第3章　排泄物に由来する養分の土壌中における動態

本章では，個々の排泄地点における養分の動態の特徴を明らかにする。尿の場合は，大量の養分が土壌に添加され，その動態は土壌中での養分間の相互関係として明らかにすることが重要と考えられるので，統計的手法による検討を行った。ふんについては，ふん塊からの放出過程を中心に解析した。

なお，本章の実験に供試した土壌の主要な特性を表9に示した。根釧農試ほ場の土壌は，厚層黒色火山性土[88]であり，Me−aA，Me−aC，Km−2aの各層が耕起混和され，一部Km−1fが混入する場合がある。作土は，腐植にすこぶる富む（10.5%）砂壌土で，置換容積（23 me）の大部分を腐植に依存している[43]。

表9　供試土壌の主な特性

層厚		粘土	腐植	全窒素	pH		CEC	N/5 HCl可溶成分[a]			燐酸吸収係数	火山灰層名[b]
cm	土性	…… % ……			H_2O	KCl	me	CaO	P_2O_5	K_2O		
0−11	SL	1.91	12.5	0.53	5.8	5.2	26.5	139.0	8.5	24.2	1,850	Me−aA
11−15	SL	1.59	4.8	0.24	6.0	5.3	6.2	102.5	4.8	12.5	1,625	Me−aC
15−29	SL	2.70	11.2	0.52	5.7	5.2	24.3	92.5	7.2	20.2	2,018	Km−2a,e
29−43	SL	4.83	10.8	0.58	5.5	4.8	27.6	85.0	4.5	18.5	2,585	Km−1f

注　a) mg/100 g土
　　b) Me−a：雌阿寒岳火山灰a層，Km−2a，Km−e，Km−1fは，それぞれカムイヌプリ岳火山灰2a，e，1f層

〈第1節〉牛尿または化学肥料添加土壌中における養分の動態

放牧草地の排尿地点には，序章で述べたとおり窒素とカリウムをはじめ多量の養分が添加される。排泄により添加された養分の動態や形態変化について，各養分単独の研究例は多い[14,16,63,91,107]が，各養分相互間の関係についての研究は少ない。しかし，放牧草地では牧草中の硝酸含量やK/(Ca＋Mg)当量比が乳牛の健康と関連して重要視されており[41,45,47,60,95]，各養分単独の動態に限らず，それらの相互作用を考慮する必要がある。本節では，そのような観点における考察の基礎的知見を得ることを考慮して，主として土壌溶液中の各種イオンの相互作用を中心として検討を加えた。その際，検討の手法に関し，有機質の火山灰土壌における各種イオンの相互作用および動態を記述する物理化学的数理モデルを作成するに先立ち，実験データに基づく解析を重ねる必要があると考えられるので，本実験結果に，多変量解析法を適用し，カチオンの固液相間の平衡を主成分分析により，また，アニオンとカチオンの関係を正準相関分析および重回帰分析により検討した。

なお，本節では，カリウム，カルシウム，マグネシウム，塩素を各元素記号で，また，アンモニア態窒素，硝酸態窒素および硫酸（イオン等）をそれぞれNH_4，NO_3，SO_4と表記する。

方　　法

実験方法……表10のとおり3因子を組み合わせ，計8処理をガラス室内の木枠に設定した。小型のライシメーター式木枠（土壌充塡容積：縦110cm×横40cm×深さ25cm）に根釧農試ほ場作土110kg（湿土；1 gP/乾土kgを混和）を充塡（1979年7月17日）し，栽植区には約10cmに生育したイタリアンライグラスを10cm×10cmの格子状に移植し，生育良好なものにより1クローン/格子点として仕立てた。施肥処理は同年9月3日に実施し，化学肥料はm^2当たり10gN，4.2gKを，Cl区は塩化アンモニウムと塩化カリウム，SO_4区は硫酸アンモニウムと硫酸カリウムにて施用した。牛尿は，放

表10　実　験　設　計

区No.	尿	化学肥料の塩化物・硫化物別	牧草
1	−	Cl	−
2	−	Cl	+
3	−	SO_4	−
4	−	SO_4	+
5	+	Cl	−
6	+	Cl	+
7	+	SO_4	−
8	+	SO_4	+

表11　供試尿中養分濃度と添加量

	濃度 (ppm)	添加量（mg/100cm²）
N	8,800	299
K	11,600	394
Ca	9.7	0.4
Mg	250	8
Cl	1,700	58
SO_4	3,000	102

牧草地の排尿地点を想定して1.5*l*/区（34.1ml/100cm²）を添加した。供試尿中の主要養分濃度と添加量を表11に掲げた。水分管理は，根釧農試における生育期間の日平均降水量4.2mm/日に近い4.5mm/日を純水にて毎日9時に添加した。

調査・測定方法……土層5cmごとに5層にわたり6回の採土を行った。毎回の採土域として，木枠の縦方向10cmずつ（栽植区ではこの採土域の中心線上に牧草4クローンを配してある）をあて，9月3日（施肥処理前），10日，17日，25日，10月1日，8日に採土を行った。100ml容採土缶にて採土後，pF 3.8までの土壌溶液を遠心法にて採り，直ちに電気伝導度を測定後，水溶性成分の分析に供した。残渣土壌は風乾し，土：液比1：10のpH 7 −N−CH_3COONH_4 およびN−KClによる浸出液を調整し，置換性成分の分析に供した。

各成分濃度の測定は，N：Conway微量拡散法，K，Ca，Mg：原子吸光光度法，Cl：チオシアン酸第2水銀比色法[112]，SO_4：硫酸バリウムによる白濁を利用する比濁法[112]によった。

データの解析……土壌溶液の AR^K（カリウムとカルシウム・マグネシウムとの活動度比）は次の関係[74]により計算した。

$$AR^K = pK - \frac{1}{2}p\,(Ca+Mg)$$

ここに，$pK = -\log a_K$ であり，a_K はカリウムの活動度である。同様に $p(Ca+Mg) = -\log a_{(Ca+Mg)}$ である。土壌溶液中のイオン対およびそれを除いた液相溶存イオンの活動度の計算はAdams[1]の繰り返し計算法*)によった。

多変量解析法の実施に際し，主成分分析[79,81]および正準相関分析[79,81]は相関係数行列から出発し，重回帰分析における変数選択には予測平方和(PSS)を指標とした総当たり法[38,81]を採用した。

結果および考察

1．土壌溶液中のカチオンの変動

土壌溶液中の1価カチオン，2価カチオンは，多くの場合，それぞれが類似の変動をすることが知られている。本実験においても，いくつかの観点からその様子を認めることができた。

すなわち，第1に，カチオン濃度間の相関係数（表12）は，KとNH₄，CaとMgがそれぞれ高い値を示した。

第2に，経時的・層別に得られた240点の各イオン濃度（m.e/*l*）のデータを主成分分析により解析した結果にそれが認められた。表13によると，第1主成分（Z_1）は，いずれのカチオン濃度とも高い相関を示し，各カチオン濃度の重みづき平均値と表現することができる。他方，第2主成分（Z_2）は1価カチオンと2価カチオンの差を表わ

表12　土壌溶液中イオン濃度の相関係数行列

	NO_3	Cl	SO_4	K	NH_4	Ca
Cl	0.151					
SO_4	0.106^{ns}	0.072^{ns}				
K	0.717	0.436	0.483			
NH_4	0.222	0.680	0.650	0.755		
Ca	0.618	0.485	0.028^{ns}	0.287	0.119^{ns}	
Mg	0.500	0.515	0.037^{ns}	0.199	0.132	0.947

注）n：240；^{ns}は5％水準で有意性なし

*)　使用したプログラムは筆者の作成によるものであり，付録1）として末尾に掲げた。

し，プラス側で1価，マイナス側で2価が多いことを示している。以上の2成分により約93%の寄与率を示した。なお，第3主成分は主としてKとNH_4との差を表わし，マイナス側でKが多く，2価カチオンに関する情報は持たないと考えられるが，固有値=0.25がその平均=1.0よりかなり小さく，各データの特徴をあまり良く説明しているとはいえず，この情報によってNH_4とKの違

表13　土壌溶液中カチオン濃度についての主成分分析

	Z_1	Z_2	Z_3
因子負荷量			
K	0.693	0.632	0.345
NH_4	0.593	0.731	− 0.337
Ca	0.850	− 0.504	0.064
Mg	0.826	− 0.536	− 0.113
寄与率(%)	55.9	36.9	6.2
累積寄与率(%)	55.9	92.8	99.0

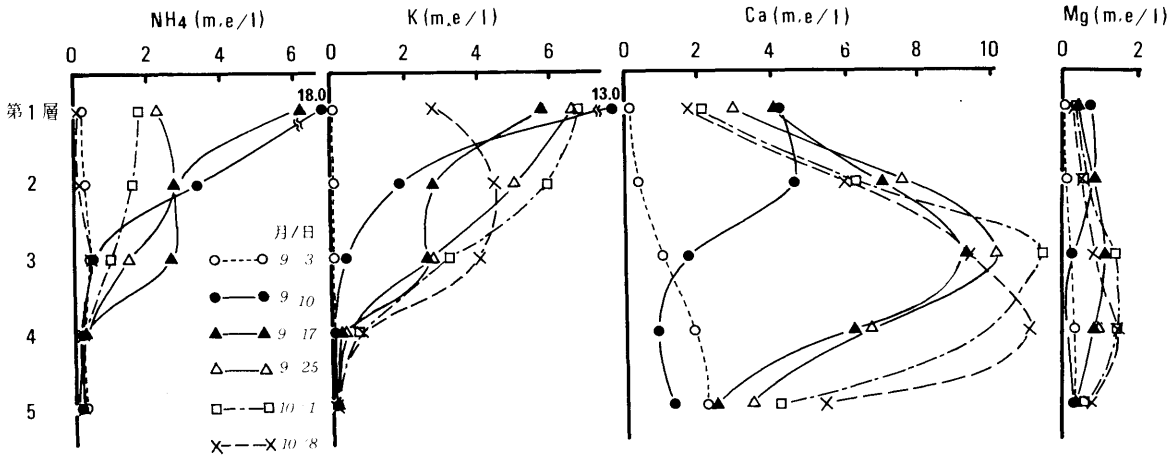

図13　各カチオンの経時的・層別変動（全区平均）

いについて言及することは，極端な場合を除き避けるべきである。そこで，第1，第2主成分について因子負荷量を比較すると，1価イオン同士，2価イオン同士がそれぞれ近い値を示し（特にCaとMgは近い），類似した変動をしていることがうかがわれる。

ところで，全区の平均値について経時的・層別変動を示した図13において，1価のカチオンが10

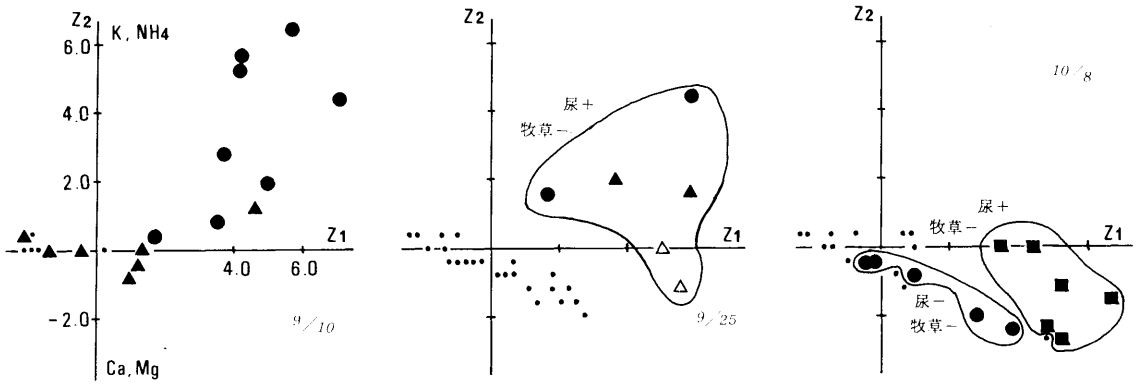

図14　各イオン濃度についての主成分スコアの経時的変動
●：第1層，▲：第2層，△：第3層，■：第2～4層（10/8のみ），・：その他。ただし，囲み線は，それぞれ記入した区に含まれる各層のサンプルであることを示す。

月８日まで上部３層における変動が多く，２価カチオンがより下層まで変動している傾向が認められた。この傾向を，全てのデータが持つ情報に基づき，Z_1 と Z_2 とに分解（両主成分スコア間は無相関）して要約したものが主成分分析の結果に相当する。

そこで，１価カチオンと２価カチオンとの相対的関係の経時的変動を把握するため，グラフ上に Z_1 軸と Z_2 軸を描き，各サンプルの主成分スコアの変動を検討した（図14）。施肥処理後１週目の９月10日は，各施肥区の第１層のサンプルのスコアが第１象限にあって，１価カチオン濃度がきわめて高いことを示し，９月25日においても尿添加・無栽植の区の第１～２層は同様にして未だ１価カチオンが主体をなすが，同区３層やそれ以外の区・層では２価カチオンが相対的に多くなっている。しかし，10月８日になると第４象限により多くのサンプル点が散らばり，全般に２価カチオンが優勢となり，かつ，第１層のサンプル点は原点に近い位置に移行している。

さて，固液相間でイオンが平衡状態にある土壌溶液の AR^K は一定となるので，ある処理（又は時期の違い）によるその値からの振れをみることにより，土壌Ｋの状態を比較検討することができるとされている[74]。図15に，AR^K，AR^{NH_4}，AR^{NH_4+K} の経時的・層別変動を掲げた。９月３日の値はほぼ平衡状態にあるものと考えられるが，それに比べ施肥処理直後の第１～２層の AR^K は尿無添加区であっても著しく低下した。尿中にはＫが多量に含有されているため，尿添加区の AR^K の低下はさらに著しく，９月10日の第１層ではマイナスを示した。そして，この第１層の AR^K は10月８日に至っても９月３日の水準に復元しなかった。他方，AR^{NH_4} は AR^K の場合とは異なり，後半は９月３日の値より大きく，相対的な NH_4 の減少（主として硝化作用による）を示した。その結果，AR^{NH_4+K} は９月３日の水準に比較的近い範囲での変動を示した。

すなわち，尿添加区ではＮとＫが大量に添加された結果，特に表層での固液相間平衡が乱れるが，主として硝化作用による NH_4 の減少により平衡が回復する傾向がうかがわれる。第４層以下では，平衡は１～２層ほど大きくは乱れないものと考えられる。

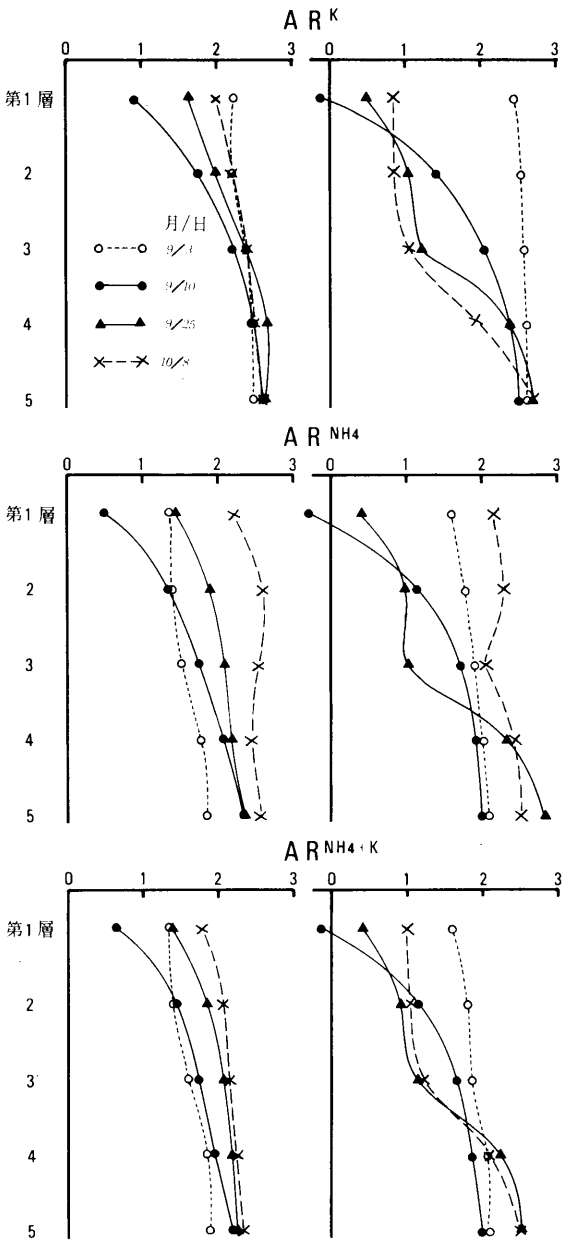

図15　AR^K，AR^{NH_4}，AR^{NH_4+K} の経時的・層別変動
（左：尿無添加，右：添加）

なお，前述の主成分分析における Z_2 軸は，１価カチオンと２価カチオンの相対的関係を表わすので AR^{NH_4+K} と関係が深い。したがって，図14に見られた第１～２層を中心とした第１象限から

第4象限，さらに原点へ向けてのサンプル点の移行の様相は，平衡を維持するための土壌中での変動を示すものと解される。

2．土壌溶液中のアニオンの変動

土壌溶液中の主要アニオンとして，NO_3，Cl，SO_4 を考えた場合，それぞれ次のような特徴を備えている。すなわち，NO_3 は主として，カチオンからアニオンへの転換である硝化作用によって付加され，Cl は一般に溶解性に富み，SO_4 は Ca，Mg などと結合してイオン対や沈殿を生成し易い。

従って，土壌中での変動もそれぞれ独自性を示し，その様子は，アニオン毎の経時的・層別変動を全区の平均値によって示した図16においても見られるとおりである。つまり，9月10日には表層の Cl，SO_4 が施肥処理に応じてきわめて高く，Cl については第3層まで施肥の影響がうかがわれた。Cl 濃度のピークは9月17日に第3層にあり，以

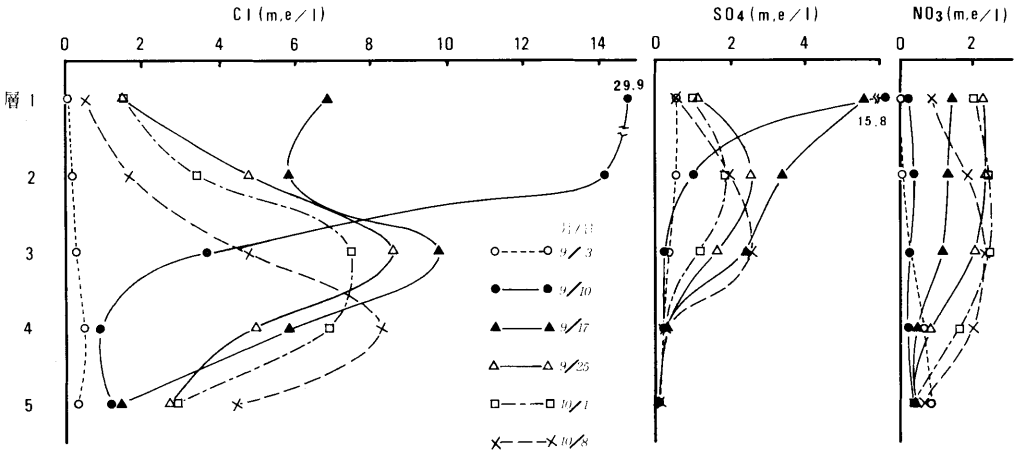

図16　各アニオンの経時物・層別変動（全区平均）

後，下層へ漸移し，10月8日には第4層へ移動した。SO_4 の下方移動は Cl に比べやや遅かった。また，NO_3 の場合は，硝化作用が後半に進展し，9月17～25日に第1～3層における増加が認められ，以後下層への移動がうかがわれた。

表12のアニオン濃度間の相関係数においてもこれら3種のアニオンは，相互にきわめて低い相関を示すにすぎず，それぞれほぼ独立して土層内を変動すると考えられる。従って，各アニオン間の関係は，主成分分析などにより要約してみるまでもなく，それぞれ単独に検討して良いと判断された。

3．アニオンとカチオンの相互作用

1）正準相関分析

一般に土壌溶液中のアニオンとカチオンは，ほぼ等量的に溶存することが多い[75]。図17(A)は，240点のサンプルにつきアニオン濃度とカチオン濃度をそれぞれ測定された全イオンにつきミリグラム当量の単位で合計しプロットしたものである。これによると，両者は密接な関係にあるものの，かなりのばらつきが見られ，寄与率 R^2 は約80%であった。この値は，岡島らの報告している例[75]に比べ等量性が劣ることを示している。この原因としては，純粋な実験誤差のほか，広範な実験条件下のサンプルが混在するための片寄りが予想される。

ところで，測定された特性値がその性質に基づき s 個と t 個を含む2組に分けられる場合，2組の間の st 個の相関についての情報を要約する方法として正準相関分析がある。今，それぞれの組での総合特性値 u_1 と v_1（これを第1正準変量と呼ぶ）を求め，u_1 と v_1 との相関（の絶対値）r_1 が最大になるようにする。この r_1 を第1正準相

関係数という。つぎに，第1組でu_1と無相関，第2組でv_1と無相関な総合特性値の中でその相関が最大になるものを選び，これらを第2正準変量，その相関を第2正準相関と呼ぶ。一般に$s \leqq t$ならば，このようにして第s正準相関まで求めることができる[79]。

本実験におけるアニオンとカチオンを2組の特性値として正準相関分析を適用した場合，実験誤差や片寄りが無視できるとすれば，データの持つほとんどの情報が第1正準変量に要約され，その相関は1に近いはずである。このことは，上記のアニオンとカチオンの等量性と同義である。もし，

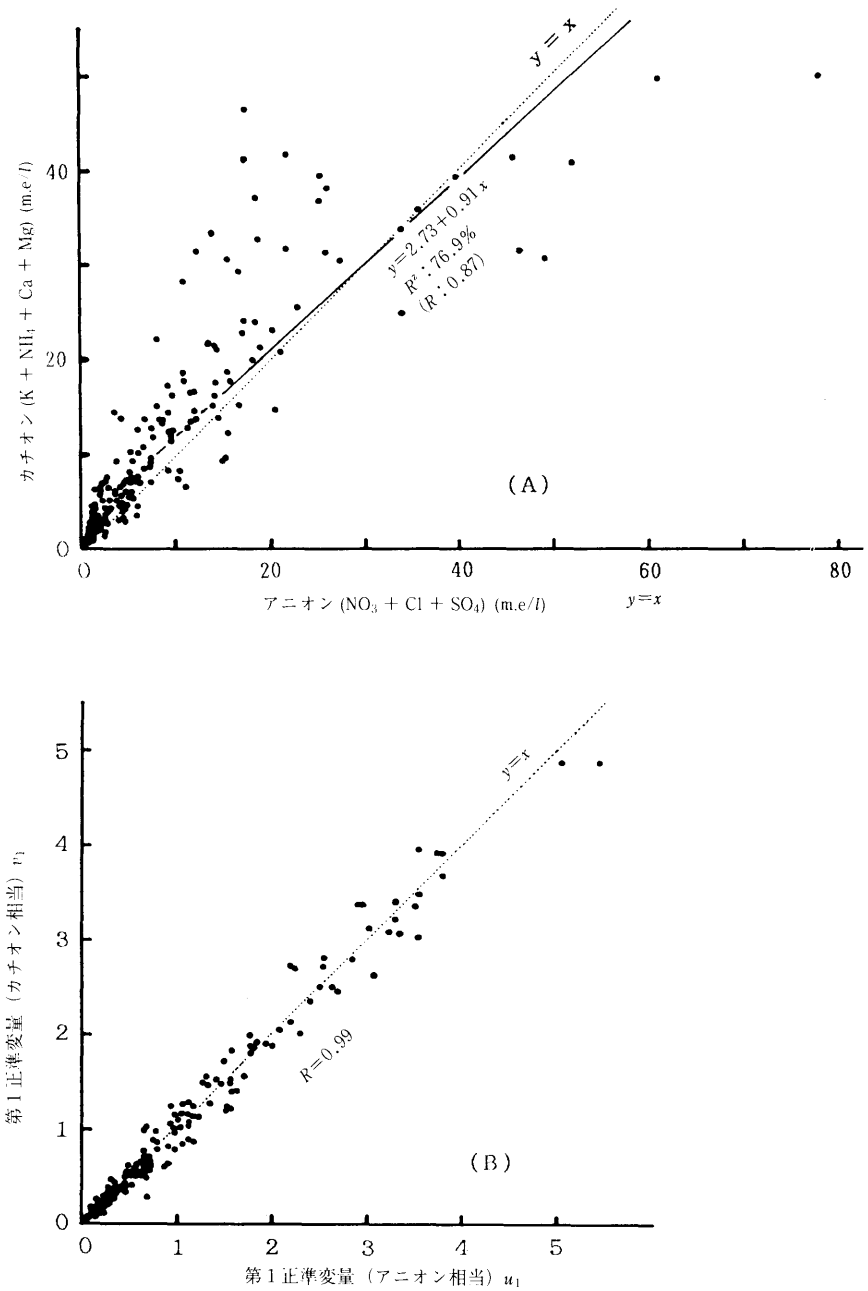

図17　土壌溶液のアニオン濃度とカチオン濃度の関係 (A) ならびに，その正準相関分析の結果 (B)

表14　土壌溶液中イオン濃度についての正準相関分析結果

• 正準変量とイオン濃度との相関係数および寄与率			
	u_1	u_2	u_3
NO_3	0.65	− 0.76	0.05
SO_4	0.51	0.34	0.79
Cl	0.73	0.40	− 0.55
寄与率(%)	41	28	31
	v_1	v_2	v_3
K	0.85	− 0.24	0.47
NH_4	0.81	0.45	0.37
Ca	0.64	− 0.32	− 0.70
Mg	0.60	− 0.18	− 0.75
寄与率(%)	54	10	35
• 正準相関係数	0.99	0.90	0.35

• 正準変量(第1)*)

$u_1 = 0.075\,[NO_3] + 0.089\,[SO_4] + 0.070\,[Cl]$

$v_1 = 0.070\,[K] + 0.121\,[NH_4] + 0.076\,[Ca] + 0.159\,[Mg]$

*)　[　]は各イオン濃度 (me/l)

誤差や片寄りが無視できないならば，それらは他の正準変量に現われるであろう。誤差については小さな寄与率で現れることが予想される。

そこで，本実験におけるアニオンとカチオンの間の関係をそのような観点から検討するため，正準相関分析を適用した。その結果を第1～3正準変量について表14に掲げた。第1正準変量u_1とv_1は各イオン濃度との間に比較的大きな正の相関を示し，u_1はアニオン濃度の，またv_1はカチオン濃度の重みづき平均値と考えられる。u_1とv_1の相関関係，すなわち，第1正準相関は0.99であった。本実験においては主要なイオンは測定しているので，未測定イオンを仮りに無視できるとした場合，表14の1次式で示したような2つの重みづき平均値が考えられ，各サンプルにつきその値を求めプロットとすると，図17(B)に掲げたとおり両者の間にほぼ1：1の対応のあることがわかる。したがって，等量性から外れる情報は，第2以下の正準変量に現われていると考えられる。すなわち，アニオンに関して，u_2がNO_3，u_3がSO_4の特徴を示し，カチオンに関しては，v_3が2価カチオンの特徴を示すので，上記の片寄りの原因はこれらに関係していると考えられる。次いで，図17(A)上で$y = x$の直線から著しく外れる23点について実験条件を調べたところ，20点が尿添加区の1～3層のサンプルであった。したがって，これらのサンプルにおいて尿添加に伴うNO_3，SO_4及び2価カチオンに関する特徴ある現象が存在したと推定される。しかし，その現象そのものについては，本実験で明らかにすることはできなかった。寄与率10%のv_2は，各イオン濃度との相関が小さいので実験誤差に相当すると考えられる。

なお，第1正準変量の係数（重み）の意味について，各アニオンの係数がほぼ等しいことは当量の単位で加算することに対応すると考えられるが，カチオンの場合は，K，CaとNH_4，Mgの係数の比が約1：2であることなど，今後，事例を累積して検討する必要がある。

2）重回帰分析

次に，各アニオンと各カチオンとの関係を重回帰分析により解析した。いわゆる，要因解析を重回帰分析により行うには注意を要するが，前述のとおり，各アニオン濃度が互いに独立に変動しているので，各アニオン濃度を説明変数とし，いずれかのカチオン濃度を目的変数とする重回帰分析により，カチオン濃度を規制する要因としてのアニオンについての解析が可能である[81]。目的変数を説明するための最良の変数組み合わせを選択する方法のうち，予測平方和（PSS）を指標とする総当たり法[38,81]により，説明変数の最良組み合わせを選択した。その結果を表15(上)に示した。

Kに関して，3種のアニオンはすべて有意性を示し，R^2は約78%であった。

NH_4に関しては，SO_4とClにより約83%のR^2を示した。ここでNO_3が有意性を示さなかったのは，硝化作用の結果生じたNO_3量がNH_4量を規制するとは考え難いので，当然の結果といえよう。

CaとMgについては，NO_3とClにより50%前後のR^2を示した。SO_4は有意性を示さなかったが，溶液中におけるSO_4濃度の高低の時期がCa，Mgのそれと一致せず（例えば表12の単相関係数はCaについて0.028，Mgについて0.037），また，各種のイオン対（Adams[1]の方法により計算した値の全サンプル平均値は，$CaSO_4^\circ$：0.075；

$MgSO_4^\circ$ ： 0.010 ； $NH_4SO_4^-$ ： 0.033 ； KSO_4^- ： 0.019mmole / l ）を除いた硫酸カルシウムの活動度積も小さく（平均：0.0396×10^{-5}；最高：0.671×10^{-5}），相互関係はほとんど認められなかった。

これらのことと関連して，置換性カチオンに注目すると（図18）と，上層部分の置換性Ca，Mgが経時的に減少し，第4～5層で後半微増する傾向が明らかであり，NH_4 の経時的減少もうかがわれた。それに比べ，置換性Kの9月10日以降の減少は大きなものではなかった。この結果と，図13の溶液中カチオン濃度とを照合すると，総体的に1価の場合に置換性カチオンと溶液中カチオンの関連が強く，2価の場合は弱かった。この傾向は，両者間の相関係数（表16）によっても明瞭である。

表15　各アニオンと各カチオンとの関係についての重回帰分析結果

◎説明変数がアニオンのみの場合

	x_1：NO_3		x_2：SO_4		x_3：Cl (me/l)			
y：K								
y=	2.00x_1	+	0.41x_2	+	0.17x_3	−	1.26	
t：	20.1***		12.7***		10.1***			R^2 = 77.8%
y：NH_4								
y=			0.52x_2	+	0.29x_3	−	0.61	
t：			22.2***		23.4***			R^2 = 82.5%
y：Ca								
y=	1.83x_1			+	0.23x_3	+	1.80	
t：	12.5***				9.0***			R^2 = 53.9%
y：Mg								
y=	0.18x_1			+	0.03x_3	+	0.30	
t：	8.9***				9.2***			R^2 = 44.8%

◎説明変数がアニオン及び対応する置換性カチオンの場合

							x_4：置換性カチオン（mg/100 g）			
y：K										
y=	0.29x_1	+	0.23x_2	+	0.11x_3	+	3.18x_4	−	1.52	
t：	16.0***		9.3***		9.1***		17.0***			R^2 = 90.0%
y：NH_4										
y=			0.37x_2	+	0.23x_3	+	3.66x_4	−	0.87	
t：			12.6***		15.4***		14.8***			R^2 = 91.2%
y：Ca										
y=	0.48x_1			+	0.22x_3	+	3.13x_4	−	12.96	
t：	15.3***				9.6***		7.2***			R^2 = 62.2%
y：Mg										
y=	0.04x_1			+	0.03x_3	+	0.60x_4			
t：	9.0***				9.2***		2.3*			R^2 = 46.0%

注）　総当たりPSS最小法による変数選択；サンプル数：240；***，*はそれぞれ0.1%，5%水準で有意であることを示す。

なお，このことから，置換性カチオンを上述の重回帰式の説明変数に加えたモデルが考えられるので，PSSによる重回帰分析を実施した（表15下）。その結果，各置換性イオンとも回帰式に取り込まれ，Mgの寄与率 R^2 はアニオンのみの時に比べほとんど増加しなかったが，置換性のK，NH_4，Caの場合はそれぞれ約12，9，8%増加し，これら3イオンは溶液中の1価カチオン濃度を規

表16　溶液中カチオン濃度と置換性カチオン含量との相関係数

	K	NH_4	Ca	Mg
相関係数	0.865	0.894	0.107	0.115

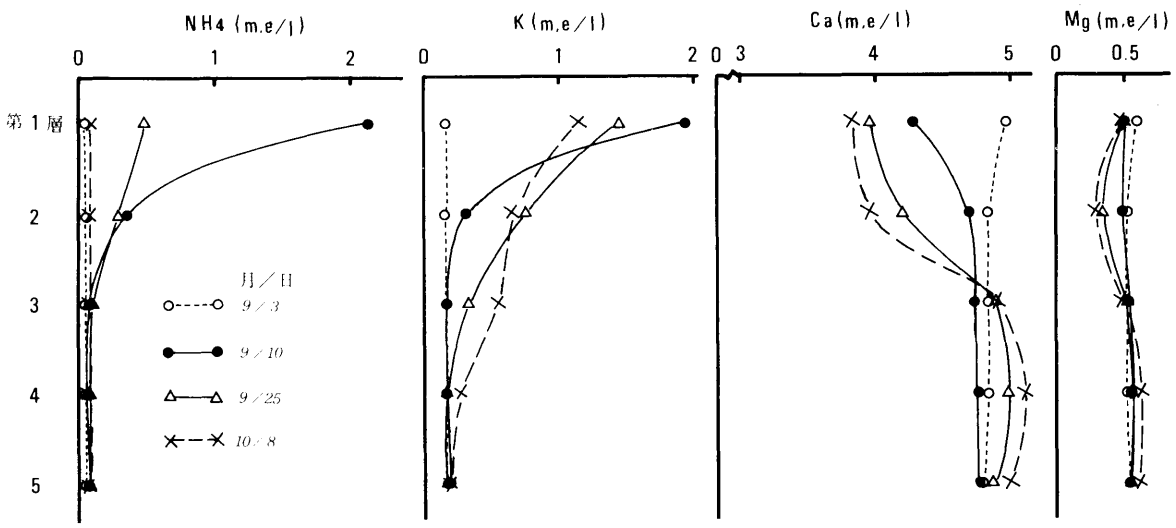

図18　土壌中置換性カチオンの経時的・層別変動（全区平均）

制していることが示された。

したがって，1価カチオンについては，アニオンと対応する置換性カチオンの濃度による重回帰モデルでほとんど変動を説明できると考えられる。他方，2価カチオンの寄与率が低い事実は，1価カチオンのような直接的関係よりむしろ，アニオンとカチオンのバランスをとることに寄与しているためとするのが妥当と考えられる。

ところで，放牧草地においては土壌中の養分含量が，通常の採草地の水準にある個所から，排尿直後の地点のように著しく高い個所まで連続的に分布する[32,35,71]。これは採草地または水田や畑と異なる点である。本節の実験ではそれらを考慮して，通常の施肥条件とともに，尿添加による極端な養分施肥処理をも施したが，その結果は，主成分分析，正準相関分析および重回帰分析のような線形モデルを仮定した手法によりかなり良く説明できた。すなわち，排尿地点のイオンの動態は，草地における通常の施肥量レベルの場合と同一の範ちゅうで考えることができ，かつ，そのことは牧草の有無にかかわらず言える可能性が強い。したがって，広範囲の施肥条件下で得られた本節の結果は，基本的には採草地や排ふん地点においても当てはまるものと推測される。

本項の結果を要約すると，土壌溶液中において1価カチオンは，置換性プールの量にある程度規制されるが，基本的にはアニオンの変動に応じて溶存し，Ca，Mgは主としてアニオンとカチオンのバランスをとるために必要な部分として溶存するものと考えられる。これを重回帰モデルで表現したものが表16である。

回帰係数などは本実験条件，とりわけ供試土壌に制約されると考えられるので，他の土壌についても同様の検討を行い，これらの関係がどう変わるかを明らかにする必要がある。

〈第2節〉排泄ふんからの養分の放出と土壌への移行

実　験　方　法

2,000分の1aのポット10個に根釧農試ほ場土壌10kgを充填し，その上に排泄直後のふん2kgを載せて放置し，その後経時的にふんおよび土壌を採取して分析に供した。ポットは戸外で自然降水下におき水分調節を行わなかったが，極端な乾燥，湿潤状態にはならなかった。

なお，実験期間中の降雨および蒸発量を表17に示した。

ふんおよび土壌の試料採取は，処理後92日目まで3～20日ごとに10回行った。ふん直下の土壌は

表17　処理期間中の降雨量及び蒸発量

	5月			6月					7月	8月	
日	24-26	27-29	30- 1	2- 4	5- 7	8-12	13-22	23- 2	3- 3	4-23	
処理後日数	1- 3	4- 6	7- 9	10-12	13-15	16-20	21-30	31-40	41-72	73-92	
降雨量(R)(mm)	0	0	0	47	137	32	13	176	56	37	
蒸発量(E)(mm)	12	7	12	6	2	14	30	20	69	52	
差　(R−E)	-12	-7	-12	41	135	18	-17	156	-13	-15	

15cmまで3cmごとに5層に分けて採土し，とくに30日にはふん側方部分についても同様に採土した。

ふんの分析は，乾燥試料を5mm以下に粉砕したものについて，窒素はGunning変法，また湿式分解液につき，りんはモリブデンブルー吸光光度法，カリウムは炎光光度法により測定し，水溶性部分の分析は，10倍量の純水で1時間振とう抽出したろ液について同様に測定した。土壌分析は，風乾細土について，無機態窒素は5％KCl浸出(土：液比は1：10)，カリウムは$N-CH_3COONH_4$および純水浸出（土：液比は，いずれも1：10）の部分についてふんと同様に測定した。

根釧農試内の未墾土（Me−a層），牧草三要素試験5年目の無カリウム区土壌，放牧草地における排ふん当日および24日目のふん直下土壌など4点を供試し，$N-CH_3COONH_4$によるカリウムの連続抽出を行った。連続抽出は，フラクションコレクターのカラムに約10gの土壌を充填し，これにほぼ水飽和になるように抽出液を連続滴下し，下方から抽出液10mlずつ分画採取し，カリウムを測定した。

結　　果

1．排泄ふんからの窒素，りん，カリウムの放出経過

ポット上のふんからの養分放出について経時的に調査した結果を表18に示した。

ふんの全窒素含有率は，かなりの変動がみられるが，調査期間中明瞭な低下がみられなかった。水溶性窒素は初期にはやや高かったが，経時的に減少傾向を示した。すなわち，ふんが固化するために，残余の水溶性部分が降水などにより溶出することは容易でなく，ふん自体の分解に伴って放出されると推定できる。

ふんの全りんは，新鮮なふんでは比較的高含量を示したが，40日目以降ではほぼ一定の値を示した。水溶性りんの全りん中に占める割合は，窒素の場合より高かったが，経時的減少傾向は全りんと同様であった。これらのことから，排ふん直後は水溶性りんに富み，その放出も多いが，ふんの固化が進む40日目以降はふんの分解に伴って徐々に放出されるものと考えられる。

ふんの全カリウムは，窒素，りんに比べ少なか

表18　風乾ふん塊のN，P，K含有率の経時変化

	N			P			K		
経過日数	全N (A)%	水溶性* (B)%	B/A ×100%	全P (A)%	水溶性* (B)%	B/A ×100%	全K (A)%	水溶性* (B)%	B/A ×100%
6	2.79	0.08	2.9	0.63	0.14	22	0.29	0.30	103
9	3.30	0.04	1.2	0.99	0.19	19	0.46	0.46	100
12	2.85	0.04	1.4	0.85	0.16	19	0.28	0.24	86
15	3.48	0.04	1.2	1.02	0.07	7	0.26	0.22	85
20	2.80	0.04	1.4	0.73	0.12	16	0.22	0.16	73
30	3.15	0.02	0.6	0.83	0.09	11	0.24	0.21	88
40	3.18	0.02	0.6	0.72	0.08	11	0.16	0.13	81
72	2.98	0.03	1.0	0.74	0.07	9	0.16	0.12	75
92	3.44	0.02	0.6	0.74	0.09	12	0.14	0.12	86

注)*：水溶性とは，純水抽出により溶出したものを示す。

ったが，大部分水溶性であった。経時的な変動は，りんと同様，30～40日目まで低下していくが，以後ほぼ一定となり，やはりふんの分解を経て初めて徐々に放出されるものと考えられる。

なお，ふんの水分含有率や分解に伴う重量変化の測定は行わなかったが，実験中の観測によれば，供試した排泄直後のふんは，2～3日後にはすでに表面がクラスト状を呈していたが，その内部はなお水分が多く，軟弱であった。しかし，20～30日を経ると内部まで乾燥し，ほとんど固化するに至った。したがって，排泄ふんからの養分放出はごく初期は主に水溶性部分の溶出によるが，排ふん後30～40日目以降は，このようなふんの固化現象のため，各養分の放出が制限され，ふん自体の分解に依存するものと考えられる。

2．排ふん地点のおける土壌の窒素，りん，カリウム含量の推移

ふんから放出された養分の土壌への移行過程を，前項のふん養分放出の過程との関連で追跡した。

表19には，ふん直下土壌の無機態窒素の消長を示した。これによると，表層3㎝までの無機態窒素は，排ふん後12日目頃から明らかに増加し，3～6㎝層でも若干の増加が認められた。しかも，これらの大部分は硝酸態窒素の増加である。このような増加は，おそらく，この時期の降雨（10～12日目に47㎝，13～15日目に137㎜）によってふんの水溶性窒素が移行したものと考えられ，また下層への影響が少ないのは，放出速度が緩慢で，放出量が少ないためと思われる。20～40日目以降，日を経るに従って表層の無機態窒素が減少していた。

表19　ふん塊直下土壌の無機態窒素含量（㎎/100ｇ）の経時変化

	土壌深	経過日数									
	(cm)	3	6	9	12	15	20	30	40	72	92
NH_4-N + NO_3-N	0-3	10.8	4.6	3.5	22.7	28.6	11.6	12.9	3.6	1.8	2.9
	3-6	3.9	-	5.1	10.7	9.6	3.8	7.0	3.2	4.0	1.4
	6-9	3.2	2.4	5.8	6.5	4.5	3.3	3.0	2.1	5.0	2.0
	9-12	3.0	2.6	5.7	5.3	3.5	2.5	2.6	2.7	4.0	1.5
NH_4-N	0-3	1.1	1.4	1.2	1.4	2.9	1.1	1.7	2.4	-	1.2
	3-6	1.5	-	1.6	2.3	1.9	1.7	2.2	1.9	-	0.5
	6-9	1.2	1.4	1.5	1.3	3.4	1.8	2.2	2.0	0.2	1.2
	9-12	1.9	0.7	1.7	1.2	1.8	1.5	1.4	2.0	0.1	-
NO_3-N	0-3	9.7	3.2	2.3	21.3	25.7	10.5	11.2	1.2	-	1.7
	3-6	2.4	-	3.5	8.4	7.7	2.1	4.8	1.3	-	0.9
	6-9	2.0	1.0	4.2	5.2	1.1	1.5	0.8	0.1	4.8	0.8
	9-12	1.1	1.9	4.0	4.1	1.7	1.0	1.2	0.7	3.9	-

ふん直下の土壌りんは，牧草に対して比較的可給度の高い2.5％酢酸可溶りん[30]を測定し，表20に示した。ふんのりんは30～40日目まで多く放出されることは前述したが，土壌のりんは，この頃から徐々に増加し，時間的ずれが見られた。これは，ふんの分解に伴って添加されるりんが増加することの反映とも考えられるが，初期放出りんが土壌中で難溶化され，後半可給態の増加となってあらわれたためと思われる。また，40日目以降（7～8月）はより下層においてもやや多くなっていることから，元来土壌中にあったりんが，地温上昇に伴って，可給態りんの増加[29]としてあらわれたのかも知れない。したがって，この場合，ふんからの放出に由来するりんの増加としては，若干控え目に考える必要があろう。

表21には，ふん直下土壌の純水浸出カリウム（以下，本節では水溶性カリウムという）および置換性カリウムを示した。両形態のカリウムとも，前述のふんのカリウム含有率低下に伴って土壌中では明らかに増加した。すなわち，排ふん後15日目頃までは，土壌の水溶性カリウムの割合が高く，この時期までのカリウム供給が多かったことによ

表20　ふん塊直下土壌の2.5%酢酸可溶りん含有量（mg P/100 g）の経時変化

土壌深	経過日数									
(cm)	3	6	9	12	15	20	30	40	72	92
0 - 3	2.7	2.4	2.5	1.7	1.8	2.3	3.1	3.5	5.3	4.7
3 - 6	2.3	2.5	2.1	1.7	2.4	2.1	2.4	3.0	3.3	3.3
6 - 9	2.2	2.5	2.1	1.1	1.7	1.5	2.3	2.5	3.1	3.0
9 -12	2.3	2.7	2.2	1.7	2.2	1.8	2.1	3.0	3.4	3.4
12-15	2.3	2.3	2.1	1.6	2.3	2.3	1.7	2.6	2.5	2.9

る。しかし，20日目以降はふんよりのカリウム供給が漸減するため，表層の水溶性カリウムは減少した。置換性カリウムは表層ではやや減少するが，3～9 cmでは増加または横ばい状態となった。これは，両形態カリウム間の平衡状態が，表層からの水溶性カリウムの供給により置換性側に進んだためと考えられる。一方，置換性カリウムの下方移動をみると，1～15日目では6 cm，15～20日目では9 cm，20～30日目では12cmまで浸透していたが，以下の層にはほとんど増加がみられなかった。

ふんに由来する土壌カリウムの特性について調査するため $N-CH_3COONH_4$ による連続抽出を行った結果を図19に示した。それによると，未墾土は初期に抽出されるカリウムが比較的少なく，その上放出速度は緩慢で，連続的に永く抽出された。無カリウム区の土壌では，初期の放出量が最も少

表21　ふん塊直下土壌のカリウムの経時変化

	土壌深	経過日数									
	(cm)	3	6	9	12	15	20	30	40	72	92
水溶性K[a] (A) (mg/100 g)	0 - 3	20.5	31.8	31.2	44.8	42.5	22.9	16.6	6.1	17.7	5.6
	3 - 6	5.8	4.6	4.7	11.0	11.0	8.6	10.0	5.2	8.3	4.6
	6 - 9	4.3	3.6	4.3	5.0	5.2	5.0	5.0	4.7	7.1	3.8
	9 -12	4.6	3.6	3.8	4.1	3.8	3.8	4.1	4.6	6.9	3.3
	12-15	4.7	3.8	4.3	4.6	3.8	3.6	3.3	3.8	4.6	3.2
置換性K[b] (B) (mg/100 g)	0 - 3	49.2	73.1	73.6	49.6	47.0	70.5	64.8	65.3	55.4	39.7
	3 - 6	24.9	27.8	26.8	37.5	44.6	54.1	49.8	51.6	48.2	34.9
	6 - 9	22.7	23.4	22.2	25.7	30.5	43.6	37.4	43.8	37.4	29.4
	9 -12	25.3	24.7	25.7	25.8	23.2	27.7	29.1	31.1	28.5	25.3
	12-15	26.0	24.8	25.2	24.1	23.2	24.7	25.3	24.8	27.0	21.8
水溶性K[a] 比率 A/(A+B) (%)	0 - 3	29	30	30	47	47	25	20	9	24	12
	3 - 6	19	14	15	23	20	14	17	9	15	12
	6 - 9	16	13	16	16	15	10	12	10	16	11
	9 -12	15	13	13	14	14	12	12	13	19	12
	12-15	15	13	15	16	14	13	12	13	15	13

注　a）純水浸出K
　　b）$N-NH_4OAc$ 浸出Kから水溶性Kを差引いた値

なく，かつ短期間にその大部分が抽出された。これらに対して，排ふん跡地土壌では，いずれも初期抽出量がきわめて多いが，無カリウム区土壌よりわずかに遅れる程度で，その大部分は急速に抽出された。すなわち，未墾土ではカリウム給源から緩慢に放出されるが，ふんに由来する土壌カリウムは含量が多く，しかもその大部分は容易に放出される性質をもっていた。

ふんより放出された養分の水平方向への移行を見るため，処理後30日目の土壌の窒素とカリウムについて調査し，表22に掲げた。これによると，両養分ともふん周3.5cmまで表層土でやや増加していた程度で，水平方向への移動はきわめて少なかった。

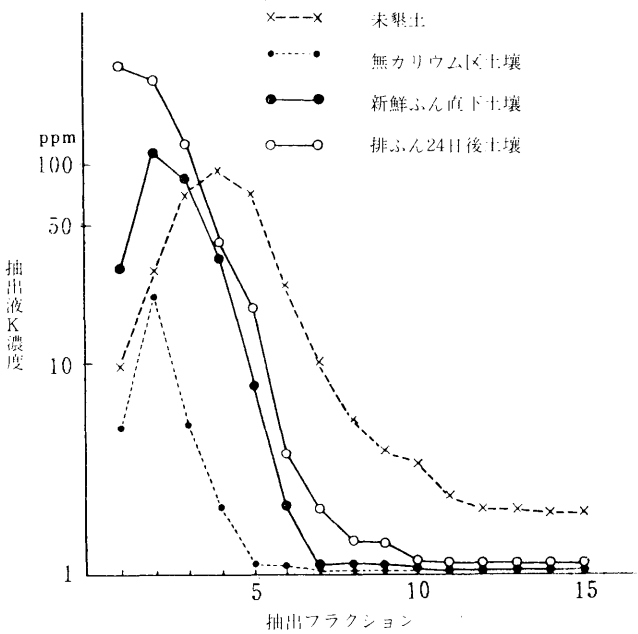

図19　N-CH_3COONH_4による土壌カリウムの連続抽出

表22　ふん塊下土壌における無機Nおよび置換性Kの立体分布[a](mg/100 g)

	土壌深 (cm)	ふん直下	ふんからの距離 3.5cm	ふんからの距離 3.5-7.0cm	対照
無機 N	0-3	8.8	10.3	9.1	8.6
	3-6	8.8	8.8	8.7	8.3
	6-9	8.9	7.9	8.5	8.1
	9-12	8.2	9.0	8.5	8.1
	12-15	6.1	8.8	9.1	8.3
置換性 N[b]	0-3	76	21	14	11
	3-6	18	15	13	12
	6-9	17	14	13	11
	9-12	13	13	13	13
	12-15	12	13	14	12

注　[a]排泄後30日目，　[b]表21に同じ。

考　察

本実験結果から，窒素，りんおよびカリウムについて，ふんから土壌への移行過程について考察する。

第1段階は，主としてふんからの養分放出過程として考えることができる。ふんからの養分放出はふんの外観的特徴と密接な関連をもつものと考えられる。すなわち，排泄直後の新鮮なふんは軟弱で水分が多く，水溶性のりんやカリウムに比較的富んでおり，特にカリウムではその大部分が水溶性である。したがって，この時期の各養分の放出は，比較的容易であると思われ，たとえば降雨などがあればかなりの量が土壌に移行されよう。なお，この時期には，アンモニアが揮散する可能性[52]も強い。その後，ふんは表面より漸次乾燥し，クラスト化していくが，その初期にはなおふん内部や土壌との接触面に湿潤な部分が残されている。しかし，一旦クラスト化が進行したふんの肥料養分は，多少の降雨では容易に洗い出されない状態となる。このような時期は，排ふん後30～40日目以降であり，ふんの養分組成がほぼ一定となる時期に相当する。しかも，まだ大半の養分がふん中に止まっており，その後ふんのクラスト化部分の分解に伴って，きわめて緩慢に放出されていくものと推定される。

ふんからの放出養分の大部分が，このように，ふんの分解に伴って土壌へ移行するものとすると

ふんの分解時間が問題となる。ふんの分解の遅速は，気候条件のほかふん虫などの昆虫，ミミズなどの土壌動物，菌類などの多寡に左右される。分解に要する期間は根釧地方では，夏でも数か月，冬をはさめば9～10か月にわたるようである[37]。

第2段階としては，土壌中での移行過程がある。ふんからの放出養分は，土壌に移行した後は，その元素によって移動の状態が異なってくる。窒素は土壌に移行した後は，表層にあり，その量も多くないため，大部分が容易に無機化，硝化あるいは揮散を受けるものと思われる。りんはたとえ水溶性で移行しても，固定力の強い火山灰土壌では直ちに不可給態化され，ある程度以上の蓄積があった後，初めて可溶性りんの増加となって表われる[30]。また，ふんに由来するりんの下方への移動性が高いことも知られている[9]が，本実験では明瞭でない。カリウムは水溶性で比較的多く移行するので土壌中での増加も多く，やや深部まで侵入していた。

放出養分の土壌中における移動は，土壌の物理的条件によって大きく影響されよう。特に，実際の放牧草地では蹄圧による土壌の緊密化のため，傾斜地などでは，表面における側方移動も考えられる。本実験ではこの点については検討していないが，ふんからの初期放出量が少なく，その後もふんの分解に伴って少量ずつ徐々に放出されるため，本実験期間では土壌のごく表層のみの増加に止まり，また側方への移動も少ないように思われる。

以上のことから，排泄ふんに由来する主要養分の放出過程はふんの分解に左右され，土壌中での移行過程は，少量ずつ添加される化学肥料と同じ範ちゅうで考えることが可能であると思われる。