

第 1 章

緒 言

1991年現在わが国の全草地面積は64万9000 haで、これは全耕地面積520万4000 haの12.5%に相当する。とくに北海道では52万6000 haの草地が存在し、これはわが国における全草地面積の81.0%、全耕地面積の10.1%に相当する。したがって面積規模からみると、草地はわが国における重要な土地利用形態の一つといえる。このことは北海道に限定した場合はさらに明確で、全耕地面積の43.5%が草地である（北海道農政部編平成元年度北海道農業統計表）。

草地は家畜を経由した乳製品または肉を最終産物とする農業形態を構成することから、単位面積当たりの生産額は少なく、草地を主な粗飼料生産の場とする草地型酪農では一戸当たり経営面積は一般の畑作や稲作に比べて大規模にならざるをえない。それゆえ、草地は土壌条件や気象条件が不良ではあるが地代が安い土地（地域）に立地することが多い。わが国においては北海道の環境がそれに相当し、北海道では草地面積割合が他府県に比べて極端に高い。そのなかでも草地は稲作、園芸などの土地収益性が高い作物やそれに次ぐ畑作が定着しにくい地帯に立地している。

北海道における主な草場地帯は、天北、根釧および十勝の周辺地域にあり、これらの地帯ではいずれも寒冷な気象条件と劣悪な土地条件のもとに草地が立地している。このうち天北地方の台地および丘陵地の環境条件は、積雪はあるが土壌凍結を伴わない寒冷な越冬条件と、降水量が非常に少ない場合を含む変動幅の大きい夏季の気象条件、ならびに物理性が劣悪な鈹質重粘土という土壌条件によって特徴づけられる。一方、根釧地方は、土壌が凍結する厳しい越冬条件と、日照時間が極端に少ない夏季の気象条件、ならびに養分供給力の低い新規火山性土という土壌条件下にある。

視点を牧草側に移すと、これらの条件は牧草が様々な環境ストレスを受けながら生育していることを意味する。すなわち、これらの地域の牧草は越冬前後の低温ストレス、養分に乏しい土壌条件における養分ストレス、さらには夏季の小雨時における低水分ストレスなどにさらされていると考えることができる。したがって、より多くの収量を得ることを目標とした育種や肥培管理法の改善策は、前者ではこれらストレスに対する耐性の強化を、後者ではとくに土壌に起因するストレスの軽減を内

包しているものとみなすことができる。これらのうち施肥方法に関しては、かつて草地が野草の延長上の作物として扱われていた時代には、草地における施肥量は少なく、いわゆる地力に依存した施肥管理を行っていた。しかし近年、より効率的な農業経営が求められるに至って、収量性の向上に加えてより良質な粗飼料生産が強く求められるようになった。それに呼応して、草地の造成、更新および施肥管理方策に関する技術的研究が急速に発展し、北海道においても1970年代には奥村⁽¹⁹³⁾、平島⁽⁹³⁾、1980年代に入って坂本⁽²²⁷⁾、松中⁽¹⁵⁴⁾らによって研究が進み、最近の三木⁽¹⁶⁵⁾、木曾⁽¹²²⁾、能代⁽¹⁸⁴⁾、三枝^(224, 225)らの研究によって草地における施肥法がほぼ確立された。これらは草地造成法と牧草生育に必要な養分を効率的に施用する施肥法に関連するもので、その適用は従来の農家慣行施肥量を増加させることにつながった。このような施肥量の増加は土壌の化学性、とくに草地表層土壌の化学性に大きな変化を与えることから、近年、施肥管理のあり方がしだいに問題視されるようになってきた。

以上の経過と実態を背景として、草地の施肥管理法に関する問題点とそれに関連する既往の研究の概要について以下に述べておきたい。

第1節 草地土壌における牧草肥培管理上の問題点

草地土壌の最大の特徴は、永年生作物である牧草を栽培することによる不耕起・連続利用にある。北海道の大部分の草地では一旦耕起して草地を造成した後、少なくとも7～8年の間は耕起せず、年間2～3回の追肥を行いつつ地上部のみの収穫を繰り返す草地管理法を採用しており、このことが草地土壌に重要な特徴を与えている。すなわち7～8年にわたる表面施肥の結果、草地土壌における表層（主に0～2 cm または0～5 cm 土層）の化学性に大きい変化がもたらされる。その代表的な変化が本論文で取り扱う①表層土壌の酸性化であり、詳しくは後述する。次いで、リンを代表とする②養分の表層蓄積が進行することが第二の特徴である^(160, 226)。さらに表面施肥に対応して③牧草根の大部分が0～5 cm 土層に集中し⁽¹⁹⁶⁾、牧草の養分吸収活力もこの土層でとくに高くなる⁽¹²⁶⁾。これら表面施肥から派生する種々の変化と並行して、不

耕起栽培を繰り返す結果、牧草リター（枯死茎葉）を主成分とする④粗大有機物が草地表層に集積し^(161, 162)、これを反映して⑤草地土壌の土壌微生物活性は表層土壌で高い^(88, 89, 90)。このほかに、不耕起栽培を繰り返しつつ、トラクターなどの機械走行により⑥表層土壌の圧縮が進行する⁽¹⁹⁵⁾。さらにこれらの変化が⑦経年的かつ累積的に進行することも草地土壌の特徴の一つである。

以上のような特徴を有する草地の肥培管理上の問題点として、まず、1) 経年的な収量低下があげられる。すなわち、上述のように、草地造成後数年ないし10年以上の期間不耕起条件で土壌を利用するなかで、牧草収量が漸減するのが一般的な問題となっている。大村ら⁽¹⁹⁴⁾がとりまとめた根釧農試の長期肥料施用試験の結果でも経年数の増加に対応して収量が低下している（図1）。経年

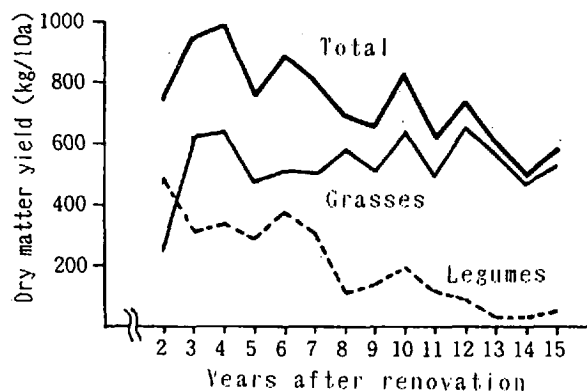


Fig. 1 Yield changes in the standard treatment (N, P and K were applied) of NPK-fertilizer application experiment (Omura, 1985⁽¹⁹⁴⁾).

的な収量低下の要因の一つとして2) 植生の悪化がある^(152, 194, 273)。つまり、造成時に播種されたオーチャードグラスまたはチモシーとシロクロローバまたはアカクロローバなどのイネ科とマメ科牧草の混生状態が経年的に変化し、多くの場合、マメ科牧草が消滅し、イネ科牧草の混生割合が上昇し、さらに雑草が侵入するのである（図1）。したがって、草地では一般に一定の植生を長期間保つことが困難とみなせる。その主要な要因として3) 不適切な施肥管理があげられる。すなわち、一定の収量を得つつ適正な草地を維持するためには、現存するマメ科牧草割合に応じた適切な施肥量（とくに窒素肥料）が施与されることが必要であるが⁽¹²¹⁾、草地の植生はまちまちであるにもかかわらず、植生に対応した量の施肥が行われているわけではなく、一律の施肥管理が行われている場合が多い。さらに、土壌から供給される窒素が経年的に減少することの影響も加わり⁽¹⁶⁴⁾、植生はさらに悪化する

ことになる。経年的な収量低下や植生悪化の重要な要因として4) 土壌物理性の悪化や5) 土壌化学性の変化をあげることができる。これらのうち物理性については、施肥や収穫作業のための機械走行による土壌の圧縮によって牧草生育が制限されるものであり⁽¹⁹⁶⁾、化学性で重要なものは経年的酸性化である。これらの要因は、草地においては機械走行が必然的で、表面施肥も不可欠であることから、ともに草地土壌のもつ不可避的、本質的な特徴であるといえる。

なかでも土壌の酸性化は草地管理において常につきまとう重要な問題点である。すなわち、降水量がある程度以上ある条件では雨水によって土壌中の塩基が溶脱するために土壌は酸性化するが、これに化学肥料の施用が重なるると酸性化の速度は一気に上昇する^(1, 21, 113, 197, 234, 235)。年間1000ミリ以上の降水量がある北海道では、一定の品質の牧草を十分確保するためには相当量の肥料を施用することが不可欠である。草地の場合、一回の窒素施肥量は2~6 kgN/10aで畑地などに比べてそれほど多くはないが、施肥位置が表層に限られ、しかも年間数回かつ数年以上にわたって連続的に施用されるために、土壌表層に対する化学肥料施用の影響は累積的に大きくなるものと考えられる。最近の北海道における草地土壌のpHを、全道で実施された土壌診断のデータからみると、0~5 cm土層では全体の約35%がpH 5.5以下の酸性土壌であり、対象を作土層にまで広げても約16%が5.5以下である（図2、図3）。草地造成時にはpH 6.5を達成するに十

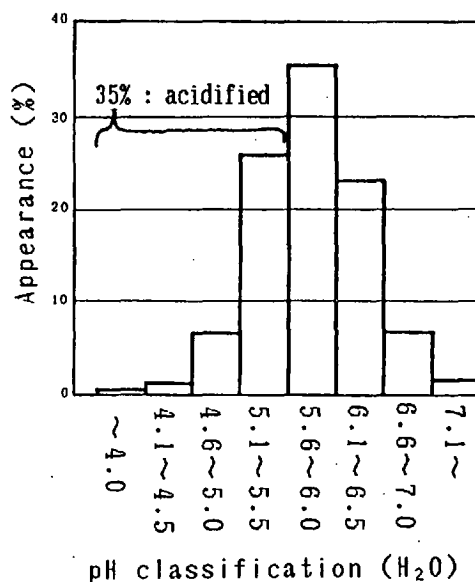


Fig. 2 Soil pH of grasslands in Hokkaido: 0-5 cm layer, n=26,818. (1988)⁽⁹⁵⁾.

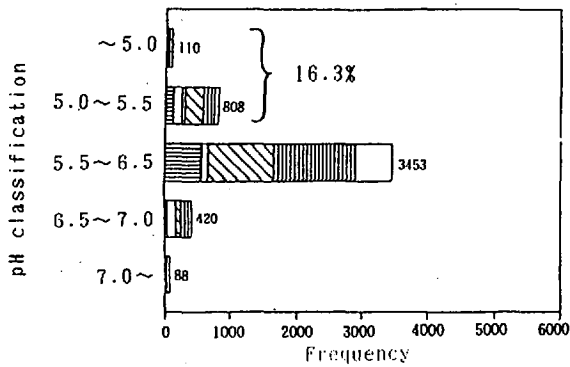


Fig. 3 Frequency distribution of soil pH of grasslands in Hokkaido ($n = 5645$, 0-5 cm layer and/or plowing layer, Different hatch shows the year of survey: 1984-1988) ⁽¹⁰¹⁾.

分な量の石灰質資材を施用しているのが一般的なので、これら酸性土壌は草地の維持段階で経年的に出現したと考えるのが妥当である。また、0~5 cm という表層土壌に限定した場合に酸性土壌の出現割合が高いことは、維持段階における土壌酸性化が表層から進行することを示唆するものである。これらのことは、さらに草地の経年数と pH の関係としてまとめることにより、より明瞭になる。すなわち、根釧地域の火山性土地帯で実施した調査の結果から、草地土壌の pH が経年的に低下することが示され (図4)、さらに、これら経年的な酸性化の進行速度が火山性土の種類によって異なることも指摘されている ^(98, 151)。

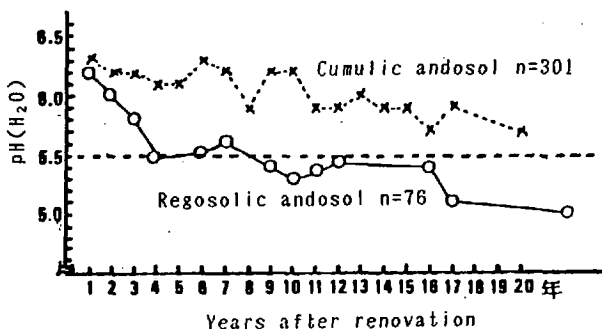


Fig. 4 Changes in soil pH of grasslands in the volcanic ash soils with years after renovation ⁽⁹⁸⁾.

以上に述べたように、アメリカ合衆国やニュージーランド・オーストラリアなどに比べて集約的な管理が求められる北海道の草地の維持管理においては、経年的な土壌の酸性化は不可避免な問題点である。さらに、草地において、牧草根が経年的に土壌表層に集中することは、牧草の生育に対する酸性化の影響をいちだんと大きくさせるものであり、草地の経年的な収量低下に対する土壌酸性化の影響はかなり大きいと推察される。

第2節 土壌の酸性化に関する既往の研究

これまでに報告された経年的な土壌酸性化に関する研究は、酸性化の原因によって大きく3通りに分類することができる。すなわち、土壌酸性化に対する、1) 施肥そのものの影響、2) 作物の養分吸収の影響、および3) 酸性雨の影響、に関する研究がそれである。

1) 施肥による土壌の酸性化に関する研究としては馬鈴薯 ^(241, 272)、クワ ⁽¹⁰⁶⁾、トウモロコシ ^(113, 202)、輪作畑作物 ^(146, 218)、コムギ ⁽²⁰⁸⁾、草地 ^(1, 21, 113, 197, 234, 235) など多くの報告がなされており、いずれの場合にも施用する窒素肥料が土壌の酸性化の主原因であり、窒素施肥量に応じて pH が低下する点で共通している。しかしそれぞれの条件における酸性化の原因物質を注意深く調べると、硫酸、塩安などの生理的酸性肥料による直接的な塩基溶脱に起因する場合と、硝酸アンモニウム (硝安) を過剰に施用した場合や、アンモニアの硝酸化後起こる硝酸の溶脱に起因する場合とがみられ、それぞれの原因物質によって酸性化の進行は微妙に異なっている ⁽¹⁴⁵⁾。我が国においては主に価格の点から硝安の利用は少ないことの影響もあるために、硝酸の流亡による酸性化は一般的ではない。

酸性化の程度は土壌によっても異なる。その違いは土壌の交換複合体の荷電総量、永久荷電と変異荷電の量比、塩基飽和度などによって生じる ⁽¹⁴⁵⁾。塩基溶脱に伴う酸性化の進行は鉍質土で著しく、腐植に富む火山性土では緩やかである ^(130, 183) が、このことは火山性土の交換基がカルシウムを強く吸着してアンモニアでは交換溶出されにくく、鉍質土壌の交換基はアンモニアを特異的に強く吸着して、カルシウムが容易に交換溶出されることによると考えられている ⁽¹⁴⁵⁾。また火山性土の種類によっても酸性化の進行速度は異なる ⁽⁹⁸⁾。

2) 施肥による酸性化とは別に、作物の養分吸収の過程で、吸収するアニオン量とカチオン量のアンバランス (アニオン量 < カチオン量) によって根から根圏 (rhizosphere) に対しプロトン (H^+) が放出されることにより土壌が酸性化することが認められている ^(87, 159, 232)。この場合、窒素肥料がアンモニア態窒素の場合に酸性化がみられ、硝酸態窒素の場合にはみられない。またカチオンを多く吸収するマメ科作物で酸性化が大きい。

作物種や牧草草種による根圏土壌を主体とした土壌の酸性化の違いについては以下の報告がある。Pierre ⁽²⁰¹⁾ はエンバクとソバで、Smiley ⁽²³⁹⁾ は小麦において根圏の酸性化を認め、Nye ⁽¹⁸⁵⁾ は根圏 pH の推定式を提案し、

Mengel もトウモロコシ⁽¹⁵⁹⁾やマメ科作物⁽²³³⁾からのプロトン放出を報告している。さらに Marschner⁽¹⁴³⁾はキュウリなどで土壌の酸性化を報告し、Jungk⁽¹²⁰⁾は根圏の酸性化に付随して起こるカリウムやリンの吸収機構について報告している。Haynes⁽⁸⁵⁾は最近、根圏酸性化機構についての総説を発表している。この他、牧草では Haynes⁽⁸⁴⁾がイネ科牧草とマメ科牧草による土壌の酸性化を報告し、Rixon⁽²¹⁶⁾は経年的な酸性化をペレニアルライグラスとシロクロバで比較している。Jarvis⁽¹¹⁰⁾らはサブテラニアンクロバやペレニアルライグラス、シロクロバにおける土壌の酸性化を報告し、Mengel⁽¹⁵⁸⁾はアカクロバとライグラスにおける土壌の酸性化を比較している。これらの研究を通覧することによって草種や作物種別の酸性化の程度の違いを定量的に比較することはできないが、土壌の酸性化の程度はイネ科作物に比べるとマメ科作物の方が大きいこと、これら根圏の酸性化は施肥に伴う塩基溶脱による酸性化に比べるとその影響範囲がごく狭いことなどがその特徴であると思われる。

3) 近年関心が高まっている酸性雨については、ライケンズらの総説⁽¹³⁴⁾、日本土壤肥料学会の調査報告書⁽⁴⁴⁾、Krug らの総説⁽¹²⁹⁾、Glass らの総説⁽⁷⁵⁾、あるいは Ronse らによる未耕地の酸性化⁽²²⁰⁾、Nygaard らによる森林土壌の酸性化⁽¹⁸⁶⁾などに報告されているように、土壌酸性化の要因の一つである。酸性雨による土壌の酸性化が作物や牧草に及ぼす影響に関しては金野⁽¹²⁸⁾、Lee⁽¹³²⁾、Evans⁽⁵²⁾、農水省農業環境技術研究所⁽¹⁸²⁾、Irving⁽¹⁰⁷⁾など多くの報告にみられるように、これも重要な問題点である。酸性雨による土壌酸性化の問題は施肥による酸性化や一般の酸性土壌における問題点と共通したものが多く、その情報は相互の研究上有効であると考えられる。

第3節 酸性化草地における牧草生育阻害要因とそれに関する既往の研究

降雨と施肥によって酸性化した草地における状況が一般の酸性土壌と同じと仮定した場合、田中ら⁽²⁵²⁾、但野らの報告⁽²⁴⁴⁾にしたがって次のようなことが考えられる。酸性土壌における作物生育阻害要因としては1) 酸性(低 pH) そのものによる害、2) 酸性条件で溶解度が高まるアルミニウム、3) マンガンなどによる害、酸性条件によって土壌中の存在量あるいは作物に対する可給度が低下する4) リンや5) カルシウム、マグネシウム、カリウムなど塩基類の不足、および6) 亜鉛、銅、ほう素、モ

リブデンなどの微量元素の欠乏、さらに酸性条件下で微生物活性が変化するために起こる7) 硝酸化成作用や窒素固定作用の減退などをあげることができる。これらのうち、低 pH そのもののみによる生育阻害は現実的には極端に pH が低い土壌や極端に低 pH 耐性が弱い植物種のような特殊な場合を除いてごくまれにしかおこらないと考えられる。一方、アルミニウムの生育阻害要因については Foy の総説^(61, 65)、我妻の報告⁽²⁶⁴⁾などに詳しく述べられているように、アルミニウム過剰吸収に起因する要因と、アルミニウム存在下で付随的に起こる要因とにわけて考えられる。

これらのうちアルミニウムの直接的な悪影響としては、Foy の総説⁽⁷⁰⁾にみられるように根の形態や機能に及ぶことが重要で、なかでも酸性土壌における根の伸長阻害として報告された例はダイズ^(103, 181, 198, 243)、ワタ⁽³⁾、ソルガム⁽²²⁾、オオムギ⁽²⁶⁹⁾、コムギ⁽²⁷⁰⁾、樹木^(135, 266)、イネ科牧草^(6, 77, 238)、マメ科牧草^(77, 116, 203)など広範にわたっており、ほぼ普遍的な現象として広く確認されている。アルミニウム障害の機構について、Sampson ら⁽²²⁹⁾はオオムギ根におけるアルミニウムによる細胞分裂停止の機構を DNA 合成の異常という観点から解析し、Matsumoto ら⁽¹⁴⁶⁾は 10^{-4} M のアルミニウムで伸長が阻害されたアラスカエンドウによって吸収されたアルミニウムの存在位置をしらべ、アルミニウムが主に核と細胞壁に存在していることを報告した。Wallace ら⁽²⁶⁵⁾はアルミニウム耐性を異にするコムギ品種を用い、アルミニウムは耐性の弱い品種に対しては DNA 合成阻害とそれに連動した根の伸長阻害を発現させ、両品種に対してチミジンの吸収阻害をもたらすと報告した。Morimura ら⁽¹⁷¹⁾はアルミニウムによる根の伸長阻害がアラスカエンドウの DNA 活性の低下に由来しているとし、Matsumoto ら⁽¹⁴⁷⁾はアラスカエンドウを供試しアルミニウム処理によって根のクロマチン RNA の合成が半減することを認め、これはアルミニウムによって DNA の RNA 複製が阻害されたためであると推察した。

一方、アルミニウムがリンとの間に特殊な関係をもつことを通した間接的な影響に関して、古く Wright⁽²⁶⁷⁾はオオムギを用いた実験から、アルミニウムによってリンが根部に蓄積し無効化することを見だし、Wright ら⁽²⁶⁸⁾は ^{32}P によるラジオオートグラフからアルミニウムとリンが根中で結合しリンの無効化がおきていることを報告した。Clarkson⁽³⁴⁾はオオムギのリン吸収に対するアルミニウムの影響についてしらべ、アルミニウム処理によって根のリン量が増加し、無機態リンは細胞表面またはフリースペースにおいてアルミニウムと沈殿したこ

と、アルミニウムはミトコンドリア内でヘキソキナーゼ活性を抑制し、糖のリン酸化を阻害すると推定した。またアルミニウムはリン吸収を阻害するが、地上部へのリンの移行を阻害しないと考えた。Andrew ら⁽⁸⁾は耐酸性の異なる暖地型マメ科牧草を用いてリン吸収に対するアルミニウムの影響をしらべ、耐酸性の強い草種ではアルミニウムの共存によってリン吸収が増加し、弱い草種ではリン吸収が低下することを報告した。Jones ら⁽¹¹⁵⁾はトマトを用い、正常なリン栄養を維持するために低 pH では高 pH より高濃度のリンが必要であることを認めた。Clarkson⁽³⁵⁾はオオムギ根に対するアルミニウムのとりこみについてしらべ、根にアルミニウムと共存するリンは根表面に存在するために再交換が可能であると推定した。Tan ら⁽²⁵⁰⁾はアルミニウム耐性の弱いソルガム系統においてはアルミニウム処理によって生育量は低下するがリン吸収・同化量は増加することを認め、同じく Tan ら⁽²⁴⁹⁾はアルミニウム耐性の強いソルガム系統では低濃度のアルミニウム処理では生育に影響を及ぼさないが高濃度のアルミニウムによって主に根の伸長阻害による生育低下がみられ、培養液リン濃度を高めることによりアルミニウムの影響を緩和できたが、高濃度のアルミニウム処理条件ではリンの効果はもはやみられなかったことなどから、アルミニウムとリンの相互関係においてはアルミニウムの濃度レベルが重要であることを指摘した。McCormic ら⁽¹⁵⁵⁾はオオムギなどでアルミニウムがリン吸収を阻害すること、その場合モリブデンブルー染色法によってアルミニウム-リンが根端 1~5 mm に存在することを認め、電子顕微鏡によってアルミニウム-リンの沈殿が根表面に沿ったムンゲル層または根端近傍の細胞間に存在することを認めた⁽¹⁵⁶⁾。Naidoo ら⁽¹⁷⁷⁾は走査型 X 線電子顕微鏡によってインゲンとワタの根におけるアルミニウムとリンの存在位置をしらべ、アルミニウムとリンの共沈が根冠外部の表面または内部にみられ、アルミニウムの濃度は核において最大であり、細胞内部では核酸と膜脂質のエステルリン酸にイオン交換によって集積していると推定した。これらの研究を通覧すると、アルミニウムが根の伸長を阻害すると同時に、根部においてアルミニウムはリンに対してなんらかの特異的な作用をもたらし、結果として作物のリン吸収を阻害すると考えられる。以上のように、アルミニウムは酸性土壌における最も重要な生育阻害要因である。

酸性条件でアルミニウムと同じように濃度が上昇するマンガンによっても作物の生育は低下するとされている。これらに関しては Adams の総説⁽²⁾、Foy の総説^(61, 63, 65, 68)などに詳しく述べられているが、いずれの場合におい

てもマンガン単独ではカルシウム、リン、鉄の含有率には影響を及ぼさず、またマンガンが高濃度である場合にはアルミニウムも高濃度であることが多いので、マンガン過剰症とされる生育障害がアルミニウム過剰と複合した結果である可能性がある⁽²⁴⁴⁾。

酸性土壌では多くの場合、リン供給が不足しているので、リンが生育の制限要因となることが多い。また pH そのものの低下もリン濃度の低下を引き起こす場面があり、Murrmann らが土壌の可溶性リンや Labile-P 濃度は pH 5.5 で最小となり、それ以上あるいはそれ以下の pH では高まると報告したように⁽¹⁷⁶⁾、少なくとも pH 7 付近から pH 5.5 まではリン濃度は pH の低下に伴って減少すると考えられる。ただし、この場合、極端に pH が低下した場合にはリン濃度の問題は解消すると見なせる。一方、pH 低下に伴い作物のリン吸収力も低下する。このように酸性条件下ではリンがきわめて重要な要素である。

牧草のリン栄養に関連した研究としては、Lambert ら⁽¹³¹⁾はベレニアルライグラス、チモンシーなどの牧草地上部リン含有率の変動に及ぼす生育ステージの要因解析を行い、生育ステージが草種・品種の要因以上に重要であることを示した。Nguyen ら⁽¹⁸⁰⁾は34年間にわたる過石連用試験から、灌水条件下のベレニアルライグラス・シロクロバ草地には 21~24 kgP/ha の施用量で十分であったことなどを報告した。近藤⁽¹²⁷⁾はオーチャードグラスのリン含有率と生育量の関係を検討し、リン栄養診断の部位として1番草の無出穂分けつ茎が適切であり、0.57 P₂O₅% 以下が欠乏レベル、0.69% 以上が充足レベルであると報告した。Goh ら⁽⁷⁶⁾も30~80年間にわたるベレニアルライグラス草地に対する過石連用試験から、蓄積リンの肥効を各種分析方法によって解析し、Saunders ら⁽²³²⁾は肥料を施用しない輪換放牧草地における土壌の有効態リン含量と牧草中のリン含有率の季節変動要因を解析し、春先の 0.01 M CaCl₂ 可溶性-土壌リン量の上昇が冬期間に土壌有機物から無機化するリンに起因すると推定した。

Dahmane ら⁽⁴⁰⁾はマメ科牧草の Jamalong medic から Wimmera ライグラス間への窒素移譲に及ぼすリン施肥レベルの影響をしらべ、前者のアセチレン還元活性および両者の乾物収量ともに一定の最適リン施肥量 (160 ppm) が認められたが、窒素移譲量との関係は不明瞭であると報告した。Caradus⁽²⁸⁾は2種類のシロクロバ品種のリン含有率と各種形質の相互関係をしらべ、地上部リン含有率に対し再生芽×根部貯蔵量×リン施用レベルの有意な相関がみられたと報告した。Davis⁽⁴¹⁾はシ

クロローバ、アカクロローバ、アルファルファなどマメ科牧草のリン施肥反応を比較し、播種後半年から1年間に2回収穫した場合、生育に必要な最低リン含有率はシロクロローバ (0.34%) > アカクロローバ (0.28%) であることを報告した。Tate ら⁽²⁵⁵⁾は羊の放牧地における牧草のリン含有率と土壌の有効態リン含量の季節変化をしらべ、春から初夏における旺盛な牧草生育が前年の秋から冬にかけての有機物に由来するリンに依存していることを報告し、Paynter ら⁽¹⁹⁹⁾は採草用ペレニアルライグラスに対するリンの施肥量と施肥時期の影響をしらべ、年間2回収刈条件では刈り取り直前のリン施肥が最大の影響を及ぼすことを報告した。松中ら^(149, 150, 153)はチモンシロの1・2番草生育に対するリン供給時期の影響を水耕培養実験によって詳しく検討し、1番草では萌芽起生期から幼穂形成期または節間伸長期までのリン供給が重要であり、2番草に対してもこの影響が及び、2番草生育期間では独立再生長期以降のリン供給が重要であることを示した。Dionne ら⁽⁴³⁾はアルファルファにおけるリンの肥効に対する温度、土壌水分およびpHの影響をしらべ、リン反応性は低温で大きく、リン施肥によって根重が増大し、pH上昇によってリン吸収量が増大したと述べた。安田ら⁽²⁷³⁾は牧草を含む多数の作物のリン施肥反応を比較したが、牧草間には明瞭な違いが認められなかった。Collins⁽³⁶⁾はマメ科牧草のリンを含む養分含有率の季節変動と飼料としての圧ぺんの影響をしらべ、アカクロローバやアルファルファではリン含有率が不足している場合がみられること、圧ぺんによってリンなどの無機含有率を低下させることを報告した。Mahler ら⁽¹⁴¹⁾はシロクロローバとアカクロローバに対するリン施肥の影響をしらべ、アカクロローバはリン施肥量の増加に反応せず、これは菌根菌の感染による菌根形成効果によるものと推定した。Caradus ら⁽³⁰⁾はシロクロローバのリン施肥反応に対する草種間競合・刈り取り回数と土壌タイプの影響をしらべ、いずれの要因ともリン施肥反応に対し有意な影響を及ぼすことを認めた。Rowarth ら⁽²²¹⁾はパドックの牧草と羊の糞尿のリン含有率の季節変動を3年間にわたりしらべ、両者間に高い相関がみられたことから羊-牧草間のリン循環について考察した。Sanginga ら⁽²³⁰⁾はマメ科牧草の窒素固定能とリン施肥との関係をしらべ、リン肥沃度が低い場合、リン要求度はホストよりも根粒の方が大きことを明らかにし、Morel ら⁽¹⁷⁰⁾はペレニアルライグラスのリン吸収量に対する施肥リンと土壌リンの寄与度合いを³²Pを用いてしらべ、リン吸収量のうち土壌リンの割合はリン施肥量にかかわらず一定であることを報告した。Rangeley ら⁽²⁰⁷⁾はペレニアルライグラスの牧草

体栄養診断を試み、粉碎した茎葉部を希硫酸溶液で抽出するPi (無機リン) によって適切な指標が得られることを報告した。Pothuluri ら⁽²⁰⁵⁾はペレニアルライグラスに対する土壌蓄積リンの肥効を検討し、みかけの施肥リン利用率は8~67%であり、土壌リン肥沃度がある程度低い場合にはBray and Kurz No. 1の方法が最も正確に有効態リンを予測することを示した。Fageria ら⁽⁵⁴⁾はアルファルファ、アカクロローバ、コムギなどを用い水耕培養によって生育に最適な培養液リン濃度を求め、それはマメ科>イネ科であり、アカクロローバ (315 μ M) > アルファルファ (264 μ M) であると報告した。Russelle ら⁽²²²⁾はバーズフットトリフォイルについてのリンの土壌診断基準の基礎データを発表している。Chisholm ら⁽³³⁾はシロクロローバのリン吸収に対してある程度の塩素イオン (30-100 μ M) が必要であることを認めた。Morris ら⁽¹⁷²⁾は寒地型牧草と暖地型牧草のリン吸収を比較し、前者の地上部リン含有率は後者の2倍高いことを示した。このようにリン栄養に関する研究は数多いが、低pHとの関連で行った試験は極めて少ない。

土壌溶液中のリン濃度は他の養分に比べると著しく低いために、作物のリン吸収に対する根長の影響が大きい。そして根の伸長はアルミニウムによって阻害されるので、リン吸収はこの面でも酸性条件下で低下する。これらのことから、酸性条件における牧草のリン栄養は根長との関連においても重要である。根長とリン吸収に関する研究としてはHendriks ら⁽⁸⁷⁾はトウモロコシなどの根圏土壌からのリン吸収をしらべ、根毛からのリン吸収速度を計算した。Jungk⁽¹¹⁹⁾は根圏におけるリン吸収ダイナミクスを論議した。またJungk ら⁽¹¹⁸⁾はトウモロコシの根からのリン流入量を測定し、根へのリン流入速度は発芽後28日をピークとし、生育ステージの進行とともに低下したが、根を切断して短くしても他の根へのリン流入速度が変わらなかったことから、リン吸収速度は地上部のリン要求量ではなく根そのものによって律速されていると考えた。Steffens⁽²⁴²⁾は圃場条件におけるペレニアルライグラスとアカクロローバのリン吸収をしらべ、リン吸収量がペレニアルライグラスでアカクロローバより多かった理由を5倍も長い根長に求めた。この場合、リン吸収量と根長には高い正の相関関係が認められた。一方、単位根長当たりのリン吸収量はアカクロローバで多く、このことからこの草種では培地に必要なリン濃度はペレニアルライグラスより高く、リン肥沃度が低い土壌で両者が混播されたときにイネ科牧草が生き残る理由もこのことにあると考えた。Tadano ら⁽²⁴⁶⁾は9種の作物を供試して根から分泌する酸性フォスファターゼを測定し、作物

種間差はあるものの、いずれの作物でも低リン条件で酸性フォスファターゼの分泌が増加することを確認した。Foehseら⁽⁵⁶⁾はアブラナ、ハウレンソウ、トマトの根毛形成にリン供給が強い影響を及ぼすことを明らかにした。Anghinoniら⁽¹⁰⁾はトウモロコシを用いて土壌へのリン施肥→土壌におけるリン拡散→作物による吸収のシミュレーションモデルを提案した。Sachayら⁽²²³⁾は水耕培養のトウモロコシの根に対する培地リン濃度の影響をしらべ、リンを与えない場合、根が長くなり、酸性フォスファターゼ分泌量が増えることを認めた。Anuradhaら⁽¹¹⁾も培地のリン欠如処理が根の伸長促進効果をもつことを認めた。Foehseら⁽⁵⁷⁾は7種類の作物のリン利用効率を比較し、タマネギとトマトのリン利用効率は低く、コムギとアブラナは高かったが、この違いは根部・地上部比と単位根長当たりのリン吸収量によって説明できるとした。さらにFoehseら⁽⁵⁸⁾はリン利用効率に対する根毛の寄与度の高さを指摘し、この理由が根毛の細さによること、根部におけるリン流入量の作物種間差が最大流入量と根毛の数と長さによって決まると考えた。Itohら⁽¹⁰⁸⁾は6種類の作物を用いて根毛の密度と長さを考慮したリン吸収モデル式を作成し、高い精度でリン吸収量が予測できることを示し、さらに16のパラメータを利用してこれを改良した⁽¹⁰⁹⁾。Roemerら⁽²¹⁹⁾はコムギ9品種を用い、リン肥沃度が高い条件ではリン吸収に対して根長はそれほど重要ではないが低リン肥沃度の場合には根長あるいは根面積が重要な意味をもつとした。Caradus⁽²⁹⁾はシロクロバにおいても菌根菌に感染していない条件では根長がリン吸収に対して重要な要因であることを報告した。Misraら⁽¹⁶⁷⁾は根毛近傍土壌からのリン吸収をしらべ、根毛の重要性を指摘した。Cahnら⁽²⁴⁾はトウモロコシの根の生育速度を詳しくしらべた。Jungkら⁽¹¹⁷⁾はトウモロコシを用い、低いリン肥沃度条件ではリン吸収量が根長に比例するがリンに接している根長割合を減らしても単位根長当たりのリン吸収速度は変わらなかったのに対し、高いリン肥沃度条件では根長切除によって単位根長当たりのリン吸収速度が高まったと報告した。この結果は、低いリン肥沃度条件における単位根長当たりのリン吸収速度はすでに限界に達していたために、根長切除によってもそれ以上増大できなかったと解釈することもできる。一方、Mackayら⁽¹³⁷⁾はリン吸収量予測モデルに温度（気温、地温）要因が重要であることを指摘し、低温条件でリン吸収が低下する要因は根の生育速度が低下することであると報告した。岡島ら⁽¹⁹²⁾はダイズ幼植物の生育と地温の関係をリン肥効の面から検討し、低温で認められたリンの肥効は、低温が作

物生育に及ぼす直接的な影響を軽減することより、主として低温による土壌リン供給力の低下を補償する効果と考えた。Vincentら^(260, 261)はコムギの根の伸長に対して温度が重要な要因であることを指摘した。このように、酸性条件や低温条件におけるリン吸収に対する根の要因は非常に重要である。

酸性条件下ではカルシウムなど塩基の濃度も低下するのでこれらの欠乏による生育低下も起こりうる。しかし、北海道の草地の場合には、造成時に十分な土壌改良資材（炭酸カルシウムやマグネシウム・リン資材）を施用するのが一般的であるので、作土層全体の塩基が欠乏することはほとんどない。したがって、経年的酸性化条件においてもこれらの塩基欠乏が生育低下の主要因とはならないと考えられる。微量要素欠乏も酸性条件で顕在化することがみられる⁽²¹⁴⁾。しかし、牧草の微量要素欠乏に関する知見の集積はまだ少ない。酸性条件下では土壌微生物の活性が低下する⁽⁹⁰⁾ので、土壌表層に集積した有機物の分解が停滞し⁽¹⁶¹⁾、その結果養分の循環が低下する。このことによっても、牧草生育は確実に低下すると考えられる。

以上のことから、経年的酸性化条件における作物生育阻害要因の中心はアルミニウムの害にあり、並行して発生するにリン吸収や微生物活性への影響も重要な要因と考えられる。

第4節 耐酸性の草種間差に関する既往の研究

これまでに述べたことから、酸性化した土壌に普遍的に存在する最も重要な作物の生育阻害要因はアルミニウム障害であり、それから派生する問題点としてリン欠乏があると理解された。そこで以下にそれらに対する作物側の耐性に関する既往の研究について述べる。

1 牧草のアルミニウム耐性

牧草のアルミニウム耐性に関する報告は比較的多いが、いくつかの草種を比較した研究は数少ない。田中ら⁽²⁵²⁾は水耕培養によるアルミニウム耐性の作物種間差を比較する中でいくつかの寒地型牧草をとりあげ、アルミニウム耐性はオーチャードグラス⁽⁹⁰⁾＞イタリアンライグラス⁽⁸⁴⁾＞アルサイククロバ⁽⁷¹⁾＞メドーフェスク⁽⁶³⁾＞アカクロバ⁽⁴⁹⁾＞アルファルファ⁽⁴²⁾＞クリムソンクロバ⁽³⁴⁾の順であると報告した。ただし（ ）内の数字は10 ppmAl区と30 ppmAl区の－Al区に対する相対乾物重平均値を示す。北村⁽¹²⁴⁾は暖地型牧草18草種の土壌pHに対する反応を比較し、全般的に暖地型牧草の耐酸性は

寒地型牧草より強いこと、マメ科牧草の根粒形成の好適 pH はホスト作物のそれより高いこと、酸性土壌に対する主要な適応はイネ科牧草では根からの養分吸収効率の向上、マメ科牧草では根長の増大によることを報告した。Baligar ら⁽¹²⁾は酸性土壌の pH 矯正ポット試験でマメ科牧草の耐酸性を比較し、キャロルバードフットトリフォイル (強) > アカクロバ・シロクロバ (弱) > アルファルファ (非常に弱い) の順であること、耐酸性の弱い草種は石灰施用によりカルシウム含有率が高まりやすいことを報告した。Jo ら⁽¹¹²⁾は鉍質酸性土壌を用いたポット試験によってマメ科牧草の耐酸性を比較し、アルサイクロバ>シロクロバ>アカクロバ>アルファルファの順であり、酸性条件では根粒着生や窒素固定能が抑制されることを認めた。Andrew ら⁽⁸⁾は暖地型マメ科牧草 5 草種と寒地型イネ科牧草 6 草種のアルミニウム耐性を水耕培養でしらべ、寒地型牧草のアルミニウム耐性は *Trifolium rueppellianum* = *Trifolium semipilosum* > シロクロバ > *Medicago scutellata* = *Medicago truncatula* = アルファルファの順であり、アルミニウム処理によってカルシウムとリンの含有率が低下することを認めた。Edmeades ら⁽⁴⁹⁾は寒地型イネ科牧草 13 草種 (37 系統) のアルミニウム耐性を多数の水耕培養実験でしらべ、相対収量が 50% となる培養液アルミニウム濃度から判定したアルミニウム耐性はチューイングフェスキュ ($12\mu\text{M}$) > トールフェスキュ ($3.7-4.0\mu\text{M}$) $\geq$ オーチャードグラス ($2.4-5.4\mu\text{M}$) > ベレニアルライグラス ($1.5-4.5\mu\text{M}$) であり、オーチャードグラス、ベレニアルライグラスとも系統間 (品種間) の差が大きいとした。Baligar ら⁽¹⁴⁾は水耕培養でマメ科牧草のアルミニウム耐性を比較し、アルファルファがアカクロバやバーズフットトリフォイルより弱く、アルミニウム処理によってアルファルファは養分吸収量が低下したのに対しアカクロバでは低下が少なかったとした。この他、同一草種の品種あるいは系統間差を検討した例として、アルファルファでは Campbell ら^(25, 26), Devine ら⁽⁴²⁾, Baligar ら⁽¹⁵⁾, Rechcigl ら⁽²¹⁰⁾, アカクロバでは Campbell ら⁽²⁷⁾, Baligar ら⁽¹³⁾, シロクロバでは Mackay ら⁽¹³⁸⁾, 芝では Murray ら⁽¹⁷⁵⁾の報告がある。このように、寒地型牧草のアルミニウム耐性について草種間比較をした例はその数が限られており、しかもアルミニウム耐性の評価にはかなりの幅がある。

2 アルミニウム耐性の機構

Foy の総説^(61, 63, 65, 67)によれば、作物のアルミニウム耐性の機構としては i) 根圏の pH 上昇能, ii) アルミニ

ウム吸収と体内移動に関する機構, iii) NH_4^+-N と NO_3^--N に対する窒素利用性の違い, iv) カルシウム利用性の違い, v) リン利用性の違い, vi) 鉄, マグネシウム, シリカ, カリウムなどの利用性の違い, vii) 作物体内の有機酸組成の違い, などが考えられている。最近この他に viii) アルミニウム排除能が提唱されている^(37, 262, 263)が、いずれもアルミニウム耐性機構を根の機能を中心に検討した例が非常に多い。

根圏の pH 上昇能に関連して Foy ら⁽⁶⁵⁾はコムギ、オオムギ、イネ、マメ、トウモロコシではアルミニウム耐性の強い品種は培地 pH を上昇させ、アルミニウムの溶存濃度と毒性を低下させるとしている。このことは根から吸収されるアニオン-カチオンのバランスがアルミニウム耐性において重要な役割を果たすことを意味している。さらに Foy ら⁽⁶²⁾はアルミニウム耐性の強いコムギ品種は NH_4^+ 共存下で NO_3^- を効率よく利用する能力を持ち、培地 pH を高めることができると報告した。Taylor ら^(256, 257, 258)もアルミニウム耐性の強いコムギ品種は NH_4^+ と NO_3^- の吸収バランスによって培地 pH を上げる能力をもつと報告した。これらの知見から NH_4^+ と NO_3^- が共存する培地から NO_3^- をより選択的に吸収する能力が強い品種がアルミニウム耐性が強いと考えることもできる。

根から有機酸を分泌することによる耐性機構も考えられている。Foy ら⁽⁶⁶⁾はアルミニウム耐性の強いオオムギは根圏にクエン酸などの有機酸を多量に分泌することによって根細胞の破壊を防いでいると考えた。小島⁽¹⁸⁹⁾は 4 mM のアルミニウム溶液で継代培養して得られたアルミニウム耐性の強いニンジン細胞についてしらべ、培養後の培養液にクエン酸などの有機酸が検出されたことから、細胞外にクエン酸を分泌し、アルミニウムはそれによってキレート化されるためにアルミニウム毒が軽減すると推定した。北川⁽¹²³⁾はアルミニウム耐性の強いコムギ品種はアルミニウム添加によって根からのリンゴ酸分泌量が増大するが、アルミニウム耐性の弱い品種では減少すると報告した。一方、Foy ら⁽⁶⁹⁾はアルミニウム耐性の異なるコムギ 5 品種の地上部と根部の有機酸含量に対するアルミニウム処理の影響をしらべたが、アルミニウム耐性との明瞭な関連は認められなかった。Lee ら⁽¹³³⁾は高速液クロによってアルミニウム耐性の異なるインゲン 2 品種を用いアルミニウム処理による有機酸の変動をしらべ、アルミニウム耐性の強い品種は高い有機酸含有率を示し、根溢液中の有機酸含量の低下が小さかったことから、アルミニウム耐性種ではこれら有機酸によるアルミニウムのキレート化・無毒化能が高いと考

えた。さらに Miyasaka ら⁽¹⁶⁹⁾はこれらのインゲン品種のうちの耐性種が放出する有機酸の多くはクエン酸であり、その量は非耐性種の10倍にも及ぶことから、クエン酸によるアルミニウムキレート化による無毒化の他に、クエン酸による不溶性アルミニウムーリン化合物からのリンの溶解によるリン供給も考えられるとした。これらの知見から、アルミニウム耐性品種はクエン酸を代表とする有機酸を根から多量に分泌することはほぼ普遍的とみなせる。

アルミニウム耐性を根のカチオン交換容量 (CEC) から解析した例もみられる。小島ら⁽¹⁹⁰⁾はアルミニウム耐性の異なるコムギ根についてしらべ、耐性種の根のアルミニウム含有率が非耐性種に比べ著しく低く、このことが耐性種の根の CEC が非耐性種に比べて小さいことに由来すると考えた。Rengel ら⁽²¹²⁾もイタリアンライグラス根の CEC をしらべ、アルミニウム耐性の強い品種の CEC が小さいことを認めた。Mugwira ら⁽¹⁷³⁾はアルミニウム耐性の異なるライコムギとコムギにアルミニウム処理を行うと、培養液 pH を調整しない場合、両作物とも相対根長と根のアルミニウム含有率は逆相関し、根の CEC は耐性種の方が小さい傾向にあることを認めた。作物根の細胞膜ポテンシャルからアルミニウム耐性を解析した例として、Miyasaka ら⁽¹⁶⁸⁾はアルミニウム耐性種のコムギはアルミニウム存在下においても根細胞における正常なイオンの流れとプラズマレナマの膜ポテンシャルを保持する能力をもっていると考えた。Rengel ら⁽²¹³⁾はイタリアンライグラスの根からのカチオンの出入りを測定し、アルミニウム処理によって2価カチオンである Ca^{2+} と Mg^{2+} の放出量が減少する一方、1価カチオンである K^{+} と Na^{+} の放出量が増大し、この関係が生育ステージによって変化したことから、アルミニウム耐性がこれらの養分の放出と生育ステージとに密接に関連すると考えた。Millard ら⁽¹⁶⁶⁾は X 線走査型電子顕微鏡を用いてアルミニウム耐性のことなるオオムギ根の元素分布解析を行い、アルミニウム耐性種は非耐性種の2倍のアルミニウムーリンを根表面に含有しており、根の表面にアルミニウムーリン化合物を蓄積することによってアルミニウムが根の中に侵入することを防ぐことがアルミニウム耐性の機構と考えた。Wagatsuma⁽²⁶²⁾、我妻^(263, 264)は作物の根細胞の原形質膜にはアルミニウム排除能が存在し、この排除能は生理的に維持され、アルミニウム耐性種ではこの排除能が強いと推定した。Cumming ら⁽³⁷⁾は総説の中で、作物の金属ストレス耐性機構としての排除能の考え方は歴史が浅いが、生物学的あるいは生理学的に金属ストレスに対応する重要

な考え方であることを指摘している。

3 アルミニウム耐性検定方法論

酸性化した土壌で作物生産をあげる方法の一つは後述する土壌改良であるが、作物側の耐性を強化する方法も場合によっては有効で、そのどちらかを採用すべきかは経済的な判断によるところが大きい^(60, 64)。世界には酸性土壌が広く分布しており、多くの研究者が育種専門家と共同でアルミニウム耐性選抜を試みている。Reid ら⁽²¹¹⁾はオオムギのアルミニウム耐性を検定するために水耕培養を用い、その結果がポット試験の結果とよく一致したことから、検定方法として満足できるとした。この中で、アルミニウム処理を施したオオムギの根長は根重とは正の、根重または根長と根の数とは負の相関を示すことを認めた。Furlani ら⁽⁷²⁾は水耕培養によるソルガムのアルミニウム耐性品種の迅速検定法を提案し、根長を判定に用いた。Polle ら⁽²⁰⁴⁾はコムギ実生にアルミニウム処理を行い、その根をヘマトキシリンで生体染色する方法によってアルミニウム耐性が容易に判定できるとし、高木ら⁽²⁴⁷⁾はこの検定法を日本のコムギ品種で追試し、その有効性を認めた。Horst⁽¹⁰²⁾はカウピーのアルミニウム耐性検定法として $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 処理をした酸性土壌による7日間のポット試験で正確な選抜が可能であることを示した。Hill ら⁽⁹²⁾はソルガムのアルミニウム耐性迅速検定法として、播種後48時間目の発芽根をアルミニウムを含有する土壌に移植または培養液に浸し、相対根長から判定する方法の有効性を報告した。Briggs ら⁽²³⁾は水耕培養によるコムギの根長からアルミニウム耐性を検定し、アルミニウム耐性を示した系統の多くが圃場で高い収量性を示したと報告した。これらの知見から、アルミニウム耐性検定法が種々考案され、ある程度の現場適応性が得られてはいるが、なお完全ではないと考えるべきであろう。

第5節 草地土壤の経年的酸性化に対する対策とその理論

造成または更新という耕起時から年次を経て、上述のような酸性化を含む収量低下要因が増大した場合にとるべき対策は、最終的には草地更新である。この場合、適切な土壌改良資材や堆きゅう肥を施用することによって土壌の化学性は改善され、耕起による土壌の圧縮などの物理性の悪化も改善される。また、あらたに牧草を播種することによって草種構成も完全に改善できる。その結果理想的な草地がよみがえることがほぼ保証される。た

だし、問題点もあり、その第一は経費である。現在、草地更新に40万円/ha（このうち種子と肥料代が20万円）の経費を要し、10年しか維持できないとすると、原価償却費は年間4万円/haとなり、50haの草地を更新するには200万円の経費が必要となる。第二に耕起・播種から次の収穫までの最低数か月以上の間、その草地から収穫物が得られないことである。草地面積にゆとりがある場合はともかく、この期間は大きなロスとなる。これらのことから、草地を効率的かつ合理的に利用するためには、頻繁な草地更新に頼るのではなく、草地維持年限をできるかぎり長くすることが重要である。

草地の経年的な収量低下が主として土壌の酸性化に起因するとすれば、酸性化を防止する対策が草地更新の次に考えられる手段である。その対策としては、第一に酸性化の原因物質を草地に施用しないこと、そして土壌酸性化に関与するのは降水量と施肥量にあることから、制御が可能である施肥量を減らすこと、加えて酸性化の原因物質となる生理的酸性肥料を使用しないことが有効である。しかし、良質な粗飼料を必要かつ十分に得るには適切な施肥は不可欠で、生理的酸性肥料を使用しないことは経済的にも効率的ではなく、この方法は必ずしも実用的ではない。酸性化防止の第二の手段は石灰質資材を施用して土壌pHを中和することである。この方法は一般的に行われており、石灰質資材施用の効果に関する理論的解析研究は比較的多い。以下にその概要を述べる。

草地に対する炭酸カルシウム施用に関する研究では、小林ら⁽¹²⁵⁾はオーチャードグラス単播草地で元肥として施用したリン酸と石灰の残効および両成分の累年追肥の効果を10年間検討し、連年追肥区のオーチャードグラス収量が初年目の水準を維持し、その効果は炭酸カルシウムよりリン酸の方が大きいこと、炭酸カルシウム追肥が酸性化に伴う雑草侵入の防止とリン酸の肥効を高めること、及び年間5～6回収穫したオーチャードグラスの年平均リン含有率の正常下限値が0.5 P₂O₅%であることを認めた。また、Edmeadesら^(47,48)及びMansellら⁽¹⁴²⁾はニュージーランドにおける放牧地に対する炭酸カルシウム施用試験（126件）の結果を総括し、炭酸カルシウムとリンの効果に負の相関がみられる場合が多く、炭酸カルシウム施用の目標値は牧草生育が頭打ちとなるpH 5.8～6.1（鈹質土）またはpH 5.0（有機質土壌）がよいとした。Adams⁽⁴⁾は炭酸カルシウムと尿素の用量試験をpH 4.7～5.6の採草地で5年間実施し、炭酸カルシウム施用によって牧草収量は増加せず、牧草体のマンガンやリン、マグネシウム含有率を低下させたと報告した。Fageriaら⁽⁵⁵⁾は酸性土壌のコモンビーンとアルファルファ

に対する炭酸カルシウム施用試験から、炭酸カルシウム施用は地上部、根部両者の生育を増大させ、土壌pHと交換性カルシウムおよびマグネシウムとの間には正、土壌交換性アルミニウムとの間には負の相関がみられ、最大収量を得たpHはアルファルファで5.8、コモンビーンで5.0であるとした。Rechciglら⁽²⁰⁹⁾はオーチャードグラス草地に不耕起で播種したアルファルファに炭酸カルシウムを表面施用したところ、収量は2倍以上に増加し、深さ1.0～1.5mの根量が増加したが、4月または8月における炭酸カルシウムの施用は影響しないと報告した。Toxopeus⁽²⁵⁹⁾はニュージーランドの羊の放牧地に炭酸カルシウムを施用すると羊の体重にわずかな効果がみられ、土壌のpHおよび交換性カルシウムに対する効果は少なくとも7年間にわたりみられると報告した。Shannonら⁽²³⁶⁾は炭酸カルシウムの施用時期の影響をしらべ、効果が高いのは夏～秋であり、春施用は効果が小さいかマイナスであることを報告した。Baligarら⁽¹²⁾は6種のマメ科牧草を供試して酸性土壌に対する水酸化カルシウム施用ポット試験を実施し、水酸化カルシウム施用によって地上部、根部ともに乾物重が増加し、牧草体カルシウム含有率が高まり、マグネシウム、カリウム、亜鉛含有率が低下すると報告した。さらに地上部生育量から判定した耐酸性はアルファルファ（非常に弱い）＜アカクロバ・シロクロバ（弱）＜フラットビー（中）＜ダイズ、バーズフットトリフォイル（強）であり、地上部カルシウム含有率は耐酸性が強いほど低い傾向にあるとした。

土壌化学性に及ぼす炭酸カルシウム施用の影響に関する研究についてみると、Curtinら⁽³⁸⁾は炭酸カルシウム施用土壌の土壌溶液組成の経時的変化を追跡し、施用1週間後にpH、カルシウム、炭酸、硝酸および有機物濃度が上昇し、カリウムとシリカが低下したが、日数の経過によるpHの低下に伴い塩基と硝酸濃度が上昇することを報告した。また、炭酸カルシウム施用（4.2～12.5 t/ha）によって土壌溶液のpHとカルシウム濃度が増加し、マグネシウム、カリウム、ナトリウム、シリカおよびマンガンの濃度が低下し、さらに窒素の無機化によって硝酸濃度が上昇することを報告している⁽³⁹⁾。Evansら⁽⁵¹⁾も土壌溶液組成をしらべ、土壌の有機物含量によってアルミニウム濃度が異なることを報告した。Edmeades⁽⁴⁶⁾は炭酸カルシウム施用によって土壌の有効カチオン交換容量（ECEC）が増大することを認め、同様なことはBartlettら⁽¹⁸⁾も報告している。吉田ら⁽²⁷⁵⁾は酸性火山性土壌に対する炭酸カルシウムの施用によって土壌のリン吸着力が増大することを報告し、Naidu

ら⁽¹⁷⁸⁾は炭酸カルシウム施用による pH の上昇に伴ってリン吸着量が一旦減少した後増加し、pH 6 以上におけるリン吸着の増大は難溶性カルシウムリン化合物の生成によると指摘している。またいずれの土壌でも pH 4.0 から pH 5.5 の領域では低 pH 側で交換性リンが増加したと報告した。Haynes⁽⁸³⁾は生土に炭酸カルシウムとリンを施用して培養した場合にはリン吸着量が増大するが、風乾土では逆に減少することを報告した。Smyth ら⁽²⁴⁰⁾はセラード土壌に対する炭酸カルシウムとリン施用試験から、炭酸カルシウムまたは事前のリン施用によって土壌のリン固定（吸着）量を減少させること、このうちリン施用がより効果的であること、またこれらの施用によって土壌の有効カチオン交換容量が増加することを報告した。Oates ら⁽¹⁸⁷⁾は石灰施用が酸性土壌の交換性アルミニウムを低下させる観点から抽出液の pH と共存イオン種によるアルミニウム減少効果のちがいをしらべ、鉍質土壌の場合には共存イオンの影響はみられず、有機質土壌（有機物 30% 以上）では銅 > ランタン > カリウムの差がみられたこと、有機質土壌では抽出液 pH に比例してアルミニウム量の減少が認められることを報告した。

炭酸カルシウム施用と作物によるリン吸収との関係に関する研究として、Martini ら⁽¹⁴⁴⁾はダイズについて、炭酸カルシウム施用によって土壌の交換性アルミニウムと抽出性マグネシウムが減少し、抽出性リンが増加するとともに根重が増加し、これに対応してリン吸収も増加したと報告した。Helyar ら⁽⁸⁶⁾は牧草 5 草種に対する炭酸カルシウムとリンの用量試験から、収量およびリン含有率ともに炭酸カルシウムに対する反応は草種間で異なることを報告した。Chen ら⁽³²⁾は酸性土壌に対する炭酸カルシウムとリンを添加した培養実験から、土壌 pH の上昇に伴って土壌溶液のリン濃度は低下するがアニオン交換樹脂抽出性のリンは増加し、Barber-Cushman の養分吸収モデルで予測したトウモロコシのリン吸収量も pH 上昇に伴って低下したと報告した。Bartlett ら⁽¹⁹⁾は酸性化した馬鈴薯耕作跡地土壌に炭酸カルシウムを施用して栽培したアルファルファとトウモロコシの最適 pH は 5.0-5.7 であり、pH がそれ以上の場合にはリン含有率の低下によるリン欠乏により生育量が低下したと報告した。さらにポット試験の結果から、炭酸カルシウム施用によってリンとホウ素の吸収が低下し、その原因は水酸化アルミニウムとの共沈あるいは吸着にあると推察した。Haynes ら⁽⁸¹⁾はシロクロバとロータスを酸性土壌に生育させたポット試験で、炭酸カルシウム施用によって水溶性 P、Morgan-P、樹脂交換性 -P、

Williams-P は有意に低下し、Bray-P はわずかに上昇すること、形態別には易溶性 -P、鉄型 -P およびカルシウム型 -P が減少し、アルミニウム型 -P が増加し、作物の収量とリン吸収はともに増加したと報告した。さらに炭酸カルシウム施用による土壌リンの有効性について多くの実験結果を比較し⁽⁸²⁾、炭酸カルシウム施用による有効態リンの増減が実験条件によって変動する原因の一つは、土壌を風乾することにあるとした。また有機態リンの無機化によって有効態リンが増加する現象がしばしばみられる一方で、高い pH 条件では不溶性のリン酸カルシウムの沈殿によりリンの有効性が低下することを指摘した。さらに、アルミニウムが作物によるリンの吸収、移動、利用それぞれの段階を阻害するために、炭酸カルシウム施用がアルミニウム毒性の軽減を通してのリンの利用性の向上をもたらすとした。下野⁽²³⁷⁾はアルミニウムなどの酸性障害が発生しない条件で畑作物に炭酸カルシウムを施用すると収量が増加したが、水溶性リンとトルオーグリンが低下し、作物のリン吸収量も低下し、この条件における収量増の主因は炭酸カルシウム施用によって土壌の窒素供給パターンが改善されることによる収穫指数の向上にあると考えた。Raij ら⁽²⁰⁶⁾は酸性土壌に炭酸カルシウムを施用することにより、ダイズおよびヒマワリの葉のリン含有率が高まったが、土壌の有効態リンは抽出方法により傾向が異なり、イオン交換樹脂法の有効性を認めた。Rhue ら⁽²¹⁵⁾は酸性土壌に栽培した馬鈴薯に対する炭酸カルシウム施用試験を 3 年間繰り返して、炭酸カルシウム施用によって作物のリン含有率が低下し、収量が低下することを認めた。Amarasiri ら⁽⁷⁾は酸性土壌に対する炭酸カルシウムおよびリン施用試験において、リンレベルに関係なく pH 6.5 に至るまでの pH 上昇によって可溶性リンが低下すること、その場合、栽培したキビは pH 5-6 に到達するまで収量、リン含有率ともに上昇したが、それ以上ではわずかに減少したと報告した。

以上のことから、酸性土壌に対する石灰質資材の施用効果の理論的解析のうち、とくにリン吸収との関連部分は不十分であり、また草地土壌の経年的酸性化に照準を合わせた炭酸カルシウム施用試験はみられない。

本研究は、これまでに述べた現状を背景として、草地における合理的な pH 管理法およびリン施肥法を確立することを目的に行ったものである。試験は 1980 年から 1992 年にかけて北海道立天北農業試験場および北海道立根釧農業試験場において実施し、草地土壌の経年的酸性化の機構と酸性化が牧草の生育に及ぼす影響を解析し、さらに酸性条件および低温条件下で問題が生じる牧草の

リン栄養を検討し、あわせて炭酸カルシウムの追肥効果を明らかにした。

謝 辞

本研究をとりまとめるに当たり、北海道大学農学部但野利秋教授には終始暖かい激励とご指導を賜り、きめ細やかなご校閲を頂いた。同じく佐久間敏雄教授および中世古公男教授に詳細なご校閲と適切なご教示を頂いた。

本研究は北海道立天北農業試験場と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。農水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。

元北海道立中央農業試験場化学部高尾欽弥部長（現ホクレン肥料株式会社）には天北農業試験場土壌肥料科長として本論文の研究の端緒を与えて頂いた。元北見農業試験場主任専門技術員佐藤辰四郎氏（現天北農業試験場総括専門技術員）には前任者として本研究のきっかけを与えて頂いた。中央農業試験場主任専門技術員坂本宣崇博士、十勝農業試験場土壌肥料科山神正弘科長、中央農業試験場環境化学部三木直倫博士、十勝農業試験場土壌肥料科東田修司博士には天北農業試験場土壌肥料科の先輩として圃場作業と論議を通じ多くのご指導を頂き、その成果は本論文の主要な部分の骨格形成に反映された。元天北農業試験場土壌肥料科長西宗昭博士（現農林水産省北海道農業試験場畑作研究管理官）には研究遂行に多くの便宜をはかって頂いた。

北海道立根釧農業試験場土壌肥料科能代昌雄科長には後半の研究遂行に多くの便宜を供与して頂いた。根釧農試土壌肥料科の木曾誠二博士（現中央農試）、三枝俊哉氏には共同作業と議論をともして頂いた。

USDA-ARS Beltsville Agricultural Research Center の Charles D. Foy 博士には実験の指導、文献供与、および適切な教示を頂くとともに、英文の校閲をお願いした。

元根釧農試場長中川渡氏（現札幌学院大学教授）および元根釧農試会計係長佐藤信博氏（現宗谷支庁農業改良係長）には研究の遂行に際し格段のご協力を頂くとともに、意義深い論議を通じ多くの刺激を与えて頂いた。元根釧農試場長国井輝男氏（現滝川畜産試験場長）および現根釧農試場長清水良彦氏には研究遂行およびとりまとめに際し、各種の便宜を供与して頂いた。元天北農試場長である斉藤亘博士、南松雄博士および後藤計二氏には研究遂行に際し各種のご協力を頂いた。農林水産省北海

道農業試験場草地部草地地力研究室長早川嘉彦博士には最終のとりまとめの際に多くの便宜をはかって頂くとともに、激励とご協力を頂いた。

以上の各氏に感謝の意を表する。

第 2 章

試験地の環境および圃場試験の方法

第 1 節 試験地の気候および土壌条件

本研究は1980年4月、北海道枝幸郡浜頓別町、北海道立天北農業試験場で開始した。同場は北緯45°07'，東経142°22'に位置し、標高22 mである。年平均気温は5.0℃，年降水量1143 mm，農耕期間（5月～10月）の平均気温は13.6℃，降水量は678 mmである。天北農業試験場の土壌は中位段丘堆積物（砂，礫，シルト，粘土）を母材とする腐植を含む埴壌土であり、北海道農牧地土壌分類（第2次案）によれば酸性褐色森林土，農耕地土壌分類（第2次案改訂版）によれば細粒褐色森林土，Soil Taxonomy の Andisol 分類法によれば Typic Dystrochrepts である。

後半の試験は北海道標津郡中標津町、北海道立根釧農業試験場（北緯43°34'，東経144°58'，標高50 m）の黑色火山性土（北海道農牧地土壌分類（第2次案）によれば積層軽しょう黑色火山性土，農耕地土壌分類（第2次案改訂版）によれば表層多腐植質黒ボク土，Soil Taxonomy によれば Acrudoxic Vitric Melanulands）において実施した。年平均気温は5.3℃，年降水量は1198 mmである。

なお本論文において、天北農試の土壌を酸性褐色森林土，根釧農試の土壌を黑色火山性土と呼ぶこととする。

第 2 節 実験方法

圃場試験は原則的にオーチャードグラス（キタミドリ）またはチモン（センボク）の単播草地で行った。播種量は2 kg/10 aである。この他にいくつかの草種を用いた圃場試験，ポット試験，水耕培養試験を行ったが，それらの詳細はそれぞれの章で記載する。供試草種およびそれらの品種は表1のとおりである。

1区面積6.25 m²（2.5 m×2.5 m）または9 m²（3 m×3 m）を標準とし，原則的に4反復で実験を実施した。草地造成時には pH が6.5になるように炭酸カルシウムを施用し，硫酸アンモニウム，過リン酸石灰，硫酸カリウムを標準肥料として施用した。施肥量などの詳細は各項で述べる。圃場試験は原則的に造成後2年以上経過した草地で実施した。

Table 1. Grass species used in the experiments.

Common name	Scientific name	Cultivar name
Orchardgrass	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Kitamidori
Timothy	<i>Phleum pratense</i> L.	Senpoku
Perennial ryegrass	<i>Lolium perenne</i> L.	Reveille
Kentucky bluegrass	<i>Poa pratensis</i> L.	
Redtop	<i>Agrostis alba</i> L.	
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i> L.	Thor
Red clover	<i>Trifolium pratense</i> L.	Sapporo
White clover	<i>Trifolium repense</i> L.	California ladino

試験区の一般的な管理方法は次の通りである。

オーチャードグラス：早春追肥として4月下旬に施肥し，6月上旬に1回目すなわち1番草の収穫を行い，その直後に2回目の施肥を行い，8月上旬に2番草の収穫を行い，その直後に3回目の施肥を行い，9月下旬に3番草の収穫を行った。

チモン：4月下旬に早春追肥，6月下旬に1番草収穫・2回目の施肥，8月下旬～9月上旬に2番草を収穫した。

オーチャードグラス，チモンともに，土壌化学性の変化を追跡するため0～2，2～5，5～10および10～15 cm 土層より土壌サンプルを10月または11月に採取した。

収量調査は刈り幅130 cm のレシプロモア（スター農機製）で一辺が2.5または3 m の試験区中央を端から端まで走り抜ける方式で，結果として1.3 m×2.5 m または1.3×3.0 m を収量調査の対象とした。刈り取り高さは約5 cm である。分析用のサンプルは刈り残した部分の6カ所から草刈鎌で均等に採取し，草種選別を行ったあと70℃で48時間の通風乾燥を行った。

乾燥した牧草サンプルは粉碎の後，硫酸・過酸化水素水によって分解し，全窒素は水蒸気蒸留法，リンはバナドモリブデン酸法，カリウムは炎光法，カルシウム・マグネシウムは原子吸光法，アルミニウムは高温パーナ（亜酸化窒素・アセチレン）による原子吸光法によってそれぞれ分析した。アルミニウム分析用の牧草サンプルは収穫直後に中性洗剤と脱イオン水で洗浄した。

土壌サンプルは天日乾燥の後，2 mm の篩を通し，pH（土壌と水の重量比は1:2.5）はガラス電極法，交換性塩基は1 N-酢酸アンモニウム液（pH 7.0）抽出-原子吸光法，有効態リンはブレイ No. 2法によって分析した。

土壌溶液を採取する場合には、施肥後1週間おきに0～2 cm, 2～5 cm および5～10 cm の3層において採取した土壌サンプルを一旦圃場容水量（水分率31%）に調整し、5℃で7日間静置した後、遠心分離法によってpF 4.2までの土壌溶液を採取した。採取した土壌溶液について、pHおよびECはガラス電極法、アルミニウムは亜酸化窒素－アセチレンを用いる高温バーナによる原子吸光法、カルシウム・マグネシウムは原子吸光法、カリウムは炎光法、リンはアスコルビン酸を用いた硫酸モリブデンによる直接比色法、塩素イオンはチオシアン酸水銀法、硫酸イオンは塩化バリウム－ゼラチン比濁法で測定した。

なお地上部リン含有率の年間平均値は単純平均ではなく年間吸収量／乾物収量で算出した。また本論文では土壌溶液に溶出したり土壌に吸着しているカルシウム、マグネシウム、カリウム、アルミニウム、硫酸、塩素、硝酸などの各イオン組成についてはそれらの単体名で呼ぶこととした。

第 3 章

草地土壤の経年的酸性化と牧草生育

第 1 節 草地土壤の酸性化解析試験

実験方法

1974年に天北農試内で造成したオーチャードグラス主体草地において、窒素源として尿素、硫酸アンモニウム（硫安）、あるいは塩化アンモニウム（塩安）を使用した窒素用量試験（6, 12, 24 kgN/10a）を1975年から10年間継続し、その間の土壌化学性と牧草生育の関係を解析した。共通肥料として10および15 kg/10aの P_2O_5 と K_2O をそれぞれ過リン酸石灰（過石）および硫酸カリウム（硫加）で施用した。リン以外の肥料は4月下旬、6月上旬、8月上旬の3回に均等に分けて表面施用し、リンは4月下旬に全量表面施用した。

実験結果

1) 土壌化学性の経年変化

1984年までの10年間に土壌の著しい酸性化現象がみら

れた。図5に土壌 pH と交換性カルシウムの経年変化を土層別に示した。土壌 pH は施肥窒素の形態別では硫安、塩安で低下が速くかつ著しく進行し、尿素区では緩やかに進行した。また窒素用量が多いほど酸性化が著しかった。土層別では0~2 cm の酸性化が著しく、とくに24 kgN/10a 区でははじめの2~3年で pH 4 台にまで低下した。2~5 cm 土層における酸性化はいくぶん緩やかではあったが、表層の酸性化に追隨して進行し、硫安、塩安区ではそれぞれ5年目（24 kgN/10a）、8年目（12 kgN/10a）に0~5 cm 土層全体が pH 4 台の強酸性に転じた。尿素区の場合、はじめの2年間では0~2 cm または2~5 cm 土層の pH が0.5ポイント程度低下したもののその後の低下はきわめて緩やかであり、硫安および塩安区とは明らかに異なった。5~10 cm 土層の酸性化は0~5 cm 土層に比べるとはるかに緩やかであるが、硫安、塩安の24 kgN/10a 区では処理5年目以降に確実に酸性化が進行した。このように草地土壤の経年的な酸性化現象は表層ほど顕著であり、施肥窒素の施用量に比例

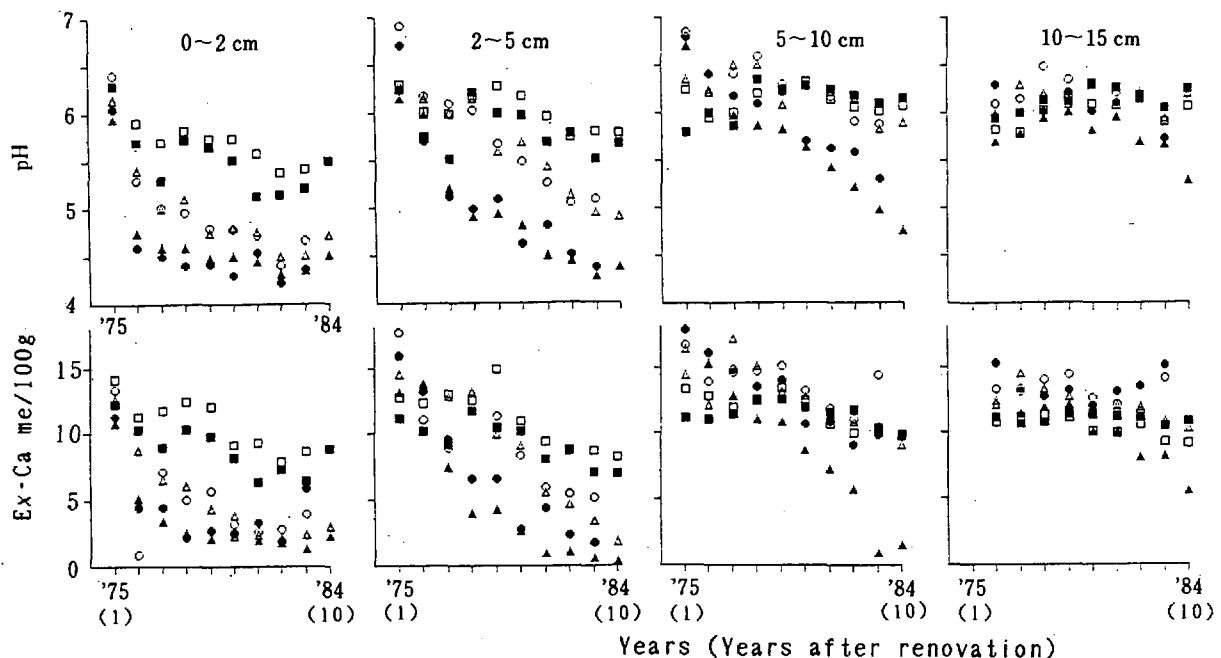


Fig. 5 Changes in soil pH and exchangeable Ca with years after renovation
 (●: ammonium sulfate 24 kgN/10a, ▲: ammonium chloride 24 kgN/10a,
 ■: urea 24 kgN/10a, Open symbols show 12 kgN/10a treatment).

し、尿素区における酸性化の進行がきわめて緩やかであるという特徴をもつ。そこで今後、硫安、塩安を酸性化区、尿素区を非酸性化区（対照区）として取り扱うことにする。

土壌の交換性カルシウムは pH の低下に対応して経年的に減少した。減少の程度は pH の低下をさらに増幅したようにみることができ、とくに pH の変化が明瞭ではない 5~10 cm あるいは 10~15 cm 土層においても明らかに減少しており、経年的な酸性化の影響が 0~15 cm 土層全体に及んでいたことを示している。交換性マグネシウムについても経年的に低下する傾向であったが（図 6）、交換性カリウムでは明瞭ではなかった（図 7）。pH と交換性カルシウムおよび交換性マグネシウムの間には明瞭な正の相関が認められたが（図 8, 9）、交換性カリウムでは認められなかった（図 10）。

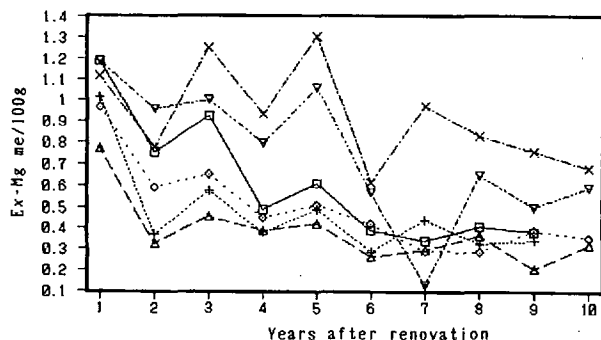


Fig. 6 Changes in exchangeable Mg with years after renovation (0-2 cm layer, 12 and 24 kgN/10 a, $\square$: ammonium sulfate 12 kgN, +: ammonium sulfate 24 kgN, $\diamond$: ammonium chloride 12 kgN, $\triangle$: ammonium chloride 24 kgN, $\times$: urea 12 kgN, ∇ : urea 24 kgN).

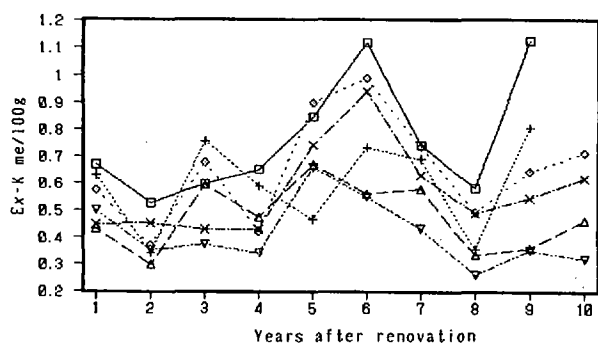


Fig. 7 Changes in exchangeable K with years after renovation (0-2 cm layer, 12 and 24 kgN/10 a, $\square$: ammonium sulfate 12 kgN, +: ammonium sulfate 24 kgN, $\diamond$: ammonium chloride 12 kgN, $\triangle$: ammonium chloride 24 kgN, $\times$: urea 12 kgN, ∇ : urea 24 kgN).

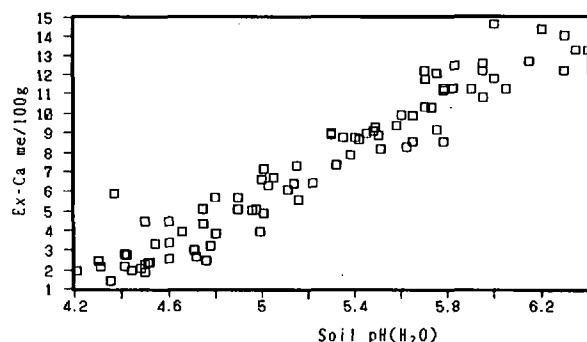


Fig. 8 Relationships between soil pH and Ex-Ca (0-2 cm layer).

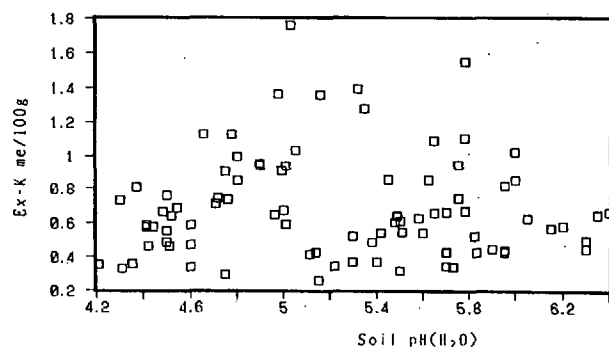


Fig. 10 Relationships between soil pH and Ex-K (0-2 cm layer).

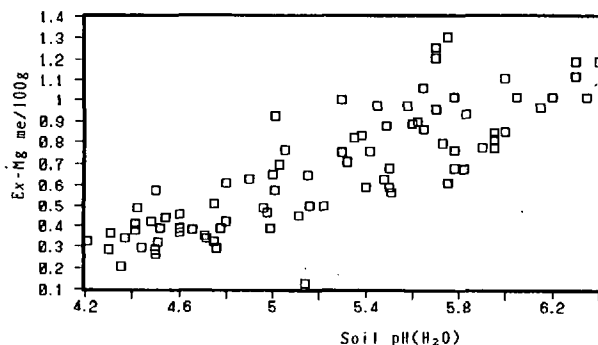


Fig. 9 Relationships between soil pH and Ex-Mg (0-2 cm layer).

2) 牧草収量の経年変化

この実験を開始した当初、造成時にはオーチャードグラスとともにシロクロバを混播したが、12 kgN/10a 以上の窒素施用区ではシロクロバが年次をおって急激に消滅した（図 11）。6 kgN/10a 区では実験開始後 5 年間はシロクロバ割合（マメ科率）が低下し、その後不規則な変動を示した（図 12）。このため 6 kgN/10a 区では乾物収量に及ぼすシロクロバの変動の影響が大きく、解析困難なため論議の対象からはずした。12 および 24 kgN/10a 区では造成後 2 年間はシロクロバの影響が若干あったものの、その後ほぼ消滅した。3 年目以降で

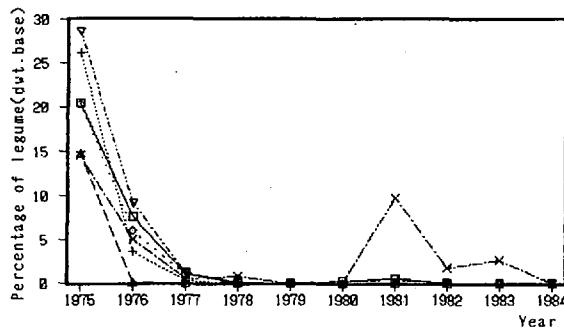


Fig. 11 Changes with time in the percentage of legume in a mixture sward (orchardgrass-white clover) (12 and 24 kgN/10 a, $\square$: ammonium sulfate 12 kgN, $+$: ammonium sulfate 24 kgN, $\diamond$: ammonium chloride 12 kgN, $\triangle$: ammonium chloride 24 kgN, $\times$: urea 12 kgN, ∇ : urea 24 kgN).

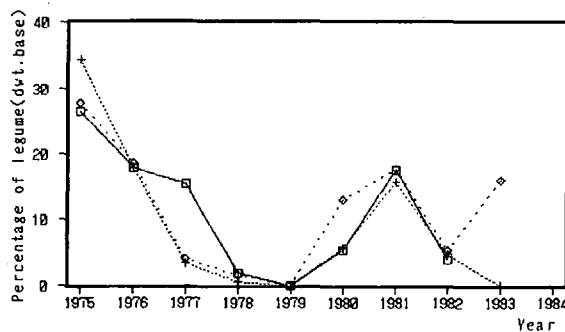


Fig. 12 Changes with time in the percentage of legume in a mixture sward (orchardgrass-white clover) (6 kgN/10 a, $\square$: ammonium sulfate, $+$: ammonium chloride, $\diamond$: urea).

は、尿素12 kgN 区で例外的に3年間のみシロクロローバがみられたが、これ以外は皆無であった。そこで、12および24 kgN/10a 区においても、長期間にわたる収量を比較するために、オーチャードグラスとシロクロローバの合計量を牧草収量とし、実質的にオーチャードグラス主体の検討を行った。

牧草収量の推移を尿素区（非酸性化区）に対する指数で示し、収量指数の経年変化を、酸性化がオーチャードグラスとシロクロローバの生育に及ぼす影響の度合いとして読み替え、表2に示した。酸性化区の収量は3年目以降、著しい低下を示す場合とそうではない場合とが混在した。収量低下年における減少程度は24 kgN 区で大きく、肥料形態では塩安区の減少程度が大きかった。

明らかな収量低下が認められた年次（3, 5, 8, 10年目）の塩安区における各番草別の収量指数を標準年の2年目（1976）を含め図13に示した。収量指数は3番草でとくに著しく低下し、3, 5, 8年目における形態別牧草収量の平均値は尿素>硫安>塩安の順に多く、いずれも窒素用量に応じて増加した。また、尿素と硫安・塩安間の収量差は24 kgN/10a 区でもっとも大きかった（図14）。

これらの結果から、草地土壌の経年的な酸性化によるオーチャードグラスの収量変動は明瞭に低下する年次と、酸性化の影響が不明瞭な年次があることがわかった。

3) 土壌溶液組成に対する酸性化の影響

造成後8年目の24 kgN/10a 区における塩安区と尿素

Table 2. Changes in the relative yield of orchardgrass and white clover.

N fertilizer	N-rate (kg/10a)	Year									
		1975 (1)	1976 (2)	1977 (3)	1978 (4)	1979 (5)	1980 (6)	1981 (7)	1982 (8)	1983 (9)	1984 (10)
Ammonium sulfate	6	97	103	93	91	102	94	84	90		
	12	90	109	98	102	100	101	100	95		
	24	101	129	95	97	90	98	106	90		
Ammonium chloride	6	94	103	94	86	91	87	98	89	72	
	12	85	100	88	104	92	106	105	90	95	89
	24	100	110	86	94	82	96	105	85	95	77
Urea	6	(474)	(607)	(764)	(800)	(483)	(507)	(797)	(643)	(647)	
	12	(558)	(717)	(928)	(956)	(669)	(575)	(799)	(736)	(726)	(612)
	24	(550)	(886)	(1192)	(1324)	(982)	(851)	(1050)	(1014)	(1057)	(866)

Yield is expressed as the relative yield of total dry weight of orchardgrass and white clover to that of urea treatment. () shows the dry weight of urea treatment kg/10a.

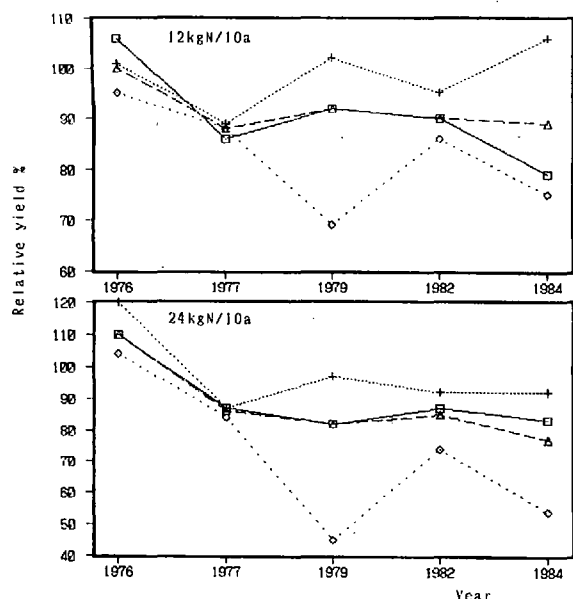


Fig. 13 Relative yield of ammonium chloride treatment to that of urea treatment in the years of lower yield (Urea: 100, $\square$: 1st cutting, Upper: 12 kgN treatment and lower: 24 kgN treatment).

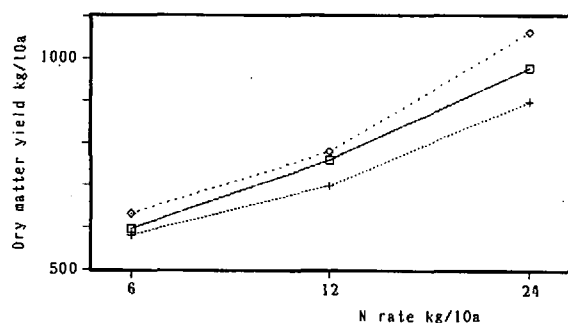


Fig. 14 Yield response of orchardgrass to rate and kind of nitrogen fertilizers (annual yield at 8 years after renovation, $\square$: ammonium sulfate, +: ammonium chloride, $\diamond$: urea).

区の土壌溶液組成の経時変化を図15に示した。塩安区では肥料に随伴する塩素がアニオンの主体であり、これに硝酸が加わる。これらのアニオン合計量とはほぼ等量のカルシウムなどの塩基が土壌溶液に溶出し、それらのイオン濃度は経時的に低下したと見なせる。これは、硝酸化によって生成したプロトンが交換性塩基（カチオン）と置換し、この塩基濃度に対応する濃度のアニオンが肥料または土壌固相から溶出し、これが降雨時に0~2 cmあるいは2~5 cm土層から下層へ流亡するというパターンを繰り返しながら酸性化が進行したのである。すなわち、アニオン量によって塩基の流亡量が規定されるので、結果として酸性化とアニオン量は対応する。なお、4月に過石、4、6、8月に硫加を施用しているので、カルシウムとリン酸、カリウムと硫酸がそれぞれ土壌溶液に加わる。尿素区の場合、アニオンの主体は硝酸と硫加に含まれる硫酸であり、塩安区に比べると土壌溶液中のア

ニオン濃度が常に低く、したがってアンモニアを主体とするカチオン濃度も低く維持され、その結果流亡する塩基類の量が少なくなり、酸性化の進行がきわめて緩やかであったと理解される。

硫安区と塩安区の間の随伴アニオン種の違いは、施肥後の土壌溶液中全イオン濃度の違いとして現れた(表3)。これは塩素と硫酸とでは形成される塩の溶解度が著しく異なり（例えば0℃で CaCl_2 : 59.5, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gypsum): 0.24 (g/100 ml)), 硫酸塩の溶解度が塩化物に比べてきわめて低いこと⁽¹⁹¹⁾, および強酸性条件下におけるAEC（アニオン交換容量）の増加^(104, 105)によって土壌溶液中の硫酸濃度が制限された結果、イオン濃度全体に差が生じたものと考えられる。

酸性化が進行した硫安・塩安両区の土壌表層では、土壌溶液中に植物の生育に有害なアルミニウムが溶出した。そこで、アルミニウムの溶出状況を施肥窒素の形態別、土層別に図16に示した。土壌溶液中のアルミニウム濃度は施肥窒素の形態間では塩安>硫安>>尿素的の順に高濃度であり、窒素施用量に比例して上昇した(図17)。土層間では施肥の影響を直接受けるもっとも地表に近い0~2 cm土層で著しく高く、塩安区の場合、5 me/L (45 mg/L)を越える時期もあった(図16)。また、2~5 cm土層でもかなり高濃度のアルミニウムが検出されたが、5~10 cm土層ではほとんど検出されなかった。アルミニウム濃度を時期間で比較すると、施肥直後をピークとして降雨に伴い漸減する0~2 cm土層のパターンと、そのピークが後にずれた2~5 cm土層のパターンとしてみることができる。

このようなアルミニウムの溶出パターンには土壌溶液中のpHや他のイオン濃度との間に密接な関連がみられた(表4)。アルミニウムの溶出濃度が高い硫安・塩安両区における土壌溶液のpHは4.0前後の極端な酸性を示し、その中でもpHが低い時にアルミニウム濃度は上昇した。図18に示した土壌pHとアルミニウム濃度の関係から土壌pHが5.0以下になるとアルミニウム濃度が高まる。アルミニウム濃度の経時的な低下は牧草による吸収や降雨に伴うイオンの下層移動と関連しているようであり、このことは各イオン濃度とアルミニウム濃度の間に高い相関が認められることによっても裏づけられる(表5および図19, 20, 21)。このうち塩安区の塩素濃度とアルミニウム濃度にはとくに明瞭な関係が認められる(図19)。同じpHレベルにある硫安区と塩安区のアルミニウム濃度の差は随伴アニオンの溶存量の違いに基づくものと考えられる。

以上に得られた結果から、土壌溶液へのアルミニウム

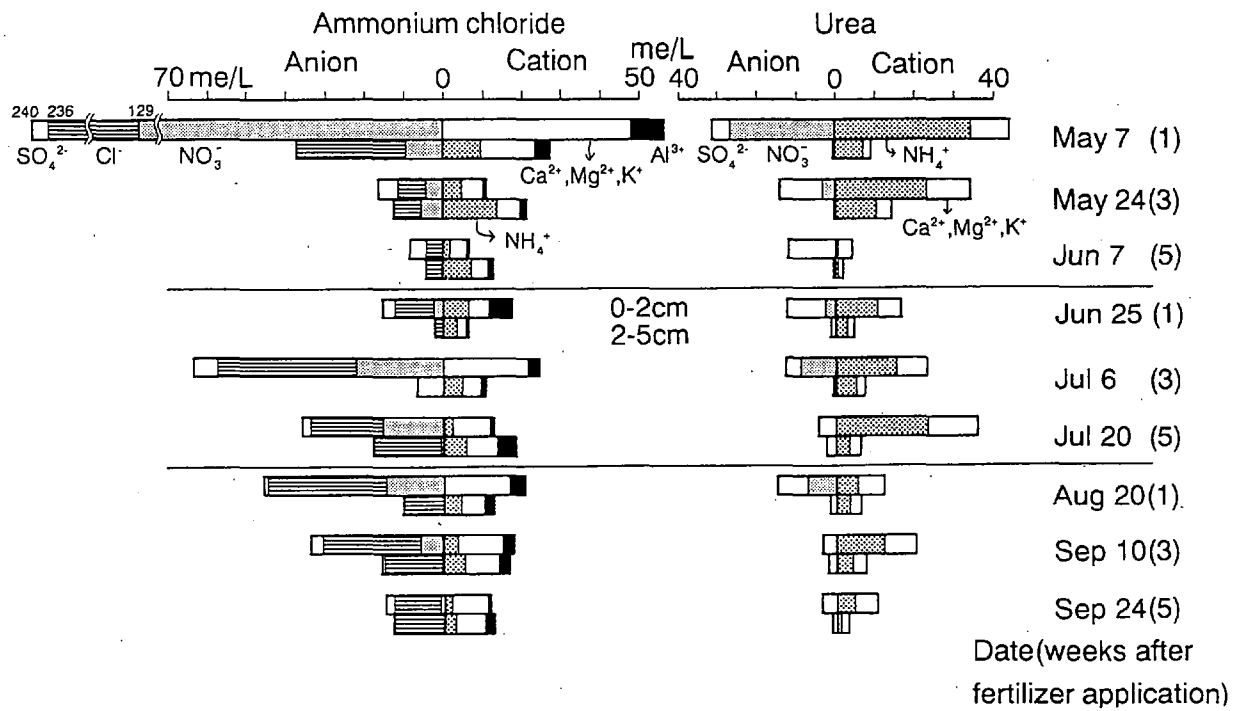


Fig. 15 Seasonal changes in soil solution composition of the ammonium chloride and urea treatments at 0-2 and 2-5 cm soil layers (24 kgN/10 a, 1982).

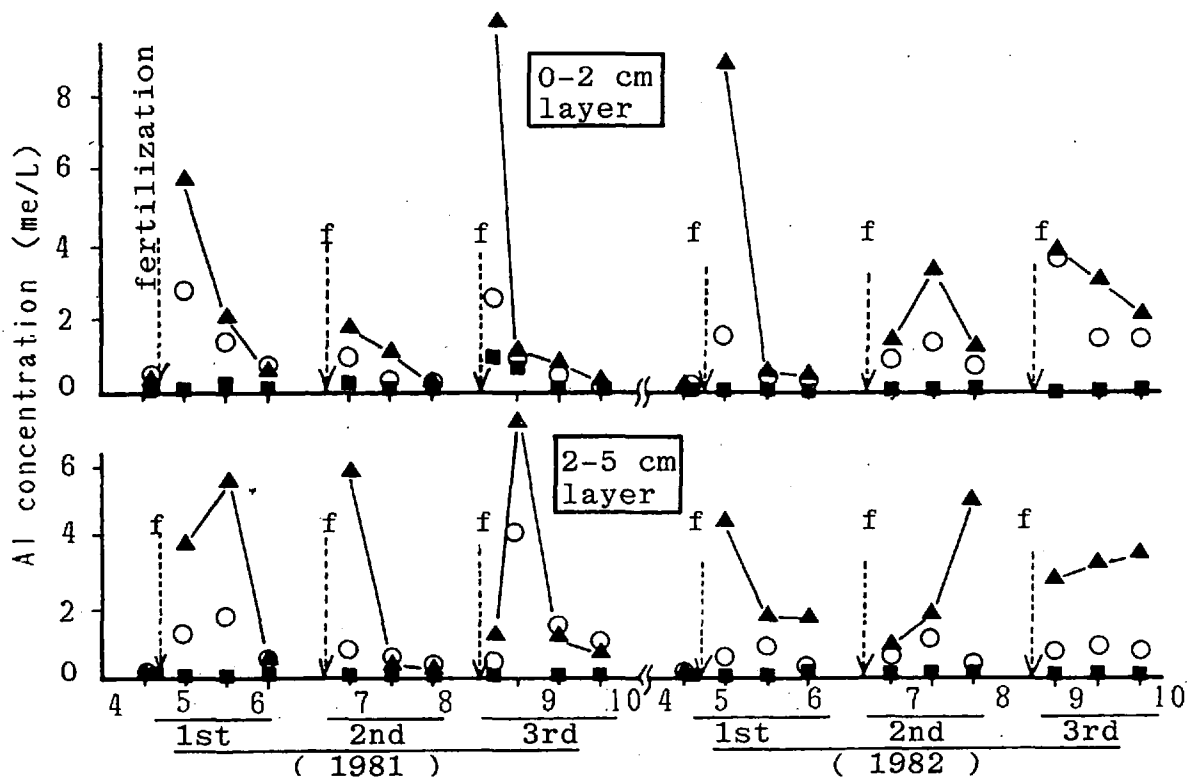


Fig. 16 Seasonal changes in Al concentration of the soil solution (24 kgN/10 a, 0-2 cm and 2-5 cm layer, ○: ammonium sulfate, ▲: ammonium chloride, ■: urea).

Table 3. Concentration of cation and anion, EC, and pH of the soil solution (0-2cm layer, 1st cutting growth period in 1982).

Weeks	Fertilizer	Composition			
		Cation* ²	Anion* ³	EC* ⁴	pH
1	Ammonium sulfate	11.6	21.8	2.6	4.23
	Ammonium chloride	57.3	111.1	9.5	3.92
3	Ammonium sulfate	5.1	4.0	0.7	4.02
	Ammonium chloride	6.5	11.5	1.0	4.18
5	Ammonium sulfate	3.7	0.7	0.4	4.22
	Ammonium chloride	5.0	8.6	0.6	4.04

*¹:Weeks after fertilizer application. *²:Total me/L of Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺ and Al³⁺. *³:Total me/L of SO₄²⁻ and Cl⁻. *⁴:mS/cm.

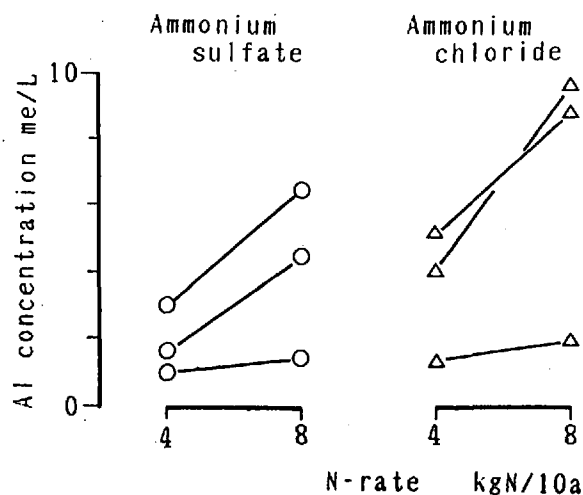


Fig. 17 Effect of N-rate on Al concentration of the soil solution 1 week after N-fertilizer application (0-2 cm layer, 1985).

Table 4(1) Changes in soil solution composition at 24kgN/10a treatment of ammonium sulfate and ammonium chloride (0-2cm layer, 1982).

Fertilizer	Composition	1st cutting			2nd cutting			3rd cutting		
		1week	3weeks	5weeks	1week	3weeks	5weeks	1week	3weeks	5weeks
Ammonium sulfate	Al me/L	1.58	0.51	0.40	0.92	1.45	0.85	3.76	1.56	1.52
	Ca me/L	5.96	3.60	2.82	5.42	7.53	5.42	7.99	6.21	6.10
	Mg me/L	2.14	0.57	0.37	0.71	1.07	0.84	1.43	1.21	1.07
	NH ₄ me/L	0.00	3.34	1.11	7.63	2.46	2.81	0.43	4.35	2.70
	NO ₃ me/L	29.29	2.59	0.69	1.54	11.19	5.29	8.74	1.59	0.77
	SO ₄ me/L	10.89	1.98	0.36	1.85	6.41	4.43	7.08	4.25	4.41
	EC mS/cm	2.61	0.68	0.39	0.82	1.53	1.09	1.62	1.13	0.97
	pH	4.23	4.02	4.22	4.13	3.99	4.03	3.98	3.92	3.92
Ammonium chloride	Al me/L	8.84	0.51	0.56	1.48	3.34	1.19	3.89	2.98	2.12
	Ca me/L	34.49	4.78	3.89	8.20	17.97	7.28	13.48	8.99	7.24
	Mg me/L	7.30	0.67	0.44	0.95	2.24	1.12	2.32	1.85	1.37
	NH ₄ me/L	0.00	4.56	1.54	6.79	0.00	2.36	0.00	3.64	1.97
	NO ₃ me/L	129.42	4.14	0.24	2.66	22.22	15.34	14.83	6.04	0.99
	Cl me/L	107.19	7.33	4.29	9.48	35.43	18.50	29.56	24.82	11.85
	EC mS/cm	9.50	0.98	0.59	1.40	3.99	2.05	3.27	2.19	1.41
	pH	3.92	4.18	4.04	4.04	3.92	4.02	3.92	3.96	3.92

Table 4(2) Changes in soil solution composition at 24kgN/10a treatment of ammonium sulfate and ammonium chloride (2-5cm layer, 1982).

Fertilizer	Composition	1st cutting			2nd cutting			3rd cutting		
		1week	3weeks	5weeks	1week	3weeks	5weeks	1week	3weeks	5weeks
Ammonium sulfate	Al me/L	0.53	0.89	0.37	0.64	1.15	0.44	0.85	0.92	0.87
	Ca me/L	1.78	2.32	2.53	1.68	2.64	2.71	3.82	2.64	2.67
	Mg me/L	0.31	0.46	0.40	0.36	0.49	0.38	0.56	0.56	0.51
	NH ₄ me/L	6.30	9.11	6.73	3.45	8.23	4.84	5.34	4.63	3.41
	NO ₃ me/L	0.02	2.14	0.09	0.09	0.11	0.00	0.00	0.04	0.00
	SO ₄ me/L	0.48	1.92	1.75	1.89	2.27	2.30	3.87	3.04	3.47
	EC mS/cm	0.44	0.70		0.37	0.60	0.48	0.62	0.56	0.53
	pH	4.35	4.15	4.38	4.22	4.04	4.16	4.12	4.10	3.96
Ammonium chloride	Al me/L	4.33	1.65	1.61	0.88	1.79	5.04	2.75	3.18	3.49
	Ca me/L	11.91	4.74	3.74	2.00	3.71	6.42	5.03	7.45	6.06
	Mg me/L	1.27	0.61	0.47	0.27	0.50	1.20	0.80	1.10	0.97
	NH ₄ me/L	9.60	13.67	7.05	3.36	4.82	5.76	4.20	5.36	2.91
	NO ₃ me/L	9.43	5.70	0.09	0.47	0.09	0.41	0.24	0.29	0.32
	Cl me/L	27.98	7.00	4.51	1.76	6.77	17.38	11.06	15.12	12.97
	EC mS/cm	2.56	1.11	0.61	0.42	0.80	1.63	1.14	1.52	1.33
	pH	4.13	4.13	3.98	4.06	3.97	3.92	4.02	3.88	3.83

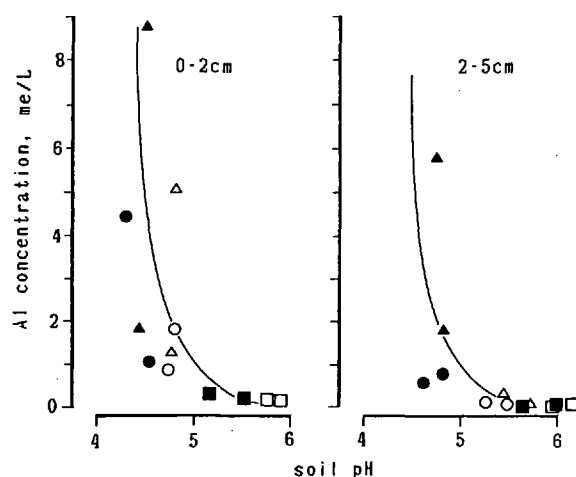


Fig. 18 Relationship between soil pH and Al concentration in the soil solution (Al concentration on June 27, 1981 and June 27, 1982, ○: ammonium sulfate 12 kgN/10 a, ●: ammonium sulfate 24 kgN, △: ammonium chloride 12 kgN, ▲: ammonium chloride 24 kgN, □: urea 12 kgN, ■: urea 24 kgN).

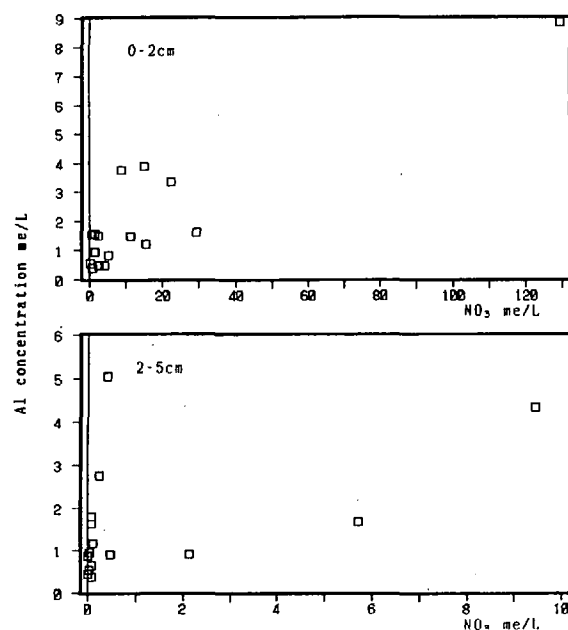


Fig. 20 Relationship between NO_3^- and Al concentration in the soil solution (Ammonium sulfate and ammonium chloride 24 kgN/10 a, 0-2 cm and 2-5 cm layer, 1982).

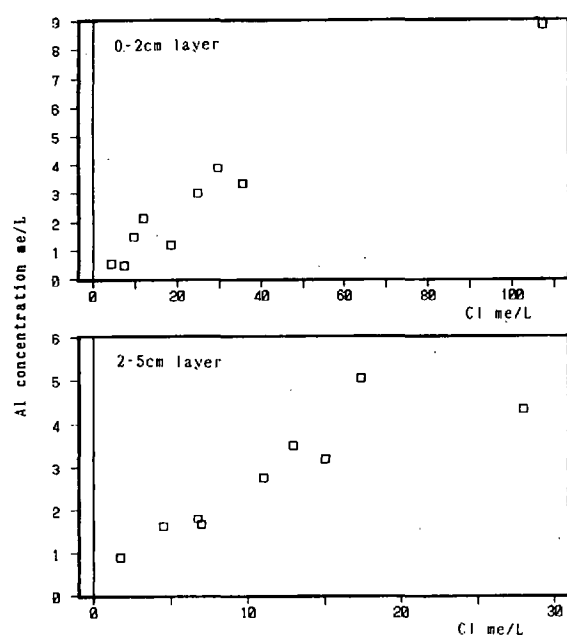


Fig. 19 Relationship between Cl^- and Al concentration in the soil solution (Ammonium chloride 24 kgN/10 a, 0-2 cm and 2-5 cm layer, 1982).

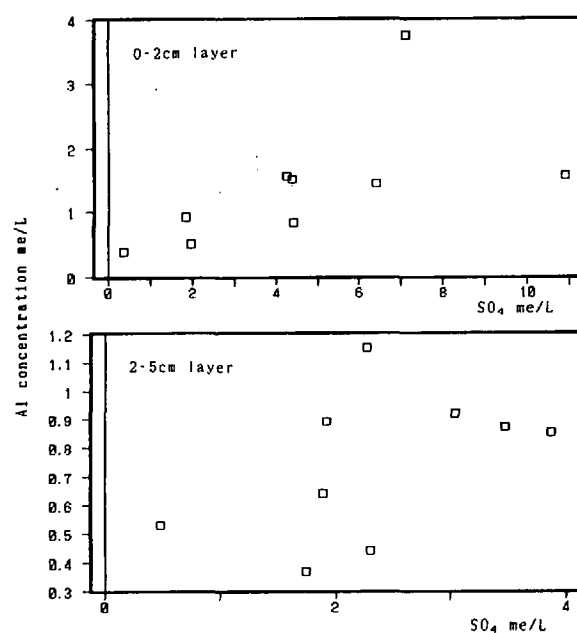


Fig. 21 Relationship between SO_4^{2-} and Al concentration in the soil solution (Ammonium sulfate 24 kgN/10 a, 0-2 cm and 2-5 cm layer, 1982).

Table 5. Correlation coefficients of Al concentration with other component in the soil solution (Ammonium sulfate and ammonium chloride 24kgN/10a, 1982).

Soil layer (cm)	Element						
	Ca	Mg	K	S	Cl	EC	pH
0-2	0.972**	0.984**	0.919*	0.254	0.974**	0.975**	-0.738*
2-5	0.842**	0.968**	0.270	0.341	0.901**	0.887**	-0.738*

Statistically significant at the 5%(*) and the 1%(**) level.

の溶出は、pH とアニオン濃度によって決定されることが明らかになった。

4) 土壌溶液へのアルミニウムの溶出と牧草の生育との関連

酸性化区（硫安、塩安区）では経年的な土壌酸性化に伴いアルミニウムが溶出すると同時に牧草収量は低下した。そこで収量低下と土壌溶液中のアルミニウム濃度の関係を明らかにするためにいくつかの実験を実施した。まず、牧草が溶出したアルミニウムを吸収することによる生育障害、すなわちアルミニウム過剰症に関する観点から牧草の地上部アルミニウム含有率を経時的に追跡した（図22）。アルミニウム含有率は春先に高く夏・秋に低く、処理間では酸性化区、とくに塩安区で高く、尿素区で低かった。しかしその差は小さく、春の活動開始直

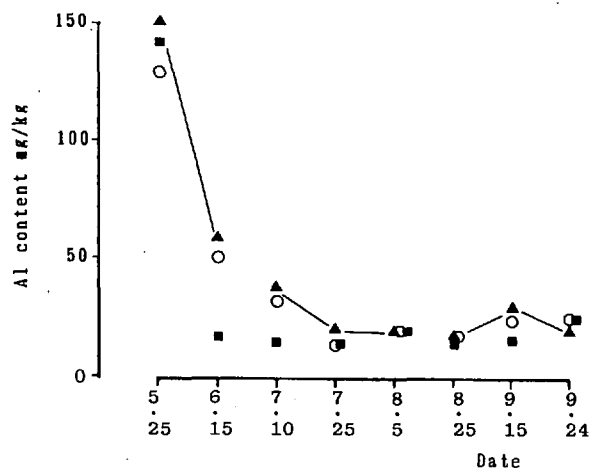


Fig. 22 Seasonal changes in Al content in the shoots of orchard-grass grown in acidified grassland (1981, ○: ammonium sulfate 24 kgN/10 a, △: ammonium chloride 24 kgN, ■: urea 24 kgN).

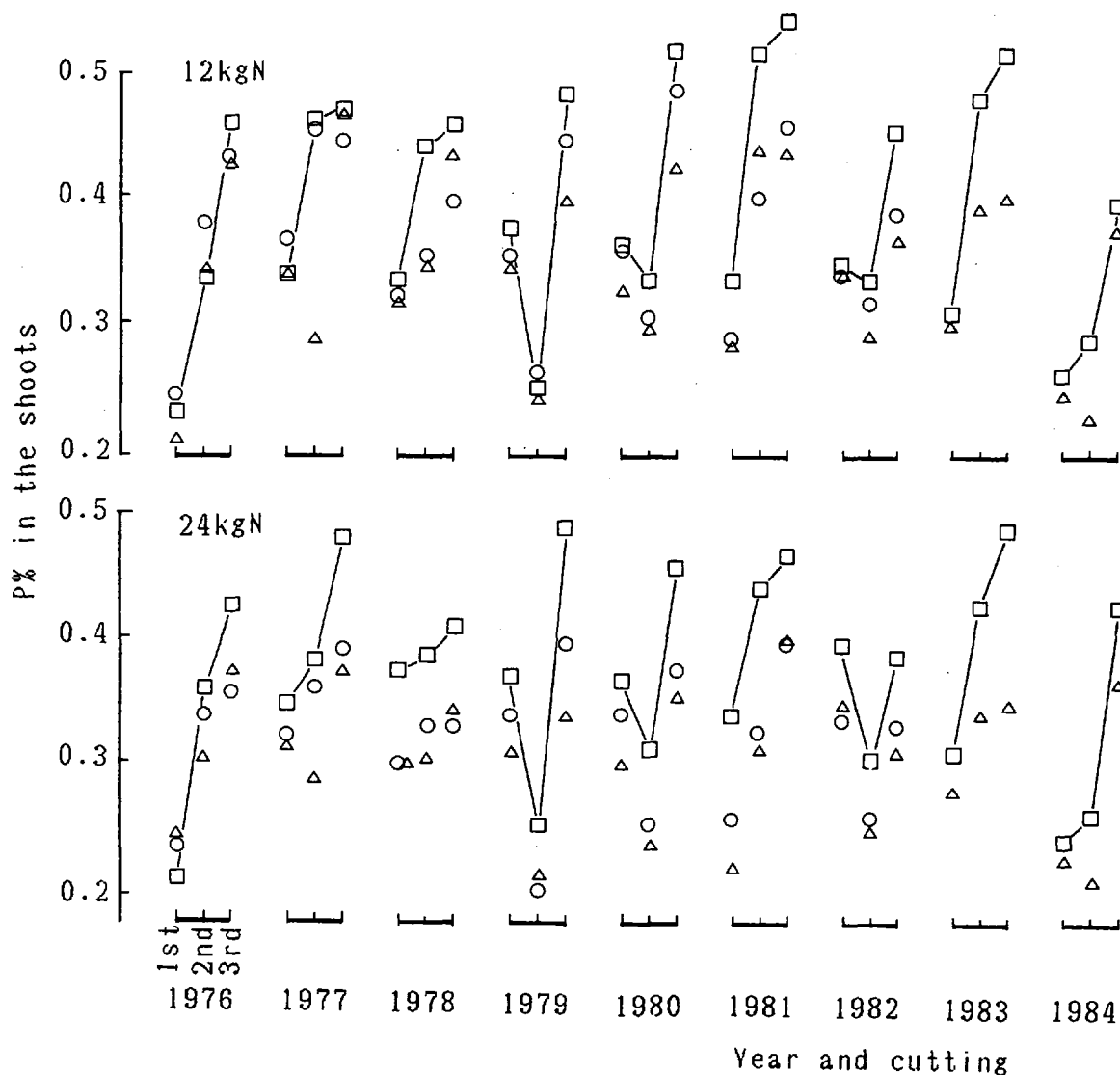


Fig. 23 Annual and seasonal changes in P content in the plant shoots of orchard-grass during 9 years (12 and 24 kgN/10 a, ○: ammonium sulfate, △: ammonium chloride, □: Urea).

後を除く夏から秋にかけての20~50 mg/kg は絶対値としても低かった。また24 kgN 条件における尿素区に対する塩安区の乾物収量指数の1975年から1982年までの7年間の平均値は1 番草で97.5, 2 番草で98.2, 3 番草で87.5であり, 牧草体のアルミニウム含有率が高い1 番草の収量低下割合は小さかった。これらのことから, 全生育期間を通じて牧草のアルミニウム過剰症は発現していなかったと考えられる。

次に, アルミニウム共存条件で吸収が抑制されるリンの吸収について検討するため, 1976年~84年の各番草における牧草のリン含有率を図23に示した。酸性化の進行に伴い, 24 kgN 区では処理開始後2 年目である1976年以降, 12 kgN 区では1977年以降においてリン含有率はほとんどの場合において尿素>硫安>塩安の順に高かった。その結果, リン吸収量, あるいは差し引き法による施肥リンの利用率はともに同様の関係を示した (表6)。このことから, 酸性化に伴うアルミニウム溶出の影響は結果的に牧草のリン吸収を抑制する形で顕在化していたといえる。そのことをさらに検討するために土壌の可給態リン (Bray(II)-P) の経年変化を調べた (図24)。年間10 kgP₂O₅/10a のリン施肥によって各区とも土壌表層にリンが蓄積し, 8 年目には45 mgP/100g 以上(0~2 cm) のレベルに達しており, その集積量は窒素の形態別では硫安≒塩安>尿素という差が認められた。これは硫安区と塩安区では土壌酸性化の過程で牧草のリン吸収が抑制された結果, 土壌からのリン収奪量に差が生じ, リン吸収量の少ない酸性化区では残存リン量が多く, それが蓄積量として現れたものと考えられる。例えば24 N 系列における尿素区の年間リン収奪量は3.84 kgP/10a, 硫安区では3.32 kgP/10a であるので (表6), 硫安区の土壌に残存するリン量は尿素区に比べ年間0.52 kgP/10a が多くなる計算になり, これは0~2 cm 土壌

では年間2.5 mgP/100g に相当し, 図24の実態にはほぼ合っている。このようにアルミニウムの溶出量が多い塩安区には多量の可給態リンが蓄積されており, 酸性化区におけるリン吸収の抑制が土壌からのリン供給量が低いことに由来するものではないことが示唆された。さらにこのことを裏づけるために土壌溶液のリン濃度を調べた (図25)。0~2 cm 土層には0.2~1.3 mgP/L という高い濃度のリンが検出され, しかも硫安≒塩安>尿素という濃度関係が認められた。つまり, 酸性化に伴うアルミニウムの溶出によってリン吸収が低下した区の根圏にはリンが高濃度に溶出しているという, 一見矛盾した現

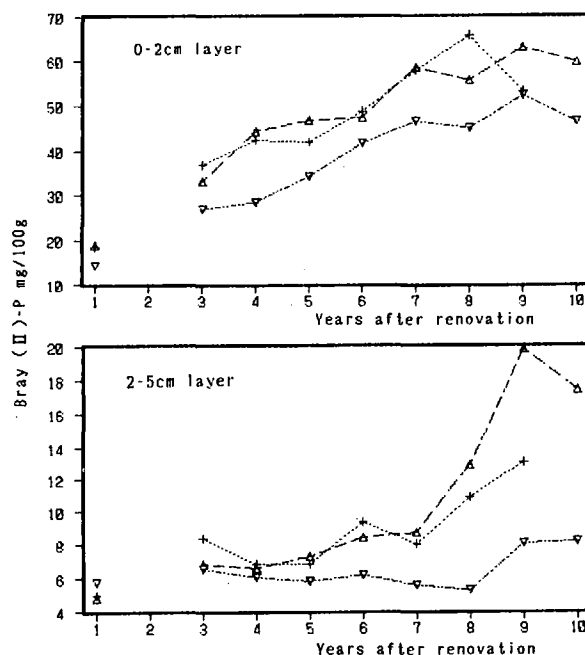


Fig. 24 Changes in Bray (II)-P during 10 years after renovation (0-2 cm and 2-5 cm layer, +: ammonium sulfate 24 kgN, Δ: ammonium chloride 24 kgN, ∇: urea 24 kgN).

Table 6. P concentration in the shoots, total P uptake, and P utilization rate (mean values during 7 years (1976-1982)).

Treatments		P content in the shoots (%)			Total P uptake (kgP/10a/year)	P utilization rate (%)
		1st cut	2nd cut	3rd cut		
Ammonium sulfate	12kgN	0.33	0.35	0.43	2.75	63
Ammonium chloride	12kgN	0.31	0.31	0.42	2.49	57
Urea	12kgN	0.33	0.42	0.48	2.88	66
Ammonium sulfate	24kgN	0.31	0.30	0.37	3.32	76
Ammonium chloride	24kgN	0.30	0.27	0.35	3.01	69
Urea	24kgN	0.34	0.35	0.44	3.84	88

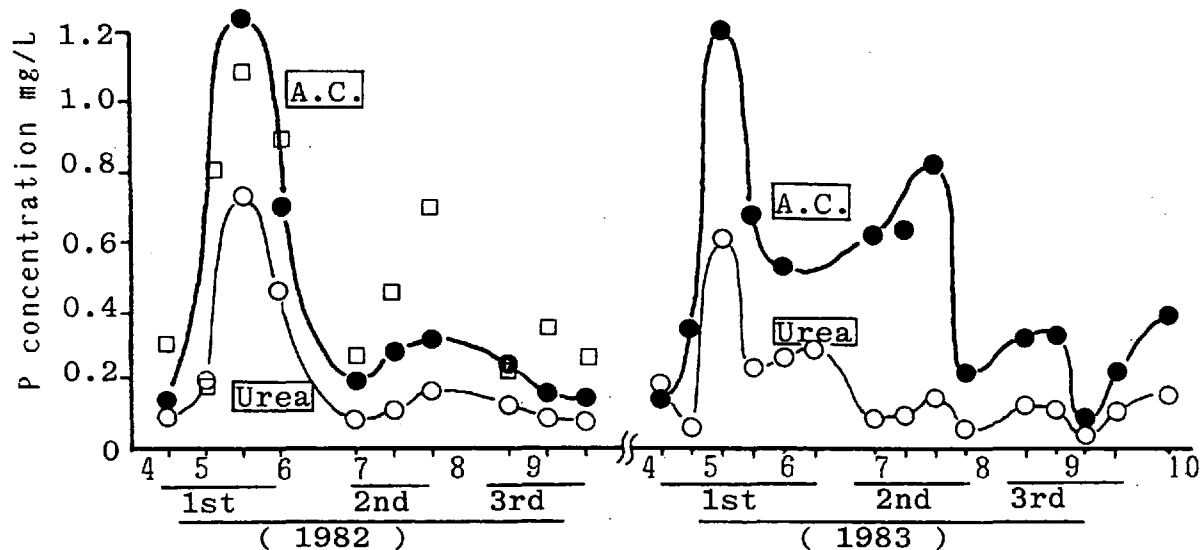


Fig. 25 Seasonal changes in P concentration of the soil solution (24 kgN/10 a, 0-2 cm layer, □: ammonium sulfate; ●: ammonium chloride; ○: urea).

象が認められた。そこでこのことを解析するための手がかりとして、牧草根表面に対するアルミニウムの付着状況をアルミノン染色法⁽⁵⁾によって観察した(表7)。硫安・塩安区では根表面に多量のアルミニウムが付着していることが確認された。一方、これら根部のリン含有率は塩安>硫安>尿素の順に高かった(表8)。これらの結果を総合すると、酸性化に伴うアルミニウムの溶出によるリン吸収低下の原因は、少なくとも土壌からのリン供給力の低下にあるのではなく、アルミニウムと根との関係において発生するリン吸収力の低下にあると推察された。

Table 7. Al adherence at the root surface measured by aluminon-staining procedure (August, 1982).

Fertilizers	Adherence intensity
Ammonium sulfate	+++
Ammonium chloride	+++
Urea	±

Table 8. P content in the plant root of orchardgrass (24kgN/10a, 2-5cm layer, P% in dry weight base).

Treatment	Month/Date/Year			
	9/4/82	9/19/82	4/19/83	4/28/83
Ammonium sulfate	0.12	0.10		
Ammonium chloride	0.13	0.13	0.13	0.14
Urea	0.11	0.10	0.11	0.11

考 察

1) 草地土壌の酸性化のメカニズムと草地の特徴

松田⁽¹⁴⁵⁾によれば化学肥料施用による土壌の酸性化の機構は i) 施肥直後における土壌と肥料の反応に基づく酸性化, ii) アンモニアの硝酸化成によって放出されるプロトンによる酸性化, および iii) 降雨に伴う塩基の溶脱による酸性化という3段階によって構成される。本研究で得られた結果はこのうちの ii) および iii) に相当する部分と考えられる。すなわち、窒素肥料として施用されたアンモニアは硝酸化成の課程でプロトンを放出し、これが酸性化の主な原因と考えられ、このため窒素肥料の施用量に酸性化は比例する。硝酸が牧草に吸収される一方で、放出されたプロトンは土壌コロイドに吸着されている交換性塩基と置換し、この塩基が土壌溶液の電荷バランスからアニオンを溶出させ、塩基とアニオ

ンが同時に溶脱する。この場合の塩基の溶脱量はアニオン量によって規定されるので、結果としてアニオン施用量が酸性化を規定する。したがって窒素施用量によって酸性化が規定される。硫酸・塩安区と尿素区との酸性化の進行速度の違いは、尿素の場合、単位窒素当たりでみると硝酸化成によって生成するプロトンが硫酸や塩安の半量であり、かつ炭酸イオン濃度が高まることによる緩衝作用があるために、酸性化の程度がきわめて緩やかとなる。

なお、図15に示した土壤溶液組成にみられるように、塩安・尿素両区ともにアニオンの一部に硝酸が含まれていた。硝酸は両区ともに1番草および3番草では施肥後1週間目に、2番草では3週間目に0~2 cm 土層に集中して高濃度で検出され、その後低下した。硝酸は窒素肥料由来のアンモニアから生成したものであるが、硝酸イオンも塩基を溶出させるので、土壤酸性化の原因の一部となる可能性は否定できない。ただし、草地の場合、表層土壤にはりめぐらされた十分量の牧草根によって生成した硝酸態窒素はすみやかに吸収されるため、土壤溶液中の存在期間は短期間に限られる。

また、牧草による窒素吸収量から次の考察が可能である。本実験における平均的な窒素吸収量は無窒素区で9.97 kgN/10a、12 N 区で15.26~16.20 kgN/10a、24 N 区で25.28~27.53 kgN/10aであった。このうち無窒素区ではシロクロバによる窒素固定が7~8 kgN/10a程度、この他に土壤から供給される窒素が2~3 kgN/10a程度あると考えられる⁽⁹¹⁾。シロクロバは12 N 区および24 N 区ではほとんど生育していなかったので（図11）、これらの区では窒素移譲はないものとみなすことができ、したがって差し引き法で算出すると、牧草に吸収された窒素のうち肥料に由来する部分としては、12 N 区で12~14 kgN/10a、24 N 区で22~24 kg/10aと考えることができる。すなわち、密植状態で牧草が栽培される草地では施肥窒素はほぼ全量が牧草（この場合はオーチャードグラス）に吸収されたと見なせる。したがって、本実験では施肥された窒素成分が硝酸態窒素として流亡したとは考えられない。

一方、別に実施したチモシーに対する窒素施用量試験の結果では、窒素施用量0, 6, 9, 15, 21 kg/10a に対してチモシーの窒素吸収量はそれぞれ5.53, 10.10, 15.67, 14.87, 19.52 kg/10a であった。この場合、マメ科牧草は混播されていない。無窒素区の窒素吸収量が土壤由来で、すべての窒素施用区に適用されると仮定すると、窒素施用量15 kg 以上では窒素吸収量が施用量を下回ることになる。つまりチモシーの場合には多量の窒

素を施用すると窒素の一部は牧草に吸収されずに土壤に残存するか、系外に流亡する可能性があり、硝酸流亡の可能性があると見える。

三木はオーチャードグラスを用いた実験で土壤および牧草の根・株も含めた施肥窒素の収支を詳細に検討し、行方不明の窒素は12 kgN/10a 施肥条件で平均6%, 18 kgN/10a で9%程度であることを示した⁽¹⁶⁵⁾。Barraclough らはベレニアルライグラスに対する硝酸アンモニウムの施用量実験を圃場及びライシメーターで行い、25 kgN/10a 条件における窒素の流亡率は圃場で1.5%, ライシメーターで0.14%であることを示し^(16, 17)、Dowdell らもベレニアルライグラスを用いたライシメーター実験で40 kgN/10a の硝酸アンモニウム施用の場合の流亡率は2~5%であることを示した⁽⁴⁵⁾。これらのことから、草地で窒素肥料を多量に施用する条件では窒素成分が流亡する可能性はあるものの、北海道で実際に行われている施肥レベルでは、窒素流亡はまったくないか、あったとしてもごく少量であると考えられる。

また、本実験で得られた塩安および硫酸区と、尿素区との間の酸性化の速度の大幅な違いは、塩基流亡の主原因が硝酸の溶脱であるとする説明できない。これに対し、アンモニアの硝酸化成によって生成するプロトンが塩基流亡の主要因と考えれば肥料による酸性化の違いが説明できる。さらに塩安区の場合は濃度や期間から考えると硝酸に比べると塩素の影響ははるかに大きい（図15）。尿素区の場合、プロトンの受容体が残存し、pH が低下せず、また硝酸とともにそれ以上の濃度でアンモニアが共存するので、実質的な塩基流亡にはそれほど影響していないと思われる。佐藤ら⁽²³¹⁾は草地土壤の土壤溶液組成の特徴の一つとして表層土壤で高濃度であることと、アニオンの主体が硫酸と塩素であることを示している。これらのことから、草地土壤における酸性化に対する硝酸溶脱そのものの影響は小さく、硝酸化成に伴うプロトン生成が主要因と考えられる。

施肥による土壤の酸性化は馬鈴薯^(241, 272)や果樹⁽¹⁰⁶⁾、トウモロコシ^(113, 202)、草地土壤^(1, 21, 113, 197, 234, 235)で認められているが、塩基溶脱の主原因が窒素肥料の硝酸化成に伴って生成するプロトンにあり、結果として随伴するアニオンによって規定されるということを示した本研究の結果は、窒素肥料として主に硝酸を多量に施用した場合^(21, 113, 197, 202, 234, 235)や多量のアンモニア態窒素の施与条件で硝酸化成の結果生じる硝酸そのものの溶脱が主因となる場合^(79, 80, 218)と異なる点である。また草地の場合、不耕起条件で永年にわたって牧草地上部の利用と施肥が繰り返されるために、一回の施肥量としてはそれほど多量

ではないにもかかわらず、土壌表層が集中的に酸性化することがその特徴である。そして、酸性化する土層は養分が蓄積する土層でもあり⁽²²⁶⁾、牧草根の多くがこの土層に集中しているために⁽¹⁹⁶⁾、酸性化する土層が比較的限られた部分であるわりに牧草生育に対する影響が大きいことも、重要な特徴である。

2) 酸性化の律速因子

草地土壌の経年的酸性化は肥料として施用されたアンモニアの硝酸化成によって生成するプロトンに起因するので、土壌酸性化の第一の律速因子は窒素施肥量である。生成したプロトンは土壌の交換性塩基と置換し、塩基は肥料に随伴する、あるいは土壌に吸着されていたアニオンを溶出させつつ溶脱するが、塩基溶脱量はアニオン量によって規定されるので、みかけ上、酸性化は施用アニオン量に比例して発現する。硝酸そのものの溶脱は、その存在期間から考えると酸性化に対する影響力は小さい。なお窒素肥料以外にもリンとカリウム肥料に随伴するリン酸と硫酸が影響を及ぼすが、本実験では一定量を均等に施用したためにその影響は顕在化していない。第二の律速因子は土壌の物理性にある。雨水の下層への移動に伴う塩基の溶脱においては、一般に溶質の拡散の影響より土壌孔隙の中の水の流れによって溶質が水とともに流亡する影響の方が大きいことが示されており⁽²⁰⁾、そのため透水性が良く保水性の小さい土壌で塩基の溶脱は起こりやすい。天北地域に分布する酸性褐色森林土は透水係数 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec の範囲にあって有効含水量が小さく⁽⁹⁷⁾、塩基が溶脱しやすい土壌であるといえる。道東に広く分布する火山性土については、その種類によって物理性が大きく異なり、そのため酸性化の速度にも土壌間に違いがあることが報告されているが⁽⁹⁹⁾、一般に非火山性土と比べると酸性化ににくいと報告されている^(130, 183)。さらに、酸性褐色森林土は交換性アルミニウムを多く含むのに対し火山性土ではこれが少ない⁽²²⁸⁾。一方火山性土はリン吸収係数が非常に大きい。これらのことから、酸性化によるアルミニウム溶出が牧草生育に及ぼす影響にも微妙な違いがあることが予想される。しかし、いずれの場合にも硫酸や塩安などの施肥によって酸性化が起こることは確かである。第三の律速因子は降雨量である。すなわち、プロトンの生成の結果、アニオン濃度の上昇と並行して土壌から溶出した塩基は降雨に伴い下層に流亡するため、降雨量が少ない場合には酸性化は進行ににくい。北海道の降雨量は年間1000 mm 以上であり、この条件で本試験で得られた土壌の酸性化が認められた。したがって、北海道より年間降雨量が多い本州ではさらに酸性化の程度は著しくなると考えられる。

3) 酸性化による牧草の生育障害

通常の酸性土壌における作物の生育阻害要因として、田中・但野らは1) 低 pH そのもの、2) 低 pH により可溶化するアルミニウム、鉄、マンガンなどの害作用、3) カルシウム、マグネシウム、カリウムなど塩基の不足、4) 可給態リンの不足、5) 微量元素の不足、および6) 酸性条件で活性が低下する微生物性をあげている^(244, 252)。本試験の結果をこれに対応させて以下に検討する：1) 低 pH そのものについては解析できなかった。2) 土壌溶液に高濃度のアルミニウムが溶出した。しかし鉄は土壌溶液中の濃度が常に低く、マンガンの濃度は上昇したもののその程度はアルミニウムに比べて小さく(5 mgMn/L (0.17 me/L)) (図26)、牧草のマンガン含有

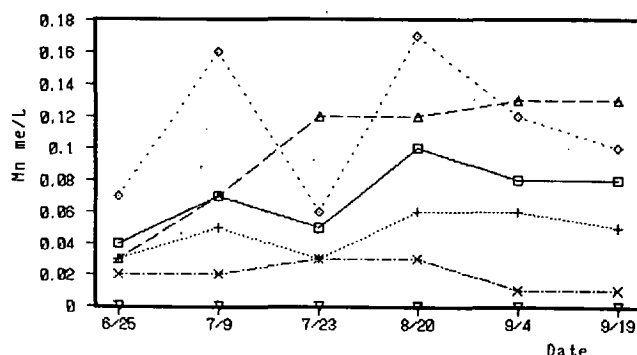


Fig. 26 Seasonal changes in Mn concentration of the soil solution (24 kgN/10 a, 1982, □: ammonium sulfate 0-2 cm, +: ammonium sulfate 2-5 cm, ◇: ammonium chloride 0-2 cm, △: ammonium chloride 2-5 cm, ×: urea 0-2 cm, ▽: urea 2-5 cm).

率も非酸性化区より高かったものの絶対値は200 mg/kg 以下でマンガン過剰症が起こる可能性はまったくない範囲にあった(表9)。3) カルシウムなどの交換性塩基は土壌中で確実に減少した(図5)が、もっとも酸性化が

Table 9. Mn content in the plant shoots of orchardgrass (mg/kg, 24kgN/10a, 1982).

Treatment	Month/Date		
	8/11	9/2	9/21
Ammonium sulfate	137	138	115
Ammonium chloride	151	192	169
Urea	81	118	83

進んだ最終年次(1984年・塩安24 N 区)におけるオーチャードグラスの年間平均含有率はカルシウムで0.39%, マグネシウムで0.17%, カリウムで1.69%で、欠

乏症は観察されなかったことから、これら養分の不足が直接オーチャードグラスの生育を抑制するには至っていなかったと考えられる⁽⁹⁶⁾。4) 可給態リンは経年的に蓄積傾向にあり(図24)、この不足は考えられないにもかかわらず牧草のリン吸収は低下した(図23, 表6)。5) 微量要素については検討していないが、少なくとも微量要素不足に由来すると思われるような症状は観察されなかった。6) 微生物性の検討は行っていないが、酸性化区では地表における粗大有機物が多量に存在することが三木らによって確認され⁽¹⁶¹⁾、Higashida らは草地土壌の微生物活性の最大の制限要因が低 pH であることを報告している⁽⁹⁰⁾。これらのことから酸性化区では微生物活性が低下していたと考えられる。ただし、微生物活性の低下そのものによる直接的な影響があるわけではなく、有機物の分解の遅延に由来する土壌からの窒素供給低下として間接的に発現するので⁽¹⁶¹⁾、十分な窒素施肥を行う条件ではその影響はほとんどないといえる。

以上のことから、草地土壌の経年的な酸性化によって牧草生育が低下する要因としては、1) 低 pH そのものの影響、2) 土壌溶液のアルミニウム、および4) なんらかの機構で発現するリン吸収低下が考えられる。しかし、pH 4.2~6.5程度の本試験の土壌 pH 条件ではアルミニウムやリンなどの強力な影響源が存在することを考えれば、低 pH 単独による生育障害は考えにくい⁽²⁵¹⁾。したがって、2) 高濃度のアルミニウムおよび4) リン吸収の低下が経年的酸性化によるオーチャードグラスの生育低下に強い影響を与えた要因と考えられる。

4) オーチャードグラスの生育に対するアルミニウムの直接的阻害作用

一般に培地のアルミニウム濃度が数 mg/L を越えると、植物根部の伸長阻害や生理機能の低下をもたらす生育が低下する⁽²⁴⁴⁾。植物の地上部アルミニウム含有率は10~数1000 mg/kg と広範囲にわたっているが、アルミニウム集積型の特殊な植物(茶、アジサイなど⁽²⁴⁸⁾)を除けば、通常の作物では200~300 mg/kg 程度にあるものが多い^(248, 252)。またアルミニウム濃度が高い培地における生育能力が大きい作物、すなわちアルミニウム耐性の強い作物ほど地上部のアルミニウム含有率が低く⁽²⁵²⁾、またアルミニウムは体内移行性がきわめて小さく根部に集積されることが多い。本試験で供試したオーチャードグラスの場合、酸性化区におけるアルミニウム含有率はせいぜい20~50 mg/kg 程度であり(図22)、アルミニウム過剰症状も観察されなかったことを考えると、オーチャードグラスは本試験で得られた程度の酸性条件ではアルミニウム耐性は十分に強く、アルミニウムの直接的

な生育阻害作用は受けていなかったと推察される。オーチャードグラスのアルミニウム耐性については別章で論ずる。

5) リン吸収に対する土壌酸性化の影響

本研究において土壌の酸性化の影響は牧草のリン吸収量の低下として顕在化していた(図23, 表6)。土壌の酸性化によってアルミニウムが土壌溶液に溶出した場合に作物のリン吸収が低下することはオオムギ^(155, 267)、マメ科牧草⁽⁹⁾、ソルガム⁽²⁶⁹⁾などで認められているが、その原因について但野⁽²⁴⁶⁾は1) アルミニウムの共存による培地リン濃度の低下、2) 根部におけるアルミニウムとリンとの共沈^(177, 267, 268)、3) アルミニウム過剰による根のリン代謝の異常^(34, 229)、4) アルミニウムによる根の伸長阻害によってもたらされる根の吸収表面積の減少、5) アルミニウムによる根の呼吸能低下に伴うリン吸収能低下、などにあるとしている。本研究の場合、土壌溶液のリン濃度は硫酸 $\geq$ 塩安 $>$ 尿素の順であり、酸性化区(アルミニウム溶出区)で高かった(図25)。すなわち、アルミニウムが高濃度に溶出しているにもかかわらず土壌溶液のリン濃度は高く、それにもかかわらず牧草によるリン吸収は低下したという事実は上述の1) 培地のリン濃度の低下では説明できない。これに対しアルミニウム溶出区の根表面に多量のアルミニウム付着が認められたこと(表7)、根部のリン含有率が高いこと(表8)は、根部におけるアルミニウムとリンの特殊な関係がリン吸収に対して影響を及ぼしていることを示唆する。

6) 土壌溶液のリン濃度

酸性化区の土壌溶液リン濃度が非酸性化区より高くなる原因として、1) 各種のリン酸カルシウム化合物の溶解度は pH 7 以下では pH が高い方が小さい^(50, 136, 217)という関係に支配されている場合、2) 牧草根によるリン吸収速度は処理区によって差があり、その結果が残存リン濃度の違いとして現れている場合、3) 土壌のリン蓄積量の差がそのまま土壌溶液中のリン濃度として反映されている場合、が考えられる。田中ら⁽²⁵⁴⁾はアルミニウムとリンのモル比を一定にして pH を変えた水耕培養実験で、pH 4.6 以下で溶存リン濃度が上昇することを認めている。酸性土壌に炭酸カルシウムを施用して pH を上げた場合に土壌の可給態リン含量が減少するという報告は数多い^(7, 19, 32, 82, 237)。これらの事例から、本試験で得られたような pH 4.5 前後の強酸性条件下で、土壌にリンが蓄積された状態であるにもかかわらず牧草のリン吸収が低下するのは、低 pH によるリン供給力の低下によるものではなく、アルミニウムとの関連で発現する牧草のリン吸収力の低下が重要な要因であると推定される。

第2節 牧草生育に対する土壌の酸性化の影響と降水量との関係

前項において草地土壌の経年的酸性化の実態と牧草生育との関係を述べたが、土壌の酸性化が牧草の生育に及ぼす影響の程度は年次変動が非常に大きかった。もともとこの地域の気象条件は夏期間の降水量の年次変動が大きく⁽²⁷⁶⁾、降水量が牧草生育の制限因子となる場合がみられる。少雨年における収量低下に影響を及ぼす要因としては、土壌の保水性と草地の経年数が指摘されている⁽¹⁶³⁾。そこで本節では経年的酸性化に視点を絞って牧草生育と降水量の関係を検討した。

実験方法

前節に記載した10年間のオーチャードグラスとシロクロローバの合計収量およびオーチャードグラスの養分含有率と、その間の降水量との関係を解析した。

実験結果および考察

1) 経年的酸性化に伴う収量低下と降水量との関係

前節において土壌の経年的な酸性化過程におけるオーチャードグラスとシロクロローバの合計収量の推移を尿素区（非酸性化区）に対する指数で示し（表2）、収量指数の経年変化を酸性化の影響の度合いとして読み替えた。その場合、酸性化区の収量指数は3年目以降著しい低下を示す場合とそうではない場合とが混在した。例えば、塩安24 kg/10 a 区において収量指数が90以下の場合が3, 5, 8, 10年目の4年あり、逆に95以上の場合が6, 7, 9年目の3年ある（1977～84年）。

その間の各年次の牧草生育期間である5月から9月までの降水量には288～732 mm という大きな年次間差が存在した（表10）。この降水量と酸性化区の収量指数との関係を図27に示した。この結果から酸性化による収量低下の割合が降水量の影響を受けていることがわかる。つまり、降水量が少ないほど酸性化による収量低下の割合が大きいためである。これを番草別にみると、表11のように3番草が降水不足の影響をもっとも強く受けていた。積算降水量の低下に伴う収量低下の傾きから判定しても3番草の収量低下割合（図28）は年間合計収量のそれ（図27）に比べてはるかに大きい。これは3番草の生育期間に当たる8月の降水量変動係数がもっとも大きい（CV: 70%, 表10）ことに起因すると考えられる。

ところで、酸性化の進行がごく緩やかであった尿素区の牧草収量も降水量によって強く支配されていた（図29）。したがって、降水量は酸性化草地の収量低下割合

Table 10. Monthly precipitation during the grass growing seasons (mm/month).

Year	Month					Total
	5	6	7	8	9	
1976	10	30	45	140	88	313
1977	112	45	77	110	146	490
1978	180	58	67	209	66	580
1979	59	115	75	4	106	359
1980	41	82	23	44	98	288
1981	126	38	130	290	148	732
1982	82	26	36	84	81	309
1983	64	95	47	98	138	442
1984	35	53	46	119	119	372
Average	64	95	47	98	138	442
C. V. %	67	51	52	70	27	34

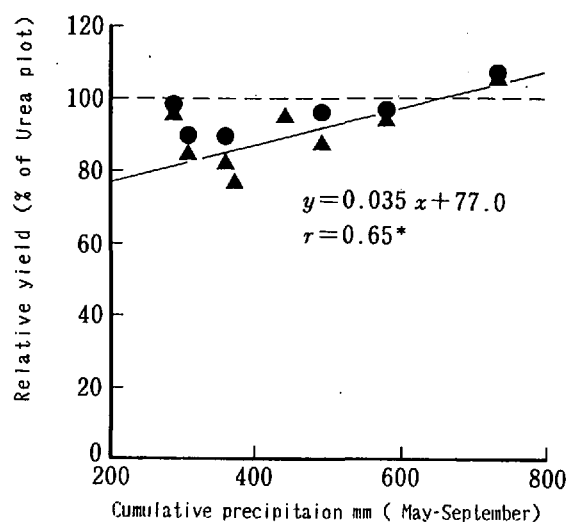


Fig. 27 Relationship between precipitation and relative yield (1) Annual total yield in 24 kgN/10 a treatment. (●: ammonium sulfate (1977-82), ▲: ammonium chloride (1977-84)). * shows statistical significance at 5% level).

を支配すると同時に、非酸性化草地の牧草収量そのものにも強く影響していると考えられる。そのため、酸性化草地の場合、少雨年には降水不足による収量低下と酸性化による収量低下の両方の影響を受け、逆に多雨年には両方の影響が小さくなっていると考えられる。これらの結果をモデル化して図30に示した。この関係と、経年的に酸性化が進行するという要素がからんで、表2に示したような収量指数の大きな年次変動が生じたものと思われる。なお、図29において尿素区の収量が窒素施用量によって大きく異なることから、この窒素レベルでは窒素

Table 11. Relative yield of orchardgrass at ammonium chloride treatment in the low precipitation year (24kgN/10a).

Year	1st	Cutting 2nd	3rd	Total
1977	89(355)	88(413)	84(262)	88(1030)
1979	82(329)	97(389)	47(84)	82(802)
1982	87(386)	92(279)	74(198)	85(863)
1984	83(183)	92(325)	54(158)	77(666)

Dry weight of urea treatment = 100,
() shows dry weight kg/10a.

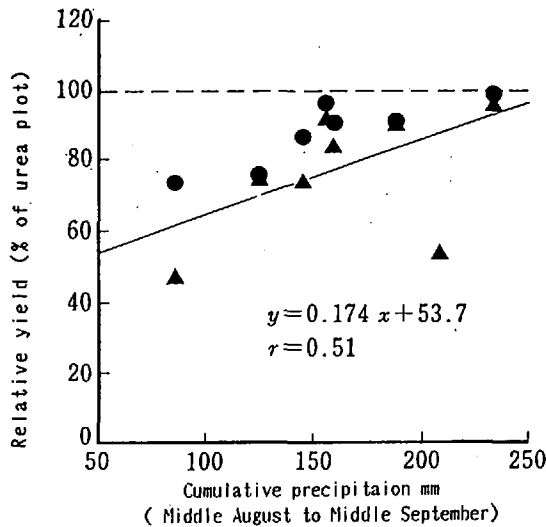


Fig. 28 Relationship between precipitation and relative yield (2) The 3rd cutting yield in 24 kgN/ 10 a treatment. (●: ammonium sulfate (1977-82), ▲: ammonium chloride (1977-84)).

供給が牧草生育を制限している重要な要因の一つであるといえる。

2) 土壌溶液のアルミニウム濃度

経年的酸性化による牧草生育の低下に対しては、土壌 pH とともに土壌溶液のアルミニウム濃度が強く関与する。土壌溶液を採取するときに水分条件を一定とした場合、アルミニウム濃度は施肥直後をピークとして経時的に低下するパターンを繰り返したが（図16）、それは土壌からのアルミニウムの溶出を支配している要因が土壌 pH の低下にあり、土壌 pH の変動はみかけ上アニオンの消長に対応するため、降雨によって流亡するアニオンとアルミニウム濃度が対応してみえるのである。そこで、降水量の影響を強く受ける土壌水分と土壌溶液のアルミニウム濃度の関係を解析するために、圃場状態の土壌水分条件のままで採取した土壌溶液のアルミニウム濃度を

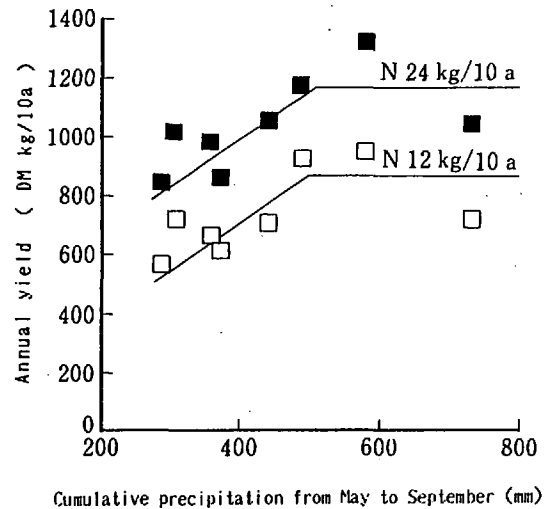


Fig. 29 Relationship between precipitation and relative yield of non-acidified treatment (urea).

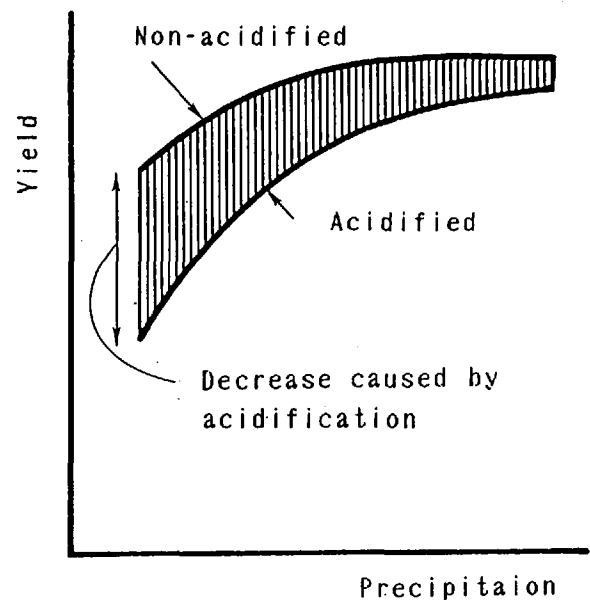


Fig. 30 Relationship between yield and precipitation - A schematic model of soil acidification effect -.

求めた（図31）。両者の間には明らかな負の相関が認められ、土壌水分が少ないときにアルミニウム濃度が高かった。つまり、降水量が少ないときにアルミニウム濃度がより高濃度になりやすいということである。したがって、少雨年に酸性化の影響が大きくなる原因は、土壌溶液中のアルミニウム濃度にあるといえる。少雨年における牧草収量低下について三木ら⁽¹⁶³⁾は、古い草地ほど収量低下割合が大きく、それには土壌の有効水量が大きな影響を及ぼすが、非常に古い草地の場合にはそれ以外の要因、すなわち酸性化が関与することを示唆しており、

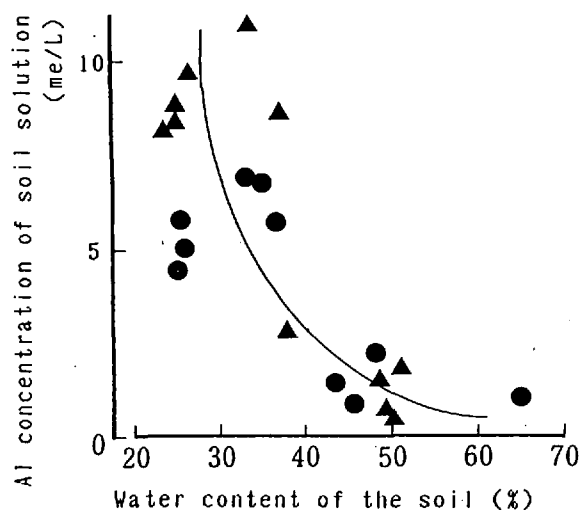


Fig. 31 Relationship between Al concentration of soil solution and water content of the soil (April-September 1980, 24 kgN/10 a, ●: ammonium sulfate, ▲: ammonium chloride).

上述の結果と一致する。

3) 牧草のリン含有率

土壌溶液中アルミニウム濃度を介する牧草生育低下の程度が降水量（土壌水分）の影響を受けるのであれば、アルミニウムの存在によって吸収が阻害されるリンの牧草体内含有率も同様に降水量の影響を受けると考えられる。図32に酸性化区と非酸性化区を対比して年平均リン含有率と降水量の関係を示した。両区ともにリン含有率は降水量の影響を受けているが、酸性化区で少雨時のリン含有率の低下が著しくなる傾向を示した。牧草の場合、酸性化の要因を除いた単純な降水不足条件でもリンなどの含有率が低下する⁽¹⁸⁸⁾。その原因として、施肥位置が表層に限られるために施肥養分が土壌表層に集中的に存在し、また根の大部分が表層に集中し⁽¹⁹⁶⁾、牧草根の吸収活力が表層で高い⁽¹²⁶⁾ために、土壌表層が乾燥することによりこれらの養分の吸収が低下すると考えられている⁽¹⁶³⁾。作物のリン吸収に対してはこの他に根長あるいは根の表面積が重要な制限因子となる^(29, 117, 137, 167, 219)ので、酸性化草地で降水量が少ないときにとくにリン吸収が低下し収量が低下することについても、アルミニウムの影響で根の養分吸収能が低下したために水分不足の影響が増幅されたと推察でき、この推論は図30のモデルと矛盾しない。

4) 土壌酸性化の影響をマスクする要因

以上に土壌の経年的酸性化が牧草収量に影響を及ぼす過程で降水量が重要な要因であることを示したが、そのことを考慮しても0~5 cm 土層の pH が4.5にまでも酸

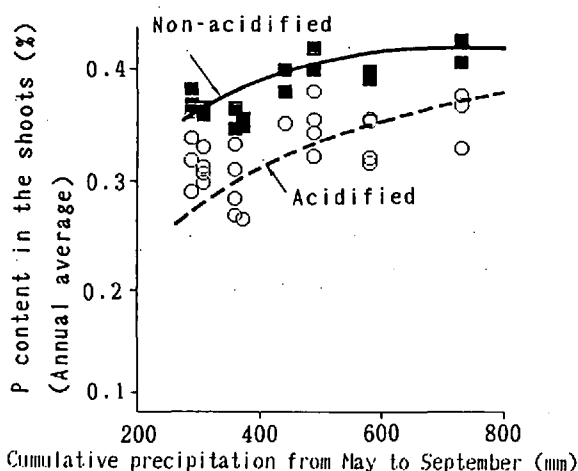


Fig. 32 Relationship between P content in the shoots of orchard-grass and cumulative precipitation during the growth season (1977-84, 12 and 24 kgN/10 a, ○: ammonium sulfate and ammonium chloride (acidified treatments), ■: urea (non-acidified treatment)).

性化した条件における牧草生育量の低下割合は意外に小さい（図27、表2）。その理由として、まず供試牧草であるオーチャードグラスの耐酸性あるいはアルミニウム耐性の強さが考えられる。田中らによればオーチャードグラスは耐酸性が強い作物とされ⁽²⁵²⁾、Edmeadesら⁽⁴⁹⁾の報告でもオーチャードグラスはペレニアルライグラスよりもアルミニウム耐性が強い。したがってオーチャードグラスより耐酸性が弱いとされるマメ科牧草^(12, 13, 15, 25, 26, 42, 138, 210)などの場合には、本試験より反応ははるかに大きくなると予想される。この他に、供試草地の5 cm 以下の土層の土壌肥沃度が比較的高いことも影響していると考えられる。つまり、酸性化の進行が著しく、かつ土壌水分が著しく減少するのは0~5 cm 土層であるが、その土層からの養分吸収が抑制される場合には、酸性化の進行が遅く土壌水分も比較的高い5 cm 以下の土層からの養分吸収への依存度が高まることが考えられる。本試験の場合、5 cm 以下の土層の有効態リン含量は6 mgP/100g (Bray(II)-P)であり、この土層からのリン吸収がかなりあったために、表層土壌の酸性化の影響がマスクされたと考えられる。

第 4 章

牧草の耐酸性

第 1 節 耐酸性の草種間差

実験方法

実験 1 アルミニウム添加実験

供試土壌（表12）1 kg に炭酸カルシウム（1 g/ 生土1 kg/ ポット）と過リン酸石灰（1 g/ 生土1 kg/ ポット）を混合し、これを15×15×5 cm（深さ）の木製ポット

に充填した。さらに0.18 gN/pot（硫安）、0.18 gP₂O₅/pot（過石）、0.18 gK₂O/pot（硫加）を施肥して、表5に示した8草種を1981年8月27日に播種した。各草種とも3～4葉期（播種後18日（マメ科牧草）～28日目（ケンタッキーブルーグラス））に塩化アルミニウム粉末（AlCl₃）をポット当たり1 g 表面散布し、その後17日間生育させた。

Table 12. Chemical properties of the soil used in the experiments.

Experiment No.	Soil type	Humus (%)	CEC me/100g	pH	Bray(II)-P mgP/100g	Ex-Ca me/100g
No.1, 3	Bfn(1)	2	18	5.50	3	1.07
No.2	(ditto)	9	24	5.70	48	9.45

(1) Typic Acid Brown Forest soils.

実験 2 生理的酸性肥料によるアルミニウム溶出実験

実験 1 と同じ形状の木製ポットに肥沃な土壌（表12）を充填し、0.10 gN/pot（硫安）、0.20 gP₂O₅/pot（過石）、0.10 gK₂O/pot（硫加）を施肥してオーチャードグラス、チモシー、ペレニアルライグラス、アルファルファおよびシロクロローバの5草種を1982年6月9日に播種した。播種後26日目の4葉期にアルミニウム溶出区（高アルミニウム区）として塩安－塩加、非溶出区（低アルミニウム区）として尿素－硫加でそれぞれ N-K₂O = 0.32 - 0.32 g/pot を表面施肥し、その後21日間生育させた。

実験 3 pH・リン肥沃度処理実験

供試土壌（表12）にあらかじめ0.29 N 硫酸100 ml/ 生土1 kg、または炭酸カルシウム2 g/ 生土1 kg を混合して高 pH 土壌と低 pH 土壌を調製し、さらに過石5 g/ 生土1 kg 添加の有無によりリン肥沃度処理を組み合わせた4種の土壌を前述と同じ形状の木製ポットに充填した。これに0.06 gN/pot（硫安）、0.10 gP₂O₅/pot（過石）、0.06 gK₂O/pot（硫加）を施用した後実験 2 と同種の 5 草種を1983年6月1日に播種し、22日後の3～4葉期に N-K₂O = 0.32 - 0.32 g/pot（硫安－硫加）を施用し、36日間生育させた。

以上の実験はいずれも天北農業試験場内のガラス室（自然光）で行い、水道水を表面より散布して土壌水分

を適切に保ち、生育期間の気温を約18～25℃に維持した。

実験結果

実験 1 では塩化アルミニウム粉末を施用することにより、実験 2 では生理的中性肥料と酸性肥料を使い分けることによって土壌溶液の pH とアルミニウム濃度をコントロールした。土壌溶液の pH は両実験ともにアルミニウム溶出の有無を問わず5以下であり、また -Al 区 > +Al 区および低アルミニウム区 > 高アルミニウム区であったが、その差は0.1～0.4と小さかった（表13）。したがって、実験 1 と 2 の結果は主に溶出したアルミニウムに対する牧草の反応性が現れたものと考えられることができる。そこで -Al 区あるいは低アルミニウム区に対する +Al 区あるいは高アルミニウム区の乾物収量を相対生育量とし、これを用いて実験 1 と実験 2 におけるアルミニウム耐性の草種間差を比較した（図33）。

オーチャードグラスは土壌溶液のアルミニウム濃度が 1.67 me/L（15 mg/L）程度でも相対生育量が低下せず、チモシーもこれと同様のパターンを示し、これらの草種のアルミニウム耐性は高いと考えられる。ペレニアルライグラスの場合、1.67 meAl/L で相対生育量が30%程度低下しており、オーチャードグラスやチモシーに比べてアルミニウム耐性は低い。マメ科牧草のアルファルファやシロクロローバでは0.44 me/L（4 mgAl/L）で

Table 13. Al dissolving treatments and chemical properties of the soil in the pot experiments.

Experiment No.	Treatments	Al dissolving chemicals	Soil solution(1)		Soil(3)	
			pH	Al(2)	pH	Bray(II)-P(4)
1	-Al	AlCl ₃	4.80	0.01(0.1)	14.0	
	+Al		4.72	1.67(15.0)		
2	Low Al	NH ₂ CONH ₂	4.73	0.08(0.7)	20.9	
	High Al	NH ₄ Cl ₂	4.32	0.44(4.0)		
3	High P High pH	CaCO ₃		0.10(0.9)	5.75	38.4
	High P Low pH	H ₂ SO ₄		1.09(9.8)	4.92	
	Low P High pH	CaCO ₃		0.03(0.3)	5.74	7.0
	Low P Low pH	H ₂ SO ₄		1.39(12.5)	4.88	

(1):Soil solution sample was taken at 5 days (Exp.1), 7 days (Exp.2), and 10 days (Exp.3) after Al treatment. (2):me/L(mg/L) (3):Soil sample was taken after the experiment. (4):mgP/100g.

生育量が大きく低下しており、イネ科牧草に比べアルミニウム耐性が低い。実験1に供試したケンタッキーブルーグラスのアルミニウム耐性はオーチャードグラスと同程度、レッドトップはペレニアルライグラスと同程度、そしてアカクロバはマメ科牧草の中では比較的高いアルミニウム耐性を示した。

-Al区あるいは低アルミニウム区における牧草体地上部のアルミニウム含有率は実験1で35~191 mg/kg, 実験2で15~69 mg/kgであり、草種ではペレニアルライグラス、シロクロバおよびアカクロバが高い傾向にあった(表14)。

Table 14. Al concentration in the shoot of -Al treatment(Exp.1) and Low Al treatment(Exp.2)(mg/kg).

Species	Exp. 1	Exp. 2
Orchardgrass	38	15
Timothy	50	21
Perennial ryegrass	99	50
Redtop	35	-
Kentucky bluegrass	51	-
Alfalfa	109	35
Red clover	121	-
White clover	191	69

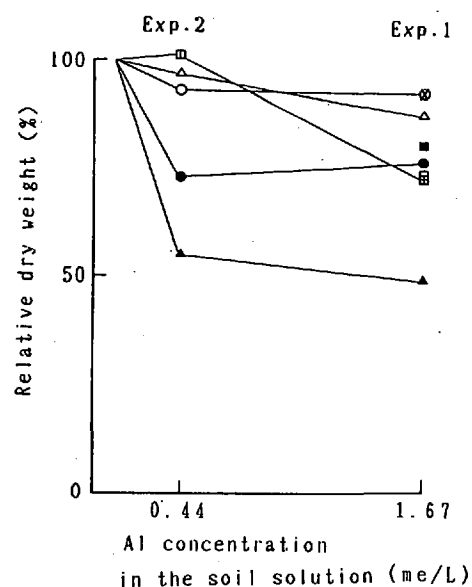


Fig. 33 Effect of Al concentration of the soil solution on the grass growth (○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ◇: redtop, ×: Kentucky bluegrass, ●: alfalfa, ■: red clover, ▲: white clover).

牧草体地上部のアルミニウム含有率は土壌溶液のアルミニウム濃度の上昇に伴って上昇したので、-Al区あるいは低アルミニウム区における牧草体地上部のアルミニウム含有率と+Al区あるいは高アルミニウム区における牧草体地上部のアルミニウム含有率の差を「牧草体地上部におけるアルミニウム含有率の上昇量」として、アルミニウム地上部移行性の指標と考え、草種間差を比較した(図34)。図に明らかなように、イネ科牧草のオー

チャードグラスやチモシー、レッドトップでは、地上部のアルミニウム含有率の上昇程度が小さいのに対し、マメ科牧草の上昇程度が大きく、この傾向はシロクロバで大きかった。イネ科牧草のうちケンタッキーブルーグラスは特異的にアルミニウム濃度が高まりやすかった。これらの結果から、土壌溶液から吸収されたアルミニウムの地上部移行性はシロクロバ>ケンタッキーブルーグラス>アルファルファ>アカクロバ>ペレニアルライグラス>レッドトップ>チモシー≧オーチャードグラスの順に高いと考えられた。

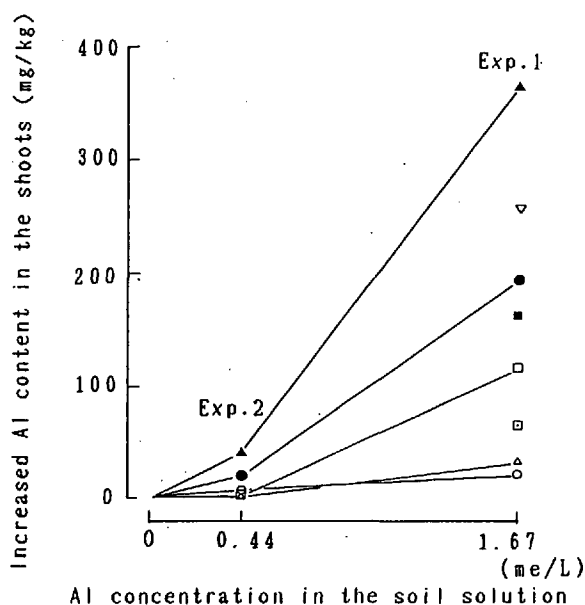


Fig. 34 Increased Al content in the shoots of several grasses (Increased Al content: Difference in Al content in the shoots between no-Al dissolved treatment and Al dissolved treatment. ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ■: redtop, ▲: white clover).

+Al 区および高アルミニウム区における牧草の地上部アルミニウム含有率と相対生育量との関係を図35に示した。実験1および2において地上部アルミニウム含有率が高いシロクロバやアルファルファでは相対生育量が小さかった。図36はアルミニウム地上部移行性と相対生長量との関係を示したものであるが、本実験では地上部アルミニウム含有率が高いことはアルミニウムの地上部移行性が高いことと一致しており、アルミニウムの地上部移行性が高いシロクロバやアルファルファでは相対生育量が小さかった。すなわちアルミニウム地上部移行性が低く高アルミニウム濃度の培地条件下でも地上部のアルミニウム含有率が上昇しにくいオーチャードグラスやチモシーなどのイネ科牧草ではアルミニウム耐性が大きく、逆に地上部移行性が高いシロクロバやアルファルファなどのマメ科牧草はアルミニウム耐性が小さい

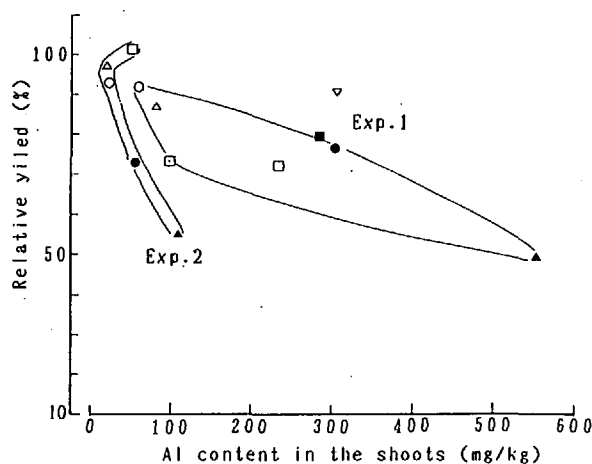


Fig. 35 Relationships between Al content in the shoots and relative yield (○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ■: redtop, ▽: Kentucky bluegrass, ●: alfalfa, ■: red clover, ▲: white clover).

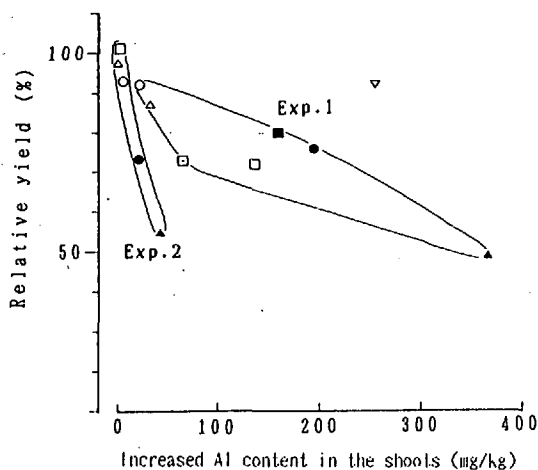


Fig. 36 Relationships between increased Al content in the shoots and relative yield (○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ■: redtop, ▽: Kentucky bluegrass, ●: alfalfa, ■: red clover, ▲: white clover).

とみることができる。イネ科牧草の中でケンタッキーブルーグラスはアルミニウムの地上部移行性が高いにもかかわらずアルミニウム耐性が大きい点で、他草種と異なっている。

実験3では処理により土壌溶液のアルミニウム濃度と土壌 pH およびリン肥沃度が異なった (表13)。リン肥沃度が高い場合 (高 P 区)、高 pH 区に対する低 pH 区の相対生育量はオーチャードグラス、チモシー、ペレニアルライグラスで大きく、アルファルファで小さく、シロクロバはその中間であった (図37)。リン肥沃度が低い場合 (低 P 区)、いずれの草種も生育が大きく抑制され、イネ科牧草は高 P 区の1/2~1/4、マメ科牧草では1/10以下の生育量となった。この結果を pH に対する

反応とリン肥沃度に対する反応とに区別して考えるために、低 pH に対する反応に及ぼすリン肥沃度の影響 (図 38) と、低 P に対する反応に及ぼす土壌 pH の影響 (図 39) として示した。このうち低 pH に対する反応、すなわち耐酸性はリン肥沃度が低い場合に低下することが多く、なかでもペレニアルライグラスではその傾向が著しかった。アルファルファではこの傾向はみられなかった。一方低 P に対する反応、すなわち低リン耐性は pH が低い場合に低下することが多く、ペレニアルライグラスでその傾向が著しく、アルファルファは例外であった。この結果から、耐酸性に及ぼすリン肥沃度の影響と、低リン耐性に及ぼす土壌酸性の影響は極めて類似した相互関係にあることがわかる。

高 P 系列においては高 pH に比べて低 pH 区で牧草のリンとカルシウム含有率が特異的に低下し、地上部のリン含有率およびカルシウム含有率の高 pH 区に対する低 pH 区の指数はオーチャードグラスで83%および74%、チモシーで72%および70%、ペレニアルライグラスで65%

%および77%, アルファルファで75%および99%, シロクロバで75%および61%であった (表15, 高 P 区)。低 P 区においてもほぼ同様の傾向であったが、高 pH 系列においてすでにリン含有率が極端に低かったために上述の傾向からはずれる場合もみられた (オーチャードグラス, アルファルファおよびシロクロバ)。

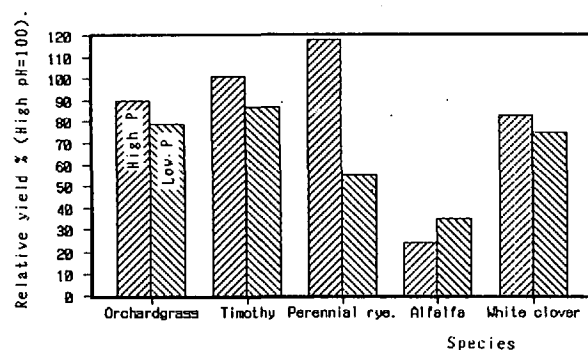


Fig. 38 Effect of P fertility of the soil on low pH tolerance.

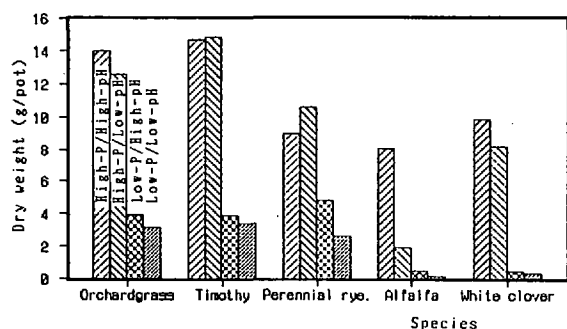


Fig. 37 Effect of pH and P-fertility of the soil on the growth of several grass species.

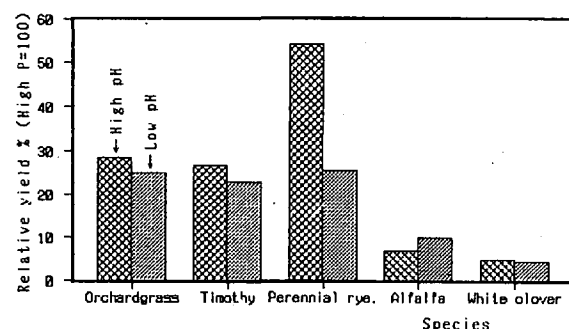


Fig. 39 Effect of the soil pH on low P tolerance.

Table 15. P and Ca content in the shoots (%) (Experiment 3).

Element	Species	Treatment			
		High P		Low P	
		High pH	Low pH	High pH	Low pH
P	Orchardgrass	0.28	0.24	0.07	0.07
	Timothy	0.43	0.31	0.11	0.09
	Perennial ryegrass	0.54	0.35	0.08	0.07
	Alfalfa	0.34	0.25	0.09	0.14
	White clover	0.24	0.18	0.09	0.10
Ca	Orchardgrass	0.36	0.26	0.29	0.16
	Timothy	0.33	0.23	0.26	0.11
	Perennial ryegrass	0.47	0.36	0.32	0.17
	Alfalfa	1.49	1.47	1.26	0.95
	White clover	1.94	1.19	1.20	0.86

第2節 経年的酸性化草地における耐酸性の草種間差

実験方法

天北農試の肥沃な酸性褐色森林土において1982年6月2日にオーチャードグラス、チモシー、ペレニアルライグラス、アルファルファおよびシロクロバの5草種を畦長4 m、畦間40 cm、1区4条=6.4 m²、3反復の条播で播種し、施肥処理によって土壌を酸性化させつつ(-CaCO₃区)1986年まで5年間にわたって栽培した。これらについて表16に示したスケジュールによって刈り取り、炭酸カルシウム施用による酸性化防止区(+CaCO₃区)との対比によって各草種の耐酸性を比較した。施肥処理内容は次の通りである。1982年～85年：N-P₂O₅-K₂O=18-10-18 kg/10a (硫安-過石-硫加)。1986年：N-P₂O₅-K₂O=6-10-6 kg/10a (硫安-過石-硫加)。+CaCO₃区に対する炭酸カルシウム施用量は次のとおりである。1982年：80 kg、83年：155 kg、1984～85年：100 kg/10a。1984年と86年の10月に各草種ともに5×30×30 cm (深さ)のモノリスを3反復で掘り取り、水洗法によって根を分離し土層深別の根量を測定した。

Table 16. Cutting schedule of the experiment.

Species	1st cut	2nd cut	3rd cut
Orchardgrass	June/E	August/E	September/L
Perennial ryegrass	June/E	August/E	September/L
White clover	June/E	August/E	September/L
Timothy	June/L	September/E	
Alfalfa	June/L	September/E	

E:Early, L:Late.

実験結果

実験開始後4年間は酸性化を進行させながら牧草生育を比較するために、窒素とカリウムの年間施肥量をオーチャードグラス(単播)に合わせて18 kgN/10aとした。その結果-CaCO₃区における土壌表層の酸性化は急激に進み、処理4年目には0～2 cm 土層の pH は草種平均で4.68 (表17および図40)、2～5 cm 土層で pH 4.75であり、交換性カルシウム (Ex-Ca) は0～5 cm 土層で大きく低下していること (表18および図41) から、5年間の酸性化の影響は0～5 cm 土層に集中していたとみることができる。土壌の酸性化の進行速度は草種によって

異なった。すなわち、処理後3年間に限ってみると0～5 cm 土層の酸性化の速度はオーチャードグラス、チモシーおよびペレニアルライグラスのイネ科牧草に比べアルファルファおよびシロクロバのマメ科牧草の方が速やかに進行した (表17)。またシロクロバでは0～2 cm 土層の Ex-Ca が2年目で降減少しておらず、pH もこれに対応していた (表17, 18)。しかしこの場合でも2～5 cm 土層の Ex-Ca および pH は確実に低下した。つまり、シロクロバの場合は表層直下土層の酸性化が先に進行することが認められた。このような現象は他の草種の -CaCO₃ 区においてもみられた。

牧草生育は土壌の酸性化に伴って低下した (図42)。相対生育量によって評価した耐酸性の順位は年次間で変動がみられたが、オーチャードグラス>チモシー>アルファルファ≧ペレニアルライグラス>シロクロバと考えられた。ただし生育低下の割合はポット試験で得られた結果よりかなり緩やかであった。

-CaCO₃ 区ではカルシウム含有率が低下した (図42：○)。リン含有率 (●) はオーチャードグラスの3年目、チモシーおよびペレニアルライグラスの2～3年目、アルファルファの3年目で低下したが、これらの草種その他

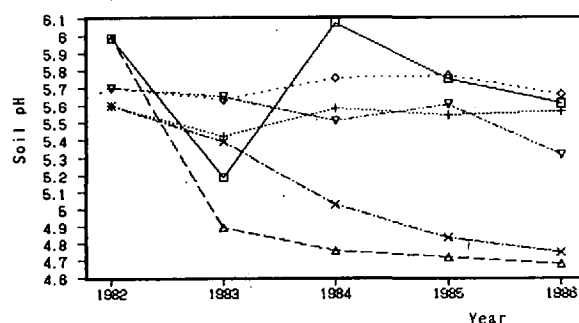


Fig. 40 Changes in soil pH (soil:water = 1:2.5) during a 5 year acidification treatment (Average pH of 5 species, □: +CaCO₃/0-2 cm, +: +CaCO₃/2-5 cm, ◇: +CaCO₃/5-10 cm, △: -CaCO₃/0-2 cm, ×: -CaCO₃/2-5 cm, ∇: -CaCO₃/5-10 cm).

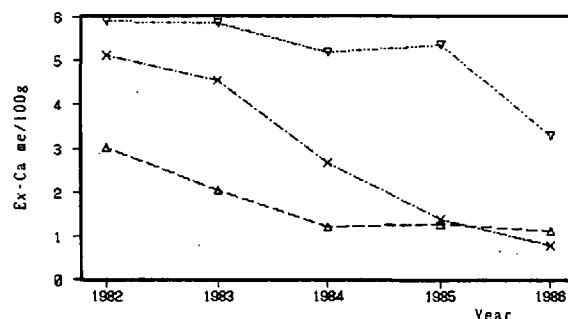


Fig. 41 Changes in Ex-Ca in the soil (Averages in samples of 5 species, -CaCO₃ treatment, △: 0-2 cm, ×: 2-5 cm, ∇: 5-10 cm).

の年次およびシロクロバでは低下しなかった。

土層別の根重測定の結果(図43), アルファルファの根域が深く, しかも単位土層深当たりの根重が多いこと, これとは対照的にシロクロバの根重が少ないことが特徴として認められた。オーチャードグラスおよびチモ

シーでは $+CaCO_3$ 処理によって表層の根重が増加したが, ペレニアルライグラスおよびアルファルファではこの関係は不明瞭であった。なお, シロクロバでは年数の経過に伴う雑草侵入が著しく, 1986年には根量測定ができなかった。

Table 17. Changes in soil pH during a 5-year treatment.

Species	Treatment	Soil layer	Year				
			1982	1983	1984	1985	1986
Orchardgrass	+CaCO ₃	0-2cm	5.99	5.20	6.05	5.64	5.34
		2-5cm	5.60	5.50	5.60	5.31	5.38
		5-10cm	5.70	5.68	5.82	5.54	5.77
	-CaCO ₃	0-2cm	5.99	4.95	4.92	4.63	4.61
		2-5cm	5.60	5.40	5.17	4.75	4.71
		5-10cm	5.70	5.69	5.61	5.49	5.51
Timothy	+CaCO ₃	0-2cm	5.99	5.20	6.28	5.79	5.51
		2-5cm	5.60	5.42	5.64	5.42	5.49
		5-10cm	5.70	5.60	5.82	5.95	5.79
	-CaCO ₃	0-2cm	5.99	4.95	4.96	4.73	4.58
		2-5cm	5.60	5.40	5.12	4.83	4.81
		5-10cm	5.70	5.65	5.61	5.64	5.21
Perennial ryegrass	+CaCO ₃	0-2cm	5.99	5.25	6.16	5.65	5.42
		2-5cm	5.60	5.50	5.72	5.83	5.39
		5-10cm	5.70	5.60	5.71	5.90	5.72
	-CaCO ₃	0-2cm	5.99	4.98	4.68	4.49	4.58
		2-5cm	5.60	5.50	5.11	4.96	4.52
		5-10cm	5.70	5.60	5.61	5.71	4.83
Alfalfa	+CaCO ₃	0-2cm	5.99	5.28	5.84	5.54	5.71
		2-5cm	5.60	5.40	5.66	5.58	5.58
		5-10cm	5.70	5.70	5.78	5.73	5.32
	-CaCO ₃	0-2cm	5.99	4.90	4.52	4.50	4.59
		2-5cm	5.60	5.45	5.00	4.62	4.69
		5-10cm	5.70	5.71	5.42	5.56	5.51
White clover	+CaCO ₃	0-2cm	5.99	4.99	6.02	6.13	6.08
		2-5cm	5.60	5.31	5.30	5.59	6.01
		5-10cm	5.70	5.60	5.66	5.74	5.71
	-CaCO ₃	0-2cm	5.99	4.68	4.70	5.24	5.03
		2-5cm	5.60	5.21	4.72	5.01	5.00
		5-10cm	5.70	5.62	5.32	5.63	5.51

Table 18. Changes in Ex-Ca content of the soil during a 5-year treatment (me/100g).

Species	Treatment	Soil layer	Year				
			1982	1983	1984	1985	1986
Orchardgrass	+CaCO ₃	0-2cm	3.01	5.03	7.17	12.02	4.85
		2-5cm	5.12	4.78	4.17	3.00	3.53
		5-10cm	5.88	5.63	5.99	5.78	5.21
	-CaCO ₃	0-2cm	3.01	2.07	1.03	0.78	0.68
		2-5cm	5.12	4.74	2.28	1.57	0.96
		5-10cm	5.88	5.81	5.56	5.39	4.32
Timothy	+CaCO ₃	0-2cm	3.01	3.67	13.84	13.37	7.28
		2-5cm	5.12	5.03	4.53	4.10	3.42
		5-10cm	5.88	5.63	6.35	6.38	5.06
	-CaCO ₃	0-2cm	3.01	1.96	1.11	0.89	0.86
		2-5cm	5.12	4.56	3.17	1.32	0.61
		5-10cm	5.88	5.85	5.42	5.92	2.53
Perennial ryegrass	+CaCO ₃	0-2cm	3.01	3.67	10.70	9.17	6.78
		2-5cm	5.12	5.03	4.56	5.10	3.74
		5-10cm	5.88	5.63	6.10	6.56	5.31
	-CaCO ₃	0-2cm	3.01	2.07	0.82	0.89	0.82
		2-5cm	5.12	4.85	3.00	1.78	0.75
		5-10cm	5.88	6.31	5.53	5.85	1.28
Alfalfa	+CaCO ₃	0-2cm	3.01	4.46	12.48	9.91	5.06
		2-5cm	5.12	4.74	6.10	3.46	6.88
		5-10cm	5.88	5.81	6.81	5.81	2.57
	-CaCO ₃	0-2cm	3.01	2.50	1.28	0.86	0.93
		2-5cm	5.12	4.89	3.14	1.11	1.00
		5-10cm	5.88	5.63	5.39	4.85	4.64
White clover	+CaCO ₃	0-2cm	3.01	2.89	12.70	19.97	13.62
		2-5cm	5.12	4.17	3.74	2.78	6.60
		5-10cm	5.88	6.21	5.56	5.71	5.60
	-CaCO ₃	0-2cm	3.01	1.57	1.71	2.85	2.21
		2-5cm	5.12	3.60	1.75	1.11	0.61
		5-10cm	5.88	5.63	4.03	4.78	3.57

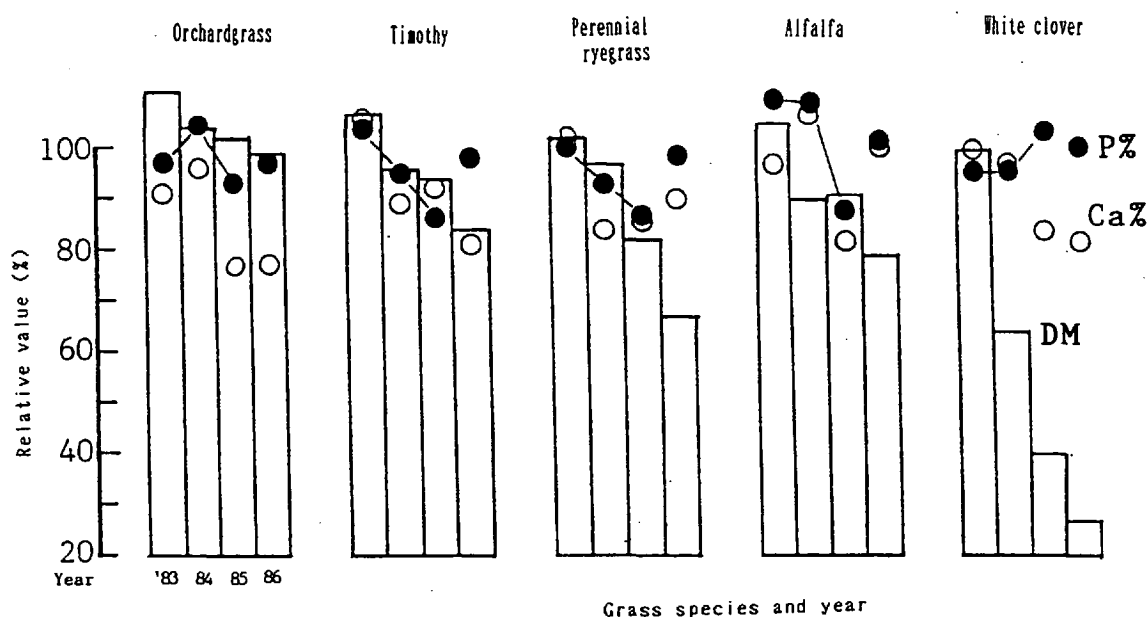


Fig. 42 Effect of soil acidification on relative yield, P and Ca content in the shoots of several grasses (Relative value: yield or content calculated as % of acidified (-CaCO₃) treatment to that of non-acidified (+CaCO₃) treatment, ●: P content in the shoots, ○: Ca content in the shoots).

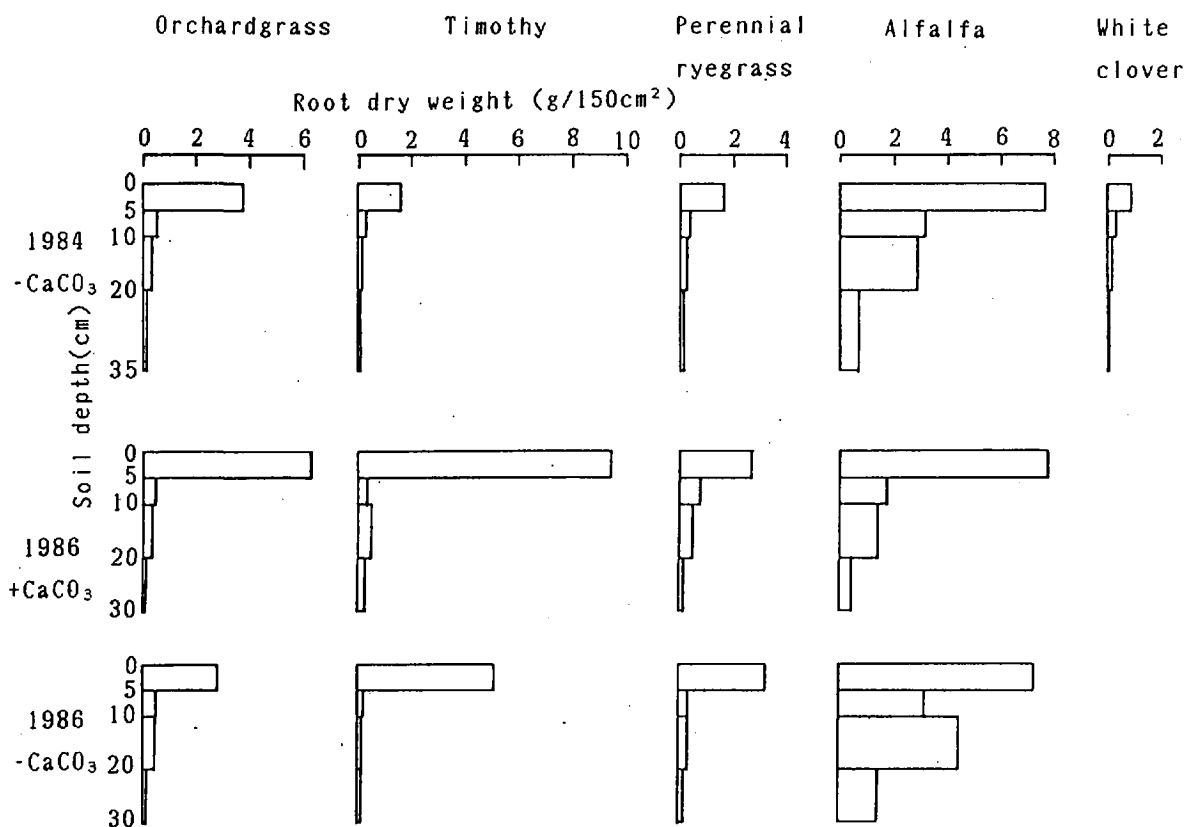


Fig. 43 Vertical distribution of root dry weight in five species.

第3節 アルミニウム存在下における牧草のリン吸収

実験方法

実験1 牧草の養分吸収に及ぼす硫酸アルミニウム施用の影響（土耕実験）

表1に示した8草種からケンタッキーブルーグラスとレッドトップを除いた6草種を1989年5月24日に1/5000 aワグネルポットに充填した黒色火山性土に播種し、発芽後30日目（3～4葉期）に硫酸アルミニウム粉末（ $\text{Al}(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ）をポット当たり6 g表面施用した区（+Al区）としない区（-Al区）を設け、アルミニウム処理後10日、20日、および30日目に地上部と根部に分けて収穫した。根部はポットから土壌ごとに取りだし、水洗によって根を注意深く分離して乾物重を測定した。各草種4反復で施肥量は次のとおりである。ポット当りに過石1 g（0.18 g P_2O_5 ）、硫酸マグネシウム2 g（0.5 g MgO ）を土壌全体に混合した後ポットにつめ、ポット当りに硫酸0.5 g（0.11 g N）、過石2 g（0.36 g P_2O_5 ）、硫酸0.5 g（0.25 g K_2O ）を播種時にポット上部から表面施用した。実験は根釧農業試験場内のガラス室の自然光下で行い、適宜ポット重量を測定して水道水を表面から散布し、土壌水分を圃場容水量の約60%に維持した。

実験2 培養液のアルミニウム濃度が根長とリン吸収に及ぼす影響（水耕培養実験）

34 L容塩化ビニール製培養槽2個と60 L容循環槽（ポリバケツ）を1セットとし、毎分7.5 L/培養槽で培養液を循環させつつ、基本培養液（表19⁽²⁴⁵⁾）を用いて下記の3処理区を設定した。

Table 19. Elemental composition of the solution culture.

Element	Chemical form	Final conc. (mg/L)
N	NH_4NO_3	40
	NaNO_3	28
P	NaH_2PO_4	0.2
K	K_2SO_4	78
Ca	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	80
Mg	MgSO_4	48
Fe	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2
Mn	$\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1
B	H_3BO_4	0.5
Zn	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.2
Cu	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.03
Mo	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	0.005

1) 0 mgAl/L区：アルミニウムを加えないでpHを

4.2とした。

2) 2 mgAl/L区：20 mgAl/L相当の $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ と16 mgP/L相当の NaH_2PO_4 を加えてpH 4.2とし、溶存するアルミニウム、リン濃度をそれぞれ2および0.2 mg/Lとした。

3) 10 mgAl/L区：40 mgAl/L相当の $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ と20 mgP/L相当の NaH_2PO_4 を加えてpH 4.2とし、溶存するアルミニウム、リン濃度をそれぞれ10および0.2 mg/Lとした。

これらの培養液のpHを2日に1回0.1 M- H_2SO_4 と0.2 M- NaOH を用いて調整しながら14日間放置し、その間2日に1回東洋濾紙No. 5 Cで濾過した培養液のアルミニウムとリン濃度を測定し、所定の濃度になるように $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ あるいは NaH_2PO_4 を添加した。この培養液にあらかじめバーミキュライトに播種して播種後30日経過し、およそ3～4葉期に達したオーチャードグラス、チモシー、ペレニアルライグラス、アルファルファ、アカクロバ、およびシロクロバの幼植物を移植した。培養槽1個を1反復とし、各処理2反復で、各培養槽に1草種当たり8個体（2個体1組）の牧草幼植物を移植した。移植後、pHの調整を毎日1～3回行い、アルミニウムとリン濃度は1日に1回あるいは2日に1回測定し、調整した。さらに5日ごとに循環槽の培養液を更新した。実験期間中は培養槽に常時通気した。実験は根釧農業試験場のガラス室内の自然光下で行い、1989年7月11日に移植し31日間生育させた後牧草体を地上部と根部に分け、根部についてはNewmanの方法⁽¹⁷⁹⁾で根長を測定した。

実験3 アルミニウム耐性を異にするイネ科牧草系統のリンおよび炭酸カルシウム施肥反応

あらかじめ強酸性テイタム土壌⁽⁷¹⁾を500 g用いたポット栽培によって、生育量の大きいものをアルミニウム耐性の強いもの、生育量の少ないものをアルミニウム耐性の弱いものとして検定・選抜したオーチャードグラス、チモシー、およびペレニアルライグラス系統それぞれから2系統を選び（表20）、合計6系統に対し、同じくテイタム土壌を用いたポット試験で次の処理を設定した実験を行った。

炭酸カルシウム処理：炭酸カルシウム1500 mg/kg相当を施用した区（+ CaCO_3 区）と施用しない区（- CaCO_3 区）を設けた。

リン処理： $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ を用いて土壌に対する施用リン濃度を0, 25, 50, 100, 200 mgP/kgとした。

共通肥料としてN-K=100-137 mg/kg相当量を硝

安と硫加で施用した。実験は3反復で実施した。ペレニアルライグラスは1990年11月19日に播種し、12月24日に収穫し、オーチャードグラスおよびチモシーは1991年1月9日に播種し、2月22日に収穫した。実験は

USDA-ARS ベルツビル研究センターの温度調節装置と補光装置（1日当たり12時間、1mの高さから200 W 白熱電灯で照射）のついたガラス室で行い、室温は18～25℃に維持した。

Table 20. Selected cultivars for Al-tolerance.

Grass species	Al-tolerant cultivar	Al-sensitive cultivar
Orchardgrass	PI 278699 (Canada)	PI 109072 (Turkey)
Timothy	Senpoku (Japan)	PI 204480 (Turkey)
Perennial ryegrass	PI 420124 (Japan)	Reveille (Japan)

実験結果

実験1

アルミニウム処理後5日目には0～5 cm 土層の土壌溶液中アルミニウム濃度は107 me/L (958 mg/L) と高濃度であったが、処理後10日～30日には12～26 me/L

(110～233 mg/L) に低下し、pHは4.09～4.64であった（表21）。5 cm 以下の土層では全期間を通じてpHは5.62～6.20であり、アルミニウム濃度は0.08～0.17 me/L (0.7～1.5 mg/L) であった。30日間の牧草生育量はアルミニウム処理によって低下したが、その程度は地上部より根部で大きかった。アルミニウム処理の生育

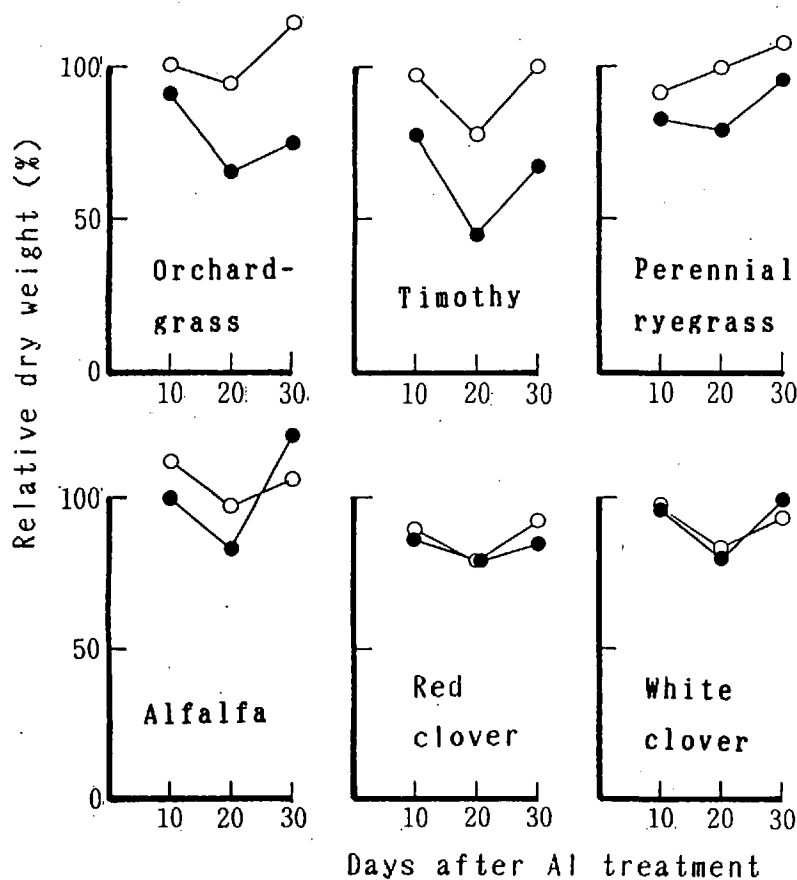


Fig. 44 Changes in relative dry weight of +Al treatment to that of -Al treatment (○: shoot, ●: root).

に対する悪影響は10日おき3回の調査のうち20日目にもっとも大きかった。20日目における地上部相対生育量はペレニアルライグラス>アルファルファ>オーチャードグラス>シロクロバ>アカクロバ>チモシーの順であった(図44)。

牧草による養分吸収のうちアルミニウム処理の影響がみられたのはイネ科牧草ではリン、カルシウム、マグネシウム、マメ科牧草ではリン、カルシウムであり、いずれの場合にもアルミニウム処理によって含有率が低下した。リンとカルシウムの吸収量と根重の関係を10日おきに30日間追跡した結果を図45および図46に示した。リンの場合、ペレニアルライグラスとシロクロバ以外の草種ではアルミニウム処理の有無にかかわらずおおむね同一直線上にのるとみなせたが、ペレニアルライグラスとシロクロバの場合、アルミニウム処理後半において異なる直線を描いた。つまり、アルミニウム処理によって単位根重当たりのリン吸収量が低下した。これに対しカルシウムではすべての草種でほぼ同一直線上にのった。

Table 21. pH and Al concentration of the soil solution of +Al treatment during the experiment.

Days after Al treatment	Soil layer	pH	Al me/L (mg/L)
5 days	0-5cm	4.09	106.56 (958)
	5-15	6.20	0.08 (0.7)
10 days	0-5	4.38	12.24 (110)
	5-15	5.62	0.14 (1.3)
20 days	0-5	4.19	25.92 (233)
	5-15	6.03	0.17 (1.5)
30 days	0-5	4.64	24.81 (223)
	5-15	6.14	0.17 (1.5)

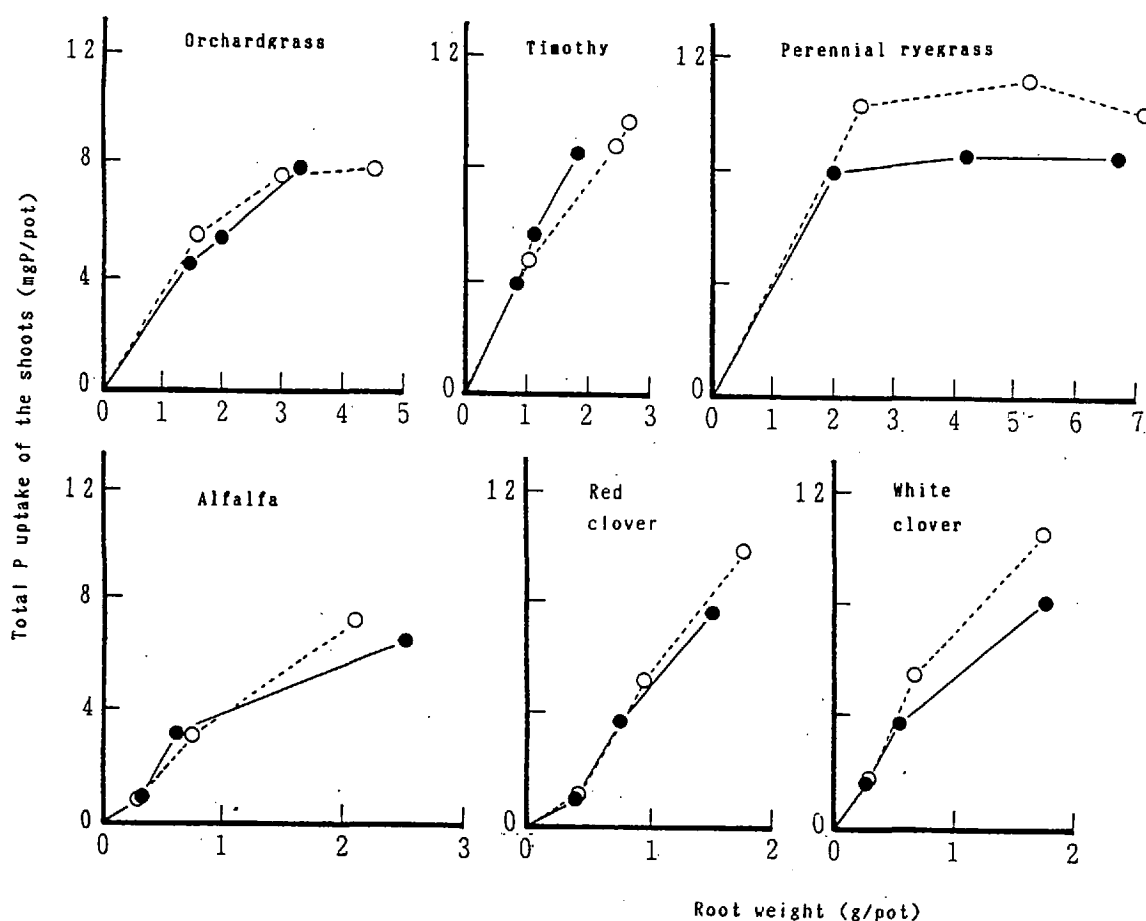


Fig. 45 Changes in relationship between root weight and total P uptake (○: -Al, ●: +Al).

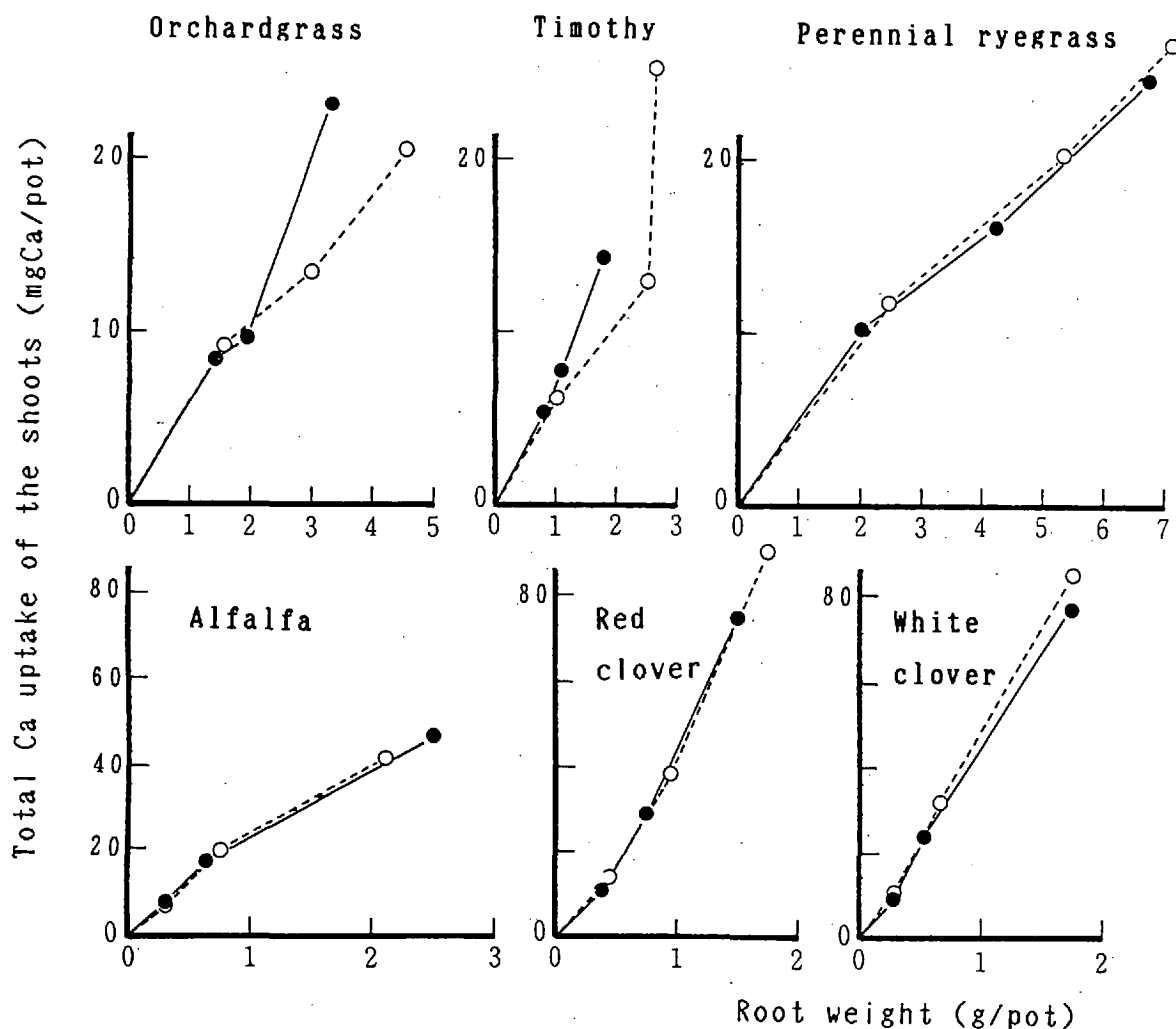


Fig. 46 Changes in relationship between root weight and total Ca uptake (○: -Al, ●: +Al).

実験 2

アルミニウム無添加区に比べアルミニウム添加区では地上部・根部ともに生育量が低下したが(図47), 根重と根長をアルミニウム無添加区に対する相対値で比較するとアルミニウム処理による低下率は根重より根長で著しかった(図48)。

地上部の窒素, リン, カリウム, カルシウム, マグネシウム含有率はいずれもアルミニウム処理によって低下したが, なかでもリン含有率の低下がすべての草種において著しく, カリウム, カルシウムがそれに次いだ(図49)。リン含有率がアルミニウム処理によって低下する場合には同一草種内において根長と比例関係を示した(図50)。さらに, 根長と地上部リン吸収量間にも明瞭な比例関係が認められ, 草種とアルミニウム処理を含めた場合でもその関係は保たれていた(図51)。

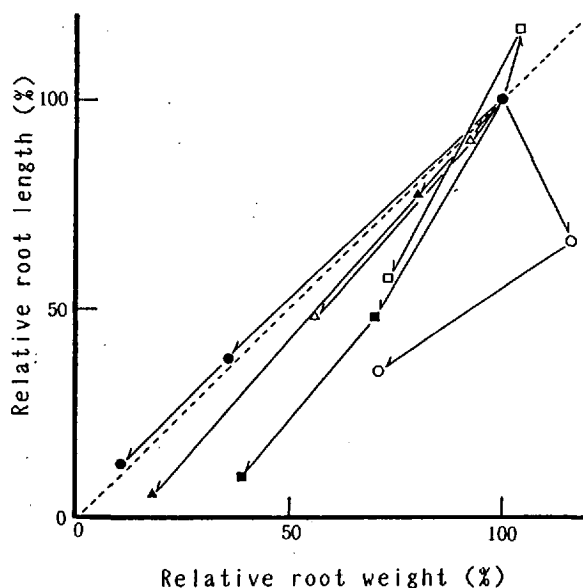


Fig. 48 Relationship between relative root weight and relative root length (Relative value: comparing to that of OmgAl/L treatment. ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: red clover, ■: white clover).

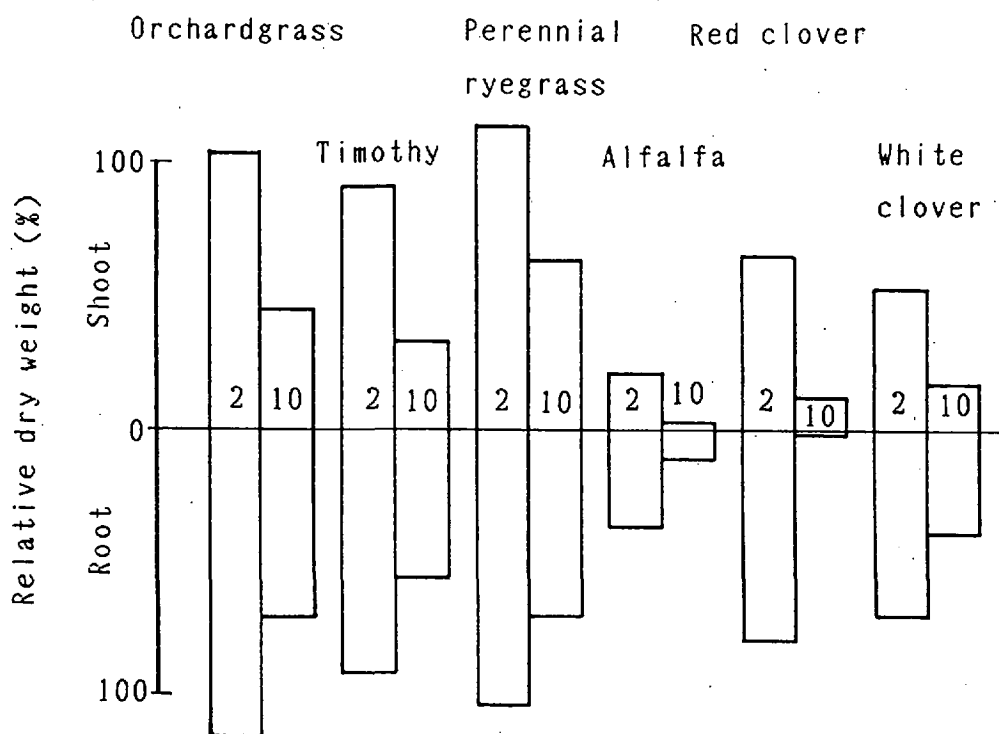


Fig. 47 Effect of Al concentration of culture solution on relative dry weight of shoot and root (OmgAl/L: 100%. Numbers in the bar show Al concentration in the solution).

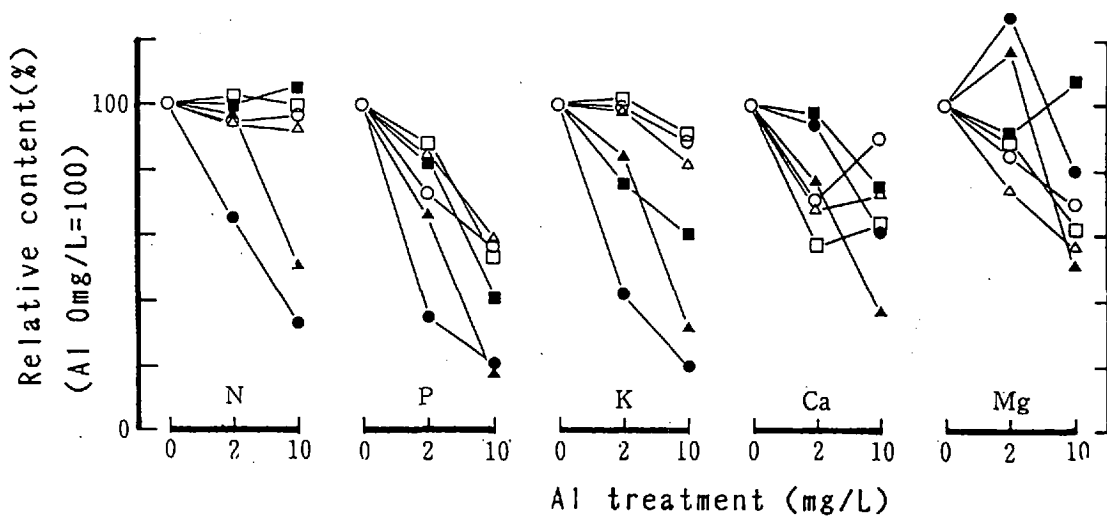


Fig. 49 Effect of Al treatment on relative content of N, P, K, Ca and Mg in the shoots (Relative content: comparing to that of OmgAl/L treatment. ○: orchard-grass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: red clover, ■: white clover).

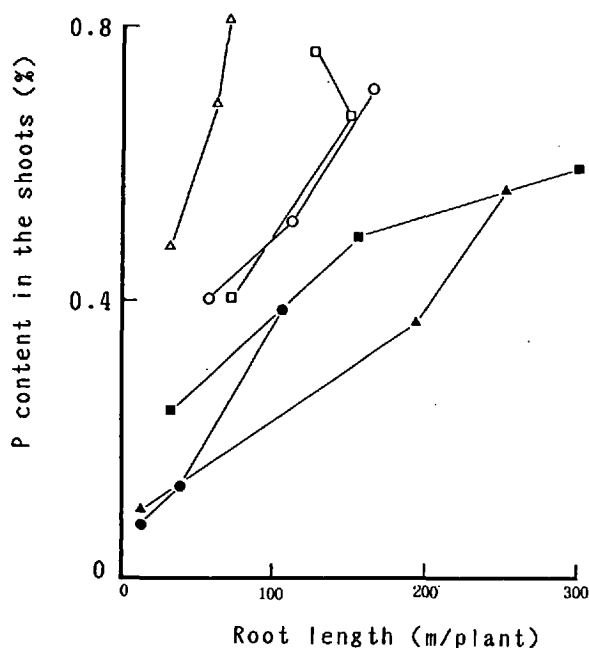


Fig. 50 Relationship between root length and P content in the shoots (○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: red clover, ■: white clover).

実験 3

実験終了時の土壌の化学的性質を表22に示した。供試したテイタム土壌は強酸性で交換性カルシウムやリン肥沃度が非常に低く交換性アルミニウムが高く、リン処理によって有効態リンが上昇し、炭酸カルシウム処理によってpHが上昇し交換性アルミニウムが低下した。ただし1500 mg/kgの CaCO_3 添加によるpH上昇は0.5ポイント程度であった。

3草種の乾物収量を図52に示した。3草種に共通する乾物収量の傾向は ①リン用量に応じて増加する ② $-\text{CaCO}_3$ 処理区 $< +\text{CaCO}_3$ 処理区である ③アルミニウム感受性系統 $<$ アルミニウム耐性系統である（ペレニアルライグラスを除く） ④乾物収量が最大となるリンレベルは $+\text{CaCO}_3$ 処理区ではP 100~200 mg/kgであるのに対し、 $-\text{CaCO}_3$ 処理区ではそれ以上のところにあると思われる ⑤図の実線または破線で示される $+\text{CaCO}_3$ 処理による乾物収量増加量はP 50~100 mg/kgにおいて最大となる、という特徴を示した。そこで $+\text{CaCO}_3$ 処理効果を解析するために、 $-\text{CaCO}_3$ 処理区の乾物収量を100とした場合の $+\text{CaCO}_3$ 処理区の乾物収量を指数として示した（図53）。この図から ①リンレベル25~50 mg/kgをピークとする山形を描くこと（3草種） ②ピークが得られるリンレベルはアルミニウム耐性系統 $<$ アルミニウム感受性系統であること（ペレニアルライグラスを除く2草種） ③ピークの高さもアルミニウム耐性系統 $<$ アルミニウム感受性系統である

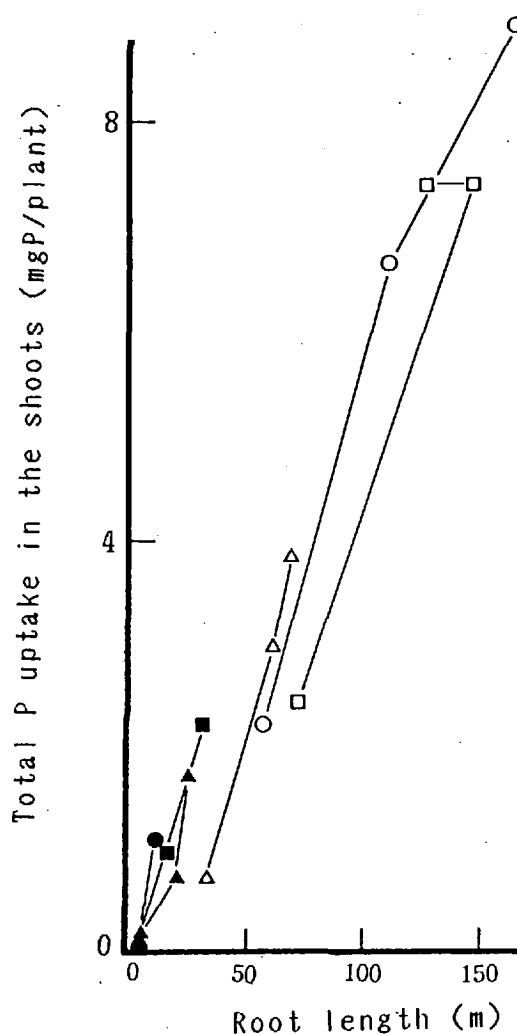


Fig. 51 Relationship between root length and total P uptake in the shoots (○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: red clover, ■: white clover).

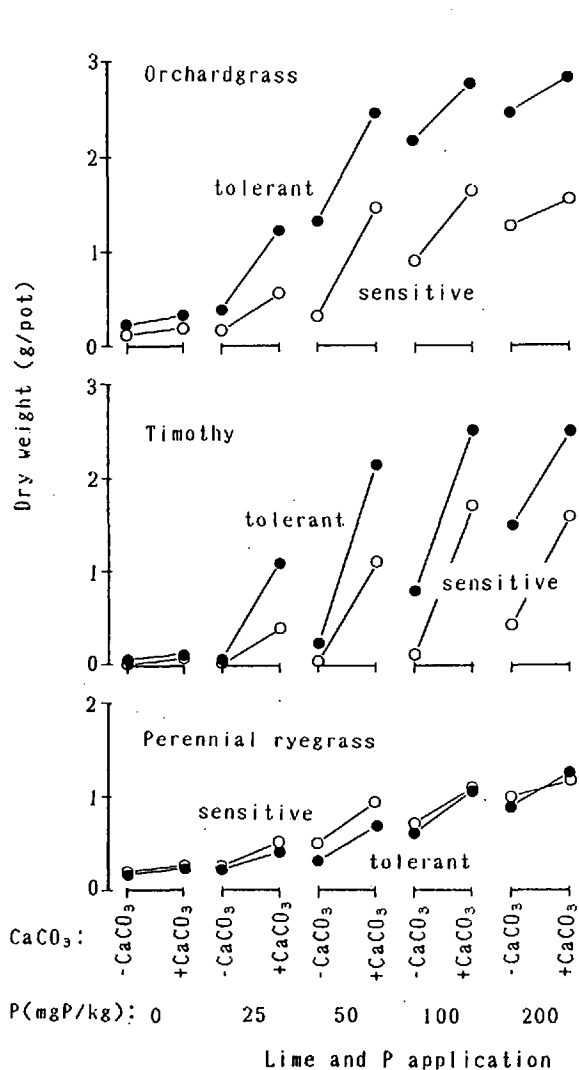
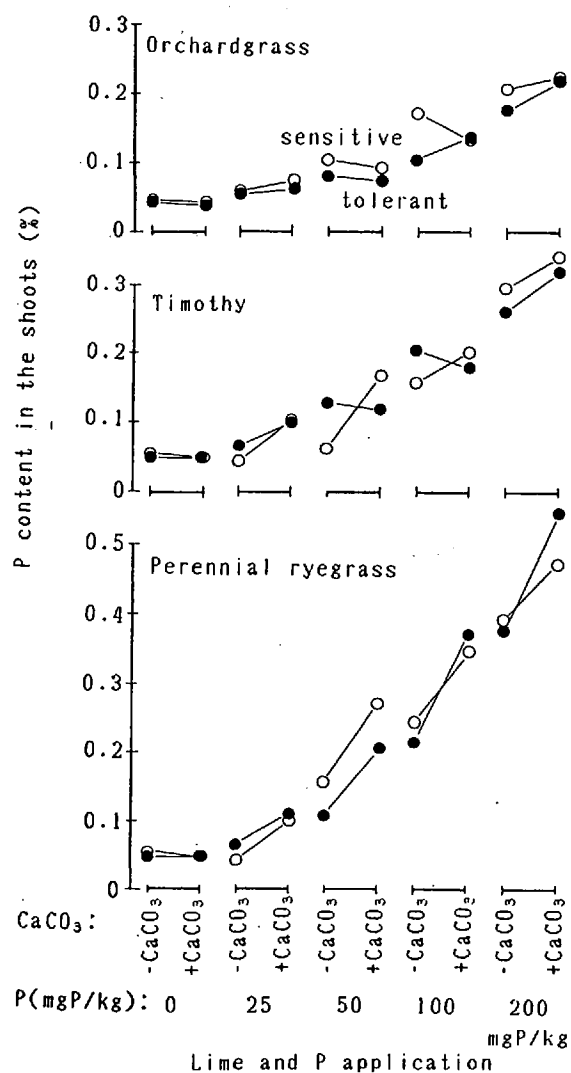
こと（ペレニアルライグラスを除く2草種）、が得られた。

牧草のリン含有率を図54に示した。リンレベルに応じてリン含有率は高まり、オーチャードグラスおよびチモシーのP 50とP 100を例外とすると、全体的には $-\text{CaCO}_3$ 処理区 $< +\text{CaCO}_3$ 処理区であった。

ペレニアルライグラスのアルミニウム耐性系統の選抜段階において、炭酸カルシウムの施用量を変えることによって根重が増大し、しかも耐性系統 $>$ 感受性系統の関係がみとめられた（図55）。この場合、耐性系統と感受性系統の根重の差は炭酸カルシウム施用量を増すことにより縮小した。

Table 22. Chemical properties of the soil after the experiment (orchardgrass).

P-level $\mu\text{gP/g}$	Lime-level $\mu\text{gCaCO}_3/\text{g}$	Final pH	Bray(II)-P $\text{mgP}/100\text{g}$	Ex-Ca	Ex-Mg me/100g	Ex-K	Ex-Al
0	0	4.44	0.04	0.18	0.51	0.86	0.54
0	1500	4.97	0.04	4.03	0.43	0.95	0.23
25	0	4.55	0.31	0.25	0.51	0.74	0.52
25	1500	4.99	0.35	3.21	0.56	0.65	0.25
50	0	4.50	1.09	0.39	0.50	0.21	0.62
50	1500	5.12	0.96	2.64	0.53	0.59	0.31
100	0	4.61	3.40	0.50	0.54	0.66	0.59
100	1500	5.14	2.57	3.07	0.54	0.56	0.30
200	0	4.67	5.72	0.57	0.49	0.43	0.54
200	1500	5.07	6.24	4.42	0.59	0.37	0.26

Fig. 52 Effect of lime and P application on dry weight of orchardgrass, timothy and perennial ryegrass (●: Al-tolerant cultivar, ○: Al-sensitive cultivar, +CaCO₃: 1500 mg/kg soil).Fig. 54 Effect of lime and P application on P content in the shoots of orchardgrass, timothy and perennial ryegrass (●: Al-tolerant cultivar, ○: Al-sensitive cultivar, +CaCO₃: 1500 mg/kg soil).

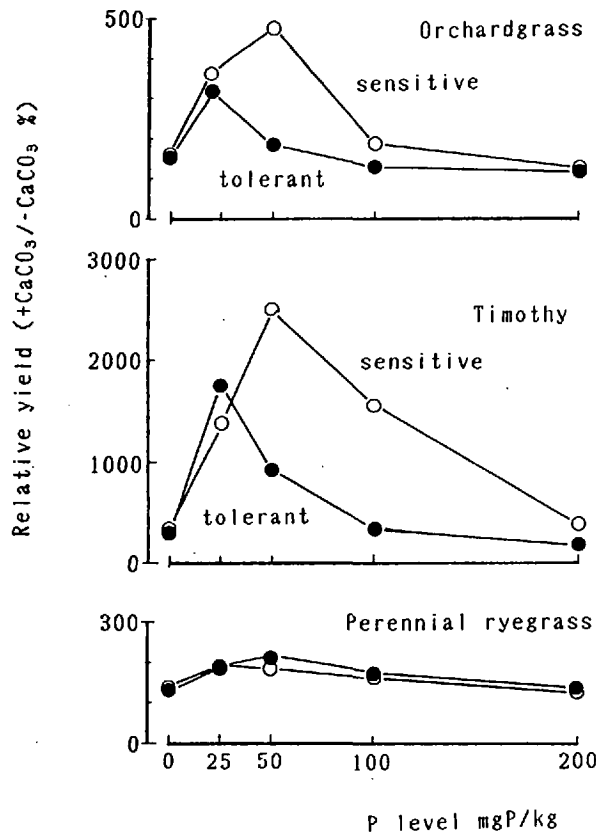


Fig. 53 Effect of P application on relative yield (+CaCO₃ / -CaCO₃ %).

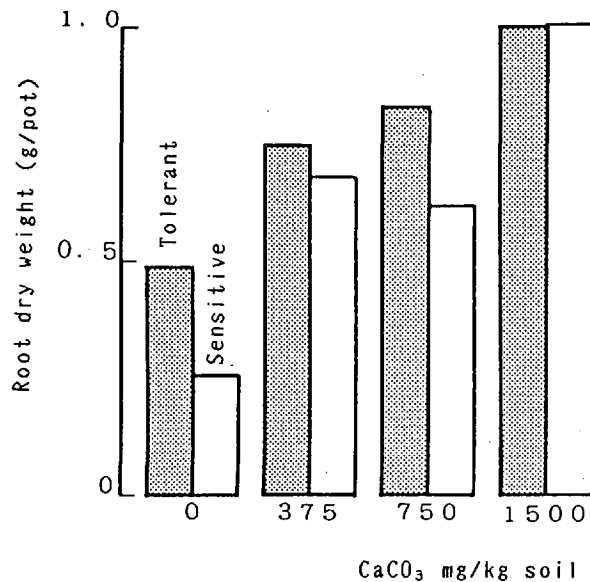


Fig. 55 Effect of CaCO₃ application on root weight of perennial ryegrass.

第4節 考 察

1 総合的な指標としての耐酸性の判定

牧草の耐酸性を評価する上で重要な指標となるアルミニウム耐性は、1) 生育低下がもたらされる土壌溶液のアルミニウム濃度、すなわちアルミニウム感受性を指標としたアルミニウム耐性と、2) 一定アルミニウム濃度条件における生育低下の程度、あるいは生育能力、すなわち耐酸性の二つの要因を含まなければならない。それは、実際の経年的酸性化条件にある圃場では、1) 酸性化に伴って生育低下がはじまるのがどの時点か、そして2) どの程度の生育低下量なのか、が草地の維持管理において重要であるためである。したがって1) と2) の指標を総合的に評価することにより、より実質的な耐酸性の判定ができると考えられる。そこで、1) 第1節の実験1と実験2の結果から生育低下がはじまるアルミニウム濃度を求め、これをアルミニウム感受性とし、これを指標としたアルミニウム耐性を求め、2) 実際の酸性化草地における土壌溶液中アルミニウム濃度を平均すると2.2 me/L (20 mg/L) 前後であること (第3章、図16) から、1.67 me/L (15 mg/L) (実験2) における相対生育量の低下度合いを求め、これを耐酸性とし、これらによる総合評価を試みた (表23)。

生育障害を受けるアルミニウム濃度から判定したアルミニウム耐性はオーチャードグラス>チモシー≒ケンタッキーブルーグラス>アカクロバ≒ペレニアルライグラス≒レッドトップ>アルファルファ≒シロクロバの順であり、土壌溶液のアルミニウム濃度を一定にした土耕条件での生育量から判定したアルミニウム耐性はオーチャードグラス≒ケンタッキーブルーグラス>チモシー>アカクロバ>ペレニアルライグラス≒レッドトップ≒アルファルファ>シロクロバの順であり、両者はほぼ対応した。したがって土壌の酸性化による主要な牧草生育障害要因の一つとしてアルミニウム過剰害をあげることができる。また両者から判定した総合的な耐酸性はオーチャードグラス>チモシー≒ケンタッキーブルーグラス>アカクロバ≒ペレニアルライグラス≒レッドトップ>アルファルファ>シロクロバの順であった。

Table 23. Evaluation of acidity tolerance among several grass species studied.

Species	Al tolerance (Al mg/L)		Relative growth at 15mgAl/L in the soil solution		Acidity tolerance (General estimation)	
	(1)	(2)	(2)	(2)	(3)	(4)
Orchardgrass	100*	5	90%	5	10	VS
Timothy	10-20	4	85	5	9	S
Kentucky bluegrass	15<	4	90	5	9	S
Red clover	<15	3	75	4	7	M
Perennial ryegrass	<15	3	70	3	6	M
Redtop	<15	3	70	3	6	M
Alfalfa	<4	1	70	3	4	W
White clover	<4	1	50	1	2	VW

(1)Al concentration of the soil solution when the grass growth began to be reduced. (2)Scores in 5 degree. Highest:5, Lowest:1.

(3)Total scores of Al tolerance and relative growth. (4)VS:very strong (tolerant), S:strong, M:medium, W:weak, and VW:very weak(sensitive).

*:Data from the other experiment.

2 耐酸性に関与する要因の相互関係

第1節実験3ではリン肥沃度が低いと牧草生育が著しく低下し、低 pH 区の相対生育量も低 P 系列で小さく、高 P 系列であっても低 pH 区では牧草のリン含有率が低下し、その低下割合はペレニアルライグラスの35%からオーチャードグラスの17%程度であった。このことから、牧草生育および耐酸性の発現に対するリン肥沃度の重要性が示されると同時に、酸性条件における牧草のリン吸収低下の重要性があらためて示された。第1節実験1ではオーチャードグラス、レッドトップおよびペレニアルライグラス以外の草種で +Al 処理により牧草のリン含有率が低下し、とくにマメ科牧草における低下割合が大きかった。第1節実験2ではペレニアルライグラス以外の草種で +Al 区のリン含有率が低下し、とくにシロクロバでその傾向が著しかった。このように、酸性条件下では牧草のリン含有率が低下することが多く、その低下割合には草種による違いが認められた。

そこで、第1節の実験2と実験3の結果から牧草根部と地上部の相対生育量の関係を図56に示した。実験間で多少のばらつきはあるものの、両者間には高い正の相関関係があり、酸性条件における地上部と根部の生育低下割合が密接に関係していることを示している。草種間ではアルファルファとシロクロバは地上部、根部生育量ともに小さく、ペレニアルライグラスやチモシーはその

反対である。これらのことから、酸性条件における牧草生育に対して根が密接に関与することが示された。

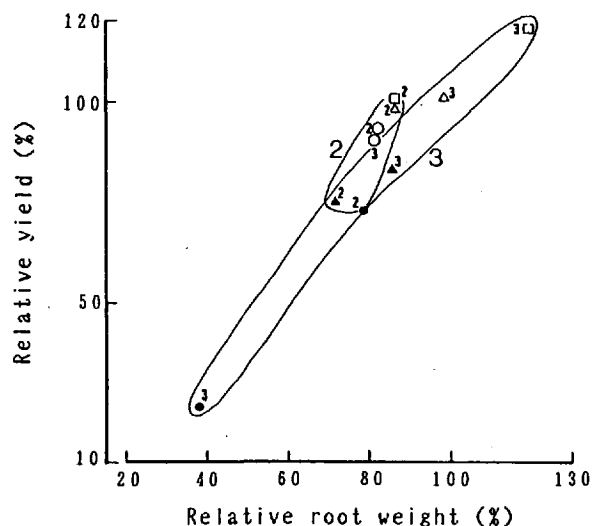


Fig. 56 Relationship between relative root weight and relative yield (Numbers show the experiment No. Relative value: comparing to that of 0mgAl/L, ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: white clover).

次に、牧草の地上部アルミニウム含有率上昇値（アルミニウム地上部移行量）と相対リン含有率すなわち -Al 区に対する +Al 区のリン含有率の相対値の関係を図57に示した。この図からアルミニウムの地上部移行性の高い草種は牧草リン含有率が低下しやすいという関係

がみられる。草種間では、オーチャードグラス、チモシー、ペレニアルライグラスなどのイネ科牧草ではアルミニウムの地上部移行性が低く、リン含有率が低下する程度が小さい。これに対しアルファルファ、シロクロバなどのマメ科牧草ではアルミニウムの地上部移行性が高く、リン含有率が低下しやすい傾向にある。ただしケンタッキーブルーグラスはこの関係からはずれ、アルミニウムの地上部移行性がある程度高い割にリン吸収の低下は小さかった。但野らによれば、アルミニウム耐性の弱いオオムギでは高濃度のアルミニウムを含む培養液で生育させると、根先端の組織と細胞が崩壊し、皮層と内皮に対して多量のアルミニウム侵入とカリウムの漏出が起これとされるので、アルミニウムの地上部移行性は根のアルミニウム障害の程度を反映しているとも考えられる⁽²⁴⁵⁾。したがって、アルミニウムによって根が障害を受けやすい作物はリン含有率が低下しやすいとみることもできる。ただしケンタッキーブルーグラスはこの関係の例外であったが、これはケンタッキーブルーグラスでは根がアルミニウム障害を受けても、リン吸収が阻害されない、あるいは高い濃度のアルミニウムが体内に存在しても生育が低下しないことによるものと考えられる。

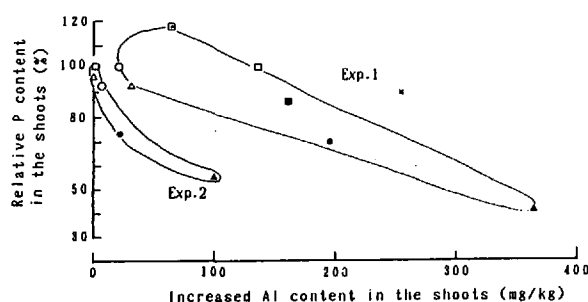
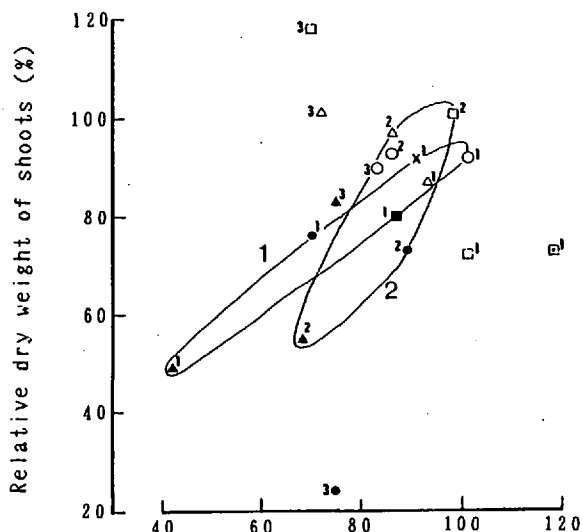


Fig. 57 Relationship between increased Al content and relative P content in the shoots (Relative value: comparing to that of 0mgAl/L, ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: redtop, ×: Kentucky bluegrass, ●: alfalfa, ■: red clover, ▲: white clover).

牧草の相対リン含有率と相対生育量の関係を図58に示した。第1節実験1および実験2では両者がおおむね対応した関係にあり、リン含有率が低下しやすい草種は相対生育量すなわちアルミニウム耐性が小さかった。ただし実験3（高P条件）ではこの関係が不明瞭であり、相対生育量の大小にかかわらず低pH区の相対リン含有率は大きく低下した。これは実験3の高P条件では低pH処理によるリン含有率の低下にもかかわらずイネ科牧草3草種ではそれに応じた生育低下がみられなかったため（図37、表15）、これら草種の耐酸性がリン肥沃度が高い場合にとくに大きいことによる。またこの場合のリン含有率が生育を抑制するレベルには達してい

なかったこともその要因と考えられる。一方実験3の低P条件ではマメ科2草種は著しい生育低下のため含有率として比較することはできなかった。このような実験3の結果には、播種時からすでに酸性条件で生育させた実験条件と、牧草の発芽定着後に酸性化させた実験1および実験2の条件とで根系発達条件に違いがあったことが影響していると考えられる。



Relative P content in the shoots (%)

Fig. 58 Relationship between relative P content and relative yield in the shoot (Numbers show the experiment No. Relative value: comparing to that of 0mgAl/L, ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: redtop, ×: Kentucky bluegrass, ●: alfalfa, ■: red clover, ▲: white clover).

図59に地上部アルミニウム含有率上昇値（アルミニウム地上部移行性）と相対根重（-Al区に対する+Al区の根重の相対値）との関係を示した（第1節実験2）。アルミニウムの地上部移行性が高いシロクロバやアルファルファでは相対根重が小さく、イネ科牧草ではアルミニウムの地上部移行性が低く相対根重が大きい。一方、相対根重と相対リン含有率の間には正の相関が認められ、シロクロバでは相対根重が小さくリン含有率の低下程度も大きいのにに対し、ペレニアルライグラスなどでは相対根重・リン含有率ともに低下割合が小さかった（図60、第1節実験2）。しかし播種時から酸性条件で生育させた第1節実験3では、根系発達全体が抑制され、これらの関係は認められなかった。

以上の結果を総合して、各要因間の相互関係を図61にまとめた。耐酸性の指標である相対生育量と相対根重および相対リン含有率はそれぞれ正比例の関係にあり、アルミニウムの地上部移行性はそれぞれに対し反比例の関係にある。つまり、アルミニウムが溶出している酸性土壌に牧草が生育するときの生育低下現象は、アルミニウ

ムによる根部発達低下および牧草によるリン吸収の低下が並行して生じていることを示す。このことは、牧草体内のリン含有率の低下が根量低下の結果として起こっている可能性を示唆するものであり、このことはさらに、牧草のリン含有率の低下が生育低下の直接的な要因であるかどうかは別として、養分吸収の場である根の生育抑制がより重要な要因であることを示すものである。さらに、リン肥沃度条件が異なる場合の耐酸性と、土壌 pH 条件が異なる場合の低リン耐性が相互に類似した関係であったことから (図38, 39)、耐酸性の発現に対して低リン耐性が密接に関連していることが示唆され、これは根を重要な要因として介在させて考えると理解しやすい。

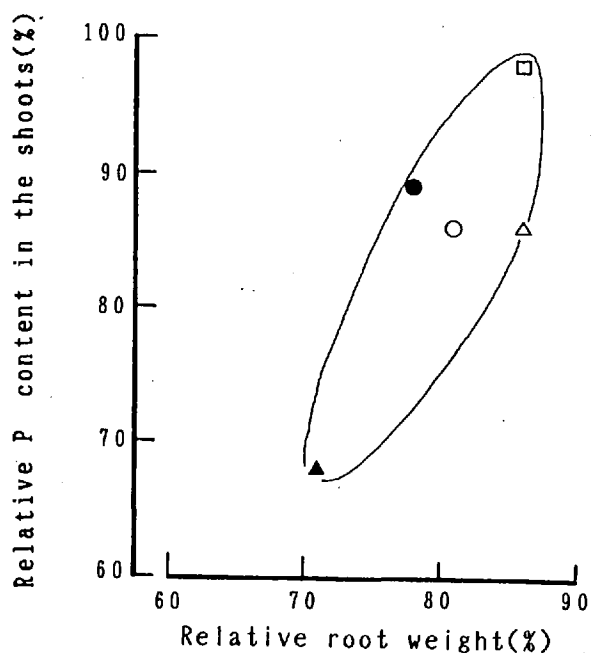


Fig. 60 Relationship between relative root weight and relative P content in the shoots (Exp. 2, Relative value: comparing to that of OmAl/L, ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: white clover).

3 経年的酸性化草地における耐酸性

第2節における経年的酸性化草地に対する耐酸性の草種間差に関する圃場実験の結果はポット試験の結果とほぼ一致したが (図42および表23)、アルファルファではポット実験と圃場実験で反応が若干異なった。すなわち、ポット実験および圃場実験の両者においてオーチャードグラスとチモシーの耐酸性は高く、ペレニアルライグラスの耐酸性はオーチャードグラスやチモシーに比べると低く、シロクロバの耐酸性はもっとも低かった。しかしポット実験で耐酸性が中程度と判定されたアルファルファは圃場実験ではそれほど大きな収量低下をみせなかった。この違いは酸性化が及ぶ土層深と牧草の根張り特

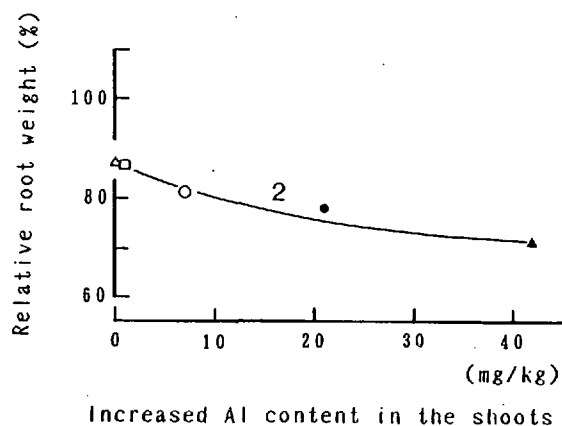


Fig. 59 Relationship between increased Al content in the shoots and relative root weight (Exp. 2, Relative value: comparing to that of OmAl/L, ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: white clover).

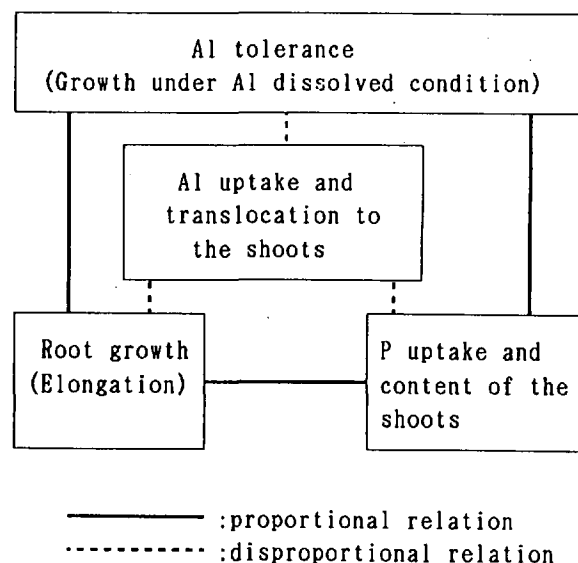


Fig. 61 Factors affecting acidity tolerance.

性によって説明することができる。アルファルファの場合、根張りが他草種に比べて著しく深く、単位土層深当たりの根重も大きいのに対し、経年的酸性化の影響が及ぶ土層深は主に0~5 cmであるため、アルファルファの根圏全体に占める酸性化土層の割合は小さい。したがってアルファルファは本来それほどアルミニウム耐性が強くないにもかかわらず圃場条件では酸性化の影響をそれほど強く受けなかったものと考えられる (図43)。しかも、アルファルファの根は土壌の酸性化が進む以前に作土層下部まで伸長するので、この点にも圃場実験とポット実験との違いがある。このことは、根が非常に浅いシロクロバを除く他の草種にもあてはまり、根の更新と強く関連すると思われるが、根の更新に関する知見は現

在のどころ十分ではないので、ここでは論議の対象からははずすことにする。

アルファルファとは対称的にシロクロバの場合は本来アルミニウム耐性が弱く、かつ、土層全体の根量が少なく根の大半が表層に分布しているために、土壌表層の酸性化の影響を強く受けたと考えることができる。オーチャードグラスやチモシーの場合は、本来アルミニウム耐性が強いことに加えてイネ科牧草の中では根量が比較的多いために、アルミニウム耐性の強さがそのまま発現したと考えられる。アルミニウム耐性が中程度であったペレニアルライグラスの場合も、圃場における酸性化土層の根圏全体に占める割合がポットの場合に比べて小さいために、相対生育量が80%を越えたと考えられる。

$-CaCO_3$ 区における牧草の養分含有率はリンとカルシウムで特異的な低下が認められた。このうちカルシウムについては、土壌中と地上部との関係から、イネ科牧草のカルシウム含有率は0~2 cm 土壌の交換性カルシウムが1.0 me/100g 以下になった場合に著しく低下しているとみることができる(図62)。しかしマメ科牧草ではこの関係は不明瞭であった。一方、牧草のカルシウム含有率と相対生育量の間には特別な関係は認められないことから(図63)、カルシウム含有率の低下は主に土壌中交換性カルシウムの減少に対応した結果であり、このことが $-CaCO_3$ 区における牧草の生育低下の主要な要因であった可能性は小さい。これに対しリン含有率と相対生育量との間には、前述のような深い根域のために酸性化の影響がマスクされていたアルファルファと雑草が侵入したために生育量が非常に少なかったシロクロバを除くと、イネ科牧草では正の相関が認められ(図64, $r=0.74$, 5%水準で有意)、 $-CaCO_3$ 区における牧草の生育とリン吸収との間には密接な関係があることが示唆された。草種間ではオーチャードグラスはリン含有率・生育量ともにあまり低下せず、チモシーおよびペレニアルライグラスではオーチャードグラスに比べると生育量、リン含有率ともに低下量が大きかった。このことはポット試験の結果と一致するものである。

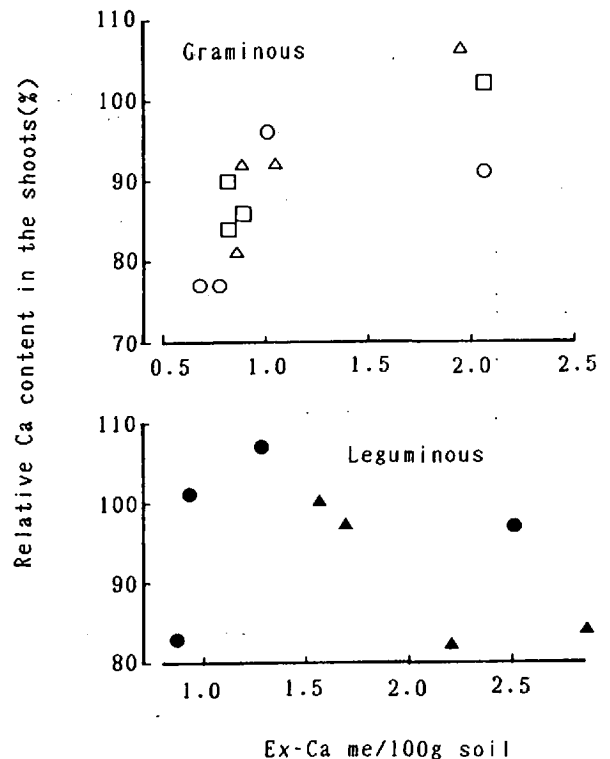


Fig. 62 Relationship between Ex-Ca in the 0-2 cm soil layer and relative Ca content in the shoots (Relative Ca content: $+CaCO_3 = 100\%$). ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: white clover.

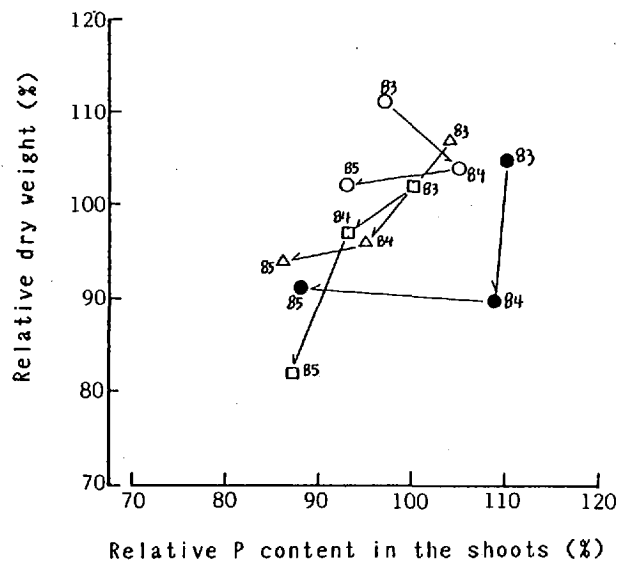


Fig. 64 Relationship between relative P content in the shoots and relative yield (Numbers show the year, ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa).

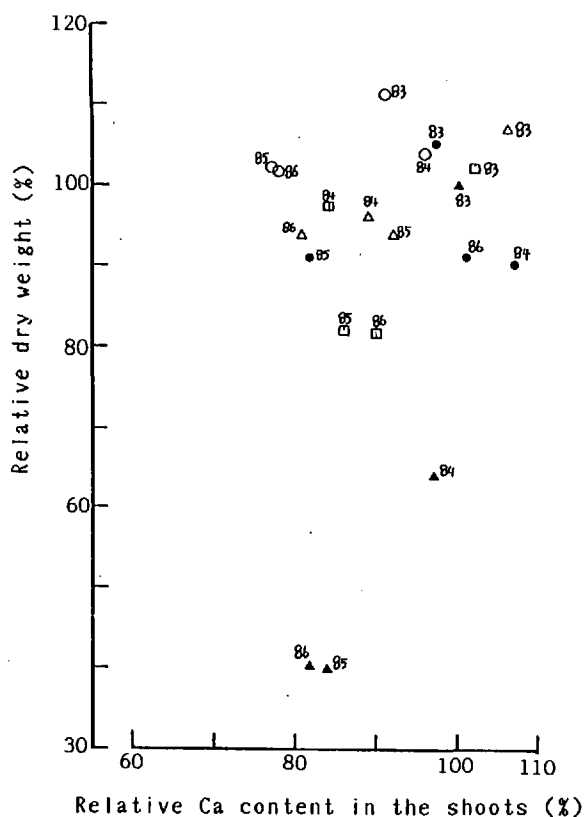


Fig. 63 Relationship between relative Ca content in the shoots and relative yield (Numbers show the year, ○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ▲: white clover).

根圏土壌の酸性化に対する作物根の影響については、根から吸収される養分のイオンバランス^(85, 159, 201, 233)や、交換性塩基の吸収量と土壌残存量のバランス、根から分泌される有機酸の影響⁽²⁰⁰⁾などが報告されており、一般にマメ科牧草の根圏土壌はイネ科牧草より酸性化が進みやすいとされている^(84, 158, 216)。本実験においてもオーチャードグラス、チモシーおよびペレニアルライグラスのイネ科牧草に比べ、アルファルファおよびシロクロバのマメ科牧草では表層土壌の酸性化が速やかに進行することがみとめられた(表17)。この草種間差は上記の報告と一致するものである。ただし、処理開始後4年目以降のシロクロバの場合、他の草種に比べて酸性化の速度が遅い傾向がみられた。この原因としては、シロクロバでは特有のランナーのために収穫作業時の茎葉回収率が他草種に比べて低く、結果的にイネ科牧草に比べてカルシウム含有率の高い茎葉が多量に地表に還元され、表層土壌の交換性カルシウムの流亡を補ったために、表層の酸性化が抑制されたこと、およびシロクロバの生育量が小さかったために根が集中する表層土壌からの交換性カルシウムの収奪量が少なかったことが考えられる。一方、同じマメ科牧草であってもアルファルファの場合

にはランナーをもたないため茎葉回収率がシロクロバより高く、このような現象がみられなかったのである。また、 $+CaCO_3$ 区において表面散布によるカルシウムの補給にもかかわらず2~5 cm 土層の pH が低下したことは、経年的酸性化の影響が確実に0~5 cm 土層におよんでいることを示すと同時に、酸性化防止のために施用される炭酸カルシウムの地表から土層内(0~2 cm および2~5 cm)への移動速度が、酸性化に伴う土壌中の交換性カルシウムの流亡速度よりも遅いことを示している(表17, 18)。

4 アルミニウム処理が養分吸収と根重に及ぼす影響

土耕条件においてアルミニウム処理によって牧草体の含有率の低下が認められた養分元素はリン、カルシウム、マグネシウムであった(図45, 46)。水耕条件では窒素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムすべての含有率が低下した(図49)。実験1ではアルミニウム溶出の手段として硫酸アルミニウムを直接表面散布する方法をとったために、土壌中の塩基類はそれほど減少しなかった。また、実験2の水耕培養では各養分とも一定濃度が保たれるように設定した。したがって、これらの実験ではいずれも土壌あるいは培養液からの牧草に対する養分供給力は低下していなかったと考えられるので、含有率低下の主たる原因は牧草側の養分吸収力の低下にあるとみることができる。

実験1の結果、リン吸収の低下と根重の低下との間に密接な関係が認められ、しかもアルミニウム処理の有無にかかわらず根重とリン吸収量の関係が同一直線に集約されたことは、リン吸収が根量によって支配されていること、すなわちアルミニウム共存下のリン吸収低下が根量低下の結果起こる現象であることを示しており、リン吸収量が根長によって支配されるとする Steffens ら⁽²⁴²⁾、Roemer ら⁽²¹⁹⁾、Caradus ら⁽²⁹⁾の報告と一致する。ただし、ペレニアルライグラスの処理後10日から30日およびシロクロバの処理後20日から30日においては、単位根重当たりのリン吸収量そのものが低下しているとみなすことができ(図45)、このことはアルミニウムが根における DNA 合成を阻害することによる根の伸長阻害^(146, 265, 288)と同時に、根の DNA 活性の低下⁽¹⁷¹⁾や根のリン含有率の低下に伴うプロトンポンプをはじめとする膜機能の低下⁽¹⁴⁸⁾、根細胞膜内外におけるリンとアルミニウムの共沈^(34, 155, 267, 268)などによって根のリン吸収能そのものが低下し、結果として単位根重当たりのリン吸収量が低下した可能性を示している。Clarkson⁽³⁴⁾はアルミニウムはリン吸収を阻害するが、リンの地上部移行は阻

害しないとしており、この説が正しいとすればリン吸収の低下が単に根長低下の結果として発現していると考えられるが、アルミニウムによってリンの吸収が低下することに加えて吸収後の植物根内におけるアルミニウムとリンの共沈やその他の要因による地上部への移行リン量の低下も生育低下の直接の要因の一つとなっている場合も考えられる。リン以外の養分、たとえばカルシウムなどの場合にはアルミニウムとの間に共沈その他の特殊な関係は発生しないために、吸収量と根重との間に単純な比例関係が常に成立する(図46)。乾物重に対するアルミニウム処理の影響が処理開始後20日目にもっとも大きな抑制作用を示したのは、0~5 cm 土層のアルミニウム濃度が11~233 mg/Lであったのに対し5 cm 以下土層中のアルミニウム濃度は0.7~1.5 mg/Lであり、相対的にアルミニウム濃度が低い5 cm 以下の土層における根の分布割合が経時的に増大し、その結果30日目におけるアルミニウムの影響が相対的に低下したためと思われる。

5 根長とリン吸収との関係

アルミニウム処理によって根の生育が阻害される場合、根の重量より長さが低下するという水耕実験の結果は、アルミニウムによって根が太く短くなる現象を意味し、このことは計算によって推定した根の長さとの相対比較(図65)にも現れている。培養液中の溶存リン濃度

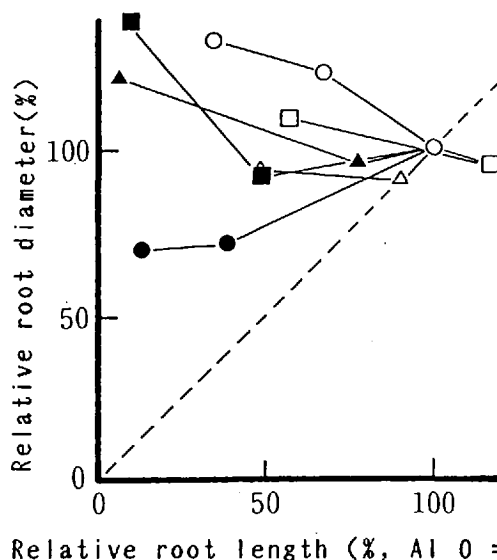


Fig. 65 Effects of Al treatment on the relationship between relative root length and relative root diameter (○: orchardgrass, △: timothy, □: perennial ryegrass, ●: alfalfa, ■: red clover, ▲: white clover).

は他の養分に比べて著しく低く、その吸収量は根長を指標とする根の表面積に依存する度合いが他の養分よりも大きいため、根の伸長阻害がとくにリン含有率の低下を強くもたらし、リン含有率やリン吸収量と根長の間に明瞭な比例関係がみられたものと考えられ(図50, 51), これは実験1の結果を補強するものである。さらに、いくつかの草種をこみにした場合でも根長とリン吸収量との間に一定の幅をもった直線関係が存在することは、生育期間などの条件が一定であるならば単位根長当たりのリン吸収量は草種が異なっても大きくは変わらないことを示唆するものである。

6 耐酸性とリン施肥反応

強酸性テイタム土壌によるポット試験で選抜した各草種のアルミニウム耐性系統と感受性系統は、炭酸カルシウム1500 mg/kg 条件でも大きな収量差を示したことから(図52), 耐性系統は酸性および非酸性両条件で生育能力が高く、逆に感受性系統は両条件で生育能力が低いという性質をもつことになる。これは、上記の選抜実験で耐酸性の検定方法として酸性条件における生育量による評価を行ったためであり、より広い適応範囲を求めることから考えれば、酸性条件だけではなく非酸性条件における生育能力も検定項目に加えるべきであろう。

オーチャードグラスとチモシーの両系統におけるリン施肥反応の特徴は、炭酸カルシウムの施用による生育改善効果がリン施用量によって変化し、さらにその最大値が得られるリンレベルが耐酸性によって異なったことにある。すなわち両草種において炭酸カルシウム施用効果はリンレベル25~50 mg/kg で最高値を示し、この場合耐性系統より感受性系統の方が相対収量・リンレベルともに高かった(図53)。炭酸カルシウム施用効果が特定のリンレベルで最高値を示したことについては、炭酸カルシウム施用効果が根長の増大によるリン吸収力の増大にあると仮定すると理解しやすい。ペレニアルライグラスのアルミニウム耐性系統の選抜段階でみとめられた炭酸カルシウム施用による根重の増大が示すように、+CaCO₃ 区では根の伸長が確実に促進され、その結果リン吸収力が高まり、少ないリンを効率的に利用できたと考えることができる(図55)。この考えにしたがって実験結果を次のように理解することができる。リンレベルが非常に低い場合(0 mgP/kg)には酸性条件(低pH または高アルミニウム)による生育制限要因に加えて著しいリン欠乏によって、牧草生育は極端に制限されるため、+CaCO₃ 区、-CaCO₃ 区ともに収量が極めて低く、両区内の差は小さい(図52)。一方、リンレベル

が十分に高い場合 (200 mgP/kg), アルミニウムによる根の伸長阻害等の生育障害があるにもかかわらず, 作物は必要量のリンを吸収することができるために, 炭酸カルシウム施用による根の伸長の効果が不明瞭である。リンレベルが25~100 mgP/kg の場合には牧草生育はリン供給量に支配されているため, 炭酸カルシウム施用による根の伸長によってリン吸収効率が高まるので, このレベルで炭酸カルシウム施用効果が最も高い。

アルミニウム耐性とリン施肥反応の関係については, 炭酸カルシウムの施用効果が最高となるリンレベルが感受性系統の方が高かった理由として, 牧草のリン吸収効率あるいは体内における利用効率の違いが考えられる。つまり, 耐性系統は感受性系統に比べるとリンの吸収効率または体内における利用効率が高いために, 低いリンレベルで炭酸カルシウムに対する収量反応が最高値を示したのである。この点を検討するために, 牧草により吸収されたリン1gに対する乾物重をリンの乾物生産効率としてとらえ, 図66に示した。炭酸カルシウム施用の影響は不明瞭であるが, 3草種に共通的にリンレベルの増加に伴って値が低下し, チモシーではその関係が不明瞭ではあるものの, 耐性系統>感受性系統の関係が認められた。この場合, 吸収したリンの乾物生産効率が比較されているのであって, 根におけるリン吸収能を比較しているのではない。

したがって, 耐性系統ではアルミニウム耐性が強いために根の伸長が感受性系統より良好に行われ, その結果リン吸収量も高かったことが, より低いリンレベルで炭酸カルシウム施用効果が最大になった要因であるが, それに加えて体内のリン利用効率が高いことも上記の炭酸カルシウム施用効果をもたらした一因であると考えることができる。

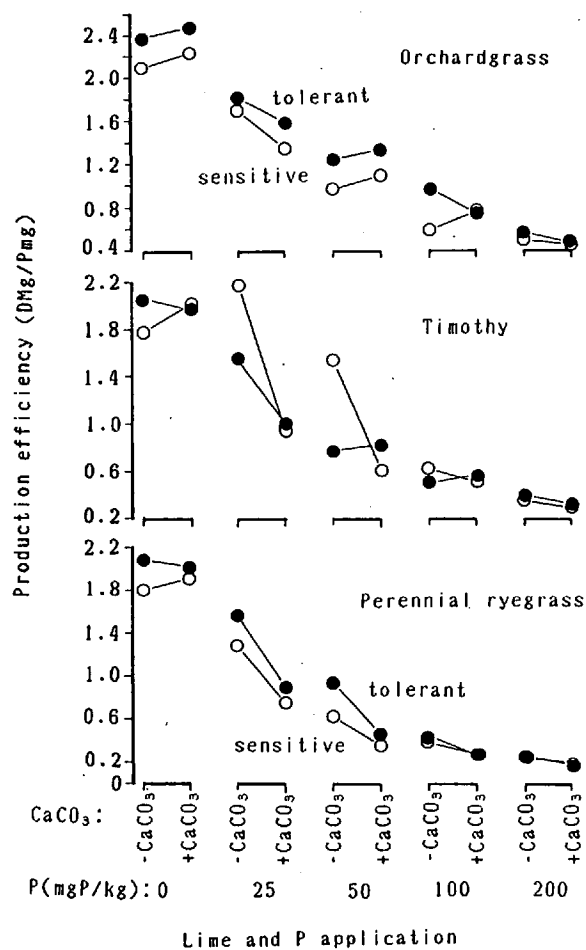


Fig. 66 Differences in production efficiency of absorbed P among Al tolerance, P level and lime treatment in orchardgrass, timothy and perennial ryegrass (Production efficiency: dry weight of shoots g per 1 mg of absorbed P in the shoot. ●: Al tolerant cultivar, ○: Al sensitive cultivar).