
 総 説

低 pH 土 壤 における 作物 の 生育

植物有害 Al と下層土のエダフォロジー

三 枝 正 彦*

キーワード 酸性土壌, 酸性障害, 植物有害 Al, 下層土酸性

1. は じ め に

熱帯・亜熱帯地域の強度に風化したアルティソルやオキシソル, 寒・温帯地域のスピドソルやアンディソル(黒ボク土), 低湿地帯に分布する酸性ヒストソルや酸性硫酸塩土壌などは, 低い pH (強い酸性) を示し, 作物の生育収量や養水分吸収が著しく阻害される. このような強い酸性を示す土壌は世界の農業利用可能地の約 1/3 を占め⁴²⁾, またその大部分が食料増産を必要とする発展途上国に分布することより, 近年高い関心を集めている^{20,43)}.

“低 pH における植物と土壌の相互作用”を, 土壌学, 植物栄養学, 植物育種学, 環境科学などの多方面から体系的に検討するために3年ごとにこの問題に関する国際会議(Plant-soil interaction at low pH)が開かれている. 1987 年にはカナダのアルバータで第1回大会(13 カ国 109 人, 75 課題)が, 昨年は米国ウエストバージニアで第2回大会(36 カ国 230 人, 215 課題)が開催された. また, 1993 年にはオーストラリアで第3回大会の開催が予定され, 1996 年にはわが国に招致しようとする動きがある. 湿潤気候下のわが国では大工原以来, 酸性土壌に関する優れた研究が多数あり, このような国際会議に大きく貢献できるものと思われる. 本稿では低 pH 土壌における作物の生育を概説するとともに, 昨年の会議で関心の高かった植物有害 Al と下層土のエダフォロジー(評価)について述べることにする.

2. 低 pH 土 壤 における 作物 の 生育

作物の生育を, 土壌の pH にのみ関連させて解釈することは極めて困難であるが, 一般に酸性土壌では, 植物有害成分(たとえば, H^+ , Al, Mn 等)の蓄積, 作物の生育に不可欠な養分(たとえば P, Ca, Mg, K 等の多量要素や Mo, Cu, Zn 等の微量元素)の不足, あるいは可給度の低下, 作物の生育を支える微生物活性(硝酸化成や窒素の無機化, 空中窒素の固定など)に関わる微生物)の低下, 逆に, ある種の土壌病害の活性化により, 作物の生育あるいは養分吸収が著しく阻害される場合が多い^{2,21,39,65,66)}. また, 逆に, 酸性土壌で有害細菌の活性が抑えられたり, 微量の Al がある種の作物の生育・養分吸収を促進することも知られている³⁶⁾.

1) 有害成分の蓄積と作物の生育

低 pH 土壌における生育阻害としては, H^+ の過剰による損傷を考えがちであるが, 特別の場合を除き, H^+ が第一義的要因となることは少ない. 一般に, 十分量の Ca が存在すれば, セロリー, ビート, キャベツなど特殊な作物を除けば pH 4 以上では, H^+ 害を受けることはない^{39,65)}. むしろ pH 4.5 以下で Al の溶出量が急激に増え(第1図参照)⁶³⁾, H^+ の過剰害そのものより Al の過剰害を伴うことが多い.

酸性土壌における作物の生育阻害要因としては, Al の過剰害が最も重大であり, とりわけ一定荷電を有する土壌では溶脱が進み交換性塩基が不足すると Al 飽和度が高まり, 作物に Al の過剰害が発生する. しかしながら, 土壌中の Al の動態は土壌の pH やコロイド組成に大きく支配され, 植物有害 Al については依然として多くの論議がある^{6,33,60,73)}. この点については次項で詳細に述べることにする.

酸性土壌中では Al とともに Mn の過剰害がしばしば

 Masahiko SAIGUSA: Plant Growth on Acid Soils with Special Reference to Phytotoxic Al and Subsoil Acidity

* 東北大学農学部付属農場 (989-67 宮城県 玉造郡鳴子町川渡局)

1991 年 2 月 28 日 受理

日本土壌肥科学雑誌 第 62 巻 第 4 号 p. 451~459 (1991)

問題となる^{1,21,43)}。しかしながら、土壤溶液の pH と土壤溶液中の Mn 濃度には、かならずしも密接な関係はみられず、Mn の過剰害は土壤の pH のみならず母材の種類や酸化還元状態とも密接に関係している。たとえば、水はけの悪い酸性土壌では、Mn 過剰による生理障害がリンゴの粗皮病、カキの緑縁症、ミカンの異常落葉等として知られている³⁵⁾。

酸性硫酸塩土壌を水田として利用する場合、Al 過剰害のほかに Fe 過剰害が発生することがある。土壤溶液中の Fe 含量は、Mn と同様に土壤の pH のみならず酸化還元状態とも密接に関係する。Fe 過剰害は土壤溶液からの Ca, Mg などの吸収に対する Fe の競合が原因するといわれる⁴⁰⁾。

2) 養分吸収と作物の生育

酸性土壌では種々の養分欠乏に起因する生育低下が知られているが、それらは酸性母材あるいは酸性化（降雨による溶脱）に伴う絶対量の不足、溶解度の低下、蓄積有害成分による吸収阻害などがある⁶⁶⁾。

ほとんどすべての酸性土壌で、リン酸は作物の生育制限要因となっているがリン酸施用に対する作物の反応は耐 Al 性と深く関係している²⁴⁾。耐 Al 性の強いイネやダイズなどでは、pH 5 以下の強酸性土壌でもリン酸施用量に応じて、生育が回復するが、耐 Al 性の弱いビートやオオムギでは、Al の過剰害が回避される pH 5 以上ではじめて施肥リン酸に反応して生育が良好となる^{41,67,69)}。Al 耐性品種は、低リン酸耐性ももつことが多く、また、Al 過剰障害で作物根の伸長が阻害されると、リン酸は土壌中の移動性が小さいので吸収が著しく阻害される²⁶⁾。従来、石灰施用による酸性矯正は、土壌の可給態リン酸含量を増加させるとされていたが、近年、石灰中和はむしろリン酸の可給度を下げ、作物体のリン酸吸収量を低下させるとする報告が多い^{41,62,67)}。

強度に風化した土壌や年降水量が年蒸発散量を上回る地域では、土壌コロイドの陽イオン交換基に吸着されている塩基の溶脱が起こり交換基は H^+ で置き変わる。一定荷電に吸着された H^+ は強酸的で解離しやすく、粘土の一部を破壊溶解する。その結果、溶出した Al^{3+} は H^+ と置換し、一定荷電土壌では陽イオンとして、 Al^{3+} が卓越する。したがって、酸性土壌では塩基が不足し、作物に Ca, Mg, K 欠乏が発生する。一般に、植物の養分吸収においては、Ca と Mg は拮抗的であるが、酸性土壌における石灰施用は Al^{3+} を不溶化することによって Mg の吸収を促進することが示された³²⁾。根の伸長によって Ca はその場から吸収されることが必要であり、後述するように、酸性下層土における Ca 欠乏は、Al 過剰

と同様に極めて深刻な問題である^{50,51)}。

酸性土壌において可給度が著しく低下する微量元素としては、Mo がある。高等植物において Mo は、硝酸還元酵素の構成成分として重要であるが、窒素固定菌のニトロゲナーゼの構成成分でもあり、窒素固定能を通して、マメ科作物の生育に大きく関係する。米国アラバマ州の Fe 酸化物に富む pH 5.6 以下のアルティソルでは、Mo が不足しダイズの生育が著しく制限される。この地域では Al の過剰害より Mo 欠乏のほうが深刻な問題といわれる^{2,14)}。Cu は酸性母材で少なく、有機物と安定なキレート化合物をつくるので、酸性黒ボク土やスポドソルで作物の Cu 欠乏が発生する。また強度に溶脱した土壌やスポドソルでは B, Zn 等の微量元素が作物の生育制限要因となることがある⁶⁵⁾。

3) 微生物活性と作物の生育

窒素は作物の生育に最も重要な養分であり、その土壌中における動態は土壌微生物の活性と極めて密接な関係がある。それら微生物活性におよぼす pH の影響は次のようにまとめられている^{2,6)}。1) 土壌窒素の無機化は幅広い pH 領域で起こるが、pH 6.0~6.5 以下でしだいに減少する。2) 硝酸化成の最適 pH は 6.6~8.0 であるが、pH の低下とともに減少し、pH 4.5 以下ではほとんど起こらない。3) 脱窒菌は pH 7.0~7.5 で活性が高く、pH 5 以下では活性がかなり低下する。4) 根粒菌による窒素固定は pH 依存性が高いが、pH 6 以上を要求するものもあれば、pH 5 以下に適正 pH をもつものもある。また、根粒菌と寄主作物では、しばしば最適 pH や Al 耐性が異なるので適切な組合せを選択する必要がある¹⁵⁾。たとえばダイズそのものは pH 4.6 でも正常な生育を示すが、根粒菌は H^+ の過剰害を受けるため窒素を施用しないと、ダイズの生育は著しく阻害される。また酸性土壌では Ca や Mo も不足し、窒素固定能の低下によって、マメ類の生育収量が抑制される¹⁴⁾。一方、水田状態においては、pH 5.5 以下では、ラン藻や光合成細菌による窒素固定能が、pH の低下とともに減少することが知られている⁷⁵⁾。

最小限の投資で増産を図ることが急務である熱帯地域のアルティソルやオキシソルでは、低いリン酸の可給性を、VA 菌根菌によって改善しようとする試みがある^{16,52)}。VA 菌根菌接種と鉍石リンの施用は、菌根菌の感染を高め、キャッサバやマメ科牧草の収量を改善する。また松根への菌根菌の感染は Al 害を軽減するといわれる³⁰⁾。自然植生下では菌根菌数は、pH の違いで大きな変動がみられないが、それぞれの pH に応じて、異なる菌根菌が存在する⁵²⁾。最近、わが国でもようやく本

第1表 世界の“強い酸性”土壌の分布面積と分布割合⁴²⁾

土壌名		分布面積 ($\times 10^4$ ha)	分布割合(%)	
USDA	FAO-UNESCO		A*	B*
サルフィック フルベント 酸性	チオニック フルビソル 酸性	1,167	0.3	0.1
アンディソル 酸性	アンドソル 酸性	9,003	2.7	0.8
ヒストソル	ヒストソル	20,853	6.2	1.9
スポドソル	ポドソル	48,165	14.2	4.4
サメント	アレノソル	68,635	20.3	6.2
アルティソル	アクリソル	83,838	24.8	7.6
オキシソル	フェラルソル	106,856	31.5	9.7
合計		338,517	100	30.7

* A, 各酸性土壌の酸性土壌全面積に対する割合; B, 各酸性土壌の農業利用可能陸地面積に対する割合。

格的な菌根菌の研究が始まった。

畑土壌の連作障害は、土壌病害による場合が多いが、それらのなかには土壌の pH と関連の深いものがある。たとえば、トマトの萎凋病やアブラナ類の根瘤病などは酸性で発病しやすく、逆に、ジャガイモのそうか病やコムギの立枯れ病などは酸性土壌で発病が抑制される⁶²⁾。また、耐酸性の強い水稻の育苗においては、苗立枯れ病を防ぐために培土の pH を 5 以下に保つことが行われている。

4) 土壌型と作物生育障害要因

世界の農業利用可能陸地面積に対する強い酸性土壌の面積は、約 34 億 ha で利用可能陸地面積の 31% にも達している（第1表参照）。各種酸性土壌の作物障害要因は次のとおりである^{42,43,60)}。

オキシソル、アルティソル：強度に風化と洗脱を受けた土壌で、強い酸性土壌の半分以上を占めている。主として、食料増産を必要とする熱帯・亜熱帯地域に分布している。生育障害要因としては、Al や Mn の過剰害、Ca 欠乏が最も深刻で、また、酸化物が多く、CEC が小さいので P や Mo とともに、塩基や微量元素欠乏も問題となる。

サメント（エンティソル）：主として、乾燥、半乾燥地に分布する砂の多い未熟土壌で、各種の養分不足が制限要因となる。

スポドソル：主に、農業的に厳しい寒-冷温帯に分布し、強度の溶脱で各種の養分が不足している。漂白層では、Al の過剰害が問題である。

酸性ヒストソル：著しく貧栄養状態で、リン酸や塩基、微量元素などすべてが不足している³⁷⁾。しかし、無機物が少なく、Al や Mn の過剰害はあまり問題となら

ない、変異荷電を主体とし中和に多量の石灰資材を必要とする、有機物の過度の分解を防ぐなどの理由から、酸性矯正は pH 5 程度までで十分とされている。

酸性アンディソル：従来、Al の過剰害が問題とならない土壌とされていたが、近年、Al 害の著しい非アロフェン質黒ボク土がみいだされた⁵⁵⁾。活性 Al が多く、リン酸の不可給態化が著しい。また、塩基や微量元素も不足している。

酸性硫酸塩土壌：熱帯マングローブ植生下に多く分布し、水田として利用される。Mn の過剰害は起きないが Al, Fe の過剰害が問題であり⁴⁰⁾、リン酸や塩基も不足している。

3. Al の存在形態と植物有害 Al

酸性土壌における生育障害要因としては、Al の過剰害が最も重大でかつ普遍的であることは誰もが認める事実である。しかし、土壌酸性の研究は依然として“土壌酸性は、第一義的に中性塩で抽出される Al^{3+} である”とする VIETCH (1904) の考え方の堂々巡り、すなわち少々形をかえた“メリーゴーランド”であるといわれる²⁹⁾。近年、植物栄養学者を中心として、 Al^{3+} より重合塩基性 Al イオンのほうがはるかに毒性が強く、植物有害 Al を再検討する動きがある^{44,71,72)}。ここでは土壌中における Al の動態を考慮しながら、酸性土壌における植物有害 Al について概説する。

1) 土壌中における Al の存在形態

Al は一般に、一次鉱物あるいは二次鉱物の主要構成成分として Si について多い。しかしながら植物の生育に深く関係するのは、一次鉱物や結晶性粘土鉱物の構成成分としての Al ではなく、活性 Al といわれる低結晶あるいは非晶質鉱物の構成成分としての Al や腐植と結合した Al および遊離の Al である。活性 Al は酸性シュウ酸塩溶液等で抽出され、リン酸との反応性が高い。したがって非晶質成分に富む黒ボク土やオキシソルで多く、リン酸の不可給態化を通して植物の生育を障害する²⁴⁾。これに対して、従来、植物に直接的に有害であるとされている Al は、KCl 溶液で抽出される土壌溶液中の Al^{3+} と土壌コロイドに吸着されている Al^{3+} で活性 Al のほんの一部である。たとえば、典型的強酸性黒ボク土では 2~3% の活性 Al を含むが、植物に直接的に有害な Al^{3+} は、活性 Al の数%に過ぎない⁵⁵⁾。

水溶液中の Al の形態は pH によって著しく異なる⁷⁶⁾。すなわち、pH 4 以下では Al^{3+} として存在するが、pH 4 以上では、一部が単体の塩基性 Al イオン ($AlOH^{2+}$, $Al(OH)_2^{+}$) あるいは重合塩基性 Al イオン

(主要形態は $\text{Al}(\text{OH})_{2.5}^{0.5+}$ あるいはこれに近い組成を持ち Al_{13} ポリマー ($\text{AlO}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}^{7+}$ が有力視されている¹²⁾) に代わり pH の上昇とともに Al^{3+} が減少する。また、さらに pH が上昇すると水酸化アルミニウム、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ として沈殿する。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ はアルカリ側ではアルミネート (AlO_2^-) として溶解する。土壤溶液中にはこの他に、有機酸や腐植とキレートした Al や SO_4^{2-} や F^- などとイオン対を形成しているものがある。

2) 土壤中における植物有害 Al

上述のごとく、土壤中には種々の形態の Al が存在するが、酸性土壌における生育阻害因子としては Al^{3+} が最も重要と考えられてきた²⁹⁾。 Al^{3+} は土壤溶液に存在するものと土壤コロイドに吸着されているものがあるが、土壤溶液中の Al^{3+} は、土壤コロイドに吸着されている Al^{3+} の 1/100 以下に過ぎない。しかしながら、作物根の生育は、土壤溶液 Al 量と関係し、Al の活動度で表わせば土壌の種類に関係なく、統一的に解釈できるとする考えがある⁴⁾。

米国南東部のワタ栽培では、土壌の種類（カオリナイト質、パーミキュライト質、モンモリロナイト質）によって、酸性障害の限界 pH、限界交換性 Al、限界 Al 飽和度が異なるが、土壤溶液の Al^{3+} の活動度を用いることにより、ワタ根の伸長量は統一的に説明された⁴⁾。また、ブラジルのアルティソルやオキシソルにおけるコーヒーの Al 過剰害では、土壤溶液中の Al^{3+} の活動度が最も優れた指標といわれる⁴⁵⁾。GEOCHEM 等のコンピュータプログラムの開発により、Al 過剰害の土壤診断法として、 Al^{3+} の活動度を重要視する報告が多い^{44,73,74)}。しかし土壤溶液 Al^{3+} は pH 4.5 以下で急激に発現するもので（第 1 図参照）、pH 4.5 以上の Al 害を

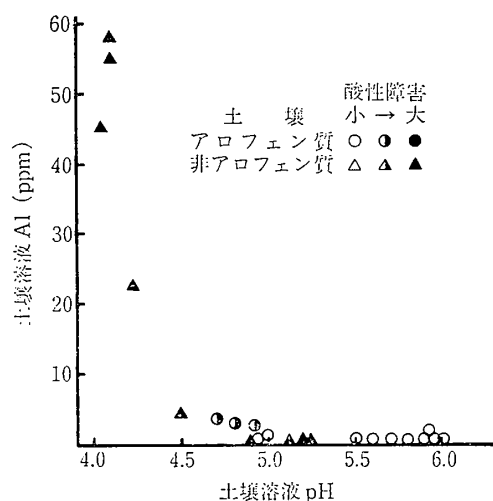
十分説明できないことや土壤溶液中には有機物と結合した毒性の低い Al も存在する等の問題点がある⁶⁾。

第 1 図には黒ボク土における土壤溶液 pH と土壤溶液中の Al 濃度、コロイドの違いとオオムギ根の酸性障害の発現の関係を示した⁶³⁾。土壤溶液 Al は pH 5 以下から発現し、pH 4.5 以下になると急激に増加する。それ故、pH 4.5 以下の Al の過剰害は一義的に土壤溶液 Al^{3+} 量あるいはその活動度で説明されるが、pH 4.5 以上では説明できない。pH 4.5~5.0 では異なる障害の程度が混在しており、pH 5 以上でも強い酸性障害がみられる土壌が 3 試料もある。pH 4.5 以上の Al 害としては、土壤コロイドに吸着している交換性 Al^{3+} ⁶⁰⁾、あるいはこの領域で存在割合が増加する重合塩基性 Al イオンの毒性などが考えられる^{9,10,44,71,72)}。

黒ボク土の酸性障害の限界 pH は非アロフェン質土壌では存在するが、アロフェン質土壌ではみられないこと、作物根の伸長はコロイド組成を問わず交換性 Al 含量と密接に関係していることが明らかにされた⁶⁰⁾。一方、米国南部では酸性土壌に関する精力的な研究が行われ、可溶性 Al は酸性土壌の生育障害に第一義的な要因でなく、また土壤 pH や Ca, Mn もこの地域の酸性障害を説明できないが、土壌の Al 飽和度は最も重要な要因の一つであるとされている²⁾。また、冒頭の“酸性土壌の研究はメリーゴーランドである”といわれるように²⁹⁾、土壌の交換性 Al は酸性障害の土壌診断法として、依然として有効な手段である。

塩基性 Al イオンが Al^{3+} より作物根の伸長をより強く阻害することは、MOORE (1971) によって指摘された³⁹⁾。Al 濃度を一定にしてコムギの水耕栽培を行うと、コムギ根の伸長は pH 4.0 より pH 4.5 で強く阻害された。彼は各 pH における Al の存在形態を理論的に計算し、pH 4.5 における伸長阻害は AlOH^{2+} であるとした。また、BLAMEY ら (1983) は水耕栽培におけるダイズ根の伸長はすべての単量体 Al 総量の活動度と密接に関係すること¹³⁾、ALVA ら (1986) はダイズやアルファルファなどの生育は AlOH^{2+} や $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ などの塩基性 Al イオンの活動度や単量体 Al 総量の活動度と関係が深いとしている⁷⁾。しかしながら、単量体の塩基性 Al イオンは、コムギに対して有害でないとする報告もある³³⁾。

BARTLETT と RIEGO (1972) は、沈殿しなければ重合塩基性 Al イオンは pH 6.5~6.8 でもトウモロコシ根の伸長を著しく阻害することを明らかにした^{9,10)}。その後、コムギ、ダイズ、トマトなど多くの作物の水耕栽培が行われ、重合塩基性 Al イオンは極めて毒性が高いことや少なくともコムギでは Al^{3+} 耐性と重合塩基性 Al



第 1 図 黒ボク土のコロイド組成と土壤溶液 pH、土壤溶液 Al および酸性障害の関係⁶³⁾

イオン耐性は一致しないことが明らかとなった^{44,71,72)}。

また、 Al^{3+} が根の CEC 以上に吸着されないのに対し、重合塩基性 Al イオンは吸着後重合、沈殿が起きるため毒性が高いことが推論された⁷¹⁾。水溶液中における重合塩基性 Al イオンは従来、種々の化学構造が提案されたが Al の 6 重合体、 $(Al_6(OH)_{12}(H_2O)_{12})^{6+}$ と 13 重合体、 $(Al_{13}(OH)_{34}(H_2O)_{12})^{7+}$ が広く認められている。また、重合塩基性 Al イオンの毒性は植物のみならず、根粒菌の活性阻害や酸性湖における魚の成長阻害、人間のアルツハイマー症とも関連するといわれ地球の酸性化問題との関係で注目されている¹²⁾。

土壌中にはこの他に各種有機酸や腐植あるいは SO_4^{2-} 、 F^- 、 PO_4^{3-} と結合した Al が存在するが、上述の Al の形態に比べて毒性は極めて弱いとされている^{10,68)}。

3) 土壌条件と重合塩基性 Al イオン

重合塩基性 Al イオンの毒性は Al^{3+} の 10 倍ともいわれ、土壌中での挙動が注目される。これまでの研究は水耕栽培の結果であり、酸性土壌における生育阻害要因か否か次の点を考慮しながら詳細な検討が必要である。

(1) 重合塩基性 Al イオンの生成環境

重合塩基性 Al イオンは酸性の湖水や河川水に広く存在するといわれるが²⁸⁾、BERTSCH (1987) は中和過程における人工物で、八面体に配位した 12 の Al 原子と $Al(OH)_4^-$ が反応することにより生成するとしており¹¹⁾、アルカリ条件が必要となる。酸性土壌では中和資材による局部的アルカリ化が考えられるが、自然状態の未耕地土壌や酸性下層土ではこのイオンは問題とならないのであろうか。また、中和資材のアルカリの強さや反応速度、中和後の熟成時間によっても生成量が変化するといわれており¹¹⁾、酸性矯正の方法についての検討が必要である。

(2) 土壌コロイドと重合塩基性 Al イオン

重合塩基性 Al イオンは 2:1 型鉱物や陽イオン交換樹脂に不可逆的に吸着し CEC を著しく低下させることが知られている。また、この吸着は Al^{3+} より選択性が高く⁷⁷⁾、スメクタイトを主体とする重粘土土壌では重合塩基性 Al イオンを用いて土壌の物理性の改善が行われている^{34,70)}。改良土壌におけるコムギや水稲は Al 害を示さず物理性の改善で 1 割程度増収するといわれる³⁴⁾。不可逆的吸着の強いこの種の土壌では重合塩基性 Al 害は起きないのだろうか。土壌コロイドに対するこのイオンの吸着は Al^{3+} と同様に、KCl で交換されるという報告もあり⁸⁾、さらに詳細な検討が必要である。また、Si が共存すると、Si と反応し、塩基性アルミノ珪酸イオン、あるいはアロフェンの生成が起こるといわれる²⁸⁾。アロ

フェン質黒ボク土では Al の過剰害が起きないことを考えると⁶⁰⁾、黒ボク土のような Si が豊富な土壌では重合塩基性 Al イオンの生育阻害は問題とならないのであろうか。

4) 土壌の最適 pH

一般に鉱質土壌では酸性改良の目標 pH (H_2O) は 6.5、有機質土壌ではこれより、1 から 1.5 低い値とされている³⁷⁾。酸性土壌の生育阻害要因はさまざまであるが、酸性ヒストソルを除いてはまず Al の過剰害を回避することが重要である。作物の Al 過剰害が発生する pH は、土壌コロイドや導入する作物、共生する微生物、気象条件などによっても異なる²⁶⁾。したがって、このような諸条件を考慮したうえでそれぞれの栽培体系に適した pH を決めることが重要である⁶²⁾。

4. 下層土のエダフォロジー

農業技術の高度化に伴い、畑作における下層土の役割すなわち“下層土のエダフォロジー”が注目されている^{1,24,53)}。作物の養水分吸収は作土のみならず下層土にも大きく依存しており、また根菜類では収穫部である作物根の生育の場として重要である。したがって、なんらかの原因で下層土への根張りが制限されると、作物の生育収量あるいは品質において大きな影響を受けることになる。

作物根の下層土への伸長を妨害する要因としては、養分の過不足、有害物質の蓄積、圧密層の存在、土壌の過乾、過湿などさまざまなものがある⁵³⁾。これらのなかで酸性土壌では、Al の過剰あるいは Ca の不足による伸長阻害が特に重要である。また Al の過剰や Ca の不足はその場における根の伸長を著しく阻害するので下層土そのものの改良対策が必要である。そこで本項では下層土の酸性状態が作物の生育に及ぼす影響と下層酸性土壌における土壌管理、栽培管理について概説する。

1) 下層土の酸性状態と作物の生育

(1) 下層土酸性と作物の生育・水分吸収

土壌の有効水分量は土壌の種類によって異なるが、作土 (0~15 cm) 当たりおおむね土壌水の厚さにして 20~40 mm である⁵³⁾。一作期間中に作物が必要とする土壌水分は数 100 mm にも及び、作土の水分だけでは不十分である。それゆえ、降水量の少ない熱帯や亜熱帯では下層土の酸性状態が作物の生育収量を大きく左右する^{19,50,51)}。また、下層土酸性と土壌乾燥の相互作用が明らかにされ、作物の水分供給源としての下層土の重要性はますます高まっている²²⁾。

下層土酸性と作物の生育、水分吸収については、米国

南東部の海岸平野土壌（アルティソル）について精力的に研究が進められた。本地域の酸性下層土における作物根伸長阻害要因は、石膏、酸化マグネシウム、消石灰を用いた栽培試験から、Al の過剰、Ca の不足あるいはその両者による場合があることが明らかにされた^{3,6)}。このような Al 過剰あるいは Ca 欠乏によって、耐酸性の弱いワタやアルファルファ、トマトなどでは pH 5 以下の強酸性下層土への根張りが制限され、水分ストレスによって著しい収量減や品質の低下が起こるといわれる^{18,19,49)}。同様の水分ストレスによる収量減や品質低下は、ブラジルセラード地帯のオキシソルやアルティソルでも発生しており、CEC の小さいオキシソルでは Al 害より Ca 欠乏が主因といわれる^{50,51)}。

作物の水分ストレスは、乾燥地帯のみならず降水量の多い地域でも容易に発生する。湿潤地域ではもともと作物の根張りが浅いが、下層土酸性が加わると一段と浅根化し、降雨後、数日で激しい水分ストレス状態となる。わが国の黒ボク土ではレッドクローバーやソルガムで^{53,54,57)}、東オーストラリアのポドソル性土壌では各種のマメ科牧草で⁴⁸⁾、カナダのグライ土ではオオムギとアルファルファで³⁸⁾下層土への不十分な根張りによる水分ストレスが発生し、収量減やマメ科牧草の生存年数の短縮が報告されている。

(2) 作物の養分吸収と下層土

諸外国における作物の生育に対する下層土の役割は主として水分供給能に関するものであるが、湿潤気候下のわが国では、降雨による溶脱成分の再吸収の場としての役割が大きい。作物の必要とする養分のなかでは窒素が最も重要であり、酸化状態の畑土壌では大部分が硝酸態として存在する。一般に土壌の陰イオン交換容量は小さく、腐植に富む黒ボク土ではほとんど 0 に等しい⁵⁵⁾。それゆえ、硝酸イオンの土壌中での分布は土壌水の動きに大きく支配される。黒ボク土における降水量と硝酸イオンの移動速度の関係をみると、蒸発散量の少ない秋期では、雨量 100 mm 当たり 15 cm 以上⁵⁹⁾、蒸発散量の多い夏期は、雨量 100 mm 当たり 10 cm 程度である⁶⁴⁾。梅雨や秋雨、台風シーズンをもつわが国では施肥窒素の下層土への移動は避けられず、下層土の酸性状態が作物の生育、窒素吸収量に大きく関係する。

第 2 表には黒ボク土における下層土の酸性状態とオオムギの生育、窒素吸収の関係を示した⁵⁹⁾。強酸性の川渡区では、耐酸性の弱いオオムギは作土と下層土の境界付近で根の伸長を停止するが、弱酸性の蔵王区では下層土深くまで伸長している。このような下層土への根張りや降雨による施肥窒素の移動を反映し子実収量と基肥窒素の利用率は、川渡区で m^2 当たりそれぞれ 397 g, 6.5%, 蔵王区では 694 g, 48.2% と著しい違いがみられる。下層土から吸収した窒素量を両区の吸収量の差から計算すると、全吸収窒素の 5 割、基肥窒素の 9 割、追肥窒素の 2 割、土壌窒素の 3 割が下層土から吸収されている。同様な結果は梅雨を経過するソルガム栽培⁶⁴⁾、秋雨を経過するアルファルファ栽培においても実証され^{56,58)}、湿潤気候下の畑作における下層土の重要性が指摘されている。

(3) 作物根の生育環境としての下層土

収穫部位が下層土にも及ぶ根菜類は、耐酸性の程度が直接、収量や品質に関係する⁶⁴⁾。耐酸性の弱いニンジンやゴボウは、下層土が強酸性な土壌では先端の肥大、分岐が起こり、商品価値が著しく低下する。これに対して、耐酸性の強いダイコンやナガイモはいずれの土壌でも良好な生育を示す。物理性に優れ、弱酸性の黒ボク土の多い青森県は東北一の根菜生産地である⁵³⁾。

草地においては牧草の栄養価、吸肥特性、窒素固定の利用を考慮し、マメ科牧草とイネ科牧草の混播栽培が重要である。しかしながら、強酸性黒ボク土の多い東北地方では、耐酸性の弱いマメ科牧草は下層土への根張りが制限され、衰退することが明らかにされている^{57,58)}。

2) 下層土強酸性土壌における作物栽培戦略

食料増産を必要とする発展途上国には、強酸性下層土をもつアルティソルやオキシソルなどが広く分布する。これら土壌における栽培管理としては、機械力による下層土の改良、石膏や有機物の作土からの溶脱を利用した化学的改良⁶¹⁾、耐酸性の作物あるいは品種の導入、溶脱の少ない緩効性肥料の利用などが上げられる⁵⁵⁾。

(1) 下層土の機械力による改良法

下層土の機械力による改良法としては石灰の犁底への施用、下層土までの混和あるいは注入などがある。

下層土の石灰中和を均一に行うことは極めて難しい。

第 2 表 下層土酸性の異なる土壌におけるオオムギの生育と窒素吸収⁵⁹⁾

下層土	全乾物重 (g/m^2)	茎 数 (本/ m^2)	稈長 (cm)	子実収量 (g/m^2)	窒素吸収量 (g/m^2)				施肥窒素利用率(%)	
					全吸収量	基肥由来	追肥由来	土壌由来	基肥	追肥
川渡	850	523	70	397	6.39	0.65	3.02	2.72	6.5	75.4
蔵王	1533	669	84	694	11.93	4.82	3.25	3.86	48.2	81.3

ワタ根が下層土で正常な根張りを行うには石灰混和層間が 2.2 cm 以内で全体の 2/3 が中和される必要があり⁴⁶⁾、また、コムギの乾物収量は縦方向に混和層を並べた場合、体積割合で 30% 混和されたとき最大となることが示された³¹⁾。

作物の収量は石灰中和層の深さと土壌条件、気象条件、作目によっても異なる。同じアルティソルでも米国南東部のワタやトウモロコシ栽培では、30 cm までの改良で十分であり⁴⁷⁾、プエルトリコのダイズやトウモロコシは、少なくとも 60 cm までの改良に直線的に増収する⁴⁷⁾。一方、下層土への物理的石灰資材の投入は、混和の不均一性、肥沃性に劣る下層土の作土への混入、多大なエネルギーと労力が必要等のさまざまな問題がある。したがって土壌の保水性、気象条件、作物の要水量などを考慮しながら必要最小限の深さの改良に止めるべきである。

(2) 作土からの化学成分の溶脱による改良

下層土における作物根の伸長阻害は、作土に施用した石灰資材、キレート物質などの化学成分の溶脱によって回避することが可能である。作土における有機物の大量施用は、下層土の交換性 Al や pH を低下させることが知られており、EDTA によるモデル試験で Al, Fe, Ca, Mg の溶脱過程が示された²³⁾。また、有機酸は Al とキレート結合することにより Al の毒性を弱めるが、解毒の程度により、強い（クエン酸、シュウ酸、酒石酸）、中庸（リンゴ酸、サルチル酸、マロン酸）、弱い（酪酸、酢酸、ギ酸、フタル酸）に分けられる²⁷⁾。しかし、有機物の施用は量的に制限があり広大な面積の改良は難しい。

近年、石膏あるいはリン酸石膏 (PG) の作土施用による下層土改良が注目されている^{45,51,61)}。下層土改良資材としての石膏の効果は (1) 溶解度が炭酸カルシウムより大きく、塩化カルシウムより小さいので溶脱が中庸で下層土に留まり、Ca 源としても働く、(2) 下層土のイオン濃度を高め、Al の活動度を下げる、(3) AlSO_4^+ の形成による弱毒化、(4) 配位子交換による pH の上昇などがあり、PG はこれらの効果の他に (5) F と Al の複合体形成による弱毒化、(6) リン酸と Al の複合体形成による弱毒化あるいはリン酸栄養の改善がある。

石膏あるいは PG による下層土改良は、経済性があり、CEC の小さいアルティソルやオキシソルで積極的に導入され、ダイズやトウモロコシなど 12 作物で増収効果が認められている⁶¹⁾。また、下層土改良の結果、植物体の生長量が増加し、リン酸欠乏が顕在化するので PG の施用あるいは石膏とリン酸資材の併用が必要である。

(3) 耐酸性作物あるいは品種の導入

強酸性土壌における栽培戦略として、多くの研究者が耐酸性作物あるいは品種の導入が、最も理想的手段と考え、マメ科牧草やワタ、コムギ、オオムギなどで耐性種の選抜を試みている。しかしながら、実用化となると多くの問題があり、疑問視する向きもある²⁰⁾。

(4) 下層土酸性と施肥管理

下層土の酸性状態は、窒素の形態や石灰資材の施用量によっても大きく変化する。大量の硝安と石灰の併用や大量の硝酸ナトリウムや硝酸石灰の施用は作物の選択的アニオン吸収により、下層土の pH を上昇させる。しかし、この方法では、パーミューダグラスの場合、N として 450 kg/ha が限界であり、また、発展途上国では経済的に不可能である²¹⁾。

一方、湿潤地域においては、基肥窒素の分施あるいは緩効性窒素肥料の利用によって、降雨による施肥窒素の溶脱を防ぎ、作物の生育・窒素吸収を著しく改善できる⁵⁵⁾。近年開発されたポリオレフィン系被覆尿素は、その溶出が主として土壌温度に依存し、施肥肥料中に酸根をもたないので強酸性土壌における窒素の施用形態として期待されている。

本稿を終わるに当たり、酸性土壌に対する関心が再び高まり、第 4 回“低 pH における植物と土壌の相互作用”に関する国際会議が、伝統あるわが国において開催されることを期待します。

文 献

- 1) ADAMS, F.: Alleviating chemical toxicity: Liming acid soils; in *Modifying the root environment to reduce crop stress*, ed. G. F. ARKIN and H. M. TAYLOR, p. 269~301, Am. Soc. Agric. Eng., Michigan, U. S. A. (1981)
- 2) ADAMS, F.: Crop response to lime in the southern United State; in *Soil acidity and liming*, ed. F. ADAMS, p. 211~265, Am. Soc. Agron., Madison, Wis., U. S. A. (1984)
- 3) ADAMS, F. and HATHCOCK, P. J.: Aluminum toxicity and calcium deficiency in acid subsoil horizons of two coastal plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1305~1309 (1984)
- 4) ADAMS, F. and LUND, Z. F.: Effect of chemical activity of soil solution aluminum on cotton root penetration of acid subsoil. *Soil Sci.*, 101, 193~198 (1966)
- 5) ADAMS, F. and MARTIN, J. B.: Liming effects on nitrogen use and efficiency; in *Nitrogen in crop production*, ed. R. D. HAUKE, p. 417~426, Am. Soc. Agron., Madison, Wis., U. S. A. (1984)
- 6) ADAMS, F. and MOORE, B. L.: Chemical factors affecting root growth in subsoil horizons of coastal

- plain soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 99~102 (1983)
- 7) ALVA, A. K., EDWARDS, D. G., ASHER, C. J. and BLAMEY, F. P. C.: Effects of phosphorus/aluminum molar ratio and calcium concentration on plant response to aluminum toxicity. *ibid.*, 50, 133~137, 959~962 (1986)
 - 8) BACHE, B. W. and SHARP, O.: Soluble polymeric hydroxy-aluminum ions in acid soils. *J. Soil Sci.*, 27, 167~174 (1976)
 - 9) BARTLETT, R. J. and RIEGO, D. C.: Toxicity of hydroxy aluminum in relation to pH and phosphorus. *Soil Sci.*, 114, 194~200 (1972)
 - 10) BARTLETT, R. J. and RIEGO, D. C.: Effect of chelation on the toxicity of aluminum. *Plant Soil*, 37, 419~423 (1972)
 - 11) BERTSCH, P. M.: Condition for Al_{13} polymer formation in partially neutralized aluminum solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51, 825~828 (1987)
 - 12) BERTSCH, P. M.: The hydrolytic products of aluminum and their biological significance. *Environ. Geochem. Health*, 12, 7~14 (1990)
 - 13) BLAMEY, F. R. C., EDWARDS, D. G. and ASHER, C. J.: Effects of aluminum, OH:Al and P:Al molar ratios, and ionic strength on soybean root elongation in solution culture. *Soil Sci.*, 136, 197~207 (1983)
 - 14) BURMESTER, C. H., ADAMS, J. F. and ODOM, J. W.: Response of soybean to lime and molybdenum on Ultisols in northern Alabama. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1391~1394 (1988)
 - 15) CLINE, G. R. and KAUL, K.: Inhibitory effects of acidified soil on soybean/*Bradyrhizobium* symbiosis. *Plant Soil*, 127, 243~249 (1990)
 - 16) DODD, J. C., ARIAS, I., KOOMEN, I. and HAYMAN, D. S.: The management of population of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in acid-infertile soil of a savanna ecosystem. *ibid.*, 122, 229~240 (1990)
 - 17) DOSS, B. D., DUMAS, W. T. and LUND, Z. F.: Depth of lime incorporation for correction of subsoil acidity. *Agron. J.*, 71, 541~544 (1979)
 - 18) DOSS, B. D., EVANS, C. E. and TURNER, J. L.: Influence of subsoil acidity on tomato yield and fruit size. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 102, 643~645 (1977)
 - 19) DOSS, B. D. and LUND, Z. F.: Subsoil pH effects on growth and yield of cotton. *Agron. J.*, 67, 193~196 (1975)
 - 20) FOX, R. F.: Soil with variable charge: Agronomic and fertility aspects; in Soil with variable charge, ed. B. K. G. THENG, p. 195~224, Soil Bureau DSIR, Wellington, New Zealand (1980)
 - 21) FOY, C. D.: Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicity in acid soil; in Soil acidity and liming, ed. F. ADAMS, p. 57~97, Am. Soc. Agron., Madison, Wis., U. S. A. (1984)
 - 22) GOLDMAN, I. L., CARTER, T. E., Jr. and PATTERSON, R. P.: A detrimental interaction of subsoil aluminum and drought stress on the leaf water status of soybean. *Agron. J.*, 81, 461~463 (1989)
 - 23) HERN, J. L., MENSER, H. A., SIDLE, R. C. and STAALEY, T. E.: Effect of surface-applied lime and EDTA on subsoil acidity and aluminum. *Soil Sci.*, 145, 52~57 (1988)
 - 24) HEYNES, R. J.: Lime and phosphate in the soil-plant system. *Adv. Agron.*, 37, 249~313 (1984)
 - 25) 宝示戸雅之・西宗 昭: 経年的酸性化草地における牧草生育と降水量の関係, 土肥誌, 61, 48~53 (1990)
 - 26) 宝示戸雅之・能代昌雄: アルミニウム存在下における牧草のリン吸収, 同上, 61, 598~605 (1990)
 - 27) HUE, N. V., CRADDOCK, G. R. and ADAMS, F.: Effect of organic acid on aluminum toxicity in subsoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 28~34 (1986)
 - 28) INOUE, K. and YOSHIDA, M.: Composition and behavior of aluminum ions and colloidal aluminosilicates in acidified terrestrial waters. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 36, 461~468 (1990)
 - 29) JENNY, H.: Reflection on the soil acidity merrygo-round. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25, 428~432 (1961)
 - 30) KASUYA, M. C. M., MUCHOVEJ, R. M. C. and MUCHOVEJ, J. J.: Influence of aluminum on *in vitro* formation of *Pinus caribaea* mycorrhizae. *Plant Soil*, 124, 73~77 (1990)
 - 31) KAUFFMAN, M. D. and GARDNER, E. H.: Segmental liming of soil and its effect on the growth of wheat. *Agron. J.*, 70, 331~336 (1978)
 - 32) 木村 武・倉島健次: 牧草のカルシウムとマグネシウム吸収に及ぼす土壌中の塩基の相互作用, 土肥誌, 54, 281~287 (1983)
 - 33) KINRAIDE, T. B. and PARKER, D. R.: Assessing the phytotoxicity of mononuclear hydroxy-aluminum. *Plant Cell Environ.*, 12, 479~487 (1989)
 - 34) 古賀 汎・白石勝恵: 土壌物理性改良へのヒドロキシア ルミニウムの利用, 土肥誌, 56, 68~70 (1985)
 - 35) 駒村研三: 果樹等における要素過剰の実態, 同上, 61, 202~208 (1990)
 - 36) 小西茂毅・宮本倉文: 茶樹の生育に対するアルミニウムの促進効果とそのリン酸吸収特性, 同上, 55, 29~35 (1984)
 - 37) LUCAS, R. E. and DAVIS, J. F.: Relationships between pH values of organic soils and availabilities of 12 plant nutrients. *Soil Sci.*, 92, 177~182 (1961)
 - 38) MCKENZIE, R. C. and NYBORG, M.: Influence of subsoil acidity on root development and crop growth in soils of Alberta and Northern British Columbia. *Can. J. Soil Sci.*, 64, 681~697 (1984)
 - 39) MOORE, D. P.: Physiological effects of pH on roots; in The plant root and its environment, ed. E. W. CARSON, p. 135~151, University Press of Virginia, Charlottesville, U. S. A. (1974)
 - 40) MOORE, P. A., Jr. and PATRICK, W. H., Jr.: Manganese availability and uptake by rice in acid sulfate soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53, 104~109, 471~476, 816~822 (1989)
 - 41) NAIDU, R., TILLMAN, R. W., SYERS, J. K. and KIRKMAN, J. H.: Lime-aluminium-phosphorus interaction and the growth of *Leucaena leucocephala*. *Plant Soil*, 126, 1~8 (1990)
 - 42) 岡川長郎: 世界における酸性土壌の分布と利用状態, 酸性土壌とその農業利用, 田中 明編, p. 21~49, 博友社, 東京 (1984)
 - 43) 大塚雄雄・井上隆弘: 世界の土壌資源, 科学, 58, 611~617 (1988)

- 44) PARKER, D. R., KINRAIDE, T. B. and ZELAZNY, L. W.: Aluminum speciation and phytotoxicity in dilute hydroxy-aluminum solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 438~444 (1988); 53, 789~796 (1989)
- 45) PAVAN, M. A., BINGHAM, F. T. and PRATT, P. F.: Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 , and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *ibid.*, 46, 1201~1207 (1982)
- 46) PEARSON, R. W., CHILDS, J. and LUND, Z. F.: Uniformity of limestone mixing in acid subsoil as a factor in cotton root penetration. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37, 727~732 (1973)
- 47) PEREZ-ESCOLAR, R., LUGO-LOPEZ, M. A. and SCOTT, T. W.: Effect of depth of lime application on yield and foliar composition of soybeans grown on a typical Ultisol of Puerto Rico. *Agric. Univ. Puerto Rico*, 3, 224~231 (1978)
- 48) PINKERTON, A. and 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)
- 49) RECHCIGL, J. E., RENEAU, R. B., Jr. and STARNER, D. E.: Effect of subsurface amendments and irrigation on alfalfa growth. *Agron. J.*, 77, 72~75 (1985)
- 50) RITCHEY, K. D.: Calcium deficiency in clayey B-horizons of Savanna Oxisols. *Soil Sci.*, 133, 378~382 (1982)
- 51) RITCHEY, K. D., SOUZA, D. M. G., LOBATO, E. and CORREA, O.: Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savanna Oxisol. *Agron. J.*, 72, 40~44 (1980)
- 52) ROBSON, A. D. and ABBOTT, L. K.: The effect of soil acidity on microbial activity in soils; in Soil acidity and plant growth, ed. A. D. ROBSON, p. 139~165, Academic Press, Australia, NSW (1989)
- 53) 三枝正彦：下層土と作物の生育，下層土のエダフォーメーション，化学と生物，27, 712~720 (1989)
- 54) SAIGUSA, M.: Agronomy of Aludands in north-eastern Japan. Proc. 9th Int. Soil Classif. Workshop, p. 593~602 (1988)
- 55) SAIGUSA, M., MATSUYAMA, N., HONNA, T. and ABE, T.: Chemistry and fertility of acid Andisols with special reference to subsoil acidity; in Plant-soil interaction at low pH, ed. R. J. WRIGHT and V. C. BALIGAR, p. 73~80, Kluwer Academic Publishers, Netherland (1991)
- 56) 三枝正彦・庄子貞雄：黒ボク土下層の酸性がアルファルファとオーチャードグラスの施肥窒素吸収・生育収量におよぼす影響，日草誌，30, 255~263 (1984)
- 57) 三枝正彦・庄子貞雄・阿部篤郎：耐酸性の異なるマメ科牧草とオーチャードグラスの混播栽培，土肥誌，62, 7~13 (1991)
- 58) 三枝正彦・庄子貞雄・後藤 純：黒ボク土下層の酸性が混播牧草の生育収量および草種構成におよぼす影響，日草誌，31, 234~240 (1985)
- 59) 三枝正彦・庄子貞雄・酒井 博：黒ボク土下層の酸性がムギ類の施肥窒素吸収と生育収量におよぼす影響，土肥誌，54, 460~466 (1983)
- 60) SAIGUSA, M., SHOJI, S. and TAKAHASHI, T.: Plant root growth in acid Andosols from northeastern Japan. *Soil Sci.*, 130, 242~250 (1980)
- 61) SHAINBERG, I., SUMNER, M. E., MILLER, W. P., FARINA, M. P., PAVAN, M. A. and FEY, M. V.: Use of gypsum on soils: A review. *Adv. Soil Sci.*, 9, 1~111 (1989)
- 62) 下野勝昭：多湿黒ボク土の土壌 pH が畑作の生育，収量に及ぼす影響，土肥誌，61, 8~15 (1990)
- 63) 庄子貞雄・西谷光生・三枝正彦：植物の Al 過剰障害の原因としての黒ボク土の交換性 Al について，土肥要旨集，33, 252 (1987)
- 64) 庄子貞雄・三枝正彦・後藤 純：黒ボク土下層の酸性状態とソルガムの窒素吸収および生育について，土肥誌，57, 264~271 (1986)
- 65) TADANO, T.: Nutritional factors limiting crop growth in problem soils and crop tolerance to them. Proc. Int. Semin. Environ. Factor Agric. Prod., Thailand, p. 329~347 (1985)
- 66) 但野利秋・安藤忠男：酸性土壌の作物生育阻害要因とそれらに対する作物の耐性，酸性土壌とその農業利用，田中 明編，p. 21~49，博友社，東京 (1984)
- 67) 田中 明・榎田木世子：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)
- 68) TANAKA, A., TADANO, T., YAMAMOTO, K. and KANAMURA, N.: Comparison of toxicity to plants among Al^{3+} , AlSO_4^+ , and Al-F complex ions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 33, 43~55 (1987)
- 69) 田中 明・但野利秋・吉田志郎：Al-P 系水耕液における作物の生育に対する pH の影響，土肥誌，52, 475~480 (1981)
- 70) WADA, K., TSUMORI, Y., NITAWAKI, Y. and EGASIRA, K.: Effects of hydroxy-aluminum on flocculation and permeability of smectite clays. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 29, 305~312, 313~322 (1983)
- 71) WAGATSUMA, T. and EZOE, Y.: Effect of pH on ionic species of aluminum in medium and on aluminum toxicity under solution culture. *ibid.*, 31, 547~561 (1985)
- 72) WAGATSUMA, T. and KANEKA, M.: High toxicity of hydroxy-aluminum polymer ions to plant roots. *ibid.*, 33, 57~67 (1987)
- 73) WRIGHT, R. J., BALIGAR, V. C. and AHLRICHS, J. L.: The influence of extractable and soil solution aluminum on root growth of wheat seedlings. *Soil Sci.*, 148, 293~302 (1989)
- 74) WRIGHT, R. J., BALIGAR, V. C. and WRIGHT, S. F.: Estimation of phytotoxic aluminum in soil solution using three spectrophotometric methods. *ibid.*, 144, 224~232 (1987)
- 75) 齋 益東・木村真人・和田秀徳・高井康雄：各種環境条件が生物的窒素固定におよぼす影響，土肥誌，55, 460~464 (1984)
- 76) 吉田 稔：土壌酸性とその測定をめぐる諸問題，同上，50, 171~180 (1979)
- 77) 吉田 稔・川畑洋子：塩基性アルミニウムイオンの形態とカチオン交換樹脂による吸着，同上，41, 449~452 (1970)