

## 円筒状の貫入岩体による母岩温度の 時間変化の簡易解： 表計算を使った野外調査での簡単見積も りツール

兵藤 博信<sup>1)</sup>

キーワード：円筒状貫入体, 温度時間変化,  
簡易表計算解, 野外ツール

### 1. 緒言

火成岩が貫入する際に周りの岩体を加熱する。いわゆる接触変成をおこす。古地磁気学では磁性鉱物のキュリー温度以上になると岩石の磁化が完全リセット、それ以下では部分リセットを受ける。火成岩のNRM(自然残留磁化)がTRM(熱残留磁化)であることを確認するコンタクトテストにおいて、母岩側のNRMを知りたいとき、またその磁気ベクトルが火成岩による加熱の影響を受けていないことが保証される距離でのサンプリングを行うとき、リセットの範囲を野外で簡単に把握することが必要になる。

野外で簡単にその貫入時の温度分布を知ることができれば効率的にサンプリングを行うことができる。そこで、差分法を用いて貫入時からの時間と温度の関係が簡易的に計算できる表計算プログラムを開発した。このプログラムでは岩体のサイズや貫入温度のパラメータを変えて計算することができる。またノートパソコンなどで持ち歩くことも可能である。

### 2. 方法

円筒形(cylinder)の貫入岩体を考える。平板状の貫入岩体に対してはすでに1次元問題として解析解が示されている(Lovering, 1935; Jaeger, 1964)。これらの解析解で用いられる誤差関数はすでにエクセルなどの表計算に組み込み済みなので、時間変化および最高到達温度は簡単に計算できる。円筒座標では角度依存性はないものとして2次元の熱拡散方程式

$$\frac{1}{K} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

は法線方向の1次元の以下の形に焼きなおすことができる。

$$\frac{1}{K} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

これに差分法を適用し、時間の差分を $\Delta t$ 、位置の差分を $\Delta r$ として時刻 $t = m \Delta t$ 、位置 $r = n \Delta r$ と整数の形で表す。その時刻、位置の数値解を $T^m_n$ とすると $\Delta t$ だけ時間を進めた解は

$$T^{m+1}_n = K \left( 1 + \frac{1}{2n} \right) T^m_{n+1} + K \left( 1 - \frac{1}{2n} \right) T^m_{n-1} \\ + (1 - 2K) T^m_n$$

で表される。なお $r=0$ では対称性から上式は

$$T^{m+1}_0 = 4KT^m_1 + (1 - 4K)T^m_0$$

の形になる。ここで熱拡散係数 $K = \kappa / \rho c$ であり、 $\kappa$ は熱伝導率(2.243W/m/K; Roy *et al.*, 1981)、 $c$ は比熱(1090 J/kg; Roy *et al.*, 1981)、 $\rho$ は岩石の密度(2600 kg/m<sup>3</sup>; Judd and Shakoor, 1981)である。簡単のためこれらの値は貫入岩と母岩をともに同じとしたが、岩石の種類が異なっても大きく違う値ではない。温度依存性についても同様である。

これらの式を用いて玄武岩の貫入温度を1150℃、母岩の温度を50℃として計算すると接触部 $r=a$ での温度は600℃にも届かない。平板状の岩脈でも同様の結果となる(Lovering, 1935)。しかし古地磁気学の結果からよく知られているように、接触部の近傍では確かに磁鉄鉱(キュリー温度580℃)の磁気ベクトルはリセットによるTRMを獲得していることが多い(Schwarz, 1977)。これはマグマがもつ潜熱を考慮しないからで、通常は60kcal/g程度の潜熱が測定されている(Lange *et al.*, 1994)。

潜熱はリキダス以下ソリダス以上の温度範囲で放出される。組成にも依存し、難しい問題であるので簡単には解けない。しかし貫入岩体の中でなく母岩側の温度のみに注目するのであれば熱伝導自体は時間的に非常に遅い拡散過程とみなされるので、貫入と同時に全部の潜熱が放出されたと仮定しても実際のプロセスに比べ、さほど大きな差が出ないと考えられる(Jaeger, 1964)。計算では60cal/gの潜熱が貫入時に放出され温度が上昇するモデルを用いたが、当然岩体内の温度は貫入時の温度1150℃を上回ることはないので、モデルはあくまで母岩側の温度のみを示した。

### 3. 結果

計算結果を無次元化した形式でFig. 1に示す。ただし貫入温度1150℃、母岩温度50℃とした。円筒の半径 $a$ を基準として、たとえば全体の温度がほぼ200℃前後まで冷却するのに $a^2/K$ 年(半径100mで約400年)必要になる。接触部( $< 2m = 0.02a$ )は変化が急激なため近似もあまりよくなく、計算された値は実際よりやや高めになっていると考えられる。

1) 岡山理科大学自然科学研究所 〒700-0005 岡山市北区理大町 1-1 (hhyodo@rins.ous.ac.jp)

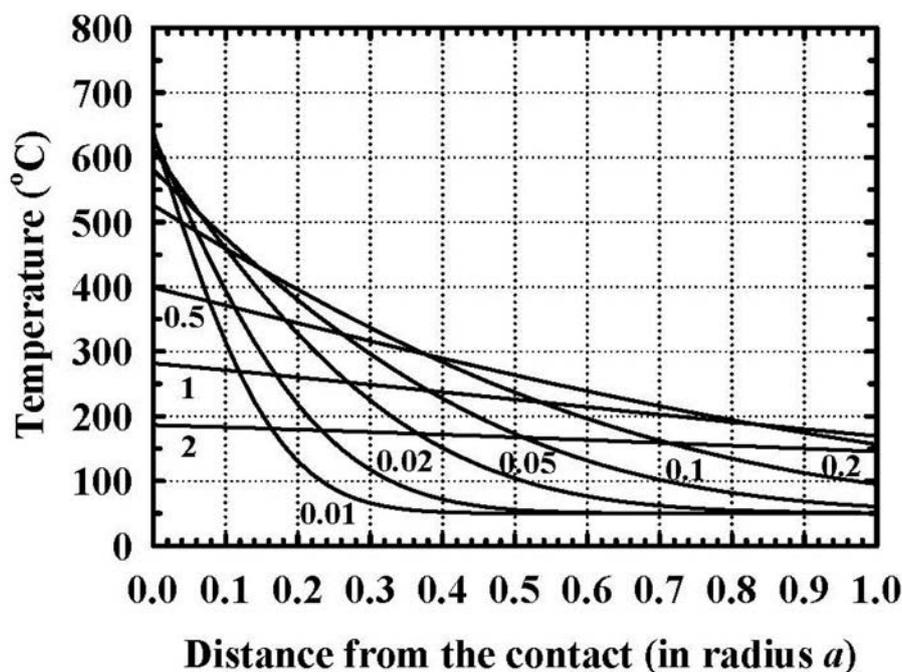


Fig. 1 Rough estimate of temperature distribution with time around cylindrical intrusion using spreadsheet. The distance from the contact is expressed in radius  $a$ . The number shown on each curve are time in  $a^2/K$ . It is approximately 400 years in case of 100 m radius cylinder. The area heated above  $300^\circ\text{C}$  is within  $0.4a$  from the contact.

#### 4. 応用

実際の貫入岩体は円筒状ではないことの方が多い。しかし熱伝導が非常にゆっくりとしたプロセスのおかげで、端の形状の効果が効いてくるのはかなり後になってからである。したがってほとんどの対象となる岩体は、母岩と接する部分の形状により平板状の場合の解析解と円筒状の解との間に入ってしまおうと考えられる。状況に応じて貫入温度、母岩温度、岩体のサイズ  $a$  を設定すれば、母岩の温度変化、その継続時間の見積もり等を近似的に行える。

計算で使用したプログラムは

<http://www.rins.ous.ac.jp/hyodo/dl/dl-list.php>

からダウンロードできる。必要に応じてメッシュやパラメータを変えることができるが、 $K\Delta t / (Ar)^2$  が 0.4 をこえないように  $\Delta t$ ,  $Ar$  を選ぶ必要がある。近似が悪くなると計算が発散してしまうのを避けるためである。小さくすると時間ステップが進まないため、表計算では初期の時間変化しか観察できない。適当な時間と距離の値を調節する必要がある。

#### 引用文献

- Jaeger, J. C. (1964) Thermal effects of intrusions. *Reviews of Geophysics*, 2, 443-466.
- Judd, W. R. and Shakoor, A. (1981) Density. In: *Physical Properties of Rocks and Minerals*, (eds. Touloukian, Y. S., Judd, W. R. and Roy, R. F.), McGraw-Hill Book Co., New York, 29-43.
- Lange, R. A., Cashman, K. V. and Navrotsky, A. (1994) Direct measurements of latent heat during crystallization and melting of a ugandite and an olivine basalt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118, 169-181.
- Lovering, T. S. (1935) Theory of heat conduction applied to geological problems. *Geological Society of America Bulletin*, 46, 69-94.
- Roy, R. F., Beck, A. E. and Touloukian, Y. S. (1981) Thermophysical properties of rocks. In: *Physical Properties of Rocks and Minerals*, (eds. Touloukian, Y. S., Judd, W. R. and Roy, R. F.), McGraw-Hill Book Co., New York, 409-502.
- Schwarz, E. J. (1977) Depth of burial from remanent magnetization: the Sudbury irruptive at the time of diabase intrusion (1250 Ma). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14, 82-88.

2015年6月22日受付, 2015年6月29日受理.