標準草地(A)			酸性化草地(B)			B/A指数(%)		
		吸収N	肥料N	土壌N	吸収N	肥料N	土壌N	吸収N	肥料N	土壌N
1		4.79	1.77	3.02	4.44	1.71	2.73	93	97	90
2		4.89	1.53	3.30	3.90	1.36	2.54	80	86	77
3		4.26	1.34	2.92	2.99	0.85	2.14	70	63	73
合 計		13.94	4.70	9.24	11.33	3.92	7.41	81	83	80

(1981, '82年平均)

表28. 表層土壌 pH が異なる経年草地の土壌由来窒素吸収量*の季節変化(kg/10 a)

草地	生育期間 積算地温(°C)	1 番 草	2 番 草	3 番 草	越冬前生育	合計
		標準草地	440(8.8)**	840(15.8)	800(17.3)	280(9.6)
	標準草地	1.1	2.8	2.5	0.9	7.3
	酸性化草地	0.4	1.9	2.3	0.4	5.0

* 1～3番草は各生育期間における刈り取り時の茎葉, 株, 根のN量から肥料N吸収量(茎葉, 株, 根の合計)および施肥前の株, 根のN量を差し引いて求めた 越冬前生育期間は越冬時の地上部(茎葉株)N量から3番草刈り取り時の株部N量を差し引いて求めた (1981, '82年平均)

** () は平均地温を示す

あり, 標準草地の利用率より10%前後低い値を示した。また, 株・根の肥料窒素利用率および枯死茎葉の肥料窒素保持率を合わせた全体の回収率は酸性化草地の2, 3番草で標準草地より10~20%程度低かった。

酸性化草地の牧草の窒素吸収量(表27)は標準草地のそれに対し1, 2, 3番草でそれぞれ93, 80, 70%と劣ったが, これを肥料および土壌由来の吸収源別に見ると, 1番草: 肥料由来97% >

土壌由来90%, 2番草: 肥料由来86% > 土壌由来77%, 3番草: 土壌由来73% > 肥料由来63%の関係にあり番草間にも相違がみられた。

すなわち, 酸性化草地の窒素吸収量が劣る原因は, 1, 2番草については肥料由来の窒素吸収量より土壌由来の窒素吸収量が劣ること, また3番草では土壌由来より肥料由来の窒素吸収量が劣ることに起因した。

そこで土壌由来の窒素吸収量の季節変化を茎葉,

株および根部の窒素吸収量から算出した結果(表28), 牧草生育期間の土壌からの窒素吸収量は標準草地の7.3kg/10aに対し, 酸性化草地のそれは5.0kg/10aと劣った。これを各番草の生育期間に分けると, 酸性化草地の土壌からの窒素吸収量は標準草地のそれに対し3番草生育時: 92% > 2番草生育時: 68% > 越冬前生育時: 44% > 1番草生育時: 36%と地温の低い時期で劣った。

3) 土壌の無機態および有機態窒素の消長

酸性化草地の肥料窒素利用率が標準草地のそれ

より劣る原因について検討した。

施肥後の土壌中の無機態窒素含量(図22)は酸性化草地で標準草地より高く推移し, 牧草の窒素吸収が遅れた。一方, リン酸緩衝液で抽出される有機態窒素含量は何れの草地でも窒素施肥後増加し, 肥料窒素の一部が有機化されたことを示した。しかし標準草地では施肥後一時的に増加した有機態窒素含量は各番草刈り取り時には施肥直前の含量を下回った。これに対し, 酸性化草地では施肥後の有機態窒素含量の増加が標準草地のそれより多く, しかも各番草の生育後半まで高水準で維持

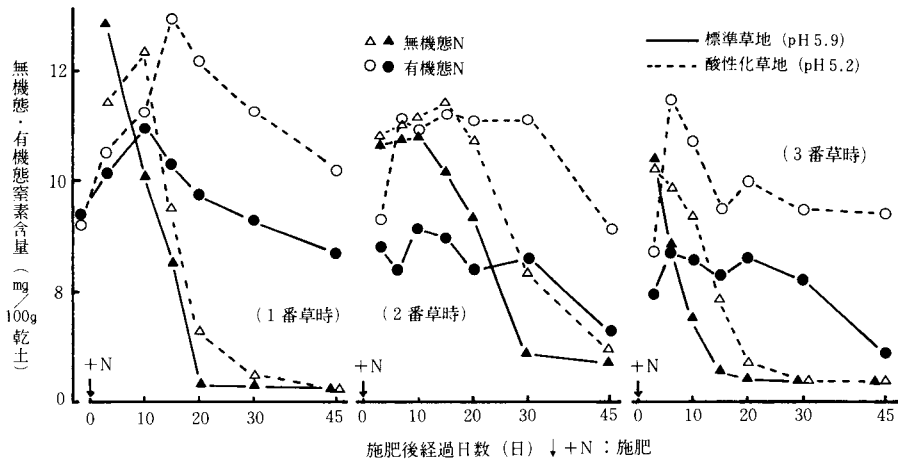


図22. 表層土壌(0~5cm)の無機態窒素含量、有機態窒素含量*の経時変化
*リン酸緩衝液(pH7.0)抽出、同時に抽出される無機態窒素を減じた

表29. 各番草刈り取りの時の枯死茎葉量と窒素含有量(kg/10a)

草地	項目 施肥N**	1番草時			2番草時			3番草時		
		乾物	N量	差*	乾物	N量	差*	乾物	N量	差*
標準草地	0	190	2.41	-	269	3.19	-	190	2.33	-
	9	195	2.33	-0.1	274	3.60	+0.4	290	3.68	+1.4
	18	214	2.60	+0.3	315	4.04	+0.9	307	4.17	+1.8
酸性化草地	0	243	2.90	-	278	3.13	-	241	2.82	-
	9	239	3.15	+0.3	403	4.81	+1.7	364	4.80	+2.0
	18	232	3.02	+0.1	412	5.25	+2.1	385	5.17	+2.4

* NO kg区との差を示す ** kg/10a

された。

地表面枯死茎葉に含有される窒素量は酸性化草地で多く、かつ無窒素施用区との差は1番草刈り取り時では標準草地のそれと大差なかったが、2, 3番草刈り取り時では酸性化草地>標準草地の関係にあった(表29)。

第2節 炭カルの表面施用による酸性化草地の改善

表層土壌の酸性化は草地系内の還元有機物の分解を抑制し、土壌からの窒素吸収量の減少および牧草の肥料窒素利用率を低下させた結果、牧草収量の低下を招いた。

本節では、施肥によって引き起される表層土壌の酸性化を改善する目的で炭カルを表面施用することが牧草生育および表層蓄積有機物の分解に及ぼす影響を検討し、併わせて炭カル施用当初の肥料窒素の動態についても検討を加えた。

実験方法

前節と同様に供試草地は①前歴の肥培管理で尿素を用い表層土壌のpHを5.9と良好に維持した標準草地と、②硫安施用によって表層土壌pHが5.2に低下した酸性化草地であり、両草地とも1977年造成の6年目オーチャードグラス主体草地である。また、③硫安を多用した表層土壌のpHが4.4と著しく低下した造成9年目のオーチャードグラス主体経年草地(1973年造成)も供試した(表30)。

炭カル処理は造成6年目草地については無石灰

区と炭カル表面施用区(1982年4月22日施用、以下炭カル区と略称する)の2系列とし、年間窒素施肥量2水準(9, 18kg/10a)の処理を設けた。また著しく酸性化した造成9年目の経年草地については無石灰区と炭カル区(施用時期2水準、秋施用:1980年10月25日、春施用:1981年4月22日)とし、各区とも年間窒素施肥量を18kg/10aとした。窒素施肥は硫安を用い、標準管理法で実施した。

窒素揮散量は直径21.5cm、高さ16cmの金属製呼吸鐘を用い、窒素施肥後2~5日間隔で20日間測定した。揮散するアンモニアガスは、0.2N硫酸液で捕集しネスラー法で、亜硝酸ガスは0.5N水酸化ナトリウム液で捕集し水蒸気蒸留後ネスラー法で、それぞれ定量した。

肥料窒素の消長を検討するために前節と同様に、施肥後経時的に表層土壌0~5cmを採取し、無機態窒素と有機態窒素含量を測定した。

蓄積有機物量は直径8cmの円筒で草地表層0~3cm程度を7~8カ所採取し、前草までと同様の水洗篩別法によって粒径0.1mm以上の有機物量を調査し、全炭素と全窒素を測定した。

表層土壌の炭酸ガス放出量と窒素無機化量の季節変化を明らかにするため表層土壌0~5cmを100cc採土管で採取し、30℃の標準培養条件で30日間培養して、その間無機化・放出される土壌炭酸ガス量を測定するとともに窒素無機化量を培養前後の無機態窒素含量の差で求めた。

また、無石灰区と炭カル区での表層土壌における窒素の有機化、無機化量を知る目的で次の実験を行った。すなわち、乾土10g相当の生土に硫安

表30. 供試草地表層土壌の化学性と蓄積有機物量

項目	前歴施肥管理		化学性(0~2cm)			蓄積有機物量(g/100cm ³)		
	N肥料	施肥量(kg/10a)	pH(H ₂ O)	Ex-CaO*	Bray P ₂ O ₅ *	1mm以上	1~0.25	0.25~0.1
供試草地	酸性化草地	硫安 9	5.20	118	70	4.46(55)**	2.04(26)	1.49(19)
	標準草地	尿素 9	5.88	222	48	3.41(47)	1.14(16)	2.71(37)
造成6年目	一般経年草地	硫安 18	4.43	84	116	4.80(43)	3.36(30)	2.98(27)

* mg/100g 乾土 ** 粒径分布割合(%)

態窒素 (1,000 ppm 溶液) 1 mg を添加した試料と、無添加試料を 30℃ の標準培養条件で 1 週間培養した。なお、窒素無機化量は窒素無添加培養試料の無機態窒素から原土の無機態窒素を減じて求め、窒素有機化量は窒素添加試料の無機態窒素から無添加試料の無機態窒素と窒素添加量を減じて求めた。

実験結果

1) 炭カル表面施用による牧草収量と窒素吸収量の変化

炭カル区の牧草収量 (表31) は施用当年に若干の低下傾向が認められたが、施用 3 年目では無石灰区より増収した。さらに、炭カル表面施用の効果発現は供試草地の表層土壌 pH および窒素施肥

量によって異なり、標準草地での効果は酸性化草地でのそれより、また窒素 18kg 施肥区での効果は同 9 kg 施肥区のものより早期に発現された。

一方、炭カル施用当年の牧草生育は、供試草地の表層土壌の pH によって異なる傾向を示した (表32)。すなわち、標準草地・炭カル区の収量は 1 番草では減収したが、2, 3 番草では無石灰区のそれと同等かやや上回った。しかし、酸性化草地・炭カル区の収量は 1 番草に限らず 3 番草に至っても同無石灰区の収量を下回った。

牧草の窒素吸収量に及ぼす炭カル表面施用の影響は 1 番草が最も大きく、無石灰区の 88~102% (平均 92%) であった。しかし、供試草地間の差異についてみると、牧草収量と同様に標準草地の 3 番草で、炭カル施用区の窒素吸収量が無石灰区

表31. 炭カル表面施用による表層土壌 pH と牧草収量の経年変化

草地	項目・年次		pH (H ₂ O: 0 ~ 2 cm) *			乾物収量 (kg/10 a)			
	施肥 N	処理	1	2	3 年目	1	2	3 年目	3 ヶ年平均
酸性化 草地	9kg	-Ca	5.20	4.76	4.69	(524)	(479)	(353)	(452)
		+Ca	-	5.50	5.17	97**	97	111	101
	18kg	-Ca	5.20	4.53	4.50	(771)	(847)	(604)	(741)
		+Ca	-	5.17	5.05	95	108	118	106
標準 草地	9kg	-Ca	5.88	5.42	5.05	(547)	(496)	(417)	(478)
		+Ca	-	6.11	5.64	95	102	113	102
	18kg	-Ca	5.88	5.15	4.96	(894)	(859)	(715)	(823)
		+Ca	-	5.69	5.52	101	111	112	107

* 早春施肥前 (前年晩秋時) の pH を示す ** + Ca 区の値は - Ca 区に対する指数で示す

表32. 炭カル表面施用による牧草収量、窒素吸収量の変化 (造成 6 年目草地)

草地	項目		乾物収量 (kg/10 a)				N 吸収量 (kg/10 a)				同差 *
	施肥 N	処理	1	2	3 番草	合計	1	2	3 番草	合計	
酸性 化 草地	9kg	-Ca	(230)	(173)	(121)	(524)	(3.95)	(3.25)	(3.02)	(10.22)	-
		+Ca	103	92	93	97	103	91	89	95	-0.49
	18kg	-Ca	(346)	(209)	(216)	(771)	(7.06)	(5.29)	(6.24)	(18.59)	-
		+Ca	95	110	80	95	88	103	80	89	-2.00
標準 草地	9kg	-Ca	(243)	(176)	(128)	(547)	(4.40)	(3.59)	(3.03)	(11.03)	-
		+Ca	92	94	102	95	88	91	105	93	-0.73
	18kg	-Ca	(349)	(271)	(274)	(894)	(7.29)	(6.53)	(7.73)	(21.55)	-
		+Ca	95	106	102	101	88	100	101	96	-0.81

() 実数値, + Ca 区は - Ca 区に対する指数で示した * - Ca 区との差 (kg/10 a)

のそれをやや上回るのに対し、酸性化草地の3番草では無石灰区の80~89%と大きく下回った。

以上のような炭カル表面施用の牧草収量に及ぼす影響は炭カルの施用時期によっても異なった(表33)。炭カル施用による収量と窒素吸収量の低下程度は春施用区>秋施用区であり、かつ春施用区では2,3番草に至っても収量と窒素吸収量の低下が認められた。

2) 炭カル表面施用による肥料窒素の揮散と有機化

呼吸鐘を用いて測定したアンモニアおよび亜硝酸ガスを合計した窒素揮散量(表34)は酸性化草地・炭カル区で16.5~21.5mg/m²(平均19.1mg/m²)、標準草地のそれで13.7~19.1mg/m²(平均17.4mg/m²)であり、無石灰区の5.2~7.8mg/m²(平均6.7mg/m²)より増加した。また酸性化草地の窒素揮散量は1番草時>2番草時>3番草時の順で低下した。

一方、これを肥料窒素に対する窒素揮散率で見ると、無石灰区のそれは0.04~0.09%(平均

0.06%)と僅かであるのに対し、炭カル区のそれは酸性化草地では0.24~0.32%(平均0.27%)、標準草地では0.17~0.27%(平均0.22%)と増加した。しかし、炭カル表面施用による肥料窒素の揮散率は僅かであった。

窒素揮散測定直後に跡地の表層土壌0~5cmを採取し、無機態および有機態窒素含量を測定した結果を表35に示した。無石灰区の無機態窒素含量に対する炭カル区のその存在割合は酸性化草地で67~83%、標準草地で84~100%であり、酸性化草地での無機態窒素の減少程度は大きかった。これら炭カル区の無機態窒素の減少量は酸性化草地で各番草時平均約1.3g/m²、標準草地で0.13g/m²と窒素揮散量0.02g/m²よりはるかに多かった。

リン酸緩衝液抽出法によって求めた有機態窒素含量は、炭カル区で増加し、その増加量は酸性化草地>標準草地の関係にあった。この有機態窒素の増加量から概算した肥料窒素の有機化率(炭カル区の有機態窒素含量から無石灰区のそれを減じ、窒素施用量で除して求めた)は酸性化草地で11~

表33. 炭カル施用時期の差異による牧草収量, 窒素吸収量の変化(造成9年目草地)

項目	乾物収量(kg/10a)				N吸収量(kg/10a)				同差*
	1	2	3番草	合計	1	2	3番草	合計	
処理									
-Ca	(379)	(377)	(248)	(1,004)	(7.77)	(7.74)	(7.21)	(22.42)	-
+Ca 秋施用	96	111	104	103	91	113	101	101	+0.32
+Ca 春施用	82	93	92	89	75	93	88	85	-3.31

()は実数値, +Ca区は-Ca区に対する指数 * -Ca区との差(kg/10a)

表34. 炭カル表面施用による肥料窒素の揮散(造成6年目草地)

項目	pH(H ₂ O: 0~1cm)	揮散量(mg/m ²)			揮散率(%)**				
		1	2	3	1	2	3		
酸性化草地									
-Ca*	5.00	4.50	4.68	2.2	3.7	2.2	-	-	-
-Ca	4.81	4.35	4.38	5.2	6.0	7.7	0.05	0.04	0.09
+Ca	6.40	6.19	5.85	21.5	19.2	16.5	0.32	0.26	0.24
標準草地									
-Ca*	-	5.53	5.72	-	3.5	2.9	-	-	-
-Ca	-	5.01	4.85	-	6.6	7.8	-	0.05	0.08
+Ca	6.70	6.22	6.20	14.4	13.7	19.1	-	0.17	0.27

* 無窒素区, 他は窒素18kg/10a・年施肥区 ** 揮散率は窒素施肥量に対する百分率

表35. 窒素揮散測定直後の表層(0~5cm)の土壤窒素含量(造成6年目草地)

番草	項目 処理	酸性化草地				標準草地			
		無機態 N*	割合 (%)	有機態 N*	有機化** 率(%)	無機態 N*	割合 (%)	有機態 N*	有機化** 率(%)
		1	-Ca	12.40	(100)	11.00	-	-	-
	+Ca	9.70	78	13.10	19.20	4.47	-	11.53	-
2	-Ca	11.28	(100)	9.13	-	4.78	(100)	8.24	-
	+Ca	9.36	83	10.79	15.2	4.76	100	8.53	2.7
3	-Ca	7.44	(100)	9.64	-	2.75	(100)	8.64	-
	+Ca	4.99	67	10.84	11.00	2.30	84	9.19	5.0

* mg/100g 乾土 ** 有機化率は -Ca 区に対する +Ca 区の有機態N増加量から概算した

19% (平均16%) , 標準草地で3~5% (平均4%) であり, 酸性化草地での有機化率が高かった。

3) 肥料窒素の土壤中での動態

炭カル施用区における無機態窒素含量の経時変化を無施用区のそれに対する割合として求め, 図23に示した。酸性化草地・炭カル区の無機態窒素含量は無石灰区に対し明らかに少なく推移し, この傾向は1番草時だけでなく2,3番草時でも認められた。また炭カル区の無機態窒素の減少程度

は1番草で施肥直後から30日目頃まで, 2,3番草時では施肥後10~20日目頃までが大きかった。

これに対し, 標準・炭カル区の無機態窒素含量は1番草時では酸性化草地と同様に無石灰区より明らかに減少したが, 2,3番草では一時的な無機態窒素の減少が認められるものの概ね無石灰区の無機態窒素含量と同程度が存在していた。

窒素施肥後の有機化態窒素含量の経時変化(表36)は, 酸性化草地, 炭カル区で施肥直後から無石灰区のそれより増加し, 炭カル表面施用の直後に肥料窒素の有機化が旺盛であったことを示した。

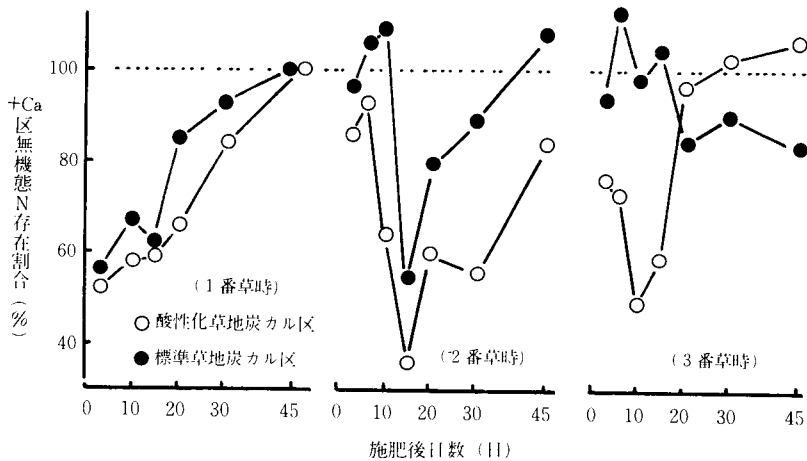


図23. 炭カル表面施用による窒素施肥後の無機態窒素存在割合* (0~5cm)の経時変化(造成6年目草地, N18kg/区)

* -Ca区無機態Nに対する+Ca区のその存在割合, -Ca区無機態Nは図22に同じ

表36. 施肥後の有機態窒素含量*の消長(造成6年目草地：0～5 cm土壌, mg/100 g 乾土)

番草	処理	酸性化草地					標準草地				
		3	10	20	30	45日	3	10	20	30	45日
1	-Ca	10.51	11.23	12.19	11.81	11.92	10.24	11.24	9.83	9.32	8.60
	+Ca	+0.97	+0.28	-0.44	+0.41	-0.47	-1.13	-0.27	-0.60	-0.56	-0.48
2	-Ca	9.32	10.86	9.55	11.09	9.14	8.80	9.13	8.47	8.70	7.32
	+Ca	+0.94	+0.10	+1.89	+1.36	+0.29	+0.88	+0.84	-0.41	-0.36	+0.40
3	-Ca	8.68	10.70	9.25	10.26	9.44	8.01	8.56	8.62	8.23	6.86
	+Ca	+0.61	+0.13	+0.50	-0.14	+0.67	-0.52	-0.66	-0.44	-0.28	+0.02

* N18kg施肥区、但し、+Ca区有機態窒素含量は-Ca区との差で示す(+：増加 -：減少)

** 施肥後日数

しかし、標準草地・炭カル区での2番草の有機態窒素含量がやや増加したのを除けば、炭カル区の有機態窒素含量は無石灰区のそれより少なかった。

4) 炭カル表面施用による表層土壌の窒素の有機化と無機化

造成9年目草地で実施した炭カル施用時期別試験の表層土壌の炭酸ガス放出量と土壌窒素無機化量の季節変化を図24に示した。表層土壌の炭酸ガス放出量は炭カル区で増加し、とりわけ地温の上

昇する6～7月にかけて顕著な差が認められた。また秋施用区の炭酸ガス放出量が早春時より6月上旬まで春施用区のそれを上回り、逆に6月中旬～7月中旬については春施用区>秋施用区の関係にあった。一方、炭カル区表層土壌の窒素無機化量は早春時より7月中旬頃まで無石灰区と差がないか、むしろ炭カル表面施用により減少する傾向が認められた。しかし8月上旬以降については炭カル区の窒素無機化量は無石灰区のそれを上回った。炭カル施用が表層土壌の窒素の有機化と無機化

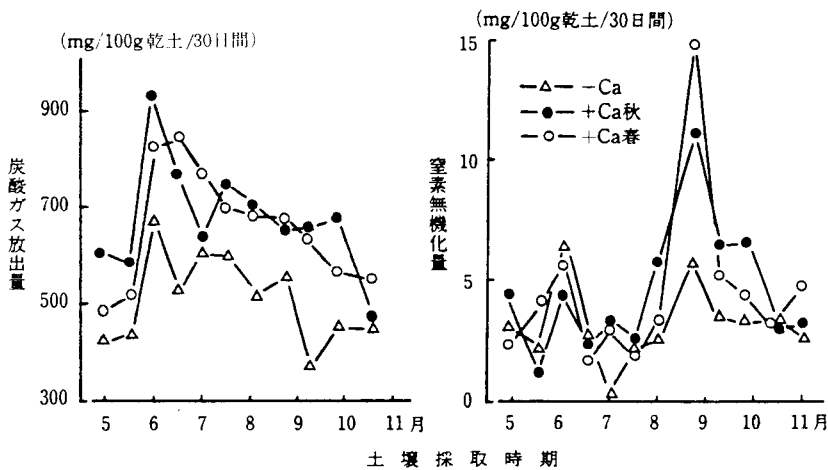


図24. 炭カル表面施用による表層土壌(0～5 cm)の炭酸ガス放出量と窒素無機化量の季節変化(造成9年目草地)

に及ぼす影響を表37に示した。造成6年目の酸性化草地における炭カル表面施用は表層土壌の窒素有機化量を増加させ、逆に窒素無機化量は無石灰区と同等か、やや減少する傾向があった。しかし標準草地・炭カル区の窒素有機化量は無石灰区のそれとほぼ同程度であった。また土壌の窒素無機化量は早春時に減少するものの、他の時期については炭カル区が無石灰区を上回った。

5) 蓄積有機物の変化

炭カル表面施用による蓄積有機物の炭素・窒素組成の変化(表38)をみると、炭素含量率は炭カル区と無石灰区で差はなかった。しかし、窒素含有率は炭カル区で高まり、特にこの傾向は粒径2mm以上の粗大画分で顕著であった。この結果、各粒径画分について求めたC/N比は炭カル区で無石灰区のそれより低下した。

炭カル表面施用による蓄積有機物の変化(表

表37. 炭カル表面施用に伴う表層土壌の窒素有機化量と無機化量の季節変化

草地	処理	項目	早 春 時		1 番草刈り取り時		2 番草刈り取り時		晩 秋 時	
			有機化量	無機化量	有機化量	無機化量	有機化量	無機化量	有機化量	無機化量
酸性化草地	N9	-Ca	0.64	1.23	1.19	1.22	0.78	0.60	0.62	0.88
		+Ca	0.83	1.39	1.75	0.62	2.12	0.38	1.25	0.60
標準草地	N18	-Ca	0.64	1.23	1.56	0.89	0.05	0.74	0.39	1.25
		+Ca	0.83	1.39	1.11	0.99	0.96	0.15	0.96	1.07
標準草地	N9	-Ca	1.62	2.36	1.45	0.84	0.86	0.29	0.76	0.68
		+Ca	1.62	2.06	1.14	1.17	1.47	0.58	0.83	0.76

(造成6年目草地, 0~5cm土壌: mg/100g乾土/1週間)

表38. 炭カル表面施用による蓄積有機物のC,N比組成

成分	区分 処理	粒径別有機物画分(mm)				
		2mm以上	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1
C (%)	-Ca	37.2	34.9	30.3	28.0	18.4
	+Ca秋	39.5	36.1	29.3	26.3	18.7
	+Ca春	40.4	36.7	28.3	27.7	18.7
N (%)	-Ca	1.37	1.80	1.65	1.42	1.04
	+Ca秋	1.65	1.85	1.71	1.59	1.15
	+Ca春	1.62	1.91	1.71	1.63	1.11
C/N	-Ca	27.2	19.4	18.4	19.7	17.7
	+Ca秋	24.0	19.5	17.1	16.6	16.3
	+Ca春	25.0	19.2	16.6	17.0	16.8

(造成9年目草地: 5月30日調査試料)

表39. 炭カル表面施用による蓄積有機物とその窒素含有率，含有量の変化

調査(月日)	項目 処理 粒径(mm)	有機物量 (g/m ²)			N含有率 (%)			N含有量 (g/m ²)			同左増減量*	
		-Ca	+Ca	+Ca	-Ca	+Ca	+Ca	-Ca	+Ca	+Ca	+Ca	+Ca
		秋 春			秋 春			秋 春			秋	春
5月	2mm以上	372	338	354	1.37	1.65	1.62	5.1	5.6	5.7	+0.5	+0.6
	2~0.5	272	243	266	1.71	1.76	1.78	4.7	4.3	4.7	-0.4	0
	0.5~0.1	470	440	476	1.18	1.30	1.30	5.5	5.7	6.2	+0.2	+0.7
30日	合計	1,114	1,021	1,096				15.3	15.6	16.6	+0.3	+1.3
7月	2mm以上	411	303	374	1.37	1.55	1.48	5.6	4.7	5.5	-0.9	-0.1
	2~0.5	283	201	199	1.72	1.83	1.80	4.9	3.7	3.6	-1.2	-1.3
	0.5~0.1	480	501	490	1.24	1.32	1.34	6.0	6.6	6.6	+0.6	+0.6
1日	合計	1,170	1,005	1,063				16.5	15.0	15.7	-1.5	-0.8
10月	2mm以上	448	307	327	1.59	1.61	1.75	7.1	4.9	5.7	-2.2	-1.4
	2~0.5	253	205	206	1.92	2.06	2.07	4.9	4.2	4.3	-0.7	-0.6
	0.5~0.1	491	538	567	1.57	1.74	1.67	7.7	9.4	9.5	+1.7	+1.8
30日	合計	1,192	1,050	1,100				19.7	18.5	19.5	-1.2	-0.2

* -Ca区N含有量に対する+Ca区の増減量(+：増加.-：減少, g/m², 造成9年目草地)

表40. 炭カル表面施用による草地表層の蓄積有機物の変化*(処理3年目秋調査)

草地	項目 処理	有機物存在量 (g/m ²)				成分含有量 (g/m ² :0.1mm以上)		
		2mm以上	2~0.5	0.5~0.1	合計	C	N	C/N
酸性化 草地	-Ca	587	215	362	1,164	519	20.9	24.6
	+Ca	81	67	83	79	83	86	96
標準 草地	-Ca	391	96	256	743	350	14.2	24.6
	+Ca	83	80	98	88	83	92	90

* +Ca区の値は -Ca区に対する指数で示した

39)は、7月および10月末調査時における粒径2mm以上の粗大画分が減少し、分解の進んだ細粒画分が僅かに増加した。また蓄積有機物が含有する窒素量は5月末調査時では無石灰区に比べ炭カル区で増加し、その量は春施用区1.3g/m²>秋施用区0.3g/m²であった。しかし、7月および10月末調査時では無石灰区より減少し、10月末調査の有機物に含まれる窒素量の減少量は秋施用区1.2g/m²>春施用区0.2g/m²と春施用区での減少量は僅かであった。

一方、造成6年目草地の炭カル表面施用試験における処理3年目の蓄積有機物量は炭カル表面施

用によって減少した(表40)。

第3節 降水量の年次変動に伴う経年草地の収量変動

天北地方における草地の牧草収量は生育期間内の降水量に影響されることは前章および他の報告で指摘されている^{44,52,76)}。一方、降水量の牧草生育に及ぼす影響は、①水分ストレスによる牧草生育の直接的な抑制^{23,82)}、②降水不足に伴う土壌養分の非有効化あるいは吸収阻害による牧草生育の抑制^{43,53,76)}とに分けて整理する必要がある。

本節では降水量の多寡が草地表層に蓄積する有機物の分解と土壤窒素の無機化に及ぼす影響を明らかにし、このことと経年数の異なる草地の牧草生育との関連を検討した。

実験1 降水量の多寡が蓄積有機物の分解と牧草生育に及ぼす影響

実験方法

前章の第1節実験2で得られた実験結果を試験年次の気象要因、特に降水量の年次変動との関係に注目して解析した。

①表層土壌の水分含有率は1984, '85年の2カ年間、融雪直後より概ね10日間隔でオーチャードグラス主体草地の0～5cm土層を採取、105℃、5時間乾燥して測定した。

②還元有機物含有炭素、窒素の消失率は、1984～'89年の粒径0.1mm以上有機物が含有する炭素、窒素量（前章第3節実験3）と還元有機物の炭素、窒素量（同実験1）の差として算出した。

③蓄積有機物が含有する窒素量の年次変動は前章第3節実験3に示した1984～'89年の粒径0.1mm以上の有機物が含有する窒素量を同一草地における前年量との差として算出した。

④灌水処理による蓄積有機物量の変化は褐色森林土に立地する造成3年目のオーチャードグラス主体草地を用いて1987年より実施した灌水試験の処理2年目（1988年）における蓄積有機物量を前

章までの実験方法により6反復で調査した。

なお、試験期間の主要気象要素の積算値（表41）から1984, '86, '88年を降水不足年、1983, '85, '87, '89年を平常年として取り扱った。また、本試験で用いた降水量の不足年と平常年は、400mm/生育期間以下か以上かによって区分した。これは、オーチャードグラス主体草地の日平均蒸散量を1,2番草それぞれ3.5, 2.8mm^{53,76)}、また3番草のそれを2.0mm¹⁰²⁾とした時の生育日数に乗じた値、1,2,3番草それぞれ約160,150,100mmで合計約410mmを基準として便宜的に区分したものである。

実験結果

1) 降水量が有機物の分解と牧草生育に及ぼす影響

1984年（降水不足年）および'85年（降水平常年）における表層土壌（0～5cm）の土壤水分（図25）は7月上旬まで大差ない状態で推移したが、7月中旬から8月中旬までの約40日間は1984年の方が明らかに低水分で推移しており、しかもこの期間は天北地方における最高地温期であり、地温的には有機物の分解が最も活発な時期に相当する。

草地表層に蓄積した粒径0.1mm以上の有機物量から算出した還元有機物の含有する炭素と窒素の消失率（図26）は4月下旬から9月中旬までの牧草生育全期間の積算降水量に支配され、また地温

表41. 試験期間の主要気象要素

時期 年次	積算気温(°C)				降水量(mm)				7～8月
	1	2	3番草	合計	1	2	3番草	合計	
1983年	401	743	675	1,819	137	113	188	438	145
'84	442	1,107	694	2,054	44	91	208	343	165
'85	452	952	735	2,139	64	170	224	458	231
'86	427	826	752	2,005	104	85	85	274	70
'87	429	895	683	2,007	98	178	163	439	264
'88	387	843	703	1,933	141	104	155	400	156
'89	345	996	727	2,068	115	145	361	621	268
'90	488	1,020	741	2,249	147	76	265	488	219

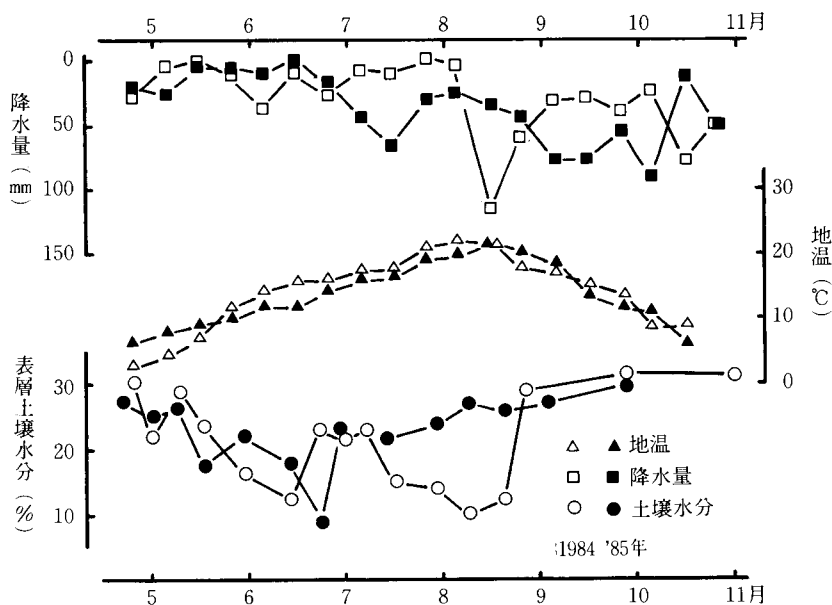


図25. 土壌水分(%: 0 ~ 5 cm)、地温(°C: 10cm)および降水量の推移

表42. 灌水処理*が表層蓄積有機物に及ぼす影響(処理2年目)

項目 処理	有機物存在量 (g / m ²)			成分存在量 (g / m ²)		
	2 mm以上	1 ~ 0.1mm	合計	C	N	C / N
無灌水	409(100)	376(100)	785(100)	356(100)	12.8(100)	27.8
2 mm灌水	317(77)	316(84)	633(81)	289(85)	10.9(85)	26.5
4 mm灌水	329(80)	262(70)	591(75)	263(74)	10.3(80)	25.6

*日蒸散量を2, 4 mmとし, 10日毎に降水量で満たされなかった水量を灌水した

が高い7月~8月の積算降水量とも直線的な関係にあった。

さらに、蓄積有機物の含有する窒素量(図27)は降水量の多い年次では前年の含有窒素量より明らかに減少し、土壌からの窒素無機化が多いこと、逆に降水量の少ない年次では前年の窒素量より増加し、土壌からのそれが少ないことを示唆していた。またこの増加あるいは減少の幅は草地の経年数の増加に伴って大きくなる傾向を示した。

以上のような降水量の多寡と蓄積有機物の量お

よび内容の違いを確かめるため灌水実験を実施しているオーチャードグラス主体草地における有機物、炭素および窒素存在量の測定結果を表42に示した。草地に対する灌水処理は有機物蓄積量および窒素量を減少させた。

次に牧草収量と降水量の関係を検討する。窒素18kg施肥区の1番草収量は当該番草の降水量と弱い正の相関関係を示し、前章の結果と一致した。これに対し窒素12kg施肥区の1番草収量は当該番草の降水量とは無関係であった(図28)。

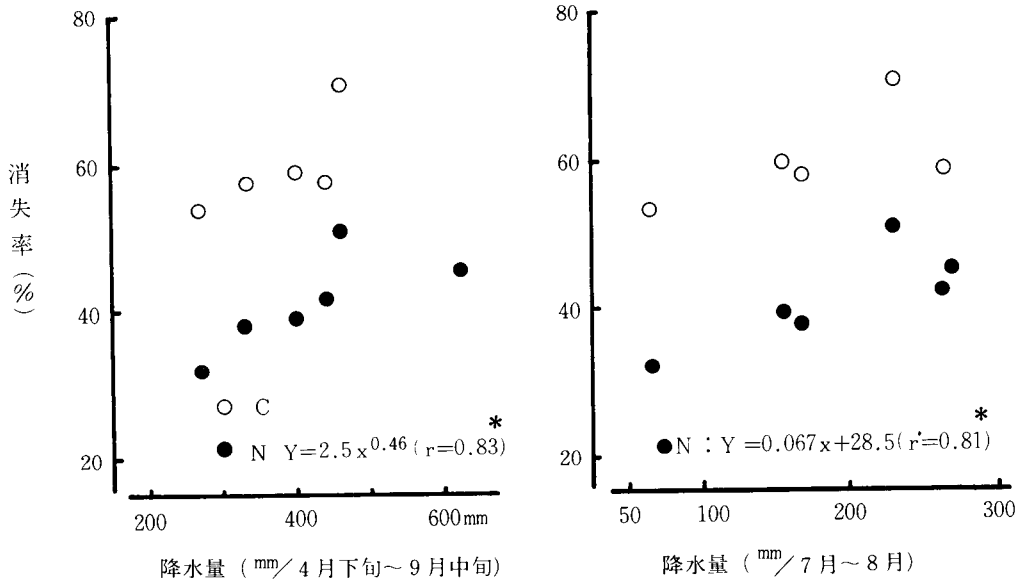


図26. 降水量と還元有機物含有C、N消失率の関係(1984~'89年)

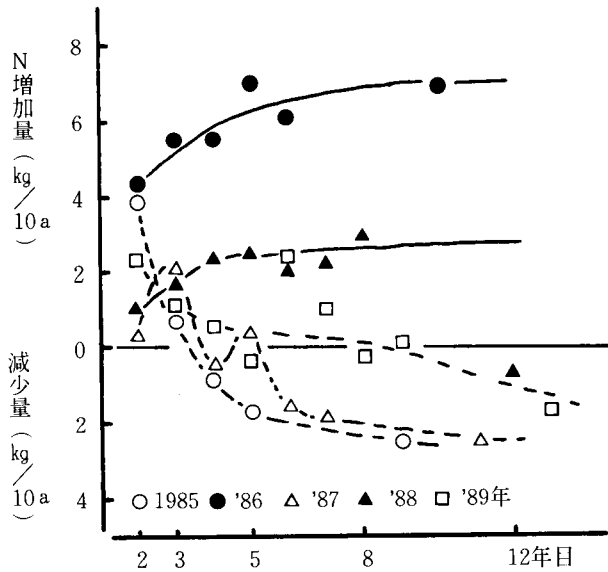


図27. 蓄積有機物含有窒素量の年次変動*
*増減量(前年含有量との差:同一草地)

一方、牧草の窒素吸収量と降水量の関係(図29)を検討すると、窒素12kg施肥区の前年3番草時の窒素吸収量を加算した「1番草+前年3番草」合計窒素吸収量は前年の降水量と正の対応関係が認められ、前年降水量の多い年次では窒素施肥量以上の吸収量を示した。また窒素18kg施肥区も窒素12kg施肥区と類似の関係が認められるが、1987年を除いた場合ほぼ同一の窒素吸収量を示した。

以上の結果から、天北地方のオーチャードグラス主体採草地における土壌からの窒素吸収量は牧草生育期間の降水量に影響されていると考えることができ、その影響は窒素施肥量の少ない草地でより大きいと言える。

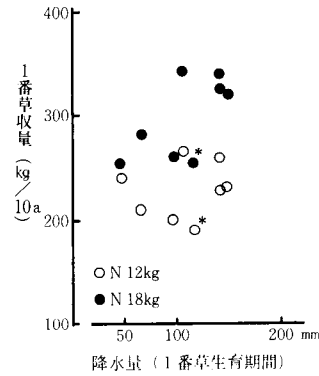


図28. 1 番草収量と当該番草生育期間の降水量との関係
(*1989年: 冬損と1 番草生育期間の低温)

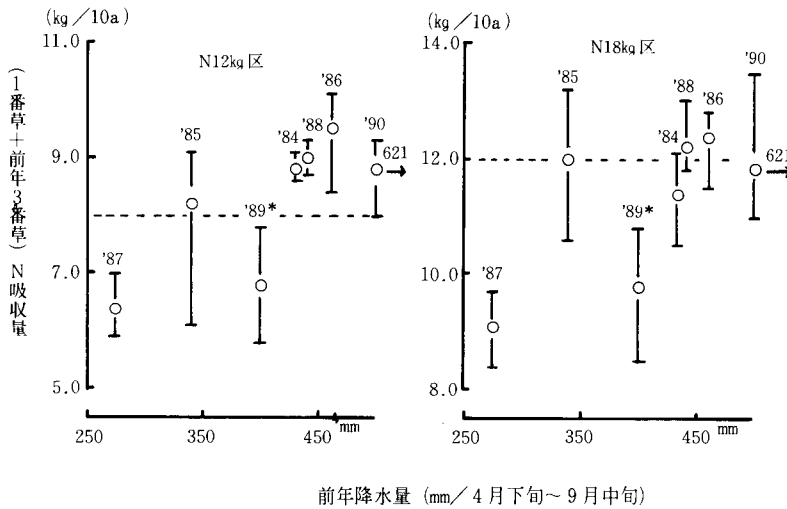


図29. 前年降水量と窒素吸収量（1 番草+前年3 番草合計）の関係
* '89年は図28に同じ、'90年の降水量は621mm
図中破線は1 番草と前年3 番草に対する合計N施肥量を示す

2) 降水量の年次変動に伴う経年草地の収量性

経年数の異なる草地の1 番草収量を1983~'90年までの8 ヶ年間について降水不足と平常年に分け表43に示した。いずれの窒素施肥水準でも1 番草収量は前年降水量の影響を強く受け前年降水平常年>前年降水不足年の関係にあった。しかも、窒素12kg 施肥区では前年降水量不足の収量に及ぼす影響を示す収量指数は2 年目>3, 4 年目=5, 6 年目=7, 8 年目>9 年目以上草地の順で、古い草地ほどその影響が大きかった。また、前年の

降水量が不足した造成9 年目以上の草地の翌春1 番草収量は造成3, 4 年目草地の75%であり、前年降水量が平常であった場合の86%より低下が大きかった。この窒素12kg 施肥区における1 番草収量の傾向は当該番草生育期間の降水量とは関係がない（既掲図28）ことから、主に前年降水量の影響を強く受けたものと判断される。これに対し、窒素18kg 施肥区の1 番草収量は窒素12kg 施肥区と同様の傾向が認められるが、経年数別の草地間の差は認められず、81~106%の収量指数を示した。

表43. 前年の降水量が経年草地の1番草収量に及ぼす影響(kg/10a : 1984~'90年)

草地 降水量区分	N 12kg 施肥区					N 18kg 施肥区				
	2 年目	3,4 年目	5,6 年目	7,8 年目	9年目 以上	2 年目	3,4 年目	5,6 年目	7,8 年目	9年目 以上
前年降水量 平常年 (A)	289 (117)*	247 (100)	243 (98)	230 (93)	213 (86)	343 (106)	323 (100)	325 (101)	307 (95)	303 (94)
前年降水量 不足年 (B)	299 ^a (136)	220 ^b (100)	214 ^b (97)	209 ^b (95)	164 ^c (75)	363 ^a (128)	284 ^b (100)	263 ^b (93)	279 ^b (98)	255 ^b (90)
B/A 収量指数 (%)	103	89	88	91	77	106	88	81	91	84

* ()内は3,4年目草地の平均収量を基準とした各経年草地の収量指数を示す(%)

a, b, c : 異文字間に5%水準で有意差あり

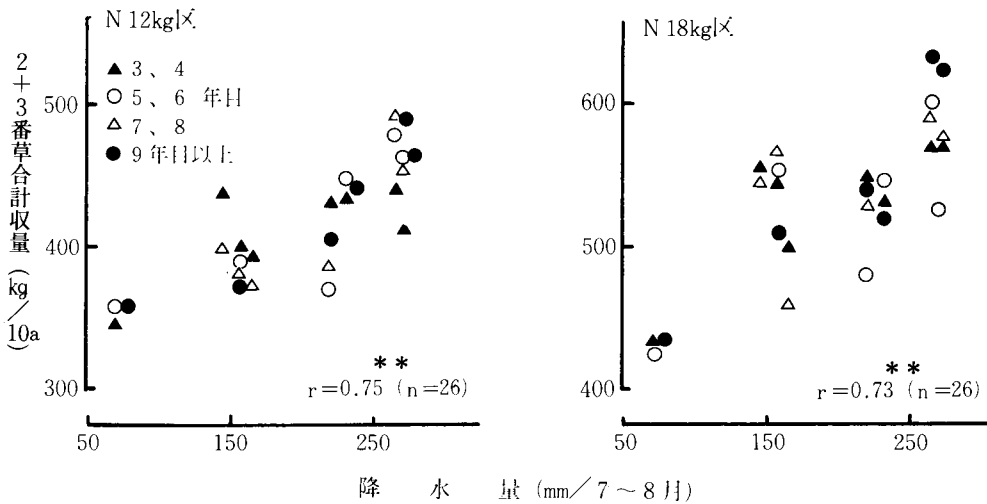


図30. 2 + 3 番草合計収量と降水量 (7 ~ 8 月) の関係 (1983 ~ '90年)

なお、造成2年目草地の1番草収量に対する前年降水量の影響が造成3,4年以降の草地の収量に対するそれと異なる傾向を示す理由は、造成初年目の7~8月が降水量不足にあった場合、当年の刈り取り回数が1回と降水量平常年のそれ(2回)より少なかったためである。

一方、2,3番草合計収量は7~8月の積算降水量と正の相関関係が認められた(図30)。しかし、草地の経年数の違いにより降水量に対する収量の反応が異なっていた。

3,4年目草地の2,3番草合計収量を基準にした各経年数別草地の収量指数と降水量の関係を図31に

示した。7月上旬から8月下旬までの地温の高い時期における降水量が70mm程度と極めて少なかった1986年は草地の経年数間に収量差は認められないが、降水量の少ない条件(150mm程度)では3,4年目草地=5,6年目≧7,8年目=9年目以上草地の関係になり、古い経年草地の収量は3,4年目草地の90~95%とやや劣った。逆に降水量の多い条件では(250mm程度)では9年目以上草地≧7,8年目>5,6年目≧3,4年目草地の順となり、7年目以上の古い経年草地は3,4年目草地の収量に対し110~120%の収量指数を示した。この降水量と経年数別草地の3,4年目草地に対する収量指数の関係は

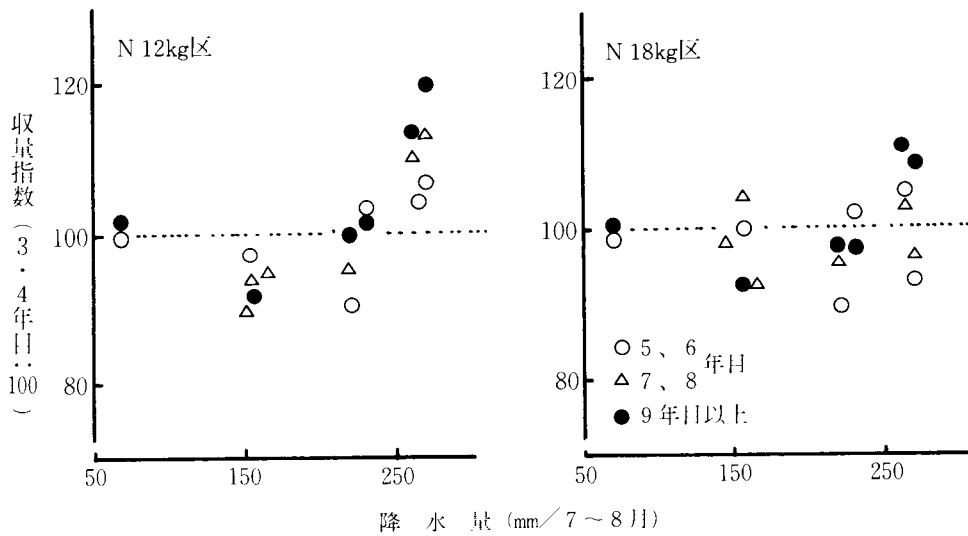


図31. 降水量の変動に伴う経年草地の収量性
(2、3番草合計収量、1983~'90年)

窒素施肥量の多い処理（窒素18kg施肥区）ではあまり明瞭でなかった。

このような地温の高い時期における降水量の多寡は牧草の越冬前生育量（図32）にも反映し、降水不足で経過した1984、'86、'88年は分けつ発生量および分けつ/主茎比が降水量の多かった1983、'85、'89年に比べ明らかに小さかった。

以上の結果から、降水量の多少（特に地温の高い7~8月）によって草地表層に蓄積する有機物の分解が影響され、降水量の多い条件では蓄積有機物の分解が旺盛となり土壌から窒素吸収が多くなる。この土壌からの窒素吸収は有機物が多量に蓄積した古い経年草地でそうでない新しい草地より多いため、2,3番草の生育量が高められると同時に越冬時の牧草形質を良好にし、これが翌春1番草収量に継承されたものと考えられる。

第4節 考察

経年草地における牧草収量の最も大きな規制要因は表層土壌の酸性化（図1、表28）であり、また天北地方における牧草収量の年次変動を規制する主要因は、牧草生育期間の降水量（表1、図28,30）であることがこれまでの検討で明らかとなった。そこで本節では、これら収量規制要因別

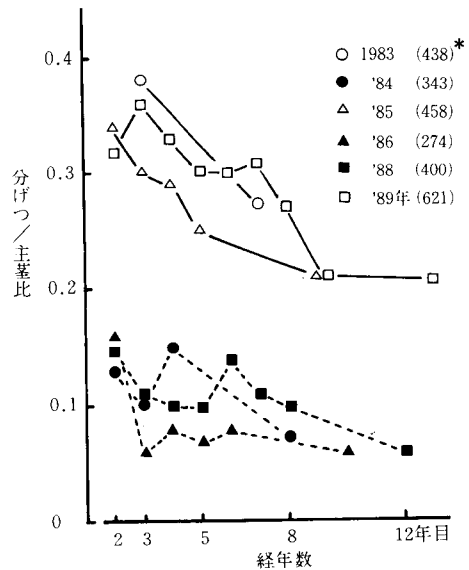


図32. 牧草生育期間の降水量が越冬前形質に及ぼす影響

*降水量(mm/4月下旬~9月中旬)

の機作とそれに対する改善法について、主に表層に蓄積する有機物量、组成的差異および土壌からの窒素吸収量と牧草生育の関係を中心にして考察

した。

1. 土壤条件

1) 草地表層土壤の酸性化による還元有機物の分解と牧草生育の関係

草地表層土壤の酸性化は草地内で循環する有機物窒素の消失を抑制し、かつ分解途中の有機物残渣のC/N比も顕著に高めた(表23, 図20)。この結果、酸性化草地では表層蓄積有機物が多く、しかも粒径の粗い粗大画分の存在割合が高い(表24)。

一方、酸性化した経年草地における牧草収量の低下程度は窒素施肥量の少ないほど、言い換えれば牧草生育が土壤からの窒素吸収量に依存する割合が高まるほど大きかった(表25)。

酸性化草地における土壤からの窒素吸収量は、地温の低い1番草および3番草刈り取り後越冬前生育期間で標準草地より顕著に劣る(表28)と同時に、酸性化草地の肥料窒素利用率は地温の高い2,3番草生育時で標準草地より劣った(表26)。

これらの結果は、①表層土壤の窒素無機化量は土壤pHが5.5以下になると顕著に抑制されること(図21)、②りん酸緩衝液抽出の有機態窒素含量は酸性化草地が標準草地より常に高い(図22)、ことなど表層土壤の窒素の無機化が抑制されたことを示した。

すなわち、酸性化草地では蓄積有機物量および可分解性炭素が多いため、低温時における土壤窒素の無機化が相対的に抑制される(前章考察)とともに、肥料窒素の有機化量も標準草地に比べて多くなることが酸性化草地とそうでない草地の低窒素施肥水準での収量差を大きくしたものと考えられた。

以上の結果から、アルミニウムイオンなど有害な土壤成分が活性化しない程度の弱酸性化草地における低収化の機作は、牧草の肥料窒素利用率と土壤からの窒素吸収量が劣ることによると要約できる。また、草地の有機物循環を適正に維持し、低収化を避けるためには表層土壤のpH環境を5.5(水pH)以上に維持する必要がある。

2) 酸性化草地に対する炭カル表面施用の効果

酸性化草地に対する炭カル表面施用は、施用当初若干の収量低下を引き起こすが(表34)、施用2年目以降の収量にはよい結果をもたらし、酸性化した草地の表層土壤を改善するための有効な手段であった。

一方、炭カル施用当年にみられる収量低下の原因は単純でないと考えられた。これに関して、草地表面のアルカリ化による肥料窒素の揮散が重要な原因であるとする報告が多い^{1,19,20,65,104,110}。しかし、本実験の炭カル区における肥料窒素の揮散率は0.2~0.3%と僅かであり(表34)、これが収量低下の主要因とは考えられなかった。本実験の結果では、炭カル施用直後に、①表層蓄積有機物の窒素含有率が上昇し、C/N比は低下したが(表38)、②有機物が含有する窒素量の減少量は僅かであった(表39)、③炭カル施用直後より表層蓄積有機物の分解によって表層土壤の炭素無機化量が顕著に増加したこと(図24)などが注目された。

すなわち、炭カル施用によって表層蓄積有機物の急激な分解(炭素無機化量の増大)が起こり、窒素の無機化より有機化が優先する。これによって肥料窒素の一部が有機化される(表37, 39)ため、炭カル施用当初の収量低下が引き起こされたものと考えられた。このことは蓄積有機物量の多い造成9年目草地における炭カル施用当初の収量低下が造成6年目草地のそれより大きかったことから裏づけられる。なお、草地の経年数によって炭カル施用当初の収量低下程度が異なる現象は既に指摘されている⁸⁵⁾。

また、2年目以降の炭カル施用による牧草収量の増加は、施用当年の秋頃より土壤窒素の無機化が増加する(図24)ためと考えられる。

なお、酸性化草地に対する炭カルの施用時期としては秋期施用が春期施用より優る(表33)。

2. 気象条件

天北地方の鈹質土に立地する草地の牧草収量に及ぼす気象要因、とりわけ降水量の影響は頗る大きかった。すなわち窒素施用水準が高い条件では

牧草の窒素栄養が充足されているため、牧草の収量は当該番草生育期間の降水量によって直接支配された。しかし、窒素施肥水準が低い条件では牧草の窒素栄養が生育の制限因子になっているため、収量は当該番草生育期間の降水量と関係が弱いか（前章表1）、または無関係であった（図28）。

草地系内における還元有機物の分解は牧草生育期間の降水量と比較的高い対応関係にあり、降水量の多い年次は窒素消失率が高く（図26）、かつ蓄積有機物が含有する窒素量も前年のそれより減少した（図27）。このことは、牧草の「1番草+前年3番草」の合計窒素吸収量が前年牧草生育期間の降水量と正の相関関係が得られること（図29）によっても支持された。すなわち、降水量の多い年次には、蓄積有機物の分解が促進されて、土壌からの窒素吸収量が多くなるのに対して、降水量の少ない年次では蓄積有機物の分解が抑制され土壌からの窒素吸収量が少なくなることを示した。

一方、「2+3番草」合計収量は7~8月の降水量と密接に関係する（図30）が、3,4年目草地に対する各経年数別の草地の収量指数は、7~8月の降水量によって明らかに異なっていた（図31）。

すなわち、①7~8月の降水量が70mm程度（1.5mm/日以下：1986年）の条件では、牧草生育が抑制されて低収となる、②150mm程度（2.5mm/日前後：1983,'84,'88,'90年）と牧草の日蒸散量^{53,75,102}をほぼ充足する条件では、3,4年目草地=5,6年目草地 \geq 7,8年目=9年目以上草地の関係が、③250mm程度（4.0mm/日前後：1985,'87,'89年）と牧草の日蒸散量を上回る条件では9年目以上草地 \geq 7,8年目 $>$ 5,6年目 \geq 3,4年目草地の関係が認められた。

有機物の分解は地温が15℃までは主に地温に、また地温が15℃以上では地温と共に土壤水分の多少にも影響される^{48,60,92,114}。降水量が2.5mm/日前後までは牧草の日蒸散量を満たす程度で、牧草の旺盛な水分吸収により表層土壌が乾燥し、有機物分解と土壌からの窒素吸収量が抑制される。その結果、土壌窒素の無機化能の高い土層が表層に

集中する古い経年草地が低収となる。しかし、降水量が4.0mm/日前後になると牧草生育および土壌微生物に十分な水分が供給される結果、表層有機物が多量に蓄積した古い経年草地では土壌から窒素吸収量が多くなり、3,4年目草地の収量を上回ったと考えられる。

一方、この7~8月の降水量の多寡は当年の2,3番草収量だけでなく3番草刈り取り後の越冬前生育量（図32）および翌春1番草収量に継承される。前年の降水量が不足した場合、造成後9年以上経過した古い経年草地の1番草収量は3,4年目草地の75%（69~90%）と明らかに劣り、逆に前年降水量が多い条件での古い経年草地のそれは86%程度（72~101%）であった（表43）。

これらのことから、低窒素施肥水準で管理されている草地では、降水量が不足した条件の牧草生育は牧草の水分ストレスだけでなく、表層土壌の乾燥→蓄積有機物の分解抑制→土壌からの窒素吸収量の減少という過程を経て収量低下がもたらされていると考えられる。

さらに、降水量の年次変動が牧草生育に及ぼす影響は土壌窒素の無機化能の高い土層が表層に集中する古い経年草地で明らかに大きいと指摘できる。

すなわち、地温の高い夏期間（7~8月）に降水量が不十分な条件（約2.5mm/日以下）で経過した場合、蓄積有機物由来の土壌からの窒素吸収量が少ないため、低窒素施肥水準で管理された経年草地では、翌春の1番草収量が劣る結果になる。したがって、秋施肥または早春の肥料窒素の増施（1~2 kg N/10 a）を実施するなど、降水量の多寡に応じた窒素施肥管理の調節が必要であると結論される。

なお、天北地方の鈹質土草地における牧草生育に及ぼす降水量不足の影響の大きさは立地土壌の物理性、特に保水性や牧草根域の有効水容量などによって異なり^{71,76}、土壌の物理的特性に対応した土壌改良と導入草種を含めた総合的な対応策を立てる必要がある^{71,75}。さらに、今後の問題として土壌の有効水分容量を考慮した窒素施肥管理の検討が残されている。