

イネの耐酸性機構に関する研究

第1報 酸性土壌耐性イネ品種の生理学的特徴

姜東鎮・石井龍一*

(東京大学大学院)

要旨: 本研究は、酸性硫酸塩土壌を有するタイ南部ナラチワ県を研究対象地とし、酸性土壌地域でのイネ収量を向上させることを目的として行ったものである。第1報として、まず、人工的に作った強酸性土壌にイネ (*Oryza sativa* L.) 48 品種を移植し、4 週間後の個体の生存率によって 14 品種を選抜した。なお、参考として、酸性土壌に強いとされるアフリカイネ (*Oryza glaberrima* Steud.) 29 品種もイネと同様に栽培し、耐酸性を調べた。その結果、イネ 14 品種とアフリカイネ 10 品種が選抜された。選抜されたイネ品種 14 のうち、強酸性土壌で最も高い生長速度を示した 4 品種と、タイ南部ですでに耐酸性があるとされている 2 品種、それに本研究で耐酸性がないとされた 3 品種を比較することによって、イネの耐酸性機構を生理学的側面から検討した。対照区に対する酸性土壌区の相対根長は、耐性品種で大きく、非耐性品種で小さかった。葉面積においても根長と同様な傾向が見られた。さらに、酸性土壌条件下での作物生長の障害は、アルミニウム (Al) に起因することから、酸性土壌条件下で栽培された植物体の葉身 Al 濃度を調べた。その結果、葉身 Al 濃度は耐性品種よりも非耐性品種の方で高くなっていた。そこで、葉身の光合成速度を測定したところ、葉身の光合成速度は耐性品種の方が非耐性品種よりも有意に高い値を示した。これらのことから、Al が葉身にまで移行しにくく、その結果高い光合成能力が維持されていることが、酸性土壌耐性の大きな原因の一つと考えられた。

キーワード: アフリカイネ, アルミニウム耐性, イネ, 光合成, 酸性土壌耐性

タイ国は世界で最大の米の輸出国であるが、全国平均収量は 2.2 トン/ha と他の東南アジア諸国に比べても低い (Khush 1997)。その理由の一つに、主にタイ南部地域に偏在している不良土壌に起因する低収性がある (Attanandanaら 1999)。特に、タイ南部にあるナラチワ県は国内最大の泥炭地帯であり、その上、パイライト (FeS_2) の酸化による酸性土壌地帯の面積が大きい (Mooreら 1990, Ritsema and Groenenberg 1993, Shamshuddinら 1995)。筆者らは、1995 年度より開始された文部省科学研究費補助金「創成的基礎研究、東アジアにおける地域の環境に調和した持続的生物生産技術開発のための基礎研究」の 1 研究グループである「熱帯湿地林地域に関する研究」班に参加し、酸性土壌条件下でのイネ収量の改善を目的とした研究を開始した (Kangら 2001)。

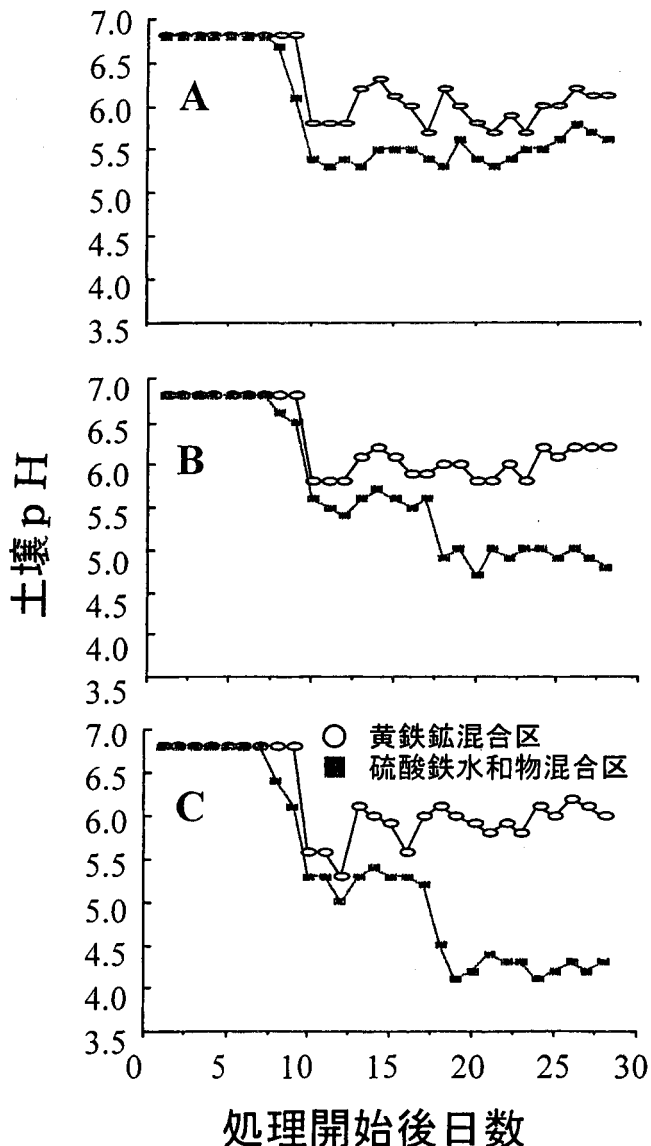
作物の耐酸性機構に関する研究は、畑作物などで多く報告されている (Ohki 1986, Foy 1988, Ahlrichsら 1990, Barceloら 1993, Simonら 1994, Bushamuka and Zobel 1998)。それらによると、土壌の酸性化による植物体の生長障害は、根の伸長障害に始まり、茎や葉といった植物の地上部の障害に及ぶとされている。すなわち、根が障害を受けたことにより、養分吸収能力の低下や地上部における水ストレスやクロロフィル含量の低下、光合成能力の低下などといった植物の生育を制限する様々な機構が引き起こされるという。

一方、イネについては研究例が未だ少ない。イネの耐酸性に関する研究では、主に、根の伸長障害や養分吸収障害の側面から調べられている (Wagatsumaら 1995, Khati-

wadara 1996, Fageria and Baligar 1999)。それらによると、イネは、酸性土壌条件下では、エンドウマメやトウモロコシなどの畑作物より根の伸長能力や養分吸収能力が強い (Fageria and Baligar 1999)。その根拠としては、イネの根端に蓄積される Al が畑作物より低いために、根端細胞の原形質膜において、Al に最も置換されやすいカルシウムが置換されずに多く残存することによって、カルシウムチャンネルが高く維持されることが挙げられる (Wagatsumaら 1995)。しかしながら、これらの研究結果のほとんどが水耕条件下で調べられたものであるため、得られた結果を、そのまま土壌条件に適用することは難しい。この研究の最初の段階として、本報では、タイ南部の土壌を想定した強酸性土壌を人工的に作成し、イネ耐性品種の同定を試みた。その際、一般に酸性土壌耐性が強いとされるアフリカイネも参考として調べた。さらに、選抜されたイネ品種を強酸性土壌条件下で栽培し、その耐性機構を主に生理学的側面から調べた。

材料と方法

酸性土壌の調製: 1/5000 a ワグナーポットに、東京大学付属農場の水田土壌を 3 L つめ、黄鉄鉱または硫酸鉄の水和物を、各 0.5, 1, 2% の割合で混合したうえ、プロトン受容体として細かく切った稲わらをポット当たり 1 g 程度を混合して、pH が 4 程度にまで低下するかどうかを調べた。pH の測定は、乾燥させた土壌に同じ量の蒸留水を加えてよく攪拌した後、携帯用 pH 計 (ラコムテスター pH Scan 1, 井内盛栄堂) で行った。調製後 1 週目から 4



第1図 土壌酸化剤処理による土壌 pH の経時的変化。
黄鉄鉱あるいは硫酸鉄水和物を 0.5%(A), 1%(B), 2%
(C) 混合した。

週目の間の pH の経時的変化を調査した (第1図)。その結果、硫酸鉄の水和物を 2% の割合で混合した土が pH 4.0 前後で安定したため、以後の実験には、この硫酸鉄水和物 2% 混合土を使用することとした。

耐性品種の選抜：1996 年 5 月 14 日に、イネ (*Oryza sativa* L.) 48 品種、アフリカイネ (*Oryza glaberrima* Steud) 29 品種の催芽種子を、東京大学農学部構内圃場のビニルハウス内に設置した苗箱に播種した。6 月 17 日に、内部をビニルシートで覆った木枠箱 (縦 90×横 180×高さ 45 cm) に硫酸鉄水和物 2% 混合土をつめ、湛水状態としたうえ、完全任意配置で 1 株 1 本植えて移植を行った。無施肥条件で約 4 週間生育させ、その時点で地上部が完全に枯死したかどうかにより酸性土壌耐性品種を同定した。

生理学的特徴の調査：上記の選抜試験で耐性品種として同定されたイネ 4 品種 (インデイカ品種の GP 15,

IR 53650, ジャポニカ品種の農林 30 号, ハツサクモチ), タイ南部で耐性品種として栽培されている 2 品種 (インデイカ品種の Luk-daeng, KDML 105) の計 6 品種を耐性品種、選抜試験で非耐性品種として同定されたインデイカ品種の Kinangdang Puti (KP) と IR 36, ジャポニカ品種の日本晴 (N-bare) を非耐性対照品種とした。各品種の催芽種子を 1996 年 8 月 14 日に苗箱に播種した。9 月 14 日、内部をビニルシートで防水した木枠箱 (縦 180×横 180×高さ 45 cm) に完全任意配置で 1 株 1 本植えて、各品種 5 個体、栽植密度を 15×30 cm として移植し、東京大学農学部構内のガラス室内で生育させた。移植後 4 週間と 10 週間に、酸性土壌区と対照区の各々から 5 個体を採取し、ルートスキャナー (Comair Root Length Scanner, 富士平工業) により根長 (Richards ら 1979) を、また、葉面積計 (林電工社製, AAM-7 型) により葉面積の計測を行った。

Al 含量の測定：硫酸鉄水和物で pH 3.8 に調整した酸性土をつめた 1/5000 a ワグナーポットに、予め苗箱で生育させた耐性 6 品種、非耐性 3 品種の苗を、1997 年 5 月 29 日 1 株 1 本植えて移植し、東京大学農学部構内のガラス室内で生育させた。1997 年 6 月 30 日にサンプリングした試料を、根、茎、葉身の 3 部分に分け、各部分について Al 含量の測定を行った。試料を 80℃ で 72 時間以上乾燥させた後、乾物重 0.2 g に対し、2.5 ml の 100% HNO_3 と 0.4 ml の H_2O_2 を加え、硝酸-過酸化水素法 (湿式炭化法) により分解を行った (後藤 1990)。分解した試料溶液 100 μl を 200 倍に希釈し、グラファイト原子吸光測定装置 (Perkin Elmer 社製, Simaa 6000 型) により定量した。

単位葉面積当たり光合成速度 (LPS) の測定：移植 4 週目の晴天日の午前 10 時前後に、圃場において行なった。最上位展開葉につき、携帯式光合成測定装置 (ADC 社製, LCA-4 型) を用いて飽和光強度、350 ppm CO_2 濃度の条件下で測定した。光合成速度や気孔・葉肉抵抗の算出は佐々木 (1990) の方法によった。

クロロフィル含量の測定：LPS を測定した後、測定葉をリーフパンチで切り抜き、90% メタノールでクロロフィルを抽出した後、Schmid (1971) の方法により測定した。

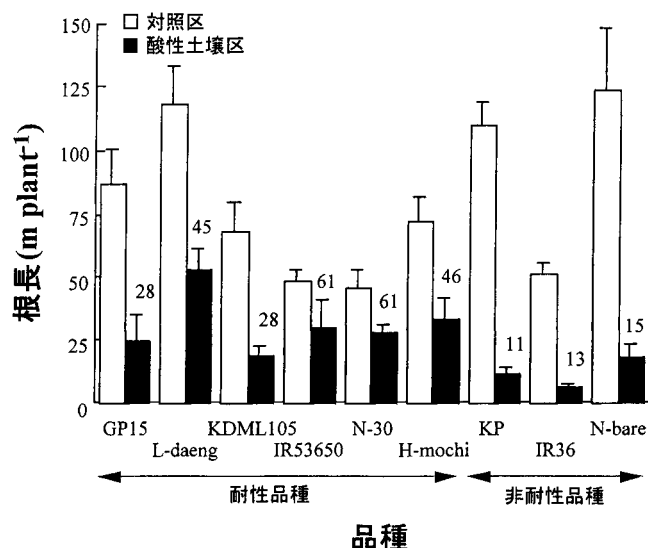
結 果

1. 耐性品種の選抜

2% の硫酸鉄水和物を混合した土壌で行った試験の結果、イネおよびアフリカイネ合計 77 品種のうち、24 品種が選抜された (第1表)。イネとアフリカイネを比較すると、その差は小さかったが、アフリカイネの方がイネよりも高い生存率を示した。またイネの生存率をインデイカ品種とジャポニカ品種で比較すると、インデイカ品種で 47%、ジャポニカ陸稲品種で 33%、同水稻品種で 14% となっていた。これらの結果より、アフリカイネの方がイネより

第1表 酸性土壌条件下 (pH 4.0) での生存率.

品種	品種の数	生存品種の数	生存率 (%)
<i>Oryza sativa</i> L.	48	14	29
ジャポニカ水稻品種	21	3	14
ジャポニカ陸稲品種	12	4	33
インディカ品種	15	7	47
<i>Oryza glaberrima</i> Steud.	29	10	35



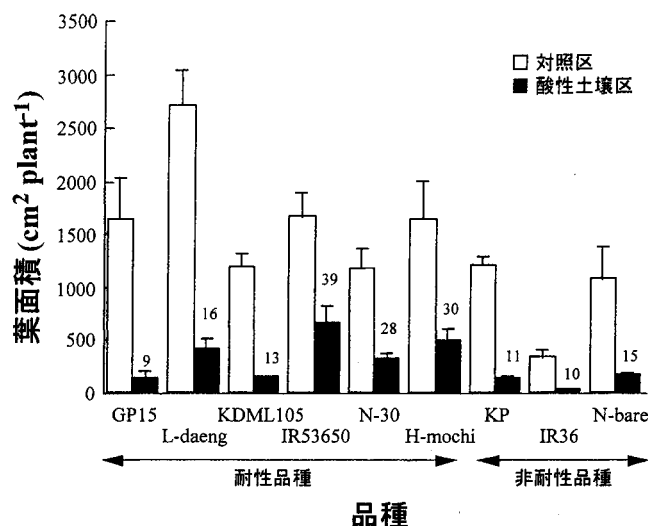
第2図 酸性土壌条件 (pH ; 3.8-4.0) 下で移植から10週間生育させた耐性品種と非耐性品種の根長。
酸性土壌区上の数値および縦線は、各々対照区に対する比率 (%) と標準誤差。

も、イネの中ではインディカ品種の方がジャポニカ品種より、また、ジャポニカ品種の中では陸稲品種の方が水稻より酸性土壌に強い傾向があると考えられた。

2. 根長と葉面積における耐性品種の特徴

耐性品種と非耐性品種とを酸性土壌条件で栽培し、養水分の吸収器官としての根の伸長と、光合成器官としての葉の生長を調べた。まず、根長を比較すると、対照区に対する酸性土壌区の割合は耐性品種で大きく、非耐性品種で小さい傾向を示した (第2図)。この傾向は、生育の進行にともなって大きくなり、10週目には耐性品種と非耐性品種の間で有意な差を示した。このことから、耐性品種は、酸性土壌による根の伸長抑制が小さいと考えられた。

葉面積についてみると、処理後10週目の酸性土壌区で、耐性品種は対照区の9-39%にまで減少していたが、非耐性品種ではさらに大きく減少し、対照区の10-15%となっていた (第3図)。この結果、比葉重 (単位葉面積当たり葉乾重) は、対照区の植物体の比葉重に比べて、耐性・非耐性品種とも処理区の植物体では大きくなる、すなわち葉が厚くなる傾向が認められた (第2表)。しかし、耐性と非耐性品種との間で、比葉重について有意な差は認められなかった。



第3図 酸性土壌条件 (pH ; 3.8-4.0) 下で移植から10週間生育させた耐性品種と非耐性品種の葉面積。
酸性土壌区の棒グラフ上の数値および縦線は、各々対照区に対する比率 (%) と標準誤差。

3. 乾物重における耐性品種の特徴

乾物重についてみると、処理後4週目の酸性土壌区では、耐性品種、非耐性品種ともに対照区の50%程度しか維持されていなかった (第4図A)。時間の経過とともに、乾物重における酸性土壌の影響は顕著になった。すなわち、移植後10週目で耐性品種では対照区の16-78%、非耐性品種では8-14%と、有意な差を示し、耐性品種は乾物生産の面で明らかな酸性土壌耐性を示していた (第4図B)。

4. Al吸収における耐性品種の特徴

強酸性土壌条件下で生育させた植物体の根および茎におけるAl濃度は、葉身に比べて低く、かつ、耐性品種と非耐性品種との間に大きな差はなかった (第5図)。しかし、葉身のAl濃度については、非耐性品種のKPとIR36が耐性品種のいずれよりも有意に高い値を示した。逆に、耐性品種のIR53650とGP15では、茎のAl濃度とほぼ同じ程度の低い値を示していた。これらのことから、耐性品種には、根で吸収されたAlが葉にまで移行しにくい機構が備わっていると考えられた。

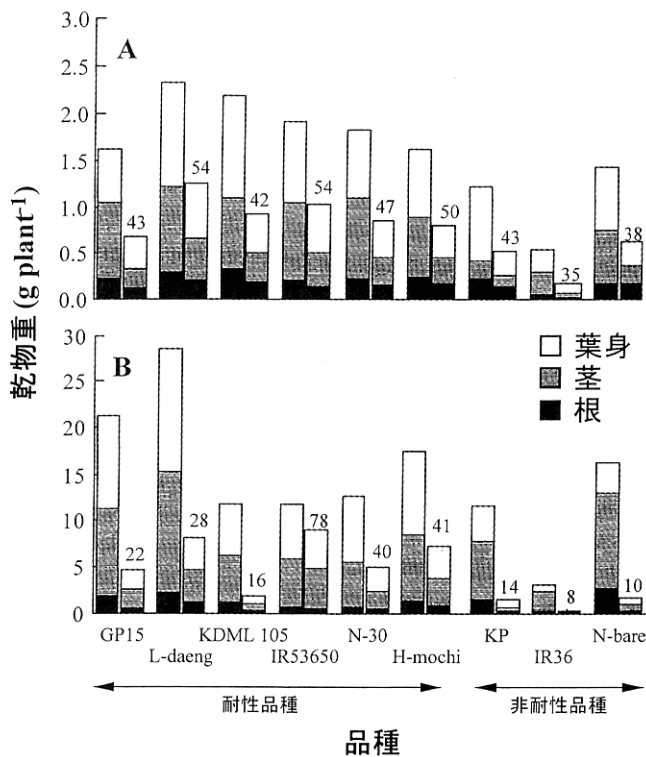
5. LPSにおける耐性品種の特徴

強酸性土壌条件下で4週間生育させた植物体のLPSを

第2表 酸性土壌条件下で生育させたイネの移植後4週間 (4 WAT) と10週間 (10 WAT) における比葉重 ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$).

品種	4 WAT		10 WAT	
	対照区	酸性土壌区	対照区	酸性土壌区
耐性品種				
GP 15	3.71 ± 0.44	5.58 ± 0.64 (151)	6.08 ± 0.50	15.62 ± 0.85 (257)
L-daeng	2.89 ± 0.26	3.25 ± 0.38 (112)	4.96 ± 0.45	8.50 ± 0.66 (171)
KDML 105	3.42 ± 0.25	3.44 ± 0.34 (101)	4.66 ± 0.50	5.31 ± 0.80 (114)
IR53650	2.93 ± 0.54	3.59 ± 0.47 (123)	3.55 ± 0.22	6.56 ± 0.43 (185)
N-30	2.91 ± 0.32	3.75 ± 0.28 (129)	5.92 ± 0.47	8.04 ± 0.51 (136)
H-mochi	2.62 ± 0.32	3.20 ± 0.33 (122)	5.40 ± 0.30	7.06 ± 0.50 (131)
非耐性品種				
KP	2.86 ± 0.38	3.29 ± 0.24 (115)	3.12 ± 0.49	6.31 ± 0.42 (202)
IR36	2.81 ± 0.27	4.42 ± 0.34 (157)	2.25 ± 0.39	5.49 ± 0.24 (244)
N-bare	3.15 ± 0.33	3.67 ± 0.51 (116)	2.93 ± 0.42	4.36 ± 0.74 (149)

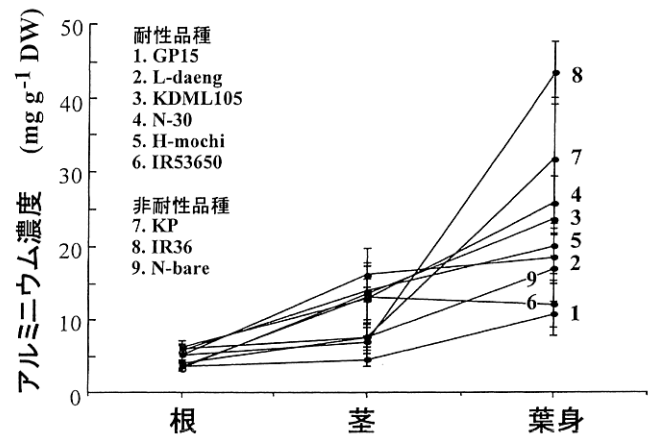
数値は、5反復の平均値 $\pm$ 標準誤差。()内の数値は対照区を100とした時の値。



第4図 酸性土壌条件 (pH ; 3.8-4.0) 下で移植から4週間 (A), 10週間 (B) 生育させた耐性品種と非耐性品種の部位別乾物重。

各品種の2本の棒グラフの左側は対照区, 右側は酸性土壌区。酸性土壌区の棒グラフ上の数値は, 対照区に対する比率 (%)。

測定した結果, 耐性品種はいずれの品種も, 対照区の52%以上を維持していた。しかし, 非耐性品種のいずれもが, 対照区の47%以下しか維持できていなかった (第3表)。LPSを規定するCO₂気孔拡散抵抗 (Rs) とCO₂葉肉拡散抵抗 (Rm) とを求めた結果, 処理区の植物体のRsは, いずれの品種においても対照区に比べて大きくなっていた。すなわち, 非耐性品種のいずれもが対照区の



第5図 酸性土壌条件 (pH ; 4.0) 下で移植から4週間生育させた耐性品種と非耐性品種の部位別アルミニウム濃度。図中の縦線は標準誤差。

355%以上, 耐性品種では306%以下となっていた。また, Rmについても上記のRsと同様な傾向を示し, 対照区に対する比は耐性品種で小さく, 非耐性品種で大きかった。さらに, クロロフィル含量を調べたところ, 強酸性土壌条件下で, 耐性品種のクロロフィル含量は, 非耐性品種のクロロフィル含量よりも高くなる傾向を示したが, その差は有意ではなかった (第3表)。これらのことから, 葉に移行したAlは葉の気孔開度を減少させるとともに, 光合成のCO₂固定機構にも被害を与えることが示唆された。

考 察

本実験では, 強酸性土壌条件下での植物体の生存の可否によって24の耐酸性品種を選抜した。一般に, 低pH/Al過剰に対する耐性品種の選抜の指標としては, 1~2週間程度の短期間, 水耕条件下で低pH/Al処理を行った植物の根の伸長阻害程度が使われる (Barceloら 1993, Khatiwadaら 1996)。しかし, 短期間, 酸性水耕液で栽培した植物体における根の伸長阻害程度が, 長期間, 酸性土壌で

第3表 酸性土壌条件下 (pH 4.0) で生育させたイネの移植後4週間における個葉光合成速度 (LPS), 気孔拡散抵抗 (Rs), 葉肉拡散抵抗 (Rm) およびクロロフィル含量 (Chl.).

品種	LPS ($\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)		Rs (sec cm^{-1})		Rm (sec cm^{-1})		Chl. ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	
	対照区	酸性区	対照区	酸性区	対照区	酸性区	対照区	酸性区
耐性品種								
GP 15	16.6 $\pm$ 0.4	15.6 $\pm$ 0.2	2.7 $\pm$ 0.3	3.1 $\pm$ 0.2	4.8 $\pm$ 0.2	5.3 $\pm$ 0.2	39.5 $\pm$ 0.3	41.7 $\pm$ 0.4
L-daeng	13.4 $\pm$ 1.1	11.8 $\pm$ 0.2	4.2 $\pm$ 0.5	6.1 $\pm$ 0.3	4.6 $\pm$ 0.2	6.1 $\pm$ 0.6	33.4 $\pm$ 0.2	37.7 $\pm$ 0.4
KDML105	17.9 $\pm$ 0.2	16.0 $\pm$ 0.3	2.5 $\pm$ 0.1	3.0 $\pm$ 0.2	4.5 $\pm$ 0.1	5.3 $\pm$ 0.1	39.8 $\pm$ 0.1	43.5 $\pm$ 0.3
IR53650	18.2 $\pm$ 0.4	13.2 $\pm$ 0.7	2.7 $\pm$ 0.2	4.0 $\pm$ 0.2	4.3 $\pm$ 0.1	6.3 $\pm$ 0.4	44.4 $\pm$ 0.1	46.7 $\pm$ 0.4
N-30	15.5 $\pm$ 0.6	13.3 $\pm$ 0.2	3.1 $\pm$ 0.6	3.9 $\pm$ 0.3	5.2 $\pm$ 0.9	6.1 $\pm$ 0.3	47.3 $\pm$ 0.1	48.6 $\pm$ 0.3
H-mochi	19.5 $\pm$ 0.2	10.1 $\pm$ 1.0	1.8 $\pm$ 0.1	5.5 $\pm$ 1.0	4.3 $\pm$ 0.1	8.6 $\pm$ 0.9	41.5 $\pm$ 0.2	42.8 $\pm$ 0.3
非耐性品種								
KP	17.1 $\pm$ 0.3	6.9 $\pm$ 0.6	2.9 $\pm$ 0.3	11.0 $\pm$ 1.4	4.4 $\pm$ 0.2	9.8 $\pm$ 0.9	39.5 $\pm$ 0.4	40.4 $\pm$ 0.1
IR36	19.4 $\pm$ 0.9	2.6 $\pm$ 1.0	2.5 $\pm$ 0.2	18.5 $\pm$ 0.1	4.0 $\pm$ 0.3	19.7 $\pm$ 0.3	36.1 $\pm$ 0.1	29.2 $\pm$ 0.5
N-bare	19.9 $\pm$ 0.1	9.3 $\pm$ 0.5	2.0 $\pm$ 0.1	7.1 $\pm$ 0.4	4.2 $\pm$ 0.1	9.6 $\pm$ 0.4	48.9 $\pm$ 0.0	48.6 $\pm$ 0.8

表注数値は、5個体の平均値 $\pm$ 標準誤差。

生育させた場合の耐酸性指標となりうるかは疑問である (Barceloら 1993)。本実験では、水耕でなく、pH 4 前後の酸性土壌を使用して4週間の栽培試験を行った。したがって、ここで選抜されたイネ24品種は、従来以上に信頼性における酸性土壌耐性を持っていると考えられた。

こうして選択された耐性品種の根長は、酸性土壌条件下で、非耐性品種の根長よりも高く維持されていた (第2図) が、Ahlrichsら (1990) や Johnsonら (1997) によると、コムギやソルガムでも耐性品種の根長は、非耐性品種よりも高く維持されており、酸性土壌耐性は根の伸長能力に顕著に現れるとされている。こうした根の伸長に対する土壌酸度の影響を、Bushamuka and Zobel (1998) は、トウモロコシやダイズの耐性品種と非耐性品種を用いて、主根・基根・側根に分けてさらに詳細に調べた。その結果、単子葉植物であるトウモロコシでは、耐性品種の方が主根・基根・側根のいずれでも、非耐性品種よりも高い伸長能力を維持していたが、ダイズでは、耐性品種と非耐性品種との間に一定の傾向は見られなかったという。このように、主根・基根・側根の伸長阻害は、作物種の間で違う傾向を示すと考えられ、今後機能の異なる根の間で酸性土壌の影響がどう異なるかをはっきりさせることが必要と考えられた。

こうした根に対する酸性土壌の影響は、土壌酸度そのものによるものではなく、酸性土壌条件によって引き起こされる Al 過剰の害症状であるとされている (Foy 1988)。そこで、強酸性土壌条件下で生育させた植物体の Al の蓄積部位を調べたところ、耐性品種には、吸収された Al が葉身にまで移行しにくい性質があることが示唆された (第5図)。逆に言えば、非耐性品種においては、吸収された Al が葉身にまで比較的容易に移行してしまう性質があると言える。耐塩性植物では、流入したナトリウムを根や茎や葉柄などの非光合成部位に蓄積し、葉身への輸送量を抑

えることによって障害を軽減させていると言われている (Uchiyama 1987)。しかし、本研究のイネにおいては、根と茎の Al 濃度は葉身よりもかえって低かったことを考えると、耐性品種における葉身への Al 移行の低下は耐塩性機構とは異なったものであると考えられる。

本実験では、酸性土壌区においてクロロフィル含量には有意な差はなかったが LPS は有意に低下していた。オオムギやソルガムでも、植物体を酸性土壌で生育させた場合、クロロフィル含量が減少すること (Ohki 1986)、また、葉身内の種々の酵素の活性低下も起こり、これらによって LPS の低下が引き起こされるとの報告がなされている (Simonら 1994)。本実験では、光合成速度を支配する気孔抵抗と葉肉抵抗を求めたが、いずれの品種においても、酸性土壌下では葉肉抵抗のみならず気孔抵抗の増加も観察された。さらにこれら二つの抵抗は、非耐性品種の方が耐性品種よりも明らかに大きくなっていった (第3表)。もし、Al の葉への移行が蒸散流に乗って行われているとすると、気孔開度の大きい耐性品種の方が葉身の Al 濃度が高くなるはずであり、このことから判断する限り、Al の移行は蒸散流に乗って行われているのではないと考えられる。また、本実験では、硫酸鉄水和物の混合による酸性土壌を使用したもので、鉄過剰害も生じる可能性も考えられる。この点については今後の研究が必要である。

引用文献

- Ahlrichs, J.L., M.C. Karr, V.C. Baligar and R.J. Wright 1990. Rapid bioassay of aluminum toxicity in soil. *Plant Soil* 122: 279–286.
- Attanandana, T., B. Chakranon, K. Kyuma and P. Moncharoen 1999. Improvement of a peat soil for rice cultivation in Thailand. *Jpn. J. Trop. Agr.* 43: 91–96.
- Barcelo, J., P. Guevara and C. Poschenrieder 1993. Silicon ame-

- lioration of aluminum toxicity in teosinte (*Zea mays* L. ssp. *mexicana*). *Plant Soil* 154: 249–255.
- Bushamuka, V.N. and R.W. Zobel 1998. Maize and soybean tap, basal, and lateral root responses to a stratified acid, aluminum-toxic soil. *Crop Sci.* 38: 416–421.
- Fageria, N.K. and V.C. Baligar 1999. Growth and nutrient concentrations of common bean, lowland rice, corn, soybean, and wheat at different soil pH on an inceptisol. *J. Plant Nutr.* 22: 1495–1507.
- Foy, C.D. 1988. Plant adaptation to acid, aluminum toxic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19: 959–987.
- Greenway, H. and R. Muns 1980. Mechanism of salt tolerance in non-halophytes. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31: 149–190.
- Johnson, J.P.Jr., B.F. Carver and V.C. Baligar 1997. Expression of aluminum tolerance transferred from atlas 66 to hard winter wheat. *Crop Sci.* 37: 103–108.
- Kang, D.J., K. Futakuchi, S. Dumnoengam, T. Mechi, B. Chakranon and R. Ishii 2001. Factors related to differences in rice yield among districts in Narathiwat Province, southern Thailand. *Jpn. J. Trop. Agric.* 45: 49–56.
- Khaliwada, S.P., D. Senadhira, A.L. Carpena, R.S. Zeigler and P.G. Fernandez 1996. Variability and genetics of tolerance for aluminum toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Theor. Appl. Genet.* 93: 738–744.
- Khush, G.S. 1997. Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. *Plant Mol. Biol.* 35: 25–34.
- Moore, P.A.Jr., T. Attanandana and W.H.Jr. Patrick 1990. Factors affecting rice growth on acid sulfate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1651–1656.
- Ohki, K. 1986. Photosynthesis, chlorophyll, and transpiration responses in aluminum stressed wheat (*Triticum aestivum*) and sorghum (*Sorghum bicolor*). *Crop Sci.* 26: 572–575.
- Richards, D., F.H. Goubran, W.N. Garwoli and M.W. Daly 1979. A machine for determining root length. *Plant Soil* 52: 69–76.
- Ritsema, C.J. and J.E. Groenenberg 1993. Pyrite oxidation, carbonate weathering, and gypsum formation in a drained potential acid sulfate soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 968–976.
- 佐々木治人 1990. 水稻における光合成能力の品種間差と、その機構に関する研究. 東京大学大学院博士論文.
- Schmid, G.H. 1971. Origin and properties of mutant plants: Yellow Tobacco. *Methods Enzymol.* 23: 171–194.
- Shamshuddin, J., I. Jamilah and J.A. Ogunwale 1995. Formation of hydroxy-sulfates from pyrite in coastal acid sulfate soil environments in Malaysia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26: 2769–2782.
- Simon, L., M. Kieger, S.S. Sung and T.J. Smalley 1994. Aluminum toxicity in tomato: 2. Leaf gas exchange, chlorophyll content, and invertase activity. *J. Plant Nutr.* 17: 307–317.
- Uchiyama, Y. 1987. Salt tolerance of *Atriplex nummularia*. *Tech. Bull. Trop. Agr. Res. Center* 22: 1–69.
- Wagatsuma, T., S. Ishikawa, H. Obata, K. Tawaraya and S. Kotahda 1995. Plasma membrane of younger and outer cells is the primary specific site for aluminum toxicity in roots. *Plant Soil.* 171: 105–112.

Studies on Acid Soil Tolerance of Rice Plants (*Oryza sativa* L.) I. Morphological and Physiological Characteristics of Acid Soil Tolerant Varieties of Rice Plants : Dong-Jin KANG and Ryuichi ISHII*¹⁾ (*Grad. Sch. of Agr. and Life Sci., The Univ. Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan; ¹⁾Present address, Coll. Biores. Sci., Nihon Univ., Fujisawa 252-8510, Japan*)

Abstract : The purpose of the present paper is to identify morphological and physiological traits of acid soil tolerant varieties of rice plants (*Oryza sativa* L.) in Narathiwat Province of Southern Thailand where the yield reduction of rice plants due to acid soil is markedly severe. Six tolerant varieties selected from 48 grown under artificially prepared acid soil (pH 4.0) for 4 weeks after transplanting, and 3 intolerant varieties as a control were used in the present study. Tolerant varieties had longer roots and a larger leaf area than intolerant varieties in acid soil conditions. Aluminum (Al) concentration in the leaves was significantly lower in tolerant varieties than in intolerant varieties. Leaf photosynthesis (LPS) of tolerant varieties was significantly higher than that of the intolerant varieties in acid soil conditions. These results indicate that transportation of Al from the root to the leaf is prevented by some mechanism in the tolerant varieties, which may be a mechanism of acid soil tolerance.

Key words : Acid soil tolerance, Aluminum, *Oryza glaberrima* Steud, *Oryza sativa* L., Photosynthesis, Rice.