

表層不飽和帯における降雨による溶質移行に関する基礎的研究

Fundamental Study on Solute Migration by Rainfall in Unsaturated Zone below Soil Surface

三菱金属中央研究所 ○佐々木 康夫 Y. Sasaki
埼玉大学 工学部 佐藤 邦明 K. Sato
福井大学 工学部 福原 輝幸 T. Fukuhara

1. はじめに

環境汚染の一つとして注目されている広域的土壌汚染問題は、酸性雨、産業廃棄物の埋立て、処理および農業散布などによってもたらされる。この種の汚染物質の地中での移行には地下水が主要な役割を演じ、その過程は不飽和浸透流の場で進行する降雨浸透に伴う鉛直流の場合と、飽和浸透流の場で支配的に現われる水平移流におけるものに大別される。著者らは数年前から、重要性が指摘されている不飽和浸透流の場で進行する溶質・物質の移流分散現象に着目し、現象の解明と定量化に取り組んできた^{1), 2)}。今回はこれまで用いた標準砂やろ過砂に加え、関東地方に広く分布する関東ロームを使用して浸透実験を行った。レイノルズ数の広い範囲における移流分散現象の解明および分散・拡散係数に含まれる長さ寸法の適切な評価を行うために、ガラスビーズ多孔体を用いた不飽和流下におけるフィンガーリングと水みち形成の観察をしたので報告する。

2. 実験装置と実験方法

実験は不飽和浸透流の場での関東ロームによるカラム実験とガラスビーズ多孔体による実験とに大別される。カラム実験は二つの場合に分けられ、一つの浸透実験は定常状態の純水降雨の場に溶質降雨を降らせ、溶質の浸透速度を試料上面から一定間隔に埋設されているプローブにより経時的に計測するもの、他の一つは初期に試料全体が溶質汚染されている場に純水を降らせるブリーチング実験である。ガラスビーズ多孔体における不飽和浸透流下のフィンガーリングや水みちの観察はクリスチャンフィルター法による。

2.1 カラム実験

実験には関東ロームを用い、その50%粒径 $d_{50} = 0.016 \text{ mm}$ 、土粒子比重 $\gamma = 2.63$ 、飽和透数係数 $k = 2.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ であり、比較的小さい値をとる。降雨には特製の噴霧ノズルを使い、降雨強度 $R = 2.4 \sim 5.0 \text{ mm/hr}$ の範囲で浸透実験し、ブリーチング実験とも4回ずつ計8回行った。

浸透実験の手順は、まず、円筒カラム中に約0.1 mずつ関東ロームを水中投下し、さらに突き固めつつ1.10 mの長さに充填する。突き固めた時に所定の位置(試料上面からの距離 $x = 0.10 \text{ m}$, 0.15 m , 0.20 m , 0.25 m) に電気伝導度用プローブを埋込む。次に、噴霧ノズルにより純水降雨を降らせ、下部溢流タンクから溢流する浸透量が一定になるまで数10時間放置し、不飽和浸透流が定常になるのを待つ。定常になったことを確認し、速やかに降雨を純水から塩水に切換え実験を開始する。充填時に所定の位置に埋込んである電気伝導度用プローブを用い塩水浸透(濃度2%のNaCl)による塩分濃度の経時変化を記録し破過曲線を得る。ブリーチングの場合にはカラム全体を塩水浸透雨で定常にしておき、降雨を塩水から純水に切換える。

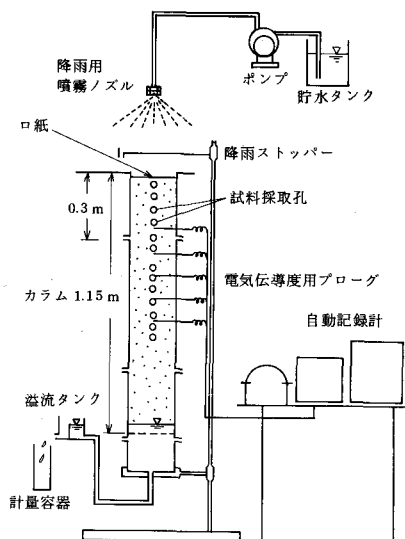
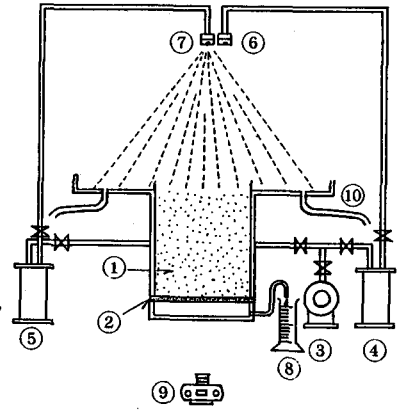


図-1 関東ロームによる浸透実験装置

実験条件や物性値は実験結果とともに表-1に示し、粒度分布はガラスビーズのそれと図-3に示してある。

2.2 水みち観察実験

実験には2種類の透明ガラスビーズを用いクリスチャンフィルター観察法を利用した。一つのガラスビーズの粒径は $d_{50} = 2.60 \text{ mm}$, $r = 2.53$, 他の一つは $d_{50} = 1.20 \text{ mm}$, $r = 2.52$ である。図-2に従い、実験装置の概略を述べると、①は厚さ5mmのガラス板製の幅0.3m, 奥行0.01m, 高さ0.3mのガラスビーズ多孔体、②は底部仕切り用ポーラスストーン、③は水圧用コンプレッサー、④、⑤は容積0.003 m^3 の純水用、染料水用タンク、⑥、⑦は純水用、染料水用噴霧ノズル、⑧は浸透流量計測用計量容器、⑨はカメラ、⑩は降雨集水容器である。実験手順は、まず①のガラス製容器にガラスビーズをつめ、数分間容器全体を振動させつつ、均一につまるようにする。次に、純水の③、④、⑥の加圧系で降雨を降らせ不飽和浸透流が定常になるまで放置し、それを確認のち染料水の③、⑤、⑦の加圧系で染料水の降雨を降らせて（純水の降雨中染料水降雨は停止する）瞬間的に両者を切換え、写真撮影、浸透流量の計測を開始する。実験は降雨量を変化させ、各ケース3回ずつ計6回行った。実験条件や物性値は実験結果とともに表-2に、粒度分布は図-3



- ① ガラスビーズ多孔体
- ② ポーラスストーン
- ③ 水圧用コンプレッサー
- ④ 純水用タンク
- ⑤ 染料水用タンク
- ⑥ 純水用噴霧ノズル
- ⑦ 染料水用噴霧ノズル
- ⑧ 計量容器
- ⑨ カメラ
- ⑩ 降雨集水容器

図-2 ガラスビーズ多孔体によるフィンガーリング形成観察実験装置

に表-2に、粒度分布は図-3に示してあり、用いた染料は赤色インクである。

表-1 関東ロームによる浸透実験の条件と結果

実験ケース	実験条件	試料粒径 $d_{50} \text{ (mm)}$	空隙率 $\lambda \text{ (\%)}$	降雨強度 $R \text{ (mm/hr)}$	粒径レイノルズ数 $Re \text{ (} d_{50} \text{)}$	分散係数 $D \text{ (m}^2/\text{s)}$
ケース1	塩水浸透	0.016	64.3	3.3	3.8×10^{-5}	2.5×10^{-9}
	ブリーチング	0.016	64.3	2.8	3.3×10^{-5}	6.0×10^{-9}
ケース2	塩水浸透	0.016	64.3	2.4	3.9×10^{-5}	1.0×10^{-9}
	ブリーチング	0.016	64.3	2.5	3.3×10^{-5}	8.0×10^{-9}
ケース3	塩水浸透	0.016	64.3	5.0	4.7×10^{-5}	1.0×10^{-8}
	ブリーチング	0.016	64.3	4.7	4.6×10^{-5}	3.3×10^{-8}
ケース4	塩水浸透	0.016	64.3	3.2	3.7×10^{-5}	3.0×10^{-9}
	ブリーチング	0.016	64.3	3.9	4.5×10^{-5}	1.7×10^{-8}

3. 実験結果

3.1 カラム実験

関東ロームのカラムによる浸透実験では、塩水浸透、ブリーチングの場合とも実験結果から得られた破過曲線に対し、以下に示す式(1)~(4)に基づき、それらの実験値に対する理論曲線を求め分散係数 D を決定した。

$$\left. \begin{aligned} C(0, t) &= C_0 \\ C(\infty, t) &= 0 \\ C(x, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &t \geq 0 \\ &t \geq 0 \\ &x > 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{C}{C_0} = f(x, t) \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} C(0, t) &= 0 \\ C(\infty, t) &= C_0 \\ C(x, 0) &= C_0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &t \geq 0 \\ &t \geq 0 \\ &x \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{C}{C_0} = 1 - f(x, t), \quad (4)$$

表-2 ガラスビーズ多孔体による水みち観察実験の条件と結果

実験ケース	試料粒径 $d_{50} \text{ (mm)}$	空隙率 $\lambda \text{ (\%)}$	飽和透水係数 $k \text{ (m/s)}$	平均浸透流速 $u_m \text{ (m/s)}$	フィンガー平均速度 $u_f \text{ (m/s)}$	平均分散スケール $\bar{L}_f \text{ (mm)}$
ケースA-1	A: 2.60	41.0	4.78	1.02×10^{-4}	2.57×10^{-3}	26.8
ケースA-2		41.0	4.78	1.20×10^{-4}	2.38×10^{-3}	
ケースA-3		41.0	4.78	1.29×10^{-4}	3.64×10^{-3}	
ケースB-1	B: 1.20	37.2	1.92	9.42×10^{-5}	1.15×10^{-3}	-
ケースB-2		37.2	1.92	1.20×10^{-4}	1.78×10^{-3}	
ケースB-3		37.2	1.92	1.94×10^{-4}	1.56×10^{-3}	

ただし

$$f(x, t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{x - ut}{2(Dt)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{ux}{D}\right) \operatorname{erfc} \frac{x + ut}{2(Dt)^{\frac{1}{2}}}$$

である。ここに、 C ：濃度、 u ：浸透流速、 D ：縦方向分散係数、 t ：時間、 x ：座標であり、不飽和浸透流の浸透流速 u は、 q ：浸透流量、 A ：浸透断面積、 λ ：空隙率、 s ：飽和度とすると $u = q/A\lambda s$ となる。通常土壌試料を用いる浸透実験などでは、溶質の吸着、各種化学成分の浸出などが起こるので、浸透実験を行う際十分念頭に置く必要がある。今回は、この点を考慮して浸透実験に先立ち使用濃度の NaCl 溶液による吸着試験と純水での浸出試験を繰返し実施した。その結果、吸着試験では NaCl の分配係数 $K_d = 0.083$ ($K_d = (C_o - C) \cdot Q/CW$, C_o ：初期溶液濃度、 C ：吸着試験後の溶液濃度、 Q ：使用溶液量、 W ：使用試料重量)、浸出試験での Na イオンの量は試料 1 g 当り 74 ppm でいずれも無視出来る値であった。このため、分散係数 D を求める式(2)、(4)において吸着、浸出は考慮しなかった。

結果の一例としてケース 3 の場合を図-4、図-5 に示した。図-4 は塩水浸透の降雨強度 $R = 5.0\text{ mm/hr}$ 、粒径レイノルズ数 $Re = 4.7 \times 10^{-5}$ 、分散係数 $D = 1 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$ の場合であり、図-5 はブリーチングの $R = 4.7\text{ mm/hr}$ 、 $Re = 4.6 \times 10^{-5}$ 、 $D = 3.3 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$ の場合である。両図において実測値と理論曲線とはかならずしも一致しておらず、浸透距離 x が大きくなる程、両者の隔たりは増す傾向にある。塩水浸透とブリーチングの場合にはブリーチングの方が隔たりは大きくなっている。しかし、本報にはのせていないが他のケース

では塩水浸透の場合の方がブリーチングのそれに比べ、理論値と実験値の隔たりが大きいものも見られ一定の傾向はない。これは図示している理論曲線の計算時に平均浸透流速を用いている事と、次に述べるようなフィンガーリングの形成などが影響しているためと推察される。図-6 は分散係数とレイノルズ数の関係を示したもので、今回の結果に佐々木ら¹⁾、佐藤ら²⁾、Harleman et al.³⁾ の値を加えたものである。Harleman

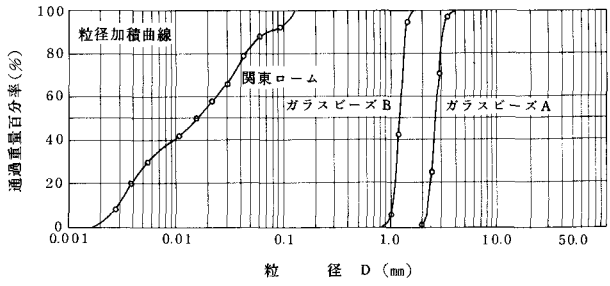


図-3 実験試料の粒度分布

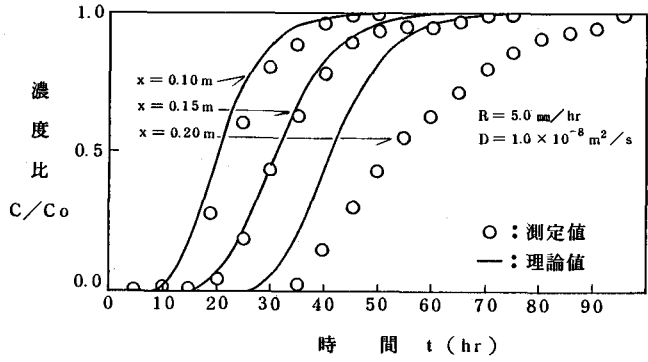


図-4 ケース 3 の塩水浸透実験結果

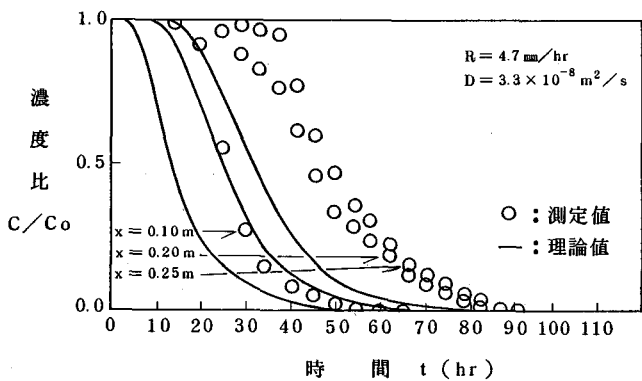


図-5 ケース 3 のブリーチング実験結果

-Rumer の飽和浸透流の値に比べ Re が 2 桁以上小さくなっており、豊浦標準砂に比べても 1 桁以上小さくなっている。不飽和浸透の場合、飽和浸透のそれに比べ分散係数 D の値が大きくなっている。そこで、次にその理由を調べるため水みち観察実験に注目する。

3.2 水みち観察実験

不飽和浸透における浸透経路を観察した結果の例として、写真-1 (a)~(d)にケース A-2 の場合を示し(a)から順に実験開始後 30, 75, 105, 150 秒経過の記録で、写真-2 (a)~(d)はケース B-2 の場合で同様に開始後 40, 80, 140, 180 秒経過の記録である。写真が示すように一様降雨にもかかわらず、その浸透形態・速度は一樣にならず不安定なフィンガーリングを形成しながら浸透が進んでいる。これらの写真からフィンガーリングの進む深さを求め、平均した値が表-2 のフィンガー平均速度である。この値は各実験ケースの一連の写真を経時的に選び、個々のフィンガーの浸透距離とその時間から求め平均したものである。この平均速度は見掛けの平均浸透速度と一致していないのは明らかである。見掛けの平均浸透速度とフィンガーの平均速度を比較すると、いま、フィンガーの平均速度 $u_f = \alpha \cdot u_m$ (α : 係数, u_m : 平均浸透速度, $u_m = \text{浸透流量} / \text{試料断面積} \times \text{空隙率}$) とおくと、ケース A $d_{50} = 2.60 \text{ mm}$ の場合 $\alpha = 2.0$

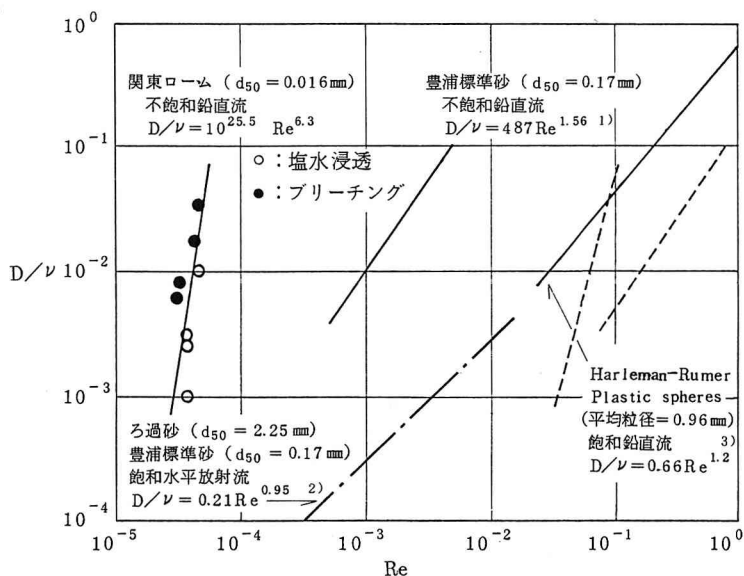
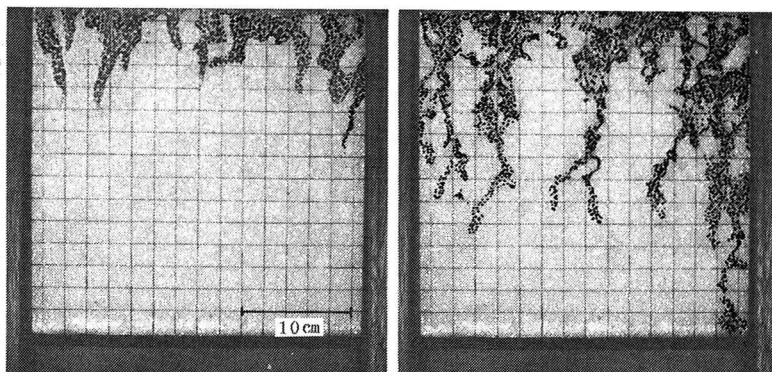
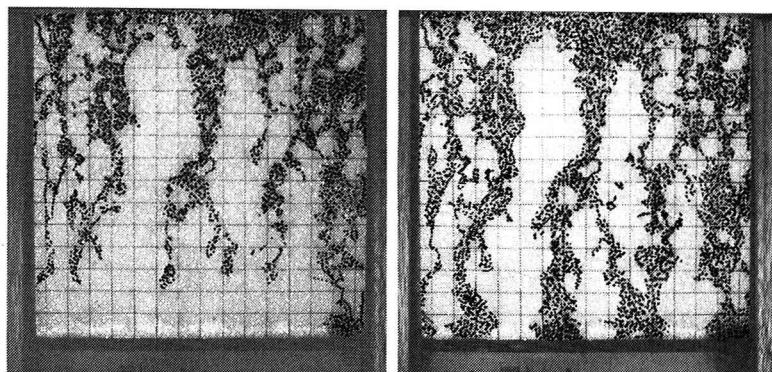


図-6 D/ν と Re の関係



(a) 観察開始 30 秒経過

(b) 観察開始 75 秒経過



(c) 観察開始 105 秒経過

(d) 観察開始 150 秒経過

写真-1 ケース A-2 におけるフィンガーの経時変化

～28倍、ケースB $d_{50} = 1.20\text{ mm}$ の場合 $\alpha = 8 \sim 15$ 倍になる。つまり、フィンガー平均速度は粒径が大きい程大きいことになる。

次に図-7に注目し、飽和浸透流の場合と不飽和浸透の流れの場を模式的に示した。図-7において(a)図は飽和浸透における粒子径と真の流速を表わし、図(b)は不飽和浸透の流れの場であり、トレーサーの流路部分と非流路部分に分かれており、非流路部分と独立非流路部分の面積の等価な円で置換えている。いま、その円の直径を l_f

(分散スケールと仮称する)としトレーサー流路部分の流速を u_f とすると、ちょうど l_f が飽和浸透流の粒子直径 d に相当し、飽和浸透流速 u は不飽和の u_f に対応する。つまり、飽和、不飽和の流れを相似に対応付けができれば。そこで、両者の相似性を用いて不飽和浸透流場におけるトレーサーの分散に係わる代表的寸法を求めて見る。

写真-3は図-7の定義による不飽和浸透の流れの場における非流路部分を覆う等価円を描いた例でケースA-3の観察開始150秒経過の場合である。また、図-8はケースAの非流路部における等価円径の分布を示したものである。図-8の分布の等価円の径の算術平均を求めると平均分散スケール $\bar{l}_f = 26.8\text{ mm}$ となる。そこ

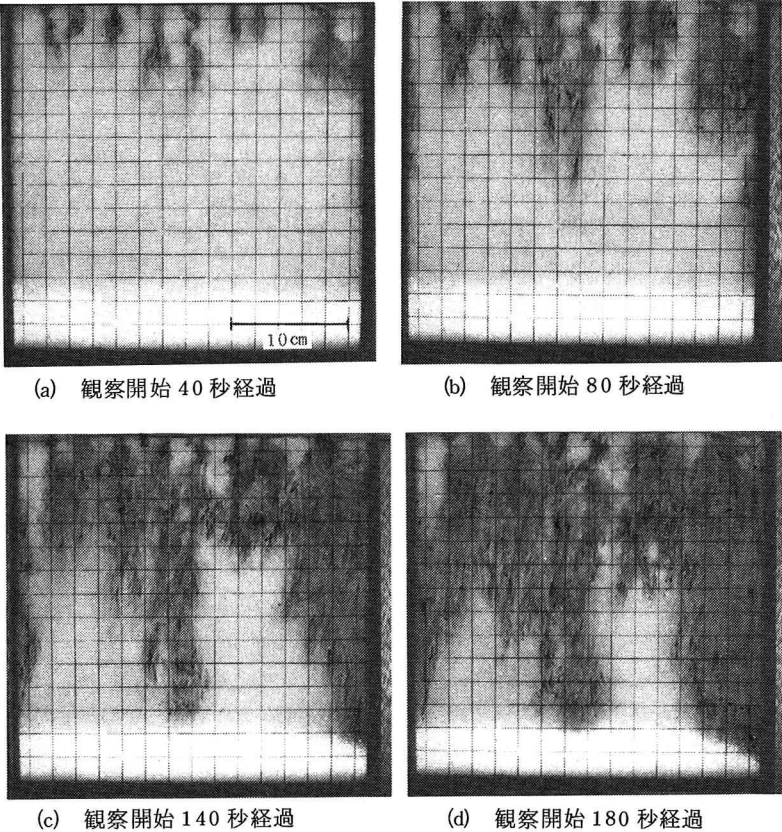


写真-2 ケースB-2におけるフィンガーの経時変化

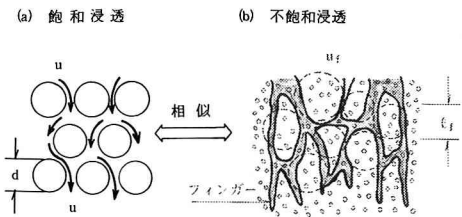


図-7 流れの場の Kinematic Similarity による概念

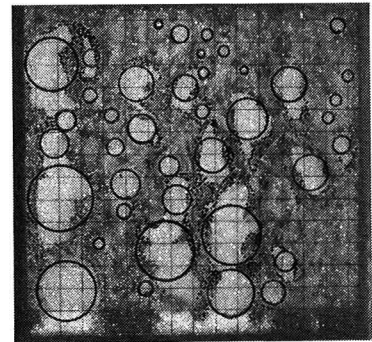


写真-3 非流路部を覆う等価円の例(ケースA-3, 150秒経過)

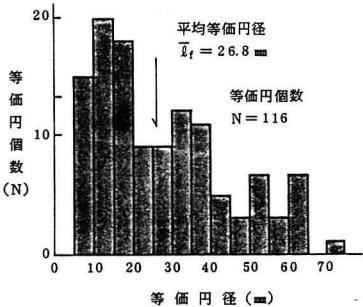


図-8 ケースAの非流路部における等価円の分布

で、 $\bar{l}_f = \beta \cdot d_{50}$ (β : 係数)と置いて β を求めると関東ロームの場合 $\beta = 1673$ 、標準砂の場合157.5となる。つまり、飽和浸透流の分散現象と違い、不飽和浸透流の場合は見掛け上 l_f に支配された分散の規模になると言えよう。この新しく定義された l_f の平均値 $\bar{l}_f$ を用いて図-6の D/ν と Re の関係を補正すると、関東ロームと標準砂の場合はそれぞれ図中の点線で示したようになる。この場合のレイノルズ数 $Re = u |\bar{l}_f| / \mu$ である (μ : 動粘性係数, u : 浸透流速, $\bar{l}_f$: 平均分散スケール)。図-6のように飽和浸透流の場合の、Harleman-Rumerの $D/\nu \sim Re$ 関係に近い関係にあることがわかる。その意味で、不飽和浸透流の移行分散スケールは見掛け上、径の $10^2 \sim 10^3$ 倍程度と非常に大きい値を持つと考えても良いものと思われる。しかし、今回のフィンガーリング可視化実験はガラスビーズの粒径が $d_{50} = 2.60$ mmとかぎられたものであるから、ただちに、この考え方の不変性を保証するものではないが、不飽和浸透流における物質分散現象の特徴をとらえていると思われる。

4. ま と め

定常不飽和浸透の場合における移流分散現象の解明と定量的把握のため、関東地方に広く分布する関東ロームを用い浸透実験を行うとともに、分散係数に含まれる長さ寸法を評価するため2種類の透明ガラスビーズを使用して、定常不飽和浸透の場合におけるフィンガーリング形成と水みちの観察実験を行った。その結果、次のような知見が得られた。

- ① 関東ロームを用いた浸透実験では、分散係数 D と粒径レイノルズ数 Re の関係は $D/\nu = a Re^b$ の形で整理でき、 $a = 25.5$ 、 $b = 6.3$ が得られた。
- ② 透明ガラスビーズと染料水を用いたクリスチャンフィルター法による定常不飽和浸透の場合でのトレーサー浸透実験では、フィンガーリングの形成が認められ、特に、粒径の大きい場合ほど、それが顕著であった。
- ③ トレーサー浸透実験写真から、フィンガーリングの平均移動速度 $u_f = \alpha \cdot u_m$ (α : 係数, u_m = 平均浸透速度)とおくと、ケースA $d_{50} = 2.60$ mmの場合、 $\alpha = 20 \sim 28$ 倍、ケースB $d_{50} = 1.20$ mmの場合8～15倍となり、フィンガー平均移行速度は粒径が大きい程大きくなる。
- ④ 不飽和浸透のトレーサーの非流路部分を代表する $\bar{l}_f$ を用いて、 $D/\nu \sim Re$ の関係を補正すれば飽和浸透の場合のそれに近い値を持つことが判った。

参 考 文 献

- 1) 佐々木康夫, 佐藤邦明, 福原輝幸 : 不飽和浸透流における溶質の拡散・分散係数に関する実験的研究, 土木学会第41回年次講演会, II, pp 181～182, 1986.
- 2) 佐藤邦明, 福原輝幸, 佐々木康夫 : 放射浸透流における熱及び溶質の実験的研究, 土木学会第19回岩盤力学シンポジウム, pp 206～210, 1987.
- 3) D.R.F. HARLEMAN and R.R. RUMER : Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium, Fluid Mech. 16, pp 385～394, 1963.