

岩盤熱水浸透流における温度伝導率の実験的研究
Experimental determination of thermal diffusivity with
heated water seepage in rocks

埼玉大学工学部 正会員 ○佐藤 邦明
三菱金属中央研究所 “ 佐々木康夫
(埼玉大学研究生)

はじめに

地熱やエネルギー備蓄などに係わって、岩石、岩盤中の伝熱問題が注目されつつあるが、多孔媒体、岩石、岩盤の伝熱パラメーターが含水状態や流れによってどういった値をとるか、あるいは伝熱現象そのものの性質がどうなるかといった基本的な事柄について不明の点が多い。これらに関し、著者の一人はすでに、粒状多孔媒体（ガラス球、砂、シルト等）を対象に伝熱実験を試み、関係パラメーターを測定した。^{1), 2)}しかし、岩石・岩盤の場合については未知のままであったので、今回4種類の岩石を用いて、乾燥、飽和状態および熱水浸透流のある場合について、特殊な装置を考案・工夫して伝熱実験を実施した。その結果、岩石における伝熱の性質、および温度伝導率が明らかとなったので、粒状多孔媒体の場合と比較しつつ述べ、岩石についての伝熱特性を明らかにする。

1. 実験装置・実験方法

本実験においては、大別して乾燥、飽和岩石の伝熱と飽和熱水浸透流による伝熱の二つの場合の実験が行なわれた。図-1は乾燥、飽和岩石の伝熱実験に用いられる装置の概略とシステムを示すものである。同様に図-2は飽和熱水浸透流による伝熱実験装置の概略である。図-1, 2に従って実験装置と各部の機能、実験方法について説明する。

まず、図-1中、装置の各部は番号に対応し、①温水タンク（径0.3m、高さ0.40mの円筒）、②電気ヒーター、③岩石試料（径0.055m、長さ0.15mの円柱状）、④下部円筒状恒温部、⑤サーミスタープローブ針（径0.32cm、長さ25cm）、⑥循環冷却水、⑦自動温度記録装置、⑧断熱材（発泡スチロール）である（写真-1参照）。本実験では、①温水タンクと④下部円筒状恒温部で定温差を与えて、乾燥、飽和岩石試料中の温度経時変化を定点（試料上端から、 $x=0.05m, 0.10m$

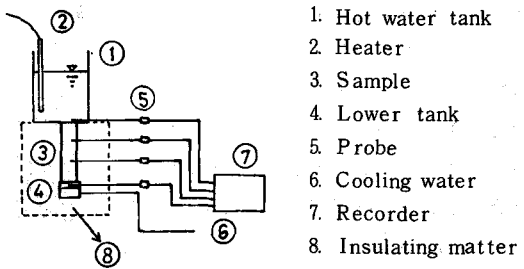


図-1 岩石の伝熱実験装置の概略

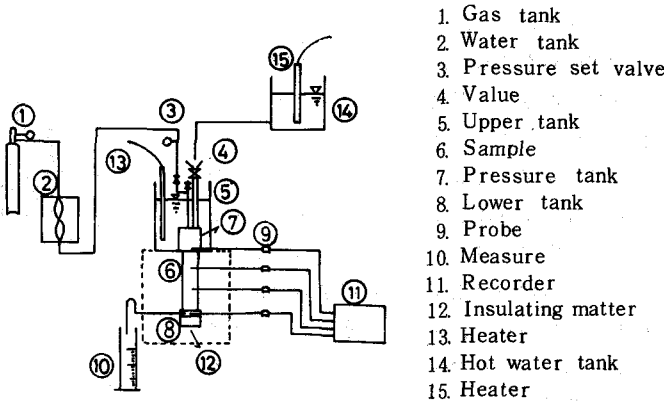


図-2 強制移流を伴う熱水浸透実験装置の概略

の2点)で測定する。実験手順は、岩石試料を作り、プローブ径より少し大きい二孔を深さ(3.0 cm)で削孔する。つぎに、乾燥か湿潤状態の試料を断熱材中に格納し、サーミスタープローブを外側からそう入し、先端を試料孔に入れる。そこで、温水タンクに熱水を入れ、ヒーターにより100℃に沸騰加熱し、同時に、下部恒温部に冷却水を循環させ、自動温度記録装置を移動させた後、岩石試料の上下端にそれぞれ熱水タンクと下部恒温部を接触させる。このような手順で岩石試料中の温度経時変化を計る。

つぎに、飽和熱水浸透流による伝熱は図-2において、①ガスボンベ(最大圧150 kg/cm², 窒素ガス), ②水槽(径20 cm, 高さ50 cm), ③, ④バルブ, ⑤上部タンク(径30 cm, 高さ40 cm) ⑥岩石試料(径5.5 cm, 長さ15 cm, 厚さ0.05 cmのアクリル系樹脂剤で側壁凝固), ⑦水圧タンク(径7.0 cm, 高さ10 cm, 水圧2.2 kg/cm²), ⑧下部流出タンク(径5.5 cm, 高さ5 cm), ⑨サーミスタープローブ, ⑩メスシリンダー, ⑪自動温度記録装置, ⑫断熱材, ⑬電気ヒーター, ⑭温水タンク(50×50 cm 高さ50 cm)によって実験する(写真-2 参照)。本実験において加圧熱水は①, ②, ③を通じ, ⑦水圧タンクから試料中の浸透する。この際, ⑤上部タンクは定温用であり, ⑭, ④, ⑦への系は初期熱水注水に供する。実験手順は, 岩石試料を作り, 岩石試料の周辺を樹脂で凝固させ, サーマスタープローブ孔を削孔する。つぎに, 脱気水で試料を飽和し, 削孔に空気が入らないようにしつつプローブをそう入した後, 樹脂で間隙を完全凝固させる。そこでプローブの付いた飽和岩石試料を断熱材中に格納し, 結線する。同時に⑦水圧タンクと⑧下部流出タンクも樹脂で接着しておく。これ

で実験準備が終わり, ⑤上部タンクに100℃の温水を入れると同時に100℃の⑭温水タンクから, ⑦水圧タンクに注水し, 満水状態で④バルブをしめ, ⑬, ⑭電気ヒーターで加熱する。同時に, ⑪自動温度記録装置を稼働させ, ③バルブを開放し, 熱水浸透が起こる。上述の手順を可及的速やかに遂行し, 移流がある場合

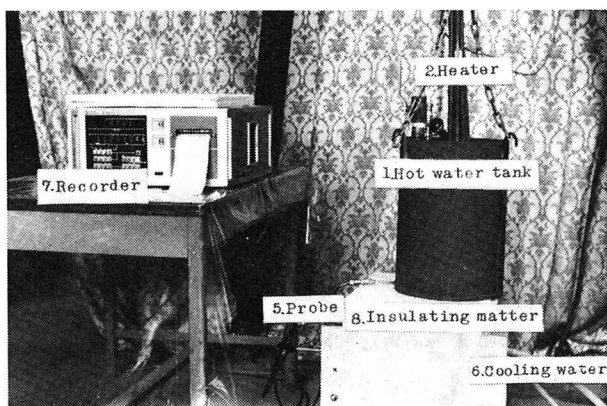


写真-1 岩石伝熱実験装置の各部

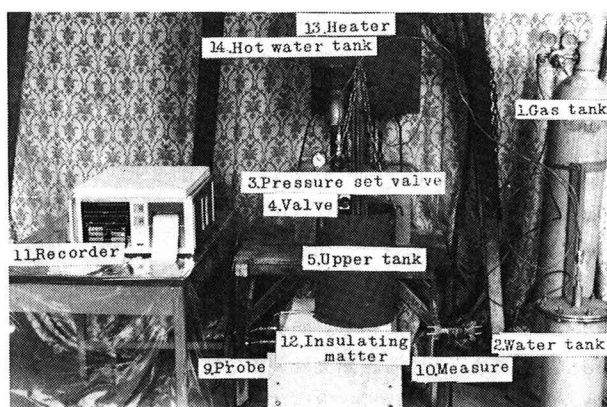


写真-2 熱水浸透実験装置の各部

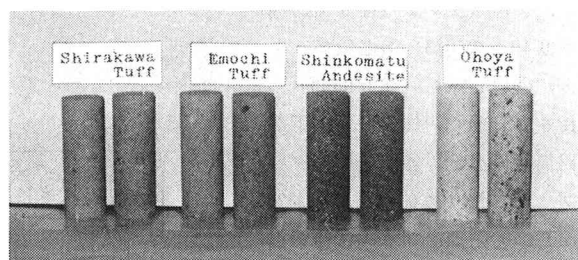


写真-3 岩石試料(左側が採取した自然状態, 右側は800℃加熱後冷却した状態)

の伝熱が岩石試料中で経時計測されることになる。岩石試料の上下端における境界温度は常に計られ、浸透流量は⑩メスシリンダーで計られる。

実験に用いた岩石試料は岩石の中では比較的多孔質のものであり、福島県産の白河、江持凝灰岩、神奈川県産新小松安山岩、および栃木県大谷石であった。岩石の透水性や空隙率は風化の程度によってずいぶん変化するから、本実験においては、岩石の強熱風化法によって人為的風化を試みた。つまり、800℃に加熱した岩石を水冷する。岩石自体の物性については、空隙率、吸水率、透水係数、密度、および比熱が計られた。これらの値については表-1にまとめて示した。

2. 実験結果と温度伝導率の決定

上述した実験手順に従って、4種類の岩石について伝熱実験を行ない、試料中の二点における温度経時変化を測定したわけであるが、これらの結果を用い、伝熱パラメーターの中でも大切な温度伝導率 (thermal diffusivity) を決定する。

本実験においては、乾燥・飽和岩石の伝熱と熱水浸透流のある伝熱に分けられるが、図-3にそれぞれの場合に対する伝熱モデルを示している。まず、乾燥・飽和岩石の伝熱については、図-3(a)に示したように、ある初期温度 T_i の岩石の上下端にそれぞれ T_o, T_ℓ の境界温度を与えた時、岩石中の任意点での温度経時変化を計ったことになる。そ

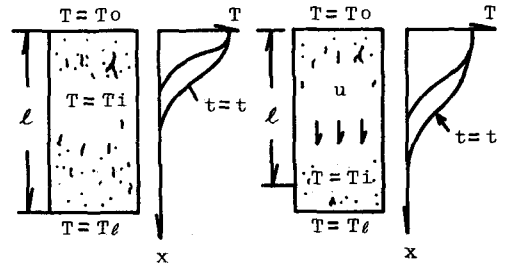


図-3 伝熱実験と理論の条件

の場合のフーリエの伝熱方程式、初期・境界条件、および解はつぎのように表わせる。¹⁾

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad a = \frac{\kappa}{\rho c}, \quad \left. \begin{array}{l} x=0, \quad T=T_o, \quad t \geq 0 \\ x=l, \quad T=T_\ell, \quad t \geq 0 \\ t=0, \quad T=T_i, \quad x > 0 \end{array} \right\}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{T-T_o}{T_\ell-T_o} &= \frac{x}{l} + \frac{4}{\pi} \frac{(T_i-T_o)}{(T_\ell-T_o)} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{(2s-1)} e^{-a \frac{(2s-1)^2 \pi^2}{l^2} t} \sin \frac{(2s-1)\pi}{l} x \\ &+ \frac{2}{\pi} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{(-1)^s}{s} e^{-a \frac{s^2 \pi^2}{l^2} t} \sin \frac{s\pi}{l} x, \quad (s=1, 2, 3, \dots), \quad (3) \end{aligned}$$

ここで、 T : 温度, T_o, T_ℓ, T_i : 各々岩石試料の上, 下端, および初期温度, x : 伝熱方向距離, l : 試料長, a : 温度伝導率, ρ : 密度, c : 比熱, t : 時間, κ : 熱伝導率である。

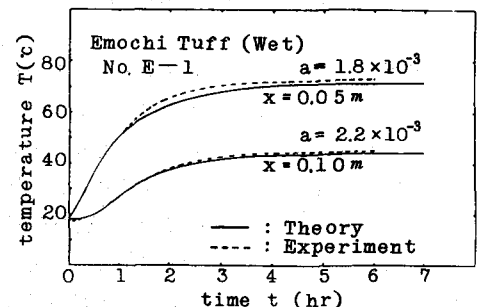
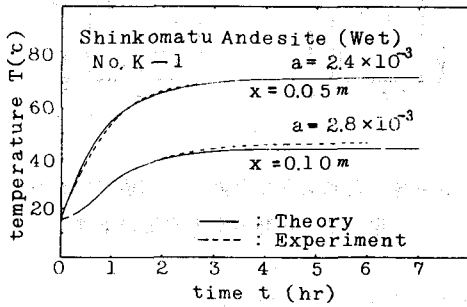
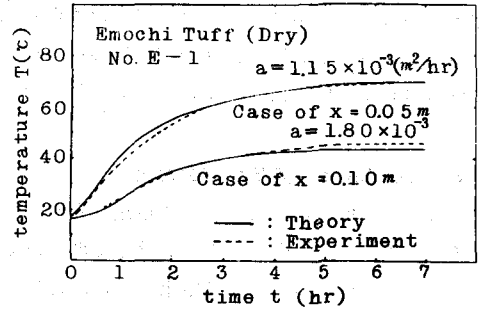
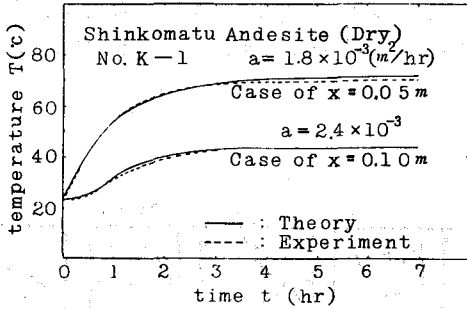
一方、図-3(b)に示した移流のある場合の伝熱方程式、初期・境界条件、および解は、それぞれ式(4), (5), (6)のようになる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \epsilon \frac{\partial \theta}{\partial X} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}, \quad \left. \begin{array}{l} X=0, \quad \theta=1, \quad \tau \geq 0 \\ X=1, \quad \theta=0, \quad \tau \geq 0 \\ \tau=0, \quad \theta=0, \quad X > 0 \end{array} \right\}, \quad (5)$$

$$\theta = \frac{e^{\frac{\epsilon}{\alpha} X} - e^{\frac{\epsilon}{\alpha}}}{1 - e^{\frac{\epsilon}{\alpha}}} - \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2}{s\pi} \frac{1}{\left\{ \left(\frac{\epsilon}{2\alpha s\pi} \right)^2 + 1 \right\}} e^{\frac{\epsilon}{2\alpha} X} \sin(s\pi X) e^{-\alpha \{ s^2 \pi^2 + (\frac{\epsilon}{2\alpha})^2 \} \tau}, \quad (6)$$

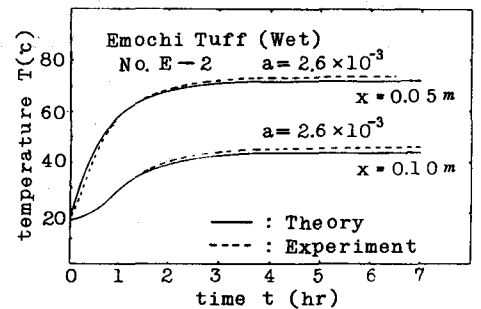
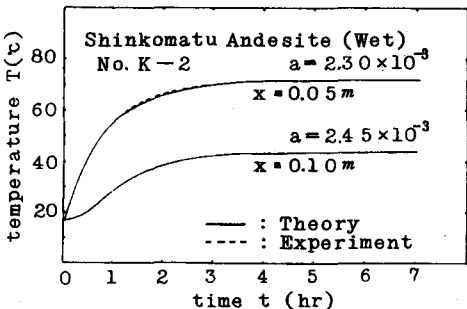
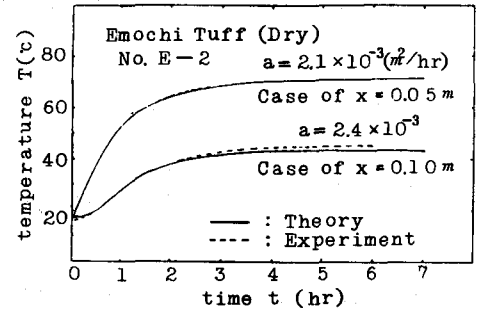
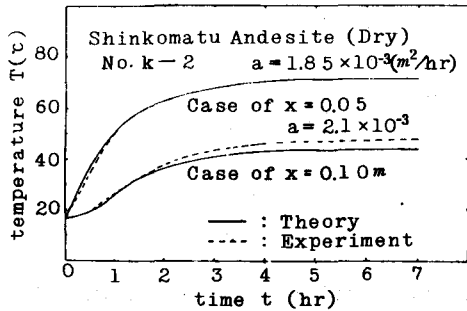
ここで, $\theta = (T - T_\ell) / (T_0 - T_\ell)$, $\tau = ut/\ell$, $X = x/\ell$, $\alpha = a/\ell u$, $\epsilon = (\rho c)_f / (\rho c)$,
 $(\rho c)_f$: 流体の熱容量, (ρc) : 等価熱容量, u : 移流速である。

式(3), (6)を用いると温度伝導率 a を決めることが出来る。



(a) 自然状態の新小松安山岩の場合

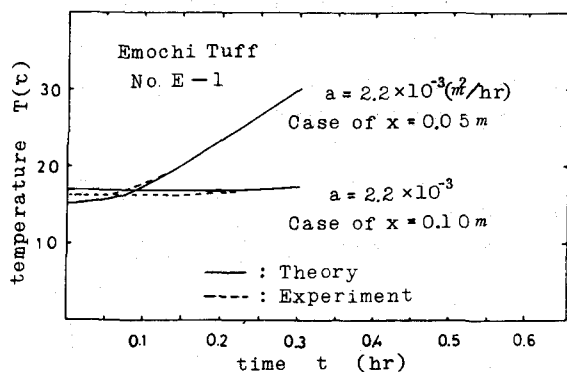
(b) 自然状態の江持凝灰岩の場合



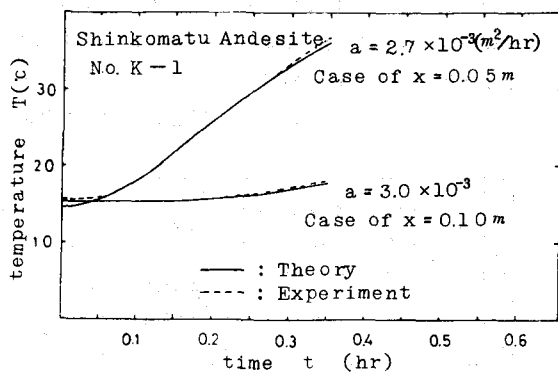
(c) 強熱風化の新小松安山岩の場合

(d) 強熱風化の江持凝灰岩の場合

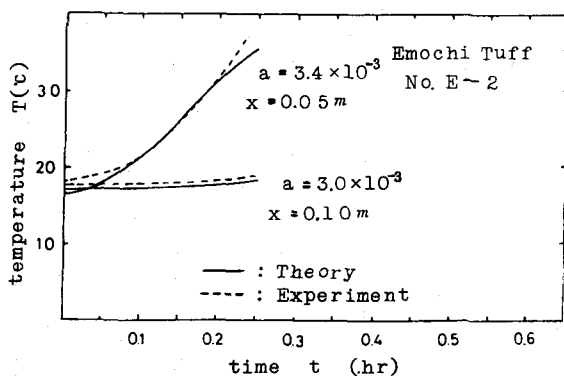
図-4 新小松安山岩と江持凝灰岩の伝熱実験結果及び実験と理論温度経時変化の比較



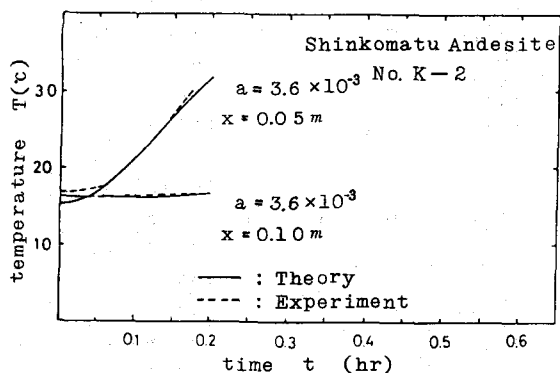
(a) 自然状態の江持凝灰岩の場合



(b) 自然状態の新小松安山岩の場合



(c) 強制風化の江持凝灰岩の場合



(d) 強制風化の新小松安山岩の場合

図一五 熱水浸透流を伴う伝熱実験結果及び実験と理論温度経時変化の比較

伝熱実験は4種類の岩石について、乾燥、湿潤、移流の場合が行なわれ、表一に示したように合計24ケースであった。岩石試料中上端から $x=0.05\text{ m}$ 、 0.10 m の位置での実測温度経時変化の数例が図一4に示されている。図一4は(a)(b)が自然状態の新小松安山岩と江持凝灰岩の場合であり、(c)(d)が強熱風化の新小松安山岩と江持凝灰岩の場合である。いずれの実測温度経時変化も時間と共にそれぞれの位置での定常温度に収束する。図中、点線が実測であり、実線は式(3)による best fit させた理論値である。従って実測と理論の温度経時変化を best fit させた時の温度伝導率が求める値となる。図中、判読できるように実測と理論はかなりよく一致しているが、温度伝導率 a の値が測定位置によって多少違っていることに気付く。もし、岩石が均質であり、測定に誤差がなければ、測定位置に無関係に a の値は同じになるはずである。恐らく、サーミスタプローブとそう入孔壁接触の関係による差異ではないかと考えている。このようにして得られた a の値は表一にまとめて示しておいた。

一方、熱水浸透流を伴う伝熱実験結果の数例は図一5に示されている。浸透流を伴う場合の伝熱では岩質伝熱に移流による伝熱が付加された形で熱が輸送されるから、理論では移流による伝熱分が飽和岩石の場合より大きくなるはずである。図一5中(a)、(b)は自然状態の江持凝灰岩、新小松安山岩の場合であり、(c)、(d)は強熱風化の江持凝灰岩、新小松安山岩の場合である。図一4の場合と同様に点線が実測結果であり、実線が best fit した理論曲線を式(6)から示したものである。実測と理論結果が大変良く一致している。やはりこのようにして得られた温度伝導率 a の値を表一にまとめて示してある。

表一 1 には本研究で得られた岩石物性、水理特性および温度伝導率（あるいは熱拡散係数） a をまとめてあるが、表中、全般的に a の値は乾燥状態のものが最も小さく、浸透がある場合が最も大きくなる。ここで得られた a の値は粒状多孔体の場合と比べると、やや小さい程度であり大差はない。

表一 1 岩石の物性、水理特性および温度伝導率の実測結果

試料名	供試体番号	加熱処理の有無	空隙率 (%)	吸水率 (%)	試験条件	密度 ($\times 10^3$) (kg/m ³)	透水係数 (m/s)	浸透流速 (m/s)	比熱 (Kcal/kg)	熱拡散係数 (m ² /hr)		
										底 1 センサー ($x=0.05$ m)	底 2 センサー ($x=0.1$ m)	平均値
白河凝灰岩	S-1	無	1.9.5	9.4.3	絶乾状態	2.0.6			0.2.0.1	2.25×10^{-3}	2.75×10^{-3}	2.50×10^{-3}
					湿潤状態	2.2.6			0.2.3.2	3.0 "	2.80 "	2.9.0 "
					移 流	2.2.6	9.18×10^{-10}	6.59×10^{-7}	0.2.3.2	2.10 "	2.20 "	2.0.5 "
	S-2	800℃	2.2.8 (1.9.5)	1.1.1	絶乾状態	2.0.5			0.1.8.8	1.8.5 "	2.0 "	1.9.8 "
					湿潤状態	2.2.7			0.2.3.5	2.32 "	2.3 "	2.3 "
					移 流	2.2.7	5.54×10^{-9}	3.08×10^{-6}	0.2.3.5	1.8.5 "	2.0 "	1.9.3 "
江持凝灰岩	E-1	無	2.2.8	1.1.3	絶乾状態	2.0.1			0.1.9.4	1.1.5 "	1.8 "	1.4.8 "
					湿潤状態	2.2.4			0.2.3.9	1.8 "	2.2 "	2.0 "
					移 流	2.2.4	2.14×10^{-8}	1.19×10^{-5}	0.2.3.9	2.2 "	2.2 "	2.2 "
	E-2	800℃	2.5.0 (2.2.6)	1.2.5	絶乾状態	1.9.9			0.1.9.2	2.1 "	2.4 "	2.2.5 "
					湿潤状態	2.2.4			0.2.4.7	2.6 "	2.6 "	2.6 "
					移 流	2.2.4	6.85×10^{-8}	4.02×10^{-5}	0.2.4.7	3.4 "	3.0 "	3.2 "
新小松安山岩	K-1	無	1.9.6	9.6.3	絶乾状態	2.1.7			0.1.9.6	1.8 "	2.4 "	2.1 "
					湿潤状態	2.3.7			0.2.1.4	2.4 "	2.8 "	2.6 "
					移 流	2.3.7	5.44×10^{-7}	2.37×10^{-5}	0.2.1.4	2.7 "	3.0 "	2.8.5 "
	K-2	800℃	2.1.9 (2.0.6)	1.0.3	絶乾状態	2.1.1			0.2.0.2	1.8.5 "	2.1 "	1.9.8 "
					湿潤状態	2.3.3			0.2.2.3	2.3 "	2.4.5 "	2.3.8 "
					移 流	2.3.3	2.67×10^{-5}	1.22×10^{-4}	0.2.2.3	3.6 "	3.6 "	3.6 "
大谷石	O-1	無	3.0.2	9.0.4	絶乾状態	1.4.5			0.2.6.6	1.0 "	1.4 "	1.2 "
					湿潤状態	1.7.5			0.3.4.8	2.4 "	1.8 "	2.0 "
					移 流	1.7.5			0.3.4.8			
	O-2	800℃	4.3.3 (3.4.8)	3.3.0	絶乾状態	1.3.9			0.2.7.2	1.2 "	1.5.5 "	1.3.8 "
					湿潤状態	1.8.2			0.3.2.2	1.1.5 "	1.2.5 "	1.2.0 "
					移 流	1.8.2	1.17×10^{-7}	1.01×10^{-5}	0.3.2.2	1.6×10^{-3}	1.75×10^{-3}	1.68×10^{-3}

むすび

白河、江持凝灰岩、新小松安山岩、および大谷石の 4 種類の岩石を対象に乾燥、飽和状態と熱水浸透流を伴う場合の伝熱実験を試みた。その結果、伝熱速度は浸透流を伴う強熱風化岩石が大きくなるが、白河凝灰岩のように透水係数が小さいと浸透、移流による効果は乏しくなる。本実験の場合、温度伝導率 a は浸透の有無、乾燥状態を含め、 $1.2 \times 10^{-3} \sim 3.6 \times 10^{-3}$ m²/hr の範囲の値をとることが判った。本実験で得られたような伝熱物性、パラメータは大切であり、今後も岩種や条件を変えて研究する積りである。

参考文献

- 1) 佐藤 邦明：飽和多孔体および温水浸透流における温度伝導率の実験的決定，土木学会論文報告集，第320号，1982，pp 57 ～ 65
- 2) 佐藤 邦明：多孔媒体中の熱輸送に関する実験的研究，土木学会第26回水理講演会論文集，1982，2，pp 575 ～ 600