

第6章 排泄物の肥料的評価

——ふん尿の分散と養分循環を結合したシミュレーションを中心に——

養分の循環を大切にする伝統は、わが国の農業において、古来、強いものがあつた。しかし、農業が商品経済に強く組み込まれるほど循環が壊れる傾向¹⁹⁾は、わが国でも近代以降明らかに見られ、農業生態系への人間の働きかけが強まるにつれ、土壤肥料的課題は一層多面化し、一部では近年土壤の汚染・悪化も問題となり、各種対策も検討されている。

そのような事情は、農業の分野ごとに違いがあるが、放牧草地では採食と排泄が同一の場で行われるため、前章までにみた通り、系全体としての養分循環が比較的維持されているということができる。しかし、そのことに対する評価は、従来、必ずしも良いものではなかった。すなわち、不食過繁草の発生による牧草利用率の低下^{37,57,96)}、土壤養分の片寄りに関して、養分の不足する地点における生産低下とそこへの雑草の侵入^{32,35)}など、効率の悪さが指摘されることが多かった。放牧草地の排泄物の正当な評価のためには、実態をより正確に把握し、量的に評価する方法の確立とそれに基づく評価の試みが必要である。

本研究においては、1) 排泄物の平面的分散、2) 排泄物に由来する養分の土壤中での変動、3) 斑点状に還元された排泄物の肥料的効果の経時的推移、4) 放牧草地での乾物生産とカリウム循環のモデル、を検討することによって、以下のような評価を行うことが可能となった。

1. 放牧草地のカリウム循環の特徴

カリウムは、化学肥料の原料としては全面的に輸入に依存する¹¹³⁾ので、わが国における省資源の観点からは、循環を特別重視すべき養分である。図42は、本研究において明らかとなった事項を中心に、放牧草地におけるカリウムの循環の特徴を掲げたものである。

放牧牛の排泄物が斑点状に還元される際の平面

的な分散のパターンは、放牧施設の有無などに影響されて片寄りを生ずる。そのパターンは、平均値が施設等からの距離に応じて変るポアソンモデルで表現できる。そのような斑点状の還元により、排泄地点の単位面積当たりに添加されるカリウム量はきわめて多いが、ふんの場合には、ふん塊の分解に伴って徐々に土壤中へ移行する。土壤中へ添加されたカリウムは、他のカチオンと共に固液相間の平衡を保ちながら、アニオンの変動と置換性プールの大きさに応じて液相中で変動する。そのようなプロセスを経たカリウムは、排泄地点から50cm以内の距離の牧草に影響を与える。この影響は、3年間にわたって持続することが判明した。

そこで、以上の知見を踏まえて次のようなコンピューター・シミュレーションを行った。

2. 排泄物の牧草に対する影響のコンピューター・シミュレーションによる評価

1) 目的

牧草収量ならびに牧草カリウム吸収量の牧区内での片寄りが、排泄物により、どのようにして発生するかを検討する。

なお、収量の片寄りの原因の内、不食過繁草によって高い収量の個所が発生することについてはすでに解明されている^{51,54,56,57,71,96)}ので、ここでは、肥料的効果によって片寄りの現象のみを検討しようとするものである。したがって、各輪換期の放牧終了後は、不食過繁草の無い状態、すなわち、牧区内の牧草生育が均一の状態から再生が始まるものとした。そのような状態は、実際には毎放牧終了時に掃除刈を行うことによって得られる。

2) モデル

前章の乾物生産ならびにカリウム循環のダイナミックモデルにより、排ふん地点、排尿地点、非排泄地点ごとに、春から秋までの経過を数値計算し、その結果を、第2章第2節の排泄物の平面的

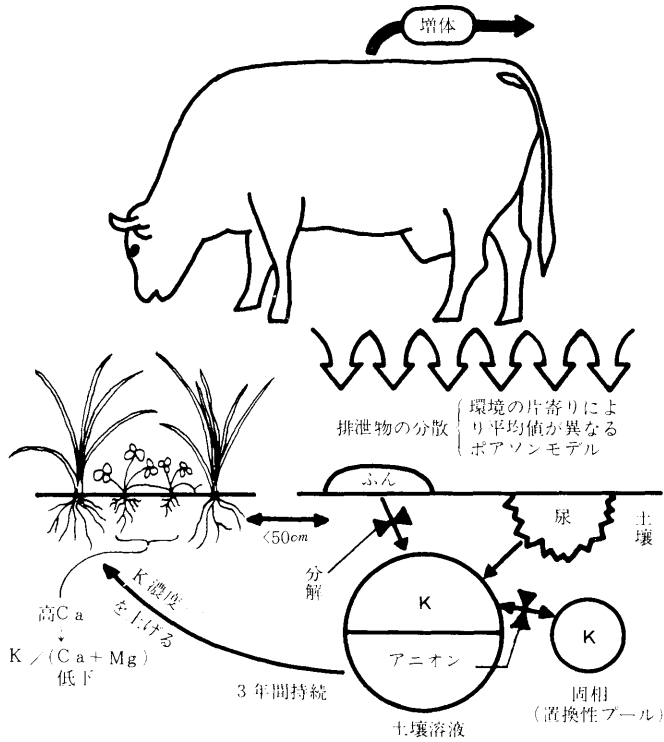


図42 放牧草地のカリウム循環の特徴

分散モデルを用いて牧区全面に拡げ、排泄物の影響範囲が周縁部50cm以内であるので1㎡毎に収量とカリウム吸収量を求めた。

3) シミュレーションの具体的な条件

i) 牧区……100m四方の一辺中央部に飲水場を設けた1haの牧区を想定した。牧区を1㎡の方形メッシュに区切り、個々の現象はこのメッシュ毎に生起するものとした。

ii) 牧草生育・カリウム吸収の経過……非排泄地点の牧草は、5月1日から前述のダイナミックモデルによる生育・カリウム吸収の経過をたどり、10月13日を迎えるものとした。他方、排泄地点の牧草は、排泄を被った時点以降、第4章で示した排泄当年の各月施与区の肥料的効果に基づき、生育・吸収を増進または抑制されつつ10月13日を迎えるものとした。具体的には、CGRの式の係数に表39に示す値を乗ずると共に、土壌溶液のカリウム濃度が、排泄地点では第3章第1節の尿添加条件下の重回帰式、他の地点では化学肥料のみ添

加条件下の重回帰式により与えられるものとして数値計算を行った。

iii) 収量・カリウム吸収量の頻度分布型……10月13日における牧草収量またはカリウム吸収量は、{(非排泄地点) + (排ふん地点, 排尿地点) × 4施与月} × (グラス, クローバ) の18ケース(表39参照)ごとに、ある平均値と標準偏差をもつ正規分布をとるものと仮定した。これは、排泄物のない採草地などでは、牧草収量のばらつき(標準偏差など)や片寄り(歪度など)が比較的小さく、またカリウム含有率のばらつきも小さい(変異係数CVで5~7%)こと⁷¹⁾、また、第4章第2節の結果から、排泄地点の収量は、平均値が非排泄地点と異なっても、同時期の排ふんまたは排尿地点の中でのばらつき、片寄りが小さい傾向がうかがわれたことなどによる。

平均値としては、各ケースごとのダイナミックモデルによる数値計算結果(表39)を当て、標準偏差は、採草地におけるグラス, クローバのCV

表39 シミュレーション^{a)}の主要条件

ケース	休牧期間 (月. 日~月. 日) ごとの CGR に乗すべき係数					平均 収量 ^{b)} (g/m ²)	平均K 吸収量 (g/m ²)			
	5.1-6.15	6.21-7.15	7.21-8.14	8.20-9.13	9.19-10.13					
ふん周 グラス	6月	1.0	↑	1.0	1.3	1.2	1.4	290.2	11.77	
	7	1.0	1.0	↑	1.0	1.5	1.2	290.3	11.53	
	8	1.0	1.0	1.0	↑	1.0	1.2	238.7	10.98	
	9	1.0	1.0	1.0	1.0	↑	1.0	221.1	10.04	
	クローバ	6	1.0	↑	1.0	1.1	1.0	0.9	230.5	11.31
		7	1.0	1.0	↑	1.0	1.1	0.8	226.9	11.12
		8	1.0	1.0	1.0	↑	1.0	0.9	225.1	10.77
		9	1.0	1.0	1.0	1.0	↑	0.8	214.3	9.82
		尿周 グラス	6月	1.0	↑	1.5	1.3	1.5	1.1	303.5
7	1.0		1.0	↑	1.3	1.2	1.1	263.8	14.69	
8	1.0		1.0	1.0	↑	1.5	1.6	325.5	18.38	
9	1.0		1.0	1.0	1.0	↑	0.7	194.6	12.01	
クローバ	6		1.0	↑	0.9	1.1	1.0	1.0	239.1	12.49
	7		1.0	1.0	↑	0.8	1.1	1.3	269.8	13.90
	8		1.0	1.0	1.0	↑	1.0	1.1	246.6	15.99
	9		1.0	1.0	1.0	1.0	↑	1.2	257.4	16.32

^{a)} 1 haの牧区を1 m²のメッシュに区切り、各メッシュは上記16ケースと非排泄地点の条件下でシミュレートされる。放牧は各回5日間実施、ふん：12個/頭/日、尿：10個/頭/日、その他の条件は第2章第2節と同じ。↑は放牧実施期間。
^{b)} 10月13日において乾物生産モデルにより得られた値。牧区内の各メッシュ当たり収量の頻度分布は、この値を平均値とし、CV(グラス：0.15；クローバ：0.30)から得られた標準偏差を持つ正規分布をとるものと仮定した。ただし、非排泄地点の10月13日の収量は、グラス：221.1 g/m²、クローバ：235.8 g/m²。同K吸収量はグラス：9.72 g/m²、クローバ：9.41 g/m²。

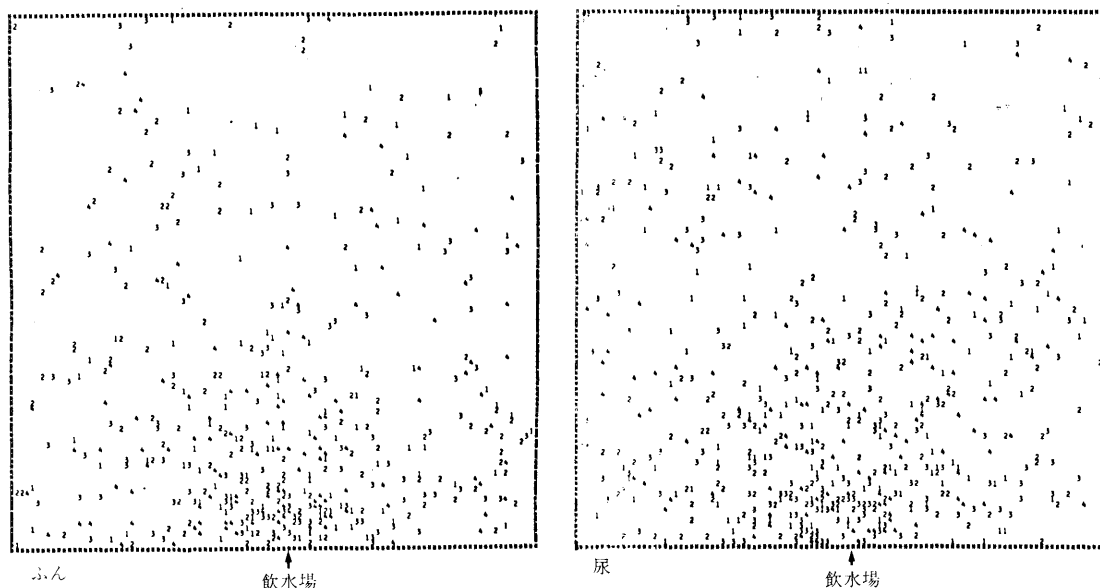


図43 排泄物分散図 (シミュレーション結果)。数字は放牧回次を示す。牧区：100m×100m

値⁷¹⁾を使って算出した。

iv) 排泄物の落下点など……分散モデルにおいて、個々の排泄物の落下点(図43)は、便宜上1㎡のメッシュの中央とした。重複して落下した場合は、先に落下した排泄物の影響は無視し、後で落下したものについてのみ有効とした。なお、シミュレーション結果では、497個のふんと608個の尿が落下し、その内、重複地点は135個であった。

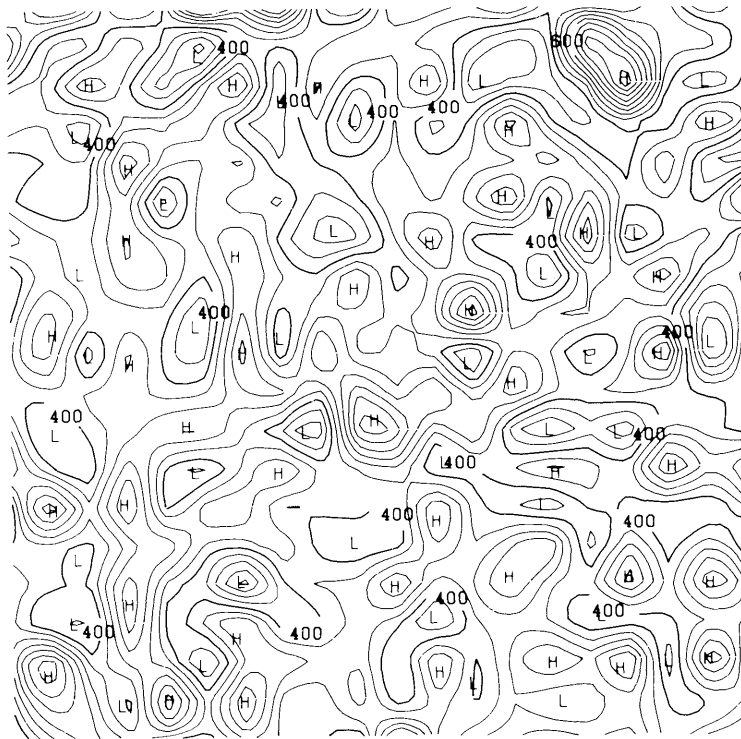
v) 結果の集計……1㎡のメッシュ毎の牧草収量ならびにカリウム吸収量につき、基本統計量を計算した。また、ふん・尿の分散図(図43)、牧草

収量については等値線図(一部、20m×20m、を図44に例示)を作成し、視覚的に確認した。

4) シミュレーションの結果

シミュレーションによって得られた排泄・非排泄地点ごとおよび牧区全体の牧草収量の基本統計量を表40に示した。

10月13日の排泄地点と非排泄地点の収量を比較すると、排泄地点のクローバの収量は非排泄地点と同等であったが、グラスは排泄地点が非排泄地点を約20%上回った。また、グラス+クローバ収量は、排泄地点が10%高かった。しかし、排泄地



20m×20m、等値線間隔25g/㎡、示度単位 g/㎡、H:頂域、L:底域

図44 牧草収量の等値線図(シミュレーション結果)

点のメッシュ数は970、非排泄地点は9,030なので、牧区全体の収量は非排泄地点の収量とほとんど同等であった。すなわち、収量についてみる限り、年4回に亘って添加される排泄物の当年秋における肥料的効果は小さいものと言える。なお、この結論は、第4章第2節の排泄当年の結果を牧区全体に広げて評価したことに相当する。

他方、収量の頻度分布型について、まず第1に、非排泄地点においては当然正規分布を示す。第2に、排泄地点においては、グラス収量の歪度が有意な正值であり、尖度が3.0より有意に小さいので、高収量側にすそを引き(正規分布の場合に比べ高収量のメッシュが多い)、かつ、正規分布に比べ平均値周辺の収量のメッシュが少ない分布型

をとることにより、正規分布から外れていることが分かる。しかし、第3に、非排泄と排泄の両地点を合わせた牧区全体については、歪度、尖度ともに有意に大きく、高収量側へのすその引き方も著しく、正規分布に比べ平均値周辺の収量のメッシュが多い分布型を示した。これは、非排泄地点の正規分布の集団に対し、平均値、標準偏差、歪度、尖度のすべてが異なる排泄地点の非正規分布

の集団が加わった結果である。

また、排泄地点のクローバ収量の分布型に関しては歪度のみ有意に大きく、この傾向は牧区全体についても同様であった。

グラス+クローバ収量については、排泄地点では歪度のみ有意であった。牧区全体では歪度、尖度ともに有意性を示した。これは、尖度を除いて上記グラスの場合と同様の理由によるものである。

表40 シミュレーションおよび放牧草地における収量についての基本統計量

		収 量 (g/m ²)	標準偏差 (g/m ²)	CV (%)	正 規 性 の 検 定 ^{a)}	
					歪 度	尖 度
グ ラ ス	排泄地点	263.3	58.4	22.2	0.270**	2.825**
	非排泄地点	220.7	33.0	15.0	0.024	3.046
	牧区全体	224.8	38.4	17.1	0.667**	4.844**
クローバ	排泄地点	236.9	72.4	30.6	0.387**	3.197
	非排泄地点	235.2	70.4	29.9	0.017	3.039
	牧区全体	235.3	70.5	30.0	0.058*	3.062
グ ラ ス + クローバ	排泄地点	500.2	118.4	23.7	0.341**	3.129
	非排泄地点	455.9	103.9	22.8	0.018	3.036
	牧区全体	460.2	105.7	23.0	0.101**	3.166**
放 牧 草 地 ^{b)}		568	256	45.1	1.090**	3.793

^{a)} 正規分布の時、歪度は、0.0、尖度は3.0となる。

*, ** は、t検定の結果、それぞれ5%、1%水準で有意であることを示す。

^{b)} 造成後1年間放牧利用した翌年春、第1回目放牧直前の生草収量。サンプル点数72。調査は1m²のコドラート内の刈取秤量による。

放牧草地で別途行った調査結果を表中に併記したが、これによると、尖度は有意性を示さなかったが、歪度は、実際の放牧草地がきわめて大きかった。なお、ここに掲げた調査例は、当該牧区への入牧直前に調査したものであり、退牧直前に観察されるきわめて不均一な状態を調査したのではない。

つぎに、CVによりシミュレーション結果の相対的なばらつきの大きさをみると、グラス収量の場合、非排泄地点の15%に対し、排泄地点では約22%であった。しかし、クローバ収量およびグラス+クローバ収量においては、両地点共にほとんど同等であり、グラス+クローバの場合、約23%であった。これらの値は、放牧草地の調査結果(45%)や、新田⁷¹⁾の示した49%より小さいものである。

これらのことから、収量についての排泄物の肥

料的効果は小さく、分布型に対する影響も正規分布からはずれることが多いとはいえ、顕著とは言えず、現実の放牧草地で見られる収量分布の大きなばらつきと片寄り、春から秋までのふん・尿の肥料的効果のみによっては得られないものと考えられる。すなわち、放牧草地の収量分布のばらつき、片寄りは排泄物の直接の肥料的効果によることは少なく、不食過繁草(可食残草の生育進展による粗剛化、踏み倒し、ふん臭による採食忌避などにより発生する)の存在が大きく影響していると判断できる。

なお、2年以上に及ぶシミュレーションは、越冬過程のモデルが作成されていないために実施しなかったが、2年目以降の収量についての肥料的効果が、6月におけるふん施肥区以外小さかったことから、2年以上放牧を行った結果も収量に関しては本質的に変らないものと予想される。

つぎに、カリウム吸収量の基本統計量を、排泄・非排泄地点ごとおよび牧区全体につき表41に示した。吸収量についての肥料的効果(=排泄地点/非排泄地点)は、草種ごと、グラス+クローバのいずれにおいても1.36前後であったが、牧区全体(=排泄地点/非排泄地点)では、非排泄地点のメッシュが多いので1.03~1.04であった。しかし、カリウムの肥料的効果は第3章で見たとおり2年目に最高値に達し、3~4年目まで持続され、排泄地点が2年目以降へ持ち越されてそのメッシュ数も増加するので、カリウム吸収量に対する影響はより強くなることが予想される。

他方、排泄地点ならびに牧区全体の吸収量の類

度分布は、グラス、クローバ、グラス+クローバのいずれも歪度、尖度共に有意であり正規分布から外れているとみなすことができる。また、歪度が正值で、かつ尖度が3.0より大きいので、分布型はやや扁平で、右へすそを引くことにより、正規分布からずれたものと考えられる。

これらの結果は、前述(第3章第1節)した尿に由来するカリウムの土壌への吸着・蓄積およびそこから土壌溶液への供給とその結果としての牧草カリウム吸収の増加によるものである(5.3式、5.5式など)。また、第4章第2節で示したカリウムについての高い肥料的効果と符合するものである。すなわち、放牧草地の土壌カリウムの偏

表41 シミュレーションにおけるカリウム吸収量についての基本統計量

		K吸収量 (g/m ²)	標準偏差 (g/m ²)	CV (%)	正規性の検定 ^{a)}	
					歪度	尖度
グラス	排泄地点	13.07	3.26	24.9	0.949**	3.962**
	非排泄地点	9.70	1.45	14.9	0.021	3.049
	牧区全体	10.03	1.98	19.7	1.741**	10.491**
クローバ	排泄地点	12.84	4.53	35.3	0.698**	3.705
	非排泄地点	9.39	2.81	29.9	0.015	3.033
	牧区全体	9.72	3.19	32.8	0.650**	5.138**
グラス + クローバ	排泄地点	25.90	7.40	28.6	0.704**	3.687**
	非排泄地点	19.09	4.26	22.3	0.019	3.043
	牧区全体	19.75	5.07	25.7	0.898**	6.111**

^{a)} 正規分布の時、歪度は、0.0、尖度は3.0となる。

**は、t検定の結果、1%水準で有意であることを示す。

在した蓄積^{32,35)}は、本研究において検討したようなプロセスにより実現するものであるが、その時々の牧草収量にはあまり大きな影響を与えないことが確認された。

3. 牧草のK/(Ca+Mg)当量比に関連して

ところで、放牧草地の牧草のK/(Ca+Mg)当量比が2.2以上の場合グラスタニーが発生しやすい^{41,45)}とされているが、排尿地点ではこの比が高くなりやすい。しかし、実際の放牧草地においては、牧草養分量があるばらつきと片寄りのもとで平面的に分布しており、それを放牧牛が歩行しながら採食し、それがある期間継続した後、更に他の条件も加わった上でグラスタニーが発生すると考えられる。したがって、平均値としてのこの

の比のみで発症を説明するのは早計であるが、この比を低く保つことは、発症のための条件を減少させる上で大切なことである。

グラスとクローバの養分吸収特性の違い^{31,64)}に基づくこの比の違いは、草地のクローバ率と関連して重要である。表42に示すとおり、グラスのカリウム含有率はクローバのそれよりやや高い程度であるが、カルシウムはクローバにおいてきわめて高く、マグネシウムはほとんど変わらないので、グラスのK/(Ca+Mg)当量比はクローバより高くなる。表42の試験では、グラスのこの比が2.2以上のサンプルは全体の29%であった。しかし、クローバでは、尿施用区においてもこの比が2.2以下であり、最高値は1.5であった。クローバは一般にカリウムの増肥により生育が旺盛になる³¹⁾

表42 草種毎のK, Ca, Mg含有率およびK/(Ca+Mg)当量比

		平均値	最小値	最大値	標準偏差
K含有率(%)	グラス	2.88	0.83	5.45	1.08
	クローバ	2.30	0.72	4.58	0.86
Ca含有率(%)	グラス	0.59	0.08	1.01	0.13
	クローバ	1.90	1.02	4.38	0.57
Mg含有率(%)	グラス	0.23	0.04	0.62	0.12
	クローバ	0.23	0.08	0.47	0.09
K/(Ca+Mg) 当量比	グラス	1.68	0.41	4.34	0.82
	クローバ	0.58	0.10	1.48	0.30
	混 合	0.74	0.14	1.63	0.35

注) 第4章第2節の試験4年間のサンプル512点についての集計。

が、放牧牛の尿により多量のカリウムが添加されるとその個所においてはクローバが増加し、当該草地の牧草のK/(Ca+Mg)当量比が低下する。

また同時に、添加された大量のカリウムを徐々に牧草根へ供給するシステムが、第3章で指摘した土壌によるカリウムの吸着によって形成され、放牧草地の牧草カリウム含有率の極端な上昇が抑制される。すなわち、放牧草地土壌によるカリウムの吸着の意義はこの点においても大きいことが分かる。

従来、根釧地方においては、晩秋又は冬期に施肥したカリウムが早春の雪解け水に伴い流亡しやすいという示唆⁸³⁾を始めとして、主として溶脱・流亡を防ぐための論議がなされてきた。その点、排泄地点のカリウムによって牧草カリウム含有率が3年間にわたって高まることが確認されたので、従来考えられていた以上に長期にわたって根域の土壌中に残存すると考える必要がある。したがって、蓄積されるカリウムを有効に利用する方策が今後の大切な検討課題となろう。

4. ふん塊の分解について

つぎに、ふんの効果に関する問題点を指摘したい。ふん塊の分解は、効果の持続性に関し重要なプロセスであるが、分解を要する塊状の還元そのものが、尿の場合のような高濃度の養分添加を避ける作用をしているという解釈が成り立つ。すなわち、養分がふん塊に蓄積・温存されるわけであるが、そのような養分を有効に利用する上で重要な点として土壌動物、特にふん虫の役割に注目す

る必要がある。

古くから遊牧が展開されていたユーラシア大陸やアフリカ大陸では、ふん虫類が多数分布して牛ふんなどを速やかに分解していることが知られている。他方、かつてはオーストラリア、アメリカ大陸には牛ふんを旺盛に分解する土着のふん虫類が存在せず、排泄後長期間にわたってふん塊が残存する様子が見られたが、その後、牛ふんを旺盛に分解するふん虫を人為的に導入することにより、分解・消失を速めることに成功した¹⁰⁶⁾。ふん虫類による処理は、分解により養分の土壌中への供給を早めると共に、分散により高濃度の養分添加を緩和するという二重の利点を持つと考えられる。

わが国では、牛ふんに集まるふん虫類の息遣いは知られている⁵⁸⁾が、ふん虫類による牛ふんの分解・分散の経過を養分循環の観点から調査した報告は見当たらない。根釧農試内の供試ほ場において、未同定のふん虫の存在は確認され、他の土壌動物と共に、毎年6月の収量に対するふんの効果に関与していることも予想された。また、その種以外のふん虫が導入されれば、より早期に分解・分散がすすみ、効果の持続性が異なる可能性も考えられ、今後の検討にまつところが大きい。

5. ダイナミックモデル手法の発展のための問題点

最後に、ダイナミックモデルの手法に関し、2つの問題点を指摘したい。

再三指摘したとおり、放牧草地の実システムの実諸現象はきわめて多要因から成る。そのような対

象を、Forester は、非線型特性を含む多重フィードバックシステムとしてとらえ、具体的に企業、都市、世界などの社会システムを扱っている^{20,21,22)}。そのような現象を取り扱うダイナミックモデルは、農学分野においては未だ明確な方法として確立されたとはいえないが、現状では、ある現象についての多くの要因からなる複数の解析結果を理論的に再構成することによって、それらの知見の整合性の検証を行い、その現象を理論的に説明するところに主要な効用があるように見受けられる。これを、個々の現象を予測し、新しい技術指針を生み出し得る手法として発展させるためには、当面、次の2点を解決する必要がある。

第1は、使い易いコンピューター・ソフトウェアの開発である。Forester のシステムダイナミックモデル手法は、特定のコンピューター機種に固有な DYNAMO というシミュレーション言語を介して用いられていたが、他機種にも同様の言語が装備されるに及んで、その応用は一層伸展した¹⁶⁾。わが国においても、社会現象に限らず、農学分野の研究においても使われてきた^{97,98,111)}。本研究においては、FORTRAN 言語による BGS-1 というシミュレーションプログラム³⁹⁾を使用した。これはバッチ型プログラムであり、モデルの作成やシミュレーションのためには効率的とはいえない。今後の課題として、プログラム言語を知らなくとも、CRT (cathode ray tube) ディスプレイ上でモデル式の差し換えやパラメーターの変

更、およびその結果の図示・表示が手軽に行えるような会話型のソフトウェアを開発する必要がある。それによって、ダイナミックモデルなどによるシミュレーションの事例が一層豊富になることが期待される。

第2に統計的手法の中の実験計画法との結合である。本論文では扱わなかったが、モデル全体の中でのパラメーターの重要性を検討するために、感度分析⁹⁹⁾が行われる。感度分析においては、一般にいくつかのパラメーターにつきシミュレーション結果に対する影響の程度を検討するが、近年、実験計画法における多因子実験の一部実施法⁷⁸⁾を導入する試み⁹³⁾がなされた。ダイナミックモデルなどによるシミュレーションを、より実験的な手法として発展させるためには実験計画法との結合が不可欠の課題であり、既にそのための方向性の指摘もなされている^{55,80)}。本研究のカリウム循環モデルでは、一部に他の元素についての現象も取り入れた(土壌溶液中のカリウム濃度予測のためのアニオンからなる重回帰式)が、養分循環は複数の元素の相互作用が重要なテーマとなるので、多要因からなるモデルを扱うことが必要となる。そのような多要因のモデルによるシミュレーションと実験計画法との結合により、放牧草地などの施肥の指針も、モデルを使って一層定量的・合理的に検討できるようになることが期待される。

摘 要

本研究は、放牧草地の養分循環系の特徴的現象を解明して数理モデルを構成し、その系における放牧牛排泄物の肥料的役割を明らかにし、もって放牧草地の合理的施肥法を確立するための基礎的知見を得ようとしたものである。

1. 放牧草地の養分循環の調査

1) 放牧による施肥試験の結果、K単用に対して、NPK施用によって牧草生産、家畜生産の両面から生産性の向上が認められた。このNPK施用の効果は、りんを制限要因から解除し、窒素の不足を補い、かつ、排泄物の斑点状の還元による効果の低下を補ったことによると解釈された。

2) 窒素、りん、カリウムの循環について、循環量(=年間に生産された牧草に吸収される養分量)に対して、牛の増体に伴う搬出率は、窒素：14～16%、りん：3.5～4%、カリウム：12～14%であり、排泄物による還元率は、窒素：46～53%、りん：58～65%、カリウム：47～55%であった。

3) 放牧草地の養分循環を解明し、排泄物の肥料的評価を行うためには、斑点状還元現象(排泄物の平面的な分散のし方、牧草養分含量・生育への影響とその持続性)を明らかにすべきことが指摘できた。

2. 排泄物の分散パターンのモデルとその適用条件

1) 放牧草地における育成牛排泄物の平面的分散を、約10haの牧区内の4haを対象に調査した結果、面積が2～8aの排泄物のかたまりは、飲水場などの放牧施設の影響により形成されることが判明した。

2) 単位面積当たり排泄物個数の頻度分布は、放牧施設により生じたかたまりを除いた場合、ポアソン又は負の二項モデルで表現でき、これら2つのモデルの適用条件を示した(図9)。ふんに

については、負の二項分布の「共通の k 」を、4.40と推定した。

3. 片寄った排泄物の分散についてのポアソンモデル

1) 放牧草地における排泄物の密度と牧区の一辺中央にある飲水場からの距離との関係を指数関数で表現した((2.3)(2.4)式)。

2) 排泄物の分散のコンピューターシミュレーションの結果、排泄物密度に、飲水場に向かう片寄りのある場合に見られる負の二項分布は、放牧施設からの距離と共に平均値が変化するポアソンモデルで表現できることが実証された。

4. 牛尿又は化学肥料添加土壌中における養分の動態

尿添加の有無、アニオンの種類(ClとSO₄)、牧草の有無を組み合わせたライシメーター実験により、土壌溶液中のイオンの変動を5cmごとの5層につき経時的に調査した。

1) 土壌溶液中のClの下方移動はSO₄に比べ速やかであり、NO₃は遅れて増加を示し、その後下方へ移動した。

2) 1価カチオン(K, NH₄)は上3層における変動が多く、2価カチオン(Ca, Mg)はより下層まで変動が認められた。また、尿添加区では、初期に表層における固液相間のイオン平衡が乱れるが、硝化作用によるNH₄の減少により平衡が回復する傾向が見られた。

3) 土壌溶液中の1価カチオンおよびCaは、置換性プールの量に規制されて溶存すると考えられる。

4) K濃度は3種のアニオンにより規制され、NH₄はSO₄とClにより、またCaとMgはClとNO₃により、規制された。

5) アニオン濃度と対応する置換性カチオンとを説明変数とする重回帰分析における寄与率は、目的変数が1価カチオンの場合は約90%、2価カ

チオンの場合はCaが約60%、Mgが約45%であった。

5. 排泄ふんからの養分の放出と土壌への移行

1) 排泄直後のふんの水溶性養分は容易に放出されるが、日数経過と共にふんが固化するため、養分の放出はふんの分解に伴って徐々に行われる。

2) ふんから放出された養分について、ふん直下の表層で硝酸態窒素が一時期増加し、30~40日以降、表層において2.5%酢酸可溶性りんがやや増加した。カリウムは排ふん後の初期には水溶性、20日目以降は置換性カリウムの増加として検出され、比較的下層まで移行した。

6. 排泄物の斑点状還元が牧草に及ぼす影響

排泄物が斑点状に還元された地点においては、面積当たりの排泄物量に比べ、収量に対する影響は少なかった。牧草のカリウム含有率に対する影響は、周辺50cm以内の範囲でうかがわれた。

7. 斑点状に還元された排泄物の効果の持続性

「肥料の効果」を、収量又は養分含有率について、排泄物施与区/同非施与区の比と定義し、施与当年を含めて4年間にわたり、その持続性を検討した。

1) ふんの肥料的效果について、N含有率に対する効果は明瞭でなかったが、牧草K含有率には鋭敏に影響し、効果が大きかった。Ca含有率に対する効果はKの効果が減衰してから現れた。PとMg含有率に対しては比較的大きな効果が長く持続した。収量に対するふんの効果は、各年次の6月に特異的に大きいことが注目される。

2) 尿の肥料的效果について、NとP含有率に対する効果はあまり大きなものではなかったが、K含有率に対してはきわめて大きな効果を示し、その持続期間は従来知られている以上に長期間(3年間)にわたっていた。CaとMg含有率に対する効果は、K含有率に対する効果と拮抗して現れた。収量に関しては、尿施与区のクローバが増収した。

8. 放牧草地の乾物生産およびカリウム循環のダイナミックモデル

養分循環系の各プロセスについての知見に基づき、グラスとクローバ混播条件下の、再生~入牧を夏期間繰り返す放牧草地を想定したダイナミックモデルを作成した。

1) 乾物生産サブモデルにおいて、乾物生産は、根鉤農試における平均的CGRに基づいて進み、地上部・根に分配され、一部は枯死する。入牧後は採食部位の一部が排泄される。リターやふんは分解により系外へ去る。

2) カリウム循環サブモデルにおいて、各土層の土壌溶液中Kは、溶液中アニオンの組成に依存して供給され、牧草根により吸収される。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Kの多くは排泄される。地上部K含有率は乾物生産に影響を与える。

3) このモデルの数値計算により排尿地点での乾物生産、カリウム循環を検討した結果、その特徴をかなり良く説明でき、モデルに組み込んだ知見の整合性はおおむね保証されたと考えられる。

9. シミュレーションによる排泄物の肥料的評価

排泄物の平面的分散のモデルと乾物生産・カリウム循環モデルとを結合したシミュレーションを行った結果、放牧草地に還元されたカリウムは、牧草収量にはあまり大きな影響を与えず、偏在して蓄積されることが確認された。このことにより、放牧草地において乳牛の排泄物に基づく偏った養分の蓄積が起り、肥料的效果が長期間にわたって持続することの説明が可能となった。

謝

本論文の取りまとめに当っては、北海道大学教授岡島秀夫博士に親切なご指導と、ご校閲を賜った。また、北海道大学教授田中 明博士、北海道大学教授朝日田康司博士、北海道大学助教授佐久間敏雄博士には有益なご指導と本稿のご校閲を載いた。

本研究は、1965年から1979年にわたって北海道立根釧農業試験場において行われ、1980年以降は国立公害研究所において取りまとめが行われた。この間、滝川畜産試験場長奥村純一博士（元根釧農業試験場草地科長）には研究の端緒を開いて載き、草地試験場生態部長平島利昭博士（元根釧農業試験場草地科長）および熱帯農業研究センター主任研究官小関純一博士（元根釧農業試験場草地科長）からは終始懇切なご指導を載いた。根釧農業試験場草地科における共同研究者であった、故橋本久夫氏、南根室農業改良普及所所長 公氏、

辞

中央農業試験場能代昌雄氏、根釧農業試験場松中照夫氏、日本緑営(株)芝生研究所馬久地隆行氏の絶大なる協力の下に進められた。また、筆者の在任中に根釧農業試験場長を勤められた弘前大学教授坪松戒三博士、松村 宏氏、雪印種苗株式会社平沢一志氏、石川県立農業短期大学教授松代平治氏には研究遂行上の便宜を凶って載いた。本研究のほとんどは農林水産省指定試験事業の一環として実施されたものであり、関係各位には大変お世話になった。国立公害研究所においては、東京理科大学教授奥野忠一博士（元国立公害研究所環境情報部長）、国立公害研究所環境情報部長廣崎昭太博士には種々ご指導載き、取りまとめについてのご教示を得た。農林水産省草地試験場塩見正衛博士には有益な討論を載いた。その他多くの先輩・同僚諸氏の協力も欠かせないものであった。

以上の方々に対し、心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) Adams, F. "Ionic Concentrations and Activities in Soil Solutions". Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 35, 420-426 (1971).
- 2) 赤塚 恵, 上具義蓮, 三須 昇. "乳牛飼養における飼料中肥料成分の回収について". 土肥誌. 35, 351-354 (1964)
- 3) Anscombe, F. J. "Sampling Theory of the Negative Binomial and Logarithmic Series Distribution". Biometrika, 37, 358-382 (1950)
- 4) von Bertalanffy, L. "General System Theory ... Foundations, Development, Applications". New York, George Braziller.. 1968. 295p.
- 5) Berthet, P., Gerard, G. "A Statistical Study of Microdistribution of *Oribatoi (Acari)* Part I. The Distribution Pattern". Oikos, 16, 214-227 (1965)
- 6) Bliss, C. I., Owen, A. R. G. "Negative Binomial Distributions with a Common k". Biometrika, 45, 37-58 (1958)
- 7) Breymeyer, A. I., Van Dyne, G. M., ed. "Grasslands, Systems Analysis and Man". Cambridge, Cambridge University Press, 1980. 950p.
- 8) Brockington, N. R. "A Mathematical Model of Pasture Contamination by Grazing Cattle and the Effects on Herbage Intake". J. Agric. Sci. Camb. 79, 249-257 (1972)
- 9) Campbell, L. B., Racz, G. J. "Organic and Inorganic P Content, Movement and Mineralization of P in Soil beneath a Feedlot". Can. J. Soil Sci. 55, 457-466 (1975)
- 10) Castle, M. E., MacDaid, E. "The Decomposition of Cattle Dung and its Effect on Pasture". J. Br. Grassld Soc. 27, 133-137 (1972)
- 11) Coic, Y. "The Potassium Requirements of Mown and Grazed Grasland". Potassium Symp. 151-162 (1957)
- 12) Coughenour, M. B., Parton, W. J., Lauenroth, W. K., Dudo, J. L., Woodmansee, R. G. "Simulation of a Grassland Sulfur-cycle". Ecol. Model. 9, 179-213 (1980)
- 13) Cuykendall, C. H., Marten, G. C. "Defoliation by Sheep-grazing versus Mower-clipping for Evaluation of Pasture". Agron. J. 60, 404-408 (1968)
- 14) Dale, W. R. "Some Effects of Sheep Urine on Pasture". N. Z. Grassl. Ass. Proc. 23rd Conf. 118-124 (1961)
- 15) Davidson, R. L. "Theoretical Aspects of Nitrogen Economy in Grazing Experiments". J. Brit. Grassl. Soc. 19, 273-280 (1964)
- 16) Doak, B. W. "Some Chemical Changes in the Nitrogenous Constituents of Urine When Voided on Pasture". J. Agr. Sci. 42, 162-171 (1952)
- 17) During, C., McNaught, K. J. "Effects of Cow Urine on Growth of Pasture and Uptake of Nutrients". N. Z. J. Agric. Res., 4, 591-605 (1961)
- 18) ———, Weeda, W. C. "Some Effects of Cattle Dung on Soil Properties, Pasture Production, and Nutrient Uptake. I. Dung as a Source of Phosphorus". N. Z. J. Agric. Res. 16, 423-430 (1973)
- 19) Floate, M. J. S. "Mineralization of Nitrogen and Phosphorus from Organic Materials of Plant and Animal Origin and its Significance in the Nutrient Cycle in Grazed Upland and Hill Soils". J. Br. Grassld Soc. 25, 295-302 (1970)
- 20) フォレスター, J. M. "アーバン・ダイナミックス". 小玉陽一 訳, 日本経営出版会, 1970. 295p.
- 21) ——— "インダストリアル・ダイナミックス" 石田晴久, 小林義雄 訳, 紀伊国屋書店, 1971. 654p.
- 22) ——— "ワールド・ダイナミックス". 小玉陽一 訳, 日本経営出版会, 1972. 146p.
- 23) Greenhalgh, J. F. D., Reid, G. W. "The Effects of Grazing Intensity on Herbage Consumption and Animal Production. 3. Dairy Cows Grazed at Two Intensities on Clean or Contaminated Pasture". J. Agric. Sci., Camb. 72, 223-228 (1969)
- 24) Gunary, D. "The Availability of Phosphate in Sheep Dung". J. Agric. Sci., Camb. 70, 33-38 (1968)
- 25) 袴田共之, 平島利昭. "根室酪農における飼料及び生産物の主要元素濃度について". 土肥要旨集, 21(II), (1975)
- 26) ——— "回帰式によるふん尿混合物の草地への施用効果の検討(予報)". 北農, 45(7), 12-19 (1978)
- 27) 原田登五郎, 久津那浩三. "土壌中における塩基の行動. 第1報, Negative charge の主因と NH_4^+ 及び Ca^{++} の吸着に就いて". 農技研報, B5, 1-26 (1955)
- 28) ———, ———. "土壌中における塩基の行動. 第2報, Negative charge の主因と NH_4^+ , Ca^{++} の吸着(続)". 農技研報, B 10, 37-79 (1960)
- 29) 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, 燐酸, 加里の供給力について". 道農試集報, 7, 16-34 (1961)
- 30) ———, 奥村純一. "根釧地方火山灰土壌中における燐酸の行動. 第2報, 可給態無機燐について". 道農試集報, 8, 13-23 (1961)
- 31) ———, 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7報, 放牧用牧草の施肥法について". 道農試集報, 10, 42-58 (1963)
- 32) ———, 奥村純一. "根釧地方の牧野改良. 第4報, 放牧による土壌成分の偏倚". 道農試集報, 14, 47-55 (1964)
- 33) ———, 橋本久夫, 奥村純一. "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9報、厩肥と瀝汁の肥効について”。道農試集報, 15, 84-100 (1967)
- 34) ———, ———, ———. “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バ固定窒素の移譲”。道農試集報, 15, 101-112 (1967)
- 35) ———, 佐藤康夫, 宮下昭光. “永年放牧草地の特性と管理。第2報、放牧家畜の種類による利用率と地力の片寄り”。北農試彙報, 93, 67-77 (1968)
- 36) 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バの移譲”。道農試集報, 23, 44-54 (1971)
- 37) 平山秀介, 吉田 悟, 齋野 保. “排糞周囲不食草面積の変遷と排糞処理効果”。北農, 33(8), 42-46 (1966)
- 38) 廣崎昭太, 小林藤雄. “予測平方和 (PSS) による重回帰式の変数選択”。農林研究計算センター報告, A15, 45-104 (1979)
- 39) 廣崎昭太, 宇田川武俊, 大塚雍雄, 奥野千恵子, 神山啓治, 塩見正衛, 橋村ヤス子. “生物現象のためのシミュレーション・プログラム BGS-1 について”。農林研究計算センター報告, B 6, 1-72 (1979)
- 40) 広田秀憲. “ニュージーランドの草地農業”。畑地農業研究会, 1953, 196p.
- 41) 飯塚三喜, 野本貞夫, 村上大蔵, 小野 齊. “飼料作物と牛の生理障害”。農山漁村文化協会, 1977, 256p.
- 42) Innis, S. ed. “Grassland Simulation Model”. New York, Springer-Verlag, 1978, 298p.
- 43) 石塚喜明, 早川康夫, 乙井 馨. “根室釧路地方に分布する摩周統火山性土の特性と其の地力維持に関する研究”。道農試報告, 5, 35-95 (1954)
- 44) 伊藤嘉昭. “動物生態学入門……個体群生態学編”。古今書院, 1969, p.81.
- 45) Kemp, A., t Hart, M. L. “Grass tetany in Grazing Cows”. Neth. J. Agric. Sci., 5, 4-17 (1957)
- 46) 小玉陽一, 内海武士, 合田周平編著. “システム・ダイナミックス”。日臨時増刊, 共立出版, 1973, 337p.
- 47) 近藤秀雄, 原植 紀. “北海道における牧草のミネラル組成。第1報、道内の若干草地における1番草の窒素, 燐, 加里, カルシウム, マグネシウム及びナトリウム含量について”。北農試彙報, 118, 81-92 (1977)
- 48) 久野英二. “水田における稲ウシカ・ヨコバイ類個体群の動態に関する研究”。九州農試彙報, 14(2), 131-246 (1968)
- 49) リービッヒ, J. “農耕と歴史・国民経済と農業”。吉田武彦 訳. 農林水産技術会議調査資料, 70, 海外, 1976, 71p.
- 50) Lotero, J., Woodhouse, Jr. W. W., Petersen, R. G. “Local Effect on Fertility of Urine Voided by Grazing Cattle”. Agr. J. 58, 262-265 (1966)
- 51) MacDiarmid, B. N., Watkin, B. R. “The Cattle Dung Patch. 1. Effect of Dung Patches on Yield and Botanical Composition of Surrounding and Underling Pasture”. J. Br. Grassld Soc. 26, 239-245 (1971)
- 52) ———, ———, ———. “————— 2. Effect of Dung Patch on the Chemical Status of the Soil, and Ammonia Nitrogen Losses from the Patch”. J. Br. Grassld Soc. 27, 43-48 (1972)
- 53) ———, ———, ———. “————— 3. Distribution and Rate of Decay of Dung Patches and Their Influence on Grazing Behaviour”. J. Br. Grassld Soc. 27, 48-54 (1972)
- 54) MacLusky, D. S. “The Estimates of the Areas of Pasture Fouled by the Excreta of Daily Cows”. J. Br. Grassld Soc. 15, 181-188 (1960)
- 55) Maguire, J. N. “Discrete Computer Simulation …… Technology and Applications …… The Next Ten Years”. Spring Joint Computer Conference, 815-826 (1972)
- 56) Marsh, R., Campling, R. C. “Fouling of Pastures by Dung”. Herb. Abstr. 40, 123-130 (1970)
- 57) Marten, G. C., Donker, J. D. “Selective Grazing Induced by Animal Excreta. 1. Evidence of Occurrence and Significant Remedy”. J. Dairy Sci. 47, 773-776 (1964)
- 58) 益本仁雄. “フン虫の採集と観察 (グリーンブックス5)”。ニュー・サイエンス社, 1977, 96p.
- 59) 増山元三郎. “実験公式の求め方 (増補版)”。竹内書店新社, 1975, p.64-65.
- 60) 松中照夫, 有賀勝太郎, 村上憲一, 石田義光. “草地酪農地帯における土壌・牧草のミネラル組成, 特に別海町の場合”。畜研, 28, 889-890 (1974)
- 61) ———, 小関純一, 三浦俊一, 森 雅雄. “根釧地方における放牧に関する問題点とその解決方向”。北農, 48(6), 1-12 (1981)
- 62) May, P. F., Till, A. R., Downes, A. M. “Nutrient Cycling in Grazed Pastures. 1. A Preliminary Investigation of the Use of (³⁵S) gypsum”. Aust. J. Agric. Res. 19, 531-543 (1968)
- 63) Metson, A. J., Hurst, F. B. “Effects of Sheep Dung and Urine on a Soil under Pasture at Lincoln, Canterbury, with Particular Reference to Potassium and Nitrogen Equilibrium”. N. Z. J. Sci. Tech. 35 A, 327-359 (1953)
- 64) 三井進午, 上田 実. “作物の養分吸収に関する動的研究。第25報、二・三の塩基とくにマグネシウムの吸収に及ぼす作物根及び土壌の塩基置換容量の影響”。土肥誌, 30, 525-530 (1960)
- 65) 宮内紀一. “わが国における草地の造成と維持管理に関する土壌肥料的諸問題 (九州)”。近代農業における土壌肥料の研究。日本土壌肥料学会編, 養賢堂, 1970, p.186-194.

- 66) 森本 宏. "家畜栄養学". 養賢堂, 1971, p.1-7.
- 67) Morisita, M. "Measuring of the Dispersion of Individuals and Analysis of the Distributional Patterns". Mem. Fac. Sci. Kyusyu Univ., Ser. E (Biol.), 2, 215-235 (1959)
- 68) ————. "I δ -index, a Measure of Dispersion of Individuals". Res. Popul. Ecol. IV, 1-7 (1962)
- 69) 諸遊英行. "土壤中におけるカリの有効性と飼料作物に対するカリの施用効果に関する研究". 中国農試報. E 9, 19-102 (1973)
- 70) Nakamura, Y., Fukukawa, T. "Decomposition of Organic Materials and Soil Fauna in Pasture. I. Distribution of Cow Dung Pats". Bull. Natl. Grassl. Res. Inst. 5, 14-19 (1974)
- 71) 新田一彦. "牧草地における標本の変動". 北農試彙報. 97, 46-52 (1971)
- 72) 新田和雄, 沢田泰男. "牛ふんの分解と土壤微生物群の推移". 草地試研報, 11, 26-33 (1977)
- 73) Norman, M. J. T., Green, J. O. "The Local Influence of Cattle Dung and Urine upon the Yield and Botanical Compositions of Permanent Pasture". J. Br. Grassld Soc. 13, 39-45 (1958)
- 74) 岡島秀夫, 松中照夫. "土壤のカリウム供給力測定法としての AR^k, PBC^k の評価 (その1) AR^k について". 土肥誌. 43, 409-416 (1972).
- 75) ————, 今井弘樹, 牧田規子. "土壤の養分供給能に関する研究 (第3報) 硝酸化成にともなう固相養分の放出について". 土肥誌. 45, 389-394 (1974).
- 76) Okubo, T., Hirosaki, S., Okuno, T. "A Model for Plant-growth under Grazing Condition". JIBP Synthesis. 13, 268-274 (1975).
- 77) 奥村純一, 平島利昭, 橋本久夫, 袴田共之, 能勢 公, 能代昌雄. "燐酸質土改資材の効果持続について". 根鋤農試資料. 第2号, 1970, p.291-294.
- 78) 奥野忠一, 芳賀敏郎. "実験計画法". 培風館. 1969. p.154-215.
- 79) ————, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤 正. "多変量解析法". 日科技連出版社, 1973, 430p.
- 80) ————, "農業試験における実験計画法……その発展と問題点……". 実験計画法, その発展と最近の話題. 東京大学出版会, 1974, p.65-108.
- 81) ————, 芳賀敏郎, 矢島敬二, 奥野千恵子, 橋本茂司, 古河陽子. "統多変量解析法". 日科技連出版社, 1976, 299p.
- 82) Oliver, S., Barber, S. A. "An Evaluation of the Mechanisms Governing the Supply of Ca, Mg, K, and Na to Soybean Roots (*Glycine max*)". Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30, 82-86 (1966).
- 83) 大村邦夫, 野村 琥. "土壤凍結地帯の牧草に対する早春施肥法に関する試験". 北農. 39(4), 20-28 (1972).
- 84) Peterson, R. G., Lucas, H. L., Woodhouse, Jr. W. W. "The Distribution of Excreta by Freely Grazing Gattle and its Effect on Pasture Fertility. I. Excretal Distribution". Agron J. 48, 440-443 (1956).
- 85) ————, Woodhouse, Jr. W. W., Lucas, H. L. "———
II. Effect of Returned Excreta on the Residual Concentration of Some Fertilizer Elements". Agron. J. 48, 444-449 (1956).
- 86) Ponnampereuma, F. N., Estrella, M. Tiansco, Tere-sita, A. Loy. "Ionic Strengths of the Solutions of Flooded Soils and Other Natural Aqueous Solutions from Specific Conductance". Soil Sci. 102, 408-413 (1966).
- 87) Richards, I. R., Wolton, K. M. "The Spatial Distribution of Excreta under Intensive Cattle Grazing". J. Br. Grassld Soc. 31, 89-92 (1976).
- 88) 佐々木龍男 編. "北海道の火山灰と土壤断面集 (1), 根室・釧路編". 北海道火山灰命名委員会. 1979. 68p.
- 89) Sounders, W. M. H., Metson, A. J. "Fate of Potassium Applied to Pasture on a Soil Derived from Andesitic Ash". N. Z. J. Agric Res., 2, 1211-1231 (1959).
- 90) 沢村 浩, 鈴木慎二郎. "牛の行動". 北農試資料, 3, p.38.
- 91) 関口久雄, 奥村純一, 豊田広三. "放牧牛の排泄尿が放牧草地の化学性に及ぼす影響". 道農試集報, 20, 52-60 (1970).
- 92) 塩見正衛. "負の2項分布とポアソン分布のあてはめ". 農林研究計算センター報告. A 6, 107-120 (1970).
- 93) Steinhorst, R. K., Hunt, W. H., Innis, G. S. "Sensitivity Analyses of the ELM Model "Grassland Simulation Model. Innis, G. S. ed. New York, Springer-Verlag, 1978, p.231-255. (Ecological Studies 26).
- 94) 高橋繁男, 大久保忠旦, 秋山 侃. "放牧草地の地下部現存量の季節的推移". 草地試研報. 16, 24-30 (1980).
- 95) 高橋達児. "本邦草地の無機栄養および牧草の無機品質に関する諸問題, 6, カリ, 石灰・苦土比について". 日草誌. 25, 161-166 (1979).
- 96) 高野信雄, 鈴木慎二郎, 難波直樹, 山下良弘. "不食過繁地の生成要因とその抑圧に関する研究, 第1報, 放牧強度と掃除刈りの影響". 北農試彙報, 94, 73-78 (1969).
- 97) 高柳 繁, 宇田川武俊, 武田元吉, 岩城英夫. "光競合条件下にある二種の植物混合群落の生長シミュレーション". 日作紀, 43, 538-549 (1974).
- 98) 武田元吉, 岩城英夫, 高柳 繁. "麦類の光合成に関する生態学的研究, 第4報, 六条オオムギの乾物生産のシミュレーション". 日作紀. 46, 178-192 (1977).

- 99) Tomović, R. "Sensitivity Analysis of Dynamic Systems". McGraw-Hill, New York, 1963, 142p.
- 100) 辻 藤吾, 原模 紀. "成乳牛排せつ物中のミネラル組成および草との関連性". 日草誌, 22, 86-94(1976).
- 101) 内島善兵衛. "食糧問題と農業科学". 21世紀の食糧・農業. 奥野忠一編. 東京大学出版会, 1975, p.1-20.
- 102) 梅棹忠夫. "狩猟と遊牧の世界……自然社会の進化". 講談社, 1976, 174p.
- 103) Van Dyne, G. M. "Grasslands Management, Research and Training Viewed in a Systems Context". Range Science Department, Science Series. No.3, Colorado State University. (1969)
- 104) Wakao, N., Hattori, T., Furusaka, C. "Study on the Distribution Patterns of Sulfate-Reducing Bacteria in a Paddy-Field Soil by $I\delta$ -Index". Soil Sci. Plant Nutr. 19, 201-203(1973).
- 105) Walters, C. J. "Systems Ecology: The Systems Approach and Mathematical Models in Ecology". Fundamentals of Ecology. 3rd ed. Odum, E. P. ed. Philadelphia, W. B. Saunders (Toppan Company), 1971, p.276-292.
- 106) Waterhouse, D. F. "The Biological Control of Dung". Sci. Am. 230, 100-109(1974).
- 107) Watkin, B. R. "The Effect of Dung and Urine and its Interactions with Applied Nitrogen, Phosphorus and Potassium on the Chemical Composition of Pasture". J. Br. Grassld Soc. 12, 264-277(1957)
- 108) Wheeler, J. L. "The Effect of Sheep Excreta and Nitrogenous Fertilizer on the Botanical Composition and Production of a Ley". J. Br. Grassld Soc. 13, 196-202(1958).
- 109) Wolton, K. M. "An Investigation into the Simulation of Nutrient Returns by the Grazing Animal in Grassland Experimentation". J. Br. Grassld Soc. 18, 213-219(1963).
- 110) ———, Brockman, J. S., Shaw, P. G. "The Simulation of Animal Returns in Grassland Experimentation". J. Br. Grassld Soc. 25, 255-260(1970)
- 111) 北海道立新得畜産試験場. "肉用牛の大規模繁殖経営における集団飼養技術に関する試験(総合報告書)". 1980, 350p.
- 112) 日本分析化学会北海道支部編. "解説水の分析". 化学同人, 1966, p.150-155.
- 113) 農林水産省肥料機械課, 通商産業省化学肥料課監修. "肥料年鑑, 昭和54年版". 肥料協会新聞部, 1979