

一次元熱輸送モデルによる熱流束推定手法の再検討

Reinvestigation of Estimation Method of Heat Flux by One-dimensional Heat Flow Models

坂川 幸洋[1]; 梅田 浩司[1]

Yukihiro Sakagawa[1]; Koji Umeda[1]

[1] サイクル機構・東濃地科学センター

[1] TGC, JNC

<http://www.jnc.go.jp/>

1. はじめに

梅田ほか(2003)は従来からコンパイルされてきた坑井温度データベース(矢野・村岡, 1986), 地殻熱流量のデータセット(山野ほか, 1997)に加えて, 新たに報告されたデータや市町村の温泉ボーリング等による未公表の坑井温度プロファイルを集集し, Bredehoeft and Papadopoulos (1965)(以降「BP」と書く)の一次元熱輸送モデルにより坑井ごとの熱流束の算定を行った。そして, パターンが山野ほか(1997)の地殻熱流量図や矢野ほか(1999)の地温勾配図等とほぼ一致する広域熱流束分布を得た。また, 火山・地熱地帯では, 流体の流動に伴う熱輸送が卓越しており, 0.5 W/m²を超えることを示した。なお, この坑井温度プロファイルのデータセットは坂川ほか(2004)により公開されている。

著者らは梅田ほか(2003)の熱流束算定方法に若干の修正を加えて再解析するとともに, Clauser and Villinger (1990)(以降「CV」と書く)の一次元熱輸送モデルにより坑井ごとの熱流束の算定を行った。

2. 2種類の一次元熱輸送モデルによる熱流束

2種類の一次元熱輸送モデルは, 熱伝導率についてBPが均質媒体, CVが水平多層媒体であることを除き本質的に同等である。2者は実測データにモデル曲線をフィッティングして熱流束等を求める際, BPが温度の値そのものの残差を最小にするのに対し, CVは温度勾配と熱伝導率の積(局所伝導熱流束)の対数の残差を最小にするという違いがある。

BPのモデルは, 地下深部の熱源によって加熱され上昇する流体は, 上昇にしたがって冷却するがその冷却された分は熱伝導によって輸送され, 伝導による熱流量と流体の流動による熱流量が上方境界面を含めて各深度で一定に保たれていると仮定している。このモデルに基づく深度Zの温度T_zは,

$$T_z = T_0 + (T_L - T_0) \left[\frac{\exp\left(-\frac{z - z_0}{L}\right) - 1}{\exp\left(-\frac{z_0 - z_0}{L}\right) - 1} \right]$$
$$= \frac{c v L}{K} (T_L - T_0) \left[\frac{\exp\left(-\frac{z - z_0}{L}\right) - 1}{\exp\left(-\frac{z_0 - z_0}{L}\right) - 1} \right]$$

で表される(但し, Kは媒体の熱伝導率, ρは水の密度, cは水の比熱, vは流動速度(下向きを正), z₀は上方境界面深度, T₀およびT_Lはそれぞれ上下境界面の温度, Lは媒体厚である)。但し, v = 0の場合は,

$$T_z = T_0 + (T_L - T_0) \frac{(z - z_0)}{L}$$

である。解析では温度の残差を最小にする無次元パラメータを探索する。これにより伝導熱流束がT_z'K, 移流熱流束が-cv(T_z - T_r)で計算できる。但し, T_z'は温度勾配, T_rは基準温度であり通常T₀を採る。

CVでは深度Zの伝導熱流束q_z(=T_z'K)の自然対数を,

$$\ln(q_z) = \ln(q_0) - (z - z_0) \text{Pe}/L$$

$$\text{Pe} = \frac{c v L}{K}$$

と書く。但し, vは上向きを正とするため, ペクレ数PeはBPのとは符号が逆である。水平多層媒体の場合, Peの表式におけるKは媒体全体に関する代表値である。PeはT_z'Kの自然対数のグラフに対して直線回帰を行い, その勾配-Pe/Lから求まる。水平多層媒体の場合, グラフは一般に折れ線状になるはずだがCVではこれを直線に近似する。伝導熱流束q_zは回帰直線から読み取る。移流熱流束は-cv(T_z - T_r) = K(T_z - T_r)Pe/Lで計算できる。なお, 今回の解析では地下モデルを均質媒体とした。

3. 水の比熱変化の考慮

一般の温度変化過程に対する比熱は

$$c = c_p + \left(\left(\frac{Q}{P} \right) \middle| T \right) \left(\frac{dP}{dT} \right)$$

で表される(但し, c_pは水の定圧比熱, Qは単位質量あたりの流入熱量, Pは圧力)。室温~200の純水(液体)のc_pは4200J/kg/K弱~4500J/kg/K弱である。(Q/P)|Tは圧力依存性に比べ温度依存性が強く, 20で-6E-5J/kg/Pa程度, 220で-9E-4J/kg/Pa程度である。比較的低温, 又は温度勾配が緩すぎない場合にはc=c_pであるが, 高温かつ緩温度勾配の場合にはcはc_pと大幅に違い得る。

例えば, 高温を想定し(Q/P)|T = -1E-3J/kg/PaとするとdP/dT = 2MPa/Kで((Q/P)|T)(dP/dT) = -2000J/kg/Kとなり, cがc_pの半分近くにまで小さくなる。dP/dT = 2MPa/Kは200m強あたり1の温

度勾配に相当する。CV の解析では片対数グラフ勾配が重要であり、それは c に比例する。安定した解析を行うには解析区間で c の変化が小さいことが必要である。そのため、CV の解析では高温かつ緩温度勾配の深度領域を解析区間から除くことにした。

4．結果

BP と CV の解析結果によると、坑井温度プロファイルに乱れがある場合には、熱流束の見積もりに 2 割程度の違いが生じる。しかしながら、日本列島スケールでの評価では熱流束の広域的なパターンと一致していることや火山・地熱地帯での流体流動に伴う熱輸送は、熱伝導卓越地域に比べて 10 倍程度に及ぶこと等の結果は、梅田ほか（2003）と整合的である。