

第V章 リン肥沃度に対応したリン施肥量

第1節 土壌中におけるリンの形態とチモシーの生育

北海道の土壌診断基準値³⁰⁾では、草地土壌中の有効態リン含量をブレイNo.2法^{10,33)}で評価している。一方、土壌中のリンは形態変化によって、リン酸吸収係数の大きい火山性土ほど難溶化することも知られている^{25,30)}。ここでは、土壌中における形態別のリン含量とチモシーの生育について検討する^{36,37,38)}。なお、ブレイNo.2法で定量されるリンを以後ブレイNo.2リンと称することとする。

1. 実験方法

試験1. 主要火山性土の構成火山灰中における形態別無機態リン含量とブレイNo.2リン含量

リン酸吸収係数の大きく異なる火山灰に添加されたリンの形態変化について検討するために、根釧地方の主要火山性土における草地の作土を構成する火山灰³⁹⁾にリンを添加し、無機態リンの形態別含量およびブレイNo.2リン含量を調査した。供試火山灰は表5-1に示した雌阿寒岳火山灰a(Me-a)、カムイヌプリ岳火山灰2aおよび4a(Km-2a、Km-4a)、カムイヌプリ岳火山灰1f(Km-1f)、矢白別火山灰(Ya)、摩周岳火山灰f₁(Ma-f₁)の6種類であり、いずれも未耕地から採取した。これらの火山灰に風乾土100g当たりP₂O₅として0、20、40、80、150、300mg相当量のリンを過リン酸石灰で添加した。土壌水分は最大含水量の60%に、温度は15℃に保ち、1987年9月23日から同年10月23日まで放置した後、風乾した試料について形態別無機態リンおよびブレイNo.2リンを定量した。

形態別無機態リンは関谷⁴⁰⁾の方法に従い、カルシウム型リンを2.5%酢酸液で、アルミニウム型リンを1Mふっ化アンモニウム溶液で、また、鉄型リンを0.1M水酸化ナトリウム溶液で分別抽出し、モリブデンブルーによって比色定量した。

試験2. チモシーのリン吸収量と各火山性土からのリン減少量（ポット試験）

供試土壌として未熟火山性土は標茶町虹別、厚層黒色火山性土は標津町川北の草地から0～15cmの作土を採取した。表5-2に供試火山性土の理化学性を示した。これらの火山性土はかさ密度が異なるので、容積が一定となるようにa/5000ワグネルポットに充填した。このため、ポット当たりの重量は乾土として未熟火山性土で2.8kg、厚層黒色火山性土で1.8kgとなった。試験処理としてリン施肥量を6段階設けた。すなわち、1985年4月23日、各火山性土のリン酸吸収係数の0、1、2、4、6、10%相当量のリンを過リン酸石灰で全層に混和した。その後、20日間ガラス室に放置し、4～5回乾湿を繰り返してリンを土壌に吸着させた。1985年5月13日、既述の方法でチモシー「ノサップ」を移植した。施肥は移植時および1番草刈取後に窒素およびカリウムを0.5gずつ表面施肥した。刈取りは6月25日、7月29日および9月26日の3回行った。

試験3. 主要火山性土のブレイNo.2リンおよび無機態リン含量とチモシーの生育（現地試験）

未熟火山性土は別海町西春別および標茶町虹別、厚層黒色火山性土は標津町川北および浜中町東円朱別においてチモシー単一的草地を1草地ずつ選定し、リンの用量

表5-1 供試火山灰*

火山灰名	Me-a	Km-2a	Km-4a	Km-1f	Ya	Ma-f ₁
リン酸吸収係数	860	1410	485	2120	1830	2300
対応する火山性土**	未熟火山性土 黒色火山性土 厚層黒色火山性土	未熟火山性土	未熟火山性土	黒色火山性土 厚層黒色火山性土	黒色火山性土 厚層黒色火山性土	黒色火山性土 厚層黒色火山性土

*：火山灰は腐植層を持たないKm-4aを除き、すべて腐植層から採取した。

**：耕起した場合、その火山灰が作土に多く混入することになる火山性土。

表5-2 供試火山性土の理化学性

供試火山性土	かさ密度 g/cm ³	pH (H ₂ O)	リン酸吸収係数*	ブレイNo.2リン含量*
未熟火山性土	0.79	5.8	755	11.0
厚層黒色火山性土	0.50	5.0	1850	16.7

*：P₂O₅mg/100g

試験を行った。リンは0、2.5、5、10、20、40、80kg/10aを早春(1987年5月7または8日)に全量を施肥した。共通施肥は北海道施肥標準³⁾に準じ、窒素16kg/10a、カリウム20kg/10aを早春に2/3、1番草刈取後(7月3または4日)に1/3の割合で分施、マグネシウム4kg/10aを早春に全量施肥した。刈取りは6月下旬と8月下旬の2回、いずれもチモシーの出穂期に行い、乾物収量、茎数および牧草体リン含有率を調査した。土壌は施肥前、施肥後15日目および各番草刈取後に採取し、ブレイNo.2および無機態リン含量を測定した。

なお、以後、特にことわりのない場合、無機態リンとはカルシウム型、アルミニウム型、鉄型の合計量を指すものとする。

試験4. 土壌中におけるリンの拡散に及ぼす吸着と体積含水率の影響

試験2のポット試験で用いた未熟火山性土と厚層黒色火山性土について、第2章で述べた方法に基づいてリンの拡散係数を測定した。測定には0.1Mリン酸二水素ナトリウム(NaH_2PO_4)溶液を用い、体積含水率は未熟火山性土で0.2、0.3、0.4 cm^3/cm^3 、厚層黒色火山性土では0.3、0.4および0.5 cm^3/cm^3 とした。また、両火山性土におけるリンの吸着特性を調査するために、試験1においてリンを添加した各火山灰を用いて後述する吸着曲線を作成した。

2. 実験結果

試験1. 主要火山性土の構成火山灰中における形態別無機態リン含量とブレイNo.2リン含量

主要火山性土の作土層を構成する火山灰について、リンの添加に伴うブレイNo.2リン含量および形態別無機態リン含量の変化を表5-3に示した。リン添加量の増加に伴って、ブレイNo.2リン含量は増大した。その程度は火山灰の種類によって異なり、リン酸吸収係数の小さい火山灰ほどブレイNo.2リン含量も、また、その増加量も大きかった。無機態リンの形態を比較すると、リン酸吸収係数の小さい火山灰ではカルシウム型およびアルミニウム型がその主体を占め、鉄型はわずかであった。これに対し、リン酸吸収係数の大きい火山灰ではカルシウム型は少なく、アルミニウム型および鉄型が多かった。また、ブレイNo.2リン含量が同程度であれば、カルシウム型、アルミニウム型、鉄型の3形態合計の無機態リン含量はリン酸吸収係数の大きい火山灰ほど多くなった。

リン添加量とブレイNo.2および無機態リンの増加量との関係を図5-1に示した。いずれの火山灰においても、添加されたリンの量とそれによって増加した無機態リンの量はほぼ等しい関係にあった。その形態を比較すると、リン酸吸収係数の小さい火山灰ほどカルシウム型リンの増加量が多く、リン酸吸収係数の大きい火山灰ほどアルミニウム型および鉄型リンの増加量が多かった。一方、

表5-3 異なる量のリンを添加した場合の火山灰におけるブレイNo.2リン含量と形態別無機態リン含量

火山灰	リン 添加量	pH (H_2O)	ブレイ No.2	無機態			火山灰	リン 添加量	pH (H_2O)	ブレイ No.2	無機態		
				Ca型	Al型	Fe型					Ca型	Al型	Fe型
Me-a (860)	0	4.9	11.5	15.5	21.3	9.9	Ya (1830)	0	6.0	2.6	0.8	18.8	11.4
	10	5.0	18.0	20.5	26.9	10.0		10	5.7	6.6	2.0	26.3	13.8
	20	4.9	23.0	24.0	28.8	10.1		20	5.6	11.5	3.4	32.2	16.0
	40	4.9	38.5	34.0	50.0	11.6		40	5.4	20.4	6.9	45.0	20.0
	80	4.9	59.6	63.5	58.5	12.5		80	5.3	39.8	14.5	67.5	28.3
	150	4.7	140.0	94.0	70.7	13.2		150	5.2	72.8	31.0	106.3	38.3
	300	4.5	215.0	201.0	138.2	16.0		300	5.1	140.5	80.0	189.4	55.2
Km-4a (485)	0	6.1	14.9	10.7	35.4	6.8	Km-lf (2120)	0	5.9	1.0	0.3	15.6	6.5
	10	6.0	25.3	14.0	40.6	7.6		10	5.7	1.8	0.7	23.8	9.2
	20	6.0	32.9	18.0	46.9	7.7		20	5.6	3.1	1.2	30.7	9.8
	40	6.0	52.4	26.5	53.8	8.5		40	5.5	5.8	2.2	46.9	17.1
	80	5.9	87.3	46.0	65.6	9.2		80	5.3	14.0	5.3	73.5	24.3
	150	5.4	143.0	108.0	93.8	10.5		150	5.2	33.4	13.0	127.5	36.0
	300	5.3	275.5	220.0	111.3	10.8		300	5.1	81.6	33.5	220.0	58.7
Km-2a (1410)	0	5.6	4.5	4.5	20.7	14.4	Ma-f ₁ (2300)	0	6.0	1.0	0.5	10.7	8.5
	10	5.3	8.9	7.7	27.8	15.8		10	5.7	2.4	3.5	16.3	11.5
	20	5.2	14.7	10.9	31.0	18.7		20	5.7	4.3	4.0	25.1	13.9
	40	5.0	29.7	13.5	47.2	19.6		40	5.5	8.1	4.9	37.9	17.9
	80	4.9	50.1	25.0	67.2	24.1		80	5.3	19.1	10.3	62.5	24.6
	150	4.8	79.5	55.0	108.2	30.5		150	5.2	37.9	10.5	102.5	31.4
	300	4.8	137.0	125.0	182.6	38.7		300	5.1	80.4	39.0	205.0	52.8

単位: $\text{P}_2\text{O}_5\text{mg}/100\text{g}$

()はリン酸吸収係数

分析値はリンを過リン酸石灰で添加後、最大容水量の60%の水分条件で15℃、1ヶ月間静置した試料の値

ブレイNo.2リンの増加量は、カルシウム型リンの場合と同様の傾向を示し、リン酸吸収係数の大きな火山灰ほど小さかった。

以上のように、リン酸吸収係数の大きい火山灰に添加されたリンは、アルミニウム型や鉄型の難溶性の形態に移行し、これに伴ってブレイNo.2法では抽出されにくくなることが明らかとなった。

試験2. チモシーのリン吸収量と各火山性土からのリン減少量（ポット試験）

各処理区におけるチモシーの乾物重とリン吸収量を図5-2に示した。いずれの火山性土においてもリンの施肥に伴ってチモシーの乾物重は増大し、その最大値は両火山性土で同程度となった。また、リン施肥量の少ない水準におけるチモシーの乾物重は茎葉部、根部ともに厚層黒色火山性土が未熟火山性土を上回っていた。一方、チモシーのリン吸収量もリンの施肥に伴って直線的に増大し、その最大値は両火山性土で同程度となった。図5-3

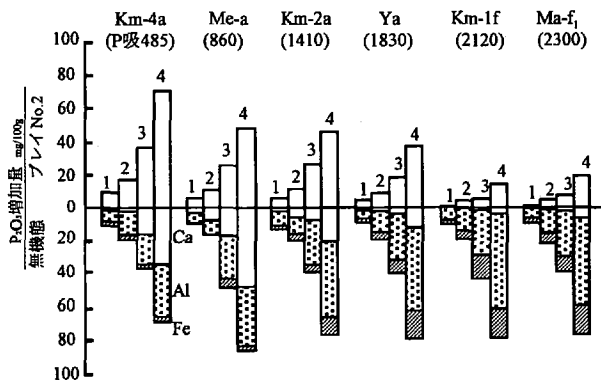


図5-1 リン酸吸収係数の異なる火山灰へのリン添加量とブレイNo.2および形態別無機態リン増加量*

P₂O₅添加量：1、2、3、4の順にそれぞれ10、20、40、80mg/100g

*：リンを過リン酸石灰に添加後最大容水量の60%の水分条件で15℃、1ヶ月間静置した試料について、リン添加前との差を計算した。

には土壌中のブレイNo.2リンおよび無機態リン含量とチモシーのリン吸収量との関係を示した。土壌中のブレイNo.2リン含量が同じ場合には、厚層黒色火山性土におけるリン吸収量が未熟火山性土におけるそれを明らかに上回った。土壌中の無機態リン含量で比較した場合には、上記の傾向は小さくなったものの、両火山性土における差は依然として認められた。図5-4にチモシーのリン吸収量とチモシー栽培前後における土壌中のリン含量の差から求めたリン減少量との関係を示した。未熟火山性土では、チモシーのリン吸収量とブレイNo.2リン減少量はほぼ等しい値を示したが、厚層黒色火山性土では明らかに前者が後者を上回った。また、無機態リン減少量とチモシーのリン吸収量との間には、いずれの火山性土でも量的にはほぼ等しい関係が認められた。無機態リンの減少量を形態別に見ると、厚層黒色火山性土では未

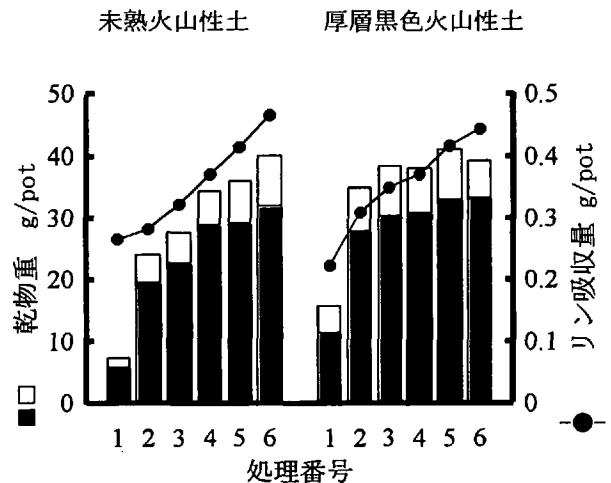


図5-2 各処理区におけるチモシーの乾物重とリン吸収量

P₂O₅添加量：1,2,3,4,5,6の順に各火山性土のリン酸吸収係数の0.1,2,4,6,10%相当量

■：1-3番草合計の茎葉部乾物重、□：根部乾物重
—●—：1-3番草合計の茎葉部のリン吸収量

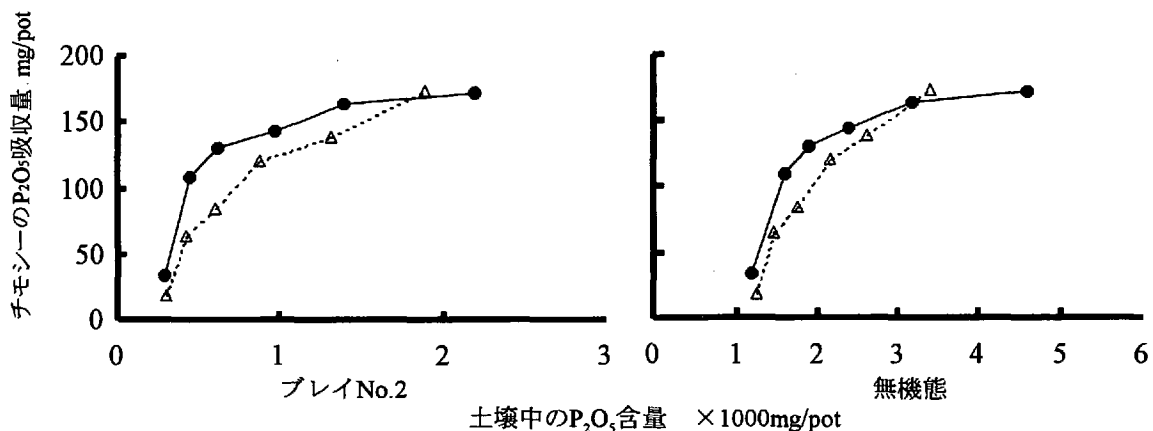


図5-3 土壌中のブレイNo.2および無機態リン含量とチモシーのリン吸収量の関係（ポット関係）

△：未熟火山性土、●：厚層黒色火山性土

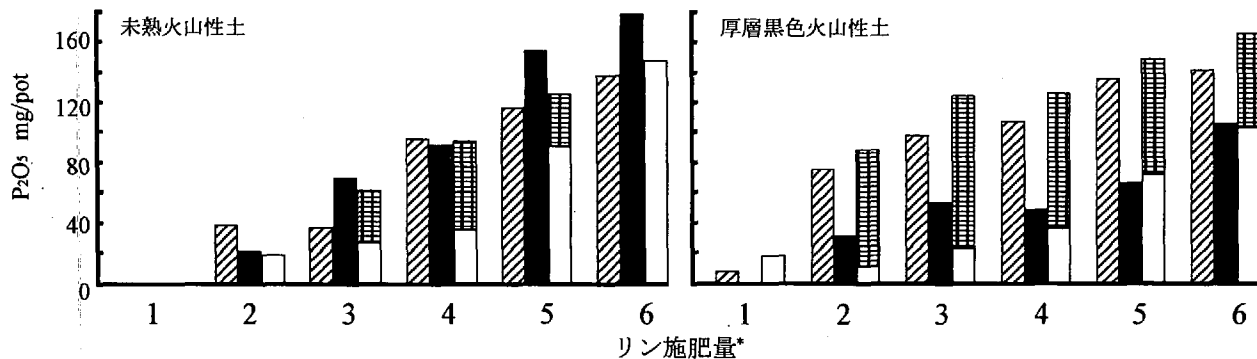


図5-4 チモシーのリン吸収量と各火山性土からのリン減少量

* : リン施肥量は1,2,3,4,5,6の順に各火山性土のリン酸吸収係数の0,1,2,4,6,10%相当量

斜線 : チモシーによるリン吸収量
 黒 : プレイNo.2リン減少量
 白 : Ca型リン減少量
 点線 : Al型リン減少量

熟火山性土よりもカルシウム型リンの減少は少なく、アルミニウム型リンの減少が多く認められた。

以上のことから、両火山性土のチモシーが同じリン吸収量を得るためには未熟火山性土の方が厚層黒色火山性土よりも多量の無機態およびプレイNo.2リンを要することが明らかとなり、また、チモシーはプレイNo.2で抽出されない形態のリンをも給源としている可能性が伺われた。

試験3. 主要火山性土のプレイNo.2リンおよび無機態リン含量とチモシーの生育（現地試験）

未熟火山性土および厚層黒色火山性土に立地するチモシー単一の草地のチモシー1番草における牧草体リン含有率と乾物収量指数との関係を図5-5に示した。このような場合、牧草体リン含有率には有穂茎や全収穫物の分析値ではばらつきが大きいので、伸長茎の分析値を用いることにより解析精度の向上が期待できる⁴⁹⁾。そこで、ここでは牧草体リン含有率に伸長茎の分析値を用いた。また、乾物収量指数は試験地による変動を除去するために、各試験地における最高収量を100とした場合の指数として表示した。厚層黒色火山性土におけるチモシーの乾物収量指数は伸長茎のリン含有率に関係なく、平均で 89.3 ± 2.1 (95%信頼区間)と高い値を示した。これに対し、未熟火山性土の乾物収量指数は伸長茎のリン含有率

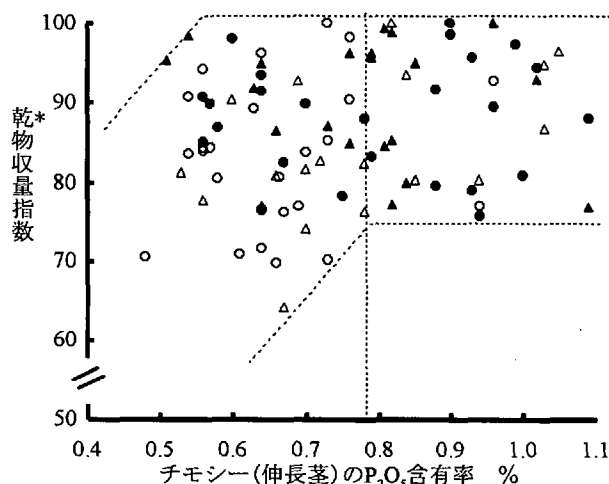


図5-5 チモシー1番草のリン含有率と乾物収量指数(現地試験)

* : 各試験地の最高収量を100とした。

最高収量:

未熟火山性土 ○ 標茶町虹別 802kg/10a, △ 別海町西春別 715kg/10a
 厚層黒色火山性土 ● 浜中町東門朱別 702kg/10a, ▲ 標津町川北 924kg/10a

が0.7~0.8%を下回ると低下する場合が認められた。

未熟火山性土のみで認められた収量低下の原因を検討するために、未熟火山性土の試験区を厚層黒色火山性土と同程度の乾物収量指数を得た区とそれ以下の区に2区分し、両区の収量構成要素を表5-4に示した。両区の区分には厚層黒色火山性土における平均乾物収量指数の95%信頼区間の下限值87.2を用い、乾物収量指数がこれよ

表5-4 未熟火山性土における標準区***および低収区のチモシー1番草における収量構成要素

区 分		早春の 全茎数 (本/m ²)	茎数(本/m ²)			1茎重(g/本)			乾物重(kg/10a)		
			有穂茎	伸長茎	合計	有穂茎	伸長茎	全体	有穂茎	伸長茎	合計
標準区 (n=15)	平均	1621	934	1002	1936	0.67	0.13	0.38	580	133	713
	標準偏差	241	225	325	340	0.23	0.04	0.06	54	55	53
低収区 (n=28)	平均	1517	773	865	1638	0.65	0.14	0.38	482	115	596
	標準偏差	306	189	377	388	0.13	0.04	0.08	53	57	53
t-検定結果		n.s.	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	**

* : 5%水準で有意 ** : 1%水準で有意 *** : 厚層黒色火山性土と同程度の乾物収量を示した区

りも高い場合には標準区、低い場合には低収区とした。これによると、有穂茎数では明らかに低収区が標準区を下回ったが、伸長茎数や1茎重ではいずれも両区に有意な差は認められなかった。すなわち、両区の収量差は有穂茎数の差によるものと判断された。

次に0~5cmの土壌中のブレイNo.2および無機態リン含量とチモシー1番草における伸長茎のリン含有率との関係を図5-6に、チモシー1番草のリン吸収量との関係を

図5-7示した。チモシーのリン含有率および吸収量は、いずれの火山性土でもブレイNo.2および無機態リン含量の増加に伴って増大した。また、同じ牧草体リン含有率および吸収量を得るためには、未熟火山性土の方が厚層黒色火山性土よりも多量のブレイNo.2および無機態リン含量を要した。この傾向は前述のポット試験で得られたものと同様であった。

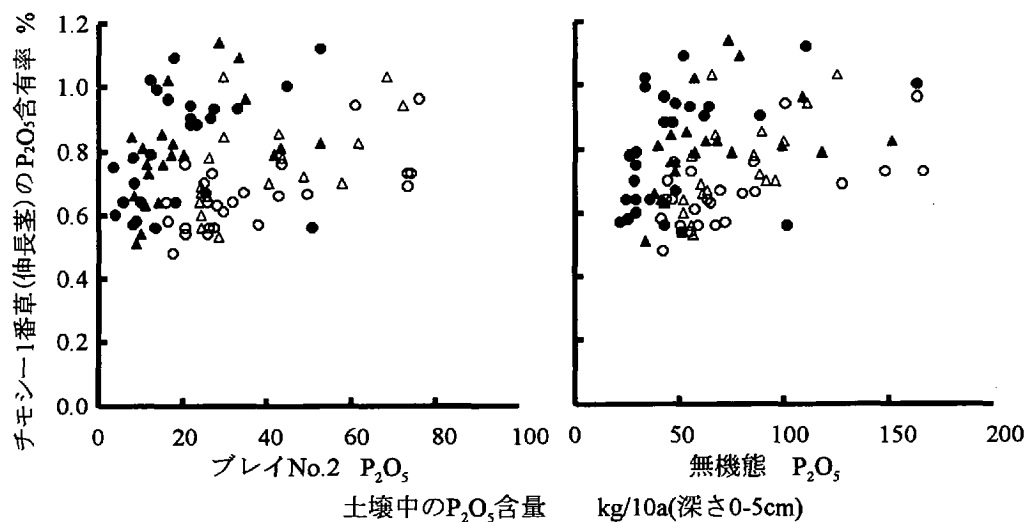


図5-6 10a当たりブレイNo.2および無機態リン含量とチモシー1番草のリン含有率（現地試験）

未熟火山性土 ○ 標茶町虹別, △ 別海町西春別
厚層黒色火山性土 ● 浜中町東円朱別, ▲ 標津町川北

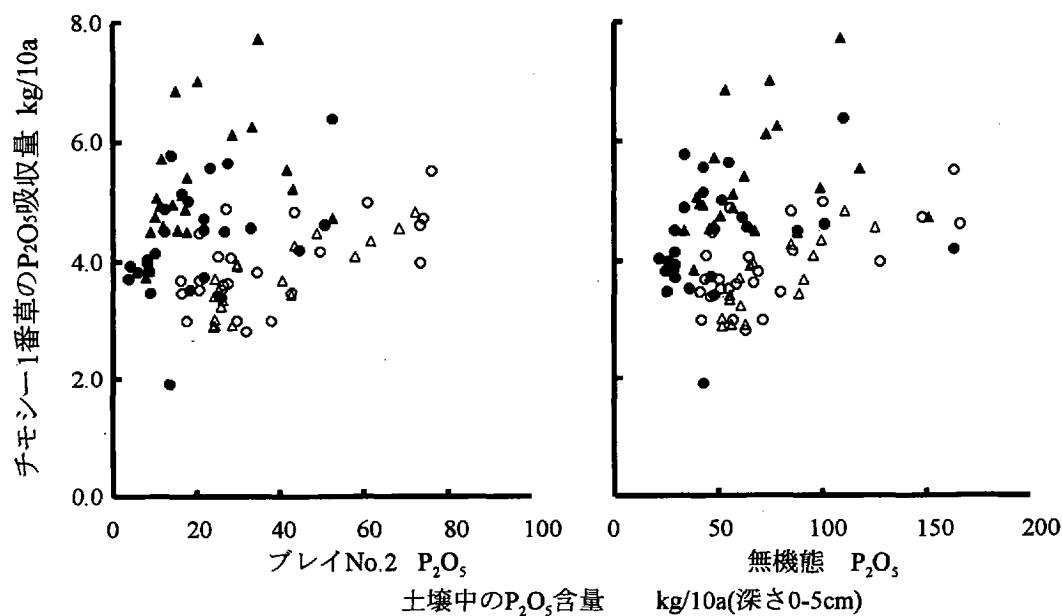


図5-7 10a当たりブレイNo.2および無機態リン含量とチモシー1番草のリン吸収量（現地試験）

未熟火山性土 ○ 標茶町虹別, △ 別海町西春別
厚層黒色火山性土 ● 浜中町東円朱別, ▲ 標津町川北

試験4. 土壌中におけるリンの拡散に及ぼす吸着と体積含水率の影響

カラム解体後における土壌からのリンの回収率はいずれも95%以上で良好であった。回収率の変動は水分調整時における塩溶液添加量の誤差に起因すると推定されたので、土壌中のリンの初期含量 C_0 の値は、第Ⅲ章と同様に、カラムからのリンの回収量から逆算して求めた。また、 C_n は塩溶液添加前の土壌中の全リン含量とした。

こうしてカラムごとに求めた C_0 の値とカラム解体後の土壌中のリン含量 C の分布から、(2.7)および(2.9)式によってカラム内のリン含量分布を計算し、実測値とともに図5-8に示した。カラム内の各位置における相対リン

含量 $(C - C_n) / (C_0 - C_n)$ の計算値 (x) と実測値 (y) の関係をみると、未熟火山性土 $y = 1.045x - 0.0225$ ($r = 0.979^{**}$, $n = 30$)、厚層黒色火山性土 $y = 0.993x + 0.00329$ ($r = 0.959^{**}$, $n = 30$) であり、いずれの火山性土でも両者はほぼ等しいといえた。すなわち、カラムごとに D を一定と仮定した計算によって得られたリン含量分布は、実測値をおおむね良好に再現した。拡散によってリン含量に差の生じた範囲は、70日間静置してもわずかに中心から1~2mmに限られた。このことから、リンの拡散は第Ⅲ章で述べた塩化物イオンに比較してきわめて遅いことが確認された。

両土壌の拡散係数を図5-9に示した。拡散係数の値は

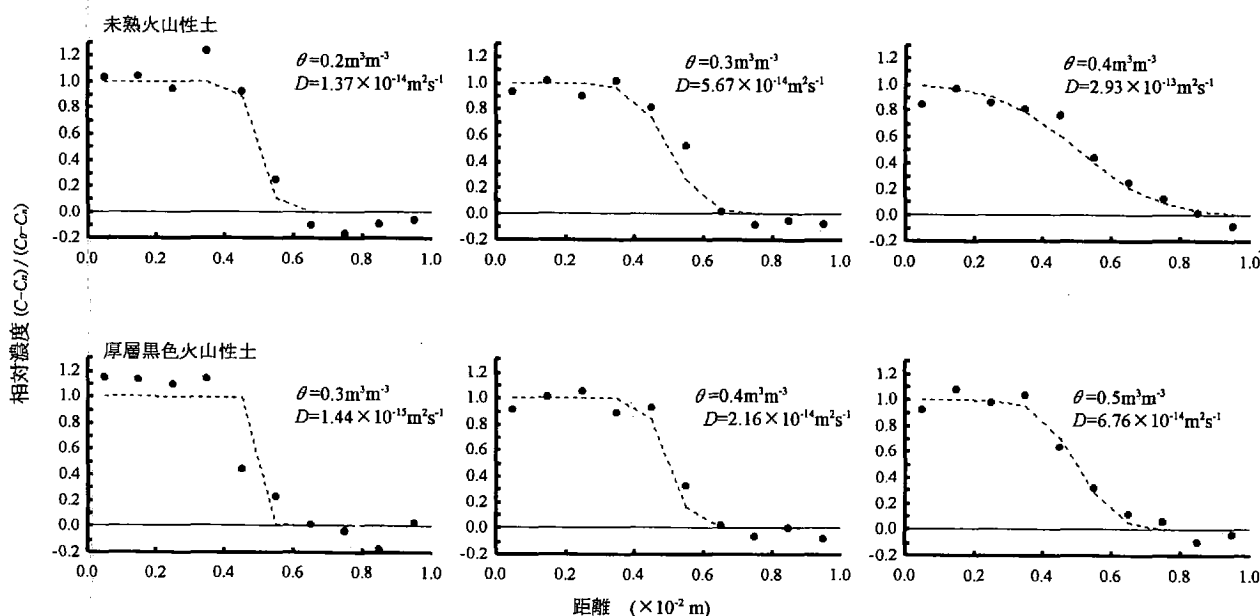


図5-8 カラム内のP含量の分布

$t = 6.048 \times 10^5 \text{ s}$, 添加した NaH_2PO_4 溶液の濃度は 0.10 M

●: 実測値, ---: (2.7)式による計算値

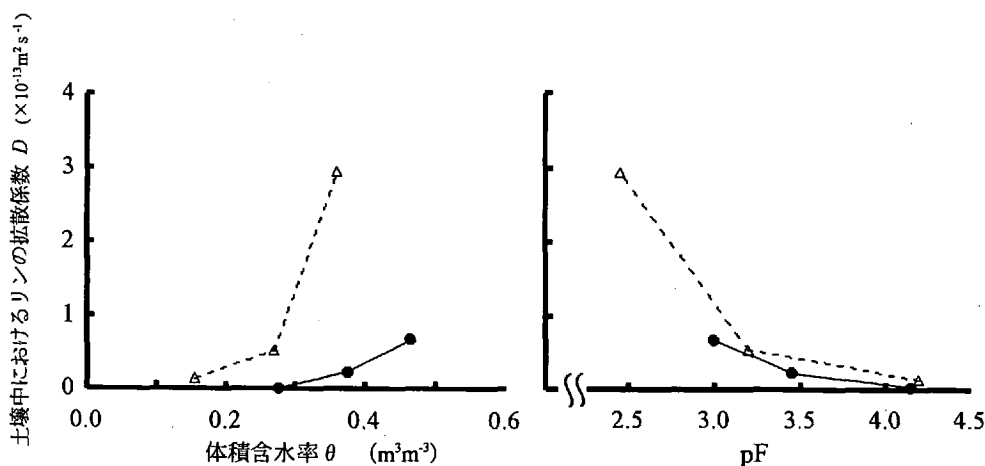


図5-9 土壌の体積含水率およびpFとリンの拡散係数の関係

--△--: 未熟火山性土, —●—: 厚層黒色火山性土

pFは図3-9を用いて体積含水率から推定

主として $10^{-13} \sim 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ の範囲に分布し、第Ⅲ章で示した塩化物イオンの拡散係数の $1/1000 \sim 1/10000$ であった。いずれの火山性土でも、拡散係数は体積含水率の増加とともに増大した。また、体積含水率が同じであれば未熟火山性土の方が厚層黒色火山性土よりも大きい値を示した。さらに、pFが同じ場合でも未熟火山性土の拡散係数は厚層黒色火山性土のそれと同等以上と推定され、塩化物イオンの場合とは傾向を異にした。

試験1で供試した各火山灰を用いて未熟火山性土と厚層黒色火山性土におけるリンの吸着曲線を推定し、図5-10に示した。推定には各火山性土の作土を構成する火山灰、すなわち、未熟火山性土にはKm-2aおよびKm-4a、厚層黒色火山性土にはKm-1f、YaおよびMa-f₁のデータを用いた。x軸の溶液濃度とは、試験1でリンを添加し

て1か月間放置後風乾した火山灰1gに水を50mL加え、1時間振とうした後の溶液中のリン濃度である。また、リン吸着量には無機態リンの合計量を当てた。GUNJIKAKE and WADA⁽⁴⁾によれば、火山灰に対するリンの吸着は溶液濃度とpHによって精度良く推定できることが知られている。しかし、表5-3に示したように、試験1でリン添加後に風乾された供試土壌のpH(H₂O)は4.8~6.3と比較的狭い範囲にあったので、pHを変数に取り込むことはこの場合には適当でないと考えた。そこで、溶液濃度を従属変数、リン吸着量を目的変数として直線回帰を行った。

第Ⅲ章で塩化物イオンの吸着が拡散係数に及ぼす影響を検討したが、これと同様の方法で第Ⅱ章で示した理論に基づいて上記のリンの吸着が拡散係数に及ぼす影響を検討し、表5-5に示した。いずれの火山性土においても吸着

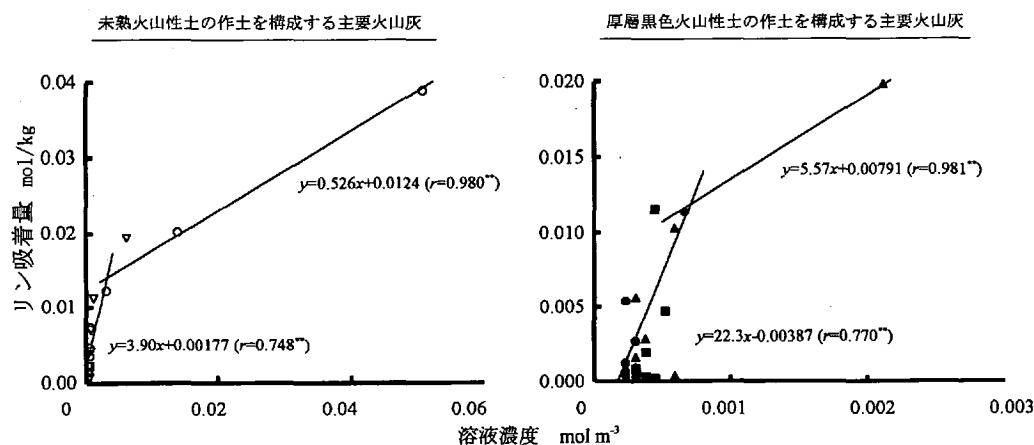


図5-10 溶液濃度とリン吸着量との関係

▽: Km-2a ○: Km-4a ■: Km-1f ▲: 矢白別 ●: Ma-f₁

溶液濃度は土：水=1：50で1時間振とうした後の溶液中P濃度、リン吸着量は土壌中の無機態リン合計量

** 1%水準で有意

表5-5 リンの拡散に及ぼす吸着の影響

設定条件		土壌	かさ密度 ρ Mg m^{-3}	体積含水率 θ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	液相中初期濃度** $\times 10^{-4} \text{mol m}^{-3}$		リン吸着量 $\times 10^{-3} \text{mol kg}^{-1}$		吸着の影響を示す項	
pF	初期含量* mol m^{-3}				C_{e2}	C_{e0}	S_n	S_0	$\frac{1}{1+(\rho/\theta)(S_0-S_n)/(C_{e0}-C_{e2})}$	
	C_e									C_0
1.5	3	5	未熟火山性土	1.14	0.53	2.22	6.72	2.63	4.93	0.000118
	3	5	厚層黒色火山性土	0.70	0.66	3.65	4.93	4.29	7.14	0.000042
	3	10	未熟火山性土	1.14	0.53	2.22	18.00	2.63	8.77	0.000118
	3	10	厚層黒色火山性土	0.70	0.66	3.65	11.50	4.29	14.30	0.000074
	3	20	未熟火山性土	1.14	0.53	2.22	97.20	2.63	17.50	0.000294
	3	20	厚層黒色火山性土	0.70	0.66	3.65	37.10	4.29	28.60	0.000130
2.5	3	5	未熟火山性土	1.14	0.35	2.22	6.72	2.63	4.93	0.000080
	3	5	厚層黒色火山性土	0.70	0.52	3.65	4.93	4.29	7.14	0.000033
	3	10	未熟火山性土	1.14	0.35	2.22	18.00	2.63	8.77	0.000080
	3	10	厚層黒色火山性土	0.70	0.52	3.65	11.50	4.29	14.30	0.000058
	3	20	未熟火山性土	1.14	0.35	2.22	97.20	2.63	17.50	0.000198
	3	20	厚層黒色火山性土	0.70	0.52	3.65	37.10	4.29	28.60	0.000103

*：単位体積土壌中の無機態リン含量。3mol m⁻³は未耕地並、5、10、20mol m⁻³はそれぞれ後述する土壌診断基準値未満、基準値内、基準値以上におおむね対応する。

**：設定条件 C_a および C_0 の値から図5-10の回帰式で得られたリン吸着量を用いて求めた液相中の濃度

の影響によって拡散係数は自由溶液中のその1/1000~1/10000以下になるものと推定された。また、吸着の影響は体積含水率および初期含量の値が小さいほど大きくなる傾向が明らかであった。さらに、第Ⅲ章で観察された根釧地方の土壤中のブレイNo.2リン含量や一般的な土壤水分状態であるpF1.5~2.5の範囲では、厚層黒色火山性土の方が未熟火山性土よりも吸着の影響を強く受けているものと試算できた。

3. 考察

これまで、北海道の草地におけるリンの土壤診断基準値²⁰⁾は、火山性土について一律にブレイNo.2法で20mg/100g以上と設定されていた。しかし、本研究の結果から、これを改めて火山性土ごとに基準値を設定することが必要であると考えられた。

その理由として、草地土壤における有効態リンの評価法に関するものがあげられる。大村ら^{80,81)}は黒色火山性土においてブレイNo.2法による評価量が牧草のリン吸収量によく適合することを明らかにし、これによって牧草生育に対して望ましい土壤中の有効態リン含量の基準を設定した。しかし、本研究で供試した未熟火山性土や厚層黒色火山性土のように、リン酸吸収係数の大きく異なる火山性土で当該評価法による基準が一律に適合するか否かについては未検討であった。すでに、リン酸吸収係数の異なる火山灰に添加されたリンは、その火山灰のリン酸吸収係数が大きいほど、より難溶性のアルミニウム型、鉄型へと形態変化すること^{25,82)}、また、これに伴って0.2M塩酸可溶の有効態リン含量が低下することが知られている⁸³⁾。本試験では有効態リンの評価法としてブレイNo.2法を用いた場合でもこれと同様の傾向の得られることを確認した。一方、チモシーのリン吸収量を評価する場合でも、リン酸吸収係数の大きい厚層黒色火山性土におけるチモシーのリン吸収量は無機態リンの減少量とはほぼ等しかったが、ブレイNo.2リンの減少量よりも明らかに大きかった。このことは、リン酸吸収係数の大きな火山性土では、ブレイNo.2法で抽出されない画分の無機態リンの一部が牧草への給源になっていることを示唆するものである。土壤からの無機態リンの減少量に占めるカルシウム型リンとアルミニウム型リンの割合が未熟火山性土と厚層黒色火山性土で異なった理由については、本試験から明らかにすることはできなかった。同じカルシウム型やアルミニウム型に分画されたリンでも、その形態や吸着エネルギーが火山性土の種類によって異なることや、根から分泌される化学物質の影響なども想像されるが、今後の課題として残された。いずれにしても、火山性土の種類によらずリン肥沃度を正確に評

価するためには、無機態リンをさらに強く抽出する方法が必要となろう。

その他の理由として、牧草へのリンの供給効率に関するものが考えられる。本試験では、図5-3、5-6、5-7のようにチモシーが同じリン吸収量または含有率を示すためには、未熟火山性土の方が厚層黒色火山性土よりも多くの土壤中の無機態リン含量を要した。また、図5-5のように未熟火山性土におけるチモシーのリン含有率の上昇が厚層黒色火山性土よりも乾物重の増加に結びつきにくい傾向のあることも観察された。チモシーの1番草生育については、幼穂形成期までに吸収されたリンが1番草の有穂茎数を増加させ、乾物収量の増大に貢献することが明らかにされている⁵⁰⁾。いま、未熟火山性土では厚層黒色火山性土よりも牧草へのリンの供給効率が劣るという仮説をとれば、未熟火山性土では幼穂形成期までにチモシーに供給されたリンの量が少なく、有穂茎数が十分に確保されなかったために、その後のリン吸収によって収穫期のリン含有率が高くなったにもかかわらず乾物収量の増大がわずかであったという解釈が可能である。また、一定期間中におけるチモシーのリン吸収量が未熟火山性土で劣っていたことも理解できる。土壤から作物へのリン供給は、土壤溶液中のリン濃度がきわめて低いためにマスフローだけでは対応できず、土壤中におけるリンの拡散によるところが大きいとされている^{74,76)}。また、このような場合には、作物の根張りが重要となることが知られている^{38,74)}。

そこで、まず、未熟火山性土と厚層黒色火山性土におけるリンの拡散係数の比較を試みた。従来、粒径の細かい土壤ほど同一のpFにおける土壤水分量が多くなり、また、有効拡散距離が短くなるのでリンの拡散速度が大きくなることが指摘されている⁷⁹⁾。本試験でもすでに第Ⅲ章で塩化物イオンの拡散に及ぼす吸着の影響が検討されている。この場合には、土壤への単位重量当たりの吸着量は明らかに厚層黒色火山性土の方が多かったが、厚層黒色火山性土のかさ密度が小さいので単位体積当たりの吸着量には土壤間差が認められなくなった。その結果、同一pFにおける塩化物イオンの拡散係数は粒径が細かく保水性の大きい厚層黒色火山性土の方が未熟火山性土よりも大きいと評価された。しかし、図5-9から、火山性土におけるリンの拡散の場合には、この知見は必ずしも当てはまらないものと推察された。土壤中におけるリンの拡散係数は吸着の影響によって自由溶液中の拡散係数の1/1000~1/10000に減少するという試算結果が得られ、土壤中のリンの拡散に及ぼす吸着の影響はきわめて大きいものと考えられた。自由溶液中におけるリンの

拡散係数が $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のオーダーである^{12,75)}とすれば、土壌中におけるリンの拡散係数は $10^{-13} \sim 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ のオーダーと計算され、実験値と良好に対応する。図5-10に示したとおり、厚層黒色火山性土におけるリンの吸着量は未熟火山性土よりも明らかに大きかった。この影響はかさ密度や保水性の違いによっても相殺しきれないほど大きく、その結果、図5-9では同一pFの場合でも未熟火山性土におけるリンの拡散係数が厚層黒色火山性土よりも大きな値を示したものと理解できた。吸着の影響は土壌の体積含水率や土壌中の初期含量によっても変化するが、表5-5から、根釧地方における通常の土壌水分状態や施肥管理条件では未熟火山性土と厚層黒色火山性土に認められたリンの拡散係数の大小関係が変化することはないと思われる。すなわち、厚層黒色火山性土では未熟火山性土よりも土壌中におけるリンの拡散速度が速いため牧草根へのリンの供給が効率的に行われるという仮説は成立しなかった。

本試験ではチモシーの根はりに対する検討が十分に行えなかった。試験2のポット試験では、リン施肥量の少ない区で厚層黒色火山性土におけるチモシーの根部乾物重が未熟火山性土のそれを上回る傾向が認められたので、リンの拡散係数の違いを越えて厚層黒色火山性土におけるチモシーのリン吸収がさかんに行われたと考えることもできる。今後は現地においても根張りに関するデータの蓄積を行い、土壌の理化学性の違いが牧草の根はりに及ぼす影響や牧草根と土壌との相互作用などを圃場レベルで明らかにしていくことを通じて、牧草へのリンの供給に関する厚層黒色火山性土の有利性の要因を検討していくことが重要となろう。

以上のように、根釧地方の火山性土において草地のリン肥沃度を評価する場合、現行のブレイNo.2法による

分析値が同じ場合には、厚層黒色火山性土の方が未熟火山性土よりもリン肥沃度が高いと判定すべきであることが判明し、その要因解析の過程でブレイNo.2法よりもさらに強く無機態リンを抽出する評価法の必要性、および、土壌から牧草根へのリンの供給に関する厚層黒色火山性土の有利性を根系調査などを活用して解析する必要性が明らかとなった。しかし、現時点において、土壌診断のための分析法として正確さとともに簡易、迅速であることが要求されるという点では、ブレイNo.2法が依然として最適であると考えられる。したがって、より適切な有効態リンの評価法が開発されるまでは、有効態リンの評価にはブレイNo.2法を用い、リン酸吸収係数によって土壌診断基準値を別々に設定することが現実的である。また、その際には、未熟火山性土の土壌診断基準値を厚層黒色火山性土よりも高く設定すべきである。

第2節 草地におけるリンの土壌診断基準値とそれに基づく施肥対応

前節の結果にしたがって、草地におけるリンの土壌診断基準値をブレイNo.2法を用いて火山性土ごとに設定するとともに、それに基づく施肥対応を明らかにする^{85,87,89)}。

1. 実験方法

試験1. リンの土壌診断基準値とそれに基づくリン施肥量

未熟火山性土、黒色火山性土および厚層黒色火山性土に立地するチモシー・アカクロバ・シロクロバ混播草地およびチモシー・シロクロバ混播草地を対象に、1982年から1987年の期間中に単年度または複数年にわたり、合計33のリン肥沃度の異なる採草地においてリンの用量試験を行った。供試草地の概況を表5-6に示した。

表5-6 供試草地の概況

火山性土	No.	試験場所	造成年	試験実施年	リン施肥量 kg/10a	備 考
未熟火山性土	1-4	標茶町虹別	1981	1982-1984	0-16	*造成時 P_2O_5 0,20,40,80kg/10aを0-15cmに混和
	5-7	別海町西春別	1980	1985	0-15	早春 P_2O_5 0,4,9kg/10aを表面施肥
黒色火山性土	1-5	中標津町桜ヶ丘	1982	1982-1984	0-16	*造成時 P_2O_5 0,20,40,80,160kg/10aを0-15cmに混和
	6-10	別海町上春別	1982	1982-1984	8	*造成時 P_2O_5 0,20,40,80,160kg/10aを0-15cmに混和
	11	中標津町	1980	1985	0-15	
	12-14	鶴居村下雪裡	1979	1985	0-15	早春 P_2O_5 0,4,9kg/10aを表面施肥
厚層黒色火山性土	1-5	標津町茶志骨	1981	1982-1984	0-16	*造成時 P_2O_5 0,20,40,80,160kg/10aを0-15cmに混和
	6-8	標津町茶志骨	1980	1985	0-15	早春 P_2O_5 0,4,9kg/10aを表面施肥
	9	標津町茶志骨	1981	1985	0-15	
	10	標津町川北	1982	1987	0-15	
	11	浜中町姉別	1984	1987	0-15	
	12	浜中町姉別	1986	1987	0-15	

*：いずれの草地も播種時には表層に20kg/10aの P_2O_5 を施用している。

表5-7 リン用量試験における試験処理の区分

処理	(P ₂ O ₅ kg/10a)	
	1982-1985	1985, 1987
1 無施肥	0	0
2 減肥	4	5
3 標準施肥	8	7.5, 10
4 増肥	12, 16	12.5, 15

リン施肥量は年度および地点によって異なったので、これらを表5-7のように、無施肥、減肥、標準施肥、増肥の4処理にまとめた。リンは早春全量、共通施肥は北海道施肥標準³⁰⁾に準じ、窒素8kg/10a、カリウム18~22kg/10aを早春および1番草刈取後に均等分施、マグネシウム4kg/10aを早春全量施肥した。刈取りは6月下旬と8月下旬の2回、いずれもチモシーの出穂期に行い、生草収量および牧草体リン含有率を調査した。土壌は早春施肥前（前年秋を含む）および各番草刈取後に採取し、ブレイNo.2リン含量を測定した。

試験2. リン肥沃度の高い草地におけるリンの減肥可能年限

試験1の供試草地からリン肥沃度の高い草地（各火山性土のNo.4草地）を選定し、リンの用量試験を行った。

リン用量は標準施肥区8kg/10a、減肥区4kg/10aとし、早春に全量施肥した。共通施肥は試験1と同様である。試験は1983年から1985年まで3年間継続し、草種構成、乾物収量、草種構成、牧草体リン含有率および0~5cmの土壌中のブレイNo.2リン含量を調査した。

2. 実験結果

試験1. リンの土壌診断基準値とそれに基づくリン施肥量

1) 土壌中のブレイNo.2リン含量と生草収量との関係

各火山性土に対応したリンの土壌診断基準値を設定するために、早春施肥前（前年秋を含む）における土壌中のブレイNo.2リン含量と各試験処理条件で栽培した場合の年間生草収量との関係を図5-11に示した。年間生草収量は、収量水準の年次による変動の影響を除去するために、各処理ごとに各年度内における最高収量を100とした場合の指数として表示した。その時の最高収量の実数は表5-8に示した通りである。生草収量のばらつきが大きかったので、ブレイNo.2リン含量が同程度の場合には、高い方の生草収量を用いて図5-11中に示した回帰式を求めた。なお、回帰式への当てはめには、

$$y = a \ln(x) + b$$

を用いた⁴⁵⁾。

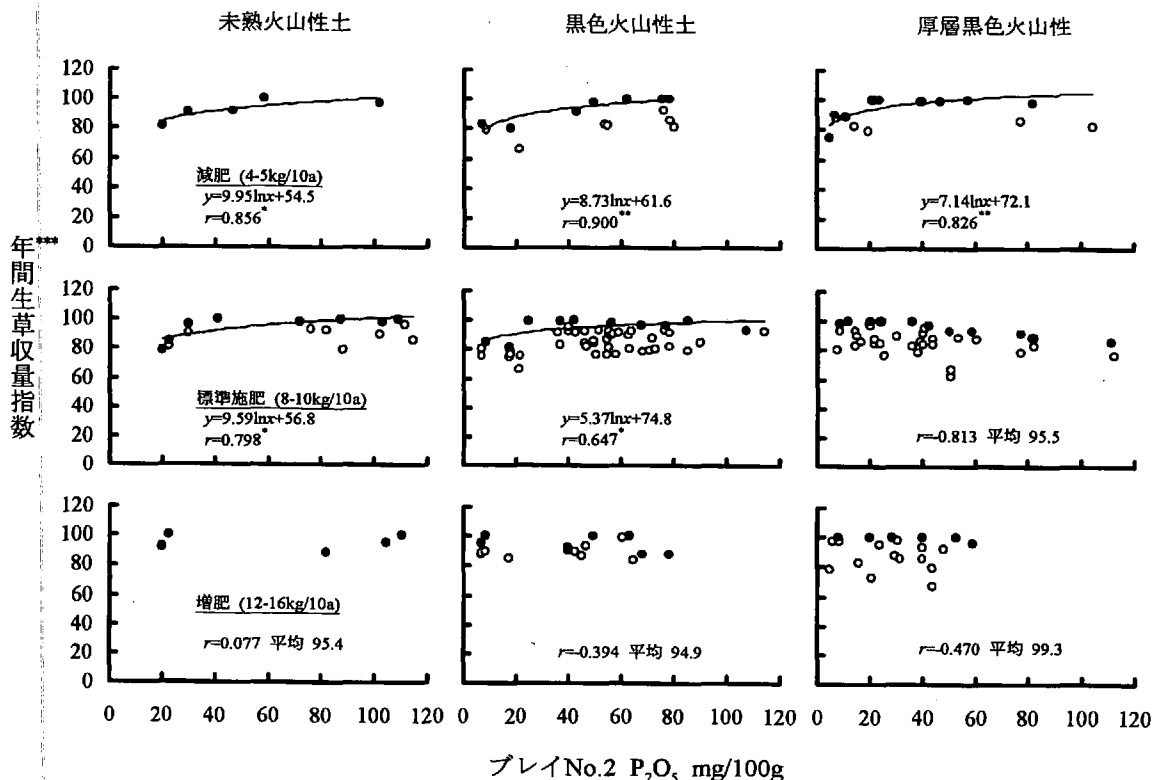


図5-11 主要火山性土におけるブレイNo.2リン含量と年間生草収量指数（現地試験）

* : 5%水準で有意 ** : 1%水準で有意 *** : 各年度、各草地における最高収量を100とした。
●を計算に使用した。

表5-8 各年度の最高生草収量

(kg/10a)

火山性土	リン施肥量*	1982	1983	1984	1985	1987
未熟火山性土	無施肥	—	—	4470	5650	—
	減肥	—	—	4970	5480	—
	標準施肥	6260	—	5410	5930	—
	増肥	—	—	4920	5060	—
黒色火山性土	無施肥	—	5960	5250	4780	—
	減肥	—	6290	5760	5520	—
	標準施肥	—	6680	6200	5800	—
	増肥	—	5750	5960	5160	—
厚層黒色火山性土	無施肥	—	4350	5780	5500	5710
	減肥	—	4580	5620	5700	6050
	標準施肥	7563	5300	5750	6060	5870
	増肥	—	4500	5700	5750	5730

*：具体的な施肥量は表5-6に記載

ここで、最高収量の90または95%以上の収量が得られるブレインNo.2リン含量の領域を充足領域に設定した。そして、リンの土壌診断基準値は施肥標準量の施肥条件で十分な収量が確保できるブレインNo.2リン含量とした。したがって、当基準値は、その下限値を標準施肥条件における充足領域の最低値とし、上限値を減肥条件における充足領域の最低値とした。たとえば、黒色火山性土の場合、最高収量の95%以上の収量が得られるブレインNo.2リン含量を充足領域とすると、減肥条件における充足領域は50mg/100g以上、また、標準施肥条件では40mg/100gであるから、リンの土壌診断基準値はブレインNo.2リンで40～50mg/100gと設定できる。

同様に、充足領域における収量を最高収量の90%以上として場合の基準値と、95%以上とした場合の基準値を、各火山性土について計算し表5-9に示した。両者の値は未熟火山性土ではそれぞれ30～40および50～60mg/100g、黒色火山性土では20～30および40～50mg/100gであった。厚層黒色火山性土ではそれぞれ10および30mg/100gが基準値の上限値と設定された。しかし、標準施肥条件でブレインNo.2リン含量の低い領域における収量低下が認められなかったため、基準値の下限は設定できなかった。なお、診断値が基準値よりも低い場合には12～16kg/10a、高い場合には4～5kg/10aのリン施肥で最高収量の90～95%の収量が得られることは図5-10から明

らかである。

2) 各火山性土のブレインNo.2リン含量と牧草のリン含有率

収穫した牧草は乳牛の粗飼料であることを想定しているので、ここで設定するリンの土壌診断基準値とそれに基づくリン施肥量は、収量ばかりでなく、収穫された牧草のリン含有率についても乳牛の要求量を満足させるものであることが望ましい。そこで、ブレインNo.2リン含量と1番草収穫物全体の牧草体リン含有率との関係を調査した。なお、一部の試験区では生草収量のみの調査が行われたため、生草収量と牧草体リン含有率の調査点数は異なっている。未熟火山性土および黒色火山性土ではブレインNo.2リン含量がそれぞれ30～60および20～50mg/100gの範囲にあれば、標準施肥条件で牧草体リン含有率はそれぞれ $0.71 \pm 0.03\%$ および $0.68 \pm 0.03\%$ （いずれも95%信頼区間）の値を示し、乳牛の飼料中に必要とされる P_2O_5 として0.7%^(32,72)をほぼ満足していた。一方、収量との関係では土壌診断基準値の下限を設定できなかった厚層黒色火山性土について、ブレインNo.2リン含量と1番草収穫物全体の牧草体リン含有率の関係を図5-12に示した。これによると、ブレインNo.2リン含量の低下に伴う牧草体リン含有率の低下は、標準施肥条件では認められなかったが、減肥条件では10mg/100g以下でやや認められた。

表5-9 施肥標準量の施肥条件で十分な生草収量の得られるブレインNo.2リン含量 (P₂O₅mg/100g)

算定基準	未熟火山性土	黒色火山性土	厚層黒色火山性土
最高収量の95%	50-60	40-50	30以下
最高収量の90%	30-40	20-30	10以下

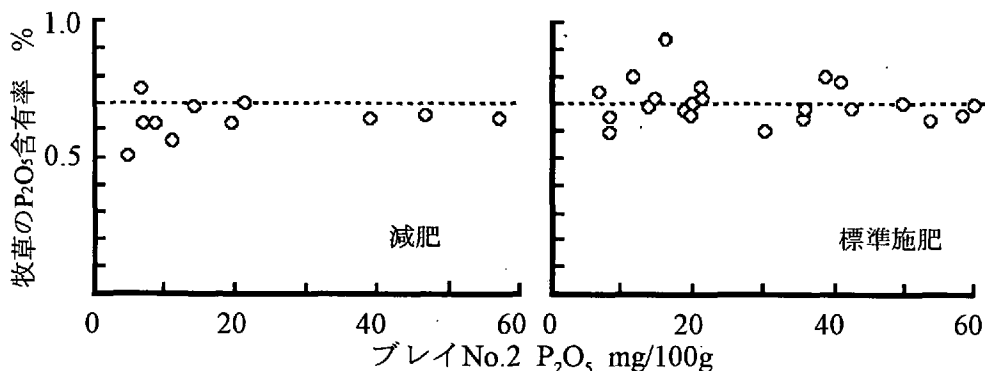


図5-12 厚層黒色火山性土におけるプレイNo2リン含量と牧草体リン含有率

試験2. リン肥沃度の高い草地におけるリンの減肥可能年限

試験1の結果によれば、土壤中のプレイNo.2リン含量が土壌診断基準値よりも高い場合のリン施肥量は年間4～5kg/10aまで減肥できる。ここでは、その減肥可能年限について検討した。図5-13にはプレイNo.2リン含量の高かった草地におけるリン減肥の影響を示した。その結果、リン4kg/10a施肥区と8kg/10a施肥区における1番草乾物収量、リン含有率、マメ科率を比較すると、3年間いずれの火山性土においてもリンの減肥による明らかな

低下が認められることはなかった。これに対し、土壤中のプレイNo.2リン含量は8kg/10a施肥区よりも4kg/10a施肥区で低い値を示す場合が多かった。以上のことから、リン肥沃度の高い草地では、少なくとも3年間はリンの減肥が可能と考えられた。

3. 考察

前節の結果に基づいて、まず、各火山性土に対応したリンの土壌診断基準値を設定する。その際、当基準値は北海道施肥標準^{30,31)}の施肥条件で、マメ科牧草の混生割合を維持しつつ、十分な収量および牧草体リン含有率が

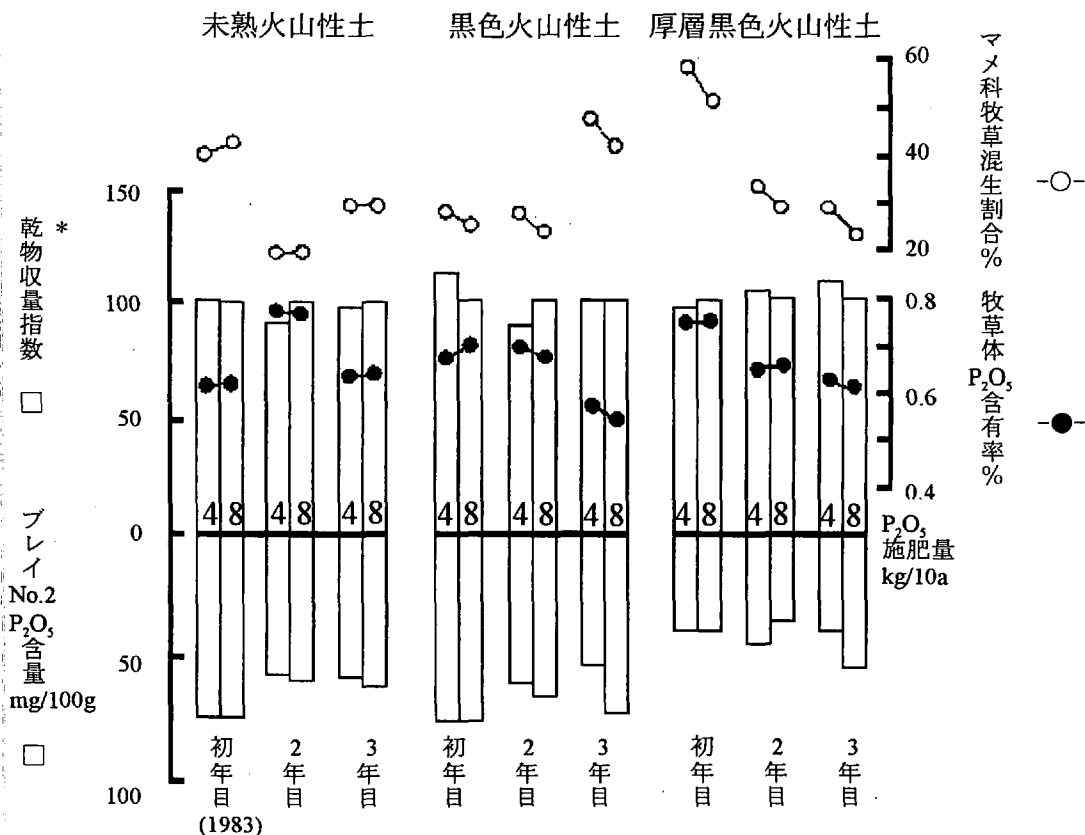


図5-13 リン肥沃度の高い草地におけるリン減肥の影響

* : 各年度の8kg/10a施肥区を100とした。

得られる土壌中のブレイNo.2リン含量であると考えた。

1982年から1987年までの期間中に単年度または複数年にわたり、合計33、延べ71の草地で行われたリンの用量試験の結果から、黒色火山性土では早春施肥前または前年秋における土壌中のブレイNo.2リン含量が20~50mg/100gの範囲にあれば、標準施肥条件で90~95の生草収量指数と0.7%前後の牧草体リン含有率の得られることが明らかとなった。これにより、黒色火山性土におけるリンの土壌診断基準値を20~50mg/100gと設定した。この値は同じ黒色火山性土の条件で設定された大村・赤城の結果³⁰⁾とほぼ一致する。同様に、未熟火山性土の土壌診断基準値は30~60mg/100gが適当と考えられた。一方、厚層黒色火山性土の場合、生草収量指数の値から、土壌診断基準値の上限値は30mg/100gが妥当と思われた。しかし、標準施肥条件におけるブレイNo.2リン含量の低下に伴う収量低下が明瞭でなく、収量の反応からは下限値の設定ができなかった。そこで、本試験の減肥条件でブレイNo.2リン含量が10mg/100g以下の場合に牧草体リン含有率が低下したこと、および、関口ら³⁰⁾によって、リン含量3.6mg/100gの草地で牧草収量およびリン吸収量に明らかな施肥反応が確認されていることから、下限値を10mg/100g程度に設定すれば安全であろうと判断した。こうして、厚層黒色火山性土の土壌診断基準値は10~30mg/100gと設定された。

以上のように、各火山性土に対応したリンの土壌診断基準値は未熟火山性土30~60mg/100g、黒色火山性土20~50mg/100g、厚層黒色火山性土10~30mg/100gと設定できた。前節では、未熟火山性土の土壌診断基準値を厚層黒色火山性土よりも高く設定することが合理的であるとの結論を得たが、その結論は多くの現地試験を通じて得られた本試験結果によって良好に支持された。

次に、土壌診断に基づく施肥対応について述べる。土壌中のブレイNo.2リン含量が当基準値内にある場合には、前述の土壌診断基準値の設定方法から考えて、北海道施肥標準^{30,31)}に相当する年間8~10kg/10aのリン施肥量が適当である。また、分析値が当基準値よりも低い場合には、12~16kg/10aのリン施肥量が90~95の生草収量指数を確保するために必要であった。一方、診断値が基準値よりも高い場合には4~5kg/10aのリン施肥で90~95の生草収量指数を確保できた。この場合の減肥可能年限を検討した結果、4kg/10a施肥区の収量、マメ科牧草混生割合および牧草体リン含有率は、少なくとも3年間、8kg/10a施肥区と同等に維持された。したがって、リンに関しては3年に1回程度の土壌診断を行い、土壌のリン肥沃度に対応した施肥を行うことにより、良質牧草の安

定的な確保が可能となろう。

なお、リンの肥効は土壌の酸性化とともに低下することが知られている³²⁾。本試験は土壌のpHが土壌診断基準値³⁰⁾である5.5~6.5の範囲にあることを想定している。このため、これを逸脱する草地に対しては、石灰質資材のどの施用によって土壌改良を行った上で上記の施肥対応を行うことが前提である。

第Ⅵ章 カリウム肥沃度に対応したカリウム施肥量

第1節 主要火山性土におけるカリウム肥沃度の評価

草地土壌中の有効態カリウムを評価する方法として、交換性カリウムが最も一般的に使用されている。本節では、火山性土のカリウム肥沃度を交換性カリウムで評価することの妥当性を確認し、圃場試験の解析を行うための基礎試験を行った^(85,86)。

1. 実験方法

供試土壌として、未熟火山性土は標茶町虹別、黑色火山性土は別海町上春別、厚層黑色火山性土は標津町川北の各草地から0~15cmの作土を採取した。表6-1には供試土壌の化学性を示した。

これらの火山性土はかさ密度が大きく異なるので、容積が一定となるようにa/5000ワグネルポットに充填した。このため、ポット当たりの乾土重量は未熟火山性土

で2.8kg、黑色火山性土で2.2kg、厚層黑色火山性土では1.8kgであった。カリウム施肥量は乾土100g当たりK₂Oとして0、2.5、5、10、15、25mg相当量の6段階とし、ポットに土壌を充填する際全層に混和した。1985年5月14日、前年に造成した草地からチモシー「ノサップ」を株ごと掘り取り、前述の試験方法に従ってポット当たり10本立てとした後、共通肥料として窒素およびリン酸をN、P₂O₅としてポット当たり0.5gずつ表面施肥した。なお、窒素は1番草刈取り後さらに同量を追肥した。

2. 実験結果

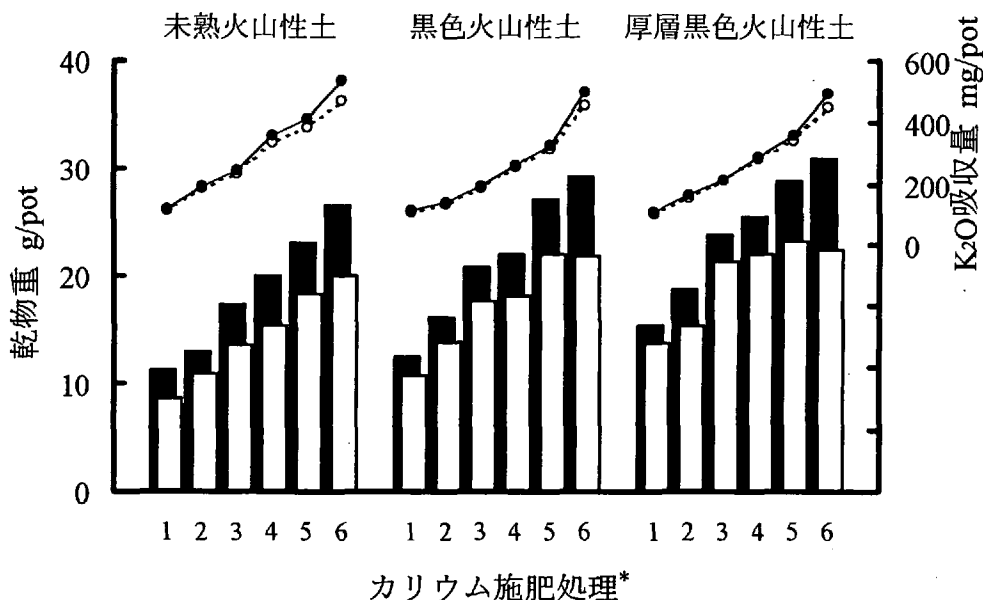
1)カリウム施肥量とチモシーの乾物重およびカリウム吸収量

図6-1にカリウム施肥量とチモシーの乾物重およびカリウム吸収量の関係を示した。いずれのカリウム施肥量においても乾物重は厚層黑色火山性土で最も高く、黑色

表6-1 供試土壌の化学性

土 壌	かさ密度 (g/cm ³)	pH (H ₂ O)	CEC* (me/100g)	交換性塩基(mg/100g)			リン酸 吸収係数 P ₂ O ₅ mg/100g
				K ₂ O	CaO	MgO	
未熟火山性土	0.79	5.8	4.7	2.2	18	1.5	755
黑色火山性土	0.60	6.4	15.6	2.9	223	8.3	1400
厚層黑色火山性土	0.50	5.0	23.8	5.9	74	4.8	1850

* : ピーチ法¹¹⁾による



* : カリウム施肥量は1~6の順に土壌100g当たり0,2.5,5,10,15,25mg相当量

図6-1 カリウム施肥量とチモシーの乾物重およびカリウム吸収量との関係

□ : 各番草における茎葉部合計の乾物重、 ○ : 同 カリウム吸収量
■ : 各番草における茎葉部および根部合計の乾物重、 ● : 同 カリウム吸収量

火山性土がこれにつぎ、未熟火山性土で低い傾向を示した。この傾向は根部まで含めた全体の乾物重で特に明らかであったが、カリウム吸収量では判然としなかった。カリウム施肥によってチモシーの乾物重およびカリウム吸収量は直線的に増大した。黒色火山性土および厚層黒色火山性土では、カリウム施肥による茎葉部乾物重の増大に頭打ちが認められたが、根部を含めると判然としなくなった。カリウム吸収量の頭打ちはいずれの火山性土でも判然としなかった。

2) チモシーの栽培前後における土壌中のカリウム含量

チモシーの栽培前後における土壌中のカリウム含量を表6-2に示した。栽培の前後にかかわらず、交換性および熱硝酸可溶性カリウム¹³含量はカリウムの施肥によって明らかに高まっていた。しかし、後者から前者を差引いた弱固定態カリウム¹³含量ではカリウム施肥による増大が明らかでなく、熱硝酸可溶性カリウムの増分は交換性カリウムのそれに由来するものと判断された。チモシーの栽培前における交換性カリウム含量はいずれのカリウム施肥量においても厚層黒色火山性土で最も高く、黒色火山性土がこれにつぎ、未熟火山性土では低かった。しかし、弱固定態カリウム含量ではこれと反対の傾向を示したため、両者の和である熱硝酸可溶性カリウム含量では土壌間差が判然としなかった。チモシーの栽培後にお

ける交換性カリウム含量は栽培前に比較して明らかに低下した。熱硝酸可溶性カリウム含量も栽培前に比較して明らかに低下したが、栽培前後における弱固定態カリウム含量の変化はほとんど認められなかったことから、土壌からのカリウムの減少分は交換性カリウムのそれに由来するものと判断された。

3) 土壌中の交換性カリウム含量とチモシーのカリウム吸収量の関係

図6-2にチモシー栽培前における土壌中の交換性および熱硝酸可溶性カリウム含量とチモシーの茎葉部における各番草合計のカリウム吸収量との関係を示した。土壌中のカリウム含量とチモシーのカリウム吸収量との対応関係はいずれの場合も良好であった。このうち最も対応関係が良好であったのは土壌中のカリウム含量の指標として単位体積当たりの交換性カリウム含量を用いた場合であった。すなわち、単位体積当たりの土壌中に同じ量の交換性カリウムがあれば、チモシーのカリウム吸収量はいずれの火山性土においても同程度になるということができた。熱硝酸可溶性カリウム含量では、牧草に対する有効性の低い弱固定態カリウムまで評価されてしまうので、単位体積当たりの交換性カリウム含量を用いた場合ほど良好な対応関係は得られなかった。

表6-2 チモシーの栽培前後における土壌中のカリウム含量 (K₂Omg/100g)

土 壤	カリウム 施肥量	栽培前			栽培後		
		交換性 (A)	熱硝酸 可溶性 (B)	弱固定態 (B-A)	交換性 (A)	熱硝酸 可溶性 (B)	弱固定態 (B-A)
未 熟 火山性土	0.0	2.2	9.3	7.1	1.4	8.3	6.9
	2.5	3.8	10.7	6.9	1.3	9.1	7.8
	5.0	5.7	13.2	7.5	1.4	8.7	7.3
	10.0	11.1	17.8	6.7	2.2	9.4	7.2
	15.0	15.4	23.6	8.2	3.0	10.8	7.8
	25.0	24.7	32.4	7.7	9.8	18.4	8.6
黒 色 火山性土	0.0	2.9	8.4	5.5	1.9	7.0	5.1
	2.5	4.7	10.3	5.6	1.5	7.2	5.7
	5.0	6.5	12.7	6.2	1.6	7.9	6.3
	10.0	11.8	17.8	6.0	1.9	7.5	5.6
	15.0	15.3	21.3	6.0	2.1	8.2	6.1
	25.0	25.3	31.6	6.3	3.5	9.5	6.0
厚層黒色 火山性土	0.0	5.9	10.1	4.2	2.1	6.2	4.1
	2.5	8.2	12.7	4.5	2.6	6.8	4.2
	5.0	10.2	15.1	4.9	2.4	6.4	4.0
	10.0	15.1	19.2	4.1	2.5	6.3	3.8
	15.0	19.9	24.0	4.1	2.7	6.8	4.1
	25.0	28.2	32.2	4.0	5.0	9.1	4.1

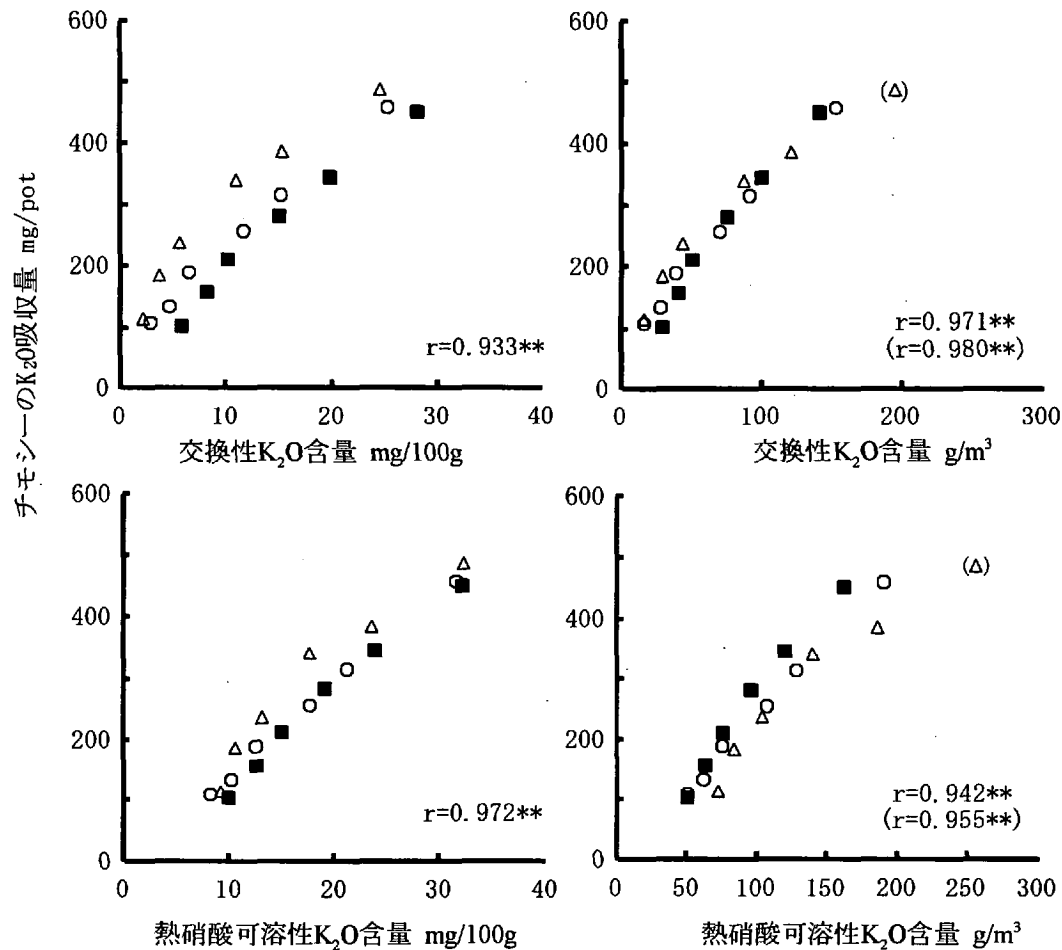


図6-2 チモシーの栽培前における土壌中のカリウム含量とチモシーのカリウム吸収量との関係
△未熟火山性土 ○黒色火山性土 ■厚層黒色火山性土
() 内の相関係数は (△) を除いた場合の値

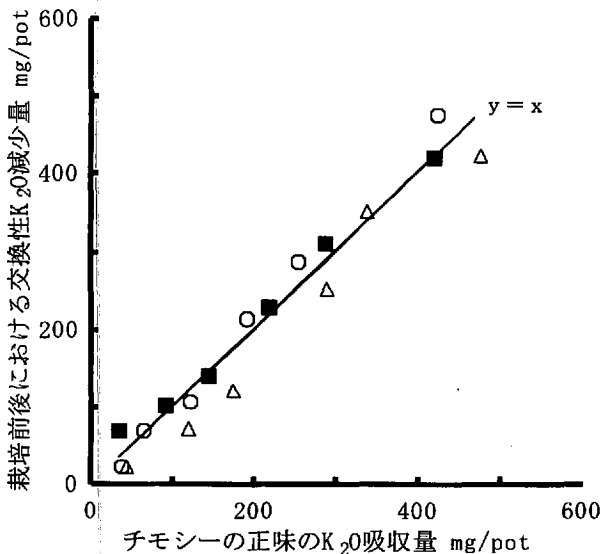


図6-3 チモシーのカリウム吸収量とチモシーの栽培前後における交換性カリウム減少量との関係
△未熟火山性土 ○黒色火山性土 ■厚層黒色火山性土

4)チモシーのカリウム吸収量と土壌からの交換性カリウム減少量

表6-2に示したチモシー栽培前における交換性カリウム含量から栽培後の値を差引いて、交換性カリウム減少量を求めた。また、チモシーの根部まで含めた全体のカリウム吸収量からポット移植時におけるチモシーのカリウム含有量を差引いて正味のカリウム吸収量を求めた。両者の値は図6-3に示したように火山性土の種類に関係なくほぼ等しかった。

3. 考察

現在、草地の土壌診断では、交換性カリウムによってカリウム肥沃度を評価している³⁾。適切な肥沃度の評価法としての必要条件は、土壌中の含量と牧草の吸収量との間に高い相関関係が得られることである。また、その相関関係が土壌の種類にかかわらず保たれること、すなわち、いずれの土壌においても、土壌中の含量が同じであれば牧草の吸収量も同程度になることが望ましい。このような観点に基づき、草地土壌のカリウム肥沃度を交

換性カリウムで評価することの妥当性を、交換性カリウムよりもさらに強い抽出法である熱硝酸可溶性カリウムとの比較によって確認した。

本試験では、チモシー栽培後における土壌からのカリウムの減少分は交換性カリウムのそれに由来するものと判断され、その量はいずれの火山性土においてもチモシーのカリウム吸収量に等しかった。このことから、本試験で供試した火山性土では、交換性カリウムが牧草に対する主要な給源であると考えられる。同様の結果は、原田・篠原¹⁾、早川・橋本²⁾によっても報告されている。

交換性カリウム、熱硝酸可溶性カリウムのいずれの評価法においても、チモシー栽培前における土壌中のカリウム含量とチモシーのカリウム吸収量と間には高い相関関係が認められた。とりわけ、交換性カリウム含量を単位体積当たりの量とした場合の対応関係はきわめて良好であった。このことは、チモシーのカリウム吸収が一定土層内における交換性カリウムの量に依存することを示唆するものと考えられた。作物のカリウム吸収は、根の代謝活性と関連した選択吸収のため、土壌中におけるカリウムの結合状態よりも、根圏域に存在する有効態カリウムの量に左右されることが指摘されている^{3,4)}が、本試験でもこのことが支持される結果となった。一方、熱硝酸可溶性カリウム含量とチモシーのカリウム吸収量との間にも高い相関関係が認められた。しかし、熱硝酸可溶性カリウムを各火山性土共通の評価法とする場合、粒径が粗く未風化な火山灰からなる未熟火山性土は牧草に対する有効性の低い弱固定態カリウムに比較的富むので、未熟火山性土のチモシーに対するカリウム供給力が過大

評価される可能性が高い。

以上のことから、草地土壌のカリウム肥沃度は、一定土層内における交換性カリウムの量によって評価することが適当であると考えられた。

第2節 主要火山性土のカリウム肥沃度に対応したカリウム施肥量

前節では火山性土のカリウム肥沃度を交換性カリウムで評価することの妥当性が確認された。ここでは、各火山性土について土壌中の交換性カリウム含量に対応したカリウム施肥量を検討するために、1982年から1985年まで4年間にわたり、カリウム肥沃度の異なるチモシー・アカクロバ・シロクロバ混播草地を対象にカリウムの用量試験を行った^{65,69)}。

1. 実験方法

表6-3に供試草地の概要を示した。カリウムの施肥量は0～48kg/10aで各草地における土壌中の交換性カリウム含量に応じて4～6段階とし、早春および1番草刈取り後に均等に分施した。他の施肥成分は北海道施肥標準³⁰⁾に準じ、10a当たり窒素8kgを均等分施、リン8または10kg、マグネシウム4kgを早春に全量施肥した。収量、草種構成および牧草体カリウム含量の調査は既述の通りとした。施肥前および各番草の刈取り後には0～5cmおよび5～15cmの土壌を採取し、交換性カリウム含量を定量した。これらの分析値から、土壌からの年間カリウム減少量 K_d kg/10aおよび牧草への年間カリウム供給量 K_s kg/10aを次のように算出した。

表6-3 供試草地の概要

土壌区分	草 地 区 分	造成年	試験年次	交換性 K_2O 含量* K_2O mg/100g		カリウム施肥量** K_2O kg/10a	備 考	
				0- 5cm	5-15cm			
未 熟 火山性土	A	1981	1985	10.3	5.3	0, 5, 22, 27.5, 33	前年秋堆厩肥 0t/10a	
	B	1981	1985	11.8	5.2	0, 16.5, 22, 27.5	同	2
	C	1981	1985	13.9	4.9	0, 11, 16.5, 22	同	4
黒 色 火山性土	D	1981	1982-1984	5.2	6.1	0, 18, 24, 30		
	E	1981	1982-1984	5.2	6.1	15, 27, 33, 39		
	F	1981	1982-1984	5.2	6.1	30, 36, 42, 48		
	G	1983	1984-1985	14.1	5.6	0,(5),(11), 22, 27.5, 33	造成時堆厩肥 0t/10a	
	H	1983	1984-1985	17.0	7.3	0,(5),(11), 16.5, 22, 27.5	同	4
	I	1983	1984-1985	21.8	10.3	0,(5), 11, 16.5, 22, (27.5)	同	8
厚層黒色 火山性土	J	1981	1985	10.8	5.5	0, 5, 22, 27.5, 33	前年秋堆厩肥 0t/10a	
	K	1981	1985	13.1	5.1	0, 16.5, 22, 27.5	同	2
	L	1981	1985	16.7	5.9	0, 11, 16.5, 22	同	4

*:D～Fは北海道立根釧農業試験場試験圃場の平均的な交換性カリウム含量、その他は処理初年目の早春施肥前における交換性カリウム含量

**:()は1985年だけの処理

$$K_d = (K_n + K_a) - K_r$$

$$K_s = K_n + K_d$$

ここで、 K_n は早春施肥前の交換性カリウム含量kg/10a、 K_a は年間カリウム施肥量kg/10a、 K_r は2番草刈取り後における交換性カリウム含量kg/10aである。

2. 実験結果

1) 牧草のカリウム吸収量と乾物収量

各草地における最高収量は表6-4に示したように年間の乾物収量で800~1000kg/10aであった。この値は生草

表6-4 各年度における各草地の最高の年間乾物収量

草地 区分	kg/10a			
	1982	1983	1984	1985
A				932
B				905
C				849
D	916	968	778	
E	972	899	818	
F	908	1007	810	
G			867	933
H			930	987
I			945	1075
J				877
K				908
L				938

収量4~5t/10aに相当し、根釧地方における混播草地の目標収量³⁰4.5t/10aと同程度であった。この収量水準が得られる場合の牧草のカリウム吸収量を求めるために、各火山性土における牧草の年間カリウム吸収量と年間乾物収量との関係を図6-4に示した。年間乾物収量は厩肥施用の有無や年次による収量水準の変動の影響を除去するため、各年度における各草地の最高収量を100とした場合の指数として表した。いずれの火山性土においても牧草の年間乾物収量指数は年間カリウム吸収量の増加に伴って増大した。両者の関係には火山性土の種類による違いが認められなかった(傾き5%、 y 切片2.5%水準)ので、共通の回帰式 $y = 25.2 \ln x + 15.4$ ($r = 0.94^{**}$)を得た。これによれば、年間乾物収量指数90の得られる年間カリウム吸収量は約20kg/10a、95では約25kg/10aであった。したがって、年間乾物収量90~100を確保し、当地方の目標収量を達成するためには、最低でも年間20

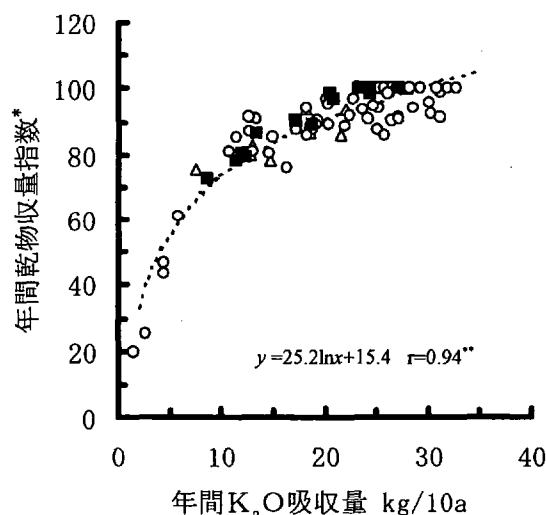


図6-4 牧草の年間カリウム吸収量と
年間乾物収量との関係 (1982-1985年)

* : 各年度における各草地の最高収量を100とした

△ : 未熟火山性土 ○ : 黒色火山性土 ■ : 厚層黒色火山性土

kg/10a、安定的には25kg/10a前後のカリウム吸収量が必要であった。

2) 各火山性土の交換性カリウム含量の推移

表6-3に示したように、供試草地の交換性カリウム含量は全体的に低かった。厩肥のすき込み量の異なるG~I、前年秋に厩肥を表面施用された未熟火山性土A~C、厚層黒色火山性土J~Lの草地では、厩肥の施用量の多い草地ほど交換性カリウム含量も高い傾向にあったが、それらの値はほとんど20mg/100g以下であった。

施肥したカリウムが交換性カリウムとしてどの程度評価されるかを明らかにするために、早春施肥後1週間目

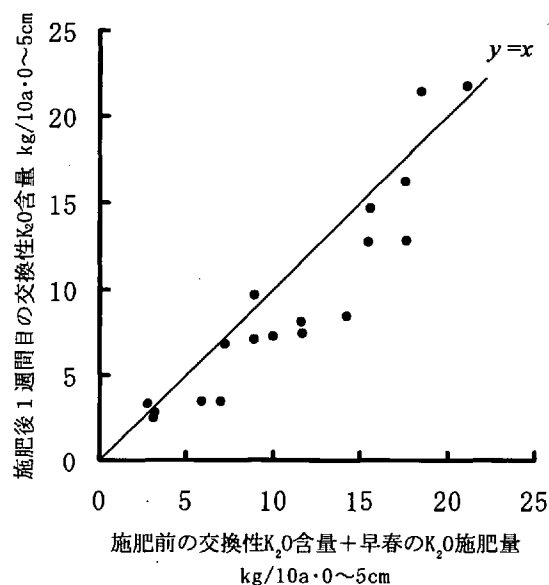


図6-5 施肥カリウムと施肥後1週間目の土壌中における
交換性カリウム含量との関係 (1985年 黒色火山性土)

に交換性カリウムを調査し、図6-5に示した。施肥後1週間目の交換性カリウム含量は早春施肥前の交換性カリウム含量に早春施肥されたカリウムの量を加えた値にほぼ等しく、施肥されたカリウムの全量が交換性カリウムとして評価できると考えられた。

次に、黒色火山性土で2～3年間同じ処理を継続したD～Iの草地における2番草刈取り後の土壌中における交換性カリウム含量の推移を図6-6に示した。カリウム無施肥区における交換性カリウム含量は0～5cmの土壌中に2kg/10a程度であり、年次による変化は小さかった。年間のカリウム施肥量22kg/10a以下の区では処理初年目に比較して、2年目以降の交換性カリウム含量は低下

した。これに対し、年間のカリウム施肥量30kg/10a以上の区における2年目または3年目の交換性カリウム含量は初年目よりも増加する傾向を示した。両者の中間のカリウム施肥量における交換性カリウム含量は0～5cmの土壌中に3～6kg/10a程度であり、年次による変化は比較的小さかった。

3) 牧草のカリウム吸収量と土壌からのカリウム減少量

前節のポット試験では、チモシーのカリウム吸収量と栽培前後の交換性カリウム減少量は等しい関係にあった。したがって、本試験でも注目する土層の深さが適切であれば、牧草の年間カリウム吸収量と土壌からの年間カリウム減少量は等しくなると期待された。そこで、0～5cm

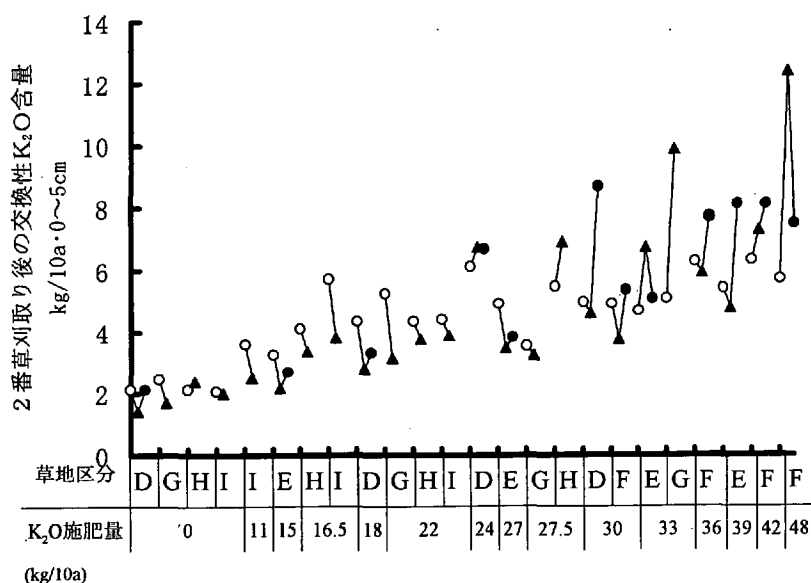


図6-6 カリウム施肥量が土壌中における交換性カリウム含量の経年変化に及ぼす影響 (1982～1985年 黒色火山性土)

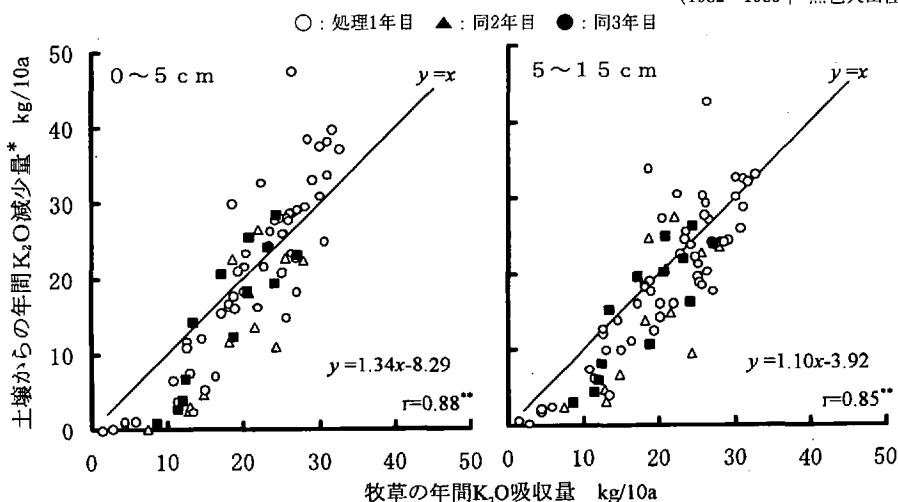


図6-7 牧草の年間カリウム吸収量と土壌からの年間カリウム減少量との関係 (1983～1985年)

△：未熟火山性土 ○：黒色火山性土 ■：厚層黒色火山性土

*：土壌からの年間カリウム減少量 K_d kg/10aは次式によって求めた

$$K_d = (K_n + K_a) - K_r$$

ここで、 K_n は早春施肥前の交換性カリウム含量kg/10a、 K_a は年間カリウム施肥量kg/10a

K_r は2番草刈取り後における交換性カリウム含量kg/10aである。

および0~15cmの土壌からの年間カリウム減少量を計算し、牧草の年間カリウム吸収量との関係を図6-7に示した。カリウム吸収量が15kg/10a以下の少ない場合には、いずれの土層からの交換性カリウム減少量よりも牧草のカリウム吸収量の方が多かった。カリウム吸収量が15~30kg/10a程度の場合には、両者の量はいずれの土層でもほぼ等しかった。さらにカリウム吸収量の多い領域では、0~5cm土層ではカリウム減少量が吸収量よりもやや多かったが、0~15cm土層ではこの傾向は判然としなかった。次に、各土層について、牧草の年間カリウム吸収量と年間カリウム減少量との関係を $y = ax + b$ に当てはめて回帰式を求めた。両者の関係には火山性土の種類による差は認められなかった（危険率5%）ので、0~5cmおよび0~15cmの土層について各火山性土共通の回帰式を求めた。このうち、0~15cm土層について得られた $y = 1.10x - 3.92$ は $y = x$ との間に有意な差が認められず（危険率 傾き5%、 y 切片1%）、当回帰式はかなり $y = x$ に近いものと判断された。これに対し、0~5cm土層で得られた回帰式 $y = 1.34x - 3.92$ は $y = x$ との間に有意な差が認められた（危険率1%）。ただし、前者と後者の回帰式には傾き（危険率2.5%）、 y 切片（危険率5%）ともに有意な差は認められなかった。このことから、火山性土における草地土壌のカリウム肥沃度を評価する対象土層としては、0~5cmよりも0~15cmの方が適当である。しかし、その程度に大きな差はないので、便宜上、従来

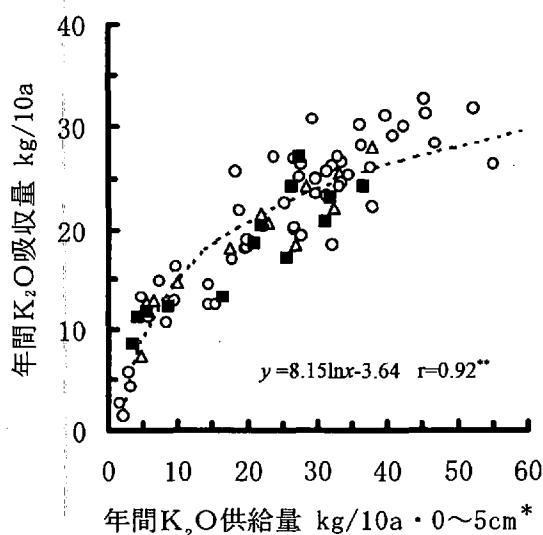


図6-8 牧草への年間カリウム供給量と牧草の年間カリウム吸収量との関係（1983~1985年）

△：未熟火山性土 ○：黒色火山性土 ■：厚層黒色火山性土
*：土壌からの年間カリウム供給量 K_s kg/10a は次式によって求めた
 $K_s = K_a + K_o$
ここで、 K_a は早春施肥前の交換性カリウム含量 kg/10a、 K_o は年間カリウム施肥量 kg/10a である。

通り0~5cmで草地土壌のカリウム肥沃度を評価しても問題は少ないと判断された。

4) 牧草へのカリウム供給量と牧草のカリウム吸収量

牧草に対する年間カリウム供給量と牧草の年間カリウム吸収量との関係を図6-8に示した。両者の関係は $y = a \ln x + b$ によく適合した。各係数には火山性土の種類による差が認められなかった（危険率5%）ので、各火山性土共通の回帰式 $y = 8.15 \ln x - 3.64$ ($r = 0.92^{**}$) を得た。1) の結果から安定的に目標収量を得るためには年間25kg/10a前後のカリウム吸収量が必要であったので、この吸収量を得るための年間カリウム供給量を回帰式から求めた。その結果、0~5cm土層に対して K_2O として年間33kg/10aのカリウムが供給された場合に、牧草は 25 ± 6 kg/10a（95%信頼区間）のカリウムを吸収すると予測された。このため、当地方において目標収量を安定的に得るためには、年間30kg/10a前後のカリウム供給量が必要と判断された。

5) 牧草へのカリウム供給量とマメ科牧草混生割合の経年変化

同一の処理を2~3年間継続した黒色火山性土のD~Iの草地における年間カリウム供給量とマメ科牧草混生割合

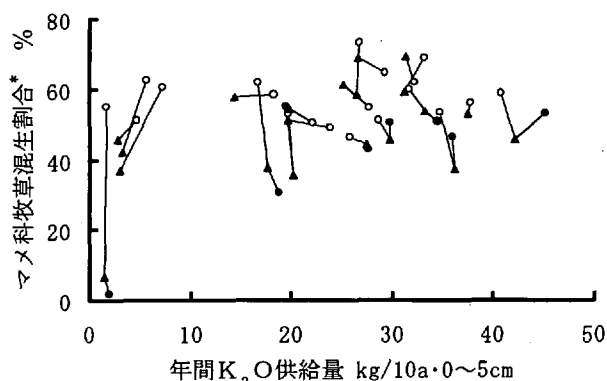


図6-9 牧草への年間カリウム供給量と1番草におけるマメ科牧草混生割合の関係（1982~1985年 黒色火山性土）
*：生草重量割合
○：処理1年目 ▲：同2年目 ●：同3年目

合との関係を図6-9に示した。なお、Fの草地は早春に冠水の影響を受け、草種構成の年次変動が大きかったので除いた。マメ科牧草混生割合は、年間カリウム供給量20kg/10a以下の場合に、年次とともに明らかに低下した。しかし、それ以上の年間カリウム供給量が確保された場合には、マメ科牧草混生割合の低下は認められなかった。目標収量を安定的に得るために必要な年間30kg/10a前後のカリウム供給量が確保された場合には、いずれの草地でも良好なマメ科牧草混生割合が維持できた。

6) 牧草へのカリウム供給量と牧草体カリウム、カルシウムおよびマグネシウム含有率

従来より、牧草体カリウム含有率とカルシウムおよびマグネシウム含有率には拮抗関係があることが知られている^{16,78)}。そこで、図6-10には牧草へのカリウム供給量とチモシーおよびシロクロバ1番草の牧草体カリウム、カルシウムおよびマグネシウム含有率の関係を示した。いずれの草種においても牧草へのカリウム供給量の増加とともに牧草体カリウム含有率は増大し、カルシウムおよびマグネシウム含有率は低下した。年間カリウム供給量30kg/10aの場合、チモシー1番草のカリウム含有率は2.5%前後、マグネシウム含有率は0.2%前後であった。

3. 考察

本試験では、圃場条件でも施肥されたカリウムのほとんどは交換性カリウムとして評価できることが確認された。したがって、対象土層が適切に設定できれば、施肥カリウム、交換性カリウムおよび牧草のカリウム吸収量を用いて算出されるカリウムの収支はその土層の中で一致すると考えられる。そこで、牧草のカリウム吸収量と交換性カリウム減少量の関係を見ると、0～15cm土層に

おける両者の値は統計的に概ね等しいと言えることが明らかになった。ただし、厳密には、0～5cmおよび0～15cmのいずれの土層においても、両者の関係はカリウム吸収量の増加に伴ってカリウム吸収量>交換性カリウム減少量からカリウム吸収量≤交換性カリウム減少量へと変化していた。カリウム吸収量の少ない場合にカリウム吸収量が交換性カリウム減少量よりも多かった理由には、前節の通り、非交換性画分からのカリウム供給に多くを期待できないので、15cm以下の土壌からの供給などが考えられる。しかし、これらのことを考慮しても、実用的には、カリウム肥沃度を0～15cm土層中の交換性カリウムで評価することは十分可能と判断した。一方、0～5cm土層では、カリウム吸収量と交換性カリウム減少量は0～15cm土層の場合ほど一致しなかったが、0～15cm土層におけるカリウム肥沃度の評価を0～5cm土層のそれで代用することは可能と考えられた。年間カリウム吸収量30kg/10a以上の場合には、0～5cm土層の交換性カリウム減少量がカリウム吸収量を上回り、牧草生育期間中に交換性カリウムが5～15cmの層に移動したことが示唆された。しかし、後述する目標収量の確保に必要な年

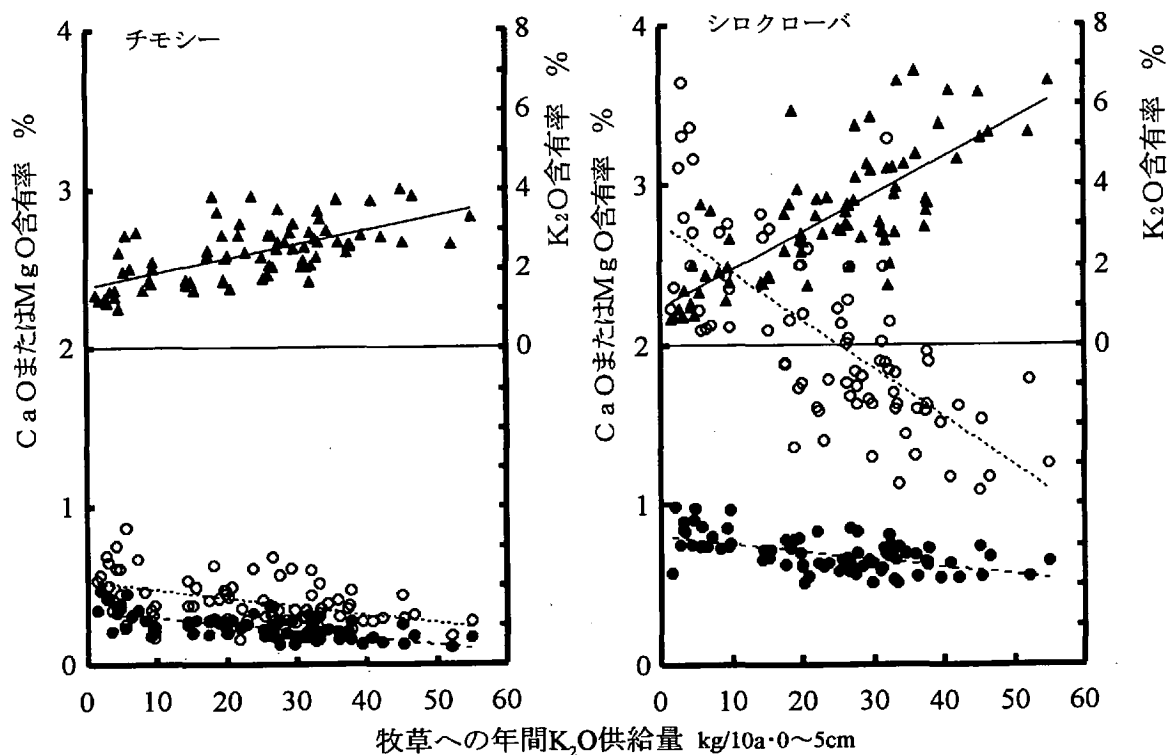


図6-10 牧草への年間カリウム供給量と1番草における牧草体カリウム、カルシウムおよびマグネシウム含有率の関係 (1983～1985年 黒色火山性土)

記号	要素	チモシー	シロクロバ
▲	カリウム	$y = 0.0357x + 1.544$ $r = 0.637^{**}$	$y = 0.0939x + 0.931$ $r = 0.771^{**}$
○	カルシウム	$y = -0.00523x + 0.527$ $r = -0.473^{**}$	$y = -0.0303x + 2.76$ $r = -0.701^{**}$
●	マグネシウム	$y = -0.00422x + 0.342$ $r = -0.682^{**}$	$y = -0.00478x + 0.803$ $r = -0.562^{**}$

間25kg/10a程度のカリウム吸収量の水準では、0~5cm土層中でもカリウム吸収量と交換性カリウム減少量はほぼ等しいと言えることから、採土深としては従来土壌診断²⁰⁾で対象とされている0~5cmでもカリウム肥沃度を評価できると考えられた。

そこで、根釧地方の主要火山性土である未熟火山性土、黒色火山性土および厚層黒色火山性土に立地したチモシー・アカクローバ・シロクローバ混播採草地を対象に、0~5cmの土壌中の交換性カリウム含量に対応したカリウム施肥量の策定を試みる。

当地方の目標収量を安定的に確保するためには約25kg/10aの年間カリウム吸収量が必要であった。また、そのことは、早春0~5cmの土壌中に存在する交換性カリウムの量と年間カリウム施肥量の合計である年間カリウム供給量を30kg/10aとすることによって達成できると考えられた。一方、良好なマメ科牧草混生割合を維持するための年間カリウム供給量はそれよりも少なく、20kg/10a以上と判断された。カリウム施肥量が不足すると、まず、乾物収量が低下し、ついでマメ科牧草混生割合の減少が生じて草種構成が悪化し、草地の衰退を招くものと推察される。このため、カリウムの不足による収量の低下を防ぐことを前提として、30kg/10aの年間カリウム供給量を確保すれば、マメ科牧草混生割合も良好に維持されることが期待できる。したがって、年間に必要なカリウム施肥量は、0~5cmの土壌中における交換性カリウムを測定し、かさ密度を用いて10a当たりの量に換算し、30kgから差引くことによって算出することとした。

現在、根釧地方の採草地に対するカリウムの施肥標準量³⁰⁾は K_2O として20~22kg/10aであるので、北海道施肥標準に基づいた施肥管理の条件で牧草へのカリウム供給量を30kg/10aとするためには、0~5cmの土壌中に8~10kg/10aの交換性カリウムが必要となる。この値は、未熟火山性土、黒色火山性土および厚層黒色火山性土の平均的なかさ密度を0.9、0.7および0.6g/cm³とすれば、それぞれ15~25mg/100g、20~30mg/100g、25~35mg/100gに相当する。したがって、北海道施肥標準³⁰⁾に従って目標収量を安定的に維持するためには、土壌中の交換性カリウム含量をこの程度に確保する必要があるということができる。

従来から、牧草体カリウム含有率とカルシウムおよびマグネシウム含有率とは拮抗関係にあることが指摘され^{16,78)}、そのことは図6-10でも確認された。飼料中のカリウム含有率がKとして3%を越えると乳牛のマグネシウム吸収率が低下するため、牧草中におけるカリウムの

過剰な蓄積はグラスステニー発生の一因とされている⁷⁹⁾。また、日本飼養標準⁷⁹⁾における泌乳牛のマグネシウム要求量は飼料乾物中Mgとして0.23%であり、チモシーはかならずしも牧草体マグネシウム含有率の高い草種でないことが知られている⁷⁸⁾。これらのことを考慮すると、年間カリウム供給量として30kg/10aを上回る施肥管理を行うことは、乾物収量の増収に対して無駄であるだけでなく、粗飼料品質の低下をも引き起こすことが容易に想像できる。また、当地方の火山性土は上記のミネラル含量に乏しく、施肥や土壌改良の必要性が高いことが指摘されている^{78,79,81)}。したがって、30kg/10aの年間カリウム供給量に合わせて正確にカリウムを施肥する場合でも、土壌中のカルシウムやマグネシウム含量を適正^{82,78,81)}に維持し、毎年マグネシウム施肥管理⁷⁸⁾を十分に行うことが重要である。

以上の結果、根釧地方の火山性土に立地した草地において目標収量を安定的に確保し、マメ科牧草を良好に維持するためには、早春0~5cmの土壌中における交換性カリウムと年間のカリウム施肥量を合計して30kg/10aになるように施肥管理を行うこと、また、北海道施肥標準^{30,31)}に示された年間20~22kg/10aのカリウム施肥量で上記の目的を達成するためには、いずれの火山性土においても、早春の0~5cmの土壌中に8~10kg/10aの交換性カリウムが必要であることが明らかになった。

第Ⅶ章 総合論議および結論

第1節 総合論議

根釧地方における採草地の施肥管理については、これまで、合理的な施肥技術に関する研究^{22, 36, 42, 43, 44, 54)}や土壌中の有効態養分含量の評価に関する研究^{23, 25, 78, 80, 81, 83, 96)}が精力的に行われてきたが、これらを組合せ、土壌中の養分含量に対応した具体的な施肥量の指針を確立するには至っていなかった。このため、実際に土壌診断を農家の施肥設計に活用するためには、土壌診断結果からその処方箋である施肥設計を策定するための新たな検討が必要であった。本研究は、このような背景に基づき、土壌中の養分含量に基づく施肥対応を具体的に設定し、あわせて土壌診断基準値を土壌の種類ごとに細分することによって、より現場に適応した実用的なものとするを目的として行われた。

1. 窒素

窒素では土壌分析を行うことなく、草地の管理来歴から窒素肥沃度を評価する方法を導入した。すでに天北地方の重粘土草地において、草地の窒素肥沃度を評価し、窒素施肥量を決定するシステムが三木²⁴⁾によって体系化されている。三木²⁴⁾はその研究の中で、土壌分析による草地の窒素肥沃度評価の方法として熱水抽出性窒素や生土培養による方法を試みたが、いずれも経過年数などの管理来歴が分析結果に及ぼす影響が大きかった。このため、土壌分析よりもむしろ草地の管理来歴から窒素肥沃度を評価する方法の有効性を指摘している。そこで、本研究では、三木²⁴⁾の考え方を導入し、根釧地方の土壌条件や気象条件に対応したパラメータを設定しようとした。すなわち、草地土壌からの窒素給源として、まず、以下の4つの要因を検討の対象とした。

- ①草地更新時の前植生および表層蓄積有機物
- ②更新時および維持段階の施用厩肥
- ③混播マメ科牧草による窒素固定
- ④維持段階における草地系内の還元有機物

土壌診断とは土壌分析を伴うものと理解されることも多いが、管理来歴によって土壌の肥沃度を評価し、それに基づく施肥対応を提示するという意味では本法もまた土壌診断のひとつの形態であると考ええる。上記4要因のうち③については、根釧地方において、すでに木曽・菊地²⁴⁾がマメ科牧草混生割合に基づく窒素施肥量の設定を行い、北海道施肥標準²¹⁾として表7-1のように農家に普及

表7-1 草播構成に対応した窒素施肥量*

植生区分	草種構成** (%)	年間窒素施肥量 (kg/10a)
1	30~50	4
2	15~30	6
3	5~15	10
4	5%未満	16

(北海道施肥標準²¹⁾、1989)

*：年間生草収量4.5t/10aを目標とする。

**：1番草収穫時の生草重量割合による。その際、チモシー率50%以上、裸地と雑草の合計値が30%未満の草地を前提とする。

している。そこで本研究では、厩肥施用に伴う窒素供給量(②)と土壌からの窒素供給量(①および④)を明らかにし、草地の窒素肥沃度に対応した窒素施肥量を設定することとした。

本研究の結果に基づいて設定された厩肥からの窒素供給量を表7-2に示した。これまで、厩肥の場合は3年程度

表7-2a すき込まれた厩肥による窒素の減肥可能性 (kg/t)

年次	造成翌年(2年目)	3年目	4年目
減肥可能性	1.0	0.5	0.3

表7-2b 表面施用された厩肥による窒素の減肥可能性 (kg/t)

年次	施用当年	2年目	3年目
減肥可能性	1.0	0.5	0.3

いずれの場合も、原物の厩肥1t当たりの窒素の減肥可能性

の肥効の持続が指摘されてきた²⁴⁾にもかかわらず、その肥効の変化に基づく施肥対応が具体的に示されてはいなかった。本研究では、厩肥について、従来から指摘されていた窒素肥効の年次変化を定量化したことに意義がある。施用された厩肥からの年間合計の窒素供給量は、すき込みの場合は造成翌年から、また、表面施用の場合は施用当年(秋施用の場合は翌年)から厩肥原物1t当たり1kg、翌年は0.5kg、さらにその翌年には0.3kgと、年次の経過に従ってほぼ半減した。厩肥のすき込み試験については、気象条件や土壌の性質の異なる未熟火山性土、黒色火山性土および厚層黒色火山性土の代表地点で同様の結果が確認されている。したがって、根釧地方における面的な温度環境の違いによって、厩肥からの窒素供給量の評価が異なる可能性は小さいと判断された。これに対し、厩肥の施用方法によって生じる厩肥周辺の温度環境の違いは、チモシーの1番草と2番草に対する窒素の肥効発現の違いに微妙な影響を与えた。すなわち、幼穂形成期に当たる5月中の窒素吸収が乾物生産に大きく寄与する1番草⁵⁰⁾においては、この時期の地表面の温度が地

中の温度よりも高いので、表面施用の方がすき込みよりも乾物収量の増加に対して効果的であった。

一方、草地土壤に蓄積された有機物からの窒素供給については、その大きさを改めて確認できたものの、本試験の中で具体的な減肥可能量として設定することはできなかった。厚層黒色火山性土の窒素無機化量が未熟火山性土のそれよりも多い理由は、前者の表層に蓄積された有機物の量と質に起因するものと考えられた。既往の実態調査の結果^{57,58,59)}によれば、厚層黒色火山性土における牧草の収量水準は未熟火山性土よりも高い。この現象は、未熟火山性土では土壤のpH緩衝能やCECが小さいので、同一の施肥管理を行っている場合には草地土壤のpHや塩基含量が厚層黒色火山性土よりも低下しやすく、その結果、マメ科牧草牧草の衰退が速まると解釈されている⁶⁰⁾。このような収量水準の違いやマメ科牧草牧草混生割合の違いは、草地に還元される有機物の量や質に影響するものと思われた。また、硝酸態窒素など吸着性の弱いイオンでは、拡散によって根に供給される効率は厚層黒色火山性土の方が良いことが本研究から推定されたので、未熟火山性土において上記の理化学性の違いを考慮し、pHや塩基含量の適正な維持によって草種構成を良好に維持しても、収量水準の違いが生ずる可能性もある。蓄積された有機物からの窒素供給量は、三木⁶¹⁾が指摘し、本研究でも明らかになったように、収量水準、草種構成、造成後の経過年数、その他の管理来歴によって大きく変化する。本研究ではこれらの変化を定量的に把握しきれなかったために、このことを施肥対応に反映させることを保留した。

以上の検討結果により、北海道根釧地方に分布する主要火山性土に立地した草地に対する年間窒素施肥量 F_N を次式により算出することとした。

$$F_N = N_{s_0} - N_{s_2} \quad (7.1)$$

ここで、 N_{s_0} は表7-1に示した草種構成に対応した窒素施肥量(kg/10a)であり、 N_{s_2} は厩肥からの窒素供給量(kg/10a)であり、表7-2の量に厩肥施用量を乗じたものである。

2. リン

リンでは黒色火山性土における試験結果⁶²⁾に基づき、Bray No.2法による土壤診断基準値⁶³⁾が P_2O_5 として20mg/100g以上と設定されている。本研究ではこれを火山性土ごとに細分し、あわせて上限値を新設することにより、表7-3のように土壤診断に基づく施肥対応を具体的に設定できた。リンの施肥量は北海道施肥標準^{30,31)}において牧草の吸収量よりも明らかに多く設定されている。そのリンについて、減肥の可能な土壤養分含量の領域を明らかにできたことの意義は大きい。

火山性土ごとにリンの土壤診断基準値を設定した主要な理由は有効態リンの評価法に関するものである。厚層黒色火山性土におけるリン吸着能は未熟火山性土よりもきわめて高い。このようにリン吸着能の高い土壤中のリンはBray No.2法で抽出されにくい形態に変化するので、Bray No.2法による定量値が同じ場合、厚層黒色火山性土の全リン含量や無機態リン含量は未熟火山性土のそれよりも明らかに多くなる。これに対し、チモシーではBray No.2法で抽出されない形態のリンも一部利用できる可能性が認められた。このため、チモシーが同じリン吸収量を示す場合のBray No.2法による有効態リン含量は、厚層黒色火山性土の方が未熟火山性土よりも低くなる。

火山性土ごとにリンの土壤診断基準値を設定したもうひとつの理由として、厚層黒色火山性土における牧草へのリンの供給効率が未熟火山性土に勝る可能性がある。チモシーが同じリン吸収量または含有率を示すためには未熟火山性土の方が厚層黒色火山性土よりも多くの無機態リン含量を土壤中に要したこと、未熟火山性土におけるチモシーのリン含有率の上昇が厚層黒色火山性土よりも乾物重の増加に結びつきにくい傾向を示したことなどがその根拠である。作物のリンの吸収は土壤中におけるリンの拡散速度^{74,75)}と根系の発達度合い^{36,74)}に大きく影響される。土壤中における養分の拡散は吸着の影響が大きいほど遅く、体積含水率が多いほど速く進行する⁷⁶⁾。従来から、粒径の細かい土壤は保水性に富み、同一pFに

表7-3 主要火山性土におけるリンの土壤診断基準値とそれに基づくリン施肥量

火山性土の種類		基準値未満	基準値内	基準値以上
0～5cm土壤中の Bray No.2 P_2O_5 含量 mg/100g	未熟火山性土	30未満	30～60	60以上
	黒色火山性土	20未満	20～50	50以上
	厚層黒色火山性土	10未満	10～30	30以上
年間リン施肥量 P_2O_5 kg/10a	共通	12～16	8～10	4～5*

*：減肥は少なくとも3年間継続できる。

における体積含水率の値が大きいため、拡散フラックスも大きくなるという指摘があり⁷⁾、本試験でも吸着性の小さい塩化物イオンでは同様の結論を得た。しかし、粒径の細かい厚層黒色火山性土は、同時に、きわめて強いリン吸着能を有していた。このため、同一pFにおける体積含水率は厚層黒色火山性土の方がきわめて大きいにもかかわらず、拡散係数は未熟火山性土よりもやや小さいと評価された。結論として、土壌中におけるリンの拡散速度によって、牧草へのリンの供給に関する厚層黒色火山性土の有利性を説明することはできなかった。

今後の課題としては、牧草の根系の発達に関する土壌間差の検討が残された。これまで、土壌の肥沃度評価は有効態養分の量的な比較によって行われてきた。しかし、今後、さらに現場に対応した正確な肥沃度評価を必要とする場合には、ここで検討したように、有効態の養分が作物の根に移動する速さについても考慮する必要がある。

3. カリウム

カリウムについては、早春0～5cm土層中に存在する交換性カリウムと年間カリウム施肥量の合計値が30kg/10aになるようにカリウム施肥量を決定することが適当であった。すなわち、年間カリウム施肥量 F_K (K₂Okg/10a)は、
$$F_K = 30 - K_s \quad (7.2)$$
ここで、 K_s は早春に0～5cm土層中に存在する交換性カリウムの量(K₂O kg/10a)である。

この関係は火山性土の種類によって変化することはなかったが、各火山性土のかさ密度が大きく異なることから、 K_s が同じであっても土壌100g当たりのK₂Omgの値は火山性土ごとに異なった。北海道施肥標準³⁾におけるカリウム施肥量は20～22kg/10aであるので、この場合の K_s は8～10kg/10aとなる。0～5cm土層中に8～10kg/10aという交換性カリウム含量は、未熟火山性土のかさ密度を0.9g/cm³、黒色火山性土0.7g/cm³および厚層黒色火山性土0.6g/cm³とすると、それぞれ15～25、20～30および25～35mg/100gに相当する。北海道施肥標準³⁾に示された施肥量で安定的な目標収量と良好な草種構成が維持可能であるための土壌中のカリウム含量という意味では、上記の値を土壌診断基準値と設定できる。ただし、この施肥対応が行われた場合、牧草は年間25±6kg/10aのカリウムを吸収することが期待されるので、最終刈取り後に土壌に残る交換性カリウムの量は平均5kg/10a前後と見積もることができる。すなわち、土壌診断基準値内にある草地に施肥標準量のカリウムを施肥した場合、十分な牧草収量は期待できるが、土壌中の交換性カリウム

含量は土壌診断基準値をやや下回る可能性が高い。もちろん、(7.2)式を用いれば、早春の土壌中における交換性カリウム含量を測定することにより、土壌中のカリウム含量にかかわらず必要な施肥量を算定できる。しかし、(7.2)式を満足した状態で、土壌中の交換性カリウム含量が急激な減少や増大を起こさないような施肥量と土壌中のカリウム含量のバランスを明らかにできれば、土壌診断の省力化につながる。そのような意味では、0～5cm土層中に交換性カリウム8～10kg/10aという土壌診断基準値には検討の余地が残されている。

4. 土壌の肥沃度に対応した施肥技術の今後

牧草収量または養分吸収量の水準、必要とされる施肥量、土壌診断基準値の3者は、それぞれ相対的な関係にあり、どのひとつを設定する場合にも、他の2者が決定されている必要がある。このうち、収量水準や施肥量は自然条件だけでなく、経済的、社会的な状況によって変化する可能性を有している。したがって、本研究で設定された草地土壌の肥沃度に基づく施肥対応の具体的な数字は、今後の農業情勢によって変化するものである。

本研究では、草地土壌の肥沃度に基づく施肥対応を設定するに当たり、①目標収量を安定的に確保すること、および②草種構成、特にマメ科牧草を良好に維持することの2点を満たすことを前提として検討を行った。その結果、窒素、リンおよびカリウムのいずれの要素においても、目標収量を安定的に確保するように設定された施肥量によって、マメ科牧草混生割合もまた良好に維持されることが確認された。

一方、近年地球レベルでの環境問題が注目され、有限な資源を効率的かつ安全に利用する観点から、低投入持続型農業あるいは環境保全型農業に対する指向が高まっている。この視点から草地の施肥管理を見直した場合、施肥量を減らし、収量水準をやや低下させても、マメ科牧草を安定的に維持する低投入持続型農業を達成しようとする方策が考えられる。低投入持続型農業や環境保全型農業の観点から前述の3要素の施肥対応を見直す場合、以下のような検討が必要になると思われる。

窒素ではすでに、草種構成に対応した合理的な窒素施肥量が設定され、マメ科牧草混生割合の高い草地ほど年間施肥量を低く設定することによって、高い生産性の確保とマメ科牧草混生割合の安定化による維持年限の延長が図られている。また、本研究で明らかにされた厩肥施用に伴う施肥対応を活用すれば、混播草地に対しては窒素施肥量をほとんど必要としない管理も可能である。その意味では、肥料の3要素中、窒素が最も低投入持続型

管理に近い技術の確立されつつある要素といえる。しかし、環境保全的な観点でみると、厩肥から牧草に供給される窒素は厩肥に含有される全窒素含量の40%であり、残りの60%の窒素の行方は本研究では明らかにできなかった。また、施肥対応に反映させられなかった草地更新時に土壌から供給される窒素量を考慮すれば、混播草地造成時から2~3年の間における土壌から牧草への窒素供給量は、牧草の収量確保に必要な量に対してかなり過剰になっている可能性が高い。土壌中で無機化したにもかかわらず牧草に吸収されることなく硝酸態窒素として流亡してゆく窒素の量を把握することは、環境保全型酪農を実現するために早急に検討を必要とする課題として残されている。

リンは牧草収量に対する施肥反応もマメ科牧草の維持に対する施肥反応も窒素やカリウムに比較してきわめて緩慢な要素であった。後述するカリウムと同様に、マメ科牧草の維持に最低限必要なリンは収量の確保を重視した本研究の結果よりも少なくなる可能性が高い。したがって、その量を明確に把握することは、より長期間の実験の継続が必要である。また、リンは肥料の原料を鉱物資源に依存しており、厩肥などの自給肥料からの補給にも多くを期待できないことから、持続型の施肥管理を考える場合には、土壌に固定されたリンの有効利用がきわめて重要な課題となろう。

カリウムの場合、マメ科牧草混生割合は年間カリウム供給量が20/10aを下回らないと明瞭な低下傾向は認められなかった。すなわち、マメ科牧草を良好に維持するためのカリウム供給量は、目標収量を安定的に確保するために必要な量よりも少なく、年間20~30kg/10aの間にあるものと考えられる。仮に年間カリウム供給量を20kg/10aと設定した場合、収穫されたチモシーのカリウム含量は2.3%程度に低下して、カルシウムやマグネシウム含量はやや向上することが期待された。泌乳牛に必要な飼料中のカリウム含量は K_2O として約1.0%である²⁾ので、この程度の牧草体カリウム含量の低下はカルシウムやマグネシウム含量の向上とともに、飼料成分として好ましい変化であると考えられる。一方、乾物収量は従来の施肥対応で保証された水準よりもやや低下し、最高収量の85~95%程度になることが予想される。今後、チモシー、アカクローバおよびシロクローバにおけるカリウムの要求量をそれぞれ明らかにし、これらを混播した場合の生育解析を行うことによって、草種構成を良好に維持し、収量を大きく低下させることなく、年間カリウム供給量を低減することが可能と考えられる。さらに、カリウムでは厩肥やスラリーなどの自給肥料の活用が有効

なので、農家経営内における効率的な循環が期待できる。

以上のように、営農上あるいは草地管理上の目標や前提条件を変化させた場合には、当然、施肥対応の具体的な設定値は変化する。本研究で得られた重要な知見は、現状の営農目標に基づいた具体的な施肥対応の数値だけではなく、土壌の肥沃度と施肥量および収量（または吸収量）の3者の相互関係を明らかにしたことにある。北海道根釧地方の火山性土において、チモシーを主体とするマメ科牧草との混播採草地を管理する限り、前述の相互関係は、その時々々の営農上あるいは草地管理上の目標や前提条件に対応した施肥指針を作成する場合の基礎資料になるものと考えられる。本研究では年間乾物収量900kg/10a程度の目標収量と良好な草種構成を安定的に維持することを前提として施肥対応を設定した。したがって、当施肥対応は良質粗飼料の安定確保を低コストで行うことに寄与するものとなる。

第2節 結論

北海道根釧地方の火山性土に立地したチモシーを基幹とするマメ科牧草との混播採草地を対象に、年間乾物収量900kg/10a程度の目標収量と良好な草種構成を安定的に維持するため、窒素、リンおよびカリウムの肥沃度に基づく施肥量を次のように設定した。

1. 窒素

年間窒素施肥量 F_N (N kg/10a) を次式により求める。

$$F_N = N_{s_0} - N_{s_2}$$

N_{s_0} は草種構成に対応した年間窒素施肥量であり、表7-1から求める。 N_{s_2} は厩肥の施用に伴う窒素減肥可能量であり、表7-2から求める。

2. リン

草地土壌0~5cmについて、Bray No.2法による土壌分析を行い、分析値に基づいて表7-3から年間リン施肥量を求める。なお、分析値が基準値よりも高かった場合、少なくとも3年間の減肥の継続が可能である。

3. カリウム

草地土壌0~5cmについて交換性カリウムを測定し、分析値に基づいて次式により年間カリウム施肥量 F_K (K_2O kg/10a) を求める。

$$F_K = 30 - K_s$$

ここで、 K_s は早春に0~5cm土層中に存在する交換性カリウムの量(K_2O kg/10a)である。

以上の施肥対応により、良質粗飼料の安定確保を低コストで行うことが期待できる。

第Ⅷ章 要 約

本研究は、北海道根釧地方に分布する主要火山性土に立地したチモシーを基幹とするマメ科牧草との混播採草地を対象に、土壌の肥沃度に対応した窒素、リンおよびカリウム施肥量の設定を行うことにより、良質粗飼料の低コスト安定生産に寄与することを目的として行われた。

根釧地方に分布する主要な火山性土は北海道農牧地土壌分類第2次案によれば未熟火山性土、黒色火山性土および厚層黒色火山性土に区分される。農耕地土壌分類によれば、未熟火山性土は表層腐植質黒ボク土～厚層腐植質黒ボク土、黒色火山性土は表層多腐植質黒ボク土～厚層腐植質黒ボク土、また、厚層黒色火山性土は厚層多腐植質黒ボク土におおむね該当する。また、Soil Taxonomyでは、未熟火山性土はThaptic Udivitrand、黒色火山性土はAcrudoxic Vitric Melanudand、厚層黒色火山性土はPachic Melanudandに対応する。未熟火山性土は標高の高い内陸に分布し、粒径が粗く腐植含量に乏しい。このため、保水性に劣り、リン酸吸収係数やイオン交換容量は小さい。厚層黒色火山性土はこれと反対の理化学的性質を有し、黒色火山性土は両者の中間的な性質を示す。根釧地方における5月から9月までの積算気温は2000～2300℃であり、沿海側で低く内陸側でやや高い。同時期の総降水量は600～700mmであり、地域差は少ない。草地作土のpFは2.0～2.5で推移することが多かった。このような立地条件に管理される採草地において、年間900kg/10a程度の目標収量と良好な草種構成を維持することを目的とし、草地土壌の肥沃度に対応した施肥量の設定を以下のように行うことができた。

1. 窒素

年間窒素施肥量は土壌分析を行うことなく、管理来歴から土壌の窒素肥沃度を評価することによって算定する。管理来歴として注目したのは以下の4項目である。

- ①草地更新時の前植生および表層蓄積有機物
- ②更新時および維持段階の施用厩肥
- ③混播マメ科牧草による窒素固定
- ④維持段階における草地系内の還元有機物

このうち、③はマメ科牧草混生割合に対応した窒素施肥量としてすでに農家に普及しているため、本研究では厩肥(②)および土壌(①、④)からの窒素供給量について検討した結果、施用された厩肥からの窒素供給量は、すき込みの場合は造成翌年から、表面施用の場合は施用当年(秋施用の場合は翌年)から厩肥原物1t当たり1kg、翌

年は0.5kg、3年目には0.3kgと設定できた。しかし、草地土壌に蓄積された有機物からの窒素供給については、その大きさを改めて確認できたものの、本試験の中で具体的な減肥可能量として設定することはできず、年間窒素施肥量 F_N は次式により算出する。

$$F_N = N_{S_0} - N_{S_2}$$

ここで、 N_{S_0} は草種構成に対応した年間窒素施肥量であり、1番草収穫時におけるマメ科牧草混生割合5%未満の草地では16kg/10a、5～15%では10kg/10a、15～30%では6kg/10a、30～50%では4kg/10aと設定されている。 N_{S_2} は前述した厩肥からの窒素供給量(kg/10a)に厩肥施用量を乗じたものである。

2. リン

年間リン施肥量はBray No.2法による土壌分析結果に基づいて判断する。土壌診断基準値は P_2O_5 で未熟火山性土30～60mg/100g、黒色火山性土20～50mg/100g、厚層黒色火山性土10～30mg/100gと設定した。リン酸吸収係数の大きい厚層黒色火山性土において、土壌診断基準値が低く設定された理由は、①チモシーがBray No.2法で抽出されないリンをも給源とし得る可能性が伺われたため、および、②土壌から牧草根へのリンの供給効率も厚層黒色火山性土が未熟火山性土を上回ると推定されたためである。②については、厚層黒色火山性土におけるリンの拡散係数が、吸着の影響を強く受けて、未熟火山性土よりも小さいと評価されたので、拡散速度の違いによる説明は困難であった。今後、根張りの影響についての検討が必要と考えられた。土壌分析値が土壌診断基準値よりも低い場合には P_2O_5 で年間12～16kg/10a、基準値内の場合には8～10kg/10aのリン施肥量が適当であった。また、土壌分析値が基準値よりも高い場合には、年間4～5kg/10a程度のリン施肥量で少なくとも3年間は安定した目標収量と良好な草種構成が維持できた。

3. カリウム

年間カリウム施肥量は早春0～5cmの土壌中における交換性カリウム含量と年間カリウム施肥量の合計値が30kg/10aとなるように決定することが適当であった。すなわち、

$$F_K = 30 - K_s$$

ここで、 F_K は年間カリウム施肥量(K_2O kg/10a)、 K_s は早春に0～5cm土層中に存在する交換性カリウムの量(K_2O kg/10a)である。この関係は火山性土の種類によっ

て変化することはなかったが、各火山性土のかさ密度が大きく異なることから、 K_s が同じであっても土壌100g当たりの K_2O mgの値は火山性土ごとに異なった。北海道施肥標準におけるカリウム施肥量は20~22kg/10aであるので、この場合の K_s は8~10kg/10aとなる。0~5cm土層中8~10kg/10aという交換性カリウム含量は、未熟火山性土のかさ密度を0.9g/cm³、黒色火山性土0.7g/cm³および厚層黒色火山性土0.6g/cm³とくと、それぞれ15~25、20~30および25~35mg/100gに相当する。

謝

本研究をとりまとめるに当たり、東京農工大学教授浜田龍之介博士には終始懇切なる御指導を頂き、本稿の御校閲を賜った。宇都宮大学教授加藤秀正博士には準備段階から本稿の御校閲と詳細な御指導を頂いた。東京農工大学助教授坂上寛一博士および茨城大学教授久保田正亜博士には本稿の御校閲と有益な御教示を頂いた。東京農工大学教授岡崎正規博士には終始暖かい激励と御指導・御校閲を賜った。

本研究の一部は北海道立根釧農業試験場で実施された農林水産省指定試験事業の研究成果をとりまとめたものである。農林水産省農林水産技術会議事務局の各位には同制度の運用に当たり大きな支援を頂いた。この間、根釧農業試験場場長として在任された奥村純一博士、田辺安一氏、岩淵晴郎博士、中川渡博士（現札幌学院大学教授）、国井輝男氏、清水良彦氏（現新得畜産試験場長）および現場長所和暢博士、さらに研究部長として在任された沢口正利博士（現中央農業試験場環境化学部長）および現研究部長関口久雄氏には研究途上で御指導と御激励を賜った。

帯広畜産大学教授菊地晃二博士には根釧農業試験場土壌肥料科長として本研究の端緒を与えて頂いた。故小関純一博士（元草地試験場山地支場草地土壌研究室長）には根釧農業試験場草地科長として本研究の初期に有益な論議を共にして頂いた。農林水産省草地試験場土壌肥料第一研究室近藤照博士には組織再編後の根釧農業試験場土壌肥料科において科長としての的確な御指導を頂いた。前根釧農業試験場土壌肥料科長能代昌雄氏（現北見農業試験場主任研究員）には本研究の行われた大半の期間を通じて研究遂行上の便宜を図って頂くと共に暖かい御指導と御激励を賜った。現根釧農業試験場土壌肥料科長寶示戸雅之博士には本研究のとりまとめに当たって多くの御支援と便宜を図って頂いた。

農林水産省北海道農業試験場草地地力研究室長早川嘉彦博士には研究の節目ごとに多くの示唆に富む御指摘を頂いた。北見農業試験場主任研究員松原一實氏には土壌分類に関する御教示を頂くとともに、折に触れて暖かい御激励を賜った。酪農学園大学教授松中照夫博士には本研究の前半においてその方向性を示して頂いた。天北農業試験場土壌肥料科長木曾誠二博士には本研究の大部分について詳細な議論を共にして頂いた。上川農業試験場土壌肥料科三浦周氏には根釧農業試験場草地科の先輩と

辞

して多くの有益な刺激を与えて頂いた。花・野菜技術センター土壌肥料科日笠裕治氏には前任者として本研究のきっかけを与えて頂いた。根釧農業試験場土壌肥料科松本武彦氏および酒井治氏には現在に至るまでの共同作業と論議をともにして頂いた。中央農業試験場土壌生態科長三木直倫博士には窒素およびカリウムの試験のとりまとめに際し、貴重な論議を共にして頂いた。農林水産省北海道農業試験場土壌特性研究室加藤英孝氏および国際協力事業団筑波国際農業研修センター天野洋司博士には拡散の実験に関して多くの御教示と便宜を図って頂いた。農林水産省東北農業試験場飼料作物研究室長田村良文博士、新得畜産試験場草地科長堤光昭氏、中央農業試験場企画情報室企画課竹田芳彦氏、根釧農業試験場作物科中島和彦氏には牧草の生育過程に関して多くの論議を共にして頂いた。中央農業試験場企画情報室情報課志賀弘行氏には北海道農業試験研究情報システム(HARIS)のデータベース使用に便宜を図って頂いた。農林水産省農業環境技術研究所資源・生態管理科長清野豁博士にはメッシュ気象データの計算に便宜を図って頂いた。

実際の研究作業の遂行に際しては本研究実施中在任された臨時農業技能員諸氏の御協力に負うところが大きい。また、現地試験の実施に際しては南根室地区農業改良普及センター、北根室地区農業改良普及センター、釧路東部地区農業改良普及センター、釧路北部地区農業改良普及センター、釧路中部地区農業改良普及センターおよび釧路西部地区農業改良普及センター関係各位に多くのご協力を頂いた。

以上の諸氏に心から感謝の意を表する。

引 用 文 献

- 1) 赤塚恵, 坂柳迪夫: 畑土壌におけるN供給力の推定方法に関する2, 3の考察, 北海道農業試験場集報, 83, 64-70(1964)
- 2) 安藤忠男・尾形昭逸: 硝酸態Nの微量迅速定量法, 日本土壤肥科学雑誌, 51, 48-54(1980)
- 3) 青峰重範: 火山灰余話(4), 農業及び園芸, 55, 1227-1232(1980)
- 4) BARBER, S.A.: Soil Nutrient Bioavailability-A Mechanistic Approach, 90-113, John Wiley & Sons, New York, U.S.A.(1984)
- 5) BARRACLOUGH, P.B. and TINKER, P.B.: The determination of ionic diffusion coefficient in field soils. II. Diffusion of bromide ions in undisturbed soil cores, J. Soil Sci., 33, 13-24(1982)
- 6) BURKE, I.C.; YONKER, C.M.; PARTON, W.J.; COLE, C.V.; FLACK, K.; SCHIMEL, D.S.: Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U.S. grassland soils. Soil Science Society of American Journal, 53: 800-805(1989)
- 7) 千葉明・新毛晴夫: 炭酸カルシウム添加・通気法による中和石灰量の測定, 日本土壤肥科学雑誌, 48, 239-242(1977)
- 8) CRANK, J.: The Mathematics of Diffusion, 2nd ed., 2~4, 62~64, Oxford Univ. Press, Oxford(1975)
- 9) 土壤物理性測定法委員会: 土壤物理性測定法, 1-247, 養賢堂, 東京(1982)
- 10) 土壤標準分析・測定法委員会: 土壤標準分析・測定法, 130-131, 博友社, 東京(1986)
- 11) 土壤養分測定法委員会: 土壤養分分析法, 29-43, 120-147, 171-296, 養賢堂, 東京(1981)
- 12) EDWARDS, O.W., and HUFFMAN, E.O.: Diffusion of aqueous solution of phosphoric acid at 25°C, J. Phys. Chem., 63, 1830-1833(1959)
- 13) GREGORY, P.J., CRAWFORD, D.V. and MCGOWAN, M.: Nutrient relations of winter wheat 2. Movement of nutrients to the root and their uptake, J. Agric. Sci., Camb., 93, 495-504(1979)
- 14) GUNJIKAKE, N. and WADA, K.: Effects of phosphorus concentration and pH on phosphate retention by active aluminum and iron of andsols, Soil Sci., 132, 347-352(1985)
- 15) 袴田共之: 放牧草地における乳用育成牛排泄物の肥料の評価に関する研究, 北海道立農業試験場報告, 55, 1-88(1986)
- 16) 原田勇: 牧草の栄養と施肥, p.124~129, 養賢堂, 東京(1985)
- 17) 原田勇, 篠原功: 草地農業における加里輪廻に関する研究 第1報 土壌中加里溶出と植物吸収加里の関係, 日本土壤肥科学雑誌, 39, 292-299(1968)
- 18) 原田靖生: 土壌の陽イオン・陰イオン交換容量-測定法とその背景-, 日本土壤肥科学雑誌, 55, 273-283(1984)
- 19) 早川康夫: 根釧地方火山灰地における開墾後の地力推移について, 北海道立農業試験場集報, 1, 30-38(1957)
- 20) 早川康夫: 根室地方に分布する摩周統火山性土の腐植の特性について, 第1報, 特に腐植中の有機態窒素及び燐酸について, 北海道立農業試験場集報, 3, 71-84(1958)
- 21) 早川康夫: 根室地方に分布する摩周統火山性土の腐植の特性について, 第2報, 腐植の塩基置換容量, 北海道立農業試験場集報, 9, 62-68(1962)
- 22) 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1報, チモシー及びアカクローバの肥料3要素試験, 北海道立農業試験場集報, 4, 9-19(1959)
- 23) 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, 北海道立農業試験場集報, 7, 16-34(1961)
- 24) 早川康夫, 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 厩肥と漚汁の肥効について, 北海道立農業試験場集報, 15, 84-100(1967)
- 25) 早川康夫, 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, 北海道立農業試験場集報, 8, 13-23(1961)

- 26) HIGASHIDA, S. and TAKAO, K.: Seasonal fluctuation patterns of microbial numbers in the surface soil of a grassland, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 31, 113-121 (1985)
- 27) 日笠祐治, 三枝俊哉, 菊地晃二: 根釧管内における草地の土壌診断に関する研究 第1報 土壌養分含量の実態について, 北海道草地研究会報, 18, 77-81 (1984)
- 28) 北海道土壌分類委員会: 北海道の農耕地土壌分類 (第2次案), 北海道立農業試験場資料, 10, 1-89 (1979)
- 29) 北海道根室支庁, 北海道立根釧農業試験場: 根室支庁管内 土層類型区分 (火山灰の性質とその活用), 8-9 (1986)
- 30) 北海道農務部: 北海道施肥標準, 31-33, (1983)
- 31) 北海道農務部: 北海道施肥標準, 37-39, (1989)
- 32) 北海道農務部農業改良課編: 土壌および作物栄養の診断基準値-改訂版-, 17 (1983)
- 33) 北海道立中央農業試験場, 北海道農務部農業改良課編: 土壌および作物栄養診断基準-分析法 (改訂版) -, p.1-199 (1992)
- 34) 北海道立中央農業試験場: 地力保全基本調査総合成績書 北海道(1), 43 (1978)
- 35) 北海道立根釧農業試験場: 北海道立根釧農業試験場50年史, 23-33 (1977)
- 36) 宝示戸雅之: 草地土壌の経年的酸性化と牧草の生育特性に関する研究, 北海道立農業試験場報告, 83, 1-106 (1994)
- 37) 伊藤豊彰・庄子貞雄・三枝正彦: Andisol分類法による北海道根釧地方の火山灰土壌の分類, 日本土壌肥科学雑誌, 62, 237-247 (1991)
- 38) JANZEN, H.H.: Soil organic matter characteristics after long term cropping to various spring wheat rotations. *Canadian Journal of Soil Science* 67: 845-856 (1987)
- 39) 加甲艶照, 小田日出夫, 豊田広三: 傾斜草地の土壌保全に関する研究, V, 傾斜草地の水の侵入能, 草地試験場研究報告, 18, 127-136 (1981)
- 40) 加藤芳朗: 東北地方の「黒ボク」土壌の一般理化学性-火山灰土壌との対比を中心として-, 日本土壌肥科学会誌, 41, 173-177 (1970)
- 41) KEMPER, W.D.: Solute Diffusivity; in *Methods of Soil Analysis*, Part 1, 2nd ed., p.1007~1024, ed. A. Klute, American Society of Agronomy, Inc., Madison, U.S.A. (1986)
- 42) 木曾誠二, 菊地晃二: チモシー (*Phleum pratense* L.) を基幹とする採草地におけるマメ科草混生割合に基づいた窒素施肥量, 日本草地学会誌, 34, 169-177 (1988)
- 43) 木曾誠二, 菊地晃二: チモシー (*Phleum pratense* L.) を基幹とする採草地の窒素施肥配分に関する研究 I. 窒素施肥配分が数種のチモシー品種の乾物収量に及ぼす影響, 日本草地学会誌, 35, 293-301 (1990)
- 44) 木曾誠二, 菊地晃二: チモシー (*Phleum pratense* L.) を基幹とする採草地の窒素施肥配分に関する研究 II. 窒素施肥配分がチモシーとマメ科草混播草地の乾物収量に及ぼす影響, 日本草地学会誌, 36, 338-346 (1991)
- 45) 近藤秀雄: オーチャードグラスのリン酸栄養診断, 日本草地学会誌, 34, 286-291 (1989)
- 46) 弘法建三, 大羽裕: 火山灰土壌の有機物含量・炭素率および腐植の形態と土壌の風化度・母材型との関係, 日本土壌肥科学会誌, 45, 227-233 (1974)
- 47) 弘法建三, 大羽裕: 火山灰土壌の腐植の集積要因および腐植が土壌の諸性質におよぼす影響, 日本土壌肥科学会誌, 45, 293-297 (1974)
- 48) 櫛引英男: 北海道におけるサイレージ用トウモロコシ栽培, 農業技術, 34, 300-302 (1979)
- 49) 前田隆, 相馬尅之, 佐々木清一: 腐植が土壌の物理性におよぼす影響, 農土論集, 61, 9-17 (1976)
- 50) 松原一實, 菊地晃二: 根釧地域における農業立地に関する研究, 第1報, 土層配列から見た土地改良および土層改良の可能性について, 日本土壌肥科学会講演要旨集, 29, 235 (1983)
- 51) 松田一: 北海道の気候の地域性, 堀口郁夫 北海道農業における気象情報と先端的利用, 28-36, 日本農業気象学会北海道支部, 札幌 (1992)
- 52) 松本武彦, 小出佳正, 吉川直, 能代昌雄: 根室管内における糞尿の処理・利用の実態と問題点, 北農, 60, 380-384 (1993)
- 53) 松本武彦, 木曾誠二, 松中照夫, 能代昌雄: 根釧地方における牧草収量の変動要因 2. 1番草乾物収量に影響を及ぼす環境要因, 日本土壌肥科学会講演要旨集, 40, 146 (1994)
- 54) 松中照夫: 寒冷・寡照地域のチモシー草地に対する窒素施肥法に関する研究, 北海道立農業試験場報告, 62, 1-72 (1987)
- 55) 松中照夫, 小関純一: チモシー1番草生育に及ぼすN, P, K供給時期の影響, 日本土壌肥科学会誌, 53, 99-105 (1982)

- 56) 松中照夫, 小関純一, 近藤熙: 北海道根釧地方の採草地に対する液状きゅう肥の効率的施用法, 日本土壤肥料学会誌, 59, 419-422(1988)
- 57) 松中照夫, 小関純一, 松代平治, 西陰研治: 根室地方の採草地における植生, 施肥量, 土壌の化学性が生草収量に及ぼす影響, 北海道立農業試験場集報, 49, 22-31(1983)
- 58) 松中照夫, 小関純一, 松代平治, 西陰研治: 経年化に伴う草地生産力低下の土壌間差異, 日本草地学会誌, 49, 212-218(1983)
- 59) 松中照夫, 小関純一, 松代平治, 赤城仰哉, 西陰研治: 収量規制要因としての草種構成の重要性, 日本草地学会誌, 30, 59-64(1984)
- 60) 松中照夫, 村上憲一, 三浦俊一: 草地酪農地帯における厩肥の成分含量とその施用実態—北海道別海町中心に—, 畜産の研究, 31, 54-56(1977)
- 61) 松中照夫, 三枝俊哉: 北海道根釧地方に分布する主要火山性土の牧草生産力, 北海道立農業試験場集報, 54, 39-48(1986)
- 62) 松中照夫, 三枝俊哉, 松原一實, 菊地晃二: 北海道根釧地方に分布する主要火山性土の理化学的性質, 北海道立農業試験場集報, 53, 81-92(1985)
- 63) 三木直倫: 寒冷地における草地土壌の有機物並びに窒素の経年的動態とそれに基づく窒素施肥管理法に関する研究, 北海道立農業試験場報告, 78, 1-98(1993)
- 64) 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, 49-91, 博友社(1982)
- 65) 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効率と土壌窒素供給力, 北海道立農業試験場集報, 51, 43-54(1984)
- 66) 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、土壌水分特性の關係, 北海道立農業試験場集報, 54, 21-30(1986)
- 67) 水野直治, 南松雄: 硫酸—過酸化水素による農作物中N,K,Mg,Ca,Fe,Mn定量のための迅速処理法, 日本土壤肥料学雑誌, 51, 418-420(1980)
- 68) 諸遊英行: 土壌中におけるカリの有効性と飼料作物に対するカリの施肥効果, 中国農試報告, 9, 19-102(1973)
- 69) 日本分析化学会北海道支部編: 水の分析第3版, 176-178, 化学同人(1986)
- 70) 日本化学会編: 化学便覧基礎編Ⅱ, 1044-1046, 丸善, 東京(1966)
- 71) 農業技術研究所化学部土壌第3科: 農耕地土壌の分類—土壌統の設定基準および土壌統一覧表(第2次案改訂版), 1-28(1983)
- 72) 農林水産省農林水産技術会議事務局編: 日本飼養標準 乳牛, 10-12, 中央畜産会, 東京(1994)
- 73) Nye, P.H. and Tinker, P.B.: Solute Movement in the Soil-Root System, 69-91, Blackwell, Oxford(1977)
- 74) 岡島秀夫: 土壌肥沃度論, 農産漁村文化協会, 162-173(1976)
- 75) Olsen, S. R., Kemper, W.D., and Lackson, R.D.: Phosphate diffusion to plant roots, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26, 222-227(1962)
- 76) Olsen, S. R. and Watanabe, F. S.: Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 27, 648-653(1963)
- 77) 大村邦男, 木曾誠二, 赤城仰哉: 火山灰草地における施肥管理が草地の経年変化に及ぼす影響, 北海道立農業試験場集報, 52, 65-78(1985)
- 78) 大村邦男, 関口久雄, 赤城仰哉: 牧草の苦土欠乏症発現とその施肥対策, 北海道立農業試験場集報, 55, 1-12(1986)
- 79) 大村邦男, 赤城仰哉: 根釧火山灰草地の施肥法改善, 第1報, 採草地における土壌と牧草の無機組成の実態, 北農, 48(12), 20-37(1981)
- 80) 大村邦男, 赤城仰哉: 根釧火山灰草地の施肥法改善, 第3報, 草地に対するりん酸の施肥について, 北農, 49(7), 1-26(1982)
- 81) 大村邦男, 赤城仰哉: 根釧火山灰草地の施肥法改善, 第5報, 土壌中の石灰含量が牧草生育におよぼす影響, 北農, 49(12), 1-12(1982)
- 82) 大村邦男, 赤城仰哉: 根釧火山灰草地の施肥法改善 第6報 草地に対する堆きゅう肥の施用効果について, 北農, 50(6), 1-23(1983)
- 83) 大村邦男, 赤城仰哉: 火山灰草地における土壌可給態りん酸の定量法と適正基準値の設定に関する研究, 北海道立農業試験場集報, 51, 61-72(1984)
- 84) 三枝俊哉, 加藤英孝, 天野洋司: 根釧地方の火山性土における塩化物イオンの拡散に及ぼす吸着と体積含水率の影響, 日本土壤肥料学雑誌, 67(1)
- 85) 三枝俊哉, 菊地晃二, 近藤熙: 根釧地方の火山性土における草地のカリ肥沃度に基づくカリ施肥対応, 北海道立農業試験場集報, 60, 99-109(1990)
- 86) 三枝俊哉, 松原一實, 能代昌雄: 根釧地方の火山性土における草地のリン酸肥沃度に基づくリン酸施肥対

- 応, 北海道立農業試験場集報, 60, 111-124(1990)
- 87)三枝俊哉, 松原一實, 能代昌雄: 火山性土に立地した草地のリン酸肥沃度に対応したリン酸施肥量, 日本土壤肥科学雑誌, 61(5), 522-525(1990)
- 88)三枝俊哉, 中島和彦, 能代昌雄, 堤光昭: 北海道根釧地方における2次元ノンパラメトリックDVR法によるチモシー (*Phleum pratense* L.) 1番草の出穂期予測メッシュ図, 日本草地学会誌, 40, 171-178(1994)
- 89)SAIGUSA, T. and NOSHIRO, M.: K and P application on grassland corresponding to the properties of andosols popular in eastern Hokkaido, Transactions of the 14th International Congress of Soil Science, vol.IV, 714-715(1990)
- 90)三枝俊哉, 能代昌雄: 根釧地方における草地土壌の粒別窒素無機化量, 日本土壤肥科学会講演要旨集, 36, (1990)
- 91)SAIGUSA, T. and NOSHIRO, M.: Nitrogen effects of barnyard manure applied on andosol grasslands in eastern Hokkaido, Proceedings of the 17th International Grassland Congress, I, 876-877 (1993)
- 92)三枝俊哉, 能代昌雄: 根釧地方の火山灰草地にすき込まれた堆肥による窒素減肥可能量, 北農, 60(4), 385-391(1993)
- 93)三枝俊哉, 能代昌雄: 根釧地方の火山灰草地に表面施用された堆肥による窒素減肥可能量, 北農, 61(1), 53-59(1994)
- 94)佐々木清一: 火山性土壌の生成論的研究, 第1報, 北海道樽前岳火山に由来する安山岩質浮石質火山抛物物について, 日本土壤肥科学雑誌, 28, 59-63(1957)
- 95)清野豁: アメダスデータのメッシュ化について, 農業気象 48, 379-383(1993)
- 96)関口久雄, 大村邦男, 赤城仰哉: 根釧火山灰草地におけるりん酸追肥効果, 北農, 49(4), 1-8(1982)
- 97)関谷宏三: 無機態リン酸の分別定量法, 土壤養分分析法, 235-238, 養賢堂(1973)
- 98)瀬尾春雄, 佐々木竜男, 富岡悦郎, 後藤計二, 片山雅弘, 天野洋司: 主としてカムイヌプリ岳火山灰の分布について, 北海道農業試験場土性調査報告書, 第13編, 169-197(1963)
- 99)So, H.B. and NYE, P.H.: The effect of bulk density, water content, and soil type on the diffusion of chloride in soil, J.Soil Sci., 40, 743-749(1989)
- 100)SOIL SURVEY STAFF: Keys to Soil Taxonomy, 5th ed., SMSS Technical Monograph No.19, 139-176, Pocahontas Press, Inc., Blacksburg, Virginia (1992)
- 101)田村昇市: 火山灰土の基本土壌型とその理化学的性質について, 日本土壤肥科学雑誌, 30, 567-576(1960)
- 102)富岡悦郎編: 北海道土壌図, 60万分の1, 北海道農業試験場(1985)
- 103)TUJINAKA, N., SAKAI, T., MAEDA, T. and SASAKI, S.: The studies on the relation between pore distribution of volcanic ejectas and distances from crater., J. Facul. Agr. Hokkaido Univ. Sapporo, 56, 267-291(1970)
- 104)和田光史: 土壌粘土によるイオンの交換・吸着反応, 日本土壤肥科学会編 土壌の吸着現象—基礎と応用—, 5-57, 博友社, 東京(1981)
- 105)WADA, K. and GUNJIKAKE, N.: Active aluminum and iron and phosphate adsorption in andosols., Soil Sci., 128, 331-336(1979)
- 106)WADA, K. and OKAMURA, Y.: Measurements of exchange capacities and hydrolysis as means of characterizing cation and anion retention by soils, Proceedings of the International Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture, 811-815, Tokyo(1977)
- 107)山田忍: 火山性地土壌調査法と北海道における火山性土壌, 北海道農業試験場報告, 44, 1-93(1951)
- 108)山田忍: 火山性土壌, 北海道農業と土壌肥料, 石塚喜明編, 北農会, 17-32(1969)

Fertilizer Application Corresponding to Fertility of Grassland in Andosols Popular in Eastern Hokkaido

Toshiya SAIGUSA

Summary

Little definite information on andosols in Hokkaido was available for grassland for deciding the amount of fertilizer application adapted soil fertility. Therefore, nitrogen, phosphorus and potassium applications on timothy-legume mixed grassland corresponding to the soil fertility in andosols in Konsen district were indicated for high and stable production of grass at low cost.

The main andosols in this district are regosolic, ordinary, and cumulic andosol. They have been classified in Soil Taxonomy as Thaptic Udivitrand, Acrudoxic Vitric Melanudand and Pachic Melanudand, respectively. Regosolic andosol was distributed close to craters, so that its altitude was higher than that of the others. The texture in this soil was coarse and humus content was low. Therefore, water retentivity, cation retention power and the phosphate retention coefficient were less in regosolic andosol. The characteristics of the physical and chemical properties of cumulic andosol which was displaced far from the crater were completely contrary to those of properties in regosolic andosol. Ordinary andosol which was distributed between regosolic and cumulic andosol had properties intermediate between the physical and chemical characteristics of regosolic and cumulic andosols. The normal accumulated temperatures from May to September in this district were 2000-2300 degrees centigrade. They were relatively higher in the inland areas than that in the coastal areas. Normal precipitation for that period was 600-700mm. The pF of topsoil in the grassland was 2.0-2.5.

In these grasslands, the amount of nitrogen, phosphorus and potassium application corresponding to fertility was estimated at 8000-10000kg/ha of annual dry matter yield and stable botanical composition.

1. Nitrogen

Nitrogen sources for grasses in continuous use without fertilizer already has been classified as follows:

- a. Nitrogen released after renovation from grass and organic residues in previous surface of grassland.
- b. Nitrogen from barnyard manure plowed under grassland and topdressed
- c. Fixed nitrogen produced by legumes
- d. Nitrogen released from returned organic residues

Among those sources, the fixed nitrogen by legume (c) has already been estimated in the Konsen district, and nitrogen application corresponding to the legume ratio was recommended. Therefore, this study tried to estimate the nitrogen supply from barnyard manure (b) and soil organic matter (a and d).

1) Nitrogen supply from barnyard manure

In pure timothy grasslands on each andosol, annual nitrogen supply from barnyard manure plowed under was 1kg as N for 1t of barnyard manure in the first year after renovation, but this effect decreased to 0.5kg/t, and 0.3kg/t in the second and third years, respectively.

In pure timothy grasslands receiving a single topdressing of barnyard manure, annual nitrogen supply from barnyard manure application did not vary very much with the season of application, whether it was autumn or spring. Their amounts were estimated at 1kg/t as N in the first year (next year for the autumn application), 0.5kg/t in the second year and 0.3kg/t in the third year. The barnyard manure roles could also be adapted to the condition of annual topdressing.

2) Nitrogen from the soil

The amount of nitrogen mineralization from cumulic andosol in the incubation experiment was more than that from regosolic andosol. The

reason seemed to be the difference of accumulated organic residue in the surface of grassland. The amount and quality of accumulated organic residues depend on soil characteristics, the botanical composition of the grassland, and other maintenance methods of grassland. Although the amounts of nitrogen supply from the organic residues were large, those could not be estimated exactly from the factors mentioned above.

From the results of 1) and 2), the annual amount of nitrogen application F_N (kg/ha) should be calculated as follows;

$$F_N = N_{S_0} - N_{S_2} \quad (1)$$

where, N_{S_0} is the amount of annual nitrogen application with N corresponding to the legume ratio; 40kg/ha for 30-50% of legume ratio at fresh weight, 60kg/ha for 15-30%, 100kg/ha for 5-15% and 160kg/ha for less than 5%. N_{S_2} is annual nitrogen supply from the barnyard manure described above.

In timothy and white clover mixed grasslands on which various amounts of barnyard manure were applied, nitrogen application from equation (1) was sufficient to maintain good yields and botanical composition compared with the standard fertilizer plot without barnyard manure.

Consequently, the effectiveness of the results of pure timothy grassland could be adapted to the condition of timothy-legume mixtures.

2. Phosphorus

It has been recommended that soil phosphorus required more than 20mg/100g as P_2O_5 with Bray No.2 in andosol for sufficient grass growth from the experiment in ordinary andosol. Regosolic andosol and cumulic andosol differ greatly in phosphorus retentivity. Therefore, in this study, the requirement of soil phosphorus for sufficient grass yield in each andosol was estimated first. After that, the amount of phosphorus application corresponding to soil phosphorus level was recommended.

Phosphorus added to volcanic ash which has large phosphorus retentivity changed to slightly soluble not only for water but also for the solution

of Bray No.2. In the pot experiment, phosphorus uptake by timothy was equal to the decrease of phosphorus with Bray No.2 from regosolic andosols. But in cumulic andosols, the former was much greater than the latter. On the other hand, the former was equal to the decrease of inorganic phosphorus in any andosol. Timothy seemed to absorb phosphorus even from the fraction which was not extracted with Bray No.2.

In the field survey, when inorganic phosphorus for certain areas in cumulic andosols was as great as that in regosolic andosols, the amount of phosphorus uptake by timothy in the former was much more than that in the latter. Dry matter yield of timothy in cumulic andosol was higher than that in regosolic andosol, although phosphorus content in timothy was equal in both andosols.

From these results, phosphorus movement to the roots in cumulic andosol seemed to be smoother than that in regosolic andosol. Although the diffusion coefficient of regosolic andosol was larger than that of cumulic andosol in the same pF level. Thus, the root condition seemed to differ with each andosol.

Consequently, the amount of soil phosphorus with Bray No.2 for sufficient production of grasses in cumulic andosol would be lower than that in regosolic andosol.

From the results of phosphorus application test in 33 timothy-legume mixed grasslands, the amounts of soil phosphorus as P_2O_5 with Bray No.2 needed to maintain high yield and phosphorus content of the grasses with a fertilizer standard in Hokkaido (8000-10000kg/ha) were as follows:

Regosolic andosols: 30-60mg/100g

Ordinary andosols: 20-50mg/100g

Cumulic andosols: 10-30mg/100g

These results were successfully adapted to the prediction mentioned above.

When phosphorus with Bray No.2 was higher than these values, 40-50kg/ha of phosphorus application as P_2O_5 allowed a high yield, phosphorus content of the grasses, and a legume ratio to be maintain for at least 3 years.

When the amount of phosphorus with Bray No.2 was lower, 120-160kg/ha of fertilizer was required.

3. Potassium

It has been recommended that exchangeable potassium is required to be 18-30mg/100g as K_2O in andosol for grassland. Regosolic andosol, ordinary andosol and cumulic andosol differ largely in bulk density.

In the pot experiment, potassium uptake by timothy was as same as the exchangeable potassium reduced from any of the andosols. The same amounts of the exchangeable potassium per pot were needed for timothy in any andosol to get certain amounts of potassium uptake.

In the field survey, 250kg/ha of annual potassium uptake as K_2O was needed to maintain sufficient dry matter yield (8000-10000kg/ha) in each andosol. In order to satisfy this requirement, 300kg/ha of potassium fertilizer as K_2O along with exchangeable potassium in the 0-5cm layer of soil was necessary in each andosol. These potassium amounts were enough to maintain a stable legume ratio.

From the results, the amount of potassium application F_K (kg/ha) should be calculated as follows;

$$F_K = 300 - K_s \quad (2)$$

where, K_s is exchangeable potassium as K_2O (kg/ha) in 0-5cm soil before application in the spring.

According to the fertilizer standard in Hokkaido, 200-220kg/ha of potassium will be applied to meadows as fertilizer. Hence, in the 0-5cm soil layer, 80kg out of the 300kg/ha of exchangeable potassium were required. This value of potassium is expressed as K_2O by changing kg/ha to mg/100g with bulk density of each andosol as follows;

Regosolic andosols: 15-25mg/100g

Ordinary andosols: 20-30mg/100g

Cumulic andosols: 25-30mg/100g