

亀裂状媒体における物質移動モデルの開発と確証

—グリムゼルテストサイトにおけるトレーサ試験データの解析—

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)



1992年5月

株式会社 三菱総合研究所

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の閲覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。また今回の配布目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

This document is not intended for publication. No public reference nor disclosure to the third party should be made without prior written consent of Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

本資料についての問い合わせは下記にお願いします。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

環境技術開発推進本部

配 布 限 定
PNC ZJ1222 92-002
1992年 5月

亀裂状媒体における物質移動モデルの開発と確証
—グリムゼルテストサイトにおけるトレーサ試験データの解析—

古屋 俊輔*, 藤田 尚宏*

要 旨

亀裂中の支配的な流れの空間的不均一性と亀裂内充填物へのマトリックス拡散を考慮した亀裂状媒体における物質移動を解析するモデルの開発を行った。

開発したモデルは、ポテンシャル理論を適用して解析的に流線に沿った流速分布を計算する地下水流动モデルと、一次元移流拡散方程式により周辺岩体あるいは亀裂内充填物へのマトリックス拡散を考慮した物質移動を解析する物質移動モデルから構成される。地下水流动モデルでは不均一場での解析も可能となるように透水量係数の空間分布を考慮できるモデルとした。核種移行解析のためにこれらのモデルを基にして地下水流动および物質移動を解析するプログラムを作成した。

解析プログラムの機能を検証するために、グリムゼル試験サイトにて実施された水理・核種移行試験から提供されたデータに基づいて実験解析を行った。比較的簡便なモデルにもかかわらず、実験値の再現性が良いことがわかり物質移動モデルの妥当性が確認できた。

本報告書は、三菱総合研究所が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：030D0292

事業団担当者：増田 純男（環境技術開発推進部 処分研究グループ）

*：株式会社 三菱総合研究所 安全工学研究部

LIMITED DISTRIBUTION

PNC ZJ1222 92-002

May, 1992

Development and Application of Solute Transport Model in the Fracture

Shunsuke Furuya*, Naohiro Yabuta*

Abstract

Solute transfer model for fissure media with fracture infill is developed. Spatial inhomogeneity of dominant flow and matrix diffusion into fracture infill are considered in this model.

Solute transfer model consists of groundwater streaming model and mass transfer model. Groundwater streaming model is derived from potential theory and calculates velocity distribution along stream line analytically. Mass transfer model analyzes solute transfer by solving one dimensional advective transport equation considering molecular diffusion from the fracture into the matrix (surrounding rocks and fracture infills).

Groundwater streaming model is prepared for considering transmissivity spatial distribution so that the model can apply inhomogeneous flow field.

Based on these models, computation program for groundwater stream and solute transfer is developed for the analysis of advective transport of radio isotope.

Verification of this model is performed for the experimental data offered from Grimsel Test Site (GTS). Although the model is simplified and handling is easy, reproducibility of experimental result is rather good, and validity of this model is confirmed.

Work performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison : Sumio Masuda (Isolation System Research Program, Radioactive Waste Management Project)

* : Mitsubishi Research Institute, Inc. Safety Engineering Dept.

亀裂上媒体における物質移動モデルの開発と確証
—グリムゼルテストサイトにおけるトレーサ試験データの解析—

目次

1. 序	.....	1
1. 1 目的	.....	1
1. 2 研究内容	.....	1
2. 物質移動モデルの検討	.....	4
2. 1 物質移動モデルの概要	.....	4
2. 2 亀裂上媒体中の物質移動モデル	.....	6
2. 3 選定した解析モデル	.....	8
2. 3. 1 モデルの概要	.....	8
2. 3. 2 地下水流動モデル	.....	8
2. 3. 3 物質移動モデル	.....	13
3. 物質移動解析コードの開発	.....	23
3. 1 解析コードの概要	.....	23
3. 2 帯水層幅の空間分布	.....	23
3. 3 流速分布計算モジュール	.....	24
3. 3. 1 入力パラメータ	.....	24
3. 3. 2 流速分布計算モジュールの機能	.....	25
3. 4 物質移動計算モジュール	.....	26
3. 4. 1 入力パラメータ	.....	26
3. 4. 2 物質移動計算モジュールの機能	.....	27
3. 5 物質移動解析コードの構成	.....	28
3. 6 コードの制限	.....	29
4. グリムゼルトレーザ試験の実験解析	.....	34
4. 1 グリムゼルトレーザ試験の概要	.....	34
4. 2 グリムゼルトレーザ試験の実験解析	.....	36
4. 2. 1 解析対象	.....	36
4. 2. 2 解析条件	.....	37
4. 2. 3 解析結果	.....	38
4. 3 物質移動モデルの妥当性の検討	.....	43
5. まとめ	.....	79

付録

入力マニュアル

1. 序

動力炉・核燃料開発事業団では、わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の技術的実現可能性を明らかにすることを最終的目標として、地層処分システムの性能評価等研究開発が進められている。この研究開発は、システムの挙動を想定するシナリオの開発、挙動を表現する数学モデルの開発、数学モデルと適切なデータを用いて行う予測解析などから構成される。

システムの挙動シナリオの内、放射性核種が人間環境へ放出されるモードの1つとして地下水を核種移行媒体とした機構が考えられている。この地下水シナリオの評価では、人工バリアシステムおよび天然バリアシステム中での核種移行解析が行われる。後者の解析対象のうち、岩盤中の亀裂状媒体は核種移行経路として重要である。本研究では地下水シナリオの評価における解析モデル開発の一環として、亀裂状媒体における物質移動に着目した解析モデルの検討と解析コード作成を行う。

1.1 目的

充填物が存在する亀裂における物質移動機構を表現するモデルには、亀裂中の支配的な流れによる移流や充填物中へのマトリックス拡散を考慮する必要がある。また、実際の亀裂では開口幅あるいは帶水層幅が空間的に均一でないことが多く、物質移動機構には空間的な不均一性が亀裂中の流れに与える影響も考慮する必要がある。

本研究では、このような亀裂場を対象とした物質移動解析モデルを作成し、作成したモデルの評価を行う。解析モデルの検証は、動力炉・核燃料開発事業団とスイス放射性廃棄物管理組合(NAGRA)との共同研究（グリムゼル試験サイトにて実施された水理・核種移行試験）から提供されるデータを解析対象として実施する。

1.2 研究内容

本研究では次の3項目を実施する。

- ①物質移動モデルの検討
- ②物質移動解析コードの作成
- ③水理・核種移行試験の解析および物質移動モデルの適用性の検討

各項目の実施内容は次の通りである。

(1) 物質移動モデルの検討

亀裂状媒体中の物質移動モデルは、地下水水流の解析モデルとその結果を利用した移流やマトリックス拡散による物質移動解析モデルに分けられる。このうち、流れの解析モデルは、亀裂中の支配的な流れの空間的不均一性を考慮できるように、流速分布計算で透水量係数の空間的な分布を取り扱えるモデルとする。また、物質移動モデルは、流れの空間的不均一性（流速分布の不均一性）を考慮するとともに、亀裂充填物中のマトリック

ス拡散も考慮できるモデルとする。

(2) 物質移動解析コードの作成

(1)の検討に基づき物質移動解析コードを作成する。コード作成に際しては、流れの解析モデルあるいは物質移動解析モデルの改良に対応できるように、各モジュールを独立したものとして扱えるようにする。

(3) 水理・核種移行試験の解析および物質移動モデルの適用性の検討

作成した物質移動解析コードを用いて、グリムゼル試験サイトにおける亀裂状媒体中の水理・核種移行試験から得たデータを対象に実験解析を行う。これにより解析モデルの適用性を検討する。

これらの3項目の実施フローを図1.1に示す。

以下、本報告書第2章で物質移動モデルの検討内容を述べる。第3章ではこの検討結果を反映して作成した解析コードを説明する。第4章ではグリムゼル実験解析結果を述べ、解析モデルの検証を行う。第5章に研究成果と今後の課題をまとめた。

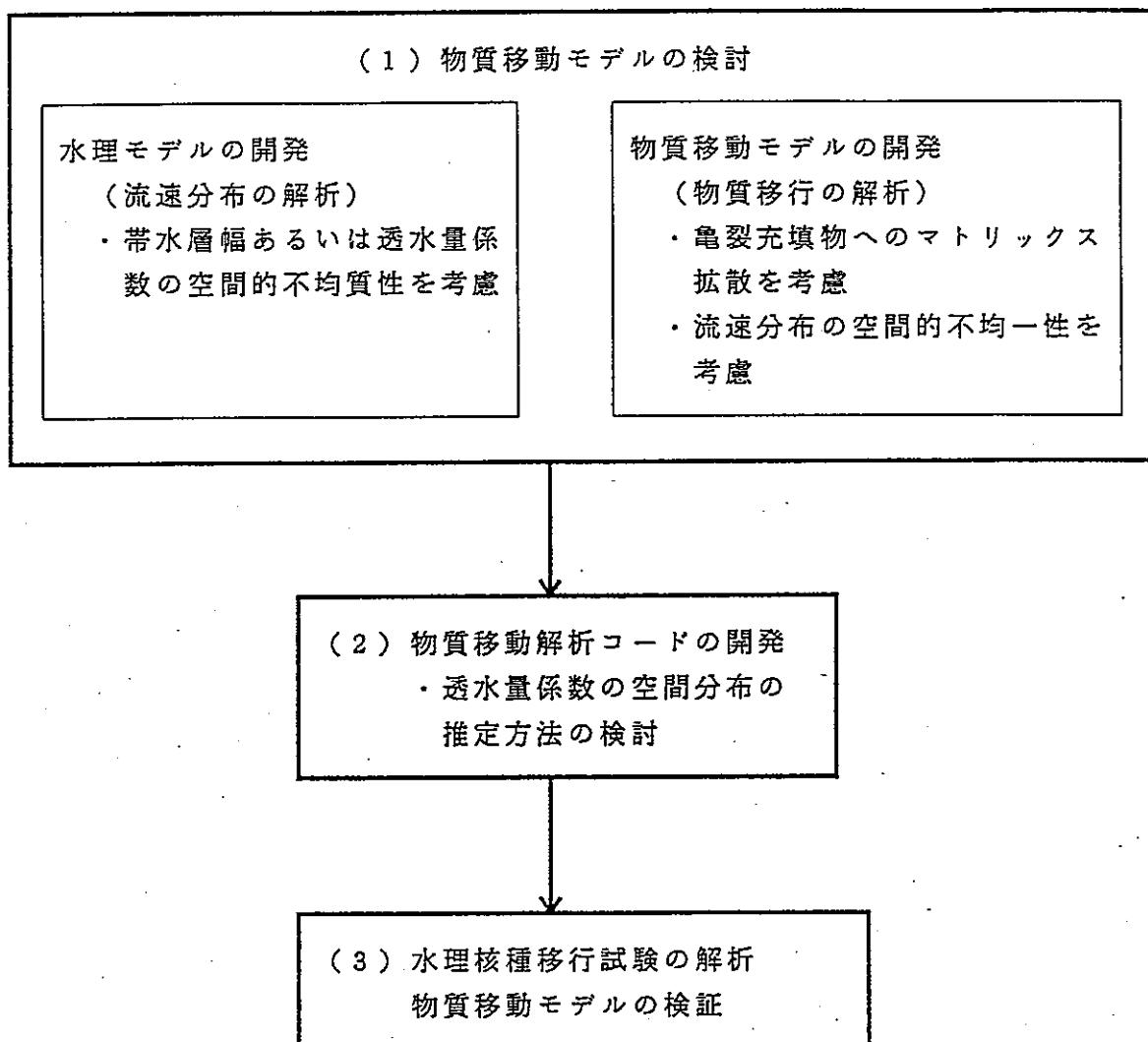


図1. 1 研究の実施フロー

2 物質移動モデルの検討

既存の物質移動モデルの検討に基づき、本研究で採用する解析モデルを説明する。

はじめに亀裂媒体中の物質移動現象を概観し、次に亀裂状媒体に適用できる既存の物質移動モデルの概要を述べる。

2.1 亀裂状媒体中の物質移動現象

亀裂中での物質移動は、主に水の流れを介して行われる。ここでは、まず亀裂中の水の流れについて述べてから物質移動について説明する。

(1) 亀裂中での水の流れ

岩盤中の水の流れは、一般に岩体と亀裂系を経路とすると考えられる。しかし、通常は岩体の部分は水を通しにくいため、水は主に亀裂系を流れている。さらに、亀裂系を構成する各亀裂の内部は、粘土や砂礫等の充填物と空隙から構成されており、亀裂中の支配的流れの流路は空隙が担うこととなる。一方、充填物については、空隙に比べて透水性は小さいため亀裂中の支配的な流れに大きな影響を与えないと考えられる。しかし、小さくとも主流路からの充填物表面の微小な割れ目がある場合は、水の流入、流出が生じる。

(2) 亀裂中での物質移動

亀裂中の物質の移動は一般に水を介して行われるので、移動の経路は(1)で示した水の流れと同様に亀裂媒体中の空隙での流れと充填物中への流入、流出経路に対応する。加えて物質移動では、流れによる移動の他に流れの中での分子拡散や周辺岩体あるいは充填物への表面吸着等もある。水の流れが非常に速い場合には、主流路の流れ方向のみの移動を考慮すればよいが、亀裂中の流れでは流速も小さく、主流路および充填物中の分子拡散や表面吸着が無視できない場合もある。以上より、亀裂媒体中の物質移動の現象として考慮すべきものとしては

- ① 亀裂内の支配的流れに沿った移流
- ② 亀裂内の支配的流れに沿った機械的分散
- ③ 亀裂内の支配的流れの中での分子拡散
- ④ 亀裂内充填物表面での吸着および滞留
- ⑤ 亀裂内充填物中の微小割れ目での流れにおける機械的分散および分子拡散

- ⑥ 亀裂内充填物中の微小割れ目での表面吸着および滞留
- ⑦ 周辺岩体あるいは亀裂内充填物への分子拡散
が挙げられる。

2.2 亀裂状媒体中の物質移動モデル

亀裂状媒体中での物質移動モデルは既に幾つか報告されている。これらのモデルは地質環境条件およびその亀裂対中に存在する地下水水流の条件により次のように三次元モデルと二次元モデルに分けられる。

(1) 三次元モデル

亀裂内が地下水の主流動経路になっているが、亀裂周辺の岩体が比較的大きな透水性を有し、周辺岩体への移流が生じている場合や、周辺岩体への物質移動は拡散支配であってもその挙動が三次元的である場合には立体的な解析対象領域を取り扱う必要がある。また前節でも述べたように周辺岩体中に微細な亀裂が多数存在し、微細亀裂中の移流あるいは拡散による物質移動が無視できない場合にも同様の取り扱いが必要となる。

このような条件下での物質移動の解析は三次元の物質移動モデルによるものが最も厳密であり、Trescott¹⁾, Reisenauer²⁾等により有限要素法、境界要素法などの手法を用いた解析モデルが提案されている。これらの解析モデルでは、立体的な解析対象領域で亀裂の透水量係数の不均一性等が考慮されている。しかし、一般に三次元モデルでは要素数が膨大な数になり、計算手順も複雑である。そのため解析精度を落さずにできるだけ要素数を減らす工夫が必要とされる。

(2) 二次元モデル

一般に、地下水流动の問題は水平方向に比べて鉛直方向の水頭値の変化が小さい。特に亀裂状媒体は不透水層に挟まれている場合が多く、亀裂中の物質移動は移流に支配され、周辺岩体へのそれは拡散支配であると考えられる。即ち、帶水層である亀裂状媒体は空隙部分と亀裂内充填物により構成されているが、亀裂内充填物は周辺岩体と同様に透水性が小さいので物質移動は拡散によって支配されるものと考えられる。従って亀裂面での移流による物質移動のみを考慮する場合は、二次元で表現される解析モデルが採用されることもある。また、周辺岩体および亀裂内充填物へのマトリックス拡散による物質移動も考慮する場合には亀裂平面を二次元で表わすと共にモデルにマトリックス拡散項を取り入れた準三次元モデルが採用されることもある。解析手法としては、三次元モデルと同様に数値解法によるものと特定の条件下で支配方程式を解析的に解く解析的手法とがある。これらを次に概観する。マトリックス拡散を考慮した亀裂状媒体中の物質移動の概念図を図2.1に示す。

a) 数値解法

亀裂状媒体が透水量係数の不均一性を有する場合にも適用できる、二次元あるいは準三次元の取り扱いを採用した解析モデルが、Cooley³⁾, Trescott⁴⁾等のモデルをはじめとして有限要素法、有限差分法等の手法を用いて多数開発されている。有限要素法によるFEMWATER/FEMWASTE⁵⁾, FTRANS⁶⁾, 有限差分法によるDIPOL⁷⁾などもこの範疇に含まれる。これらの手法は解析対象領域の地下水流の速度ポテンシャルを計算し、流速分布を求めて物質移動解析を行っているが、周辺岩体および亀裂内充填物へのマトリックス拡散項を組み込むと収束性が悪くなるとされている。また、数値解析モデルは境界条件の変更、サイトに応じたグリッドの設定等が容易でないものが多い。

b) 解析的手法

亀裂内が地下水の主流動経路となっており、周辺岩体への物質移動は拡散支配であるような亀裂状媒体において、解析対象領域の透水量係数が一定と見なせる場合の地下水流动解析では、ポテンシャル理論により解析的に亀裂面内に流管を定め、各流管内での物質移動を移流拡散方程式を数値的に解く手法があり、実際にトレーサー試験へ適用した例がHerzog等⁸⁾により報告されている。

また、均一場における一定流速の地下水流による物質移動について、周辺岩体内へのマトリックス拡散を考慮した一次元の移流拡散方程式の解析解が、Tang⁹⁾, Ahn¹⁰⁾等により報告されている。これらのうちAhn等の解析解は超長期($\sim 10^4$ yr)にわたる物質移動を予測することが可能であるが、~day程度の短時間の解析では比較的収束性がよくない。一方、Tang等の解析解は超長期の解析に対する検討はされておらず、実績もないが、数day~ 10^4 day程度のタイムスケールでの解析では数値解法による解析結果との良い一致が確認されている。

2.3 選定した解析モデル

2.3.1 モデルの概要

2.2節に述べた既存のモデルの概略説明からわかるように、三次元モデルは地層中の物質移動を解析する際に考慮すべき項目を網羅しているものの、計算対象とすべき要素数が非常に多い、境界条件の設定変更の柔軟性に欠けるなど、比較的取り扱いが複雑である。また周辺岩体の透水性の面から亀裂状媒体中の地下水流动は、近似的に二次元的な挙動をすると考えても解析精度を損なうことはないと思われる。

本研究で用いる解析モデルの候補としては、不均一性を考慮することができるがマトリックス拡散の取り扱いに問題を残している数値解析的手法と、マトリックス拡散の効果を取り入れることにより周辺岩体あるいは亀裂内充填物への物質移動を考慮することができる解析的な準三次元モデルの二つが考えられる。

このうち、実験条件、境界条件の変更への対応が容易であること、マトリックス拡散による亀裂面に垂直な方向の物質移動を考慮することが可能なことから解析的な準三次元モデルが適当であると思われる。ただし、前述のように準三次元モデルでは流れ場の不均一性が考慮されない。

そこで本解析で用いた解析モデルは、透水量係数に関して不均一な亀裂状媒体中の物質移動解析に適用できるように、不均一な流れ場を局所的に均一な領域の集合として取り扱うものとした。即ち、局所的な均一領域における地下水流动の解析結果を結合して解析対象領域全体の流れ（流線網）を定め、この時各流線を帶水層幅によって決る径をもつ流管とみなす。あわせて、マトリックス拡散を考慮する。この非均一場における流动とマトリックス拡散を考慮した物質移動を解析できる点にこの解析モデルは特徴がある。

選定した解析モデルは地下水流动解析モデルと物質移動解析モデルとからなり、地下水流动解析ではポテンシャル理論に基づき亀裂平面内の流線網を解析的に定め、物質移動解析では地下水流动解析で定めた全ての流線に対し、流れに沿った一次元の物質移動と周辺岩体、亀裂内充填物への拡散による物質移動を解析する。

2.3.2 地下水流動モデル

地下水の流动のモデルを述べる。まず、一般的な均一媒体中での流線網の定め方をまとめ、次に不均一媒体への適用方法を述べる。

1) 均一媒体中の流線網

不透水層ではさまれた、流入孔および流出孔が存在する亀裂状媒体において流出孔中心を座標原点にとる。流出孔からの距離 r_w を半径とし、帶水層幅を高さとする円筒を考えると、この円筒の外側から流出孔に流れ込む流量は次式で表せる。

$$Q_w = 2\pi r_w a u_r = 2\pi k a r_w \frac{d\Phi_w}{dr} \quad (2.1)$$

ここで

- a : 帯水層幅
- k : 透水係数
- u_r : 中心からの距離 r_w における流速
- Φ : 水頭値 ($u_r = k \frac{d\Phi}{dr}$; ダルシー則)

また、流入孔と流出孔を結ぶ直線を亀裂の軸と定義する。

定常的な流出を考えると上式を流出孔半径 r_0 から r_w まで積分して(2.2)式が得られる。

$$Q_w = \frac{2\pi k a (\Phi_w - \Phi_0)}{\ln(r_w/r_0)} \quad (2.2)$$

- r_0 : 流出孔の半径
- Φ_0 : 流出孔における水頭値
- Φ_w : 位置 r_w における水頭値

これを変形して次式が得られる

$$\Phi_w - \Phi_{0w} = \frac{Q_w}{2\pi k a} \ln\left(\frac{r_w}{r_0}\right) \quad (2.3)$$

一方この亀裂状媒体に流出孔と同径の流入孔がある場合の水頭値は、符号を逆転して

$$\Phi_i - \Phi_{0i} = - \frac{Q_i}{2\pi k a} \ln\left(\frac{r_i}{r_0}\right) \quad (2.4)$$

と表せるので、流出孔と流入孔が同時に存在する場合には

$$\Phi \equiv \Phi_w + \Phi_i = \Phi_0 + \frac{Q_w}{2\pi T} \ln \frac{r_w}{r_0} - \frac{Q_i}{2\pi T} \ln \frac{r_i}{r_0} \quad (2.5)$$

により、任意の位置における水頭が表現できる。

ここで

Φ_0 : 基準面を定めるための任意定数

T : 透水量係数 ($T = ka$)

である。流出孔と流入孔の中間を座標原点とした直交座標系で亀裂面内の位置関係を図2.2に示す。

ただし、

$$r_i^2 = (L+x)^2 + y^2$$

$$r_w^2 = (L-x)^2 + y^2$$

L : 流出／流入孔間隔の半値幅

の関係がある。

境界条件は帶水層の地下水位によって定まる距離 R に関して

$$2\pi r T \left. \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right|_{R} = Q_i - Q_w \quad (2.6)$$

である。

(2.5)式とダルシー則から x , y 方向のダルシー流速の成分を求めると

$$q_x = -\frac{T}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{Q_i}{2\pi a} \left\{ \frac{(L+x)}{(L+x)^2 + y^2} + \beta \frac{(L-x)}{(L-x)^2 + y^2} \right\}$$

$$q_y = -\frac{T}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{Q_i}{2\pi a} \left\{ \frac{y}{(L+x)^2 + y^2} - \beta \frac{y}{(L-x)^2 + y^2} \right\} \quad (2.7)$$

となる。

ここで

q_x, q_y : ダルシー流速の x , y 方向成分

a : 帯水層幅

β : 流出流量／流入流量の比 = Q_w/Q_i

(2.5)式に示される二次元平面における速度ポテンシャルに対するコーシー・リーマンの関係は

$$\begin{aligned}\frac{T}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= \frac{\partial \Psi}{\partial y} \\ \frac{T}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial y} &= -\frac{\partial \Psi}{\partial x}\end{aligned}\quad (2.8)$$

である。(2.7)式および(2.8)式から導かれるラプラス方程式

$$\Delta \Phi(x,y) \equiv \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.9)$$

を用いてポテンシャル Φ に対する流れ関数は

$$\Psi(x,y) = \frac{Q_i}{2\pi a} \left\{ \arcsin \frac{x+L}{\sqrt{(x+L)^2+y^2}} - \beta \arcsin \frac{x-L}{\sqrt{(x-L)^2+y^2}} - \frac{1}{2}(1+\beta)\pi \right\} \quad (2.10)$$

となる。

図2.3に(2.10)式により表される流れ関数の分布を示す。流線は流れ関数一定の等高線の集まりであり、(2.10)式の流れ関数から得られる流線網は図2.4のようになる。

2) 不均一媒体中の流線網

透水量係数が一定とみなせる均一な亀裂状媒体については上記のように流線網を求めることができるが、実際の亀裂状媒体は多くの場合、透水量係数の空間的不均一性を有しているため、(2.10)式から直接的に流線網を決定することはできない。

このような亀裂状媒体における流線網を求めるために以下に示すような手法を適用した。

亀裂状媒体の組成が均一とみなせるとすれば透水係数が亀裂帯中で一定であると考えられるので、透水量係数の空間的不均一性は帶水層幅の空間的不均一さに置き換えて取り扱うことができる。図2.5に帶水層幅が不均一な亀裂状媒体の概念図を示す。

帶水層幅が不均一な亀裂帯を、その内部では帶水層幅が一定とみなせるような複数のブロック状の局所的均一領域（均一ブロック）に分割する。均一ブロックに分割された流れ場を図

2.6に示す。これらの各均一ブロックに対して(2.5)～(2.10)を適用して流線網を求める。

各ブロック内の流線において水等差を電圧、流量を電流、帶水層幅の逆数を電気抵抗と置き換えると、流れ関数の等しい隣接するブロックの流線はブロック毎に異なる値の電気抵抗を接続した一本の電気回路と考えることができる。この考え方に基づき、流れ関数が等しい流線をブロック毎に接続していき、流れ場全体の流線網を求める。

この流線網に沿った流れは次のように考えることができる。一定流量の地下水が帶水層幅に応じて流速を変えながら流れしていく。流速は帶水層幅が大きければ遅く、小さければ速くなるはずである。流線に沿った地下水の流れを、流速に応じて径が異なるパイプをつなぎ合わせた水路（流管）を流れる水流と考えると、均一ブロックに分割された不均一な流れ場における地下水流动を表現することができる。流速に応じた流管の径の計算については2.3.3節で説明する。

以上に説明した手法にしたがって流線網を構成する全ての流線に沿った流管をつくることにより、不均一な流れ場の地下水流动を解析的にモデル化することができる。

不均一な亀裂状媒体における地下水流动の解析手法では、亀裂状媒体の透水係数を一定とみなすことができ、不均一性は帶水層幅の変化に依存するものとしている。実際の亀裂状媒体では、亀裂が非常に滑らかな平行平板状で帶水層幅は一定であっても、亀裂を構成する地質の組成が流れの方向に大きく変化し、透水係数が一定とみなせないような流れ場、あるいは帶水層幅、透水係数ともに変化するような流れ場も考えられる。しかし、このような場合でも、透水量係数の定義から帶水層幅と透水係数はどちらか一方の値が測定あるいは近似等により与えられれば、もう一方の値は一意に決る。このため透水量係数が局所的に一定とみなせるように均一ブロックに分割すれば、上記とほぼ同様の手順で不均一な亀裂における地下水流动をモデル化することができる。このことは亀裂状媒体の透水係数を一定とした前提がこの解析モデルの適用性を強く制限するものではないことを示すものである。

2.3.3 物質移動モデル

物質移動モデルは一般的な移流などの現象のほか、マトリックス拡散を考慮することが重要である。ここでは次の前提を設け、マトリックス拡散を扱うこととした。

1) モデルの前提と仮定

亀裂状媒体中の物質移動においてマトリックス拡散を考慮する場合に検討すべき現象は

- a) 亀裂からマトリックス中への分子拡散
- b) マトリックス表面への吸着（移動物質が吸着種である場合）
- c) マトリックス内部での吸着（移動物質が吸着種である場合）
- d) 放射性崩壊（移動物質にRIを用いる場合）

である。

物質移動のモデル化に際しては以下のようない仮定を設けることとした。

- a) 帯水層幅は亀裂の長さに比べて極く小さい。
- b) 亀裂の幅方向の拡散と分散は全時間を通じて完全に混合されている。
- c) 亀裂状媒体の透水係数は極く小さくマトリックス内への移行は主として分子拡散による。
- d) 亀裂に沿った物質移動はマトリックス中の移行よりも極めて速い。
- e) 流線を亀裂中の支配的な流れの流路とし、各々の流線を流速により定まる径をもつ流管とみなす。

仮定a), b)により流管に沿った物質移動を一次元で取り扱うことが可能となる。仮定c), d)により岩体マトリックスへの物質移動が亀裂中の地下水流に垂直な方向であると簡略化することができる。

2) 一次元移流拡散方程式の解析解⁹⁾

図2.1に示される亀裂-マトリックス系における、亀裂中の一次元移流拡散方程式は流管に沿った流れの方向をZ、これに垂直なマトリックス方向をXとすれば式(2.11)のようになる（図2.1参照）。

$$v \frac{\partial c}{\partial z} - D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial s}{\partial t} + \lambda c + \frac{\lambda}{b} s + \frac{q}{b} = 0 \quad 0 \leq z \leq \infty \quad (2.11)$$

ここで

z : 流管中の軸方向位置

X	: マトリックス方向の位置
t	: 時間
D	: 拡散係数
c	: 地下水中の移動物質の濃度, $c(z, t)$
λ	: 放射性の移動物質の場合の崩壊定数
q	: 流れに垂直方向の、岩体あるいは充填物への拡散による損失

である。流管内の流れに沿った分散は機械的分散と分子拡散からなり、次のように定義されている。

$$D = \alpha_L v + D^*$$

α_L : 分散係数

D^* : 自由水中の分子拡散係数

である。

(2.11)式の左辺各項の意味は第一項から順に亀裂に沿った移流、亀裂中の機械的分散、濃度の経時変化、周辺岩体および亀裂内充填物表面への吸着、亀裂中を移動する放射性物質の放射性崩壊、表面吸着された放射性物質の放射性崩壊、周辺岩体および亀裂内充填物へのマトリックス拡散による物質移動である。

拡散損失は

$$q = -\epsilon D' \frac{\partial c'}{\partial x} \Big|_{x=b}$$

ただし、 $b \leq x \leq \infty$ 、また、

c' : 周辺岩体あるいは亀裂内充填物表面における移動物質濃度、 $c'(x, z, t)$ のように流管と周辺岩体あるいは亀裂内充填物との境界位置におけるフィックの法則で表される。

式(2.11)を以下の境界条件の下に解く。

$$c(0, t) = c_0 \quad c_0 : 移動物質の流入濃度$$

$$c(\infty, t) = 0$$

$$c(z, 0) = 0$$

この境界条件により、ある流管中で流入孔からの流れ方向位置zにおける濃度の経時変化と

して次式が得られる。

$$\frac{C_0 \exp(\zeta z)}{\pi^2} \int_L^\infty \exp\left[-\xi^2 \frac{\zeta^2 z^2}{4\xi^2}\right] \exp(-\eta z^2) \left\{ \exp[-\lambda^2 Y] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y - \lambda^2 T}{2T}\right] + \exp[\lambda^2 Y] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y + \lambda^2 T}{2T}\right] \right\} d\xi \quad (2.12)$$

ここで

ρ : マトリックス密度

R, R' : 亀裂中、マトリックス中の吸着による遅延係数

K_f, K_m : 亀裂中、マトリックス中の吸着係数

D' : 有効拡散係数 ($D' = \tau D^*$, τ : マトリックスの屈曲度)

$$Y = \frac{v^2 \beta^2 z^2}{4A\xi^2}, A = \frac{bR}{\epsilon(R'D')^{1/2}}$$

$$T = \left(t - \frac{Rz^2}{4D\xi^2} \right)^{1/2}, \eta = \frac{\lambda R}{4D\xi^2}$$

$$\zeta = \frac{v}{2D}, R = 1 + \frac{K_f}{b}, R' = 1 + \frac{\rho}{\epsilon} K_m, L = \frac{z(R)}{2(Dt)}$$

である。

3) 不均一場への適用

2.3.2節で述べた地下水流动モデルにより流線網を作成し、各流管について(2.2)式のダルシー流速を実流速に換算する。実流速の平均値または代表値を(2.12)式に与えることにより流管中の任意の位置における移動物質濃度の経時変化を解析することができる。ただし、(2.12)式では流管中のある一点における流速からその点における濃度分布を計算する式であるので、流速が軸方向に大きく変化するような不均一場には直接適用することはできない。

そのため局所的に均一とみなせる領域に分割し、帶水層幅が異なる均一領域が連続した構造として、各均一ブロック内の流れに対して(2.12)式を適用した。その際、以下の点を考慮した。

a) 均一ブロック間の物質保存

地下水流动モデルにより定めた第一領域（第一番目の均一ブロック；流入孔を含む領域）と第二領域（第二番目の均一ブロック）との境界位置での流速と第一領域の帶水層幅から、第一領域中の各流管について物質移動モデルにより第一領域と第二領域の境界における濃度の経時変化を求め、その時間積分を第一領域から第二領域への移動物質の入力とする。

同様に第二領域への入力と第二領域と第三領域の境界の位置での流速と第二領域の帶水層幅から境界における移動物質濃度の経時変化を求め、その時間積分を第三領域への入力とする。以下同様の解析を順次行い、揚水孔を含む最終領域における全ての流管中の濃度の経時変化を破過曲線とする。

b) 解析対象領域全体について一本の流管内を流れる水の流量を一定とし、ある均一ブロックについて、ダルシー則から定まる流速に対して(2.13)式の三乗則により流管径を定めれば、その均一ブロック内の流管と隣接する均一ブロック内の流管を、流れ関数の等しいものどうしを接続して、質量バランスを保った連続する流管とことができる。

$$\frac{Q \cdot k}{\varepsilon \cdot v} = \left(\frac{W}{L} \right) \left(\frac{\rho \cdot g}{12 \cdot \mu} \right) (2 \cdot b)^3 \quad (2.13)$$

ここで

- ε : 空隙率
- v : 流速
- W : 亀裂幅
- L : 流管長さ
- g : 重力加速度
- μ : 粘性係数
- b : 流管半径

流入孔に発する流線が流出孔に到達するまでに通過する全ての均一ブロックについて、同様の手順により流管を接続していくことにより流入孔から流出孔まで連なる一本の流管となる。

c) 流入濃度の細分化

(2.11)式から(2.12)式を導出した際に移動物質の流入濃度として、一定濃度で一定時間流入孔から亀裂帯に流入するステップ状の入力、または瞬間に移動物質の流入が完了するパルス入力を仮定しているのが、実際に流入する移動物質溶液の濃度分布は比較的幅広いピークをもつ山状になっており、均一ブロックを順次通過していくに連れてピークがより低く、幅広くなっていく。したがって各均一ブロックへの移動物質の流入濃度を単一のステップ状入力で表現することは無視できない誤差を伴うものと思われる。本解析においては移動物質の流入濃度分布を連続するステップ状入力の和と考えて、各ステップ入力について物質移動解析を行い、解析結果の濃度分布の総和を均一ブロックの境界における濃度分布とした。

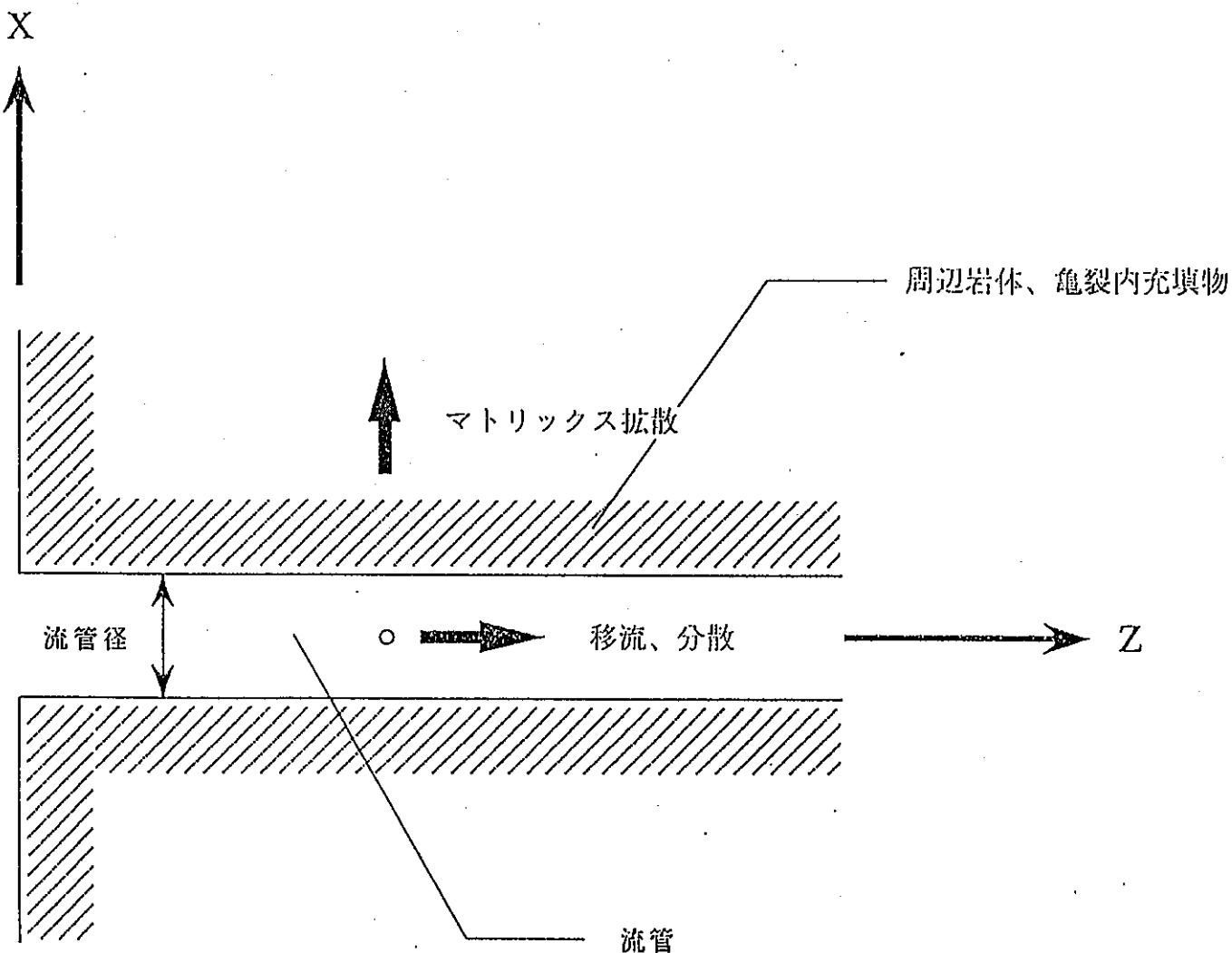


図2.1 亀裂-マトリックス系における物質移動

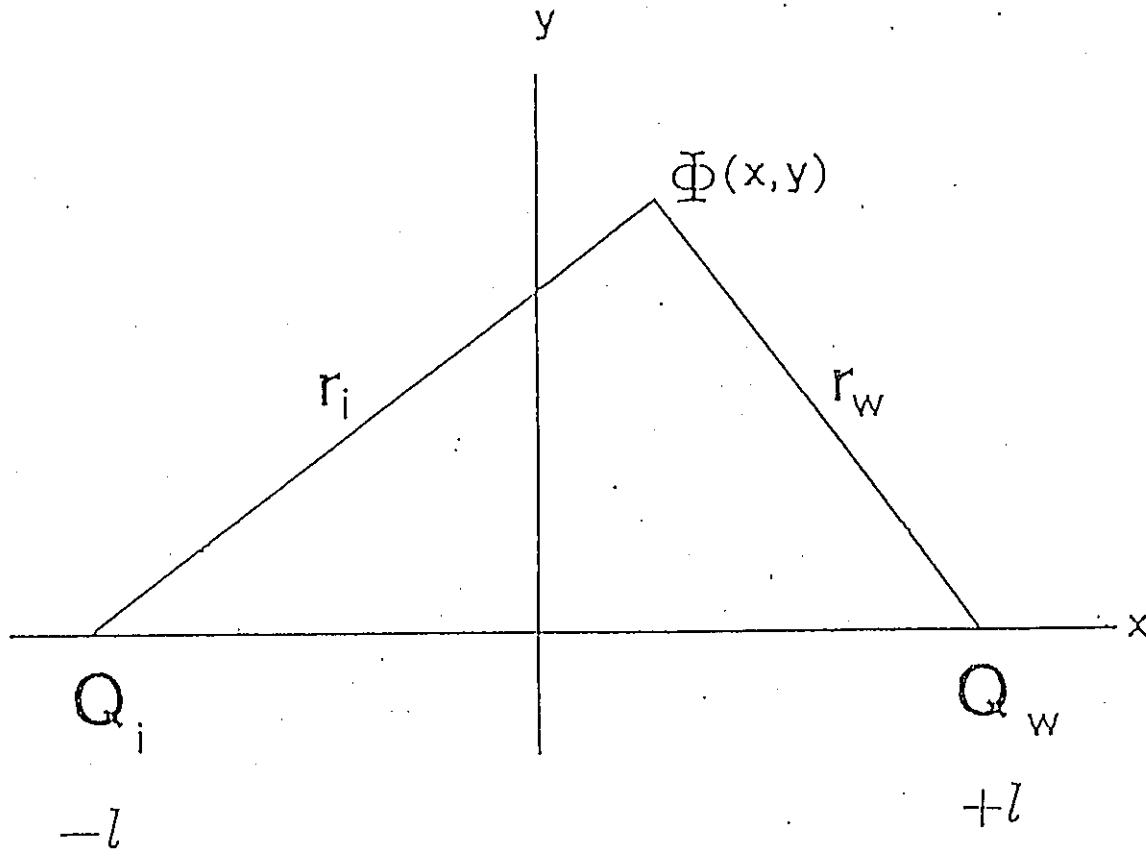


図2.2 注水孔／揚水孔が存在する亀裂面内の座標系⁸⁾

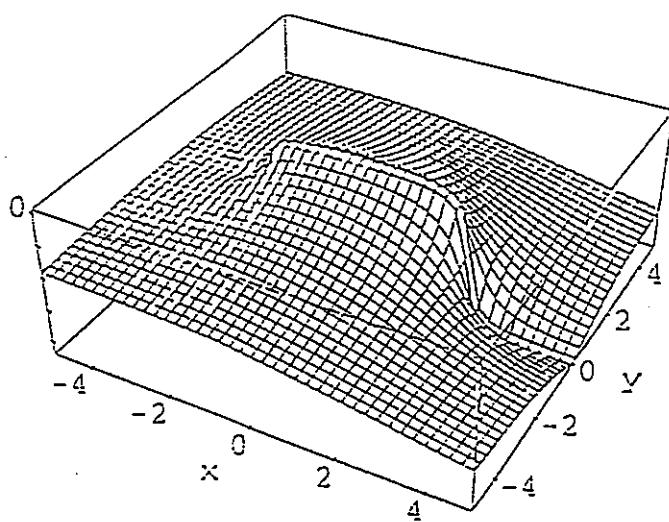


図2.3 流れ関数概念図

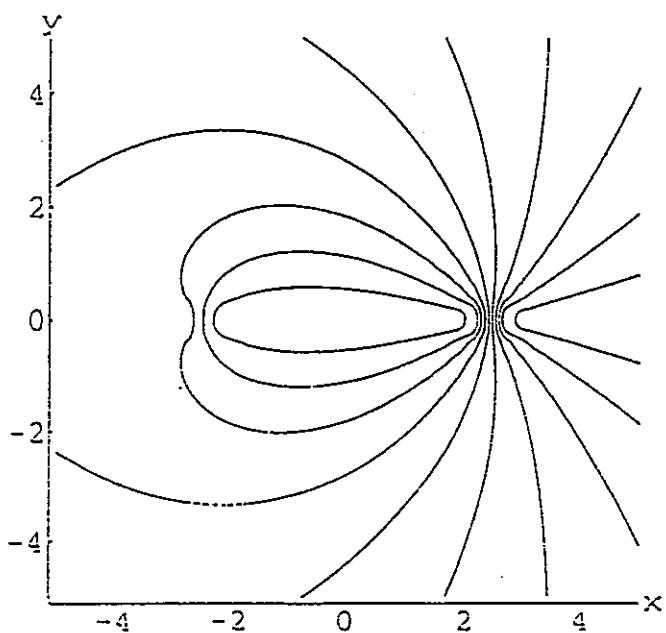
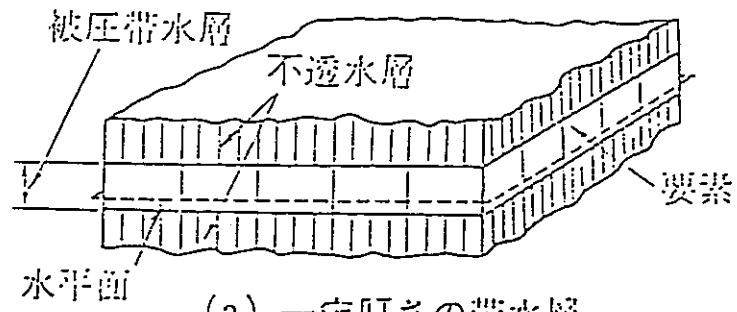
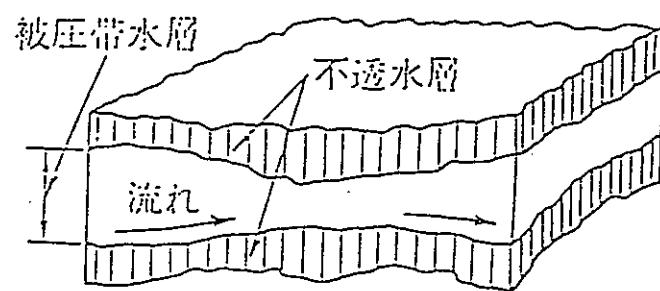


図2.4 流線図概念図



(a) 一定厚さの帶水層



(b) 帯水層厚さが場所的に変化する場合

図2.5 帯水層幅が不均一な危険

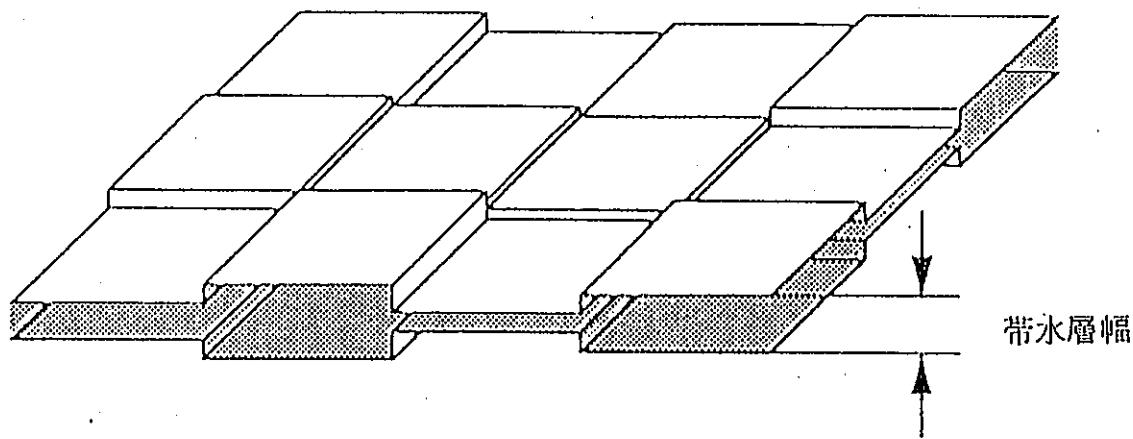


図2.6 均一ブロックに分割された亀裂

3. 物質移動解析コードの作成

3.1 解析コードの概要

亀裂状媒体中の物質移動モデルを確証するためにこのモデルを基にしてグリムゼルテストサイトでの水理核種移行試験の実験解析に適用できる物質移動解析コードを作成した。このコードは地下水流动モデルによる流速分布計算モジュールと亀裂状媒体でのマトリックス拡散を考慮した一次元の物質移動計算モジュールにより構成される。流速分布計算モジュールでは解析対象領域を帶水層幅の空間分布にしたがって複数ブロックに分割し、次に入力データとして与えられた流入／流出孔間隔の半幅、亀裂媒体の空隙率、流入／流出流量等をもとにブロック毎の流速分布を求める。図3.1に流速分布計算モジュールによる解析の流れを示す。なお、ここで用いた帶水層幅の空間分布については3.2節で述べる。

他方、物質移動計算モジュールでは流速分布計算モジュールから引き渡された流速とトレーサの分子拡散係数、表面および体積吸着係数、崩壊定数などのトレーサに固有の条件から(2.12)式に表される解析解から亀裂の軸方向の濃度分布を計算する。図3.2に解析コード全体の解析の流れを示す。

各モジュールの機能の詳細については3.3節、3.4節で説明する。

3.2 帯水層幅の空間分布

流速分布計算に先だって解析対象領域分割の基準となる帶水層幅の分布は次のようにして求められる。

解析対象領域内の複数点において透水量係数が実測されている場合はこれらの値から統計的手法により領域全体の透水量係数の分布が推定される¹¹⁾。帶水層幅の分布はこの透水量係数の分布から解析対象領域の透水係数が一定であると仮定して求められる。

ただし透水量係数を求めるにあたり、実測値の個数が極めて少なく、統計的処理が有意と考えられない場合もある。このような場合には、解析対象領域内での亀裂中では帶水層幅がなだらかに変化するものと仮定して各実測点での透水量係数から求められる帶水層幅を用いて多項式近似により空間分布を推定する。

3.3 流速分布計算モジュール

流速分布計算に必要な入力データについて説明する。

3.3.1 入力パラメータ

流速分布の解析に必要とされる入力データは以下のとおりである。

- 1) 流入／流出孔間隔の半幅
- 2) 亀裂状媒体の空隙率
- 3) 流入流量
- 4) 流出／流入流量比
- 5) 分割した均一ブロックの帶水層幅
- 6) 解析対象領域の分割数、均一ブロックの境界
- 7) 流線網の範囲および流線本数

である。これらのうち1), 2)は地質環境条件から、3), 4)は実験条件、5)は帶水層幅分布の推定値から決められる値である。他方、6), 7)については計算上は任意に設定することができるパラメータである。

分割数の決定に際しては、領域分割して求めた均一ブロック毎の流線を隣接した領域間で接続する場合の相互の流線位置のずれの大きさを目安にできる。

流線間のずれは流線が流入、流出孔から離れるにしたがって大きくなるため流速分布計算上考慮する流線網の最外側でのずれを対象とすることが望ましい。

また流線網の範囲設定では以下のことに留意する。

物質移動モデルでは流線を亀裂中での支配的な流れの流路としている。このため流入孔から流出孔への物質移動を解析する場合には流入孔近傍を通る流線のみを流路として扱えばよいものと考えられる。したがって流線網の範囲もこの条件を満たすように設定する。流線の本数に関しては任意に設定するものとする。

解析手順は以下の通りである。

- ① 亀裂への流入流量、流出流量からポテンシャル理論に基づき亀裂面内の水頭値を求める。
- ② 流入孔を始点とする流線網が得られるように流れ関数値を決定する。
- ③ 各流線の長さを求める。
- ④ 流線網を構成する流線群に沿った流速分布をダルシー則より求める。

3.3.2 流速分布計算モジュールの機能

上記入力データをもとにした流線網および流線上の流速の計算方法について述べる。

1) 流線網の計算

流速分布計算モジュールは解析対象領域を分割した各均一ブロックについて(2.10)式から流れ関数の値を定め、これを満たす(x, y)座標を計算する。求めた座標を結んで各均一ブロックについて流線とし、ブロック毎に求めた流線を接続することにより解析対象領域全体にわたる流線を得る。

同様にして流れ関数値を変えて流線を求めていき、流線網を作成する。流線網の範囲は前述した条件に基づき設定する。得られた流線上の流速分布を物質移動計算モジュールに引き継ぐ。また流線の計算に平行して各流線の長さを求められる。これを物質移動計算での流路の長さとして用いる。

2) 流線上の流速の計算

1)より得られた流線網から(2.2)式により各流線上の流速分布を求めることが求められる。物質移動計算モジュールで用いる流速は実流速であるから(3.1)式により実流速の分布に換算する。

$$v = \sqrt{(q_x/\epsilon)^2 + (q_y/\epsilon)^2} \quad (3.1)$$

v : 実流速

均一ブロック内での実流速の平均値をそのブロックにおける流速の値とする。

$$v_{ave}^k = \frac{\sum v}{n} \quad (3.2)$$

v_{ave} : 均一ブロック内の平均値

k : 均一ブロック数

n : ブロック内の流線の分割数

図3.2に流線網の作成例、図3.3に流速分布の解析例を示す。

3.4 物質移動計算モジュール

物質移動計算で必要な入力パラメータとモジュールの機能を以下に説明する。

3.4.1 入力パラメータ

物質移動計算で必要なパラメータは大きく地質環境条件、実験条件とその他の解析条件に分類される。

地質環境条件としては

- ① 亀裂状媒体の空隙率
- ② 亀裂状媒体の密度

の二つである。

一方実験条件としては

- ③ 流管半径
- ④ 軸方向の分散距離
- ⑤ トレーサの分子拡散係数、有効拡散係数
- ⑥ 表面吸着係数、体積吸着係数
- ⑦ 崩壊定数
- ⑧ トレーサ流入持続時間

が挙げられる。これらのパラメータは解析対象領域固有の値あるいは実施している実験内容によって決る値である。またその他としては解析上の条件にあたるもので

- ⑨ 軸方向の観測位置
- ⑩ 軸に垂直方向（マトリックス方向）の観測位置
- ⑪ 解析開始時間、解析終了時間

が必要である。

解析手順を以下に示す。

地下水流动モデルで得られた流線を亀裂中の流れの主流路とし、流速によって定まる径をもつ流管が流線に沿って存在するものとすれば以下の手順で流管中の移行物質の濃度を解析することができる。

- ① 主流路の流れ方向に垂直な向きマトリックス拡散を導入した移流拡散方程式を不均質性をもつ亀裂状媒体の全ての局所的均一領域について地下水流动モデルより得られた流速分布を考慮して解き、各流管中の移行物質の濃度分布を求める。
- ② 全ての局所的均一領域について流管中の濃度分布の総和をとることにより、流れ方

向の任意の位置における移行物質の濃度の経時変化を得る。流出孔位置について解析から移行物質の破過曲線が求められる。

- ②' 亀裂状媒体が均一で流管中の流速が一定とみなせる場合、あるいは不均一場における流速分布を、平均値もしくは特定の区間の流速を代表値として採用することにより、局所的均一領域毎に濃度分布の総和を計算する手順を省略して簡易的に破過曲線を求めることができる。

3.4.2 物質移動計算モジュールの機能

物質移動計算では、上記パラメータおよび流速分布計算より得られた流線と各均一毎の流速変化を考慮した流線上の物質ブロック毎の流速分布に基づいて、各均一ブロック境界における濃度の経時変化および流出孔位置における破過曲線を求める。このとき流管半径は流線上の流速の変化に対応できるように三乗則に従う値とする。ただし、流速分布が流線上では、平坦と見なせる場合には、各流線の流速を1点で代表させて簡略化した物質移動計算を行える。

ここでは、流管半径にも代表値が用いられる。また、物質移動モジュールでは、複数流線を亀裂中の支配的な流れの流路とし物質移行を解析している。従って、流出孔に到達するまでの流路の長さによる物質移行の時間的なずれが破過曲線に反映される。

3.5 物質移動解析コードの構成

コードは、大きくは流速分布計算と物質移動計算モジュールから成るが、ここではこの2つの構成するサブルーチンとその機能を簡単に説明する。

(1) 流速分布計算モジュール

モジュールを構成している各サブルーチンの機能は以下のように分かれている。

- ① MAIN パラメータの読み込み、物質移動計算モジュールとの接続
- ② VP 流線網作成、流管長さ計算、流管内の流速分布計算

(2) 物質移動計算モジュール

ツリー構造を図3.5に示す。各構成サブルーチンの機能は以下の通りである。

- ① MAIN 全体のコントロール、流速分布計算モジュールとの接続
- ② DATAIN パラメータの読み込み
- ③ TDZDIR 亀裂軸方向、固定位置、時間依存の解析
- ④ TFZDIR 亀裂軸方向、固定時間、位置依存の解析
- ⑤ TDYDIR 軸に垂直方向、固定位置、時間依存の解析
- ⑥ TFYDIR 軸に垂直方向、固定時間、位置依存の解析
- ⑦ FUNCF 亀裂軸方向移流拡散方程式の積分形解析式の作成
- ⑧ FUNCX 軸に垂直方向岩体内移流拡散方程式の積分形解析式の作成
- ⑨ DERFC 補誤差関数の計算
- ⑩ SIMP2D 解析式の積分のための配列設定
- ⑪ QSF 解析式の数値積分

3.6 コードの制限

解析コードのモデルあるいは使用上の制限を各モジュール毎に述べる。

(1) 流速分布計算モジュールでの制限

この場合の解析モデルが原因となるもので、計算上は以下のような制限を考慮しなければならない。流速分布計算モジュールでは、機能として流入孔流出孔を結ぶ軸と平行に領域分割して形成される均一ブロックを扱うことはできない。このため、軸と垂直な方向で帶水層幅の分布が大きく変化している場合でも分布を平均化するなどして領域として1領域にしなければならない。

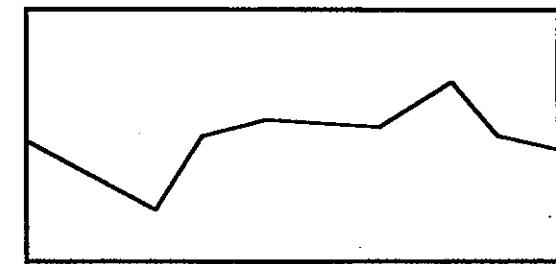
(2) 物質移動計算モジュール

物質移動分布計算による流速分布を用いるために生じている制限であり、物質移動計算自体が原因ではないものである。本来、物質移動の計算では(2.12)式の解析からは、

- ① 流路の任意の位置における濃度の経時変化
- ② 時間を固定した場合の流路上の一次元の濃度分布を求めることは可能である。

しかし、流速分布計算と組み合わせて使用するため流速分布が与えられる位置が固定される。この場合の①に対しては、位置が固定されるため問題とならない。一方、②に対しては、流路上の濃度計算は、流速が与えられる位置（均一ブロック境界）のみとなるため、濃度の流路に沿った分布を求めるには不十分である。ただし、流速分布解析コードと物質移動コードを独立に使用し、流速分布解析コードから代表流速を定め、特定の流線についての解析を行う場合には、①、②ともに解析することができる。

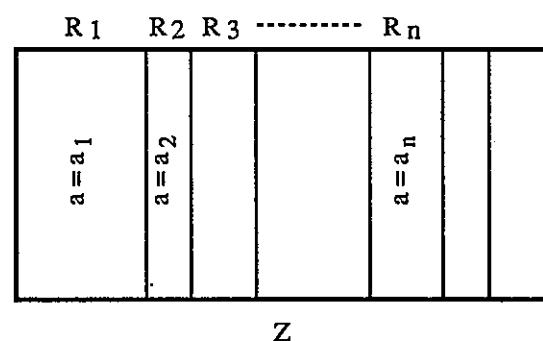
帯水層幅の分布を仮定



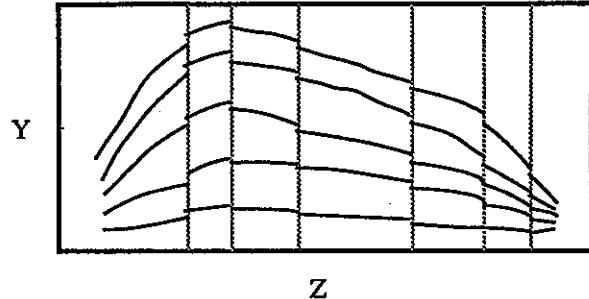
$$T = k a$$

k : 透水係数
 a : 帯水層幅

解析対象領域の分割
 R_n : 均質ブロック

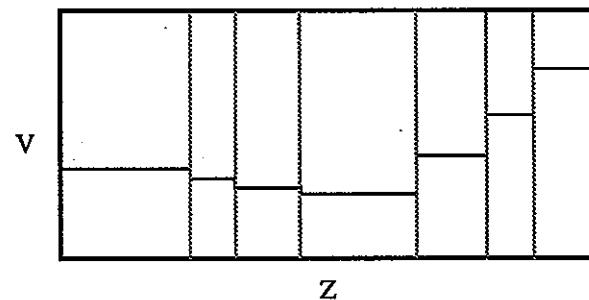


領域毎に流れ関数
 ψ を解く



不均質場における流線網
の決定

ダルシー則



領域毎に平均化した
流速分布の計算

図3.1 水理モデルの解析の流れ

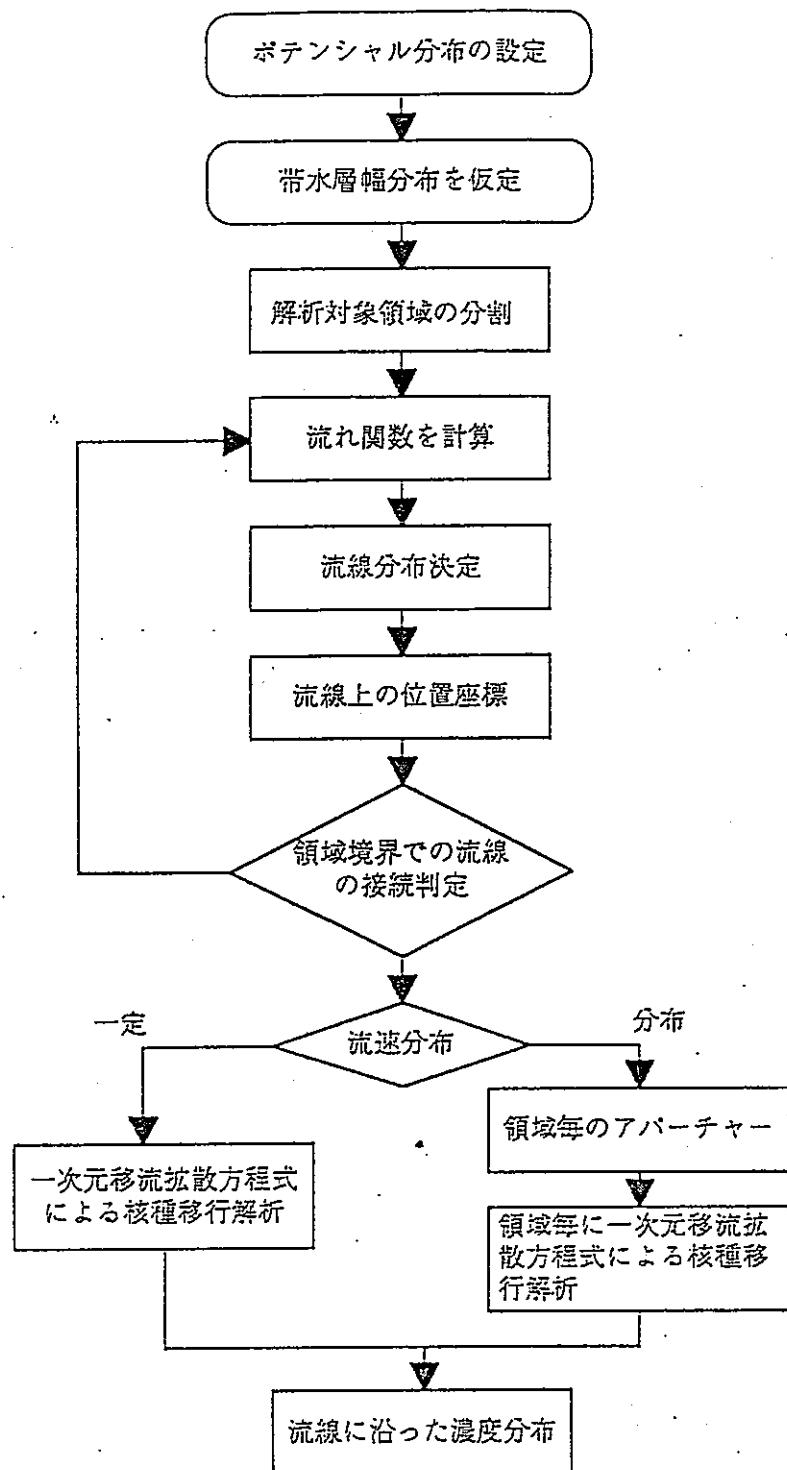


図3.2 解析の流れ

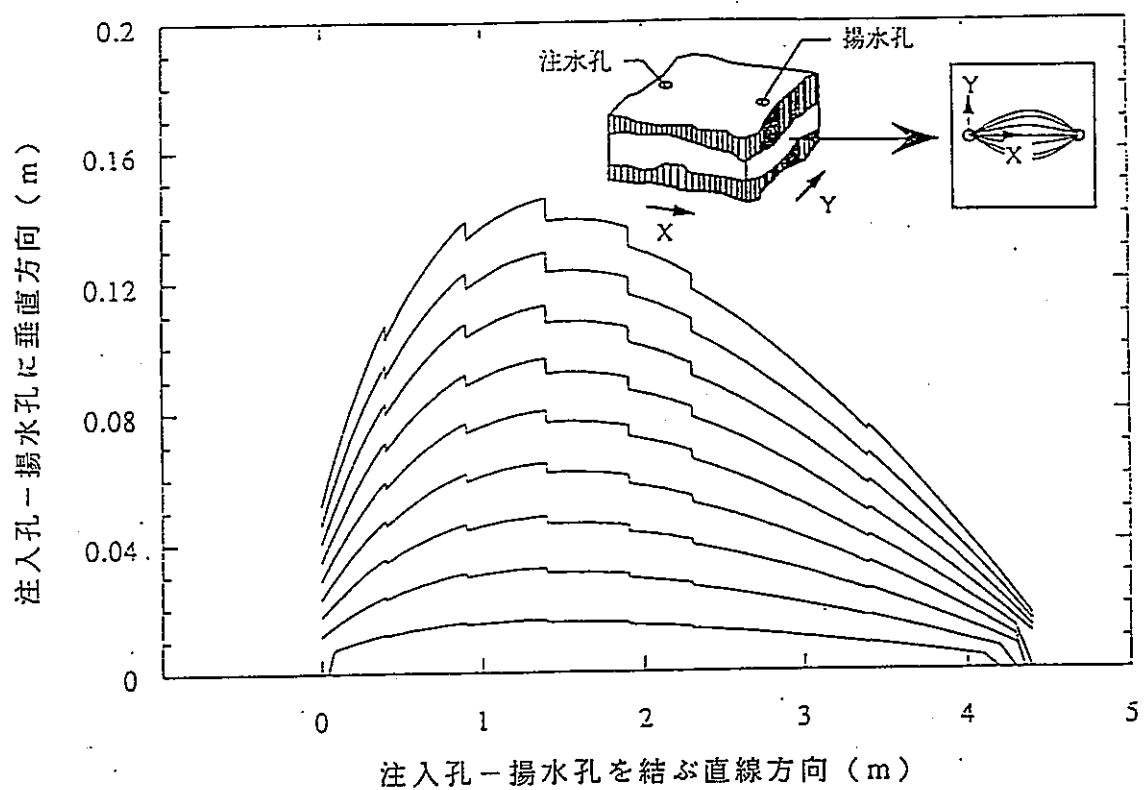


図 3. 3 不均一場における流線網の作成例

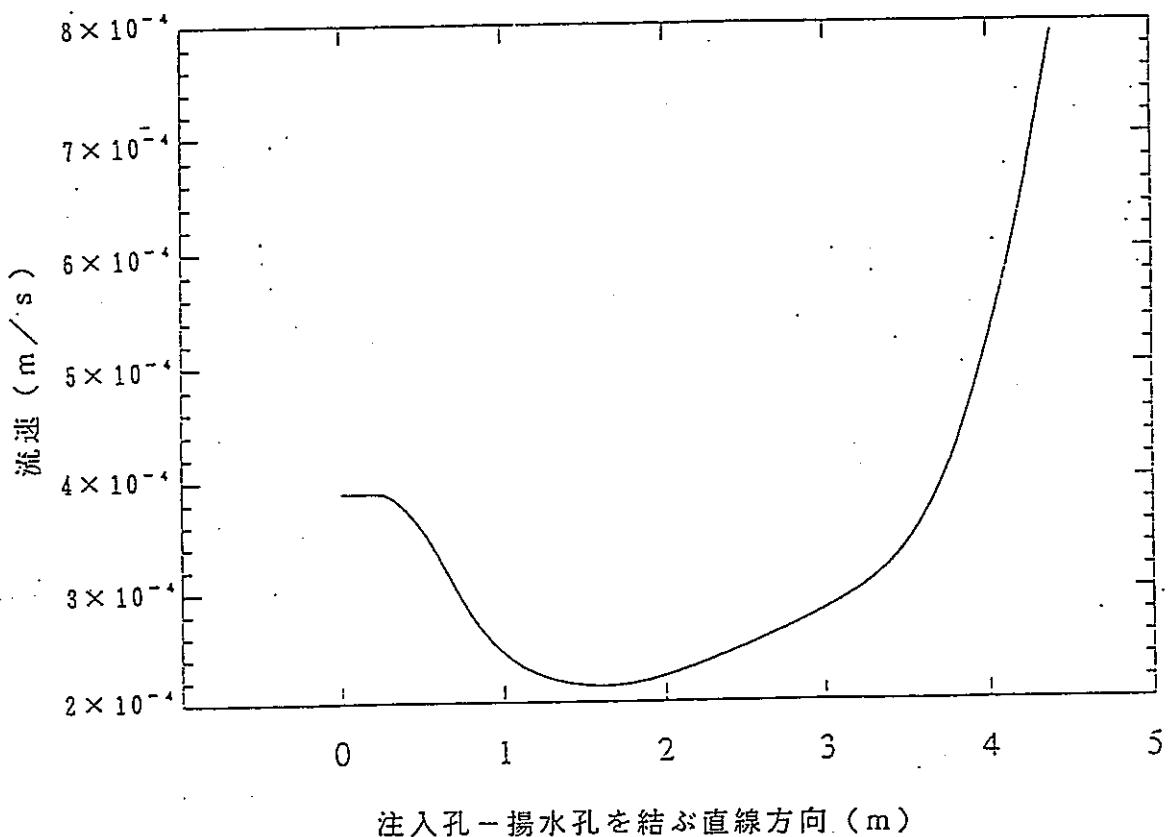


図 3. 4 不均一場における流速分布の解析例

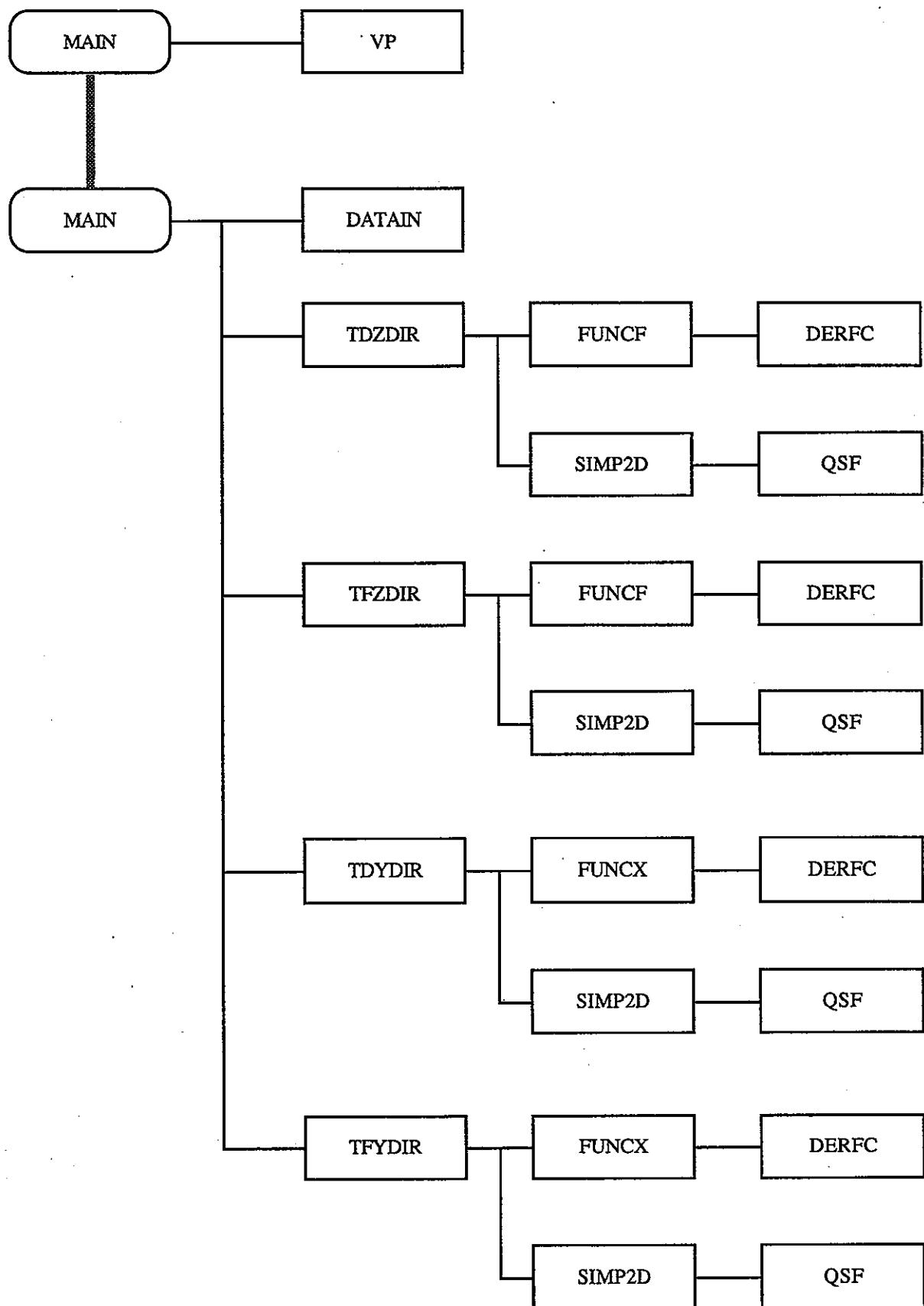


図3.5 解析コードのツリー構造

4 グリムゼルトレーサ試験の実験解析

4.1 グリムゼルトレーサ試験の概要

Nagra's Grimsel Test Site(GTS)(グリムゼルテストサイト)における水理・核種移行試験は、図4.1、図4.2、図4.3、図4.4¹²⁾に示されているサイトで実施されている。図4.1は試験サイトの位置を中心とした広域的な断面図、図4.2は試験サイトに存在する個々のトンネルの位置を示すスケールでの断面図、図4.3は本研究での実験解析対象であるトレーサ試験の行われた亀裂帯及びその亀裂帯を横切っている試験坑道と坑道から掘削されたボアホールの位置を示した図である。また、図4.4は図4.3に示す亀裂帯、坑道及びボアホールの3次元的な表示である。亀裂帯には複数のボアホールが試験坑道から掘削されており、このボアホールを用いて水利・核種移行試験が行なわれている。

この水理・核種移行試験対象となっている亀裂帯は次のような特徴を有している。

- ① 1方向数十メートルの広がりを持つ平面上の亀裂帯である。
- ② 試験坑道への亀裂帯からの湧水量は数年間一定(約0.7liter/min.)
- ③ 亀裂帯に存在する水は塩分の含有量が非常に小さくまた高pH(約9.5)である。
- ④ 水の化学的特性は、すべてのサンプルポイントにおいて一定である。
- ⑤ 近傍にせん断領域が存在する。
- ⑥ 亀裂帯近傍に微細な亀裂が存在する可能性がある。

水理・核種移行試験ではシングルホールとクロスホールの試験が実施されている。トリプルパッカーシステムを使用した圧力測定では、試験坑道壁においては動水勾配が大きくなってしまっており、またポテンシャルの場が不均一であることが示されている。この不均一性はシングルホールを使用した圧力パルス試験とシングルホールとクロスホールで行なわれた非吸着性のトレーサ試験(Uranine and 82Br)により定量化されたものである。

グリムゼルテストサイトでの水理・核種移行試験は、以下の2つを主目的として実施されている。

- (1) 亀裂性媒体中の放射性核種の移行を表現する数学モデルをフィールド試験から得られたデータを用いて確証する
- (2) フィールドにおいて核種移行特性調査を行うために必要な実験の装備を開発

し、専門知識を深める。

4.2 グリムゼルトレーサ試験の実験解析

4.2.1 解析対象

解析対象領域の亀裂表面は均質な粘土層に被われておりその透水性は非常に小さい。亀裂中は被圧帶水層となっており、定常的に一定流量の地下水が流れている。GTSにおける現在までの実験結果⁸⁾との比較によるパラメータの同定の結果、亀裂中の透水係数を 1.5×10^{-4} mで一定であると仮定した。

透水係数を一定とすれば(2.1)式により透水量係数の観測値から帶水層幅を直接求めができる。帶水層幅の連続性に関する3.2節の仮定から最小二乗法により曲面の多項式で観測点の帶水層幅をフィッティングして解析対象領域の帶水層幅分布とした。表4.1に各試験孔で測定された透水量係数およびそれから計算した帶水層幅を示す¹²⁾。

表4.1

試験孔	位置 (m)	透水量係数 (m^2/s)	帶水層幅 (m)
Bore Hole 4	(-2.45,0.08)	1.85×10^{-6}	1.23×10^{-2}
Bore Hole 5	(14.11,1.97)	8.26×10^{-8}	5.51×10^{-4}
Bore Hole 6	(2.45,-0.08)	2.01×10^{-6}	1.34×10^{-2}
Bore Hole 8	(6.32,0.79)	6.70×10^{-7}	4.47×10^{-3}
Bore Hole 9	(1.49,-1.50)	1.62×10^{-6}	1.08×10^{-2}

亀裂面における観測点の位置と帶水層幅の関係を式(3.1)により多項式近似することにより得られた曲面を解析対象領域における帶水層幅の分布とした。

$$a = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 y + c_5 y^2 + c_6 y^3 \quad (3.1)$$

表4.1の透水量係数を帶水層幅へ換算し、多項式フィッティングにより仮定した帶水層幅の分布を図4.5a, 4.5bに示す。表4.2に(3.1)式のフィッティング係数を示す。図4.5aはb.h.(borehole)4を注入孔、b.h.6を揚水孔とした場合の分布、図4.5bはb.h.9を注水孔、b.h.6を揚水孔とした場合の帶水層幅分布である。なお、図4.5bは図4.5aに対してダイポールの軸を

b.h.4-b.h.6からb.h.6-b.h.9にするために座標変換を施したもので本質的には同じ分布である。

図4.5a, bからあきらかに帶水層幅は平面的な分布をもつが本解析においては流線が比較的ダイポール軸に集中しており、軸に垂直な方向への広がりが小さい流線網を仮定しているので入孔と揚水孔を結ぶ軸方向の直線的な分布のみを考慮した。

表4.2に各均一ブロックの帶水層幅と境界を示す。テストケースでは、多項式近似した帶水層幅分布と軸方向位置の関係を詳細に検討し、7つの均一ブロックの境界を定めたが、本解析の対象となる亀裂帶の帶水層幅分布（あるいは透水量係数分布）は解析対象領域中ではほぼ放物線状に変化している。従ってダイポール間を等しく10分割することで整合性を保って不均一場を均一ブロック化することができると思われる。図4.6aにb.h.4-b.h.6間の、図4.6bにb.h.9-b.h.6間のダイポール軸上の帶水層幅の分布と10分割された均一ブロックを示す。

4.2.2 解析条件

GTSで行われた#47, #50, #61, #62の実験結果に対して実験解析を行った。#47, #50はb.h.4を注入孔、b.h.6を揚水孔としたダイポール試験である。また#61, #62はb.h.9を注入孔、b.h.6を揚水孔とした試験である。全てのケースに共通の解析条件を以下に述べる。各々のケースの実験条件および解析条件は表4.3に示した。

図4.7aに亀裂平面内の流線網の座標系を示す。X軸は注水孔と揚水孔を結ぶ直線上の位置を、Y軸は注水孔と揚水孔を結ぶ直線に垂直方向の位置を示している。4.2.1で述べた方法により亀裂中の帶水層幅の分布を平面的に仮定することができるが、物質移動解析が一次元であることと、本解析の実験条件のように大きな β 値 ($\beta \gg 1$) に対しては流線がダイポール軸から大きく広がることはないであろうことからGTSの実験解析においては軸方向一次元の帶水層幅分布のみを考慮した。

解析に用いたパラメータの取り扱いについて以下に述べる。流れ場に注入されたトレーサ溶液は注入孔と揚水孔を直線的に結ぶ流れの軸に沿った流管中に最も多く、軸から離れた流管ほど少ない割合で分配されると考えられる。したがって、ある程度以上軸から離れた流管の物質移動への寄与は無視できる。しかし、本解析に用いたモデルでは流線網を構成する各流線へのトレーサ溶液の分配比は考慮せず、全ての流線に注入されたトレーサ溶液が均等に分配されると仮定しているため、解析にあたってはじめに流線網の広がりを定めなければならない。これは流線網に対応する流れ関数の範囲を設定することを意味する。

物質移動解析においては流管径、流速、マトリックス拡散の寄与の程度を定める有効拡散係数が主要な解析パラメータとなる。

まず流管径については地下水流动モデルにより求められる値ではないので、2.3.2節に述べた三乗則により均一ブロック毎の流速から求めた流管径の平均値を、代表値として全ての均一ブロックに設定して解析した。また、参考のために本解析と同様なGTSの実験解析において Herzog⁽⁸⁾らが流速とは無関係に設定している値($b=1.5 \times 10^{-4}$ m)を全ての領域における流管径の代表値とした解析を行った。

また流れ場全体の流速としては両者とも地下水流动モデルにより得られる流速の平均値を設定した。

有効拡散係数についてはマトリックスの屈曲度を仮定し、自由水中の拡散係数として実験的に得られている値を基に幾つかの値を設定してサーベイ計算を行った。

物質移動モデルにより求められるそれぞれの流管中の濃度分布の取り扱いは、揚水孔付近では注入流量と揚水流量の差により、図4.7bに示すように流管によるトレーサの移行以外に流線網の外から地下水が流入し揚水孔で希釈されているものとした。従って揚水孔位置で観測される各流管の濃度の総和に希釈係数（注入流量／揚水流量 = 1 / β ）を乗じて破過曲線を求めた。

4.2.3 解析結果

RUN#47の実験をテストケースとして地下水流动解析により異なる流線網について流速分布を求めた。例として図4.8aに流れ関数範囲 $\psi = 0 \sim -180$ まで20間隔でとった流れ関数に対応する流線網を、また図4.8bに $\psi = 0 \sim -450$ まで50間隔の流れ関数に対応する流線網を示す。流線網の広がり方は流れ関数の形によるが、流れ関数範囲を大きくとるほど流線網は広くなる。

$\psi = -180$ までとった場合に軸から最大0.15m、 $\psi = -450$ までとった場合で軸から最大0.37m程度まで広がっている。

流線網の広がりは流線に沿った流管毎の物質移動に時間遅れを与え、全体として破過曲線の形状を規定する要因となる。流線網を構成する全ての流線毎に流速が求められるが、本解析においては β 値が3または15と大きく、流線が流れの軸付近に集中しているため流線毎の流速の差は小さいので全ての流管中を同じ流速で流れていると考えてよい。したがって流管の長さの差による移行距離の違いにより流管毎の濃度分布に時間遅れが生じるものと考えることができる。

今回設定した流れ関数範囲の中では、 $\psi=0\sim-450$ に対応する流線網を採用した場合に実験結果の破過曲線の形状を最もよく再現した。したがって、以下の解析では流れ関数範囲0~-450に対応する流線網を用いることとした。

① RUN#47

図4.9の流速分布の平均値($v=3.4\times10^{-4}$ m/s)を領域全体の流速とし、三乗則により流速に対応する流管径($b=5.6\times10^{-4}$ m)を定めた場合の解析結果を図4.10に示す。自由水中の拡散係数を $DM=1.5\times10^{-9}$ m²/s、マトリックスの屈曲度は $\tau=0.1$ と推定して、 $DE=DM \cdot \tau$ の関係式より有効拡散係数を $DE=1.5\times10^{-10}$ m²/sとした。破過曲線の立上りが実験結果に対して遅れているのは移流による物質移動速度が小さすぎることを意味しており、地下水水流が全領域の平均流速で流れているとする近似では流速を過小評価しているものと思われる。

そこで全領域の流速の代表値として図4.9に示す流速分布の最大値である揚水孔近傍の均一ブロック内の流速($v=7.9\times10^{-4}$ m/s)で全領域を流れるものと近似して解析を行った。三乗則から流管径を $b=4.2\times10^{-4}$ mに定めた場合の解析結果を図4.11に示す。破過曲線の立上りとピーク時間は比較的よく一致しているが破過曲線の広がりの再現性は良くない。

破過曲線の形状を実験結果に近づけるために図4.11と同様の条件で、有効拡散係数をパラメータとしてサーベイ計算を行い、 $DE=1.5\times10^{-9}$ m²/sとした場合の解析結果を図4.12に示す。有効拡散係数を一桁大きくすることにより実験結果と比較的よい一致を得た。

一方、流管径を一定値($b=1.5\times10^{-4}$ m)に固定し、有効拡散係数を $DE=1.5\times10^{-9}$ m²/sに設定した場合でも三乗則により定めた流管径を用いた場合と同様、流速に平均値を用いると過小評価となる。また、揚水孔近傍の流速($v=7.9\times10^{-4}$ m/s)を代表値とした場合の解析結果を図4.13に示す。破過曲線の立上り、ピーク時間の比較的よい一致を得てはいるがピーク幅の再現性は良くない。

そこでピーク幅を実験結果に近づけるために有効拡散係数についてサーベイ計算を行い、 $DE=1.5\times10^{-9}$ m²/sを得た。このときの解析結果を図4.14に示す。この結果から流管径を流速に関係なく固定した場合にも有効拡散係数を調整することにより実験結果と比較的良く一致することがわかった。

以上の解析結果から、流れ場の流速として揚水孔近傍の均一ブロック内の流速を設定し、有効拡散係数を $DE=1.5\times10^{-9}$ m²/sとすることで実験結果を比較的良く再現できることが示された。

有効拡散係数と自由水中の分子拡散係数の関係式からこの有効拡散係数の設定値では $\tau \approx 1$ となる。すなわち、マトリックス中の拡散と自由水中の拡散をほぼ等しいとしていることになる。これはマトリックス拡散を過大に評価することになるが、流速として全領域の平均値もしくは揚水孔近傍の流速を代表値として用いた近似の影響をマトリックス拡散が補っていることを意味している。このことは次のように説明することができる。注入孔から流れ場に入ったトレーサの濃度分布は不均一場を通過する流管内を移行しながら分散及び拡散により変化し、揚水孔近傍の均一ブロックに到達すると考えられる。これに対し揚水孔近傍の均一ブロック内の流速で流れ場全体の流速を近似し、その流速に対して定めた流管径を用いた解析では、注入されたトレーサ濃度分布を維持したまま揚水孔近傍の均一ブロックに到達することになる。したがって流速に代表値を用いた物質移動解析では、流管内の移行によるトレーサの注入濃度分布の変化をマトリックス拡散で補うことにより破過曲線のピーク 形状の再現性が良くなるものと思われる

② RUN#61

図4.15に表4.3に示す#61の実験条件において $\psi=0$ から -450 まで 50 間隔でとった流れ関数に対応する流線網を示す。流線は流れの軸から最大で 0.21m 程離れている。図4.16に図4.15の流線網から求めた流速分布を示す。

全ての均一ブロック内の流速の平均値 ($v=6.7 \times 10^{-4}$ m/s) を流れ場全体の流速として近似し、流管径として三乗則から求めた値 ($b=2.0 \times 10^{-4}$ m) を設定した場合の物質移動解析の結果を図4.17に示す。有効拡散係数は $DE=1.5 \times 10^{-10}$ m²/s としている。RUN#47の場合と同様に流速の設定が小さすぎる。また、破過曲線も全体に過小評価となっている。

物質移動解析の結果を実験結果の破過曲線に近づけるために揚水孔近傍の流速 ($v=2.2 \times 10^{-3}$ m/s) を流れ場全体の流速とし、これに対応する流管径 ($b=1.3 \times 10^{-4}$ m) を設定した場合の解析結果を図4.18に示す。立ち上がり時間、ピーク時間については実験結果に近づくものの、破過曲線の形状は良く再現できない。

解析結果の濃度分布の形状を実験結果に近づけるために、図4.18と同一の条件で有効拡散係数として RUN#47 でサーベイした値 ($DE=1.5 \times 10^{-9}$ m²/s) を設定した場合の解析結果を図4.19に示す。有効拡散係数を過大評価することにより濃度分布の形状が実験結果に近づくので、RUN#47 と同様に、不均一な流れ場内の移行によるトレーサ濃度分布の変化の影響を補っているものと考えられる。

③ RUN#62

図4.20に表4.3に示す#62の実験条件において $\psi=0$ から-450まで50間隔でとった流れ関数に対応する流線網を示す。流線は流れの軸から最大で0.24m程離れている。図4.21に図4.20の流線網から求めた流速分布を示す。

全ての均一ブロック内の流速の平均値($v=6.2 \times 10^{-4}$ m/s)を流れ場全体の流速とし、流管径として三乗則から求めた値($b=3.5 \times 10^{-4}$ m)を設定した場合の解析結果を図4.22に示す。 $DE=1.5 \times 10^{-10}$ m²/sである。流速を小さく設定しすぎていることがわかる。

物質移動解析の結果を実験結果の破過曲線に近づけるために揚水孔近傍の流速($v=2.3 \times 10^{-3}$ m/s)を流れ場全体の流速とし、対応する流管径($b=2.3 \times 10^{-4}$ m)を設定した場合の解析結果を図4.23に示す。立上り時間、ピーク時間は実験値に近づくが、形状は再現できていない。

図4.23の条件で有効拡散係数として $DE=1.5 \times 10^{-9}$ m²/sとした場合の解析結果を図4.24に示す。破過曲線の形状が実験値に近づくからこの結果からもRUN#47, 61の物質移動解析の結果と同じくマトリックス拡散により、移行に伴うトレーサ濃度分布の変化の影響を補っていることが考えられる。

④ RUN#50

図4.25に表4.3に示す#50の実験条件において流れ関数 $\psi=0$ から-450まで50間隔とした流れ関数範囲に対応する流線網を示す。流線は流れの軸から最大で0.65m程離れている。注入流量がRUN#47の5分の1程度になっているため、注入孔付近では流線網がダイポール軸から放れ、注入されたトレーサ溶液が亀裂平面内に広がっているが、大きな揚水／注入流量比($\beta=15$)により、揚水孔に近づくにつれ、急速に収束する。図4.26に図4.25の流線網から求めた流速分布を示す。注入流量が小さいため注入孔近傍の流速と最低流速に大きな差がないが、 β 値が大きいため流線網と同様に揚水孔に近づくにつれて指数的に増加している。

全ての均一ブロックの平均流速を流れ場全体の一定流速とし、 $DE=1.5 \times 10^{-10}$ m²/sと設定した場合、揚水孔近傍の流速を流れ場全体に設定した場合、揚水孔近傍の流速を設定し、有効拡散係数を $DE=1.5 \times 10^{-9}$ m²/sに設定した場合の解析結果を図4.27, 4.28, 4.29に示す。

図4.27によりRUN#47, 61, 62と同様に全ての均一ブロックの平均流速では流速を過小評価することがわかる。

図4.28により揚水孔近傍の流速を代表値として設定した場合はやや流速を過大評価してい

るが立上り時間、ピーク時間ともに実験値に近づいている。

図4.29で有効拡散係数として $DE=1.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ を設定することによって破過曲線の全体的な形状が実験結果に近づいている。これは前述のRUN#47, 61, 62の3つの解析例と同じ理由によるものと考えられる。

不均一な流れ場内の移行によるトレーサの注入濃度分布の変化の影響を検討するため、図4.29と同一の条件の下で分割された各均一ブロックを通過していくことによる濃度分布の変化を追跡した解析を行った。解析対象領域を3つの均一ブロックに分割し、注入孔近傍の均一ブロックを領域I、次の均一ブロックを領域II、揚水孔近傍の均一ブロックを領域IIIとする。

2.3節に述べたようにトレーサ入力をステップ入力に分割し、各ステップ入力に対して物質移動解析を行った。初期濃度分布のステップ入力への分割の概念図を図4.30に示す。b.h.4に注入された初期濃度分布を領域Iへの入力とするためにステップ入力に分割した構成を、図4.25に示される流れの軸上の流管と流れの軸から最も離れた流管について表4.5a, bの領域Iに示す。

領域Iと領域IIの境界における濃度分布を領域IIへの入力のために分割した構成の例を表4.5a, bの領域IIに、領域IIにおける濃度分布を領域IIIへの入力するために分割した構成例を表4.5a, bの領域IIIに示す。

表4.5aに示される各領域の入力に対して流速分布を考慮し、流管径を三乗則により定めた解析を行った結果を図4.31a～4.31cに示す。同様に表4.5bに示される各領域の入力に対して計算した結果を図4.32a～4.32cに示す。上記、図4.29と同様に有効拡散係数には $DE=1.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ を用いた。各流線に関する物質移動解析の結果得られた濃度分布を図4.33に示す。

図4.33により、流速分布を考慮し、トレーサ濃度分布の移行による変化を反映させた解析結果は全体に実験結果の破過曲線が潰れて広がった形状をしている。これは $DE=1.5 \times 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$ とした有効拡散係数の設定が大きすぎることを意味しており、トレーサの移行に伴う濃度分布の変化を考慮した解析によればマトリックス拡散の寄与を過大評価する必要はなく、有効拡散係数として自由水中の拡散係数から推定される $DE=1.5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ 程度の値を採用することにより物質移動解析の結果がトレーサ移行試験の結果に近づくことが期待できる。

4.3 物質移動モデルの妥当性の検討

地下水水流におけるポテンシャル理論により流線網、流速分布を解析する地下水水流動モデルと一次元の移流拡散解析により濃度分布を求める物質移動モデルの組み合せによって軸方向に不均一性をもつ流れ場における核種移行の実験解析を行い、解析的な取り組み方による簡便な解析手法を検証した。

解析の第一段階として地下水水流動モデルにより得られた不均一な流れ場における地下水水流の流速分布の平均値を流れ場全体の流速と近似して物質移動解析を試みたが、移行速度を過小評価する結果となり実験値との良好な一致は見られなかった。したがって本解析に用いた地下水水流動モデルが全体に流速を過小評価しているか、局所的な均一領域の流速の単純平均を移行速度とすることに問題があるかのいずれかが原因と考えられる。

揚水孔近傍の局所的均一領域における流速を流れ場全体の流速とした場合にはマトリックス拡散を過大に見積もることにより解析結果を実験結果に近づけることができた。これは流速を代表値に近似した場合に考慮されないトレーサの移行に伴う注入された濃度分布の変化の影響がマトリックス拡散により補われるためであると考えられる。

また、流管径として三乗則により流速から定まる値を設定した場合の物質移動解析の結果と流速に依らず固定した値に設定した場合の解析結果を比較し、流管径の大きさは2~3倍程度の違いでは解析結果に大きな影響を及ぼさず、むしろ有効拡散係数により定まるマトリックス拡散が解析結果の濃度分布の形状に与える影響が大きいことがわかった。

流速及び流管径として全領域に揚水孔近傍の領域における値を設定して物質移動解析を行った結果に対するマトリックス拡散の影響を検討するため、解析の第二段階として不均一な流れ場を局所的に均一な領域に分割して流速分布を計算し、流速から定まる径をもつ流管による物質移動を解析した。この結果トレーサが通過する局所的均一領域毎の濃度分布の変化を順次解析することにより、揚水孔近傍の領域における濃度分布の解析結果と実験結果の破過曲線との比較的良好い一致を得た。この場合の解析結果と実験結果との差異は、第一段階の解析と同様にマトリックス拡散を過大評価したために生じているものと思われる。

また、マトリックス拡散を過大評価しているためにピーク値、ピーク幅に差異はあるものの、実験結果と解析結果の破過曲線の立ち上がりに大幅な時間遅れはみられない。したがって第一段階の解析で平均流速を流れ場全体の流速と近似した場合の時間遅れは、地下水水流動モデルに起因するものではなく、全領域の流速の単純平均を流れ場全体の流速として用いることに問題があるものと考えられる。

本解析の結果として得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 地下水流動解析により得られた不均一な流れ場内の流速分布の平均値を流れ場全体の流速と近似すると、移行速度を過小評価することになり物質移動解析の結果に時間遅れを生じる。
- 2) 揚水孔近傍の局所的均一領域の流速を流れ場全体の流速と近似した場合の解析結果は全てのケースで破過曲線の立ち上がり、ピーク時間をほぼ再現する。したがって流れ場全体の流速を近似する場合には揚水孔近傍の流速、すなわち流速分布の中の最も速い流速を代表値として採用すべきであると思われる。
- 3) 流速としていづれの値を用いた場合も、流れ場全体の流速を代表値で近似した解析では有効拡散係数を自由水中の拡散係数から推算される値よりも一桁程度大きく設定することにより実験結果の破過曲線の形状、特にピーク幅を再現した。これは流速に代表値を用いる近似計算ではトレーサの注入濃度分布が流管内の移行により変化する効果を反映することができないため、その効果をマトリックス拡散により補っているものと考えられる。
- 4) 局所的均一領域毎に物質移動解析を行い、揚水孔に到達するまでの濃度分布の変化を追跡した解析では地下水水流動解析の結果得られた流速分布により破過曲線の立ち上がり、ピーク時間を再現でき、ピーク幅についても有効拡散係数を補正することなく実験結果を再現できると思われる。

以上により本解析に用いた解析モデルにより不均一な流れ場における物質移動を推算することが可能であると考えられる。

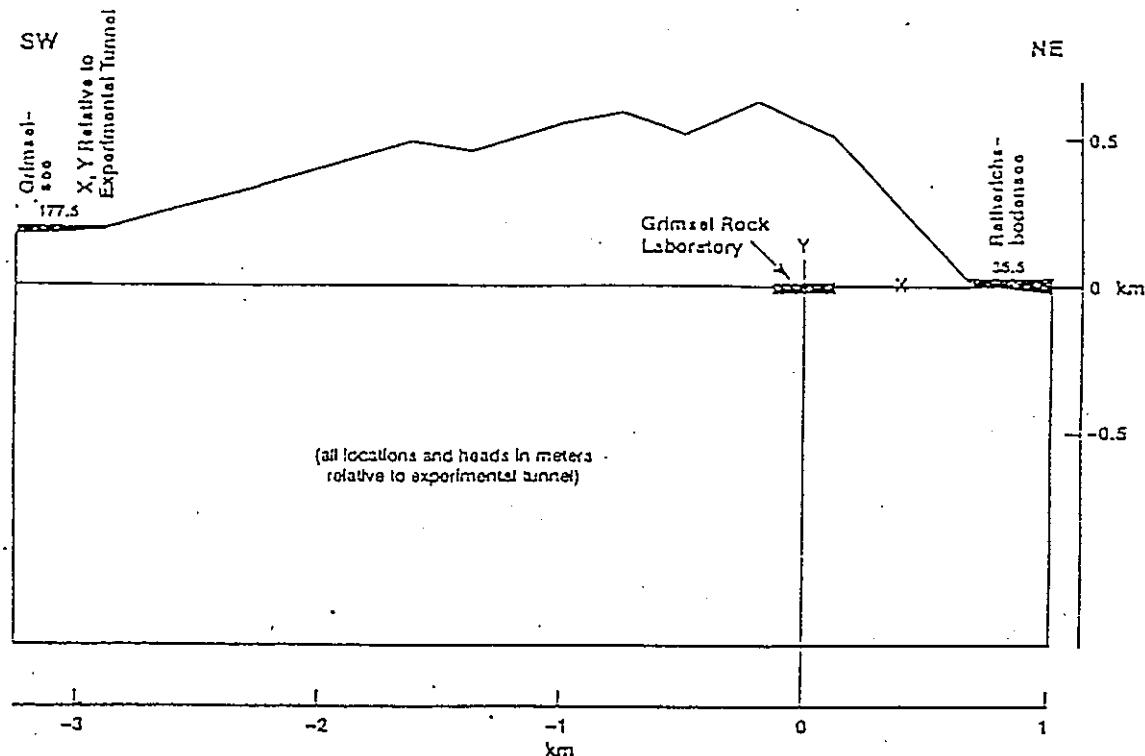


図4.1 広域的断面図

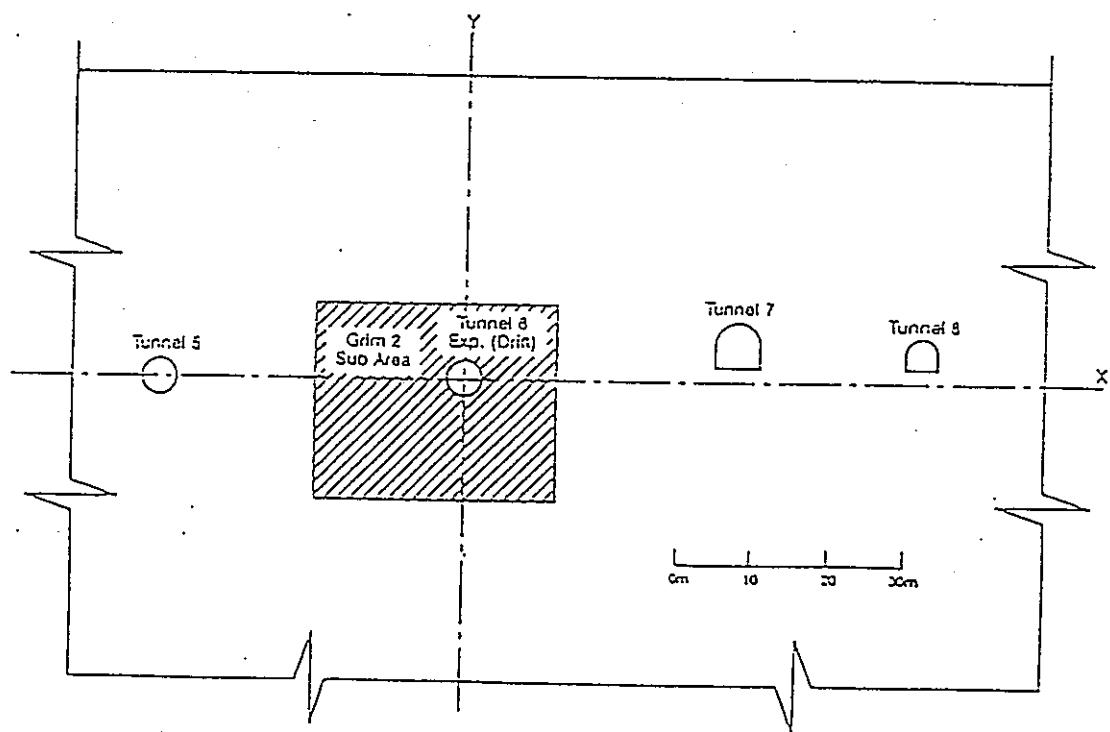


図4.2 試験サイトの断面図

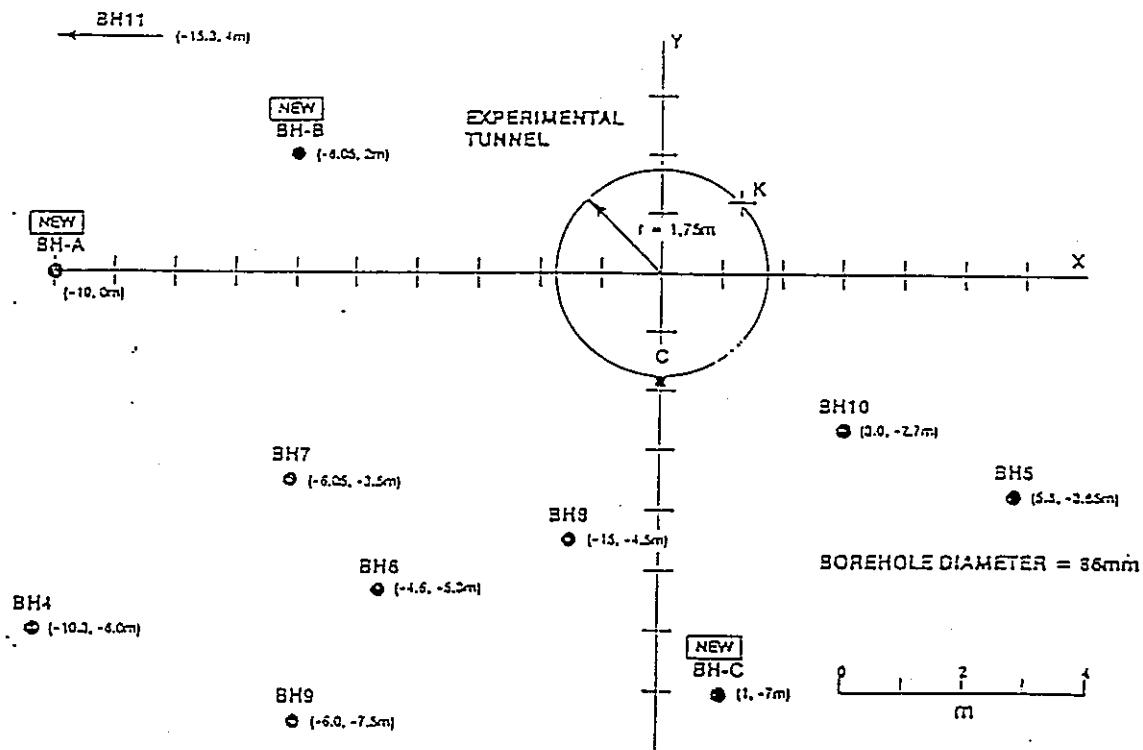


図4.3 試験対象となる亀裂面

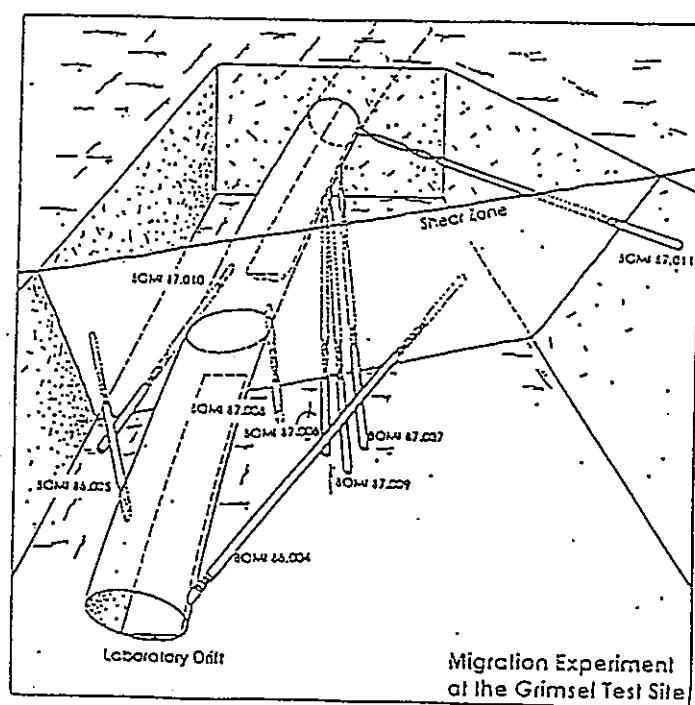


図4.4 龜裂、試験坑道、ボアホールの位置関係

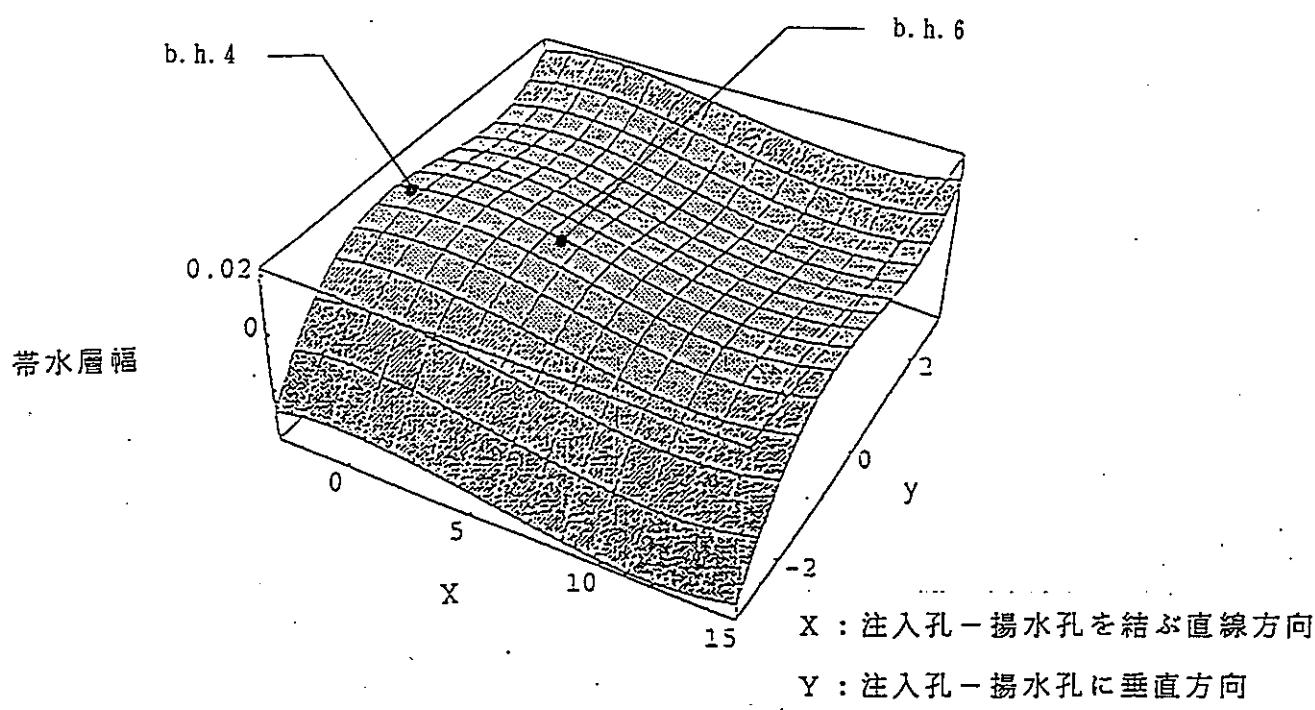


図4.5a 带水層幅分布の多項式近似 (b.h.4-b.h.6)

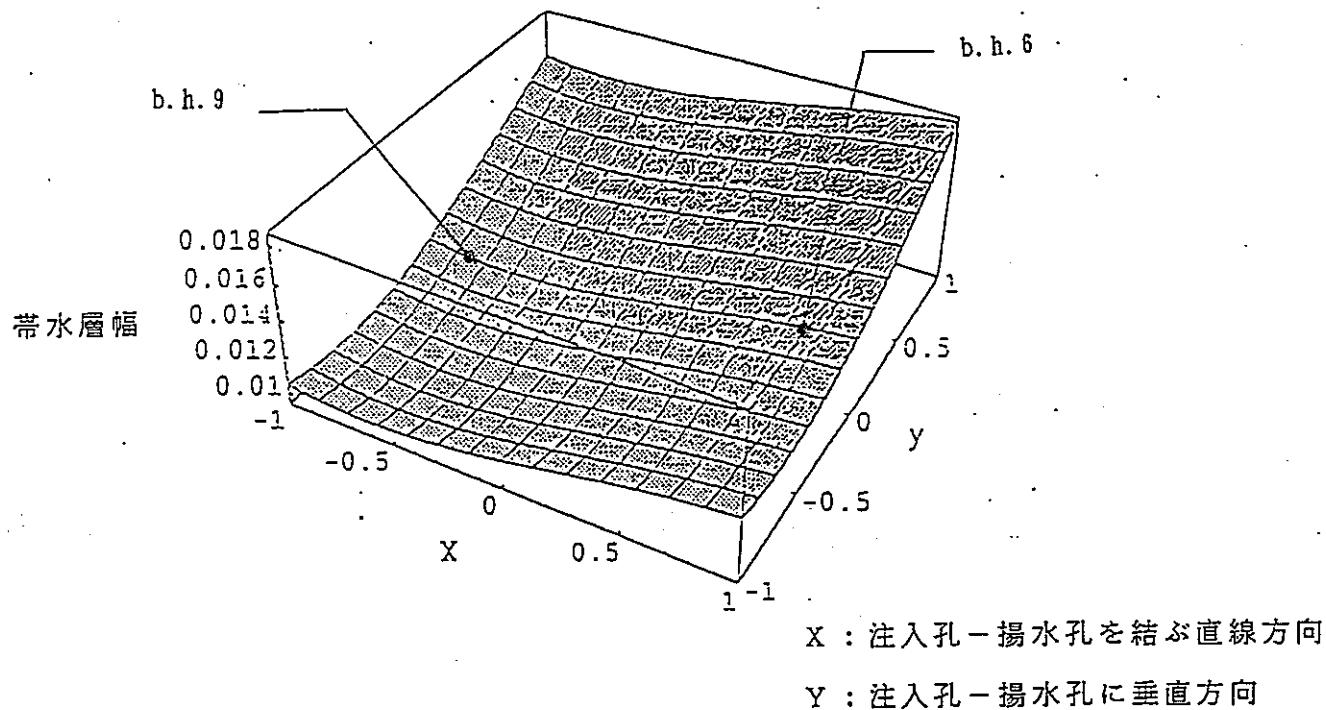


図4.5b 带水層幅分布の多項式近似 (b.h.9-b.h.6)

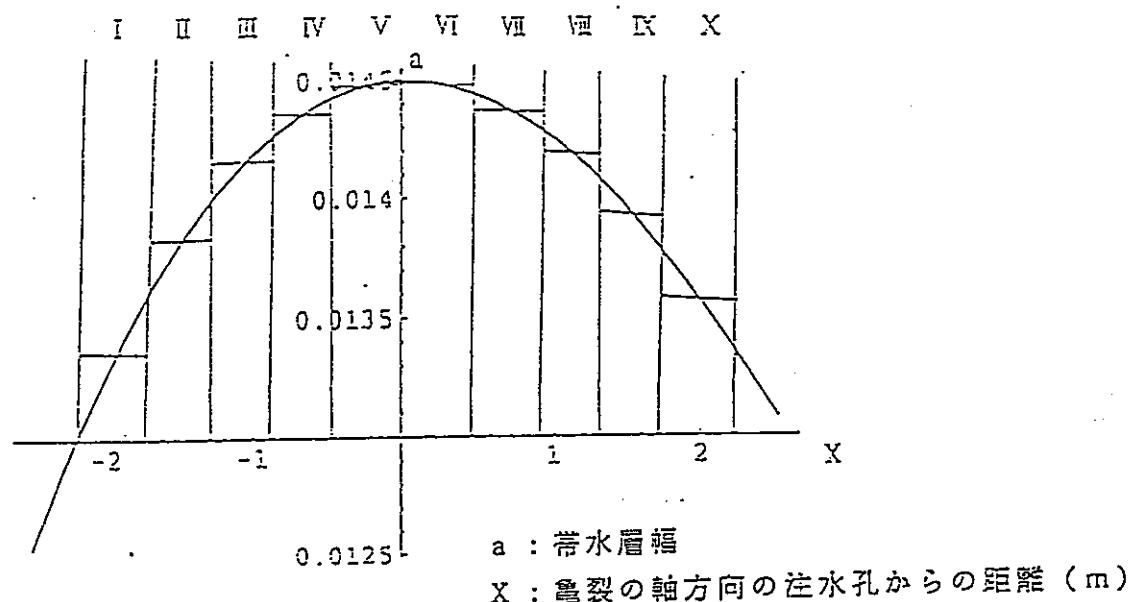


図4.6a 注水孔-揚水孔軸上の帶水層幅の分布 (b.h.4-b.h.6)

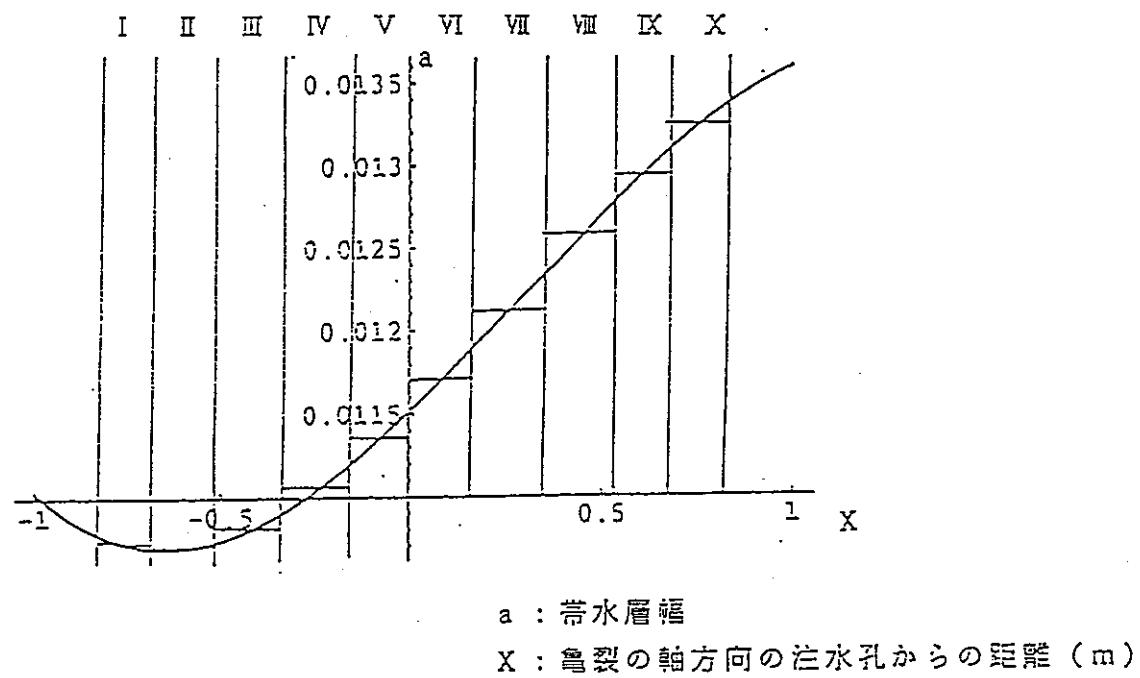


図4.6b 注水孔-揚水孔軸上の帶水層幅の分布 (b.h.9-b.h.6)

表4. 2 均質ブロック境界と平均帶水層幅

4 7

領域	区間 (m)	帶水層幅 ($\times 10^{-2}$ m)
I	0.00 - 0.40	1.33
II	0.40 - 0.90	1.33
III	0.90 - 1.40	1.42
IV	1.40 - 1.90	1.44
V	1.90 - 2.30	1.45
VI	2.30 - 3.40	1.44
VII	3.40 - 4.40	1.33

5 0

領域	区間 (m)	帶水層幅 ($\times 10^{-2}$ m)
I	0.00 - 0.44	1.33
II	0.44 - 0.88	1.33
III	0.88 - 1.32	1.41
IV	1.32 - 1.76	1.44
V	1.76 - 2.20	1.45
VI	2.20 - 2.64	1.45
VII	2.64 - 3.08	1.44
VIII	3.08 - 3.52	1.42
IX	3.52 - 3.96	1.39
X	3.96 - 4.40	1.36

6 1, # 6 2

領域	区間 (m)	帶水層幅 ($\times 10^{-2}$ m)
I	0.00 - 0.13	1.07
II	0.13 - 0.30	1.07
III	0.30 - 0.48	1.03
IV	0.48 - 0.65	1.10
V	0.65 - 0.82	1.13
VI	0.82 - 0.99	1.17
VII	0.99 - 1.15	1.21
VIII	1.15 - 1.34	1.25
IX	1.34 - 1.51	1.29
X	1.51 - 1.64	1.32

表4. 3

注入流量(ml/min)	51(#47)/10(#50, #61)/48(#62)
領域数	7(#47)/10, 3(#50)/10(#61, #62)
流れ関数範囲	0～-450
流線本数	10
ダ・イ・ボ・ル間隔半幅(m)	2.45(#47, #50)/0.82(#61, #62)
揚水／注入流量比	2.94(#47)/15.00(#50)/14.80(#61)/3.08(#62)
空隙率	0.1
流管径(m)	1.5×10^{-4} [固定値*]
分散長(m)	0.008
マトリクス密度(kg/m ³)	2670
分子拡散係数(m ² /s)	1.5×10^{-9}
有効拡散係数(m ² /s)	$1.5 \times 10^{-10}/1.5 \times 10^{-9}$
トレーサー表面吸着係数(m)	0.
体積吸着係数(m ³ /kg)	0.
トレーサー崩壊定数(1/s)	1.551E-10
トレーサー注入時間(s)	120(#47)/2100(#50)/720(#61)/180(#62)
トレーサー注入濃度	1.0

* 地下水流動解析結果の流速に対応して三乗則
により定めた場合の値は各解析結果を参照

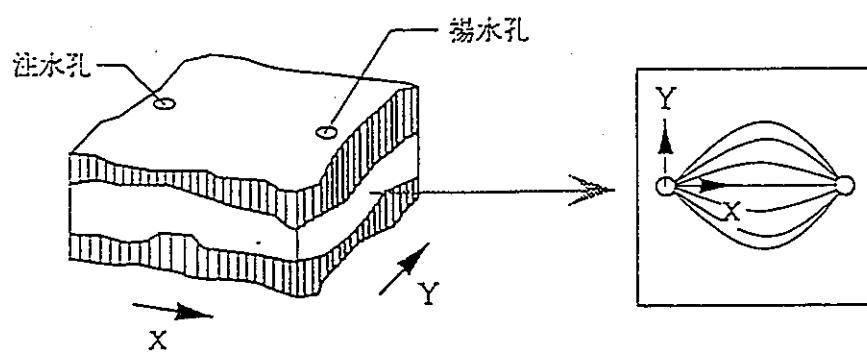


図4.7a 流線網の座標系

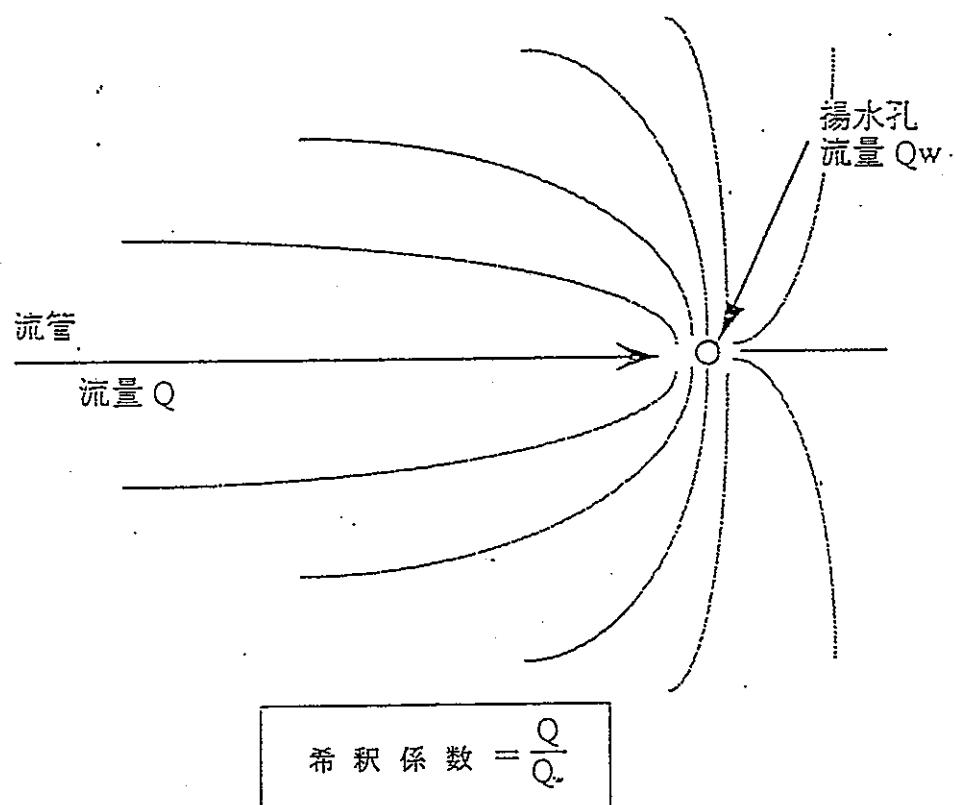


図4.7b 流線網外からの地下水流入による希釈の効果

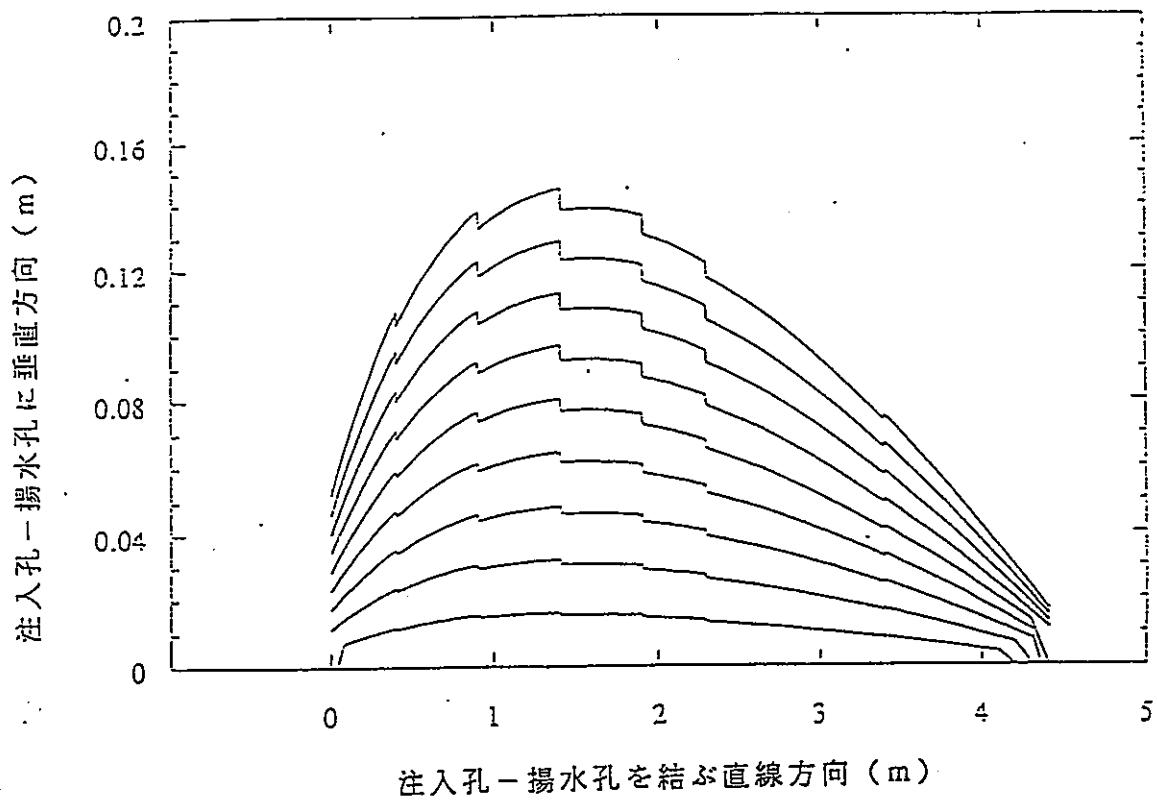


図4.8a RUN #47 流線網 流れ関数 = 0 ~ -1 8 0

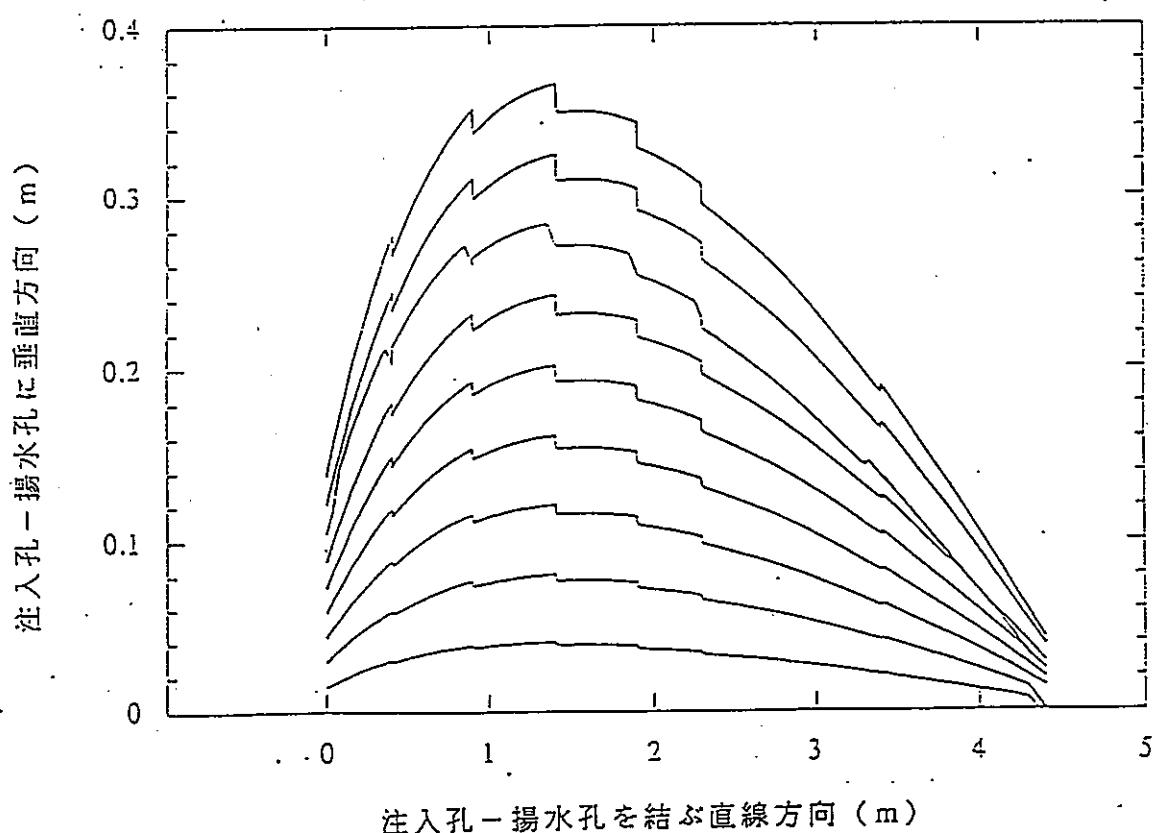


図4.8b RUN #47 流線網 流れ関数 = 0 ~ -4 5 0

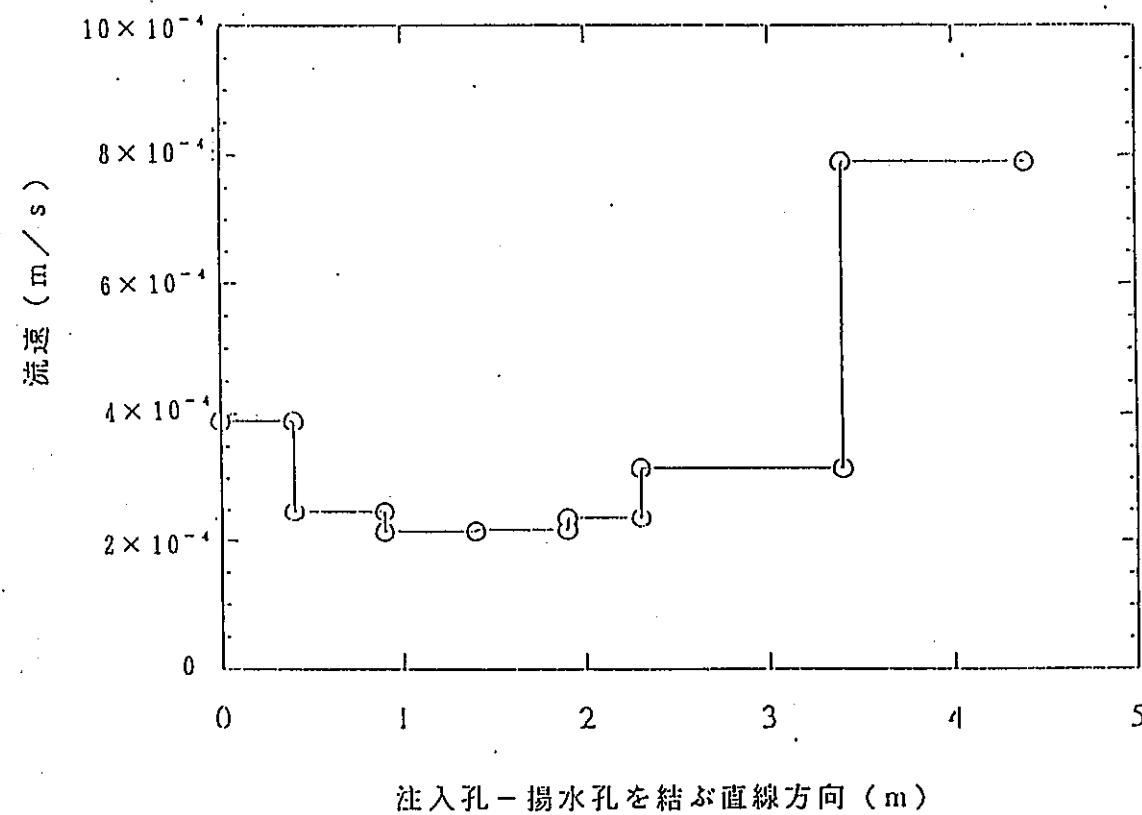


図4.9 RUN #47 流速分布　流れ関数 = 0 ~ -4.5 0

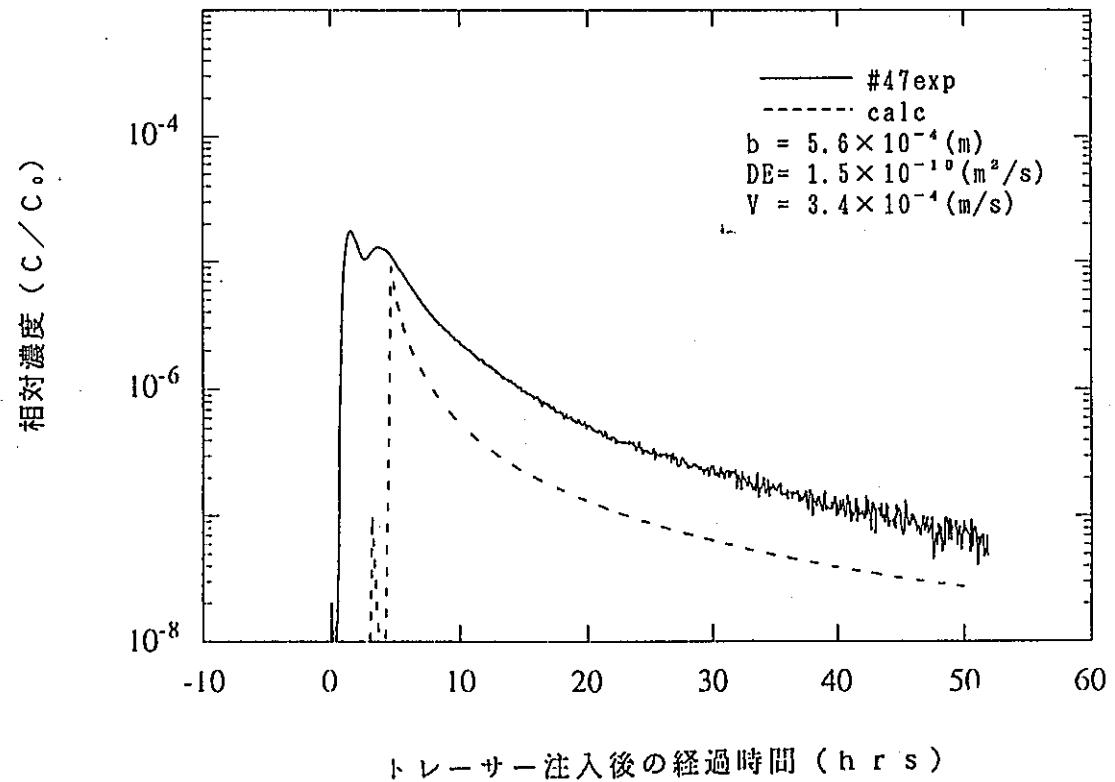


図4.10 RUN #47 破過曲線

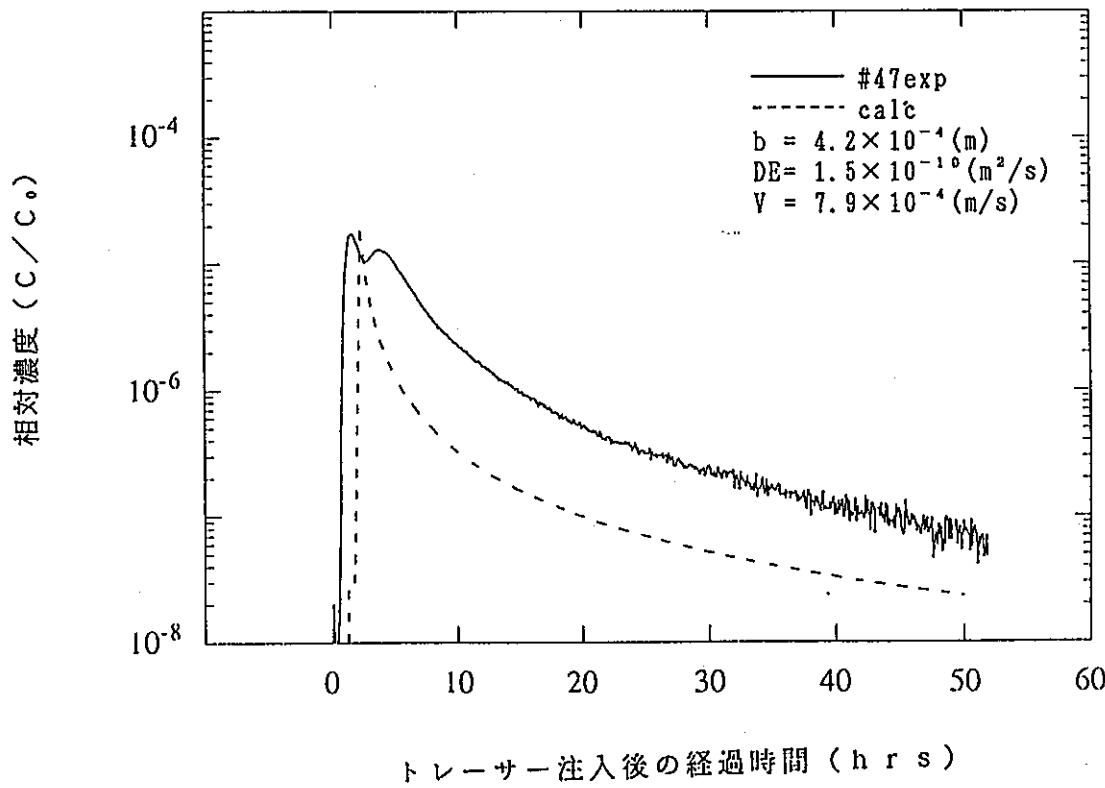


図4.11 RUN #47 破過曲線

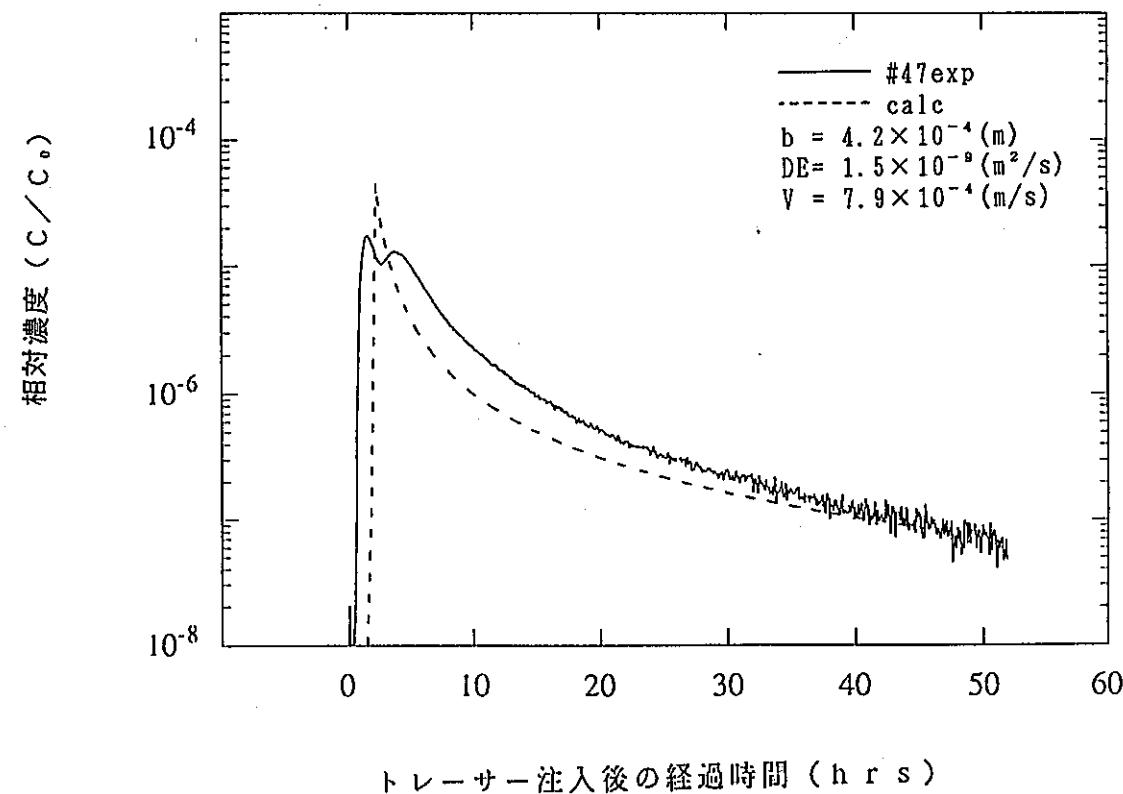


図4.12 RUN #47 破過曲線

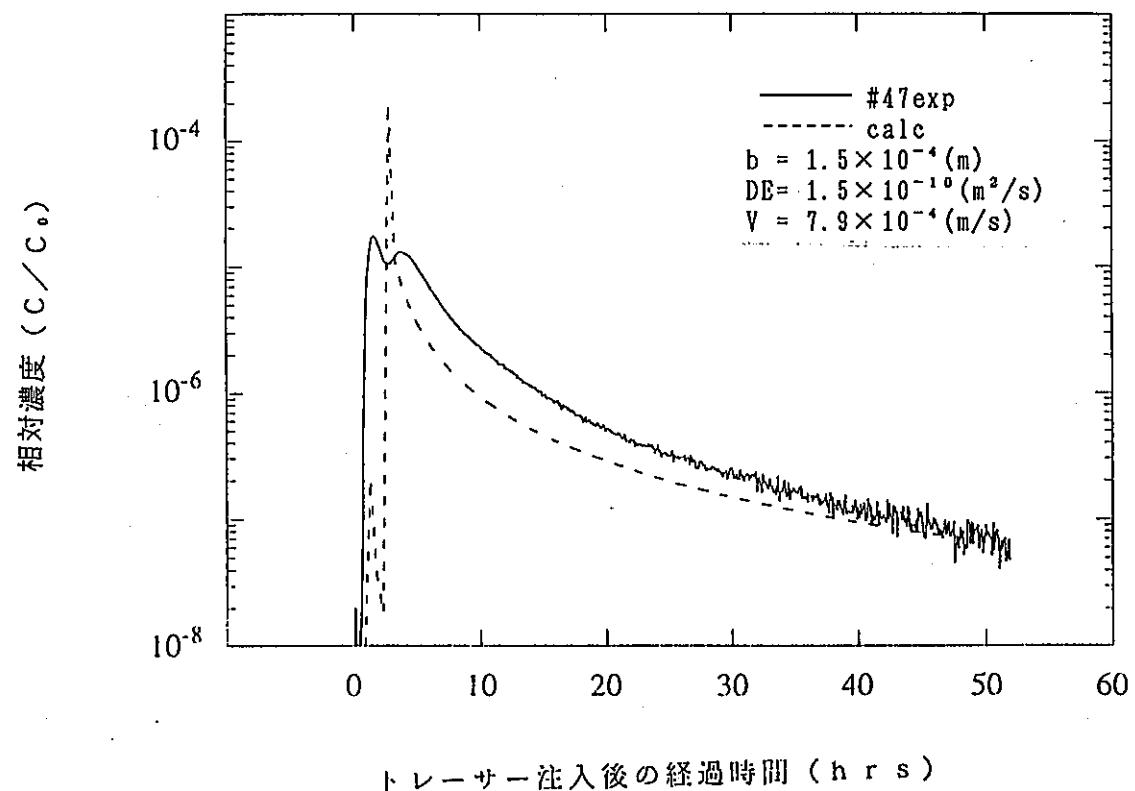


図4.13 RUN #47 破過曲線

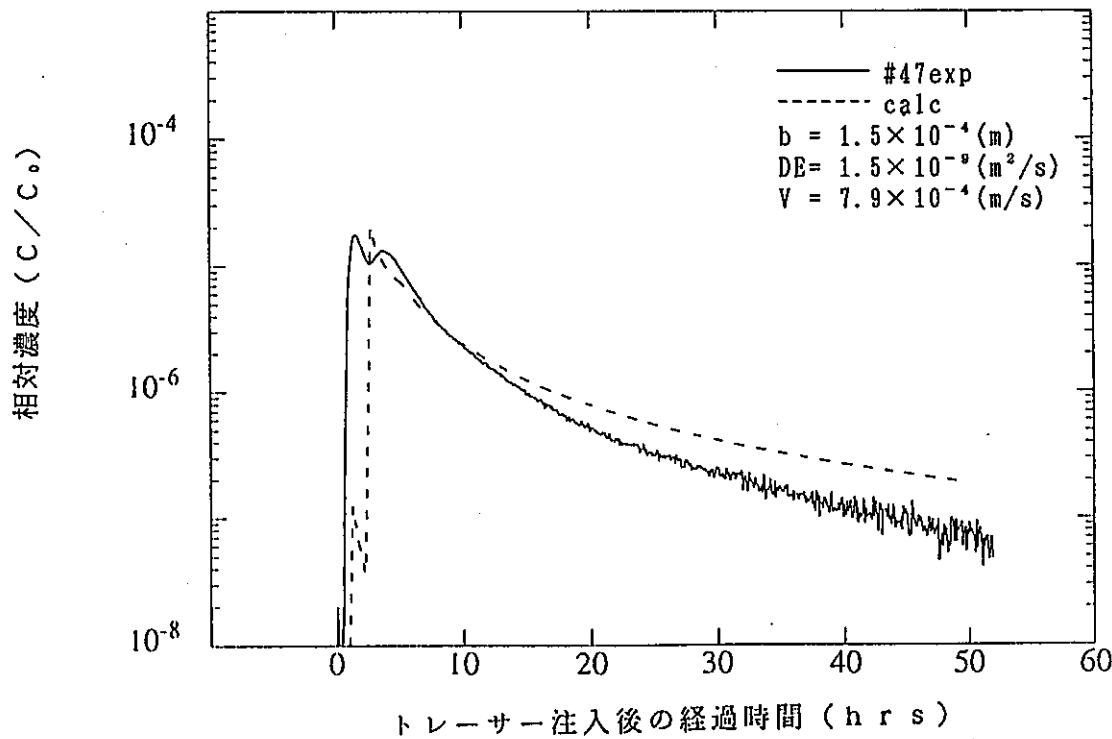


図4.14 RUN #47 破過曲線 流れ関数=0～-450

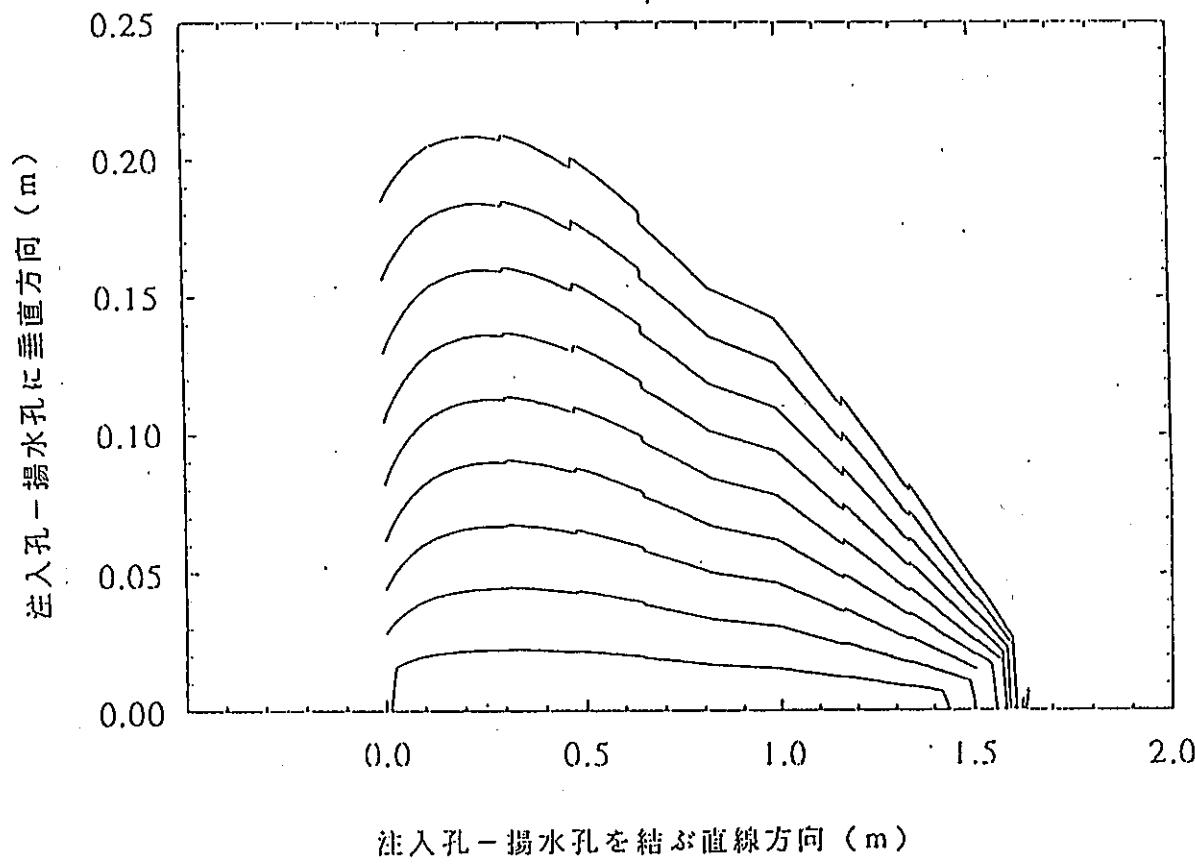
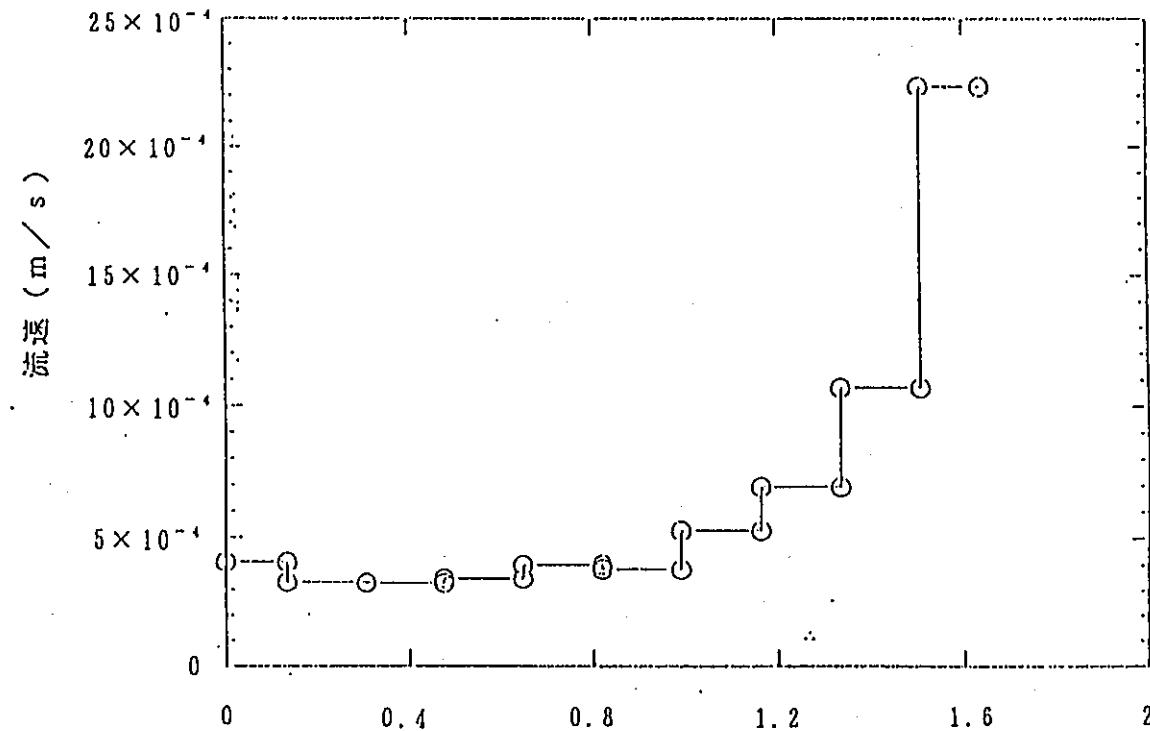


図4.15 RUN #61 流線網



注入孔 - 採水孔を結ぶ直線方向 (m)

図4.16 RUN #61 流速分布

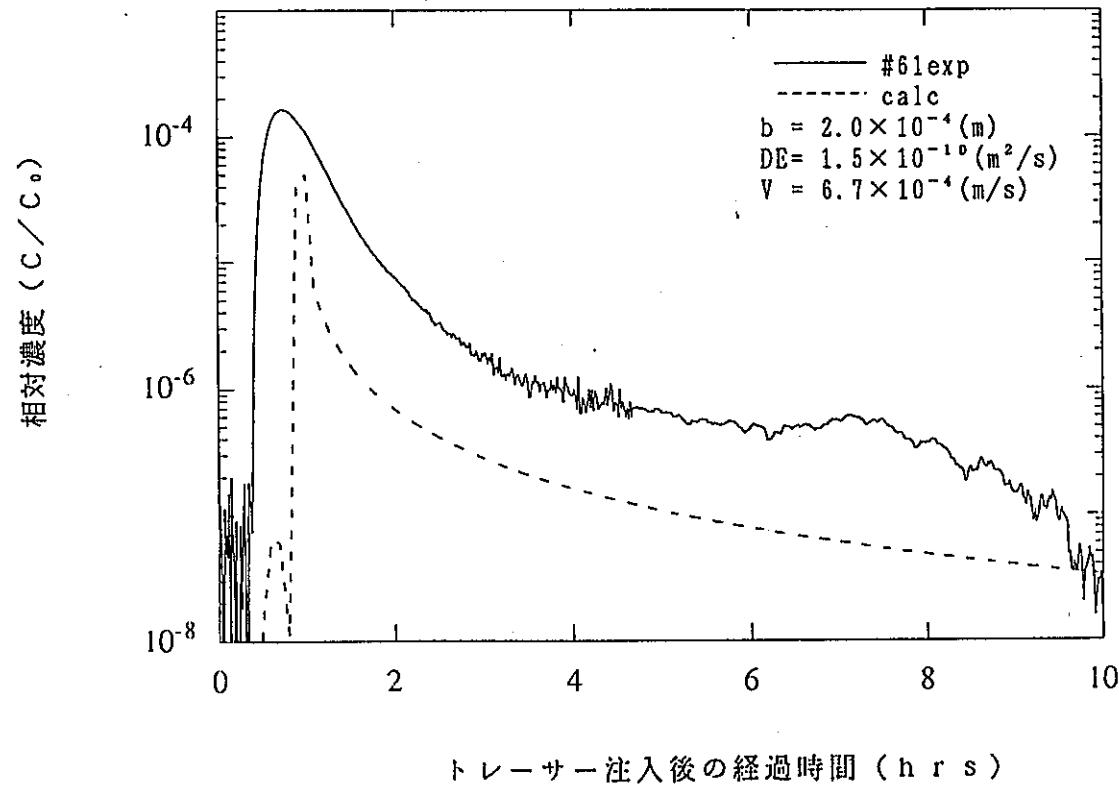


図4.17 RUN #61 破過曲線

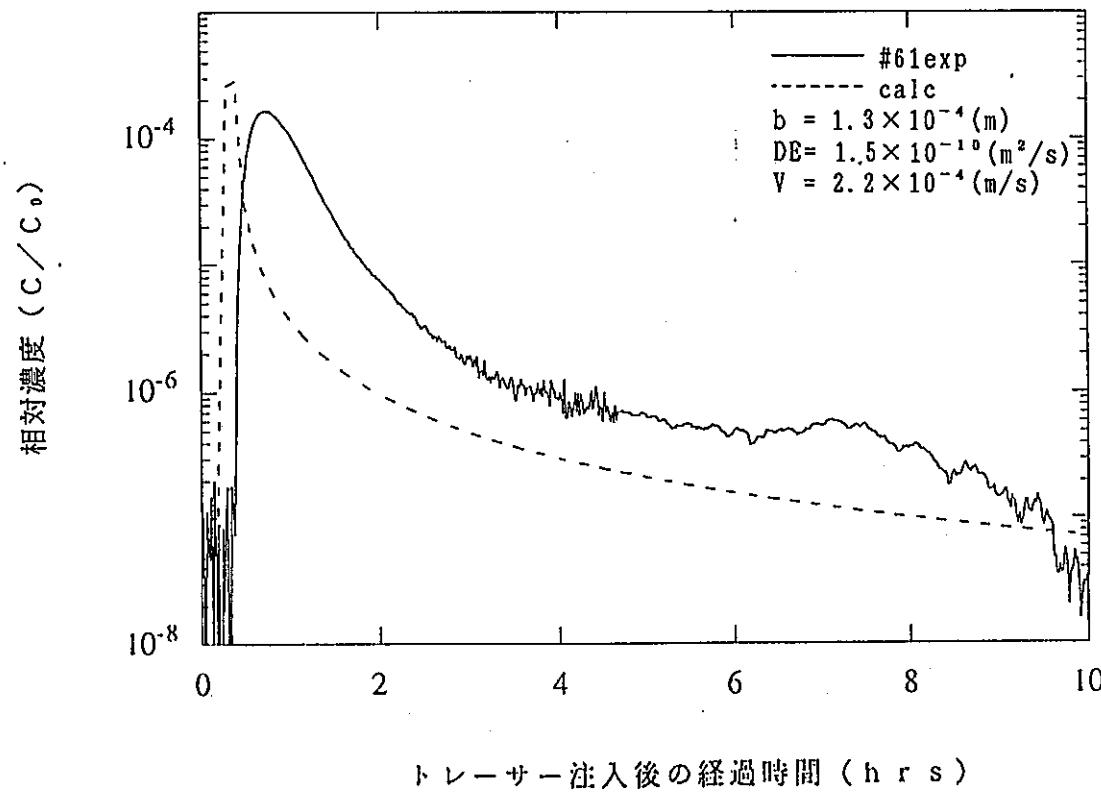


図4.18 RUN #61 破過曲線

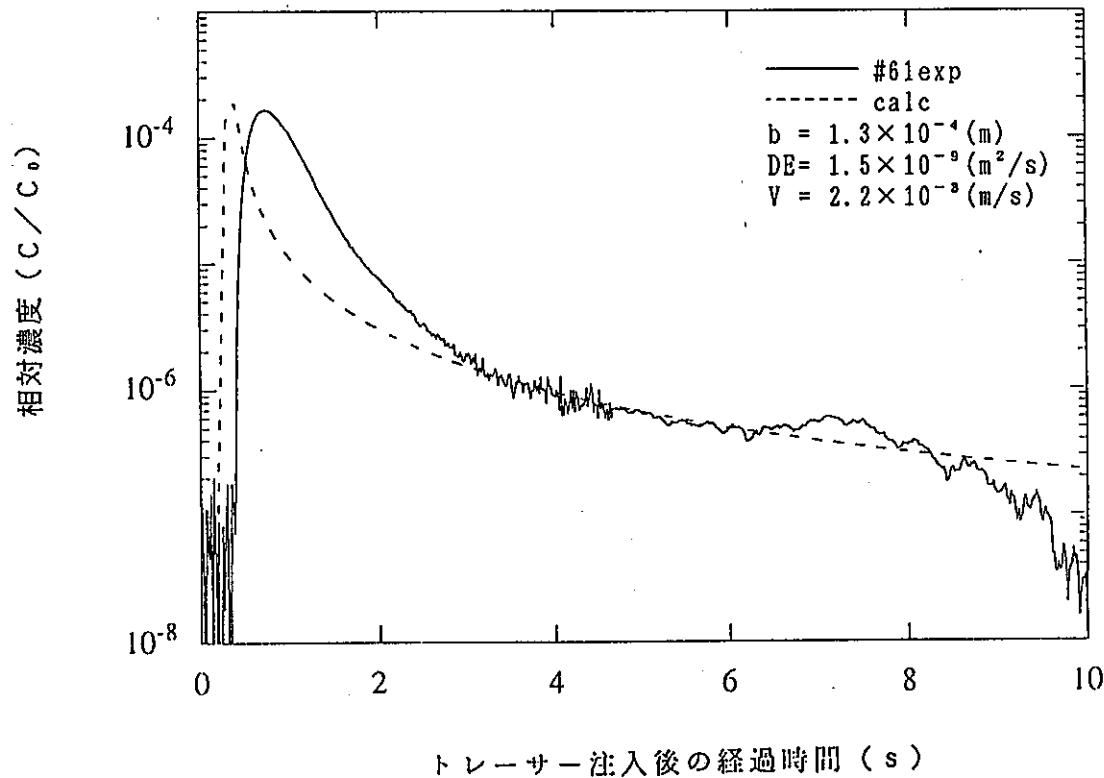


図4.19 RUN #61 破過曲線

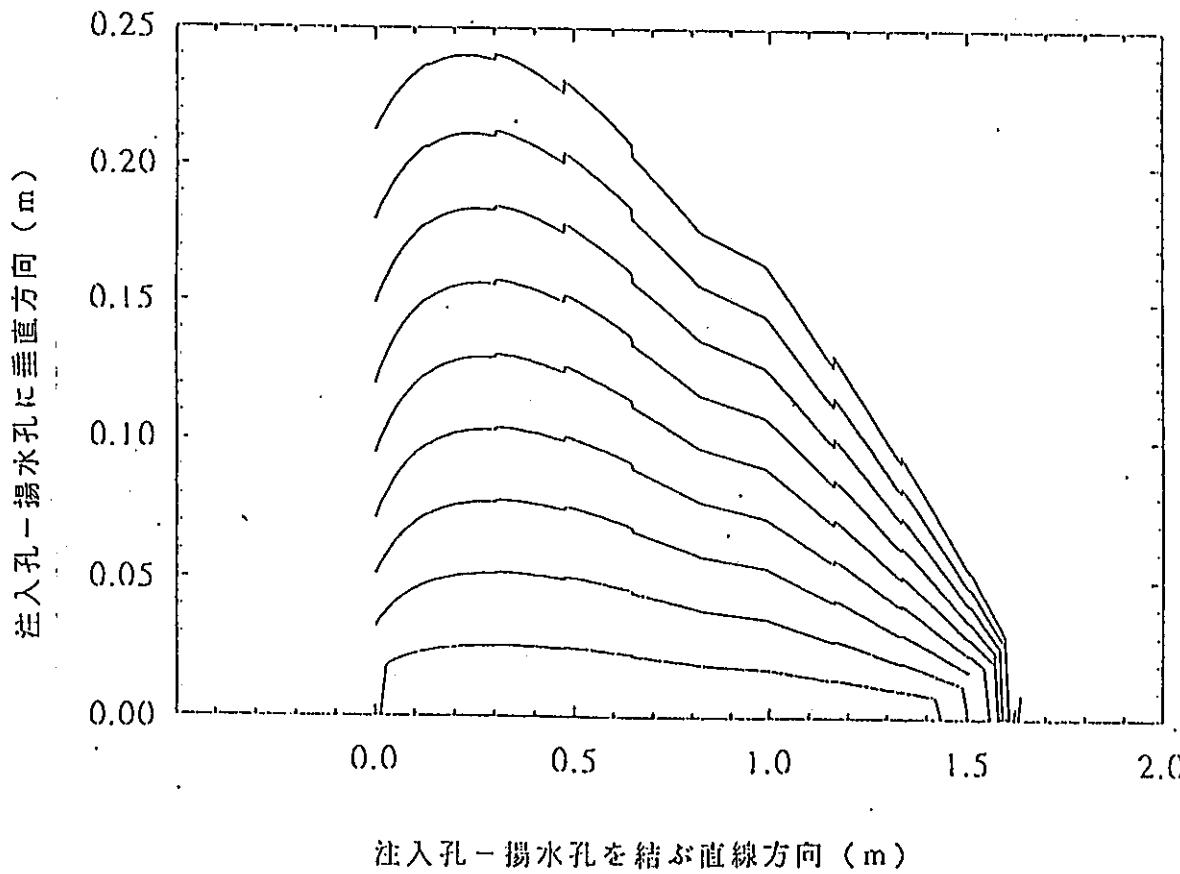


図4.20 RUN #62 流線網

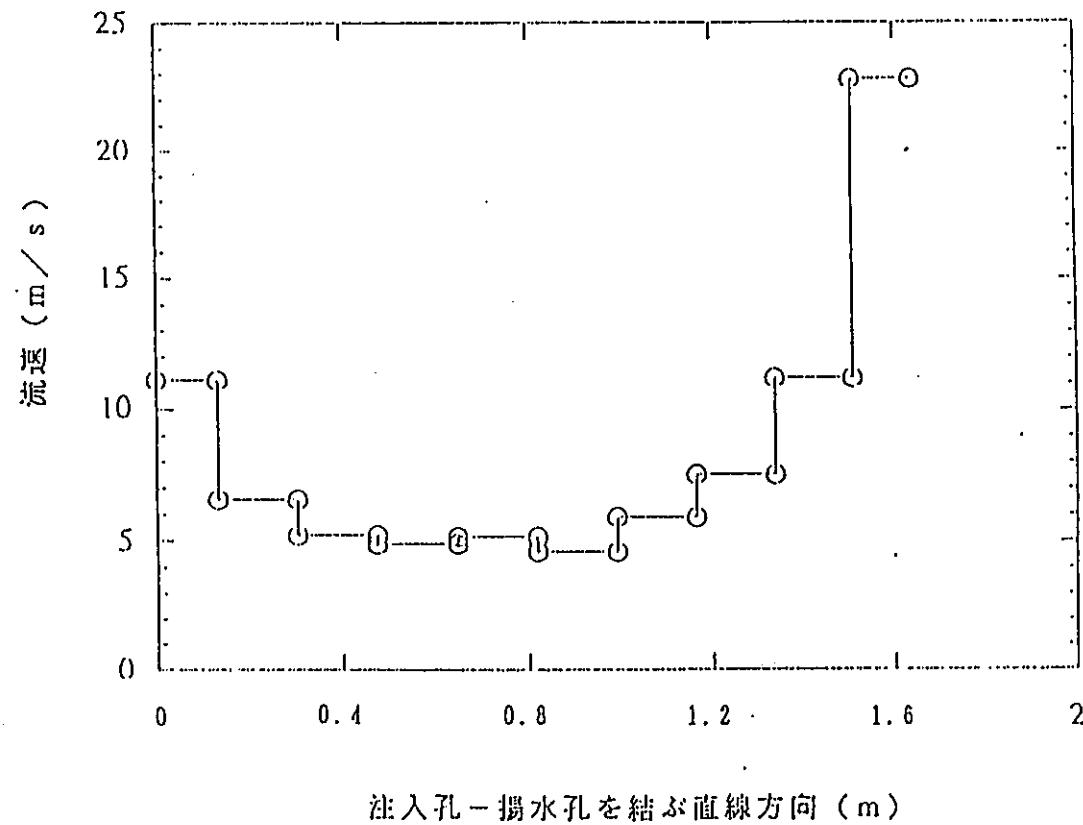


図4.21 RUN #62 流速分布

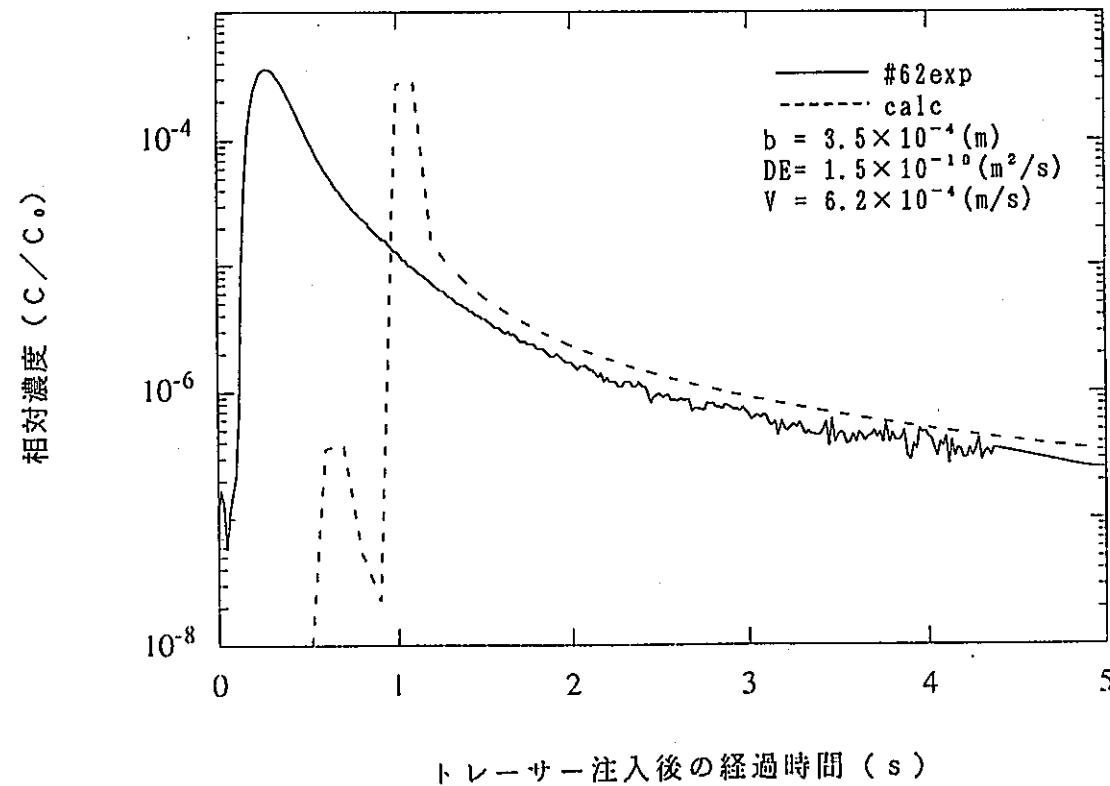


図4.22 RUN #62 破過曲線

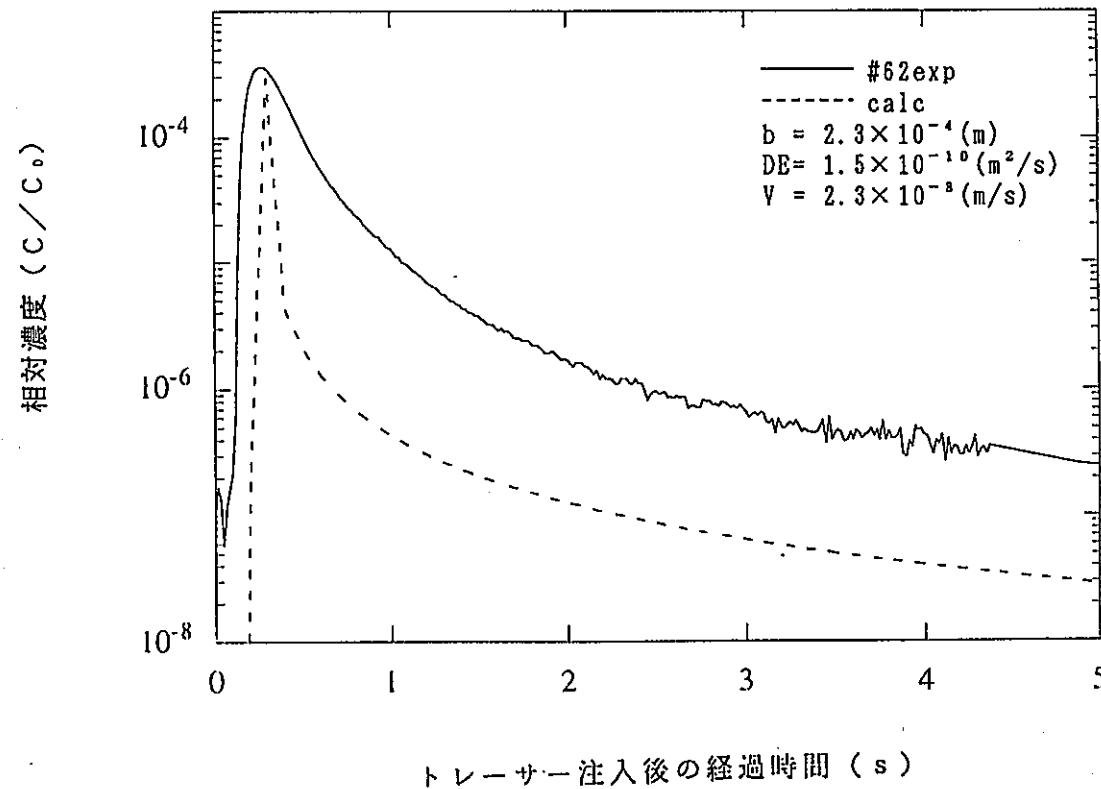


図4.23 RUN #62 破過曲線

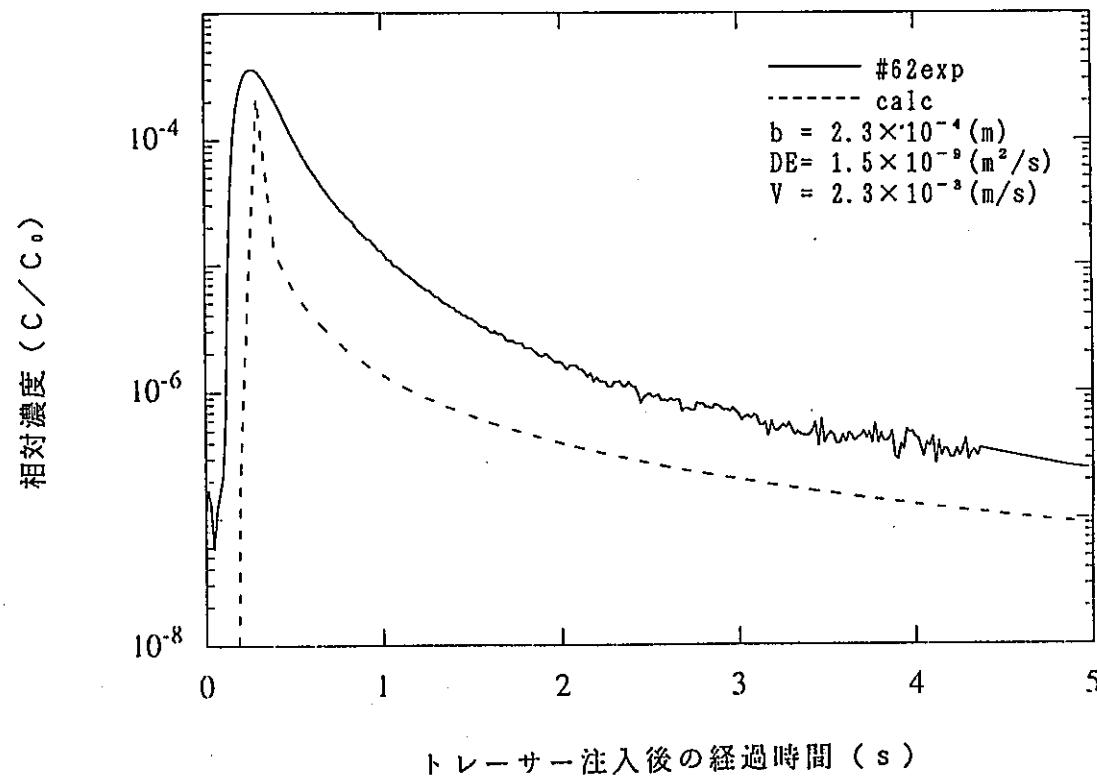


図4.24 RUN #62 破過曲線

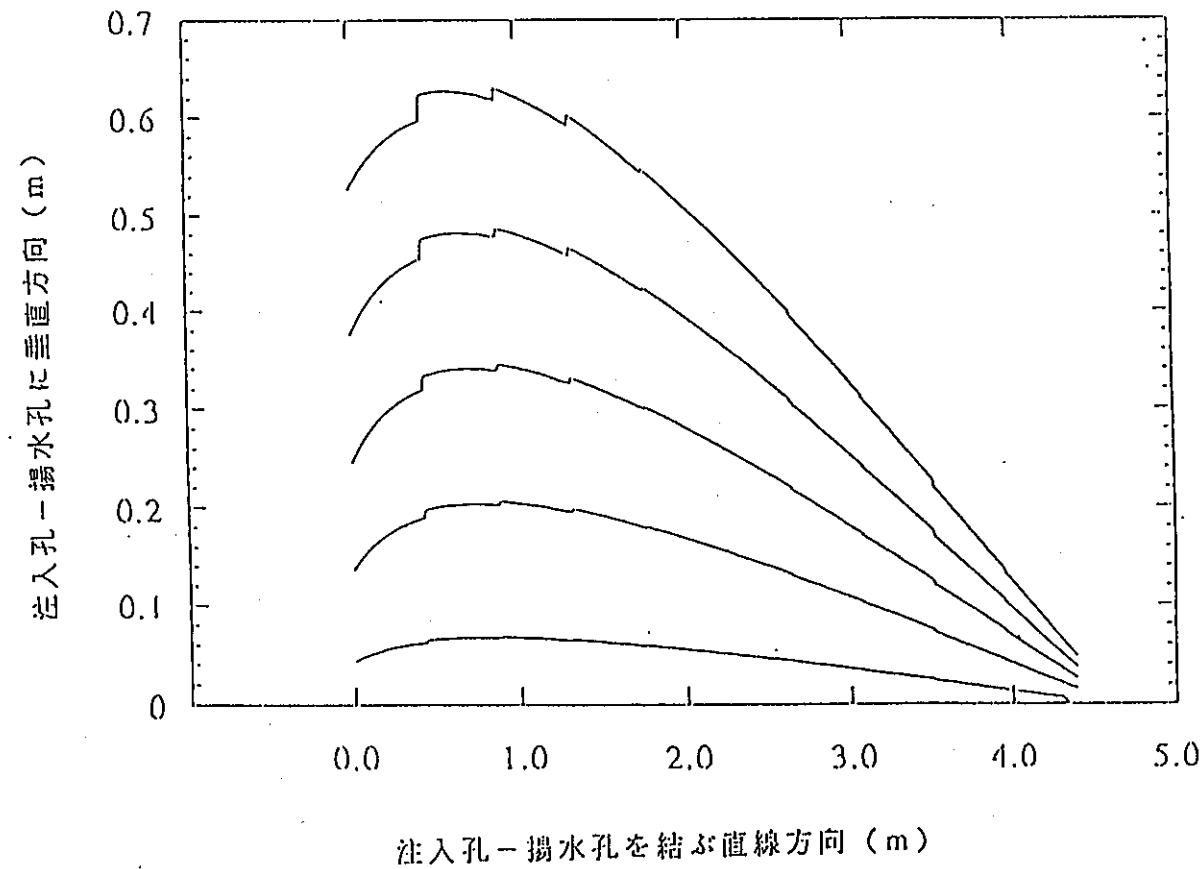


図4.25 RUN #50 流線網

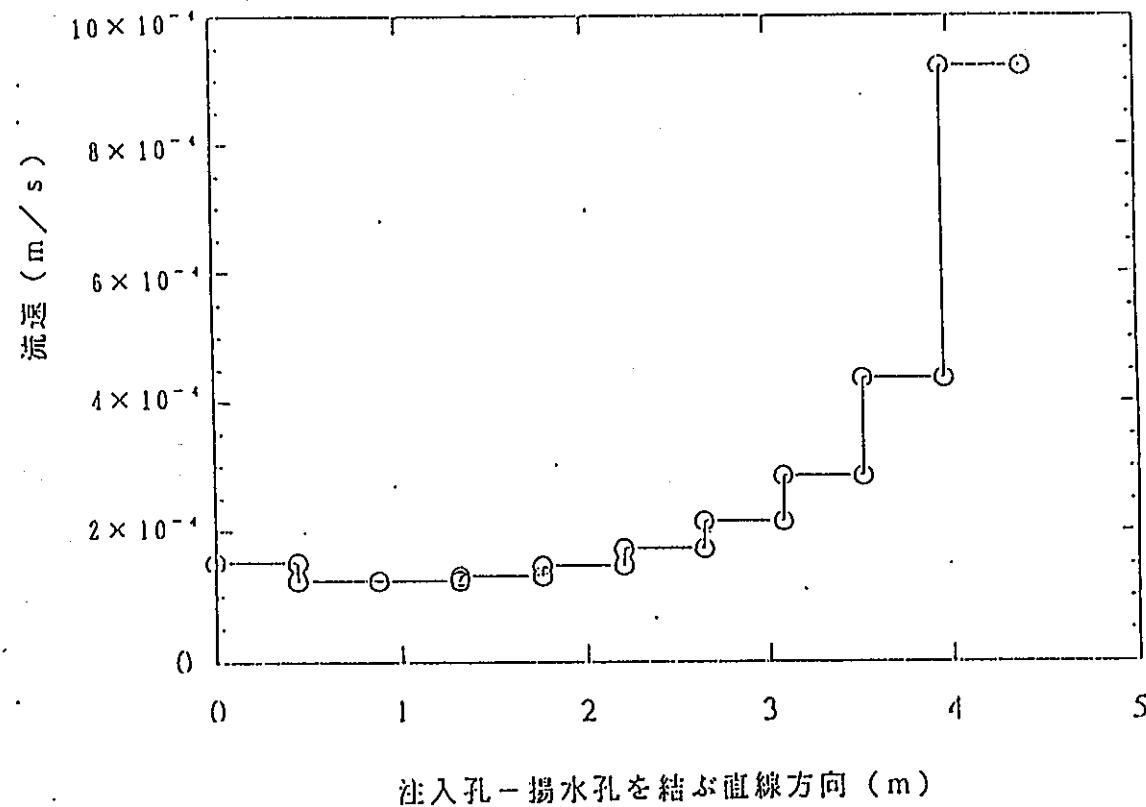


図4.26 RUN #50 流速分布

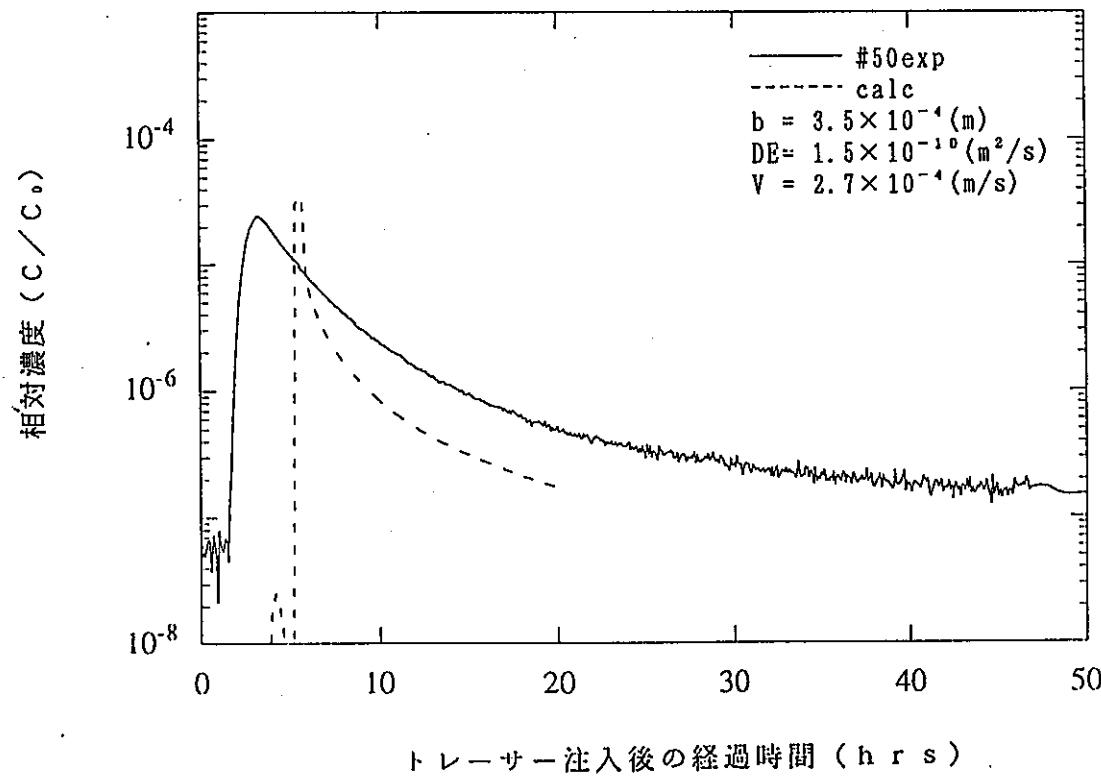


図4.27 RUN #50 破過曲線

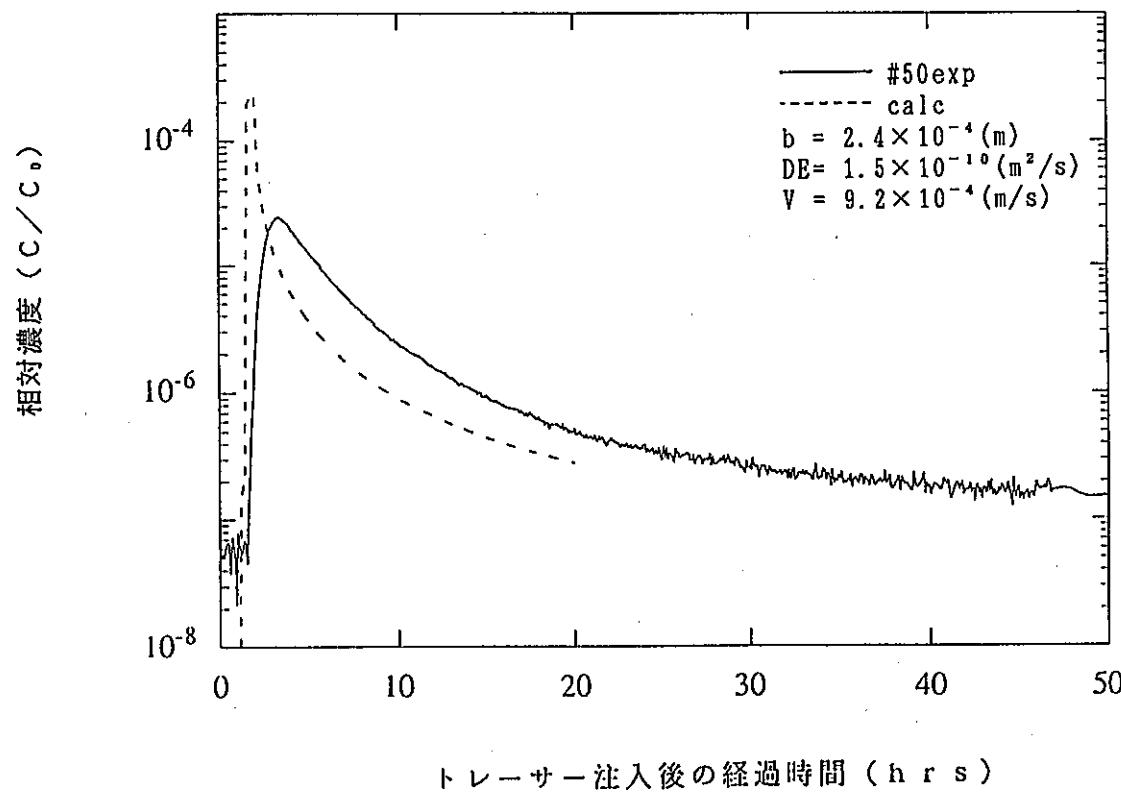


図4.28 RUN #50 破過曲線

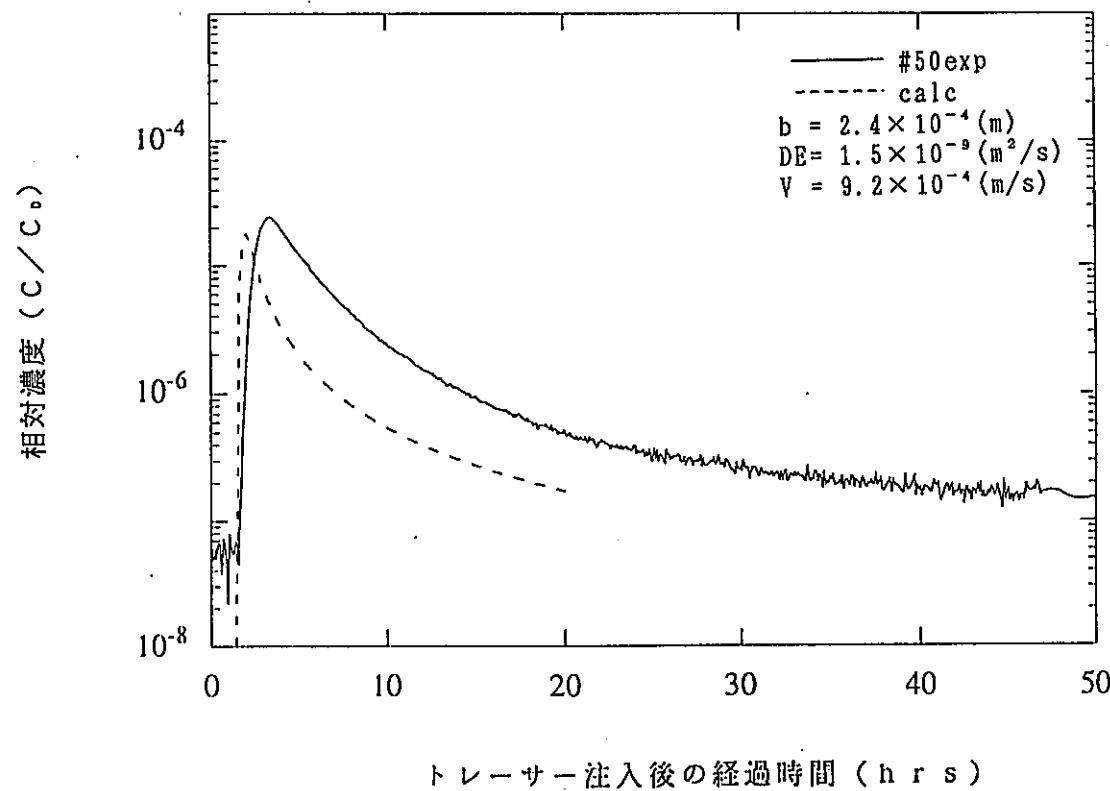


図4.29 RUN #50 破過曲線

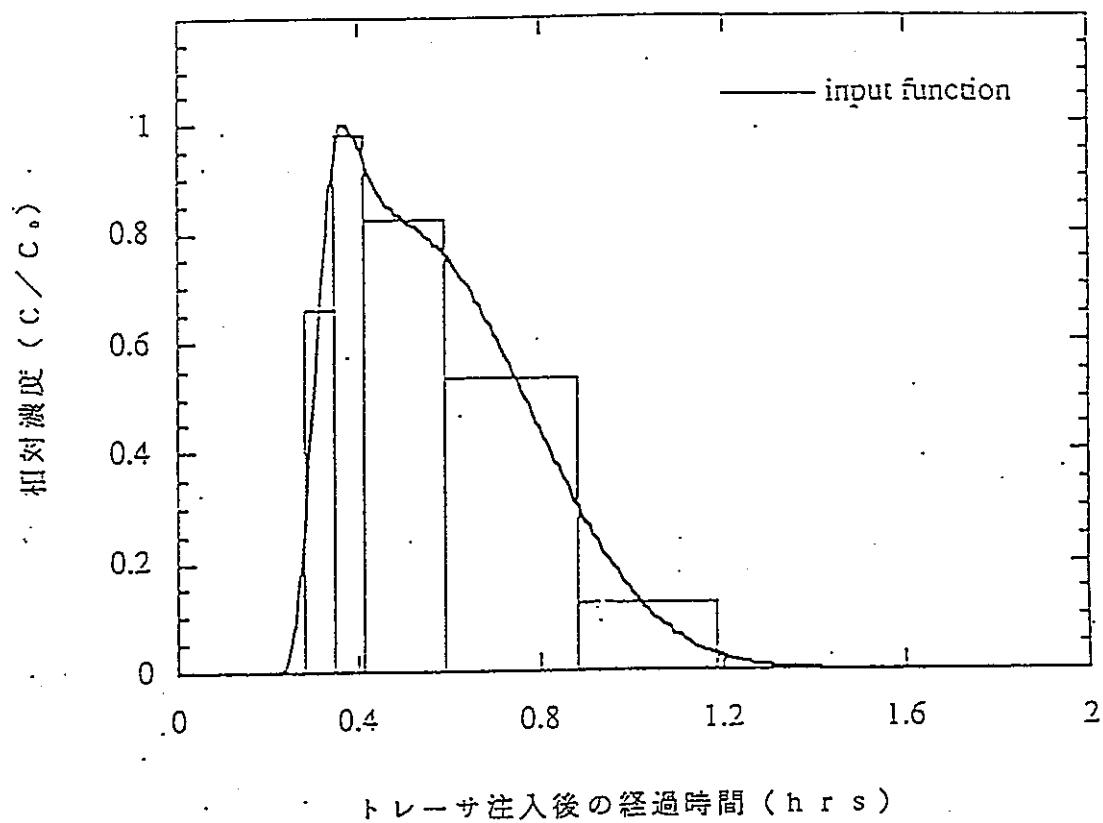


図4.30 RUN #50 注入濃度

表4.4a ステップ入力 流線1 ($\Psi = 0$)

領域	区間	分割ステップ入力	濃度	時間(s)
I	1.46	I - 1	3.68E-3	180
		I - 2	3.53E-3	270
		I - 3	3.08E-3	300
II	1.48	II - 1	1.245E-3	2479
		II - 2	1.386E-3	2479
		II - 3	2.696E-4	18894
III	1.46	III - 1	1.546E-4	2412
		III - 2	3.467E-4	2412
		III - 3	4.250E-4	2479
		III - 4	3.180E-4	2412
		III - 5	1.686E-4	18827
		III - 6	1.196E-4	13735

表4.4b ステップ入力 流線10 ($\Psi = -450$)

領域	区間	分割ステップ入力	濃度	時間(s)
I	1.49	I - 1	3.68E-3	201
		I - 2	3.53E-3	268
		I - 3	3.08E-3	335
II	1.51	II - 1	1.08E-3	2546
		II - 2	1.18E-3	2479
III	1.49	III - 1	1.27E-4	2479
		III - 2	2.99E-4	4958
		III - 3	2.25E-4	2412
		III - 4	8.58E-4	30954

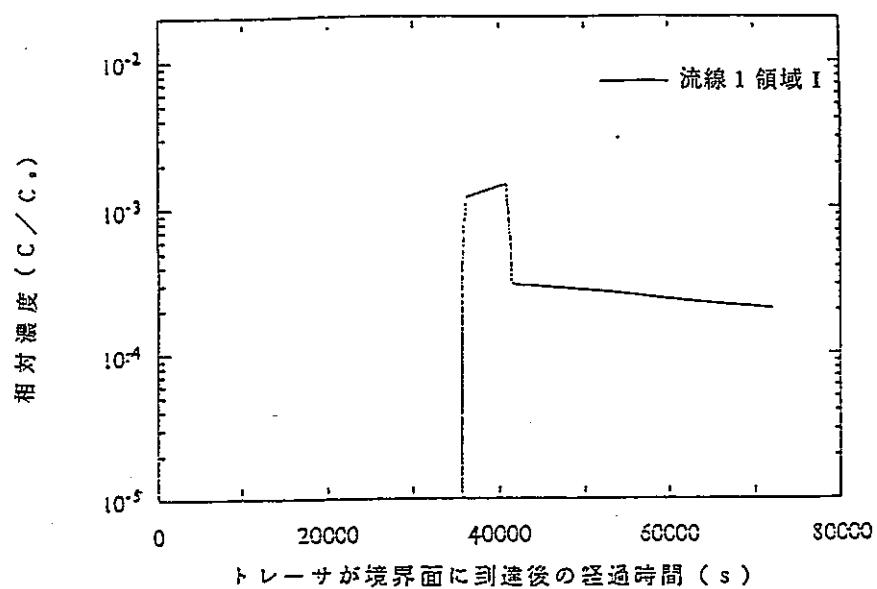


図4.31a 領域I, IIの境界における濃度の経時変化 流線1流れ関数=0

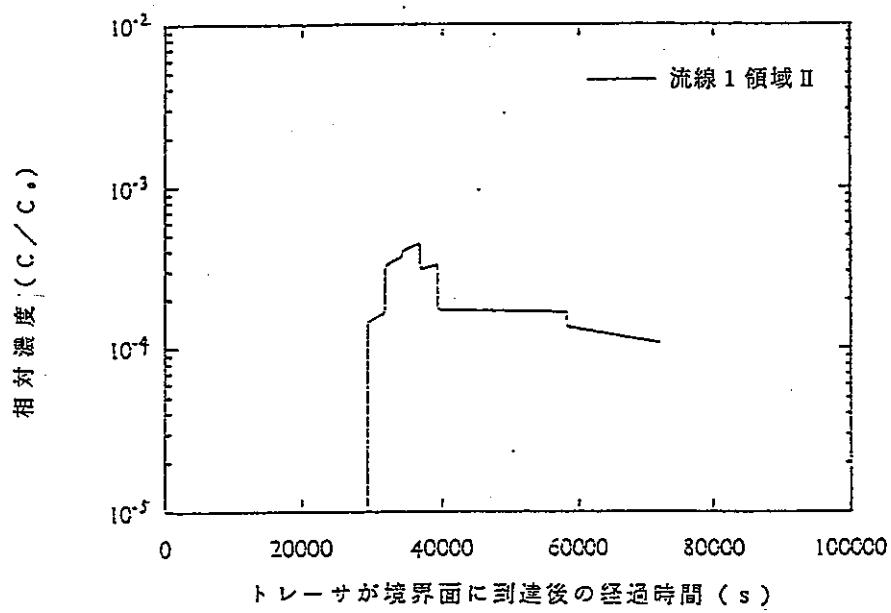


図4.31b 領域II, IIIの境界における濃度の経時変化 流線1流れ関数=0

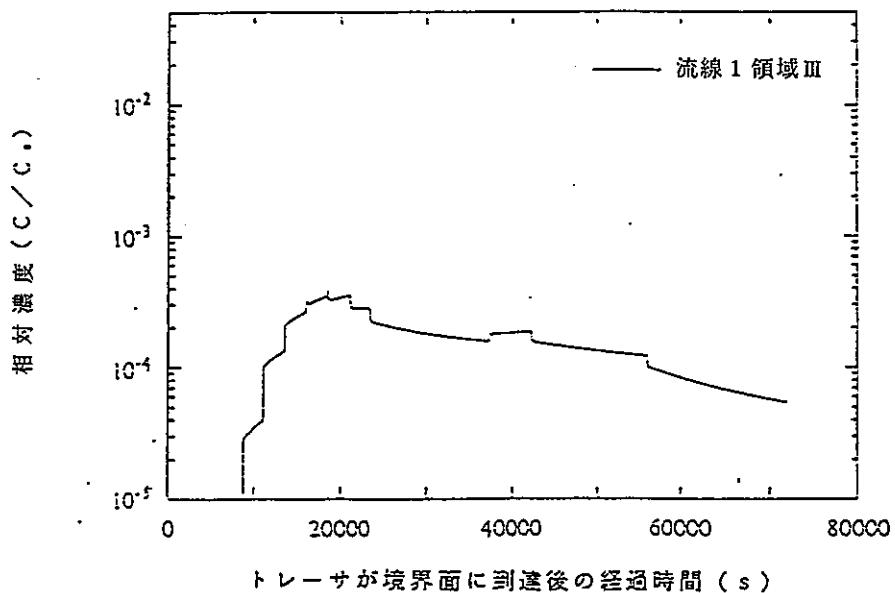


図4.31c 領域III, 揚水孔近傍における濃度の経時変化 流線1流れ関数=0

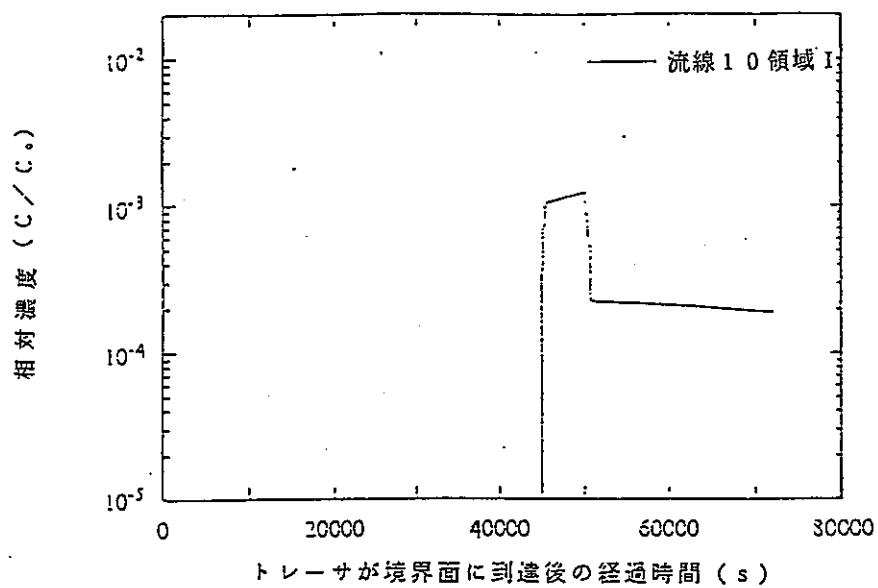


図4.32a 領域I, IIの境界における濃度の経時変化 流線1流れ関数=-450

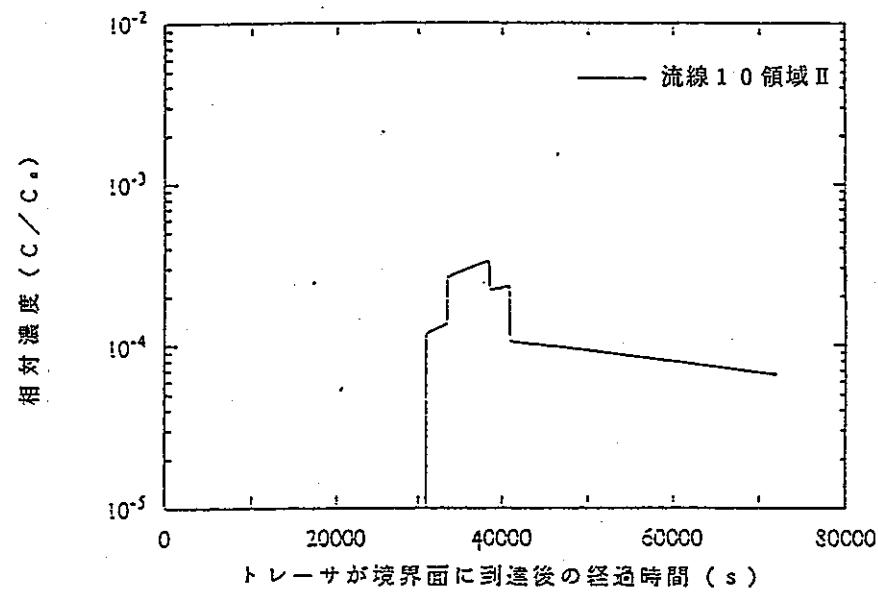


図4.32b 領域II, IIIの境界における濃度の経時変化 流線1流れ関数=-450

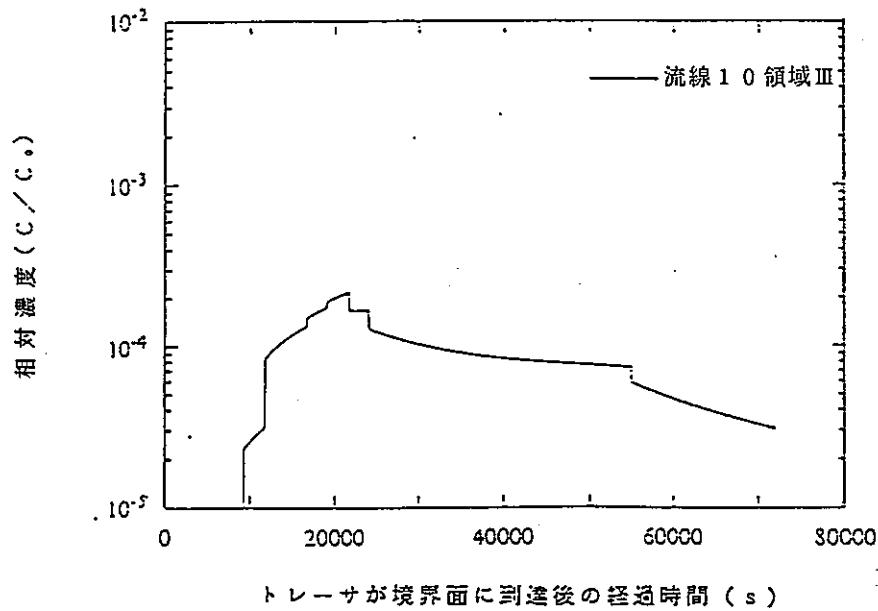


図4.32c 領域III, 揚水孔近傍における濃度の経時変化 流線1流れ関数=-450

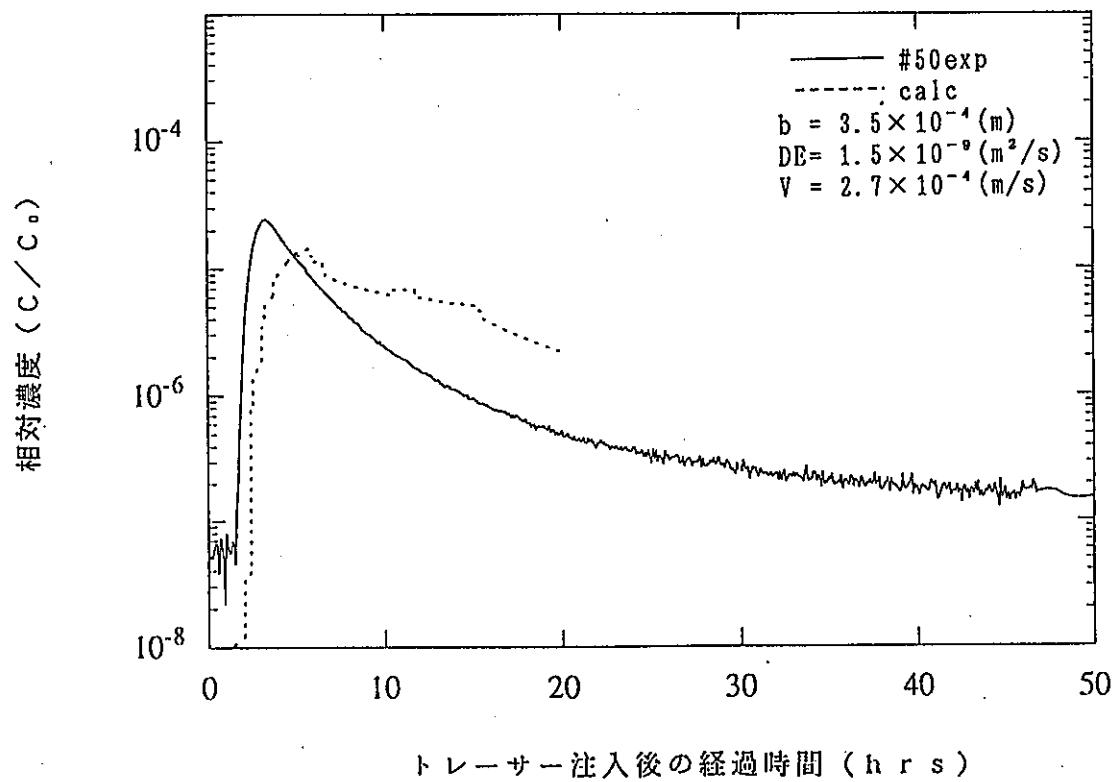


図4.33 RUN #50 破過曲線

5. まとめ

本研究の成果は次の3項目に要約される。

- 1) 透水量係数が空間的に不均一な亀裂状媒体中の核種移行を表現するモデルとして、不均一な流れ場における地下水水流の流線網を推定し、流速分布を推算する地下水水流解析モデルとこれにより得られた流速分布から一次元の移流拡散解析をおこなう物質移動解析モデルを開発した。
- 2) 開発したモデルをグリムゼルテストサイトにおける核種移行試験に適用することにより検証を行った。
- 3) 実験解析の結果、不均一な流れ場における物質移動を再現することを示す結果が得られ、簡便かつ高速な解析的方法という特徴を備えた解析モデルとして有効性が確認できた。

以上により、本研究で開発した解析モデルは核種移行試験解析および評価のためのツールとして有効であると考える。

本解析に用いた解析モデルに関する課題および今後の展望としては次の4項目が挙げられる。

- 1) 今回実施した実験解析においては実験条件、地質環境条件から解析対象となる亀裂帯の不均一性を揚水試験の軸方向一次元についてのみ考慮することで十分であったと考えられるが、より一般的な場の解析を可能とするためには二次元的な不均一性を取り扱うことができるモデルの開発が必要であろう。
- 2) また、今回の解析に用いたモデルは流線範囲の決め方に試行錯誤を要することや、全ての流線を等価としており流線毎に異なると思われる物質移動への寄与が反映されないこと等、流線網の取り扱いに改良の余地を残している。
- 3) 注入濃度分布あるいは移行経路途中の濃度分布のステップ状入力への分解をコード化することにより解析ツールとしての機能を向上させる必要がある。
- 4) 流速分布に対応する流管半径の計算を地下水水流動解析モジュールに統合する。

これらの課題をより詳細に検討して開発したモデルに組み込むことにより、解析精度の向上を期待することができる。これによって、経験と技術を要し、試行錯誤によるほかなかつ

た作図法による流線網の作成を不均一場においても容易に行うことも可能になると思われる。

一方、今回開発した解析モデル、あるいはこれに修正を加えたモデルによる実験解析の経験を蓄積することにより、実験的に観測することが困難である深部地下水媒体における透水係数、拡散係数、吸着係数等のパラメータの推定に利用することができると考えられる。

参考文献

- 1) Trescott, P.C. 1975. Documentation of Finite - Difference Model for simulation of Three - Dimensional Ground - Water Flow. U.S. Geological Survey Open - File Report 75 - 438, U.S. Geological Survey.
- 2) Reisenauer, R.E. 1979. Variavle Thickness Transient Grandwater Flow Model (VVT), Formulation, User's Manual and Program Listings.
- 3) Cooley, R.L. 1974. Finite Element Solutions for the Equations of Grandwater Flow. Nevada University, Nevada.
- 4) Trescott, P.C., G.F.Pinder and S.P.Larson. 1976. Finite - Difference Model for Aquifer Simulation in Two Dimensions with Results of Numerical Experiments. Techniques of Water Resource Investigations, book 7, Chapter C1, U.S. Geological Survey,.
- 5) Yeh, G.T., Wards, D.S., FEMWATER:A Finite - Element Model of Water Flow through Saturated - Unsaturated Porous Media, ORNL-5567, 1980.
- 6) FTRANS:A Two - Dimensional Code for simulating Fluid Flow and Transport of Radioactive Nuclides in Fractured Rock for Repository performance Assessment (Technical Report) ONWI-426 Distribution Category UC-70, 1983
- 7) 大井、出光他、ファーフィールド試験用水理・核種移行モデルの開発、日本原子力学会放射性廃棄物研究連絡会報、pp.71 - 81, 1989.
- 8) F.Herzog, Transport-modeling for the Grimsel Migration Experiments : Streamtube approach, first results and predictions, Paul Scherrer Institute TM - 41 - 90 - 18 PES - 90 - 517

- 9) D.H.Tang, Contaminant Transport in Fractured Porous Media : Analytical Solution for a Single Fracture, Water Resources Research, VOL.17, No.3, pages 555-564, June 1981.
- 10) Joonhong Ahn, Mass Transfer and Transport of Radionuclides in Fractured Porous Rock, University of California, Berkeley; 1988
- 11) 藤間聰、地下水パラメータの推定に関する基礎的研究
- 12) U.Frick, Grimsel Migration Experiment Hydrodynamic & Transport Modelling Phase I (Information Package 1) AN/92-038

付録 入力マニュアル

入力マニュアル目次

1. 概要	付 - 1
2. 計算式	付 - 1
3. コードの構造と機能	付 - 6
4. 入力データ	付 - 8
5. 出力結果の例	付 - 13
6. 使用上の注意事項	付 - 21

1. 概要

解析コードは大別して、地下水流动を解析し、不均一な解析対象領域における流線網と流速分布を計算する流速分布計算モジュールと代表流速もしくは流速分布から流線網を構成する全ての流管内の濃度分布を計算し、揚水孔位置における破過曲線を解析する物質移動解析モジュールとから構成される。

2. 計算式

1) 流速分布計算モジュールの計算式

図に示すようなクロスホール試験の場において

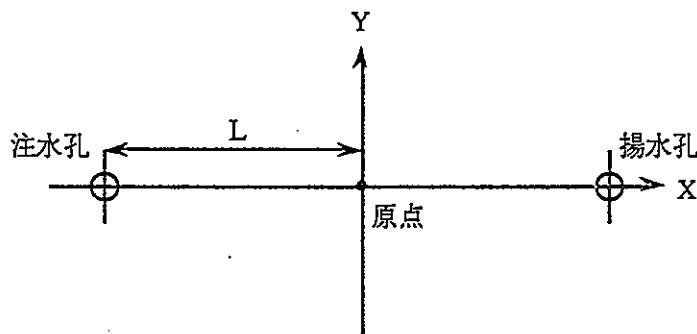


図 1

ダイポール周辺の水頭ポテンシャル Ψ と複素共役な関係にある流れ関数は

$$\Psi(x,y) = \frac{Q_i}{2\pi a} \left\{ \arcsin \frac{x+L}{\sqrt{(x+L)^2+y^2}} - \beta \arcsin \frac{x-L}{\sqrt{(x-L)^2+y^2}} - \frac{1}{2}(1+\beta)\pi \right\} \quad (1)$$

となる。

Q_i : 注入流量

L : ダイポール間半幅

a : 帯水層幅

β : 流出流量／流入流量の比 $= Q_w/Q_i$ (Q_w : 揚水流量)

(1)式により定まる流線上の座標から計算されるダルシー流速のx, y方向成分は

$$\begin{aligned} q_x &= \frac{Q_i}{2\pi a} \left\{ \frac{(L+x)}{(L+x)^2+y^2} + \beta \frac{(L-x)}{(L-x)^2+y^2} \right\} \\ q_y &= \frac{Q_i}{2\pi a} \left\{ \frac{y}{(L+x)^2+y^2} - \beta \frac{y}{(L-x)^2+y^2} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

となる。

また、ダルシー流速の実流速への変換は次式に従う。

$$v = \sqrt{(q_x/\epsilon)^2 + (q_y/\epsilon)^2} \quad (3)$$

ϵ : 空隙率

均一ブロック毎に流線網を作成し、ブロック内での実流速の平均値をそのブロックにおける流速の値とする。

$$v_{ave}^k = \frac{\sum v}{n} \quad (4)$$

v_{ave} : 均一ブロック内の平均値

k : 均一ブロック数

n : ブロック内の評価点数

2) 物質移動解析モジュールの計算式

物質移動解析モジュールは図2のような座標系において流管内一次元の物質移動を計算する。

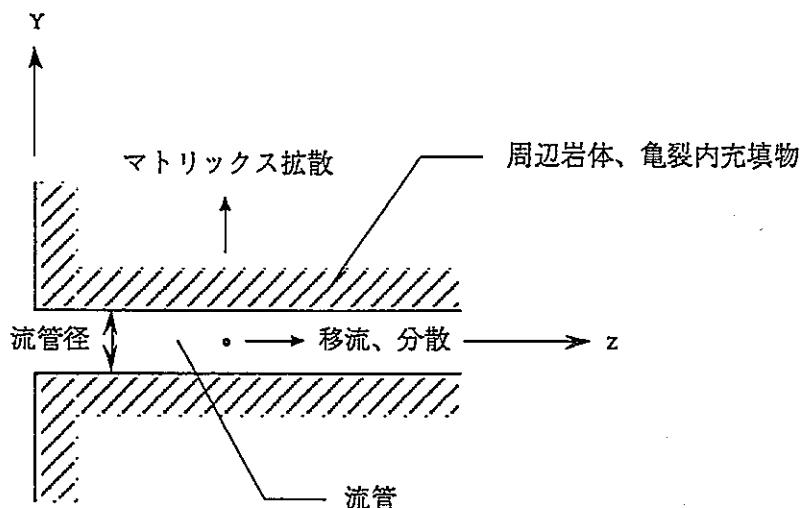


図2

物質移動解析モジュールが計算する流管中の一次元移流拡散方程式は式(5)のようになる¹⁾。

$$v \frac{\partial c}{\partial z} - D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial s}{\partial t} + \lambda c + \frac{\lambda}{b} s + \frac{q}{b} = 0 \quad 0 \leq z \leq \infty \quad (5)$$

ここで

- z : 流管中の軸方向位置
- b : 流管半径
- t : 時間
- v : 流速
- D : 分散係数
- c : 地下水中の移動物質の濃度, $c(z, t)$
- λ : 放射性の移動物質の場合の崩壊定数
- q : 流れに垂直方向の、岩体あるいは充填物への拡散による損失

である。

(5)式の左辺各項の意味は第一項から順に亀裂に沿った移流、亀裂中の機械的分散、濃度の経時変化、周辺岩体および亀裂内充填物表面への吸着、亀裂中を移動する放射性物質の放射性崩壊、表面吸着された放射性物質の放射性崩壊、周辺岩体および亀裂内充填物へのマトリックス拡散による物質移動である。

流管内の流れに沿った分散は機械的分散と分子拡散からなり、次のように定義されている。

$$D = a_L v + D^*$$

a_L : 分散係数

D^* : 自由水中の分子拡散係数

である。

拡散損失は

$$q = -\varepsilon D' \frac{\partial c'}{\partial y} \Big|_{y=b}$$

ε : 空隙率

y : 流れに垂直方向の位置 ($b \leq y \leq \infty$)

c' : 周辺岩体あるいは亀裂内充填物表面における移動物質濃度、 $c'(y, z, t)$

のように流管と周辺岩体あるいは亀裂内充填物との境界位置におけるフィックの法則で表される。

式(5)を以下の境界条件の下に解くと(6)式のような積分形の解が得られる。

$$c(0, t) = c_0 \quad c_0 : \text{移動物質の注入濃度}$$

$$c(\infty, t) = 0$$

$$c(z, 0) = 0$$

$$\frac{C - \exp(\zeta z)}{C_0} \int_L^\infty \exp\left[-\xi^2 \frac{\zeta^2 z^2}{4\xi^2}\right] \exp(-\eta z^2) \left\{ \exp[-\lambda^2 Y] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2T} - \lambda^2 T\right] + \exp[\lambda^2 Y] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2T} + \lambda^2 T\right] \right\} d\xi \quad (6)$$

ここで

ρ : マトリックス密度

R, R' : 亀裂中、マトリックス中の吸着による遅延係数

K_p, K_m : 亀裂中、マトリックス中の吸着係数

D' : 有効拡散係数 ($D' = \tau D^*$ 、 τ : マトリックスの屈曲度)

$$Y = \frac{v^2 \beta^2 z^2}{4A\xi^2}, A = \frac{bR}{\varepsilon(R'D')^{1/2}}$$

$$T = \left(t - \frac{Rz^2}{4D\xi^2}\right)^{1/2}, \eta = \frac{\lambda R}{4D\xi^2}$$

$$\zeta = \frac{v}{2D}, R = 1 + \frac{K_f}{b}, R' = 1 + \frac{\rho}{\varepsilon} K_m, L = \frac{z}{2} \left(\frac{R}{D t} \right)$$

である。(6)式を数値積分することにより流管中で流入孔からの流れ方向位置zにおける濃度の経時変化を得ることができる。

3. コードの構造と機能

(1) 流速分布計算モジュール

モジュールを構成している各サブルーチンの機能は以下のように分かれている。

- ① MAIN パラメータの読み込み、物質移動計算モジュールとの接続
- ② VP 流線網作成、流管長さ計算、流管内の流速分布計算

計算手順は以下とおりである。

- ① 流速分布計算モジュールは解析対象領域を分割した均一ブロックについて(5式)の流れ関数の値を定め、その値に対する等高線を求める。すなわち、定められた流れ関数値を満たす(x, y)座標をニュートン・ラフソン法で計算する。求めた流線上の座標を評価点と呼ぶ。現在のバージョンでは評価点は一つの均一ブロックに対して10点に固定されている。
- ② 評価点の計算に平行して流線の長さ（各評価点間の距離の総和）を計算する。
- ③ 評価点におけるダルシー流速のx, y成分を計算する。
- ④ ダルシー流速を実流速に変換し、均一ブロック内の平均流速を求める。
- ⑤ 全ての均一ブロックについて①～④の手順を繰り返し、解析対象領域全体の流線網、流速分布を求める。また、各均一ブロック中の流線長さの総和を取り、流線に沿った注水孔から揚水孔までの距離、すなわちトレーサの移行距離を求める。

(2) 物質移動計算モジュール

構成サブルーチンの機能は以下の通りである。

- ① MAIN 全体のコントロール、流速分布計算モジュールとの接続
- ② DATAIN パラメータの読み込み
- ③ TDZDIR 亀裂軸方向、固定位置、時間依存の解析
- ④ TFZDIR 亀裂軸方向、固定時間、位置依存の解析
- ⑤ TDYDIR 軸に垂直方向、固定位置、時間依存の解析
- ⑥ TFYDIR 軸に垂直方向、固定時間、位置依存の解析
- ⑦ FUNCF 亀裂軸方向移流拡散方程式の積分形解析式の作成
- ⑧ FUNCX 軸に垂直方向岩体内移流拡散方程式の積分形解析式の作成

- ⑨ DERFC 補誤差関数の計算
- ⑩ SIMP2D 解析式の積分のための配列設定
- ⑪ QSF 解析式の数値積分

解析手順を以下に示す。

地下水水流動モデルで得られた流線を亀裂中の流れの主流路とし、流速によって定まる径をもつ流管が流線に沿って存在するものとすれば以下の手順で流管中の移行物質の濃度を計算することができる。

- ① 主流路の流れ方向に垂直な向きマトリックス拡散を導入した移流拡散方程式を不均質性をもつ亀裂状媒体の全ての局所的均一領域について地下水水流動モデルより得られた流速分布を考慮して解き、各流管中の移行物質の濃度分布を求める。
- ② 全ての局所的均一領域について流管中の濃度分布の総和をとることにより、流れ方向の任意の位置における移行物質の濃度の経時変化を得る。流出孔位置について解析から移行物質の破過曲線が求められる。
- ②' 亀裂状媒体が均一で流管中の流速が一定とみなせる場合、あるいは不均一場における流速分布を、平均値もしくは特定の区間の流速を代表値として採用することにより、局所的均一領域毎に濃度分布の総和を計算する手順を省略して簡易的に破過曲線を求めることができる。

物質移動計算では、流速分布計算より得られた流線と各均一毎の流速変化を考慮した流線上の物質ブロック毎の流速分布に基づいて、各均一ブロック境界における濃度の経時変化および流出孔位置における破過曲線を求める。このとき流管半径は流線上の流速の変化に対応できるように三乗則に従う値とする。ただし、流速分布が流線上では、平坦と見なせる場合には、各流線の流速を1点で代表させて簡略化した物質移動計算を行える。その場合、流管半径にも代表値が用いられる。

4. 入力データ

流速分布の解析に必要とされる入力データは以下のとおりである。入力形式は全てフリー フォーマットとなっている。

- ① QI : 流入流量 (ml/min)
- ② NA : 解析対象領域の分割数 (-)
- ③ AV(I) : 分割した均一ブロックの帶水層幅 (m)
- ④ RX(I) : 均一ブロックの境界 (m)
- ⑤ C, BETA, EPS : ダイポール間隔の半幅 (m), 揚水／注入流量比 (-), 空隙率 (-)
- ⑥ Y0, INTAL, INTVL, SMAX : 流線y座標初期値 (m), 流れ関数初期値 (-), 流れ関数刻み幅 (-), 流線本数 (-)

これらのうちダイポール間隔の半幅、空隙率は地質環境条件から実測値あるいは推定値に基づき設定される。注入流量、揚水／注入流量比は実験条件から定まる。分割した均一ブロック毎の帶水層幅は解析対象領域全体の帶水層幅の統計的手法による推定値、あるいは多項式フィッティングによる近似値により設定する。

分割数、均一ブロックの境界位置、流線Y座標初期値、流れ関数初期値、流れ関数刻み幅については計算上は任意に設定することができるパラメータである。

・使用上の注意点

- 1) 通常、流線がダイポール間を結ぶ直線に近いほど、流速が速く、破過曲線の形状に与える影響が大きいから、特別な解析条件でない限り流れ関数初期値は0にとるべきである。
- 2) 均一ブロック境界位置の入力に際してはダイポールの中間点を原点としてZ方向位置を指定することに注意する。

- 3) 分割数の決定に際しては、領域分割して求めた均一ブロック毎の流線を隣接した領域間で接続する場合の相互の流線位置のずれの大きさを目安にできる。
- 流線間のずれは流線が流入、流出孔から離れるにしたがって大きくなるため流速分布計算上考慮する流線網の最外側でのずれを対象とすることが望ましい。
- 4) 物質移動モデルでは流線を亀裂中の支配的な流れの流路としている。このため流入孔から流出孔への物質移動を解析する場合には流入孔近傍を通る流線のみを流路として扱えばよいものと考えられる。したがって流線網の範囲もこの条件を満たすように設定する。流線の本数に関しては任意に設定するものとする。
- 5) 流線座標解析が収束しない場合はエラーメッセージ “NOT SETTLED” が表示される。この場合は Y_0 の値（既定値は0.1）を変えて再度計算を行う。 Y_0 として与えるべき値は実験条件により異なるが、多くの場合ダイポール間距離の1%程度にとれば収束性に問題はないはずである。

物質移動解析モジュールでの解析に必要なデータは以下のものである。

- ① IOPT1, IOPT2, IOPT3 :計算オプションの選択.
- IOPT1 = 1; 時間を独立変数とした解析
 IOPT1 = 0; 位置を独立変数とした解析
 IOPT2 = 1; 亀裂中の濃度分布の解析
 IOPT2 = 0; マトリックス中の濃度分布の解析
 IOPT3 = 1; リニアスケール
 IOPT3 = 0; LOGスケール
- ② B :流管半径 (m)
- ③ DELTA, PA :浸透深さ設定のパラメータ. 既定値は0.01、10
- ④ AL :分散長 (m)
- ⑤ TH, RO :空隙率 (-)、マトリックス密度 (kg/m^3)

⑥ DM, DE	:分子拡散係数 (m ² /s)、有効拡散係数 (m ² /s)
⑦ KF, KM	:表面吸着係数 (m)、体積吸着係数 (m ³ /kg)
⑧ DC	:トレーサ崩壊定数 (1/s)
⑨ TL	:注入持続時間 (s)
⑩ ZF, ZFM, ZTO	:Z方向(亀裂方向)固定位置、始点、終点 (m)
⑪ YF, YFM, YTO	:Y方向(マトリックス方向)固定位置、始点、終点 (m)
⑫ TF, TFM, TTO	:固定時間、開始時間、終了時間 (s)

計算オプションの選択により以下の解析が可能である。

- 1) 亀裂中のトレーサ濃度の経時変化 (IOPT1 = 1, IOPT2 = 1, 評価位置固定)
- 2) マトリックス中のトレーサ濃度の経時変化 (IOPT1 = 1, IOPT2 = 0, 評価位置固定)
- 3) 亀裂中のトレーサ濃度の流れ方向の分布 (IOPT1 = 0, IOPT2 = 1, 時間固定)
- 4) マトリックス中のトレーサ濃度の流れ方向の分布 (IOPT1 = 0, IOPT2 = 0, 時間固定)

・使用上の注意点

現在のバージョンでは流速分布解析モジュールと接続して不均一な流れ場における破過曲線の解析を行う場合はIOPT1 = 1, IOPT2 = 1すなわち、時間依存、亀裂中の解析を選択する。これは流速分布解析モジュールで計算された各流管の長さをトレーサの移行距離として順次読み込み、物質移動解析を行っているためである。

流速分布計算モジュールにより流線網を作成し、各流管中の流速分布、あるいは平均流速、特定の均一ブロックにおける流速を代表流速として物質移動解析モジュールに与えることにより流管中の任意の位置における移動物質濃度の経時変化を解析する。現在のバージョンで

は流速分布解析モジュールと物質移動解析モジュールを接続して計算する場合は揚水孔にもつとも近い均一ブロック内の平均流速を代表流速として用いる。

各モジュールを独立に使用する場合は流速分布計算モジュールが計算する均一ブロック毎の流速を物質移動解析モジュールに入力し流速分布を考慮した解析を行うことができる。

この場合は流管径を流速分布に対応させるために、式(7)の三乗則により均一ブロック毎の流速に対応する流管半径(b)の値を求め、これを用いる。

$$\frac{Q \cdot k}{\varepsilon v} = \left(\frac{W}{L} \right) \left(\frac{\rho g}{12 \mu} \right) (2 b)^3 \quad (7)$$

ここで

W : 亀裂幅

L : 流管長さ

g : 重力加速度

m : 粘性係数

入力データの例を以下に示す。

入力サンプル

10
10
0.998E-02,1.04E-02,1.06E-02,1.08E-02,1.09E-02,1.09E-02,
1.08E-02,1.07E-02,1.04E-02,1.02E-02
-2.20,-1.76,-1.32,-0.88,-0.44,0.00,0.44,0.88,1.32,1.76,2.20
2.45,15.,0.1
0.1,0.,50,10
1 1 1
2.4e-4
0.01 10
0.008
0.1 2670
1.5e-9 1.5e-10
0. 0.
1.551e-10
2100
4.4 1.0e-9 1.0e1
0.0 1.0e-9 1.0e0
0.0 1.0E-5 7.2e4
100 100
2.
1.0

5. 出力結果の例

出力される情報は以下のものである。

A. 流速分布解析モジュールと物質移動解析モジュールを接続して破過曲線を解析する場合

流速分布解析モジュールと物質移動解析モジュールを接続して流速、流管径の代表値により破過曲線を解析した場合の出力は次のようになる。

① 流線網

流れ関数値

流線上の点のx, y座標 (m)

② 均一ブロック中の平均流速 (m/s)

③ 流管長さ (m)

④ 揚水孔位置における時間対濃度 (s, arbitrary)

出力サンプル

QI,C,BETA,EPS	10.00000	2.450000	15.00000	0.1000000	
Y0,INTAL,INTVL,SMAX	0.1000000	0.0000000E+00	50.00000		10
A VALUES	9.9799996E-03	1.0400000E-02	1.0600000E-02	1.0800000E-02	
	1.0900000E-02	1.0900000E-02	1.0800000E-02	1.0700000E-02	1.0400000E-02
	1.0200000E-02				
RX VALUES	-2.200000,	-1.760000,	-1.320000,	-0.8800000	
	-0.4400000,	0.0000000E+00,	0.4400000,	0.8800000,	1.320000
	1.760000,	2.200000			

Z	Y	V	[流管内z方向位置、y方向位置、流速]
---	---	---	---------------------

AQUIFER WIDTH	9.9799996E-03	[均一ブロック帶水層幅]
0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.9205456E-04
4.3999910E-02	0.0000000E+00	1.7696242E-04
8.8000059E-02	0.0000000E+00	1.6602856E-04
0.1320000	0.0000000E+00	1.5782213E-04
0.1760001	0.0000000E+00	1.5150344E-04
0.2200000	0.0000000E+00	1.4654757E-04
0.2640001	0.0000000E+00	1.4260947E-04
0.3080001	0.0000000E+00	1.3945310E-04
0.3520000	0.0000000E+00	1.3691167E-04
0.3960000	0.0000000E+00	1.3486389E-04
0.4400001	0.0000000E+00	1.3321973E-04
AVERAGE V	1.5254332E-04	[ブロック内平均流速]

AQUIFER WIDTH	1.0400000E-02	
0.4400001	0.0000000E+00	1.2783970E-04
0.4840001	0.0000000E+00	1.2658362E-04
0.5280000	0.0000000E+00	1.2559866E-04
0.5720000	0.0000000E+00	1.2484528E-04
0.6160001	0.0000000E+00	1.2429206E-04
0.6600000	0.0000000E+00	1.2391382E-04
0.7040000	0.0000000E+00	1.2369030E-04
0.7480000	0.0000000E+00	1.2360488E-04
0.7919999	0.0000000E+00	1.2364394E-04
0.8360000	0.0000000E+00	1.2379624E-04

0.8800000 0.0000000E+00 1.2405247E-04

AVERAGE V 1.2471463E-04

AQUIFER WIDTH 1.0600000E-02

0.8800000 0.0000000E+00 1.2171188E-04

0.9240000 0.0000000E+00 1.2205766E-04

0.9680001 0.0000000E+00 1.2249153E-04

1.012000 0.0000000E+00 1.2300820E-04

1.056000 0.0000000E+00 1.2360333E-04

1.100000 0.0000000E+00 1.2427331E-04

1.144000 0.0000000E+00 1.2501521E-04

1.188000 0.0000000E+00 1.2582664E-04

1.232000 0.0000000E+00 1.2670572E-04

1.276000 0.0000000E+00 1.2765103E-04

1.320000 0.0000000E+00 1.2866143E-04

AVERAGE V 1.2463691E-04

AQUIFER WIDTH 1.0800000E-02

1.320000 0.0000000E+00 1.2627878E-04

1.364000 0.0000000E+00 1.2733375E-04

1.408000 0.0000000E+00 1.2845153E-04

1.452000 0.0000000E+00 1.2963206E-04

1.496000 0.0000000E+00 1.3087555E-04

1.540000 0.0000000E+00 1.3218234E-04

1.584000 0.0000000E+00 1.3355319E-04

1.628000 0.0000000E+00 1.3498896E-04

1.672000 0.0000000E+00 1.3649078E-04

1.716000 0.0000000E+00 1.3806006E-04

1.760000 0.0000000E+00 1.3969833E-04

AVERAGE V 1.3250414E-04

AQUIFER WIDTH 1.0900000E-02

1.760000 0.0000000E+00 1.3841670E-04

1.804000 0.0000000E+00 1.4011013E-04

1.848000 0.0000000E+00 1.4187576E-04

1.892000 0.0000000E+00 1.4371586E-04

1.936000 0.0000000E+00 1.4563295E-04

1.980000 0.0000000E+00 1.4762978E-04

2.024000 0.0000000E+00 1.4970938E-04

2.068000	0.0000000E+00	1.5187508E-04
2.112000	0.0000000E+00	1.5413051E-04
2.156000	0.0000000E+00	1.5647954E-04
2.200000	0.0000000E+00	1.5892647E-04
AVERAGE V	1.4804566E-04	

AQUIFER WIDTH	1.0900000E-02	
2.200000	0.0000000E+00	1.5892647E-04
2.244000	0.0000000E+00	1.6147598E-04
2.288000	0.0000000E+00	1.6413306E-04
2.332000	0.0000000E+00	1.6690319E-04
2.376000	0.0000000E+00	1.6979236E-04
2.420000	0.0000000E+00	1.7280696E-04
2.464000	0.0000000E+00	1.7595400E-04
2.508000	0.0000000E+00	1.7924115E-04
2.552000	0.0000000E+00	1.8267664E-04
2.596000	0.0000000E+00	1.8626954E-04
2.640000	0.0000000E+00	1.9002971E-04
AVERAGE V	1.7347356E-04	

AQUIFER WIDTH	1.0800000E-02	
2.640000	0.0000000E+00	1.9178922E-04
2.684000	0.0000000E+00	1.9576392E-04
2.728000	0.0000000E+00	1.9993016E-04
2.772000	0.0000000E+00	2.0430106E-04
2.816000	0.0000000E+00	2.0889087E-04
2.860000	0.0000000E+00	2.1371539E-04
2.904000	0.0000000E+00	2.1879192E-04
2.948000	0.0000000E+00	2.2413967E-04
2.992000	0.0000000E+00	2.2977982E-04
3.036000	0.0000000E+00	2.3573601E-04
3.080000	0.0000000E+00	2.4203437E-04
AVERAGE V	2.1498841E-04	

AQUIFER WIDTH	1.0700000E-02	
3.080000	0.0000000E+00	2.4429636E-04
3.124000	0.0000000E+00	2.5102857E-04
3.168000	0.0000000E+00	2.5816876E-04
3.212000	0.0000000E+00	2.6575415E-04

3.256000	0.0000000E+00	2.7382644E-04
3.300000	0.0000000E+00	2.8243309E-04
3.344000	0.0000000E+00	2.9162766E-04
3.388000	0.0000000E+00	3.0147150E-04
3.432000	0.0000000E+00	3.1203445E-04
3.476000	0.0000000E+00	3.2339722E-04
3.520000	0.0000000E+00	3.3565302E-04
AVERAGE V	2.8542650E-04	

AQUIFER WIDTH	1.0400000E-02	
3.520000	0.0000000E+00	3.4533531E-04
3.564000	0.0000000E+00	3.5897462E-04
3.608000	0.0000000E+00	3.7377418E-04
3.652000	0.0000000E+00	3.8988719E-04
3.696000	0.0000000E+00	4.0749504E-04
3.740000	0.0000000E+00	4.2681428E-04
3.784000	0.0000000E+00	4.4810551E-04
3.828000	0.0000000E+00	4.7168502E-04
3.872000	0.0000000E+00	4.9794087E-04
3.916000	0.0000000E+00	5.2735378E-04
3.960000	0.0000000E+00	5.6052784E-04
AVERAGE V	4.3708124E-04	

AQUIFER WIDTH	1.0200000E-02	
3.960000	0.0000000E+00	5.7151861E-04
4.004000	0.0000000E+00	6.0996093E-04
4.048000	0.0000000E+00	6.5403344E-04
4.092000	0.0000000E+00	7.0506765E-04
4.136000	0.0000000E+00	7.6485059E-04
4.180000	0.0000000E+00	8.3583978E-04
4.224000	0.0000000E+00	9.2150702E-04
4.268000	0.0000000E+00	1.0269227E-03
4.312000	0.0000000E+00	1.1598000E-03
4.356000	0.0000000E+00	1.3324685E-03
4.400000	0.0000000E+00	1.5659352E-03
AVERAGE V	9.2253683E-04	

STREAM FUNC VALUE 0.0000000E+00
 No. of A, A VALUE 10 1.0200000E-02
 AVERAGE V FOR A 9.2253683E-04
 TUBE LENGTH 4.40000095367432
 IOPT1,IOPT2,IOPT3 1 1 1
 B 2.400000000000000E-04
 DELTA,PA 1.000000000000000E-02 10.0000000000000
 (V GIVEN BY VP),AL 9.2253682669252157E-04 7.99999999999999E-03
 TH,RO 0.100000000000000 2670.00000000000
 DM,DE 1.500000000000000E-09 1.500000000000000E-10
 KF,KM 0.000000000000000E+00 0.000000000000000E+00
 DC 1.551000000000000E-10
 TL 2100.00000000000
 ZF,ZFM,ZTO 4.40000095367432 1.000000000000000E-09
 10.0000000000000
 YF,YFM,YTO 0.000000000000000E+00 1.000000000000000E-09
 1.000000000000000
 TF,TFM,TTO 0.000000000000000E+00 1.000000000000000E-05
 72000.0000000000
 NOI,NG 100 100
 GAM 2.000000000000000
 C0 1.000000000000000

 TUBE LENGTH,V 4.40000095367432 9.2253683E-04 [流管長さ、流管内代表流速]

 TIME(S) C/C0 [トレーサ注入後の経過時間、相対濃度]
 7.2000E+02 0.0000E+00
 1.4400E+03 0.0000E+00
 2.1600E+03 0.0000E+00
 2.8800E+03 2.1900E-19
 3.6000E+03 6.5234E-08
 4.3200E+03 4.3393E-04
 5.0400E+03 5.8871E-04
 5.7600E+03 5.6876E-01
 6.4800E+03 6.6955E-01
 7.2000E+03 7.2076E-01
 7.9200E+03 1.7273E-01
 8.6400E+03 1.0164E-01
 9.3600E+03 6.9998E-02
 1.0080E+04 5.2241E-02
 1.0800E+04 4.1006E-02
 1.1520E+04 3.3336E-02
 1.2240E+04 2.7811E-02
 1.2960E+04 2.3672E-02
 1.3680E+04 2.0472E-02
 1.4400E+04 1.7938E-02

1.5120E+04	1.5888E-02
1.5840E+04	1.4203E-02
1.6560E+04	1.2797E-02
1.7280E+04	1.1609E-02
1.8000E+04	1.0595E-02
1.8720E+04	9.7205E-03
1.9440E+04	8.9604E-03
2.0160E+04	8.2946E-03
2.0880E+04	7.7075E-03
2.1600E+04	7.1867E-03
2.2320E+04	6.7220E-03
2.3040E+04	6.3055E-03
2.3760E+04	5.9303E-03
2.4480E+04	5.5909E-03
2.5200E+04	5.2827E-03
2.5920E+04	5.0019E-03
2.6640E+04	4.7451E-03
2.7360E+04	4.5096E-03
2.8080E+04	4.2930E-03
2.8800E+04	4.0932E-03
2.9520E+04	3.9084E-03
3.0240E+04	3.7371E-03
3.0960E+04	3.5780E-03
3.1680E+04	3.4299E-03
3.2400E+04	3.2917E-03
3.3120E+04	3.1626E-03
3.3840E+04	3.0417E-03
3.4560E+04	2.9283E-03
3.5280E+04	2.8218E-03
3.6000E+04	2.7216E-03
3.6720E+04	2.6272E-03
3.7440E+04	2.5381E-03
3.8160E+04	2.4540E-03
3.8880E+04	2.3744E-03
3.9600E+04	2.2990E-03
4.0320E+04	2.2275E-03
4.1040E+04	2.1597E-03
4.1760E+04	2.0952E-03
4.2480E+04	2.0339E-03
4.3200E+04	1.9755E-03
4.3920E+04	1.9198E-03
4.4640E+04	1.8668E-03
4.5360E+04	1.8161E-03
4.6080E+04	1.7677E-03
4.6800E+04	1.7213E-03
4.7520E+04	1.6770E-03
4.8240E+04	1.6346E-03
4.8960E+04	1.5939E-03
4.9680E+04	1.5549E-03
5.0400E+04	1.5174E-03
5.1120E+04	1.4814E-03
5.1840E+04	1.4468E-03
5.2560E+04	1.4136E-03
5.3280E+04	1.3816E-03
5.4000E+04	1.3508E-03
5.4720E+04	1.3211E-03
5.5440E+04	1.2925E-03
5.6160E+04	1.2649E-03

5.6880E+04	1.2382E-03
5.7600E+04	1.2125E-03
5.8320E+04	1.1877E-03
5.9040E+04	1.1637E-03
5.9760E+04	1.1405E-03
6.0480E+04	1.1181E-03
6.1200E+04	1.0964E-03
6.1920E+04	1.0754E-03
6.2640E+04	1.0550E-03
6.3360E+04	1.0353E-03
6.4080E+04	1.0162E-03
6.4800E+04	9.9767E-04
6.5520E+04	9.7970E-04
6.6240E+04	9.6226E-04
6.6960E+04	9.4533E-04
6.7680E+04	9.2890E-04
6.8400E+04	9.1293E-04
6.9120E+04	8.9742E-04
6.9840E+04	8.8234E-04
7.0560E+04	8.6767E-04
7.1280E+04	8.5341E-04
7.2000E+04	8.3954E-04

6. 使用上の注意事項

- 1) 本解析コードはDEC製VAX STATION上で開発されたが、コードのコンパイル、リンクにおいては通常のFORTRANコンパイラが準備している関数ライブラリ以外には特別の関数ライブラリ、サブルーチンライブラリは必要としない。
- 2) 計算結果は外部ファイルに出力される。本コードは結果を流線網図や破過曲線として表現する機能は有していない。出力結果のグラフ化には別にグラフ作成ツールを必要とする。
- 3) 計算処理に要する時間は流線本数と解析対象領域の分割数にほぼ比例し、積分点数、刻み数等にも依存するが、流線本数10本、領域分割数10で計算した場合はVAX STATION 3100を用いて数分～十分のオーダーである。