

堆積岩の熱物性値取得に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

2001年2月



北海道大学

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

堆積岩の熱物性値取得に関する研究 (研究委託内容報告)

熊田 俊明*

要 旨

本報告では、提供された岩石（堆積岩Bおよび船生岩）の乾燥および水分飽和状態の熱伝導率および比熱を測定した。本研究シリーズの第2年度の受託研究として行った点熱源熱物性値測定法（1997年度）の測定精度を一層向上させて、測定を行った。

堆積岩Bの密度より求めた空隙率は0.55（水分を十分吸収させた場合と乾燥時の密度の差から計算した空隙率は0.42）である。このため熱伝導率は小さく、同じ密度であれば、堆積岩Bの熱伝導率はベントナイトの熱伝導率より幾分大きい程度である。乾燥および水分飽和状態の堆積岩Bの熱伝導率は、0.285W/mKと0.838W/mKである。水分飽和の場合の熱伝導率が乾燥時より約3倍大きい。同じ乾燥密度のベントナイトの熱伝導率の坂下・熊田の式による推算値は、それぞれ0.238W/mKと1.152W/mKで、その比は約4倍弱で堆積岩Bと大きな差はない。

船生岩の空隙率は26%で、構成する粒子が細かく空隙も比較的一様である。船生岩の熱伝導率は、乾燥時と水分飽和時で、0.914W/mKおよび1.41W/mKである。

堆積岩Bおよび船生岩を分散物質と見なして、乾燥時には空隙を空気の回転楕円体が分散されているとして、水分飽和時には空気の分散体が同じ形状の水の分散体に置き換わるとして、分散体の長軸と短軸および空隙率が0の場合の熱伝導率を決定し、異なる空隙率の場合の熱伝導率を推算するFrickeの式を導いた。

本報告書は、北海道大学が、核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究内容の結果である。

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部
処分バリア性能研究グループ

* 北海道大学

Measurements of Thermal Properties of Rocks

Toshiaki Kumada

Abstract

The report concerns the measurement of thermal conductivity and specific heat of supplied sedimental rock B and Funyu rock. The method of measurement of these properties was done with the method which was developed at 1997 and improved much in its accuracy by the present author et al. The porosity of sedimental rock B is 0.55, which is deduced from the density of rock (the porosity deduced from the difference between dry and water filled conditions is 0.42) and the shape and size of pores in rock are much different. Its thermal conductivity is 0.238 W/mK in dry and 1.152W/mK in water filled conditions respectively, while the thermal conductivity of bentonite is 0.238W/mK in dry and 1.152W/mK in water saturated conditions. The difference of thermal conductivity between dry and water saturated conditions is little different in sedimental rock B and bentonite at same porosity.

The porosity of Funyu rock is 0.26 and the shape and size of pores in the rock are uniform. Its thermal conductivity is 0.914W/mK in dry and 1.405W/mK in water saturated conditions, while the thermal conductivity of bentonite is 0.606W/mK in dry and 1.591W/mK in water saturated conditions respectively.

The correlation estimating thermal conductivity of rocks was derived based on Fricke correlation by presuming rocks as a suspension.

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| 1. 緒 言 | 1 |
| 2. 測定の改良 | 2 |
| 2-1 2次元モデルとプローブ各部の寸法決定法 | 2 |
| (1) 2次元モデル | |
| (2) 各部の寸法決定 | |
| 2-2 プローブの較正と熱物性値の決定法 | 5 |
| (1) プローブの較正 | |
| (2) グリセリンと水銀の測定温度 | |
| 2-3 測定回路と測定法 | 7 |
| 2-4 熱伝導率と比熱の決定法 | 8 |
| 3. 岩石の測定結果 | 11 |
| 3-1 試料の作成 | 11 |
| 3-2 測定結果 | 12 |
| 3-3 異なる空隙率の岩石の熱伝導率推算式 | 17 |
| 3-4 堆積岩Bの熱伝導率 | 19 |
| 3-5 測定誤差 | 19 |
| 4. 結 言 | 21 |
| 記 号 | 23 |
| 参考文献 | 24 |

1. 緒言

高レベルガラス固化体を深地層に埋設する際の緩衝材の周辺は、サイトによって結晶質岩が堆積岩である。したがって、ガラス固化体やその周辺の温度を知るには、緩衝材ばかりでなく周囲の岩石の熱伝導率も知る必要がある。

本研究シリーズの第2年度（1997年度）に提案した点熱源法⁽¹⁾を、比較的熱拡散率の小さい物質では、密度と比熱の積も精度よく決められるように改良した。3次元構造のサーミスタの2次元モデルをゼラチン水溶液により精密に較正した。測定による温度と計算値を、より初期の時間帯でも一致させるためには、密度と比熱の正確な値を用いる必要がある。このため、初期の段階から温度の計算値と測定値が一致するように密度と比熱の積を決定すれば、熱伝導率と密度と比熱の積を同時に決定できる。

提供された船生岩と堆石岩Bの乾燥と水分含有状態の熱伝導率を測定し、これらの岩石の空隙を回転楕円体状の空隙に換算して、Frickeの推算式を応用して異なる空隙率の岩石の熱伝導率を推算する式を提案した。この方法は、提供された岩石の種類が二種類と少なく、岩石の物理的性質についての十分なデータが無いため、必ずしも根拠のある方法といえない。したがって、この試みは、現状でどの程度の推算が可能を確かめる手掛かりを得る目的で行うものである。堆積岩Bでは、空隙の一部が開放型でないためか、空隙率から逆算した理論密度が 2017kg/m^3 と小さく、水分飽和の条件での測定はできなかった。したがって、乾燥状態での岩石の推算式のみを提示した。今後、岩石の種類が増え、その物理的性質がより詳細に明らかにされるならば、より一般性のある結論が導かれるものと考えられる。

2. 測定法の改良

岩石の熱伝導率を測定する前に、すでに開発した点熱原測定法の熱伝導モデルを大幅に改良した。熱伝導率だけでなく比熱と密度の積も測定できるように、二次元熱伝導モデルをより正確なモデルとして、測定温度の初期の段階から測定値に一致するように工夫した。

2-1 二次元モデルとプローブ各部の寸法決定法

(1) 二次元モデル

点熱源として使用するプローブの構造をFig.1-(a)に示す。プローブは、縦、横が0.3mm、厚さが0.15mmの直方体のサーミスタの両面にリード線を接合し、これを回転楕円体状のガラスにより被覆した構造である。二次元モデルを用いたのは、計算時間を短縮するためである。Fig.1-(b)に示すプローブの二次元熱伝導モデルは、円筒座標の r と z 方向の二次元である。サーミスタは寸法が直方体であるが、これを円柱状とした。また、円筒座標系で二次元とするためには、2本のリード線を1本にまとめる必要があり、サーミスタを模擬した円柱の中央にリード線を接続する構造とした。ガラス被覆はサーミスタ円柱と同軸の円柱状とした。このように実物とモデルの間の形状の違いは、サーミスタとガラス被覆および試料間の

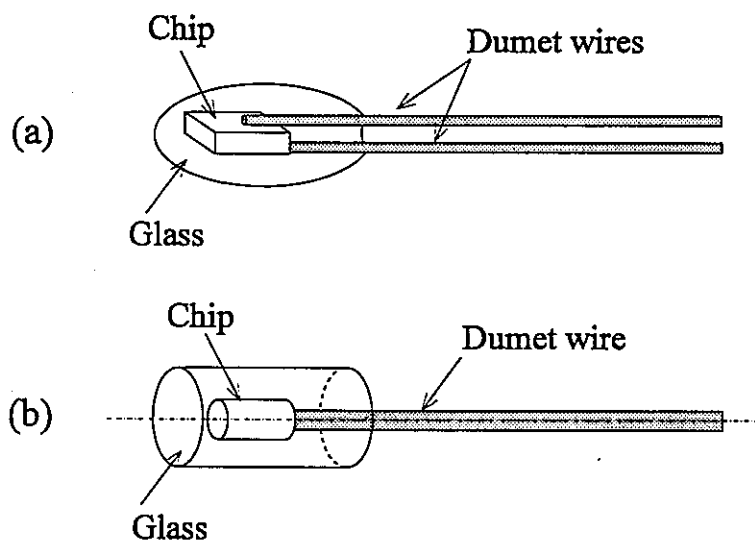


Fig.1 Structure of probe and its simulation model

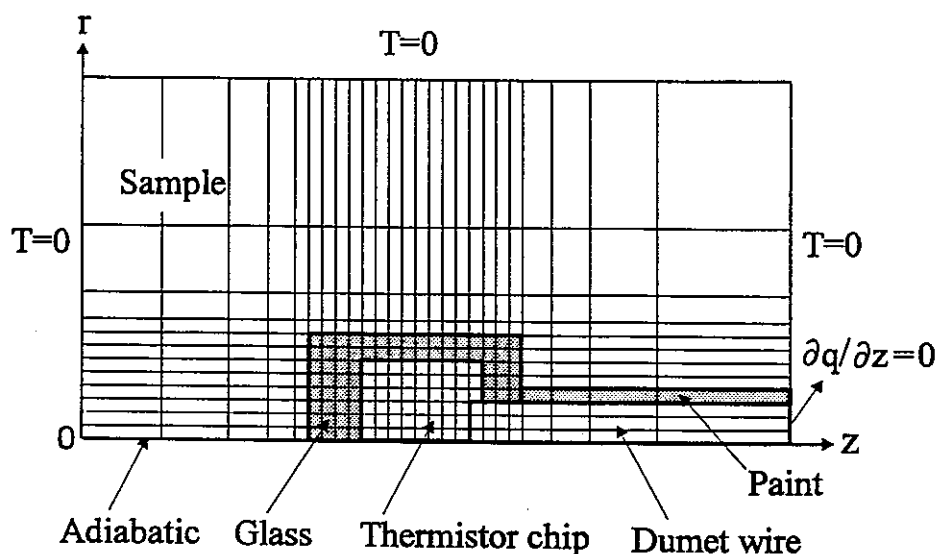


Fig.2 Two-dimensional calculation model

熱抵抗の違いとなり、サーミスタの温度に影響する。Fig.2に数値計算のためのメッシュの切り方を示す。温度勾配の大きいプローブ周辺の領域ではメッシュを細かくした。計算範囲は試料寸法より十分大きくした。モデル周囲の境界条件は、リード線端部では熱流束の勾配を一定として、他を初期温度とした。計算範囲を十分大きくしてあるので、熱伝導率の計算に必要な時間範囲では、試料の境界条件によるサーミスタの温度上昇への影響は、リード線を通じての熱伝導について検討すればよい。

(2)各部寸法の決定法

一般に、形状の違うモデルによって、実物のサーミスタ、ガラス被覆、リード線および試料の界面近傍の熱抵抗を厳密に近似することはできない。より近似を良くする形状を選び、標準試料の温度の時間変化をより正確に模擬するように寸法を決定する。

(2-1)リード線の直径と熱伝導率

市販のサーミスタのリード線には、外径が0.1mmのデュメット線が使われており、熱伝導率が銅線に近い。2本のリード線を一本にまとめることによる誤差要因は、サーミスタとリード線間およびリード線と試料間の熱伝導である。また、リード線が試料を出る位置で、サーミスタからの熱伝導によるリード線の温度上昇があれば、試料周辺の温度の影響が考えられる。サーミスタとリード

線間の接触面積を制限するため、リード線の先端部は実際のリード線と同じ直径とした。挿入距離は実際のリード線とサーミスタの接触面積と等しくなるように決め、熱伝導率は実際のリード線の2倍とした。Fig.3にサーミスタ近傍のモデルの構造を示す。

リード線と試料間の熱伝導を模擬するために、先端部を除きリード線の直径を2倍にして、2本のリード線と表面積を等しくした。また、熱伝導率を2分の1にすることで、2本のリード線の軸方向の熱コンダクタンスと等しくした。リード線の温度が試料出口で加熱前よりも高くなることによる影響については、試料出口でリード線の温度が十分下がっていることを計算により確かめた。リード線には絶縁塗料が塗布されており、この厚さを20 μm とした。

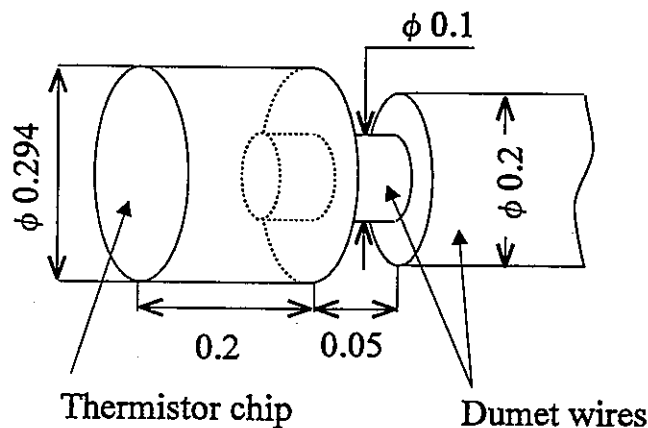


Fig.3 Details around contact between thermistor chip and lead wire

(2-2)サーミスタとガラス被覆の形状

サーミスタの熱伝導率がガラスに比べて10倍以上大きいことから、サーミスタ内の温度はリード線挿入部近傍を除いてほぼ均一である。サーミスタの形状を円柱状に近似することによるサーミスタ温度への影響は、ガラス被覆との界面形状の違いによる界面近傍での主としてガラス側の熱抵抗である。サーミスタの体積は寸法より既知であり、この体積を一定として、サーミスタの円柱の直径をパラメータとした。ガラスの形状は実物とあまり差がないので、長さを一定として直径をパラメータとした。

2-2 プローブの較正と熱物性値の決定法

(1) プローブの較正

標準物質として、0.5%重量のゼラチン水溶液を用いてステップ加熱の場合の温度を測定し、計算温度と測定温度がより一致するようにプローブ各部の寸法を決めた。この溶液の熱伝導率は、純粋の水のそれに比べて0.2%程度小さい⁽²⁾。ゼラチン水溶液の熱伝導率を用いて、計算値と測定値がより広い範囲で一致するように、2-1節で述べた二つのパラメータ（サーミスタ円柱とガラス円柱の直径）を決定した。Table 1 にプローブ各部の寸法を示す。Fig.4

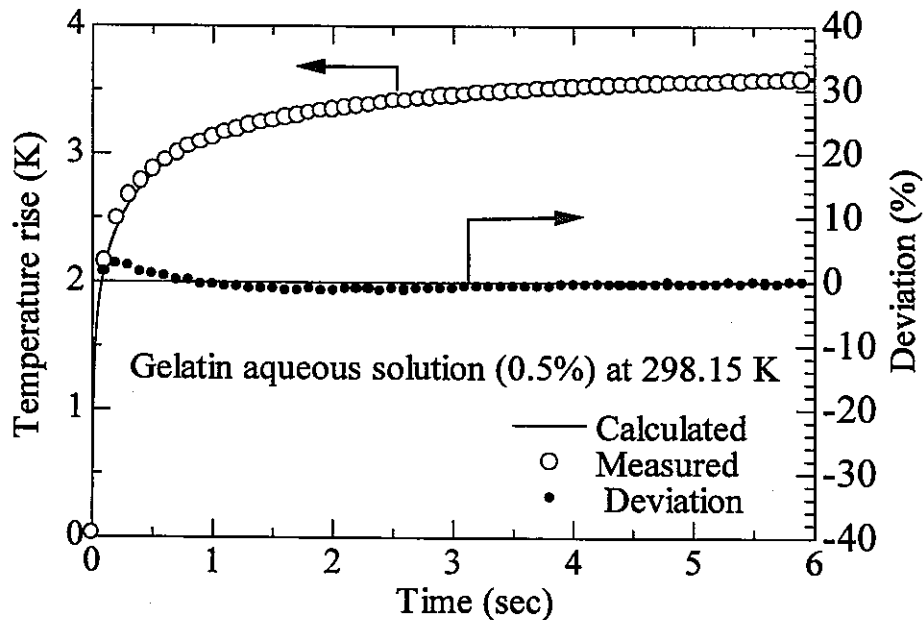


Fig.4 Comparison of measured and predicted temperature histories (gelatin aqueous solution)

Table 1 Specification of thermistor probe

| material | radius, mm | length, mm | λ , W/mK | ρ , Kg/m ³ | C_p , J/KgK |
|------------|----------------|---------------|---------------------|-------------------------------|------------------|
| dumet wire | 0.1 | 26 | 172 | 8400 | 485 |
| themistor | 0.147 | 0.2 | 20 | 5000 | 393 |
| glass | 0.26 | 1.0 | 0.85 | 2190 | 700 |
| paint | thickness 0.02 | | 0.1 | 1420 | 1093 |

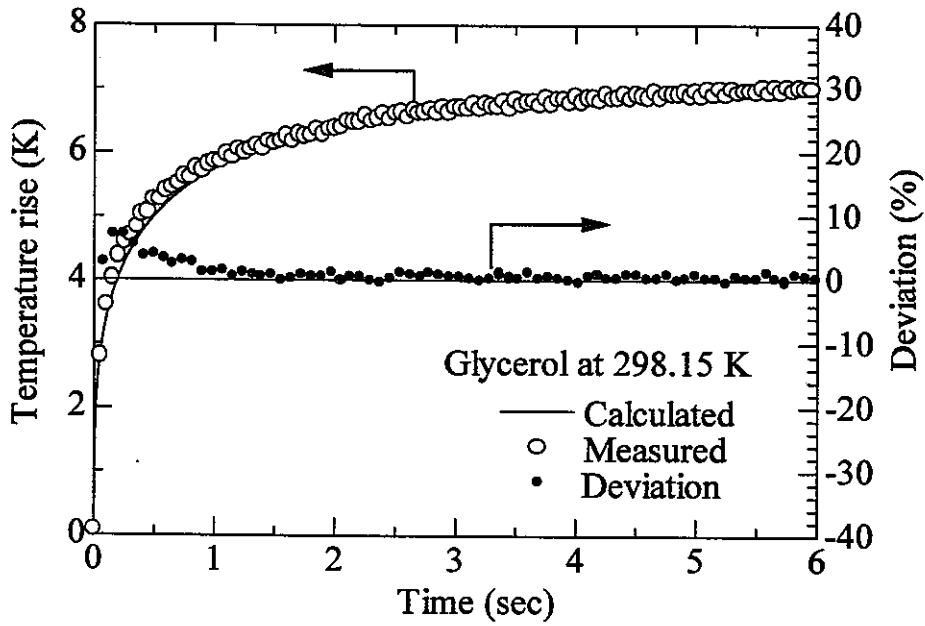


Fig.5 Comparison of measured and predicted temperature histories (glycerol)

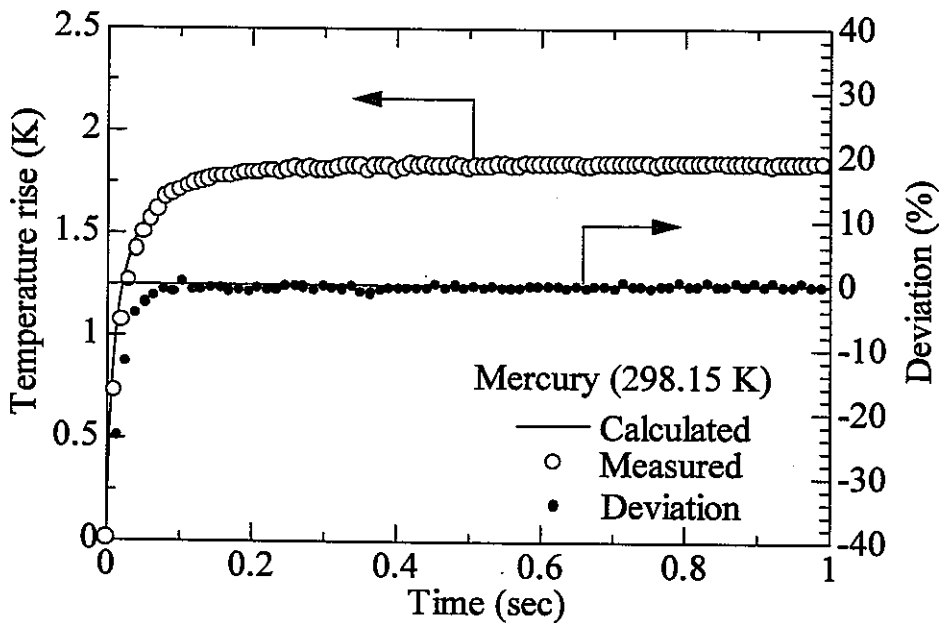


Fig.6 Comparison of measured and predicted temperature histories (mercury)

にステップ発熱の場合の温度の測定値と計算値の比較を示す。測定値と計算値は加熱開始から初期の温度域を除いてよく一致し、加熱開始から0.6秒経過すると偏差は1.0%以内となる。その間の誤差の原因は、主として実際のサーミスタプローブとモデルの形状の違いによると考えられ、熱拡散率を求める際には誤差要因とな

る。

(2) グリセリンと水銀の測定温度

熱伝導モデルを用いて熱伝導率を広い範囲で正確に計算するには、ゼラチン水溶液に比べて、熱伝導率が小さい試料と大きい試料について、十分な精度で温度を計算できなければならない。この目的のために、粘性が大きく測定時間の範囲では自然対流が起きないグリセリンと、測定時間が短いことと被覆のガラス表面の温度が低い対流の起きにくい水銀について温度を測定し、熱伝導率を計算した。Fig5、6に温度の計算値と測定値を示す。初期の温度領域を除いて、計算と測定による温度の差が小さく、グリセリンや水銀のように標準物質と熱伝導率が大きく異なる試料についても温度上昇を十分な精度で測定できることがわかる。

2-3 測定回路と測定法

本測定法では、熱伝導モデルを数値解析してサーミスタの温度上昇を求めるので、発熱率の時間変化に制限はない。しかし、サーミスタの発熱率は、パルスやステップ状変化のように急激な変化を伴う場合の方が、熱物性値を精度良く決定できる。測定系は

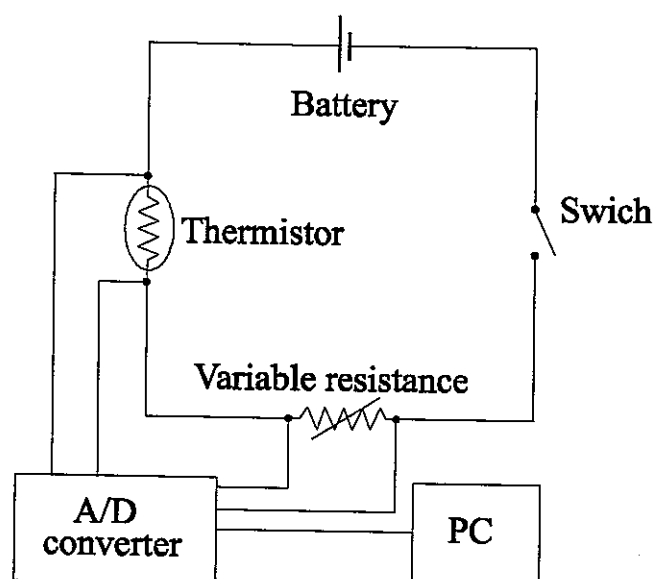


Fig.7 Measurement circuit

Fig.7に示すように極めて簡単な回路であり、この回路で可変抵抗とサーミスタの初期抵抗を等しくすると、サーミスタの温度変化が僅かであればステップ発熱の条件がほぼ満たされる。なお、サーミスタの電気抵抗は室温でほぼ $15\text{K}\Omega$ である。

サーミスタの温度上昇は 2K から 6K 程度であり、試料の周りを断熱構造としないと室温の僅かな変化の影響を受ける。試験部は外径 10mm （水銀では 20mm ）、高さ 15mm の円筒で、中央部にプローブを設置した。部屋の温度の影響を受けないように、保温材で覆って断熱構造として、所要の温度で定常となるのを待って、電源スイッチを入れ測定を開始する。基準抵抗とサーミスタの端子電圧をA-Dコンバータを介して 5KHz でパーソナルコンピュータに記録し、これを解析してサーミスタの温度と発熱率の時間変化を求める。測定試料の温度は、ガラス被覆表面温度（ $2\text{K}\sim 3.5\text{K}$ ）と加熱前の試料温度の平均値（膜温度）とした。

2-4 熱伝導率と比熱の決定法

試料の温度を計算するには、熱伝導率と熱拡散率か密度と比熱の積が必要である。一般に、密度や比熱は既知の場合が多い。例えば、圧密ベントナイトでは、乾燥密度や水分含有率が異なっても、乾燥状態のベントナイトや水の密度や比熱が既知であれば、種々の乾燥密度や水分含有率のベントナイトの比熱や密度を知ることができる。また、試料の密度と比熱の積は、物質によってあまり差がないので、通常 $\pm 30\%$ 程度の誤差で推算することは容易である。

ステップ発熱の場合でも、リード線の影響があつて、測定時間の範囲ではサーミスタの温度は定常とならない。この場合、熱伝導率を温度変化のどの時点で計算すべきか、基準が必要である。ここでは、次の無次元温度上昇率を採用した。測定した温度上昇を T 、加熱後の時間を t 、 t から Δt 時間後の温度上昇を ΔT として、 $(\Delta T/T)/(\Delta t/t)=G$ の値を計算してFig.8に示す。また同図には密度と比

熱の積 (ρC_p) が既知の場合について、極く初期の温度域を除いて、各時刻での一定時間幅（ゼラチン水溶液とグリセリンでは0.5秒、水銀では0.1秒）の温度の測定値と計算値の偏差が最小となるように、熱伝導率を決定した結果も示す。

初期温度域での測定値と文献値^{(3),(4)}の差は、主としてFig.4、5および6における温度の偏差によるものであり、結局熱伝導モデルの不完全さによる。ゼラチン水溶液やグリセリンでは、加熱開始から0.6および2.0秒後には熱伝導率の計算値は一定となり、Gの値では0.15に相当する。水銀では0.3秒後で熱伝導率がほぼ一定で、Gの値で0.04に相当する。通常物質では、 $G = 0.15$ より小さいGの値で熱伝導率を決定すればよい。水銀ではGの値が非常に小さくなっているが、水銀はガラス被覆に比べて熱伝導率が7から10倍大きく、初期の温度域では、サーミスタと水銀の温度差の大部分がガラス被覆中の温度降下である。このため水銀では、より後の時間帯の温度により熱伝導率を計算する必要がある、Gの値が小さくなる。なお、上に決めたGの値より小さい領域、すなわち、より後の時間

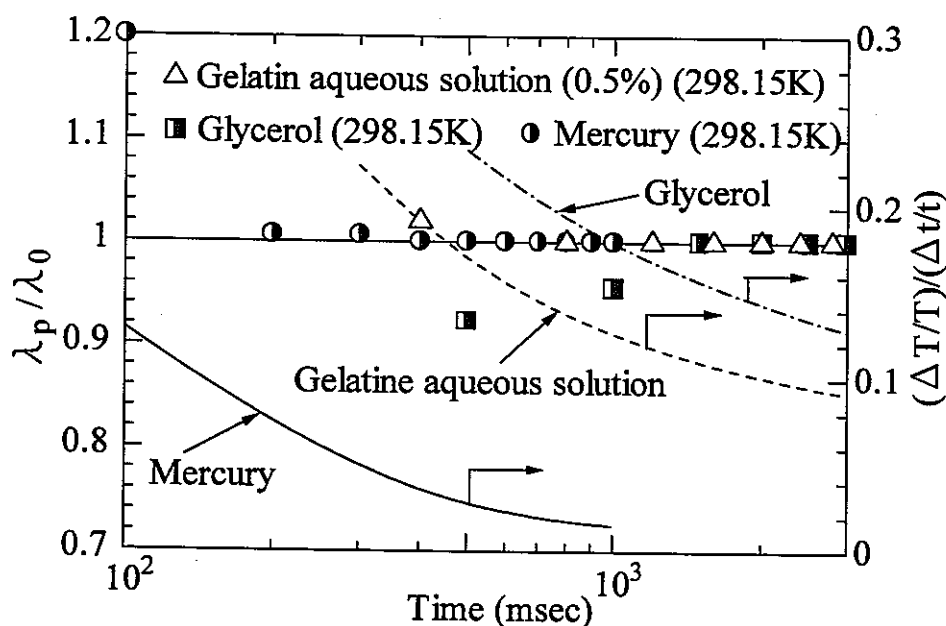


Fig.8 Measured thermal conductivity and non-dimensional increasing rate of temperature of each material

帯で熱伝導率を決める場合には、仮に (ρC_p) の値に20%程度の誤差があっても、求まる熱伝導率の値には差を生じない。したがって、 (ρC_p) の値が未知であっても、前述の適当なGの値について、計算による温度が、ある程度測定値に合うように (ρC_p) の値を選んで計算すれば、 (ρC_p) の値が既知の場合と同様の精度で熱伝導率を計算できる。

3. 岩石の測定結果

3-1 試料の作成

供与の二種類の岩石の板から2枚の試料を、Fig.9に示すように直方体状に切り出し、電気炉で200°Cの一定温度で5時間乾燥して乾燥岩石とする。この試料には、サーミスタプローブとほぼ同寸法の窪みとリード線部のための細い溝を設けた。二枚の試料の間にサーミスタプローブを挟んで測定用試料とする。この試料をFig.10に示す試験部にセットしてボルトで縮めて、サーミスタプローブと試料の接合状態を確実にする。堆積岩Bでは所々に大きな空隙があり、この位置を避けてプローブをセットする必要がある。岩石は固く、サーミスタとの熱的接触を良くするため強く締めると、プローブが破損する。このため、強く締め付ける方法と、二枚の試料の間にベントナイトの粉末を薄く塗る方法により測定を行った。

(1) 試料の乾燥密度と空隙率

空隙率は、試料の寸法と、試料の乾燥時と水分飽和時の重量差より試料に浸透した水分量より決定した。岩石に水を浸透させるには、真空容器に水を入れた後真空に引いて、岩石中の空気を膨張させて排除し、開放型の空隙には十分に水が入るようにした。岩石の空隙の性質については十分なデータが無く、試料が小さい

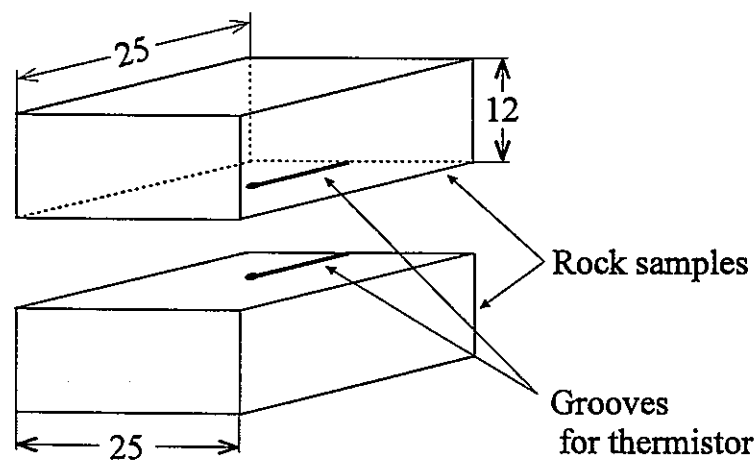


Fig.9 Specimens made of rocks

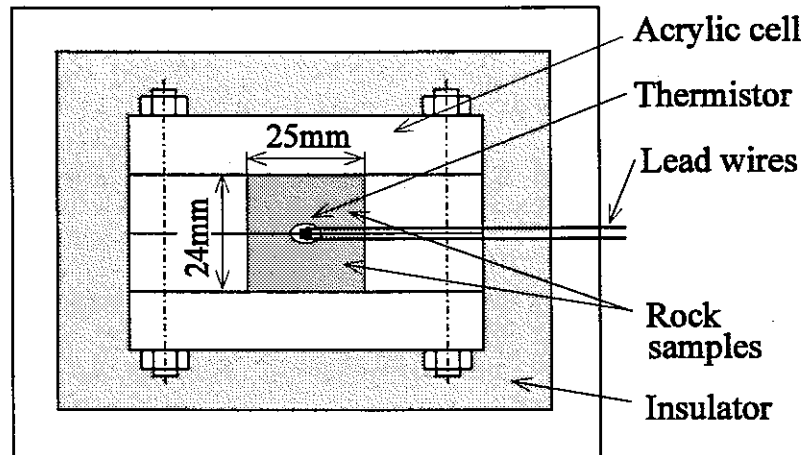


Fig.10 Test section for measurement of thermal conductivity of rocks

ので、閉じた空隙が有無については正確に測定できない。水分を吸収させて測定できる開放形の空隙率は、船生石が0.26、堆積岩Bが0.42であった。

この空隙がないとした場合の理論密度は、船生石が 2704kg/m^3 、堆積岩Bが 2017kg/m^3 となる。空隙のない岩石の密度が $2500\text{kg/m}^3 \sim 2800\text{kg/m}^3$ であることを考えると、堆積岩Bには閉じた空隙があるため密度が小さくなっていると考えられる。堆積岩Bの理論密度を 2704kg/m^3 とすれば、乾燥時の密度から計算した空隙率は0.55であり、乾燥時と水分を十分しみ込ませた場合の密度の差から求めた空隙率0.42とは0.13の差があり、仮定した理論密度が正しければ、この差が閉じた空隙となる。

3-2 測定結果

Fig.11~14に、堆積岩Bと船生石の、乾燥状態と閉じていない空隙に十分に水分を満たした場合の温度の測定結果と計算結果を示す。計算結果は、測定値と計算値の温度変化がよく一致するように、熱伝導率および比熱と密度の積を変化させて得た値である。乾燥試料の場合に問題となるサーミスタプローブと試料の熱的接触がよくないと、熱伝導率や比熱と密度の積の値が小さくなるよ

うな結果となる。この問題については、サーミスタプローブを試料に何度も設定し直し、測定した熱伝導率が最も大きい一定値が得られることを確かめた。この場合の熱伝導率の変動は5%程度である。

船生石および堆積岩Bの、乾燥および水分飽和の熱伝導率および空隙率などの測定結果の平均値をTable 2に示す。また、JNCより提供された測定値をTable 3に示す。岩石の空隙率と同じ空隙率のベントナイトの乾燥および水分飽和状態の熱伝導率をTable 4に示す。

Table 2 Various measured values of rocks (present)

| Name of rock | Volume (mm ³) | Porosity n | T _{sample} (K) | Sr(%) | Density ρ(Kg/m ³) | λ (W/mK) | α (mm ² /s) | C _p (KJ/KgK) |
|-------------------|---------------------------|------------|-------------------------|-------|-------------------------------|----------|------------------------|-------------------------|
| Sedimental rock B | 1380 | 0.55 | 298 | 0 | 1194 | 0.285 | 0.299 | 0.75 |
| Funyu rock | 1380 | 0.26 | 299 | 0 | 1990 | 0.914 | 0.574 | 0.8 |
| Sedimental rock B | 1380 | 0.55 | 293 | 100 | 1612 | 0.838 | 0.371 | 1.4 |
| Funyu rock | 1380 | 0.26 | 293 | 100 | 2254 | 1.405 | 0.623 | 1.2 |

Table 3 Various measured values of rocks (JNC)

| Name of rock | Volume (mm ³) | Porosity n | T _{sample} (K) | Sr(%) | Density ρ(Kg/m ³) | λ (W/mK) | α (mm ² /s) | C _p (KJ/KgK) |
|-------------------|---------------------------|------------|-------------------------|-------|-------------------------------|----------|------------------------|-------------------------|
| Sedimental rock B | 19600 | 0.55 | 293 | 0 | 1194 | 0.52 | 0.41 | 1.06 |
| Funyu rock | 19600 | 0.23 | 293 | 0 | 2079 | 1.08 | 0.82 | 0.66 |
| Sedimental rock B | 19600 | 0.55 | 293 | 100 | 1765 | 0.98 | 0.35 | 1.72 |
| Funyu rock | 19600 | 0.23 | 293 | 100 | 2309 | 1.72 | 0.71 | 1.07 |

Table 4 Predicted values of thermal conductivity of bentonite

| Porosity | Sr (%) | Density(Kg/m ³) | λp(W/mK) |
|----------|--------|-----------------------------|----------|
| 0.26 | 0 | 1940 | 0.606 |
| 0.55 | 0 | 1220 | 0.238 |
| 0.26 | 100 | 2220 | 1.591 |
| 0.55 | 100 | 1770 | 1.152 |

船生岩の熱伝導率は、同じ空隙率であれば、ベントナイトの熱伝導率より、乾燥状態で約50%大きく、水分飽和では約12%小さい。乾燥状態での差の原因は、船生岩を構成する粒子の接合の度合いが、ベントナイト粒子の場合より幾分大きいためと考えている。

ベントナイトの密度や水分含有の熱伝導率を推算する式を求めるのに、空隙分散体としてFrickeの式⁽⁵⁾を用いたが、船生石や堆積岩Bは、もともと粉体のベントナイトより分散体としての特徴を備えている。空隙に空気がある場合と水が充填された場合の熱伝導率の違いから、熱伝導率に影響する空隙を回転楕円体に近似した場合の回転軸とそれに垂直な軸の比、 a/b を求める。それによって、この場合の熱伝導率を推算する式を、Frickeの式に基づいて導くことにする。

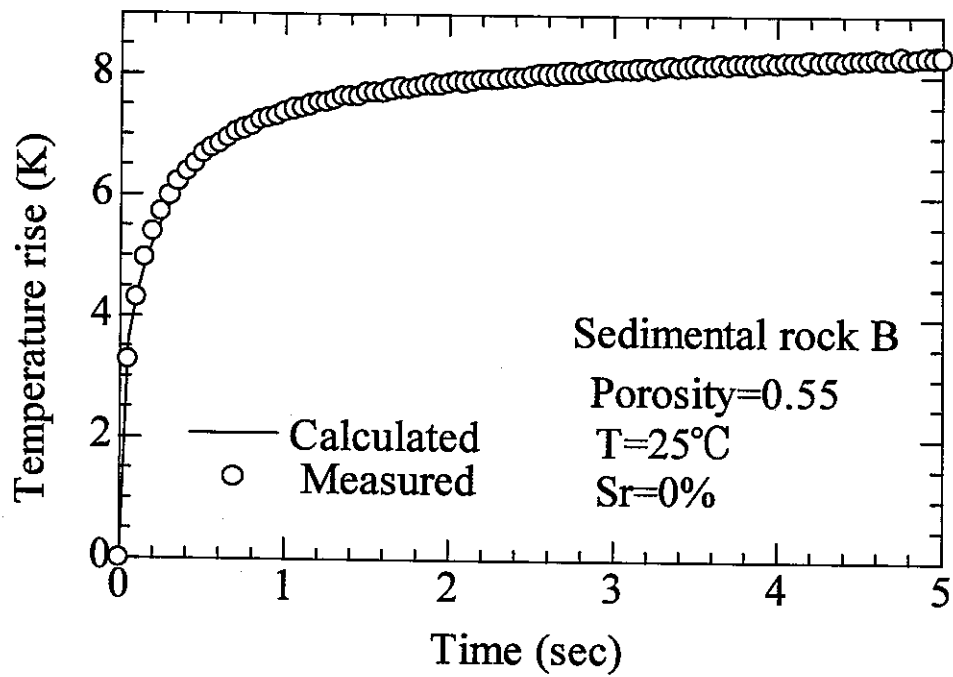


Fig.11 Comparison of measured and predicted temperature histories (Sedimental rock B :dry)

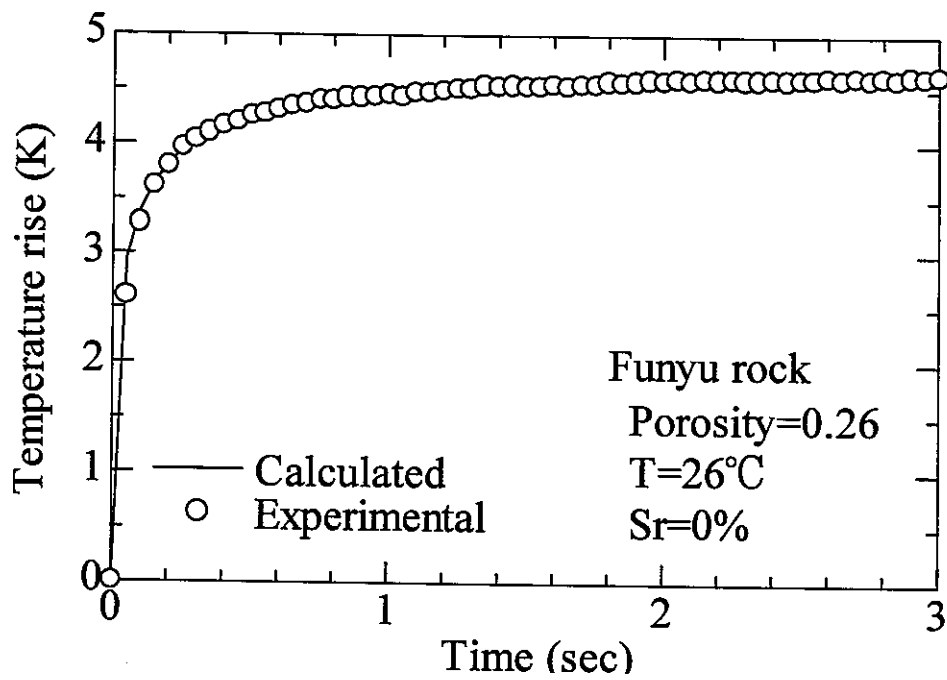


Fig.12 Comparison of measured and predicted temperature histories (Funiyu rock :dry)

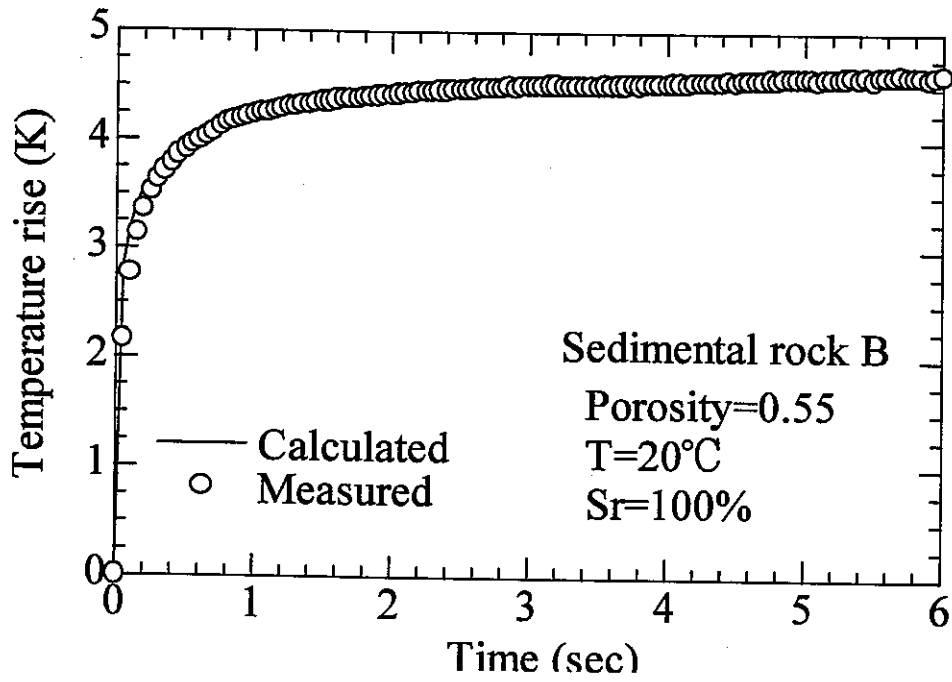


Fig.13 Comparison of measured and predicted temperature histories
(Sedimental rock B :water saturated)

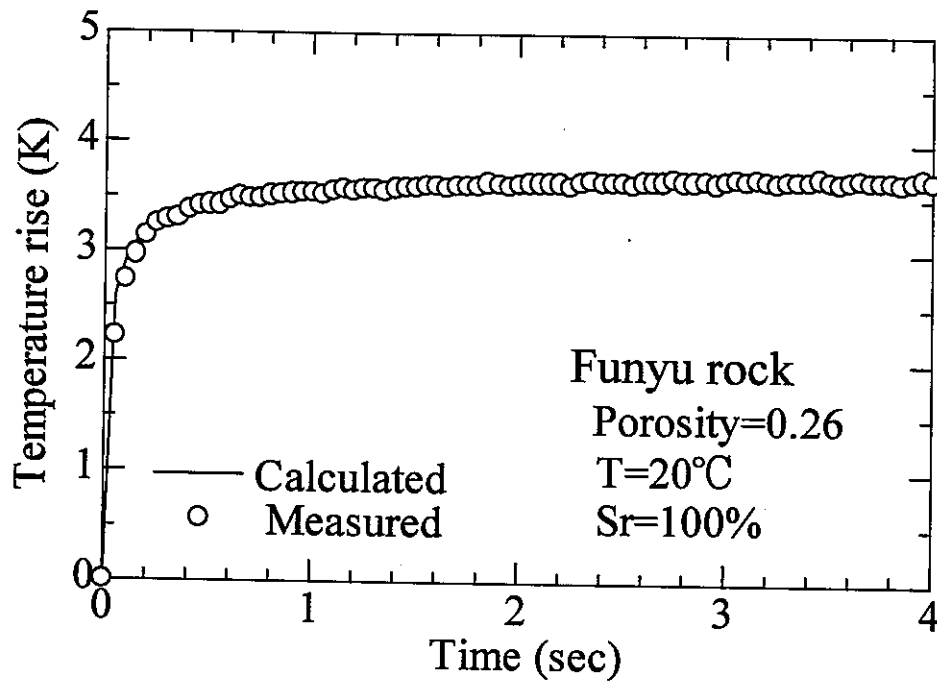


Fig.14 Comparison of measured and predicted temperature histories
(Funyu rock :water saturated)

3-3 異なる空隙率の岩石の熱伝導率推算式

堆積岩による乾燥および水分飽和の熱伝導率を求めたが、水分飽和度を変えた熱伝導率の測定はできていない。この理由は、水分飽和の状態から水分含有率を減らすために乾燥すると、先ず表面が乾燥して均一な水分分布の試料が得られないためである。そこで、これを推算する式を求めるために、岩石を連続媒質、空隙を分散体として、二種類の岩石の測定値に基づいて推算式を求める。まず、Frickeの式は次式で与えられる。

$$\lambda_{m,p} = \lambda_c \{x + \kappa - xP_d(1 - \kappa)\} / \{x + \kappa + P_d(1 - \kappa)\} \quad (1)$$

ここで、 $\lambda_{m,p}$ 、 λ_c は混合物質と連続媒質の熱伝導率、 $\kappa = \lambda_d / \lambda_c$ で、 λ_d は分散体の熱伝導率である。また、 x は次式で与えられる。

$$x = -\{(\kappa - 1) - \kappa\beta\} / \{(\kappa - 1) - \beta\} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{(\kappa - 1)}{3} \left\{ \frac{2}{1 + (\kappa - 1)M/2} + \frac{1}{1 + (\kappa - 1)(1 - M)} \right\} \quad (3)$$

$$M = \left\{ \frac{\theta - (1/2)\sin 2\theta}{\sin^3 \theta} \right\} \cos \theta \quad (4)$$

$$\cos \theta = a/b \quad (5)$$

ここで、 a は回転軸方向半径、 b はそれに垂直な方向の半径である。いま、式(1)により乾燥および水分飽和の状態での熱伝導率を $\lambda_{a,p}$ 、 $\lambda_{w,p}$ とすれば次式を得る。

$$\lambda_{a,p} = \lambda_c \{x + \kappa_a - xP_d(1 - \kappa_a)\} / \{x + \kappa_a + P_d(1 - \kappa_a)\} \quad (6)$$

$$\lambda_{w,p} = \lambda_c \{x + \kappa_w - xP_d(1 - \kappa_w)\} / \{x + \kappa_w + P_d(1 - \kappa_w)\} \quad (7)$$

ここで、 κ_a 、 κ_w は乾燥および水分飽和の岩石の熱伝導率比 ($\kappa_a = \lambda_a / \lambda_c$ 、 $\kappa_w = \lambda_w / \lambda_c$) である。形状係数 x は、回転楕円体の軸長比 a/b と熱伝導率比の関数であるから、軸長比 a/b と λ_c を未知数として、乾燥および水分飽和の熱伝導率の測定値により式(6)、(7)を連立して決定することができる。実際には、形状係数 x は式(2)~(5)で与えられ、 a/b と κ の複雑な関数となるため解析的に a/b と λ_c を決定することはできない。ここでは、 $\lambda_{a,p}$ 、 $\lambda_{w,p}$ が実験値と近い値となるような a/b と λ_c を繰り返し計算により求めている。Table 5は、このようにして決定

Table 5 Estimated values of λ_c and a/b

| Present | Name of rock | λ_c (W/mK) | a/b | ρ_m (Kg/m ³) | P_d | $\lambda_{a,d}$ (W/mK) | $\lambda_{w,d}$ (W/mK) |
|---------|--------------|--------------------|-------|-------------------------------|-------|------------------------|------------------------|
| Present | Sedimental B | 1.70 | 0.05 | 2704 | 0.55 | 0.283 | 0.99 0.624* |
| | Funyu | 2.00 | 0.075 | 2704 | 0.26 | 0.911 | 1.49 |
| JNC | Sedimental B | 2.00 | 0.14 | 2704 | 0.55 | 0.52 | 1.11 0.85* |
| | Funyu | 2.20 | 0.075 | 2704 | 0.23 | 1.08 | 1.68 |

λ_a および λ_w は、空隙が空気および水で満たされた場合の熱伝導率である。

*は空隙率 0.13 の閉じた空隙があるとした場合の熱伝導率である。

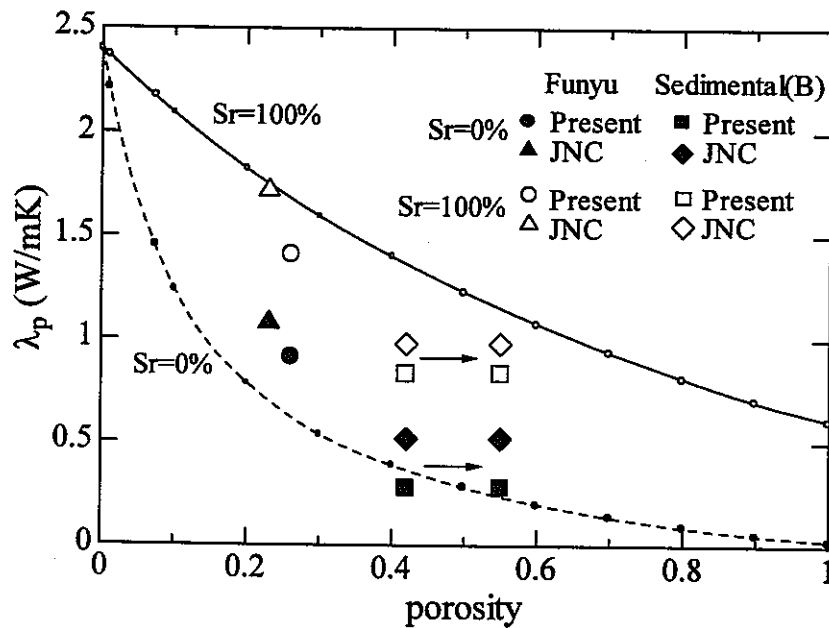


Fig.15 Comparisons of thermal conductivity of rocks and bentonite

した本測定値とJNCの測定値について、二つの岩石の a/b と λ_c の計算値である。船生石についてはJNCの測定した空隙率は0.23で、著者の測定値0.26とは僅かに差がある。堆積岩Bは著者らの測定値を用いて計算した。

Table 5の結果から、船生石については、 a/b と λ_c を適切に選べばFrickeの式によって乾燥と飽和の両熱伝導率を推算できることが分かる。堆積岩Bについては空隙率0.55の空隙が全て水で充満された場合 (λ_w の欄の上段) と、これを一様物質としてその中に空隙率0.13の閉じた空隙がある場合 (下段の*印) について計算した。測定値

は両者の中間の値となっている。また、著者とJNCの a/b と λ_c の計算値は、いずれも船生石と堆積岩Bではやや差がある。

Fig.15に、ベントナイトの熱伝導率を空隙率に対して求めた値と比較して、堆積岩の熱伝導率を示す。空隙率0.55は、理論密度を 2704kg/m^3 とした場合の値である。また空隙率0.42は、乾燥と水分充填の場合の密度の差から求めた値である。乾燥時の熱伝導率は同じ空隙率ではベントナイトの熱伝導率より幾分大きい、水分充填の場合には、ベントナイトと同程度か、幾分小さい値となっている。このことは、岩石がベントナイトに比べてよりコンソリデイト（接合）していることで理解できるが、ベントナイトが粉体であることを考えると、いずれの測定値も実際の熱伝導率の値より測定値が小さく測定されていると推定される。

3-4 堆積岩Bの熱伝導率

堆積岩Bの空隙率の中で、0.13相当が閉じた空隙とする。先に求めた λ_c 、 a/b の値を用いて、空隙がすべて水で飽和された場合の熱伝導率は、Table 5に示すように、本実験データに基づく 0.99W/mK 、JNCのデータに基づく 1.11W/mK である。これらの値の岩石中に0.13の空隙があるとして熱伝導率を計算すると、各々 0.62W/mK と 0.85W/mK となり、本測定値 0.838W/mK と JNCの測定値 0.98W/mK は両者の中間の値となっている。計算値と実験値が一致しない要因として、閉じた空隙と開いた空隙の形状の違いが影響しているとも考えられるが、詳細はさらに検討する必要がある。JNCの測定結果は、本測定値より試料とセンサーの接触がよく、測定値は幾分精度が良いと考えられるが、乾燥状態でベントナイトの熱伝導率との差は小さく、依然として試料とセンサーの接触が十分でないと考えられる。

3-5 測定誤差

乾燥時も水分含有の場合も熱伝導率が予想より小さく、ガラス

被覆のプローブと岩石の接合状態が十分でないために、熱伝導率が小さく測定されている可能性がある。この点については、今後測定法を改善して確かめる予定である。また、岩石の種類や性状についてのデータがあれば、さらに詳細な検討ができる。

4. 結言

ベントナイトの熱伝導率を測定するために提案したサーミスタを用いる方法で、2種類の堆積岩の熱伝導率を測定し、同じ空隙率のJNCおよびベントナイトの熱伝導率と比較した。

- (a) 測定した範囲の空隙率の乾燥岩石の熱伝導率は、同じ密度の乾燥ベントナイトの熱伝導率より幾分大きい。また、本測定値に比べて、JNCの測定値は船生石で15%、堆積岩Bで40%程度大きい。
- (b) JNCの水分飽和の船生石と堆積岩Bの熱伝導率は、水分飽和のベントナイトの熱伝導率との差は小さい。本測定値による熱伝導率は、ベントナイトのそれに比べて15%から20%小さな値となっているが、乾燥時に比べて差は小さくなっている。この理由は、岩石を構成する粒子がベントナイトより接合していることで説明できる。
- (c) 堆積岩Bは、乾燥時と水分を吸収させた場合の重量の差から求めた密度が 2017kg/m^3 と小さく、岩石内に閉じた空隙がある。堆積岩Bの理論密度を船生石の密度 2704kg/m^3 と同じと仮定して、乾燥時の空隙を求めると0.55であった。この値を用いて、乾燥時および水分飽和時の熱伝導率を推算する式を求めた。
- (d) 船生石の乾燥と飽和の場合の熱伝導率は、連続媒質の熱伝導率と空隙の形状を適切に選ぶことによってFrickeの式で推算することができる。
- (e) 堆積岩Bの空隙が全て水分で充満されたとして求めた熱伝導率の計算値は、本実験値に基づくと 0.99W/mK 、JNCの実験値に基づくと 1.11W/mK となった。これを一様物質として、0.13の閉じた空隙があるとして求めた熱伝導率は 0.624W/mK および 0.85W/mK であり、本実測値 0.99W/mK とJNCの実測値 0.98W/mK は両者の中間の値となった。計算値と実測値の不一致の原因は今後の検討課題である。
- (f) 以上の理論的検討は、岩石の種類が少なく、岩石が小さいため

に密度や水分含有率を正確に求められないため、測定精度は十分とはいえない。今後、岩石の種類を増やして検討する必要がある。また、本測定値ばかりでなくJNCの測定値もセンサーと試料の接触が十分でない可能性があり、今後この点について検討の必要がある。

記号

- a, b : 回転楕円体の回転軸とそれに垂直な軸長
 n : ベントナイトの空隙率
 P_d : 岩石の空隙率
 S_r : 水分飽和度
 T : 温度
 α : 熱拡散率
 κ : λ_d/λ_c
 ρ : 密度
 $\lambda_{a,p}$: 乾燥岩石の熱伝導率
 λ_c : 連続媒質の熱伝導率
 λ_d : 分散体の熱伝導率
 $\lambda_{m,p}$: 分散物質の熱伝導率
 $\lambda_{w,p}$: 水分飽和岩石の熱伝導率

添字

- a : 空気に関する値
 w : 水に関する値
 0 : 乾燥時の値

参考文献

1. 熊田俊明「点熱源法による緩衝材の熱物性値測定法の開発」, 動燃研究報告書, PNC ZJ160097-004, (1997)
2. T.Hori, K.Itoh; The 15th Japan Symposium on Thermophysical Properties, 215-218 (1994)
3. 日本熱物性学会編; 流体の熱物性値 (1986)
4. D.R.Lide; CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press 79th edition, 6 (1999)
5. Fricke, H.; Phys. Rev., 24, 575 (1924)
6. 坂下弘人, 熊田俊明: 日本原子力学会誌, 40[3], 235 (1998)