

単一き裂を含む岩体からの熱抽出問題 (有限要素法による数値解析)

増田善雄*¹, 木村繁男*², 林 一夫*³

Heat Extraction from a Hot Rock with a single fracture (Numerical Analysis by a Finite Element Method)

Yoshio MASUDA, Shigeo KIMURA, and Kazuo HAYASHI

Two numerical methods to analyze heat extraction problem through fractured rock are examined. A specific problem to which the numerical methods are applied assumes a single fracture that drains heat from neighboring blocks of homogeneous and isotropic impermeable rock. The outlet temperature history is monitored to evaluate the amount of heat extraction from the rock.

One is the method of Equivalent Porous Media proposed by Gale. In this method the product of the width, b , and the permeability, k , of a fracture block is kept constant. Therefore, the actual dimension of b and the actual permeability of k are often significantly different from those in the numerical calculation. The numerical results by this method are not well compared with the analytical data proposed by Gringarten *et al.*, especially when b is taken much larger than the actual fracture width.

However, the results by the second method, LINC, proposed by the present authors are favorably compared with the analytical data. In this method the heat and fluid flows in the fracture and those in the less permeable rock are calculated separately. The interaction between the fractures and the rock formation is then taken into account through sink and source terms in the governing equations that are describing the transport phenomena in the respective systems.

1. 緒言

過去20年にわたる地熱貯留層内の探査と、計測技術の進歩にともない貯留層内の構造が次第に明らかになりつつある。それによると貯留層の構造は、一様な多孔隙体の空間によって構成されていると考えるよりむしろ透水率の低い岩体と岩体内に存在するき裂のネットワークにより構成されていると考える方が合理的であるということが明らかになってきた。このため地熱熱水の流動は主にき裂を通して行われ、熱移動のメカニズムとしてはき裂内では流れによる移流効果が支配的であるのに対し、岩体内では熱拡散が支配的である。このようにき裂内での熱移動現象と岩体内での熱移動現象は全く異なった因子により支配されていると考え

られる。

このような系を計算する場合、き裂部分のメッシュは他の岩体部分と比べて極めて小さくする必要があり、計算時間や計算機の主記憶容量などの点で困難が伴う。またタイムステップは現象が速いき裂部分に制限されてタイムステップを大きくとることが出来ないため、計算量、計算時間の増大につながる。このため地熱貯留層の数値解析を行う場合何らかのモデル化が必要となり、多くのモデルが提案されてきた。Gale¹⁾は Equivalent Porous Media の考えを示し、花野ら²⁾はこの方法を実際の地熱貯留層解析に応用している。また筆者ら^{3) 4)}はき裂支配型地熱貯留層の計算に有効な LINC法 (Line Source Implanted Networks for Fractured Continua)を開発した。本論文ではこのふたつの方法を紹介し、単一き裂からの熱抽出問題に応用した。

*1 機械金属部計測制御課
*2 機械金属部計測制御課主任研究官
*3 東北大学流体科学研究所

2. 使用した主な記号

b : き裂幅	[m]
c : 比熱	[J/kgK]
E : 単位体積あたりの内部エネルギー	[J/m ³]
F : 質量流束	[kg/m ² s]
G : エネルギー流束	[J/m ² s]
g : 重力加速度	[m/s ²]
h : 比エンタルピ	[J/kg]
k : 透水性	[m ²]
L : き裂長さ	[m]
M : 単位体積あたりの流体質量	[kg/m ³]
p : 圧力	[Pa]
Q : 流量	[m ³ /s]
q : 単位体積内で湧き出すエネルギー流量	[J/m ³ s]
T : 温度	[K]
t : 時間	[s]
u : 流速	[m/s]
W : 岩体の幅	[m]
w : 単位体積内で湧き出す質量流量	[kg/m ³ s]
γ : 無次元長さ (岩体の幅)	[-]
θ : 無次元温度	[-]
λ : 熱伝導率	[W/mK]
μ : 粘度	[Pa s]
ρ : 密度	[kg/m ³]
τ : 無次元時間	[-]
ϕ : 間隙率	[-]
添字	
o : 初期値	
f : き裂	
r : 岩体	
w : 流体 (水)	

3. 基礎式及び計算方法

今回の計算においてはき裂の開口幅は十分に小さく流れも遅いと仮定して、き裂内の流れにも Darcy 則が成り立っているとした。そのため基礎式は岩体もき裂も同一の式となる。蒸気表の組み込みが容易なため未知数は圧力 p と比エンタルピ h とする。連続式及びエネルギー方程式をそれぞれ次のように表す。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \nabla F + w = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla G + q = 0 \tag{2}$$

M , E はそれぞれ単位体積あたりの流体質量、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湧き出す質量流量、エネルギー流量である。

ここで

$$M = \phi \rho \tag{3}$$

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

$$F = \rho u$$

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

とする。

なお速度ベクトル u は、Darcy 式が成り立つものとする。と次の式のようになる。

$$u = -\frac{k}{\mu} (\nabla p - \rho g) \tag{4}$$

流体は水とし、常に液体単相の状態にあるものとして、非圧縮性の条件を仮定して計算を行った。

解析手法としては汎用性の高い Galerkin 有限要素法を用いた。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た。

4. Equivalent Porous Media の考え方

この方法はき裂自身の透水性からき裂周辺をも含めた部分であるフラクチャーブロックの透水性に換算する方法である。き裂自身の透水性を求め、同一圧力差においてフラクチャーブロック断面における流量がき裂そのもの場合と等しくなるようにフラクチャーブロックの透水性を決定する、すなわちフラクチャーブロックの幅と透水性の積とを一定とする方法である。この方法を用いるとメッシュをき裂の厚さそのものに切ることではなく、き裂の厚さより大きくすることが出来るのでメッシュを極端に細かくする必要がなくなり、計算上のメリットが大きい。なおき裂自身の透水性を計算する方法としては、き裂内の流れを層流と仮定して、き裂の開口幅から透水性を計算するいわゆる Cubic Law がある。Cubic Law による式は次のようになる。

$$k_f = \frac{b^2}{12} \tag{5}$$

ここで b はき裂の開口幅 [m]、 k_f はき裂自身の透水性 [m²] となる。Cubic Law で透水性を求め、それを Equivalent Porous Media の方法を用いてフラクチャーブロックを広げるという具体的な方法を図 1 に示す。

この方法を単一き裂を含む岩体からの熱抽出問題に応用し、この方法の問題点を明らかにする。単一き裂による岩体からの熱抽出問題は高温岩体発電システム

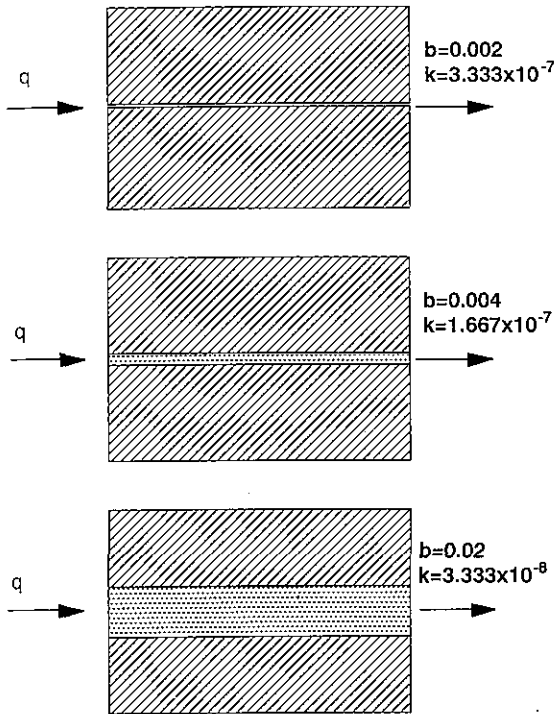


図1 Equivalent Porous Mediaの方法

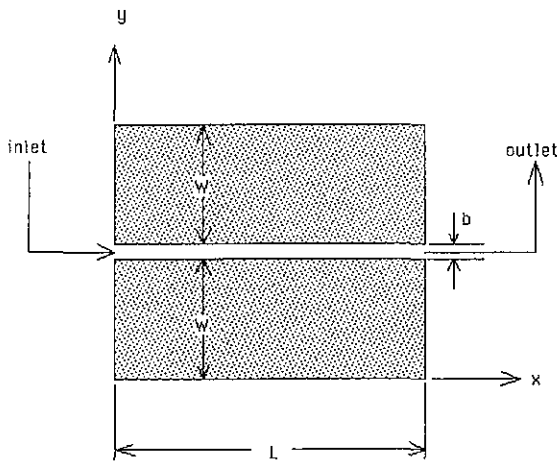


図2 物理モデルと座標軸

の開発に関係することからこれまで様々な研究がなされている (例えば厨川ほか⁵⁾)。ここでは Gringarten ら⁶⁾ によって解析された問題を、流体の物性値は常に一定であると仮定して計算を行った。今回取り上げた問題の物理モデルと座標軸を図2に示す。長さW長

表1 計算に用いた物性値

Parameter	Symbol	Value	Dimension
Thermal Conductivity	λ	3.64	[w/m k]
Porosity	ϕ	0.12	[-]
Porous Matrix Density	ρ	2500	[kg/m ³]
Porous Matrix Specific Heat	c	963	[J/kg K]

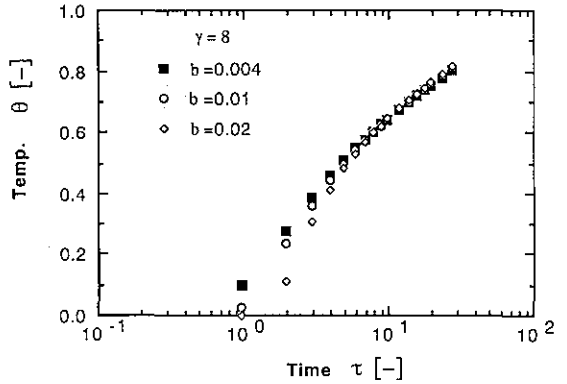


図3 Equivalent Porous Mediaの方法による計算結果

さLの2つの高温岩体 (温度 T_{r0}) の間に熱水を含む幅 b のき裂が存在し、熱的及び静水圧的に平衡状態にあるとする。岩体の物性値については表1に示す通りである。ここで時刻 $t=0$ において x 方向に圧力勾配が発生し、 $x=0$ から一定の割合で冷水 (温度 T_{w0}) が注入される。この時出口 ($x=L$) での温度履歴について計算値と比較検討する。岩体の境界条件は次のようになっている。

$$\frac{\partial T_r(0, y, t)}{\partial x} = \frac{\partial T_r(L, y, t)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_r(x, 0, t)}{\partial y} = \frac{\partial T_r(x, 2W+b, t)}{\partial y} = 0$$

計算結果は Gringarten らに従って、次のような無次元数と無次元パラメータに基づいて整理した。

$$\theta = [T_r - T_w(L; t)] / (T_{r0} - T_{w0}) \quad (7)$$

$$\gamma = (\rho_w c_w / \lambda_r) (Q/L) W$$

$$\tau = [(\rho_w c_w)^2 / \lambda_r \rho_r c_r] (Q/L)^2 t$$

図3に $\gamma=8.0$ の場合の出口温度の履歴を示す。なお b はフラクチャーブロックの厚さであり、 $b=0.004$ の場合の計算結果は Gringarten らによるものとよく一致している。図から $b=0.01$ までほぼ一定の値を示しており、Gale の考えが有効であることを示して

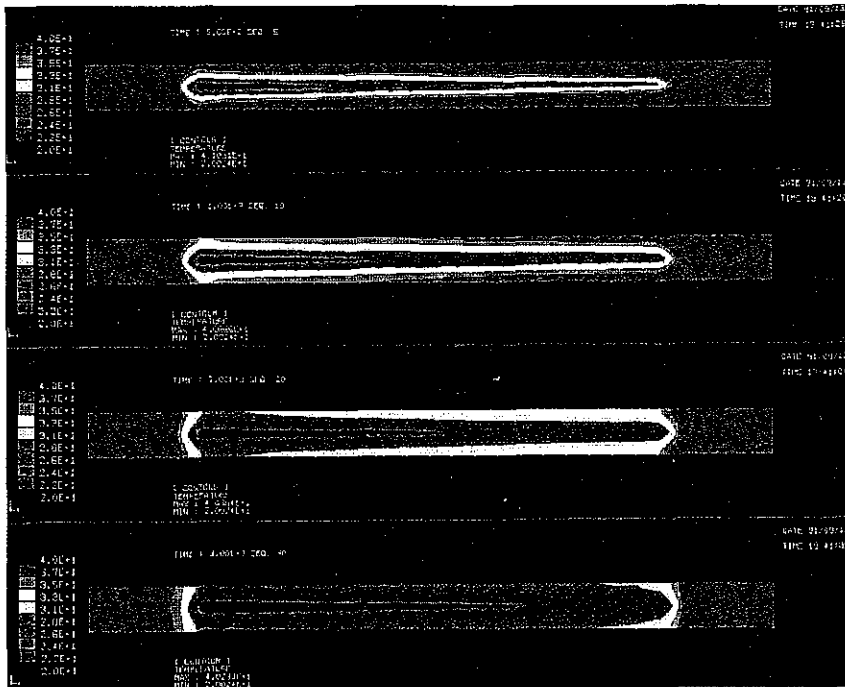


図4 $b=0.004$ の場合の岩体の温度分布の時間変化
赤が高温(40℃), 青が低温(20℃)を示す。経過時間は上から無次元時間で, $\tau=4.8385, 9.677, 19.354, 29.031$ である。

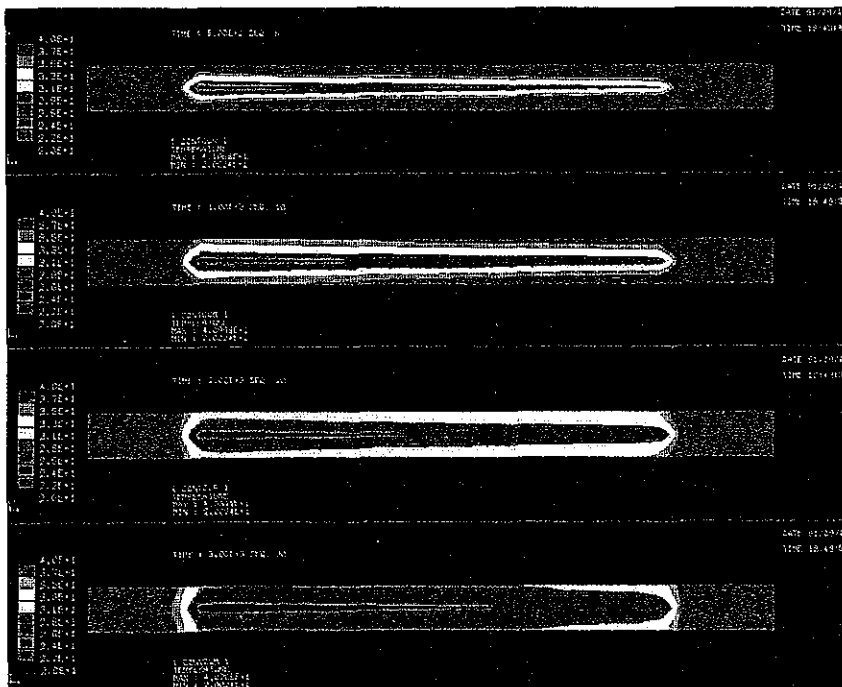


図5 $b=0.02$ の場合の岩体の温度分布と時間変化
図中の色の意味, 経過時間は図4と同じである。

いる。また $b = 0.004$ の場合の岩体の温度分布の時間変化を図4に示す。無次元時間は上からそれぞれ $\tau = 4.8385$, $\tau = 9.677$, $\tau = 19.354$, $\tau = 29.031$ である。この図からき裂部分では温度の低下がかなりはやく、それとともに岩体部分も時間とともに温度の低い部分が広がっていくことが分かる。しかし $b = 0.02$ の場合は、図3から分かるとおりの初期においてのずれが大きく、温度の低下が始まるまで時間が長くかかる。しかし時間がたつにつれて温度の低下の割合が $b = 0.004$ の場合よりも大きくなっていくことが分かる。また図5にはフラクチャーブロックの厚さを $b = 0.02$ にした場合の岩体の温度分布を示す。図4と比べてみるとき裂部分である温度が最も低下している部分が $b = 0.02$ の方が厚くなり、岩体部分の温度の低下の広がりも大きく、境界との相互作用を起こす時間も早いことが分かる。このように Equivalent Porous Media の方法を用いて計算した場合、き裂周囲の岩体との影響が大きく見積もられるため、正確な計算が出来ないことが明らかになった。

5. LINC法による考え方

低透水性の岩体の中に高透水性を有するき裂が存在する場合を考え、ある時刻においてき裂内に流動が発生し、岩体とき裂との間の熱的及び静水圧的な平衡状態からずれるため岩体内にも熱と流体の流れが生じる。このときき裂及び岩体内での移動現象について一般に次のことが言える^{3) 4)}。き裂側では①き裂内での圧力変動は岩体に比べ高速で伝播し、き裂内流動は短い時間で準定常流れとなる。②き裂内での流動は比較的速いため流れ方向の熱拡散は対流の効果に比べ小さい。③き裂の幅は一般に小さいため幅方向の温度変化は無視できる。また、岩体側に対しては①低透水率かつ低熱伝導率を有するため、き裂内で流動が発生してから経過時間が短い間は、岩体内で熱と流れはき裂近傍でのみ起こりその方向はき裂面に直角である。②しかし経過時間が長くなると熱および流れの影響はより深く及び、遠方の境界条件等と相互作用を起こし、熱や流れの方向ももはや1次的ではなくなる。

以上に述べた現象をLINC法の基礎モデルである二重空げき二重透水率モデル³⁾では次のように扱う。岩体を2次元として計算を行う場合、図6に示すようにき裂内の流動・熱移動を岩体とは空げき率、透水率の異なる1次元の現象と考え、流体管路網内での流れとして計算を行う。岩体内の流動・熱移動とき裂内流動・熱移動を独立に計算する。き裂面を通して行われ

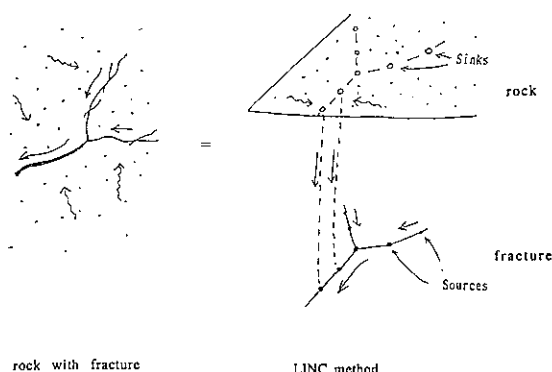
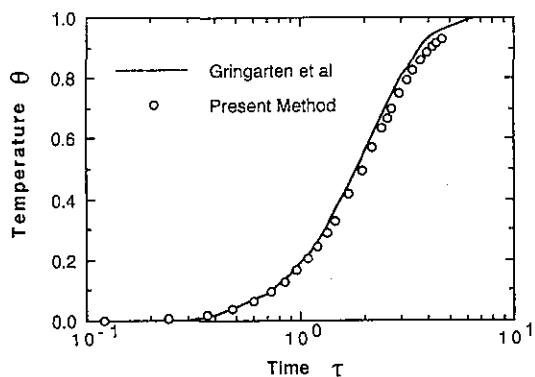
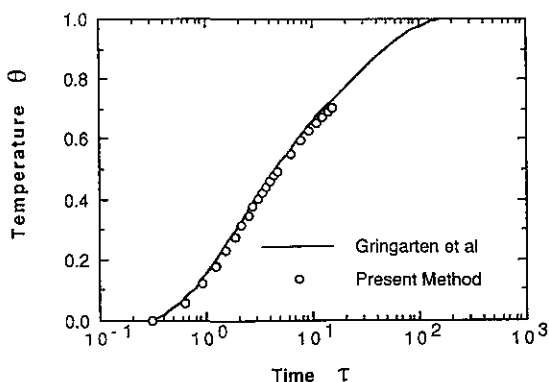


図6 LINC法の概念



(a) $\gamma = 1.0$



(b) $\gamma = 8.0$

図7 計算結果と解析解との比較

る熱や流体の移動は Sink-Source 項を介して行われるとする。この方法を用いると、き裂を1次元として扱うため、単一き裂から多くのき裂によるき裂のネッ

トワークが出来た状態まで扱うことが可能である。これはき裂内流動についてのキャラクタリゼーションや、それにもなう熱・物質の移動についての基礎的な特性が明らかになるにつれて、それらについての研究成果を本モデルの中に容易に反映することが出来ることを意味する。

この計算方法の有効性の確認のため3.で行った計算と同じ計算を行った。図7(a)に $\gamma=1.0$ の場合の、(b)に $\gamma=8.0$ の場合の出口温度の履歴を示す。図中の実線は Gringarten ら⁶⁾による解析解であり、○印はLINC法による計算結果である。これらの図からわかる通り計算結果は γ がいずれの場合も解析解とよく一致している。このことは差分法を用いた計算では木村ら³⁾により確認されていたが、有限要素法を用いた計算においてもLINC法による計算が解析解とよく一致することが示された。また木村らの計算では岩体とき裂を独立に扱いき裂を1次元とした場合、き裂を完全な2次元メッシュの中で計算した場合よりも計算スピードが11倍速くなったことが示されている。

このような結果から、二重空げき二重透率モデルに基づくLINC法が貯留層解析の数値計算手法として妥当かつ有効であることが確認された。

6. 結言

(1) き裂自身の透率からき裂周辺をも含めた部分で

あるフラクチャーブロックの透率に換算する Equivalent Porous Media の方法を用いた場合、周辺の影響や、境界条件との相互作用を大きく見積もってしまう可能性が示された。

(2) き裂内での現象を1次元の現象とし、岩体とき裂を別々に計算した後、両者の間での相互作用を Sink と Source を介して行うというLINC法は地熱貯留解析の手法として有効であることを確認した。

参考文献

- 1) Gale, J. E., *Geological Society of America, Special Paper 189*, 163-181 (1982)
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, “熱水利用発電プラント等開発 (可採量増大技術の開発)” 平成2年度 (掲載予定)
- 3) 木村繁男, 増田善雄, 林一夫; 機論B, 57, 538, 2083-2087 (1991)
- 4) 増田善雄, 木村繁男, 林一夫; 日本地熱学会誌, 3, 179-190 (1991)
- 5) 厨川道雄, ジョージ・ジボロスキー, シュラッド・ケルカー, 松永烈, 山口勉; 日本鉱業会誌, 104, 431-436 (1988)
- 6) Gringarten, A. C. et al., *J. of Geophy. Res.*, 80, 1120-1124 (1975)