

# 土壌ガス拡散係数測定と土壌診断

遅 沢 省 子\*

Measurement of soil-gas diffusion coefficient for soil diagnosis

Seiko OSOZAWA

National Institute of Agro-Environmental Sciences

## 1. はじめに

土壌空気の様子や組成は、作物生育や微生物活性などに影響を及ぼす点で重要である。

土壌の通気不良が作物に及ぼす直接的影響は、酸素と二酸化炭素の生理的効果に関わるもので、土壌中の酸素欠乏により生ずる根の呼吸困難、気孔閉鎖、蒸散減少などである。間接的影響は、還元に伴う土壌溶液の化学組成や養分可給態性の変化、硫化物イオン、有機酸などの有害物質の出現、病原菌、害虫の活性化などが挙げられている<sup>1)</sup>。

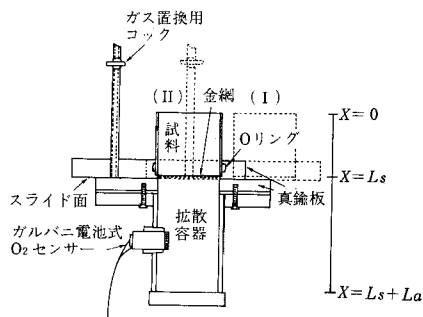
わが国の土壌空気に関する研究では、ODRの測定法と意義に関する研究(安田, 1982<sup>2)</sup>)、通気係数測定法と土壌間差の研究(長田, 1963<sup>3)</sup>, 木下, 1973<sup>4)</sup>)等があり、転換畑の湿害研究などに活用されている。しかし、ガス交換の主体をなすといわれているガス拡散<sup>1,5)</sup>の測定例はわずかである。安田<sup>6)</sup>や矢吹<sup>7)</sup>は数種の土壌について気相率と拡散係数の関係を調べ、それが土壌によって相違することを認めた。このように、2, 3重要な知見が得られているものの、研究はあまりなされていない。特に、拡散係数 $D$ を求める式や測定装置を吟味した報告は見あたらない。

ここでは、簡便安価かつ能率的に拡散を測定するために、非定常法の $N_2$ -air相互拡散測定装置を試作し、拡散係数の算出式を比較検討した結果、有効性を確認したので、その概略を紹介し実用の手引きを示す。また、土壌診断においてガス拡散測定が重要であることを、いくつかの測定例によって示す。

## 2. 土壌ガス拡散係数の測定

### 1) 測定装置

試作したガス拡散係数測定装置を図一に示す。接触面が平滑な2枚の真鍮板を重ねて、下板には上板のスライドを容易にするために押え枠をねじでとめた。両スライド面は必要に応じて研磨できる。真鍮板は幅100 mm, 長さ140 mm, 厚さは上板が15 mm, 下板が10 mmである。100 cm<sup>3</sup>の土壌採取用円筒が装着できるように、上板の円孔にはOリングをはめこんだ。上板の円孔の下側には試料を支える金網をのせ、試料円筒を固定できるようにした。



図一 土壌ガス拡散係数測定装置

定位置において試料円筒と下板の円孔の内壁と合致するようにした。内径50 mm, 厚さ5 mm, 高さ80 mmの有底の亚克力カラムを真鍮板円孔と内壁が合致するようにゴム板を介して下板に固定した。以後この空間を「拡散容器」と呼ぶ。

拡散容器の中央側面の円孔にゴム栓を介してガルバニ

電池式 O<sub>2</sub> センサーを挿入した。試料円筒を載せた上板はその円孔が下板の円孔を完全に遮断（位置Ⅰ）または一致（位置Ⅱ）できるように自由にスライドできる。

操作はまず位置Ⅰにおいて上板にあけた二つの小円孔に固定した2本の二方コックを通して拡散容器を N<sub>2</sub> ガスで置換する。次に上板をスライドさせて位置Ⅱにし、拡散容器中の N<sub>2</sub> ガスと外部の大気を試料を通して相互拡散させる。大気中から拡散容器内へ拡散してくる O<sub>2</sub> の濃度を経時的に測定する。

拡散測定においては、上板円孔下部の金網部の気相容積も拡散容器に含めて、正確な容積を補正使用した。また、拡散容器を N<sub>2</sub> で置換し、位置Ⅱにすると金網部の気相容積の空気が混合することも計算上考慮し、瞬間的に（時間  $t=0$  で）その空気が容器中の N<sub>2</sub> と混合するとした。

2) O<sub>2</sub> 濃度の測定

ガルバニ電池式 O<sub>2</sub> センサー（コスモス電機株製）では、Pt 極から Pb 極へ酸素濃度に比例した電流が流れ、検出抵抗の両端電圧として信号を取り出す。

O<sub>2</sub> の測定限界は 10 ppm、センサーの寿命は O<sub>2</sub> 80000% hr、温度依存性は常温では無視できるとされている。既知組成の O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 混合ガスを用いてセンサーを検量した結果、O<sub>2</sub> 濃度と出力は 0~100% で高い直線性を示した。なお、半年後でもこの直線性は維持された。

3) 装置を用いた拡散係数の決定

2種類の気体（N<sub>2</sub> ガスと空気）が試料を通して拡散容器、大気間を非定常状態で拡散する場合を考える。

試料中のガス拡散は〔1〕式で表わされる Fick の第1法則に従うものとする。

$$q = -D \frac{dC}{dx} \quad [1]$$

$q$  : 拡散ガスフラックス ( $g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ )

$D$  : N<sub>2</sub>-air の相互拡散係数 ( $cm^2 \cdot s^{-1}$ )

$C$  : 拡散するガスの濃度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )

$x$  : 流れの方向距離 (cm)

上述のような非定常測定からの拡散係数  $D$  の決定に関しては、拡散ガスの試料中での貯留を考えない Taylor<sup>8)</sup> による式、それを考慮した Currie<sup>9)</sup> による式が提案されている。

(1) 拡散ガスの試料中での貯留を考えない場合 (Taylor<sup>8)</sup>の式の類似式)。

用いる初期・境界条件を図-2に示す。

すると

$$q = -D \frac{dC}{dx} = -D \frac{C(L_s, t) - C_i}{L_s} \quad [2]$$

ここで、

$C_i$  : 外気中の拡散ガス濃度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )

$C(L_s, t)$  : 拡散容器中の拡散ガス濃度 ( $g \cdot cm^{-3}$ )

$L_s$  : 試料長 (cm)

試料を通して外気から拡散容器中へと拡散する拡散ガスの量は、拡散容器内の拡散ガス量の変化に等しいので、

$$q \cdot A = \frac{dC(L_s, t)}{dt} \cdot L_s \cdot A = \frac{d(C(L_s, t) - C_i)}{dt} \cdot L_s \cdot A \quad [3]$$

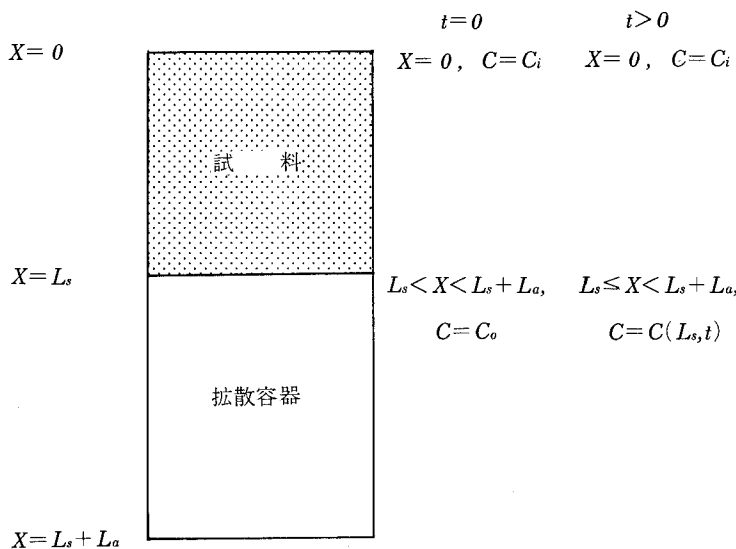


図-2 初期・境界条件 ((1)の場合)

ただし、 $A$ ：試料および拡散容器の断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$L_a$ ：拡散容器長 ( $\text{cm}$ )

[2], [3] 式から

$$\frac{d(C(L_s, t) - C_i)}{dt} L_a = -D \frac{C(L_s, t) - C_i}{L_s} \quad [4]$$

$t = 0$  の時、試料両端の濃度差は  $C_0 - C_i$  という初期条件のもとで [4] 式を解くと

$$D = \frac{L_s L_a}{t} \ln \frac{C_0 - C_i}{C(L_s, t) - C_i} \quad [5]$$

ただし、

$C_0$ ： $t = 0$  の拡散容器内の拡散ガス濃度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

(2) 拡散ガスの試料中での貯留を考える場合 (Currie<sup>9)</sup> の式)

試料中の、断面積  $A$ 、厚さ  $dx$  の土壤の体積空間を考えると、この空間内の拡散ガスに関する質量保存則から、

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} &= A(q_{in} - q_{out}) \\ &= A \cdot q_{in} - A \left( q_{in} + \frac{\partial q}{\partial x} dx \right) \\ &= -A \frac{\partial q}{\partial x} dx \\ &= A \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) dx \\ &= D \cdot A \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} dx \quad [6] \end{aligned}$$

$Q$ ：土壤の微小体積空間中の拡散ガス量 ( $\text{g}$ )

$q_{in}$ ：この空間に入る拡散ガスフラックス ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$q_{out}$ ：この空間から出る拡散ガスフラックス

( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

この微小空間中の拡散ガス量  $Q$ 、拡散ガス濃度  $C$ 、気相率  $\epsilon$  の間には次の関係がある。

$$Q = \epsilon C A dx \quad [7]$$

[6], [7] 式から

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{\epsilon} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad [8]$$

図-3 に示した初期・境界条件を用い、熱伝導式の解法<sup>10)</sup>を参考に [8] 式を解くと、

Currie<sup>9)</sup>の示したように、

$$\begin{aligned} &\frac{C(x, t) - C_i}{C_0 - C_i} \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\epsilon}{L_a} \cdot \frac{\exp(-D\alpha_n^2 t/\epsilon) \sin \alpha_n x}{\sin \alpha_n L_s [L_s \{\alpha_n^2 + (\epsilon/L_a)^2\} + \epsilon/L_a]} \quad [9] \\ &\alpha_n : \alpha \tan(\alpha L_s) = \epsilon/L_a \text{ の } n \text{ 番目の正の根 } (n=1, 2, 3 \dots) \end{aligned}$$

拡散容器中の拡散ガスの濃度  $C$  は  $x = L_s$  における濃度に等しいから

$$\begin{aligned} &\frac{C(L_s, t) - C_i}{C_0 - C_i} = \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\epsilon}{L_a} \cdot \frac{\exp(-D\alpha_n^2 t/\epsilon)}{L_s \{\alpha_n^2 + (\epsilon/L_a)^2\} + \epsilon/L_a} \quad [10] \end{aligned}$$

時間  $t$  が大きくなるにつれて右辺の指数項は 0 に収束し、2 項以下を無視することができ、次式で近似される。

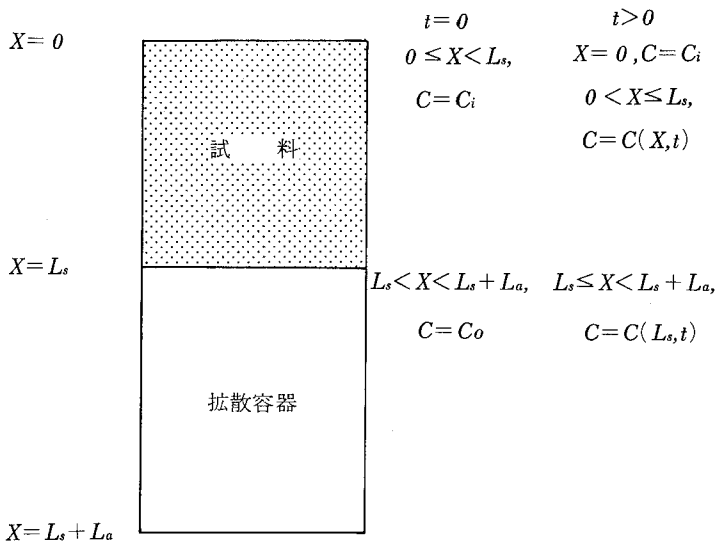


図-3 初期・境界条件 ((2)の場合)

$$\frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i} = \frac{2\varepsilon}{L_a} \frac{\exp(-D\alpha_1^2 t/\varepsilon)}{L_s \{\alpha_1^2 + (\varepsilon/L_a)^2\} + \varepsilon/L_a} \quad [11]$$

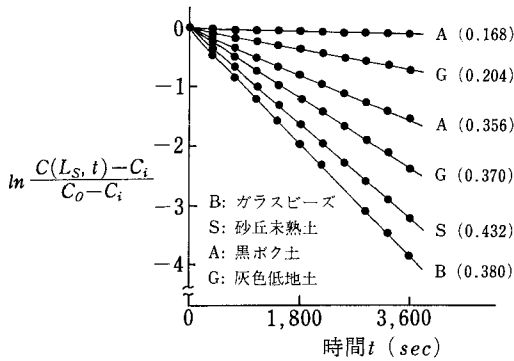
したがって  $\ln \frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i}$ , あるいは  $\ln(C(L_s, t) - C_i)$  を  $t$  に対してプロットすれば, 傾き  $-D\alpha_1^2/\varepsilon$  の直線が得られ,  $D$  が求められる。

$N_2$  と相互に拡散する大気は拡散によってその組成が変わらないと仮定すると, 大気成分中どのガスに着目してもよいから, 本実験では  $O_2$  ガスに着目する。

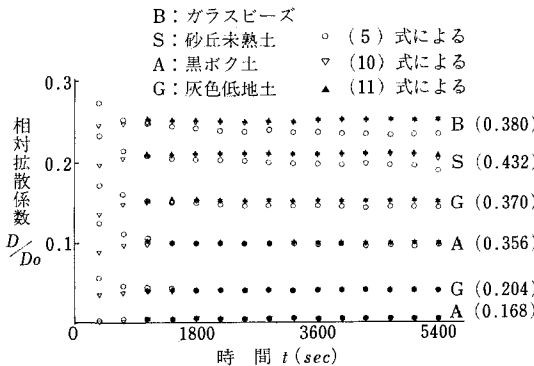
4) 実験結果と考察

ガラスビーズ, 風乾篩別土壌を円筒に充填し, 飽和後脱水過程で水分調整した試料について拡散実験を行ない [5], [10], [11] 式による算出  $D$  値\* を比較した。

図一4 に測定した  $\ln \frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i}$  と  $t$  の関係, 図一



図一4 試料両端  $O_2$  濃度差変化割合と時間の関係 (( ) 内の数字は気相率)



図一5 拡散係数と時間の関係 (( ) 内の数字は気相率)

\* [10] 式では右辺の級数 6 項までについて大型計算機により非線形方程式の数値解法を用いて  $D$  を算出した。

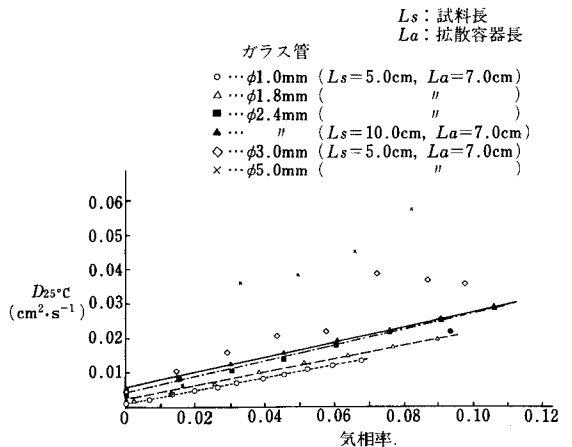
\*\* 内径 3 mm 以上のガラス管ではグラフの直線性が悪くなるが, これは管内で乱流が生じるためと考えられる。

5 に各々の式で算出した相対拡散係数  $D/D_o$  と  $t$  の関係 ( $D_o$  は大気中の  $N_2$ -air 相互拡散係数  $0.178 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ ) を示す。[11] 式では360秒から時間  $t$  までの  $\ln \frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i} \sim t$  のプロットの傾きから  $D$  を求めた。図一4では0から約360秒までの直線性が悪く, [5] 式ではこれを0秒から, [11] 式では360秒から直線近似し, [10] 式ではこれを曲線で表している。

図一5に示すように, 算出  $D$  値が測定時間によらず一定の値が得られるのは [10], [11] 式であった。[5] 式による  $D$  値が時間と共に漸減する傾向は, 図一4に示す実験開始後数分間の  $\ln \frac{C(L_s, t) - C_i}{C_o - C_i} \sim t$  が直線にならないため, これは [5] 式が試料内の貯留効果を無視していることによる。

図一5により, [10] 式と [11] 式とはほぼ等しい  $D$  の値を与えるので, 簡便性に優れた [11] 式を用いるのが適当である。ただし, 拡散開始後数分間の測定値は省き, 数分後から約30分までの測定をもとに  $D$  を求める方がよい。また, [5] 式では貯留を無視したことによる簡略化が  $D$  の値に影響するので, 使用は気相率  $\varepsilon$  が求められない時に限るとよい。

[11] 式を用いてさらに検証実験を試み, 以下の結果を得た。①装置と式の妥当性を調べるために, ガラス管で屈曲のない気相系をつくり拡散実験を行った。その結果を図一6に示す。気相率1に相当する  $D$  が大気中の  $N_2$ -air 相互拡散係数になる。内径 2.4 mm 以下のガラス管では  $D$  と気相率は比例\*\*, 標準状態下の大気拡散係数の物性値,  $0.178 \text{ (cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$  と極めて近い値,



図一6 気相率と  $D$  の関係

0.175 (cm<sup>2</sup>・s<sup>-1</sup>) が得られた\*。②表-1 に、測定中に試料中から少量抽出したガスの O<sub>2</sub> 濃度 (ガスクロ測定) と、拡散容器中の O<sub>2</sub> 濃度変化から算出した D による推定値 ([9] 式使用) を示す。両者はよく一致した。③表-2、図-7 に、ガラス管、ガラスビーズ試料を用いて異なる拡散容器長、試料長について D を測定した結果を示す。D のそれらへの依存性は認められなかった。また、試料支持の金網、土壌呼吸、水分蒸発、風、湿度等の影響を検討した結果、それらは通常合わせて 2~3% 以下であり無視できることも確かめられた<sup>12)</sup>。

これらの結果、試作装置、用いた式、初期および境界条件が適切であることがわかった。

5) 実用にあたって

[11] 式を用いて D を算出する場合、拡散実験から必要なデータは、図-8 に示すように測定開始数分後 (t<sub>1</sub>) と約 30 分後 (t<sub>2</sub>) の拡散容器の、および装置外大気 O<sub>2</sub> 濃度出力の読みの 3 つ (C<sub>0</sub>'、C'(L<sub>s</sub>, t)、C<sub>i</sub>' : 濃度に対応するセンサー出力でよいので、「'」をつけ

表-1 実験的に求めた試料中の O<sub>2</sub> 濃度と理論式からのそれとの比較 (火山灰を充填した例)

	t (sec)	x (cm)	O <sub>2</sub> 濃度 (%)		測定値 / 計算値
			計算値	測定値	
1	680	8.0	14.03	13.45	0.96
2	780	5.0	16.67	16.59	1.00
3	2160	2.0	20.22	20.30	1.00
4	2220	8.0	18.58	18.33	0.99
5	3310	0.5	20.60	20.93	1.02

表-2 異なる長さの拡散容器を用いた時の拡散係数の比較 (直径 2.4 mm のガラス管を用いた例)

	気相率	D/D <sub>0</sub>		
		容器長 7.0 cm	容器長 12.0 cm	$\frac{D_{La=7\text{ cm}}}{D_{La=12\text{ cm}}}$
1	0.015	0.017	0.016	1.06
2	0.030	0.029	0.030	0.97
3	0.045	0.043	0.047	0.91
4	0.106	0.101	0.104	0.97

\* その際、後述の [12] 式により、温度、圧力補正を行なった。

た。) と時間 t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub> である。別に、拡散容器長 L<sub>a</sub>、試料長 L<sub>s</sub>、気相率 ε、気温 T (できれば気圧 P も) のデータが必要である。[5] 式を使う場合 ε は不要である。出力と O<sub>2</sub> 濃度が直線関係のセンサーを用いたため、検量線作成、出力から濃度への換算が不要となった。D の算出式は [11] 式を用い、式中の α<sub>1</sub> は数行の Basic プログラム、または手軽な表<sup>10)</sup> で求められる。

試料の拡散強度の指標としてはガスの種類に依存しないと考えられる D/D<sub>0</sub> が D よりも便利である。その際、次式<sup>13)</sup> により標準状態下の大気拡散係数を測定状態下の値に直して用いればよい。

$$D_o(T, P) = D_o(S) \left( \frac{T}{273} \right)^n \frac{760}{P} \quad [12]$$

D<sub>o</sub>(S) : 標準状態下の大気拡散係数 (cm<sup>2</sup>・s<sup>-1</sup>)  
(N<sub>2</sub>-air 相互拡散では 0.178<sup>11)</sup>)

D<sub>o</sub>(T, P) : TK, P mmHg 下の大気拡散係数 (cm<sup>2</sup>・s<sup>-1</sup>)  
n : N<sub>2</sub>-air 相互拡散では 1.67<sup>11)</sup>

3. 土壌診断におけるガス拡散測定

1) 各種類型土壌のガス交換特性

不攪乱土壌試料 (黒ボク土、灰色低地土、黄色土、砂丘未熟土) について、種々の水分条件に調節した後拡散

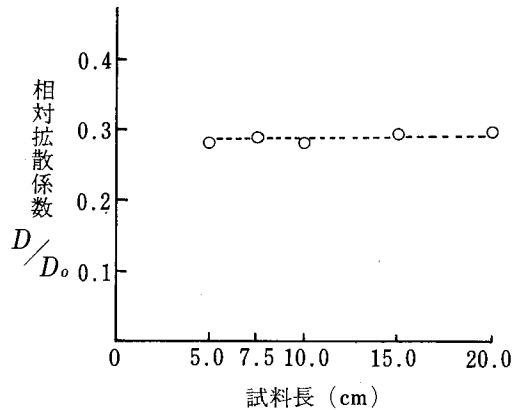


図-7 異なる長さの試料の拡散係数の比較 (ガラスビーズを均一に充填した試料を用いた例)

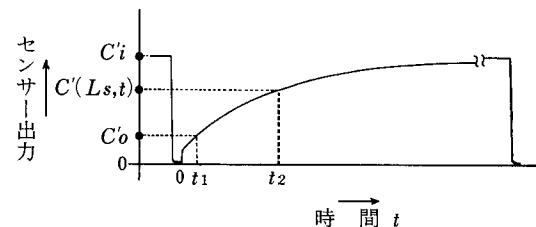


図-8 チャート例

実験を行い、[11]式によって $D$ を算出し、その結果を図-9に示した。

図-9のように、気相率と $D$ の関係は土壤により差がみられ、黒ボク土、黄色土ではグラフの立ち上がりの気相率が灰色低地土や砂丘未熟土に比べて高く、ガス拡散に参与しない孔隙量が多い。

図-10に $pF$ と $D$ の関係を示す。どの土壤も高 $pF$ ほど気相率の増大によって $D$ が高まったが、特に砂丘未熟土では $pF$  1.5~1.8で増加率は高かった。通常の畑水分状態の $pF$  2~3の範囲の比較では $D$ は砂丘未熟土 > 淡色黒ボク土B層(強度の亜角塊状) > 黄色土 > 灰色低地土だった。

なお、図-11に、拡散との比較のため通気係数 $K_a$ と $pF$ の関係を示す。通気係数はガスフラックスが圧力勾配により生じる場合のマス・フローの指標であり、単位時間に試料を通過するガス量と、その時の試料両端のガスの圧力差から求める。ここでは市販のガスメータ(大起理化製)を用いた。

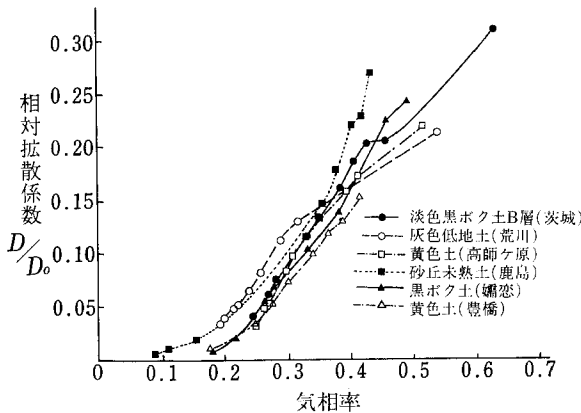


図-9 各種類型土壤の気相率と拡散係数

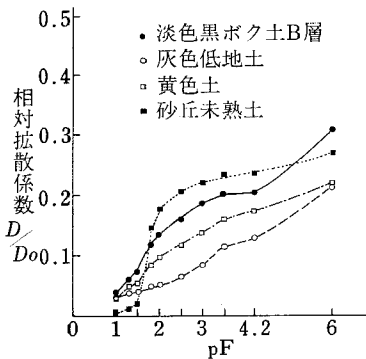


図-10 各種土壤のpFと拡散係数

どの土壤も $pF$ の増大につれて $K_a$ が高まったが、 $pF$  2~3の範囲では $K_a$ は灰色低地土 > 黄色土 > 淡色黒ボク土B層 > 砂丘未熟土となり、拡散とは逆の順序になった。

この4土壤については地下水位160cm(ライシメーター)の条件下で $CO_2$ 濃度分布を測定し、その結果を図-12に示した。 $CO_2$ 濃度は深さとともに増し、各層位とも灰色低地土 > 黄色土 > 淡色黒ボク土B層 ≒ 砂丘未熟土の順序で推移した(6~8月測定)。土壤中の $CO_2$ 濃度はガス交換の目安と考えられるが、それは通気係数ではなくガス拡散係数と密接な関係をもつことが認められた。拡散がガス交換の主体であるといわれるが、この結果も矛盾しない。

2) 土壤層位と拡散係数

畑圃場は多くの場合、機械の走行、水管理等により土層分化し、層別にガス交換特性も異なっている。図-13に黒ボク土(茨城、筑波)の各層位の気相率と拡散係数の関係を示す。上位層土壤ほどグラフの立ち上がりが遅

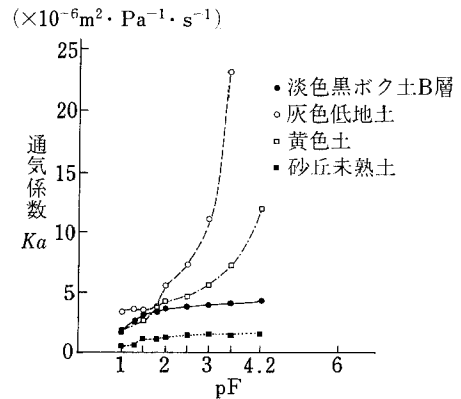


図-11 各種土壤のpFと通気係数

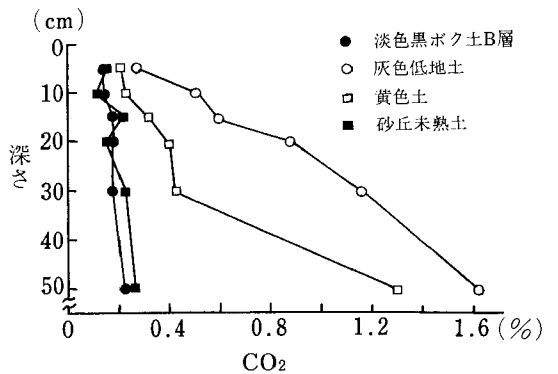
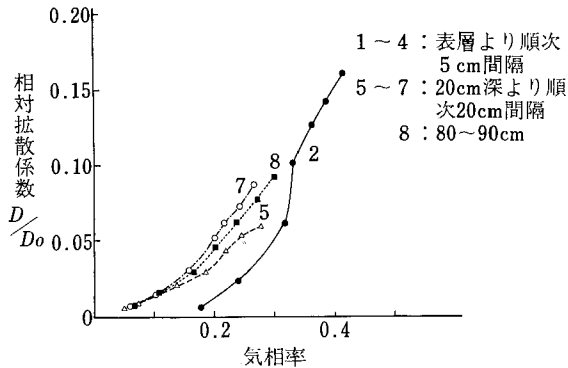
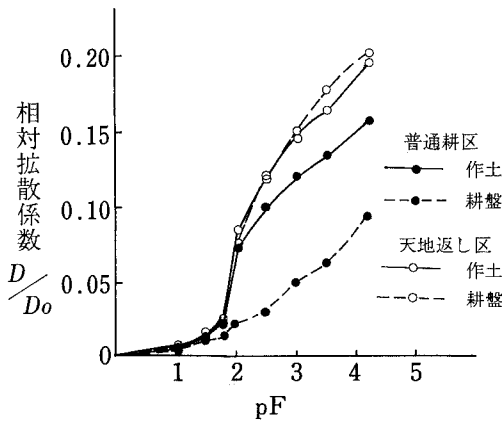


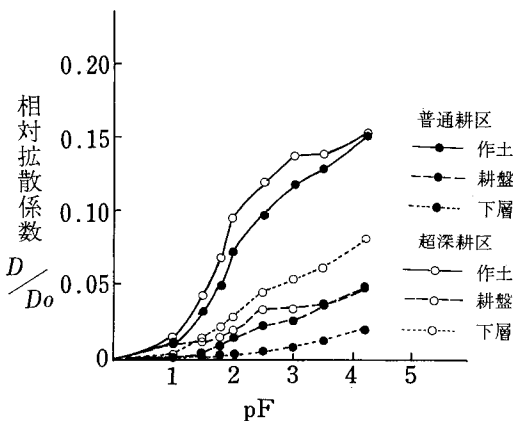
図-12 土壤中 $CO_2$ の分布('85.8.29)



図一13 黒ボク土圃場（筑波）の気相率と拡散係数



図一14 黒ボク土圃場（三浦）のpFと拡散係数



図一15 黄色土圃場（豊橋）のpFと拡散係数

くなる。これは黒ボク土では表層に粒状構造がよく発達し、孔隙が入り組み封入空気が多いこと、下層ではいくぶん縦の構造がみられ封入空気も少ないことを示しているものと思われる。

図一14、図一15に、黒ボク土（神奈川、三浦）と黄色土（愛知、豊橋）の耕起法の異なる2圃場の各層位のpFと拡散係数の関係を示す。

三浦黒ボク土では天地返しにより普通耕に比べて特に耕盤のガス拡散性が改良されている（黒ボク土は、この場合にも低pF域の拡散係数は比較的小さいことが認められる）。豊橋黄色土でも超深耕によって各土層のガス拡散能が向上している。昨今、野菜産地では土壌病害や連作障害対策として超深耕や天地返しによる土層改良が進行しているが、土壌ガス交換能の良否が野菜の健全な生育に大きく関わっていることをうかがわせる。

### 3) 土壌診断におけるガス拡散測定的重要性

従来、ガス交換の尺度としては気相率が用いられてきた。しかしながら、上記の結果は気相率ではガス交換能を十分に評価できないことを示している。土壌中の封入空気や孔隙の入り組み度合（屈曲度）などが土壌構造によって異なり、気相がガス交換に機能する効率が異なることによると思われる。

作物培地のガス交換の主体をなす拡散の直接測定は土壌診断の有効な方法のひとつになるだろう。

作物根の生育阻害の指標に相対拡散係数  $D/D_0$  を用いた報告がある。根が生育阻害を生じはじめる  $D/D_0$  0.02<sup>14,15)</sup>、危機的 (critical) 状態になる  $D/D_0$  0.005<sup>14,16,17)</sup> とされている。

筆者らは現在、熊本県下主要畑土壌についてガス交換性を調査中であるが、通常の畑状態水分下においてもガス交換不良による障害が予想される不良土壌が多い<sup>18)</sup>。

今後、土壌の種類別にガス交換特性を洗い出す必要がある。また、拡散係数とODRの関係等を明らかにし、より簡便に土壌診断ができる方法を確立することが重要である。さらに、作物種別に根の阻害点を調べていくことも必要であろう。

### 4. おわりに

大気と土壌のガス交換のメカニズムを明らかにすることは、作物培地機能評価の面ばかりでなく、農耕地における物質循環の計量や土壌の浄化機能の評価にも不可欠である。このような要請に応えられるよう研究を進めてゆきたい。

## 引用文献

- 1) Glinski, J., and Stepniewski, W. : Soil Aeration and Its Role for Plants, 39, 137-171, CRC Press, Boca Raton, Florida (1985)
- 2) 安田 環 : 土肥誌, 43, 223—230 (1972)
- 3) 長田 昇 : 農土研究別冊, 7, 37-53 (1963)
- 4) 木下 彰 : 土肥学会講要, 19, 2 (1973)
- 5) Baver, L. D., Gardner, W. H., and Gardner, W. R. : Soil Physics 4th Ed. 230-252, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto (1972)
- 6) 安田 環 : 野菜試報A, 10, 185-221 (1982)
- 7) 矢吹萬壽 : 作物の動的環境, 113-117, 朝倉書店 (1985)
- 8) Taylor, S. A. : Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 14, 55-61 (1949)
- 9) Currie, J. A. : Br. J. Appl. Phys., 11, 314-317 (1960)
- 10) Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. : Conduction of Heat in Solids, 2nd Ed. 128, appendix IV, Clarendon Press, Oxford (1959)
- 11) 化学工学協会編 : 物性定数, 8集, 230, 丸善 (1970)
- 12) 遅沢省子・久保田徹 : 土肥誌, 58, 528—535
- 13) 日本化学会編 : 化学便覧 基礎編II, 改訂2版, 602, 丸善 (1975)
- 14) Stepniewski, W. : Pol. J. Soil Sci., 14, 3-13 (1981)
- 15) Grable, A. R., and Siemer, E. G. : Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 32, 180-186 (1968)
- 16) Gradwell, M. W. : N. Z. J. Agric. Res., 8, 238-261 (1965)
- 17) Flühler, J. : Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchswes. 49, 125-250 (1973)
- 18) 小財 伸・遅沢省子・久保田徹 : 土肥学会講要, 33, 2 (1987)

## Summary

A laboratory apparatus to measure gas diffusion in porous media and undisturbed soil cores was developed and its practicality and fitness to theoretical equations for the determination of the gas diffusion coefficient  $D$  were examined.

$N_2$ -air interdiffusion was determined by measuring the concentration of atmospheric oxygen which diffused through the soil sample into the vessel previously filled with  $N_2$  gas.

It was confirmed experimentally that the most appropriate equation was the simplified equation proposed by Currie in which soil gas storage was considered in the determination of  $D$ .

The use of the proposed method enables to simplify the calculation due to the linearity of the output of the galvanic battery  $O_2$  sensor in relation to  $O_2$  concentration, and the high efficiency of the measurement which requires only 30 minutes for one determination.

The manual for the determination of  $D$  was presented for practical use.

The possibility of application of the relative diffusion coefficient  $D/D_0$  was evaluated for soil diagnosis by examining the relationship between  $D/D_0$  and air porosity  $\varepsilon$  or moisture tension pF.

In all the soils the value of  $D/D_0$  increased with the increase of  $\varepsilon$  and pF. The amount of pores which did not contribute to gas diffusion was large mainly in Andosols. The value of  $D/D_0$  decreased in the order of Sandy soil, Andosol, Yellow soil, Gray Lowland soil in the pF range of 2—3, which corresponded well to the order of increasing  $CO_2$  concentration in the soils. The difference in the relationship between  $D/D_0$  and  $\varepsilon$  among soil layers which was also observed in an Andosol was ascribed to the difference in the soil structure, i.e. the degree of aggregation of the surface layer enabling to hold entrapped air was more pronounced than that of the sublayers. The favorable effect of deep cultivation on gas diffusion was observed in a survey of vegetable growing areas.

Further studies should be carried out to analyze the relationship between soil-air diffusion and crop growth.