

JAERI-M
85-130

帯水槽内土壌層中における放射性核種の
移動予測コード (MIGSTEM-AQ)

1985年9月

大貫 敏彦・前村 克己

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, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1985

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山出軽印刷所

帯水槽内土壌中における放射性核種の移動予測コード
(MIGSTEM-AQ)

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

大貫 敏彦・前村 克己

(1985年8月1日受理)

帯水層槽内土壌中における放射性核種の移動を評価するために、3次元核種移動予測コード(MIGSTEM-AQ)を開発した。本コードは、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。本コードは2つの部分から構成されている。1つは水の流れを予測するものであり、もう1つは核種の移動を予測するものである。

帯水層中における水頭値の等高線、水頭分布の鳥瞰図、水の流れの場を、2つの異なる条件の下に計算した。1つは放射性水溶液を一定点より流入する場合で、もう1つは一定点から流入された核種が定常流と共に移動する条件である。放射性核種の1次元および2次元分布、鳥瞰図および濃度の経時変化を2つ条件に対して計算した。

Development of Prediction Code (MIGSTEM-AQ) for Radionuclide
Migration through Soil Layer in Aquifer Zone Apparatus

Toshihiko OHNUKI and Katsumi MAEMURA

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 1, 1985)

A Computer code for radionuclide migration (MIGSTEM-AQ) has been developed to estimate a migration of radionuclide through soil layer in the aquifer zone apparatus. The code is differential model for the estimation of the migration of dissolved constituents in ground water through saturated porous medium. The code is composed of two parts, one is the part for predicting water flow and the other is the part for estimating the migration of radionuclide.

Contour of water head, perspective view of distribution of water head and water flow fields in aquifer zone are calculated in two different cases. One is the case where radioactive aqueous solution is introduced into the aquifer zone at one point. The other is the case where radionuclide introduced into the aquifer zone at one point transports with constant water flow. One and two dimensional concentration distributions, perspective view of distributions and changes in concentrations with time are calculated in such two cases.

Keywords: Migration, Radionuclides, Prediction Code, Saturated Porous
Medium, Differential Model, Water Flow, Soil Layer

目 次

1. 緒 言	1
2. 放射性核種移動予測モデル	2
2.1 水流支配方程式	2
2.2 放射性核種移動支配方程式	2
3. 放射性核種移動予測コード	4
3.1 領域およびメッシュ分割	4
3.2 初期条件および境界条件	4
3.2.1 水流予測モデル	4
3.2.2 放射性核種移動予測モデル	5
3.3 水流予測コード	5
3.3.1 水流支配方程式の差分解	5
3.3.2 解 法	6
3.3.3 水流速の決定	7
3.3.4 水流予測コードの構成	7
3.4 放射性核種移動予測コード	7
3.4.1 核種移動支配方程式の差分解	8
3.4.2 解 法	9
3.4.3 固相への吸着量	13
3.5 出 力	13
3.5.1 水流予測コード	13
3.5.2 放射性核種移動予測コード	14
4. 結果および考察	14
4.1 水 流 予 測	14
4.1.1 入力データ	15
4.1.2 水頭分布および水流速分布	15
4.2 放射性核種移動予測	15
4.2.1 入力データ	16
4.2.2 放射性核種濃度分布および経時変化	16
5. 結 言	17
謝 辞	17
文 献	18

Contents

1.	Introduction	1
2.	Prediction model for radionuclide migration	2
2.1	Equation describing water flow	2
2.2	Equation describing radionuclide migration	2
3.	Prediction code for radionuclide migration	4
3.1	Region and mesh dividing	4
3.2	Initial and boundary conditions	4
3.2.1	Prediction model for water flow	4
3.2.2	Prediction model for radionuclide migration	5
3.3	Prediction code for water flow	5
3.3.1	Differential model of water flow equation	5
3.3.2	Solution	6
3.3.3	Determination of water velocity	7
3.3.4	Outline of water flow code	7
3.4	Prediction code for radionuclide migration	7
3.4.1	Differential model of radionuclide migration	8
3.4.2	Solution	9
3.4.3	Quantity of radionuclide adsorbed on soil matrix	13
3.5	Output	13
3.5.1	Output in prediction code for water flow	13
3.5.2	Output in prediction code for radionuclide migration	14
4.	Result and discussions	14
4.1	Prediction of water flow	14
4.1.1	Input data	15
4.1.2	Distribution of water head and water flow fields	15
4.2	Prediction of radionuclide migration	15

4.2.1	Input data	16
4.2.2	Concentration distribution and change in concentration with time	16
5.	Conclusions	17
	Acknowledgement	17
	References	18

1. 緒 言

日本原子力研究所においては、将来実施される陸地処分における天然バリア、すなわち浅地層（通気層および帯水層）における放射性核種の移動を評価するため、環境シミュレーション試験を実施している¹⁾。環境シミュレーション試験では、通気層用装置および帯水層用装置により放射性核種の移動を検討しており、この試験で得られるデータは、地層中における放射性核種濃度分布および地層からの流出曲線等である。環境シミュレーション試験の目的の1つには、これらのデータを用いて放射性核種の地層中移動を検討することがある。

そのためには、通気層用および帯水層用装置内の地層中における放射性核種の移動を予測するコードを開発する必要がある。著者らは、まずはじめに通気層カラム内地層中における放射性核種の移動を予測するコード（MIGSTEM-2D）を開発した²⁾。MIGSTEM-2Dは、通気層カラム内に形成した通気層中における放射性核種の移動を予測するため、3次元拡散輸送方程式を円柱座標表現したものを、有限差分法により解いたものである。

帯水層用装置内の地層中における放射性核種の移動を検討する試験は、3次元土壤中における放射性核種の移動を検討するために行なう。また、その試験条件としては、均一流が存在する帯水層に一定点より放射性核種を流入する方法を採用している。したがって、MIGSTEM-2Dを直接試験条件の異なる帯水層用装置内の地層中における放射性核種の移動を予測するコードに適用することはできない。それ故、環境シミュレーション試験で得られた帯水層中における放射性核種の移動に関するデータを解析することを目的とし、帯水層中放射性核種移動予測コード（MIGSTEM-AQ）を開発した。

本報告は、MIGSTEM-AQ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 水流支配方程式

帯水層中における 3 次元直交座標系の水流支配方程式は、次式で表わされる。⁽³⁾

$$\nabla^2 \varphi + Q = 0 \quad (1)$$

ここに、

φ : 水頭

Q : 湧水率 ($Q = q / (\rho \cdot k)$)

k : 透水係数

q : 湧水率

ρ : かさ密度

である。

一方、水頭と水流速の間には、ダルシーの法則から次式の関係が成り立つ。

$$V = -k(\nabla \varphi) \quad (2)$$

ここに、

V : 水流速

である。

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、帯水層土壤中における水頭分布が得られる。次に、その結果と(2)式から、帯水層土壤中における水流分布を求めることができる。

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、(3)式で表現される。⁽⁴⁾

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(C + \frac{1}{\theta} Q \right) = \nabla \cdot \vec{D} (C) - \nabla \cdot (\vec{V} C) - \lambda \left(C + \frac{1}{\theta} Q \right) \quad (3)$$

ここに、

C : 放射性核種の間隙水中の濃度

Q : 放射性核種の固相中の濃度

D : 放射性核種の拡散係数

λ : 放射性核種の崩壊係数

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

$$Q = kd C \quad (4)$$

ここに、

kd : 分配係数

・非可逆反応式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = K_1 \frac{\partial C}{\partial t} + K_2 C \quad (5)$$

ここに、

K_1 : 分配係数

K_2 : 反応速度係数

・可逆反応式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = K_3 C - K_4 Q \quad (6)$$

ここに、

K_3 : 反応速度係数

K_4 : 反応速度係数

平衡式(4)、非可逆反応式(5)、可逆反応式(6)を、放射性核種の移動支配方程式(3)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。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{K_\alpha} \left[\nabla \cdot \vec{D}(\nabla C) - \nabla \cdot (\vec{V} C) + S_\alpha \right] \quad (7)$$

$\alpha : 1, 2, 3$

ここに、 K_α および S_α はそれぞれの反応式(4)、(5)、および(6)式により、次の関係で表わされる。

・平衡

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

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

・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、(7)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、帯水層中における放射性核種の移動を予測することができる。

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

本コードは、3次元帯水層内土壤中（以下、帯水層）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式を差分法で解いて予測するため、3次元座標メッシュ分割（ x 、 y 、 z ）を行なう必要がある。配列の添字は、 x 方向を i で、 y 方向を j で、 z 方向を k で表現する。また、メッシュ番号の増加の方向は、一般の3次元座標と同じである。

メッシュの分割とグリッド上の配列添字番号との関係をFig. 1に示す。Fig. 1では、 zx 平面におけるそれらの関係を示す。ここで、他の平面についても同様の関係となる。Fig. 1で、 NZ は z 方向のメッシュ分割数である。水頭、放射性核種濃度および水流速の設定位置をFig. 2に示す。Fig. 2より明らかなように、水頭および放射性核種濃度等のスカラー量はメッシュセンター位置で定義し、水流速度等のベクトル量はグリッド上で定義した。

3.2 初期条件および境界条件

環境シミュレーション試験において行なわれる帯水層試験の試験方法には、均一的水流を保持している帯水層へ放射性核種をポイントで流入する方式を採用している。

3.2.1 水流予測モデル

水の流れは、定常状態であるため、初期条件は関係なく、境界条件だけが問題となる。

境界条件は、 x 方向の両境界における水頭の値を与える。また、ポイント流入であるので、流入口に湧水する放射性水溶液量も境界条件として与える。 y 、 z 方向の両境界は全て壁であるため、壁としての条件を与える。

すなわち、 $y = 0$ 面では、

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

・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、(7)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、帯水層中における放射性核種の移動を予測することができる。

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

本コードは、3次元帯水層内土壤中（以下、帯水層）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式を差分法で解いて予測するため、3次元座標メッシュ分割（ x 、 y 、 z ）を行なう必要がある。配列の添字は、 x 方向を i で、 y 方向を j で、 z 方向を k で表現する。また、メッシュ番号の増加の方向は、一般の3次元座標と同じである。

メッシュの分割とグリッド上の配列添字番号との関係をFig. 1に示す。Fig. 1では、 zx 平面におけるそれらの関係を示す。ここで、他の平面についても同様の関係となる。Fig. 1で、 NZ は z 方向のメッシュ分割数である。水頭、放射性核種濃度および水流速の設定位置をFig. 2に示す。Fig. 2より明らかなように、水頭および放射性核種濃度等のスカラー量はメッシュセンター位置で定義し、水流速度等のベクトル量はグリッド上で定義した。

3.2 初期条件および境界条件

環境シミュレーション試験において行なわれる帯水層試験の試験方法には、均一的水流を保持している帯水層へ放射性核種をポイントで流入する方式を採用している。

3.2.1 水流予測モデル

水の流れは、定常状態であるため、初期条件は関係なく、境界条件だけが問題となる。

境界条件は、 x 方向の両境界における水頭の値を与える。また、ポイント流入であるので、流入口に湧水する放射性水溶液量も境界条件として与える。 y 、 z 方向の両境界は全て壁であるため、壁としての条件を与える。

すなわち、 $y = 0$ 面では、

$$\varphi_{i,1,k} = \varphi_{i,0,k}$$

である。他の面についても同様である。

3.2.2 放射性核種移動予測モデル

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な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。

帯水層試験においては、放射性核種はポイントより流入するため、 x 方向の両端においては、

$$\frac{\partial C}{\partial x} = A$$

とした。

ここで、 A は定数である。実際のコードでは放射性核種濃度を0とする距離を入力するようにしている。

他の面に対しては、水流予測コードと同様に、壁とした。すなわち、 $y = 0$ 面では、

$$C_{i,1,k} = C_{i,0,k}$$

であるから、

$$D_{i,\frac{1}{2},k} (C_{i,1,k} - C_{i,0,k}) = 0$$

となるので、

$$D_{i,\frac{1}{2},k} = 0$$

とした。 $y = NY$, $z = 0$, NZ 面でも同様である。

境界条件ではないが、放射性核種は、一定点より帯水層へ流入してくるため、一定点の位置と湧水する放射性核種濃度を与える。

3.3 水流予測コード

(1)および(2)式を用いて、帯水層中における水頭および水流速を求めるため、それらの偏微分方程式を差分近似で解いてコード化した。

3.3.1 水流支配方程式の差分解

(1)式を、差分近似すると(8)式が得られる。

$$\begin{aligned}
\varphi_{i,j,k} = & \frac{H^2}{2} \left\{ \left(\frac{1}{\Delta x^2} \right) (\varphi_{i+1,j,k} + \varphi_{i-1,j,k}) \right. \\
& + \frac{1}{\Delta y^2} (\varphi_{i,j+1,k} + \varphi_{i,j-1,k}) \\
& \left. + \frac{1}{\Delta z^2} (\varphi_{i,j,k+1} + \varphi_{i,j,k-1}) + \frac{2}{H^2} q_{i,j,k} \right\}
\end{aligned} \tag{8}$$

ここに,

$$H^2 = \frac{\Delta x^2 \Delta y^2 + \Delta y^2 \Delta z^2 + \Delta z^2 \Delta x^2}{\Delta x^2 \cdot \Delta y^2 \cdot \Delta z^2}$$

である。

3.3.2 解法

(1)式は、時間に関する微分項がない。すなわち、定常状態における水頭分布を求め方程式である。そのため、(8)式の定常解をS. O. R. 法で求める。

(8)式は、S. O. R. 法により(9)式となる。

$$\varphi_{i,j,k}^{\text{NEW}} = \varphi_{i,j,k}^{\text{OLD}} + \omega \left\{ \frac{H^2}{2} (\psi_i + \psi_j + \psi_k) + \frac{2}{H^2} q_{i,j,k} \right\} \tag{9}$$

ここに,

$$\psi_i = \varphi_{i+1,j,k} + \varphi_{i-1,j,k}$$

$$\psi_j = \varphi_{i,j+1,k} + \varphi_{i,j-1,k}$$

$$\psi_k = \varphi_{i,j,k+1} + \varphi_{i,j,k-1}$$

ω : 加速パラメーター

である。

(9)式の解法手順について説明する。

① step 1

全てのメッシュにおける水頭の初期値 $\varphi^{(0)}$ を与える。ここで、境界条件の与えられているメッシュ上の値には、境界条件値 $\varphi^{(\text{bound})}$ を与える。

② step 2

(8)式により、 $\varphi_{i,j,k}^{\text{NEW}}$ の値を全メッシュについて計算する。ただし、境界条件の与えられ

ているメッシュの上の値はそのままとする。

③ step 3

step 2で求めた $\varphi_{i,j,k}^{NEW}$ の値と $\varphi_{i,j,k}^{OLD}$ の値との差が最大のもの(Rs)を、収束判定値(ϵ)と比較する。Rsが ϵ よりも小さい場合には、処理を終了する。Rsが ϵ よりも大きい場合には、step 2をRs $<\epsilon$ となるまで繰り返す。ここで、この処理を有限回で終了させるため、収束処理回数上限値を定め、収束処理の回数が収束処理回数上限値以上になったら、収束処理を打ち切る。

以上の結果、適当な境界条件に対して、帯水層中の水頭分布を求められる。

3.3.3 水流速の決定

3.3.2で述べた方法により求まる帯水層中の水頭分布より、(2)式を用いて水流速を求める。

(2)式を差分近似すると、x方向では、

$$V_{x,i+\frac{1}{2},j,k} = -k \frac{\varphi_{i+1,j,k} - \varphi_{i,j,k}}{\Delta x} \quad (10)$$

となる。他の方向でも同様である。

したがって、水流速は、3.3.2で述べた方法により得られた水頭の値を(10)式に代入することから求められる。

3.3.4 水頭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. 3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. 4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、水頭および水流速計算を総合的に制御するルーチンである。

② INPUT

INPUTルーチンは、リスト指示メカ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 CALSOR

CALSORルーチンは、差分法の収束処理を行ない処理を制御するルーチンである。

④ ZAN

ZANルーチンは、それぞれのメッシュ上の値よりRsを求めるルーチンである。

3.4 放射性核種移動予測コード

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

3.4.1 放射性核種移動支配方程式の差分

(7)式をDouglasによるADI法で解く^[5], x, y, z方向に関して各々1stepずつ3stepで解く。

C*, C**を中間変数として, 3重アルゴリズムで計算すると, (7)式は, (11)~(13)式ようになる。

$$K_{i,j,k} \frac{C_{i,j,k}^* - C_{i,j,k}^{\text{OLD}}}{\Delta t} = \frac{1}{2} (\nabla_x^{(2)} C_{i,j,k}^* + \nabla_z^{(2)} C_{i,j,k}^{\text{OLD}}) + \nabla_y^{(2)} C_{i,j,k}^{\text{OLD}} + \nabla_z^{(2)} C_{i,j,k}^{\text{OLD}} \\ - \frac{1}{2} (\nabla_x C_{i,j,k}^* + \nabla_x C_{i,j,k}^{\text{OLD}}) - \nabla_y C_{i,j,k}^{\text{OLD}} - \nabla_z C_{i,j,k}^{\text{OLD}} + S_{i,j,k} \quad (11)$$

$$K_{i,j,k} \frac{C_{i,j,k}^{**} - C_{i,j,k}^*}{\Delta t} = \frac{1}{2} (\nabla_y^{(2)} C_{i,j,k}^{**} - \nabla_y^{(2)} C_{i,j,k}^{\text{OLD}}) - \frac{1}{2} (\nabla_y C_{i,j,k}^{**} - \nabla_y C_{i,j,k}^{\text{OLD}}) \quad (12)$$

$$K_{i,j,k} \frac{C_{i,j,k}^{\text{NEW}} - C_{i,j,k}^{**}}{\Delta t} = \frac{1}{2} (\nabla_z^{(2)} C_{i,j,k}^{\text{NEW}} - \nabla_z^{(2)} C_{i,j,k}^{\text{OLD}}) - \frac{1}{2} (\nabla_z C_{i,j,k}^{\text{NEW}} - \nabla_z C_{i,j,k}^{\text{OLD}}) \quad (13)$$

ここに,

$$\nabla_x^{(2)} C_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta x^2} \{ D_{i+\frac{1}{2},j,k} (C_{i+1,j,k} - C_{i,j,k}) - D_{i-\frac{1}{2},j,k} (C_{i,j,k} - C_{i-1,j,k}) \}$$

$$\nabla_y^{(2)} C_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta y^2} \{ D_{i,j+\frac{1}{2},k} (C_{i,j+1,k} - C_{i,j,k}) - D_{i,j-\frac{1}{2},k} (C_{i,j,k} - C_{i,j-1,k}) \}$$

$$\nabla_z^{(2)} C_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta z^2} \{ D_{i,j,k+\frac{1}{2}} (C_{i,j,k+1} - C_{i,j,k}) - D_{i,j,k-\frac{1}{2}} (C_{i,j,k} - C_{i,j,k-1}) \}$$

$$\nabla_x C_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta x} \{ (V_x C)_{i+\frac{1}{2},j,k} - (V_x C)_{i-\frac{1}{2},j,k} \}$$

$$\nabla_y C_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta y} \{ (V_y C)_{i,j+\frac{1}{2},k} - (V_y C)_{i,j-\frac{1}{2},k} \}$$

$$\nabla_z C_{i,j,k} = \frac{1}{\Delta z} \{ (V_z C)_{i,j,k+\frac{1}{2}} - (V_z C)_{i,j,k-\frac{1}{2}} \}$$

である。

また, $V C$ の項は, 風上差分で表現する。すなわち, 上流のメッシュの放射性核種濃度 C を用いて計算する。

(11)~(13)式を整理して, それぞれ(14)~(16)式が得られる。

$$\left\{ \frac{K_{i,j,k}}{\Delta t} - \frac{1}{2} (\nabla_x^{(2)} - \nabla_x) \right\} C_{i,j,k}^* \quad (14)$$

$$= \left\{ \frac{K_{i,j,k}}{\Delta t} + \frac{1}{2} (\nabla_x^{(2)} - \nabla_x) + (\nabla_y^{(2)} - \nabla_y) + (\nabla_z^{(2)} - \nabla_z) \right\} C_{i,j,k}^{\text{OLD}} + S_{i,j,k}$$

$$\left\{ \frac{K_{i,j,k}}{\Delta t} - \frac{1}{2} (\nabla_y^{(2)} - \nabla_y) \right\} C_{i,j,k}^{**} = \frac{K_{i,j,k}}{\Delta t} C_{i,j,k}^* - \frac{1}{2} (\nabla_y^{(2)} - \nabla_y) C_{i,j,k}^{\text{OLD}} \quad (15)$$

$$\left\{ \frac{K_{i,j,k}}{\Delta t} - \frac{1}{2} (\nabla_z^{(2)} - \nabla_z) \right\} C_{i,j,k}^{\text{NEW}} = \frac{K_{i,j,k}}{\Delta t} C_{i,j,k}^{**} - \frac{1}{2} (\nabla_z^{(2)} - \nabla_z) C_{i,j,k}^{\text{OLD}} \quad (16)$$

ここで、風上差分表示を用いて、風上差分指数 δ_n ($n: x, y, z$) を導入する。すなわち、 δ_n はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \delta_x \begin{cases} 1; V_x \geq 0 \text{ の時} \\ 0; V_x < 0 \text{ の時} \end{cases} &\rightarrow C_{i+\frac{1}{2},j,k} = \delta_x C_{i,j,k} + (1-\delta_x) C_{i+1,j,k} \\ \delta_y \begin{cases} 1; V_y \geq 0 \text{ の時} \\ 0; V_y < 0 \text{ の時} \end{cases} &\rightarrow C_{i,j+\frac{1}{2},k} = \delta_y C_{i,j,k} + (1-\delta_y) C_{i,j+1,k} \\ \delta_z \begin{cases} 1; V_z \geq 0 \text{ の時} \\ 0; V_z < 0 \text{ の時} \end{cases} &\rightarrow C_{i,j,k+\frac{1}{2}} = \delta_z C_{i,j,k} + (1-\delta_z) C_{i,j,k+1} \end{aligned}$$

である。

3.4.2 解 法

(11)~(13)式について解いて、 $C_{i,j,k}^{\text{OLD}}$ から $C_{i,j,k}^{\text{NEW}}$ を求めていく。それぞれの step では、3つの未知数があるため、バンド幅3の行列を解くことにより、解が求まる。解法手順は、MIGSTEM-2Dの場合と同じである。

放射性核種濃度の中間値に着目して、(11)~(13)式を整理すると、(17)~(19)式となる。

$$-A_{xi} C_{i-1,j,k}^* + B_{xi} C_{i,j,k}^* - C_{xi} C_{i+1,j,k}^* = M_{xi} \quad (17)$$

$$-A_{yj} C_{i,j-1,k}^{**} + B_{yj} C_{i,j,k}^{**} - C_{yj} C_{i,j+1,k}^{**} = M_{yi} \quad (18)$$

$$-A_{zk} C_{i,j,k-1}^{\text{NEW}} + B_{zk} C_{i,j,k}^{\text{NEW}} - C_{zk} C_{i,j,k+1}^{\text{NEW}} = M_{zk} \quad (19)$$

ここに、

$$A_{xi} = \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x^2} \left\{ D_{i-\frac{1}{2},j,k} + V_{xi-\frac{1}{2},j,k} \cdot \delta_{xi-\frac{1}{2},j,k} \cdot \Delta x \right\}$$

$$\begin{aligned}
B_{xi} &= K_{i,j,k} + \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x^2} \left\{ (D_{i+\frac{1}{2},j,k} + D_{i-\frac{1}{2},j,k}) \right. \\
&\quad \left. + (V_{xi+\frac{1}{2},j,k} \cdot \delta x_{i+\frac{1}{2},j,k} - V_{xi-\frac{1}{2},j,k} (1 - \delta x_{i-\frac{1}{2},j,k})) \cdot \Delta x \right\} \\
C_{xi} &= \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta x^2} \left\{ D_{i+\frac{1}{2},j,k} - V_{xi+\frac{1}{2},j,k} (1 - \delta x_{i+\frac{1}{2},j,k}) \cdot \Delta x \right\} \\
A_{yj} &= \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta y^2} \left\{ D_{i,j+\frac{1}{2},k} + V_{yi-\frac{1}{2},k} \cdot \delta y_{i,j-\frac{1}{2},k} \cdot \Delta y \right\} \\
B_{yj} &= K_{i,j,k} + \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta y^2} \left\{ (D_{i,j+\frac{1}{2},k} + D_{i,j-\frac{1}{2},k}) \right. \\
&\quad \left. + (V_{yj,j+\frac{1}{2},k} \cdot \delta y_{i,j+\frac{1}{2},k} - V_{yi,j-\frac{1}{2},k} (1 - \delta y_{i,j-\frac{1}{2},k})) \cdot \Delta y \right\} \\
C_{yj} &= \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta y^2} \left\{ D_{i,j+\frac{1}{2},k} - V_{yi,j+\frac{1}{2},k} (1 - \delta y_{i,j+\frac{1}{2},k}) \cdot \Delta y \right\} \\
A_{zk} &= \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta z^2} \left\{ D_{i,j,k+\frac{1}{2}} + V_{zi,j,k-\frac{1}{2}} \cdot \delta z_{i,j,k-\frac{1}{2}} \cdot \Delta z \right\} \\
B_{zk} &= K_{i,j,k} + \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta z^2} \left\{ (D_{i,j,k+\frac{1}{2}} + D_{i,j,k-\frac{1}{2}}) \right. \\
&\quad \left. + (V_{zi,j,k+\frac{1}{2}} \cdot \delta z_{i,j,k+\frac{1}{2}} - V_{zi,j,k-\frac{1}{2}} (1 - \delta z_{i,j,k-\frac{1}{2}})) \cdot \Delta z \right\} \\
C_{zk} &= \frac{\Delta t}{2 \cdot \Delta z^2} \left\{ D_{i,j,k+\frac{1}{2}} (1 - \delta z_{i,j,k+\frac{1}{2}}) \cdot \Delta z \right\} \\
M_{zi} &= \Delta t \cdot S_{i,j,k} + A_{zi} C_{i-1,j,k}^{OLD} + 2A_{yj} C_{i,j-1,k}^{OLD} + 2A_{zk} C_{i,j,k-1}^{OLD} \\
&\quad + (6K_{i,j,k} - B_{xi} - 2B_{yj} - 2B_{zk}) C_{i,j,k}^{OLD} \\
&\quad + C_{xi} C_{i+1,j,k}^{OLD} + 2C_{yj} C_{i,j+1,k}^{OLD} + 2C_{zk} C_{i,j,k+1}^{OLD} \\
M_{yj} &= K_{i,j,k} C_{i,j,k}^* - A_{yj} C_{i,j-1,k}^{OLD} + (B_{yj} - K_{i,j,k}) C_{i,j,k}^{OLD} - C_{yj} C_{i,j+1,k}^{OLD}
\end{aligned}$$

$$M_{zk} = K_{i,j,k} C_{i,j,k}^{**} - A_{zk} C_{i,j,k-1}^{OLD} + (B_{zk} - K_{i,j,k}) C_{i,j,k}^{OLD} - C_{zk} C_{i,j,k+1}^{OLD}$$

である。

① step 1

(17)式を整理して(20)式が得られる。

$$C_{i,j,k}^* = E_i C_{i+1,j,k}^* + F_i \quad (20)$$

ここに,

$$E_i = \frac{C_{xi}}{-A_{xi} E_{i-1} + B_{xi}}$$

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

である。

x 方向の両側の境界における値は、境界条件によって異なる。すなわち、 $x = 0$ 、 NX が壁の場合と壁でない場合である。

$X = 0$ 面が壁の場合には、($C_{0,j,k}^* = C_{1,j,k}^*$) となり

$$E_1 = \frac{C_{x1}}{B_{x1}}, \quad F_1 = \frac{M_{x1}}{B_{x1}}$$

$X = 0$ 面が壁でない場合には、($C_{0,j,k}^*$ は 0.0) となり

$$E_1 = \frac{C_{x1}}{B_{x1}}, \quad F_1 = \frac{M_{x1} + A_1 \cdot C_{0,j,k}^*}{B_{x1}} = \frac{M_{x1}}{B_{x1}}$$

$X = NX$ 面が壁の場合には、($C_{0,j,k}^* = C_{NX,j,k}^*$) となり

$$C_{NX,j,k}^* = \frac{F_{Nx}}{1 - E_{Nx}}$$

$X = NX$ 面が壁でない場合には、($C_{NX+1,j,k}^*$ は 0.0) となり

$$C_{NX,j,k}^* = F_{Nx}$$

である。したがって、 $C_{i,j,k}^*$ の値が $i = 1 \sim NX$ について順次求まる。

② step 2

(18)式を整理して(21)式が得られる。

$$C_{i,j,k}^* = E_j C_{i,j+1,k}^{**} + F_j \quad (21)$$

x 方向と同様に、境界面では次下の関係が成り立つ。

$Y = 0$ 面が壁の場合には, $(C_{i,0,k}^{**} = C_{i,1,k}^{**})$ となり

$$E_1 = \frac{C_{y1}}{B_{y1}}, \quad F_1 = \frac{M_{y1}}{B_{y1}}$$

$Y = 0$ 面が壁でない場合には, $(C_{i,0,k}^{**} \text{は } 0.0)$ となり

$$E_1 = \frac{C_{y1}}{B_{y1}}, \quad F_1 = \frac{M_{y1} + A_{y1} \cdot C_{i,0,k}^{**}}{B_{y1}}$$

$Y = NY$ 面が壁の場合には, $(C_{i,NY+1,k}^{**} = C_{i,NY,k}^{**})$ となり

$$C_{i,NY,k} = \frac{F_{NY}}{1 - E_{NY}}$$

$Y = NY$ 面が壁でない場合には, $(C_{i,NY+1,k}^{**} \text{は } 0.0)$ となり

$$C_{i,NY,k} = F_{NY}$$

したがって, $C_{i,j,k}^{**}$ の値が $j = 1 \sim NY$ について順次値が求まる。

③ step 3

(19)式を整理して(22)式が得られる。

$$C_{i,j,k}^{NEW} = E_k C_{i,j,k+1}^{NEW} + F_i \quad (22)$$

ここに,

$$E_k = \frac{C_{zk}}{-A_{zk} E_{k-1} + B_{zk}}$$

$$F_k = \frac{M_{zk} + A_{zk} \cdot F_{k-1}}{-A_{zk} \cdot E_{k-1} + B_{zk}}$$

である。

x 方向と同様に, 境界面では以下の関係が成り立つ。

$Z = 0$ 面が壁の場合には, $(C_{i,j,0}^{NEW} = C_{i,j,1}^{NEW})$ となり

$$E_1 = \frac{C_{z1}}{B_{z1}}, \quad F_1 = \frac{M_{z1}}{B_{z1}}$$

$Z = 0$ 面が壁でない場合には, $(C_{i,j,0}^{NEW} \text{は } 0.0)$ となり

$$E_1 = \frac{C_{z1}}{B_{z1}}, \quad F_1 = \frac{M_{z1} + A_{z1} \cdot C_{i,j,0}^{NEW}}{B_{z1}} = \frac{M_{z1}}{B_{z1}}$$

$Z = NZ$ 面が壁の場合には, $(C_{i,j,NZ+1}^{NEW} = C_{i,j,0}^{NEW})$ となり

$$C_{i,j,NZ} = \frac{F_{NZ}}{1 - E_{NZ}}$$

したがって、 $C_{i,j,k}^{NEW}$ の値が $z = 1 \sim NZ$ について順次求まる。

3.4.3 固相への吸着量

i) 平衡式

平衡式(4)式を用いる場合は、 $C_{i,j,k}^{n+1}$ が求まれば、 $Q_{i,j,k}^{n+1}$ は、(23)式より得られる。

$$Q_{i,j,k}^{n+1} = P_1 K_d C_{i,j,k}^{n+1} \quad (23)$$

ii) 非可逆反応

非可逆反応式(5)式より、 $Q_{2i,j,k}^{n+1}$ は(24)式を用いて得られる。

$$Q_{2i,j,k}^{n+1} = Q_{2i,j,k}^n + P_2 (k_1 + \Delta t k_2) C_{i,j,k}^{n+1} - P_2 k_1 C_{i,j,k}^n \quad (24)$$

iii) 可逆反応

可逆反応式(6)式より、 $Q_{3i,j,k}^{n+1}$ は、(25)式を用いて得られる。

$$Q_{3i,j,k}^{n+1} = (Q_{3i,j,k}^n + \Delta t P_3 k_3 C_{i,j,k}^{n+1}) / (1 + \Delta t k_4) \quad (25)$$

3.4.4 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. 5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. 6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、放射性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 WCONC

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

④ SCONC

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

3.5 出力

本コードでは、帯水層中における水流および放射性核種移動を予測するため、これらの結果を

リストおよび図として以下に述べるような型式で出力する。

3.5.1 水流予測コード

水流予測コードにおいて、リスト出力することができるものとしては、

- ① xy, yz, zx 面の水頭値
- ② xy, yz, zx 面の水流速値

である。また、図として出力できるものとしては、

- ① xy, yz, zx 面の水頭の等高線
- ② xy, yz, zx 面の水頭の鳥瞰図
- ③ xy, yz, zx 面の水流速のベクトル図

である。

3.5.2 放射性核種移動予測コード

放射性核種移動予測コードにおいて、リスト出力できるものとしては、

- ① ある時刻における xy, yz, zx 面の放射性核種濃度値
- ② ある地点における放射性核種濃度の経時変化
- ③ ある時刻における x, y, z 軸の 1 次元濃度値

である。また、図として出力できるものとしては、

- ① ある時刻における xy, yz, zx 面の放射性核種濃度分布図
- ② ある時刻における xy, yz, zx 面の放射性核種濃度分布の鳥瞰図
- ③ ある時刻における x, y, z 軸の 1 次元濃度分布図
- ④ ある地点における放射性核種濃度の経時変化図

である。

4. 結果および考察

水流予測コードおよび放射性核種移動予測コードを用いて、試験的に計算を行なった。3.2 で述べたように、環境シミュレーション試験の帯水層試験においては、均一流を保持している帯水層へ放射性核種を一定点から流入する方式を採用している。このことから、放射性核種は一定点入力により生じた水流と、均一流の両方の流れにより移動すると考えられる。したがって、2つのケース、すなわち

- ① 一定点からの流入だけで、他に流れが存在しない場合（ケース 1）
- ② 一定の水の流れが存在（水頭差による流れ）して、さらに一定点からの流入がある場合（ケース 2）の放射性核種の移動について検討する。ここで、試算においては、水流の状態の影響を検討することに重点を置いたため、吸着反応式としては、平衡式(4)式を用いて行なった。

リストおよび図として以下に述べるような型式で出力する。

3.5.1 水流予測コード

水流予測コードにおいて、リスト出力することができるものとしては、

- ① xy, yz, zx 面の水頭値
- ② xy, yz, zx 面の水流速値

である。また、図として出力できるものとしては、

- ① xy, yz, zx 面の水頭の等高線
- ② xy, yz, zx 面の水頭の鳥瞰図
- ③ xy, yz, zx 面の水流速のベクトル図

である。

3.5.2 放射性核種移動予測コード

放射性核種移動予測コードにおいて、リスト出力できるものとしては、

- ① ある時刻における xy, yz, zx 面の放射性核種濃度値
- ② ある地点における放射性核種濃度の経時変化
- ③ ある時刻における x, y, z 軸の 1 次元濃度値

である。また、図として出力できるものとしては、

- ① ある時刻における xy, yz, zx 面の放射性核種濃度分布図
- ② ある時刻における xy, yz, zx 面の放射性核種濃度分布の鳥瞰図
- ③ ある時刻における x, y, z 軸の 1 次元濃度分布図
- ④ ある地点における放射性核種濃度の経時変化図

である。

4. 結果および考察

水流予測コードおよび放射性核種移動予測コードを用いて、試験的に計算を行なった。3.2 で述べたように、環境シミュレーション試験の帯水層試験においては、均一流を保持している帯水層へ放射性核種を一定点から流入する方式を採用している。このことから、放射性核種は一定点入力により生じた水流と、均一流の両方の流れにより移動すると考えられる。したがって、2つのケース、すなわち

- ① 一定点からの流入だけで、他に流れが存在しない場合（ケース 1）
- ② 一定の水の流れが存在（水頭差による流れ）して、さらに一定点からの流入がある場合（ケース 2）の放射性核種の移動について検討する。ここで、試算においては、水流の状態の影響を検討することに重点を置いたため、吸着反応式としては、平衡式(4)式を用いて行なった。

4.1 水流予測

帯水層内における水流を、2つのケースについて本コードを用いて計算した。

4.1.1 入力データ

帯水層の、幾何データおよびメッシュの分割を以下のように定めた。

帯水層の大きさ：幅 40，長さ 120，深さ 30 cm

(y 方向) (x 方向) (z 方向)

メッシュ数：9，20，10

放射性核種の流入口の位置は，30，20，4.5 cmである。

境界条件：均一流が存在する場合には，x 方向の 0 cm 位置における水頭を 5 cm とした。均一流が存在しない場合には， $x = 0$ ，120 cm 位置における水頭を 0 cm とした。また，他の面は全て壁とした。

透水係数 k ：透水係数としては，日本原子力研究所東海研究所敷地内において採取した土壌の値， 9.42×10^{-3} cm/sec を用いた。

湧水量： 1.0×10^2 ml/hr

4.1.2 水頭分布および水流速分布

水頭分布および水流速分布を，2つのケースに対して $x = 30$ cm (A面)， $y = 20$ cm (B面) および $z = 4.5$ cm (C面) について求めた。

Fig. 7(a), (b), (c)には，計算により得られたケース 1 の場合の A，B および C 面における水頭分布を示す。Fig. 8(a), (b), (c)には，計算により得られたケース 1 の場合の A，B および C 面における水頭分布の鳥瞰図を示す。Fig. 9(a), (b), (c)には，計算により得られたケース 1 の場合の A，B および C 面における水流速分布を示す。一方，Fig. 10(a), (b), (c)には，計算により得られたケース 2 の場合の A，B および C 面における水頭分布を示す。Fig. 11(a), (b), (c)には，計算により得られたケース 2 の場合の A，B および C 面における水頭分布の鳥瞰図を示す。Fig. 12(a), (b), (c)には，計算により得られたケース 2 の場合の A，B および C 面における水流速分布を示す。

Fig. 7, 8 および 9 より，流入口における水頭および水流速が最も大きくほぼ円形状に分布していることがわかる。一方，均一流が存在する場合には，水頭および水流速は Y，Z 方向においては流入口が最も大きく流入口の回りに円形状に減少するように分布するが，X 方向においては流れの上流端位置で最も大きく流れ方向下流側に減少するように分布する。これは，Fig. 7 (a) に示されるように流入口からの水の流入による水頭値は約 4.2×10^{-2} cm であり，この値は均一流の場合の境界における水頭値と比較すると非常に小さいために流入口からの水の流入による流れの場が均一流によるその中に隠れてしまったためと考えられる。

4.2 放射性核種移動予測

4.1において得られた水流速分布を用いて、放射性核種移動予測コードにより帯水層内における放射性核種の移動を求めた。

4.2.1 入力データ

放射性核種の帯水層中移動を計算するにあたって、分配係数、拡散係数等の値を次のように定めた。ここに、拡散係数は水流速と次式の関係があるため、

$$D = D_m + D_d$$

拡散長 D_m と分子拡散係数 D_d とを定めた。

分配係数 : 50

拡散長 : 0.92 cm

分子拡散係数 : 0.036 cm²/min

流入口から湧出する放射性核種の濃度は、 1.0×10^{-6} Ci/ml とした。

4.2.2 放射性核種濃度分布および経年変化

放射性核種濃度分布および経年変化を、2つのケースに対してA、BおよびC面について求めた。放射性核種の移動を予測した時間は20 hr とした。

Fig. 13(a), (b), (c), Fig. 14(a), (b), (c)およびFig. 15(a), (b), (c)には、ケース1の場合のA、BおよびC面における放射性核種濃度の等濃度曲線をそれぞれ5, 10, 20時間後について求めた結果を示す。また、Fig. 16(a), (b), (c), Fig. 17(a), (b), (c)およびFig. 18(a), (b), (c)には、ケース1の場合のA、BおよびC面における放射性核種濃度の鳥瞰図をそれぞれ5, 10, 20時間後について求めた結果を示す。一方、Fig. 19(a), (b), (c), Fig. 20(a), (b), (c)およびFig. 21(a), (b), (c)には、ケース2の場合のA、BおよびC面における放射性核種濃度の等濃度曲線をそれぞれ5, 10, 20時間後について求めた結果を示す。また、Fig. 22(a), (b), (c), Fig. 23(a), (b), (c)およびFig. 24(a), (b), (c)には、ケース2の場合のA、BおよびC面における放射性核種濃度の鳥瞰図をそれぞれ5, 10, 20時間後について求めた結果を示す。

Fig. 25(a), (b)および(c)には、ケース1の場合のX=30, Y=20のZ方向における5, 10, 20時間後の1次元濃度分布を示す。Fig. 26には、ケース2の場合のX=30, Y=20, Z=4.5 cm位置における放射性核種濃度の経時変化を示す。一方、Fig. 27(a), (b)および(c)には、ケース1の場合のX=30, Y=20のZ方向における5, 10, 20時間後の1次元濃度分布を示す。Fig. 28には、ケース2の場合のX=30, Y=20, Z=4.5 cm位置における放射性核種濃度の経時変化を示す。

これらの結果から、ケース1およびケース2のどちらの場合でも、放射性核種は時間の経過と共に帯水層中を移動していくことが明らかである。また、等濃度曲線に着目することから、放射性核種は流入口の回りにほぼ円形状に分布する。一方、水の流入状態に着目すると、Y, Z方向に関してはどちらの条件でもほぼ同じであるが、Fig. 15とFig. 18との比較から明らかなよう

にX方向すなわち水の流れの方向に関しては均一流の存在する方が存在しない場合よりも下流側に移動していることが明らかである。

さらに、ケース2における水頭の分布と、放射性核種の分布を比較することから、水頭分布においては流入口からの水の湧出の影響はほとんどないが、放射性核種の分布においては流入口の回りに分布していることから湧出の影響を受けることが明らかである。したがって、帯水層中の放射性核種の移動を検討する場合に、流入口を設けて放射性核種を帯水層中に流入させる試験においては、湧出の影響を十分考慮する必要があると考えられる。

5. 結 言

環境シミュレーション試験により、放射性核種の浅地層中移動を評価するため、拡散輸送方程式をベースにした帯水層中における放射性核種移動予測コード(MIGSTEM-AQ)を開発した。本コードは、放射性核種の移動を支配する液-固相反応式を検討するため、3種類の反応式と拡散輸送方程式とを連立して差分法により解いて得たものである。本コードは、水の移動を予測する水流コードと放射性核種の移動を予測する放射性核種移動予測コードから成る。本コードを用いて、均一流が存在する帯水層中および流れのない帯水層中に放射性核種を一定点から流入させた場合の水流および放射性核種の移動を環境シミュレーション試験とほぼ同じ条件を与えて予測した。

1. 水流を予測した結果、水頭および水流速は、流れがない場合には流入口位置で最も大きくなり流入口の回りに円形状に減少するように分布するが、均一流の存在する場合には均一流による流れに対して流入口からの湧出量が小さいため、均一流による流れとほとんど同じになった。この原因として、一定点からの水の流入による水頭値が均一流の場合の境界におけるそれと比較して非常に小さいために、流入口からの水の流入による流れの場が均一流によるそれの中に隠れてしまったことが考えられた。
2. 放射性核種の移動を予測した結果、均一流および流れのない場合のどちらの場合についても放射性核種が流入口の回りに分布したが、その分布形状を比較すると均一流が存在する方が存在する方が存在しない場合よりも、流れの方向において放射性核種の移動が大きいことが観察された。

以上の結果、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で得られるデータを用いて、帯水層中における放射性核種の移動を検討することが可能と考えられる。

謝 辞

本報をまとめるにあたっ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幅主任研究員に感謝の意を表します。

にX方向すなわち水の流れの方向に関しては均一流の存在する方が存在しない場合よりも下流側に移動していることが明らかである。

さらに、ケース2における水頭の分布と、放射性核種の分布を比較することから、水頭分布においては流入口からの水の湧出の影響はほとんどないが、放射性核種の分布においては流入口の回りに分布していることから湧出の影響を受けることが明らかである。したがって、帯水層中の放射性核種の移動を検討する場合に、流入口を設けて放射性核種を帯水層中に流入させる試験においては、湧出の影響を十分考慮する必要があると考えられる。

5. 結 言

環境シミュレーション試験により、放射性核種の浅地層中移動を評価するため、拡散輸送方程式をベースにした帯水層中における放射性核種移動予測コード(MIGSTEM-AQ)を開発した。本コードは、放射性核種の移動を支配する液-固相反応式を検討するため、3種類の反応式と拡散輸送方程式とを連立して差分法により解いて得たものである。本コードは、水の移動を予測する水流コードと放射性核種の移動を予測する放射性核種移動予測コードから成る。本コードを用いて、均一流が存在する帯水層中および流れのない帯水層中に放射性核種を一定点から流入させた場合の水流および放射性核種の移動を環境シミュレーション試験とほぼ同じ条件を与えて予測した。

1. 水流を予測した結果、水頭および水流速は、流れがない場合には流入口位置で最も大きくなり流入口の回りに円形状に減少するように分布するが、均一流の存在する場合には均一流による流れに対して流入口からの湧出量が小さいため、均一流による流れとほとんど同じになった。この原因として、一定点からの水の流入による水頭値が均一流の場合の境界におけるそれと比較して非常に小さいために、流入口からの水の流入による流れの場が均一流によるそれの中に隠れてしまったことが考えられた。
2. 放射性核種の移動を予測した結果、均一流および流れのない場合のどちらの場合についても放射性核種が流入口の回りに分布したが、その分布形状を比較すると均一流が存在する方が存在する方が存在しない場合よりも、流れの方向において放射性核種の移動が大きいことが観察された。

以上の結果、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で得られるデータを用いて、帯水層中における放射性核種の移動を検討することが可能と考えられる。

謝 辞

本報をまとめるにあたっ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幅主任研究員に感謝の意を表します。

にX方向すなわち水の流れの方向に関しては均一流の存在する方が存在しない場合よりも下流側に移動していることが明らかである。

さらに、ケース2における水頭の分布と、放射性核種の分布を比較することから、水頭分布においては流入口からの水の湧出の影響はほとんどないが、放射性核種の分布においては流入口の回りに分布していることから湧出の影響を受けることが明らかである。したがって、帯水層中の放射性核種の移動を検討する場合に、流入口を設けて放射性核種を帯水層中に流入させる試験においては、湧出の影響を十分考慮する必要があると考えられる。

5. 結 言

環境シミュレーション試験により、放射性核種の浅地層中移動を評価するため、拡散輸送方程式をベースにした帯水層中における放射性核種移動予測コード(MIGSTEM-AQ)を開発した。本コードは、放射性核種の移動を支配する液-固相反応式を検討するため、3種類の反応式と拡散輸送方程式とを連立して差分法により解いて得たものである。本コードは、水の移動を予測する水流コードと放射性核種の移動を予測する放射性核種移動予測コードから成る。本コードを用いて、均一流が存在する帯水層中および流れのない帯水層中に放射性核種を一定点から流入させた場合の水流および放射性核種の移動を環境シミュレーション試験とほぼ同じ条件を与えて予測した。

1. 水流を予測した結果、水頭および水流速は、流れがない場合には流入口位置で最も大きくなり流入口の回りに円形状に減少するように分布するが、均一流の存在する場合には均一流による流れに対して流入口からの湧出量が小さいため、均一流による流れとほとんど同じになった。この原因として、一定点からの水の流入による水頭値が均一流の場合の境界におけるそれと比較して非常に小さいために、流入口からの水の流入による流れの場が均一流によるそれの中に隠れてしまったことが考えられた。
2. 放射性核種の移動を予測した結果、均一流および流れのない場合のどちらの場合についても放射性核種が流入口の回りに分布したが、その分布形状を比較すると均一流が存在する方が存在する方が存在しない場合よりも、流れの方向において放射性核種の移動が大きいことが観察された。

以上の結果、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で得られるデータを用いて、帯水層中における放射性核種の移動を検討することが可能と考えられる。

謝 辞

本報をまとめるにあたっ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幅主任研究員に感謝の意を表します。

参 考 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, 斎藤和明; 日本原子力学会誌, 24, 182 (1982).
- (2) 大貫敏彦; JAERI-M 84-136 (1984).
- (3) A. Klute; Soil Sci., 73, 105 (1952).
- (4) Y. Inoue; W. J. Kaufman; Health Phys., 9, 705 (1963).
- (5) 矢島信男, 野木達夫; “発展方程式の数値解析”, 199, 岩波書店 (1977).

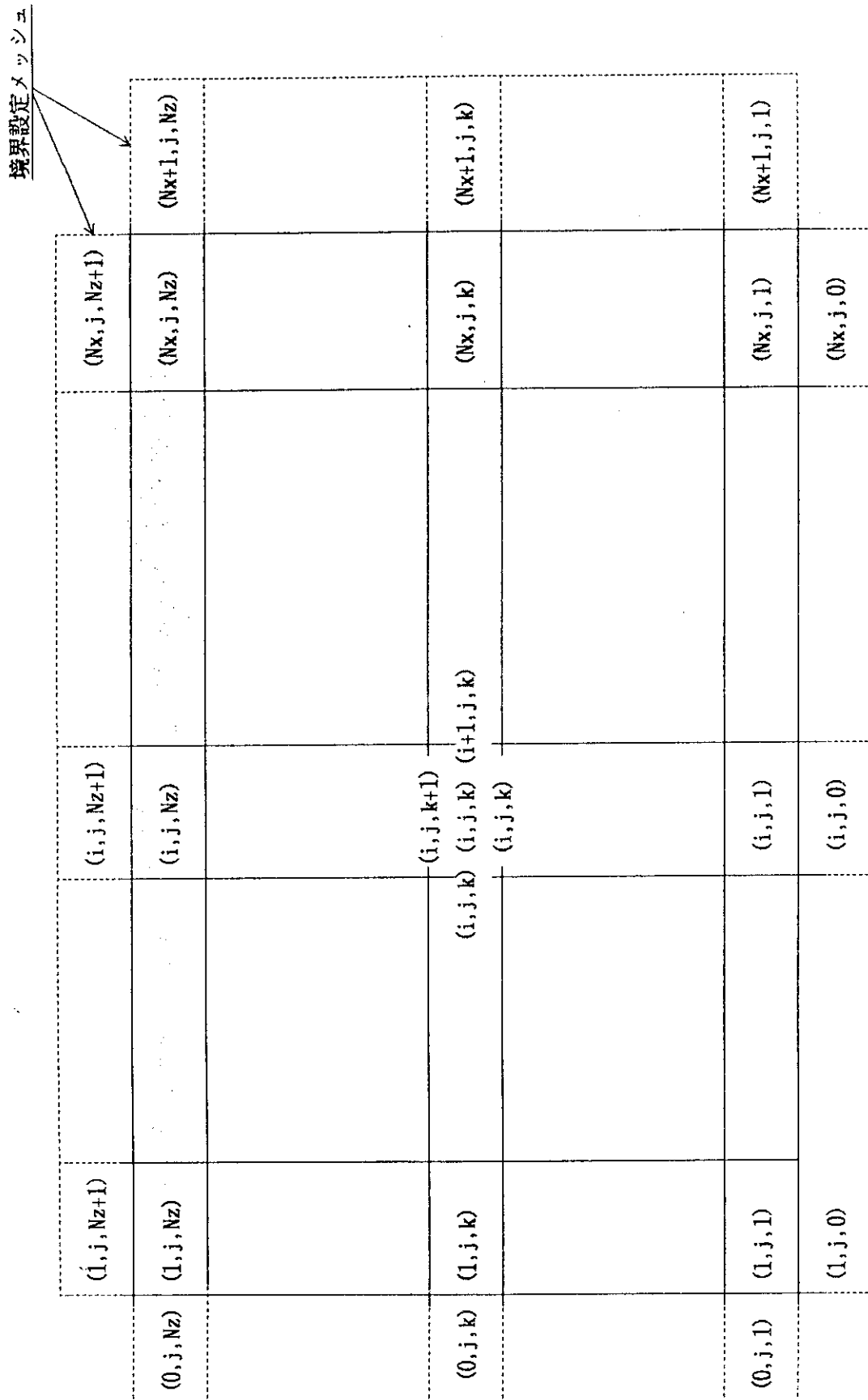


Fig. 1 Mesh divided in differential model.

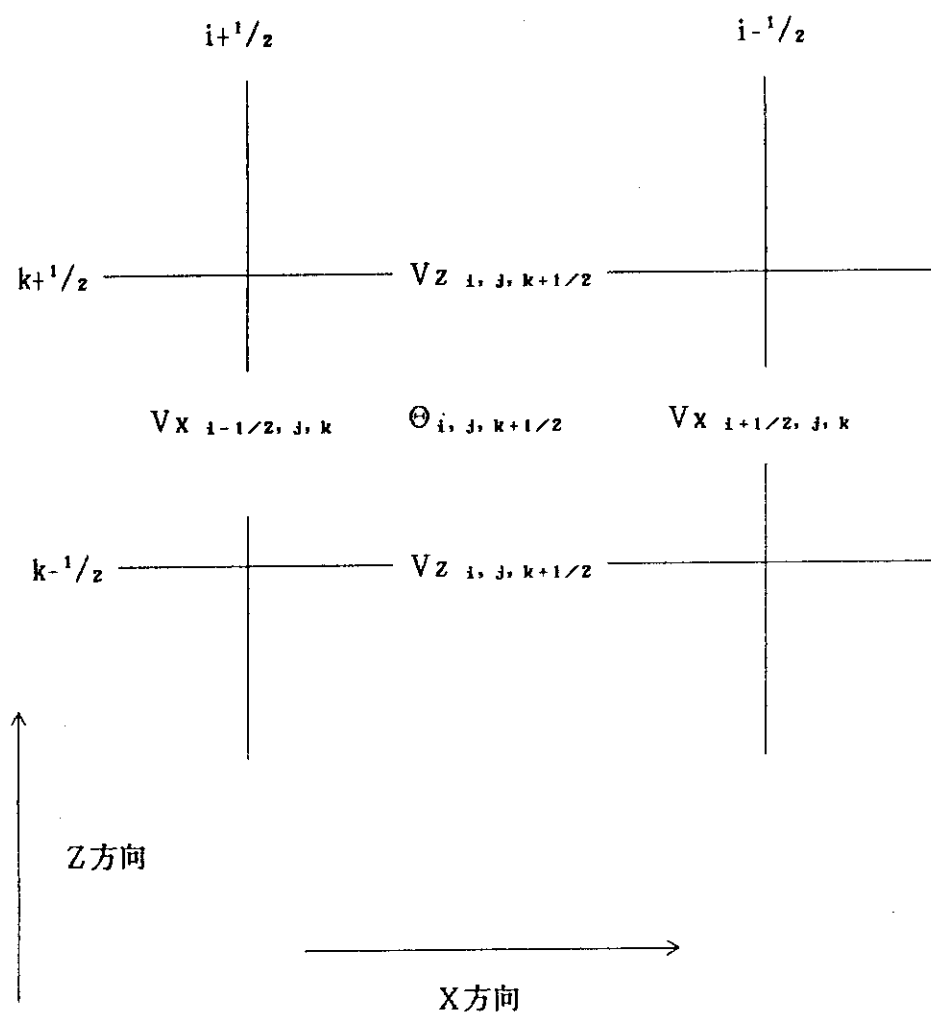


Fig. 2 Estimation points of properties in code.

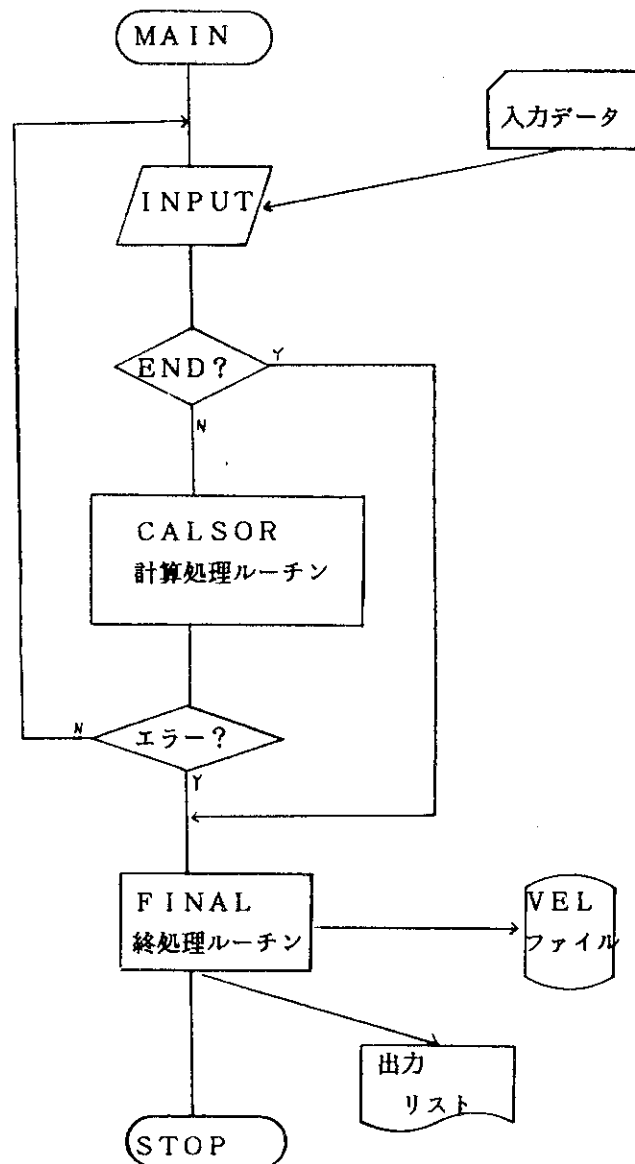


Fig. 3 Flow chart of water flow code.

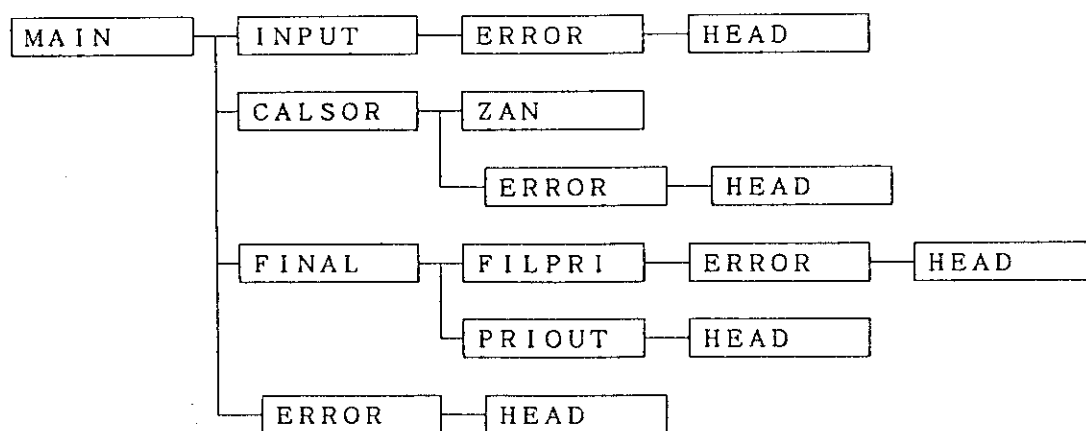


Fig. 4 Block diagram of water flow code.

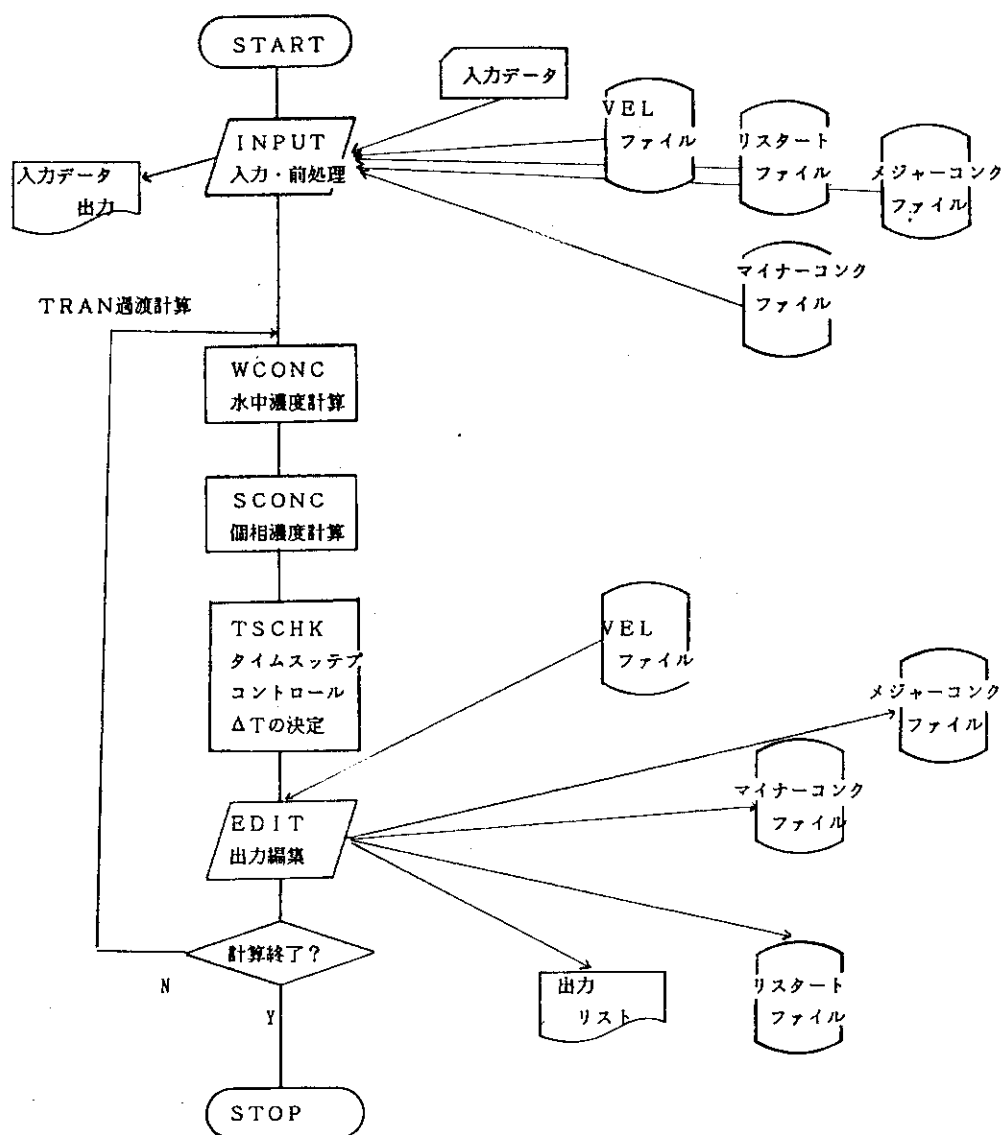


Fig. 5 Flow chart of radionuclide migration code.

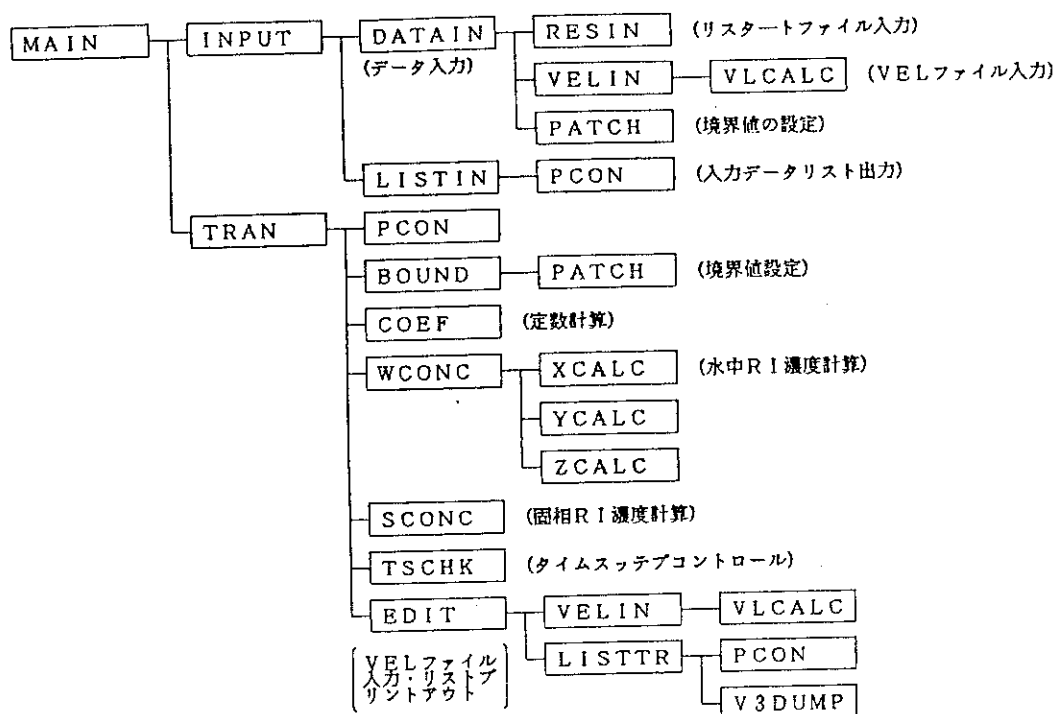


Fig. 6 Block diagram of radionuclide migration code.

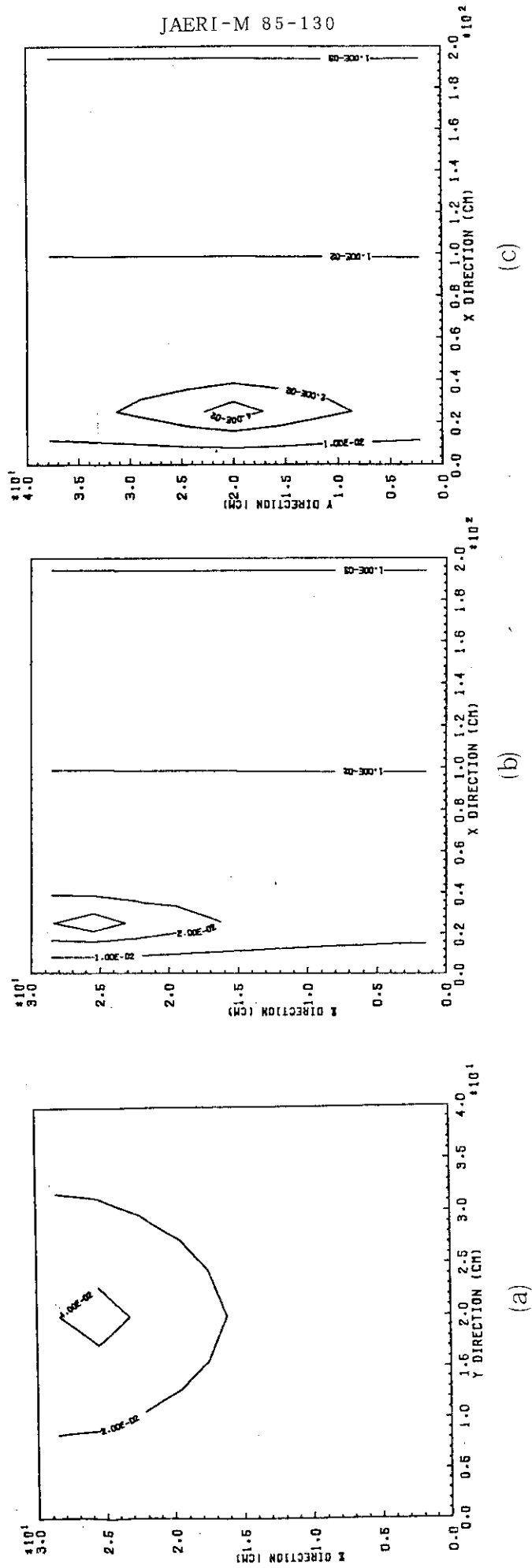


Fig. 7 Contour of water head calculated in case 1, (a) : in y, z plane ($x=30$ cm), (b) : in x, z plane ($y=20$ cm) and (c) : in x, y plane ($z=4.5$ cm).

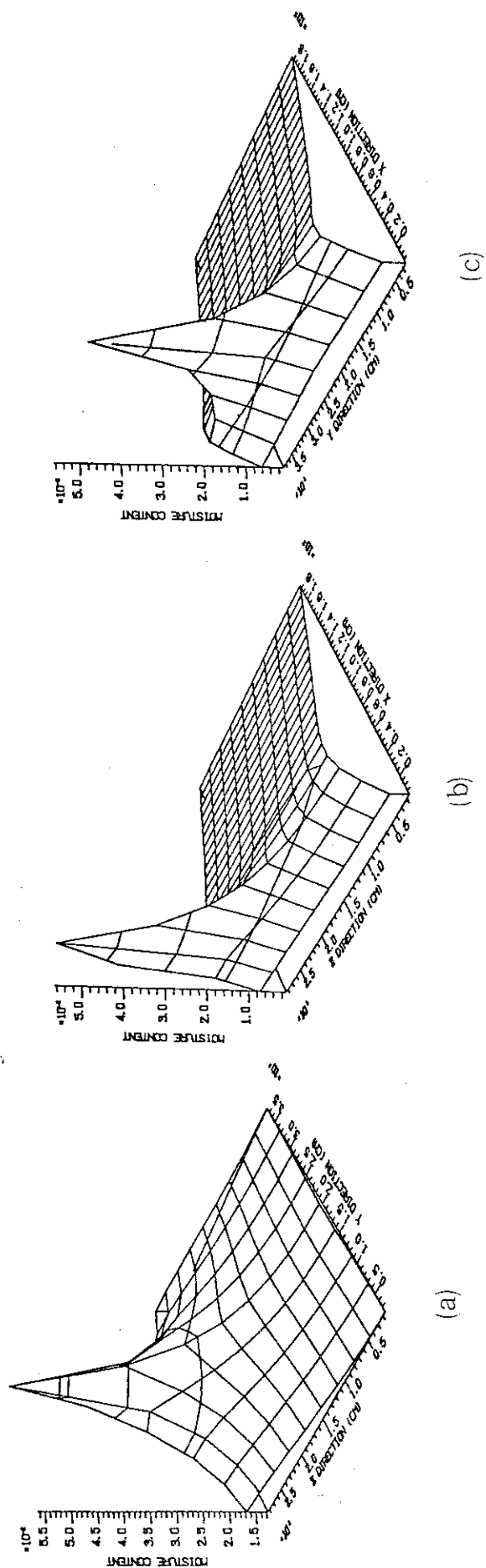


Fig. 8 Perspective view of distribution of water head calculated in case 1, (a) : in y,z plane ($x=30$ cm), (b) : in x,z plane ($y=20$ cm) and (c) : in x,y plane ($z=4.5$ cm)

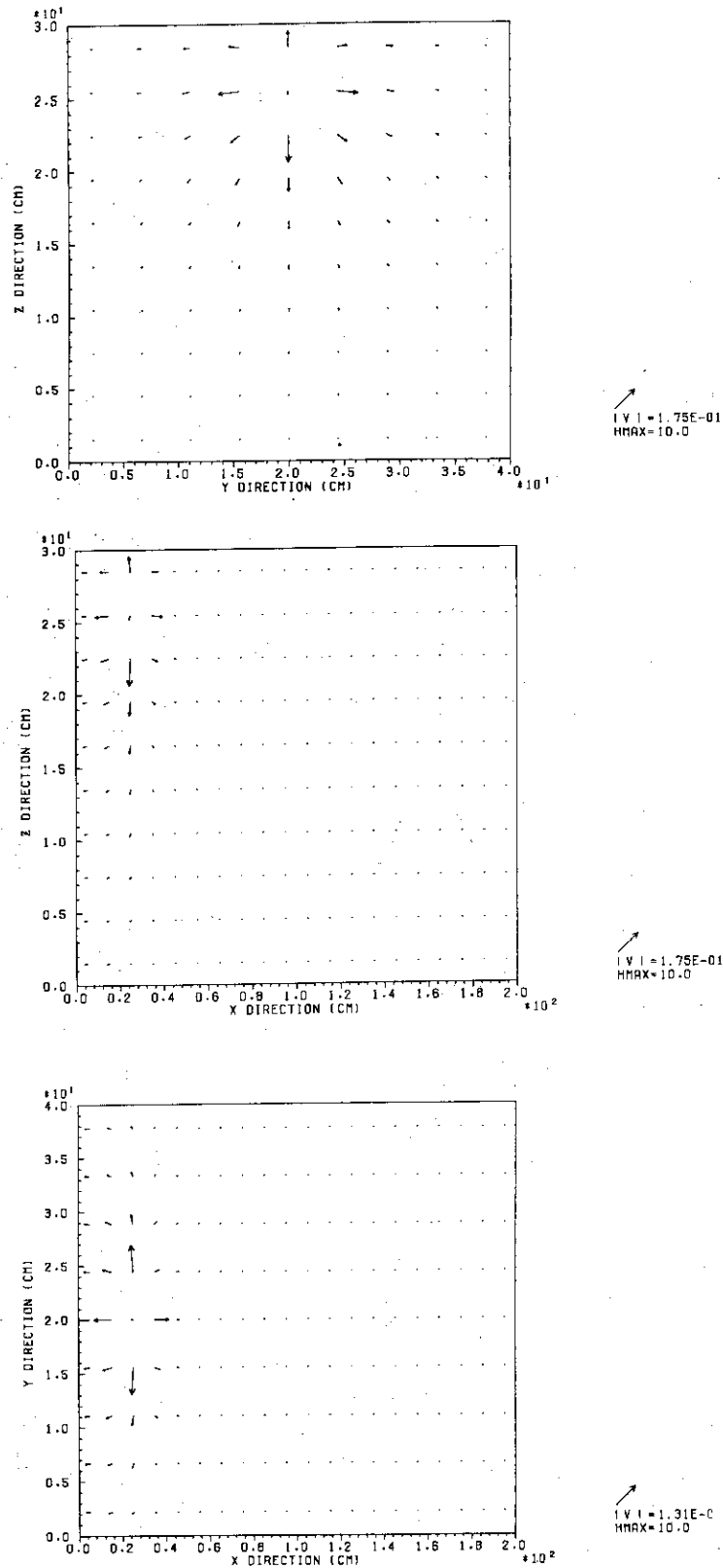


Fig. 9 Water flow fields calculated in case 1, (a) : in y,z plane ($x=30$ cm), (b) : in x,z plane ($y=20$ cm) and (c) : in x,y plane ($z=4.5$ cm)

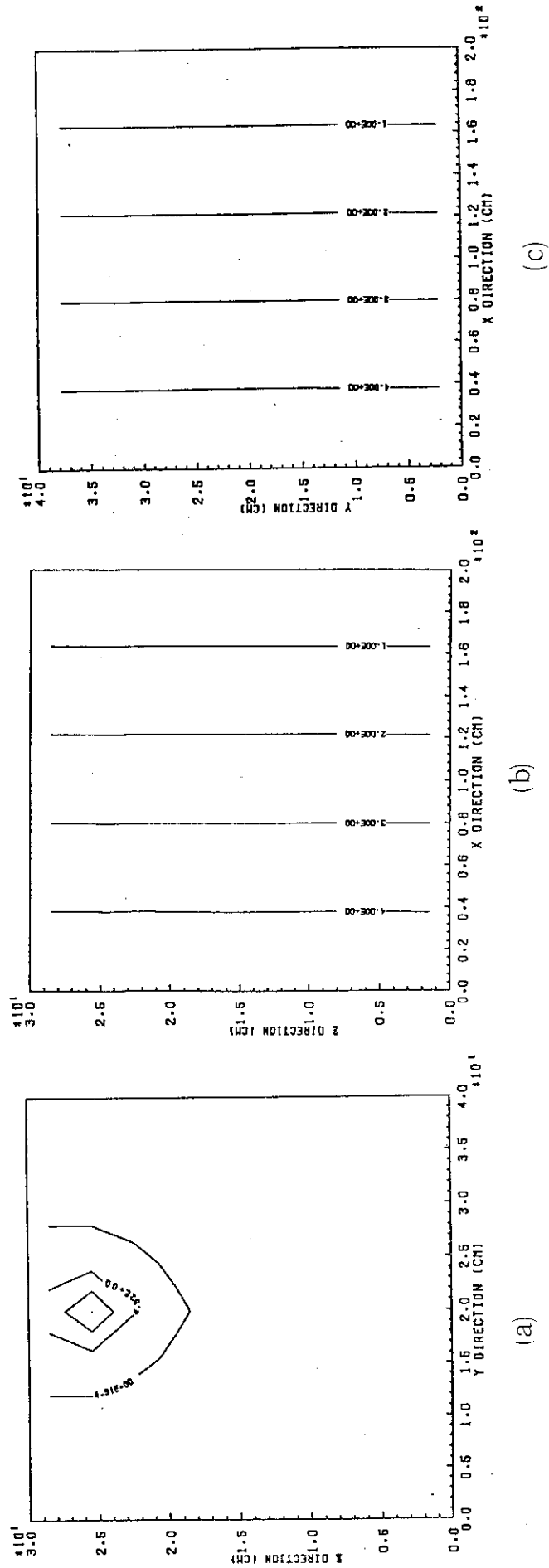


Fig.10 Contour of water head calculated in case 2, (a) : in y,z plane (x=30 cm), (b) : in x,z plane (y=20 cm) and (c) : in x,y plane (z=4.5 cm)

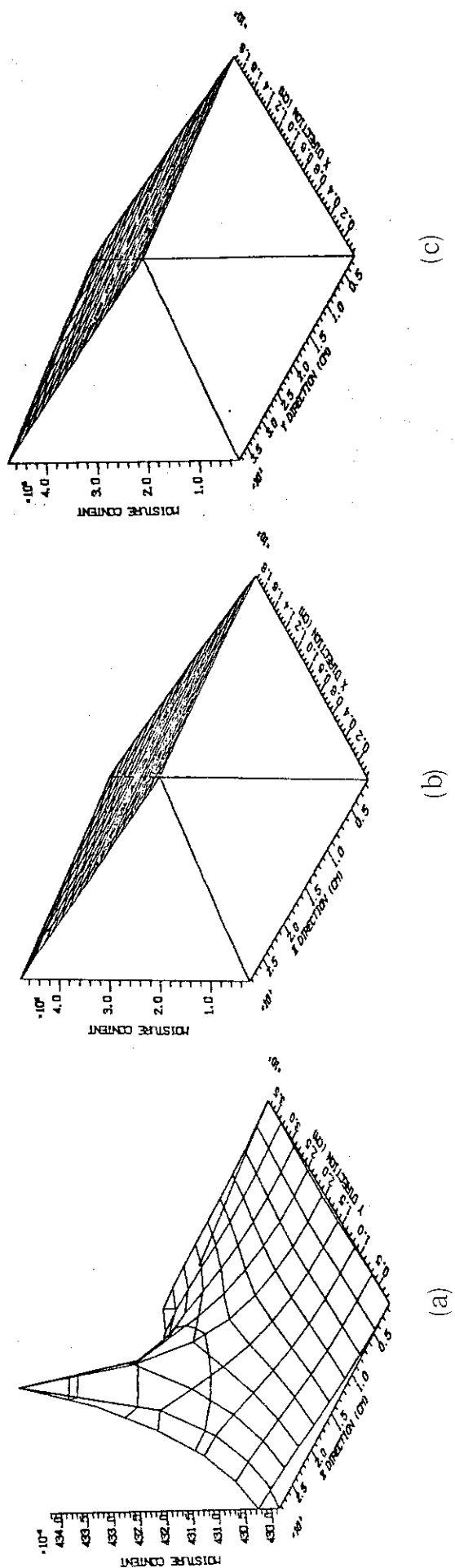


Fig.11 Perspective view of distribution of water head calculated in case 2, (a) : in y,z plane ($x=30$ cm), (b) : in x,z plane ($y=20$ cm) and (c) : in x,y plane ($z=4.5$ cm)

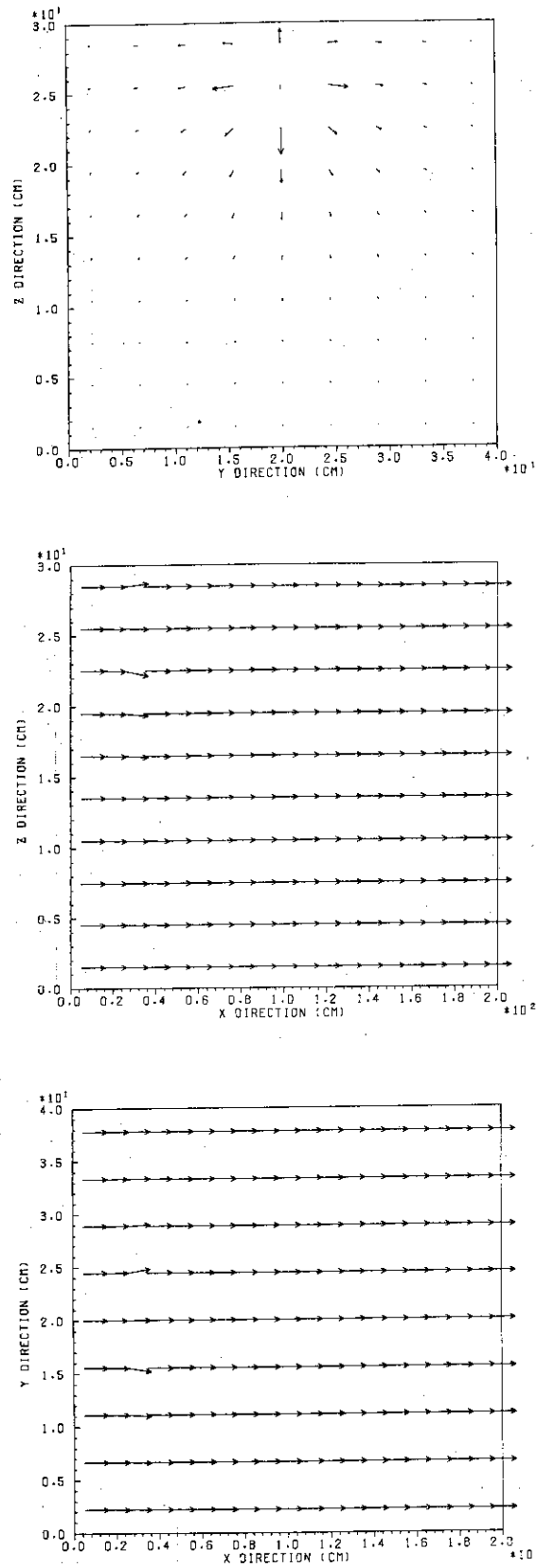


Fig.12 Water flow fields calculated in case 2, (a) : in y,z plane (x=30 cm), (b) : in x,z plane (y=20 cm) and (c) : in x,y plane (z=4.5 cm).

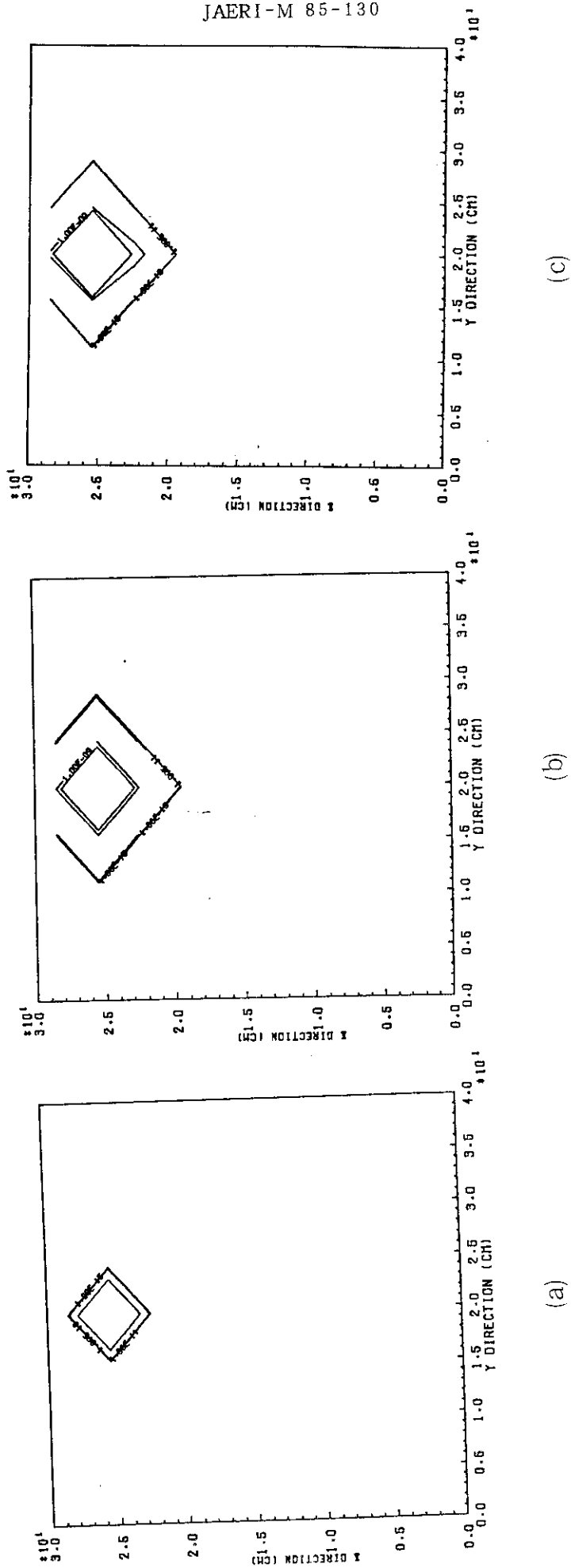


Fig.13 Concentration distribution of radionuclide in y,z plane

(x=30 cm) calculated in case 1, (a) : at 5 hours, (b)

: at 10 hours and (c) : at 20 hours.

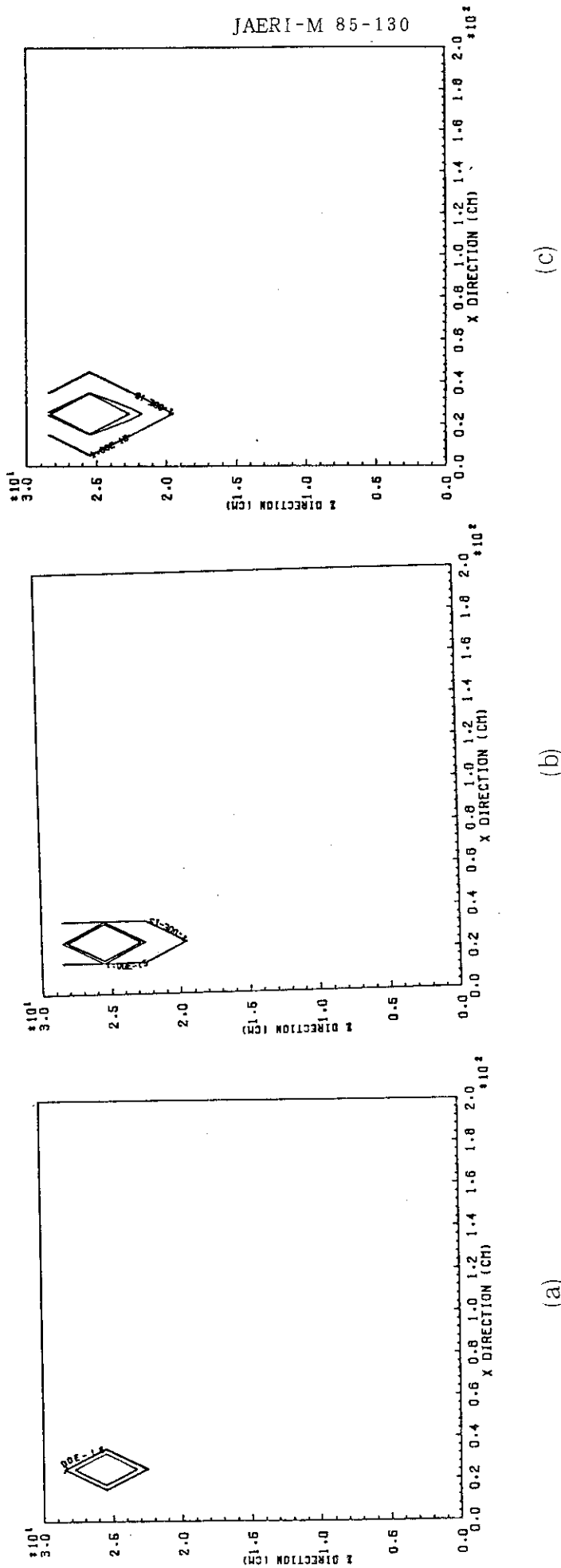
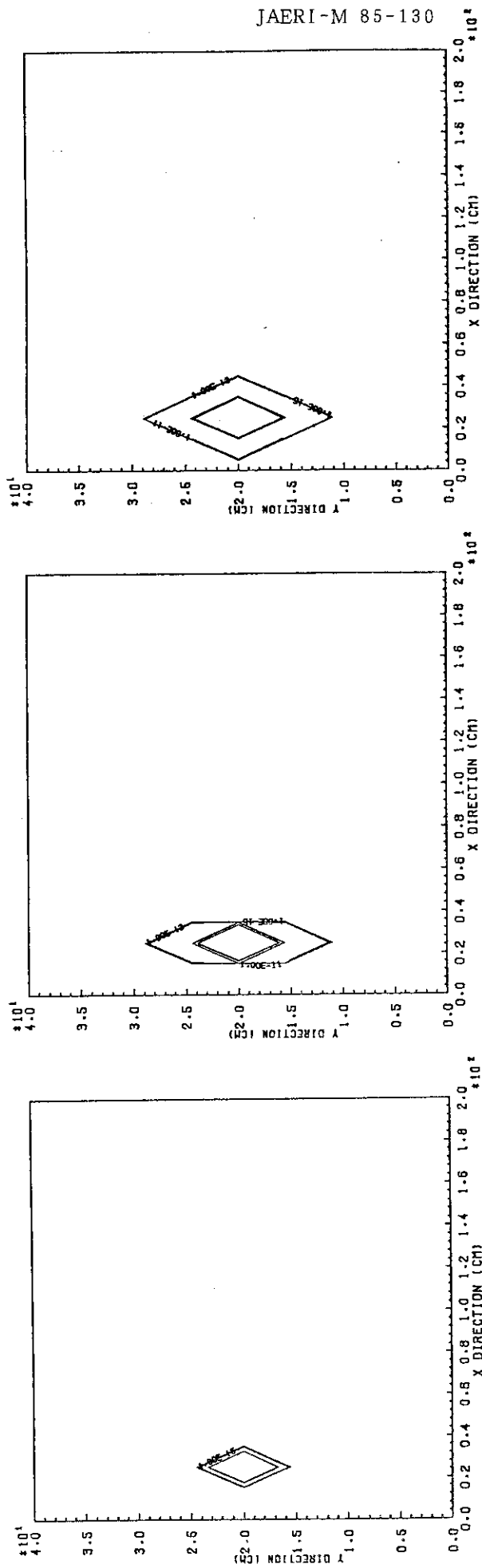


Fig.14 Concentration distribution of radionuclide in x,z plane (y=20 cm) calculated in case 1, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.



(a)

(b)

(c)

Fig.15 Concentration distribution of radionuclide in x,y plane ($z=4.5$ cm) calculated in case 1, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

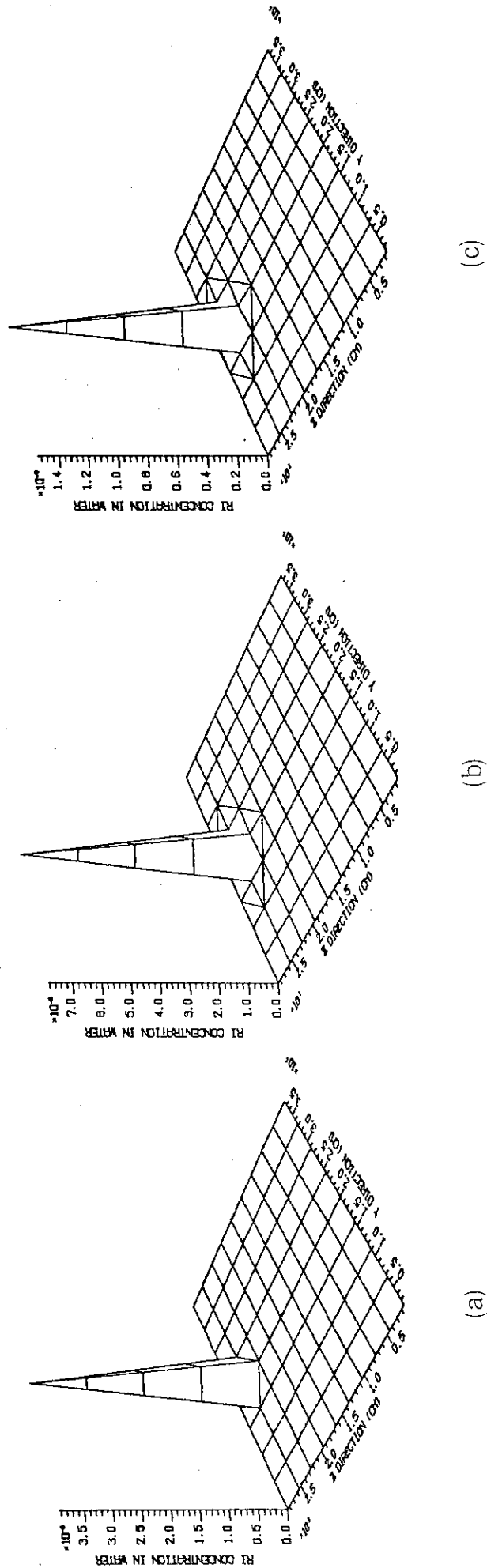


Fig.16 Perspective view of concentration of radionuclide in y,z plane ($x=30$ cm) calculated in case 1, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

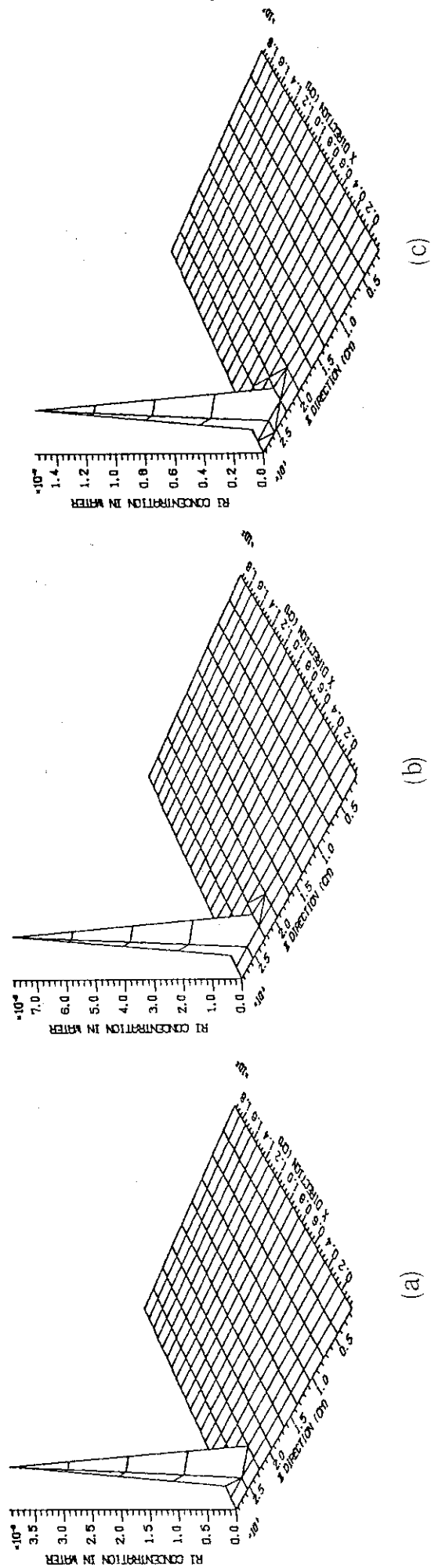


Fig.17 Perspective view of concentration of radionuclide in x,z plane ($y=20$ cm) calculated in case 1, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

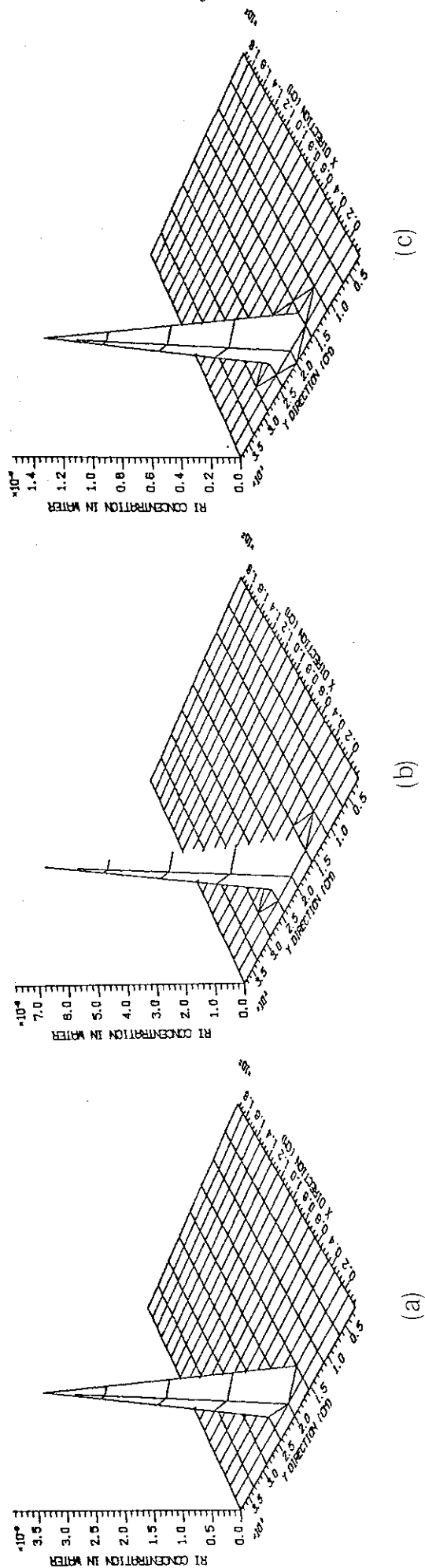


Fig.18 Perspective view of concentration of radionuclide in x,y plane ($z=4.5$ cm) calculated in case 1, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

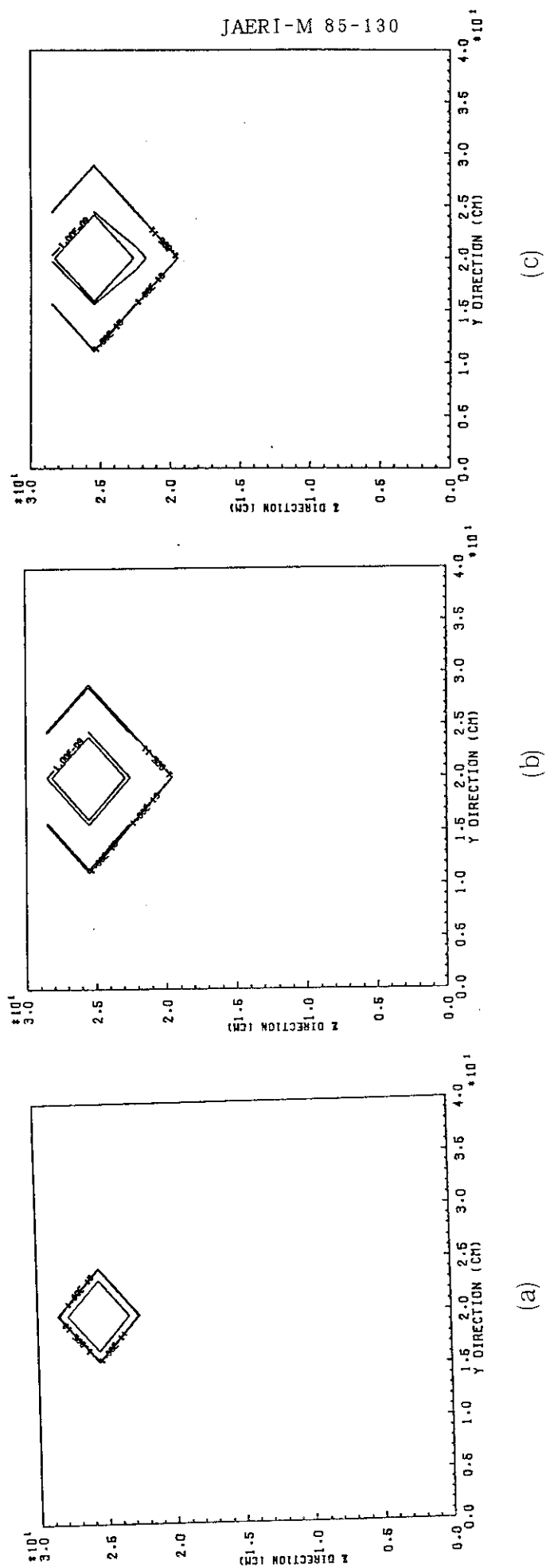


Fig.19 Concentration distribution of radionuclide in y,z
plane (x=30 cm) calculated in case 2, (a) : at 5 hours, (b)
: at 10 hours and (c) : at 20 hours.

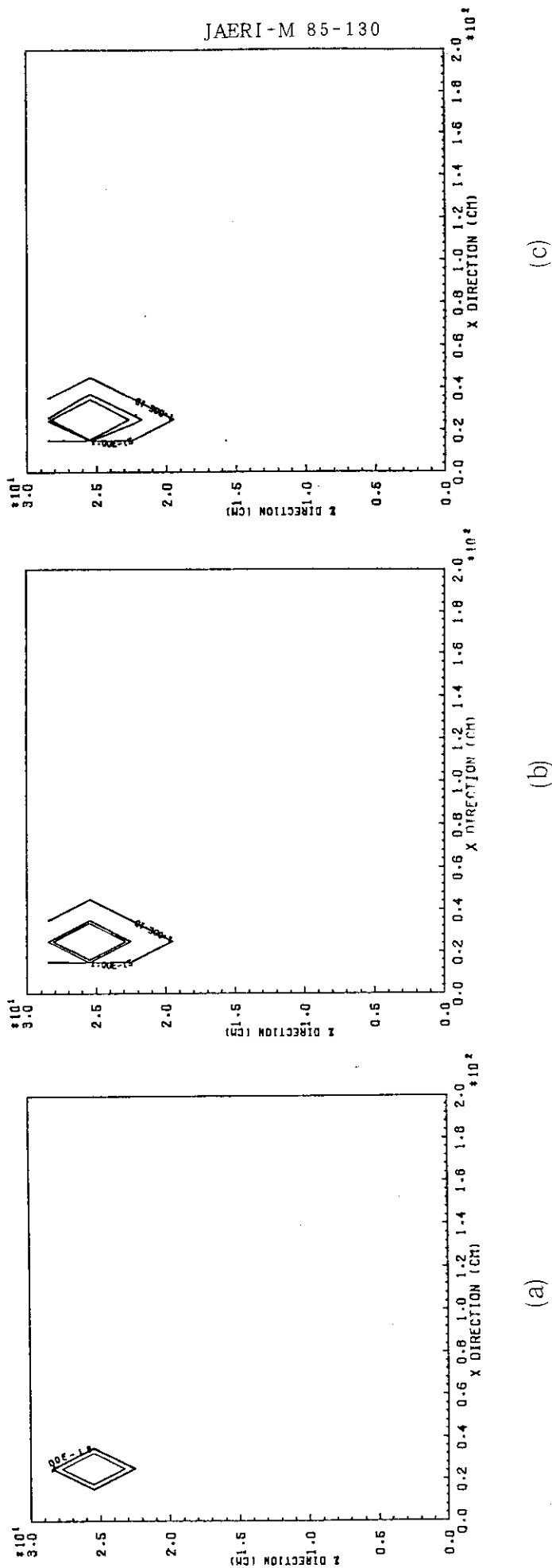


Fig.20 Concentration distribution of radionuclide in x,z plane (y=20 cm) calculated in case 2, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

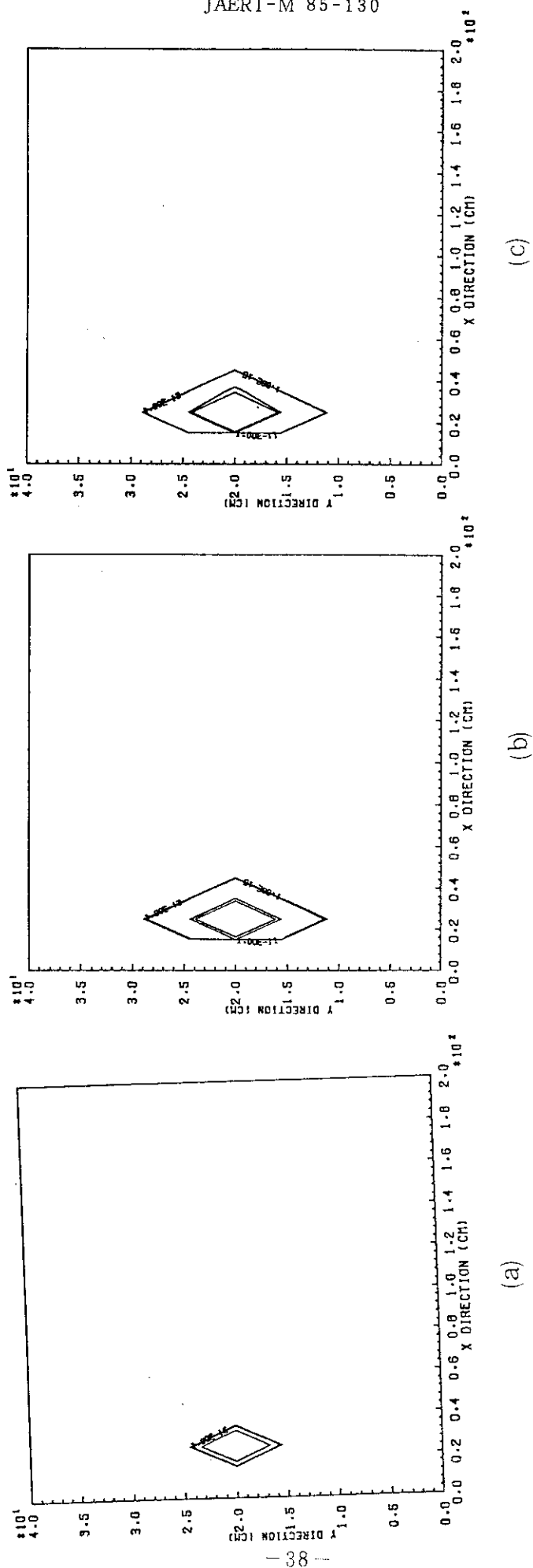


Fig.21 Concentration distribution of radionuclide in x,y plane
 (z=4.5 cm) calculated n case 2, (a): at 5 hours, (b): at
 10 hours and (c): at 20 hours.

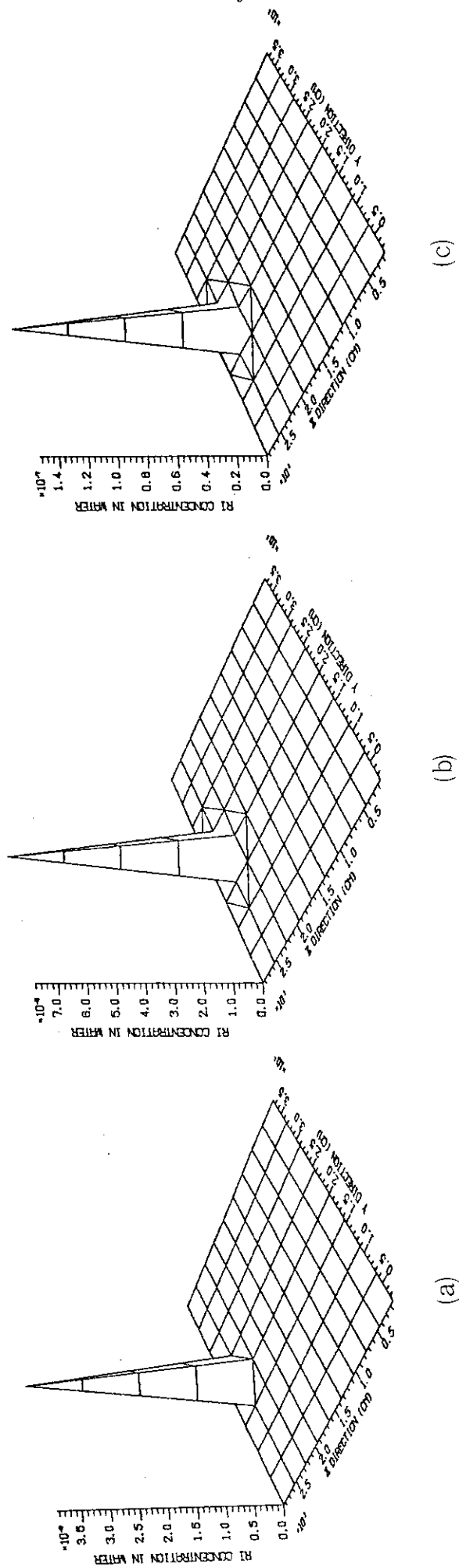


Fig.22 Perspective view of concentration of radionuclide in y,z plane ($x=30$ cm) calculated in case 2, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

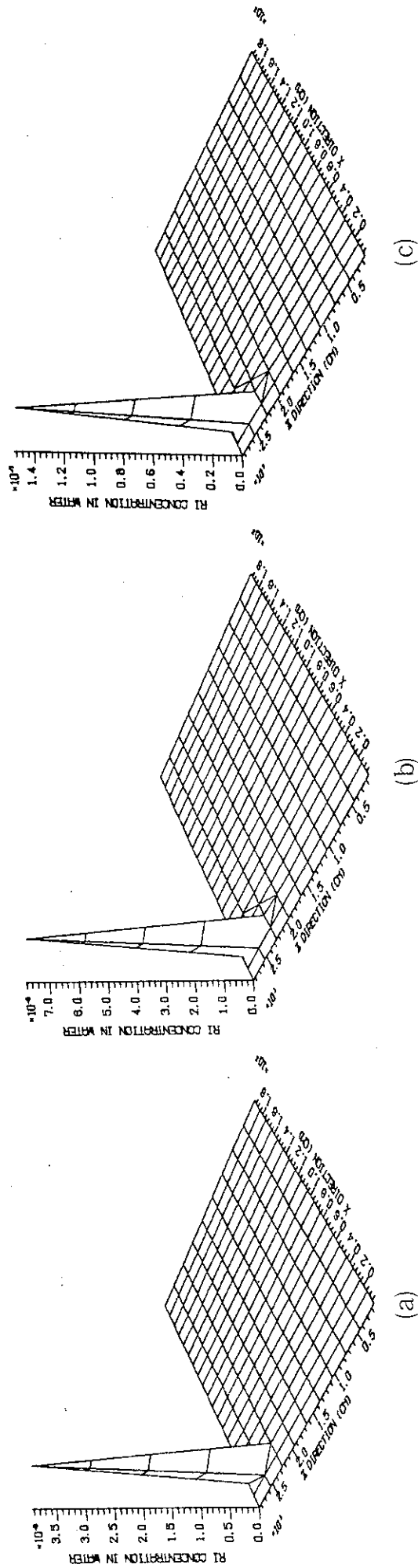


Fig.23 Perspective view of concentration of radionuclide in x,z plane ($y=20$ cm) calculated in case 2, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

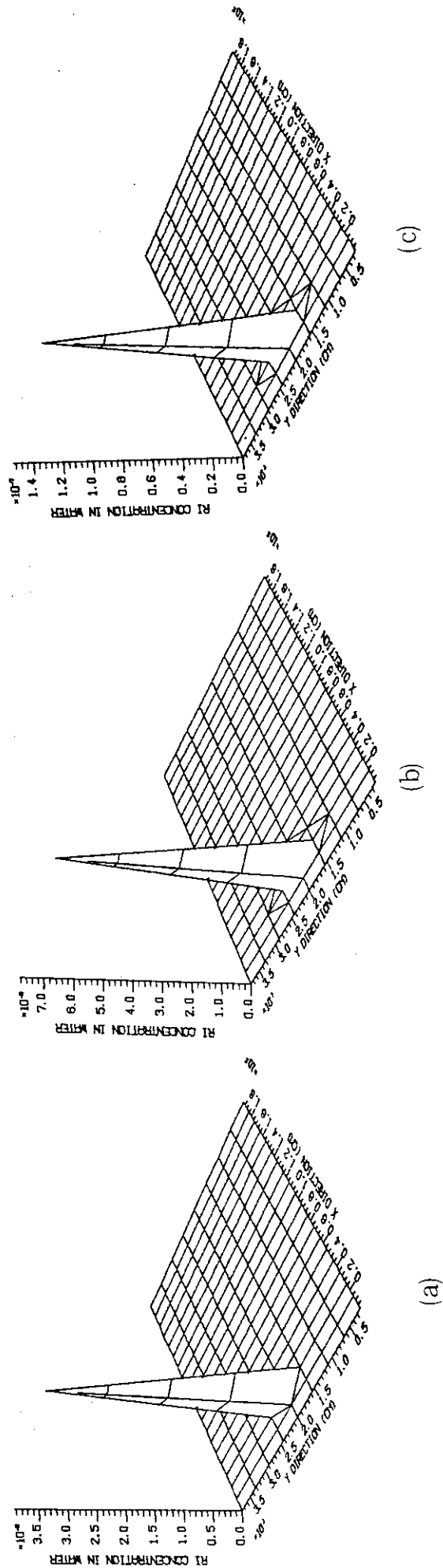


Fig.24 Perspective view of concentration of radionuclide in x,y plane ($z=4.5$ cm) calculated in case 2, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

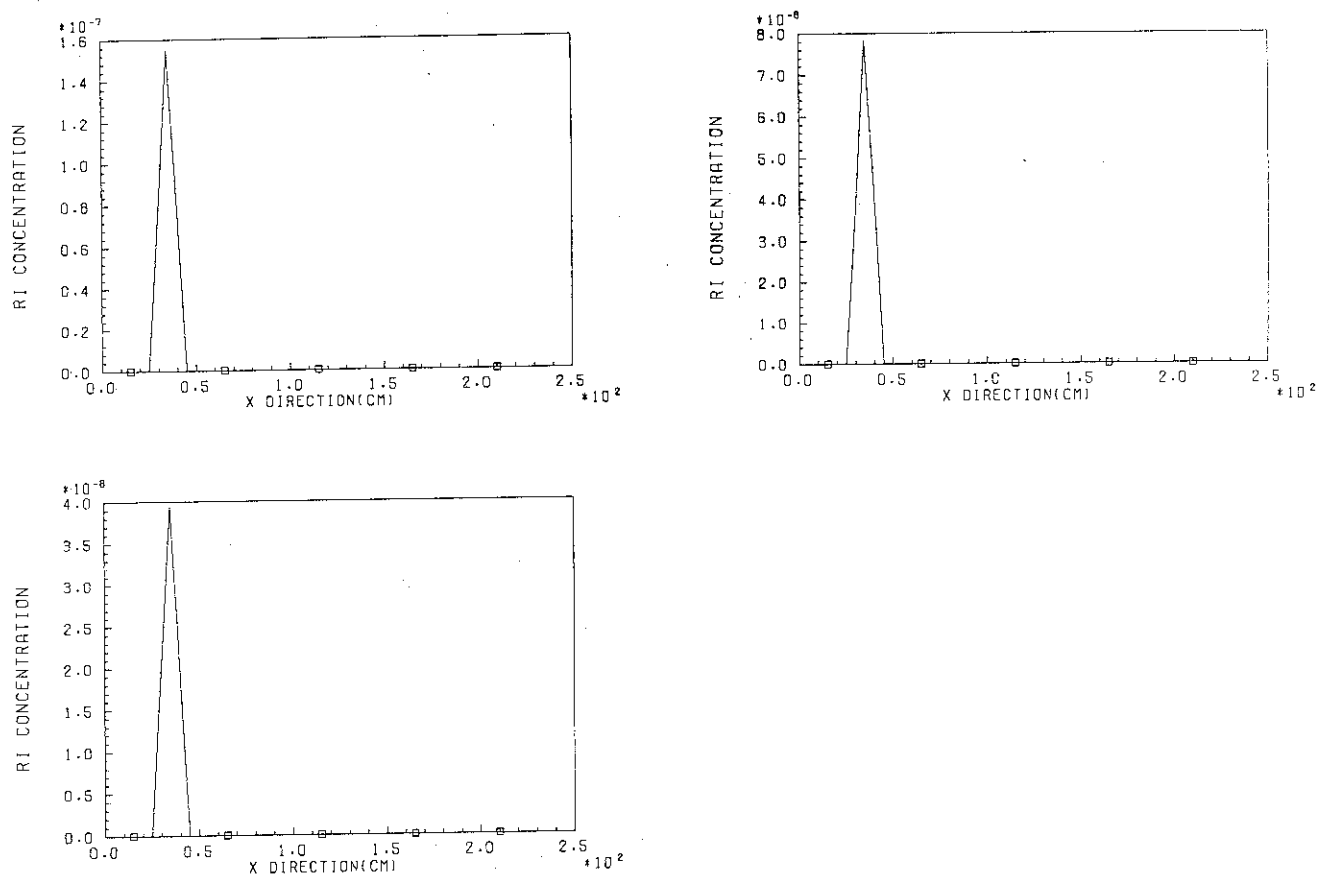


Fig.25 One dimensional concentration distribution of radionuclide in x direction at y=20 cm, z=4.5 cm calculated in case 1, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

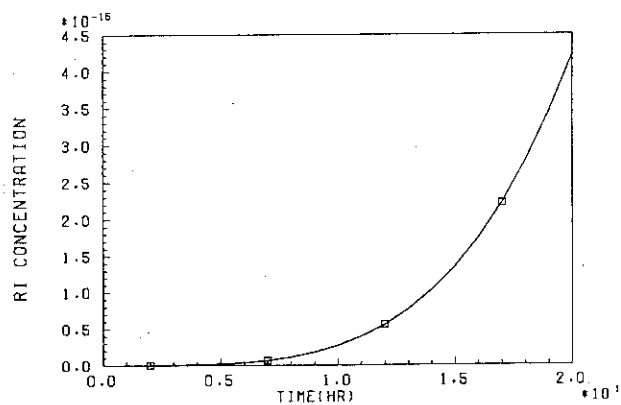


Fig.26 Change in concentration of radionuclide at x=30, y=20 and z=4.5 cm calculated in case 1.

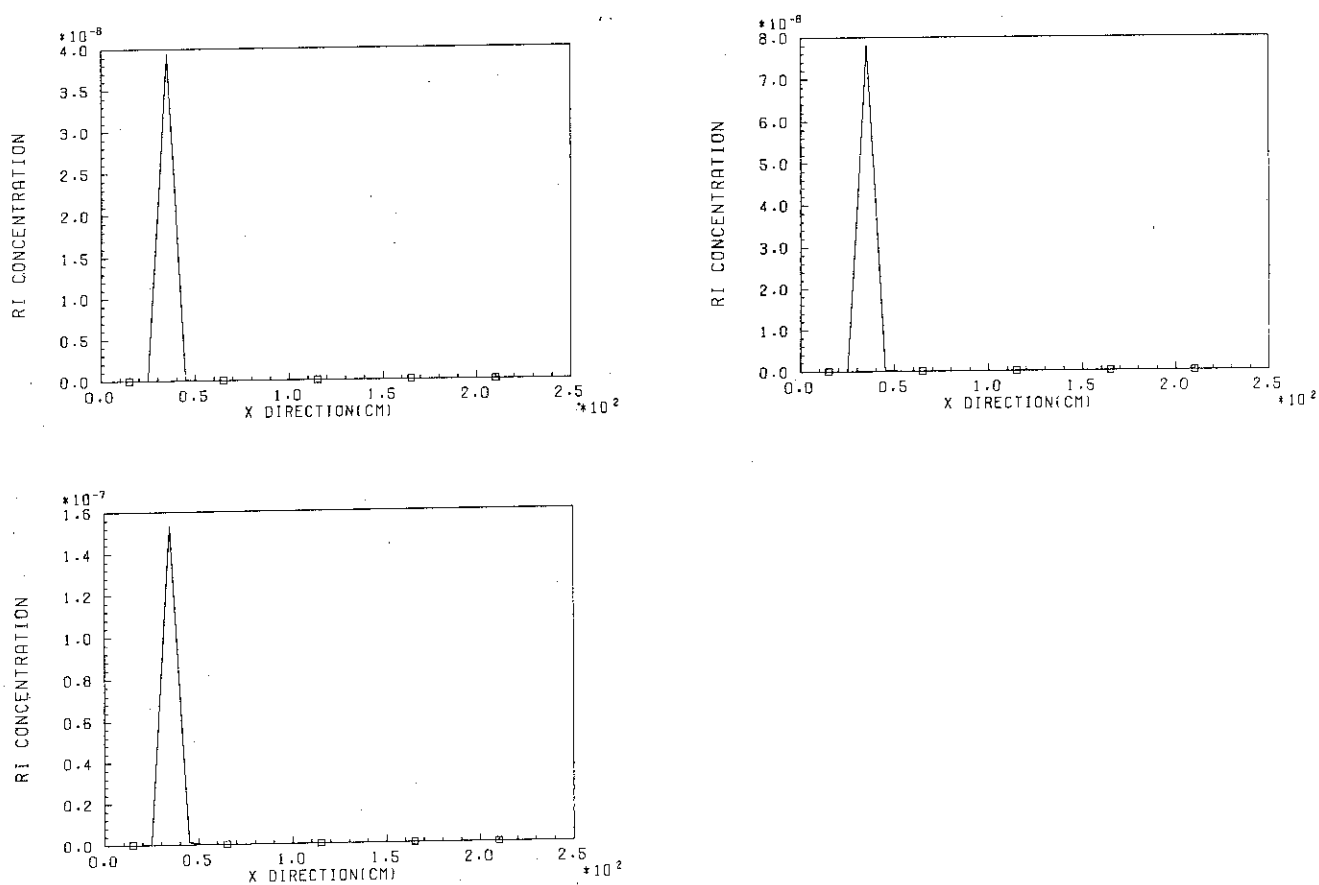


Fig.27 One dimensional concentration distribution of radionuclide in x direction at y=20 cm, z=4.5 cm calculated in case 2, (a) : at 5 hours, (b) : at 10 hours and (c) : at 20 hours.

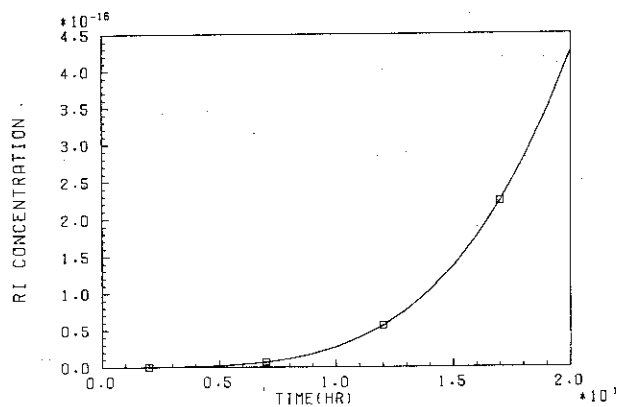


Fig.28 Change in concentration of radionuclide at x=30, y=20 and z=4.5 cm calculated in case 2.