土 壌 の 気 相 環 境 の 研 究 (1)

土壌の気体拡散係数と通気係数との関係について¹⁾

伊 藤 実*

岩手大学農学部*

本研究は土壌空気の拡散係数を測定容易な通気係数から算出することを目的とし、土壌の気相環境研究の基礎としておこなったものである。研究の結果つぎのような結論をえた。

- 1) いろいろの充填のもとでの拡散係数 (D) と通気係数 (K) との関係をみると、そこにはちがひがあることがわかる。しかしこの関係にも 3) で述べるような傾向がある。
- 2) 土壌粒径の大きさによって通気係数は大きく変化するが、拡散係数はあまり影響をうけない。
- 3) 一定充填のもとで含水比のみ変化したときの集中粒径の土壌での通気係数と拡散係数との関係は次式が成立し、そこでの n は $n \approx 1$ となる。

$$D = aK^n$$

- 4) ある含水比下での拡散係数と通気係数との関係がわかれば、その土壌の拡散係数は上式を用いることによって測定容易な通気係数から算出できる。

1976 年 8 月 24 日受付

1. は し が き

作物根圏の物理環境要因としての気相のもつ役割や土壌空気の拡散理論について、すでに多くの研究がなされてきた^{1,2)}。また地下環境物理の視点に立っての土壌空気の更新についてすでに明らかにされてきたことは、この更新現象が気体の移動交換現象と拡散現象とに分けられ、そのうち後者が土壌空気更新に支配的役割を果たしているということである³⁾。作物生育の場である土壌中には多くの有機物が含まれており、それらの生成・消長にともなう土壌空気の成分変化を調節するには、土壌空気更新の主たる役割を果たしている拡散現象について十分な理解をすることが急務であると考えられる。

従来、土壌の空気更新の特徴をとらえる一つに通気係数が考えられてきた⁴⁾。この通気係数で拡散係数が求められるならば、以下述べる面倒な拡散係数を測定するよ

りも簡単な測定で得られる通気係数を用いることの意義が理解できる。しかし、すでに「通気係数」を土壌の「通気性の良否を表わす指標とするには疑問」が提示されている⁵⁾のが現状である。

筆者はこれらのことをもとにして拡散係数と通気係数との関係について、ここでは集中粒径の砂 1 (1.0~0.5 mm), 砂 2 (0.42~0.25 mm), および標準砂 (0.297~0.105 mm) を対象にして実験・考察をおこない、土壌空気の気相環境の調節を目的とした研究の基礎としてその結果を報告する次第である。

2. 実験方法

2-1. 供試土壌

土壌中に腐植など有機物を含むと微生物の呼吸作用によって土壌中の酸素が消費され、 CO_2 ガスが生成される。このために拡散係数を測定する拡散質に用いる気体の選択が問題となる。しかし気体濃度を測定するセンサにベックマン社の“Fieldlab”溶存酸素分析計を用いることとしたので拡散質は空気中酸素となる。このことから土壌中に有機物のないものを供試土壌として用いざるをえない。そこでこの条件に合うものとして、砂 1 (1.0~0.5 mm), 砂 2 (0.42~0.25 mm), および標準砂 (0.297

¹⁾ Minoru Ito*: Studies on Gaseous Environment in Soils (1). The Relation between Gaseous Diffusion Coefficient and Air Permeability.

* Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka, Japan.

～0.105 mm) のいわゆる集中粒径から成立つ土壌を実験に供した。

2-2. 測定用容器

拡散係数と通気係数との関係をとらえるためには両係数を同一供試体で測定できる容器が必要である。そのために Fig. 1 の容器を用いた。この容器の構成・使用法はつぎのようになっている。

Fig. 1 A cross-sectional sketch of a container to measure both gaseous diffusion coefficient D and air permeability K .

(D): Experimental procedure for arranging to measure gaseous diffusion coefficient.

(K): Experimental procedure for measuring air permeability.

容器下部のゴム栓AにT字型塩ビパイプを取付け、下端aから通気係数測定の場合は空気を、拡散係数測定実験ではゴム栓で密閉した。また下部側方端bは通気係数測定実験ではマンメータに接続、拡散係数測定の準備に N_2 ガスを送りこむ。ゴム栓A上に9 mm程度の空間をもうけ、その上に目の細かい真鍮の金網をとりつけ、その上に供試土壌を所定高さ($L=9.6$ cm)まで充填した。さらにその上に同じ真鍮の金網をはりつけたゴム栓Bをとりつける。ゴム栓Bの中央に塩ビパイプをつけ(上端c)、通気係数測定時では開放にし、拡散係数測定の場合

にはセンサをパイプ内にできるだけ隙間のないように挿入できるようにしてある。

2-3. 通気係数の測定法

湿式フローメータで流量を測定した空気を下端aから供試土壌中へ圧送する。このときの圧力水頭 H を下部側方端bを通してマンメータで測定する。なおこのとき単位時間・単位面積あたりの土壌を通過する空気量 q をできるだけ少なくし、上端cでの圧力水頭が0という条件を満たすようにした。通気係数 K は次式を用いて算出した。

$$q = K \frac{H}{L} \quad (1)$$

2-4. 拡散係数の測定法

拡散係数を測定するとき、はじめに土壌中には O_2 ガスがない状態にしておく。このために通気係数測定後下端aを密栓し、下部側方端bから N_2 ガスを圧入し、上端c中に入れてあるセンサで試料中に含まれている O_2 ガスが次第に排出されていくのを見る。試料中に O_2 ガスが完全にない状態になってからセンサを完全に塩ビパイプ内に挿入し、 N_2 ガスの洩れなどないようにし、5～10分間この状態のままで O_2 ガスfreeを確認してから測定を開始する。すなわち、下端aおよび下部側方端bを開放し、直ちにゴム栓Aを静かに取除き、試料下端が空氣の酸素分圧であるという境界条件を満たすようにするために、下端部を軽くあおいでそこでの空氣の更新をはかった。なお通気および拡散係数を求める実験は $25^\circ C$ 恒温室内でおこなった。

3. 拡散係数 D の算出法

通気係数は土壌体の平均化された巨視量をあらわしている⁶⁾と同じように、拡散係数も測定上で土壌中を気体が拡散している過程での平均化された巨視量である。このことはPENMANが拡散係数を求める式⁷⁾での拡散係数とは異なっている。すなわち、本研究では計測は O_2 ガス分圧 p を過渡状態で測定していることから、拡散係数は次のように書ける⁸⁾。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (2)$$

ただし D : 拡散係数, x : 容器下端網からの距離

2-4 で述べた実験方法でわかるように、測定開始時には試料内は O_2 ガスがない状態であるが、測定開始と同時に測定容器下端は開放されて、そこでの面は以後空氣中の酸素分圧となる。また上端のセンサを挿入してある部分は遮断壁となっている。いま試料長を L として $2L=l$ を用いて上のことを一般的表現形式で表わすと初期

および境界条件はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} p &= 0 ; & 0 \leq x \leq l \text{ で } t=0 \text{ のとき} \\ p &= p_0 ; & x=0 \text{ および } x=l \text{ で } t>0 \text{ のとき} \\ \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 ; & x=\frac{l}{2}=L \text{ で } t>0 \text{ のとき} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし p_0 : 空気中の O_2 ガス分圧

いま (2) 式を無次元形式⁹⁾に変換するとつぎのようになる。

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{\partial^2 P}{\partial X^2} \quad (4)$$

ここで

$$T = Dt/l^2 \quad (5)$$

$$P = p/p_0 \quad (6)$$

$$X = x/l \quad (7)$$

(3) 式の初期および境界条件も同様に變形し、(4) 式を変数分離法によって解くとその厳密解は次式のようになる。

$$P = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} e^{-(2n+1)^2 \pi^2 T} \sin(2n+1)\pi X \quad (8)$$

(8) 式を用いて拡散係数 D の算出は次のようにしておこなった。センサの位置が O_2 ガス遮断壁 ($x=L$) であることから、(7) 式で $X=\frac{1}{2}$ となる。この位置での O_2 ガス分圧 p の変化を (6) 式の P で表わし、この値と (8) 式からの数値計算で得られる P の値との相対誤差が 0.05% 以下になるまで T の値を反復計算して求める。このようにして得られる無次元化した T の値と実測時間 t とを用いて (5) 式から

$$D = \frac{(2L)^2 T}{t} \quad (9)$$

として拡散係数 D が求められる。

4. 実験結果と考察

4-1. 土壤を充填しないときの容器内での拡散係数

はじめに容器内に土壤を充填しない場合の拡散係数の測定を 2-4 の手順に従っておこなった。この場合、土壤を入れる試料長 L を用いて算出した結果、 $D=0.18 \sim 0.19 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となった。しかし 2-1 に述べたように、下部金網とゴム栓 A との間に 9 mm の空間があることから、土壤のない空の状態の測定容器の場合の試料長 L は $L=9.6+0.9=10.5 \text{ cm}$ として (9) 式を用いて計算する必要がある。このようにして求めた測定容器のみでの O_2 ガスの拡散係数はほぼ $0.22 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。

多くの気体に対して拡散係数の温度 (T_t) および圧力 (p_a) による変化は次式であらわされる。

$$D = D_s \left(\frac{T_t}{273} \right)^n \cdot \left(\frac{760}{p_a} \right) \quad (10)$$

本実験の場合、拡散媒が N_2 ガス、拡散質が O_2 ガスであることから、上式を用いて 25°C ($T_t=298^\circ\text{K}$)、1 気圧 ($p_a=760 \text{ mmHg}$) 下での O_2 ガスの拡散係数を算出すると $D=0.21 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ただし、 $D_s=0.18$, $n=1.75$ をうる。この値は土壤を充填しない場合の D の測定値と殆ど同じである。このことから本実験での測定は、容器下部のゴム栓 A を丁寧にとれば充填しない場合の拡散係数はかなりの精度でえられることがわかった。

しかし土壤を充填した場合には、境界面が金網であることから、2-4 の測定法で述べたようにゴム栓 A を静かに取除いた後で軽くあおいでそこでの空気更新をはかり、境界条件を満たすようにした。

4-2. 土壤充填を変えたときの拡散係数と通気係数

測定容器への土壤の充填を変えて、そこでの拡散係数 (D) と通気係数 (K) との関係をみることにした。実験での土壤充填の変化を固相と水分の両方の容積率でみたとき、つぎのような範囲であった。固相の容積率の範囲は砂 1: 38.7~42.6%, 砂 2: 38.5~43.9%, 標準砂: 37.3~45.1% であり、水分容積率はそれぞれ 6.9~21.6%, 8.1~22.6%, 0.00~33.5% であった。このような範囲の充填土壤に関して拡散係数と通気係数との関係を Fig. 2 a~c にあらわしてある。また拡散係数と空気容積率 (以下、空気率 air porosity という) との関係を Fig. 3 a~c にあらわしてある。

これらの図をみると、諸量間の関係は程度の差はあるがらばっていることがわかる。しかし特徴的なことは供試土壤の粒径によって通気係数は大きく変化するが、拡散係数は粒径による影響をうけていないといえる。すなわち粒径が小さいため通気係数が小さくなっている土壤の拡散係数は粒径の大きな土壤で通気係数が前者より 10 倍も大きなものの、それとほぼ同じ程度になっている。

通気係数 K (25°C) が $1 \text{ cm}/\text{sec}$ であると、土壤の固有透過係数は $1.8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ となる。透過係数は「土壤骨格の構成のみにかかわる係数」⁹⁾とされているが、土壤内の代表的長さの 2 乗の次元をもっている。いま代表的長さとして空隙 (げき) 半径 r とすると、 r は 10^{-4} cm のオーダーになる。この大きさの空隙であると多孔体内での気体の運動を KNUDSEN 流として取扱われるもの¹⁰⁾もあるが、現在のところ粒径の大きさによる拡散係数と通気係数との関係はつぎのように説明する方が適当であろう。

通気係数は粒子からの流動抵抗の逆数であることから

Fig. 2 Relation between diffusion coefficient D and air permeability K of soils.
Standard sand (0.297-0.105 mm), Sand 1 (1.0-0.5 mm), Sand 2 (0.42-0.25 mm)

Fig. 3 a Relation between diffusion coefficient and air porosity of soils variously remoulded.

Fig. 3 b-c Relation between diffusion coefficient and porosity of soils variously remoulded.

ら、粒子系が細くなれば当然、通気係数も小さくなる。これに対して拡散は土壌内空隙に気体が拡散していくことから、粒子からの流動抵抗に影響をうけるにしても土壌内の空気率に大きく影響をうけているとみられる。そのことは Fig. 3 a~c の空気率 P と拡散係数 D との関係からも理解できる。

なおこの土壌の充填をいろいろ変えた時の拡散係数と通気係数との間の関係にちらばりがあることがわかった

が、しかしこのちらばりの中にも1つの傾向がみられる。それは次項で述べる土壌骨格構造を変えないで含水比のみを変化させたときに成立つ両係数間の関係と同じになっている。

4-3. 一定充填下での拡散係数と通気係数

通気係数は土壌粒子からの抵抗、拡散係数は空気率によって影響をうけることはすでにみてきた。そこでこれをさらに明らかにするため、湿った土壌（含水比表示で

砂 1: 0.178, 砂 2: 0.238, 標準砂: 0.158) を充填 (固相容積率表示で, それぞれ 42%, 39.3%, 43.7%) 後, 土壌の充填すなわち土壌の骨格構造は変らないで土壌を徐々に乾燥させながら両係数を測定し, その関係を見ることにした. このときの最終含水比はそれぞれ 0.025, 0.018, 0.008 であった.

拡散係数は空気率によって変化することから, その関係を Fig. 4 a~c に示した. これと Fig. 3 a~c と比較すると空気率と拡散係数との間のちがいは小さくなっている. また砂 2 と標準砂では空気率と拡散係数の関

係はほぼ同じであるが, 砂 1 では異なった形になっている. このことは CURRIE の論文¹¹⁾においてもみられる. すなわち多孔体においては, 拡散係数と空気率との関係は個々の物質ごとに直線ないしそれに近い形であらわされるが, いろいろの物質の多孔体全部を 1 つの形にあらわすことはできない. その理由は拡散係数は空気率のみではなく当然空隙の形あるいはそれと関連しての土壌粒子からの流動抵抗にも関係してくるからである. しかし抵抗の指標としての通気係数は, 空気率より粒径の大小によって大きく影響をうけているのがわかる. すなわち

Fig. 4 a-b Relation between those of D (●) and K (○) and porosity under the condition of various water content in a given remoulded soils.

Fig. 4 c Relation between those of D (●) and K (○) and porosity under the condition of various water content in a given remoulded soils.

標準砂に対して粒径の大きな砂 1 および 2 では通気係数は同一空気率に対して 2~8 倍になっている。このように拡散係数は空気率と間接的な形で粒子からの抵抗との 2 面から影響をうけていることがわかる。

次に拡散係数 D (cm^2/sec) と通気係数 K (cm/sec) との関係を求めた結果を Fig. 5 にあらわしてある。これを見ると両係数間には次式が成立つ。

$$D = aK^n \quad (11)$$

対象とした土壤は集中粒径の粒子から成立っていて、そこでの n は、 $n \approx 1$ であることがわかる。このことは土壤骨格を変えない場合の拡散係数は通気係数に比例し

ているといえる。しかしすでにみたように、拡散係数は空気率やその形状にも関係することから、 a の値は土壤材料によって変化する。この a の値に関しては土壤物理学的見地からの解析を必要とし、今後の研究課題となる。また n の値も集中粒径を対象としている場合 $n \approx 1$ であるが、広い粒径分布をもつ土壤体では当然 n の値も変化することが予想され、次報以後においてこの問題を検討する予定である。

作物生育している土壤ではかん水などによる含水比変化がおこっているが、この集中粒径の土壤の場合、含水比変化では土壤骨格構造は変化しないと考えられる。このことから、ある骨格構造をもつ土壤では任意の含水比下での拡散係数と通気係数との関係が求まれば、(11) 式で $n \approx 1$ を用いることにより他の任意の含水比状態での拡散係数を測定容易な通気係数から算出することができる。

5. ま と め

土壤空気の更新に大きな影響を与える拡散の係数を通気係数との関係で集中粒径の土壤について研究をおこなった。その結果つぎのような結論をえた。

1) 土壤をいろいろ充填して、そこで測定した拡散係数 D と通気係数 K との間には、程度の差はあるが、ばらつきがあり、そのおおよその傾向は (11) 式と同じである。同様のちらばりは拡散係数と空気率との間にもみられる。

2) 土壤粒径の大きさによって通気係数は大きく変化

Fig. 5 Relation between D and K under the condition of various water content in a given remoulded soils.

○: Standard sand
×: Sand 1
●: Sand 2

するが、拡散係数は粒径による影響をうけていない。すなわち粒径が小さいとき通気係数が粗い粒径の土壌の1/10であっても両方の拡散係数はほとんど同じになっている。

3) 上の結果は通気係数が粒子からうける抵抗、拡散係数が空気率の影響をうけていることを示しているといえる。

4) 集中粒径土壌を一定充填下で含水比のみを変化させたときの拡散係数 D と通気係数 K との関係は (11) 式 $D=aK^n$ となり、 $n \approx 1$ である。

5) (11) 式を用いることにより、ある含水比下での拡散係数と通気係数の関係がとらえられれば、任意の含水比状態の拡散係数は測定容易な通気係数から算出できる。

本研究は集中粒径土壌についておこなったが、広い粒度分布をもつ土壌体についてはさらに研究を進めていく予定にしている。

最後に本研究の遂行にあたり実験に本学学生吉田修一君から多大の御協力を得たこと、また文部省科学研究費特定研究「生物生産プロセスのシステム化」の補助をうけたことに謝意を表します。なお拡散係数算出のための計算は本学共同利用研究施設の HITAC-8250 を使用したことを付記する。

文 献

- 1) TAYLOR, S. A. 1972. "Physical Edaphology" 352-390, W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- 2) DON KIRKHAM and W. L. POWERS. 1972. "Advanced Soil Physics" 428-455, John Wiley, New York.
- 3) 八幡敏雄. 1975. 「土壌の物理」 71-121, 東大出版会, 東京.
- 4) 長田 昇. 1963. 土壌の通気性に関する実験的研究 (I), 農業土木研究 別冊 7号: 37-42.
- 5) 安田 環. 1976. 土壌通気性測定の評価, 土壌の物理性 33: 43-48.
- 6) 吉田昭治. 1968. 浸透流の基礎的研究—浸透流の

力学—, 山形大学紀要 (農学) 5: 257-329.

- 7) PENMAN, H. L. 1940. Gas and vapour movements in the soil 1. The diffusion of vapour through porous solids, J. Agr. Sci. 30: 437-462.
- 8) VAN BAVEL, C. H. M. 1951. A soil aeration theory based on diffusion. Soil Sci. 73: 33-46.
- 9) G. D. スミス著, 藤川洋一郎訳. 1971. 「電算機による偏微分方程式の解法」 9-10, サイエンス社, 東京.
- 10) HUGO, P. 1972. The influence of pore structure on the pressure and temperature dependence of the effective diffusion coefficient. In "Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media" (International Association for Hydraulic Research) 14-24, Elsevier Publishing Co., Amsterdam.
- 11) CURRIE, J. A. 1960. Gaseous diffusion in porous media, Part 2—Dry granular materials. British J. of Applied Physics. 11: 318-324.

Summary

The purpose of this investigation as the basic research for the studies on soil aeration is to calculate the gaseous diffusion coefficient of soils from the air permeability which is easily measured. The results obtained are as follows:

1) Scattered relations are observed between diffusion coefficient and air permeability of soils which are variously remoulded. But there is a tendency mentioned in 3) in above relation.

2) The permeabilities depend on the size of soil particles, but the diffusion coefficients are not affected by them.

3) The following formula holds for the relation between diffusion coefficient D and air permeability K when measured under the conditions of various water content in a given remoulded soil consisting of closely graded particles.

$$D=aK^n \quad \text{where } n \approx 1$$

4) If the relation between diffusion coefficient D and air permeability K under a given water content in a soil is known, by using the above formula, diffusion coefficients D of any water content in same soil are calculated from air permeability easily measured.

(Received August 24, 1976)