

九州産業大学 正会員 ○ 細川 士佐男
阿部 孝行

1. まえがき 浸透層中の浸透度が異なる2種類の非混合性液体の非定常運動で問題となる現象の1つに, fingering と呼ばれている境界面の不安定現象がある。この現象は, 浸透度が大きい液体中へ浸透度が小さい液体が侵入するために生じ, これまでも2, 3の研究が行われている¹⁾。しかし, この現象を室内実験で検討したものは少ないようである。そこで筆者らは, これについて Hele-shaw モデルにより実験を行い, mobility ratio M , 動水こう配 I および位置の変化による fingering の発生・発達の様子の観測などを行った²⁾。本報では, この時間的発達過程において, fingering の移動先端位置および移動付根位置と時間との観測を行い, 先端と付根の移動速度および伸長速度を求め, これらと既往の理論解との比較を行った。

2. Hele-shaw モデルによる実験 図-1に示すように, 浸透度 k_2/μ_2 の液体2の中へ k_1/μ_1 の液体1が侵入する場合の不安定条件は, 次式の mobility ratio $M > 1$ で表わされる。

$$M = (k_1/\mu_1)/(k_2/\mu_2) > 1 \dots \dots \dots (1)$$

ここに, k_1, k_2 : ダルシー単位の透水係数 (cm^2), μ_1, μ_2 : 粘性係数 ($\text{g} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$)。

微小間隙幅が $2R$ の平行板の間を粘性液が層流状態で流れるときの, 平均流速は, ポアジューユの法則より

$$v = P g I R^2 / (3 \mu) \dots \dots \dots (2)$$

ここに, P : 密度 ($\text{g} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$), I : 動水こう配, $2R$: 平行板の間隙幅 (cm), $g = 980 \text{ cm/s}^2$ 。

次に, ダルシーの法則より

$$v = (P g R / \mu) \cdot I \dots \dots (3)$$

上2式より

$$R = R^2 / 3 \dots \dots \dots (4)$$

これを式(1)に代入すれば

$$M = \frac{\rho_2 \nu_2}{\rho_1 \nu_1} > 1 \dots \dots (5)$$

となる。ここに, ν_1, ν_2 : 動粘性係数 (cm^2/s)。すなわち, 液体1と液体2についてそれぞれ密度と動粘性係数を知れば, M の値が求まる。

実験は, 液体1としてグリセリン水溶液をローダミンB溶液で赤色に着色したもの, 液体2として無色のグリセリン水溶液を用い, 図-2に示す装置により行った。その種類を, 表-1に示している。

3. 実験結果と検討 まず, fingering の移動先端位置 ξ と時間 t との関係は, 次式で与えられる。¹⁾

$$t = \frac{12 \nu_1 \rho_1 \lambda}{(2R)^2 (\rho_1 g H_1 - \rho_2 g H_2)} \{ M L (\xi + \xi') + 0.5 (1 - M) (\xi + \xi')^2 \} \dots \dots \dots (6)$$

ここに, λ : 有効空隙率, $2R$: 平行板の間隙幅 (cm), L : 浸透領域の長さ (cm), H_1, H_2 : 水深 (cm)。

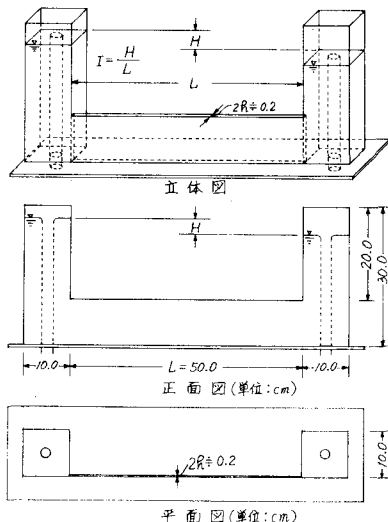
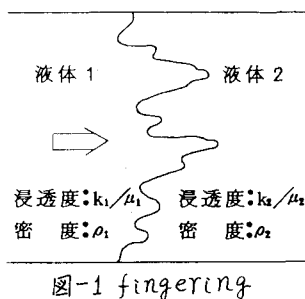


図-2 実験装置

表-1 実験の種類

$M = 249.271$, 温度 13.0°C $\nu_1 = 0.085$, $\rho_1 = 1.266$ $\nu_2 = 21.188$, $\rho_2 = 1.266$
$M = 124.487$, 温度 12.5°C $\nu_1 = 0.193$, $\rho_1 = 1.266$ $\nu_2 = 24.026$, $\rho_2 = 1.266$
$M = 61.649$, 温度 14.0°C $\nu_1 = 0.316$, $\rho_1 = 1.265$ $\nu_2 = 19.481$, $\rho_2 = 1.264$
$M = 0.961$, 温度 11.3°C $\nu_1 = 20.558$, $\rho_1 = 1.264$ $\nu_2 = 19.721$, $\rho_2 = 1.266$
$M = 0.099$, 温度 10.0°C $\nu_1 = 24.585$, $\rho_1 = 1.266$ $\nu_2 = 2.431$, $\rho_2 = 1.264$

ν : (cm^2/s), ρ : ($\text{g} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$)

上式に表-1と図-3に示す値を適用して、それぞれのMについて ξ と ξ' との関係を求めた。なお入は、空隙率や液体1の飽和度あるいは液体2の残留飽和度から求められるものであるが、ここでは、それぞれのMについての実験結果で、表-2に示す末端の測定値 ξ と ξ' ともを用いて式(6)で逆算した値を採用した。その値を表-2に示している。図-4に ξ と ξ' との関係を示す。この結果より、理論と実験の結果は、 $M \leq 0.961$ と $M = 124.489$ では定性的に一致している。

次に、fingeringの先端の移動速度 V_0 、付根の移動速度 V_1 および伸長速度 V_2 、付根の移動速度 V_1 および伸長速度

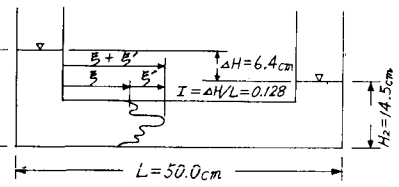


図-3 測定位置と水深

表-2 末端の測定値と有効空隙率

M	t (s)	ξ (cm)	ξ' (cm)	$\xi + \xi'$ (cm)	V_1 (cm/s)	V_2 (cm/s)	V_0 (cm/s)	λ	λ_0	λ_1	λ_2
0.099	140	—	—	37.75	—	—	0.160	0.144	0.137	—	—
0.961	280	—	—	15.00	—	—	0.048	0.392	0.434	—	—
61.649	280	4.82	18.12	22.94	0.030	0.125	0.155	0.338	0.252	0.789	0.075
124.487	280	6.74	25.54	32.28	0.045	0.155	0.200	0.222	0.242	0.446	0.076
249.271	280	4.08	35.90	40.26	0.025	0.250	0.289	0.229	0.345	0.859	0.067

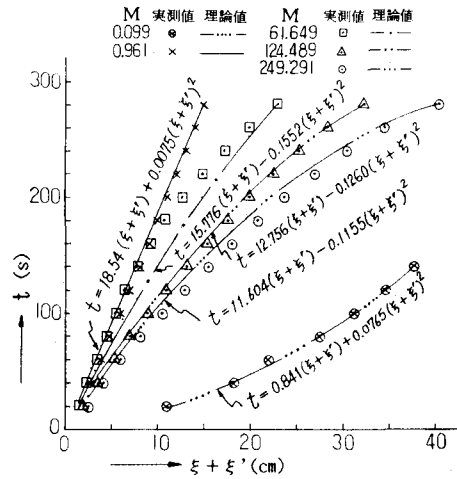


図-4 移動先端位置と時間

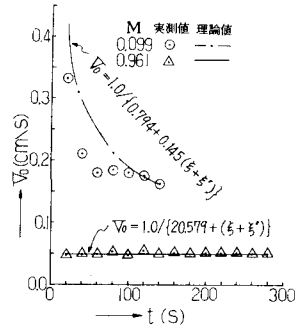


図-5 時間と速度

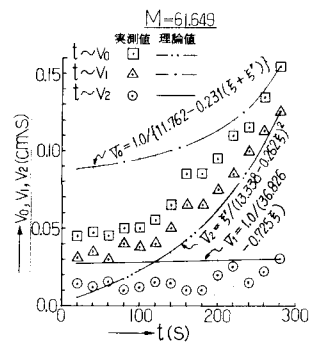


図-6 時間と速度

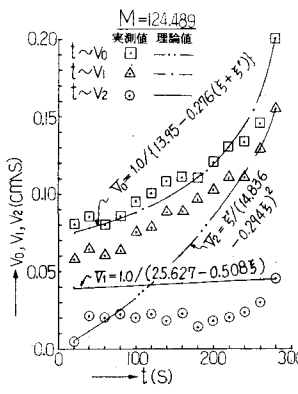


図-7 時間と速度

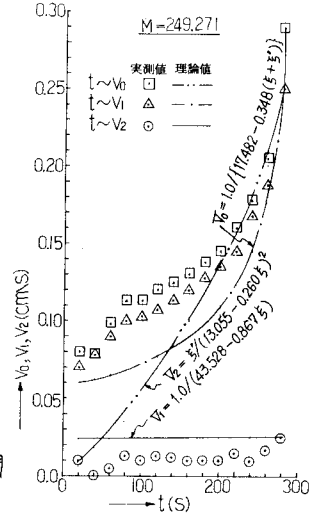


図-8 時間と速度

度 V_2 は、次式で与えられる¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= \frac{(2R)^2(P_1gH_1 - P_2gH_2)}{12P_1\lambda_1\lambda_0\{ML + (1-M)(\xi + \xi')\}} \\ V_1 &= \frac{(2R)^2(P_1gH_1 - P_2gH_2)}{12P_1\lambda_1\lambda_1\{ML + (1-M)\xi\}} \\ V_2 &= \frac{-(2R)^2(P_1gH_1 - P_2gH_2)(1-M)\xi'}{12P_1\lambda_1\lambda_2\{ML + (1-M)\xi\}^2} \end{aligned} \right\} (7)$$

ここに、 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ は有効空隙率で、ここで
も、上述の場合と同様にして求めた。図-5～8に、 V_0, V_1 および V_2 を時間 t に対応させて示す。これらの結果より、理論と実験の結果は定性的に一致している。特に V_0 については、これまでに指摘されている $M=1$ であれば一定で、 $M>1$ では加速され、 $M<1$ では減速されるといった定性が実験結果でも確認できる。なお今後、実験装置を改良して精度を高め、理論との照合を行ってみたい。

参考文献

- 1) 水理委員会密度流研究小委員会：成層密度流の界面現象(2) - 第4編地下密度流，地学論文報告集，第243号，PP.110～PP.121, 1975年。
- 2) 崎山正博ほか2名：fingeringの伸長について，昭和57年度西部支那研究，II-4，昭和60年2月。