

水田土壤の硬度と水稻生育

滝 嶋 康 夫

はじめに

水稻の生育基盤として、水田土壤の適性を「土の硬さ」の面からながめると、水田の造成、区画拡大やその後の機械作業には「硬い」ことが要求されるが、水稻生育そのものに対しては「軟い」ことが必要とされる。つまり土質工学、土壤化学や作物生理の面から、土壤適性を総合的に判定しなければならない。たとえば、「水田区画拡大の難易」自体は土質工学的立場から主として評価されるが、これに続いて「水稻生産の障害」⁴³⁾⁵⁰⁾を除去、改善するための対策を確立することが望まれる。このことは基盤整備工事を例にとれば、事前に土壤の層位的な把握に基づいた工事設計の重要性を指摘すると同時に、事後の農作業効率の向上、生産力増強について土壤肥料分野における新たな研究の視角を提供しつつあるといえよう。筆者がここに「土壤の硬さ」をとりあげた目的は、もっぱら水稻の根系発達への阻害因子として水稻生産への影響を明らかにすることで、土壤の生産力や生産性的意義の一部に止まるにすぎない。この研究のねらいは次のようなものであった。

- 1) 圧縮による土壤のち密化状況を土壤類型と関連して調査する。
- 2) 「土壤の硬さ」の限界を測定数値を用いて明らかにする。
- 3) またこの影響を土壤生成に基づく自然土層と人工的な機械耕うんによるち密層とについて比較する。
- 4) 得られた成績に基づいて、ち密層と水田土壤の機械化適性の関係を検討する。

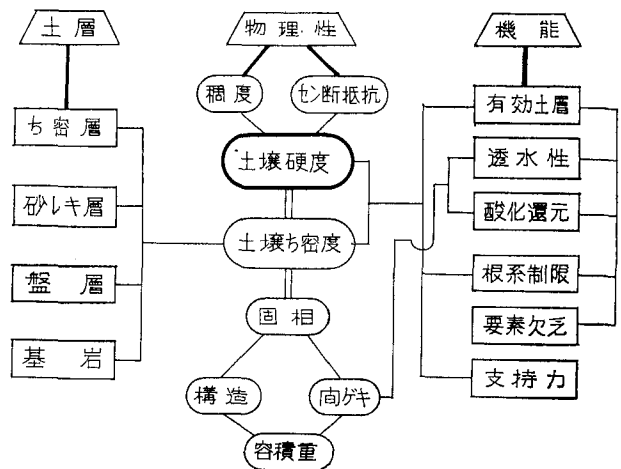
以下「土壤の硬さ」を土壤硬度として表わすことにするが、これはわが国の土壤調査で土層のち密度を表わす指標として用いられ、かつ多くの現地データが集積されている山中式土壤硬度計¹⁶⁾により計測される数値である。

そこでまず、土壤硬度が他の物理的諸元および土壤の諸性質と、どのような関係にあるかを考えておく必要がある。図一はこれらの関

係を模式化したものである。まず、山中は土壤硬度を土壤ち密度(soil compactability)の指標としたが、これは氏の理想土壤の研究⁴³⁾に示す如く、土壤粒子の配列の粗密が「土壤の硬さ」に直接的な関係をもつと考えたからである。土壤ち密度は、土壤の立体的構成要素として土壤に特異的である構造、間ゲキと相関する固相割合と同意義的な表現であると考えられ、また土壤の容積重とも密接な関係をもつとみなされよう。

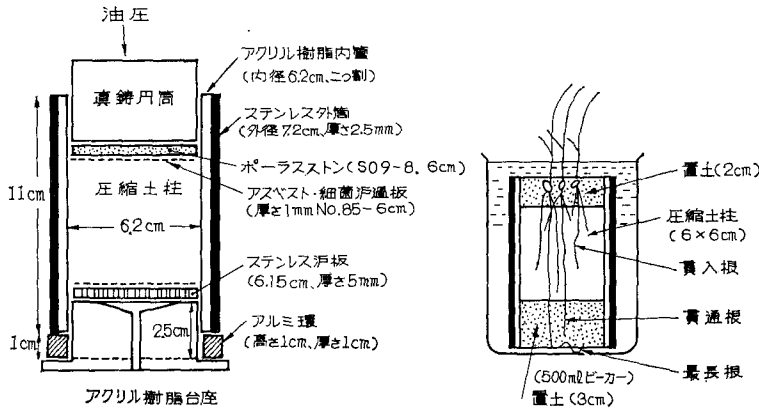
また土質力学の立場からみると「土壤の硬さ」は稠度(consistency)やせん断抵抗(shear resistance)によって代表される。前者の数値は ATTERBERG 限界(液性、塑性、収縮限界など)により、後者は3軸圧縮試験の強度等によって求められる。これらの数値と土壤硬度の示す数値との関係を土質力学的に明らかにすることは、本研究の直接のねらいではないが、土壤硬度計の原理的な問題としてその解明が求められよう。

さて、図式から知られるように、土壤ち密度は根系発達への直接的な制限因子としてみた場合に、いわゆるち密層のほか、密に堆積した砂レキ層、土壤粒子が粘土、鉄、アルミ、石灰などで半固結した硬盤層、あるいは基岩そのものが対象としてあげられる。そしてこれらの制限土層が作物生育におよぼす機能的な面としては、それ自身根系発達の場合となり得ない(根系制限)、また有効



図一 土壤硬度を中心とした物理性と機能

* 農業技術研究所



図一 2 土柱調製容器(左)と根系実験状況(右)

な土層量を制限することによって養分吸収に直接的な影響を与える。これらの制限層は多くの場合透水性を低下させるから土壌の還元化を助長し、酸素供給を制限して間接的に根系の発達、吸収機能を妨害するとみられる。このような作物に対する機能阻害とは別に、機械作業における土壌支持力 (bearing power) の増大に対して有利な存在であることはすでに指摘したとおりである。

ところで、土壌硬度の直接的意義としての根系発達に対する限界域をどのように考えたらよいであろうか。畑土壌生産力に関する研究協議会²⁰⁾では、土壌調査における根系観察と硬度の関係から指標硬度29以上(層厚 10 cm 以上)の密層を根の伸長を許さぬものとして、有効土層から除いている。この限界値がそのまま現在も土壌の生産力的評価(生産力可能性分級)に利用されていることは、土壌調査の計測化とその応用の好例といえるべきであろう。しかしながら、硬度29という数値はまさにいかなる根も伸長できない条件であるように思われる。一つには有効土層の定義がかなりきびしい限界をとっているためであるが、土壌断面の観察によればさらに弱い硬度範囲にわたって根系発達に種々の差異が認められている。本研究は土壌の種類、性質とくに土性、水分との関係において土壌硬度の影響をどのように区分すべきかに重点をおいた。「大型機械化に伴う水田土壌基盤整備の総合的研究」の一環として行ったもので、当然水稻を対象作物としたが、一般畑作物、牧草、果樹などについての比較研究も今後必要であろう。

1. 圧縮による土壌硬度の増大

供試土壌は水田土壌分類¹⁹⁾で泥炭、黒泥、グライ、灰色、灰褐色、黒色および黄褐色土壌にわたり、その中で

土性の差がつくように採取した。後の根系実験に供試することも考えて、図一 2 (左) に示す容器で圧縮実験を行った。このような core の作り方には色々の型があり³⁾⁴⁾⁵⁾¹⁾ また硬度測定にも針型²⁸⁾、コーン型³⁾³⁹⁾ やシリンダー型³⁾³⁹⁾ を圧入する方法がある。とくに BARLEY ら³⁾ の小型計器による自動記録法は将来この種の実験に参考となる。

土壌の圧縮特性については、土質力学的な測定法があるわけであるが、ここでは土壌硬度と容

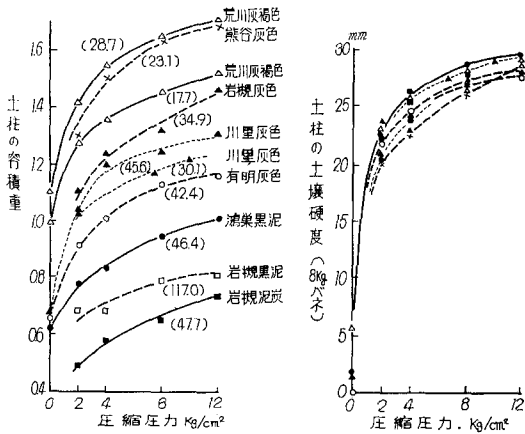
積重の増大に焦点を合わせてみた。硬度測定には同じく山中氏が試作された 2kg バネの硬度計が、このような小容積の供試体には好都合であった。この硬度計は従来の 8 kg バネに比して、コーンの長さ、底辺の径が2分の1で、圧入したとき指標目盛 (20mm まで) も丁度2分の1に出るから、測定値を2倍すれば正規の 8 kg バネによる測定値に換算できる。

図一 3 は沖積土壌を圧縮した例を示したもので、土壌硬度は圧縮圧力に伴ってほぼ一様に増大して指標目盛で 28—30 に集中するが、容積重は泥炭、黒泥土壌が小さく、全体として土壌類型毎に異なる。容積重のほか、土壌毎に真比重が違うので三相分布の割合もまた区々に変化する。このことは土壌硬度が土壌間の特性に関係なく密性を表示できるという利点を示している。ところで、土壌硬度は水分状態と密接な関係があるので、どのような条件下で最も硬くなるかを調べてみた。その結果、土壌の最大硬度は突固めの試験において最大乾燥密度を示す含水比より大きい水分状態で圧縮して得られる。この水分状態は水が多少しぼり出される半湿状態に相当した。つまり圧密状態が起る条件ということができる。次に、根系実験のために調整された土柱をタン水状態にすると、その硬度は 20—80% も低下する。このもどりはとくに膨潤性の土壌を除いてタン水による水分増加によるものである。一般に圧縮時の硬度が低いほど大きい。また砂質土壌はタン水による硬度の低下が大きい。

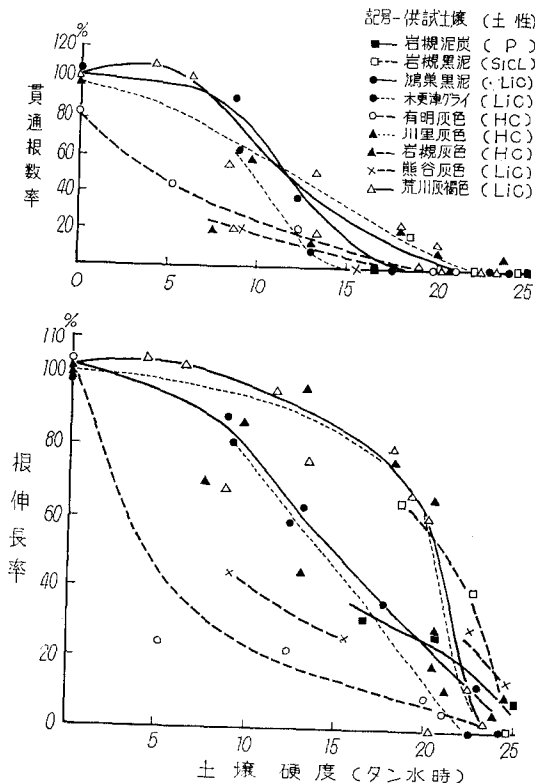
2. 土壌硬度と根系の発達

このもどった硬度の状態で、土柱の上に置土をし、これに水稻の発芽種子をまいて、根が土柱の中へどのように伸びるかを実験した(図一 2 (右)参照)。この結果を同

じく沖積土壌について例示したのが図一4である。そのほか、粗砂混入、土塊の大きさの影響、さらに人工土柱に対する自然土柱での成績比較を行った結果をまとめると、次のようになった。



図一3 土壌の圧縮による容積重および硬度の増大 (左図の()内は圧縮直前の土壌含水比を示す)



図一4 土壌硬度と幼植物根系の発達—沖積世堆積物—

1. 圧縮土柱における根系の発達と土壌硬度

1) 根の土柱への貫入および伸長は土壌硬度と密接な関係がみとめられる。根の生育阻害の始まる硬度は大別して沖積土壌で10—15、洪積土壌で5—10、またほとんど根の生育の停止する硬度は前者で23前後、後者で20前後であった。砂質土壌およびタン水下で土壌還元の著しい土壌ではより低い硬度において阻害があらわれた。

2) 粗砂の混入は根の伸長をより強く阻害したが、25%のレキの混合はほとんど影響を与えない。

3) 沖積粘土質土壌の土塊が大きいときは(5—20 mm)、根伸長に対する阻害が大きかった。

2. 圧縮土柱における根系の発達と土壌物理性

土壌硬度以外の物理性、すなわち容積重および3相分布との関係は次のとおりである。

1) 土壌の種類により圧縮土柱の容積重は著しく異なるので、根生育の阻害に対する限界値は区々であることが認められた。

2) 圧縮土柱の固相率、したがって間ゲキ率も土壌の特性を反映しているので、根生育に対し一定値が認められない。

3) 気相率はかなり小さいが、還元化の著しい土壌を除いて酸素の供給制限による阻害的影響は弱いものと考察された。

4) 液相率は40—60%と大きい、有効水分域(pF 2~4)からみて、とくに強圧縮の試料ではある程度の悪影響の関与が推定された。

3. 自然土柱における根系の発達と土壌硬度

各種土壌の自然土柱を打ち込み法により金属筒に採取し、上記と同じ根系実験を行った結果は次のとおりである。

1) 根生育と土壌硬度との関係については前記圧縮土柱と同様の傾向がある。

2) 土壌構造ないし割れ目の発達した試料では、一般に圧縮土柱よりも阻害の影響の弱いことが認められる。

以上の結論として、根系の発達に土壌硬度が直接的な制限因子であることが明らかにされたといえよう³⁾¹²⁾¹³⁾³⁹⁾⁴⁰⁾⁴²⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾⁵¹⁾。従来の研究はほとんど畑作物の根系問題に集中されており、土壌の気相条件⁴⁾⁸⁾¹²⁾²⁵⁾⁴⁶⁾、有効水分—pF⁴¹⁾、土壌構造⁷⁾¹⁰⁾⁴⁶⁾などの影響が論議されている。これらについては別の機会に述べてみたい。要するに、タン水土壌中において水稲根が伸長できるための物理的条件としては次の2点があげられる。

1) 土壌中に根の太さ(直径)より大きい径をもち、しかも連続した空間(間ゲキ)があること¹⁾¹⁷⁾⁴⁵⁾。

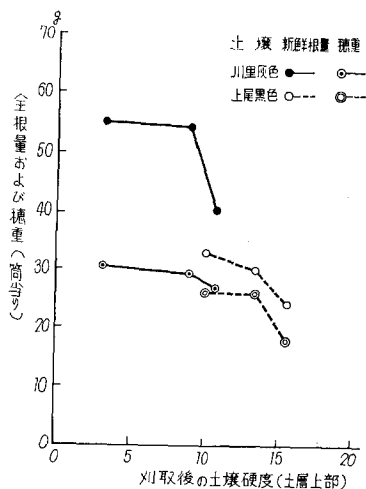
2) この空間がより狭いか、またはほとんどない時

は、土壌粒子の集合が疎であるか、摩擦抵抗が小さく根の伸長圧（膨圧）がこれより大きいこと。

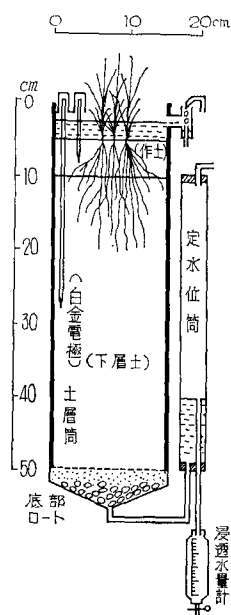
1)には下層土でよくみられるように、土壌の構造面、割れ目、根孔などに沿って根が伸びる現象も含まれる。2)の根の伸長圧とはどの位であろうか。沖積の粘土質土壌だと、根は土塊を貫いて伸びられるが、砂質土壌や火山灰土壌ではもっぱら間ゲキを求めて伸びることが観察される。火山灰土壌の場合は土壌粒子がローム層のように密なアグリゲートを形成していることに加え²⁹⁾、土壌自体の不良化学性の影響があるようである。強還元を起す有機質の湿田土壌の場合も同じである³⁰⁾。いずれにせよ、毛管間ゲキが主体を占めている水田土壌中で径0.1~1.0mmの水稲根が伸びるためには能動的に進路を開拓しなければならない。この問題については畑作物を用いた TARDORら³⁶⁾³⁹⁾、ほか数研究者²³⁾¹¹⁾²⁶⁾の模型実験の結果が引用される。ここに BARLEY²⁾らの実験を紹介すれば次のとおりである。すなわち容器として三軸の test cell を使い、ガラス玉の層中にトウモロコシの根端を入れて、全体を透析膜でおおい、外から圧力を加える。この方法で根の伸長圧を求めると、根の伸びられない限界からして 5 kg/cm²程度と考えられた。この test cell は通気と水分補給に周到な注意がはらわれたことはいうまでもない。氏はいわゆる根圧は 10kg/cm² を出ることあるまいとした。筆者らの得た限界の硬度 23 は、丁度 10kg/cm² の抵抗値にあたるので、水稲根もほぼこの辺が伸長力の最大値とみてよからう。

3. 土壌硬度と水稲の生育、収量

土壌のち密化による根系の発達障害は、実際の水稲生



図一六 人工土層の硬度と全根量および穂重 (1965)



図一五 土層実験装置の内容

育や収量にどの程度影響するであろうか。この関係を知るため、突固め法により圧縮した人工土層および現地水田に金属筒を打込み採取した自然土層²⁷⁾を用い、土層実験を行った。この実験は径16.5cm、高さ50cmの塩化ビニール製の土層筒を6個ずつセットして、給排水装置、浸透水量計をつけ水稲を移植栽培するものである。図一5はこの装置を模式的に示したもので、人工土層の成績の一部を例示したのが図一6である。自然土層は泥炭から黄褐色土壌まで用いた。得られた成績は次のように要約される。

1) 人工土層では沖積灰色粘質土壌と火山灰黄褐色壤質

土壌を供試した。土壌硬度の増大に伴って土層中の根量が減少し、水稲の生育、収量も最高30%減少した。根系の発達阻害の関係は圧縮土柱による成績とよく一致した。

2) 自然土層では泥炭土壌から、強グライ、灰色、黒色の各土壌を供試した。これらの土層をジャッキにより圧縮した結果、根量の減少と水稲の生育収量の減少がみられた。しかし人工土層実験の場合よりち密化の影響は弱く、減収率は20%を越えなかった。泥炭と灰色土壌の一部では、適度に圧縮された土層における生育がかえって良くなることが認められた。

3) その他、土壌の pH, Eh および NH₄-N, Fe²⁺ の浸透状況を時期的に調査した。これらの理化学性が圧縮土層における水稲生育を主体的に悪化させる可能性は見出せなかった。

2)の適度な圧縮という表現はあいまいで、おそらく土壌粒子のち密化に伴う養分供給の改善と、酸素補給に適正な透水状態が重なる点が土層毎に存在するものであろう。この点は今後の解明を期待したい。要するに土層実験の範囲では予期したほどの減収にはならなかったが^{14) 15)}、もともと根の伸長しにくいち密な下層土を用いたことと、したがって圧縮による土層悪化がそれほど大きく起らなかったためであろう。この実験でもし下層土だけでなく、作土の圧縮を加味すれば生育収量への影響はさらに大きくなったことであろう。

4. 生産力分級における土壌硬度の評価

耕地土壌の生産力的評価には可能性分級法 (capability classification) といわれる方法が採用されている²⁰⁾²¹⁾²²⁾。水田土壌についてはさらに農業構造改善適性分級法²¹⁾が提案されている。これは基準項目と呼ばれるところの土壌自体の生産力因子と環境因子を組合わせて評価する方法で、それぞれの項目の等級は必要に応じて要因項目といわれる細かい土壌の性質から判定される。土壌調査の密度や目的によって分級内容や手順に相異があるのは当然である³¹⁾³⁶⁾。

さて、今まで述べてきた土壌硬度の実験成績をもとにして、水田土壌の生産力可能性分級や適性分級への適用を検討する必要がある。たとえば、水田の区画拡大における表土処理の要否を判定するのに、不良下層土の混入や露出をどのように取り扱うか³²⁾³³⁾³⁴⁾³⁵⁾、また水田土壌の機械化適性では土層の透水性⁵⁰⁾や支持力¹⁵⁾のほかには密度の評価をいかに加えるかなどの問題がある。ここには前に述べた「有効土層の深さ」(基準項目)について検討した結果について触れたい。その基準としてまず土壌硬度と根系発達の間関係を整理してみよう。図-4 に示したように成績の表示に用いたのは貫通根数率と根伸長率で、ともに根系発達の性格を表現する。前者は根数の増減を示すので「根量増加」の制限に、後者は根の伸長で

表-1 水田土層における土壌硬度の評価区分 (根系発達の制限因子として)

水分状態	硬度計(8Kgパネ)数値	土性区分	根量増加			根域拡大		
			1 容易	2 やや困難	3 困難	1 容易	2 やや困難	3 困難
湿	目盛	強粘~ 粘質 砂質	<11	12-19	>20	<17	18-22	>23
		粘質 砂質	<7	8-14	>15	<12	13-19	>20
潤	Kg/cm ²	強粘~ 粘質 砂質	<1.7	1.9-5.4	>6.3	<4.0	4.7-8.5	>10.0
		粘質 砂質	<0.8	1.0-2.6	>3.0	<1.9	2.2-5.4	>6.3
乾	目盛	-	<22	23-25	>26	<23	24-27	>28
燥	Kg/cm ²	-	<8.5	10.0-14.0	>16.7	<10.0	11.8-20.1	>24.5

備考：土性区分の内容は次のごとくである。

区分(旧区分)	土性
強粘質(微)	SC, LIC, SiC, HC
粘質(細)	SCL, CL, SiCL
壤質(中)	SL, FSL, L, SiL
砂質(粗)	SL, S

注：次の場合は要因強度を1下げる。
 1) 土性が粗砂に富むSC, SCL, SLの場合
 2) レキ含量が40% (重量) を越える場合
 3) 火山灰土壌の場合
 土層の構造および間ケキの発達著しい場合は要因強度を1上げる。

きる土層の深さを示す意味から「根域拡大」の制限を表わすと考える。この方針でそれぞれ難易性を区分、評価したのが表-1である。この区分は、阻害率70%以下を容易、70~90%をやや困難、90%以上を困難とした。湿润時と乾燥時の硬度に分けたのは、土壌調査の際に排水の悪い湿田には前者を、乾田には後者を採用するように考えたからである。作付中と落水期における下層土の硬度変化はさして大きくないようであるが¹⁶⁾、表土からスキ床にかけての硬度変化はわずかな水分変化にも鋭敏であるから、いずれの区分を採るかは土層調査時の判定にまつべきであろう。同様の区分は水稻の生育、収量についてもおこなうことができる。

そこで有効土層の問題にもどる。有効土層とは根が物理的に貫入できる土層の意味で、土壌の生産力を表わす重要な因子である。この深さを従来単に基岩、盤層や硬度29以上のち密層までの距離で示したのであるが、この範囲における土壌の質的、量的内容には全く触れていない。物理性の評価を考へても砂レキ含量やち密度を加味するのが適当のように思われる³⁴⁾⁴⁹⁾。このような評価のしかたはむしろ「有効土量の多少」というべきもので、

表-2 「有効土量の多少」の分級法

要因項目について：

a. 基岩、盤層までの深さ

区分基準	深さ	要因強度
深い	>50 cm	1
やや深い	50-25	2
浅い	25-15	3
きわめて浅い	<15	4

(注) 極端なレキ層も含める

b. 下層土の最高ち密度

区分基準	湿润硬度	乾燥硬度	要因強度
中	<17mm	<23mm	1
大	18-22	24-27	2
極大	>23	>28	3

(注) 山中式土壌硬度計(8Kgパネ)の目盛で示す。

C. 下層土の最高砂レキ含量

区分基準	粗砂レキ含量の合計	要因強度
中	<50%	1
多	50-75	2
極多	>75	3

(注) 含量は重量割合を示す。

備考：下層土の中で厚さ10cm以上をわたる層を対象とする。

分級基準について：

等級	分級基準
I	有効土量が多く、根系発達が容易である
II	有効土量がやや少なく、根系が発達しにくい
III	有効土量がかなり少なく、根系がかなり発達しにくい
IV	有効土量がきわめて少なく、根系がきわめて発達しにくい

表一2がこの提案である。すなわち、三つの要因項目を組み合わせたもので、項目間の重要度を $a > b > c$ として、かなり細かい評価が可能となろう。

以上、各実験成績および検討内容については別に詳しく報告する予定である。

お わ り に

水田の土地基盤整備をいかに合理的におこなうかは、わが国ばかりでなく米を主食とする世界各国における共通の問題になりつつある。この問題は当面かんがいや区画などの土木工事の可能性から論ぜられる傾向が強い。しかし、すでに多くの事例から指摘されるように、造成後の水田は土壌の物理性や化学性において水稻生産に必ずしも好適でない場合が多い。本稿で述べた土壌硬度は主としてち密な下層土の根域への混入、露出、さらに機械圧に伴う土層のち密化という形でこの問題に関与している。もとより土壌硬度の生産力的意義の一局面を明らかにしたに止まるが、今後このような物理的阻害因子の研究を進めるに当たって参考となれば幸いである。

なお本研究を行うに際しては、前記総合研究に従事された各位から種々ご助言を戴き、また供試土壌の採取は農事試、各県農試のご厚意によった。ここに記して関係各位に深く感謝したい。

参 考 文 献

- 1) Barley, K. P. and Sedgley, R. H. : *The Australian Jour. Sci.*, **23**, 297 (1961)
- 2) Barley, K. P. : *Soil Sci.*, **96**, 175 (1963)
- 3) Barley, K. P., Farrell, D. A. and Greacen, E. L. : *The Australian Jour. Soil Research*, **3**, 69 (1965)
- 4) Baver, L. D. : *Soil Physics*, 3rd Ed., John Wiley & Sons (1956)
- 5) Bruce, R. R. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, **19**, 253 (1955)
- 6) Dagg, M. and Hosegood, P. H. : *East African Agri. Forest. Jour., Special Issue*, 129, (1962)
- 7) Fehrenbacher, J. B. and Rust, R. H. : *Soil Sci.*, **82**, 369 (1956)
- 8) Flocker, W. J., Vomocil, J. A. and Howard, F. D. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, **23**, 188 (1959)
- 9) Flocker, W. J., Timm, H. and Vomocil, J. A. : *Agron. Jour.*, **52**, 345 (1960)
- 10) Fountaine, E. R. : *Proc. Intern. Symp. on Soil Structure*, Ghent Belgium, May, 28 (1958)
- 11) Gill, W. R. and Miller, R. D. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, **20**, 154 (1956)
- 12) Hanks, R. J. and Thorp, F. C. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.* **20**, 307 (1956)
- 13) Jamison, V. C. and Domby, C. W. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.* **20**, 307 (1956)
- 14) 木内知美 : 中国農試, 昭和38年度成績書(1963)
- 15) 国分欣一, 他 : 農事試作業技術部, 昭和40年度成績書(1966)
- 16) 久津那浩三, 他 : 富山農試, 農林省指定試験昭和40年度成績書(1966)
- 17) Lutz, J. F. : *Agronomy, A Ser. Monog.*, Vol. **II**, 42, Academic Press, N. Y. (1952)
- 18) 松尾憲一 : 農技研報, B14, 285 (1964)
- 19) 農技研化学部土壌第3科 : 水田土壌統設定(第1次案)および補遺(3) (1963~1966)
- 20) 農林水産技術会議事務局編 : 畑土壌生産力に関する研究(1962)
- 21) 農林水産技術会議事務局編 : 水田土壌適性分級法試案—農業構造改善のための—(1964)
- 22) 農林水産技術会議事務局 : 草地土壌の生産力に関する研究(1967)
- 23) 小野薫, 他共訳 : テルツァギ・ベック「土質力学」応用編, P346, 丸善(1955)
- 24) Phillips, R. E., Jensen, C. R. and Kirkham, Don : *Soil Sci.*, **89**, 2 (1960)
- 25) Phillips, R. E. and Kirkham, Don : *Agron. Jour.*, **54**, 29 (1962)
- 26) Raney, W. A., Edminster, T. W. and Allaway, W. H. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, **19**, 423 (1955)
- 27) Scharpenseel, H. W. und Kerpen, W. : *Zeitsl. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk.*, **101**, 1 (1963)
- 28) Swanson, C. L. W. and Jacobson, H. G. M. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, **20**, 161 (1956)
- 29) 滝嶋康夫・佐久間宏 : 土肥誌, **33**, 205 (1962)
- 30) 滝嶋康夫 : 農技研報, B13, 117 (1963)
- 31) 滝嶋康夫, 阿部和雄他 : 農技研土壌第2, 3科, 昭和40年度成績書(別冊)(1966)
- 32) 滝嶋康夫 : 土壌肥料分野における技術集録, P6 農林水産技術会議(1966)
- 33) 滝嶋康夫, 佐久間宏 : 土肥誌, **38** (1967) (印刷中)
- 34) 滝嶋康夫, 佐久間宏 : 土肥誌 **38** (1967) (印刷中)
- 35) 滝嶋康夫 : 土肥誌, **38** (1967) (印刷中)
- 36) Takijima, Y. : *Soil Sci. Plant Nutrition*, Tokyo, (投稿中)
- 37) 滝嶋康夫 : 土壌肥料分野における試験研究上の問題点, P41, 農業技術研究所編(1966)
- 38) Taylor, H. M. and Gardner H. R. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, **24**, 79 (1960)
- 39) Taylor, H. M. and Gardner, H. R. : *Soil Sci.*, **96**, 153 (1963)
- 40) Taylor, H. M. and Burnett, E. : *Soil Sci.*, **98**, 174 (1964)
- 41) 寺沢四郎 : 農技研化学部昭和40年度成績書(1966)
- 42) Trowse, Jr., A. C. and Humbert, R. P. : *Soil Sci.*, **91**, 208 (1961)
- 43) 宇野要次・他 : 水田土壌の機械化適性実態調査成績, 農技研化学部, 土壌第2科(1965)
- 44) Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, A. H. : *Soil Sci.*, **62**, 451 (1947)
- 45) Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, A. H. : *Soil Sci.*, **65**, 487 (1948)
- 46) Vomocil, J. A. and Flocker, W. J. : *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.* **30**, 7 (1965)
- 47) Wiersum, L. K. : *Plant and Soil*, **9**, 75 (1959)
- 48) 山中金次郎 : 農技研報, B6, 1 (1955)
- 49) 山中金次郎・松尾憲一・本村悟 : 御殿場市耕地土壌報告書(1961)
- 50) 横井肇 : 関西土肥協議会講演要旨, **27**, 1, (1966)
- 51) Zimmerman, R. P. and Kardos, L. T. : *Soil Sci.*, **91**, 280 (1961)