

本資料は 11 年 7 月 25 日付で
登録区分変更する。 [技術展開部技術協力課]

有効空隙率の空間分布特性を考慮した二重空隙モデルの開発

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
秘	J1214 93-005	1994 921
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

1993年3月

三菱原子力工業株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複写、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

要 目

地層中における物質の移動特性に関して、有効空隙率の空間分布特性を考慮して地下水の流れと物質の移動のモデル化を行った。地下水流れ及び核種移行のモデル化においては、亀裂帯での核種移行評価のために、透水性の高い層（亀裂層）と透水性の低い層（隣接層）からなる2層モデルを構築し、地下水流れと核種移行の計算プログラムシステム (FATRACS) を作成した。

作成したプログラムシステム (FATRACS) について、地下水流れ及び核種移行の計算プログラムの検証を実施し、計算の妥当性が確認できた。また、この計算プログラムを用いて、フィンションサイトの試験を解析することにより、亀裂帯での核種移行を表現することができ、モデルの妥当性を確認することができた。

目 次

1. はじめに	1-1
2. 地下水流れのモデル化	2-1
2.1 評価体系	2-1
2.2 解析モデル	2-1
2.3 モデル式	2-1
3. 物質移動のモデル化	3-1
3.1 評価体系	3-1
3.2 解析モデル	3-1
3.3 モデル式	3-1
4. モデルの検証	4-1
4.1 計算プログラムの概要	4-1
4.2 計算プログラムの検証	4-1
4.3 フィンションでの試験結果の解析によるモデルの妥当性検討	4-2
5. あとがき	5-1

1. まえがき

地層中における物質の移動特性は、その地層の有する空隙構造及び移動する物質自身の性質に依存する。すなわち、物質は地下水で満たされた地層の空隙中を移流分散により移動するが、その物質自身のもつ性質により、物質ごとに移動に寄与する空隙が異なってくる。この物質ごとの有効空隙の違いが、移動速度の違いに表れ、結果的に評価地点において異なる破過曲線が得られることになる。

本研究では、この物質ごとの有効空隙率の違いに着目し、その空間分布特性を考慮して地下水の流れと物質移動のモデル化を行い、モデルの妥当性の検討を行った。モデルの妥当性の検討においては、スウェーデンのフィンションサイトで実施された亀裂帯における水理・トレーサ試験に開発したモデルを適用し、試験データとの比較により、その妥当性を検討した。

2. 地下水流れのモデル化

2.1 評価体系

亀裂帯での核種移行評価のために、地層の構成を透水性の高い層（亀裂層）とこれに接する透水性の低い層（隣接層）からなる体系とした（図2.1-1 参照）。亀裂層は水平な2次元体系とし、動水勾配は1ヶ所または、2ヶ所の井戸で与えられるものとした。

2.2 解析モデル

透水性の高い層と低い層からなる多孔質媒体モデルとし、ダルシー則を適用した。透水性の高い層の地下水流速の算出にあたり、水平な亀裂層での透水係数の分布を考慮した。透水係数の分布は、井戸で測定された値をもとに設定した。亀裂層での地下水流れは2次元的な流れであるが、モデルでは亀裂層での全地下水流量を等分割し、各々の領域を代表する流線を求め、代表流線に沿って地下水が流れるものとして、地下水流速を求めた。隣接層での地下水流速は、対応する亀裂層の流れに比例するものとした。

2.3 モデル式

体系の定常状態での地下水流速を表2.3-1 に示す方法により計算した。地下水の流れる領域を分割したときの各々の領域の代表流線を表2.1-2 に示す方法により計算した。計算で求めた体系の地下水流速と代表流線より、地下水流速を流線上の位置に内挿することで、流線に沿った流速分布を求めた。境界条件は表2.1-3 によるものとした。

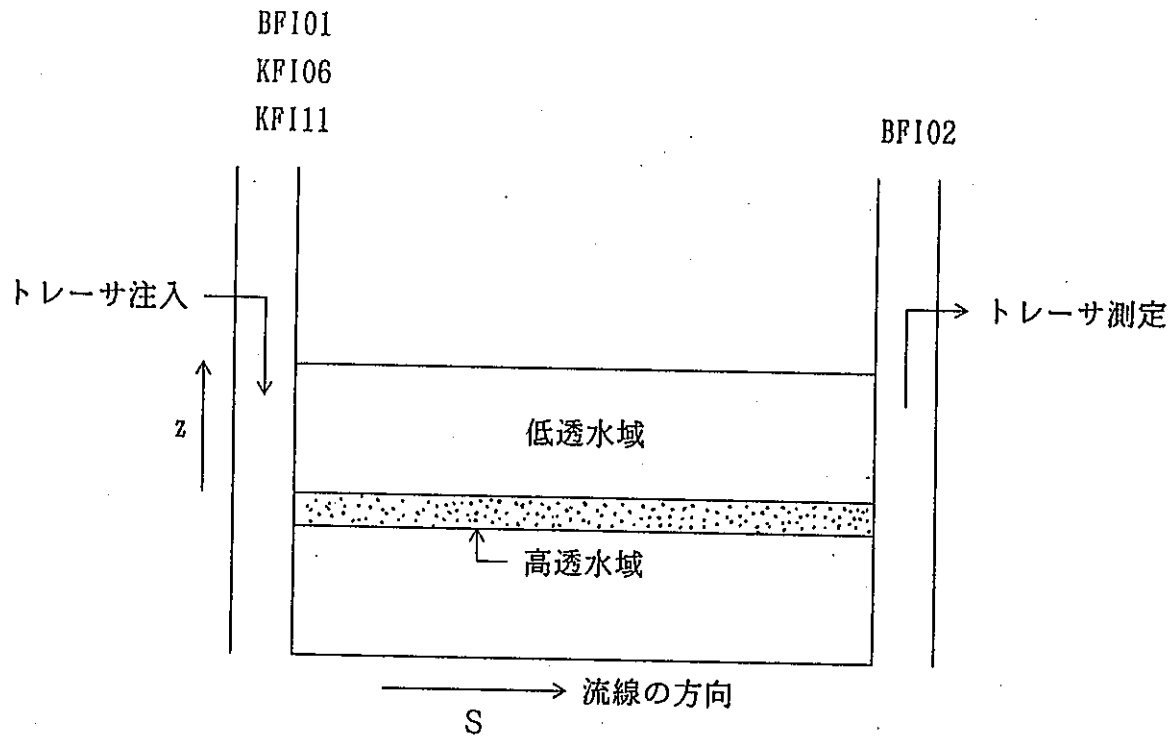


図 2.1-1 2 層 モ デ ル

表 2.3-1 流速の計算方法

(1) 基礎式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(x,y) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(x,y) \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0$$

ここで h : 水 頭
K : 透水係数

(2) 境界条件

表 2.3-3 参照

(3) 解 法

差分法によりメッシュ点における $h(x, y)$ を求める。

次に下式を用いて流速を計算する。

$$V_x = -K \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$V_y = -K \frac{\partial h}{\partial y}$$

ここで V_x : 流速の x 成分
 V_y : 流速の y 成分

表 2.3-2 流線の計算方法

(1) 基礎式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{K(x,y)} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{K(x,y)} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0$$

ここで ϕ : 流れ関数 ($\phi = \text{const}$ のとき関数 ϕ は流線の軌跡を表わす)
 K : 透水係数

(2) 境界条件

表 2.3-3 参照

(3) 解 法

差分法によりメッシュ点における $\phi(x, y)$ を計算する。

次に流量を n 分割して、各領域を代表する流線 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ を求める
 (下図参照)。これらの関数は次式で与えられる。

$$\phi_i = \frac{\phi_0}{n} \left(i - \frac{1}{2} \right), \quad i = 1 \sim n$$

ここで ϕ_0 : 全流量

n : 分割数

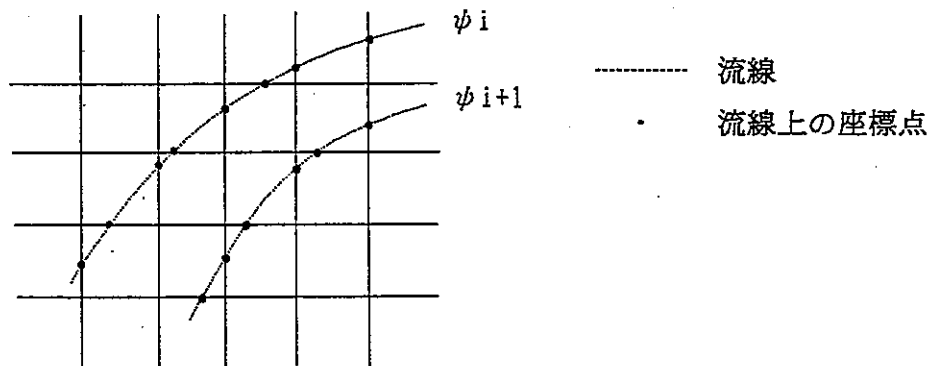
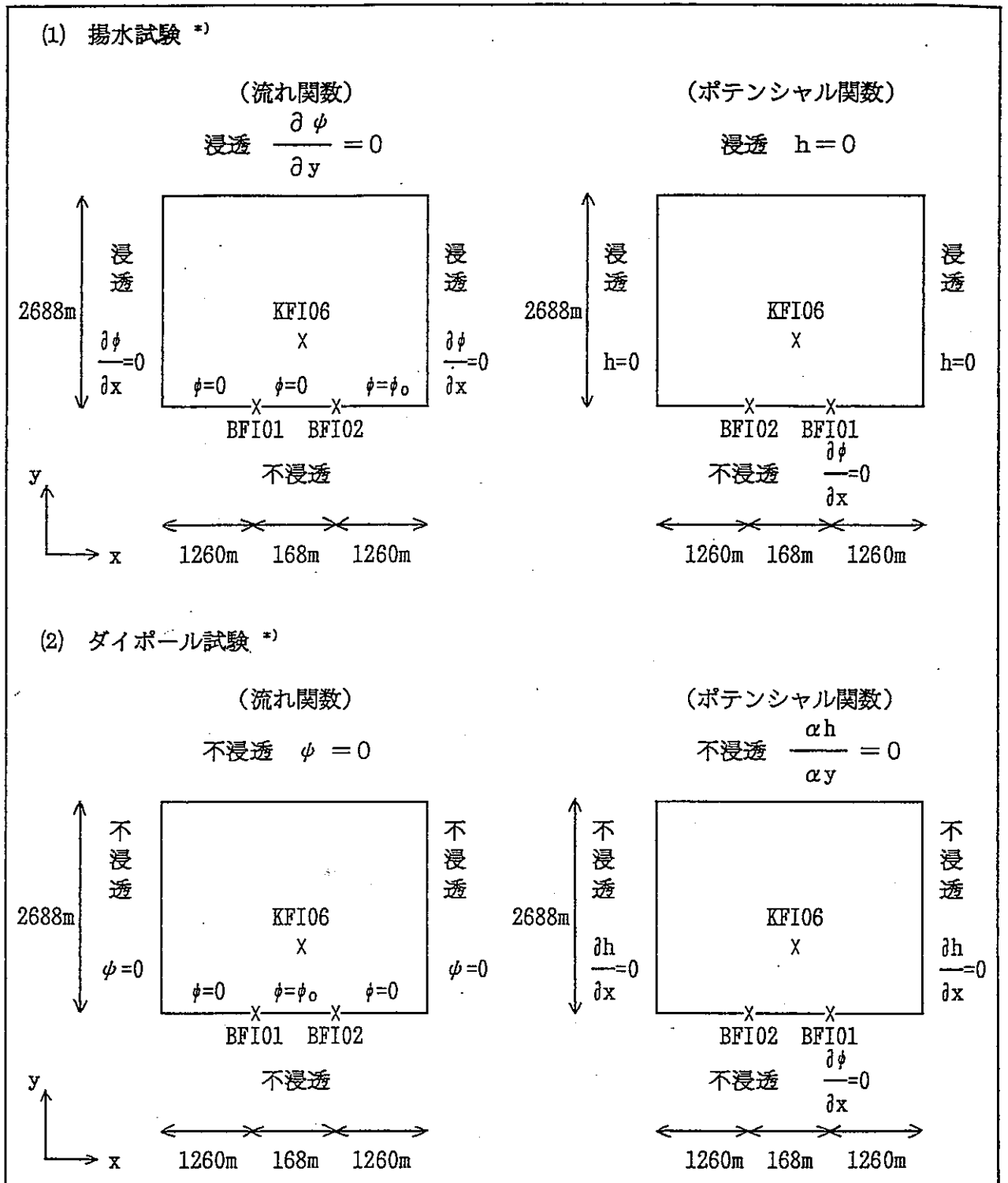


表 2.3-3 境界条件



*) BFI01 - BFI02 - KFI11 面についても同様の境界条件を設定

3. 物質移動のモデル化

3.1 評価体系

2章で述べた地下水流の評価体系と同じ体系とする。

3.2 解析モデル

2章の地下水流れのモデル化で述べた様に、透水性の高い層（亀裂層）とこれに接する透水性の低い層（隣接層）からなる2層モデルでの物質移行を考える（図2.1-1 参照）。亀裂媒体中の核種移行では、亀裂中と隣接層から母岩への核種移行及び母岩から亀裂中への核種移行がある。トレーサ移行に関して、後述する様に試験結果からみるとトレーサ注入が完了し、十分時間が経過しても出口におけるトレーサ濃度が小さくならず、テーリング現象が見られる。これは、トレーサの移行に何らかの遅延効果があることを示している。この効果を表現するために、トレーサは、

- ・ 亀裂層及び隣接層中のポテンシャル流れ場における移流と分散
- ・ 亀裂層と隣接層の間の分散による層間の移行

により移動するものとした。

亀裂層と隣接層の間のトレーサ移行を考慮することで、遅延効果を表現することができると考えられる。

3.3 モデル式

2章で求めた流線上の流速分布を用いて、表3.3-1 に示す方法により、各流線に沿ったトレーサ移行量を計算し、トレーサ出口で移行量を合成する。

表3.3-1 のモデル式において、空隙率として、次の2種類の空隙率を考えた。

- ・ 移流に寄与する空隙率 ----- ϕ_{wf} （亀裂帯）, ϕ_{wp} （隣接層）
- ・ 分散に寄与する空隙率 ----- ϕ_{df} （亀裂帯）, ϕ_{dp} （隣接層）

但し、考えている体系において、これらの空隙率は場所によらず一定とした。

表3.3-2 に示す様にモデル式を変形することにより、空隙率、分散に関する以下の4つのパラメータが主なパラメータとなる。

- ・ $\phi_{t,f}$ ----- 亀裂帯における全空隙率
- ・ $\phi_{t,p}$ ----- 隣接層における全空隙率
- ・ $\alpha_{d,f}^* = \frac{\phi_{df}}{\phi_{wf}} \times \alpha$ ----- 亀裂帯における分散に関するパラメータ

$$\bullet \alpha_p^* = \frac{\phi_{dp}}{\phi_{wp}} \times \alpha \quad \text{----- 隣接層における分散に関するパラメータ}$$

出口におけるトレーサの破過曲線に計算値をフィッティングすることにより、これらのパラメータの算出が行える。

表 3.3-1 トレーサ移行の計算方法 (1/2)

(1) 基礎式

(亀裂帯)

$$\phi_{tf} \frac{\partial C_f}{\partial t} = - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial s} (h C_f \phi_{wf} v_f) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial s} (h \phi_{df} D_f \frac{\partial C_f}{\partial s})$$

$$\text{ここで} \quad + \frac{\phi_{dp} D_{pv}}{b} \frac{\partial C_p}{\partial z} \Big|_{z=0} - \lambda \phi_{tf} C_f$$

C_f : 亀裂帯でのトレーサ濃度

ϕ_{tf} : 亀裂帯での全空隙率

ϕ_{wf} : 亀裂帯での移流に寄与する空隙率

ϕ_{df} : 亀裂帯での分散に寄与する空隙率

v_f : 亀裂帯での地下水流速

D_f : 亀裂帯での分散係数 ($= \alpha_{Lf} v_f$, α_{Lf} : 分散長)

s : 流線に沿った距離

h : 座標の変換因子

b : 亀裂帯の巾の1/2

ϕ_{dp} : 隣接層での分散に寄与する空隙率

D_{pv} : 隣接層での分散係数 ($= \alpha_{TP} v_p$, α_{TP} : 流れ方向の分散長)

λ : 崩壊定数

(隣接層)

$$\phi_{tp} \frac{\partial C_p}{\partial t} = - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial s} (h C_p \phi_{vp} v_p) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial s} (h \phi_{dp} D_{ph} \frac{\partial C_p}{\partial s})$$

$$\text{ここで} \quad + \frac{\partial}{\partial z} (\phi_{dp} D_{pv} \frac{\partial C_p}{\partial z}) - \lambda \phi_{tp} C_p$$

C_p : 隣接層でのトレーサ濃度

ϕ_{tp} : 隣接層での全空隙率

ϕ_{vp} : 隣接層での移流に寄与する空隙率

ϕ_{dp} : 隣接層での分散に寄与する空隙率

v_p : 隣接層での地下水流速

D_{ph} : 隣接層での流れに沿った分散係数 ($= \alpha_{LP} v_p$, α_{LP} : 流れ方向の分散長)

D_{pv} : 隣接層での流れに垂直方向の分散係数

($= \alpha_{TP} v_p$, α_{TP} : 流れに垂直な方向の分散長)

表 3.3-1 トレーサ移行の計算方法 (2/2)

(2) 境界条件

$$C_f(s;0) = C_p(s,z;0) = 0$$

$$C_f(0;t) = C_0(t)$$

$$C_f(s;t) = C_p(s,0;t)$$

$$C_f(L;t) = 0$$

$$C_p(0,z;t) = C_p(L,z;t) = 0$$

s : 流線に沿った座標

z : 高さ方向の座標

L : 流線の長さ

(3) 仮定

$$\alpha_{Lf} \approx \alpha_{Lp} \approx \alpha_{Tp}$$

(4) 解法

差分法によりトレーサ濃度を求める。地下水流速としては、表2.3-1の地下水流速の計算結果と表2.3-2の流れ関数の計算結果を用いて、流線に沿った地下水流速を内挿して求める。

表 3.3-2 トレーサ移行計算式の整理 (1/2)

(亀裂帯)

$$\phi_{if} \frac{\partial C_f}{\partial t} = -\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial S} (h C_f \phi_{wf} v_f) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial S} (h \phi_{df} D_f \frac{\partial C_f}{\partial S})$$

$$+ \frac{\phi_{dp} D_{pv}}{b} \frac{\partial C_p}{\partial Z} \Big|_{z=0} - \lambda \phi_{if} C_f \quad \dots\dots \textcircled{1}$$

(隣接層)

$$\phi_{ip} \frac{\partial C_p}{\partial t} = -\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial S} (h C_p \phi_{wp} v_p) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial S} (h \phi_{dp} D_{ph} \frac{\partial C_p}{\partial S})$$

$$+ \frac{\partial}{\partial Z} (\phi_{dp} D_{pv} \frac{\partial C_p}{\partial Z}) - \lambda \phi_{ip} C_p \quad \dots\dots \textcircled{2}$$

使用記号は表 3.3-1 と同様

①, ②式において

$$D_f = \alpha v_f$$

$$D_{ph} = D_{pv} = \alpha v_p$$

ここで α : 分散長

と仮定し、①, ②式の両辺をそれぞれ $\phi_{wf} v_f$, $\phi_{wp} v_p$ で割って整理すると、

(亀裂帯)

$$\frac{\phi_{if}}{v_{df}} \frac{\partial C_f}{\partial t} = -\frac{\partial C_f}{\partial S} + \alpha_f^* \frac{\partial^2 C_f}{\partial S^2} + \frac{\alpha_p^*}{b} \frac{v_{dp}}{v_{df}} \frac{\partial C_f}{\partial Z} \Big|_{z=0} - \frac{\phi_{if}}{v_{df}} \lambda C_f \quad \dots\dots \textcircled{3}$$

(隣接層)

$$\frac{\phi_{ip}}{v_{dp}} \frac{\partial C_p}{\partial t} = -\frac{\partial C_p}{\partial S} + \alpha_p^* \frac{\partial^2 C_p}{\partial S^2} + \alpha_p^* \frac{\partial^2 C_p}{\partial Z^2} - \frac{v_{ip}}{v_{dp}} \lambda C_p \quad \dots\dots \textcircled{4}$$

表 3.3-2 トレーサ移行計算式の整理(2/2)

ここで
$$\alpha_j^* = \frac{\phi_{dj}}{\phi_{wp}} \alpha$$

$$\alpha_p^* = \frac{\phi_{dp}}{\phi_{wp}} \alpha$$

$$v_{dj} = \phi_{wj} v_j$$

$$v_{dp} = \phi_{wp} v_p$$

よって ③, ④式のトレーサ移行に関係する主なパラメータは

$$\phi_{ij}, \phi_{ip}, \alpha_j^*, \alpha_p^*$$

となる。

4. モデルの検証

4.1 計算プログラムの概要

2章と3章で述べたモデル式に従がい、井戸が1つの場合と井戸が2つの場合について地下水流の流れの計算プログラム及び、核種移行の計算プログラムを表4.1-1に示す。また、プログラム間のデータの流れを図4.1-1に示す（プログラムの詳細はプログラム使用説明書参照）。

4.2 計算プログラムの検証

4.2.1 地下水流れの計算プログラムの検証

(1) 検証方法

計算プログラムによる計算値と解析解と比較することにより、検証を行った。

地下水流速については、表4.2-1及び表4.2-2の体系において透水係数が一定の場合、解析解が存在するので、表2.3-3に示すケースについて作成したプログラムで計算した。ただし、解析解は体系が無限媒体で求められているのに対して、プログラムでは有限体系の境界条件を設定する必要があるため、同じ体系での比較は行えないが、なるべく大きな体系で計算することにより、計算体系の境界の影響を小さくした。

(2) 計算プログラムの検証

表4.2-3に示す計算ケースに従って計算プログラムにより計算した地下水流速の計算値と解析解との比較を図4.2-2と図4.2-3及び図4.2-4に示す。図4.2-2より、1つの井戸に収斂する地下水の流れ場における流速の計算プログラムによる計算値は、解析解による計算値と良く一致していることが分かる。また、図4.2-3及び図4.2-4に示す2つの井戸間での流れ場の場合においても、流速の計算プログラムによる計算値は、ほぼ一致していた。地下水流の計算プログラムによる計算値と解析解による計算値に計算プログラムで用いた境界近くで若干差が見られたのは、プログラムでは表2.3-3に示す有限体系で境界条件（境界では不浸透境界）を設定して計算しているのに対して、解析解は無限体系で求められているために、プログラムの計算で境界の影響が避けられなかったためと考えられる。

4.2.2 核種移行の計算プログラムの検証

(1) 検証方法

表4.2-4に示す1次元有限体系での移流-分散（流速は一定）による核種移行に

については解析解が存在するので、表4.2-5 に示すケースについて、解析解とプログラムによる計算値の比較を行った。一方、2次元での濃度計算では、本モデルの検証に適した解析解はないため、表4.2-6 に示すケースで、マスバランスをとることで計算の正しさのチェックを行った。

(2) プログラムの検証

表4.2-5 に示すケースについて、プログラムによる濃度計算値と解析解との比較を図4.2-5 に示す。図4.2-5 より、いずれのケースにおいてもプログラムによる濃度計算値と解析解による計算値は、ほぼ一致していることがわかる。従ってプログラムによる計算は妥当であると考えられる。

表4.2-6 に示すケースについて2次元体系での濃度計算を行い、入口濃度、出口濃度及び、体系内の濃度の積算値を求めることで、マスバランスをチェックした。計算の結果、誤差約0.5%以内でマスバランスがとれていることがわかった。

4.2.3 検証結果のまとめ

上記4.2.1項及び4.2.2項の検討結果から、以下のことが言える。

- ・ 地下水流の計算値は解析値とほぼ一致したことから、地下水流の計算は正しい計算結果を与える。
- ・ 境界部分の影響を小さくするため、計算体系はなるべく大きくとる必要がある。
- ・ 1次元の濃度計算では、プログラムによる計算値と解析解による計算値はほぼ一致しており、プログラムによる計算は妥当と考えられる。
- ・ 2次元の濃度計算では、計算体系でのマスバランスがとれており、プログラムによる計算は妥当と考えられる。

4.3 フィンションでの試験結果の解析によるモデルの妥当性検討

上記で作成したモデルを用いて、以下に述べるフィンションでの試験結果を解析することにより、モデルの妥当性を検討した。

4.3.1 試験の概要

解析に利用したデータは、スウェーデンのフィンションで実施されたフィールド試験から得られたものである。この試験は、地下約300mにおける結晶性岩からなるほぼ水平な亀裂帯で行われたトレーサ移行試験である。

このフィールド試験では、次に示す揚水試験とダイポール試験の2種類の試験が

実施された。試験体系の概略図と試験に使用した井戸をそれぞれ図4.3-1, 図4.3-2に示す。

(a) 揚水試験

揚水試験では、図4.3-2において、BF102の井戸から地下水を揚水し、BF101, KFI06, KFI11の井戸からトレーサを注入した。揚水孔BF102の地下水を採取し、トレーサ濃度を測定した。トレーサの注入場所は、図4.3-1に示す様に、亀裂帯の中でも透水性の高い3つの層（上部, 中部, 下部）である。

(b) ダイポール試験

ダイポール試験では、揚水試験と同じBF102の井戸から地下水を揚水し、揚水した地下水をBF101の井戸に再注入して地下水を循環させた。この状態において、トレーサをBF101の井戸から注入し、揚水孔BF102におけるトレーサ濃度を測定した。トレーサは、亀裂帯の中で透水性の高い上部の層に注入した。

試験では、トレーサ濃度の他に、各井戸における水頭データ、透水係数の値が測定されている。

4.3.2 解析手順

解析は、図4.3-3に示す手順に従って行なった。

(a) 4つの井戸（BF101, BF102, KFI06, KFI11）で測定された透水係数と、揚水試験のトレーサ移行のデータより、亀裂帯での透水係数の分布を設定する。

(b) 設定した透水係数の分布を用いて、ダイポール試験におけるポテンシャル分布、流速分布、流れ関数の分布を求め、これらの結果を基に、流線を設定し流線に沿った地下水流速を求める。

(c) 設定した流速場でのダイポール試験の移行パラメータ（分散長、空隙率）を、ダイポール試験の揚水孔（BF102）での破過曲線へのフィッティングにより求める。

(d) ダイポール試験で求めた移行パラメータを用いて、揚水試験でのトレーサ濃度を求め、実測値と比較することにより、揚水試験データの再現性を検討する。データの再現性が良くない場合には、揚水試験データを再現するパラメータを求めることとする。

(e) 揚水試験の解析では、試験でトレーサ回収率がわかっているため、回収率につ

いても検討する。

(f)上記の結果を踏まえて、モデルの妥当性を評価する。

4.3.3 解析対象ケース

解析対象ケースは、揚水試験とダイポール試験に共通に使用されているトレーサ、In-EDTA, Tm-EDTA, Gd-DTPA, Iodineの4ケースとした(表4.3-1 参照)。

4.3.4 解析結果

(a)地下水流

試験で使用した4つの井戸(BFI01, BFI02, KFI06, KFI11)において測定された透水係数(表4.3-2 参照)を基に、揚水試験でのトレーサ破過曲線から、亀裂帯の移行に関する空隙率がトレーサによらず一定になるように、透水係数の分布を設定した。透水係数の分布の設定には表4.3-3 及び表4.3-4 に示す分布関数を用いた。設定した透水係数の分布を図4.3-4 ~図4.3-8 に示す。図4.3-4 と図4.3-5 は、体系全体の分布を示しており、図4.3-6 ~図4.3-8 は各井戸間の分布を示している。透水係数の分布の傾向としては、井戸BFI02と井戸KFI11の間では、2つの井戸での透水係数の平均値よりも高めの値、井戸BFI02と井戸KFI06の間では、2つの井戸での透水係数の平均値よりも低めの値、井戸BFI02と井戸BFI01の間では、2つの井戸での透水係数の平均値に近い値、となっている。

図4.3-4 の透水係数の分布を用いて求めた揚水試験とダイポール試験における流線をそれぞれ図4.3-9、図4.3-10 に示す。図4.3-10 のダイポール試験における流線は、地下水全流量を等流量に分割したときのそれぞれの分割した領域を代表する流線を表している。井戸BFI02と井戸KFI11の間の透水係数は、井戸BFI02と井戸KFI06の間の透水係数よりも高めになっているため、井戸BFI02と井戸KFI11の間で、流線が密になっている。

(b)トレーサ移行

ダイポール試験での破過曲線へのフィッティングの結果を図4.3-11 ~図4.3-14 に示す。これらの計算結果から、よう素のケースを除いて計算値と実測値は、よく一致している。従って、解析に用いた2層モデルは、亀裂帯でのトレーサ移行を再現できると考えられる。フィッティングで算出した移行パラメータを表4.3-5 に示す。これらのパラメータを用いて計算した、揚水試験でのトレーサ濃度と実測値との比較を図4.3-15 ~図4.3-18 に示す。Gd-DTPAとTm-EDTAのケースで

は、計算値と実測値は比較的合っている。しかし、In-EDTAとよう素のケースでは、トレーサの移動時間は、計算値と実測値で合っているものの、テーリング部分に差が見られる。そこで、揚水試験での破過曲線へのフィッティングにより、揚水試験を再現するパラメータの算出を試みた。計算結果を図4.3-19～図4.3-22に示す。計算結果は実測値とよく一致しており、2層モデルで揚水試験結果を再現できることがわかった。再現パラメータを表4.3-6に示す。試験では、トレーサ回収率がわかっているため、回収率の計算値と実測値も同表に示す。表4.3-6より、回収率の計算値は、実測値と比較して、大略一致している。In-EDTA, よう素のケースでは、特によく一致している。

4.3.5 モデルの妥当性

フィンションの試験にモデルを適用することにより、以下のことが分かった。

- ・揚水試験データより、亀裂帯での空隙率が核種によらず一定となるような透水係数の分布を設定することができた。
- ・ダイポール試験結果へのフィッティングにより、実測値と計算値はよう素のケースを除き、よく一致した。従って、亀裂帯のトレーサ移行は、亀裂帯と隣接層からなる2層モデルにより、再現することができた。
- ・ダイポール試験で算出した移行パラメータを用いて計算した、揚水試験のトレーサ濃度は、 $Tm-EDTA$ と $Gd-DTPA$ のケースでは、実測値と大略一致したが、 $In-EDTA$ とよう素のケースでは、実測値と差がみられた。しかし、揚水試験結果へのフィッティングにより、揚水試験結果を再現できるような移行パラメータを算出することができた。

以上の結果により、2章及び3章で述べた2層モデルによる亀裂帯での核種移行は妥当であることが分かった。

表 4.1-1 プログラムの内容

項 目	内 容
1. 地下水流れの計算 オプション1 (井戸が2つの場合) DPOT. F DSL. F TOKON. F DVS. F	地下水流の計算 流れ関数の計算 等値線の計算 流線に沿った流速の計算
オプション2 (井戸が1つの場合) RPOT. F RSL. F TOKON. F RVS. F	地下水流の計算 流れ関数の計算 等値線の計算 流線に沿った流速の計算
2. 濃度の計算 AMCON. F	濃度の計算

(井戸が2つの場合)

(井戸が1つの場合)

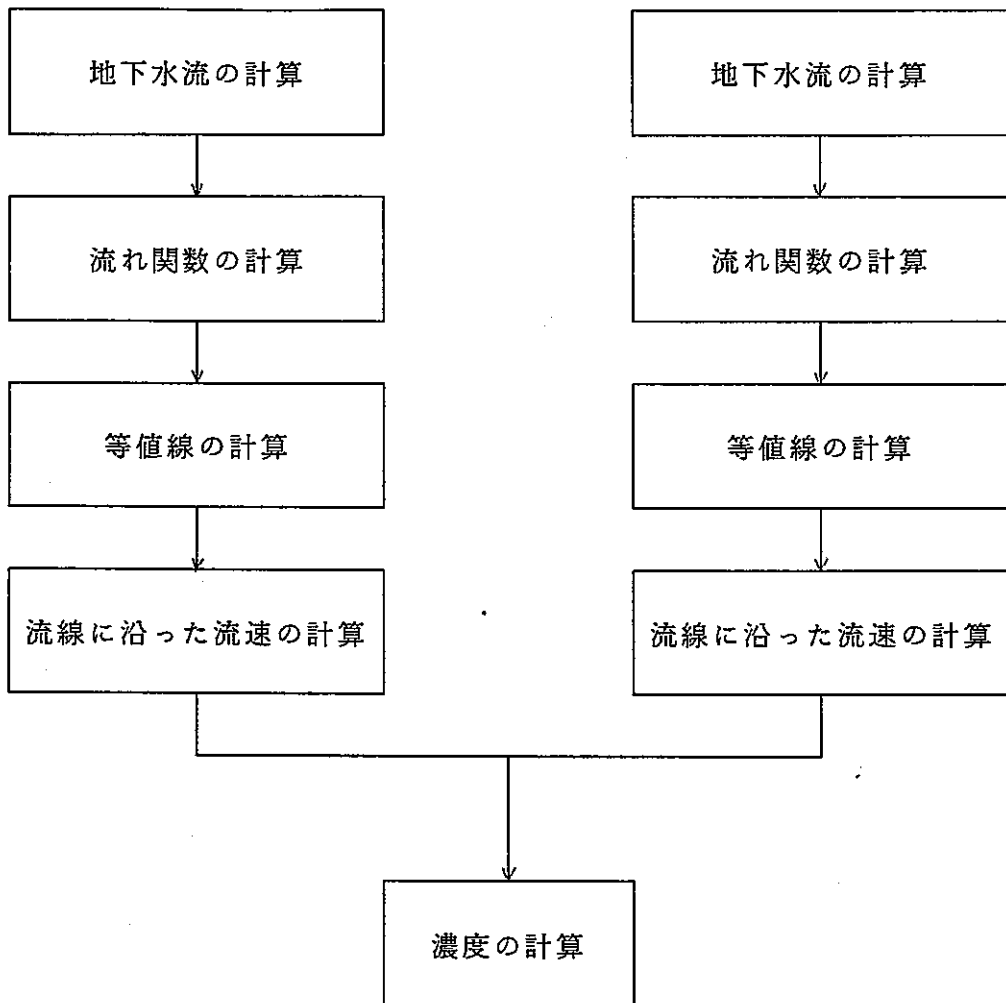


図 4.1-1 プログラムの計算手順

表 4.2-1 揚水試験における地下水流速の解析解

○流 速

揚水試験は井戸BF102 からの揚水で水頭分布が決まるため、揚水孔の中心からの距離 r での速度は次のようになる。

$$v_d = K \cdot \Delta P \cdot \frac{1}{r} / \ln(R/r_w)$$

ここで、 K : 透水係数

r : 揚水孔BF102 の中心からの距離

r_w : 揚水孔の半径

R : 揚水孔との水頭差が測定されている場所の距離

ΔP : R と r_w の地点の水頭差

v_d : ダルシー流速

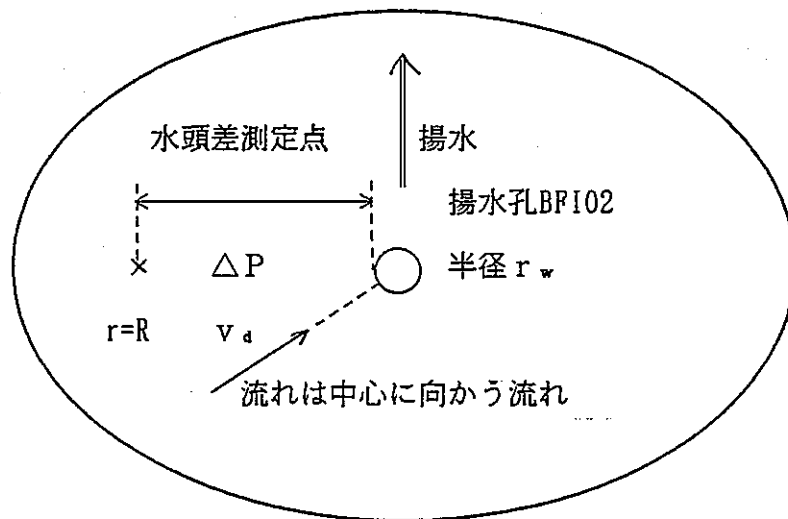


表 4.2-2 ダイポール試験における地下水流速の解析解

流 速

座標 (x, y) でのダルシー流速 v_d ($v_d(x)$, $v_d(y)$) は次のようになる。

$$v_d(x) = \frac{K \cdot \Delta P}{2} \left\{ \frac{x+x_1}{(x+x_1)^2+y^2} - \frac{x-x_1}{(x-x_1)^2+y^2} \right\} / \ln [(2x_1-r_0)/r_0]$$

$$v_d(y) = \frac{K \cdot \Delta P}{2} \left\{ \frac{y}{(x+x_1)^2+y^2} - \frac{y}{(x-x_1)^2+y^2} \right\} / \ln [(2x_1-r_0)/r_0]$$

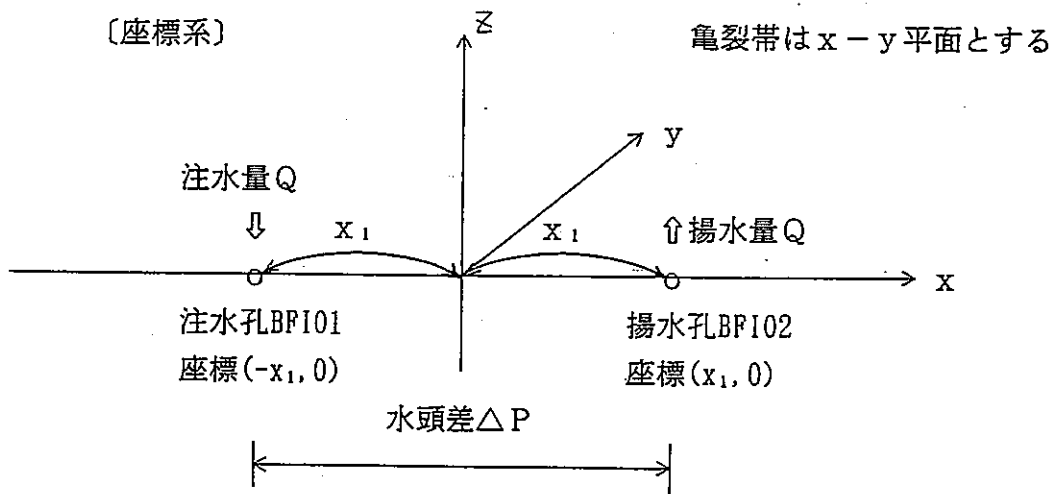
ここで、K : 透水係数

ΔP : 注水孔と揚水孔の水頭差

r_0 : 孔の半径

$2x_1$: 注水孔の中心と揚水孔の中心間の距離

座標系は下図参照, 流線は図 4.2-1 参照



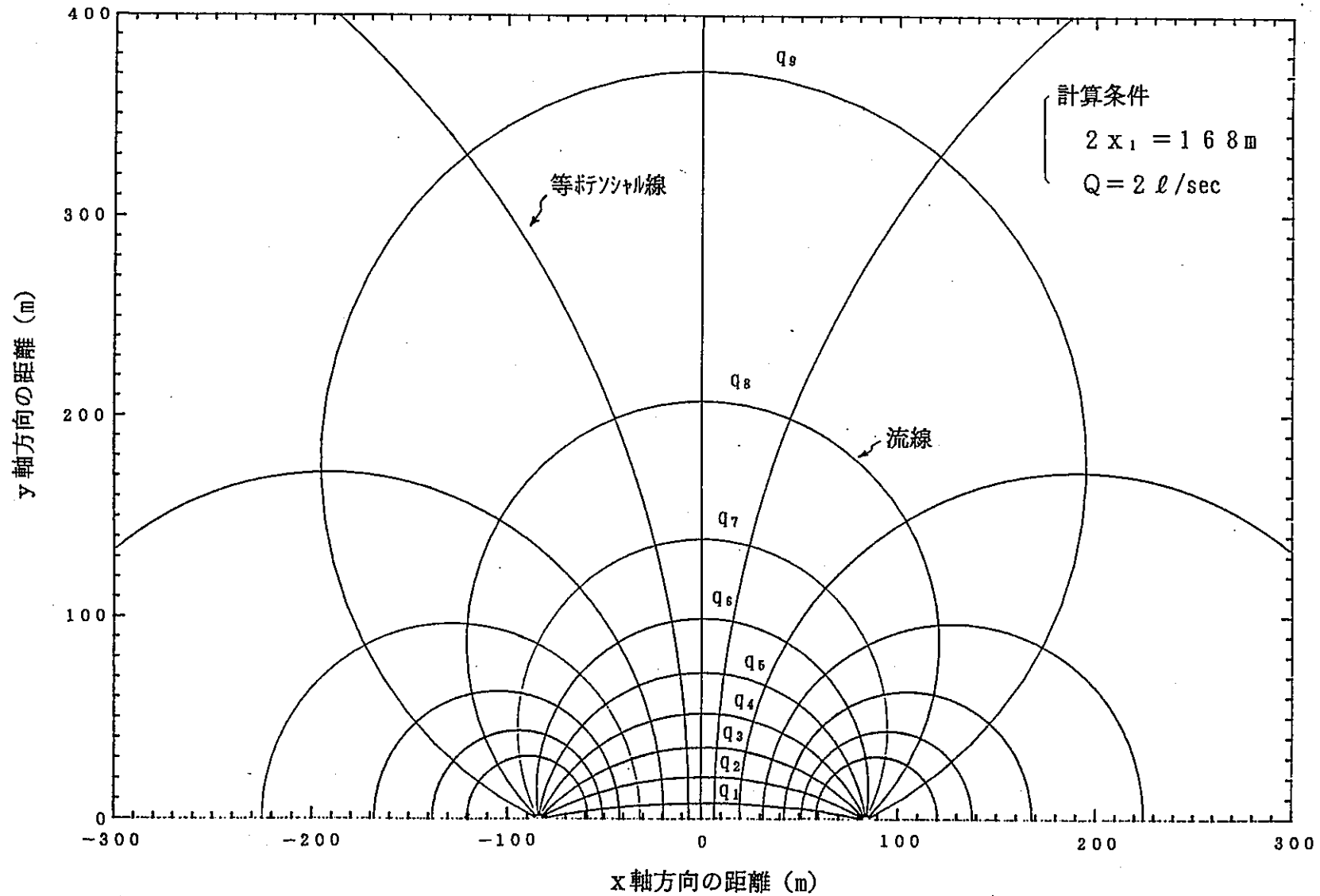


図 4.2-1 ダイポール試験における流線と等ポテンシャル線

表 4.2-3 地下水流速の計算ケース

ケース	ΔP (m)	K (m/s)	L (m)	次元	試験の種類
1	1	1×10^{-4}	160	1	揚水試験
2	1	5×10^{-4}	160	1	揚水試験
3	2	1×10^{-4}	160	2	ダイポール試験
4	2	5×10^{-4}	160	2	ダイポール試験

注) ΔP : 井戸間の差圧

K : 透水係数

L : 井戸間の距離

表4.2-4 トレーサ濃度の解析解

1次元 移流-拡散方程式

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq l$$

初期条件

$$t=0 \text{ のとき} \quad c=0, \quad 0 \leq x \leq l$$

境界条件

$$x=0 \text{ のとき} \quad c=c_0, \quad t>0$$

$$x=l \text{ のとき} \quad c=0, \quad t>0$$

これらの境界条件の下での解は下式となる。

$$\begin{aligned} \frac{c}{c_0} = & \frac{\sinh(l-x) v/2D}{\sinh l v/2D} \cdot e^{vx/2D} \\ & + \frac{2\pi}{l^2} e^{vx/2D} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)}{v^2/4D^2 + n^2\pi^2/l^2} e^{-(v^2/4D + Dn^2\pi^2/l^2)t} \end{aligned}$$

また、出口での濃度フラックス J は

$$\begin{aligned} J(x=l) = & \frac{\frac{v}{2} e^{vl/2D}}{\sinh l v/2D} \\ & - \frac{2\pi D}{l^2} e^{vl/2D} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \frac{n^2\pi}{l}}{v^2/4D^2 + n^2\pi^2/l^2} e^{-(v^2/4D + Dn^2\pi^2/l^2)t} \end{aligned}$$

となる。

表 4.2-5 トレーサ濃度の計算ケース（1次元）

ケース	L (m)	v (m/hr)	α (m)	Pe 数	備 考
1	160	1	10	16	解析解と比較する。
2	160	1	2	80	
3	160	1	20	8	
4	160	0.1	10	16	
5	160	10	10	16	
6	160	1	4	40	

注) L : 井戸間の距離
 v : 地下水流速 (=一定)
 α : 分散長

表 4.2-6 トレーサ濃度の計算ケース（2次元）

ケース	亀裂層		隣接層		備考
	ϕ (-)	α (m)	ϕ' (-)	α' (m)	
1	1×10^{-3}	10	1×10^{-3}	10	標準ケース
2	5×10^{-4}	10	5×10^{-4}	10	ϕ, ϕ' を変化
3	1×10^{-3}	20	1×10^{-3}	20	α, α' を変化

注) ϕ, ϕ' : 空隙率

α, α' : 分散長

地下水流速はダイポール試験の流速場とし、下記の条件とする。

井戸間の距離 $L = 160\text{m}$

井戸間の差圧 $\Delta P = 2\text{m}$

透水係数 $K = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

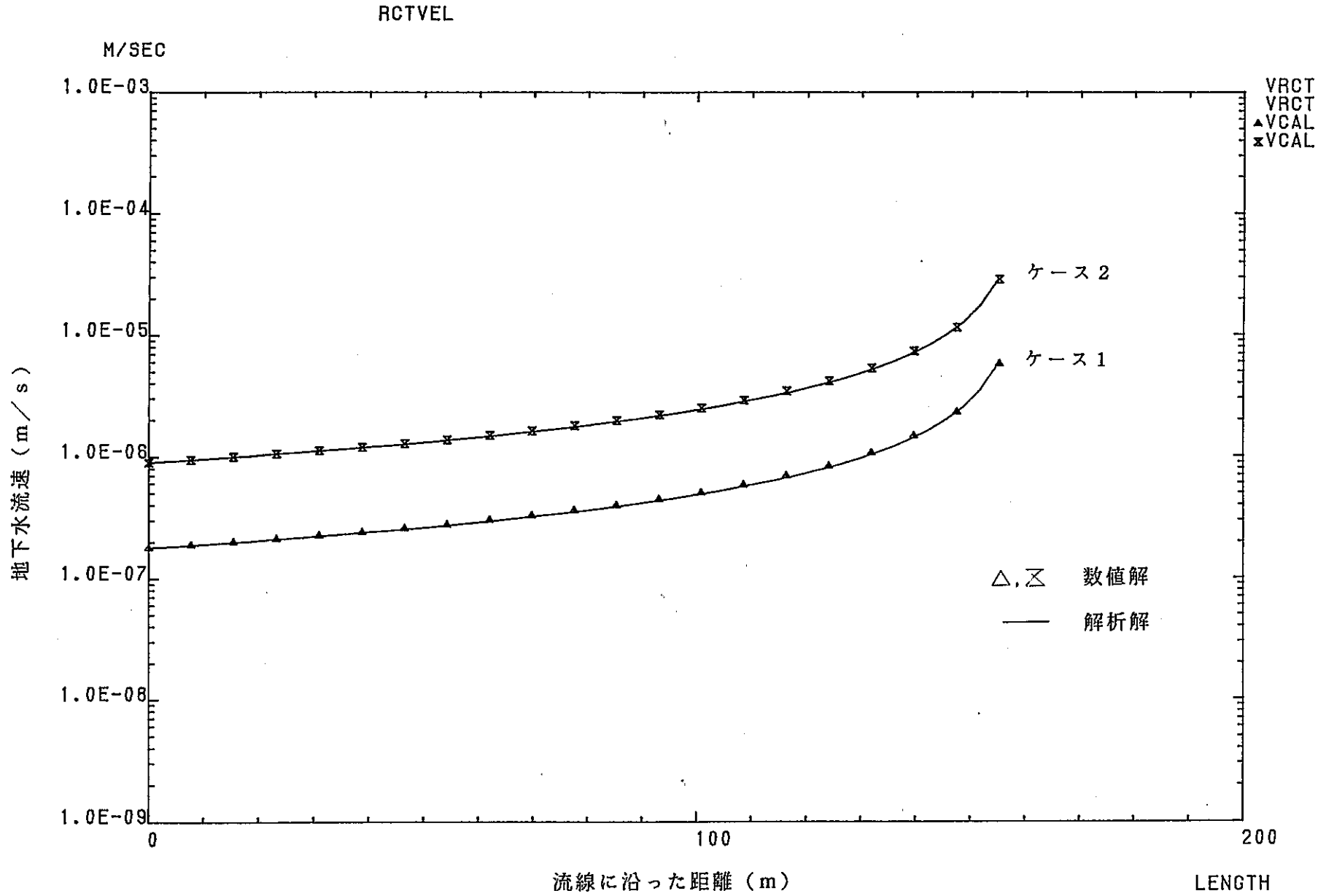


図4.2-2 井戸が1つの場合の地下水流速分布

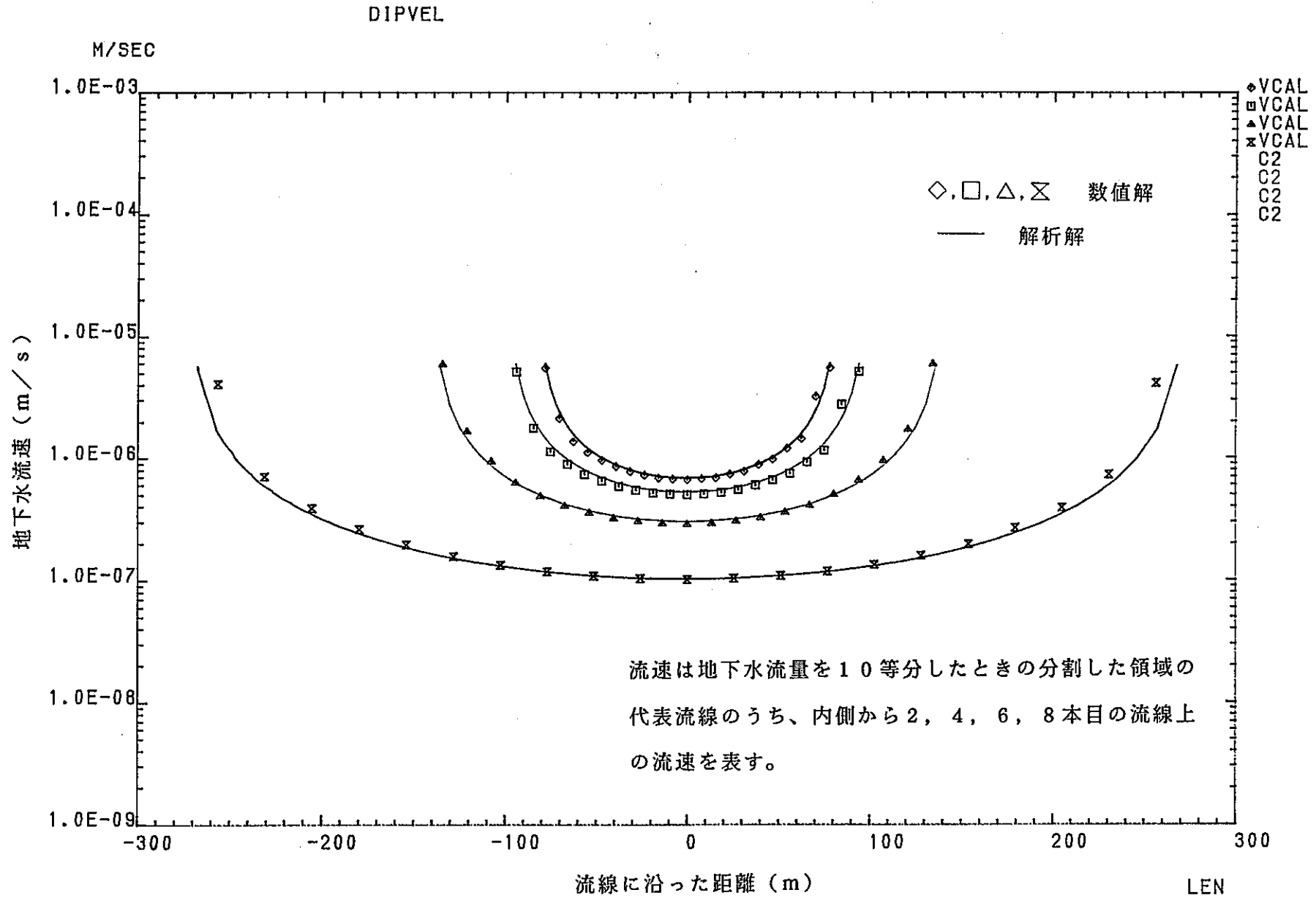
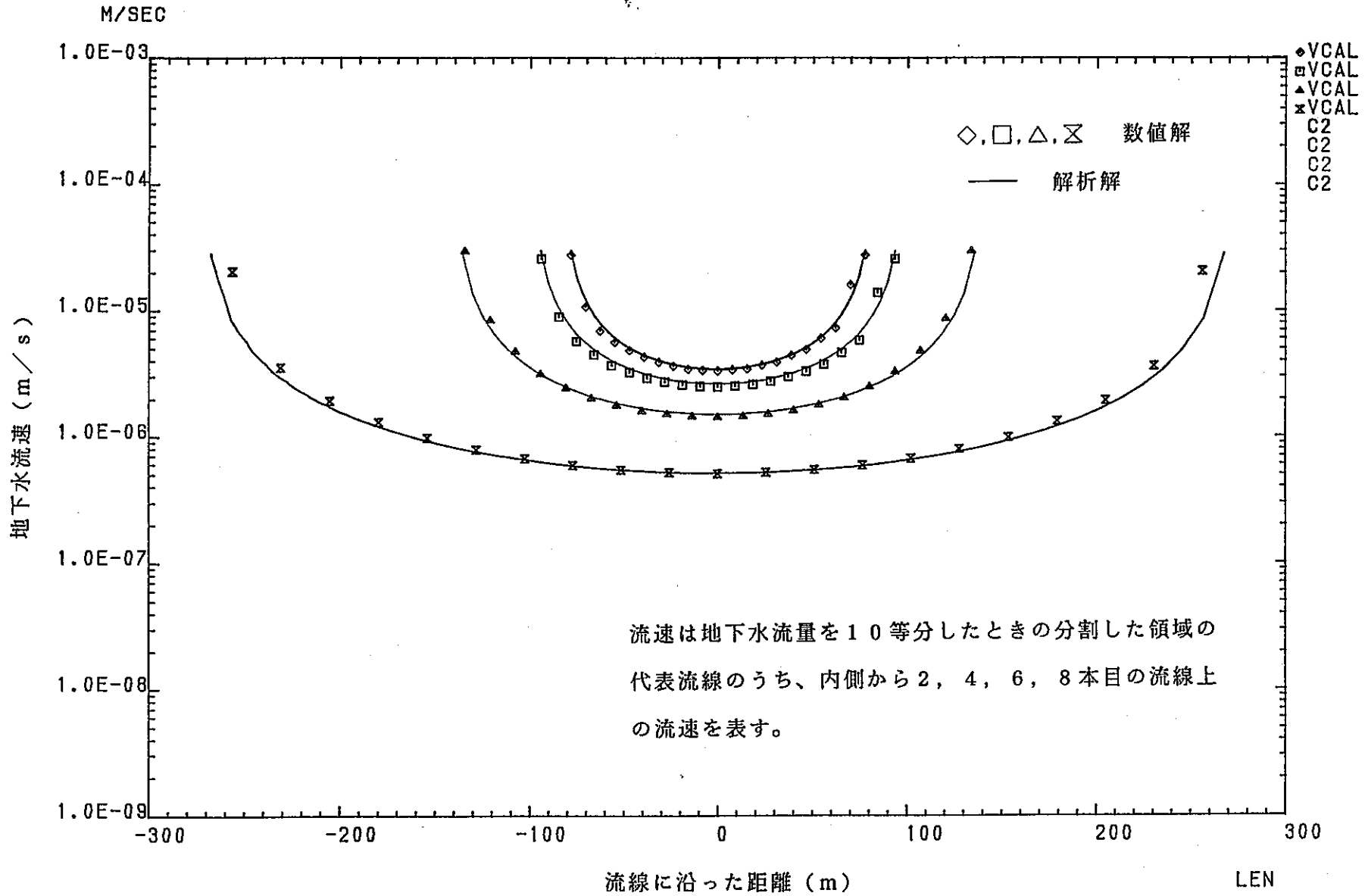


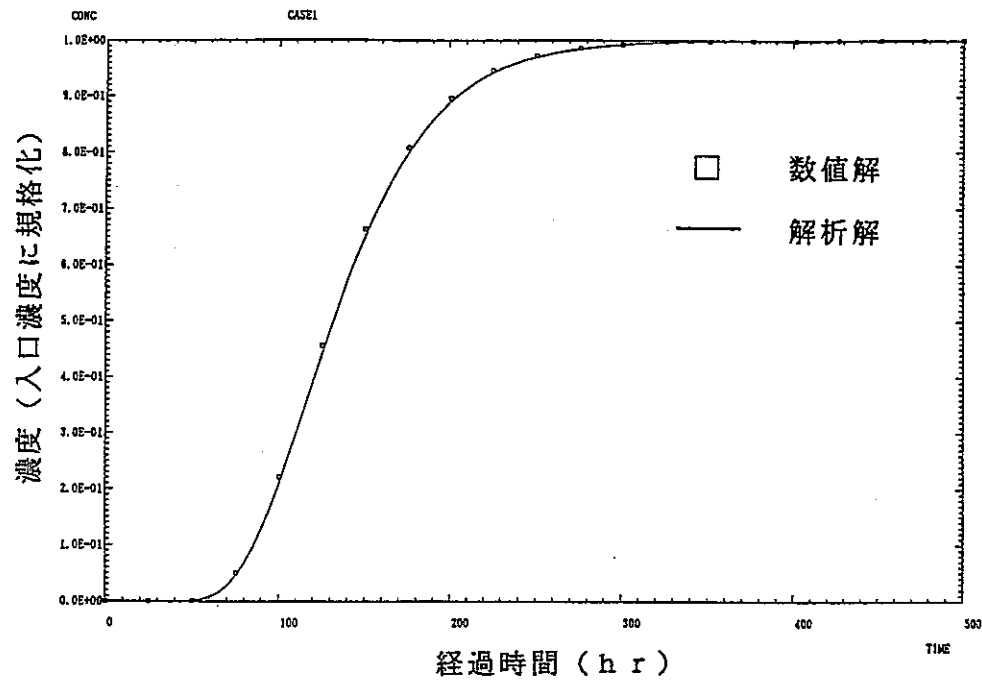
図4.2-3 井戸が2つの場合の地下水流速分布 (ケース3)

DIPVEL

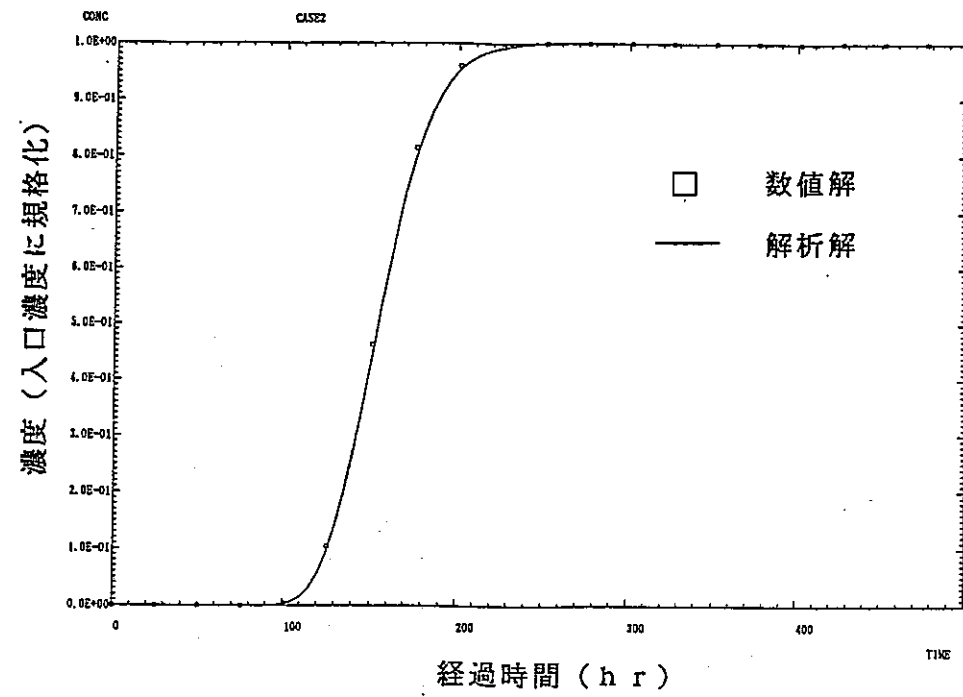


4-17

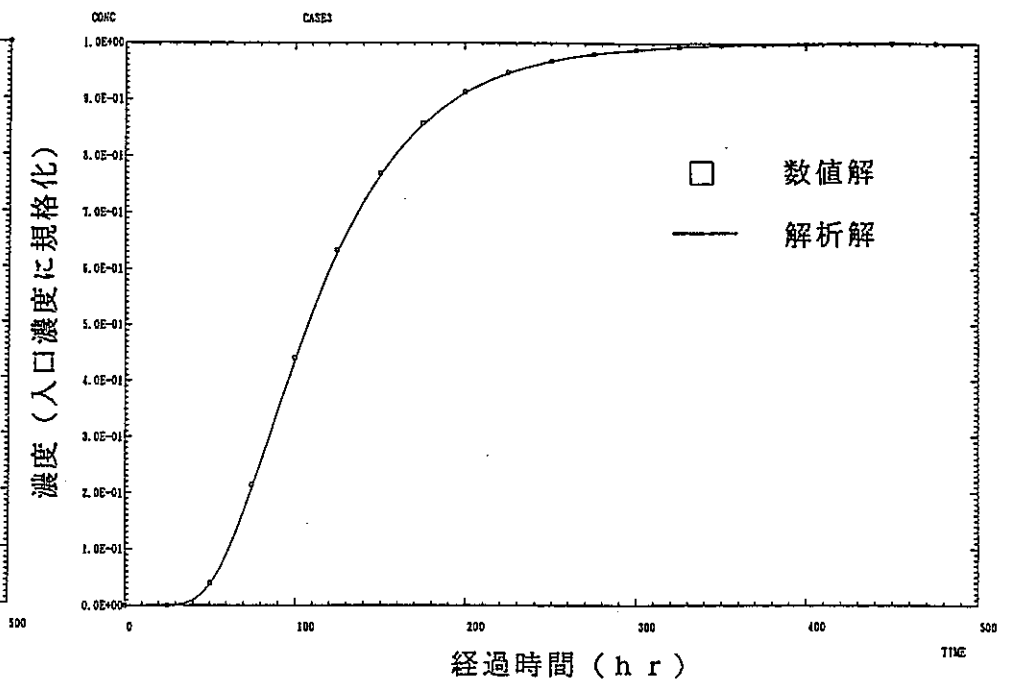
図4.2-4 井戸が2つの場合の地下水流速分布 (ケース4)



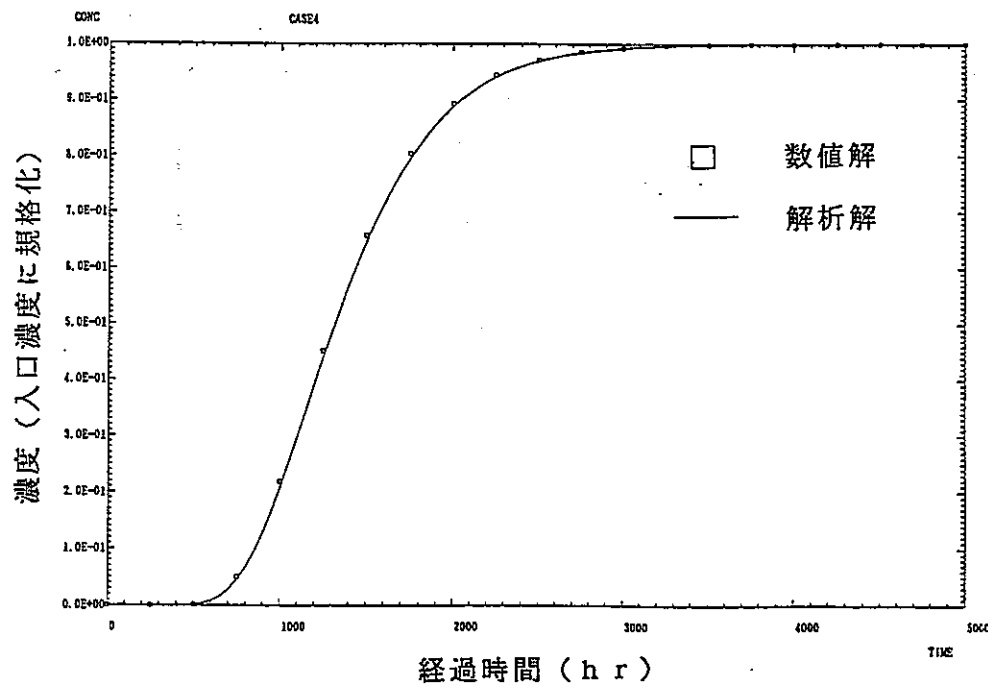
(1) ケース 1



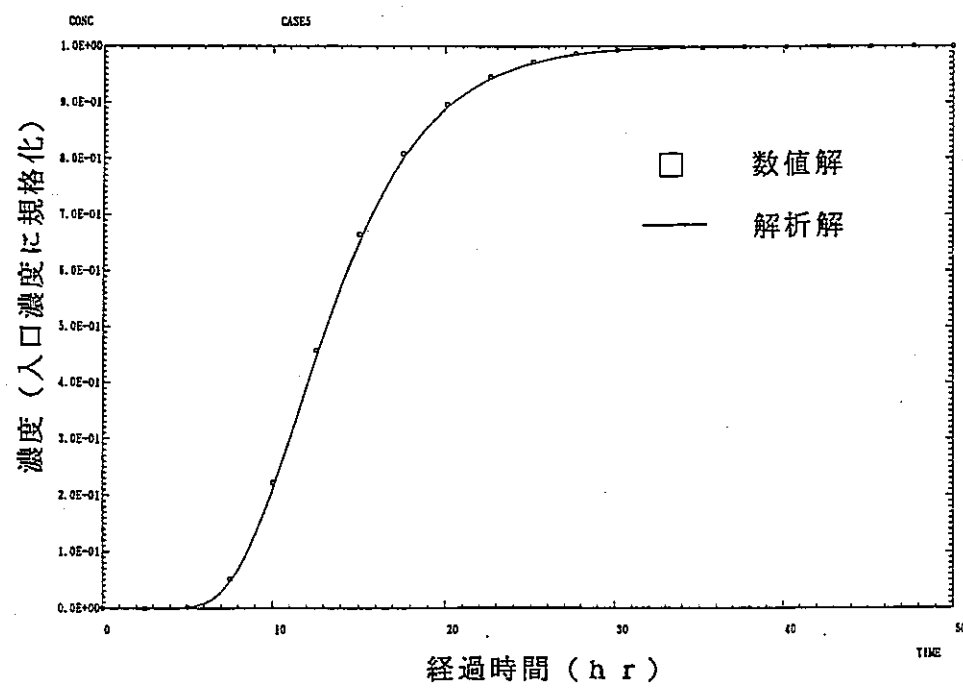
(2) ケース 2



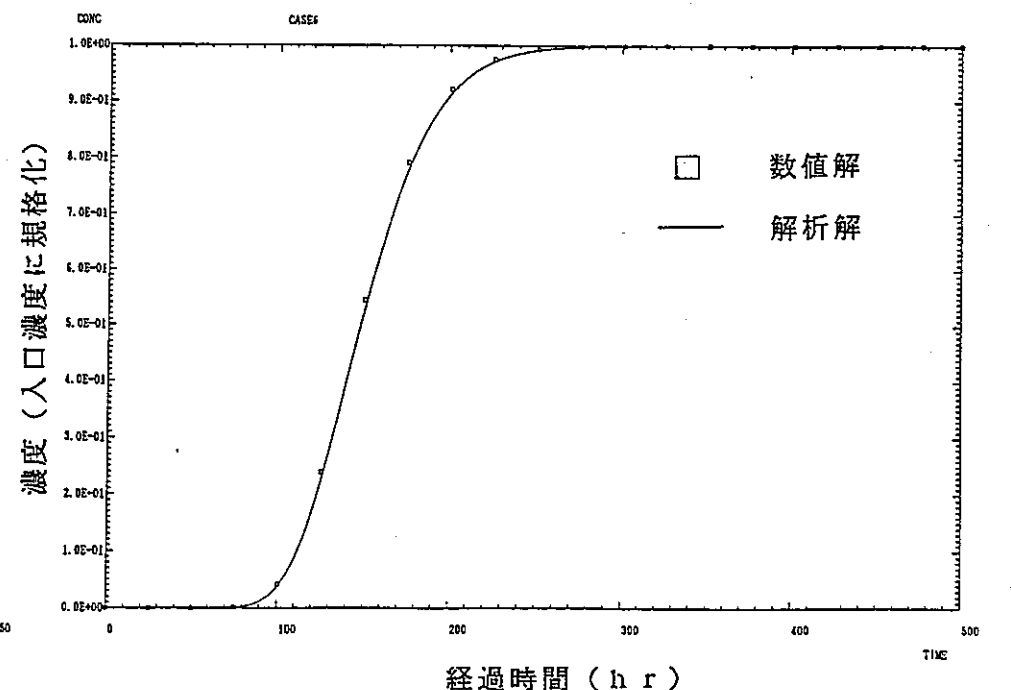
(3) ケース 3



(4) ケース 4



(5) ケース 5



(6) ケース 6

図 4.2-5 出口濃度の時間変化

表 4.2-8 トレーサ濃度計算におけるマスバランス

ケース *1	時間 *2	濃度積算値 *3			$\frac{S^2 + S^3}{S^1}$
		入口 S_1	出口 S_2	体系内 S_3	
1	①	1.00	6.07×10^{-3}	9.98×10^{-1}	1.004
	②	1.09	9.87×10^{-2}	9.97×10^{-1}	1.002
	③	1.31	3.10×10^{-1}	9.94×10^{-1}	0.999
2	①	1.00	7.53×10^{-3}	9.95×10^{-1}	1.003
	②	1.12	1.31×10^{-1}	9.94×10^{-1}	1.002
	③	1.40	4.11×10^{-1}	9.93×10^{-1}	1.001
3	①	1.00	1.70×10^{-2}	9.89×10^{-1}	1.006
	②	1.09	1.07×10^{-1}	9.87×10^{-1}	1.002
	③	1.25	2.67×10^{-1}	9.84×10^{-1}	0.998

*1 : 表 4.2-6 に示すケース

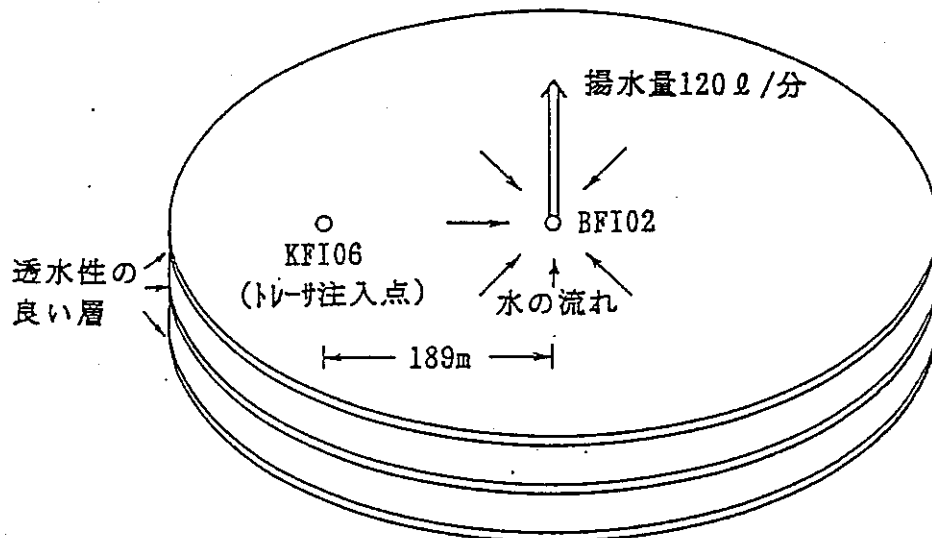
*2 : ①濃度ピークの時期の半分の経過時間後

②濃度ピークの時期

③濃度ピークの時期の2倍の経過時間後

*3 : 時期①における入口濃度積算値を1.0に規格化した値

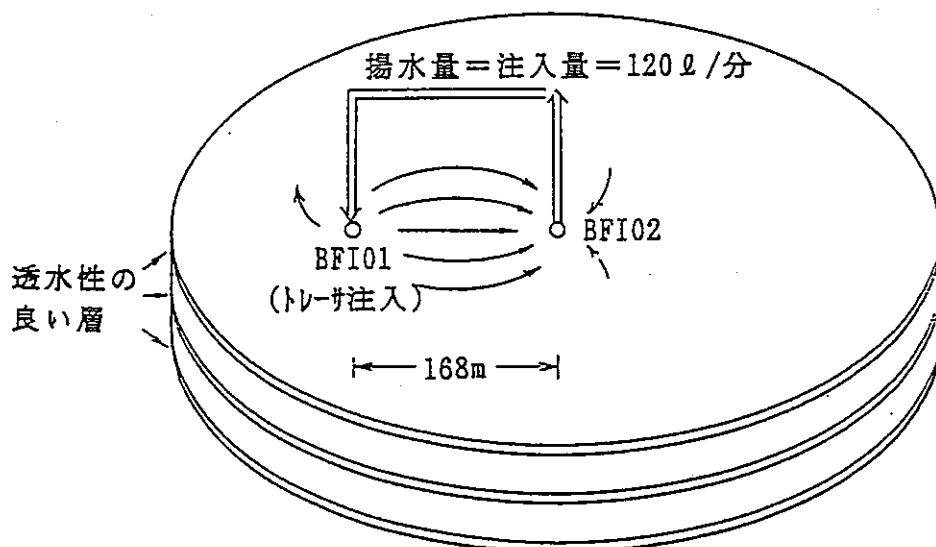
揚水試験



BFI01, KFI11からも
トレーサを注入

水頭勾配はBFI02による揚水により
形成される。透水性の良い各層の厚
さは薄いので、ほぼ平面上のBFI02
に向う2次元的な流れが形成される。

ダイボール試験



水頭勾配はBFI02による揚水とBFI01
による注水により形成される。流れ
は、ほぼ2次元的である。

図 4.3-1 Finnsjönの試験体系

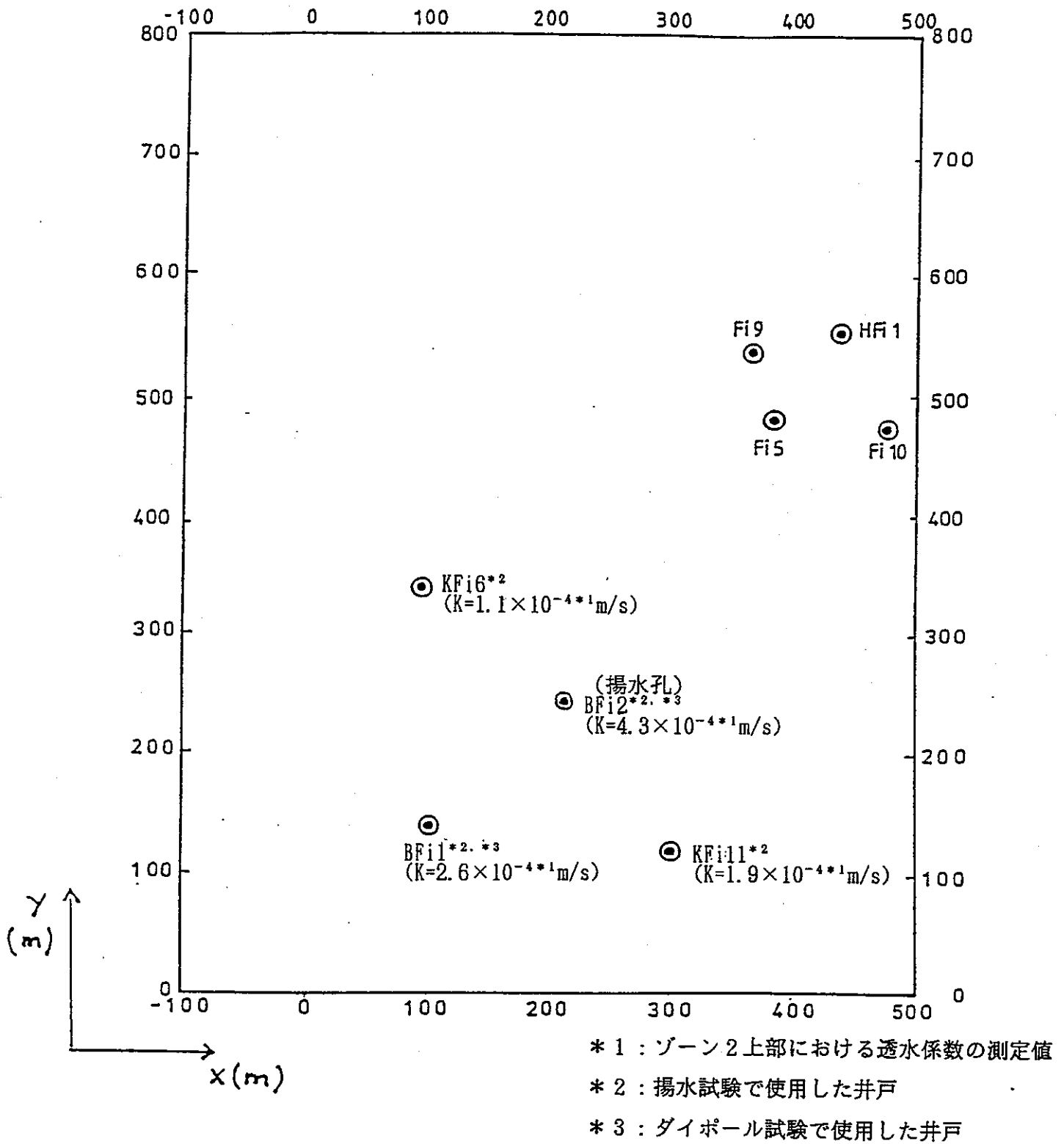


図 4.3-2 井戸の位置

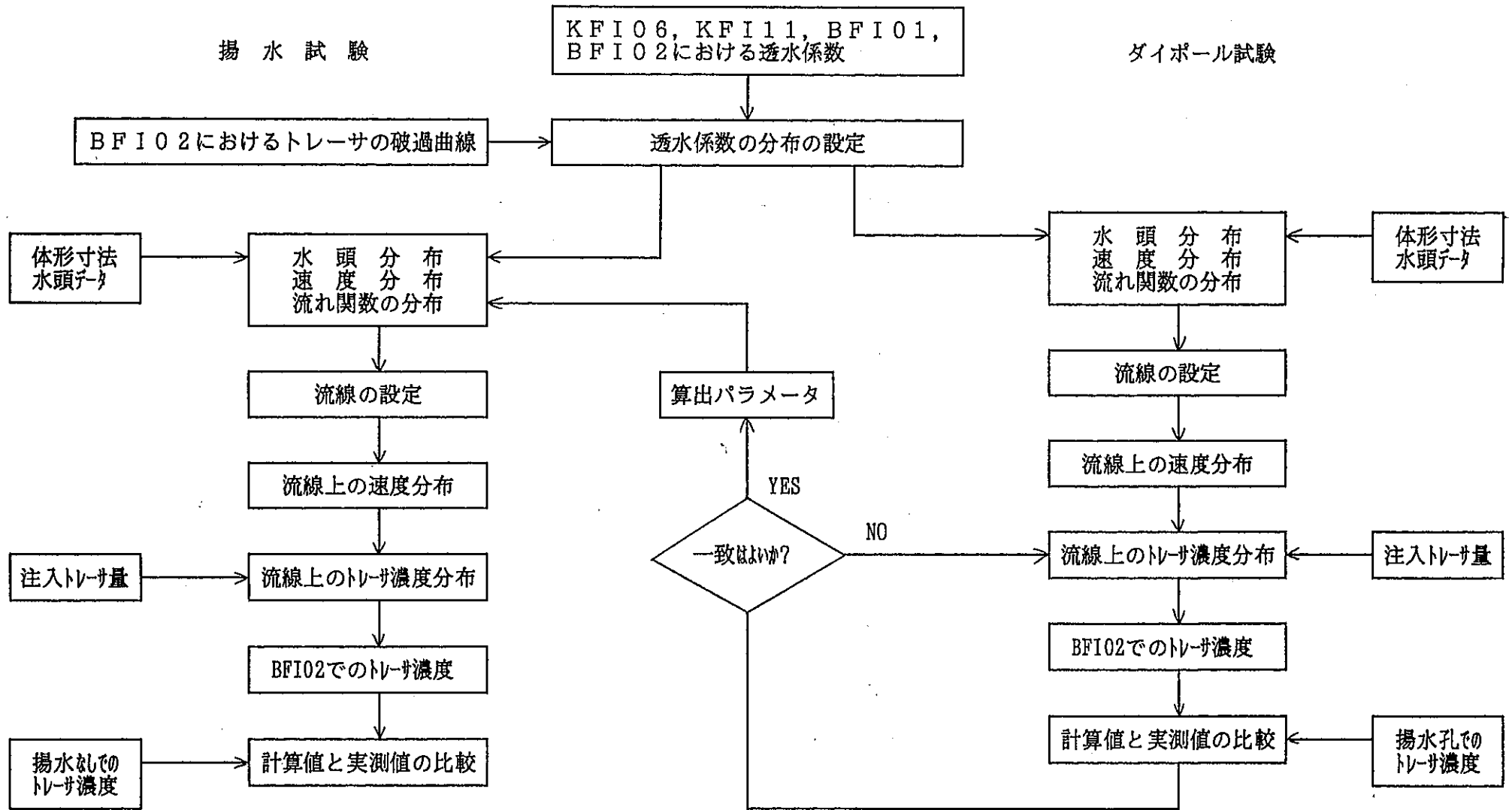


図 4.3-3 解析手順

表 4.3-1 解析するテストケース

トレーサ	揚水試験			ダイポール試験		
	注入孔	揚水孔	トレーサの種類	注入孔	揚水孔	トレーサの種類
In-EDTA	BF101上部 (1.14)	BF102	安定核種	BF101上部 (2.8)	BF102上部	安定核種
Gd-DTPA	KF111上部 (0.81)	BF102	安定核種	BF101上部 (2.8)	BF102上部	安定核種
Tm-EDTA	KF111上部 (0.81)	BF102	安定核種	BF101上部 (2.8)	BF102上部	安定核種
I ⁻	KF106上部 (0.62)	BF102	安定核種	BF101上部 (2.8)	BF102上部	放射性核種

() 内の数値は揚水孔との水頭差 (m) を表す。

表 4.3-2 設定した透水係数と亀裂巾

井戸	K_f (m/sec)	b (m)	$\omega (=K_p/K_f)$	備考
KFI06	1.4×10^{-4}	4	1×10^{-3}	
KFI11	9.5×10^{-5}	4	1×10^{-3}	透水係数の値は亀裂巾4mに補正した値
BFI02	4.3×10^{-4}	4	1×10^{-3}	
BFI01	2.8×10^{-4}	4	1×10^{-3}	

ここで K_f : 亀裂帯での透水係数

K_p : 隣接層での透水係数

b : 亀裂帯の巾

ω : K_p/K_f

表 4.3-3 透水係数の分布関数

(KFI11-BFI02-BFI01)平面における透水係数の分布

井戸KFI11, BFI02, BFI01の位置を P_1, P_2, P_3 とする。

P_1 と P_2 を結ぶ線上において、透水係数の分布関数を次式で設定する。

$$K = a \cdot \exp(-b(y - cy_0)^2) + K_0$$

ここで、 K : 透水係数

K_0 : 透水係数 (定数)

a : 定数

b : 定数

y : P_2 からの距離

y_0 : P_1 と P_2 の距離

c : 定数

定数 c と K_0 を与え、点 P_1, P_2 における透水係数の値 K_1, K_2 を用いると定数 b は次式で与えられる。

$$b = \frac{1}{y(y - 2cy_0)} \ln\left(\frac{K_2 - K_0}{K_1 - K_0}\right)$$

$$a = (K_2 - K_0) \cdot \exp(b(cy_0)^2)$$

P_2 と P_3 を結ぶ線上において、透水係数の分布関数を次式で設定する。

$$K = K_2 \cdot \exp(fx) + K_0$$

ここで、 K : 透水係数

f : 定数

定数 f は、点 P_2, P_3 における透水係数の値 K_2, K_3 を用いて、次式で与えられる。

$$f = \frac{1}{x_3 - x_2} \ln\left(\frac{K_3 - K_0}{K_2 - K_0}\right)$$

ここで、 x_2, x_3 : 点 P_2 と P_3 の x 座標

任意の点 (x, y) での透水係数 K の値は、上記で設定した線上での分布関数をこれと平行な線上でも同様の分布関数で与えるものとする、次式で与えられる

$$K = a \cdot \exp(-b(y/\sin\theta - cy_0)^2) \cdot \exp(f(x - x_2 - y \cdot \cot\theta)) + K_0$$

ここで θ : $\angle P_1 P_2 P_3$

表4.3-4 透水係数の分布関数

(BF101-BF102-KF106)平面における透水係数の分布

井戸BF101, BF102, KF106の位置を P_1, P_2, P_3 とする。

P_2 と P_3 を結ぶ線上において、透水係数の分布関数を次式で設定する。

$$K = a \cdot \exp(-b \cdot y^n) + K_0$$

ここで、 K : 透水係数

K_0 : 透水係数 (定数)

a : 定数

b : 定数

y : P_2 からの距離

n : 定数

定数 n と K_0 を与え、点 P_2 と P_3 における透水係数の値 K_2, K_3 を用いると定数 a, b は次式で与えられる。

$$b = \frac{1}{y_0} \ln \left((K_2 - K_0) / (K_3 - K_0) \right)$$

$$a = K_2 - K_0$$

ここで、 y_0 : P_2 と P_3 の距離

P_1 と P_2 を結ぶ線上において、透水係数の分布関数を次式で設定する。

$$K = K_2 \cdot \exp(fx) + K_0$$

ここで、 K : 透水係数

f : 定数

定数 f は、点 P_1, P_2 における透水係数の値 K_1, K_2 を用いて、次式で与えられる。

$$f = \frac{1}{x_1 - x_2} \ln \left((K_1 - K_0) / (K_2 - K_0) \right)$$

ここで、 x_1, x_2 : 点 P_1 と P_2 の x 座標

任意の点 (x, y) での透水係数 K の値は、上記で設定した線上での分布関数をこれと平行な線上でも同様の分布関数で与えるものとする、次式で与えられる

$$K = a \cdot \exp(-b(y / \sin \theta)^n) \cdot \exp(f(x - x_2 - y \cdot \cot \theta)) + K_0$$

ここで θ : $\angle P_1 P_2 P_3$

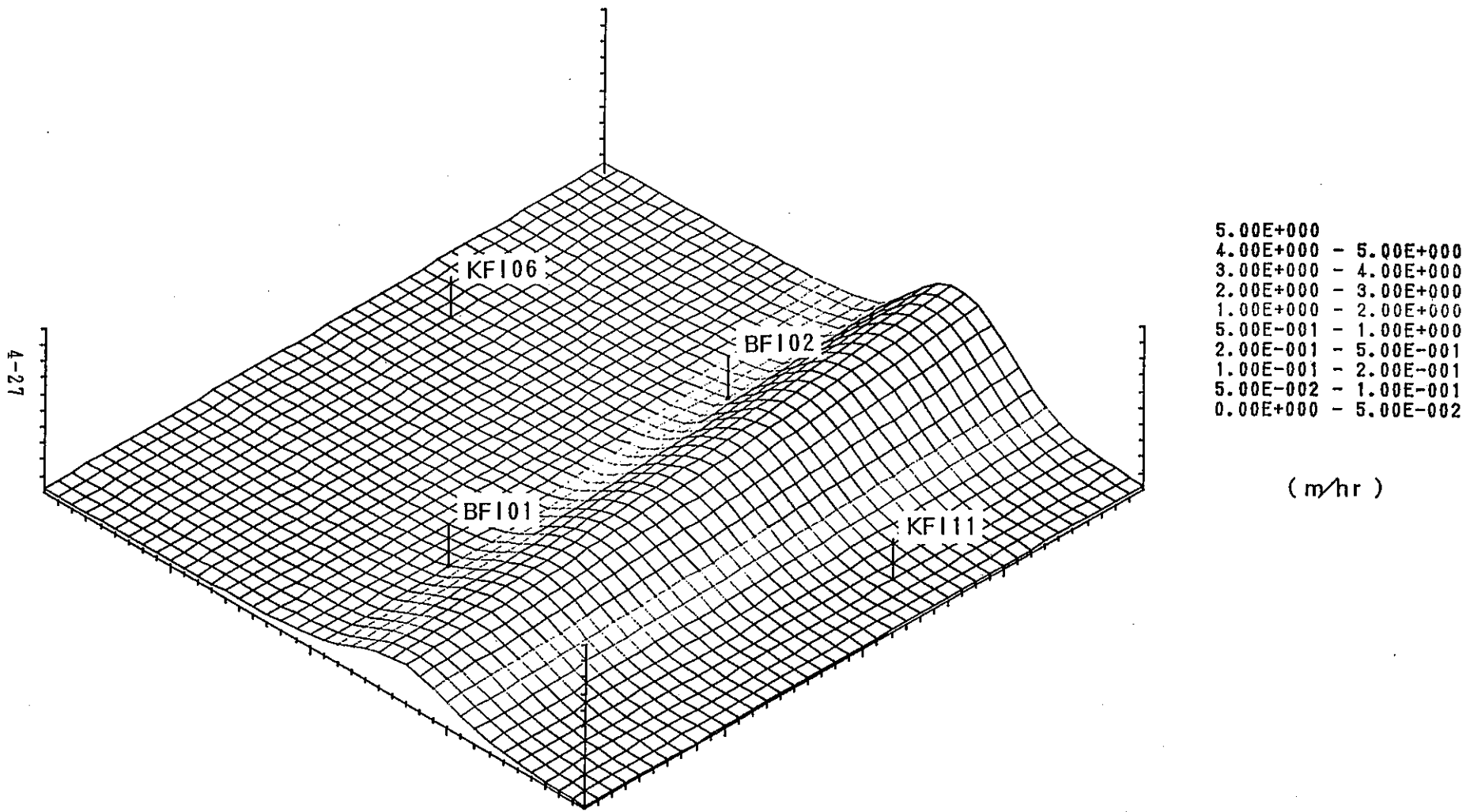
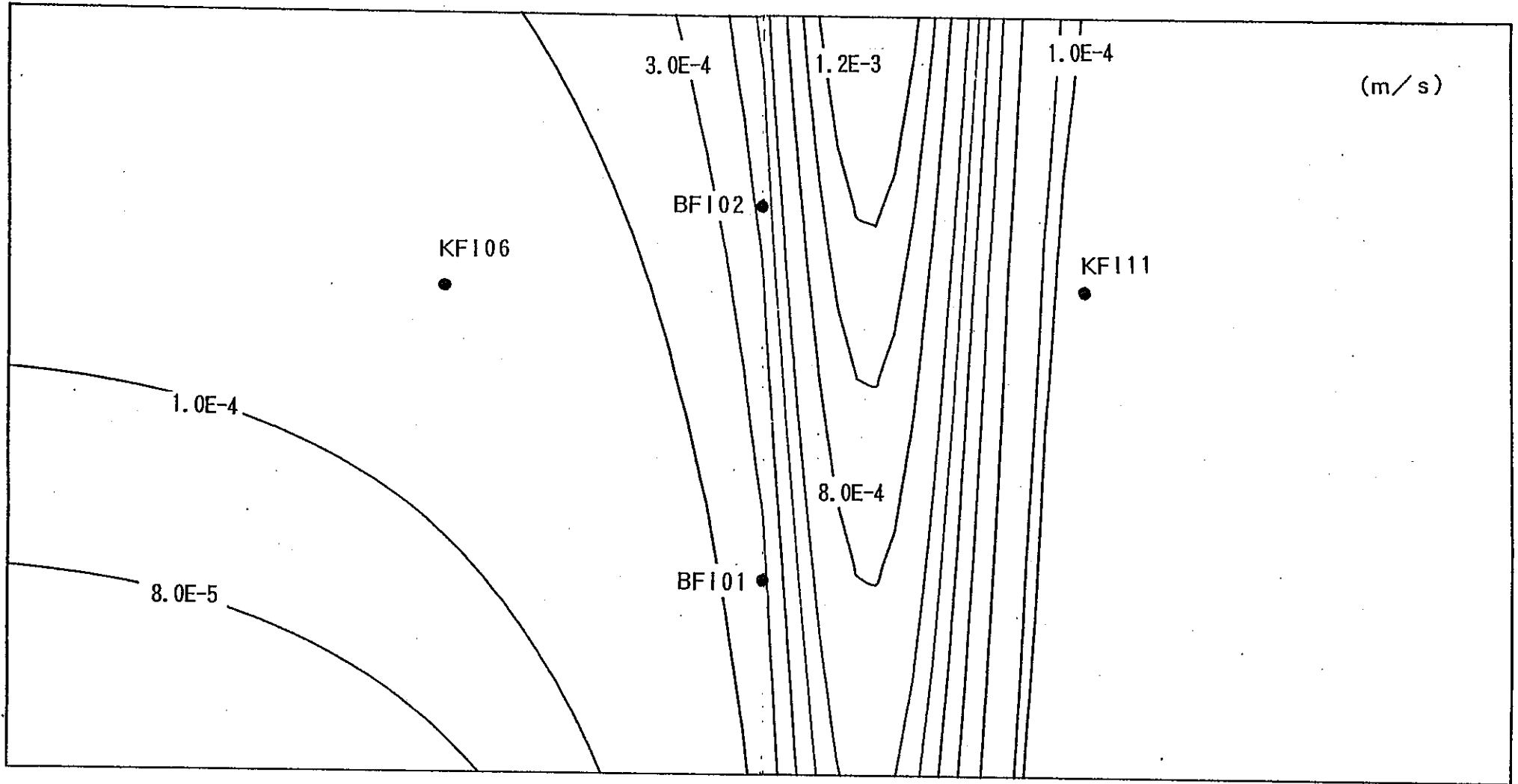


図 4.3-4 ゾーン 2 上部における透水係数の分布

1.20E-003
 1.80E-004
 1.60E-004
 1.50E-004
 1.40E-004
 1.30E-004
 1.20E-004
 1.10E-004
 1.00E-004
 8.00E-005
 6.00E-005
 4.00E-005



4-28

図4.3-5 ゾーン2上部の透水係数の分布 (計算値)

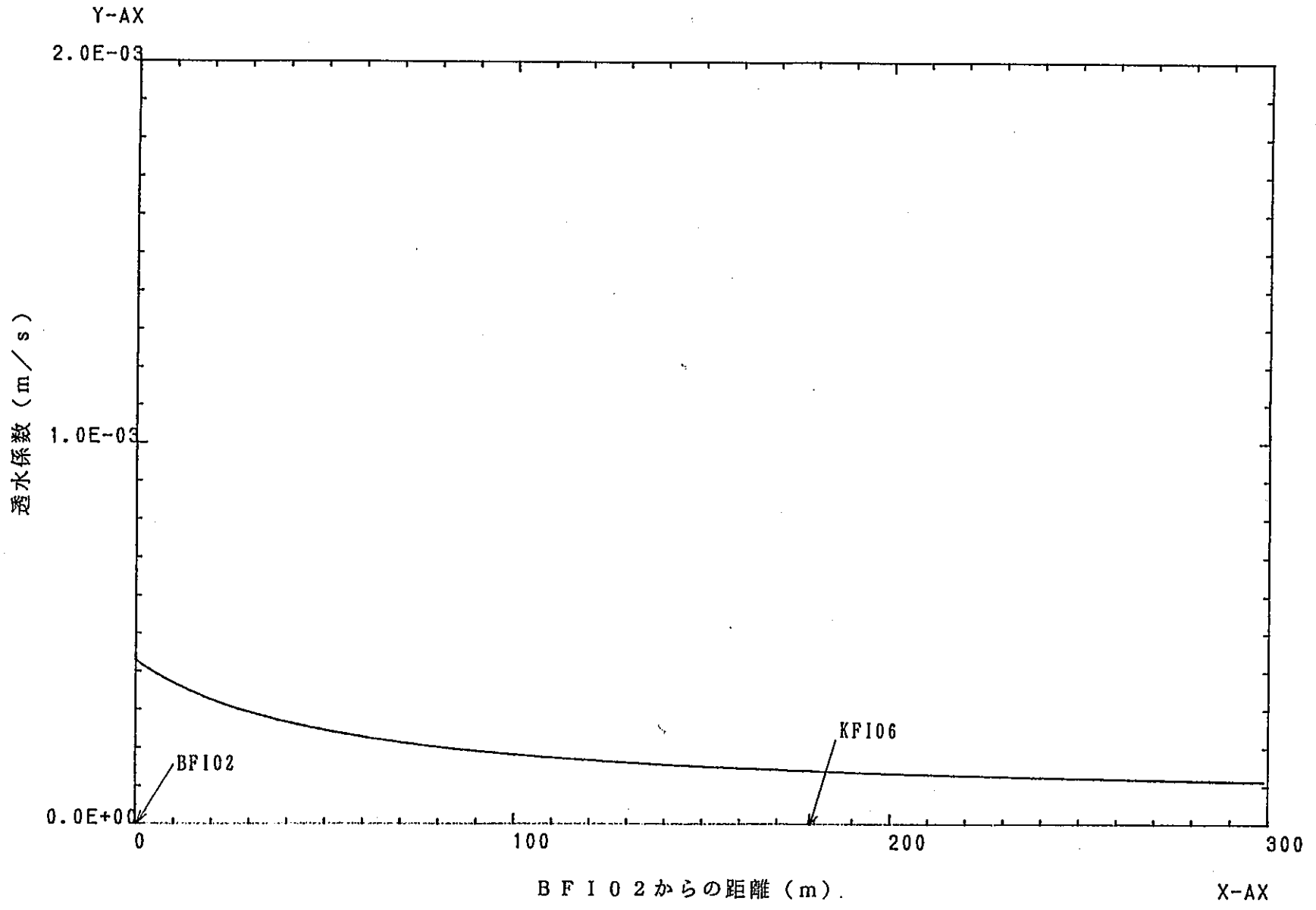


図 4.3-6 B F I 0 2 と K F I 0 6 の間の透水係数の分布

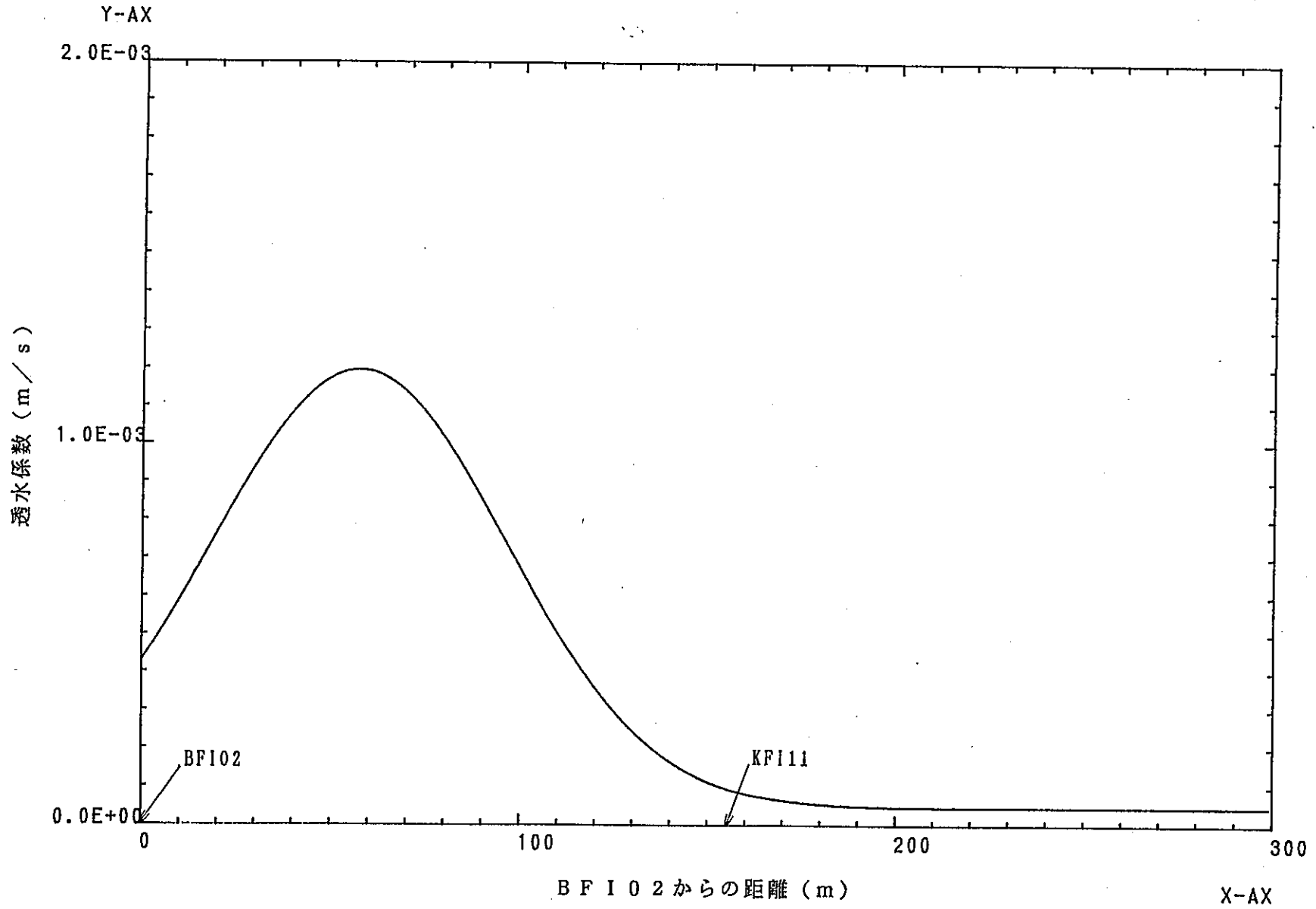


図 4.3-7 B F I 0 2 と K F I 1 1 の間の透水係数の分布

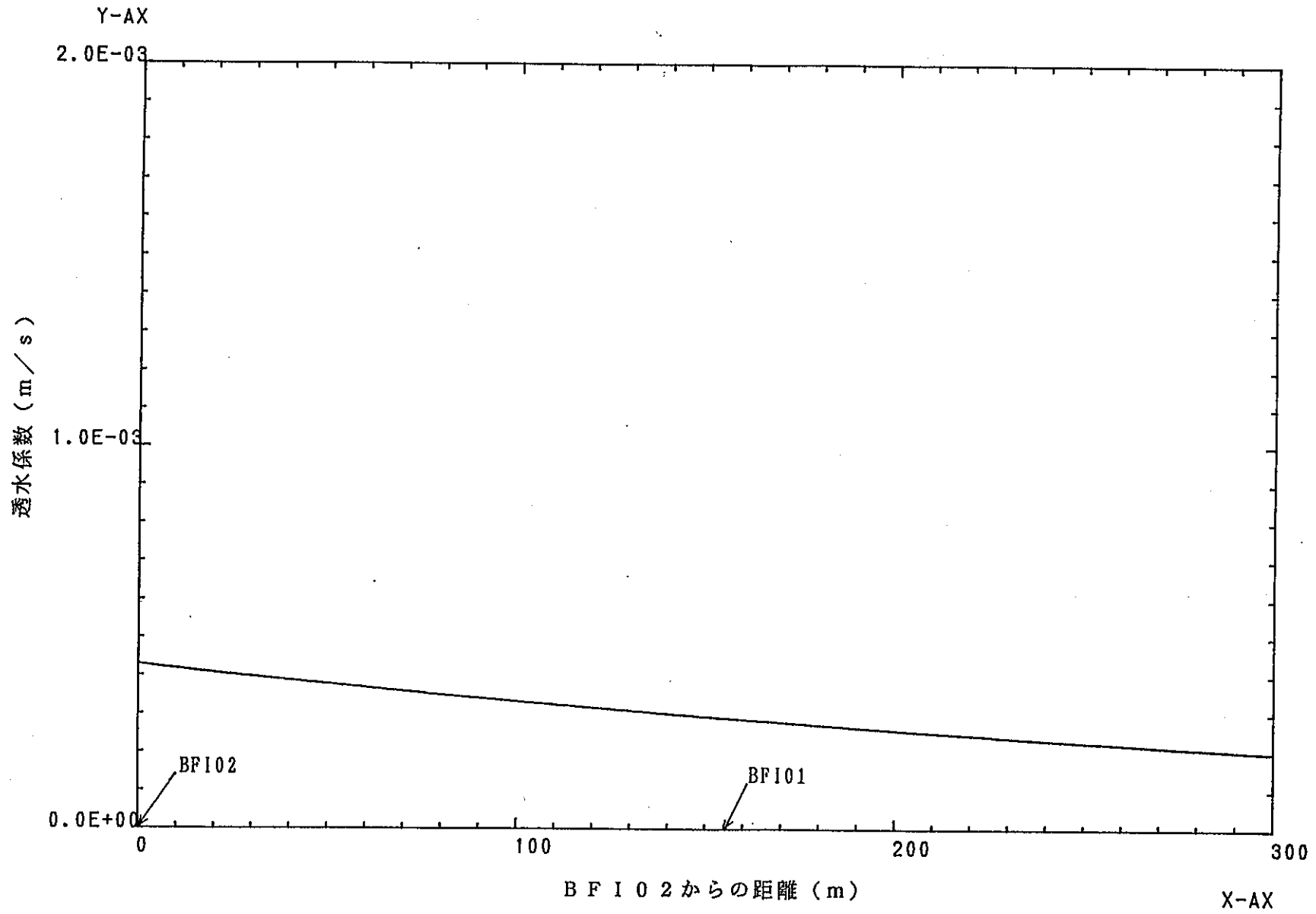


図 4.3-8 BFI02とBFI01の間の透水係数の分布

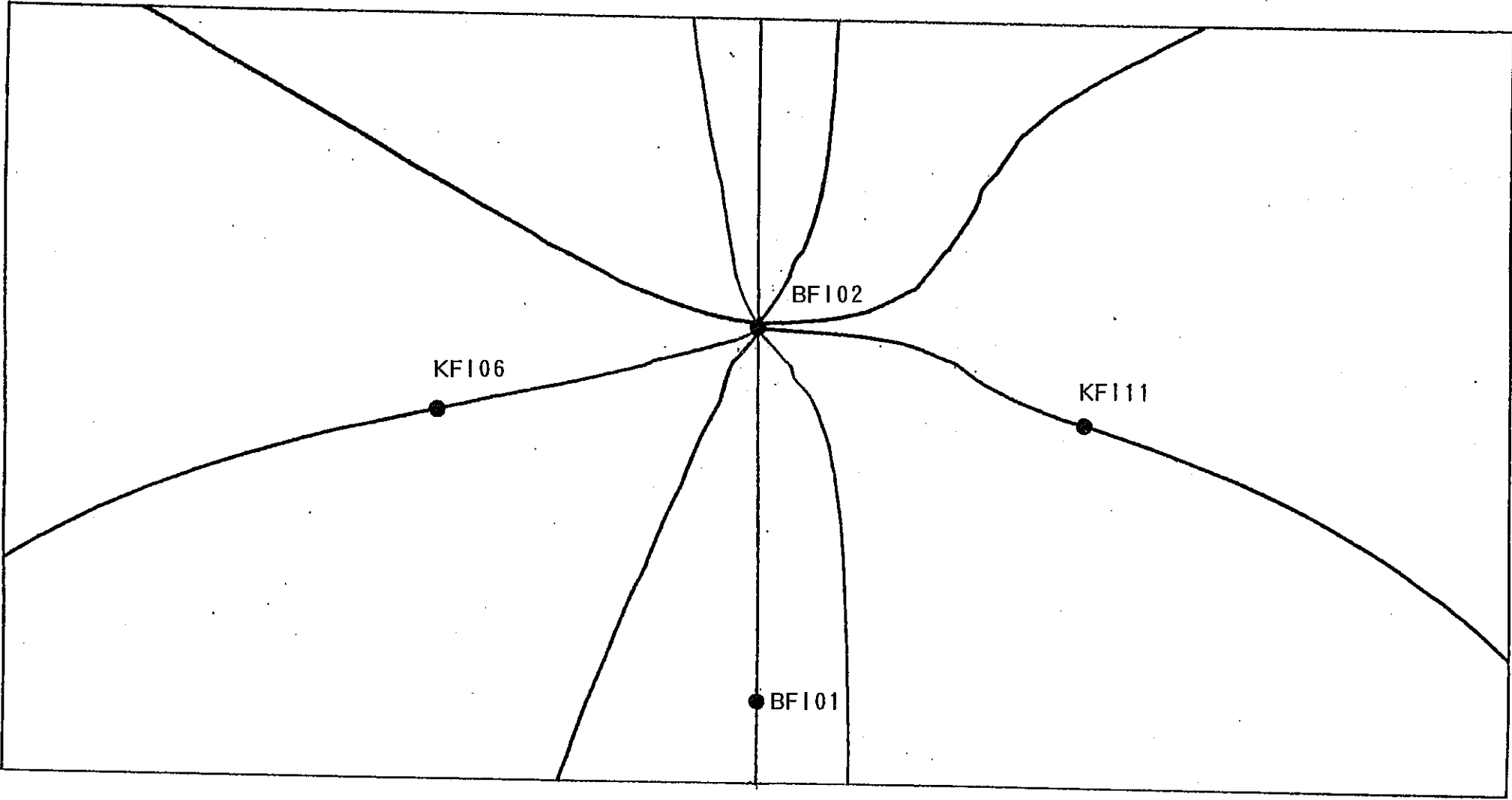


図 4.3-9 揚水試験における流線

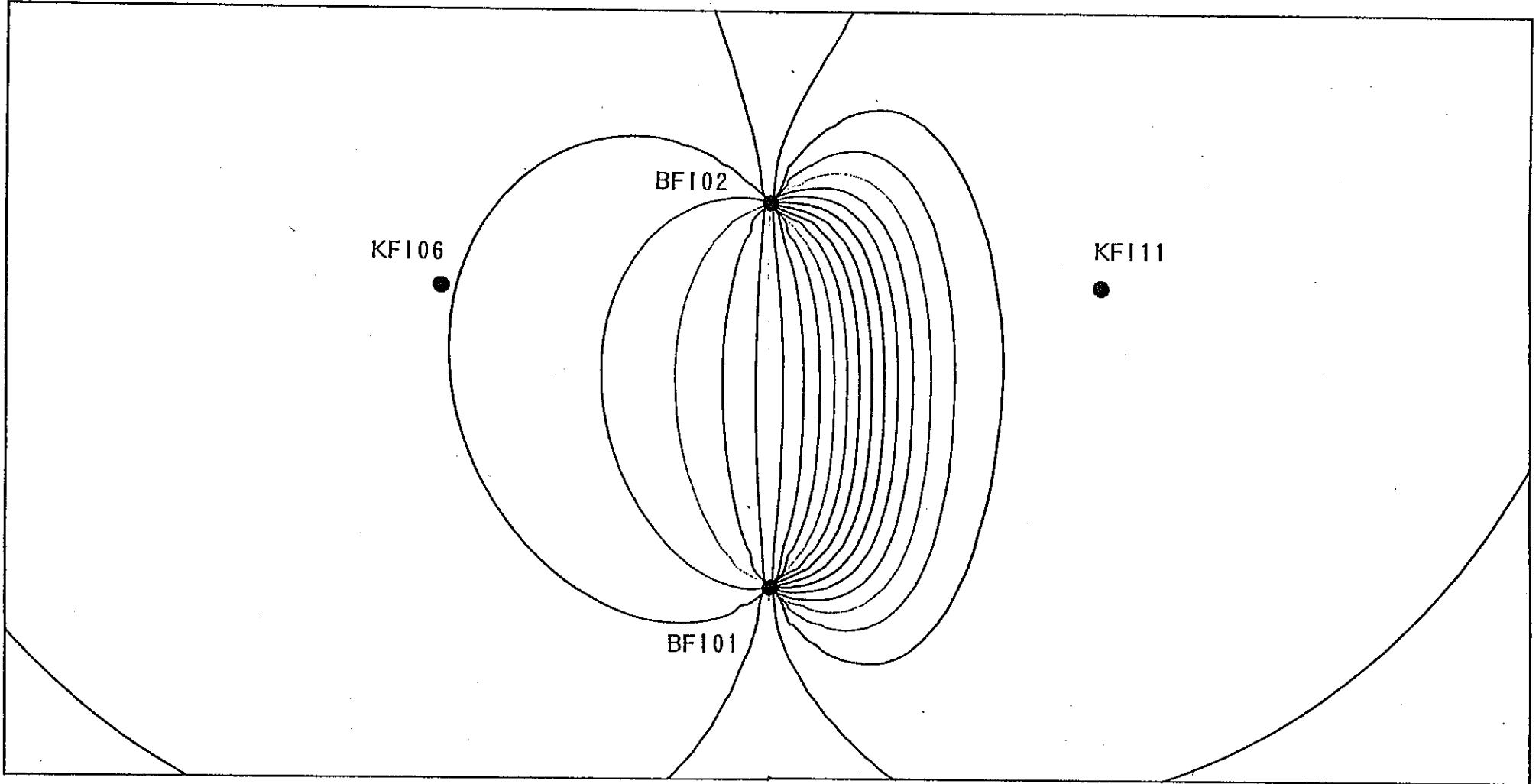


図4.3-10 ダイポール試験における流線

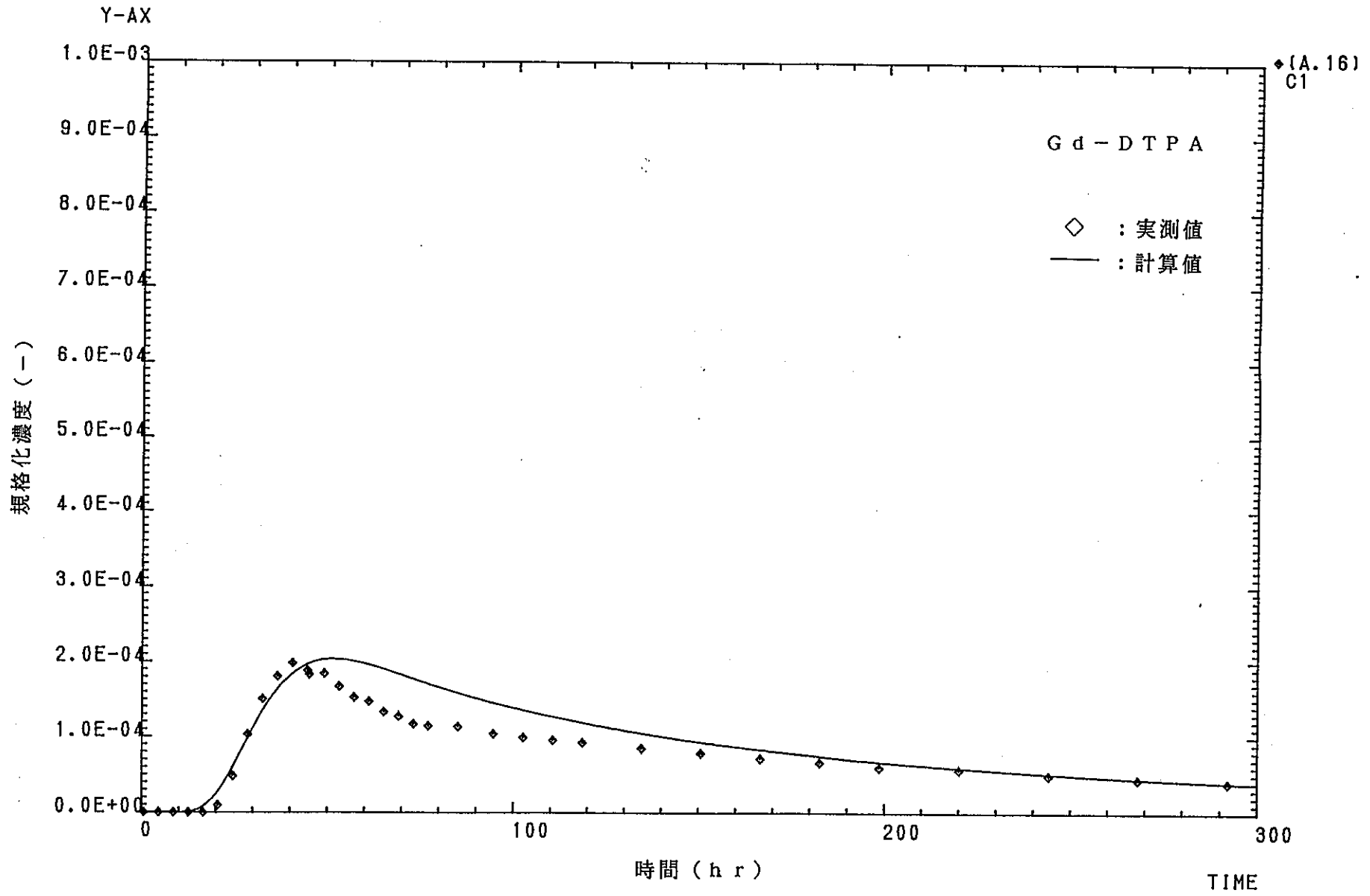


図 4.3-11 ダイポール試験における Gd-DTPA の破過曲線

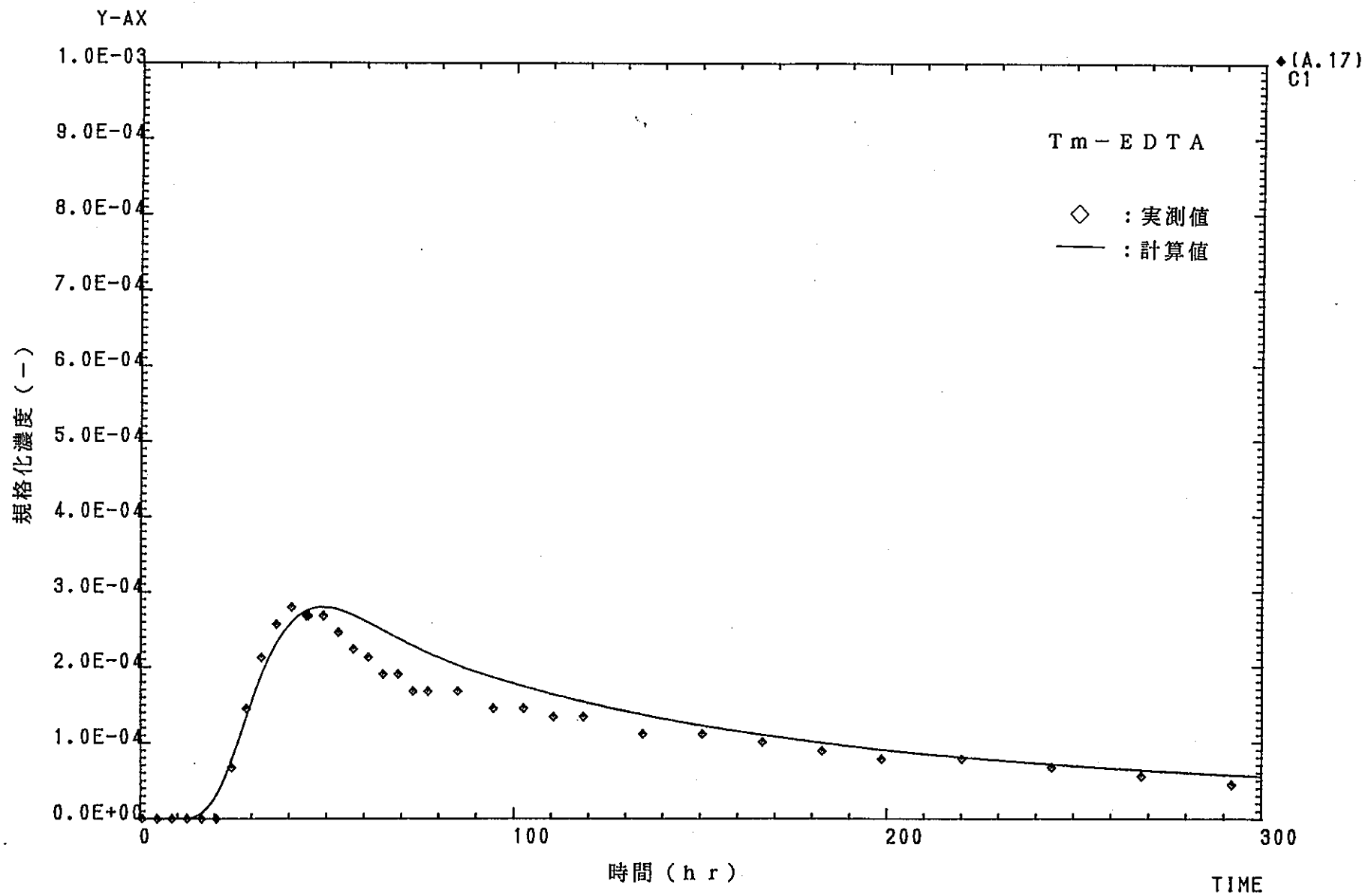


図 4.3-12 ダイポール試験における Tm-EDTA の破過曲線

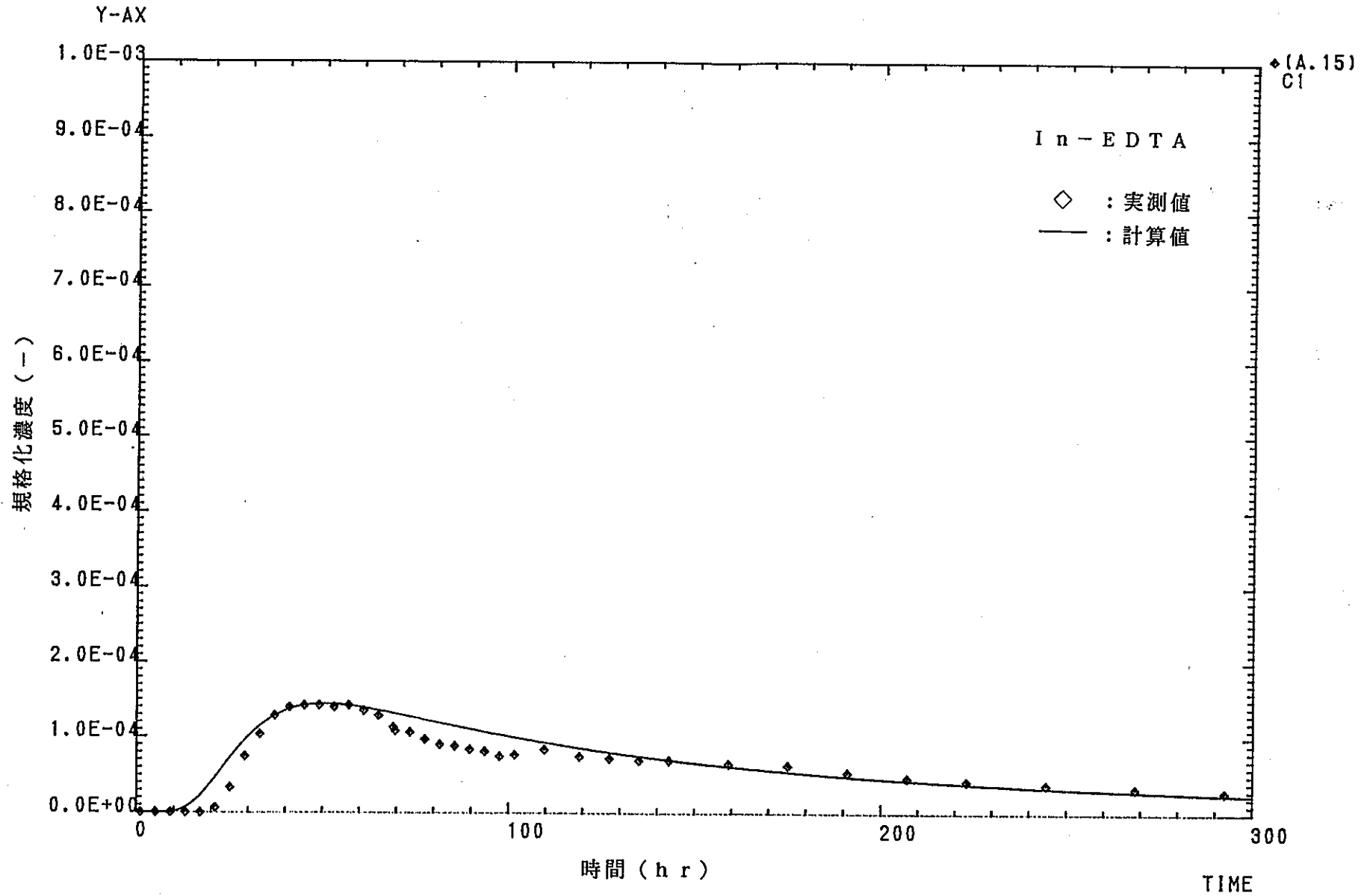


図 4.3-13 ダイポール試験における In-EDTA の破過曲線

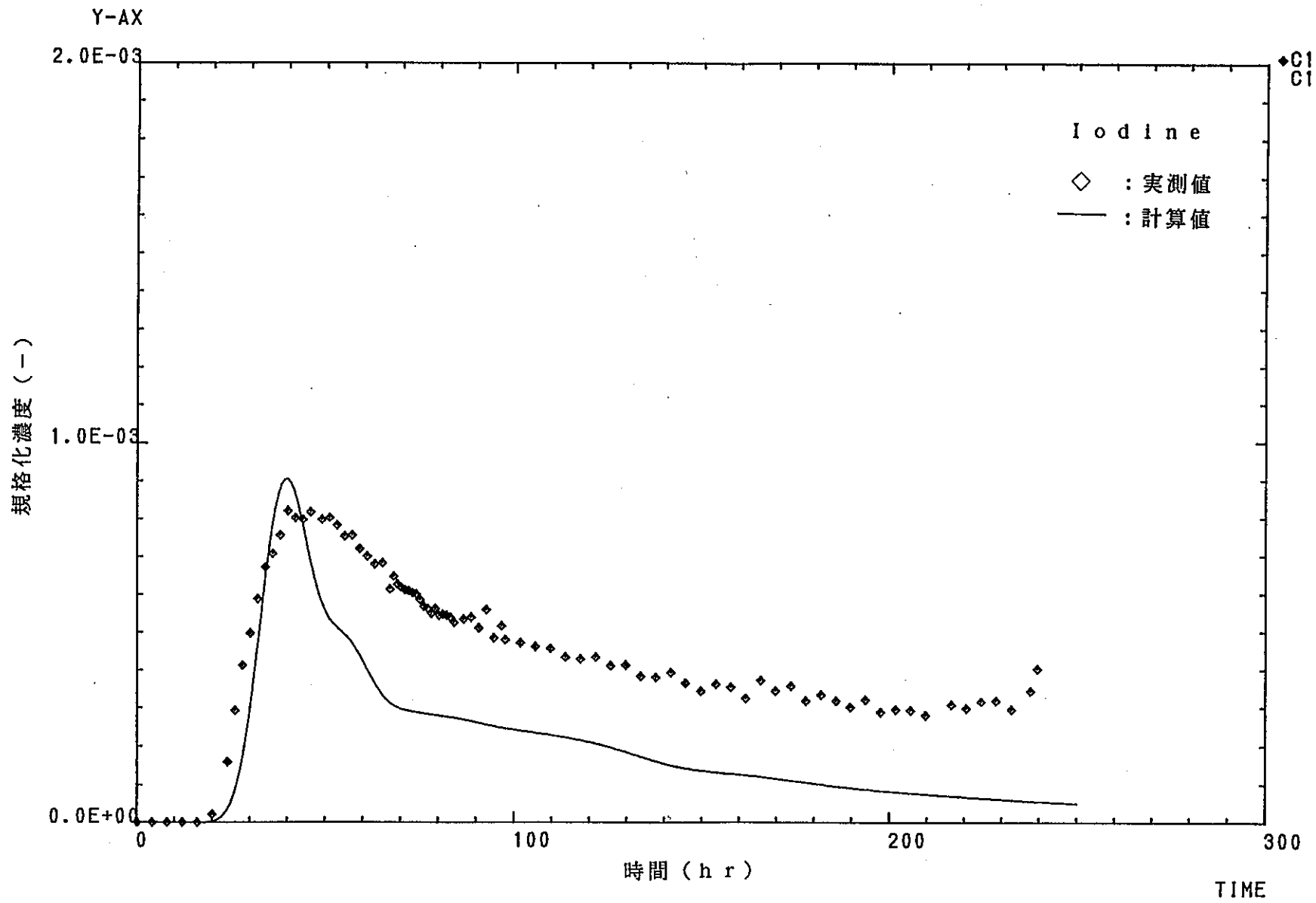


図 4.3-14 ダイポール試験における Iodine の破過曲線

表 4.3-5 ダイポール試験における算出パラメータ

トレーサ	ϕ_{tf} (-)	$\frac{\phi_{df}}{\phi_{wf}} \alpha$ (m)	ϕ_{tp} (-)	$\frac{\phi_{df}}{\phi_{wf}} \alpha$ (m)
In-EDTA	8.5×10^{-4}	20	8.5×10^{-4} ($=\phi_{tf}$)	50
Tm-EDTA	8.5×10^{-4}	10	8.5×10^{-4} ($=\phi_{tf}$)	20
Gd-DTPA	8.5×10^{-4}	12	8.5×10^{-4} ($=\phi_{tf}$)	30
Iodine	8.5×10^{-4}	1	8.5×10^{-4} ($=\phi_{tf}$)	2

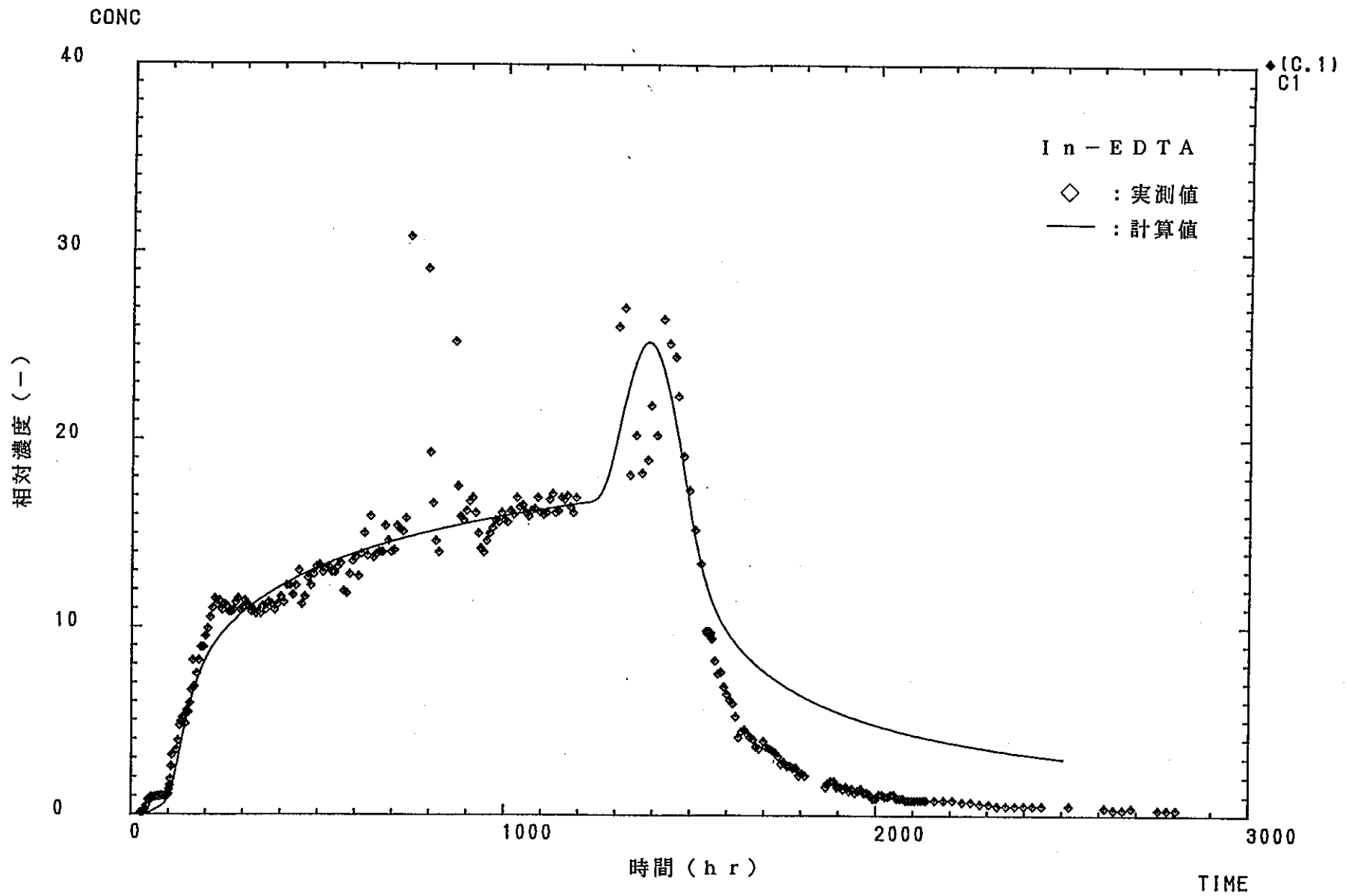


図 4.3-15 ダイポール試験で算出したパラメータを用いた揚水試験における In-EDTA の破過曲線

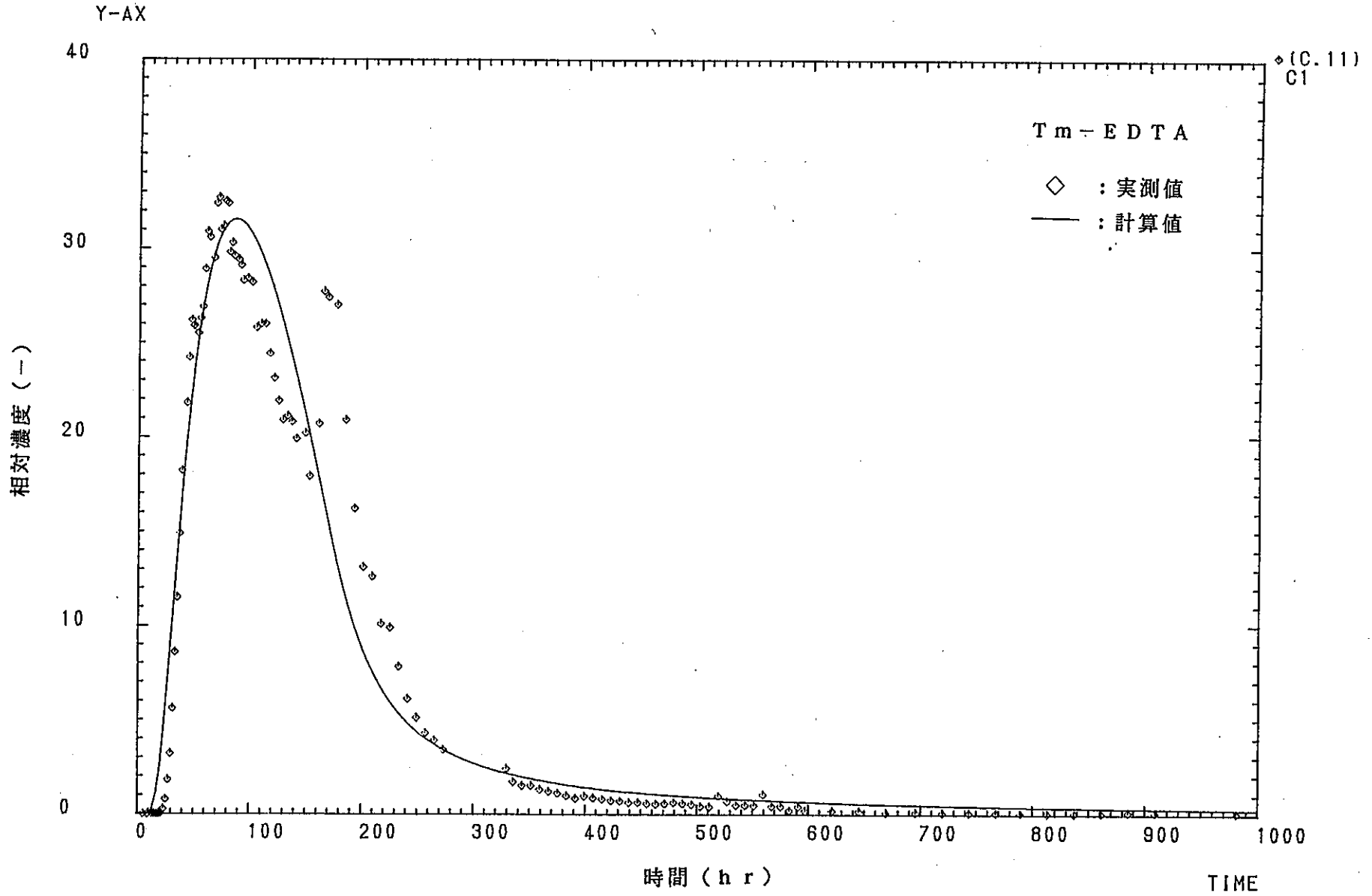


図 4.3-16 ダイポール試験で算出したパラメータを用いた揚水試験における Tm-EDTA の破過曲線

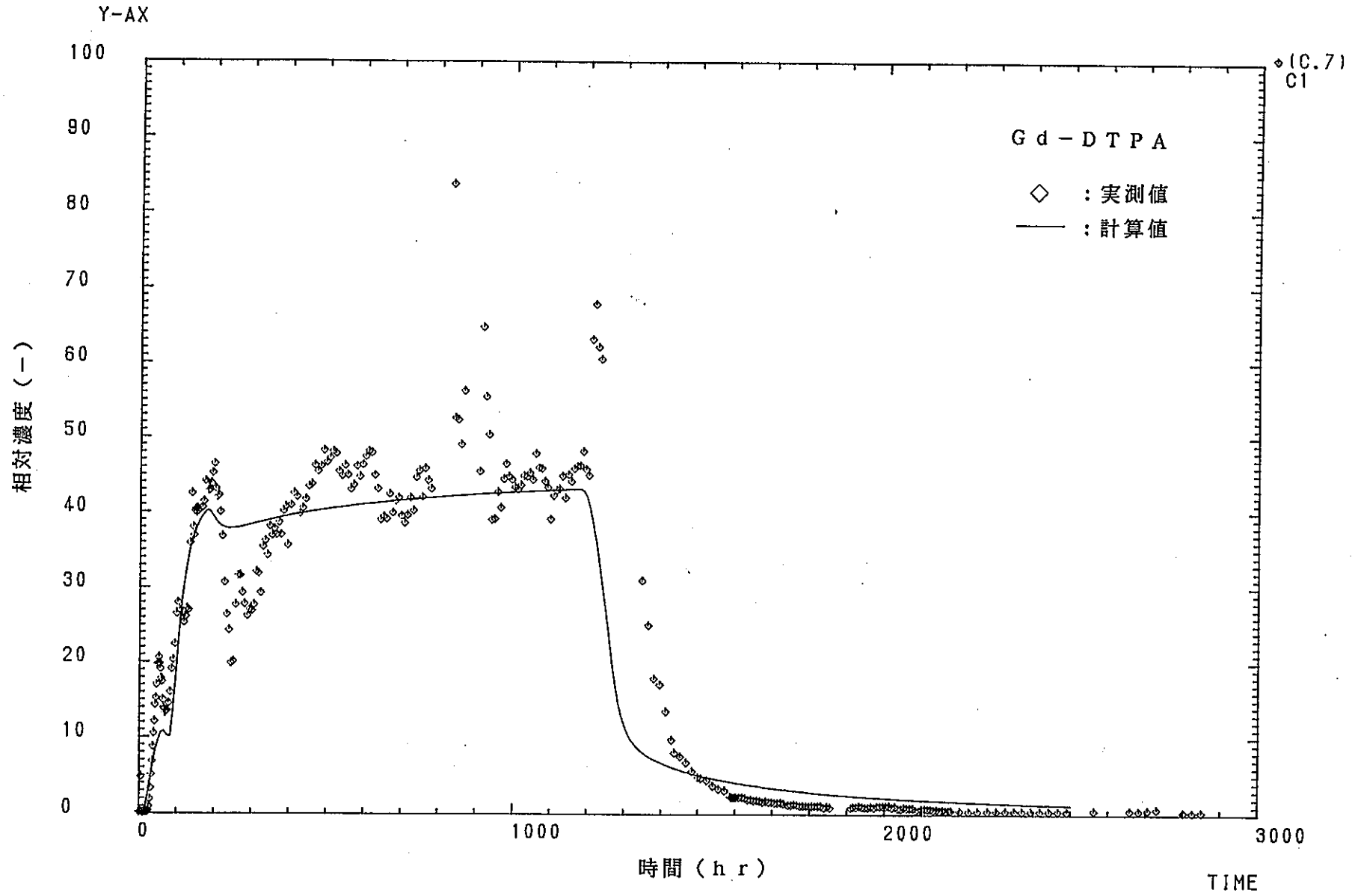


図 4.3-17 ダイポール試験で算出したパラメータを用いた揚水試験における G d - D T P A の破過曲線

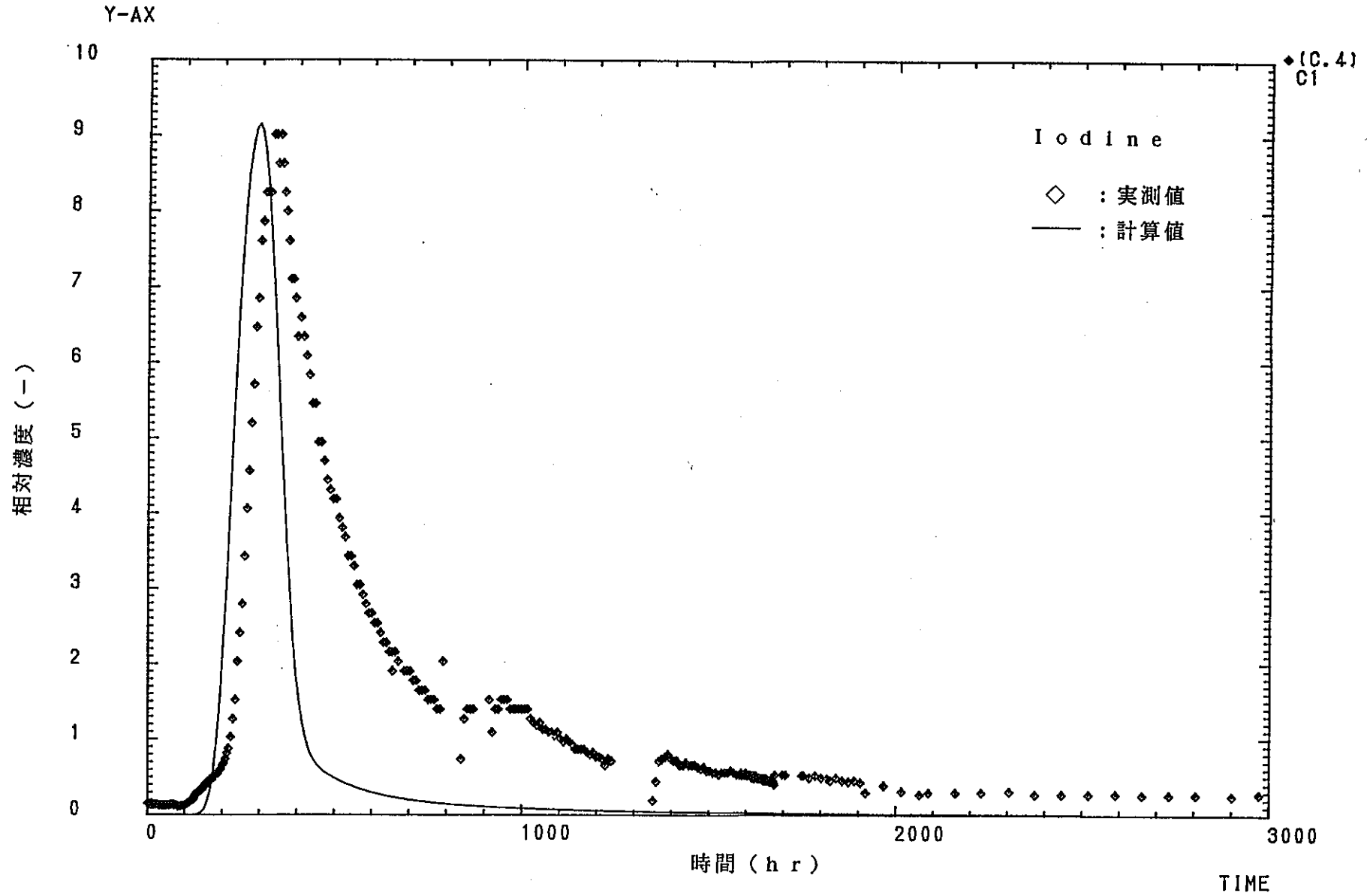


図 4.3-18 ダイポール試験で算出したパラメータを用いた揚水試験における Iodine の破過曲線

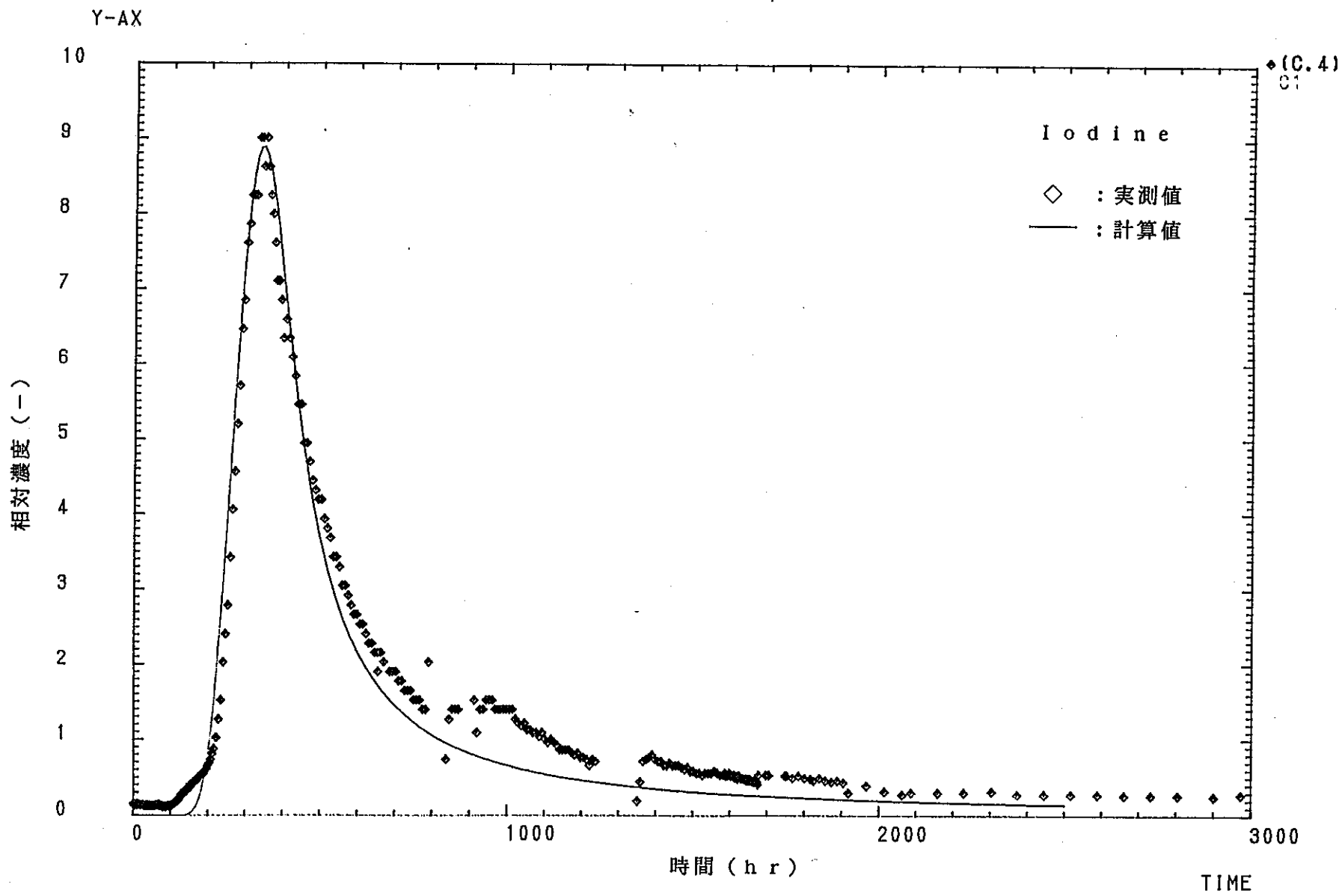


図 4.3-19 揚水試験における Iodine の破過曲線

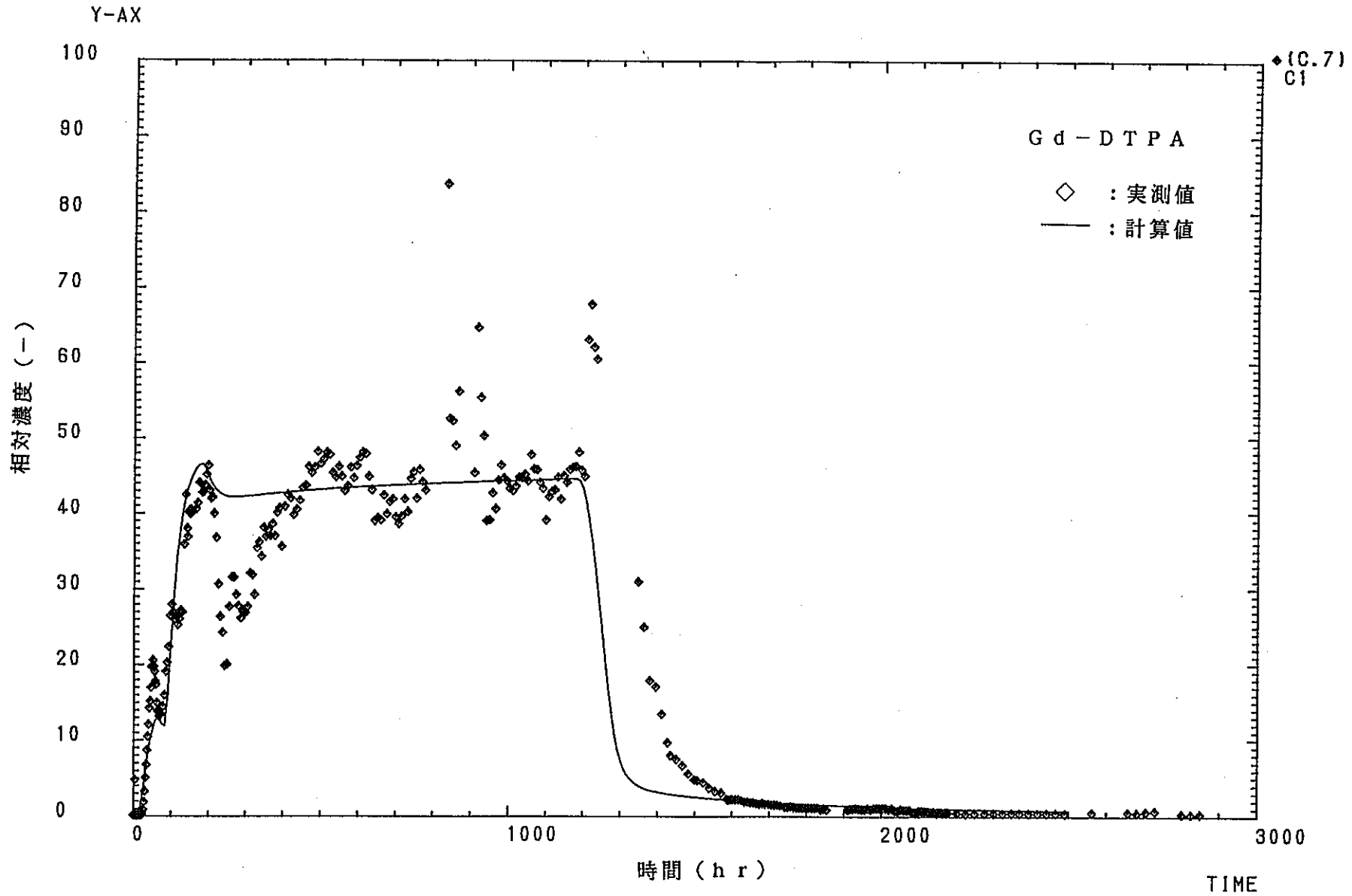


図 4.3-20 揚水試験における Gd-DTPA の破過曲線

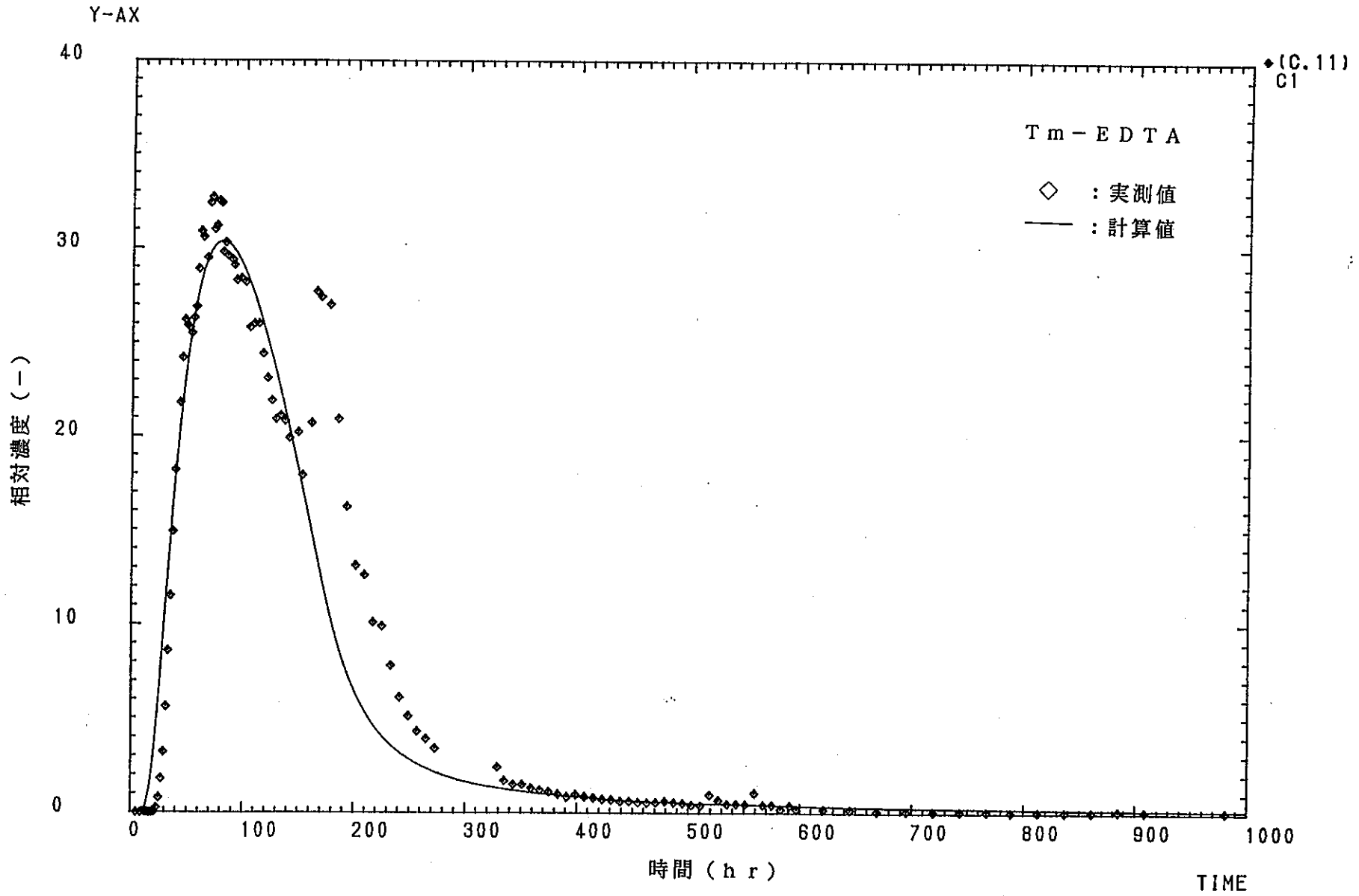


図 4.3-21 揚水試験における T m - E D T A の破過曲線

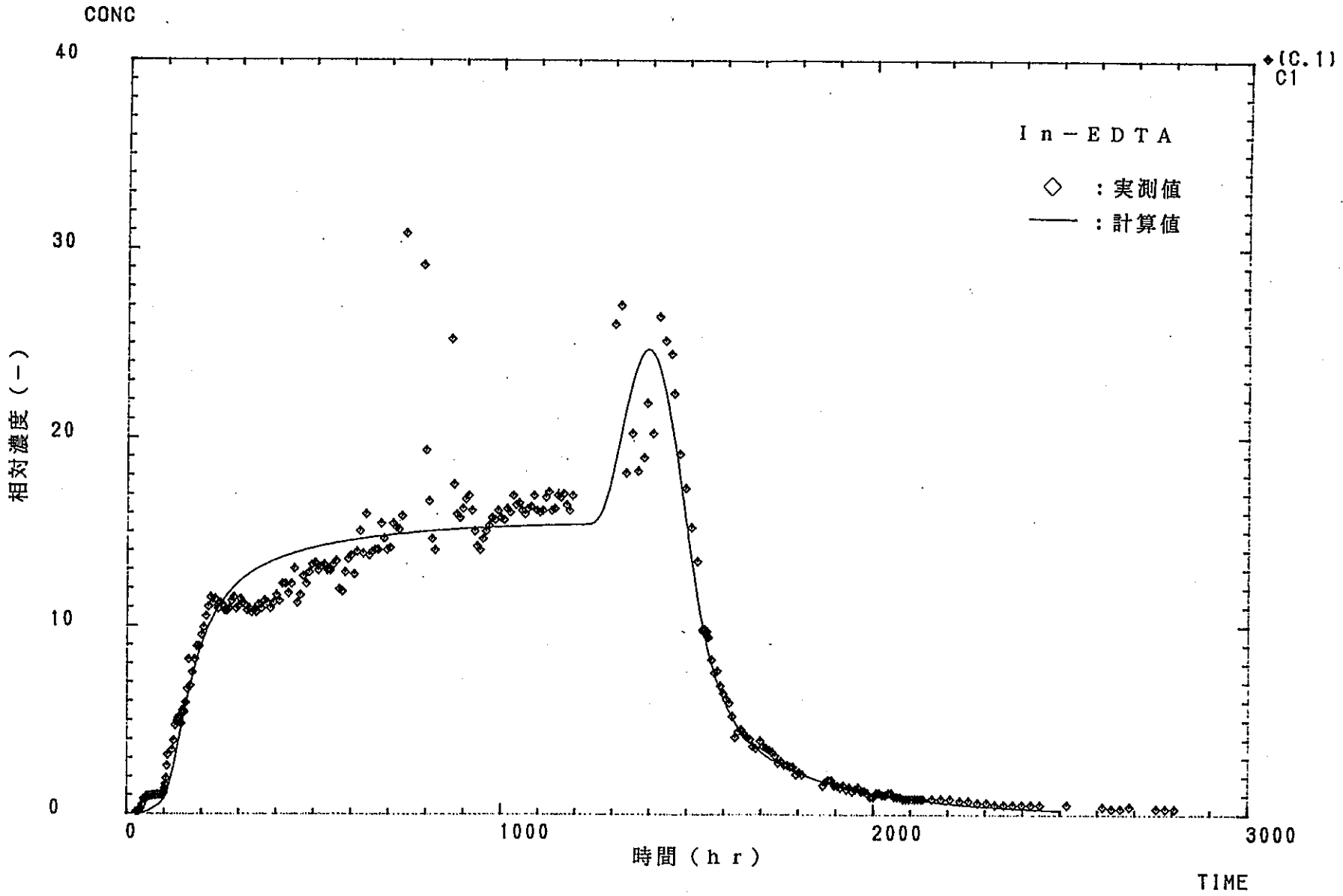


図 4.3-22 揚水試験における In-EDTA の破過曲線

表 4.3-6 揚水試験における算出パラメータとトレーサ回収率

トレーサ	ϕ_{tf} (-)	$\frac{\phi_{df}}{\phi_{wf}} \alpha$ (m)	ϕ_{tp} (-)	$\frac{\phi_{dp}}{\phi_{wp}} \alpha$ (m)	回収率 (%)	
					計算値	実測値
In-EDTA	9×10^{-4}	20	$1.8 \times 10^{-4} (= \frac{1}{5} \phi_{tf})$	30	98	98
Tm-EDTA	9×10^{-4}	10	$9 \times 10^{-4} (= \phi_{tf})$	10	95	72
Gd-DTPA	9×10^{-4}	12	$9 \times 10^{-4} (= \phi_{tf})$	12	96	89
Iodine	8.5×10^{-4}	1	$8.5 \times 10^{-4} (= \phi_{tf})$	30	70	70

5. あとがき

亀裂帯における核種移行挙動評価のために、透水性の高い層と低い層からなるモデルを構築し、計算プログラムシステム（FATRACS）を作成した。作成したプログラムシステムについてプログラムの検証を実施し、計算プログラムの妥当性を確認した。この計算プログラムを用いてフィンションの試験を解析することにより、亀裂帯でのトレーサ移行挙動を表現することができ、モデルの妥当性が確認できた。