

JAERI - M
84-136

カラム内土壌層中における放射性核種の
移動予測コード (MIGSTEM-2D)

1984年8月

大貫 敏彦

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。
入手の間合わせは、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、お申しこしてください。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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷㈱

カラム内土壌層中における放射性核種の移動予測コード
(MIGSTEM-2D)

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

大 貫 敏 彦

(1984年7月9日 受理)

カラム内土壌層中における放射性核種の移動予測コードを開発した。コードは、不飽和多孔質媒体中における溶質の移動を求める差分モデルである。コードは2つの部分から構成され、1つは水の浸透を求めるものであり、もう1つは核種の移動を予測するものである。移動機構としては、移流、拡散、液-固相反応および崩壊を考慮した。その中で、液-固相反応式としては、

$$\textcircled{1} \quad Q = K_d C$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = k_1 \frac{\partial C}{\partial t} + k_2 C$$

$$\textcircled{3} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} = k_3 C - k_4 Q$$

の3種類について検討した。その結果、それぞれの反応式における核種の濃度分布および流出曲線が得られた。

Development of Prediction Code (MIGSTEM-2D) for Radionuclide
Migration through Soil Layer Packed in Column

Toshihiko OHNUKI

Department of Environmental Safety Research,
Tokei Research Establishment, JAERI

(Received July 9, 1984)

Prediction code for radionuclide migration (MIGSTEM-2D) has been developed to estimate the migration of radionuclide through soil layer packed in column. The code is a differential model for the determination of the migration of dissolved constituents in ground water through unsaturated porous media. The code was divided into two parts, one is the part for predicting soil water flow, the other is the part for estimating the migration of radionuclide. Migration mechanism includes convection, hydrodynamic dispersion, liquid-solid phase interaction and first order decay. Three types of liquid (Q)-solid(C) phase interaction equation are considered: 1. $Q = K_d C$, 2. $\frac{\partial Q}{\partial t} = k_1 \frac{\partial C}{\partial t} + k_2 C$ and 3. $\frac{\partial Q}{\partial t} = k_3 Q - k_4 C$. Concentration distribution and effluent curves were obtained by the code.

Keywords: Migration, Radionuclide, Prediction Code, Unsaturated Porous Media, Differential Model, Liquid-solid Phase Interaction, Environmental

目 次

1. 緒 言	1
2. 放射性核種移動予測モデル	2
2.1 水浸透支配方程式	2
2.2 放射性核種移動支配方程式	3
2.3 初期条件および境界条件	5
2.3.1 水浸透モデル	5
2.3.2 放射性核種移動モデル	5
3. 放射性核種移動予測コード	7
3.1 領域およびメッシュ分割	7
3.2 水浸透予測コード	7
3.2.1 水浸透支配方程式の差分解	7
3.2.2 解 法	11
3.2.3 水流速の決定	15
3.2.4 水分率および水流速予測コードの構成	15
3.3 放射性核種移動予測コード	18
3.3.1 核種移動支配方程式の差分解	18
3.3.2 解 法	20
3.3.3 固相への吸着量	22
3.3.4 放射性核種移動予測コードの構成	22
4. 結果および考察	25
4.1 水浸透予測	25
4.1.1 入力データ	25
4.1.2 水分率分布および水流速分布	25
4.2 核種移動予測	26
4.2.1 入力データ	26
4.2.2 核種濃度分布および流出曲線	26
5. 結 言	37
謝 辞	37
文 献	38

Contents

1.	Introduction	1
2.	Prediction model of radionuclide migration	2
2.1	Equation of dominating water flow	2
2.2	Equation of dominating radionuclide migration ..	3
2.3	Initial and boundary conditions	5
2.3.1	Model of water flow	5
2.3.2	Model of radionuclide migration	5
3.	Prediction code of radionuclide migration	7
3.1	Region and mesh dividing	7
3.2	Prediction code of water flow	7
3.2.1	Differential model of water flow equation	7
3.2.2	Solution	11
3.2.3	Determination of water velocity	15
3.2.4	Outline of code of water flow	15
3.3	Prediction code of radionuclide migration	18
3.3.1	Differential model of radionuclide migration ...	18
3.3.2	Solution	20
3.3.3	Quantity in soil matrix adsorbed	22
3.3.4	Outline of code of radionuclide migration	22
4.	Results and discussions	25
4.1	Prediction of water flow	25
4.1.1	Input data	25
4.1.2	Water content and velocity distribution	25
4.2	Prediction of radionuclide migration	26
4.2.1	Input data	26
4.2.2	Concentration distribution and effluent curve ..	26
5.	Conclusions	37
	Acknowledgement	37
	References	38

1. 緒 言

原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会は、低レベル放射性廃棄物の陸地処分を中心に見直しを行い、1982年6月に基本的な考え方を答申している。それによると、「陸地処分に当っては、低レベル放射性廃棄物の特性に応じて固化体や処分施設等の人工バリア及び土壌や地層という天然バリアにより総合的に安全性を確保できるようその処分方式を決定することが必要である。処分方式としては、トレンチ、ピット、構造物または地下空洞内への処分が考えられる。」としている。

この答申に従って、陸地処分を実施する場合いずれの処分方式を採用しても、事前にその安全性を評価しておかなければならない。そのためには、人工バリアおよび天然バリア中における放射性核種の挙動について検討する必要がある。それらの中でも、環境と直接接する地層中における核種の移動について検討することは、安全評価上重要である。

通気層、帯水層中における核種の移動に対する正確な評価を行うためには、放射性トレーサーを使用するフィールド試験が直接的な方法である。しかしながら、我国ではホットトレーサーを使用するフィールド試験は、種々の理由で実行し難い。そのため、著者らは放射性トレーサーを使用して、自然状態の土壌を充填した地中シミュレーション装置により、通気層および帯水層中における核種移動試験を施設内で実施する“環境シミュレーション試験”^{(1),(2)}を行っている。

一方、通気層および帯水層中における核種の移動モデルを作成して、計算により核種の移動を求める研究も行われている^{(3)~(6)}。核種は、通気層および帯水層中を水とともに移動するが、その際、層中の土壌等に吸着する。したがって、通気層および帯水層中における核種の移動は、層中における移動を支配する輸送拡散方程式と液-固相反応式(吸着反応式)とを組み合わせたモデルを用いて予測できる。輸送拡散方程式は、間隙水中における、物質の移動と拡散と質量保存則から成り立っている。吸着反応式としては、ヘンリー型等の平衡論に基づいたもの、あるいは、速度論的に提案されている可逆型、非可逆型のものがある。

これまでに開発されてきた計算コードには、NRCモデル⁽³⁾、FEMWASTE⁽⁴⁾、MLTRAN⁽⁵⁾等がある。それらのコードは、ヘンリー型吸着反応式に基づいている。一方、H.S. Levineらは、ラングミュア型吸着反応式を用いて、核種の移動に対する水流速と反応速度との関係を検討している。また、福井ら⁽⁷⁾は、種々の反応式を用いて輸送拡散方程式の1次元解析解を得ている。

しかしながら、それらの報告では通気層および帯水層中における核種の移動に関与する吸着反応式については明らかにされていない。したがって、核種の移動に関与する吸着反応式を決定するため、環境シミュレーション試験で得られた通気層中移動データを解析することを目的とした放射性核種地中移動予測コード(MIGSTEM-2D)を作成した。MIGSTEM-2Dは、3次元輸送拡散方程式を円柱座標で表現し、平衡型吸着反応式、非可逆的吸着反応式および可逆的吸着反応式とを組み合わせて、有限差分法により解いたコードである。

本報告は、MIGSTEM-2Dの内容紹介と試算の結果である。

2. 放射性核種移動予測モデル

2.1 水浸透支配方程式

通気層中における3次元直交座標系の水浸透支配方程式は、次式で表わされる。⁽⁸⁾

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + k(\theta) \right) \quad (1)$$

ここに、

- θ : 水分率
- $D(\theta)$: 拡散係数
- $k(\theta)$: 透水係数

である。

一方、水分率と水流速の間には、ダルシーの法則から次式の関係が成り立つ。

$$\vec{v} = -k(\theta) \nabla \varphi \quad (2)$$

ここに、

- \vec{v} : 水流速
- φ : ポテンシャル

である。

Kluteが不飽和浸透流を求める際に提案した、拡散係数と透水係数との関係(3)式より、

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \quad (3)$$

(2)式は、(4)式となる。

$$\vec{v} = -D(\theta) \nabla \theta \quad (4)$$

したがって、(1)式を適当な境界条件および初期条件のもとに解くことから、通気層土壤中における水分率分布が得られる。次に、その結果と(4)式を合わせることから、通気層土壤中における水流速分布を求めることができる。

通気層中における放射性核種の移動を実験により検討する場合、円筒形カラム内に通気層状態土壤層を形成して行っている⁽⁹⁾。水浸透支配方程式を円筒座標系(r, z)で表現すると、(1)式より(5)式が得られる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D(\theta) r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + k(\theta) \right) \quad (5)$$

一方、半径方向および鉛直方向の水流速は、(4)式よりそれぞれ(6)式および(7)式となる。

半径方向

$$u = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (6)$$

鉛直方向

$$v = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (7)$$

ここに,

- u : 半径方向水流速
v : 鉛直方向水流速

したがって、カラム内土壌層中における水分率分布および水流速分布は、(5)、(6)および(7)式を実験条件と同じ初期条件および境界条件のもとに解くことから得られる。

2.2 放射性核種移動支配方程式

放射性核種の地中移動は、水とともに移動する移流項と放射性核種自身の濃度勾配による拡散項と、物質収支より、(8)式で表現される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(C + \frac{1}{\theta} Q \right) = \nabla \cdot \overline{D} \nabla C - \nabla \cdot \overline{v} C - \lambda \left(C + \frac{Q}{\theta} \right) \quad (8)$$

ここに,

- C : 放射性核種の間隙水中の濃度
Q : " の固相中の濃度
D : 放射性核種の拡散係数
 λ : 放射性核種の崩壊定数

である。

一方、放射性核種の間隙水中および固相中における吸着反応は、核種の種類により異なると考えられる。ここでは、平衡式、非可逆反応式、可逆反応式の3種類について検討する。

◦平衡式

$$Q = K_d C \quad (9)$$

ここに,

- K_d : 分配係数

◦非可逆反応式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = k_1 \frac{\partial C}{\partial t} + k_2 C \quad (10)$$

ここに,

- k_1 : 分配係数
 k_2 : 反応速度係数

。可逆反応式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = k_3 C - k_4 Q \quad (11)$$

ここに、

k_3 : 反応速度係数

k_4 : "

平衡(9)式、非可逆(10)式および可逆反応式(11)式を、放射性核種の移動支配方程式(8)式に代入して、それぞれの吸着反応条件における放射性核種の移動支配方程式を求めると次式のように表わすことができる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{K_\alpha} \{ \nabla \cdot \vec{D} \nabla C - \nabla \cdot \vec{v} C + S_\alpha \} \quad (12)$$

α : 1, 2, 3

ここに、 K および S は反応式(9)、(10)および(11)式により、次の関係で表わされる。

平衡 :

$$K_1 = 1 + \frac{K_d}{\theta}$$

$$S_1 = -\lambda (1 + K_d / \theta) \cdot C$$

非可逆 :

$$K_2 = 1 + \frac{k_1}{\theta}$$

$$S_2 = -\left(\lambda + \frac{k_2}{\theta} \right) C - \lambda Q / \theta$$

可逆 :

$$K_3 = 1$$

$$S_3 = -\left(\lambda + \frac{k_3}{\theta} \right) \cdot C - (\lambda - k_4) Q / \theta$$

したがって、(12)式を適当な初期条件および境界条件のもとに解くことから、通気層土壤中における放射性核種の分布が得られる。

放射性核種地中移動支配方程式を円筒座標系 (r, z) で表現すると、(12)式より(13)式が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{K_\alpha} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D \cdot r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot u \cdot C) - \frac{\partial}{\partial z} (vC) + S_\alpha \right]$$

(13)

したがって、カラム内土壤層中における放射性核種濃度分布は、平衡、非可逆および可逆反応条件を用いることから、(13)式により求まる。

2.3 初期条件および境界条件

2.3.1 水浸透モデル

本コードでは、水浸透支配方程式を解くための初期条件として、2種類与えられる。すなわち、 $t < 0$ において、

i) 各メッシュ地点で任意に与える。

ii) (5)式と(6)および(7)式を連立して、 $u = 0$ 、 $v = 0$ となるような $\theta(r, z, 0)$ を求め、初期条件として与える。

本コードでは、水浸透支配方程式を解くための境界条件として、半径方向に対して1種類、鉛直方向に対して3種類与えられる。すなわち、 $t \geq 0$ において、

半径方向

$$r = 0, r = r_{\max} : u = 0$$

鉛直方向

鉛直方向における境界条件としては、通気層上表面と下端面の両方に与える。与えられる境界条件としては3種類から選択できる。すなわち

i) 上表面および下端面で任意の水分率を与える。

ii) 上表面および下端面で中心および最外側の水分率を与え、2次曲線 $\theta = ar^2 + b$ (a, b : 定数)より内挿して各点の水分率を求め、境界条件とする。

iii) 初期条件 ii)の手法により得られた上表面および下端面の水分率を基準にして、上表面および下端面に水分率の増加量を境界条件として与える。

2.3.2 放射性核種移動モデル

本コードでは、放射性核種移動支配方程式を解くための初期条件として、放射性核種の流入を行う前は全ての地点で放射性核種濃度は0となるため、 $t < 0$ において、

$$C_{all} = 0$$

$$Q_{all} = 0$$

を与えた。

本コードでは、放射性核種移動支配方程式を解くための境界条件として、①半径方向中心部、②壁面、③上表面および④下端面において下記のものを与える。

① 半径方向中心部

半径方向中心部において半径方向への拡散は、みかけ上0となるため、

$$D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

② 壁面

半径方向最外側においては半径方向への拡散はないと考えられるため、

$$D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=r_{\max}} = 0$$

③ 上表面

上表面における拡散はないと考えられるため、

$$D \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$$

④ 下端面

下端面外側における放射性核種濃度は0であるため、

$$C_{\text{out}} = 0$$

である。

3. 放射性核種移動予測コード

3.1 領域およびメッシュ分割

本コードでは、カラム内土壌層中における放射性核種の移動を水および放射性核種移動支配方程式を差分法で解いて予測するため、2次元円筒座標メッシュ分割 (r, z) を行う必要がある。なお、配列の添字は、 r 方向を I 、 z 方向を J で表現する。また、カラム内半径方向中心、上表面位置を座標 $(1, 1)$ とし、半径方向外側および鉛直方向下側方向にメッシュ番号が増加するように設定した。

半径方向メッシュおよび鉛直方向メッシュ分割図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 で、NR は半径方向のメッシュ分割数である。また、水分率、放射性核種濃度および水流速等の設定位置を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より明らかなように、水分率および放射性核種濃度のスカラー量はメッシュセンターで定義し、水流速等のベクトル量はグリッド上で定義した。

3.2 水浸透予測コード

(5)、(6)および(7)式を用いて、カラム内通気層中における水分率および水流速を求めるため、それら偏微分方程式を差分近似で解いてコード化した。

3.2.1 水浸透支配方程式の差分解

(5)式を、位置に関する微分について差分近似を行うと、(14)式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{i,j}}{\partial t} = & \frac{2}{(2i-1) \Delta r^2} \left\{ i D_{i+\frac{1}{2},j} (\theta_{i+1,j} - \theta_{i,j}) - (i-1) D_{i-\frac{1}{2},j} \right. \\ & \left. (\theta_{i,j} - \theta_{i-1,j}) \right\} + \frac{1}{\Delta z_j} \left\{ D_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}}{\Delta z_j + \frac{1}{2}} - D_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{\theta_{i,j} - \theta_{i,j-1}}{\Delta z_j - \frac{1}{2}} \right\} \\ & + \frac{1}{\Delta z_j} \left\{ k_{i,j+\frac{1}{2}} - k_{i,j-\frac{1}{2}} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、

$$D_{i-\frac{1}{2},j} = D \left(\frac{\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j}}{2} \right)$$

$$D_{i,j-\frac{1}{2}} = D \left(\frac{\theta_{i,j} + \theta_{i,j-1}}{2} \right)$$

* Δz が $\Delta z_{j-\frac{1}{2}}$ となっているのは、鉛直方向において、メッシュ幅を数ヶ所変更できるようにしたためである。

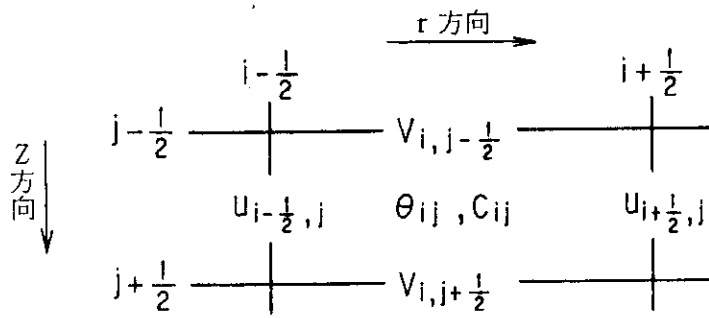


Fig.2 Estimation points of properties in code

$$k_{i,j-\frac{1}{2}} = k \left(\frac{\theta_{i,j} + \theta_{i,j-1}}{2} \right)$$

Δr : 半径方向きざみ幅

Δz : 鉛直方向きざみ幅

さらに、(14)式を時間について差分近似する。ここで、時間差分は、ADI法 (Alternating Direct Implicit)⁽¹⁰⁾を用いた。解法は、step 1 : 半径方向陰解法、step 2 : 鉛直方向陰解法の順で行う。すなわち、

step 1

$$\frac{\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \theta_{i,j}^n}{\Delta t / 2} = \nu_r^{(2)} \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \nu_z^{(2)} \theta_{i,j}^n \quad (15)$$

step 2

$$\frac{\theta_{i,j}^{n-1} - \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t / 2} = \nu_r^{(2)} \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \nu_z^{(2)} \theta_{i,j}^{n+1} \quad (16)$$

である。ここで、 $n, n + \frac{1}{2}, n + 1$ にはタイムステップ番号で、それぞれOld値、中間値、New値である。

(14)式を(15)、(16)式に従ってADI法で表現すると、(17)、(18)式が得られる。

step 1 半径方向 Implicit

$$-A_{ri} \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + B_{ri} \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{ri} \theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = M_{ri}^n \quad (17)$$

step 2 鉛直方向 Implicit

$$-A_{zj} \theta_{i,j-1}^{n+1} + B_{zj} \theta_{i,j}^{n+1} - C_{zj} \theta_{i,j+1}^{n+1} = M_{zj}^{n+\frac{1}{2}} \quad (18)$$

ここで

$$A_{ri} = \frac{\Delta t (i-1)}{(2i-1) \Delta r^2} D_{i-\frac{1}{2},j}^n$$

$$B_{ri} = 1 + \frac{\Delta t}{(2i-1) \Delta r^2} \left\{ i \cdot D_{i+\frac{1}{2},j}^n + (i-1) \cdot D_{i-\frac{1}{2},j}^n \right\}$$

$$C_{ri} = \frac{\Delta t \cdot i}{(2i-1) \Delta r^2} D_{i+\frac{1}{2},j}^n$$

$$M_{ri} = \theta_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{2 \Delta z_j} D_{i,j+\frac{1}{2}}^n \frac{\theta_{i,j+1} - \theta_{i,j}^n}{\Delta z_{j+\frac{1}{2}}} - D_{i,j-\frac{1}{2}}^n \frac{\theta_{i,j}^n - \theta_{i,j-1}^n}{\Delta z_{j-\frac{1}{2}}}$$

$$+ \frac{\Delta t}{2 \Delta z_j} \left\{ k_{i,j+\frac{1}{2}}^n - k_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right\}$$

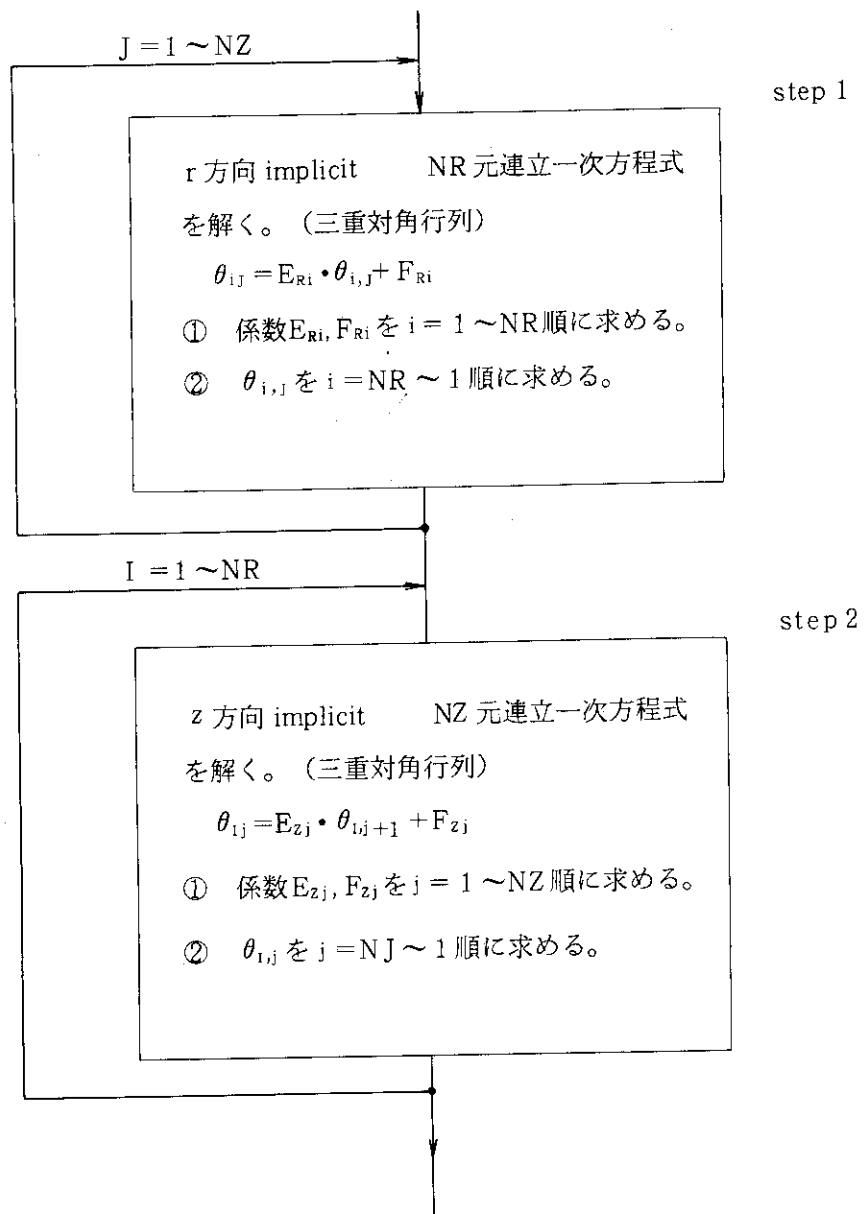


Fig.3 Flow sheet of water flow code

$$\mathbf{M}_j = \begin{pmatrix} M_{r1} \\ M_{r2} \\ \vdots \\ M_{ri} \\ \vdots \\ M_{rNR} \end{pmatrix}$$

連立一次方程式を解くために、(17)式を(19)式の形で表現する。

$$\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = E_i \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + F_i \quad (19)$$

(19)式より次式が得られ、

$$\theta_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = E_{i-1} \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + F_{i-1}$$

(17)式に代入することから、 $\theta_{i-1,j}$ を消去すると、(20)式が得られる。

$$-A_{ri} \left(E_{i-1} \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + F_{i-1} \right) + B_{ri} \theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{ri} \theta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = M_{ri} \quad (20)$$

(20)式を θ に関して整理し、(19)式と比較して、 E_i および F_i に関する次の漸化式が得られる。

$$E_i = \frac{C_{ri}}{-A_{ri} \cdot E_{i-1} + B_{ri}},$$

$$F_i = \frac{M_{ri} + A_{ri} \cdot F_{i-1}}{-A_{ri} E_{i-1} + B_{ri}}$$

A_{r1} の値は $-D_{\frac{1}{2},j} \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0$ より0となる。したがって

$$E_1 = \frac{C_{r1}}{B_{r1}} \quad \text{および} \quad F_1 = \frac{M_{r1}}{B_{r1}}$$

となる。 A_{r1} 、 B_{r1} および C_{r1} の値は既知であるため、 $\{E_i, F_i\}$ ($i=1 \sim NR$)の値は*i*の昇順に決定できる。さらに、半径方向の境界条件

$$\theta_{NR,j}^{n+\frac{1}{2}} = \theta_{NR+1,j}^{n+\frac{1}{2}}$$

より、

$$\theta_{NR,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_{NR} / (1 - E_{NR})$$

となる。したがって、 $\theta_{NR,j}$ の値より(19)式を用いて、 $i=NR-1 \sim 1$ の降順に $\theta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ の値が定まる。

② step 2

(18)式において、 $\theta^{n+\frac{1}{2}}$ の値から θ^{n+1} の値を決定するため、それぞれの $r=r_i$ ごとにNZ個の

$$\theta_{i,1}^{n+1} = \frac{C_{z1}}{B_{z1}} \theta_{i-2}^{n+1} + \frac{M_{z1} + A_{z1} \theta_{i,0}^{n+1}}{B_{z1}}$$

と表わされる。したがって、 E'_1 および F'_1 はそれぞれ

$$E'_1 = C_{z1} / B_{z1}$$

$$F'_1 = (M_{z1} + A_{z1} \theta_{i,0}^{n+1}) / B_{z1}$$

となる。これより、 $j = 2 \sim NZ$ の昇順に、 E'_j, F'_j の値が求まる。

さらに、 $j = NZ$ の場合、 $\theta_{i,NZ}^{n+1} = E'_{NZ} \theta_{i,NZ+1}^{n+1} + F'_{NZ}$ より、 $\theta_{i,NZ+1}$ は既知であるため、 $j = NZ - 1 \sim 1$ に関して降順に $\theta_{i,j}^{n+1}$ が決定される。

これらの結果、タイムステップ Δt ごとに、step 1 および step 2 の解法を順次行って、カラム内土壌層中の水分率分布を求められる。

3.2.3 水流速の決定

3.2.2 で述べた方法から求めたカラム内土壌層中の水分率分布より、(6)、(7)式を用いて水流速を求められる。

(6)式を差分近似すると、

半径方向

$$u_{i+\frac{1}{2},j} = -D_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\theta_{i+1} - \theta_{i,j}}{\Delta r} \quad (21)$$

鉛直方向

$$v_{i,j+\frac{1}{2}} = -D_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\Delta_{i,j+1} - \theta_{i,j}}{\Delta z_{j+\frac{1}{2}}} \quad (22)$$

ただし、 $u_{\frac{1}{2},j} = u_{NR+\frac{1}{2},j} = 0$ である。

したがって、水流速は、3.2.2 に述べた方法により得られた水分率を(21)および(22)式に代入することから求められる。

3.2.4 水分率および水流速予測コードの構成

本コードのフローチャートを Fig. 4 に示す。また、本コードを構成するメインルーチンおよびサブルーチンの関係を Fig. 5 に示す。以下、主なルーチンについて説明する。

① MAIN

MAIN ルーチンは、本コードのメインルーチンであり、水分率および水流速計算を総合的にコントロールする。

② INPUT

INPUT ルーチンは、カードイメージで NAMELIST 文により入力されたデータを読み込むルーチンである。

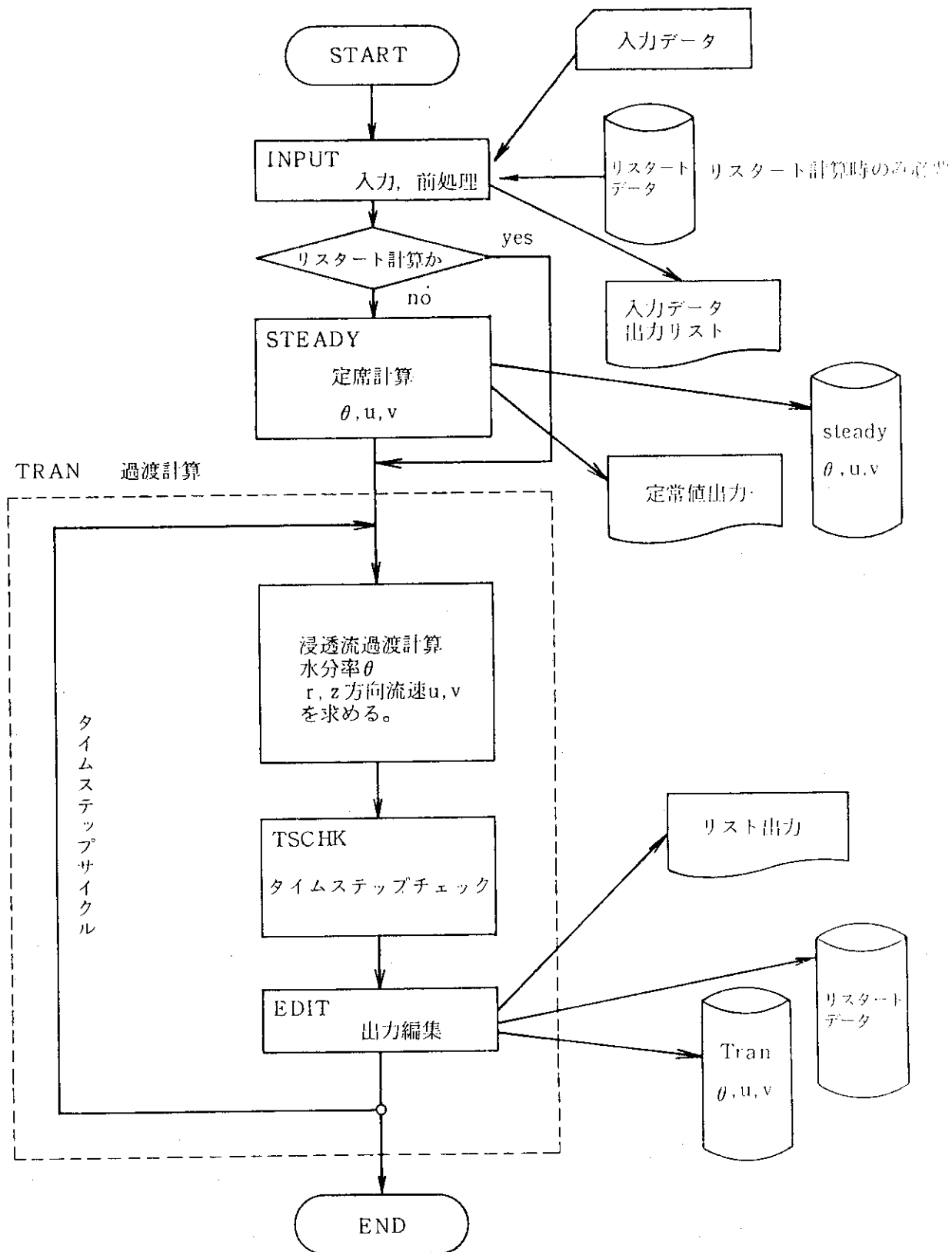


Fig.4 Flow chart of water flow code

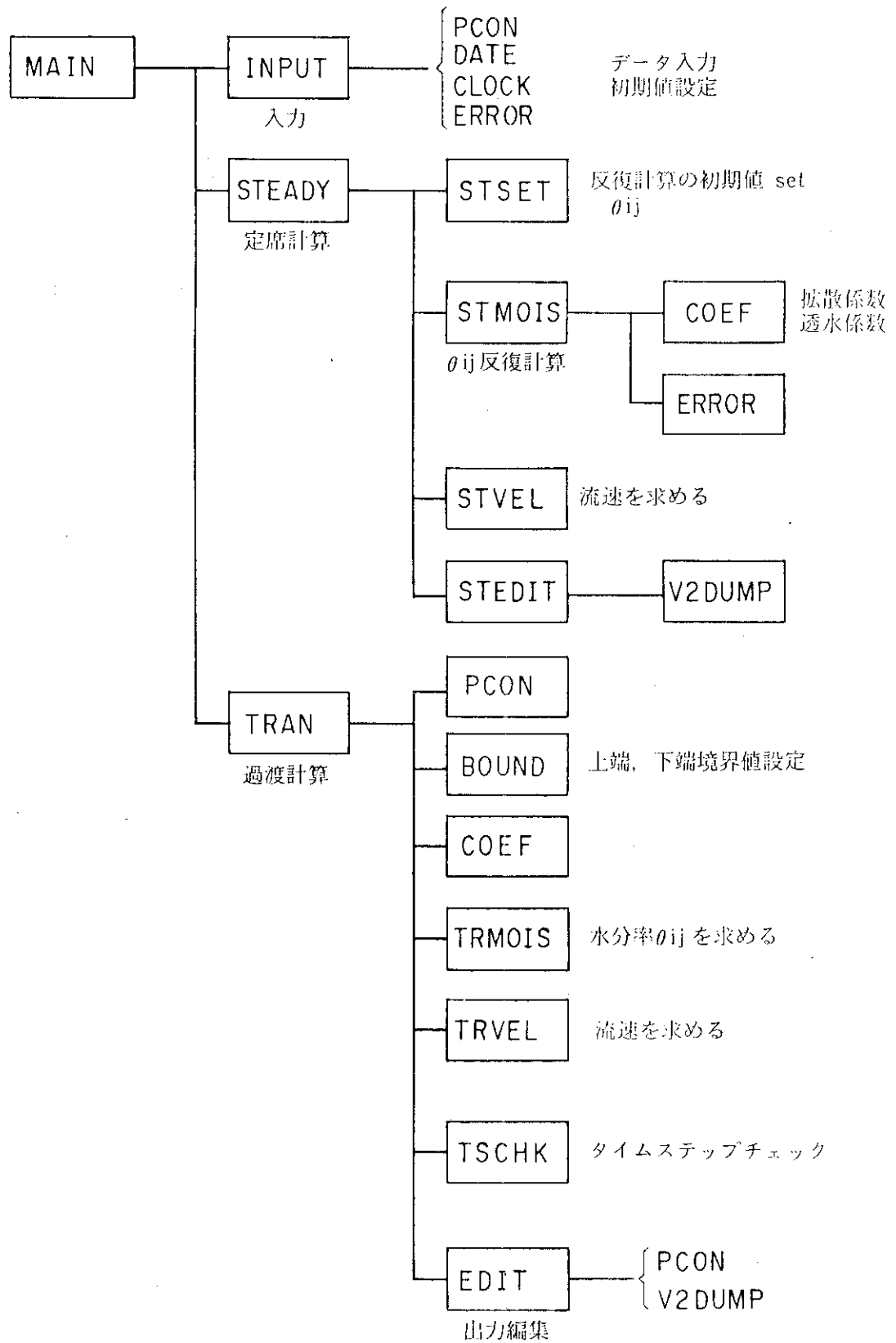


Fig.5 Block diagram of water flow code

③ STSET

STSET ルーチンは、水分率の初期値をセットするルーチンである。本コードでは、水分率の初期値を任意に与えること、および、土壌層内の流速が全て0となるように与えることができる。本ルーチンは、後者の初期値を与えるためのルーチンである。

④ TRAN

TRAN ルーチンは、水分率の過渡的变化を求め、土壌層中の水分率および水流速を求めるルーチンである。TRAN ルーチンは、サブルーチン TRMOIS および TRVEL より成る。

⑤ TRMOIS

TRMOIS は、ADI 法を用いて、水分率を求めるルーチンである。

⑥ TRVEL

TRVEL ルーチンは、TRMOIS にて求めた水分率より、水流速を求めルーチンである。

3.3 放射性核種移動予測コード

(13)式および吸着反応式を用いて、カラム内土壌層中における放射性核種の移動を求めるため、それら偏微分方程式を差分近似で解いてコード化した。

3.3.1 核種移動支配方程式の差分解

(13)式を位置に関しては Implicit 法で差分近似し、時間に関しては、ADI法にて行う。

ADI 法により、r 方向差分は、

$$\left[K_{i,j} - \frac{\Delta t}{2} (v_r^{(2)} - v_r) \right] C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left[K_{i,j} + \frac{\Delta t}{2} (v_z^{(2)} - v_z) \right] C_{i,j}^n + \frac{\Delta t}{2} S_{i,j} \quad (23)$$

となり、

z 方向差分は、

$$\left[K_{i,j} - \frac{\Delta t}{2} (v_z^{(2)} - v_z) \right] C_{i,j}^{n+1} = \left[K_{i,j} + \frac{\Delta t}{2} (v_r^{(2)} - v_r) \right] C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} S_{i,j} \quad (24)$$

したがって、(23)、(24)式を C_{ij} に関して整理して(25)式、(26)式が得られる。

$$-A_{ri} C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + B_{ri} C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{ri} C_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = M_{ri,j} \quad (25)$$

$$-A_{zj} C_{i,j-1}^{n+1} + B_{zj} C_{i,j}^{n+1} - C_{zi} C_{i,j+1}^{n+1} = M_{zi,j} \quad (26)$$

ここに、

$$A_{ri} = \frac{(i-1) \Delta t}{(2i-1) \Delta r^2} \left(D_{i-\frac{1}{2},j} + \Delta r \delta_r u_{i-\frac{1}{2},j} \right)$$

$$B_{ri} = K_{ij} + \frac{\Delta t}{(2i-1) \Delta r^2} \left\{ i D_{i+\frac{1}{2},j} + (i-1) D_{i-\frac{1}{2},j} + i \cdot \Delta r \delta_r u_{i+\frac{1}{2},j} - (i-1) \Delta r (1-\delta_r) u_{i-\frac{1}{2},j} \right\}$$

$$C_{ri} = \frac{i \Delta t}{(2i-1) \Delta r^2} \left(D_{i+\frac{1}{2}, j} - \Delta r \cdot (1 - \delta_r) u_{i+\frac{1}{2}, j} \right)$$

$$A_{zi} = \frac{\Delta t}{2 \Delta z_j} \left(\frac{D_{i, j-\frac{1}{2}}}{\Delta z_{j-\frac{1}{2}}} + \delta_z v_{i, j-\frac{1}{2}} \right)$$

$$B_{zi} = K_{ij} + \frac{\Delta t}{2 \Delta z_j} \left\{ \frac{D_{i, j+\frac{1}{2}}}{\Delta z_{j+\frac{1}{2}}} + \frac{D_{i, j-\frac{1}{2}}}{\Delta z_{j-\frac{1}{2}}} + \delta_z v_{i, j+\frac{1}{2}} - (1 - \delta_z) v_{i, j-\frac{1}{2}} \right\}$$

$$C_{zj} = \frac{\Delta t}{2 \Delta z_j} \left\{ \frac{D_{i, j+\frac{1}{2}}}{\Delta z_{j+\frac{1}{2}}} - (1 - \delta_z) v_{i, j+\frac{1}{2}} \right\}$$

$$M_{rij} = A_{zj} C_{i, j-1}^n + (2K_{ij} - B_{zj}) C_{i, j}^n + C_{zi} C_{i, j+1}^n + \frac{\Delta t}{2} S_{ij}^n$$

$$M_{zij} = A_{ri} C_{i-1, j}^{n+\frac{1}{2}} + (2K_{ij} - B_{ri}) C_{i, j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{ri} C_{i+1, j}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2} S_{ij}^n$$

$$D_{i+\frac{1}{2}, j} = D_m |u_{i+\frac{1}{2}, j}| + D_u$$

$$D_{i, j+\frac{1}{2}} = D_m |v_{i, j+\frac{1}{2}}| + D_u$$

$$K_{i, j} = 1 + (P_1 K_d + P_2 k_1) / \theta_{i, j}^n$$

$$S_{i, j} = -\lambda C_{i, j}^n - (P_1 \lambda K_d + P_2 k_2 + P_3 k_3) \frac{C_{i, j}^n}{\theta_{i, j}}$$

$$-\lambda \frac{Q_{2ij}^n}{\theta_{ij}} - (\lambda - k_4) \frac{Q_{3ij}^n}{\theta_{ij}}$$

$$\begin{aligned} \nabla_r^{(2)} C_{i, j}^n = & \frac{2}{(2i-1) \Delta r^2} \left[i \cdot D_{i+\frac{1}{2}, j} (C_{i+1, j}^n - C_{i, j}^n) - (i-1) D_{i-\frac{1}{2}, j} \right. \\ & \left. (C_{i, j}^n - C_{i-1, j}^n) \right] \end{aligned}$$

$$\nabla_r C_{i, j}^n = \frac{2}{(2i-1) \Delta r} \left[i \cdot u_{i+\frac{1}{2}, j} C_{i+\frac{1}{2}, j}^n - (i-1) u_{i-\frac{1}{2}, j} C_{i-\frac{1}{2}, j}^n \right]$$

$$\nabla_z^{(2)} C_{ij}^n = \frac{1}{\Delta z_j} \left[D_{i, j+\frac{1}{2}} \frac{C_{i, j+1}^n - C_{i, j}^n}{\Delta z_{j+\frac{1}{2}}} - D_{i, j-\frac{1}{2}} \frac{C_{i, j}^n - C_{i, j-1}^n}{\Delta z_{j-\frac{1}{2}}} \right]$$

$$\nabla_z C_{ij}^n = \frac{1}{\Delta z_j} \left[v_{i, j+\frac{1}{2}} C_{i, j+\frac{1}{2}}^n - v_{i, j-\frac{1}{2}} e_{i, j-\frac{1}{2}}^n \right]$$

$$C_{i+\frac{1}{2},j}^n = \delta_r C_{i,j}^n + (1-\delta_r) C_{i+1,j}^n \quad \delta_r = \begin{cases} 1 : u_{i+\frac{1}{2},j} \geq 0 \text{の時} \\ 0 : u_{i+\frac{1}{2},j} < 0 \text{の時} \end{cases}$$

$$C_{i,j+\frac{1}{2}}^n = \delta_z C_{i,j}^n + (1-\delta_z) C_{i,j+1}^n \quad \delta_z = \begin{cases} 1 : v_{i,j+\frac{1}{2}} \geq 0 \\ 0 : v_{i,j+\frac{1}{2}} < 0 \end{cases}$$

3.3.2 解法

① step 1

半径方向 Implicit

水浸透式の解法と同様に(25式)を行列式で表わして、(27式)が得られる。

$$\mathbf{A}_J \mathbf{C}_J = \mathbf{M}_{r,J} \quad (J=1 \sim NZ) \quad (27)$$

ここに、

$$\mathbf{A}_J = [a_{\ell m}]_J$$

$$\mathbf{C}_J = [C_{\ell}^{n+\frac{1}{2}}]_J$$

$$\mathbf{M}_{r,J} = [M_{r\ell}]_J$$

$$\ell = 1 \sim NR$$

$$m = 1 \sim NR$$

水浸透の解法と同様に、連立一次元方程式を解くために、(27式)を(28式)の形で表わす。

$$C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = E_{ri} C_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + F_{ri} \quad (28)$$

水浸透の解法と同様にして、(28式)の係数 E_{ri} , F_{ri} は次式のように求まる。

$$E_{ri} = \frac{C_{ri}^{n+\frac{1}{2}}}{-A_{ri} E_{ri-1} + B_{ri}} \quad (29)$$

$$F_{ri} = \frac{M_{ri} + A_{ri} \cdot F_{ri-1}}{-A_{ri} E_{ri-1} + B_{ri}} \quad (30)$$

A_{ri} の値は、境界条件 $D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_1 = 0$ より、 $A_{r1} = 0$ であるため、 E_{r1} , F_{r1} は、それぞれ

$$E_{r1} = C_{r1}^{n+\frac{1}{2}} / B_{r1}$$

$$F_{r1} = M_{r1} / B_{r1}$$

となる。したがって、 E_{ri} , F_{ri} の値が $i = 1 \sim NR$ について順次求まる。

境界条件より, $C_{NR}^{n+\frac{1}{2}} = C_{NR+1}^{n+\frac{1}{2}}$ であるので,

$$C_{NR,J}^{n+\frac{1}{2}} = F_{rNR} / (1 - E_{rNR})$$

となり, (28)式より, $C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$ の値が順次定まる。

これらのステップを $J = 1 \sim NR$ についてくり返して行う。

② step 2

鉛直方向 Implicit

水浸透の解法と同様に, (26)式を行列式で表わして, (31)式が得られる。

$$A_I C_I = M_{zI} \quad (I = 1 \sim NR) \tag{31}$$

ここに,

$$C_I = \{ C_j^{n+1} \}$$

である。

水浸透の解法と同様に, 連立一次元方程式を解くために, (31)式を(32)式の形で表わす。

$$C_{I,j} = E_{z,j} \cdot C_{I,j+1}^{n+1} + F_{zj} \tag{32}$$

よって, 係数 E_{zj} , F_{zj} は, 次式のようにになる。

$$E_{zj} = \frac{C_{zj}}{-A_{zj} \cdot E_{z,j-1} + B_{z1}} \tag{33}$$

$$F_{zj} = \frac{M_{zj} + A_{zj} \cdot F_{z,j-1}}{-A_{zj} \cdot E_{z,j-1} + B_{zj}} \tag{34}$$

境界条件より,

$$C_1^{n+1} = \frac{C_{z1}}{B_{z1}} \cdot C_2^{n+1} + \frac{M_{z1} + A_{z1} C_0^{n+1}}{B_{z1}}$$

となり,

$$E_{z1} = C_{z1} / B_{z1},$$

$$F_{zj} = (M_{z1} + A_{z1} \cdot C_0^{n+1}) / B_{z1}$$

となる。

したがって, E_{zj} , F_{zj} の値は, $j = 2 \sim NZ$ の順に求まる。

境界条件④より, $C_{out} = 0$ であるので,

$$C_{INR} = F_{zNZ}$$

が得られる。

したがって, (32)式より, $C_{i,j}^{n+1}$ の値が順次定まる。これらのステップを, $I = 1 \sim NR$ につい

てくり返して行う。

3.3.3 固相への吸着量

i) 平衡式

平衡式(9)式を用いる場合は、 $C_{i,j}^{n+1}$ が求まれば、 $Q_{1,i,j}^{n+1}$ は、(35)式より得られる。

$$Q_{1,i,j}^{n+1} = P_1 K_d C_{i,j}^{n+1} \quad (35)$$

ii) 非可逆反応

非可逆反応式(10)式より、 $Q_{2,i,j}^{n+1}$ は(36)式を用いて得られる。

$$Q_{2,i,j}^{n+1} = Q_{2,i,j}^n + P_2 (k_1 + \Delta t k_2) C_{i,j}^{n+1} - P_2 k_1 C_{i,j}^n \quad (36)$$

iii) 可逆反応

可逆反応式(11)式より、 $Q_{3,i,j}^{n+1}$ は、(37)式を用いて得られる。

$$Q_{3,i,j}^{n+1} = (Q_{3,i,j}^n + \Delta t P_3 k_3 C_{i,j}^{n+1}) / (1 + \Delta t k_4) \quad (37)$$

3.3.4 放射性核種移動予測コードの構成

本コードのフローチャートを Fig. 6 に示す。また、本コードを構成するメインルーチンおよびサブルーチンの関係を Fig. 7 に示す。以下、主なルーチンの概要を説明する。

① MAIN

MAINルーチンは、本コードのメインルーチンであり、核種の地中移動計算を総合的にコントロールする。

② INPUT

INPUTルーチンは、カードイメージでNAMELIST文により入力されたデータを読み込むルーチンである。

③ BOUND

BOUNDルーチンは、鉛直方向における土壌層表面の間隙水中核種濃度を求め、前述したコードで計算された水流速および水分率から、評価時点におけるそれらを求めたルーチンである。

④ WCONC

WCONCルーチンは、核種地中移動支配方程式をADI法で解き、間隙水中における核種濃度を求めるルーチンである。

⑤ SCONC

SCONCルーチンは、WCONCルーチンで求めた間隙水中における核種濃度から、吸着反応式を用いて、固相中における核種濃度を求めるルーチンである。

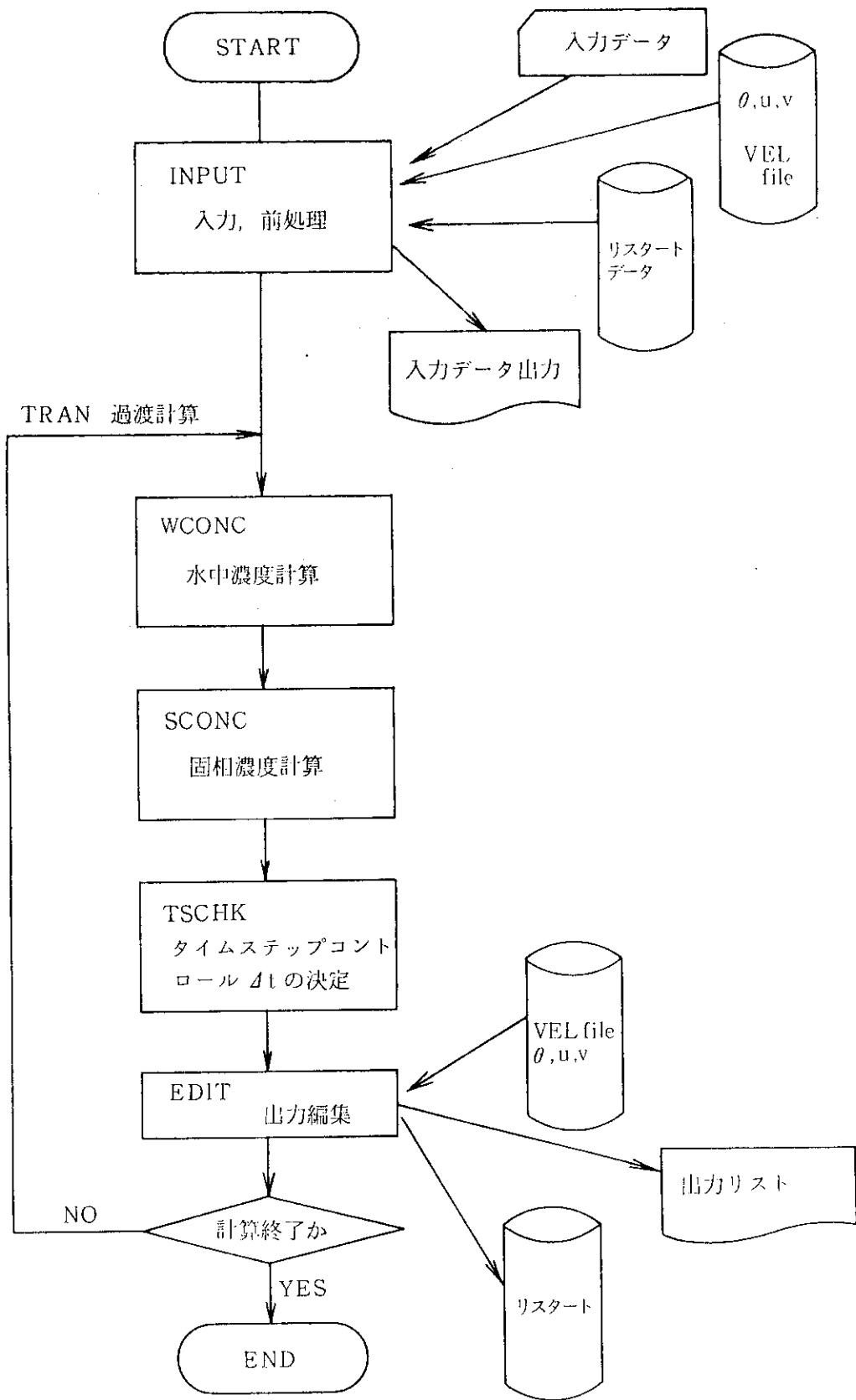


Fig.6 Flow chart of radionuclide migration code

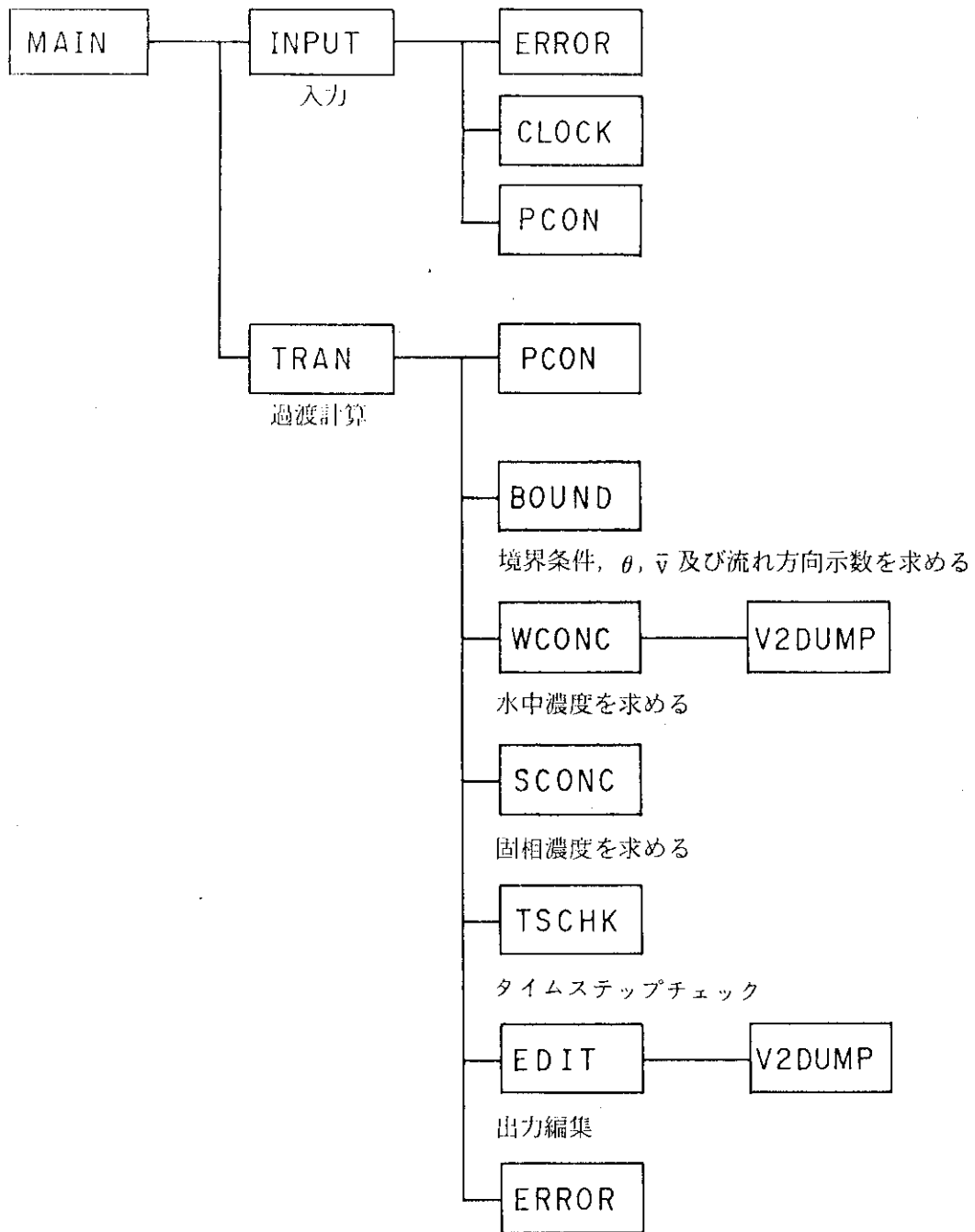


Fig.7 Block diagram of radionuclide migration code

4. 結果および考案

水浸透予測コードおよび核種移動予測コードを用いて、試験的計算を行った。

4.1 水浸透予測

カラム内土壌層表面に水を供給した場合の土壌層中における水分率および水流速を本コードにより計算した。

4.1.1 入力データ

透水係数 $k(\theta)$: 透水係数としては、森沢ら⁽¹¹⁾が日本原子力研究所敷地内の砂を用いて得た次式を採用した。

$$k(\theta) = \begin{cases} 0 & \theta < 0.1 \\ 0.02 \exp \{ 20.4 (\theta - 0.0026) \} & 0.1 \leq \theta \leq 0.3 \\ 1.08 \exp \{ 7.0 (\theta - 0.0026) \} & 0.3 < \theta \end{cases}$$

幾何データ 半径: 15 cm メッシュ数 15
 高さ: 120 cm メッシュ数 40

境界条件および初期条件

初期条件

カラム内土壌層中における全ての点で水流速が 0 cm/hr となるように定めた。この際、土壌層底部における水分率として $0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ を与えた。

境界条件

カラム内土壌層表面において、水を流下する時刻 ($t = 0$) より中心では 0.4, 半径方向の端では $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ を与え、その間は、 $\theta = ar^2 + b$ の二次曲線で得た値を用いた。

4.1.2 水分率分布および水流速分布

1, 2, 3 および 4 時間後におけるカラム内土壌層中の水分率分布をそれぞれ, Fig. 8(a), (b), (c) および (d) に示す。また, 1 および 3 時間後におけるカラム内土壌層中の水流速分布を, Fig. 9(a) および (b) に示す。

Fig. 8(a), (b), (c) および (d) より, 土壌層表面に水を供給することにより, 土壌層中の水分率分布が変化していくことがわかる。また, 3 時間経過した後は土壌層中の水分率分布は平衡に達することが明らかである。さらに, 半径方向の水分率分布は, 土壌層表面付近についてだけ現われることがわかる。

Fig. 9(a) と (b) とを比較することから, 水分率分布が非平衡時における水流速分布と, 水分率分布が平衡に達した後のそれとの間にそれ程の違いが見られない。また, 水分率分布図と同様に

水流束分布図においても、土壌層表面付近についてだけ半径方向に分布する。

これらのことから、土壌層表面の境界条件にも関係するが、水分率および水流速は土壌層表面付近についてだけ半径方向に分布し（2次元分布）、それ以外の深部では鉛直方向についてだけ分布する（1次元分布）ことが明らかとなった。

4.2 核種移動予測

4.1 で得られた水分率および水流速分布を用いて、核種移動予測コードによりカラム内土壌層中における放射性核種の移動を求めた。

4.2.1 入力データ

拡散係数 D_v , D_m : 森沢らが日本原子力研究所敷地内の砂を用いて、水について得た値を用いた。

$$D_v = 0.036 \text{ (cm}^2/\text{hr)}$$

$$D_m = 0.92 \text{ (cm)}$$

崩壊定数 λ : 短時間における評価であるため、 $\lambda = 0$ (1/hr) とした。

分配係数, 反応速度および流入時間 :

分配係数, 反応速度および流入時間の入力データを Table 1 に示す。

Table 1 Input data for calculation of radionuclides migration

Case	Kd	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	Leaching time of RI
1	10	—	—	—	—	0 ≤ t
2	—	10	1	—	—	0 ≤ t
3	—	—	—	0.1	0.01	0 ≤ t

4.2.2 核種濃度分布および流出曲線

i) Case 1.

平衡吸着反応式を用いた場合の 10, 60 および 110 時間後におけるカラム内土壌層中の核種の固相中濃度分布を Fig. 10 (a), (b) および (c) に示す。また、流出曲線を Fig. 11 に示す。Fig. 10 (a), (b) および (c) より、放射性核種が時間の経過とともに深部に移動していることがわかる。また、Fig. 11 より、核種は 80 時間後から流出を開始してその後徐々に増加していくことがわかる。

ii) Case 2.

非可逆吸着反応式を用いた場合の 10, 60 および 110 時間後におけるカラム内地層中の核種の固相中濃度分布を Fig. 12 (a), (b) および (c) に示す。また、流出曲線を Fig. 13 に示す。Fig. 12 (a), (b) および (c) より、放射性核種は時間の経過とともに深部に移動していくことがわかる。Fig. 13 より、

り、核種は80時間後から流出を開始しその後徐々に増加していくことがわかる。

iii) Case 3.

可逆吸着反応式を用いた場合の 10, 60 および 110 時間後におけるカラム内地層中の核種の固相中濃度分布を Fig. 14 (a), (b) および (c) に示す。また、流出曲線を Fig. 15 に示す。Fig. 14 (a), (b) および (c) より、放射性核種は時間の経過とともに深部に移動していくことがわかる。Fig. 15 より、核種は、10 時間後から流出を開始しその後徐々に増加していくことがわかる。

以上の結果より、それぞれの吸着反応式を用いることから得られた濃度分布曲線および流出曲線を比較検討する。

Fig. 10 と Fig. 12 および Fig. 14 を比較すると、平衡および可逆反応式を用いた場合における核種の移動は、非可逆反応式を用いた場合のそれよりも大きいことが明らかである。また、Fig. 11, Fig. 13 および Fig. 15 の流出開始時刻に着目すると、平衡反応の場合と非可逆反応の場合はほとんど同じであるが、可逆反応の場合は前者に比べて早いことがわかる。さらに、流出濃度は、可逆、平衡、非可逆の順に小さくなっている。

一方、可逆反応式(11)において、 $\partial Q / \partial t = 0$ を代入して得られる。

$$Q = \frac{k_3}{k_4} C$$

に、 $k_3 = 0.1$ 、 $k_4 = 0.01$ を代入した場合には、 $k_3 / k_4 = 10$ すなわち、(9)式において $k_d = 10$ と代入して得られる式と同じとなる。それにもかかわらず、可逆反応式を用いた場合における核種の移動度が平衡反応式を用いた場合のそれよりも大きいことがわかる。

これらの理由は、以下のように説明される。非可逆過程においては、(10)式右辺第2項があるため、液相に存在する核種が、固相に右辺第1項にある分配係数値よりも多く吸着するため、みかけの分配係数値が平衡反応のそれよりも大きくなったものと考えられる。可逆過程においては、 $k_3 = 0.1$ 1/hr と反応速度係数が小さいために、液相から固相への吸着反応速度が、水流速に比べて小さいために平衡に達しないため、みかけの分配係数値が平衡反応のそれよりも小さくなったものと考えられる。

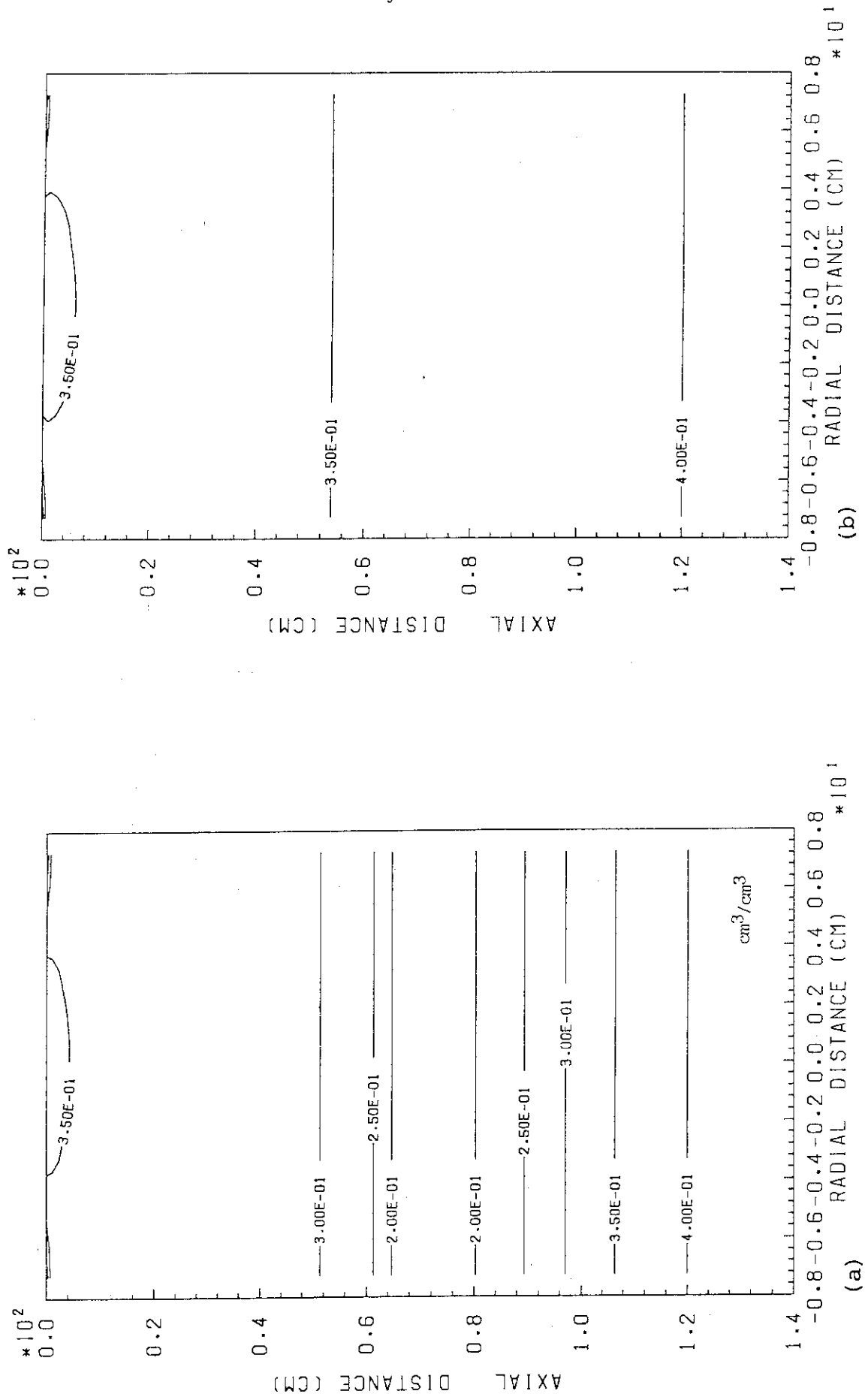


Fig.8 Distribution of water content in soil layer

(a) at 1 hour, (b) at 2 hours, (c) at 3 hours, (d) at 4 hours

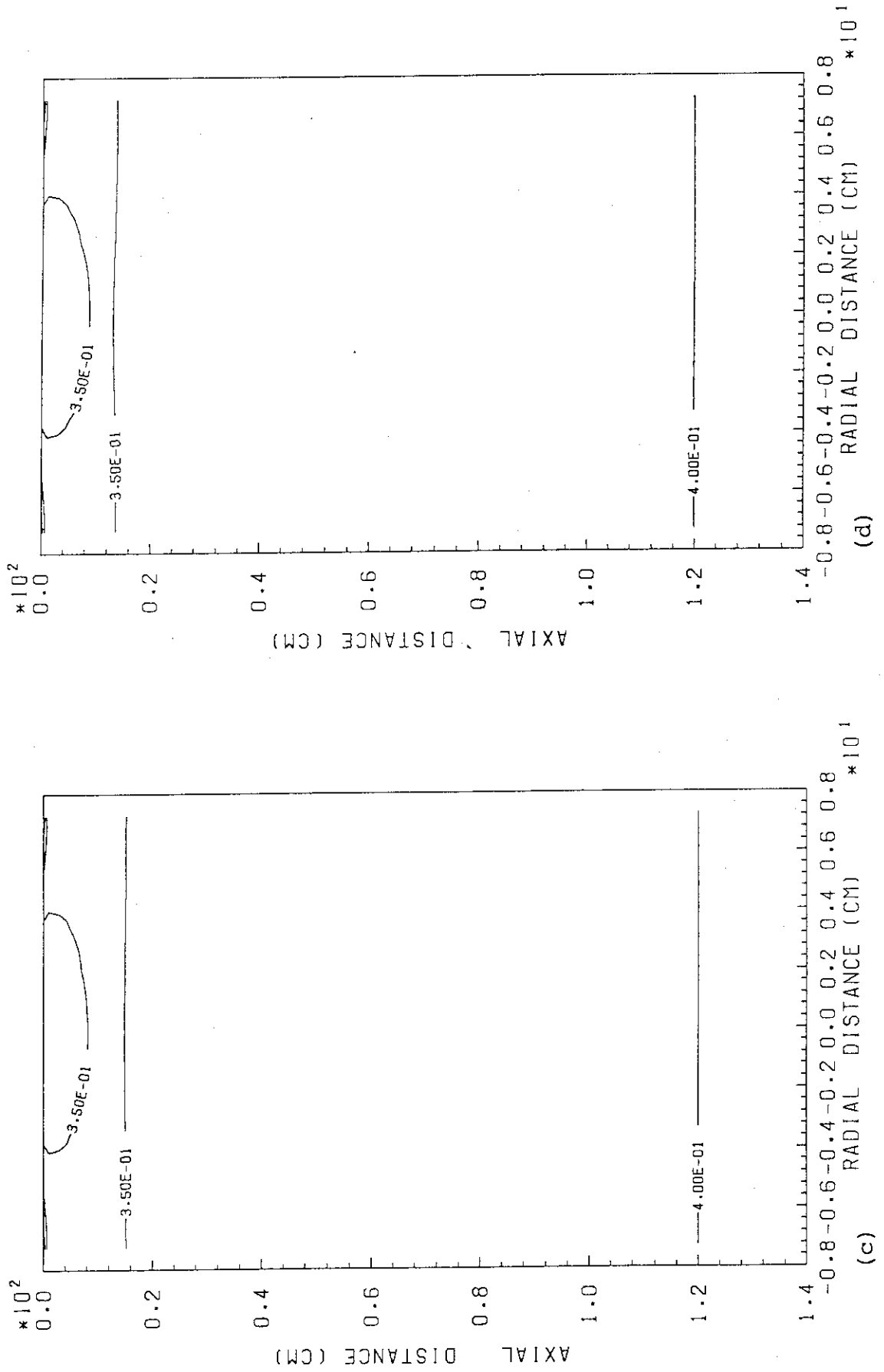


Fig.8 (continued)

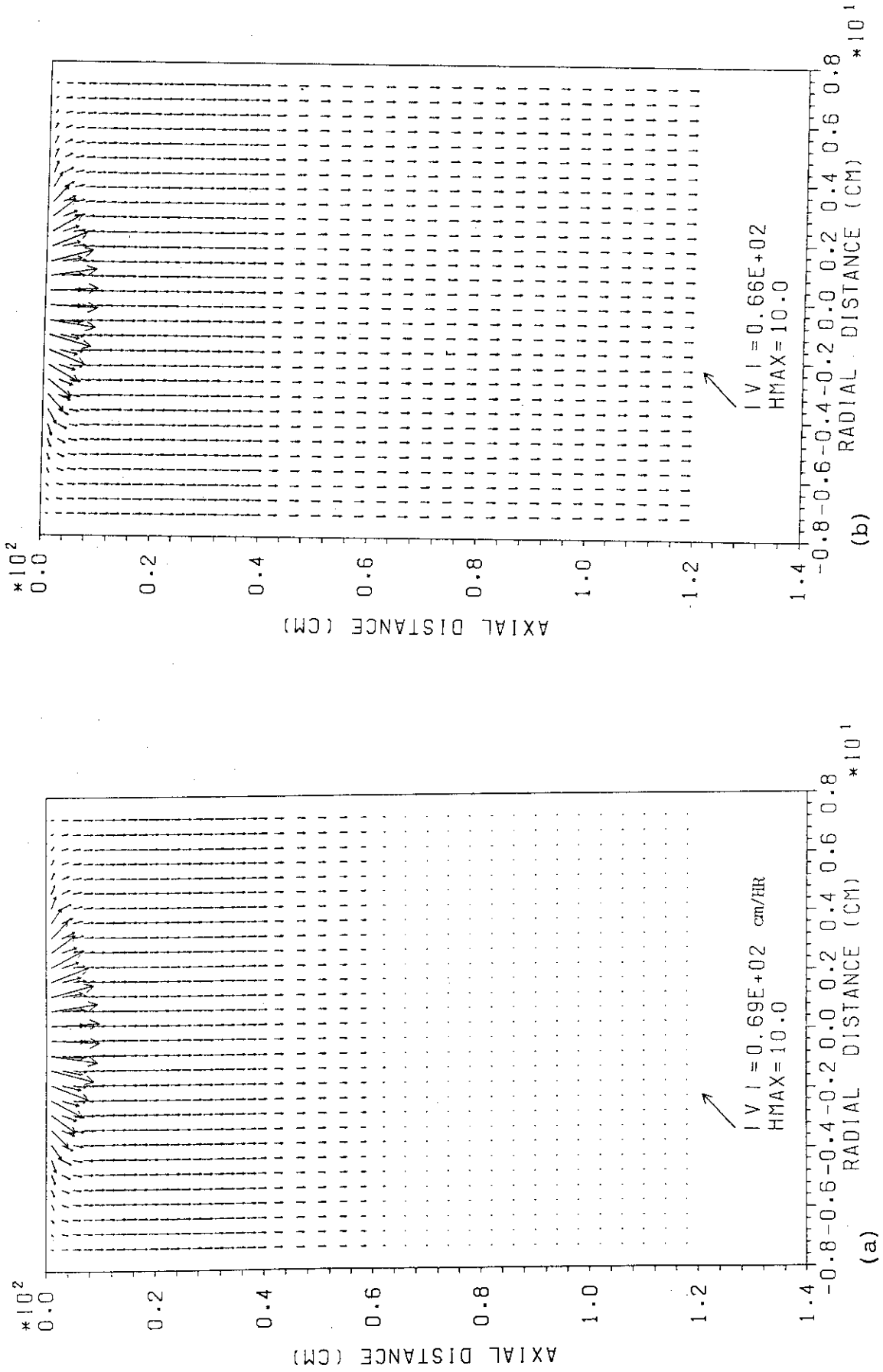


Fig.9 Distribution of water velocity in soil layer

(a) at 1 hour , (b) at 4 hours

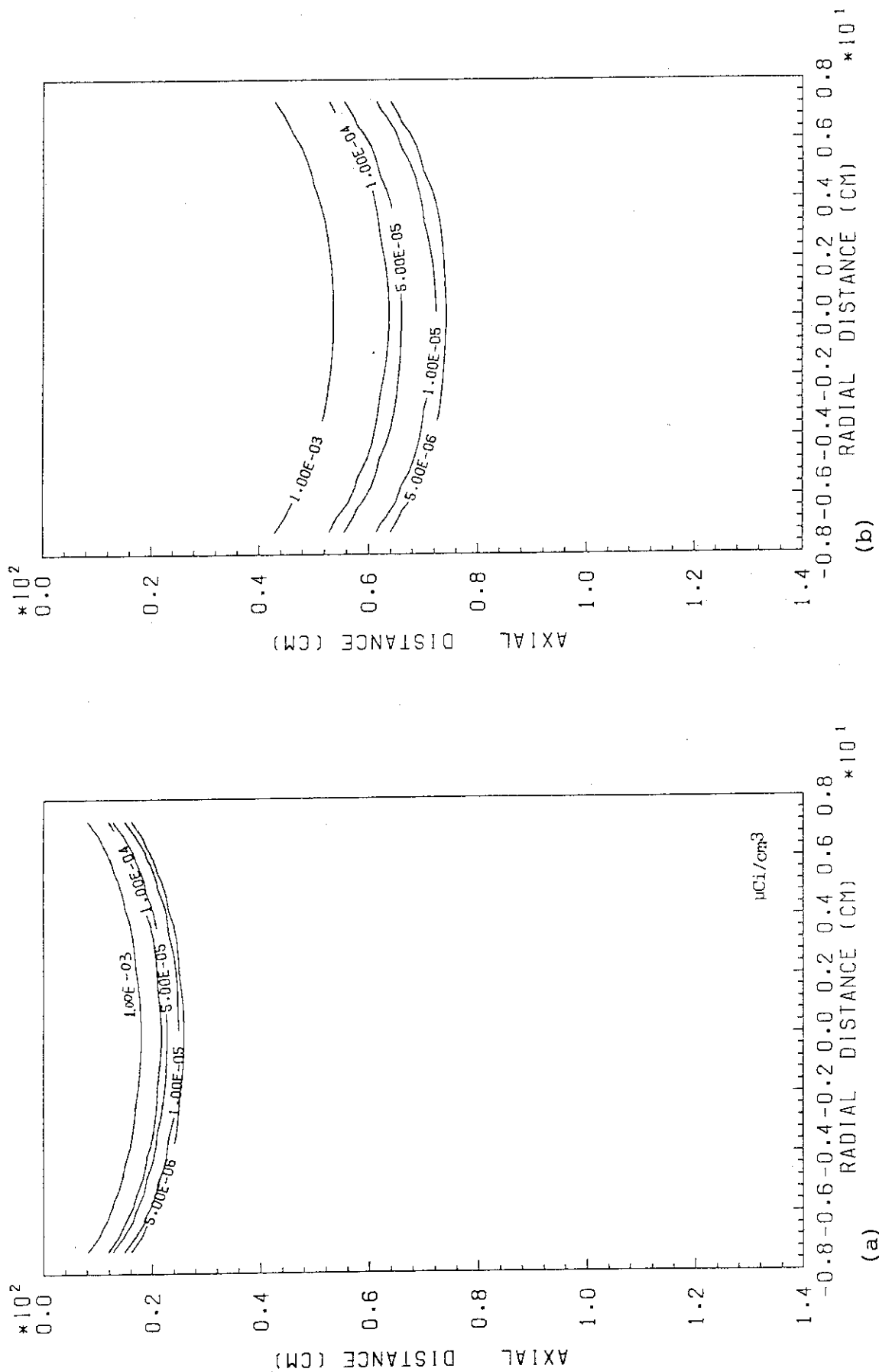


Fig.10 Concentration distribution of radionuclide in soil layer
 by the case of isotherm reaction equation
 (a) at 60 hours, (b) at 110 hours

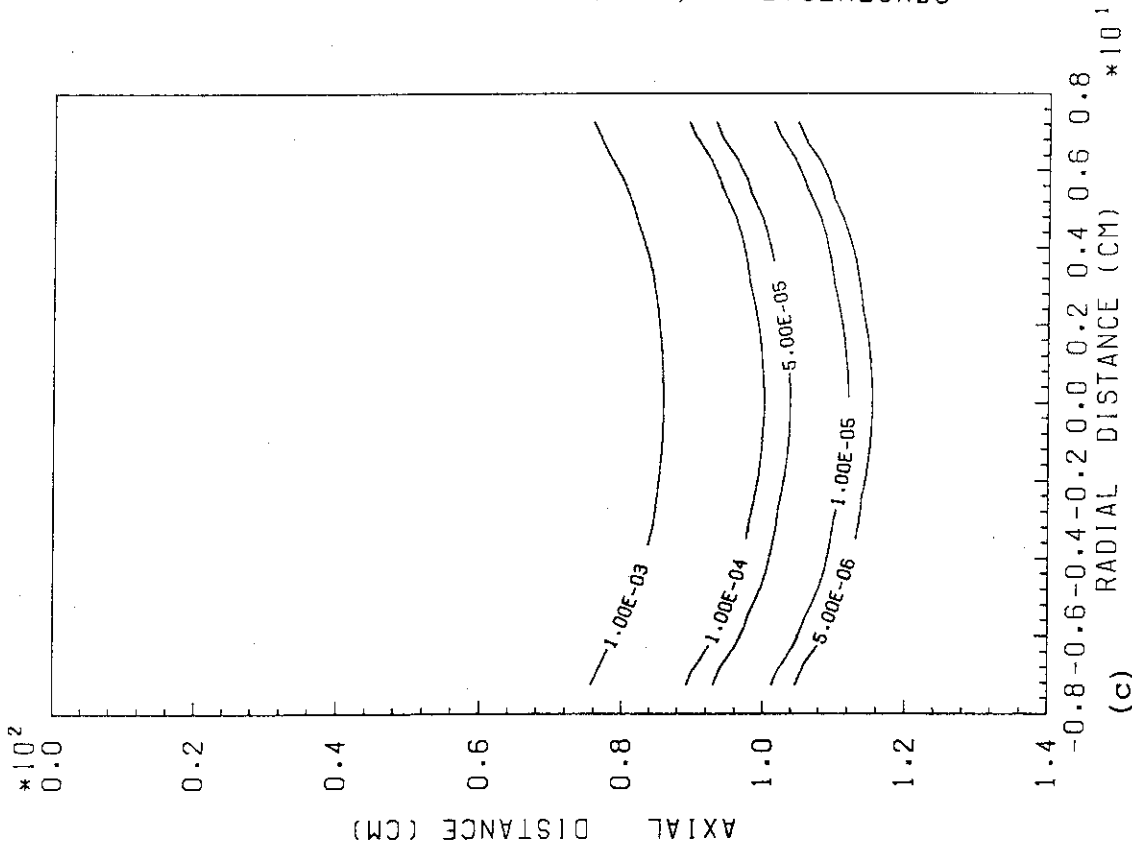


Fig.10 (continued)

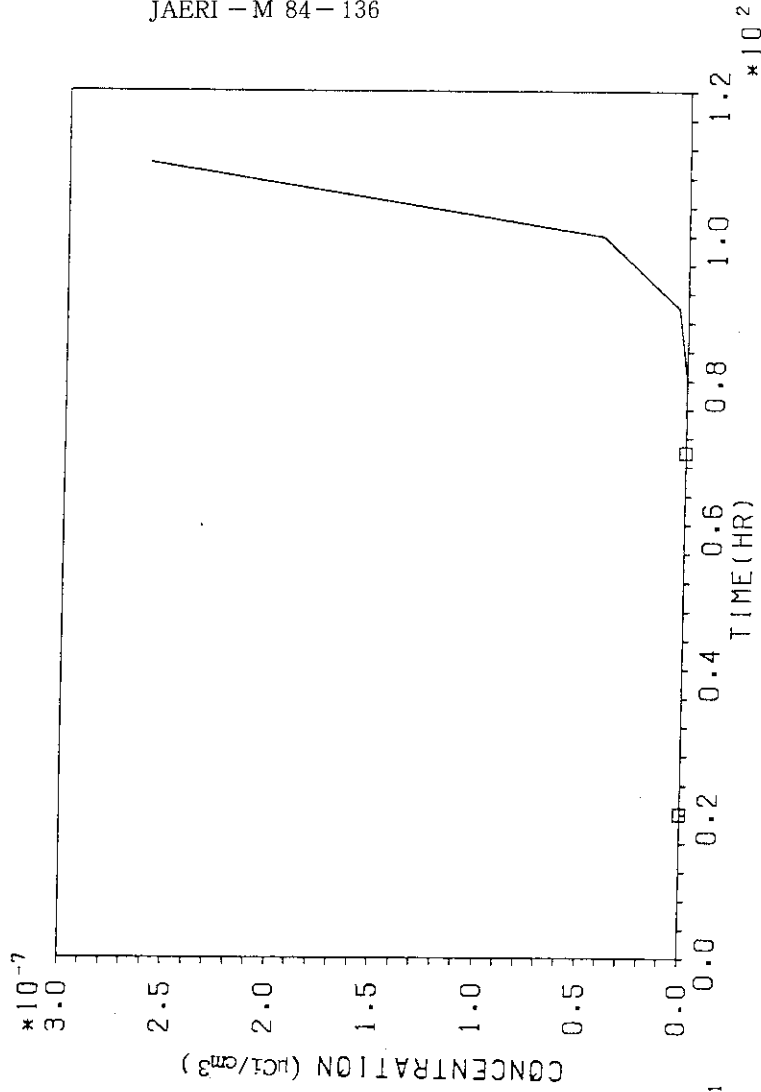


Fig.11 Effluent curve of radionuclide from soil layer by the case of isotherm reaction equation

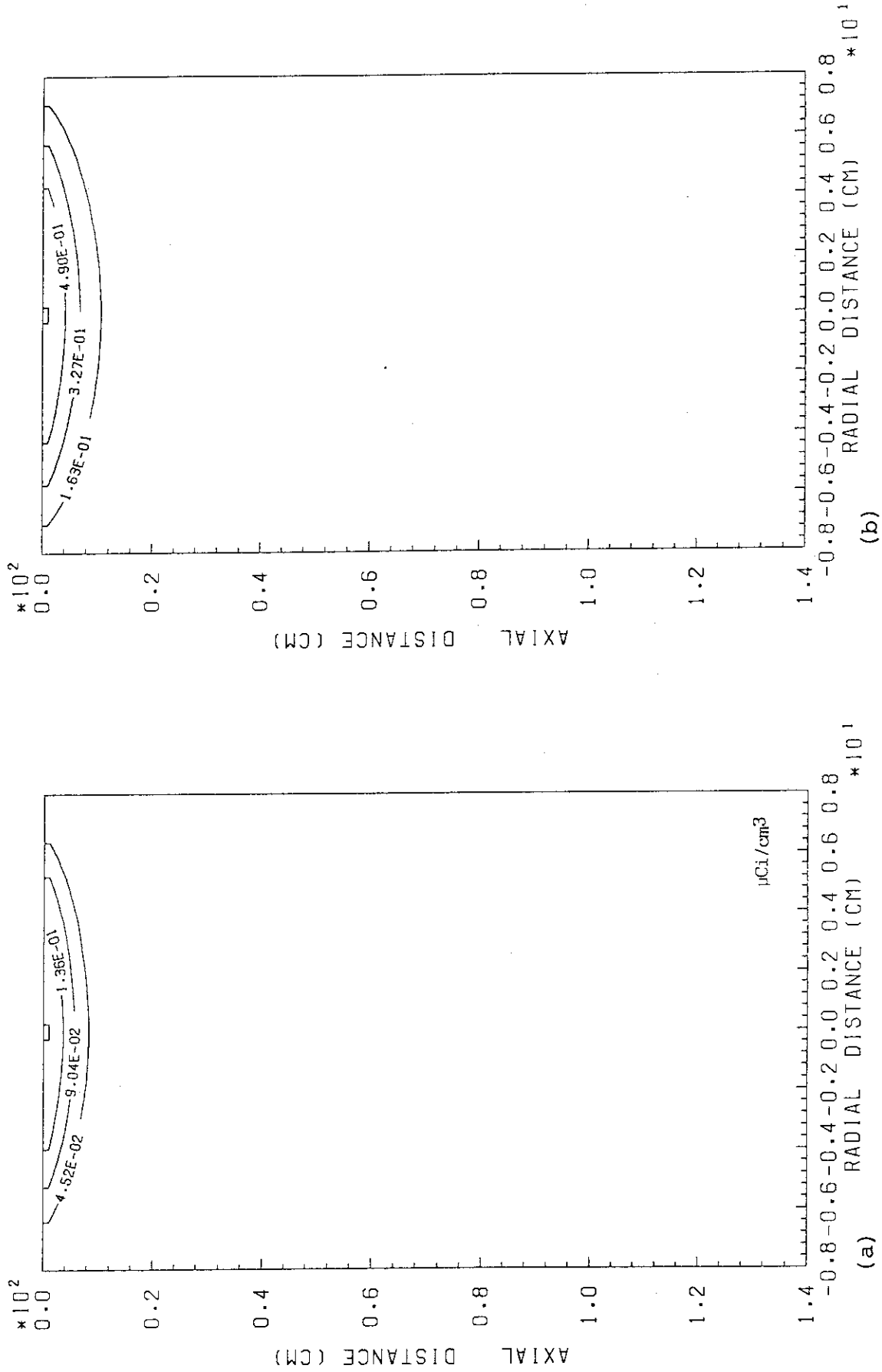


Fig.12 Concentration distribution of radionuclide in soil layer
 by the case of irreversible reaction equation
 (a) at 10 hours, (b) at 60 hours, (c) at 110 hours

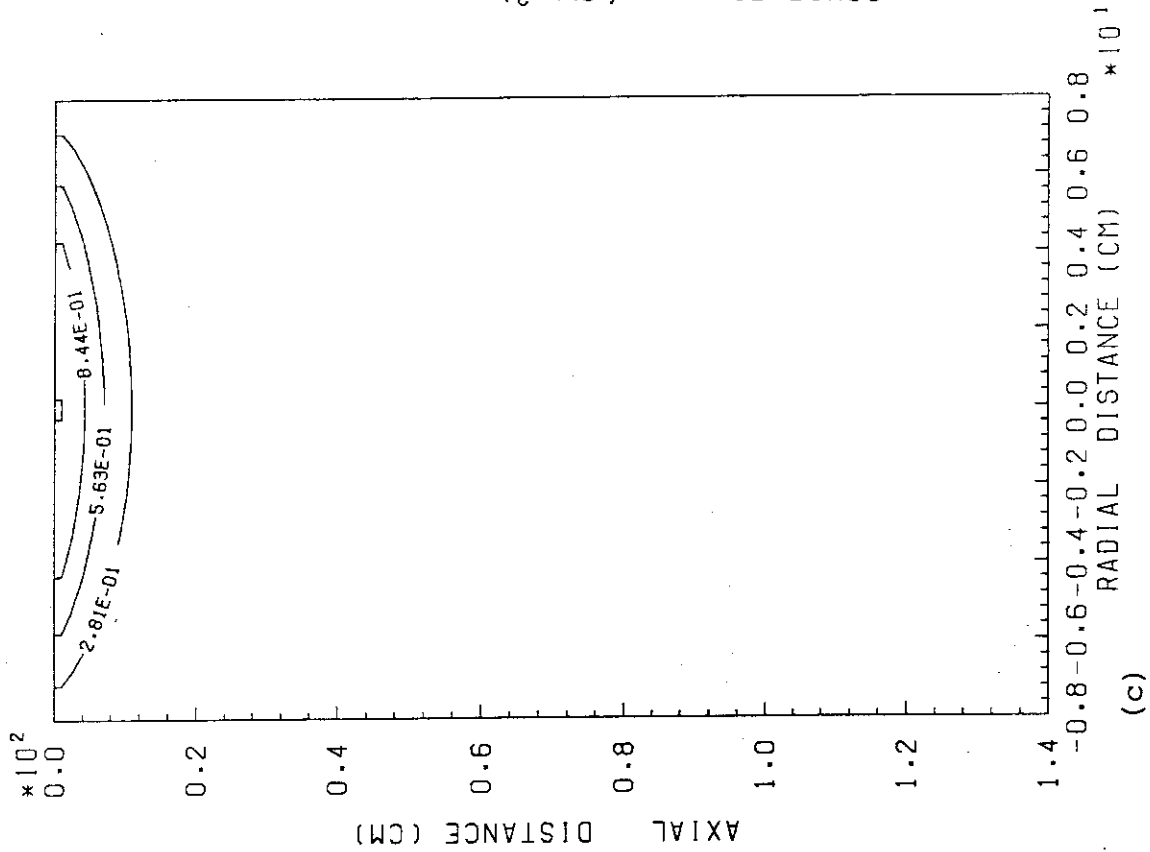


Fig. 12 (continued)

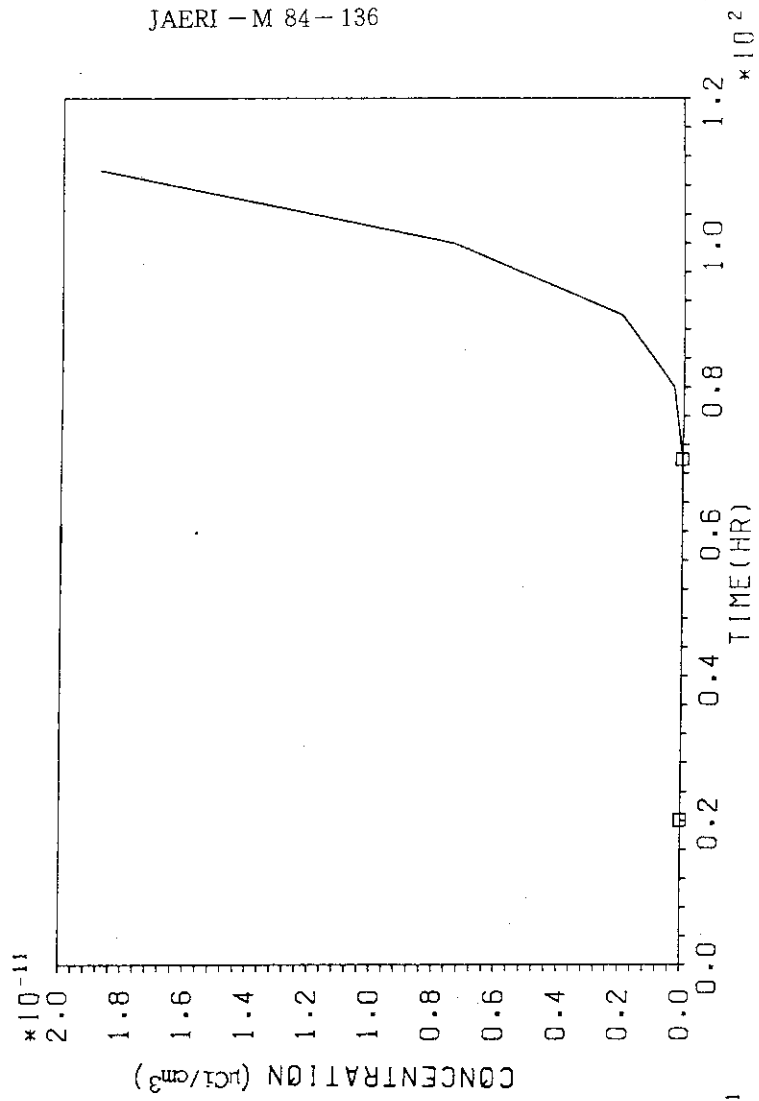


Fig. 13 Effluent curve of radionuclide from soil layer by the case of irreversible reaction equation

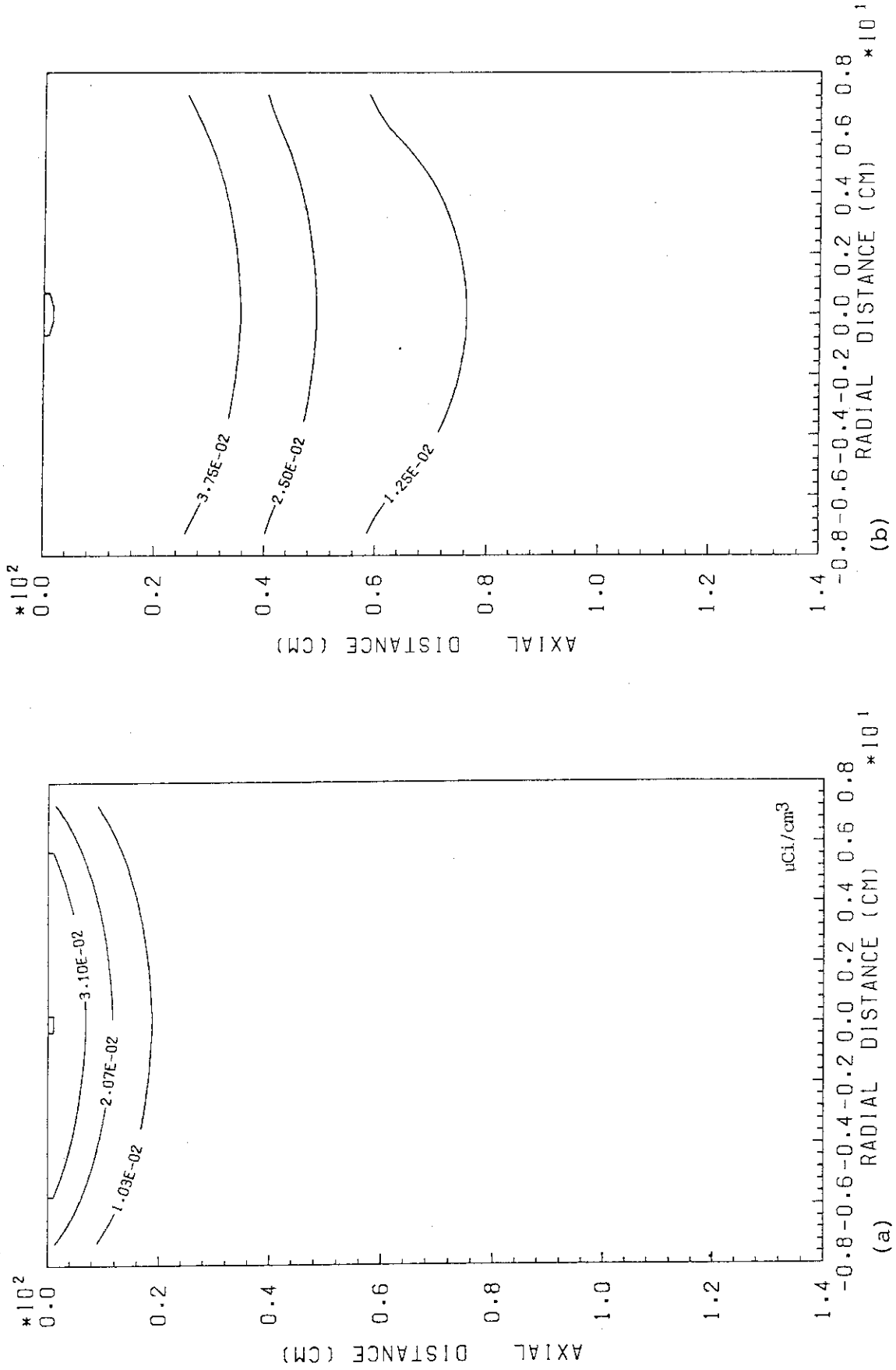


Fig.14 Concentration distribution of radionuclide in soil layer by the case of reversible reaction equation (a) at 60 hours, (b) at 110 hours, (c) at 110 hours

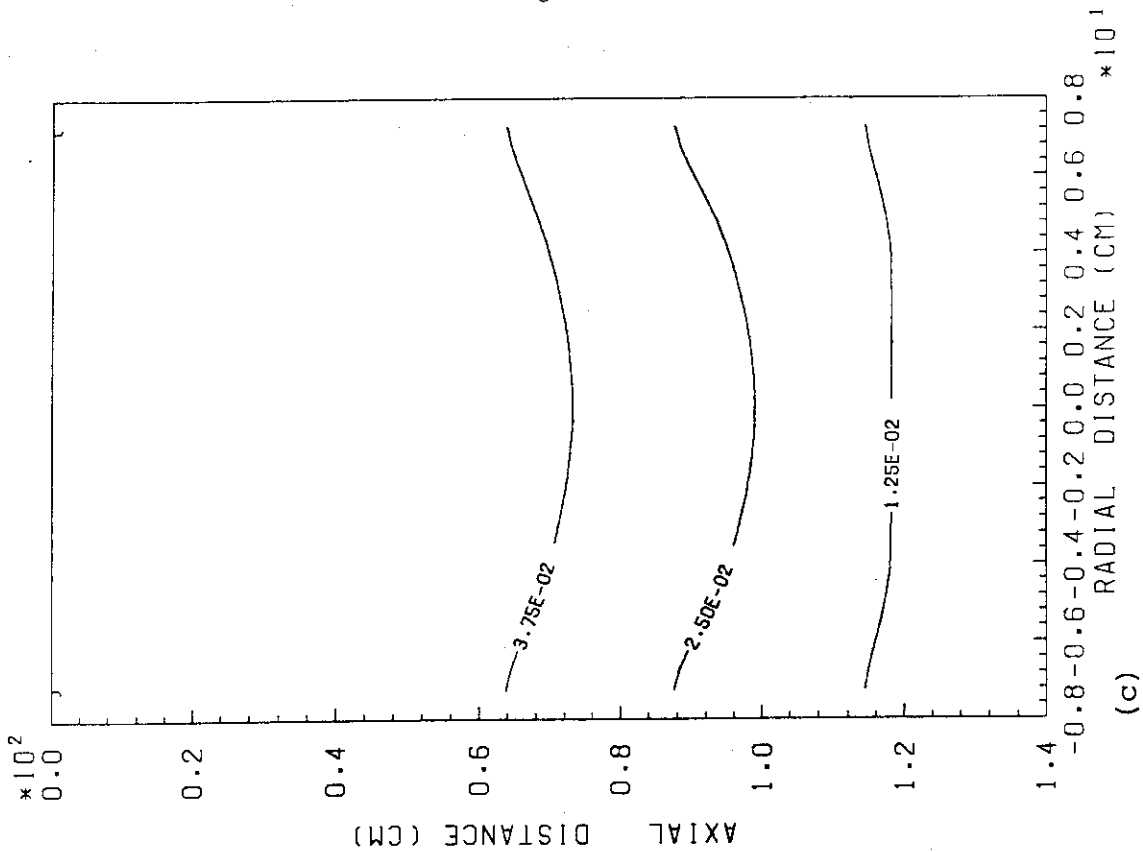


Fig. 14 (continued)

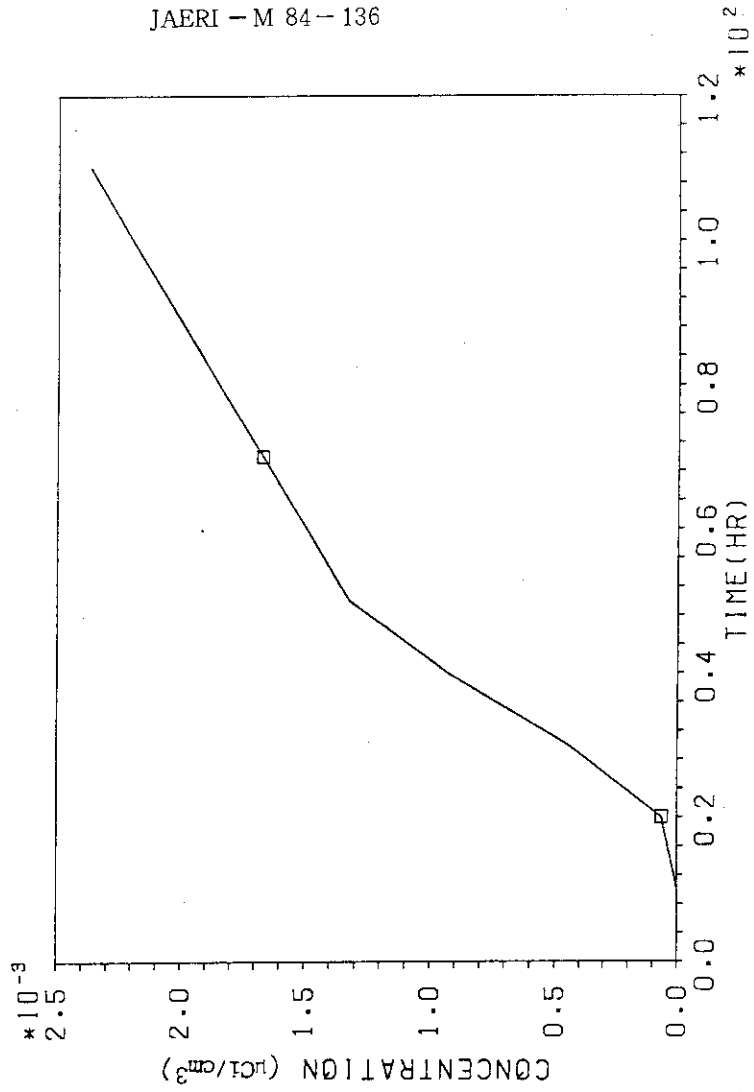


Fig. 15 Effluent curve of radionuclide from soil layer by the case of reversible reaction equation

5. 結 言

放射性核種の浅地層中移動を検討するため、拡散輸送方程式をベースにしたカラム内地層中核種移動予測コードを作成した。本コードは、核種の移動を支配する液-固相反応式を検討するため、各種の反応式を拡散輸送方程式と連立して差分法により得たものである。本コードは、水の移動を予測する水浸透予測コードと放射性核種の移動を予測する核種移動予測コードから成る。本コードを用いた結果、それぞれの反応式を用いて、カラム内地層中の水の移動および核種の移動を予測できた。したがって、本コードを用いることにより、環境シミュレーション試験において得られる通気層中のデータから、核種の移動を支配する反応式について検討することが可能となった。

謝 辞

本報をまとめるに際して多くの助言をいただいた、環境安全研究部低レベル廃棄物処理処分研究室、和達嘉樹室長ならびに山本忠利副主任研究員に感謝の意を表します。

5. 結 言

放射性核種の浅地層中移動を検討するため、拡散輸送方程式をベースにしたカラム内地層中核種移動予測コードを作成した。本コードは、核種の移動を支配する液-固相反応式を検討するため、各種の反応式を拡散輸送方程式と連立して差分法により得たものである。本コードは、水の移動を予測する水浸透予測コードと放射性核種の移動を予測する核種移動予測コードから成る。本コードを用いた結果、それぞれの反応式を用いて、カラム内地層中の水の移動および核種の移動を予測できた。したがって、本コードを用いることにより、環境シミュレーション試験において得られる通気層中のデータから、核種の移動を支配する反応式について検討することが可能となった。

謝 辞

本報をまとめるに際して多くの助言をいただいた、環境安全研究部低レベル廃棄物処理処分研究室、和達嘉樹室長ならびに山本忠利副主任研究員に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 和達嘉樹, 山本忠利, 武部慎一, 大貫敏彦, 鷺尾方一, 原田芳金, 齊藤和明; 日本原子力学会誌, 24, 182 (1982).
- (2) 山本忠利, 原田芳金, 齊藤和明, 武部慎一, 大貫敏彦, 小川弘道, 大塚芳郎, 和達嘉樹; 私信 (1982).
- (3) R.B. Codell and D.L. Schreiber ; "Management of Low-Level Radioactive Waste", Vol.2, P.1193 (1979).
- (4) G.T. Yeh and D.S. Ward ; ORNL-5601 (1982),
- (5) A.E. Reisenauer, S.K. Gupta, R.W. Nelson and C.A. Newbill ; PNL-3994 (1981).
- (6) H.S. Levine ; "Scientific Basis for Nuclear Waste Management", Vol.2, 747 (1979).
- (7) 福井正美; 保健物理, 16, 111 (1981).
- (8) A.Klute ; Soil Sci. , 73, 105 (1952).
- (9) 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹; 保健物理, 17, 437 (1982).
- (10) 矢嶋信男, 野木達夫; " 発展方程式の数値解析", p.199, 岩波書店, (1977).
- (11) 森沢真輔, 井上頼輝, 馬原保典; 日本原子力学会誌, 20, 133 (1978).