



高レベル放射性廃棄物の
地層処分研究開発特集

地層処分研究

2. 性能評価研究

2-3 ファーフィールド研究

東海事業所 環境技術開発部

資料番号: 85-10

Research on Geological Disposal

2. Performance Assessment

2-3 Study on Flow and Nuclide Migration Within Far-Field

(Waste Technology Development Division, Tokai Works)

ファーフィールドを対象とした性能評価を行う上では、地下水流れ、物質移動および物理化学的
反応の場となる地質環境の特性を表現するためのモデルとモデルによる解析のためのデータが必要
である。本報は、そのモデルとデータについてその知見を整理し、併せて解析の結果について紹介
する。

1. はじめに

性能評価におけるファーフィールドの役割は、大
きく2つに分けられる。第1の役割は、ニアフィー
ルドの外側境界条件として水理、水質を規定する役
割であり、第2の役割はニアフィールドから移動し
た核種の生物圏にいたる移行経路としての役割であ
る。

第1の目的のためには、広域水理解析を行うこと
によりニアフィールドを通過する流量を評価すると
ともに、ニアフィールド入口での水質を評価する必
要がある。

第2の目的のためには、ファーフィールドにおけ
る核種の移行経路として重要となる破砕帯中の核種
移行について評価する必要がある。

先般公開した高レベル放射性廃棄物地層処分研究
開発の技術報告書—平成3年度—¹⁾ (以下、技術報
告書) においては、ニアフィールド固有の性能を評
価することに主眼が置かれたため、上記の第1の目
標に関連した研究を行った。具体的には、ニア
フィールドの外側境界条件としての水質および動水
勾配を評価するための、ファーフィールドにおける
水質変化のモデル化と広域地下水流動解析を行っ
た。

しかし、動燃事業団においてはこの他にも、第2
の目的のために、破砕帯中の水理・物質移動特性に
ついて、国際共同研究INTRAVALEプロジェクトに

参加し、モデル開発を行っている。

また、第1の目標に関連して、広域地下水流動解
析の信頼性の向上に向けて、広域地下水流動解析に
使用する各有限要素の物性値を亀裂ネットワークモ
デルを用いて評価する方法の開発を行っている。

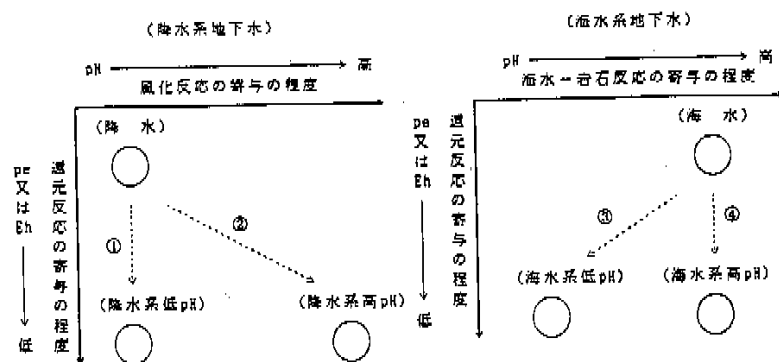
ここでは、技術報告書の内容と、技術報告書では
使用されていないが、今後のレポートにおいて反
映される内容の両方について述べる。

2. 地下水の地球化学モデルの開発

地下水の地球化学は、人工バリア材料の長期的挙
動や核種移行挙動の評価を行う上で重要である。こ
こでは、これらの評価を行う上で重要な地下水特性
に着目して、その幅を把握するため、水-岩石反応
の化学平衡論に基づく地下水の化学的変遷プロセス
のモデル化を行った。またこのモデル化の考え方の
適合性を地下水組成の実測値と比較し、検討した。

(1) モデル化の基本的考え方

地下水特性を規定する重要なパラメータとして
pH、Ehおよびイオン濃度に着目した。これら特性
を支配する地球化学プロセスについて、一般的に適
用可能と考えられる化学平衡論に基づき、地下水組
成の実測値や花崗岩の亀裂内や堆積岩に出現する
鉱物種も参照し、次のようなモデル化を行うことと
した。すなわち、pHについては、主に造岩鉱物の
風化の度合いや有機物による還元作用に、Ehにつ



凡 例

- ①：未風化帯における有機物の還元作用
- ②：風化作用の進行
- ③：有機物の還元作用
- ④：海水-鉱物反応の進行および有機物の還元作用

図1 性能評価上の地下水組成の設定概念

いては、Fe、S、Cに関する酸化還元反応の寄与の度合いに、またイオン濃度については、主に、地下水の起源（降水・海水）や降水系では造岩鉱物の風化の度合いに各々依存するとし、閉鎖系における部分平衡を仮定して、それらの生起順序も考慮した。

上記考え方および地下水特性の幅を把握するという観点から地球化学プロセスの現実的組み合わせについて検討し、以下の4種類の還元性の深部地下水組成を設定することとした。

- ① 降水系高pH型地下水
- ② 降水系低pH型地下水
- ③ 海水系高pH型地下水
- ④ 海水系低pH型地下水

このような地下水組成の設定概念を図1に示す。

表1 地下水地球化学モデルによる計算結果
(イオン等の濃度の単位: mol/l, 25°C)

地下水タイプ 地下水特性	降水系高pH型地下水	降水系低pH型地下水	海水系高pH型地下水	海水系低pH型地下水
pH	8.7 (8.6)	5.7	8.0	6.3
pe	-4.8 (-5.1)	-2.7	-5.2	-3.1
SO ₄ ²⁻	1.3×10 ⁻⁴ (1.0×10 ⁻³)	—*	7.3×10 ⁻³	1.3×10 ⁻³
HCO ₃ ⁻	6.6×10 ⁻³ (1.5×10 ⁻²)	8.2×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³	1.5×10 ⁻²
CO ₃ ²⁻	2.3×10 ⁻⁴ (—)	2.8×10 ⁻⁷	2.1×10 ⁻⁴	3.6×10 ⁻⁹
Cl ⁻	—*	—*	5.5×10 ⁻¹	5.5×10 ⁻¹
Na ⁺	7.2×10 ⁻³ (1.5×10 ⁻²)	2.5×10 ⁻³	6.0×10 ⁻¹	4.8×10 ⁻¹
Ca ²⁺	3.8×10 ⁻⁹ (1.3×10 ⁻⁴)	2.0×10 ⁻³	2.2×10 ⁻⁴	2.3×10 ⁻³
SiO ₂	1.8×10 ⁻⁴ (3.2×10 ⁻⁴)	1.6×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻⁴

*: モデル化でイオン濃度を支配する地球化学反応を考慮していない。

() 東濃地域の実測された地下水組成

(2) モデル地下水の特性

(1)の考え方に基づき地球化学コード(PHREEQE)²⁾および熱力学データベース(PHREEQEオリジナルおよびNEAデータベース)^{3),4),5)}を用いて25°Cで計算した結果を表1に示す。計算結果から、モデル地下水の化学的性質について以下のようにまとめることができる。

- ① 4つのモデル地下水は、モデル化において考慮した黄鉄鉱、有機炭素等が降水または海水に含まれる溶存酸素等の酸化性化学種を消費することにより、すべて還元状態(pe: 約-5~-3)にある。またpHは約6~9の弱酸性から弱アルカリ性の領域にある。
- ② 2つの海水系地下水におけるpHの範囲は、pH約6~8(pe約-5~-3)と小さく、組成的にも大きな違いはない。
- ③ 2つの降水系地下水におけるpHの範囲は、pH約6~9(pe約-5~-3)である。
- ④ 降水系地下水と海水系地下水とでは、Na⁺、Cl⁻濃度以外の溶存イオンの組成的差異は小さい。

(3) 実測値によるモデルの適合性の検討

上記モデルのうち、降水系高pH型地下水のモデル化についての適合性を実測された地下水データとの比較により検討した。実測値は岐阜県東濃地域の深度約130mの坑道から掘削したボーリング孔より得られた地下水⁶⁾を対象とした。上記モデル化の考

え方および観察された鉱物情報に基づき、pHについては、土壌中の CO_2 ガス吸収およびアルバイトとカオリナイト間の化学平衡、Ehについては、黄鉄鉱と水溶液間の酸化還元平衡、イオン濃度については、上記の他に方解石・白雲母・石英と水溶液間の溶解平衡を各々仮定して、PHREEQEコードを用いて解析した。表1の()内に示すとおり、その結果は実測値とほぼ一致した。

(4) まとめ

主要な地下水特性の幅を明らかにするため、化学平衡論に基づく概括的な地球化学モデルを構築し、モデル地下水組成を導出した。また、この考え方に基づき深部地下水の実測値の一例を近似的に説明することができた。今後は、深部地下水データをさらに収集することにより、ここで示した方法の適合性の範囲を明らかにし、より適切なモデル化を進めたい。

3. 広域水理解析

— 仮想的垂直二次元水理地質モデルによるわが国の水理特性の検討 —

地層処分の性能評価を行うためには、処分場近傍における地下水流速・流量を評価する必要がある。しかし、この導出に際しては、各深度毎における岩盤のモデル化を行うため、解析モデルに使用する有限要素のスケールでの透水係数が必要となるが、現段階では十分なデータが得られていないため、直接地下水流速・流量を導出することは避け、動水勾配をモデル解析により導出することとした。

わが国における動水勾配の範囲を、合理的なケース数で評価するため、地形断面、境界条件、透水係数といった動水勾配に影響を及ぼす主要な要因を保守的に組み合わせ、仮想的な二次元水理地質モデルを作成した。流動解析には、有限要素法による垂直二次元地下水解析コードFEMWATER⁷⁾を用い、定常状態の地下水流動シミュレーションを行った。

(1) 概念モデル

動水勾配を評価するにあたり、地下水流動を支配する要因として、

- ① 地形形状 (地形断面)
- ② 境界条件
- ③ 透水係数分布

の3つを考慮することとし、それぞれ合理的な範囲での上限値を定めることによって垂直二次元水理地質モデルを作成した。

1) 地形形状 (地形断面)

地形断面の設定に際しては、動水勾配に影響を及ぼす要因として、山地の斜面規模、山地の傾斜、山

頂から下流側境界までの距離、について検討した。

山地の斜面規模 (山地斜面部の標高差)

わが国の主要な山の地形を解析し、山体が平野もしくは海に臨む場合と、山地内に位置する場合とに分け、モデル上考慮する山地の標高を検討した。

山体が平野もしくは海に臨む場合には、山地斜面の規模が900～1000m級 (山頂標高1100～1200m) の山が最も多い⁸⁾ことから、山地の斜面規模を1000m (山頂標高1,200m) とした。

山体が山地内に位置する場合については、山頂から谷までの標高差を検討した結果、最大級で1,600m程度の標高差を有する山が存在する⁸⁾ことから、保守性を考慮し1,600mとした。

山地の傾斜

山地の傾斜については、山体が平野もしくは海に臨む場合には、山頂から標高200mまでの山地斜面の最大傾斜が30～35%の山体が最も出現頻度が高いとの結果が得られた⁸⁾ので、基本ケースにおける山地の傾斜を保守性を加味し40%とした。また、一部、1000m級の山で50%を超える急斜面も認められること、および傾斜58.8%以上の斜面が国土の8.3%存在する⁹⁾ことから、保守的なケースとして、傾斜60%も検討に加えた。

山体が山地内に位置する場合については、1600m級の山体の勾配として、60%が最大級であることからこの値を採用した。

山頂から下流側境界までの距離

山体が平野もしくは海に臨む場合の、山頂から下流側境界までの距離は、平野 (海岸線から標高100mまでのいわゆる平野部) の規模によって変化する。わが国の場合、固有名称を持つ平野の多くは平野の規模 (ここでは海岸線から標高100mの等高線までの距離) が10km程度であることから10kmとした。また、より小規模の平野のケースとして平野規模4kmを、さらに山地が海岸にせまっているケースとして、平野規模0kmもケースに加えた。

以上の検討の結果、図2に示す5つの地形モデルを作成した。

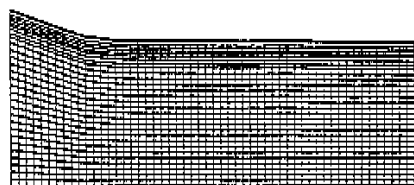
2) 境界条件

上部境界

上部境界は、地表面直下に地下水位面が認められる場合が多く、また地下水位面の位置は透水係数の値の影響を受けると考えられるので、信頼性の高い透水係数分布が定められない現時点での想定として、地形面と地下水位面が一致するよう地表面での圧力水頭を0に設定した。

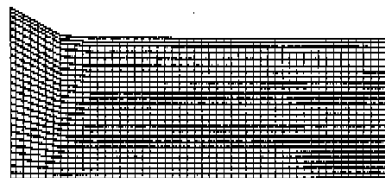
下部境界、流入側境界

下部境界は、標高-5000mの位置に不透水境界を



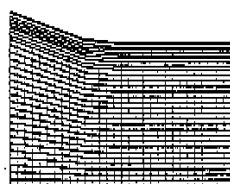
基本地形モデル

(山頂標高 1,200m, 斜面傾斜 40%, 平野規模 10km)



急斜面モデル

(山頂標高 1,200m, 斜面傾斜 60%, 平野規模 10km)



小規模平野モデル

(山頂標高 1,200m, 斜面傾斜 40%, 平野規模 4km)



平野なしモデル

(山頂標高 1,200m, 斜面傾斜 40%, 平野規模 0km)



山地モデル

(標高差 1,600m, 斜面傾斜 60%, 平野規模 0km)

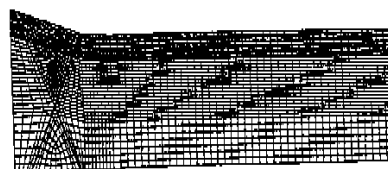
図2 地形モデル

設定した。また、流入側境界も、山地が分水嶺をなす事が考えられるため、基本ケースにおいては、不透水境界とした。さらに周辺の地形との干渉を評価するため、保守的な想定として、海岸線から28kmの位置に3000m級の高山が存在することを仮定した広域流動モデルから得られた水頭値を与えたケースについても解析を行った。

流出側境界

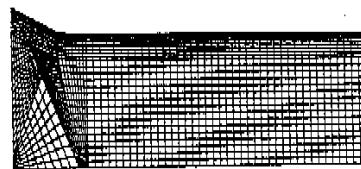
基本ケースについては、不透水境界で近似した。

しかし、平野部の規模が小さい場合、あるいは山地が直接海にせまっている場合には、不透水境界を



断層モデル

(山頂標高 1,200m, 斜面傾斜 40%, 平野規模 10km)



断層モデル

(山頂標高 1,200m, 斜面傾斜 60%, 平野規模 10km)

図3 断層モデル

与えると地下水流出域での上昇流が過大評価されて非保守的となる可能性があるため、静水圧境界を解析に加えた。

3) 透水係数分布

動水勾配を出力として上部境界固定で行う解析においては、モデル内での透水係数の相対比は、地下水流束の集散の割合を規定するため、動水勾配を変化させる要因となる。

透水係数の相対比の差違を生じるものとして、

- 高透水性の表層
- 高透水性の断層、あるいは砂層等
- 低透水性の断層

を考慮した。

岩盤の透水係数は、空洞への湧水量から評価した巨視的透水係数の値^{10,11)}を参考として 1×10^{-6} cm/s に、表層の透水係数については文献値^{12,13)}を参考に 1×10^{-1} cm/s、断層の透水係数については、文献値¹²⁾を参考に 1×10^{-2} cm/s に設定した。また、新第三紀の堆積岩中の断層の場合については、断層の透水係数を 1×10^{-3} cm/s とした。

断層の位置は、図3に示すように、山麓にある場合とこれに加えて山頂付近を通る場合を考慮した。

以上の検討を行い、表2に示す19の解析ケースを設定し、流動解析を行った。

(2) 解析結果

各ケースにおける地表下500mおよび地表下1000mでの動水勾配の最大値、最小値を表3に示す。

標準ケースと考えられるケース3の動水勾配は、地表下500mで最大0.45、最小0.015、地表下1000mで最大0.30、最小0.014であった。本ケースの地表下500mおよび地表下1000mの各レベルでの最大値

表2 解析ケース

ケース 番号	山地斜面 標高差 (m)	山地斜面 勾配 (%)	平野の 長さ (km)	岩盤の 透水性係数 (cm/s)	表層		断層		流入側 境界条件	流出側 境界条件
					厚さ	透水性係数 (cm/s)	位置	透水性係数 (cm/s)		
1	1000	40	10	1×10^{-4}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界
2	1000	40	10	1×10^{-4}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界
3	1000	40	10	1×10^{-4}	30m	1×10^{-1}	—	—	不透水境界	不透水境界
4	1000	40	10	1×10^{-3}	30m	1×10^{-1}	—	—	不透水境界	不透水境界
5	1000	40	10	1×10^{-3}	30m	1×10^{-1}	—	—	不透水境界	不透水境界
6	1000	40	10	1×10^{-3}	300m	1×10^{-1}	—	—	不透水境界	不透水境界
7	1000	40	10	1×10^{-4}	300m	1×10^{-1}	—	—	不透水境界	不透水境界
8	1000	40	10	1×10^{-4}	30m	1×10^{-1}	山麓部通過	1×10^{-2}	不透水境界	不透水境界
9	1000	60	10	1×10^{-3}	30m	1×10^{-1}	山麓部通過	1×10^{-2}	不透水境界	不透水境界
10	1000	40	10	1×10^{-3}	30m	1×10^{-1}	山麓部通過+山頂部通過	1×10^{-2}	不透水境界	不透水境界
11	1000	60	10	1×10^{-3}	30m	1×10^{-1}	山麓部通過+山頂部通過	1×10^{-2}	不透水境界	不透水境界
12	1000	40	10	1×10^{-3}	30m	1×10^{-1}	山麓部通過	1×10^{-2}	不透水境界	不透水境界
13	1000	60	10	1×10^{-4}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界
14	1000	60	10	1×10^{-3}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界
15	1000	40	4	1×10^{-4}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界
16	1000	40	4	1×10^{-3}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界
17	1000	40	0	1×10^{-4}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界
18	1000	40	0	1×10^{-3}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界
19	1600	60	0	1×10^{-4}	—	—	—	—	不透水境界	不透水境界

を基準としたケース8、11、5の動水勾配の比の水平変化を、図4に示す。

最大動水勾配が標準ケースに対し最も増加したのは、60%斜面と断層2本を組合せたケース11であった。その他、標準ケースに対して増加したのは、1600mの標高差と60%斜面を考慮したケース19、60%斜面と断層1本を組合せたケース9、60%斜面と平野10kmのケース13、14、表層300mのケース7、40%斜面と断層1本を組合せたケース8であった。逆に、平野0kmのケース17、背後に3000m級の高山を想定したケース2、5、6においては、最大動水勾配が減少した。

表3 各モデルにおける動水勾配の最大値および最小値

ケース 番号	動水勾配			
	—500m		—1000m	
	最大値	最小値	最大値	最小値
1	0.441	0.015	0.297	0.014
2	0.324	0.046	0.214	0.045
3	0.451	0.015	0.302	0.014
4	0.451	0.011	0.303	0.011
5	0.323	0.046	0.217	0.046
6	0.396	0.045	0.246	0.044
7	0.500	0.014	0.349	0.014
8	0.488	0.012	0.339	0.012
9	0.574	0.012	0.379	0.012
10	0.381	0.021	0.324	0.020
11	0.613	0.023	0.608	0.022
12	0.389	0.011	0.222	0.010
13	0.537	0.013	0.365	0.013
14	0.537	0.010	0.365	0.011
15	0.438	0.041	0.294	0.037
16	0.443	0.015	0.299	0.019
17	0.413	0.193	0.262	0.116
18	0.458	0.120	0.316	0.120
19	0.568	0.289	0.391	0.134

今回の解析においては、保守的な地形を採用したため、山地部において全般に非常に高い動水勾配が得られた。しかし、このような条件下でも平野部の動水勾配は0.2以下であり、多くの場合約0.1以下であった。

今回の解析では直接解析を行わなかった丘陵部や一般的に存在する数百m級の斜面規模の山地内では、山地斜面の規模や斜面勾配が小さいため、より低い動水勾配となっているものと推定される。

今回の解析においては、地下深部の透水性係数データが不足していることからエアフィールドへの境界条件として流量を評価することができなかったため、今後は流量としての評価を行う。また、透水性係数の深度依存性を考慮しなかったが、地下深部での流量を制限する要因として重要でありモデル化を

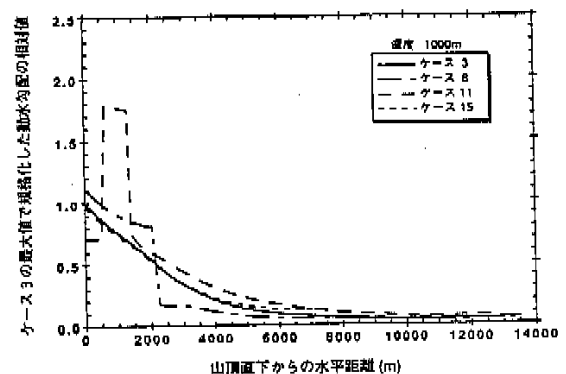


図4 2次元水理地質モデルに基づく深度1000mにおける動水勾配の解析例

行っていく予定である。

4. 亀裂ネットワークモデルを用いた等価多孔質媒体近似に関する研究

亀裂性岩盤の水理モデルは、①連続体モデル、②不連続体モデルと③二重空隙モデルに大別される。連続体モデルや二重空隙モデルは、解析モデルの要素内の不均質性が無視可能な大きなスケールでのモデル化に使用されるが、原位置試験からモデル各要素の透水係数の設定が厳密に行いにくい欠点がある。一方、不連続体モデルの中でも亀裂ネットワークモデルは、原位置試験から得られるデータをモデルに直接反映させることが可能であるものの、個々の亀裂をモデル化するため、数100m以上の領域のモデル化には不向きである。しかし、亀裂ネットワークモデルを用いて亀裂性岩盤のブロックの物性値を等価な多孔質媒体として評価し、それを連続体モデルや二重空隙モデルの各要素の物性値として用いれば、原位置データとモデル各要素の物性値の関係がより明らかな多孔質媒体モデルや二重空隙モデルを用いて、サイトスケール以上の領域のモデル化が可能となる。すなわち、モデルの信頼性を損なうことなく、モデル化が可能な領域を拡張できる。

このように、亀裂性岩盤を等価な多孔質媒体に近似可能なブロックの規模を代表的な基準体積(Representative Elementary Volume: REV)と呼び、これまでに多くの研究がなされている^{14),15),16)}。それらによれば、REVは、(1)等価透水係数がREVの少量の増加あるいは減少によってわずかな変化しか示さない、(2)動水勾配の方向を変化させることにより等価な透水テンソルが得られる、(3)各方向の透水係数の比が安定する、と定義されている。

亀裂ネットワークモデルを用いた等価多孔質媒体近似のテストケースとして、文献にある亀裂の統計的データ(表4)¹⁷⁾を用いて、REVの評価を行った。

解析は、以下に示す手順で行った。

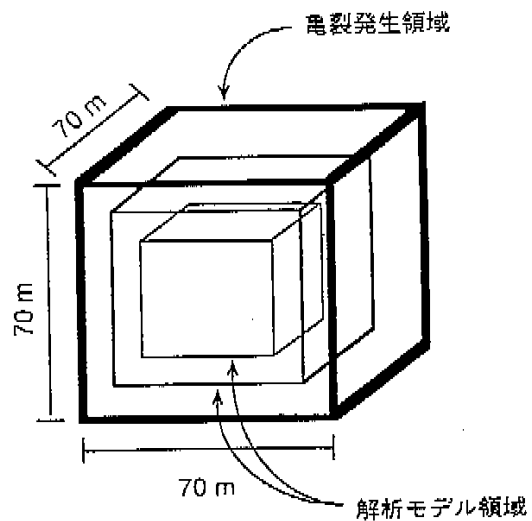


図5 亀裂発生領域とモデル領域

- ① 表4の統計的亀裂データを入力値として、一辺が70mの立方体ブロックに亀裂を発生させる。その際、realizationは50ケースとする。
- ② ①で発生させた亀裂モデル50ケースを基に、それぞれ一辺が10、25、32、40、50、55mのブロックを図5に示すように切り出す。
- ③ それぞれのケースに図6に示す外側境界条件を各座標軸方向(それぞれ南北、東西、鉛直方向の三方向)毎に与えて浸透流解析を行う。
- ④ 各方向のブロックとして等価な透水係数 K_i は以下の式から算出する。

$$K_i = Q_i / (P_i - P_0) L$$

ここで、 Q_i 、 P_i 、 P_0 、 L は、それぞれ i 方向の浸透流量、加圧側の圧力水頭(1m)、流出側の圧力水頭(0m)、ブロック一辺の長さを表す。解析は、50個のrealizationに対して、それぞれ6種類のサイズと、3方向について浸透流解析を合計約900

表4 統計的亀裂データ

	亀裂セット1	亀裂セット2
亀裂の平均方向(pole)*	248.0, 7.4	40.7, 72.7
Fisher係数	10	10
亀裂の半径の密度関係	対数正規分布	対数正規分布
亀裂の平均半径(m)	1.092	1.576
亀裂半径の標準偏差(m)	0.927	1.238
節理の中心の分布密度(個/m ³)	0.070	0.006

*: 亀裂の方向は、ステレオ投影図法(下半球投影)におけるpoleのtrendとplungeで表している。

注) 各亀裂の透水係数は 1×10^{-4} m/sと仮定

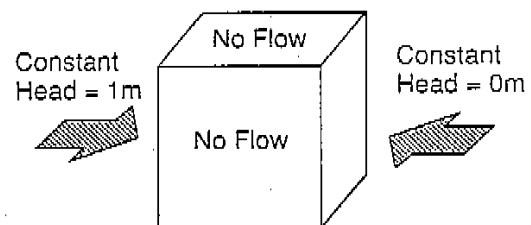


図6 外側境界条件

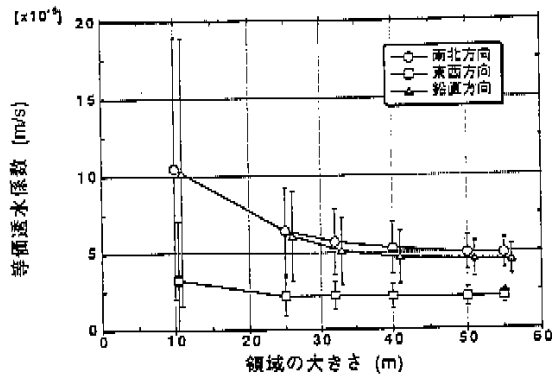


図7 等価透水性係数のスケール依存性

ケースを行った。

図7に等価透水性係数のブロックスケール依存性を示す。一辺が40m以上のブロックスケールにおいて、各方向の等価透水性係数はほぼ安定するが、依然としてばらつきが残り、REVとしてユニークな透水性係数が得られなかった。そこで、各方向の等価透水性係数の分布を分布関数で代表することを検討する

ために、各ブロックスケールのヒストグラムを作成した(図8参照)。同図には、算術平均値、標準偏差から導いた正規分布曲線を、実線で示した。また、実線で示した正規分布曲線を解析結果で近似可能かどうか χ^2 検定で判定した。その結果を、図9に示す。両図から、40m以上のブロックサイズで χ^2 検定による信頼度が90%以上となり、各方向の等価透水性係数が正規分布関数で近似できることがわかった。これらの結果から、ブロックとして等価な各方向の透水性係数は、以下のように表わすことができる。

$$K_i = N(\mu_i, \sigma_i)$$

ここで、

K_i : i 方向の透水性係数

$N(\mu_i, \sigma_i)$: 正規分布関数

μ_i : i 方向の透水性係数の平均値

σ_i : i 方向の透水性係数の標準偏差

各方向間の相関性を検討したところ(図10)、相関係数は0.35~0.57と低いものの、わずかに相関性が見られた。したがって、各方向の等価透水性係数はそれぞれ独立ではなく相関性を持つと考えられ、今

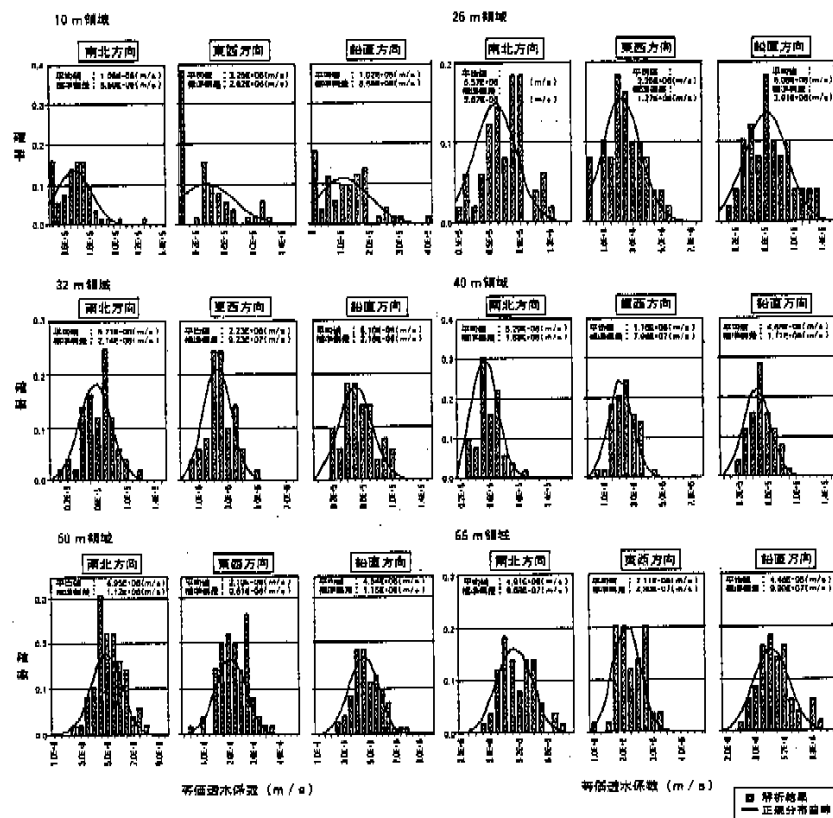
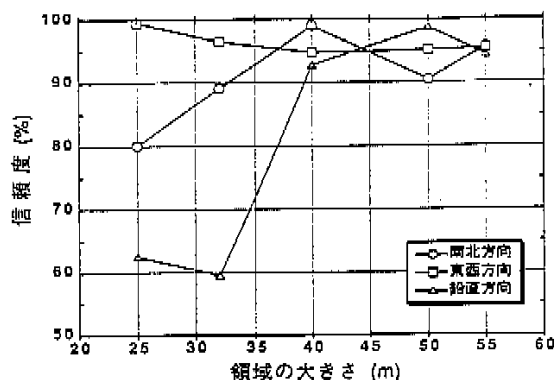


図8 各スケールの等価透水性係数のヒストグラム

図9 χ^2 検定信頼度の変化

後このような相関性を定式化する必要がある。

このテストケースでは、単一亀裂の透水係数に関するデータがなかったために、個々の亀裂の透水係数を一定値 (1×10^{-4} m/s) と仮定して解析を行った。しかし、実岩盤においては、亀裂の透水係数は亀裂の大きさや方向に依存して変化すると考えられる。また、単一の亀裂内においても、チャネリングといった不均質性の存在が原位置試験や室内実験から明らかになっている¹⁸⁾。このような不均質性は、透水係数の異方性に大きな影響を与えると考えられ、今後検討していく必要がある。

5. スウェーデンFinnsjönサイトでの原位置試験の解析

亀裂帯での核種移行評価には、多孔質媒体モデルや亀裂ネットワークモデル等が用いられているが、

モデルの適合度にそれ程誤差がなければ、モデルの robustness の面からは、モデル自体に含まれているパラメータが少なく、かつモデルに必要なデータが直接測定されていることが望ましい。本研究では、透水係数の異なる層を準3次的に組み合わせた比較的簡単な多孔質媒体モデルを作成し、亀裂帯における原位置試験データを用いて、トレーサ移行の予測解析を行うことにより、モデルの有効性を検討した¹⁹⁾。

開発したモデルは、亀裂帯を透水係数の異なる多層の多孔質媒体で表現するモデルであり、物質移動は、各層中のポテンシャル流れの場合における移流分散、隣接層への分散により定義される。解析に際しては、各層内において透水係数の場所的変化を考慮して数値的に決定した流れの場をいくつかの流管に分割し、各流管中の物質移動現象を隣接層への分散による物質移行を考慮した移流分散モデルを基に解き、各層内での平面的な濃度分布を計算する手法を採用した。

解析に使用したデータは、スウェーデンのFinnsjönにおける地下300mの深さのほぼ水平な亀裂帯を対象とした原位置試験から得られたものである。揚水試験（モノポール）とダイポール試験の2種類のトレーサ試験が実施されており、試験の結果から、対象としている亀裂帯は、透水性の高い層と低い層の2層から構成されていると考えられる。そこで上記モデルにしたがって、透水性の高い層と低い層の2層からなる不均質多孔質媒体モデルを用い、解析を行った。解析の手順としては、ダイポール試験で得られた破過曲線から移行パラメータ（各層での空隙率と分散係数）の値を推定し、その推定パラメータ値

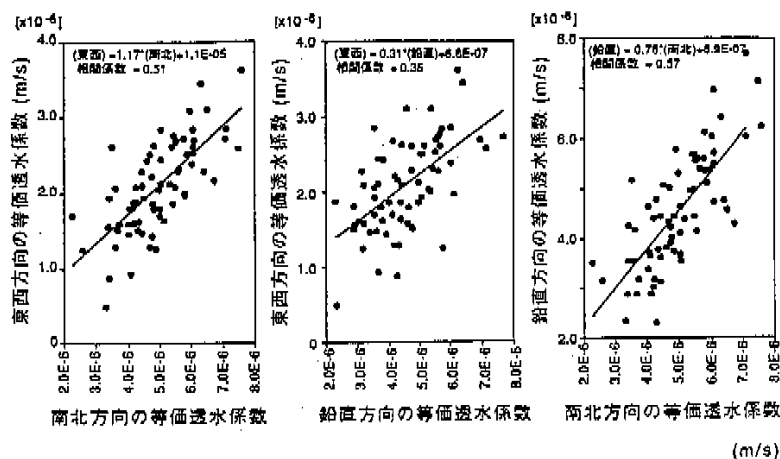


図10 各方向間の等価透水係数の相関性

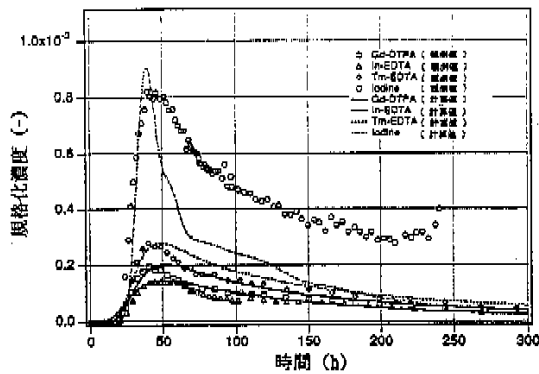


図11 ダイボール試験におけるトレーサの破過曲線

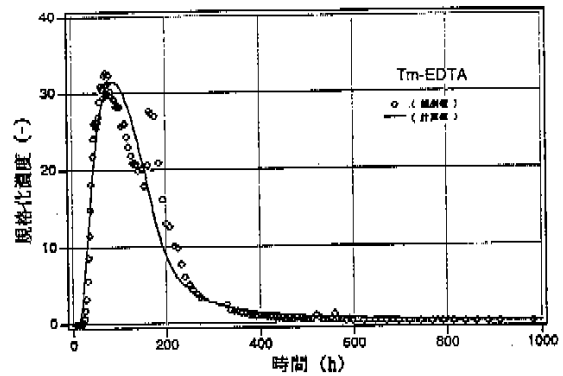


図12 揚水試験におけるTm-EDTAの破過曲線

を用いて揚水試験をシミュレートし、実測された破過曲線と比較した。

ダイボール試験からパラメータフィッティングを行うと、図11に示すようにI-を除くトレーサに関して実測値と良い一致を示すパラメータ値を推定することができた。各トレーサに関して推定されたパラメータ値を使用して揚水試験をシミュレートすると、I-を除くトレーサに関して、ほぼ試験を再現しており、ここで開発したモデルおよび発生させた透水係数の空間分布の有効性が確認された。一例として、図12にTm-EDTAの揚水試験のシミュレーション結果を示す。

本解析において流れの場の不均質性は、原位置に掘削されている孔井から得られた透水係数値をもとに推定した。

今後、原位置で得られている透水係数、地下水位等のデータを有効に活用し、統計的手法を用いて、最適な透水係数場を推定していくとともに、得られた透水係数場の信頼性についても評価していく予定である。

なお、本解析はスウェーデン原子力検査局(SKI: Statens Kärnkraft Inspektion)が中心となって進めているOECD/NEAの国際検証研究プロジェクトINTRAVAL (An International Study for Work on Validation of Geosphere Transport Models)への参画の中で実施したものである。

(東海事業所 環境技術開発部 地層処分開発室
油井三和、内田雅大、畑中耕一郎、
牧野仁史、澤田 淳)

参考文献

- 1) 動燃事業団、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書、PNC TN 1410 92-081 (1992)。
- 2) Parkhurst, D.L., Thorsteson, D.C. and Plummer, L.N.: "PHREEQ-A computer program for geochemical calculations", U.S. Geol. Surv. Water-Resources Investigations, 96, 210, (1980)。
- 3) Ball, J.W., Jenne, E.A., and Nordstrom, D.K.: "WATEQ2-A Computerized Chemical Model for Trace and Major Element Speciation and Mineral Equilibria of Natural Waters, Chemical Modeling in Aqueous Systems, Jenne, E.A., ed., ACS Symp. Series 93, American Chemical Society, Washington DC, p.815-835, (1979)。
- 4) Ball, J.W., Nordstrom, D.K., and Jenne, E.A.: "Additional and Revised Thermochemical Data and Computer Code for WATEQ2-A Computerized Chemical Model for Trace and Major Element Speciation and Mineral Equilibria of Natural Waters, U.S. Geol. Surv. Water-Resources Investigations, 78-116, p.109, (1980)。
- 5) Grenthe, L., Fuger, J., Lemire, R.J., Muller, A.B., Cregu, C.N.T., and Wanner, H.: "NEA-TDB Chemical Thermodynamics of Uranium, Final Draft for Peer Reviews, OECD/NEA, (1990)。
- 6) Seo, T., Ochiai, T., Takeda, S. and Nakatuka, N.: "Natural Analogue Study on Tono Sandstone-type Uranium Deposit in Japan", Proceedings of the Joint International Waste Management Conference, Vol. 2, p.353-358, (1989)。
- 7) Yeh, G.T. and D.S. Ward: "PEMATER, A Finite Element Model of Water Flow Through Saturated-Unsaturated Porous Media", Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-5601, (1980)。
- 8) 内田雅大、岡本二郎：「仮想的な二次元水理地質モデルに基づくわが国の水頭特性の検討」, PNC TN8410 92-168, (1992)。
- 9) 国土庁：国土統計要覧, (1987)。
- 10) 下茂道久、竹田直樹、宮下国一郎、青木謙治：「岩盤内空割断層と地下水環境-瀬田実証プラント-」, 土と基礎, No.1045, p.57-63, (1986)。
- 11) 植田和寛、野口雅文、地田政隆：「花崗岩盤における巨視的透水係数の評価」, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム要旨論文集, p.26-30 (1992)。
- 12) 土木学会・編：「ダム地質調査」, (1977)。
- 13) 柳沢孝一、古賀和夫、大塚芳明、若松尚則、畑中耕二：「わが国における地質の透水性に関する調査・研究 (その1)」, PNC TN741092-015 TR/GE 92-01, (1992)。
- 14) Long, J.C.S., J.S. Remer, C.R. Wilson and P.A. Witherspoon, Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, Water Resour. Res., vol.18, No.3, 645-658, (1982)。
- 15) Herbert, A. and B. Splawski, Prediction of Inflow into the D-Holes at the Stripa Mine, STRIPA PROJECT 90-14, (1990)。
- 16) Oda, M. and Y. Hattayama, Permeability tensor of jointed granite at Stripa mine, The 21th Japan National Conf. on Soil Mech. Engrg. I, 991-992, (1984)。
- 17) 吉田淳、岩盤不連続データの解析とそのブロック理論への適用について、(社)システム総合第11回ケーブロック実用化研究会, (1990)。
- 18) Kikuchi, K., Y. Mito and T. Okuno, Experimental study for groundwater flow in an actual jointed rock mass, International Symposium at Great Depth, vol. 1, 457-464, (1989)。
- 19) 向井博、土井英雄、畑中耕一郎、植木博之：「亀裂帯での核種移行に対する多孔質媒体モデルの有効性の検討」, 日本原子力学会1992年秋の大会予稿集 p.325, (1992)。