

埼玉大学 工学部 ○渡 辺 邦 夫

東京大学 、 浅 枝 隆

埼玉大学 、 石 山 宏 二

はじめに

従来から、飽和した岩盤中に貯蔵されたガス体の漏洩、あるいは飽和・不飽和岩盤中に注入されたグラウト液の動きなど、多種流体の共存した浸透流の性質が研究されている。それらの研究の多くは、たとえば1つの流体の占める存在割合に注目するなど、流れを平均的に捉えようとするものであった。しかしながら、多種流体は、水とガス体との共存に典型的にみられるように、界面を持って接することが多い。グラウト液の動きなども、たしかに多少の拡散・混合は生ずるものの、大きくみれば1つの界面の動きで表現しうる。界面を持って接する2種流体の動きの大きな特徴の1つは界面不安定現象である。したがって、多種流体の岩盤内流れでは、界面不安定現象に注目した基礎研究が必要と思われる。とくに、従来石油工学の分野でおこなわれてきたような、安定・不安定の限界条件、初期不安定の性質などを調べるばかりでなく、界面の動きそのものを解析することが大事であると考えられる。最近、流体力学の分野で、Tryggvason ら¹⁾により、界面の動きを数値解析する試みが行なわれるようになってきた。しかし、まだ数値解析上多くの問題が残っており、定まった方法がない状態である。本研究は、Tryggvason らの考えを基礎として数値解析を試みると共に、開口割れ目をヘルシヨウセルでモデル化した実験とあわせ、岩盤中で生ずる不安定現象を明らかにすることを目的としたものである。研究の結果、不安定現象について、2, 3の特徴が明らかとなったので、報告する。

1. 界面不安定現象の数値解析

図-1に模式的に示すように、密度 ρ_1 、粘性係数 μ_1 を持つ流体が、それぞれ ρ_2 、 μ_2 を持つ流体と波状の界面を持って接している場合を考える。実際、岩盤浸透流の分野で問題となるのは、主に、 $\rho_2 > \rho_1$ 、 $\mu_2 > \mu_1$ の場合であり、以下この状態を想定する。座標軸、単位ベクトル $\hat{j}$ を図のように設定する。 s は、界面に沿った座標であり、 $\hat{s}$ は接線ベクトルである。 U は、各流体の界面上下の流速をそれぞれ u_2, u_1 とした時、 $(u_1 + u_2)/2$ で定義される流速であり、 $U(0)$ は、広域的な境界条件で定まるポテンシャル流速である。Tryggvason らは、界面をポイントボルテックスの並んだボルテックスシートと考え、以下の式を導入した。

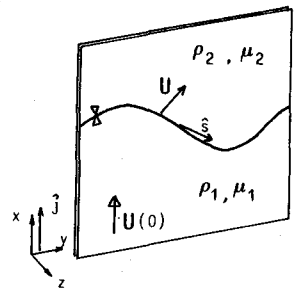


図-1 現象のモデル

$$\gamma = \frac{\Delta\mu}{\mu} U \hat{s} + \frac{b^2 g}{12\bar{\mu}} \Delta\rho \hat{j} \cdot \hat{s} + \frac{b^2}{12\bar{\mu}} \nabla(\Delta p) \cdot \hat{s} \quad \text{-----}(1)$$

$$U = U(s, t) = \frac{1}{2\pi} \oint \frac{2 \cdot (X(s, t) - X(s', t))}{|X(s, t) - X(s', t)|^2} \gamma(s', t) ds' \quad \text{-----}(2)$$

ここに、 γ はボルテックスシートの強さ $((u_1 - u_2) \cdot \hat{s})$ 、 $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$ 、 $\bar{\mu} = (\mu_1 + \mu_2)/2$ 、 $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ 、 b はヘルシヨウセル間隙幅、 g は重力加速度、 p は圧力である。(1)式右辺第4項については、 $x-z$ 平面内の界面曲率でのみ決まる表面張力で近似している。解析は(1)、(2)式を連立させて解き、(2)式で定まる U と $U(0)$ により界面を移動させ、(1)、(2)式でイタレーションを行ないながら、順次時間ス

テップを進ますことにより行なう。実際の計算では、界面上に等間隔に多くの代表点（ボルテックスエレメント）を設定し、両式を離散化させて行なう。この代表点数の数が多い程、計算精度は向上するが、とくに、（２）式の計算で計算時間が増大する。このため、従来、解析領域を正方形格子で区切り、各正方形要素領域に入るボルテックスエレメントから、要素隅格子点の流関数・流速を計算し、あらためて各ボルテックスエレメントの流速を求める vortex in cell 法が用いられる^{2),3)}。今回の計算では、同様な考え方に基づくものの、計算をより簡単化するため、（２）式を用い直接的に格子点流速を求め、面積加重法を用いて各ボルテックスエレメントの流速を計算した。この方法は近似的なものであり、とくに界面の変形がかなり進んだ段階では、適用が難しい点もあろう。今回の解析では、50 cm × 50 cm の領域を設定し、水平界面に、半振幅 0.1 cm、波長 12.5 cm の乱れを加え初期条件とした。また、界面上のエレメント数は 401、格子間隔は 1 cm とした。計算にあたって、 μ_2 、 ρ_2 としてそれぞれ、100 c p、1.5 g/cm³ を与え、 μ_1 、 ρ_1 は空気を仮定し共に 0 とした。また、表面張力は 80 d y n/cm、b は 0.1 cm とした。

この条件では、（１）式で示されるボルテックスシートの強さから、 $U(0) = 0$ の場合に比べ、 $U(0) < 0$ （下降流）で不安定が押さえられ、 $U(0) > 0$ で加速する性質を示すことになる。今回設定した条件は、粘性係数などを一つの値に定めているが、その計算結果は、高密度・高粘性の流体が低密度・低粘性流体の上方に存在する場合の現象を定性的にはかなり一般的に示すと考えて良い。

解析結果例を図-2 に示す。（a）、（b）、（c）はそれぞれ図中に示す $U(0)$ 流速を与えた場合である。図中の数字は経過時間である。（c）の $U(0)$ はほぼ動水勾配 1 の場合の自由落下流速であり、一方（a）は上昇流、（b）は流速 0 の場合である。図から、（a）、（b）の条件で時間と共に界面の歪み（不安定性）が拡大していることがわかる。それらに比べ、（c）では、界面の歪みはほとんど発達していない。（a）、（b）図双方で、15.2 秒後、波長の短い界面のゆがみが大きく成長していることがわかる。これは、数値計算上のわずかの誤差が、高周波成分の界面の乱れとなってあらわれ、その一部が発達したものであると思われる。（c）でも同様の乱れが生じているが、ほとんど発達することはない。この計算結果をふまえ、つぎに、実際の界面不安定の発達状態を実験的に調べた。

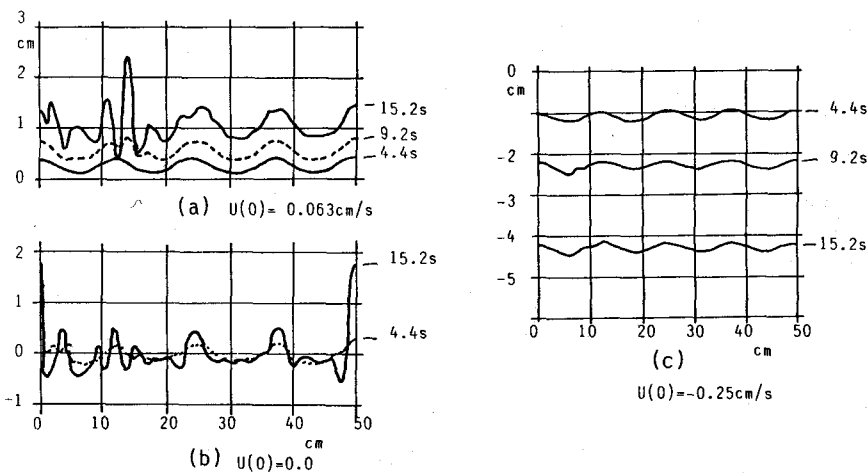


図-2 界面不安定性発達の数値解析結果

2. ヘルショウセルによる実験

2-1 実験装置

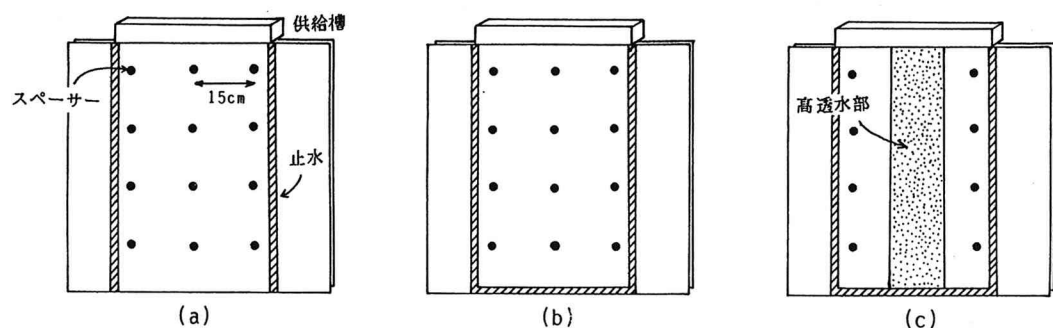


図-3 今回用いた3種類の実験装置

数値解析の結果、上部に高粘性・高密度流体が存在する場合、 $U(0)$ 、換言すれば、界面の平均移動速度によって、不安定性の発達が大きく影響されることがわかった。この現象を実験的に検証することを考える。今回、界面の平均的な移動速度を変えるために、図-3に示す3つのタイプの実験装置を用いた。これらの装置は、いずれも間隔幅1mmのヘルシウセルの上部に、粘性流体の供給槽をのせたものである。ヘルシウセル中央部は、供給槽幅に合わせて止水してあり、粘性流体は平均的に下方に鉛直一次元流として流れる。図中、(a)は、ヘルシウセル内の流れの場の下方が開放されている場合である。一方、(b)では下方が閉じられており、ヘルシウセル内に存在していた空気が周囲に逃げない条件となっている。したがって、(b)では、粘性流体の侵入に伴って空気圧が上昇し、界面流速が遅くなるため、時間と共に不安定性が増大するはずである。(c)は、本質的には(b)と同タイプであるが、流れの場の中央部の間隔幅が図に示すようにやや大きくしてある。そのため、上方から侵入した粘性流体は、透水係数の大きい中央部をより速く流下し、両側部分の界面速度が押さえられる。したがって、中央部に比べて側方部で不安定性が増大すると思われる。いずれの実験装置においても、ヘルシウセル内の間隔幅を一定とするため、多くのスペーサーがボルトで止められている。とくに、(a)、(b)では、流れの場の鉛直中心線上にもスペーサーが設置されている。これらのスペーサーは、界面に強制的に乱れを与える作用をすることになる。なお、今回用いたヘルシウセルの間隔幅は1.2mmであり、粘性流体として、ほぼ1000cPのグリセリン水溶液を用いた。

2-2 実験結果の例

図-4に(a)、(b)の実験装置を用いた界面変動結果の例を示す。図中の(a)、(b)はそれぞれの実

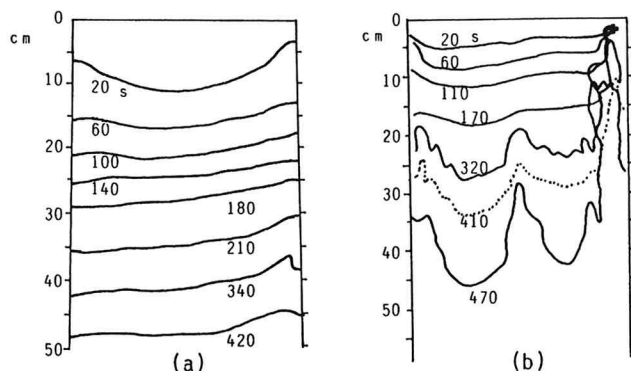


図-4 実験装置(a)、(b)を用いた結果

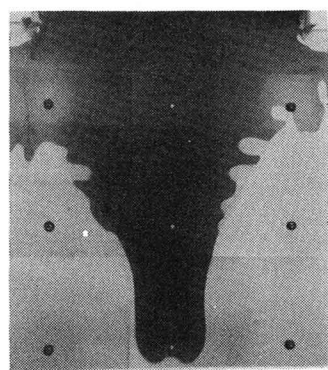


図-5 実験装置(c)の結果

験装置に対応し、数字は経過時間である。いずれの実験においても、界面がスパーサーに達すると界面がみだれる。しかし、(a)では、その乱れがすぐに解消し、かなりの時間経過後もほぼ水平に近い界面形状を示している。一方、(b)では、ほぼ4分以後スパーサー下方で流体が分かれていることがみとめられる。これは、界面の下降流速の低下による乱れの発達によるものと考えられ、数値解析結果と定性的には一致する。

図-5は、(c)装置に見られた結果の一例を写真で示したものである。大きく下方に侵入した中央部先端の小さなくびれは、局所的な間隙幅の縮小によるものであり、本質的な性質ではない。これに対し、両側方部では明瞭な界面の歪みをしめしている。このことは、界面下降流速の小さい部分で選択的に不安定性が増大することであり、数値計算結果から理論的に予測しえたことである。

3. 結論と今後の問題

今回、2つの流体が、開口割れ目モデルの中で水平界面を持って接している場合の界面変動を数値解析することを試みた。流体の性質として、上部のものの粘性、密度が共に大きいことを仮定した。また、界面は、ポイントボルテックスの並んだボルテックスシートとしている。同時に、ヘルショウセルを用いた実験を行ない、理論解析結果を定性的に検証した。その結果、界面下降流速の小さい部分でとくに、歪みが大きくなるなど不安定性が大きくなるなどの性質が明らかとなった。このような状態は、空気や水など、もともと岩盤内に存在していた流体に突発的に高圧が加わった場合のほか、他の流体が侵入した時にそれらが逃げ難い場、たとえば、割れ目中の難透水部で囲まれた高透水部などで作られるといえる。

以上のように、今回の研究によって、定性的には界面の不安定変動の2、3の特徴が明らかとなったとかがえる。しかしながら、界面の動きを長時間にわたって精度良く追跡するには、解析手法上まだ多くの問題を抱えている。また、実際の岩盤内でおこる不安定現象の詳細な観察・検討が必要となる。今後これらの点について、さらに詳しく調べて行くつもりである。

参考文献

- 1) Tryggvason, G. & Aref, H. (1983) Numerical experiments on Hele Shaw flow with a sharp interface, J.F.M., vol. 136, pp. 1-30.
- 2) Christiansen, J. P., & Zabusky, N. K. (1973) Instability, coalescence and fission of finite-area vortex structure, J.F.M., vol. 61, pp. 219-243.
- 3) Aref, H. & Siggia, E. D. (1980) Vortex dynamics of the two-dimensional turbulent shear layer, J.F.M., vol. 100, pp. 705-737.

(82) Numerical analysis and experiments on two-phase displacement in an open fracture

Kunio Watanabe*

Takashi Asaeda**

Koji Ishiyama***

Abstract

Recently, gas and oil reservoirs are planned to construct in fractured rock mass. The instability motion such as fingering occurred at an interface between two immiscible fluids must be basically studied to prevent groundwater flowing around the reservoir against contamination due to the leakage of stored fluids. The present authors studied on the instability motion in a vertical open fracture by means of some numerical simulations and experiments in laboratory.

Some cases of numerical simulation were carried out in a similar manner as Tryggvason and Aref had reported, with different potential velocities around the interface.

Three types of Hele-Shaw cell were prepared as models of open fractures in this experimental study. Both sides in these cells were sealed with paste. Bottoms of two of these cells were also sealed to preserve the air in cell from leakage. Glycerin were downwardly supplied from top of the cell to make an interface with air in cell. The interface downwardly moves by the gravity acceleration. However, the velocity of this downward motion in both "completely sealed cell" decreases with time because of the rise of air pressure. The effect of this velocity on the instability can be examined by the use of these cells.

As a result, it was clearly shown that the instability motion of the interface remarkably grows at the place where the downward velocity is low.

* Associate Professor, Faculty of Engineering, Saitama University.

** Associate Professor, Faculty of engineering, University of Tokyo.

*** Graduate Student, Faculty of Engineering, Saitama University.