

第4章 放牧草地における排泄物の肥料的効果

通常の施肥が草地全面に散布されるのに対し、放牧家畜の排泄物は、きわめて狭い面積に高い密度で斑点状に還元されるという特徴がある。

排泄物の斑点状還元が周辺牧草の養分含有率や生育に影響をおよぼすことは明らかであるが、その実態は必ずしも明らかにされたとはいえない。また、斑点状還元の影響をみようとする場合、放牧草地そのものにおいては実験条件を設定しにくい。そこで、第1節において、斑点状還元が牧草に及ぼす影響の特徴を調べ、その結果に基づき、ほ場試験の試験区の設定法につき考察する。第2節では、それを受けて、斑点状に還元された排泄物の効果の持続性をほ場試験によって検討する。

〈第1節〉排泄物の斑点状還元が牧草に及ぼす影響

〔試験1〕牧草生育に対する「凝集度」の影響

一定量の排泄物を全面散布する場合に比較して、より少数個所に点状に凝集させた場合の牧草生育

の変化を検討した。なお、この場合、1試験区あたりの全排泄物量を一定とした場合、試験区面積（9 m²）あたりの全排泄物個数の逆数を「凝集度」と定義すると、排泄物個数が少ないほど凝集度が高いことになる。

試験方法……耕起更新後2年目のメドウフェスク、ラジノクローバを主体とする混播草地に、図20に示した試験区を設け（3反復、乱塊法）、1971年6月30日にふん又は尿を施用した。全面散布区の尿はジョロで、またふんは水にといて散布した。他の各区においては、1個のふんは直径25cmの円型に施用した。したがって、凝集度が高いほど1個のふんの厚さは増すことになる。収量調査は8月10日に行い、9月21日および翌年6月20日、8月10日に残効を調査した。なお、1年目8月にグラス草丈を調査した。収量調査は、9 m²の試験区を全刈りし、生草重を測定した。草丈は、施用した排泄物の真上を通るように試験区の対角線上に巻尺を張り、10cmごとに測定した。

なお、化学肥料は、1年目の5月上旬に3 kg N/10a, 2.2kg P/10a, 5.8kg K/10aをそれぞれ施

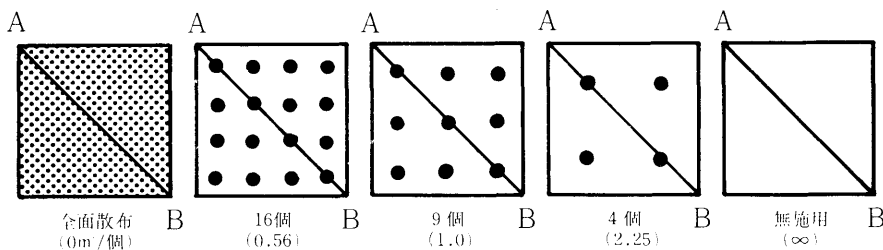


図20 排泄物の凝集度に関する試験処理。なお、凝集度とは、試験区面積（9 cm²）当たりの排泄物個数の逆数を言い、（ ）内が凝集度。ふんは直径25cmに施用したので、個数の多少により厚さが異なる。また、ふんの場合4個の処理はなし。対角線 AB は草丈調査の個所を示す。

酸アンモニウム、過りん酸石灰、硫酸カリウムにて施用し、2年目は6月20日の調査直後に、2 kg N/10a, 3.5kg K/10aを施用した。それ以外の施肥は行わなかった。

結果……尿（総量7.2kg）を、全面散布区を

基準にして、16、9、4個に分けて配置（凝集度はそれぞれ0.56、1.0、2.25 m²/個）すると、表23に示したように、施用後40日目の8月10日には、それぞれ約10%、20%、25%の減収となった。すなわち、凝集度が高いほど減収割合が高かった。

9月の残効は、全面散布～9個まではほとんど差がなかったが4個になると約20%の減収となった。しかし、この減収には統計的な有意性は認め

られなかった。2年目は、6月、8月共に、前年ほど明瞭な傾向を示さず、16個の場合にやや高収の傾向があったとはいえ、有意性は認められなかった。

表23 尿の凝集度と牧草収量（生草kg/10a）

		1年目		2年目	
		8月	9月	6月	8月
全面散布	7.2kg	1,319(100)	705	405	1,417
0.45kg×16個	=7.2	1,208(92)	677	507	1,474
0.8	×9個=7.2	1,050(80)	695	329	1,268
1.8	×4個=7.2	973(74)	564	478	1,442
無施用		737(56)	391	314	1,057
LSD(5%)		251	NS	NS	NS
(1%)		365	NS	NS	NS

注 ()内は全面散布区を100とした指数。凝集度については、図20および本文参照。

ガラスの草丈を、試験区の断面として図21に示したが、全般に凝集度が増すほど波の形が明瞭となった。全面散布区では20～40cmの間を不規則に変動したが収量は高かった。他方、4個の場合は尿の真上で50cm以上を示したが、全刈り収量は少なかった。すなわち、一部分の大きな伸長よりも、全体にわたる均一な伸長の方が全体の収量を上げるためには有利であった。

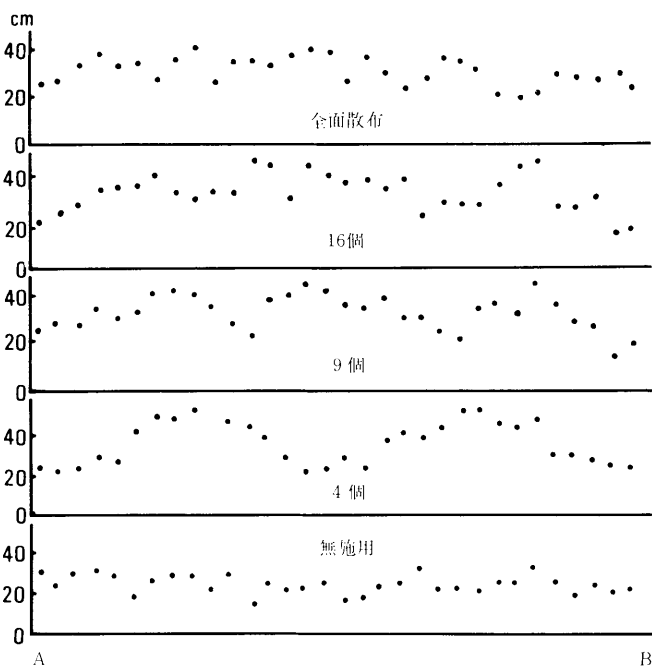


図21 尿の凝集度とガラスの草丈……10cmごとの測定
A, Bは試験区の対角線端を示す(図20参照)

ふん(総量18kg)の場合(表24), 8月, 9月共に収量の区間差が少なく, 以後の残効についてもほとんど差がなかった。草丈(図22)は, 尿の場合ほどシャープな反応を示さず, 9個の場合にピークが判読できるのみであった。

表24 ふんの凝集度と牧草収量(生草kg/10a)

	1年目		2年目	
	8月	9月	6月	8月
全面散布 18kg	879(100)	492	387	1,265
1.1kg×16個=18	969(110)	426	317	1,234
2.0 × 9個=18	865(98)	397	389	1,245
無施用	737(84)	391	314	1,057
LSD	NS	NS	NS	NS

注 ()内は全面散布区を100とした指数。凝集度については, 図20および本文参照。

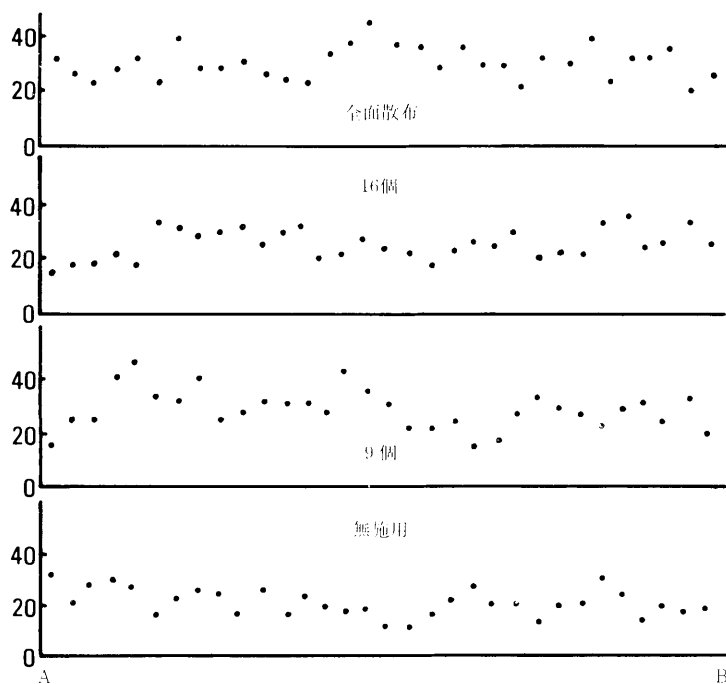


図22 ふんの凝集度とグラス草丈……10cmごとの測定
A, Bは試験区の対角線端を示す(図20参照)

〔試験2〕斑点状に還元された排泄物個数の牧草収量に対する影響

排泄物1個当たりの重量は一定とし, 区当たりの個数を増加した場合に牧草収量がどう変化するかを検討した。

試験方法……〔試験1〕と同様な方法で, 1個当たり尿は0.8kg, ふんは2kgを使用し, 無施用, 4個, 9個, 16個の処理区(1区面積: 9m²)を設定した。

結果……尿の施用個数を増すと, 表25に示し

表25 尿の施用個数と牧草収量(生草kg/10a)

	1年目		2年目	
	8月	9月	6月	8月
無施用	737	391	314	1,057
0.8kg×4個=3.2kg	878	472	340	1,230
0.8 × 9個=7.2	1,050	695	329	1,268
0.8 × 16個=12.8	1,271	900	633	1,463
LSD (5%)	194	326	NS	NS
(1%)	294	NS	NS	NS

たとおり, 8月における収量は個数に応じて増加した。1年目9月の残効についても同様の傾向を

示した。2年目の6月は16個の場合に増収を示し、その直後の施肥により8月の収量は個数と共に増加する傾向を示したが、いずれも有意性は認められなかった。

ふんについて(表26)は、1年目8月には施与個数と共に増収する傾向を示したとはいえ、統計的な有意性は認められなかった。9月および2年目6月の残効では16個の場合のみ、やや高い値であった。2年目の8月には、尿と同様、施与個数と共に増収する傾向があったが、有意差とはならなかった。

表26 ふんの施与個数と牧草収量(生草kg/10a)

	1年目		2年目	
	8月	9月	6月	8月
無施与	737	391	314	1,057
2kg×4個=8kg	783	392	305	1,147
2×9個=18	865	397	389	1,245
2×16個=32	1,060	582	586	1,397
LSD	NS	NS	NS	NS

〔試験3〕 牧草養分含有率から見た排泄物の影響の波及範囲

次に排泄物周囲の牧草が、どの位の範囲まで影響されるかを、牧草中の窒素とカリウムの含有率

を指標として検討する。

調査方法……根鋤農試の放牧草地(採草地より更新して2年目)において、排泄物周囲の牧草を分析に供するため同心円状に分けて採取した。調査は、あらかじめ6月下旬の放牧時に日印を付した排泄地点について22日目、42日目、85日目に行った。

結果……ふんについての調査結果(図23)によれば、排泄ふん周囲のグラスの窒素含有率は、22日目の10cm地点でやや高いが、その後、明瞭な差はうかがわれなかった。これに対し、カリウム含有率はグラス、クローバともに排ふん初期にはふんに近いほど高く、42日目は50cm地点が高く、さらに85日後でもクローバはふん周30cmまで、グラスは10cm地点が高い値を示した。なお、42日目の10cm、30cm地点ではグラス、クローバともに対照と同水準であったが、その原因については不明である。

尿についての結果(図24)によると、排泄尿周囲のクローバの窒素含有率は、22日目に非排泄地点よりやや高い傾向がみられたとはいえ、大きな差は認められない。グラスは22日目は50cm、42日目および85日目は30cmまで影響がうかがわれた。

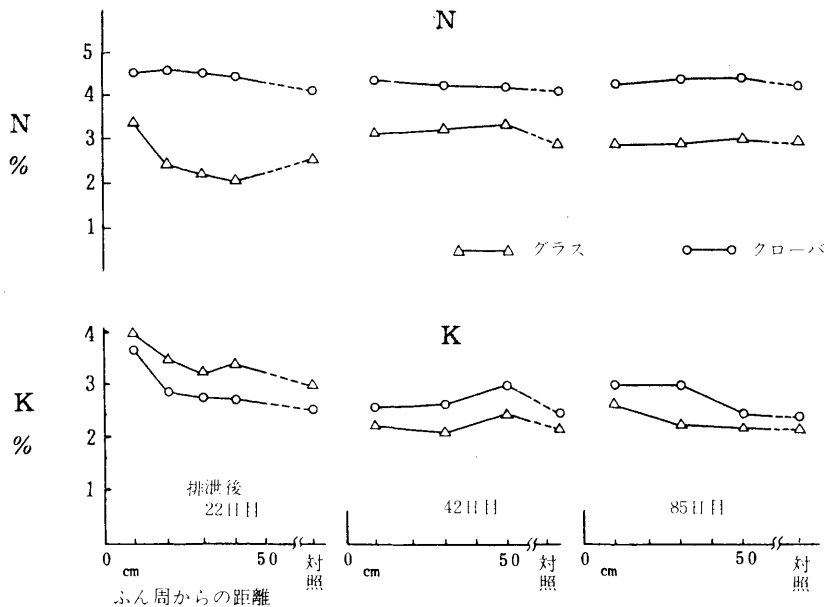


図23 排泄ふん周からの距離による牧草N, K含有率の変化。対照:非排泄地点

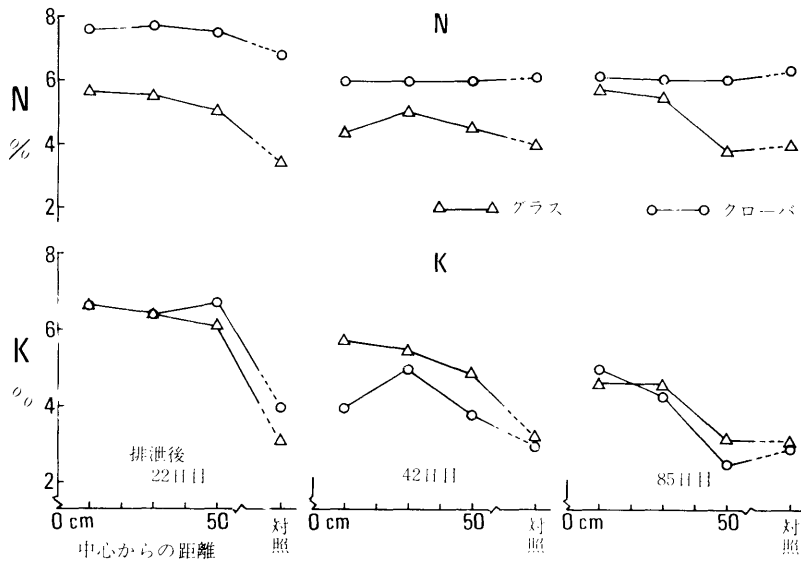


図24 排泄尿中心からの距離による牧草N, K含有率の変化. 対照:非排泄地点

カリウム含有率についてはクローバとグラスは全般に似た傾向を示し、22日目および42日目は50cmまで、また85日目には30cmまで高い値を示した。

考 察

斑点状還元の影響をほ場試験で検討する場合、放牧草地における単位面積当たり排泄物個数をそのまま再現したのでは、排泄物（重量又は個数）密度が低すぎて効果の判定が困難である。一方、ふん又は尿を全面散布した場合、牧草収量は、無施用から尿：0.6kg/m²；ふん：2 kg/m²までの範囲では、施用量と牧草収量は直線的に増加することが知られている²⁶⁾。したがって、〔試験1〕の施用量（尿：0.8kg/m²；ふん：2 kg/m²）の水準で見られたところの、斑点状還元が牧草収量に対する排泄物の効果を低下させる現象は、排泄物密度がより低い実際の放牧草地においても、同様に生起していると考えて良いであろう。

次に、〔試験2〕における処理の最高水準（尿：1.4kg/m²；ふん3.6kg/m²）は、実際の排泄物密度よりかなり高いが、2年目においては無施用区との有意性が認められない程度に効果が減少した。2年目の6月調査直後に全区に共通の施肥を行っ

た結果、8月調査で〔試験1、2〕において、尿およびふんの効果がやや認められたので、排泄物の残効をみるためには若干の施肥が必要であると考えられる。

また、〔試験3〕によると、カリウム含有率に対する影響の及ぶ範囲は経時的に狭くなった。

したがって、斑点状に還元された排泄物の効果の発現と減衰の過程を、何年かにわたってほ場試験によって追跡するためには、若干の施肥を継続した上で、排泄物を相互にかなり接近して高密度に施与する必要があり、次節の試験では、この結果を参考にしてふん・尿を施与することとした。

〈第2節〉斑点状に還元された排泄物の効果の持続性

実際の放牧草地において、排泄物は面積当たりの放牧頭数に応じて、各放牧期ごとに順次累積されていく一方、以前に還元されたものの効果は減衰していくものと考えられる。また、効果の発現・減衰の様相はふんと尿では異なる。この実態を解明し持続性を明確にするために、以下の試験を実施した。

試験方法

試験設計および調査……試験は1976年～1979年の4年間にわたり、表27に示した設計に基づき実施した。供試草地はメドウフェスク・ラジノクローバの混播（更新後3年目）であったが、試験終了時の全区平均混生比率はメドウフェスク2%，ラジノクローバ（白クローバを含む）42%，チモシー3%，レッドトップ9%，ケンタッキーブルーグラス5%，ヒメスイバ32%であった。

排泄物の試験区への施与については、前節の結果に基づき、ふん・尿共に5個/区（=4m²）2kg（尿は1）/個（=2.5kg/m²）とし、中心部の1m²に5個が入るように配置した（図25）。

供試ふん・尿の養分の平均含有率および施用量は表28のとおりである。

刈取り調査は中央部1m²の正方形部分について行い、グラスとクローバを分離し、混生比率および風乾物率（70℃1昼夜以上）を測定し、草種ごとの風乾物取量（以下、取量とはこれを指すものとする）を得た。同じサンプルを粉碎後各養分含有率の定量に供した。表層5cmの土壌を初年目（別途に設けたサンプリング用試験区）および3年目10月（全区）に採取し、有効態養分を測定した。供試は場の土壌は第3章と同一である。

分析法……牧草については窒素(N)はセミマイクロケルダール法により、以下湿式分解液につきりん(P)はバナドモリブデン法、カリウム(K)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)は原子吸光法による。土壌養分については第3章と同様である。

表27 排泄物の肥料的効果の持続性の試験設計

因子	因子記号	水 準				各試験区の因子水準の組合せ																
		1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
ブロック	(R)	1	2			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ふん	(F)	0	10 (kg/区)			1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	
尿	(U)	0	10 (kg/区)			1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	
N	(N)	1.0	2.0 (kg/10a/回)			1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	
K	(K)	1.25	2.5 (kg/10a/回)			1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	
施与時期	(T)	6月	7月	8月	9月	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
						17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
ブロック	(R)	1	2			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
ふん	(F)	0	10 (kg/区)			2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	
尿	(U)	0	10 (kg/区)			2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	
N	(N)	1.0	2.0 (kg/10a/回)			1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	
K	(K)	1.25	2.5 (kg/10a/回)			1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	
施与時期	(T)	6月	7月	8月	9月	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	

注) L₃₂直交表利用1/2実施多因子試験⁷⁸⁾。試験区数32。各区の内容は、表の縦にそれぞれの水準の処理が組合せられる。化学肥料N、Kは、それらの有無により、ふん、尿の効果が変わるか否かを検討するための処理であり、Nは硫酸アンモニウム、Kは硫酸カリウムを早春および刈取直後（秋の最終刈を除く）に追肥した。その他に、共通肥料として全区に、早春、過りん酸石灰にて1.3kg P/10aを施用した。施与時期とは、初年目のふん、または尿の施与時期を示す。

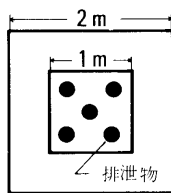


図25 排泄物の効果の持続性、試験区の見取図

表28 供試ふん・尿の養分含有率および施用量

	現物中含有率(%)		施用量 (g/区)	
	ふん	尿	ふん	尿
N	0.36	0.87	36	87
P	0.10	0.00	10	0
K	0.14	0.90	14	90
C _a	0.17	0.02	17	2
M _g	0.06	0.01	6	1

結 果

本節以下において、ふん又は尿の肥料的効果(以下効果と略することがある。)とは、養分含有率又は収量について、ふん又は尿施与区/非施与区の比(=2水準/1水準)を指すものとし、含有率、収量などについての分散分析の結果、10%以上の危険率で有意となった場合につき「有意」との表現を用いることとする。

さて、排泄物中に多量に含まれる養分の効果は、牧草の収量、又は牧草中の養分含有率の変化とし

て確認できると期待される。しかし、その際、降雨量などの気象条件、土壌生物の多少を含む土壌の特性、牧草の種類などによって含有養分の効果の現われ方は異なると考えられる。これらのうち降雨量は、ふんの施与月による効果の発現の違いにかかわるので、蒸発量と共に施与当年について表29に掲げた。降雨量は、6月(中旬を除く)と9月に多く、7月が少なく、8月上・中旬は蒸発量をやや上回る程度であった。

表29 排泄物施与当年における降雨量および蒸発量

	6 月			7 月			8 月			9 月		
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
降 雨 量 (mm)	39	5	57	5	19	3	26	23	2	59	93	23
蒸 発 量 (mm)	28	14	17	37	29	35	14	13	27	19	10	10

1. ふん・尿非施与条件下の牧草養分含有率および収量

表30に、効果の判定の基礎となるふん・尿非施与区における養分含有率および収量、クローバ率の推移を掲げた。

グラスの含有率は8月以降に高く、クローバのN含有率の季節変化は一定しなかった。Pは毎春10kg/10a(初年目は5kg)を施用したが、P含有率は1~2年目にはグラス>クローバのことが多く、クローバでは6~7月に高い傾向がうかがわれた。K含有率は各月ともグラス>クローバであり、8月又は9月に高い値を示すことが多かった。Ca含有率はクローバ≧グラスであり、クローバは6月に高い値を示した。Mg含有率の草種間差はほとんどうかがわれなかったが、年次の経過とともに低下する傾向が明瞭であった。

次に、牧草収量は4年目を除き各月初旬に1回ずつ調査することを原則としたが、各月間のばらつきは大きかった。グラスの年間収量は、クローバの旺盛な成育に抑制され年々漸減する傾向を示した。クローバ率は3年目には80数%を示すに至ったが、4年目は刈取り間隔を長くしたため減少した。グラス+クローバの収量は2年目にピークを示したが、これは初年目の収量に6月の収量が含まれていないためであり、実際には、更新後3

年目に相当する供試初年目の草勢が最も旺盛であり、以後下降傾向をたどった。

以上の経過は、根釧地方で放牧タイプの刈取り試験を行った際によく見られるパターン³¹⁾であり、この状態を対照としてふん・尿が施与された場合の効果を比較することになる。

2. ふん施与当年における効果の発現

初年目は6~9月の各初旬にふんを施与し、各施与月ごとに効果を追跡した結果を、図26に示した。試験区内の調査対象域には、36gN/m²が添加されたが、ふん施与区のグラスN含有率は施与翌月から高くなることが多く、降雨の少なかった7月に施与されたふんの場合以外は、ほとんどの月で有意性が認められた。土壌中の無機態N(表31)は、月を経ると共に減少したが、それに対応して効果も小さくなる傾向がうかがわれた。

ふんに伴うPの添加量は比較的多いが、グラスの場合は、8月、9月施与の、またクローバの場合は、8月施与のふんの効果が、施与の翌月又は翌々月に認められた。このようにやや遅れて効果が発現するのは、その頃から観察されたふん塊中への牧草根の侵入によるほか、家畜ふんの肥効の特徴として報告されている有機態による根圏域への供給^{9,12,24)}が考えられる。なお、6月、7月

表30 ふん・尿非施与区における牧草養分含有率、収量およびクローバ率

	グラス含有率 (%)					クローバ含有率 (%)					風乾物量 (kg/10a)			クローバ率 (%)
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	グラス	クローバ	計	
・ 1 年目 (1976)														
7月 1日	2.76	0.36	2.19	0.64	0.40	4.47	0.34	1.45	2.56	0.40	101	129	230	63
8月 5日	3.07	0.38	2.09	0.75	0.53	4.00	0.34	1.50	2.14	0.47	108	168	276	65
9月 2日	3.86	0.37	2.12	0.69	0.59	4.38	0.33	1.30	1.67	0.47	53	140	193	77
10月 1日	4.28	0.38	2.09	0.60	0.51	4.80	0.35	1.31	1.87	0.35	32	68	100	73
.....														
・ 2 年目 (1977)														
6月10日	3.38	0.40	1.37	0.87	0.21	4.27	0.42	1.23	3.80	0.22	49	97	146	71
7月 7日	3.99	0.48	2.80	0.67	0.26	4.69	0.41	1.80	2.52	0.23	57	75	132	58
8月 2日	4.01	0.45	2.82	0.78	0.26	4.30	0.36	2.19	1.77	0.23	57	116	173	70
9月 1日	3.98	0.36	2.61	0.70	0.23	4.34	0.33	2.02	1.44	0.19	71	112	183	69
10月 3日	4.01	0.35	2.44	0.64	0.23	3.96	0.29	2.11	1.49	0.16	41	104	145	73
.....														
・ 3 年目 (1978)														
6月 6日	3.39	0.38	1.64	0.63	0.09	3.93	0.49	1.57	2.30	0.10	25	75	100	74
7月10日	2.49	0.32	2.03	0.52	0.12	3.93	0.36	1.90	1.47	0.14	84	131	215	52
8月 4日	3.99	0.37	2.57	0.61	0.19	4.05	0.35	2.16	1.43	0.17	22	155	177	81
9月 8日	4.12	0.32	2.97	0.67	0.17	4.33	0.31	2.25	1.67	0.15	20	122	142	85
10月16日	3.94	0.31	2.71	0.63	0.18	4.04	0.27	2.02	1.98	0.13	13	98	111	83
.....														
・ 4 年目 (1979)														
6月25日	2.66	0.35	1.94	0.49	0.17	4.15	0.49	1.72	2.21	0.21	63	78	141	48
8月 9日	2.79	0.33	1.92	0.57	0.26	4.04	0.40	1.91	1.72	0.26	96	110	206	39

施与の場合、2年目以降も含めて、Pの効果が見られないことが多かったが、その原因については不明である。

ふんによるKの添加量は、尿の場合に比べると少ないが、ふん塊から土壤中へ比較的早く移行するため、施与翌月の土壤中置換性Kは著しく多く、それを反映してグラス、クローバに対する効果は施与翌月から大きかった。8月施与のふんについては、施与後の降雨が少なかったため、ふんがクラスト化して養分放出が少なく、効果が小さかったと考えられる。なお、9月施与ふんの場合、10月の調査で効果が1.33を示しながら有意性が認められなかったのは、統計上の誤差分散が大きかった(CV:34%)ためであり、全般にK含有率に対するふんの効果が大きいことを否定するものではない。クローバの場合、効果の大きさがグラスに比べて小さく、グラスでは秋になる程効

果が大きくなるのに対し、クローバでは低下した。これは、混播条件下ではクローバのK吸収競合力がグラスに劣る³¹⁾ことによると考えられる。

表31 ふん施与および対照地点の土壤無機態窒素および置換性養分含有量 (mg/100g)

		調 査 月			
		7月	8月	9月	10月
N	ふん	58.5	15.4	7.4	—
	対照	4.4	2.8	2.7	—
K	ふん	280.8	81.4	75.4	60.9
	対照	14.2	4.6	5.5	4.9
Ca	ふん	117.9	72.9	115.1	117.9
	対照	72.9	89.3	74.3	105.1
Mg	ふん	38.4	6.9	20.8	35.8
	対照	8.2	5.5	9.1	11.2

注) 6月ふん施与区についての調査。
NはNH₄-N+NO₃-N、10月のNは未測定

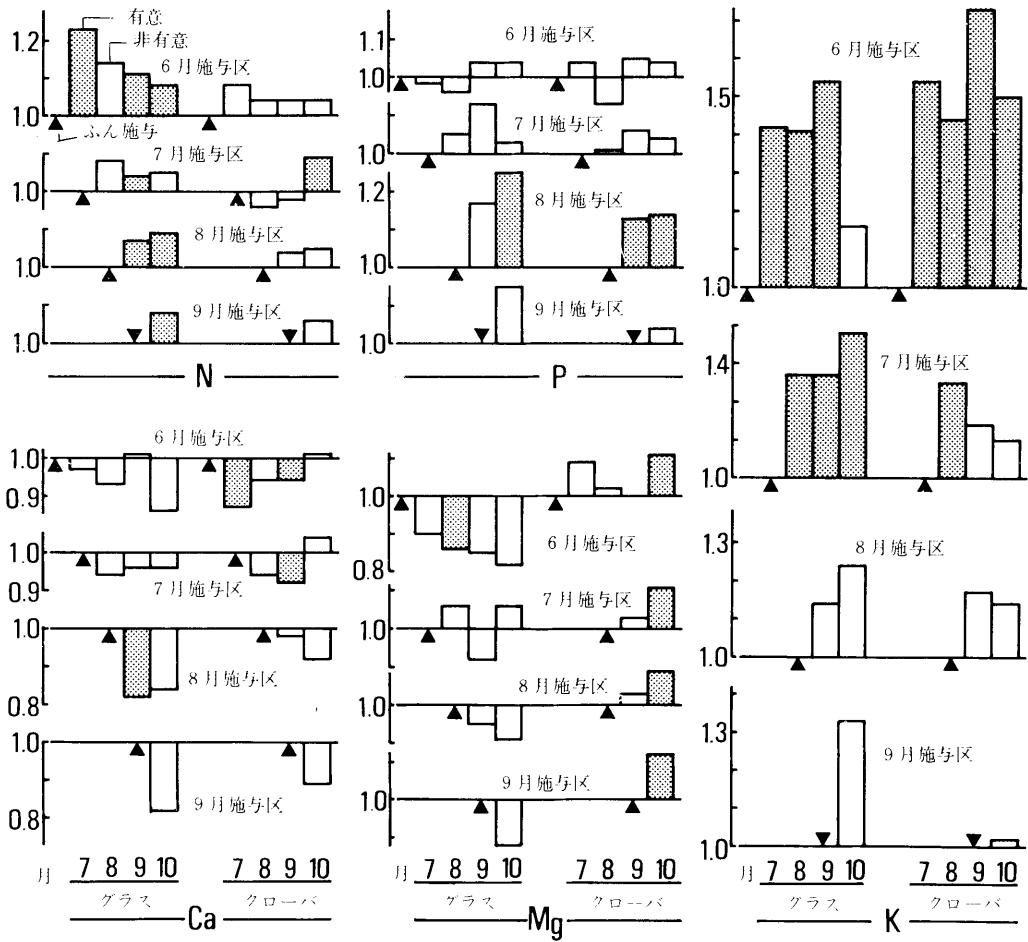


図26 初年目におけるふん施与後の各月の効果の推移。ここで効果とはふん施与区含有率/同非施与区含有率の比を表わす。(養分含有率について各月施与区ごとに施与翌月以降の効果の推移をみた。)なお、白スキは非有意、影付きは有意な効果のあったことを示す。▲は施与月を表わす。

Caは、ふん中の塩基類のなかでは最も多量に含有されることが多く、そのため施与後の土壤中置換性Caは対照区に比べ多かった。ところが、グラスおよびクローバ中のCa含有率はふん施与によって低下する傾向が明瞭で、初年目は2年目以後に比べ、1.0以下の有意な値を示すことが多かった。

土壤中置換性Mgは、施与翌月から対照区に比べきわめて多かったが、マグネシウム含有率に対するふんの効果は、グラスの場合、有意性を示すことが少なかった。他方、クローバは1.0以上のことが多く、各施与月の10月における効果がいずれも有意性を示した。これは、6月施与の場合以

外は、K含有率に対する効果が有意でなくなった時期に対応し、Caと同様にKとの関連が強いと考えられる。

グラスの風乾物取量に対しては、施与後2か月を経て効果が現われ、1.2~1.5の値を示した。クローバに対しては、10月に減収(効果は0.84)をもたらしたが、グラス・クローバ合計取量に対しては有意な効果は全く見られなかった。

3. 2年目以降のふんの効果

養分含有率および取量に対する効果の2年目以降の推移は次のとおり(図27~28)である。

窒素……グラスのN含有率に対する効果は0.96

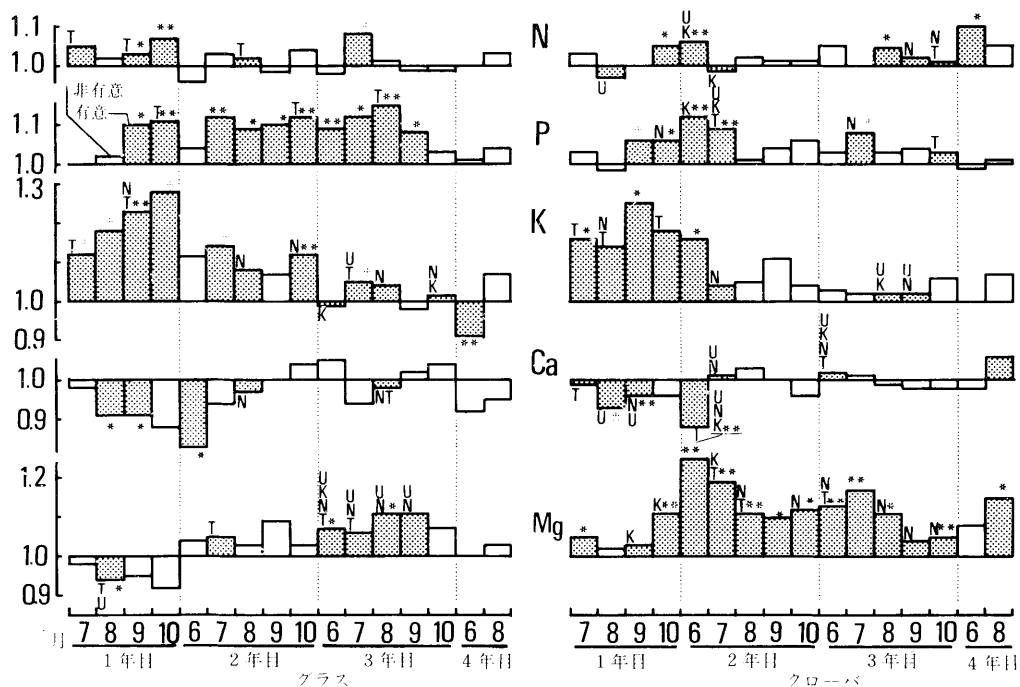


図27 養分含有率に対するふんの効果の月別推移。†:主効果についての10%有意, *:同5%有意, **:同1%有意。白スキは非有意、ローマ字は、ふんとの交互作用が5%水準で有意な因子 (cf. 表27) を示す。

～1.08であり、有意性は3か年の12期間中2時期に認められたにすぎず、全般に顕著な効果はうかがわれなかった。他方、クローバは3年目9、10月のN少肥条件下で、ふん施与区のN含有率が有意に高くなる場合がみられた (図29)。これは、クローバのN含有率がN増肥によって上昇する傾向がうかがわれたことから、ふん中のNの効果と推定される。なお、3年目8月および4年目6月に有意な効果が認められた。

りん……グラスの場合、P含有率に対しては1.1以上の効果を示すことが多く、有意な効果を示すことも多く、有意な効果は3年目9月まで持続した。

クローバの場合、2年目の6月、7月に比べ効果は小さかったが、3年目まで1.0以上の効果が持続し、3年目7月および10月には有意性が認められた。なお、2年目の6月、7月にはF (ふん施与処理) × K (K増肥処理) の交互作用が有意であった (図30)。これは、ふんがなければK増肥によりP含有率が低下するところを、ふんに

由来するPによりその低下が阻止されたものと解される。

カリウム……グラスについて、2年目は1.1前後の効果が認められたが、3年目は1.05以下であり、4年目6月にはふん施与区におけるK含有率の低下が見られた。

クローバの場合、2年目7月以降は1.05以内のことが多かった。すなわち、グラスの場合に比べ効果は若干小さく、効果の減衰が早いことになる。

なお、グラス、クローバともにN増肥によりK含有率が低下することがしばしばあったが、ふんが存在すればN増肥によってもK含有率は低下しない傾向があった (図31)。これは、ふんがカリウムの有効な給源となっていることを示すものである。

カルシウム……前述のふん施与によるCa含有率の低下傾向は、Kについての効果が少なくなる2年目後半以降はほとんどうかがわれなかった。これらは、ふんに由来する牧草K含有率の上昇によって拮抗的にCaの吸収が抑制されるとともに、

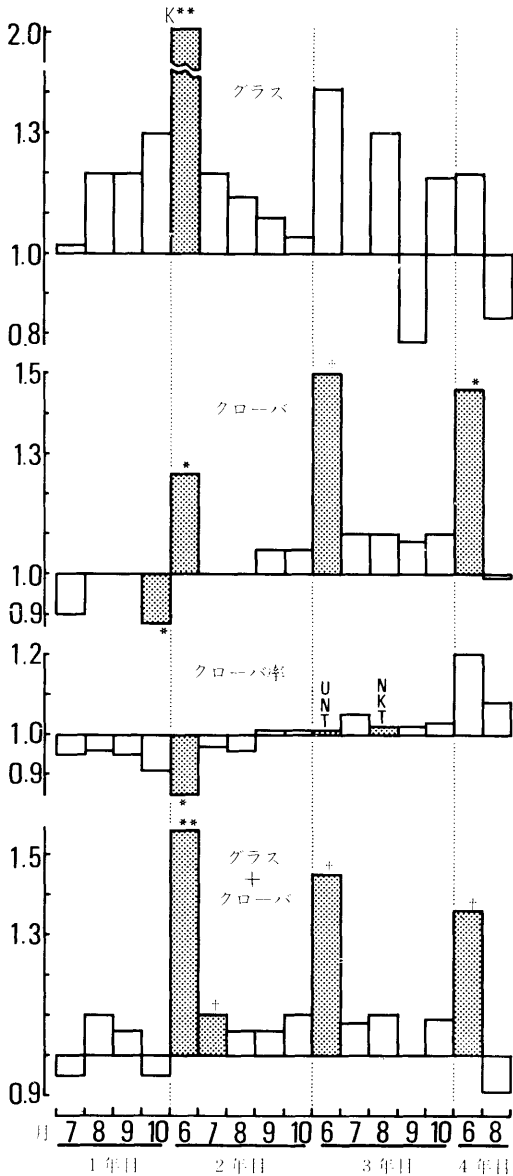


図28 牧草収量およびクローバ率に対するふんの効果の月別推移。
 †, *, **, ローマ字, 白ヌキ: 図27に同じ。

この関係において K が主導的に作用することを示すものと考えられる。

マグネシウム……グラスの Mg 含有率に対する効果は、2 年目以降は 1.0 以上を示し、3 年目には 1.1 前後で、有意性を示す場合も多かった。しかし、3 年目 10 月～4 年目には有意な効果は認められなかった。

他方、クローバにおける効果は、グラスの場合より全般に大であり、全時期にわたって 1.0 以上を示し、4 年目 8 月までのほとんどの時期に含有率の有意な上昇がみられた。

Mg 含有率についての F (ふん施与処理) × N (N 増肥処理) の交互作用は、グラス (3 年目) とクローバ (2 年目 8 月～3 年目) に共通に見られた傾向であるが、図32に典型例を示したとおり、いずれの場合も、N が増肥されると Mg 含有率はふんが施与されていても上昇しなかった。

グラス収量……図28によると、2 年目 6 月に 2.03 の有意な効果を示したが、F × K の交互作用も有意 (データは省略) であり、K 少肥条件下でふんの効果がより大であった。しかし、それ以降は各年の 6 月にやや大きな効果を示したが、有意な効果は認められなかった。

クローバ収量……2～4 年目の各 6 月に、1.25～1.50 の有意な効果を示した。

グラス・クローバ合計収量……2 年目の 6、7 月、3～4 年目の各 6 月に特異的に顕著な効果が認められた。

クローバ率……2 年目 6 月のグラスに対する効果が大きかったため、この時期のクローバ率は、ふんにより減少した。しかし、それ以外の時期には明らかな効果はほとんど認められなかった。すなわち、グラスとクローバに対する効果の強弱は、2 年目 6 月を除き総体にほとんど同等とみなすことができる。

4. 尿施与当年における効果の発現

初年目は 6～9 月の各初旬に尿を施与し、各月の施与区ごとに効果を追跡した。図33に養分含有率についての効果を示した。

本試験で使用した尿により、試験区内の調査対象域には、約 90gN/m² (1 施与個所を 700cm² とすれば、その個所では 260gN/m²) が添加された。尿中 N の大半は尿素を中心とする有機態であるが、それらは比較的早く無機化される¹⁶⁾。尿施与直後は、土壤中に NH₄-N と NO₃-N の増加が認められ (表32)、それを反映してグラスの N 含有率が顕著に増加した。以後土壤中の NH₄-N は対照区と差がなく、NO₃-N は対照区と差が次第

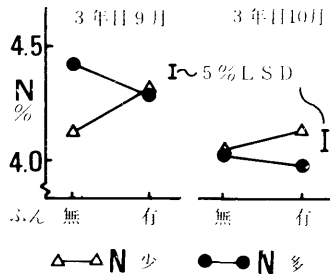


図29 クローバN含有率に対するふん施与の影響の窒素施用量による相違

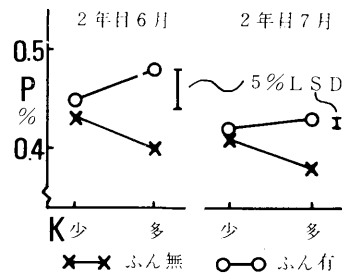


図30 クローバP含有率に対するカリウム施与の影響のふんの有無による相違

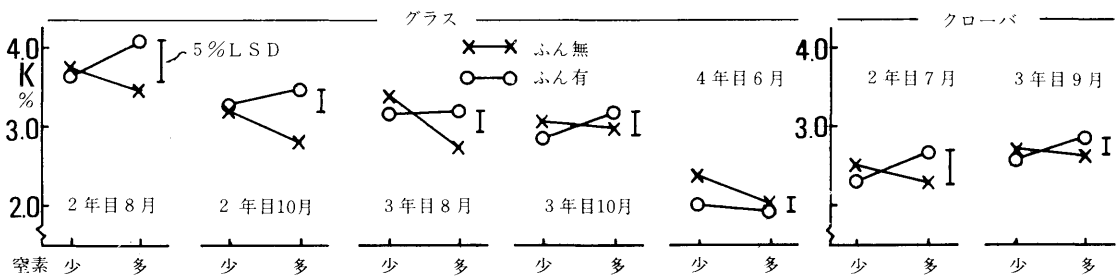


図31 牧草K含有率に対する窒素施用量の影響のふんの有無による相違

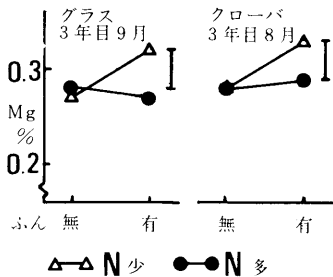


図32 牧草Mg含有率に対するふん施与の窒素施用量による相違

表32 尿施与および対照地点の土壤無機態窒素および置換性カリウム含有量 (mg/100q)

		調査月			
		7月	8月	9月	10月
NH ₄ -N	尿	0.4	1.0	1.5	—
	対照	0.7	1.0	2.2	—
NO ₃ -N	尿	14.4	14.0	9.3	—
	対照	3.4	2.5	1.8	—
K	尿	259.4	127.9	68.7	21.4
	対照	11.7	9.2	5.5	6.1

注) 7月の尿施与区についての調査。7月の調査は施与翌日に実施。10月のNは未測定

に少なくなり、同時にグラスのN含有率に対する効果が月毎に漸減した。

なお、クローバのN含有率が有意に増加することはまれであった。

次に、尿に伴い添加されたKは、調査対象域では90gK/m²であり、土壤中有効態Kは著しく増加し(表32)、グラスおよびクローバのK含有率も施与翌月から顕著に増加し、測定養分中では際立って大きい効果(1.5~2.1)を示した。

他方、P, Ca, Mg含有率はグラス、クローバとも施与翌月に減少し、有意性を示すことが多かった。特にグラスのMg含有率に対する効果が著しかった(0.6~0.7)。これらのうち、CaおよびMg含有率の減少はK含有率の増加による二次的な減少であるため、Kに比べ減少幅が相対的に小さかった。

なお、施与当年の収量に対する効果は、グラスについては1.3~1.5を示すこともあったが、有意性が認められず、クローバの場合は一定の傾向が認められなかったため、データを省略した。

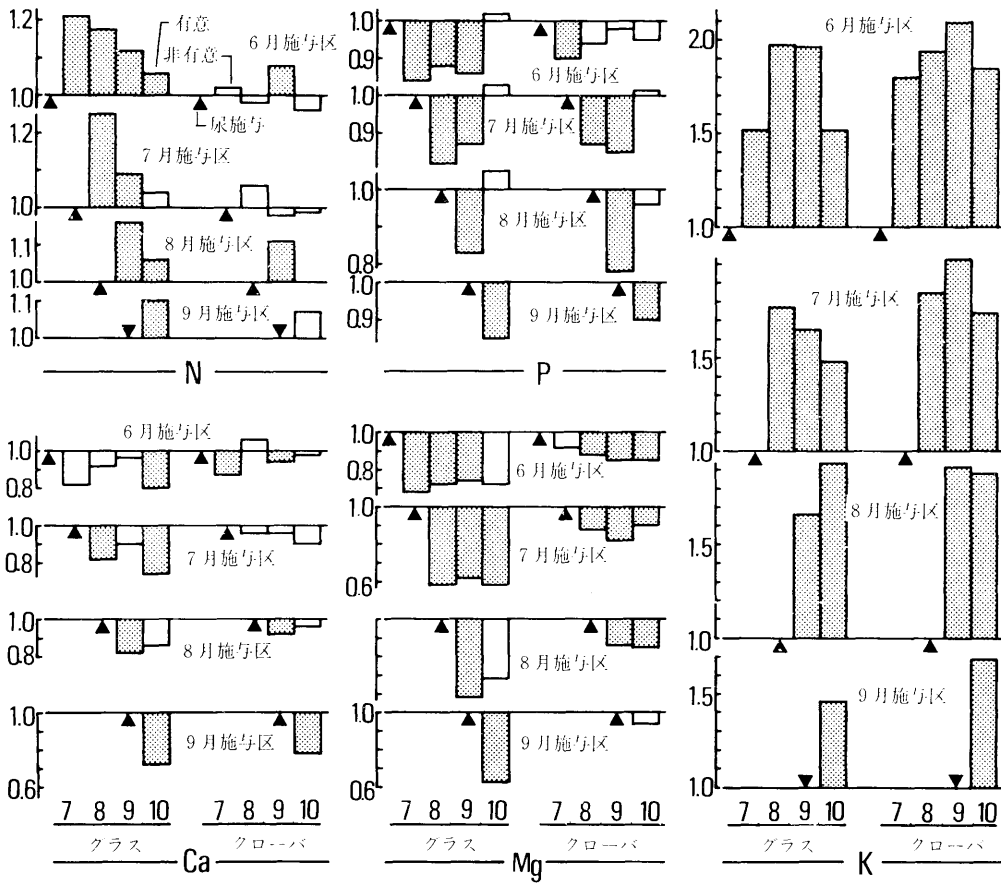


図33 初年目における尿施与後の各月の効果の推移（養分含有率について、各施与月ごとに施与翌月以後の効果の推移をみた）。記号等、図26に同じ

5. 2年目以降の尿の効果

養分含有率および収量に対する効果の推移を図34および35に示した。

窒素……N含有率は、2年目以降、グラスで有意な増加を示した月があったが、クローバにおける効果は4年目まで1.0前後で経過し、全般に大きな効果はうかがわれなかった。本試験においては、クローバによるN固定量が推定できないので、N収支の正確な試算は困難であるが、全試験期間のN収奪量の尿施与区(101.9g/m²)と非施与区(95.4g/m²)との差は、尿施与区のクローバ率が高いにもかかわらず、6.5g/m²にすぎず、Doak¹⁶⁾が指摘する空中への揮散やNO₃-Nなどとしての溶脱が考えられる。なお、2、3年目の夏にうかがわれるグラスに対する有意な効果は、表33にみ

られるように、3年目秋における尿施与区の土壤中無機態Nの形態が、化学肥料の継続施用の場合とは異なることから、有機態で残留した尿中Nの効果とも考えられたが、むしろ、尿により増加したクローバの固定Nの効果と解するのが妥当であろう。

りん……P含有率に対しては、2年目のグラスにおける効果が0.9~1.1の間を上下しながら経過し、3年目7月以降の有意な効果は全く認められなかった。一方、クローバにおける効果は、2~3年目の尿施与区のP含有率が低く、0.9前後の有意な効果を示すことがあった(4回)が、3年目8月以降は有意な効果が全く認められなかった。カリウム……K含有率に対する尿の効果は、グラスおよびクローバにおいてきわめて顕著であり、

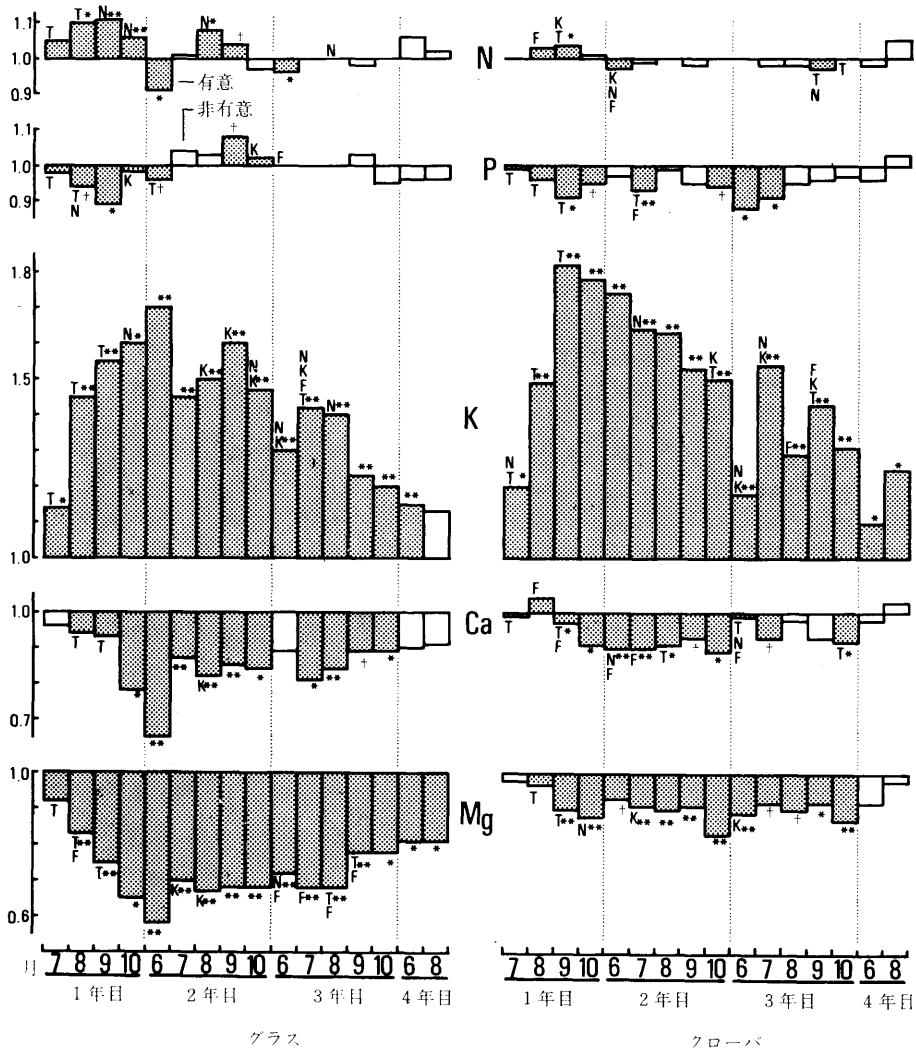


図34 養分含有率に対する尿の効果の月別推移。†, *, **, ローマ字; 図27に同じ

かつ、4年目までほとんどの時期に有意な効果が認められた。3年目10月の土壤置換性K含量(表34)は非施与区との有意差が認められ、その値は、非施与区とK少肥区、施与区とK増肥区がそれぞれ同等であった。火山性土壌におけるKの動態については、溶脱の側面が強調されることが多かった^{27,28,83)}が、その蓄積についても重視する必要がある。Kの蓄積形態などは、なお検討すべき課題として残されるが、放牧草地の排尿地点においては、3年間はKが残存し牧草に影響を与えると推定される。この残効期間は既往の報

告^{10,14,17,85,91)}の中でも最も長期にわたるものであるが、供試土壌の置換容量が23m.e.であり、その多くを腐植に負っている上に、根釦地域の水分収支が流出に傾いていることを考えるなら、結晶性粘土鉱物からなる土壌の地域⁶⁹⁾など、排尿に由来するKの効果がより長期間継続する地域は多い可能性がある。

カリウムおよびマグネシウム……Ca含有率については、グラス、クローバともに2年目は全月において1.0以下の有意な効果を示したが、3年目は有意性を示さない月があり、4年目には有意な

表33 排泄物又は化学肥料の施与と土壤無機態窒素の形態…3年目10月

		土壤無機態 N (mg/100q)		
		NH ₄ -N	NO ₃ -N	計
尿	非施与	1.09	0.62	1.71
	施与	1.04	0.72	1.76
ふん	非施与	1.05	0.69	1.74
	施与	1.08	0.64	1.72
化学肥料	N 少	1.23)	0.45)	1.68
	N 多	0.89)**	0.89)	1.78

注) 水準間の差について, *, **はそれぞれ5% 1%有意, 無印は有意性なしを表わす。化学肥料Nは硫酸アンモニウムで施用。

表34 排泄物又は化学肥料の施与と土壤置換性養分…3年目10月

		土壤置換性養分 (mg/100q)		
		K	Ca	Mg
尿	非施与	8.0)	53.3	1.4)
	施与	10.9)**	47.1	1.2)
ふん	非施与	8.9)	36.5	1.0
	施与	10.0)	63.9	1.6
化学肥料 (N又はK)	少	7.5)	73.7)	1.7)
	多	11.4)**	26.7)**	0.9)**

注) 化学肥料は, Kについてはカリウム(硫酸カリウム)施肥の少多, Ca, Mgについては, 窒素(硫酸アンモニウム)施肥の少多を示す。水準間の差について, †, *, **はそれぞれ10%, 5%, 1%有意, 無印は有意性なしを表わす。

効果が認められなかった。また, Ca含有率に対する効果はクローバに比べグラスの場合が一層著しかった。

Mg含有率に対する効果については, グラスの場合は4年目までのすべての時期に0.6~0.8の有意な値が続いたが, クローバはグラスより影響を受け難く4年目には有意性が認められなかった。

CaとMgの各含有率に対する効果の継続期間は, Kとほぼ同じか又はやや短かく施与後2~3年とみられる。なお, 尿施与区の土壤の置換性Caや同Mg(表34)は非施与区に比べ少なかった(Mgは有意)が, N増肥による減少に比べその幅は小さかった。

収量およびクローバ率……グラス収量(図35)については, 2年目6月に1.45の有意な増収を示し

た後は全て0.5~0.9であり, 2, 3年目の各8~10月には有意性が認められた。尿が, グラスを減収せしめたのと逆に, 2, 3年目のクローバを増収せしめ, 1, 2前後の効果が4年目まで継続し, 大半の時期は有意な増収であった。したがって, 2年目7月以降はクローバ率が増加し, 多い時には80%を上回る結果となった。

しかし, 両草種を合わせた全収量は, 2年目6月に顕著な増収を示した以外, 有意な効果はほとんど認め難かった。

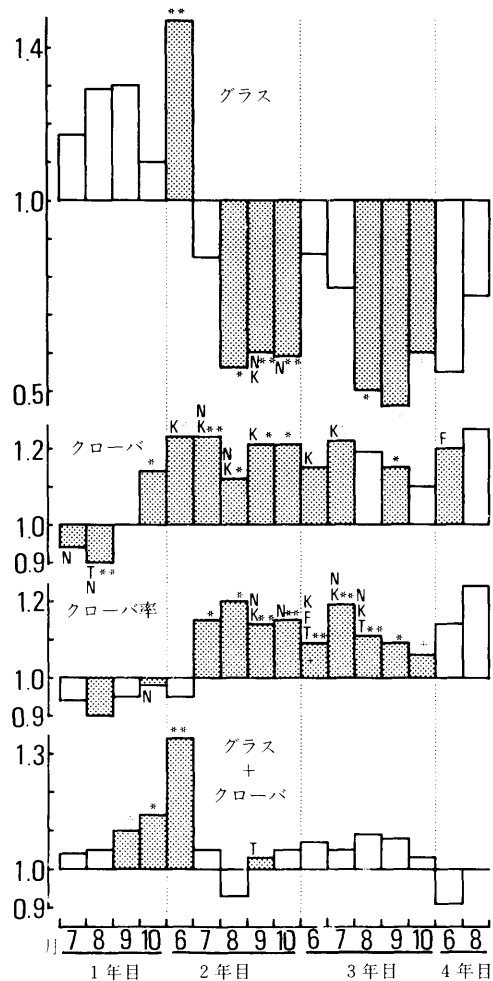


図35 牧草収量およびクローバ率に対する尿の効果の月別推移。
†, *, **, ローマ字, 白ヌキ: 図27に同じ

6. 尿の効果に対する窒素又はカリウム施肥の影響

分散分析の結果から有意と判定された交互作用のうち、尿の効果にかかわる要因を図33～35中に記した。それらの中から、U（尿施与処理）×N およびU×Kの効果の特徴を図36に掲げた。

U×Nの交互作用がグラスのN含有率について4時期にわたって認められ、いずれの時期においても尿施与又はN増肥によりN含有率の増加がみられたが、尿施与条件下でさらにNを増肥しても含有率はそれ以上増加しなかった。同様に、クローバ収量について尿施与およびN増肥により増収がみられたが、尿施与条件下ではNを増肥してもそれ以上の増収はうかがわれなかった。これらは、尿中のNの効果を示すものである。

なお、N増肥（2 kg/10a/回）によってクローバが増収しグラスは減収したが、これは少N条件下における混播クローバの増収現象として、既に早川・橋本³¹⁾によって報告されている。

次に、U×Kの交互作用が、グラスおよびクローバのK含有率についてそれぞれ4時期に認められ、尿施与又はKを増肥すると含有率は増加し、両処理を併用すると含有率は一層増加した。K含有率とN含有率の間の相違は、ぜいたく吸収現象の有無によるものと解される。収量については、2年目9月にみられるように、クローバではK増肥による増収よりも尿施与による増収が著しかったが、尿施与に加えて更にK増肥をした場合にはむしろ減収した。この現象は、2年目以降12時期中6時期に認められた。

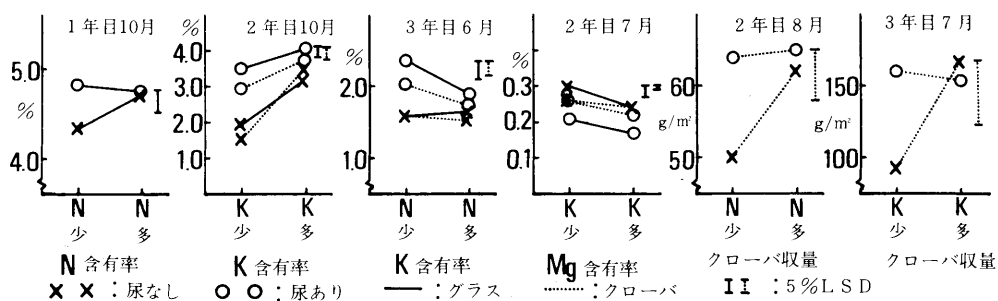


図36 尿の効果にかかわる交互作用(U×N, U×K)の典型例

論 議

ふん・尿の効果の持続性、すなわち、持続期間と効果の大きさは、指標を何にとるかににより異なるが、ここでは、グラス、クローバ別に養分含有率と収量を指標とした。

いま、牧草の養分含有率に鋭敏にかつ強く効果が現われた尿のKをとりあげると、図34のとおり、ある牧区についてみれば、初年目は放牧期ごとにふん・尿の施与量が累加されるので効果が大きくなり、その後、秋または次年の春から減衰を始める。しかし、4年目に至っても、効果は残存する。このような効果の推移のプロセスに対し、

$$y = ax^b e^{ax} \quad (4.1)$$

のあてはめ⁵⁹⁾を試みた。yとして、効果から1.0

を減じた値を使用し、xとしては調査月順に付した1～16（クローバの場合は、効果が不安定になった後半を除き1～9とした）の順序数を使用した。eは自然対数の底、a、b、cはパラメータである。

(4.1)式の右辺は ax^b と e^{ax} との積となっているが、

$$y = ax^b$$

は $a > 0, b < 0$ ならxの増加と共にyも増加し、

$$y = e^{ax}$$

は、 $x > 0$ の領域で $c < 0$ ならxの増加と共にyは減少するので、(4.1)式は効果の発現と減衰の複合した過程を表現できる。なお、(4.1)式におい

て、効果のピーク（発現と減衰の過程が切り替る点）は

$$x = -b/c$$

で与えられる。

あてはめの結果は、グラスについて、

$$y = 0.593x^{1.010} e^{-0.273x} \quad (4.2)$$

であり、効果のピークは $x = 3.7$ であった。クローバについては、

$$y = 1.443x^{1.019} e^{-0.425x} \quad (4.3)$$

が得られ、効果のピークは $x = 2.4$ の時点において見られた。(4.2)、(4.3)式により、減衰過程において $y < 0.1$ になった時に効果が消滅したとすると、グラスは $x = 16$ 、すなわち4年目8月、クローバは $x = 12$ 、すなわち3年目8月まで効果が持続することとなる。

ところで、(4.2)、(4.3)式のあてはめについての寄与率 R^2 は、それぞれ25.6%、30.5%であり、あてはまりは良好と言えない。これは、効果の算出の基礎（分母）になる排泄物非施与区のK濃度が、気象条件、草種構成の変化、調整時の生育ステージの違いなどの原因により変動し、必ずしも滑らかな推移をせず、他方、ふん・尿施与区においては、それらの原因のほかに、施与された個々のふんの分解にかかわる生物（観察によると、大小の昆虫やミミズのほか、それらを食すると思われるカラスなどまでがふんにかかわっていた）の関与のし方、微地形による尿のひろがり方や浸透のちがい、などの不規則な変動因により滑らかな変化が乱されて、実測値と(4.2)、(4.3)式による計算値との間の残差が大きくなったものと解釈できる。

取り上げた養分のなかで最も鋭敏かつ強く効果が現われたKの R^2 がこの程度なので、他の養分についての(4.1)式あてはめは実用的でないが、基本的な効果の発現と減衰の複合過程が、各養分について(4.1)式により説明されると考えることは可能であろう。

グラスならびにクローバのK、およびクローバのPに対するふんの効果は $a > 0$ であり、グラス

のCaおよびMgに対する尿の効果、グラスのCaに対するふんの効果は $a < 0$ である。さらに、グラスのPに対するふんの効果、クローバのP、Ca、Mgに対する尿の効果は、遅れて一層明瞭になる ($b \gg -c$) ケースであり、また、グラスおよびクローバのCa、グラスのMgに対するふんの効果、グラスのPに対する尿の効果などは、2年目前半に $a < 0$ から $a > 0$ へと変化する過程とすることができる。実際に、表31～表34に示されるように、排泄物非施与区の土壤中養分量が、初年日から3年目の間に減少し、特にCaやMgはその低下が著しいので、後半になって、これらに関するふんの効果が目立ってきたことも理解できる。

しかし、ふん・尿共にNについては(4.1)式に基づく考察ができない。これに関して、3年目10月の土壤養分量をみると、無機態N（表33）は排泄物施与区と非施与区との間に有意性が認められず、他方で他の養分について（表34）は有意性が認められたこと、また、尿については、2年目夏以降クローバが旺盛になり、クローバ率が急に増加したことなどから、ふん・尿中に比較的多く含まれているNも、2年目春前後には失効したものと推定される。失効が早い原因としては、揮散^{16,52)}のほかに、ふん跡では増加した微生物⁷²⁾による有機化も考えられ、今後実証的に解明する必要がある。

ところで、収量に対する効果に関して、ふんの場合に、2年目以降各6月の収量が特異的に増加する現象が見られた。草種別にみると、クローバ収量に関しては明瞭に各6月のみが有意性を示したのに対し、グラス収量については2年目6月以外有意性が認められなかった。グラス収量に対する3～4年目の6月の効果は、絶対量が減少すると共に、誤差分散が相対的に大きかったために有意性を示さなかったものであるが、それぞれ1.4、1.2であり、グラスに対し、効果がないとは言いきれない。

根釧地方は冬期の土壤凍結が長期にわたりかつ激しいので、土壤養分の何らかの状態変化が影響していると考えられる。早川³³⁾は、放牧タイプの刈取試験において、厩肥施用区の非施用区に対

する収量比が一番刈（5月末～6月上旬）において、夏以降より著しく高かったことを報告しており、当現象と共通するところが多いと推測されるが、その原因については言及していない。この現象の解明は、放牧草地の施肥法に関する重要事項として、今後の検討課題である。

なお、排泄物の効果に関して、ふんと尿の間の交互作用は、データは省略するが、調査した16期のうち、CaやMg含有率について、4～5時期に有意性がうかがわれたが、収量についてはほとんど認められず、実際上は特に考慮する必要はないものと判断される。

以上の検討をもとに排泄物の効果の持続性の特徴をまとめると次のとおりである。

Nは、ふん・尿中に多量に含まれるが、効果は明瞭でない。Kは、ふん・尿共に牧草含有率に鋭敏に、かつ強く影響した。しかし、ふんのKの

効果の減衰は早かった。Caは、ふん中に比較的多く含有されているが、その効果はKの効果に左右される。牛により摂取されたPとMgは、尿への分配はほとんど無く、搾乳牛においては牛乳のP、Mg濃度も低いので、ふんへ相対的に多く分配され、牧草（一般に飼料）の濃度よりふんの濃度が高いのが普通である^{2,25,100}。その結果、ふん中のPとMgは、比較的大きな効果が長く持続した。なお、Mgの場合は、牧草の吸収におけるKとの拮抗作用が強いので、Kの効果が減衰するにつれ明瞭な効果を現わすようになった。収量に対する効果の特徴は、尿によってクローバが増収し、グラス収量が減少すること、および特に、各年の6月の収量がふんによって増加することであった。

これらの効果の持続期間について、一覧表にまとめと表35のとおりである。

表35 斑点状に還元された排泄物の効果の持続期間

指 標	グ	ラ	ス	ク	ロ	ー	バ
◎ふん							
N含有率	(施与翌月)	～	1年目内				～2年目6月
P	〃	施与翌月又は翌々月	～3年目9月				～2年目7月(3年目10月)
K	〃	(施与翌月)	～3年目10月				～3年目9月
Ca	〃	(～2年目8月)				(～2年目6月)
Mg	〃		～3年目9月				1年目10月～4年目8月
収 量		施与翌々月	～2年目6月				2年目から4年目の各6月
◎尿							
N含有率	施与翌月	～	(1年目)				～1年目内
K	〃	施与翌月	～4年目8月				施与翌月～3年目8月
収 量	(～2年目6月)				1年目10月～4年目6月

注) 開始月がないのは、「なし崩し」的に効果が発現することを、また()は明確に時期を区切れないが概略で示したことを表わす。

第5章 放牧草地乾物生産およびカリウム循環の ダイナミックモデル

第1章における養分循環の調査結果は、各放牧期ごと、あるいは年間の累積結果を全体として量的に把握しようとしたものである。しかし、実際の養分循環はよりダイナミックなプロセスである。そこで、放牧草地の養分循環システムの各プロセスについて、前章までの結果や既往の知見をダイナミックモデルとして構成することにより、システムの中での整合性を検討すると共に、各種条件下における養分循環を予測するため、以下のような検討を試みた。

モデルの概要

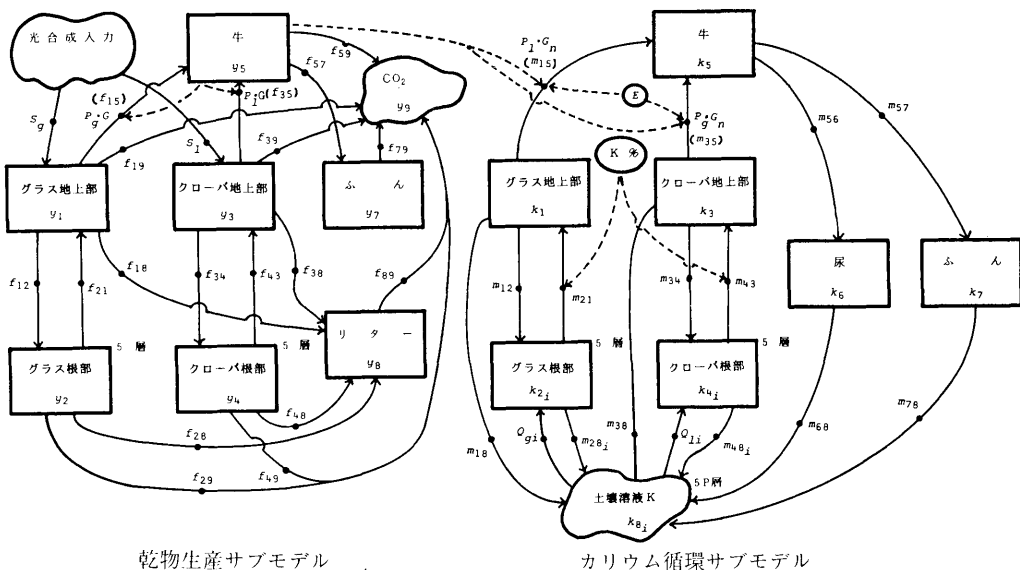
生態系における養分循環は、エネルギー流との相互作用のもとに展開している。しかし、ここではエネルギー流の代わりに乾物生産を考えることとする。そして、放牧草地系の中心である牧草部分において、エネルギーを固定再分配する乾物生産とカリウムの吸収・移行とを抱き合せ、また、牛の増体とカリウムの摂取・排泄とが併行するとい

うモデルを構成した。図37は、各コンパートメント間の分配・移行を定性的に表わすもので、Van Dyne¹⁰³¹は、このようなモデルをコンパートメントモデルと称している。

乾物生産サブモデルでは、光合成入力により乾物生産がすすみ、それが地上部・根に分配され一部は枯死して、リター化する。地上部は放牧牛に採食され、一部が排泄される。リターやふんは、分解して二酸化炭素となり系外へ放出される。

カリウム循環サブモデルでは、5層に分けられた各土層において、土壌溶液中のカリウムが牧草根により吸収され、地上部へ移行する。根と地上部との間では、可逆的な移行が行われる。放牧牛に採食されたカリウムの多くは、牛体を経て排泄される。ふん中のカリウムは徐々に放出され、土壌中に添加される。リターや脱落根などにもない、添加されるカリウムもある。

そして、この二つのサブシステムが、地上部において、カリウム含有率を中継のための情報として、また、採食プロセスにおいて、相互に結合さ



乾物生産サブモデル

カリウム循環サブモデル

図37 コンパートメントモデル

れる。同様のことが根においても行われると考えられるが、ここでは、根における知見の不足と実験上の技術的困難により省略し、今後の課題として残すこととした。

以上のプロセスの数式化は次のとおりである。

$$\begin{pmatrix} dy_1/dt \\ dy_2/dt \\ \cdot \\ \vdots \\ dy_n/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum f_{1i} & f_{21} & \cdots & f_{n1} \\ f_{12} & -\sum f_{2j} & \cdots & f_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{1n} & f_{2n} & \cdots & -\sum f_{nk} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \cdot \\ \vdots \\ K_n \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

(ただし、 $i \neq 1, j \neq 2, k \neq n$)

により、近似的に表わすことができ、マトリックスとベクトルを用いると、

$$y = f \cdot y + k, \quad (5.2)$$

となる。 f は、 Y_l から Y_m への物質移動のし易さを表わす係数 f_{lm} を成分とするマトリックスであり、移動が行われないプロセスの成分は0となる。本来、 f_{lm} は該当するプロセス独自の法則性を示すはずであるが、放牧草地の養分循環では、それを数式化できる場合は、現状ではそれほど多くないので、化学反応速度論における一次反応型を仮定し、速度定数に相当する係数を f_{lm} としたものである。そして、独自の法則性を一次反応型以外で数式化できる場合には k にそれを配置し、 f の該当成分を0とする。したがって、系内の法則性が解明されるほど k の成分が増えるものと期待される。そこで、 k を「独自項」と呼ぶこととする。なお、系への入力、出力は k に含まれることとする。(5.1)式を、図37のコンパートメントモデルに基づき、独自項を含めて具体的に表わすと、次のようになる。

乾物生産サブモデルについては、

コンパートメント Y_i ($i = 1, 2, \dots, n$)からなる系において、 Y_i 間に物質の移動がある場合、コンパートメント Y_i の現存量 y_i の微小時間 dt 当たりの変化は、常微分方程式

$$\left. \begin{aligned} dy_1/dt &= -(f_{12} + f_{15} + f_{18} + f_{19})y_1 + f_{21}y_2 + S_g - P_g \cdot G \cdot y_5 \\ dy_2/dt &= f_{12}y_1 - (f_{21} + f_{28} + f_{29})y_2 \\ dy_3/dt &= -(f_{34} + f_{35} + f_{38} + f_{39})y_3 + f_{43}y_4 + S_l - P_l \cdot G \cdot y_5 \\ dy_4/dt &= f_{34}y_3 - (f_{43} + f_{48} + f_{49})y_4 \\ dy_5/dt &= -f_{15}y_1 + f_{35}y_3 - (f_{57} + f_{59})y_5 + G \cdot y_5 \\ dy_7/dt &= f_{57}y_5 - f_{79}y_7 \\ dy_8/dt &= f_{18}y_1 + f_{28}y_2 + f_{38}y_3 + f_{48}y_4 - f_{89}y_8 \\ dy_9/dt &= f_{19}y_1 + f_{29}y_2 + f_{39}y_3 + f_{49}y_4 - f_{59}y_5 + f_{79}y_7 + f_{89}y_8 \end{aligned} \right\}$$

ここに、尿についての式 dy_6/dt は、実際には無視できるので省略した。 S_g, S_l, P_g, P_l, G は独自項を構成し、それぞれ、グラスおよびクローバの光合成インプット (=CGRの季節変化)、グラスおよびクローバの嗜好性を示す係数 ($P_g + P_l = 1, P_g \geq 0, P_l \geq 0$)、滞牧を示すスイッチ関数 (滞牧時： $G > 0$ 、そうでない時： $G = 0$ ；なお、草量が日当り採食量に満たない時には、 $f_{15}, f_{35} > 0, G = 0$ となり、満たす時には、 $f_{15}, f_{35} > 0, G = 0$)である。

カリウム循環サブモデルについて、まず、土壤溶液中のK濃度は主としてアニオン濃度により規制される(第3章第2節)ので、土層 i ($i = 1, 2, \dots, 5$)ごとの $Cl(x_{i1}), SO_4(x_{i2}), NO_3(x_{i3})$ の濃度(実測データ)から各土層のK量を予測する重回帰式

$$k_{8i} = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + b_3 x_{i3}, \quad (5.3)$$

を、カリウム循環系のインプットとして用いた*1。
定数および係数については後述する。

各コンパートメントについては、

$$\left. \begin{aligned} dk_1/dt &= -(m_{15} + m_{12} + m_{18})k_1 + m_{21}k_2 - P_g \cdot G \cdot y_5 \\ dk_3/dt &= -(m_{35} + m_{34} + m_{38})k_3 + m_{43}k_4 - P_l \cdot G \cdot y_5 \\ dk_5/dt &= m_{15}k_1 + m_{35}k_3 - (m_{56} + m_{57})k_5 + G \cdot E \cdot y_5 \\ dk_6/dt &= m_{56}k_5 - m_{68}k_6 \\ dk_7/dt &= m_{57}k_5 - m_{78}k_7 \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

また、グラスおよびクローバの根におけるカリウムの動態は、それぞれ、

$$\begin{aligned} dk_{3i}/dt &= Q_{gi} + m_{12}r_i k_1 - (m_{28} + m_{21}r_i) k_{2i} \\ &\quad (i=1, 2, \dots, 5; \text{土層}) \\ dk_{4i}/dt &= Q_{li} + m_{34}r_i k_3 - (m_{48} + m_{43}r_i) k_{4i} \\ &\quad (i=1, 2, \dots, 5; \text{土層}) \end{aligned}$$

ここに、 k は(5.2)式の \mathbf{y} に対応し、 m は \mathbf{f} に対応する。 r_i は i 番目の土層に存在する根量の割合 ($\sum r_i = 1$) を示す。 E はカリウムの牛体への同化効率である。 Q_{gi} 、 Q_{li} はグラス、クローバの i 土層におけるカリウム吸収を表わす独自項であり、以下の内容を含んでいる。

Oliver と Barber⁸²⁾ によると、養分の根への供給は、① mass flow、② root interception および③ 拡散のプロセスからなる。これらのプロセスに対応するものとして各土層ごとに、

$$\begin{aligned} M_i &= h_M \cdot r_i \cdot y_i \cdot k_{8i} / w_i \\ R_i &= h_R \cdot b^{0.75}, \quad (b \geq 0) \\ D_i &= h_D \cdot k_{8i} \end{aligned}$$

とし、グラス、クローバごとに、それぞれ、

$$\begin{aligned} Q_{gi} &= M_{gi} + R_{gi} + D_{gi} \\ Q_{li} &= M_{li} + R_{li} + D_{li} \end{aligned} \quad (5.5)$$

とした。

すなわち、① mass flow は地上部の現存量 y_1 または y_3 を各根量割合 r_{gi} 、 r_{li} に応じて配分した値および土壌溶液中カリウム濃度 (k_{8i}/w_i ; w_i は土壌溶分量) とに比例する。② rot interception は、微少時間当たりの根の生長量 b を表面積の単位に換算した値 $b^{0.75}$ に比例し、枯死などで生長がない場合は $b = 0$ とした。③ 拡散は根表面周辺での溶液中濃度勾配が関係するが、本モデルでは溶液中濃度を土層内では均一として扱うので、濃度に比例するとした。各プロセスにおける比例定数 h_M 、 h_R 、 h_D は、ここで取り上げた以外の関係する因子をすべて包含するものとして経験的に与えることとした。

以上のモデルにつき数値計算を行うためには、各係数およびそこに含まれるパラメーター値を具体的に与える必要がある。対象期間を通じて係数値が不変な場合は定数であるが、変化する場合はいくつかのパラメーターを含む変数で表わすこととなる。また、これらの係数がすべてのプロセスについて実験的に求められるとは限らない。実験的に求められても、定量的に決められないことが多い。そのような場合、経験的または定性的に変数や数値を与えておき、数値計算結果を見て改善するという手順を踏む。この際、比較対照する実システムについてのデータおよび経験が重要な役割を果たす。なお、この手順は、実験的に求めた係数およびモデルの全体についても適用される。すなわち、モデル全体が実システム全体に最も良く適合するように改善を繰り返すことになる。全般に妥当な結果を得るようになった時の係数およびパラメーター (係数中に含まれる定数) を、乾物生産サブモデルについて表36に、またカリウム循環サブモデルについて表37に掲げた。なお、モデルのサブルーチン・プログラムと供試データの1例をそれぞれ付録2)、付録3) として掲げた。

まず、乾物生産サブモデルについて、 S は CGR の季節変化であり、根鉤農試草地科における1965年以降10年間の各種試験結果から多項式近似によ

*1) 本重回帰式の説明変数に置換性カチオンを入れなかったのは、シミュレーションに使用したプログラム BGS-1 の制限により、より多量のデータを使用できなかったためである。

り得られた平均的な式⁶¹⁾である。この式が各種条件によりどう変化するかは、放牧草地の乾物生産系のインプットを明らかにするという観点から、極めて重要であるが、そのような観点での試験研究はわが国においては少く、根釧地方に適用するためには多項式近似によらざるを得ない。

U は、180日目（5月上旬～10月下旬までの根釧地方における牧草生産日数）を半周期とする sin 曲線であり、根から地上部への乾物の再分配を表わすプロセスに使用し、それに乗ずるパラメーターで上限が決まる。

f_{18} などに見られる指数関数は、秋になるほど反応が大きくなるようなプロセス（地上部の脱落など）に使用するが、全般に指数部のパラメーター値が小さいので、秋に向けての立ち上りの角度は大きくない。

表36 乾物生産サブモデルの係数およびパラメーター

$S = 46.0 + 0.92t - 0.0073t^2 \dots \dots \text{CGR}$ (g/m ²)	
$U = \sin(\pi t/180)$	
$f_{12} = a_1 / (1 + e^{-a_2 t^{a_3}})$ $a_1 = 0.02, a_2 = 0.03, a_3 = 90$	
$f_{18} = a_5 e^{a_6 t}$ $a_5 = 0.015, a_6 = 0.001$	
$f_{19} = a_7 + a_8 T$ $a_7 = 0.0028, a_8 = 0.0008$	
$f_{21} = a_9 U$ $a_9 = 0.005$	
$f_{28} = a_{10}$ $a_{10} = 0.002$	
$f_{29} = a_{11} + a_{12} T$ $a_{11} = 0.0014, a_{12} = 0.00042$	
$f_{31} = a_{13} / (1 + e^{-a_{14} t^{a_{15}}})$ $a_{13} = 0.02, a_{14} = 0.03, a_{15} = 90$	
$f_{38} = a_{17} e^{a_{18} t}$ $a_{17} = 0.015, a_{18} = 0.001$	
$f_{39} = a_{19} + a_{20} T$ $a_{19} = 0.0028, a_{20} = 0.0008$	
$f_{43} = a_{21} U$ $a_{21} = 0.005$	
$f_{48} = a_{22}$ $a_{22} = 0.002$	
$f_{49} = a_{23} + a_{24} T$ $a_{23} = 0.0014, a_{24} = 0.00042$	
$f_{79} = a_{27} + a_{28} T$ $a_{27} = 0.002, a_{28} = 0.002$	
$f_{89} = a_{29} + a_{30} T$ $a_{29} = 0.002, a_{30} = 0.002$	
$P_g = a_{37}$ $a_{37} = 0.33$	
$P_l = 1 - a_{37}$	
$S_g = a_{38} S$ $a_{38} = 0.45$	
$S_l = (1 - a_{38}) S$	
$f_{57} = a_{25}$ $a_{25} = 0.005 \text{ or } 0$	
$f_{59} = a_{26}$ $a_{26} = 0.36 \text{ or } 0$	
$G = a_{33}$ $a_{33} = 0.4202 \text{ or } 0$	
$f_{15} = a_4$ $a_4 = 0.5 \text{ or } 0$	
$f_{35} = a_{16}$ $a_{16} = 0.5 \text{ or } 0$	

注) t は日数, T は旬別気温, パラメーターの単位: a_3, a_{15} は日, 他は日⁻¹。

f_{12} などのロジスティック関数は、生育期間の前半は指数関数的に増加するが、後半で飽和値に達するようなプロセス（地上部から根への有機物の転流など）に使用する。

呼吸と分解に係る係数は、温度が関係するので、Okuboら⁷⁶⁾のモデルに準じて気温を変数とする単回帰式を適用し、温度は根釧農試測定による旬別平均気温の直線補間値を使用した。

他はいずれも定数である。

カリウム循環サブモデル（表37）については、(5.3)式に掲げたインプット k_{8i} が第3章第1節で得た重回帰式（単位は、第3章の m.e/l を ppm に変更して使用した。）である。その他の係数については、 m_{12}, m_{31} がロジスティック式であるほかは定数である。

なお、モデルのサブルーチン・プログラムと供

表37 カリウム循環サブモデルの係数およびパラメーター

$m_{12} = c_1 / (1 + e^{-c_2 t^{c_3}})$ $c_1 = 0.01, c_2 = 1.0, c_3 = 90$	
$m_{18} = c_5 e^{c_6 t}$ $c_5 = 0.015, c_6 = 0.016$	
$m_{21} = c_7 U$ $c_7 = 0.01$	
$m_{43} = c_9 U$ $c_9 = 0.015$	
$m_{38} = c_{11} e^{c_{12} t}$ $c_{11} = 0.015, c_{12} = 0.016$	
$m_{31} = c_{13} / (1 + e^{-c_{14} t^{c_{15}}})$ $c_{13} = 0.01, c_{14} = 1.0, c_{15} = 90$	
$m_{68} = c_{19}$ $c_{19} = 0.121$	
$m_{78} = c_{20}$ $c_{20} = 0.0121$	
$m_{56} = c_{17}$ $c_{17} = 0.0121 \text{ or } 0$	
$m_{57} = c_{18}$ $c_{18} = 0.0343 \text{ or } 0$	
$G_n = G \cdot c_4$ $c_4 = 0.035$	
$m_{15} = f_{15}$	
$m_{35} = f_{35}$	
$m_{28i} = c_{21i}$ $c_{211} = 0.001, c_{212} = 0.0005, c_{213} = 0.0005$ $c_{214} = 0.0005, c_{215} = 0.0005$	
$m_{48i} = c_{22i}$ $c_{221} = 0.001, c_{222} = 0.0005, c_{223} = 0.0005$ $c_{224} = 0.0005, c_{225} = 0.0005$	
$E = c_8$ $c_8 = 0.2$	

・インプット式(土層別溶液中カリウム量)、[] 内は各アニオン濃度(ppm)

$$k_{8i} = (-11.658 + 5.6165[\text{Cl}] + 6.1493[\text{SO}_4] + 2.2889[\text{NO}_3]) / 1000 \dots \dots \text{A}$$

$$k_{8i} = (-70.993 + 7.8968[\text{Cl}] + 17.041[\text{SO}_4] + 20.297[\text{NO}_3]) / 1000 \dots \dots \text{B}$$

注) A: 非排泄地点, B: 排泄地点, t は日数, U, G は表36参照。パラメーターの単位: c_3, c_{15} は日, c_8 は単位なし, 他は日⁻¹。

試データの1例を、それぞれ付録2)、付録3)として掲げた。

結果および考察

数値計算は、萌芽期(5月1日とした)から開始し、第1回放牧を46日(6月16日)から5日間行い、以後は30日間休放牧後5日間滞牧するサイクルを4回繰り返す、合計170日間に5回の放牧を行って10月18日に終了した。なお、各回の放牧終了後は、牧区内の牧草生育は均一の状態(実際には、掃除刈によりこの状態が得られる)から再生

が始まるものとした。また、以下本節で示す結果は、第1放牧期のみには排尿を受けた地点のものである。

この計算に使用した各コンパートメントの初期値を表38に示した。これらは、根部Kが第3章第1節の調査結果であるが、他は標準的と考えられる概数を設定したものである。また、カリウム循環システムのインプットに相当する(5.3)式のアニオン濃度は、第3章第1節の尿添加・栽植区(第1放牧後)および尿非添加・栽植区(それ以外の時)における実測値(38日間に6回の測定値が得られている)を使用した。そのため、図38に

表38 モデルの数値計算における各コンパートメントの初期値

乾物生産 サブモデル	グラス 地上部	グラス 根 部	クローバ 地上部	クローバ 根 部	リター
	100	50	100	50	0
	牛 尿	135	0	0	0
カリウム循環 サブモデル	グラス 地上部	クローバ 地上部	牛	尿	ふん
	3.0	3.0	4.5	0	0
	根 部	第1層	第2層	第3層	第4層
		0.220	0.105	0.065	0.005
					第5層 0.060

注) 単位:牛, kg/頭, 他は g/m²

掲げた土壤溶液K量が各入牧時点で不連続になっているが、実際の放牧草地にあっても施肥を行った場合には、これと類似のパターンをとると考えられる。

図39に、各コンパートメントにおける乾物現存量およびカリウム現存量の季節変化の計算結果を示した。

放牧草地のように、多要素からなる生態系を連立常微分方程式モデルとして構成する場合には、一般にモデル式ないし係数・パラメーターを、相対的に実験的情報の多い一部を除き、かなり大まかな近似によって与えるため、実システムとの厳密な量の一致を得ることは困難が多い。また、実システムとの適合性の検討については、計算値の情報量に比べ実測値の情報量が著しく不足することが一般的であり、そのような場合の比較の方法も確立していない。したがって、現状では、おお

よその量的水準と季節変化のパターンにおいて、全体にバランスのとれた動きを再現できれば良しとせざるを得ない。

そのような観点から計算結果を検討すると、地上部乾物重および同K量は概して現実的な経時変化を表わしているものといえよう。ちなみに、地上部のK含有率を計算した結果(図40)は、放牧草地における含有率の季節変化と類似したパターンを示した。リター量も放牧草地で予備的に調査した結果に近いものであった。地下部乾物重の季節変化は秋に向って単調な増加を示したが、実際には出穂期前後にピークがあり、また、放牧後には減少することが経験的に知られており、今後本モデルにおける当該部分は一層の検討を必要とする。

次に、放牧牛の増体はほぼ通常の経過を示した。他方、牛体カリウムについては(5.4)式に示した

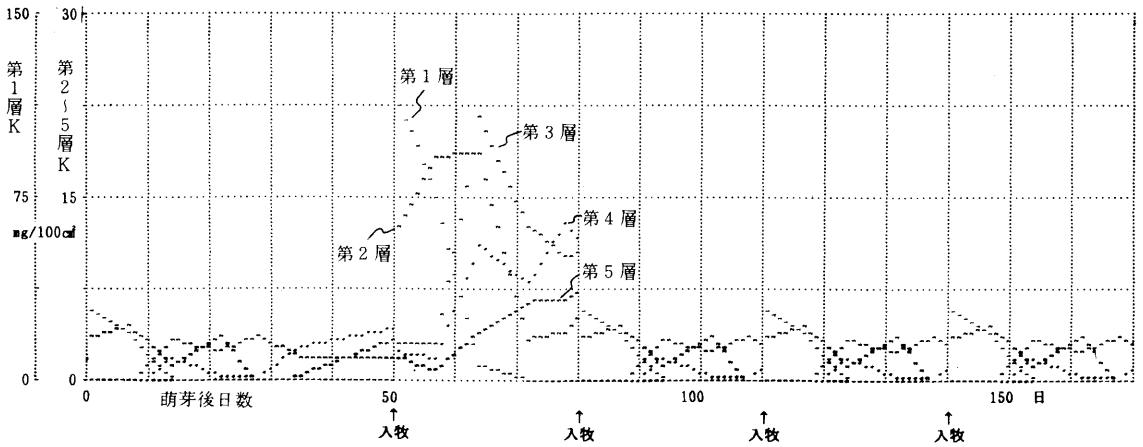


図38 土層別、土壌溶液 K の推移 (シミュレーション、カリウム循環サブモデルのインプット)

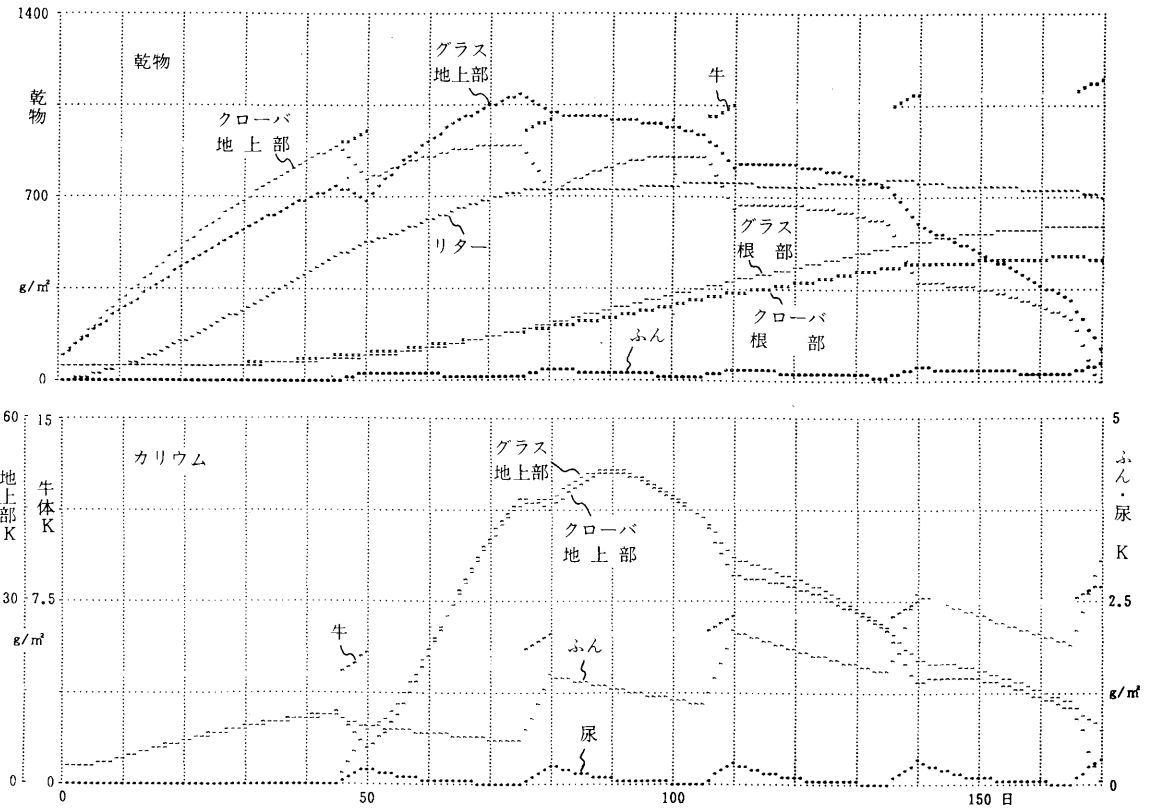


図39 各コンパートメントの乾物, K 量の推移 (シミュレーション結果)

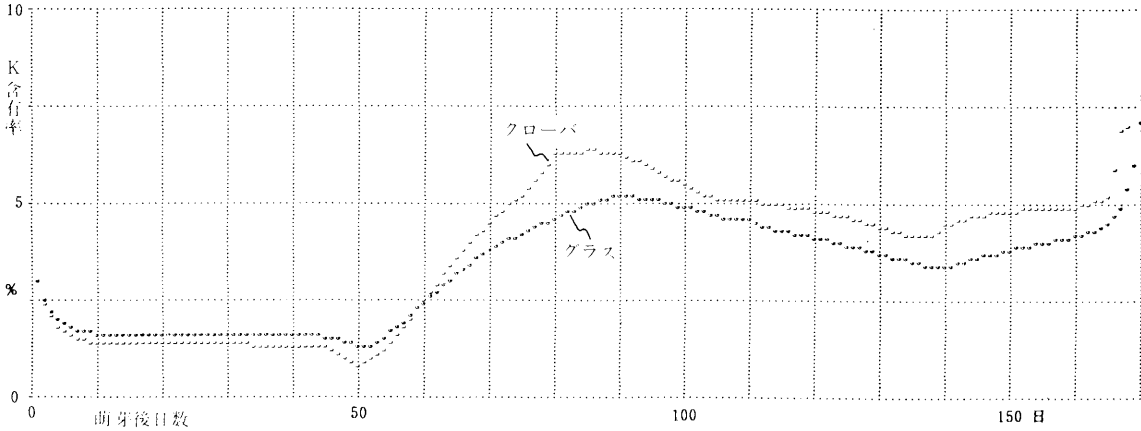


図40 牧草地上部カリウム含有率の推移 (シミュレーション結果)

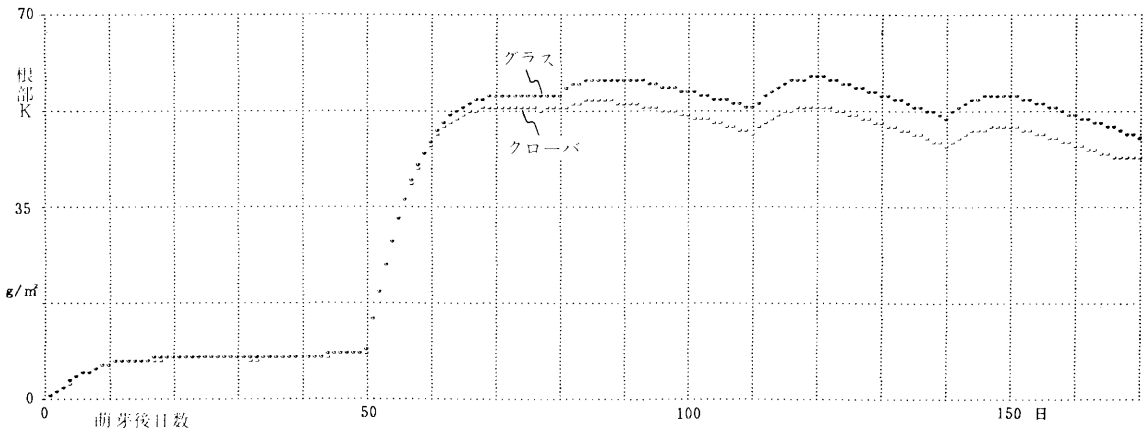


図41 牧草根部カリウム量の推移 (シミュレーション結果)

とおり、摂取量に対し「同化効率」に相当する係数を乗じて図中の値を得たものである。乳牛をめぐる養分収支を、摂取量、泌乳量、排泄量およびそれぞれにおける濃度調査から計算すると、牛体中に異常に蓄積する結果を得ることがしばしばあり、検討を要する点である²⁵⁾。

また、排泄ふんのK量の推移は、第3章第2節の結果に近いパターンを示した。なお、尿中のK量は、排泄と同時に土壤中へ移行するので地上蓄積はない。

ところで、対象システムの中に知見の欠落した部分がある場合、他の部分のモデルは正しいという仮定のもとで、計算結果によって欠落部分を予

測することになる。草地生態系の各要素の中では、地下部に関する情報が、調査に多くの困難を伴うために不足しており、なかでも放牧草地に関しては少い⁹⁴⁾。そこで、根中K量の計算を試みた結果(図41)、施肥又は放牧(排泄)後約10日間にわたって根中K量が増加し、以後減少するパターンを示した。根をめぐるKの出入りが本モデルにしたがって行われていれば、このようなパターンを示すはずである。