土 壌 の 気 相 環 境 の 研 究 (3)

土壌内一次元 CO₂ 濃度分布のシミュレーション

伊 藤 実*

岩手大学農学部*

本論文は土壌内一次元 CO₂ 濃度分布のシミュレーションについての研究である。シミュレーションに際して、土壌内 x での拡散係数 $D(x)$ が必要である。拡散係数 D と通気係数 K との間には、本実験の場合、次式のような関係があった。

$$\begin{aligned} K \geq 1.2 \text{ cm/sec} & \text{ で } D = 0.093 \text{ cm}^2/\text{sec} \\ K < 1.2 \text{ cm/sec} & \text{ で } D = 0.0845 K^{0.432} \text{ cm}^2/\text{sec} \end{aligned}$$

一般に土壌内で拡散係数 $D(x)$ を測定することは困難であるため、通気係数 $K(x)$ を測定して上式から $D(x)$ を求める。つぎに土壌内での CO₂ 発生量 $P_{\text{CO}_2}(t)$ を次式のように仮定する。

$$P_{\text{CO}_2}(t) = A e^{-B \left(\log \frac{t}{T_m} \right)^2} + C_{\text{const}}$$

P_{CO_2} が、上式に従って、時々刻々変化しながら経過した後で得られる土壌末端部での CO₂ 濃度 $C(l)_{pv}$ と、その時刻での P_{CO_2} の値のまま実験開始から一定値で経過する時に求まる末端部での CO₂ 濃度 $C(l)_{pc}$ とを比較すると、前者は後者の約 0.9~1.6 倍になることがわかった。このことから、CO₂ 濃度分布を CO₂ 濃度 $C(x)$ そのもので表わすには、 $P_{\text{CO}_2}(t)$ の式が明らかでないかぎり不可能である。他方、土壌の末端部の濃度を 1 ($=RC(l)$) として、土壌内の CO₂ 濃度を

$$RC(x) = C(x)/C(l)$$

で表わすと、 $P_{\text{CO}_2}(t)$ 式内のパラメーターに関係なく、一定の分布形がえられることがわかった。それゆえ、CO₂ 濃度分布の表現として、相対 CO₂ 濃度 $RC(x)$ で表わすことにした。この方法で実測した CO₂ 濃度分布とシミュレーションによる分布とを対比してみると、両者はきわめて一致していることがわかった。このことから、土壌内一次元 CO₂ 濃度分布形のシミュレーションが可能となったといえる。

1979年1月6日受付

1. は し が き

作物生育に対する土壌内の CO₂ 濃度の影響に関する見解はわかれているが¹⁾、O₂ 濃度に関しては酸素拡散速度 (ODR) の値で大略整理されている²⁾。一方、畑土壌の呼吸商は 1 に等しいとみてよいことから³⁾、土壌中での O₂ 濃度と CO₂ 濃度とは密接な関係にある。それゆえ、作物生育への土壌の気相環境の影響をさらに押し進

めて研究するには、土壌中での各気体の濃度分布について体系的な理論が要求される。

本研究は気相環境のなかの一つである CO₂ を中心にして、その濃度分布形を求めるためのシミュレーションの考察を行った。今回は土壌柱内で発生する CO₂ によって生ずる一次元の CO₂ 濃度分布を測定し、これとシミュレーションによる結果とを対比させることに重点をおいた。

2. 一次元 CO₂ 濃度分布の測定方法

供試土壌は岩大滝沢農場の岩手山火山灰土壌である。含水比 0.55 近くまで乾燥させた土壌 10 kg 当りに 600 g の新鮮牛糞を加え、よく混合してさらに水を加えて、含水比 0.61 にした。このように調整した土壌を 4 mm

Minoru ITO*: Studies on the Gaseous Environment in Soil (3). Simulation of the One Dimensional Distribution of CO₂ Concentrations in Soils.

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

フルイにかけ、フルイ通過した土壌を実験に用いた。

測定容器および装置は Fig. 1 に大略示してある。すなわち、測定容器は内径 6.7 cm、高さ 65 cm の塩ビ管でできている。この円筒に底面から 60 cm 高さまで土壌をつめる。円筒側方に底面から、0, 10, 20, 30, 40, 50, 55 cm の位置に径 5 mm の小孔があけてある。この小孔に径 6 cm のゴムボールを接続させ、その位置での土壌空気と平衡状態にある空気をボール内に蓄えられるようにした。

Fig. 1 A cross-sectional sketch of a container used to determine both CO₂ concentration and air permeability.
RB, rubber ball; x , depth; M, manometer.

測定容器上端部は、土壌面上 2 cm の空間をのこし、ゴム栓で密栓をする。そして、このゴム栓を通して、CO₂ free の空気を容器上部の 2 cm の空間に送り、土壌面から発生する CO₂ と混合させて測定容器外へ出す。この CO₂ を含んだ空気は、ガラスボール濾過器（フィルタ G2）を通して、小さな気泡の形で Ba(OH)₂ 水溶液中を通す。これによって、発生する CO₂ 量が測定できる。

土壌を測定容器につめ、上端部から CO₂ free の空気を送り、ガラス濾過器を通して放出するように設置してから、三日間そのままの状態経過させる。その後、側方にあるゴムボールへのコックを閉じ、ボール内の空気の CO₂ 濃度を測定し、その位置での土壌内の CO₂ 濃度とした。この方法によって、土壌から直接一定量の空

気をとり出すことによる CO₂ 濃度分布の乱れを消去することができる。

CO₂ 濃度の求め方は次のようにした。ボールから空気 5 cc を注射器で取り出し、これをガスクロマトグラフィー装置（島津製 GC-3AH）に注入する。そこで得られたクロマトグラムの N₂, O₂, CO₂ の分離ピーク面積を面積計で求め、かつ補正係数⁴⁾を用いて CO₂ 濃度を算出する。この算出法によると、5.2% の標準ガスの場合、5 回の測定結果では 5.39~5.63% の範囲にあり、平均は 5.5% であった。

上述の算出法によって得られた土壌柱内の CO₂ 濃度 ($C(x)$) 分布の結果が Fig. 2 に示してある。

Fig. 2 Distribution of the CO₂ concentration $C(x)$ in soils of experimental samples.
Sample No. 1 -----●, 2 -----△, 3 -----○, 4 -----■, 5 -----□.

なお、土壌面からの CO₂ 発生量は、ボールのコックを閉じてから 1 時間の間に Ba(OH)₂ 水溶液に吸収された CO₂ 量で、シュウ酸による滴定量から求めた⁵⁾。

3. 一次元 CO₂ 濃度分布の計算法

土壌内での CO₂ 濃度分布を規定する要因として、ガス濃度差によるガス拡散が主因であるとする⁶⁾。

いま、土壌中で発生する CO₂ 量を P_{CO_2} (mg/m³·hr) とし、土壌内での CO₂ ガス拡散係数 $D(x)$ (m²/hr) は場所によって異なるとすると、土壌内での CO₂ 拡散方程式は次式のように表現できる。

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x) \frac{\partial C_m}{\partial x} \right) + P_{CO_2} \quad (1)$$

ただし、 C_m : 土壌内の CO₂ 濃度 (mg/m³)。

境界条件として、土壌深部では

$$D(x) \frac{\partial C_m}{\partial x} = -F \quad x=l \quad (2)$$

ただし、本実験の場合は有底であることから、 $F=0$ 。

また、土壌表面での境界条件は、土壌表面での CO_2 濃度 C_{sf} と上部空気の CO_2 濃度 C_0 との差に比例して CO_2 が土壌表面より発生することから、

$$D(x) \frac{\partial C_m}{\partial x} = -H_{sf}(C_{sf} - C_0) \quad x=0 \quad (3)$$

ただし H_{sf} : 土壌表面での CO_2 拡散速度 (m/hr).

つぎに、容器上部は 2 cm の空間 V (m^3) になっており、そこへ外部から CO_2 free の空気を q (m^3/hr) 送入し、土壌からの発生する CO_2 を外部へ排出している。そのことから、空間 V 内の空気中の CO_2 濃度 C_0 は次式を満たさなければならない。

$$V \frac{dC_0}{dt} = -qC_0 + H_s(C_{sf} - C_0) \quad (4)$$

上記 (1)~(4) 式によって土壌内の一次元 CO_2 濃度分布が決定できる。その計算法はつぎのようにして行った。

(1) 式を Crank-Nicolson の陰解法の差分形式で表現するとつぎようになる。

$$\begin{aligned} & -D_{i-1/2} C_{i-1, j+1} + \left(\frac{2h^2}{k} + D_{i-1/2} + D_{i+1/2} \right) C_{i, j+1} \\ & - D_{i+1/2} C_{i+1, j+1} \\ & = D_{i-1/2} C_{i-1, j} - \left(D_{i-1/2} + D_{i+1/2} - \frac{2h^2}{k} \right) C_{i, j} \\ & + D_{i+1/2} C_{i+1, j} + 2P_{CO_2} \cdot h^2 \end{aligned} \quad (5)$$

ただし $x = ih \quad (i = 0, 1, 2, \dots)$

$t = jk \quad (j = 0, 1, 2, \dots)$

また、(2) および (3) 式を中心差分形式で表わし、上式 (5) に代入すると、 $x=l$ 、および $x=0$ での差分方程式が得られる。これらを Gauss の消去法を用いて土壌内の各位置での $C_{i, j}$ を求める。(4) 式の積分は第 4 次の Runge-Kutta 法で行う。なお時間刻みは、 H_{sf} が大きくないかぎり、1 分間隔で充分であるが、 H_{sf} が大きくなるに従い時間刻みは小さくする必要がでてくる。

4. 通気係数 K と拡散係数 D との関係

土壌柱内の CO_2 濃度分布を、前述の計算法でシミュレーションするには、 CO_2 の拡散係数 $D(x)$ が既知であることが必要である。しかし、土壌柱内での $D(x)$ を測定することは一般に困難である。筆者はすでに土壌の通気係数 K と O_2 の土壌内拡散係数 D との間に

$$D = aK^n \quad (6)$$

が成り立つことを明らかにした⁷⁾。

本研究でも、上と同じ方法で、通気係数 $K \sim \text{CO}_2$ 拡散係数 D を求めた。すなわち、実験に用いた測定容器は既報⁷⁾ とまったく同じである。この容器で、つめ方をかえて、土壌試料の通気係数 K を測定した。その後、

いったん、土壌試料に N_2 を充填させてから、容器の一端を空気にさらし、他端で O_2 濃度の時間的変化を測定した。これにより、土壌の O_2 拡散係数 D_{O_2} が求まる。その結果、 K と D_{O_2} との関係は Fig. 3 のようになった。

Fig. 3 Relation between D_{O_2} and K .
 D_{O_2} , coefficient of O_2 diffusion in a soil;
 K , air permeability.

これをみると、 $K \geq 1.2 \text{ cm/sec}$ 以上の土壌では、拡散係数 D_{O_2} は

$$D_{O_2} = 0.12 \text{ (cm}^2/\text{sec)} \quad (7)$$

となる。この式での 0.12 という値は、多孔体中での拡散係数 D_{O_2} が

$$D_{O_2} = 0.66\varepsilon D_{O_2, A} \quad (8)^{8)}$$

とした時、 $\varepsilon = 1$ における値に近い。

ただし ε : 空ゲキ率、 $D_{O_2, A}$: 空気中での O_2 の拡散係数 ($= 0.20 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 20°C)

$K < 1.2 \text{ cm/sec}$ では

$$D_{O_2} = 0.109K^{0.432} \text{ (cm}^2/\text{sec)} \quad (9)$$

となっている。

(7) および (9) 式の D_{O_2} は土壌中の O_2 の拡散係数である。しかし本研究のシミュレーションでは CO_2 の拡散係数 D が必要である。そのため、

$$\frac{D_{O_2, A}}{D_{\text{CO}_2, A}} = \frac{0.178}{0.138} = 1.29 \quad (10)$$

であることから、

$$\left. \begin{aligned} K \geq 1.2 \text{ cm/sec} & \text{ で } D = 0.093 \text{ cm}^2/\text{sec} \\ K < 1.2 \text{ cm/sec} & \text{ で } D = 0.0845K^{0.432} \text{ cm}^2/\text{sec} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

とした。ただし $D_{\text{CO}_2, A}$: 空気中での CO_2 拡散係数 (0°C で $0.138 \text{ cm}^2/\text{sec}$, なお 0°C での $D_{O_2, A}$ は $0.178 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である)。これにより、土壌内での任意の位置 x での CO_2 拡散係数 $D(x)$ はその位置での通気係数 $K(x)$ を測定することによって得られる。

土壌内での任意の位置 x での通気係数 $K(x)$ の測定法の大略は Fig. 1 に示してある。すなわち、試料上部から下部へ通気させ、 CO_2 濃度測定位置間 (L_x) での

圧力差 (ΔH_x) はマノメータで、通気量 Q は下部で湿式フローメータで測定する。これにより、

$$K(x) = \frac{Q}{AT} \frac{L_x}{\Delta H_x} \quad (12)$$

から $K(x)$ が算出できる。ただし A : 試料断面積, T : 測定時間. Fig. 2 の CO_2 濃度分布を求めた試料について、それらの $K(x)$ を測定した結果が Fig. 4 に示してある。

Fig. 4 $K(x)$ determined in soils of experimental samples.

Sample No. 1 -----●, 2 -----△, 3 -----○, 4 -----■, 5 -----□.

5. シミュレーションの結果と考察

シミュレーションにさいしての必要な数値は前述の他に、 CO_2 free 空気の流量 q , 土壌面での拡散速度 H_{sf} および土壌からの CO_2 発生量 P_{CO_2} である。このうち、 q はフローメータで測定して求める。 H_{sf} に関しては、その値をいろいろ変えて、適当な数値を求める以外目下のところない。ここでは狭い空間 V での H_{sf} として、種々検討した結果、0.36 m/hr とした。

土壌面から発生する CO_2 量 S_{CO_2} の時間的変化を、予備実験として、測定した結果が Fig. 5 に示してある。これをみると、 CO_2 発生量にピークやその生起時刻

Fig. 5 Relation between S_{CO_2} and time. S_{CO_2} , amount of CO_2 generated from the soil surface.

(T_m) があることがわかる。

いま、 CO_2 濃度分布のシミュレーションに必要な土壌内での CO_2 発生量 P_{CO_2} を Fig. 5 の形にあうような式

$$P_{\text{CO}_2}(t) = A e^{-B(\log \frac{t}{T_m})^2} + C_{\text{const}} \quad (13)$$

を仮定してみた。ここで A , B , T_m を変化させて、 $t = 4320$ min (3日後) での P_{CO_2} , あるいは土壌面からの CO_2 発生量 S_{CO_2} ($\equiv P_{\text{CO}_2} \times 0.6$ (試料長: m)), に対応して形成された土壌内 CO_2 濃度分布での末端部 ($x=l=0.6$) での濃度 $C(l)_{pv}$ を、また $t=4320$ min での P_{CO_2} が実験開始から変化しないで、一定値のまま、経過した時の同じく末端部での CO_2 濃度 $C(l)_{pc}$ を、Fig. 4 の3および5の通気係数をもとに、算出した結果が Table 1 に示してある。

これをみると、末端部での CO_2 濃度では、 $C(l)_{pv}$ が $C(l)_{pc}$ の約 0.9~1.6 倍になっていることがわかる。それゆえ、土壌内の CO_2 濃度の絶対量 ($C(x)$) を求めるためには、(13) 式に含まれるパラメータが必要である。しかしパラメータの値に関しては目下のところ明らかにできないことから、土壌内の CO_2 濃度の分布を $C(x)$ で表わすことは困難である。

土壌柱の末端部での CO_2 濃度を 1 ($=RC(l)$) として、土壌内の CO_2 濃度を

Table 1 Relation between $C(l)_{pv}$ and $C(l)_{pc}$.

Sample No.	T_m (min)	P_{CO_2} ($\text{gCO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$)	S_{CO_2} ($\text{gCO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$)	$C(l)_{pv}$ (%)	$C(l)_{pc}$ (%)	$C(l)_{pv}/C(l)_{pc}$
3	1440	1.07	0.642	0.884	0.772	1.22
	2160	1.87	1.12	1.54	1.26	1.22
	2880	2.81	1.68	2.11	1.90	1.11
	3600	3.42	2.05	2.34	2.31	1.01
5	1440	1.07	0.642	2.61	1.67	1.56
	2160	1.87	1.12	3.97	2.93	1.35
	2880	2.81	1.68	4.80	4.41	1.09
	3600	3.42	2.05	4.94	5.36	0.92

$$RC(x) = \frac{C(x)}{C(l)} \quad (14)$$

で表わすと、 $P_{CO_2}(t)$ の式に含まれるパラメータに関係なく、Table 2 のような一定の分布値をとることがわ

かった。このことから、土壌内の一次元 CO_2 濃度分布をシミュレーションで求めるときには、 CO_2 濃度の絶対量ではなく、末端部の CO_2 濃度を 1 とした相対値 $RC(x)$ での CO_2 濃度の分布形を算出することになる。

Table 2 Regular distribution of the relative CO_2 concentrations $RC(x)$ in soils.

Sample No.	Depth x (cm)	Air permeability $K(x)$ (cm/sec)	Calculated CO_2 diffusion coefficient $D(x)$ (cm ² /sec)	Relative CO_2 concentration $RC(x)$
3	5	0.54	0.065	0.272
	10	0.32	0.052	0.399
	20	0.30	0.050	0.638
	30	0.48	0.061	0.801
	40	0.54	0.065	0.917
	50	0.67	0.071	0.982
	60	1.05	0.086	1.000
5	5	0.073	0.027	0.178
	10	0.024	0.016	0.343
	20	0.034	0.020	0.607
	30	0.038	0.020	0.818
	40	0.143	0.036	0.907
	50	0.069	0.027	0.983
	60	0.174	0.040	1.000

Fig. 6 Distributions of the relative CO_2 concentrations $RC(x)$.

○, experimental values; ●, simulated values.

1, 2, 3, 4 and 5 are the samples given in Fig. 2.

Fig. 6 には, Fig. 1 の実験結果を相対 CO_2 濃度値 $RC(x)$ でもって表わし (○), これと Fig. 4 の通気係数をもとにしてシミュレーションで得られた相対 CO_2 濃度値の分布 (●) とを表わしてある。

これらの結果をみると, 土壌中での一次元 CO_2 濃度分布形を, 通気係数をもとにして, シミュレーションで十分求められることがわかった。

5. む す び

土壌内での一次元 CO_2 濃度分布をシミュレーションで算出する方法を考察してきた。その過程で, 通気係数と拡散係数との関係, 土壌内 CO_2 発生量の時間的变化など, シミュレーションに必要な数値のとらえ方について論述した。これらをもとにして, 相対値であらわした CO_2 濃度分布は実測での濃度分布とよく一致していることが明らかになった。

おわりに本研究遂行にあたり実験に本学卒業生 草瀨義勝, 本学学生 小林正和, 松本敦, 松井栄一の諸君の協力を得たこと, 計算は東北大学大型計算機を使用したことを付記する。

文 献

- 1) STOLZY, L. H. 1974. Soil atmosphere. In "The Plant Root and Its Environment" (Ed. by Carson) 335-361, University Press of Virginia, Charlottesville.
- 2) 土壌物理性測定法委員会編. 1971. 「土壌物理性測定法」275, 養賢堂, 東京.
- 3) 土壌微生物研究会編. 1966. 「土と微生物」94, 岩波書店, 東京.
- 4) 荒木 峻. 1969. 「ガスクロマトグラフィー (第2版)」100, 東京化学同人, 東京.
- 5) 生態学実習懇談会編. 1967. 「生態学実習書」25-26, 111-115, 朝倉書店, 東京.
- 6) 八幡敏雄. 1975. 「土壌の物理」71-121, 東大出版会, 東京.
- 7) 伊藤 実. 1976. 土壌の気相環境の研究 (1). 生物環境調節 14: 99-106.
- 8) PENMAN, H. L. 1940. Gas and vapour movements in the soil 1. J. Agric. Sci. 30: 437-462.

Summary

An investigation of simulations of one dimensional distributions of CO_2 concentrations in soils was made. For the simulation, the coefficients of CO_2 diffusion in a soil $D(x)$ were required. The relation between the diffusion coefficient (D) and air permeability (K) in this experiment, was found the following equations.

$$D=0.093 \text{ cm}^2/\text{sec} \quad \text{at } K \geq 1.2 \text{ cm/sec}$$

$$D=0.0845K^{0.432} \text{ cm}^2/\text{sec} \quad \text{at } K < 1.2 \text{ cm/sec}$$

As it was very difficult to determine the $D(x)$ of a soil, the $D(x)$ was estimated from the equations above after determining the air permeability $K(x)$. Then, we made the assumption that the amount of CO_2 generated in a soil is expressed by the following equation

$$P_{\text{CO}_2}(t) = A e^{-B \left(\log \frac{t}{T_m} \right)^2} + C_{\text{const}}$$

$C(l)_{pv}$ was the CO_2 concentration at the bottom of a soil, and was calculated by the P_{CO_2} change with time. $C(l)_{pc}$ also was the CO_2 concentration at the same place, and was calculated by assuming that the amount of P_{CO_2} when the CO_2 concentration was determined was constant throughout the experiment.

Comparing $C(l)_{pv}$ with $C(l)_{pc}$, we found that $C(l)_{pv}$ was about 0.9-1.6 times as great.

Therefore, distribution of the CO_2 concentration could not be expressed as $C(x)$ so far as the parameters in the equation of P_{CO_2} are concerned. When the CO_2 concentration at the bottom of a soil was taken as 1 ($=RC(l)$), and all the CO_2 concentrations in a soil were taken as $RC(x) = C(x)/C(l)$, distributions of the CO_2 concentrations in soils were found to be regular regardless of the parameters in the equations of P_{CO_2} . Therefore, to express the distributions of the CO_2 concentrations, we used $RC(x)$ which denotes the relative concentrations of CO_2 .

The distributions determined and those simulated by the expression above agreed very well. Thus, the one dimensional distributions in a soil could be simulated.

(Received January 6, 1979)