

団粒構造を持つ黒ボク土における溶質分散について

Solute hydrodynamic dispersion for Andisols with aggregated soil structure

取出伸夫 大石雅人

Nobuo Toride and Masato Ooishi

はじめに 我が国に広く分布する団粒構造が発達している黒ボク土は、団粒内と団粒間隙による階段状の水分保持曲線を持つのが特徴である。本研究では、団粒構造が水分や溶質移動に及ぼす影響を調べるため、飽和水分流れの濃度変化から移流分散式(CDE)の分散係数を推定し、分散長の間隙流速依存性を調べた。そして、動相・不動相モデル(mobile-immobile model, MIM)を用いた解析により、黒ボク土の団粒構造の溶質流れに対する役割を考察した。

実験 熊本県九州沖縄農業研究センター、茨城県岩瀬町ヒノキ林、長野県畜産草地研究所の牧草地より採取した3種類の黒ボク土を2mm篩いした攪乱土試料を用いた。熊本黒ボク土は、さらに団粒分析装置により、1~2mm, 0.5~1mmに水中で篩い分けした試料を作成した。それぞれの試料の水分保持曲線を Fig.1, 2 に示す。内径 4.5cm, 高さ 23-36cm のカラムに攪乱土を充填後、CaCl₂ 溶液で毛管飽和させ、マリOTT管で一定水頭を与えて飽和定常流れを作成した。熊本、茨城、長野黒ボク土の乾燥密度 ρ_b は、それぞれ 0.48, 0.48, 0.77g cm⁻³ である。カラム内部の土中水濃度として電気伝導度 EC を4極塩分センサー、また排水量を電子天秤により自動計測した。浸透溶液濃度を変化させ、ECの経時変化(BTC)を測定した。また、マリOTT管内の空気圧調節し、異なる水分フラックスについて同様の測定を行った。

溶質移動モデル 均一な土中の溶質移動は、CDE で表すことができる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1)$$

ここで c は溶質濃度, v は平均間隙流速 ($=J_w/\theta$, 水分フラックス J_w , 体積含水率 θ), z は位置, t は時間である。分散係数 D は溶質の広がりを表し, D/v である分散長 (cm) は, 溶質の混合スケールを与える。団粒土中の溶質移動に対して, 団粒内部を不動相と見なして, 次式の動相・不動相モデル(MIM)が適用できると仮定した。

$$\theta_m \frac{\partial c_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 c_m}{\partial z^2} - \theta_m v_m \frac{\partial c_m}{\partial z} \quad (2)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial c_{im}}{\partial t} = \alpha (c_m - c_{im}) \quad (3)$$

ここで下添え字 m と im は動相と不動相を示し, α は物質移動係数(d⁻¹)である。このとき, MIMにおける溶質の広がりに対して分散係数を定義することにより, CDEの分散長 λ はMIMのパラメータと次の関係を持つ。

$$\lambda = \lambda_m + \frac{\theta_{im}^2 v}{\alpha \theta} \quad (4)$$

ここで $\lambda_m = D_m/v_m$, $v = v_m \theta_m/\theta$ であり, 右辺第1項は団粒間隙の水理学的分散, 第2項は団粒内外の溶質交換による分散への寄与を表す。

測定したBTCに対してCDEの解析解に基づき, v と D を非線形最小二乗法より推定した。また, 水分保持曲線における粗間隙の排水した水分量を不動相水分量 θ_{im} と仮定し(Fig.1, 2中の矢印), 求めた λ と v の直線回帰式の傾きと切片から, λ_m と α を決定した(Fig.2)。

結果と考察 いずれの条件の BTC においても, CDE はよく適合し, また得られた ν と D の値は, 測定位置によらずほぼ一定であった。Fig.3 は 3 種類の黒ボク土, Fig.4 は団粒径を篩い分けた 3 種類の熊本黒ボク土の λ と ν の関係である。Fig.3 には, 鳥取砂丘砂の結果も併記した。3 種類の黒ボク土とも, λ が一定の単粒構造である鳥取砂丘砂とは異なり, λ は ν に比例して増加した。回帰式から求めた λ_m は砂丘砂と比較的近い。また溶質混合時間を与える $1/\alpha$ は小さく, 団粒間の交換速度は速い。そのため, 団粒内外の濃度は短時間で平衡に達し, CDE がよく適合したと考えられる。また, 大きな団粒で構成される 1 ~

2mm の試料は, 0.5 ~ 1mm の黒ボク土に比べて溶質の混合に時間を要するため, 溶質の相対的な広がり, すなわち λ がより大きい。本研究により, 黒ボク土では, 団粒内外の溶質交換が水理学的分散の主な要因であること, 速やかな溶質交換が生じているが, 交換速度は団粒径や黒ボク土の種類により異なることが明らかになった。

表 1. 黒ボク土の MIM パラメータ推定値
Table 1 MIM parameter values for Andisols

	θ	θ_m	θ_{im}	λ_m (cm)	$1/\alpha$ (sec)
Ibaraki	0.76	0.21	0.55	0.452	42.9
Nagano	0.67	0.28	0.39	0.0977	27.4
Kumamoto <2.0mm	0.78	0.28	0.5	0.203	100
1.0-2.0mm	0.7	0.31	0.39	1.09	235
0.5-1.0mm	0.68	0.3	0.38	0.661	62.6

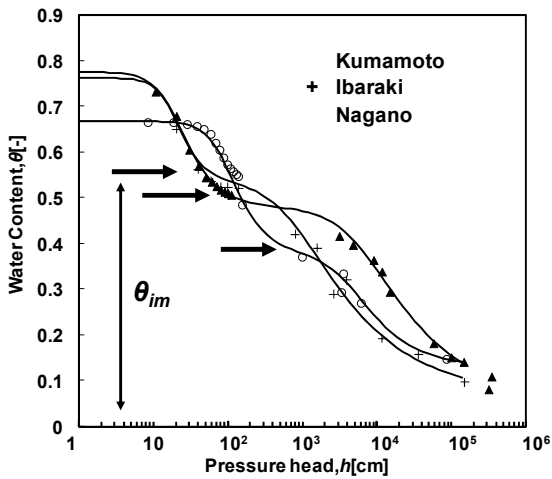


図 1 3 種類の黒ボク土の水分保持曲線
Fig. 1 Water retention curves for three different Andisols

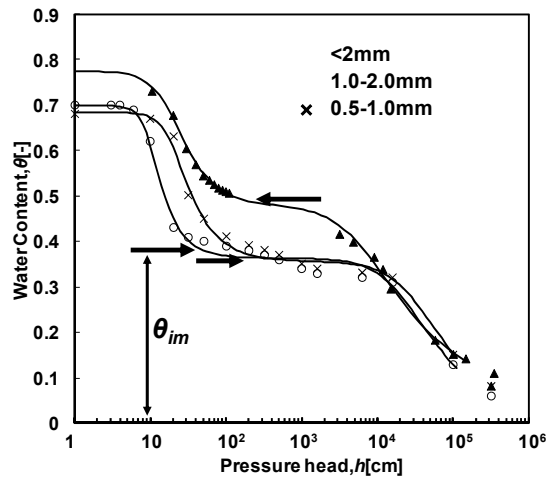


図 2 異なる団粒径の熊本黒ボク土の水分保持曲線
Fig. 2 Water retention curves for Kumamoto Andisols having different aggregate sizes

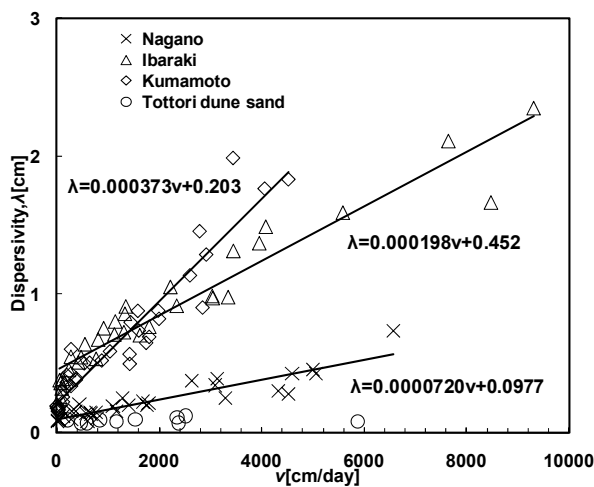


図 3 3 種類の黒ボク土の飽和流れの ν と λ の関係
Fig. 3 ν vs. λ for three different saturated Andisols.

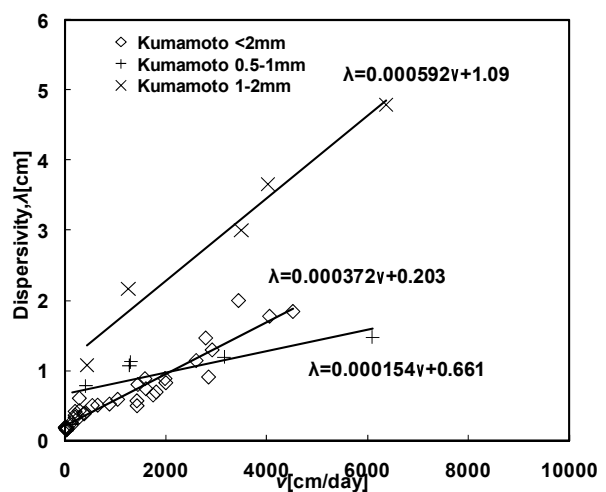


図 4 異なる団粒径の熊本黒ボク土の飽和流れの ν と λ の関係
Fig. 4 ν vs. λ for saturated Kumamoto Andisols having different aggregate sizes.