流体物性が著しく変化する場合の
多孔質体内自然対流熱伝達*増田 善雄^{*1}, 木村 繁男^{*1}, 林 一夫^{*2}Natural Convection Heat Transfer in a Porous Matrix with
Significant Fluid Property Changes

Yoshio MASUDA, Shigeo KIMURA and Kazuo HAYASHI

Natural convection heat transfer in a porous matrix with significant fluid property changes under high pressure and temperature is analyzed by a finite element method. A specific problem involves convection in a square box heated from one side. The fluid properties are mostly tabulated from a steam table, but the viscosity is calculated from temperature and density. It is found that the average heat transfer characteristics with significant fluid property changes do not differ much from those with Boussinesq approximation, if the Rayleigh number is defined at the algebraic mean temperature. However, local Nusselt numbers and temperature fields exhibit measurable deviations, primarily due to significant viscosity changes.

Key Words: Natural Convection, Heat Trasfer, Porous Media, Fluid Property Change, Numerical Solution, Finite Element

1. 結 言

多孔質体内自然対流の応用分野として代表的なものに地熱貯留層の解析が挙げられる。地熱貯留層から効率的に熱を抽出するためには貯留層内での熱水流動やそれにともなう熱移動についての諸特性を明らかにする必要がある。また地球物理の面からも例えば地下高温貫入岩体の冷却過程、および天然地熱貯留層の形成過程と、それにともなう地表面での熱流速異常との関係は地熱探査のうえで重要な問題である⁽¹⁾。ただし地下は高圧下にあるため水は広い温度範囲で液体の状態が存在すると予想されるが、物性値(特に粘性)は大きく変化することが考えられる。しかしこのように流体物性が著しく変化する場合での多孔質体内自然対流による基本的熱伝達特性について満足な理解が得られているとは言い難い。

最近多孔質体内の熱伝達の研究は数多く行われてい

る⁽²⁾。そのなかで流体の物性値変化を考慮したものとしては、Ribandoら⁽³⁾によるものがある。これは (μ/k) の値を深さ方向に変化させた場合の数値解析を行ったものである。またGaryら⁽⁴⁾は粘性を温度と深さの関数として表し、数値解析を行った。その結果、対流パターンの対称性が著しく失われたり、熱伝達特性が物性値一定の場合に比べて低くなったりする傾向などが報告されている。しかしこれらはいずれも下方加熱の場合の計算である。一方地熱貯留層内の熱解析の分野では、蒸気表を組み込んで計算を行っているものがいくつか見られる⁽⁵⁾。しかしこれらの解析の多くは個別のフィールドを対称としたものであり、閉空間での自然対流による熱移動のようにある基本的な物理現象についての知見を深めようとしたものではない。

このため著者らは物性値変化が自然対流熱伝達特性に及ぼす影響を解析する目的で、多孔質内での自然対流をシミュレートする有限要素法の数値解析プログラムに蒸気表を組み込むことにより、広い温度範囲での熱水の物性値変化を考慮して計算することを可能にした。本報告においては地球物理学的应用を念頭におき、実際の地下の状態に近い状況下で、液体単相状態での自然対流による熱伝達について解析を行った。特にまだ物性値変化を取り入れた研究が行われていない側方

* 平成2年9月23日 第68期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成2年10月8日。

^{*1} 正員、東北工業技術試験所 (〒983 仙台市宮城野区苦竹4-2-1)。

^{*2} 正員、東北大学流体科学研究所 (〒980 仙台市青葉区片平2-1-1)。

加熱による自然対流を対象とし、これまで多数報告がある物性値一定(Boussinesq 近似)による熱伝達特性を地熱解析に適用する場合の妥当性について検討を加えるものである。

主 な 記 号

- c : 比熱
 d : 代表長さ
 g : 重力の加速度
 h : 比エンタルピー
 H : 局所熱伝達率 $= -\lambda(dT/dx)/\Delta T$
 k : 透水性
 Nu : 局所ヌッセルト数 $= Hd/\lambda$
 $\overline{Nu}$: 平均ヌッセルト数
 p : 圧力
 T : 温度
 t : 時間
 ΔT : 温度差 $= T_h - T_c$
 Ra : レイリー数 $= g\beta\Delta Tdk/\alpha\nu$
 u : 流速
 α : 飽和多孔質体の温度拡散率 $= \lambda_w/\rho_w c_w \times \phi + \lambda_r/\rho_w c_w \times (1-\phi)$
 β : 体膨張率
 λ : 熱伝導率
 μ : 粘性係数
 ν : 動粘度
 ρ : 密度
 ϕ : 間げき率
添 字
 c : 低温壁
 h : 高温壁
 r : 多孔質体
 w : 流体(水)

2. 基礎式および計算方法

蒸気表の組込みが容易なため未知数は圧力 p と比エンタルピー h とする。連続式およびエネルギー方程式をそれぞれ次のように表す。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla F + w = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla G + q = 0$$

M , E はそれぞれ単位体積当たりの流体質量, 内部エネルギー, F は質量流束, G はエネルギー流束, w , q はそれぞれ単位体積内でわき出す質量流量, エネルギー流量である。

ここで

$$M = \phi \rho$$

$$E = \phi(\rho h - p) + (1 - \phi)\rho_r c_r T$$

$$F = \rho u$$

$$G = -\lambda \nabla T + \rho h u$$

なお速度ベクトル u は, 多孔質内での流動なので Darcy 式が成り立つものとする, 次の式のようになる。

$$u = -\frac{k}{\mu}(\nabla p - \rho g)$$

わき出しがない, つまり $w = q = 0$ で, 流体は非圧縮性と仮定して, 計算を行った。

流体の粘度以外の物性値は蒸気表から一次補間して求める。粘度は密度と温度の関数として次式で与えられるものとする⁽⁷⁾。

$$\mu = \mu_0 \exp \left[\frac{\rho}{\rho^*} \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^4 b_{ij} \left(\frac{T^*}{T} - 1 \right)^i \left(\frac{\rho}{\rho^*} - 1 \right)^j \right]$$

ここに

$$\mu_0 = \left(\frac{T}{T^*} \right)^{1/2} \left[\sum_{k=0}^3 a_k^* \left(\frac{T}{T^*} \right)^k \right]^{-1} \times 10^{-6}$$

であるとする [係数などは文献⁽⁶⁾によるものとしここでは省略する]。多孔質体の物性値としては, 実際の岩体の物性値を用いた。それらの物性値を表 1 に示す。

実際の地熱貯留層の問題では, き裂などの複雑な形状への適応なども考える必要があるため, 解析手法としてははん用性の高い Galerkin 有限要素法を用いて二次元非定常の計算を行った。要素には三角形要素を用い一次の内挿関数を用いた。時間微分に関しては安定性を考慮して完全陰解法を用い, 非線形項は誤差が 0.1% 以下になるまで繰返し計算することにより求めた。

3. 解 析 条 件

解析の条件としては地下 1.5~2.0 km にある水で飽和された岩体を考え, 500 m × 500 m の閉区間で左側面の温度が $t=0$ において急に上がったものとして計算を行い, 温度変動がなくなった時点で定常と認めた。左右の面は等温壁, 上下の面は断熱壁であるとし

表 1 計算に用いた物性値

Parameter	Symbol	Value	
Thermal conductivity	λ	3.64	[W/m K]
Porosity	ϕ	0.12	[-]
Porous Matrix density	ρ_r	2500	[kg/m ³]
Porous Matrix specific heat c_r		963	[J/kg K]

図 1 物理モデル

た。なおこのときの物理モデルを図 1 に示す。

温度の範囲は 323.15~473.15 K, 初期圧力は静水圧とした。レイリー数 Ra は領域内の平均温度での物性値で定義するものとし、透水率 k の値によって Ra を変化させた。このため k は 6.02×10^{-15} から 1.2×10^{-12} の範囲の値となった。

4. 結果および考察

図 2 に物性値変化を考慮した場合としない場合それぞれの、 Ra 数と平均 Nu 数の関係を示す。実線が物性値変化を考慮しない場合で、○印などが考慮した場合である。実線と○印などがよく一致していることから、自然対流によるマクロな熱伝達特性は物性値変化を考慮しない場合(Boussinesq 近似を用いた場合)とほぼ同じであることがわかった。このことは地熱貯留層解析のような流体物性が著しく変化する場合の計算に Boussinesq 近似を用いても、平均 Nu 数で見ると限りにおいては妥当な結果が得られることを示している。

しかし局所的には物性値変化を考慮した影響が出ている。図 3 に $Ra=100, 200, 300$ のときの物性値変化を考慮しない場合と考慮した場合(温度差 150 K)の温度分布を示す。破線が物性値変化を考慮した場合、実線が考慮しなかった場合である。図 3 から物性値変化を考慮した場合、領域上部の高温部分がより大きく張り出し、領域下部の低温部分の張り出しが抑えられることが明らかになった。次にこのような場合の流速ベクトルについて示す。図 4 に $Ra=100, 200, 300$ での物性値一定の場合と物性値変化を考慮した場合の流速ベクトルを示す。これらの図から物性値一定の場合には中心点で対称であった流速ベクトルが、物性値変化を

図 2 物性値変化を考慮した場合としない場合の熱伝達特性の比較

(a) $Ra=100$, $T_h=473.15$, $T_c=323.15$

(b) $Ra=200$, $T_h=473.15$, $T_c=323.15$

(c) $Ra=300$, $T_h=473.15$, $T_c=323.15$

図 3 物性値を考慮した場合(破線)としない場合(実線)の温度分布の比較(等温線の間隔は 15 K)

考慮した場合には中心点がずれてしまうことがわかった。また領域の上部や、高温壁付近では流速がかなり速くなっていることもわかった。このように領域上部で速い流れが起こり、領域下部では流れが抑えられることから図3のような温度分布となることが考えられ

る。図5では $Ra=100, 200, 300$ の各場合での、等温壁での局所 Nu 数の y 方向における分布を示す。破線が物性値変化を考慮した場合で、実線が考慮しなかった場合である。図5から最も流速の影響が現れやすいと思われる高温壁の上部と、低温壁の下部において局

図4 流速ベクトル

図 5 物性値を考慮した場合(破線)としない場合(実線)の壁面での局所 Nu 数

所 Nu 数の違いが最も大きく現れている。さらにこの場合にも領域内の対称性が崩れていることが明らかとなった。

これらのことは粘度が大きな温度依存性を持つためであると思われる。 $T=323.15\text{ K}$ では $\mu=5.5 \times 10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ であるが、 $T=473.15\text{ K}$ では $\mu=1.4 \times 10^{-4}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ であり、領域内で約 4 倍も違っている。このため高温部と低温部で大きな速度差を生じ、それが領域内の対称性を奪っていると思われる。

5. 結 言

地下の高温高圧下で流体物性が著しく変化する場合の、飽和多孔質体内での自然対流熱伝達の数値解析を行い、以下の結論を得た。

- (1) 流体物性を考慮した場合でも、平均温度の物

性値で定義される Ra 数に基づいて整理すると、マクロな熱伝達特性には大きな違いは生じない。

- (2) 流体物性を考慮した場合、高温壁上部で熱伝達量が大きく、低温壁下部で熱伝達量が小さくなるなど、領域内の温度場、局所 Nu 数などの対称性が崩れる。

- (3) (2)の現象は粘度の温度依存性が大きいためであると思われる。

文 献

- (1) Kimura, S., ほか 1 名, *J. Phys. Earth*, **36**(1988), 185.
- (2) 増岡, 伝熱研究, **28**-108(1989), 147.
- (3) Ribando, R. J., ほか 1 名, *J. Heat Transf.*, **103**(1976), 42.
- (4) Gary, J., ほか 3 名, *J. Fluid Mech.*, **117**(1982), 233.
- (5) 林・ほか 1 名, 日本地熱学会誌, **11**(1989), 43.
- (6) 長島, 機誌, **79**-696(1976), 1040.