

シンポジウム

## 作物の水・酸素要求に対する土壌の供給力

長谷川 周 一\*

Evaluation of water and oxygen supply ability of soils to suffice the demands of crops.

Shuichi Hasegawa

Division of soil Science, National Institute of  
Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Ibaraki, Japan

### Summary

The lower and the upper limits of soil water content for plant growth were reviewed in terms of water and gas transmission in the soil. Plants can survive for about one month after a lot of rainfall by extracting water held in the soil, but plants exhaust soil oxygen within a few days if soil oxygen was not replenished by gas exchange between the soil and the ambient air. This is a distinct difference between soil water and soil air for plant growth. In case of water, both water potential and hydraulic conductivity are expressed as a function of soil water content, which enables to translate from the water potential to the hydraulic conductivity and *vice versa*. The lowest limit of soil water called wilting point corresponds to  $-1.5$  MPa for soil water potential or to a value of the order of  $10^{-11}$  cm/s for hydraulic conductivity, and this limitation was explained well by a single root model. The highest soil water content, which impedes respiration has been studied by use of air porosity, oxygen concentration, oxygen diffusion rate (ODR) or relative gas diffusion coefficient. Even though these studies have proposed critical values of root respiration such as 0.1 to 0.2 for air porosity, 0.1 for a critical oxygen concentration, 10 for a critical ODR and 0.005 for relative gas diffusion coefficient, we still have little knowledge of the relation among these physical factors.

Transpiration begins to decrease at soil water potential between  $-0.1$  and  $-1.0$  MPa and the uppermost layer in the field supplies the largest amount of water to roots by this time. It is important for research to confirm either water potential or hydraulic conductivity governs the break point of the potential transpiration. Under field conditions, water transmission ability of the soil should be evaluated by the amount of water above the break point in the surface soil.

Aa gas exchange is inevitable for soil aeration and air porosity is the easiest physical factor to be measured in the field, relative gas diffusion coefficient as a function of air porosity must be studied further. It is important for gas diffusion to evaluate the amount of isolated air filled pores at saturation and the reflection point or the bubbling pressure in the soil water characteristic curves.

**Keywords** : water potential, hydraulic conductivity, air porosity, gas diffusion coefficient, ODR.

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn, 69,55-66, 1994)

### 1. はじめに

植物根は水を吸収するとともに呼吸によって酸素を消費する。通気が十分であれば水耕中で植物が正常に生育することは、土耕で使われる水分過剰は、有害物質の生

\*農業環境技術研究所 〒305 つくば市観音台3-1-1

キーワード：水ポテンシャル，透水係数，気相率，ガス拡散，ODR

成を除くと、酸素不足と言うことが出来る。したがって、土壌が持つ水と酸素の供給力とは、植物が正常な生育を維持するための土壌水分の上下限値を求めることにほかならない。そして、この上下限値の間の広い土壌ほど、高い評価が与えられる。植物の水吸収のみを対象とした場合、土壌水分の上限として圃場容水量が良く用いられる。圃場容水量は、その土地固有の保水を示す非常に優れた概念である。しかし、これからの議論では、土壌水分の上限を酸素供給の下限と位置付けることにする。

我々は今まで、水分率と気相率、土壌の水ポテンシャルと酸素濃度、透水係数とガス拡散係数等の因子を用いて、さらには移動モデルを適用して土壌の持つ水や酸素の供給力を評価して来た。本課題では、これらの研究過程を経て、供給力の評価にどの程度接近出来たのかを、水と酸素の類似性と相違点にも着目しながら振り返ってみる。また、土地の水と酸素の供給力について、現場での測定が容易な作土の水分率と気相率を用いて評価することについて考えてみる。

2. 植物の要求量と土壌中の水・酸素の存在量

土壌に含まれる水と酸素が植物の要求量を満たす期間は非常に異なる。黒ボク土を対象とした水とガスの研究<sup>1,2)</sup>をもとに植物の水と酸素要求に対する土壌の供給時間を試算してみる。表1に計算に必要な数値を示した。根群の深さはダイズ(タチナガハ)開花後期の深さ別根長測定より得た。根が吸収出来る水の量を表す有効水分量は、深さ80 cmまでの各層位における-6 kPaから-1.5 MPaの水分率の差をもとに計算した値である。水分消費型は仮定である。蒸発散速度は大き目の値を仮定した。乾燥時及び湿潤時の気相率は、約1ヶ月の干天後と数10 mmの降雨後3日目の深さ80 cmまでの含水比の実測により計算された平均値である。気相中の酸素濃度は大気中と同一の値とした。封入空気率はガス拡散係数がゼロの時にも土壌中に含まれている空気の割合で、

表-1 植物の要求量と土壌中の水・酸素の存在量

黒ボク土		ダイズ畑の例	
水		酸素	
根群深さ	80 cm	乾燥時の気相率	26%
有効水分量	20%	湿潤時の気相率	11%
水分消費型	4:3:2:1	封入空気率	6%
(全消費水分量 100 mm)		ダイズ畑呼吸量	21.6 g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
蒸発散速度	5 mm d <sup>-1</sup>	裸地呼吸量	9.4 g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
消費期間		消費期間	
20日		ダイズ畑	裸地
		湿潤時	0.6日
		乾燥時	2.2
			5.1

後述の相対ガス拡散係数と気相率との関係から得た。ダイズ畑及び裸地の呼吸量は、フィックの法則より求めた夏期の一日の平均値である。以上の数値を用いて土壌の供給時間を計算すると、土壌中に貯留された水は約3週間の作物の生育を保証する。実際には、乾燥に伴い深い層から根群に向かって水の補給が行われるため<sup>3)</sup>、計算で得られた値以上の長期の水供給が可能である。一方、深さ80 cmまでのダイズ畑の気相に貯えられた酸素は、湿潤時では1日未満、乾燥時においても3日未満ですべて消費つくされてしまう。乾燥時の裸地でさえ、5日で土壌中の酸素はなくなってしまふ。

水と酸素との比較から、土壌の供給力を評価する場合、水では土壌中に貯留されている有効水分量が重要で、酸素では土壌と大気とのガス交換速度が重要であることが理解出来る。

なお、表1から、ダイズ根の呼吸量をダイズ畑と裸地の差とみなし、実測のダイズ根長(11.4 km m<sup>-2</sup>)を用いて単位長さの根の酸素呼吸量を計算すると0.006 cm<sup>3</sup> cm<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>となる。同じく表1から計算される単位長さの根の吸水量は0.004 cm<sup>3</sup> cm d<sup>-1</sup>となる。体積的には酸素の吸収量が多いことがわかる。

3. 水と酸素の供給力の評価法

(1) 水と酸素の評価法の類似点と相違点

表2に水と酸素の供給力の下限値を評価するときによく使われる因子を示す。両者とも、容量割合、強度、移動性という因子を持っている。水の場合は、水分率自体が供給力の対象となることはない。しかし、水ポテンシャル、透水係数とも水分率の函数として表現出来るので、土壌の供給力は強度と移動性とを関連づけながら考察されて来た。前節で述べたように、水の評価は土壌中の存在量であるため、強度、移動性の下限値は水分率で表現される。一方、酸素の場合には、気相率、酸素濃度、ガス拡散係数とも供給力の評価に用いられている。ガス拡散係数は気相率の関数として表現される。しかし、水の場合と異なって強度と移動性を関連づけながら酸素の供給力を評価する試みはなく、独立して研究が進められて来た。また、酸素の場合には、根の表面は水膜で覆われているという視点から、水に溶解した酸素をもとに供給力

表-2 土壌の水・酸素供給力

	容量割合		強度	移動性
	水分率	水ポテンシャル	水ポテンシャル	透水係数
水				
酸素	気体	気相率	濃度	拡散係数
	溶解	—	濃度	拡散係数

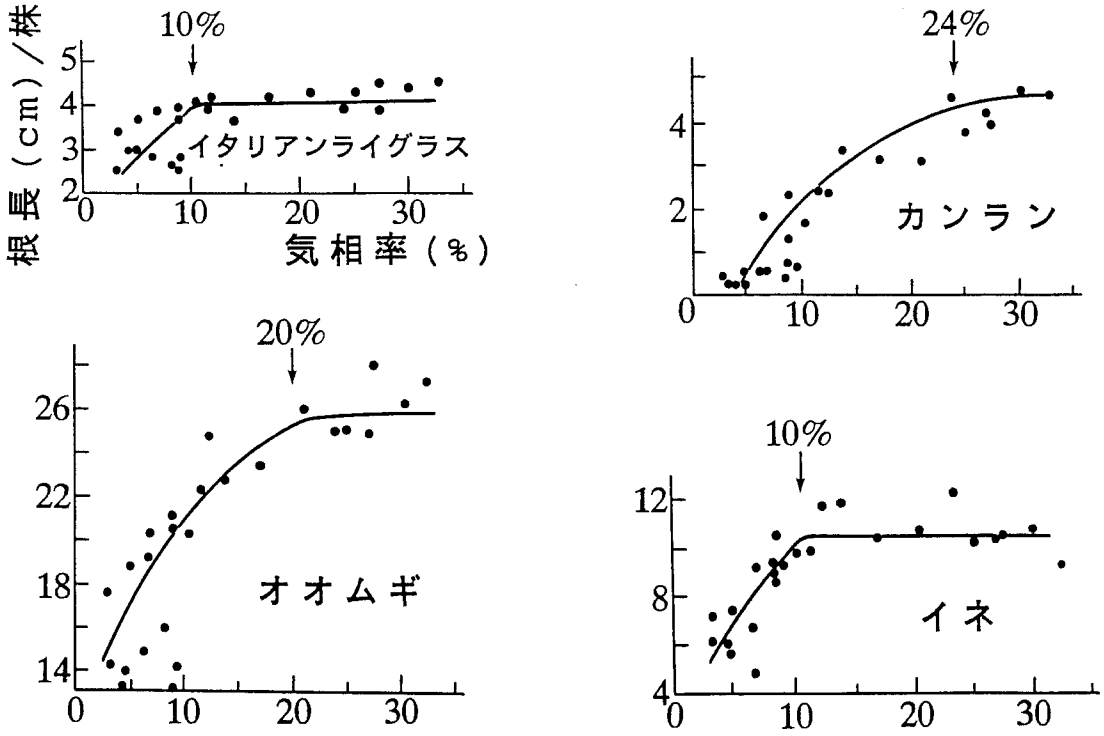


図-1 気相率と根の生育 (文献4より一部改変)

を考えると全く別の方法もある。この場合には濃度、拡散係数とも土壌水中の酸素濃度、酸素ガス拡散係数である。なお、黒ボク土の深さ80 cmまでの液相中に溶けている酸素の量は、地表面 1 m<sup>2</sup> 当たりせいぜい数グラムであり、根が1日に消費する酸素量の約半分である。

(2) 水分率と気相率

例えば、水分率が0.3(m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)のとき、ある土壌では植物は正常に生育しても、異なる土壌では水分不足のこともあり得る。したがって、水分率は供給力の指標としては使えない。一方、酸素の場合には、気相率自体が供給力の限界値の指標として用いられることがある。森と小川<sup>9)</sup>は、根の伸長は気相率が10~24%以下で抑制されること(図1)、幸田<sup>9)</sup>は作物が正常に生育するためには、気相率が11~21%以上必要を示した(図2)。気相率に幅があるのは作物種による違いを示す。このような評価手法は、気相率が小さな値でも生育する作物の選抜に使うのに有効である。しかし、転換畑作における適正地下水位の実測例が土壌の種類によって大きく異なるように、作物の生育を保障する気相率は土壌によって当然異なるであろう。また、気相率を用いた場合、生育

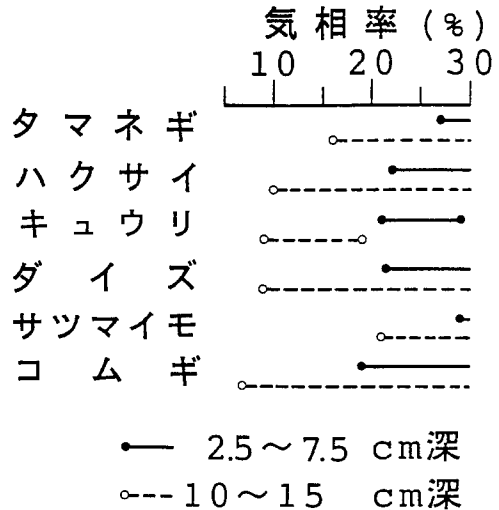


図-2 作物生育に適した気相率 (文献5より抜粋)

の阻害がガス交換の速さで決定されるのか、気相中の酸素濃度によって決定されるのかが特定出来ず、水の供給状態を水分率で表現し得ないことと同一の限界を持っている。

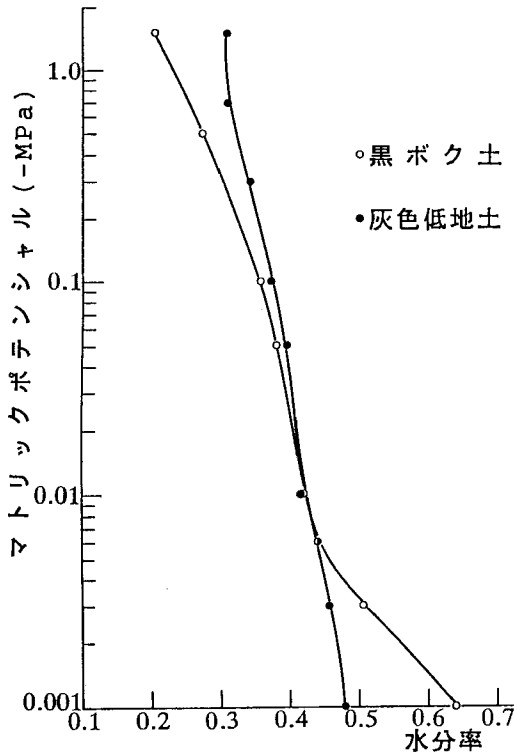


図-3 作土の水分特性曲線

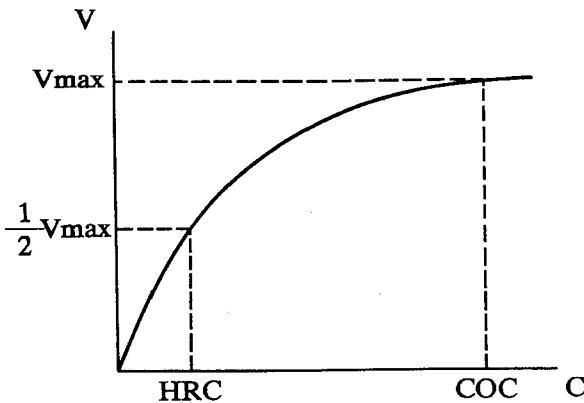
(3) 水ポテンシャルと酸素濃度

根の吸水が土壌と葉の水ポテンシャル差によって生じていることから、土壌の水ポテンシャルが供給力の指標として使われるようになってから約半世紀が過ぎた。最も良く使われているのはしおれ点である。土壌水分がしおれ点に近づくとつれ、根と土壌との水ポテンシャル差は小さくなっていき、水が動きにくくなる。しおれ点の水ポテンシャルは-1.5 MPaとされている。ある水ポテンシャルの土壌水分状態からしおれ点までに保持される水の量は水分特性曲線(図3)によって求めることが出来る。

酸素の場合は、水ポテンシャルに対応するのは酸素濃度であり、研究の蓄積があるのは気相の濃度である。根の呼吸は、酵素触媒反応として考えることが出来る。そのため、呼吸が低下し始めるときの酸素濃度である critical oxygen concentration (COC) とミハエリス定数に相当する、酸素吸収速度が最大値の1/2になったときの酸素濃度 (HRC) が良く調べられている(図4)。GlinskiとStepniewski<sup>6)</sup>は COC, HRCについて既往のデータを整理している。それによると、インタクトな根の場合、COCは0.1~0.2 (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), HRCは0.01~0.02の例が多いが、作物種、栽培条件、実験条件により大きな幅がある。Armstrong<sup>7)</sup>は、COCを求めることは価値のあることと認めながらも、実際の測定例は少なく、しかも切り取った根を対象とした測定が多いため、一般に信頼性は低いと述べている。また、気相における平均酸素濃度は、根が利用出来る酸素量の指標にならないという指摘<sup>8)</sup>もある。

(4) 透水係数とガス拡散係数

水や空気の移動が水ポテンシャル差、濃度差で生じるとき、その速度を規定する因子である透水係数やガス拡



$$V = V_{max} \frac{C}{HRC + C}$$

V : 呼吸速度

V<sub>max</sub> : 最大呼吸速度

C : 濃度

COC : critical 濃度

HRC :  $\frac{1}{2} V_{max}$  時の濃度

図-4 酵素触媒反応による根の酸素吸収の考え方

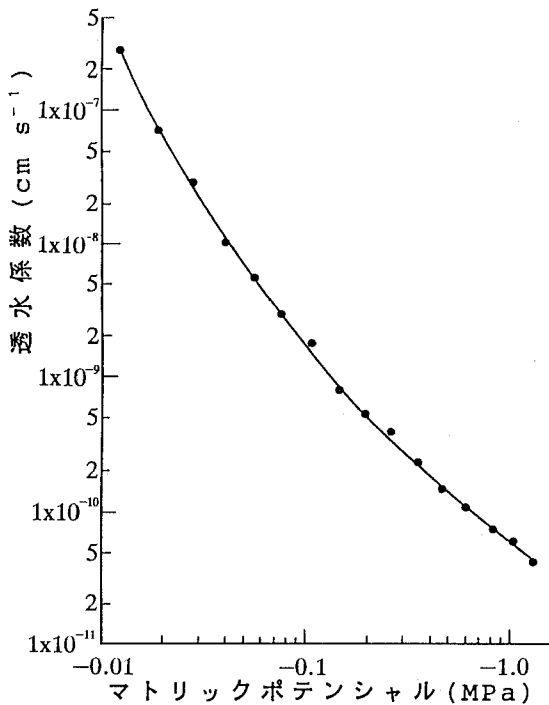


図-5 不飽和透水係数とマトリックポテンシャルとの関係 (LiC, 文献9より)

散係数も土壌の供給力の指標となり得る。透水係数は図5にみるように土壌の乾燥につれ低下する。いくつかの実測例をまとめたMolz<sup>10)</sup>によると、水ポテンシャルが-100 kPaから-1.0 MPaまで低下するにつれ、透水係数は $10^{-9}$  cm s<sup>-1</sup>のオーダーから $10^{-11}$  cm s<sup>-1</sup>のオーダーへと2オーダー変化する。透水係数は供給力の直接の指標としては使われず、水移動モデルの中でその寄与が考察されている。我が国の畑地灌漑の灌水点としては、しおれ点よりも湿潤側の生長阻害水分点を用いられており、水分恒数の1つともなっている。生長阻害水分点は、「根への水分移行速度が極端に衰えている水分状態」として定義されている<sup>11)</sup>。正確な測定法が確立しなかったという問題は残るものの、水の移動性に着目した点は評価出来る。生長阻害水分点は-50~-100kPaの水ポテンシャルに相当し、光合成や蒸散速度の低下が指摘されている<sup>12)</sup>。生長阻害水分点と類似の概念として毛管連絡切断含水量がある。この定義には液状水としての移動がこれ以上の乾燥では生じないという表現があるため、現在の土壌物理では受け入れ難い。

根の呼吸にとっては土壌と大気とのガス交換が不可欠であり、ガス拡散係数の大小は決定的な役割を担っている。図6にいくつかの土の相対ガス拡散係数と気相率との関係を示す<sup>13)</sup>。相対ガス拡散係数( $D/D_0$ )は、土壌中のガス拡散係数( $D$ )と大気中のガス拡散係数( $D_0=0.2$

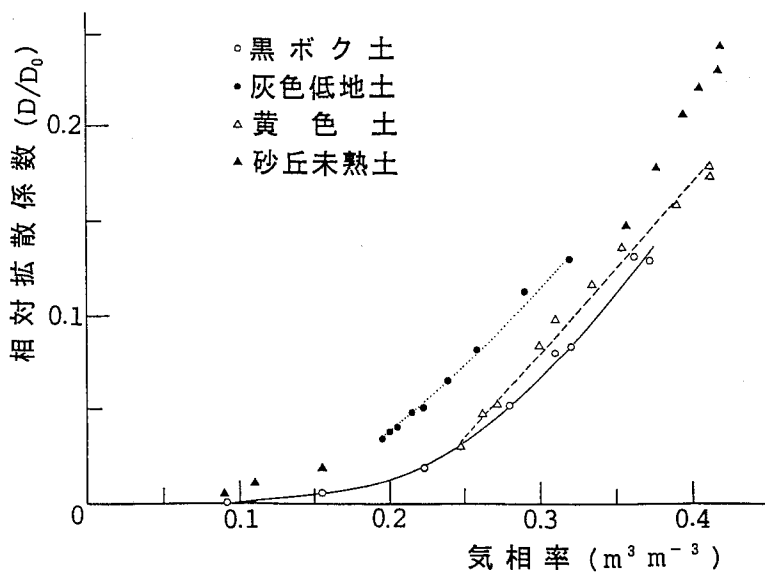


図-6 相対拡散係数と気相率との関係 (文献13より)

$\text{cm}^2/\text{s}$ )の比である。透水係数が植物の生育する水分領域内で水分の低下とともに数オーダー変化するに比べ、相対ガス拡散の変化幅は約2オーダーと小さい。植物の生育が抑制される相対ガス拡散係数としては、トマト、ライグラスでは0.005<sup>14,15)</sup>、トウモロコシでは0.02<sup>16)</sup>という値が提案されている。ダイズとトウモロコシを用いた栽培実験から、遅沢は、 $D/D_0$ の下限値は出芽期では0.02以上、幼植物以後は0.005以上が必要であるという結果を得ている<sup>2)</sup>。相対拡散係数と気相率との関係は土壌によって異なり、 $D/D_0=0.005$ に対応する気相率は、黒ボク土では16%と大きく、黄色土では13%、灰色低地土では9.6%と小さい。

#### 4. 水と酸素の移動モデル

水と酸素の移動モデルは2通りの方法で展開されてきた。一つは個々の根を対象としたマイクロモデルで、他は根を含む土の体積を対象としたマクロモデルである。移動の基本式は水ではダルシー則であり、酸素ではフィックの法則である。以下にマイクロモデルとマクロモデルに分け、水と酸素の移動を並列的に議論していく。

##### (1) ミクロモデル

水ではポテンシャルと透水係数を、酸素では濃度と酸素拡散係数を用いることにより、マイクロモデルは図7に示すように全く同一の形で表現される。ただし、ここでのガス拡散は根の表面の水膜中の拡散を考えている。マイクロモデルの水移動では、土壌中と植物体中の水移動

の難易は、土と根及び根と葉の水ポテンシャル差により評価されてきた。Newman<sup>17)</sup>は、しおれ点近くまでは、土壌中の水移動は土壌-植物の水移動に障害を与えないと結論し、その後の研究はほぼこの結論を支持している<sup>18,19)</sup>。実際に、マイクロモデルを使って試算してみると、透水係数が $10^{-9} \text{ cm s}^{-1}$  ( $-100 \text{ kPa}$ の水ポテンシャルにはほぼ相当)では $\phi_s - \phi_r$ は数kPa程度であること、透水係数が $10^{-11} \text{ cm s}^{-1}$  ( $-1.0 \sim -1.5 \text{ MPa}$ の水ポテンシャルに相当)になると $\phi_s - \phi_r$ は根と葉の水ポテンシャル差と同程度となることがわかる<sup>20)</sup>。しかし、一方では、マイクロモデルは、対象が小さ過ぎて実験的な検討が出来ないこと、水耕と異なり、土壌中では、乾燥するにつれ根と土壌水との接触面積が減少すること<sup>21)</sup>、畑では、モデルより高水分でホストレスを受けること<sup>22)</sup>などが指摘されている。水のマイクロモデルは、根の吸水機構の理解には役立ったが<sup>23)</sup>、その限界も明らかとなった。

酸素のマイクロモデルは水膜の厚さや酸素濃度を決定出来ないなど、水の場合より概念的なものである。しかし、酸素拡散速度(ODR)測定法の物理的根拠を与えるものとして使われている。根に見立てた細い白金電極を土壌中に挿入し、ある範囲の電圧を与えると酸素は白金電極で還元され、還元速度に比例した電圧に無関係な電流が流れる。ODRの原理は、この還元速度は水膜中の酸素の拡散速度に等しいという視点にたっている。したがって、ODRはマイクロモデルと還元速度の2つの式を用いて以下のように展開される<sup>24)</sup>。図7の単位長さ当たりの

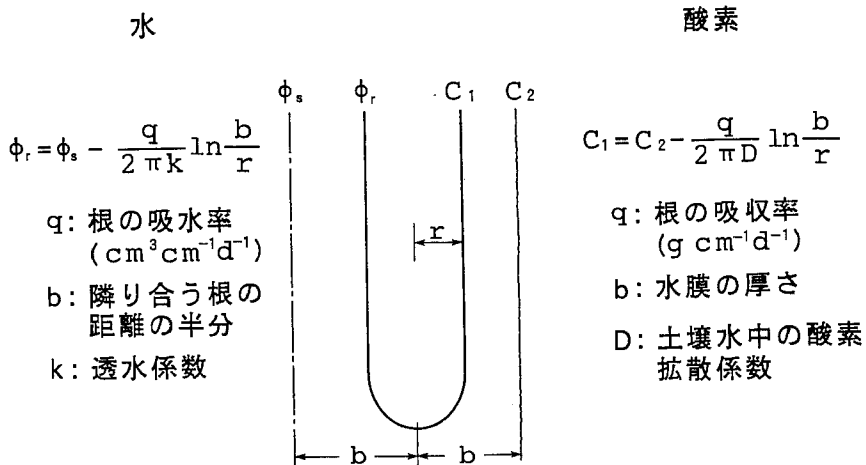


図-7 水移動・ガス拡散のマイクロモデル

酸素吸収速度を単位面積当たりの吸収速度  $f_a$  で表示すると  $q = f_a \cdot 2\pi r$  となり、なおかつ、根の表面で酸素濃度がゼロ ( $C_i = 0$ ) とすると、マイクロモデルによる拡散の式は次のように変形される。

$$f_a = \frac{C_2 D}{r (\ln b - \ln r)} \quad (1)$$

すなわちこれが ODR である。一方還元速度に比例する電流は

$$i = \alpha A f_r \quad (2)$$

で与えられる。 $\alpha$  は定数、 $A$  は電極の表面積である。還元速度 ( $f_r$ ) と吸収速度 ( $f_a$ ) を等しいと置くと

$$\text{ODR} = \frac{i}{\alpha A} = \frac{C_2 D}{r (\ln b - \ln r)} \quad (3)$$

実際の ODR の測定に際しては、単位の変換等があるので、 $\alpha$  の詳細は実験書等を参照する必要がある。(3) 式の重要性は、ODR がマイクロモデルから展開出来るという物理的な根拠を与えていることである。しかし、ODR には根の表面の酸素濃度はゼロという仮定の妥当性に加え、水膜の厚さ、土壌水中の拡散係数など、他の方法では検討出来ない項を含んでいる。したがって、ODR は絶対的なものではなく、根の呼吸という動的な側面にとって有意義な情報を与える数値と理解すべきであろう。

図 8 は、ODR と出芽率の関係を Glinski と stepniewski がまとめたものである<sup>6)</sup>。ODR が 40 以下になると出芽率が低下する。我が国の測定例は多くないが、安田<sup>26)</sup>はイ

ソゲンの生育は ODR が 40 以上であることが好ましく、10 前後では乾物生産が著しく劣ることを指摘している。また、土壌物理性測定法では図 8 の右側のようにまとめている<sup>26)</sup>。遅沢らは、強グライ土を除き、ODR = 20 は  $D/D_0 = 0.02$  に相当するという結果を得ている<sup>27)</sup>。異なる測定法による酸素供給力の比較を可能にする貴重なデータである。

(2) マクロモデル

水移動のマクロモデルは鉛直方向を  $Z$  とすると次式で与えられる

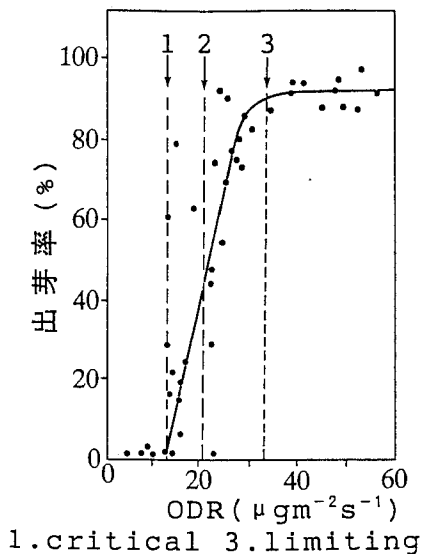
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left( k \left( \frac{\partial \phi_s}{\partial Z} + 1 \right) \right) - s \quad (4)$$

この式は、ある深さの水分率 ( $\theta$ ) の時間変化は、右辺第 1 項のマトリックポテンシャル勾配による水移動と右辺第 2 項の根の吸水によって変化することを示している。吸水項としては様々な式が提案されているが、その多くは根の吸水は土壌との水ポテンシャル差によるという概念を利用している。

$$s = \frac{\phi_s - \phi_p}{R_s + R_p} \quad (5)$$

ここで、 $\phi_s$  は植物の水ポテンシャル、 $R_s$ 、 $R_p$  は土壌及び植物中を水が流れるときに発生する流動抵抗である。この式は Hillel が用いた式である<sup>28)</sup>。また、経験的に次のような式も提案されている<sup>29)</sup>。

$$s = -\frac{1.6}{L^2} T Z + \frac{1.8}{L} T \quad (6)$$



ODR	作物生育
10 以下	枯死しないしは著しく阻害
10 ~ 20	相当の阻害
20 ~ 30	かなりの影響
30 ~ 40	ほぼ良好
40 以上	好適である

図-8 ODRの値 (左:文献6より, 右:文献26より)

ここで、 $L$ は根群の深さ、 $T$ は蒸散量である。この式では根群を四等分したとき、土層別吸水量が4:3:2:1となる。水移動のマクロモデルは、根系分布を持った植物の水分吸収型を説明するのには有効であり、また、根系分布、根の伸長や枯死、蒸散強度が深さ方向の水分吸収型に及ぼす影響を考察するために利用された<sup>30,31)</sup>。しかし、吸水項として(6)式のようなポテンシャルを用いるモデルでは、 $R_p$ や $R_s$ をあらかじめ別な方法で決定するのが困難なこと、ある作物、土壌条件で得られた $R_p$ 、 $R_s$ を他の条件に適用してうまくいく場合がほとんどないことが知られている<sup>32)</sup>。 $\phi_s - \theta$ 、 $k - \phi_s$ の関係が異なる土壌をマクロモデルに入力すると、土壌の水供給力を評価するが、それは相対的なものである。したがって、マクロモデルの評価は期待した程にはあがっていない。

マクロモデルによる酸素の拡散は次式によって表される。

$$a \frac{\partial C_g}{\partial t} = D_g \frac{\partial^2 C_g}{\partial Z^2} + r_g \quad (7)$$

ここで、 $a$ は気相率、 $C_g$ は土壌空気中の酸素濃度、 $D_g$ は土壌空気中の拡散係数、 $r_g$ は酸素消費率である。(7)式の物理的意味は、ある深さの酸素量の時間的変化は、拡散によってこの深さを出入りした酸素量の差と、根や微生物の呼吸によって失われた酸素量に等しいということである。一般に土壌中のガスの拡散は迅速に行われるため、ガス拡散の問題は定常状態として解かれる場合が多い<sup>33)</sup>。土壌の酸素供給力は、ODRは別としても、濃度とガス拡散係数によって別々に検討された。そこで、マクロモデルを用い、濃度とガス拡散係数の関係を検討してみる。計算に用いた方程式は、(7)式左辺をゼロとした定常状態の式である。境界条件としては、地表面の酸素濃度は大気中の濃度に等しい、作土下端を横切って酸素の流れは生じないとした。2番目の条件は、土壌の酸素供給力は過湿条件で問題となることから、作土直下に地下水面がある、又は作土直下は依然として水で飽和しているという状態に相当する。また、酸素の消費は作土層に様に分布した根の呼吸と微生物による消費の和とし、その値は表1のダイズ畑呼吸量とした。作土の深さは20cmである。定常状態の解は次式で与えられる。

$$\frac{C_g(z)}{C_0} = 1 + \frac{r_g L^2}{C_0 D_g} \left( \frac{1}{2} \left( \frac{z}{L} \right)^2 + \frac{z}{L} \right) \quad -L < z < 0 \quad (8)$$

ここで、 $Z$ は深さ、 $L$ は作土の厚さ、 $C_0$ は大気中の酸素濃度である。(8)式は、土壌のガス拡散係数が決まれば、深さ方向の酸素濃度分布は一義的に決定されることを示している。相対ガス拡散係数の下限値として採用されて

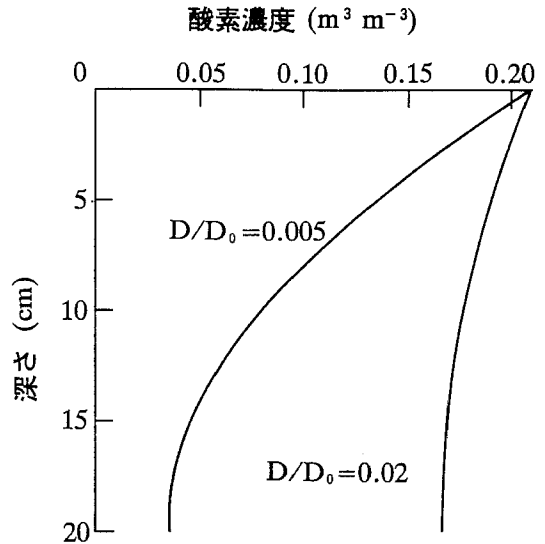


図-9 相対ガス拡散係数と酸素濃度

いる $D/D_0=0.02$ と $0.005$ の時の酸素濃度分布を図9に示す。 $D/D_0=0.02$ の時は酸素濃度は15%以上に維持され、平均値では18%となる。一方、 $D/D_0=0.005$ の場合、作土下端(20cm)では酸素濃度は3.5%まで低下し、平均値も9.3%と大気濃度の半分以下となる。前述のように酸素濃度を指標とした供給力は、作物や方法によって大きく異なり十分評価出来る段階にないが、酸素供給に対する相対拡散係数と酸素濃度の関係が検討されることが望まれる。このような場合にこそ、マクロモデルはその機能を発揮すると考えられる。

以上のように、移動モデルは水や酸素の吸収機構を説明したが、モデルをより厳密に考えていくと未知のパラメータが増え、結局汎用性を持たないモデルとなる宿命を持っている。根の吸水モデルにはこの10年間、めざましい進展はない。複雑なモデルに頼るよりも、信頼性、再現性の高い実験にもとづく単純なモデルの開発が必要とされる。

## 5. 水の供給力からみた土地の評価

土壌の水供給力の下限値であるしおれ点は、水ポテンシャルが $-1.5$  MPa、透水係数が $10^{-11}$  cm s<sup>-1</sup>に相当することが、ポテンシャルと移動の両者からはほぼはっきりした。しかし、作物を生産する場合、しおれ以前の、蒸散量や光合成が維持出来る土壌水分量の評価も重要な意味を持つ。生長阻害水分点はこの点で有効な指標と考えられるが、土壌物理からの評価は未だ不十分である。一



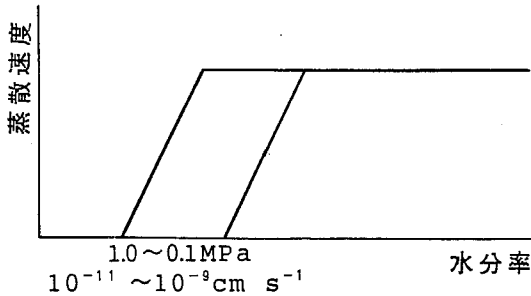


図-10 蒸散速度と水分率との関係

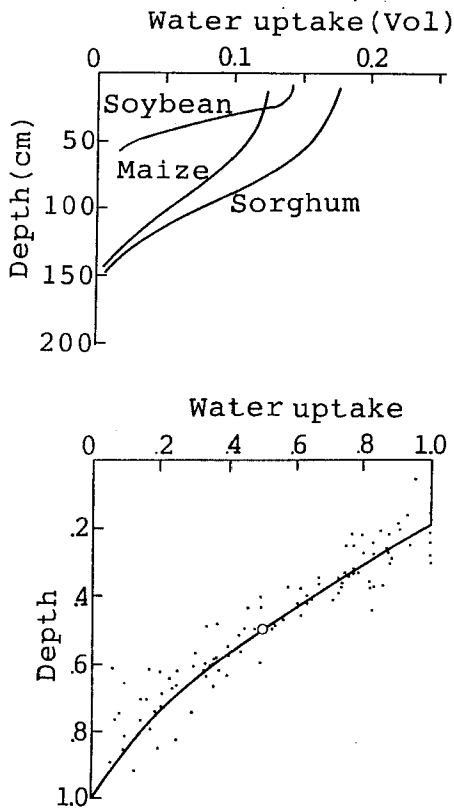


図-11 根系分布のある場合の吸水パターンとその規格化 (文献35より改変)

方、植物は根系分布を持ち、一般に浅層から多くの水を吸収し、深層に吸水可能な水分を残したまま蒸散量は低下していく。したがって、土壌の水供給をさらに進めて考える場合には、蒸散速度の低下を規定する土壌物理

要因の明確化と根系分布の取り扱いが大切となってくる。

土壌水分と蒸散速度との関係をみると、土壌水分が十分にあるときには、蒸散速度は光強度、大気温湿度等の外的要因に支配され(ポテンシャル蒸散)、ある水分以下では土壌側の要因の制限を受けて図10に示すようにほぼ直線的に低下する。蒸散速度が低下し始めるときの水分は、良く知られているように、外的要因の強度(external evaporativity)に依存するが<sup>30)</sup>、多くの栽培試験から、土壌の水ポテンシャルが $-0.1 \sim -1.0$  MPaの範囲に入っている<sup>35)</sup>。培地に水が十分ある条件下でも、土壌と根の水ポテンシャルには数100 kPaの差があること、葉の気孔は $-1.2 \sim -1.6$  MPaで閉じること<sup>36)</sup>を考慮すると、土壌の水ポテンシャルが蒸散速度の低下の支配的要因と考えることが出来る。一方、土壌の透水係数が $-0.1$  MPaから $-1.0$  MPaの間で約2オーダー低下することを考慮すると、土壌中の水移動が蒸散速度の低下の鍵を握っていると考えることも出来る。

蒸散速度が低下する要因が特定されたとしても、畑では根系分布があるため、どこまでの深さを対象にして供給力の評価をすべきかという問題が残る。Gardnerは、蒸散速度が低下し始めるときの土壌水分分布について既往の研究をまとめた<sup>35)</sup>。図11の上の図はその例である。作物、気象、土壌にくわえ施肥等の栽培条件によって土壌水分分布は異なる。そこでGardnerは、全吸水量の50%に相当する深さを0.5とし、また、最上層(25cm)の吸水量を1として規格すると、上の図の吸水パターンは、下の図のようにほぼ同様の吸水パターンとなることを示した。深さ0.2の吸水量を1、深さ0.8の吸水量を0として直線を引くと、0.2ごとの消費水量は40,33,20,7%となる。これは古くから、深さ1フィートまでに全体の40%の水が消費され、1フィート深くなるごと30,20,10%となるという経験<sup>37)</sup>とほぼ一致する。また、根群域を4等分したときの吸水パターン<sup>38)</sup>や前述の経験則にもとづいたMolzの吸水項とも一致する。我が国では、降雨が頻繁にあるため、図11の上の図のような吸水パターンを得るのは容易ではない。また、湿潤地域の我が国では畑作物の根系分布は浅いと言われるものの、根長分布に関するデータは非常に少ない。一方、我が国の畑地灌漑では、有効土層内で水分消費に最も支配的な役割を果たし、その層の水分状態が生育等に強く影響を与える層を制限土層と呼んでいる。そして多くの場合、作土が制限土層となる。このように、Gardnerのまとめと我が国の経験をもとにすれば、土壌の水供給力の限界は表層から生じていくことは明らかであり、限界値の評価は作土を対象とすれば良いであろう。

植物の水要求に対する土壌の供給力の評価に、“簡単

な”という修飾語を付ければ、作土の $-0.1$  MPa水分量が基準となる。もちろん研究面では、蒸散の低下が水ポテンシャルで規定されるのか、移動性で規定されるかを明確にする必要がある。一方、蒸散が低下してから枯死するまでの土壌の水供給力の評価は生存という面で重要である。この場合は、作土の有効水分の多くは消費され、心土に最大吸水部位が移行するため、心土の水供給の役割の評価が大切となる。心土は人為的攪乱を受けないため、根の伸長、発達は土壌の硬さ、孔隙構造の影響を受け<sup>39)</sup>、根の分布が局所的になっていることが多い。このような不均一に発達した根においては、均一に発達した根系と比べ、土から根までの水移動距離が長い<sup>40)</sup>ため、土壌中の水移動が吸水の阻害要因となり易い<sup>40)</sup>。また、根群土壌が乾くにつれ、より深い層から根群に向かって毛管水が補給されるが、定量化手法が確立しているとは言い難い。生存のための水供給力の評価には、このような面からの研究の発展が必要である。

## 6. 酸素の供給力から見た土地の評価

酸素の場合は水と異なり、大気から土壌へのガス交換が保証される必要がある。この点からすると、降雨後の地表湛水排除時間は大きな意味を持っている。畑、汎用農地では、湛水が24時間以内で排除されれば十分であると考えられる。酸素の供給力の評価は、今までみてきたように因子間の関連性は強調されて来なかったため、相互の読み替えは不十分である。そこで、最も測定が容易な気相率を変数として、気相率の函数で表現出来るガス

拡散係数に限界値を求めるのが妥当と考えられる。対象とする深さは、水の場合と同様に作土である。図6に示したように、 $D/D_0$ が小さい領域では気相率の差は少ない。酸素の拡散には気相の連続が不可欠であるため、限界負圧(空気侵入値)を超えたところの $D/D_0$ が意味を持っている可能性が高い。また、GrableとSiemer<sup>41)</sup>は水分特性曲線の変曲点を境に $D/D_0$ は値を持つと述べており、これらの点についての研究が望まれる(図12)。我々は土壌の三相比をしばしば測定するが、毛管飽和状態での程度孤立した気相(封入空気)が含まれているのかをあまり注目して来なかった。単純で基本的なこのようなデータは、ガス拡散開始点の気相率の評価につながる<sup>42)</sup>と考えられる。さらに、ガス拡散係数下限値の作物間差の検討、ODRと気相率との関係も研究としては検討していかねばならない。最後に、水と酸素の下限値について表3にまとめておく。

表-3 土壌の水・酸素供給力の限界

	容量割合	強度	移動性
水	生存	$-0.1$ MPa	$10^{-9}$ cm/s
	生存	$-1.5$ MPa	$10^{-11}$ cm/s
酸素	気体	CO <sub>2</sub> =10% HRC= 2%	$D/D_0=0.005$
	溶解	?	ODR=10

## 7. おわりに

水・酸素の供給力とも、移動モデルによって評価する

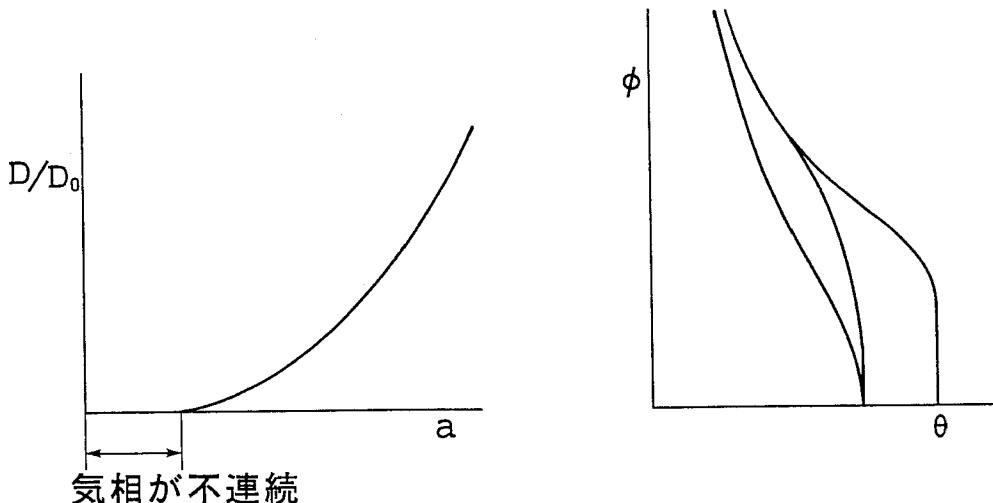


図-12 土壌中のガス拡散と気相率との関係

方向に進んだ。しかしながら、土壌-植物系の複雑さにくわえ、気象要素が関与することから、モデルも複雑となり、その適用性の限界も明らかとなった。より単純化した汎用性のあるモデルの構築は一方では進めなければならない。しかしながら、土壌の供給力の評価は今まで述べて来たように、再び量的、質的な変数をもとに考えていかざるを得ないのが現状である。これは、研究の進歩に対して逆行しているのかどうか改めて考えてみる必要がある。

### 謝辞

本原稿をまとめるにあたり、四国農業試験場の遅沢省子氏からガス拡散係数に関するデータの提供と貴重な助言を得た。記して謝意を表します。

### 引用文献

- 1) 長谷川周一：転換畑土壌中の水分移動、土壌の物理性, 53, 13~19 (1986)
- 2) 遅沢省子：土壌中のガスの拡散測定法とその応用に関する研究, 学位論文, 京都大学 (1994)
- 3) Hasegawa, S., S. Osozawa and H. Ueno: Measurement of soil water flux in Andisols at a depth below a root zone of about 1m, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 40, 137~147 (1994)
- 4) 森哲郎, 小川和夫：土壌の物理的要因と作物の生育に関する研究, *東海近畿農試験報*, 16, 77~104 (1967)
- 5) 幸田浩俊：野菜類と普通作物による低湿地帯の田畑輪換栽培に関する研究, *茨城県農試験報*, 22, 25~63 (1983)
- 6) Glinski, J. and W. Stepniewski: Soil aeration and its role for plants, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL. (1985)
- 7) Armstrong, W. and T.J. Gaynard: The critical oxygen pressures for respiration in intact plants, *Physiol. Plant.* 37, 200~206 (1976)
- 8) Russel. R.C.: 田中典幸訳, 作物の根系と土壌, P.257, 農文協 (1981)
- 9) Hasegawa, S., F.T. Parao and S. Yoshida: Root development and water uptake under field condition, Saturday seminar, Feb. 24, IRRI (1979)
- 10) Molz, F.J.: Potential distribution in the soil-root system, *Agron. J.*, 67, 726~729 (1975)
- 11) 農業土木標準用語事典：農業土木学会 (1992)
- 12) 鴨田福也, 坂田公男, 伴義之：干ばつ時における限界灌水量に関する研究, *防災科学技術総合研究報告*, 34, 47~60 (1974)
- 13) 遅沢省子：土壌ガス拡散係数測定と土壌診断, 土壌の物理性, 55, 53~60 (1987)
- 14) Lemon, E.R. and A.E. Erickson: The measurement of oxygen diffusion in soil with a platinum microelectrode, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 16, 160~163 (1952)
- 15) Gradwell, M.W.: Soil physical conditions of winter and the growth of ryegrass plant, *N.Z.J. Agric. Res.* 8, 238~269 (1965)
- 16) Bertrand, A.R. and H. Kohnke: Subsoil conditions and their effects on oxygen supply and growth of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21, 135~140 (1957)
- 17) Newman, E.I.: Resistance to water flow in soil and plant I. Soil resistance in relation to amount of root: theoretical estimates, *J. Appl. Ecol.* 6, 1~12 (1969)
- 18) Lawlor, D.W.: Growth and water use of *lolium perenne* I. Water transport, *J. Appl. Ecol.*, 9, 79~98 (1972)
- 19) Reicosky, D.C. and J.T. Ritchie: Relative importance of soil resistance and plant resistance in root water absorption, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40, 293~297 (1976)
- 20) 長谷川周一：土壌中の水移動と根の吸水, 移動現象 PP.11~40, 博友社 (1987)
- 21) Tinker, P.B.: Transport of water to plant roots in soil, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, 273, 445~461 (1976)
- 22) Zur, B., J.W. Jones, K.J. Boote and L.C. Hammonds: Total resistance to water flow in field soybeans: II. Limiting soil moisture, *Agron. J.*, 74, 99~105 (1982)
- 23) McCoy, E.L., L.Boersma, M.L. Unga and S. Akwatanakul: Toward understanding soil water uptake by plant roots, *Soil Sci.*, 172, 67~77 (1984)
- 24) Phene, C.J.: Oxygen electrode measurement, *In* Method of soil analysis, part 1. Physical and mineralogical methods, *Agronomy monograph* no.9, 1137~1159, Am. Soc. Agron., Madison, WI. (1986)
- 25) 安田環：土壌空気に関する研究, *日土肥誌*, 43, 223~230 (1970)

- 26) 土壌物理性測定法：土壌空気, PP.255~277, 土壌物理性測定法委員会編, 養賢堂 (1972)
- 27) 遅沢省子・小財伸・久保田徹：「根生育非制限有効水分域」による熊本県主要土壌の物理的評価, 土壌の物理性, 60, 6~14 (1990)
- 28) Hillel, D., H. Talpaz and H.V. Keulen : A macroscopic-scale model of water uptake by a nonuniform root system and of water and salt movement in the soil profile, *Soil Sci.*, 121, 242~255 (1976)
- 29) Molz, F.J. and I. Remson : Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants, *Water Resour. Res.* 6, 1346~1356 (1970)
- 30) 石田朋靖・中野政詩：土壌~植物~大気系における土壌水分消費の動態, 農土論集, 91, 26~34 (1981)
- 31) Hillel, D. and H. Talpaz : Simulation of root growth and its effect on the pattern of soil water uptake by a nonuniform root system, *Soil Sci.*, 121, 307~312 (1976)
- 32) Rendig, V.V. and H.M. Taylor : Principles of soil-plant interrelationships, PP.117~139, McGraw-Hill, Inc. (1989)
- 33) Jury, W.A., W.R. Gardner and W.H. Gardner : Soil physics fifth edition, John Wiley & Sons, Inc. (1991)
- 34) Denmead, O.T. and R.H. Shaw : Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions, *Agron. J.* 54, 385~390 (1962)
- 35) Gardner, W.R. : Soil properties and efficient water use : An overview. *In* : H.M. Taylor, W.R. Jordan and T.R. Sinclair (eds.), Limitations of efficient water use in crop production, PP.45~64, Am. Soc. Agron., Madison, WI. (1983)
- 36) Hsiao, T.C. and K.J. Bradford : Physiological consequences of cellular water deficit : *ibid.* PP.227~265
- 37) Israelsen, O.W. and V.E. Hansen : Irrigation principles and practices, John Wiley & Sons, Inc. (1962)
- 38) Hasegawa, S. and S. Yoshida : Water uptake by dryland rice root system during soil drying cycle, *Soil Sci. Plant Nutr.* 28, 191~204 (1982)
- 39) Hatano, R., K. Iwanaga, H. Okajima and T. Sakuma : Relationship between the distribution of soil macropores and root elongation, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 34, 535~546 (1988)
- 40) Tardieu, F., L. Bruckler and F. Lafolie : Root clumpling may affect the root water potential and the resistance to soil-root water transport, *Plant and Soil*, 140, 291~301 (1992)
- 41) Grable, A.R. and E.G. Siemer : Effects 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 (1966)

(受稿年月日 1993年12月9日)