

岩の溶質分散・拡散係数の実験的研究
Experimental Determination of Dispersion Coefficient
with Solute Matter in Rocks

埼玉大学工学部

正員 佐藤 邦明

㈱三菱金属中央研究所(埼玉大学研究生) 正員○佐々木 康夫

はじめに

鉱山周辺の土壌汚染の問題や放射性廃棄物を含めた産業廃棄物処理の重要性が増しつつある。これらの問題にはしばしば岩盤浸透流に伴う物質分散・拡散現象が水理学的側面から関与してくる。従来、砂、ガラス球充てん層などを用いた物質分散・拡散現象に係わる研究は多いが、それらの結果をそのまま岩盤に適用することはかならずしも適切でないと思われる。しかし、岩石の場合の物質分散・拡散を対象とした研究がほとんどなされていないのが現状であるので、われわれはまずほぼ等方・均質に近いと考えられる4種類の岩を選び、岩そのものの縦方向塩分分散・拡散係数の測定を試みた。その結果、2、3の知見を得たので、それらについて以下に報告する。

1. 実験装置と実験方法

(1) 実験装置

本研究に用いられた実験装置は図-1、写真-1、2に示したように溶液加压部(図-1、写真-1、2の①、②)、モールド部③、導電率計測プローブ⑦、および計測・記録装置⑨、⑩などから構成される。

図-1において、①は高圧窒素ガスボンベ、②は容量約20ℓの溶液タンクで溶液中に窒素ガスが溶解しないようにゴムバルーンが挿入されている。③は0～6 kg-f/cm²の範囲で任意の圧力を設定できる圧力調整バルブ、⑤は直径8 cm、長さ30 cmの大きさまでセットできるステンレス製モールド、⑥は今回用いた直径5.5 cm、長さ15 cmの試料、⑦は直径0.4 cm、長さ56 cmの導電率計測プローブ、⑧は浸透流量計測用メスシリンダー、⑨は導電率計、⑩は記録計である。また、ト

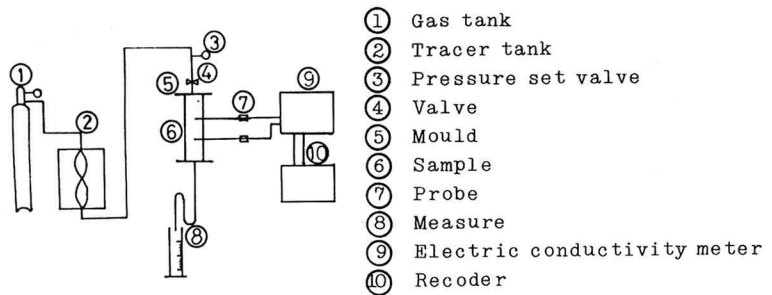


図-1 実験装置の略図

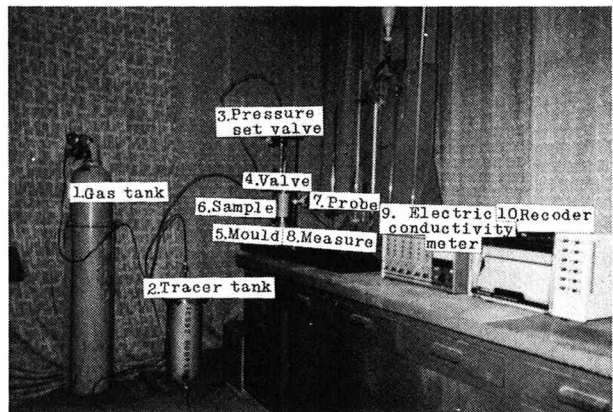


写真-1 実験装置の全景

レーサーは容易に作れ、岩に比較的吸着されにくく、しかも計測装置が一般化していることから薄い塩水を用い、その溶液濃度は1%とした。

これらの装置により一定圧力に保たれた溶液が試料上面から試料中を流れ、その時の塩水濃度の経時的变化を、試料上端から0.05 m、0.10 mに挿入されている導電率計測プローブにより計測し、記録計で連続的に記録させる。浸透流量は実験終了と同時にメスシリンダーから計量する。

(2) 実験試料

今回の実験では、測定方法、解析方法などを考慮し、容易に入手でき、等方・均質に近い岩という条件から福島県産の白河凝灰岩、江持凝灰岩、神奈川県産の新小松安山岩、栃木県産の大谷凝灰岩の4種類を選定した。

試料はこれら4種類とそれぞれ800℃加熱後水中投入急冷により空隙率を変化させた4種類の計8種類を用いた(以後、前者は無処理、後者は加熱処理と記述する)。

試料の作成手順は、まず角柱状の大型試料から0.06×0.06×0.35 m程の角柱状に切出し、旋盤を用い直径0.05 mに切削する。次に長さ0.16 m程に切断し、物性値の測定と加熱処理を行う。

このあと、接着剤を用いて試料周囲を完全にシールし、接着剤固結後上下両端面を平面研削盤で平行かつ長さ0.15 mに仕上げる。

導電率計測プローブ投入孔は径0.006 m、深さ0.03 mとし、試料中の浸透流速になるべく影響をおよぼさない様に、挿入角度をずらして、上端から0.05 m、0.10 mの位置に設けた。

このような手順で作成した8種類の物性値は表-1に示した通りであり、写真-3にはシール前の試料の様子が示してある。写真において、各試料とも左側は無処理、右側は加熱処理である。

表-1が示すように、白河凝灰岩と江持凝灰岩は各物性値とも同程度を示し、新小松安山岩はこれらの試料より密度がやや大きく、空隙率、吸水率は逆に幾分小さくなっている。大谷凝灰岩は他の3試料に比較し、

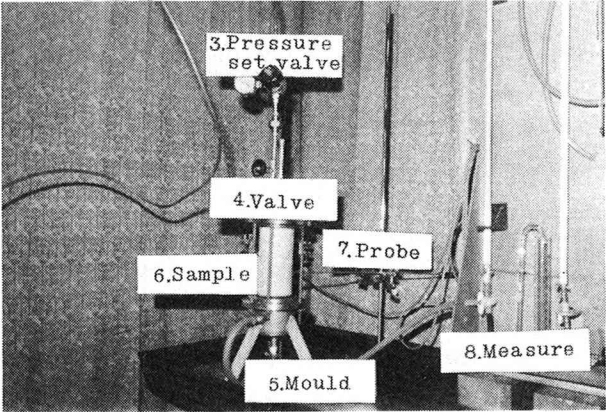


写真-2 透水試料付近の拡大

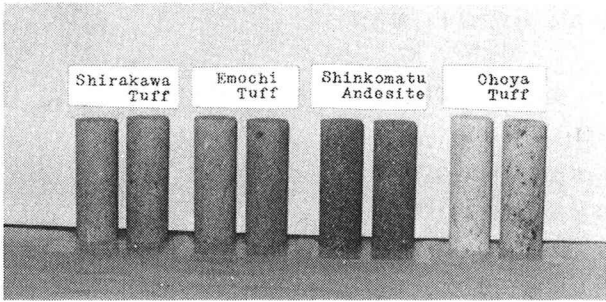


写真-3 実験試料（左側：無処理，右側：加熱処理）

表-1 実験試料の物性値

試料名	供試体番号	加熱処理の有無	空隙率(%)		吸水率(%)	密度(g/cm ³)	
			加熱前	加熱後		乾燥密度	湿潤密度
白河凝灰岩	S-1	無処理	19.0		9.19	2.07	2.26
	S-2	加熱処理	22.1	24.3	12.1	2.00	2.25
江持凝灰岩	E-1	無処理	21.0		10.3	2.05	2.26
	E-2	加熱処理	23.0	25.4	12.8	1.98	2.23
新小松安山岩	K-1	無処理	16.3		7.20	2.26	2.42
	K-2	加熱処理	17.3	18.7	8.49	2.20	2.39
大谷凝灰岩	O-1	無処理	35.9		25.4	1.42	1.78
	O-2	加熱処理	39.4	44.5	33.0	1.35	1.79

2 倍近い空隙率を示し、かつ密度もきわだって小さい。加熱処理による空隙率の増加は大谷凝灰岩が 5 % 程増加したほかは、いずれも 2 % 前後で予想された値よりかなり小さくなっている。

(3) 実験方法

実験手順は図-1 に基づいて述べると、まず、試料⑥を⑤のモールドにセットし、試料の上・下面から水漏れを起さないように、モールドと試料上・下面にラバーパッキンを挿入して十分緊締する。つぎに、あらかじめ試験溶液でキャリブレーションを行っておいた⑦の導電率計測プローブを投入孔に挿入し、接着剤で接着する。接着剤が完全に固結したのち（約 8 ～ 10 時間経過させる）、予備試験として②のトレーサータンクの替りに蒸留水入りの圧力タンクを用い、①のガスタンク、⑤のモールドに配管し、⑦のプローブ、⑨の導電率計、⑩の記録計を結線する。つぎに、①のガスタンクのバルブを開き圧力タンクに適当な圧力をかけ、④のバルブを開きながら③の圧力調整バルブを開き配管およびモールド上部の空気を排除する。完全に空気が排除されたのを確認して④のバルブを閉じ試料に蒸留水を作用させる。この状態で数時間から数 10 時間置き、導電率計測プローブの接着箇所からの水漏れの有無、浸透水量などを計測する。この予備試験の結果から本試験の作用圧力、記録紙の送り速度などを決定する。

本試験では蒸留水入りの圧力タンクから②のトレーサータンクに配管替えを行い、予備試験結果に基づいて③の圧力の調整バルブの圧力、試験紙の記録紙送り速度を設定する。これらの準備が完了したら、予備試験と全く同じに④のバルブを開きながら③の圧力調整バルブを開き塩水を送り込む。空気が完全に排除されたのを確認して④のバルブを閉じ、同時に記録計をスタートさせる。

測定は記録紙に連続的に記録され、試料上端から 0.10 m の位置に挿入されている導電率計測プローブの示す値が漸近一定値になるまで継続される。測定終了と同時にメスシリンダーの浸透流量を計量する。

2. 分散・拡散係数の決定法

今、図-2¹⁾のような縦方向（x 軸方向）の分散・拡散物質の質量保存の式は次のように書ける。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

- ここで、C : 分散・拡散物質の濃度
- u : 浸透速度
- D_x : 縦方向分散・拡散係数
- x : 浸透する方向

とする。

(1) 式において、初期・境界条件を次のように与えた場合に

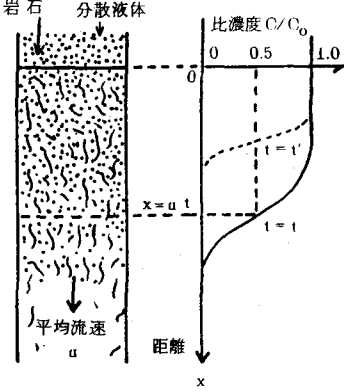


図-2 縦方向分散・拡散

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

Harleman と Rumer²⁾ は

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x-ut}{2(D_x t)^{1/2}} \right\} + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{ux}{D_x} \right) \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x+ut}{2(D_x t)^{1/2}} \right\} \quad (2)$$

と解を与えている。

実験値から Dx を求める手順は、記録紙の漸近一定値を濃度 C_0 とし、ある時間 t における濃度 C の値を読み取り、 C/C_0 の値を求め、(2)式から算出した。

3. 実験結果

測定結果の一例が図-3～図-6に示されている。いずれも比濃度 C/C_0 と経過時間（分または時）の関係が上端から距離 $x = 0.05\text{ m}$ 、 $x = 0.10\text{ m}$ に置かれたプローブの同時計測によりプロットされている。

図-3は江持凝灰岩の無処理で、表-2中、 $x = 0.05\text{ m}$ 、 0.10 m の平均浸透流速 $\bar{u} = 2.31 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ 、同じく平均縦方向分散・拡散係数 $Dx = 4.8 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 、後述する空隙率換算寸法 d^* を用いて求めた $Re = 12.8 \times 10^{-3}$ の場合である。

図-4は同じ江持凝灰岩の加熱処理で、 $\bar{u} = 21.6 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ 、 $Dx = 33.5 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 、 $Re = 128 \times 10^{-3}$ の場合であり、加熱処理を行うことにより各値とも1桁大きくなっている。

図-5は新小松安山岩の無処理で、 $\bar{u} = 39.0 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ 、 $Dx = 133 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 、 $Re = 180 \times 10^{-3}$ の場合である。

図-6は新小松安山岩の加熱処理で、 $\bar{u} = 53.8 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ 、 $Dx = 235 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$ 、 $Re = 280 \times 10^{-3}$ の場合であり、加熱処理を行っても江持凝灰岩ほど増加していない。

いずれも、分散・拡散は下流方向距離の増加に従い大きい事が分る。また、実測値と理論曲線の C/C_0 値が0と1.0に近い範囲で合致しなくなる傾向が見られる。特に1.0に近い程この傾向は顕著になるが、これは試料中に設けた径 0.006 m のプローブ投入孔の影響であると思われる。

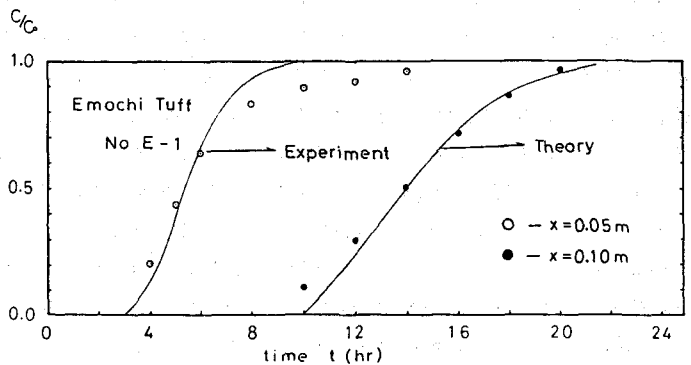


図-3 江持凝灰岩の場合の理論破過曲線と実験値（無処理）

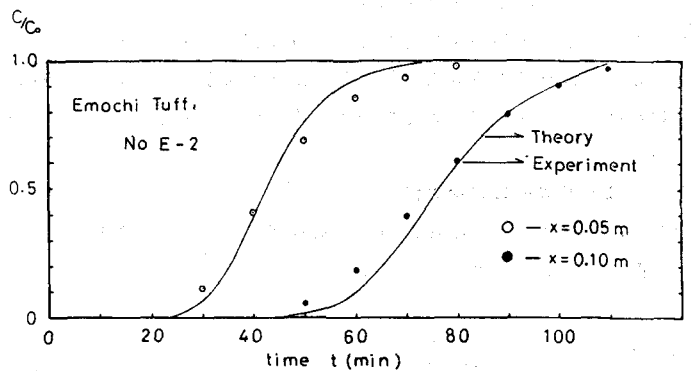


図-4 江持凝灰岩の場合の理論破過曲線と実験値（加熱処理）

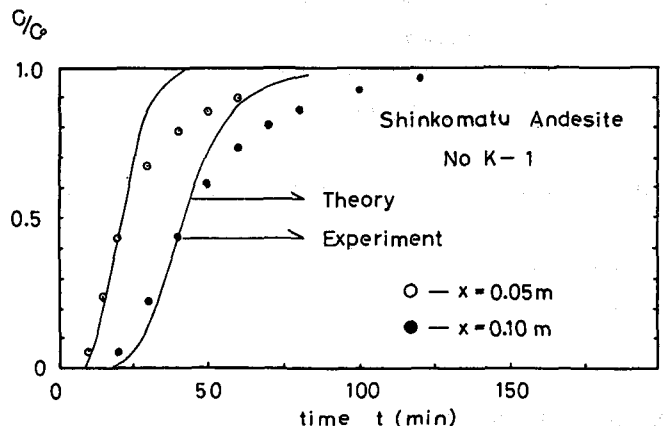


図-5 新小松安山岩の場合の理論破過曲線と実験値（無処理）

大谷凝灰岩の無処理試料は 3.85 kg.f/cm² の圧力で3日間実験を継続してもほとんど浸透流量が認められなかったが、これは試料中に含まれるモンモリロナイトが吸水膨脹し、空隙部分を閉塞した影響であると思われる。

つぎに、Re 数と Dx の関係について述べるが、一般に砂粒・ガラス球充てん層などの実験では、Re 数算出の場合、その代表寸法(d)として実験に供した試料の平均粒径を用いるのが普通である。しかしわれわれは岩そのものを用いた実験を行っており、従来のように容易に代表寸法を求めることはできない。このため、新に粒径 d の替りに空隙率換算寸法 (d*)を用いることにした。これは単位体積中の空隙体積 (V_λ) を単位長さの円管に換算する方法で次のような式で表わされる。

$$d^* = 2 \cdot \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \ell$$

- ここに
- d : 空隙率換算寸法 (m)
 - λ : 空隙率
 - ℓ : 単位長さ (m)

とする。

このようにして求めた Re 数は、従来の平均粒径 d を用いる Re 数の定義と異なり、両者を同一に取扱うことはできないが、参考までに Re 数と Dx/ν の関係を求め、その結果を図-7 に示した。図中、破線で表わしたものが Harleman - Rumer の実験式で、参考として併せて示した。

今回実施した実験結果をまとめて示したのが表-3 である。表中注目されるのは、火山細屑岩である白河凝灰岩、江持凝灰岩や堆積岩の大谷凝灰岩と火成岩である新小松安山岩では、浸透流速(ū), 透水係数(k)などの値に顕著な差が見られることである。(大谷凝灰岩の無処理の場合を除く)。すなわち凝灰岩類の場合は火成岩の新小松安山岩に比べ空隙率が大きいにもかかわらず無処理で浸透流速、透水係数とも逆に1桁以上小さくなっている。また加熱処理では、空隙率が2%程増加することにより、浸透流速、透水係数などは1桁以上増加している。一方、新小松安山岩は凝灰岩類に比べ空隙率は小さいが浸透流速、透水係数などは大きく、加熱処理後もそれらの値は30～40%増加するのみで、凝灰岩類に比べその増加率は小さい。

これらの結果は、凝灰岩類と火成岩類では熱による影響に差があることを示していると同時に、空隙の形

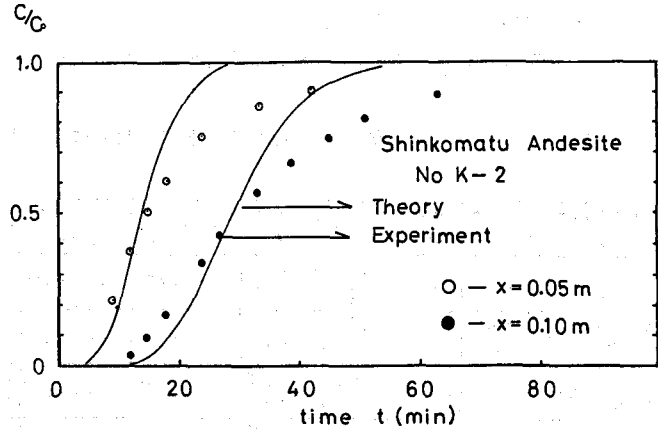


図-6 新小松安山岩の場合の理論破過曲線と実験値 (加熱処理)

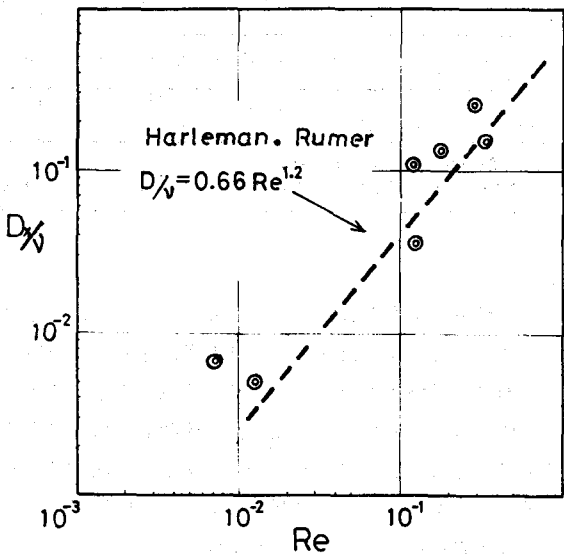


図-7 Re と Dx/ν の関係

状・分布などが岩種の違いによりかなり異っていることも示唆している。更に、浸透流速の比較的小さい白河凝灰岩、江持凝灰岩の無処理の場合は、分子拡散現象が影響を与えるものと考えられる。

表一 3 実験による縦方向分散・拡散係数値

試料名	供試体番号 および加熱 処理の有無	浸透密度 ($\times 10^{-3}$)	空隙率 (%)	浸透流速 u_e (m/s)	浸透流速 (m/s)		透水係数 (m/s)	拡散係数 D_x (m^2/s)		代表寸法 d^* (m) ($\times 10^{-3}$)	レイノルズ数 Re
					浸透流速 u	平均値 $\bar{u}$		拡散係数	平均値		
白河凝灰岩	S-1 (無処理)	2.25	19.0	1.23×10^{-6}	1.20×10^{-6} 1.60×10^{-6}	1.40×10^{-6}	1.00×10^{-9}	5.80×10^{-9} 7.00×10^{-9}	6.40×10^{-9}	4.92	7.86×10^{-3}
	S-2 (加熱処理)	2.25	24.3 (22.1)	13.2×10^{-6}	2.40×10^{-6} 1.60×10^{-6}	2.00×10^{-6}	2.33×10^{-9}	9.00×10^{-9} 1.10×10^{-9}	1.00×10^{-9}	5.56	1.22×10^{-3}
江持凝灰岩	E-1 (無処理)	2.26	21.1	1.64×10^{-6}	2.65×10^{-6} 1.98×10^{-6}	2.31×10^{-6}	1.58×10^{-9}	4.80×10^{-9} 4.80×10^{-9}	4.80×10^{-9}	5.80	1.28×10^{-3}
	E-2 (加熱処理)	2.23	25.4 (23.0)	20.9×10^{-6}	2.00×10^{-6} 2.20×10^{-6}	2.10×10^{-6}	6.10×10^{-9}	2.70×10^{-9} 4.00×10^{-9}	3.5×10^{-9}	5.69	1.28×10^{-3}
新小松安山岩	K-1 (無処理)	2.42	16.3	28.2×10^{-6}	39.0×10^{-6} 39.0×10^{-6}	39.0×10^{-6}	4.79×10^{-9}	9.50×10^{-9} 1.70×10^{-9}	1.33×10^{-9}	4.56	1.80×10^{-3}
	K-2 (加熱処理)	2.39	18.7 (17.3)	34.9×10^{-6}	53.8×10^{-6} 53.8×10^{-6}	53.8×10^{-6}	7.70×10^{-9}	1.90×10^{-9} 2.80×10^{-9}	2.35×10^{-9}	4.88	2.87×10^{-3}
大谷凝灰岩	O-1 (無処理)	1.78	35.9	3.85 $kg-f/cm^2$ の水圧で、3日間透過しなかつた。						6.76	—
	O-2 (加熱処理)	1.79	44.5 (39.4)	2.79×10^{-6}	4.07×10^{-6} 4.07×10^{-6}	4.07×10^{-6}	1.66×10^{-9}	1.40×10^{-9} 1.40×10^{-9}	1.40×10^{-9}	7.53	3.42×10^{-3}
注 u_e : 浸透流量による u : 透過曲線による。 代表寸法 (d^*) は空隙率換算寸法である。 浸透流速 (u) 拡散係数 (D_x) の上段の値は試料上端から 0.05m、下段の値は 0.10m の値である。 空隙率のカッコ内は加熱処理時の値である。											

まとめ

従来から数多く研究されてきた砂・ガラス球などによる分散係数の測定を、今回、実際の岩を用いて試みた。実験に用いた岩はほぼ等方・均質と考えられる白河凝灰岩、江持凝灰岩、大谷凝灰岩および新小松安山岩の4種類で、試料は各岩とも 800℃加熱急冷を施し空隙率を大きくさせたものを加え8試料であった。

本実験により、岩の場合の分散・拡散係数も普通の多孔体と同様に測定できることが判明し、新に定義した空隙率換算寸法 (d^*) を用いて求めた Re 数と D_x の関係を参考として、Harleman — Rumer の実験式とともに示した。また、火成岩の新小松安山岩と白河凝灰岩、江持凝灰岩などでは、加熱急冷による影響度合が異なり凝灰岩類程、大きい影響を受けた。

しかし、今回の凝灰岩類、火成岩類などのように岩種が異なる場合には、浸透流速、透水係数などの推定には岩質の差異に加えて、空隙形状・分布なども考慮する必要があると思われる。

以上のような実験の結果をふまえて、今後多くの試料について実験を継続し、実験手法の確立と現位置での適応をめざしていきたいと考えている。

参考文献

1) 本間 仁・林 泰造：水理学，丸善出版，pp.301～309
2) D.R.F.Harleman and R.R.Rumer：Longitudinal and lateral dispersion in an isotropic porous medium, J.Fluid Mech, Vol 16, 1963. pp. 385～394
3) 室田 明・佐藤 邦明：浸透流によるトレーサの分散係数について，土木学会関西支部講演会・1969 pp. II-10-1～4