

第4章 根粒菌による窒素固定と草地の生産力

第1節 窒素の固定量と移譲量

根粒菌による窒素固定は、草地における土壤微生物の役割の中でも特に重要なものである。ニュージーランドでは草地に対する窒素供給のほとんどをいわゆるclover nitrogenに頼っており、そのため極めて低コストの畜産物生産が可能になっている⁹¹⁾。北海道においても、これを有効に利活用することは施肥窒素量を削減し、牧草生産を低コストでおこなうための有力な手段といえる⁴⁶⁾。

根粒菌はマメ科牧草と共生して窒素固定を行う。マメ科牧草自体については、北海道でも草種や品種の地域適応性、マメ科牧草の維持を始めとする構成草種の管理、および収量向上の面から栽培法に関する研究が行われている^{112, 157, 180)}。しかし、マメ科牧草を窒素固定の担い手として位置づけ、窒素固定量を定量的に取り扱おうとした研究例は多くない。この節では、根粒菌・マメ科牧草の共生窒素固定系の特性と、固定された窒素の草地生産性に及ぼす影響を明らかにしようとした。

1. アセチレン還元活性による窒素固定特性の把握

共生窒素固定が行われる場である根粒の着生や窒素固定活性について、ダイズなどの畑作物では北海道でも詳細なデータの蓄積がなされている。しかし、マメ科牧草については、ほとんど調べられていないのが現状である。ここでは、天北地方の主要マメ科牧草であるアルファルファとラジノクロウバの窒素固定の特性をアセチレン還元活性と窒素集積量の両面から明らかにしようとした。

実験方法

1982年に造成したアルファルファ単播草地(酸性褐色森林土)について1984, 1985年の両年にわたってアルファルファの乾物、窒素集積量、根粒着生量、およびアセチレン還元活性を測定した。

窒素集積量は、ケルダール法によって測定した牧草の窒素含有率に乾物重をかけることによって求めた。さらに、根箱にアルファルファを植え、根粒形成の観察を行った。晩秋には、根箱を圃場に埋設して、アルファルファを越冬させ、その前後の根粒の状態も観察した。

ラジノクロウバのアセチレン還元活性測定等は1981年に造成したチモシーとの混播草地(酸性褐色森林土)で1985年に実施した。アルファルファ草地も含め施肥量は $N \cdot P_2O_5 \cdot K_2O$ それぞれ0, 10, 15kg/10aとした。

アセチレン還元活性は以下のように測定した。天北地方の重粘土は、粘性が強いため、牧草根に付着した土壌を取り除こうとすると、根粒も土壌と共に除かれてしまう。そこで、直径37mmで深さ20cmの採土器で土壌が付いたままの根を草地から引き抜き、それをそのまま1000ml容のビンに入れてアセチレン還元活性の測定に供した。試料を入れた容器を密栓し、一度軽く脱気し、100mlのアセチレンを注入した後に、常圧まで空気を再注入した。30℃、1時間培養後、生じたエチレンをガスクロマトグラフ(FID)で測定した。

結 果

(1) アルファルファの根粒による窒素固定

根箱・圃場での観察とアセチレン還元活性の測定結果からアルファルファの窒素固定は次のように特徴づけられた。まず、越冬直後は根粒着生が認められなかったが、地上部の再生と平行して根粒が着生し始めた。アルファルファのアセチレン還元活性は5月上旬にはラジノクロウバよりも低かったが、地上部の生育が乾物で30kg/10a(草丈約10cm)を超えてから根粒重の急激な増加が起これ、アセチレン還元活性もそれに伴って上昇した(図4-1)。地上部乾物が300kgに達すると(再生後40日、草丈40cm)、アセチレン還元活性は最大値に達し、その後低下した。

根箱での観察によれば刈り取りによって根粒は脱落しなかった。アセチレン還元活性は刈り取り

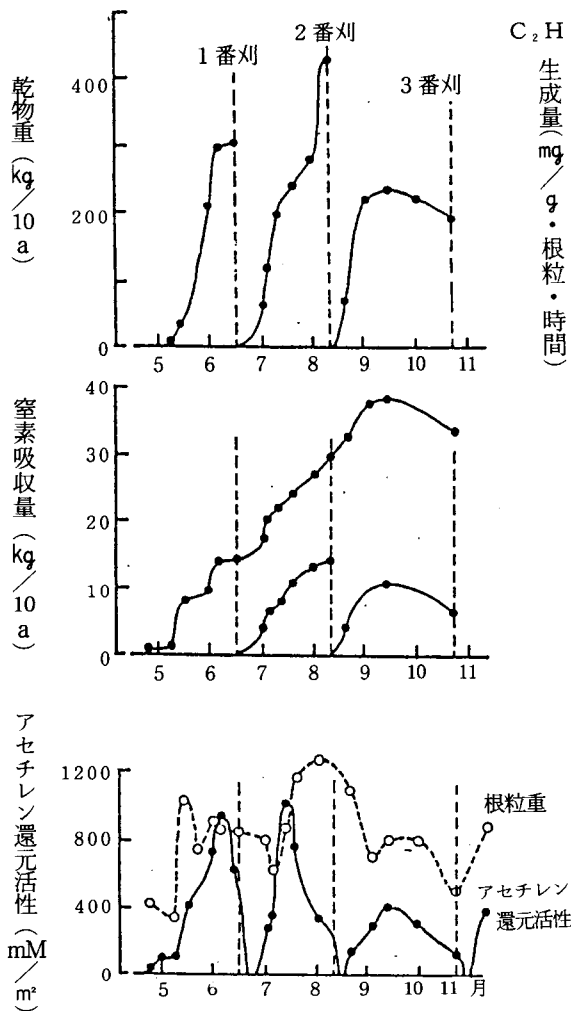


図4-1 アルファルファのアセチレン還元活性、乾物重および窒素吸収量の季節変化

翌日にはまだ刈り取り前のレベルを保ったが(図4-2)、その後急激に低下し、3~5日後に検出できなくなり、続いて地上部の再生に伴って再び高まった。刈り取りを行わなかった場合、ダイズなど一年生のマメ科作物では開花、結実期に根粒の脱落とアセチレン還元活性の低下が観察されたが¹¹⁸⁾、アルファルファでは、結実期になっても顕著なアセチレン還元活性の低下は認められず、最大値の50%程度を保った。また、アルファルファのアセ

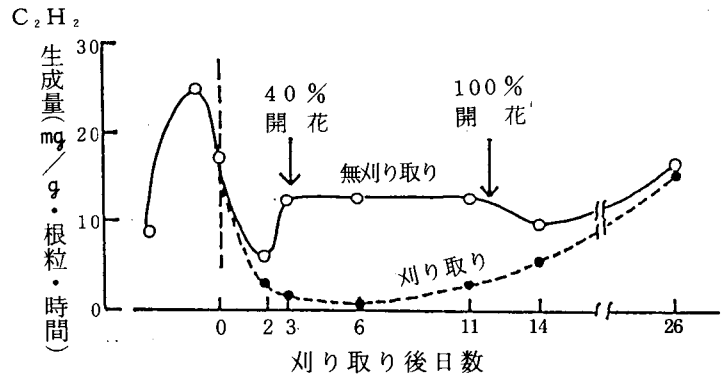


図4-2 アルファルファの刈り取りによるアセチレン還元活性の減退と回復

チレン還元活性は11月の積雪期になっても検出され、晩秋のかなり遅くまで根粒はその活性を保持した。しかし、翌春には根粒は観察されず、ほとんどの根粒が越冬中に脱落した。

窒素固定の結果として、アルファルファの窒素集積量は、1 番草、2 番草、3 番草の合計で30kg/10aを上回った(図4-1)。なお、天北農試内の草地数箇所では根粒を含まない土壌のアセチレン還元活性を測定したところ、エチレンの発生は認められなかった。このため、非共生の窒素固定は無視できると考えられ、ここで測定した値は、マメ科牧草の根粒に由来すると判断された。

(2) ラジノクロワバの根粒による窒素固定

ラジノクロワバは単播草地として利用されることがないので、本実験ではチモシーとの混播条件で調査を行った(図4-3)。ラジノクロワバは、イネ科牧草との競合の点で不利なほふく型の生育をするので、乾物収量は1 番草生育期の6 月初めに最大となった後は逆に低下した。1 番草刈り取り後には、チモシーの再生が遅いためラジノクロワバが一時優勢となったが、チモシーの再生のために2 番草刈り取り時にはラジノクロワバの収穫量は極めて小さかった。この様な生育経過は窒素集積量とアセチレン還元活性にも反映した。

ラジノクロワバのアセチレン還元活性は次のように推移した。ラジノクロワバもアルファルファ

と同様に早春には根粒の着生がみられなかったが、地上部の再生と同時に、根粒が着生し、それに伴ってアセチレン還元活性が上昇した。春先におけるアセチレン還元活性の発現はラジノクロウバの方がアルファルファよりも速いと判断された。アセチレン還元活性は5月中旬に最高値に達し、5月下旬以降、イネ科牧草の伸長に伴って低下し、1番草刈り取り直前には最高時の1/10までになった。アセチレン還元活性は1番草刈り取り後再び上昇したが、チモシー茎葉の伸長にともなって8月にはまた低下した。2番草刈り取り後、11月まで徐々にアセチレン還元活性が向上していく傾向が認められた。

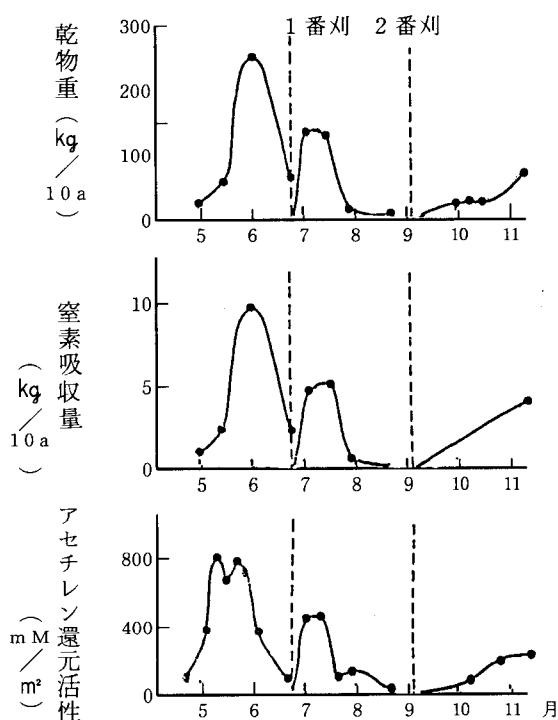


図4-3 ラジノクロウバのアセチレン還元活性、窒素集積量、および乾物重の季節変化

考 察

本実験におけるアルファルファの年間窒素集積量は30kg/10aを超えた。隣接するオーチャードグラス単播草地で牧草に吸収された土壤窒素は、約

2kg/10aに過ぎず(表4-4)、アルファルファの窒素集積量のほとんどが、根粒窒素由来と考えられる。この量は、より気象条件の良い十勝地方のダイズ根粒菌による窒素固定量が15kg/10a程度⁸⁵⁾と考えられているのに対比するとかなり大きな値である。この要因としては、①アルファルファは早春、株に蓄積した炭水化物を用いて生育を開始するので根粒による窒素固定が速い時期から始まる、②アルファルファは刈り取りによって常に栄養成長期にあるので、大豆のように子実肥大と根粒が光合成産物の点で競合することがない、③秋期においても遅くまで窒素固定が営まれる、などの点が挙げられる。さらに、アルファルファでは根部に光合成産物を蓄積することも窒素固定量が多いことと関連する可能性がある。積雪期でもアセチレン還元活性が検出されたことは(図4-1)根粒が根部に蓄えられた炭水化物を利用して窒素固定を行ったことを示している。このように、アルファルファでは畑作物に比べて窒素固定のためにエネルギーを利用し易いしくみを持っていると考えられる。

ラジノクロウバは、ほふく型でイネ科牧草との光競合において不利なため、各番草の刈り取り3～4週間前に乾物重および窒素集積量のピークがあるのが特徴であった。図4-3では1番草生育中期の6月初めに集積された窒素は10kg/10aであったが、6月下旬の収穫時にはイネ科牧草に被覆、抑圧されたために3kg/10aまで低下した。ここでは、ラジノクロウバによる窒素集積量の経時変化を詳細には追っていないので最大窒素集積量は図4-3で示したよりさらに高かった可能性もある。2番草時にも同様のことがいえる。また、ラジノクロウバは生育と脱葉が同時に進行する側面を有するので、実際の窒素固定量は最大時の窒素集積量よりもさらに大きいと推定される。ラジノクロウバから失われた窒素は、最終的には土壤に還元され微生物によって分解されて、無機態窒素となり、牧草に吸収されることによって回収されると推定される。

同様に、アルファルファ、ラジノクロウバとも共通して、最終番草刈り取り後に固定された窒素

の一部は株部に転流して越冬・再生用に貯蔵されるが、他の部分は越冬中に枯死し、土壌微生物による分解後、再び牧草に吸収、利用されると考えられる。

図4-1, 3に示したようにアルファルファで年間30kg/10a、ラジノクローバで最大生育時に限っても15kg以上の窒素固定が行われた。根粒による窒素固定をさらに増強し、これを草地生産に効率的に利用することは、牧草生産を高めつつ窒素施肥量を削減する上で、重要であると考えられる。

2. 草種組合せ別の窒素固定量と移譲量

アルファルファを含め、マメ科牧草はイネ科牧草との混播で利用されることが多い。混播条件では、マメ科牧草によって固定された窒素はすべて、マメ科牧草に集積して収穫されるのではなく、その一部は土壌を経由してイネ科牧草にも移行することが知られており、これを窒素移譲と呼んでいる。北海道の根釧地方の例では、年間2～4 kg/10aの固定窒素がイネ科牧草に移譲されることが報告された^{54, 125)}。この窒素の移譲によってイネ科牧草も含めた草地全体の生産量が増加することになる。ここでは、実際の草地条件での窒素移譲量の推定法を検討した。また、これをもとに、天北地方でよく用いられるイネ科牧草とマメ科牧草の組合せにおける窒素固定と窒素移譲の特徴を比較した。

実験方法

表4-1に示した草地の1983年の収量調査結果をもとに窒素固定量、移譲量の算出を行った。

オーチャードグラス・アルファルファ混播草地では6月下旬、8月中旬、10月下旬の3回刈りを行い、オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地は6月上旬、8月上旬、9月下旬の3回刈りを行った。チモシー・アルファルファ、チモシー・ラジノクローバ混播草地は6月下旬、9月上旬の2回刈りであった。リン酸、カリ施肥量は、すべての処理区で年間それぞれ10, 15kg/10aであり、窒素も含めてオーチャードグラス草地では早春、1・2番草刈り取り後の3回均等施用、チモシー草地では特に断わらない限り、早春、1番草刈り取り後に3:2の割合で施用した(表4-2)。供試した各草種の特性を表4-3に示した。草丈の差は、両草種の競合力の差を表している。階層別乾物重の測定も行ったが、ここではデータを示さなかった。

結 果

各イネ科牧草とマメ科牧草を組み合わせ、窒素施肥量を0あるいは6kg/10aとした草地における、1983年度の年間合計乾物収量は、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地では窒素施用の有無に拘らず、年間18kg/10aの窒素を施用したオーチャードグラス単播草地とほぼ同等であった(表4-4)。また、チモシーとの混播草地ではアルファルファ、ラジノクローバいずれの組合せでもオーチャードグラスとの混播草地に比べて収量が低かった。

窒素の施用により乾物収量に占めるマメ科牧草の割合が低下し、その程度は再生力の強いオーチャードグラスとほふく型で光に対する競合力が弱いラジノクローバの組合せで最も著しかった。そのため、オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草

表4-1 供試草地の造成条件

イネ科草	マメ科草	牧草品種		造成年	播種量(kg/10a)	
		イネ科草	マメ科草		イネ科草	マメ科草
OG	AL	ヘイキング	ソ ア	1982	0.7	2.0
OG	LC	キタミドリ	カリフォルニアラジノ	1975	1.5	0.5
TY	AL	センボク	ソ ア	1982	0.75	0.5
TY	LC	センボク	カリフォルニアラジノ	1981	1.0	0.5

いずれも酸性褐色森林土に設置

OG:オーチャードグラス、TY:チモシー、AL:アルファルファ、LC:ラジノクローバ

表4-2 供試草地の施肥量および刈り取り時期

草 種		施 肥 量 (kg/10a・年)			刈り取り時期 (月・旬)		
イネ科	マメ科	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	1 番草	2 番草	3 番草
OG	AL	0-6	10	15	6・中	8・中	10・下
OG	LC	0-6	10	15	6・上	8・上	9・下
TY	AL	0-6	10	15	6・下	9・上	—
TY	LC	0-6	10	15	6・下	9・上	—

OG: オーチャードグラス、TY: チモシー、AL: アルファルファ、LC: ラジノクローバ

表4-3 供試草種の特徴

草 種 (略 号)	特 徴
オーチャードグラス (OG)	再生良好、競合力が高い 冬損の少ない天北地方の主草種
チモシー (TY)	OGよりも多量の炭水化物を株に蓄積するため、越冬性が良い 早春・1番草刈り取り後の再生が悪いため、光競合力が劣る 根圏域はOGよりも浅い
アルファルファ (AL)	地下水位の高い圃場では衰退しやすい 高温になる夏期2番草の生育が良好 主根が深く地中に伸びるので、干ばつ時の生産性が高い
ラジノクローバ (LC)	ほふく型で草丈が低く光競合に弱い ほふく茎から発根できるので、一度株密度が減少しても 再び個体密度を増加することができる。

草 種	年間 刈り取り 回数	早 春 の 再 生	1 番刈 後 の 再 生	草丈 (cm) の例・1985年度					
				1 番草中期		2 番草中期			
				5/6	5/31	7/16	7/16	7/25	7/25
オーチャードグラス	3	良	良	16	29	36			
チモシー	3	やや不良	不良	23	39		25	35	41
アルファルファ	3 ^{*1}	良 ^{*3}	極良	13	28	46	30		52
ラジノクローバ	2or3 ^{*2}	良	良	13	20			22	

*1: 地下水位が高いなど、条件の悪い土壌では2回刈り

*2: 刈り取り回数は随伴イネ科草に合わせる

*3: 前年の秋に、多雨・低温の場合は早春の再生が不良

表4-4 イネ科とマメ科牧草混播草地の乾物収量と窒素集積量

草 種		窒素施肥量 (kg/10a・年)	乾物収量(kg/10a・年)			収穫部窒素集積量			窒素固定量 (kg/10a・年)
イネ科	マメ科		イネ科草	マメ科草	合 計	イネ科草	マメ科草	合 計	
OG	なし	18	1065	0	1065	19.9	0	19.9	0
OG	AL	0	415	600	1015	8.0	24.1	32.1	30.2
OG	AL	6	523	552	1075	10.3	21.8	32.1	24.2
OG	LC	0	529	306	835	10.9	12.4	23.3	21.4
OG	LC	6	544	103	647	10.0	3.4	13.4	5.5
TY	なし	12	932	0	932	13.4	0	13.4	0
TY	AL	0	299	497	796	5.0	18.3	23.3	21.9
TY	AL	6	439	453	892	7.1	17.5	24.6	23.2
TY	LC	0	244	321	565	4.9	13.0	17.9	16.5
TY	LC	6	621	246	867	9.7	9.6	19.3	17.9

OG：オーチャードグラス、TY：チモシー、AL：アルファルファ、LC：ラジノクロバ
1983年の調査結果

地では窒素を施用した方が無窒素より収量が低かった。それに対し、2番草の再生力の弱いチモシーと直立した草型で競合力の強いアルファルファの組合せでは、窒素施肥の影響が小さかった。

マメ科牧草に集積された窒素量は、アルファルファではオーチャードグラス、チモシーとの混播とも20kg/10a前後であったが、2回刈りのチモシー混播は3回刈りのオーチャードグラス混播と比べて窒素集積量が少なかった。ラジノクロバの窒素集積量はオーチャードグラスとの混播で窒素施

肥を行った区を除き10～15kg/10aであった。イネ科牧草・マメ科牧草両者によって集積された窒素の合計量は、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地で最も大きく30kg以上に達した。なお、窒素無施用条件で、チモシー・ラジノクロバよりもオーチャードグラス・ラジノクロバ混播草地での窒素集積量が大いことには、両草地の経年数の違いも関与したと考えられ、これについては第3節. 4.で考察を行う。

表4-5 イネ科とマメ科牧草混播草地での窒素移譲量

草 種		窒素施肥量 (kg/10a・年)	土 壌 窒 素 供 給 量 (kg/10a・年)	窒素移譲量(kg/10a・年)	
イネ科	マメ科			NT1	NT2
OG	AL	0	1.9	6.1	7.2
OG	AL	6	1.9	2.4	6.5
OG	LC	0	0.7	10.2	10.5
OG	LC	6	0.7	3.3	4.4
TY	AL	0	2.8	2.2	3.9
TY	AL	6	2.8	-0.7	3.3
TY	LC	0	2.8	2.1	3.7
TY	LC	6	2.8	-0.4	3.4

OG：オーチャードグラス、TY：チモシー
AL：アルファルファ、LC：ラジノクロバ

考 察

(1) 窒素固定量

マメ科牧草と混播したイネ科牧草の窒素吸収量は窒素無施用区でも最小4.9kg、最大10.9kg/10aに達しており、このうちの相当部分がマメ科牧草の固定した窒素に由来すると考えられた(表4-4)。すなわち、イネ科牧草とマメ科牧草が集積した窒素の合計量から土壌および肥料に由来した窒素量を差し引いたものが、根粒による窒素固定量になる。土壌からの窒素供給量を推定する方法としては、ダイズの場合、根粒非着生形質を有する同質遺伝子系統が利用されている場合があるが⁸⁴⁾、本研究で用いたアルファルファ、ラジノクローバには適当な根粒非着生系統がない。一方、天北地方の重粘土壌草地では、透水性が不良な上に、常に牧草根が草地表面にはりめぐらされているため、窒素の流亡、揮散が極めて少なく、施肥窒素利用率は極めて高いことが報告されているので、イネ科牧草単播草地での窒素集積量から窒素施肥量を差し引いたものを土壌窒素供給量とした。土壌窒素供給量の算出にあたって、無窒素区での窒素集積量を用いなかったのは①無窒素区ではラジノクローバが侵入し、窒素固定をおこなう可能性を完全に排除できない、②無窒素区では根の生育が劣るため土壌窒素を十分に吸収できない可能性がある、などの理由のためである。

このようにして求めた合計窒素固定量は、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地で30kg/10aと、最も大きかった(表4-4)。これにチモシー・アルファルファ混播草地が続いた。

窒素無施肥条件での窒素固定量は、2回刈りであるチモシー混播草地よりオーチャードグラス混播草地のほうが、アルファルファ、ラジノクローバとの混播とも多かった(表4-4)。アルファルファの場合その理由は、チモシー混播草地が年2回刈り取り条件であり、各番草の生育期間が年3回刈り取りの場合よりも長いので、アルファルファが過繁茂となり、窒素固定にとって不利な条件である期間が長いためと考えられた。このためアルファルファの窒素固定を活用するためには2回刈りよりも3回刈りの方がより適切であると考えら

れる。ラジノクローバとの混播の場合は本実験で供試したチモシーとの混播草地とオーチャードグラスとの混播草地の経年数の違い(表4-1)がイネ科牧草への窒素移譲量に影響を及ぼす側面があるので第3節で詳細に検討を加える。

また、オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地では窒素の施用によって、窒素固定量が急激に低下することが特徴的であり、これが後に論じるように天北地方において常に一定割合のラジノクローバを維持することの困難さにつながっている。

(2) 窒素移譲量の推定法

次に窒素移譲量について考察する。マメ科牧草混播草地におけるイネ科牧草の窒素吸収量は土壌と肥料から供給され则认为される窒素量を超える場合が多かった(表4-4)。これは、畑作におけるマメ科作物は、1年を通じてみると、むしろ土壌窒素を収奪する方向にあることが報告されている^{29, 30, 85)}のと対照的である。この違いの原因としては、ダイズ等のマメ科作物は子実生産を目的としているので、作物体内に一度集積した窒素化合物を体外へ損失しにくく、子実へ効率的に転流させるような方向で育種が進められたことが考えられる。これに対して、牧草は常に栄養成長期にあり、かつ、ラジノクローバでは光に対するイネ科牧草およびラジノクローバ自身との競合によって、まだ老化していない状態の葉が脱葉するなど、栽培条件や生育状況も畑作物とは異なる。

窒素移譲量の測定には現在¹⁵Nを用いた方法が取り入れられている。これは、一定期間内にマメ科牧草によって固定された窒素のイネ科牧草への移譲を測定するためには有効であると言われている。しかし、永年草地では、前年度に固定された窒素が土壌を経由して、翌年イネ科牧草に吸収される量も多いと推定される。そこで、本研究では、従来の差引法に改良を加えて、窒素の移譲量を推定しようとした。単純に考えると、「イネ科牧草が吸収した窒素と土壌および肥料から供給される窒素の差」を窒素移譲量と見なすことができる。この関係は式①で表される。ここで、施肥窒素の

見かけの利用率が問題となる。本実験で施用した窒素施肥量は最大でも1回当たり4kg/10aであり、本実験を行った重粘土では透水性が小さいことに加えて、夏期の降水量が牧草による蒸散量を下回っているため、流亡による窒素の系外への流失は非常に少ないと考えられる⁶³⁾。そこで、見かけの利用率を100%として以後の計算を行った。

$$NT1 = NYg - (Nf + Ns) \cdots \cdots \textcircled{1}$$

NY1; 窒素移譲量

NYg; イネ科牧草の窒素吸収量

Nf; 肥料からの窒素供給量

Ns; 土壌からの窒素供給量

式①は土壌及び肥料から供給された窒素をイネ科牧草がすべて吸収することを前提としている。しかし、実際にはマメ科牧草も土壌窒素および施肥窒素を吸収する。そこで、化合態窒素の吸収量をそれぞれの草種の乾物量で按分したものが、NT2で表示した窒素移譲量である。計算式は式②に示した。

$$NT2 = NYg - (Nf - Ns) \times DMg / (DMg + DM1) \cdots \cdots \textcircled{2}$$

DMg; イネ科牧草の乾物収量

DM1; マメ科牧草の乾物収量

本実験で得られた結果から算出可能な窒素移譲量としては、これが最も実際の値に近いと考えられるので、以後この算出法を用いて論議を進める。

ここで得られた窒素移譲量の最大値は、オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地の10.5kg/10aであった(表4-5, NT2)。天北地方における草地の平均窒素施肥量は6~8kg/10a・年と言われており、マメ科牧草を利活用することによりこれに匹敵する窒素移譲量が得られることは明らかである。表4-5の例ではチモシー混播はオーチャードグラス混播とくらべて両マメ科牧草との組合せとも窒素移譲量が少なかった。この原因の1つとして、チモシーの混生割合がオーチャードグラスより低いことに加えて、チモシーの窒素含有率が一般にオーチャードグラスより低いこと、すなわち、窒素を移譲される側のイネ科牧草の窒素吸収力が小さいことがあげられる。つまり、窒素移譲量は窒素の供給者(窒素供給体)であるマメ科牧

草と窒素を供給される側(窒素受容体)であるイネ科牧草の比率や、イネ科牧草の窒素吸収力に左右されるといえる。たとえば、マメ科牧草割合が非常に少ない場合は当然窒素の供給量が少ないため移譲量も少なくなる。逆にマメ科混生割合が高すぎる場合には、窒素の供給量は多いがイネ科牧草の方で吸収しきれなくなり、これがマメ科牧草に吸収されることにより窒素固定が抑制されることも想定される。このことから、マメ科牧草の固定窒素を草地生産に効率的に結び付けるためには、各組合せによって固有の適切なマメ科牧草混生割合が存在することとなり、これを、明らかにすることが必要となろう。

農作物の低コスト生産は、世界的に重要な課題である。その手段の1つとして、遺伝子工学的な手法によって、イネ科作物に窒素固定遺伝子を導入することが試みられている。しかし、牧草生産においては、ここで示したようにマメ科牧草を維持することによって、根粒菌のかたちで草地生態系として窒素固定遺伝子を導入することができる。これは、草地の持つ利点の1つであり、その基本的な性質を理解し、利用することにより、より低コストな草地管理が可能となる。

第2節 マメ科牧草混播による土壌微生物の活性化

マメ科牧草と根粒菌の共生窒素固定系によって固定された窒素の一部は土壌に還元され、イネ科牧草に吸収され、移譲窒素として回収される。窒素移譲源としては、生育途中の脱葉、越冬中に枯死した葉、根からの分泌物等が考えられるが、いずれにしても微生物の作用によって無機化され、イネ科牧草に受け渡されることになる。この際、窒素化合物の供給を受けて、微生物の数と活性にも変化が起こる可能性がある。ここでは、マメ科牧草の混生による土壌微生物特性の変化について検討を加えた。

実験方法

1985年に表4-6に示したオーチャードグラス・

表4-6 供試草地の造成条件と管理法

草 種		造成年	供試品種（播種量kg/10a）		施肥量(kg/10a・年)		
イネ科	マメ科		イネ科	マメ科	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
O G	なし	1982	ヘイキング	—	18	10	15
O G	A L	1982	ヘイキング	ソア	0	10	15
T Y	なし	1982	セ ン ポ ク	—	10	10	15
T Y	A L	1982	セ ン ポ ク	ソア	10	10	15
T Y	なし	1981	セ ン ポ ク	—	10	10	15
T Y	A L	1981	セ ン ポ ク	カリフォルニアラジノ	10	10	15

OG:オーチャードグラス、TY:チモシー、AL:アルファルファ、LC:ラジノクローバ

アルファルファ、チモシー・アルファルファ、チモシー・ラジノクローバ混播草地での、0—2 cm 土層の窒素無機化量、微生物数を測定した。有機物の量は下記のように測定した。草地表面の土壌を厚さ 5 cm、縦横25cmに切り取り、容器に入れた約10リットルの水に浸けて攪拌し、浮いてきた有機物を集めて乾燥・計量した。1984年晩秋には、各草地の越冬前の乾物および窒素集積量を調査した。

また、チモシー・ラジノクローバ混播草地（表4-6）の全細菌数と窒素無機化量を1983年に11回にわたって測定した。

結 果

(1) マメ科牧草混播草地の窒素無機化量と微生物数の特徴

各草地の造成後3～4年目にあたる1985年度の微生物数等の測定結果を示した（表4-7）。5月9日には、チモシー単播草地に比べ、アルファルファまたはラジノクローバと混播した草地では、窒素無機化量、全細菌数、グラム陰性菌数、および糸状菌数はいずれも著しく高かった。これに対し、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地では、微生物数はオーチャードグラス単播草地より高まったものの、窒素無機化量はオーチャード

グラス単播草地とほとんど変わらなかった。7月下旬の測定結果も5月とほぼ同じ傾向であった。ただし、チモシーとマメ科牧草の混播草地と単播草地の差は全般に5月と比べ縮小した。

9月下旬では、チモシー・ラジノクローバ混播草地では、5月とほぼ同様の傾向であったが、チモシー・アルファルファ混播草地とチモシー単播草地との差は小さくなった。オーチャードグラス・アルファルファ混播草地ではグラム陰性菌数がオーチャードグラス単播草地より高かったものの、他の微生物特性には差が認められなかった。

また、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地、チモシー・ラジノクローバ混播草地の地表面に集積した枯死茎葉の量はそれぞれ対応する単播草地よりも少なかった。

(2) イネ科牧草単播草地とイネ・マメ混播草地における越冬前の窒素集積量

草地土壌にマメ科牧草の枯死茎葉が、最も多量に還元されるのは、越冬時である。この時期に還元された枯死茎葉は翌年の微生物数をはじめとする微生物特性に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、微生物特性を測定した年の前年の各種草地における越冬直前の地上部窒素集積量を表示した（表4-8）。オーチャードグラス・アルファル

表4-7 マメ科牧草の混播が微生物数と窒素無機化量におよぼす影響

調査 月日	草 種		全細菌数 ($10^6/g \pm$)	グ ラ ム 陰 性 菌 数 ($10^6/g \pm$)	糸 状 菌 数 ($10^4/g \pm$)	窒 素 無 機 化 量 ($mg/100g \pm$)	表層有機物 蓄 積 量 ($kg/10a$)
5 月 9 日	OG	なし	37.4	1.3	12.1	8.1	—
	OG	AL	49.2	2.3	14.0	7.8	—
	TY	なし	54.6	2.3	6.7	7.4	—
	TY	AL	81.3	7.4	14.0	15.7	—
	TY	なし	39.2	2.2	5.9	6.1	—
	TY	LC	98.5	6.1	21.7	19.1	—
7 月 26 日	OG	なし	33.5	0.3	18.3	8.5	—
	OG	AL	32.8	3.4	16.4	9.8	—
	TY	なし	15.5	0.2	11.4	4.1	—
	TY	AL	27.8	1.4	18.5	10.4	—
	TY	なし	20.5	1.1	12.2	9.6	—
	TY	LC	25.0	1.9	19.1	13.0	—
9 月 27 日	OG	—	31.6	3.2	24.4	8.3	126
	OG	AL	27.9	4.5	16.1	7.1	60
	TY	—	25.3	2.1	13.0	5.3	118
	TY	AL	27.0	3.3	17.4	5.8	35
	TY	—	29.0	2.4	18.2	6.4	120
	TY	LC	64.9	8.5	22.6	11.9	88

OG:オーチャードグラス、TY:チモシー、AL:アルファルファ、LC:ラジノクロバ
1985年測定

表4-8 越冬直前の地上部窒素集積量 (1984年11月9日測定)

草 種	最 終 番 草 刈り取り日	乾物($kg/10a$)*			窒素集積量($kg/10a$)		
		イネ科	マメ科	計	イネ科	マメ科	計
OG 単 播	10月19日	34	—	34	1.0	—	1.0
OG・AL		4	T	4	0.2	T	0.2
TY 単 播	8月30日	63	—	63	1.4	—	1.4
TY・AL		27	60	87	0.7	3.8	4.5
TY 単 播	8月30日	26	—	26	0.5	—	0.5
TY・LC		68	119	187	1.6	8.8	10.4

OG:オーチャードグラス、TY:チモシー、AL:アルファルファ、LC:ラジノクロバ

*:株部を除いた越冬中に枯れ死すると考えられる葉部のみの集積量

T:0.1 $kg/10a$ 以下

ファ混播草地は最終刈り取りを9月下旬から10月中旬日に行くとアルファルファの冬損が激しくなる¹⁵⁷⁾ので10月下旬に刈り取りを行った。それ以降は、日平均気温が牧草にとっての有効気温である5℃以下に低下する時期であるため、刈り取られたアルファルファの再生は、ほとんどなかった。これに対し、チモシー・アルファルファ混播草地の刈り取りは8月30日であり、その後、越冬までのアルファルファの窒素集積量は約4 kg/10aであった。同時期に刈り取られたチモシー・ラジノクローバ混播草地のラジノクローバは低温伸長性が良好であるため、越冬前の窒素集積量はチモシー・アルファルファ混播草地におけるアルファルファの2倍以上に当たる8.8 kg/10aに達した。これらの一部は越冬時に株部に転流するが、大部分は落葉して土壤に還元され、翌年の土壤微生物の生育や土壤窒素無機化量などに影響を与えと考えられる。

(3) チモシー・ラジノクローバ混播草地における窒素無機化量、全細菌数の季節変化

前項の実験においてマメ科牧草混播の影響が最も大きく現れたチモシー・ラジノクローバ混播草地における、窒素無機化量と微生物特性の季節変化を図4-4に示した。チモシー単播草地における、全細菌数は、第3章で示したオーチャードグラス単播草地(図3-2)とほぼ同様に、春と秋に極大値を示す季節変化を辿った。チモシー・ラジノクローバ混播草地の全細菌数は、秋のピーク時には、チモシー単播草地より高かったが、初春・夏・晩秋の低下した時期には、ほぼ同等の値であった。また、チモシー・ラジノクローバ混播草地では、夏期に全細菌数が抑制される期間が、チモシー単播草地より短く、秋にかけての全細菌数の回復が早くから始まることも特徴の一つであった。

窒素無機化量も全細菌数と類似して、春と秋あるいは晩夏にピークを有する季節変化のパターンで推移した。チモシー単播草地の窒素無機化量は、5月に一旦高まって最大値を示し、その後低下して6月中に最低となり、7月以降に増加に転じて9月に2回目のピークを示し、晩秋には再び低下

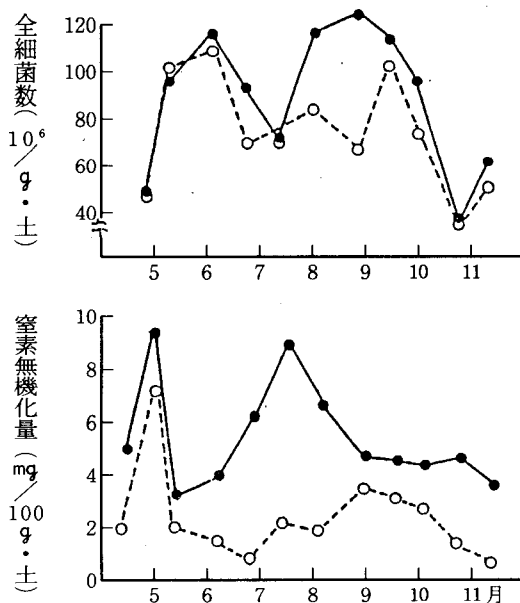


図4-4 チモシー・ラジノクローバ混播草地とチモシー単播草地における全細菌数と窒素集積量の季節変化(1983年)

●, チモシー・ラジノクローバ混播草地;
○, チモシー単播草地

した。但し、2回目のピークは5月より低かった。これに対し、チモシー・ラジノクローバ混播草地における5月始めのピークは単播草地以上に高く、その後の低下も長く続かず、6月中に増加に転じて7月中に5月に匹敵するレベルにまで高まった。また、窒素無機化量は全期間を通じて混播草地で単播草地より高かった。

考 察

(1) マメ科牧草の混播が窒素無機化量におよぼす影響

マメ科牧草からイネ科牧草に対する窒素の移譲は土壌を介して行われるので、マメ科牧草の混生する草地では、マメ科牧草由来の移譲窒素の前駆物質が存在するはずである。その物質は微生物によって分解されて無機態窒素になりイネ科牧草に

吸収されることになる。ここでは、それを土壌の窒素無機化量として捉えることを試みた。チモシー・ラジノクローバ混播草地ではチモシー単播草地に比べて、窒素無機化量の明らかな増加が認められた(表4-7, 図4-4)。この原因としては、越冬時に大量のラジノクローバの枯死茎葉が土壌に供給されることがあげられる。これに対し、刈り取りが遅いために越冬時の地上部生育がほとんどなかったオーチャードグラス・アルファルファ混播草地では、窒素無機化量の増加は認められなかった。

チモシー・ラジノクローバ混播草地における窒素無機化量には春先の5月始めに1回目のピークがあり(図4-4)、これは前述した越冬時における牧草枯死茎葉の還元を反映したと考えられる。その後、5月下旬に一度低下し、7月から8月にかけて、幅の広いピークが現れた。このピークは生育途中におけるラジノクローバ枯死茎葉の還元に対応すると考えられる。このピークの面積は1回目のピークより大きいことから、この時期に土壌に還元されるラジノクローバの枯死茎葉の量は越冬時を凌ぐと推定される。

チモシー・アルファルファ混播草地でも春先5月には、窒素無機化量の増加が観察された(表4-7)。これも越冬時に還元された枯死茎葉に由来すると考えられた。しかし、9月には、単播と混播の差が縮小した。また、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地では全期間を通じて窒素無機化量に対するマメ科牧草混生の影響が小さく、アルファルファでは、窒素無機化量として捉えられるような生育途中の枯死茎葉の還元量が極めて少ないと推定された。このことは生育中の観察結果とも一致する。

(2) マメ科牧草の混生が微生物数に及ぼす影響

全細菌数は、マメ科牧草の混生によって増加し、その程度はアルファルファよりラジノクローバで大きかった。ラジノクローバの茎葉は構造性画分の含量が少なく蛋白含有率が高いため、家畜にとってイネ科牧草より栄養価が高いことが報告された¹²¹⁾。したがって、ラジノクローバ茎葉は微生物

にとっても良好な基質であるため、これが供給された草地では微生物数が大幅に増加した(表4-7, 図4-4)と推定される。一方、枯死茎葉の土壌への還元量が少ないと推定されるオーチャードグラス・アルファルファ混播草地でも、5月の測定時にはオーチャードグラス単播草地に比べて明らかに微生物数が増加した(表4-7)。この原因の1つとして、アルファルファの根から低分子の窒素化合物が分泌されていることがあげられる¹⁶⁹⁾。吉田ら¹⁹³⁾も、アルファルファとアカクローバの根圏で有機態窒素要求性の細菌数が増加することを認めた。分泌される物質が低分子化合物であれば微生物によって直ちに分解され、無機化した窒素はイネ科牧草に吸収されるので、窒素無機化量としてはほとんど検出されないが、分解の過程で微生物数が増加し、それが測定によって捉えられたと理解される。

また、マメ科牧草混播草地ではグラム陰性菌数が特に増加した(表4-7)。マメ科牧草と共生する根粒菌はグラム陰性菌であり、マメ科牧草の根圏では、イネ科牧草と比べてグラム陰性菌が増殖しやすい条件がある可能性がある。

このように、マメ科牧草が混生することによって、いわば励起状態に置かれた土壌微生物は、単にマメ科牧草の枯死茎葉を分解するに留まらず、より難分解性のイネ科牧草の枯死茎葉をはじめとして、草地表層蓄積有機物や土壌有機物等の分解も行うことが期待される。草地においては、微生物活性の低下とそれに伴う土壌表層での有機物の蓄積¹⁰⁵⁾が問題となっているが、マメ科牧草の混播草地では表層蓄積有機物量がイネ科牧草単播草地に比べて少なかったことから(表4-7)、マメ科牧草の導入により活性化された微生物がこの状態を改善しうる事が示唆される。すなわち、林産廃棄物の様な難分解性有機質資材の堆肥化においては、易分解性の鶏ふん等を加えて微生物の分解活性を高め、難分解性有機物の分解を促進させようとするが、同様のことがマメ科牧草を導入した草地でも期待できる。また、チモシー・ラジノクローバ混播草地では、チモシー単播に比べて1番草刈り取り枯死茎葉に由来すると思われる全細

菌数の2回目のピーク出現が早まった(図4-4)。これも、マメ科牧草による微生物の活性化に起因すると考えられる。

根粒菌による窒素固定は、牧草と土壤微生物によって構成される草地生態系への窒素供給量を増すばかりでなく、微生物の活性化によって枯死茎葉等の有機物分解と無機化を促進し、物質循環を円滑化するといえる。

第3節 窒素移譲量に及ぼすマメ科牧草混生比と窒素施肥の影響

イネ科牧草とマメ科牧草の混播草地における窒素移譲量の多寡は、組み合わされた草種の特性の他に、窒素供給体としてのマメ科牧草と窒素受容体としてのイネ科牧草の比率によって決定される。現在まで、混播草地におけるイネ科牧草とマメ科牧草の割合は主に飼料としての栄養価や飼料調整上の難易の面から検討が加えられてきたが、窒素移譲やそれを含めた窒素集積量の面からの検討は比較的少ない。本節では、マメ科牧草と根粒菌による共生窒素固定系の能力を草地における牧草生産のために最大限活用する視点から、天北地方の主草種であるオーチャードグラス、チモシーとアルファルファ、ラジノクローバの組合せにおいて、イネ科牧草とマメ科牧草の混生比が窒素移譲量に及ぼす影響を検討した。

1. オーチャードグラス・アルファルファ混播草地における窒素移譲

天北地方は、同じ草地型酪農地帯である根釧地方とは異なり越冬時に土壤凍結がないので、アルファルファの断根による障害がない。また、アルファルファは深根性であるため、表層土壤が酸性化した場合に悪影響を受ける程度が小さい⁶⁸⁾。このため、天北地方ではアルファルファをより永続的に維持できる可能性がある。さらに、アルファルファは根が深く、そのため干ばつ条件でも収量性が高いばかりでなく直立形で光競合にも優れているため、天北地方の採草地で極めて安定なイネ

科牧草であるオーチャードグラスの随伴草種となり得る可能性がある。したがって、これまでにオーチャードグラス・アルファルファ混播草地の維持のための窒素施肥法や刈り取り時期の検討がなされた^{157, 180)}。そこで本項では、混生比の異なるオーチャードグラス・アルファルファ混播草地における窒素集積量ならびに窒素移譲からみた両草種混播草地の特性とそれらに及ぼす窒素施肥や土壤条件の影響について検討を加える。

実験方法

(1) 混生比の異なるオーチャードグラス・アルファルファ混播草地における窒素移譲量

1983年にオーチャードグラスとアルファルファの播種割合をかねて混生比の異なる草地を造成した。オーチャードグラスとアルファルファの播種割合はそれぞれ1.0と0kg/10a、1.0と2.0kg/10a、0.2と2.0kg/10a、0.1と2.0kg/10aの4段階とした。1984年にはこれらの草地に対して無窒素および6kg/10a・年の2段階の窒素施用処理をほどこした。その結果として、1985年にはさらに多様な混生比のオーチャードグラス・アルファルファ混播草地が得られた。1985年に、混生比の異なるオーチャードグラス・アルファルファ混播草地に対し、さらに無窒素、窒素6kg/10a・年施用区を設けた。次項の(2)を含め、リン酸、カリの施用量は年間それぞれ10、15kg/10aとし、窒素を含め均等に3分割した量を早春、1番草刈り取り後、2番草刈り取り後の3回に分けて施用した。刈り取り時期は表4-2に準じ、牧草の乾物量と窒素含有率から、窒素固定量および窒素移譲量を第4章・第1節・2.に準じて算出した。

なお、混生比の表現方法としては、基底部被度、播種量や株数を用いる場合もあるが、本研究ではイネ科牧草とマメ科牧草の年間の乾物収量比を「混生比」とした。また、「混生量」は特に断わらない限り年間の乾物収量とした。

(2) オーチャードグラス・アルファルファ混播草地の収量ならびに窒素集積量の経年推移とこれらに対する地下水位の影響

A草地；1982年にオーチャードグラスとアルファルファの混播区と単播区を造成し、1983年以降それぞれに0, 6, 9kg/10aの3段階と9, 18kg/10aの2段階の窒素施肥を行い、収量と窒素集積量の調査を行った。オーチャードグラス・アルファルファ混播区の播種量はそれぞれ0.7, 2.0kg/10a、オーチャードグラス単播区の播種量は2.0kg/10aとした。

B草地；1983年に隣接する地下水位の異なる圃場にオーチャードグラスとアルファルファをそれぞれ1.0および2.0kg/10a播種して混播草地を造成し、翌年は窒素を施用しなかった。1985年度に0および6kg/10aの2段階の窒素施用を行って、収量と窒素集積量を調査した。また、造成時にオーチャードグラス単播区も併設し、造成の翌年から窒素18kg/10a・年を施用した。

1984年秋にA, B両草地に塩化ビニール製の測水管を約135cmの深さに埋設し、1985年に地下水

位を測定した。

結 果

(1) 混生比の異なるオーチャードグラス・アルファルファ混播草地における窒素移譲量

アルファルファ混播草地のイネ科牧草は単播草地のイネ科牧草と比べて通常葉色が濃い。このことは、アルファルファからの窒素移譲によって、イネ科牧草の窒素含有率が上昇したことを示す可能性がある。これを実証するために、オーチャードグラスの窒素含有率とアルファルファ混生量の関係を示した(図4-5)。オーチャードグラスの窒素含有率は各番草とも混生するアルファルファの乾物収量の増加に伴って上昇し、アルファルファからの窒素移譲が極めて短い時間内にオーチャードグラスの窒素濃度に反映することが示唆された。アルファルファの混生量が低い場合には窒素施肥によってオーチャードグラスの窒素含有率が高まる傾向であったが、アルファルファの収量が高い

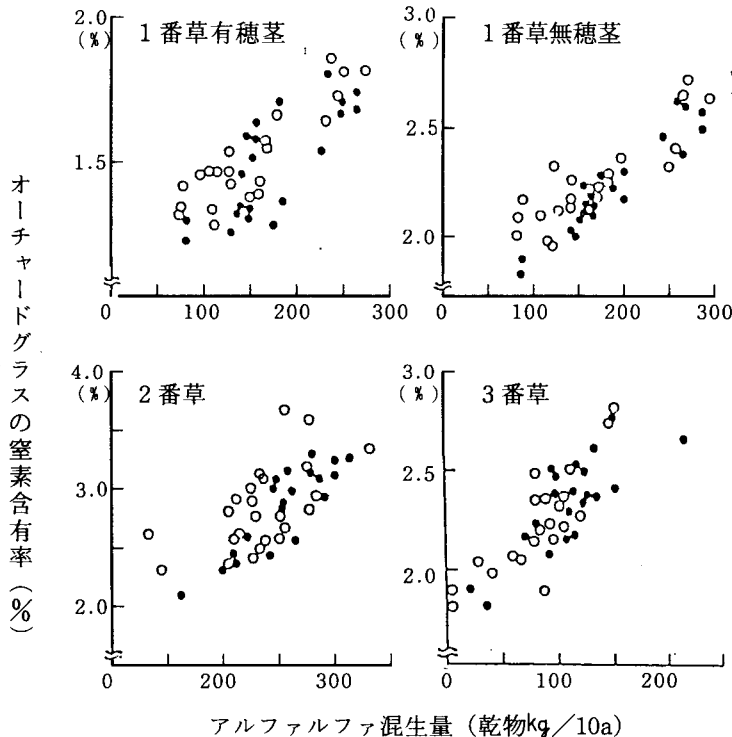


図4-5 オーチャードグラス・アルファルファ混播草地におけるアルファルファ混生量とオーチャードグラスの窒素含有率の関係

●, 無窒素; ○, 窒素6kg/10a施用

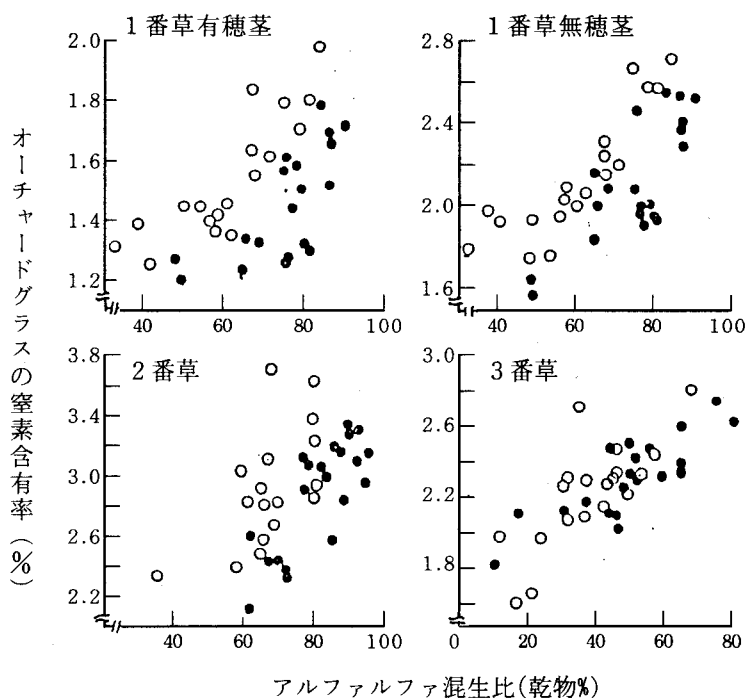


図4-6 オーチャードグラス・アルファルファ混播草地におけるアルファルファ混生比とオーチャードグラスの窒素含有率の関係

●, 無窒素; ○, 窒素6kg/10a施用

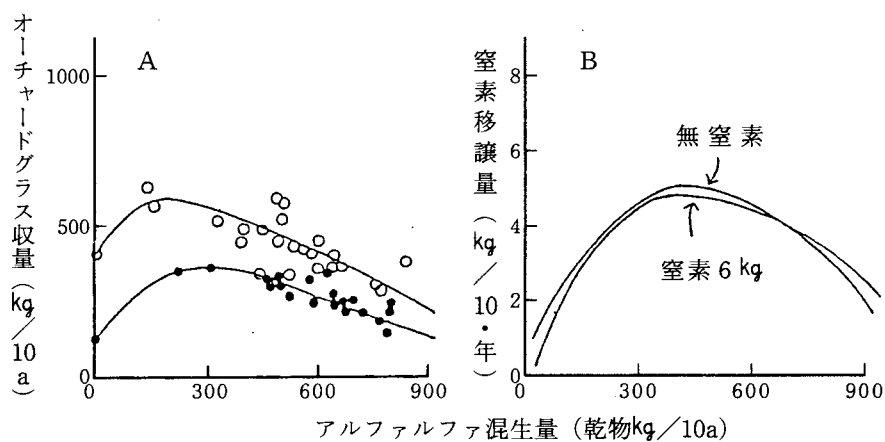


図4-7 オーチャードグラス・アルファルファ混播草地におけるアルファルファ混生量とオーチャードグラスの収量および窒素移譲量の関係

●, 無窒素; ○, 窒素施用量6kg/10a/年

レベルでは、窒素施用区と無施用区の差は不明瞭になり、この領域では特に無窒素区でオーチャードグラスの窒素含有率がアルファルファからの移譲窒素によって支配されると理解できる。横軸としてアルファルファの混生比を用いた場合も、混生量を用いた場合とほぼ同じ傾向が得られた（図4-6）。

図4-7にはアルファルファの混生量とオーチャードグラスの乾物収量(A)および窒素移譲量(B)との関係を示した。オーチャードグラスの乾物収量はオーチャードグラス単播区では、窒素無施用・施用条件でそれぞれ約100kgおよび400kg/10aであった。アルファルファの混生量が200~300kgまでは、窒素移譲量が増加するためアルファルファの混生量の増加にともなってオーチャードグラスの収量も増加した。しかし、200~300kgを境にして、光に対する競合の激化からアルファルファ混生量の増加に伴ってオーチャードグラス収量は減少した。また、同一アルファルファ混生量では窒素を施用した区でオーチャードグラス収量が高かったが、その差はアルファルファの混生量が低い場合に大きく、アルファルファの混生量が高くなるにともなって縮小した。このことは、窒素含有率と同様にアルファルファ混生量が大きい条件では、オーチャードグラス収量は窒素施肥量よりもアルファルファからの移譲窒素量によって支配される程度が大きいことを示している。

オーチャードグラスの窒素吸収量をもとに窒素移譲量を算出した（図4-7B）。これによると、窒素施用区と無施用区間の窒素移譲量の差は総じて小さく、窒素移譲量は窒素施肥量が0~6kg/10aの範囲であれば、主に混生するアルファルファの生育量によって支配されることが理解される。また、窒素移譲量は窒素施用区・無施用区ともにアルファルファの混生量が約400kg/10aである場合に最大値に達し、その量は約5kg/10a・年であった。すなわち、窒素移譲からみた最適アルファルファ混生量はほぼ400kg/10aであり、アルファルファ混生比に換算すると窒素施用区で約45%、窒素無施用区では約55%であった。アルファルファ混生量がこれ以下になると窒素供給体の不足から窒素

移譲量は低下し、アルファルファ混生量が200kg/10a以下になると、窒素不足のためにオーチャードグラス収量の低下が著しくなることが伺えた。逆にアルファルファ混生量が400kg以上になると、光に対する競合の激化によって窒素受容体の生育が劣るために窒素移譲量は低下した。窒素移譲量が最大となるときのアルファルファ混生量は、オーチャードグラス収量が最大となるアルファルファ混生量よりも多かった。このことはアルファルファ混生量が200から400kg/10aまではオーチャードグラス収量の減少分を相殺するほどのオーチャードグラスの窒素含有率の向上が起こったことを示す。

(2) オーチャードグラス・アルファルファ混播草地の収量ならびに窒素集積量の経年推移とこれらに対する地下水位の影響

B草地では、地下水位は融雪直後には10cm以上であったが、5月以降8月まで下がり続けた。地下水位は8月から9月にかけては比較的一定水準で推移し、10月になるとゆるやかな上昇傾向に転じた（図4-8）。高低の地下水位区の差は融雪直後には認められなかったが、5月以降7月までは約30cmの差が存在した。8月から9月にかけての水位は、高水位区で約65cm、低水位区で85cmであり、両区の差は約20cmであった。B草地に対してA草地の水位は低く、融雪直後から100cm以下であり、5月中旬以降に135cm以下となり測定不能となった。10月には一時期120cmまで上昇したが、その後再び135cm以下となった。

地下水位の低いA草地におけるオーチャードグラス・アルファルファ混播草地のアルファルファ混生比は造成2年目では無窒素区で59%、窒素6kg/10a施用区で51%であったが、4年目ではそれぞれ92%、82%に上昇した（表4-9）。アルファルファ混生比は窒素9kg/10a施用区においても2年目から3年目にかけて41%から61%まで上昇し、排水性のよい土壌条件では少なくとも窒素6kg/10a・年の施用によってアルファルファが経年的に衰退する傾向は認められなかった。

A草地のアルファルファ混生量は最低でも600kg/10aと多かったのも、オーチャードグラス、ア

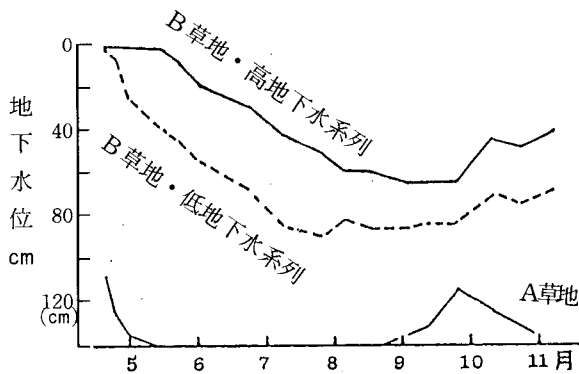


図4-8 オーチャードグラス・アルファルファ草地における地下水位の季節変化

ルファルファ合計収量と窒素集積量の窒素施肥反応は極めて小さく、逆に窒素施肥によって合計乾物収量が低下する場合も認められた(表4-9, 1985年)。これは、排水が良くアルファルファ混生割合の高い条件ではアルファルファの窒素固定が極めて旺盛に行われるためであると思われる。さらに、窒素無施用条件でもオーチャードグラスとアルファルファの合計乾物収量は18kg/10a・年の窒素施肥を行ったオーチャードグラス単播草地と同等であり、窒素集積量はオーチャードグラス単播草地を約10kg/10a上回り、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地の高収性が示された。

表4-9 オーチャードグラス(OG)・アルファルファ(AL)混播草地とオーチャードグラス単播草地における窒素集積量、窒素固定量および窒素移譲量の窒素反応性とそれらの経年推移(A草地)

年 度	供 試 草 地	窒 素 施 肥 量 (kg/10a)	乾物収量(kg/10a)			AL 率 (%)	窒素集積量(kg/10a)			窒 素 固 定 量 (kg/10a)	窒 素 移 譲 量 (kg/10a)
			OG	AL	計		OG	AL	計		
1983 (2年目)	OG単播	9	746	0	746	0	12.8	0	12.8	—	—
	草地	18	1065	0	1065	0	19.9	0	19.9	—	—
	混播草地	0	415	600	1015	59	8.0	24.1	32.1	30.2	7.2
		6	523	552	1075	51	10.3	21.8	32.1	24.2	6.5
		9	657	459	1116	41	13.7	18.5	32.2	19.4	7.0
1984 (3年目)	OG単播	9	593	0	593	0	9.8	0	9.8	—	—
	草地	18	911	0	911	0	16.2	0	16.2	—	—
	混播草地	0	176	662	838	79	4.7	23.8	28.5	27.7	4.7
		6	315	624	938	67	8.2	22.2	30.4	23.6	6.2
		9	348	542	891	61	8.3	18.6	26.9	17.1	4.8
1985 (4年目)	OG単播	9	671	0	671	0	11.8	0	11.8	—	—
	草地	18	928	0	928	0	19.3	0	19.3	—	—
	混播草地	0	91	992	1084	92	2.5	38.3	40.8	38.0	2.4
		6	187	861	1048	82	4.8	33.4	38.2	29.4	3.5
	OG単播	9	670	0	670	0	11.5	0	11.5	—	—
3年間の 平均値	草地	18	968	0	968	0	18.5	0	18.5	—	—
	混播草地	0	227	751	979	77	5.1	28.7	33.8	32.7	4.8
		18	342	679	1020	67	7.9	25.8	33.7	26.6	5.5

1982年造成草地

表4-10 地下水位が異なるオーチャードグラス(OG)・アルファルファ(AL)混播草地における窒素集積量、窒素固定量の窒素施肥反応 (B草地)

収獲 年度	供試 草地	地下 水位	窒 素 施 肥 量 (kg/10a)	乾物収量(kg/10a・年)			A L 率 (%)	窒素集積量(kg/10a・年)		
				OG	AL	計		OG	AL	計
1985	混播草地	低	0	179	748	927	81	5.2	26.8	32.0
			6	352	640	992	65	10.2	25.1	35.3
	混播草地	高	0	313	336	649	52	7.1	13.0	20.1
			6	537	211	748	28	11.5	8.3	19.8
1985	単播草地		18	1004	0	1004	0	19.9	0	19.9

1983年度造成草地

A草地より排水性が劣るB草地におけるアルファルファ混生量は、地下水位が比較的低い系列ではA草地に遜色がなかったが、地下水位が高い系列では無窒素区でも300kg/10a近くまで低下し、オーチャードグラスとアルファルファの合計収量は700kg/10aに満たなかった(表4-10)。地下水位の高い系列に窒素を施用することにより、オーチャードグラス収量は増加したが、これに抑制されてアルファルファの混生量はさらに低下し、窒素固定量も10kg/10a近くまで低下した。この結果から排水性の劣る圃場でのアルファルファの窒素固定力は低く、オーチャードグラスとの混播条件では窒素施肥を行うことによってアルファルファ混生量は激しく低下することが明らかになった。

考 察

(1) 窒素移譲の経路

図4-7に示した実験の結果では最大4kg/10aの窒素がアルファルファからオーチャードグラスに移譲された。窒素移譲の機作としては、①マメ科牧草の枯死茎葉の土壌への還元によるもの、②死根および死滅した根粒によるもの、③根からの低分子窒素化合物の分泌によるもの、等が考えられる。アルファルファの場合、後に論じるラジノクロバと異なりイネ科牧草との光競合においてそれほど不利ではないため、生育中の光競合による茎葉の枯死量は多くない。また、最終刈り取りが10月20日前後であるため、その後のアルファル

ファの生育量が少なく(表4-8)、越冬による枯死も少ないので①の経路による窒素移譲は多くないと判断できる。また、根箱での観察結果では、生育中の根粒の脱落もほとんど認められず、越冬中を除けば②もさほど寄与しないと推定されるので、残された③が最も有力な窒素移譲経路と考えられる。ここでは、これを裏づける具体的な実験は行わなかったが、③は窒素源が低分子の窒素化合物として根から分泌されるために最もlag-timeの短い窒素移譲経路であり、これはオーチャードグラスの窒素含有率が直接その時点のアルファルファ混生量と直線関係にあったことと一致する(図4-5)。また、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地で、窒素無機化量の増加は認められないものの、微生物数が増加した(表4-7)ことも、アルファルファからの窒素移譲が、土壌の化学分析による窒素無機化量として捉えられないようなturn-overの速い物質によって媒介されていることを示唆する。Simpson¹⁵⁸⁾も土壌に対する牧草茎葉部の還元をすべて排除したポット条件での実験結果から、アルファルファの窒素移譲が根からの分泌物で行われると推定した。

(2) オーチャードグラスの混播がアルファルファの窒素固定に及ぼす影響

次に、アルファルファの根粒の窒素固定に対するオーチャードグラス混播の影響について検討を加える。Joら⁸⁰⁾は、ポットを用いた実験によってイ

ネ科・マメ科牧草混播草地のイネ科牧草は、マメ科牧草の窒素固定に対して光競合を通じて抑制的に働くことと、土壌窒素を吸収して根粒を活性化することによって促進的に働く面の両面性があることを報告した。そこで、図4-7から、アルファルファの窒素固定能の1つの指標として単位アルファルファ乾物重当りの窒素固定量を算出し、オーチャードグラスの混生比との関係を求めた。アルファルファ乾物量当りの窒素固定量は以下に示す式によって算出した。

(単位アルファルファ当りの窒素固定量) = $\{ (\text{アルファルファの窒素吸収量}) + (\text{オーチャードグラスの窒素吸収量}) - (\text{施肥窒素量} + \text{土壌から供給された窒素吸収量}) \} / (\text{アルファルファの乾物収量})$

単位アルファルファ乾物重当りの窒素固定量は窒素施用区・無施用区ともにオーチャードグラス混生比の上昇にともなって増加した(図4-9)。この結果は、オーチャードグラスの混生比が高い場合には、アルファルファの根から分泌される窒素化合物由来の無機態窒素が活発にオーチャードグラスによって吸収されるため、アルファルファ

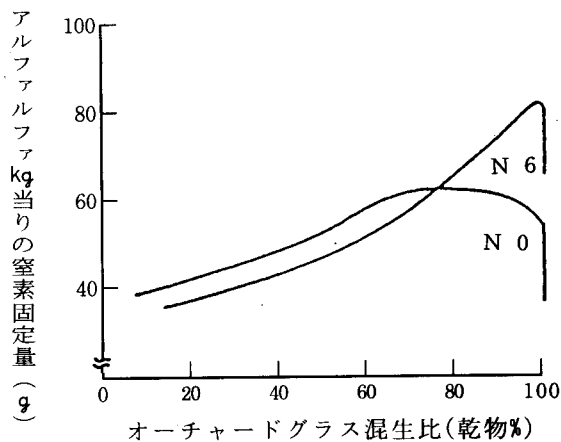


図4-9 オーチャードグラス・アルファルファ混播草地におけるオーチャードグラス混生比が単位アルファルファ乾物重当りの窒素固定量に及ぼす影響

N 0 ; 年間窒素施用量 0kg/10a

N 6 ; 年間窒素施用量 6kg/10a

根粒による窒素固定が活発に行われたことを示す。これに対し、オーチャードグラスの混生比が低い場合には、アルファルファから分泌された窒素化合物由来の無機態窒素がオーチャードグラスに充分吸収されない結果、アルファルファ自身がそれを再吸収するために窒素固定力が低下したとの理解が可能である。単位アルファルファ乾物重当りの窒素固定量はオーチャードグラス混生比が低い場合は無窒素区で窒素施用区より高かったが、オーチャードグラス混生比約80%を境にして窒素施用区の方が高くなったが、この原因は不明であった。この結果から、アルファルファにオーチャードグラスが混播される意義として、飼料調整のし易さ等に加えて、アルファルファの根から分泌される窒素をオーチャードグラスが吸収することによって根粒の窒素固定能が高まることもあげることができる。

(3) オーチャードグラス・アルファルファ混播草地に対する窒素施肥の必要性

アルファルファ混生量が小さいオーチャードグラス・アルファルファ混播草地の収量は、混生量が多い草地に比べてアルファルファ根粒による窒素固定量が充分でないため低下した(図4-7)。このような場合にアルファルファからの窒素移譲量を補う目的でオーチャードグラス・アルファルファ混播草地に窒素施肥を行うことの必要性について検討を加えた。

ここでは、アルファルファによる窒素固定を草地生産のために生かす立場から窒素施肥量を6kg/10aと比較的低く設定した。図4-7Aの結果をもとに、アルファルファ混生量とオーチャードグラス収量ならびにオーチャードグラス・アルファルファ合計収量の関係を図示した(図4-10)。アルファルファ混生量が窒素の施用によって低下しないと仮定して、無窒素と窒素6kg/10a施用条件でのオーチャードグラス収量の差はアルファルファ混生量が0~150kg/10aまでは約260kg/10aであったが、アルファルファ混生量が300kg/10aでは200kg/10aとなり、同600kg/10aでは130kg/10aまで低下した。実際には混播草地に窒素を施用した場合

にはアルファルファ混生量が低下するので、アルファルファ収量を一定としたときの、無窒素区と窒素施用区の収量差から、アルファルファ収量の減少分を差し引いたものが窒素を施用した時の増収量となる。窒素を施用した場合のアルファルファ混生量の低下は、アルファルファに好適な条件では小さく(表4-9、1984年)、地下水位の高い草地では大きかった(表4-10)ので図中にそれぞれアルファルファ減少量をA、Bの矢印で示した。表4-9の例では窒素6kg/10aを施用することによってアルファルファ混生量は3年間の平均で73kg/10a減少した。これを差し引けばアルファルファ混生量が300kg/10aの場合には約130kg/10aの増収が得られることになる。アルファルファ混生量が600kg/10aの場合には混播草地の牧草収量に対する窒素施用の効果は同300kgの場合に比べて半減する。仮に100kg/10a以上の増収を目標とすれば、400kg/10a以上のアルファルファ混生量の草地に対して窒素施肥を行っても、増収量はこの目標に達せず、効率的でないといえる。表4-9の例では、無窒素

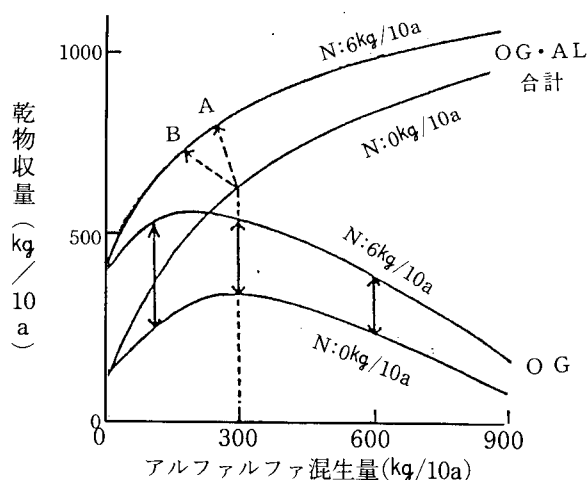


図4-10 オーチャードグラス(OG)・アルファルファ(AL)混播草地における窒素施用量と乾物収量の関係の模式図
A：地下水位が低い圃場での窒素施肥によるALの減少
B：地下水位が高い圃場での窒素施肥によるALの減少

区のアルファルファ混生量が600kg/10a以上であり、この条件では牧草による合計窒素集積量の3年間の平均値が窒素施肥によって増加しておらず、窒素の施肥が非効率的であることが示される。したがって、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地に対する施肥はアルファルファ混生量が300~400kg/10a以下の草地に対して行うべきである。

一方、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地への窒素施肥はオーチャードグラスの生育を促進するために、アルファルファを衰退させる危険性をはらんでいる。本実験で用いた地下水位が低いA草地では窒素6kg/10aの施用によってアルファルファが経年的に衰退する傾向はなかったが、B草地の地下水位が高い系列では造成3年目でもアルファルファの生育量が少なく、それに窒素施肥を行うことによってアルファルファの混生量は著しく低下した。アルファルファは排水不良土壌で生育や持続性が劣ることが報告されている⁴⁹⁾。このため、年間6kg/10aの窒素施用は排水性が悪くアルファルファ生育の劣る土壌では避けるべきであり、地下水位が低い土壌ではアルファルファ混生量の低い草地に対する年6kg/10a程度の窒素施用はアルファルファによる窒素移譲量の不足を補う上で有効な方法であるといえる。

2. チモシー・アルファルファ混播草地における窒素移譲

天北地方はもともと気象条件が厳しいため、排水が不良である疑似グライ土性酸性褐色森林土や海岸の強風・低温地帯でアルファルファの3回刈りをおこなう場合には、その持続性に問題が生じる場合がある。このような地帯では光に対する競合力が強いオーチャードグラスとの混播はアルファルファの混生量をさらに低下させる原因となる危険性がある。そこで、2回刈りであり光に対する競合力が劣るチモシーと混播することによってこのような地帯でのアルファルファ混播草地を維持できる可能性が考えられる。

チモシー・アルファルファ混播草地は、刈り取

り回数と刈り取り時期がオーチャードグラス・アルファルファ混播草地と異なるため、窒素固定と窒素移譲の特性もオーチャードグラス・アルファルファ混播草地とは異なった性格になると考えられる。そこで、本項ではチモシーとの混播条件でのアルファルファの窒素固定と窒素移譲の特性を明らかにしようとした。

実験方法

(1) 混生比の異なるチモシー・アルファルファ混播草地における収量と窒素移譲量

1982年に、チモシーとアルファルファの播種割合を5段階に変えて、アルファルファ混生比の異なる草地を造成した(表4-11)。この草地に、1983年から継続して年間5および10kg/10aの2段階の窒素施肥区を設定した。1984年に各処理区の収量、窒素集積量等を調査した。なお、リン酸、カリの施用量はそれぞれ10、15kg/10aであり、窒素も含めて早春と1番草刈り取り後に3:2の割合で施用した。他の草地管理条件は表4-2に準じた。

表4-11チモシー(TY)・アルファルファ(AL)

混播草地の造成条件

草種(品種)	播種量(kg/10a)	
	TY	AL
AL率	(センボク)	(ソア)
低	1.0	0
↓	0.75	0.5
↓	0.5	1.0
↓	0.25	1.5
高	0	2.0

(2) チモシー・アルファルファ混播草地におけるアルファルファ混生比と窒素集積量の窒素施肥反応と経年推移

1982年にチモシーとアルファルファをそれぞれ0.5、1.0kg/10aの割合で播種し、チモシー・アルファルファの混播草地を造成した。1983年以降これに窒素を0、5、10、15kg/10aの4段階の用量で施用し、それぞれの区の収量と窒素集積量を調査した。窒素の施肥配分、リン酸およびカリの施肥量は前項に準じた。

結 果

(1) 混生比の異なるチモシー・アルファルファ混播草地における収量と窒素移譲量

チモシー・アルファルファ混播草地の年間合計収量はアルファルファ2.0kg/10a播種区を除いてチモシー単播草地の年間窒素15kg施用区より多かった。これは、おもにチモシー単播草地とアルファルファとの混播草地の2番草の収量差に由来した。すなわち、チモシー単播草地では2番草収量が低く、これにアルファルファが混播されることによって2番草の収量が大幅に増加した。また、窒素施用量にかかわらず混播草地の年間の合計収量はアルファルファ播種量が1.0kg/10aの区で最も高く、そのときのアルファルファ混生比は約50%であったので、このアルファルファ混生比がチモシー・アルファルファ混播草地にとって好適であるといえる(表4-12)。

チモシーは早春萌芽後の再生が遅い特性を有する反面、1番草時には旺盛な節間伸長を示すので、アルファルファの播種量が1.5kg/10a以下であるチモシー・アルファルファ混播草地のチモシー1番草収量はアルファルファを凌いだ。しかし、2番草時にはチモシーの再生がアルファルファに比べて遅れるため、アルファルファ播種量の最も少ない区でもチモシー混生量はアルファルファ混生量の約半量にすぎず、チモシーはアルファルファに被圧されることがうかがわれた。また、1番草のアルファルファ収量はアルファルファの播種量が低いほど低下したが、2番草ではアルファルファ収量に対する播種量の影響が1番草に比べて小さく、アルファルファの生育がチモシーの生育と競合しないことが示された。このように、2番草でチモシーの生育がアルファルファに比べて劣勢であるので、混播区の年間チモシー合計収量は、年間窒素施用量が5kg、10kg/10aの両区とも対応する窒素施用量のチモシー単播区よりも小さかった。

本実験では、競合条件をチモシーにとってより有利にするため窒素施用量を比較的高水準の年間5、10kg/10aの2段階とした。それでも造成3年目でアルファルファの年間混生量が400kg/10a以

下の混播区は得られず、混播区のチモシー収量は最大でも550kg/10aであり、アルファルファ混生量が400kg/10a以上の草地では、アルファルファ

混生量の増加にともなってチモシー収量が急激に減少した（図4-11B）。

表4-12 チモシー(TY)・アルファルファ(AL)混播草地およびチモシー単播草地の1・2番草別収量(1984年)

窒素 施肥量 (kg/10a)	AL播種量 (kg/10a)	乾物収量(kg/10a)								
		1番草			2番草			年間合計		
		TY	AL	計	TY	AL	計	TY	AL	計
3-2	0.5	381	140	521	139	265	404	520	405	925
	1.0	332	184	517	123	303	426	455	487	943
	1.5	294	214	509	88	294	382	382	508	891
	2.0	41	327	368	25	369	393	66	596	761
6-4	0.5	423	152	575	127	273	400	550	425	975
	1.0	367	173	540	137	330	468	504	503	1008
	1.5	352	181	533	154	284	438	506	465	971
	2.0	111	267	377	83	340	423	194	607	800
0-0	0	212	—	—	63	—	—	275	—	275
3-2	0	445	—	—	114	—	—	559	—	559
6-4	0	563	—	—	236	—	—	799	—	799
9-6	0	576	—	—	303	—	—	879	—	879

窒素施肥量は(早春-1番草刈り取り後)に分けて示した。

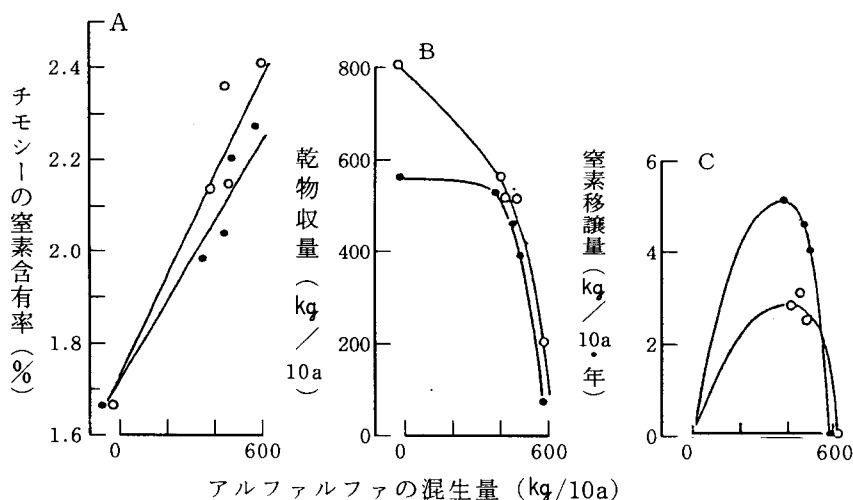


図4-11 チモシー・アルファルファ混播草地におけるアルファルファ収量とチモシーの窒素含有率、乾物収量および窒素移譲量の関係

●, 窒素5kg/10a・年; ○, 窒素10kg/10a・年

また、オーチャードグラス混播の場合と同様にチモシー混播の場合でも、アルファルファ混生量の増加に伴ってチモシーの窒素含有率が上昇した（図4-11A）が、オーチャードグラスとは異なり、アルファルファ混生量が高いレベルにおいても窒素施用量の高い区の方がより高い窒素含有率であった。窒素移譲量はアルファルファ混生量が約400kg/10aの場合に最も大きく、窒素5kg施用条件で5kg/10a、窒素10kg施用で2.5kg/10aであった（図4-11C）。

(2) チモシー・アルファルファ混播草地におけるアルファルファ混生比と窒素集積量の窒素施肥反応と経年推移

アルファルファの混生比は窒素施用量が増えるにしたがって低下した（表4-13）。しかし、1983

年には、アルファルファ混生比が無窒素区から窒素15kg/10a施用区まで61～32%であったのに対し、2年後の1985年には83～47%まで上昇し、チモシーが年々抑制されることが示された。窒素施用量が多い区でもチモシーが経年的に抑制されるのは2番草時にチモシーの生育が不良なためである（表4-12）。チモシーの2番草時の抑制が激しいため4年目には雑草の侵入量も多くなった。また、無窒素区を除けばチモシーの窒素吸収量は、窒素施用量にほぼ対応しており、窒素施用量5kg/10a以上ではアルファルファからの窒素移譲が事実上草地生産性に寄与しないといえる。このため、マメ科牧草の根粒による窒素固定を草地生産のために活用する立場から適当と思われる年間0～5kg/10aの窒素施肥ではアルファルファ混生率を50%程度に維持することは難しいと判断された。

表4-13 チモシー(TY)・アルファルファ(AL)混播草地における窒素集積量、窒素固定量の窒素施肥反応とその経年推移

年 度 (経年数)	窒 素 施 肥 量 (kg/10a)	乾物収量(kg/10a)			AL 率 (%)	窒素集積量(kg/10a)			窒 素 固 定 量 (kg/10a)	窒 素 移 譲 量 (kg/10a)
		TY	AL	計		TY	AL	計		
1983 (2年目)	0	299	479	778	61	5.0	18.3	23.3	20.5	3.9
	5	439	453	892	51	7.1	17.5	24.6	16.8	3.3
	10	604	438	1042	42	9.6	16.6	26.2	13.4	2.2
	15	861	405	1266	32	16.8	15.1	31.9	14.1	4.7
1984 (3年目)	0	187	498	685	73	3.8	15.9	19.7	16.9	3.0
	5	279	429	708	61	5.8	13.4	19.2	11.4	2.7
	10	452	396	848	47	9.1	12.9	22.0	9.2	2.3
	15	633	298	930	32	13.5	9.8	23.3	5.5	1.4
1985 (4年目)	0	165	778	943	83	4.0	24.8	28.8	26.0	3.5
	5	324	694	1018	68	6.7	21.1	27.8	20.0	4.2
	10	460	655	1115	59	10.6	21.5	32.1	19.3	5.3
	15	617	537	1154	47	14.4	19.9	34.3	16.5	4.9

1982年度造成

考 察

(1) 窒素移譲の特性

オーチャードグラス・アルファルファ混播草地とチモシー・アルファルファ混播草地における窒素移譲を比較する上での相違点として次の2点をあげることができる。第1には、チモシーがアルファルファとの競合関係において劣勢であることである。そのため、窒素移譲における窒素受容体が不足しがちになる。第2には、チモシー・アルファルファ混播草地では最終刈り取りが9月上旬であって比較的早く、刈り取り後に行われるアルファルファによる窒素固定の一部が窒素移譲源となることである。1984年の例によると、越冬直前にアルファルファは茎葉に約4kg/10aの窒素を集積しており(表4-8)、この大部分は越冬期間中に土壌に還元されると推定される。このことは土壌の窒素無機化量にも反映した(表4-7)。このため、チモシー・アルファルファ混播草地における窒素移譲にはオーチャードグラス・アルファルファ混播草地と同様の根分泌物と越冬時に脱落した根粒由来のもの他に、越冬時の枯死茎葉に含まれる窒素が加わることになる。そのため、アルファルファからの窒素移譲量はオーチャードグラス混播よりもチモシー混播でより高いと考えられる。図4-11Cの結果においても、窒素受容体側に制約があるにも拘らず、チモシー・アルファルファ混播草地における窒素移譲量の最大値はオーチャードグラス・アルファルファ混播草地(図4-7)より高かった。

オーチャードグラス・アルファルファ混播草地では、窒素移譲量が最大となるアルファルファ混生量は400kg/10aであった(図4-7)。本実験では、アルファルファ混生量が400kg/10a以下の草地が得られなかったため、窒素移譲量が最大となるアルファルファ混生量は不明であったが、チモシーの生育がアルファルファによって抑制される特性からみて、400kgより少ないところにある可能性が大きい。

(2) アルファルファ混生量とチモシー収量の関係

本実験では、アルファルファ混生量が400kg/10a以下の草地が得られなかったため(図4-11)、アルファルファ混生量が0から400kgの間で、チモシー収量は光に対する競合のために漸減するのみなのか、あるいはオーチャードグラス・アルファルファ混播草地のように(図4-7A)一度増加してから減少するののかについては不明であった。しかし、窒素10kg/10a施用条件では、単播区におけるチモシー収量が乾物で800kg/10aに達しており(図4-11)、且つ、アルファルファとの競合関係においてチモシーがより劣勢であるので、アルファルファ混生量の低い場合でもアルファルファ混生量の増加にともなうチモシー収量の増加は僅かであると推察される。一方、窒素5kg区ではチモシー単播区の収量は窒素10kg施用区より低かったが、アルファルファ混生量が400kg/10a以上の場合には窒素10kg施用区との差が小さくなった。

アルファルファとチモシーの合計収量は、アルファルファ混生比が50%のときに最大となった。しかし、年間0~5kg/10aの窒素施肥では、アルファルファ混生比をこの割合に保つことは難しかった。これらの結果から、根粒による窒素固定を牧草生産に活用する立場からはチモシーとアルファルファの組合せは、効率的ではないと判断された。

3. オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地における窒素移譲

オーチャードグラスは天北地方で最も競合力の強いイネ科草種であり、逆にラジノクローバは最も競合力の弱いマメ科草種である。しかし、オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地においても窒素を施用しない条件であれば、不安定ながらラジノクローバは維持され、年間約10kg/10aの窒素を施用した草地と同様の収量をあげ得ることが報告された¹⁹⁰⁾。これは当然ラジノクローバの窒素固定とその移譲によってもたらされる。

ほふく型で各番草の中期に最大生育を示すラジノクローバはアルファルファとは異なった性格の窒素移譲を行うと推定されるので、ここでは無窒素条件でのオーチャードグラス・ラジノクローバ

混播草地における窒素固定・移譲の特徴と、それが牧草収量に及ぼす影響について検討を加えた。

実験方法

(1) ラジノクローバ混生量とオーチャードグラスの窒素含有率との関係

1982年造成のオーチャードグラス草地を1985年に供試した。供試草地の施肥、刈り取り管理は一律におこなったが、窒素施肥を充分に行わなかったため、ラジノクローバが自然に侵入した状況であった。1985年にラジノクローバ侵入程度の異なる地点からオーチャードグラスとラジノクローバを採取し、窒素含有率を分析した。

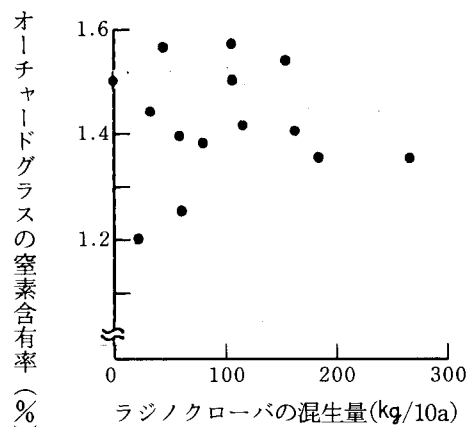


図4-12 オーチャードグラスの窒素含有率に及ぼすラジノクローバ混生比の影響

(2) オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地における窒素固定量と移譲量の経年推移

表4-1に示したオーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地を供試した。この草地は造成した翌年の1976年から継続して窒素を施用せず、リン酸、カリのみを年間それぞれ15, 10kg/10a施用した。刈り取り時期は表4-2に示したとおりであり、肥料は早春、1番草刈り取り後、2番草刈り取り後に1/3ずつ施用した。収穫調査、牧草分析の結果から、窒素固定量と窒素移譲量を算出した。

結果

(1) ラジノクローバ混生量とオーチャードグラスの窒素含有率との関係

オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地の場合もオーチャードグラス・アルファルファ混播草地と同様の経路で窒素移譲が起るとすると、ラジノクローバ収量の増加にともなってオーチャードグラスの窒素含有率が直線的に上昇するはずである。そこで、天北農試試験圃場内でラジノクローバの混生するオーチャードグラス草地での一番草におけるオーチャードグラスの窒素含有率とラジノクローバ混生量の関係をプロットしたところ(図4-12)、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地で認められた様なマメ科牧草の混生量増に対応したオーチャードグラスの窒素含有率の上昇は観察されなかった。

(2) オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地における窒素固定量と移譲量の経年推移

次に、長期間継続しているオーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地の収量調査結果から窒素移譲量を表4-5のNT2の方法で算出した(表4-14)。その結果、ラジノクローバの乾物収量と窒素固定量は、それぞれ年度間で20~306kg/10a、7.4~22.6kg/10aの幅があり、ラジノクローバの不安定性が示された。窒素移譲量も3.7~10.3kg/

表4-14 オーチャードグラス(OG)・ラジノクローバ(LC)混播草地の窒素集積量と移譲量

年 度	乾物収量(kg/10a)		固定窒素集積量(kg/10a)		
	OG	LC	OG (窒素移譲量)	LC	計
1976	320	186	6.6	7.6	14.2
1977	432	150	9.5	5.7	15.2
1978	542	41	9.7	1.7	11.4
1979	260	20	3.9	0.6	4.5
1980	212	102	3.7	3.7	7.4
1981	425	180	8.4	6.9	15.3
1982	449	111	7.2	4.1	11.3
1983	529	306	10.3	12.3	22.6
平 均	396	137	7.4	5.3	12.7

10aと変動が大きかった。調査を行った8年間を平均するとラジノクロバによって固定された窒素量は12.7kg/10aであり、アルファルファ(表4-4)の42%であった。この窒素固定量はラジノクロバの草型がほふく型であり、光競合の点で不利であるため、収穫調査時の乾物収量ではアルファルファの23%にしかならないことを勘案するとかなり大きい値である。窒素固定量のうち58%がイネ科牧草に移譲されて回収されており、この割合はアルファルファが約25%(表4-4, 5)であったのと比べると大きい値である。すなわち、ラジノクロバはアルファルファと比べると、収穫時乾物収量の割に窒素固定量が大きく、また、全固定窒素に占める移譲窒素の割合が大きいことが特徴であった。

考 察

(1) ラジノクロバからオーチャードグラスへの窒素移譲の機作

ラジノクロバは窒素固定量に比して移譲量が多い特徴を持っていたが、ラジノクロバ混生率が大きくなってもオーチャードグラスの窒素含有率は高まらず(図4-12)、アルファルファとは別の経路で移譲が起こることが示唆された。

そこで、表4-14に示した草地の窒素移譲量と当年のラジノクロバ混生量および前年のラジノクロバ混生量との相関係数を求めたところ、当年との相関係数は0.520と低かったが、前年度との相関係数は、0.747であり5%水準で有意性を示し、ラジノクロバ混播草地での窒素移譲量は当年よりも前年度のラジノクロバ混生量に左右されると考えられた(図4-13)。Herriotら⁵¹⁾も、クロバが減少した年の翌年には窒素移譲量が増大することから、同様の考察を行った。

Simpson¹⁵⁹⁾はラジノクロバの場合、アルファルファと異なり生育中に根から分泌される窒素化合物量は少ないと推定した。それに対し、ラジノクロバの生育相から考えて、枯死茎葉に由来する窒素移譲はかなりの量になると推定される。すなわち、ラジノクロバ乾物収量の最大時期は各番草の前にあり、その後、イネ科牧草との光と水

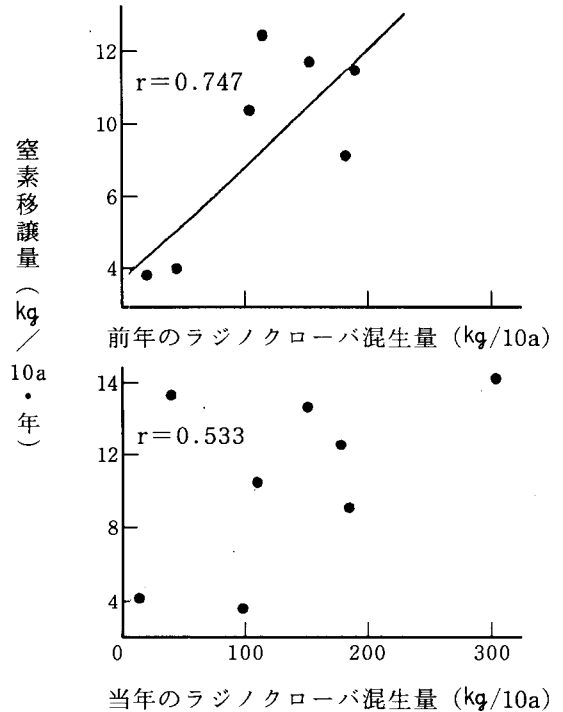


図4-13 オーチャードグラス・ラジノクロバ混播草地における窒素移譲量とラジノクロバ乾物重の関係

に対する競合のために減少する場合のあることが観察された(図4-3)。この、減少分は土壤に還元され微生物によって分解・無機化されて移譲窒素の母体になると予想される。また、オーチャードグラス・ラジノクロバ混播草地の最終刈り取りは9月下旬であるので、その後に若干の生育と窒素固定が行われる。この越冬前に行われる生育の一部は越冬中に枯死し、有力な窒素移譲源になると考えられるが、その量は当然その年のラジノクロバ生育量をそのまま引き継ぐはずである。こうして供給される枯死茎葉の無機化は、根からの低分子化合物の無機化よりも時間がかかる。いいかえると、time-lagがより長い経路であると考えられる。これがラジノクロバの窒素移譲が当年よりも前年のラジノクロバ乾物収量との相関が高かった要因であろう。ラジノクロバでは、全窒素固定量に占める窒素移譲量が約60%にもなることを考え合わせると、混播草地において、ラ

ジノクローバは、ラジノクローバそのものとして収穫されることに加えて、畑作における緑肥の様に有機態の窒素源として働く意義も大きいといえる。一方、Cowling²⁷⁾がイギリスで行われた実験の結果を取りまとめた報告によると、ラジノクローバ混播草地での窒素移譲は、全固定窒素量の34%に留まっていた。これらの実験は放牧を前提とした短草利用、多回刈り条件で行われており、そのため土壤に還元されるマメ科牧草の枯死茎葉は本実験の場合と比べて少ないことが移譲窒素の割合が低い原因と考えられる。

(2) オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地における窒素移譲が植生変遷におよぼす影響

次に、窒素移譲とラジノクローバ混生量の相互関係について若干の考察を加える。本実験で得られたラジノクローバ混生量は最大でも約300kg/10aであり(表4-14)、アルファルファで窒素移譲量が最大となる400kg/10aに及ばない(図4-17)。さらに、同じ混生量であってもラジノクローバはほふく型の草型のためにオーチャードグラスとの競合上、より劣性であることを考えあわせると、天北地方の気象・土壤条件ではアルファルファにみられたように、アルファルファ混生比が高すぎて窒素受容体が制約されることによる窒素移譲量の低下が起ころとは考えられない。

逆に、オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地では窒素肥料の施用によってラジノクローバ混生量が大幅に減少することから(表4-4)、窒素無施用条件でも、ラジノクローバからの窒素移譲によってオーチャードグラスの生育が向上し、光と水に対する競合の激化によってラジノクローバの生育が抑制される可能性が指摘できる。すなわち、表4-14に示されるように造成当初のラジノクローバ混生量は高く、従って、次年度のオーチャードグラスに対する窒素移譲量が多くて、その結果オーチャードグラスの生育は促進され、これに抑圧されて競合力の弱いラジノクローバの生育抑制が引き起こされとの解釈が可能である。したがって、このような条件では各番草の生育中

期においてラジノクローバの生育は劣るが、落葉割合も上昇し(図4-3)、これが土壤に還元されて緑肥的に働きオーチャードグラスへの窒素供給を増やし、さらにラジノクローバ混生量を減少させる。そして、ラジノクローバ混生量が下限まで低下すると、翌年のオーチャードグラスへの窒素移譲量が少なくなるのでオーチャードグラスの生育は低下し、競合条件は緩和されてラジノクローバが増加し、再び移譲量が多くなって、同じサイクルをたどると考えることができる。具体的なデータは取らなかったが、1984年度のラジノクローバ混生量は再び大きく減少した。すなわち、土壤化学性が良好に維持されたオーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地のラジノクローバ混生量は4~6年に一巡する周期的変動パターンを描いて遷移する可能性がある。Ball¹⁹⁾もニュージーランドでのクローバ混播草地における窒素固定量の季節変化が同様の要因により左右されていることを推定した。実際の圃場条件でのラジノクローバ混生量の遷移は、他にもpH低下等の草地の経年化による土壤化学性の変化や気象要因の影響、さらにはウリハムシモドキの食害を受けることもあり、より複雑であるが、ラジノクローバ混生量の年次変化を論ずるためには、ラジノクローバからの窒素移譲が重要な要因であることを指摘したい。

天北地方の重粘土土壌は保水性が小さく、浅根性でありストロンの定着に多水分条件を必要とするラジノクローバが不安定であると言われてきた。また、乾燥年に多発するウリハムシモドキの食害もラジノクローバの不安定性を増す大きな要因である。しかし、ラジノクローバはアルファルファと異なり、いったん衰退して個体数が減少しても条件が整えば、ほふく茎(ストロン)から発根して再び個体数が増加する。これは一旦株数が減少すると回復し得ないアルファルファと対比すると大きな長所である。表4-14の例でも、8年間の平均でラジノクローバの窒素固定量は12.7kg/10aにもなっており、天北地方でもその窒素固定力は無視できない。オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地は、草地経営内で比較的粗放的な管理を行う草地として位置付け、その長所を生かすよ

うな利用・管理法を確立することが必要である。

4. チモシー・ラジノクローバ混播草地における窒素移譲

チモシーは早春や1番草刈り取り後の再生が劣るため、その間ラジノクローバが生育する余地がある。そのため、チモシーと混播したラジノクローバはオーチャードグラスとの混播と比べてより活発な窒素固定を行なう可能性がある。反面、ラジノクローバはほふく型で光競合にきわめて不利であるため、刈り取り回数が多い草地では、少ない草地より混生率が高くなるとされている。チモシー混播草地は、2回刈りであり、これはラジノクローバにとって不利な条件となる。したがって、本項ではラジノクローバにとって有利・不利の相反する条件が存在するチモシーとの混播条件における窒素の固定と移譲の特徴を明らかにしようとした。

実験方法

1981年に造成したチモシー・ラジノクローバ混播草地(表4-1)に1982年以降年間窒素施用量0, 6, 10kg/10aの3段階の処理を設け、生育・収量調査を行った。リン酸、カリの施用量は表4-2に準じ、早春と1番草刈り取り後にそれぞれ3:2の割合で施用した。窒素の施用時期と施用量は

表4-15, 16に記した。また、チモシー単播草地も同時に造成し、1982年以降、年間0, 6, 10, 12, 14kg/10aの5段階の窒素を継続して施用する処理区を設定して土壌分析に供した。

結 果

チモシー・ラジノクローバ混播草地における造成後2年目から4年目にかけてのチモシー収量は、どの年度も窒素施肥量の増加に従って増加し、それに伴う競合の激化からラジノクローバ収量は低下した(表4-15)。ただし、オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地で認められたように(表4-4)窒素を施用することによって、イネ科牧草とマメ科牧草の合計収量が低下することはなかった。窒素移譲量も窒素施用量が増加するのにもなって減少した(表4-15)。年次の推移をみると、2年目から4年目にかけて、どの区でもチモシー収量は増加する傾向であった。とくに、無窒素区でのチモシー収量は2年目に窒素10kg/10a施用区の36%であったのに対し、4年目には77%まで増加した。これは、無窒素区の窒素移譲量が2年目で3.7kg/10aであったものが4年目には3倍以上の12.9kg/10aにも増加したためである。しかし、収穫時のラジノクローバ乾物重はどの区でも2年目から4年目にかけて減少した。

表4-15 チモシー(TY)・ラジノクローバ(LC)混播草地における窒素集積量と移譲量の経年変化

年次	経年数	窒素施用量(kg/10a)		乾物収量(kg/10a)		窒素集積量(kg/10a)		窒素移譲量(kg/10a)
		早秋	1番刈後	TY	LC	TY	LC	
1983	2年目	0	0	244	321	4.9	13.0	3.7
		4	2	621	246	9.7	9.6	3.4
		6	4	853	180	13.8	7.2	3.2
1984	3年目	0	0	460	167	9.2	6.4	7.1
		4	2	605	125	12.0	4.4	4.7
		6	4	700	92	12.7	3.4	1.4
1985	4年目	0	0	858	52	15.5	2.0	12.9
		4	2	1089	66	20.9	2.5	12.6
		6	4	1024	70	20.5	2.8	8.5

各番草の生育中期におけるラジノクローバ生育も窒素移譲に大きな影響を与え、ラジノクローバ生育と窒素集積量の経時的な変化を調査した。1984年の例では(表4-16)、5月上旬において、ラジノクローバの乾物重はチモシーよりも多く、早春からすでに盛んな窒素固定が行われたことが示された。また、1番草刈り取り後は、比較的高温条件であるのでラジノクローバの再生が良好であり、7月10日での窒素0.6kg/10a施用区(年間)のラジノクローバ乾物重は、チモシーを凌いだ。これは、チモシーの生育にともなって急速に低下し、2番草の収穫時には、約1/4になった。また、いずれの調査時期にも、窒素施用量が多いほどラジノクローバの乾物重が低かった。1985年の調査結果でも(図4-14)、ラジノクローバの生育経過は前年と同一の傾向であり、ラジノクローバの生育は各番草の中間に最大となった。窒素を施用した場合でも1, 2番草の最大期における合計ラジノクローバ生育量は少なくとも150kg/10aに達し、その後低下した。無窒素区のラジノクローバ乾物

重は、6月上旬に120kg/10aに達した後、著しく低下し、7月下旬には、窒素施用区よりはるかに低い乾物重であった。これは、この年が乾燥年でありウリハムシモドキの発生が多く、特に無窒素区ではチモシーの生育が劣ったので、被害を激しく受けたためである。したがって、以後の考察では、この区を除外する。

次に、窒素施用量の異なるチモシー・ラジノクローバ混播草地およびチモシー単播草地土壌の窒素無機化量を表4-17に示した。チモシー単播草地では、窒素施用量の増加に伴って窒素無機化量が増加したが、ラジノクローバ混播草地では窒素無施用区で他より低い傾向を示すものの、窒素施用量6kg/10a以上では、窒素施用量間の差はなかった。また、窒素施用量に拘らず、ラジノクローバ混播草地の窒素無機化量はチモシー単播草地よりかなり高く、ラジノクローバの混播によって土壌中に易分解性の窒素化合物が付加されることが示された。

表4-16 チモシー(TY)・ラジノクローバ(LC)混播草地における生育経過(1984年)

月 / 日	窒素施用量 (kg/10a)		乾物収量 (kg/10a)		
	早 春	1番刈後	T Y	L C	合 計
5 / 9	0	0	5	46	51
	4	2	10	37	47
	6	4	13	15	18
5 / 18	0	0	25	154	179
	4	2	80	111	191
	6	4	100	66	166
6 / 20 (1番草)	0	0	265	130	395
	4	2	450	96	546
	6	4	458	62	520
7 / 10	0	0	59	98	157
	4	2	70	77	147
	6	4	122	39	161
8 / 30 (2番草)	0	0	195	37	232
	4	2	155	29	184
	6	4	242	30	272

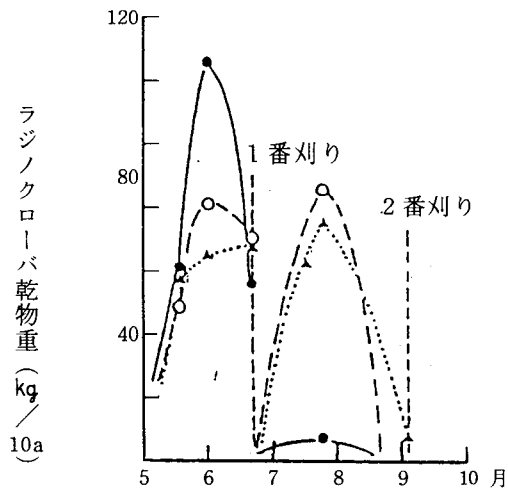


図4-14 チモシー混播条件下でのラジノクローバの生育経過 (1985年)

●, 無窒素; ○, 窒素6kg/10a; ▲, 窒素10kg/10a

表4-17 チモシー単播草地とチモシー・ラジノクローバ混播草地における土壌窒素無機化量
におよぼすラジノクローバ混生量と窒素施肥の影響 (1984年)

草 種	窒素施肥量 (kg/10a・年)	L C 乾 重 (kg/10a・年)	窒素無機化量 (mg/100 g・土)
T Y ・ L C	0	167	2.7
	6	125	3.9
	10	92	3.5
T Y 単 播	0	0	0.5
	6	0	0.9
	10	0	0.6
	12	0	1.3
	14	0	2.6

*: 1984年11月20日に採土

考 察

前項で示したようにオーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地の窒素移譲量は前年度のラジノクローバ混生量によって左右されたが(図4-13)、チモシー・ラジノクローバ混播草地では、3年目のラジノクローバ混生量が2年目のそれより低いにも拘らず、4年目の窒素移譲量は3年目より多かった。これを理解するためには、次の3つの要因を考慮する必要がある。1つは、アルファルファ

との混播の場合と同様にチモシー・ラジノクローバ混播草地においても最終刈り取りが9月上旬であるので、その後のラジノクローバの生育が主要な窒素移譲源となることである。表4-8の結果では、越冬前の茎葉部に集積された窒素は8.8kg/10aにも達した。先に示したチモシーとアルファルファとの混播の場合と同様に、このほとんどは土壌に還元されて窒素移譲源になると考えられる。2番目の要因として、収穫時のラジノクローバ混

生量が必ずしも各番草のラジノクローバ生育、すなわち窒素固定量を反映しないことがあげられる。チモシーの生育はその特性上、越冬後の起生期以降と、1番草刈り取り後に一時停滞する。その間はふく型であるラジノクローバが繁茂する余地ができる(表4-16)。しかし、チモシー・ラジノクローバ混播草地は2回刈であるため、各番草の後期にはチモシーに被覆されて茎葉が脱落しラジノクローバ乾物量は減少する。その脱落したものが土壤に還元されて、次番草以降にチモシーへの窒素移譲となって現れる。同様のことはオーチャードグラスとの組合せでも言えるが、各番草生育の中期までのラジノクローバの生育は、競合条件の厳しくないチモシーとの混播の方がより大きいと考えられる。3番目の要因としては、ラジノクローバの枯死茎葉の中で短期間に分解利用されなかったものが土壤に集積することによって、土壤の窒素供給力が徐々に高まり(表4-17)、これがチモシー収量に反映したことが考えられる。本実験で用いた草地は、もともと窒素供給力が低い土壤に造成されたものであり、この影響も無視できないであろう。

オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地と同様に、チモシー・ラジノクローバ混播草地でも窒素固定量・移譲量が数年間隔の増減周期を示すかどうかは興味ある問題である。本実験で行った3年間の結果から、その答えを出すことは出来ない。しかし、オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地では前年のラジノクローバ混生量が低い場合には窒素移譲量が低下したが(表4-14)、チモシー・ラジノクローバ混播草地では、3年目のラジノクローバ混生量が低下しても4年目の窒素移譲量はむしろ増加した(表4-15)。この違いは、オーチャードグラスとの混播では、オーチャー

ドグラスの再生が極めて良好であるため、再生直後からラジノクローバが抑制されるのに対して、ラジノクローバとの混播では各番草の刈り取り後しばらくはラジノクローバが生育する余地があることに起因する。すなわち、早春と刈り取り後の再生が不良であるチモシーの特性から考えて、無窒素ないし窒素施用量6kg/10a・年程度の条件ではラジノクローバからの窒素移譲量が高まり、チモシーの生育が旺盛になっても、各番草中期のラジノクローバの生育が極端に抑制されることはないといえる。さらに、最終刈り取りが9月上旬であるため、その後の窒素固定も見込めるので、オーチャードグラスとの混播草地にみられたような大きな振幅の増減周期は起きないと考えられる。

以上のように、チモシーとラジノクローバとの混播では各番草の中間に最大生育量を示すラジノクローバの生産力の意義は大きい。チモシーは、各番草の初期に一時生育が緩慢になるので、ある程度の窒素施用を行ってもラジノクローバが生育する余地がある。それ故、2回刈りでも、ラジノクローバが被覆・抑圧される程度は、オーチャードグラスとの混播より小さいといえよう。チモシーとラジノクローバの組合せは窒素移譲を有効に活用しつつ、その不足分を施肥で補うような管理ができる可能性のある組合せであると言える。表4-15の結果から、無窒素条件では造成2～3年目までのチモシーとラジノクローバの合計収量が低いので堆肥鋤込みや窒素施肥などによって窒素を補給し、4年目以降、マメ科牧草から土壤を経由しての窒素移譲量が増加した段階で、窒素施用を控えるような肥培管理が望まれる。本実験の結果から、天北地方においてラジノクローバの組合せとしてはオーチャードグラスよりもチモシーの方が有望であることが明らかとなった。

第5章 総 合 考 察

第1節 重粘土草地における土壤微生物特性の 実態と草地生産性との関係

牧草は光合成を介して草地生態系に有機物を供給する。草地土壤に生息する微生物のうち独立栄養を営むごく一部を除く多くは牧草が生産した有機物を利用する従属栄養を行っている。その結果、牧草から土壤に還元された有機物は短期的には微生物の菌体合成に利用されるが長期的には分解・無機化して、再び作物に吸収利用されるサイクルを描くことになる。本研究では土壤微生物の草地生態系における役割を有機物の分解・無機化として位置づけ、この分解・無機化の視点からの土壤微生物の働きを土壤微生物特性と表現した。

一方、草地における牧草生産には常に低コスト化が求められる。それ故、人為的に草地に投入される要素量は、最大牧草生産量を得るのに必要な量より少ないことが多い。このような条件では、牧草の枯死茎葉と土壤由来の有機物が土壤微生物によって分解されて生ずる窒素、リン酸などの無機成分と根粒によって固定される窒素の草地生産性に及ぼす影響は極めて大きい。牧草に対する窒素を中心とした養分供給量が増加することは、単に乾物生産量の増加をもたらすばかりでなく、牧草の生育が旺盛になるために牧草の早期収穫を可能にし、ひいてはTDN（可消化養分含量）やCP（粗蛋白含量）が高まることによって、飼料としての牧草品質の向上にもつながる。

ここでは、前章までに記載した草地における微生物の働きを、①土壤微生物による有機物の分解と、②根粒による窒素固定、の2者に分けて、それぞれについて天北地方に分布する重粘土草地での特徴を整理するとともに、それらと草地生産性との関わりについて総合的に考察を加える。

1. 土壤微生物特性の層位分化と各層位における微生物特性が草地の生産性に果たす役割

(1) 微生物特性の層位分化の実態および

その原因と問題点

天北重粘土地帯の草地において土壤微生物は比較的浅い作土0-15cmの土層内でも明瞭な層位分化を起こしており、作土表層（0-2cm土層）は作土下層（5-15cm土層）にくらべて数倍の微生物数と活性を有する（表3-6）。微生物特性の層位分化は草地が畑地と異なり永年にわたって耕起されずに利用されることに起因する。自然界で土壤の微生物数を規制する最も大きな要因は基質となる有機物の供給量であるが、草地は数年から十数年にわたって耕起されないために、一次生産者である牧草地上部からの有機物の供給が土壤表面に限られるのが特徴である。特に重粘土においては土壤の堅密化に伴って牧草根も表層に集中するために（表3-8）、根から分泌される有機物や、枯死根も作土表層を中心に供給されることになる。それゆえ作土表層の微生物数と活性は、それ以下の土層に比べて高まることになる。

一方、作土下層では、牧草からの有機物供給量が少なく、加えて土壤が堅密化するため酸素の供給も乏しくなる（表3-30）。作土下層に対する酸素供給の低下は牧草根や表層に蓄積した有機物の分解のために酸素が消費されるので、より激しくなる。その結果、作土下層の微生物数とその活性は低下を与儀なくされる。

作土0-15cm土層全体の微生物数を各土層の厚さを考慮して加重平均して求めると、その値は畑地よりも低い（表3-6, 7）。すなわち、層位分化の結果、作土全体で比較すると、草地の微生物数と活性は、作土全体でほぼ均一な微生物特性を示す畑地よりも低いとみることができる。

また、火山性土と比較すると、重粘土の有機物分解量は通気性が劣るため作土全体で抑制されており（表3-29）、その程度は作土下層でより激しかった。すなわち、天北地方においては、草地特有の性質に加えて、基盤となる土壤が重粘土であることが層位分化をより顕在化すると考えることができる。加えて、土壤微生物による有機物の分解速度は、温度が低下すると当然遅くなる。

天北地方の年平均気温は5℃と低く（表1-1）、これも当地方の草地土壌における微生物活性を低下させ、物質循環を停滞させる一要因である。土壤微生物による有機物分解が停滞することの草地生産力に及ぼす影響を作土表層（0-2cm土層）と作土下層（5-15cm土層）に分けて以下に論議を加える。

（2）0-2cm土層における微生物特性と 草地生産性との関係

有機物が多量に還元され、加えて、リン酸・カリなどの微生物にとって必須な無機養分が表面施用される草地の0-2cm土層では、これらの要因は特に微生物特性の規制要因にはならない。他方、天北地方では9月から翌年の4月までは降雨量が蒸散量を上回るので、土壌の塩基は溶脱方向にある。硫酸アンモニウム、塩化アンモニウム、硫酸カリウム、塩化カリウム、過リン酸石灰などの肥料を施用する場合には硫酸イオン、塩素イオンなどの随伴アニオンが同時に施与されるため、塩基の溶脱が加速され、草地表面に近い土壌は酸性化する（表3-15）。これが、0-2cm土層の微生物活性規制要因であった（表3-18、図3-9）。作土表層の細菌数は牧草からの基質供給に対応して春と秋に増加したが（図3-2）、表層pHが低下した草地では、微生物は牧草からの有機物供給に対応して増殖できず（図3-11）、表層に有機物の蓄積が起こった（表3-15、20）。加えて、土壌表面は過乾・過湿に陥り易いばかりでなく（図3-1）、刈り取り・利用直後は太陽光の直射を受ける。これらも、微生物の活動にとって好適な条件とは言えず、有機物の分解速度を低下させる原因であろう。このような部位に大量の有機物が還元されることは、いわば草地の宿命と言えよう。これまで述べてきた理由により供給された有機物の分解が充分進まないことは、草地生産力にとっての問題点の1つである。

本研究では、土壤微生物を草地における分解者として位置づけた。草地では牧草として収穫される乾物量と同程度の枯死茎葉が草地表面に還元されるといわれている²⁰⁾。本研究の結果でもラジノ

クローバ混播草地では窒素量として年間約10kg/10aが土壌に還元された（図4-3）。ここに生育する微生物は還元される有機物を利用して自らの菌体を合成し、草地における物質循環のなかで主に還元される有機物の分解と無機化を行うといえる。

草地における土壤微生物の分解活性は0-2cm土層で他の土層よりも相対的に高かった（表3-6）。これは、土壌表層に有機物が供給されることに起因する。しかし、先に述べたように低温などの要因のためにもともと高くない微生物活性が低pHなどの要因によってさらに低下した場合には、0-2cm土層では草地生態系の物質循環における有機物の分解・無機化の部分が遮断されることにより、牧草への無機養分供給量が低下し、このことが牧草収量にも反映することになる¹⁰⁶⁾。これに加えて、養分供給の不足した牧草は、根系の発達が充分でないため、下層の水分を効率よく利用することが出来ず、水ストレスに対しての耐性が低下する。特に保水力が小さく2番草収量が降雨による水供給に依存する天北重粘土草地ではこのことが低生産性の重要な原因となる¹⁰⁸⁾。

これと同時に、分解されずに土壌表面に蓄積した枯死茎葉などの粗大有機物は一旦乾燥すると疎水性を持つにいたる¹¹³⁾。粗大有機物の疎水性は2つの点から、干ばつを助長し草地の生産性にとってマイナスになると考えられる。第一は、干ばつ時に、少量の降雨があっても有機物の疎水性のために、それが土壌に浸透して牧草に利用されるのを妨げる。第二は、有機物が疎水性を有するため土壌表面が湿りにくくなり、乾いた状態になるので微生物の活動を制限し、ますます有機物の蓄積を加速させることになる。

0-2cm土層の微生物は肥料として草地表面に施用された無機成分の動態とも関わりを有する。草地の表面に施用された窒素やリン酸は植物根によって吸収されるばかりでなく微生物体にも取り込まれる¹⁰⁵⁾。いったん微生物にとりこまれた無機成分は有機化・無機化を繰り返しつつ最終的には徐々に牧草に供給される¹¹⁷⁾。草地における施肥窒素やリン酸の動態と牧草によるそれらの利用率や吸

収時期については未解明の点が多く、これらを明らかにするためには、土壌、微生物、表層蓄積有機物、および牧草を含めた草地生態系内でのこれら要素の挙動を追跡する必要がある。

以上に述べたように、0-2cm土層の微生物は、この土層に供給される枯死茎葉などの有機物や施肥された無機成分等を包含してダイナミックに展開する物質循環の駆動力となっており、草地生産性に果たす役割も大きい。

(3) 5-15cm土層における土壌の微生物特性と草地生産性の関係

草地の作土下層は耕起されないために堅密化し、その程度は有機物の蓄積する0-2cm土層よりも激しい(表3-4)。これに作土表層での微生物や根による酸素消費が加わって、作土下層に対する酸素供給は停滞することになる。また、作土下層に対しては枯死茎葉の供給がないのは無論のこと、草地の経年化によって牧草根は極浅い表層に集中するので、根の分泌物や、死根などの微生物の基質となる有機物の供給量も低下する。それに加えて、施肥は草地表面に限定されるのでリン酸、カリウムのように土壌中を移動しにくい無機要素の供給も極少い。また、造成時の作土下層に対する酸性改良は充分でない場合も多く、土壌pHも微生物特性を規制する要因の1つであった。以上に記した要因が複合して5-15cm土層の微生物特性は経年的に低下するのが実態であった(図3-14)。

草地は長年の間耕起されないために更新時を除いては直接大量の有機物供給を受けることがない。それ故、この部位の微生物は更新時に鋤込まれた牧草体、堆肥や土壌の有機物を分解しており、その過程で生成した窒素が牧草に供給されるので、いわば地力として放出される養分分の供給者としての役割を担うと考えることができる。

しかし、さきに述べた要因によって微生物数と活性が低下した草地作土下層では、有機物の分解によって供給される無機成分量は一般に少ないと考えられる。たとえば、主要畑作地帯である十勝地方の数十ヶ所の畑土壌で行われた実験では、無窒素区のテンサイの窒素吸収量は平均年間12kg/

10aであるのに対し⁶²⁾、本研究で供試したイネ科牧草単播草地の例では0-4kg/10a(表4-4, 9)にすぎない。これは、窒素をはじめとする無機成分の供給量が常に収量の制限要因である草地では極めて重要な意味を持つものである。草地では微生物活性が低いために、作土下層に微生物基質が存在しても微生物がそれを分解できない状態になっている(表3-29)。微生物活性の低下も草地経年化による生産力低下の一要因と考えられる。

このことから、作土下層の微生物特性を正しく把握することは、土壌窒素診断の精度を上げるためにも不可欠であると考えられる。有機物の無機化によって供給される養分のうち、特に重要な窒素を例にとると、その供給速度は、(微生物基質量) × (分解速度) で表すことができる。畑土壌では、微生物の基質となり得る土壌有機物画分、すなわち易分解性窒素の評価手段の1つとして、熱水抽出性窒素を指標として窒素診断が行われている⁶²⁾。しかし、この方法の適用は当然分解速度が一定とみなせる範囲にとどまる。厚層多腐植質多湿黒ボク土が適用外とされるのは、この土壌の微生物活性すなわち分解速度が多湿条件によって抑制されることによると理解される。

一方、Whitehead¹⁸⁶⁾は、草地では、培養法や化学分析による窒素供給力の予測に関する報告が見あたらないことを指摘した。天北地方の検討例でも土壌の分析値と無窒素区の牧草の窒素吸収量との相関性は小さい⁶⁴⁾。また、牧草による窒素吸収量から推定される堆肥の分解率は土壌によって異なった⁶⁰⁾。この原因としては、土壌からの炭酸ガス放出量に代表されるように(表3-29)、作土下層の有機物分解速度は、土壌によって大きく異なり、一定ではないことがあげられる。熱水抽出性窒素のような易分解性窒素量と本研究で測定した微生物特性を組み合わせで解析することによって、草地土壌からの窒素供給量を予測することがはじめて可能となろう。

さらに、5-15cm土層の微生物特性は草地の根圏環境指標として利用できる可能性がある。牧草根は土壌の堅密化や肥料の表面施用に対応して作土表層に集中してくるが¹²³⁾、これは草地の生産性

低下の一因となる。作土表層に集中した牧草根は、表層土壌のpH低下や乾燥などのストレスをより強くうけることになる。逆に作土下層の根圏密度が高いことは作土全体の無機養分や水を利用する上で有利である。

5–15cm土層の微生物特性を規制する易分解性有機物、有効態のリン酸、カリ、pHおよび酸素供給はいずれも牧草根の活性と直接に関わる要因でもある。それらの要因が微生物にとって好ましくない状況であれば、牧草生産も低下せざるをえない。このことを利用すれば、微生物数と活性が一定水準以下であった場合、その土壌が牧草根にとっても良好な環境ではないと判断することができる。たとえば、草地造成後5年目以降の全細菌数や糸状菌数は、それ以前に比べて明らかに低下した(表3–26)。これを、指標として用いれば、作土下層への酸素供給等物理性や化学性の状態を総合的に指標化することができる。すなわち作土下層の微生物が活性化する条件では、有機物分解が盛んで無機養分の供給が潤沢であるばかりでなく、同時に牧草根の生育環境としても良好なため、牧草生産性も高いことが想定される。

草地の生産性が低下する原因は、土壌の理化学性の悪化と、植生の悪化など非土壌的要因に大別される。もし、理化学性の悪化が低収化の原因であれば耕起による更新をすべきであり、そうでなければ優良牧草の追播など、より簡易な方法を選択することができる。土壌の微生物特性を利用した簡易な根圏環境指標を確立することができれば、植生診断と併用して草地の更新指標として用いることも可能であろう。

2. 根粒による窒素固定と草地の生産性

(1) アルファルファおよびラジノクローバの

混播条件における窒素固定とその移譲の特徴

マメ科牧草と根粒菌が共生して行う窒素固定は、草地の生産性に直接大きな影響を与える。寒冷な天北地方の気象条件でも、イネ科牧草とマメ科牧草の混播利用を前提とした場合の根粒による固定窒素量は、ラジノクローバで年間最大約25kg/10a、

アルファルファでは30kg/10a以上にも達した(表4–4)。この量はいずれも、天北地方の農家での平均窒素施肥量をはるかに凌ぐ。単に乾物生産の面ばかりでなく、収穫される牧草にマメ科牧草が加わることは、飼料中の蛋白質やMg、Caの含量が増加するため、牧草の飼料としての品質向上にも寄与する。

さらに、マメ科牧草によって固定された窒素の一部はイネ科牧草にも移行する。その量はアルファルファ、ラジノクローバそれぞれ最大約7、10kg/10aであり、全固定窒素のそれぞれ約20、50%に相当した(表4–5)。ラジノクローバにおいて固定窒素の過半がイネ科牧草に移譲されるのは、ラジノクローバの草型がはふく型で光競合に弱いことに起因する。すなわち、ラジノクローバは再生が早く、光競合に弱いため、各番草の収穫期以前に最大生育量となり、その後茎葉が枯死落葉して現存量が減少する(表4–16、図4–14)。この減少によって失われた作物体は土壌に還元されて、緑肥的に働く。アルファルファは直立型の草型のため光に対する競合が強く、生育途中の枯死量は少ない。このため、実際の根粒による固定窒素の利用形態として、アルファルファではマメ科牧草そのものとして収穫され、ラジノクローバではイネ科牧草に移譲されて収穫される割合が高いとの性格付けが出来る。

(2) 混播草地における窒素移譲と草地の生産性

オーチャードグラス・アルファルファ混播草地において窒素移譲が最大となるマメ科率は約50%であった(図4–7)。この条件での乾物収量と窒素集積量はそれぞれ1000kg、30kg/10a以上にも達した。乾草やサイレージなどへの飼料調整のしやすさや、飼料としての栄養価からも50%程度のアルファルファ混生率が好ましい。この割合でアルファルファが維持されている草地では、施肥された窒素やアルファルファから分泌された窒素がオーチャードグラスによって吸収されるので、無機態の窒素が土壌に蓄積することがなく、従って根粒は無機態の窒素による抑制を受けずに窒素固定を継続することができるかと推定される(図4–9)。この意味

で、オーチャードグラス・アルファルファ混播草地においてはアルファルファ混生比が50%の場合に根粒の窒素固定が牧草生産のために最も合理的に活かされるといえる。アルファルファ混生比が50%以下の草地はそれ以上の草地と比べて窒素不足によって低収化した。

アルファルファの混生比が低く窒素固定だけでは十分な収量が得られない場合には、施肥によって窒素を補給することが考えられる(図4-10)。排水のよいオーチャードグラス・アルファルファ混播草地では、年間6kg/10aの窒素を施用しても、アルファルファ混生比の経年的な減少は認められず、乾物収量でも100kg/10a程度の増収が得られた(表4-9)。このような条件では施肥によって窒素を補給することが可能である。しかし、地下水位の高い土壌ではアルファルファの生育が過湿条件のために不良になるのに加えて、年間6kg/10a程度の窒素施肥によってオーチャードグラスの生育が旺盛となり光に対する競合のためにアルファルファ生育は大きく抑制された(表4-10)。アルファルファの生育は土壌の排水性や降雨によって大きな影響を受けることが知られており、排水の不良な草地でアルファルファが衰退方向にあるにも拘らず、窒素の不足分を施肥で補おうとすると、さらにアルファルファ生育を抑制することになるので注意を要する。

チモシーとアルファルファの組合せではチモシーの生育が各番草の初期に一時期停滞することから、一般の農家圃場でイネ科牧草単播草地に施肥されている窒素量に匹敵する10kg/10aの施肥を混播草地に行っても2年目から4年目にかけてチモシー収量が低下した(表4-13)。また、年間10kg/10aの窒素施用条件での見かけの窒素固定量は3年間の平均で14kg/10a程度と低かった。したがって、根粒の窒素固定を活用しようとする視点から判断すると、チモシーとアルファルファは実用的な組合せとはいえない。

一方、ラジノクロバはほふく型の草型を有し、光競合に弱いばかりでなく、根が浅いため、水分競合でも劣る。しかし、チモシーとの組合せでは、各番草の生育中期までと(図4-14)、2番草収穫

後から越冬前に(表4-8)かなりの量の窒素固定を見込むことができる。本実験で供試したチモシー・ラジノクロバ混播草地での無窒素区の窒素固定量は約15kg/10aであり、これは3年間ほぼ同一の水準で推移した(表4-15)。また、年間10kg/10aもの窒素施肥を行っても、各番草の生育中期までのラジノクロバ生育が顕著には抑制されないことから(図4-14)、窒素固定の不足分を施肥窒素で補うことが可能な組合せであった。

これに対し、オーチャードグラス・ラジノクロバの組合せでは、窒素無施用条件であっても、窒素移譲によってオーチャードグラスの生育が旺盛になり、ラジノクロバの生育を激しく抑制するので数年周期でラジノクロバ生育量が高低を繰り返す現象が認められた(表4-14)。このことから無窒素条件でもオーチャードグラスとの組合せでラジノクロバを安定的に維持し、窒素固定を利用することは不可能であると理解される。しかし、オーチャードグラス・ラジノクロバ混播草地の収量は実験期間8ケ年中5ケ年に約600kg/10aに達しており(表4-14)、粗放的草地としての利用は可能である。

以上の結果から、天北地方の土壌、気象条件では、アルファルファはオーチャードグラスとの、ラジノクロバはチモシーとの混播が根粒による窒素固定の利活用の観点から適当であると結論された。

(3) マメ科牧草による土壌微生物の活性化

根粒によって固定された窒素は土壌微生物にも影響を及ぼした。アルファルファでは主に根からの分泌物によって微生物数の増加が起こり、ラジノクロバでは、枯死茎葉の還元によって微生物数と窒素無機化量の増加がもたらされた。増加した微生物は、第1にマメ科牧草からイネ科牧草に対する窒素移譲において一定の役割を果たす。すなわち、根粒によって固定され、根の分泌物、枯死茎葉や脱落根粒などの有機態として土壌に還元された窒素化合物を分解無機化してイネ科牧草に供給する。第2に、いわゆるpriming effectによって、草地表面に蓄積した比較的難分解性有機物の

分解を行う可能性もある。この結果、マメ科牧草混播草地の表層に蓄積した有機物の量は、イネ科牧草単播草地より少なかった(表4-7)。すなわち、根粒による窒素固定が行われることによって、草地生態系に窒素が付加されるのみならず、物質循環の流れ自体も円滑化することが指摘できる。

第2節 草地生産性の向上を目的とした土壤微生物活性と根粒による窒素固定の強化策

これまでに明らかにした微生物特性と草地生産性の関係と、それに介在する各要因を図5-1にまとめた。以下に、これに沿って、微生物特性の向上を通じた草地の維持管理方策について検討を加える。

1. 0-2cm土層における土壤微生物の活性化方策

0-2cm土層における土壤微生物特性の規制要因は土壤pHであり、低pH土壤では有機物の分解が停滞し、草地の生産力が低下する。

それ故、この部位の微生物数と活性を低下させないために表層土壤の酸性化を起こさないような草地施肥管理を行うことが望ましい。そのためには随伴アニオンの少ない肥料を用いて、塩基の溶脱を最小限にとどめることも一策である。宝示戸ら⁶⁶⁾によると年間12kg/10aの窒素を硫酸アンモニウム、または尿素で施用した草地の作土表層土壤のpHは10年後にそれぞれ4.5と5.4であった。

硫酸イオンや塩素イオンのようなアニオンを含んだ肥料を施用するにしても、酸性化が進行しないように毎年炭酸カルシウムを施用すれば土壤pHの低下は起こらない。しかし、天北地方の降雨条件では、降雨中にふくまれる重炭酸イオンのために、肥料中に含まれる随伴アニオンに相当する炭酸カルシウムを施用しても土壤pHは低下方向にあった(表3-15)。それ故、作土表層のpH低下を阻止するためには雨水による流亡分をも考慮した量の炭酸カルシウムを施用しなければならない。毎年充分な量の炭酸カルシウム施用を行うことが原則となっているニュージーランドでは、微生物活

性が経年的に向上したことが報告されており¹⁶⁵⁾、天北地方の草地においても微生物活性が低下して表層に有機物が蓄積し、先に論議した問題が生じないための対策をとることが必要である。

すでに表層土壤のpHが低下し、微生物活性が抑制された草地に対しては、炭酸カルシウムの表面施用が有効であり、これによって微生物が活性化した(表3-32~34)。しかし、有機物が多量に蓄積した草地に対する炭酸カルシウムの表面施用は一時的に施肥窒素の有機化を起こし、収量向上に結び付かないことが報告されている¹⁰⁷⁾。本研究では、酸性矯正をして土壤pHが6.0を上回った区では牧草収量が増加したが、6.0に至らなかった区では牧草収量が炭酸カルシウム無施用区に比べてむしろ低下した(表3-32, 34)。したがって、炭酸カルシウムは毎年施用し、表層有機物の蓄積を起こさせないことが草地管理上望ましいが、やむをえず表層土壤pHの低下した草地に対しては、pHを6.0~6.5に矯正することを目標に炭酸カルシウムを施用する必要がある。

また、0-2cm土層のpHが適正であれば、耐酸性が特に弱いラジノクロバ⁶⁸⁾を維持しやすくなる。ラジノクロバの混播は土壤の微生物活性を高める(表4-7)。ラジノクロバが衰退し易いとされる天北地方の草地においても、表層が酸性化していない条件では、窒素12kg/10aの施用レベルであれば、年によってラジノクロバの侵入が起こることが観察されている。侵入したラジノクロバは、収穫時までにはイネ科牧草に被覆されて大部分の葉が枯死脱落し収穫物の主要な構成成分とはならないことも多いが、枯死茎葉は緑肥的に作用して草地に供給される窒素量を増大させるとともに土壤微生物の活性化をもたらす。

酸性化対策は、草地作土表層土壤のpHが5.5を下回らないように行うことが指導されている⁵⁶⁾。しかし、イネ科牧草は比較的耐酸性が強い⁶⁸⁾ため、草地における表層土壤の酸性化にはあまり注意が払われない傾向にある。草地が酸性化した場合には、微生物活性が低下して、物質循環が停滞することは繰り返し述べた通りである。微生物の活性化と、ラジノクロバによる窒素固定ならびにそ

の利用の観点から、表層土壌のpHの低下を避けることが必須である。

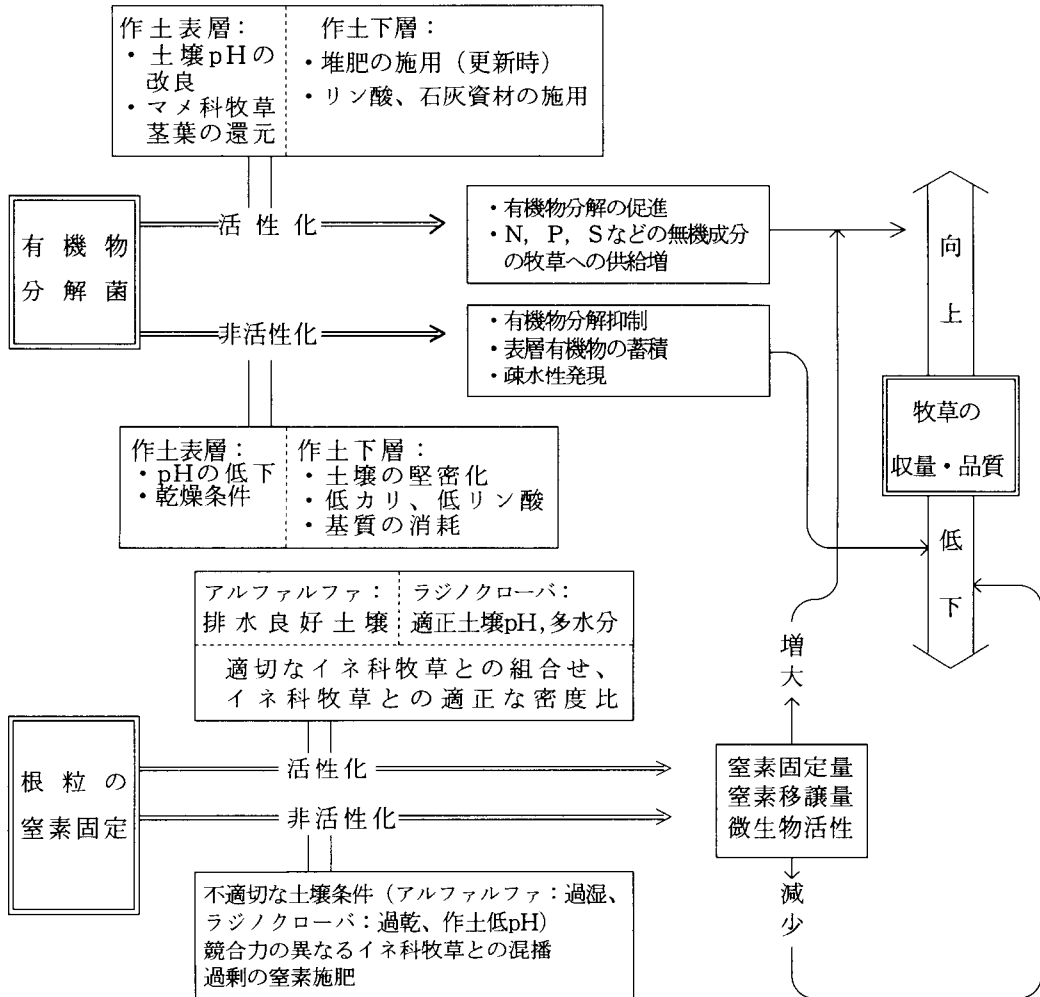


図5-1 草地における土壌微生物の役割と生産性

2. 5-15cm土層における土壌微生物の活性化 方策

作土下層(5-15cm土層)の微生物数と活性を低下させる要因は、物理性の劣悪化に起因する酸素供給不足、カリウムやリン酸ならびに微生物の基質となる有機物の不足および低pHなどであった。

草地は数年から十数年に1度の割合で耕起されるので、作土下層の微生物特性を改善するために、この土層の化学性と物理性を草地の維持段階で直接改善することは難しい。それ故、作土下層に対して人為的な働きかけを行う時期は、更新時が中心となる。更新時における堆肥の鋤き込みは、草地の経年化による作土全体の微生物特性の低下を

緩和した(表3-35)。堆肥は土壤の物理性を改善するばかりでなく、作土下層に有機物やカリを供給することによって微生物数と活性の増加をもたらした。さらに、更新時に炭酸カルシウムやリン酸資材を施用し、これらの成分を富化することも微生物の活性化のために効果的である。この際土壤pHやリン酸、カリ含量の改善目標値の設定にあたっては、図3-13の結果が参考になろう。この結果から、作土下層の化学性改善の目標値を土壤pH6.0以上、BrayII-リン酸10mg/100g以上とすることを提案したい。

この様な方策を採用することによって、作土下層において常に高い微生物数と活性を維持することができ、同時に牧草根の生育環境としても良好になるので、草地の維持年限の延長を図ることもできよう。草地の更新は費用がかかるばかりでなく、更新年の牧草収量は低い。それに加えて、更新年においては雑草対策等の草地管理が必要であり、労力的にも負担が大きい。したがって、草地の維持年限を延長することは牧草生産を低コスト化するために最も効率的な方策である。堆肥、炭酸カルシウムやリン酸資材の施用のために草地造成時の費用が増加したとしても、更新を行う回数が減ることになれば経済的にも充分成り立つと考える。以上のように、作土下層から供給される養分の増加と、草地の利用年限延長のために、作土下層の微生物を活性化することが有効である。

3. 根粒による固定窒素の利活用による草地の収量向上方策

天北地方で牧草収量が低迷している原因の1つとして、窒素を代表とする投入養肥分量の不足をあげることができる。天北地方の厳しい気象条件でもアルファルファで30kg/10a、ラジノクローバで20kg/10a程度の窒素固定が見込まれ、マメ科牧草の利用は牧草収量の向上のためにきわめて重要な寄与をすることになる。本研究においては、マメ科牧草の維持について詳細な検討を加えなかったが、前述の0-2cm土層の酸性改良や、作土下層の理化学性改善は土壤微生物の活性化のみならず、

マメ科牧草の維持においても重要である。特に浅根性のラジノクローバは、極浅い表層の化学性が良好で水供給量の大きな土壤で生産力が高い。深根性のアルファルファは、過湿になりにくい土壤で高い生産力を示し、作土を含めた有効土層全体を良好に保つことが、その利用にとって重要になる(表4-9, 10)。イネ科牧草との組合せについては、天北地方の気象・土壤条件では、ほふく型のラジノクローバはチモシーとの、直立型のアルファルファはオーチャードグラスとの混播利用が根粒の窒素固定を有効利用する上でより適切な組合せである。

また、窒素施肥すなわち化合態の窒素施用は、畑地におけるマメ科作物のように直接根粒の窒素固定活性を低下させることに加え、随伴イネ科牧草の生育促進を通じて光に対する競合を激化させ、マメ科牧草の生育抑制を通じて根粒活性を低下させる側面が大きい。マメ科牧草が混播された草地に対する不適切な窒素施肥は、窒素固定を抑制することによって草地全体の収量を低下させる場合すらあった(表4-4)。それ故、マメ科牧草の窒素固定を利用するためには、マメ科牧草と混播イネ科牧草の特徴にあった窒素施肥を行う必要がある。

たとえば、排水のよい土壤のアルファルファ・オーチャードグラス混播草地では、アルファルファの生育が旺盛であるために、年間6kg/10a程度の窒素施肥は、アルファルファ生育を抑制しなかった(表4-9)。アルファルファ混生量が400kg/10a・年以上の草地に対しては窒素施肥の必要はないが、アルファルファによる窒素固定量が不足して低収である草地に対しては、土壤の排水性が良好であれば年6kg/10aの窒素施用をおこなうことによって100kg/10a以上の増収が得られる(図4-10)。しかし、排水の悪い草地ではアルファルファの生育が劣り、窒素施肥はオーチャードグラスの生育促進を通じてアルファルファ生育を強く抑制した(表4-10)。アルファルファは株が減少すると復活することはないので、株数を減少させない管理が必要であり、この観点から排水の不良な草地での窒素の施肥は危険である。

一方、ラジノクローバはいったん株数が減少し

ても、条件が良ければランナーによって再び株数自体が増加するので、何らかの理由でラジノクロバ混生量が低下して低収に陥ったとしても長い目でみた対処が可能である。ラジノクロバとオーチャードグラスの組合せでは、無窒素でも根粒による窒素固定と窒素移譲によって、年間窒素10kg/10a程度を施用したイネ科牧草単播草地と同程度の収量を得ることができる。年6kg/10a程度の窒素施用はラジノクロバを抑制して無窒素より低収となったので(表4-4)、オーチャードグラスとの混播でラジノクロバの窒素固定を利用しようとする場合にはラジノクロバが一旦衰退したとしても窒素施用を行うべきではない。ただし、無窒素条件でも窒素固定量の年次変動が激しいために安定的な牧草生産を期待することはできない。

チモシー・ラジノクロバ混播草地では、窒素施肥を行ってもラジノクロバは極端に衰退しない(表4-15)。このため、チモシー・ラジノクロバ混播草地では、窒素固定量が充分でない場合には、年間6kg/10a程度の窒素を施肥することが生

産性向上のために必要であると考えられた。根粒固定窒素を利用する立場からは効率的ではないが、10kg/10a以上の窒素施肥を行ってもラジノクロバは維持された。

実際の酪農経営において、牧草生産は各草種単独または各草種を組合せた草地を経営草地内に合理的に配置して行われる。草種の配置についてはいくつかのモデルが提唱されている⁵⁹⁾が、本研究で明らかになった特性を考慮しつつ、各イネ、マメ科牧草の混播草地をモデルの一つに当てはめることを試みた(図5-2)。

オーチャードグラス・アルファルファ混播草地は収量が高い反面、その維持のために適期の刈り取り管理が要求されるので、集約的な採草地として利用することが適当である。年3回刈りを行う場合にアルファルファの永続性に問題がある土壌や地帯ではチモシーとの組合せでこれを利用することができる。地下水位が高いためアルファルファを維持することが困難な土壌ではラジノクロバを積極利用すべきである。チモシー・ラジノクロ

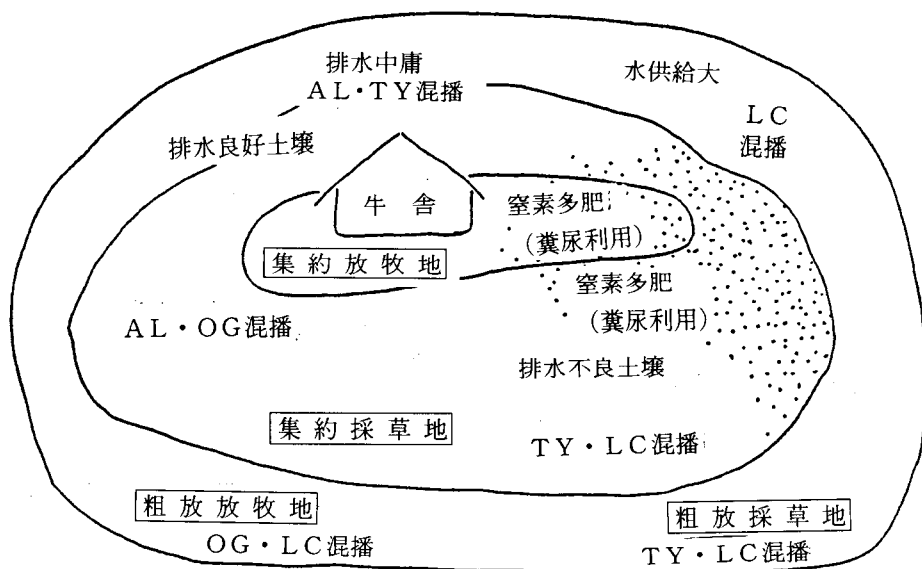


図5-2 マメ科牧草混播草地の合理的配置モデル

AL: アルファルファ LC: ラジノクロバ
OG: オーチャードグラス TY: チモシー

バの混播草地は年間800kg/10a以上の乾物収量を得ることが可能なので、窒素の多施を前提とした集約的イネ科牧草単播草地と置き換えることが可能である。オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地は、安定した収量が期待できないので、外縁部に位置する比較的粗放な採草地・放牧地としての利用が適当であろう。さらに、アルファルファ混播草地の生産力がきわめて高いことから、排水改良の可能な土壌では、明暗きよの付設など十分な排水対策を行ってアルファルファの導入を行うことも有効である。

マメ科牧草の根粒による窒素固定を合理的に利

用することによって余剰となった窒素肥料は、集約的イネ科牧草単播草地に集中して施用することが可能になる。そうすることによって、根粒の固定窒素は経営内の全草地の生産性を向上させることになる。

以上の結果から、草地の微生物活性を高めて有機物から牧草に供給される窒素を中心とした無機成分を増加させることと、マメ科牧草による窒素固定の有効利用によって、北海道における草地経営の命題である低コスト・多収・永年維持を達成することが可能であると考ええる。

第6章 要 約

本研究は、天北地方に分布する重粘土地帯における草地の物質循環と窒素固定を通じて、牧草生産力に大きな影響をおよぼす土壤微生物の特徴と、その働きを規制する諸要因を明らかにし、それらを改善することによって、草地管理の合理化を図る目的で実施した。得られた結果の概要は次の通りである。

1. 天北重粘土に立地する採草地の土壤微生物的特徴

(1) 草地土壤の微生物特性は、0-15cmのAp層内で顕著に層位分化しており、微生物数は表層で多く下位層に向かうほど減少した。Ap層の最上部0-2cm土層の微生物は牧草から土壤に還元された有機物の分解・無機化を行い、作土下層5-15cm土層の微生物は更新時に鋤込まれた植物体、堆肥や土壤有機物の分解を担っているとの位置づけができる。これに対し畑土壤では、Ap層内での微生物特性の層位間差は極めて小さかった。

(2) 0-2cm土層の全細菌数は、春と秋に高く、初春、夏、晩秋に低い季節変化を辿った。季節変化を起こす要因としては牧草からの基質供給と土壤水分をあげることができる。すなわち、春と秋のピークはそれぞれ越冬時と1番草の枯死茎葉に由来し、ピークの出現時期は土壤の乾燥によって遅れた。季節変化の振幅は0-2cm土層に比べて、作土下層で小さかった。糸状菌菌糸長の季節変化は細菌数のそれに比べて小さく、フラクトース、尿素の分解活性の季節変化は細菌数にほぼ類似した。

2. 微生物活性の規制要因とその改善

(1) 0-2cm土層では草地の経年化に伴い、pHが低下し、リン酸・カリおよび有機物が蓄積した。これらの要因の中で最も大きく微生物特性を規制する要因は土壤pHであり、pHが5.0以下では細菌数と分解活性が著しく低下した。土壤のリン酸・置換性カリおよび有機物含量の増加は、微生物数を増加させた。pHが低い草地では、枯死茎葉の

供給に対応した細菌数の季節変化が起こらないため、有機物の分解が円滑に進まず、草地表層での有機物蓄積量が増加した。糸状菌菌糸長に対する低pHの影響は小さかったが、TTC還元活性、硝酸化成活性および有機物分解活性は細菌数と同様に低pH条件で低下した。

(2) 5-15cm土層の細菌数、糸状菌数、微生物活性は草地の経年化に伴って減少した。減少の要因は、基質の減少と酸素供給の低下であった。土壤の化学性では有効態のリン酸、置換性カリ、低pHが微生物特性の規制要因であった。pH6.0以下、Bray II-リン酸10mg/100g以下の土壤では細菌数が顕著に抑制された。この土層では微生物数と活性の減少にともなって存在基質量当りの炭酸ガス放出量が減少した。基質量当りの炭酸ガス放出量は、気相率が低く、土壤空気中の酸素分圧の低い土壤で小さかった。

作土下層の微生物特性は窒素無機化量の予測や牧草の根圏環境指標に利用できることが示唆された。

(3) 0-2cm土層のpHが低下した草地に炭酸カルシウムを表面施用することによって、微生物数と活性が増大した。炭酸カルシウム施用後の土壤pHが6.0以下の草地では牧草収量がむしろ低下したが、6.0以上の草地では増収が得られた。

堆肥の鋤込みによって、作土表層と下層の両土層で微生物数が増加した。草地造成時の堆肥鋤込みは、草地の経年化にともなう微生物特性の低下を緩和する上で有効な手段であった。

(4) 天北地方の草地土壤における微生物数と活性は、全細菌数、糸状菌長および糸状菌数によって代表される3つのグループに大別された。細菌数と同じグループには尿素・フラクトースなどの低分子化合物の分解活性が含まれた。これらの分解活性は、草地土壤の炭酸ガス放出量とも相関が高く、草地における0-2cm土層の微生物特性の簡易指標となりうる。微生物数と活性の測定値は土壤の保存によって変化した。したがって、土壤微生物特性の測定は土壤採取後直ちに行うことが望

ましい。

3. マメ科牧草の窒素固定と窒素移譲

(1) アルファルファとラジノクローバの根粒は越冬時には脱落し、早春の地上部再生と同時に着生を開始し、刈り取り後も脱落しなかった。アセチレン還元活性は刈り取り後に著しく低下したが、地上部の再生に伴って再び高まった。ほふく型であるラジノクローバでは、各番草の後半になるとイネ科牧草に被覆されるため、アセチレン還元活性のピークが各番草の中間にあるのが特徴であった。

(2) オーチャードグラス混播草地の収量と窒素固定量は、窒素無施用条件ではアルファルファ、ラジノクローバいずれとの組合せでもチモシー混播草地を上回り、マメ科牧草の窒素固定量は2回刈りより3回刈りで多かった。混播草地におけるアルファルファとラジノクローバの窒素固定量はそれぞれ最大約30kg、25kg/10aであった。窒素固定量はアルファルファの場合には、窒素施肥によって大幅に変化しなかったが、オーチャードグラスとラジノクローバの組合せでは、大幅に減少した。イネ科牧草に対する窒素移譲量はオーチャードグラス・アルファルファ草地では最大約7kg/10a、オーチャードグラス・ラジノクローバ草地では10kg/10aであった。オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地の移譲量は窒素施肥によって大幅に減少した。

(3) ラジノクローバ混播草地では、全生育期間を通じて土壤の窒素無機化量、微生物数ともに大幅に増加した。これはラジノクローバでは、越冬時に加えて、生育中にも枯死茎葉の還元が行われることに起因した。越冬時における枯死茎葉還元が少ないオーチャードグラス・アルファルファ混播草地では年間を通じて土壤窒素無機化量の増加が認められなかったが、微生物数は増加した。これは根から直接供給される基質が比較的速やかに分解されることによると考えられた。根粒菌による窒素固定は、草地生態系内への窒素供給量を増大させるばかりでなく、微生物の活性化によって草地土壌内の物質循環を円滑化した。

4. 窒素集積量、牧草収量および窒素移譲量に及ぼすマメ科牧草混生比と窒素施肥の影響

(1) オーチャードグラス・アルファルファ混播草地ではアルファルファ混生量にほぼ比例してオーチャードグラスの窒素含有率が上昇した。アルファルファからオーチャードグラスに対する窒素移譲は、おもにアルファルファ根の分泌物を介して行われると考えられた。窒素移譲量はアルファルファ収量が400kg/10aのときに最大値となった。アルファルファ収量が400kg/10a以上では、窒素受容者としてのオーチャードグラスの生育が相互遮蔽のために低下した。アルファルファ収量が300kg以下では窒素移譲量はオーチャードグラス収量に対して充分でなかった。このような草地では窒素施用をすることによって牧草収量は向上するが、排水不良土壌では窒素施用によってアルファルファの生育が激しく抑制された。

(2) チモシー・アルファルファ混播草地においては、チモシーはアルファルファに比べて早春と1番草刈り取り後の再生が遅く競合力が劣るため、年間10kg/10aの窒素を施肥しても、窒素受容者であるチモシーが不足した。このため、窒素固定を利活用する立場から考えるとチモシー・アルファルファ草地は効率的ではないと判断された。

(3) オーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地においては、ラジノクローバ混生量とオーチャードグラスの窒素含有率との間に、比例関係が認められなかった。反面、ラジノクローバの窒素移譲量は当年の収量よりも前年のラジノクローバ収量に強く支配された。これらの結果から、ラジノクローバの窒素移譲はアルファルファとは異なり、生育中や越冬時に土壌に還元された枯死茎葉を介して行われると理解された。無窒素条件のオーチャードグラス・ラジノクローバ混播草地における8年間の平均窒素固定量は約13kg/10a・年であったが、年次間の変動が大きく周期的に高低を繰り返した。

(4) チモシー・ラジノクローバ混播草地での無窒素区の窒素移譲量は造成2年目で4kg/10a・年であったが、経年数と共に増加して4年目には約13kg/10aに達し、オーチャードグラス・ラジノクロー

バ混播草地を凌いだ。10kg/10a・年の窒素施肥条件でも、4年目の窒素移譲量は8.5kg/10aと多かった。チモシーと混播したラジノクローバは、チモシーの生育が遅いため各番草における中期までの生育が旺盛あり、これと2番刈り後の窒素固定が移譲源であった。ラジノクローバの生育は窒素施用によって激しく低下せず、年間6kg/10a程度の窒素施用は収量向上のために有効であった。

5. 土壤微生物の活性化と根粒による固定窒素の有効利用のための草地管理法

(1) 草地作土表層の微生物特性を維持するためには、流出量に対応する炭酸カルシウムを毎年施用することが望ましい。作土表層土壌のpHが低下した草地に対する炭酸カルシウムの施用に当たっては、pHの改善目標を6.0~6.5に設定する必要がある。作土下層の微生物数と活性を高めるため

には、更新時に堆肥の鋤込みを行うことが有効であり、同時に土壤改良材の施用によって土壌pH、Bray II-リン酸をそれぞれ6.0、10mg/100g以上に高めることが望ましい。

(2) 根粒による固定窒素を利用する立場からアルファルファ、ラジノクローバと組み合わせるイネ科牧草としては、それぞれオーチャードグラス、チモシーが適切である。排水の良好な土壌において、アルファルファの混生量が300kg/10a・年以下のオーチャードグラス・アルファルファ混播草地の牧草収量は、年間6kg/10aの窒素施用によって増収するが、排水不良土壌における窒素施肥はアルファルファを衰退させるので避けるべきである。チモシー・ラジノクローバ混播草地に対する年間6kg/10aの窒素施肥は窒素移譲量の不足を補う有効な手段である。

引用文献

- 1) 鑑谷大節・北沢健治・鈴木孝仁・赤井純：畑作物の土壤病害に関する研究 1. 畑の土壤微生物相について，北農試研究報告，88, 45-52 (1965)
- 2) Amato, M., Ladd, J. N. : Assay for microbial biomass based on ninhydrin - reactive nitrogen in extracts of fumigated soils. *Soil Biol. Biochem.*, 20, 107 - 114 (1988)
- 3) Anderson, J. P. E., Domsch, K. H. : A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 10, 215-221 (1978)
- 4) Bååth, E., Lundgren, B., Söderström, B. : Fungal populations in podzolic soil experimentally acidified to simulate acid rain. *Microb. Ecol.*, 10, 197-203 (1984)
- 5) Babiuk, L. A., and Paul E. A. : The use of fluorescein isothiocyanate in the determination of the bacterial biomass of grassland soil. *Can. J. Microb.*, 16, 57-62 (1970)
- 6) Baker, H. K., Garwood, E. A. : Studies in the root development of herbage plants. 4. Seasonal changes in the root and stubble weights of various leys. *J. Br. Grassl. Soc.*, 14, 94-104 (1959)
- 7) Ball, P. R., and Crush, J. R. : Prospects for increasing symbiotic nitrogen fixation in temperate grasslands. *Proc. 15th Int. Grassl. Congress.*, 56-60 (1985)
- 8) Barta, A. L. : Effect of root temperature on dry matter distribution, carbohydrate accumulation, and acetylene reduction activity in alfalfa and birdsfoot trefoil. *Crop Sci.*, 18, 637-640 (1978)
- 9) Blue, W. M. G., Eno, C. F., Westgate, P. J. : Influence of soil profile characteristics and nutrient concentrations on fungi and bacteria in Leon fine sand. *Soil Sci.*, 89, 303-30 (1955)
- 10) Boller, B. C., Nösberger, J. : Symbiotically fixed nitrogen from field-grown white and red clover mixed with ryegrasses at low levels of ^{15}N fertilization. *Plant and Soil*, 104, 219-226 (1987)
- 11) Bottomley, P. J., Jenkins, M. B. : Some characteristics of *Rhizobium meliloti* isolates from alfalfa fields in Oregon. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 47, 1153-1157 (1983)
- 12) Broadbent, F. E., Nakashima, T., Chang, G. Y. : Estimation of nitrogen fixation by isotope dilution in field and greenhouse experiments. *Agron. J.*, 74, 625-628 (1982)
- 13) Brophy, L. S., Heichel, G. H., Russelle, M. P. : Nitrogen transfer from forage legumes to grass in a systematic planting design. *Crop Sci.*, 27, 753-758 (1987)
- 14) Bryant, R. D., Gordy, E. A., Laishley, E. J. : Effect of soil acidification on the soil microflora. *Water, Air and Soil Pollution*, 11, 437-445 (1979)
- 15) Burity, H. A., Ta, T. C., Faris, M. A., Coulman, B. E. : Estimation of nitrogen fixation and transfer from alfalfa to associated grasses in mixed swards under field conditions. *Plant and Soil*, 114, 249-255 (1989)
- 16) Burns, R. G., Pukite, A. H., McLaren, A. D. : Concerning the location and the persistence of soil urease. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36, 308-311 (1972)
- 17) Campbell, C. A., Biederbeck, V. O. : Soil bacterial changes as affected by growing season weather conditions : A field and laboratory study. *Can. J. Soil Sci.*, 56, 293-310 (1976)
- 18) Campbell, C. A., Biederbeck, V. O. : Changes in mineral N and numbers of bacteria and actinomycetes during two years under wheat-fallow in southwestern Saskatchewan. *Can. J.*

- Soil Sci., 62, 125-137 (1982)
- 19) Campino, I. : Effect of the K fertilization on the N-mineralization in a grassland soil and on the N-uptake by Italian ryegrass. Proc. 15th Int. Grassl. Congress, 452-453 (1985)
 - 20) Carter, L. P., Scholl, J. M. : Effectiveness of inorganic nitrogen as a replacement for legumes grown in association with forage grasses. II. Nitrogen content, yield of nitrogen, and seasonal distribution. Agron. J., 56, 287-290 (1964)
 - 21) Casida, L. E. Jr. : Microbial metabolic activity in soil as measured by dehydrogenase determinations. Appl. Environ. Microbiol., 34, 630-636 (1977)
 - 22) Cassman, K. G., Munns, D. N. : Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature and depth. Soil Sci. Soc. Amer. J., 44, 1233-1237 (1980)
 - 23) Chestnutt, D.M.B. : The effects of white clover and applied nitrogen on the nitrogen content of various grass/clover mixtures. J. Br. Grassl. Soc., 27, 211-216 (1972)
 - 24) Chu, A. C.P., Robertson, A. G. : The effects of shading and defoliation on nodulation and nitrogen fixation by white clover. Plant and Soil, 41, 509-519 (1974)
 - 25) Clark, F. E., Paul, E. A. : The microflora of grassland ; in Adv. Agron. Vol. 22, Brady, N. C. ed., p. 375-435, Academic Press, New York (1970)
 - 26) Cowling, D. W. : The effect of white clover and nitrogenous fertilizer on the production of a sward. 1. Total annual production. J. Brit. Grassl. Soc., 16, 281-290 (1961)
 - 27) Cowling, D. W. : Biological nitrogen fixation and grass-land production in the United Kingdom. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B296, 297-404 (1982)
 - 28) Craig, L. A., Wiebold, W. J., McIntosh, M. S. : Nitrogen fixation rates of alfalfa and red clover grown in mixture with grasses. Agron. J., 73, 996-998 (1981)
 - 29) 大門弘幸・中条博良 : 混作, 間作, 輪作における作物の生長と窒素の動態 第2報 エンドウならびにソラマメとの混作がコムギの窒素吸収に及ぼす影響, 日作紀, 55, 162-170 (1986)
 - 30) 大門弘幸・中条博良 : 混作, 間作, 輪作における作物の生長と窒素の動態 第3報 ダイズ, ササゲおよびインゲンマメとの混作がトウモロコシの窒素吸収に及ぼす影響, 日作紀, 55, 171-178 (1986)
 - 31) Dick, W.A. : Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. Soil Sci. Soc. Amer. J., 48, 569-574 (1984)
 - 32) Dilz, K., Mulder, E. G., Effect of associated growth on yield and nitrogen content of legume and grass plants. Plant and Soil 16, 229-237 (1962)
 - 33) 土壌微生物研究会編 : 土壌微生物研究法, 培地の組成とつくり方, p.431-434, 養賢堂, 東京 (1975)
 - 34) Doll, E. C., Hatfield, A.L., Todd, J.R. : Vertical distribution of topdressed fertilizer phosphorus and potassium in relation to yield and composition of pasture herbage. Agron. J., 51, 645-648 (1959)
 - 35) Evans, D. D., Don Kirkham : Measurement of the air permeability of soil *in situ*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 14, 65-73 (1949)
 - 36) Frankenberger, W. T. Jr., Tabatabai, M. A. : Amidase activity in soils : IV. Effects of trace elements and pesticides. Soil Sci. Soc. Amer. J., 45, 1120-1124 (1981)
 - 37) Frankenberger, W. T. Jr., Dick, W. A. : Relationships between enzyme activities and

- microbial growth and activity indices in soil. Soil Sci. Soc. Amer. J., 47, 945-951 (1983)
- 38) 福井作蔵：還元糖の定量法, p47-54, 東京大学出版会, 東京 (1969)
- 39) Goodman, P. J., Collison, M., Effect of three clover varieties on growth, ^{15}N uptake and fixation by ryegrass/white clover mixtures at three sites in Wales. Grass and Forage. Sci., 41, 191-198 (1986)
- 40) Graham, T. W. G., Myers, R. J. K., Doran, J. W., Catchpoole, V. R., Robbins, G. B.: Pasture renovation: The effect of cultivation on the productivity and nitrogen cycling of a buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) pasture. Proc. 15th. Int. Grassl. Congress, 640-642 (1985)
- 41) Halliday, J., Pate, J. S.: The acetylene reduction assay as a means of studying nitrogen fixation in white clover under sward and laboratory conditions. J. Brit. Grassl. Soc., 31, 29-35 (1976)
- 42) Hanson, R. G., MacGregor, J. M.: Soil and alfalfa plant characteristics as affected by a decade of fertilization. Agron. J. 58, 3-5 (1966)
- 43) 服部 勉：土壤の団粒構造と微生物, 東北大農研報, 18, 159-193 (1967)
- 44) 服部 勉：微生物学の基礎, 学会出版センター, 東京 (1986)
- 45) 早川康夫・橋本久夫：根釧地方火山灰地における牧草地土壌の理化学的特性とその施肥法に関する試験 第5報 牧草地土壌としての特性発現過程と窒素, 磷酸, 加里の供給力について, 北海道立農試集報, 7, 16-33 (1961)
- 46) 早川康夫・橋本久夫・奥村純一：根釧地方の牧野改良, 第6報, 耐減肥性牧草の比較とイネ科牧草へのクローバ固定窒素の移譲, 北海道立農試集報, 15, 101-112 (1967)
- 47) Haystead, A., Marriott, C.: Fixation and transfer of nitrogen in a white clover-grass sward under hill conditions. Ann. Appl. Biol., 88, 453-457 (1978)
- 48) Haystead, A., Marriott, C.: Transfer of legume nitrogen to associated grass. Soil Biol. Biochem., 11, 99-104 (1979)
- 49) Heinrichs, D. H.: Flooding tolerance of legumes. Can. J. Plant Sci., 50, 435-438 (1970)
- 50) Henson, R. A., Heichel, G. H.: Partitioning of symbiotically fixed nitrogen in soybeans and alfalfa. Crop Sci., 24, 986-990 (1984)
- 51) Herriot, J. B. D. and Wells, D.: Clover nitrogen and sward productivity. J. Br. Grassl. Soc., 15, 63-69 (1960)
- 52) 東田修司, 高尾欽弥：草地の経年化と土壤微生物, 北海道草地研究会報, 16, 44-46 (1982)
- 53) 東田修司・高尾欽弥・坂本宣崇：個体密度の異なるオーチャードグラス草地の収量推移と窒素反応性, 北海道立農試集報, 52, 1-11 (1985)
- 54) 平島利昭・能勢 公・袴田共之・奥村純一 極寒冷地域における放牧草地の維持管理法 第1報 イネ科牧草に対するシロクローバの窒素移譲, 北海道立農試集報, 23, 44-54 (1971)
- 55) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科：天北地方におけるオーチャードグラス主体草地の肥培管理と植生変遷, 北海道農業試験会議資料, (1983)
- 56) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科：草地の経年化に伴う土壌酸性化と石灰施用, 北海道農業試験会議資料, (1984)
- 57) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科・北海道立根釧農業試験場土壌肥料科：草地の土壌カリ供給力に応じた施肥改善法, 北海道農業試験会議資料, (1986)
- 58) 北海道立根釧農業試験場土壌肥料科：チモシーを基幹とする採草地の効率的窒素施肥法, 北海道農業試験会議資料, (1987)
- 59) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科：施肥のすすめ, (1986)

- 60) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科：鉍質土草地における施用堆きゅう肥の窒素評価，北海道農業試験会議資料，（1988）
- 61) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科：天北地方鉍質重粘土草地の収量規制要因（水分供給）とその改善策，北海道農業試験会議資料，（1988）
- 62) 北海道立中央農業試験場，十勝農業試験場，北見農業試験場，ホクレン：熱水抽出性窒素によるてん菜及び馬鈴しょ畑の土壌窒素診断，北海道農業試験会議資料，（1990）
- 63) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科：天北地方イネ科主体草地の経年化に伴う収量変動要因と窒素施肥対応，北海道農業試験会議資料，（1990）
- 64) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科・北海道立根釧農業試験場土壌肥料科：土壌窒素供給力の評価による草地の効率の窒素施肥管理，北海道農業試験会議資料，（1991）
- 65) 宝示戸雅之・坂本宣崇・高尾欽弥：天北地方のオーチャードグラス主体草地における気象要因と乾物生産，北農，48，1-10（1981）
- 66) 宝示戸雅之・佐藤辰四郎・高尾欽弥：草地土壌の酸性化に伴うアルミニウム溶出と牧草生育，北海道立農試集報，50，43-53（1983）
- 67) Hojito, M., Higashida, S., Nishimune, A., Takao, K.,; Effects of liming on grass growth, soil solution composition, and microbial activities. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33, 177-185（1987）
- 68) 宝示戸雅之・西宗 昭・高尾欽弥：牧草の耐酸性，北海道立農試集報，57，79-92（1988）
- 69) Hoglund, J. H., Crush, J. R., Brock, J. L., Ball, R. : Nitrogen fixation in pasture. XII. General discussion. *N. Z. J. Exper. Agric.*, 7, 45 -51（1979）
- 70) 井田 明・森 哲朗：鉍質畑土壌における窒素の行動に関する研究 第1報 硝化作用に及ぼす土壌空気と土壌水分の影響，東海近畿農試研究報告，19，98-109（1970）
- 71) Ivarson, K. C. : Changes in decomposition rate, microbial population and carbohydrate content of an acid peat bog after liming and reclamation. *Can. J. Soil Sci.*, 57, 129 - 137（1977）
- 72) 石沢修一・鈴木達彦：季節変動，土壌微生物の生態，生態学講座，p. 80-84，共立出版，東京（1973）
- 73) 伊藤憲治・土谷 馨・関谷長昭・湯藤健治：天北泥炭地における草地利用の実態と牧草の採食性に関する意識調査，北農，52，1-17（1985）
- 74) Jackman, R. H. : Accumulation of organic matter in some New Zealand soils under permanent pasture. I. Patterns of change of organic carbon, nitrogen, sulphur, and phosphorus. *N. Z. J. Agric. Res.*, 7, 445 - 471（1964）
- 75) Jenkinson, D. S., Powlson, D. S. : The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. I. Fumigation with chloroform. *Soil Biol. Biochem.*, 8, 167 - 177（1976）
- 76) Jenkinson, D. S., Powlson, D. S., Wedderburn, R. W. M. : The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. III. The relationship between soil biovolume, measured by optical microscopy, and the flush of decomposition caused by fumigation. *Soil Biol. Biochem.* 8, 189 - 202（1976）
- 77) Jenkinson, D. S., Oades, D. S., : A method for measuring adenosine triphosphate in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 11, 193 - 199（1979）
- 78) Jenkinson, D. S., Davidson, S. A., Powlson, D. S. : Adenosine triphosphate and microbial biomass in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 11, 521-527（1979）
- 79) Jo, J., Yoshida, S., Kayama, R., : Influence of soil acidity and applied nitrogen on the growth and chemical compositions of ladino clover

- and alfalfa. *J. Japan. Grassl. Sci.*, 27, 79 - 84 (1981)
- 80) Jo, J., Yoshida, S., Kayama, R., : Effect of legume/grass association on the growth and symbiotic nitrogen fixation of leguminous forages. *J. Japan. Grassl. Sci.*, 30, 351 - 359 (1985)
- 81) Joergensen, R. G., Brooks, P. C., Jenkinson, D. S. : Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures. *Soil Biol. Biochem.*, 22, 1129 - 1136 (1990)
- 82) Jones, P. C. T., Mollison, J. E. : A technique for the quantitative estimation of soil organisms. *J. Gen. Microb.*, 2, 54 - 69 (1948)
- 83) de Jong, E., Schappert, H. J. V., MacDonald, K. B., : Carbon dioxide evolution from virgin and cultivated soil as affected by management practices and climate. *Can. J. Soil Sci.*, 54, 299 - 307 (1974)
- 84) 金森哲夫：窒素固定能の測定法（1），農業および園芸，61，705-710（1986）
- 85) 金森哲夫：寒地ダイズ多収の条件（2），農業および園芸，61，1074-1078（1986）
- 86) 金沢晋二郎：森林の土壤酵素－層位別土壤酵素活性と土壤有機物の存在様式について－土と微生物，20，27-41（1978）
- 87) 金沢晋二郎・早野恒一・都留信也：土壤酵素 1. 土壤の炭素・窒素・燐循環，化学と生物，19，235-242（1981）
- 88) Katznelson, H. : The "rhizosphere effect" of mangels on certain groups of soil microorganisms. *Soil Sci.*, 62, 343 - 354 (1946)
- 89) Kauri, T. : Seasonal fluctuations in numbers of aerobic bacteria and their spores in four horizons of a beech forest soil. *Soil Biol. Biochem.*, 14, 185 - 190 (1982)
- 90) 鬼頭 誠・吉田重方：アルファルファの成育および窒素栄養に及ぼす土壤水分環境の影響 日作紀，59，455-460（1990）
- 91) 北岸確三：ニュージーランド草地農業における土壤肥沃度の諸問題，土肥誌，32，115-120（1961）
- 92) Ladd, J. N., Butler, J. H. A. : Short-term assays of soil proteolytic enzyme activities using proteins and dipeptide derivatives as substrates. *Soil Biol. Biochem.*, 4, 19 - 30 (1972)
- 93) Laidlaw, A. S. : The contribution of different white clover cultivars to the nitrogen yield of mixed swards. *Grass and Forage Science*, 43, 347 - 350 (1988)
- 94) Ledgard, S. F., Simpson, J. R., Freney, J. R., Bergersen, F. J. : Field evaluation of ^{15}N techniques for estimating nitrogen fixation in legume-grass associations. *Aust. J. Agric. Res.*, 36, 247 - 258 (1985)
- 95) Ledgard, S. F., Freney, J. R., Simpson, J. R. : Assessing nitrogen transfer from legumes to associated grasses. *Soil Biol. Biochem.*, 17, 575-577 (1985)
- 96) Li, J., Yang, T., Zhu, G. : Studies on the numbers, activity and seasonal dynamics of nitrogen metabolic microorganisms in soils of Qinghai-Xizang alpine meadow. *Proc. 15th Int. Grassl. Congress*, 519 - 521 (1985)
- 97) Lundgren, B., Söderström, B. : Bacterial numbers in a pine forest soil in relation to environmental factors. *Soil Biol. Biochem.* 15, 625 - 630 (1983)
- 98) Mack, A. R. : Biological activity and mineralization of nitrogen in three soils as induced by freezing and drying. *Can. J. Soil Sci.*, 43, 316 - 324 (1963)
- 99) Marriott, C. A. : Seasonal variation in white clover content and nitrogen fixing (acetylene reducing) activity in a cut upland sward. *Grass Forage Sci.*, 43, 253 - 262 (1988)
- 100) Marriott, C. A., Thomas, R. J., Smith, M. A., Logan, K. A. B., Baird, M. A., Ironside, A.,

- D.: The effect of temperature and nitrogen interactions on growth and nitrogen assimilation of white clover. *Plant and Soil*, 111, 43-51 (1988)
- 101) 松田敬一郎・永田武雄: 微生物の繁殖に及ぼす A1 の影響について, *土肥誌*, 28, 23-26 (1958)
- 102) 松代平治・佐藤辰四郎: 十勝地方火山性土における有機物の利用に関する研究. 3. 作物収穫残さ連用土壌からの考察, *北海道立農試集報*, 49, 12-21 (1983)
- 103) 三木和夫・森 哲郎: 新鮮有機物の分解に及ぼす土壌水分・空気の影響, *東海近畿農業試験場研究報告*, 17, 59-66 (1968)
- 104) 三木直倫・佐藤辰四郎: 草地における表面施肥, 施肥位置と栽培技術, *日本土壤肥料学会編*, p. 49-92, 博友社, 東京 (1982)
- 105) 三木直倫: 畜産草地系における窒素サイクルと管理上の問題点, *北海道土壌肥料研究通信*, 17-32 (1984)
- 106) 三木直倫・高尾欽弥: 経年酸性化草地における施肥窒素の利用率と土壌窒素供給力, *北海道立農試集報*, 51, 43-54 (1984)
- 107) 三木直倫・高尾欽弥: 経年草地の炭カル表面施用に伴う施肥窒素の動態, *北海道立農試集報*, 53, 21-31 (1985)
- 108) 三木直倫・高尾欽弥・西宗 昭: 天北地方重粘土草地の生産力と気象, 土壌水分特性の関係, *北海道立農試集報*, 54, 21-30 (1986)
- 109) 三木直倫・東田修司・宝示戸雅之・山神正弘・高尾欽弥: 天北地方鉾質土草地のカリ供給力に応じた施肥法, *土壌誌*, 58, 758-761 (1987)
- 110) 水野直治・南 松雄: 硫酸一過酸化水素による農作物中 N, K, Mg, Ca, Fe, Mn 定量のための迅速前処理法, *土肥誌*, 51, 418-420 (1980)
- 111) Murphy, P. M.: Effect of light and atmospheric carbon dioxide concentration on nitrogen fixation by herbage legumes. *Plant and Soil*, 95, 399-409 (1986)
- 112) 中村克巳・筒井佐喜雄・熊谷秀行・下小路英男・東田修司: 天北地方におけるアルファルファ混播草地の植生維持 第1報 アルファルファ・オーチャードグラス混播草地の刈り取り時期と施肥管理, *北農*, 57, 179-183 (1990)
- 113) 仲谷紀男: 有機物が関与する土壌の水分特性について—とくに, 土壌有機物の存在様式と撥水性を中心として—, *農業技術研究所報告*, B 32, 1-72 (1981)
- 114) Nannipieri, P. Pedrazzini, F., Arcara, P. G., Piovaneli, C.: Changes in amino acids, enzyme activities, and biomasses during soil microbial growth. *Soil Sci.*, 127, 26-34 (1979)
- 115) Newman, E. I.: A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.*, 3, 139-145 (1966)
- 116) Nishio, M., Kusano, O.: Fluctuation patterns of microbial numbers in soil applied with compost. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 26, 581-593, (1980)
- 117) 西尾道徳・木村龍介: リン溶解菌とその農業利用の可能性, *土と微生物*, 28, 31-40 (1986)
- 118) 西宗 昭・斉藤元也・金野隆光・藤田 勇: 十勝地方の主要畑土壌に栽培されたマメ類の窒素固定量と子実収量, *北海道農試研報*, 137, 81-106 (1983)
- 119) 能勢 公・平島利昭・袴田共之・奥村純一: 根釧地方の採草地に対するシロクロバ導入効果, *北農*, 36, 63-69 (1969)
- 120) 小川和夫・森 哲郎: 土壌の物理的要因と作物の生育に関する研究 第2報 青刈トウモロコシの生育段階と土壌空気の要求度および心土耕による湿害の回避について, *東海近畿農試研究報告*, 19, 70-80 (1970)

- 121) 大原益博・田辺安一・土岐和夫：寒地型牧草の in vitro 乾物消化率および粗蛋白質含量，新得畜試研究報告，8，13-20 (1977)
- 122) 大崎玄佐夫・奥村純一：根圏土壤の理化学性が牧草生育に及ぼす影響．第1報 土壤ち密度と牧草生育との関係，北海道立農試集報，27，77-88 (1973)
- 123) 大崎玄佐夫・奥村純一・関口久雄：根圏土壤の理化学性が牧草生育に及ぼす影響．第2報 鈹質土壤における牧草根の発達分布，北海道立農試集報，32，35-44 (1975)
- 124) 岡野正豪・沢田泰男・近藤 熙：放牧草地における微生物バイオマス，草地試研報，26，8-16 (1983)
- 125) 奥村純一・袴田共之・能勢 公：低コスト公共草地における白クローバ導入に関する一考察，北農，34，30-33 (1967)
- 126) 奥村純一：天北地方に分布する各種土壤とそれに対応する草地造成，管理の基本方式，道農試報告，22，1-107 (1973)
- 127) Pancholy, S. K., Rice, E. L. : Soil enzymes in relation to old field succession : amylase, cellulase, invertase, dehydrogenase, and urease. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 37, 47-50 (1973)
- 128) Pancholy, S. K., Rice, E. L. : Carbohydrases in soil as affected by successional stages of revegetation. Soil Sci. Amer. Proc., 37, 227-229 (1973)
- 129) Pauli, F. W. : The biological assessment of soil fertility. Plant and Soil, 22, 337-351 (1965)
- 130) Paulson, K. N., Kurtz, L. T.: Locus of urease activity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33, 897-901 (1969)
- 131) Phillips, T. G., Sullivan, J. T., Loughlin, M. E. Sprague, V. G. : Chemical composition of some forage grasses. Agron. J., 46, 361-369 (1954)
- 132) Porter, L. K. : Method for urease activity; in Methods of Soil Analysis, Part 2, edit. by C. A. Black, American Society of Agronomy, Inc., p. 1545-1546, Madison (1965)
- 133) Redmann, R. E. : Soil respiration in a mixed grassland ecosystem. Can. J. Soil Sci., 58, 119-124 (1978)
- 134) Robinson, J. B.: Nitrification in a New Zealand grassland soil. Plant and Soil, 19, 173-183 (1963)
- 135) Ross, D. J. : Biological studies of some tussock-grassland soils XVI. Non-symbiotic nitrogen-fixing bacteria of two cultivated soils. N. Z. J. Agric. Res., 3, 224-229 (1960)
- 136) Ross, D. J. : A seasonal study of oxygen uptake of some pasture soils and activities of enzymes hydrolysing sucrose and starch. J. Soil Sci. 16, 73-85 (1965)
- 137) Ross, D. J. : A Survey of activities of enzymes hydrolysing sucrose and starch in soils under pasture. J. Soil Sci., 17, 1-15 (1966)
- 138) Ross, D. J., Roberts, H. S. : A study of activities of enzymes hydrolysing sucrose and starch and of oxygen uptake in a sequence of soils under tussock grassland. J. Soil. Sci., 19, 186-196 (1968)
- 139) Ross, D. J., Tate, K. R., Cairns, A., Meyrick, K. F. : Influence of storage on soil microbial biomass estimated by three biochemical procedures. Soil Biol. Biochem., 12, 369-374 (1980)
- 140) Ross, D. J., Tate, K. R., Cairns, A., Pansier, E. A. : Microbial biomass estimations in soils from tussock grasslands by three biochemical procedures. Soil Biol. Biochem., 12, 375-383 (1980)
- 141) Ross, D. J., Tate, K. R., Cairns, A., Meyrick, K. F. : Fluctuations in microbial biomass indices at different sampling times in soils from tussock grassland. Soil Biol. Biochem., 13, 109-114 (1981)

- 142) Ross, D. J., Speir, T. W., Cowling, J. C., Karina, N. W. : Temporal fluctuations in biochemical properties of soil under pasture. II Nitrogen mineralization and enzyme activities. *Aust. J. Soil Res.*, 22, 319-330 (1984)
- 143) Rovira, A. D. : A study of the development of the root surface microflora during the initial stages of plant growth. *J. Appl. Bacteriol.*, 19, 72-79 (1956)
- 144) 坂井 弘・池 盛重 : 十勝火山灰地における有機物の施用効果に関する研究 (第2報) 十勝火山灰土壌における施用有機物の分解過程, *土肥誌*, 31, 383-386 (1960)
- 145) 坂本宣崇・奥村純一 : 晩秋から早春にかけての牧草の生育特性と肥培管理 II . 秋季の施肥時期が翌春収量に及ぼす影響, *道立農試集報*, 30, 65-74 (1974)
- 146) 坂本宣崇・奥村純一 : 牧草の周年栄養生理と肥培管理に関する研究 第3報 越冬前後の肥培管理が2番草生育に及ぼす影響, *道立農試集報*, 43, 12-23 (1980)
- 147) Sarathchandra, S. U., Upsdell, M. P. : Nitrogen mineralization and the activity and populations of microflora in a high producing yellow-brown loam under pasture. *N. Z. J. Agric. Res.*, 24, 171-176 (1981)
- 148) Sarathchandra, S. U., Perrott, K. W., Upsdell, M. P. : Microbiological and biochemical characteristics of a range of New Zealand soils under established pasture. *Soil Biol. Biochem.*, 16, 177-183 (1984)
- 149) 沢田泰男・五十嵐好典・小梁川忠士・本橋裕 : 永年草地における土壌の理化学性の変化, *北農試研報*, 77, 68-78 (1962)
- 150) 沢田泰男・新田恒彦 : 耕・草・林地土壌の微生物相の対比, *草地試研報*, 6, 32-39 (1975)
- 151) 沢田泰男・新田恒雄 : リン酸と石灰の欠乏に由来する荒廃草地の微生物相, *草地試研報*, 10, 106-110 (1977)
- 152) 沢田泰男・新田恒雄 : 草地土壌中の有機物残渣に分布する微生物フロラ I . 微生物存在量, *草地試研報*, 17, 33-38 (1980)
- 153) 沢田泰男・新田恒雄 : 草地土壌中の有機物残渣に分布する微生物フロラ II . 微生物の生育, *草地試研報*, 17, 39-44 (1980)
- 154) 沢田泰男 : 草地土壌における微生物の生育環境, *土と微生物*, 24, 1-6 (1982)
- 155) 関谷長昭 : 北海道十勝地方に分布する土壌型の微生物相について, *ペドロジスト*, 18, 72-86 (1974)
- 156) 関谷長昭 : 十勝火山性土の土壌微生物学的特性 第1報 湿性火山性土における石灰施用による土壌微生物性の変化, *北海道立農試集報*, 39, 54-65 (1978)
- 157) 下小路英男 : 天北地方におけるアルファルファの刈取管理, *北農*, 50, 23-40 (1983)
- 158) Simpson, J. R. : The transference of nitrogen from pasture legumes to an associated grass under several systems of management in pot culture. *Aust. J. Agric. Res.*, 16, 915-926 (1965)
- 159) Simpson, J. R. : Transfer of nitrogen from three pasture legumes under periodic defoliation in a field environment. *Aust. J. Exp. Agric. Animal Husb.*, 16, 863-870 (1976)
- 160) Smith, D. : Classification of several native North American grasses as starch or fructosan accumulators in relation to taxonomy. *J. Br. Grassl. Soc.*, 23, 306-309 (1968)
- 161) Soulides, D. A., Clark, F. E. : Nitrification in grassland soils. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 22, 308-311 (1958)
- 162) Soulides, D. A., Allison, F. E. : Effect of drying and freezing soils on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation, and bacterial population. *Soil Sci.*, 91, 291-298 (1961)

- 163) Sparling, G. P. : Microcalorimetry and other methods to assess biomass and activity in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 13, 93-98 (1981)
- 164) Sparling, G. P., West, A. W. : A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration *in situ* using microbial respiration and ^{14}C labelled cells. *Soil Biol. Biochem.*, 20, 337-343 (1988)
- 165) Speir, T. W., Ross, D. J., Orchard, V. A., Cairns, A., Pansier, E. A. : Biochemical and microbiological properties of a West Coast wet land soil at different stages of pasture development. *N. Z. J. Sci.*, 25, 351-359 (1982)
- 166) Steele, K. W., Wilson, A. T. : Nitrification activity in New Zealand grassland soils. *N. Z. J. Agric. Res.*, 23, 249-256 (1980)
- 167) 菅原 潔・副島正美：蛋白質の定量法, p. 95-109, 学会出版センター、東京 (1977)
- 168) Suzuki, T., Tokunaga, Y., Watanabe, I. : Effect of the difference of tillage operations on microbial properties of soil layers. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 15, 280-291 (1969)
- 169) Ta, T. C., MacDonald, F. D. H., Faris, M. A. : Excretion of assimilated nitrogen from N_2 fixed by nodulated roots of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Can. J. Bot.*, 64, 2063-2067 (1986)
- 170) Ta, T. C., Faris, M. A. : Species variations in the fixation and transfer of nitrogen from legumes to associated grasses. *Plant and Soil*, 98, 265-274 (1987)
- 171) Ta, T. C., Faris, M. A. : Effects of alfalfa proportions and clipping frequencies on timothy-alfalfa mixtures. II Nitrogen fixation and transfer. *Agron. J.*, 79, 820-824 (1987)
- 172) Ta, T. C., Faris, M. A. : Effects of environmental conditions on the fixation and transfer of nitrogen from alfalfa to associated timothy. *Plant and Soil*, 107, 25-30 (1988)
- 173) 田中 博：土壤細菌数と土壤水分ポテンシャル (土壤水分吸収力, pF, Bar) の関係, 土と微生物, 16, 70-76 (1974)
- 174) Vallis, I., Haydock, K. P., Ross, P. J., Henzell, E. F. : Isotopic studies on the uptake of nitrogen by pasture plants. III. The uptake of small additions of ^{15}N -labelled fertilizer by Rhodes grass and Townsville lucerne. *Aust. J. Agric. Res.*, 18, 865-877 (1967)
- 175) Vallis, I., Henzell, E. F., Evans, T. R. : Uptake of soil nitrogen by legumes in mixed swards. *Aust. J. Agric. Res.*, 28, 413-425 (1977)
- 176) Vance, C. P., Heichel, G. H., Barnes, D. K., Bryan, J. W., Johnson, L. E. : Nitrogen fixation, nodule development, and vegetative regrowth of alfalfa (*Medicago sativa* L.) following harvest. *Plant Physiol.*, 64, 1-8 (1979)
- 177) Vandecaveye, S. C., Katznelson, H. : Microbial activities in soil, IV. Microflora of different zonal soil types developed under similar climatic conditions. *Soil Sci.*, 46, 57-84 (1938)
- 178) Vandecaveye, S. C., Katznelson, H. : Microbial activities in soil : VI. Microbial numbers and nature of organic matter in various genetic soil types. *Soil Sci.*, 50, 295-311 (1940)
- 179) Wagner, R. E. : Legume nitrogen versus fertilizer nitrogen in protein production of forage. *Agron. J.*, 46, 233-237 (1954)
- 180) 脇本 隆：混播牧草の草種構成に関する研究, 北海道立農業試験場報告, 31, (1980)
- 181) Waksman, S. A. : Bacterial numbers in soils, at different depths, and in different seasons of the year. *Soil Sci.*, 1, 363-380 (1916)
- 182) Walker, T. W., Orchiston, H. D., Adams, A. F. R. : The nitrogen economy of grass legume associations. *J. Brit. Grassl. Soc.*, 9

- 249-274 (1954)
- 183) Warcup, J. H. : On the origin of colonies of fungi developing on soil dilution plates. Trans. Br. Mycol. Soc., 38, 298-301(1955)
- 184) Warembourg, F. R., Paul, E. A. : Seasonal transfers of assimilated ^{14}C in grassland : plant production and turnover, soil and plant respiration. Soil Biol. Biochem., 9, 295-301 (1977)
- 185) Wedin, W. F., Donker, J. D., Marten, G.C. : An evaluation of nitrogen fertilization in legume-grass and all-grass pasture. Agron. J., 57, 185-188 (1965)
- 186) Whitehead, D. C. : The role of nitrogen in grassland productivity. Commonwealth Agricultural Bureaux, p. 30 - 41, London (1970)
- 187) Wildung, R. E., Garland, T. R., Buschbom, R. L. : The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. Soil Biol. Biochem., 7, 373-378 (1975)
- 188) Wivstad, M., Mårtensson, A. M., Ljunggren, H. D. : Field measurement of symbiotic nitrogen fixation in an established lucerne ley using ^{15}N and an acetylene reduction method. Plant and Soil, 97, 93-104 (1987)
- 189) Woldendorp, J. W. : The influence of living plants on denitrification. Meded. LandbHogeschool Wageningen, 63, 1-100 (1963) (Whitehead, D. C., 1970,からの引用)
- 190) 山神正弘 : 北海道の採草地に対する施肥, 牧草と園芸, 30, 4-9 (1982)
- 191) 吉田富男・坂井 弘 : 北海道における各種土壌の微生物学的研究 第1報 各種土壌の微生物相とその作用, 北海道農業試験場彙報, 79, 36-44 (1962)
- 192) 吉田富男・坂井 弘 : 北海道における各種土壌の微生物学的研究 第2報 土壌微生物相の季節的变化と有機物添加の影響, 北海道農業試験場彙報, 79, 45-50 (1962)
- 193) 吉田富男・坂井 弘 : 豆科牧草の生育に伴う根圏微生物相の消長, 北海道農業試験場彙報, 79, 51-57 (1962)
- 194) 吉田富男・坂井 弘 : 北海道における各種土壌の微生物学的研究, 第4報 土壌微生物相におよぼすアルミニウムの影響, 北海道農業試験場彙報, 82, 21-27 (1963)
- 195) 吉田富男・坂井 弘 : 北海道における各種土壌の微生物学的研究, 第5報 土壌の水分環境と微生物相について, 土肥誌, 34, 155-160 (1963)
- 196) 吉田富男・坂井 弘 : 北海道における各種土壌の微生物学的研究, 第6報 土壌の水分環境と有機物分解について, 土肥誌, 34, 197-202 (1963)
- 197) 吉田重方・谷田沢道彦 : ラジノクローバの再生過程における共生窒素固定能の変動—アセチレン還元法による調査—, 日草誌, 23, 6-13 (1977)
- 198) Young, D. J. B. : A study of the influence of nitrogen on the root weight and nodulation of white clover in a mixed sward. J. Brit. Grassl. Soc., 13, 106-114 (1958)
- 199) Zantua, M. I., Bremner J. M. : Preservation of soil samples for assay of urease activity. Soil Biol. Biochem., 7, 297-299 (1975)
- 200) Zantua, M. I., Dumenil, L. C., Bremner J. M. : Relationships between soil urease activity and other soil properties. Soil Sci. Soc. Amer. J., 41, 350-352 (1977)
- 201) Zerefos, V. M. : Development of the microflora and biological activity of a leached chernozem upon reduction of its cultivations. Soviet Soil Sci., 11, 677-681 (1980)

Soil Microbial Activities in the Tenpoku District and its Contribution to Grassland Productivities.

by
Shuji Higashida

Summary

The Tenpoku district, where heavy clay soils are dominant, is located in the northern part of Hokkaido and developed mainly as a dairy farm land based on grassland. In grassland productivity, soil microorganisms play an important role. They catalyze decomposition of organic matter, which is an essential process in recycling mineral nutrients such as N, P and S. In addition, nitrogen fixation of rhizobia directly supplies nitrogen to the grassland ecosystem. This investigation was carried out to clarify the factors which affect microbial activities and nitrogen fixation of rhizobia, and to rationalize management of grassland with the information obtained.

The results obtained are summarized as follows.

1. Characteristics of soil microbial activities of grassland which is covered by heavy clay soils.

(1). In a 0 to 15cm soil depth (a plow layer), microbial numbers of grassland soils clearly decreased with soil depth, while cropland soils had relatively uniform microbial numbers within a plow layer.

(2). The numbers of bacteria in the 0 - 2cm soil layer (an upper plow layer) fluctuated with peaks occurring twice a year in spring and autumn. The factors responsible for the seasonal patterns of bacterial numbers were the supply of substrate from the vegetation, and soil water status. The microbial numbers in the lower plow layers were small and relatively constant. The range of seasonal fluctuation in fungal hyphal length was narrower than that of the number of bacteria, and the patterns of seasonal changes of fructose and urea decomposing activities were similar to those of bacterial numbers.

2. The factors affecting microbial activity and its control.

(1). In the 0 - 2cm soil layer, soil pH decreased and available phosphate, exchangeable K_2O and organic C tended to increase with grassland age. Application of phosphate, potassium and organic matter increased soil microbial numbers, while soil pH was the factor primarily controlling microbial activities. In the grassland soils which had low pH, organic matter was accumulated at the surface soil layer because of its low microbial decomposing activities. The response of hyphal length to the low pH was less than that of the bacterial number, while TTC reducing activity and nitrifying activity decreased as sharply as bacterial numbers.

(2). In the 5 - 15cm soil layer (a lower plow layer), bacterial numbers, fungal numbers, and microbial decomposing activities decreased as grassland age increased. The principal factors responsible for the lower microbial activities were declines of substrate and supply of oxygen. Decreases of available phosphate, exchangeable potassium, and soil pH were also factors responsible for low microbial activities. In the soils which have pH lower than 6.0 or Bray - P_2O_5 lower than 10mg / 100g · soil, bacterial numbers were sharply depressed. Carbon dioxide evolution of this layer was not related to substrate content, but was positively correlated with the ratios of the gaseous phase.

The factors affecting microbial activities in the 5-15cm layer might be very important factors for root activities of grasses, and microbial activity may also play an important role in mineralization of plant nutrient elements as well. So, microbial activity can be used as an index of soil conditions for root growth and nutrient supply.

(3). Topdressing of CaCO_3 to the acidified soil enhanced the microbial numbers and their activities. Liming increased grass yields when soil pH became more than 6.0 after application.

Incorporation of manure in the plow layer increased the microbial number in both the upper and lower plow layers. This effect continued for at least 5 years. Liming and incorporation of manure were suggested to be good methods to alleviate the depression of microbial activities associated with grassland age.

(4). Microbial measures employed in this study could be divided into three groups which were represented by bacterial number, hyphal length, and fungal number. The group represented by bacterial number consisted of decomposing activities of small molecular organic matter such as urea or fructose. These decomposing activities showed significant correlations with CO_2 evolution of surface soils and could be an index for microbial activity of grassland soil. The microbial numbers and decomposing activities should be measured just after sampling soils, because storage of the soil samples resulted in changes of the values of microbial measures.

3. Nitrogen fixation of forage legume and nitrogen transference to associated grasses.

(1). Nodules of white clover and alfalfa started to be formed just after spring sprout and were not detached by cutting treatment, although they disappeared during winter season. Acetylene reducing activity decreased just after cutting. Then it increased with the development of new leaves. The acetylene reducing activity of white clover was characterized by reaching the maximum in the middle of the span between each cutting, due to its low competitive ability to light.

(2). The maximum amounts of nitrogen fixation of alfalfa and ladino clover in legume-grass mixture were 30 and 25kg / 10a year, respectively. Nitrogen application didn't affect the amount of nitrogen fixed by alfalfa, but in the case of ladino clover-orchardgrass mixture, nitrogen fertilizer inhibited nitrogen fixation. The amounts of nitrogen transfer were 7 kg / 10a in alfalfa-orchardgrass mixture and 10kg / 10a in ladino clover-orchardgrass mixture.

(3). In the mixed sward associated with ladino clover, soil microbial numbers and amounts of mineralized nitrogen exceeded those in pure grass sward during the entire season. The results indicated that ladino clover supplied nitrogenous compound as substrate for microbes, and source of nitrogen mineralization, not only in the winter period but in the whole growing season. In the alfalfa-orchardgrass mixture, excreta from roots seemed to increase the number of soil microbes. The amount of nitrogen mineralization was, however, constant, suggesting that these excreta were consumed too rapidly to be detected as nitrogen mineralization.

Nitrogen fixation increases net nitrogen supply to the grassland ecosystem and activates turn-over of organic matter as well.

4. Effects of legume/grass ratios and fertilizer nitrogen on the yields of pasture, nitrogen fixation and its transfer.

(1). In alfalfa and orchardgrass mixture, nitrogen concentration of orchardgrass was positively correlated to

the dry matter weight of alfalfa. Nitrogen transfer from alfalfa to orchardgrass might derive from root excreta. The amount of nitrogen transfer was at maximum, when the dry matter yield of alfalfa was nearly 400kg/10a·year. Thus the mixed sward, in which alfalfa mass was up to 300kg/10a·year, indicated low productivity due to the shortage of nitrogen transfer. In the mixture where legume content was not sufficient to provide nitrogen to grass, application of fertilizer evidently increased the dry matter yields, but nitrogen application to the mixed sward located at badly drained soils depressed the growth of alfalfa severely.

(2). In alfalfa-timothy mixture, timothy yields tended to decline as the year progressed because of the lower competitive ability of timothy, even when 10kg of nitrogen per 10a per year was applied. Due to the deficiency of timothy as a nitrogen acceptor, alfalfa-timothy mixture was not effective for intensive use of nitrogen transfer.

(3). Nitrogen percentages of orchardgrass in combination with ladino clover were not related to the dry matter weight of ladino clover. However the amount of nitrogen transferred was more clearly controlled by the dry matter of ladino clover in the previous year than by that in the same year. These results indicated that the main source of nitrogen transfer in ladino clover mixture seemed to be leaves and stems that were sloughed off. This was not the same as the case with alfalfa. The average amount of fixed nitrogen for 8 years was 13kg/10a·year in a nitrogen fertilizer free plot, while this value fluctuated very widely year by year because of the low competitive ability of ladino clover.

(4). Nitrogen transferred from ladino clover to associated timothy without nitrogen fertilizer was 4 kg/10a·year in the second harvest year after sowing. Then it gradually increased and reached 13kg/10a·year in the fourth year, exceeding that of ladino clover and orchardgrass mixture. Even in the plots with 10kg of nitrogen, the amount of nitrogen transferred was 8.5kg/10a in the fourth year. Growth of ladino clover was not severely depressed in this mixture by the fertilizer nitrogen, and application of 6 kg/10a of nitrogen per year is sometimes a good selection to obtain good yields.