

## 土壌ガス拡散係数予測モデルの提案と国内土壌への適用

川本 健\*・小松登志子\*\*・Per Moldrup\*\*\*・吉川省子\*\*\*\*・藤川智紀\*\*\*\*\*

### Development and Tests of Predictive Soil-Gas Diffusivity Models for Japanese Undisturbed Soils

Ken KAWAMOTO\*, Toshiko KOMATSU\*\*, Per MOLDRUP\*\*\*, Seiko YOSHIKAWA\*\*\*\*  
and Tomonori FUJIKAWA\*\*\*\*\*

\* Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo, Sakura-ku,  
Saitama 338-8570, Japan

\*\* Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-okubo,  
Sakura-ku, Saitama 338-8570, Japan

\*\*\* Department of Life Sciences, Section for Environmental Engineering, Aalborg University,  
Sohngaardsholmsvej 57, DK-9000 Aalborg, Denmark

\*\*\*\* Department of Hilly Land Agriculture, National Agricultural Research Center  
for Western Region, 2575 Ikano, Zentsuji, Kagawa 765-0053

\*\*\*\*\* Department of Regional Resources, National Institute for Rural Engineering,  
2-1-6 Kannondai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8609, Japan

#### Abstract

Accurate description of gas diffusivity in undisturbed soil is required for predicting oxygen transport in cultivated soil and the fate of greenhouse gases and volatile organic chemicals. Based on measured data for 51 undisturbed soils, we developed three types of pedotransfer models for soil-gas diffusivity: (i) a model including the effect of pore-size distribution (Campbell type soil-water characteristic, SWC); (ii) a model including the effect of pore-size distribution and inactive (isolated) air-filled pore space; and (iii) a simple power function model for use in case limited SWC data are available. The influence of selecting the reference air-filled porosity at either  $-100$  and  $-63$  cm of matric potentials ( $\epsilon_{100}$  and  $\epsilon_{63}$ ) on predicting soil-gas diffusivities was also examined. The new models were compared with recent predictive models such as the Millington-Quirk (MQ) model, the Buckingham-Burdine-Campbell (BBC) model, and Macroporosity-dependent (MPD) model.

The widely-used MQ model generally underpredicted data. The new models as well as the BBC model and MPD model well predicted the measured soil-gas diffusivities, with the BBC model performing slightly better. There was no significant effect of including an inactive pore space term on predicted soil-gas diffusivities. In the new models, there was a tendency that the equations using  $\epsilon_{100}$  as a reference point gave a better prediction of soil-gas diffusivities compared to the equations using  $\epsilon_{63}$ .

**Key words**: soil-gas diffusivity, air-filled porosity, pore-size distribution, undisturbed soil

\* 埼玉大学工学部 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

\*\* 埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

\*\*\* オルボー大学生命科学科 オルボー, デンマーク

\*\*\*\* 近畿中国四国農業研究センター 四国研究センター 〒765-0053 香川県普通寺生野町 2575

\*\*\*\*\* 農業工学研究所 地域資源部 〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6

キーワード: 土壌ガス拡散係数, 気相率, 間隙径分布, 不攪乱土壌

## 1. はじめに

土壌通気の主たるメカニズムはガス拡散であり、土壌におけるガス拡散係数の正しい把握や適切な予測は耕地土壌のガス循環や通気不良の解明にとって不可欠である(安田, 1972; 長谷川, 1994; 藤川ら, 2003)。さらに、近年環境問題として取り上げられる二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの土壌からの排出量推定(Osozawa and Hasegawa, 1995; Hillel, 1998; Kruse *et al.*, 1996)、土壌汚染で問題となる揮発性有機化合物の挙動解明や運命予測(Jury *et al.*, 1990; Petersen *et al.*, 1996; El-Farhan *et al.*, 1998; Poulsen, *et al.*, 1999; Gamst *et al.*, 2003)にも、ガス拡散係数の把握は重要な役割を果たす。

土壌のガス拡散係数の予測モデルは、一般に、土壌ガス拡散係数  $D_p$  を大気中のガス拡散係数  $D_0$  で除した相対土壌ガス拡散係数  $D_p/D_0$  と気相率  $\varepsilon$  の関係として表され、これまでいくつかの実験式や半理論式が提案されている(Penman, 1940; Millington and Quirk, 1961; Moldrup *et al.*, 1999; Moldrup *et al.*, 2000)。これらの予測モデルの大半は欧米土壌を対象として提案されたものであり、国内土壌の実測データを基に提案されたモデルは少ないのが現状である。例えば、Buckingham-Burdine-Campbell モデル(BBC モデル, Moldrup *et al.*, 1999) や Macroporosity-dependent モデル(MPD モデル, Moldrup *et al.*, 2000) は、ヨーロッパ土壌の実測データを基に構築された予測モデルである(モデルの詳細は後述)。

Moldrup *et al.* (2003) は、日本の黒ボク土 18 試料および灰色低地土 4 試料の実測データに対して、BBC モデルと MPD モデルを含む既存の予測モデルを適用し、実測値との適合性を検証した。この中で、BBC モデルや MPD モデルは、Penman (1940) モデルや Millington and Quirk (1961) モデル(MQ モデル)と比較して、予測値と実測値の間に十分な適合性を有するものの、これらの予測モデルは実測値をやや過小評価する傾向があることを示した。彼らはこの原因として、MPD モデルの記述式の中で使われている  $D_{p,100}/D_0$  と  $\varepsilon_{100}$  の関係式( $\varepsilon_{100}$ : マトリックポテンシャル  $\phi = -100$  cm (pF=2.0) における気相率,  $D_{p,100}/D_0$ : 同 pF における相対土壌ガス拡散係数) がヨーロッパ土壌を基に提案された式であり、これが日本土壌の  $D_{p,100}/D_0$  の実測データを過小評価するためであると指摘した。

また、BBC モデルや MQ モデルの記述式の中には全間隙率が含まれる。これらの予測モデルの構築・検証に用いられた土壌は、全間隙率は  $0.4-0.6 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  程度の砂質やローム質土壌が中心であり、日本の黒ボク土のよ

うな大きな全間隙率 ( $0.7-0.8 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  程度) を有する土壌とは異なる。このようなモデル構築に用いられた土壌の全間隙率の違いは、国内の多数の黒ボク土を対象として予測モデルを適用した場合、その適合性に影響を与える可能性が考えられる。

以上のように、国内土壌に対して土壌ガス拡散係数の予測モデルの適合性を向上させるためには、既存モデルの記述式に用いられる関係式(MPD モデルの  $D_{p,100}/D_0$  と  $\varepsilon_{100}$ ) を国内土壌の実測データを用いて改良することが有効であると思われる。さらに、予測モデルの改良にあたり、国内と欧米土壌の間で定義の異なる物理量(圃場含水量や粗大間隙率)などを考慮し、これらの違いが土壌ガス拡散係数の予測にどのような影響を及ぼすのかを検討することは重要であると考えられる。

そこで本研究では、国内土壌の土壌ガス拡散係数を測定した後、国内土壌の実測データを用いて既存のガス拡散係数予測モデルを改良し、3 タイプの予測モデルを提案した。そして、これらのモデルと既存モデルを用いて予測値と実測値との適合性を検証し、その評価を行った。

## 2. 試料

土壌ガス拡散係数の測定には、国内の1都6県より採取した不攪乱試料を用いた(表1)。試料採取は、畑地を中心に、未耕地、水田、牧草地の深さ0-108 cmの表層土壌から行った。試料総数は51で、黒ボク土が37試料、黄色土が9試料、灰色低地土が5試料である。試料は直径5.0 cm、高さ5.1 cmの体積  $100 \text{ cm}^3$  のステンレス製コアサンプラーで採取した。なお、表1の土壌試料の実測データのうち、試料No. 6-10, 38-39, 42は遅沢(1998)、試料No. 16-19はOsozawa and Hasegawa (1995)から引用した。また、試料No. 1-5, 11-15, 32-37, 40-41, 44はMoldrup *et al.* (2003)、試料No. 45-51はMoldrup *et al.* (2004)の中で予測モデルの検証のために用いられている。

各試料の飽和からの脱水過程における水分特性曲線を吸引法と加圧法の組み合わせにより測定した(中野ら, 1995)。そして、水分特性曲線より土壌間隙分布を表現する物理パラメータであるCampbellの保水係数  $b$  を求めた。ここで、 $b$  はCampbellの水分特性モデル(Campbell, 1974)

$$\phi/\phi_e = (\theta/\theta_s)^{-b} \quad (1)$$

の係数であり、(1)式の両辺を常用対数表示した pF (=  $\log(-\phi) - \log \theta$ ) 関係の傾きとして求まる。ただし、(1)式の  $\phi$  はマトリックポテンシャル (cm)、 $\phi_e$  は空気侵

表-1 土壌ガス拡散係数の測定に用いた試料（黒ボク土 37, 黄色土 9, 灰色低地土 5）

Table 1 Soil materials for measuring soil-gas diffusivities (37 Andosols, 9 Yellow soils, and 5 Gray Lowland soils).

No.	Site	Soil*	Layer	Depth	Particle	Bulk	Labeled soil name in the reference	
					density	density		
				cm	Mg m <sup>-3</sup>	Mg m <sup>-3</sup>		
1	Gunma	Andosol, H	Plowed soil	0-5	2.47	0.57	Tsumagoi 3 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
2	(Tsumagoi)	(Cultivated)	Plow pan	20-25	2.46	0.73	Tsumagoi 1 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
3			Subsurface soil	44-49	2.41	0.61	Tsumagoi 2 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
4		Andosol, H	Surface soil	25-30	2.39	0.40	Tsumagoi 6 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
5		(Non-cultivated)	Subsoil	76-81	2.82	0.69	Tsumagoi 7 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
6		Andosol	Plowed soil	0-20	2.57	0.57	— (Osozawa, 1998)	
7		(Cultivated)	Plow pan	20-40	2.57	0.76	— (Osozawa, 1998)	
8			Subsurface soil	40-60	2.55	0.72	— (Osozawa, 1998)	
9		Andosol	Plowed soil	0-16	2.56	0.63	— (Osozawa, 1998)	
10		(Cultivated)	Plow pan	16-21	2.56	0.77	— (Osozawa, 1998)	
11	Kanagawa	Andosol, H	Plowed soil	0-5	2.51	0.79	Miura 1 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
12	(Miura)	(Cultivated)	Plowed soil	30-35	2.50	0.71	Miura 2 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
13			Subsurface soil	50-55	2.68	0.49	Miura 3 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
14		Andosol	Plowed soil	0-5	2.66	0.67	Miura 4 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
15		(Cultivated)	Plow pan	30-35	2.52	0.62	Miura 5 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
16	Ibaraki	Andosol, H	Plowed soil	0-20	2.57	0.75	Ap 1 (Osozawa & Hasegawa, 1995)	
17	(Tsukuba)	(Cultivated)	Plow pan	20-37	2.28	0.71	Ap 2 (Osozawa & Hasegawa, 1995)	
18			Subsurface soil	37-79	2.75	0.55	2B1 (Osozawa & Hasegawa, 1995)	
19			Subsurface soil	79-108	2.75	0.57	3B21 (Osozawa & Hasegawa, 1995)	
20	Tokyo	Andosol	Plowed soil	5-10	2.61	0.77	—	
21	(Nishi)	(Cultivated)	Plowed soil	5-10	2.61	0.79	—	
22	Tokyo)		Plowed soil	5-10	2.61	0.80	—	
23			Subsurface soil	45-50	2.68	0.51	—	
24			Subsurface soil	45-50	2.68	0.52	—	
25			Subsurface soil	45-50	2.68	0.60	—	
26		Andosol	Plowed soil	10-15	2.73	0.67	—	
27		(Cultivated)	Plowed soil	10-15	2.63	0.62	—	
28			Plowed soil	10-15	2.66	0.62	—	
29		Andosol	Surface soil	5-10	2.61	0.84	—	
30		(Pasture)	Surface soil	5-10	2.56	0.80	—	
31			Surface soil	5-10	2.60	0.76	—	
32	Kumamoto	Andosol, H	Plowed soil	4-9	2.45	0.74	Kyushu 1 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
33		(Cultivated)	Plowed soil	25-30	2.59	0.56	Kyushu 2 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
34			Plowed soil	45-50	2.62	0.52	Kyushu 3 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
35		Andosol, H	Plowed soil	3-8	2.53	0.61	Kyushu 4 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
36		(Cultivated)	Plowed soil	17-22	2.58	0.81	Kyushu 5 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
37			Plowed soil	45-50	2.58	0.75	Kyushu 6 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
38		Yellow soil	Plowed soil	3-8	2.69	1.33	— (Osozawa, 1998)	
39		(Cultivated)	Subsurface soil	15-20	2.79	1.58	— (Osozawa, 1998)	
40		Gray Lowland soil	Plowed soil	5-10	2.68	1.07	KyuGL 1 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
41		(Cultivated)	Plow pan	22-27	2.68	1.37	KyuGL 2 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
42			Gley horizon	73-78	2.67	0.95	— (Osozawa, 1998)	
43			Buried humic soil	78-83	2.42	0.32	KyuGL 3 (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
44	Saitama	Gray Lowland soil	Plowed soil	0-5	2.69	1.05	KounosuGL (Moldrup <i>et al.</i> , 2003)	
	(Kounosu)	(Paddy field)						
45	Aichi	Yellow soil	Plowed soil	0-18	2.66	1.24	Yellow 1 (Moldrup <i>et al.</i> , 2004)	
46	(Toyohashi)	(Cultivated)	Plowed soil	18-36	2.66	1.52	Yellow 2 (Moldrup <i>et al.</i> , 2004)	
47			Plowed soil	36-70	2.66	1.37	Yellow 3 (Moldrup <i>et al.</i> , 2004)	
48		Yellow soil	Plowed soil	0-13	2.64	1.17	Yellow 4 (Moldrup <i>et al.</i> , 2004)	
49		(Cultivated)	Plowed soil	13-20	2.66	1.45	Yellow 5 (Moldrup <i>et al.</i> , 2004)	
50			Subsurface soil	20-27	2.68	1.45	Yellow 6 (Moldrup <i>et al.</i> , 2004)	
51			Subsurface soil	27-60	2.61	1.38	Yellow 7 (Moldrup <i>et al.</i> , 2004)	

\*H=highly humic soil.

入ポテンシャル (cm),  $\theta$  は体積含水率 ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\theta_s$  は飽和体積含水率 ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) である。

図1に  $pF (= \log(-\psi)) - \log \theta$  の関係例を示した。今回測定した水分特性曲線はいずれも(1)式で良く回帰でき、 $b$  は黒ボク土で4.7-40.8, 黄色土で7.4-29.0, 灰色低地土で13.5-28.3となった(表2)。

### 3. 土壌ガス拡散係数の測定

土壌ガス拡散係数は、遅沢・久保田 (1987) と Rolston and Moldrup (2002) に従い、次の非定常法で測定した。コアサンプラーと連結した拡散容器に窒素ガスを充填し、試料を通して大気と窒素ガスを相互拡散させる。大気より試料を通して拡散容器内へ拡散してくる酸素濃度の経時変化を求める。そして、測定時の初期・境界条件における拡散方程式 (Fick の第2法則) の解に、酸素濃度の経時変化を当てはめることにより、土壌ガス拡散係数  $D_p$  ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) を決定する。

本研究では、 $\psi = -10, -32, -63, -100, -316, -1.00 \times 10^3, -3.16 \times 10^3, -1.58 \times 10^4$  cm の8段階 ( $pF = 1.0, 1.5, 1.8, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.2$ ) に水分調整を行った試料を用いて  $D_p$  測定を行った。また、 $D_p$  を大気中の酸素拡散係数  $D_0$  で除した相対土壌ガス拡散係数  $D_p/D_0$  を求め、気相率  $\varepsilon$  の関数として表した。

図2に全試料より得られた  $D_p/D_0$  と  $\varepsilon$  の関係を示した。実測データの上限は  $D_p/D_0 = \varepsilon^{1.6}$ , 下限は概ね  $D_p/D_0 = \varepsilon^3$  に位置した。また、黒ボク土の実測データは黄色土と灰色低地土に比べて広い気相率の範囲に分布した。

### 4. 土壌ガス拡散係数の予測モデル

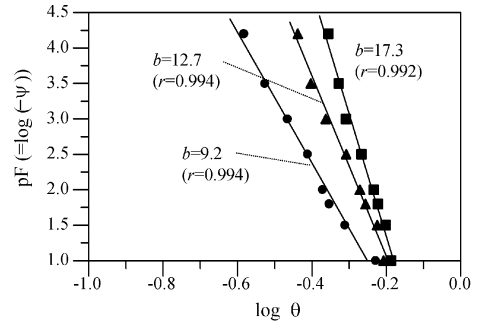
#### 4.1 既存の予測モデル

相対土壌ガス拡散係数  $D_p/D_0$  の予測モデルは、実験式で表現される Penman モデル (Penman, 1940), 理論式で表現される Millington and Quirk モデル (MQ モデル, Millington and Quirk, 1961), 半理論式で表現される Buckingham-Burdine-Campbell モデル (BBC モデル, Moldrup *et al.*, 1999), Macroporosity-dependent モデル (MPD モデル, Moldrup *et al.*, 2000) などがこれまでに提案されている。

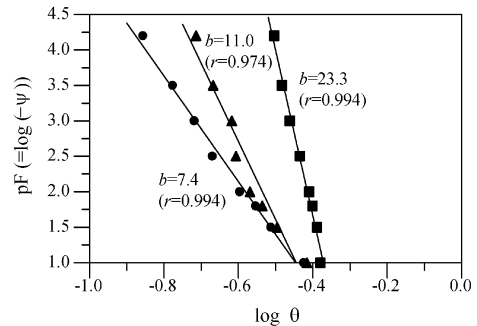
MQ モデルは全間隙率  $\Phi$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) を用いて次式で表される:

$$D_p/D_0 = \varepsilon^{10/3} / \Phi^2 \quad (2)$$

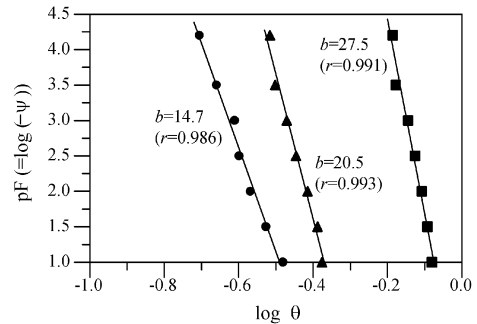
BBC モデルは、土壌ガス拡散係数予測モデルの1つである Buckingham (1904) モデル ( $D_p/D_0 = \Phi^2$ ) と Burdine (1953)-Campbell (1974) の不飽和透水係数モデル (Moldrup *et al.*, 1992) を組み合わせたモデルで、



(a) Andosol (Gunma) ●No.6 ▲No.7 ■No.8



(b) Yellow soil (Aichi) ●No.48 ▲No.49 ■No.50



(c) Gray Lowland soil (Kumamoto) ●No.40 ▲No.41 ■No.43

図-1  $pF (= \log(-\Psi))$  と  $\log \theta$  の関係  
図中の実線は Campbell (1974) の水分特性曲線モデルによるデータの回帰、 $b$  はモデルの係数、 $r$  は相関係数

Fig. 1 Relationship between  $pF (= \log(-\Psi))$  and  $\log \theta$ .

Solid lines are the Campbell's soil water characteristic model (1974) fitted to data. Values of model parameter Campbell  $b$  and correlation coefficients  $r$  for each soil are given.

次式で表される:

$$D_p/D_0 = \Phi^2 (\varepsilon / \Phi)^{2+3/b} \quad (3)$$

表-2 試料の土壌物理パラメータ

Table 2 Soil physical parameters for soil materials.

No.	Site	Soil*	Depth	Total porosity $\Phi$	$\varepsilon_{100}$	$\varepsilon_{63}$	Campbell $b$
				$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	
1	Gunma	Andosol, H (Cultivated)	0-5	0.77	0.34	0.32	8.5
2	(Tsumagoi)		20-25	0.71	0.08	0.08	18.5
3			44-49	0.75	0.06	0.05	13.9
4		Andosol, H	25-30	0.83	0.28	0.26	10.8
5		(Non-cultivated)	76-81	0.76	0.17	0.17	34.7
6		Andosol (Cultivated)	0-20	0.78	0.35	0.34	9.2
7			20-40	0.71	0.17	0.15	12.7
8			40-60	0.72	0.13	0.12	17.3
9		Andosol (Cultivated)	0-16	0.75	0.36	0.34	7.7
10			16-35	0.70	0.17	0.14	16.3
11	Kanagawa	Andosol, H (Cultivated)	0-5	0.69	0.22	0.10	9.4
12	(Miura)		30-35	0.72	0.27	0.18	7.7
13			50-55	0.82	0.23	0.18	15.1
14		Andosol (Cultivated)	0-5	0.75	0.32	0.23	9.3
15			30-35	0.75	0.28	0.22	9.3
16	Ibaraki	Andosol, H (Cultivated)	0-20	0.71	0.29	0.27	8.3
17	(Tsukuba)		20-37	0.69	0.20	0.16	9.0
18			37-79	0.80	0.16	0.13	23.7
19			79-108	0.79	0.15	0.13	17.3
20	Tokyo	Andosol (Cultivated)	5-10	0.71	0.11	NM**	10.1
21	(Nishi Tokyo)		5-10	0.70	0.14	NM**	13.4
22			5-10	0.69	0.14	NM**	11.8
23			45-50	0.81	0.20	NM**	12.3
24			45-50	0.81	0.19	NM**	14.0
25			45-50	0.78	0.24	NM**	10.1
26		Andosol (Cultivated)	10-15	0.75	0.31	0.29	7.6
27			10-15	0.76	0.34	0.32	7.2
28			10-15	0.77	0.36	0.34	4.7
29		Andosol (Pasture)	5-10	0.68	0.12	0.10	16.8
30			5-10	0.69	0.14	0.12	16.2
31			5-10	0.71	0.19	0.17	12.0
32	Kumamoto	Andosol, H (Cultivated)	4-9	0.70	0.14	NM**	12.7
33			25-30	0.78	0.09	NM**	40.8
34			45-50	0.80	0.10	NM**	28.0
35		Andosol, H (Cultivated)	3-8	0.76	0.37	NM**	10.1
36			17-22	0.69	0.20	NM**	14.4
37			45-50	0.71	0.20	NM**	12.4
38		Yellow soil (Cultivated)	3-8	0.50	0.08	NM**	20.0
39			15-20	0.43	0.07	NM**	29.0
40		Gray Lowland soil	5-10	0.60	0.33	NM**	14.7
41		(Cultivated)	22-27	0.49	0.10	NM**	20.5
42			73-78	0.64	0.09	NM**	28.3
43			78-83	0.87	0.07	NM**	27.5
44	Saitama (Kounosu)	Gray Lowland soil (Paddy field)	0-5	0.61	0.21	NM**	14.0
45	Aichi	Yellow soil (Cultivated)	0-18	0.54	0.31	0.29	8.0
46	(Toyohashi)		18-36	0.43	0.15	0.14	14.3
47			36-70	0.49	0.20	0.18	12.9
48		Yellow soil (Cultivated)	0-13	0.56	0.30	0.28	7.4
49			13-20	0.46	0.19	0.17	11.0
50			20-27	0.46	0.07	0.06	23.3
51			27-60	0.47	0.10	0.09	14.3

\*H=highly humic soil. \*\*NM=not measured.

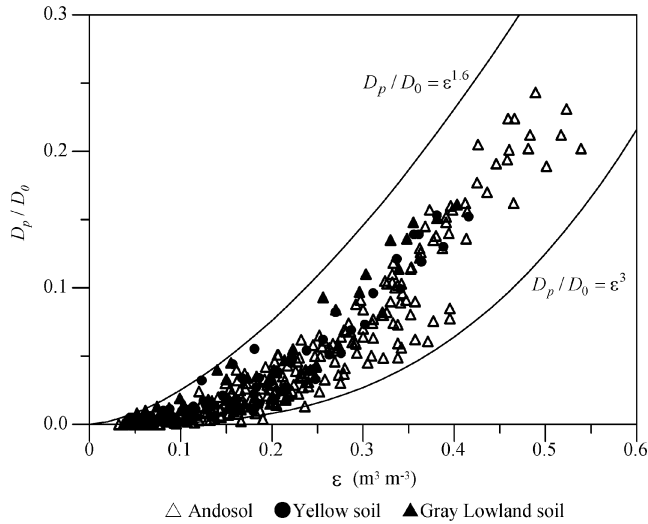


図-2 相対土壌ガス拡散係数  $D_p/D_0$  と気相率  $\varepsilon$  の関係  
試料数 51, 測定数 361 (黒ボク土 259, 黄色土 69, 灰色低地土 33)

**Fig. 2** Relative soil-gas diffusivity  $D_p/D_0$  as a function of air-filled porosity  $\varepsilon$ .  
Data for 51 soils and 361 measurements (259 Andosols, 69 Yellow soils, and 33 Gray Lowland soils).

ここで、右辺指数部  $(2+3/b)$  は Campbell の保水係数  $b$  を含み、土壌の間隙径分布特性を表すパラメータとなる。

MPD モデルは、ヨーロッパ土壌 126 個の不攪乱試料の実測データを基に構築されたモデルであり、 $\phi = -100$  cm ( $pF=2.0$ ) における気相率  $\varepsilon_{100}$  ( $m^3 m^{-3}$ ) と同  $pF$  における相対土壌ガス拡散係数  $D_{p,100}/D_0$  を用いて次式で表される：

$$D_p/D_0 = (D_{p,100}/D_0) (\varepsilon/\varepsilon_{100})^{2+3/b} = \{2.00(\varepsilon_{100})^3 + 0.04(\varepsilon_{100})\} (\varepsilon/\varepsilon_{100})^{2+3/b} \quad (4)$$

ここで、 $D_{p,100}/D_0 = 2.00(\varepsilon_{100})^3 + 0.04(\varepsilon_{100})$  は、実測データより得られた  $D_{p,100}/D_0 - \varepsilon_{100}$  関係を多項式で回帰することにより求まる。MPD モデルは土壌の粗大間隙率を  $\varepsilon_{100}$  とし、この気相率を基準気相率 (Moldrup *et al.*, 1996) としてモデルに用いている。また、(4)式は BBC モデルと同様に、指数部  $(2+3/b)$  によって土壌の間隙径分布特性を表す。

#### 4.2 予測モデルの改良

既存モデルは、一般に次の記述式で整理できる：

$$D_p/D_0 = A(\varepsilon/\varepsilon_*)^B \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon_*$  は基準気相率、 $A$  は  $\varepsilon = \varepsilon_*$  における  $D_p/D_0$  の関数形、 $B$  は土壌間隙分布特性を表すパラメータとな

る。 $\varepsilon_*, A, B$  の一覧を表 3 に示した。本研究では、国内土壌の実測データに基づく回帰式、無効間隙率の影響、土壌間隙分布特性を考慮して、(5)式の  $\varepsilon_*, A, B$  を新たに設定することにより、3 タイプの予測モデル (モデル I, II, III) を提案した。さらに、基準気相率  $\varepsilon_*$  は、 $\varepsilon_{100}$  と  $\phi = -63$  cm ( $pF=1.8$ ) における気相率  $\varepsilon_{63}$  ( $m^3 m^{-3}$ ) の 2 通りを用いた。ここで、 $\phi = -63$  cm は国内土壌を対象とした研究において粗大間隙率や圃場含水量を定めるために広く用いられているポテンシャルであり (例えば、久馬ら, 1984; Hasegawa *et al.*, 1994),  $\phi = -100$  cm における  $\varepsilon_{100}$  と比較するために用いた。 $\varepsilon_* = \varepsilon_{100}$  のモデルに  $a$ ,  $\varepsilon_* = \varepsilon_{63}$  のモデルに  $b$  を添字することにより両者を区別した (表 3)。表 2 に各試料の土壌物理パラメータ、 $\Phi$ ,  $\varepsilon_{63}$ ,  $\varepsilon_{100}$  および保水係数  $b$  の一覧を示した。

モデル I-a および I-b では、MPD モデルと同様に、実測データより得られた  $D_{p,100}/D_0 - \varepsilon_{100}$  および  $D_{p,63}/D_0 - \varepsilon_{63}$  関係を多項式回帰することにより  $A$  を求めた。図 3 (a) に  $D_{p,100}/D_0 - \varepsilon_{100}$ 、図 3 (b) に  $D_{p,63}/D_0 - \varepsilon_{63}$  の関係を示した。図中の点線が多項式回帰曲線であり、モデルの記述式は以下となる：

$$\text{モデル I-a: } D_p/D_0 = \{1.92(\varepsilon_{100})^3 + 0.06(\varepsilon_{100})\} (\varepsilon/\varepsilon_{100})^{2+3/b} \quad (6)$$

表-3 相対土壌ガス拡散係数モデル式  $D_p/D_0 = A (\epsilon/\epsilon_*)^B$  の  $\epsilon_*$ ,  $A$ ,  $B$

Table 3 A list of  $\epsilon_*$ ,  $A$ , and  $B$  of model expressions for relative soil-gas diffusivities  $D_p/D_0 = A(\epsilon/\epsilon_*)^B$ .

	$\epsilon_*$	$A$	$B$
MQ model*	$\Phi$	$\Phi^{4/3}$	10/3
BBC model**	$\Phi$	$\Phi^2$	2+3/b
MPD model***	$\epsilon_{100}$	$2.00\epsilon_{100}^3 + 0.046\epsilon_{100}$	2+3/b
Model I-a	$\epsilon_{100}$	$1.92\epsilon_{100}^3 + 0.06\epsilon_{100}$	2+3/b
Model I-b	$\epsilon_{63}$	$1.65\epsilon_{63}^3 + 0.05\epsilon_{63}$	2+3/b
Model II-a	$\epsilon_{100}$	$2.35 (\epsilon_{100} - 0.05)^3 + 0.13 (\epsilon_{100} - 0.05)$	2+3/b
Model II-b	$\epsilon_{63}$	$1.98 (\epsilon_{63} - 0.05)^3 + 0.11 (\epsilon_{63} - 0.05)$	2+3/b
Model III-a	$\epsilon_{100}$	$1.92\epsilon_{100}^3 + 0.06\epsilon_{100}$	2.2
Model III-b	$\epsilon_{63}$	$1.65\epsilon_{63}^3 + 0.05\epsilon_{63}$	2.2

\*Millington and Quirk (1961) \*\*Buckingham-Burdine-Campbell model (Moldrup *et al.*, 1999)

\*\*\*Macroporosity-dependent model (Moldrup *et al.*, 2000)

$$\begin{aligned} \text{モデル I-b: } D_p/D_0 &= \{1.65(\epsilon_{63})^3 + 0.05(\epsilon_{63})\} (\epsilon/\epsilon_{63})^{2+3/b} \end{aligned} \quad (7)$$

(6), (7)式は MPD モデルや BBC モデルと同様に、土壌の間隙径分布特性を指数部 (2+3/b) で表現している。

モデル II-a および II-b では、図 3 (a), (b) の  $D_{p,100}/D_0$ ,  $D_{p,63}/D_0$  が実質的に 0 となる間隙率 0.05 をガス拡散に寄与しない間隙率 (無効間隙率) と定めて、それ以外の有効間隙率 ( $\epsilon - 0.05$ ) の範囲で多項式回帰 (図中の実線) を行った。ここで、無効間隙率 0.05 は図 3 (a), (b) から読み取った。モデルの記述式は以下となる：

$$\begin{aligned} \text{モデル II-a: } D_p/D_0 &= \{2.35(\epsilon_{100} - 0.05)^3 + 0.13(\epsilon_{100} - 0.05)\} (\epsilon/\epsilon_{100})^{2+3/b} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{モデル II-b: } D_p/D_0 &= \{1.98(\epsilon_{63} - 0.05)^3 + 0.11(\epsilon_{63} - 0.05)\} (\epsilon/\epsilon_{63})^{2+3/b} \end{aligned} \quad (9)$$

(5)式の  $B$  は、モデル I-a および I-b と同様に指数部 (2+3/b) によって表現される。このモデルで考慮した無効間隙率の存在は幾つかの研究で指摘されており、土壌を含む多孔質媒体では 0-0.15 の値を示すことが報告されている (Troeh *et al.*, 1982)。本研究で定めた無効間隙率 0.05 は、過去に砂質土壌 (Lai *et al.*, 1976) や粘土質土壌 (Blake and Page, 1948) を用いた実験結果と一致する。

モデル III-a および III-b は、モデル I-a および I-b と多項式回帰曲線は同じであるが、(6), (7)式の指数部 (2+3/b) に本試料の平均値 2.2 を用いたモデルであり、以下

で記述される：

$$\begin{aligned} \text{モデル III-a: } D_p/D_0 &= \{1.92(\epsilon_{100})^3 + 0.06(\epsilon_{100})\} (\epsilon/\epsilon_{100})^{2.2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{モデル III-b: } D_p/D_0 &= \{1.65(\epsilon_{63})^3 + 0.05(\epsilon_{63})\} (\epsilon/\epsilon_{63})^{2.2} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、平均値 2.2 は本実験に用いた 51 試料の Campbell の保水係数  $b$  の平均値 (=14.9) より計算した。モデル III-a および III-b は、個々の試料の Campbell の保水係数  $b$  の値を必要としないことから、水分特性曲線が得られていない土壌試料に対して土壌ガス拡散係数を推定する際に有効であると思われる。

#### 4.3 予測モデルと実測データの適合性評価

適合性の評価には二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, 以下 RMSE) とバイアス (bias) を用いた。RMSE は次式で表される：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (12)$$

ここで、 $d_i$  は予測値と実測値との差、 $n$  は測定数である。RMSE は 0 に近いほど予測値と実測値との差が小さくなり、両者の適合性が良いことを意味する。バイアスは次式で表される：

$$\text{bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (13)$$

バイアスは、値が正の場合は予測値が実測値を過大評価し、逆に負の場合は予測値が実測値を過小評価する。

以上、本研究では国内土壌の実測データに基づく回帰

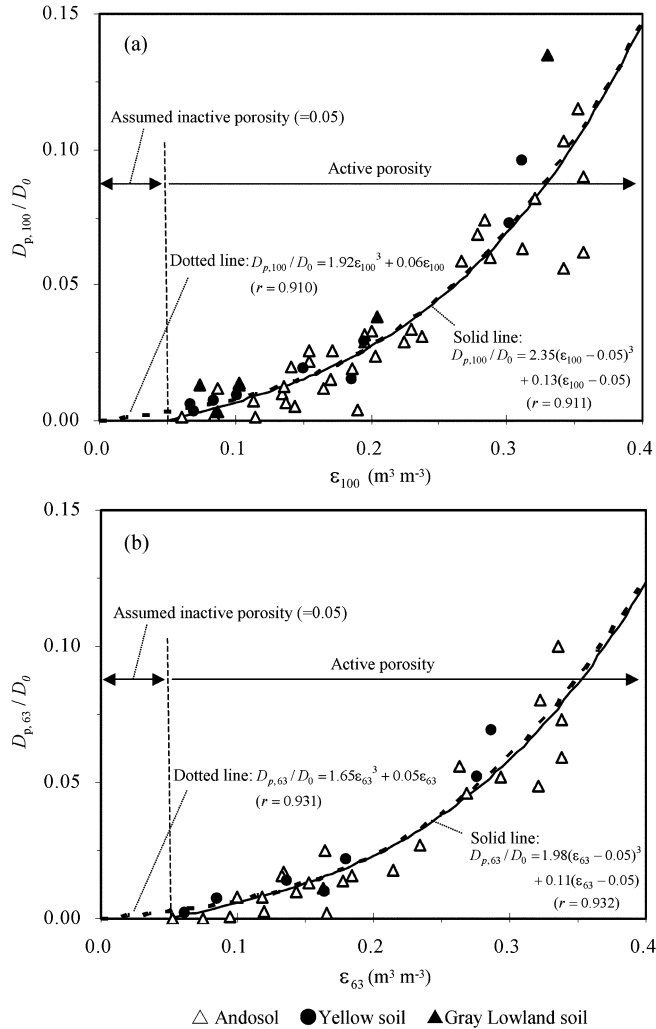


図-3 (a)  $\Psi = -100 \text{ cm}$  における相対土壌ガス拡散係数  $D_{p,100}/D_0$  と気相率  $\epsilon_{100}$  の関係  
 測定数 51 (黒ボク土 37, 黄色土 9, 灰色低地土 5)

(b)  $\Psi = -63 \text{ cm}$  における相対土壌ガス拡散係数  $D_{p,63}/D_0$  と気相率  $\epsilon_{63}$  の関係  
 測定数 32 (黒ボク土 25, 黄色土 7)

点線はモデル I-a および I-b, 実線はモデル II-a および II-b の多項式回帰曲線

Fig. 3 (a) Relative soil-gas diffusivity  $D_{p,100}/D_0$  as a function of air-filled porosity at  $\Psi = -100 \text{ cm}$   $\epsilon_{100}$ , 51 measurements (37 Andosols, 9 Yellow soils, and 5 Gray Lowland soils), and (b) relative soil-gas diffusivity  $D_{p,63}/D_0$  as a function of air-filled porosity at  $\Psi = -63 \text{ cm}$   $\epsilon_{63}$ , 32 measurements (25 Andosols and 7 Yellow soils).

Dotted and solid lines are polynomial regression curves for Model I-a, I-b and II-a, II-b, respectively.

式, 無効間隙率の影響, 土壌間隙分布特性を考慮して構築した3タイプの予測モデル(モデルI, II, III)と, MQモデル, BBCモデル, MPDモデルの既存のモデルに対して予測モデルと実測データの適合性の評価を行った。なお, 既存モデルと今回提案したモデルの適合性の

比較は,  $\epsilon_{100}$  が得られている全51試料の実測データに対して行い, 無効間隙率と基準気相率が予測モデルの適合性に与える影響は,  $\epsilon_{100}$  と  $\epsilon_{63}$  の両方が得られている32試料の実測データに対して行った。



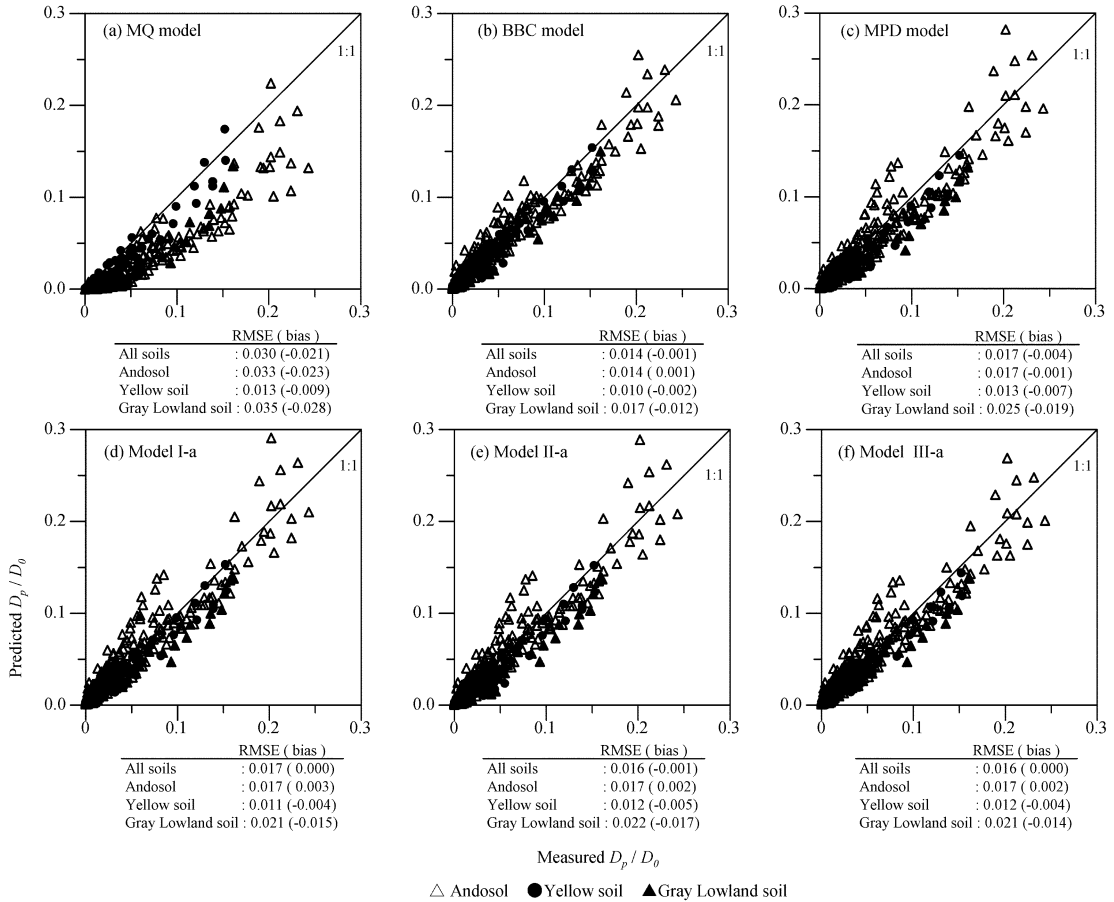


図4 各モデルによる予測値と実測値の比較

(a) MQ モデル, (b) BBC モデル, (c) MPD モデル, (d) モデル I-a, (e) モデル II-a, (f) モデル III-a  
測定数 371 (黒ボク土 259, 黄色土 69, 灰色低地土 33)

Fig. 4 Scatterplot comparison of predicted and measured soil-gas diffusivities for each model.  
(a) MQ model, (b) BBC model, (c) MPD model, (d) Model I-a, (e) Model II-a, (f) Model III-a  
371 measurements (259 Andosols, 69 Yellow soils, 33 Gray Lowland soils)

## 5. 予測モデルの適合性評価

### 5.1 全試料および各土壌に対する予測モデルの適合性

図4に各モデルの予測値と実測値との比較を示した。また、同図には全土壌試料と黒ボク土, 黄色土, 灰色低地土の各土壌に対して得られたRMSEとバイアスを示した。

MQモデルを除き, 今回提案した予測モデル(モデル I-a, II-a, III-a), BBCモデル, MPDモデルは, 全土壌に対するRMSEが0.014から0.020の範囲にあり, 実測データとの間に良い適合性があることが分かる。RMSE

に注目すると, BBCモデル(図4(b))が0.014と最も良い適合性を与えた。この理由として, 黒ボク土との適合性が良い点(RMSE=0.014)が挙げられる。今回予測モデルの検証を行った総測定数は371で, この中の約7割となる259が黒ボク土であった。このため, 黒ボク土のRMSEが全土壌との適合性を左右したのと言える。

次に, ヨーロッパ土壌126試料の実測データを基に構築されたMPDモデル(図4(c), (4)式)と, 本研究の国内土壌51試料の実測データを基に構築されたモデル I-a(図4(d), (6)式)を比較する。両モデルの違いは $D_{p,100}/D_0$ の回帰式(表3のA)の違いで表現され, 両モデルのRMSEを比較することにより, モデル構築に用

いたヨーロッパ土壌と国内土壌の実測データの違いが、予測モデルの適合性にどのような影響を与えたかが判断できる。

黄色土と灰色低地土では、国内土壌を用いたモデル I-a の方が MPD モデルよりもやや小さな RMSE を与えるものの、全土壌および黒ボク土では、両モデルの RMSE は同じ値 (RMSE=0.017) を示した。一方 MPD モデル (図 4 (c)) のバイアスはすべて負の値を示し、予測値は実測値を過小評価していることが分かる。これに対し、モデル I-a (図 4 (d)) は、MPD モデルよりもバイアスが 0.004 程度増加し、値が 0 に近づいている。以上のように、国内土壌のデータを用いてモデルを構築することにより、土壌ガス拡散係数の予測に関して若干の向上が見られるものの、現時点では今回提案したモデルと既存の MPD モデルの間に顕著な差はないと言える。今回モデル I-a の構築に用いた国内土壌の試料数は 51 と、MPD モデルの 126 試料に比べて少ないことから、今後国内土壌の実測データを増やし、再度モデル I-a における  $D_{p,100}/D_0$  の帰帰式を検討する必要があると思われる。

モデル III-a (10 式) は、土壌間隙分布特性を表すパラメータ ((5) 式の  $B$ ) として、国内土壌 51 試料の平均値 2.2 を用いた。このモデルは、個々の試料の保水係数  $b$  を必要としないことから、水分特性曲線が得られていない土壌の  $D_p/D_0$  予測への適用が容易である。III-a (図 4 (f)) の RMSE は 0.016 となり、モデル I-a (図 4 (d))、RMSE=0.017) やモデル II-a (図 4 (e))、RMSE=0.016) とほぼ同じ値を示した。このことから、水分特性曲線が得られていない国内土壌について土壌ガス拡散挙動を推定する際には、 $B=2.2$  を用いたモデル III が妥当であると判断できる。

## 5.2 個々の試料に対する予測モデルの適合性

次に、個々の試料 (表 1) について RMSE を求め、予測モデルの適合性を評価した。図 5 に予測モデルと実測値の比較例として、6 試料 (黒ボク土 4 試料、黄色土と灰色低地土各 1 試料) についての  $D_p/D_0$ - $\epsilon$  関係を示した。図には、前述の全土壌に対して最も良い適合性を与えた BBC モデルと、今回提案したモデル I-a、II-a、III-a を示した。

各サイトの黒ボク土の RMSE に注目すると、群馬 (試料 No. 1-10) は、BBC モデルとモデル II-a が実測値との間に良い適合性を与え、両者はほぼ同じ RMSE を示した (図 5 (a))。神奈川 (試料 No. 11-15)、茨城 (試料 No. 16-19)、熊本 (試料 No. 32-37) は、いずれのモデルもほぼ同じ RMSE を示した (図 5 (b), (c))。また、東京 (試料 No. 20-31) は、今回提案したモデル I-a、II-a、

III-a の方が小さな RMSE を与え、BBC モデルよりも僅かではあるが良い適合性を示した (図 5 (d))。一方、バイアスに注目すると、神奈川 (試料 No. 11-15) は 1 試料を除いて負の値を示したことから、予測値が実測値を過小評価する傾向が見られる。これに対し、東京 (試料 No. 20-31) のバイアスは全て正の値を示し、予測値が実測値を過大評価することが分かる。群馬 (試料 No. 1-10)、茨城 (試料 No. 16-19)、熊本 (試料 No. 32-37) では正負のバイアスが混在した。このように、今回測定した黒ボク土では、各サイトにおいて予測モデルの適合性の傾向やバイアスの正負の発現に違いが見られた。

黄色土 (試料 No. 38-39, 45-51) と灰色低地土 (試料 No. 40-44) は、今回提案したモデル I-a、II-a、III-a、および BBC モデルともに、ほぼ同じ RMSE を示し (図 5 (e), (f))、バイアスは負の値が大半を示した。

## 5.3 無効間隙率の影響

図 6 に  $\epsilon_{100}$  と  $\epsilon_{63}$  の両方が得られている 32 試料の実測データを対象に、今回提案した 6 つのモデルの予測値と実測値との比較を示した。また、同図には全土壌試料と黒ボク土、黄色土の各土壌に対して得られた RMSE とバイアスを示した。

モデル II-a と II-b は、 $D_{p,100}/D_0$  や  $D_{p,63}/D_0$  が実質的に 0 となる間隙率 0.05 をガス拡散に寄与しない間隙率、無効間隙率としてモデル式 (8)、(9) 式) を導いた。無効間隙率が予測モデルの適合性に与える影響は、モデル II-a と II-b (図 6 (b), (e)) を、無効間隙率を考慮していないモデル I-a と I-b (図 6 (a), (d)) と比較することにより判断できる。

基準気相率が  $\epsilon_{100}$  の場合、モデル II-a の全土壌に対する RMSE は 0.016 と、モデル I-a の 0.019 に比べて僅かに小さくなっている。しかし、基準気相率が  $\epsilon_{63}$  の場合、モデル II-b の全土壌に対する RMSE は 0.019 と、モデル I-b の 0.018 に比べて僅かに大きくなっている。このことから、今回検討した 32 試料については、無効間隙率が予測モデルの適合性に及ぼす影響は小さいものと言える。

## 5.4 基準気相率の影響

基準気相率  $\epsilon_{100}$  と  $\epsilon_{63}$  の違いが予測モデルの適合性に与える影響は、モデル I-a (図 6 (a)) とモデル I-b (図 4 (d))、モデル II-a (図 4 (b)) とモデル II-b (図 4 (e))、およびモデル III-a (図 4 (c)) とモデル III-b (図 4 (f)) の、a と b を添字したモデルを比較することにより判断できる。全土壌、各土壌のいずれの比較においても、RMSE は  $\epsilon_{100}$  の予測モデルの方が  $\epsilon_{63}$  の予測モデルよりも小さく、前者の方がより良い適合性を与えることが分かる。

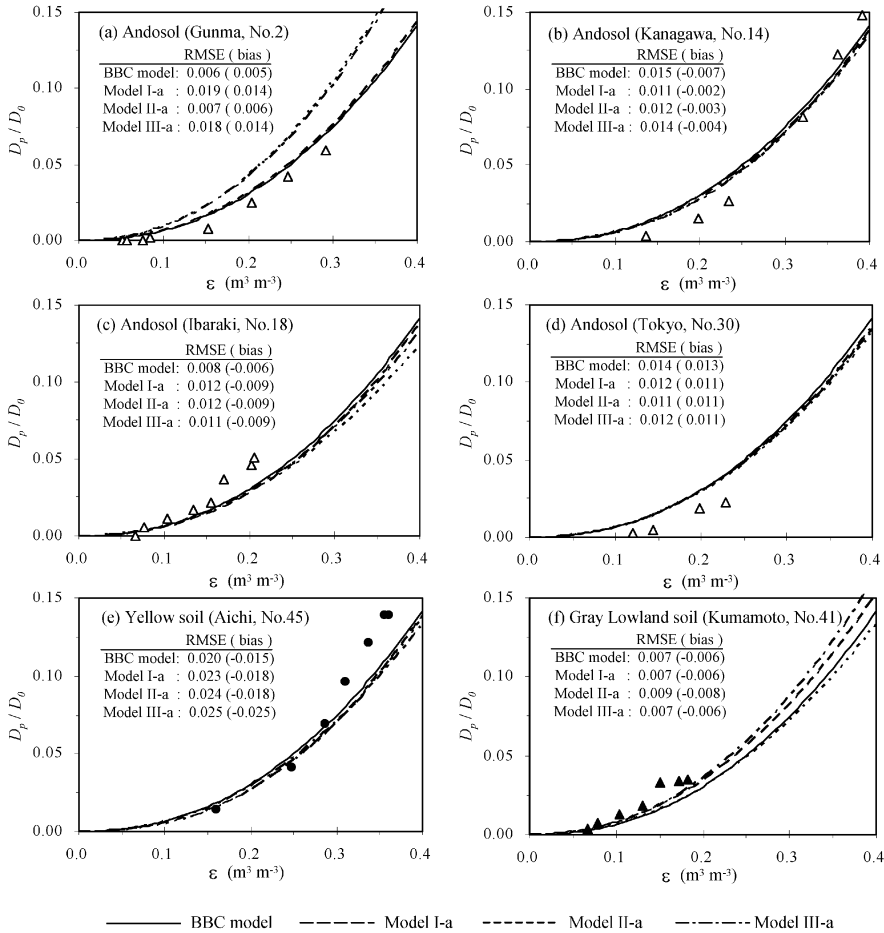


図-5 個々の試料における土壌ガス拡散係数の予測モデルと実測値の比較

Fig. 5 Comparison of four predictive models for soil-gas diffusivities with measured data.

$\epsilon_{100}$  の予測モデルの方が良い適合性を与えた理由は明らかではないが、 $D_p/D_0$  の実測データの分布範囲と  $D_{p,100}/D_0$ 、 $D_{p,63}/D_0$  の位置関係が予測モデルの適合性に影響を与えたものと思われる。 $\epsilon_{100}$  の予測モデル (I-a, II-a, III-a) と  $\epsilon_{63}$  の予測モデル (I-b, II-b, III-b) は、それぞれ、( $\epsilon_{100}$ ,  $D_{p,100}/D_0$ ) と ( $\epsilon_{63}$ ,  $D_{p,63}/D_0$ ) を固定点として曲線形状が変化することから、これらの固定点が  $D_p/D_0$  の分布範囲の中心に近いほど予測モデルと実測データとの間に良い適合性を与えるものと考えられる。基準気相率の影響を検討した 32 試料の  $\epsilon_{100}$  と  $\epsilon_{63}$  の平均値はそれぞれ 0.22, 0.19 となり、これらの気相率における  $D_p/D_0$  を、モデル I-a と I-b の予測モデル (6) 式, (7) 式) を例にして計算すると、それぞれ 0.034, 0.022 となる。これらの値、( $\epsilon_{100}$ ,  $D_{p,100}/D_0$ ) = (0.22, 0.034), ( $\epsilon_{63}$ ,  $D_{p,63}/D_0$ ) = (0.19, 0.022), を  $D_p/D_0 - \epsilon$  上で見ると、 $\epsilon_{100}$

の方が  $\epsilon_{63}$  よりも僅かではあるが  $D_p/D_0$  の分布範囲の中心 ( $\epsilon_{100}$  の場合は  $D_p/D_0 = 0.050$ ,  $\epsilon_{63}$  の場合は  $D_p/D_0 = 0.039$ , 図 2 の実測データの上限 ( $D_p/D_0 = \epsilon^{1.6}$ ) と下限 ( $D_p/D_0 = \epsilon^3$ ) より計算) に近いところに位置することが分かる。

一般に、土壌の拡散現象は土壌間隙の分布や屈曲度、土壌水の保水形態 (団粒内外の間隙水) などに左右され、土壌構造の発達にともない拡散現象は複雑なものとなる (Moldrup *et al.*, 2001)。今後はより詳しく土壌間隙構造の違いに注目して、土壌における物質拡散現象の解明、物理モデルの構築を目指す予定である。

## 6. まとめ

本研究では、国内土壌の実測データを用いて 3 タイプの予測モデルを提案した。そして、これらのモデルと既

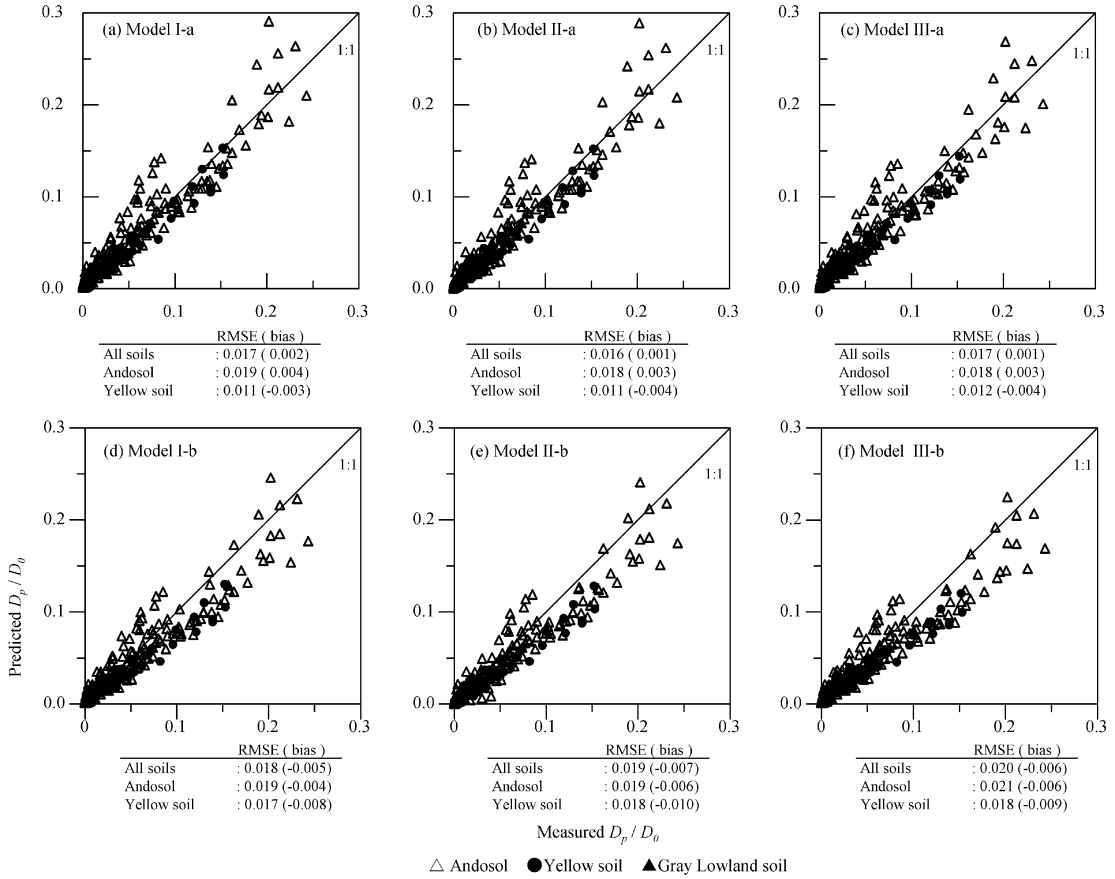


図-6 各モデルによる予測値と実測値の比較  
 (a) モデル I-a, (b) モデル II-a, (c) モデル III-a, (d) モデル I-b, (e) モデル II-b, (f) モデル III-b  
 測定数 235 (黒ボク土 179, 黄色土 56)

Fig. 6 Scatterplot comparison of predicted and measured soil-gas diffusivities for each model.  
 (a) Model I-a, (b) Model II-a, (c) Model III-a, (d) Model I-b, (e) Model II-b, (f) Model III-b  
 235 measurements (179 Andosols, 56 Yellow soils)

存モデルを用いて予測値と実測値との適合性を検証し、その評価を行った。

MQ モデルは実測値を大きく過小評価した。BBC モデルが実測値との間に最も良い適合性を示したが、MPD モデルと今回提案した予測モデルも実測値との間に十分な適合性を有した。また、予測モデルと実測値との適合性に無効間隙率 0.05 の影響は見られず、基準気相率  $\epsilon_{100}$  を用いたモデルの方が  $\epsilon_{63}$  を用いたモデルよりも良い適合性を示す傾向が見られた。

謝 辞

本実験の遂行にあたり、埼玉大学工学部建設工学科の宮内 健氏の協力を得た。また、試料採取にあたり、東

京大学大学院農学生命科学研究科附属農場の協力を得た。本研究は埼玉大学 21 世紀総合研究機構研究プロジェクトの補助を受けた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

引用文献

Blake, G.R. and Page, J.B. (1948) : Direct measurement of gaseous diffusion in soils, Soil Sci. Soc. Am. Proc., **13** : 37-41.  
 Buckingham, E. (1904) : Contributions to our knowledge of the aeration of soils, U.S.D.A. Bur. Soil Bull. : 25.  
 Burdine, N.T. (1953) : Relative permeability calcula-

- tions from pore size distribution data, *Trans. AIME* : 71-77.
- Campbell, G.S. (1974) : A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Sci.*, **117** : 311-314.
- El-Farhan, Y.H., Scow, K.M., de Jonge, L.W., Rolston, D.E. and Moldrup, P. (1998) : Coupling transport and biodegradation of toluene and trichloroethylene in unsaturated soils, *Water Resour. Res.*, **34** : 437-445.
- Gamst, J., Moldrup, P., Rolston, D.E., Scow, K.M. and Komatsu, T. (2003) : Comparison of naphthalene diffusion and nonequilibrium adsorption-desorption experiments, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **67** : 765-777.
- 長谷川周一 (1994) : 作物の水・酸素要求に対する土壌の供給力, *土壌の物理性*, **69** : 55-66.
- Hasegawa, S., Osozawa, S. and Ueno, H. (1994) : Measurement of soil water flux in Andisols at a depth below a root zone of about 1 meter, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **40** : 137-147.
- Hillel, D. (1998) : *Environmental Soil Physics*. pp. 302-304, Academic Press, San Diego, California.
- 藤川智紀・宮崎 毅・井本博美 (2003) : 耕盤層を有する土壌中の CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ガス挙動に関する研究, *農土論集*, **225** : 111-118.
- Jury, W.A., Russo, D., Streile, G. and El Abd, H (1990) : Evaluation of volatilization by organic chemicals residing below the soil surface, *Water Resour. Res.*, **26** : 13-20.
- Kruse, C.W., Moldrup, P. and Iversen, N., (1996) : Modeling diffusion and reaction in soils : II. Atmospheric methane diffusion and consumption in a forest soil, *Soil Sci.*, **161** : 355-365.
- 久馬一剛・庄子貞雄・鍬塚昭三・服部 勉・和田光史・加藤芳郎・和田秀徳・大羽 裕・岡島秀夫・高井康雄 (1984) : *新土壌学*. pp. 112-114, 朝倉書店, 東京.
- Lai, Sung-ho, Tiedje, J.M. and Erickson, A.E. (1976) : In situ measurement of gas diffusion coefficient in soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **40** : 3-6.
- Millington, R.J. and Quirk, J.P. (1961) : Permeability of porous solids, *Trans. Faraday Soc.*, **57** : 1200-1207.
- Moldrup, P., Rolston, D.E., Hansen, J. AA. and Yamaguchi, T. (1992) : A simple, mechanistic model for soil resistance to plant water uptake, *Soil Sci.*, **153** : 87-93.
- Moldrup, P., Kruse, C.W., Rolston, D.E. and Yamaguchi, T. (1996) : Modeling diffusion and reaction in soils : III. Predicting gas diffusivity from the Campbell soil-water retention model, *Soil Sci.*, **161** : 366-375.
- Moldrup, P., Olsen, T., Yamaguchi, T., Schjonning, P. and Rolston, D.E. (1999) : Modeling diffusion and reaction in soils : IX. The Buckingham-Burdine-Campbell equation for gas diffusivity in undisturbed soil, *Soil Sci.*, **164** : 542-551.
- Moldrup, P., Olsen, T., Schjonning, P., Yamaguchi, T. and Rolston, D.E. (2000) : Predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil from soil water characteristics, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64** : 94-100.
- Moldrup, P., Olsen, T., Komatsu, T., Schjonning, P. and Rolston, D.E. (2001) : Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **65** : 613-623.
- Moldrup, P., Yoshikawa, S., Olsen, T., Komatsu, K. and Rolston, D.E. (2003) : Gas diffusivity in undisturbed volcanic ash soils : Test of soil-water-characteristic-based prediction models, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **67** : 41-51.
- Moldrup, P., Olsen, T., Yoshikawa, S., Komatsu, K. and Rolston, D.E. (2004) : Three-porosity model for predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68** : 750-759.
- 中野政詩・宮崎 毅・塩沢 昌・西村 拓 (1995) : *土壌物理環境測定法*. pp. 74-87, 東京大学出版会, 東京.
- 遅沢省子・久保田徹 (1987) : 土壌ガス拡散係数の測定法, *土肥誌*, **58** : 528-535.
- 遅沢省子 (1998) : 土壌中のガスの拡散測定法とその土壌診断やガス動態解析への応用, *農業環境技術研究所報告*, **15** : 36-48.
- Osozawa, S. and Hasegawa, S. (1995) : Diel and seasonal changes in carbon dioxide concentration and flux in an Andisol, *Soil Sci.*, **160** : 117-124.
- Penman, H.L. (1940) : Gas and vapor movements in soil : The diffusion of vapors through porous solids, *J. Agric. Sci.*, **30** : 437-462.
- Petersen, L.W., El-Farhan, Y.H., Moldrup, P., Rolston,

- D.E. and Yamaguchi, T. (1996) : Transient diffusion, adsorption, and emission of volatile organic vapors in soils with fluctuating low water contents, *J. Environ. Qual.*, **25** : 1054-1063.
- Poulsen T.G., Moldrup, P., Yamaguchi, T., Schjønning, P. and Hansen, J.A. (1999) : Predicting soil-water and soil-air transport properties and their effects on soil-vapor extraction efficiency, *GROUND WATER MONITORING & REMEDIATION*, **19** : 61-70.
- Rolston, D.E. and Moldrup, P. (2002) : *Methods of Soil Analysis Part 4-Physical Methods*, SSSA Book Series No. 5, Soil Science Society of America : 1113-1139.
- Troeh, F.R., Jabro, J.D. and Kirkham, D. (1982) : Gaseous diffusion equations for porous materials, *Geoderma*, **27** : 239-253.
- 安田 環 (1972) : 土壌空気に関する研究 (第3報) 白金電極法による酸素拡散速度 (ODR) の測定法とその作物培地への応用, *土肥誌*, **43** : 223-230.

## 要 旨

土壌通気の主たるメカニズムはガス拡散であり、土壌におけるガス拡散係数の把握や予測は、耕地土壌の通気不良の解明や土壌汚染で問題となる揮発性有機化合物の運命予測に重要となる。本研究では、国内土壌の実測データに基づき、土壌間隙分布特性、無効間隙率、基準気相率の違いを考慮して、3タイプの土壌ガス拡散係数予測モデルを提案した。そして、これらのモデルと既存の Millington & Quirk (MQ) モデル、Buckingham-Burdine-Campbell (BBC) モデル、Macroporosity-dependent (MPD) モデルを用いて、予測値と実測値との適合性を検証し、予測モデルの評価を行った。

今回提案した予測モデルと、BBC モデル、MPD モデルは実測値との間に十分な適合性を有した。この中でも BBC モデルが最も良い適合性を示した。また、MQ モデルは実測値を大きく過小評価した。予測モデルと実測値との適合性に無効間隙率の影響は見られず、基準気相率として  $\epsilon_{100}$  (pF2.0 における気相率) を用いたモデルが良い適合性を示す傾向が見られた。

受稿年月日: 2005年 5月 9日  
 受理年月日: 2005年 9月 1日