

不飽和土壌の溶質・ガス拡散係数の統合的予測モデルの構築 Development of unified predictive model for solute and gas diffusivities in soils

○濱本 昌一郎* 川本 健** 小松 登志子** Per Moldrup***
Shoichiro Hamamoto*, Ken Kawamoto**, Toshiko Komatsu**, Per Moldrup***

1. はじめに

土壌中のガス・溶質輸送の主要な移動メカニズムの一つとして濃度勾配による拡散現象が挙げられる。ガス拡散係数 ($D_{s,g}$, $m^2 s^{-1}$) および溶質拡散係数 ($D_{s,l}$, $m^2 s^{-1}$) は、ガスおよび溶質の拡散移動を規定する重要な輸送パラメータである。各拡散係数の予測モデルとして、気相率、体積含水率、全間隙率といった土壌の物理パラメータを関数とするモデルが提案されている。しかしながら、両拡散係数間の類似性・相違に注目し、両拡散係数に適用可能な統合的予測モデルを提案した研究例は少ない。

本研究では、異なる土性および水分条件を有する土壌のガス拡散係数、溶質拡散係数の実験データを用いて、古典的伝導モデル(Maxwell, 1881)に基づく両拡散係数に適用可能な統合的予測モデルを構築することを目的とした。

2. 試料およびデータ

本研究では、ガラスビーズ、砂、ローム質・粘土質土壌（一般土壌）を用いて測定されたガス拡散係数 ($D_{s,g}$) および溶質拡散係数 ($D_{s,l}$) の文献値を解析に用いた(Hamamoto et al. 2012)。

3. 結果および考察

(1) 流体飽和時のガス・溶質拡散係数モデル

Maxwell (1881)により提案された伝導モデルを、流体飽和状態 ($D_{s,g}$: 空気飽和状態(絶乾状態), $D_{s,l}$: 水飽和状態) での $D_{s,g}$ および $D_{s,l}$

データに適用した。Maxwell (1881)モデルの一般形は次式で表すことが出来る。

$$\frac{D_{s,j}}{D_{0,j}} = \frac{(M-1)\Phi}{M-\Phi} \quad (1)$$

ここで、添字 j はガス(g)または溶質(l)を意味する。 D_0 は流体中の拡散係数 ($D_{0,g}$: 空気中のガス拡散係数, $D_{0,l}$: 水中の溶質拡散係数, $m^2 s^{-1}$), Φ は全間隙率($m^3 m^{-3}$)。本研究では、式(1)中の M は間隙の屈曲度・連結性を表すパラメータとして扱われた。Maxwell (1881)では $M=3$ が与えられている。

図1に流体飽和時の相対拡散係数測定値を示す。Maxwell (1881)モデル ($M=3$)は測定値を過大評価した。 M 値を 2.0 とした時に全データに対して最も良い適合性が得られた。

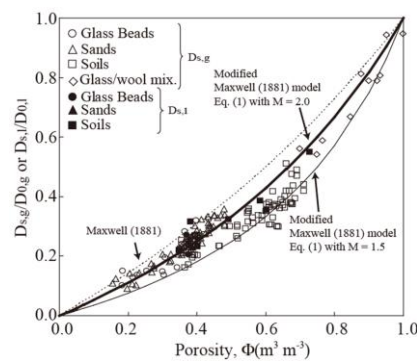


図 1. 流体飽和時の拡散係数測定値

(2) 流体不飽和時のガス・溶質拡散係数モデル

Moldrup et al. (2000)は、ガス拡散係数予測モデルに土壌水による拡散阻害効果を考慮することで予測精度が上昇することを報告している。本研究では、Moldrup et al. (2000)および $M=$

*東京大学大学院農学生命科学研究科/Graduate School of Agric. and Life Sciences, The Univ. of Tokyo

**埼玉大学大学院理工学研究科/Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

***オルボー大学土木工学科/Department of Civil Engineering, Aalborg University

キーワード ガス拡散 溶質拡散 予測モデル

2を与えた際の式(1)に基づき、流体不飽和時のガス・溶質拡散係数(Liquid and Gaseous (LIGA) diffusivity) モデルを次式で表した。

$$\frac{D_{s,j}}{D_{0,j}} = \left(\frac{\kappa_j}{2 - \kappa_j} \right) \left(\frac{\kappa_j}{\Phi} \right)^N \quad (2)$$

ここで、 κ_j は流体含有率 (ガス κ_g : 気相率 (ε), ガス κ_l : 体積含水率 (θ)), N は土壌水または空気の存在による拡散阻害効果を表すパラメータである。図2に示すように、 $N = 1.0$ とした場合、LIGAモデル (式(2)) は、 $D_{s,g}$ および砂質土で得られた $D_{s,l}$ に対して良い適合性が得られた。一方、一般土壌における $D_{s,l}$ に対しては $N = 2.5$ で最もモデルは適合した。このことは、溶質拡散係数がガス拡散係数に比べ土性の違いによってより影響を受けることを示唆している。

各試料の $D_{s,l}$ データに対して、 N 値をフィッティングパラメータとしてLIGAモデルを適用した。図3(a)に得られた N 値と細粒分含有割合($FINES_{vol}$)との関係を示す。 $FINES_{vol}$ は次式で定義される。

$$FINES_{vol} = \rho_b \{ (CF/2.7) + (OM/1.0) \} \quad (3)$$

ここで、 ρ_b は乾燥密度($Mg\ m^{-3}$), CF は粘土分割合($g\ g^{-1}$), OM は有機物含有量 ($g\ g^{-1}$)を表す。図3aに示すように、 N 値と $FINES_{vol}$ の間に線形関係が見られた。この結果は細粒分含有割合が高い程比表面積の増大に起因して液相の連結性が低下 (高 N 値) することを示唆している。得られた N と $FINES_{vol}$ との関係式($N = 1 + 10FINES_{vol}$)を導入した修正LIGAモデルを $D_{s,l}$ に適用した結果、モデル精度は向上した (図3b)。

LIGAモデルを用いて、土壌の気相および液相の屈曲度と水飽和度との関係について調べた。LIGAモデル (式(2)) を適用する際、 $D_{s,g}$ については $N = 1.0$, $D_{s,l}$ については $N = 1 + 10FINES_{vol}$ を与えた。各相中の屈曲度(τ)は $\tau = \sqrt{\kappa(D_s/D_0)}$ で計算した。

図4に示すように、気相中および液相中の屈曲度は、同水飽和度で全間隙率が増加すると低

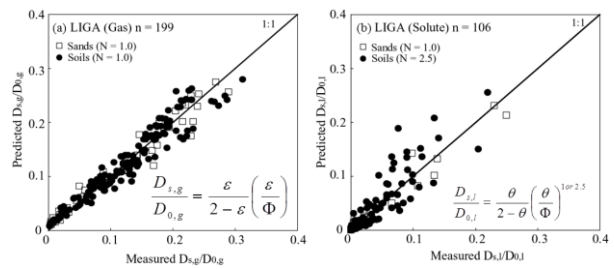


図 2. LIGA モデルの適合性 (a): $D_{s,g}$, (b): $D_{s,l}$

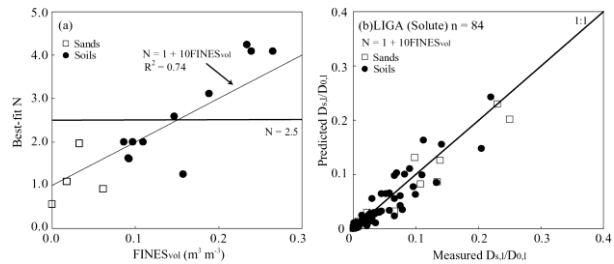


図 3 (a) N 値と細粒分含有割合との関係, (b): $D_{s,l}$ に対する修正 LIGA モデルの適合性

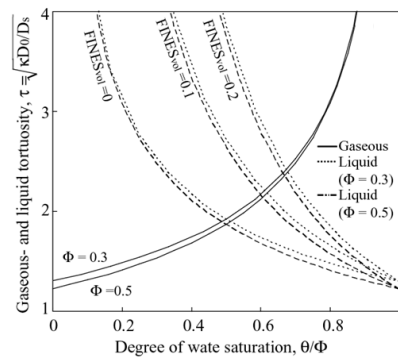


図 4 気相・液相の屈曲度と水飽和度

下することが分かる。また、液相中の屈曲度は $FINES_{vol}$ に非常に影響を受け、 $FINES_{vol}$ が高い程、屈曲性が増加することが分かった。

4. まとめ

Maxell (1881)モデルに基づき、ガス・溶質拡散係数に適用可能な統合的予測モデルを構築した。溶質拡散係数は、土性の影響を強く受け、拡散阻害効果を表すパラメータを細粒分含有割合の関数とすることで予測精度は向上した。参考文献

- Maxwell (1881) “A treatise on electricity and magnetism”, second eds.
- Hamamoto et al. (2012) Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 64, pp. 1588-1594. 76: 1509-1517.
- Moldrup et al. (2000) Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 64, pp. 1588-1594.