水・空気を含む岩石の熱伝導率に関する実験研究*

— 多孔質岩石の熱伝導率に関する研究 (第1報) —

出口 衛¹ 幾世橋 広² 榎本 兵治³

Experimental Study on the Thermal Conductivity of Porous Rocks Containing Water and Air

— Studies on the thermal conductivity of porous rocks (1st Report) —

by Mamoru DEGUCHI¹, Hiroshi KIYOHASHI¹ and Heiji ENOMOTO¹

1. Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980

In order to investigate the effect of moisture on the effective thermal conductivity of porous rocks, eighteen rocks conditioned at dried, moist and water-saturated conditions were used for measuring the thermal conductivity by a transient hot wire comparison method developed by Deguchi, et al²⁾.

The moist rocks were conditioned in the atmosphere of 20 °C and 60 % relative humidity. This condition was adopted on the base of X-ray analysis of montmorillonite to simulate the natural dry condition, at which montmorillonite contained two layers of water in its interlayers.

The results showed that the effective thermal conductivities of all rocks increased with increase of water in the pore. The conductivity of zeolite rocks is most affected by the degree of saturation of water. The thermal conductivity of water-saturated rocks is 1.2 to 2.5 times higher than that of the dry rocks.

KEY WORDS: Thermal Conductivity, Measurement, Moisture, Altered Rock, Three Phases

1. 緒 言

岩石の熱伝導率は、多様な利用が検討されている地下空間の熱的設計や地熱地帯の熱流量解析などにおいて重要である。

岩石は固相、液相および気相の三相から構成される多孔質体^{a)}であり、その有効熱伝導率には各相の熱伝導率および体積率が関係する。しかし、岩石の固相を構成する鉱物の組成および液相と気相の体積率の和である孔隙率は多様であり、また、岩石中に含まれる液相や気相の体積率を間接的に表す飽和率（これらが孔隙内で占める割合）は、岩石が置かれている環境により変化するため、これらの要因の有効熱伝導率（以下、まぎらわしくない場合には“有効”を省略する）への寄与に関する系統的研究が必要である。

岩石の熱伝導率に関する従来の研究では、これらの要因の影響を個々に、あるいは、特定の条件下においてのみ検討しており、固相、液相および気相の熱伝導率ならびに体積率と岩石の熱伝導率との関係について総合的に検討した研究は見あたらない。

本研究では、多孔質岩石の固相、液相および気相の熱伝導率ならびに体積率と多孔質岩石の熱伝導率との相関を明らかにすることを目的として、実験とモデル解析を行った。まず、実験研究で

は、岩石の水分含有状態の調整方法について検討し、解析に必要な固相、液相および気相の体積率ならびに岩石の熱伝導率の測定を行った。

三相状態にある岩石の熱伝導率に関する従来の研究では、岩石を自然乾燥して測定を行っていることが多い。しかし、岩石には、温度と湿度などの環境条件により水分量が著しく変化する沸石類や水分の吸脱着により結晶構造が変化する粘土鉱物など、特異的性質を有する変質鉱物が含まれる場合が少なくなく、したがって、時と場所により温度や湿度が異なる自然乾燥では、同一岩石であっても水分量が異なることが予想され、水分量の特が困難である。このため、変質鉱物の特異的性質に配慮し、自然乾燥条件と類似する水分含有状態の調整条件について、まず検討を行った。従来、このような変質岩石の特異性に配慮して水分含有状態を調整した試料について熱伝導率測定を行った研究は見あたらず、変質鉱物に着目した茂木ら¹⁾の花崗岩の研究においても、変質鉱物の熱伝導率の検討を行ってはいないが、水分含有状態の調整は特定せず、自然乾燥条件で行っている。

熱伝導率の測定実験には、出口ら²⁾が開発した細線加熱比較法による熱伝導率測定システムを用いた。さらに、鉱物組成の測定・分析も行った。本報では熱伝導率に及ぼす水分飽和率の影響について実験的に検討した結果について述べる。

2. 岩 石 試 料

試料には、表1に示すような18種類の多孔質岩石を用いた。

各岩石試料のX線回折および顕微鏡観察の結果は、表1に示す通りである。構成鉱物の相対的な量比はこの結果から求めた。砂

* 1994年8月8日受付 1995年4月12日受理

1. 正会員 工博 東北大学助手 工学部資源工学科

2. 正会員 工博 東北大学助教授 工学部資源工学科

3. 正会員 工博 東北大学教授 工学部資源工学科

〔著者連絡先〕 FAX 022-217-7389 (東北大・資源・榎本研)

キーワード: 熱伝導率, 測定, 水分, 変質岩, 三相系

a) 自然界に存在する岩石は、その孔隙に水や気体が常に含まれた状態で存在する。本論文では、このような集合体を岩石と定義する。

表1 試料の岩質と鉱物組成

試料名	構成鉱物																岩石名
	Qz	Cr	Fs	Cp	Md	Mi	Cc	Do	Mo	CM	Ch	Ka	Sr	Pp	Gl	Rf	
ベリア砂岩	◎	○					○					○	○				中粒石英質砂岩
紀州砥石	◎	○			○	○						○	○				細粒砂岩（新第三紀）
和泉砂岩	○	○					○					○	○				中粒砂岩（白亜紀）
多胡砂岩	◎	○											○				粗粒砂岩（白亜紀）
宮城ゼオライト	○			○	◎												モルデン沸石化した凝灰岩（新第三紀）
熊ヶ根ゼオライト	○	○		◎					○								モルデン沸石化した凝灰岩（新第三紀）
荻野凝灰岩	○		○	◎													モルデン沸石化した凝灰岩（新第三紀）
二ツ井ゼオライト	○	○		◎													斜ブチロル沸石化した凝灰岩（新第三紀）
東通クリストバライト	○	◎															クリストバライト（オパールCT）化した珪藻質岩（新第三紀）
喜多方パーライト	○	○												◎			未変質（新第三紀）
湯八木沢パーライト	○	○												◎			未変質（新第三紀）
月布ベントナイト	○									◎							モンモリロナイト化した凝灰岩（新第三紀）
八沢木白土1(白色)	○	○								◎							モンモリロナイト化した凝灰岩（新第三紀）
八沢木白土2(淡灰緑色)	○	◎								○							モンモリロナイト化した凝灰岩（新第三紀）
八沢木白土3(淡灰白色)	○	◎	○	○	○					◎							モンモリロナイト化した凝灰岩（新第三紀）
岩手カオリナイト	○										◎						フリントクレー（古第三紀）
大峠カオリナイト	○										◎						カオリナイト化した凝灰角礫岩（新第三紀）
大峠ロウ石	○												○	◎			ロウ石化した凝灰角礫岩（新第三紀）

Cc 方解石, Ch 緑泥石, Cp 斜ブチロル沸石, Cr クリストバライト, CM 緑泥石/モンモリロナイト混合層鉱物,
Do 苦灰石, Fs 長石, Gl 火山ガラス, Ka カオリナイト, Md モルデン沸石, Mi 雲母, Mo モンモリロナイト,
Pp バイロフィライト, Qz 石英, Rf 岩片, Sr セリサイト ◎ 多量, ○ 中量, 〇 少量

表2 試料のモード組成

試料	石英 (%)	長石 (%)	黒雲母 (%)	火山ガラス (%)	岩片 (%)	炭酸塩鉱物 (%)	その他 (%)
ベリア砂岩	71.4	4.2			6.4	11.3	6.7
和泉砂岩	33.8	17.0	0.9		47.1	0.1	1.1
喜多方パーライト	8.1	1.7	0.4	89.8			
湯八木沢パーライト	8.3	7.8	0.5	83.4			

表3 試料の水分含有状態の調整条件

調整環境	期間 (日)
(a) 20℃, 圧力1mmHgの気中	120
(b) 20℃, 湿度60%, 常圧の気中	120
(c) 脱気後, 20℃の水	3

岩およびパーライトの構成鉱物の量比については、ポイントカウントによるモード組成も測定した。モード組成を表2に示す。

表1に示す試料のうち、砂岩であるベリア砂岩、紀州砥石、和泉砂岩および多胡砂岩は石英を主成分鉱物とした岩石であり、ゼオライト岩である宮城ゼオライト、熊ヶ根ゼオライト、荻野凝灰岩および二ツ井ゼオライトはモルデン沸石または斜ブチロル沸石を、東通クリストバライトはクリストバライトを、喜多方パーライトおよび湯八木沢パーライトは火山ガラスを主成分鉱物とした岩石である。また、月布ベントナイト、八沢木白土、岩手カオリナイト、大峠カオリナイトおよび大峠ロウ石は主に粘土鉱物からなる岩石であり、月布ベントナイトはモンモリロナイト、八沢木白土はモンモリロナイトやクリストバライト、岩手カオリナイトおよび大峠カオリナイトはカオリナイト、大峠ロウ石はパイロフィライトを主成分鉱物とする岩石である。

これらの試料のなかで主に粘土鉱物からなる岩石には、乾燥するとクラックが生じたり、水中では試料形状を一定に保持できなくなるものがあり、このような岩石は水分による孔隙率の変化が大きいことが予想される。そのため、本研究では、砂岩、ゼオライト岩、クリストバライト岩およびパーライトを、(1)固相が比較的単純な鉱物組成であり、(2)水分による孔隙率の変化が無視できる程度に小さい岩石で、かつ(3)孔隙率が幅広く異なる岩石として、固相、液相および気相の熱伝導率ならびにそれらの体積率と岩石の熱伝導率との関係解明のために用いた。また、主に粘土鉱物からなるその他の岩石は、表1に示したように砂岩やゼオライト岩にはモンモリロナイトやカオリナイトなどの粘土鉱物も少量含まれ、また、一般に岩石にはこれら粘土鉱物を含有することが少なくないことなどの理由から、三相状態にある岩石の水分

含有状態調整条件と調整方法の検討のために用い、またその条件における熱伝導率の測定も行った。

3. 岩石試料の水分含有状態の調整

3・1 試料の調整条件と調整方法

本研究では、水分飽和率を変えて岩石の熱伝導率を測定するため、水分ゼロの乾燥条件と水分100%の水分飽和条件およびその間の水分含有状態として、表3に示す3条件で試料を調整した。2.で述べたように、岩石に含まれる粘土鉱物のうち、モンモリロナイトは水分により膨潤する性質を有する。また、固結度の低い岩石は、水分により固結状態が変化し、乾燥するとクラックが生じたり、水分飽和状態では試料形状を一定に保持できなくなるものがある。そのため、このような岩石については、表3に示した調整条件(b)においてのみ熱伝導率測定を行った。20℃・湿度60%調整条件の選択理由については後述する。

岩石試料の水分含有状態の調整は、各条件で試料の20日間の質量変化が調整前の質量の0.001以下になるまで行った。(c)の水分飽和調整条件では3日の調整期間が必要であり、この条件では比較的短期間で調整できたが、(b)の20℃・湿度60%調整条件では一辺の長さが約150mmの立方体試料を質量が恒量となるまで調整するのに120日間を要し、長い調整期間が必要であった。なお、本研究では、調整条件(a)を20℃・1mmHg乾燥条件、(b)を20℃・湿度60%条件、(c)を水分飽和条件と称する。

3・2 20℃・湿度60%調整条件の検討

20℃・湿度60%調整条件の選択にあたっては、以下のような

表4 月布ベントナイトの粉末X線回折用試料の水分調整条件および層間水の状態

調整条件	温度 (℃)	湿度 (%)	圧力 (mmHg)	調整時間 (h)	X線回折結果	層間水の状態
					底面間隔(Å)	
1	60		1	48	10.0	層間水なしに近い構造
2	20		1	48	11.5	層間1層水に近い構造
3	60		360	48	12.6	層間1層水に近い構造
4	20	60	常圧	48	15.8	層間2層水に近い構造

検討を行った。

本研究で用いた試料の主成分鉱物のうち、石英、長石、ゼオライト、クリストバライトおよびパーライトなどは、水分の吸脱着により結晶構造は変化しないが、モンモリロナイトは層間水が吸脱着すると結晶構造が変化する³⁾ことが知られている。そこで、モンモリロナイトのように、水分によって結晶構造が変化する鉱物を多量に含有する岩石を対象に検討することにした。この試料には月布ベントナイトを用い、従来の研究でよく採用されている諸条件で水分含有状態を調整し、粉末X線回折によりモンモリロナイトの層間水の状態を調べた。手順は以下のようである。

月布ベントナイトを62~74 μ m (250~200 mesh) に粉碎し、表4に示す各条件で水分調整して、直ちにX線回折を行った。表4の条件のうち、温度については、石油鉱業において粘土鉱物を多量に含むコアの乾燥条件⁴⁾として60℃を取り上げ、また、一般に行われている自然乾燥条件⁵⁾として20℃を定め、さらに、減圧する場合も含めて水分調整条件を検討した。粉末試料の調整時間は各条件とも48時間である。この時間は、温度20℃・湿度60%・常圧条件で試料を48時間以上調整すればその質量が変化しなかったことから定めた。

X線粉末回折によるモンモリロナイトの底面間隔の測定結果およびその結果から推定した層間水を表4に示した。モンモリロナイトは、自然乾燥状態では層間に2層水がある構造である³⁾。しかし、モンモリロナイトは60℃・1mmHgの条件では層間水なし、60℃・360mmHgと20℃・1mmHgの条件では1層水に近い構造であり、これらの条件では、モンモリロナイトは乾燥し過ぎとなっている。

後述する熱伝導率測定用試料の寸法と同程度の大きさの月布ベントナイト、八沢木白土および岩手カオリナイトの岩塊を表4に示した各条件において水分含有状態を調整した結果、条件(1)および(2)では肉眼で見える程度のクラックが生じた。したがって、これらの条件は、熱伝導率測定には不適当と考えられる。

以上の結果から、多孔質岩石の熱伝導率を自然乾燥状態に近い条件で評価する場合、その水分含有状態の調整には20℃・湿度60%・常圧条件が適しており、この条件を本研究の調整条件の一つと定めた。

4. 岩石試料の孔隙率、密度および水分

4・1 固相、液相および気相の体積率の測定方法

各試料について、ダイヤモンドソウにより固・液・気各相の体積率測定用試料を切り出した。試料形状は、層理に平行および垂直な面を有する立方体であり、質量測定の測定精度から試料寸法は一辺の長さを15mmとした。

岩石の固相・液相・気相の体積、孔隙率および密度を測定するには、水分ゼロの状態を規定する必要がある。本研究ではJIS M8812およびJIS M8107~M8109⁶⁾に準じて、105℃で24時間

乾燥した状態を水分ゼロの状態、すなわち絶乾状態と定めた。この乾燥条件より高い温度でないと脱離しない結晶水などは固相の一部とみなした。水分ゼロの状態をこのように定義すると、105℃・24時間乾燥で脱離するモンモリロナイトの層間水やゼオライトの沸石水³⁾は、液相の一部となる。なお、前述したように、固相・液相・気相の体積率、孔隙率および密度測定用の試料は一辺の長さが約15mmであり、

各試料は105℃で乾燥すると24時間で恒量となった。

上述の水分ゼロの状態の定義に基づき、各試料の固相・液相・気相の体積率(ϕ_m , ϕ_w , ϕ_a)を以下の測定により求めた。

20℃・常圧下で水銀置換法により各試料の見掛けの体積〔固相・液相・気相の合計体積($v_m + v_w + v_a$)〕を、またヘリウムポロシメータにより固相および液相の合計体積($v_m + v_w$)を測定し、得られた各相の体積から気相の体積率 ϕ_a を次式により求めた。

$$\phi_a = 1 - (v_m + v_w) / (v_m + v_w + v_a) \quad \cdots \cdots (1)$$

試料を105℃で24時間乾燥し水銀置換法により測定した($v_m + v_a$)およびヘリウムポロシメータにより測定した v_m から、固相の体積率 ϕ_m を次式により求めた。

$$\phi_m = v_m / (v_m + v_a) \quad \cdots \cdots (2)$$

(1)および(2)式により求めた ϕ_a と ϕ_m を用いて、液相の体積率 ϕ_w を次式により求めた。

$$\phi_w = 1 - \phi_m - \phi_a \quad \cdots \cdots (3)$$

試料の密度 ρ は、105℃で24時間乾燥した試料の質量ならびに($v_m + v_a$)および v_m から求めた。また、孔隙率 ϕ および水分飽和率 S は、 ϕ_m , ϕ_w および ϕ_a から次の各式により求めた。

$$\phi = 1 - \phi_m \quad \cdots \cdots (4)$$

$$S = \phi_w / \phi = \phi_w / (\phi_w + \phi_a) \quad \cdots \cdots (5)$$

4・2 20℃・湿度60%調整試料中の水分分布の検討

本実験で使用した一辺の長さが約150mm立方の試料のなかで、温度20℃・湿度60%の水分調整による試料の20日間の質量変化が調整前の質量の0.001以下となり、恒量となるまでの調整日数は以下のようであった。月布ベントナイトが約120日間、八沢木白土が約110日、東通クリストバライトが約100日であり、その他の試料は約90日程度であった。試料内水分分布の一樣性の検討は、水分調整に比較的長時間を必要とした上位3種類の岩石の構成鉱物を参考に、八沢木白土を選定し、20℃・湿度60%条件で120日間調整した下記の試料について行った。

調整試料(八沢木白土(3), 300mm×190mm×100mm)を20℃・湿度60%大気圧下においてハンマで半分(150mm×190mm×100mm)に割り、破断面の外側表面、中心およびそれらの中間の計5カ所(約40mm間隔)から約1cm角の岩片を分離し、直ちにその水分飽和率 S を測定した。その結果、5カ所の岩片の S は31~36%であり、中心部が高かったが試料外側表面との差異は5%以内であった。また、20℃・湿度60%条件で120日間調整した約15mm角の固・液・気各相体積率測定用試料の S は31%(後述の表5参照)であり、これらの結果から20℃・湿度60%条件で120日間調整すれば、一辺の長さが約150mm程度までの大きさであれば、試料内の水分分布はほぼ一樣であるとみなした。

4・3 孔隙率、密度および水分飽和率の測定結果

各試料から切り出した各5個の固・液・気各相の体積率測定用

表5 試料の孔隙率、密度および水分の測定結果

試料	孔隙率 ϕ (%)	密度 ρ (g/cm ³)	20℃ 1mmHg乾燥条件 水分飽和率 S (%)	20℃ 湿度60% 条件 水分飽和率 S (%)	水分飽和条件 水分飽和率 S (%)
ベリア砂岩	17	2.6	0	0	100
紀州砥石	14	2.7	0	3	100
和泉砂岩	5	2.7	0	52	100
多胡砂岩	24	2.7	0	6	100
宮城ゼオライト	51	2.2	0	14	100
熊ヶ根ゼオライト	48	2.3	0	12	100
荻野凝灰岩	27	2.1	0	14	100
二ッ井ゼオライト	20	2.2	0	40	100
東通クリストバライト	29	2.2	0	39	100
喜多方パーライト	23	2.3	0	0	100
湯八木沢パーライト	26	2.3	0	0	100
月布ベントナイト	26	2.6		78	
八沢木白土 1	37	2.4		76	
八沢木白土 2	37	2.3		21	
八沢木白土 3	37	2.2		31	
岩手カオリナイト	8	2.5		90	
大峠カオリナイト	18	2.5		12	
大峠ロウ石	19	2.7		17

図1 熱伝導率の測定面と測定方向
〔試料の形状および寸法：
一辺約150 mmの立方体〕

の試料孔隙率 ϕ および密度 ρ 、ならびに各水分調整条件における水分飽和率 S の平均値を表5に示す。各試料5個のばらつき（測定誤差＋試料のばらつき）は、孔隙率および密度では平均値に対し $\pm 3\%$ 程度であった。

全試料の ϕ の範囲は5～51%であり、広い範囲で孔隙率の異なる試料を用いていることが分かる。ゼオライト岩およびクリストバライト岩の ϕ は20～51%であった。このように大きな ϕ を有する理由は、岩石の構成鉱物粒子間の孔隙に加えて、その鉱物内にさらに微細な孔隙が存在する³⁾ためである。また、粘土鉱物を主とする月布ベントナイト、八沢木白土、岩手カオリナイト、大峠カオリナイトおよび大峠ロウ石の ϕ は8～37%である。八沢木白土は、クリストバライトを含み、続成作用の圧密の程度が低い場合、粘土鉱物の多い岩石の中でも ϕ は特に大きく37%であり、岩手カオリナイトは圧密の程度が高く8%である。和泉砂岩の ϕ は小さく5%である。

20℃・湿度60%調整試料の S の測定結果について検討すると、同一の20℃・湿度60%条件で調整しても、 S は試料によって0～90%と大きく異なっていることが分かる。砂岩およびパーライトは用いた試料のなかでは低く、 $S=0\sim 3\%$ であった。ゼオライト岩や粘土鉱物を主成分とする岩石の S は最低でも12%であり、砂岩やパーライトに比べ極めて高い。3・2で述べたように、20℃・湿度60%調整条件が自然乾燥条件⁵⁾に近い条件であることから、ゼオライト岩や粘土鉱物を主成分とする岩石の吸湿性は高いことが推察される。なお、砂岩のなかでも和泉砂岩の場合には、孔隙率 ϕ が小さいため少量の水分であっても S が大きくなったと考えられる。

ゼオライト岩や粘土鉱物を主成分とする岩石では、同一岩種であっても S の範囲は広く、このうち、粘土鉱物を主とする八沢木白土(1)～(3)では、試料により水分は大きく異なったが、これは、表1に示したように、八沢木白土中の粘土鉱物（モンモリロナイト）、クリストバライトおよび沸石の含有量と鉱物内の微細孔隙の構造の相違によると推察される。

5. 岩石試料の熱伝導率

5・1 熱伝導率の測定方法

各岩石について、ダイヤモンドソウにより熱伝導率測定用試料を切り出した。試料形状は立方体であり、層理面の判断ができる

岩石については、層理に平行および垂直な面を有するように切り出した。寸法は測定に必要な大きさを考慮し、一辺の長さを約150 mmとした。

測定原理は細線加熱比較法である。測定装置および測定精度などについては、既に報告した²⁾ので詳細については省略するが、測定精度は $\pm 5\%$ 以内である。熱伝導率の測定は以下に述べる環境下で行った。すなわち、20℃・1 mmHg乾燥試料についてはシリカゲルを入れた20℃のデシケータ中、20℃・湿度60%調整試料については温度20℃および相対湿度60%の恒温・恒湿室内、ならびに水分飽和試料については20℃の恒温水槽中である。

5・2 熱伝導率の測定結果および試料の熱伝導率の異方性の検討

本研究では肉眼的に均質な岩石試料を用いたが、熱伝導率の異方性の有無を確認するため、図1に示す試料面上6方向で熱伝導率の測定を行った。測定回数は各方向でそれぞれ5回である。それらの測定値の算術平均値を表6の(1)～(6)欄に示した。なお、各測定値のばらつきは平均値に対し $\pm 5\%$ 以内であり、本測定システムの測定誤差内²⁾であった。

表6に示した各方向の熱伝導率の差は、どの調整条件においても、(1)～(6)の平均値に対し $\pm 10\%$ 以内である。したがって、本測定システムの測定精度が $\pm 5\%$ であることから、本実験で用いた試料はほぼ均質であるとみなすことにした。以上より、本研究では、(1)～(6)方向の、合計30回の測定値の算術平均値を熱伝導率の測定値 λ_{exp} とする。

各岩石の λ_{exp} について検討すると、20℃・1 mmHg乾燥、20℃・湿度60%調整および水分飽和の各水分調整条件において、砂岩の熱伝導率は、ゼオライト岩、クリストバライト岩およびパーライトに比べ2倍程度高く、20℃・1 mmHg乾燥条件で2.2～2.7、水分飽和条件で3.0～4.4 W/(m・K)であった。また、20℃・湿度60%条件で調整した主に粘土鉱物からなる岩石の熱伝導率は、月布ベントナイトで1.8、八沢木白土で0.8～1.2、岩手カオリナイトおよび大峠カオリナイトで2.5～2.8、大峠ロウ石で3.2 W/(m・K)であり、カオリナイトやロウ石の熱伝導率は高い。砂岩や大峠カオリナイトおよび大峠ロウ石が比較的高い熱伝導率であったのは、表1に示した鉱物組成から推察すると、他の鉱物に比べ高い熱伝導率⁷⁾の石英によるものと考えられ、また、岩手カオリナイトの場合には、石英の含有率は低いが、孔隙率が小さく、かつ水分飽和率が高いことによると推察される。

表6 熱伝導率の測定結果

試料	熱 伝 導 率 (W/(m・K))																				
	20℃・1mmHg乾燥試料								20℃・湿度60% 調整試料								水分飽和試料				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	平均	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	平均	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	平均
ベリア砂岩	2.7	2.6	2.7	2.6	2.6	2.7	2.7	2.5	2.6	2.7	2.7	2.7	2.6	2.7	4.2	4.3	4.5	4.5	4.6	4.4	4.4
紀州砥石	2.2	2.0	2.4	2.2	2.3	2.3	2.2	2.2	2.2	2.3	2.2	2.2	2.3	2.2	3.4	3.4	3.4	3.3	3.4	3.3	3.4
和泉砂岩	2.5	2.4	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.6	2.7	3.1	3.0	3.1	3.0	3.0	3.1	3.0
多胡砂岩	2.5	2.6	2.6	2.7	2.6	2.4	2.6	2.5	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	3.2	3.2	3.7	3.6	3.7	3.6	3.5
宮城ゼオライト	0.40	0.41	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.47	0.47	0.44	0.43	0.45	0.45	0.45	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	0.99	1.0
熊ヶ根ゼオライト	0.55	0.53	0.53	0.52	0.50	0.51	0.52	0.60	0.54	0.56	0.54	0.59	0.57	0.57	1.2	1.2	1.2	1.1	1.3	1.2	1.2
萩野凝灰岩	0.73	0.72	0.72	0.73	0.74	0.73	0.73	0.84	0.82	0.83	0.83	0.90	0.84	0.84	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2
二ツ井ゼオライト	0.79	0.82	0.82	0.82	0.74	0.77	0.79	0.94	0.89	0.95	0.97	0.95	0.97	0.95	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2
東通クリストパライト	0.95	0.99	0.97	0.96	1.0	0.96	0.97	1.3	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.6
喜多方パーライト	0.60	0.61	0.70	0.70	0.68	0.68	0.66	0.60	0.62	0.72	0.72	0.66	0.65	0.66	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
湯八木沢パーライト	0.74	0.75	0.72	0.70	0.81	0.84	0.76	0.74	0.77	0.72	0.68	0.81	0.84	0.76	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1
月布ベントナイト								1.8	1.7	1.7	1.9	1.7	1.7	1.8							
八沢木白土 1								1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2							
八沢木白土 2								0.82	0.79	0.77	0.79	0.82	0.83	0.80							
八沢木白土 3								0.93	1.1	0.93	1.1	0.91	1.1	1.0							
岩手カオリナイト								2.7	2.6	2.4	2.4	2.5	2.4	2.5							
大峠カオリナイト								2.6	2.7	2.7	2.6	2.9	2.9	2.8							
大峠ロウ石								2.9	3.4	3.4	2.9	3.4	3.0	3.2							

表中の熱伝導率(1)~(6)は図1に示した各測定面における熱伝導率の測定値、平均はそれらの平均値を示す。

5・3 試料内水分分布の不均一性による熱伝導率の差異の検討

4・2で述べたように、20℃・湿度60%条件で120日間調整した試料内の水分分布を測定した結果、中心部の水分飽和率 S が最も高かったが、その他の部分との差異は5%以内であり一様とみなした。これは以下のような検討結果による。

乾燥試料の熱伝導率に対する水分飽和試料の熱伝導率の増加割合(表6参照)から、試料中心部と試料表面の S が5%程度異なることによって生じる試料中心部の熱伝導率と試料表面のそれとの差について検討すると、温度20℃・湿度60%条件で調整した場合には、試料表面の熱伝導率に対し最大で+7.1%(平均値に対し±3.6%)(宮城ゼオライト)、最小で+1.2%(平均値に対し±0.6%)(和泉砂岩)程度であると推察される。したがって、本測定システムの測定精度(±5%)²⁾から判断すると、試料内の水分飽和率分布の5%以内の差異が熱伝導率へ及ぼす影響は十分小さいと考えられる。

5・4 熱伝導率に及ぼす水分の影響

20℃・1mmHg乾燥、20℃・湿度60%調整および水分飽和試料の熱伝導率の測定値 λ_{exp} に及ぼす水分飽和率 S の影響を図2および図3に示す。両図とも、各試料について、 S が増加すれば λ_{exp} が増加することを示している。

20℃・1mmHg乾燥試料の λ_{exp} に対する水分飽和試料の λ_{exp} は試料全体で1.2~2.5倍増加した。そのなかでも特にゼオライト岩の増加は大きく、宮城ゼオライトおよび熊ヶ根ゼオライトの増加割合は、それぞれ2.5および2.3倍である。

従来、岩石の熱伝導率測定は自然乾燥条件下で行われている場合が多

い⁸⁾⁹⁾。しかし、本実験で示されたように、ゼオライト岩は、砂岩やパーライトなどに比べ、 S による λ_{exp} の増加割合が大きく、かつ、高い吸湿性を有する岩石であり、このような岩石では、同じ自然乾燥条件下といえども、その相対湿度のわずかの相違が水分飽和率に影響し、その水分飽和率の相違が岩石の熱伝導率に大きく影響する場合もあると推察される。

種々の岩石について水分の影響を定量的に検討するために、以下のように数式化を試みた。

従来、土壌やガラスビーズ充填層について、その有効熱伝導率 λ_e と水分飽和率 S の間には一次関数または指数関数(ロジスティック関数)の関係が得られており¹⁰⁾¹¹⁾、また、岩石についても、シルト岩や砂岩および頁岩などの研究¹²⁾¹³⁾において、岩石の熱伝導率が水分の増加とともに指数関数に類似した関係で増

図2 砂岩の水分飽和率と熱伝導率との関係

図3 ゼオライト岩、クリストパライト岩およびパーライトの水分飽和率と熱伝導率との関係

加するという結果が実験的に得られている。

岩石は固相、液相および気相の三相から構成される多孔質体であるので、その λ_e に及ぼす S の影響は、固相、液相および気相の三相から構成される土壌や充填層の場合と基本的には同様と考えられる。しかし、 λ_e に及ぼす液相の影響を孔隙を満たす水の熱橋現象により説明した従来の土壌の研究結果¹⁴⁻¹⁶⁾と本測定結果や上述のシルト岩や砂岩および頁岩などの従来の岩石の研究結果とを比較すると、粒子径の大きい土壌（砂）の低水分領域では水分の増加による λ_e の増加割合は小さいが、それ以上のある水分域から急に増加割合が大きくなり、高水分領域では λ_e の増加割合は再び低くなるのに対し、粒子径の小さい土壌（ローム）では、水分の増加による λ_e は指数関数的に増加している。しかし、岩石の場合には、指数関数が得られた従来の研究結果¹²⁾¹³⁾や本研究の結果からでは、正確な判断はできないが指数関数で表現してもある程度一致し、土壌の粒子径の小さい場合の関係と近い関数関係になっている。そこで、本研究における各試料の λ_{exp} と S との関係も指数関数で整理することにした。その結果が図2および図3に示す実験式である。図中の曲線はこれらの式により描いたものであり、実験値とよく一致している。以上のように、岩石の λ_e は S の増加とともに指数関数的に増加することから、岩石の孔隙を満たす液相は、粒径が小さい土壌における熱橋現象に近い作用をすると考えられる。これには岩石鉱物の固結の程度による固相と固相の接触点における熱抵抗、孔隙の形状と寸法等が大きく影響していると考えられる。しかし、上述したように、所定の水分含有状態に調整するには長い調整時間を必要とするため、水分含有状態の異なる熱伝導率の測定点は各試料について3点しか得られてなく、このような整理により得られた実験式の妥当性を詳細に検討することは困難であった。また、岩石の熱伝導率に及ぼす水分の影響を検討するために、得られた実験式の係数と岩種等との関係、すなわち、岩石の固相、液相および気相の熱伝導率や体積率との関係についても検討したが、特定の関係を見いだすことはできなかった。これは、実験点が少ないことも原因の一つと考えられるが、多孔質岩石の熱伝導率に及ぼす岩石の固相の熱伝導率や固相、液相、気相の体積率の影響の仕方は複雑で、これを単純な式で表そうとすることに本質的な問題があると思われる。したがって、より詳細な解明のためには、岩石を三相系物質として取り扱った新たな熱伝導率のモデルによる解析が必要と考えた。これについては続報¹⁷⁾で述べる。

6. 結 言

本研究は、多孔質岩石の固相、液相および気相の熱伝導率ならびに体積率と多孔質岩石の有効熱伝導率との関係を明らかにすることを目的としたものであり、本報では、3条件（20℃・1mmHg乾燥、20℃・湿度60%および水分飽和）で水分調整した18種類の岩石の熱伝導率の測定とそれらの鉱物組成、孔隙率および水分飽和率の分析・測定について述べた。さらに、岩石の熱伝導率とそれらの水分飽和率との関係を実験的に検討した結果について述べた。これらの結果をまとめると以下のようである。

1. 多孔質岩石の熱伝導率を自然乾燥状態に近い条件下で評価する場合、粘土鉱物や沸石類が含まれることを考慮すると、その水分含有状態の調整には20℃・湿度60%条件が適している。

2. 岩石の不飽和水分含有状態の調整には長い調整期間が必要である。20℃・湿度60%条件で一辺の長さが約150mm程度の立方体を調整するのに120日を要した。

3. 自然乾燥に近い、20℃・湿度60%調整試料の水分飽和率は試料によって大きく異なり、0~90%であった。このうち、砂

岩およびパーライトは0~3%と特に低く、吸湿性の高いゼオライト岩、クリストバライト岩および粘土鉱物を主とする岩石では高い。

4. 20℃・1mmHg乾燥、20℃・湿度60%調整および水分飽和の各水分調整条件において、砂岩の熱伝導率は、ゼオライト岩、クリストバライト岩およびパーライトに比べ2倍程度高く、乾燥条件で2.2~2.7、水分飽和条件で3.0~4.4 W/(m・K)であった。

5. 20℃・湿度60%調整した主に粘土鉱物からなる岩石の熱伝導率は、月布ベントナイトで1.8、八沢木白土で0.8~1.2、岩手カオリナイトおよび大峠カオリナイトで2.5~2.8、大峠ロウ石で3.2 W/(m・K)であり、カオリナイトやロウ石の熱伝導率は高い。

6. 20℃・1mmHg乾燥試料に対する水分飽和試料の熱伝導率の増加割合は、1.2~2.5倍であった。水分飽和率の増加によるゼオライト岩の熱伝導率の増加の割合は特に大きく、宮城ゼオライトおよび熊ヶ根ゼオライトではそれぞれ2.5および2.3倍であった。

7. 個々の岩石について、岩石の熱伝導率は水分飽和率の増加とともに指数関数に類似した関係で増加するという従来の結果と同様の傾向が認められたが、岩石の熱伝導率を固相、液相、気相の熱伝導率や体積率の関数として実験式を求めることはできなかった。

謝辞 秋田職業能力開発短期大学学校校長 鈴木舜一先生（東北大学名誉教授）には本研究の全般にわたってご助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

引 用 文 献

- 1) 茂木 透・石沢一吉・西村 進・桂 京造：変質をうけた花崗岩類の熱伝導率、日本地熱学会誌、Vol. 8, p. 427-436, (1986)
- 2) 出口 衛・幾世橋 広・鈴木舜一：細線加熱比較法による岩石の熱伝導率の高精度測定法、資源と素材、Vol. 107, p. 17-22, (1991)
- 3) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック、p. 1354, (1987)、技報堂出版（東京）
- 4) 石油技術協会編：石油鉱業便覧、p. 511, (1983)、石油技術協会（東京）
- 5) 日本規格協会編：JIS工業用語大辞典、p. 461, (1982)、日本規格協会（東京）
- 6) 日本規格協会編：日本工業規格 M8107, p. 22, (1959), M8108, p. 66, (1994), M8109, p. 33, (1974), M8812, p. 38, (1993)、日本規格協会（東京）
- 7) Horai, K.: Thermal Conductivity of Rock-Forming Minerals, J. Geophys. Res., Vol. 76, p. 1278-1308, (1971)
- 8) Nottenburg, R., Rajeshevar, K., Rosenfold, R. and DuBow, J.: Measurement of Thermal Conductivity of Green River Oil Shales by a Thermal Comparator Technique, Fuel, Vol. 57, p. 789-795, (1978)
- 9) 伊藤芳朗・斎藤照夫・南雲政博・馬場健三：岩石の熱伝導率測定における Box Probe 法（熱線法）について、地熱、Vol. 12, p. 35-44, (1975)
- 10) 松本順一郎・大久保俊治：土の伝熱特性に関する実験的研究、土木学会論文集、Vol. 257, p. 53-60, (1977)
- 11) 幾世橋 広・出口 衛・京 宗輔：地熱地帯における土壌の有効熱伝導率に関する基礎研究、第8回日本地熱シンポジウム講演論文集、Vol. 8, p. 74-76, (1987)
- 12) 伊藤芳朗・斎藤照夫・南雲政博：岩石の種々なる物理的状態における熱伝導率測定について、地熱、Vol. 14, p. 21-34, (1977)
- 13) Mücke, G.: Die Wärmeleitfähigkeit von Karbongesteinen und ihr Einfluß auf das Grubenklima, Bergbau-Archiv, Vol. 25, p. 35-58, (1964)
- 14) De Vries, D.A.: Thermal Properties of Soils, Physics of Plant Environment. (edited by Van Wijk, W.R.), p. 210-235, (1963), North-Holland Pub. Co.
- 15) 石田智之・三野 徹・丸山利輔：低含水域における土壌の熱伝導、農土論集、Vol. 103, p. 28-34, (1983)
- 16) 三野 徹・石田智之・丸山利輔：三相系土壌の熱伝導モデルと熱伝導率の計算による推定、農土論集、Vol. 103, p. 35-43, (1983)
- 17) 出口 衛・幾世橋広・榎本兵治：三相系相乗平均モデルに基づいた相関式の導出と多孔質岩石の有効熱伝導率の解析 — 多孔質岩石の熱伝導率に関する研究（第2報）—、資源と素材、（投稿中）