

JAERI - M
89-156

人工バリアとしての土壤充填材中における
水分移動および放射性核種移動の解析

1989年10月

下岡 謙司

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division,
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

人工バリアとしての土壤充填材中における
水分移動および放射性核種移動の解析

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部
下岡 謙司

(1989年9月26日受理)

原子力発電所から発生する低レベル放射性廃棄物の最終貯蔵・処分の安全性を評価するためには、人工バリアならびに天然バリアの一つとして考えられる土壤中（通気層および帶水層中）での水の移動と放射性核種の移動状況を把握することが重要である。

この土壤の持つ放射性核種閉じ込め性能を確認する試験を、「人工バリアの安全性実証試験」の一環としてコンクリートピット中で実施した。一つは土壤充填材の表面に放射性水溶液を散布したピットB-1における試験であり、もう一つは、土壤充填材中に放射性廃棄物模擬セメント固化体を埋設したピットB-2における試験である。これらのピットには、降雨量相当の水が2年間にわたって散布された。これらの試験結果に基づき、人工バリア安全性実証試験装置（ピットB-1, B-2）中に充填された土壤中における水分移動、核種移動の解析を実施した。

本報告書は、この実証試験に基づく土壤充填材中の水分移動・核種移動の解析手法ならびにその解析結果について述べたものであり、オイラー・ラグランジェ手法が土壤充填材中の¹³⁷Cs,⁹⁰Sr および⁶⁰Co の移行シミュレーションに有効な方法であることを確認したものである。

本報告は、電源開発促進対策特別会計法に基づき、科学技術庁からの受託によって行われた研究成果の一部である。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根2-4

Analysis of water movement and radionuclide migration
in the backfill soil as an engineered barrier

Kenji SHIMOOKA

Department of Environmental Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 26, 1989)

It is important to understand the movement behavior of water and radionuclide migration through soil formation (saturated and unsaturated zone) which is expected as one of the engineered barriers and also natural barrier, for the safety evaluation of final storage and disposal of Low Level Radioactive wastes come from nuclear power plants.

The barrier performance tests of the soil were carried out in concrete pits as a part of "Safety demonstration test of engineered barrier system". One of the tests was carried out in the concrete pit B-1 by suppling radioactive solution on the surface of the backfill soil, the other was in the pit B-2 in which the simulated solidified wastes were burried in the backfill soil. A water, equivalent amount of rainfall was sprinkled for two years over the backfill soil in the concrete pits.

Based on the experimental results, water movement and radionuclide migration through backfill soil were analysed. Method of the analysis and the analyzed results as well as the experimental results were described in the report. Euler-Lagrange method described in the

The work was performed under contract with Atomic Energy Bureau of Science and Technology Agency of Japan.

report was confirmed to be effective simulation method for the migration of ^{137}Cs , ^{90}Sr and ^{60}Co through the backfill soil.

Keywords: Radionuclide Migration, Backfill Soil, Engineered Barrier, Saturated and Unsaturated Zone, Concrete Pit, Low Level Radioactive Waste

目 次

1.はじめに	1
2.解析手法	3
2.1 浸透流解析手法	3
2.2 核種の移流拡散解析手法	3
3.カラム試験	7
3.1 カラム試験の概要	7
3.2 解析手順	7
3.3 浸透流解析	7
3.4 核種移行解析	8
4.安全性実証試験(ピットB-1)の解析	30
4.1 試験概要	30
4.2 浸透流解析	30
4.3 核種移行解析	31
5.安全性実証試験(ピットB-2)の解析	41
5.1 試験概要	41
5.2 浸透流解析	41
5.3 核種移行解析	42
5.4 長期にわたる放射性核種濃度分布の推定	43
6.まとめ	61
謝辞	61
参考文献	61

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis method	3
2.1 Analysis method for seepage flow	3
2.2 Analysis method for radionuclide migration	3
3. Column experiment	7
3.1 Outline of the column experiment	7
3.2 Flow of analysis	7
3.3 Analysis of the seepage flow	7
3.4 Analysis of the radionuclide migration	8
4. Analysis of the safety demonstration test (pit B-1)	30
4.1 Outline of the test	30
4.2 Analysis of the seepage flow	30
4.3 Analysis of the radionuclide migration	31
5. Analysis of the safety demonstration test (pit B-2)	41
5.1 Outline of the test	41
5.2 Analysis of the seepage flow	41
5.3 Analysis of the radionuclide migration	42
5.4 Estimation of the radionuclide distribution extend over long term	43
6. Conclusion	61
Acknowledgements	61
References	61

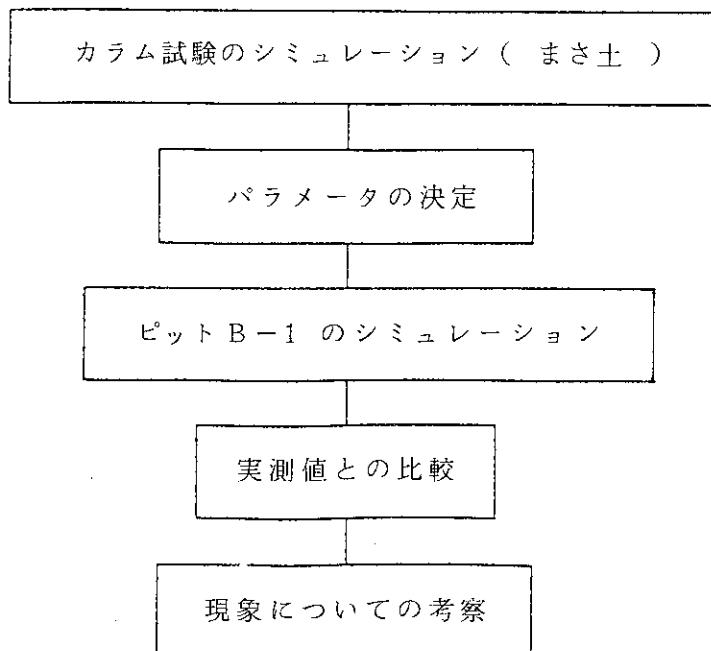
1. はじめに

低レベル放射性廃棄物陸地処分安全性実証試験のうち人工バリア安全性実証試験では、土質材料（まさ土および砂丘砂と火山灰土の混合土の2種類）の充填材のバリア性能を調べるために、充填材の表面に放射性核種水溶液 (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{90}Sr) を散布したピットB-1および放射性核種 (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{90}Sr) を含む模擬セメント固化体を充填材中に埋設したピットB-2において、約2年間その上部から定期的に散水し、充填材中の水分ポテンシャル、流出水量の経時変化の測定および流出水中の放射性核種濃度の測定を行った。試験開始から約2年後、試験装置を解体して充填材内部の放射性核種濃度分布の測定を行った。本解析は、以上のような一連の安全性実証試験のシミュレーションを行うことにより、放射性核種の充填材中の移行過程について考察を行い、将来の濃度分布について検討することを目的とする。

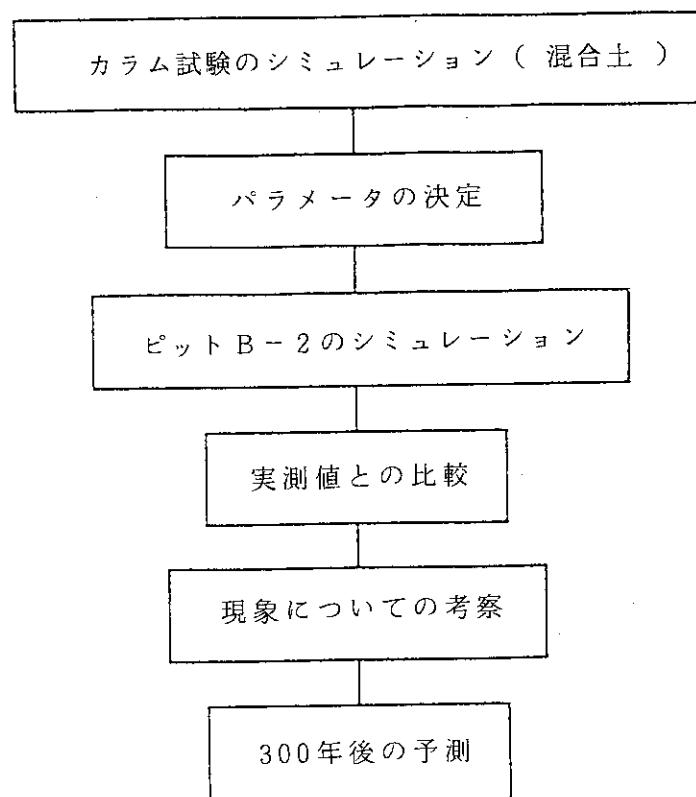
本解析はまず、実証試験で充填材として用いた土質材料と同じ土に対して行ったカラム試験の有限要素法を用いた解析により放射性核種濃度の実測値との比較を行い、ピットB-1およびB-2の解析のパラメータ（遅延係数）を決定する。カラム試験結果では既に解析解を用いてその充填材に対する3核種の遅延係数、分散係数が同定されているが、解析解を得るためにいくつかの仮定（初期の吸着深さ = 0.1 cm, 流速が一定など）が用いられている。従って、今回の有限要素解析では、試験過程の忠実なシミュレーションにより、実測に矛盾しないようなパラメータの同定を行う。

以上のようにして求められたパラメータを用いて、ピットB-1およびB-2の解析を次に行う。ピットB-1およびB-2の不飽和浸透特性については、試験装置の解体時に採取した未搅乱試料を用いて別途試験した結果を採用した。ピットB-1およびB-2についての解析手順を以下の(1)および(2)にそれぞれ示す。

(1) ピットB-1の解析



(2) ピットB-2の解析



2. 解析手法

2.1 浸透流解析手法

(1) 支配方程式と解法

浸透流解析には、THAMES（応力－浸透－熱移動連成解析コード）¹⁾の飽和－不飽和浸透流解析機能を用いて行った。飽和－不飽和浸透流を支配する基本方程式は(1)式である。

$$\{S_s + C(\psi)\} \frac{\partial h}{\partial t} = \operatorname{div} K_{ij} \nabla h \quad (1)$$

ここで、 S_s は比貯留量、 $C(\psi)$ は比水分容量、 h は全水頭、 K_{ij} は透水係数テンソルである。

不飽和部では、透水係数テンソルに比透水係数（＝不飽和透水係数／飽和透水係数）を乗じることにより、不飽和部での透水性の低下を表す。比透水係数は図1の様な不飽和透水係数によりその時点における水圧から決定される。比水分容量も同図より求められ、不飽和領域において値を有し、不飽和部での地下水の保水能力を表現している。以上のように、本手法は飽和部と不飽和部を同時に扱うことができ、自由水面は圧力水頭がゼロの点を結ぶことにより評価される。

この手法は、1970年にNeuman²⁾によって提案されたもので、わが国において多くの実績を持っている。この支配方程式を適当な境界条件のもとで、有限要素法を用いて解く。THAMESでは浸透流解析については、線形の四角形要素を用いる。解析は、透水係数、比水分容量が水圧の関数であるため問題が非線形となるので、解が収束するまで繰り返し計算を行う。

(2) 検証例題

本手法の有効性を確認するために、赤井・宇野³⁾が行った砂箱を用いた浸透実験をシミュレートし、実測値との比較を行った。その結果を図2に示す。同図によると数値解は実験結果とよく一致しており、本手法は現象をよく再現できることがわかる。

2.2 核種の移流拡散解析手法

(1) 支配方程式と解法

核種の移行解析には、オイラー・ラグランジェ手法を用いたACTELM⁴⁾を採用した。

放射性核種の移流拡散過程を表す支配方程式を以下に示す。

$$\phi R_f \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\phi D \nabla C - v C) + \sum_{m=1}^M \xi_m \lambda_m C_m - \phi R_f \lambda C + q \quad (2)$$

ここで、 C は核種の水中濃度、 D ($L^2 T^{-1}$) は水力学的分散係数テンソル、 v ($L T^{-1}$) はダルシー流速、 ϕ は有効空隙率、 λ (T^{-1}) は核種の崩壊定数、 R_f は核種の遅延定数、 ξ_m

は親核種mから娘核種への壊変率、Mはその親核種の数であり、 $q (ML^{-3}T^{-1})$ は核物質の湧き出し項である。

式(2)の初期・境界条件は次のようになる。

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= C^0(x) \\ -\phi D \nabla C + v C + \alpha (C - C') &= Q' \end{aligned}$$

ここで、 $C^0(x)$ 、 C' 、 Q' は既知量である。

α は $\alpha \rightarrow \infty$ とすると既知濃度境界条件となり、 $\alpha = 0$ とすると既知流量境界条件となる。

上記の方程式は、流速の速い場あるいは分散係数が小さい地盤の解析に用いる際には数値振動が起り、良い解が得られない⁵⁾。

このような数値振動を回避するための手法として上流法を用いた有限要素解法があるが、この手法も上流への重みの掛け方により精度がかなり異なってくるという欠点を持っており、また、高いペクレ数の時には正解が求められない。本解析では、このような広範囲にわたるペクレ数に対しても常に安定した解を求めることができるオイラー・ラグランジエ手法を採用した。

この方法では、まず媒体となる地下水に乗って移動する物質の濃度変化をラグランジエ的に求める。次にその変化した濃度分布から、固定座標で表された有限要素メッシュの節点における移流による変化分を補間によって求め、その後オイラー的に拡散による濃度変化を計算する(図3参照)。

また、移流拡散の解析には有限要素法を用いる。

本手法の概念は1981年に Neuman⁶⁾によって提唱されたもので、ACTELMはこれを2次元に拡張したコードである。

(2) 検証例題

以上の手法を用いて1次元問題を計算した例を示す。

解析モデルは、拡散現象が支配的なものと移流現象が支配的なものの2つである。

支配方程式、初期・境界条件は次のようである。

$$\phi \frac{\partial C}{\partial t} = \phi D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

$$C(x, 0) = 0$$

$$C(0, t) = 1$$

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

$$\text{解析解: } C(x, t) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt/\phi}{2\sqrt{Dt}} \right) + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{vx}{\phi D} \right)$$

$$\operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt/\phi}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (4)$$

拡散挙動が支配的なケースの条件は $D = 0.01$, $v = 0.05$, $\phi, R_f = 1$ であり, 解析では, 長さ $\ell = 2.5$, $\Delta x = 0.05$, $\Delta t = 0.5$ として行った。この場合のペクレ数は, $p_e (= v \ell / D) = 12.5$, クーラン数 $C_u (= \Delta t \cdot v / \Delta x) = 0.5$ である。図 4 に計算結果と解析解との比較を示す。これによると, 極めてよい一致が得られている。

移流現象が支配的なケースの条件は, $D = 1.0$, $v = 10^4$ であり, 解析では長さ 1.0 , $\Delta x = 0.02$, $\Delta t = 5 \times 10^{-6}$ と $\Delta t = 1.66 \times 10^{-6}$ として行った。この場合, $p_e = 10^4$, $C_u = 2.5$ と $C_u = 5.8$ である。図 5 に計算結果と解析解の比較を示す。これによると, Δt が大きい, すなわちクーラン数の大きいケースの方が解析解と良い一致を示している。ここでは, 移流計算のメッシュと拡散解析のメッシュは同一のものを用いているが, 拡散解析のメッシュを細かくすることによっても, 精度の高い解が求められる。

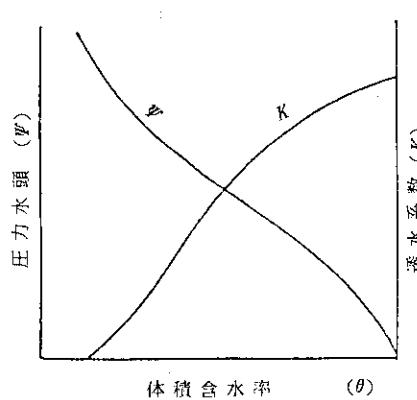


図 1 飽和-不飽和関数
概念図

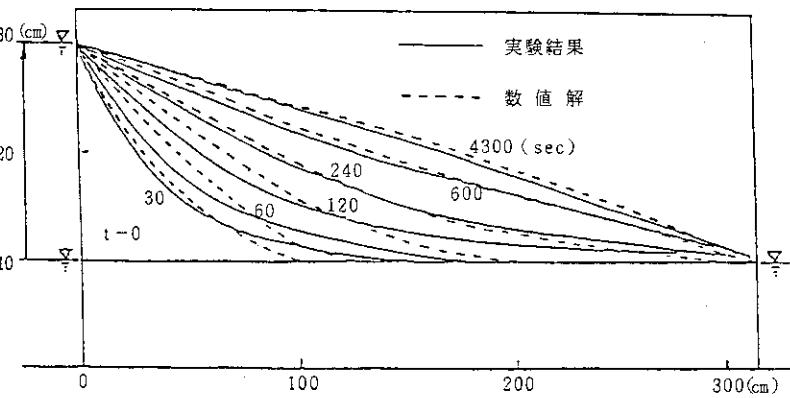


図 2 飽和-不飽和浸透流解析の
実験結果と計算結果の比較

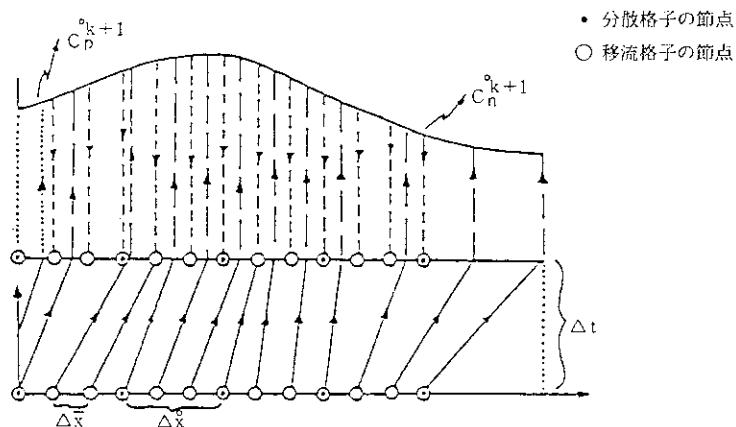


図 3 オイラー・ラグランジェ手法の概念図

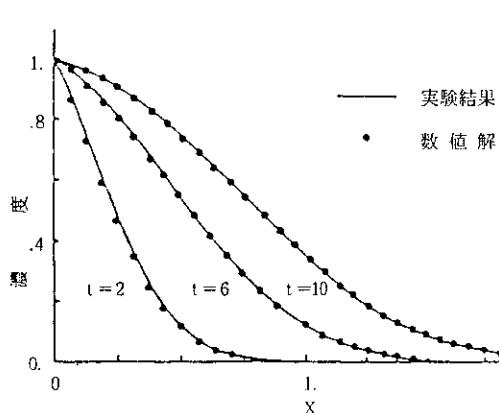


図 4 ペクレ数が小さい場合の
理論解と計算値との比較

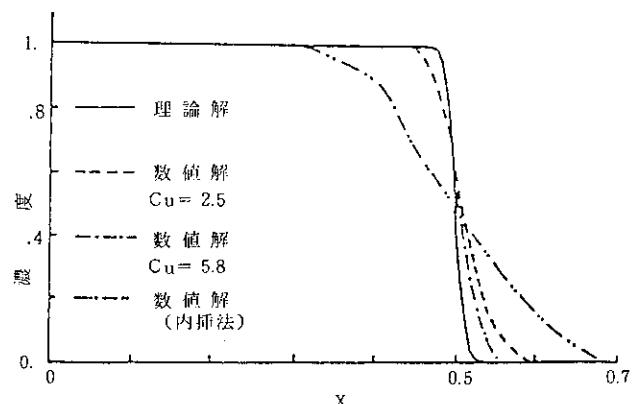


図 5 ペクレ数が大きい場合の
理論解と計算値の比較

3. カラム試験

3.1 カラム試験の概要

カラム試験は、充填材供試体（カラム内径；10 cm, 16.2 cm, 20.0 cm, 土質種類；まさ土, 混合土）を水で飽和させた後、所定の上下流水位を設定して通水を開始し、流速、圧力状態が安定するのを待つ。流れが安定になった後、一旦給水を停止し、供試体上面の水を排水する。次にR I投入口から放射性水溶液（約100 mLリットル, 0.1 N HCl溶液）を投入し、供試体中の放射性水溶液がすべて浸透し終わったことを確認した後、イオン交換水の通水を再開する。投入した放射性核種の量は⁶⁰Co; 14.1 ~ 15.6 μCi, ¹³⁷Cs; 6.0 ~ 16.8 μCi, ⁹⁰Sr; 1.09 ~ 1.36 μCiである。

放射性水溶液投入から所定の期間通水を行った後、供試体を厚さ10~20 mmごとに分割・採取し、各分割試料中に含まれる放射性核種量を測定する。

表1にカラム試験概要を示す。

3.2 解析手順

全体の解析手順を図6に示す。

同図の手順によって求められた値を、非吸着性の物質について得られている間隙流速～分散係数関係にプロットし、同関係が吸着性の核種に対しても妥当であるかチェックする。

3.3 浸透流解析

(1) 解析方法

以上の試験では、放射性水溶液の投入およびその後のイオン交換水の通水過程における充填材供試体中での水の流れは定常とは言い難く、その流速の把握が核種移行解析の前に必要である。本カラム試験の解析では放射性水溶液投入直前までは浸透流は定常であったと仮定し、この溶液投入開始時からの浸透過程を再現することにより、まず供試体内の非定常な流速分布の把握を行う。次に、その見かけの流速を用いて核種移行解析を行う。

解析の手順を図7に示す。

(2) 解析条件

a) 解析モデル

解析は1次元非定常解析を行う。解析に用いたメッシュ図のうち、カラム長10.2 cmの場合を図8に示す。

b) 初期条件および境界条件

本解析では下端の水位を充填材がまさ土の場合は供試体の中央部に設定し、混合土の場合

は供試体下端より下方部に設定した。上端の水位は、供試体上端から、流入して貯った水面までの高さを h とし、放射性水溶液の浸潤過程を次のように求める。

まず水位低下量を

$$\Delta h = v \times \Delta t$$

で求める。ここで、 v は上端からの浸潤流速である。次の時間ステップにおける上端面に貯った投入水溶液の高さを

$$h_{t+\Delta t} = h_t - \Delta h$$

として求める。このように境界条件を経時変化させ、 $h = 0$ になった次の時間ステップからは、マリオットタンクの設定高さである $h = 4 \text{ cm}$ に固定し、イオン交換水の通水過程のシミュレーションを行った（図9参照）。

初期状態は、上端の水位が供試体上端面にあるものとし、下端は供試体中央部の高さに水位があるとしてその間を線形補間して求めた。

c) 入力パラメータ

最終的な流速分布の算定に用いた入力パラメータを表2に示す。

カラム試験に用いた不飽和透水関数は図10のように与えた。

(3) 解析結果

以上の浸透流解析結果の妥当性を確認するため、実測の浸入流量と解析時の浸入流量の比較を行った。図11、12に比較図を示す。解析結果と試験結果は傾向は若干異なるが、その流量は大体一致した値を示したので、この解析結果より求められた流速分布を次の移流拡散解析のデータとして用いた。この傾向の違いは、通水による土粒子の再配列による目詰まり現象、あるいは浸透溶液中の溶存空気の土中間隙への溶出による飽和度の低下などが考えられる。すなわち、試験期間中に透水性が低下したためと思われるが、そのメカニズムを解析に反映させることは現時点では困難であるので、平均的な流出量が一致したことで、本解析は妥当であると判断した。

3.4 核種移行解析

(1) 解析方法

浸透流解析結果より得られた流速分布を用いて移流拡散解析を行う。

図13に移流拡散解析の手順を示す。

(2) 解析条件

a) 解析モデル

解析は1次元非定常計算で行う。解析に用いたメッシュ図を図14に示す。

ここで、まさ土の ^{137}Cs 、混合土の $^{60}\text{Co} + ^{137}\text{Cs}$ の解析に細かいメッシュを用いているのは、遅延係数が大きいために遅延を考慮したクーラン数 $\{ = (\Delta t \cdot v) / (\Delta x \cdot R_f \cdot \phi) \}$ が小さくなるので、精度を高めるために Δx を小さくしたことによる。

b) 初期条件および境界条件

時間ステップ $0 \leq t < t^*$ (t^* はイオン交換水による通水開始時刻)においては, $Q = vC$ (v は上端からの浸透速度, C は投入放射性水溶液の濃度) というフラックス流入境界で放射性水溶液の浸入を表現し, $t \geq t^*$ においては放射性核種の流入をゼロとしてイオン交換水の流入による移流と拡散によって核種が移行する過程を再現する。流出境界では, 全過程において $Q = 0$ とした(図15参照)。

初期濃度分布は全領域でゼロとした。

c) 入力パラメータ

解析に用いた非定常な流速分布は, 事前に行った浸透流解析結果の値を用いた。遅延係数, 分散係数は次節に示す手法で検討した。

(3) 解析結果(遅延係数, 分散係数の同定)

a) 同定方法

カラム試験の移流拡散解析手順は, 遅延係数および分散係数を仮定し, 非定常1次元移流拡散解析を行い, 解析後, 放射性核種の解析濃度と実測濃度の比較を行う。この際, 分散係数の下限値は分子拡散係数 ($1.6 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$)とした。

試験結果は, 単位乾土重量当たりの放射能量 ($\mu\text{Ci/g}$) で与えられる。なお, この放射能量は, 土粒子に吸着した放射能量と間隙水中の放射能量を合わせた値となる。一方, 解析では水中放射能濃度が得られているため, その値に $R_f \theta$ (R_f ; 遅延係数, θ ; 体積含水率) を乗じ, さらに乾燥密度で除することにより, 単位乾土重量当たりの放射能量に換算し, 実測値と比較する。

同定法は, 図16の手順に従ってパラメータの推定を行った。なお, パラメータの推定には, 図16に示すとおり, 最低5回の解析を必要とする。まさ土および混合土のパラメータの値が決定した最終段階の計算値(単位体積当たりの放射能量)を測定範囲別に表3および4に示す。

b) パラメータ同定結果

前述の同定方法により決定したパラメータは, 表5のとおりである。

c) 実測濃度分布と計算値の比較

決定したパラメータを用いて求めたまさ土および混合土に対する計算値と実測値の比較を図17~22に示す。

d) 考察

図23は非吸着性の物質に対して求められた間隙流速~拡散係数の関係図 ($D = 1.6 \times 10^{-5} + 664 V^{1.8} \dots ①$) である。同図に今回の計算値をプロットするとほぼその関係を満足しており, 吸着性の核種の拡散係数も間隙流速の関数であることがわかる。

従って, ピットB-1およびB-2の解析時に使用する拡散係数については, 浸透流解析結果の間隙流速から①式によって与えることにした。

遅延係数については, カラム試験解析から同定された値を用いる。ただし, カラム長以外ほぼ同条件であるにもかかわらず, 得られた遅延係数にかなりの開きが生じている。この原因として充填材供試体内での間隙の存在の仕方や流れの様相が異なっていたことが予想されるが, これは, この様な試験の持つ精度のばらつきであると解釈して, 平均値を採用するこ

ととした。表6, 7にピットB-1およびB-2の解析に用いるパラメータの値を示す。

表1 カラム試験概要一覧表

No.	土質	使用核種	カラム長 (cm)	乾燥密度 (g/cm³)	間隙率	飽和度	通水期間 (day)	総投入核種量 (μ Ci)
1	まさ土	Co-60	10.2	1.388	0.497	0.92	7.76	15.6
2		Cs-137						16.8
3		Co-60	16.2	1.388	0.497	0.91	12.8	15.6
4		Cs-137						16.8
5		Sr-90	10.2	1.394	0.495	0.93	7.76	1.33
6		Sr-90	16.2	1.378	0.501	0.92	16.8	1.09
7	混合土	Co-60	10.2	1.229	0.553	0.96	18.0	15.0
8		Cs-137						6.9
9		Co-60	20.2	1.228	0.553	0.92	64.1	14.1
10		Cs-137						6.0
11		Sr-90	10.2	1.227	0.554	0.96	15.0	1.36

表2 カラム試験浸透流解析入力パラメータ

土 質	ま さ 土	混 合 土
間 隙 率	0.497	0.553
透 水 係 数	2×10^{-4} cm/sec	1×10^{-5} cm/sec

表3 まさ土のカラム試験の解析結果

(網掛け部が決定値、範囲の*印の位置の濃度分布と計算値を比較した。)

CASE	範囲 (cm)	実測値 ($\mu\text{Ci/g}$)	解析値 ($\mu\text{Ci/g}$)				
			Rf=155 D=1.91E-4	Rf=155 D=1.96E-4	Rf=155 D=1.86E-4	Rf=160 D=1.91E-4	Rf=150 D=1.91E-4
No.1 Co-60 カラム長=10.2 cm (まさ土)	*0~1	3.3E-2	3.4E-2	3.4E-2	3.4E-2	3.5E-2	3.2E-2
	*1~2	5.8E-2	6.1E-2	5.9E-2	6.3E-2	6.0E-2	6.2E-2
	*2~4	2.4E-2	2.8E-2	2.8E-2	2.8E-2	2.6E-2	3.0E-2
	*4~6	2.6E-3	2.7E-3	2.9E-3	2.5E-3	2.2E-3	3.2E-3
	6~8	2.7E-5	1.1E-4	1.3E-4	8.6E-5	7.9E-5	1.4E-4
	8~10	6.4E-7	3.5E-6	4.5E-6	2.7E-6	2.5E-6	5.0E-6
	e= $\sum (\ln C1 - \ln C2)^2$	0.032	0.040	0.034	0.034	0.112	
No.2 Cs-137 カラム長=10.2 cm (まさ土)	(cm)	($\mu\text{Ci/g}$)	Rf=1800 D=2.01E-4	Rf=1800 D=2.06E-4	Rf=1800 D=1.96E-4	Rf=1850 D=2.01E-4	Rf=1750 D=2.01E-4
	*0~1	1.5E-1	1.9E-1	1.9E-1	1.9E-1	1.9E-1	1.9E-1
	*1~2	1.8E-3	6.6E-3	7.9E-3	6.3E-3	6.4E-3	7.9E-3
	*2~4	2.5E-5	1.2E-5	1.6E-5	9.4E-6	1.1E-5	1.5E-5
	4~6	2.0E-6	1.6E-11	2.8E-11	9.4E-12	1.2E-11	2.4E-11
	6~8	7.3E-7	6.8E-16	1.4E-15	3.6E-16	4.5E-16	1.2E-16
	8~10	2.3E-7	1.2E-19	2.5E-19	5.5E-20	7.2E-20	2.0E-19
	e= $\sum (\ln C1 - \ln C2)^2$	2.266	2.466	2.586	2.376	2.566	
No.3 Co-60 カラム長=16.2 cm (まさ土)	(cm)	($\mu\text{Ci/g}$)	Rf=235 D=1.21E-4	Rf=235 D=1.26E-4	Rf=235 D=1.16E-4	Rf=240 D=1.21E-4	Rf=230 D=1.21E-4
	*0~1	3.8E-2	4.0E-2	4.0E-2	4.0E-2	4.3E-2	3.9E-2
	*1~2	5.8E-2	6.6E-2	6.4E-2	6.8E-2	6.6E-2	6.6E-2
	*2~4	1.9E-2	2.2E-2	2.2E-2	2.1E-2	2.1E-2	2.2E-2
	*4~6	8.9E-4	9.4E-4	1.1E-3	7.9E-4	7.9E-4	1.0E-3
	6~8	1.8E-6	1.4E-5	2.1E-5	1.0E-5	1.2E-5	1.8E-5
	8~10	1.2E-7	2.4E-7	3.7E-7	1.4E-7	1.9E-7	3.0E-7
	10~12	1.0E-7	2.9E-9	5.3E-9	1.4E-9	2.2E-9	3.8E-9
	12~14	6.9E-8	3.0E-11	6.3E-11	1.3E-11	2.2E-11	4.0E-11
	14~16	7.9E-8	2.7E-13	6.6E-13	1.0E-13	1.9E-13	3.9E-13
	e= $\sum (\ln C1 - \ln C2)^2$	0.045	0.082	0.048	0.048	0.048	0.069

表3 (続き)

CASE	範囲 (cm)	実測値 ($\mu\text{Ci/g}$)	解析値 ($\mu\text{Ci/g}$)				
			Rf=2500 D=4.02E-5	Rf=2500 D=4.52E-5	Rf=2500 D=3.52E-5	Rf=2550 D=4.02E-5	Rf=2450 D=4.02E-5
No.4 Cs-137 カラム長=16.2 cm (まさ土)	*0~1	1.2E-1	2.1E-1	2.1E-1	2.2E-1	2.1E-1	2.1E-1
	*1~2	1.4E-4	1.4E-4	3.6E-4	5.4E-5	1.0E-4	1.9E-4
	2~4	1.2E-5	1.7E-9	3.8E-9	3.6E-10	1.4E-9	2.7E-9
	4~6	6.7E-7	7.2E-19	2.7E-17	4.5E-21	6.6E-19	6.9E-18
	6~8	1.2E-7	6.5E-25	1.2E-23	1.1E-27	6.3E-26	5.6E-24
	8~16	検出限界下	—	—	—	—	—
	e=Σ (lnC1 - lnC2)²	0.293	1.230	1.183	0.383	0.388	
	(cm)	($\mu\text{Ci/g}$)	Rf=155 D=2.22E-4	Rf=155 D=2.27E-4	Rf=155 D=2.17E-4	Rf=160 D=2.22E-4	Rf=150 D=2.22E-4
No.5 Sr-90 カラム長=10.2 cm (まさ土)	*0~1	2.5E-3	2.8E-3	2.8E-3	2.8E-3	2.9E-3	2.7E-3
	*1~2	4.9E-3	4.9E-3	4.7E-3	4.9E-3	4.8E-3	4.9E-3
	*2~4	2.3E-3	2.4E-3	2.4E-3	2.4E-3	2.2E-3	2.6E-3
	4~6	5.1E-5	2.9E-4	3.0E-4	2.7E-4	2.4E-4	3.3E-4
	6~8	2.6E-7	1.5E-5	3.1E-5	1.3E-5	1.1E-5	1.9E-5
	8~10	1.8E-7	6.2E-7	7.9E-7	5.0E-7	4.5E-7	8.6E-7
	e=Σ (lnC1 - lnC2)²	0.0199	0.208	0.0201	0.036	0.0211	
	(cm)	($\mu\text{Ci/g}$)	Rf=210 D=2.10E-4	Rf=210 D=2.15E-4	Rf=210 D=2.05E-4	Rf=215 D=2.10E-4	Rf=205 D=2.10E-4
No.6 Sr-90 カラム長=16.2 cm (まさ土)	*0~1	1.6E-3	1.6E-3	1.6E-3	1.6E-3	1.7E-3	1.5E-3
	*1~2	2.6E-3	3.0E-3	3.0E-3	3.1E-3	3.2E-3	2.9E-3
	*2~4	2.2E-3	2.2E-3	2.2E-3	2.2E-3	2.2E-3	2.2E-3
	*4~6	5.4E-4	5.3E-4	5.5E-4	5.2E-4	4.9E-4	5.7E-4
	6~8	1.8E-6	6.6E-5	7.2E-5	6.0E-5	5.9E-5	7.2E-5
	8~16	検出限界下	—	—	—	—	—
	e=Σ (lnC1 - lnC2)²	0.024	0.026	0.033	0.048	0.030	

表4 混合土カラム試験解析結果
 (網掛け部が決定値、範囲の*印の位置の
 濃度分布と計算値を比較した。)

CASE	範囲 (cm)	実測値 ($\mu\text{Ci/g}$)	解析値 ($\mu\text{Ci/g}$)				
			Rf=1000 D=6.33E-5	Rf=1000 D=6.83E-5	Rf=1000 D=5.83E-5	Rf=1050 D=6.33E-5	Rf=950 D=6.33E-5
No.7 Co-60 カラム長=10.2 cm (混合土)	*0~1	1.5E-1	1.6E-1	1.5E-1	1.6E-1	1.6E-1	1.5E-1
	*1~2	1.1E-2	8.1E-3	1.1E-2	6.0E-3	7.0E-3	9.0E-3
	*2~4	1.4E-5	2.3E-5	4.8E-5	1.1E-5	2.0E-5	3.2E-5
	4~6	3.5E-6	4.9E-11	2.0E-10	9.0E-12	2.7E-11	9.0E-11
	6~8	2.7E-6	2.2E-15	1.3E-14	2.6E-16	1.1E-15	5.0E-15
	8~10	検出限界下	—	—	—	—	—
	e= $\sum (\ln C_1 - \ln C_2)^2$	0.373	1.387	0.490	0.397	0.751	
No.8 Cs-137 カラム長=10.2 cm (混合土)	(cm)	($\mu\text{Ci/g}$)	Rf=1600 D=1.81E-5	Rf=1600 D=2.31E-5	Rf=1600 D=1.31E-5	Rf=1650 D=1.81E-5	Rf=1550 D=1.81E-5
	*0~1	7.4E-2	9.0E-2	9.0E-2	9.0E-2	9.0E-2	9.0E-2
	*1~2	1.7E-5	1.7E-5	9.0E-5	5.1E-7	1.5E-5	2.0E-5
	2~10	検出限界下	—	—	—	—	—
	e= $\sum (\ln C_1 - \ln C_2)^2$	0.036	2.778	12.332	0.060	0.066	
No.9 Co-60 カラム長=20.0 cm (混合土)	(cm)	($\mu\text{Ci/g}$)	Rf=1100 D=1.60E-5	Rf=1150 D=1.60E-5	Rf=1050 D=1.60E-5		
	*0~1	1.5E-1	1.6E-1	1.7E-1	1.5E-1		
	*1~2	8.6E-3	2.7E-3	2.0E-3	3.5E-3		
	*2~4	8.1E-7	1.5E-6	9.0E-7	3.0E-6		
	4~6	2.7E-7	1.4E-11	4.8E-12	4.1E-11		
	6~8	1.5E-7	5.2E-16	1.4E-16	2.1E-15		
	8~10	1.5E-7	1.6E-19	3.7E-20	8.1E-19		
	10~20	検出限界下	—	—	—		
e= $\sum (\ln C_1 - \ln C_2)^2$			1.886	2.230	2.623		

表4 (続き)

CASE	範囲 (cm)	実測値 ($\mu\text{Ci/g}$)	解析値 ($\mu\text{Ci/g}$)				
			Rf=1000 D=6.33E-5	Rf=1000 D=6.83E-5	Rf=1000 D=5.83E-5	Rf=1050 D=6.33E-5	Rf=950 D=6.33E-5
No.10 Cs-137 カラム長=20.0 cm (混合土)	#0~1	1.8E-1	2.0E-1	1.9E-1	2.0E-1	2.0E-1	1.9E-1
	#1~2	1.4E-2	1.0E-2	1.3E-2	7.4E-3	8.6E-3	1.1E-2
	2~20	検出限界下	—	—	—	—	—
	e= $\sum (\ln C_1 - \ln C_2)^2$	1.886	2.230	2.623	—	—	—
No.11 Sr-90 カラム長=10.2 cm (混合土)	(cm)	($\mu\text{Ci/g}$)	Rf=125 D=3.61E-5	Rf=125 D=4.11E-5	Rf=125 D=3.11E-5	Rf=130 D=3.61E-5	Rf=120 D=3.61E-5
	#0~1	7.2E-3	7.3E-3	7.2E-3	7.6E-3	7.7E-3	7.1E-3
	#1~2	4.3E-3	2.9E-3	2.8E-3	3.0E-3	2.8E-3	2.9E-3
	#2~4	2.3E-4	3.0E-4	3.7E-4	2.3E-4	2.7E-4	3.3E-4
	#4~6	1.6E-6	1.7E-6	4.0E-6	5.2E-7	1.3E-6	2.4E-6
	6~8	5.5E-7	4.5E-9	1.9E-8	5.9E-10	2.9E-9	6.9E-9
	8~10	2.4E-7	2.2E-11	1.3E-10	1.8E-12	1.3E-11	3.7E-11
	e= $\sum (\ln C_1 - \ln C_2)^2$	0.251	1.025	1.441	0.278	0.435	—

表5 パラメータ推定結果

土質	No.	使用核種	カラム長(cm)	遅延係数	分散係数(cm ² /s)	平均間隙流速(cm/s)
まさ土	1	Co-60	10.2	155	1.91 E-4	3.58 E-4
	2	Cs-137	10.2	1800	2.01 E-4	3.58 E-4
	3	Co-60	16.2	235	1.21 E-4	3.00 E-4
	4	Cs-137	16.2	2500	4.02 E-5	3.00 E-4
	5	Sr-90	10.2	155	2.22 E-4	3.60 E-4
	6	Sr-90	16.2	210	2.10 E-4	2.97 E-4
混合土	7	Co-60	10.2	1000	6.33 E-5	6.31 E-5
	8	Cs-137	10.2	1600	1.81 E-5	6.31 E-5
	9	Co-60	20.0	1100	1.60 E-5	3.15 E-5
	10	Cs-137	20.0	1000	1.60 E-5	3.15 E-5
	11	Sr-90	10.2	125	3.61 E-5	6.30 E-5

表6 ピットB-1解析時(充填材まさ土)のパラメータ

使用核種	遅延係数	分散係数(cm/s)
Co-60	195	図23中の①式より決定
Cs-137	2150	
Sr-90	183	

表7 ピットB-2解析時(充填材混合土)のパラメータ

使用核種	遅延係数	分散係数(cm/s)
Co-60	1050	図23中の①式より決定
Cs-137	1300	
Sr-90	125	

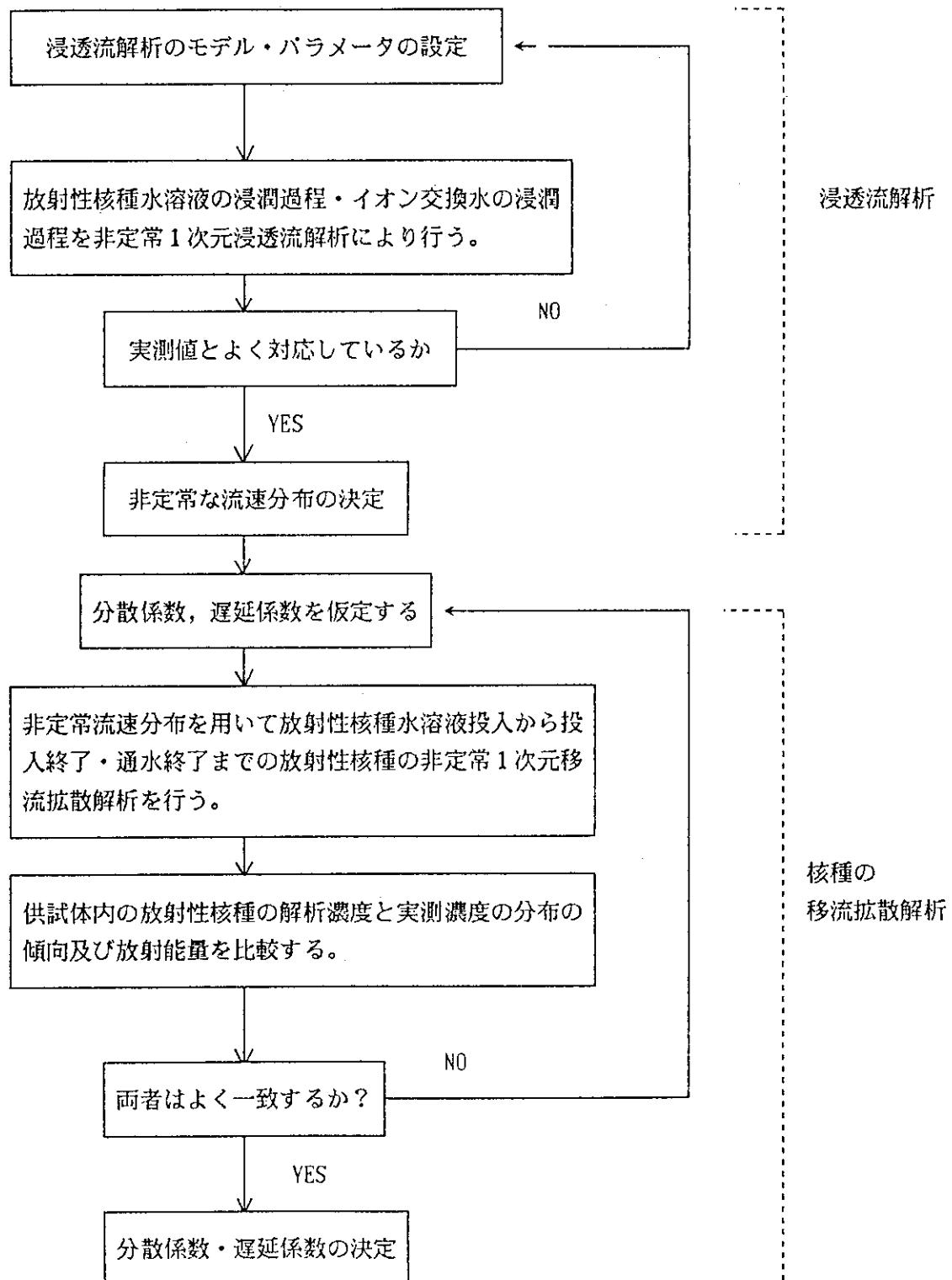


図 6 カラム試験の解析フロー

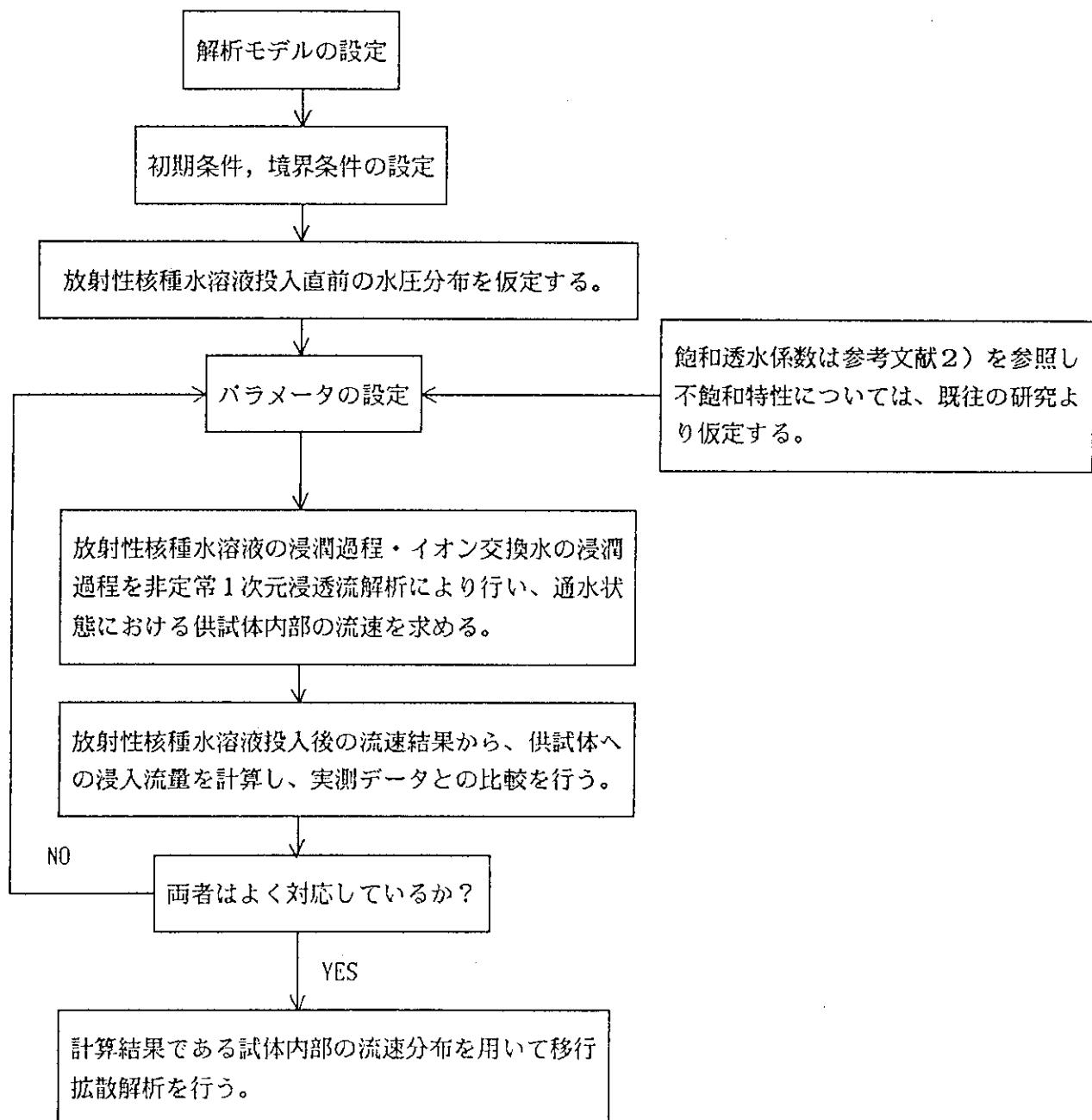


図7 浸透流解析概略フロー

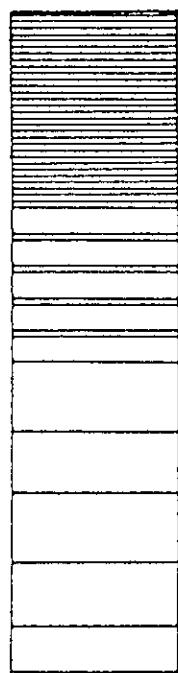
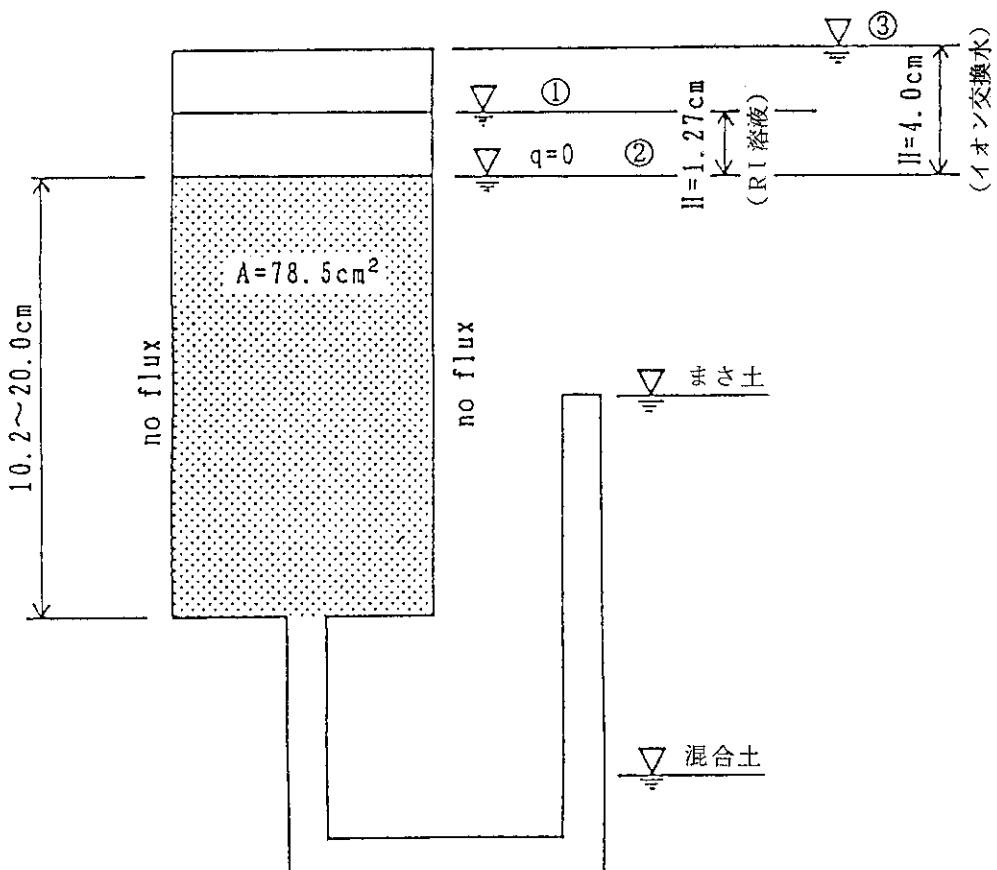


図 8 カラム試験の浸透流解析に用いたメッシュ図



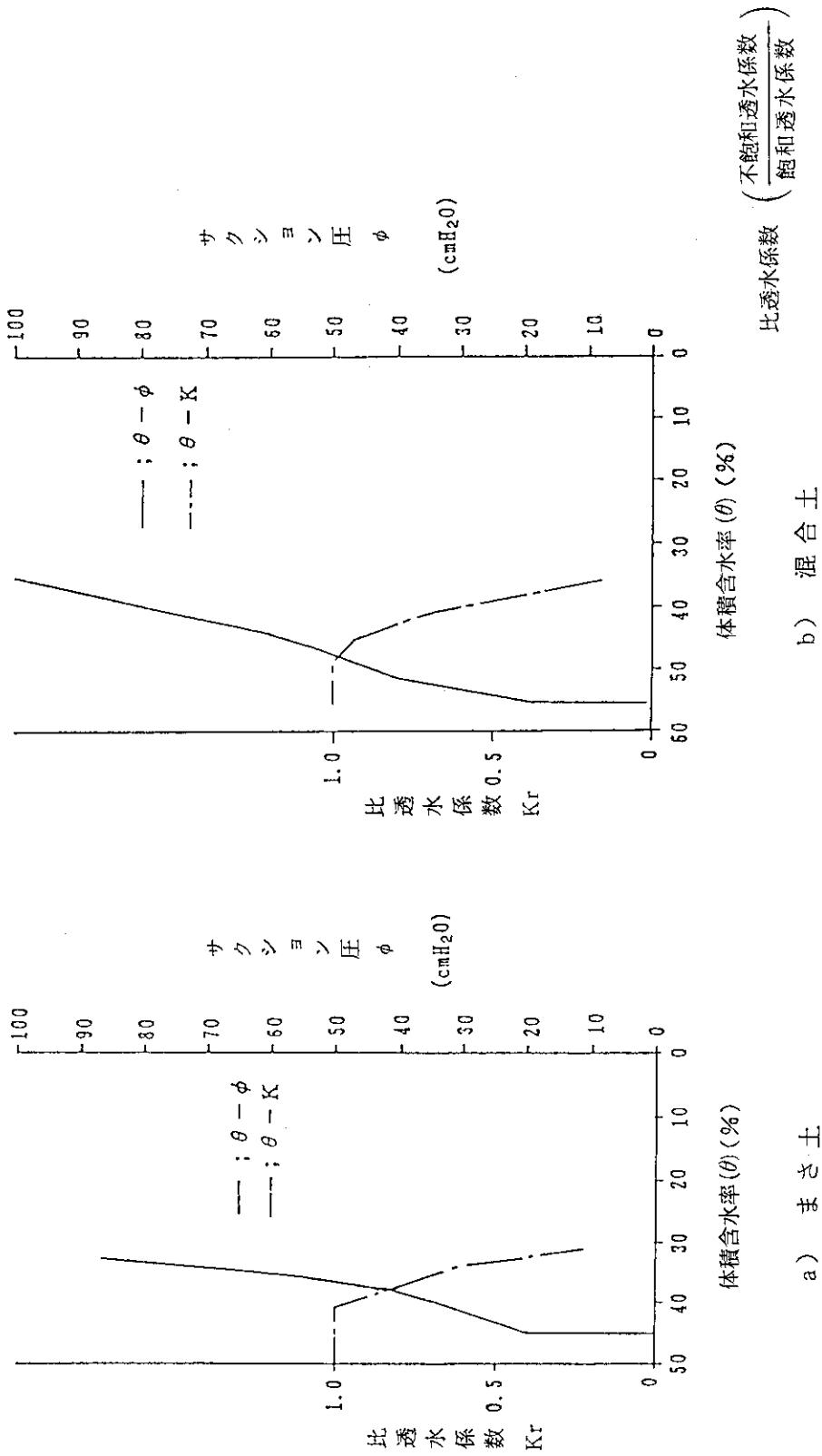


図10 カラム試験に用いた不飽和透水関数

a) まさ土

b) 混合土

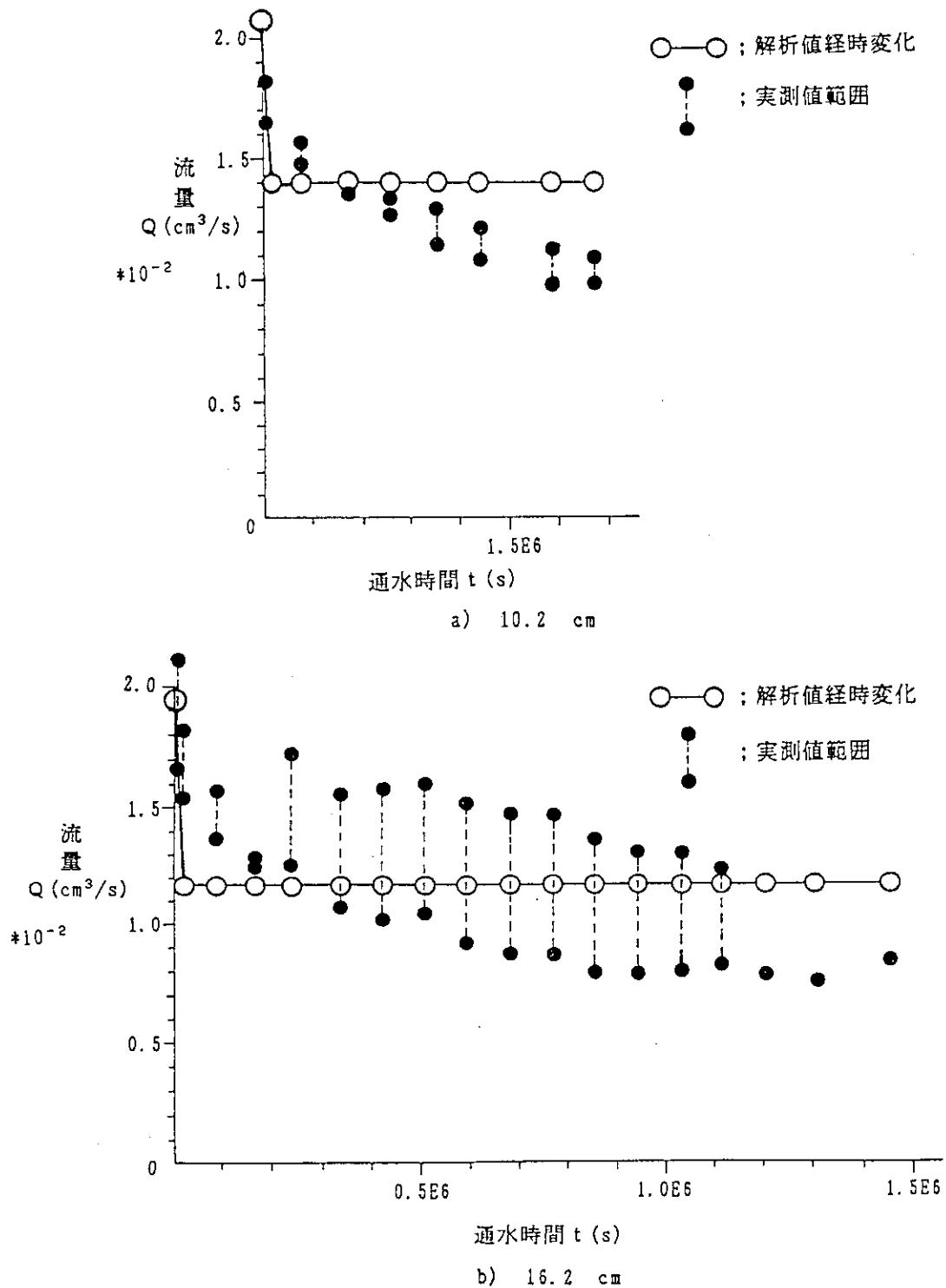


図 11 カラム試験(まさ土)の浸透流解析結果の実測値と計算値の比較

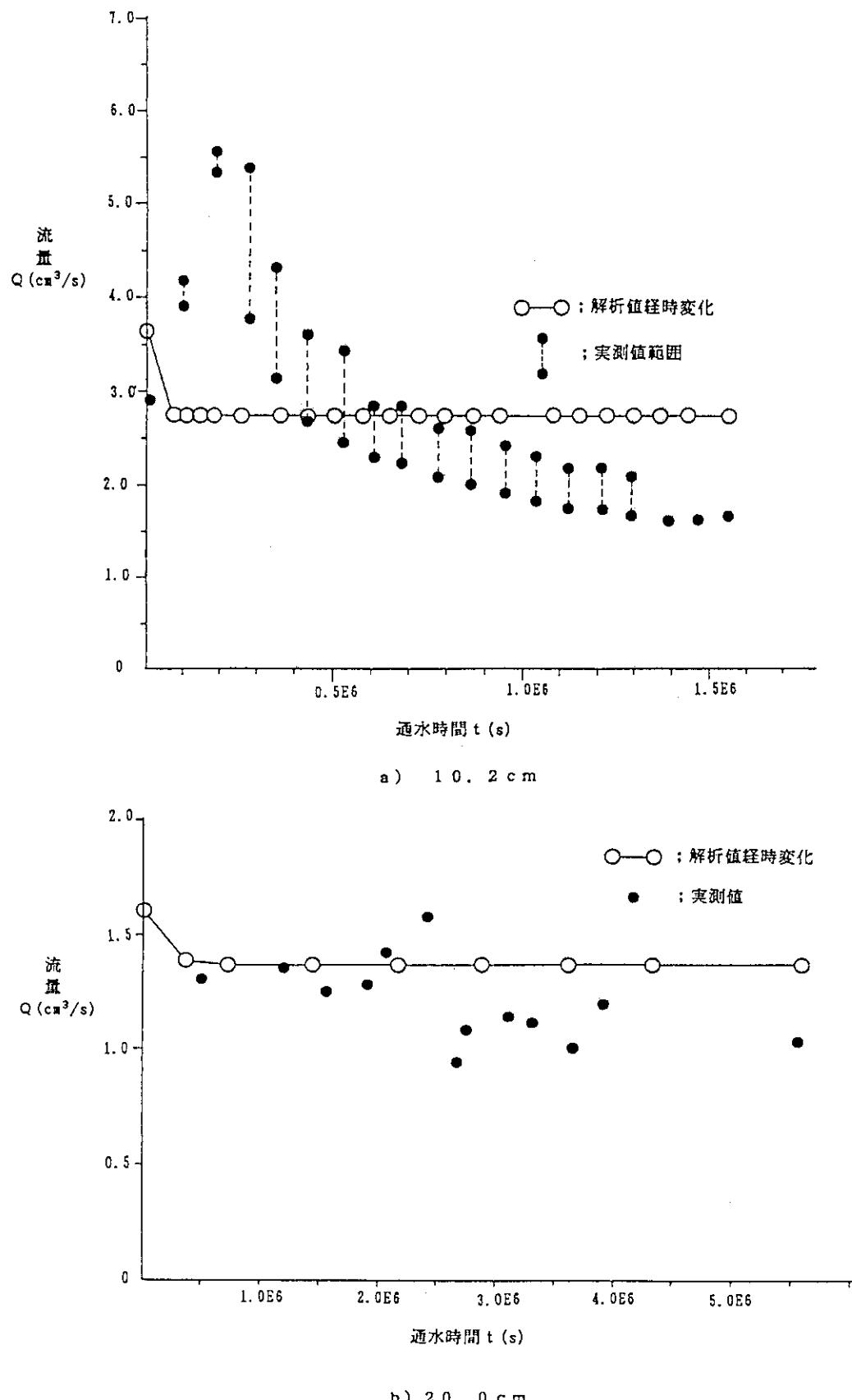


図 12 カラム試験（混合土）の浸透流解析結果の実測値と計算値の比較

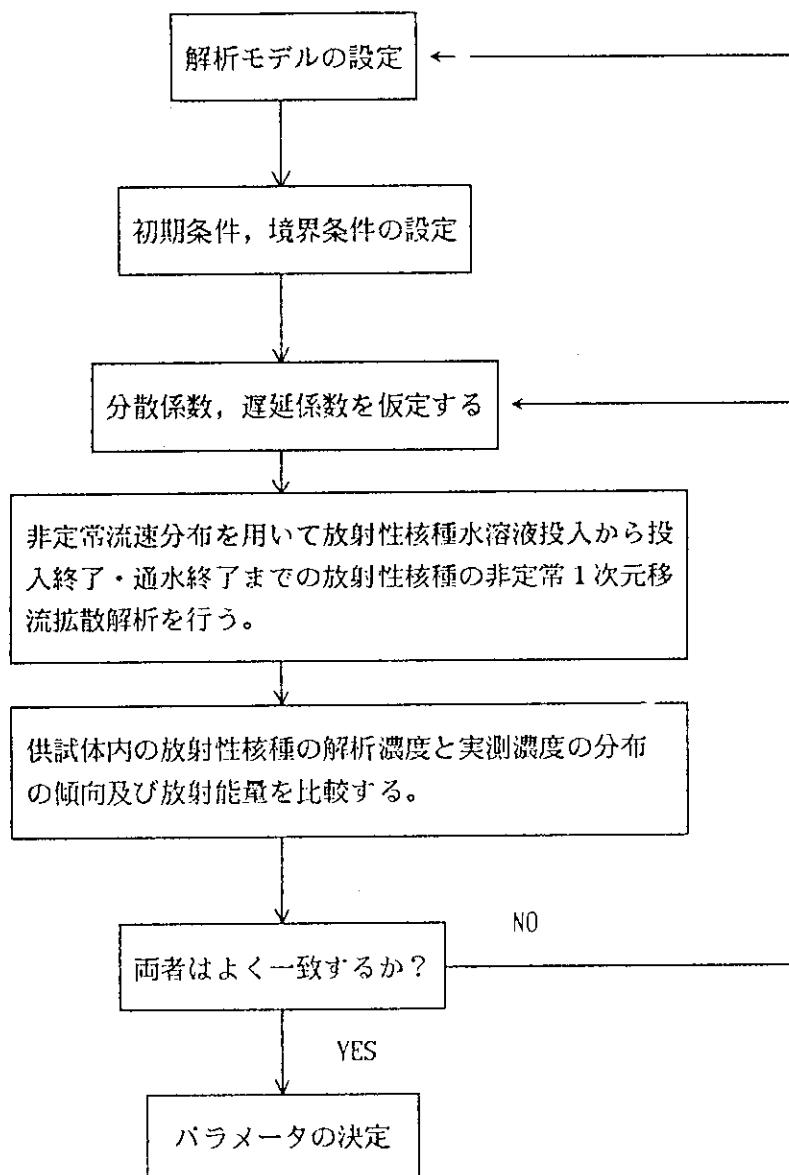


図13 移流拡散解析フロー

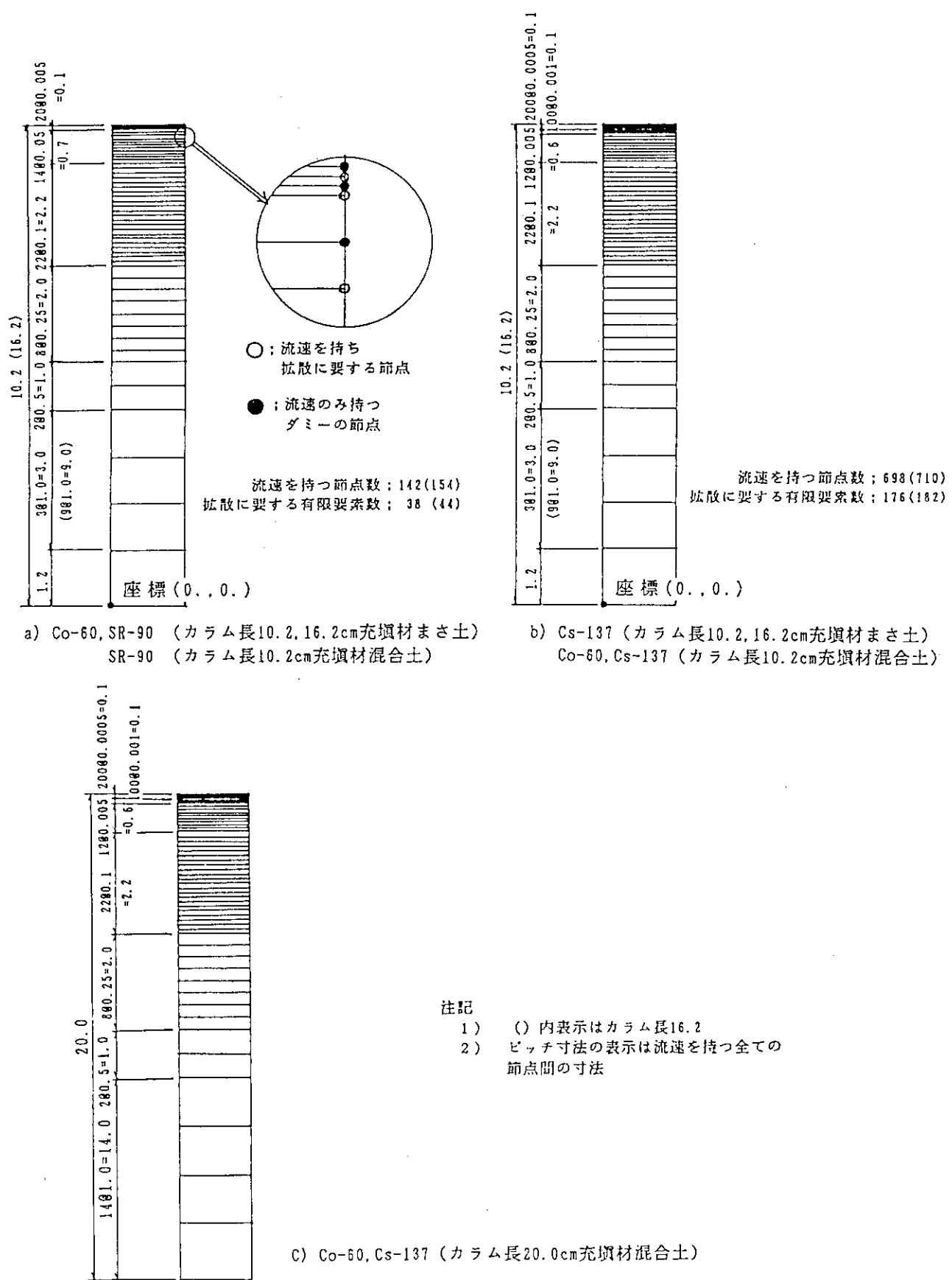


図 14 カラム試験の拡散解析に用いたメッシュ図

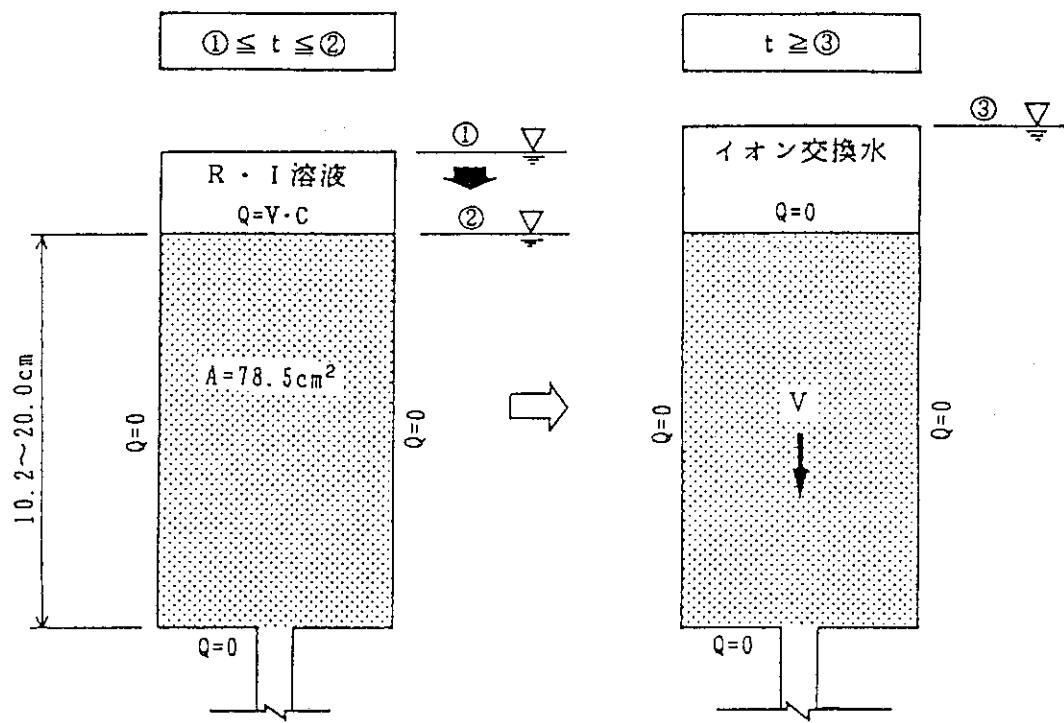
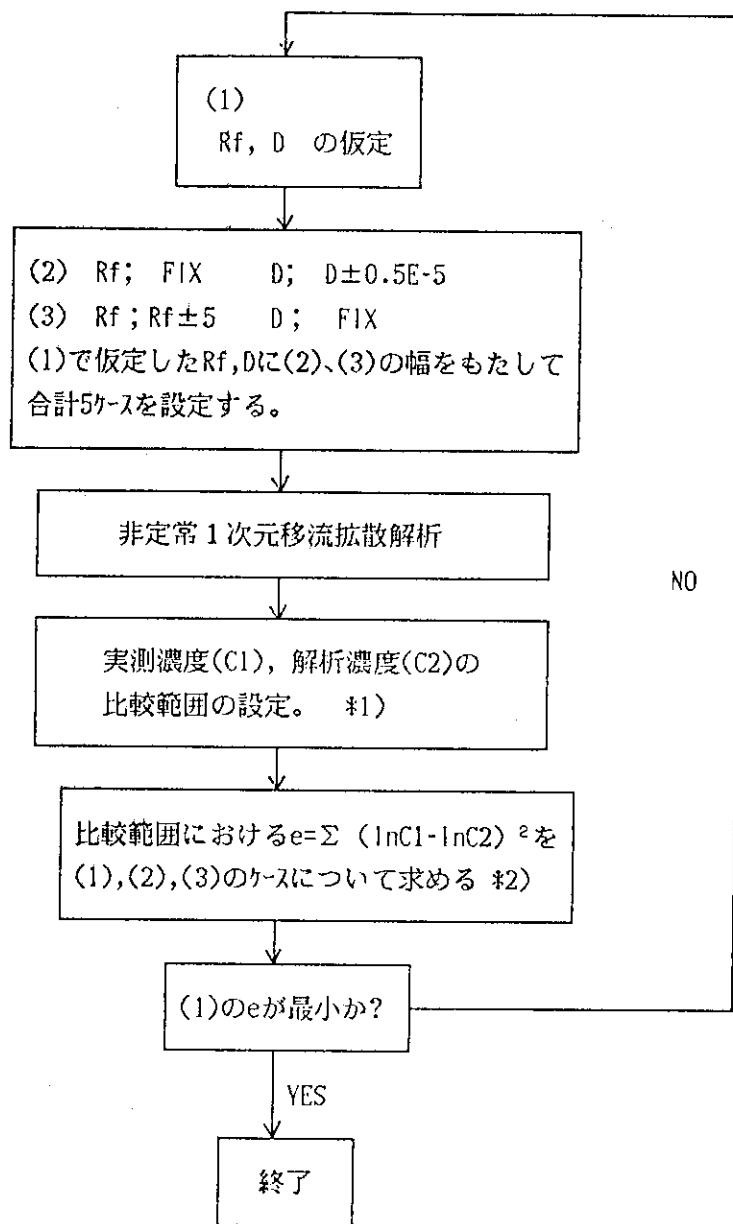


図 15 カラム試験核種移行解析の境界条件

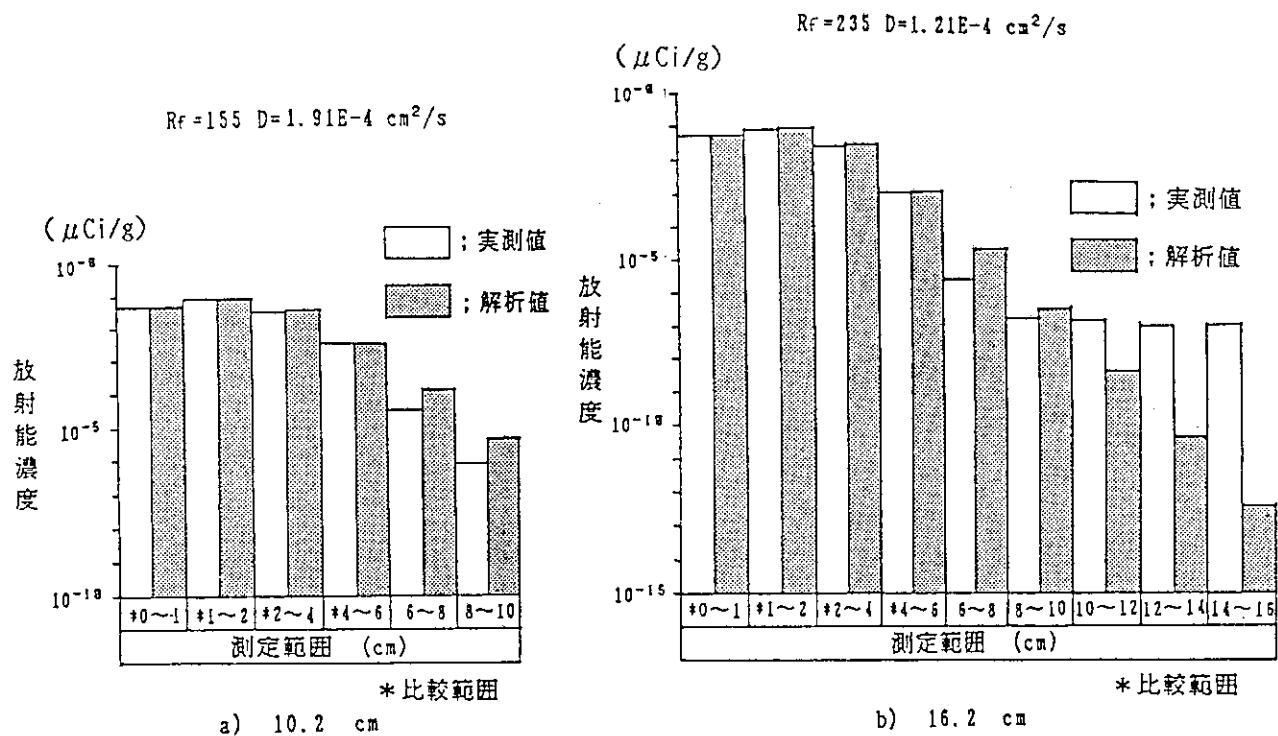
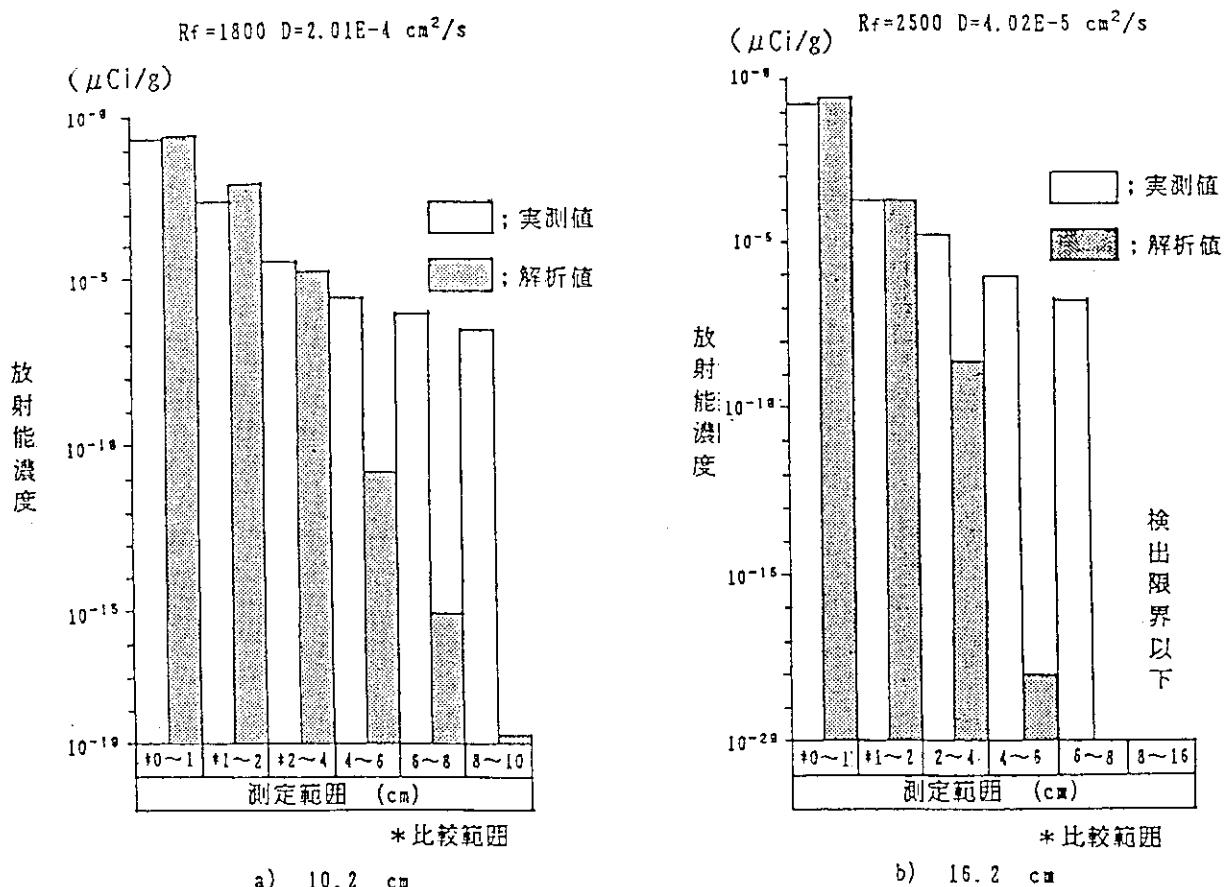


注記

*1) 実測されたデータでは、下流部においても比較的高い濃度を示すいわゆるティリング現象が現れており、供試体全体の濃度分布を本解析で一致させることは不可能であるため、濃度値の高い範囲（上流側）を比較範囲として設定した。

*2) 比較範囲の誤差を同じ頻度で表すため、対数によって誤差を算出している。

図 16 カラム試験の拡散パラメータ同定フロー

図17 カラム試験（まさ土）実測濃度分布と計算値の比較（ $\text{Co}-60$ ）図18 カラム試験（まさ土）実測濃度分布と計算値の比較（ $\text{Cs}-137$ ）

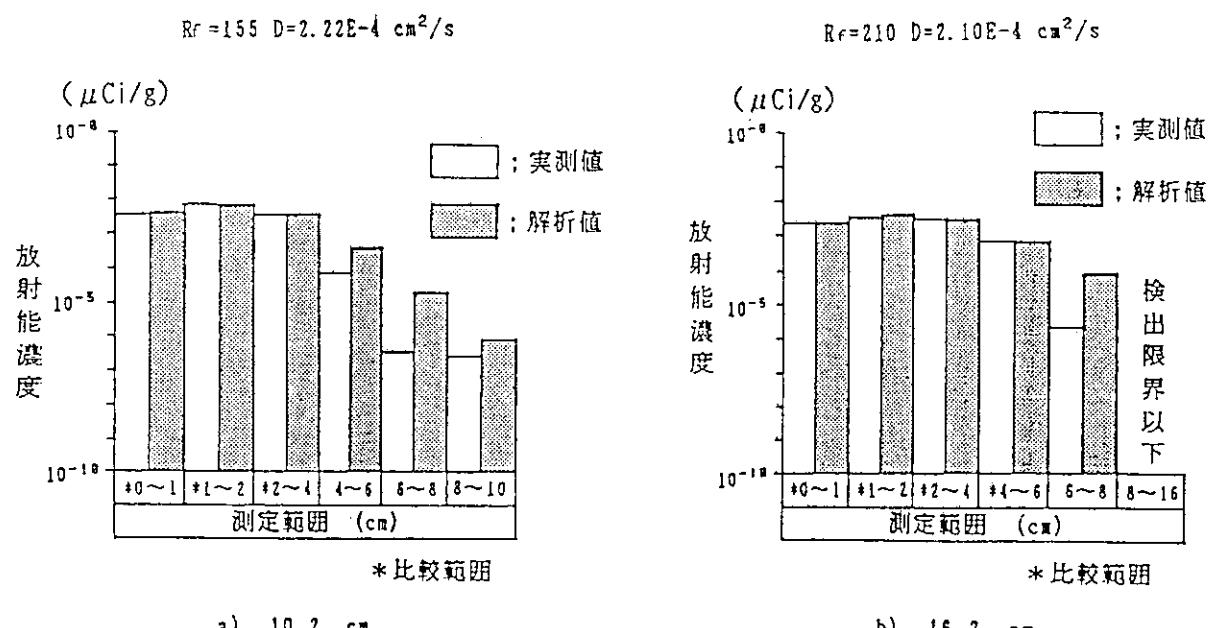


図 19 カラム試験（まさ土）実測濃度分布と計算値の比較（Sr - 90）

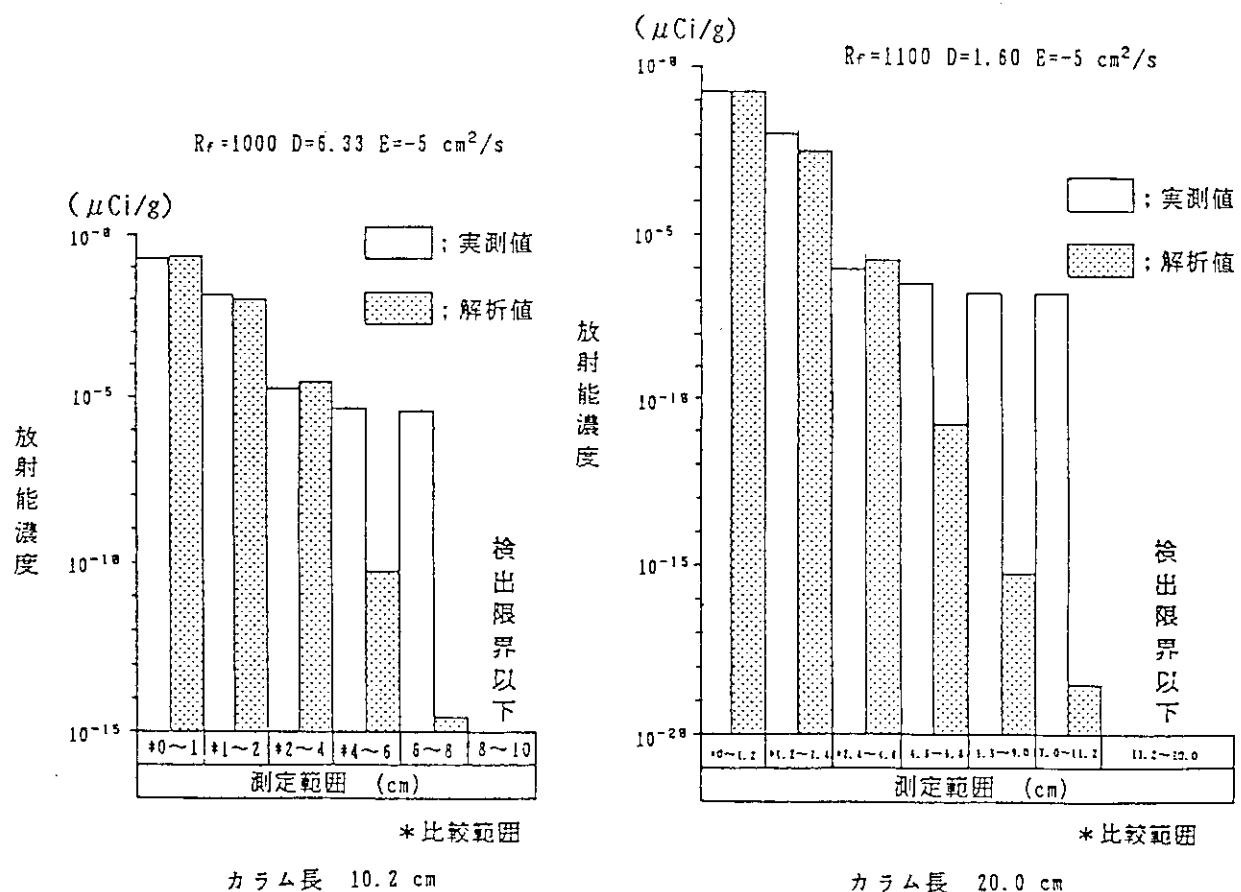


図 20 カラム試験（混合土）実測濃度分布と計算値の比較（Co - 60）

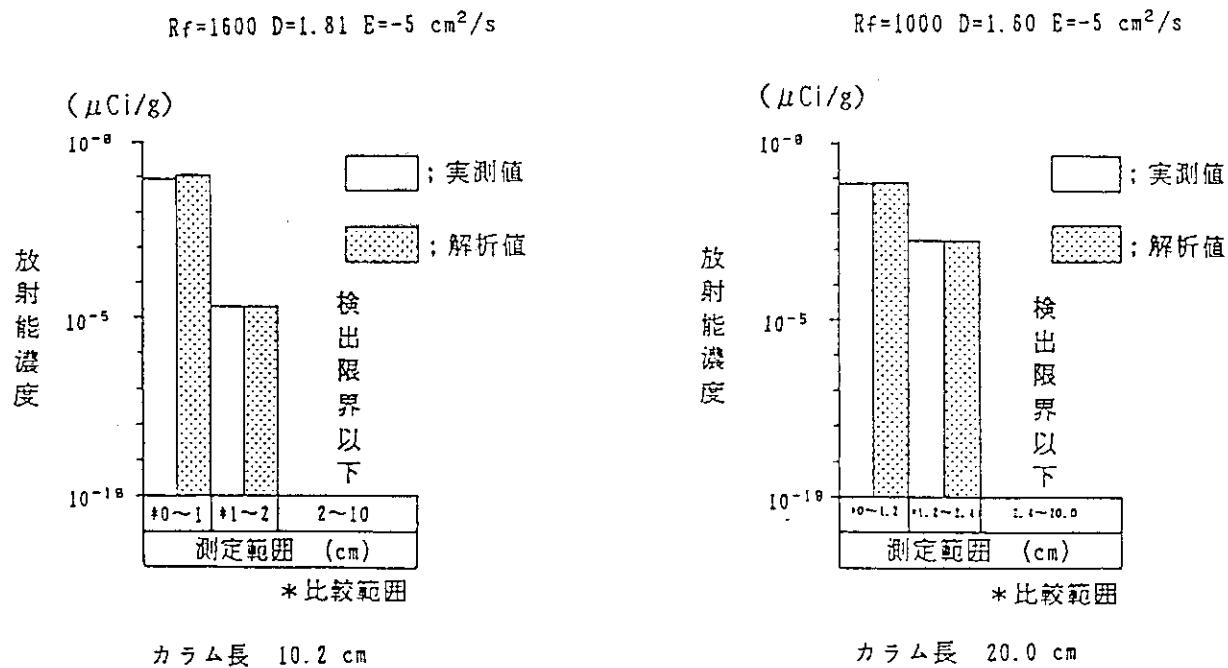


図 21 カラム試験（混合土）実測濃度分布と計算値の比較（Cs-137）

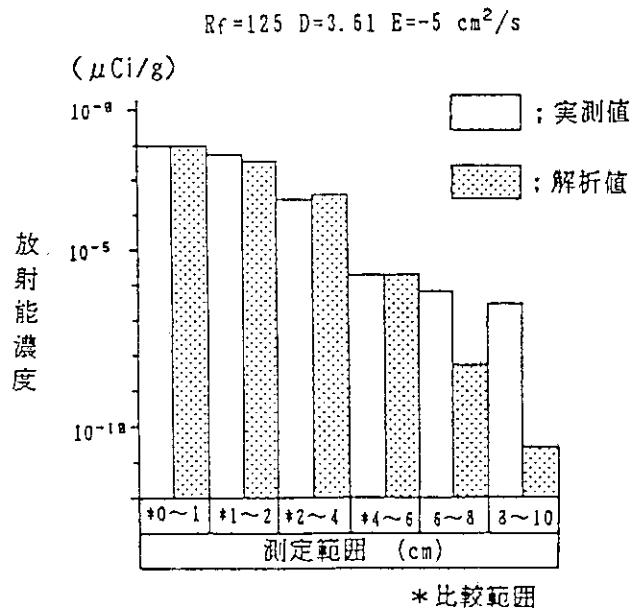


図 22 カラム試験（混合土）実測濃度分布と計算値の比較（Sr-90）

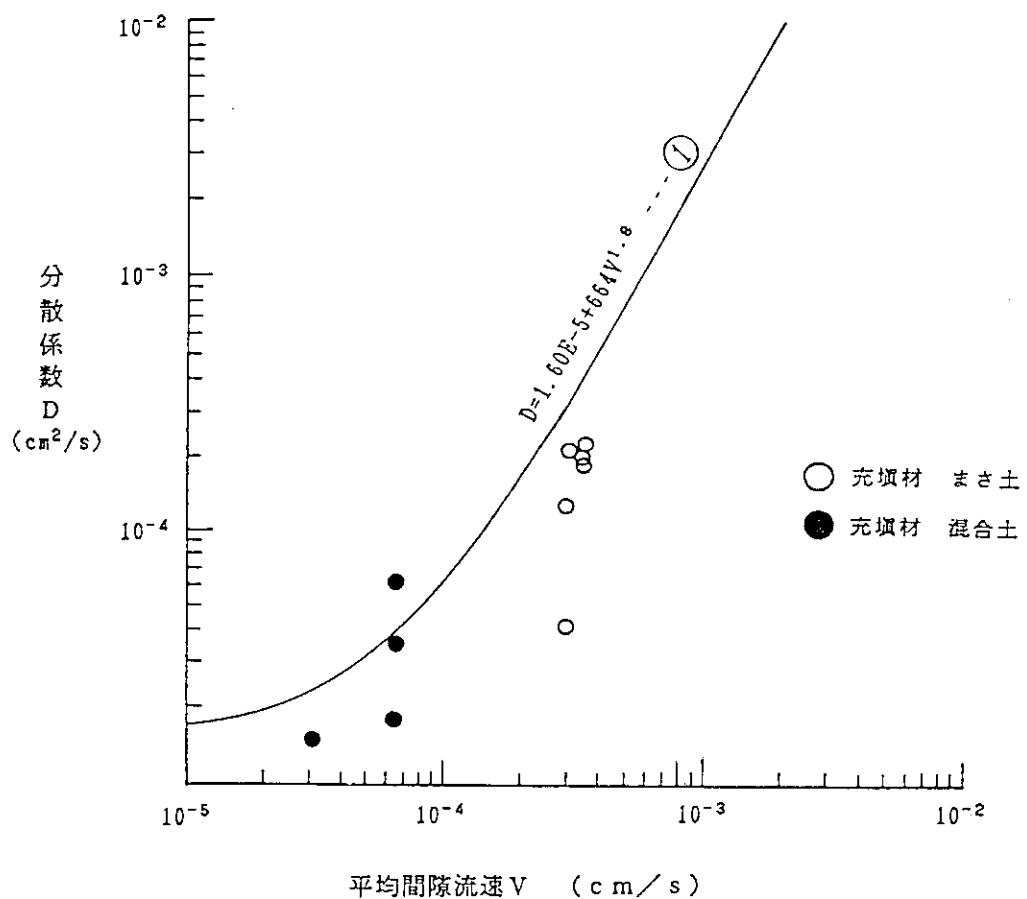


図23 間隙流速と分散係数の関係

4. 安全性実証試験（ピットB-1）の解析

4.1 試験概要

放射性水溶液 (¹³⁷Cs, ⁶⁰Co および ⁹⁰Sr) を添加後、週1回40リットル／4分の水を充填材表面に供給した。充填材下部に流出した水は、原則的に、充填材に通気性を保つよう排水を行った。散水期間は、約2年間である。

対象ピットの諸条件を表8に示す。

4.2 浸透流解析

ピットB-1の解析方法は、基本的にカラム試験の解析と同様である。ただし、ピット内の非定常な流速分布を把握するために、カラム試験と同様に非定常1次元浸透流解析を行うが、その際の不飽和浸透特性については、別途試験された結果を用いている。

(1) 解析条件

飽和-不飽和浸透流1次元非定常解析を行う。

(2) 境界条件

約2年間の散水状況は、表9の通りである。

40リットル散水した時点の境界条件を示すと次の通りである。

$$h = \frac{\text{散水量}}{\text{散水面積}} = \frac{40 \times 10^3}{36256} = 1.1 \text{ cm}$$

h は供試体上端面から、貯った水面までの高さである。この h を上端面に与え（図24の①）、カラム試験の浸透流解析の場合と同様の手法でこの境界水位の変化を再現し水位がゼロになった時点で、境界条件を水位固定からフラックスがゼロの境界条件に変更する。（同図の②）。また、側面は不透水境界、底面はドレーン材が敷かれているので、圧力水頭ゼロの境界とした。

(3) 土中水分特性

試験後に採取したピット充填材未攪乱試料を用いて測定した水分特性を、図25に示す。

(4) 解析結果

試験後に採取したピット充填材未攪乱試料を用いての透水試験結果の透水係数は、 4×10^{-6} cm/secと非常に小さい値であった。これは、繰り返し通水による水締め作用のためかなり地盤が初期の状態より密になったためと思われる。この透水係数を用いると、湛水からその浸潤完了までに要する時間が数日かかる計算結果となり、実際に観察された十数時間という時間と矛盾する。それゆえ、不飽和透水関数は図25のままでして、飽和透水係数を変化させることにより、実測された排水量と水分ポテンシャルの経時変化の両方と合う値を求める作業を行った。その結果を図26および27に示す。これらは、飽和透水係数を3倍にしたときの結果である。

この時の結果が、排水量、水分ポテンシャルの両方の結果と最も整合の取れる場合であった。B-1の解析には、この時の流速分布を用いて拡散解析を行うことにした。

4.3 核種移行解析

(1) 解析条件

a) 解析モデル

ピットB-1の核種移行解析は、カラム試験同様1次元解析であり、その解析に用いたメッシュ図を図28に示す。

b) 初期・境界条件

境界条件の扱いは、カラム試験の場合と同じである(図29参照)。

初期条件も初期濃度分布をゼロに設定した。

c) 入力パラメータ

解析に用いたパラメータの内、遅延係数については表6に示した値を用い、拡散係数については、図23に示した①式を用いて決定する。

(2) 解析結果

図30～32に¹³⁷Cs・⁶⁰Co・⁹⁰Srの核種移行解析結果を示す。この濃度はスライスされた充填材供試体内に含まれる単位乾土重量当りの放射能量($\mu\text{Ci/g}$)であり、この放射能量は土粒子に吸着した放射能量と間隙水中の放射能量を合わせた値である。一方、解析では水中放射能濃度が得られているため、それに $R_f \theta$ (R_f : 遅延係数、 θ : 体積含水率)を乗じ、さらに乾燥密度で除することにより単位乾土重量当りの放射能量に換算した。表10にそれらの値の一覧を示す。

同結果によると、全核種とも実測値の方がかなり下流まで移行している。特に、上端より20cm程の深さにかなりの量の核種が存在している。解析では、供試体は上部から下部まで全て均一であると仮定しているが、実際の供試体内の水の流れやそれにともなう核種の移行形態は、かなり選択的なものであることが予想される。このことは、実測された核種の分布形状が似ていることからも予想できる。

表8 ピットB-1の概要

項目		摘要
充填材土質	まさ土	
使用核種	Co - 60	使用量 2.0 mCi
"	Sr - 90	" 1.0 mCi
"	Cs - 137	" 3/11 0.5 mCi " 3/17 0.5 mCi
比重	2.73	
平均乾燥密度	1.52 g/cm ³	
間隙率	41.4 (%)	
平均飽和透水係数	4.21×10^{-6} cm/s	未攪乱試料より求めた値
散水量	40 ℥/週	毎分 10 ℥ の 4 分で散水
試験期間	617 日	総定期散水量 3320 ℥

表9 ピットB-1の散水状況

単位；リットル

S. 61.3 / 11	3 / 12	3 / 17	3 / 18	4 / 10	4 / 17	4 / 24
22 + (22)	38	(20)	40	40	40	40
~	7 日毎	~	S. 62.11 / 12			
40	40	40	40			

() は、放射性核種水溶液の投入量。

3/11は3種類の放射性核種水溶液を散布、3/17は¹³⁷Csのみ散布。

表 10 ピット B-1 核種移行解析結果一覧

核種	深度(cm)	単位体積当り放射能量($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)			核種	深度(cm)	単位体積当り放射能量($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)			
		100日後	1年後	最終(588日後)			100日後	1年後	最終(588日後)	
Co-60	0~1	2.0E-2	8.0E-3	5.0E-3	Sr-90	0~1	1.0E-2	4.7E-3	3.4E-3	
	1~2	1.6E-2	9.0E-3	6.2E-3		1~2	8.2E-3	4.8E-3	3.5E-3	
	2~4	6.3E-3	7.7E-3	5.9E-3		2~4	3.8E-3	4.2E-3	3.4E-3	
	4~6	1.1E-3	4.8E-3	4.7E-3		4~6	6.6E-4	2.7E-3	2.8E-3	
	6~8	9.3E-5	2.2E-3	3.1E-3		6~8	6.1E-5	1.3E-3	1.9E-3	
	8~10	4.8E-6	7.8E-4	1.7E-3		8~10	3.6E-6	5.0E-4	1.1E-3	
	10~12	1.8E-7	2.2E-4	8.0E-4		10~12	1.5E-7	1.5E-4	5.3E-4	
	12~14		4.7E-5	3.2E-4		12~14		3.5E-5	2.2E-4	
	14~16		8.3E-6	1.1E-4		14~16		6.9E-6	7.9E-5	
	16~18		1.2E-6	3.1E-5		16~18		1.1E-6	2.5E-5	
	18~20		1.5E-7	7.8E-6		18~20		1.5E-7	6.7E-6	
	20~22			1.7E-6		20~22			1.6E-6	
	22~24			3.4E-7		22~24			3.3E-7	
Cs-137	核種	単位体積当り放射能量($\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)								
		100日後	1年後	最終(588日後)						
	0~1	4.6E-2	3.1E-2	2.5E-2						
	1~2	3.6E-3	1.5E-2	1.6E-2						
	2~4	1.7E-5	1.7E-3	4.0E-3						
	4~6	3.4E-9	2.8E-5	2.1E-4						
	6~8		1.9E-7	5.0E-6						
	8~10		7.7E-10	6.6E-8						
	10~12									
	12~14									
	14~16									
	16~18									
	18~20									

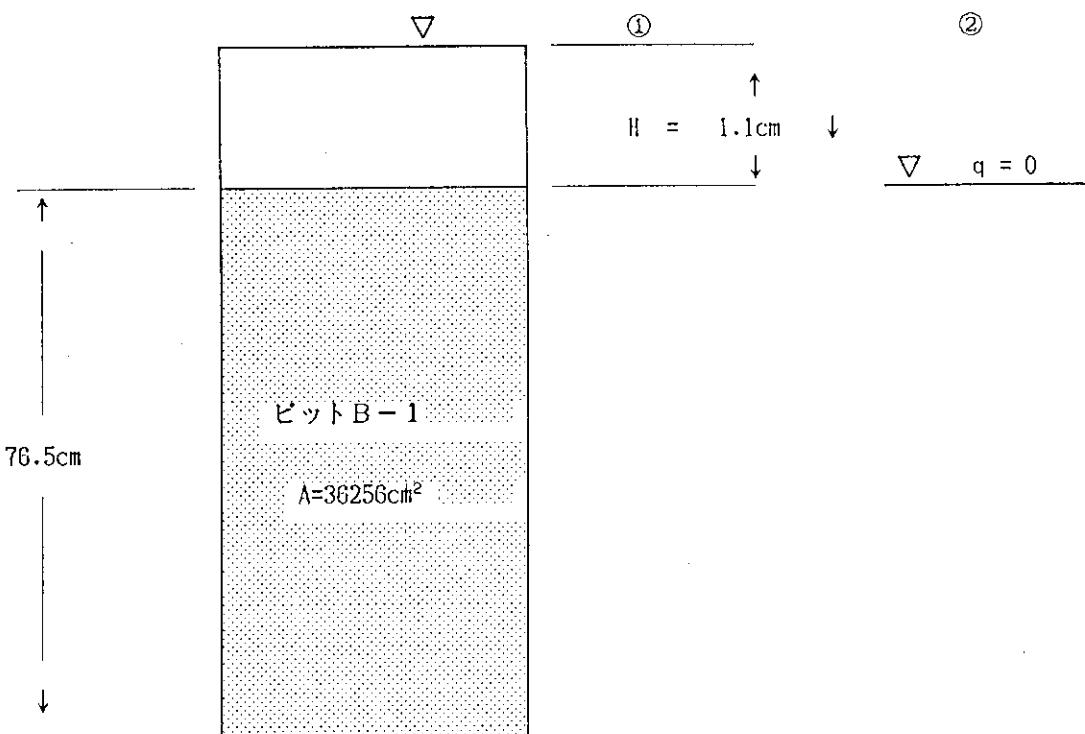


図24 ピットB-1 浸透流解析の境界条件

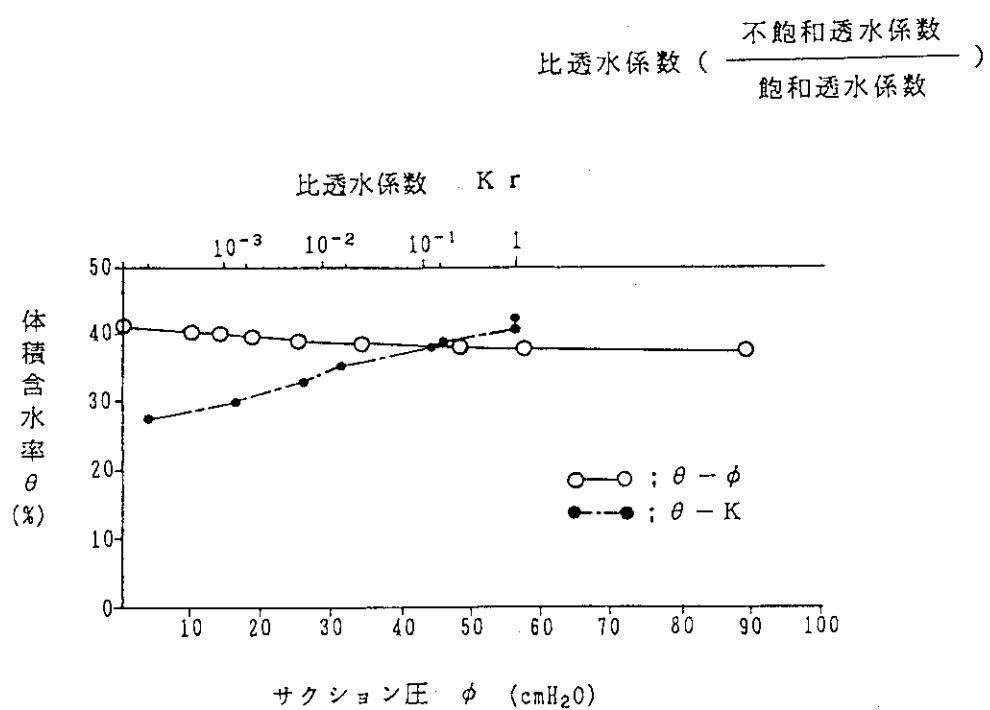
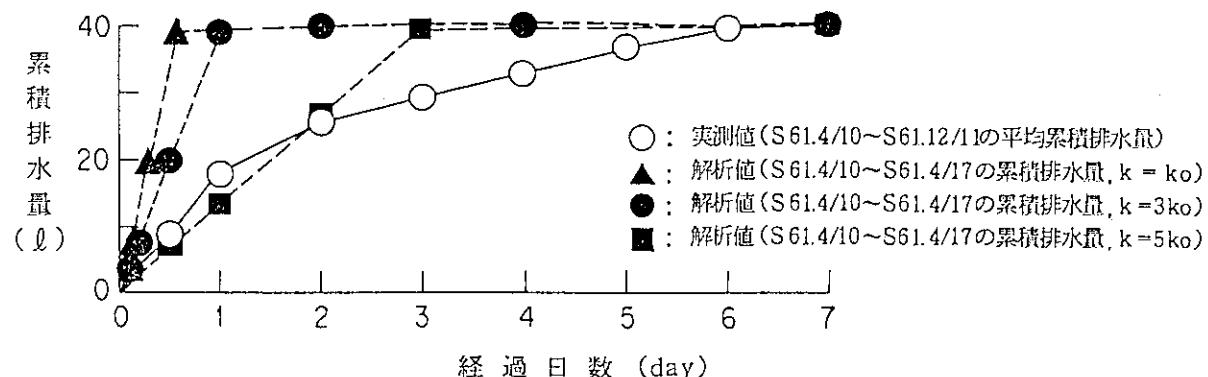


図25 ピットB-1に用いた不飽和透水関数



(注1)散水は○dayに40 l

(注2) $k_0 = 4.21 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$

図 26 ピット B-1 の浸透流解析結果（実測排水量との比較）

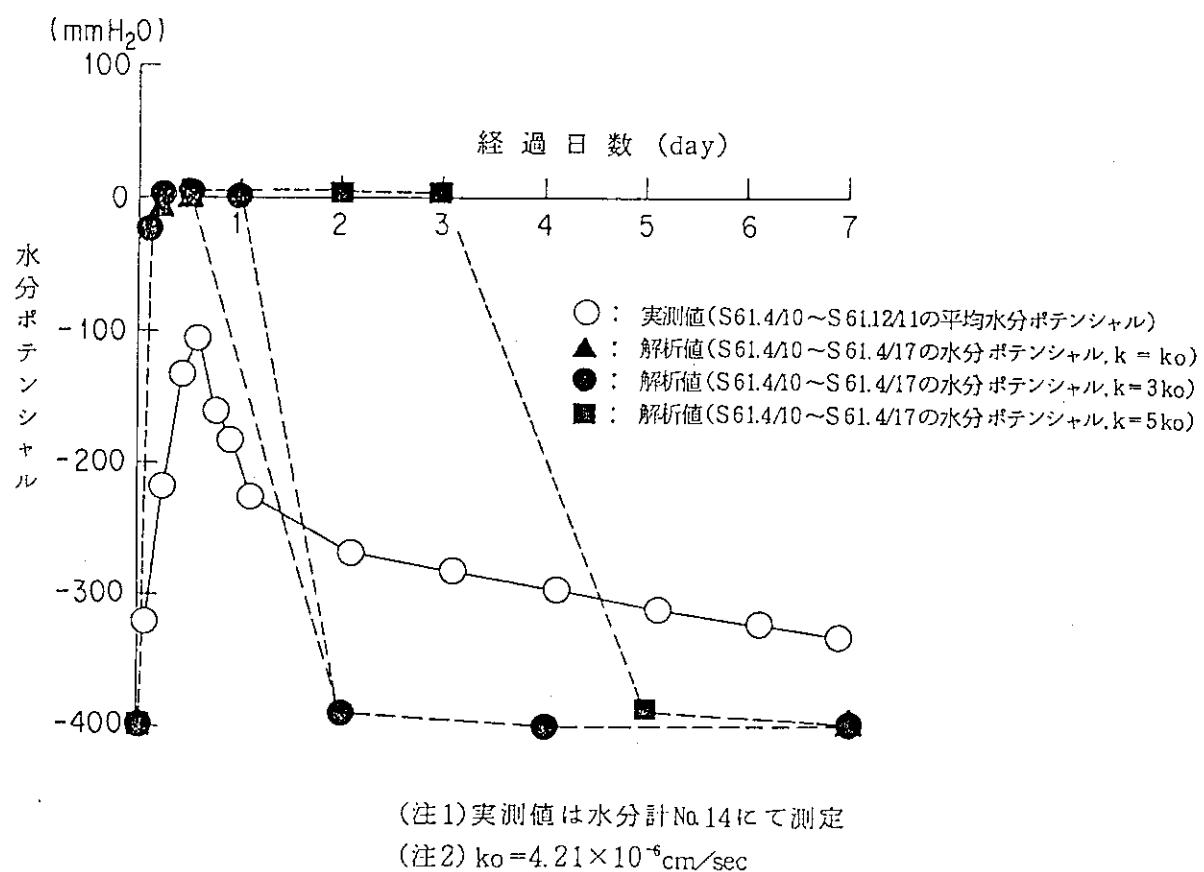


図 27 ピット B-1 の浸透流解析結果（実測水分ポテンシャル値との比較）

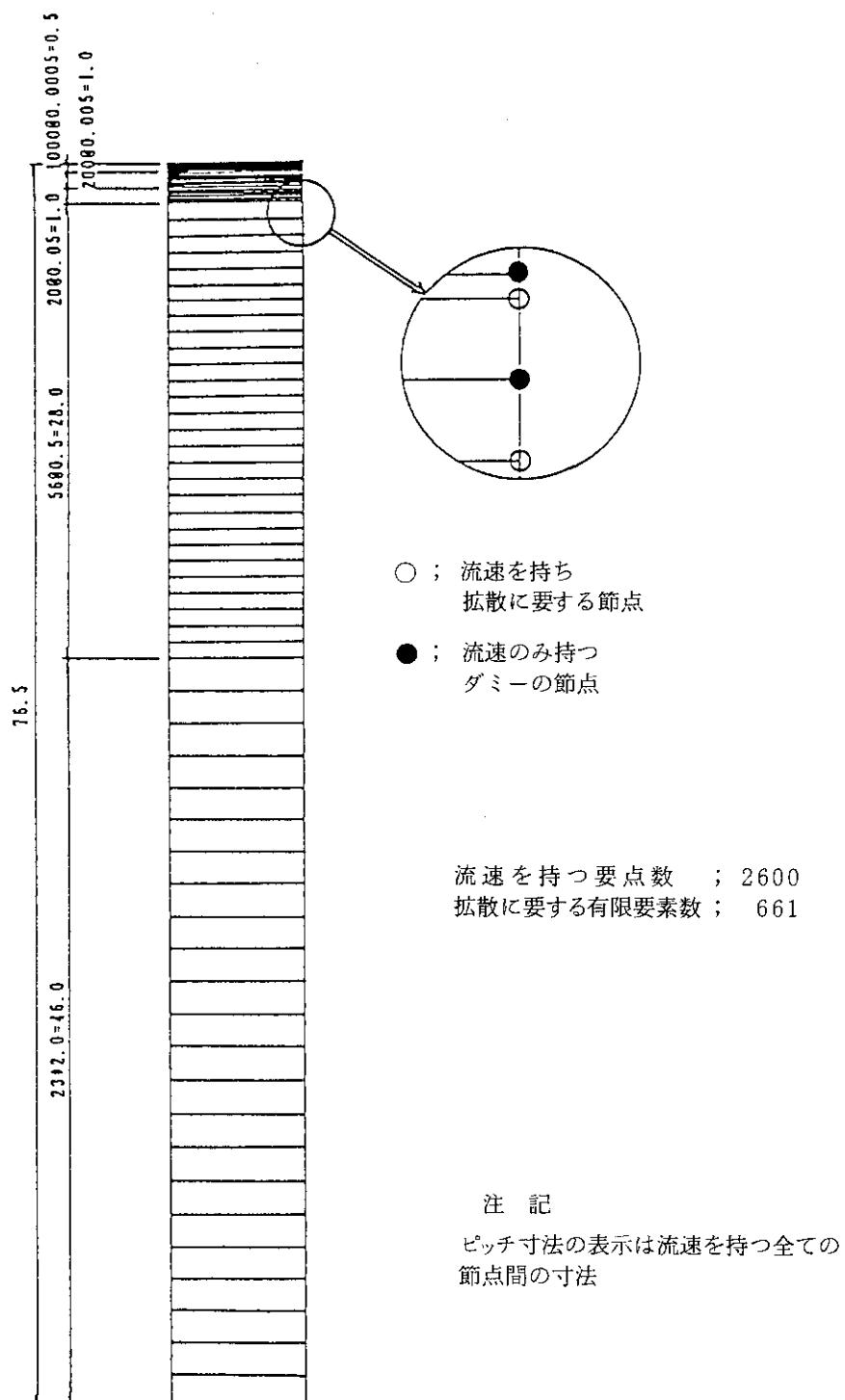


図 28 ピット B-1 の拡散解析に用いたメッシュ図

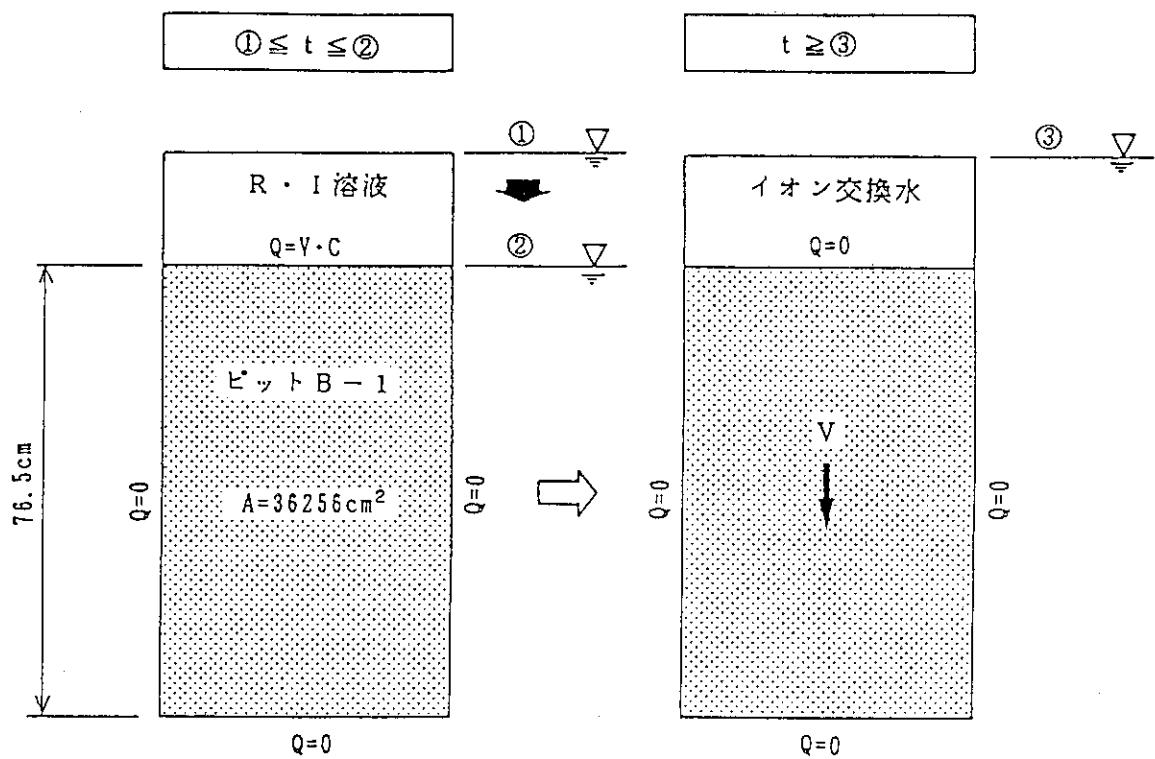


図29 ピットB-1の核種移行解析の境界条件

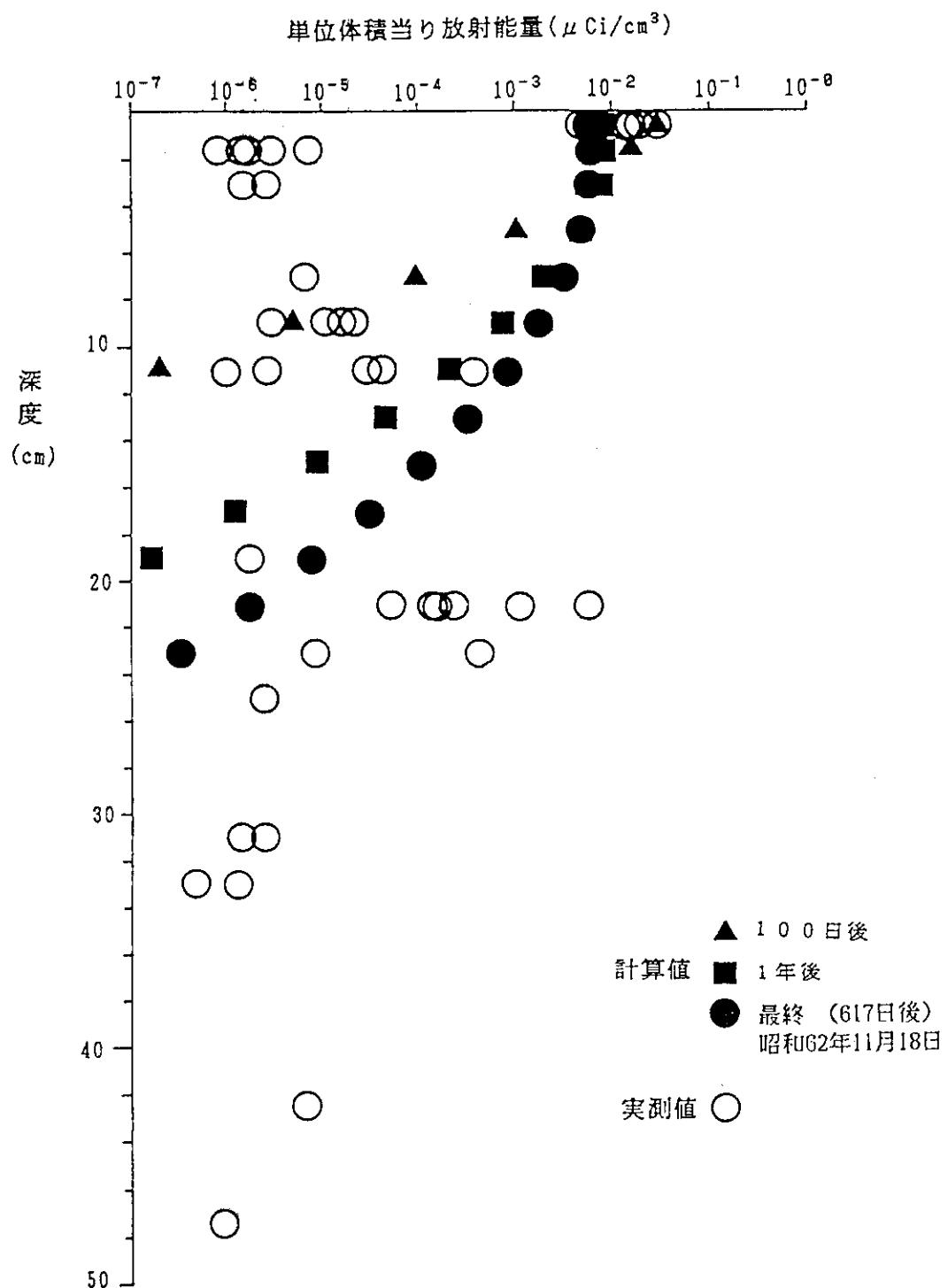


図30 ピットB-1の核種移行解析結果 (Co-60)

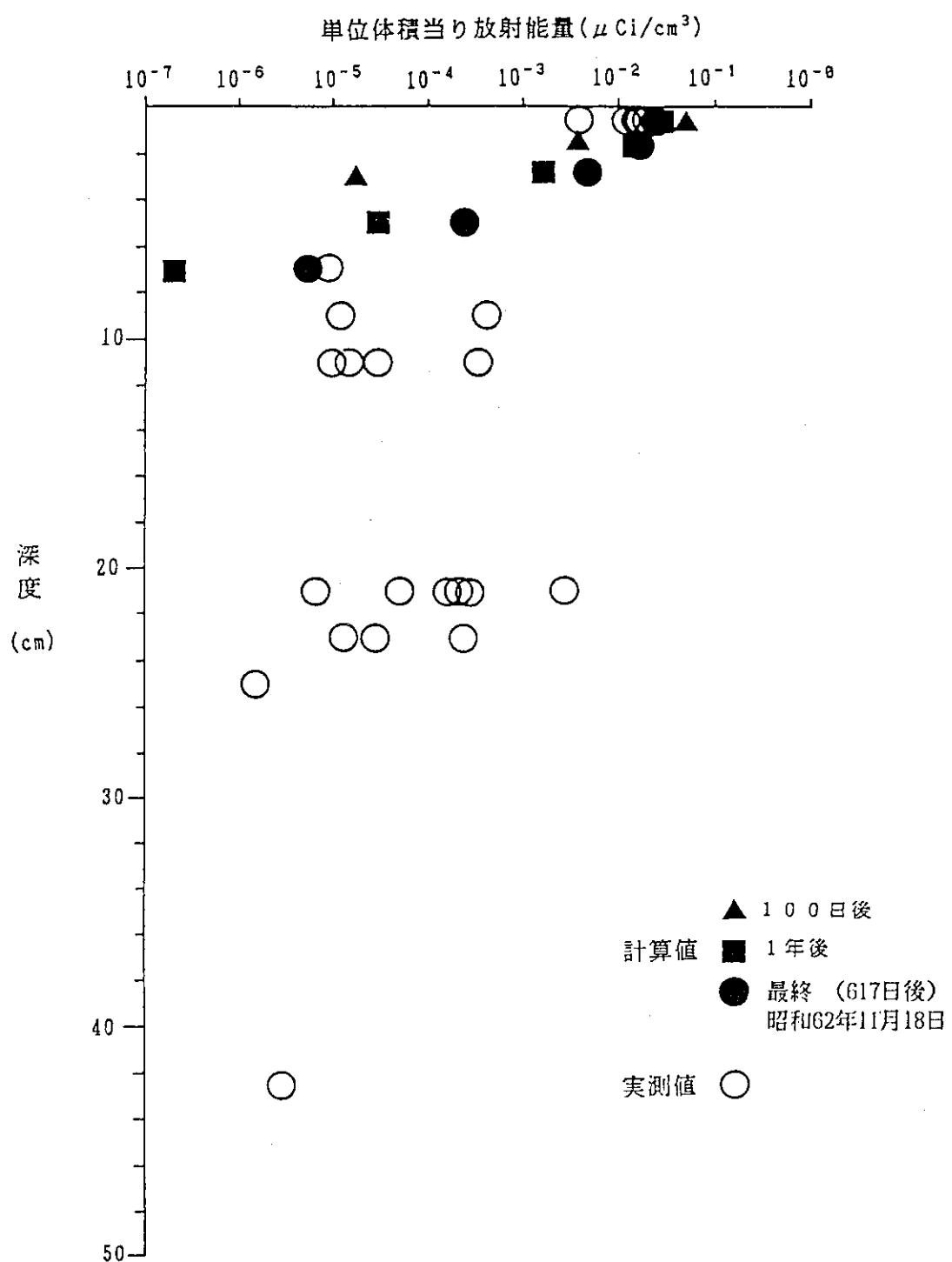


図31 ピットB-1の核種移行解析結果 (Cs-137)

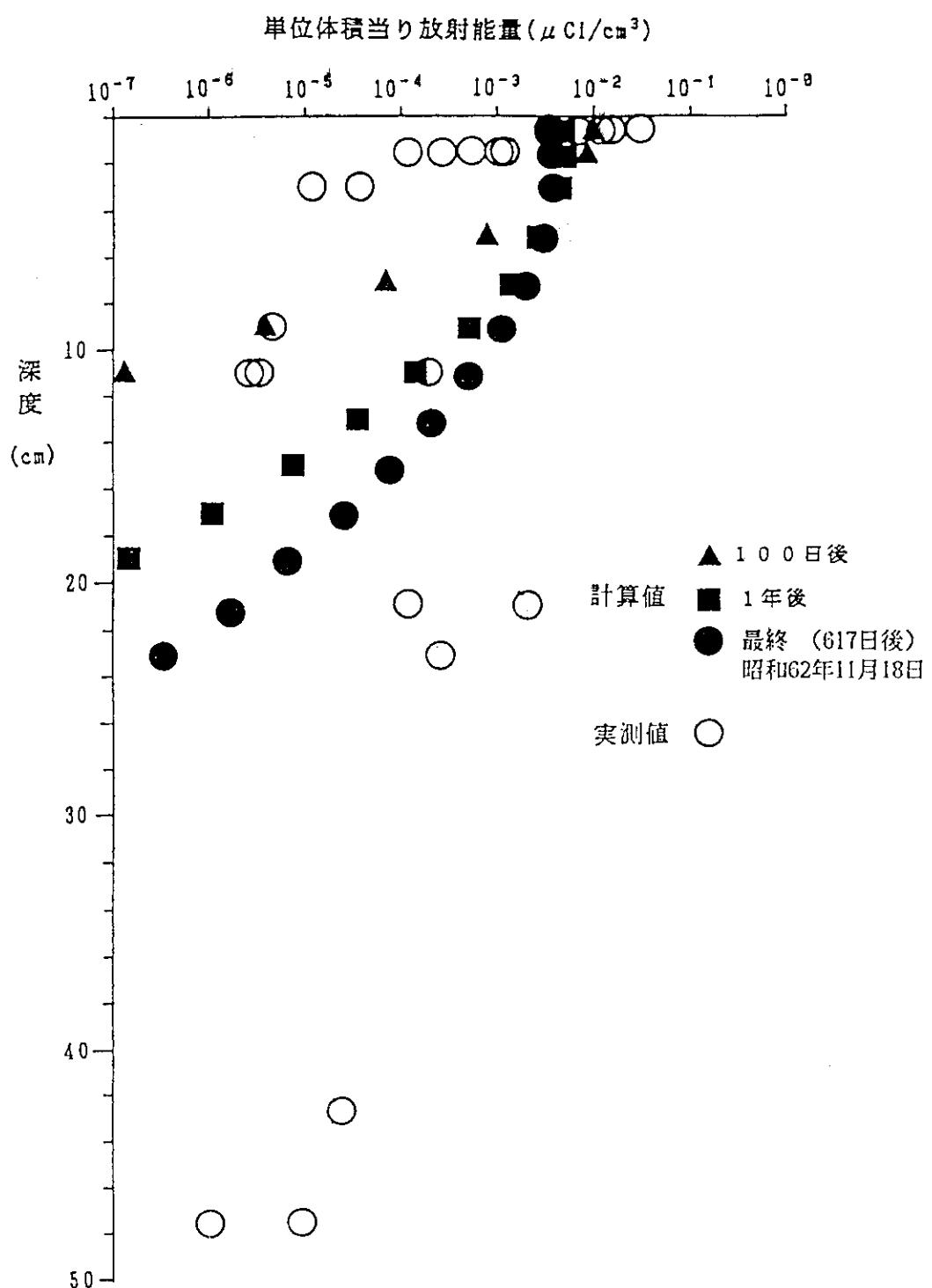


図32 ピットB-1の核種移行解析結果(Sr-90)

5. 安全性実証試験（ピットB-2）の解析

5.1 試験概要

砂丘砂80%と火山灰土20%（乾燥重量比）の混合土を充填材として用い、その内部に放射性核種を含有しているセメント固化体（200リットル）4本を装荷している。

散水は、週1回100リットル/10分の水を充填材表面に供給し、流出水はピットB-1同様に排水している。散水期間は、約2年間である。

対象ピットの諸条件を表11に、概要図を図33に示す。

5.2 浸透流解析

ピットB-2の浸透流解析は、放射性模擬セメント固化体の円形断面を含む鉛直断面内における非定常な水分移動を解析の対象としているため、非定常2次元解析とする。また、その際の不飽和浸透特性については、ピットB-1同様、試験装置解体時に採取した未搅乱充填材試料を用いて別途試験された結果を採用した。

(1) 解析条件

飽和-不飽和浸透流2次元定常解析を行う。

解析に用いたメッシュ図を図34に示す。

(2) 境界条件

約2年間の散水状況は、表12の通りである。

100リットル散水した時点の境界条件は次の通りである。

$$h = \text{散水量 (cm}^3\text{)} / \text{散水面積 (cm}^2\text{)} = 100 \times 10^3 / 36168 = 2.8 \text{ cm}$$

h は、供試体上端面から、貯った水面までの高さである。この h を上端面に与え、ピットB-1同様水位がゼロになった時点で、境界条件を水位固定からフラックスがゼロの境界条件に変更する。また、側面およびセメント固化体周面は不透水境界とし、底面については、試験を観察したところ常時1cmの水が貯っていたため、その値を圧力水頭値として与えた（図-35参照）。

(3) 土中水分特性

試験後に採取した未搅乱充填材試料を用いて測定した水分特性は、図36のようである。

(4) 解析結果

解析結果と実測された排水量と水分ポテンシャルの比較を、図37および38に示す。

実測された排水量の経時変化は、全量を排水するのに1週間を要している。一方、水分ポテンシャルの経時変化は、約2日でほぼ定常状態に落ち着いている。これは、同試験のポテンシャルの範囲での比水分容量が高いか、あるいは、排水に抵抗するような何らかの要因（例えば目

詰まり等) があったと思われる。

本解析で用いた不飽和水分特性は図36の様であり、本試験でのポテンシャルの範囲では、きわめて小さい比水分容量を有している。また、解析では、前提条件として均一を仮定しており、目詰まり等による場の変化は考慮していないので、実測されたような現象を再現することは難しい。それ故、本解析では排水量、水分ポテンシャルの両者の結果にできるだけ整合が取れるような飽和透水係数を設定した。

図37、38に示した解析結果に用いた飽和透水係数は $7 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ であり、これは未攪乱試料を用いて別途室内試験で求められた値と同じである。

以上の理由により、この解析結果を拡散解析の流速データとして用いることにした。図39に散水から1日目の流速ベクトル分布図を示す。

5.3 核種移行解析

(1) 解析条件

a) 解析モデル

ピットB-2の核種移行解析は、非定常2次元解析とし、その解析に用いるメッシュ図は、浸透流解析同様図34の通りである。

b) 初期・境界条件

初期条件は、初期濃度分布をゼロに設定した。

境界条件は、図40に示す。

c) 固化体からの浸出量

固化体からの放射性核種浸出量(図40中に示したQ)は、ピットAのセメント固化体浸漬後200日目までの貯留水中放射性核種濃度曲線とピットA中のセメント固化体に投入された初期放射能量から求めた浸出比曲線に、ピットB-2のセメント固化体埋設から2年後(正確には717日後)におけるセメント固化体周辺10cm以内への放射性核種の全浸出量を考慮し補正して得られた曲線式を用いて算出した。ここで浸出比F(t)とは、固化体から浸出した放射性核種の全量を固化体中の初期放射性核種量で除した比である。図41に各核種の浸出比曲線を示し、以下に各核種毎の得られた式を示す⁷⁾

$$^{60}\text{Co}: F(t) = 1.6 \times 10^{-5} (1 - e^{-0.15t}) + 2.7 \times 10^{-6} \sqrt{t}$$

$$^{137}\text{Cs}: F(t) = 5.0 \times 10^{-3} (1 - e^{-0.75t}) + 1.4 \times 10^{-4} \sqrt{t}$$

$$^{90}\text{Sr}: F(t) = 2.8 \times 10^{-4} (1 - e^{-0.76t}) + 2.8 \times 10^{-5} \sqrt{t}$$

ここで、tは経過日数である。

上式を時間で微分し、固化体中の初期核種量(2mCi)を乗じ、体積含水率で除することによって各核種の土中の浸出量を計算する。

また、解析に用いたメッシュの節点1箇所当たりの浸出量は、土中への放射性核種の浸出が固化体の円周面から浸出するものとし、それを単位奥行きあたり(固化体長90cm)に換算した後、節点数(12個)で等分することにより与えた。

節点1箇所当たり = $dF(t) / dt \times 2mCi / (\text{体積含水率} \times 90\text{cm} \times 12)$ の浸出量

d) 入力パラメータ

解析に用いたパラメータの内、遅延係数については表7に示した値を用い、分散係数についてはピットB-1同様、図23に示した①式を用いて決定した。

(2) 解析結果および考察

図42～44に¹³⁷Cs・⁶⁰Co・⁹⁰Srの実測結果（固化体埋設から717日後）の放射能濃度コンターを示す。また、解析結果の濃度コンターを経時別に図45～47に示す。

なお、濃度はスライスされた充填材供試体に含まれる単位乾土重量当たりの放射能量（ $\mu Ci/g$ ）であり、この放射能量は土粒子に吸着した放射能量と間隙水中の放射能量を合わせた値である。一方、解析では水中放射能濃度が得られているため、それに $R_f \theta$ (R_f ；遅延係数、 θ ；体積含水率) を乗じ、さらに乾燥密度で除することにより単位乾土重量当たりの放射能量に換算した。

実測結果では、全核種とも全般的に流速の影響を受け下流部へ移行する傾向を示しているが、解析結果は、流速による移流の効果が小さく、セメント固化体周辺では同心円状の濃度分布が見られる。しかし、その濃度値は、実測値とよく対応していると言える。

解析結果の経時別濃度分布状況（図45～47）をみると、時間当たり浸出量の多い初期段階（図41参照）ほど濃度分布にバラツキが見られ、流速の影響を大きく受けたと考えられる。しかし、時間の経過とともに周辺の濃度分布は、ほぼ同心円状になる。

本解析の核種移行解析に用いた流速分布は、2日ほどでほぼ排水完了するものであり、その流速の最大値は $3.5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ であった。排水が完了した2日以降7日までは、流速がゼロの状態が続くものである。従って、本解析で用いた分散係数は、図23において流速が $3.5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 以下の時の値すなわち、分子拡散係数とほぼ同じ値になる。このことから、本解析では、放射性核種の移動は、流速による移流よりも濃度勾配による拡散現象の方が卓越したものと考えられる。

以上の結果、本解析で用いた手法で現象を大体再現できるものと考えられる。

5.4 長期にわたる放射性核種濃度分布の推定

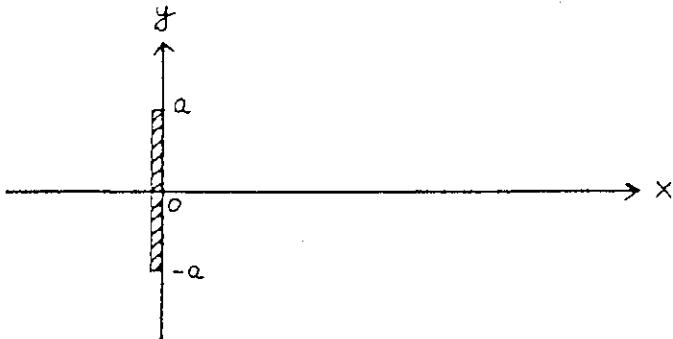
(1) 解析手法

今までの結果を基にピットB-2における300年後の濃度分布の予測を行う。

解析手法は、上記の2年後までの解析で用いた手法を採用することが望ましいが、流速場が非定常であるので計算を実施することが現実的ではないタイムステップになる。また、流速場に平均値を用いた場合にも、解の精度を維持するためには約数万ステップの計算が必要であり、この扱いも実際にすることは難しい。それ故、ここでは、図42～47の本解析結果から、固化体から浸出した核種は流速場の変化の影響を受けず、ほぼ濃度勾配による拡散現象によって周辺へ移動していることが分かっているので、理論解を用いて推定することにする。

ゼロ流速場に於て、境界の濃度が指數関数的に減少する場合の理論解は次式で表される⁸⁾。

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 x}{4(\pi D)^{1/2}} \exp(-\alpha t) \cdot \int_0^{t/R} \exp[-(\lambda R - \alpha R)\tau] - \frac{x^2}{4D\tau}] \tau^{-3/2} \cdot [\operatorname{erf}\left(\frac{a-y}{2(D\tau)^{1/2}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{a+y}{2(D\tau)^{1/2}}\right)] d\tau \quad (5)$$



ここで、 a は濃度指定境界長さの二分の一である。 α は境界における濃度の減少の割合を表す定数で、境界条件は以下のように与えられる。

$$C(0, y, t) = C_0 \exp(-\alpha t); -a \leq y \leq a, \quad C(0, y, t) = 0; \text{他の } y \text{ の時}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{C}{x} = 0, \quad \lim_{y \rightarrow \infty} \frac{C}{y} = 0$$

B-2の境界条件は指数関数と放物曲線を足した形で表され、指数関数のみとは異なるので、2年後の解析結果との比較においては、100日と707日の単位時間当たり浸出量から C_0 と α を求めた。すなわち、100日の単位時間当たり浸出量を $F(100)$ 、707日のそれを $F(707)$ として次式より α を求める。

$$\frac{F(100)}{F(707)} = \exp [(-100 + 707) \cdot \alpha] \quad (6)$$

次に、この α を用いて(7)式さら C_0 を求めた。

$$F(707) = C_0 \exp(-\alpha \cdot 707) \quad (7)$$

この様にして求めた $y=0$ における2年後の ^{137}Cs の濃度分布を図48に示す。同図から、有限要素法を用いての結果もほぼこの様な流速ゼロかつ指数関数的に減少する境界の場合と同じであることが分かる。また、実験では解析に用いた遅延係数よりも大きな遅延係数を持っているような結果になっている。これらのこととは、 ^{60}Co , ^{90}Sr についても同様であった。

(2) 解析結果

以上のことから、ピットB-2の実験を上記のような手法で評価してもさほど現実から遊離したものにはならないと判断できる。

図49に上述した手法と同様の手法で求めた300年後の¹³⁷Cs, ⁶⁰Coおよび⁹⁰Srの濃度分布を示す。放射性核種は同心円状に拡散するので、この濃度分布で放射状に分布するものと予想される。なお、300年後の予測に対しての境界条件として、10年と300年の浸出量からCoとαを求めた。

(3) 考 察

固化体からの浸出量が最も多い¹³⁷Csが最も高い濃度のピークを示し、300年後には計測限界 ($1 \times 10^{-7} \mu\text{Ci}$) の濃度が固化体より40 cm以上離れた地点でも見られる。遅延係数の小さい⁹⁰Srも同程度の地点まで計測限界以上の濃度が検出されるが、最高濃度は低い。⁶⁰Coは2年後から300年後まであまり移動しないと言える。

ピットB-2の実験では固化体から下端まで36 cmであるので、¹³⁷Csと⁹⁰Srは下端の排水槽に300年後には核種が流出するものと予想される。

表11 ピットB-2の概要

項目		摘要
充填材土質	混合土	砂丘砂+火山灰土(4:1)
使用核種	Co - 60	添加量 固化体 No.32.0 Ci " " No.42.0 Ci
"	Cs - 137	添加量 固化体 No.32.0 Ci " " No.42.0 Ci
"	Sr - 90	添加量 固化体 No.52.0 Ci " " No.62.0 Ci
比重	2.71	
平均乾燥密度	1.35 g/cm ³	
平均飽和透水係数	6.96×10^{-5} cm/s	未搅乱試料より求めた値
散水量	100 ℥/週	毎分 10 ℥ の 4 分で散水
試験期間	717 日	総散水量 10030 ℥

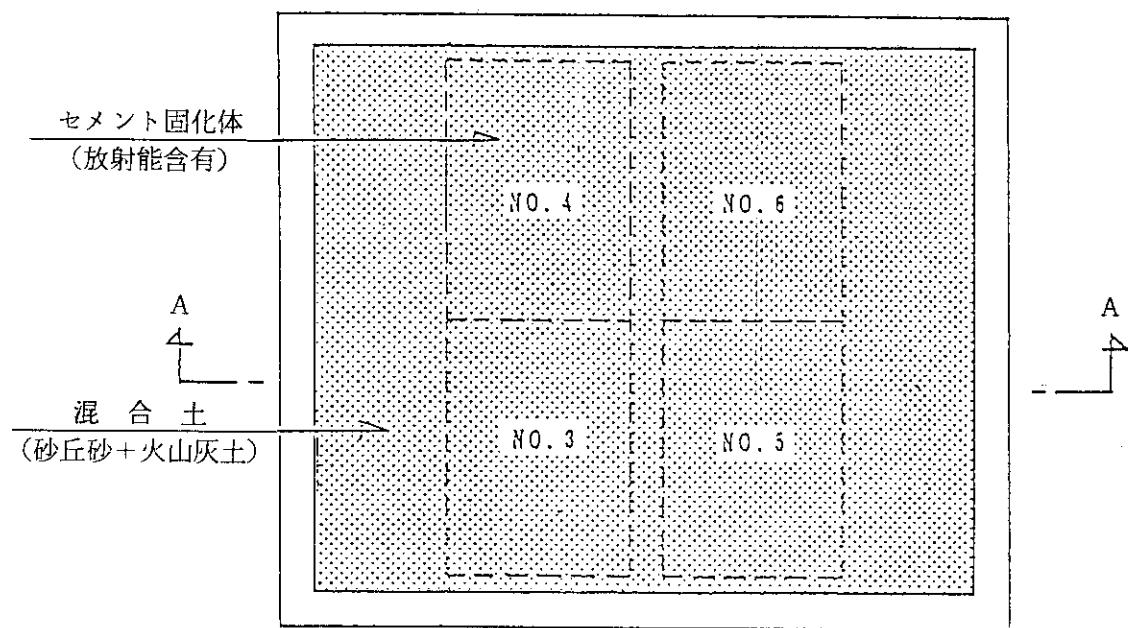
表12 ピットB-2の散水状況

単位；リットル

S.60.12/2	12/5	12/11	12/18	12/24	S. 61.1/9	1/22
100	160	100	100	100	100	70
1/30	~	7日毎	~	S. 62.11/12		
100	100	100	100	100		

S. 60.10/30, 31に固化体を埋設した。

平面図



A-A 断面図

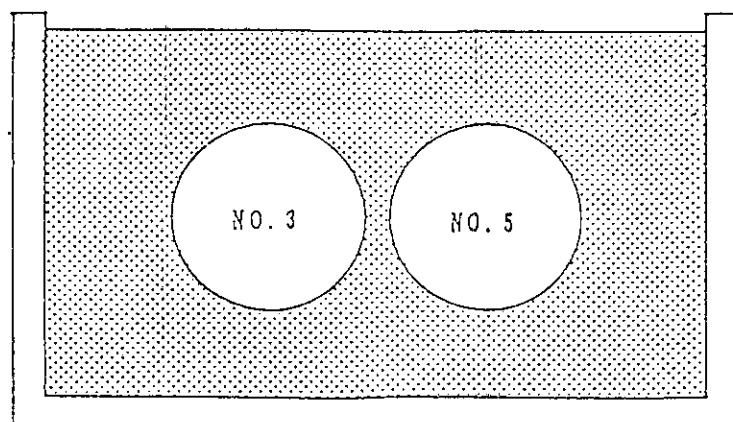


図33 ピットB-2 試験装置概略図

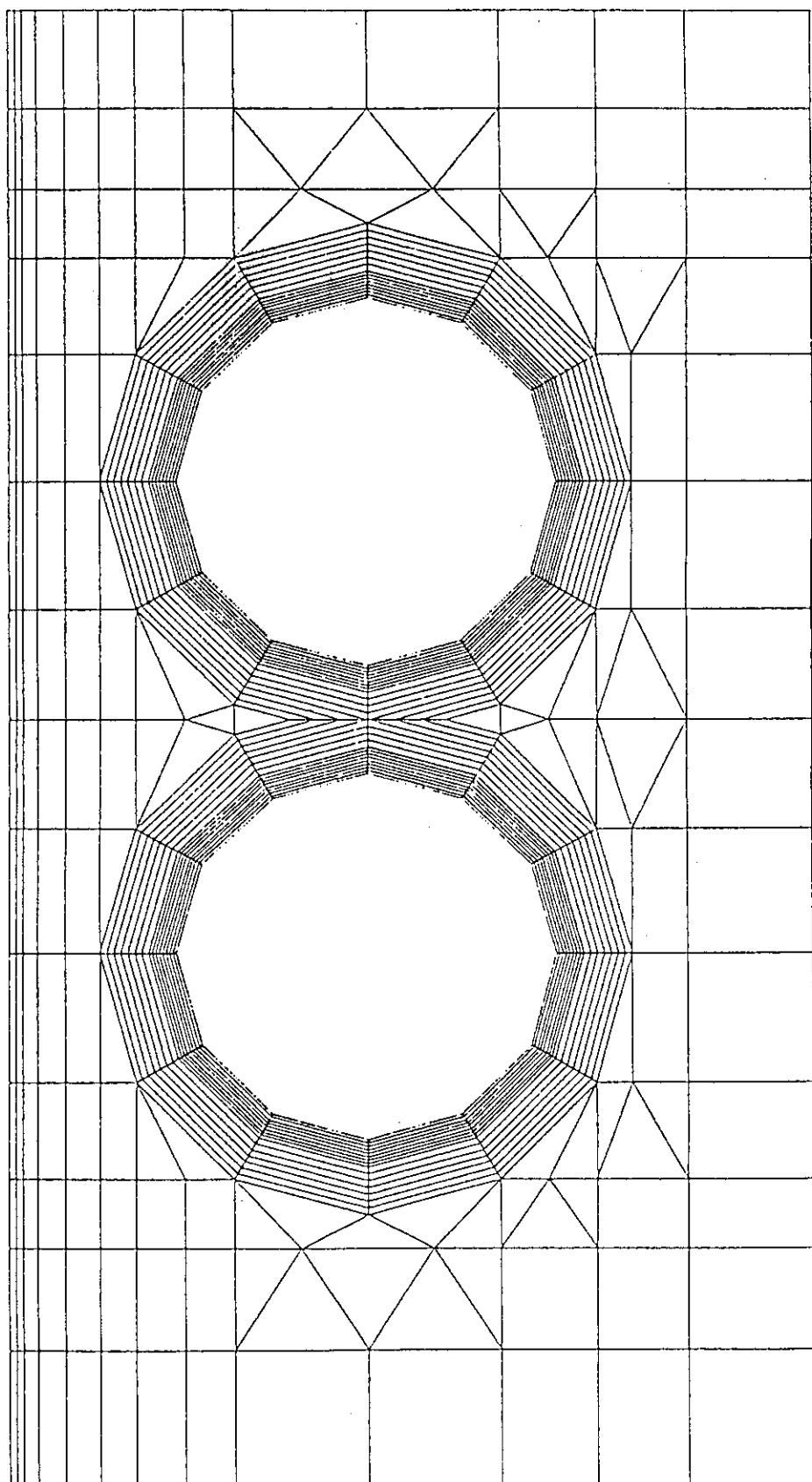


図 34 ピッタ B-2 の解析に用いたメッシュ図

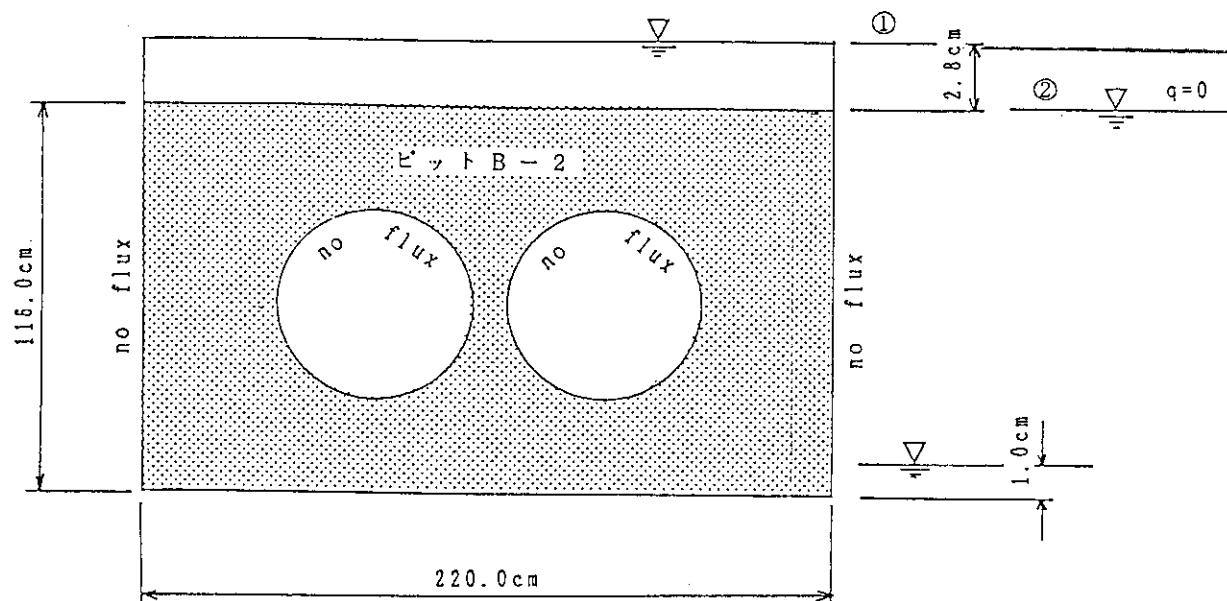


図 35 ピット B-2 浸透流解析の境界条件

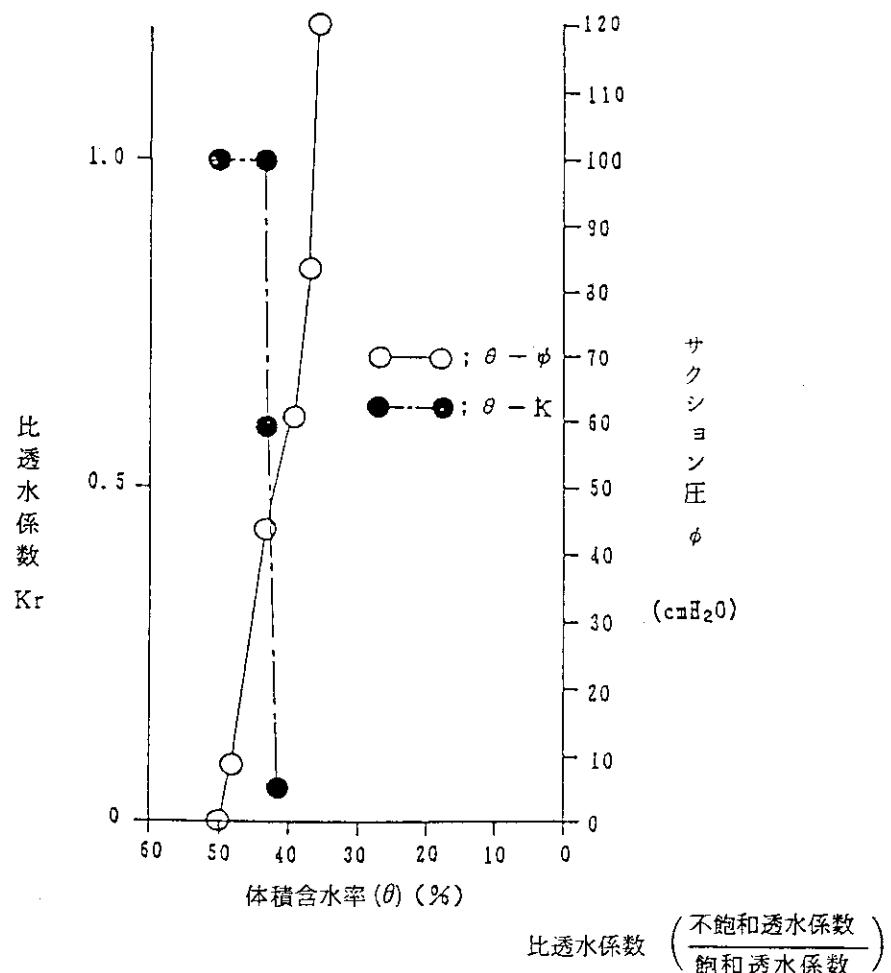


図 36 ピット B-2 に用いた不飽和透水関数

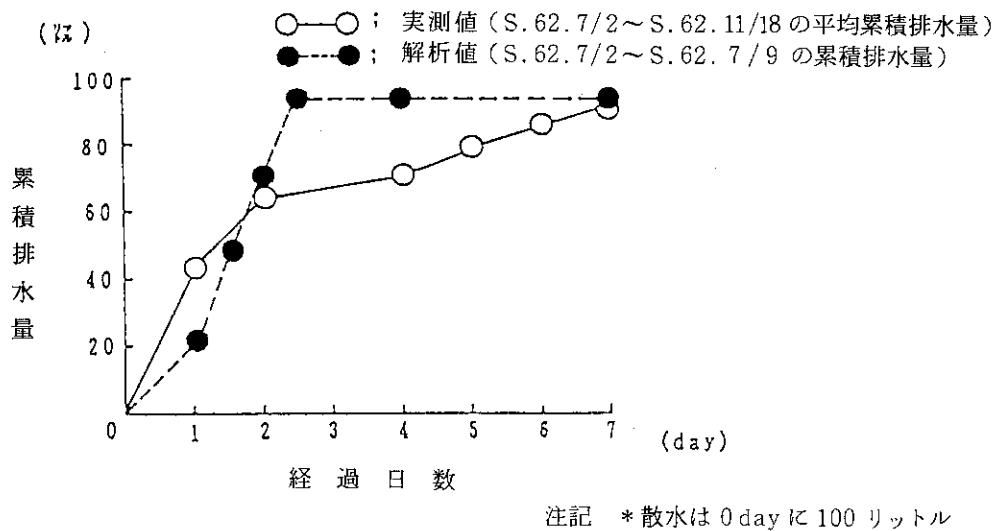


図37 ピットB-2の浸透流解析結果（実測排水量との比較）

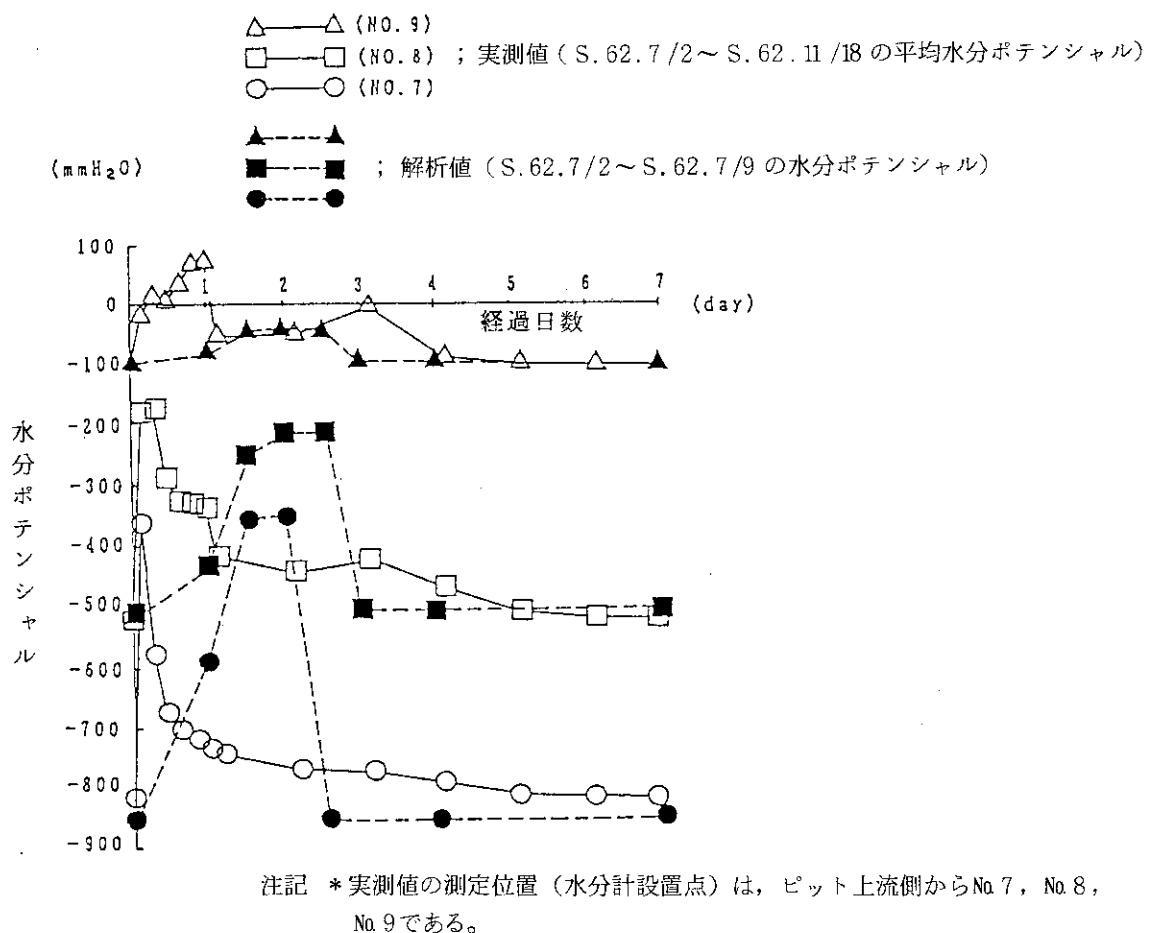


図38 ピットB-2の浸透流解析結果（実測水分ポテンシャル値との比較）

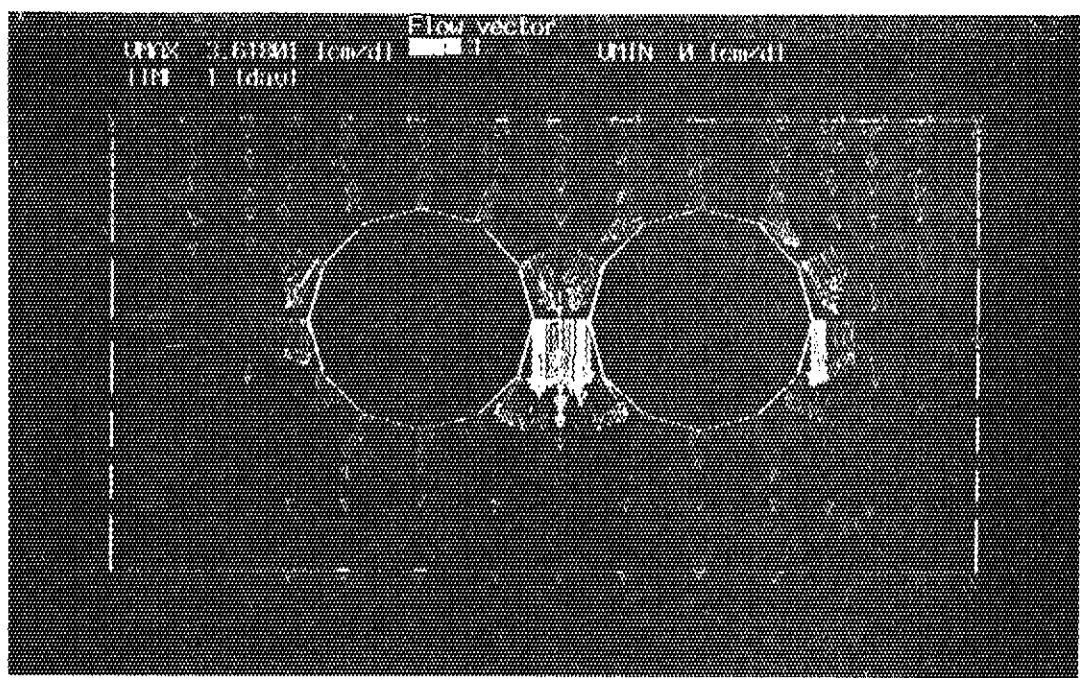


図39 ピットB-2の流速ベクトル分布図（散水から1日目）

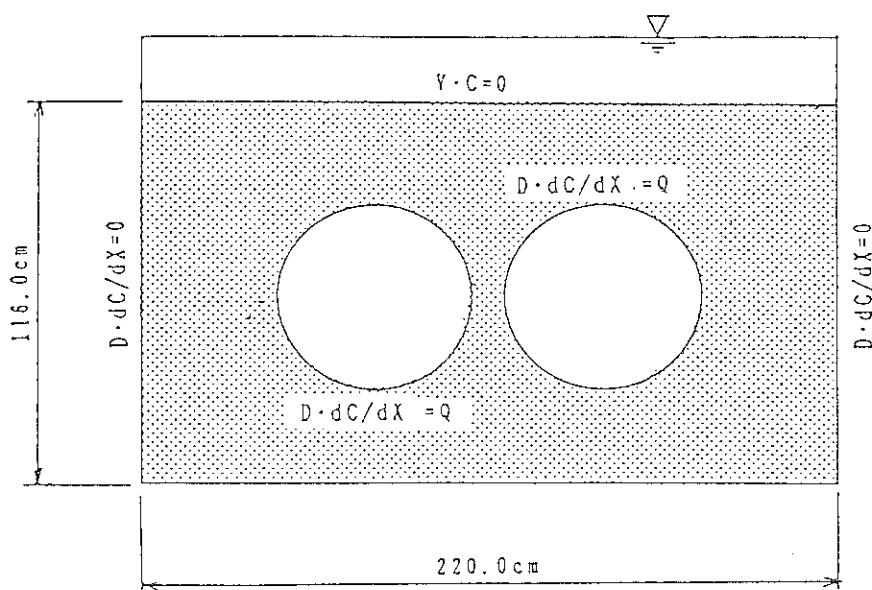


図40 ピットB-2核種移行解析の境界条件

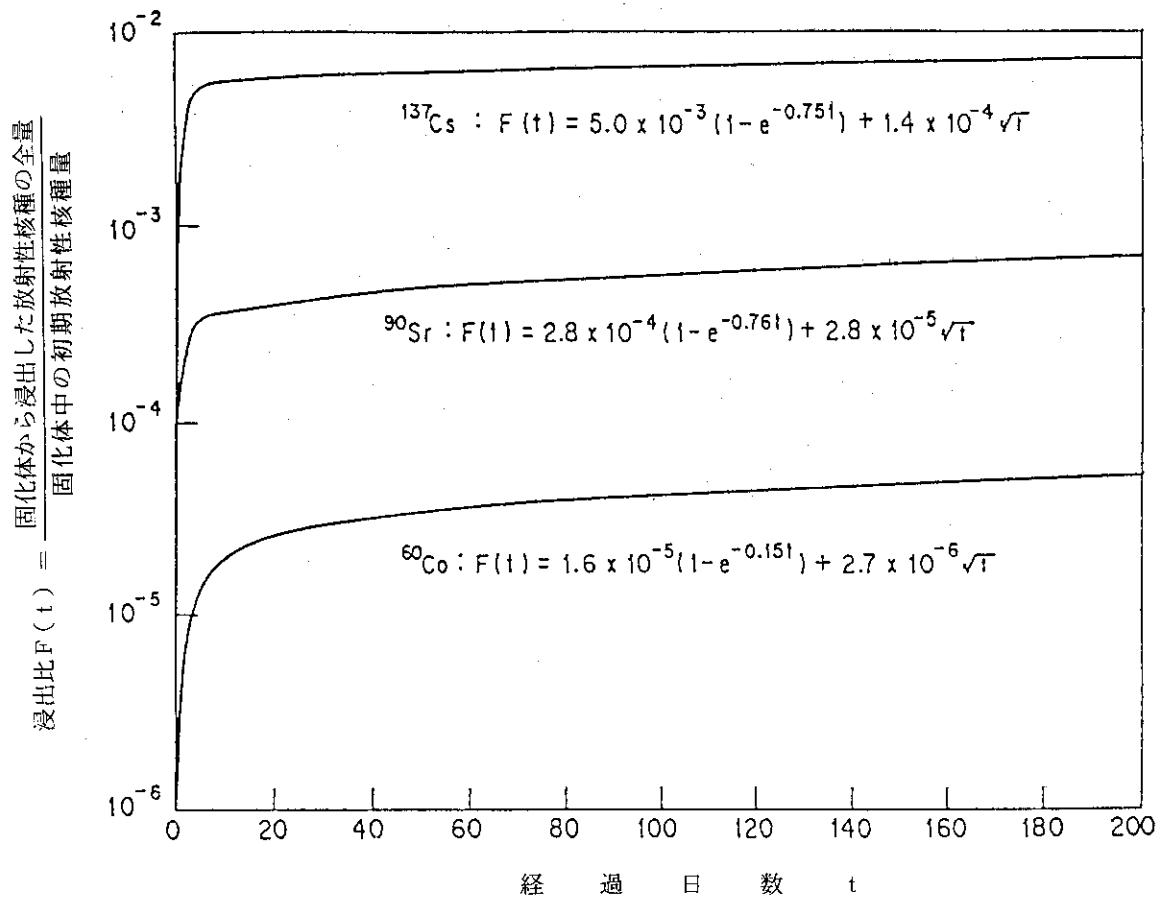


図 41 ピット B-2 の解析に用いる各種の浸出比曲線

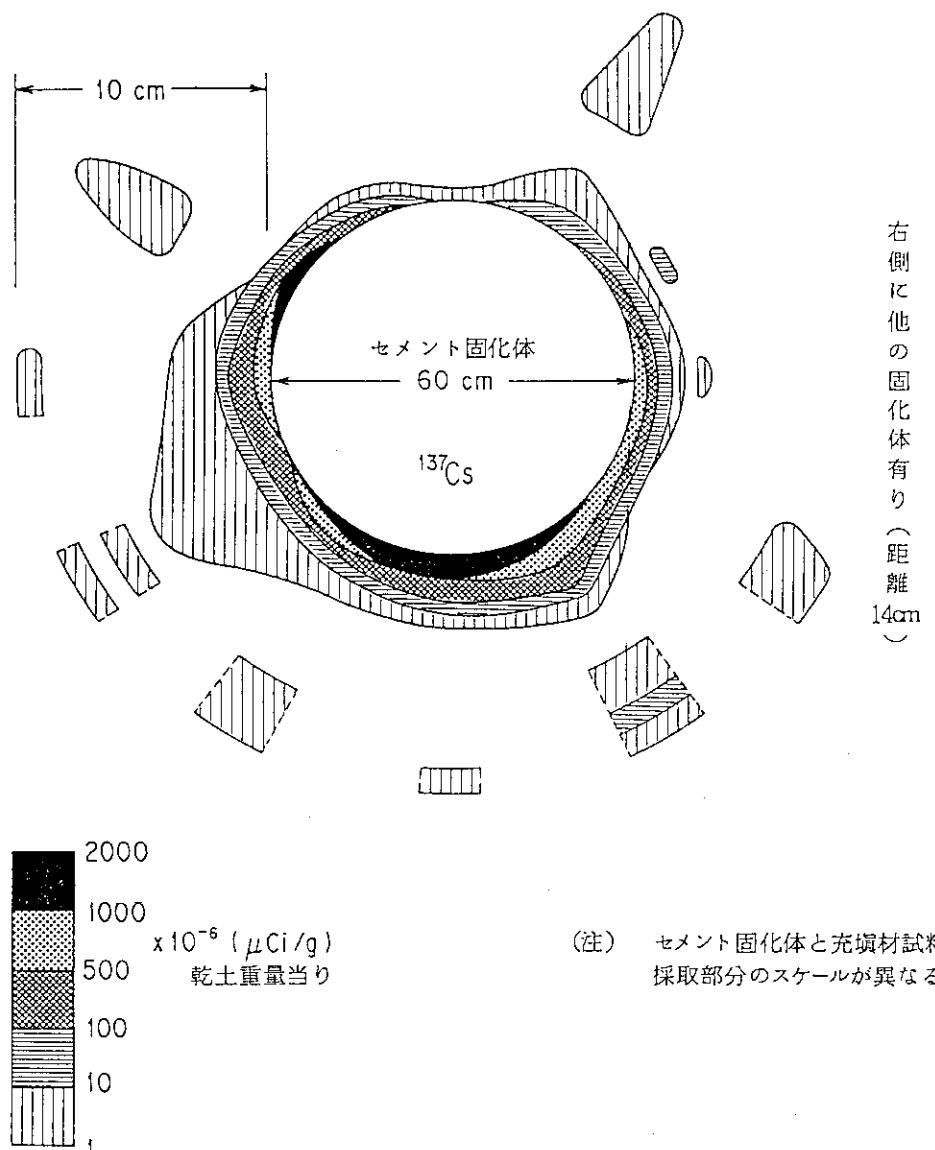


図 42 固化体周辺充填材（混合土）中の ^{137}Cs の放射能濃度分布
(固化体 No.3, 4 周辺の平均濃度分布)

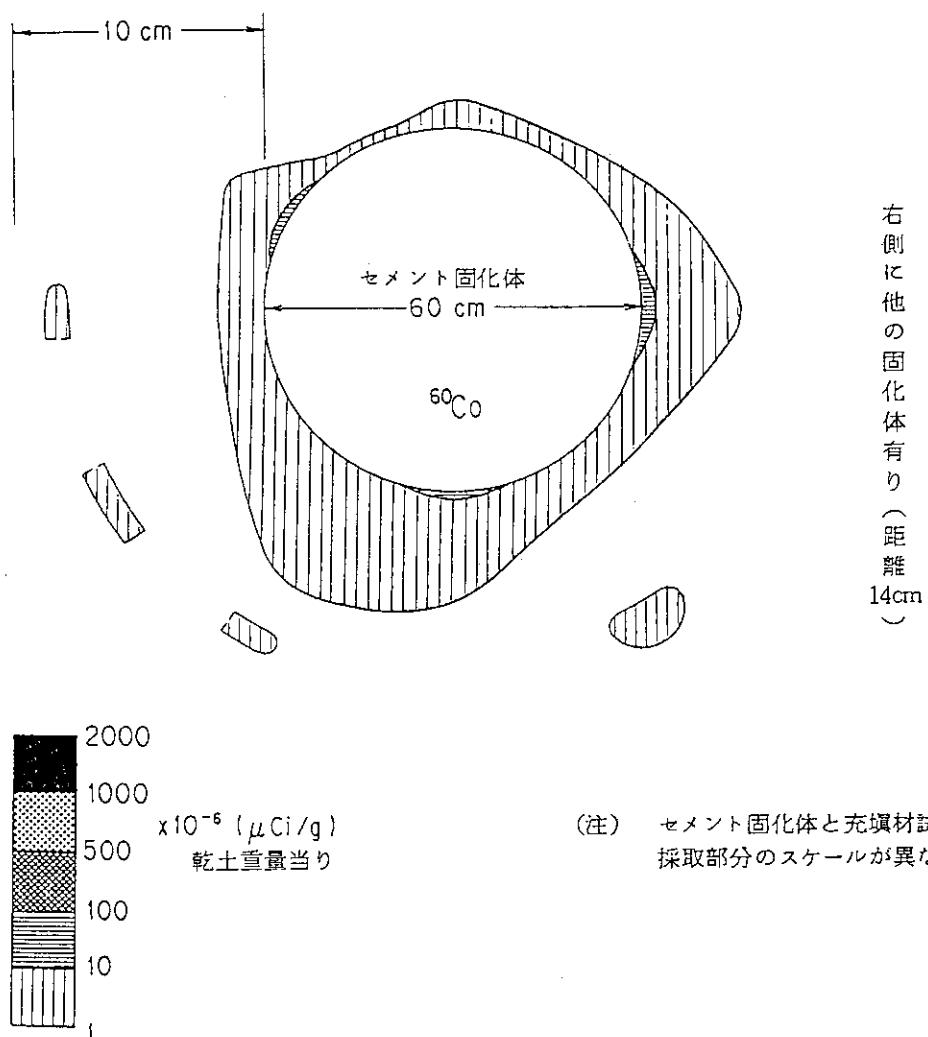


図43 固化体周辺充填材（混合土）中の ^{60}Co の放射能濃度分布
(固化体 No. 3, 4 周辺の平均濃度分布)

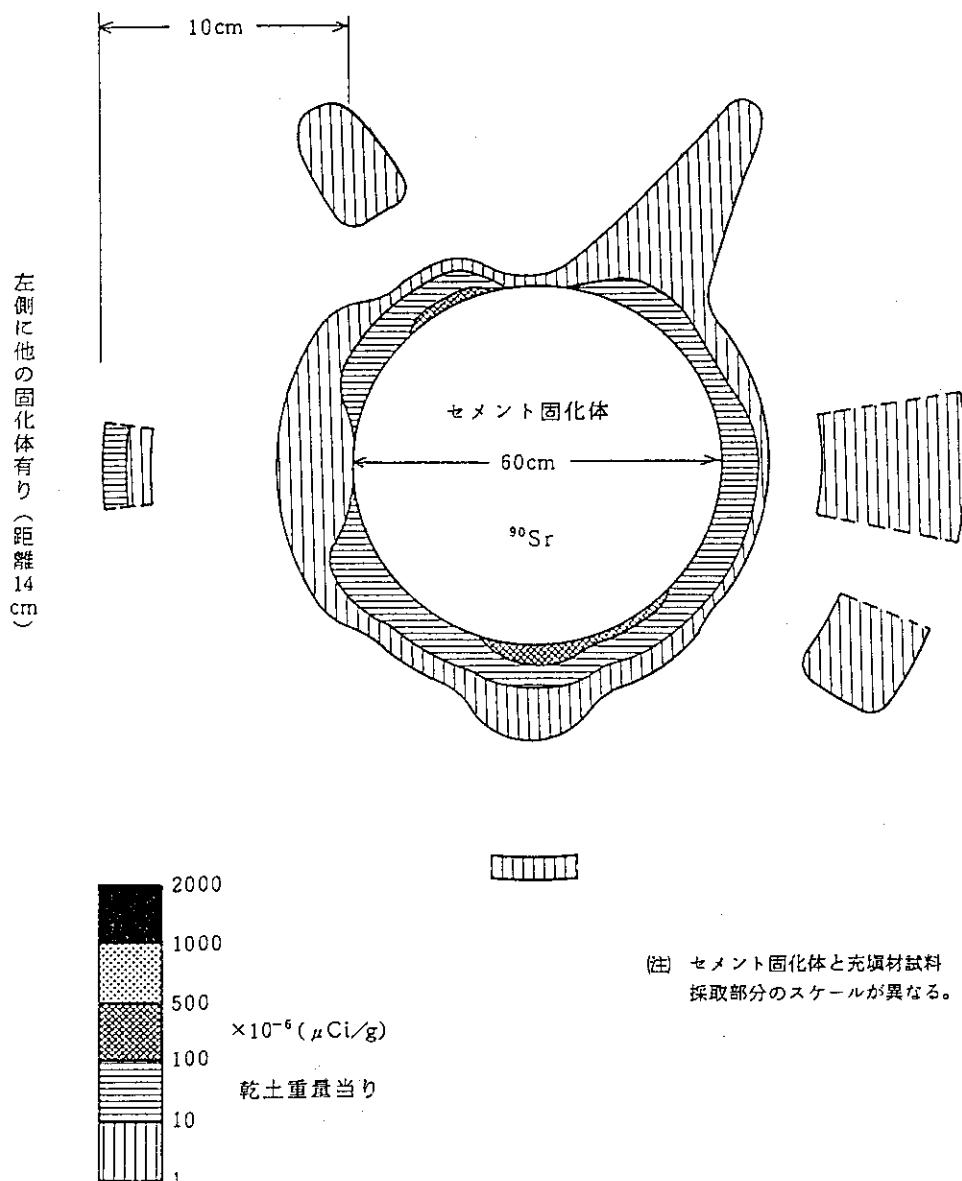
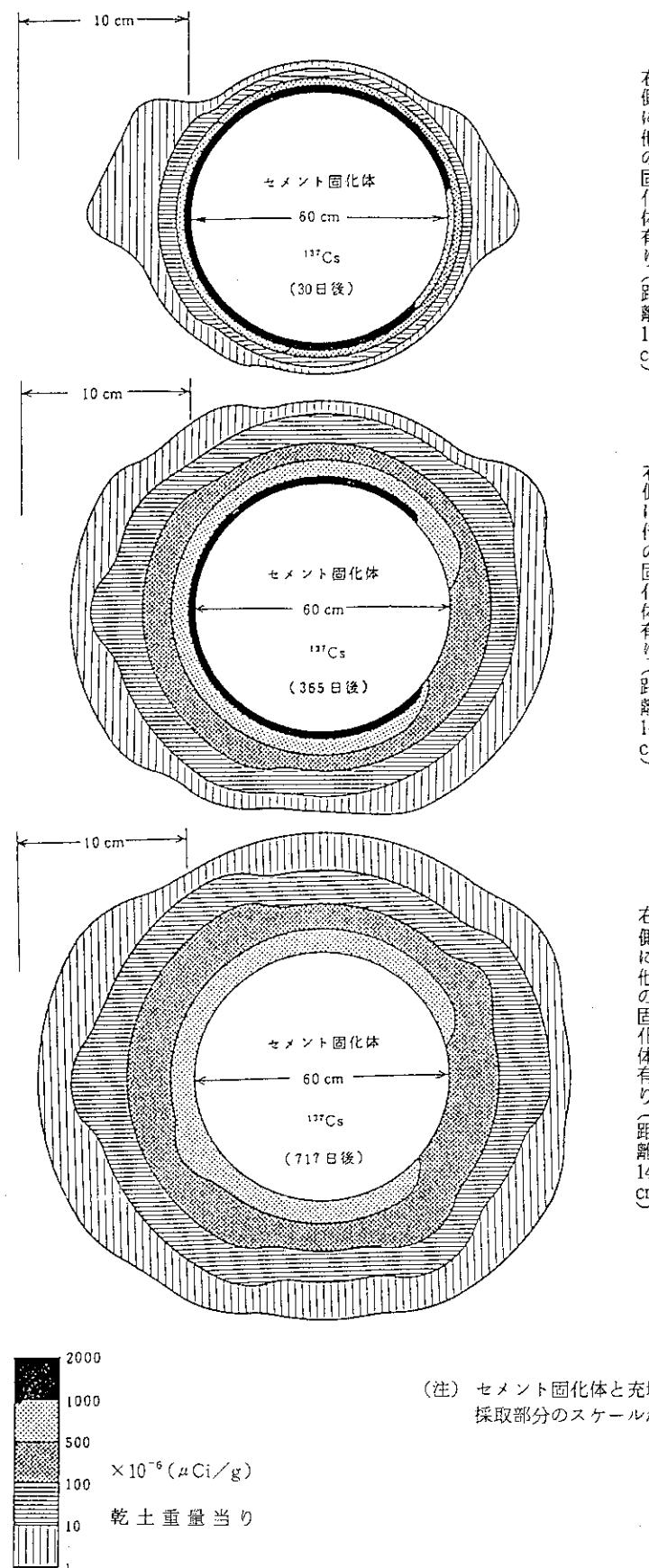
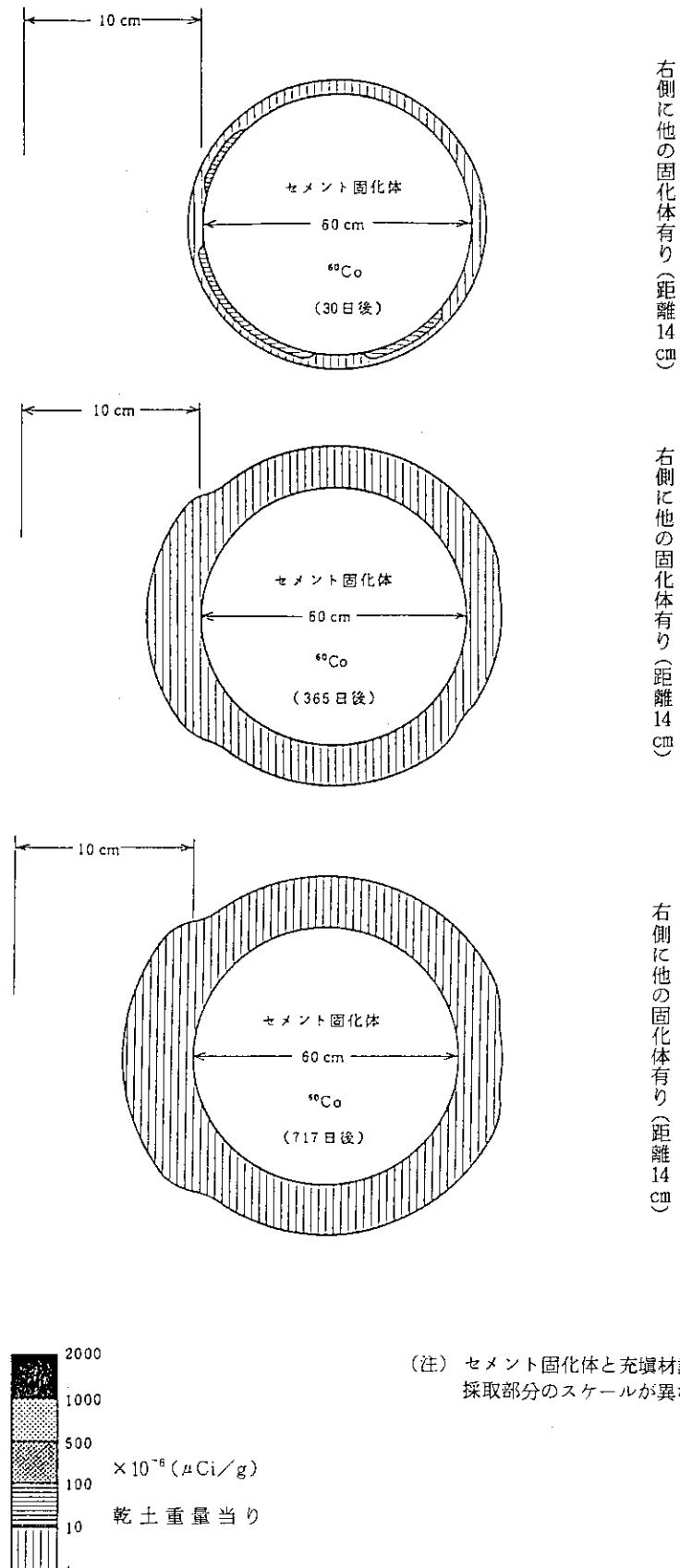
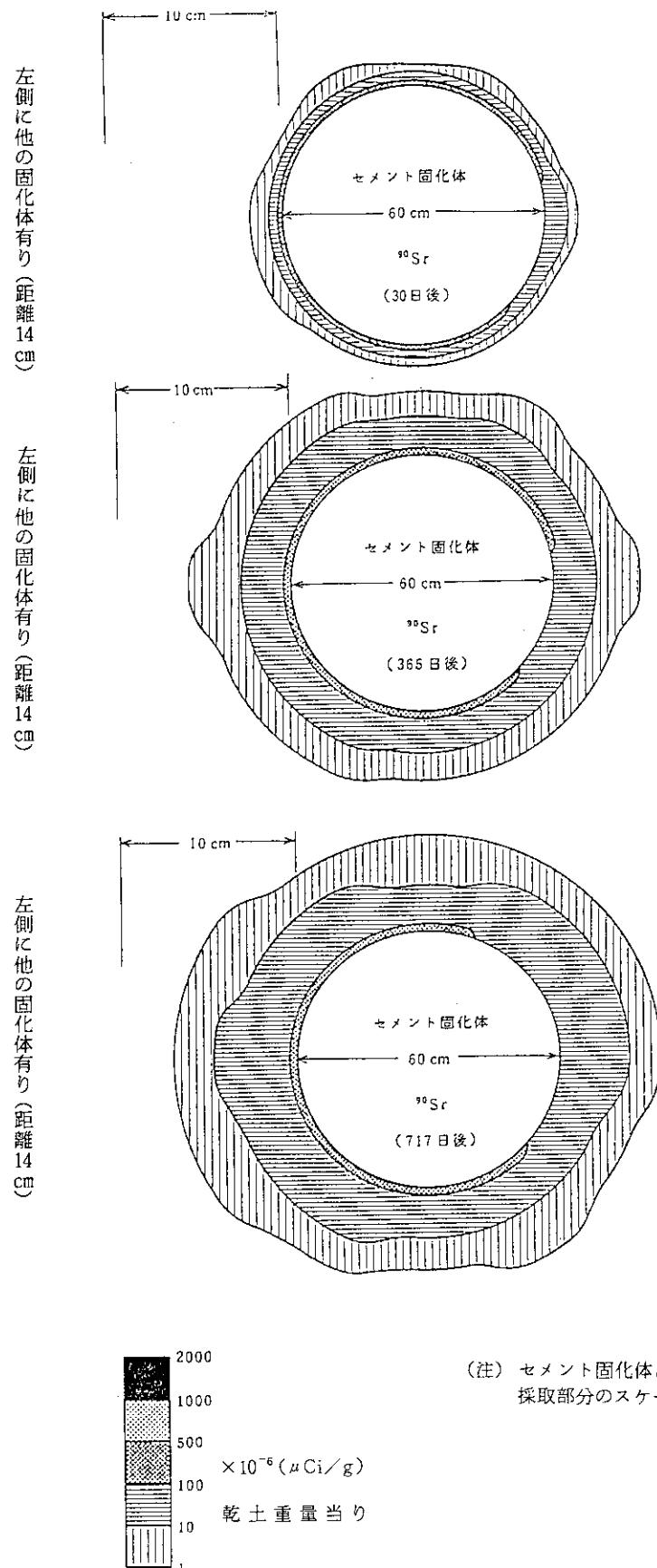
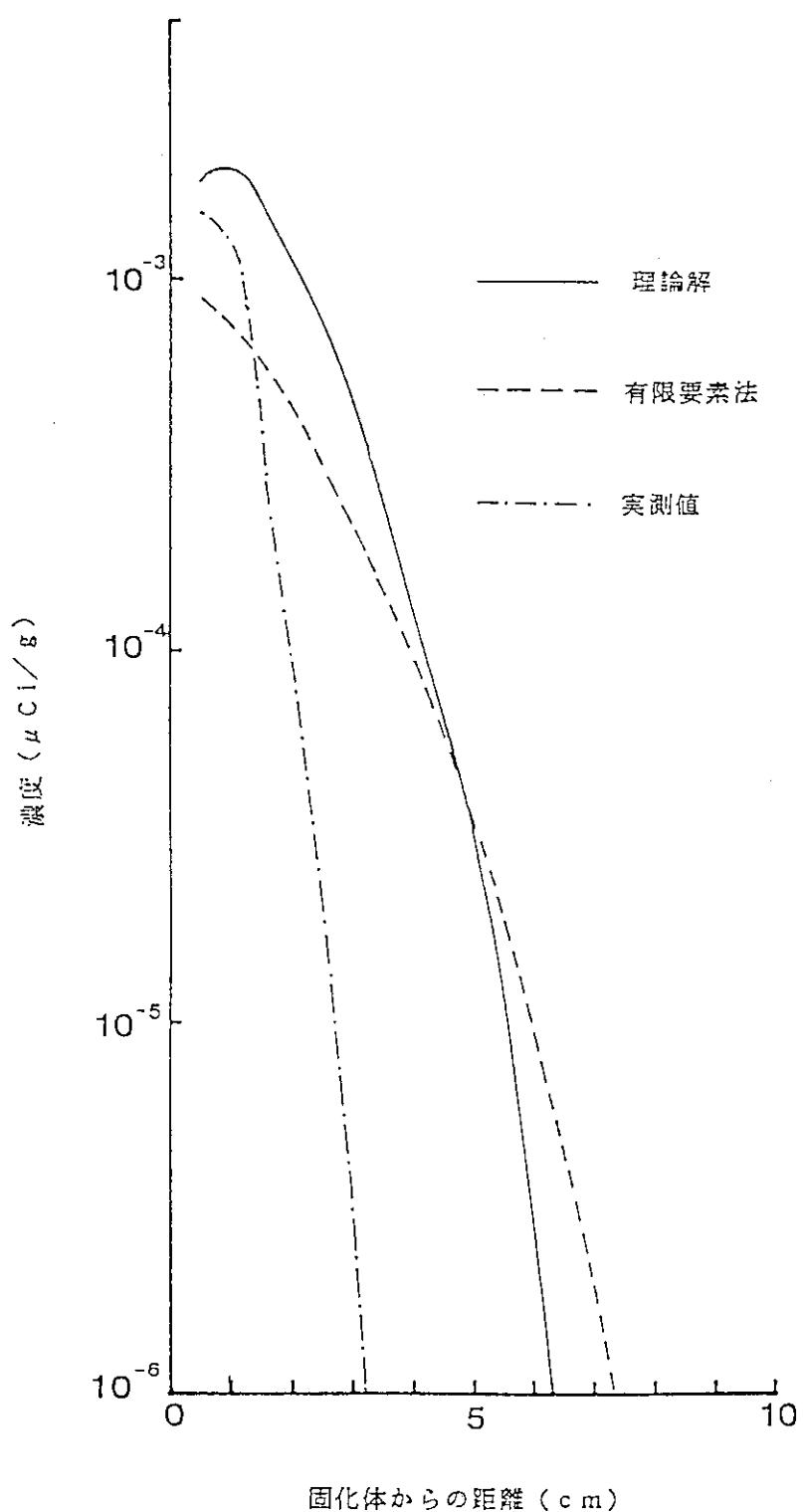


図44 固化体周辺充填材（混合土）中の ^{90}Sr の放射能濃度分布
(固化体 No.5, 6周辺の平均濃度分布)

図45 解析による ^{137}Cs の濃度分布の経時変化

図46 解析による⁶⁰Coの濃度分布の経時変化

図 47 解析による ^{90}Sr の濃度分布の経時変化



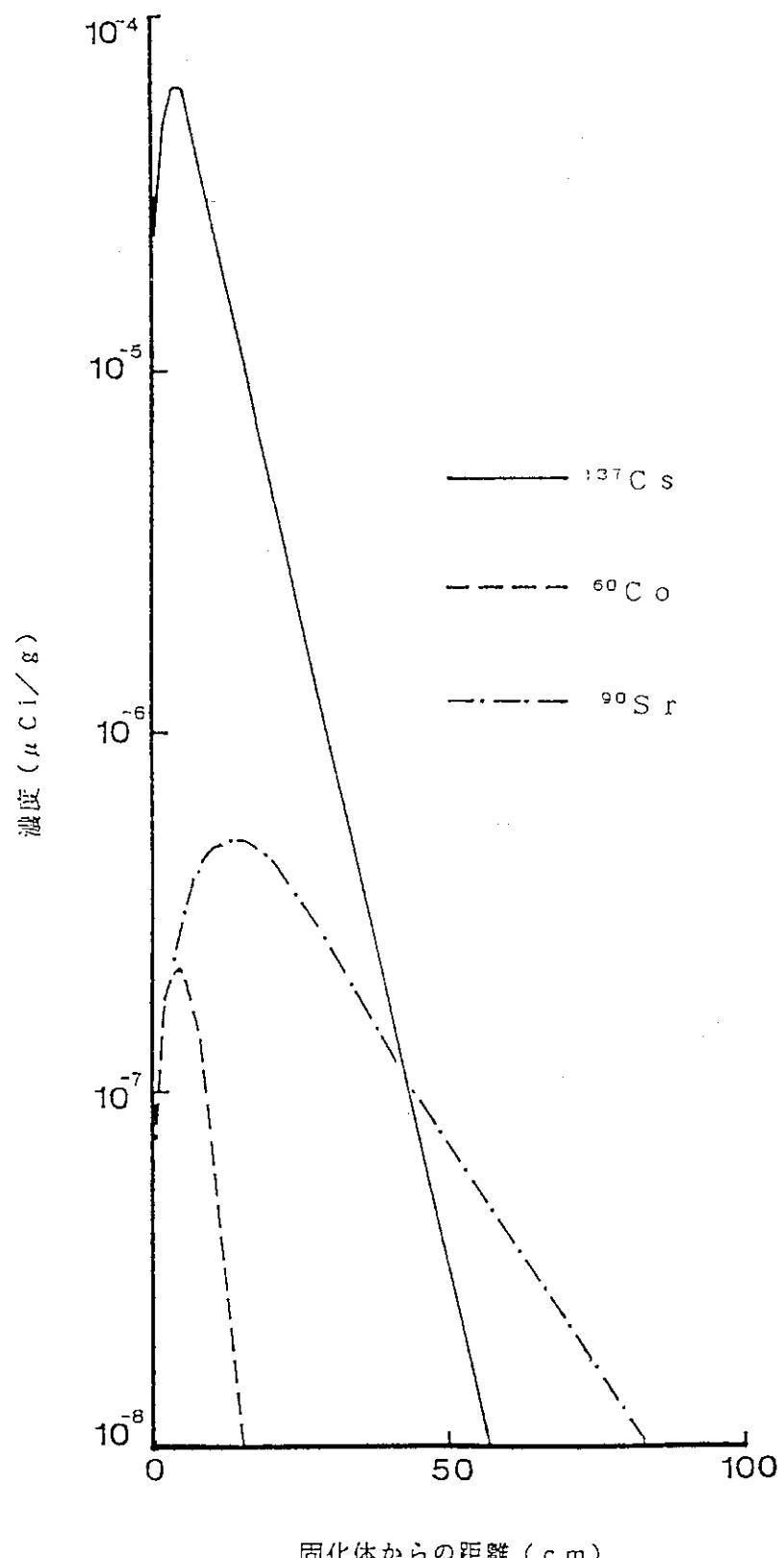


図49 300年後の濃度分布

6. まとめ

土質材料を用いた充填材中を、浸透流に沿って⁶⁰Co, ⁹⁰Srおよび¹³⁷Csの3核種が移行する現象をシミュレートする方法として、オイラー・ラグランジエ手法を用いた有限要素法による核種移行解析は、非常に有効であると判断された。

謝 辞

本報告をまとめに際して、多くの助言を頂いた環境安全研究部和達嘉樹次長ならびに東京大学農学部中野政詩教授に感謝の意を表します。また、計算およびまとめに協力を頂いた懶間組弘末文紀氏ならびに小林晃氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 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307号, III-5, pp. 151~158, 1986.
- 2) Neuman, S.P., P.A. Witherspoon: Analysis of Nonsteady Flow with a Free Surface using the Finite Element Method, Water Resour. Res., pp.889~897, 1970.
- 3) 赤井浩一, 宇野尚雄: 土中の準一次元非定常浸透流に関する研究, 土木学会論文集, 127, pp. 14~22, 1966.
- 4) 小林晃: オイラー・ラグランジエ手法を用いた岩盤内の拡散挙動解析, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 241~246, 1987.
- 5) P. S. フヤコーン, G. F. ピンダー: 地下水解析の基礎と応用 上巻 基礎編, pp. 205~206, 1987.
- 6) Neuman, S.P.: A Eulerian-Lagrangian scheme for the dispersion-convection equation using conjugate space-time grids, J. Compt., Phys., 41, pp.270~294, 1981.
- 7) Pierre L. Cote, Thomas W. Constable: An Evaluation of Cement-based Waste Forms using the Results of Approximately Two Years of Dynamic Leaching, NUCLEAR AND CHEMICAL WASTE MANAGEMENT. Vol. 7, pp.129~139, 1987.
- 8) Iraj Javandel, Christine Doughty, Chin-Fu Tsang: GROUNDWATER TRANSPORT: HANDBOOK OF MATHEMATICAL MODELS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION WASHINGTON, D.C., 1984.

6. まとめ

土質材料を用いた充填材中を、浸透流に沿って⁶⁰Co, ⁹⁰Srおよび¹³⁷Csの3核種が移行する現象をシミュレートする方法として、オイラー・ラグランジエ手法を用いた有限要素法による核種移行解析は、非常に有効であると判断された。

謝 辞

本報告をまとめに際して、多くの助言を頂いた環境安全研究部和達嘉樹次長ならびに東京大学農学部中野政詩教授に感謝の意を表します。また、計算およびまとめに協力を頂いた懶間組弘末文紀氏ならびに小林晃氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 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307号, III-5, pp. 151~158, 1986.
- 2) Neuman, S.P., P.A. Witherspoon: Analysis of Nonsteady Flow with a Free Surface using the Finite Element Method, Water Resour. Res., pp.889~897, 1970.
- 3) 赤井浩一, 宇野尚雄: 土中の準一次元非定常浸透流に関する研究, 土木学会論文集, 127, pp. 14~22, 1966.
- 4) 小林晃: オイラー・ラグランジエ手法を用いた岩盤内の拡散挙動解析, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 241~246, 1987.
- 5) P. S. フヤコーン, G. F. ピンダー: 地下水解析の基礎と応用 上巻 基礎編, pp. 205~206, 1987.
- 6) Neuman, S.P.: A Eulerian-Lagrangian scheme for the dispersion-convection equation using conjugate space-time grids, J. Compt., Phys., 41, pp.270~294, 1981.
- 7) Pierre L. Cote, Thomas W. Constable: An Evaluation of Cement-based Waste Forms using the Results of Approximately Two Years of Dynamic Leaching, NUCLEAR AND CHEMICAL WASTE MANAGEMENT. Vol. 7, pp.129~139, 1987.
- 8) Iraj Javandel, Christine Doughty, Chin-Fu Tsang: GROUNDWATER TRANSPORT: HANDBOOK OF MATHEMATICAL MODELS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION WASHINGTON, D.C., 1984.

6. ま　と　め

土質材料を用いた充填材中を、浸透流に沿って⁶⁰Co, ⁹⁰Srおよび¹³⁷Csの3核種が移行する現象をシミュレートする方法として、オイラー・ラグランジエ手法を用いた有限要素法による核種移行解析は、非常に有効であると判断された。

謝　　辞

本報告をまとめるに際して、多くの助言を頂いた環境安全研究部和達嘉樹次長ならびに東京大学農学部中野政詩教授に感謝の意を表します。また、計算およびまとめに協力を頂いた懶間組弘末文紀氏ならびに小林晃氏に感謝致します。

参　考　文　献

- 1) 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307号, III-5, pp. 151~158, 1986.
- 2) Neuman, S.P., P.A. Witherspoon: Analysis of Nonsteady Flow with a Free Surface using the Finite Element Method, Water Resour. Res., pp.889~897, 1970.
- 3) 赤井浩一, 宇野尚雄: 土中の準一次元非定常浸透流に関する研究, 土木学会論文集, 127, pp. 14~22, 1966.
- 4) 小林晃: オイラー・ラグランジエ手法を用いた岩盤内の拡散挙動解析, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 241~246, 1987.
- 5) P. S. フヤコーン, G. F. ピンダー: 地下水解析の基礎と応用 上巻 基礎編, pp. 205~206, 1987.
- 6) Neuman, S.P.: A Eulerian-Lagrangian scheme for the dispersion-convection equation using conjugate space-time grids, J. Compt., Phys., 41, pp.270~294, 1981.
- 7) Pierre L. Cote, Thomas W. Constable: An Evaluation of Cement-based Waste Forms using the Results of Approximately Two Years of Dynamic Leaching, NUCLEAR AND CHEMICAL WASTE MANAGEMENT. Vol. 7, pp.129~139, 1987.
- 8) Iraj Javandel, Christine Doughty, Chin-Fu Tsang: GROUNDWATER TRANSPORT: HANDBOOK OF MATHEMATICAL MODELS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION WASHINGTON, D.C., 1984.