

牧 草 の 耐 酸 性^{*1}宝示戸雅之^{*2} 西宗 昭^{*3} 高尾 欽弥^{*4}

牧草の耐酸性の重要な指標であるアルミニウム (Al) 耐性の草種間差をポット試験によって解析し、圃場試験の結果もあわせて耐酸性の発現に関与する要因を検討した。

相対生育量で表わされる牧草のAl耐性と、相対根重および相対りん酸含有率の三者間には正の相関関係が認められた。これらの要因に対し牧草のAl地上部移行性は負の相関関係にあった。このことからAlの溶出している酸性土壌に生育するときの生育抑制は、根部発達の抑制およびりん酸吸収の抑制に並行して起る現象と考えられた。そして、土壌溶液中Alの地上部移行性が耐酸性の重要な指標であった。牧草の耐酸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>レッドトップ≧ペレニアルライグラス、赤クローバ>アルファルファ>ラジノクローバの順であった。

経年的に酸性化が進行する圃場条件における各牧草の耐酸性はおおむねポット試験の結果に対応したが、アルファルファは予想より耐酸性が大きかった。このことは牧草の根張り特性によって説明できることから、圃場条件における耐酸性評価には根張り特性も重要な要因であることがわかった。

緒 言

草地土壌は繰り返される表面施肥に伴って土壌表層から経年的に酸性化する性質をもち⁶⁾、これを経年的酸性化と呼ぶことにする⁷⁾。この酸性化の主な原因は肥料に含まれるアニオン（主に塩素根、硫酸根あるいは硝酸）であり、この他に雨水に含まれる炭酸イオンや酸性雨として問題化している酸性物質²⁰⁾などが考えられるが、良質粗飼料を確保するためには適正な施肥が不可欠であることを考えると、経年的酸性化は草地土壌のもつ宿命的な現象といえる。もちろん、酸性化に対しては石

灰追肥技術がすでに確立しており^{8,9)}、この問題が表面化する機会は少なくなっているが、潜在的な要因として草地の植生悪化や収量性の低下に深く関わっていることにはかわりはない。

一方、作物の酸性土壌に生育する能力(耐酸性)には種間差のあることが知られており、コムギ^{22,27)}、トウモロコシ²⁴⁾、ソルガム⁴⁾などの作物や根粒菌³³⁾などは耐酸性がスクリーニングする指標に用いられている。田中・早川^{28,29,30)}は酸性土壌における作物の生育抑制要因を解析的に検討し、牧草を含む多数の作物について耐酸性とそれに関連する各種耐性の比較を行なった。但野²⁶⁾は不良培地条件のひとつとして、高Al濃度に対する作物の耐性を支配する機構を詳しく検討した。Wagatsuma^{35,36,37,38)}はAl耐性と根におけるAlの吸収・体内移行との関連を検討した。牧草では暖地型牧草の耐酸性を比較した例¹³⁾、マメ科牧草の石灰反応性を検討した例²⁾などがあり、またマメ科牧草の根粒に対する培地pHの影響を検討した報告が多数みられる^{10,11,19,34,39)}。しかし、イネ科の寒地型牧草についての報告は比較的少なく、また北海道で一般に栽培される草種が一同に比較された例はない。また、

1988年1月11日受理

^{*1} 本研究は農林水産省指定試験で実施したもので、結果の一部は国際草地学会 (1985) および土壤肥料学会北海道支部 (1987) において発表した。

^{*2} 北海道立天北農業試験場, 098-57 枝幸郡浜頓別町 (現北海道立根釧農業試験場, 086-11 標津郡中標津町)。

^{*3} 北海道立天北農業試験場 (現農林水産省北海道農業試験場畑作物部, 082 河西郡芽室町)。

^{*4} 北海道立天北農業試験場 (現北海道立中央農業試験場, 069-13 夕張郡長沼町)。

前述の経年的酸性化を前提とした場合、実際の草地管理の場面では牧草の種の特性としての耐酸性の検討のみならず、経年的酸性化条件での検討がなされねばならない。なぜなら、経年的酸性化には土壤表層が集中的に酸性化するという特徴があり、このことは一般の酸性土壌における作物の生育反応とは異なった条件だからである。そこで、本報では北海道で広く栽培されている草種を用いて、耐酸性に強く関与していると考えられるAl耐性をもとに耐酸性の草種間差を明らかにしようとした。また、耐酸性の発現機構をAlと根重、りん酸含有率との関連から検討し、また圃場における経年的酸性化条件での牧草生育との関連性を検討した。

方 法

本試験は非連続的に実施した3回のポット試験(Exp. 1～3)と、5年間にわたって継続した圃場試験(Exp. 4)から構成される。ポット試験に供試した土壌の化学性をTable 1に示した。

Exp. 1. アルミニウム添加試験

15×15×5 cm(深さ)の木製ポットに供試土壌に炭カル(1 g/生土1 kg)と過石(1 g/1 kg)を混合したものを充てんし、 $N-P_2O_5-K_2O=0.18-0.18-0.18$ g/ポット(硫安-過石-硫加)とともに8草種(Table 2)を播種し(1981年8月27日)、各草種とも3～4葉期(播種後18日(マメ科)～28日(KB))に塩化アルミニウム粉末($AlCl_3$)を

1 g/ポット表面散布し、その後17日間生育させた。

Exp. 2. 生理的酸性肥料によるアルミニウム溶出試験

Exp. 1と同様の木製ポットに肥沃な土壌(Table 1)を充てんし、 $N-P_2O_5-K_2O=0.10-0.20-0.10$ g/ポット(尿素-過石-硫加)とともに5草種(Table 2からRT, KB, RCを除いたもの)を播種し(1982年6月9日)、播種後4葉期(26日後)にAl溶出区(+Al区)として塩安-塩加、非溶出区(-Al区)として尿素-硫加でそれぞれ $N-K_2O=0.32-0.32$ g/ポット施肥し、その後21日間生育させた。

Exp. 3. pH. P肥沃度処理試験

Table 2に示した土壌にあらかじめ $\frac{N}{3.5}$ 硫酸100 ml/生土1 kg, または炭カル2 g/生土1 kgを混合して高pH土壌と低pH土壌を準備し、さらに過石5 g/生土1 kg添加の有無によりりん酸肥沃度処理を組み合わせた4種の土壌を、Exp. 1, 2と同様の木製ポットに充てんした。これに $N-P_2O_5-K_2O=0.06-0.10-0.06$ g/ポット(硫安-過石-硫加)とともにExp. 2と同様の5草種を播種し(1983年6月1日), 22日後(3～4葉期)に $N-K_2O=0.32-0.32$ g/ポット(硫安-硫加)を施用し、36日間生育させた。

なおExp. 1～3はガラス室内で実施し、1処理に4～6ポットを供試した。結果はすべてこれらの平均値で示した。

Table1. Chemical properties of the soil used in pot experiments.

Exp. No.	Soil	Humus %	CEC me/100g	P-abs	pH (H ₂ O)	Bray No. 2 P ₂ O ₅ mg/100g	Ex-CaO mg/100g
1, 3	Acid Brown	2	18	960	5.50	3	30
2	Forest Soil	9	24	1030	5.70	48	265

Table2. Grass species used in experiments.

Grass	Orchardgrass	(<i>Dactylis glomerata</i> L. Kitamidori)	" OG "
	Timothy	(<i>Phlem pratense</i> L. Sempoku)	" TY "
	Redtop	(<i>Agrostis alba</i> L.)	" RT "
	Perennial ryegrass	(<i>Lolium perenne</i> L. Reveille)	" PR "
	Kentucky bluegrass	(<i>Poa pratensis</i> L.)	" KB "
Legume	Alfalfa	(<i>Medicago sativa</i> L. Thor)	" AL "
	Ladino clover	(<i>Trifolium repens</i> L. California Ladino)	" LC "
	Red clover	(<i>Trifolium pratense</i> L. Sapporo)	" RC "

Exp. 4. 経年的酸性化試験—圃場試験—

天北農試の肥沃な酸性褐色森林土に5草種を播種し(条播・1982年6月2日), 施肥処理によって土壌を酸性化させつつ(−Ca区)Table 3に示したスケジュールによって刈取り, 炭カル施用による酸性化防止区(+Ca区)との対比によって耐酸性を比較した。施肥処理内容は次の通り。1982~85年: N-P₂O₅-K₂O=18-10-18kg/10a (硫安-過石-硫加)。1986年: N-P₂O₅-K₂O=6-10-6kg/10a (硫安-過石-硫加)。+Ca区に対する炭カル施用量は次の通り。1982年: 80kg/10a, 1983年: 155kg/10a, 1984~85年: 各100kg/10a。

1984年と1986年秋に各草種5×30×30cm(深さ)のモノリスを掘り取り(3反復), 水洗法によって根を分離し, 土層深別の根重を測定した。

Table3. Cutting schedule*

Grass	1st	2nd	3rd
OG	6/E	8/E	9/L
PR	}		
LC			
TY	6/L	9/E	
AL			

* Month/Early or Late

結 果

Exp. 1では塩化アルミニウム粉末を添加することにより, Exp. 2では生理的中性肥料と酸性肥料を使いわけることによって土壌溶液中のアルミニ

ウム(Al)濃度をコントロールした。両試験でもAl溶出の有無を問わず土壌溶液のpHは5以下であり, また−Al>+Al区であったが, その差は0.1~0.4と小さかった。つまり, Exp. 1と2の結果は主に溶出したAlに対する牧草の反応性を表わしたものと考えられる(Table 4)。

−Al区に対する+Al区の乾物収量を相対生育量

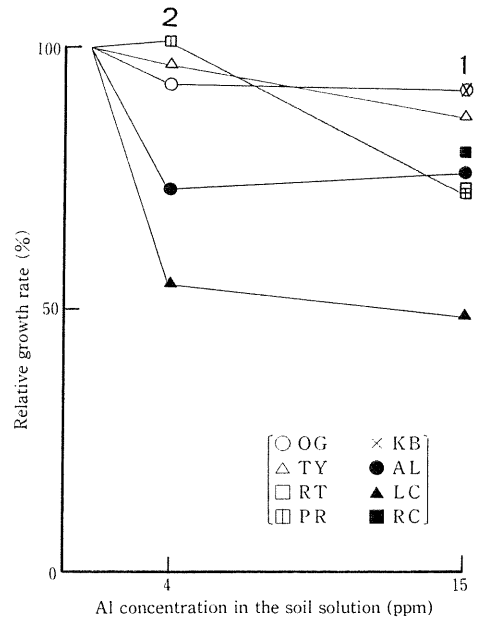


Fig.1 Effect of Al concentration of the soil solution on the grass growth (Numbers show the experiment No. Same symbols are used in common with the other Fig.)

Table4. Experimental method and chemical properties of the soil in pot experiments.

Exp. No.	Al dissolving material	Name of treatment	Soil solution*1		Soil Bray No.2 P ₂ O ₅ mg/100g
			pH	Al (ppm)	
1	AlCl ₃	−Al	4.80	1.0	32
		+Al	4.72	15.0	
2	NH ₄ Cl*2 NH ₂ CONH ₂ *3	−Al	4.73	0.7	48
		+Al	4.32	3.8	
3	{H ₂ SO ₄ } {CaCO ₃ }	High P HpH	5.75*1	0.9	88
		LpH	4.92*1	9.8	
		Low P HpH	5.74*1	0.3	16
		LpH	4.88*1	12.5	

*1 Sampled 5 days (Exp. 1) or 10 days (Exp. 2) or 7 days (Exp. 3) after Al treatment.

*2 Ammonium chloride

*3 Urea

*1 These values are measured by soil : water = 1 : 2.5.

と呼ぶことにし、これを用いてAl耐性の草種間差を比較した (Fig. 1)。OGは土壌溶液のAl濃度が15ppm程度まで相対生育量が低下せず、TYもこれと同様のパターンを示し、これらの草種のAl耐性は大きいと考えられた。PRの場合、Al 15ppmで相対生育量が30%程度低下しており、OGやTYに比べてAl耐性は小さかった。マメ科牧草のALやLCではAl 3.8ppmで生育量が大きく低下しており、イネ科牧草に比べAl耐性が小さかった。Exp.1 (Al濃度15ppm) に供試したKBのAl耐性はOGと同程度、RTはPRと同程度、そしてRCはマメ科牧草の中では比較的大きいAl耐性を示した。

牧草体地上部のAl含有率は土壌溶液のAl濃度の増加に伴って上昇したが、上昇のしかたは草種によって異なっていた。そのようすをFig. 2に示した。イネ科牧草のOGやTY、RTでは体内Al濃度が高まりにくく、これに比べマメ科牧草のLC、AL、RCは高まりやすかった。イネ科牧草のうちKBは特異的にAl濃度が高まりやすかった。この結果から土壌溶液中のAlの地上部移行性はLC > KB > AL > RC > PR > RT > TY > OGの順に高いと考えられた。

牧草のAl地上部移行性と相対生育量の関係をFig. 3に示した。土壌溶液中Alの地上部移行性が高いLCやALでは相対生育量が小さい。すなわちAl耐性が小さく、逆に地上部移行性の小さいイネ科牧草ではAl耐性が大きいことがわかる。この中でKBはAl地上部移行性が高いにもかかわらずAl耐性が大きい点が他の草種と異なっている。

Exp. 3では処理により土壌溶液中のAl濃度と土

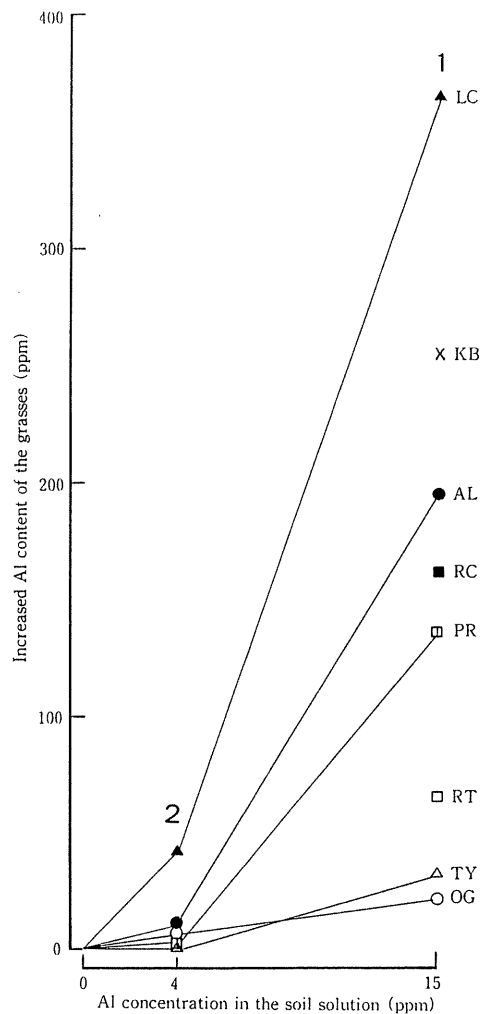


Fig. 2 Upward translocation of Al in the grass plant.

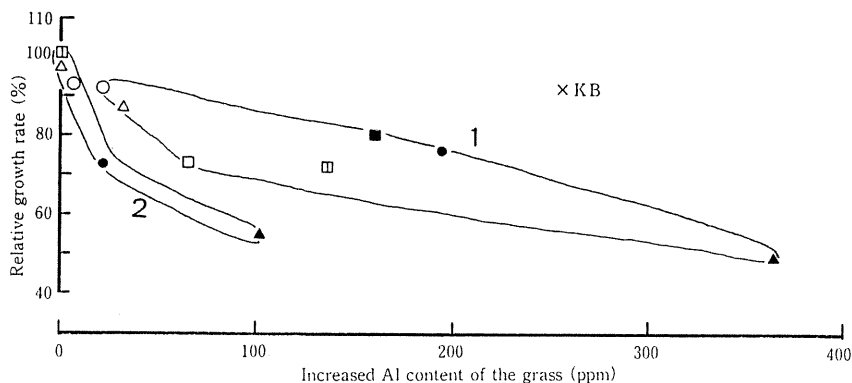


Fig. 3 Relations between the extent of Al translocation and the relative growth rate (Numbers show the Exp. No.).

壤のpHおよびりん酸肥沃度に差ができた(Table 4, 5)。P肥沃度が高い場合(High-P), 高pH区に対する低pH区の相対生育量はOG, TY, PRで大きく, ALで小さく, LCはその中間であった。P肥沃度が低い場合(Low-P), いずれの草種も生育が非常に抑制され, イネ科牧草はP肥沃度が高い場合の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{4}$, マメ科牧草では $\frac{1}{10}$ 以下の生育量となった。各P肥沃度条件における相対生育量からみた耐酸性は, P肥沃度が低い場合に低下することが多かった。また低pH区では牧草のりん酸とカルシウムの含有率が特異的に低下していた。

Exp. 4のはじめの4年間(1982~85年)は酸性化を進行させながら牧草生育を比較するために, 年間施肥量をOG(単播)に合わせてN18kg/10aとした。その結果土壌表層の酸性化は急激に進み, 処理4年目には0~2cm土層のpHは4.3, 2~5cm土層でpH4.4~5.1であり(Fig.4), 置換性カルシウム(Ex-Ca)は0~5cm土層で大きく低下していること(Table 6)から, 5年間の土壌酸性化の影響はほぼ0~5cm土層に限られていたと考え

られる。土壌酸性化の進行速度は各草種ともおおむね同一とみなせたが, LCだけは0~2cm土層の

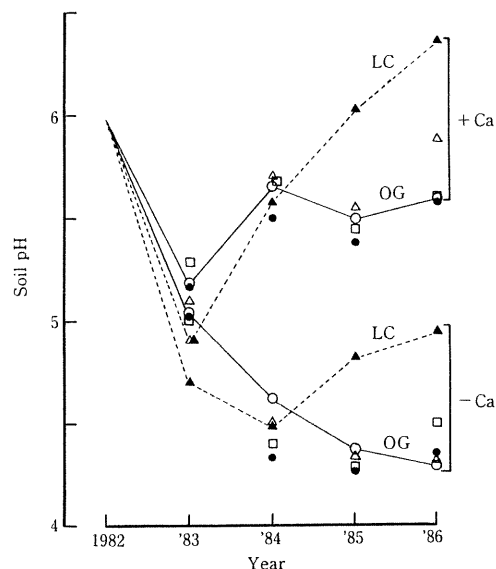


Fig.4 Changes of soil pH (soil : water = 1 : 2.5) during a 5 year treatment (0-2 cm layer).

Table5. Relations between soil condition and grass growth(Exp.3)

P fertility		High (rich)		Low (poor)	
pH treatment		H-pH	L-pH	H-pH	L-pH
DM	OG	14.0	(90%)	4.0	(79%)
g/pot	TY	14.6	(101)	3.9	(87)
	PR	9.0	(118)	4.9	(55)
	AL	8.0	(24)	0.6	(35)
	LC	9.9	(83)	0.5	(75)

() shows the relative value to High pH plot.

Table6. Changes of Ex-CaO during a 5 year treatment.

Grass	Lime treatment	Soil layer	Ex-CaO mg/100g			
			1983	1984	1985	1986
OG	+Ca	0 - 2 cm	141	201	337	223
		2 - 5	134	117	84	99
		5 - 10	158	168	162	146
	-Ca	0 - 2	58	29	22	19
		2 - 5	133	64	44	27
		5 - 10	163	156	151	121
LC	+Ca	0 - 2	81	356	560	382
		2 - 5	117	105	78	92
		5 - 10	174	156	160	157
	-Ca	0 - 2	44	48	80	62
		2 - 5	101	49	31	17
		5 - 10	158	113	134	100

Ex-Ca が2年目以降減少しておらず、pH もこれに対応していた。しかしこの場合でも、2～5 cm 土層のEx-CaおよびpHは確実に低下しており、このような表層直下土層の酸性化が先に進行する現象は他の草種の+Ca区においても認められた。

牧草生育は土壤酸性化に伴って抑制された (Fig. 5)。相対生育量によって評価した耐酸性の順位は年次間で多少の変動がみられたが、OG > TY > AL ≥ PR > LCと考えられた。ただし、生育抑制の程度はポット試験に比べると小さかった。

—Ca区ではカルシウム含有率 (Ca %) が低下していた (Fig. 5)。りん酸含有率 (P %) はOGの3年目、TYおよびPRの2～3年目、ALの3年目で低下する傾向がみられた。

1986年の処理で年間N施用量を18kg/10a から6 kg/10aに減少させると、各草種とも—Ca 区の

相対生育量が低下した。特にN18kgレベルで相対生育量が90%以上あったALはN6kgレベルで80%以下に低下した。

土層別の根重測定の結果、ALの根域が深く、しかも単位土層深あたりの根重が多いこと、これに対し LCの根量が少ないことが特徴として認められた。なおLCでは試験後半で雑草の侵入が著しく、根量測定ができなかった (1986年、Table 7)。

考 察

牧草の耐酸性の重要な指標としてのAl耐性は、生育低下がはじまる土壤溶液のAl濃度、すなわちAl感受性と、一定Al濃度条件における生育抑制の程度をその要因として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、酸性化の進行とともに生育低下がはじまるのがど

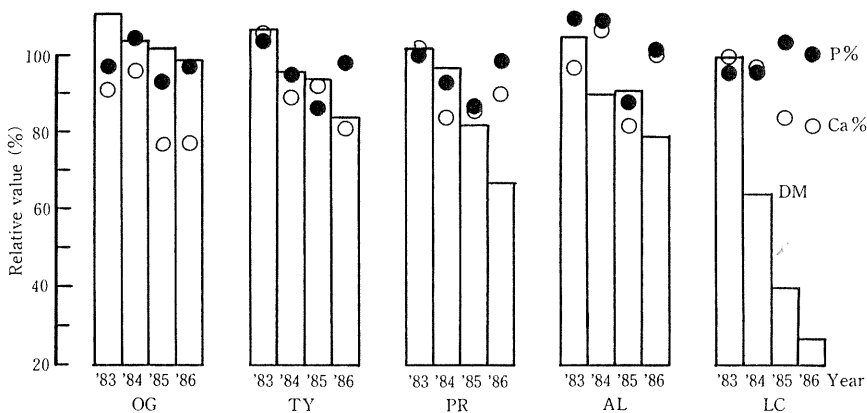


Fig.5 Effect of soil acidification on relative yield, P, and Ca content of the grasses.

Table7. Root weight*

Year	Grasses	Root weight (DM g/150cm ²)				Total
		0 - 5 cm	5 - 10	10 - 20	20 - 30	
1984	OG	3.72	0.55	0.33	0.13	4.73
	TY	1.60	0.32	0.17	0.09	2.18
	PR	1.63	0.36	0.24	0.09	2.32
	AL	7.63	3.14	2.85	0.65	14.27
	LC	0.81	0.29	0.16	0.06	1.32
1986	OG	4.53	0.48	0.42	0.13	5.68
	TY	7.24	0.29	0.32	0.22	8.07
	PR	2.92	0.56	0.38	0.12	3.98
	AL	7.41	2.48	2.94	0.90	13.73

* Root samples were taken from —Ca plot (1984) and from both the +Ca and —Ca plots (1986) in 3 duplications. Data in 1986 is the mean value of the +Ca and —Ca plots.

の時点か、そしてどの程度の生育低下がみられるかが重要だからである。また、本試験の結果から Al 耐性と密接な関係が認められた Al 地上部移行性も重要な要因と考えられる。そこでこれらの要因を草種別に 5 段階の指数によって表わし、その合計点から Al 耐性を評価した (Table 8)。この評価方法によれば Al 耐性の順序は $OG > KB, TY > RT \geq PR, RC > AL > LC$ であった。

Al 耐性と牧草の P 含有率

前報⁶⁾において、経年的に酸性化した草地の土壌表層 (0~2 cm) には施肥直後をピークとして数 10~100ppm の Al が土壌溶液中に溶出し、OG を用いた実験から OG は Al の過剰吸収による直接的な生育障害よりも Al を介しておこる P 吸収抑制によって生育が低下したと推定した。しかし、Al の生育影響はまず根に現れることが一般的に指摘されており、マメ科牧草²¹⁾、ソルガム³⁾、ワタ¹⁾、アルファルファ¹²⁾、コムギ¹⁸⁾などで地上部の生育低下と根重 (量) の低下が密接な関係にあったと報告されている。このことは、P や Ca の吸収抑制が根量低下の結果としての現象である可能性を示している。田中ら^{31, 32)}は酸性土壌の生育阻害要因が異なる pH 領域において Al 障害の発現と P 欠乏の発現とがみられ、Al 耐性の強い作物では P 存在量が多ければ酸性障害を受けにくいとしている。但野・田中²⁵⁾は Al による根の伸長阻害と Al 集積状態を解析する実験の中で、Al 処理によって作物

体の P 含有率 (以下 P % と記す) が低下する場合があったとしても P 欠乏領域にまでは至っていなかったと報告している。これらの知見を踏まえて、牧草の Al 耐性と P 吸収の関係を検討した。

Exp. 3 では P 肥沃度が低い場合に牧草生育が著しく低下し、低 pH 区の相対生育量も Low-P 区で小さく、一方、High-P 系列の中でも低 pH 区は牧草の P % が低下した ($OG: P_2O_5$ 0.65→0.54%, $TY: 0.98 \rightarrow 0.71\%$, $PR: 1.23 \rightarrow 0.80\%$, $AL: 0.77 \rightarrow 0.58\%$, $LC: 0.56 \rightarrow 0.42\%$)。これらのことから、牧草生育および耐酸性の発現に対する P 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 P 吸収低下が改めて示唆された。Exp. 1 では OG, RT, PR 以外の牧草で +Al 処理により牧草 P % が低下し、特にマメ科牧草の低下割合が大きかった。Exp. 2 では PR 以外の牧草で +Al 区の P % が低下し、特に LC でその傾向が著しかった。これらの結果から、酸性条件では牧草の P % が低下することが多く、その低下割合には草種間差が認められた。

そこで、根部と地上部の相対生育量の関係を Exp. 2, 3 の結果から Fig. 6 に示した。試験間で多少のバラツキはあるものの、両者は対応しており、酸性化処理による地上部と根部の生育抑制が密接な関係にあることが示された。草種的には AL と LC は相対生育量も根量も小さく、PR や TY はその反対である。同一の草種に常に一定の傾向を認め

Table 8. Acidity tolerance

Grasses	Al sensitivity ¹⁾ (Al ppm)		Relative growth at 15ppm Al in the soil solution		Extent of Al trans- location ²⁾		Acidity tolerance (Total score) ⁴⁾	
OG	100 ³⁾	5 *	90%	5 *	+ 21ppm	5 *	15*	VS
TY	10-20 ³⁾	4 *	85	5 *	+ 32	5 *	14*	S
RT	<15	3 *	70	3 *	+ 65	4 *	10*	M
PR	<15	3 *	70	3 *	+136	3 *	9*	M
KB	15>	4 *	90	5 *	+255	(2*)	(11*)	S
AL	<4	1 *	70	3 *	+195	3 *	7*	M
LC	<4	1 *	50	1 *	+365	1 *	3*	VW
RC	<15	2 *	75	4 *	+161	3 *	9*	M

1) Al concentration of soil solution when the grass growth began to be reduced.

2) Increased Al content of the grass when the grass grew in 15 ppm Al of soil solution, in comparison to that which grew in 1 ppm Al.

3) This is data from another pot experiment which evaluated the effects of high Al concentration in the soil solution on grass growth.

4) VS: very strong, S: strong, M: medium, W: weak, VW: very weak.

* Scores in 5 degrees (5: The most contributable to acidity tolerance).

ることはできないが、酸性条件での生育に根が重要なはたらきをすることが示されている。

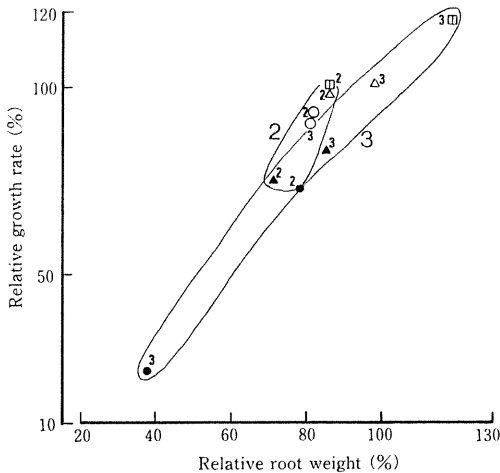


Fig.6 Relations between relative root weight and relative growth rate. (Numbers show the Exp. No.)

次に牧草のAl含有率上昇値と相対P%すなわち -Al 区に対する +Al 区の牧草 P% の相対値の関係を Fig. 7 に示した。この図から地上部 Al 含有率が高まりやすい草種、すなわち Al 地上部移行性の高い草種は牧草 P% が低下しやすいという関係がうかがえる。草種的には OG, TY, PR などのイ

ネ科牧草では Al 地上部移行性が低く、P 含有率が低下していない。これに対し、AL, LC などのマメ科牧草では Al 地上部移行性が高く、P 含有率も低下しやすい。

牧草の相対生育量と相対 P% の関係を Fig. 8 に示した。Exp. 1, 2 では両者がおおむね対応した関係にあり、牧草 P% が低下しやすい草種は相対生育量すなわち Al 耐性が小さい。ただし Exp. 3 (P rich 条件) ではこの関係が不明瞭で、相対生育量

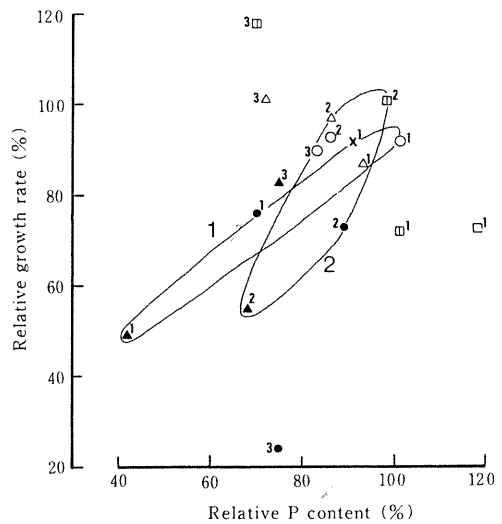


Fig.8 Relations between relative P content and relative growth rate.

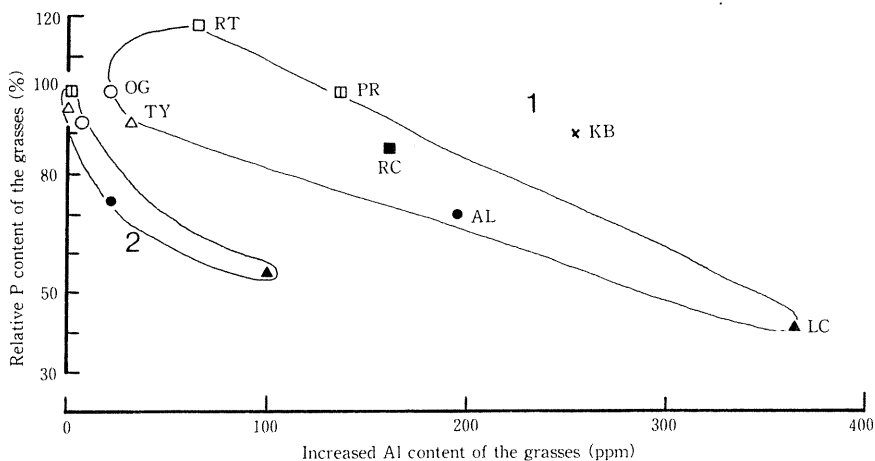


Fig.7 Relations between Al translocation and relative P content (Numbers show the Exp. No.).

の大小に関わらず相対P%が大きく低下していた。このことはExp. 3においては播種時からすでに酸性条件で生育させており、牧草の発芽定着後に土壌酸性化を進めたExp. 1および2の実験条件とは根系発達の条件に大きな差があったことがひとつの原因と考えられる。

Fig. 9に相対根重（-Al区に対する+Al用根重の相対値）と地上部Al含有率上昇値との関係を示した（Exp. 2のみのデータ）。Al地上部移行性の高いLCやALでは相対根重が小さく、イネ科牧草ではAl地上部移行性が低く、相対根重は大きい。

Fig. 10に相対根重と相対P%の関係を示した。Exp. 2では両者間におおむね正の相関が認められ、LCでは相対根重が小さくP%も大きく低下していたのに対し、PRなどでは相対根重・P%とも低下が小さかった。しかしExp. 3ではこれらの関係はほとんど認められなかった。

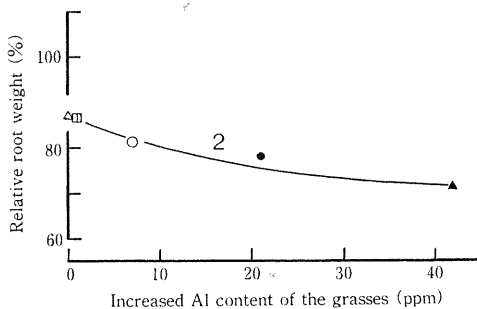


Fig. 9 Relations between Al translocation and relative root weight (Exp. 2).

Exp. 1及び2の結果から各要因をFig. 11のように関連づけることができる。すなわち、耐酸性の指標である相対生育量と相対根重および相対P%はそれぞれ正比例的関係にあり、Al地上部移行性はそれぞれに対し反比例的関係にある。この場合、Alの溶出している酸性土壌に生育するときの生育抑制現象は、根部発達の抑制および牧草のP吸収抑制と並行して起っていることが考えられる。このことは、牧草P含有率の低下が、根量低下の結果としておこる現象であって、牧草のP含有率の低下が生育抑制の直接的要因ではなく、養分吸収の場である根量低下がより重要な要因である可能性も

ある。今回のデータから、根におけるAlとPのinteraction⁵⁾そのものが否定されたわけではなく、酸性条件における牧草の生育抑制要因として、根の生育抑制がそれらの要因と切り離せない要因であることが示唆された。なお、詳細についてはさらに検討する余地が残されている。

一方、Al地上部移行性については、根のCEC（カチオン置換容量）とAlの吸収量が密接な関係にあり、耐酸性の大きな作物では根におけるAl排除能が存在するというWagatsuma^{35, 36, 37, 38)}の報告、Al耐性の大きいコムギ根のCECは相対的に小さい

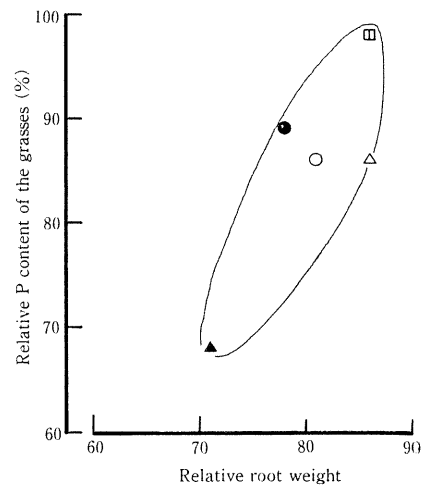


Fig. 10 Relations between relative root weight and relative P content of the grass (Exp. 2).

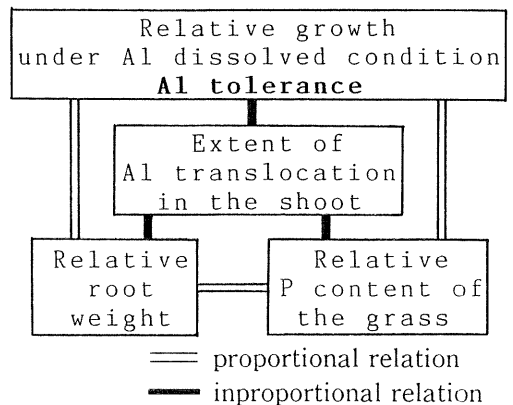


Fig. 11 Factors affect on acidity tolerance.

とするMugwira・Elgawhary¹⁷⁾や小島¹⁴⁾の報告,あるいはCa含有率が上昇しやすいマメ科牧草では耐酸性が小さいとするBaligar²⁾の報告と共通的なものである。

経年的酸性化条件における耐酸性

Exp. 4の経年的酸性化に対する耐酸性はポット試験の結果とほぼ一致したが,ALでは若干異なっていた。すなわち,OGとTYの耐酸性は大きく,PRの耐酸性はOG・TYに比べると小さく,LCの耐酸性は最も小さかった。しかし,ポット試験で耐酸性が中程度であったALはそれほど大きな収量低下をおこさなかった。このちがいは,酸性化が及ぶ土層深と牧草の根張り特性によって次のように説明できよう。ALの場合,根張りが他に比べて非常に深く,単位土層深あたりの根重も大きいのにに対し,経年的酸性化の影響が及ぶ土層深はおおよそ0~5cmであるため,ALの根圏全体に占める酸性化土層の割合が小さく,本来Al耐性が大きくないにもかかわらず酸性化の影響を大きく受けなかったものと考えられる。これに対しLCの場合は本来Al耐性が小さく,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,酸性化の影響を大きく受けたものと考えられる。OGやTYの場合,イネ科牧草の中では比較的根量が多いためにAl耐性の大きさがそのまま発現し,イネ科牧草の中でAl耐性が比較的小さかったPRの場合でも,圃場における相対生育量が80%を越えていた(N18kgレベル)ことは,根圏全体に占める酸性化土層の割合がポットの場合に比べて小さいことに起因していると考えられる。本試験では根張り特性として単に根の乾物重のみを指標としたが,根の養分吸収機能を含めた各草種の根圏特性を考慮すれば,さらに論議を深める必要があると思われる。例えばMengel・steffens¹⁶⁾はPRとRCのカリ吸収機構の比較において根のCECに根の表面積あるいは根長といった根の密度のファクターを組み込んで,一定土壌体積あたりの養分吸収能を論議している。このようなことから,圃場における経年的酸性化に対する牧草の生育反応には根の活性を含めた根張り特性が大きく関与しており,耐酸性の草種間差を支配する重要な要素と考えるのが妥当である。

-Ca区における牧草の養分含有率はPとCaで特異的な低下が認められた。このうちCa%の低下

は土壌中のEx-Caに対応した結果であり,Ca%と相対生育量の間に特別な関係が認められないことから(Fig. 12),Ca%が-Ca区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P%と相対生育量の間には,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たALと雑草侵入のため生育量が非常に少なかったLCを除くと,イネ科牧草では正の相関が認められ(Fig. 13: $r = 0.74$, 5%水準で有意),-Ca区の生育と牧草のP吸収が密接な関係にあることが示された。草種的にはOGではP%・生育量ともあまり低下せず,TY・PRではOGに比べると低下量が大きかった。このことは,ポット試験で得られた結果が圃場で再現されたといえる。

土壌pHに対する作物根の影響については,根から吸収されるイオンバランス⁵⁾や,置換性塩基の吸収量と土壌残存量²³⁾などの説明がなされており,一般にマメ科作物の根圏はイネ科作物よりも

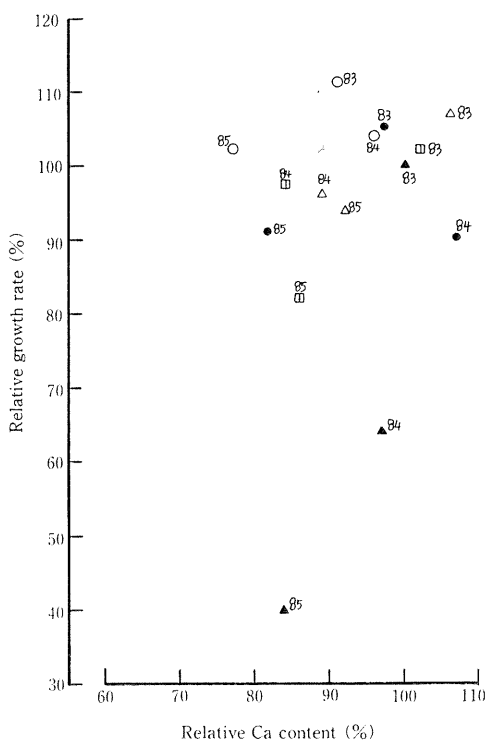


Fig.12 Relations between relative Ca content of the grass and the relative growth rate (Numbers show the year).

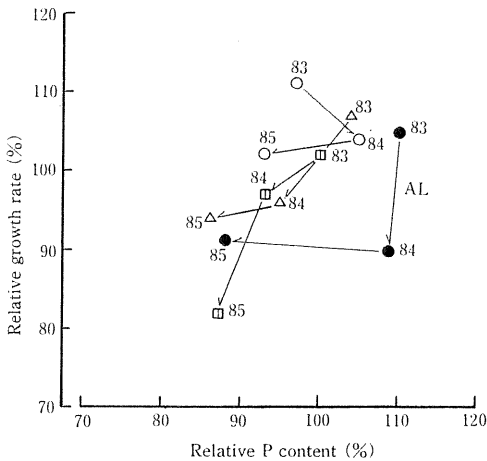


Fig.13 Relations between relative P content of the grass and the relative growth rate (Numbers show the year).

酸性化が進みやすいとされている²³⁾。本試験のLCの場合、他草種に比べて表層のpHが低下しない現象がみられた。この原因としては、LCの収穫作業上の茎葉回収率が他草種に比べて低いために、イネ科牧草に比べてCa%が高いLCの茎葉が地表に還元され、表層土壌のEx-Caの流亡を補った結果、表層の酸性化が進行しなかったことが考えられる。また、LCの生育量が著しく少なかったために根が集中する表層からのEx-Ca収奪量が少なかったことが、他の要因として考えられる。同じマメ科牧草のALの場合には茎葉の回収率がLCに比べると高いために、土壌表層のEx-Caがみかけ上増加する現象はみられなかったと考えられる。また、他草種の+Ca区において、表面散布によるCaの補給にもかかわらず2~5cm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0~5cm土層に及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カルの土層内への移動速度(地表から2cmまで)が、既存の土壌中Ex-Caの流亡速度よりも遅いことを示している。

以上ポット試験と圃場試験の結果から、結局、経年的酸性化条件における牧草の耐酸性は、ポット試験で求められたAl耐性の指標と根圏特性の要因が複合した結果とみなせた。また、牧草の耐酸性の発現にかかわる要因として、根圏特性以外に

Al地上部移行性、根量、P吸収という3つの要因があることを考えると、今後、牧草の根の機能や低P培地耐性などの草種特性を解明することは、絶えず多くの環境ストレスを受けて生育する牧草の根圏制御法を確立する上で重要な問題と考える。

謝 辞 本研究を遂行するに当たり、天北農試土壌肥料科三木直倫研究員および東田修司研究員(現十勝農試)には絶大なご協力をいただいた。道立根釧農試場長岩渕晴郎博士、同土壌肥料科長能代昌雄氏並びに道立中央農業試験場環境資源部大崎玄佐雄部長には原稿のご校閲をいただいた。記して感謝の意を表す。

引用文献

- 1) Adams F.; Moore B. L., "Chemical factors affecting root growth in subsoil horizons of coastal plain soils". *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**, 99-102 (1983).
- 2) Baligar V. C.; Wright R. J.; Bennett O. L.; Hern J. L.; Perry H. D.; Smedley M. D., "Lime effects on forage legume growth and mineral composition in an acid subsoil". *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.*, **16**, 1079-1093 (1985).
- 3) Brenes E.; Pearson R. W., "Root responses of three gramineae species to soil acidity in an oxisol and an ultisol". *Soil Science*, **116**, 295-302 (1973).
- 4) Furlani P. R.; Clark R. B., "Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions". *Agron. J.*, **73**, 587-594 (1981).
- 5) Haynes R. J., "Soil acidification induced by leguminous crops". *Grass and Forage Science*, **38**, 1-11 (1983).
- 6) 宝示戸雅之, 佐藤辰四郎, 高尾欽弥, "草地土壌の酸性化に伴うアルミニウム溶出と牧草生育". 北海道立農試集報, **50**, 43-53 (1983).
- 7) 宝示戸雅之, 佐藤辰四郎, 高尾欽弥, "草地土壌の経年的酸性化と改良対策". 土肥誌, **58**, 92-95 (1987).
- 8) 北海道立天北農業試験場土壌肥料科, "草地の経年化に伴う土壌酸性化と石灰施用". 昭和58年度北海道農業試験会議資料, 1984, 26p.
- 9) 北海道立根釧農業試験場土壌肥料科, "根釧地方における火山灰草地の土壌酸性化と石灰施用". 昭和61年度北海道農業試験会議資料, 14p. 1987.
- 10) Keyser H. H.; Munns D. N., "Tolerance of Rhizobia to acidity, aluminum, and phosphate". *Soil*

- Sci. Soc. Am. J., 43, 519-523(1979).
- 11) Jo J.; Yoshida S.; Kayama R., "Acidity tolerance and symbiotic nitrogen fixation capacity of some varieties of alfalfa". J. Japan Grassl. Sci., 26, 174-178(1980).
 - 12) Joost R. E.; Hoveland C. S., "Root development of *Secirca Lespedeza* and alfalfa in acid soils". Agron. J., 78, 711-714(1986).
 - 13) 北村征生, "南西諸島における暖地型牧草の実用栽培に関する研究. XIV. 暖地型マメ科・イネ科18草種の生育に及ぼす土壌 pH の影響". 日草誌, 32, 20-28 (1986).
 - 14) 小島邦彦, 小池 博, 浦野 元, 大平幸次, "アルミニウム耐性を異にするコムギ2品種の川渡黒ボク土における生育". 土肥誌, 57, 563-570(1986).
 - 15) McCormic L. H.; Borden F. Y., "Phosphate fixation by aluminum in plant roots". Soil Sci. Soc. Am. Proc., 36, 779-802(1972).
 - 16) Mengel K.; Steffens D., "Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters". Biol. Fert. Soils, 1, 53-58(1985).
 - 17) Mugwira L. M.; Elgawhary S. M., "Aluminum accumulation and tolerance of Triticale and wheat in relation to root cation exchange capacity". Soil Sci. Soc. Am. J., 43, 736-740(1979).
 - 18) Mugwira L. M.; Sapra V. T.; Patel S. U.; Choudry M. A., "Aluminum tolerance of Tricale and wheat cultivars developed in different regions". Agron. J., 73, 470-475(1981).
 - 19) Murphy H. E.; Edwards D. G.; Asher C. J., "Effects of aluminum on nodulation and early growth of four tropical pasture legumes". Aust. J. Agric. Res., 35, 663-673(1984).
 - 20) Oden S., "The acidity problem—An outline of concepts". Water, Air and Soil pollution, 6, 137-166(1976).
 - 21) Pinkerton A.; Simpson J. R., "Effects of subsoil acidity on the shoot and root growth of some tropical and temperate forage legumes". Aust. J. Agric. Res., 32, 453-463(1981).
 - 22) Reid D. A.; Jones G. D.; Armiger W. H.; Foy C. D.; Koch E. J.; Starling T. M., "Differential aluminum tolerance of winter barley varieties and selections in associated greenhouse and field experiments". Agron. J., 61, 218-222(1969).
 - 23) Rixon A. J., "Soil fertility changes in a red-brown earth under irrigated pastures. I. Changes in organic carbon, carbon/nitrogen ratio, cation exchange capacity and pH". Aust. J. Agric. Res., 17, 303-316(1966).
 - 24) Rhue R. D.; Grogan C. O., "Screening corn for Al tolerance using different Ca and Mg concentrations". Agron. J., 69, 755-760(1977).
 - 25) 但野利秋, 田中 明, "アルミニウムによる作物根の伸長阻害と根先端近傍におけるアルミニウムの集積". 土肥誌, 56, 77-84 (1985).
 - 26) 但野利秋, "不良培地条件に対する作物の耐性とその遺伝制御". 日本土壤肥料学会編. 植物栄養特性の遺伝的側面. 博友社. 1987. p9-41.
 - 27) 高木洋子, 生井兵治, 村上寛一, "日本のコムギ品種のアルミニウム耐性". 育雑, 33, 69-75(1983).
 - 28) 田中 明, 早川嘉彦, "耐酸性の作物種間差. 1. 耐低pH性の種間差—比較植物栄養に関する研究—". 土肥誌, 45, 561-569 (1974).
 - 29) 田中 明, 早川嘉彦, "耐酸性の作物種間差. 2. 耐Al性および耐Mn性の種間差—比較植物栄養に関する研究—". 土肥誌, 46, 19-25 (1975).
 - 30) 田中 明, 早川嘉彦, "耐酸性の作物種間差. 3. 耐酸性の種間差—比較植物栄養に関する研究—". 土肥誌, 46, 26-32 (1975).
 - 31) 田中 明, 檀田木世子, "酸性土壌の作物生育阻害要因の解析的研究(予報)". 土肥誌, 51, 119-125 (1980).
 - 32) 田中 明, 但野利秋, 吉田志郎, "Al-P系水耕液における作物生育に対するpHの影響". 土肥誌, 52, 475-480 (1981).
 - 33) Thornton F. C.; Davey C. B., "Response of the clover-Rhizobium symbiosis to soil acidity and Rhizobium strain". Agron. J., 75, 557-560 (1983).
 - 34) Thornton F. C.; Davey C. B., "Acid tolerance of *Rhizobium Trifolii* in culture media". Soil Sci. Soc. Am. J., 47, 496-501(1983).
 - 35) Wagatsuma T., "Effect of non metabolic conditions on the uptake of aluminum by plant roots". Soil Sci. Plant Nutr., 29, 323-333(1983).
 - 36) Wagatsuma T., "Characterization of absorption sites for aluminum in the roots". Soil Sci. Plant Nutr., 29, 499-515(1983).
 - 37) Wagatsuma T., "Characteristics of upward translocation of aluminum in plants". Soil Sci. Plant Nutr., 30, 345-358(1984).
 - 38) Wagatsuma T.; Yamasaku K., "Relationship between differential aluminum tolerance and plant-induced pH change of medium among barley cultivars". Soil Sci. Plant Nutr., 31, 521-535(1985).

- 39) Wright S. F.; Wright R. J.; Bennet O. L., "Comparative growth respons of N₂-fixing and N-fertilized subterranean clover on acid soils". Plant and Soil, **97**, 151-154(1987).

Acidity Tolerance of Grasses

Masayuki HOJITO*, Akira NISHIMUNE and Kinya TAKAO

Summary

The aluminum (Al) tolerance of several grasses were analyzed by using pot experiments, and the results were compared with those of field experiment where the acidification progressed from the top soil layer as the soil aged.

In pot experiments, wooden box pot (15*15*5 cm) were used and eight grasses (Orchard-grass = *Dactylis glomerata* = " OG ", Timothy = *Phleum pratense* = " TY ", Redtop = *Agrostis alba* = " RT ", Perennial ryegrass = *Lolium perenne* = " PR ", Kentucky bluegrass = *Poa pratensis* = " KB ", Alfalfa = *Medicago sativa* = " AL ", Red clover = *Trifolium pratense* = " RC ", Ladino clover = *Trifolium repens* = " LC ") were seeded. After budding, the Al concentration of the soil solution was controlled by applying 1) aluminum chloride powder or 2) ammonium chloride or urea as fertilizers.

The relative growth rate used as an index for Al tolerance showed the proportional relations with the relative root weight and the relative phosphorus (P) content of the grasses, and the relative root weight and the relative P content were in proportional relations themselves. Upward translocations of Al in grass plants, on the other hand, affected these three factors inproportionally. From these results, it was suggested that the grass growth regulation on the acid soil where Al is dissolved into the soil solution is a phenomenon that occurs simultaneously with the regulation of P uptake and of the root growth. And the extent of Al translocation in the shoot could give an important indication of Al tolerance in each grass. The order of acidity tolerance was judged as $OG > KB, TY > RT \geq PR, RC > AL > LC$, using as indicators the Al sensitivity to the Al concentration of the soil solution and the extent of Al translocation in the shoots.

The acidity tolerance in field condition where the soil was acidified from the top of the soil layers during a five year experiment was in the following ordered : $OG > TY > AL \geq PR > LC$. AL showed the different result from the results of pot experiments. That difference was attributable to the characteristics of root spread in each grass. That is, the root of AL is not only deep but also steady, the proportion of acidified layer (0 to 5 cm) to the whole root layer is relatively small in comparison to the other grasses, so the native characteristics of weak tolerance to acidity was masked in the field. As shown in these results, in order to apply the result of acidity tolerance recognized in pot experiments to the field condition, it is important to consider the characteristics of root spread of each grass.

* Hokkaido Prefectural Konsen Agricultural Experiment Station, Nakashibetsu, Hokkaido, 086-11, Japan.