

地質統計法を用いた帶水層パラメータの推定及びトレーサ試験解析

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

技 術 資 料		
開示区分	レポートNo.	受領日
X	J1214 94-005	1994.7.6

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

1994年2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。については、複製、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合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

限定資料

PNC ZJ1214 94-005

1994年2月

地質統計法を用いた帶水層パラメータの推定及びトレーサ試験解析

向井 哲^{*1}・土井英雄^{*1}・江崎正弘^{*2}

要
旨

本研究は、地質統計法を用いて、地層の不均質性を定量的に把握し、地層中の水理・物質移動モデルの信頼性を高めるために、以下に示す研究を実施した。

- (1) スウェーデンのフィンションサイトで掘削された井戸で得られた透水係数の実測値を基に、Kriging法と呼ばれる方法を用いて解析領域における2次元的な平面での透水量係数の分布及び、分散値を推定した。
- (2) 推定した透水係数分布を用いて、フィンションサイトで実施されたトレーサ試験での地下水水流速場をモデル化し、流速場及び水頭分布を推定した。推定した水頭分布を実測値と比較することにより、推定した透水係数分布の妥当性を評価した。
- (3) 地下水流動解析により決定された地下水水流速分布の基で、トレーサ移行解析を実施した。モデル化では、移行プロセスとして移流と分散を考え、トレーサ破過曲線の計算値を実測値にフィッティングすることにより、移行パラメータを算出した。

本報告書は、三菱原子力工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：050D0186

事業団担当部課室及び担当者：環境技術開発部地層処分開発室（畠中 耕一郎）

*1：大宮研究所第二研究室評価解析グループ

*2：燃料サイクル統括部

Estimation of Aquifer Parameters and Analysis of Tracer Test by Geostatistic Method

Satoru Mukai*¹ · Hideo Doi*¹ · Masahiro Ezaki*²

Abstract

In the study, the following tasks have been performed in order to develop reliable models of hydrogeology and mass transport in underground, and to understand quantitatively heterogeneous underground formation.

- (1) We have estimated two dimensional distribution of hydraulic conductivities and variance of estimation error by using Kriging method with the observed hydraulic conductivities that obtained in the boreholes at Finnsjon site.
- (2) By using the estimated distribution of hydraulic conductivities, we have modeled velocity fields of the groundwater for the tracer tests at Finnsjon site, and estimated distribution of the velocity fields and the hydraulic heads. By comparing the estimated hydraulic heads with the observed values, we have evaluated validity of the estimated distribution of the conductivities.
- (3) We have performed analysis of the tracer transport by using the velocity distribution of groundwater that was determined by analysis of the groundwater flow. In modelling the tracer transport, we have considered advection and dispersion as the tracer transport process and estimated transport parameters by fitting calculated breakthrough curve to the observed values.

Work performed by Mitsubishi Atomic Power Industries. Inc. under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation.

PNC Liaison: Waste Technology Development Division, Geological Isolation Technology Section, Koichiro Hatanaka.

*1 : Omiya Technical Institute, Research Laboratory II, Analytical Evaluation Group.

*2 : Nuclear Fuel Cycle Division

目 次

1. まえがき	-----	1
2. 実施内容	-----	3
2.1 透水係数分布の推定	-----	3
2.2 地下水流動解析	-----	3
2.3 トレーサ移行解析	-----	3
3. 透水係数分布の推定	-----	5
3.1 試験体系	-----	5
3.2 推定方法	-----	5
3.2.1 Kriging法	-----	5
3.2.2 トレンドの推定方法	-----	6
3.2.3 バリオグラムの推定方法	-----	7
3.2.4 Conditional Simulation	-----	7
3.3 推定結果	-----	8
3.3.1 トレンド	-----	8
3.3.2 バリオグラム	-----	8
3.3.3 Kriging 推定値及び分散値	-----	9
3.3.4 Conditional Simulation	-----	9
3.3.5 トレンド推定方法の妥当性	-----	9
4. 地下水流動解析	-----	27
4.1 試験体系	-----	27
4.2 解析モデル	-----	27
4.3 解析結果	-----	27
5. トレーサ移行解析	-----	43
5.1 試験体系	-----	43
5.2 解析モデル	-----	43
5.3 移行パラメータの推定方法	-----	43
5.4 解析手順	-----	44
5.5 解析結果	-----	44

5.5.1 ダイポール試験	-----	44
5.5.2 揚水試験	-----	44
5.6 文献調査	-----	45
5.6.1 文献調査結果	-----	45
5.6.2 モデリングのアプローチについて	-----	48
5.6.3 本解析結果に関する考察	-----	49
5.7 フィンションのテストケースの比較解析	-----	50
6. あとがき	-----	69
7. 参考文献	-----	71
付録A フィンションのテストケースの比較解析	-----	A-1
付録B フィンションにおけるトレーサ試験解析結果	-----	B-1

図 目 次 (1 / 2)

図 3 - 1	井戸の位置	-----	11
図 3 - 2	透水量係数のバリオグラム (トレンドなしの場合)	-----	13
図 3 - 3	透水量係数のバリオグラム (トレンド1次の場合)	-----	14
図 3 - 4	透水量係数のバリオグラム (トレンド2次の場合)	-----	15
図 3 - 5	Kriging 推定値 (トレンドなしの場合)	-----	16
図 3 - 6	Kriging 推定値 (トレンド1次の場合)	-----	17
図 3 - 7	Kriging 推定値 (トレンド2次の場合)	-----	18
図 3 - 8	Kriging 分散値 (トレンドなしの場合)	-----	19
図 3 - 9	Kriging 分散値 (トレンド1次の場合)	-----	20
図 3 - 10	Kriging 分散値 (トレンド2次の場合)	-----	21
図 3 - 11	Conditional Simulation の例 (トレンドなしの場合)	-----	22
図 3 - 12	Conditional Simulation の例 (トレンド1次の場合)	-----	23
図 3 - 13	Conditional Simulation の例 (トレンド2次の場合)	-----	24
図 3 - 14	Universal kriging による推定値 (トレンド1次の場合)	-----	25
図 3 - 15	Universal kriging による推定値 (トレンド2次の場合)	-----	26
図 4 - 1	フィンションの試験体系	-----	29
図 4 - 2	ダイポール試験における水頭分布の例 (トレンドなしの場合のConditional Simulation による推定値を使用)	-----	32
図 4 - 3	揚水試験における水頭分布の例 (トレンドなしの場合のConditional Simulation による推定値を使用)	-----	33
図 4 - 4	ダイポール試験における水頭分布の例 (トレンド1次の場合のConditional Simulation による推定値を使用)	-----	34
図 4 - 5	揚水試験における水頭分布の例 (トレンド1次の場合のConditional Simulation による推定値を使用)	-----	35
図 4 - 6	ダイポール試験における水頭分布の例 (トレンド2次の場合のConditional Simulation による推定値を使用)	-----	36
図 4 - 7	揚水試験における水頭分布の例 (トレンド2次の場合のConditional Simulation による推定値を使用)	-----	37
図 4 - 8	透水量係数のバリオグラム	-----	40

図 目 次 (2 / 2)

図 5 - 1	解析手順	-----	53
図 5 - 2	ダイポール試験における Iodine の破過曲線 (トレンドなしの場合)	-----	54
図 5 - 3	ダイポール試験における Iodine の破過曲線 (トレンド 1 次の場合)	-----	55
図 5 - 4	ダイポール試験における Iodine の破過曲線 (トレンド 2 次の場合)	-----	56
図 5 - 5	ダイポール試験における In-edta の破過曲線 (トレンドなしの場合)	-----	57
図 5 - 6	ダイポール試験における Gd-dtpa の破過曲線 (トレンドなしの場合)	-----	58
図 5 - 7	ダイポール試験における Tm-edta の破過曲線 (トレンドなしの場合)	-----	59
図 5 - 8	揚水試験における Iodine の破過曲線 (トレンドなしの場合)	-----	61
図 5 - 9	揚水試験における In-edta の破過曲線 (トレンドなしの場合)	-----	62
図 5 - 10	揚水試験における Gd-dtpa の破過曲線 (トレンドなしの場合)	-----	63
図 5 - 11	不均質な土壤中への溶質浸透の概念図	-----	65
図 5 - 12	7 日後の地層中の濃度分布	-----	65
図 5 - 13	14 日後の地層中の濃度分布	-----	65
図 5 - 14	地下水流速の x 成分の σ_y に対する依存性	-----	66
図 5 - 15	σ_h の σ_y に対する依存性	-----	66
図 5 - 16	地下水流速の x 成分の標準偏差の σ_y に対する依存性	-----	66
図 5 - 17	地下水流速の y 成分の標準偏差の σ_y に対する依存性	-----	66
図 5 - 18	揚水孔における破過曲線	-----	67
図 5 - 19	ファーフィールドでの揚水孔における破過曲線	-----	67

表 目 次

表 3 - 1	ゾーン 2 上部における透水量係数	-----	12
表 4 - 1	地下水流速の計算方法	-----	30
表 4 - 2	境界条件	-----	31
表 4 - 3	ダイポール試験における揚水区間との水頭差	-----	38
表 4 - 4	揚水試験における揚水区間との水頭差	-----	39
表 4 - 5	ダイポール試験における揚水孔(BFI02)との水頭差	-----	41
表 4 - 6	揚水試験における揚水孔(BFI02)との水頭差	-----	41
表 5 - 1	核種移行モデル(1/2)	-----	51
表 5 - 1	核種移行モデル(2/2)	-----	52
表 5 - 2	フィッティングにより算出したパラメータ	-----	60
表 5 - 3	トレーサ試験解析ケース一覧	-----	64
表 5 - 4	地層の不均質性を考慮した核種移行解析	-----	68

1. まえがき

H L W地層処分において、地層中の核種移行特性を把握することは、安全評価上重要である。地下水及び核種の移行媒体である地層は、不均質性を有しているため、核種移行特性は空間的に変化する。この地層の特性に関する情報は、地層中に掘削された井戸を使用した水位観測、透水係数、トレーサ試験等により得られる。しかし、これらの情報は井戸における点としての情報でしかない。これらの点情報を基に、面としての情報である解析領域全体の地下水分布や透水係数分布を推定できる方法に地質統計法がある。

本研究は、この手法を用いて地層の不均質性を定量的に把握し、地層中の水理・物質移動モデルの確証を行うことにより、性能評価に使用するパラメータ及びモデルの信頼性を高めることを目的として実施した。解析に際しては、スウェーデン、フィンションサイトで実施されたトレーサ試験⁽¹⁾,⁽²⁾を対象として選び、地質統計法による透水係数分布の推定及びそれに基づいたトレーサ解析を実施した。

2. 実施内容

本研究では、地質統計法を用いた帶水層パラメータの推定及びトレーサ解析に関する以下の作業を実施した。

2.1 透水係数分布の推定

スウェーデン、フィンションサイトに掘削されている8本の井戸での透水係数の実測値から、地質統計法を使用して解析領域の透水係数分布及び分散を推定した。

2.2 地下水流動解析

2.1で推定した透水係数分布を基に、トレーサ試験での地下水流速場のモデル化を行った。また、このときの井戸における水頭の計算値を実測値と比較することにより、推定した透水係数分布の妥当性を評価した。

2.3 トレーサ移行解析

地下水水流動解析により、決定された流速分布の基で、トレーサ移行解析を実施した。モデル化において、移行プロセスとして移流と分散を考えた。井戸におけるトレーサの破過曲線の計算値を実測値にフィッティングすることにより、移行パラメータである分散率を推定した。

3. 透水係数分布の推定

3.1 試験体系

フィンションサイトでの水理試験により、図3-1に示す井戸における透水係数が測定されている。透水係数は、高さ方向に2m間隔で測定されている。後述するように、トレーサ試験は、ゾーン2と呼ばれる結晶性岩からなる亀裂帯で実施されており、トレーサ移行解析には、ゾーン2上部の領域を用いている。従って、透水係数分布の推定にあたっては、ゾーン2上部における透水係数の測定値を用いた。使用した透水係数の値を表3-1に示す。

3.2 推定方法

測定された透水係数から、解析領域全体の透水係数分布をKrigingと呼ばれる方法⁽³⁾により推定した。以下に推定方法を示す。

3.2.1 Kriging法

解析領域中のある点xにおける透水係数をZ(x)とすると、Z(x)は確率場における確率変量とみなせる。ここで、確率場に以下の仮定をおく。

$$E [Z(x_i) - Z(x_j)] = 0 \quad (3.2.1)$$

$$\text{Var} [Z(x_i) - Z(x_j)] = 2\gamma(d_{ij}) \quad (3.2.2)$$

ここで、 $d_{ij} = |x_i - x_j|$

関数 $\gamma(d_{ij})$ は、variogramと呼ばれ、透水係数の測定値を用いて下式で計算される。

$$2\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{N(d_{ij})} \sum_{ij} [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \quad (3.2.3)$$

ここで、 $N(d_{ij})$ は、距離 d_{ij} だけ離れた観測点i, jの組の数である。

variogramは、後述する3.2.3項で計算した値を用いた。

次に、測定された透水係数を基に、任意の地点xの推定値 $Z^*(x)$ をKriging法により推定する。これは、測定値を確率場における実現値と考え、以下の条件を満たす推定値を求めるものである。

$$\text{Var}[Z^*(x) - Z(x)] \rightarrow \min \quad (3.2.4)$$

$$Z^*(x) = \sum_i^n w_i Z_i \quad (3.2.5)$$

$$E [Z^*(x) - Z(x)] = 0 \quad (3.2.6)$$

ここで、 Z_i : 観測点 i における測定値 ($i = 1 \sim n$)

W_i : Z_i の重み係数

$$\sum_i^n W_i = 1 \quad (3.2.7)$$

これらの式から、次のKriging方程式が導かれる。

$$\sum_i^n W_i \gamma(d_{ii}) + \mu = \gamma(d_i) \quad (3.2.8)$$

ここで、 $d_i = |x - x_i|$, $i = 1 \sim n$

μ : Lagrangeの未定定数

上記2式からなる ($n+1$) 個の方程式を解くことにより、 W_i , μ を求めることができる。この値を用いて、(3.2.5)式から $Z^*(x)$ を求めることができます。

一方、Kriging分散は、

$$Var [Z^*(x) - Z(x)] = \sum_i^n W_i \gamma(d_i) + \mu \quad (3.2.9)$$

より、求めることができる。

3.2.2 トレンドの推定方法

上述した $Z(x)$ の平均値は、場所によらず一定であるが、実際の平均値は空間的に変動することが考えられる。そこで、 $Z(x)$ を次式で示す様に、トレンド成分 $m(x)$ と残差成分 $R(x)$ からなっているものとする。

$$Z(x) = m(x) + R(x) \quad (3.2.10)$$

$$E[Z(x)] = m(x) \quad (3.2.11)$$

$$E[R(x)] = 0 \quad (3.2.12)$$

トレンド成分 $m(x)$ は、次式で示す多項式で表現できるものとする。

$$m(x) = \sum_i^k a_i f^i(x) \quad (3.2.13)$$

ここで、 $f^i(x)$: 多項式

a_i : $f^i(x)$ の係数

k : トレンド項数

解析では、トレンド項数として、1次の場合と2次の場合を考えた。

係数 a_i は、測定値を用いて、重回帰分析により求め、トレンド成分を推定した。残差成分については、3.2.1で述べたKriging法を適用し、推定した残差成分から、(3.2.10)式より、透水係数を推定した。

3.2.3 バリオグラムの推定方法

透水係数の測定値を用いて、(3.2.3)式からvariogramを推定した。

(3.2.3)式において、距離 d_{ij} は場所によってまちまちであるため、距離を40mごとにクラス分けして $N(d_{ij})$ を求めた。variogramの近似式として、次式に示す指數関数型を用いた。

$$\gamma(d) = \sigma^2 (1 - \exp(-d/L)) \quad (3.2.14)$$

ここで、 σ^2 : $Z(x)$ の分散

d : 2点間の距離

L : 定数

3.2.4 Conditional Simulation

3.2.1で述べたKriging推定値は、測定値を考慮した推定値の最適値であり、実際の値は、Kriging推定値とKriging誤差の差で表される。すなわち、

$$Z(x) = Z^*(x) - e(x) \quad (3.2.15)$$

$$e(x) = Z^*(x) - Z(x) \quad (3.2.16)$$

ここで、 $e(x)$: Kriging誤差

$Z(x)$ の空間分布を見るために、 $Z^*(x)$ の統計的構造を保ちながら測定点ではゼロとなるような $e(x)$ をモンテカルロ法的に発生させる方法として、Conditional Simulationがある。

今、 $e(x)$ の共分散行列を $[S]$ とすると、測定点を除く任意の2点 x_1, x_m ($1, m = 1 \sim K$) において、

$$[S_{1m}] = \sum_j^n W_{mj} \gamma(d_{1j}) - \gamma(d_{1m}) + \mu_m \quad (3.2.17)$$

で表される。 $j = m$ のとき、 $[S]$ の対角項はKriging分散に相当する。

$[S]$ は一般に正値対角行列のため、

$$[S] = [Q] [Q]^{-1} \quad (3.2.18)$$

と分解できる。

K個の白色正規乱数を成分にもつ列ベクトルを $\{\varepsilon\}$, e_i ($i = 1 \sim K$) を成分にもつベクトルを $\{e\}$ とし、

$$\{e\} = [Q] \{\varepsilon\} \quad (3.2.19)$$

とおくと、 $\{e\}$ は平均ゼロ、共分散 $[S]$ の正規乱数ベクトルとなる。従って、地点 i における Kriging 推定値 $Z^*(x)$ に e_i を加えることにより、 $Z(x)$ の Conditional Simulation を行うことができる。

3.3 推定結果

フィンションサイトで測定された透水係数（表 3-1 参照）を基に、3.2 に示す手法により、解析領域全体にわたる透水係数の空間分布を推定した。なお、推定にあたって推定量は透水量係数 $T(x)$ の対数値 ($\ln T(x)$) とした。

3.3.1 トレンド

重回帰分析により、トレンド次数が 1 次の場合と 2 次の場合について、トレンドを推定した。その結果は以下の通りである。

① トレンド 1 次の場合

$$\begin{aligned} \ln T(x, y) = & -5.84 - 7.41 \times 10^{-4} x \\ & - 2.33 \times 10^{-3} y \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

② トレンド 2 次の場合

$$\begin{aligned} \ln T(x, y) = & -23.6 + 1.47 \times 10^{-2} x + 5.00 \times 10^{-2} y \\ & - 5.00 \times 10^{-6} x^2 - 1.54 \times 10^{-6} xy \\ & - 4.28 \times 10^{-5} y^2 \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

ここで、 $T(x, y)$: 透水量係数 (m^2/s)

x : x 軸方向の距離 (m)

y : y 軸方向の距離 (m)

3.3.2 バリオグラム

3.2.3 で述べた方法により、variogramを求めた。トレンドがある場合には、トレンド成分を差し引いた残差成分を用いて、variogramを求めた。

variogramの計算結果を、図3-2～図3-4に示す。図中の実線は、指
数関数型でvariogramを近似したときの計算値である。図3-2～図3-4
においてデータにはらつきが見られる。これは、解析領域にわたって、測定
に用いた井戸の数が9つと少ないためと考えられる。トレンドの次数が高い
ほど、分散は小さくなっている。

3.3.3 Kriging推定値及び分散値

上記3.3.2で求めたvariogramを用いて、3.2.1で述べた方法により
透水量係数の空間分布を求めた。Kriging推定値及び分散値を図3-5～図
3-10に示す。Kriging推定値は、井戸近傍では、測定値に近い値となっ
ており、測定された領域を離れるにつれて、平均的な値となっている。また、
分散は、井戸近傍では小さく、井戸から離れるにつれて大きくなっている。
トレンドがある場合のKriging推定値は、井戸近傍では、測定値に近い値で
あるが、井戸を離れるにしたがって測定値とはかなり異なった値となっ
ている。

3.3.4 Conditional Simulation

Conditional Simulationにより求めた、透水量係数の空間分布の例を図3
-11～図3-13に示す。これらの結果をKriging推定値と比較すると、
3.2.4で述べたように、Kriging誤差を考慮した分、場所による透水量係
数の変動が大きくなっていることがわかる。

3.3.5 トレンド推定方法の妥当性

トレンドが存在する場合、3.2.2項に示す様に重回帰分析により、トレ
ンド成分を推定し、残差成分について統計量である透水量係数を推定した。
トレンドが存在するときの推定方法としてUniversal Kringing法と呼ばれる
手法がある。これは、Kriging法と同様に、(3.2.4)～(3.3.6)式を満たす推
定値を求める手法である。そこで、この手法と重回帰分析を用いた手法によ
り推定されるそれぞれの透水量係数の空間分布を比較し、手法の違いによる
空間分布の差について検討した。

Universal Kriging法による透水量係数の空間分布は、以下に示す方法により推定される。

推定量 $Z(x)$ は、3.2.2項に述べた様にトレンド成分と残差成分から成っているとする（(3.2.10)式参照）。また、トレンド成分は多項式で表されるとする（(3.2.13)式参照）。このとき、Kriging方程式は下式で表される。

$$\sum_j^n W_j \gamma(d_{ij}) + \sum_1^k \mu_i f^{-1}(x_i) = \gamma(d_i), \quad i=1 \sim n, 1 \sim k \quad (3.3.3)$$

$$\sum_i^n W_i f^{-1}(x_i) = f^{-1}(x) \quad (3.3.4)$$

ここで、 $d_{ij} = |x_i - x_j|$, $d_i = |x - x_i|$

μ_i : Lagrangeの未定定数

(3.3.3)式と(3.3.4)式の連立方程式を解くことにより、 W_i , μ_i を求めることができ、(3.2.5)から $Z^*(x)$ を推定することができる。

トレンドが1次の場合と2次の場合についてUniversal Kriging法により推定した透水量係数の分布をそれぞれ図3-14及び図3-15に示す。図3-14及び図3-15を、トレンドを重回帰分析により推定した場合の透水量係数の分布（図3-6及び図3-7参照）と比較すると、あまり大きな差は見られなかった。これは、観測された井戸間の距離が約100mあるいはそれ以上となっており、variogram関数の代表長さ（40m）に比べて長いため、観測値間の相関が弱いためと考えられる。従って、本解析の試験体系では、透水量係数の分布を重回帰分析を用いて推定する方法は妥当と考えられる。

Y-AX

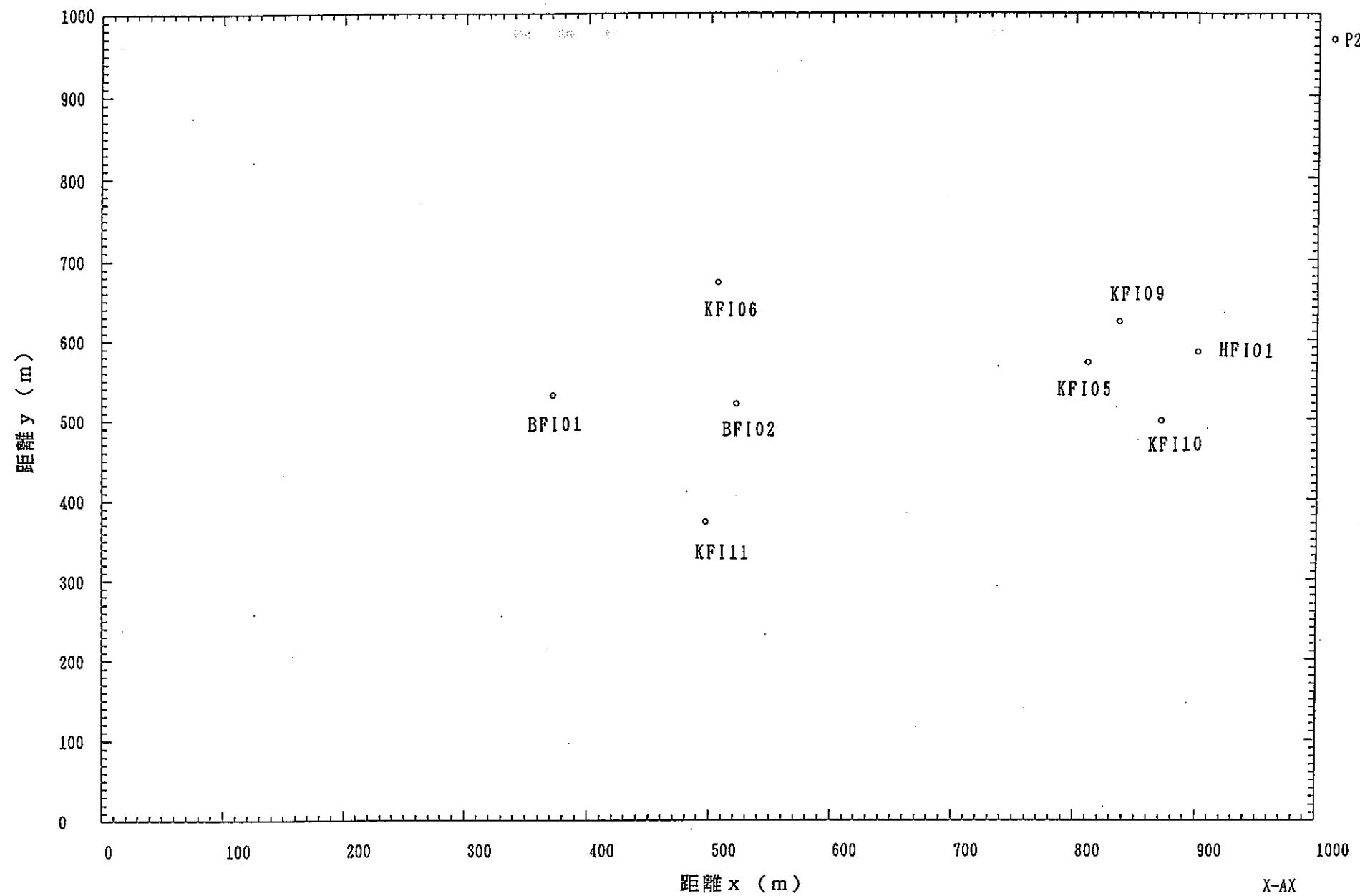


図3-1 井戸の位置

表3-1 ゾーン2上部における透水量係数

井戸	区間巾(m)	透水量係数(m^3/s)
BFI01	5	1.29×10^{-3}
BFI02	2.4	1.84×10^{-3}
KFI06	5	5.60×10^{-4}
KFI11	5	3.71×10^{-4}
KFI05	6	8.61×10^{-4}
KFI09	2	1.90×10^{-4}
KFI10	2	1.80×10^{-4}
HFI01	2	3.80×10^{-4}

Y-AX

DRIFT 0

2

バリオグラム

1

0

100

200

300

400

500

600

距離 h (m)

X-AX

○ GAM
○ GAM
○ GAM○ 実測値
— 計算値

図 3-2 透水量係数のバリオグラム（トレンドなしの場合）

Y-AX

DRIFT 1

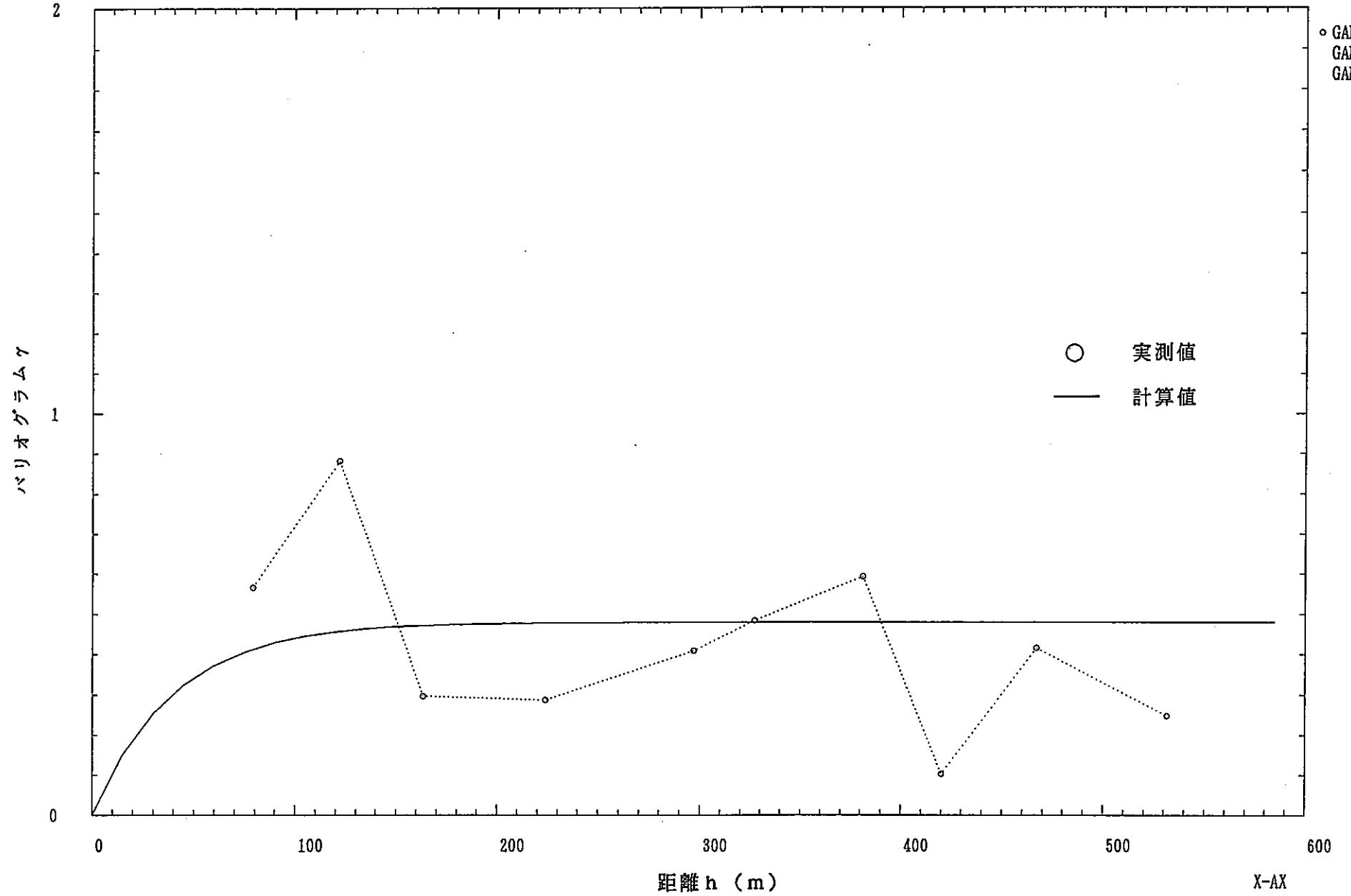
○ GAM
○ GAM
○ GAM

図 3-3 透水量係数のバリオグラム（トレンド1次の場合）

Y-AX

DRIFT 2

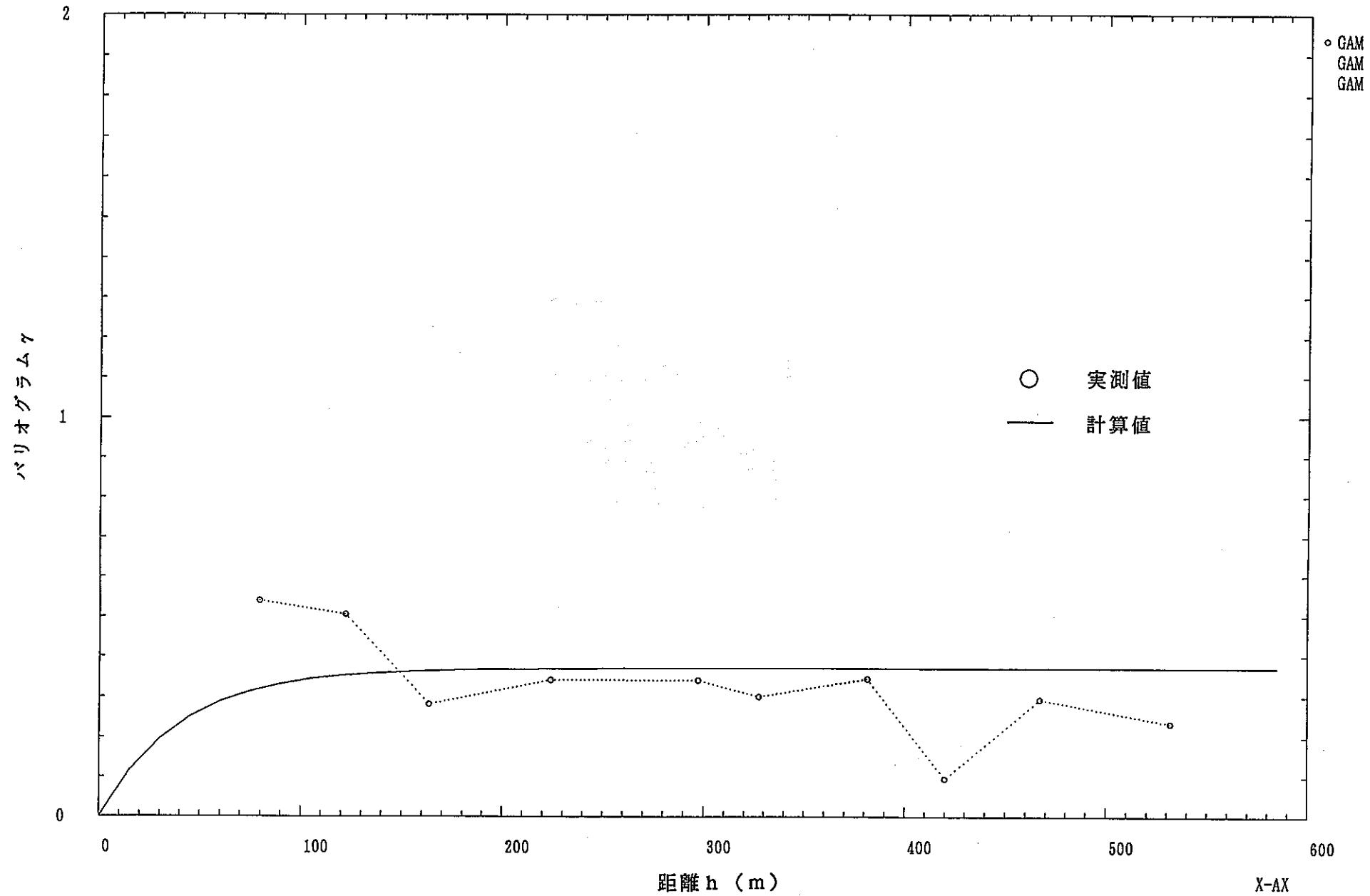


図 3-4 透水量係数のバリオグラム（トレンド2次の場合）

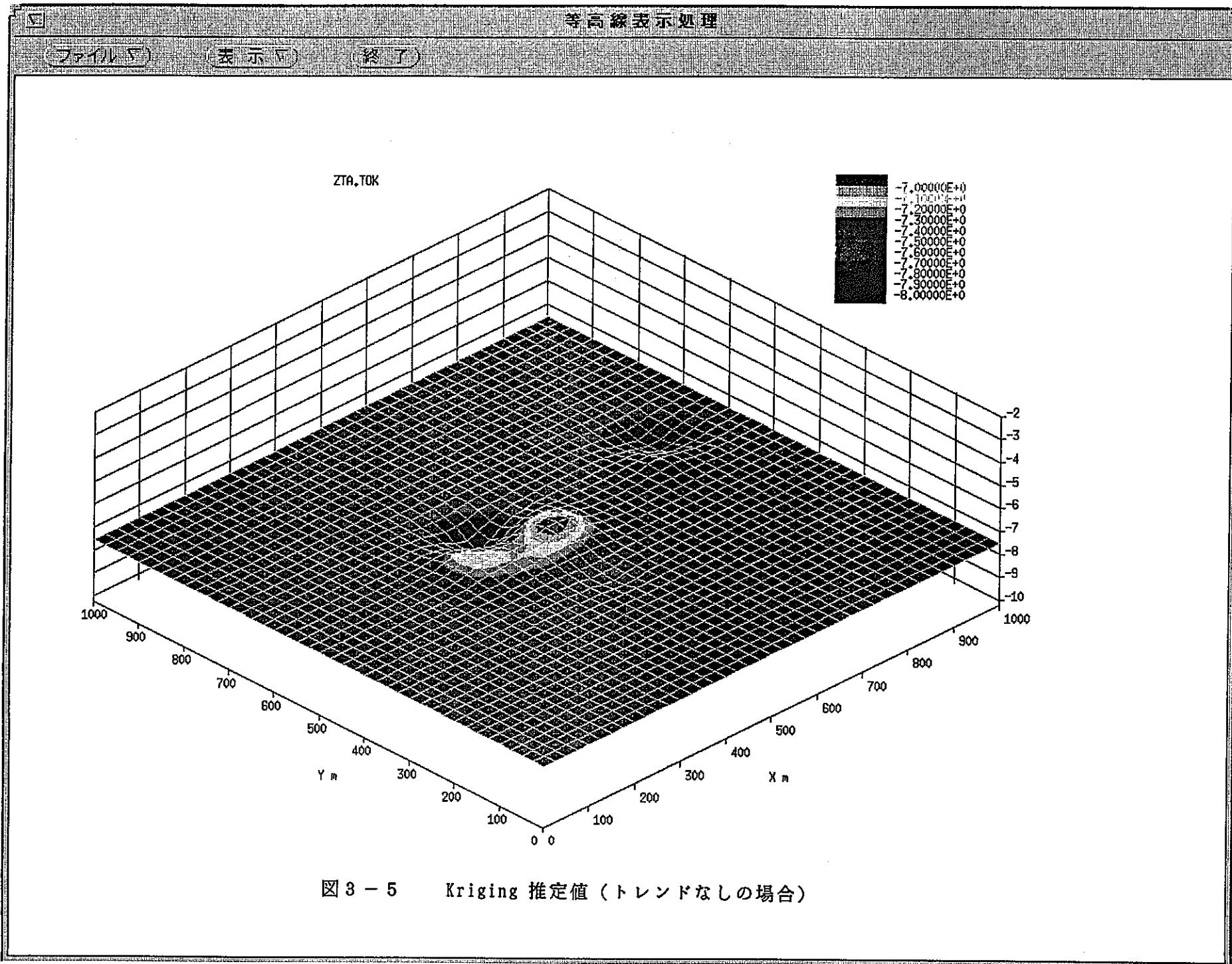
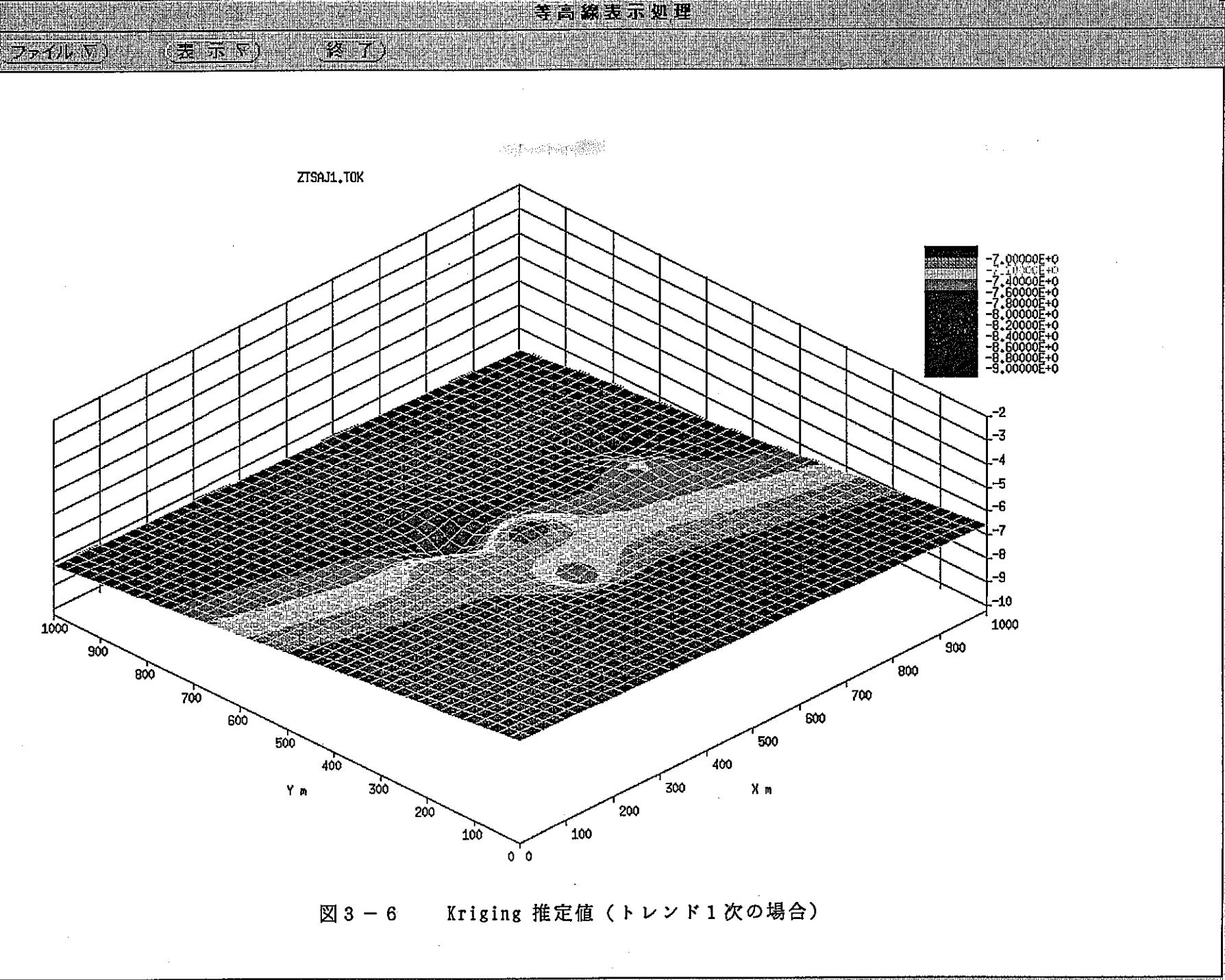


図 3-5 Kriging 推定値（トレンドなしの場合）



[ファイル] [表示] [終了]

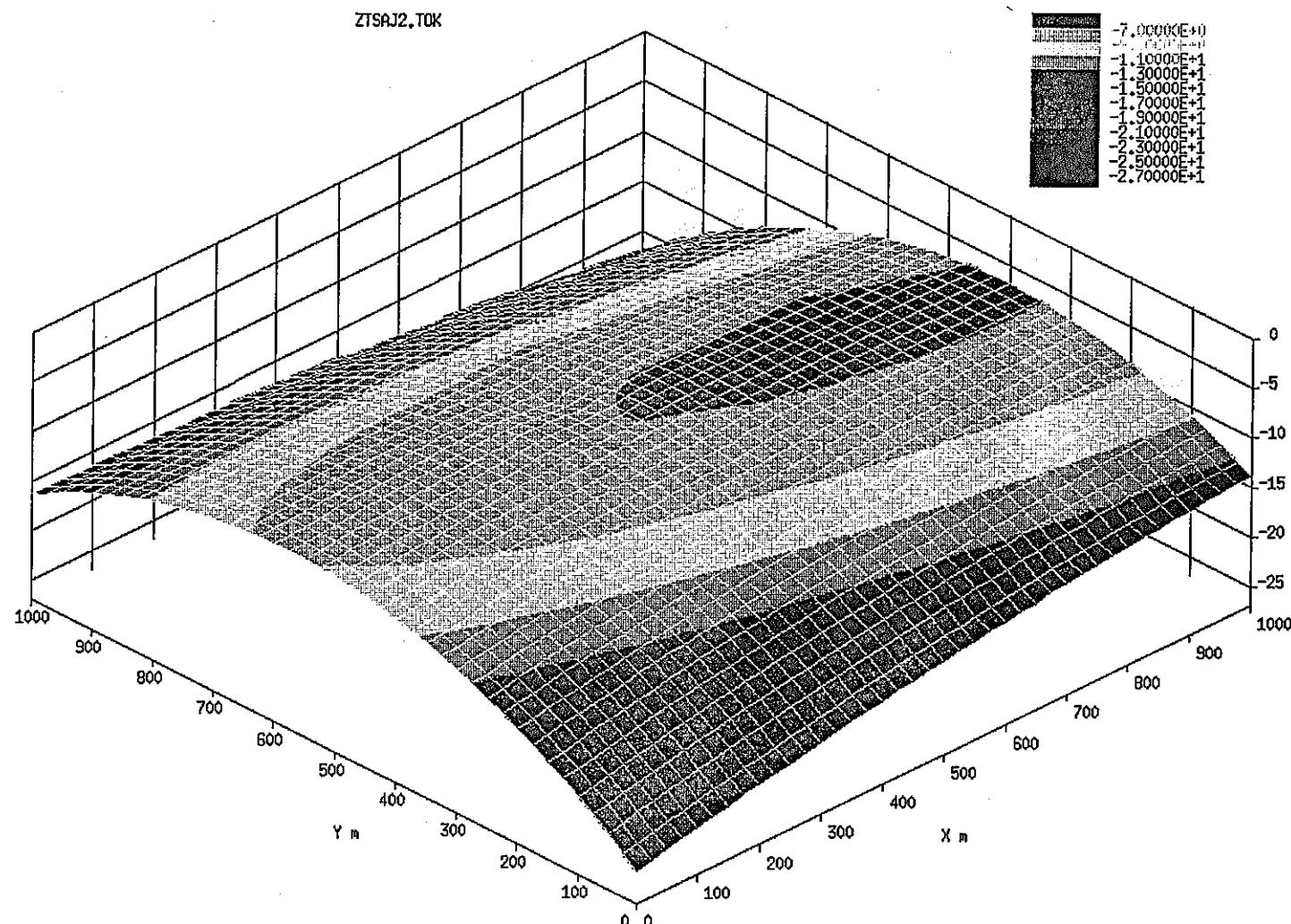


図 3-7 Kriging 推定値（トレンド 2 次の場合）

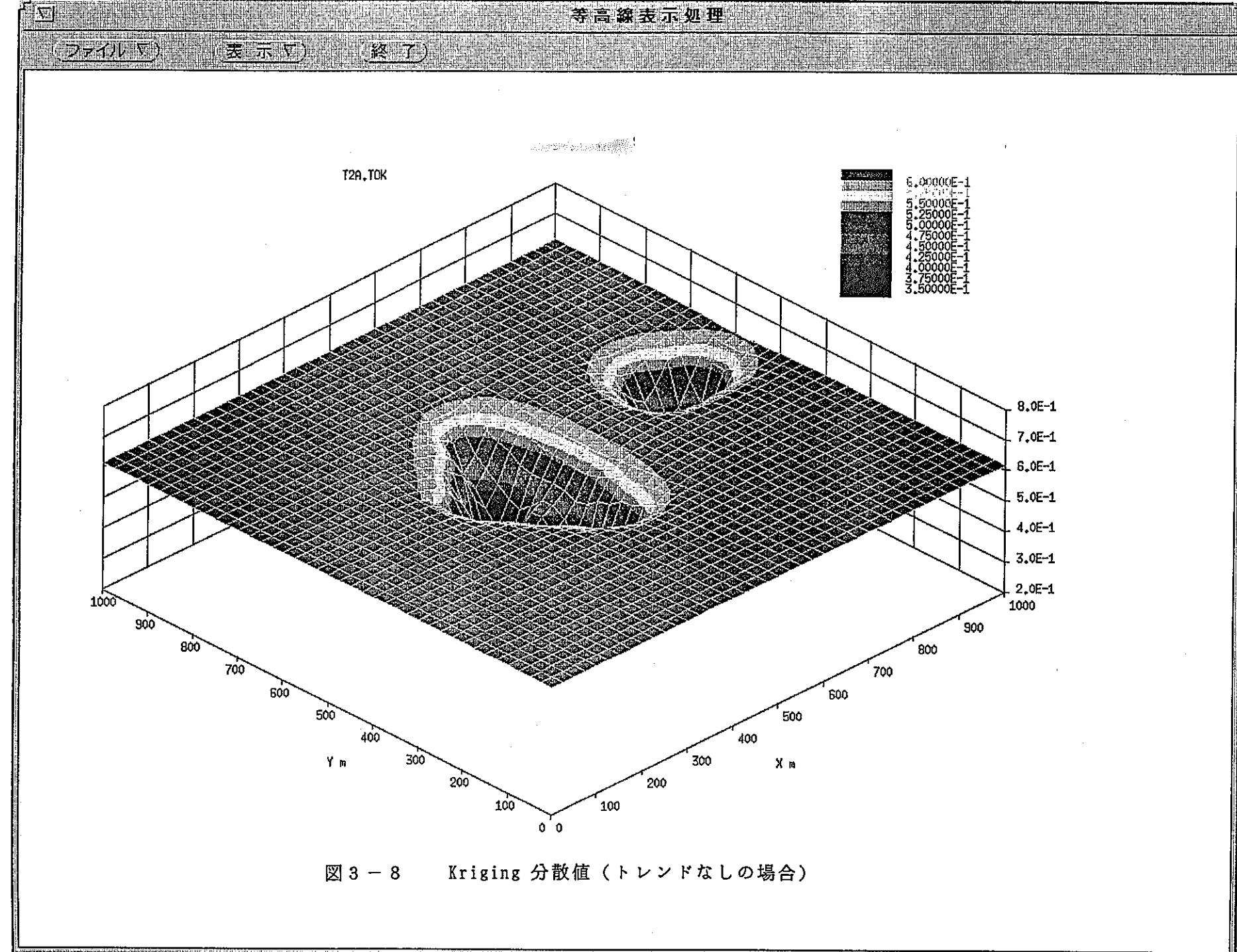


図 3 - 8 Kriging 分散値（トレンドなしの場合）

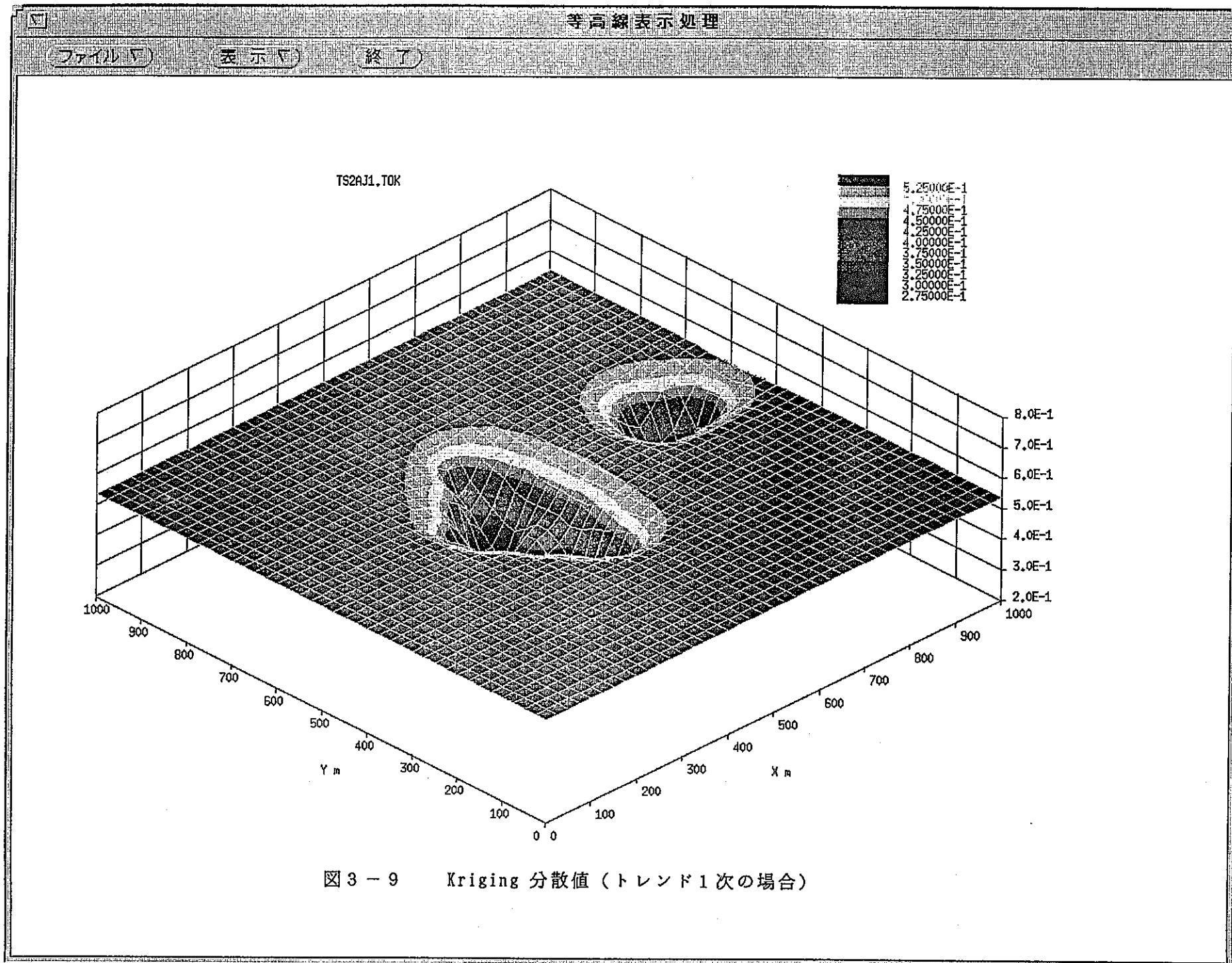


図 3 - 9 Kriging 分散値（トレンド 1 次の場合）

[ファイル]

[表示]

[終了]

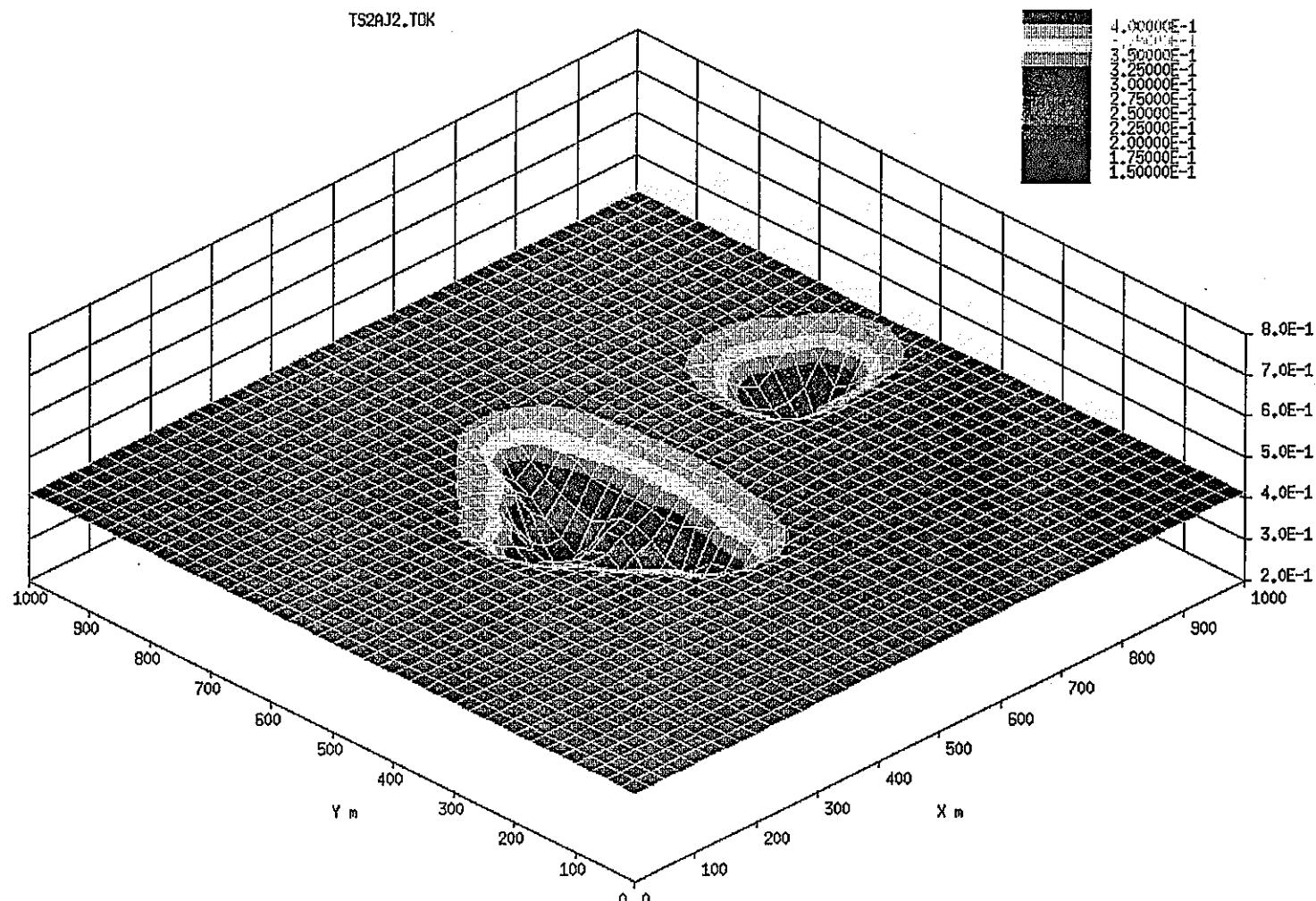
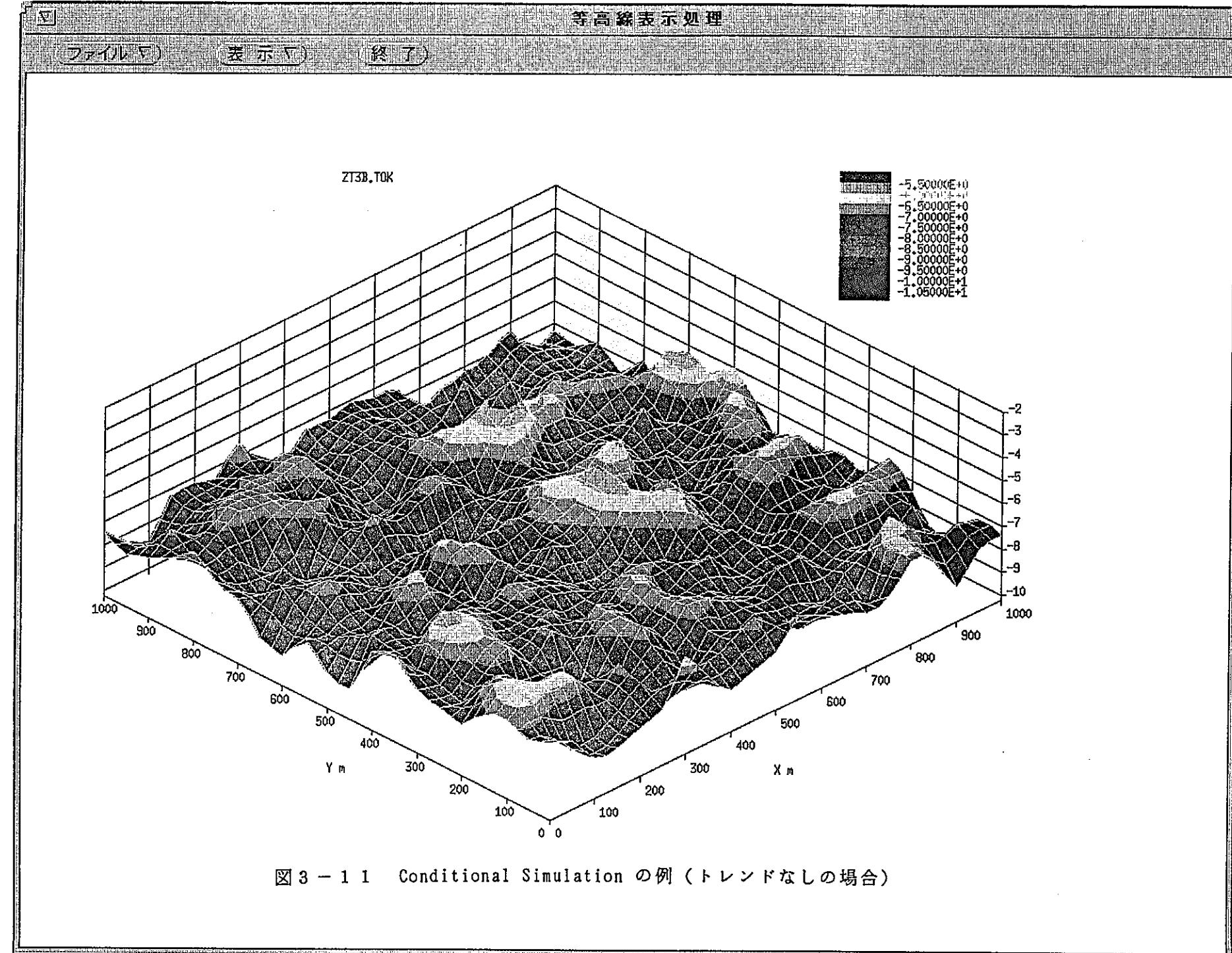
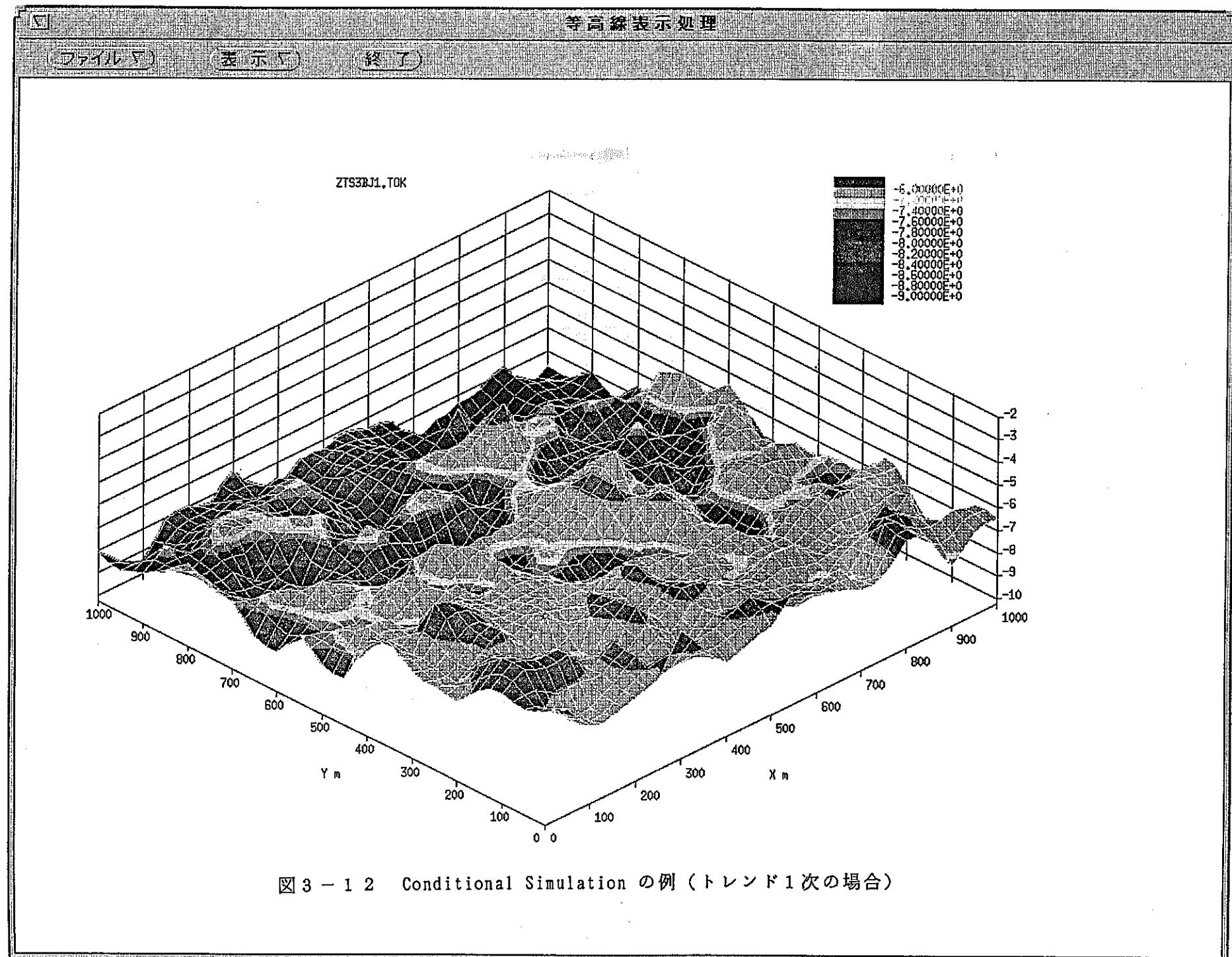


図3-10 Kriging 分散値（トレンド2次の場合）





[ファイル] [表示] [終了]

ZTS3BJ2.TOK

0.0000E+0
-1.1000E+1
-1.3000E+1
-1.5000E+1
-1.7000E+1
-1.9000E+1
-2.1000E+1
-2.3000E+1
-2.5000E+1
-2.7000E+1

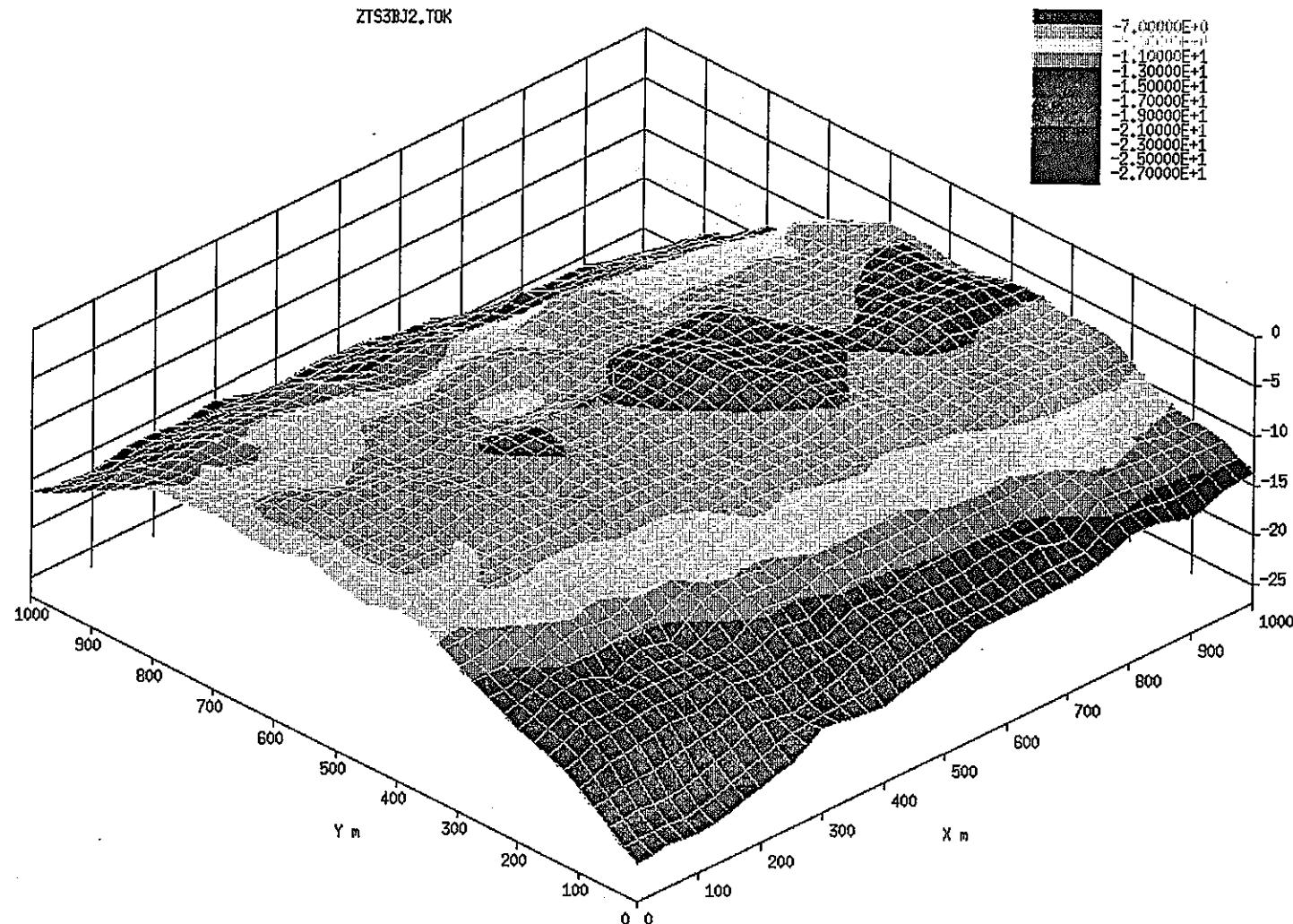


図3-1-3 Conditional Simulation の例（トレンド2次の場合）

ファイル 表示 終了

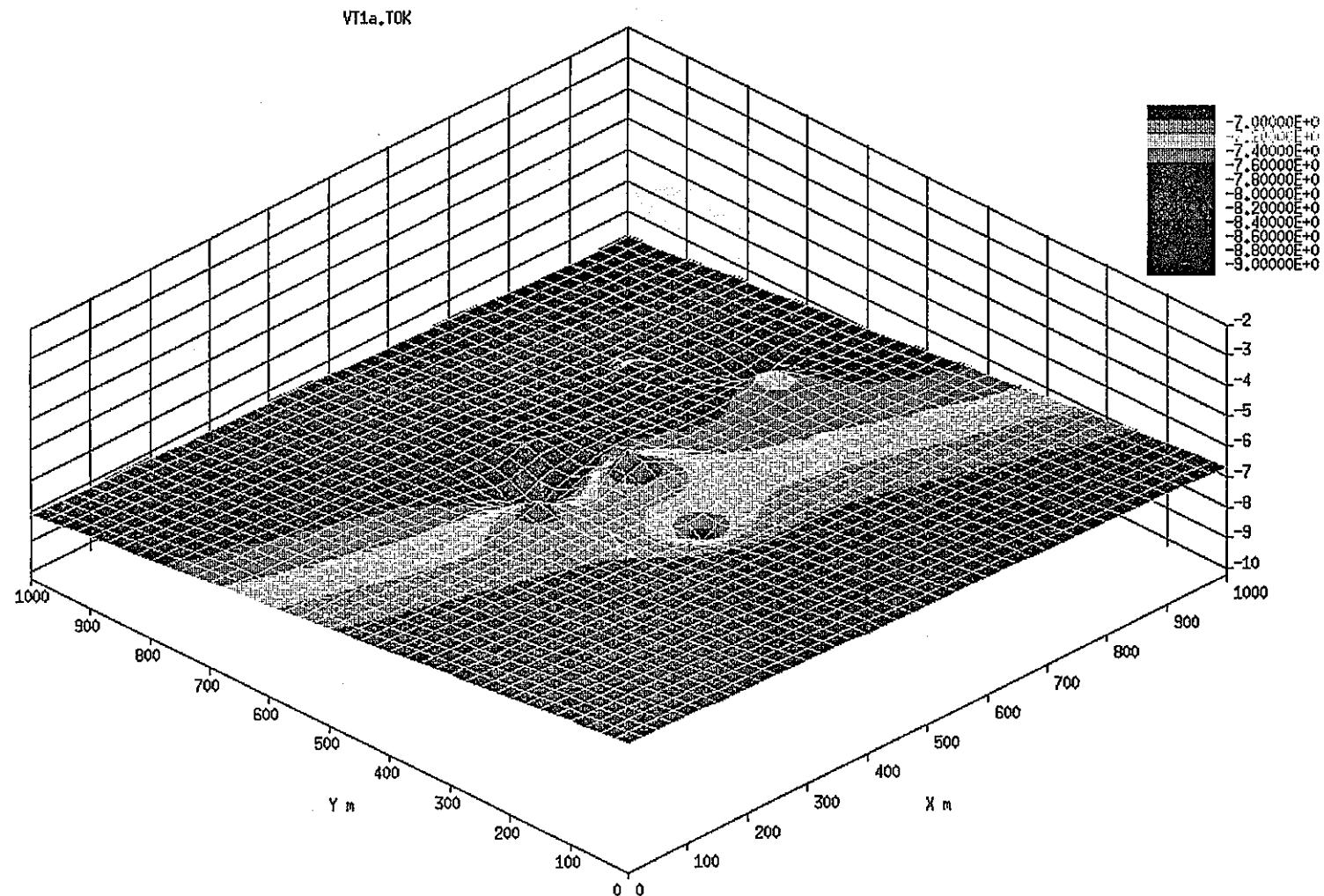


図 3-14 Universal kriging による推定値（トレンド1次の場合）

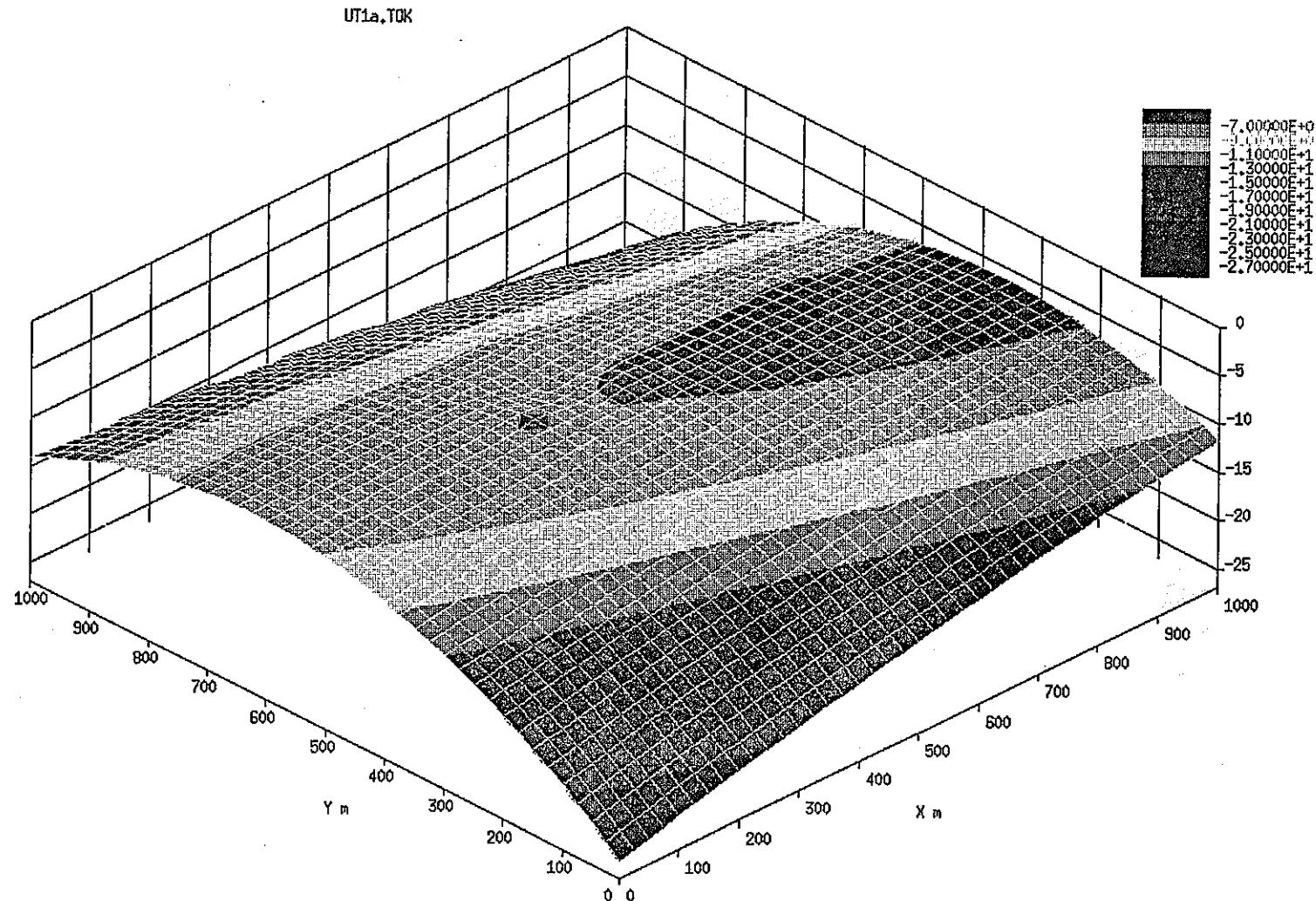


図 3-15 Universal kriging による推定値（トレンド 2 次の場合）

4. 地下水流動解析

第3章で求めた透水量係数の空間分布をもとに、地下水流及び水頭分布を求めた。

4.1 試験体系

フィンションサイトでのトレーサ試験では、1つの井戸から地下水を揚水する揚水試験と2つの井戸を用いて、一方の井戸から地下水を揚水し、他方の井戸に揚水した地下水を注入するダイポール試験の2種類の試験が実施された（図4-1参照）。そこで、これら2種類の流速場での解析を実施した。

4.2 解析モデル

地下水流速の算出にあたって、水平な亀裂層での透水量係数の空間分布を考慮した。分布は第3章で算出した分布を用いた。地下水流速は、動水勾配に比例するとしたダルシー則に従うものとした。亀裂層での地下水流速は2次元的な流れとした。

解析に用いた地下水流速の計算方法を表4-1に示す。地下水流速算出のための境界条件を表4-2に示す。

4.3 解析結果

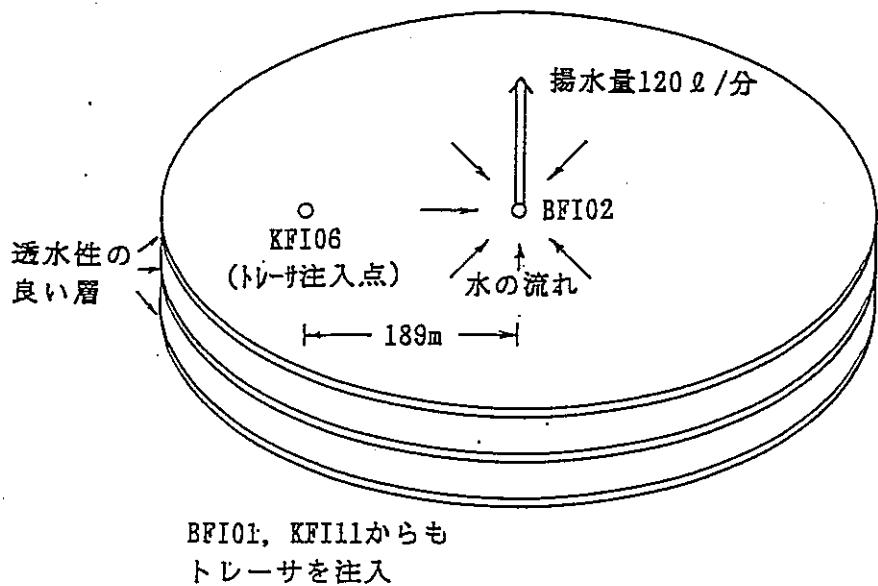
図3-11～図3-13に示す透水量係数分布を用いて、地下水流速を算出し、井戸における水頭を求めた。ダイポール試験及び揚水試験における水頭分布をそれぞれ図4-2～図4-7に示す。試験では、井戸における水頭が測定されているため、測定値と計算値を比較した。比較の表を表4-3～表4-4に示す。この表から、トレンドがない場合及び、トレンドがある場合、いずれも測定値と計算値は、比較的合っていると考えられる。

水頭の測定値と計算値が合っていることから、推定した透水量係数分布は妥当なものと考えられる。

透水量係数の推定に用いたバリオグラム関数はexponential typeを仮定したが、図4-8に示すspherical typeのバリオグラムを用いた場合について、同様の地下水流动解析を実施し、水頭値を比較した。これらの2つのタイプのバリオグラムを用いた場合の水頭値の比較を表4-5～表4-6に示す。表4-5～表4-6の水頭値の比較から、バリオグラムの違いによる水頭値の違いはあまり見られ

なかった。従って、第5章のトレーサ移行解析では、exponential type のパリオグラムによる地下水流动解析結果を用いて、解析を実施した。

揚水試験



ダイボール試験

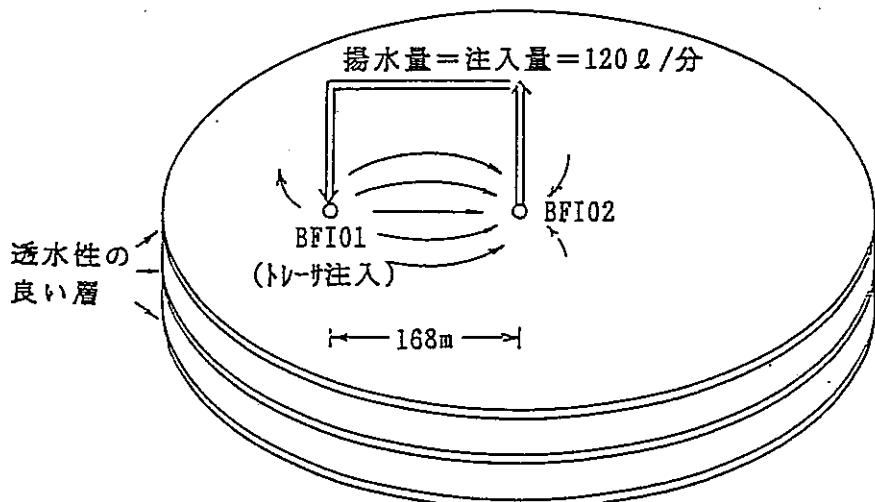


図4-1 Finnsjönの試験体系

表 4 - 1 地下水流速の計算方法

(1) 基礎式

$$\frac{\partial}{\partial x} (T(x,y) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T(x,y) \frac{\partial h}{\partial y}) + Q = 0$$

ここで h : 水頭値(m)

$T(x,y)$: 点(x, Y)における透水量係数(m^2/hr)

Q : 地下水流量(m^3/hr)

(2) 境界条件

表 4 - 2 参照

(3) 地下水流速の計算方法

差分法によりメッシュ点(x, y)における水頭値 $h(x, y)$ を求め、下式を用いて地下水流速(ダルシー流速)を算出する。

$$v_x = -K(x, y) \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -K(x, y) \frac{\partial h}{\partial y}$$

ここで

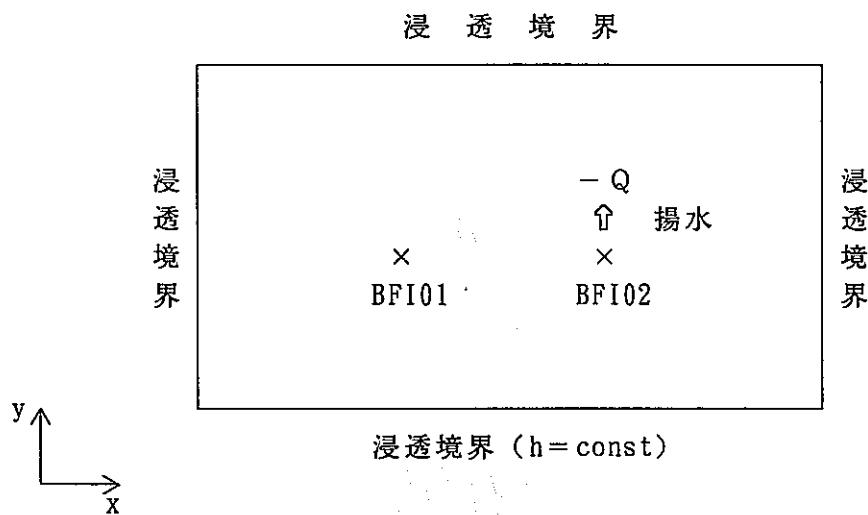
v_x : 地下水流速の x 成分(m/hr)

v_y : 地下水流速の y 成分(m/hr)

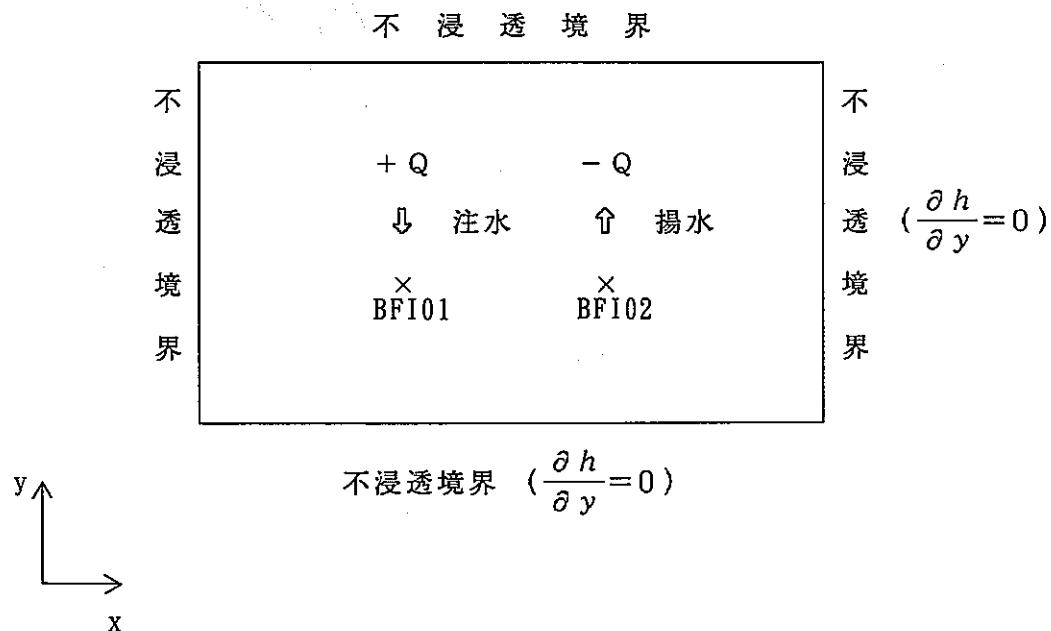
$K(x, y)$: 点(x, y)における透水係数(m/hr)

表 4-2 境界条件

(1) 井戸が1つの場合



(1) 井戸が2つの場合



P3B.TOK

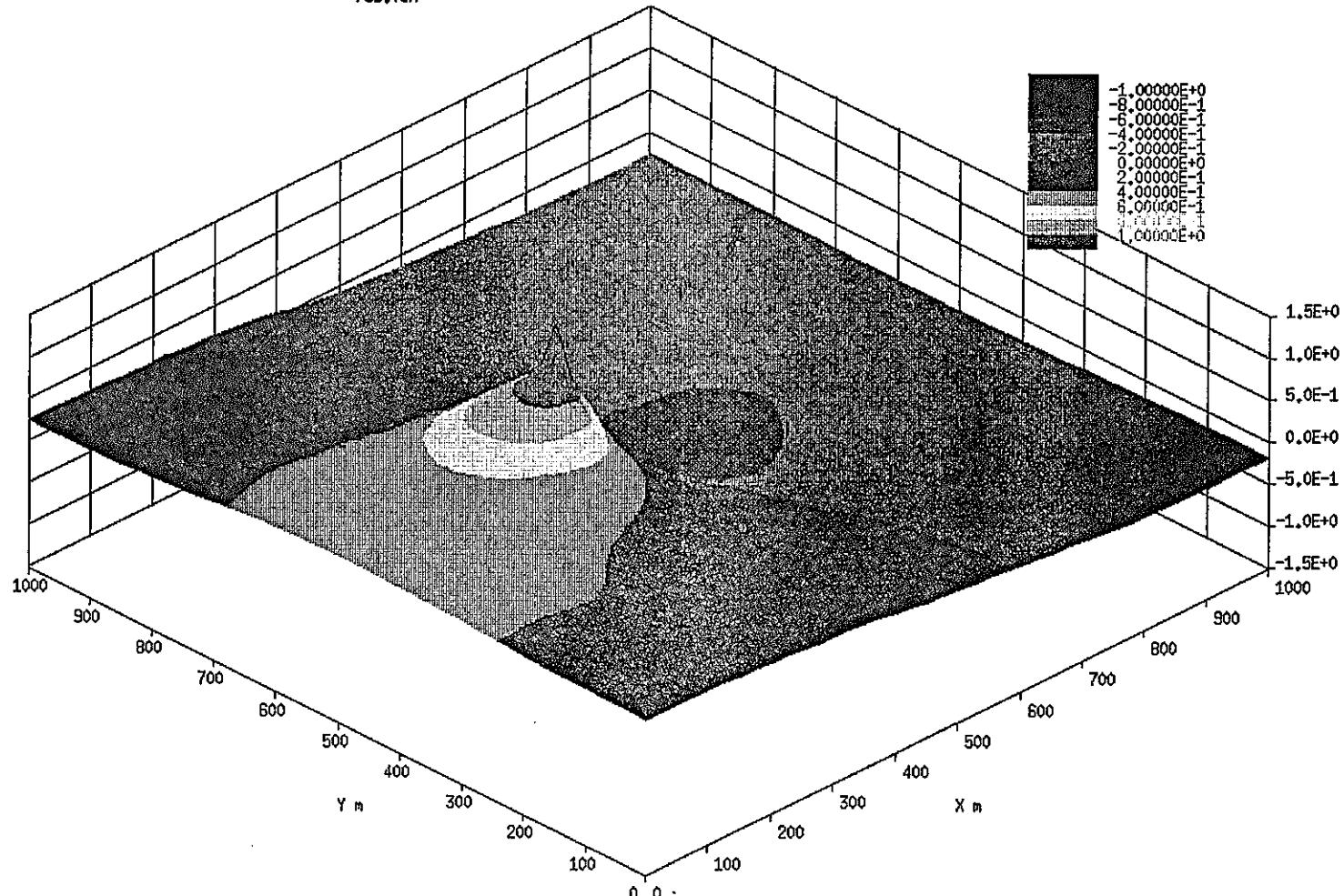


図 4-2 ダイポール試験における水頭分布の例

(トレンドなしの場合のConditional Simulationによる推定値を使用)

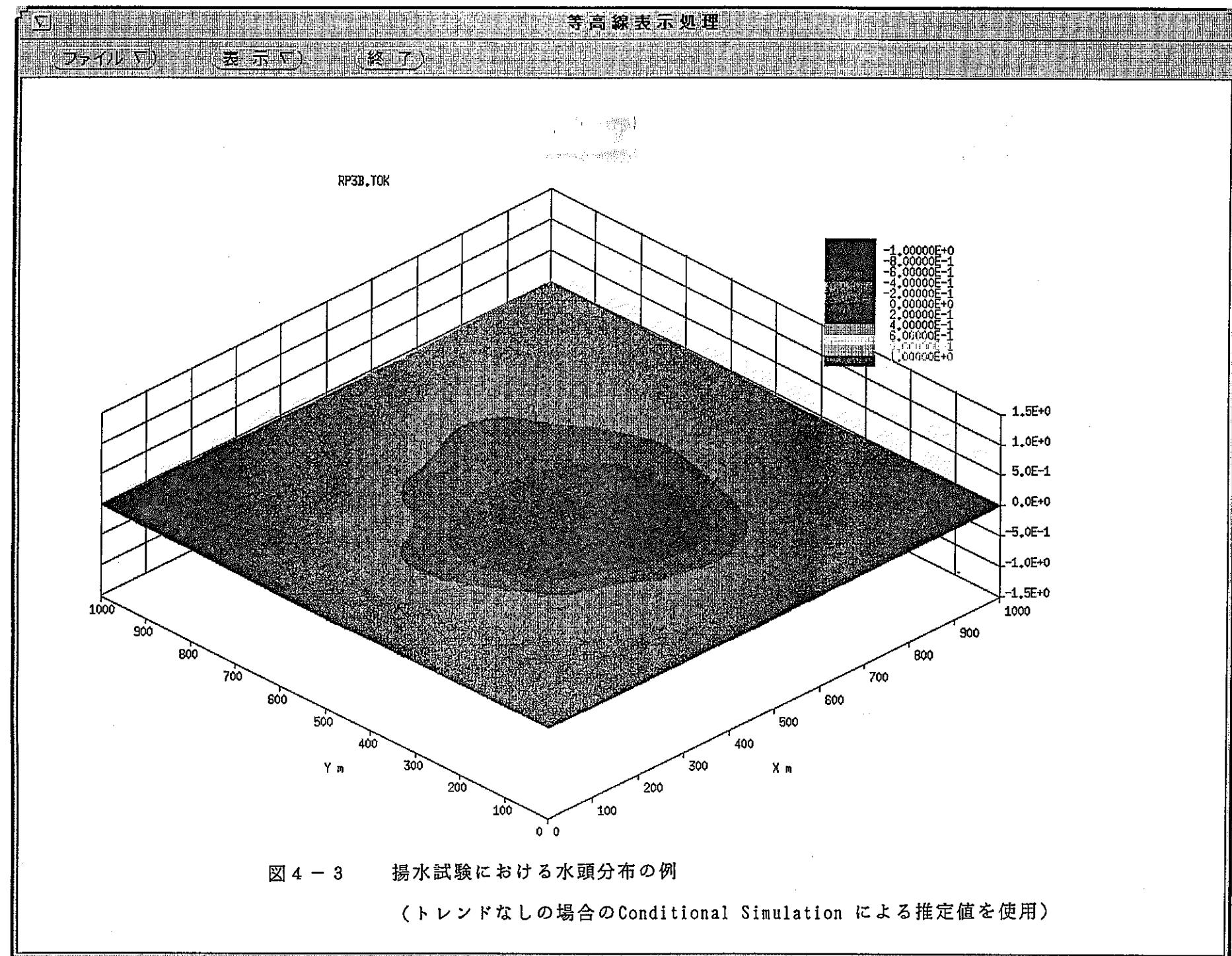


図 4 - 3

揚水試験における水頭分布の例

(トレンドなしの場合のConditional Simulationによる推定値を使用)

ファイル(F)

表示(V)
終了(E)

P38J1.TOK

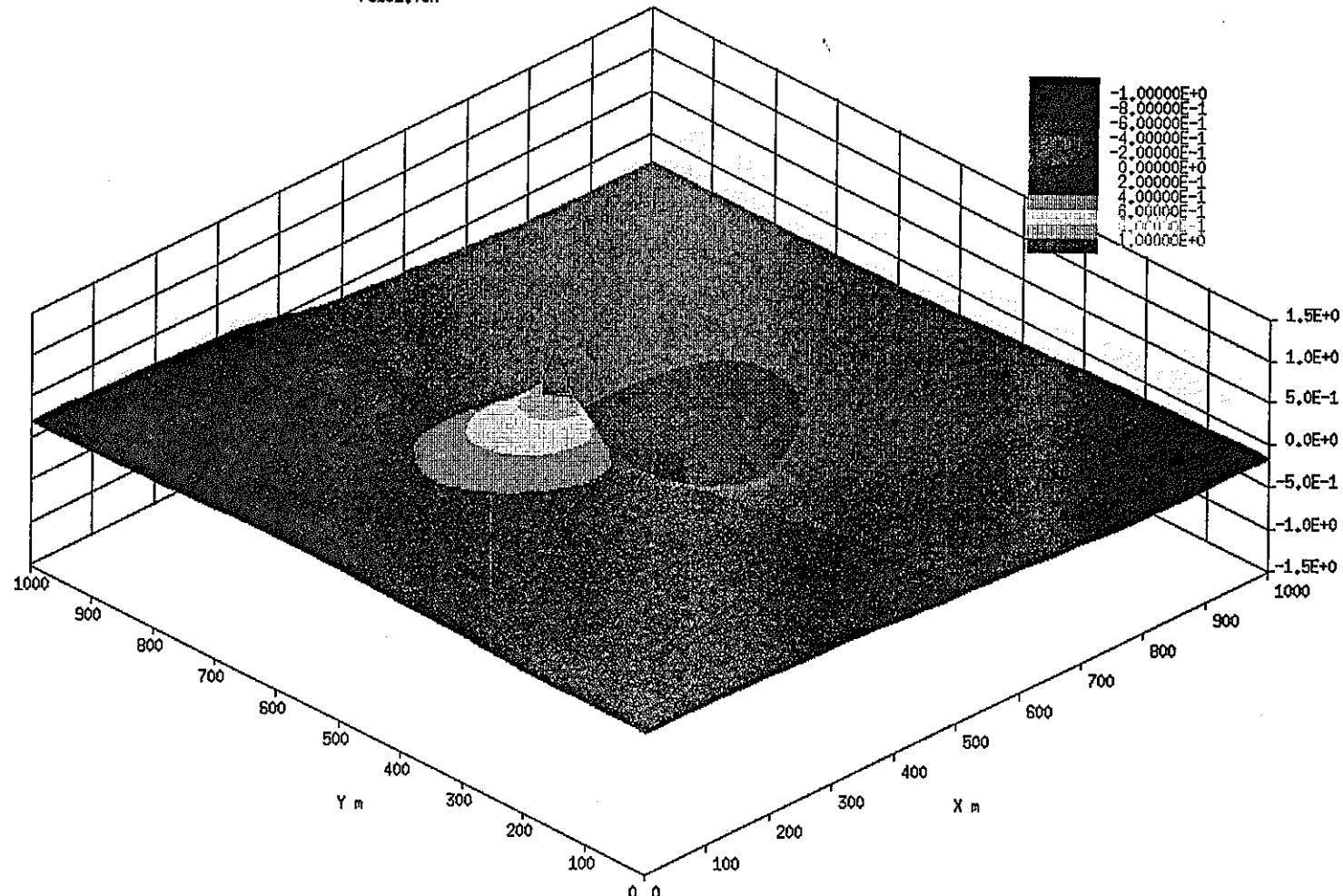


図 4-4 ダイポール試験における水頭分布の例

(トレンド1次の場合のConditional Simulationによる推定値を使用)

[ファイル]

[表示]

[終了]

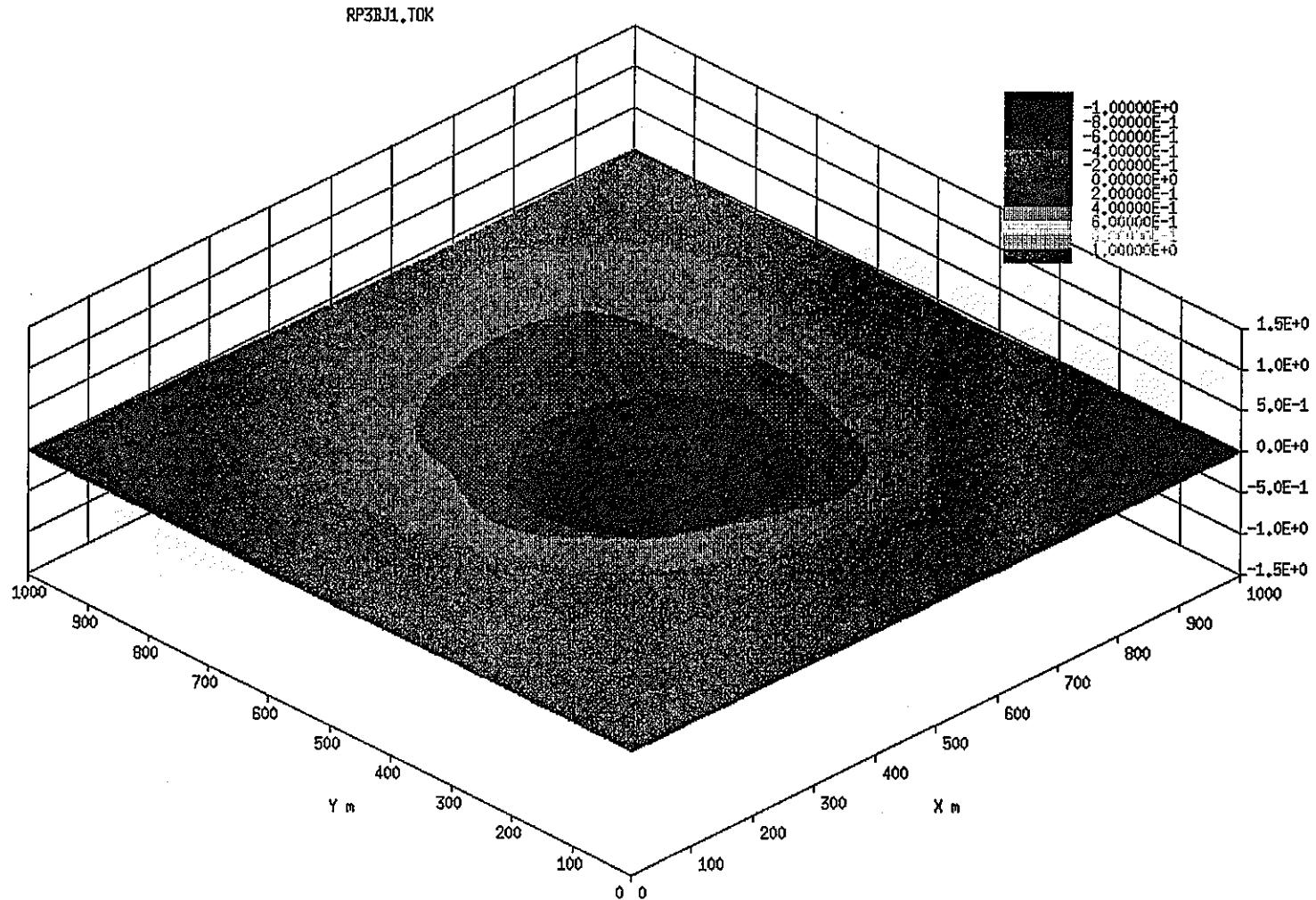
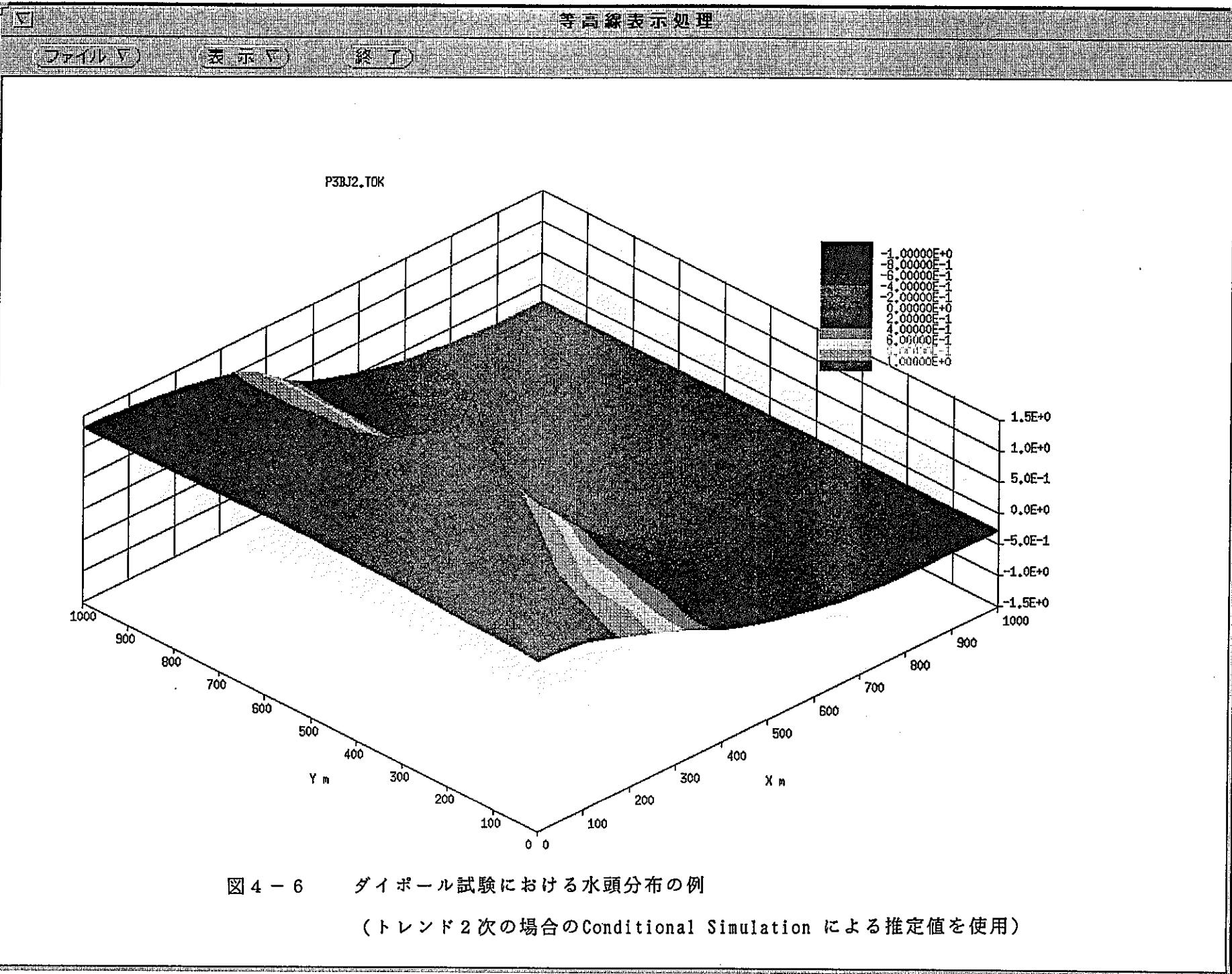


図 4-5

揚水試験における水頭分布の例

(トレンド1次の場合のConditional Simulationによる推定値を使用)



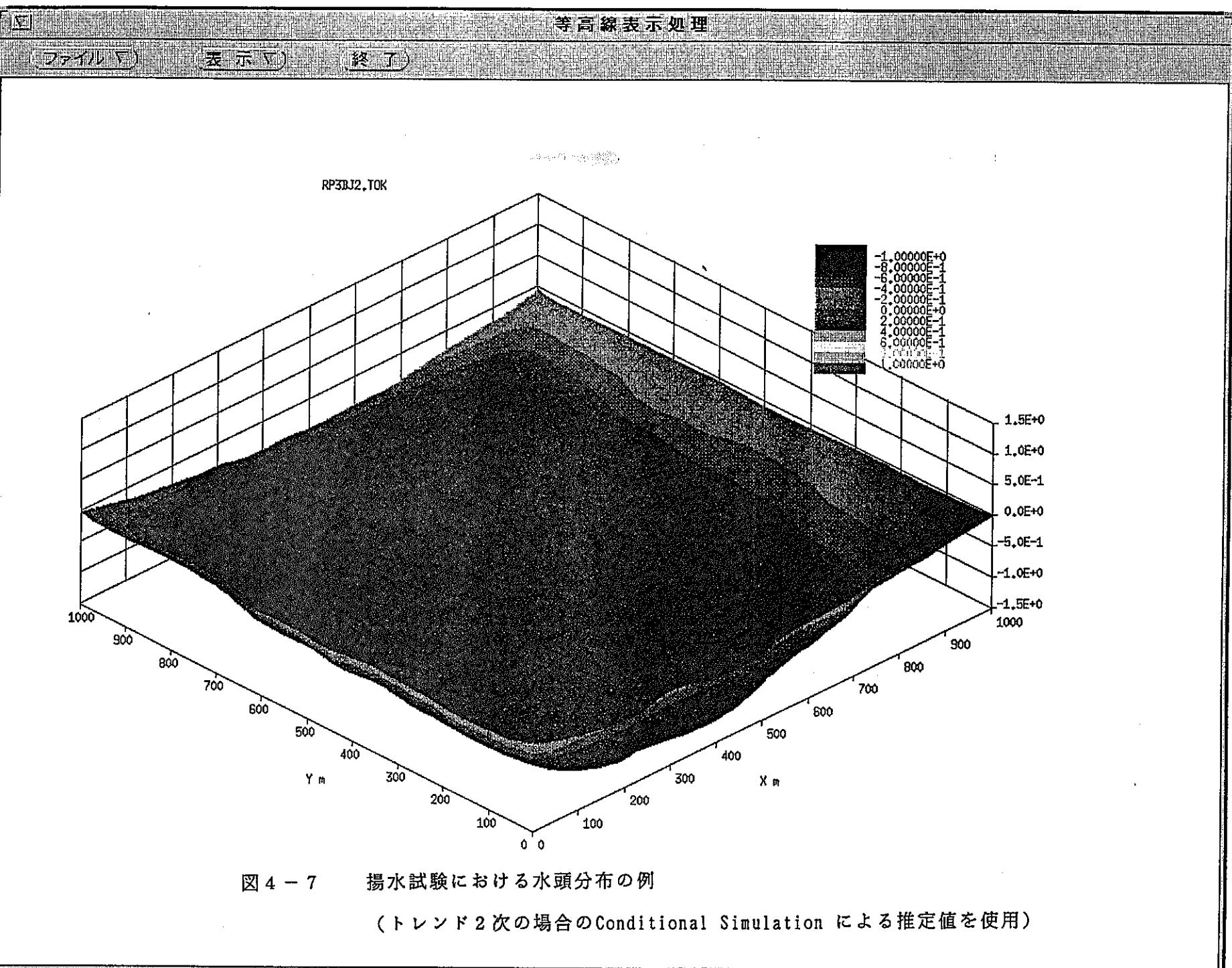


図 4-7 揚水試験における水頭分布の例
(トレンド 2次の場合のConditional Simulationによる推定値を使用)

表 4 - 3 ダイポール試験における揚水区間との水頭差

(ドリフトなしの場合)

井戸	実測値 (m)	計算値 (m)			
		ケース 0	ケース 1	ケース 2	ケース 3
BFI01	2.7	3.05	2.77	2.77	2.26
KFI06	0.6~0.4	1.30	1.08	0.87	0.80
KFI11	1.0~0.9	1.29	1.07	0.96	0.69

(ドリフトを1次式で近似した場合)

井戸	実測値 (m)	計算値 (m)			
		ケース 0	ケース 1	ケース 2	ケース 3
BFI01	2.7	2.86	2.61	2.57	2.13
KFI06	0.6~0.4	1.25	1.04	0.86	0.79
KFI11	1.0~0.9	1.30	1.10	0.98	0.72

(ドリフトを2次式で近似した場合)

井戸	実測値 (m)	計算値 (m)			
		ケース 0	ケース 1	ケース 2	ケース 3
BFI01	2.7	2.99	2.75	2.93	2.45
KFI06	0.6~0.4	1.05	0.86	0.78	0.79
KFI11	1.0~0.9	1.00	0.83	0.80	0.64

ケース 0 : Kriging推定値を使用した場合

ケース 1 : Conditional Simulationによる値(標本1)を使用した場合

ケース 2 : Conditional Simulationによる値(標本2)を使用した場合

ケース 3 : Conditional Simulationによる値(標本3)を使用した場合

表4-4 揚水試験における揚水区間との水頭差

(ドリフトなしの場合)

井戸	実測値 (m)	計算値 (m)			
		ケース0	ケース1	ケース2	ケース3
BFI01	1.14	1.44	1.26	1.03	0.85
KFI06	0.62	1.52	1.40	1.07	0.87
KFI11	0.81	1.41	1.24	1.01	0.74

(ドリフトを1次式で近似した場合)

井戸	実測値 (m)	計算値 (m)			
		ケース0	ケース1	ケース2	ケース3
BFI01	1.14	1.45	1.27	1.08	0.87
KFI06	0.62	1.33	1.19	0.95	0.78
KFI11	0.81	1.49	1.32	1.10	0.81

(ドリフトを2次式で近似した場合)

井戸	実測値 (m)	計算値 (m)			
		ケース0	ケース1	ケース2	ケース3
BFI01	1.14	0.98	0.91	0.70	0.64
KFI06	0.62	0.89	0.83	0.61	0.53
KFI11	0.81	1.02	0.98	0.72	0.57

ケース0 : Kriging推定値 を使用した場合

ケース1 : Conditional Simulationによる値(標本1)を使用した場合

ケース2 : Conditional Simulationによる値(標本2)を使用した場合

ケース3 : Conditional Simulationによる値(標本3)を使用した場合

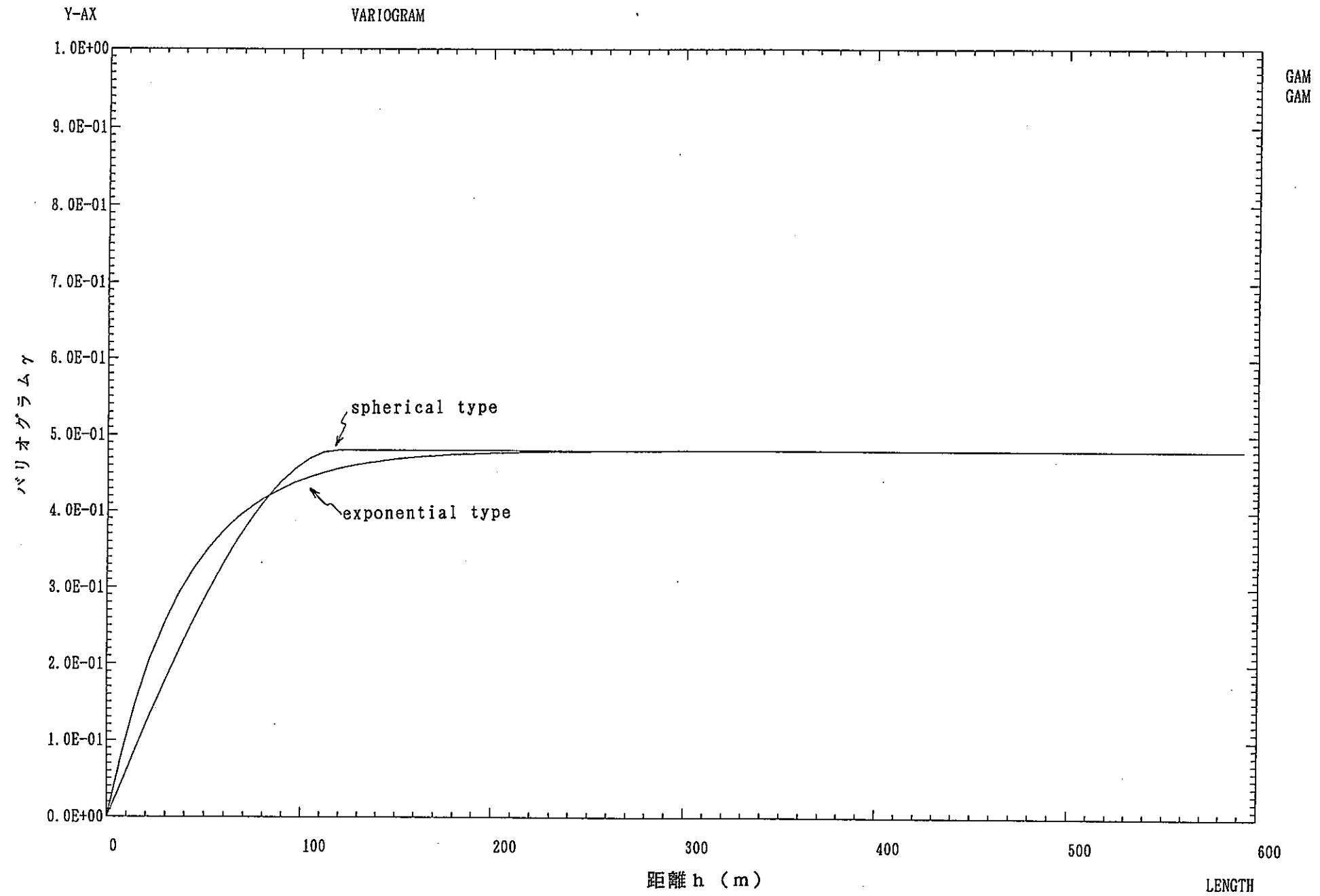


図 4 - 8 透水量係数のバリオグラム

表 4 - 5 ダイポール試験における揚水孔(BFI02)との 水頭差*

(ドリフト1次の場合)

井戸	実測値	ケース1		ケース2		ケース3	
		exponential	spherical	exponential	spherical	exponential	spherical
BFI01(m)	2.74	2.61	2.44	2.57	2.36	2.13	2.01
KFI06(m)	0.36	1.04	0.97	0.86	0.74	0.79	0.76
KFI11(m)	0.91	1.10	1.03	0.98	0.85	0.72	0.69
σ (%)**	—	110	98	80	62	71	67

(ドリフト2次の場合)

井戸	実測値	ケース1		ケース2		ケース3	
		exponential	spherical	exponential	spherical	exponential	spherical
BFI01(m)	2.74	2.75	2.68	2.93	2.80	2.45	2.41
KFI06(m)	0.36	0.86	0.85	0.78	0.71	0.79	0.81
KFI11(m)	0.91	0.83	0.82	0.80	0.75	0.64	0.60
σ (%)**	—	80	79	68	57	71	75

表 4 - 6 揚水試験における揚水孔(BFI02)との水頭差*

(ドリフト1次の場合)

井戸	実測値	ケース1		ケース2		ケース3	
		exponential	spherical	exponential	spherical	exponential	spherical
BFI01(m)	1.14	1.27	1.20	1.08	0.95	0.87	0.84
KFI06(m)	0.62	1.19	1.13	0.95	0.85	0.78	0.76
KFI11(m)	0.81	1.32	1.25	1.10	0.97	0.81	0.77
σ (%)**	—	65	57	23	28	20	20

(ドリフト2次の場合)

井戸	実測値	ケース1		ケース2		ケース3	
		exponential	spherical	exponential	spherical	exponential	spherical
BFI01(m)	1.14	0.91	0.92	0.70	0.65	0.64	0.66
KFI06(m)	0.62	0.83	0.82	0.61	0.56	0.53	0.54
KFI11(m)	0.81	0.98	0.97	0.72	0.64	0.57	0.56
σ (%)**	—	26	25	23	28	32	31

* 透水係数の分布はConditional Simulationによる 推定値を使用

$$** \sigma \text{ (標準偏差)} = \sqrt{\sum ((\text{計算値}) / (\text{実測値}) - 1)^2 / 3}$$

5. トレーサ移行解析

第4章で求めた地下水流速分布を基に、トレーサ移行解析を行った。

5.1 試験体系

図4-1に示す地下水流动解析と同様の体系とした。

5.2 解析モデル

透水性の高い層（亀裂帯）と透水性の低い層（ミキシング領域と母岩領域）からなるモデルとした（表5-1参照）。地下水は、透水性の高い亀裂帯を流れるため、透水性の高い層では、移流と分散による核種移行を考えた。母岩中では、地下水流れのない状態での通常の濃度勾配による拡散移行を考えた。亀裂帯と母岩領域の中間的な領域として、ミキシング領域を考えた。そこでは、地層中の亀裂を通じて高さ方向への地下水の移動により核種が移行する、と考えた。ミキシング領域では、高さ方向の分散による亀裂帯とミキシング領域間の移行を考えた。亀裂帯とミキシング領域の間の分散による移行、及びミキシング領域と母岩との間の拡散による移行を考えることで、トレーサ移行の遅延効果が説明できると考えられる。

核種移行モデルを表5-1に示す。表5-1に示すモデル式には、空隙率、分散等のパラメータがあるが、表5-1中に示す仮定をおくことにより、3つのパラメータ（亀裂帯での空隙率 ϕ 、亀裂帯での分散率 α 、亀裂帯と隣接層との分散率）が主なパラメータとなる。

5.3 移行パラメータの推定方法

トレーサ試験では、井戸での破過曲線が得られているため、測定された破過曲線に計算値をフィッティングすることにより、移行に関するパラメータを算出した。フィッティングの方法には、Marquardt法を用い、下式により逐次パラメータを修正することにより、最適なパラメータを算出した。

$$\begin{aligned} \{ J^T (x^{(k)}) J (x^{(k)}) + \lambda^{(k)} D^{(k)} \} \Delta x^{(k)} \\ = - J^T (x^{(k)}) \{ y - f (x^{(k)}) \} \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (5.3.2)$$

ここで、 J : ヤコビアン行列 ($= \partial f_i(x) / \partial x_j$)

λ : Marquardtパラメータ

D : 単位行列

y : 測定されたトレーサ濃度の列ベクトル

f : 計算されたトレーサ濃度の列ベクトル

x : 算出するパラメータの列ベクトル

Δx : パラメータの修正ベクトル

k : 繰り返し回数

5.4 解析手順

解析は、図5-1に示す手順で行った。トレーサ移行解析では、ダイポール試験の結果を用いて移行パラメータの算出を試みた。算出したパラメータを用いて揚水試験結果の再現性を検討した。

解析に用いたトレーサは、ダイポール試験と揚水試験に共通に使用されている4種類のトレーサ (In-edta, Tm-edta, Gd-dtpa, Iodine)とした。

5.5 解析結果

5.5.1 ダイポール試験

ダイポール試験での破過曲線へのフィッティング結果の例を図5-2～図5-7に示す（他の解析ケースの結果は付録B参照）。なお、透水量係数の分布は、表4-3におけるトレンドなし、1次のトレンドのケース2及び、2次のトレンドのケース2とした。移行に関するパラメータは、トレーサ注入後の一定の経過時間 (200 hr)までの濃度データにフィッティングすることにより算出した。算出したパラメータを表5-2に示す。

5.5.2 揚水試験

ダイポール試験結果へのフィッティングにより算出したパラメータを用いて揚水試験における破過曲線の予測計算結果の例を図5-8～図5-10に示す（他の解析ケースの結果は付録B参照）。破過曲線における濃度の立ち上がり部分、ピーク位置、及びテーリング部に着目して、計算値と実測値を

比較した結果を表5-3に示す。表5-3から、ダイポール試験結果へのフィッティング計算では、いずれの解析ケースにおいても、計算値と実測値は良く合っていた。一方、揚水試験結果の予測計算では、トレンドが2次のケースで、一部計算値と実測値の一致が良くないケースが見られるが、トレンド次数が0次と1次のケースでは、経過時間が実測値よりも若干(20~30 hr)遅れている傾向がみられるものの、実測値の濃度変化の傾向を大略再現していると考えられる。予測値の時間おくれは、空隙率が実際よりも若干高めに推定されたために、地下水流速が実際よりも低くなつたことによると考えられる。トレンド次数が高くなる程、計算値と実測値の一致が悪くなるのは、次数が高いケースでは透水量係数の場所ごとの変化が大きいため、地下水流速の場所ごとの変化が大きくなり、トレーサの移行に関して、地下水流速の変化の影響が大きくなつたためと考えられる。トレンド次数の低いケースの方が、計算値と実測値が比較的合っていることから、実際の透水量係数分布はトレンド次数の低いケースに近いと考えられる。

5.6 文献調査

5.6.1 文献調査結果

統計的手法により、地層の不均質性を評価し、核種移行解析を行つた文献を調査した。以下に調査結果を示す。

(1) 不均質な土壤中の溶質の浸透⁽⁴⁾

土壤表面からの汚染物質の浸透に関して、統計的な移行モデルを開発し、決定論的な移流-分散モデルを用いた場合と移行解析結果の比較を行つてゐる。解析体系として、土壤表面から深さ方向への溶質移行を考えている(図5-11参照)。土壤の不均質性(透水係数、空隙率、含水率の場所ごとの変化)に伴い、浸透速度が場所ごとに変化するため、これを考慮して溶質移行を評価している。

土壤を Δx の巾をもつたカラムの集まりと考え、時間 t 、深さ z における体系の平均濃度 $C(z, t)$ は、次式で与えられる。

$$C(z, t) = \frac{\sum C_0 G_i \Delta x_i \theta_i}{\sum \Delta x_i \theta_i}$$

ここで、 θ ：含水率

C_0 ：表面濃度

i ：カラムの番号

$G_i : v_i t \geq z$ のとき $G_i = 1$

$v_i t < z$ のとき $G_i = 0$

v_i ：浸透速度

z ：深さ

t ：時間

上式を用いて濃度を求めるために、浸透速度 v が対数正規分布をもち、
 v と θ の間に相関関係がないと仮定した場合 (Uncorrelated
Stochastic model) 、

$$C(z, t) = \bar{C}_0 F(u)$$

ここで、 \bar{C}_0 ：表面の平均濃度

$$u = [\mu_{\ln v} - \ln(z/t)] / \sigma_{\ln v}$$

$\mu_{\ln v}$ ： $\ln v$ の平均値

$\sigma_{\ln v}$ ： $\ln v$ の標準偏差

$F(u)$ ：平均値 0、分散 1 の分布関数

で与えられる。実際には、 v と θ には相関関係があると考えられるため、
 $\ln v$ と θ の間に 1 次の関係を仮定した場合 (Correlated Stochastic
model) 、

$$C(z, t) = \bar{C}_0 [1 + \beta F(-u)] F(u)$$

$$\text{ここで、 } \beta = \rho_{\theta u} \sigma_{\theta} / \bar{\theta}$$

$\rho_{\theta u}$ ： θ と u の相関係数

上式 をモンテカルロ法を用いて溶質移行のシュミレーションを行い、
濃度の計算結果を用いて、移流-分散モデル、Uncorrelated
Stochastic モデル、及び、Correlated Stochastic モデルのキャリブレー
ション、予測計算を行った。

キャリブレーションの結果 (図 5-12 参照) から、統計的モデルの

計算結果はモンテカルロ法を用いた計算結果とよくあつてゐるが、移流一分散モデルの計算結果はあまり一致していないことがわかつた。また、予測計算結果（図5-13参照）では、モンテカルロ法を用いた計算結果と若干のずれがあるものの、統計的モデルはずれが小さく、Correlated Stochasticモデルの方がUncorrelated Stochasticモデルよりも若干良い結果を与えてゐることがわかつた。

これらの解析結果から、従来の移流一分散モデルよりも統計的モデルの方が、溶質移行に及ぼす不均質性の影響を良く説明できることが分かった。

(2) 不均質帯水層における物質移行予測⁽⁵⁾

不均質な帯水層における流れ場、濃度場の推定を確率論的手法により行い、推定した流れ場、濃度場の不確定性を評価した。

流れ場の解析では、モンテカルロ法により透水量係数Tの標本を多数発生させ、各T場について、水位h、流速qを求め、多数のh場、q場について統計的性質を求めてゐる。濃度場の解析では、流れ場の解析と同様の条件で濃度cを求め、c場の統計的性質を調べている。

解析の結果、以下のことが分かった。

- ・ $\bar{Y} = \int_0 g_{10} T$ の標準偏差 σ_y が大きくなると、流速 q_x の平均値 \bar{q}_x 及び h 、 q_x 、 q_y の標準偏差 σ_h 、 σ_{qx} 、 σ_{qy} は共に増加し、不確定性が増すことが分かった（図5-14～図5-17参照）。
- ・ \bar{q}_x が σ_y と共に増加するのは、透水量係数Tの期待値 \bar{T} が増加することに関係していると考えられる。
- ・ 透水量係数Tの積分スケールが大きいほど、汚染源から離れた地点の濃度の変動係数は大きくなる。

本モデルの妥当性については、今後実験で得られたデータに基づいて検証してゆく必要がある。

(3) フィンションのトレーサ試験を用いた統計モデルの解析⁽⁶⁾

フィンションで実施されたダイポール試験の条件で、統計モデルによ

るトレーサ移行解析を実施した。

解析では、ゾーン2上部で測定された透水係数を用いて、解析領域における透水係数の分布をConditinal Simulationにより推定している。この推定した分布を用いて、ダイポール試験での地下水流速場及び、移行解析を実施している。透水係数分布の推定にあたり、①透水係数は対数正規分布に従う、②バリオグラムはexponential typeの共分散構造をもっている、とした仮定をおいて分布を推定している。また、トレーサ移行解析は、粒子追跡法によるモデルを用いている。移行プロセスとしては、移流のみとし、分散は考慮していない。トレーサ注入後、揚水孔での破過曲線を求めているが、実測値との比較はされておらず、一般的なケースとして、推定した種々の流速場での数多くの破過曲線を求めている。

解析の結果、破過曲線の立ち上がりが急激で、その後テーリングが見られた。これは、地下水流速の場所ごとの変動及び、トレーサの移行経路の違いによるものと考えられる。個々の標本場で得られた破過曲線は、流速場が異なっているために、各々異なっている。しかし、これらの平均的な値は、Kriging法で得られた流速場での破過曲線に近い値となっていることが分かった（図5-18参照）。これらの解析領域はフィンションの試験の実施された場所を想定しているが、さらに広い体系での同様の解析を実施すると、個々の標本場での破過曲線での平均値は必ずしもKriging法で得られた流速場での破過曲線に近い値とはなっていない（図5-19参照）。したがって、広い体系での解析では、さらに多くのデータ（数多くの井戸での透水係数）が必要と報告している。

5.6.2 モデリングのアプローチについて

統計モデルによる移行解析の結果を表5-4に示す。これらの解析では、地層の不均質性に伴う地下水流速の変動を定量的に評価し、この地下水に沿った核種移行解析を実施することで、核種移行の変動を定量的に評価している。核種移行の解析方法として、

- ・不均質性に伴う地下水流速の変動を統計分布（例えば対数正規分布）で

仮定して、解析的に濃度変化を推定する方法

- ・モンテカルロ法を用いて透水係数の分布の標本サンプルを、数多く発生させ、各々の分布を用いて、移行解析を行うことにより、濃度の変化を推定する方法

があった。

これらの方法により、地層の不均質性による核種移行への影響が定量的に示されており、その影響は無視できないことが分かった。移行への影響がみられる要因としては、透水係数が対数正規分布に近い分布をしていることが考えられる。

水理パラメータ（透水係数、水頭など）の統計的性質を定量的にモデリングする方法は見られるものの、移行パラメータ（空隙率、分散率など）に関して統計的手法でモデリングした例はなく、これまでの解析例ではいずれも解析領域で一定の値を仮定している。実際の体系では、これらの移行パラメータは場所によって分布をもつことが予想されるため、今後はこれらのパラメータの分布を考慮したモデリングを行い、核種移行に及ぼす移行パラメータの影響を検討する必要があると思われる。

5.6.3 本解析結果に関する考察

文献調査の結果を踏まえて、地層の不均質性に伴う、破過曲線への不確定性の影響について考察した。本解析で得られた破過曲線の本解析では、トレンドがない場合、一次の場合及び、二次の場合の三種類の透水係数分布を用いて算出した地下水流速に基づいて、破過曲線を求めている。トレーサは4種類のトレーサ（Iodine, In-edta, Gd-dtpa, Tm-edta）である。ダイポール試験結果へのフィッティングにより、移行パラメータ（分散率、空隙率）を求めた。各トレーサについて、トレンドがない場合、一次の場合及び、二次の場合の移行パラメータを比較すると（表5-2参照）、若干の変動（10～20%）が見られる。これは、透水係数分布の違いにより地下水流速が異なったためと考えられ、地層の不均質性が影響していることが分かった。

5.7 フィンションのテストケースの比較解析

地層中の水理物質移行モデルに関する確証研究のための国際プロジェクト

INTRAVALにおいて、これに参加している各国の研究機関が、フィンションサイトで実施されたトレーサ試験に対して解析を行っている。そこで、条件が明かな同一の問題を解くことにより、モデリングの考え方、構築したモデルの信頼性について議論することを目的として、フィンションのテストケースの比較解析を行った。解析の詳細を付録Aに示す。

表 5-1 核種移行モデル (1/2)

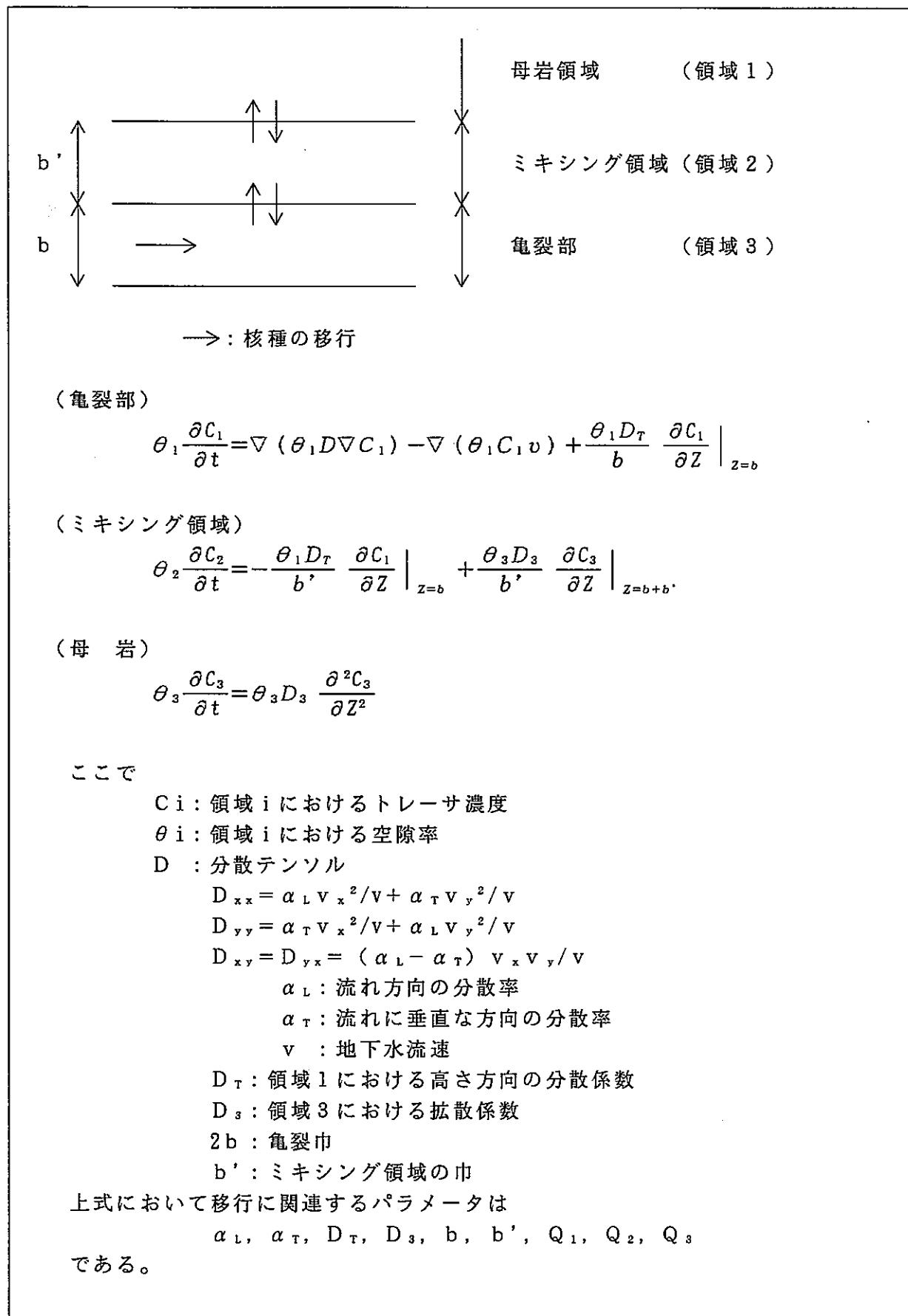


表 5 - 1 核種移行モデル (2/2)

ここで以下の仮定を設ける。

$$\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta_3 (= \theta)$$

2b ≈ 亀裂部の巾

b' ≈ 隣接層の巾

$$D_T = \alpha_T v$$

$$D_s = \text{水中のイオンの拡散係数} (= 10^{-9} \text{m}^2/\text{s})$$

このとき、未知パラメータは

$$\alpha_L, \alpha_T, \theta$$

となる。

(透水量係数の推定)

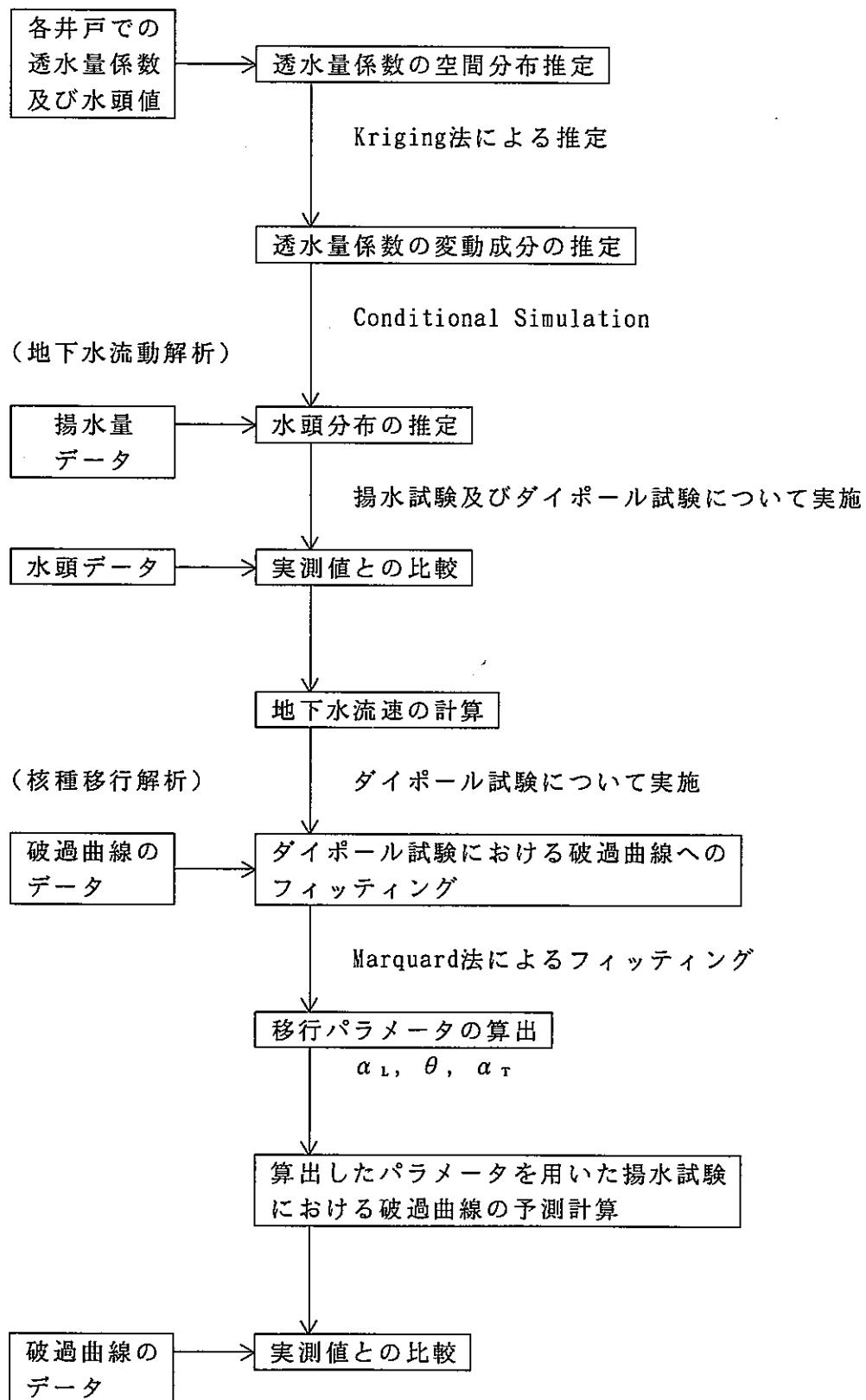
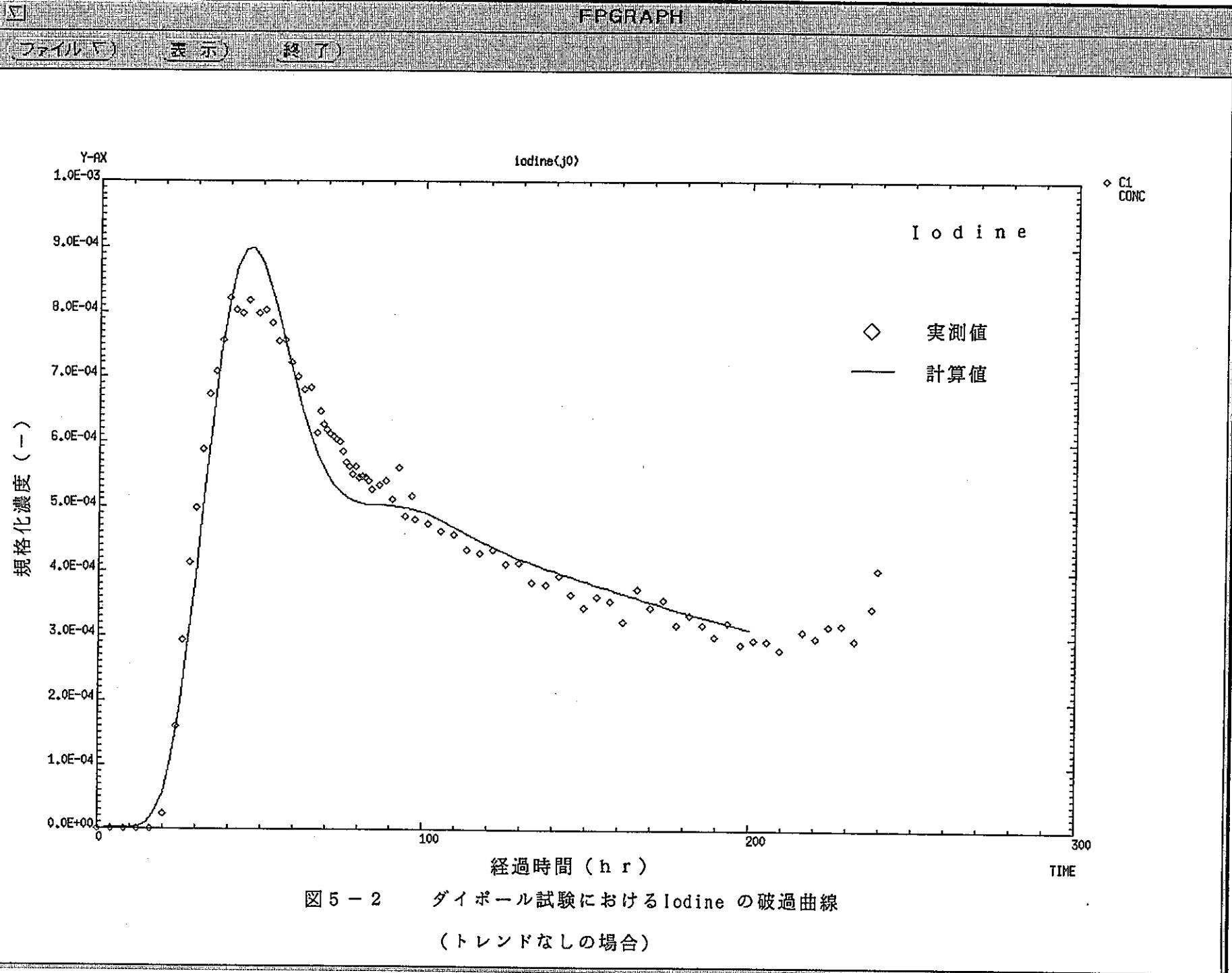


図 5-1 解析手順



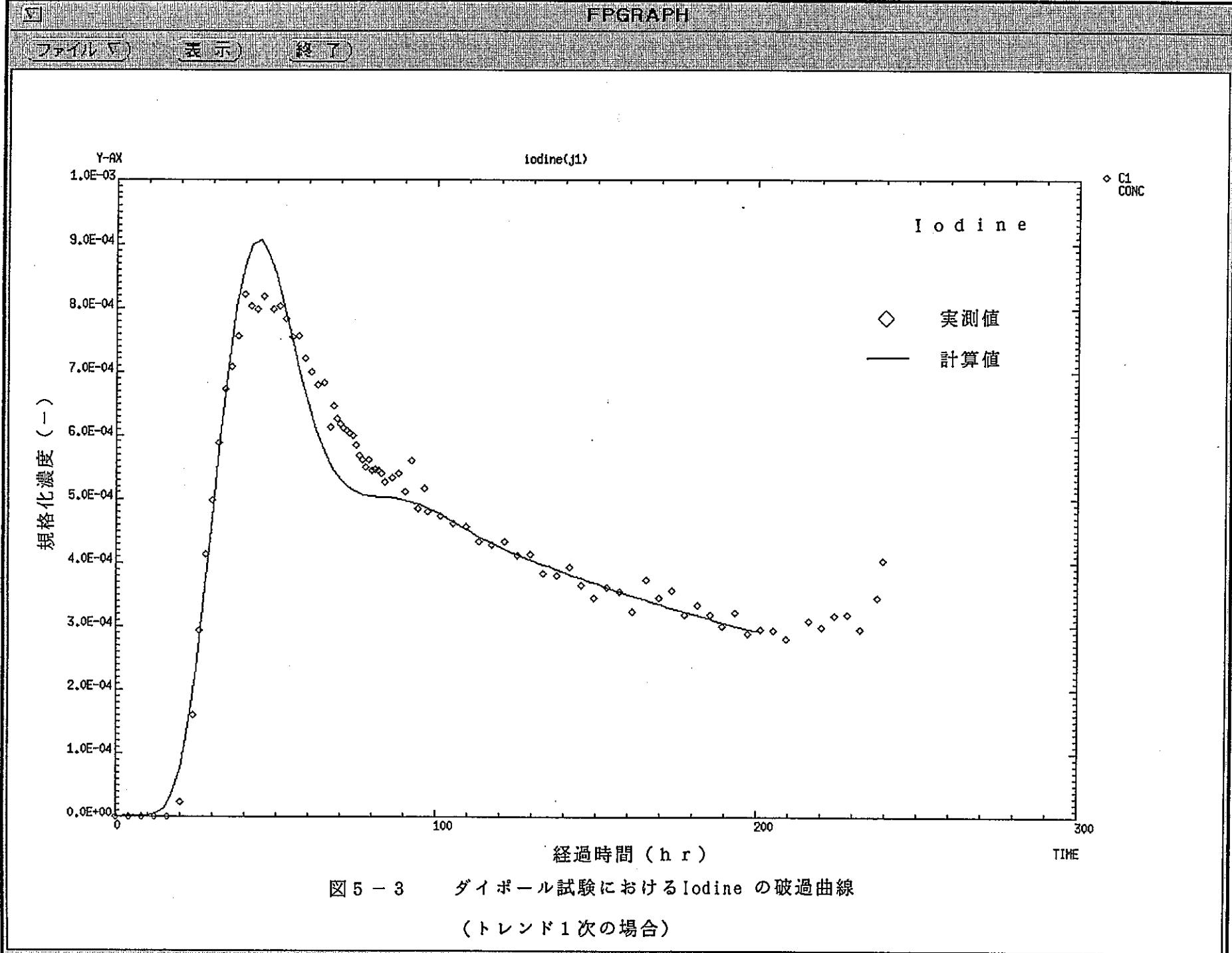


図 5-3 ダイポール試験における Iodine の破過曲線
(トレンド 1 次の場合)

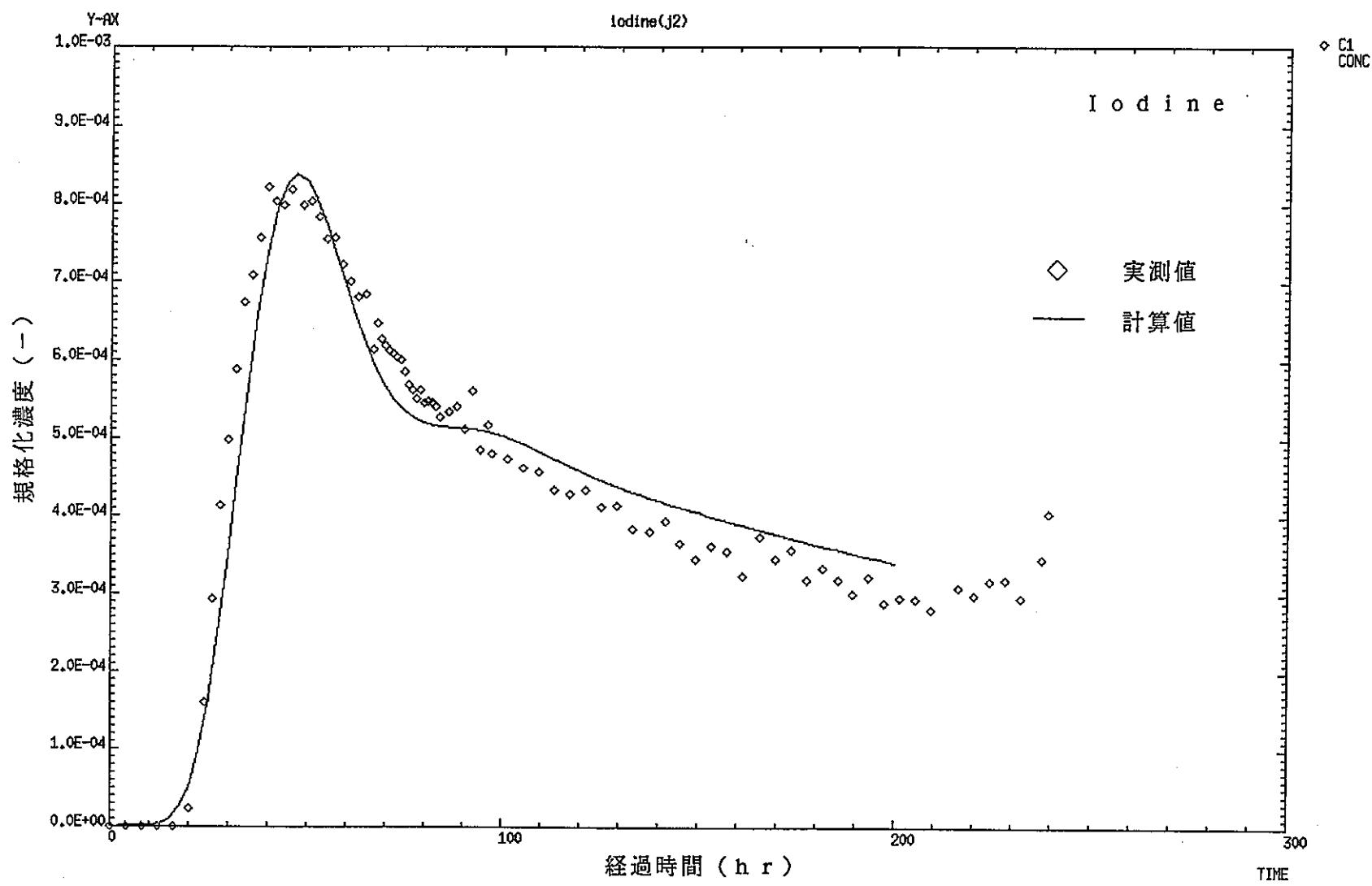


図 5-4 ダイポール試験における Iodine の破過曲線
(トレンド 2 次の場合)

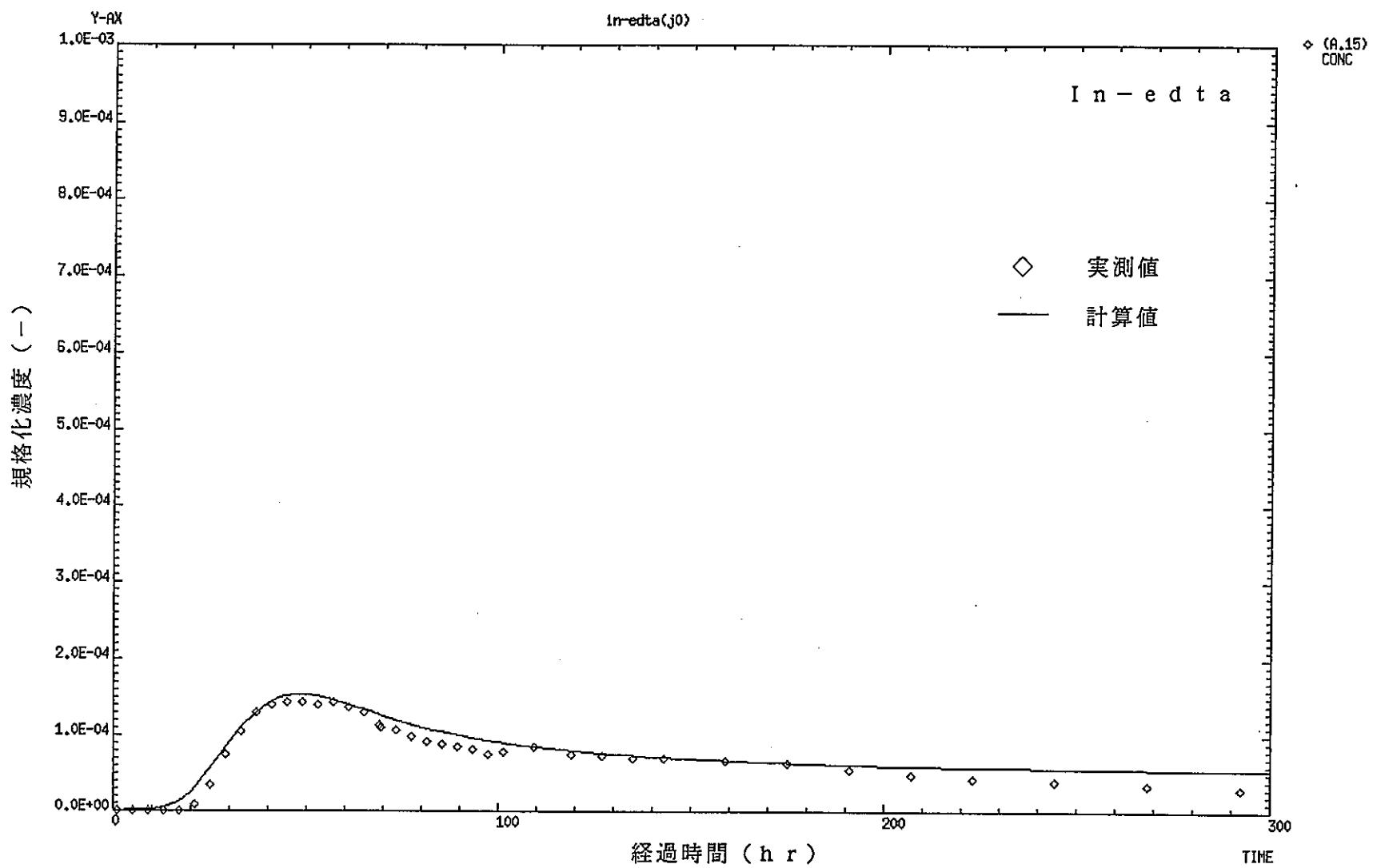
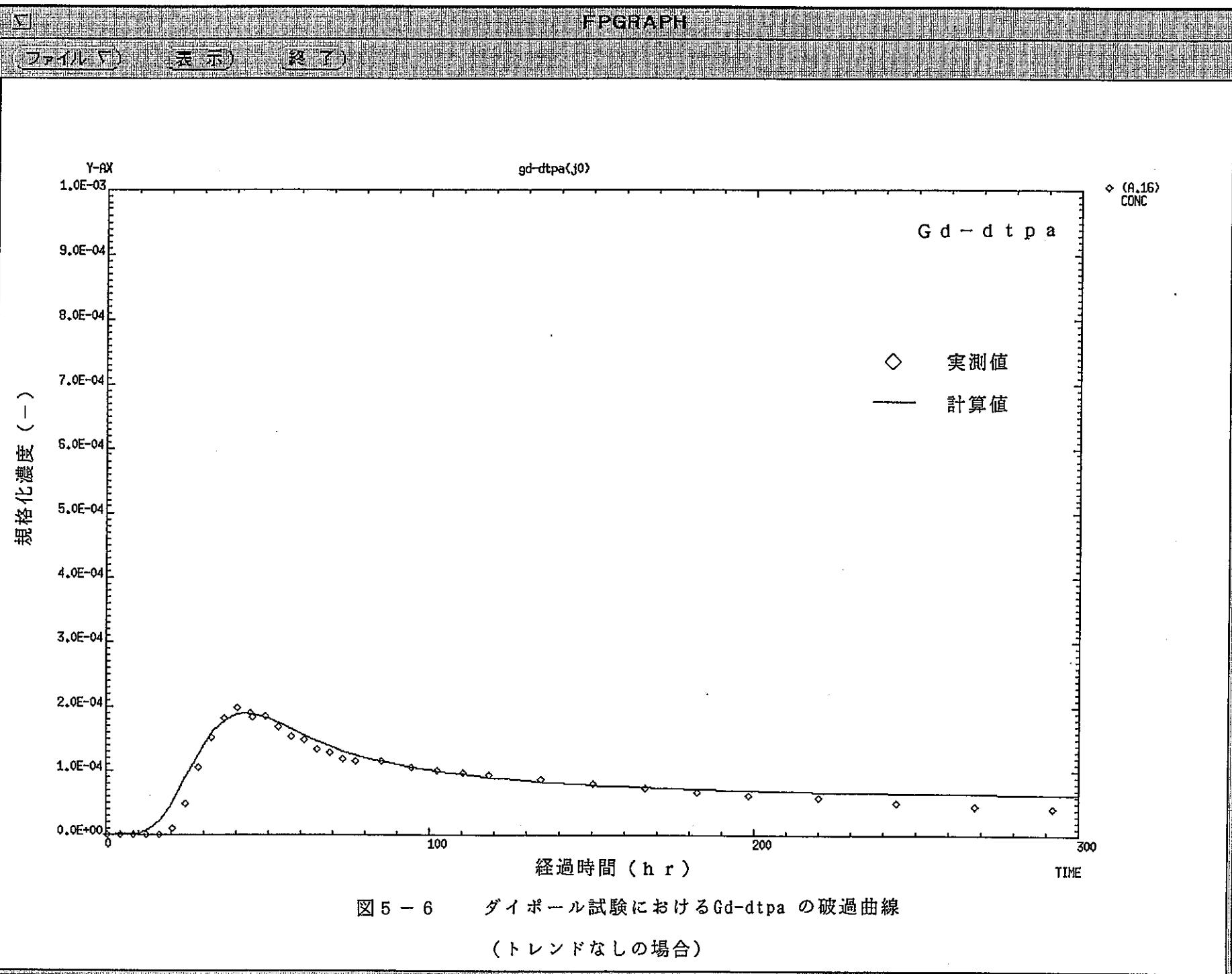


図5-5 ダイポール試験におけるIn-edtaの破過曲線
(トレンドなしの場合)



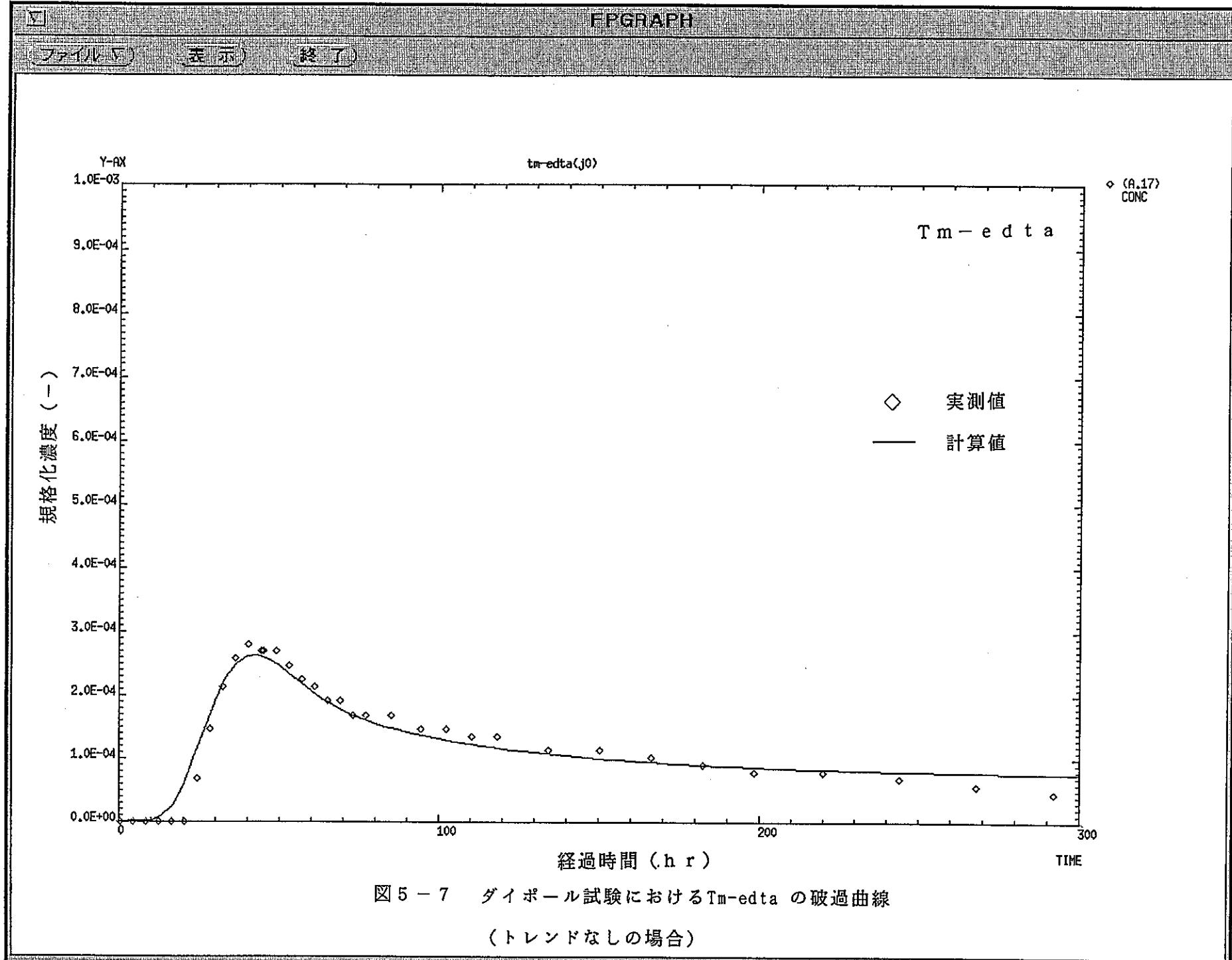


表 5-2 ダイポール試験における算出パラメータ

(I o d i n e)

トレンド次数	$\alpha_L(\text{m})$	$\alpha_T(\text{m})$	$\theta(-)$
0	7.0	3.5×10^{-2}	1.0×10^{-2}
1	7.0	3.5×10^{-2}	9.0×10^{-3}
2	7.0	8.4×10^{-2}	1.2×10^{-2}

(I n - e d t a)

トレンド次数	$\alpha_L(\text{m})$	$\alpha_T(\text{m})$	$\theta(-)$
0	16.0	3.2×10^0	7.5×10^{-3}
1	16.0	3.2×10^0	7.5×10^{-3}
2	20.0	4.0×10^0	9.0×10^{-3}

(G d - d t p a)

トレンド次数	$\alpha_L(\text{m})$	$\alpha_T(\text{m})$	$\theta(-)$
0	15.0	3.0×10^0	6.5×10^{-3}
1	15.0	3.0×10^0	6.5×10^{-3}
2	17.0	3.4×10^0	8.5×10^{-3}

(T m - e d t a)

トレンド次数	$\alpha_L(\text{m})$	$\alpha_T(\text{m})$	$\theta(-)$
0	12.0	2.4×10^0	6.0×10^{-3}
1	11.0	2.2×10^0	6.0×10^{-3}
2	13.0	2.6×10^0	7.5×10^{-3}

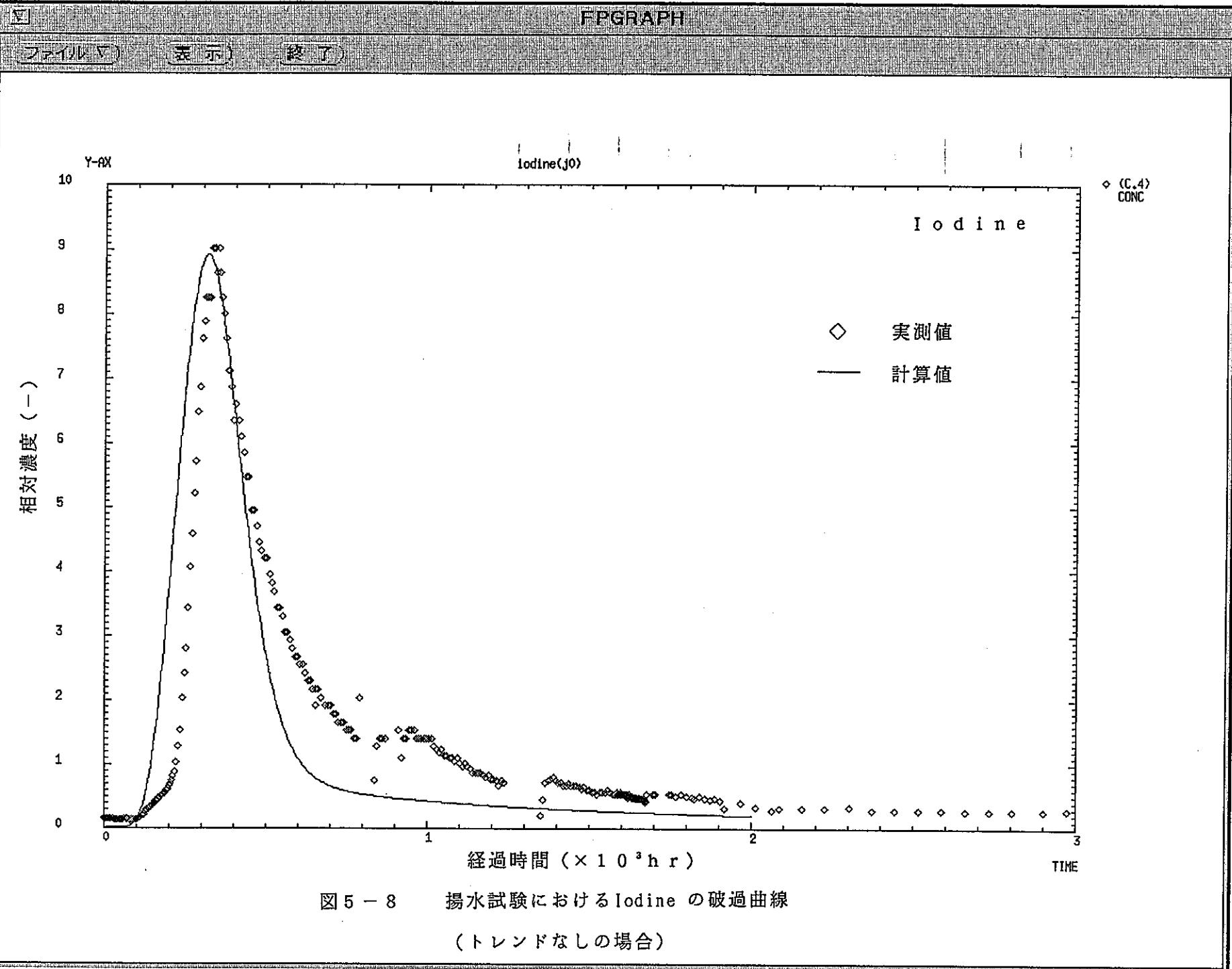
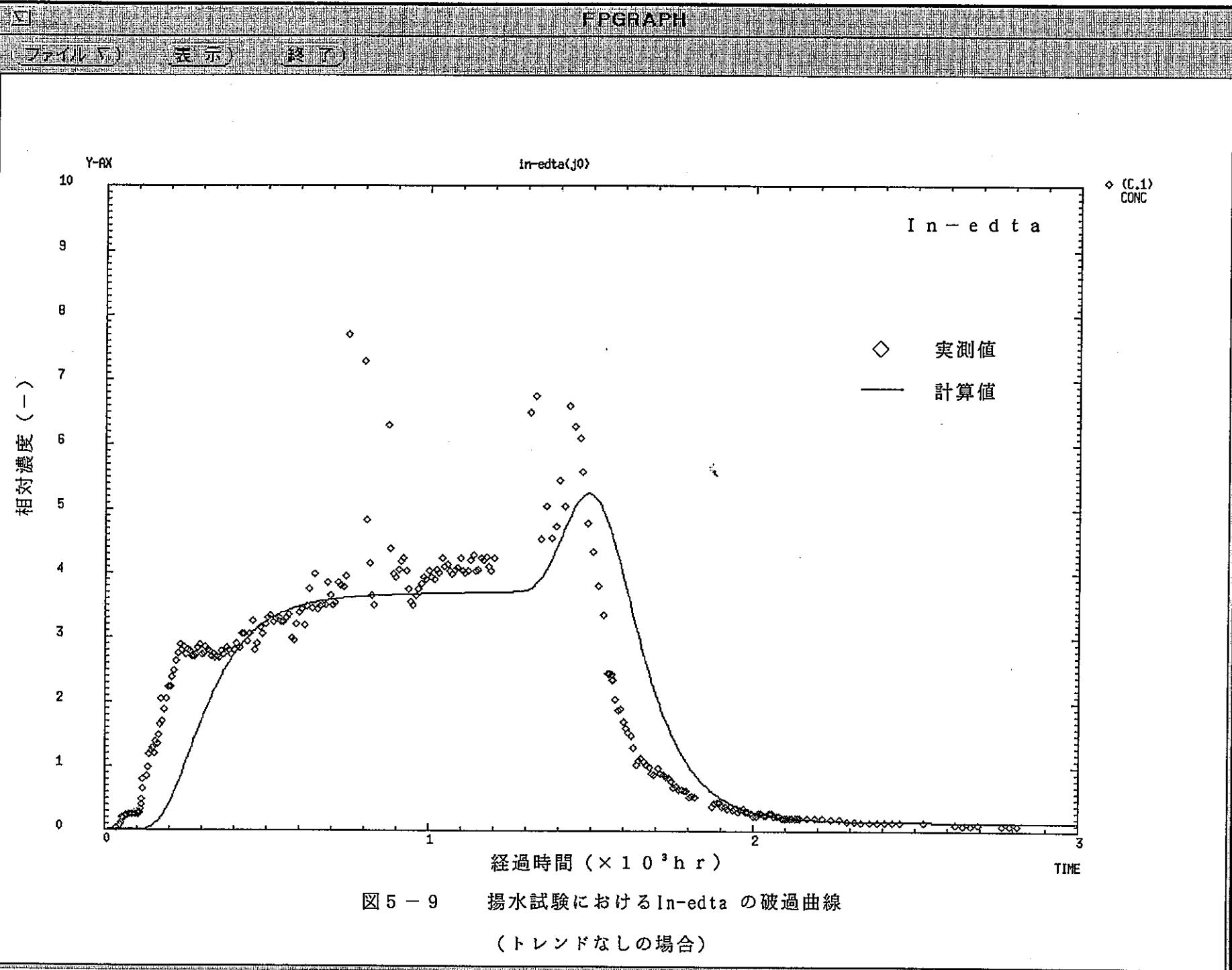


図 5-8 揚水試験における Iodine の破過曲線
(トレンドなしの場合)



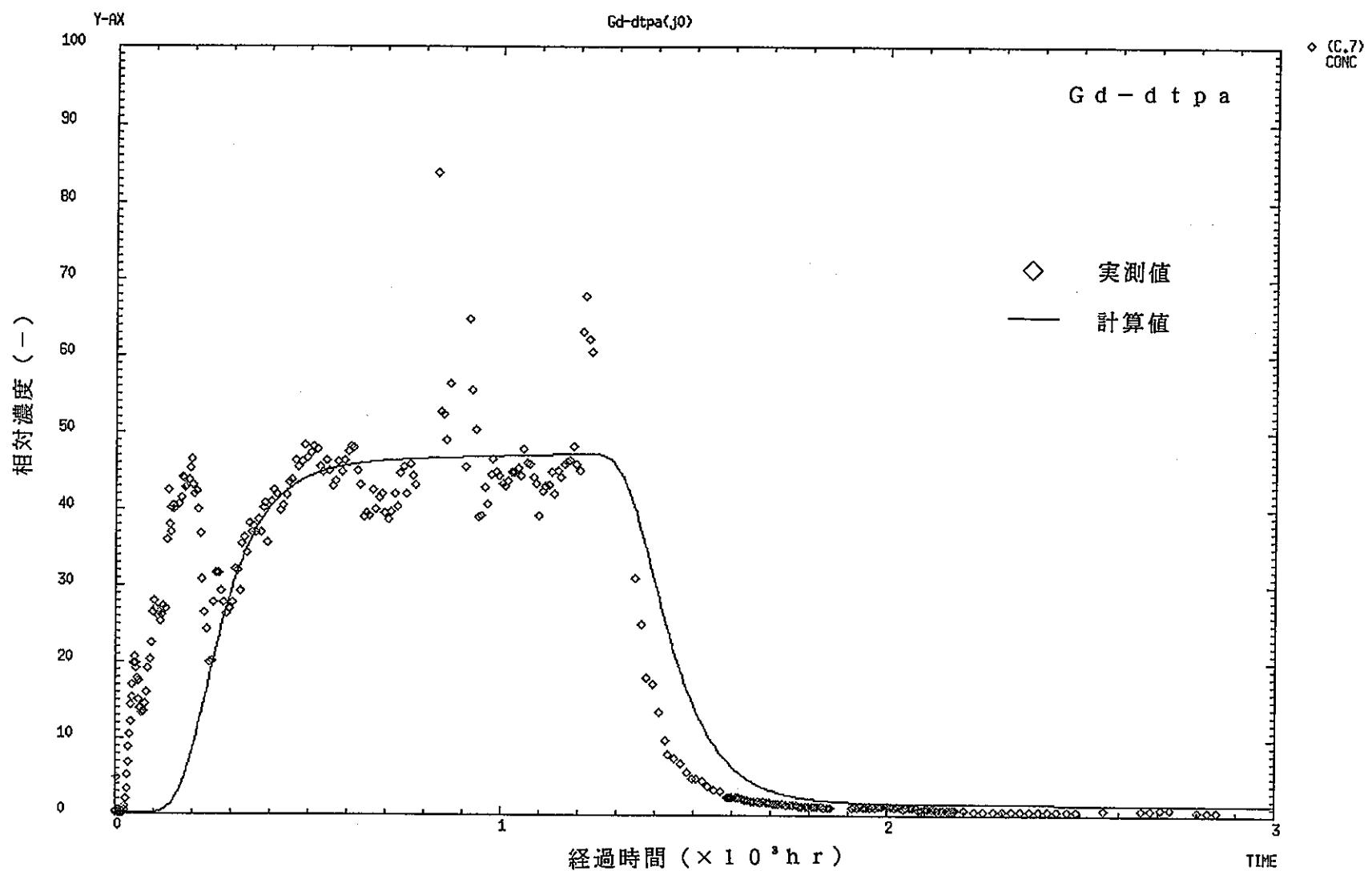


図 5-10 揚水試験における Gd-dtpa の破過曲線
(トレンドなしの場合)

表 5 - 3 トレーサ試験解析ケース一覧

核 種	トレンド次数	ダイポール試験結果へのフィッティング計算	揚水試験結果の予測計算
I o d i n e	0	○	△
	1	○	△
	2	◎	△
I n - E D T A	0	○	○
	1	○	○
	2	○	△
G d - D T P A	0	◎	○
	1	○	○
	2	○	×
T m - E D T A	0	○	△
	1	◎	△
	2	○	×

- 注) ピーク位置または濃度の立ち上がり部分の
計算値と実測値のずれ
- テーリング部の濃度の
計算値と実測値のずれ
- ◎ : $\pm 10\%$ 以内
 - : $\pm 50\%$ 以内
 - △ : $\pm 50\%$ 以上
または $\pm 50\%$ 以内
 - × : $\pm 50\%$ 以上
 - ± 10%以内
 - ± 50%以内
 - ± 50%以内
 - ± 50%以上
 - ± 50%以上

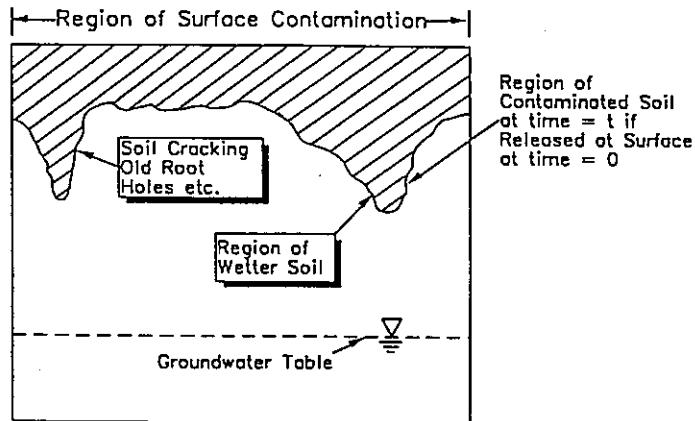


図 5-1-1 不均質な土壤中への溶質浸透の概念図

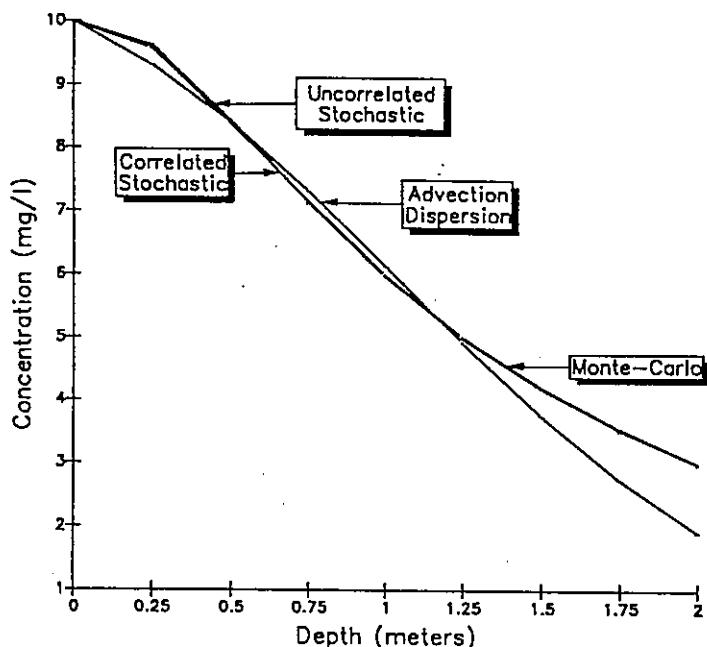


図 5-1-2 7 日後の地層中の濃度分布

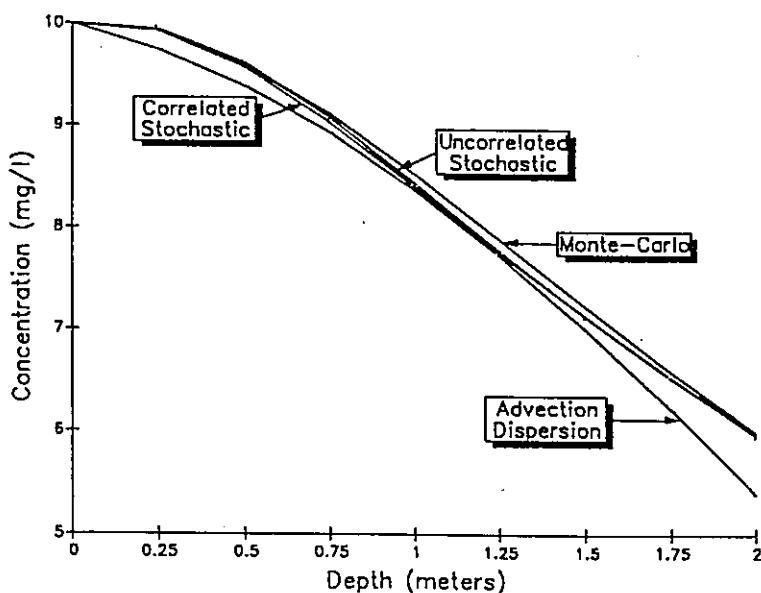


図 5-1-3 14 日後の地層中の濃度分布

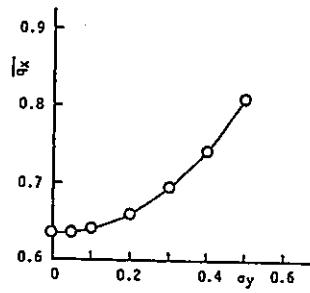


図 5 - 1 4 地下水流速の x 成分の σ_y に対する依存性

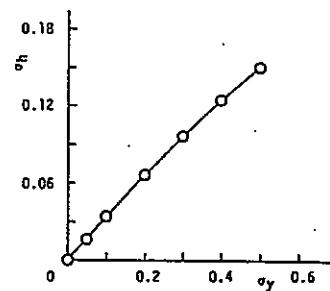


図 5 - 1 5 σ_h の σ_y に対する依存性

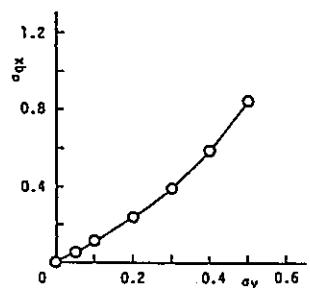


図 5 - 1 6 地下水流速の x 成分の標準偏差の σ_y に対する依存性

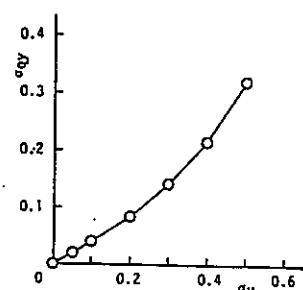


図 5 - 1 7 地下水流速の y 成分の標準偏差の σ_y に対する依存性

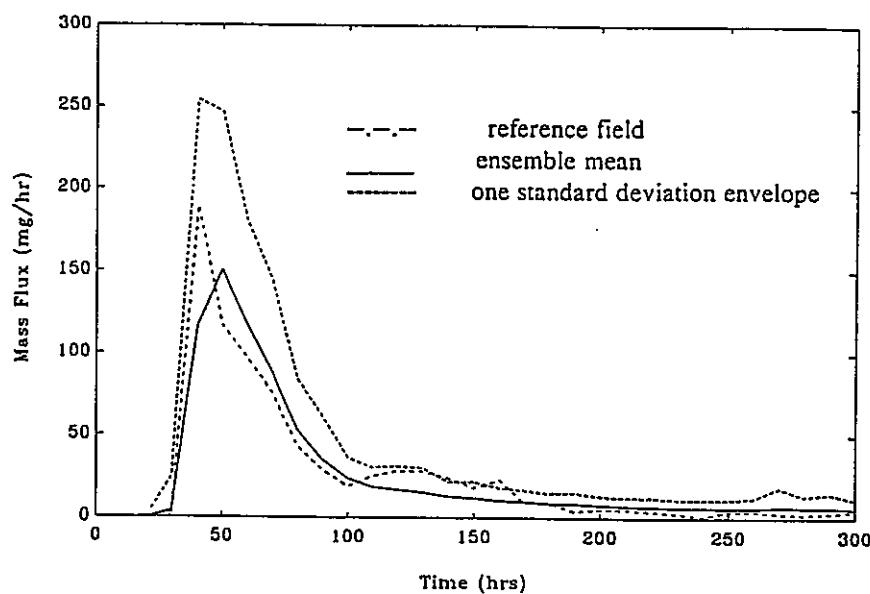


図 5-18 揚水孔における破過曲線

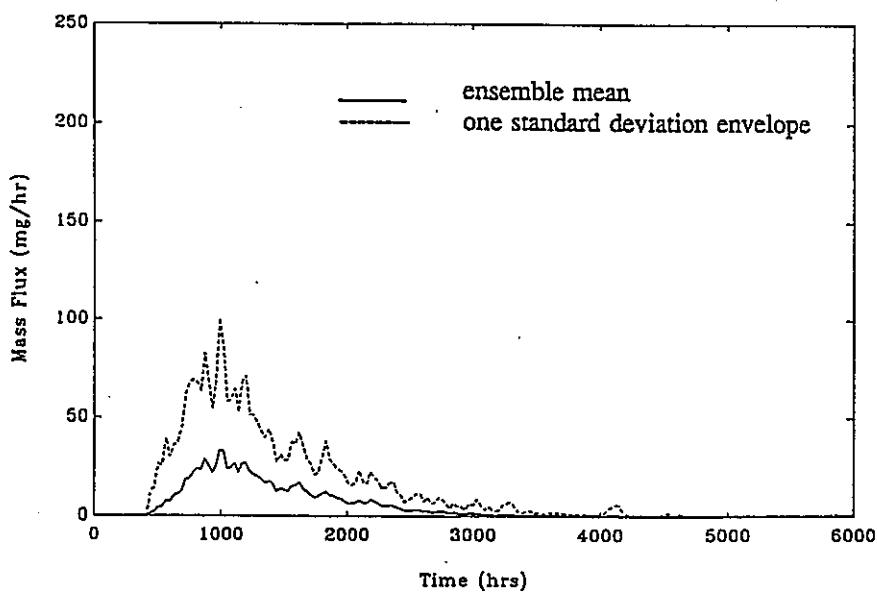


図 5-19 ファーフィールドでの揚水孔における破過曲線

表 5-4 地層の不均質性を考慮した核種移行解析

解析方法の概要	解析モデル	解析結果	引用文献
土壤の不均質性に伴う地下水の浸透速度の分布を考慮し、地下水流れに沿って核種が移行するものとして、深さ方向の濃度分布を解析的に求めている。	地表から深さ方向に 2 mまでの 1 次元領域で解析している。地下水浸透速度は対数正規分布を仮定し、含水率についても不均質性を考慮している。核種は地下水流れに沿って深さ方向に浸透するとして解析している。	得られた深さ方向の濃度分布は、従来から用いられている移流一分散モデルに比べて、核種移行に及ぼす不均質性の影響を良く説明できることが分かった。	(4)
不均質な帶水層中の流れ場及び濃度場を確率論的に評価している。	$X = 20\text{ m}$, $Y = 10\text{ m}$ の地表に平行な地層からなる 2 次元の領域において、透水量係数の確率場を多数発生させ、個々の場での定常流速場と非定常状態での移流拡散による流れ場を解析している。	地層の不均質性の増加に伴って、水位、流速、濃度分布の不確定性が増加することが分かった。	(5)
透水性の高い地層における透水係数分布を統計モデルにより推定し、地下水流速場と核種移行解析を行っている。	$X = 1200\text{ m}$, $Y = 1200\text{ m}$ の地表に平行な地層での透水係数分布の標本を多数発生させダイポール試験条件での流れ場を求めてい る。この流れ場での核種移行を粒子追跡法によるモデルを用いて解析している。	個々の流れ場での地下水揚水孔におけるトレーサ破過曲線は、流速場が異なっているために各々異なっていることが分かった。	(6)

6. あとがき

地質統計法を用いることにより、地層中の不均質性を定量的に評価することができた。この不均質性をもった地層中での地下水流动及び、核種移行モデルを作成し、フィンションで実施されたトレーサ試験を対象に、解析を実施することで解析モデルの妥当性について評価することができた。

本研究における核種移行解析では、移行パラメータは一定と仮定した解析したが、実際の体系では場所ごとに変化すると考えられるため、今後、モデルに含まれるパラメータの不均質性について評価すると共に、これらのパラメータ値の物性値と対応したデータ取得について検討する必要があると考えられる。

7. 参考文献

(1) E. ustafsson et al.,

Radially converging tracer experiment in a low-angle fracture zone at the Finnsjon site,

IRAP 88313, (1989)

(2) P. Andersson et al.,

Dipole Tracer experiment in a Low-Angle Fracture Zone at the Finnsjon Site,

IRAP-90-206, (1990)

(3) G. Marsily,

Quantitative Hydrogeology,

Academic Press, Inc., (1986)

(4) J. C. tracy,

Movement of Nonpoint-Source Contaminants through Heterogeneous Soils,

J. Irrig. Drain Eng., Vol.118, No.1, 88-103, (1992)

(5) 米田他,

不均質帶水層における物質移動予測への確率論的アプローチ,

土木学会衛生工学研究論文集, Vol.19, 50-59, (1983)

(6) K. C. Chan et al.,

Calibration and Validation of a Stochastic Continuum Model using the Finnsjon Dipole Tracer Test,

INTRAVAL phase 2 report(draft), November 1992

付録 A

フィンションのテストケースの比較解析

1994年2月

三菱原子力工業（株）

1. はじめに

S K B 提案内容に従って、Finnsjonのテストケースについての比較解析を行い、解析結果をまとめた。

2. 解析方法

(1) 透水量係数分布の推定

表 A - 1 に示す $500\text{m} \times 500\text{m}$ と $500\text{m} \times 1000\text{m}$ の 2 ケースについて、それぞれの領域での透水量係数分布を推定した。透水量係数は、井戸での観測された透水量係数（表 3 - 1 参照）を基に、Kriging 法により推定した。透水量係数の推定にあたり、透水量係数のドリフトを考慮し、回帰分析によりドリフトを推定した。ドリフトは 1 次を仮定した。

(2) 地下水流速場の解析

上記(1)で推定した透水量係数分布を用いて、表 A - 1 に示す境界条件の下で、地下水流速場を推定した。

(3) 核種移行解析

上記(2)で推定した地下水流速場を用いて、表 A - 2 に示す移行モデルを用いて核種移行解析を行った。移行プロセスとして、亀裂帯における移流と分散、亀裂帯とミキシング領域における高さ方向の分散、及び母岩における拡散を考慮したモデルにより移行解析を行った。核種移行解析のための境界条件を表 A - 3 に示す。

3. 解析結果

(1) 透水量係数分布

推定した透水量係数分布を図 A - 1 及び図 A - 2 に示す。図中の透水量係数の値は透水量係数の自然対数 ($\ln K$) で表示した値である。

(2) 地下水流速場

図 A - 1 及び図 A - 2 の透水量係数分布を用いて、表 - 1 に示す境界条件の下で推定した水頭分布を図 A - 3 及び図 A - 4 に示す。

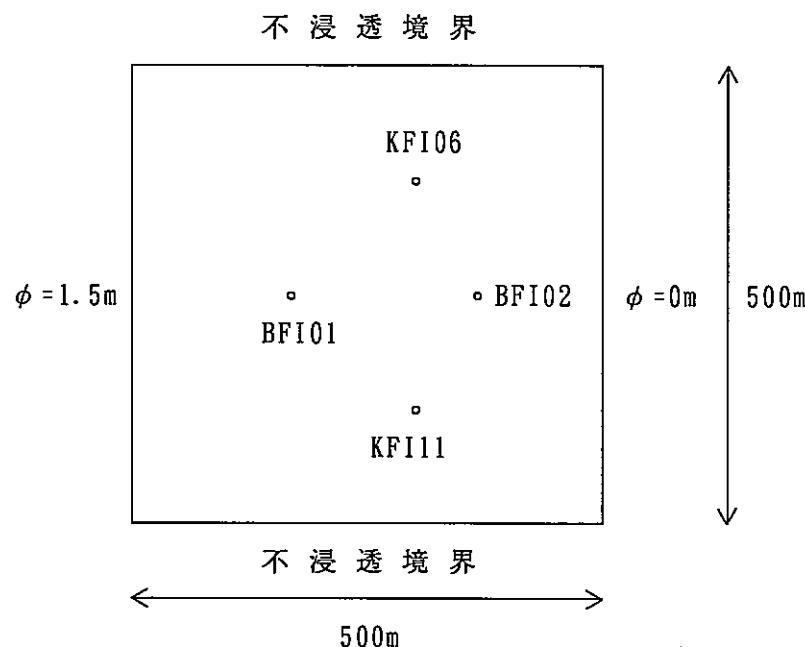
(3) 核種移行解析

表 A - 4 に示す境界条件の下で、トレーサをパルス注入（注入時間 1 h r）したときの下流領域におけるトレーサの破過曲線を図 A - 5 に示す。図 A - 5 における縦軸は M/M_0 (M : 下流側のトレーサ回収量, M_0 : 上流側のトレーサ注入量), 横軸は時間を表している。移行計算に用いたパラメータ値は、トレーサ試験結果の解析で得られたパラメータの平均的な値とした。

図 A - 5 と同様のパラメータを用いて、パラメータ吸着を考慮した場合のトレーサ破過曲線の計算結果を図 A - 6 と図 A - 7 に示す。

表 A - 1 地下水流解析の境界条件

(ケース A)



(ケース B)

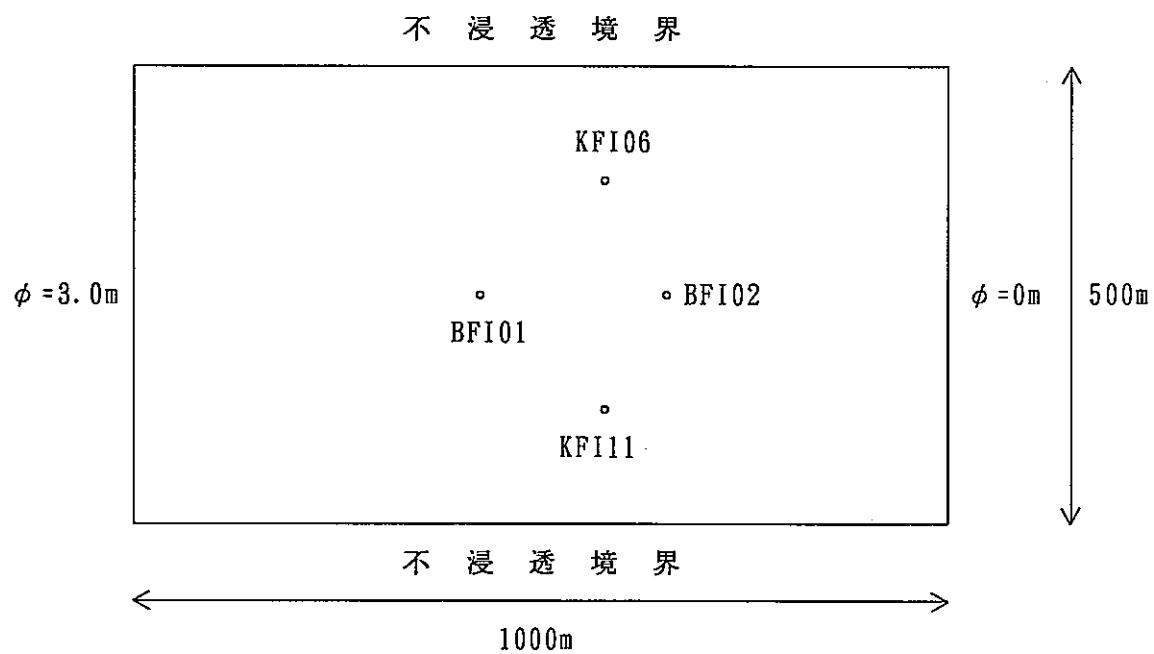
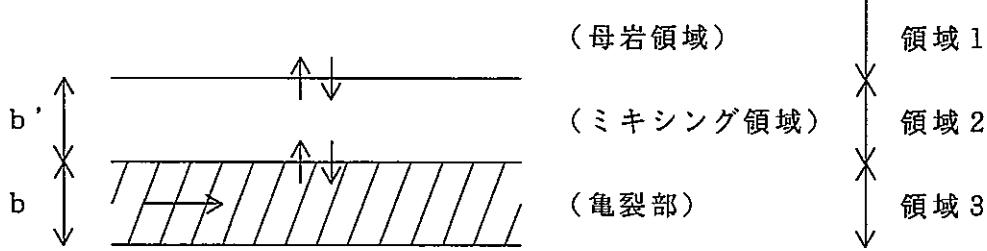


表 A-2 核種移行モデル



(亀裂部)

$$R_1 \theta_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} = \nabla (\theta_1 D \nabla C_1) - \nabla (\theta_1 C_1 v) + \frac{\theta_1 D_T}{b} \left. \frac{\partial C_1}{\partial Z} \right|_{z=b}$$

(Mixing領域)

$$R_2 \theta_2 \frac{\partial C_2}{\partial t} = - \frac{\theta_1 D_T}{b'} \left. \frac{\partial C_1}{\partial Z} \right|_{z=b} + \frac{\theta_3 D_m}{b'} \left. \frac{\partial C_3}{\partial Z} \right|_{z=b+b'}$$

(母岩)

$$R_3 \theta_3 \frac{\partial C_3}{\partial t} = \theta_3 D_m \frac{\partial^2 C_3}{\partial Z^2}$$

ここで

C_i : 領域 i におけるトレーサ濃度

θ_i : 領域 i における空隙率

D : 分散テンソル

D_T : 亀裂帯における高さ方向の分散係数

D_m : 母岩中の拡散係数

$2b$: 亀裂帯の厚さ

b' : ミキシング領域の厚さ

$D_{xx} = \alpha_L v_x^2 / v + \alpha_T v_y^2 / v$

$D_{yy} = \alpha_T v_x^2 / v + \alpha_L v_y^2 / v$

$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) v_x v_y / v$

α_L, α_T : 流れ方向及び流れに垂直な方向の分散率

v : 地下水流速

R_i : 領域 i における遅延係数

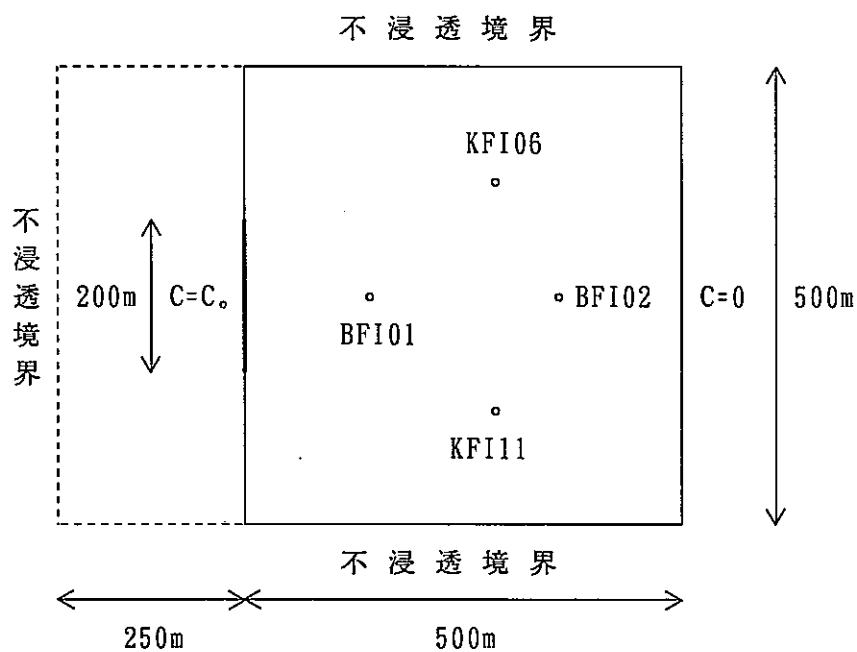
$$R_i = 1 + \frac{1 - \theta_i}{\theta_i} \rho K_d$$

K_d : 分配係数

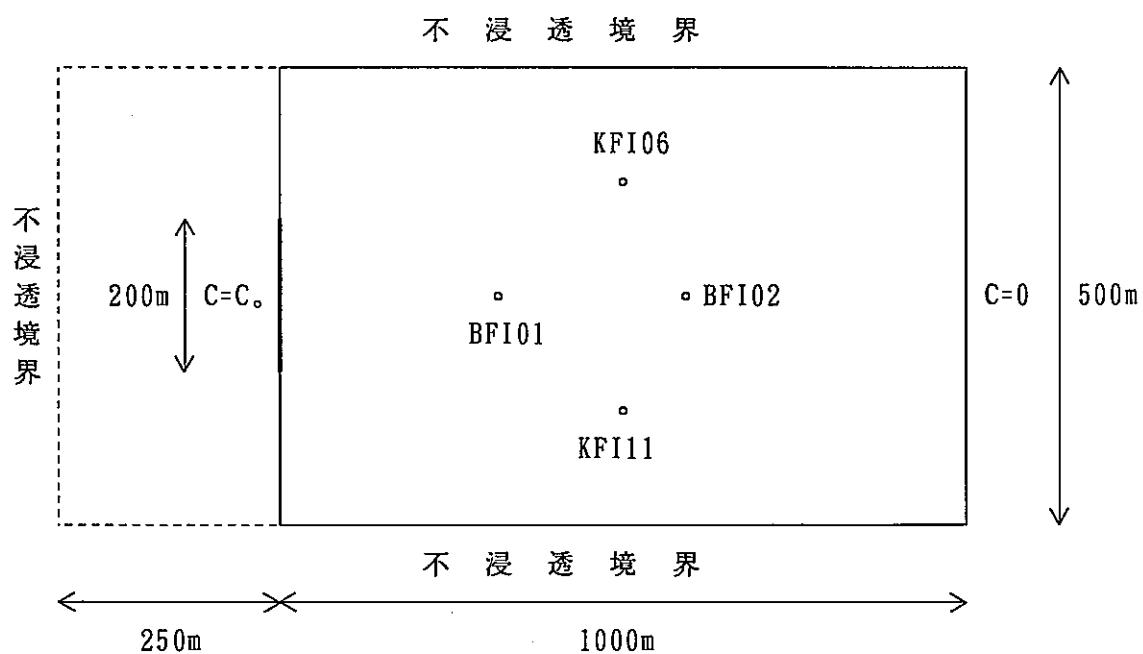
ρ : 岩石密度

表 A - 3 核種移行解析の境界条件

(ケースA)



(ケースB)



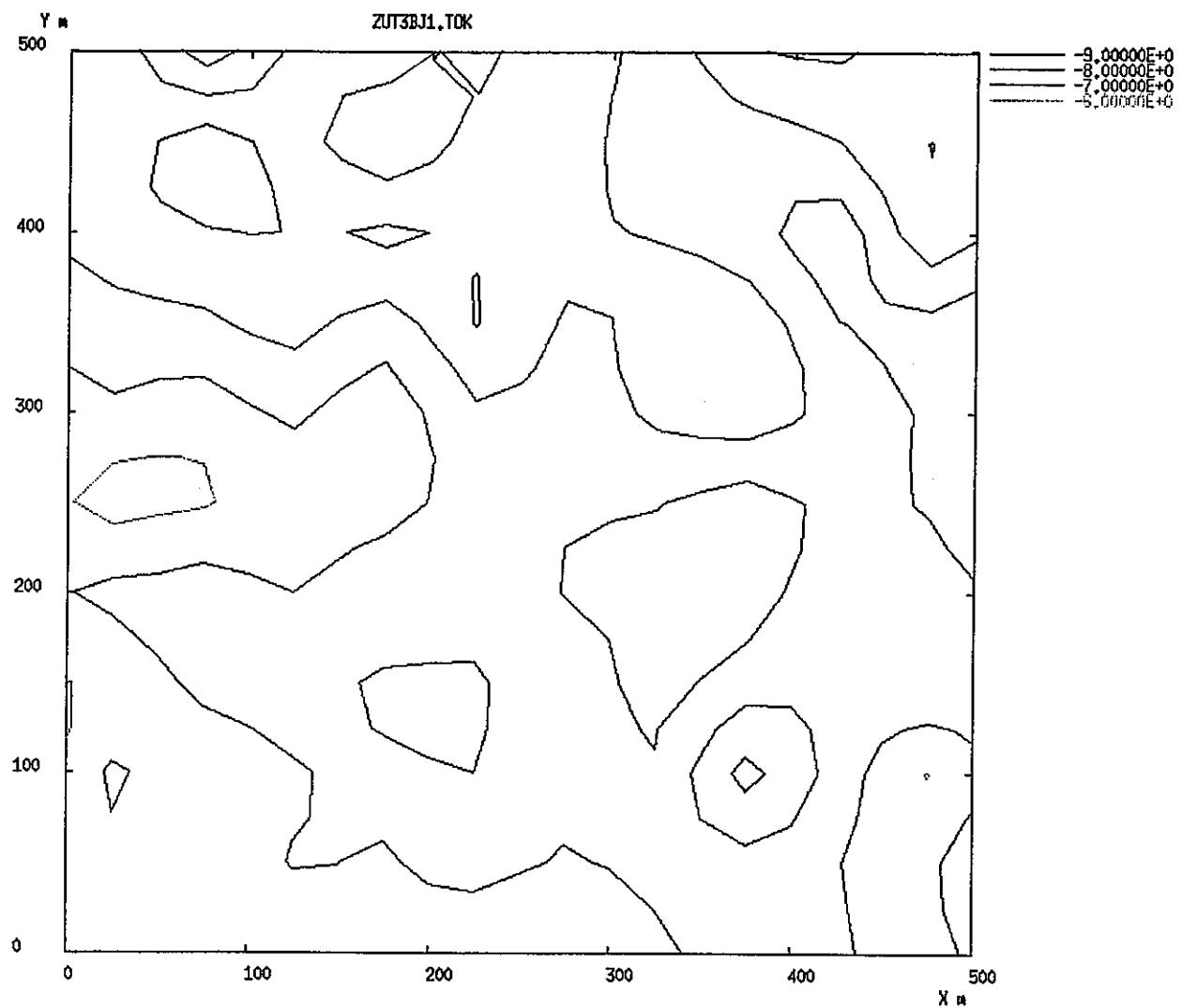


図 A-1 ケース A における透水量係数分布

[ファイル]

[表示]

[終了]

ZTT3BJ1.TOK

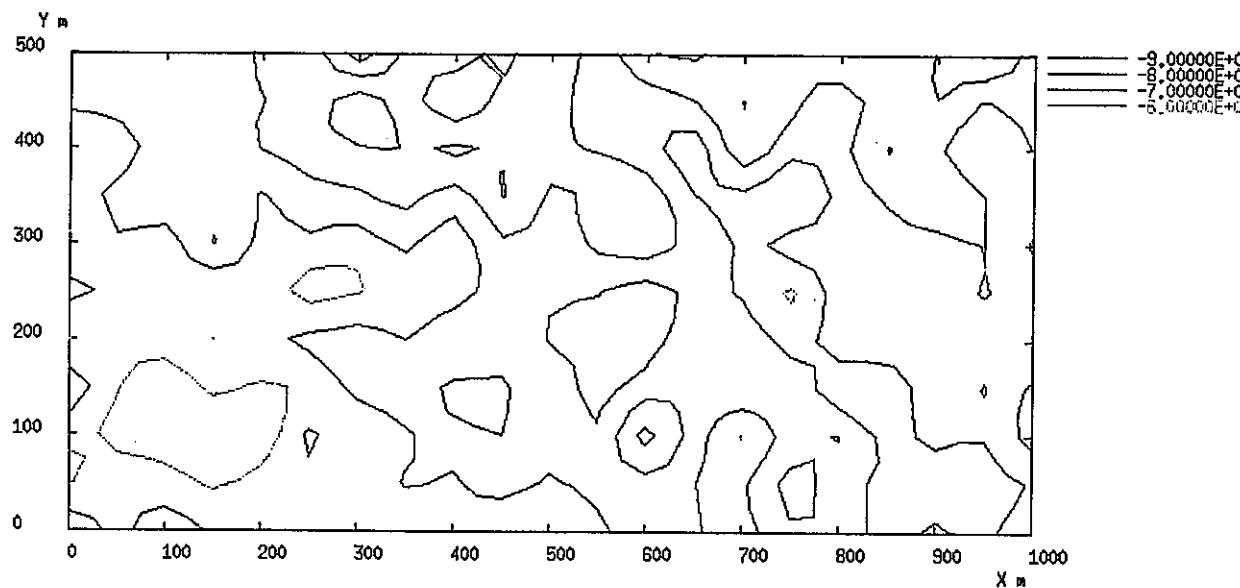


図 A - 2 ケース B における透水量係数分布

等高線表示処理

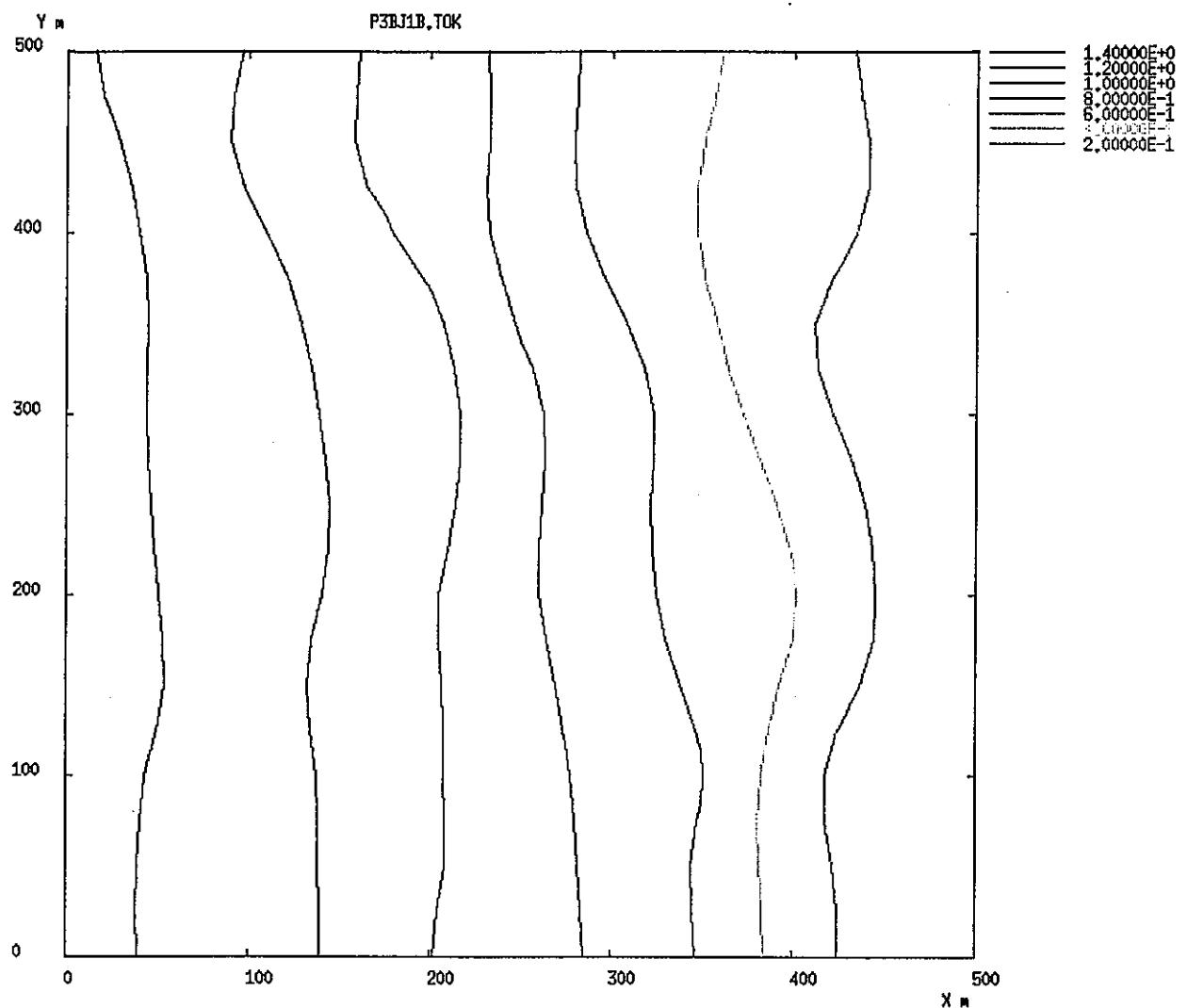


図 A - 3 ケース A における水頭分布

[ファイル ▾]

[表示 ▾]

[終了]

P3RJ1.TOK

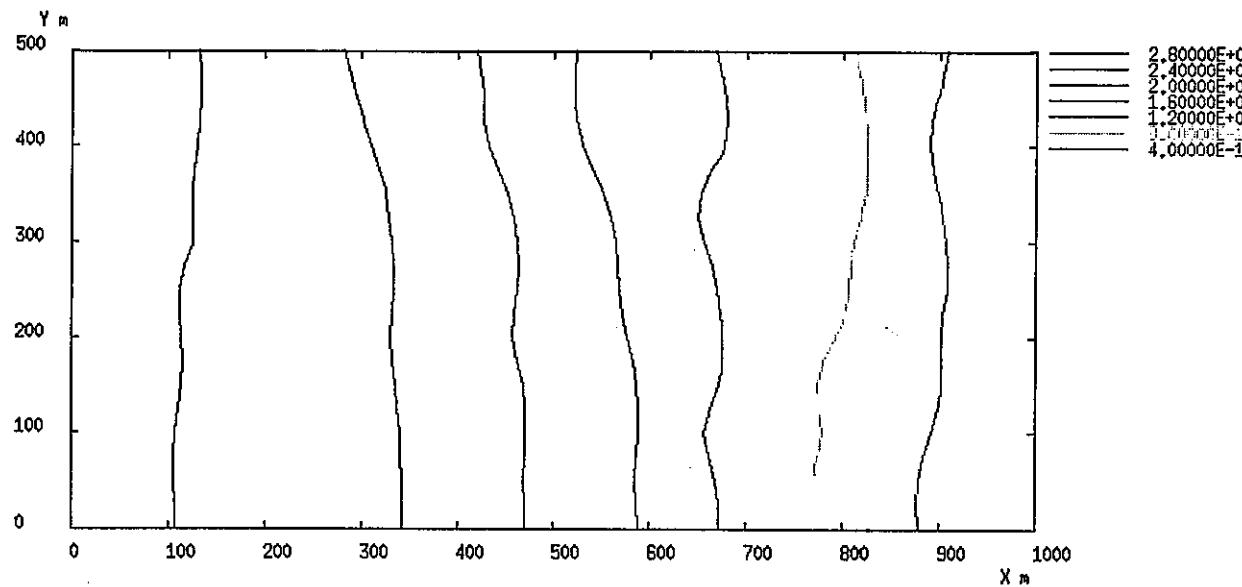


図 A - 4 ケース B における水頭分布

表 A-4 計算に使用したパラメータ

ケース	計算体系	$\alpha_L(m)$	$\alpha_T(m)$	$\theta(-)$	$K_d(m^3/kg)$ (R_d)*
1	500m×500m	10.0	1.0	8.0×10^{-3}	1.0 (3.3×10^5)
2	500m×500m	10.0	1.0	8.0×10^{-3}	0.0 (1.0)
3	500m×1000m	10.0	1.0	8.0×10^{-3}	1.0 (3.3×10^5)
4	500m×1000m	10.0	1.0	8.0×10^{-3}	0.0 (1.0)

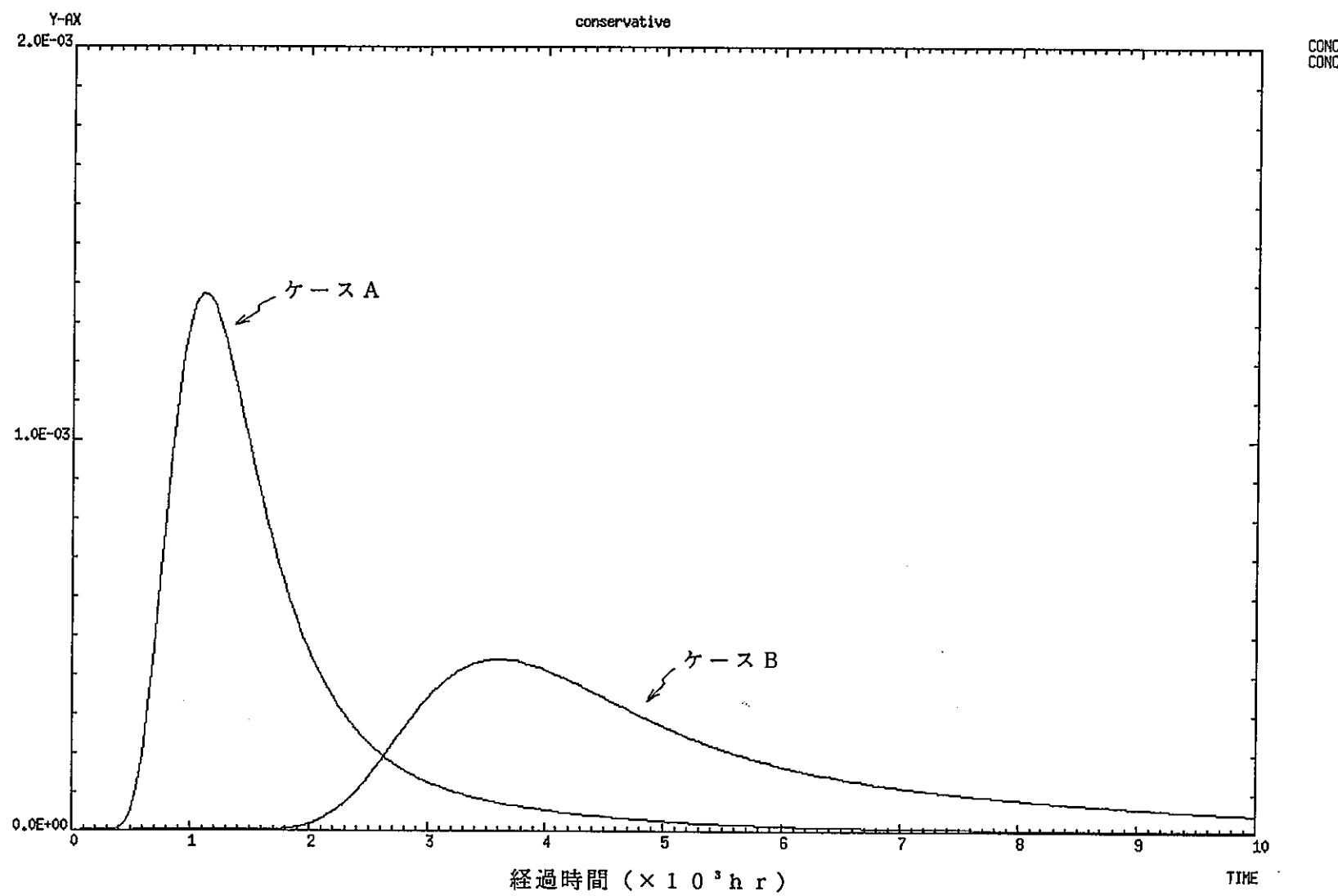
$$* R_d = 1 + \frac{1-\theta}{\theta} \rho K_d$$

$\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ (花崗岩の密度)

卷之三

卷之三

卷之三



図A-5 トレーサの破過曲線（吸着なし）

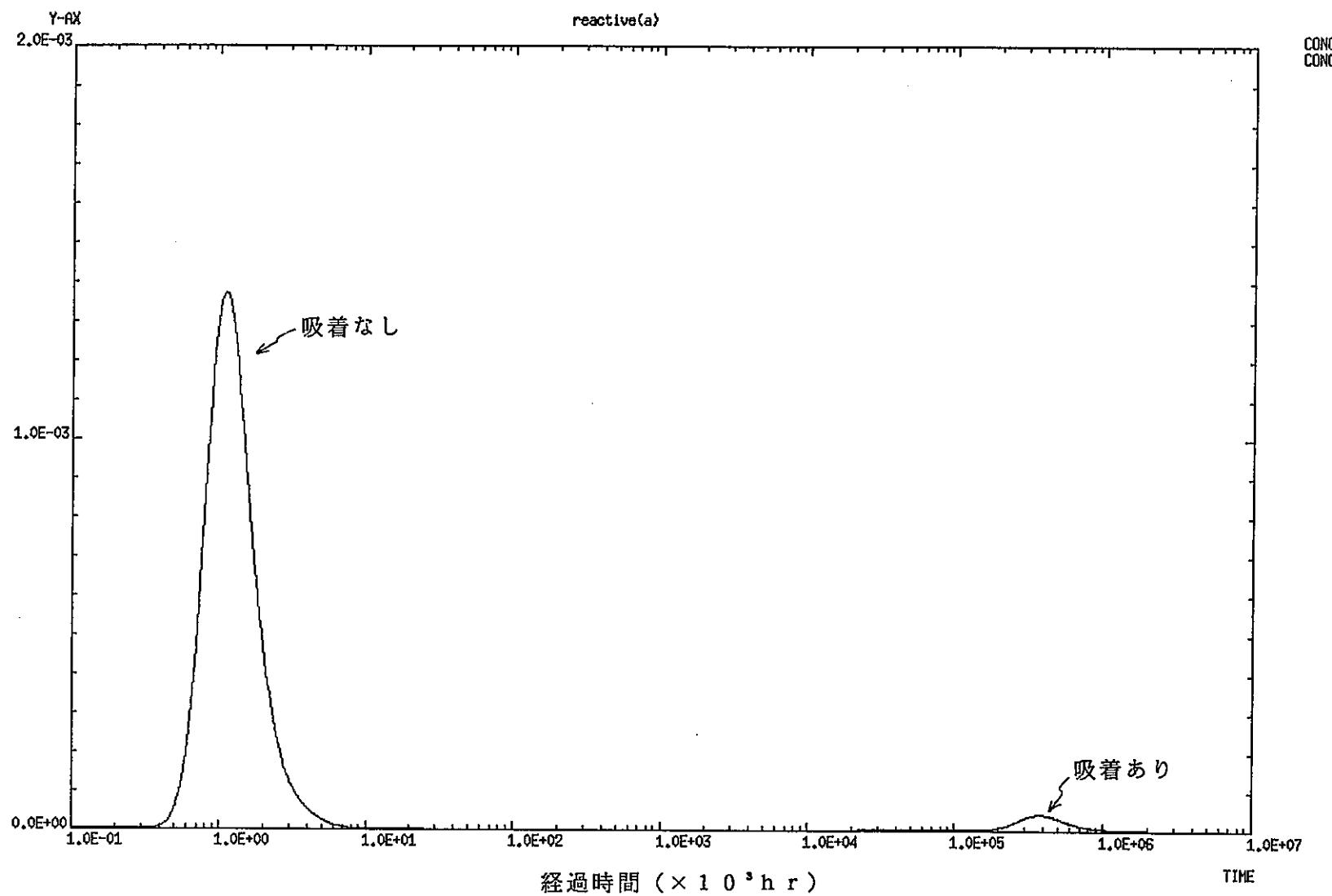


図 A - 6 ケース A におけるトレーサの破過曲線

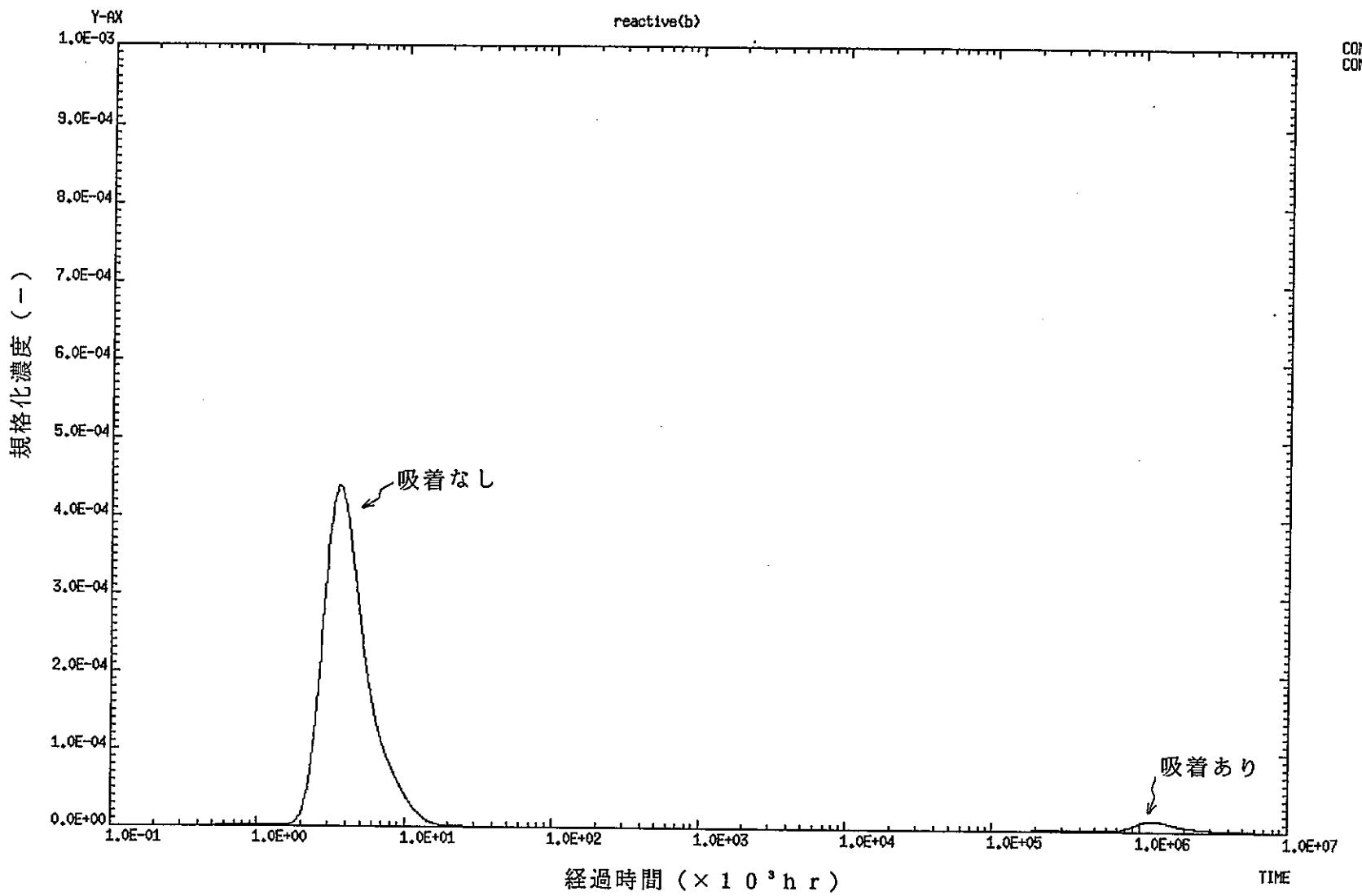


図 A-7 ケース B におけるトレーサの破過曲線

付録 B

フィンションサイトにおけるトレーサ試験解析結果

1994年2月

三菱原子力工業（株）

1. はじめに

フィンションサイトで実施したトレーサ試験（ダイポール試験、及び揚水試験）の解析結果についてまとめた。

2. 解析結果と考察

(1) ダイポール試験結果へのフィッティング計算結果

4種類のトレーサ（Iodine, In-edta, Gd-dtpa, 及びTm-edta）を用いて実施したダイポール試験で得られた破過曲線へのフィッティング計算結果を、図B-1～図B-12に示す。トレーサ移行計算では、透水量係数分布としてトレンドがない場合、1次の場合、及び2次の場合のConditional Simulationの結果得られた分布を用いて計算した地下水流速分布を用いた。図B-1～図B-12から、いずれの解析ケースにおいても、計算値は実測値と比較的一致していることがわかる。

(2) 揚水試験結果の予測計算結果

ダイポール試験結果へのフィッティングにより得られた移行パラメータ値（表5-2参照）を用いて、揚水試験でのトレーサ破過曲線の予測計算を行い実測値と比較した。揚水試験における破過曲線の予測計算結果を図B-13～図B-24に示す。図B-13～図B-24から、トレンドが2次のケースで、一部計算値と実測値の一致が良くないケースが見られるが、トレンド次数が0次と1次のケースでは、経過時間が実測値よりも若干（20～30 hr）遅れている傾向がみられるものの、実測値の濃度変化の傾向を大略再現していると考えられる。予測値の時間おくれは、空隙率が実際よりも若干高めに推定されたために、地下水流速が実際よりも低くなったことによると考えられる。トレンド次数が高くなる程、計算値と実測値の一致が悪くなるのは、次数が高いケースでは透水量係数の場所ごとの変化が大きいため、地下水流速の場所ごとの変化が大きくなり、トレーサの移行に関して、地下水流速の変化の影響が大きくなつたためと考えられる。トレンド次数の低いケースの方が、計算値と実測値が比較的合っていることから、実際の透水量係数分布はトレンド次数の低いケースに近いと考えられる。

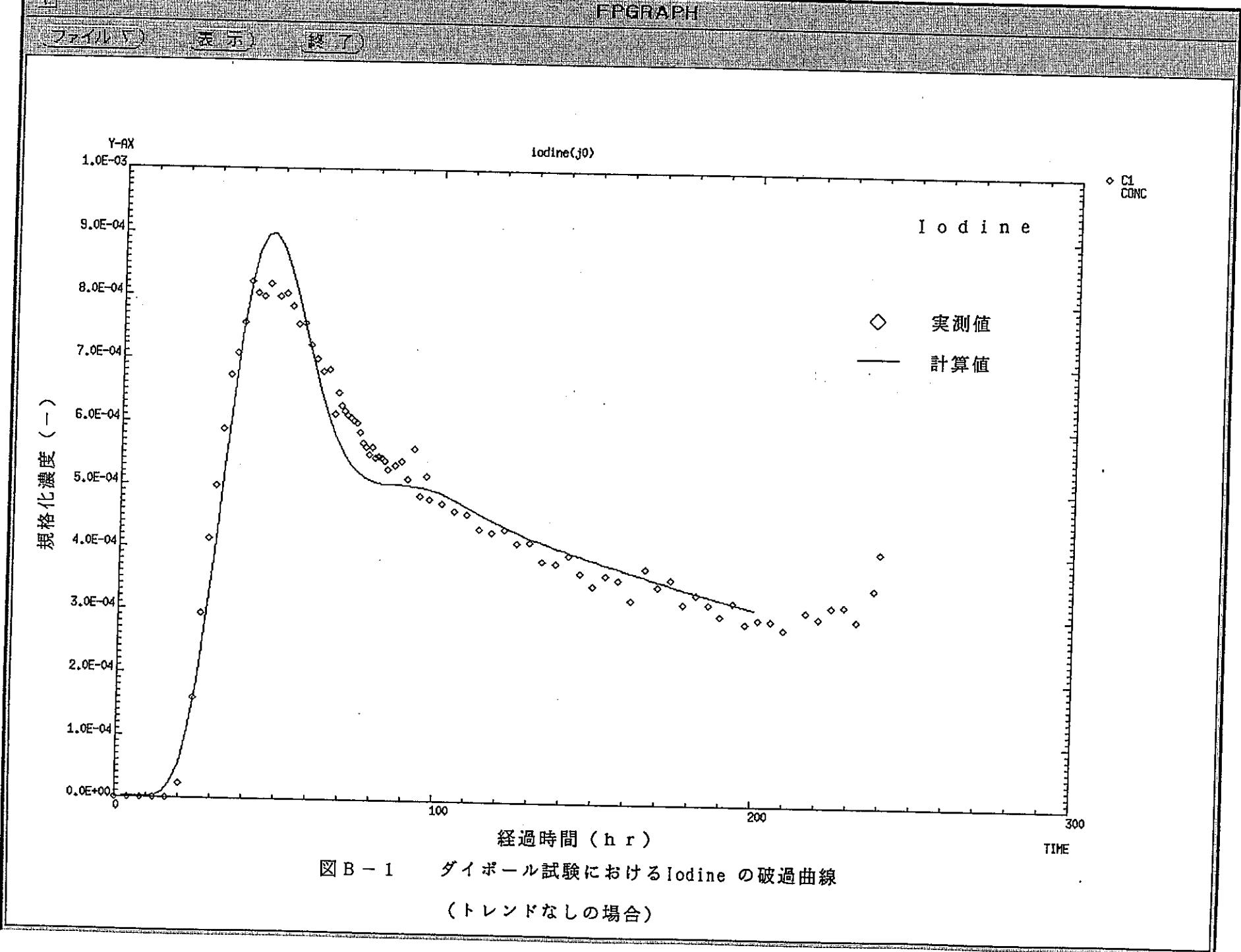


図 B - 1 ダイポール試験における Iodine の破過曲線
(トレンドなしの場合)

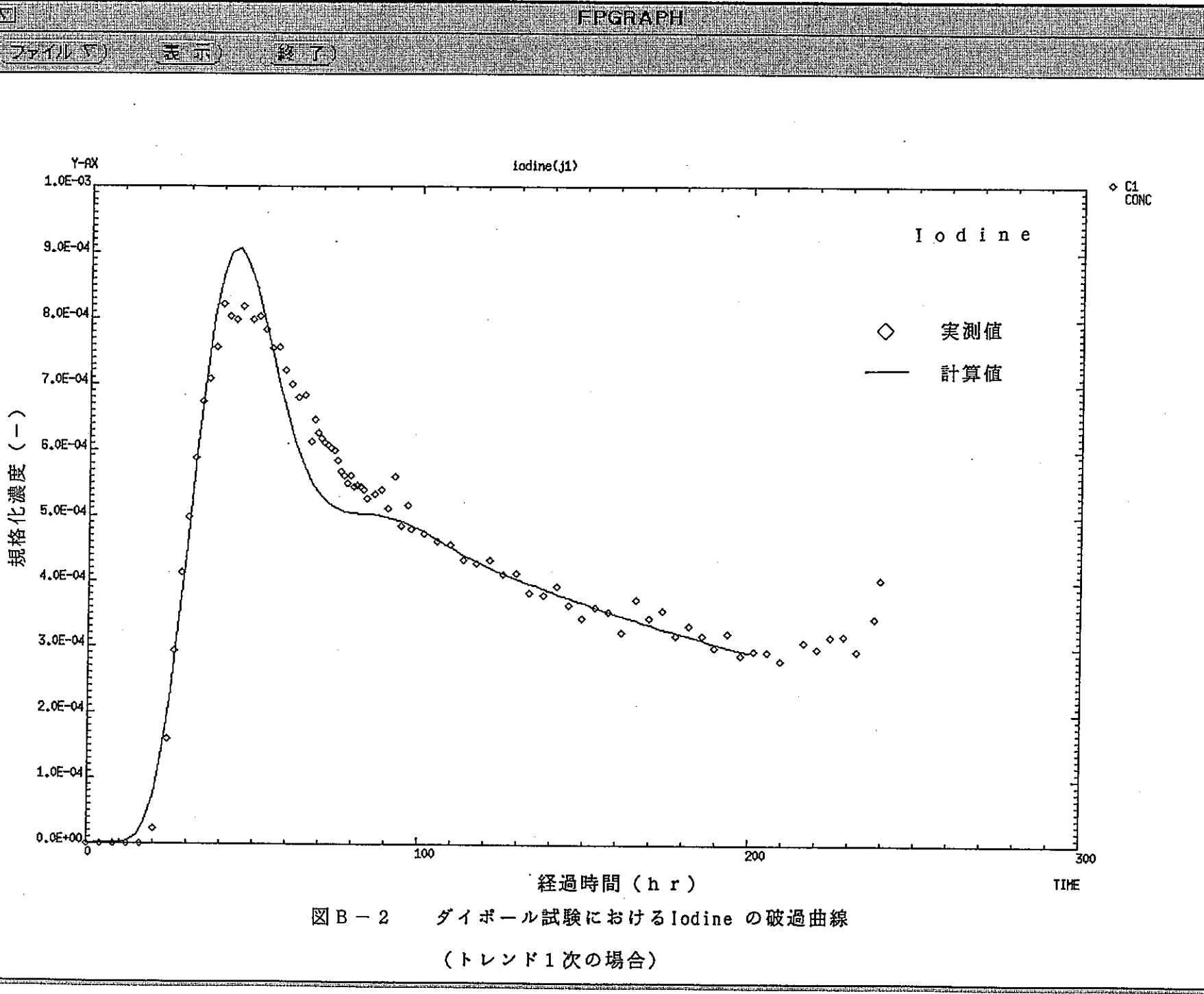


図 B - 2 ダイポール試験における Iodine の破過曲線
(トレンド 1 次の場合)

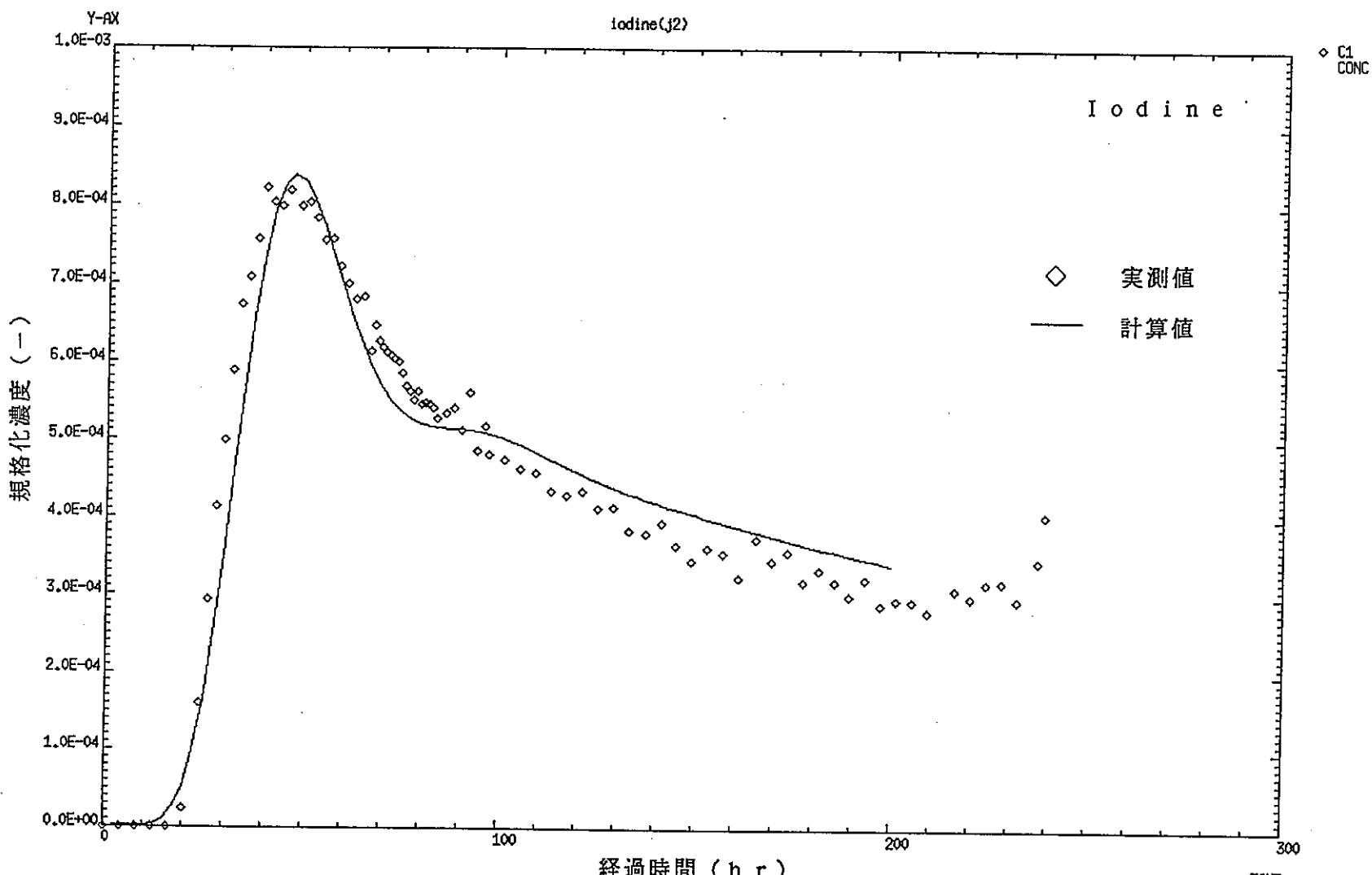


図 B - 3 ダイポール試験における Iodine の破過曲線
(トレンド 2 次の場合)

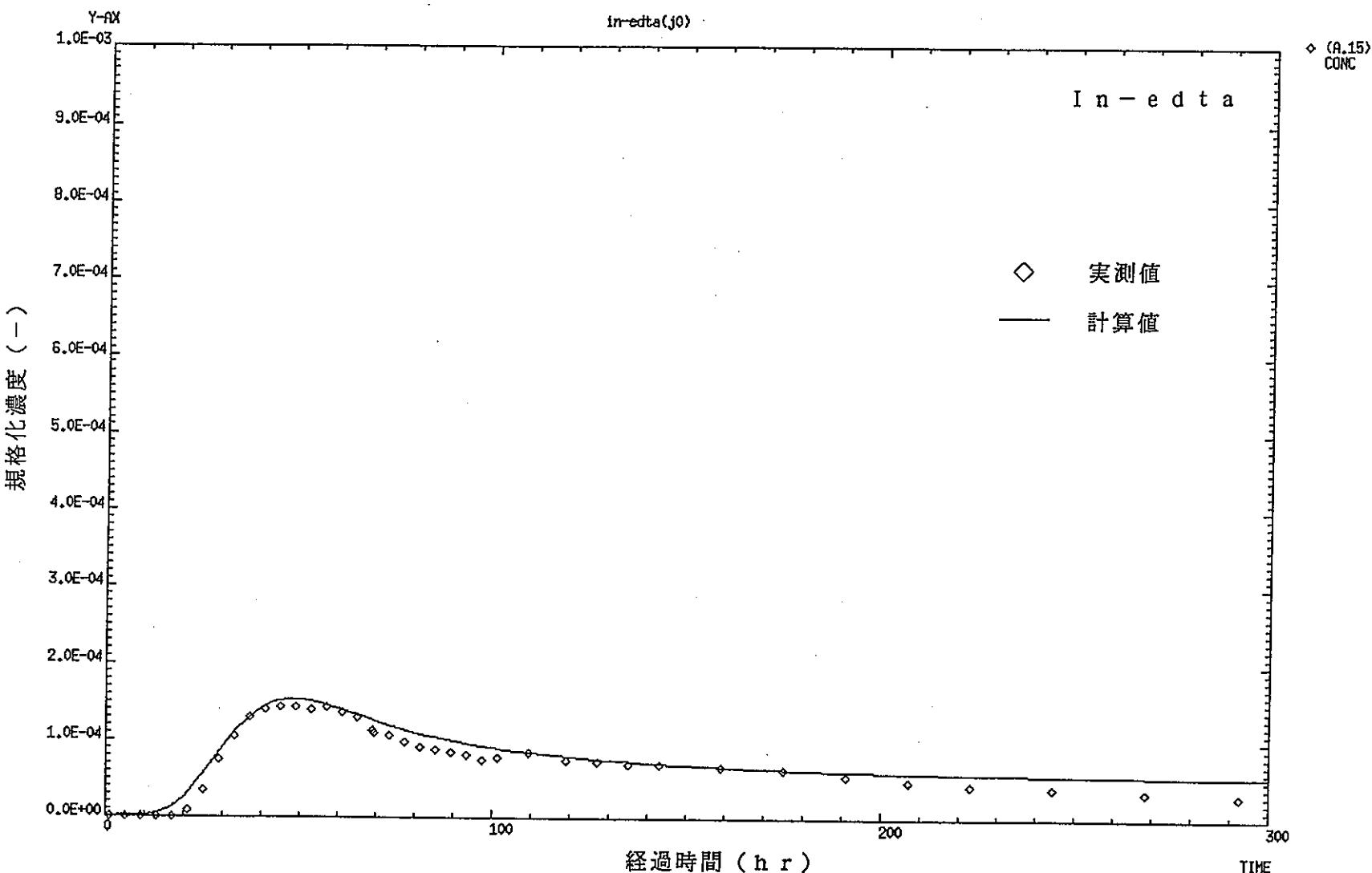


図 B - 4 ダイポール試験における In-edta の破過曲線
(トレンドなしの場合)

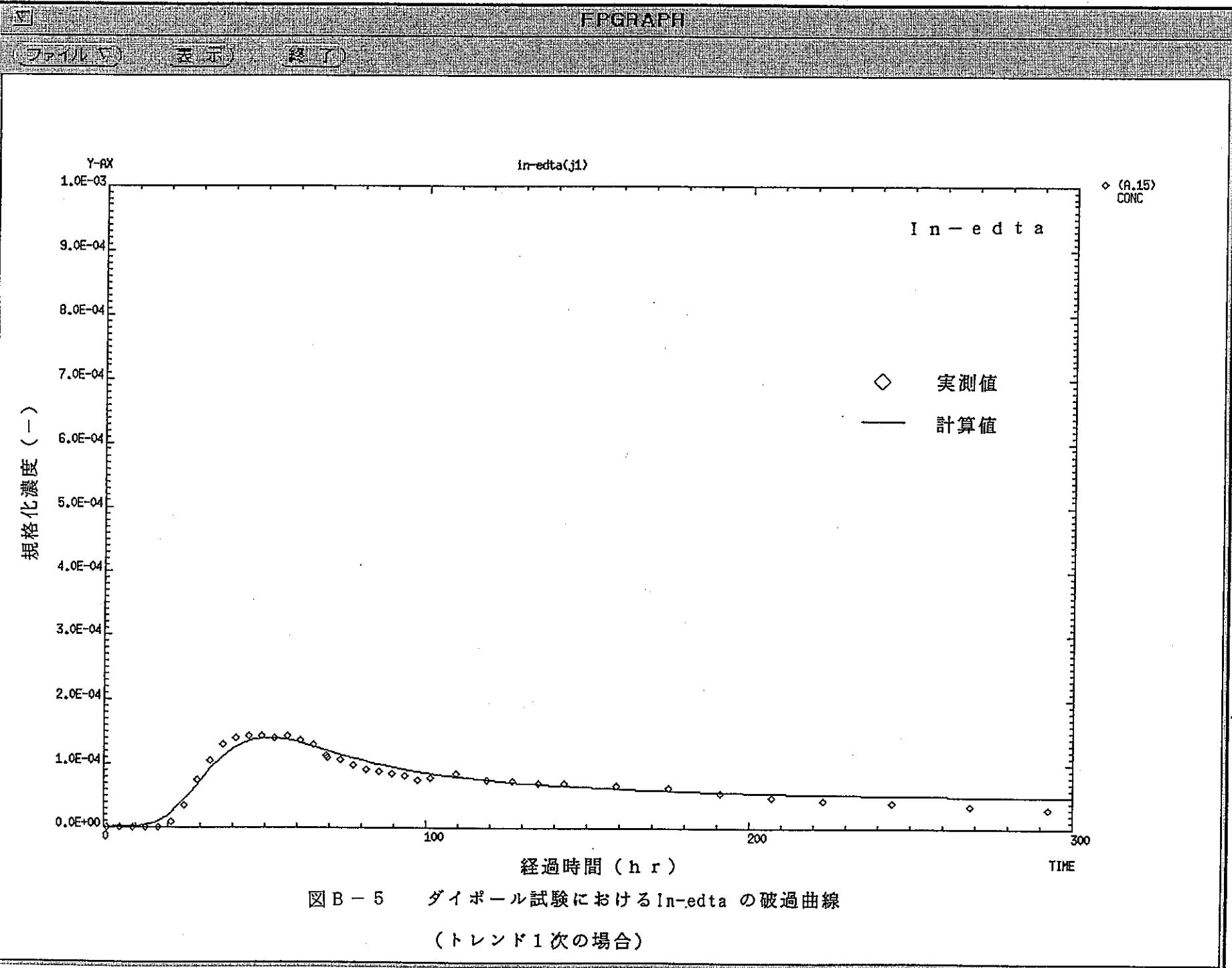


図 B-5 ダイポール試験における In-edta の破過曲線

(トレンド1次の場合)

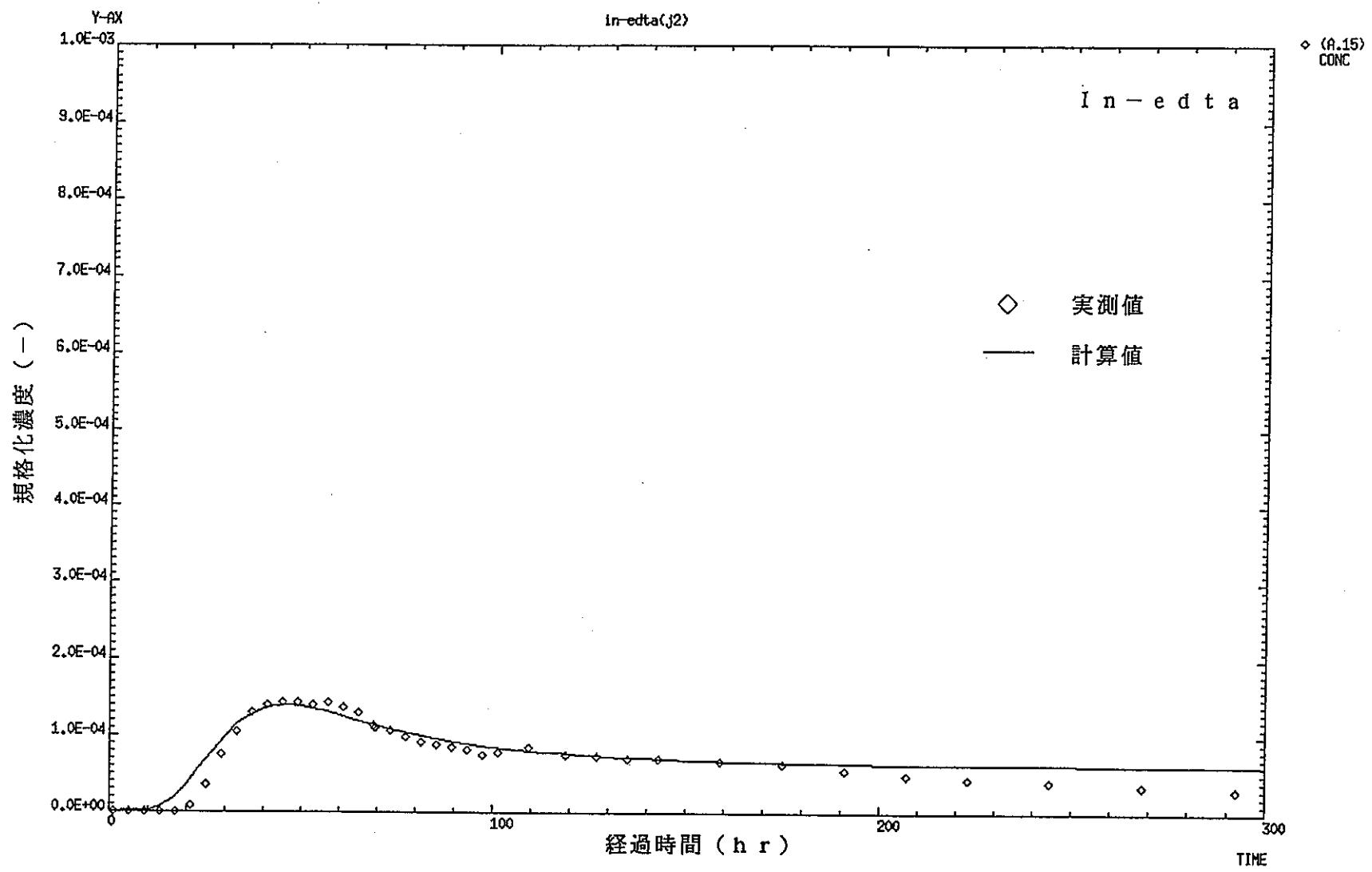


図 B-6 ダイポール試験における In-edta の破過曲線
 (トレンド 2 次の場合)

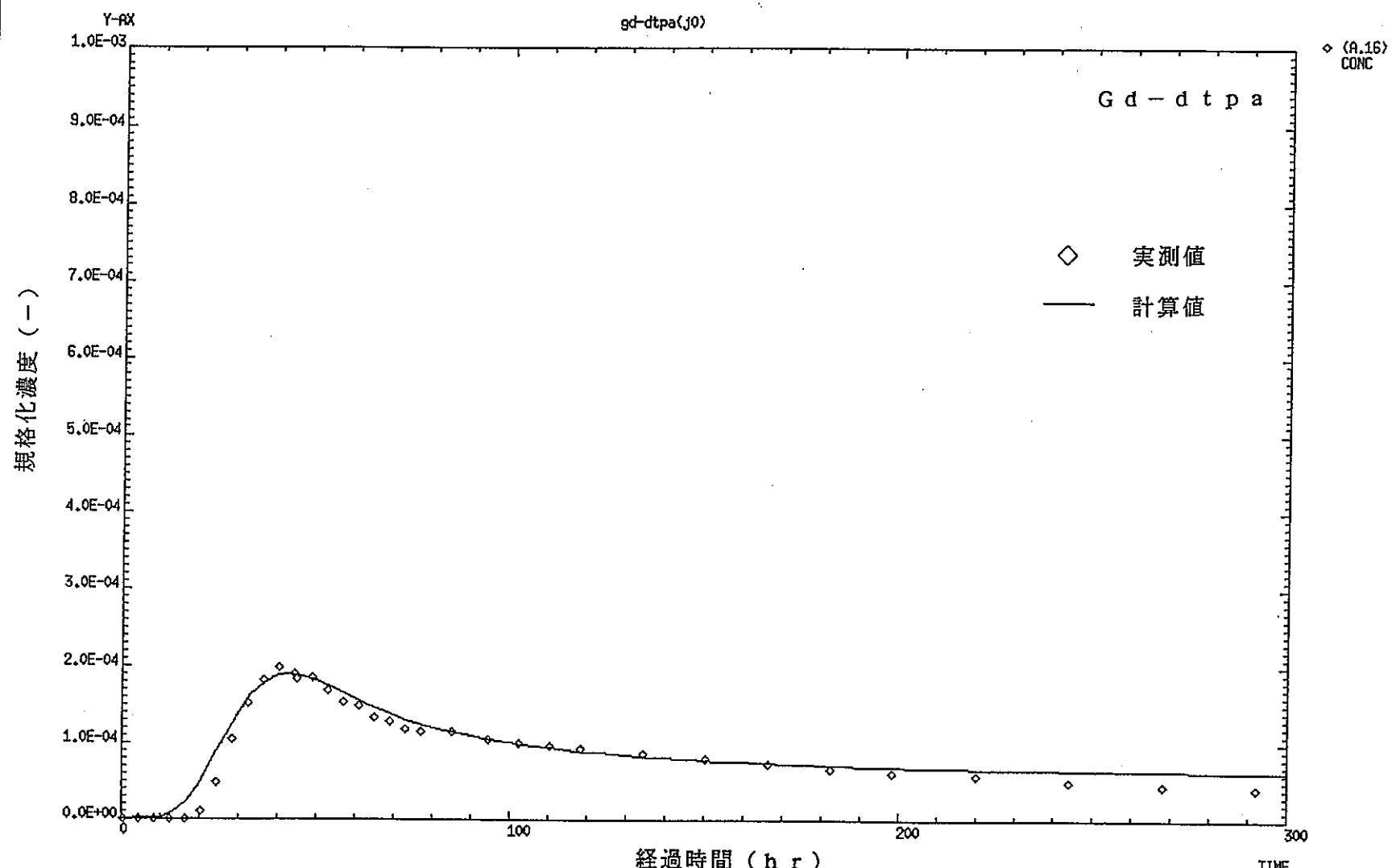


図 B-7 ダイポール試験におけるGd-dtpa の破過曲線

(トレンドなしの場合)

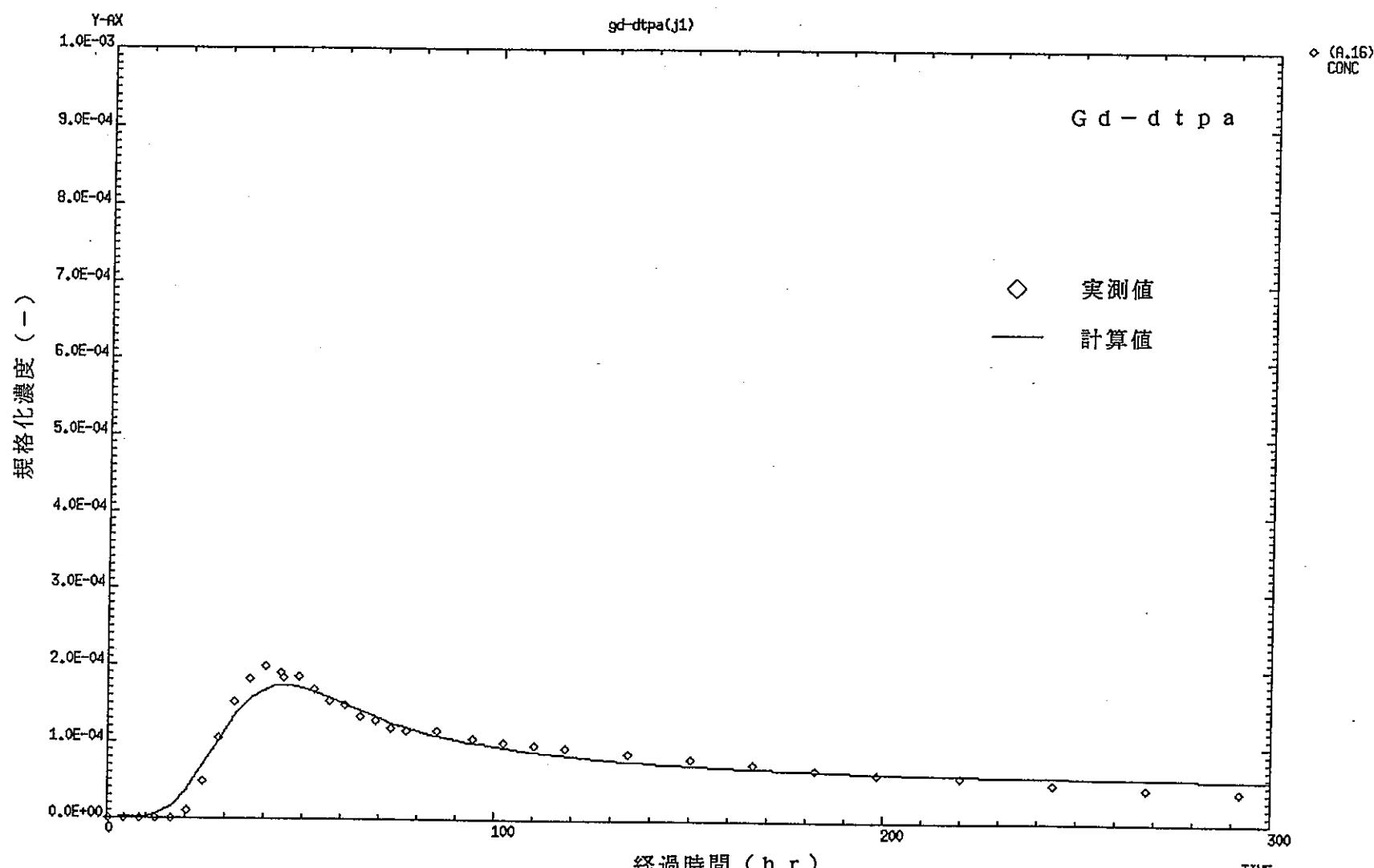
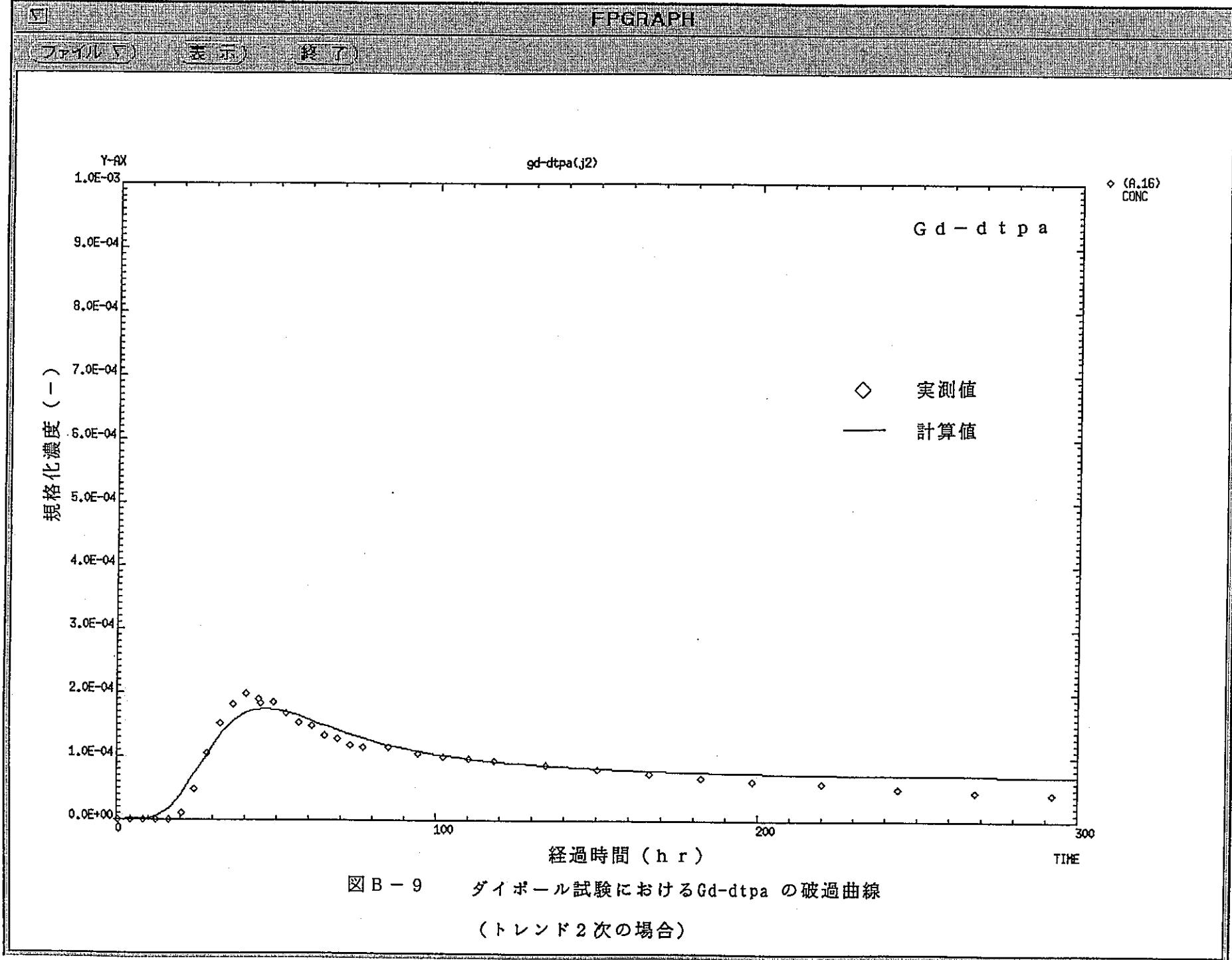


図 B - 8 ダイポール試験における Gd-dtpa の破過曲線
(トレンド 1 次の場合)



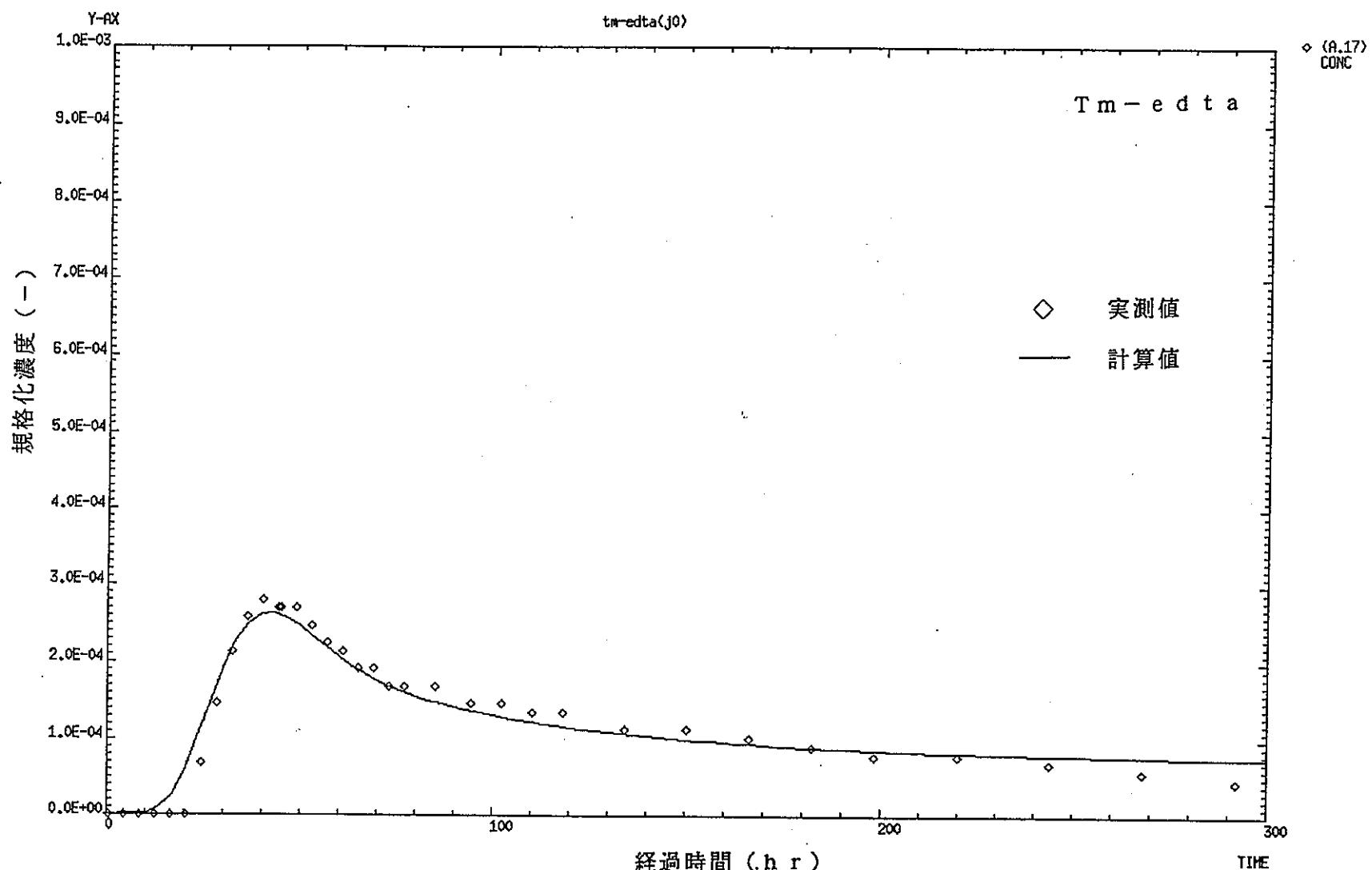


図 B - 10 ダイポール試験におけるTm-edta の破過曲線
(トレンドなしの場合)

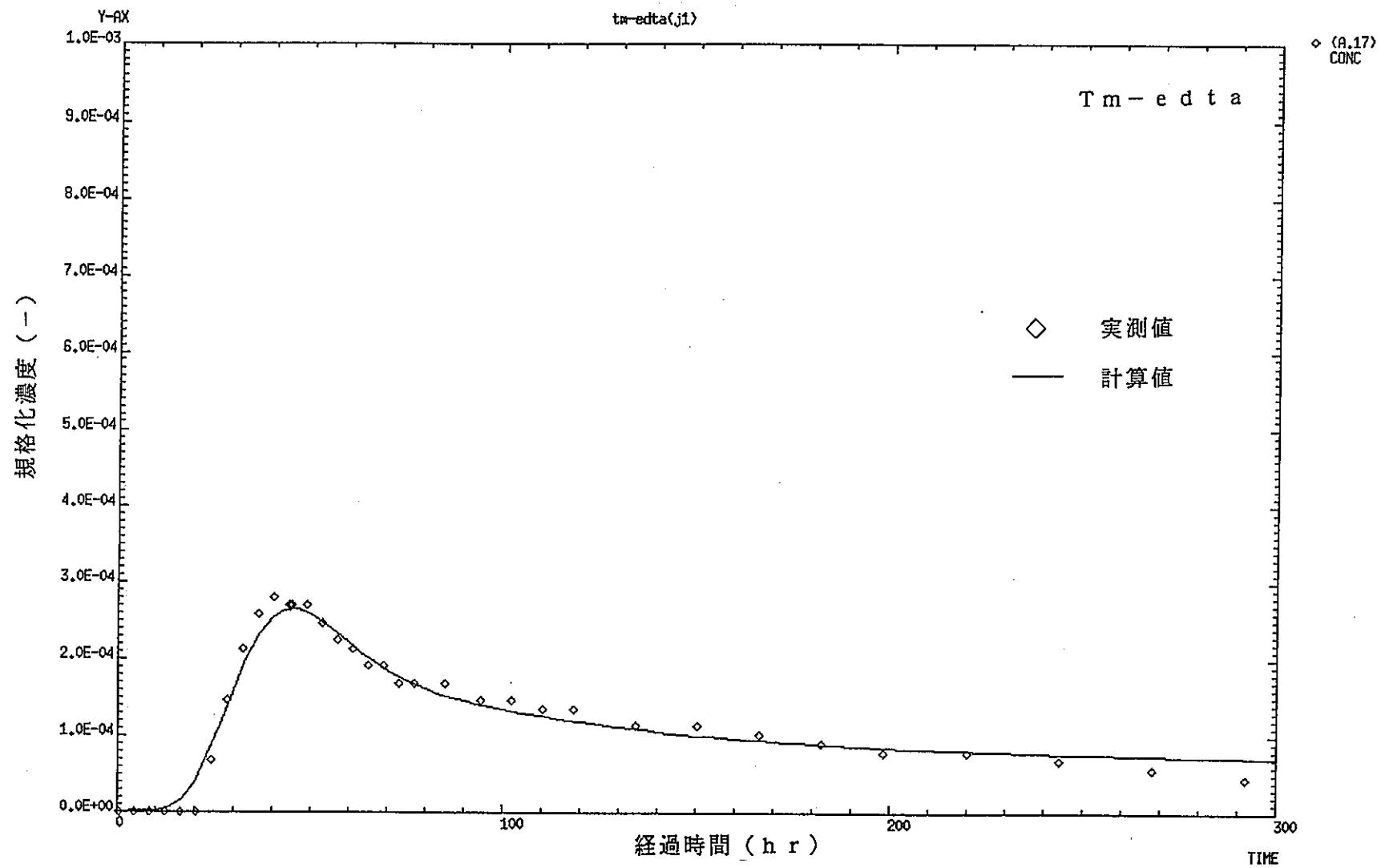


図 B - 1 1 ダイポール試験におけるTm-edta の破過曲線
(トレンド1次の場合)

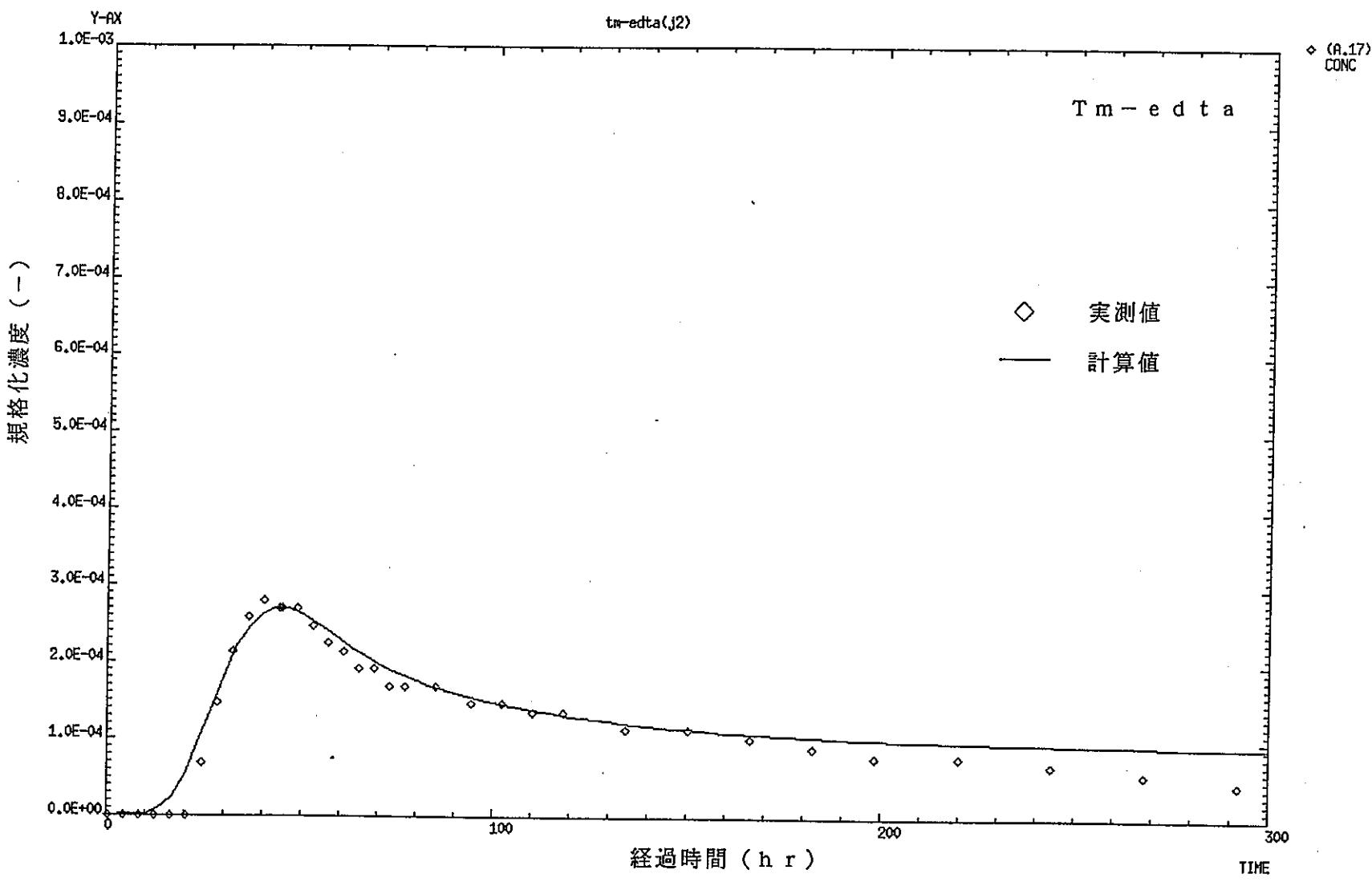


図 B - 1 2 ダイポール試験における Tm-edta の破過曲線
(トレンド 2 次の場合)

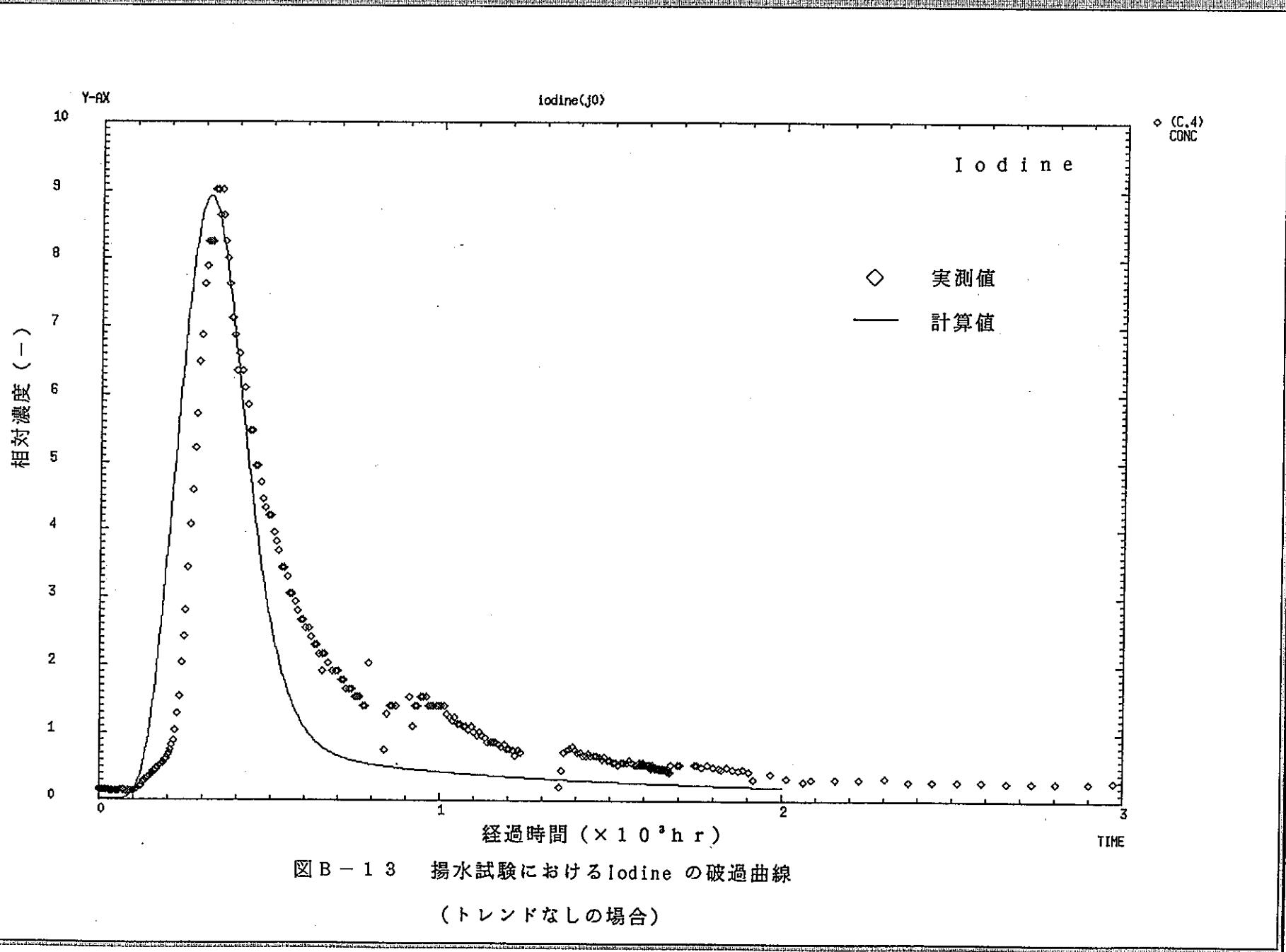


図 B-1-3 揚水試験における Iodine の破過曲線
 (トレンドなしの場合)

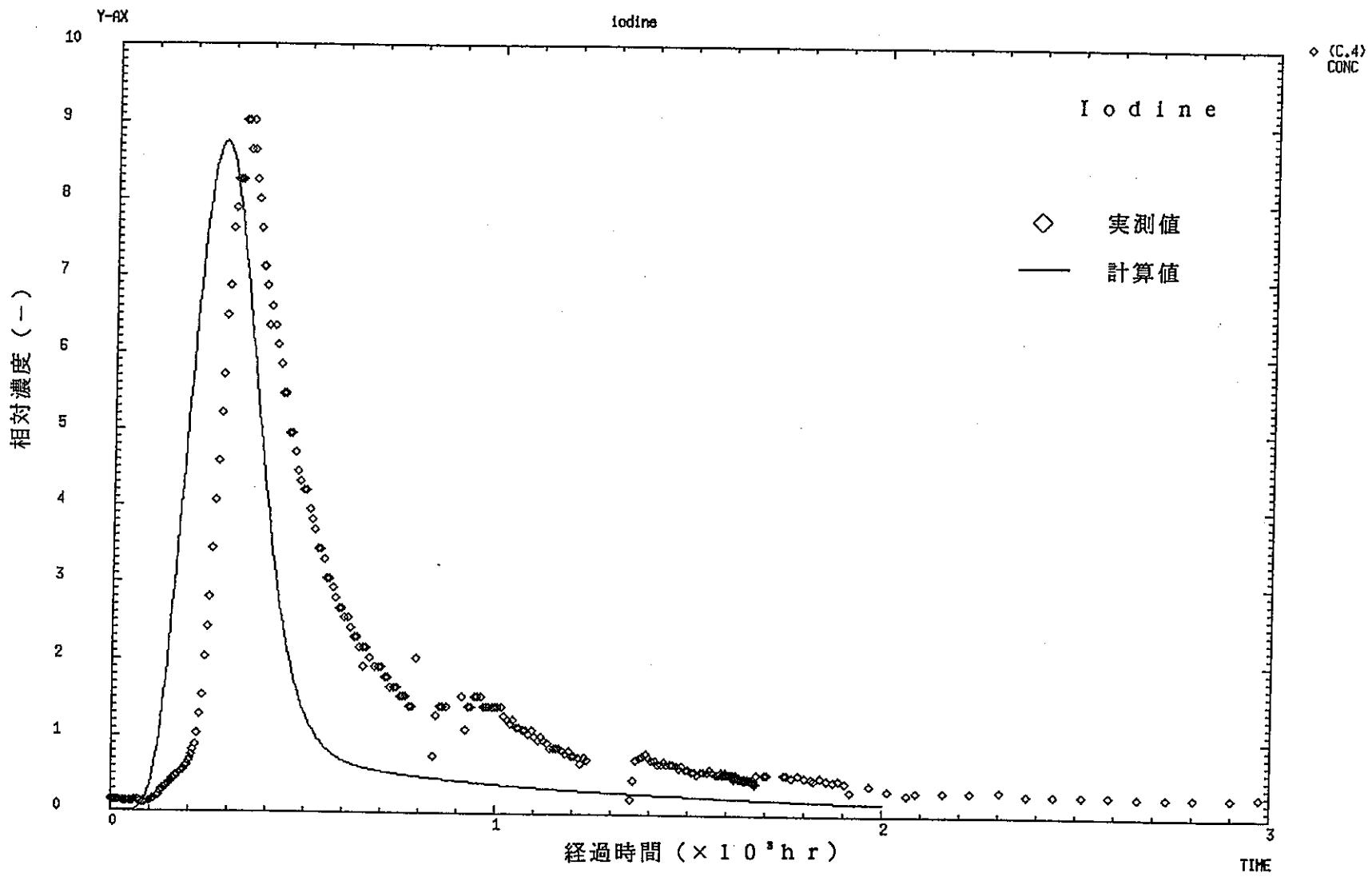


図 B - 14 揚水試験における Iodine の破過曲線
(トレンド 1 次の場合)

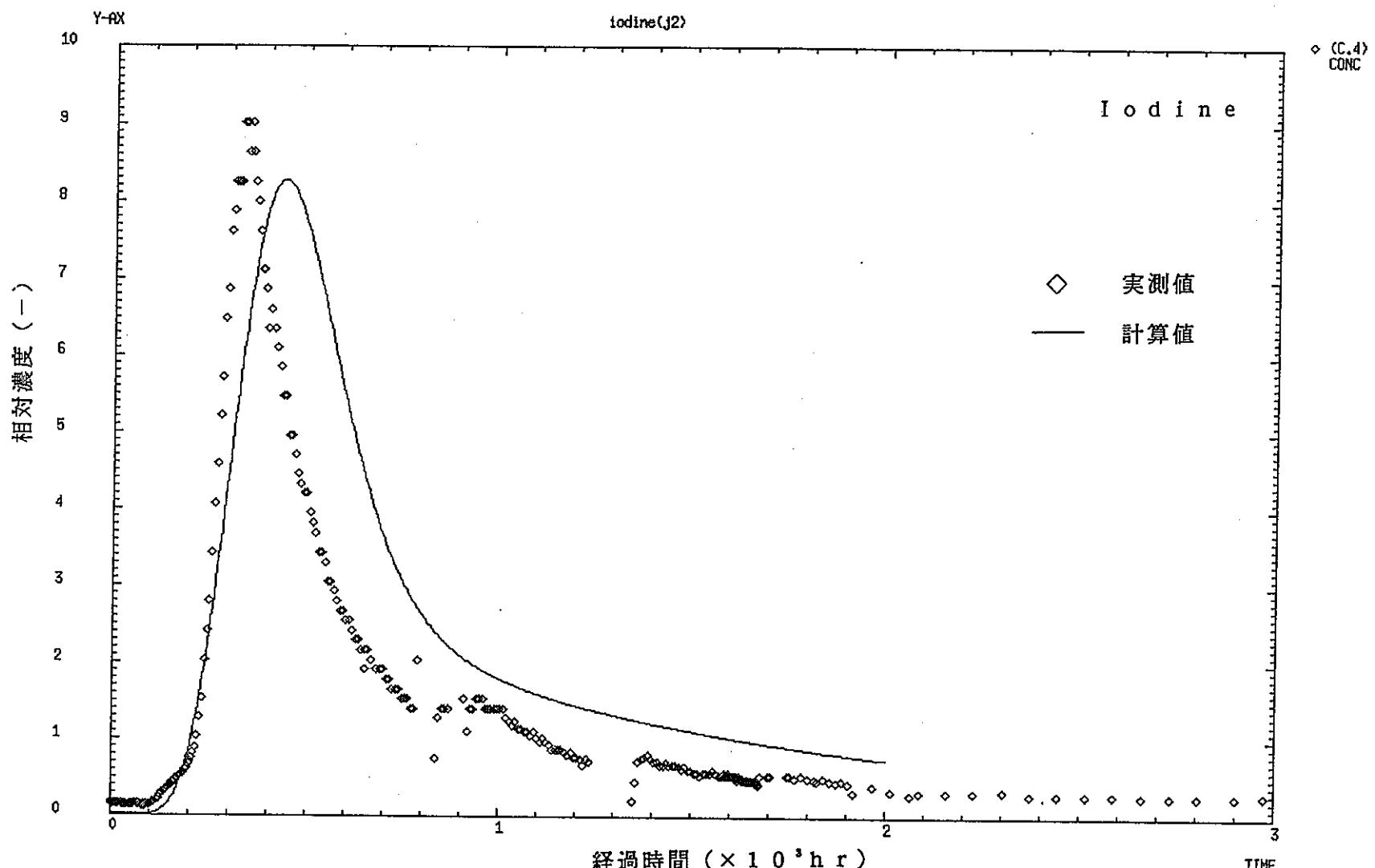


図 B - 15 揚水試験における Iodine の破過曲線
(トレンド 2次の場合)

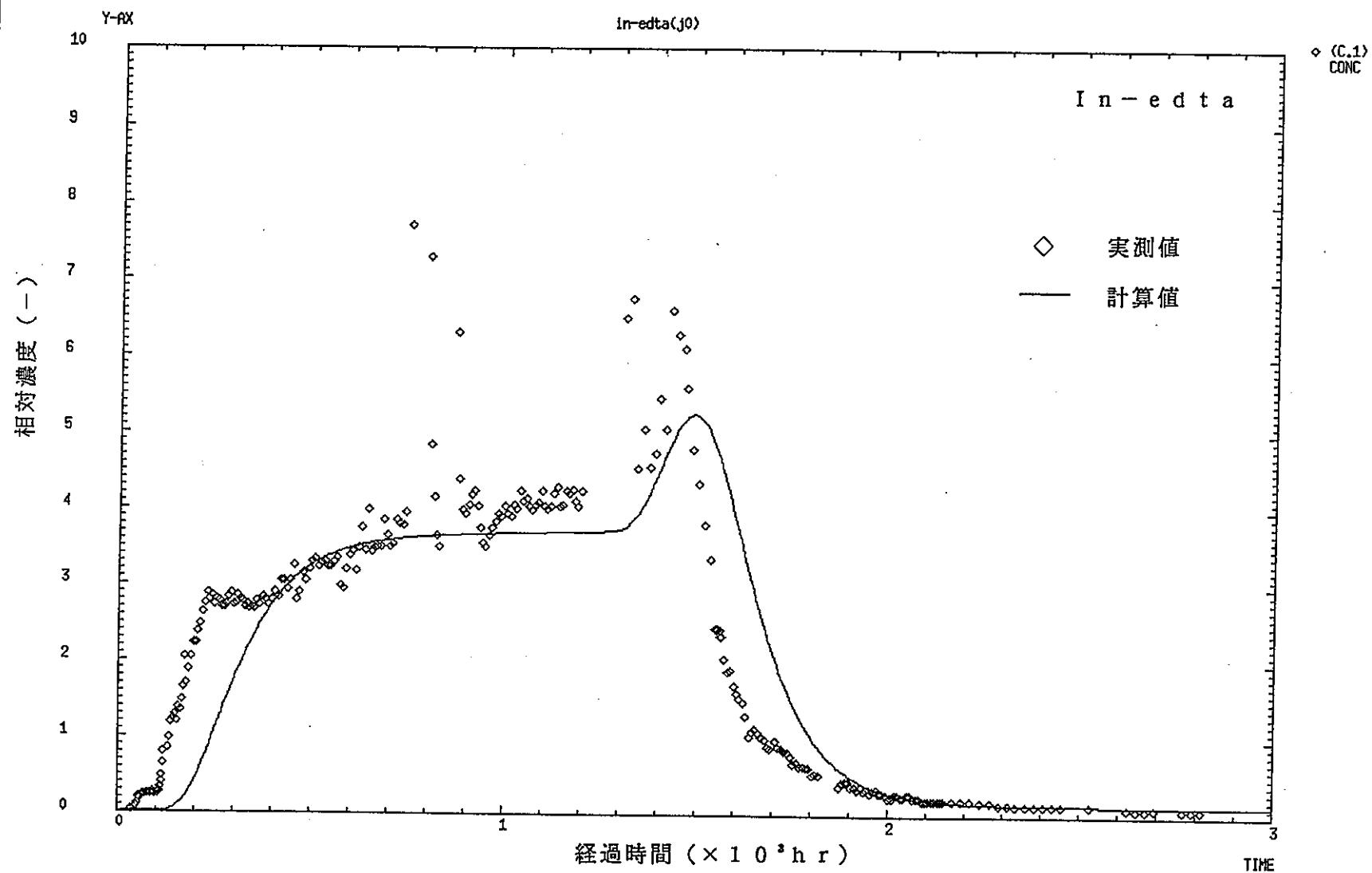


図 B - 1 6 揚水試験における In-edta の破過曲線
(トレンドなしの場合)

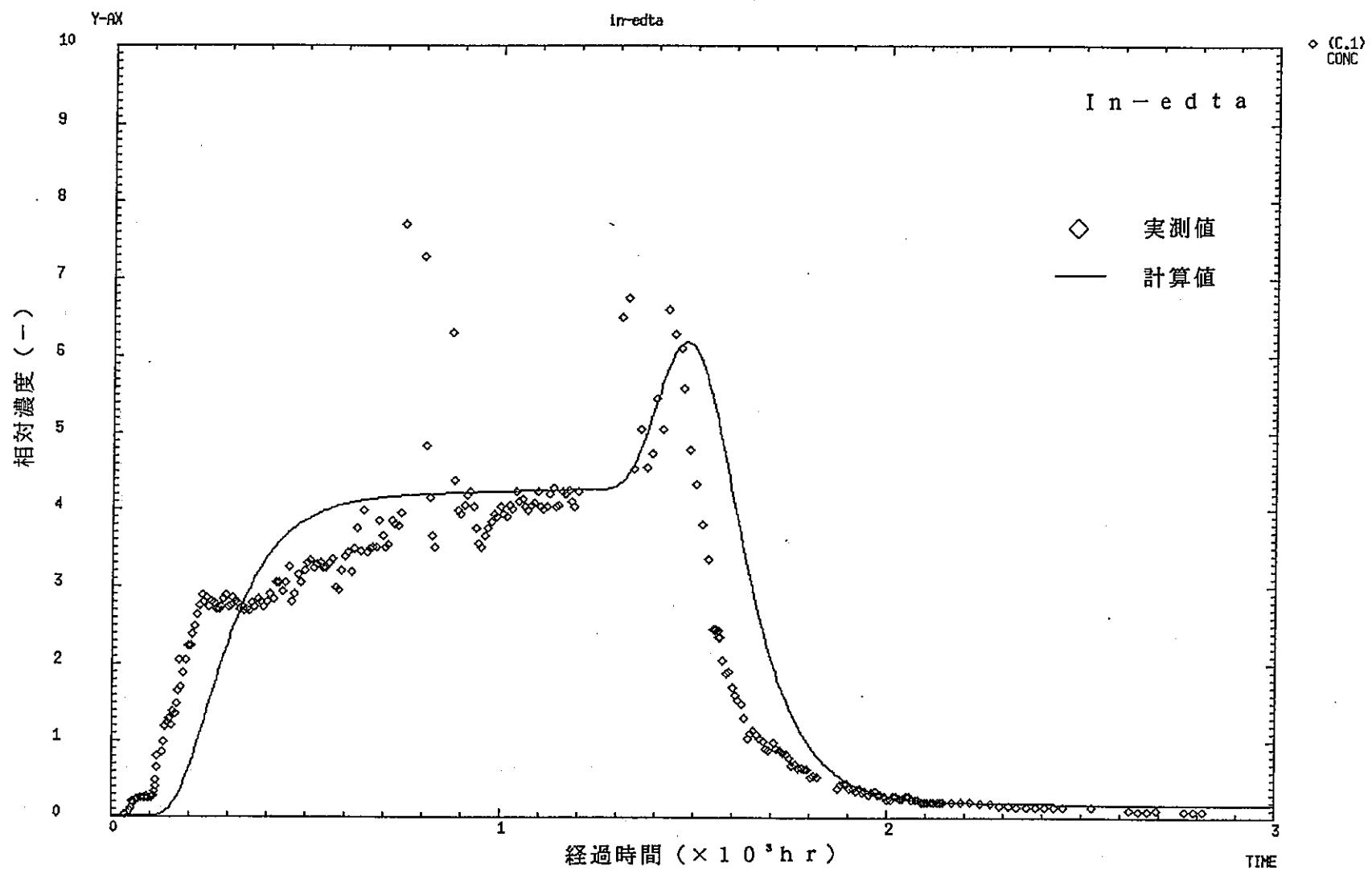


図 B-17 揚水試験におけるIn-edtaの破過曲線

(トレンド1次の場合)

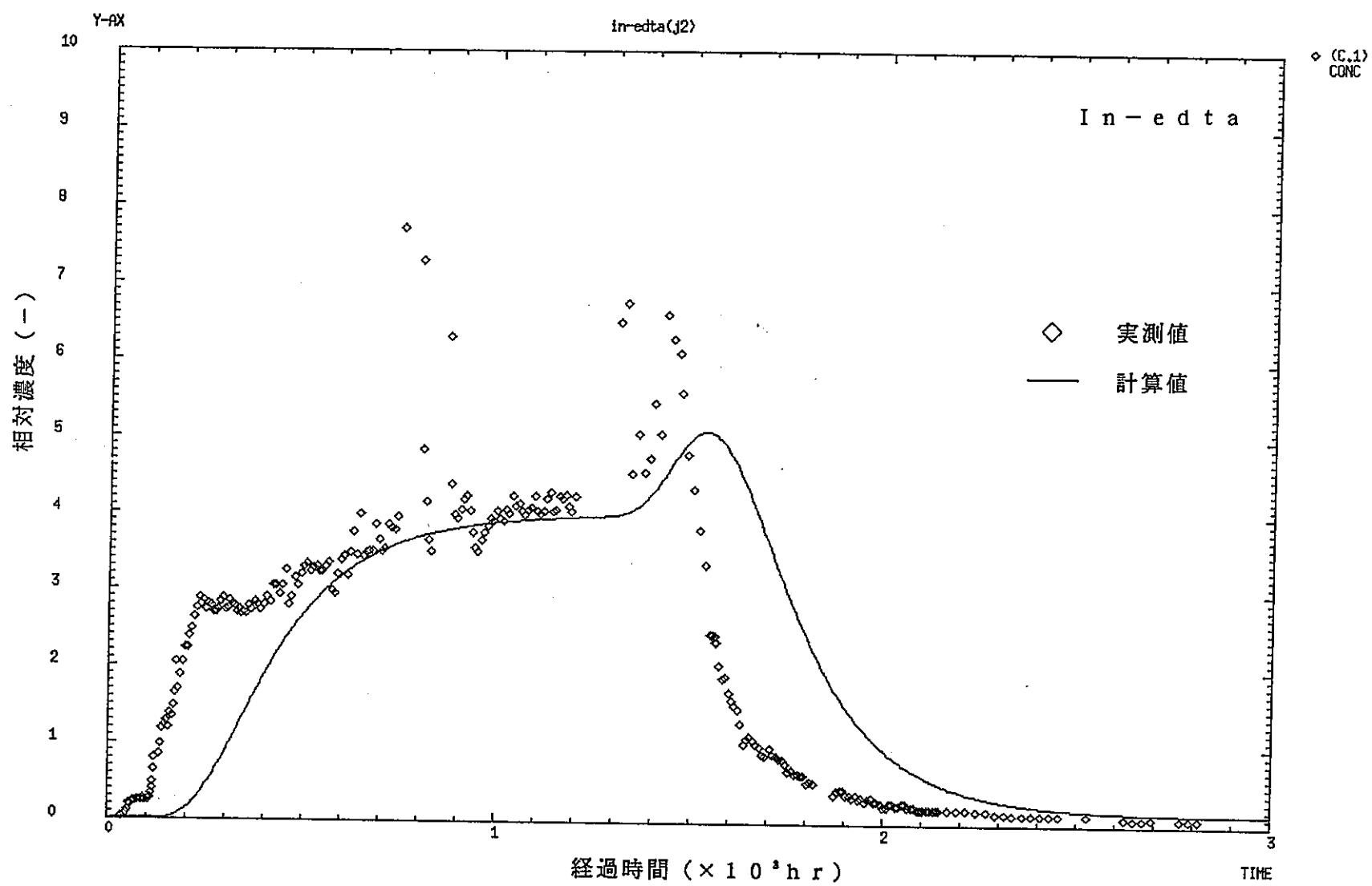
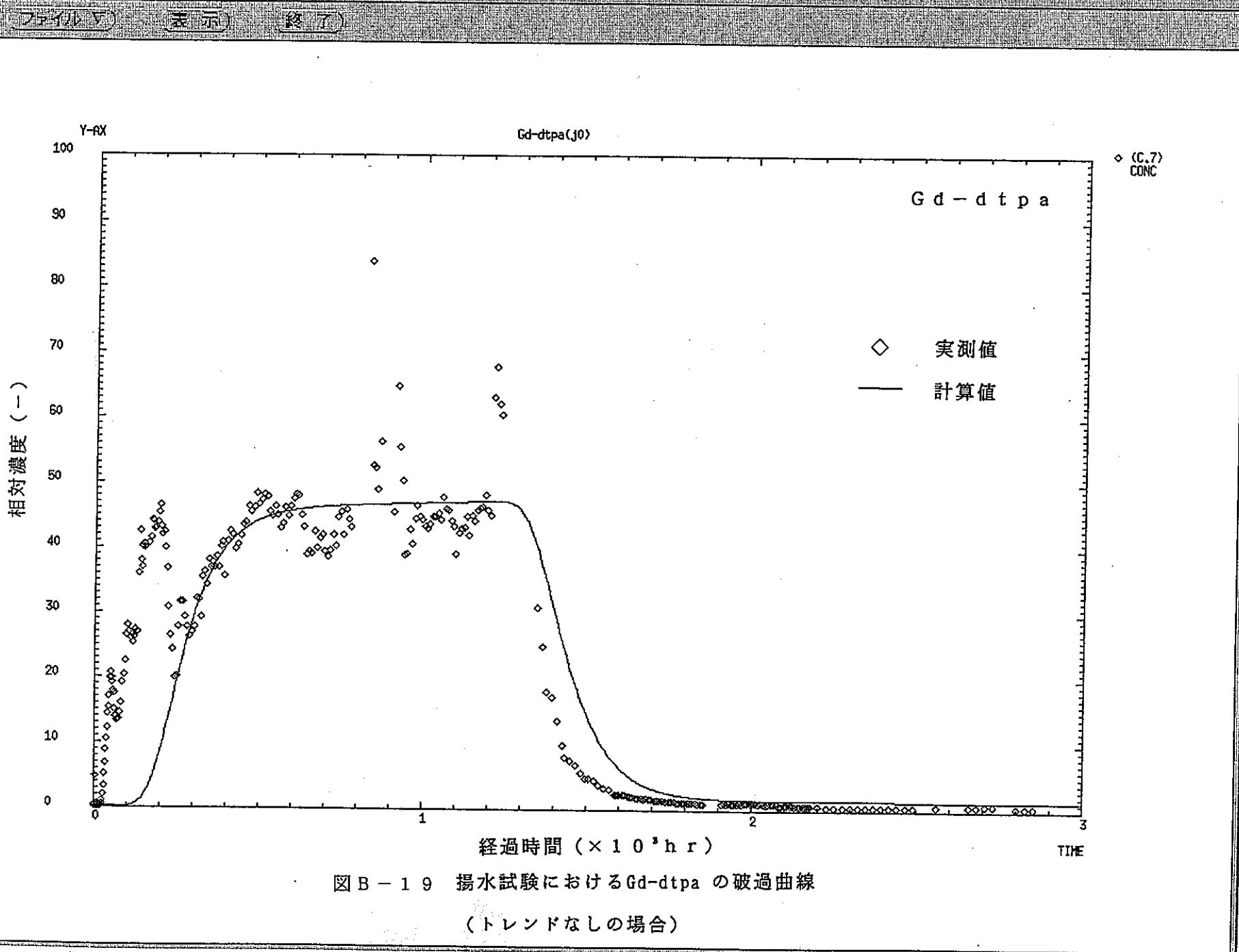


図 B - 1 8 揚水試験における In-edta の破過曲線
(トレンド 2 次の場合)

3

GRAPH

ファイル [V] 表示 終了



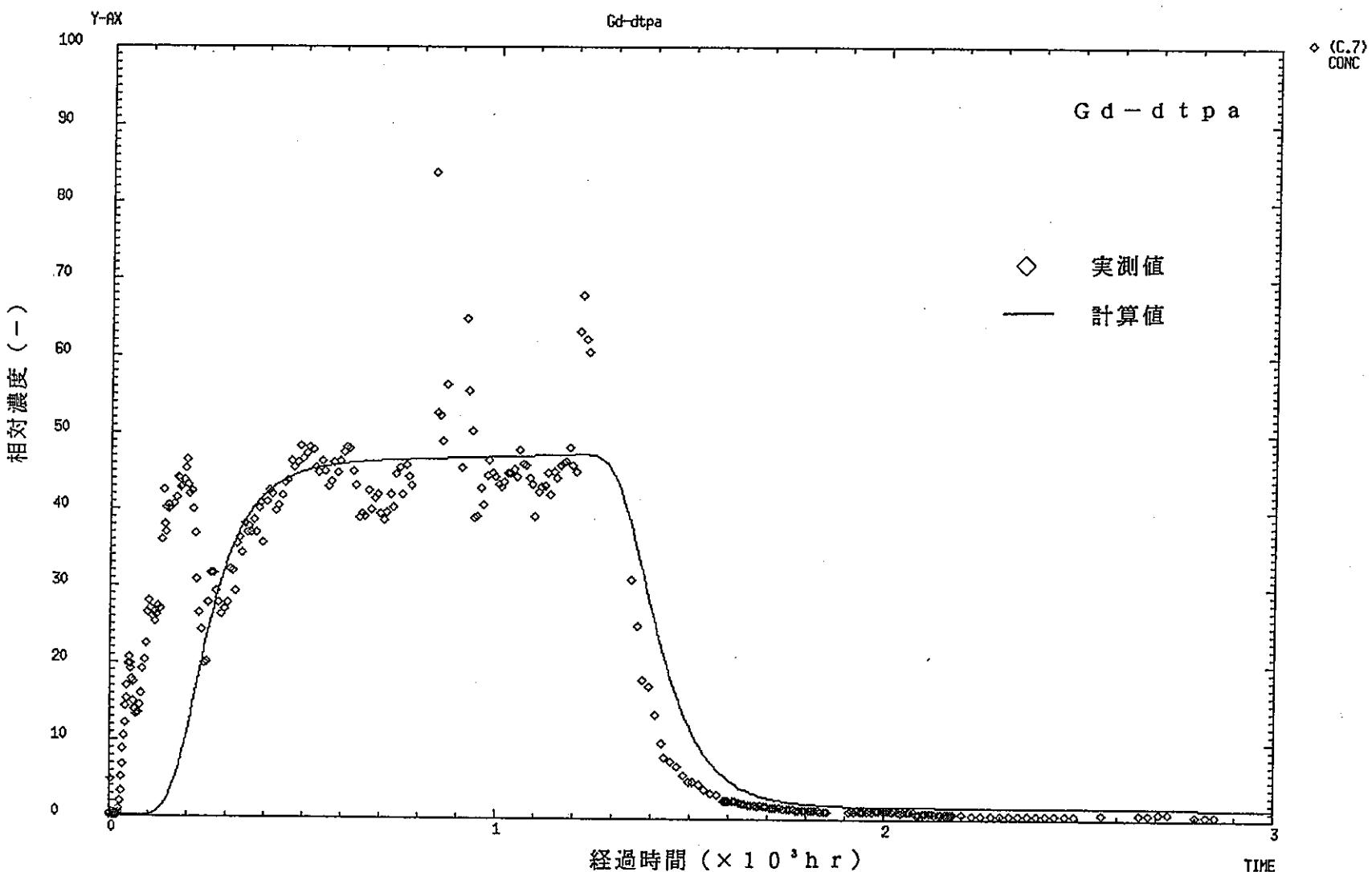


図 B-20 揚水試験における Gd-dtpa の破過曲線
(トレンド 1 次の場合)

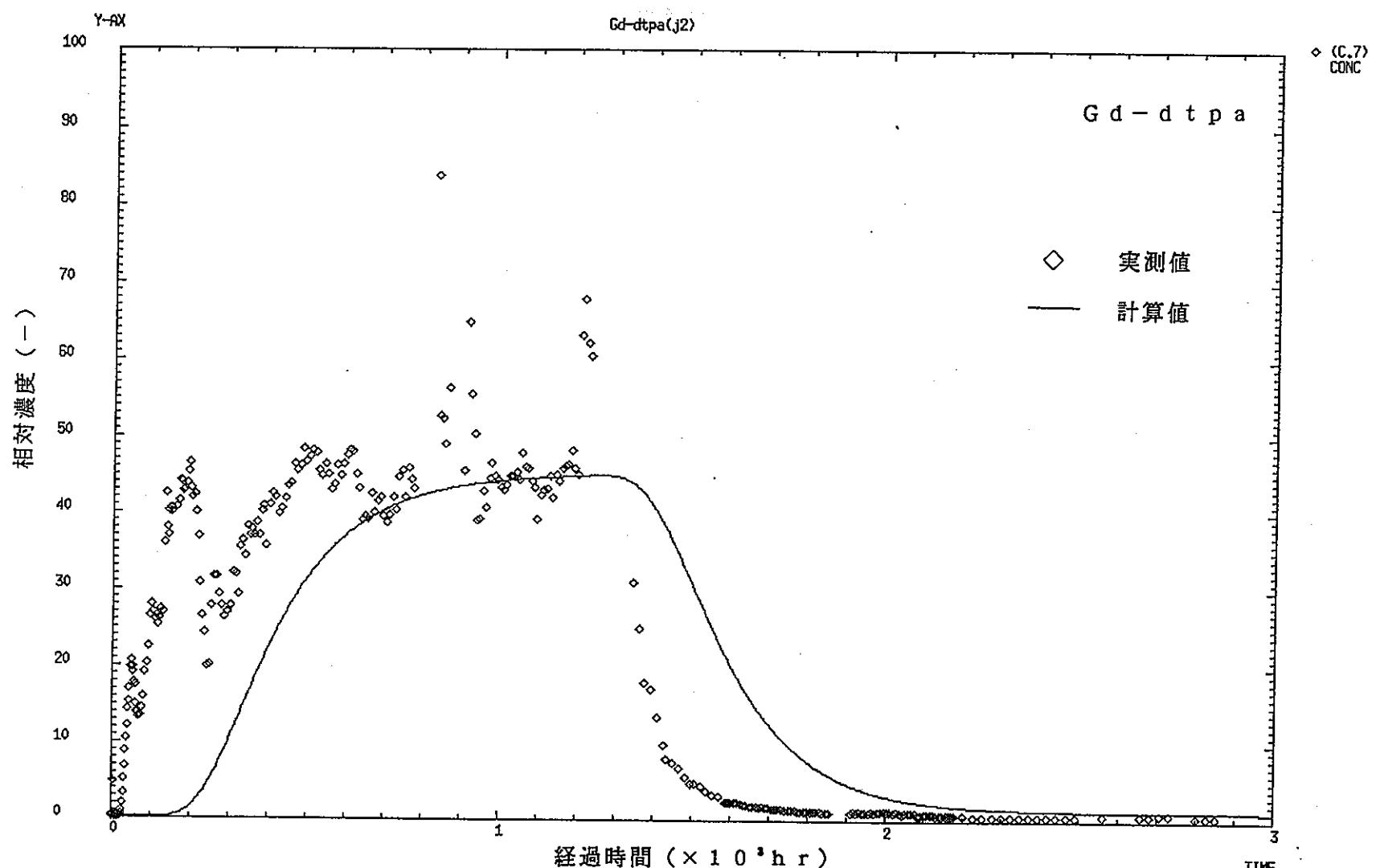


図 B - 21 揚水試験におけるGd-dtpa の破過曲線
(トレンド2次の場合)

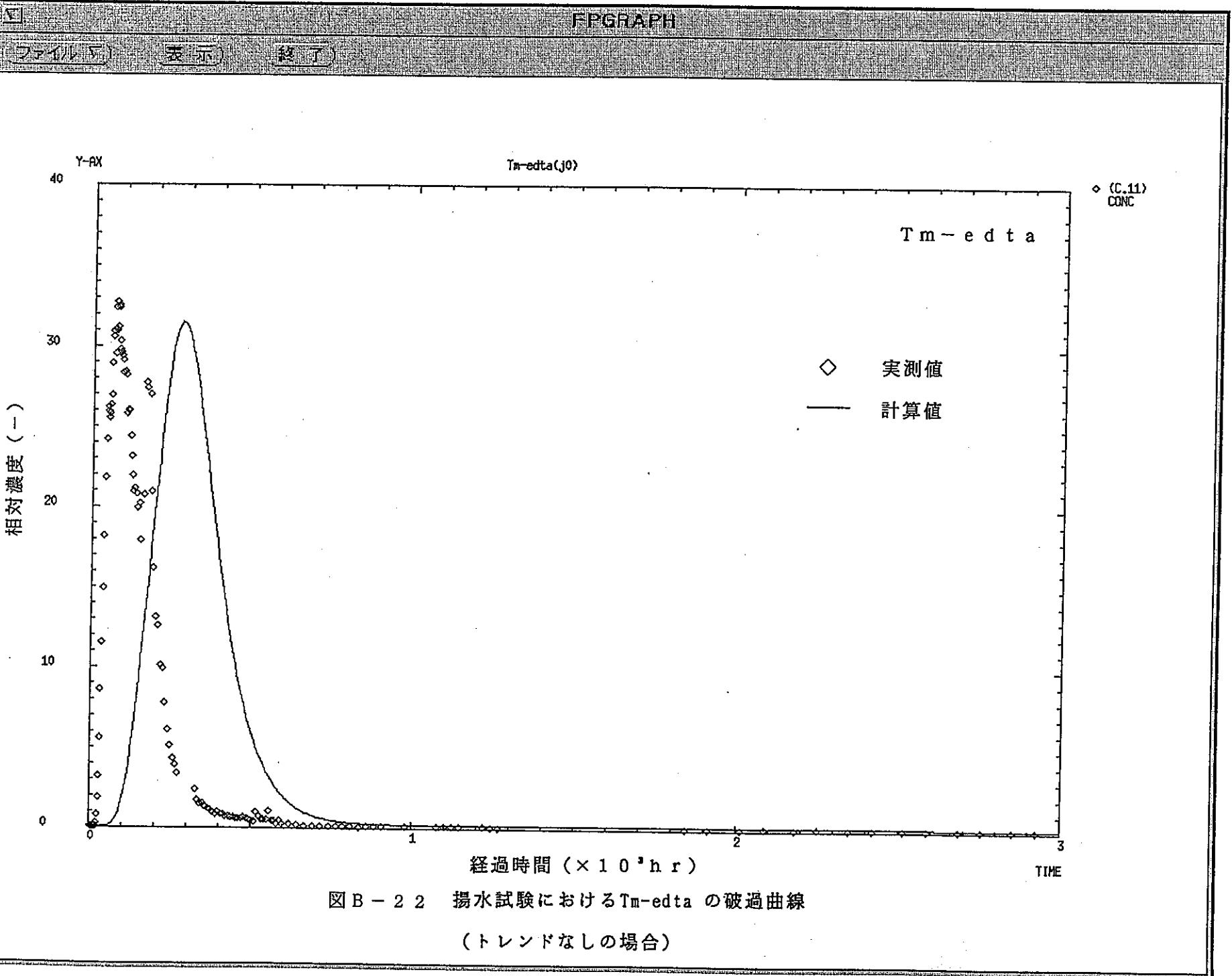


図 B - 2 2 揚水試験における Tm-edta の破過曲線
(トレンドなしの場合)

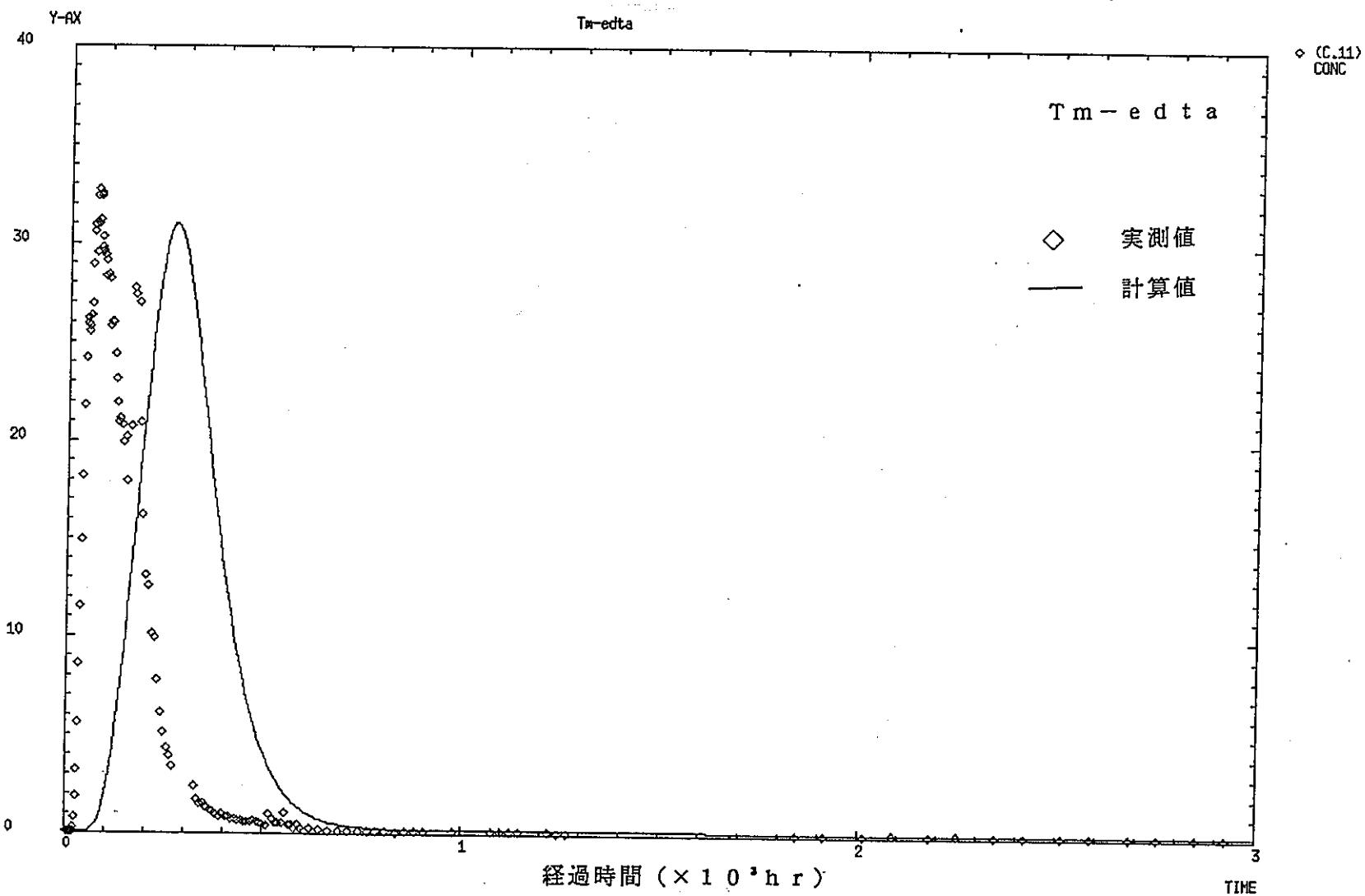


図 B - 2 3 揚水試験における Tm-edta の破過曲線

(トレンド 1 次の場合)

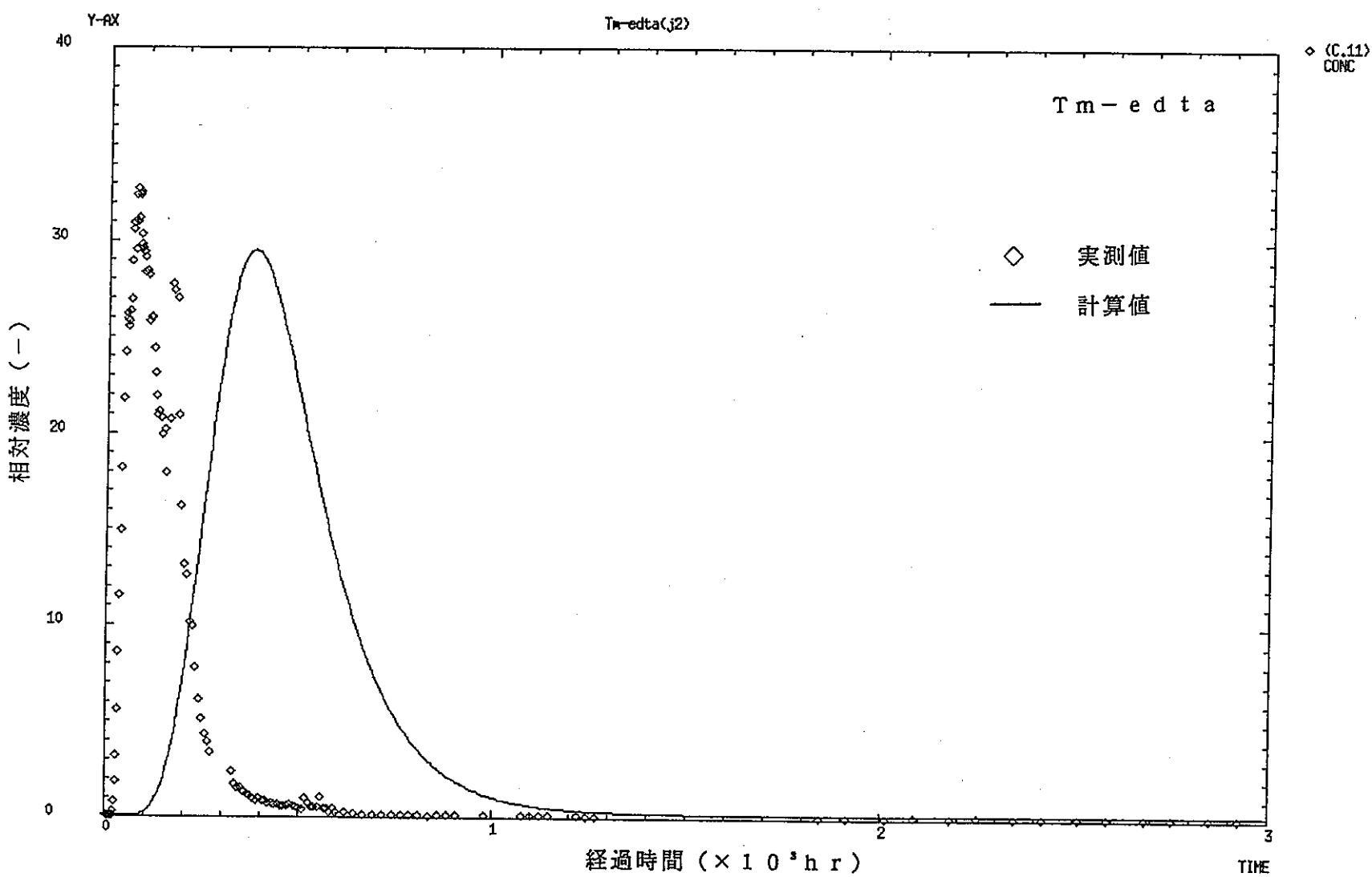


図 B - 24 揚水試験における Tm-edta の破過曲線
(トレンド 2 次の場合)