

「根生育非制限有効水分域」による 熊本県主要畑土壌の物理的評価

遅沢省子*・小財伸**・久保田徹*

Evaluating Physical Condition of Kumamoto Soil Based
on the "Non-Limiting Water Range" Concept

Seiko OSOZAWA, Shin KOZAI and Toru KUBOTA

Division of Soil Science, National Institute of Agro-Environmental Science
Kumamoto Prefectural Agricultural Research Center

従来、畑土壌の作物生産に関わる土壌の物理性は、気相率、透水性、土壌硬度等個別の物理性測定によって診断評価されてきた。しかしながら、実際には、これらの要因は水分条件に依存し、相互に絡み合い、作物根に作用している。したがって、個々の物理性測定では生産力の評価は十分とはいえず、諸要因を加味した新しい畑土壌物理性の評価法が必要である。

近年、畑土壌の基本的な物理性である水、空気、土壌硬度がどのように関連して作物生育に影響するかを、LETEY¹⁾が簡潔に示した。この考えは、従来の圃場容水量から永久しおれ点までの有効水分域において土壌ガス交換と土壌硬度のどちらにも制限されない水分域を「根生育非制限有効水分域 (Non-Limiting Water Range)(以下、NLWRと略記する)」とし、これによって作物根生育にかかわる土壌の物理的機能を評価しようというものである。NLWRは強度因子すなわち根成育pF域と、容量因子すなわちNLWRの保水量の両者を表すことができる。しかしながらLETEYは実際の測定はしていない。

ここでは熊本県下の主要な畑土壌を供試して、土壌水分pF変化に応じて土壌ガス交換能、土壌硬度がどのように推移するかを明らかにし、NLWRによる根圏土壌の作物生産機能の評価を試みたので、その結果を報告する。

1. 実験材料および方法

1) 供試土壌

熊本県下の主要畑土壌である風積性の厚層多腐植質黒ボク土(以下、風積性黒ボク土とする)、再積性の厚層腐植質黒ボク土(以下、再積性黒ボク土とする)、細粒黄色土、細粒灰色低地土・灰色系(下層グライ層の水田ハウス土壌、以下、灰色低地土とする)の4土壌統群と、埋没腐植層(以下、黒ニガ層とする)の中から代表地点を選び、各土壌の作土層、耕盤層、下層(但し、黄色土は作土層、耕盤層からのみ採取、黒ニガ層は下層相当部分を採取)より、100cm³土壌採土円筒に土壌を採取した。選定地点の生産力にかかわる一般的特徴は以下の通りである。

＜厚層多腐植質黒ボク土(風積性)畑谷統＞

母材は非固結火成岩で主に阿蘇起源の火山灰が降り積もってきたと考えられる土壌である。作土は中度の粒状構造、耕盤以下は弱～中度の亜角塊状構造を有する。作土の粘着性はそれほど大きくなく耕起碎土は容易である。作土は現状では12cmと浅い。有効土層は一般に深い。作土直下から30cmまで密度が高く(現場土壌硬度22～26mm)、根生育にとって不利な条件となっている。保水性は大きく、過乾のおそれは少ない。

＜厚層腐植質黒ボク土(再積性)ぬるゆ統＞

台地上の浅谷や凹部にみられ、水の作用により主に阿蘇起源の火山灰が再積されたと考えられる土壌である。作土は中度の粒状構造、耕盤以下は弱～中度の亜角塊状構造を有する。極端な密層もなく下層まで均質な様相を呈する。耕起碎土は容易である。同地域の平坦面の風積性黒ボク土に比べて概して作物生育が良い。下層までかなり均質な理由として、水流にかくはんされて混ざり

* 農業環境技術研究所 〒305 つくば市観音台3-1-1

** 熊本県農業試験場 〒861-41 熊本市上の郷町501
(現在、熊本県農業大学校 〒861-11 熊本県菊池郡合志町大字栄 3805)

合いながら運ばれた均質な土壌が浅谷などに深く再積したことで、試料採取圃場では10年前に40cmまで深耕した経緯などが考えられる。

<細粒黄色土（斑紋あり）蓼沼統>

母材は固結堆積岩（砂岩）である。作土は中度の塊状構造を有し、層厚が薄くて腐植に乏しい。耕盤以下は腐朽礫にすこぶる富む。土性は粘質～強粘質で固結しやすく耕起砕土は困難である。丘陵地に分布し侵蝕を受け易い。干害が出易い反面、凹部では湿害も出やすい。下層はち密で構造の発達は弱く透水、保水性が悪く、有効土層も浅く養分が不足がちとなる傾向がある。試料採取した一帯は、畜産団地となっており11年程前に開かれた比較的新しい飼料畑であり、概して生育むらが激しい。

<細粒灰色低地土，灰色系 鴨島統>

母材は河・海成非固結堆積物である。細粒質であるが、粘着性が中程度のため耕起砕土は容易である。土層の自然肥沃度は高い。作土は強度の粒状および亜角塊状構造、耕盤以下は弱～強度の塊状構造を有する。ただし、下層には硫化物を含むグライ層があり、根腐れを生じやすく場合によっては酸性障害のおそれがある。採取試料は、水田ハウス土壌である。なお、年に一度、塩類集積防止等を目的に1ヶ月程度の湛水による洗浄処理が行われている。

<埋没腐植層（黒ニガ層）>

熊本県では火山灰埋没土のうち、乾燥後収縮し、くるみ状の極めて硬い構造を示す土層を「ニガ土」と称し、腐植含量が高く土色がより黒いものを「黒ニガ」と呼んでいる。乾燥の進んでいない黒ニガの土壌断面は水の抜けにくい連結状無構造を呈し、気相率は極めて低い。ニガ土は、作土に露出すると生産力が極端に劣る。

2) 測定方法

100 cm³ 円筒土壌を、水分飽和後、砂柱法および加圧板法により、脱水過程で各水分ポテンシャルに調整し、土壌硬度、ガス拡散係数、ODRを測定した。

土壌硬度については、5個の試料の上面下面の中央に山中式硬度計を貫入し、その平均値について、最大、最小を除く3データの平均値を求めた。

ガス拡散係数については、3連の試料について遅沢らの方法²⁾により試料のN₂-air相互拡散速度を測定し、大気中の拡散係数との比D₁/D₀の平均値を求めた。

ODRについては、3連のpF1.5、2.0の試料について、ODR測定装置(大起理化製)を用い、試料の上面中央の2.0cm深に比較電極を、中央から1.5cm離して2.0cm深に白金電極を2本埋め込んで測定し、その平均値を求めた。

試みに、NLWRの容量因子、すなわち、根生育非制限有効水分量の作物根生育の指標としての有効性を検討するため、供試土壌中でのコムギ根の生育を観察した。

方法は、現地構造の100cm³円筒土壌の上部に厚さ2cmの黒ボク土の播種床を載せ、コムギ(農林61号)3粒を播種し、高さ30cmの砂柱上に置いてグロースチャンパー内で栽培した。土壌の過乾、コムギの萎ちょうを避けるために、砂柱の下部に連結した漏斗に水位30cmになるように時々注水し、圃場水分条件を模して2連で栽培実験を行った。25°Cで15日間栽培後、伸長した根の長さを交点法³⁾により測定した。

2. 結果および考察

1) 供試土壌の一般物理性

供試土壌の一般物理性を表-1に、pF水分曲線を図-1に示す。

作土のpF1.5粗孔隙量は再積性黒ボク土および灰色低地土が30%と多く、黄色土や黒ニガでは少なかった。風積性と再積性の黒ボク土を比較すると、後者が粗孔隙量および透水係数が高く、より大きな構造が発達していることがうかがわれた。塑性変形に対する土壌構造の安定度^{4,5)}、ないし土壌の耕し易さ⁶⁾および地耐力⁷⁾の指標とされる(塑性限界(pF)/圃場含水量(pF))の値は、軟弱で乾燥履歴をもたない壁状構造の灰色低地土下層、埋没黒ニガ層、および仮比重が高く気相率に乏しい黄色土作土では他の土壌に比べて低く、構造の不安定性を示していた。この土壌間差は、現地の工学的特性や土壌の取り扱いの難易の差異をよく反映しているものと思われる。

火山性の黒ボク土、黒ニガ層は非火山性の黄色土、灰色低地土に比べて、概して体積水分率が、圃場含水量(pF1.8)から永久しおれ点(pF4.2)までの有効水分量が多い傾向を示した。黒ボク土は両土壌ともに、それぞれ耕盤層と下層のpF水分曲線は似かよっていて、pF上昇に伴う脱水は作土ほど大きくなかった。風積性黒ボク土は再積性黒ボク土に比べて全pF域で保水量が高かった。黄色土は全pF域で作土の保水量は耕盤層よりも数パーセント高かった。灰色低地土は全pF域にわたり保水量が下層グライ層、耕盤層、作土の順に高かった。黒ニガ層は全pF域で保水量が最も高かった。

2) 土壌pFと土壌硬度の関係

土壌pFと土壌硬度の関係を図-2に示す。黒ボク土では概してpFの上昇とともに土壌硬度が高まるが、風

表-1 供試土壤の一般物理性 General physical properties of soils used

	採取位置	固相率(%)	真比重	仮比重	粗孔隙 (<PF1.5) (%)	有効水 (pF1.8-4.2) 保持能 (%)	P. L.	pF2.0含水比	構造安定指標 P.L./pF2.0	飽和透水係数 K ₂₀ (cm・s ⁻¹)
風積性黒ボク土Ap1	4~9cm	30.3	2.45	0.74	8.9	21.2	69.7	74.1	0.94	2.6×10 ⁻³
2A11	25~30cm	21.7	2.59	0.56	5.7	8.3	126.2	122.9	1.03	3.8×10 ⁻⁵
2A12	45~50cm	19.8	2.62	0.52	6.4	11.7	128.3	133.0	0.96	3.8×10 ⁻⁴
再積性黒ボク土Ap	3~8cm	24.2	2.53	0.61	30.1	12.6	63.0	62.3	1.01	2.7×10 ⁻²
A1	17~22cm	31.5	2.58	0.81	13.4	13.6	58.0	58.8	0.99	2.4×10 ⁻³
2A1	45~50cm	29.2	2.58	0.75	12.5	17.9	65.4	66.5	0.98	1.1×10 ⁻³
黄色土Ap	3~8cm	49.6	2.69	1.33	5.6	11.5	27.2	31.9	0.85	8.8×10 ⁻⁴
B2ir	15~20cm	56.6	2.79	1.58	5.1	7.3	23.4	22.7	1.03	6.2×10 ⁻⁴
灰色低地土Ap	5~10cm	40.0	2.68	1.07	30.2	8.7	26.7	25.3	1.05	2.2×10 ⁻²
C1g	22~27cm	51.2	2.68	1.37	7.9	8.3	26.9	78.1	0.96	1.4×10 ⁻³
2G	73~78cm	35.7	2.67	0.95	6.3	10.3	42.6	59.1	0.72	8.8×10 ⁻³
黒ニガ層3A1	78~83cm	13.4	2.42	0.32	5.8	13.7	195.0	238.8	0.82	7.2×10 ⁻⁵

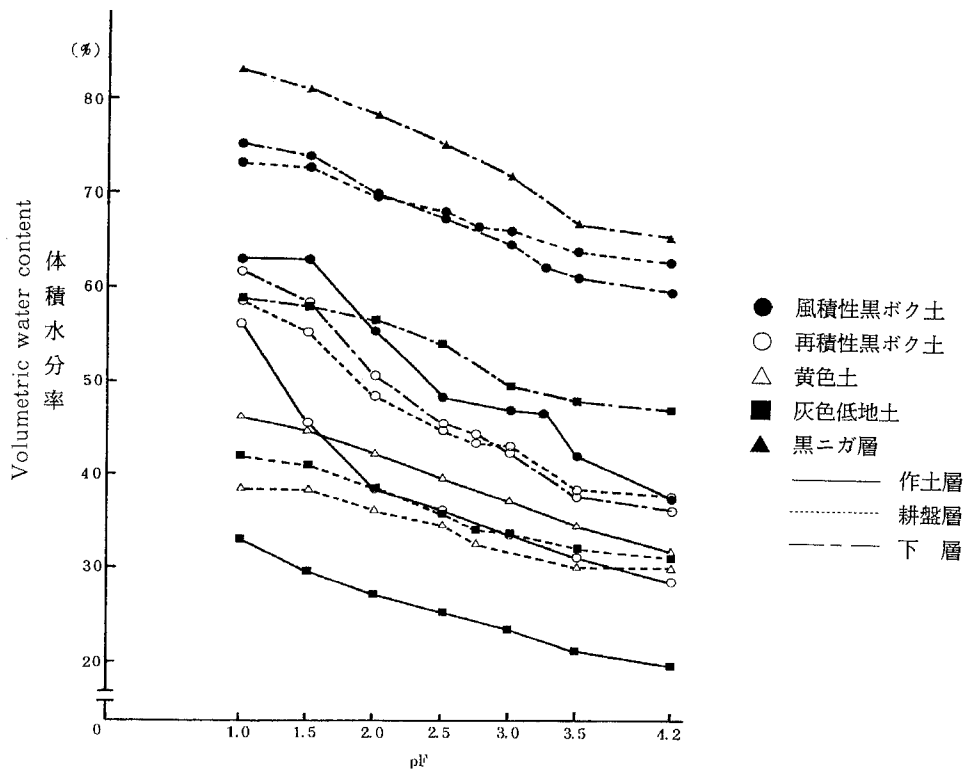


図-1 PF~水分曲線
The pF-soil moisture curves

遅沢・小財・久保田：「根生育非制限有効水分域」による熊本県主要畑土壌の物理的評価

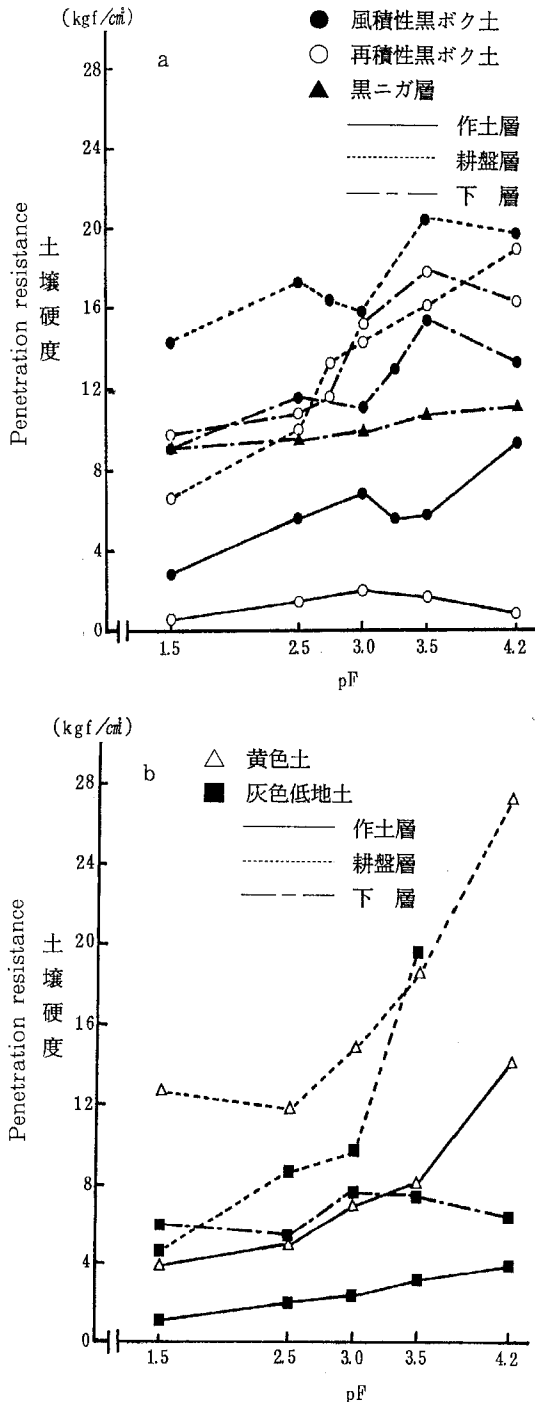


図-2 pFと土壤硬度

The pF-penetration resistance curves

積性黒ボク土では特徴的にpF2.5 - 3.5の範囲で土壤硬度の低下が観察された。土壤水分の低下に伴う土壤凝集力の変化は、黒ボク土や重粘性黄色土ではある水分で極大ないし極小値が現れることが観察されている^{8, 9)}。ここで認められた風積性黒ボク土の硬度の極小値は、黒ボク土や重粘性黄色土で報告されているような土壤の凝集力の極小によるものか、試料のバラツキによるのかは明らかでない。風積性黒ボク土は作土の土壤硬度は低いが、耕盤層はpF4.2以下全域で高く(14kgf/cm²以上)、下層土も9kgf/cm²以上と高かった。再積性黒ボク土は、作土は2.5kgf/cm²以下と極めて低く、耕盤層、下層土は土壤硬度に大差なく、ともに風積性黒ボク土耕盤層に比べて低かった。黄色土、灰色低地土ではpFが高まるにつれて土壤硬度が高まった。黄色土の作土の土壤硬度はそれほど高くない(4~15kgf/cm²)だが、耕盤層は高く(12kgf/cm²以上)、特にpF2.5以上で顕著に上昇した。灰色低地土は作土と下層土の土壤硬度はpF4.2以下全域で低く(8kgf/cm²以下)、耕盤層もpF3.0以下では比較的強く推移した。黒ニガ層土壤の硬度の変化はpF4.2以下全域でゆるやかで、中程度(9~11kgf/cm²)の硬度を示した。

3) 土壤pFと通気機能の関係

土壤pFとガスの相対拡散係数 D/D_0 の関係を図-3に示す。どの土壤もpFが高まり気相率が增大するにつれて D/D_0 が高まった。同じ土壤pFで比較すると、風積性黒ボク土は粗孔隙量の多い再積性黒ボク土に比べて全層で D/D_0 が低く推移した。黒ニガ層はpF4.2以下全域で D/D_0 は低く(0.05以下)、特にpF2.5以下では0.01以下であった。また、非黒ボク土は粗孔隙量の多い灰色低地土の作土を除いて、 D/D_0 はpF2まで増加しないのに対して、黒ボク土はpFが高くなるにつれて増加した。作土は概して D/D_0 が高かったが黄色土では特徴的に低かった。

ここでは記述するにとどめるが、それぞれの土壤では気相率が高まるにつれて D/D_0 が高まった。同じ気相率で比較すると、黄色土、灰色低地土は黒ボク土や黒ニガに比べて D/D_0 が高く、気相のガス交換効率が高い傾向があった。黄色土や灰色低地土は黒ボク土(特に粒状構造をもつ作土)に比べてより大きな塊状構造や柱状構造をもったりあるいは礫にすこぶる富むため、孔隙の屈曲度が小さいことが考えられること、黒ボク土は孔隙が入り組んでいることを反映したと思われる。

D/D_0 はODRと密接な関係が認められた(図-4)。

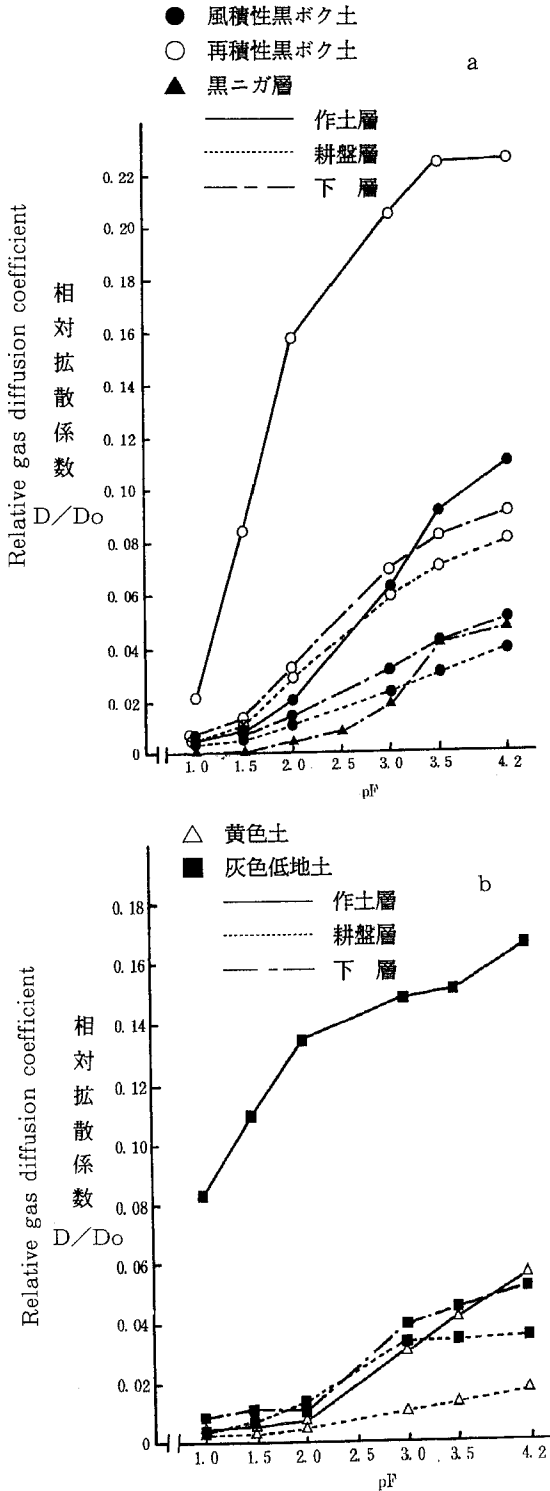


図-3 pFと相対ガス拡散係数 (D/D₀)

The pF—relative gas diffusion coefficient curves

ただし、灰色低地土の下層グライ層では、気相率に比べて異常に高いODR値が得られ、D/D₀と密接な関係は認められなかった。LEMON¹⁰⁾は、ODR測定は白金電極近傍のO₂濃度に影響され、VAN DOREN¹¹⁾は、土壤中に酸化還元を受けるイオンが存在するとODR値に影響を及ぼすことを報告している。グライ層で得られた特異なODR値は2価鉄の影響を受けたためと推察される。

普通畑作物の生育に必要なODR値はおおむね20とされている。すなわち、シバクサで15¹²⁾、ヒマワリでは20¹³⁾、トウモロコシで25¹⁴⁾ インゲンマメ、トマト、ナス、ピーマン、キュウリ、キャベツ、トウモロコシで約20¹⁵⁾、コムギで30、トウモロコシ、アズキで25、ダイズで25~30¹⁶⁾ 等が報告されている。図-4によれば、グライ層を除いてD/D₀とODRには一次の関係(相関係数は0.81で有意水準1%)があり、ODR値20はほぼD/D₀0.02に相当した。

4) NLWR

ガス拡散係数D/D₀と作物生育の関係について、GRABLE¹⁷⁾はD/D₀0.02以下ではトウモロコシの値が減少することを、GRADWELL¹⁸⁾はD/D₀0.005以下でライグラスの生育がかなり悪くなることを、BOONE¹⁹⁾はトウモロコシの生育はD/D₀0.015以下で制限を受け始めD/D₀0.00075では不可能になることを報告している。STEPNIEWSKI²⁰⁾は作物の通気不良による生育阻害はD/D₀0.02で始まり、0.005で生育が危機状態になるとしている。土壤硬度と作物生育の関係では、硬度の測定方法、土壤および供試作物が異なると、生育臨界硬度にはばらつきがみられる。BOONE²¹⁾は9~16 kgf/cm²のあいだでトウモロコシの根の伸長が50%以上減少したことを報告した。TAYLOR²²⁾によれば、ワタの種子根は中・粗粒質土壤において15kgf/cm²の土壤硬度で著しい伸長阻害を受けた。GREACEN²³⁾によれば、エンドウの臨界硬度は水分飽和の団粒状粘土では24kgf/cm²、ねり返し粘土では10kgf/cm²であり、構造によって異なることが注目される。わが国の地力増進法では、作物根に影響を及ぼす臨界硬度として山中式硬度計24mm(12kgf/cm²に相当)を設定してある。

これらの報告を参考に、根生育非制限水分域を求めるにあたり、通気制限による作物根の生育阻害臨界値として相対拡散係数D/D₀0.02を、また、土壤硬度による生育阻害臨界値として12kgf/cm²を設定した。求めた供試土壤のNLWRを図-5に示す。ここで圃場含水量に相当する水分pFは1.8とした。*

遅沢・小財・久保田：「根生育非制限有効水分域」による熊本県主要畑土壌の物理的評価

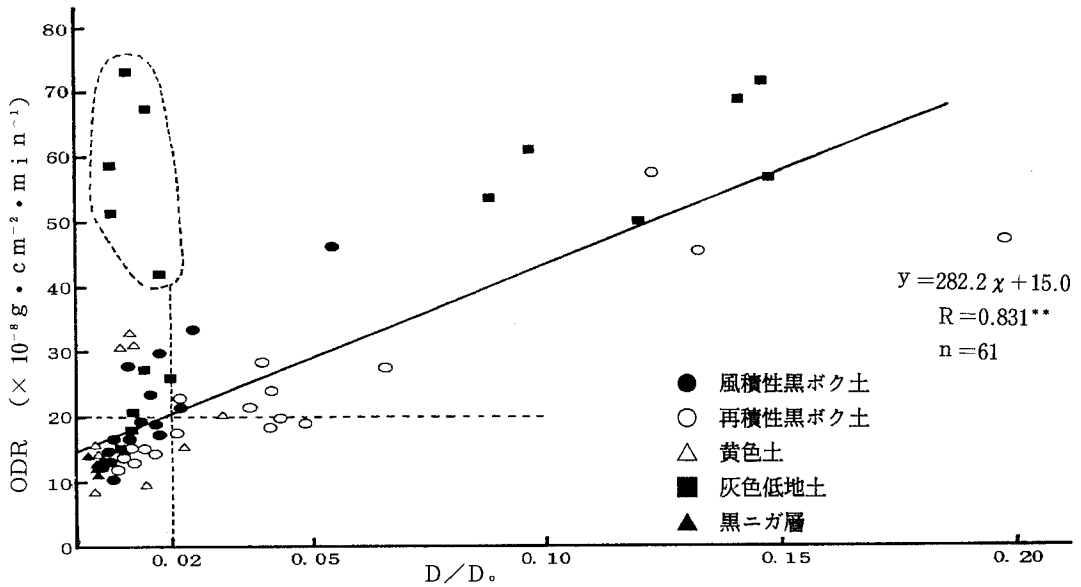


図-4 相対ガス拡散係数 (D/D₀) と酸素拡散速度 (ODR)

The relationship between relative gas diffusion coefficients and ODR

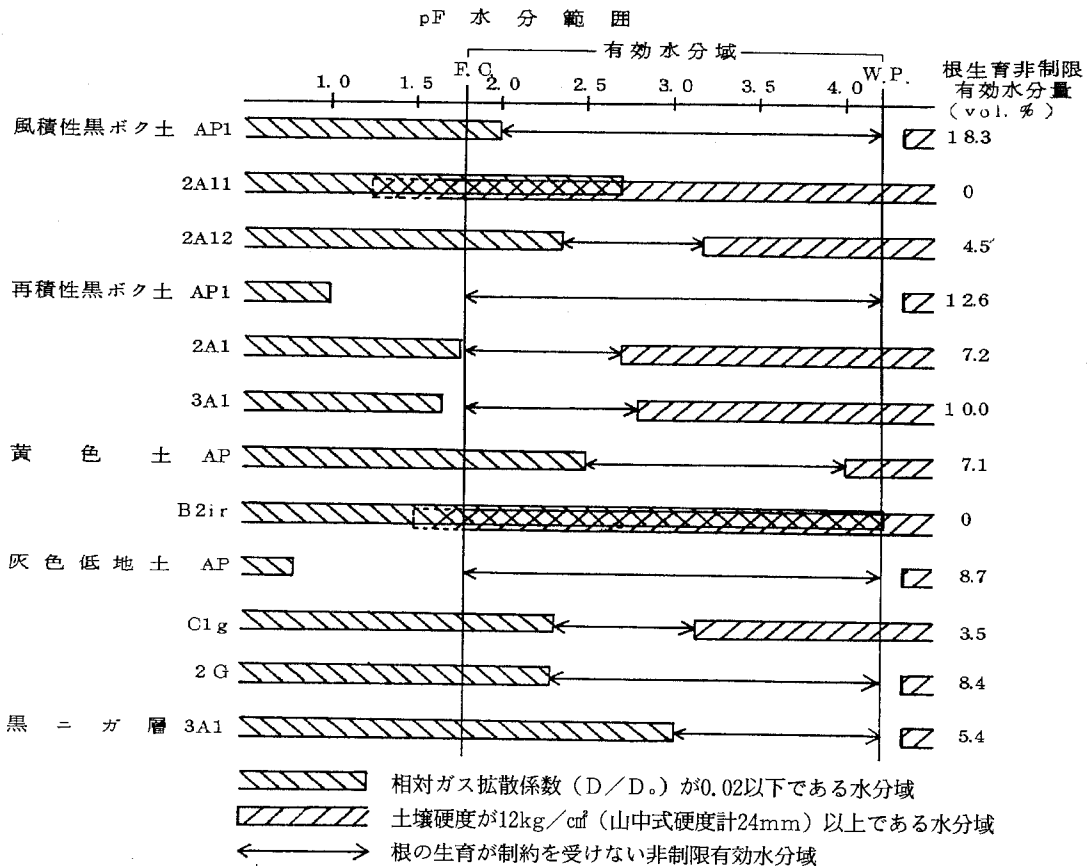


図-5 熊本県における主要畑土壌の根生育非制限有効水分域

Non-Limiting Water Range of Kumamoto soils

これより次のようなことが読み取れた。風積性黒ボク土の作土では、ほぼ全有効水分域において土壌硬度、ガス交換障害は現れず、非制限有効水分量は18%と高かった。一方、下層土は土壌硬度と通気の制限によってpF 2.3~3.2 という限られた水分域でしか根は十分に生育できない。また耕盤層は根の貫入伸長を許さない。再積性黒ボク土の作土のNLWRは全有効水分域に相当した。耕盤層、下層土も風積性黒ボク土に比べてpF 1.8~2.7, pF 1.8~2.8 と有効水分域が広く非制限有効水分量も多かった。黄色土は耕盤層が硬く、通気も悪く、根の伸長阻害が生じることがわかる。灰色低地土では、作土は物理的な阻害要因はないが、耕盤層では主に土壌硬度が阻害要因になりやすく、非制限有効水分域はpF 2.3~3.2 と狭められていた。下層グライ層は耕盤層に比べて根の物理的伸長阻害は少なかった。黒ニガ層では、通気が大きな阻害要因になっていて非制限有効水分量も5%と少なかった。

これらの各土壌の物理機能の特徴は、前記したような現地で経験される物理的生産力特性、すなわち、構造安定度、干ばつの発生しやすさ、再積性黒ボク土や灰色低地土のいわゆる栽培しやすさ等を、適切に反映しているものと思われた。

5) コムギ根の生育と非制限有効水分域の保水量

各供試土壌に生育させたコムギの根長を表-2に示す。コムギの根はそれぞれの土壌の作土土壌に多く分布した。

表-2 栽培した小麦の根長 Wheat root length

土 壌	層 位	根 長 (cm/100cm ³)	同 指 数
風積性黒ボク土	A p 1	940	100
	2A11	250	27
	2A12	62	7
再積性黒ボク土	A p 1	1530	163
	A 1	550	59
	2 A 1	479	51
黄 色 土	A p	550	59
	B 2 i r	480	51
灰色低地土	A p	1300	138
	C1g	610	65
	2G	0	0
黒ニガ	3 A 1	50	5

最も根長が長かったのは再積性黒ボク土の作土土壌で下層土壌でも根が入った。風積性黒ボク土は再積性黒ボク土に比べて根長が短く、下層土壌では根があまり入らなかった。黄色土は根の量は多くないが、作土土壌、耕盤層土壌ともに根が分布した。灰色低地土は作土土壌の根の分布はよいが、下層土壌では根が貫入しなかった。下層土壌は物理的生育阻害は少ないが、グライ層であり還元的で硫化物を含み、化学性に制限要因があることが考えられる。黒ニガ土壌ではわずかしが根が伸びなかった。

培地のNLWR水分量とコムギ根長を図-6にプロットした*。両者に一次の関係があり、相関係数は0.71で有意水準は2.5%だった。NLWRがゼロの点においても根の伸長がいくらかみられた理由については、土壌水中の溶存酸素が関係しているのか、作物特性によるものなのか、根の補償作用によるものなのか、明らかでない。水耕栽培で根の上部が空気に接していれば水中の根が生育できることと考え合わせると興味深い。

以上の現地土壌調査、コムギ栽培試験の結果を総合して、NLWRは作物根生育にかかわる土壌の物理的特性をかなり把握できること、また、基本的な土壌物理性である水、空気、土壌硬度のうち、どこに生産力阻害があるかを評価できるものと結論した。

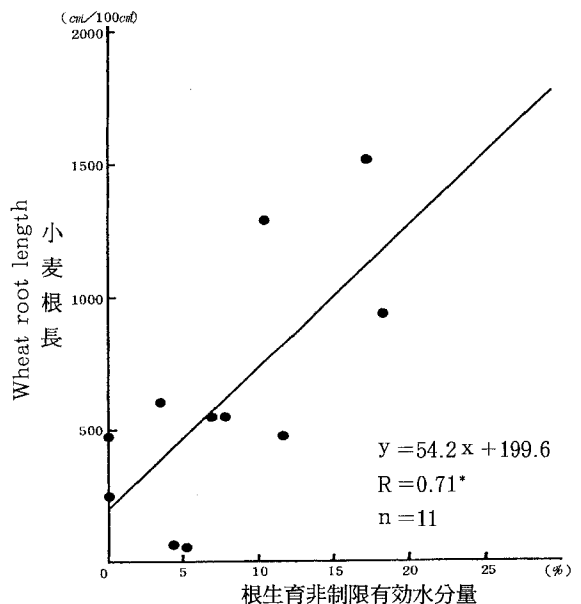


図-6 根生育非制限有効水分量と小麦根長
The relationship between water in NLWR and wheat root length

*採取時の土壌水分はpF 1.3-2.7 相当水分でありpF 1.8 - 2.0付近に相当する水分の土層が多かった。

圃場においてNLWRと根の生育にどのような関係が見られるかは、今後調べていく必要がある。また、NLWRは根の分布や根の吸水に伴う水の動きは考慮していない。これらは今後の検討課題である。

3. 要 約

作物根生育に関わる土壌の物理的特性は、気相率、有効水分量、ガス拡散、土壌硬度などそれぞれの測定によって診断されてきた。しかしながら、これらの要因は作物生育に相互に影響しあっている。作物の生育に最適な物理条件は、土壌水、通気、土壌硬度により制限されない条件であろう。

LETEY によって提唱されたNLWR (Non-Limiting Water Range, 根生育非制限有効水分域) はこれらの要因を総括的に考慮しているため、土壌の物理条件の優れた指標と考えられる。

これらの要因の関係について、作物根の生育阻害臨界値として相対拡散係数 D/D_0 、0.02、土壌硬度 12kgf/cm² を用いて熊本県の主要な畑土壌について検討した。その結果、NLWRと経験的な土地生産性の間により対応がみられ、またNLWR保水量と小麦根長の間にも相関 ($r=0.71$) が認められた。

謝 辞

この研究を行うにあたり、熊本県農試の古閑孝彦前化学第一部長、草地試の岩間秀矩氏、農環研の加藤英孝氏には有益な助言を頂きました。御礼申し上げます。なお、この研究は著者のひとり、小財が依頼研究員制度により農環研土壌物理研究室滞在中に行われたものであり、便宜を図ってくださった方々に感謝申し上げます。

**ここでは圃場容水量をpF 1.5水分とした。低pF側ではpF 1.5相当水分まで作物が利用できる実験条件だったためである。また、明らかに化学性が生育を阻害したと考えられる灰色低地土下層はここでは除いた。

引用文献

- 1) LETEY, J.: Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. *Advances in Soil Science*, Vol. 1, p277-294, Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo (1985)
- 2) 遅沢省子・久保田徹：土壌のガス拡散係数の測定法，土肥誌，58，528-535(1987)
- 3) MARSH, B.: Measurement of Length in Random Arrangements of Lines. *J. Appl. Ecol.*, 8, 265-267 (1971)
- 4) Boekel, P.: The Effect of Organic Matter on the Structure of Clay Soils. *Neth. J. Agric. Sci.*, 11, 250-263 (1963)
- 5) 中野啓三：低湿重粘土水田の転換畑に伴う土壌物理性の推移，北陸農試報，21，63-94(1978)
- 6) 久保田徹：作土の構造維持に対する有機物施用の効果—コンシステンシーに及ぼす影響—，土肥誌，42，7-11 (1971)
- 7) 久保田徹：重粘土田土壌の地耐力診断のための土壌構造指標，土肥誌，55，173-179(1984)
- 8) 山中金次郎：土壌の凝集力に関する研究，農技研報告 B6，1-142 (1955)
- 9) 佐藤雄夫・湯村義男：耕うんの立場からみた重粘性土壌の物理性に関する研究，東近農試研報告，19，127-147 (1970)
- 10) LEMON, E. R. and ERICKSON, A. E.: The Measurement of Oxygen Diffusion in the Soil with a Platinum Microelectrode. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 16, 160-163 (1952)
- 11) VAN DOREN, D. M. and ERICKSON, A. E.: Factors Affecting the Platinum Microelectrode Method for Measuring the Rate of Oxygen Diffusion through the Soil Solution. *Soil Sci.*, 102, 23-28 (1966)
- 12) LETEY, J., MORGAN, W. C., RICHARDS, S. J., and VALORAS, N.: Physical Soil Amendments, Soil Compaction, Irrigation, and Wetting Agents in Turf Grass Management 3. Effects on Oxygen Diffusion Rate and Root Growth. *Agron. J.*, 58, 531-535 (1966)
- 13) LETEY, J., STOLZY, L. H., VALORAS, N., and Szuszkiewicz, T. E.: Influence of Oxygen Diffusion Rate on Sunflower Growth at Various Soil and Air Temperatures. *Agron. j.*, 54, 316-319 (1962)
- 14) BERTRAND, A. R. and KOHNKE, H.: Subsoil Conditions and Their Effects on Oxygen Supply and the Growth of Corn Roots. *Soil Sci. Soc. Proc.*, 21, 135-140 (1957)
- 15) 安田環：O₂供給と作物生育からみた培地環境の改善に関する研究，野菜試報，A. 10, 185-221 (1982)
- 16) 久津那浩三・宮崎直美・古賀野完爾：転換畑土壌の通気性と作物の生育，北海道農試報告，145, 31-52 (1986)

- 17) GRABLE, A. R., and SIEMER, E. G.: Effect of Bulk Density, Aggregate Size, and Soil Water Suction on Oxygen Diffusion, Redox Potentials, and Elongation of Corn Roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 180-186 (1968)
- 18) GRADWELL, M. W. : Soil Physical Conditions of Winter and the Growth of Ryegrass Plants. *N. Z. J. Agric. Res.* 8, 238-269 (1965)
- 19) BOONE, F. R., VAN der WERF, H. M. G., KROESBERGEN, B., TEN HAG, B. A., and BOERS, A.: The Effect of Soil Compaction of the Arable Layer in Sandy Soils on the Growth of Maize for Silage. 1. Critical Matric Water Potentials in Relation to Soil Aeration and Mechanical Impedance. *Neth. J. Agric. Sci.*, 34, 155-171 (1986)
- 20) STEPNIIEWSKI, W.: Oxygen Diffusion and Strength as Related to Soil Compaction. II. Oxygen Diffusion Coefficient. *Pol. J. Soil Sci.*, 14, 3-13 (1981)
- 21) BOONE, F. R. and VEEN, B. W. : The Influence of Mechanical Resistance and Phosphate Supply on Morphology and Function of Maize Roots. *Neth. J. Agric. Sci.* 30, 179-192 (1982)
- 22) TAYLOR, H. M., ROBERSON, G. M. and PARKE R, J. J.: Soil Strength-Root Penetration Relations for Medium to Coarse-Textured Soil Materials. *Soil Sci.*, 102, 18-22 (1966)
- 23) GREECEN, E. L., BARLEY, K. P., and FARRELL, D. A. : The Mechanics of Root Growth in Soils with Particular Reference to the Implications for Root Distribution in Proceedings 15th Easter School in Agric. Sci. 'Root Growth', Univ. of Nottingham, p256-269 (1968)

Summary

Soil Physical Properties related to root growth have been diagnosed by measuring separately air porosity, available water, gas diffusion, mechanical impedance etc.

However, these factors interrelatedly and affect crop growth. The optimum physical condition for crop growth may be that non-limited by soil water, aeration, and mechanical resistance.

NLWR, proposed by Letey, seems superior diagnosis of soil physical conditions because of considering these factors comprehensively.

These relationships were demonstrated using D/D_0 0.02 and soil strength 12 kgf/cm^2 as limiting values with main upland soils of Kumamoto prefecture. As the results, reasonable correspondance between NLWR and experiential productivity, and correlation ($r=0.71$) between NLWR water content and root length of wheat were found.