

## 不均質媒体中の地下水汚染に関する研究

Study on the groundwater contamination in the heterogeneous medium

代表研究者 奈良教育大学教育学部助教授  
Assoc. Prof., Nara University of Education  
Makoto TANIGUCHI

谷口真人

Theoretical analyses and two- and three-dimensional experiments on the wetting front instability have been made to clarify the pathway of groundwater contaminations which occur as fingers in heterogeneous medium. The finger number and finger width decrease with increasing heterogeneity, however the finger velocity increases with increasing the heterogeneity. The diameters of the fingers observed in three-dimensional experiments agree well with the values obtained theoretically.

### 研究目的

従来の均質多孔質媒体中のマトリックスフロー理論では予期できない地下水汚染物質の早い移動(アリアリッシュフロー)が、フィンギアリング現象(指の様な形の移動形態)として各地で観測されている。このアリアリッシュフローやフィンギアリング現象を明らかにすることは、正確な地下水汚染速度及び汚染経路を知る上で重要である。不飽帯におけるアリアリッシュフローとフィンギアリングの発生は、水と空気の2相流体による境界不安定性現象の特別な場合と考えられているが、不均質媒体中の物質移動のメカニズムやその移動経路はいまだ不明な点が多く、アリアリッシュフローの一要因としての2相流体の不安定現象を、均質媒体中ばかりでなく、不均質媒体中においても明らかにし、その3次元的構造及び移動形態を明らかにすることが重要である。

フィンギアリング現象やアリアリッシュフローによる汚染物質の早い移動は、産業廃棄物処理場や核廃棄物埋設予定地からの地下水汚染に関して重要かつ深刻な問題であり、早期の現象解明が必要とされている。産業廃棄物や核廃棄物の埋設地は、水により汚染物質が流去されないように水の少ない地域の基盤岩に予定されている場合が多い。しかし同時にフィンギアリングは土壌水分の少ない地域でよく観測されている。しかも、不均質媒体中の水や汚染物質の移動形態は、その移動速度など不明な点が多

く、それらを明らかにすることは地下水汚染経路を明らかにする上で必要不可欠である。そこで本研究では、不均質媒体中の水の流動に伴う汚染物質の移動形態を明らかにし、早い水の流れとそれに伴う汚染物質の移動経路を明らかにすることを目的とする。

### 研究経過

本研究は、2相流境界不安定の理論解析と2次元・3次元のフィンギアリングに関する室内実験により行った。理論解析では、2相流体が接触するとき生じる境界不安定現象を波形で近似した2次元理論を基にし、それを一般化して3次元に拡大し、ぬれ前線の不安定性に起因するフィンギアの直径を求める式を展開した。

実験は次の手順で行った。(1)降雨浸透による汚染物質の移動形態を明らかにするために、不飽和帯における水-空気の2流体境界不安定性に関する2次元実験を、様々な粒径の多孔質媒体を用い、供給水の流速・初期水分量を変えて行い、フィンギアの2次元構造を明らかにする。(2)同様に、粒径・供給水の流速を変えてフィンギアの3次元構造を明らかにする。(3)不均質媒体中のフィンギアの構造を明らかにするために、2層モデル(上層:細粒、下層:粗粒)による実験を行う。

2層モデルを用いた、多孔質媒体中のフィンギアリングの発生と成長に関する2次元実験は次

のように行った。実験装置は、高さ35cm、長さ45cm、幅1cmの透明アクリル板からなり、隙間が1cmになるよう2枚並べ、その中に様々な粒径のガラスビーズをつめて行った。なお、ガラスビーズ上端への水の供給は、点滴用輸液セットを用いて行い、フィンギアの発生及び成長過程はビデオカメラにより撮影し、フィンギアの本数・フィンギアの幅・フィンギアの降下速度を測定した。

フィンギアの3次元構造を明らかにするため、2層（上層：細粒、下層：粗粒）モデルを用いた多孔質媒体中のフィンギアリングの発生と成長に関する3次元実験を次のように行った。実験装置は直径35cmの塩ビパイプと同様の孔の開いた仕切鉄板からなり、定常状態到達後にカラムを輪切りにすることにより、フィンギアの本数および直径等を測定した。測定はビデオカメラにより撮影した画像をパーソナルコンピュータに取り込み、ぬれた部分の面積を求めた後、フィンギアの直径を求めた。カラム上端への水の供給は定量ポンプおよび湛水条件で行った。

実験に用いたガラスビーズの直径は、0.177mm - 0.990mm、飽和透水係数は $3.5 \times 10^{-4}$  -  $5.5 \times 10^{-3}$   $\text{m s}^{-1}$ であった。

## 研究成果

### (1) 理論解析

今、3次元の多孔質媒体中を2流体（ $\nu, \mu, 1, 2$ ）が無限の広がりとも明確な境界（図1、 $x^*$ 、 $z^*$ 面）をもって接していると仮定する。流体1が均一な

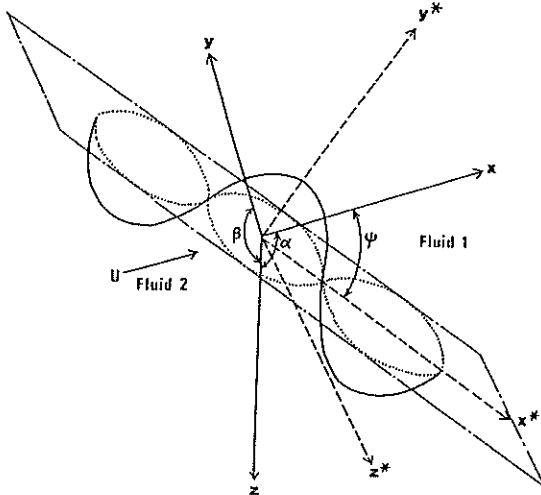


図1

速度Uを持ってx軸に沿って透水性媒体中を流体2に向かってゆっくりと移動し、 $x-x^*$ 、 $x-z$ 、 $y-z$ の角度をそれぞれ $\psi$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ とする。時刻 $t=0$ において、2流体の境界が乱されて波のような形が形成されたと仮定すると、1つの波は次のように表される。

$$\eta = \varepsilon e^{i(n x^* + m z^*) + \sigma t} \quad (1)$$

$$M^2 = n^2 + m^2 \quad (2)$$

ここで $\varepsilon$ は正の定数、 $\sigma$ は振幅（あるいは成長係数）、 $n, m, M$ は $x^*$ 、 $z^*$ 及び3次元における波数を示す。速度ポテンシャルはラプラスの式を満足するため

$$\nabla^2 \phi_j = 0, \quad j=1 \text{ and } 2 \quad (3)$$

境界 $z=\eta$ における運動状態は次式で1次近似できる。

$$-\partial \phi_1 / \partial y^* = -\partial \phi_2 / \partial y^* = U \sin \psi + \sigma \varepsilon e^{i(n x^* + m z^*) + \sigma t} \quad (4)$$

$y^* \rightarrow +\infty$ で波は消滅すると仮定すると(3)(4)式の解は次式で表される。

$$\phi_1 = -U(x^* \cos \psi + y^* \sin \psi) + (\sigma \varepsilon / n) x e^{i(n x^* + m z^*) - n y^* + \sigma t} \quad (5)$$

$$\phi_2 = -U(x^* \cos \psi + y^* \sin \psi) - (\sigma \varepsilon / n) x e^{i(n x^* + m z^*) + n y^* + \sigma t} \quad (6)$$

両領域でダルシーの法則が成立つと仮定すると、次のような圧力の不連続性が境界に存在する。

$$P_1 - P_2 = \mu_1 \phi_1 / k_1 - \mu_2 \phi_2 / k_2 - (\mu_1 / k_1 - \mu_2 / k_2) y^* U \sin \psi - (\rho_1 - \rho_2) y^* g (\sin \psi \cos \alpha + \cos \psi \cos \beta) \quad (7)$$

ここで $\mu, \rho, k$ は、それぞれ流体の粘性、密度、透水性を表す。

境界での圧力の不連続を、有効界面張力 $T^*$ を導入すると次のように表せる。

$$P_1 - P_2 = T^* (\partial^2 \eta / \partial x^{*2} + \partial^2 \eta / \partial z^{*2}) \quad (8)$$

(7)式と(8)式より

$$\mu_1 \phi_1 / k_1 - \mu_2 \phi_2 / k_2 - [(\mu_1 / k_1 - \mu_2 / k_2) U \sin \psi + (\rho_1 - \rho_2) g (\sin \psi \cos \alpha + \cos \psi \cos \beta)] \eta = -T^* (\partial^2 \eta / \partial x^{*2} + \partial^2 \eta / \partial z^{*2}) \quad (9)$$

(1)式および(5)(6)式より、(9)式は次のように表される。

$$(\mu_1 / k_1 + \mu_2 / k_2) \sigma - [(\mu_1 / k_1 - \mu_2 / k_2) U \sin \psi + (\rho_1 - \rho_2) g (\sin \psi \cos \alpha + \cos \psi \cos \beta)] M + T^* M^3 = 0 \quad (10)$$

従って、 $M > 0$ において、不安定状態が発生する（つまり $\sigma > 0$ となる）必要十分条件は

$$M^2 < M_c^2 \quad (11)$$

となる。ここで

$$M_0^2 = \{(\mu_1/k_1 - \mu_2/k_2) U \sin \psi + (\rho_1 - \rho_2) g (\sin \psi \cos \alpha + \cos \psi \cos \beta)\} / T^* \quad (12)$$

また、(10)式において  $\sigma / M = 0$  より、最大不安定波長（最も早く成長する波の波長）の波数  $M_m$  は

$$M_m = M_0 / \sqrt{3} \quad (13)$$

2次元のフィンギアに関しては、 $M = n$ 、 $m = 0$  より、臨界波長  $\lambda_c (= 2\pi / n_c)$  および最大不安定波長  $\lambda_m$  は次のように表される。

$$\lambda_c = 2\pi [T^* / \{(\mu_1/k_1 - \mu_2/k_2) U \sin \psi + (\rho_1 - \rho_2) g (\sin \psi \cos \alpha + \cos \psi \cos \beta)\}]^{1/2} \quad (14)$$

$$\lambda_m = 2\pi [3T^* / \{(\mu_1/k_1 - \mu_2/k_2) U \sin \psi + (\rho_1 - \rho_2) g (\sin \psi \cos \alpha + \cos \psi \cos \beta)\}]^{1/2} \quad (15)$$

3次元のフィンギアに関しては、 $m = n$ 、 $\lambda = 2\pi / n = 2\pi / m$ 、 $M = (2n^2)^{1/2}$  より、臨界波長  $\lambda_{c3}$  および最大不安定波長  $\lambda_{m3}$  は次のように表される。

$$\lambda_{c3} = 2\pi [2T^* / \{(\mu_1/k_1 - \mu_2/k_2) U \sin \psi + (\rho_1 - \rho_2) g (\sin \psi \cos \alpha + \cos \psi \cos \beta)\}]^{1/2} \quad (16)$$

$$\lambda_{m3} = 2\sqrt{2}\pi [3T^* / \{(\mu_1/k_1 - \mu_2/k_2) U \sin \psi + (\rho_1 - \rho_2) g (\sin \psi \cos \alpha + \cos \psi \cos \beta)\}]^{1/2} \quad (17)$$

今、ぬれ前線の降下浸透によるフィンギア発生について考えてみる。流体1を水、流体2を空気とすると、 $\mu_1 \gg \mu_2$ 、 $\rho_1 \gg \rho_2$  となる。また水は動水勾配  $I_v$  をもって鉛直に浸透し、初期の水-空気境界面は水平であるとする ( $\psi = \pi/2$ 、 $\alpha = \pi$ 、 $\beta = \pi/2$ )、(12)式は次のようになる。

$$M_0^2 = \rho_1 g (1 - I_v) / T^* \quad (18)$$

従って、2次元及び3次元の最大不安定波長  $\lambda_m$  (15式)  $\lambda_{m3}$  (17式) は次のように表される。

$$\lambda_m = 2\pi [3T^* / \rho_1 g (1 - I_v)]^{1/2} \quad (19)$$

$$\lambda_{m3} = 2\sqrt{2}\pi [3T^* / \rho_1 g (1 - I_v)]^{1/2} \quad (20)$$

またフィンギアの幅（2次元）あるいは直径（3次元）で表すと

$$w = \pi [3T^* / \rho_1 g (1 - I_v)]^{1/2} \quad (21)$$

$$d_{3s} = 4.44 [3T^* / \rho_1 g (1 - I_v)]^{1/2} \quad (22)$$

2次元のフィンギアの係数  $\pi$  はこれまでにも導かれているが、3次元のフィンギアの係数 4.44 は、ベッセル関数を用いて求めた従来の係数 4.8 とは異なった値を示している。今回、一般化されたフィンギアの最大不安定波長を表す式が導かれ、3次元のフィンギアの直径を表す係数 4.44 を得た。

## (2) 実験結果

### 「2次元実験結果」

異なった粒径のガラスビーズを用いた2次元実験により、供給水のフラックスが同じ場合、粒径の細かいビーズ中のフィンギアは、粒径が粗いビーズ中のフィンギアよりも幅が広いことが明らかになった。また、フィンギアの数・幅・降下速度は供給水のフラックスが大きいほど大きくなった。媒体の不均質性がフィンギアの発生および成長に与える影響を明らかにするために行った2層モデル（上層：細粒、下層：粗粒）実験により、以下のことが明らかになった。フィンギアの数と幅は不均質性が増すほど（上層と下層のビーズの粒径の差が大きいほど）減少する。これに対し、フィンギアの降下速度は、不均質性が増すほど増大した。したがって、媒体の不均質性が増すほどぬれ前線の不安定性が増大し、早い降下浸透が発生することが明らかになった。また媒体の土壤水分や透水係数の不均質性はフィンギアの発生や合併、分岐の引金となり得ることからも、媒体の不均質性が2相流体の不安定性を増大させていると言える。

また、フィンギアの幅および進行速度は、初期土壤水分量にも依存することが明らかになった。フィンギアの幅は、初期水分量が多いほど広く、初期水分量が少ないほど狭い。またフィンギアの降下速度は、土壤水分量が多いほど遅く、水分量が少ないほど早いことが明らかになった。つまり、初期土壤水分量が少ないほどぬれ前線の不安定性が増大し、フィンギアの発生・早い降下浸透が起こることが明らかになった。

### 「3次元実験結果」

フィンギアの3次元構造を明らかにするために行った実験から、次のことが明らかになった。スライスする事によって得られた3つの深度におけるフィンギアの断面を比較すると、各深度とも濡れた部分の形・面積はほぼ変わらなかった。したがって、本研究での実験条件では、フィンギアの3次元構造は、ほぼ円柱形であることが明らかになった。また、媒体の不均質性がフィンギアの3次元構造に与える影響を明らかにするために行った2層モデルによる実験結果から、媒体の不均質性が増すほど（上層と下層のビーズの粒径差が大きいほど）フィンギアの数・フィンギアの占める断面積は減少し、フィンギアの降

下速度は増大した。つまり、2次元実験結果と同様に、3次元実験の場合も、媒体の不均質性が増すと、濡れ前線の不安定性が増大し、単位断面積に占めるぬれたフィンギアの部分の割合が小さく、早い降下浸透が現れることが明らかになった。

3次元実験によって得られたフィンギアの直径と、理論解析によって得られた3次元フィンギアの直径(22式)を図2に示した。図2より、

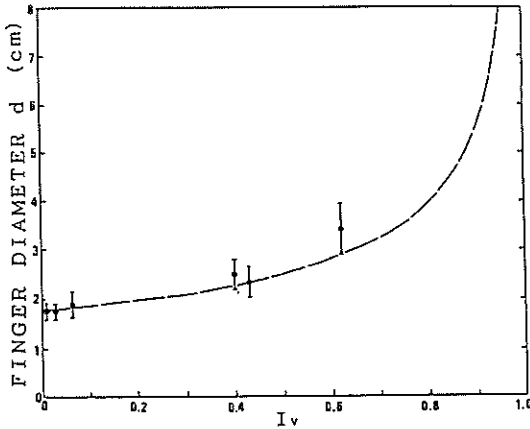


図2

所与のパラメータを与えて22式を用いて計算したフィンギアの幅は、実測したフィンギアの直径とほぼ一致した。このことから、層状多孔質媒体中で発生する不安定流(フィンギア)の大きさが予測可能であることが示された。したがって、単位断面積に占めるフィンギアの割合を求めることによって、従来の均質多孔質媒体中のマトリクス70-理論では予期できない地下水汚染物質の早い移動降下速度を予測することが可能であることが明らかになった。

#### 今後の課題と発展

ぬれ前線の降下時における、2相流境界での不安定性に起因するフィンギア発生とその成長に関する理論的考察と、様々な粒径のガラスビーズを用いた実験を行った。フィンギアの3次元構造に関する理論展開では、従来用いられた係数とは異なったエバ-ル係数が得られ、3次元の実験結果から得られたフィンギアの直径とほぼ一致した。このことから、層状多孔質媒体中で発生する不安定流の幅が予測可能であることが示された。しかし、今回得られ理論では、フィンギアの幅および降下

速度は予測できたものの、フィンギアの降下場所の特定は出来なかった。今後は確率統計的手法等により降下場所に関するモデルの構築が必要である。

また、不均質媒体中でのぬれ前線の不安定現象については、媒体の不均質性が増大すると、不安定性が増大し、フィンギアの早い降下浸透が発生することが2次元および3次元の実験で明らかになった。したがって今後は、この不均質性をパラメータ化することが必要である。

ぬれ前線の不安定現象は、産業廃棄物埋設地等からの地下水汚染問題等に関して早急に解明すべき問題である。層状不均質媒体中のみならず、亀裂岩を含む岩盤中におけるぬれ前線の降下時のフィンギア発生条件や、発達形態を明らかにすることが今後の研究において必要である。

#### 発表論文リスト

- 1, ぬれ前線の不安定性に関する研究, 日本地理学会予稿集, 212-213, 1994.
- 2, 2相流境界の不安定現象に関する実験, 日本地下水学会1994年秋季講演会予稿集, 20-21, 1994.
- 3, An overview of instability and fingering during immiscible fluid flow in porous and fractured media. NUREG/CR, USA, 1995 (in press).
- 4, Two-dimensional experiments on unstable flow in layered porous medium. Jap. Jour. Groundwater Hydrol., 1995 (in submission).
- 5, Wetting front instability: 1. A theory for three-dimensional fingers. Water Resour. Res., 1996 (in preparation).
- 6, Wetting front instability: 2. Three-dimensional experiments. Water Resour. Res., 1996 (in preparation).
- 7, A study on three-dimensional fingers in layered porous medium. Jap. Jour. groundwater Hydrol., (in preparation).