

# 密度流を考慮した水理・物質移動解析コードの 整備及び解析

(核燃料サイクル開発機構 役務作業内容報告書)

1999年3月

髙CRC総合研究所

**本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。**

**〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33**

**核燃料サイクル開発機構 東海事業所**

**運営管理部 技術情報室**

**核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Development Institute) 1999**

密度流を考慮した水理・物質移動解析コードの整備及び解析  
(核燃料サイクル開発機構 役務作業内容報告書)

斎藤 裕明\*, 入谷 佳一\*

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、地下水流動および水質の変化の少ない安定した環境下に処分サイトを決定することが重要な課題である。特に沿岸地域の地下深部に処分場を想定した場合は、塩水の浸入により処分場周辺の水質が変化する可能性があるため、塩水/淡水境界の挙動が処分環境に与える影響を把握することが重要である。そのためには塩水の淡水への浸入過程および塩水/淡水境界の挙動を適切にモデル化する必要がある。

核燃料サイクル開発機構殿は、これまでに室内試験により得られたデータを使用して様々な水理・物質移動モデルを用いた数値シミュレーションを行い精度を比較し、核燃料サイクル開発機構殿と共同研究を行っている九州大学の提案しているモデル(解析コード)の数値誤差が比較的少なく精度の良い結果が得られることを確認した。

本作業ではより多様な条件の解析を行うことを可能とするために上記の解析コードの整備を行った。具体的には、解析コード内の各モジュールの機能および主要変数について内容の分析を行った後、入出力機能の整備を行った。整備を行った解析コードについては、理論解との比較解析および既往の文献に示されている水理・物質移動解析と同様の解析を行うとともに、核燃料サイクル開発機構殿で実施している密度流を考慮した室内試験の解析を行い、作成した解析コードの妥当性を確認した。さらに、解析条件およびパラメータを変化させた場合の塩水/淡水境界面の挙動についての感度解析を実施した。

---

本報告書は、株式会社 CRC 総合研究所が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した役務作業に関するものである。

契約番号：10C4636

機構担当部および担当者：

環境・保全研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ 畑中 耕一郎 殿

\*：株式会社 CRC 総合研究所 エネルギー技術部

## 目次

1	目的	1
2	内容分析	2
2.1	数値計算モデル	2
2.1.1	基礎式	2
2.1.2	物性値・物性式	2
2.1.3	解析領域と境界条件	3
2.2	コードの内容	4
2.2.1	概要	4
2.2.2	コードの構成	4
2.3	処理の詳細	13
2.3.1	main ルーチン	13
2.3.2	SPM ルーチン	16
3	入出力機能の整備および検証解析	20
3.1	コード整備	20
3.2	入力出力機能の整備	20
3.2.1	入力出力機能整備項目	20
3.2.2	入出力機能の追加に伴う整備内容	20
3.2.3	入力ファイル形式	21
3.3	整備後のコードの構成	25
3.4	機能確認	28
3.4.1	整備前のコードの解の再現	28
3.4.2	理論解の比較	28
4	室内試験解析	30
4.1	試験装置の概要	30
4.2	試験解析	31
4.2.1	解析モデル	31
4.2.2	試験解析に使用した物性値	31
4.2.3	解析の方針	31
4.2.4	SOR 打ち切り精度と収束回数について	32
4.2.5	結果のまとめ	33
5	沿岸処分を想定した場合の塩水／淡水境界面の挙動に関する感度解析	73
5.1	解析条件	73
5.2	解析結果	74
	参考文献	106

## 表目次

表 2.1	サブルーチン一覧	4
表 2.2	サブルーチン SPM 引数	6
表 2.3	サブルーチン GRID 引数	7
表 2.4	サブルーチン HOKAN 引数	7
表 2.5	サブルーチン INSA1 引数	7
表 3.1	入力ファイル内容	22
表 3.2	分布,履歴データの入力指定	23
表 3.3	ネームリスト変数	24
表 3.4	整備後のコードのファイル構成	25
表 3.5	理論解, 嶋・玉井の式	28
表 4.1	試験装置のサイズ, 透水係数, 間隙率など	30
表 4.2	試験解析に使用した物性値	31
表 4.3	試験解析, 解析ケース一覧	32
表 4.4	解析に使用した計算パラメータ	32
表 5.1	解析ケース(感度解析用)	73
表 5.2	解析に使用した物性値	74
表 5.3	解析に使用した計算パラメータ	74
表 5.4	淡水の単位幅あたり流入量	75
表 5.5	塩水浸入距離と透水係数および動水勾配の関係	105
表 5.6	沿岸から 2km における深度 0.5km および 1km の地点の実流速と透水係数 および動水勾配の関係	105

## 目次

図 2.1	解析領域	3
図 2.2	サブルーチンツリー	5
図 2.3	main ルーチン処理フロー	8
図 2.4	SPM ルーチン処理フロー	9
図 2.5	GRID ルーチン処理フロー	10
図 2.6	HOKAN ルーチン処理フロー	11
図 2.7	解析グリッド	13
図 2.8	注入口の扱い	15
図 2.9	移動粒子法領域図	17
図 2.10	粒子移動法解析領域	18
図 3.1	サブルーチンツリー	26
図 3.2	main ルーチン処理フロー	27
図 3.3	不圧帯水層の場合の定常塩淡水境界面	28
図 3.4	境界面の式と計算結果の比較	29
図 4.1	試験装置の概要	30
図 4.2	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)1 時間後	34
図 4.3	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)1 時間 30 分後	35
図 4.4	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)2 時間後	36
図 4.5	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)2 時間 30 分後	37
図 4.6	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)3 時間後	38
図 4.7	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)3 時間 30 分後	39
図 4.8	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)4 時間後	40
図 4.9	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)4 時間 30 分後	41
図 4.10	ケース 1：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線)5 時間後	42
図 4.11	実験写真 1 時間後	43
図 4.12	実験写真 1 時間 30 分後	44
図 4.13	実験写真 2 時間後	45
図 4.14	実験写真 2 時間 30 分後	46
図 4.15	実験写真 3 時間後	47
図 4.16	実験写真 3 時間 30 分後	48
図 4.17	実験写真 4 時間後	49
図 4.18	実験写真 4 時間 30 分後	50
図 4.19	実験写真 5 時間後	51
図 4.20	ケース 2：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線) 1500 秒後	52
図 4.21	ケース 2：塩水/淡水境界(C=0.1C <sub>0</sub> ,0.5C <sub>0</sub> ,0.9C <sub>0</sub> の等濃度線) 2000 秒後	53

図 4.22	ケース 2: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 2500 秒後	54
図 4.23	ケース 2: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 3000 秒後	55
図 4.24	ケース 2: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 3500 秒後	56
図 4.25	ケース 2: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 4000 秒後	57
図 4.26	ケース 2: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 4500 秒後	58
図 4.27	ケース 2: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 5000 秒後	59
図 4.28	ケース 2: 2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル	60
図 4.29	ケース 3: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 1500 秒後	61
図 4.30	ケース 3: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 2000 秒後	62
図 4.31	ケース 3: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 2500 秒後	63
図 4.32	ケース 3: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 3000 秒後	64
図 4.33	ケース 3: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 3500 秒後	65
図 4.34	ケース 3: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 4000 秒後	66
図 4.35	ケース 3: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 4500 秒後	67
図 4.36	ケース 3: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) 5000 秒後	68
図 4.37	ケース 3: 2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル	69
図 4.35	ケース 4: 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線)	70
図 4.36	ケース 4: 2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル	71
図 4.37	ケース 4: 鉛直塩水濃度分布	72
図 5.1	解析対象領域及び境界条件(感度解析用)	73
図 5.2	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-1	76
図 5.3	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-2	77
図 5.4	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-3	78
図 5.5	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-4	79
図 5.6	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-5	80
図 5.7	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-6	81
図 5.8	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-7	82
図 5.9	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-8	83
図 5.10	塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-9	84
図 5.11	2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル ケース 5-1	85
図 5.12	2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル ケース 5-2	86
図 5.13	2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル ケース 5-3	87
図 5.14	2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル ケース 5-4	88
図 5.15	2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル ケース 5-5	89
図 5.16	2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル ケース 5-6	90
図 5.17	2 次元 $xy$ 領域における流速ベクトル ケース 5-7	91

図 5.18	2次元 xy 領域における流速ベクトル	ケース 5-8	-----	92
図 5.19	2次元 xy 領域における流速ベクトル	ケース 5-9	-----	93
図 5.20	塩水浸入距離と透水係数及び動水勾配の関係		-----	94
図 5.21	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-1	-----	95
図 5.22	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-2	-----	96
図 5.23	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-3	-----	97
図 5.24	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-4	-----	98
図 5.25	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-5	-----	99
図 5.26	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-6	-----	100
図 5.27	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-7	-----	101
図 5.28	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-8	-----	102
図 5.29	深度 0.5km 及び 1km の水平断面の実流速分布	ケース 5-9	-----	103
図 5.30	沿岸から距離 2km における深度 0.5km 及び 1km の地点の実流速と透水係数及び 動水勾配の関係図		-----	104

## 1 目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、地下水流動および水質の変化の少ない安定した環境下に処分サイトを決定することが重要な課題である。特に沿岸地域の地下深部に処分場を想定した場合は、塩水の浸入により処分場周辺の水質が変化する可能性があるため、塩水／淡水境界の挙動が処分環境に与える影響を把握することが重要である。そのためには塩水の淡水への浸入過程および塩水／淡水境界の挙動を適切にモデル化する必要がある。

核燃料サイクル開発機構殿は、これまでに室内試験により得られたデータを使用して様々な水理・物質移動モデルを用いた数値シミュレーションを行い精度を比較し、核燃料サイクル開発機構殿と共同研究を行っている九州大学の提案しているモデル(解析コード)の数値誤差が比較的少なく精度の良い結果が得られることを確認した。

本作業ではより多様な条件の解析を行うことを可能とするために上記の解析コードの整備を行った。具体的には、解析コード内の各モジュールの機能および主要変数について内容の分析を行った後、入出力機能の整備を行った。整備を行った解析コードについては、理論解との比較解析および既往の文献に示されている水理・物質移動解析と同様の解析を行うとともに、核燃料サイクル開発機構殿で実施している密度流を考慮した室内試験の解析を行い、作成した解析コードの妥当性を確認した。さらに、解析条件およびパラメータを変化させた場合の塩水／淡水境界面の挙動についての感度解析を実施した。

## 2. 内容分析

### 2.1 数値計算モデル

#### 2.1.1 基礎式

水理・物質移動解析コード<sup>(1),(2)</sup>で用いている地下水流れの基礎式及び2次元移流分散方程式は次式で与えられる。

(1)地下水流れの式

(1a)圧力水頭

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = - \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (1)$$

(1b)ダルシー流速

$$u = -k \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (2)$$

$$v = - \left( k \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) \quad (3)$$

(2)2次元移流分散方程式

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \theta D_x \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \theta D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \theta D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial(\theta u' C)}{\partial x} - \frac{\partial(\theta v' C)}{\partial y} \quad (4)$$

ここで  $S$  比貯留係数,  $h$  圧力水頭,  $t$  時間,  $u, v, x, y$  方向 Darcy 流速,  $k$  透水係数,  $\rho$ : 流体密度,  $\rho_f$ : 淡水密度,  $C$  塩水密度,  $u', v'$ :  $x, y$  方向の実質流速,  $D_x, D_{xy}, D_{yx}, D_y$ : 分散係数である。また, 実質流速  $u', v'$  は空隙率  $\theta$  を用いて  $u' = u/\theta, v' = v/\theta$  で与えられる。

#### 2.1.2 物性値・物性式

水理・物質移動解析コードで用いている定数・関係式は以下の通りである。

流体密度

$$\text{淡水密度: } \rho_f = 1.0 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$$

$$\text{100\%塩水密度: } \rho_s = 1.025 \text{ (g cm}^{-3}\text{)}$$

$$\text{流体密度: } \rho_f = \rho_f + (\rho_s - \rho_f) \times C \quad (5)$$

分散定数の関係式

$$\alpha_L = \alpha_T \times 10$$

$\alpha_T$  (cm) は入力で与える。

水の分子拡散係数

$$D_M = 1.0 \times 10^{-5} \text{ (cm}^2 \text{ sec}^{-1}\text{)}$$

分散係数

$$D_x = \frac{\alpha_T u'^2}{V} + \frac{\alpha_L v'^2}{V} + D_M$$

$$D_{yy} \frac{\alpha_T u'^2}{V} + \frac{\alpha_L v'^2}{V} + D_u$$

$$D_{xy} = D_{yx} = \frac{(\alpha_L - \alpha_T) u' v'}{V} \quad (6)$$

ここで  $V = (u'^2 + v'^2)^{1/2}$  である。

比貯留係数

$$S = 10^{-6} \quad (7)$$

### 2.1.3 解析領域と境界条件

解析領域は図 2.1 の点線領域である。

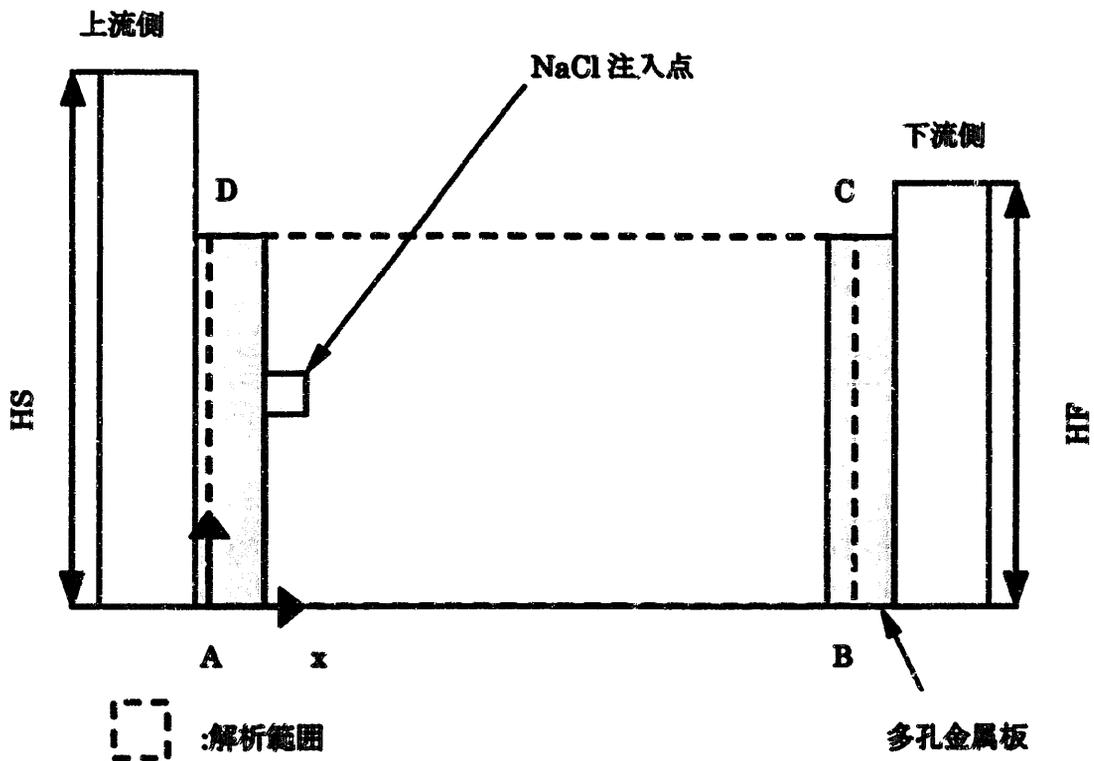


図 2.1 解析領域

圧力水頭境界条件

$$h = (HS - y)\rho_f \quad \text{on 境界 AD} \quad (8)$$

$$h = (HF - y)\rho_f \quad \text{on 境界 BC} \quad (9)$$

$$v = -\left(k \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f}\right) = 0 \quad \text{on 境界 AB, CD} \quad (10)$$

## 2次元移流分散方程式境界条件

$$C=0 \quad \text{on 境界 AD, BC} \quad (11)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y}=0 \quad \text{on 境界 AB, CD} \quad (12)$$

## 2.2 コードの内容

### 2.2.1 概要

水理・物質移動解析コードでは基礎式および関係式(1)～(4)を連立せず、圧力水頭、濃度の順に順次求めていく。

圧力水頭の方程式の解法には陰形式の差分法を用いSOR法を用いて解く。

2次元移流分散方程式の解法には粒子移動法を用いる。

### 2.2.2 コードの構成

水理・物質移動解析コードのサブルーチン一覧を表2.1に、サブルーチンツリーを図2.2に示す。また、それぞれの解析ルーチンの解析フローを図2.3～図2.6に示す。

表 2.1 サブルーチン一覧

サブルーチン名	内 容
main	タイムステップ制御 圧力水頭、ダルシー流速、流量の計算 計算結果の印刷
spm	粒子移動法
grid	粒子領域テーブル、各領域での粒子の局所通番テーブルの作成
hokan	濃度補間(グリッド濃度→粒子濃度)
insac	配列の印刷(未使用)
insacl	配列の印刷(未使用)
ineahl	配列の印刷
ineauv	配列の印刷(未使用)

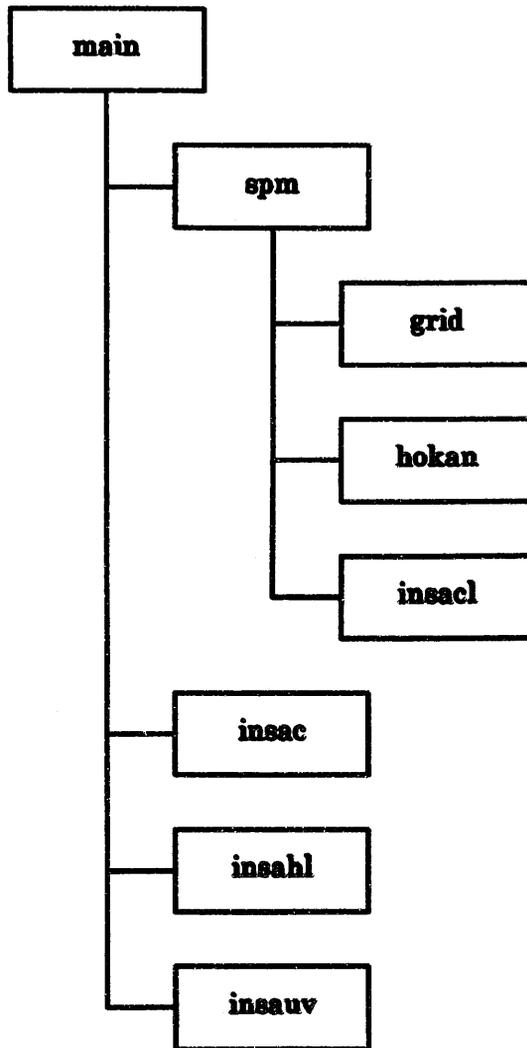


図 2.2 サブルーチンツリー

表 2.2 サブルーチン SPM 引数

引 数		内 容
CP(i)	領域のみ	粒子 i の濃度
DELC(i,j)	領域のみ	領域(i,j)の分散による濃度増分
XP(i)	領域のみ	粒子 i の x 座標
YP(i)	領域のみ	粒子 i の y 座標
KGRID(i,2)	領域のみ	粒子 i の領域アドレス
C(i,j)	入出力	領域(i,j)の濃度
U(i,j)	入力	領域(i,j)の実質流速 x-成分
V(i,j)	入力	領域(i,j)の実質流速 y-成分
DX	入力	x 方向グリッド間隔
DY	入力	y 方向グリッド間隔
DT	入力	タイムステップ幅
IKAI	入力	タイムステップ番号
KOSU	書いてあるだけ	粒子個数
XL	入力	解析領域左端座標
XR	入力	解析領域右端座標
YU	入力	解析領域上端座標
IMIN	入力	x 方向グリッド番号最小値
IMAX	入力	x 方向グリッド番号最大値
JMAX	入力	y 方向グリッド番号最大値
JMIN	入力	y 方向グリッド番号最小値
KDIM	入力	パラメータ(粒子数最大)
IDIM	入力	パラメータ(配列次元数)
JDIM	入力	パラメータ(配列次元数)
DM	入力	分子拡散係数
IJEMP	入力	パラメータ(空領域個数最大)
IEMPTY	領域のみ	空領域 x 方向アドレス
JEMPTY	領域のみ	空領域 y 方向アドレス
SITA(i,j)	入力	領域(i,j)の空隙率
AL(i,j)	入力	領域(i,j)の縦方向分散長
AT(i,j)	入力	領域(i,j)の横方向分散長
PKOSU(i,j)	領域のみ	領域(i,j)の粒子数
PRYUSI(i,j)	領域のみ	領域(i,j)の k 番目の粒子の全領域での通番
W1VJ0	入力	注入口周囲の実質流速
W1VJ2	入力	注入口周囲の実質流速
W2VJ0	入力	注入口周囲の実質流速
W2VJ2	入力	注入口周囲の実質流速
W1UI0	入力	注入口周囲の実質流速
W1UI2	入力	注入口周囲の実質流速
W2UI0	入力	注入口周囲の実質流速
W2UI2	入力	注入口周囲の実質流速

表 2.3 サブルーチン GRID 引数

引 数		内 容
X(i)	入力	粒子 i の x 座標
Y(i)	入力	粒子 i の y 座標
DX	入力	x 方向グリッド間隔
DY	入力	y 方向グリッド間隔
KGRID(i,2)	出力	粒子 i の領域アドレス
CP(i)	入力	領域 i の濃度
KOSU	入力	粒子個数
XL	入力	解析領域左端座標
XR	入力	解析領域右端座標
YU	入力	解析領域上端座標
KDIM	入力	パラメータ(粒子数最大)
PKOSU(i,j)	出力	領域(i,j)の粒子数
PRYUSI(i,j)	出力	領域(i,j)の k 番目の粒子の全領域での通番
IDIM	入力	パラメータ(配列次元数)
JDIM	入力	パラメータ(配列次元数)

表 2.4 サブルーチン HOKAN 引数

引 数		内 容
C(i,j)	入力	粒子(i,j)の濃度増分
X(i)	入力	粒子 i の x 座標
Y(i)	入力	粒子 i の y 座標
DX	入力	x 方向グリッド間隔
DY	入力	y 方向グリッド間隔
KGRID(i,2)	入力	粒子 i の領域アドレス
CP(i)	出力	領域 i の濃度
KOSU	入力	粒子個数
JMAX	入力	y 方向グリッド番号最大値
YU	入力	解析領域上端座標
KDIM	入力	パラメータ(粒子数最大)
IDIM	入力	パラメータ(配列次元数)
JDIM	入力	パラメータ(配列次元数)

表 2.5 サブルーチン INSAH1 引数

引 数		内 容
A(i,j)	入力	印刷する配列
IDIM	入力	パラメータ(配列次元数)
JDIM	入力	パラメータ(配列次元数)
IPMAX	入力	x 方向グリッド番号最大値
IMIN	入力	y 方向グリッド番号最小値
IMAX	入力	x 方向グリッド番号最大値
JMIN	入力	y 方向グリッド番号最小値
WR	入力	タイトル文字列
TIME	入力	時間

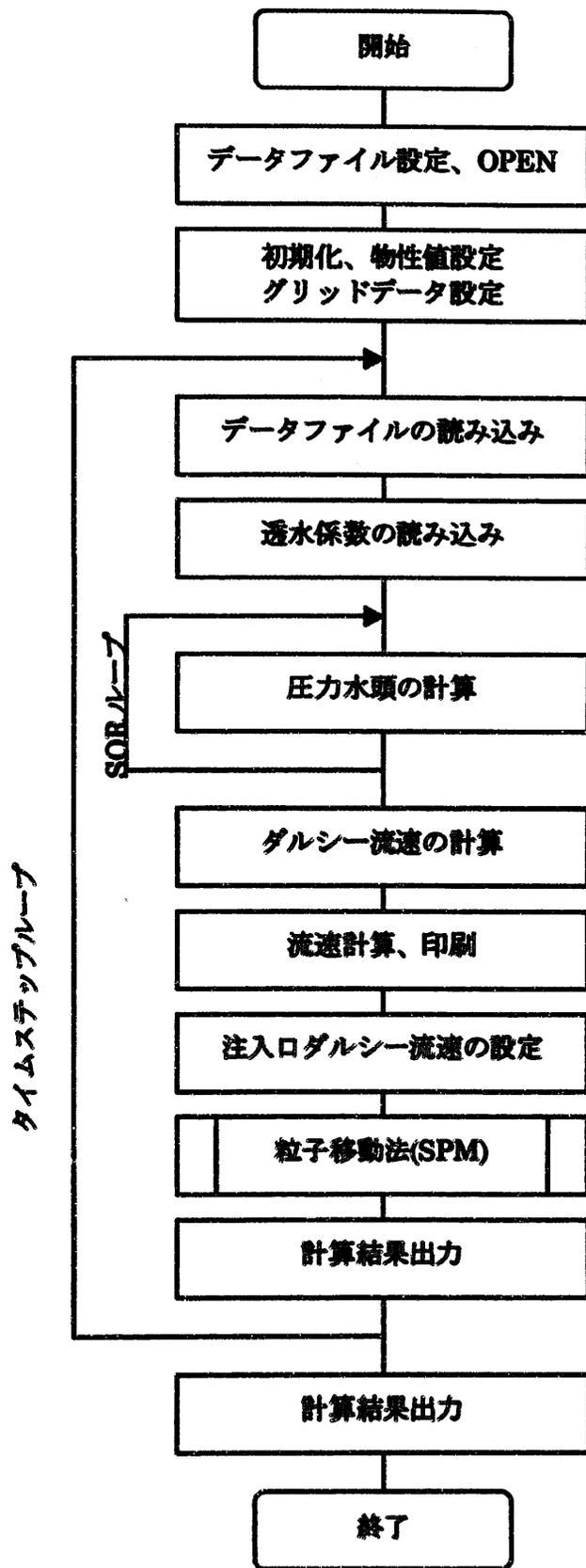


図 2.3 main ルーチン処理フロー

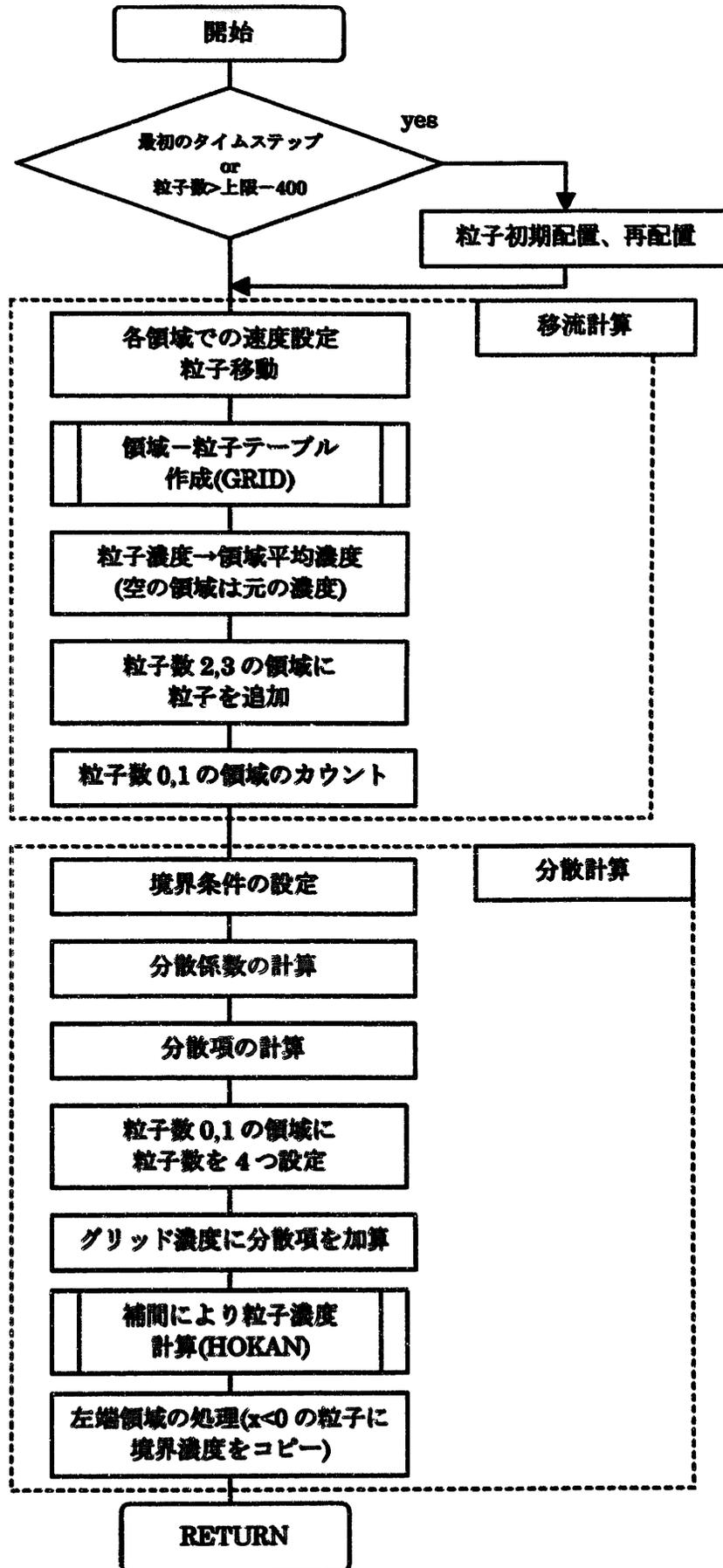


図 2.4 SPM ルーチン処理フロー

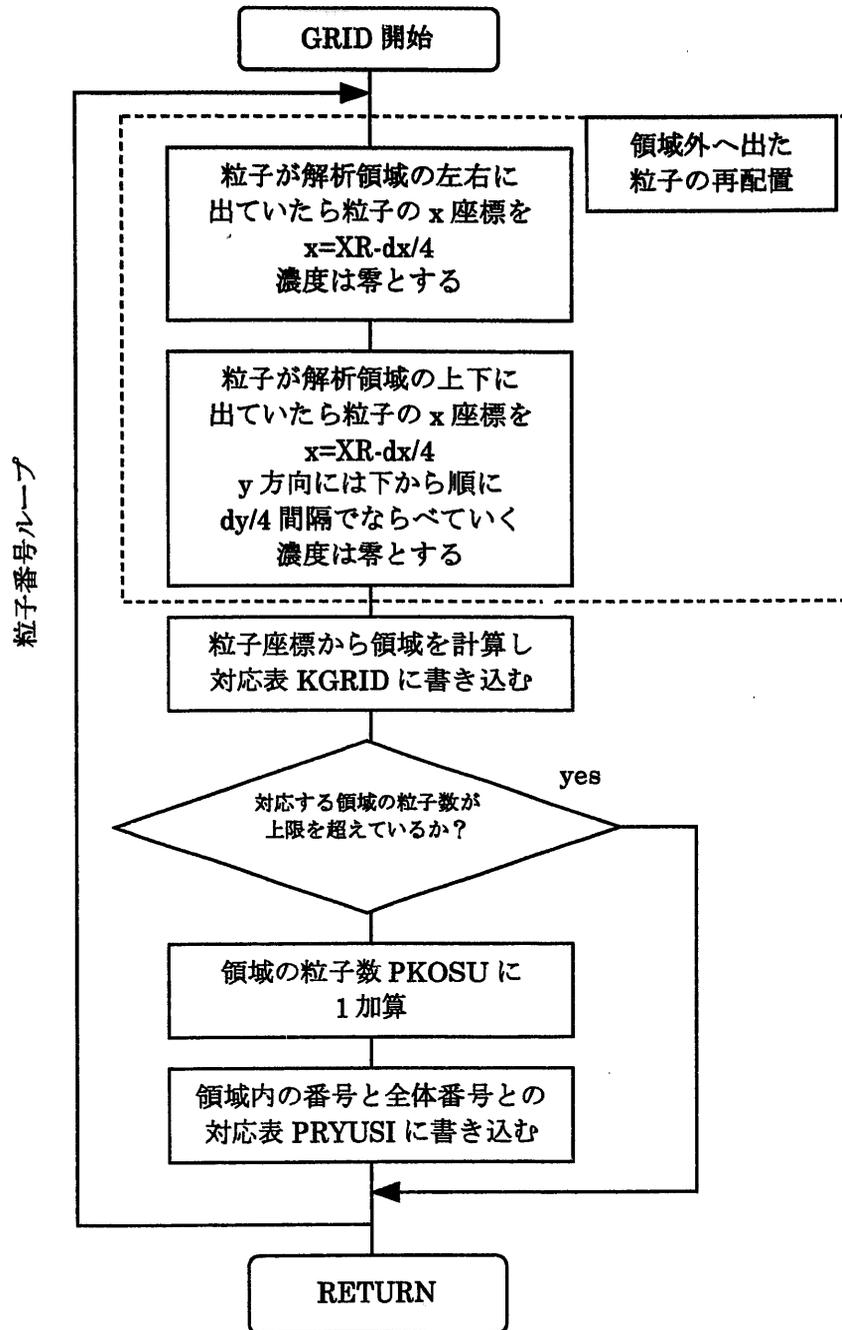


図 2.5 GRID ルーチン処理フロー

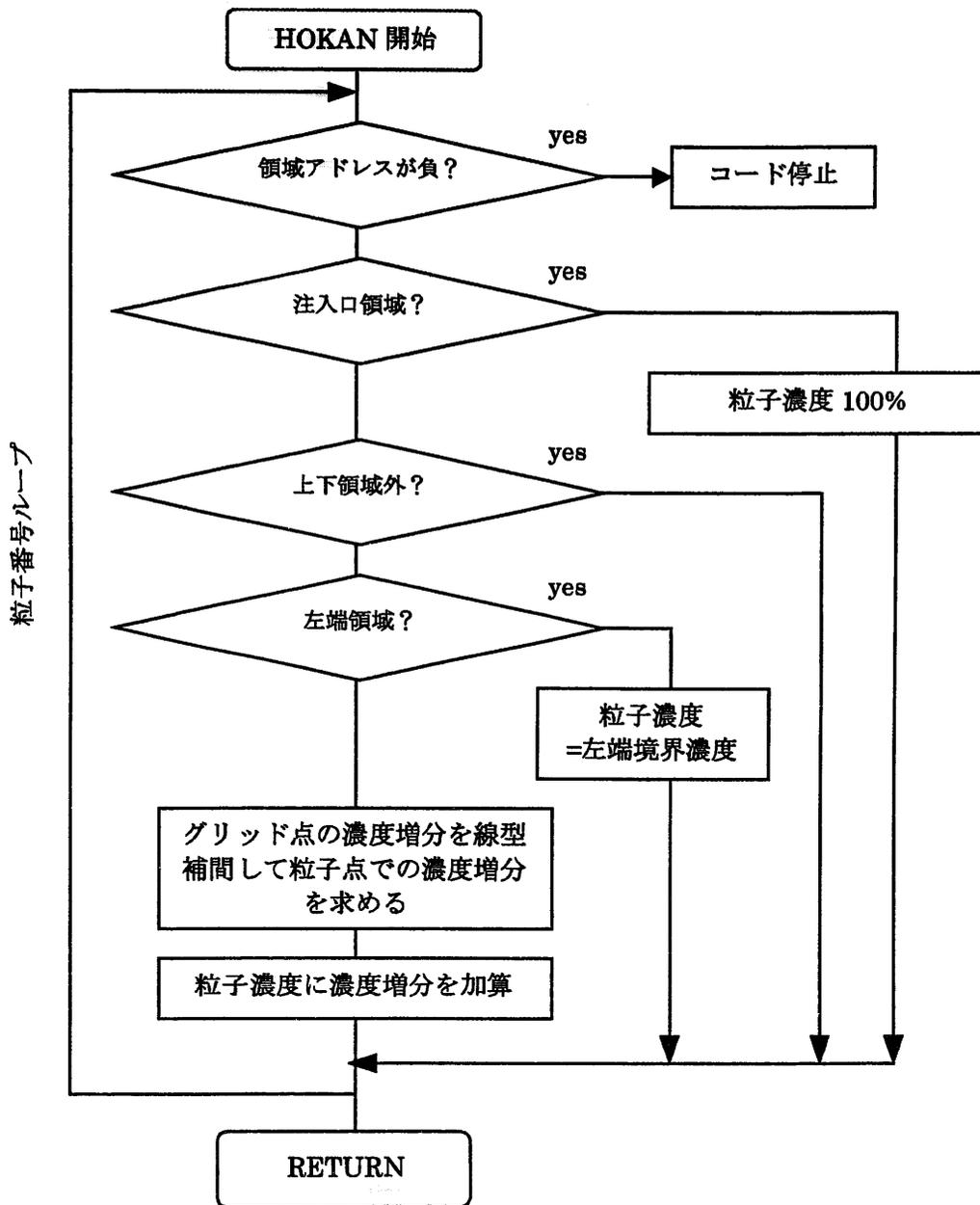


図 2.6 HOKAN ルーチン処理フロー

## 入力データ

- 計算条件(リスタート, 粒子移動法利用)の設定
- 入出力データファイル名
- 水位差(cm)
- 初期塩水濃度(% , 一様)
- タイムステップ幅, タイムステップ数(-)
- 圧力水頭計算時 SOR 許容誤差(絶対誤差, cm)

## 入力ファイル

- 透水係数の分布
- トレーサ流入量の 15 分間隔の履歴( $\text{cm}^3\text{min}^{-1}$ , 最大履歴数 50)
- ポロシティの分布(-, n2.dat)
- 縦方向分散長の分布(cm, at2.dat)
- 密度(リスタート時)
- 圧力水頭(リスタート時)

## 2.3 処理の詳細

### 2.3.1 main ルーチン

#### a) 入力

“はじめからなら 0, 続きなら 1 を入力しなさい” ⇒ リスタートフラグ: IAG

“粒子移動法を使用 (1), 未使用 (0)” ⇒ IAG2

“粒子移動法をはじめて (0), そうでない (1)” ⇒ IAG3

- リスタートでかつ粒子移動法を利用する場合, 途中 5 回計算結果を出力できる.
- リスタートであるなしに関わらず, 粒子移動法をはじめて使用するときのみ解析開始時間がゼロセットされる.
- 解析開始時間はゼロセットされないときには未定義

#### b) 圧力水頭の計算

圧力水頭の計算には基本式(1)~(3)を陰形式の差分法を用いる. ただし粒子移動法を用いるため密度を同時にとけないので密度には前段の値を用いる. 差分法の解析グリッドを図 2.7 に示す.

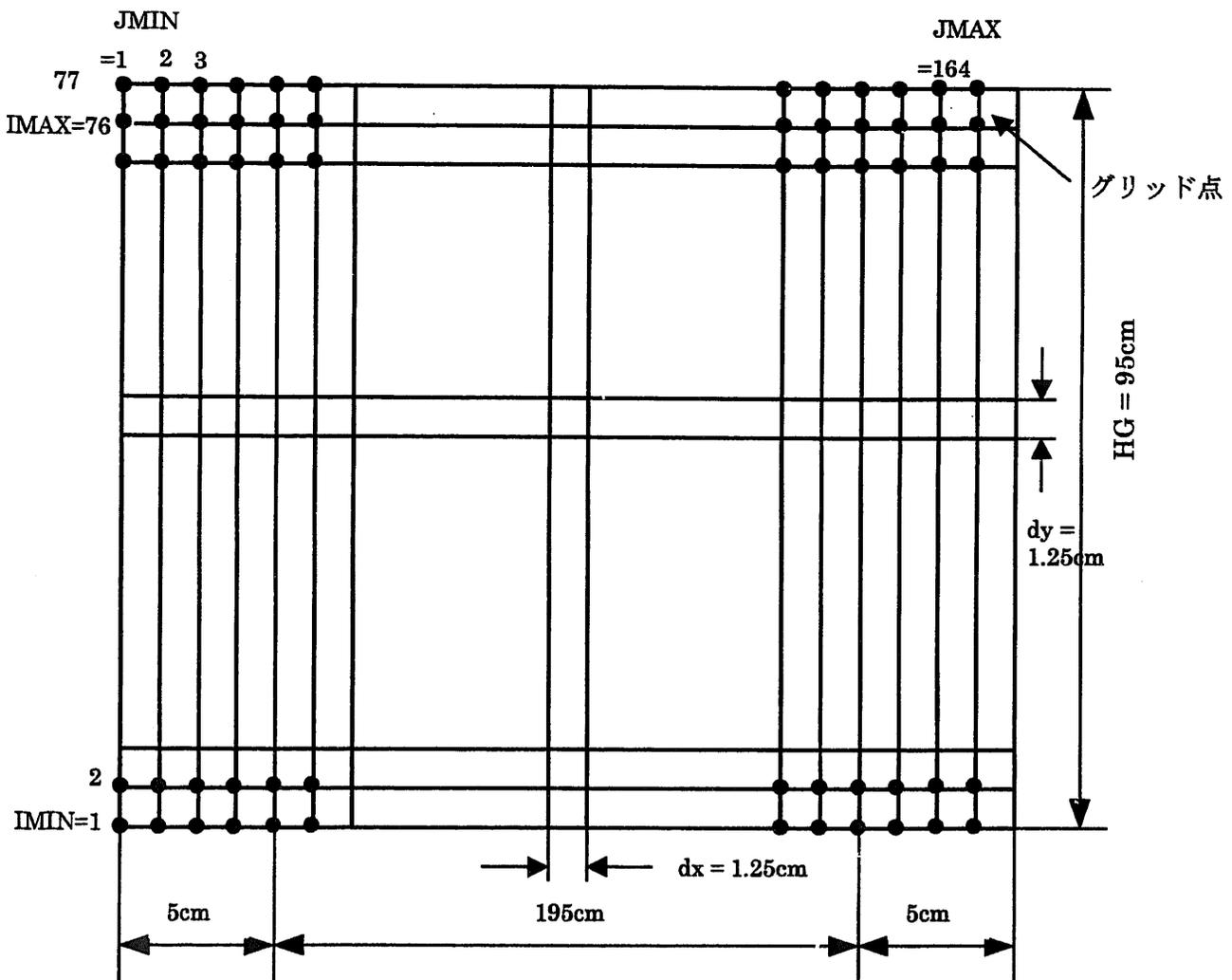


図 2.7 解析グリッド

差分式

$$h_{i,j}^{n+1} = (Sh_{i,j}^n + A\Delta t)/(S + B\Delta t)$$

$$A = (k_{i+1/2,j} + k_{i-1/2,j}h_{i-1,j}^{n+1})/\Delta x^2 + \{k_{i,j+1/2}(h_{i+1/2,j}^{n+1}/\Delta y + \rho_{i+1/2,j}^n/\rho_f) + k_{i,j-1/2}(h_{i,j-1}^{n+1}/\Delta y + \rho_{i,j-1/2}^n/\rho_f)\}/y$$

$$B = (k_{i+1/2,j} + k_{i-1/2,j})/\Delta x^2 + (k_{i,j+1/2} + k_{i,j-1/2})/\Delta y^2$$

$$k_{i\pm 1/2,j} = (k_{i\pm 1/2,j} + k_{i,j})/2, k_{i,j\pm 1} = (k_{i\pm 1,j} + k_{i,j})/2$$

$$\rho_{i\pm 1/2,j} = (\rho_{i\pm 1/2,j} + \rho_{i,j})/2, \rho_{i,j\pm 1} = (\rho_{i\pm 1,j} + \rho_{i,j})/2$$

境界条件

$$i = \text{IMIN}$$

Do j=1, IMAX ;  $h_{\text{IMIN}j} = \text{HS} - (j-1)\Delta y$  ; end do

$$i = \text{IMAX}$$

Do j=1, IMAX ;  $h_{\text{IMAX}j} = \text{HS} - (j-1)\Delta y$  ; end do

$$j = \text{JMIN}$$

$$\frac{h_{i,\text{JMIN}+1} - h_{i,\text{JMIN}+1}}{2\Delta y} + \frac{\rho_{i,\text{JMIN}}}{\rho_f} = 0, \rho_{i,\text{JMIN}+1} = \rho_{i,\text{JMIN}-1}$$

$$j = \text{IMAX}$$

$$\frac{h_{i,\text{JMAX}+1} - h_{i,\text{JMAX}+1}}{2\Delta y} + \frac{\rho_{i,\text{JMAX}}}{\rho_f} = 0, \rho_{i,\text{JMAX}+1} = \rho_{i,\text{JMAX}-1}$$

注入口の扱い

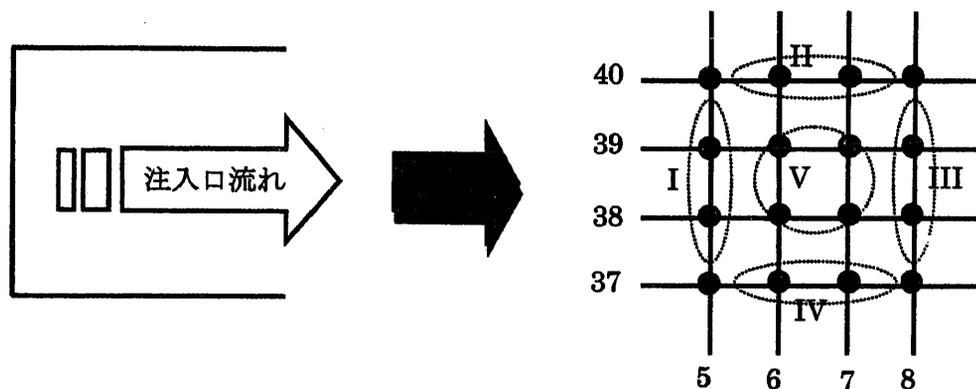


図 2.8 注入口の扱い

領域 I

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \Rightarrow h_{i,j} = h_{i-1,j}$$

領域 II

$$v = -\left(k \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f}\right) = 0 \Rightarrow h_{i,j} = h_{i+1,j} + \frac{\rho_{i,j}}{\rho_f} \Delta y$$

領域 III

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Q_{IN}}{2\Delta y \cdot Z} \Rightarrow h_{i,j} = h_{i+1,j} + \frac{Q_{IN} \Delta x}{2k_{i,j} \Delta y}$$

$$\rho = \rho_{IN} \Rightarrow \rho_{i,j} = \rho_{IN}$$

領域 IV

$$v = -\left(k \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f}\right) = 0 \Rightarrow h_{i,j} = h_{i,j-1} + \frac{\rho_{i,j}}{\rho_f} \Delta y$$

領域 V

$$h = 0 \Rightarrow h_{i,j} = 0$$

$$\rho = \rho_{IN} \Rightarrow \rho_{i,j} = \rho_{IN}$$

c)ダルシー流速の計算

$$u_{i,j} = \begin{cases} k_{i,j} \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x} & \text{for } i = \text{IMIN} \\ k_{i,j} \frac{h_{i+1,j} - h_{i-1,j}}{2\Delta x} & \text{for } \text{IMIN} < i < \text{IMAX} \\ k_{i,j} \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{\Delta x} & \text{for } i = \text{IMAX} \end{cases}$$

$$v_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{for } j = \text{JMIN} \\ k_{i,j} \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j-1}}{2\Delta y} + \frac{\rho_{i,j}}{\rho_f} & \text{for } \text{JMIN} < j < \text{JMAX} \\ 0 & \text{for } j = \text{JMAX} \end{cases}$$

流入口の扱い

領域 I,III

$v=0$ ,  $u$  は未定義

領域 II,IV

$u=0$ ,  $v$  は未定義

d)断面流量の計算

$$Q_{f,i} = \sum_{j=\text{JMIN}}^{\text{JMAX}} (u_{i,j} \theta_{i,j} + u_{i,j+1} \theta_{i,j+1}) \Delta y / 2$$

\*  $u_{j,\text{JMAX}+1}$ ,  $\theta_{j,\text{JMAX}+1}$  は未定義

### 2.3.2 SPM ルーチン

2次元移流分散方程式を粒子移動法で解く際の領域の構造を図 2.9 に示す。図中の●印は粒子の初期および粒子数が KDIM-400 を超えたときの配置位置である。(但し 1 ステップで増える粒濃度は注入濃度を 100 として規格化して計算。)

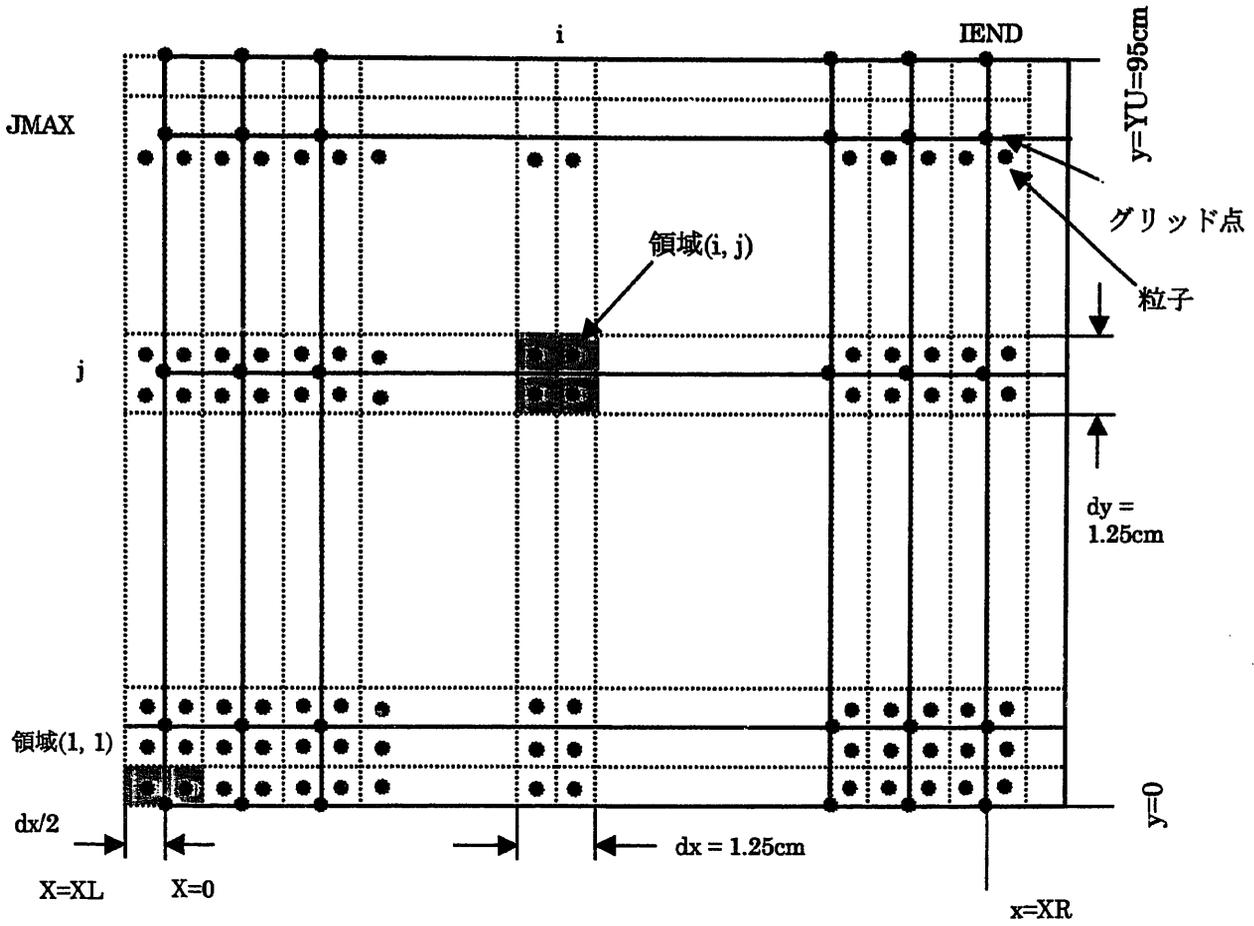


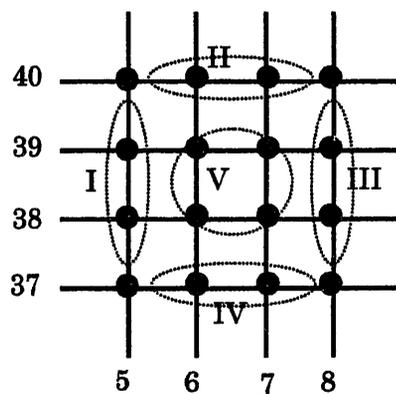
図 2.9 粒子移動法領域図

a) 粒子の濃度

粒子の速度は近傍の 3 つのグリッド点の流速を線型補間して求める。

$x < 0$  にある粒子の速度は領域のグリッド点の流速とする。

注入口のグリッド点流速については、下図の様に領域 I~V として、それぞれ以下に示す。



流入口の扱い

領域 I, II, IV, V

$$u=0, v=0,$$

領域 III

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Q_{IN}}{2\Delta y \cdot Z} \Rightarrow h_{i,j} = h_{i+1,j} + \frac{Q_{IN} \Delta x}{2k_{i,j} \Delta y}$$

$$v=0$$

b) 粒子の移動

$$x_k^{n+1} = x_k^n + u_k \Delta t$$

$$y_k^{n+1} = y_k^n + v_k \Delta t$$

c) 移動後の粒子の位置する領域を決定 (GRID ルーチン)

d) 領域の濃度を計算

下図で網掛けされた領域について領域内の粒子の濃度の平均を計算し領域濃度とする。

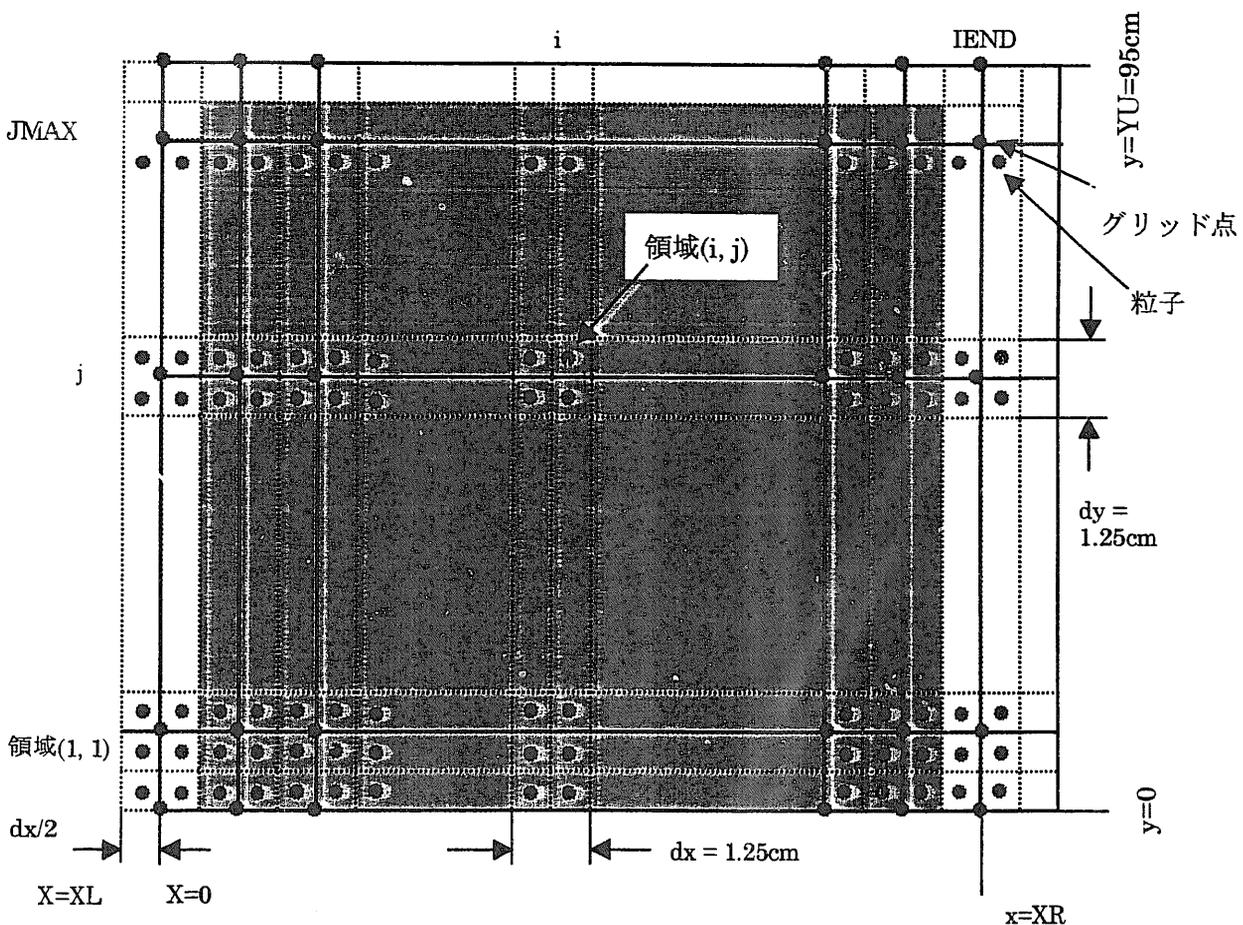


図 2.10 粒子移動法解析領域

e) 粒子の密度が低い部分が生じ解析濃度が低下することを避けるため、網掛けの領域のうち粒子数が2~3個の領域では領域の中心に領域の平均濃度を持つ粒子を1つ設置する。

d) 分散の計算

分散項

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D'_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D'_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D'_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D'_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right)$$

を陽に差分化する。ここで  $D'_{xx} = \theta D_{xx}$ ,  $D'_{xy} = \theta D_{xy}$ ,  $D'_{yx} = \theta D_{yx}$ ,  $D'_{yy} = \theta D_{yy}$  とした。

第1項

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( D'_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{\substack{x=x_i \\ y=y_j}} &\Rightarrow \frac{1}{\Delta x} \left( D'_{xx,i+1/2,j} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{i+1/2,j} - D'_{xx,i-1/2,j} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{i-1/2,j} \right) \\ &= (D'_{xx,i+1/2,j} (C_{i+1,j} - C_{i,j}) - D'_{xx,i-1/2,j} (C_{i,j} - C_{i-1,j})) / (\Delta x)^2 \end{aligned}$$

第2項

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( D'_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{\substack{x=x_i \\ y=y_j}} &\Rightarrow \frac{1}{\Delta x} \left( D'_{xy,i+1/2,j} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{i+1/2,j} - D'_{xy,i-1/2,j} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{i-1/2,j} \right) \\ &= \frac{1}{\Delta x} \left( D'_{xy,i+1/2,j} \frac{(C_{i+1,j+1} + C_{i,j+1})/2 - (C_{i+1,j-1} + C_{i,j-1})/2}{2\Delta y} \right. \\ &\quad \left. - D'_{xy,i-1/2,j} \frac{(C_{i,j+1} + C_{i-1,j+1})/2 - (C_{i,j-1} + C_{i-1,j-1})/2}{2\Delta y} \right) \end{aligned}$$

第3項

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left( D'_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{\substack{x=x_i \\ y=y_j}} &\Rightarrow \frac{1}{\Delta y} \left( D'_{yx,i,j+1/2} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{i,j+1/2} - D'_{yx,i,j-1/2} \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{i,j-1/2} \right) \\ &= \frac{1}{\Delta y} \left( D'_{yx,i,j+1/2} \frac{(C_{i+1,j+1} + C_{i+1,j})/2 - (C_{i-1,j+1} + C_{i-1,j})/2}{2\Delta y} \right. \\ &\quad \left. - D'_{yx,i,j-1/2} \frac{(C_{i+1,j-1} + C_{i+1,j})/2 - (C_{i-1,j-1} + C_{i-1,j})/2}{2\Delta x} \right) \end{aligned}$$

第4項

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left( D'_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{\substack{x=x_i \\ y=y_j}} &\Rightarrow \frac{1}{\Delta y} \left( D'_{yy,i,j+1/2} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{i,j+1/2} - D'_{yy,i,j-1/2} \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{i,j-1/2} \right) \\ &= (D'_{yy,i,j+1/2} (C_{i,j+1} - C_{i,j}) - D'_{yy,i,j-1/2} (C_{i,j} - C_{i,j-1})) / (\Delta y)^2 \end{aligned}$$

## 3 入出力機能の整備および検証解析

### 3.1 コード整備

今後のコードの改良整備を容易にするために以下の観点でコードの整備を行った。

- 1.冗長，不要なステップの削除
- 2.変数のローカル化，IMPLICIT 宣言の廃止
- 3.機能毎にコードをサブルーチン化
- 4.GOTO 文の排除
- 5.記憶領域の二重利用の廃止

### 3.2 入力出力機能の整備

#### 3.2.1 入力出力機能整備項目

対話式であった入力をファイルによる入力に変更し，以下の内容を入力により指定できるよう整備を行った。

- 解析領域，格子サイズ
- 透水係数，間隙率，貯留係数，縦方向および横方向分散長
- 2 流体密度
- 初期条件(圧力分布，濃度分布)
- 境界条件(濃度固定，圧力固定，流量固定，流量時間変化)
- 注入孔について位置，サイズ，濃度，流量，圧力水頭
- 計算精度に係わるパラメータ(収束条件，移動粒子数)
- 出力ファイル名，計算結果出力時間間隔
- 濃度時間履歴出力位置

#### 3.2.2 入出力機能の追加に伴う整備内容

入出力機能の整備内容は以下の通りである。整備に当たり，元のコードに不足していた機能について機能の追加を行った。

##### 解析領域，格子サイズ

解析領域サイズは x 方向，y 方向のサイズとメッシュ間隔を入力により指定できるものとした。解析領域を問題の領域に一致させた。

##### 分布を指定できる定数

透水係数，間隙率，貯留係数，縦方向および横方向分散長の分布を指定できる定数は，個別にファイルより読み込むものとし，入力ファイルにはファイル名を記述するものとした。ただし，一様な分布のときには入力ファイルに直接数値を記述できるものとした。

##### 2 流体密度

2 流体密度には既定値を設け，変更は Namelist によるものとした。

既定値：淡水  $\rho_{\text{hof}}=1.000$ ，塩水  $\rho_{\text{ous}}=1.025$

初期条件(圧力分布, 濃度分布)を個別にファイルより読み込むことができるよう整備した。

### 境界条件, 注入孔

解析領域左右端において濃度, 圧力を指定できるものとした。

注入孔の形状は方形のみとし, その位置, サイズを指定できるものとした。また濃度および圧力あるいは流量を指定できるものとし, 流量に関しては別途ファイルにより時間変化を指定できるものとした。

### 計算精度に関するパラメータ

圧力水頭計算の収束条件, 収束加速因子, 粒子移動法の初期移動粒子数を Namelist 入力により指定できるものとした。

既定値 収束条件  $espi=1.0d-2$ , 加速因子  $omega=1.6d0$ , 移動粒子数  $nspm$ :各セルに 4 つ

移動粒子法で用いる粒子数の初期値を入力により指定するため, 粒子の初期配置を乱数により決定する機能を追加した。ただし, 乱数により配置を決定後, セル内の粒子数が 4 未満のセルについては, 従来どおり 4 つの粒子を均等に配置するものとした。

### 計算結果出力

指定時間間隔毎の圧力分布, 濃度分布, 実流速分布を指定ファイルに保存できるものとした。

また 20 点までの指定点についての濃度の時間履歴を指定ファイルに保存できるものとした。指定点数の上限は parameter 文により与え include ファイルに記述しているため, 変更は容易となっている。

### タイムステップコントロール

オプションで流速とグリッド間隔とによりタイムステップを制限することができるようにした。

### リスタートファイル変更

リスタート時に使用するために計算最終段の密度分布を f 形式で出力していたが, 密度が通常  $1.0***$  であることから常に頭 2 桁分の精度を無駄にしていた。このためリスタート情報を濃度に改めた。

### デバッグ

- ・ 圧力水頭計算時の注入孔の判定後の GOTO の飛び先が誤っていたため修正した。
- ・ 流速計算時に注入孔流速の計算で dx と dy を間違えていたため修正した。

## 3.2.3 入力ファイル形式

入力ファイルは以下の形式である。

入力形式: 標準入力

ファイル形式: 1 行 80 文字以内

コメント行: #で始まる行

入力ファイルの内容を表 3.1 に示す。

表 3.1: 入力ファイル内容

項目	変数名	形式	備考
<b>1. 表題 セクション</b>			
表題	title	a80	
<b>2. ネームリスト セクション</b>			
Namelist	\$param...\$end	---	表 3.3 参照
<b>3. リスタート セクション</b>			
リスタートフラグ	iag, iag2	2i5	=0:通常計算, =1 リスタート計算
圧力水頭ファイル名	fnamh0	a10	iag=0 のとき省略
濃度データファイル名	fnamc0	a10	iag=0 のとき省略
<b>4. 形状データ セクション</b>			
解析領域	x1, y1, dx, dy	4f10.3	
境界圧力(左右)	hl, hr	2f10.3	
境界濃度(左右)	cl cr	2f10.3	
透水係数	ksat	2a10	*1 表 3.2 参照
間隙率	theta	2a10	*1 表 3.2 参照
貯留係数	ca	2a10	*1 表 3.2 参照
縦方向分散係数	al	2a10	*1 表 3.2 参照
横方向分散係数	at	2a10	*2 表 3.2 参照
<b>5. 注入孔セクション</b>			
注入孔フラグ	injet	i5	=0:無し, =1:1個所有り =2:2個所有り
位置, サイズ	injcx(2) injcsz	2f10.3, i5	injet=0 のとき省略
濃度	conci	f10.3	
境界条件フラグ	injbcd	i5	=0:圧力水頭, =1:流量 1, =2:流量 2 *4 injet=0 のとき省略
境界条件の値	---	2a10	*3 表 3.2 参照 injet=0 のとき省略
位置, サイズ	injcx2(2) injcsz2	2f10.3, i5	injet=0,1 のとき省略
濃度	conci2	f10.3	
境界条件フラグ	injbcd2	i5	=0:圧力水頭, =1:流量 1, =2:流量 2 injet=0,1 のとき省略
境界条件の値	---	2a10	*3 表 3.2 参照 injet=0,1 のとき省略
<b>6. 計算コントロール セクション</b>			
解析時間, 初期時間刻み, 時間刻み調整フラグ	ttime, dt, idt	2f10.3, i5	idt=0:時間刻みを制御しない idt=1:時間刻みを制御する

表 3.1: 入力ファイル内容(続き)

項目	変数名	形式	備考
圧力分布ファイル名	fnamhd	a10	
濃度分布ファイル名	fnamcd	a10	
実流速分布ファイル名	fnamvd	a10	
濃度変化ファイル名	fnamcc	a10	
圧力分布(リスタート用)	fnamh0	a10	
濃度分布(リスタート用)	fnamc0	a10	
計算結果出力時間間隔	dtprt	f10.3	
濃度分布変化出力点数	npert	i5	mpert 以下
濃度分布変化出力点座標	prtxy(2,mpert)	2f10.3	npert 行指定

### 分布・履歴データの入力方法(\*1,\*2,\*3)

透水係数, 間隙率, 貯留係数, 縦方向分散係数等, 格子毎の分布を入力する変数では行の最初の 10 文字で入力方法を指定する. 指定方法を表 3.2 に示す.

表 3.2: 分布・履歴データの入力指定

最初の 10 文字	適用	内容
'file'	*1*2*3	続く 10 文字で読み取るファイル名を指定する.
'ratio'	*2	続く 10 文字で(f10.3)で縦方向分散係数に対する比を指定する.
数値	*1*2	解析領域を与えられた数値で一様に指定する. 続く 10 文字は無視される.
	*3	注入口の流量あるいは圧力水頭を与えられた数値で一定とする. 続く 10 文字は無視される.

例: ファイル'ksat.dat'より透水係数を入力

カラム	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	2	
	f	i	l	e							k	s	a	t	.	d	a	t				

透水係数を一定値 0.385 として入力

カラム	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	2	
					0	.	3	8	5	0												

### 注入孔境界指定(\*4)

注入孔境界条件で流量を指定するとき injcbd=1 は注入孔の四方を同等に扱い, injcbd=2 では注入孔右側境界にのみ流出するものとして扱う.

### 濃度の指定について

入力ファイルでの濃度は  $100(\rho - \rho_f) / (\rho_s - \rho_f)$  で計算される 100 百分率で指定する.

### ネームリスト変数

Namelist param で指定できる変数を表 3.3 に示す.

表 3.3: ネームリスト変数

項目	変数名	形式	既定値・内容
<b>物理パラメータ</b>			
分子拡散係数	dm	real*8	1.000d-5
流体密度 1	roh1	real*8	1.0000
流体密度 2	roh2	real*8	1.0250
<b>計算パラメータ</b>			
圧力水頭計算時 SOR 加速パラメータ	omega	real*8	1.60
圧力水頭計算時収束判定値	epsi	real*8	1.0d-2
SPM 移動粒子数初期値	nspm	real*8	0 =0 で各セル 4 つ ずつ均等配置 ≠0 では指定数だ け乱数にて一様配 置
リスタート時濃度ファイルオプション	irestc	integer	0 =0 : 濃度 =1 : 密度

### 3.3 整備後のコードの構成

整備後のコードのファイル構成を表 3.4 に、サブルーチンツリーを図 3.1 に、main ルーチンのフローチャートを図 3.2 に示す。

表 3.4 整備後のコードのファイル構成

ファイル名	内容
サブルーチン	
blockdata.f	コモン変数の初期値
darcy.f	ダルシー流速の計算
grid.f	粒子-領域テーブル, 各領域での粒子の局所通番テーブルの作成
hokan.f	濃度補間(グリッド濃度→粒子濃度)
init.f	初期設定
input.f	入力処理
main.f	タイムステップ制御, 計算コントロール
press.f	圧力水頭の計算
print0.f	圧力水頭, 濃度, 流速の分布の書き出し
print1.f	リスタートファイルの書き出し
print4.f	指定点における濃度の履歴の書き出し
spm.f	粒子移動法
インクルードファイル	
constc.h	common /constc/: 計算精度に係わる変数
constm.h	common /constm/: 物性値関連変数
inject.h	common /inject/: 模擬坑道についての変数
ioset.h	common /ioset/: 入出力機番
param.h	配列サイズ等の parameter 文

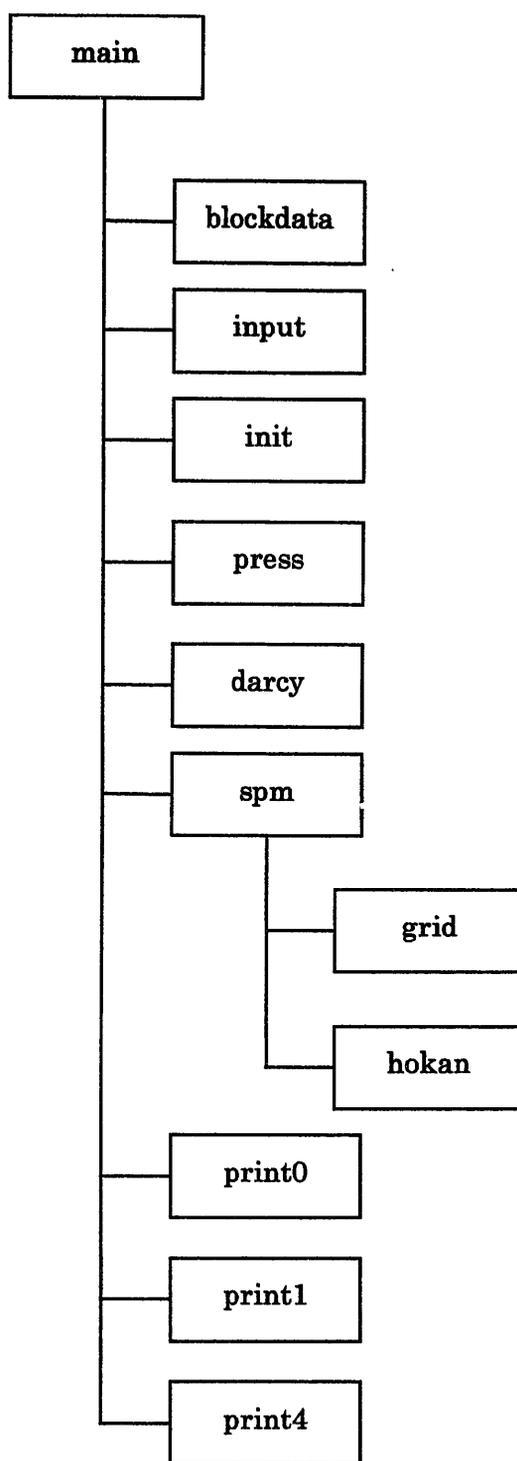


図 3.1 サブルーチンツリー

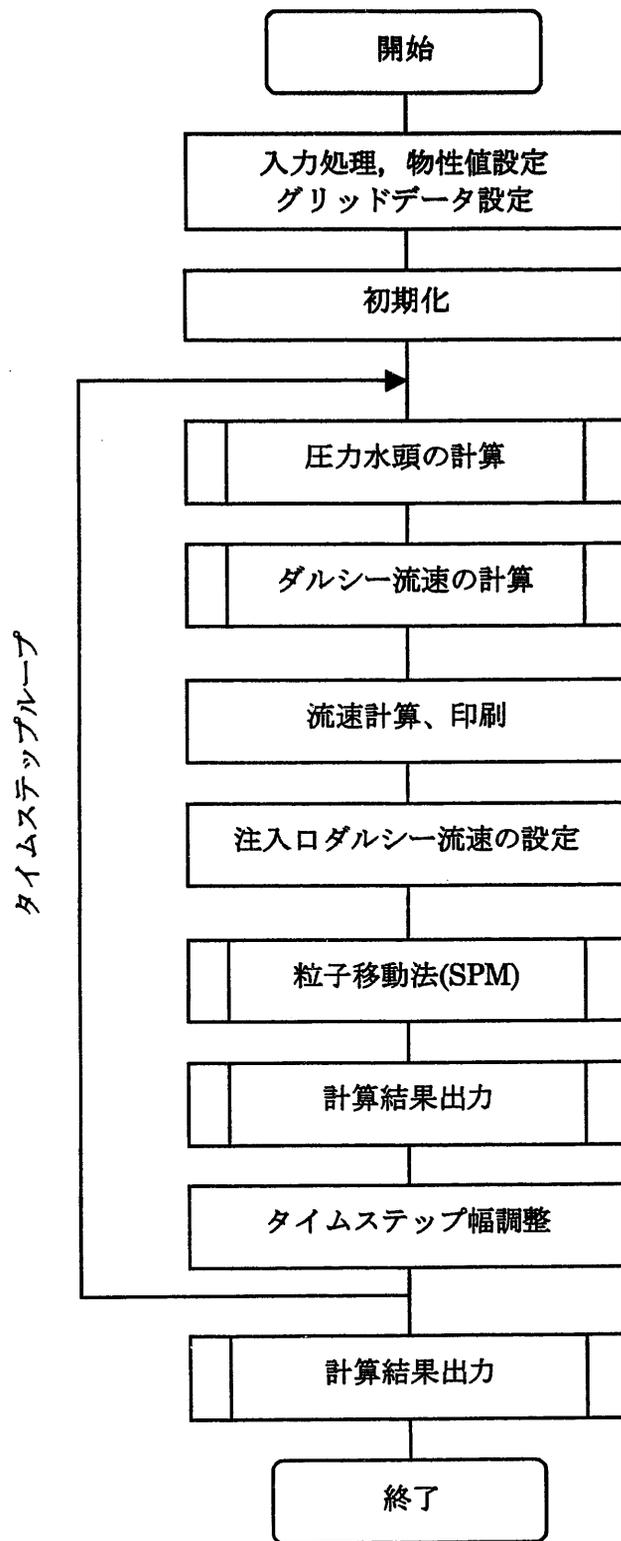


図 3.2 main ルーチン処理フロー

### 3.4 機能確認

#### 3.4.1 整備前のコードの解の再現

核燃料サイクル開発機構殿より貸与頂いたデータ(「不均質多孔質媒体中の水理・物質移動に関する研究」(PNC TY1606 97-001)3章 case.3 に相当する。)により整備前のコードと計算結果を比較し一致することを確認した。

#### 3.4.2 理論解の比較

整備したコードに対し表 3.5 に示す理論解<sup>(9)</sup>との比較を行った。

表-3.5 理論解、嶋・玉井の式

嶋・玉井は、図 3.3 に示すような不圧帯水層が水平の不透水層上に存在する場合をとりあげ、鉛直流速の影響を考慮して境界面の式と塩水くさびの長さを次式のように与えている。

・境界面の式

$$\frac{(\Delta\rho/\rho_1)k}{|Q_L|} \cdot h = \left( \frac{2(\Delta\rho/\rho_1)k}{|Q_L|} x + 0.5 \right)^{1/2} \quad (1)$$

・塩水くさびの長さ

$$L = \frac{k(\Delta\rho/\rho_1)(1 + \Delta\rho/\rho_1)}{2|Q_L|} h_1^2 \quad (2)$$

$\rho_1$ :淡水密度、 $\rho_2$ :塩水密度、 $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$ :二層間の密度差、 $L$ :塩水くさびの長さ、 $h$ :海面から塩水/淡水境界までの深さ、 $h_1$ :不透水層より海面までの高さ、 $Q_L$ :単位幅当りの淡水流量

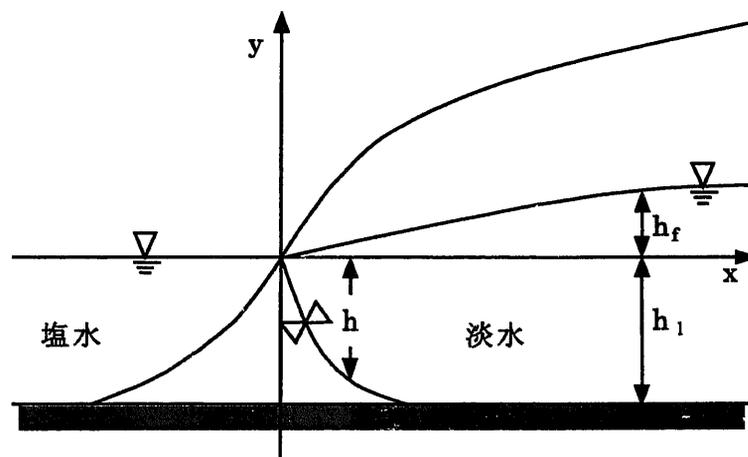


図 3.3 不圧帯水層の場合の定常塩淡境界面

### 計算条件

解析領域	200cm x 100cm(グリッド間隔 1cm)
圧力水頭差	2.8 cm
透水係数	$0.358 \text{ cm s}^{-1}$
淡水密度	$1.000 \text{ g cm}^{-3}$
塩水密度	$1.025 \text{ g cm}^{-3}$
貯留係数	$1.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$
縦方向分散長	$2.93 \times 10^2 \text{ cm}$
横方向分散長	$2.93 \times 10^{-3} \text{ cm}$
解析時間	$1.02 \times 10^5 \text{ s}$

### 計算結果

ほぼ定常に至ったときの単位幅あたり流量	約 $0.3025 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
理論解((1)式)より計算される塩水楔長	151.2cm
解析による塩水楔長(50%境界)	138.6cm

となり 8%程度の誤差で一致した。

ただし、境界面の式((2)式)より計算される塩水楔長は 139.1cm であり 0.4%程度の誤差で一致する。

境界面の式と計算結果の比較を図 3.4 に示す。0.5 $C_0$  の等濃度線と境界面の式がよく一致している。

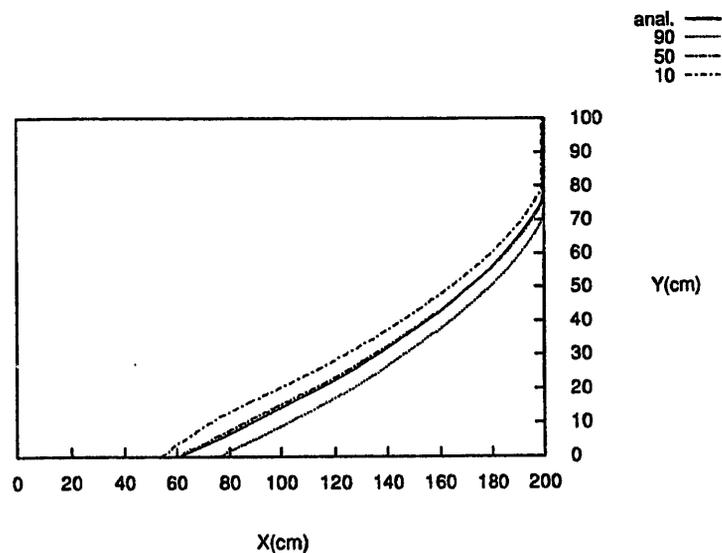


図 3.4 境界面の式と計算結果の比較

## 4 室内試験解析

核燃料サイクル開発機構殿において実施された密度流試験について、整備した解析コードを用いて試験解析を実施し両者の結果を比較した。さらに定常計算、模擬坑道の有無について試験計算を行った。

### 4.1 試験装置の概要

図 4.1 に MACRO 試験装置の概要を示す。また、試験装置のサイズと透水領域の透水係数値を表 4.1 に示す。

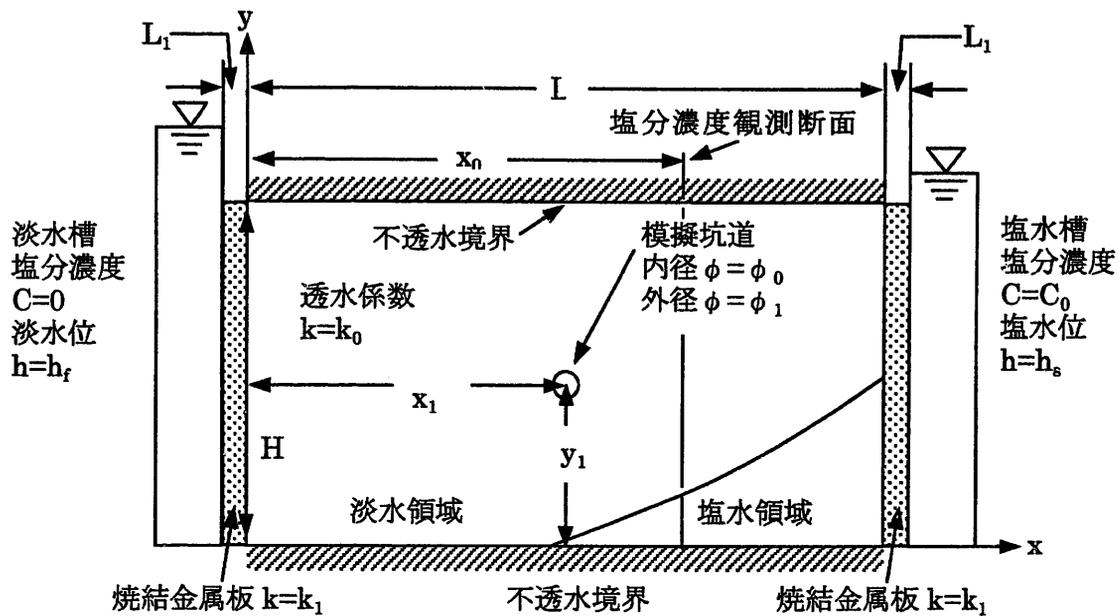


図 4.1 試験装置の概要

表 4.1 試験装置のサイズ、透水係数、間隙率など

媒体槽	長さ	$L$	2000mm
	高さ	$H$	1000mm
	透水係数	$K$	3.58E-01cm/s
	間隙率	$K$	37.3%
模擬坑道	$x$ 座標	$x$	1625mm
	$y$ 座標	$y$	340mm

## 4.2 試験解析

### 4.2.1 解析モデル

試験解析モデルを作成するにあたっては、次の点に注意した。

- ・ 媒体槽のみモデル化し、焼結金属板はモデル化しない。
- ・ 模擬坑道の形状は特にモデル化しない。模擬坑道の圧力水頭=0とした解析を行う際には、解析メッシュの1格子分を模擬坑道として解析を行う。

### 4.2.2 試験解析に使用した物性値

試験解析に用いた物性値を表 4.2 に示す。

表 4.2 試験解析に使用した物性値

項目	値
淡水密度	Case4-1 1.07 g/cm <sup>3</sup>
	Case4-2,3,4 1.00 g/cm <sup>3</sup>
塩水密度	Case4-1 1.10 g/cm <sup>3</sup>
	Case4-2,3,4 1.025 g/cm <sup>3</sup>
縦方向分散長( $\alpha_L$ )	$2.93 \times 10^{-2}$ cm
横方向分散長( $\alpha_T$ )	$\alpha_L/10$

### 4.2.3 解析の方針

- ・ 試験データは1ケースのみ（境界での水頭差は 15cm で塩水側が高くなっている。模擬坑道は全水頭条件（すなわち模擬坑道をモデル化しないことと同じ）得られているため、解析との比較は1ケースのみとした。その他は核燃料サイクル開発機構殿と協議の上、条件を設定して解析を行った。
- ・ 試験との比較解析においては、焼結金属板の圧力損失を考慮して塩水側の境界条件（圧力水頭）を変化させて試行錯誤的に試験結果の塩淡境界を再現するものとした。

解析ケースを表 4.3 に、それぞれのケースについての計算パラメータを表 4.4 にまとめた。

表 4.3 試験解析, 解析ケース一覧

ケース	定常 / 非定常	内容
ケース 4-1	非定常	試験との比較解析を行うため, 試行錯誤により 5 時間経過時の塩水/淡水境界がおよそ一致するよう圧力水頭差を調整し, 塩水側を 1.5cm 低く設定した.
ケース 4-2	非定常	ケース 4-4 に圧力を指定した模擬坑道を設け, 定常状態からリスタートし 5000 秒間の非定常計算を行った. 模擬坑道の圧力水頭:50cm
ケース 4-3	非定常	ケース 4-4 に流量を指定した模擬坑道を設け, 定常状態からリスタートし 5000 秒間の非定常計算を行った. 流量はケース 4-2 で計算される流出量の 1/5 とした.
ケース 4-4	定常	塩水楔が淡水境界に達しないよう, 圧力水頭差を淡水側が 2.8cm 高くとり定常に達するまで計算を行う.

表 4.4 解析に使用した計算パラメータ

ケース	解析時間(秒)	SOR 打切精度	粒子数
4-1	$1.80 \times 10^4$	0.00001	200000
4-2	$5.0 \times 10^3$	0.01	200000
4-3	$5.0 \times 10^3$	0.01	200000
4-4	$1.0 \times 10^5$	0.01	200000
	$1.02 \times 10^5$	0.00000001	200000

#### 4.2.4 SOR 打切り精度と収束回数について

ケース 4-4 について SOR 打切り精度と収束回数を調べた。TimeStep1 では 0.01 と 0.001 で約 8 倍,  $-4$  乗以降はほぼ線型に収束回数が増えている。TimeStep10 では  $-6$  乗以降急速に収束回数が増えている。

これに対し計算結果を見ると,  $-2$  乗では計算初期には濃度分布に影響が出るほど誤差が大きい。 $-4$  乗から  $-5$  乗で濃度分布はほぼ収束し,  $-7$  乗から  $-8$  乗で解析領域全体で流量が一緒になった。しかし  $-2$  乗でも定常状態近くまでタイムステップを重ねることにより, 流量で 1 割程度の誤差となる。最初のタイムステップの  $-4$  乗から  $-5$  乗のケースを考えるとこの時の濃度分布は  $-4$  乗から  $-5$  乗のものに近いことが期待できる。

そこで今回の計算では計算時間との兼ね合いから, 非定常には  $-5$  乗を, 定常計算には  $-2$  乗を採用することを基本とした。ただしケース 4-2,4-3 は比較対象が無いこと, 模擬坑道周辺の流速が大きいためタイムステップが小さく計算に時間がかかることを考慮し  $-2$  乗とした。

表 4.5 SOR 打ち切り誤差と収束回数

$\epsilon$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$
TimeStep1	51	402	2765	7371	11988	16605	21233
TimeStep10	8	8	10	17	147	618	3823

#### 4.2.5 結果のまとめ

計算結果のまとめとして非定常計算については一定時間間隔の塩水／淡水境界( $C=0.1C_0$ ,  $C=0.5C_0$ ,  $C=0.9C_0$  の等濃度線)のプロット図を, 定常計算については定常時の塩水／淡水境界( $C=0.1C_0$ ,  $C=0.5C_0$ ,  $C=0.9C_0$  の等濃度線), 2次元 xy 領域における流速ベクトル, 塩分濃度垂直分布のプロット図を掲げた.

##### ケース 4-1: 実験との比較

試験との比較解析を行うため, 2次元 xy 領域における塩水／淡水境界( $C=0.1C_0$ ,  $C=0.5C_0$ ,  $C=0.9C_0$  の等濃度線)を 1 時間後から 5 時間後まで 30 分間隔で図 4.2 から図 4.10 に示し, 同時刻の試験結果を図 4.11 から 図 4.19 に示す.

最初の 1 時間の挙動が著しく異なるが, これは, 焼結金属板をモデル化していないため初期の急圧力勾配にしたがって塩水が速やかに流入したためであると考えられる.

##### ケース 4-2: 模擬坑道(圧力指定)

模擬坑道設定後 1500 秒後から 5000 秒後まで 500 秒ごとの 2次元 xy 領域における塩水／淡水境界( $C=0.1C_0$ ,  $C=0.9C_0$  の等濃度線)を図 4.20 から図 4.27 に, 5000 秒後の 2次元 xy 領域における流速ベクトルを図 4.28 に示す.

##### ケース 4-3: 注入口(流量指定)

模擬坑道設定後 1500 秒後から 5000 秒後まで 500 秒ごとの 2次元 xy 領域における塩水／淡水境界( $C=0.1C_0$ ,  $C=0.9C_0$  の等濃度線)を図 4.29 から図 4.36 に, 5000 秒後の 2次元 xy 領域における流速ベクトルを図 4.37 に示す.

##### ケース 4-4: 定常計算

2次元 xy 領域における塩水／淡水境界( $C=0.1C_0$ ,  $C=0.9C_0$  の等濃度線)を図 4.38 に 2次元 xy 領域における流速ベクトルを図 4.39 に, 鉛直塩分濃度分布を図 4.40 に示す.

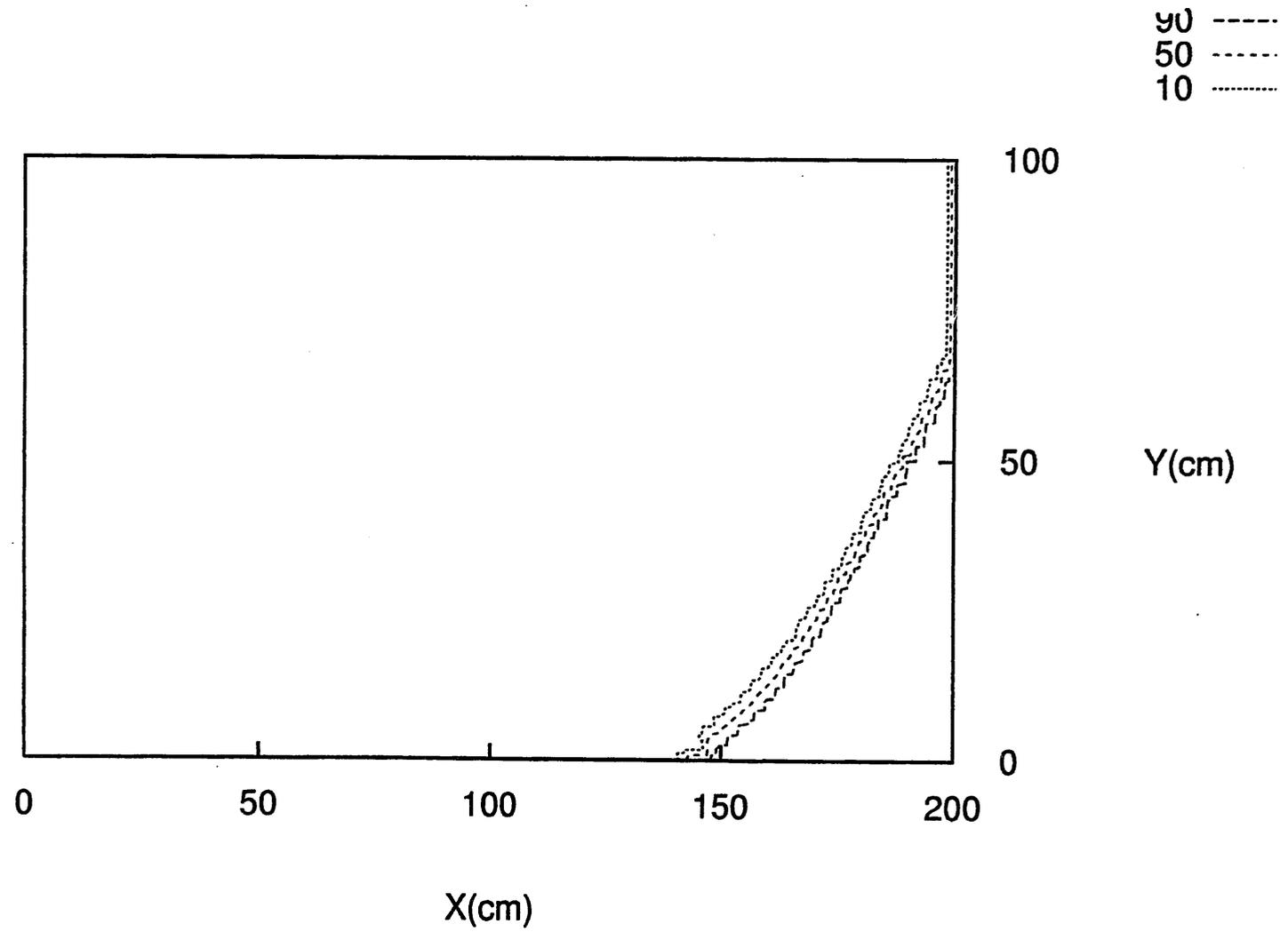


図 4.2 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 1 時間後

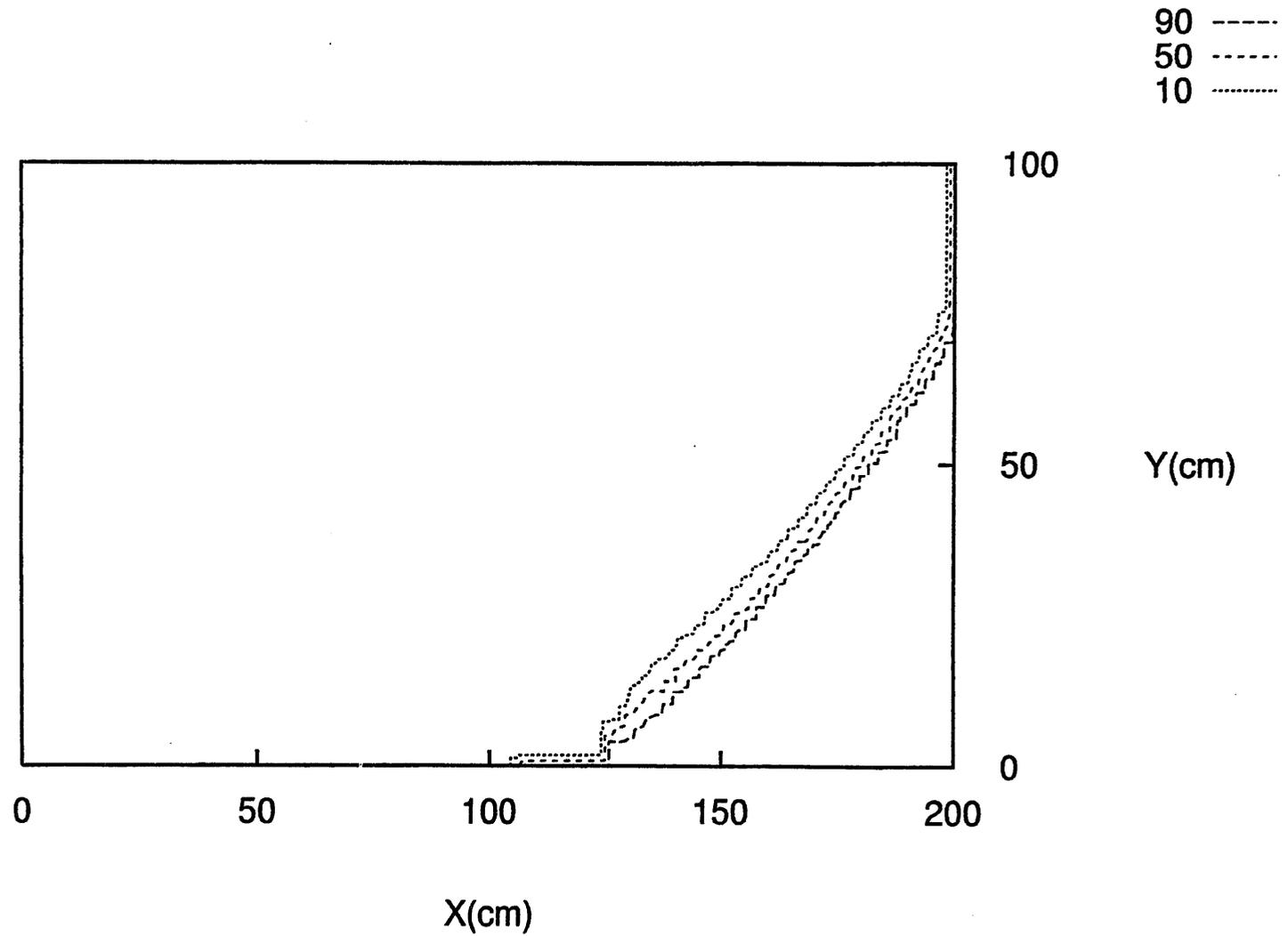


図 4.3 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 1 時間 30 分後

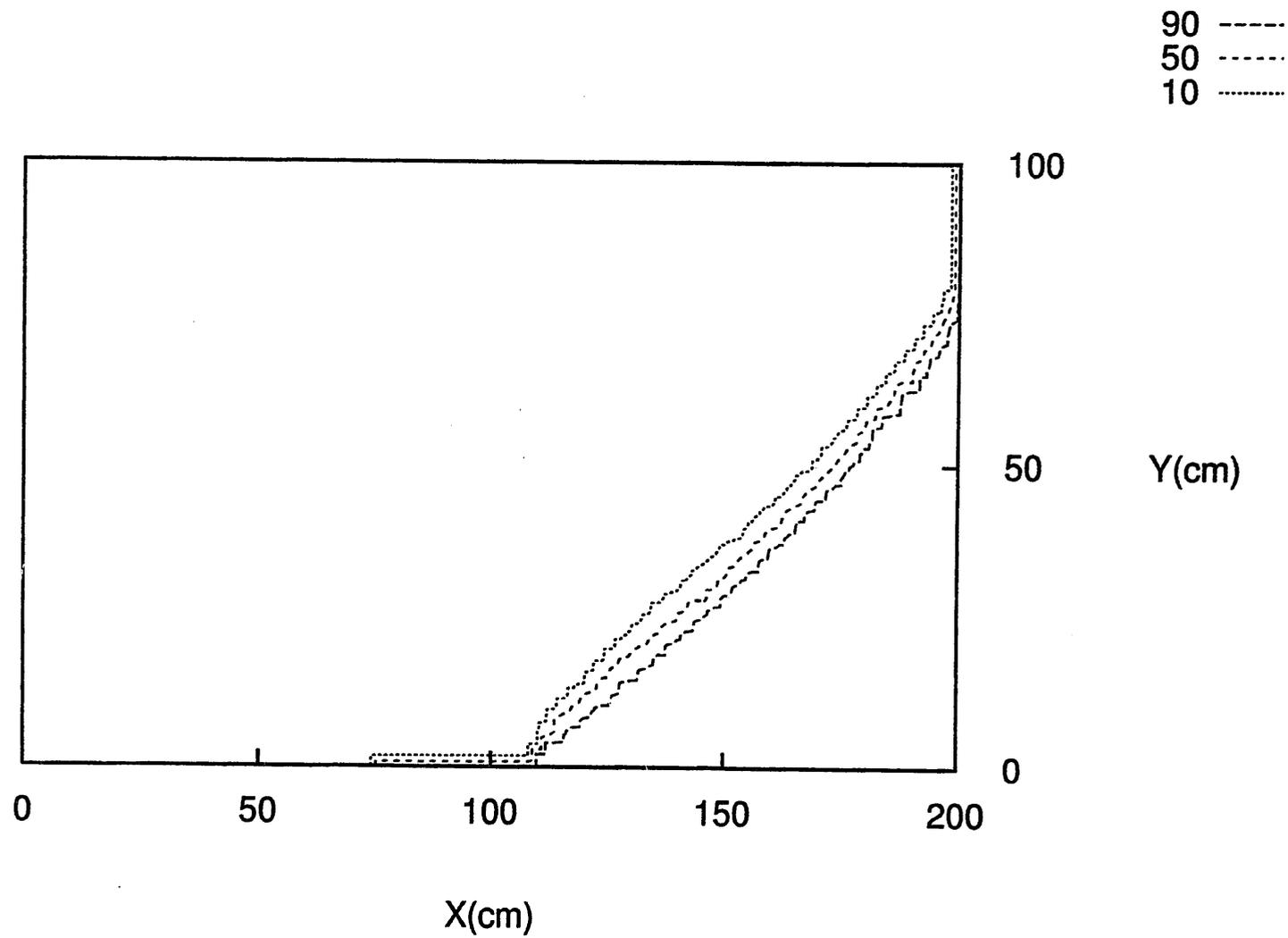


図 4.4 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 2 時間後

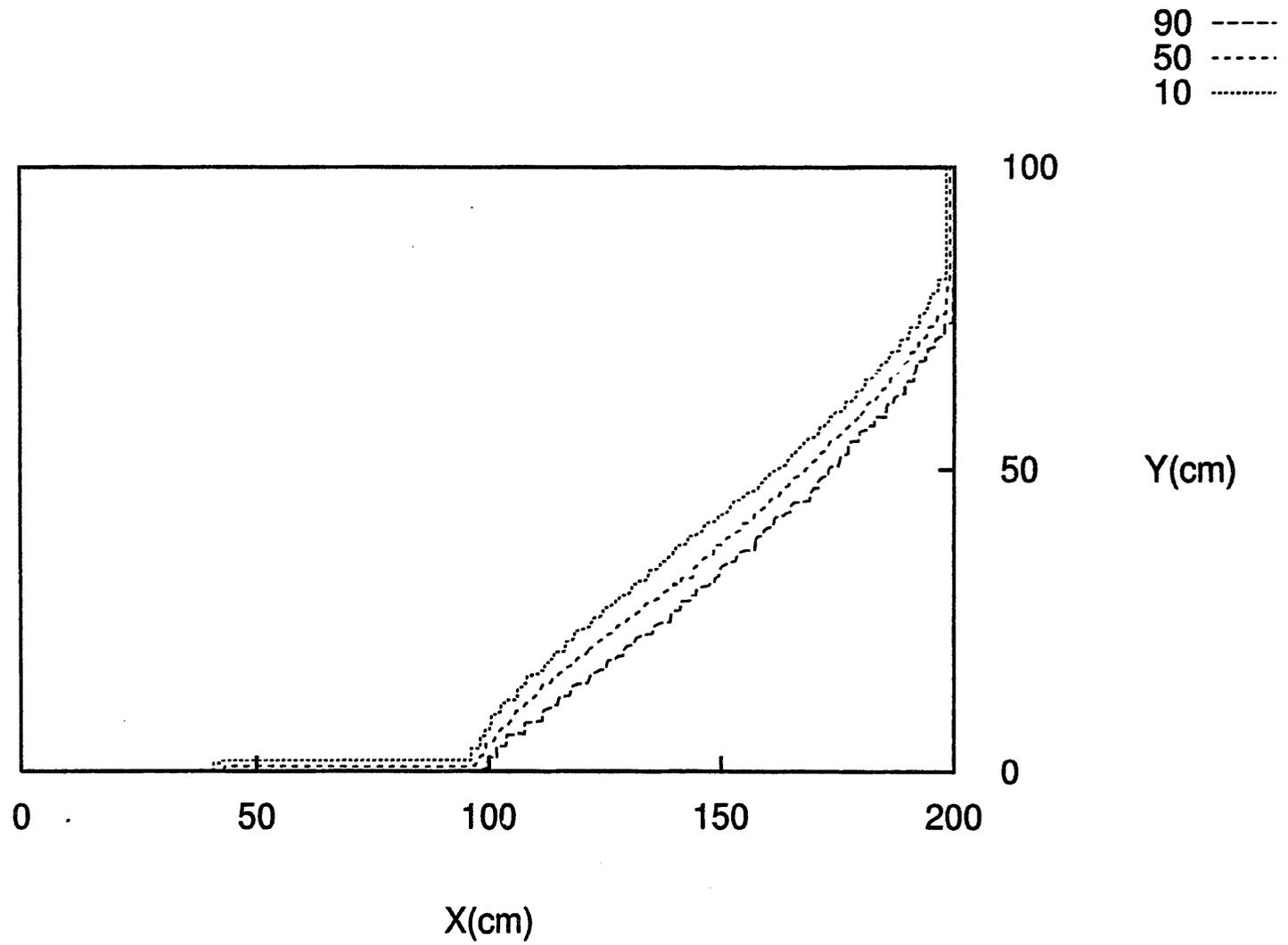


図 4.5 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 2 時間 30 分後

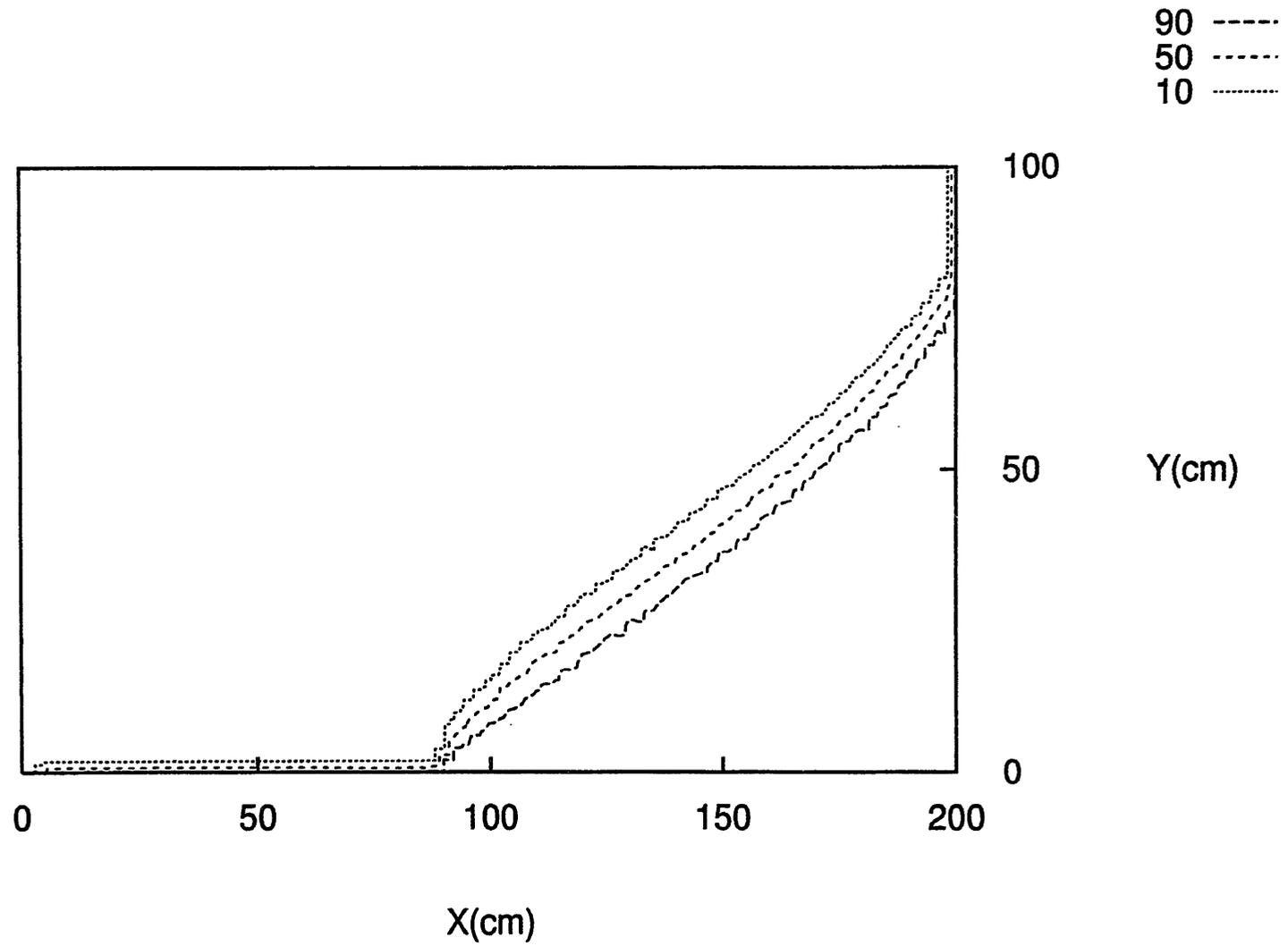


図 4.6 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 3 時間後

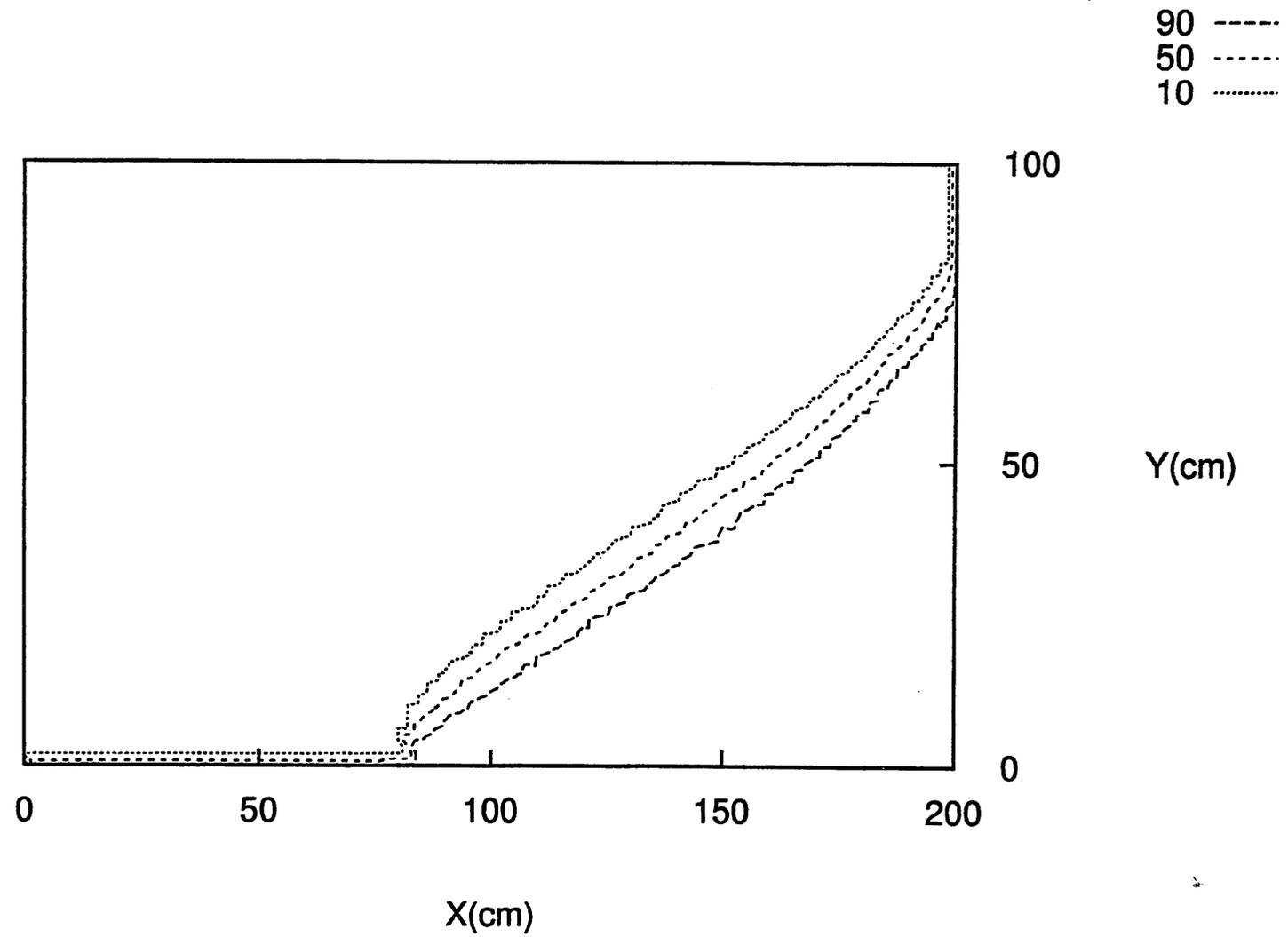


図 4.7 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 3 時間 30 分後

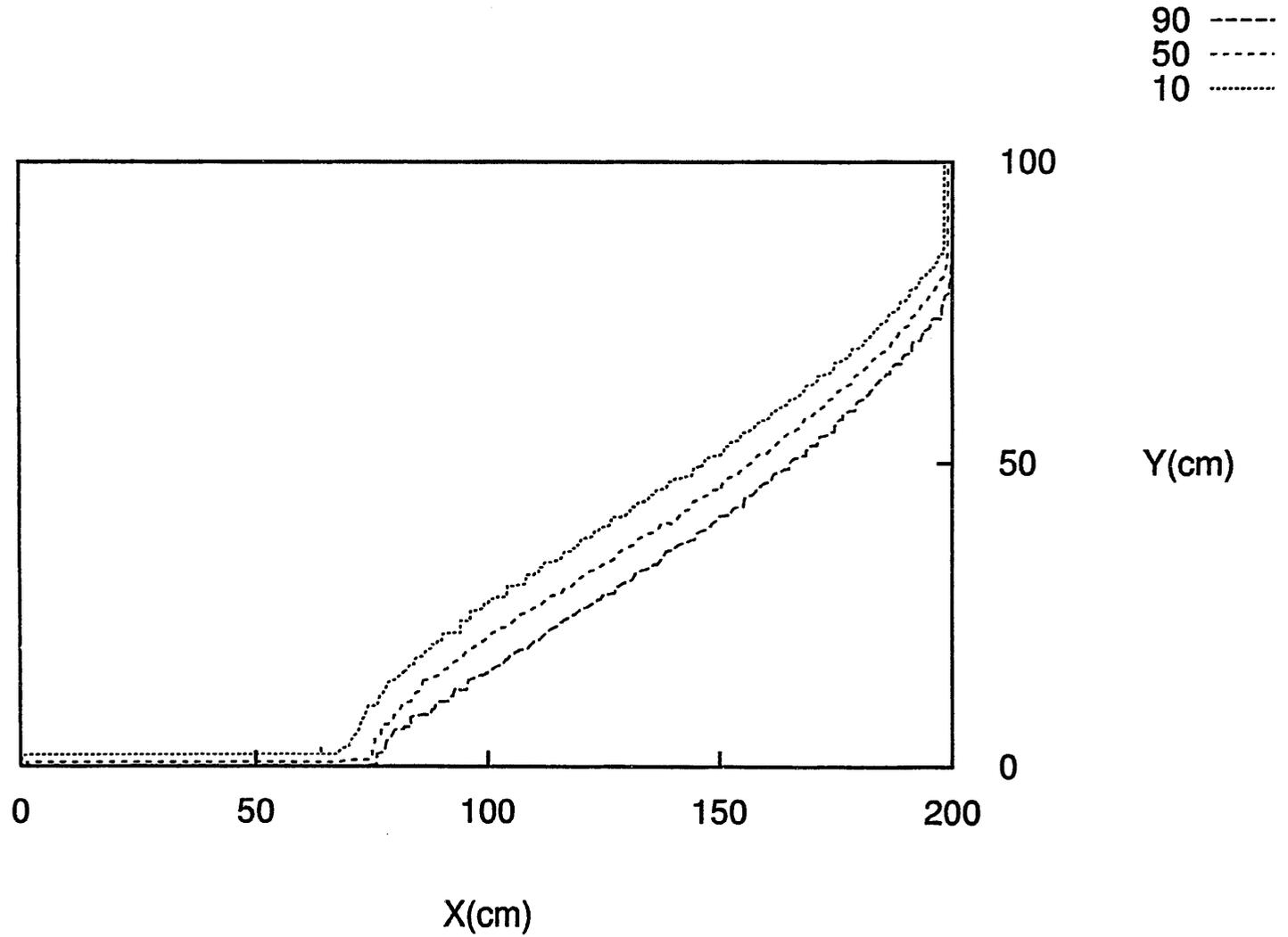


図 4.8 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 4 時間後

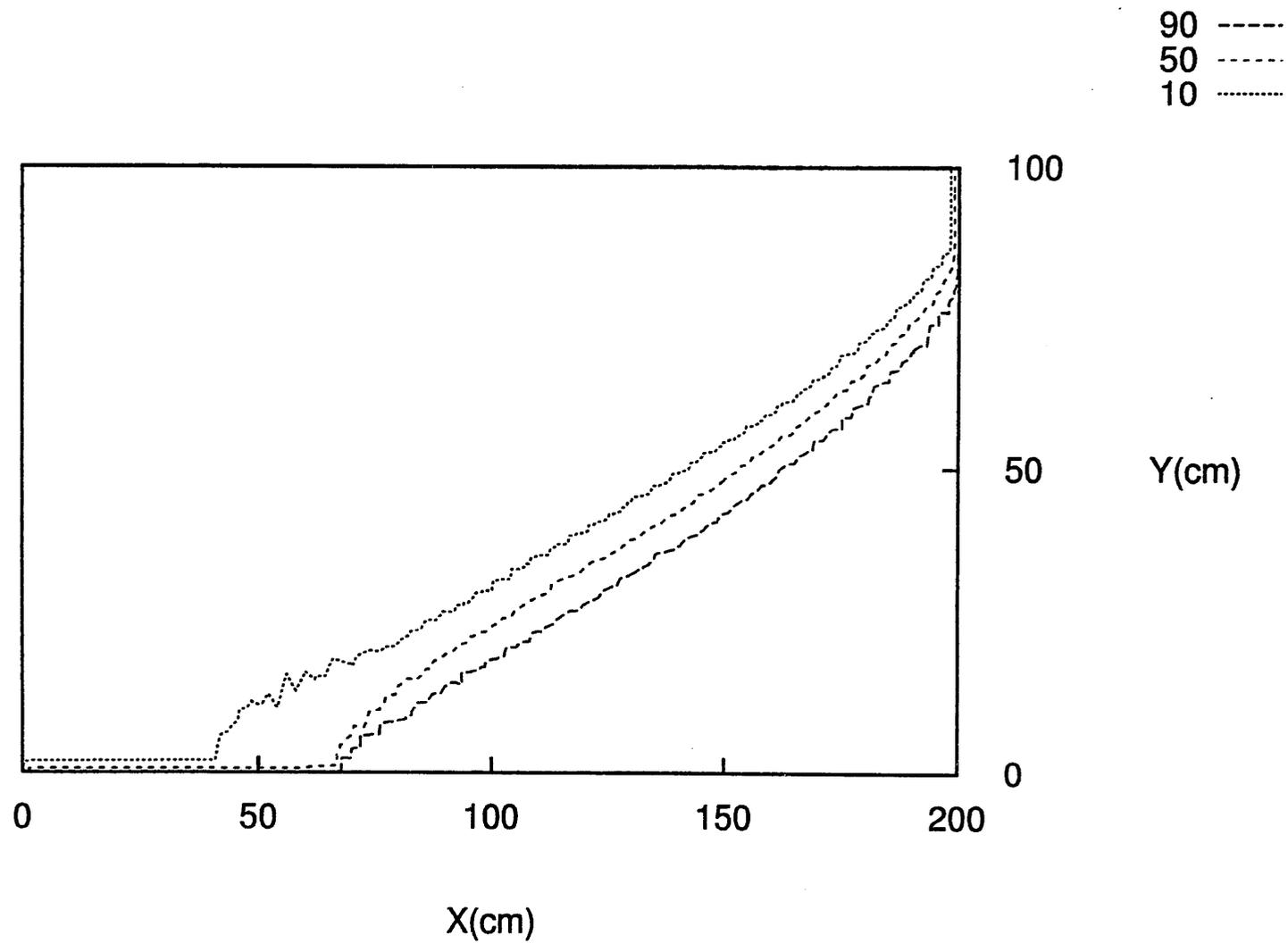


図 4.9 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 4 時間 30 分後

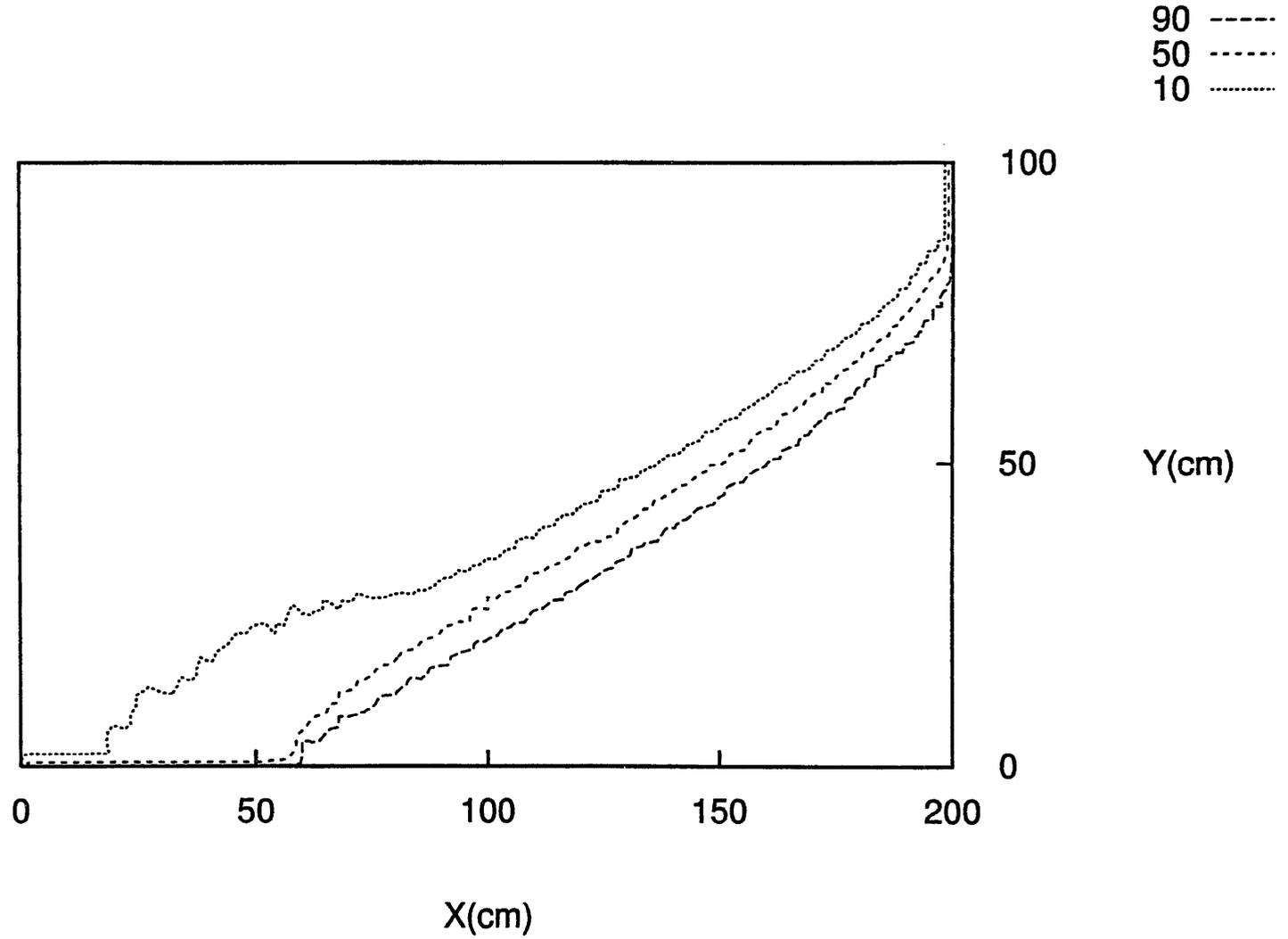


図 4.10 ケース 1 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 5 時間後



图 4.11 实验写真 1 時間後



図 4.12 実験写真 1 時間 30 分後

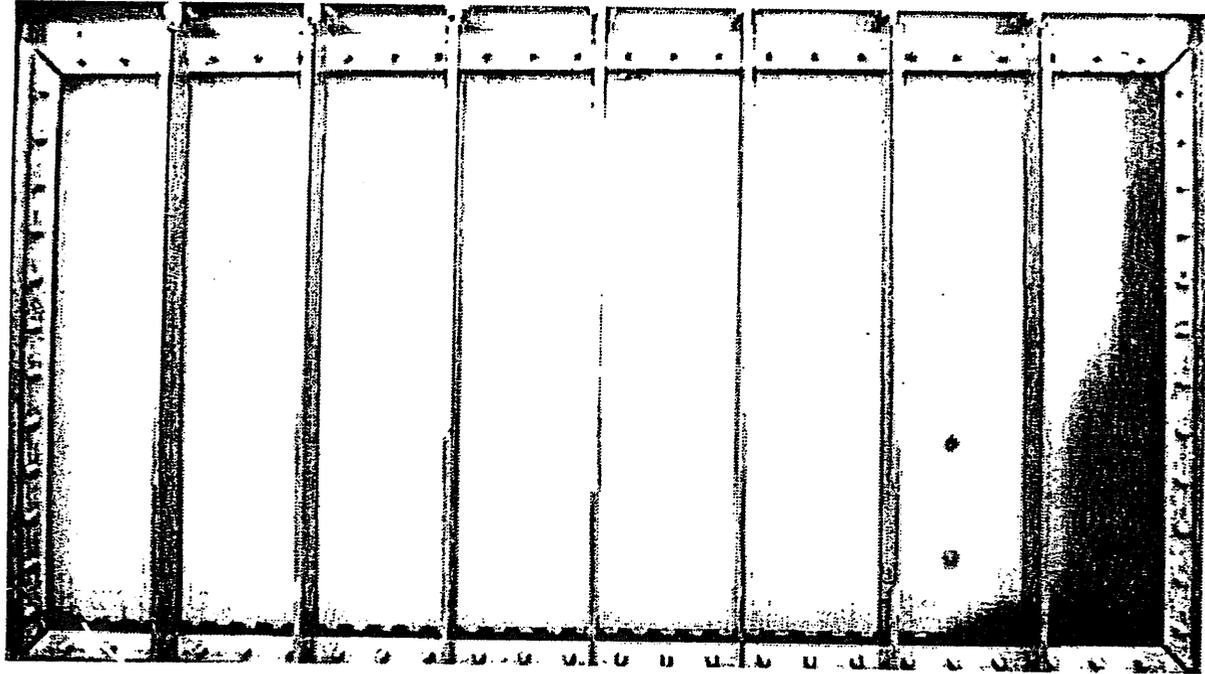


図 4.13 実験写真 2 時間後



図 4.14 実験写真 2 時間 30 分後

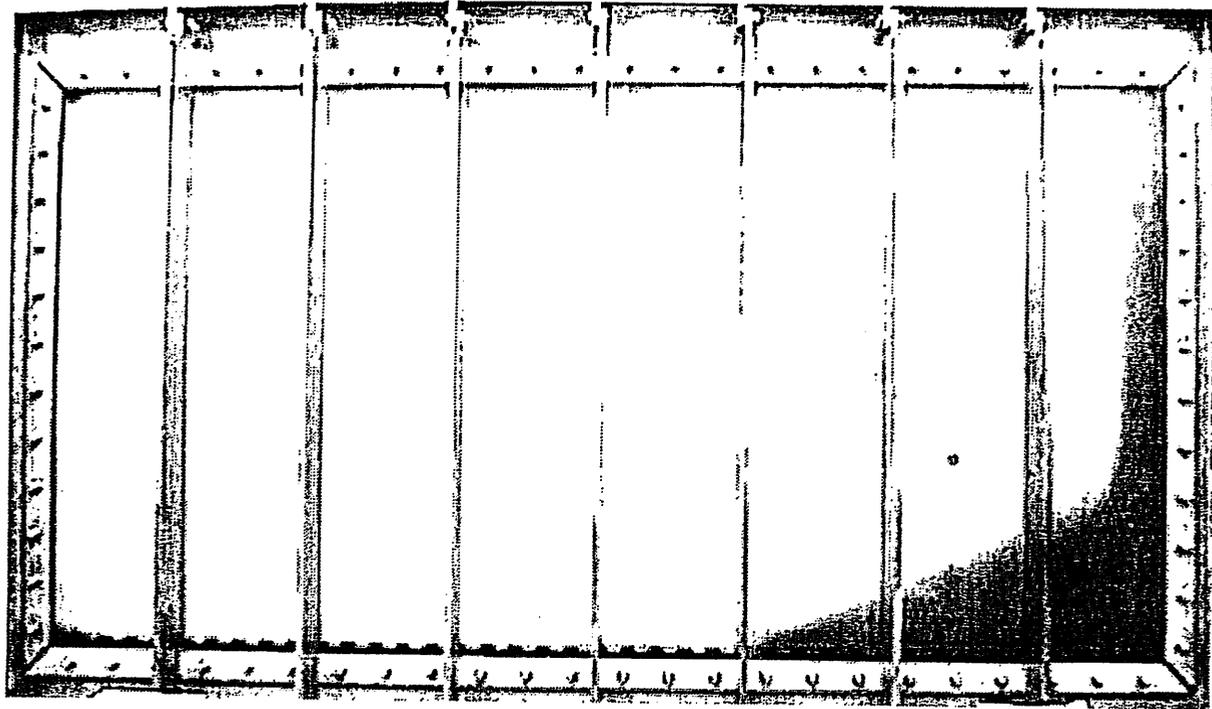


図 4.15 実験写真 3 時間後

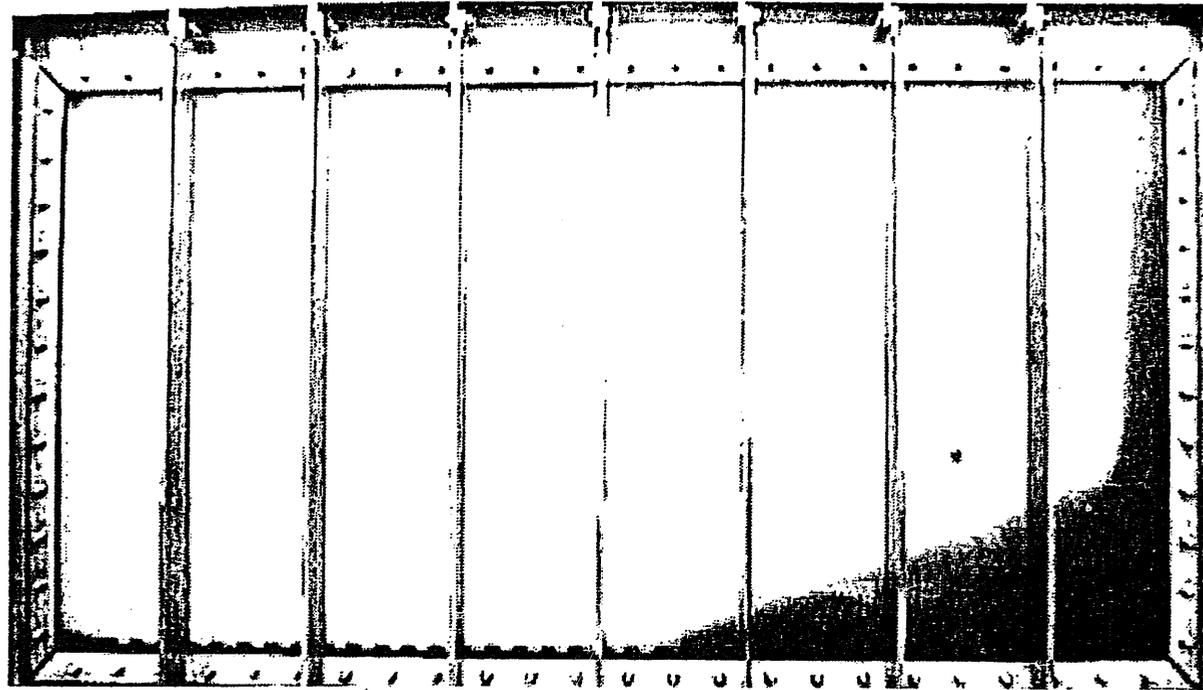


図 4.16 実験写真 3 時間 30 分後

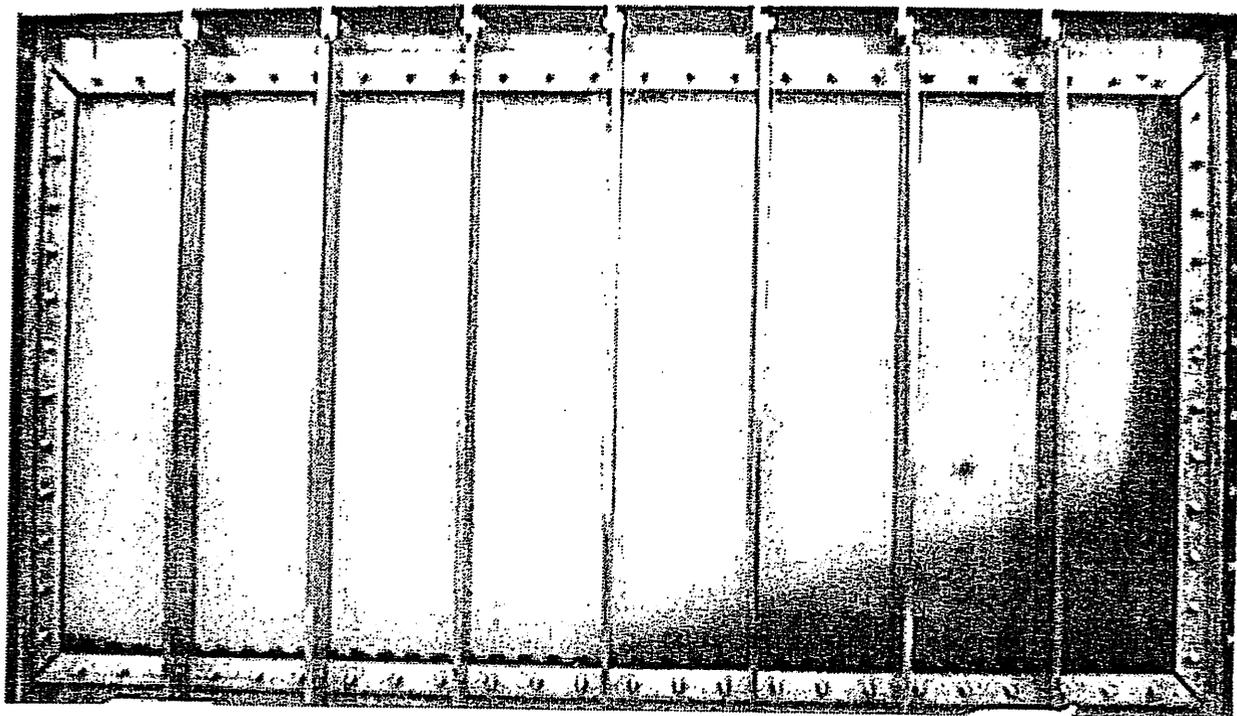


図 4.17 実験写真 4 時間後



図 4.18 実験写真 4 時間 30 分後



図 4.19 実験写真 5 時間後

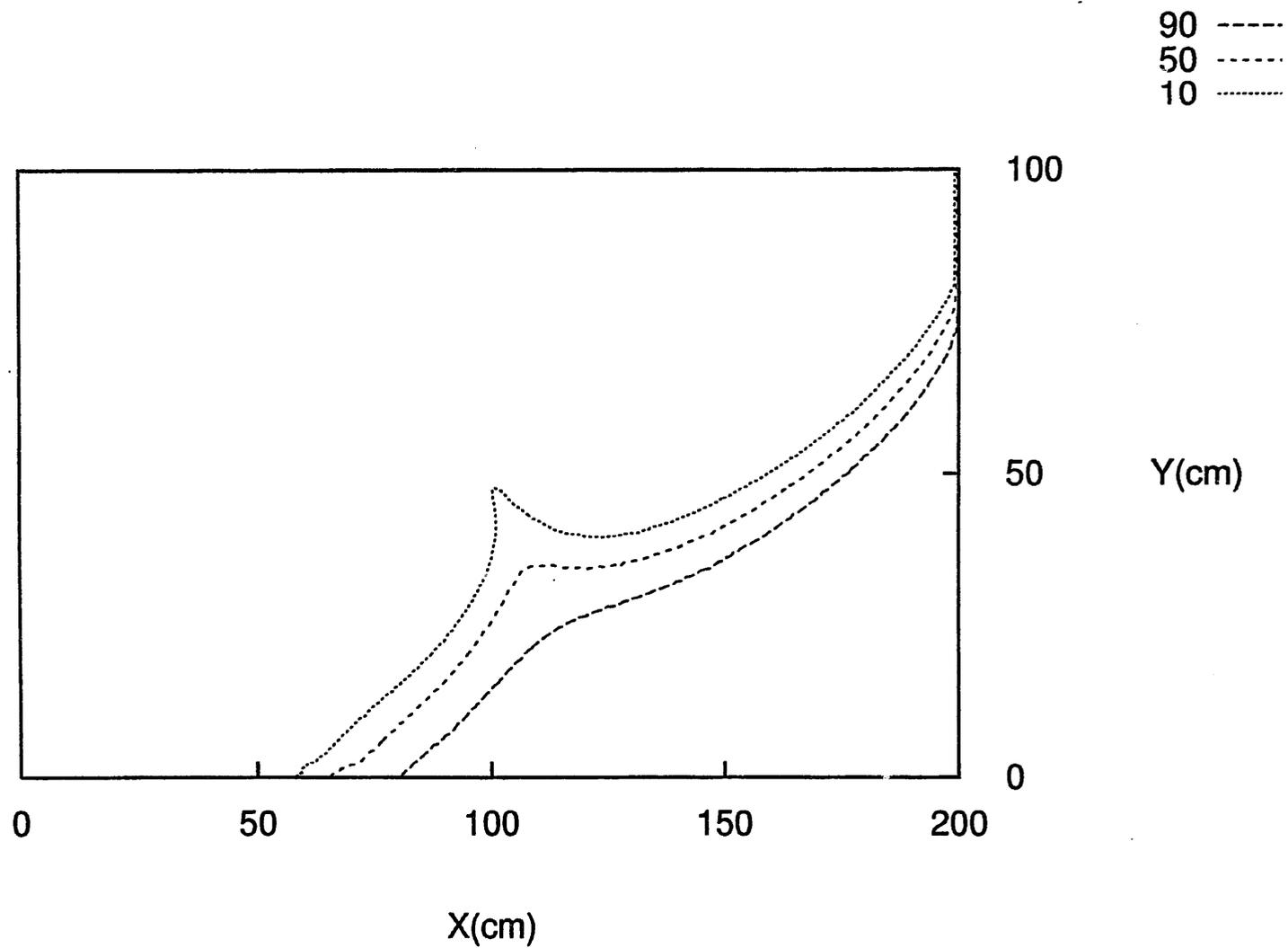


図 4.20 ケース 2 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 1500 秒後

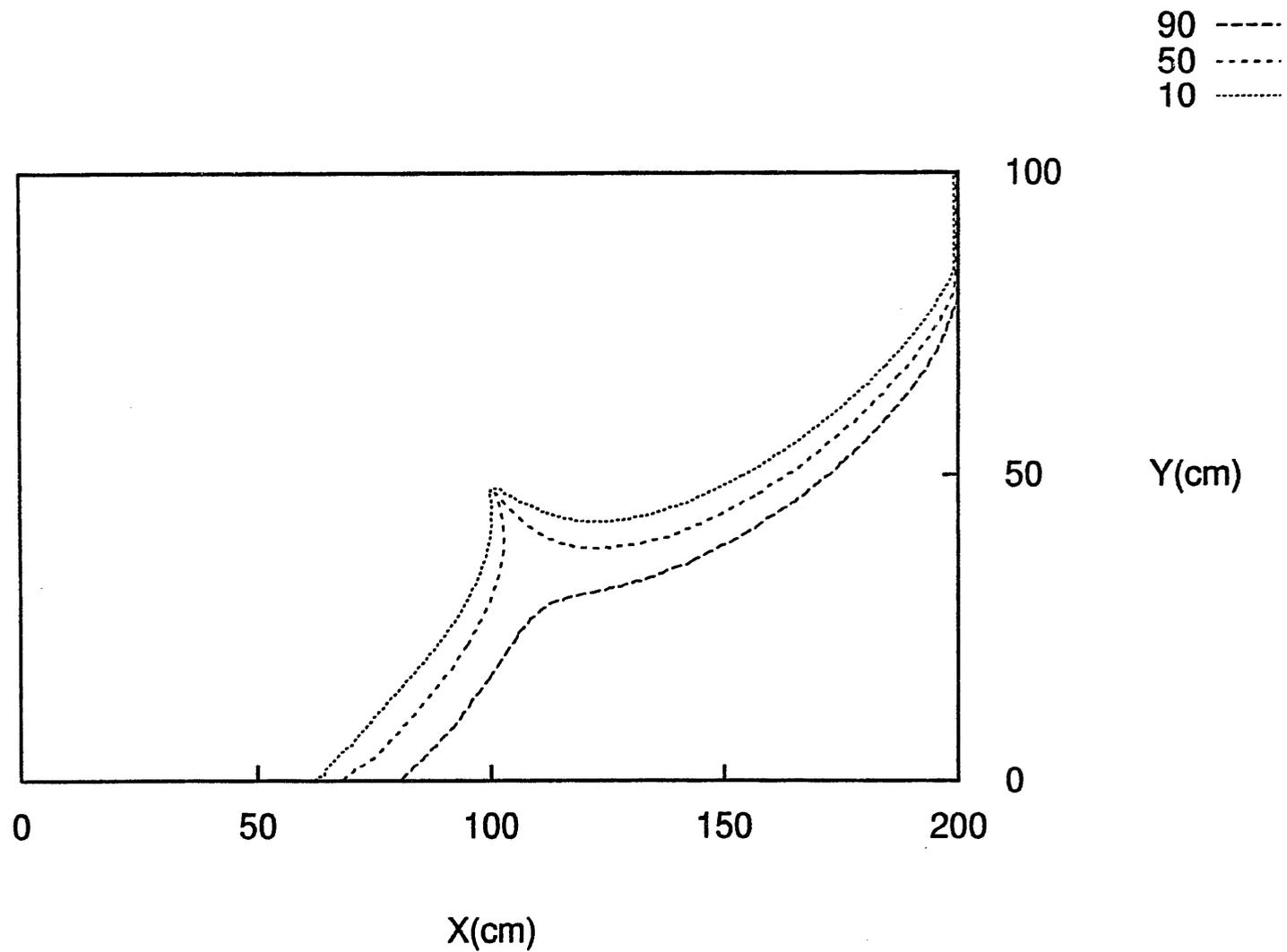


図 4.21 ケース 2 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 2000 秒後

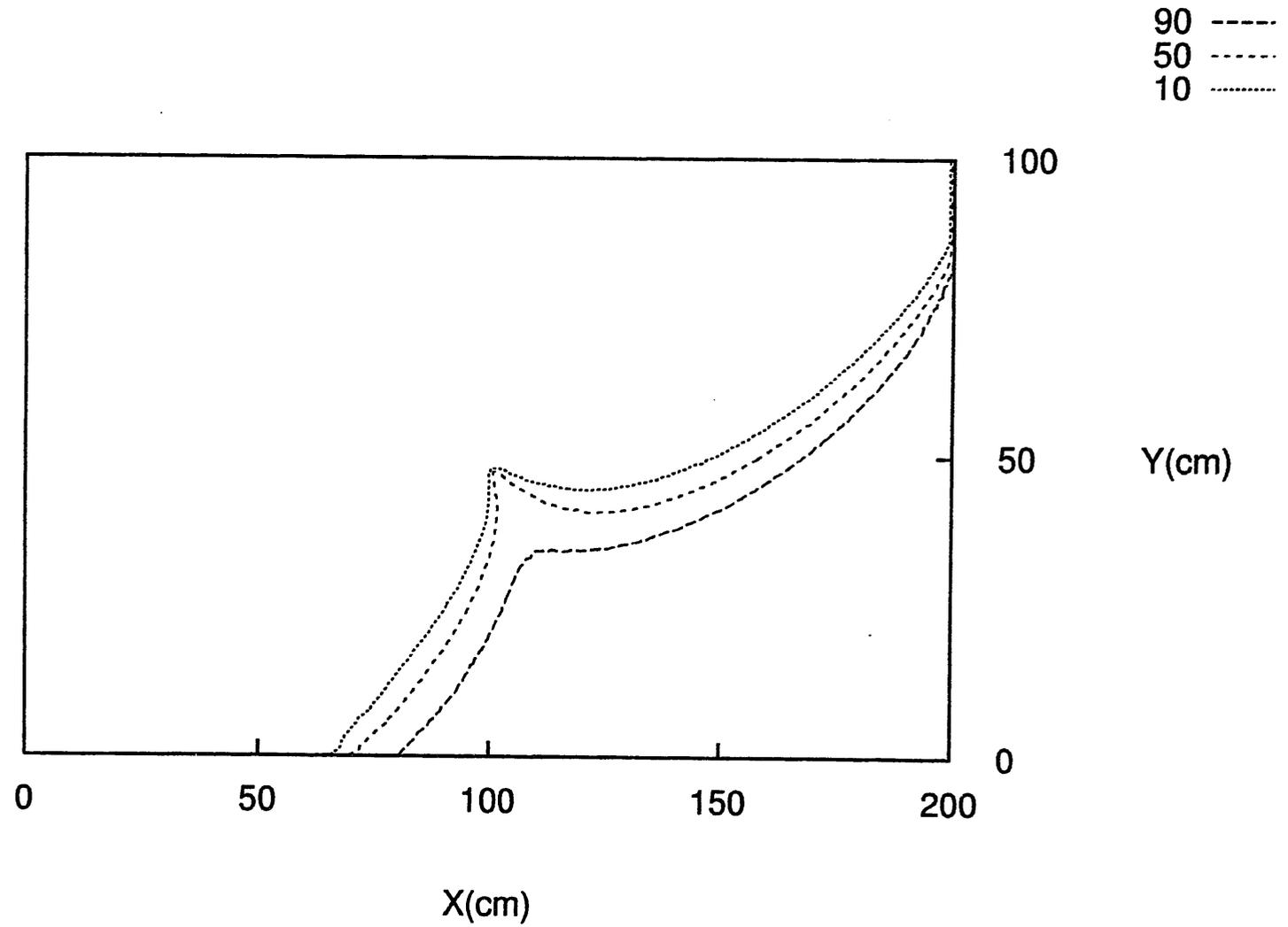


図 4.22 ケース 2 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 2500 秒後

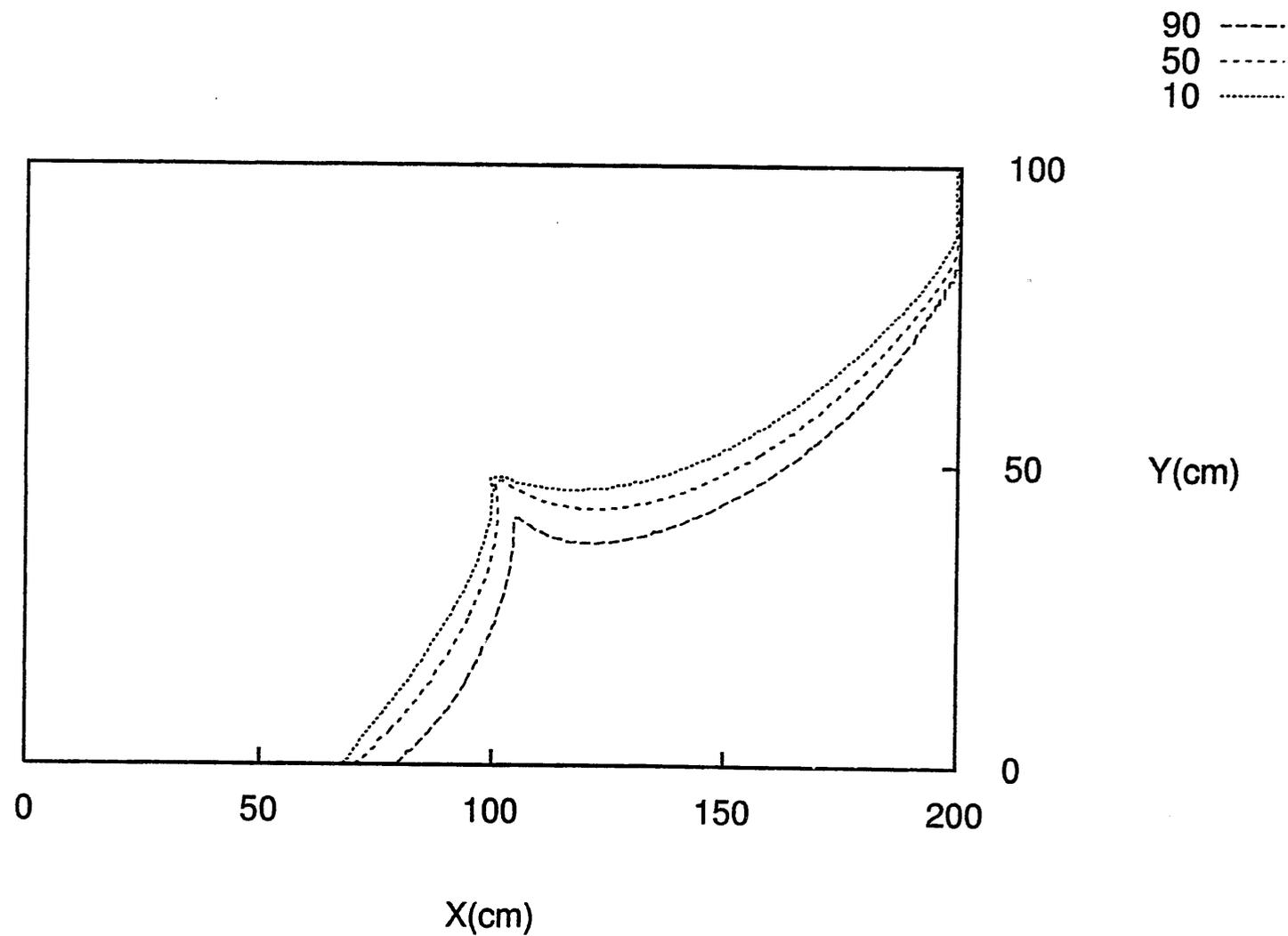


図 4.23 ケース 2 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 3000 秒後

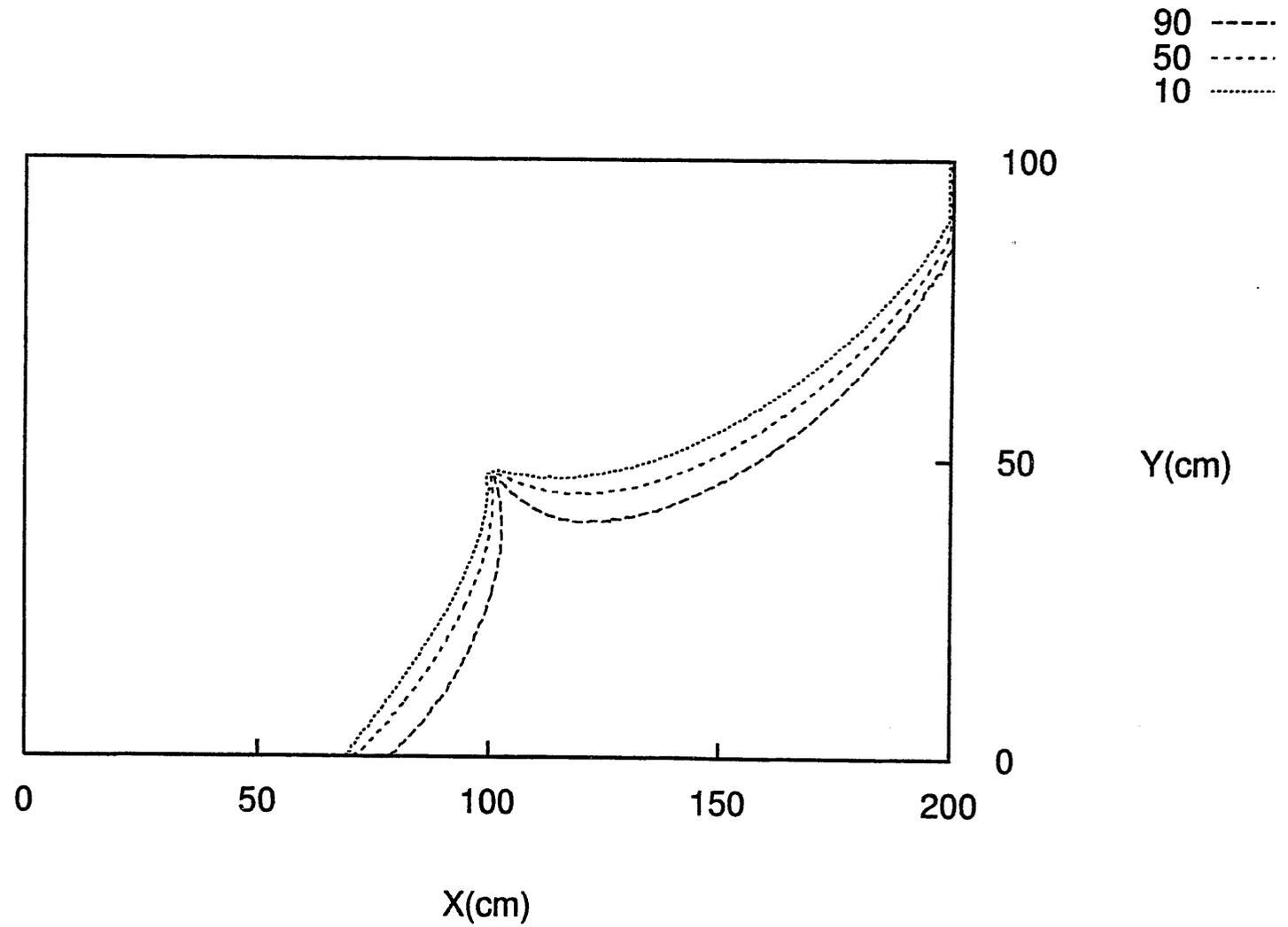


図 4.24 ケース 2 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 3500 秒後

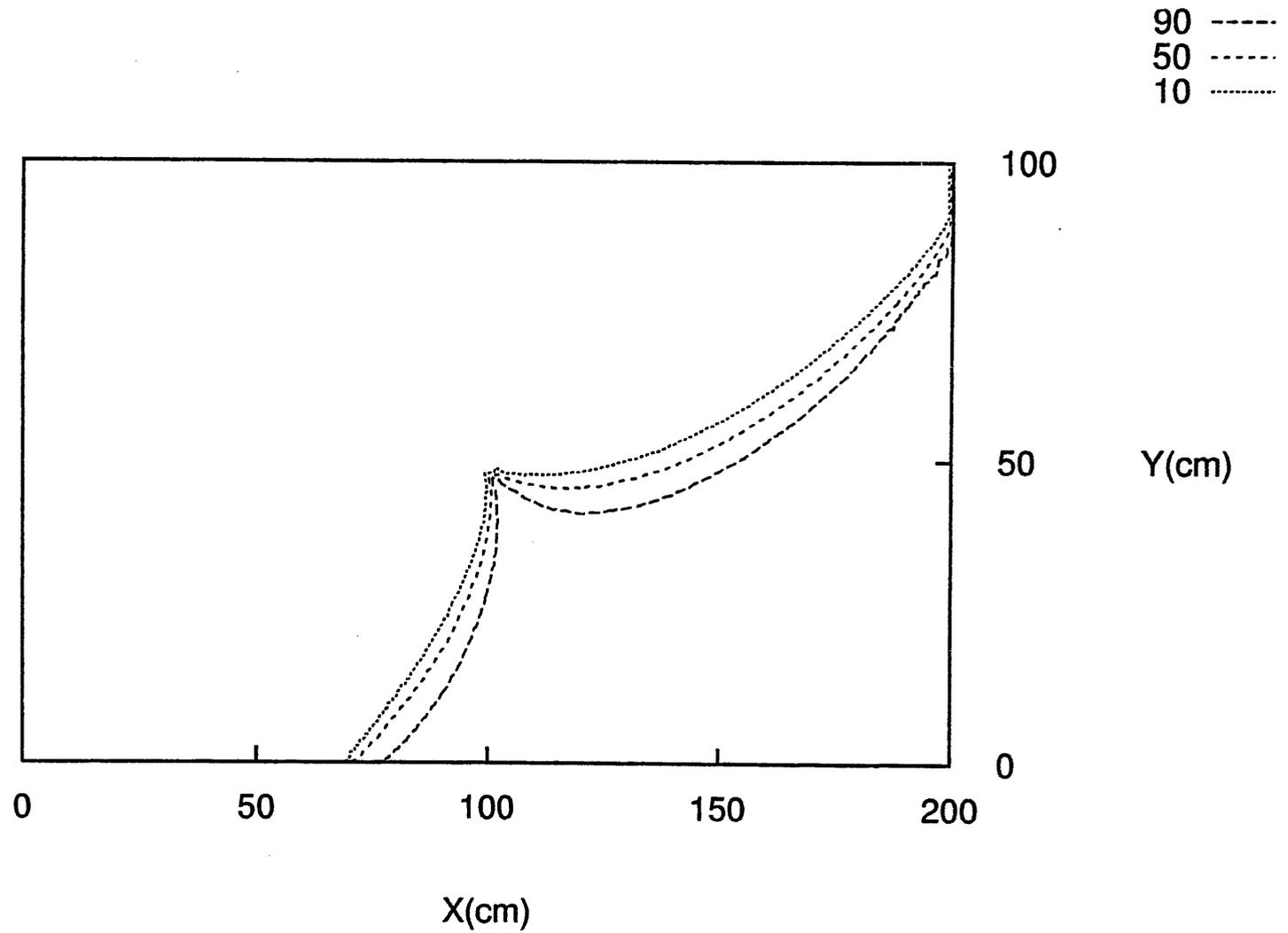


図 4.25 ケース 2 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 4000 秒後

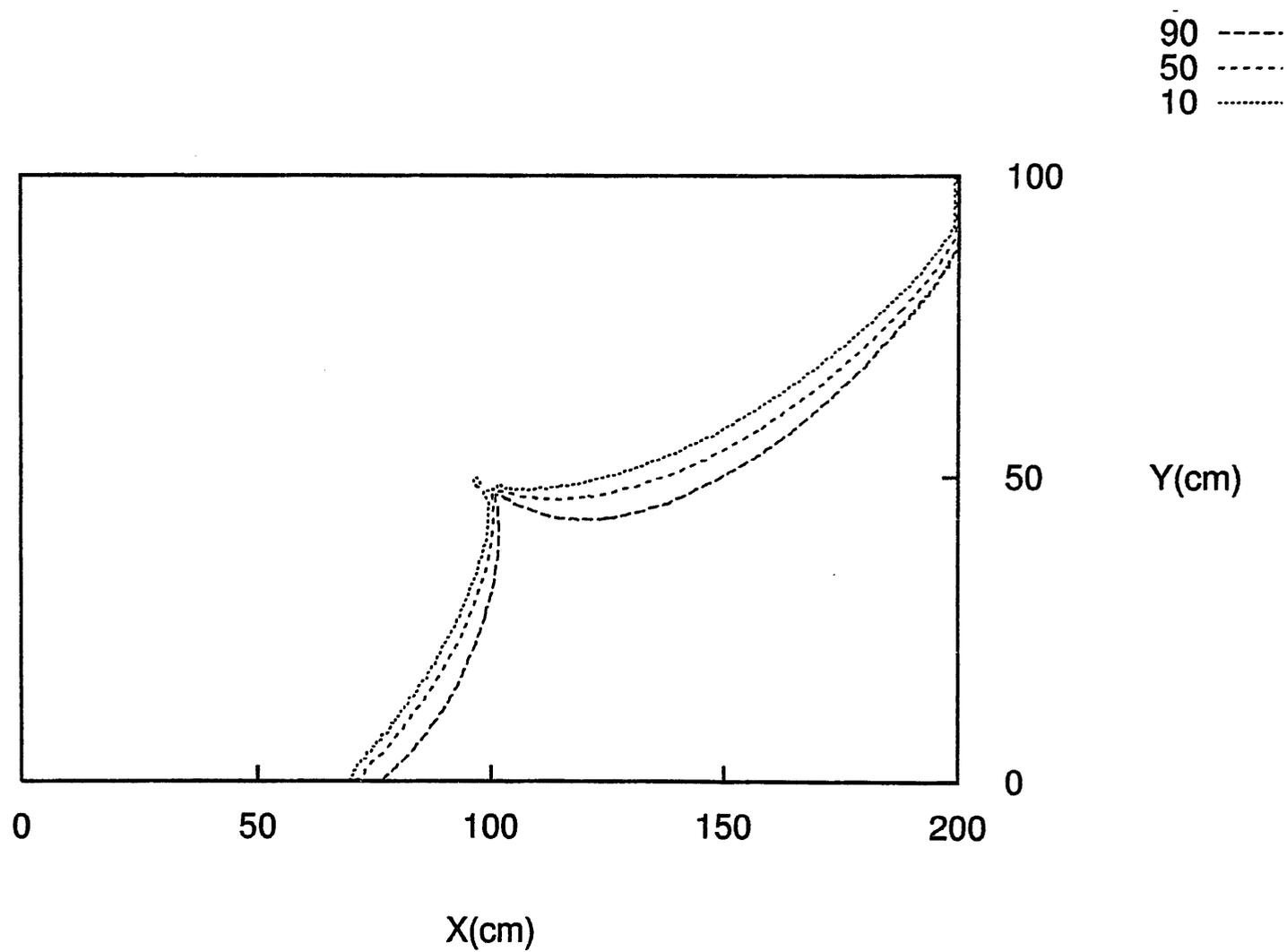


図 4.26 ケース 2 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 4500 秒後

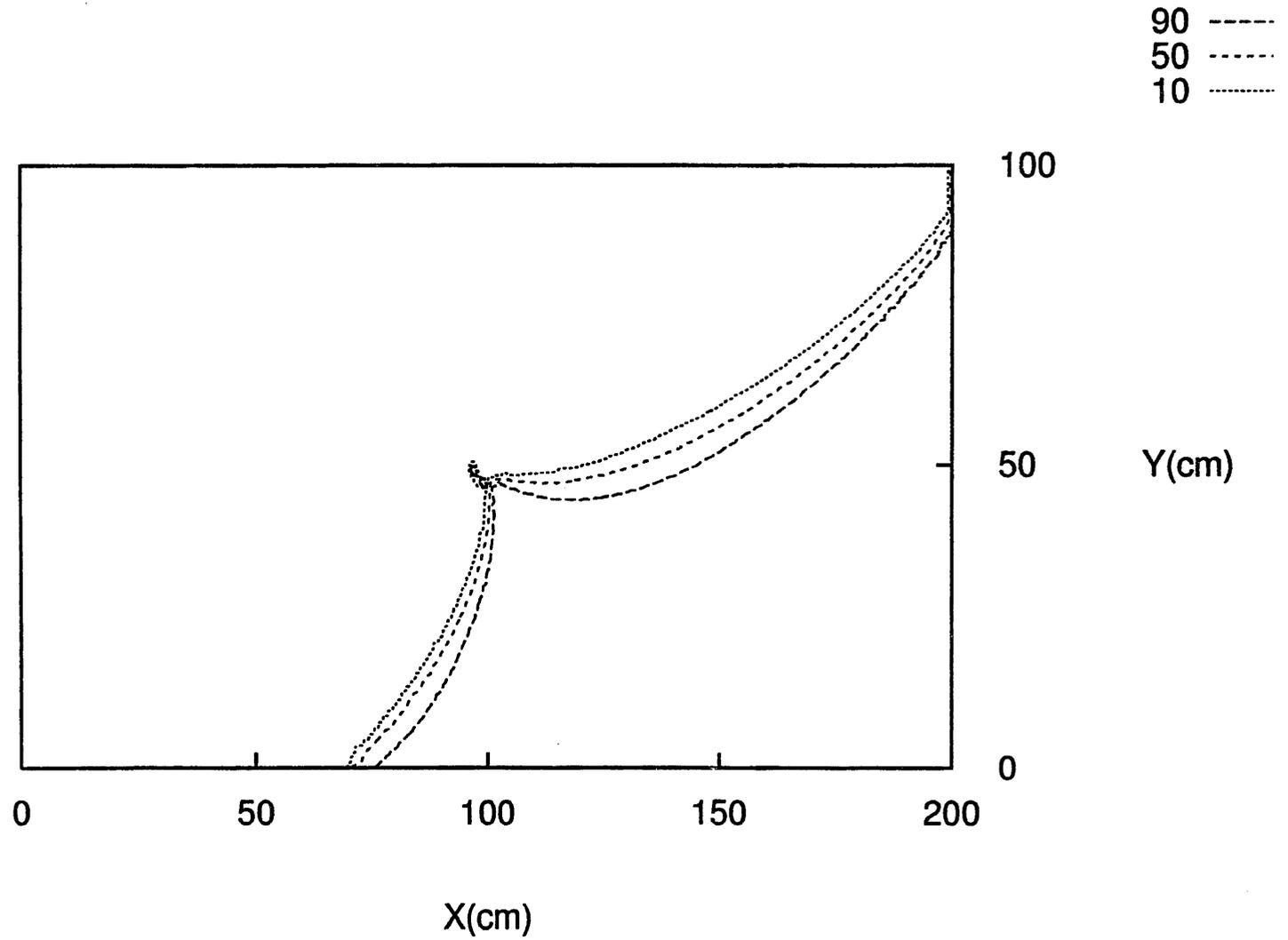


図 4.27 ケース 2 : 塩水 / 淡水境界 ( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 5000 秒後

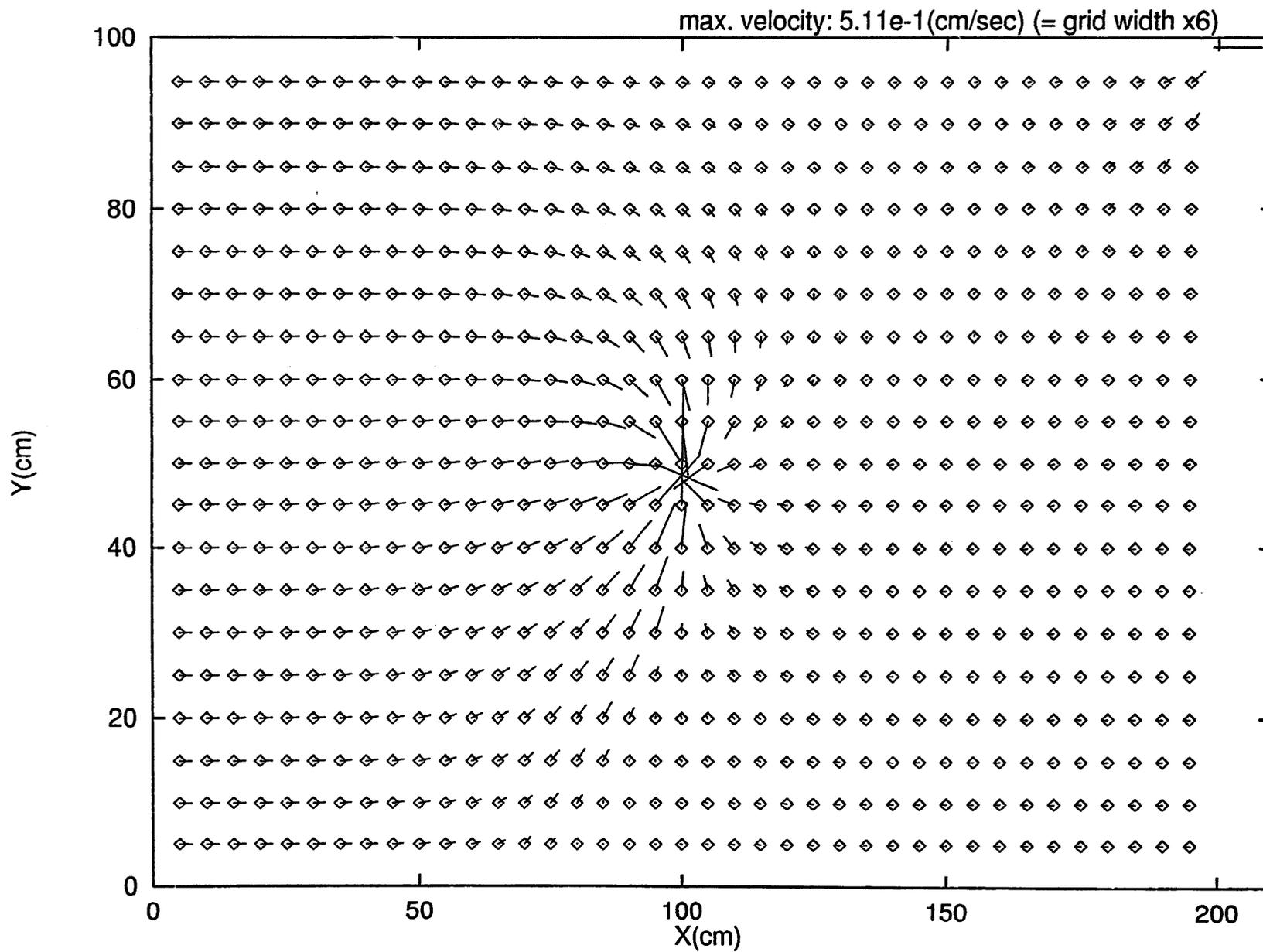


図 4.28 ケース 2 : 2次元 xy 領域における流速ベクトル

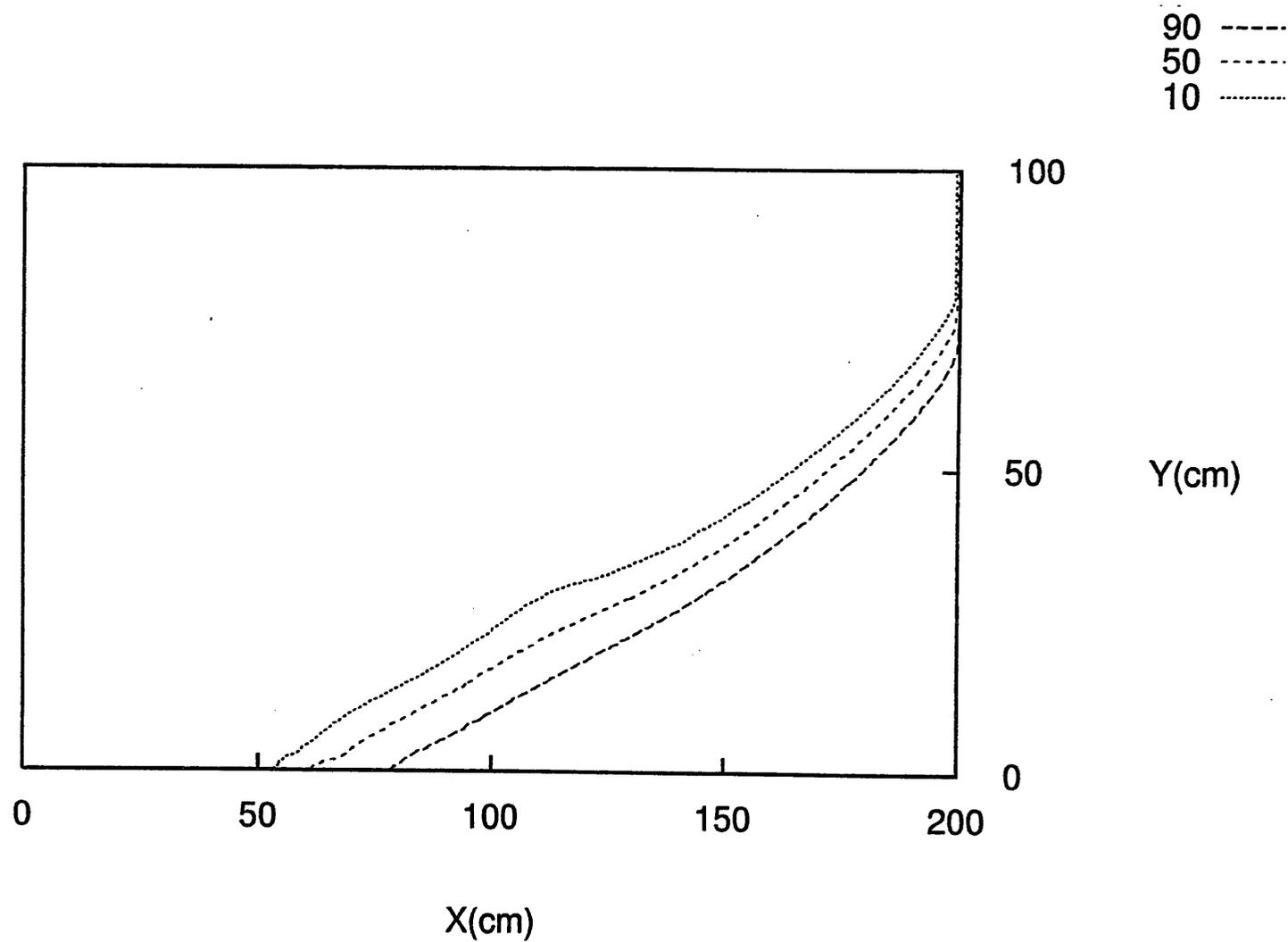


図 4.29 ケース 3 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 1500 秒後

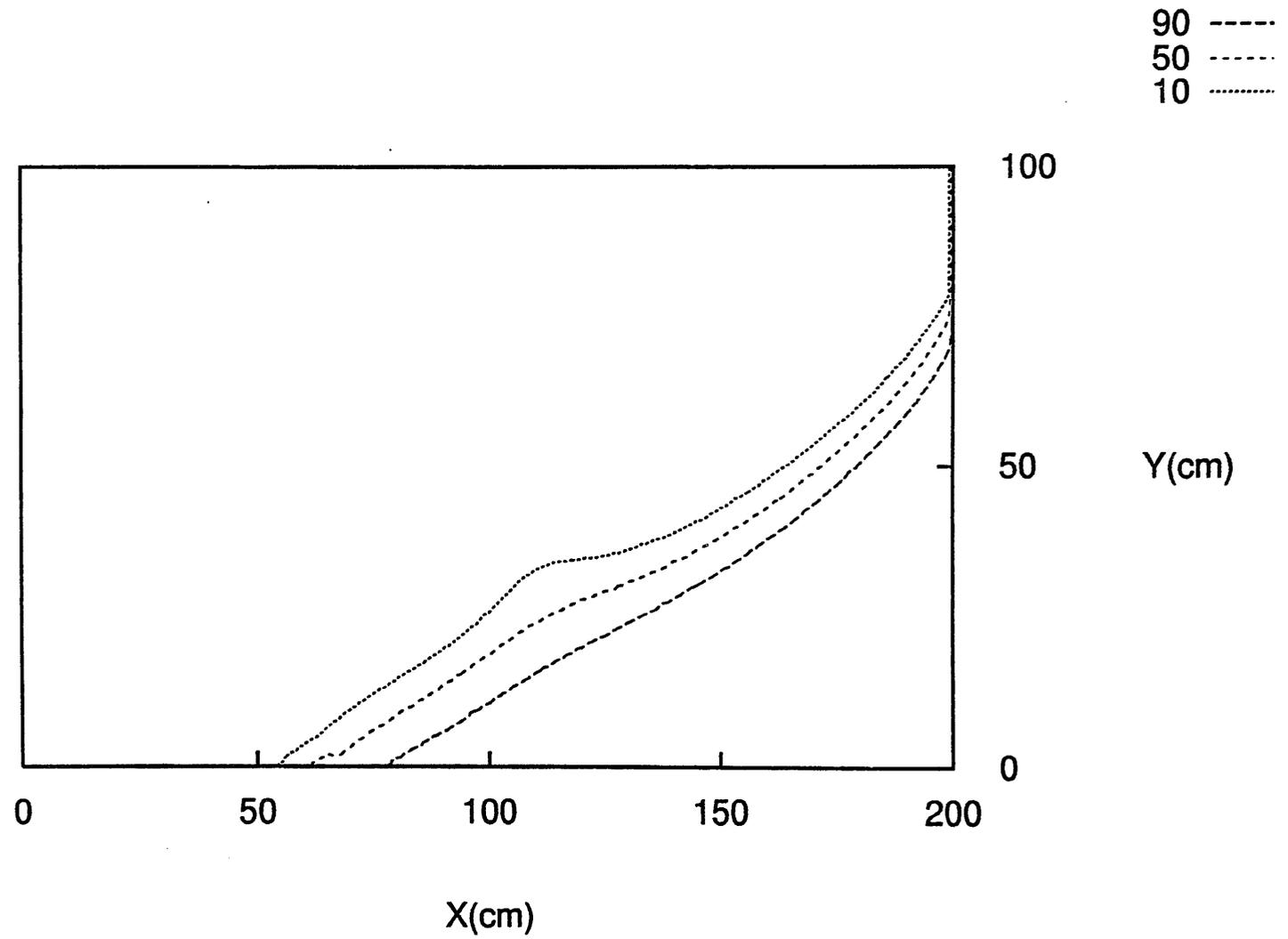


図 4.30 ケース 3 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 2000 秒後

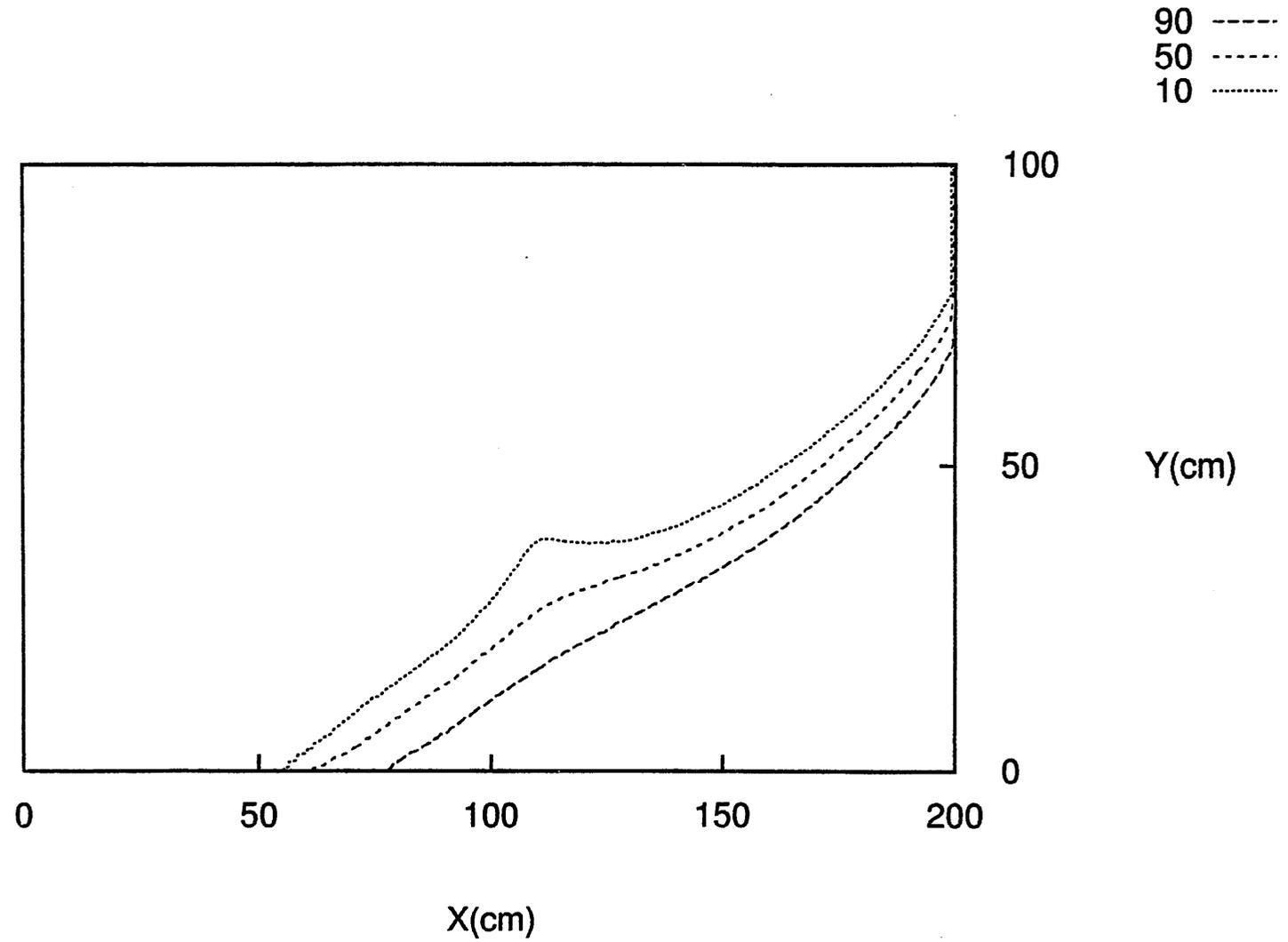


図 4.31 ケース 3 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 2500 秒後

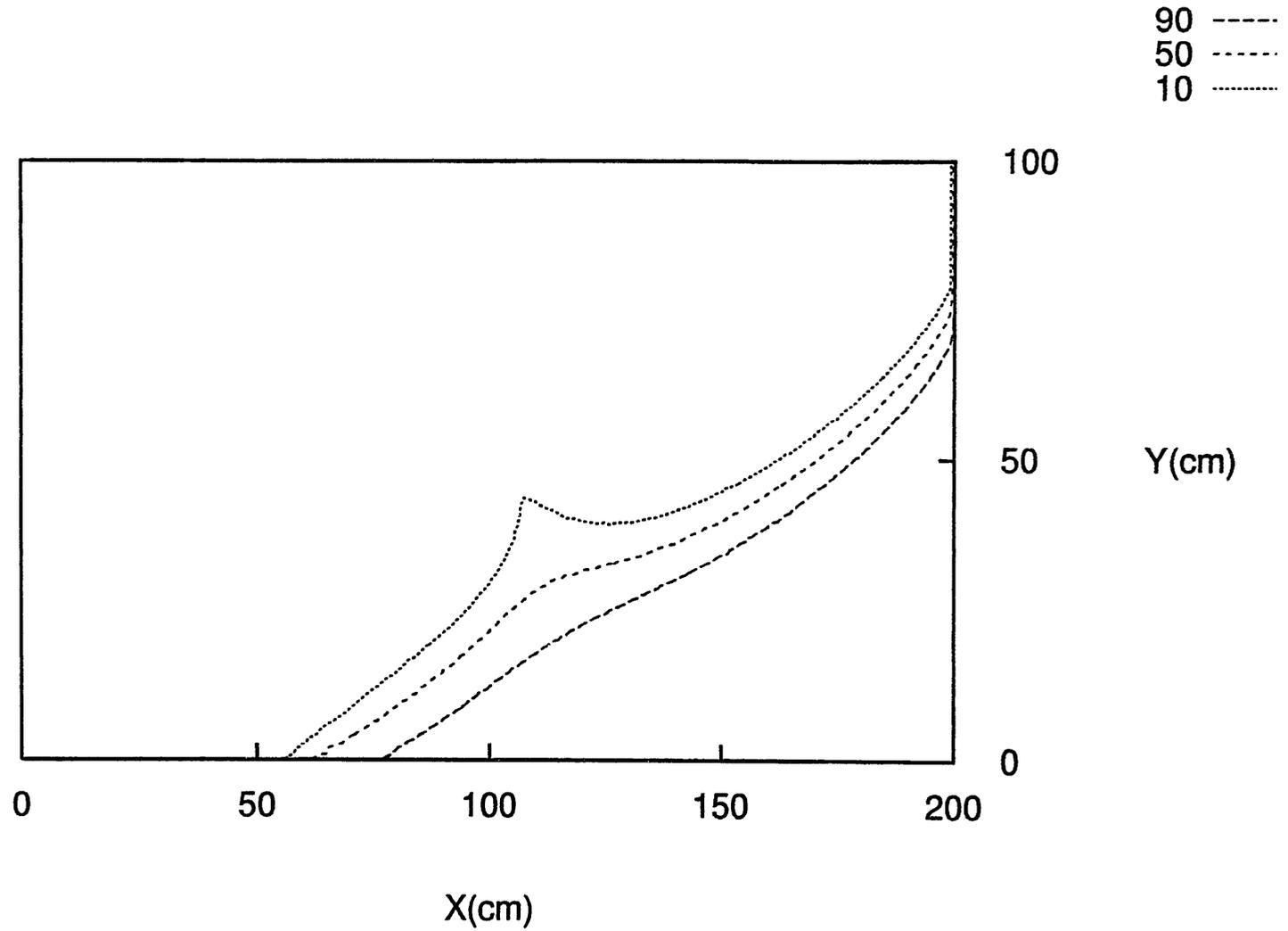


図 4.32 ケース 3 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線) 3000 秒後

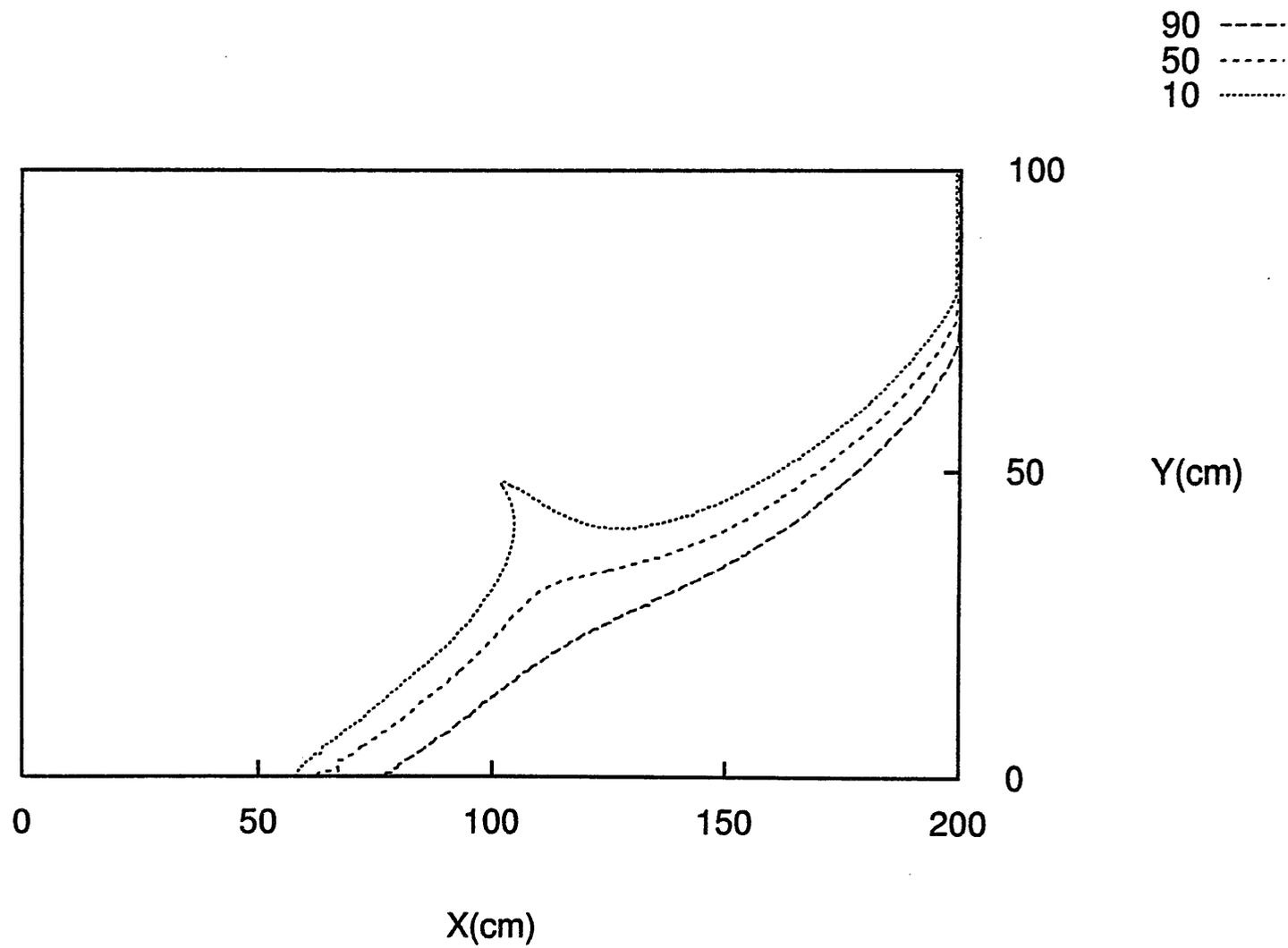


図 4.33 ケース 3 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 3500 秒後

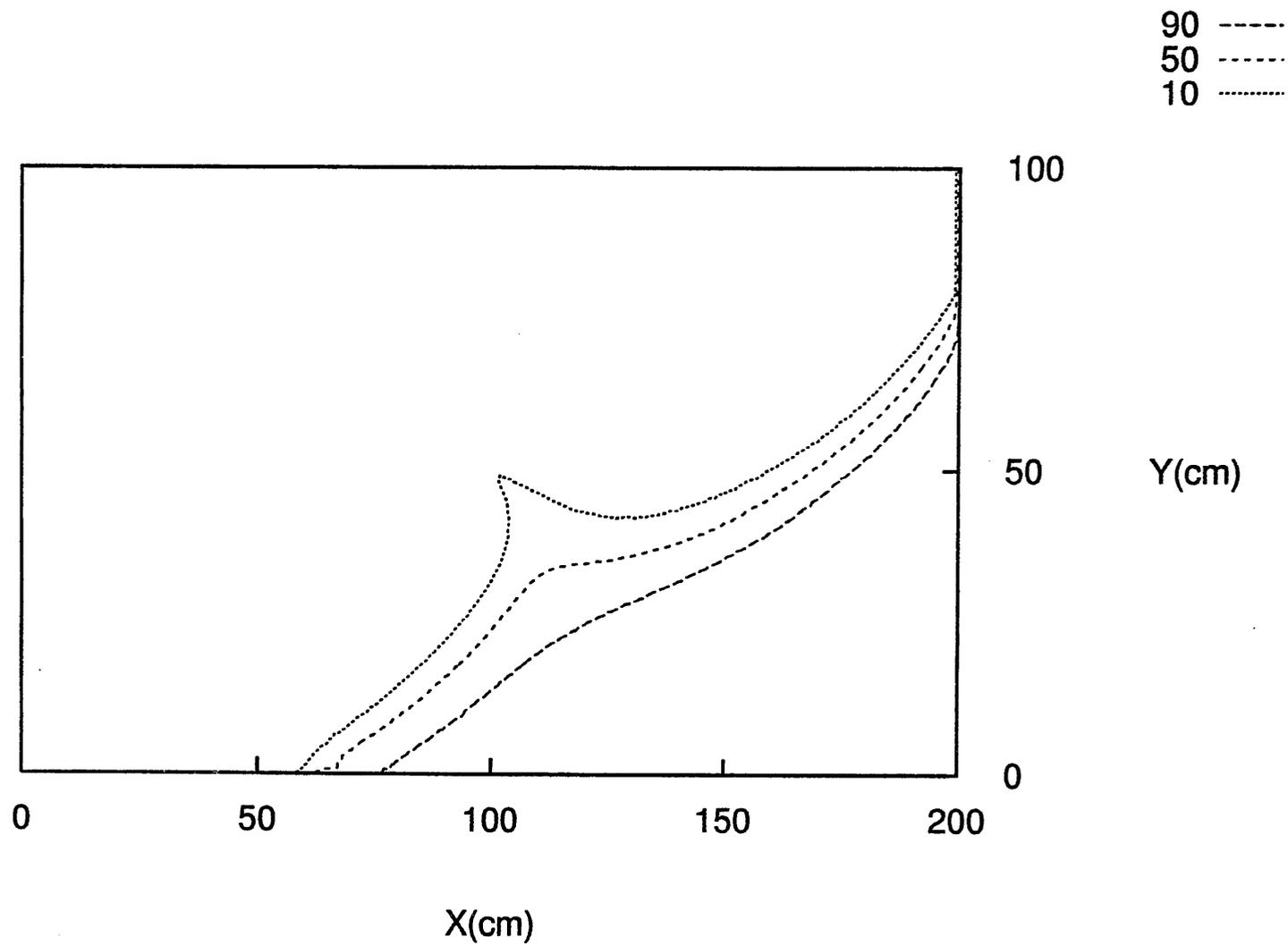


図 4.34 ケース 3 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 4000 秒後

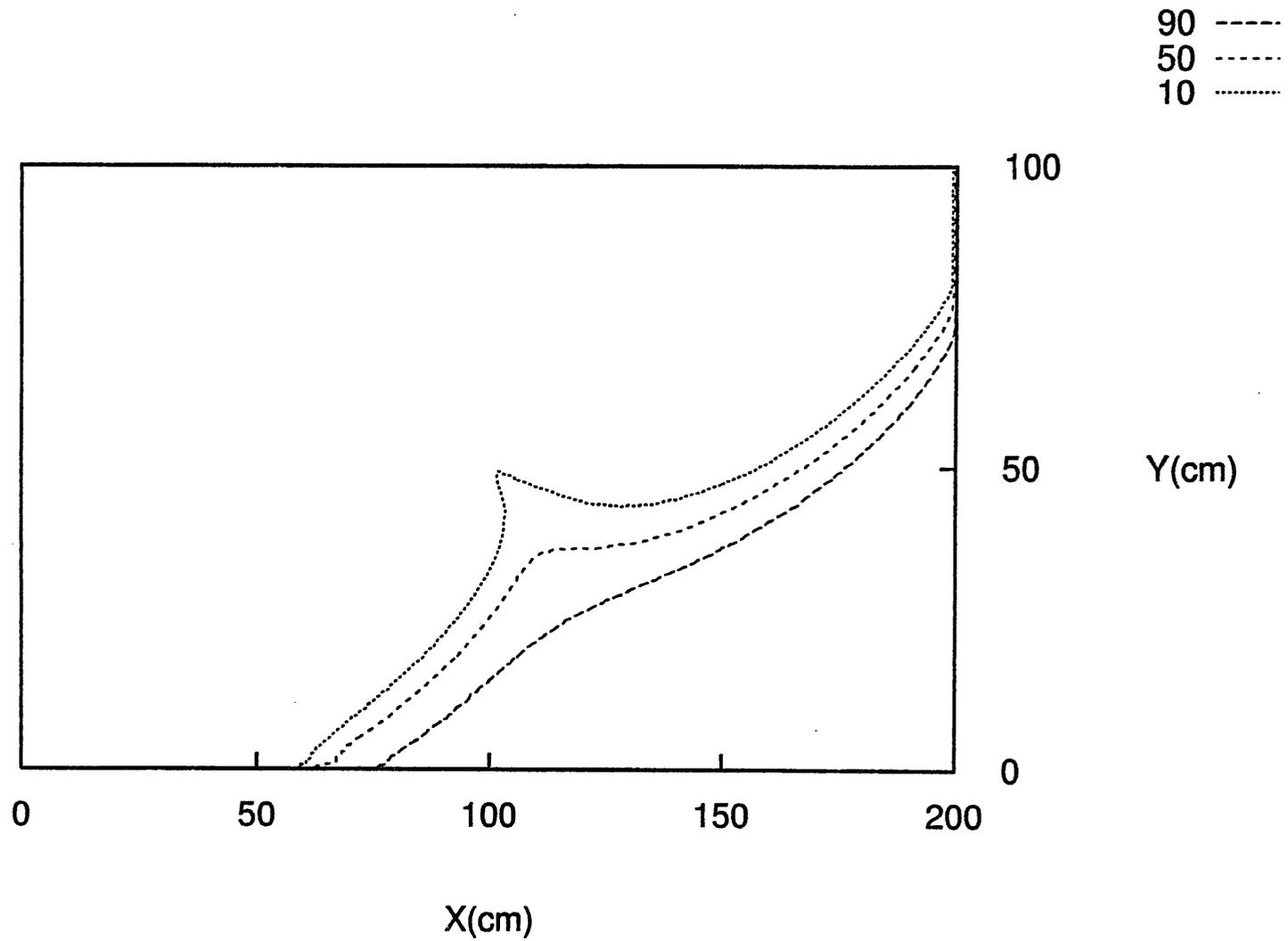


図 4.35 ケース 3 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 4500 秒後

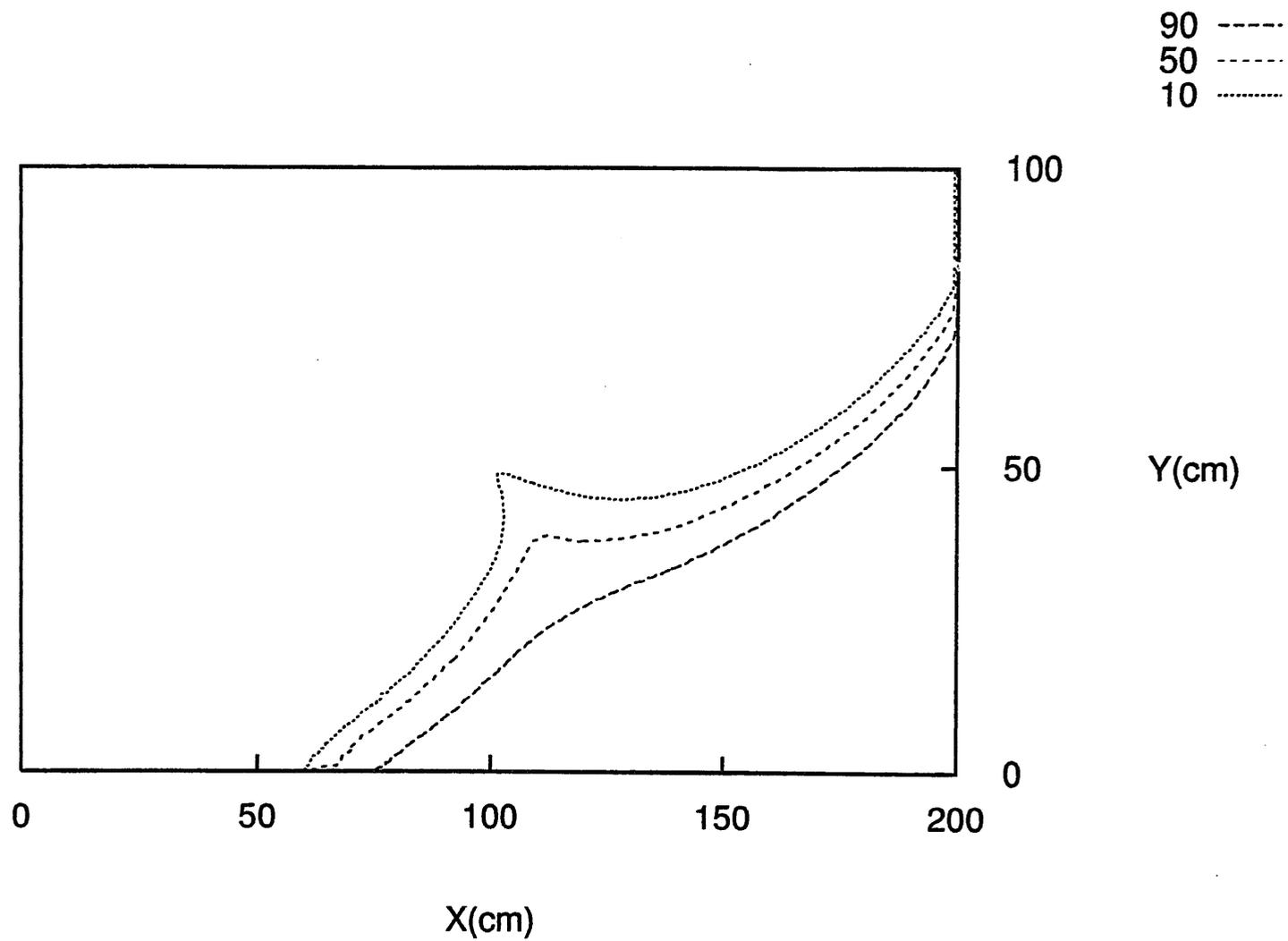


図 4.36 ケース 3 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$ の等濃度線) 5000 秒後

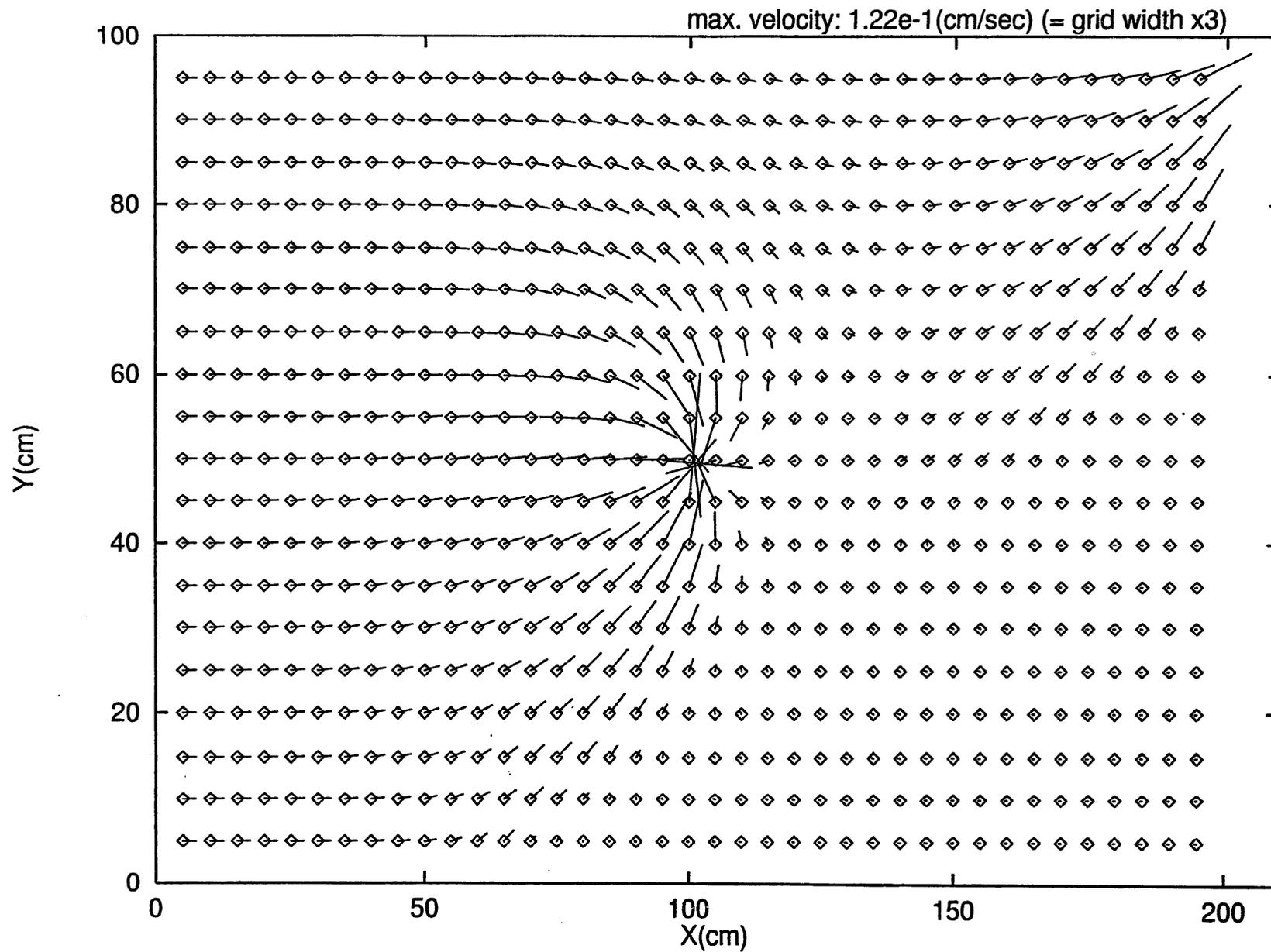


図 4.37 ケース 3 : 2次元 xy 領域における流速ベクトル

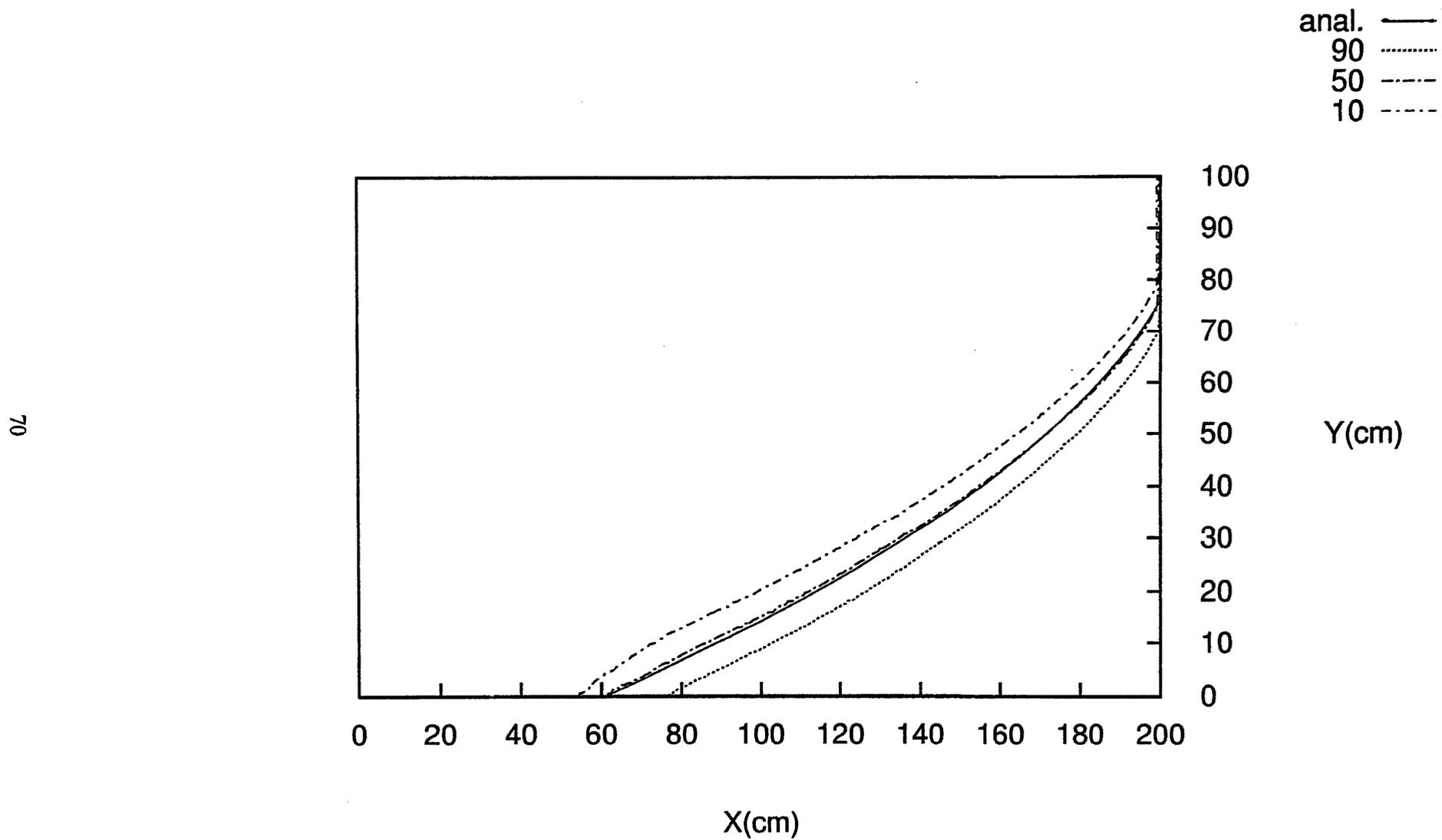


図 4.38 ケース 4 : 塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, C=0.9C_0$  の等濃度線)

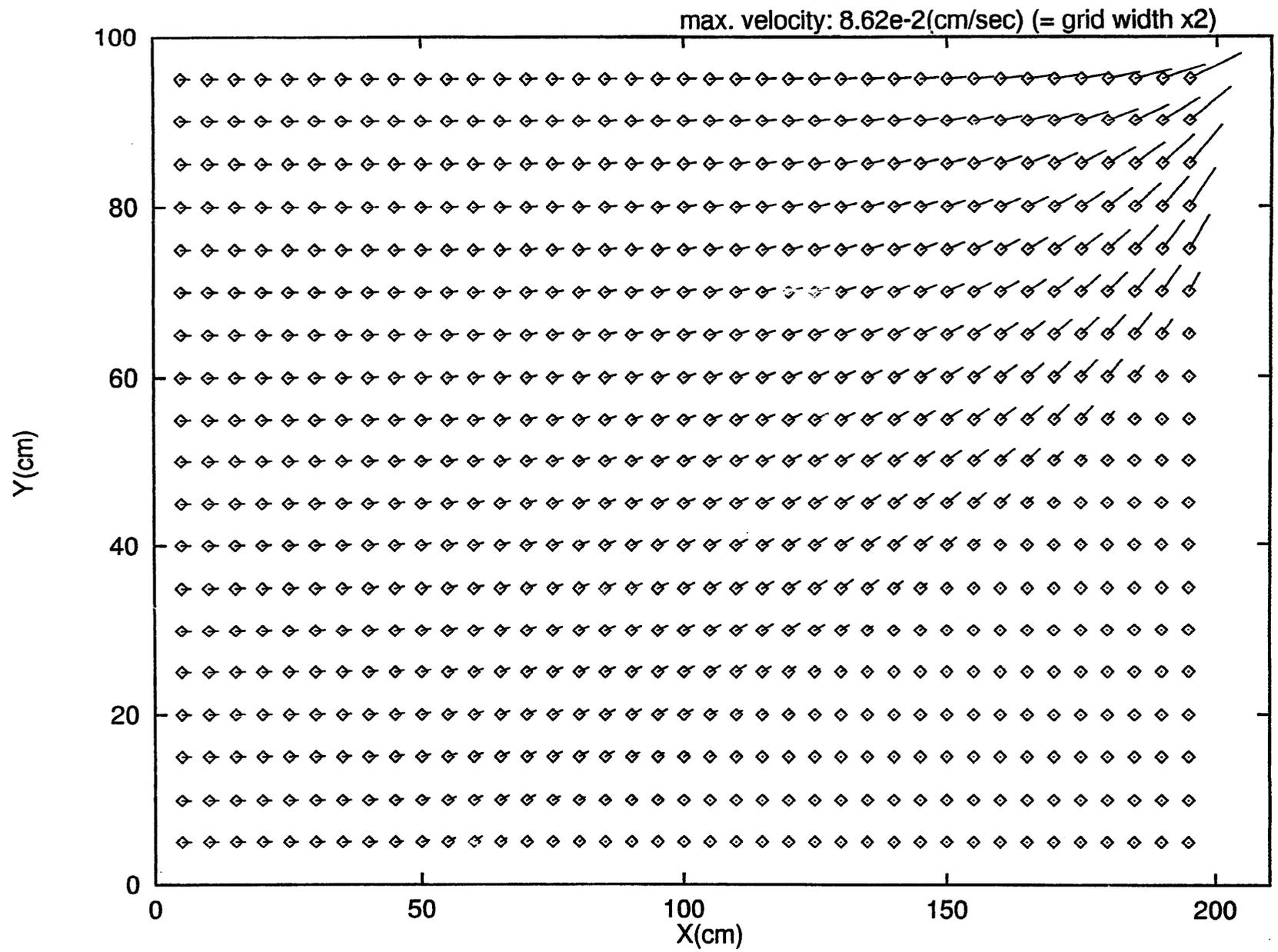


図 4.39 ケース 4 : 2 次元 xy 領域における流速ベクトル

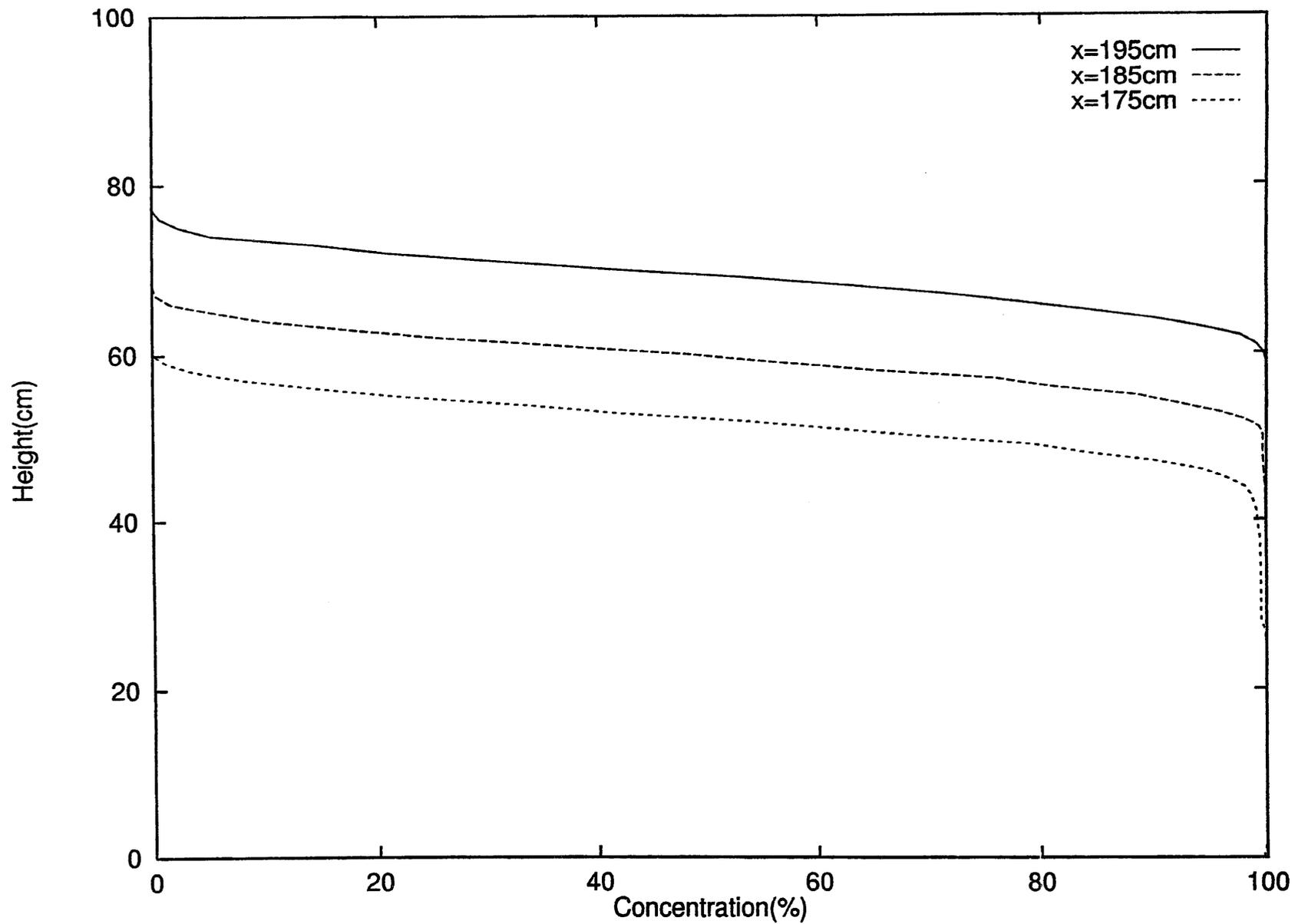


図 4.40 ケース 4 : 鉛直塩水濃度断面

## 5 沿岸処分を想定した場合の塩水／淡水境界面の挙動に関する感度解析

### 5.1 解析条件

整備した解析コードを用いて、塩水／淡水境界面の挙動を理解するため感度解析を実施した。透水場として均質の被圧帯水層を仮定する。解析条件を図 5.1 に示す。解析ケースについては動水勾配および透水係数をそれぞれ 3 ケースずつ設定し、合計 9 ケースとする。これを表 5.1 に示す。また計算に用いた物性値を表 5.2 に、計算パラメータを表 5.3 に示す。

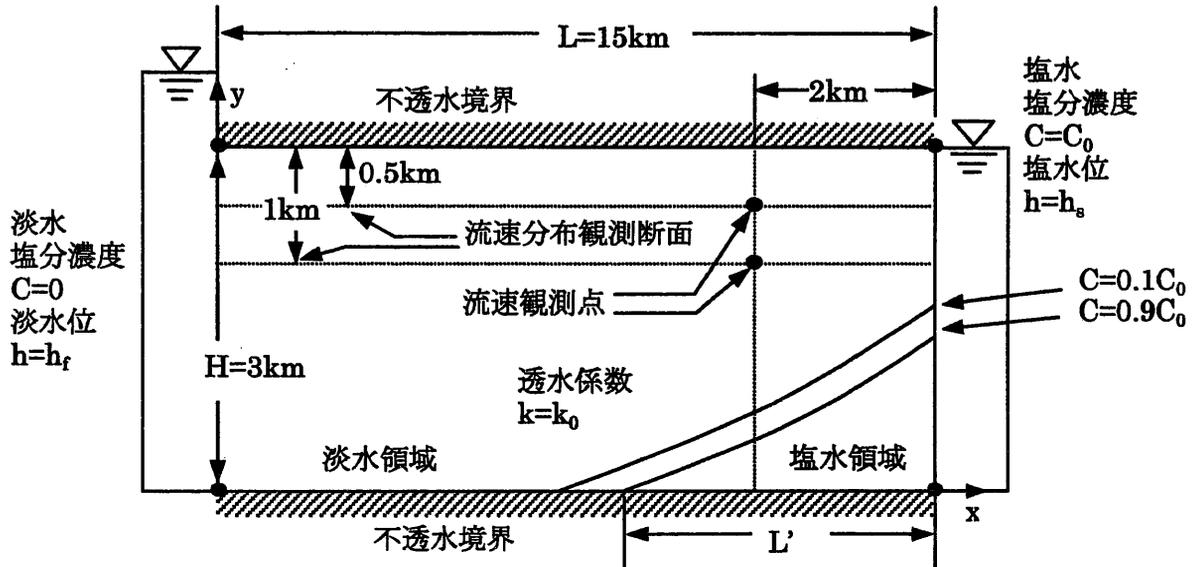


図 5.1 解析対象領域及び境界条件(感度解析用)

表 5.1 解析ケース(感度解析用)

解析ケース	透水係数 $k_0$ (m/s)	動水勾配 $\Delta H=(h_f h_s)/L$ (-)	$k_0 \times \Delta H$ (m/s)
1	$10^{-7}$	1/200	$5 \times 10^{-10}$
2		1/100	$10^{-9}$
3		1/50	$2 \times 10^{-9}$
4	$5 \times 10^{-8}$	1/200	$2.5 \times 10^{-10}$
5		1/100	$5 \times 10^{-10}$
6		1/50	$10^{-9}$
7	$10^{-8}$	1/200	$5 \times 10^{-11}$
8		1/100	$10^{-10}$
9		1/50	$2 \times 10^{-10}$

表 5.2 解析に使用した物性値

項目	値
淡水密度	1.000 g/cm <sup>3</sup>
塩水密度	1.025 g/cm <sup>3</sup>
縦方向分散長( $\alpha_L$ )	1.0×10 <sup>2</sup> cm
横方向分散長( $\alpha_T$ )	$\alpha_L/10$
間隙率(-)	0.37

表 5.3 解析に使用した計算パラメータ

ケース	解析時間(秒)	SOR 打切精度	粒子数
5-1	14.0×10 <sup>13</sup>	0.01	60000
5-2	8.0×10 <sup>13</sup>	0.001	60000
5-3	2.0×10 <sup>13</sup>	0.01	—
5-4	8.0×10 <sup>13</sup>	0.01	—
5-5	6.0×10 <sup>13</sup>	0.01	60000
5-6	6.0×10 <sup>13</sup>	0.01	—
5-7	20.0×10 <sup>13</sup>	0.01	—
5-8	6.0×10 <sup>13</sup>	0.01	—
5-9	6.0×10 <sup>13</sup>	0.01	—

- ・ 計算パラメータのうち SOR 打切り精度について Case5-2 だけ一桁上げているのは、打ち切り精度の比較に用いたためである。精度を一桁上げたにもかかわらず定常に至ったときの解に大きな変化はなく計算時間が 10 倍ほどかかったため他のケースはすべて 0.01 とした。
- ・ いくつかのケースで粒子数を指定しているが、これは計算の最初の段階で、塩水側境界付近の濃度分布に y-方向の振動が現れたため 1 割ほど粒子を増やしたものである。
- ・ ケース 5-1,4,7 については塩水楔が淡水側境界に達するケースであると考えられるが、淡水側境界は濃度一定条件であるため塩水楔が淡水側境界に達しようとする正しく計算できない。そのためこれらのケースの解析時間は塩水楔が淡水側境界に達する十分手前に設定した。

## 5.2 解析結果

計算結果のまとめとして次の 5 項目を実施した。

- ・ 淡水の単位面当りの流入流量の算出(表 5.4)
- ・ 2次元 xy 領域における塩水/淡水境界( $C=0.1C_0, 0.5C_0, 0.9C_0$  の等濃度線)および流速ベクトルの表示 (図 5.2 から図 5.19)
- ・ 塩水浸入距離と透水係数および動水勾配の関係図作成(図 5.20)
- ・ 処分場の建設が想定される深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布作成(図 5.21 から図 5.29)
- ・ 沿岸から距離 2km における深度 0.5km および 1km の地点の実流速と透水係数および動水勾配の関係図作成(図 5.30)

ケース 5-1,4,7 についての解析時間を塩水楔が淡水側境界に達する十分手前に設定したため、これらのケースでは塩水楔長さを正しく計算していないが、流入流量、着目深度における流速分布については大きな誤りはないと考えられる。

表 5.4 淡水の単位面当りの流入流量

ケース	流入流量( $\text{cm}^2\text{min}^{-1}$ )
5-1	0.40
5-2	1.35
5-3	3.16
5-4	0.20
5-5	0.64
5-6	1.58
5-7	0.044
5-8	0.135
5-9	0.316

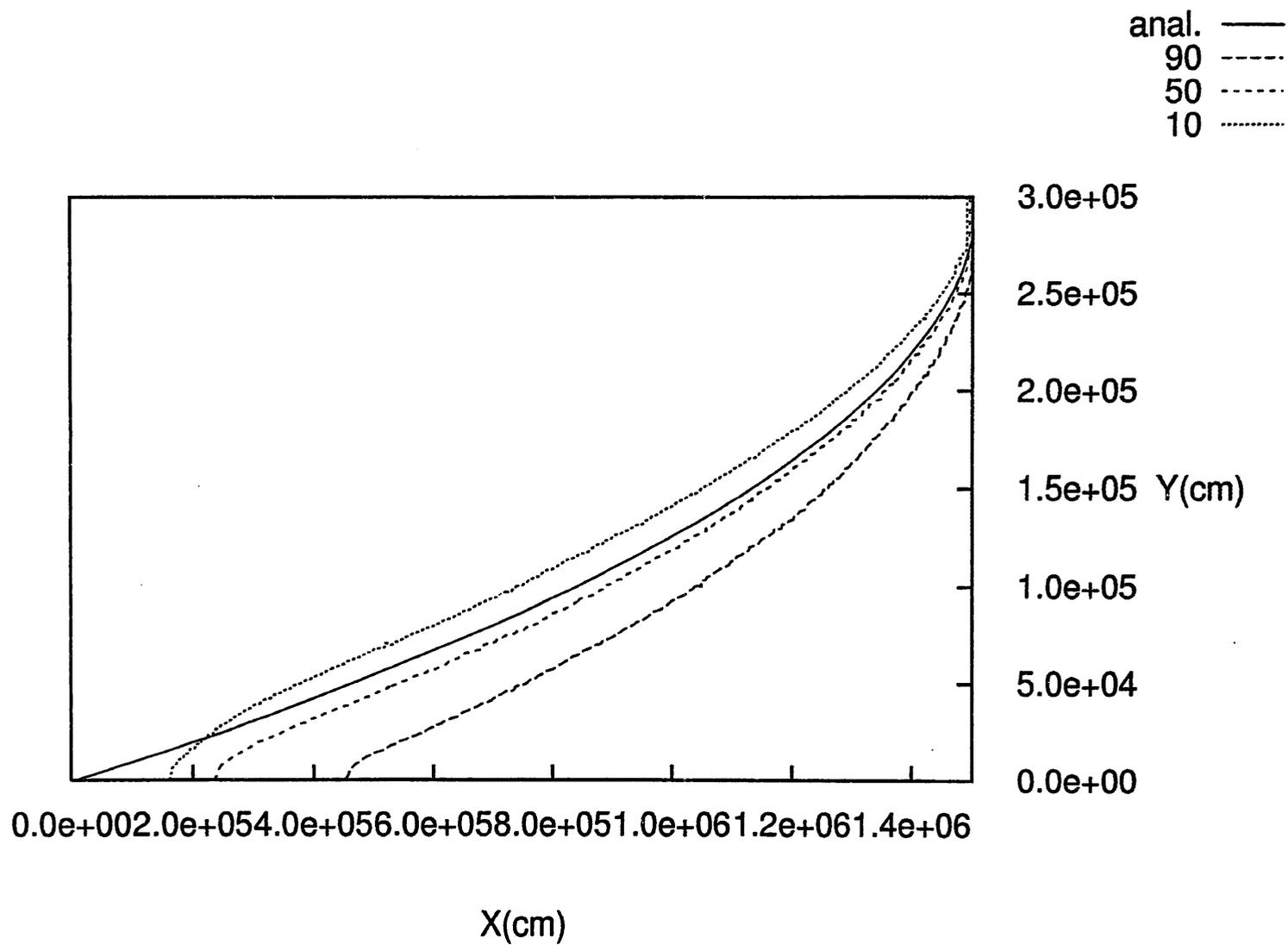


図 5.2 2次元 xy 領域における塩水/淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-1

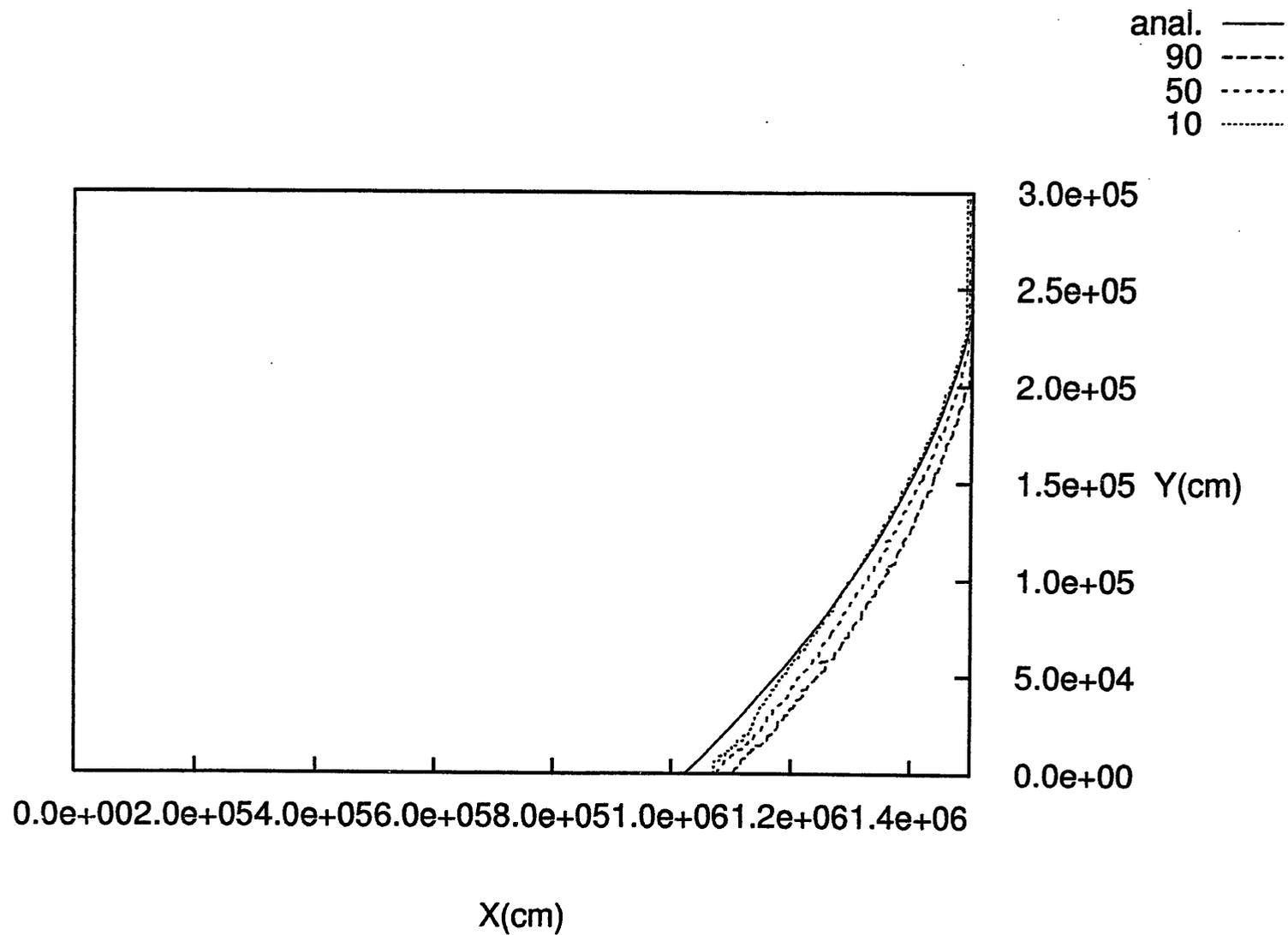


図 5.3 2次元 xy 領域における塩水／淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$  の等濃度線) ケース 5-2

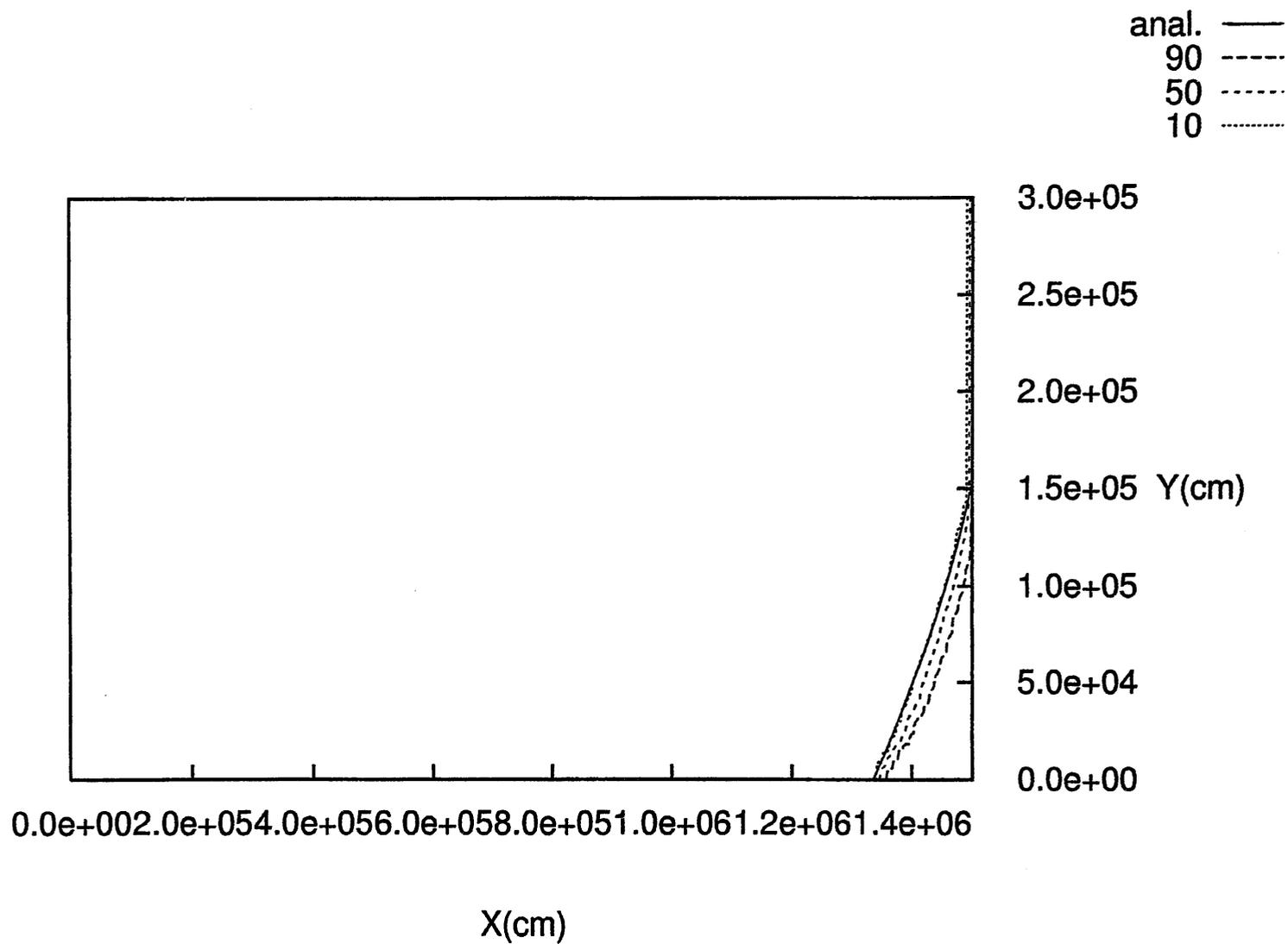


図 5.4 2次元 xy 領域における塩水/淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-3

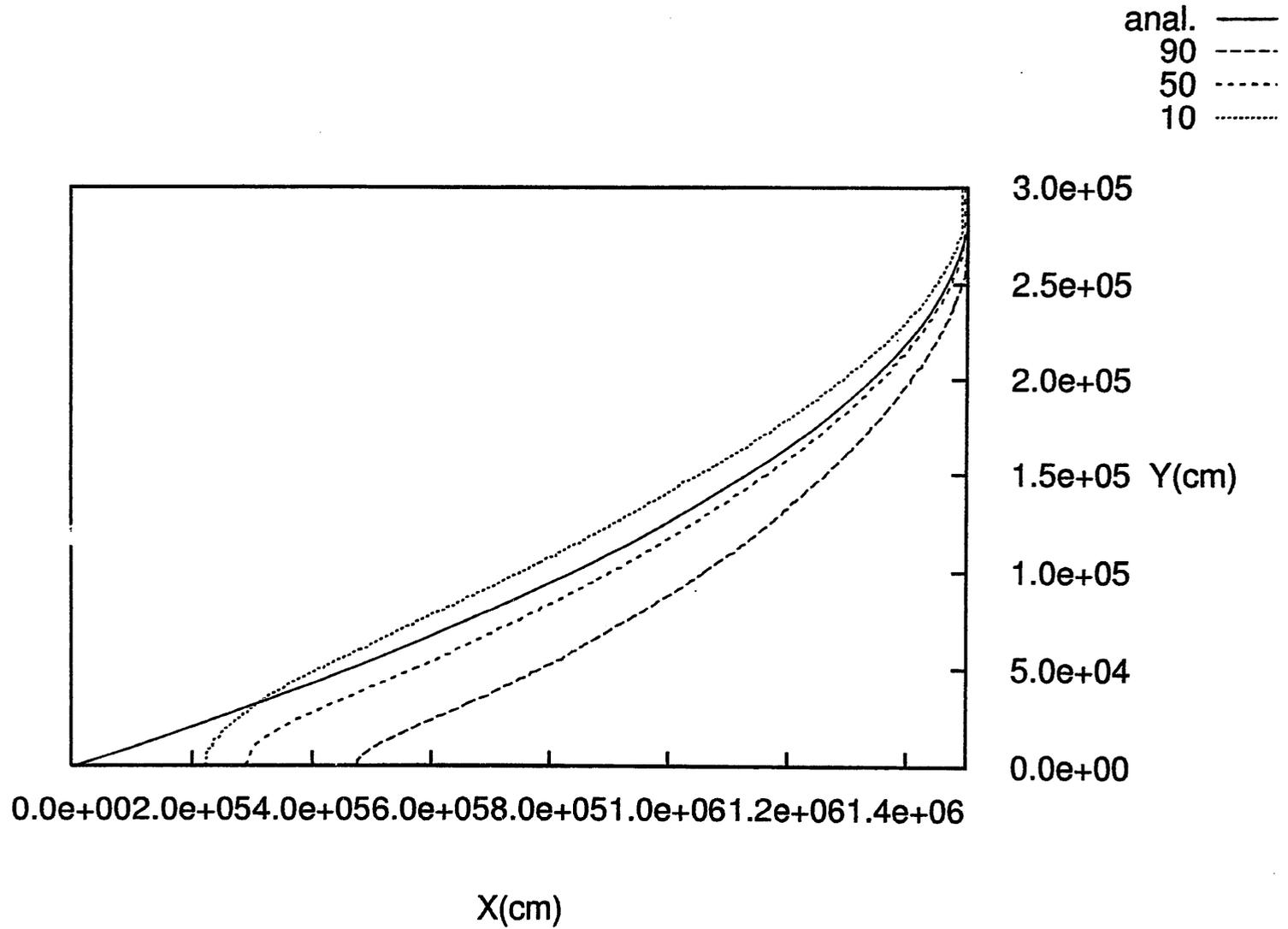


図 5.5 2次元 xy 領域における塩水/淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-4

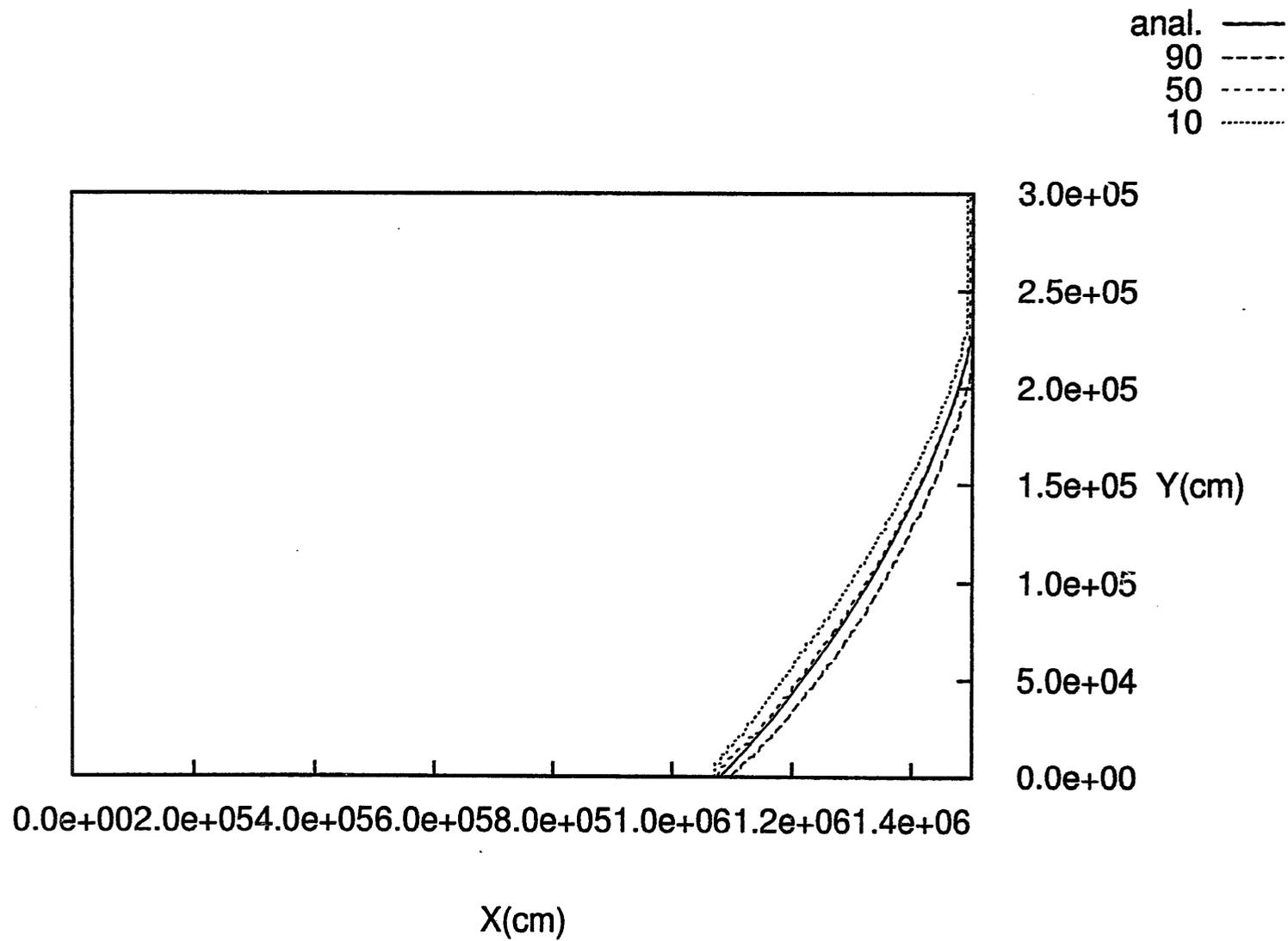


図 5.6 2次元 xy 領域における塩水／淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$  の等濃度線) ケース 5-5

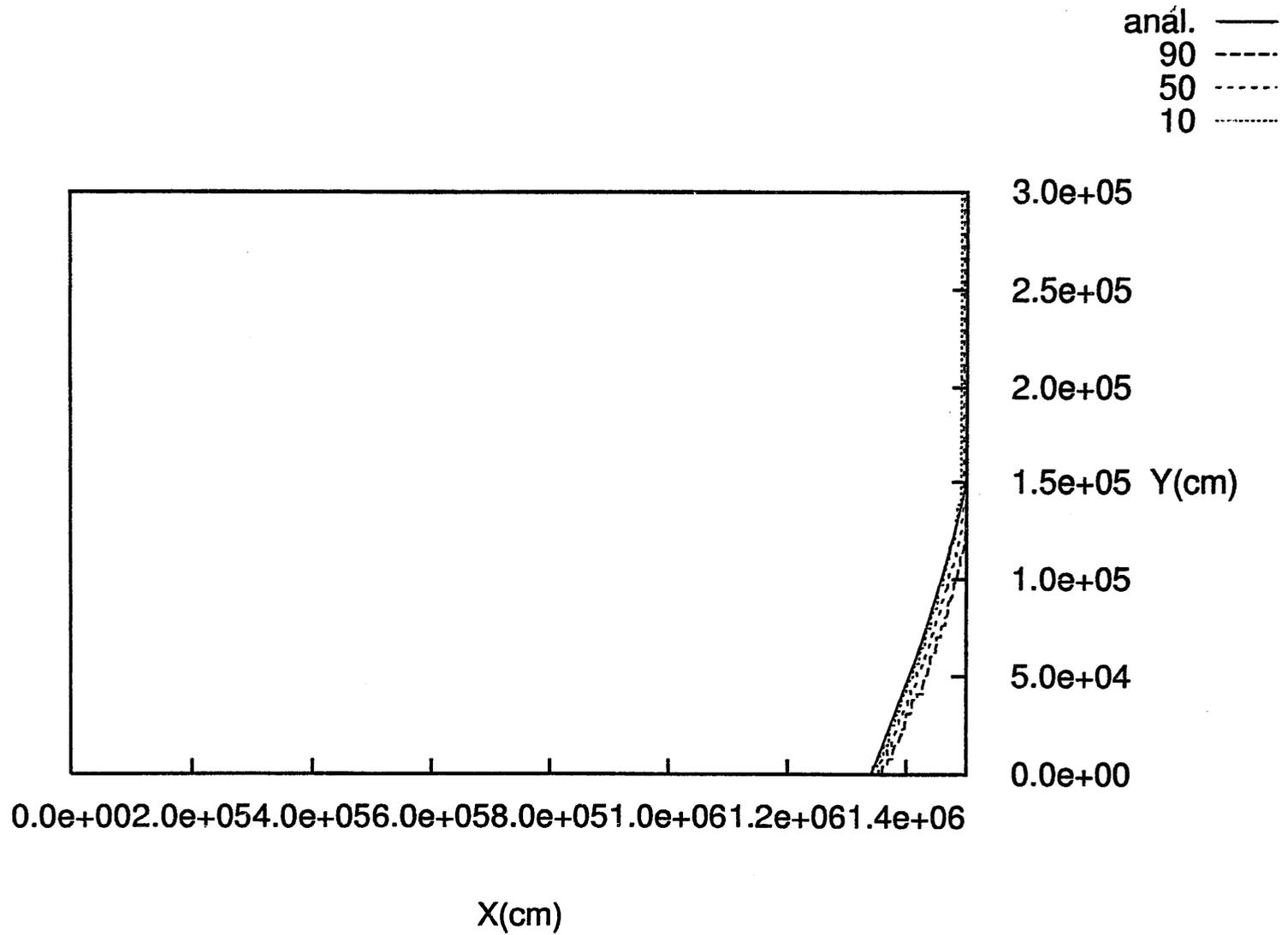


図 5.7 2次元 xy 領域における塩水／淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$  の等濃度線) ケース 5-6

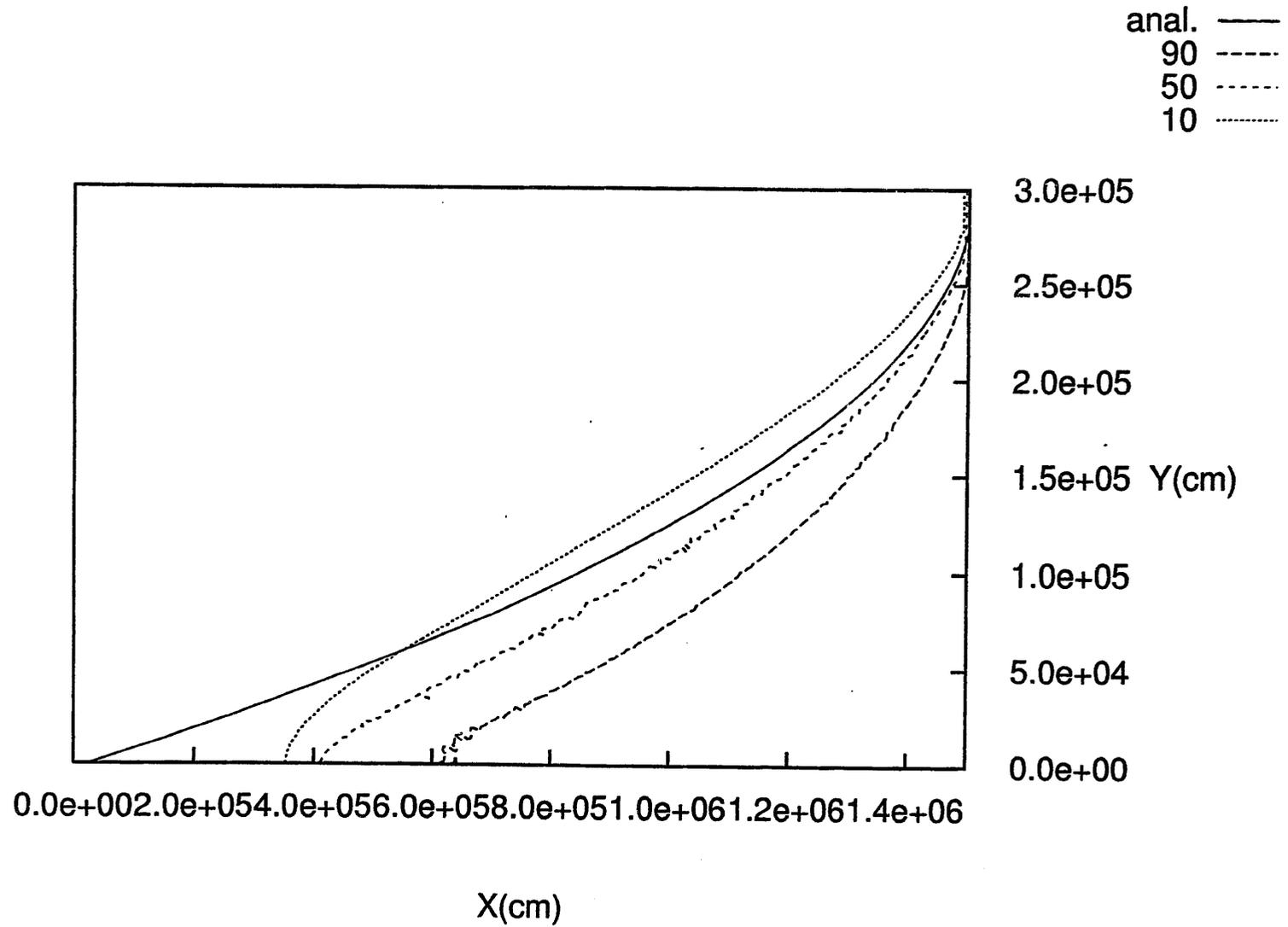


図 5.8 2次元 xy 領域における塩水/淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-7

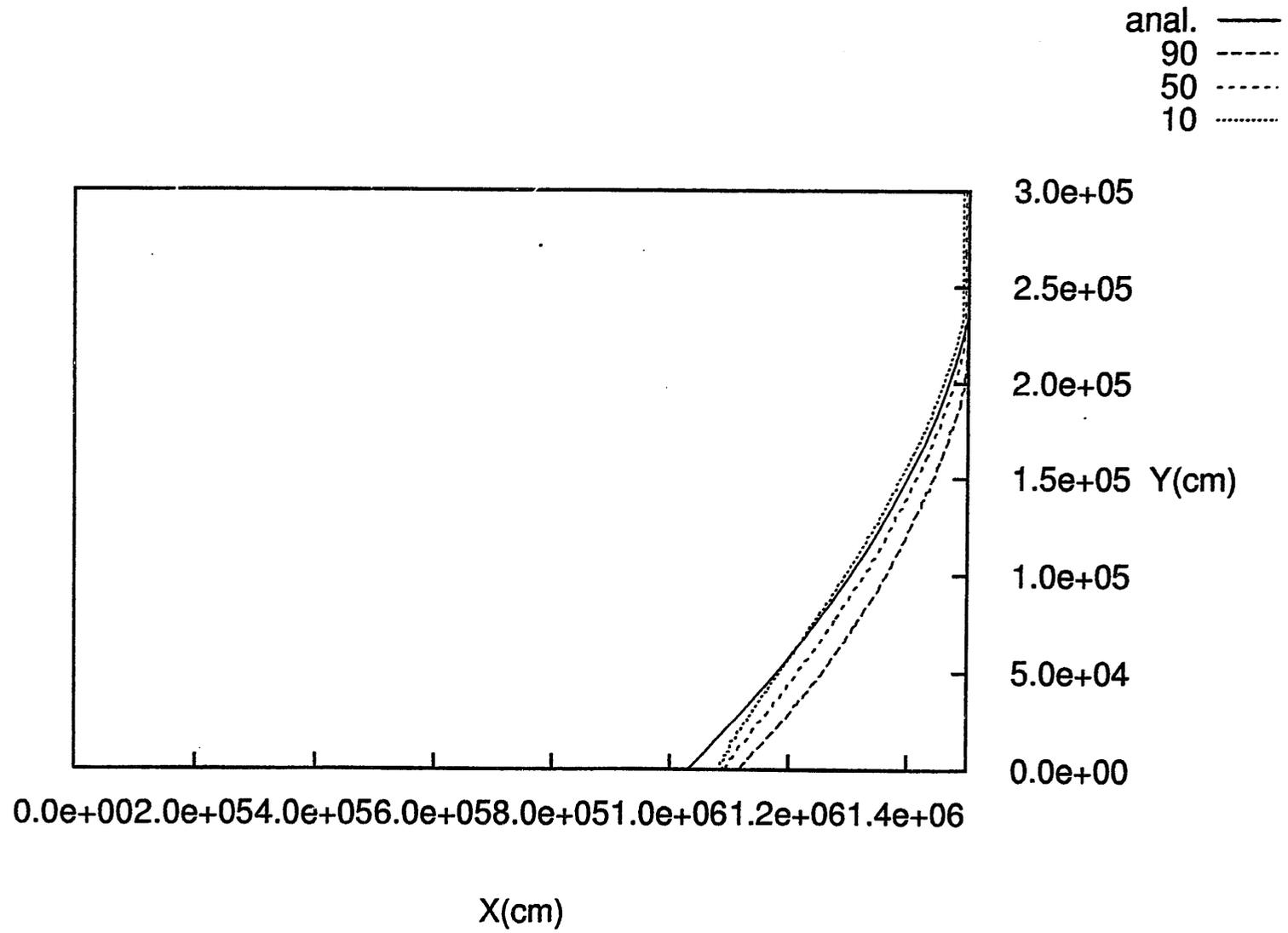


図 5.9 2次元 xy 領域における塩水／淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-8

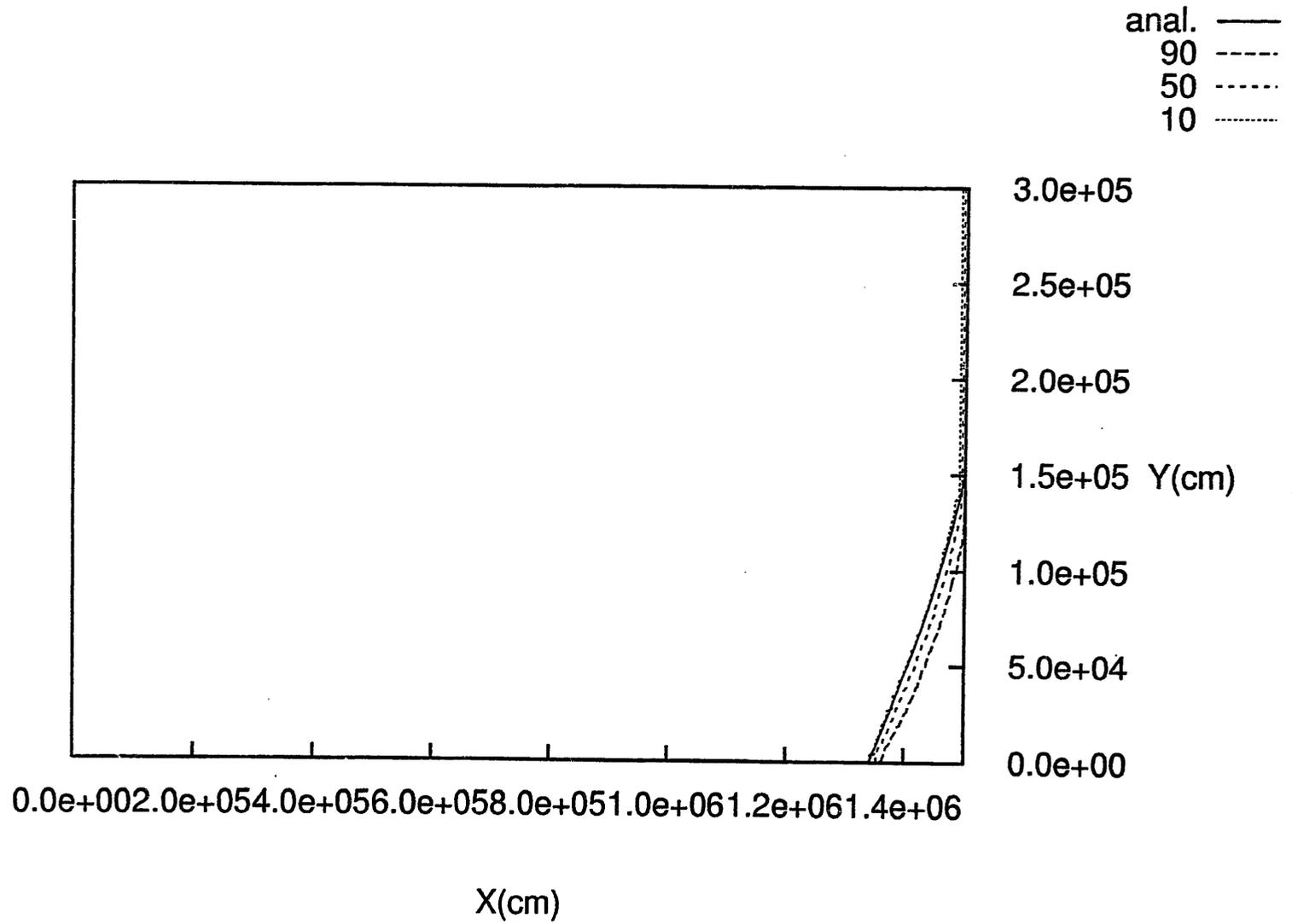


図 5.10 2次元  $xy$  領域における塩水／淡水境界( $C=0.1, 0.5, 0.9C_0$ の等濃度線) ケース 5-9

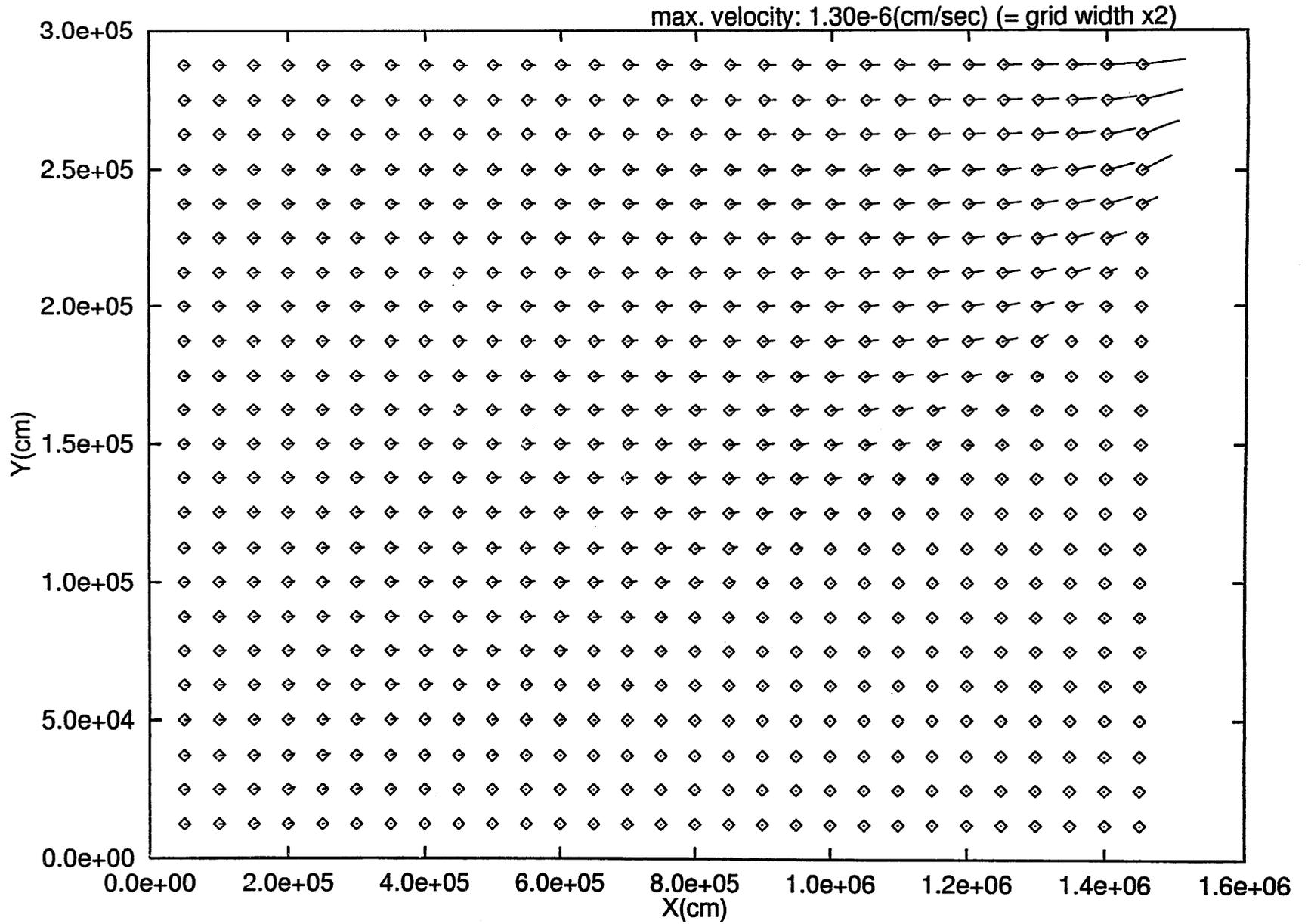


図 5.11 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-1

max. velocity:  $1.77 \times 10^{-6}$  (cm/sec) (= grid width x2)

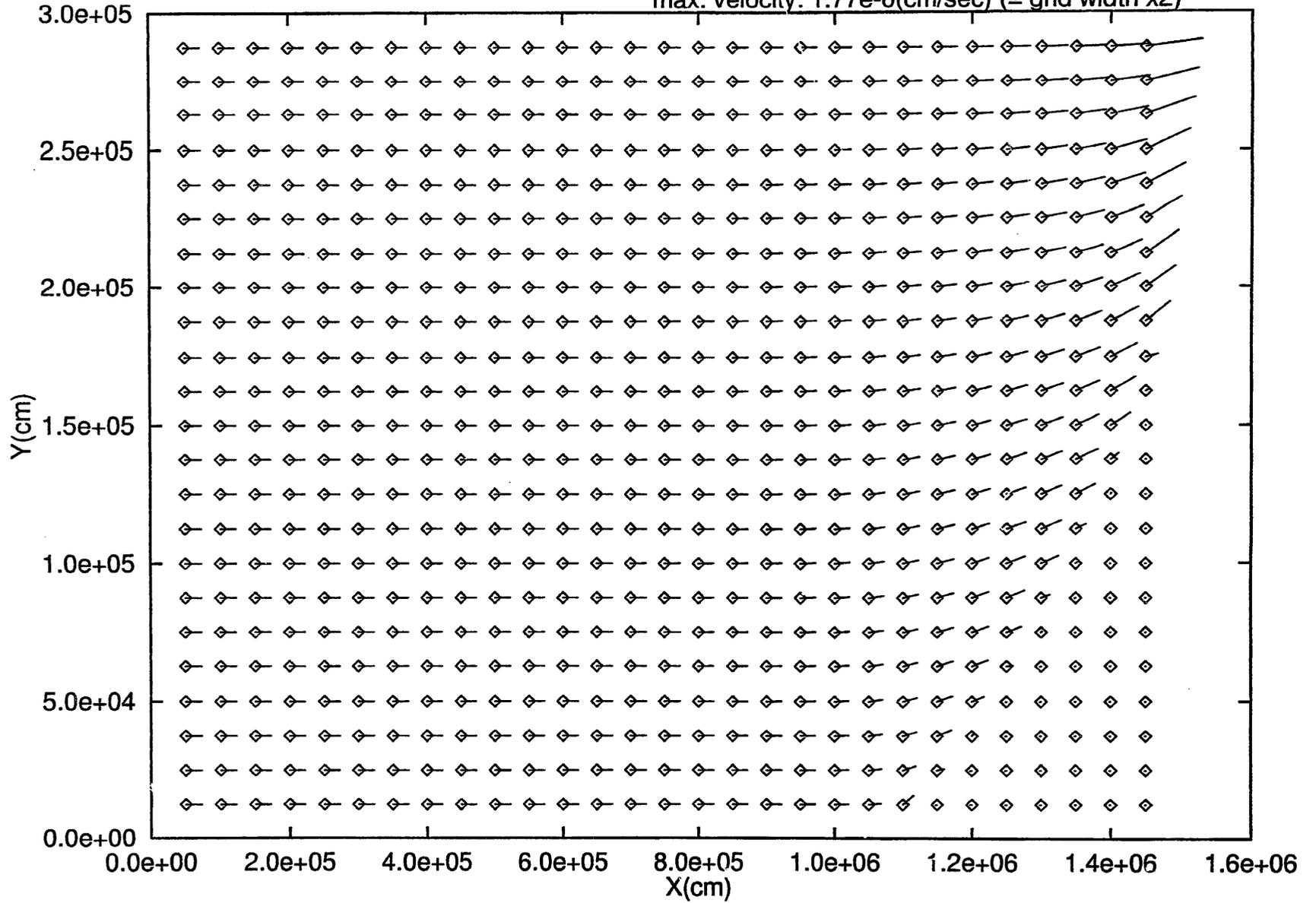


図 5.12 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-2

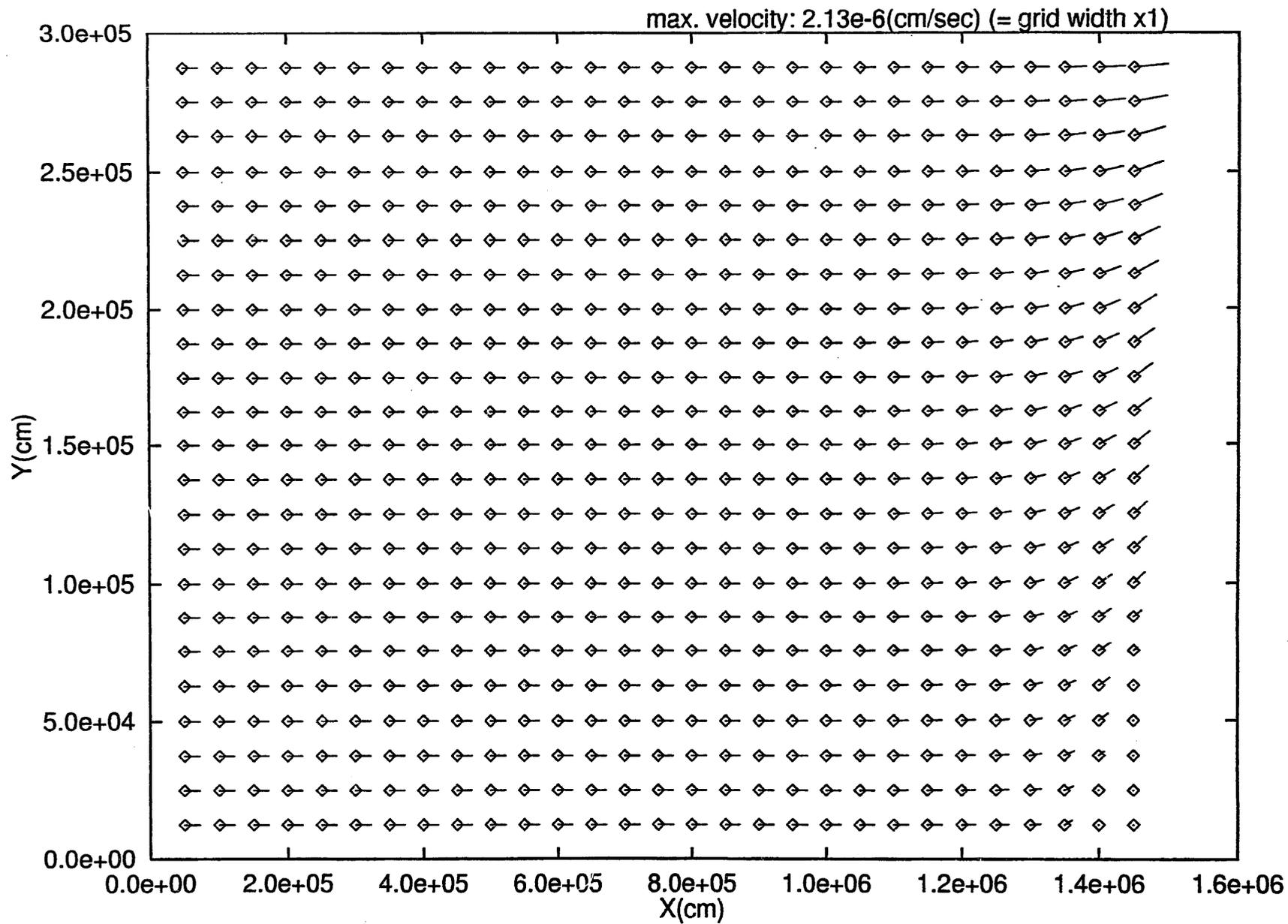


図 5.13 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-3

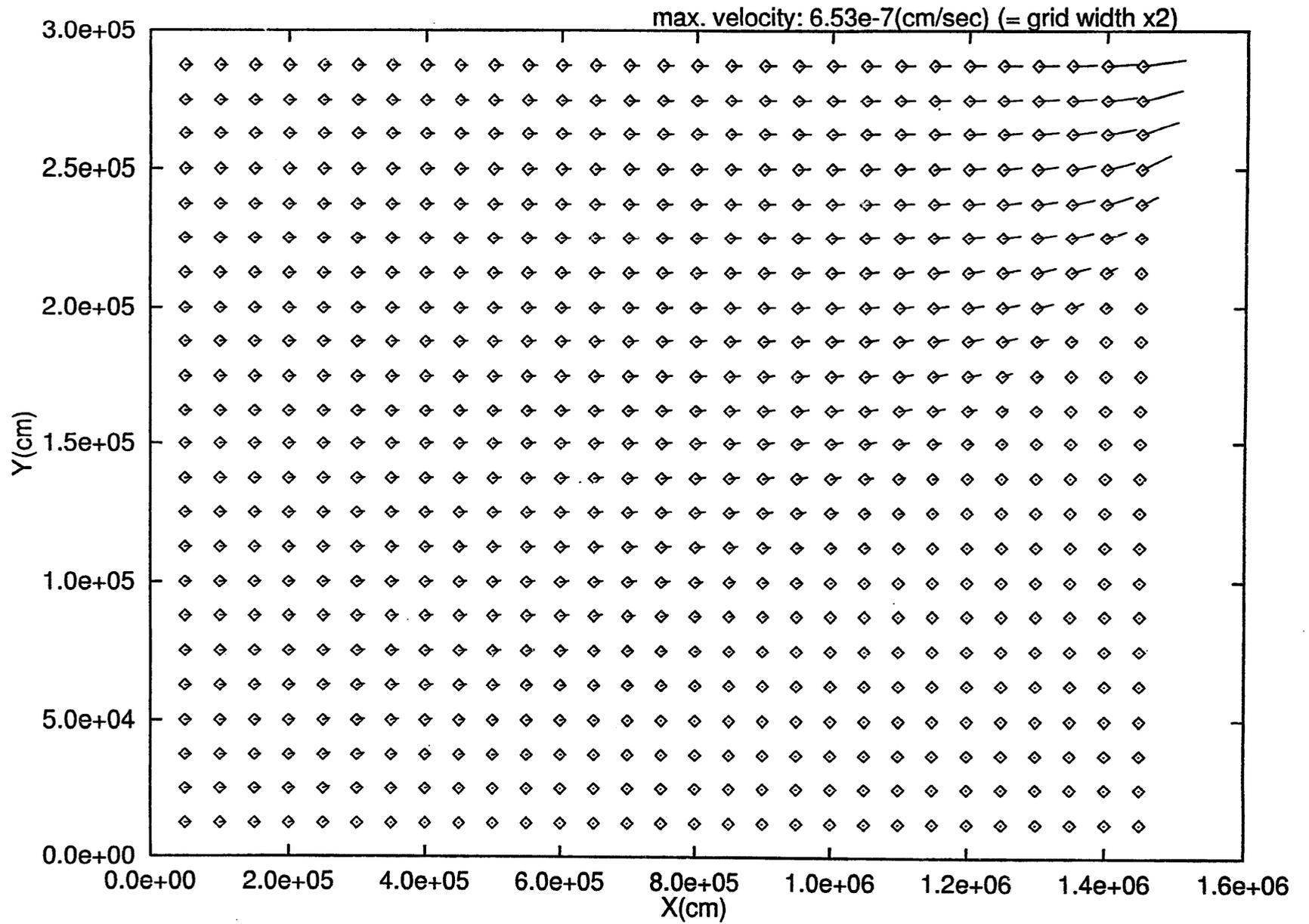


図 5.14 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-4

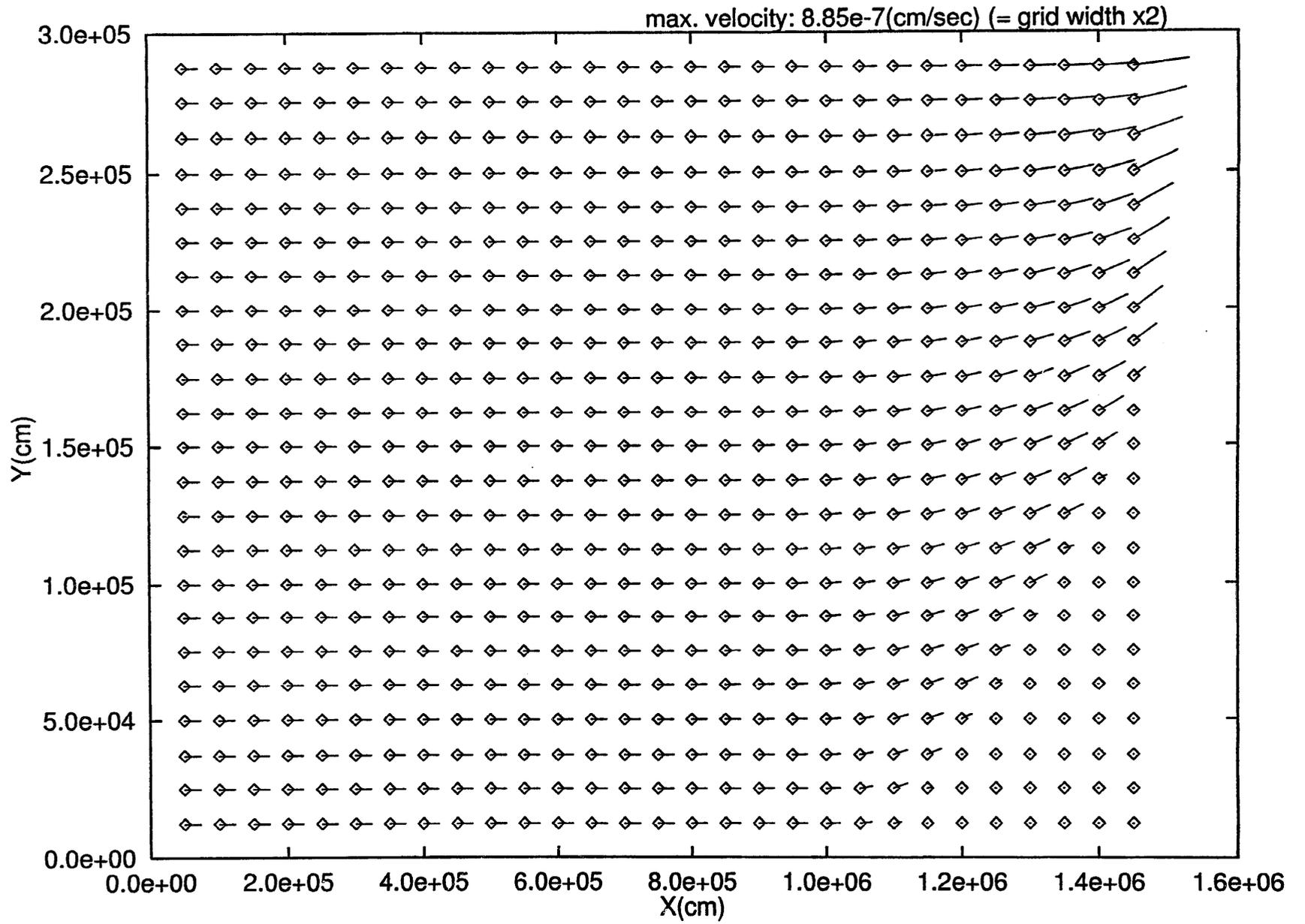


図 5.15 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-5

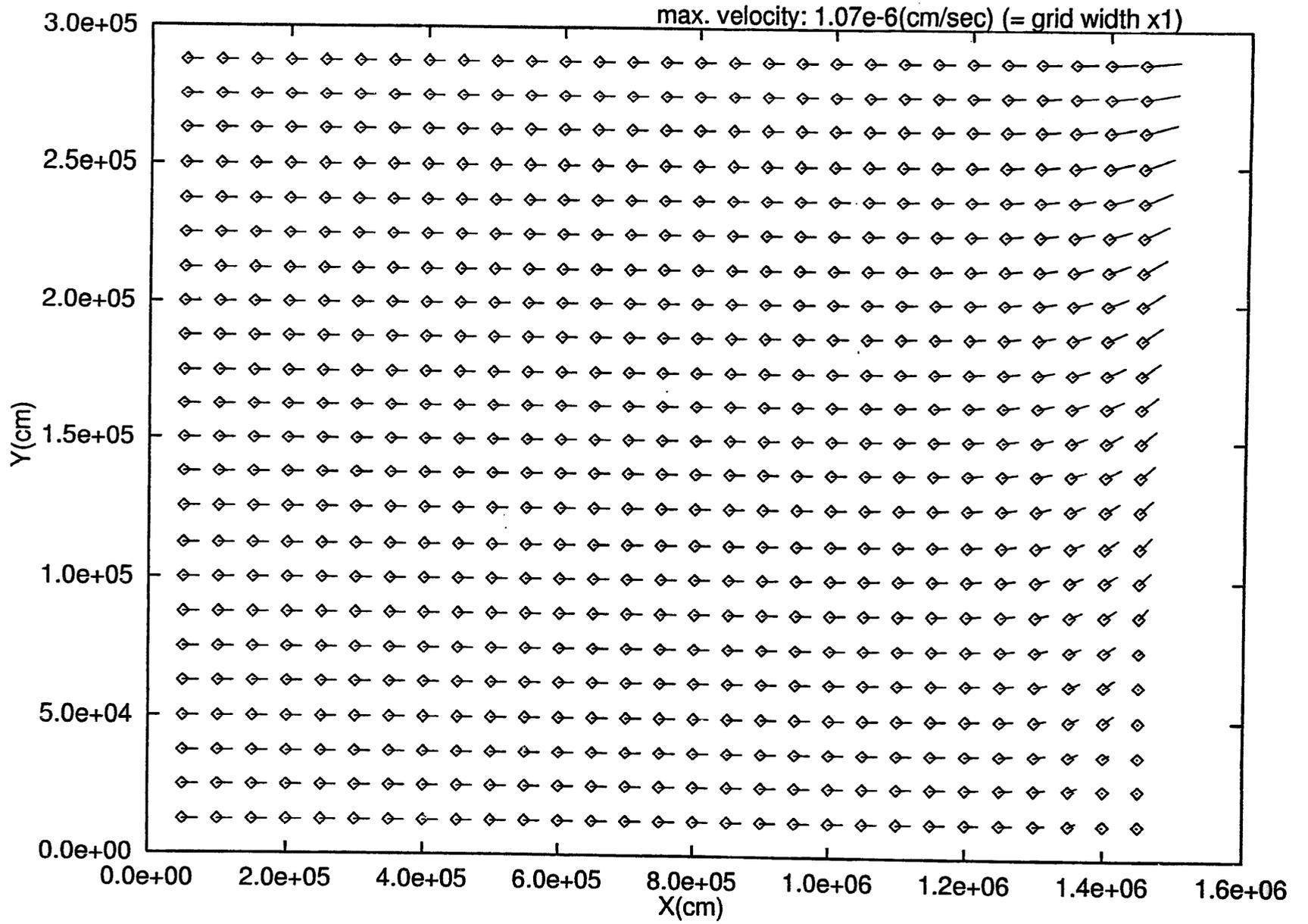


図 5.16 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-6

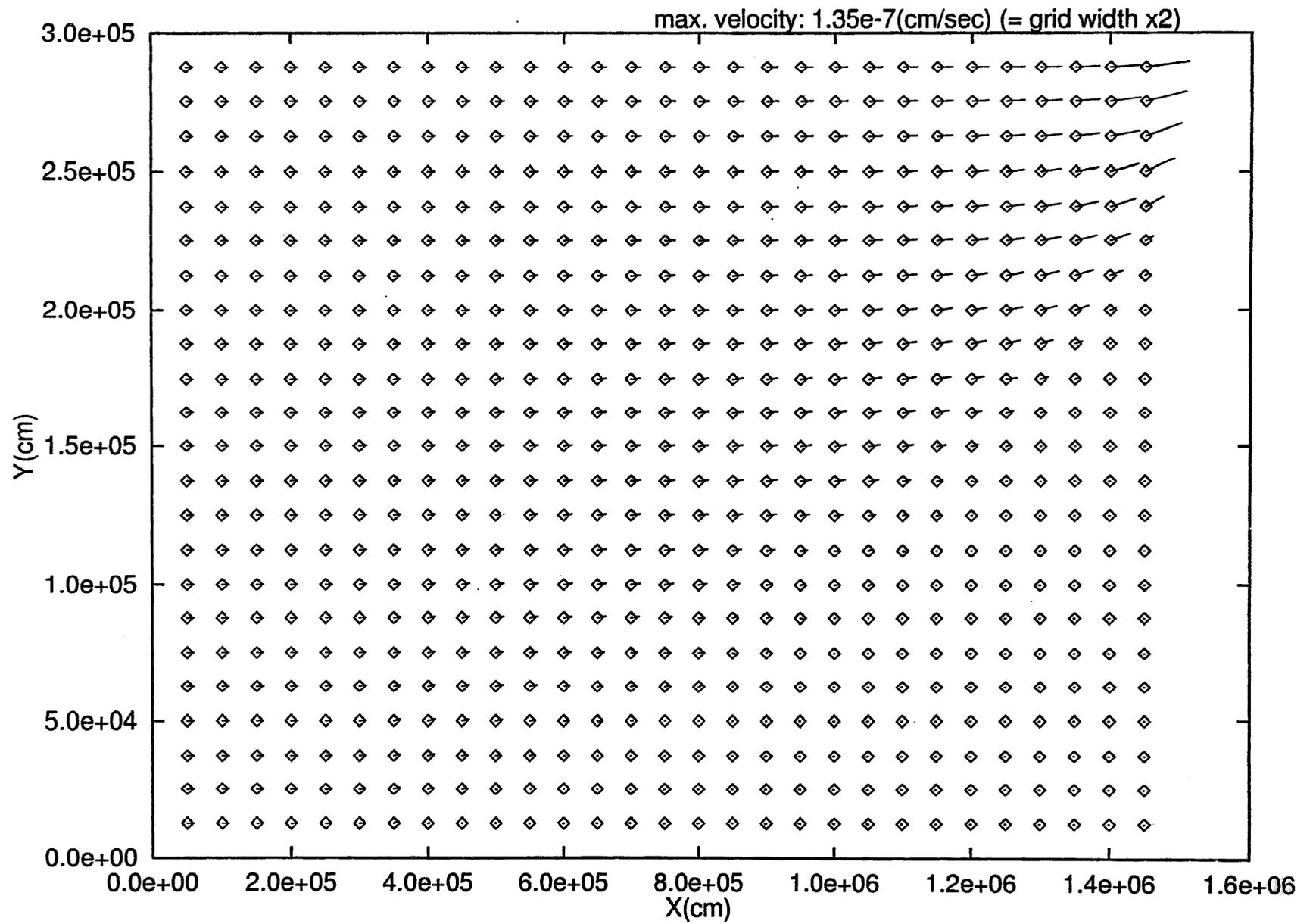


図 5.17 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-7

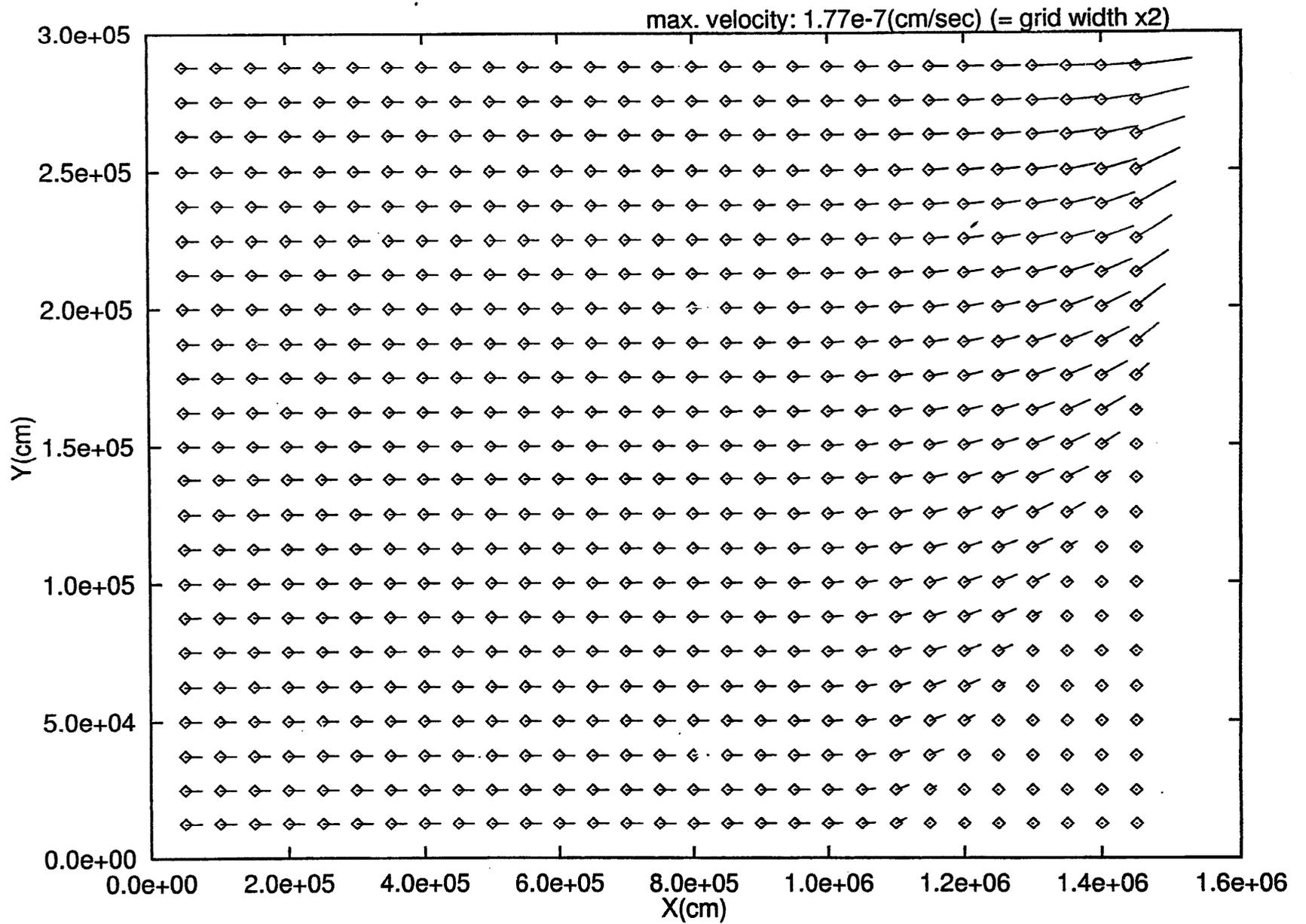


図 5.18 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-8

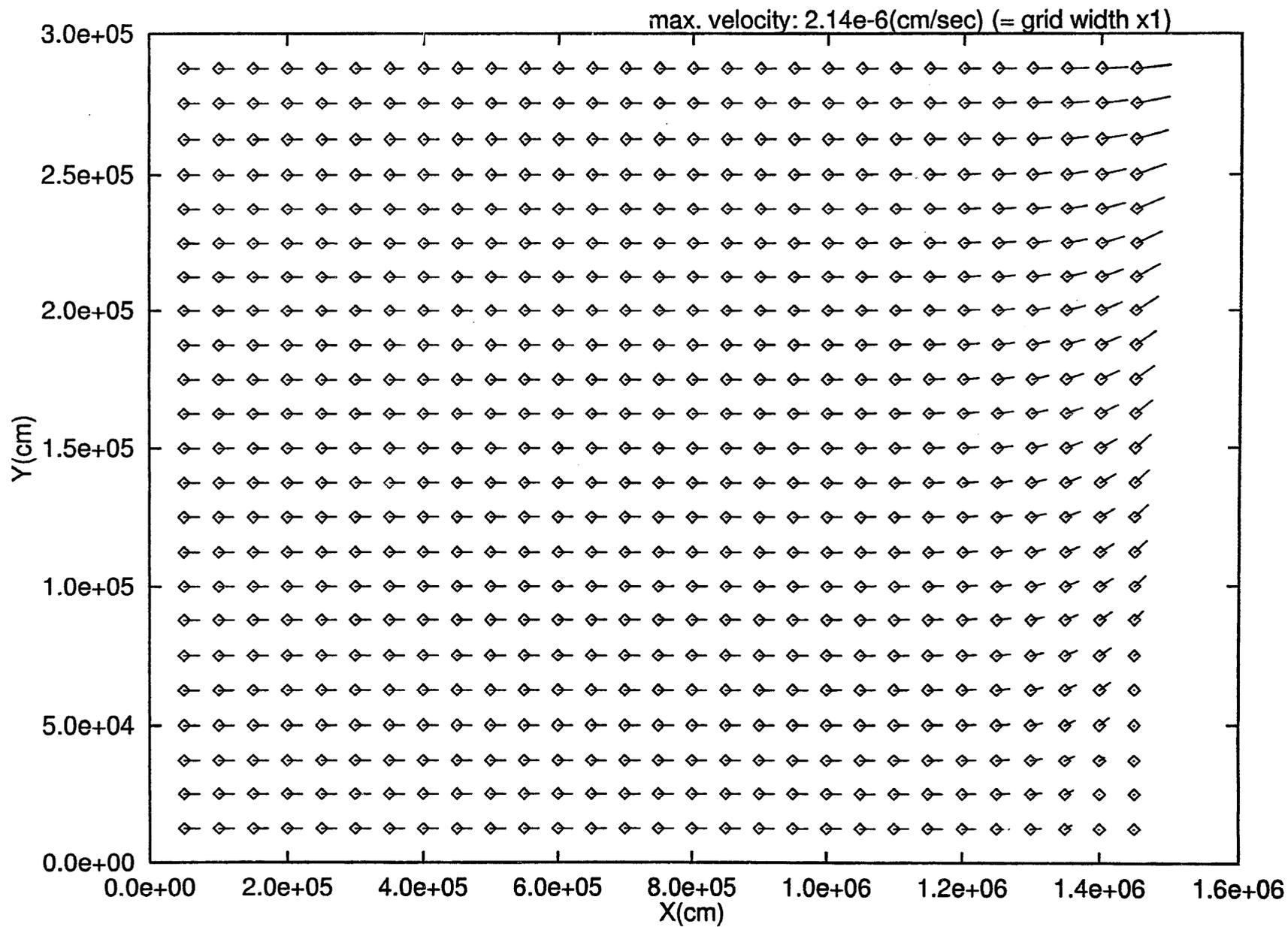


図 5.19 2次元 xy 領域における流速ベクトル ケース 5-9

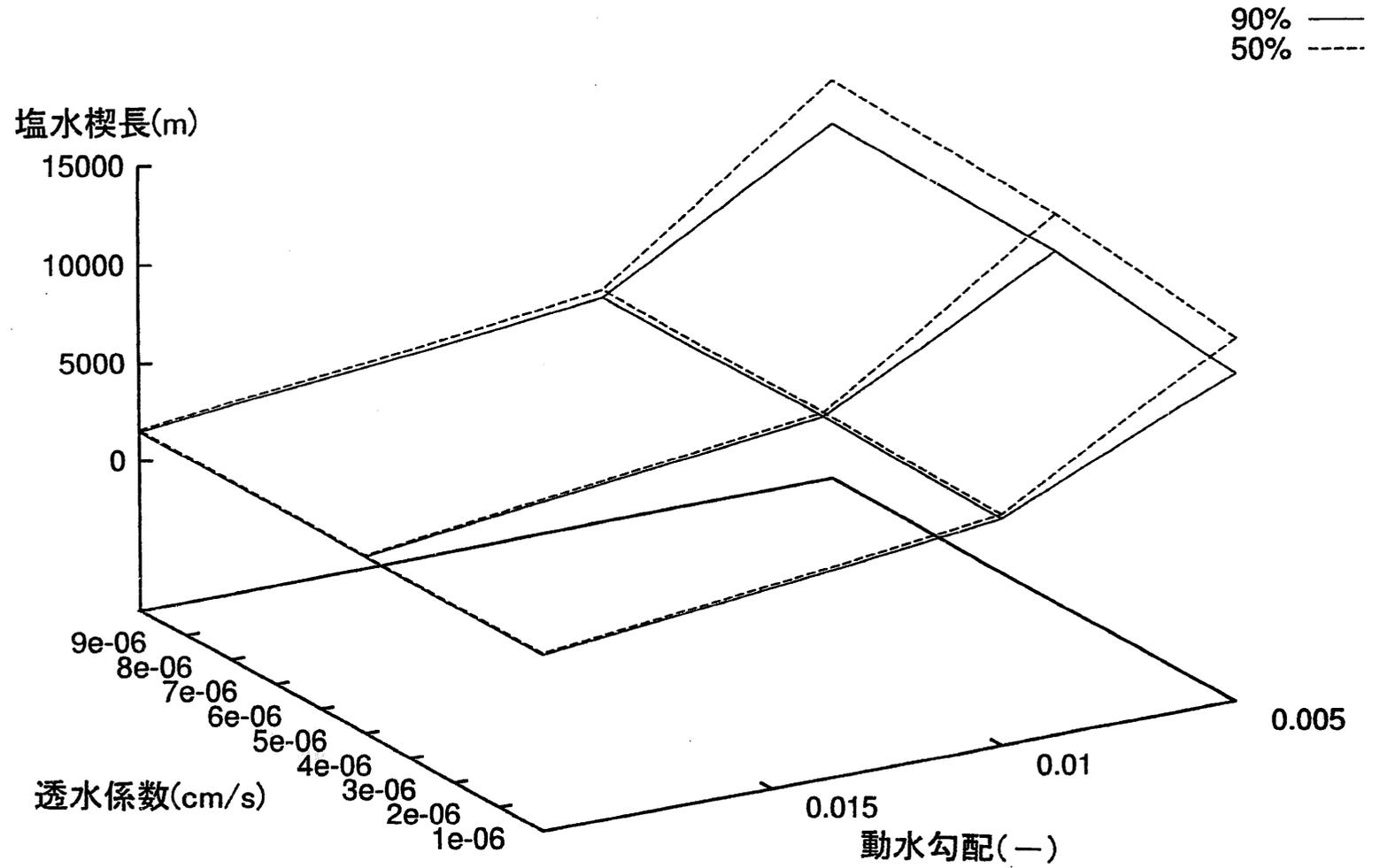


図 5.20 塩水侵入距離と透水係数および動水勾配の関係

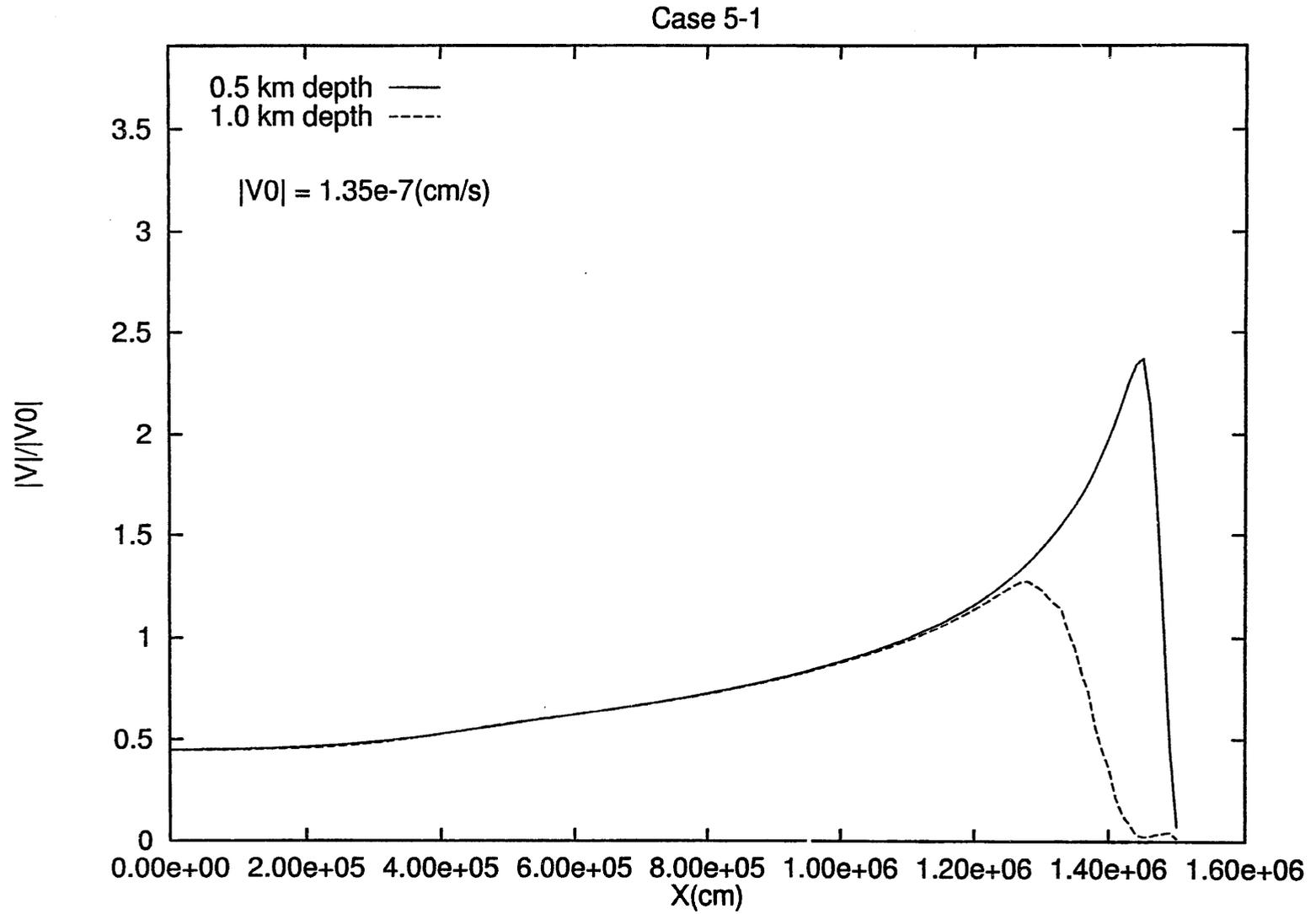


図 5.21 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-1

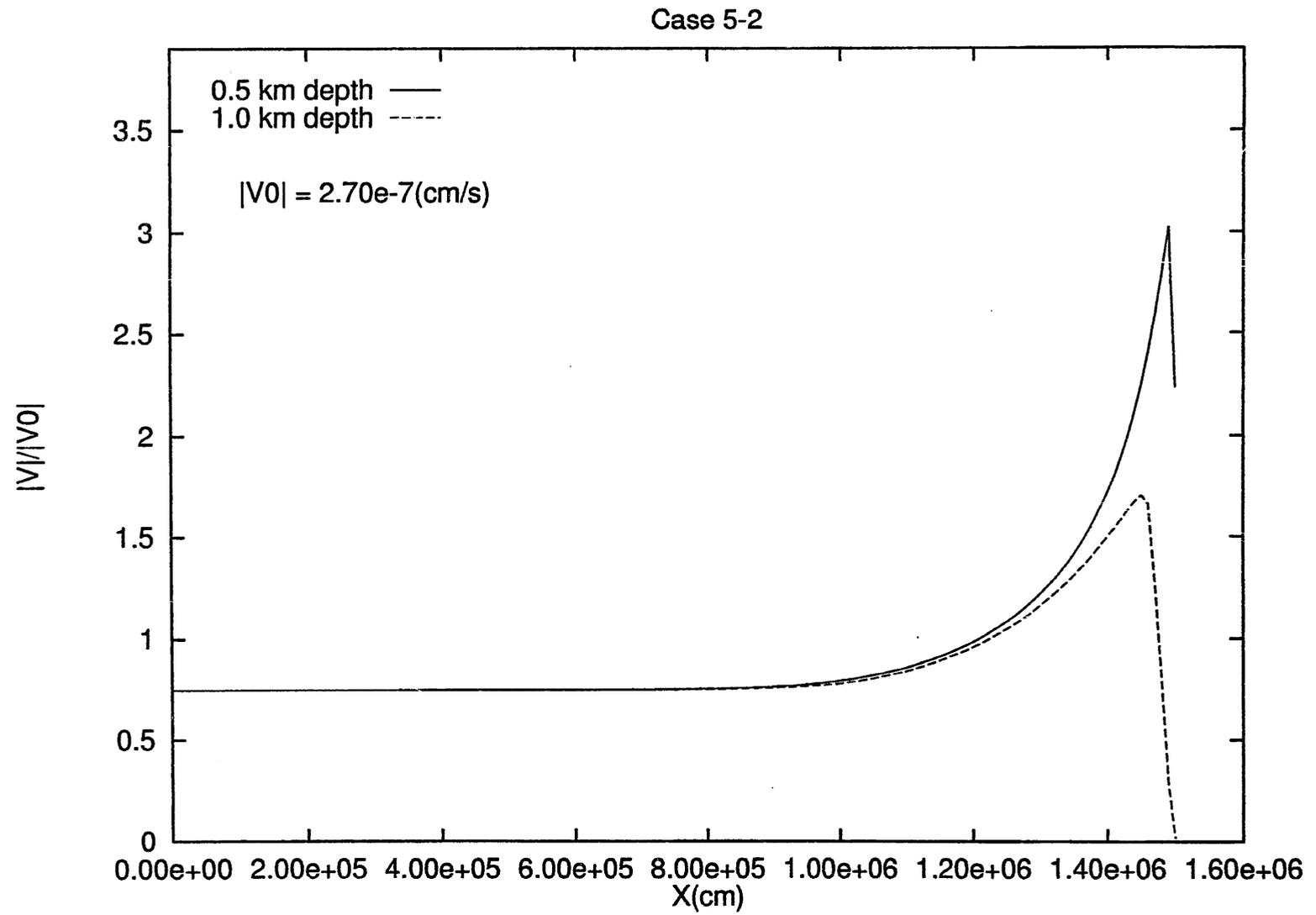


図 5.22 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-2

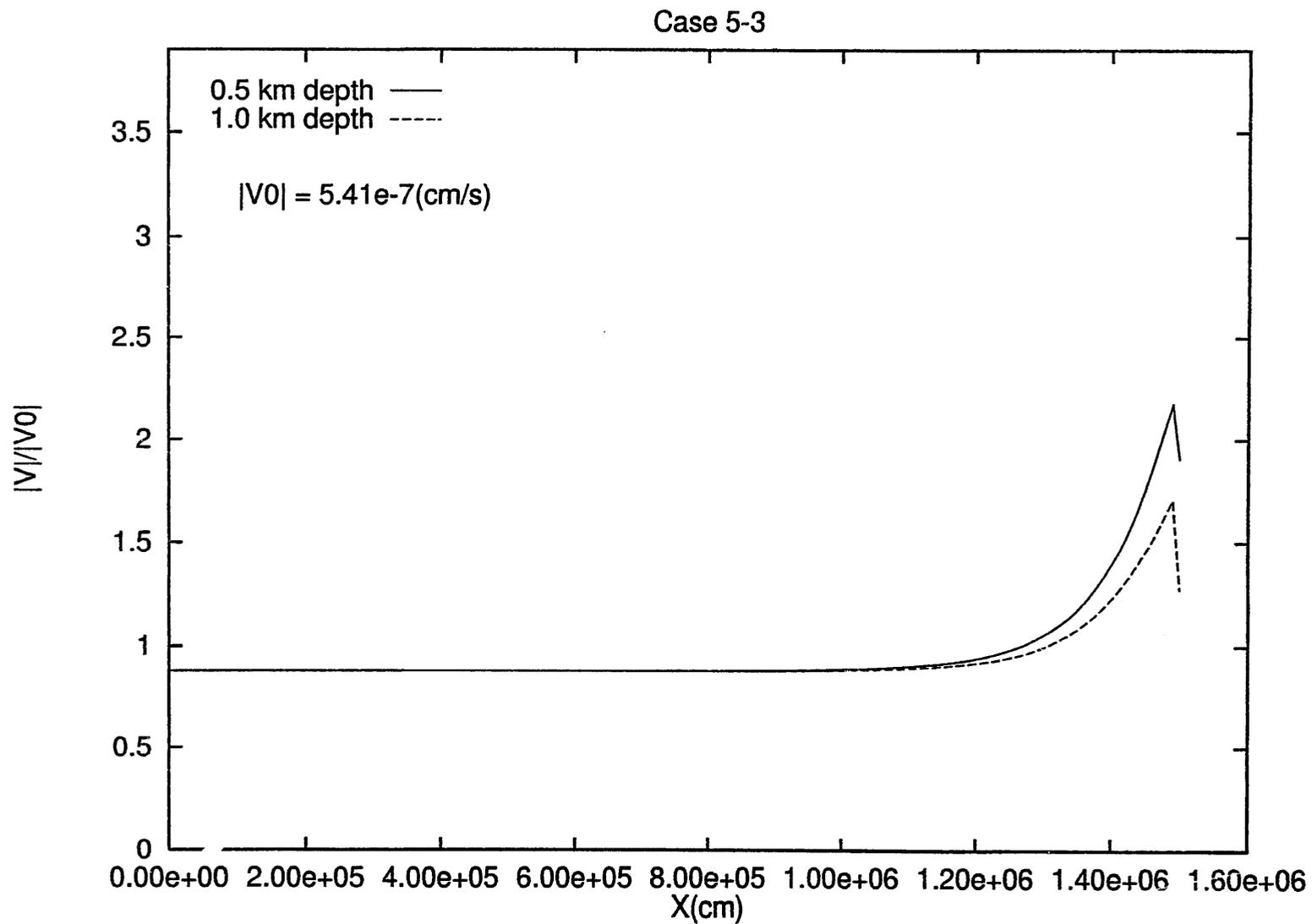


図 5.23 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-3

Case 5-4

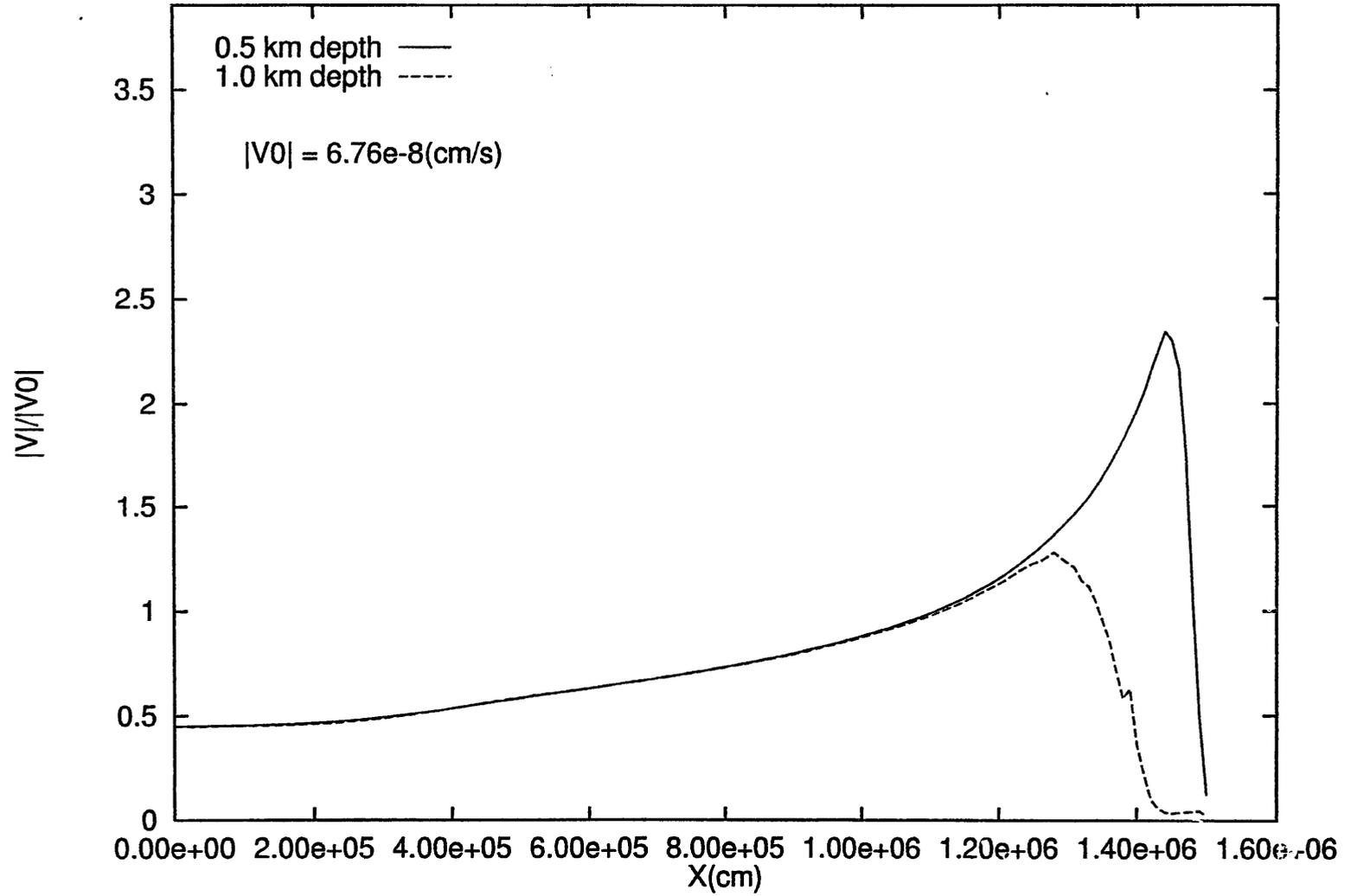


図 5.24 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-4

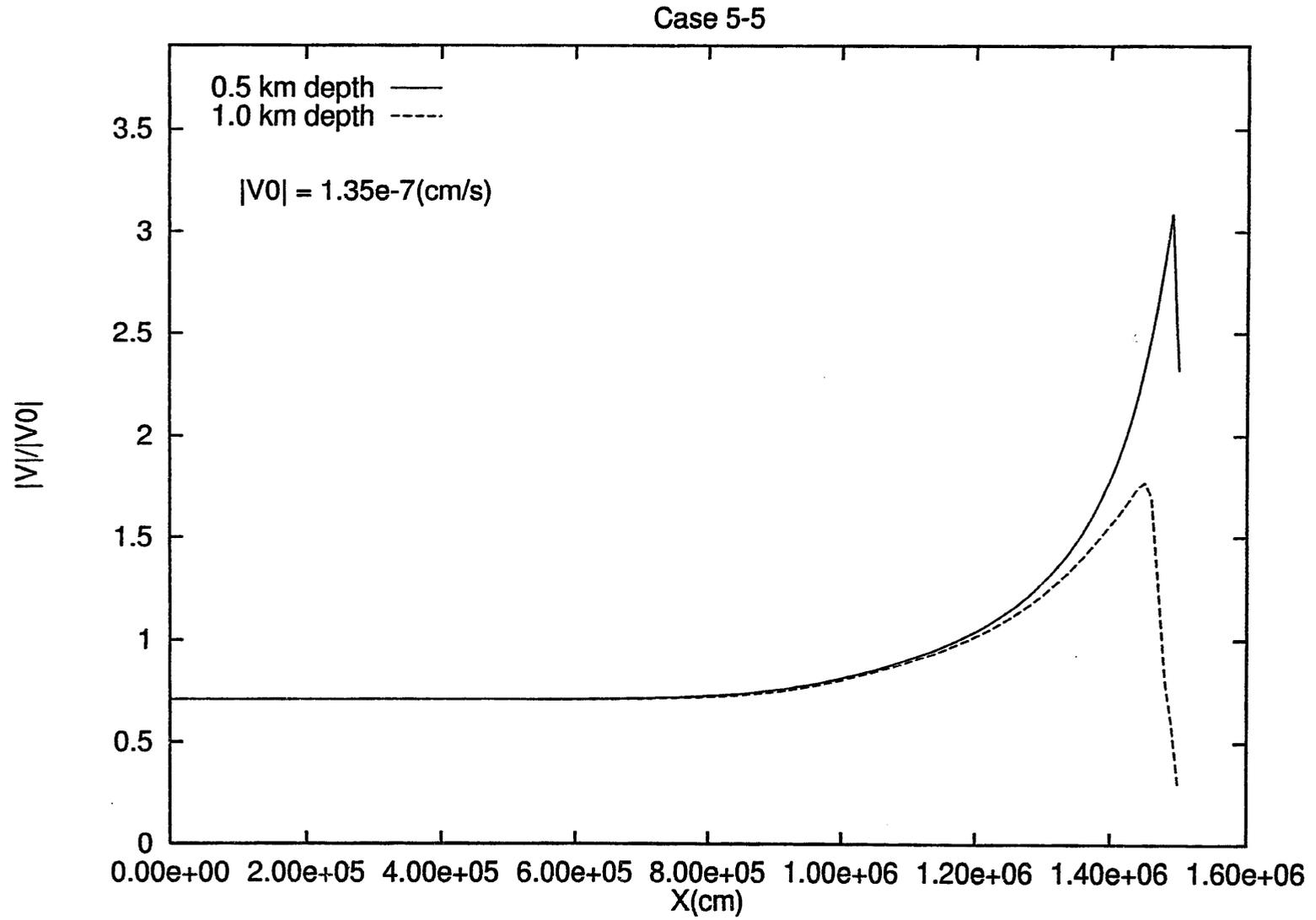


図 5.25 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-5

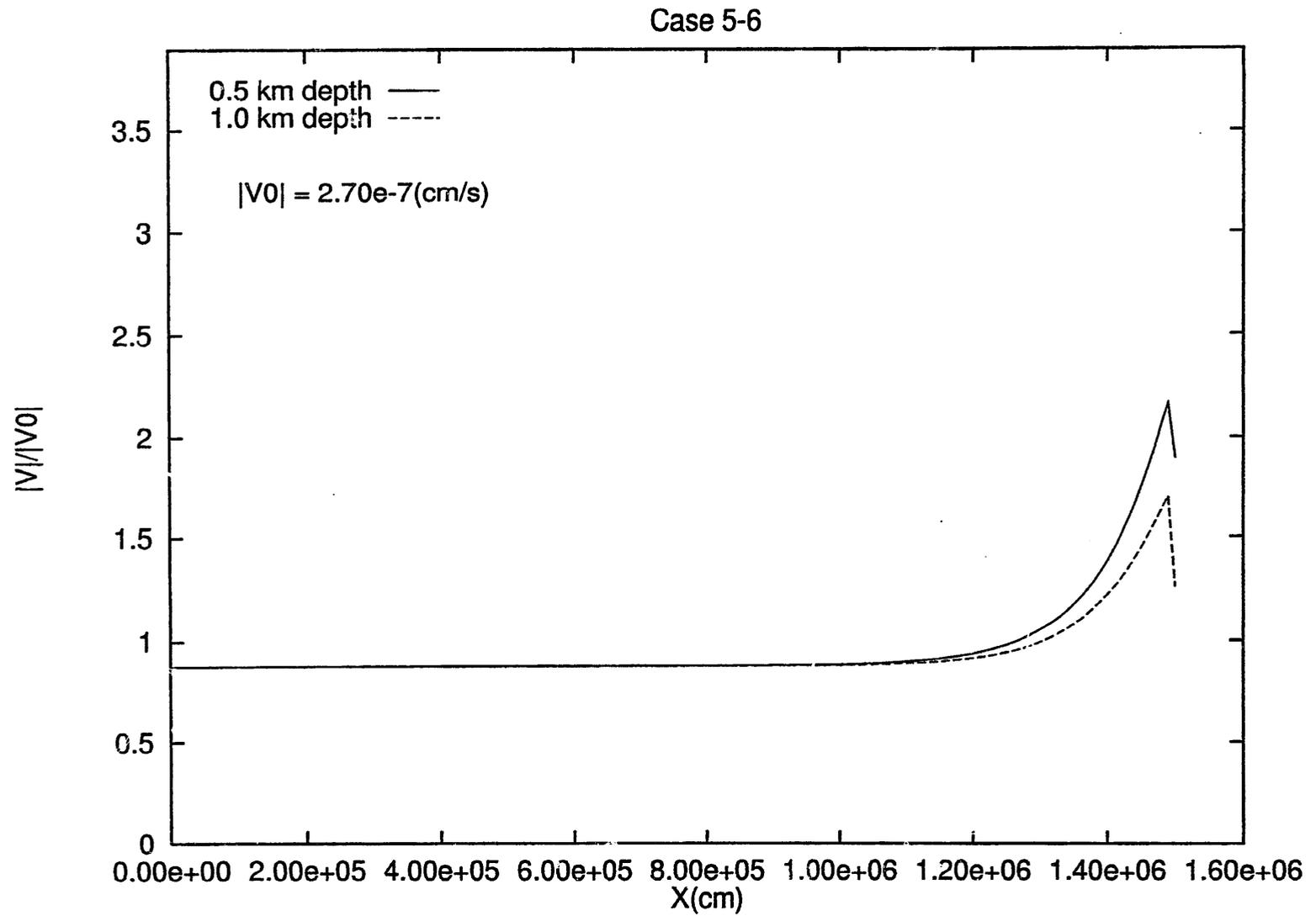


図 5.26 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-6

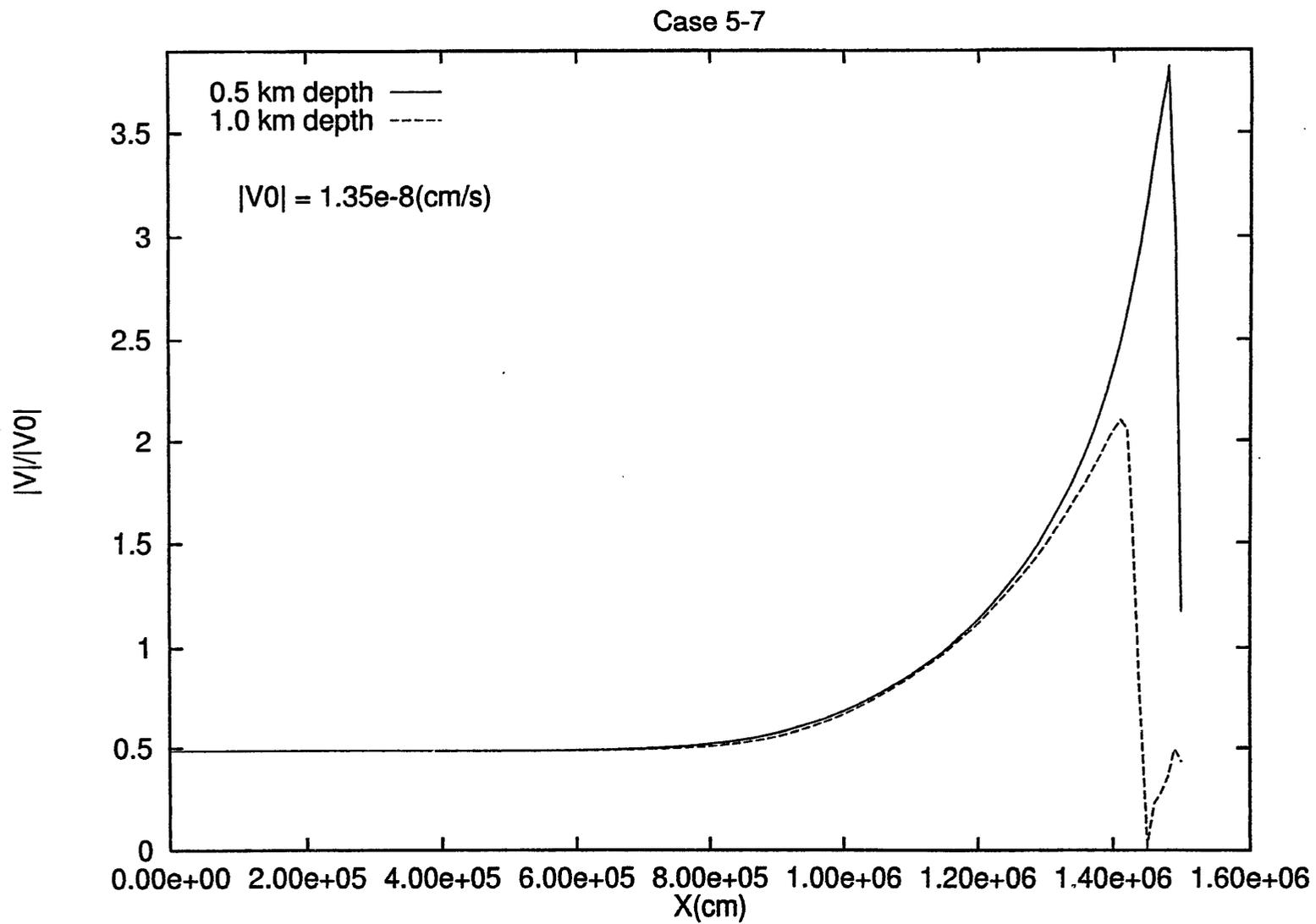


図 5.27 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-7

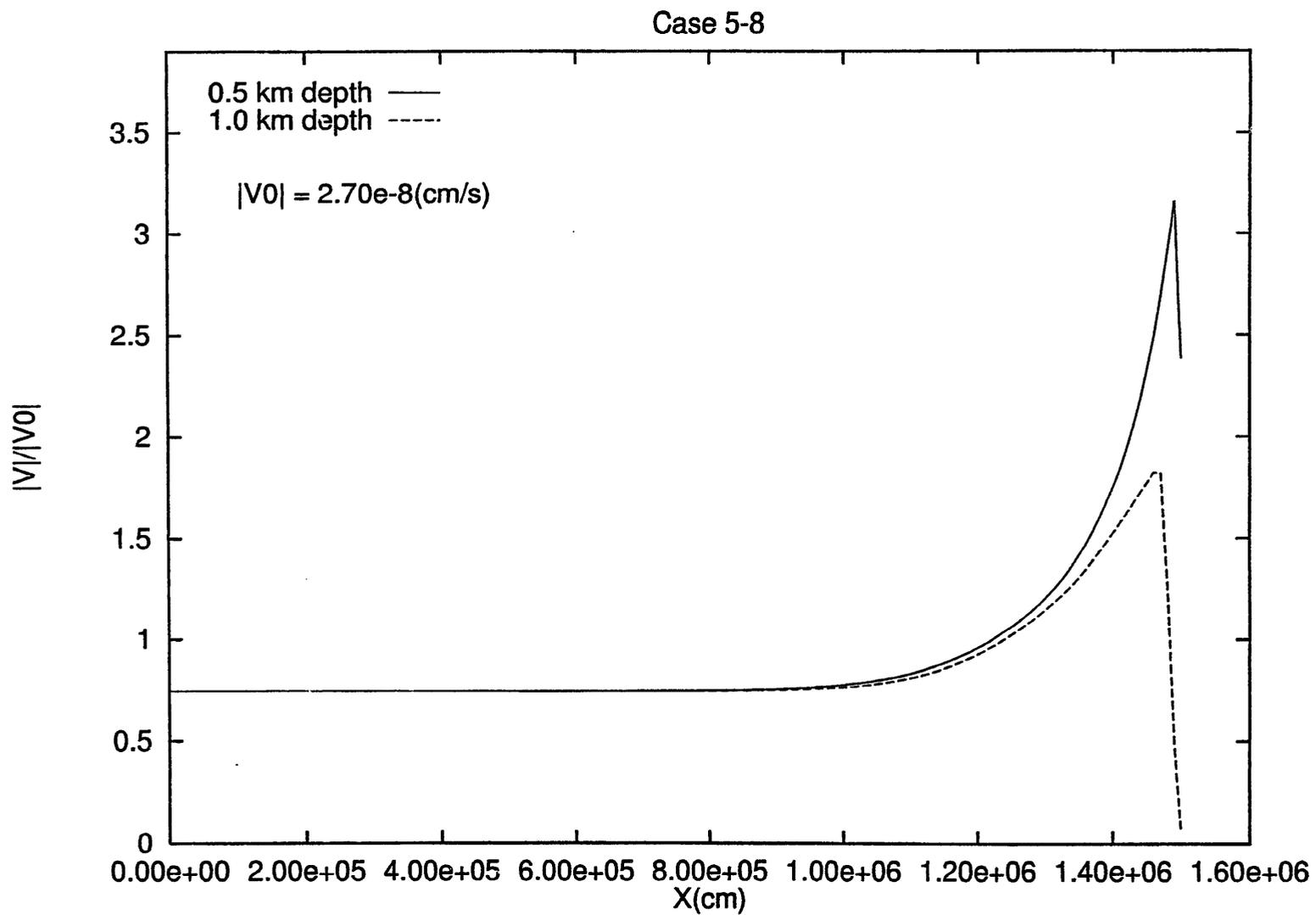


図 5.28 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-8

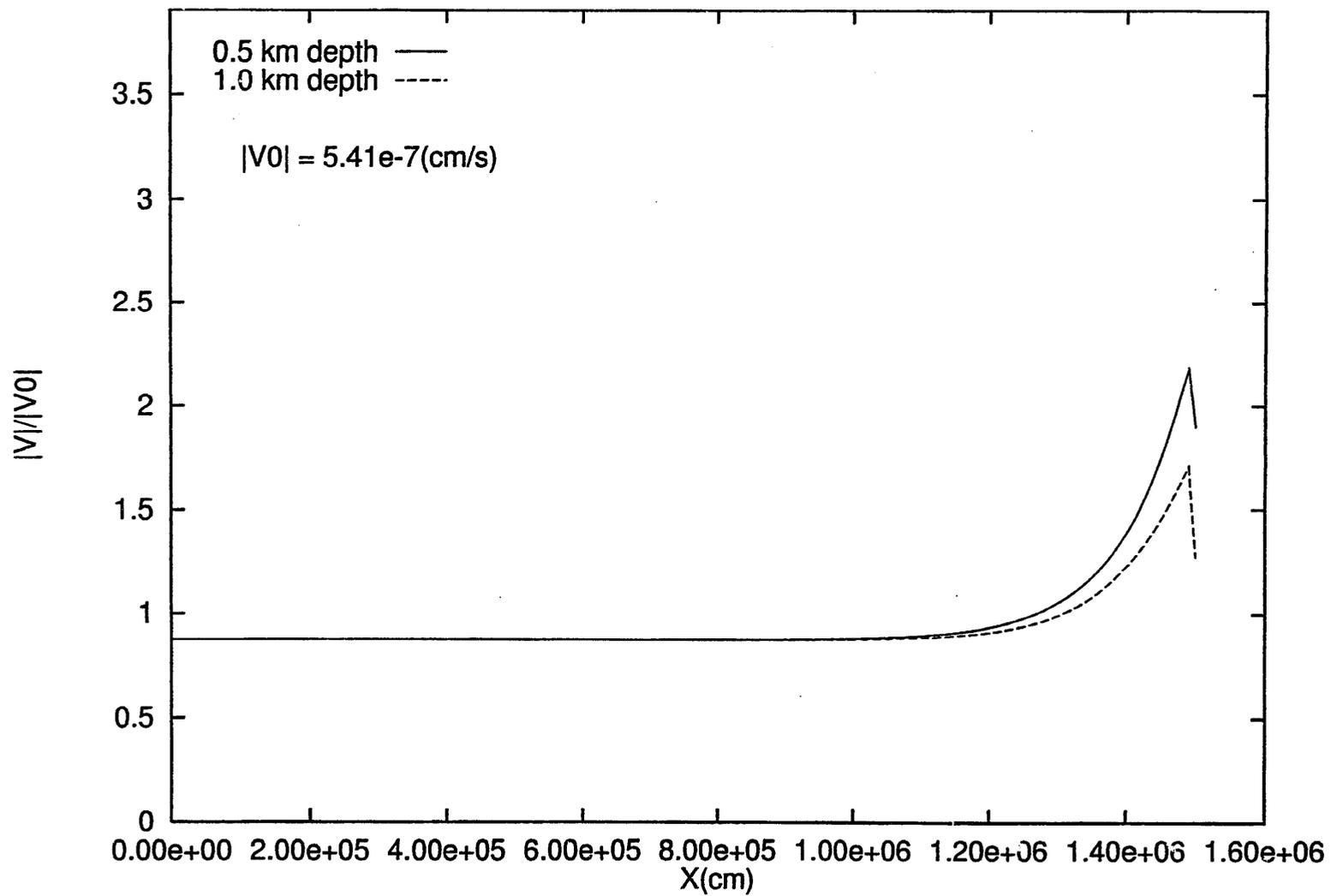


図 5.29 深度 0.5km および 1km の水平断面の実流速分布 ケース 5-9

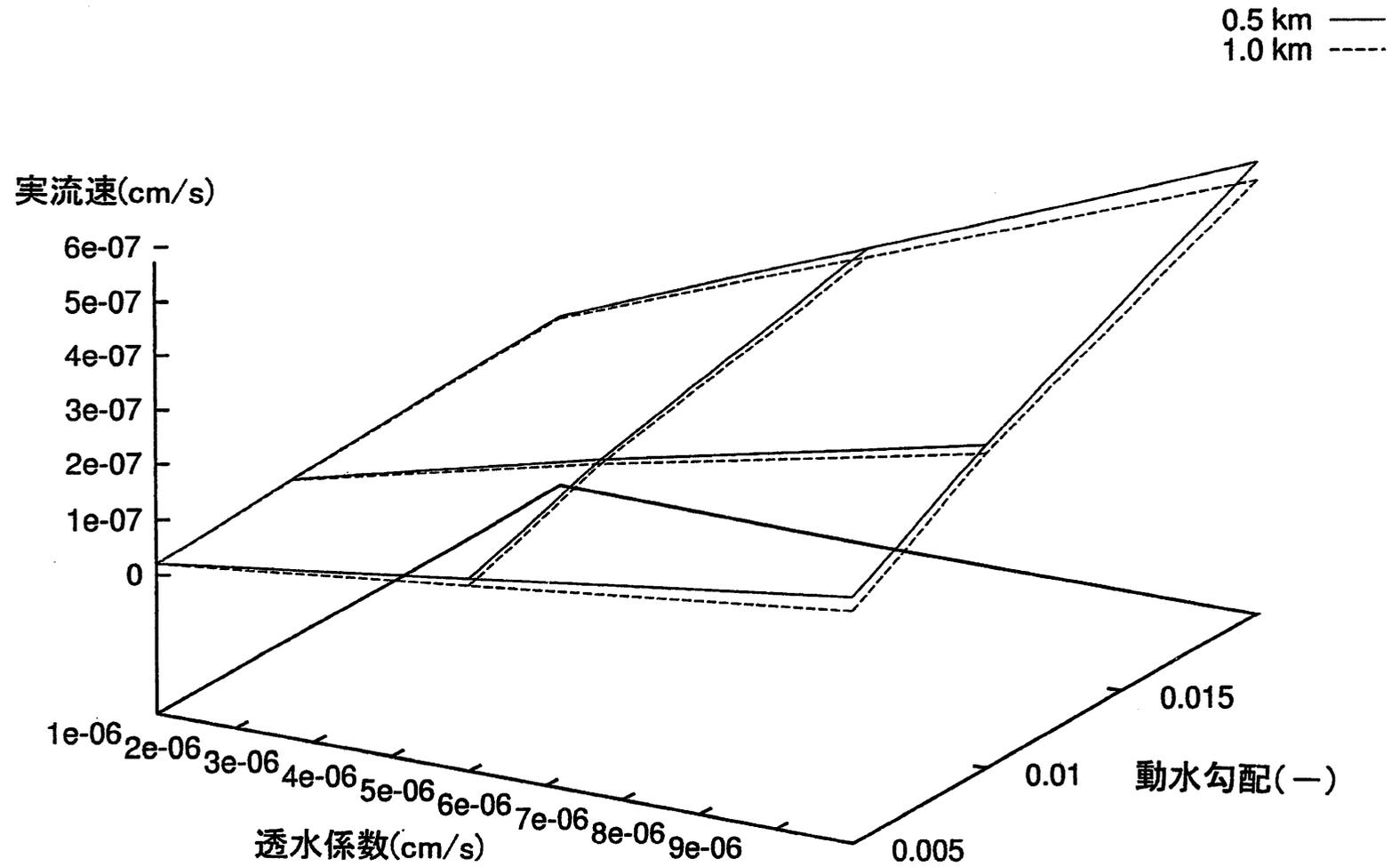


図 5.30 沿岸から距離 2km における深度 0.5km および 1km の地点の実流速と透水係数および動水勾配の関係図

表 5.5 塩水侵入距離と透水係数および動水勾配の関係

透水係数 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	動水勾配 (-)	塩水楔長 (m)	塩水楔長 (m)
1.e-5	0.005	10476	12660
1.e-5	0.010	3940	4320
1.e-5	0.020	1449	1550
5.e-6	0.005	10247	12120
5.e-6	0.010	4010	4230
5.e-6	0.020	1408	1470
1.e-6	0.005	9010	10850
1.e-6	0.010	3818	4040
1.e-6	0.020	1402	1480

表 5.5 沿岸から 2km における深度 0.5km および 1km の地点の  
実流速と透水係数および動水勾配の関係

透水係数 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	動水勾配 (-)	実流速(0.5km) ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	実流速(1km) ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1.e-5	0.005	1.934e-7	1.674e-7
1.e-5	0.010	3.295e-7	3.140e-7
1.e-5	0.020	5.716e-7	5.396e-7
5.e-6	0.005	9.629e-8	8.294e-8
5.e-6	0.010	1.728e-7	1.649e-7
5.e-6	0.020	2.844e-7	2.683e-7
1.e-6	0.005	2.093e-8	2.011e-8
1.e-6	0.010	3.262e-8	3.100e-8
1.e-6	0.020	5.695e-8	5.371e-8

## 参考文献

- (1) 神野健二,上田年比古:粒子の移動による移流分散方程式の数値解法の検討,土木学会論文集,271,pp.45-53,1978.
- (2) 初井和郎,細川土佐男,神野健二,伊藤敏郎:海岸帯水層における鉛直塩分濃度に基づく横方向分散係数の推定方法,土木学会論文集,411/II-12,pp.45-53,1989.
- (3) 水理公式集 - 昭和 46 年版 - 、(社)土木学会、pp.581-596、1985