

岩盤モデル内の二相流の安定・不安定

Stability and instability of two-phases flow in rack fissure model

埼玉大学工学部 正会員 ○佐藤邦明

〃 〃 〃 渡辺邦夫

はじめに

一般的に言って、浸透流は流れの場を支配する多孔体の空隙の形態によって力学的挙動が大きく変わるわけである。空隙形態は、粒状固体からなるような空隙形態と岩盤・岩石に見られるときそれとでは、同じ内部連結空隙系 (interconnected pore system) でも違い、後者の空隙系の特色は異方性と連続性の程度にある。このような性格をもつ岩盤割れ目の評価については、著者ら (1978)¹⁾の研究があるが、本研究では、岩盤割れ目を浸透流の側面からモデル化することによって、水と油の二相流の特に界面の安定・不安定に注目して、その物理的・力学的性格を実験的に明らかにしようとした。このような岩盤内二相流の問題は石油・採油工学の分野でいくつかの研究²⁾はあるものの、水理学的立場より扱ったものは少い。そのため、工学的に油浸透、グラウトの水理などの目的のためには不十分であり、まず、岩盤内二相流の力学的機構を究明することが先決であると考え、ここにそれに係わる二・三の実験結果を報告するものである。

1 実験とその結果

(1) 実験装置

實際上、岩盤の割れ目をどうモデル化すればよいかについては異論はあろうが、今回の岩盤二相流に対しては、図-1のような実験装置で5通のモデル化を行ない、流れを実験的に発生してみた。装置は全体透明アクリル樹脂性であって、概略のべると、長さ56cm、幅32cm (板厚、10mm)であり、長さ方向左右に貯留部があつて、水頭変化を自由に与えうる。割れ目モデルは高さ12cmの外箱と内箱の接触面にあり、内箱の底部に5種類のモデル割れ目 (後述) が作られ、いくつかのボルトで圧着され、流体はこの平面モデル割れ目を流動する。この実験モデルの特徴は平面的な流れのパターンが着色液体の観測によって正しく可視化できるという事と内箱の交換によってモデル割れ目の種類が容易に作りうるという点にある。流れは粘性流であるから、低速で、かつ水と油の界面は immiscible

fluidのため明確に表われ、表面張力のため曲率をもつ。

実験は大別して、一様流、つまり、静止あるいは一方向流の中へ、他の流体が浸入する場合と静止あるいは一方向流場の中心から他の流体が一点注入される場合の二種である。なお、実験の性格から恒温室 (19℃) 内ですべての実験は行なわれ、界面の観測は定時間の写真観測によった。

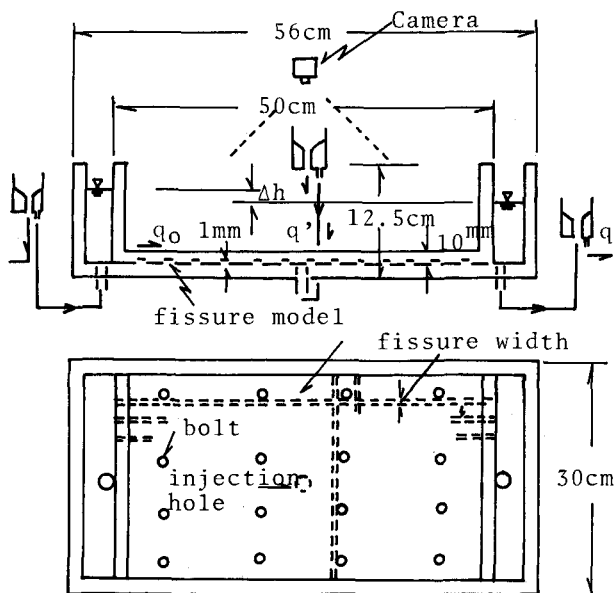


図-1 実験装置の概略

(2) 実験方法と実験ケース

実験装置は上述のようであるが、ここで、実験の方法、使用流体特性、割れ目モデルの形態・特性、さらに実験ケースについて示す。まず、実験の方法は油の中へ水が浸入、水の中へ油が浸入、空気中へ油が浸透する三つの場合（後述、表－１参照）で異なる。前二者の場合には装置の内箱と外箱を圧着して、割れ目モデルを設定する前に水か油で間隙は飽和されていなければならないから、気泡の間隙内への停留を防ぐため、外箱内に水か油をプールしておき、内箱を挿入してから内・外箱をボルトで圧着する。つぎに、割れ目モデルの間隙がある流体で飽和された状態で、一様流の実験では上流貯留部の流体を間隙飽和流体と遮断板を利用して置換した後、定水位タンクに連動して浸入実験を開始する。また、一点注入浸入では間隙内がある流体で満たされた段階で、一様流がある場合か無い場合について実験を始める。いづれの実験についても液体は赤色（油染料）か青色（染料）で着色され、５～１０秒間ごとの写真撮影による。さらに、一方向流の流量、注入量はその都度計量する。

割れ目モデルの形態は図－２に示した平面的形状をもち、タイプ１～５まで５種類であって、間隙幅 b 、深さ d 、間隙間隔 B 、平均空隙率 ϵ 等は図中に示した通りである。

実験ケースは一方向流浸入の場合と一点注入に分けて、表－１に示すようであり、上下流水位差等の条件も併せて示されている。

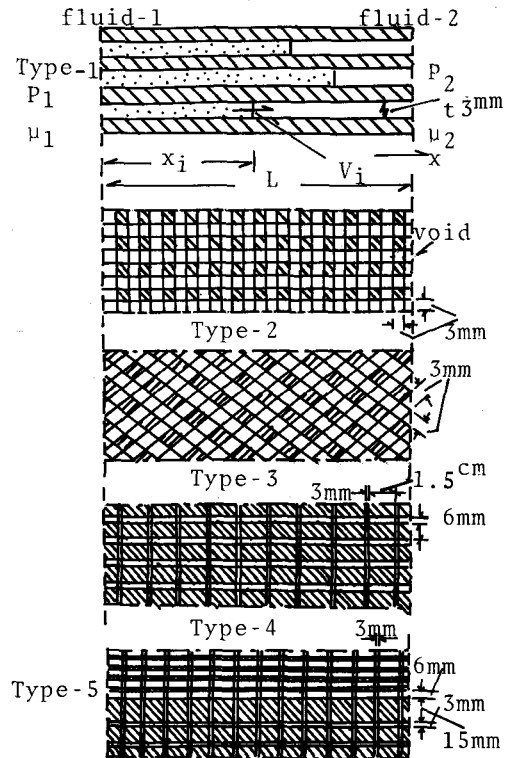
つぎに、流体についてであるが、油は比較的粘性の高い油（商品名；三共ルーブリカント，SPE-30）であり、粘性係数 $\mu_{19^\circ\text{C}} = 1.31$ ，密度 $\rho_{19^\circ\text{C}} = 0.866$ (CGS) である。また、水は蒸留水を用い $\mu_{19^\circ\text{C}} = 0.010$ であった。

各々の割れ目モデルの一方向流の場合の浸透係数 k (k_o ；油， k_w ；水) は表－１に併せて掲げておいた。

2 実験結果と考察

実験による界面の浸入状態は写真によって、鮮明にその経時変化が観測された。いろいろな浸入の代表例が図－３に示され、その中の数例の写真が写真－１～６である。

これら浸入実験結果から判かるように、全体的に一様流の浸入界面も一点注入のそれも、水の流場ないし間隙に油が浸入する場合は明らかに界面が経時的にどの割れ目モデル間隙でも一様に拡がり、その進行速度も安定している。しかし、逆に粘性の低い水が油の流場や間隙に浸入する場合は特に界面は不規則であり、進行速度もまちまちで、いわゆる fingering 現象が顕著となつて、しかも fingering の発生する割れ目は決して特定の位置、場所ではなく、時間変化も極めて変則的で、不安定である。これらの事に共通しているのは、まず、水に油が浸入した時の界面の進行速度は必ず時間的に減速にあり、逆に油に水が浸入する場合は進行速度は必ず加速され、fingering の発達の方向は不定であるという事である（図－４ 参照）。さらに、注目すべき事は割れ目モデルの平面的形態によって、排除 (displacement) する流体は排除される流体を entrap してしまい、実際に流れの場において、真に流動している間隙と非流動のそれ、つまり、死水域に対応、とは明瞭な区別が認められ、いわゆる有効空隙率は全体流場でかなり小さい事が明確に観察される。特に、平均流方向に直交する間隙には始めの流体場の流体が entrap され易く、かつ流れもほとんど生じていない。以上が実験上認められる二相流界面の大きな性格である。



図－２ 実験に用いた割れ目モデル形態

表-1 実験ケースのまとめ

Type & Porosity	k(cm/s) k _o for oil k _w for water	One-dimensional, uniform flow						Point injection					
		O → A		O → W		W → O		O → W			W → O		
		h _d	Δh	h _d	Δh	h _d	Δh	h _d	Δh	h _o	h _d	Δh	h _o
Type-1 λ=0.150	k _o =0.150 k _w =20.100	0	5.3	1.9	6.1	1.5	7.6						
				1.9	5.5	1.8	4.7						
Type-2 λ=0.280	k _o =0.130 k _w =12.176	0	8.5	1.2	4.8	1.9	4.5	2.9	5.6	15	3.9	0	8.4
								4.4	0	8.0	1.9	1.8	8.5
Type-3 λ=0.270	k _o =0.132 k _w =17.080	0	6.9	0.7	5.5	1.8	7.4	5.8	2.0	16	3.4	0	9.9
								1.4	0	10	1.7	3.3	7.4
Type-4 λ=0.581	k _o =0.330 k _w =70.519	0	6.6	1.9	8.0	3.8	1.1	3.7	0	10	2.2	3.1	7.7
		0	7.1	2.5	4.5	1.7	3.1	4.3	0.9	10			
Type-5 λ=0.301	k _o =0.279 k _w =55.456	0	8.6	2.1	6.1	1.3	5.3	1.7	0	12	2.6	1.1	6.1
						1.8	4.6	2.7	1.1	9.4	2.7	0	10.1

＜記号の説明＞ λ；空隙率，O→A；油が空気へ浸入，O→W；油が水へ浸入，W→O；水が油に浸入
h_d；下流水位，Δh；上・下流水位差，k；浸透係数 (cm/s)，h_o；注入水圧 (cm)

さて、これらの性格をもつ流れを特性づける（圧力、粘性力、表面張力）流体力学的な物理量は何か、また流れのモデル化について若干考察してみることにしよう。

まず、最も基本的な場合として、図-2の割れ目モデルタイプ-1に注目すると、図中の記号を用いて i 番の割れ目中の流体速度 V_i （今の場合、完全浸入で流体 1 と 2 で等しい）は、圧力差 $P_1 - P_2$ (P_1 ；流体 1 > P_2 ；流体 2) と粘性力のつり合い関係より、

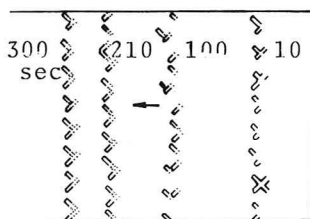
$$V_i = \frac{k_{1i}}{\mu_1} \frac{P_1 - P_2}{ML + (1-M)x_i} \quad , \quad (1) \quad M = (k_{1i}/\mu_1)/(k_{2i}/\mu_2) \quad , \quad (2)$$

となる。ここで、t；間隙幅， μ_1, μ_2 ；各々流体 1, 2 の粘性係数， k_1, k_2 ；各々流体 1, 2 の真の浸透係数（次元； L^2 ）であり，M；可動率（mobility ratio）と呼ばれているものである。

一般に、上述した水が油に浸入する場合の加速 ($M > 1$) と油が水に浸入する場合の減速 ($M < 1$) は M で評価され、一応前者が不安定、後者が安定と判別することが可能である。通常、二相流では、水が油へ、気体が水や油に浸入する時は $M > 1$ となり、油が水や軽油へ、あるいは水や油が空気へ（乾燥多孔体への浸潤フロントなども含まれる）浸入する時は $M < 1$ となり、例示することができよう。

本実験の場合に、界面進行中のある時間ごとの平均速度 V とそれぞれの時間 t に対応させて示すと図-4 の代表例のごとくなる。これらの図ではある finger に注目して関係を求めたわけである。また、油の飽和度 S_o と水のそれを S_w とすると、図-4 の上部に実験中の代表的なものが示されている。

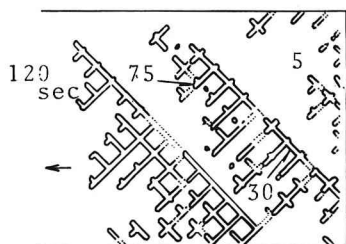
時間平均速度 V は水が油の中へ浸入するような、 $M > 1$ の場合には式(1)のごとく、全部の結果を通して時間的に増加傾向を示すことが明確にわかる。逆に、油が水に浸入する場合 $M < 1$ であり、 V は時間的に減少する。 $M > 1$ の場合と $M < 1$ のそれを比べると、 V は前者が非常に大きく、この場合は fingering が著しいため、最大浸入 finger で V を求めているわけであるが、タイプ-1 のモデルの結果を除けば、浸入路が不規則であり、分岐をもつことになる（図-3 参照）。特に興味をもてるのは、タイプ-1, 3 を除いた直交格子形流路の場合には、揭示写真でも判かるようにもとの流場内の流体を浸入流体が流路中に封入した形



Oil → Water

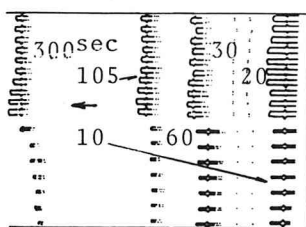
Type-3, $h_d=0.7\text{cm}$
 $\Delta h=5.5$

Water → Oil



Type-3, $h_d=1.8\text{cm}$
 $\Delta h=7.4$

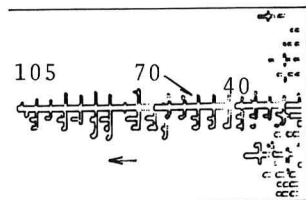
Oil → Water



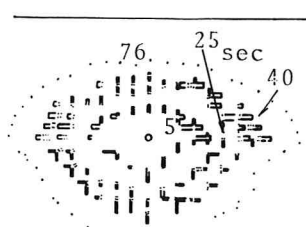
Oil → Water

Type-5, $h_d=2.1\text{cm}$
 $\Delta h=6.1$

Water → Oil



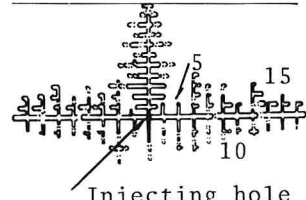
Type-5, $h_d=1.3\text{cm}$
 $\Delta h=5.3$



Oil → Water

Type-5, $h_d=1.7\text{cm}$
 $\Delta h=0, h_0=11.8$

Water → Oil

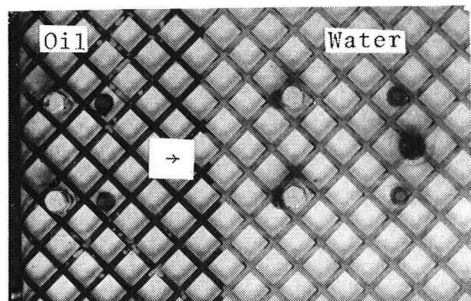


Point Injection

Type-5, $h_d=2.7\text{cm}$
 $\Delta h=0, h_0=10.1$

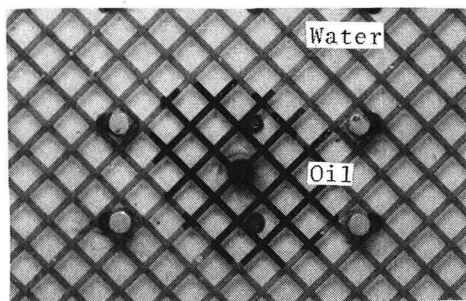
Oil → Water

図一三 界面の浸入状況の代表例



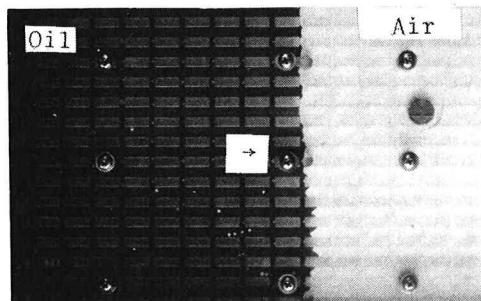
$h_d=0.7\text{cm}, \Delta h=5.5\text{cm}$

写真一 Type-3 (60sec)



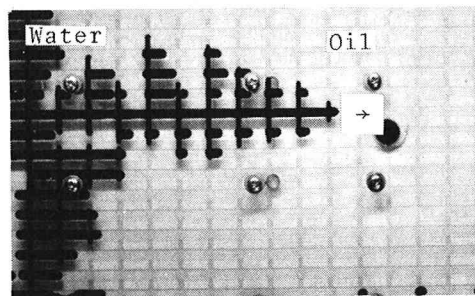
$h_d=5.8\text{cm}, \Delta h=2.0, h_0=16\text{cm}$

写真二 Type-3 (15sec)



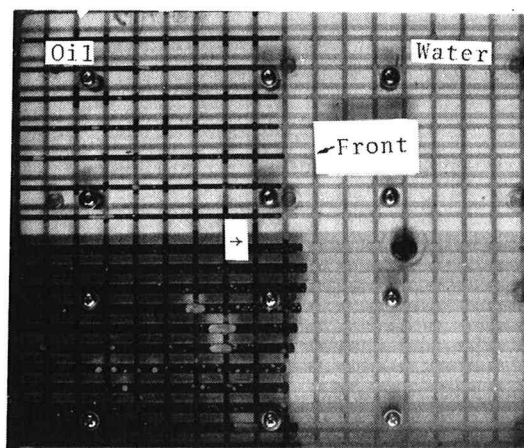
Oil → Air, $\Delta h=7.1\text{cm}$

写真三 Type-4 (60sec)



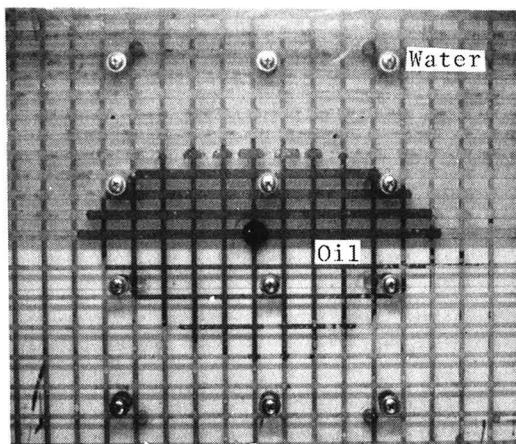
Water → Oil
 $h_d=1.7\text{cm}, \Delta h=3.1$

写真四 Type-4 (150sec)



$h_d = 2.1\text{cm}, \Delta h = 6.1\text{cm}$

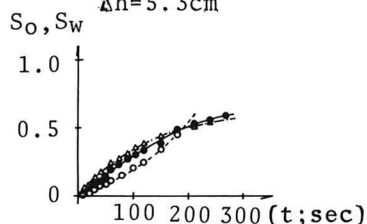
写真-5 Type-5 (90sec)



$h_d = 2.1\text{cm}, \Delta h = 0, h_o = 11.8\text{cm}$

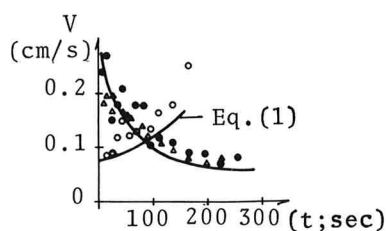
写真-6 Type-5 (20sec)

- ; Water→Oil
 $\Delta h = 4.7\text{cm}$
- ; Oil→Water
 $\Delta h = 6.1\text{cm}$
- △ ; Oil→Air
 $\Delta h = 5.3\text{cm}$



Type-1

One-dimensional or uniform flow

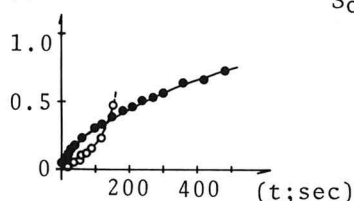


Type-1

One-dimensional or uniform flow

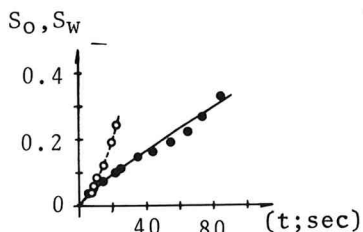
- ; Water→Oil
 $\Delta h = 7.4\text{cm}$
- ; Oil→Water
 $\Delta h = 5.5\text{cm}$

S_o, S_w Uniform Flow



Type-3

- ; Water→Oil
 $\Delta h = 0\text{cm}$
- ; Oil→Water
 $\Delta h = 0\text{cm}$

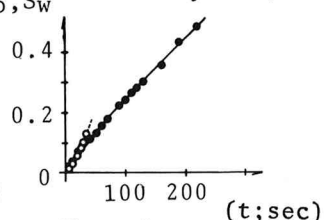


Type-3

Point Injection

- ; Water→Oil
 $\Delta h = 3.1\text{cm}$
- ; Oil→Water
 $\Delta h = 0\text{cm}$

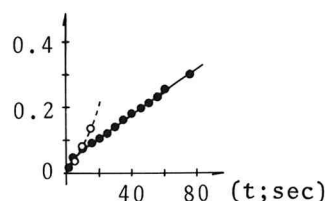
S_o, S_w Point Injection



Type-4

- ; Water→Oil
 $\Delta h = 0\text{cm}$
- ; Oil→Water
 $\Delta h = 0\text{cm}$

S_o, S_w Point Injection



Type-5

<Notation>

S_o ; Degree of saturation for seeping oil, V ; Mean velocity of small
 S_w ; Degree of saturation for seeping water, time interval

図-4 代表的な割れ目モデル finger 浸透速度、飽和度と時間の関係

で entrap してしまう。さらに、飽和度の時間的变化に注目すると、やはり $M > 1$, $M < 1$ の場合ではその増加率が異った傾向を示していることが判かる。

界面付近の一つの finger に注目すると、力関係はすでに述べたように、粘性力、圧力、表面張力の三者で決まる流れであるが、界面の安定・不安定に大きく関与するのは表面張力である。ある finger の二流体の界面にミクロに着目すると、流路内では流路壁と界面の接触角 θ 、表面張力 T 、曲率半径 R に関係した毛管圧力 P_c を生む。この毛管圧力は浸入距離に無関係に存在して、流路中では常に θ 、 T に比例し、 R に逆比例した毛管圧力が二流体に作用する外圧力に加え、作用している。したがって、流路中の二相流内の圧力分布は必ず界面をはさんで急激な変化をする。この事は fingering 現象を考える際は重要であって、毛管圧力は entrap された流体（たとえば、水の中の空気）内の圧力を上昇させ、連結流路網にミクロ的に複雑な圧力分布を生む原因となる。また、流路網のある位置で作用圧力が界面力より小さくなると自閉流体塊を作り易くなり、mobility ratio で評価したものと別に界面力による不安定性とも見れる不連続流場が生れる。

基本的に一様流路の保存式、Buckley-Leverett³⁾ 式が成立ち、重力、表面張力を考えず、

$$\lambda A \frac{\partial S_w}{\partial t} + \frac{\partial Q_w}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$\lambda A \frac{\partial S_o}{\partial t} + \frac{\partial Q_o}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

$$S_o + S_w = 1, \quad (5)$$

$$\partial(Q_o + Q_w)/\partial x = \partial Q/\partial x = 0, \quad (6)$$

となる。ここで、 S_o ；油の飽和度、 S_w ；水の飽和度、 Q_w , Q_o ；各々水、油の流量、 Q ；全流量、 A ；断面積、 λ ；空隙率である。

運動の式は Darcy 則より、水、油の速度、 V_w , V_o が

$$V_w = \frac{Q_w}{A} = -k \frac{k_{rw}}{\mu_w} (S_w) \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (7)$$

$$V_o = \frac{Q_o}{A} = -k \frac{k_{ro}}{\mu_o} (S_w) \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (8)$$

となる。ここで、 k ；単相の透水係数、 k_{rw} , k_{ro} ；各々水、油の相対浸透係数、 μ_w , μ_o ；各々水、油の粘性係数である。式(6)が成立つ事は実験的に明らかで、式(6)より $Q = \text{const}$ である。

むすび

本研究は岩盤の割れ目に見られるような、異方空隙を基本的な形でモデル化して、そこでの水と油の如く物理特性の違った流体を用いた、二相浸透流の性質を実験的に検討してみたわけである。今回はまずその基礎的性格・機構の究明に重点をおき、その流体力学的把握・取扱いについて若干考察したが、こういった二相流個有の fingering 現象、その安定・不安定に関しては mobility ratio を用いて一応説明できるものの、二相流の界面の巨視的・工学的な意味での平面・空間的な挙動・拡がりや fingering のごとき局所的な運動をどう結びつけて扱えばよいか、さらに、実際の岩盤割れ目の評価とこれらをどう結びつけていけばよいかなど残された問題はある。しかし、今回の実験では少なくとも岩盤二相流の性格・機構はある程度明らかにされたものと思われるので、さらに発展的研究成果はこれらの成果をふまえて、別の機会に新たに報告する予定である。

参考文献・資料

- 1) 佐藤・渡辺；岩盤の透水性に与える種々の crack 性状の影響、埼玉大・地盤水理年報，vol.4, S53
- 2) R. J. M. De Wiest；Flow through porous media, Academic Press, 1969, pp.455～
- 3) J. Bear；Dynamics of fluid in porous media, Amer.Elsevier, 1967, pp.468～