掘屑の熱伝導率とその技術的問題への応用について

田中彰一*・鈴木宏芳**

(昭和54年1月13日受理)

Thermal Conductivity Determined from Well Cuttings and its Application to Engineering Work

By

Shoichi TANAKA and Hiroyoshi SUZUKI

Abstract: Cores and cuttings are taken from a well located near Tokyo. Thermal conductivities of cores are determined from divided bar method. Thermal conductivities of cuttings are determined from needle probe method, and evaluated by three models, i.e. series distribution model, parallel distribution model and random distribution model. For sandy siltstone in shallow depth, the random distribution model gives same value as that obtained from cores, and the thermal conductivity of the sandy siltstone is 3×10^{-3} cal/cm·sec·°C. The heat flow of this well is approximately 0.9×10^{-6} cal/cm·sec. A thermal conductivity of schist in deep depth is estimated from the heat flow and geothermal gradient, and a value of 5.9×10^{-3} cal/cm·sec·°C is obtained. For this layer the series distribution model is a good one to estimate a thermal conductivity from cuttings data.

1. ま え が き

岩石の熱伝導率 (K_r) はマトリックスの熱伝導率 (K_s) と岩石の孔隙中を満している流体の熱伝導率 (K_f) および孔隙率 (ϕ) に関係し、これら4つの変数の間にはある関係がある。

$$K_r = f(K_s, K_f, \phi) \quad (1)$$

この関数形の具体的な形としては種々なものが提案されているが、次のものがよく用いられている¹⁾。

直列分布モデル：

$$K_r = \frac{K_s \cdot K_f}{\phi K_s + (1 - \phi) K_f} \quad (2)$$

調和平均モデルとも呼ばれ、最小値を与える。

並列分布モデル：

$$K_r = (1 - \phi) K_s + \phi K_f \quad (3)$$

算術平均モデルとも呼ばれ、最大値を与える。

ランダム分布モデル：

$$K_r = K_s^{(1-\phi)} \cdot K_f^{\phi} \quad (4)$$

重み付き幾何平均モデルとも呼ばれ、中間値を与える。

レジスターモデル：

$$K_r = \frac{a K_s K_f}{K_s(1-d) + d K_f} + b K_s + c K_f \quad (5)$$

ここで、 a, b, c および d は、それぞれ係数である。

これらの式より、3つの変数の値が与えられれば残りの1つの値を推定することができる。多孔質な岩石に対してはレジスターモデルがよく適合するといわれているが、簡単さのゆえに、ランダム分布モデルが実用式として用いられることが多い。

岩石の熱伝導率の測定は坑井より採取したコアを分割棒法で測定するのが標準的な方法であるが、最近では経済的理由と物理検層による調査法の進歩によりコアを必要以上に採取しない傾向がある。またコアの整形不能により測定ができないことがある。このようなことより掘屑を用いて熱伝導率を測定することが試みられている。また、岩石の熱伝導率は熱流量と温度勾配より推定することもできる。

岩石のマトリックスの熱伝導率の直接測定は孔隙の無い岩石を除けば不可能である。間接測定法としては岩石の熱伝導率より前記の諸式を用いて計算する方法と、掘屑の測定値より計算する方法とがある。

岩石の孔隙率の測定法としてはコアを用いる方法と物理検層による方法とがある。掘屑を用いる方法も提案されているが、試料が小さいので信頼性にとぼしい。

坑井の掘さくのさいには多量の掘屑が生成されるが、これを有効に利用することを技術上および経済上から考慮すべきである。掘屑を用いることの利点および問題点としては次のことがあげられる。

* 東京大学工学部資源開発工学科

** 科学技術庁国立防災科学技術センター

利点：

- 1) 多量に全層にわたって入手しうること。
- 2) 採取に特別な費用を要しないこと。
- 3) 水で飽和された状態で得られること。

問題点：

- 1) 採取深度に誤差が入りやすいので、かなりの厚さの地層しか対象としないこと。
- 2) 多量にある成分のみ集めやすく、不均質な地層では少量の成分あるいは泥水に流されやすい成分は無視されやすいこと。
- 3) 岩石に異方性があっても検出できず、平均的な値が得られること。
- 4) 何らかの方法で孔隙率がわかっている必要があること。

これらの点を考慮して用いれば、掘屑による熱伝導率の測定は工学的な方法の1つとして利用しうるであろう。

2. コアおよび掘屑熱伝導率について

掘屑の熱伝導率の測定法としては分割棒法²⁾およびニードルプローブ法³⁾が報告されている。本研究ではニードルプローブ法を用いたが、これの詳細については参考文献1と4を参照されたい。本研究においては国立防災科学技術センターの下総地殻活動観測井（千葉県東葛飾郡沼南町）を対象にして、掘屑の熱伝導率を測定し、同センターの行なったコアの分割棒法による測定との比較を試みた。なお、物理検層データも利用した。

掘屑の熱伝導率の測定の概要は次のようである⁴⁾。水で飽和した掘屑を円筒容器に入れ、これにニードル

プローブを挿入し、水と掘屑の混合物の熱伝導率を測定し、これを K_m とする。次に試料を乾燥して水の割合を (e) 測定する。水の熱伝導率 (K_w)*は物性表より求める。ランダム分布モデルの式(4)を用いて掘屑自体、すなわち、岩石マトリックスの熱伝導率 (K_s) を求める。

$$K_s = K_m^{(1/(1-e))} \cdot K_w^{-(e/(1-e))} \quad (5)$$

この掘屑の孔隙率がわかっているならば、式(4)より水で飽和した岩石の熱伝導率が計算できる。

コアの分割棒法による熱伝導率と掘屑のニードルプローブ法による熱伝導率との比較を表1に示す。同表のコア試験の欄の孔隙率はコア試験の間隙比より換算した。飽和度は94.4~98.2%と報告されている。コアの欄の K_r は岩石の熱伝導率である。掘屑はコア掘の直前または直後に採取し、物理検層曲線により同一地層であることを確かめた。前述の方法で掘屑のマトリックスの熱伝導率 (K_s) を求め、コア試験の孔隙率を用いて掘屑の熱伝導率 (K_r) に換算した。No.7の砂岩では、コアによる熱伝導率の測定が整形不能でできなかった。この坑井の物理検層柱状図を図1に、温度検層柱状図を図2に示す。これらは原図より50m間隔に測定値を読みとって作成した。

この坑井の地質層序は次のようである。上位から成田層群、上総層群、先上総第三系、1,500m以深は基盤（三波川系結晶片岩）となっている。基盤とその上の堆積岩とは物理検層で明瞭に区分されている。上総層群の砂質シルト岩においてはコアで2点、掘屑で3点の測定値がある。コアの岩石の熱伝導率の平均値は $3 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ であり、掘屑のそれは $3.1 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ であり、ほぼ一致している。No.1からNo.6

表1 下総地殻活動観測井のコアおよび掘屑の性質、コアの諸測定値は国立防災科学技術センターの報告書による。

No.	LITHOLOGY	CORE				CUTTINGS		
		DEPTH (m)	POROSITY (%)	BULK DENSITY (g/cm ³)	Kr	DEPTH (m)	Ks	Kr
1	SANDY SILTSTONE	323	48	1.99	3.0			
2	SANDY SILTSTONE	577	48	1.94	2.4	500	4.7	2.7
3	SANDY SILTSTONE	788	46	2.00		800	5.6	3.0
4	SANDY SILTSTONE	1104	44	2.09		1100	6.3	3.3
5	SANDY SILTSTONE	1250	44	1.99	4.2	1260	5.5	3.0
6	SANDY SILTSTONE	1403	38	2.16	3.7			
7	PALE GREEN SANDSTONE	1486	36	2.11		1500	11.0	5.3
8	SCHIST	1599		2.63	3.8	1600	12.0	
9	SCHIST	2164		2.79		2165	11.3	
10	SCHIST	2316		2.71	2.7	2317	12.6	

Kr - THERMAL CONDUCTIVITY OF ROCK ($10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$)

Ks - THERMAL CONDUCTIVITY OF MATRIX ($10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$)

* 水の熱伝導率は $1.4 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ とする。

図1 下総地殻活動観測井の物理検層柱状図

図2 下総地殻活動観測井の温度分布と熱伝導度の分布

までの砂質シルト岩を対象とすると、コア4点の平均値は 3.3×10^{-3} cal/cm·sec·°Cであり、掘屑4点の平均値は 3.0×10^{-3} cal/cm·sec·°Cであり、ほぼ一致している。

岩石のマトリックスの熱伝導率は岩石の鉱物組成に関係すると考えられるが、掘屑の測定値についてこの値(K_s)の深度による変化をみるとNo.7の砂岩を境にして2倍近い増加を示しており、岩石の組成がここを境にして異なっていることを示している。

基盤の試料No.8～10においてコアの測定値(K_f)と掘屑の測定値(K_s)が大幅に異なっている。これについては次のように考えられる。なお、基盤の掘屑は孔隙がほとんどないので、 K_f と K_s は等しいと考えられる。基盤は結晶片岩よりなるが、コア試験の熱伝導率においてその上位のシルト岩とほとんど差がない。No.8のコアの顕微鏡観察によれば石墨、緑泥石、絹雲母、石英からなる片岩で、方解石の細脈をもつ。No.10のコアは石墨、緑泥石、絹雲母、石英からなる片岩で方解石の細脈を含む。化学成分として SiO_2 の含有量はNo.8が64.8%、No.10は57.3%であり、以上のことよりこれらの片岩は砂岩あるいは泥岩の変成岩と思われる。石英の熱伝導率

として参考文献¹⁾は 20×10^{-3} cal/cm·sec·°Cの値を用いている。これらのことを考慮するとコアの熱伝導率の測定のさい何らかの障害があったものと思われる。

3. 基盤の性質の推定

この坑井は昭和52年6月に全作業が終了し、ケーシングは次のように設置されており、すべてセメンチングされている。

0～130m	20in
0～452m	13 $\frac{3}{8}$ in
0～1,500m	9 $\frac{5}{8}$ in
1,298～2,326m	7in (ライナー)

昭和52年12月12日に約6ヵ月の静置後温度検層が行なわれた。坑井内は地温とほぼ平衡状態になっていたと考えられる。温度検層柱状図と50m間隔で求めた地温勾配とを図2に示す。地表より500m位までは地温勾配の変動が大きい。それ以深ではシルト岩の区間は $2.5\text{--}2.8 \times 10^{-20}$ °C/mで平均 2.7×10^{-20} °C/mであるが、基盤中は $1.4\text{--}1.6 \times 10^{-20}$ °C/mで平均 1.5×10^{-20} °C/mに急激に減少し、岩石の熱的性質が大きく異なることを示している。この変化は前記の物理検層および熱伝導率の変化と合致している。ケーシングによる熱の流れの乱れについては、Conaway ら⁵⁾は温度勾配の連続測定($T\text{--log}$)においてケーシングの存在はほとんど影響がないと報告している。

この坑井は平野の中に位置しており、地殻深部からの熱は地表に向って垂直方向に平行に流れていると考えられる。以上の結果からシルト岩の区間の熱流量は次のようになる。

$$\text{熱伝導率 } K_f = 3.3 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{温度勾配 } \Delta T / \Delta L = 2.7 \times 10^{-20} ^\circ\text{C/m}$$

$$\text{熱流量 } q = 0.89 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$$

基盤における熱伝導率をこの熱流量と温度勾配より推定してみた。

熱流量 $q = 0.89 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$

温度勾配 $\Delta T / \Delta L = 1.5 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/m}$

熱伝導率 $K_r = 5.9 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$

基盤内の物理検層カーブには SP や比抵抗にみるようかなりの変化があり、これはコアの観察から割れ目の存在が考えられる。密度検層においては $2.75 \sim 2.60 \text{ g/cm}^3$ の変動がみられる。岩石マトリックスの密度を 2.75 g/cm^3 、割れ目を含む部分の密度を 2.6 g/cm^3 、水の密度を 1 g/cm^3 として孔隙率を計算すると約 9% となる。

熱流量より求めた岩石の熱伝導率 $5.9 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ と掘屑より求めたマトリックスの熱伝導率 $12.0 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ とより式(2)～(4)を用いて基盤の孔隙率を計算してみた。

直列分布モデル $\phi = 13\%$

並列分布モデル $\phi = 57\%$

ランダム分布モデル $\phi = 33\%$

密度検層からの計算値と比較すると直列分布モデルによる値が最も近い。したがって、基盤がほぼ同一の岩相よりなり、割れ目による孔隙が存在するとすればその割合は約 10% と推定される。

密度検層より求めた孔隙率 9% と、掘屑より求めたマトリックスの熱伝導率 $12.0 \times 10^{-3} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$ とから岩石の熱伝導率を求めると、次のようになる。

直列分布モデル $K_r = 7.1 \times 10^{-3}$

並列分布モデル $K_r = 11.0 \times 10^{-3}$

ランダム分布モデル $K_r = 10.6 \times 10^{-3}$

この場合も直列分布モデルが熱流量より求めた値に最も近くなっている。基盤の中の孔隙が割れ目によるもの証拠はないが、上位の堆積岩とは異なったモデルを適用すべきであると考えられる。

4. 応用面の検討

地下流体資源の開発において岩石の熱的性質が問題になるのは次の場合である。

(1) 動的状態における坑井内温度分布

泥水・セメント液の性質の調節

スチーム インジェクションの設計

冷水による高温岩体の破碎の設計

ホット ドライ ロックの熱回収の設計

(2) 静的状態における坑井内温度分布の回復と地温の推定

(3) 地層の熱包蔵量の推定

これらの検討において岩石の熱伝導率と比熱が必要となる。堆積岩においてはこれらの値の変動幅は比較的狭いが、変成岩や火成岩ではかなりの幅がある。岩石の熱伝導率は飽和流体により、また乾燥状態と濡れ状態とで

異なってくる。地下の岩石は水で飽和されているのが普通の状態であるから、その状態での熱伝導率を求める必要がある。岩石の熱伝導率の測定法としては次のものが考えられる。

(1) 岩石試料の室内測定

コアを用いるもの

掘屑を用いるもの

(2) 物理検層による測定

直接測定

間接測定

(3) トンネルの壁面における測定

物理検層による直接測定が最も望ましいものであるが、今後の開発課題である。コアの分割棒法による測定が精度の上からは最もすぐれているが、コアの採取は深度が増すと経済的にも技術的にも困難さが増してくること、かなり良好な状態で採取される必要があることが問題点である。

掘屑および温度検層からいかなる情報が得られるか検討してみた。熱伝導率の間には式(1)の関係があるが、水の熱伝導率は既知としうるから、 $K_r \cdot K_a \cdot \phi$ の3変数の関係になる。これらのうちの2つがわかれば残りの1つを推定しうるが、これらの間には種々な組み合わせが考えられる。

A. 掘屑より比較的容易に岩石のマトリックスの熱伝導率(K_r)を測定できる。

1) 岩石マトリックスの熱伝導率の深度分布は鉱物組成の変化を反映する1種の地質柱状図として役立つであろう。

2) 孔隙率(ϕ)がコアより、または物理検層より得られれば岩石の熱伝導率(K_r)を推定しうる。

粒間孔隙を主とする堆積岩においては、本論文2節で検討したようにランダム分布モデルが適用できる。

孔隙が割れ目を主とした変成岩や火成岩においては、本論文3節で検討したように直列分布モデルも考慮する必要がある。

3) 岩石の熱伝導率(K_r)がわかれば孔隙率が推定できるが、精度は低いものである。

B. 温度検層が利用できる場合：

1) 岩石の熱伝導率がわかっていれば熱流量が推定できる。

2) 熱流量がわかっていれば岩石の熱伝導率が推定できる。

3) 2において岩石のマトリックスの熱伝導率がわかれば孔隙率の見当がつけられる。

本論文においてはこれらのうちA-1, A-2, B-1, B-2およびB-3について坑井のデータを用いて論じたが、今

後のデータの蓄積が望まれる。

5. ま と め

下総地殻活動観測井における掘屑の熱伝導率を測定し、コアによる測定値との比較および温度検層との組み合わせ等について検討した。掘屑は特別な経費なしに多量に入手できるものであり、これの積極的な利用を考える必要がある。

(1) 掘屑の熱伝導率をニードルプローブ法で測定し、ランダム分布モデルで岩石の熱伝導率を求めた。

(2) 砂質シルト岩の熱伝導率について掘屑によるものとコアによるものと比較し、かなりよい一致をみた。

(3) マトリックスの熱伝導率は掘屑から容易に求まるが、これの深度による分布は地質柱状図の1種として利用できるであろう。

(4) 対象坑井付近の熱流量として $0.9 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{sec}$ の値を得た。

(5) 基盤の熱伝導率および孔隙率について種々な面より検討を加えた。

謝 辞

掘屑、物理検層柱状図およびコア試験結果の使用を許可された国立防災科学技術センターに感謝します。また、実験を担当された宮沢政助手に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Woodside, W. and Messmer, J.H. (1961): Thermal Conductivity of Porous Media. I. Unconsolidated Sands, *Jour. of Applied Physics*, vol. 32, no. 9, p.1688
- 2) Sass, J.H. et al. (1971): Thermal Conductivity of Rocks from Measurements on Fragments and its Application to Heat-Flow Determinations, *Jour. of Geophys. Union*, vol. 76, no. 14, p.3391
- 3) King, W. and Simmons, G. (1972): Heat Flow Near Orlando, Florida and Uvalde, Texas Determined from Well Cuttings, *Geothermics*, vol. 1, no. 4, p.133
- 4) 田中彰一・宮沢 政 (1979): ニードル プローブ 法による掘屑の熱伝導率の測定について, 地熱, vol. 16, no. 1, p.1
- 5) Conaway, J.G. and Bech, A.E. (1977): Continuous Logging of Temperature Gradients, *Tectonophysics*, vol. 41, p.1
- 6) 国立防災科学技術センター(1977): 下総地殻活動観測井作井工事報告書