

岩盤中における熱・地下水・放射性核種移行挙動の有限要素解析 FEM Analysis on Transfer of Heat, Groundwater and Radionuclide in Rocks

(財)電力中央研究所 河西 基 M. Kawanishi
(財)電力中央研究所 塚本 政樹 M. Tsukamoto
(株)R. C. C. M. 〇熊井 規 N. Kumai

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の研究に関しては、諸外国の多くが既に原位置試験を行い、更に処分場決定のための安全評価研究を進めている現状にあるが、地質・地下水条件等が欧米と異なるわが国における地層処分の安全評価研究は最近になってようやく進展の機運が高まってきている。一方、高レベル放射性廃棄物の地層処分を推進する上では、安全評価手法の確立が不可欠である。また、安全評価上においては、処分施設から周辺岩盤へ漏洩した放射性核種の深部岩盤中での移行挙動とその輸送媒体としての地下水流動を予測評価することが重要項目の一つであり、多くの研究がなされているが、^{1), 2), 3), 4)}それらの実用化のためにはまだ多くの課題が残されている。本論文においては、節理性岩盤中での飽和地下水流動と放射性核種移行挙動ならびに熱～地下水連成解析を対象として、二重間隙モデル等に基づき節理性岩盤をモデル化した有限要素解析モデルの開発を行う⁵⁾とともに、厳密解や観測例等に適用することにより解析モデルの有効性について検討した結果を述べる。

2. 解析手法の構成と内容

本解析モデルは、節理性岩盤中での放射性核種の2次元移流拡散問題を対象としており、二重間隙モデルを基本として節理性岩盤のモデル化を行い岩盤中地下水流動、放射性核種移行挙動ならびに熱～地下水連成問題に関する解析を行うモデルから構成されている。それぞれのモデルの概要を以下に述べる。

(1) 節理性岩盤のモデル化

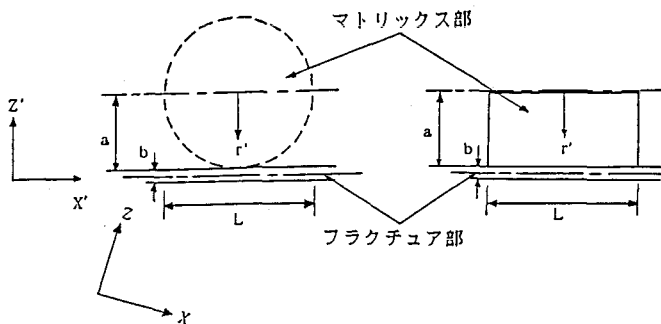
本研究では、従来の異方性多孔媒体として節理性岩盤を表す他に、図-1に示すような二重間隙モデルを用いて節理性岩盤のモデル化を行っている。すなわち、後者のモデルは、節理性岩盤をフラクチュア部と母岩マトリックス部とに分割して取扱ひ、それぞれが相互作用を及ぼし合うものとして構成される。このような岩盤のモデル化に基づく岩盤浸透流および核種移行に関する解析モデルについて以下に述べる。

(2) 解析モデル

① 岩盤浸透流解析モデル

二重間隙モデルによる岩盤浸透流解析を提唱したのはBarenblatt et al.⁶⁾であり、渡辺ら⁷⁾はこのモデルを導入した岩盤浸透流の検討を行っている。しかし、従来の二重間隙モデルにおける流れの解析では母岩ブロックとフラクチュア(割れ目)間の相互作用を準定常的に取り扱っており、Huyakorn et al.¹⁾はさらにこれを改善して母岩ブロックにおける非定常貯留効果をよりよく表現できるleakageモデルを提案している。ここでは、Huyakornの非定常leakageモデルを用いた二重間隙モデルに基づく定式化に従うこととし、基礎方程式として次式を用いる。

$$(\text{割れ目}) \quad S_0 \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x'} \left(K \frac{\partial h}{\partial x'} \right) + \Gamma_f / b + q \quad \dots\dots\dots (1)$$



(i) 円柱ブロックモデル (ii) 平行ブロックモデル

図-1 節理性岩盤の二重間隙要素モデル

$$(母岩) \quad S'_s \frac{\partial h'}{\partial t} = \frac{K'}{r'^j} \frac{\partial}{\partial r'} (r'^j \frac{\partial h'}{\partial r'}) \quad (j=0: \text{平行ブロックモデル} \quad j=1: \text{円筒ブロックモデル}) \quad \dots (2)$$

$$\Gamma_r = \Gamma_{r1} - \Gamma_{r2} = [-K \frac{\partial h}{\partial z}]_{-b/2}^{b/2} \dots (3)$$

ここに、 b ：割れ目開口幅、 (h, h') 、 (S_s, S'_s) 、 (K, K') ：割れ目と母岩における全水頭、比貯留係数および透水係数、 Γ_r ：割れ目と母岩における地下水の相互作用、 q ：降雨等による湧水量である。割れ目内では割れ目方向のみの一次元的平均流として扱い、厚さ方向に積分している。また、母岩マトリックス部では図-1に示すような平行あるいは円柱ブロックモデルに基づく定式化を行った。上式はいずれもダルシー則に基づくものであるが、母岩マトリックス部における境界条件、初期条件としては次の関係式が用いられる。

$$h' = h, \Gamma_{r1} + \Gamma_r' = 0, \Gamma_r' = -K' \frac{\partial h'}{\partial r'} \Big|_{r'=a} (r'=a); \quad \partial h' / \partial r' = 0 (r'=0); \quad h' = h'(0) (t=0) \quad \dots (4)$$

Huyakorn et al. は式(2)、(3)から求められる積分方程式表示の厳密解を用いて Γ_r を陽に表現することも試みているが、ここでは式(2)を離散化して割れ目に対する式(1)と共に有限要素法による数値解析を行う。

なお、従来の異方性多孔媒体モデルとして解析する場合には、式(1)、(2)の代わりに次式が用いられる。

$$S_s \partial h / \partial t = \nabla \cdot (K \cdot \nabla h) + q \quad \dots (5)$$

② 放射性核種の移流拡散解析

放射性核種は単相多成分系とし、吸着、崩壊および分解を考慮する。岩盤浸透流モデルと同様に岩盤を二重間隙モデルで表現することにより、基礎方程式は次のように表される。

$$(割れ目) \quad n R_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x'} (D \frac{\partial C_i}{\partial x'}) - \frac{\partial}{\partial x'} (U C_i) - \lambda_i n R_i C_i + \sum_{m=1}^M \xi_{im} \lambda_m n R_m C_m - n (K_{wi} + (1-R_i) k_{si}) C_i + q (C_i^* - \beta C_i) + \Gamma_c / b \quad \dots (6)$$

$$R_i = 1 + \{ (1-n) / n \} \rho_s \cdot K_{di} \quad \dots (7)$$

$$(母岩) \quad n' R_i' \frac{\partial C_i'}{\partial t} = \frac{D'}{r'^j} \frac{\partial}{\partial r'} (r'^j \frac{\partial C_i'}{\partial r'}) - \lambda_i n' R_i' C_i' + \sum_{m=1}^M \xi_{im} \lambda_m n' R_m' C_m' - n' (k_{wi}' + (1-R_i') K_{si}') C_i' \quad \dots (8)$$

$$\Gamma_c = \Gamma_{c1} - \Gamma_{c2} = [D \frac{\partial C_i}{\partial z}]_{-b/2}^{b/2} \quad \dots (9)$$

ここに、 D, D' ：分散係数、 U ：割れ目内地下水流速、 n, n' ：間隙率、 R_i, λ_i ：核種 i の遅延係数、崩壊定数、 C_i, C_i' ：核種 i の濃度、 M ：核種 i に壊変する親核種 m の数、 ξ_{im} ：核種 m から核種 i への変換率、 C_m, C_m' ：核種 i の親核種 m の濃度、 K_w, k_s ：分解速度定数、 C_i^* ：注入流水中の核種 i の濃度、 β ：流入出に関する作用素、 Γ_c ：割れ目と母岩における物質相互作用、 ρ_s ：媒体の真密度、 K_d ：核種 i と媒体との分配係数。上式のように、 Γ_c は母岩部と割れ目の境界面においてFickの拡散則で表現しており、母岩マトリックス部における境界条件、初期条件としては次の関係式が用いられる。

$$C_i' = C_i (r'=a), \quad \partial C_i' / \partial r' = 0 (r'=0); \quad C_i' = C_i' (0) (t=0) \quad \dots (10)$$

なお、従来の異方性多孔媒体モデルの場合、式(6)、(8)の代わりに次式が用いられる。

$$n R_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C_i) - \nabla \cdot (u C_i) - \lambda_i n R_i C_i + \sum_{m=1}^M \xi_{im} \lambda_m n R_m C_m + q (C_i^* - \beta C_i) \quad \dots (11)$$

③ 熱～地下水連成解析

大西ら²⁾は応力～浸透～熱移動の連成問題に関する有限要素解析手法を提案しているが、ここでは多孔媒

体としての岩盤内における熱と飽和地下水流の連成問題を取り扱う。支配方程式は、エネルギー保存則より式(12)、地下水保存則より式(14)、またダルシー則から式(15)として表される。

(温度)
$$(\rho C)_{av} \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_{av} \nabla^2 T - (\rho C)_f u \nabla T + Q_T \dots\dots\dots (12)$$

$$(\rho C)_{av} = n (\rho C)_f + (1-n)(\rho C)_s, \quad \rho C = f(T) \rho_0 C \dots\dots\dots (13)$$

(地下水)
$$\rho(T) S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \rho(T) Q_s - \nabla \{ \rho(T) u \} \dots\dots\dots (14)$$

$$u = -K g(T) \{ \nabla h + (f(T)-1) \nabla z \} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 ρ : 密度, C : 比熱, T : 温度, κ : 熱伝導率, 添字 av : 等価量であることを意味する
 上式において、 $f(T)=\rho(T)/\rho(T_0)$; $\rho_0=\rho(T_0)$, $g(T) = \mu(T_0)/\mu(T)$ (16)
 と仮定し、温度変化にともなう密度および粘性変化の非線形性が考慮されている。しかし、通常の場合はこの効果は小さいと考え、保存式(12),(14)における $\rho(T)$ の評価では一定 (Bousinesq 近似) として扱うこととする。

表-1 要素ライブラリー

(3) 数値解析アルゴリズム
 上述した各解析モデルは、有限要素法により数値解析されるが、それらの主要な機能を以下に述べる。

要素名	内容	解析モデル
① PORO	異方性多孔体要素 (アイソパラメトリック要素),	A, B, C
② FRAC	離散フラクチュア要素	A, B, C
③ DBLP	二重間隙平行ブロック要素	A, B
④ DBLC	二重間隙円筒ブロック要素	A, B

(A : 岩盤浸透流解析, B : 核種移行解析, C : 熱~地下水連成解析)

① 要素ライブラリー
 本解析において用いることができる要素は表-1、図-2に示すように4種類からなり、対象とする問題に応じて組合せが可能である。

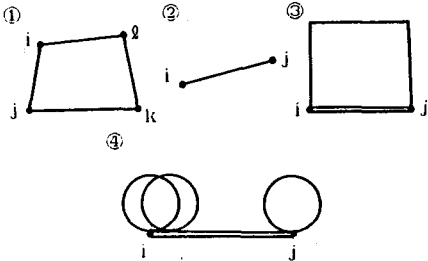


図-2 要素概念図

② 離散化と時間積分
 離散化に際しては、岩盤浸透流解析では線形重み関数によるGalerkin法を適用し、核種移行および熱~地下水連成解析では上流重み関数による重み付残差法を適用している。時間積分には、いずれも一般化Crank-Nicolson法による差分スキームを用いる。
 ③ 収束法
 熱~地下水連成解析では、温度依存性による非線形反復計算をNewton-Raphson法を用いて行う。

K=2.0 DBLP要素マトリックス部: 等価母岩厚 4.0
 S=1.0 4要素の分割
 B=1.0 PORO要素: 透水係数
 $K_{xx}=K_{yy}=0, K_{xy}=2.0$
 $\Delta x=1.0$ 初期条件: 節点⑤, ⑥... $h=1.0$, その他... $h=2.0$
 $\Delta t=0.2$ ⑦, ⑧... $h=1.0$, その他... $\delta h/\delta n=0.0$

3. 厳密解との比較
 (1) 岩盤浸透流解析における各要素モデルの適用
 表-1に示したような各要素モデルについては、それぞれ簡単な一次元浸透流問題の厳密解と比較し、基本的に良好な一致を得ることを確認した。ここでは、図-3に示すような多孔体要素 (PORO) と二重間隙要素 (DBLP, DBLC) とを組み合わせたモデルおよび諸条件に基づき、非定常浸透流解析を実施した結果を図-4に示す。DBLP要素を含むモデルは、POROとFRAC要素によるモデルとほとんど一致した結果を得た。一方、DBLC要素を含むモデルは、DBLC要素部での水頭の変化がPORO要素とFRAC要素による対応部での変化よりも若干早かった。これによ

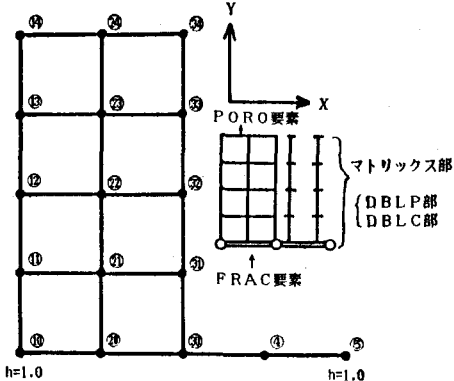


図-3 浸透流非定常解析要素混合モデル

り、DBLC要素についてはさらに検討が必要であるが、PORO要素とFRA C要素の組み合わせ及びDBLP要素については十分な適用性を有することが確認された。

(2) 三核種連鎖の一次元移流拡散解析への適用

まず、簡単な一次元移流拡散問題の厳密解に対し各要素モデルを適用した結果を比較し、妥当な結果が得られることを確認した。図-3と同じ要素混合モデル

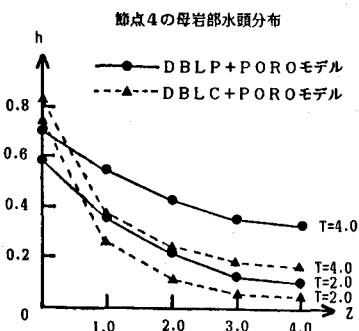


図-3 節点20, 30, 4の水頭時刻歴

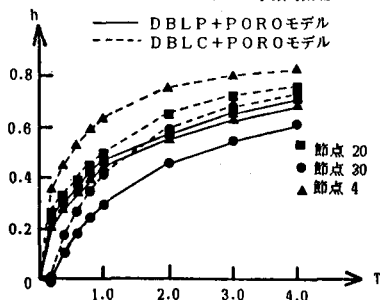


図-4 非定常浸透流解析結果

を用いて核種の移流拡散解析を行ったところ、遅延係数及び崩壊連鎖の関係を含めて各要素モデルともにほぼ同一の結果が得られた。ここでは、Huyakornが議論している図-5に示すような三核種連鎖の一次元移流拡散問題³⁾に対して、厳密解と各要素モデルを用いた本解析モデルによる計算結果を比較した。図-6にはDBLP要素を用いた計算結果と厳密解との比較例を示したが、いずれの要素の場合も厳密解との良好な一致が得られた。これより、核種移流拡散解析については、いずれの要素の組み合わせにおいてもほぼ同程度の妥当な精度で解析できることが確認されたと考える。

4. 観測結果への適用

(1) 岩盤中核種移行実験結果¹⁰⁾への適用

実験は、図-7に示すような装置を用いて円柱状のコア試料の中心及び外面に通水を行い、その中にあらかじめ添加した放射性トレーサーを岩に浸透させた。浸透した微量のトレーサー濃度分布は、オートラジオグラフと画像解析を組み合わせることにより測定した。コア試料は $\rho=2.75 \text{ g/cm}^3$, $n=0.00374$ の稲田花こう岩であり、トレーサー核種としては ^{134}Cs を用いている。図-8は51日後における吸着量比(外表面吸着量を基準)の分布について示したものであり、縦方向分散率 $D_L=50 \text{ cm}^2/\text{day}$ 程度の場合に計算値と実験値の傾向は比較的合っているものの、分布形の表現そのものは良好とは言えない。吸着モデルとして、

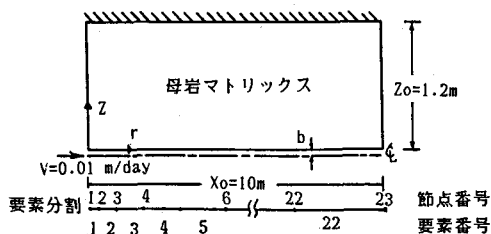


図-5 核種移行計算場の条件

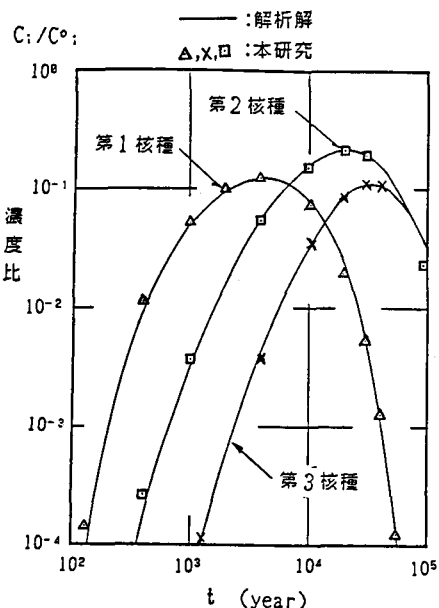


図-6 核種移行計算の厳密解との比較

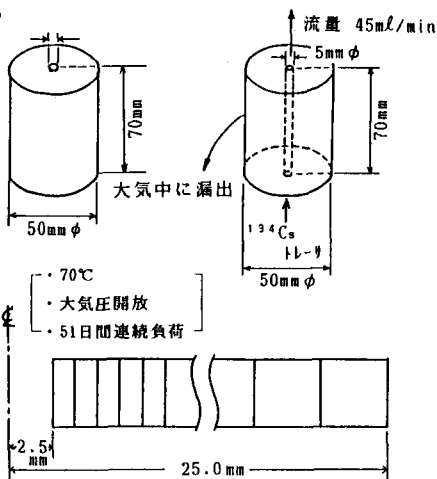


図-7 核種移行実験の概要¹⁰⁾

ここでは簡単なHenry 型線形吸着平衡モデルを用いているが、今後Freundlich型のような非線形型吸着モデルの適用も検討する必要があるだろう。

(2) 熱～地下水連成問題

熱～地下水連成問題への適用例として、スウェーデンSKI主催のHYDROCOIN（地下水流評価コード国際比較プロジェクト）のLevel2-Case1の例題として提案された花こう岩体中の軸対称二次元定常問題への適用結果を述べる。主要な計算条件と解析場は、表-2および図-9に示す通りである。花こう岩体中の鉛直孔内に上昇流が存在し、孔内壁の一部に熱源からの熱供給が行われ、周辺に掘られた別のボーリング孔で温度が観測されている。図-10は、観測孔の一つであるPホール($r=2.83\text{m}$)での温度上昇の観測値と計算値の比較を示したものであり、きわめて良好な一致を示している。ただし、用いたパラメータのうち、透水係数 K と熱伝導率 κ についてはコア試験結果(K_0, κ_0)をもとにパラメーター同定したものであり、例題の目的の一つになっている。すなわち、Pホールで得られている3点における温度観測値と対応する計算値の差(ΔT)の値を、 $K/K_0, \kappa/\kappa_0$ をそれぞれ横軸、縦軸としてプロットしてみると、図-11に示すように ΔT の値について等高線を描くことができることが示された。この

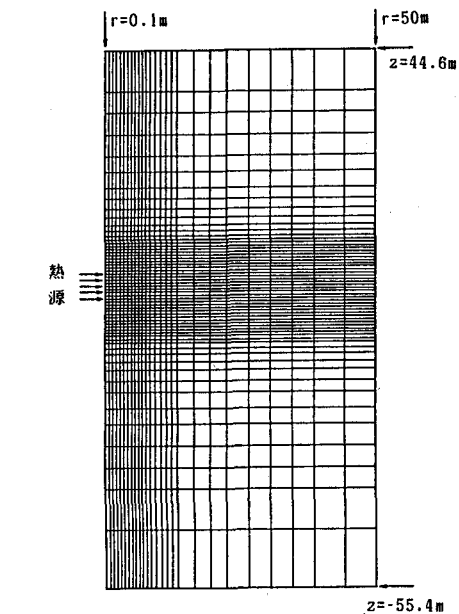


図-9 計算メッシュ図（熱～地下水）

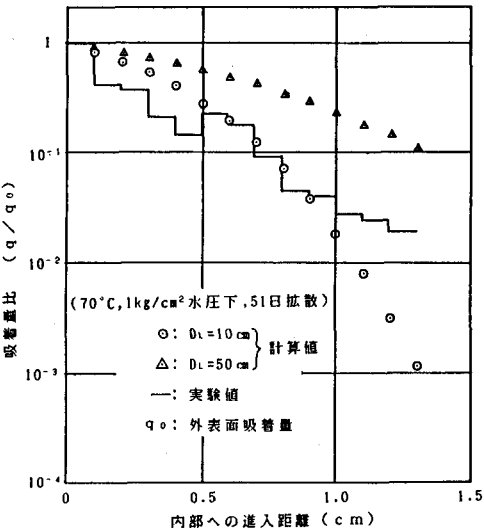


図-8 核種移行実験結果と計算値の比較

表-2 主要計算条件（熱～地下水）

境界条件	
(温度)	$q = \frac{G \cdot}{2\pi r_{in} \cdot \Delta Z}$ ($ Z \leq 2.3, = r_{in}$) $q=0$ ($ Z > 2.3, = r_{in}$)
	$G = 8.6 \times 10^3 \text{ W}$ $r_{in} = 0.1 \text{ m}$ $\Delta Z = 4.6 \text{ m}$
(流れ)	$T=0$ ($r_{in} < r \leq 50$) $u_n=0$ ($r_{in} < r \leq 50$) $h_p=0$ ($Z=0, r = r_{in}$)
初期条件	
(温度)	$T(x, 0) = 0$ ($T_0 = 10.8^\circ\text{C}$)
(流れ)	$u_z \approx 0.01 Kz$ ($t = 0$)

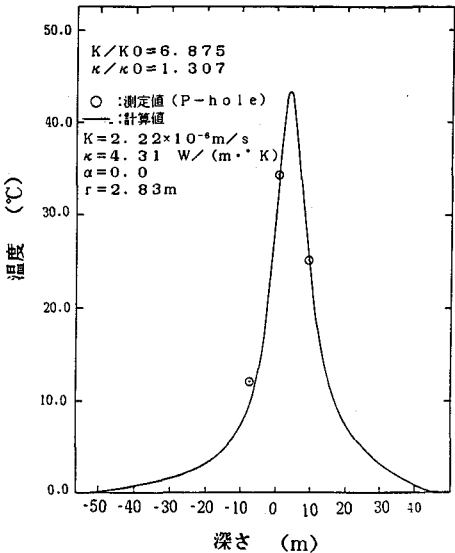


図-10 計算値と観測値の比較（熱～地下水）

滝壺点に相当するところが最適な K と κ を与えることになり、両パラメータが明確でない場合においても比較的少ない試計算で合理的なパラメータ同定の可能なことが示された。上述の試計算によれば、10サンプル程度の計算点を用いれば概略のパラメータ推定は可能であろうと思われる。また、流速ベクトルや温度分布の計算結果から、熱源部付近では対流が生じており、特に中心軸内側に沿って比較的大きな上昇流と熱の拡散が生じることが示された。

5. まとめ

本論文では、高レベル廃棄物地層処分時安全評価研究の一環として、節理性岩盤における岩盤浸透流、放射性核種移流拡散ならびに熱～地下水連成解析について、二重間隙モデルなど二、三の岩盤モデルを用いて解析モデルの開発を行い、数値解や観測結果との比較検討により基本的に十分な適用性を有することが確認された。今後は、複雑な節理性岩盤中での熱・地下水・放射性核種の移行挙動現象をより適切に表せるよう解析手法の高度化を図って行く予定である。

最後に本研究を進めるにあたり貴重な御助言を頂いた電力中央研究所の駒田広也、大江俊昭の両博士および多大な御協力を頂いた五十嵐敏文、田中靖治の両氏に対して深く感謝する次第です。

参考文献

- 1) Huyakorn, P.S., Lester, B.H. and Faust, C.R. : Finite element techniques for modeling groundwater flow in fractured aquifers, Water Resour. Res., 19-4, pp.1019-1035, 1983
- 2) Huyakorn, P.S., Lester, B.H. and Mercer, J.W. : An efficient finite element technique for modeling transport in fractured porous media 1. Single species transport, Water Resour. Res., 19-3, pp.841-854, 1983
- 3) 大西有三, 塩田卓央, 西垣誠, 小林晃 : 不連続性岩盤における浸透流と核種移行の有限要素解析, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.191-195, 1985-2.
- 4) 伊藤洋, 佐藤邦明, 清水昭男 : 変形FLIC法による亀裂性岩盤内の熱・物質拡散解析, 第29回水理講演会論文集, pp.893-898
- 5) 河西基, 駒田広也, 五十嵐敏文 : 岩盤中の地下水流動・核種移行解析, 日本原子力学会「昭61年会」, p213, 1986-3
- 6) Barenblatt, G.I., Zheltov, Iu.P. and Kochina, N. : Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, Prikl. Matem. Mekh., vol.24, pp.852-864, 1960.
- 7) 渡辺邦夫, 佐藤邦明 : double porosity modelを導入した岩盤浸透流の研究, 第24回水理講演会論文集, pp.115-120, 1980-2.
- 8) 大西有三, 柴田裕章, 小林晃 : 有限要素法による応力～浸透～熱移動連成問題解析手法, 土木学会論文集, 第370号/Ⅲ-5, pp.151-158, 1986-6
- 9) Huyakorn, P.S., Lester, B.H. and Mercer, J.W. : An efficient finite element technique for modeling transport in fractured porous media 2. Nuclide decay chain transport, Water Resour. Res., 19-5, pp.1286-1296, 1983
- 10) 塚本政樹, 大江俊昭 : 花崗岩中の放射性核種の拡散挙動, 電中研研究報告285053, pp.1-25, 1986-6
- 11) Kwanishi, M. et al. : Preliminary results of level 2 - case 1 - Thermal convection and conduction around a field heat transfer experiment (Cornel United Kingdom), a report for the 5th HYDROCOIN workshop at RIVM, Netherland, 1987-11.

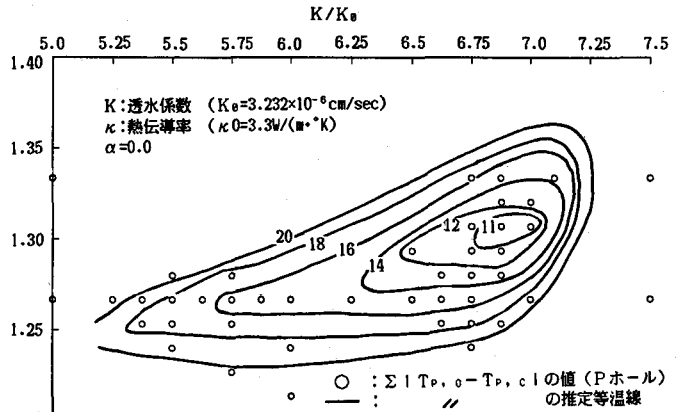


図-1.1 パラメータ同定 ($K/K_0 \sim \kappa/\kappa_0$)