

塩淡水境界による地下水流動への影響評価と 調査解析手法に関する研究(その3)

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

2000 年 8 月

大成建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合せください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

2000 年 8 月

塩淡水境界による地下水流動への影響評価と調査解析手法に関する研究(その3)

姉崎 進*

要 旨

沿岸部および地下深部の地下水流動特性を評価する上で重要な項目として、塩水と淡水の密度差や濃度差によって生じる塩淡水境界が挙げられる。また、塩淡水境界の性状(境界面の形状や塩分濃度分布)を把握することは、地下水の水質を評価する上でも重要である。

本研究は、塩淡水境界による地下水流動への影響の評価と、調査解析手法の構築を目的として、以下の項目について調査・検討を行った。

(1) 地下水流動解析の実施

(2) 現場調査の実施

なお、本研究は、核燃料サイクル開発機構殿と通商産業省工業技術院地質調査所殿との共同研究の一環として実施したものである。

本報告書は、大成建設株式会社が、核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究の成果である。

契約番号:110D0226

サイクル機構担当部課室および担当者:

東濃地科学センター 地層科学研究グループ グループリーダー 武田精悦

*:大成建設株式会社エンジニアリング本部計画グループ

A study on evaluation and analytical methods for groundwater flow
with considering sea/fresh-water boundary (Phase 3)

S.Anezaki*

Abstract

Sea/fresh-water boundary caused by density and concentration balance of sea-water and fresh-water is an important item for groundwater flow evaluation in deep underground near the coast. Also, in order to evaluate groundwater quality, it is important to understand the characteristics of sea/fresh-water boundary, for example boundary shape, salt distribution.

In order to establish the evaluation and analytical methods for groundwater flow with considering sea/fresh-water boundary, we investigated the following items in this study.

- (1) Groundwater simulation for the field measurement site
- (2) Field measurement

This work performed by Taisei Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Geoscience Research Execution Group, Tono Geoscience Center

Seietsu Takeda

*: Taisei Corporation, Engineering Division

目 次

1. 概要.....	1-1
2. 地下水流動解析の実施	2-1
2.1 解析の目的.....	2-1
2.2 解析概要.....	2-2
2.2 基本解析条件	2-3
2.2.1 解析地点の地質状況	2-3
2.3.2 解析領域の設定	2-17
2.3.3 水理地質モデルの作成.....	2-17
2.3.4 解析用物性値	2-17
2.3.5 境界条件・初期条件	2-19
2.4 GEOFLOWS-V2による解析.....	2-20
2.4.1 解析条件	2-20
2.4.2 解析結果.....	2-25
2.5 地下水流動解析のまとめ.....	2-62
3. 現地調査	3-1
3.1 調査概要	3-1
3.2 調査内容	3-2
3.2.1 調査原理	3-2
3.2.2 測定方法	3-4
3.2.3 解析方法	3-16
3.3 調査結果	3-19
3.3.1 測定結果	3-19
3.3.2 解析結果	3-21
3.4 まとめ・考察.....	3-33
3.4.1 電気探査(直流比抵抗二次元探査)のまとめ.....	3-33
3.4.2 塩淡水境界の位置、形状、分布に関する考察	3-34
3.4.3 調査解析手法の適用性および課題等の整理.....	3-43

1. 概要

沿岸部および地下深部の地下水流動特性を評価する上で重要な項目として、塩水と淡水の密度差や濃度差によって生じる塩淡水境界が挙げられる。塩淡水境界は、それ自体が移動することによって、地下深部の地下水の流動方向や流速に影響を及ぼす可能性が考えられる。また、塩淡水境界の性状(境界面の形状や塩分濃度分布)を把握することは、地下水の水質を評価する上でも重要である。

本研究の対象地域として、最も単純な塩淡水境界の存在が予想される千葉県九十九里浜北部の蓮沼海浜公園を選定した。当該地域は、海岸線が平坦なばかりでなく沿岸より内陸に幅 5km の平坦地が続くこと、さらに地質的に見てもほぼ水平に堆積した層状構造を呈する。

1昨年来、解析コードのスクリーニングを実施し、有用性、実用性、精度等に関する検討を実施し、本年度は GEOFLOWS-V2 に焦点を定め解析を実施した。

昨年までに得られた課題を解決し、定常状態までの解析を実施した。さらに海水準変動を考慮した解析を実施し、境界条件の変動による塩淡水境界の変動に関する検討を行った。

さらに、現地での塩淡水境界の位置や形状の把握、さらに、塩淡水境界の位置や形状を把握するための調査試験手法の構築を目的として、深度 200m の既存の試錐孔(3本)を用いて、比抵抗トモグラフィ調査および地表電気探査を実施し地盤の比抵抗分布を把握した。得られた地盤の比抵抗分布に対し、他調査結果を踏まえて、塩淡水境界の位置、形状および分布に関する考察を行った。

なお、本研究は、核燃料サイクル開発機構殿と通商産業省工業技術院地質調査所殿との共同研究の一環として実施したものである。

2. 地下水流動解析の実施

2.1 解析の目的

『塩淡水境界による地下水流動への影響評価と調査解析手法に関する研究(その1)』(以下、塩淡水境界の研究(その1)と略す)では、既存シミュレーターの調査を行ない4つのシミュレーターを選定し、これらを用いて出来る限り条件を統一して鉛直二次元断面のシミュレーションを実施した。塩淡水境界の研究(その2)では、(その1)で用いた4つのシミュレーターから2つを選択し、蓮沼海浜公園に設置した観測井を含む3次元解析を実施した。

1昨年来、解析コードのスクリーニングを実施し、有限要素法と差分法の双方の解析コードのうち有望と考えられる2コード(DTRANS, GEOFLOW-V2)について三次元解析における有用性、実用性、精度等について検討してきた。その中で有限要素法については、計算速度の点で難点があり(特に塩水濃度変化による対流現象が起こる場合)、塩淡水境界の研究(その3)では差分法(GEOFLOW-V2)に焦点を定め、解析を行った。

昨年、GEOFLOW-V2でも塩水が山側に上っていくような現象がみられ、メッシュの変更および涵養水の付与方法について詳細な検討が必要になったことが明らかになってきた。そのような背景の中、今年度は以下の事項を明らかにすることを目的として行なうものとする。

① 新規モデルによる計算の遂行

昨年度のメッシュの再チェック、特に表面勾配、各要素の形状の妥当性を詳細に調査し、モデル由来の問題か解析自体の問題かを明らかにする。明らかにした後、海水準変動に考慮できるメッシュに変更し、定常状態までの解析を行なう。

② 境界条件の変動による塩淡水境界の変動

境界条件の変動については、比較的推定が容易な海水準の変動について考慮する。

③ 解析結果の検証

現在得られている井戸内の塩分濃度との比較検証を行う。

2.2 解析概要

塩淡境界の研究(その3)で実施した解析は、蓮沼海浜公園内の観測井近傍を対象としJR線の西側に存在する台地を含めた広域モデル(幅 6km、長さ 31km、深さ 1km)で3次元解析を行った(図 2.3-14 参照)。今回行った解析の概要は以下の通りである。

① 海水準変動を考慮できるモデルによる計算の遂行

基本的に昨年度の広域モデルと同様のモデルで行うが、海水準変動を考慮できるように、海側に 20km メッシュを追加する。解析結果については、合理的な定常境界が得られるまで行なうこととする。また、解析を行う中で、時間刻みの検討等を行い、なるべく実用的かつある程度精度の高い方法を模索する。塩水濃度の局所的変動による対流等に対しての対処も考慮する。検討項目は以下の通りである。

- 1) 解の安定性、収束性、計算速度
- 2) 塩淡境界付近の地下水流動
- 3) 塩淡境界付近の濃度勾配
- 4) 透水係数(地層)と塩淡境界の関連(移動速度、勾配等)

② 境界条件の変動による塩淡境界の変動

境界条件を変動させて、塩淡境界の変動を調査する。境界が変動する要因としては、海水準の変動を考慮することとした。解析的には最も簡単で、海側の境界条件の変更のみで可能である。変動量としては、海水準下降 100m 海水準上昇 6m を与える。変動速度は、既往の変動速度を参考にし、同等の変動速度を与えた。

③ 解析結果の検証

現在、解析結果を検証できるデータは、井戸内の塩分濃度分布とコアサンプルからの塩分その他の地化学データである。定常解析結果とこれらのデータと良い一致がみられないことも十分考えられる。現状が定常であるや否やについての判断は難しいが、定常解析結果に至るまでの過程や海水準変動に伴う非定常状態との比較を試み、現在の塩分濃度分布についての考察を試み、解析結果を検証する。

④ 輸送時間の算定

深度 1000m からの流線を用いて、地表までの輸送時間を算定し、塩淡境界が輸送時間に及ぼす影響を検討する。

2.2 基本解析条件

2.2.1 解析地点の地質状況

「千葉県蓮沼地区を対象とした既存ボーリングデータ報告書」(JNC殿)より、地質断面線および断面図、各層における地層コンター図を図 2.2-1～ 図 2.2-13に示す。

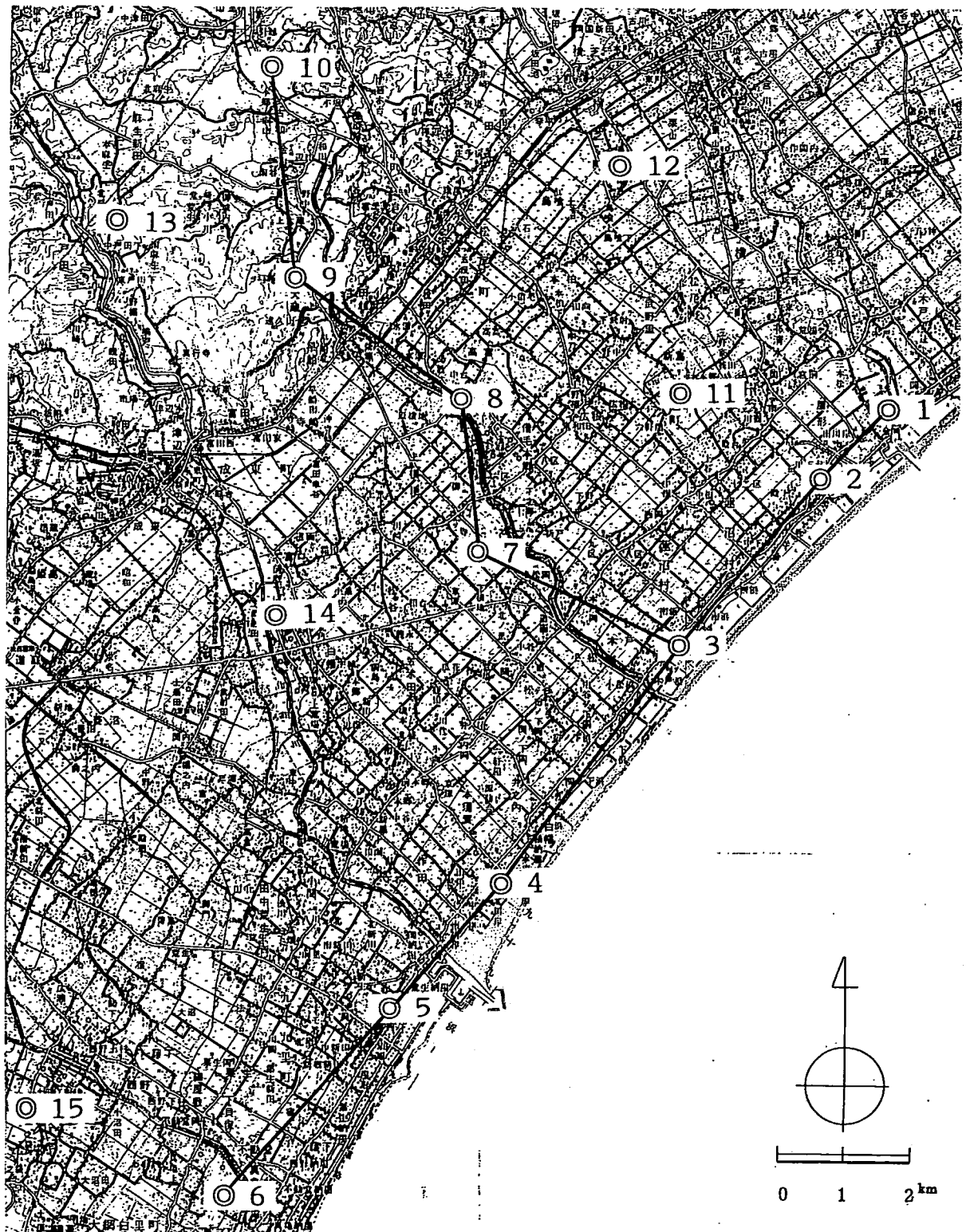


図 2.2-1 地質断面線位置図(広域図)

広域断面図 (No. 1-2-3-4-5-6)

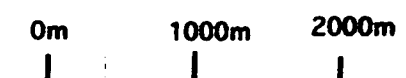
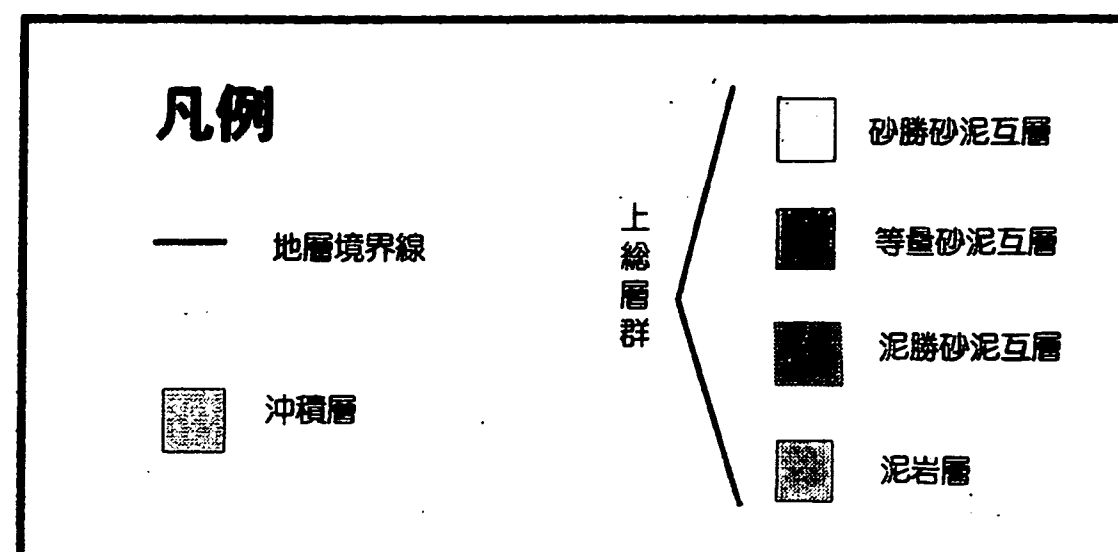
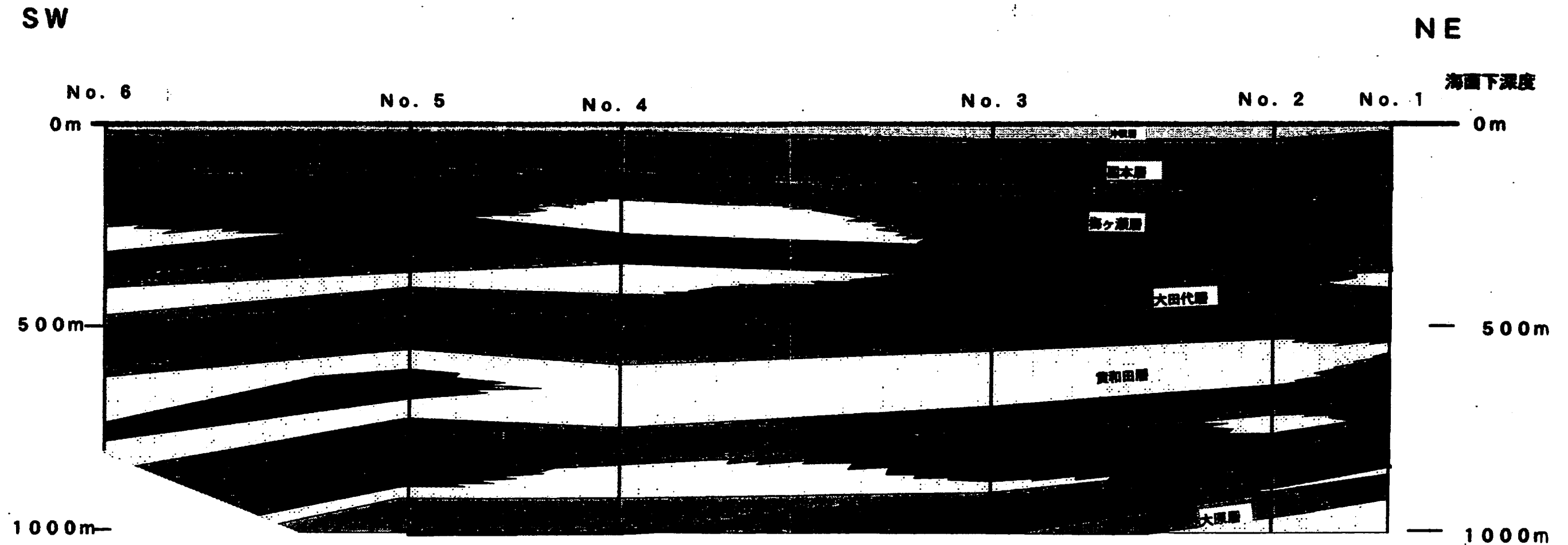


図 2.2-2 広域断面図 (No.1-2-3-4-5-6)

広域断面図 (No. 3-7-8-9-10)

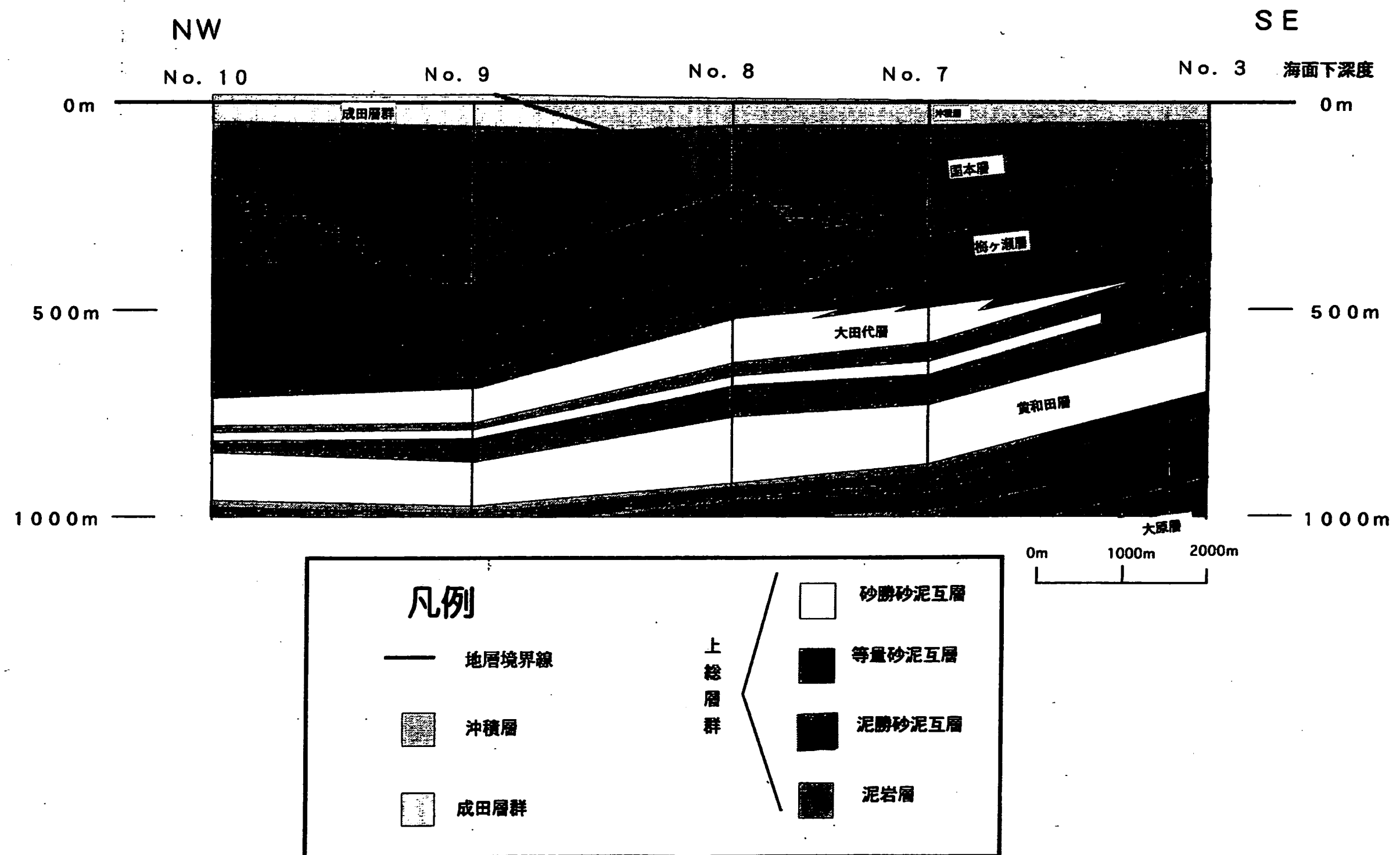


図 2.2-3 広域断面図 (No.3-7-8-9-10)

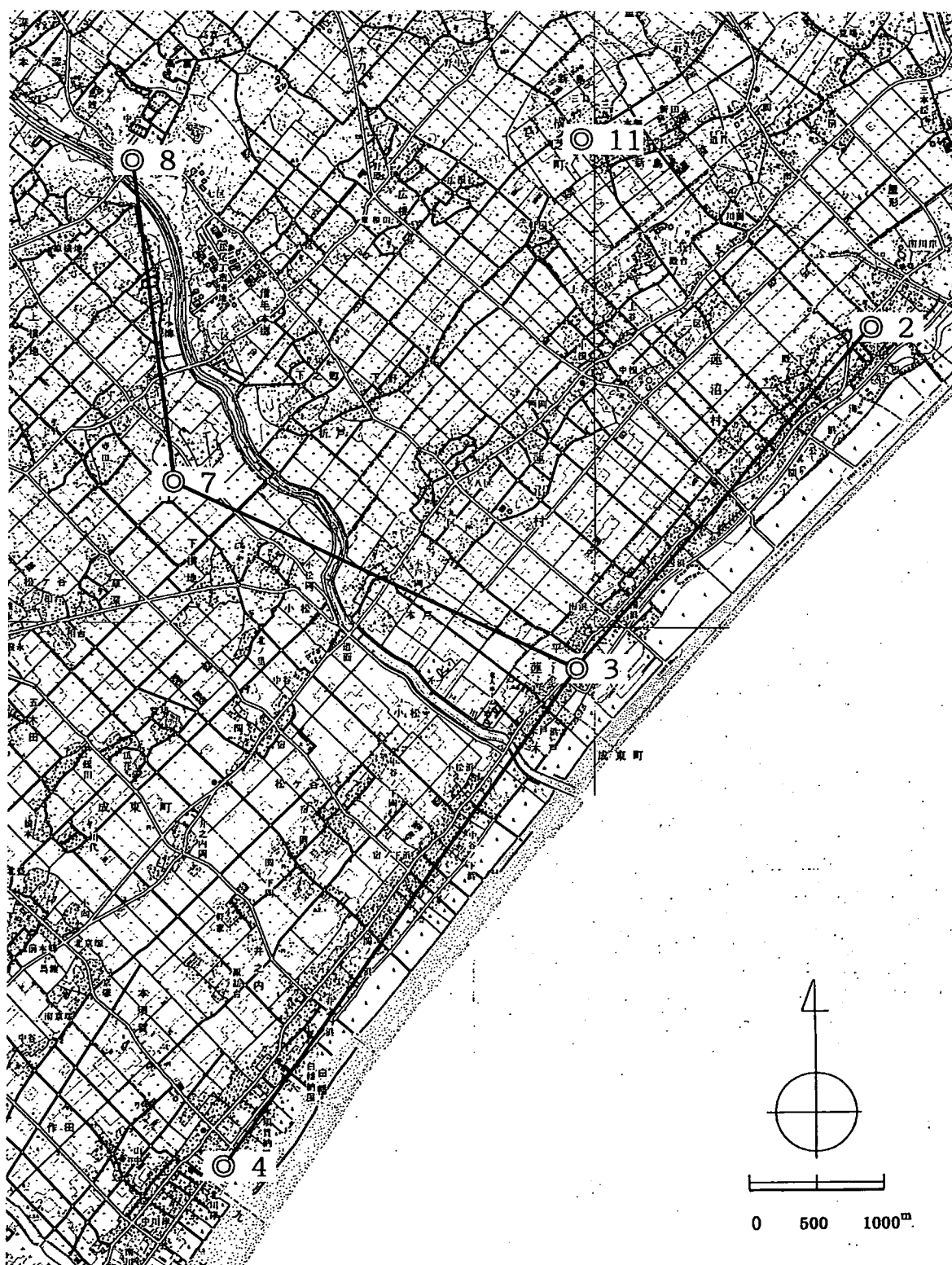


図 2.2-4 地質断面線位置図(詳細図)

詳細断面図 (No. 3-7-8)

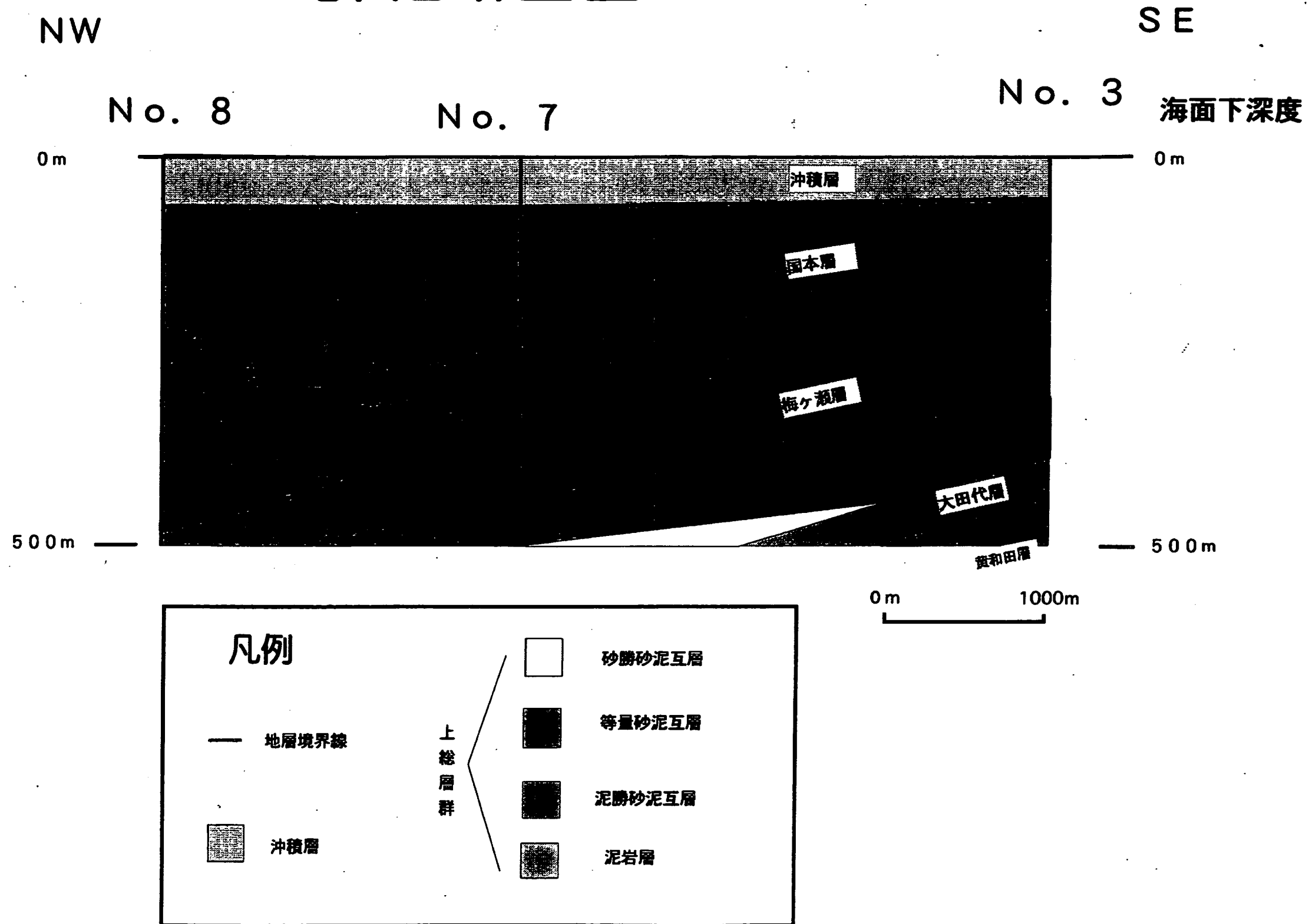
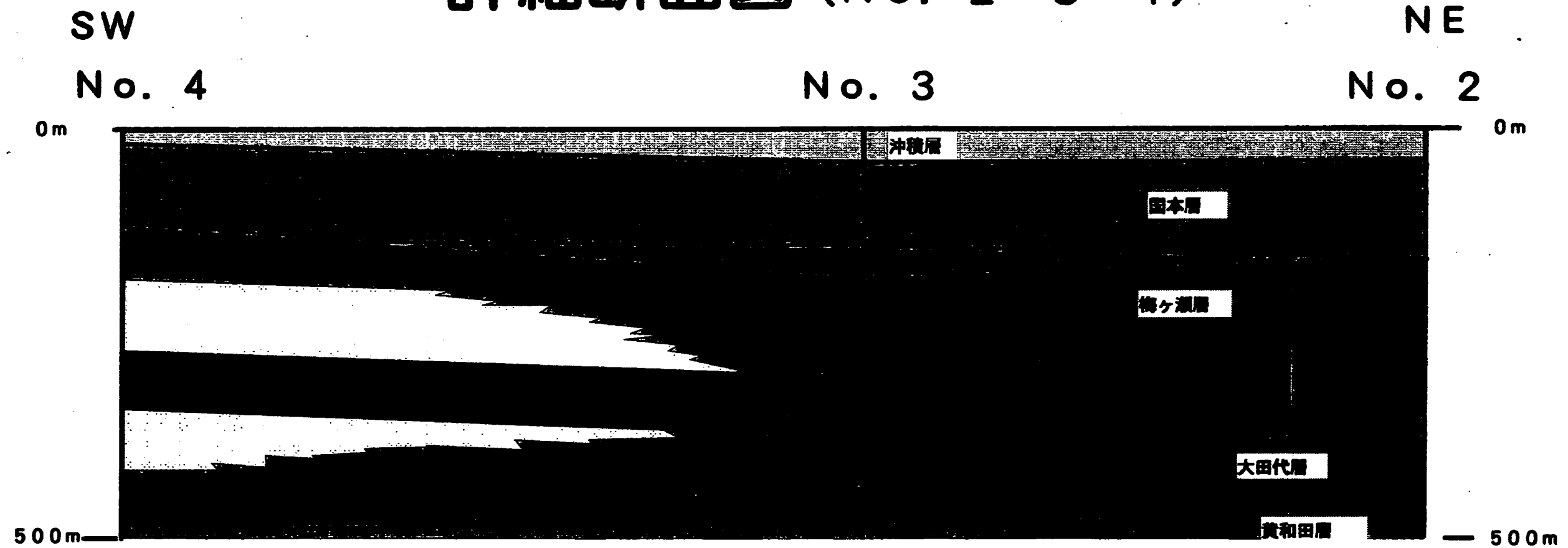


図 2.2-5 詳細断面図 (No.3-7-8)

詳細断面図 (No. 2-3-4)



0 m 1000m

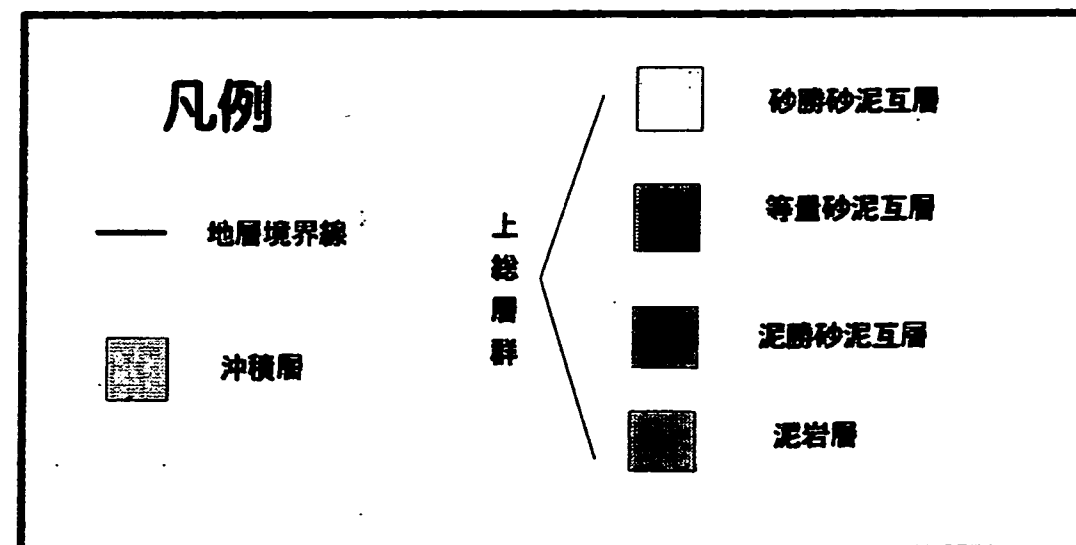
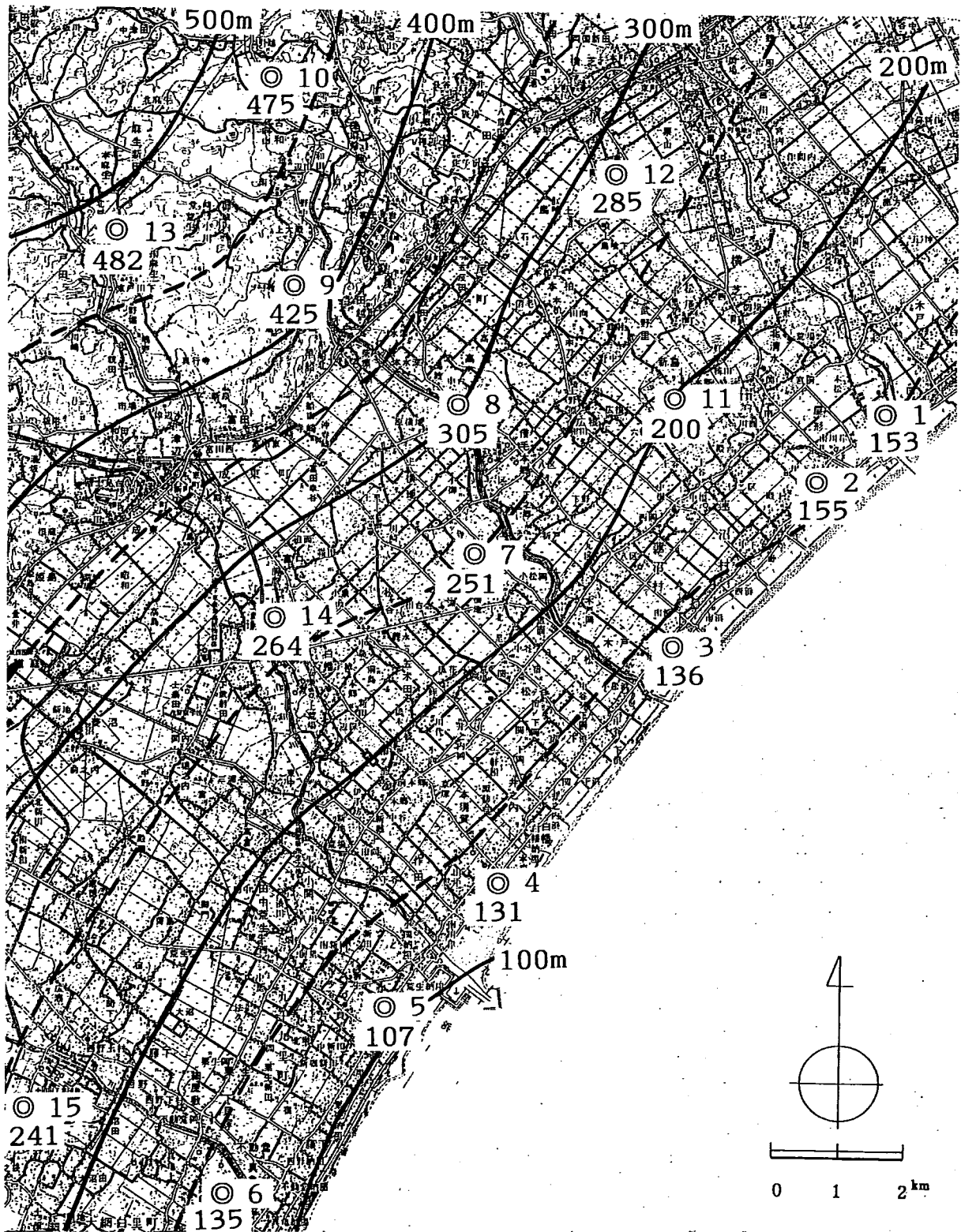
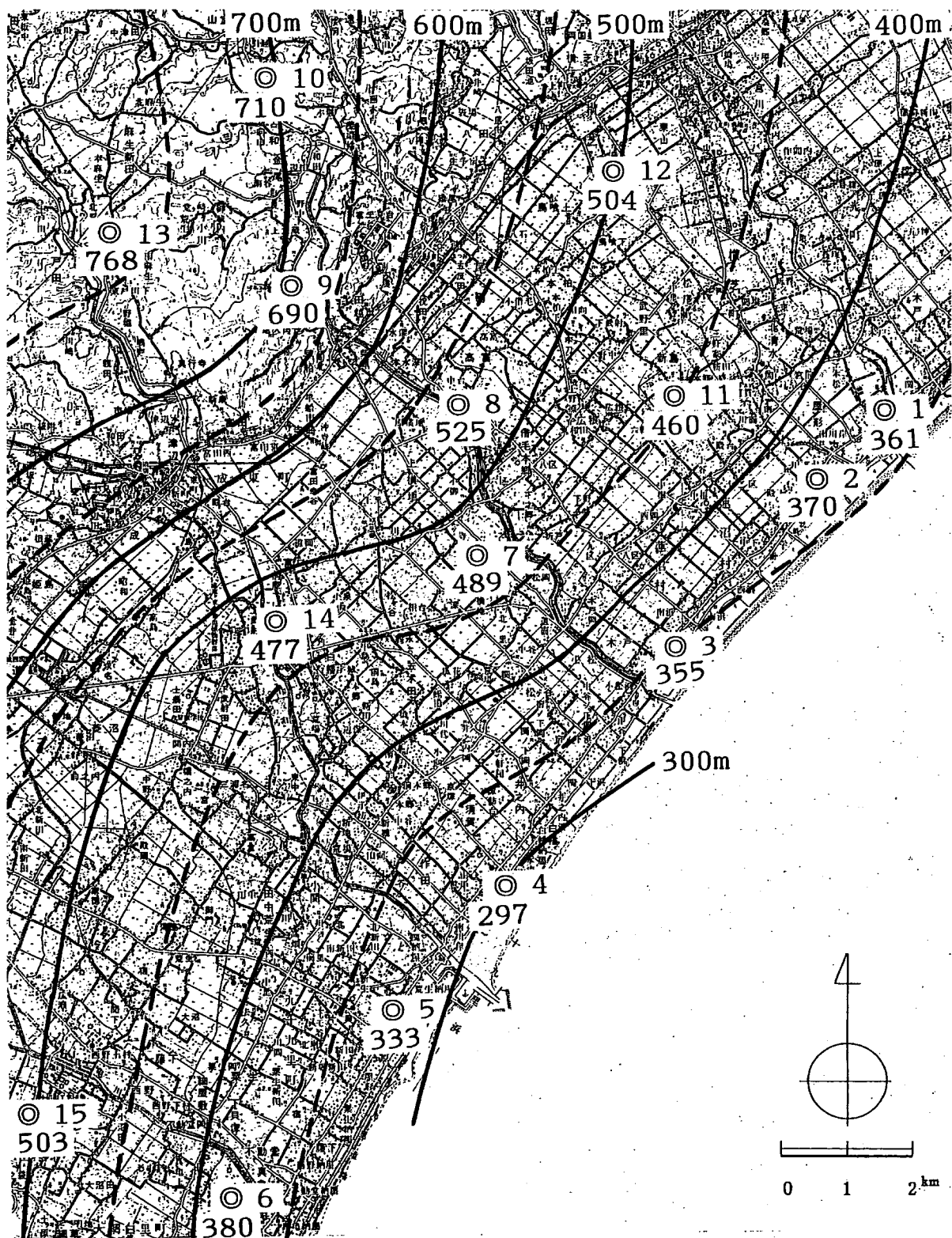


図 2.2-6 詳細断面図 (No.2-3-4)



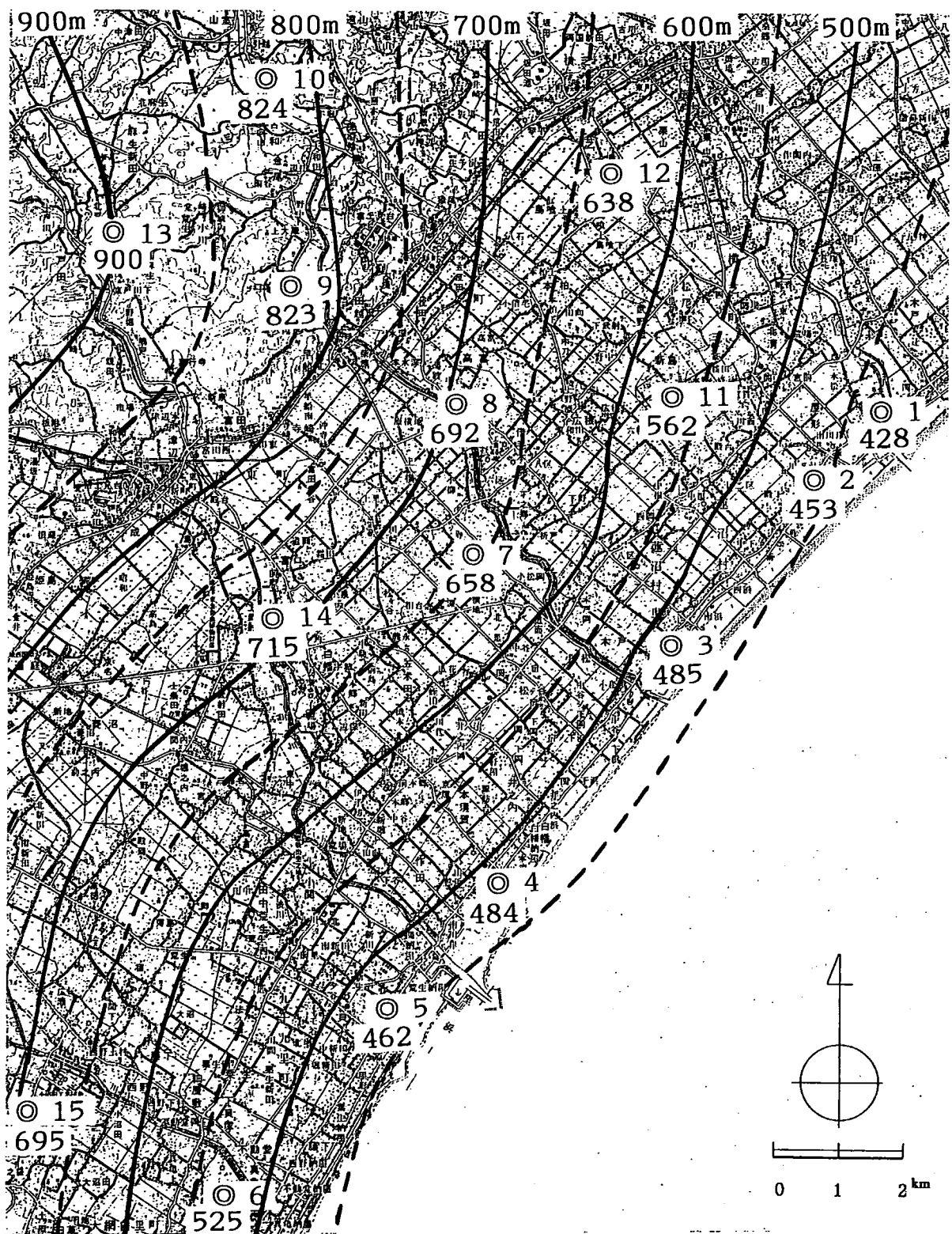
(深度:SL.m)

図 2.2-7 梅ヶ瀬層上限等深度線図(広域図)



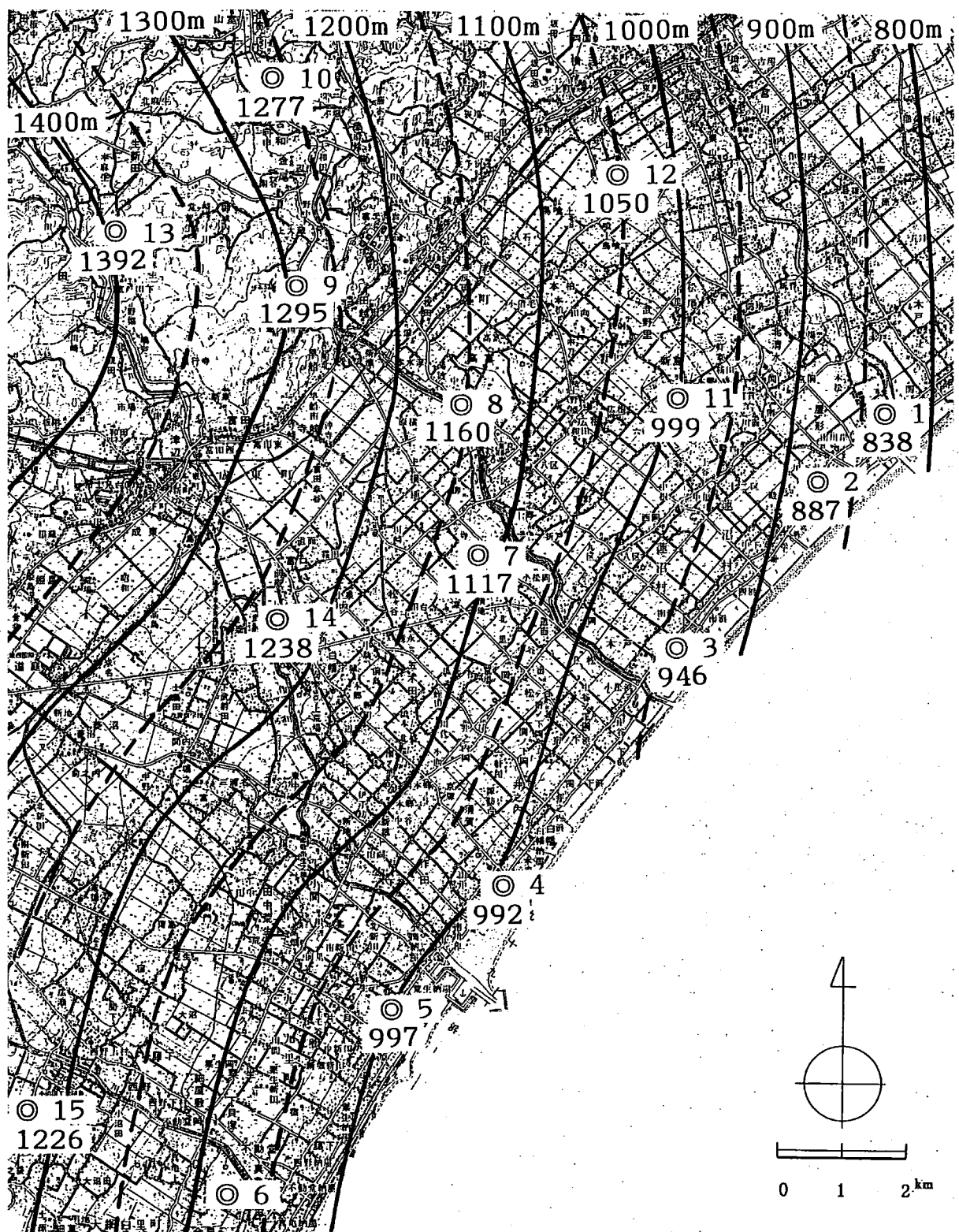
(深度:SL.m)

図 2.2-8 大田代層上限等深度線図(広域図)



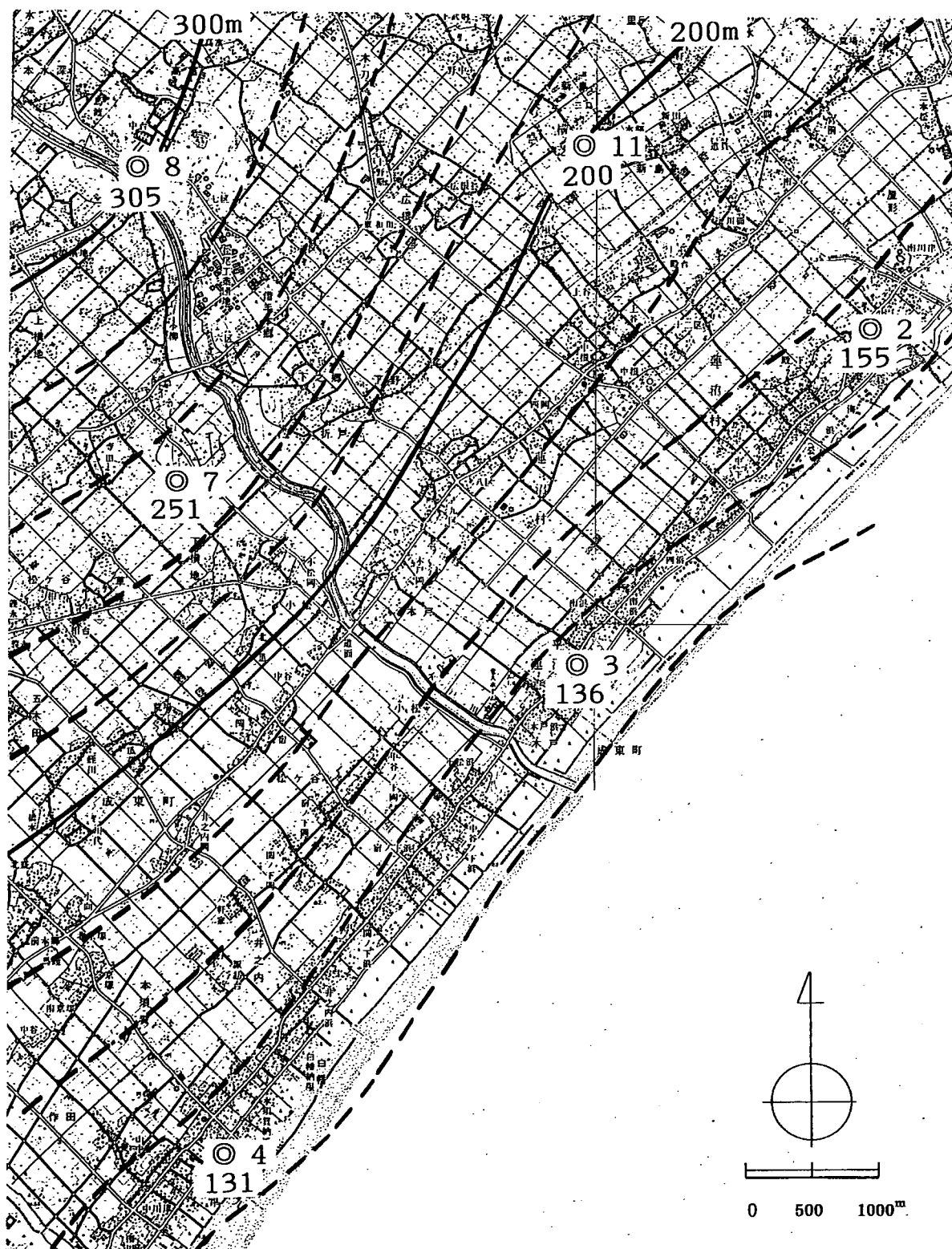
(深度:SL.m)

図 2.2-9 黄和田層上限等深度線図(広域図)



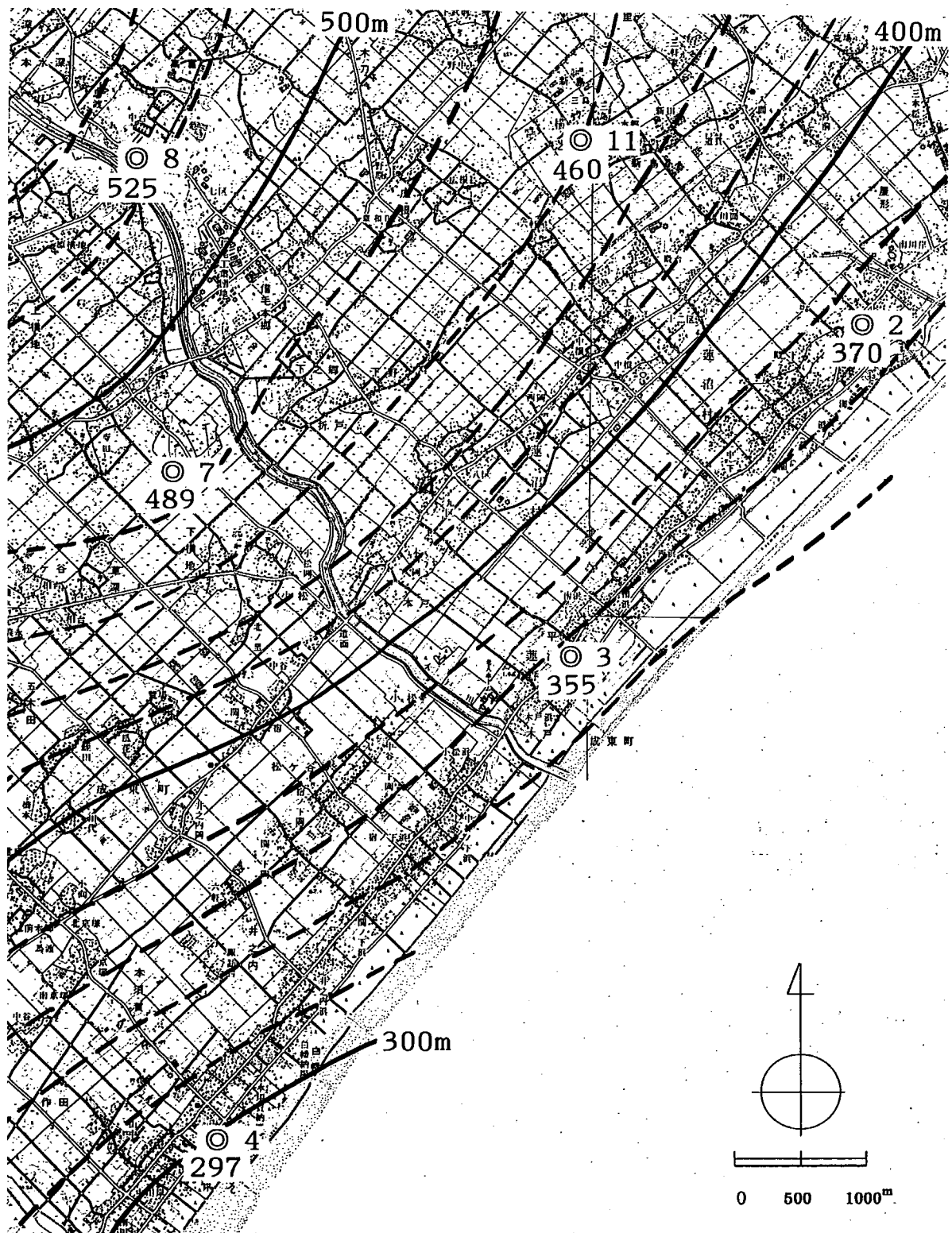
(深度:SL.m)

図 2.2-10 大原層上限等深度線図(広域図)



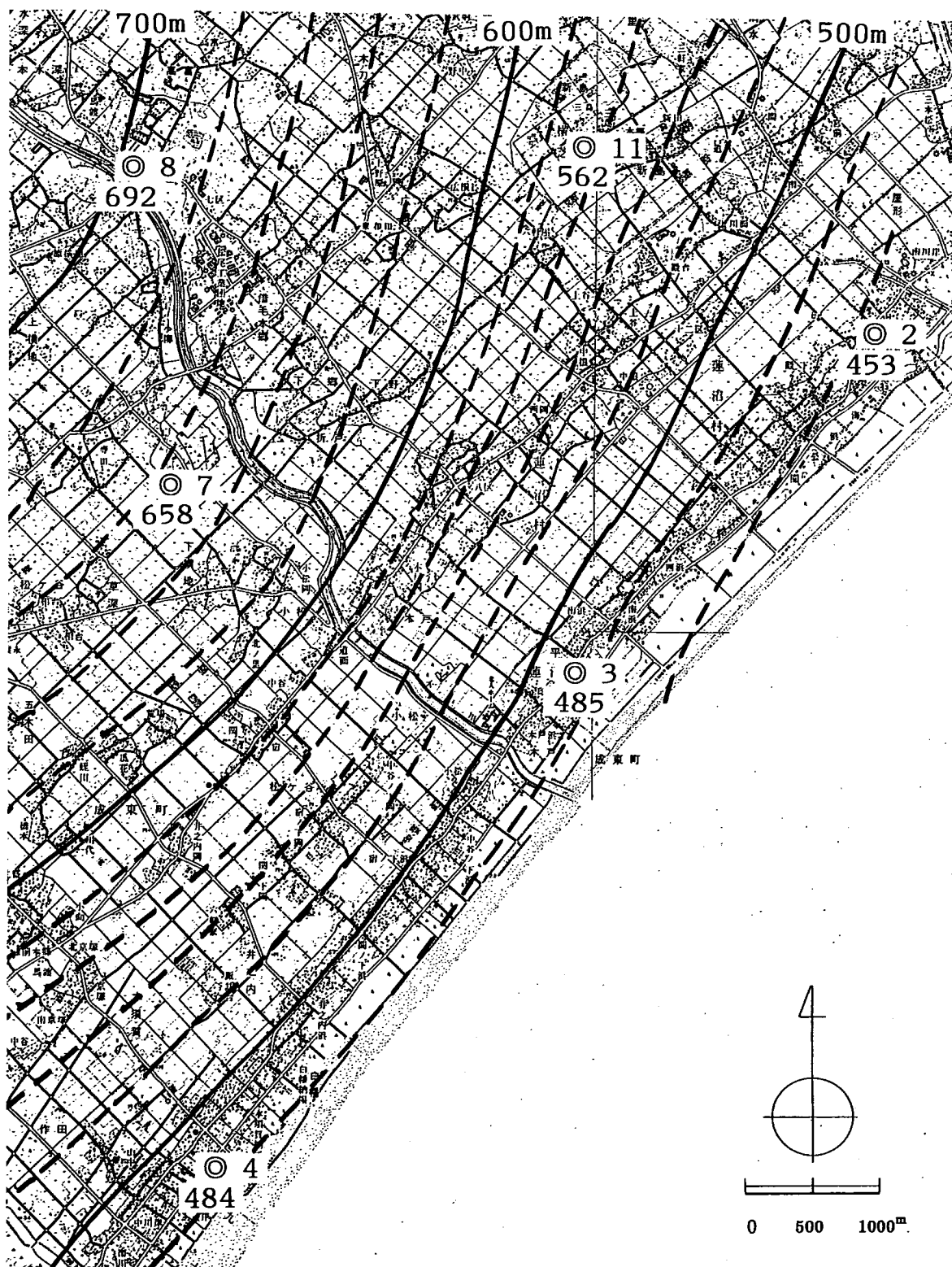
(深度:SL.m)

図 2.2-11 梅ヶ瀬層上限等深度線図(詳細図)



(深度:SL.m)

図 2.2-12 大田代層上限等深度線図(詳細図)



(深度:SL.m)

図 2.2-13 黄和田層上限等深度線図(詳細図)

2.3.2 解析領域の設定

今回用いたモデルは、塩淡水境界の研究(その2)で用いた広域モデルと同様であるが、海水準の変動を考慮するために海岸方向に20km延長した幅6km、長さ31km、深さ1km程度とした。に解析領域の設定範囲図を示す。

2.3.3 水理地質モデルの作成

地層境界は、JNC殿の地層コンターを基に設定する。尚、国本層上面のコンターに関しては、EL-50mで水平に分布しているものと仮定する。また、海底面の勾配は、1/100の一定勾配とする。

2.3.4 解析用物性値

解析用物性値を表 2.3-1に示す。

表 2.3-1 解析用物性値

	透水係数(m/s)	間隙率(%)	有効間隙率(%)	比貯留係数(1/m)
沖積砂層	1.0×10^{-4}	30	27	5.0×10^{-4}
成田層	5.0×10^{-6}	50	45	5.0×10^{-4}
国本層	1.0×10^{-7}	49	43	5.0×10^{-5}
梅ヶ瀬層	7.0×10^{-8}	47	41	5.0×10^{-5}
太田代層	3.0×10^{-8}	43	34	5.0×10^{-5}
黄和田層	1.0×10^{-8}	40	32	5.0×10^{-5}



図 2.2-14 解析領域の設定範囲図

2.3.5 境界条件・初期条件

境界条件 : 表 2.3-2、図 2.3-2.2-15を参照。

初期条件 : 定常に至るまでの時間を短縮するために、現在の水際線を境に
海側は初期塩水、陸側は初期淡水とした。

物性値 : JNC殿のデータを基本とする。

- ・屈曲率 0.5
- ・海水比重 1.025
- ・拡散係数 $1.0\text{E-}9 (\text{m}^2/\text{sec})$
- ・縦方向分散係数 10(m)
- ・横方向分散係数 1(m)

表 2.3-.2 境界条件

境 界	流れの方程式	輸送方程式	備 考
A	不透水境界	濃度フラックス=0	
B	水頭固定境界	濃度フラックス=0	地表のみ固定
C	水頭固定境界	流入：濃度固定=1 流出：濃度フラックス=0	$h = \varepsilon (0.0 - y)$
D	水頭固定境界	濃度固定=1	$h = \varepsilon (0.0 - y)$
E	水頭固定境界	濃度フラックス=0	静水圧分布

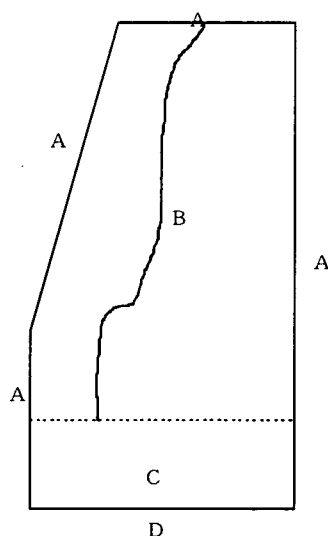


図 2.3-2.2-15 境界条件

2.4 GEOFLOWS－V2による解析

2.4.1 解析条件

(1) 要素分割の設定

解析対象は、図 2.3-14 に示したように、木戸川を中心にして内陸に約 9 km 入った段丘まで、および海側へ 22 km 張り出した幅約 6km 程度の領域であり、面積的には約 180km²である。この領域を $120 \times 41 \times 25 = 123000$ の格子に分割した。

図 2.4-1(a)、(b)に断面分割図および鳥瞰図を示す。

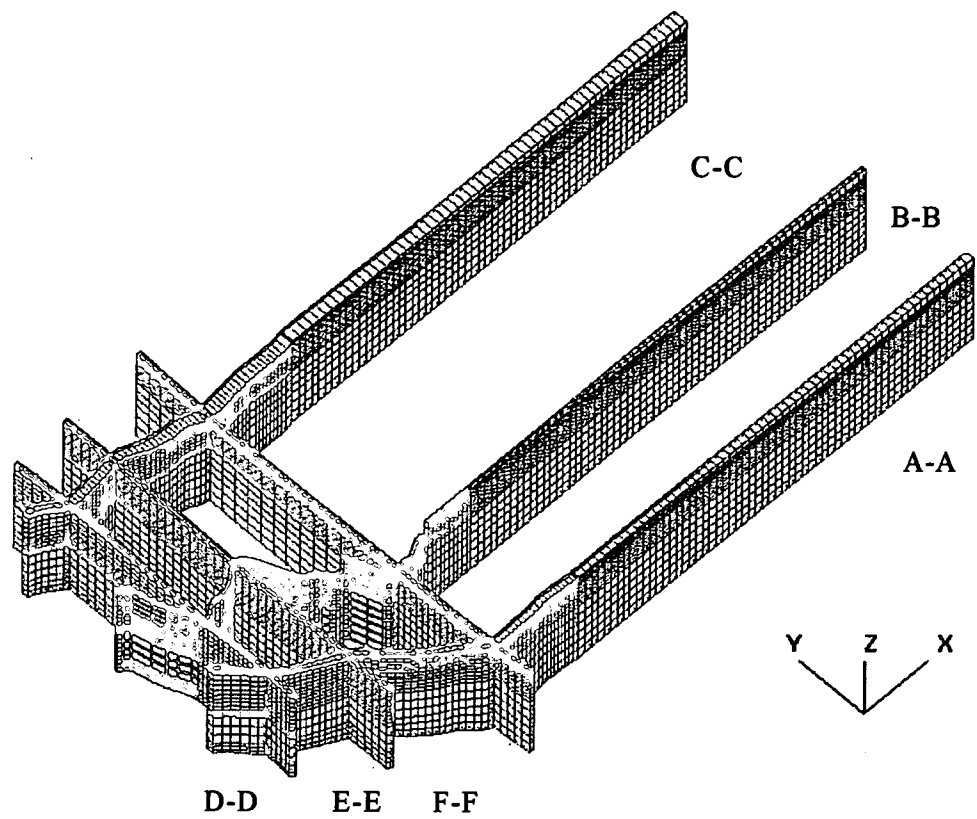
縦方向の分割は、第1層(大気層)、第2層(地表・河川格子)、第3層(沖積層)、第4層～8層(成田層)、第9層～12層(国本層)、第13層～16層(梅ヶ瀬層)、第17層～19層(太田代層)、第20～22層(黄和田層)、第23～25層(低浸透率層)とした。地層境界(国本、梅ヶ瀬、太田代、黄和田)は各地層構造図から、地表地形は地形図をデジタイズして入力した。平面的な格子分割は、弾性バネネットワークモデル(登坂他、1998)により作成した。

(2) 解析用物性値の設定

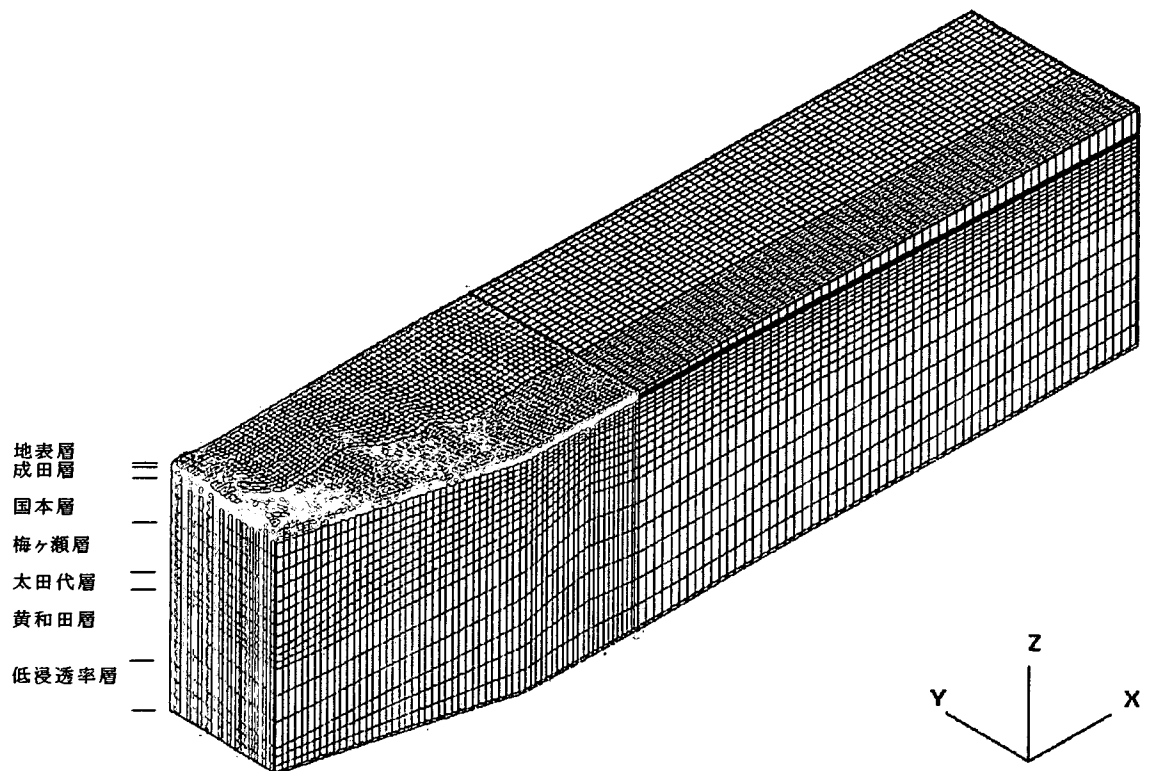
解析のために与えた物性(浸透率、間隙率)は表 2.3-1 に示した。濃度による渦の影響をみるために、均質モデルとしてすべての層の物性を成田層と同一にしたモデルでも解析を行った。地表に関しては、マンニングの粗度係数を河川部 0.05、段丘部 10.0、低地部 1.0 として与えた。

また、相対浸透率、毛管圧力については、一般的と考えられる

図 2.4-2 に示したものを使用した。岩に対する信頼性の高い不飽和物性はほとんど得られていないため、岩相別に異なる曲線は設定しなかった。しかし、今回の計算においては、強制的に所定の降雨量を地層第一層(表層)に入れているため、不飽和特性が結果には影響をほとんど与えていない。



(a) 断面図



(b) 鳥瞰図

図 2.4-1 解析モデル三次元格子分割図

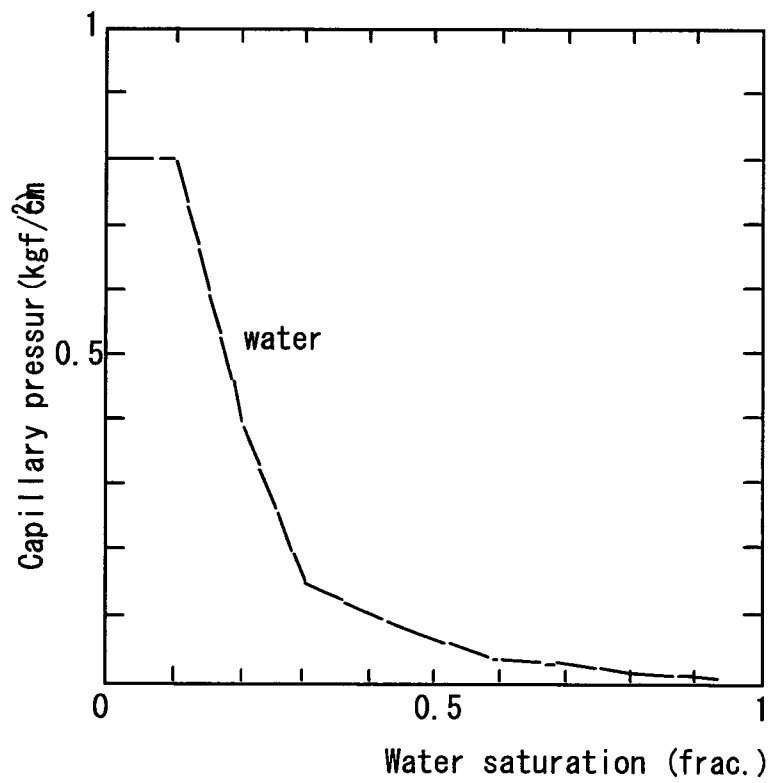
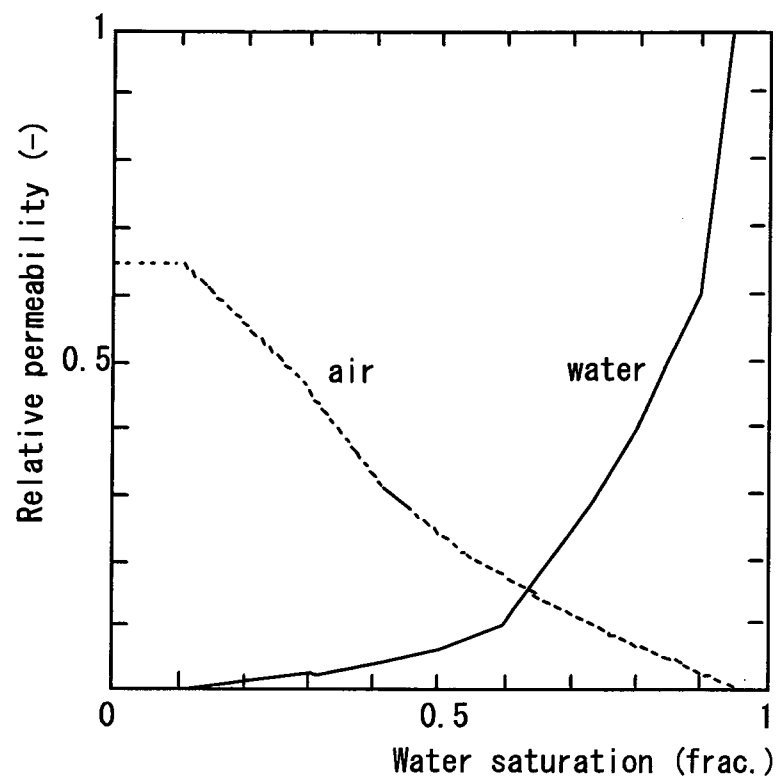


図 2.4-2 相対浸透率および毛管圧力曲線

(3) 降雨量の設定

GEOFLOWS-V2は、地表流・河川流等のマニング型流れを多孔質体の多相ダルシー流れと同形式に変換することにより、両者を同時に解くことができる。従って、年間降雨量に匹敵した量の雨を降らせることにより、降雨による地下水涵養を考慮することができる。本検討では、降雨量を5mm/日とした場合と2mm/日とした場合の2ケースを行った。GEOFLOW-V2では、地表要素に降雨を与えると、降雨は地表に注がれ、地表・河川流となり海に注ぐ部分と地下浸透する部分に物理的に分けられる。しかし、地表流を扱った場合、演算速度が遅くなるため、今回は降雨を地表要素に入れずに、地盤第1層(表層)に入れて行った場合を主体とした。

(4) 境界条件初期条件の変更点

海側境界:常に海水が満ちており、一定圧力にあるものとした。

陸側境界:閉境界とした。

側方境界:閉境界とした。

下部境界:地下最下部は不透水境界(閉境界)とした。

地表境界:地表は大気圧とし、降雨が注入され、地表流・河川流・地下浸透が起こる場としてモデル化もできる。その場合、段丘部では降雨が速やかに浸透し、地下水位が上昇するように設定し、低地部では河川部においてはマニング係数を0.05とし、地表面は1.0として流れやすくした。しかし、演算速度の関係上、前述したように降雨を地盤第1層に入れ、余剰の浸透水(地表にでてくる地下水)については、地表要素に蓄えられるようにした。その場合地表要素の間隙率を無限大にし、地表要素の水位が上がらないようにした。

初期条件:陸側では全ての地層を淡水とし、地下水位は+1.5mにあるものとして、圧力、飽和率、濃度を設定した。海側では全ての地層が海水とし、海水密度に応じた静水圧分布を与え、圧力、飽和率、濃度を初期化した。

海進・海退解析条件:GEOFLOW-V2では、簡単に海水準変動の解析ができるように、海水準の変動パラメーターを装備しており、このパラメータにより、自動的に海水準変動に必要な境界条件の変動が行われる。今回の海進・海退解析においては、図2.4-3に示す既往の海水準変動を模擬して図2.4-4のように設定した。

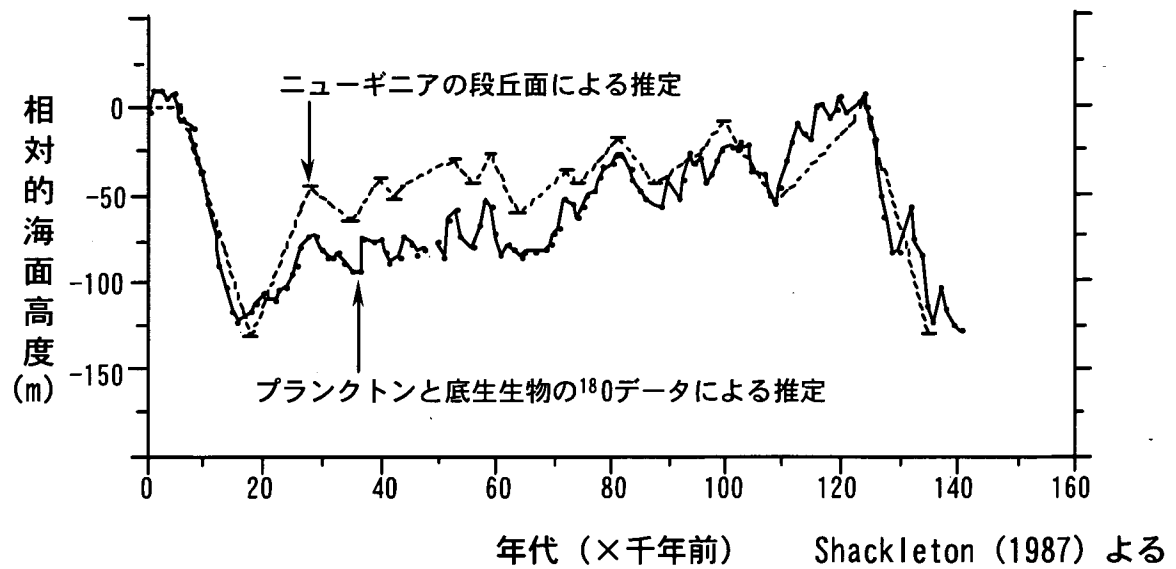


図 2.4-3 過去 13 万年間の氷河性海面変化曲線

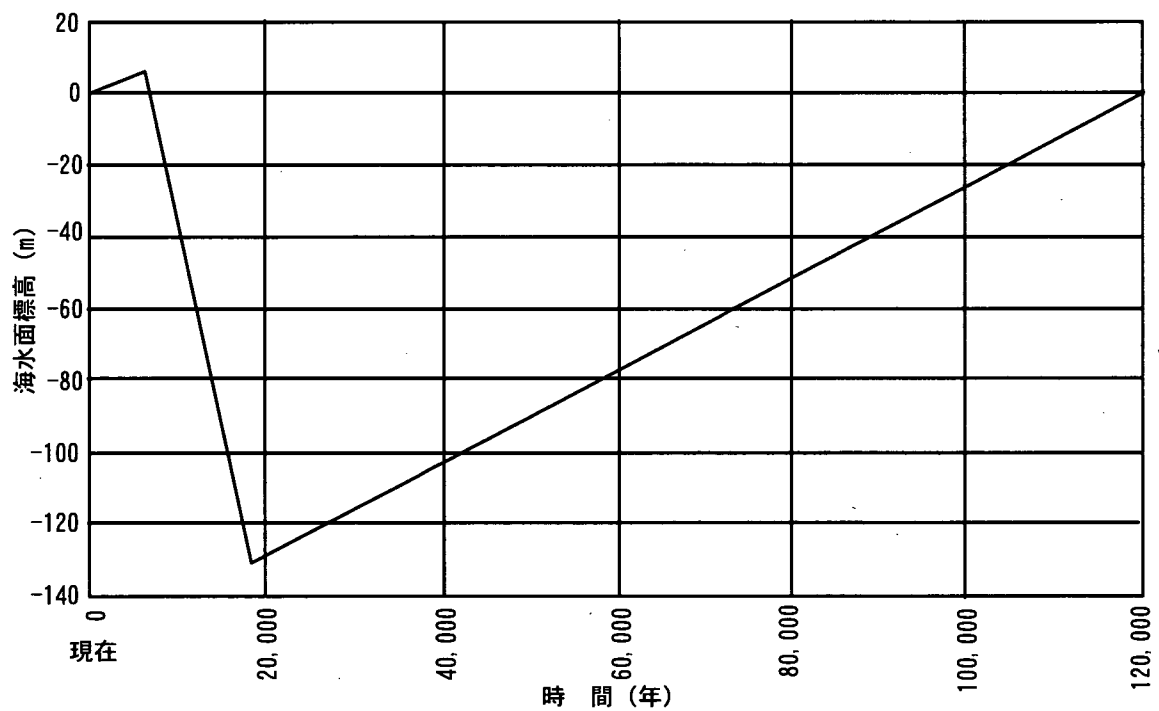


図 2.4-4 海水準変動の設定

(5) 解析ケース

解析ケースは物性値、降雨量、投入層、解析の種類の影響をみるために、以下の6ケースとした。

表 2.4-1 解析ケース

解析ケース	物性値	降雨量	降雨投入層	解析の種類
Case-0	均質媒体	2mm/day	表層	初期～定常
Case-1	基本ケース	5mm/day	表層	初期～定常
Case-2	基本ケース	5mm/day	地表	初期～定常
Case-3	基本ケース	2mm/day	表層	初期～定常
Case-4	基本ケース	2mm/day	表層	海退
Case-5	基本ケース	2mm/day	表層	海進

2.4.2 解析結果

本解析は以下の計算環境で行った。

- ・計算機 : VT-Alpha 600U (CPU は Alpha 21164、600MHZ)
- ・O S : DIGITAL UNIX
- ・実行形式: FORTRAN77 最高レベルのオブティマイズ
- ・プログラムサイズ(記憶域): 約 325MB

計算時間ステップの長さは最小 0.01 日(計算開始時点)から最大 400 年(落ち着いた時期)をとり計算を行った。1ステップあたりの計算時間は収斂状況に依存し、1分から6分程度の範囲で変動する。

(1) 定常時の塩分濃度分布図

Case-0, Case-1 および Case-3 の定常時の塩分濃度分布図を図 2.4-5～図 2.4-7 に示した。定常状態の塩分濃度分布は均質媒体の Case-0 の方が濃度差による渦が生じないために、円滑な濃度分布となっており、Case-1 および Case-3 では、湧昇流による不均一な濃度分布が生ずることがわかる。Case-0 の河川部に濃度の上昇が見られるのは、地表要素の間隙率を 1 にして、ためであり、Case-1 および Case-3 では地表要素の間隙率を無限大に設定しているため、河川に塩分濃度の溯上はみられない。なお、塩分濃度は 1.425×10^{-2} が飽和濃度であり、鉛直方向の縮尺は 5 倍に表示している。

塩淡水境界解析
汚染相濃度

step = 1
time = 5.94409E+07
162851.78 year
vmax = 1.425E-02
vmin = 0.000E+00

imin,imax = 1 60
jmin,jmax = 1 41
kmin,kmax = 3 25

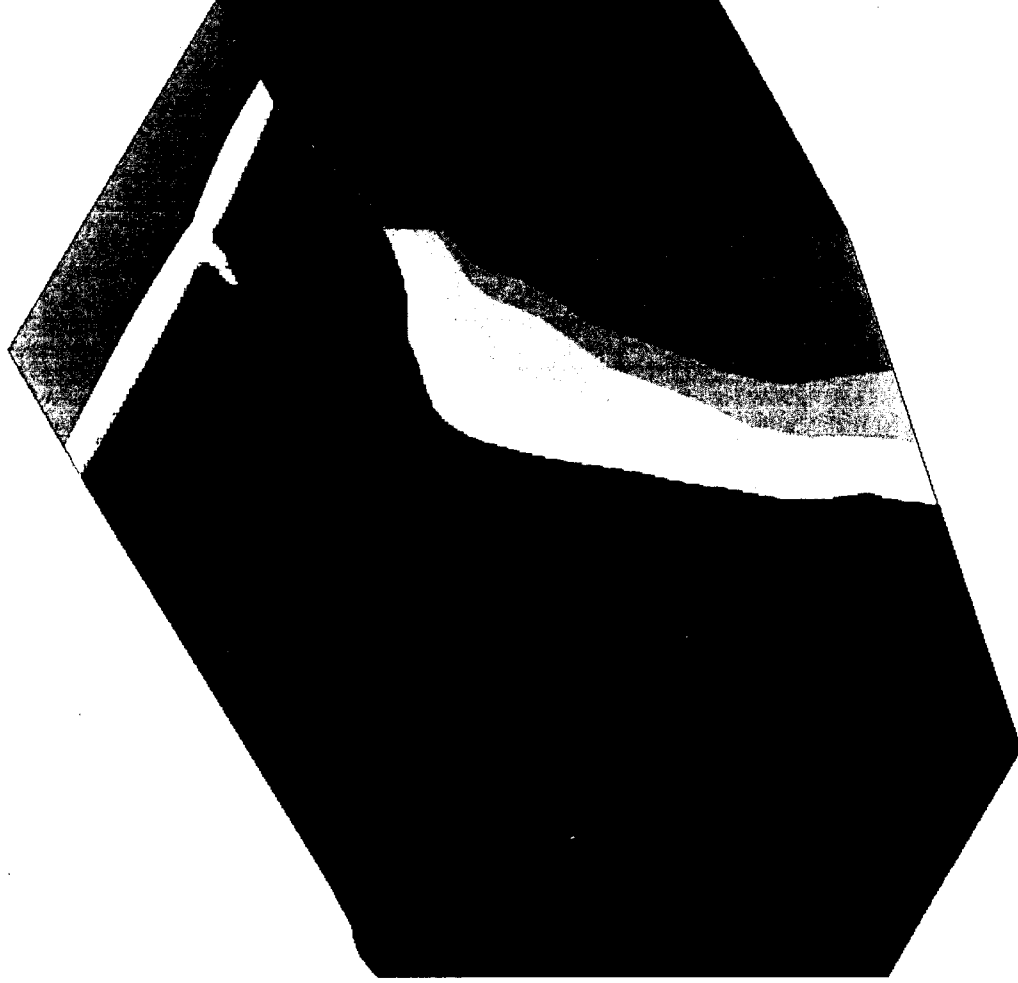
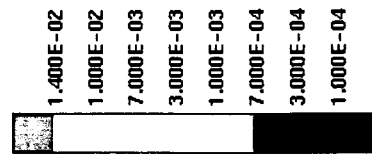


図 2.4-5 定常時塩分濃度分布 (Case-0)

塩淡水境界解析
汚染相濃度

step = 1
time = 2.87620E+08
788000.00 year
vmax = 1.425E-02
vmin = 0.000E+00

imin,imax = 1 60
jmin,jmax = 1 41
kmin,kmax = 3 25

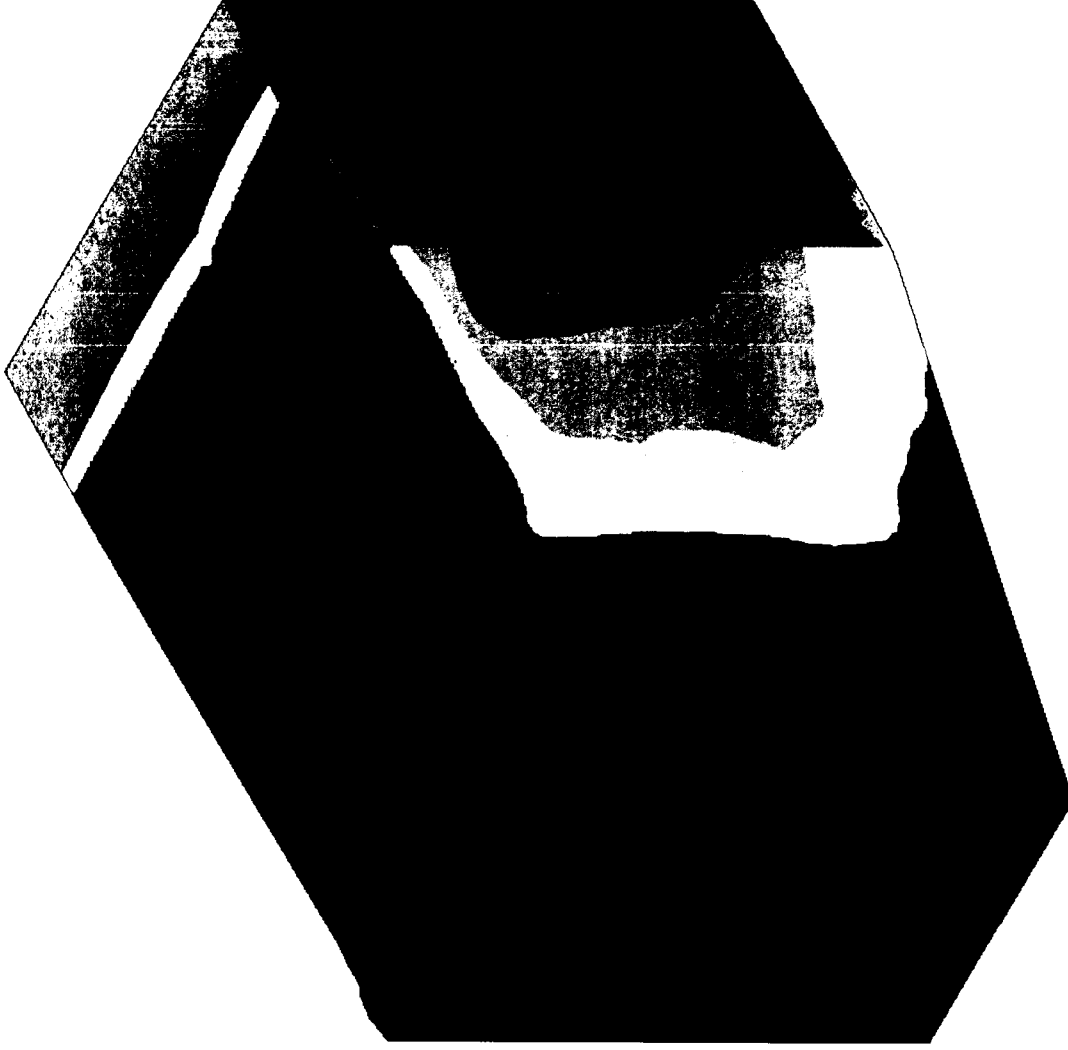
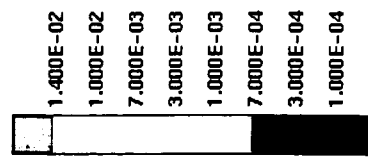


図 2.4-6 定常時塩分濃度分布 (Case-1)

盐淡境界解析
污染相浓度

step = 1
time = 4.01851E+08
1100961.62 year
vmax = 1.425E-02
vmin = 0.000E+00
lmin,imax = 1 60
jmin,jmax = 1 41
kmin,kmax = 3 25

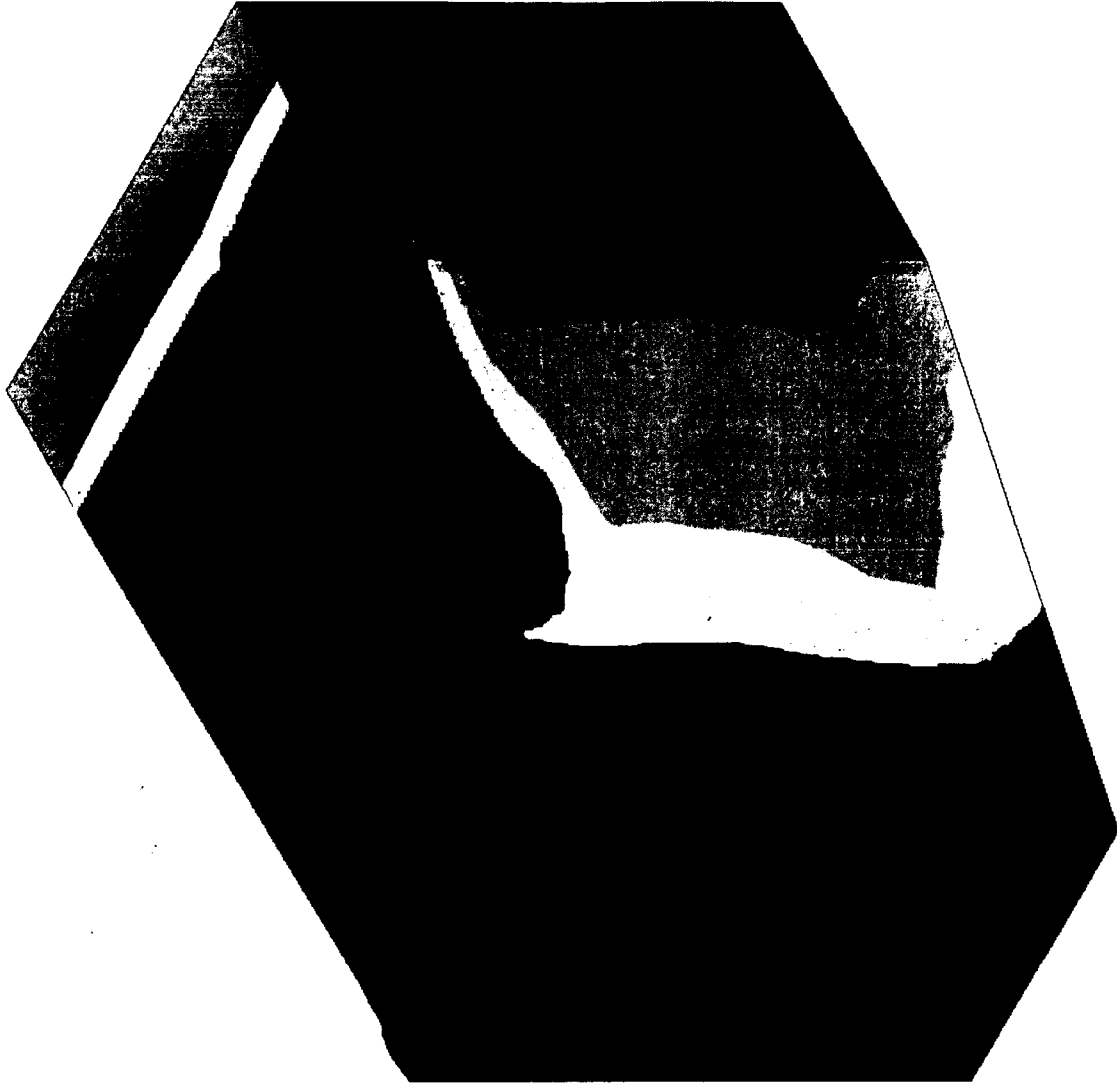
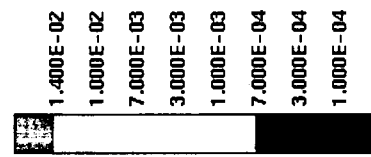


图 2.4-7 定常时盐分浓度分布 (Case-3)

(2) 定常時流速ベクトル図

Case-0, Case-1 および Case-3 の定常時の流動ベクトル図 (A-A 断面) と流速ベクトル図と塩分濃度を重ねた図を図 2.4-8～図 2.4-13 に示した。流速ベクトル図は、 $1 \times 10^{-9} \text{cm/day}$ を 1 とした対数表示であり、色は実流速を表し、矢印の長さは描画面に投影した長さを示す。したがって、実際の長さに比較して、青色の部分の流速は極端に小さい。

いずれのケースも山岳部から浸潤した地下水の段丘面への浸出と水際付近の塩水浸入に伴う水循環が支配的である。また、当然ではあるが、濃度分布の円滑でない部分は地下水流動によって、よく説明できる。山岳部によって涵養された地下水が深部までの大きな循環の要因であるため、塩水浸入は下部で進まない結果となった。

Case-1 と Case-3 では、水際線から 1km ほど内陸に入った箇所の湧昇流が、Case-0 に比較して特徴的であるが、これは下部ほど透水係数が低い媒体のためと考えられる。

定常状態の解析結果は、かなり鉛直流が卓越している。今回の解析では、鉛直方向と水平方向の透水係数は同等に設定しているためと考えられ、鉛直方向の透水係数を低下させることにより、深部までの大きな循環系は比較的小さな循環系になって、いくのではないかと考えられる。

Case-3 の場合の河川 (木戸川) に沿って切った断面 (B-B 断面) の流速ベクトル・塩分濃度図を図 2.4-14 に示した。河川は周囲の地形より低いために、地下水が集まっているが、現地の地下水位が GL-3.2m 付近であることから考えても妥当な結果と考えられる。しかし、今後、実際の水文観測結果との比較を行い、モデルの妥当性を上げていく必要があると思われる。

Case-3 の C-C 断面の流速ベクトル・塩分濃度図を図 2.4-15 に示した。段丘面と沖積低地との境界付近で渦が見られることと、その付近の下降流が A-A 断面との大きな違いである。

Case-3 の横断方向断面図 (D-D 断面、E-E 断面、F-F 断面) を図 2.4-16～図 2.4-18 に示した。河川への流出と比較的高地からの水涵養が大きな駆動力となっていることと、そのために複雑な流況になっていることがわかる。

塩淡水境界解析
流速ベクトル 1

step = 1
time = 5.94409E+07
162851.78 year
vmax = 2.284E-02
vmin = 6.730E-05

imin,imax = 1 60
jmin,jmax = 6 6
kmin,kmax = 3 25

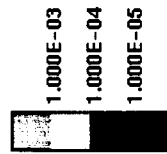
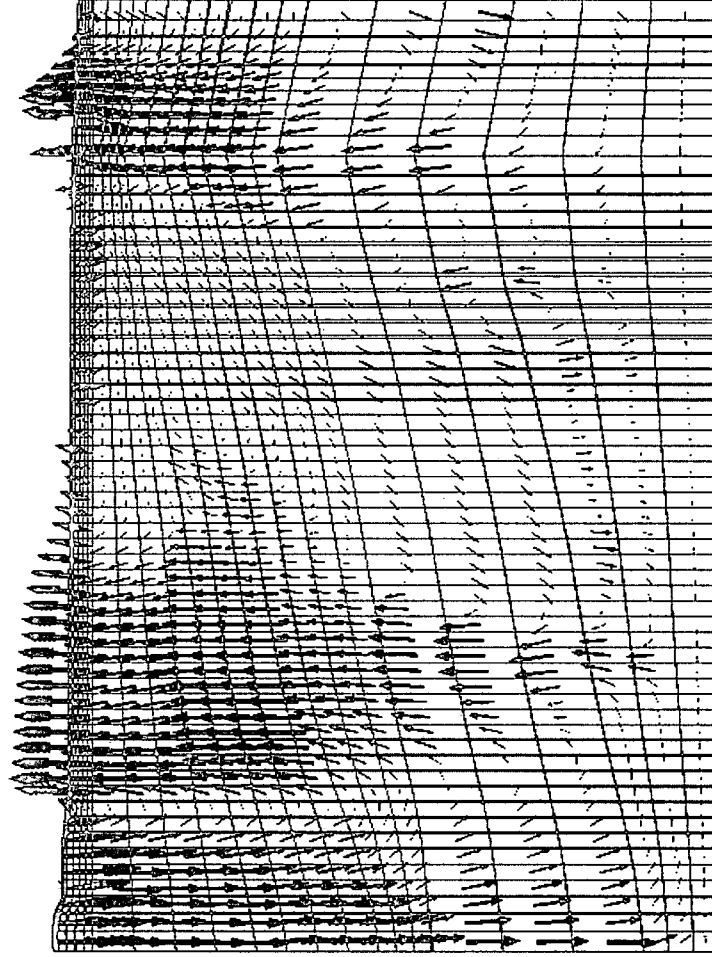


図 2.4-8 流速ベクトル図 (Case-0, A-A 断面)

塩淡水境界解析
汚染相濃度

step = 1
time = 5.94409E+07
162851.78 year
vmax = 1.425E-02
vmin = 0.000E+00

imin,imax = 1 60
jmin,jmax = 6 6
kmin,kmax = 3 25

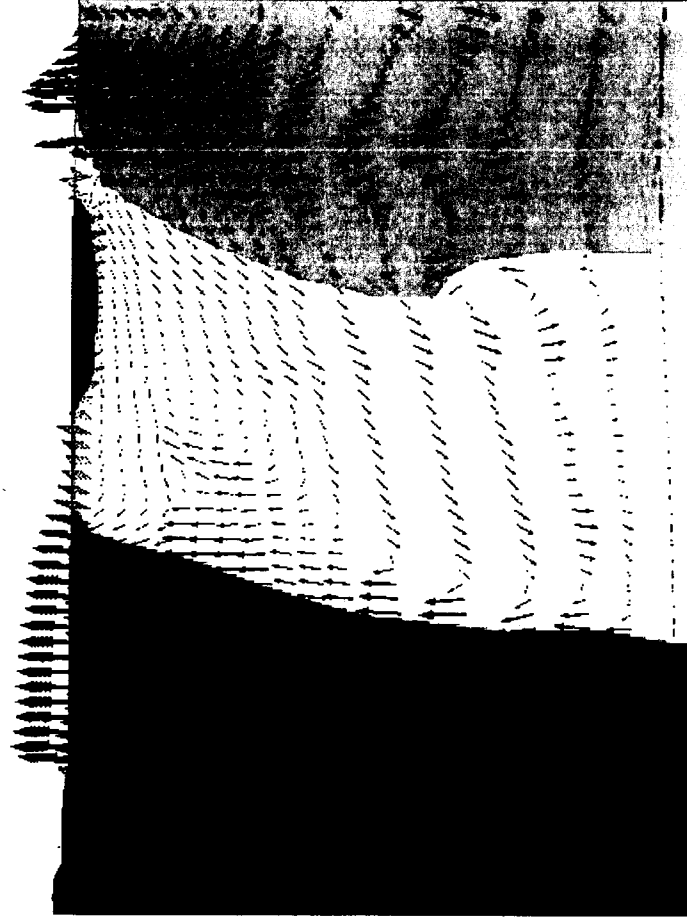
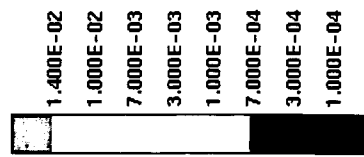


図 2.4-9 流速ベクトル・塩分濃度分布図 (Case-0, A-A 断面)

塩淡水境界解析
流速ベクトル1

step = 1
time = 2.87620E+08
788000.00 year
vmax = 2.794E-02
vmin = 1.696E-07

imin,imax = 1 60
jmin,jmax = 6 6
kmin,kmax = 3 25

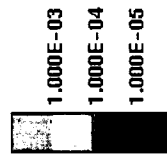
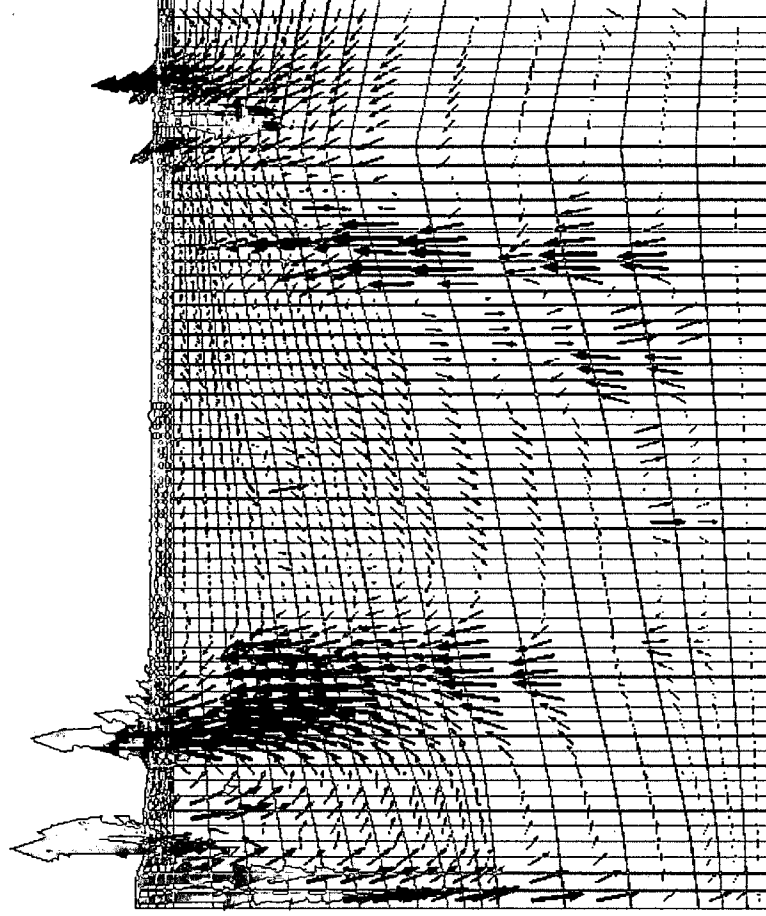


図 2.4-10 流速ベクトル図 (Case-1,A-A 断面)

塩境界解析
汚染相濃度

step = 1
time = 2.87620E+08
788000.00 year
vmax = 1.425E-02
vmin = 0.000E+00

imin,imax = 1 60
jmin,jmax = 6 6
kmin,kmax = 3 25

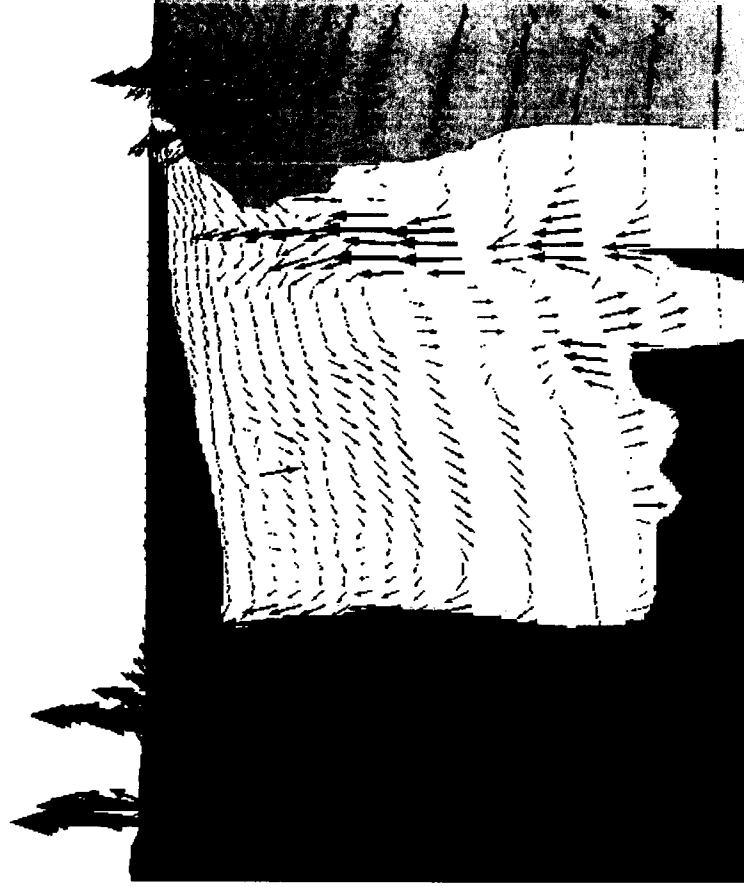
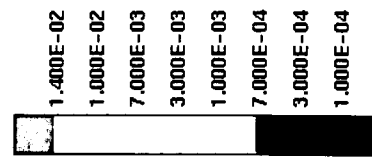


図 2.4-11 流速ベクトル・塩分濃度分布図 (Case-1, A-A 断面)

塩淡水境界解析
流速ベクトル1

step = 1
time = 4.01851E+08
1100961.62 year
vmax = 2.093E-02
vmin = 8.801E-08

imin,imax = 1 60
jmin,jmax = 6 6
kmin,kmax = 3 25

sx = 1.000
sy = 1.000
sz = 5.000

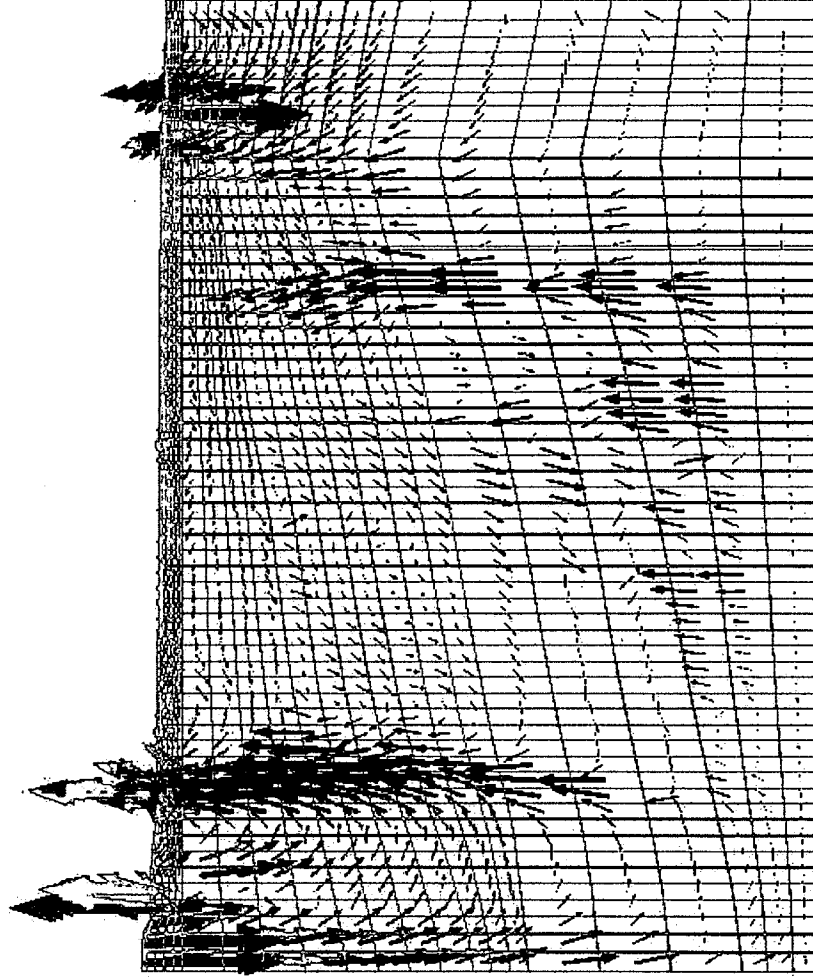


図 2.4-12 流速ベクトル図 (Case-3, A-A 断面)

塩淡水境界解析
汚染相濃度

step = 1
time = 4.01851E+08
1100961.62 year
vmax = 1.425E-02
vmin = 0.000E+00

imin,imax = 1 60
jmin,jmax = 6 6
kmin,kmax = 3 25



図 2.4-13 流速ベクトル・塩分濃度分布図 (Case-3,A-A 断面)

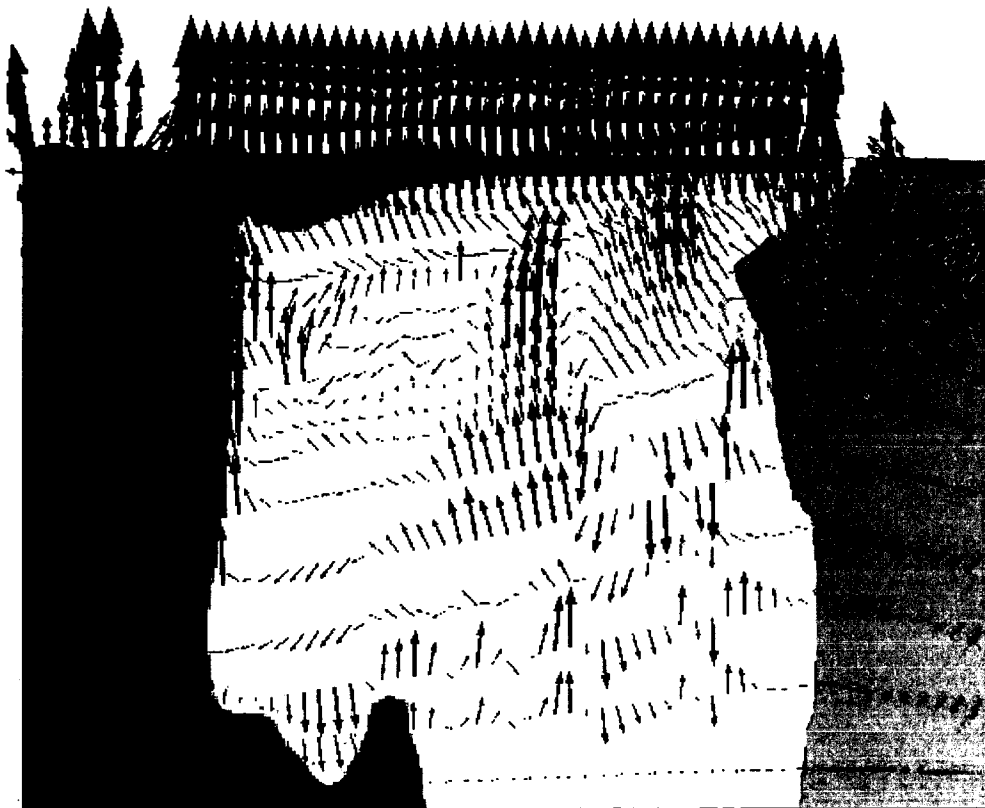


図 2.4-14 流速ベクトル・塩分濃度分布図 (Case-, B-B 断面)

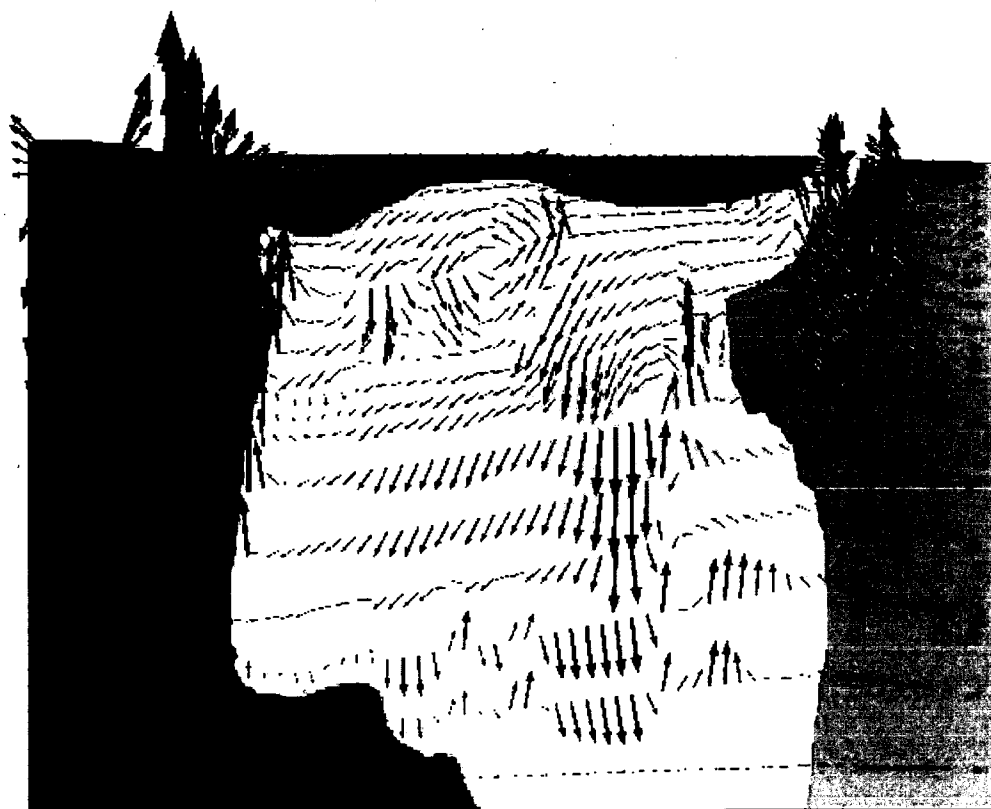


図 2.4-15 流速ベクトル・塩分濃度分布図 (Case-3, C-C 断面)

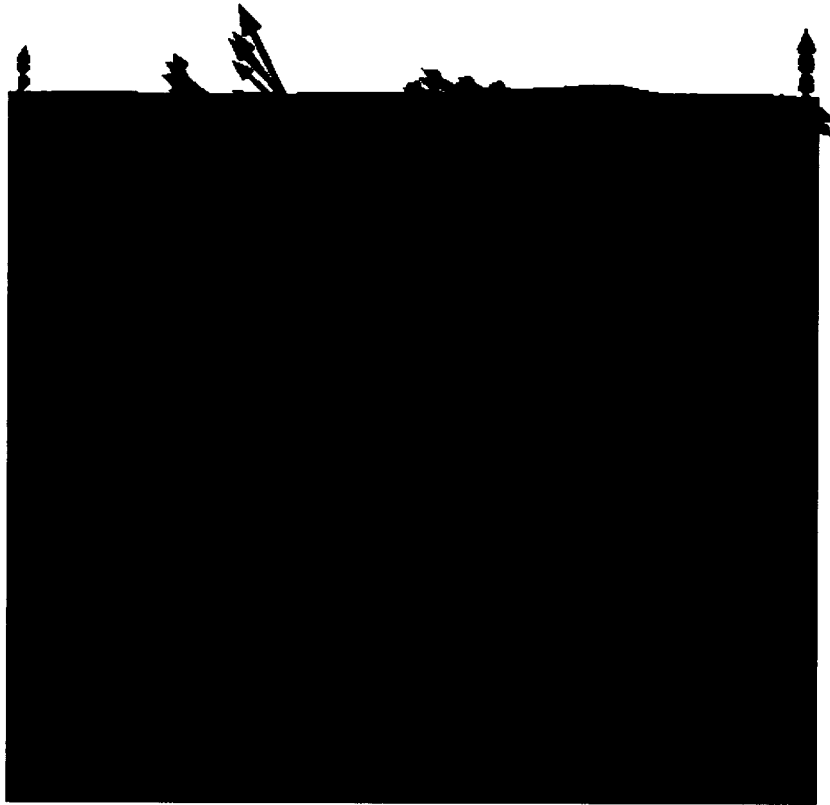


図 2.4-16 流速ベクトル・塩分濃度分布図 (Case-3,D-D 断面)

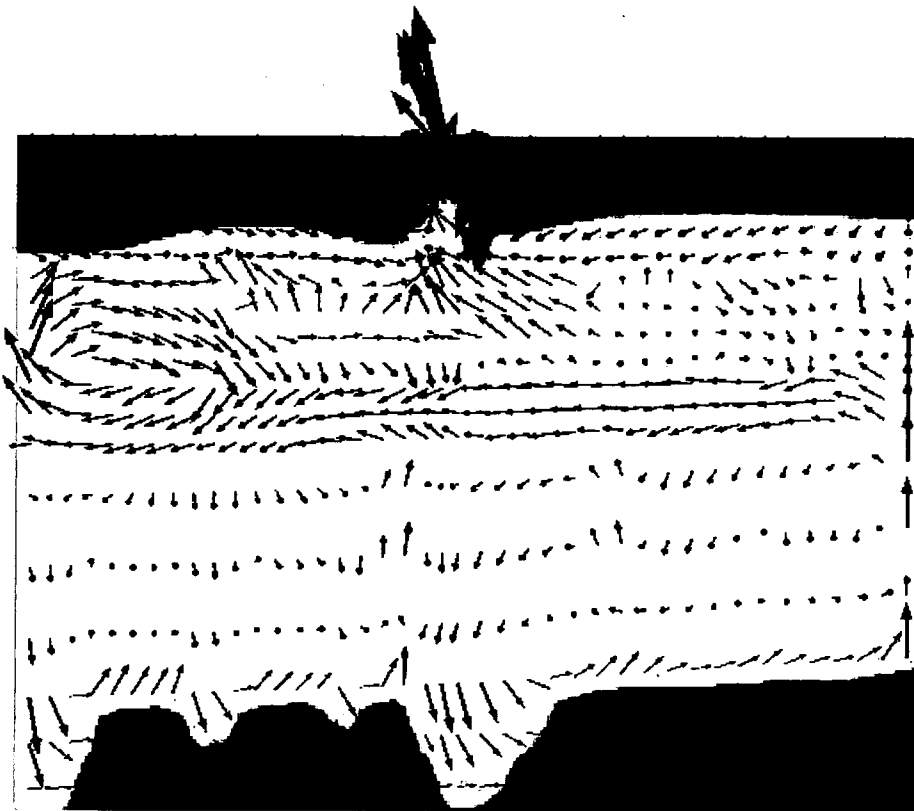


図 2.4-17 流速ベクトル・塩分濃度分布図 (Case-3,E-E 断面)

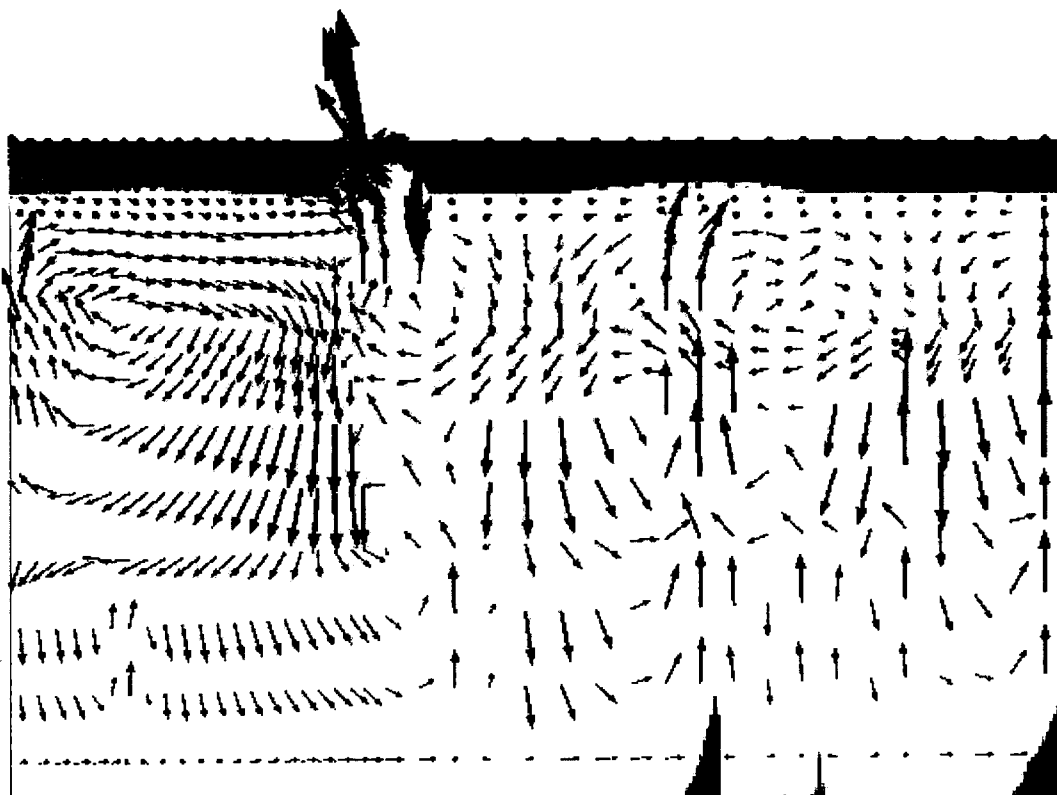


図 2.4-18 流速ベクトル・塩分濃度分布図 (Case-3, F-F 断面)

(3) 塩分濃度分布の推移 (Case-3)

図 2.4-19(a)~(h)に、1 万年,3 万年,10 万年,30 万年,50 万年,70 万年,90 万年,110 万年における A-A 断面の塩分濃度の推移を示した。塩分濃度の推移は、成田層の表層の流れが卓越しているため塩水浸入は起こらず、国本層から起こり始めている。国本層以深においても透水係数に応じて、塩水の浸入が起こり始めている。10 万年経過した段階では、梅が瀬層付近と黄和田層付近に塩水浸入が卓越するところが生ずるが、これは水際線近辺の上昇流によるものである。30 万年経過した段階では、水際線近辺の下降流とそれに伴う上昇流により、塩分濃度分布にくびれが生じ、それに応じて解析断面中央付近の湧昇流が大きくなり、塩水浸入はそれにより加速され、地表面方向に塩分濃度の進展が見られる。70 万年以降もその傾向は継続するが、定常状態の流速ベクトルからわかるように、山岳部から段丘面への水循環に伴う湧昇流により、それ以上塩水浸入が起こらないことがわかった。

前年度の解析においては、国本層以深を塩水として解析を行ったが、今山岳部への涵養に伴う大きな水循環が存在するために、塩水浸入の形状は大きく異なると考えられる。塩水浸入は基本となる地形・降雨・涵養・河川に大きな影響を受ける水循環と塩水浸入に伴う水循環の形成という二つの大きな駆動力によって、移動して行く。したがって、初期条件、境界条件によって大きく異なることが予想される。



図 2.4-19(a) 塩分濃度の推移 1 万年後 (Case-3)



図 2.4-19(b) 塩分濃度の推移 3 万年後 (Case-3)



図 2.4-19(c) 塩分濃度の推移 10 万年後 (Case-3)



図 2.4-19(d) 塩分濃度の推移 30 万年後 (Case-3)



図 2.4-19(e) 塩分濃度の推移 50 万年後 (Case-3)



図 2.4-19(f) 塩分濃度の推移 70 万年後 (Case-3)



図 2.4-19(g) 塩分濃度の推移 90 万年後 (Case-3)

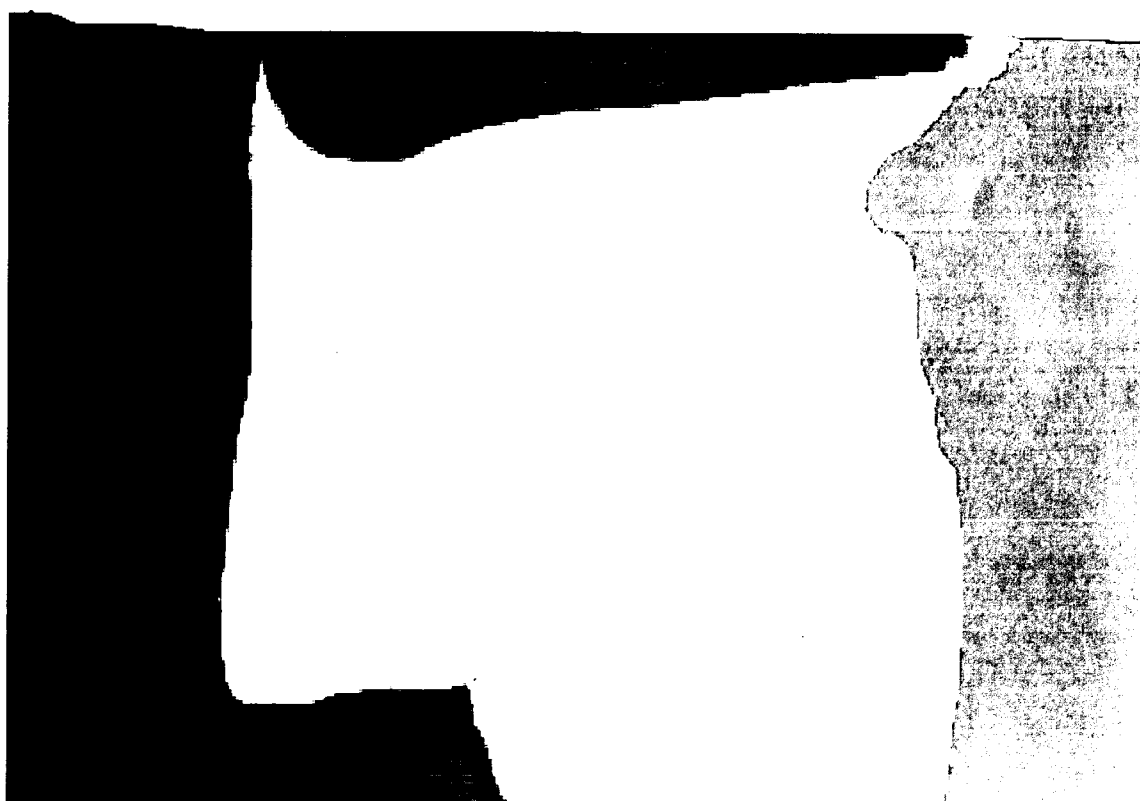


図 2.4-19(h) 塩分濃度の推移 110 万年後 (Case-3)

(4) 海退期の解析結果

図 2.4-20 に海退期終了時の塩分濃度分布を示した。図 2.4-21～図 2.4-26 に A-A 断面～F-F 断面までの 6 断面の流速ベクトル・塩分濃度分布図を示した。陸側の塩分濃度分布、流速ベクトルともに定常時(海退開始前)に比べて大きな変化はなかった。今回の解析では、海退に伴なって出現した陸地への降雨および河川の形成を無視しており、そのために出現した陸地での水涵養がないために、淡水の浸入が少なく、大きな影響があらわれなかったと考えられる。海退に伴なって出現した陸地への降雨を取り扱うにあたっては、地表要素へ降雨を与える必要があるが、今回は演算速度の都合上取り扱えなかった。また河川の形成については、あらかじめ地形を想定する必要があり、その妥当性の問題も今後生じてくると考えられる。

図 2.4-27(a)～(d)に海退期の塩分濃度の推移を示した。

(5) 海進期の解析結果

図 2.4-28 に海進期開始 3000 年後の塩分濃度分布を示した。また、図 2.4-29,30 に A-A 断面と C-C 断面までの 2 断面の流速ベクトル・塩分濃度分布図を示した。海退期終了時に比べ、水際線での下降流・上昇流の位置はずれてくるが、陸側の分布に大きな変化はまだ無い。

塩淡水境界解析
汚染相濃度

step = 1
time = 3.72300E+07
102000.00 year
vmax = 1.452E-02
vmin = 0.000E+00

imin,imax = 1 120
jmin,jmax = 1 41
kmin,kmax = 3 25

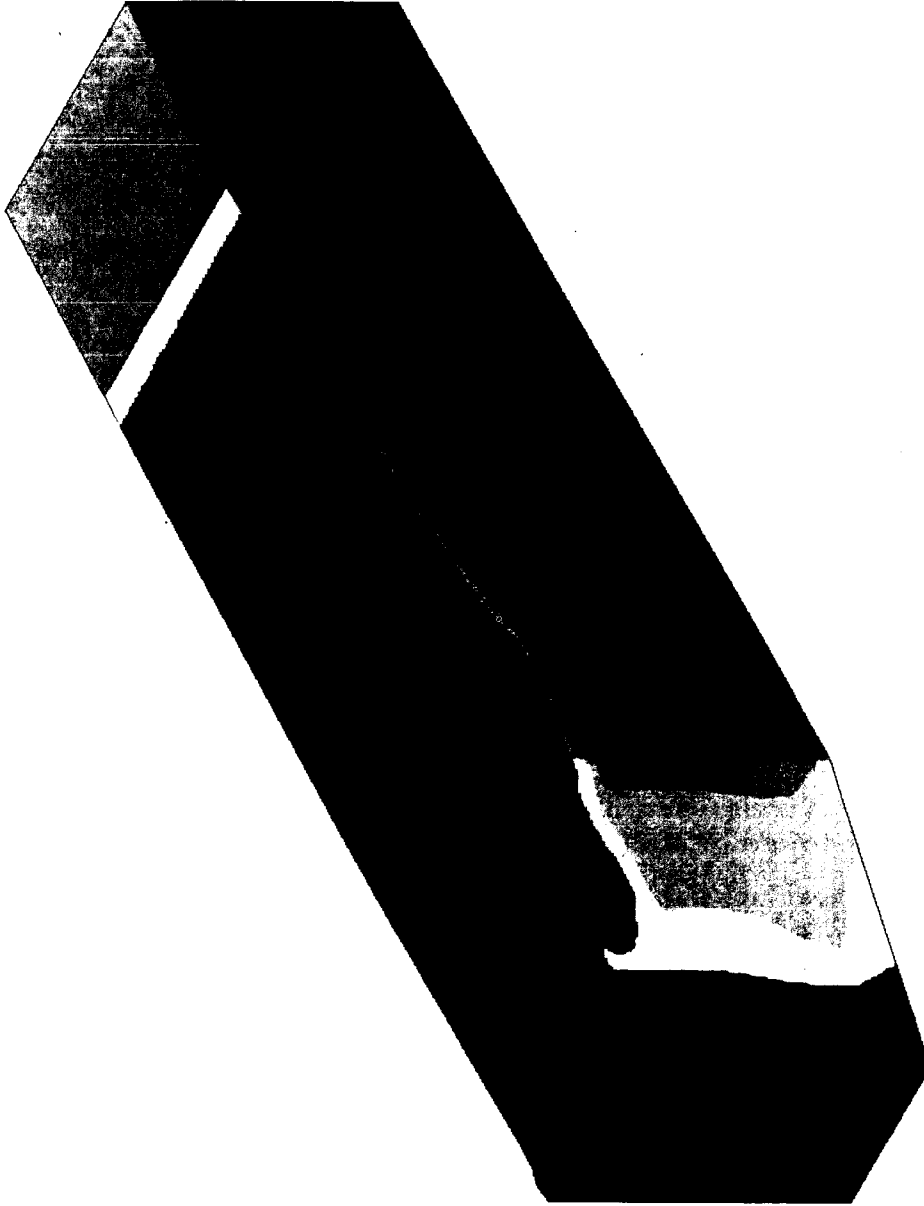
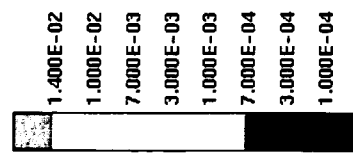


図 2.4-20 海退終了時の塩分濃度分布 (Case-4)



図 2.4-21 海退終了時の流速ベクトル・塩分濃度分布 (A-A 断面、Case-4)

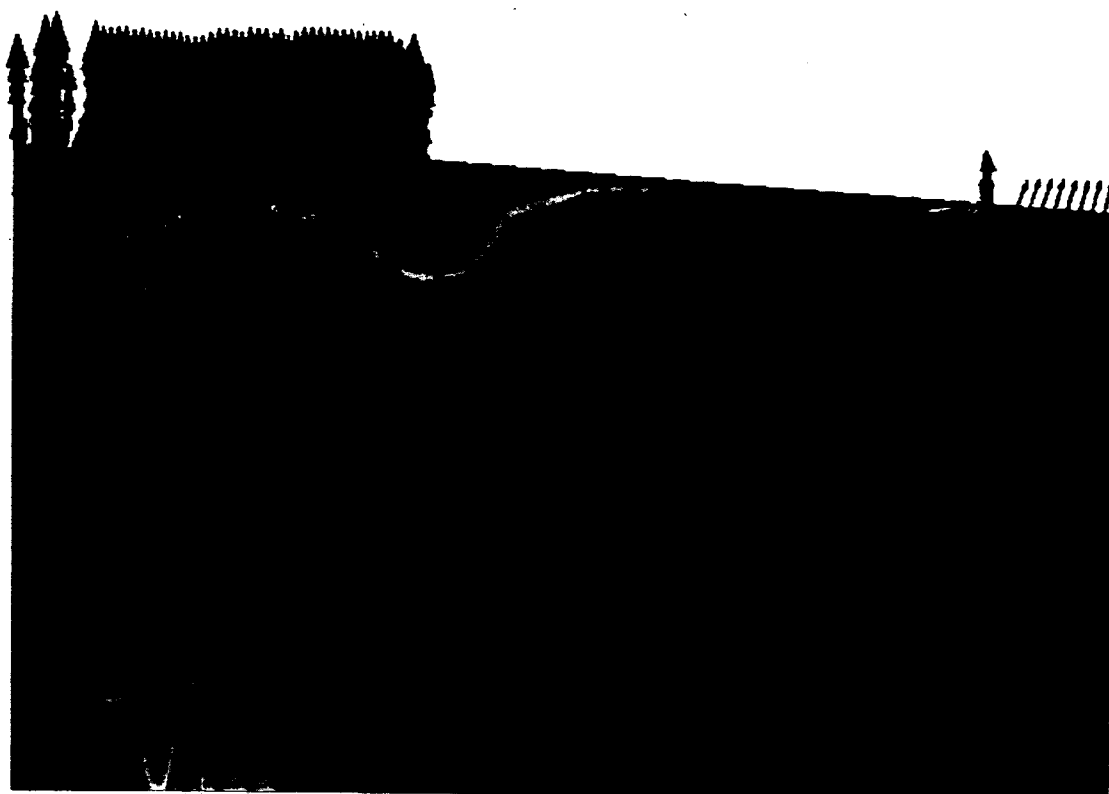


図 2.4-22 海退終了時の流速ベクトル・塩分濃度分布 (B-B 断面、Case-4)

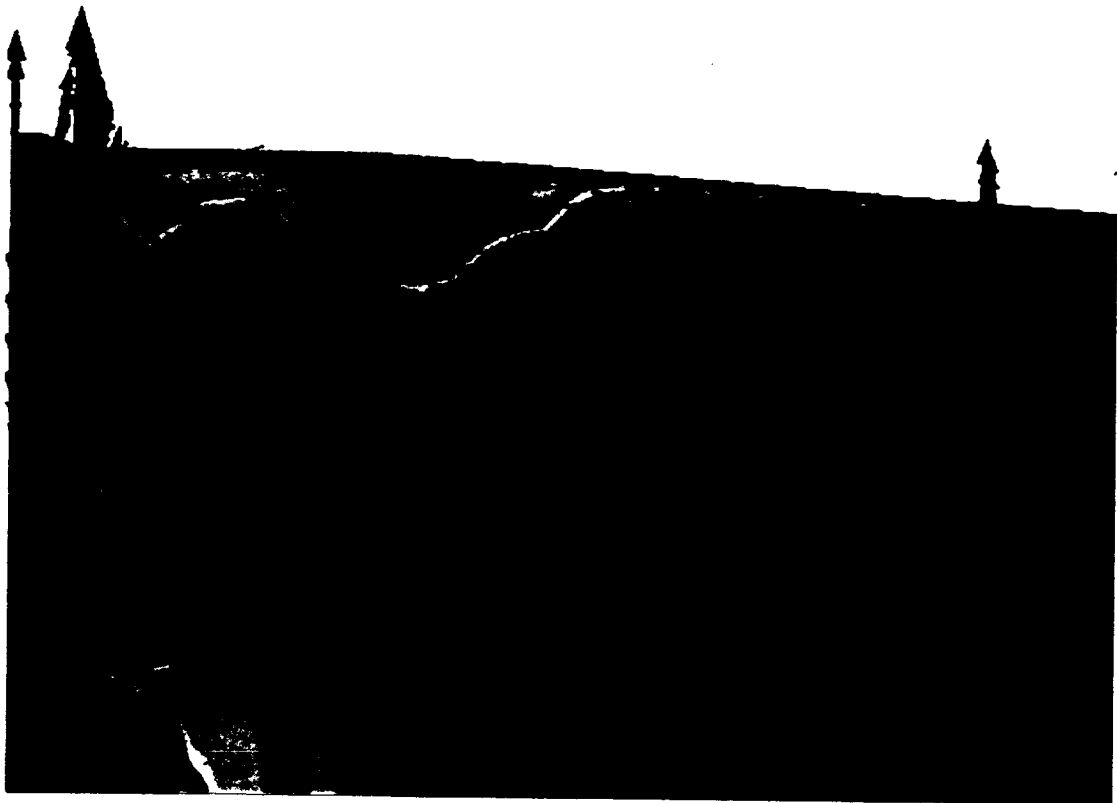


図 2.4-23 海退終了時の流速ベクトル・塩分濃度分布 (C-C 断面、Case-4)



図 2.4-24 海退終了時の流速ベクトル・塩分濃度分布 (D-D 断面、Case-4)

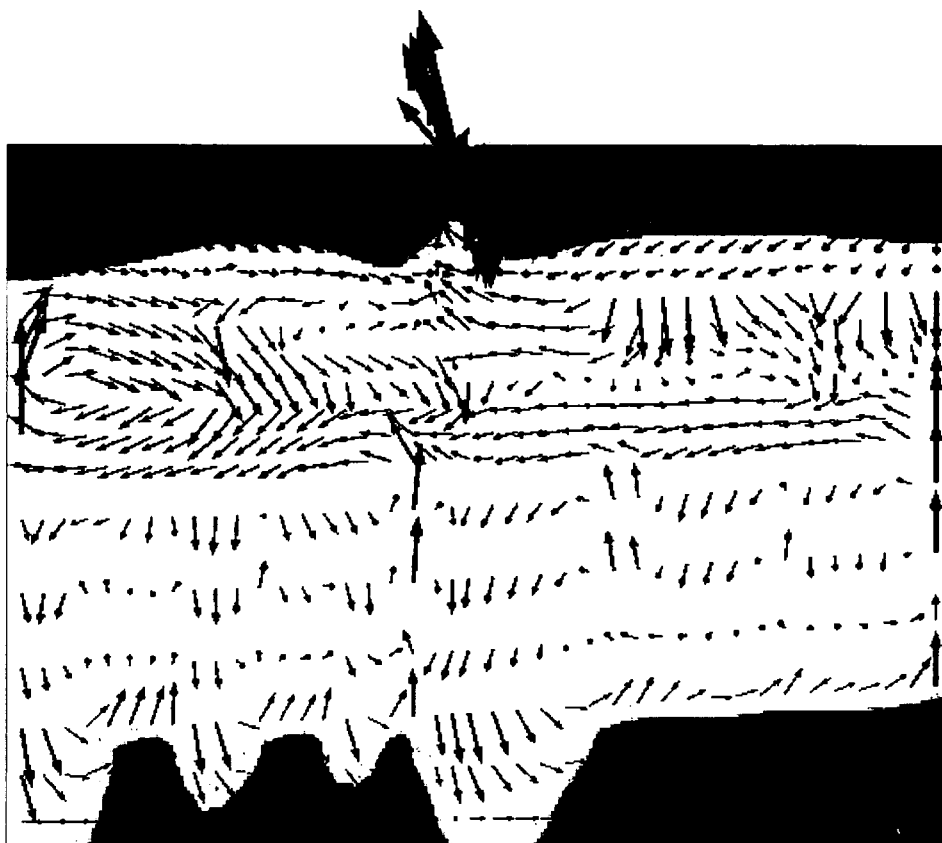


図 2.4-25 海退終了時の流速ベクトル・塩分濃度分布 (E-E 断面、Case-4)

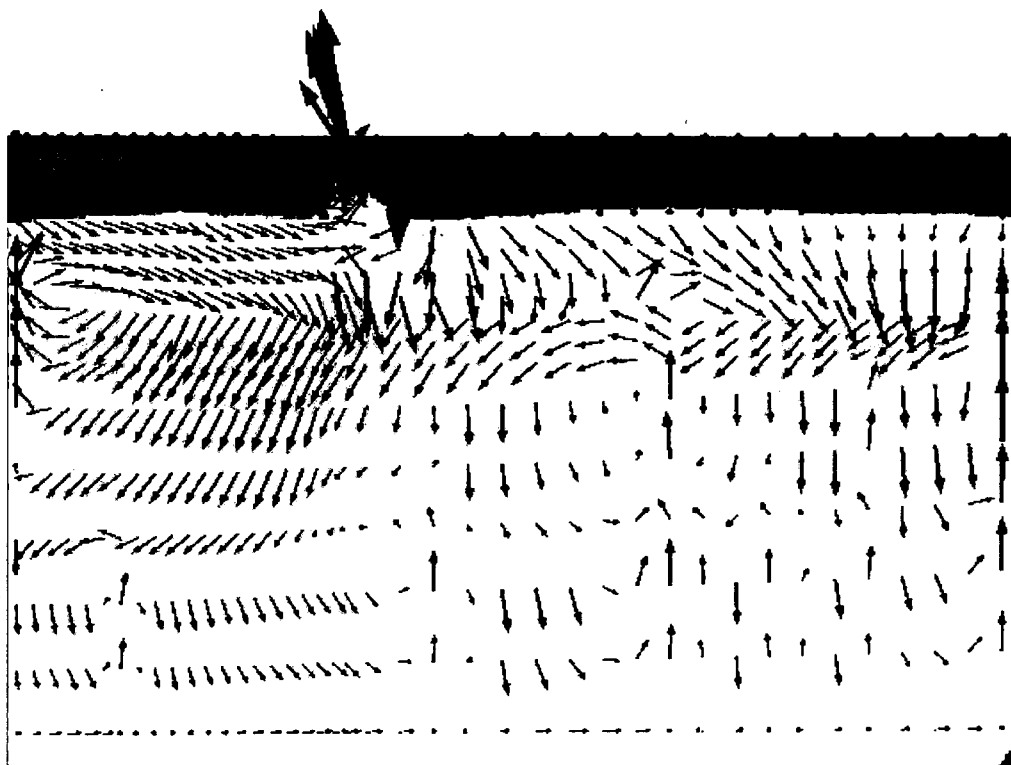


図 2.4-26 海退終了時の流速ベクトル・塩分濃度分布 (F-F 断面、Case-4)

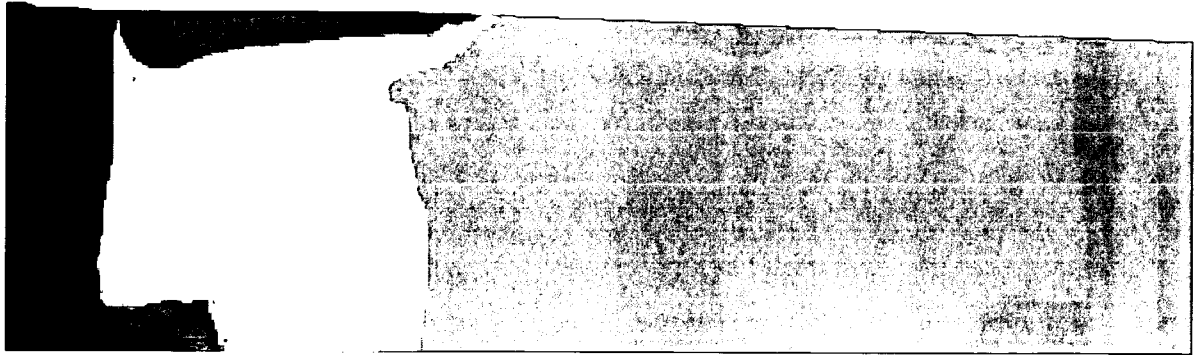


図 2.27(a) 海退期塩分濃度 10000 年経過時

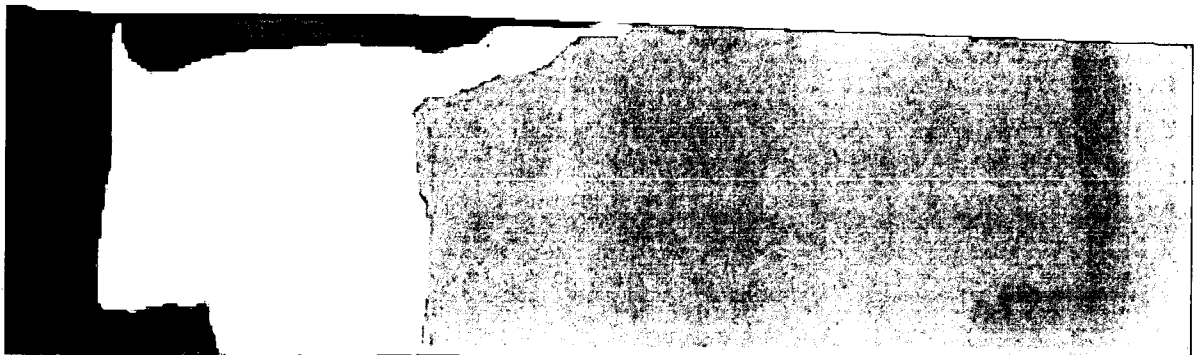


圖 2.4-27(b) 海退期塩分濃度 30000 年經過時



圖 2.4-27(c) 海退期塩分濃度 60000 年經過時



圖 2.4-27(d) 海退期塩分濃度 100000 年經過時

塩淡水境界解析
汚染相濃度

step = 1
time = 3.83834E+07
105160.00 year
vmax = 1.444E-02
vmin = 0.000E+00

lmin,lmax = 1 120
jmin,jmax = 1 41
kmin,kmax = 3 25

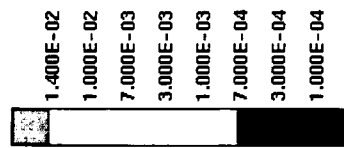


図 2.4-28 海進時の塩分濃度分布 (Case-5)



図 2.4-29 海進時の流速ベクトル・塩分濃度分布 (A-A 断面、Case-5)



図 2.4-30 海進時の流速ベクトル・塩分濃度分布 (C-C 断面、Case-5)

(6) 現地塩分濃度との比較

定常解析結果と現地のコアサンプルの間隙水電気伝導度を比較した。比較の結果を図 2.4-31 に示した。間隙水電気伝導度の分布と解析値の深部の塩分濃度は、似通っていると考えられるが、上部 GL-50m 付近に存在する塩分濃度の上昇を解析結果は模擬できていない。原因はあきらかでないが、一般に定常状態の解析では2つの塩淡境界を再現することはかなり難しい。また、今回の解析結果からわかるように、現在の深度 1km に及ぶ解析結果における地下水流動状況はかなり複雑であり、深部の流動も塩淡境界に大きな影響を及ぼしている。その中で実測の塩淡境界のフィッティングを行うことはかなり難しいと考えられる。上部の塩淡境界は段丘砂に限った解析を行えば、かなりそれらしい結果が出る形状をしており、今後段丘砂のみの解析や鉛直方向の透水性を落とした解析等により、段階的にモデルの妥当性を高めて行く必要があるのではないだろうか？

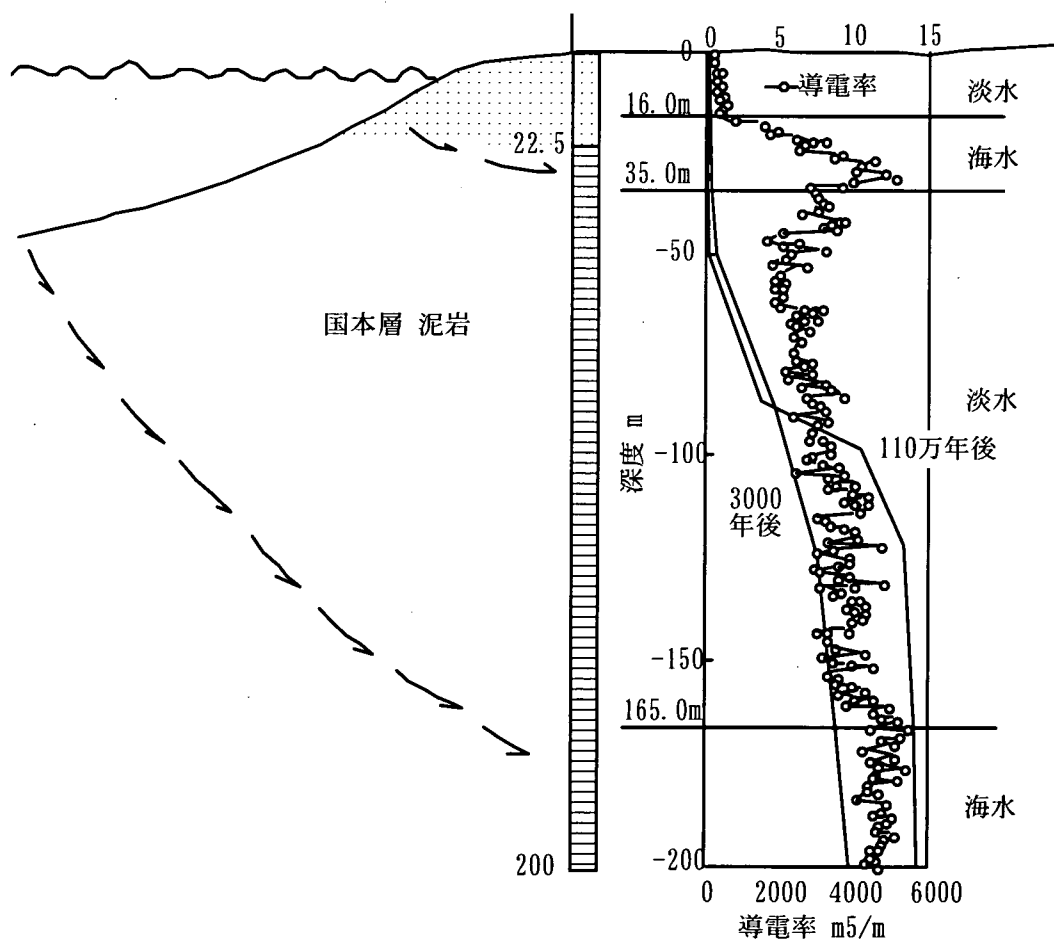


図 2.4-31 間隙水塩分濃度との比較

(7) 解析時間の影響

各ケース毎の解析時間の比較表を表 2.4-2 に示す。Case-2 の地表要素に降雨を入れた

場合には、地表での河川の流れ等が大変速いために、時間ステップを細かくせざるを得ず、演算速度が解析上問題となる。Case-5 の海進のケースでも、塩水が淡水の上に常時乗り上げるようになるためか、演算速度は極端に遅くなることわかる。実用的な解析であるためには、1 週間程度で妥当なところでは無いかと考えると、さらなるアルゴリズムの改良やマシンの性能の向上が必要ではないかと考えられる。Case-1 の均質媒体ケースでは、演算速度が遅いように思われるが、これは流速が速いため、解析終了までに要する時間と言う意味では、Case-1、Case-3 に比較して2倍程度速い。やはり、Case-1、Case-3 の場合、水際付近で生ずる濃度による渦が演算速度を遅らせている原因ではないかと考えられる。

表 2.4-2 解析時間の比較

解析ケース	平均解析時間	解析終了までの期間
Case-0	3.3万年/day	16.3万年（定常まで）
Case-1	10.5万年/day	78.8万年（定常まで）
Case-2	0.05万年/day	途中終了
Case-3	9.3万年/day	111万年（定常まで）
Case-4	0.7万年/day	10.2万年（海退）
Case-5	0.03万年/day	1.3万年（海退）

(8) 輸送時間の比較

Case-1 と Case-3 の結果を用いて、上昇流が問題となりそうな水際付近、段丘面境界付近、山岳部境界付近の9地点(A-A,B-B,C-C断面上)の深度1000mから地表までの輸送時間を比較した。比較の結果は表 2.4-3 の通りである。また、それぞれ計算に用いた軌跡を図 2.4-32～図 2.4-37 に示した。

Case-1 の A-A 段丘面の軌跡(図 2.4-33)からわかるように、この地点の軌跡は地表には出てこないで、この場合は除外しても、出発点によって大きく輸送時間は異なり感度が高いことが判明した。たとえば、Case-1 では、最も短時間で地表に出てくるものが52 万年程度であるのに対し、最も時間がかかるものは607 万年と10 倍以上開きがあった。

表 2.4-3 輸送時間の比較

出発点		水際	段丘面	山岳部
Case-1	A-A	2910849	1320142464	770383
	B-B	6072602	1963068	836926
	C-C	4334493	2132282	518021
Case-3	A-A	16369562	15104328	351931
	B-B	4858466	3294109	341265
	C-C	7368465	3752137	349923

単位(年)

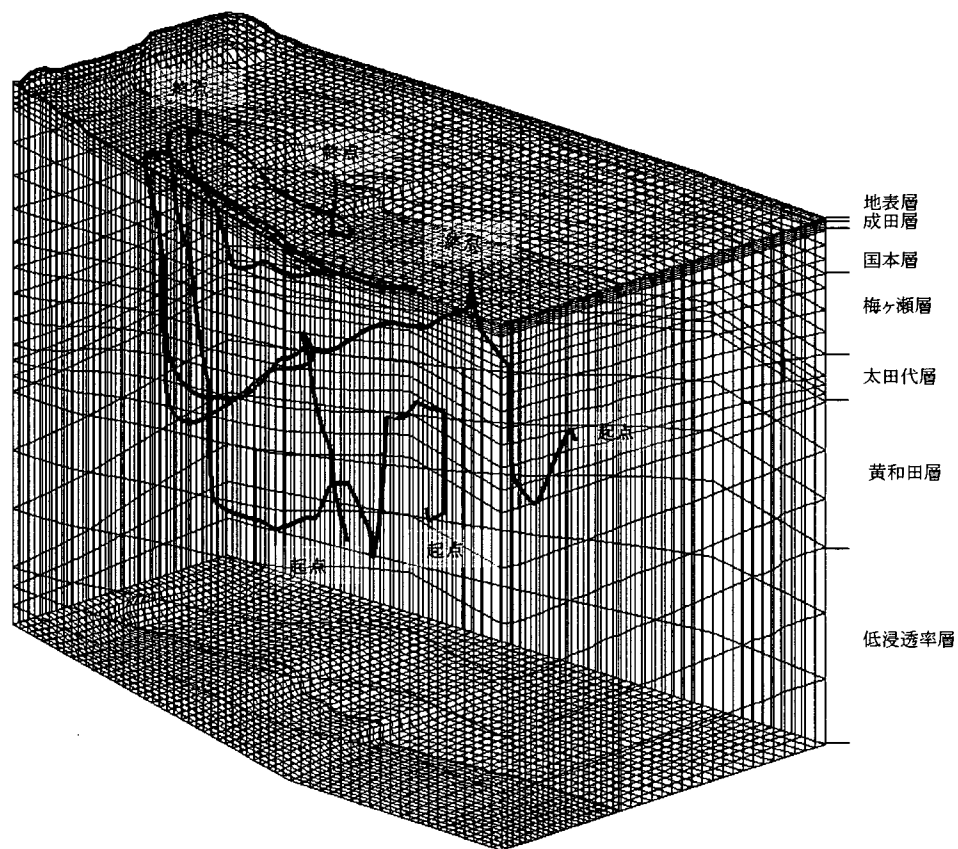


図 2.4-32 Case-1 水際付近からの軌跡

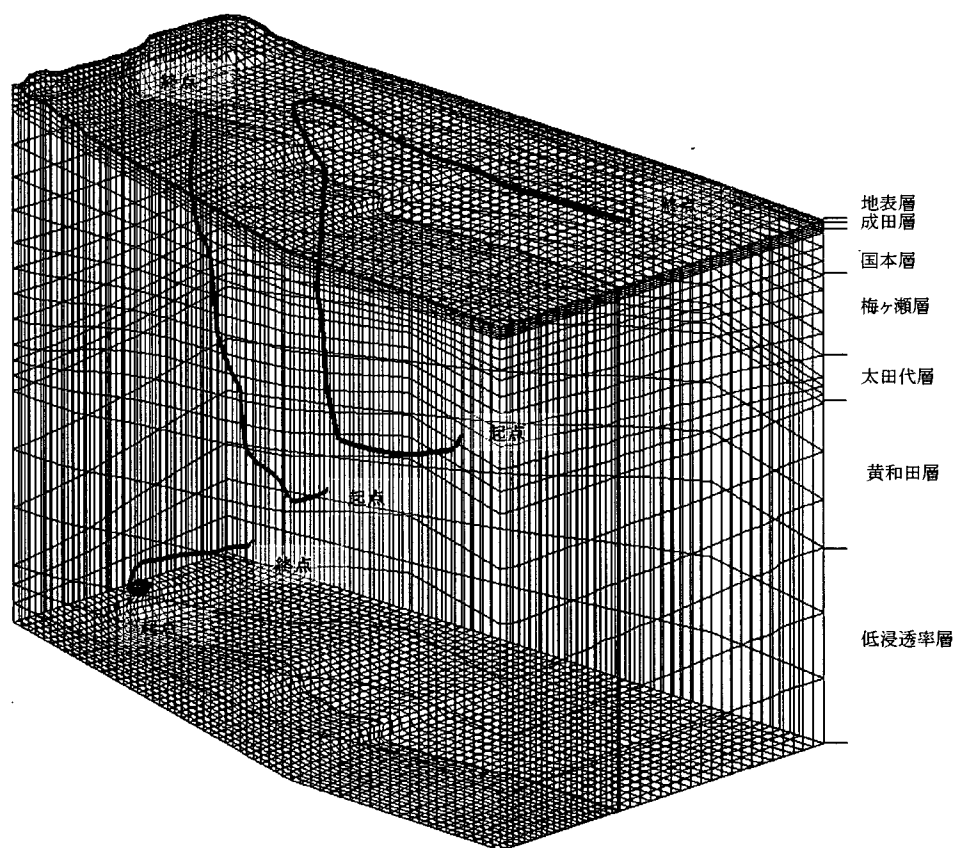


図 2.4-33 Case-1 段丘面付近からの軌跡

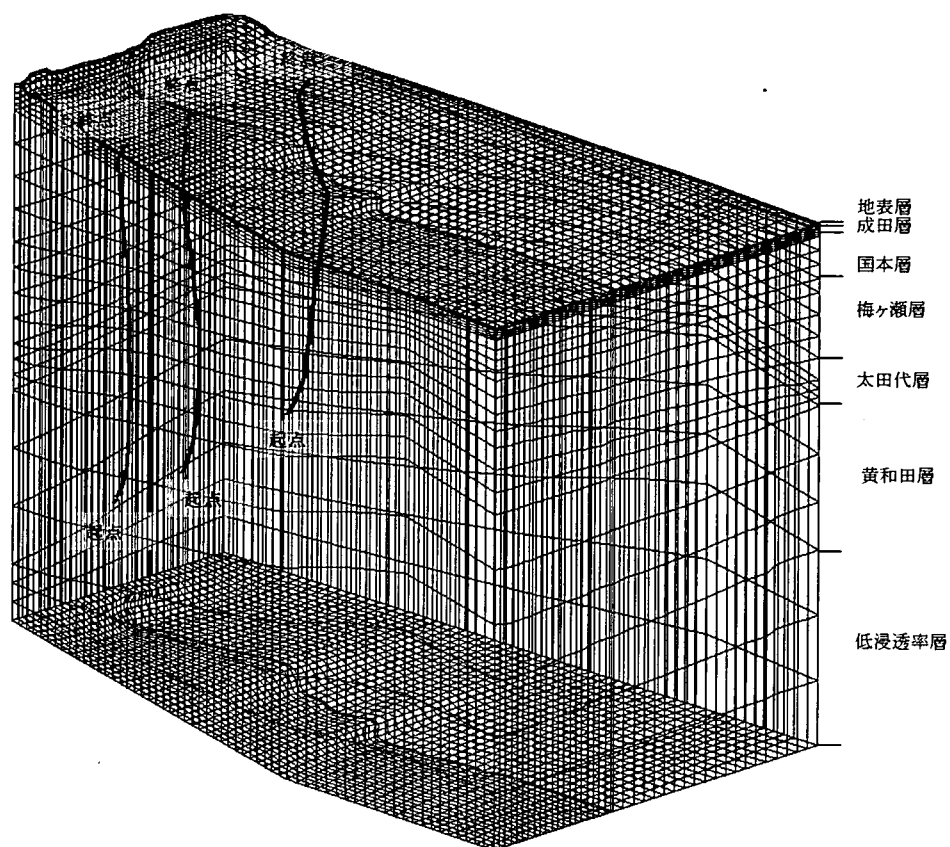


図 2.4-34 Case-1 山岳部付近からの軌跡

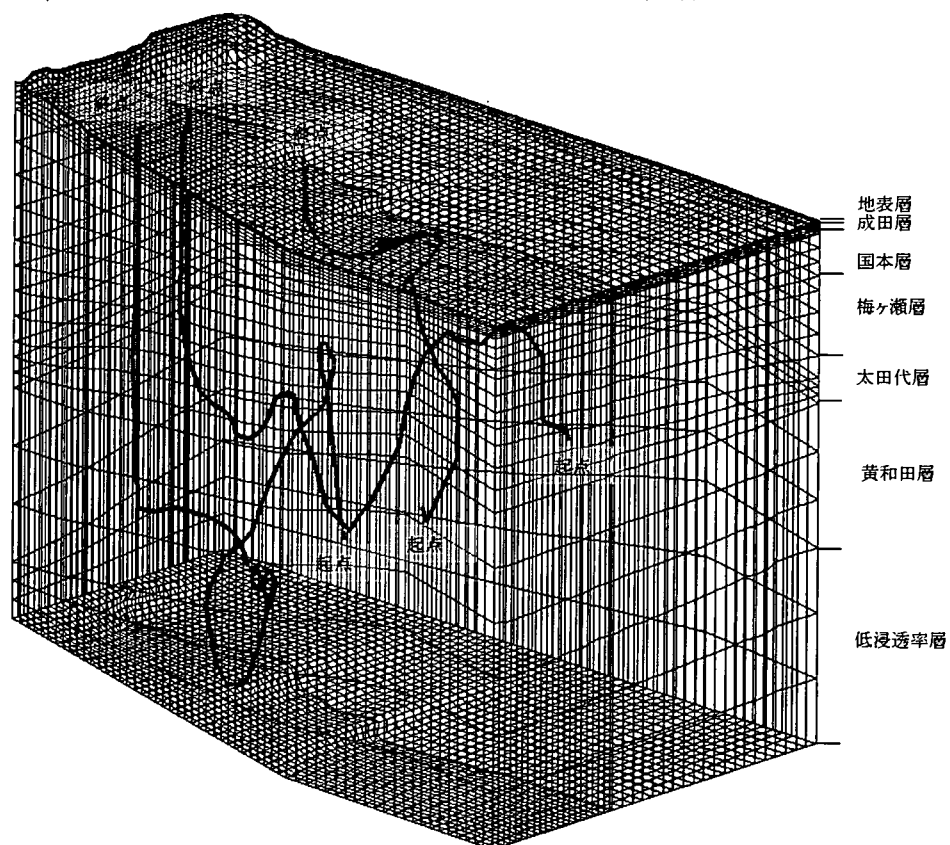


図 2.4-35 Case-3 水際付近からの軌跡

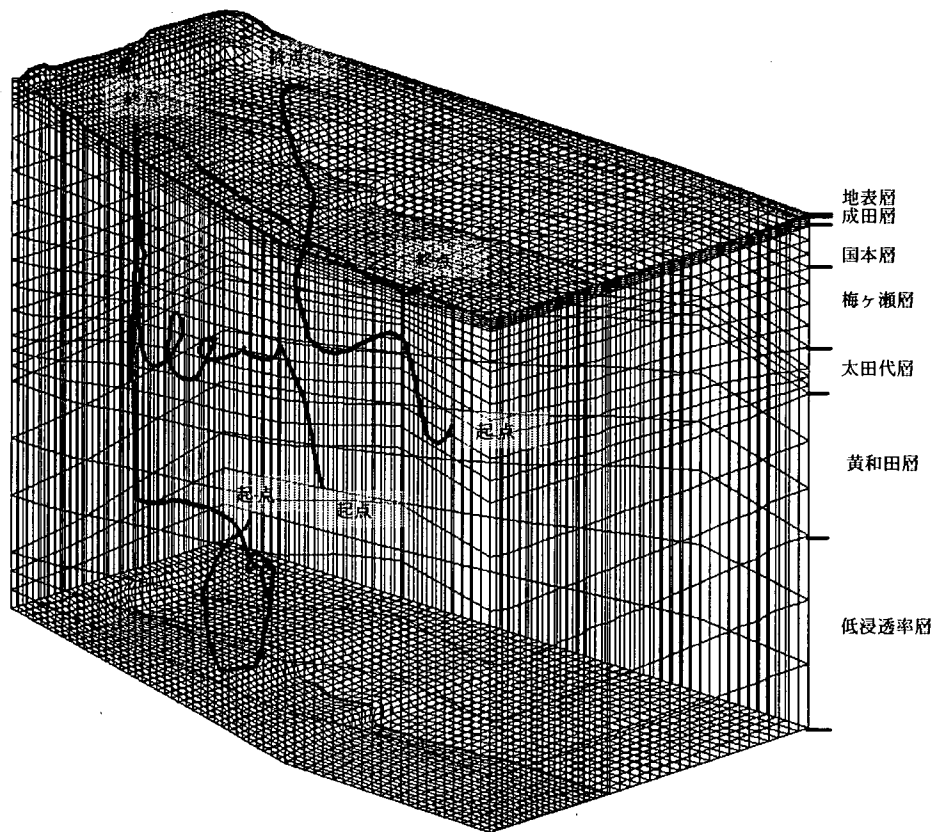


図 2.4-36 Case-3 段丘面付近からの軌跡

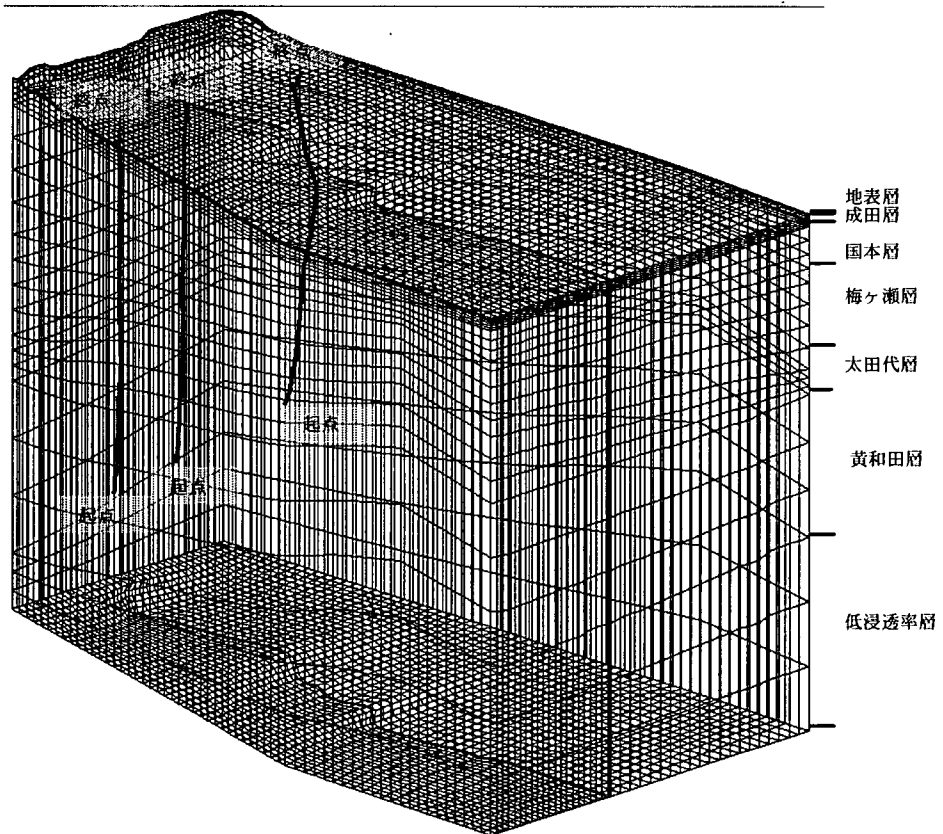


図 2.4-36 Case-3 山岳部付近からの軌跡

2.4.3 解析結果の考察

本解析は、ある程度大きな3次元領域における塩淡境界解析の適用可能性を検討したものである。塩淡境界の計算では、現在の状態を再現するために数万年～数百万年の時間経過を追跡する必要があり、計算機に対する負荷は非常に大きくなる。本計算では100万年程度まで計算を進めたが、解析条件によっては、モデリング技術のさらなる改良が必要である。また、海進・海退解析を行うにあたっては、演算時間と妥当性のあるモデル化についていくつかの問題点も判明した。以下に、本解析を通じての考察結果をまとめる。

(5) 海水準変動を考慮できるモデルによる解析

塩淡境界は基本的に地下水位に敏感であり、地下水位は地形に依存する。本モデルでは、陸側に段丘があり、低地部との間に30m程度の高低差があり、河川部においても周囲に比較し数m以上の高低差がある。この地形の影響と塩水浸入による地下水流動の乱れの影響を受け、地下水流動および塩淡境界は三次元的に非常に複雑な形状を呈した。地形、境界条件、初期条件によって、解析結果は大きく異なると考えられるので、条件の設定にあたっては現地データとの詳細な検証作業が必要である。

(6) 海水準変動による塩淡境界への影響

海進・海退期における塩淡境界への影響を比較した。いずれの解析においても陸側の塩水濃度分布・地下水流動ベクトルともに大きな変化はなかった。海退期において出現する陸地での降雨および河川の形成を考慮しなかったことが大きな原因である。降雨および河川の形成を考慮するためには、演算速度の高速化と河川形成の合理的なモデルの検討が必要である。海進期においては、演算速度が極端に低下するため、それへの対処が必要であるが、幸運にも海進速度は速いため、現在でも1ヶ月程度で解析は終了する。

(7) 解析結果の検証

現地で得られた塩水濃度との比較を試みたが、上部成田層内の塩淡境界を模擬することはできなかった。今後、成田層のみの解析や異方性を顧慮した解析等の検討が必要である。50m以深では形状は良く似通っていた。

(8) 輸送時間の算定

上昇流が問題となりそうな地点において、深度1000m付近から地表までの輸送時間を算定した。輸送時間は地点によって、10倍以上の差があり、出発地点の違いによる感度が敏

感であった。今回の解析結果は上昇流が卓越していると考えられるが、それでも数10万年程度の輸送時間が必要であった。

(参考文献)

登坂博行、岩井卓、伊藤一誠、長富功、小島圭二(1998): 水理解析における地形離散化手法に関する基礎的研究、日本応用地質学会平成10年度研究発表会講演論文集, 285-288.

2.5 地下水流動解析のまとめ

以下に、3次元解析の結果から得られた知見および今後の課題を示す。

(1) 海水準変動を考慮できるモデルによる解析

今回の解析では、節点数 12 万を越える大きなモデルで、定常状態に至る 100 万年程度の解析を実用的な演算時間(10 日程度)で終了することができた。しかし、地表要素における水の移動を扱おうとすると、実用的な演算時間の範囲では、解析を終了することができなかった。今後地表要素のみを取り出して算定するなどの方策が必要であろう。

塩淡境界は地形の影響と塩水浸入による地下水流動の乱れの影響を受け、地三次元的に非常に複雑な形状を呈する。地形、境界条件、初期条件によって、解析結果は大きく異なると考えられるので、条件の設定にあたっては現地データとの詳細な検証作業が必要である。

(2) 海水準変動による塩淡境界への影響

海進・海退期の解析も行えたが、海進期においては、演算速度が極端に低下するため、それへの対処が必要である。また、海退期において出現する陸地での降雨および河川の形成を考慮するためには、演算速度の高速化と河川形成の合理的なモデルの検討が必要である。

(3) 解析結果の検証

現地で得られた塩水濃度との比較を試みたが、上部成田層内の塩淡境界を模擬することはできなかった。今後、成田層のみの解析や異方性を考慮した解析等の検討が必要である。50m 以深での形状は良く似通っていたが、もう少し広域・大深度のデータとの比較が必要である。

ある地域での塩淡境界を捉えるためには、予備解析、ボーリングによる観測、詳細解析が必要であろう。予備解析では、まず、河川流量、地下水位などの観測値を複数の地点で再現できるような広域モデルを構築することが必要であろう。地表付近の地下水位分布が妥当な範囲で表されていないければ、計算される塩淡境界の信頼性は薄く、観測値との照合も難しいことになろう。

(4) 輸送時間の算定

上昇流が問題となりそうな地点において、深度 1000m 付近から地表までの輸送時間を算

定した。輸送時間は地点によって、10 倍以上の差があり、出発地点の違いによる感度が敏感であった。今回の解析結果は上昇流が卓越していると考えられるが、それでも数10万年程度の輸送時間が必要であった。

(5) **Geoflow-V2** を用いた3次元解析適用上の今後の課題

今回の解析を踏まえ、今後取り組む必要のある課題を以下に示す。

- a) 異方性の検討(上昇流・境界への影響)
- b) 地表要素に降雨を入れたときの演算速度の低下
- c) 海進時の演算速度の低下
- d) 海退時の境界の取り扱い(降雨、河川の形成)
- e) 地表付近の地下水位分布・塩淡水境界の信頼性の向上

3. 現地調査

3.1 調査概要

本調査は、千葉県山武郡蓮沼村蓮沼海浜公園内の試錐孔(3孔)を用いて比抵抗トモグラフィ調査(2次元3断面)、および地表電気探査(比抵抗法)を実施し、その得られた比抵抗分布より塩淡水境界の位置、形状、分布を推定することを目的とする。

調査内容および数量を表 3.1-1に示す。

表 3.1-1 調査数量一覧表

調査内容	数量	備考
地表電気探査	1断面 (地表測線×H-1孔)	地表測線=250m H-1孔=185m*
比抵抗 トモグラフィ 調査	孔間3断面 (H-1孔×H-2孔) (H-2孔×H-3孔) (H-3孔×H-1孔) 各断面とも孔間の地表部を含む	H-1孔=185m* H-2孔=170m* H-3孔=195m* H-1×H-2 孔間地表=78.8m (孔間=38.8m、両側延長部=40m) H-2×H-3 孔間地表=76.6m (孔間=36.6m、両側延長部=40m) H-3×H-1 孔間地表=65m (孔間=42.2m、両側延長部=25m)

*測定時における各孔の孔底深度

3.2 調査内容

3.2.1 調査原理

本調査で行う地表電気探査と比抵抗トモグラフィ調査はどちらも電気探査(直流比抵抗法二次元探査)の手法を用いた調査である。

電気探査とは、地盤の電氣的性質に着目し、地盤に電流を流して生じる電位を測定することにより、電流の流れにくさ(比抵抗)の分布を求めるものである。本調査で用いた手法は、電気探査のうち直流比抵抗法を発展させたもので、地下構造を2次元の比抵抗分布で表示するものである。

測定地点直下の深度方向の比抵抗分布が得られる垂直電気探査が古くから実施されてきたが、これは地下構造が水平方向には均質であると仮定できる場合に適用され、複雑な構造を求めることはできなかった。一方、直流比抵抗二次元探査は測線全域の地盤の比抵抗分布を2次元断面のカラーコンター図として求めることができ、複雑な地下構造を精度良く解析することができる手法である。

測定では、2極法と呼ばれる電極配置を用いている。図 3.2-1に2極法電極配置による測定の概要を示す。2極法とは、図に示したように、2本の電流電極および2本の電位電極のうち、それぞれ一方の電極を無限遠と考えられる十分遠方に固定・設置し、残りの1本ずつの電流電極と電位電極を測線内を移動させて、電流電極から通電し電位電極での電位を測定する方法である。

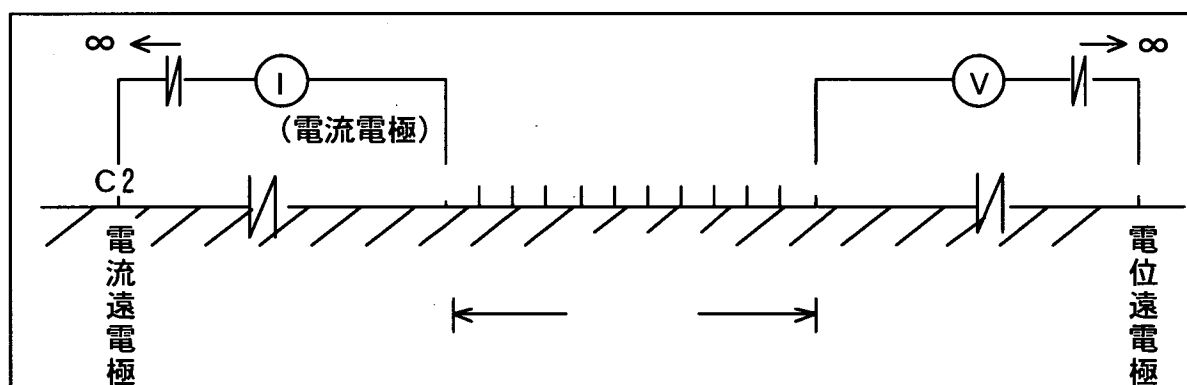


図 3.2-1 2極法測定の概要

ところで、地盤の電流の流れにくさを示す比抵抗とは、地盤の単位体積あたりの電気抵抗のことである。他の物理量が地盤を構成する物質ごとに異なるように、比抵抗値も地盤を構

成する物質固有の値を示す。

ここで、最も単純なモデルについて、比抵抗の理論式を次に示す。すなわち、均質な物質から地盤が構成されている場合の比抵抗(ρ)は、図 3.2-2のように求めることができる。

$$V = \frac{\rho I}{2 \pi r} \quad : \text{電流源が地表に存在する場合}$$

ρ : 比抵抗

r : 電極間隔

V : 電位差

I : 通電電流値

$$\therefore \rho = 2 \pi r \times \frac{V}{I}$$

図 3.2-2 比抵抗の説明

しかし、実際の地盤は、ほとんどの場合不均質であるため、この式で計算される比抵抗値は真の比抵抗ではない。しかしながら、その値は地下の比抵抗分布を反映したものであり、電極周辺の比抵抗の一種の平均値と考えることができる。そこで、先の式で得られる値は見掛け比抵抗と呼ばれている。

見掛け比抵抗から地下の比抵抗の概要を知ることができるが、真の比抵抗分布を求めるためには、いわゆる逆解析の手法を用いる。すなわち、地下の比抵抗分布を何らかの方法で仮定し、その仮定された比抵抗構造に基づいた測定値を理論的に計算する。計算された測定値と実測された測定値とは当然異なっており、その差を残差と呼ぶ。残差が小さくなるように仮定された比抵抗構造を修正し、実測値を満足するような比抵抗構造を求める。理論的な測定値の計算(これをモデリングと言う)はFEM(有限要素法)を用い、比抵抗構造の修正は逐次修正型の最小二乗法を用いる。

3.2.2 測定方法

(1) 地表電気探査

a) 測定概要

地表電気探査の測定は、地表面および孔中にて電流を流し、発生させた電位分布を測定する方法で実施した。測定位置は、図 3.2-3に示す通りである。

b) 測定諸元

測定諸元は以下の通りである。

測定断面 : 1断面(地表測線×H-1孔)

地表測線=250m、H-1孔=185m

地表電位電極間隔:5m

地表通電間隔 :5m

孔中通電間隔 :10m

電極配置 :2極法電極配置

印加電流 :最大4A

データ収録器 :ELREC6(6ch同時収録)

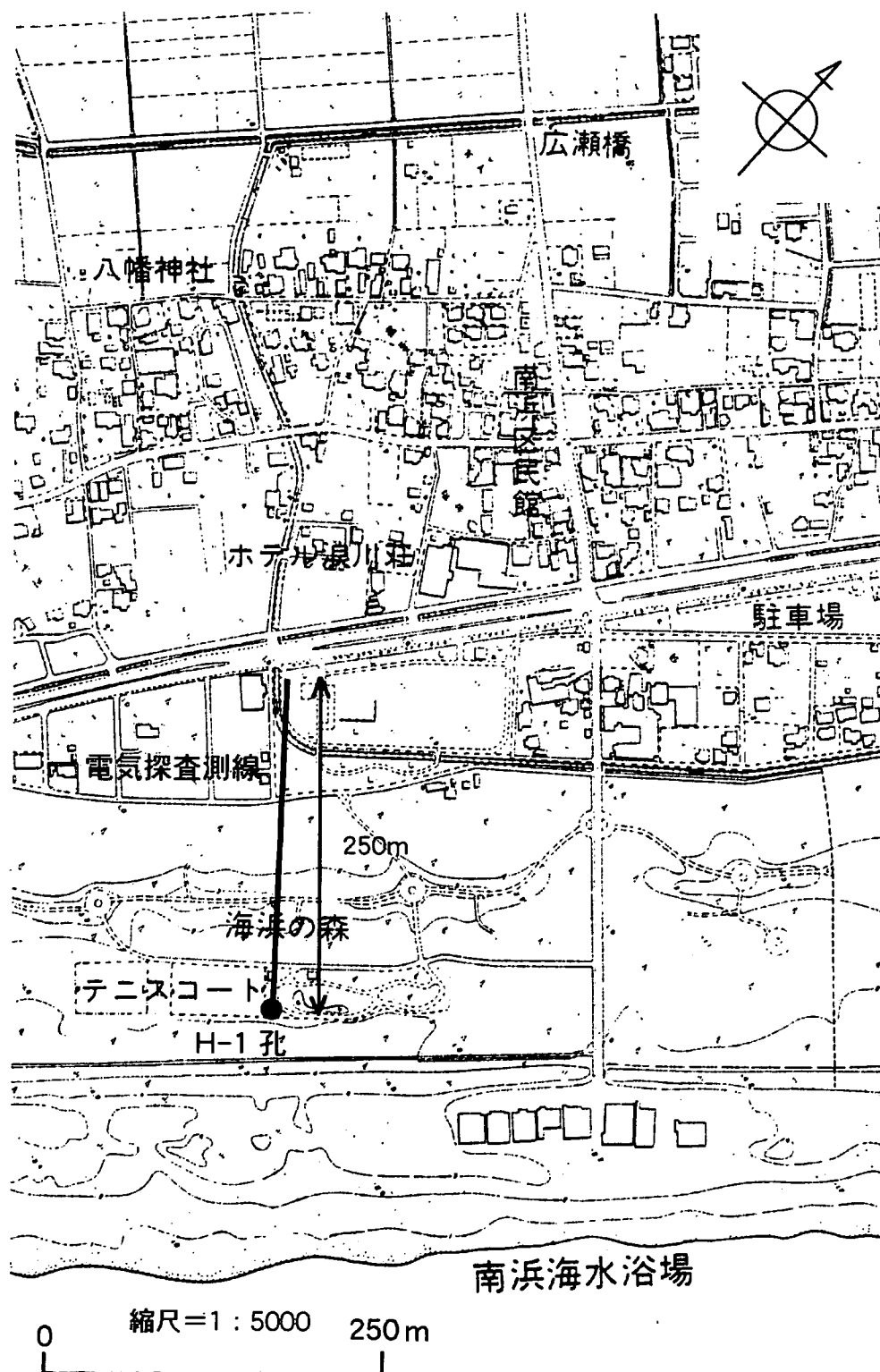


図 3.2-3 地表電気探査測定位置図

c) 測定手順

図 3.2-4に測定概要図を示す。また、測定に使用する機器の一覧を表 3.2-1に示す。

地表電気探査の測定には地表測線とH-1孔を使用した。測定作業性から次に示す測定パターン毎に測定を行った。

- ①地表測線のみの測定(地表通電、地表電位測定:電位測定間隔 5、10、20m)
- ②H-1孔-地表の測定(孔内通電、地表電位測定:電位測定間隔 10m)
- ③H-1孔のみの測定(孔内通電、孔内電位測定:電位測定間隔 5m)

測定手順を以下に示す。

- ・ 地表測線およびH-1孔から十分離れた所(最大電極間隔:探査深度の 10 倍程度の距離)に基準となる電極(電流遠電極および電位遠電極)を設置した(電流遠電極は北東方向に 1.4km、電位遠電極は南西方向へ 1.0km)。←(①、②、③)
- ・ 測定で設置した遠電極、地表電極、孔中電極はそれぞれケーブルを介して測定本部のデータ収録器に接続した。←(①、②、③)
- ・ 地表測線に 5m 間隔となるように目印となる木杭を設置し、その木杭の近傍に電位測定用電極を配置した。この電極には無分極電極*を使用した。←(①、②)
- ・ 地表通電、地表電位測定の測定を行った。通電および電位測定間隔は 5、10、20m で行い、探査深度に応じた測定を行った。←(①)
- ・ H-1孔内に孔中通電電極を挿入し所定の測定深度に設置した。←(②)
- ・ H-1孔通電、地表電位測定の測定を行った。孔内の通電間隔は 5m とし、地表での電位測定は 10m 間隔とした。←(②)
- ・ H-1孔に孔中通電電極および孔中電位電極を挿入し所定の測定深度に設置した。←(②)
- ・ H-1孔のみの測定を行った。孔内の通電および電位測定はともに 5m 間隔とした。このデータは比抵抗トモグラフィ調査に共用した。←(③)
- ・ 電位差の測定は図 3.2-1に示すように、まず電流電極(C)を固定し、一定間隔毎の電位変化を電位電極(P1, P2, …Pn)で測定する。一つの電流電極での測定が終了した後、電流電極を切換えて同様に測定を繰り返した。

* 通常の電気探査で使用する金属製の電極では地盤に打ち込んだ時に地盤と電極間に僅かであるが電位差が生ずる(分極)。本調査地は低比抵抗地であることが判明しているため、僅かの電位差でも調査に影響を及ぼすと考えられ、電極自体の分極の影響が少ない無分極電極を使用した。無分極電極には、鉛-塩化鉛電極とテクノゲル無分極電極があり、前者は土に穴を掘って設置するタイプであり、後者は粘着性のシートタイプで道路等に設置することができるものである。

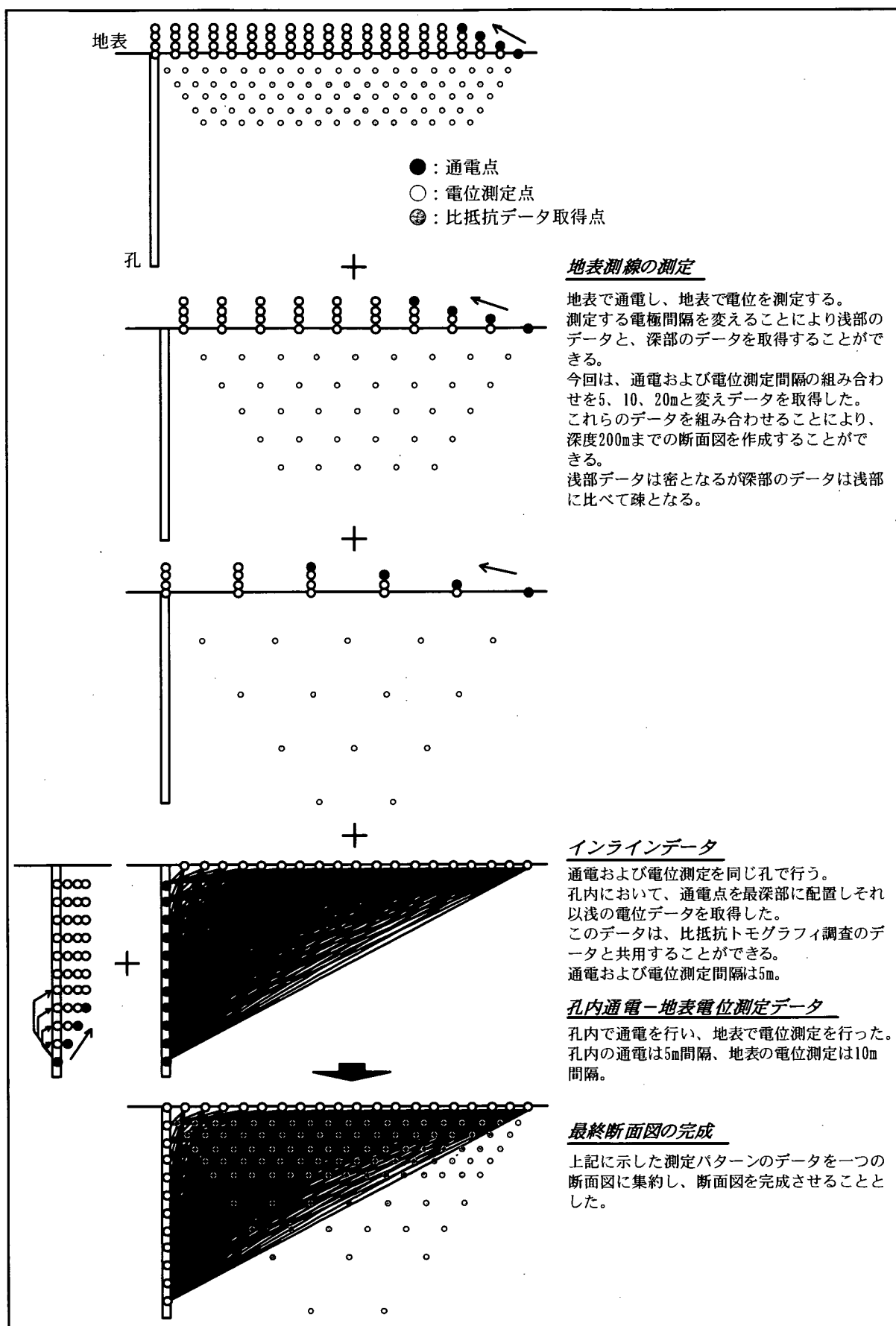


図 3.2-4 地表電気探査測定概要図

表 3.2-1 地表電氣探查使用機器一覽表

機 器 名	数量	仕 様	製 造 社
孔中通電電極	一式	電極数：1個、ケーブル長 300m	応用地質(株)
テイクアウトケーブル	一式	電極数：32 個，電極間隔：5m、ケーブル長 300m	
電極棒 (地表通電,電流遠電極用)	一式	ステンレス製(長さ=60cm)	
鉛－塩化鉛無分極電極 (電位測定,電位遠電極用)	50 個	直径 10cm、高さ 8cm の円筒型 鉛の棒を石膏と塩化鉛を混ぜたもので締め固めたもの	
テクノゲル無分極電極(電位測定用)	一式	直径 8cm、厚さ 2mm のシート型 高分子ポリマーからなる、使い捨て、粘着力あり	
遠電極用ケーブル	一式	2芯ケーブル、3000m 分	
データ収録器 (ELREC6)	一式	入力チャンネル : 6ch 出力波形 時間領域 : on +, off, on -, off 0.5, 1, 2, 4, 8秒 入力インピーダンス : 10MΩ 入力電圧保護 : 1000V以上 入力電圧レンジ 各ダイポール = 10Vmax 2～6ダイポールの合計 = 15Vmax 20ビットシグマデルタコンバーター ノッチフィルター : 50Hz, 60Hz サンプリングレート : 10ms 比抵抗レンジ : 0.1～467KΩ 初期電圧 レゾリューション : 1μV (スタッキング後) 精度 : typ.0.3% 充電率 レゾリューション : 0.01mV/V 精度 : typ.0.6% メモリー容量 : 2,500リーディング 寸法 : (W)31×(H)21×(D)21 重量 : 8kg(内蔵バッテリー含む) 電源 : 12V 内部バッテリー,外部 12V	IRIS社 (フランス)
通電装置 (VIP3000)	一式	最大出力 : 3000VA 出力電圧 : 最大3000V(オートレンジ) 出力電流 : 最大5A(プログラマブル) ダイポール数 : 最大8ダイポール 出力ターミナル : 最大直径4mmのUniclip™ 出力波形 時間領域 : +, off, -, off(on=off) 0.5～8秒(プログラマブル) 周波数領域 : 方形波 0.0625Hz～4Hz(プログラマブル) シングルおよびデュアルモード 時間/周波数精度 : 0.01% 表示 : LCD (出力電流,電圧,接地抵抗,入力電流等) 電源 : 175～270VAC, 45～450Hz リモートコントロール : RS-232c 寸法 : (W)320mm×(H)410mm×(D)240mm 重量 : 16kg	

(2) 比抵抗トモグラフィ調査

a) 測定概要

比抵抗トモグラフィ調査は、既設の調査孔3孔を用いた孔間3断面の測定を行った。測定は地盤に電流を流し発生させた電位分布を測定する方法で行った。測定を行った調査孔は、図 3.2-5に示す通りである。

b) 測定諸元

測定諸元は以下の通りである。

測定断面 : 孔間3断面

H-1孔×H-2孔(185m×170m)

(孔間地表部 78.8mを含む: 孔間=38.8m、両側延長部=40m)

H-2孔×H-3孔(170m×195m)

(孔間地表部 76.6mを含む: 孔間=36.6m、両側延長部=40m)

H-3孔×H-1孔(195m×185m)

(孔間地表部 67.2mを含む: 孔間=42.2m、両側延長部=25m)

孔中電位電極間隔 : 5m

孔中通電間隔 : 5m

地表電位電極間隔 : 2.5m

地表通電間隔 : 2.5m

電極配置 : 2極法電極配置

印加電流 : 最大4A

データ収録器 : ELREC6(6ch同時収録)

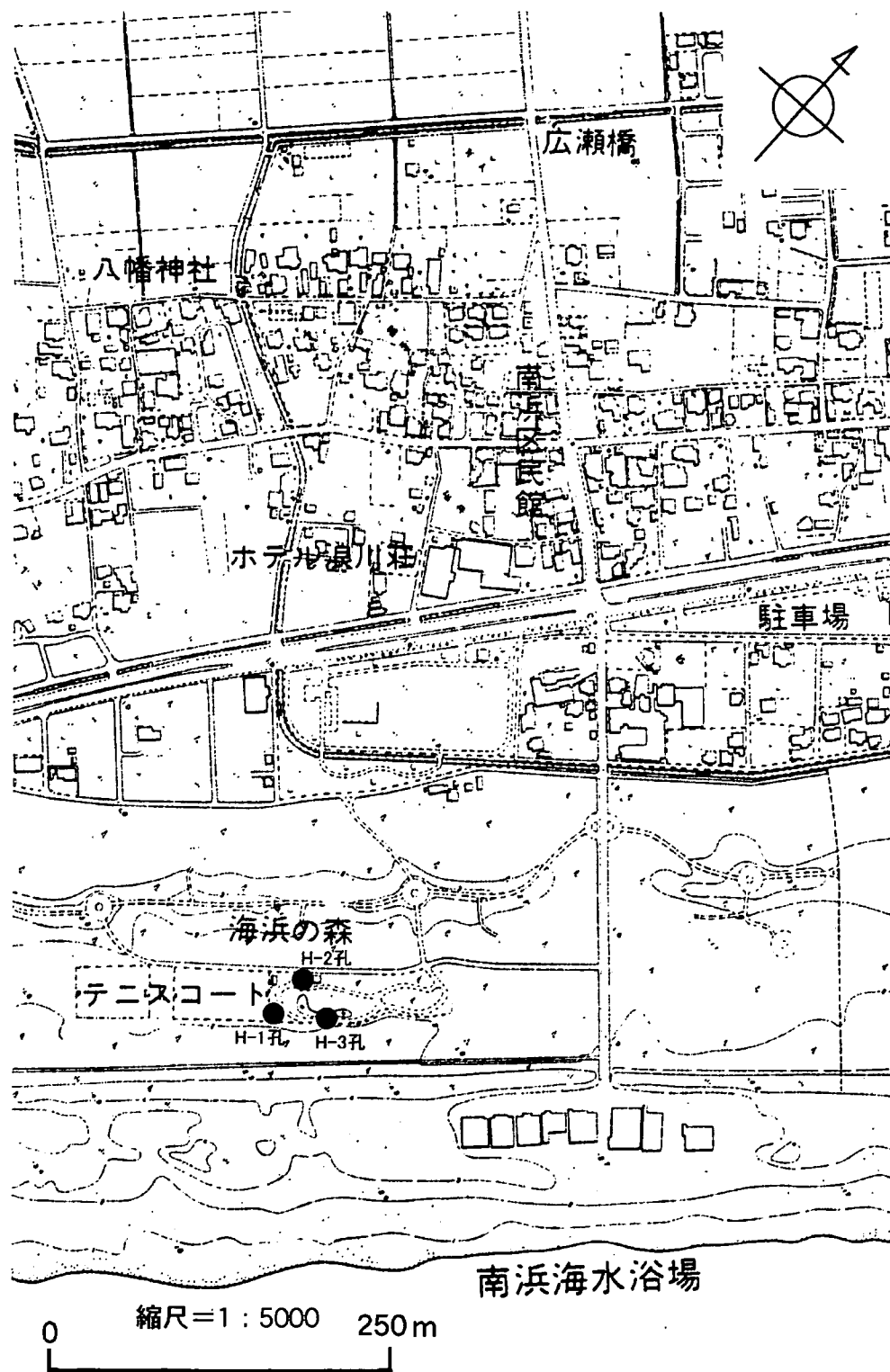


図 3.2-5 比抵抗トモグラフィ調査測定位置図

c) 測定手順

図 3.2-6に測定概要図を示す。また、測定に使用する機器の一覧を表 3.2-2に示す。

比抵抗トモグラフィ調査の測定では各断面毎に2本の調査孔とその孔間を結ぶ地表部分を使用した。測定作業性から次に示す測定パターン毎に測定を行った。

- ①インライン測定(孔内通電、同孔内電位測定:電位測定間隔 5m)
- ②クロスライン測定(孔内通電、別孔内電位測定:電位測定間隔 5m)
- ③孔―地表の測定(孔内通電、地表電位測定:電位測定間隔 2.5m)
- ④孔間地表のみの測定(地表通電、地表電位測定:電位測定間隔 2.5m)

測定手順を以下に示す。

- ・ 調査孔から十分離れた所(最大電極間隔の10倍以上の距離)に基準となる電極を設置した(電流遠電極および電位遠電極)。これらは地表電気探査で使用したものと同様である。←(①、②、③、④)
- ・ 測定で設置した遠電極、地表電極、孔中電極はそれぞれケーブルを介して測定本部のデータ収録器に接続した。←(①、②、③、④)
- ・ ある調査孔に孔中通電電極および孔中電位電極を挿入し所定の測定深度に設置した。←(①)
- ・ インライン測定を行った。孔内の通電および電位測定はともに 5m 間隔とした。←(①)
- ・ ある調査孔に孔中通電電極を挿入し所定の測定深度に設置した。また、もう一方の調査孔に孔中電位電極を挿入し所定の測定深度に設置した。←(②)
- ・ クロスライン測定を行った。孔内の通電および電位測定はともに 5m 間隔とした。一方での調査孔での通電が終了したら、各調査孔の孔中通電電極と孔中電位電極を入れ替えて測定を繰り返した。←(②)
- ・ 孔間の地表に 2.5m間隔となるように目印となる木杭を設置し、その木杭の近傍に電位測定用電極を配置した。この電極には無分極電極を使用した。←(③、④)
- ・ ある調査孔に孔中通電電極を挿入し所定の測定深度に設置した。←(③)
- ・ 孔―地表の測定を行った。孔内の通電間隔は 5m、地表の電位測定間隔は 2.5m とした。一方の調査孔での通電作業が終了したら、もう一方の調査孔に孔中通電電極を

移し測定を繰り返した。←(③)

- ・ 地表通電、地表電位測定の測定を行った*。通電および電位測定間隔はともに 2.5m とした。←(④)
- ・ 電位差の測定は地表電気探査と同様に、まず電流電極を固定し、一定間隔毎の電位変化を電位電極で測定する。一つの電流電極での測定が終了した後、電流電極を切換えて同様に測定を繰り返す。
- ・ 測定は、以上のことを3断面でそれぞれ行った。ただし、インライン測定のデータは隣り合う断面で共用した。

* 調査孔浅部(深度 30m 程度)に保孔のために設置された無孔塩ビ管の影響で、インライン測定、クロスライン測定、孔―地表測定における当該深度のデータの精度が懸念されたため(特に各調査孔近傍のデータ)、当初設定した孔間地表のみの測定では不十分と考えられ、孔間地表のみの測定区間を孔間の両外側 20m ずつ延長し行った(H-3孔×H-1孔断面ではH-1孔側の延長上にテニスコートが存在したため 5m の延長に留めた)。

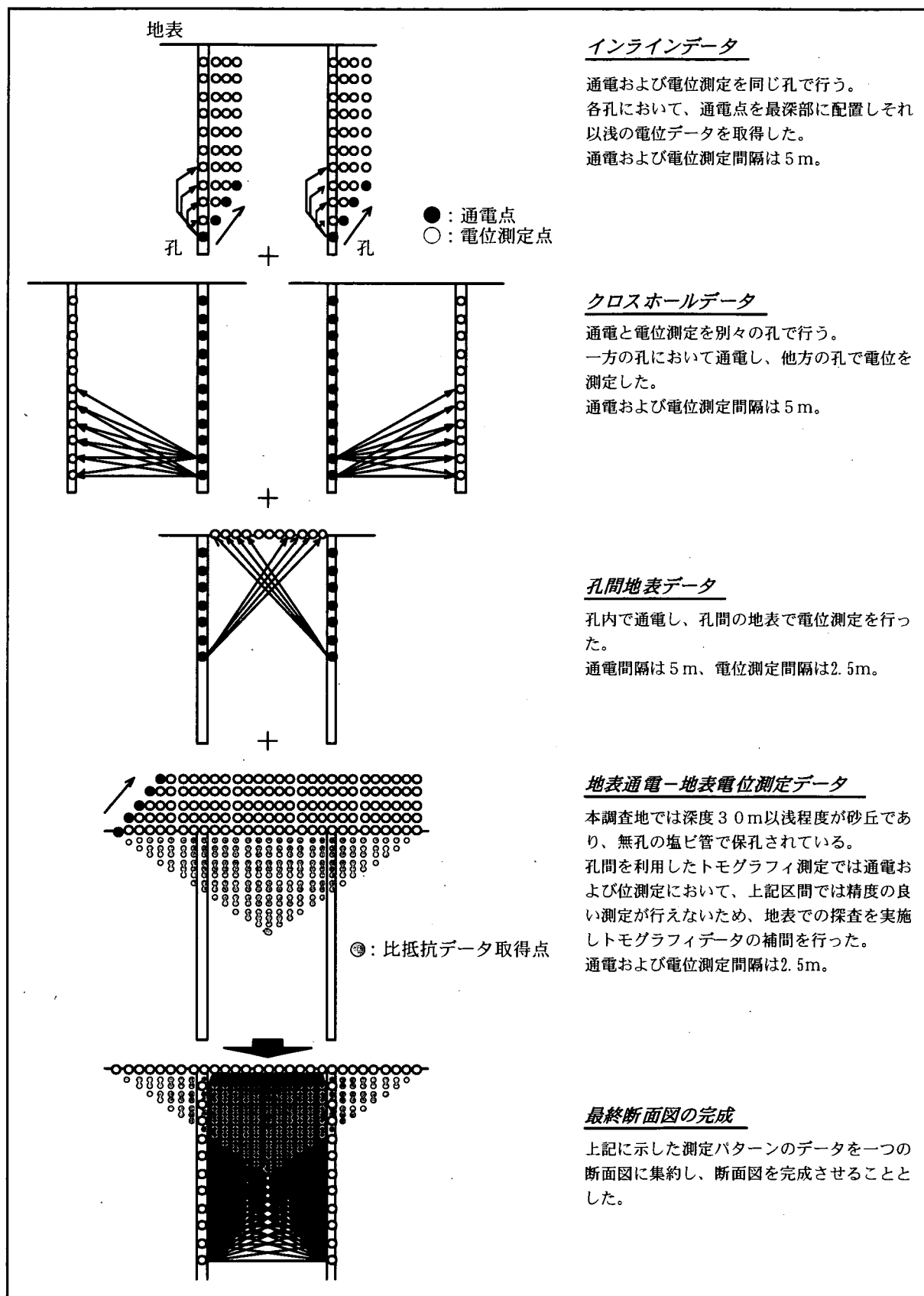


図 3.2-6 比抵抗トモグラフィ調査測定模式図

表 3.2-2 比抵抗トモグラフィ調査使用機器一覧表

機 器 名	数量	仕 様	製 造 社
孔中通電電極	一式	電極数：1個、ケーブル長 300m	応用地質(株)
孔中電位電極	一式	電極数：32 個、電極間隔：5m、ケーブル長 300m	
電極棒 (地表通電、電流遠電極用)	一式	ステンレス製(長さ=60cm)	
鉛－塩化鉛無分極電極 (電位測定、電位遠電極用)	50 個	直径 10cm、高さ8cmの円筒型 鉛の棒を石膏と塩化鉛を混ぜたもので締め固めたもの	
テクノゲル無分極電極(電位測定用)	一式	直径 8cm、厚さ 2mm のシート型 高分子ポリマーからなる、使い捨て、粘着力あり	
遠電極用ケーブル	一式	2芯ケーブル、3000m 分	
データ収録器 (ELREC6)	一式	入力チャンネル : 6ch 出力波形 時間領域 : on +, off, on -, off : 0.5, 1, 2, 4, 8秒 入力インピーダンス : 10MΩ 入力電圧保護 : 1000V以上 入力電圧レンジ 各ダイポール = 10Vmax 2～6ダイポールの合計 = 15Vmax 20ビットシグマデルタコンバーター ノッチフィルター : 50Hz, 60Hz サンプリングレート : 10ms 比抵抗レンジ : 0.1～467KΩ 初期電圧 レゾリューション : 1μV (スタッキング後) 精度 : typ. 0.3% 充電率 レゾリューション : 0.01mV/V 精度 : typ. 0.6% メモリー容量 : 2,500リーディング 寸法 : (W)31×(H)21×(D)21 重量 : 8kg(内蔵バッテリー含む) 電源 : 12V 内部バッテリー, 外部 12V	IRIS社 (フランス)
通電装置 (VIP3000)	一式	最大出力 : 3000VA 出力電圧 : 最大3000V(オートレンジ) 出力電流 : 最大5A(プログラマブル) ダイポール数 : 最大8ダイポール 出力ターミナル : 最大直径4mmのUniclip™ 出力波形 時間領域 : +, off, -, off(on=off) : 0.5～8秒(プログラマブル) 周波数領域 : 方形波 : 0.0625Hz～4Hz(プログラマブル) シングルおよびデュアルモード 時間/周波数精度 : 0.01% 表示 : LCD (出力電流, 電圧, 接地抵抗, 入力電流等) 電源 : 175～270VAC, 45～450Hz リモートコントロール : RS-232c 寸法 : (W)320mm×(H)410mm×(D)240mm 重量 : 16kg	

3.2.3 解析方法

地表電気探査および比抵抗トモグラフィの解析フローチャートを図 3.2-7に示す。

解析では、まずデータの品質チェックを実施した。

まず生の測定データについてデータの品質チェックを行った。品質のチェックでは、電位減衰曲線を用いて異常なデータを抽出し、削除あるいは修正を行った。また、測定データの相反性*もチェックしたところ、ほとんどのデータは相反誤差が数%以内の再現性の良いデータであることが分かった。

2極法で用いる遠電極は、解析の中では無限遠方にあると仮定しているが、実際には有限の距離にある。このため測定した電位データを解析に用いるためには、遠電極の影響を補正する必要がある。今回は、プログラムを用いて、すべての電位データについて遠電極補正係数を計算した。

以上の処理を行い、解析用のデータセットを作成した。

解析では、まず比抵抗分布の初期モデルを作成した。

地表電気探査における初期モデルは、深度 30m 以深についてはH-1孔のインラインデータのうちオフセット距離が 5m での比抵抗データを水平方向に延長し、深度 30m 以浅については地表のデータを用いた直流比抵抗法二次元探査の解析結果から求めた比抵抗分布を採用した。

比抵抗トモグラフィ調査における各断面の初期モデルは、それぞれの断面におけるインラインデータおよびクロスラインデータ**のみを用いた解析結果から得られた比抵抗分布を採用した。

それぞれの初期モデルから理論電位を計算し、この理論電位データと測定データの差が小さくなるように、非線形最小二乗法により初期モデルについて繰り返し修正を行い、比抵抗分布を推定した。地表からの探査である直流比抵抗二次元探査では、見掛け比抵抗を基準として解析を行うことが多いが、比抵抗トモグラフィでは見掛け比抵抗を定義することが困難であるため、解析はすべて電位ベースで行った。理論電位の計算には有限要素法を用いた。今回、水平方向の単位電極間隔が 2.5m、鉛直方向の電極間隔が 5m であるため、 $2.5 \times 5\text{m}$ の要素で比抵抗分布をモデル化した。(要素数はH-1孔×H-2孔断面で 1,360 個、H-2孔×H-3孔断面で 1,360 個、H-3孔×H-1孔断面で 1,080 個)

十分に測定データと理論データの差が十分小さくなった比抵抗モデルを、最終的な比抵

抗断面として採用した。

なお、以上の解析はすべてパーソナルコンピュータ(PC)のプログラムで実施した。

*2極法にて測定された電位データは、電流電極と電位電極を入れ替えても等しい値を示すことが知られており、これを相反定理と言う。

**本調査では、測定の段階では測定可能な限りのデータを全て取得した。しかし、当該地域の比抵抗値は低比抵抗であるため、どうしても通電点と電位測定点の距離(オフセット距離)が大きくなると、測定される電位値が小さくなり、精度が低下する。その結果、オフセット距離の大きい測定データを含めて解析を行うと全体の結果の精度の低下を招くと判断し、そのようなデータは除外して解析を行うこととした。その基準は、各断面の孔間距離を補うことを前提に、インラインデータおよびクロスラインデータはオフセット距離50mまでを採用した。

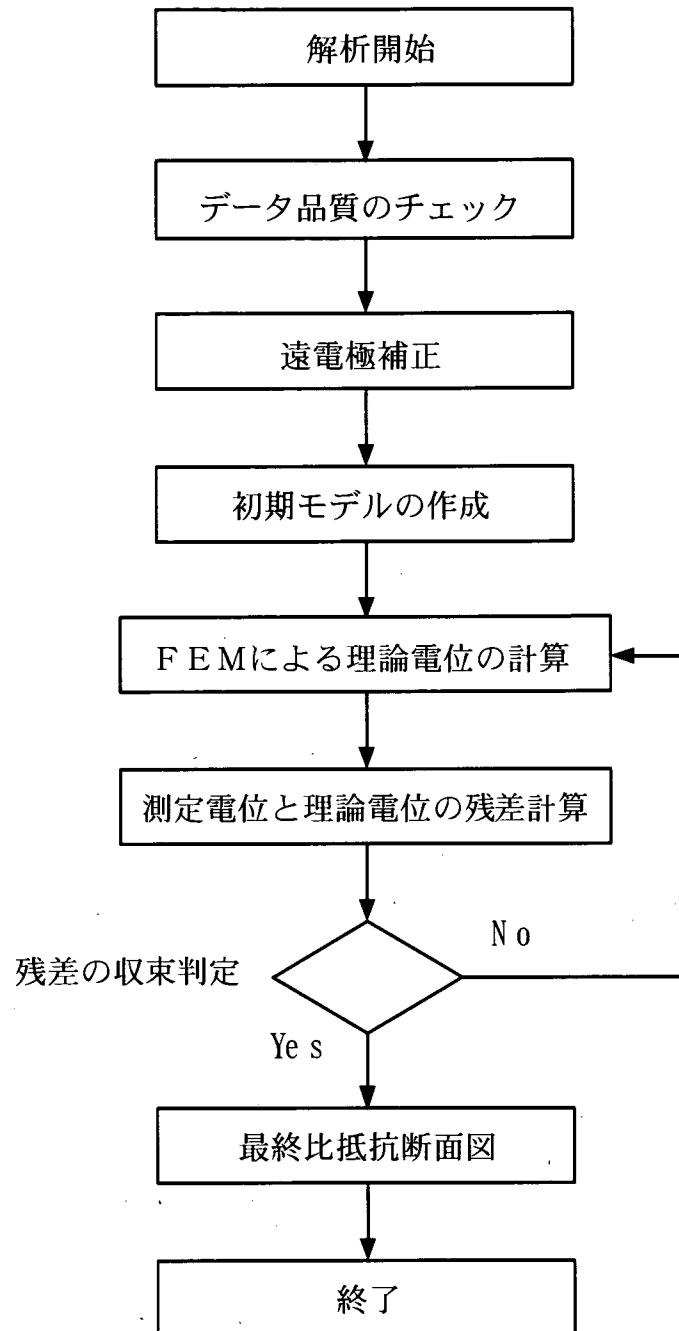


図 3.2-7 地表電気探査および比抵抗トモグラフィ調査解析フローチャート

3.3 調査結果

3.3.1 測定結果

(1) 地表電気探査

測定から得られた測定電位をデータシートにまとめ、巻末資料に示す。

得られた電位を各測定パターンごとにプロットした電位減衰曲線を巻末資料に示す。そのうちの例を図 3.3-1に示す。

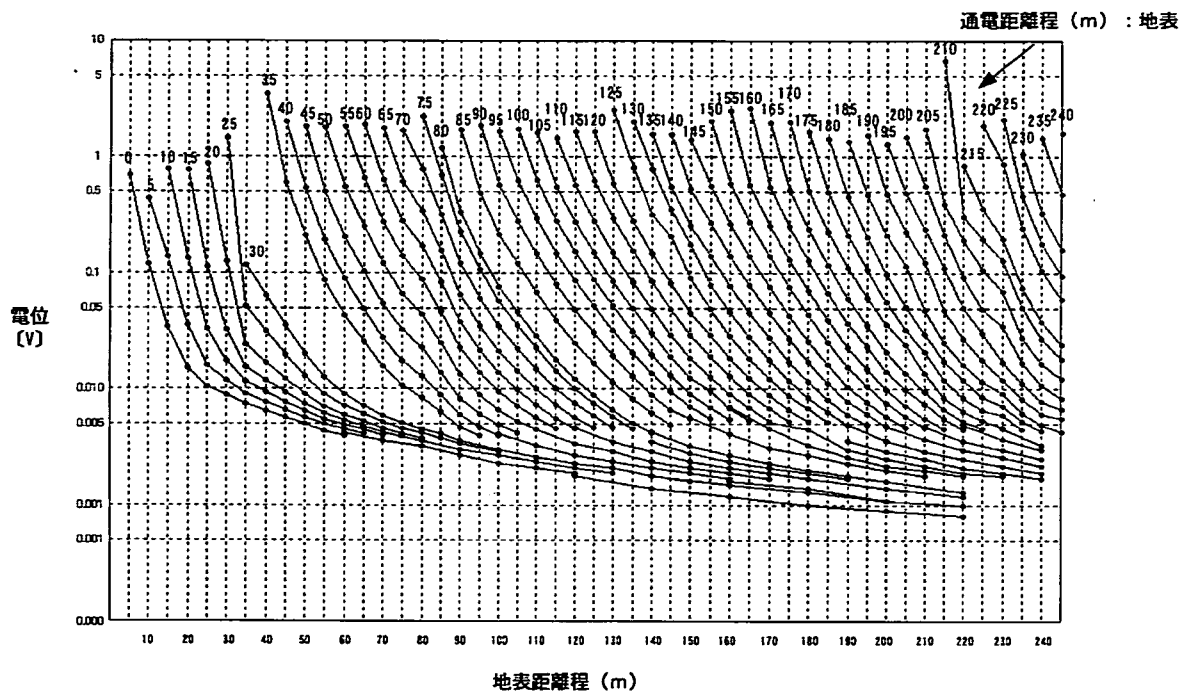


図 3.3-1 電位減衰曲線(地表電気探査:地表通電、地表電位測定)

(2) 比抵抗トモグラフィ調査

測定から得られた測定電位をデータシートにまとめ、巻末資料に示す。

得られた電位を各測定パターンごとにプロットした電位減衰曲線を巻末資料に示す。そのうちの例を図 3.3-2に示す。

地表電気探査および比抵抗トモグラフィ調査で使用した地表電極点の測量結果を巻末資料に示す。

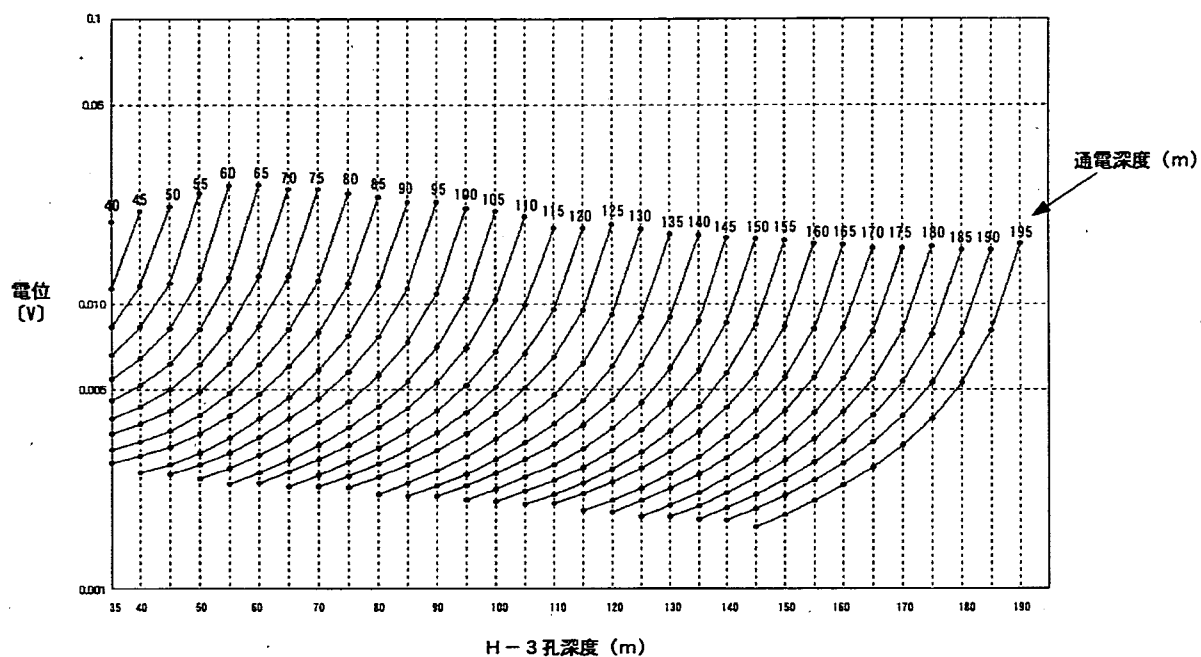


図 3.3-2 電位減衰曲線

(H-2孔×H-3孔断面、H-3孔×H-1孔断面:H-3孔インラインデータ)

3.3.2 解析結果

(1) 地表電気探査

解析結果である断面のコンター図を図 3.3-3に、また、各グリッドのデジタル値を図 3.3-4に示す。

以下にその特徴を述べる。

- ・ 深度 20m 以浅には比抵抗値 $20\ \Omega \cdot \text{m}$ 以上が分布している。
- ・ 深度 20～50m の比抵抗分布は、ほぼ成層である。深度 30～40m 間には比抵抗値 $1\ \Omega \cdot \text{m}$ 程度の低比抵抗帯が存在する。距離程 160～250m ではその下部にも同様なものが見受けられる。
- ・ 深度 50m 以深の比抵抗分布は測線の始点側で比抵抗値が高く、終点側で比抵抗値が低くなっている。その形状は楔状を呈している。

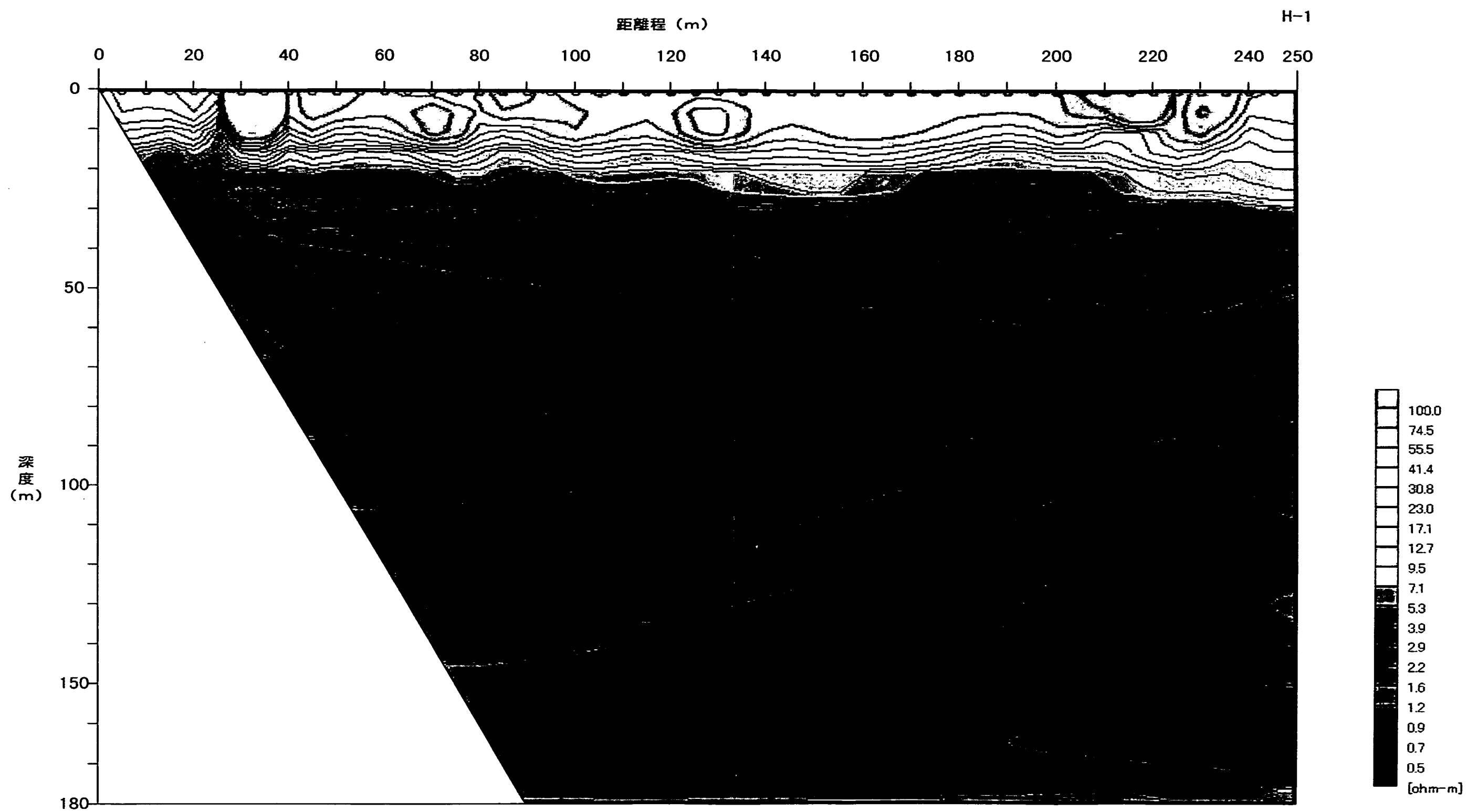
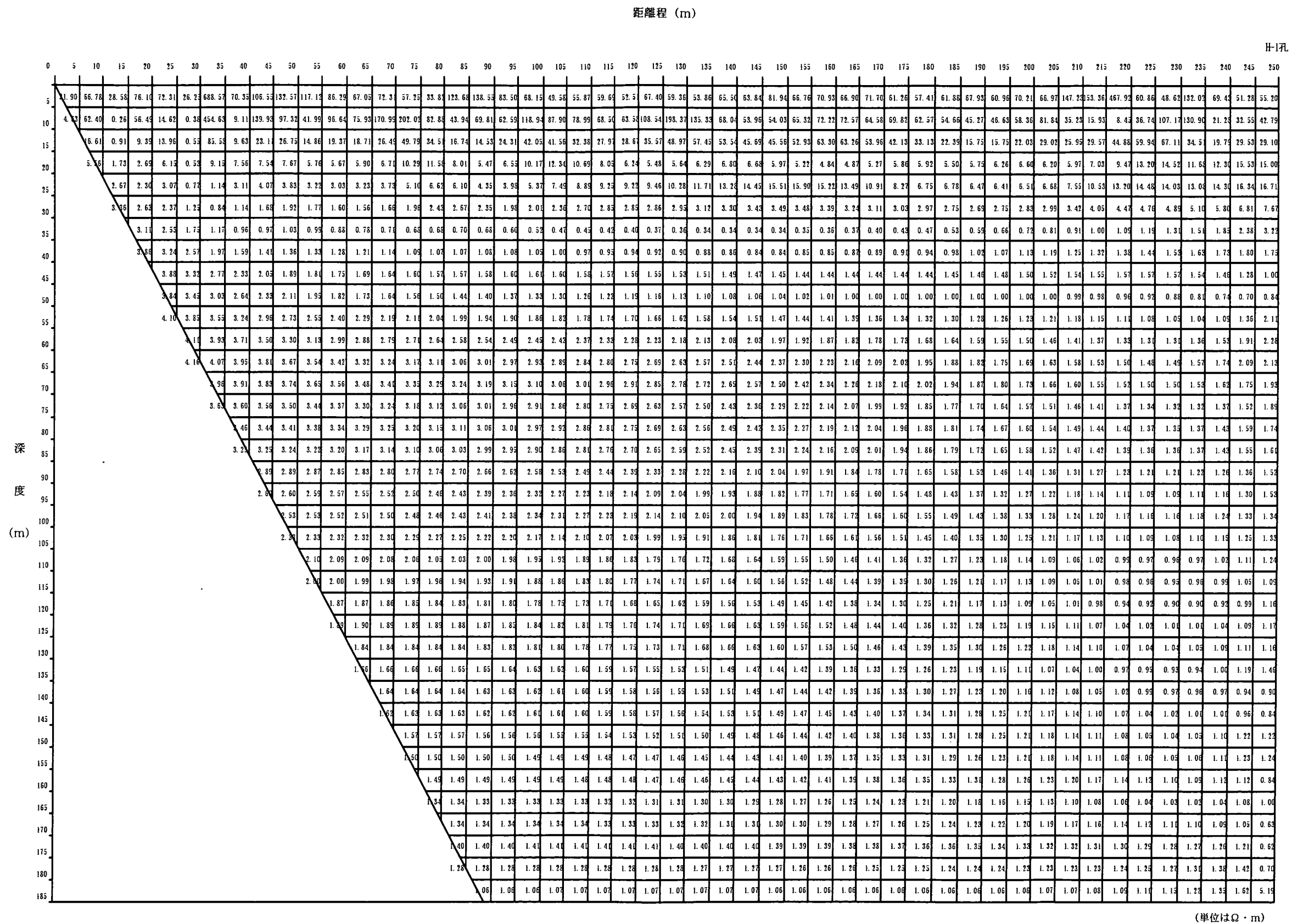


図 3.3-3 地表電気探査解析結果(コンター図)



(2) 比抵抗トモグラフィ調査

解析結果である各断面のコンター図を図 3.3-5～図 3.3-7にまた、各グリッドのデジタル値をに示す。

各断面にはいくつかの特徴が見られるため、その特徴ごとに番号を付け、以下に結果を示す。

a) H-1孔×H-2孔断面

- ①深度 15m 以浅は比抵抗値 $20\ \Omega \cdot m$ 以上となっているが、H-2孔側ではH-1孔側に比較して若干低くなっている。
- ②深度 15m～30m では比抵抗値 $3\sim 10\ \Omega \cdot m$ 程度でほぼ成層構造を示す。
- ③深度 30m～100m は比抵抗値 $2\ \Omega \cdot m$ 程度であるが、H-1孔の深度 50m 付近に部分的に比抵抗値の高いところが見受けられる。
- ④深度 100m～200m では比抵抗値 $1\ \Omega \cdot m$ 程度であり、ほぼ一様である。

b) H-2孔×H-3孔断面

- ①深度 15m 以浅は比抵抗値 $20\ \Omega \cdot m$ 以上となっているが、H-2孔側ではH-3孔側に比較して若干低くなっている。
- ②深度 15m～25m では比抵抗値 $3\sim 10\ \Omega \cdot m$ 程度である。
- ③深度 25m～100m は比抵抗値 $2\ \Omega \cdot m$ 程度であるが、深度 30m～50m には比抵抗値 $1\sim 1.5\ \Omega \cdot m$ 程度が分布する。この傾向はH-3孔側でより顕著である。また、深度 80m～100m には比抵抗値 $1\ \Omega \cdot m$ が分布するが、断面の両端(両調査孔付近)には現れていない。
- ④深度 100m～200m では比抵抗値 $1\sim 1.5\ \Omega \cdot m$ 程度であり、ほぼ一様である。

c) H-3孔×H-1孔断面

- ①深度 15m 以浅は比抵抗値 $20\ \Omega \cdot m$ 以上となっており、その分布はほぼフラットである。
- ②深度 15m～30m では比抵抗値 $3\sim 10\ \Omega \cdot m$ 程度でほぼ成層構造を示す。
- ③深度 30m～100m は比抵抗値 $2\ \Omega \cdot m$ 程度であるが、H-3孔側の深度 30m～50m には比抵抗値 $1\sim 1.5\ \Omega \cdot m$ 程度が分布する。これとは逆に、H-1孔側の深度 50m 付

近には部分的に比抵抗値の高いところが見受けられる。

④深度 100m～200m では比抵抗値 $1\Omega\cdot\text{m}$ であり、ほぼ一様である。

また、各断面は各調査孔において交差しているため展開図として表現できる。その結果を図 3.3-11に示す。

断面図を上記に示した各断面の番号を付けた特徴についてそれぞれ述べる。

- ①深度 15m 以浅の比抵抗値 $20\Omega\cdot\text{m}$ 以上の箇所は、H-2孔側ではその分布が薄く凹状を呈している。
- ②深度 15m～30m における比抵抗値 $3\sim 10\Omega\cdot\text{m}$ 程度の分布は、ほぼ成層構造を示すが、その分布はH-2孔×H-3孔断面側で比較的薄い。
- ③深度 30m～100m 間は各断面ごとに様相が若干違っている。H-2孔～H-3孔側には低比抵抗 ($1\Omega\cdot\text{m}$ 程度) が存在し、その傾向はH-3孔近傍でより顕著である。逆に、H-1孔付近には低比抵抗は存在せず、周囲よりも高比抵抗が見られる。H-3孔～H-1孔には深度 80m～100m にかけて比抵抗値 $1\Omega\cdot\text{m}$ が存在する。
- ④深度 100m～200m では比抵抗値 $1\Omega\cdot\text{m}$ 程度であり、ほぼ一様である。

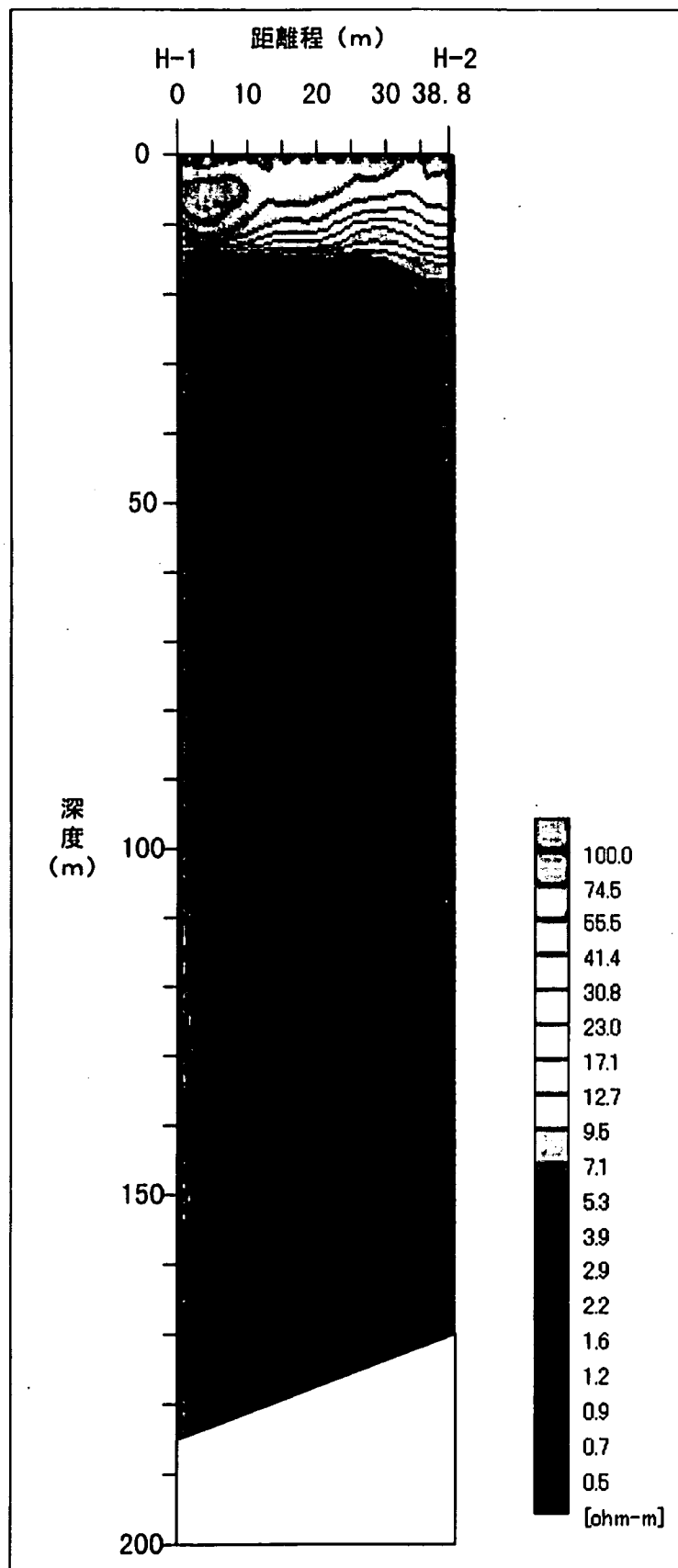


図 3.3-5 比抵抗トモグラフィ調査解析結果コンター図(H-1孔×H-2孔断面)

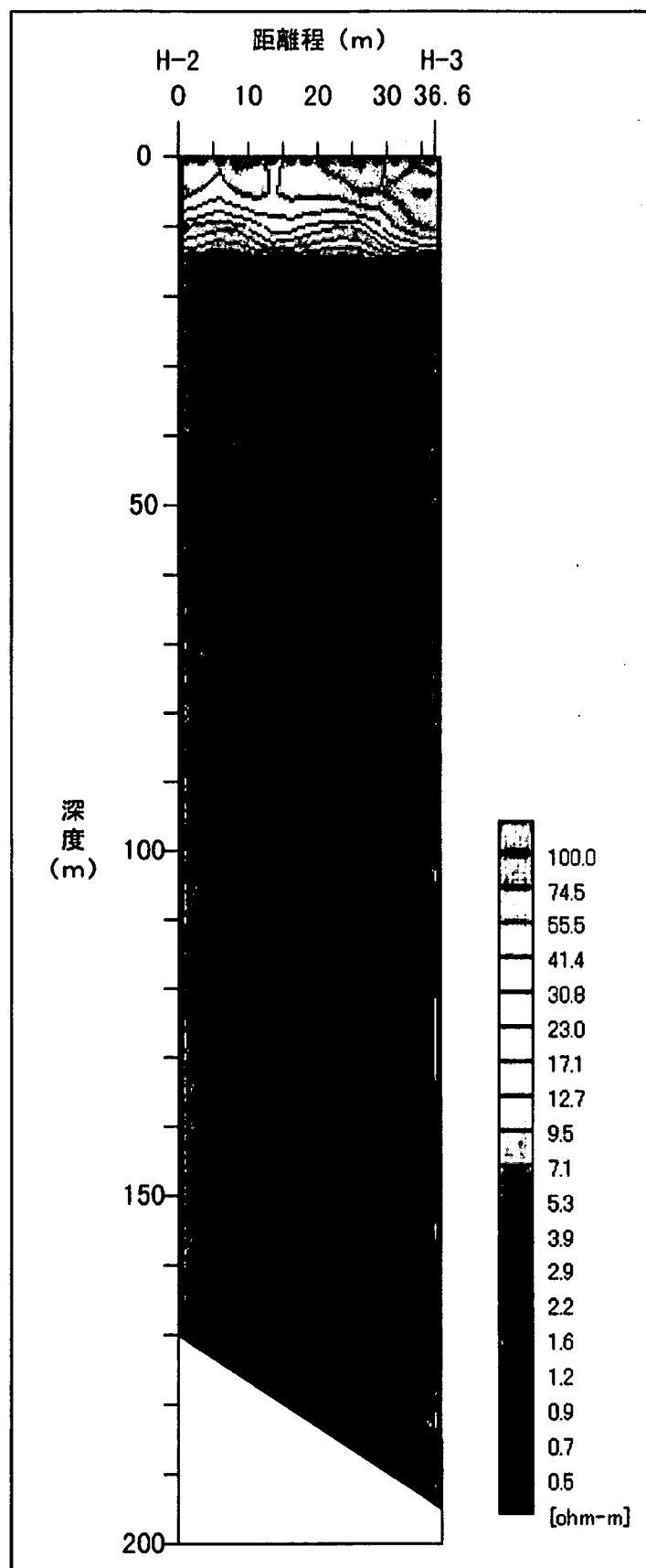


図 3.3-6 比抵抗トモグラフィ調査解析結果コンター図(H-2孔×H-3孔断面)

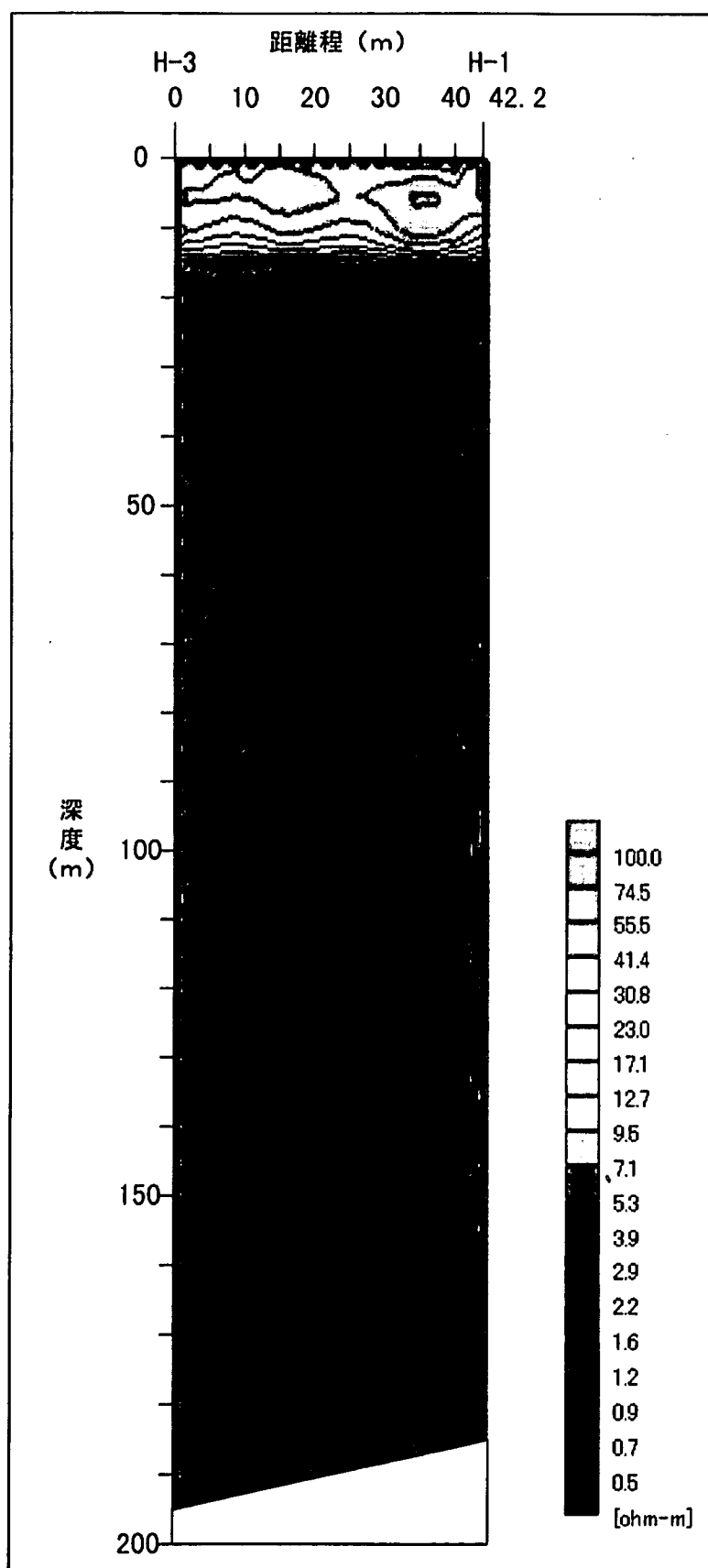


図 3.3-7 比抵抗トモグラフィ調査解析結果コンター図(H-3孔×H-1孔断面)

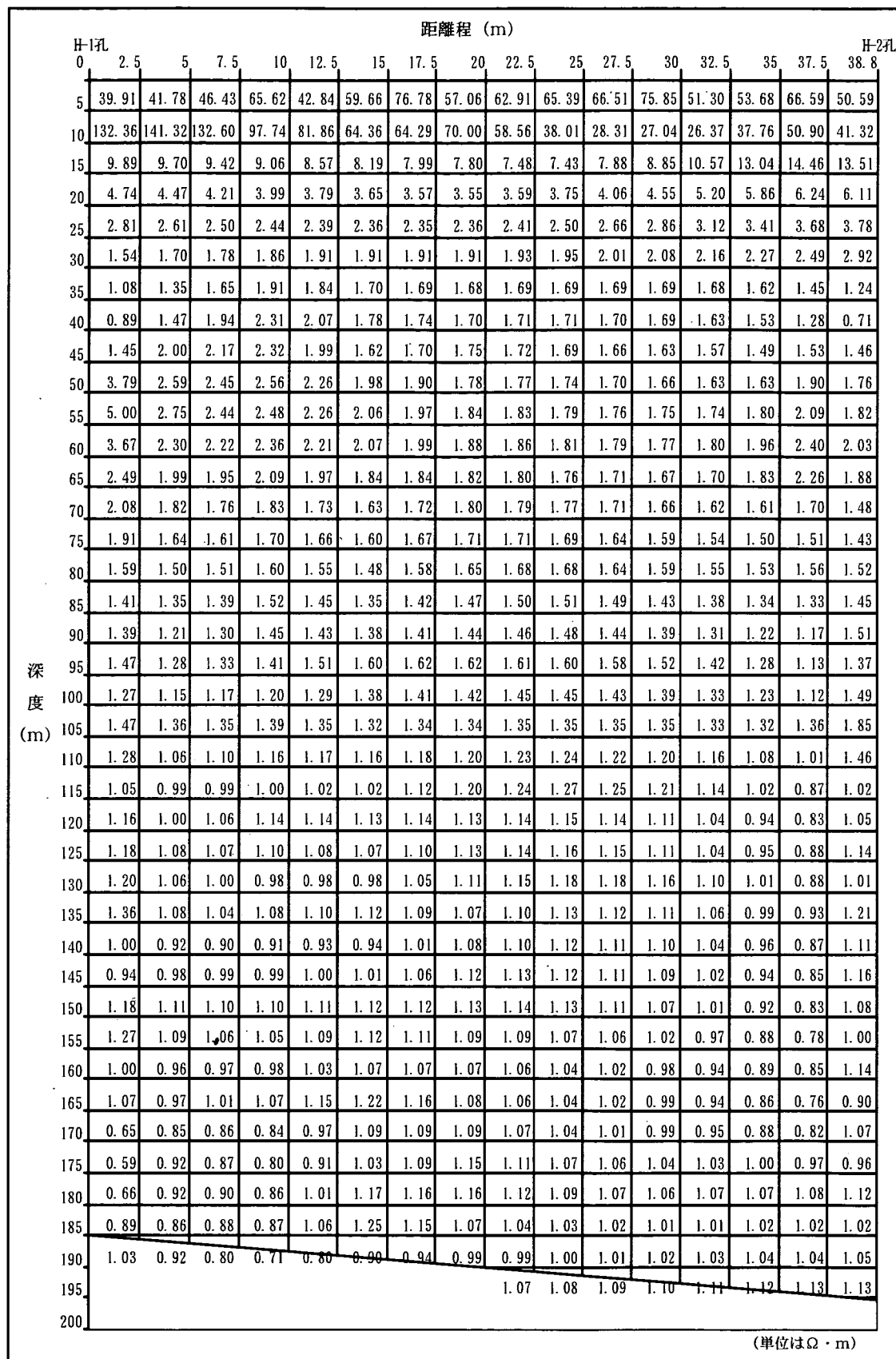


図 3.3-8 比抵抗トモグラフィ調査解析結果グリッドデジタル値
(H-1孔×H-2孔断面)

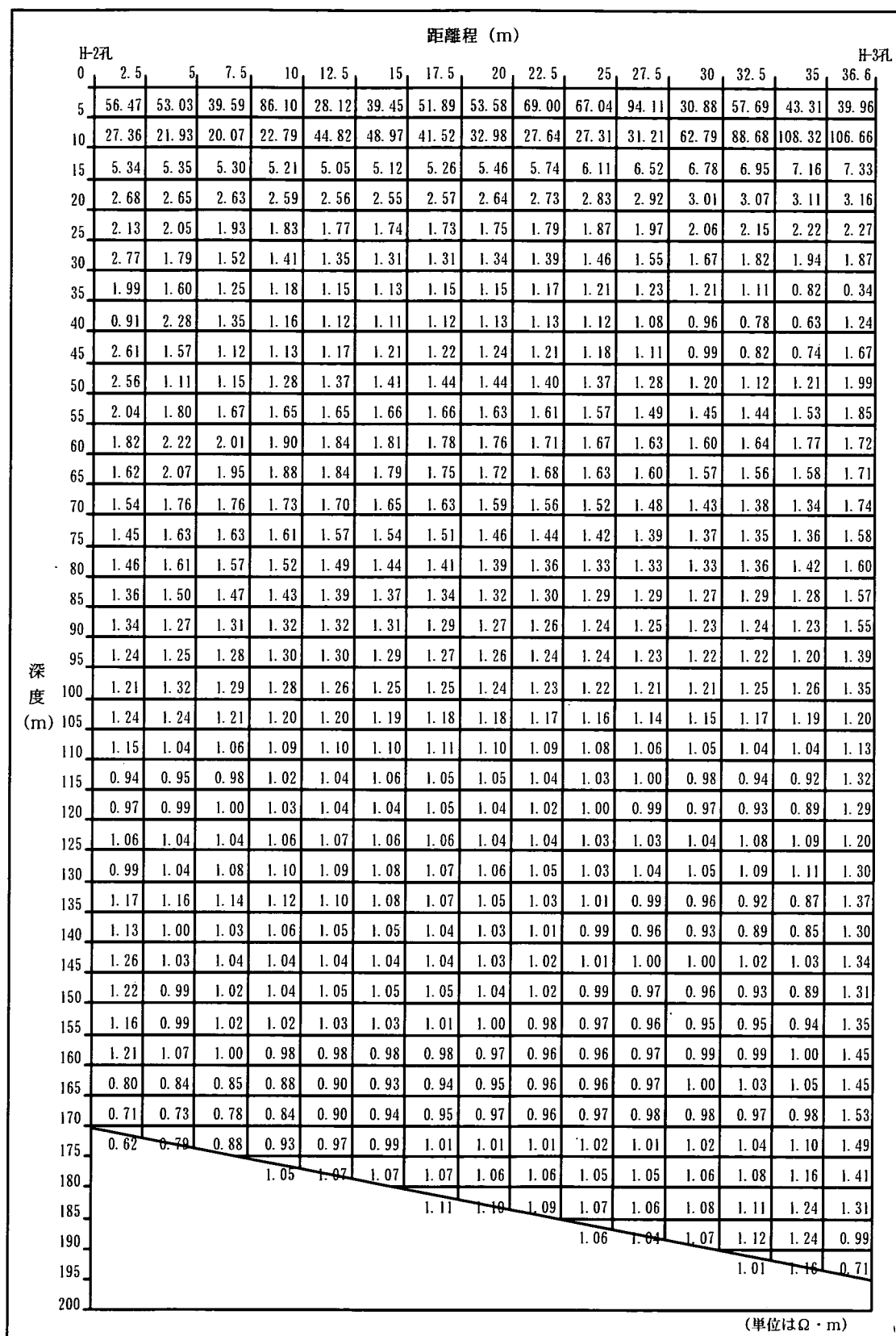


図 3.3-9 比抵抗トモグラフィ調査解析結果グリッドデジタル値
(H-2孔×H-3孔断面)

H-3孔	距離 (m)																	H-1孔
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30	32.5	35	37.5	40	42.2
深度 (m)	5	42.85	47.31	59.24	51.45	54.59	55.89	51.09	52.68	47.88	43.54	46.42	37.78	34.57	35.12	33.64	26.39	96.69
	10	76.82	67.67	59.53	53.87	69.58	81.77	80.56	73.24	64.78	62.87	70.21	89.50	16.85	26.37	13.38	89.45	66.09
	15	7.77	8.09	8.19	8.06	7.88	7.69	7.45	7.18	6.92	6.74	6.67	6.79	6.85	6.70	6.39	5.95	5.10
	20	4.02	4.16	4.16	4.06	3.90	3.74	3.59	3.48	3.40	3.38	3.39	3.40	3.40	3.35	3.28	3.14	2.90
	25	2.97	3.04	2.99	2.88	2.73	2.60	2.49	2.42	2.39	2.39	2.40	2.41	2.46	2.45	2.46	2.39	2.32
	30	2.45	2.52	2.35	2.21	2.08	1.99	1.95	1.91	1.91	1.91	1.94	1.96	2.02	2.02	2.12	2.07	2.15
	35	0.87	1.11	1.47	1.50	1.55	1.55	1.57	1.57	1.60	1.61	1.62	1.63	1.67	1.66	1.72	1.67	2.40
	40	1.17	0.81	0.95	1.02	1.22	1.25	1.34	1.36	1.39	1.40	1.41	1.39	1.35	1.31	1.26	1.29	3.18
	45	0.92	0.59	0.82	0.89	1.10	1.14	1.25	1.28	1.31	1.31	1.31	1.29	1.24	1.22	1.25	1.45	2.80
	50	1.41	1.04	1.01	1.01	1.15	1.18	1.27	1.28	1.32	1.32	1.32	1.30	1.28	1.27	1.36	1.53	3.50
	55	1.68	1.37	1.24	1.19	1.25	1.26	1.32	1.33	1.37	1.37	1.39	1.39	1.41	1.42	1.60	1.74	3.39
	60	1.81	1.67	1.43	1.35	1.35	1.35	1.38	1.39	1.42	1.43	1.46	1.48	1.57	1.62	1.97	2.27	3.48
	65	1.74	1.67	1.49	1.41	1.38	1.37	1.39	1.40	1.44	1.45	1.50	1.52	1.65	1.71	2.07	2.31	3.02
	70	1.60	1.56	1.46	1.39	1.37	1.36	1.37	1.38	1.41	1.42	1.48	1.50	1.63	1.68	1.96	2.12	2.58
	75	1.44	1.46	1.43	1.35	1.33	1.31	1.32	1.32	1.35	1.36	1.42	1.44	1.55	1.60	1.86	1.98	2.45
	80	1.45	1.48	1.39	1.30	1.27	1.24	1.24	1.24	1.27	1.27	1.31	1.33	1.43	1.49	1.74	1.92	2.27
	85	1.35	1.37	1.31	1.23	1.21	1.17	1.18	1.16	1.17	1.17	1.19	1.20	1.23	1.30	1.36	1.54	1.83
	90	1.31	1.33	1.25	1.16	1.14	1.11	1.11	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.15	1.19	1.34	1.50	1.88
	95	1.23	1.29	1.21	1.12	1.11	1.06	1.08	1.07	1.07	1.07	1.09	1.11	1.15	1.19	1.33	1.44	1.81
	100	1.29	1.34	1.20	1.09	1.08	1.04	1.06	1.04	1.07	1.07	1.11	1.12	1.17	1.22	1.37	1.54	1.73
	105	1.19	1.26	1.13	1.04	1.03	1.00	1.04	1.03	1.06	1.06	1.10	1.11	1.17	1.22	1.40	1.55	1.74
	110	1.03	1.07	1.05	0.98	1.01	0.98	1.03	1.02	1.06	1.06	1.08	1.09	1.11	1.14	1.14	1.20	1.44
	115	1.08	1.03	0.99	0.94	0.99	0.97	1.02	1.01	1.04	1.04	1.06	1.07	1.06	1.08	1.01	1.08	1.30
	120	1.03	0.99	0.99	0.94	1.00	0.98	1.03	1.02	1.04	1.04	1.04	1.04	1.03	1.05	1.03	1.10	1.44
	125	1.02	1.04	1.03	0.97	1.02	0.99	1.03	1.01	1.03	1.03	1.04	1.04	1.02	1.05	1.05	1.13	1.46
	130	1.11	1.13	1.05	0.98	1.02	1.00	1.04	1.03	1.05	1.05	1.04	1.04	1.02	1.04	1.02	1.10	1.48
	135	1.11	1.04	1.01	0.96	1.03	1.01	1.06	1.05	1.06	1.06	1.05	1.05	1.03	1.04	1.07	1.13	1.56
	140	1.01	0.95	0.98	0.95	1.03	1.02	1.07	1.06	1.07	1.07	1.06	1.05	0.99	0.99	0.87	0.90	1.13
	145	1.06	1.04	1.00	0.98	1.03	1.02	1.07	1.07	1.09	1.08	1.07	1.07	1.01	1.01	0.88	0.91	1.04
	150	1.05	0.99	0.99	0.96	1.03	1.03	1.08	1.08	1.10	1.10	1.10	1.11	1.11	1.13	1.14	1.19	1.40
	155	1.01	0.95	0.96	0.94	1.02	1.02	1.07	1.07	1.09	1.10	1.09	1.10	1.11	1.14	1.24	1.27	1.46
	160	1.02	0.95	0.96	0.94	1.00	1.01	1.05	1.05	1.06	1.06	1.05	1.05	0.98	0.98	0.83	0.86	0.96
	165	1.03	0.98	0.95	0.94	0.99	0.99	1.03	1.04	1.04	1.04	1.01	1.01	0.94	0.95	0.92	0.98	1.06
	170	0.99	0.88	0.92	0.92	0.99	1.00	1.04	1.04	1.05	1.05	1.02	1.02	0.93	0.94	0.74	0.77	0.63
	175	1.01	0.94	0.93	0.93	1.00	1.01	1.06	1.07	1.09	1.09	1.07	1.08	1.00	1.00	0.84	0.88	0.57
	180	1.01	0.90	0.94	0.94	1.03	1.04	1.10	1.10	1.14	1.14	1.14	1.15	1.09	1.10	0.95	0.95	0.77
	185	1.11	1.02	0.98	0.98	1.06	1.07	1.14	1.16	1.18	1.19	1.20	1.20	1.16	1.16	1.02	0.96	1.05
	190	1.04	0.98	0.99	0.99	1.09	1.11	1.18	1.19	1.23	1.23	1.24	1.24	1.22	1.23	1.10	1.11	0.67
	195	0.86	0.91	1.00	1.00	1.14	1.15	1.21	1.22									
	200																	

(単位は $\Omega \cdot m$)

図 3.3-10 比抵抗トモグラフィ調査解析結果グリッドデジタル値

(H-3孔×H-1孔断面)

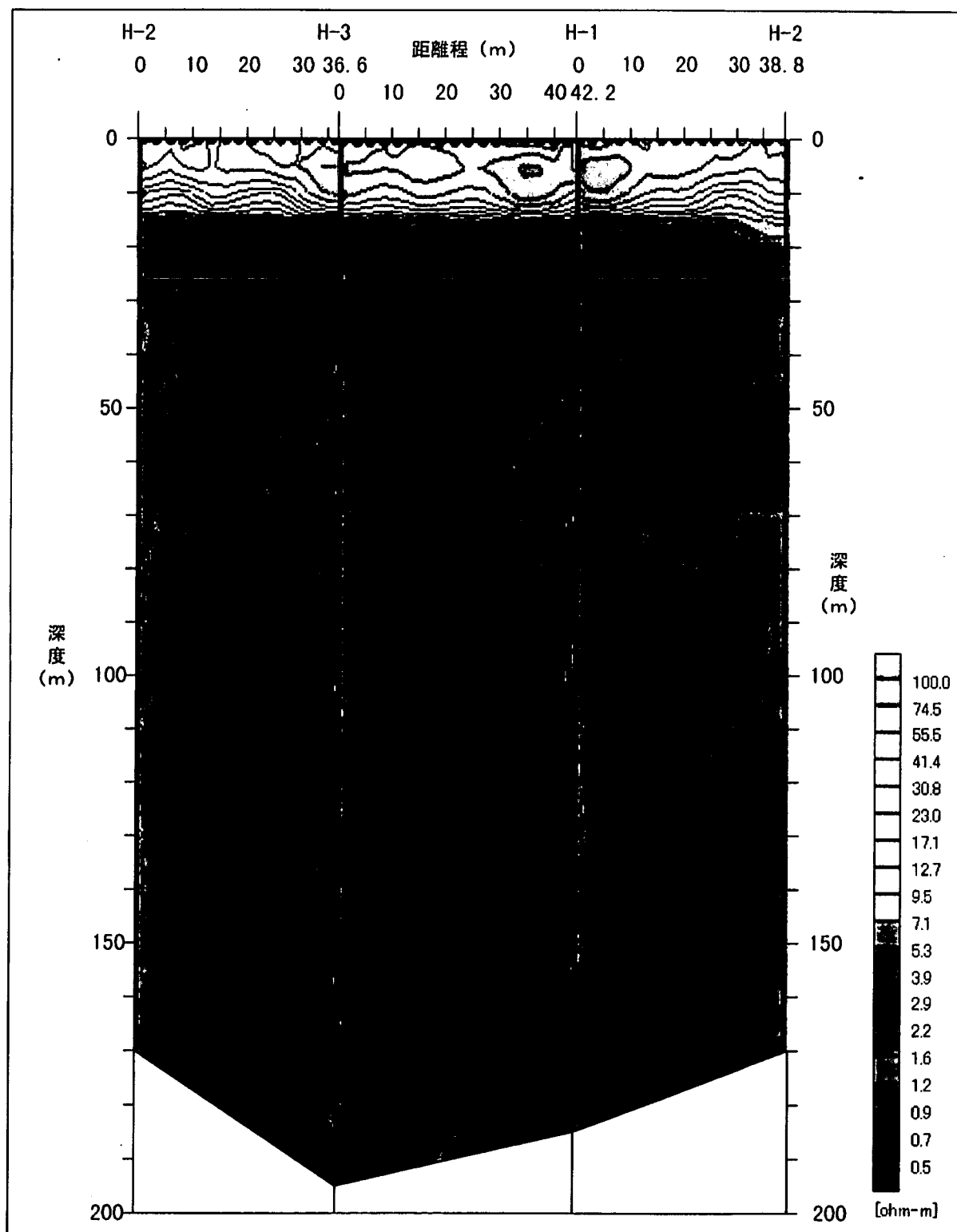


図 3.3-11 比抵抗トモグラフィ調査解析結果展開図

3.4 まとめ・考察

3.4.1 電気探査(直流比抵抗二次元探査)のまとめ

地表電気探査および比抵抗トモグラフィ調査の結果を以下にまとめる。

- ①深度 15m 以浅 : 比抵抗値は $20\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上である。
- ②深度 15m～30m : 比抵抗値は $3\sim 10\ \Omega\cdot\text{m}$ 程度である。
- ③深度 30m～50m : 比抵抗値は $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 程度と低比抵抗であるが、H-1 孔付近では顕著ではない。
- ④深度 50m～100m : 比抵抗値は $1.5\sim 2\ \Omega\cdot\text{m}$ 程度であるが、一番海側の H-3 孔×H-1 孔断面には比抵抗値 $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 程度と低比抵抗値を示す部分も見られる。また、陸側に行くに従い比抵抗値は高くなる傾向を示す。その形状は海側に向かって楔状を呈している。
- ⑤深度 100m 以深 : 比抵抗値は $1\ \Omega\cdot\text{m}$ 程度でほぼ一様である。

H-1 孔の近傍に相対的に比抵抗が高い部分が存在する。これは H-1 孔が掘削後時間が経過していること、掘削径が他の 2 本よりも大きいこと等から、ボーリング孔の影響であると考えられる。

深度 15～30m 間は深度が増すに従って比抵抗が徐々に低下する区間であるが、ボーリング孔内のデータは深度 30m 以深しかないため、他の部分と比べて相対的に精度が落ちている可能性がある。

3.4.2 塩淡境界の位置、形状、分布に関する考察

本調査は、当該地の塩淡分布(2次元分布)を求める事を目的としている。そのためには塩淡分布すなわち地層水の比抵抗(導電性)を求める必要がある。

地層水の比抵抗は、その地層水を伏在させる地層の比抵抗値の要因となっていることは明らかであるが、地層の比抵抗値はその他にもいくつかの要因によって左右されていると考えられる。以下にその要因を示す。

①地層水の比抵抗

②孔隙率

③構成物質の導電性:導電性鉱物分布(粘土鉱物含有量)

以上のことから地層水の比抵抗は、地層の比抵抗、孔隙率、粘土鉱物含有量(導電性物質の関与)を求めることによって、間接的に把握する事ができると考えられる。ただし、2次元分布を求めるためには、先に述べた3項目の2次元分布が必要となる。

以下に示す方法で、それぞれの項目における2次元分布を把握する。

- ・2次元地層の比抵抗分布 : 比抵抗トモグラフィ調査結果
- ・2次元孔隙率分布 : 別途実施した調査孔(断面両端2孔)における密度検層結果の補間
- ・2次元導電性鉱物分布 : 別途実施した調査孔(断面両端2孔)における自然放射能検層結果の補間

具体的には、以下のようにそれぞれの二次元分布を算出した。

- ①二次元電導度分布は、比抵抗トモグラフィの結果から、深度方向 5m 水平方向 2.5m の長方形のセルごとに一つの比抵抗が与えられるので、これの逆数を取ることで電導度に換算して求めた。
- ②二次元孔隙率分布は、断面両端2孔での密度検層結果から以下の式によって孔隙率を算出し、比抵抗トモグラフィのセルの深度方向の長さである 5m 毎に平均した後、両孔の同じ深度の値をボーリング孔からの距離に応じて重み付け平均して求めた。

$$\phi = (\rho_{ma} - \rho_b) / (\rho_{ma} - \rho_f)$$

ρ_{ma} : 岩盤のマトリックスの密度(2.65を採用)

ρ_b : 密度検層結果

ρ_f : 孔隙液体の密度(1.0を採用)

③二次元導電性鉱物分布は、自然放射能検層結果が粘土鉱物含有量の相対的变化を表しているとの考えでに基づき、断面両端2孔での自然放射能検層結果を比抵抗トモグラフィのセルの深度方向の長さである5m 毎に平均した後、両孔の同じ深度の値をそれぞれのボーリング孔からの距離に応じて重み付け平均して求めた。

導電性鉱物分布を除いた地層の電導度と地下水の電導度と孔隙率との関係は Archie (1942)によって示されている。

$$R_f = a \cdot R_w \cdot \phi^{-m} \quad \leftarrow \text{アーチーの式}$$

R_f : 地層の比抵抗

R_w : 地下水の比抵抗

ϕ : 孔隙率

a, m : 係数

電導度で書き換えると

$$C_f = a^{-1} \cdot C_w \cdot \phi^m$$

C_f : 地層の電導度

C_w : 地下水の電導度

導電性鉱物の影響などを含めた式を以下のようにする。

$$C_f = a^{-1} \cdot C_w \cdot \phi^m + C_m$$

C_m : 導電性鉱物の影響などのその他の効果を含んだもの

以上から、地層水の電導度を求める式は以下のようになる。

$$C_w = a \cdot (C_f - C_m) / \phi^m$$

m は一般に 1.8~2.1 程度とされるがここでは 2.0 とした。

C_m は自然放射能検層結果を N 、係数を b として

$$C_m = b \cdot N$$

bは1とした。

図 3.4-1に2次元地層水の電導度分布を求めるための流れを示す。

また、図 3.4-2にH-2孔×H-3孔断面を例にとり、地層水の電導度を導くまでの作業を模式的に示す。図を見ると検層結果が示す通り、孔隙率および粘度含有量の分布はほぼ成層構造を示している。ただし、表層の砂丘砂と岩盤(泥岩)の境界部である深度 25m付近を境に値の変化が見られる。岩盤中では上部の風化帯(深度 50m程度か)以外では大きな変化は見られない。このことは全断面について同様に言え、孔隙率と粘土鉱物含有量の分布は当該地域では地盤の比抵抗の分布に与える影響は大きくないと判断することができ、地盤の比抵抗を大きく左右するのは地層水の比抵抗であると考えられる。そのことは図中の地層水の電導度分布が地盤の電導度分布に酷似していることから肯定される。

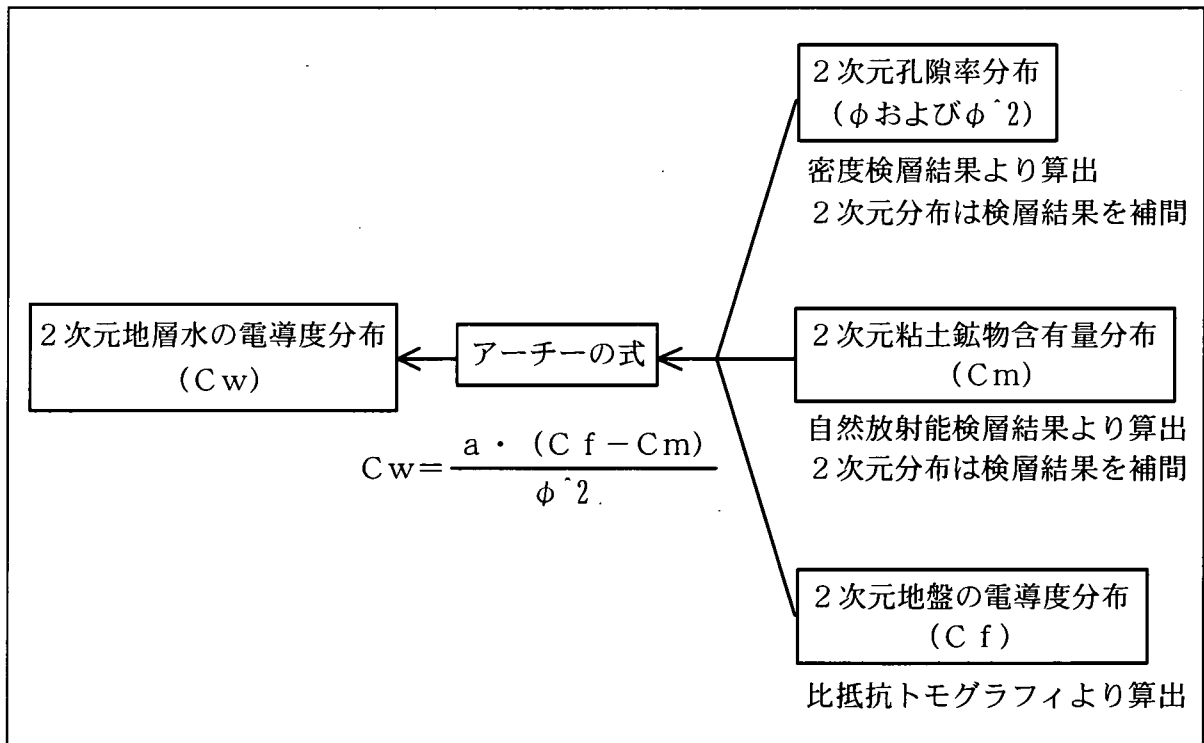


図 3.4-1 2次元地層水の電導度分布算出フローチャート

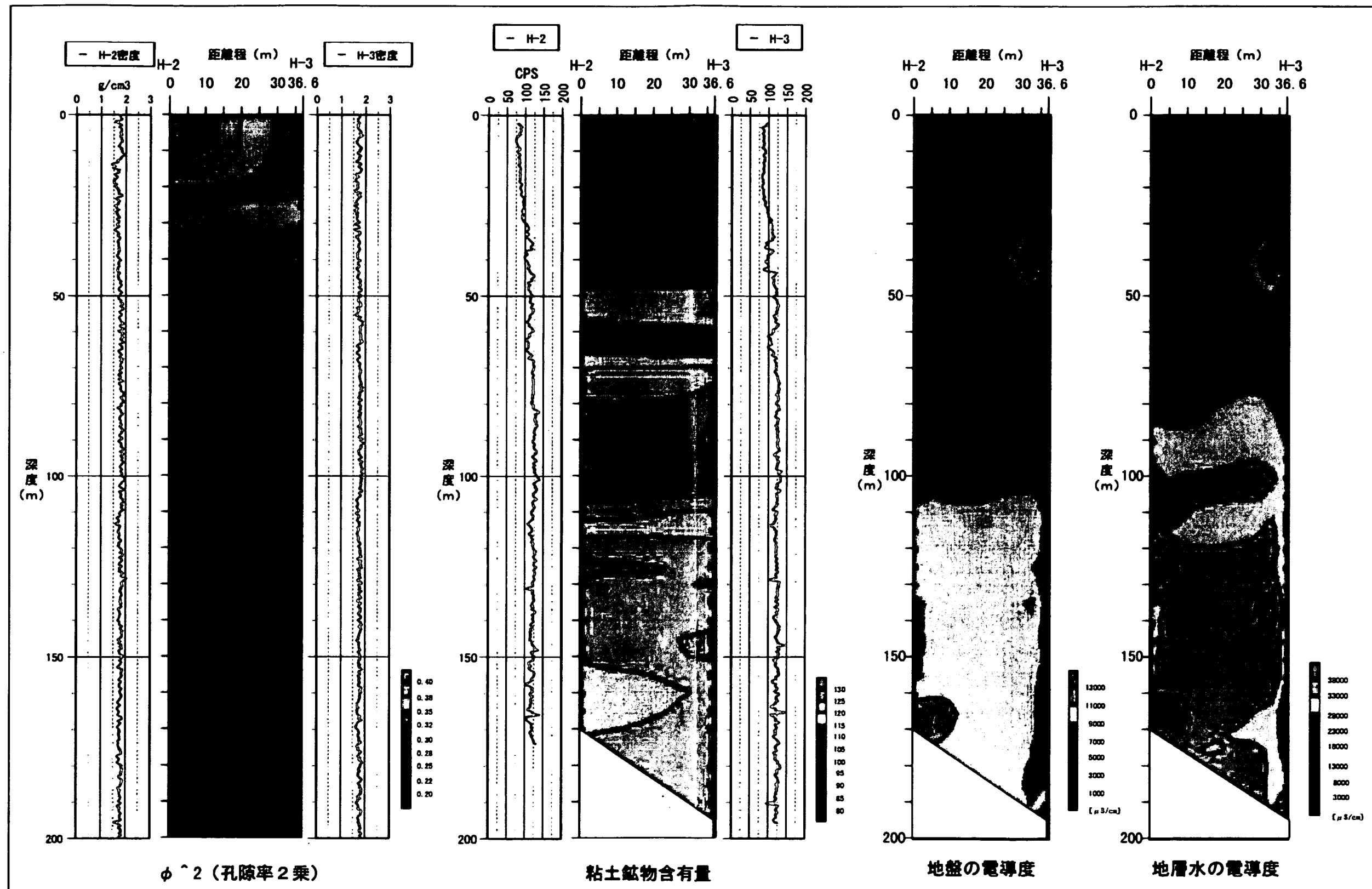


図 3.4-2 検層結果を用いた地層水の電導度算出作業模式図

全ての断面について地層水の電導度の算出を行い、図 3.4-3に展開図として示す。さらにその展開図をもとに塩淡境界の検討を行い、模式図として同図中に示す。

まず展開図について、その特徴を以下に述べる。

- ・深度 25m以浅 : 地層は砂丘砂に対応しており、地層水の電導度は $13,000 \mu S/cm$ 以下となっている。その分布はフラット状である。
- ・深度 25～50m : 地層は岩盤(泥岩)であるが風化帯に相当しているのではないかと考えられる。地層水の電導度は $15,000 \sim 30,000 \mu S/cm$ 程度であるが、H-3孔付近には局所的に高電導度を示す個所が見られる。
- ・深度 50～120m : 地層水の電導度は $18,000 \sim 38,000 \mu S/cm$ と変化している。深度 80～90m付近に見られる $28,000 \mu S/cm$ 以上の分布は凸状を呈している。
- ・深度 120m以深 : 地層水の電導度はそのほとんどが $33,000 \mu S/cm$ 以上となっている。その分布はほぼフラットである。より深部に行くに従い地層水の電導度は高くなる傾向を示しているとも見受けられるが、深度 170m 以深のデータが少ないため現状では判断する事は難しい。

次に塩淡境界の模式図について以下に述べる。

塩淡境界を論ずる上で、地層水を淡水帯、塩水帯、漸移帯の3つに区分することができるが、漸移帯には淡水が優勢なものと塩水が優勢なものとがあると考え、ここでは4区分とした。その区分ごとに以下に述べる。

- ・淡水系地層水(紺色) : 深度 25m以浅に相当し、地質は砂丘砂である。その分布はほぼフラットである。
- ・漸移系(淡水)地層水(青色) : 深度 25～80m程度に相当し、地質は泥岩である。
下部の漸移系(海水)地層水帯との境界は逆凹状を呈す。
- ・漸移系(塩水)地層水(黄色) : 深度 80～120m程度に相当し、地質は泥岩である。
上部の漸移系(淡水)地層水帯との境界は凸状

を呈す。

・塩水系地層水(赤色)

:深度 120m以深に相当し、地質は泥岩である。その分布はほぼフラットである。

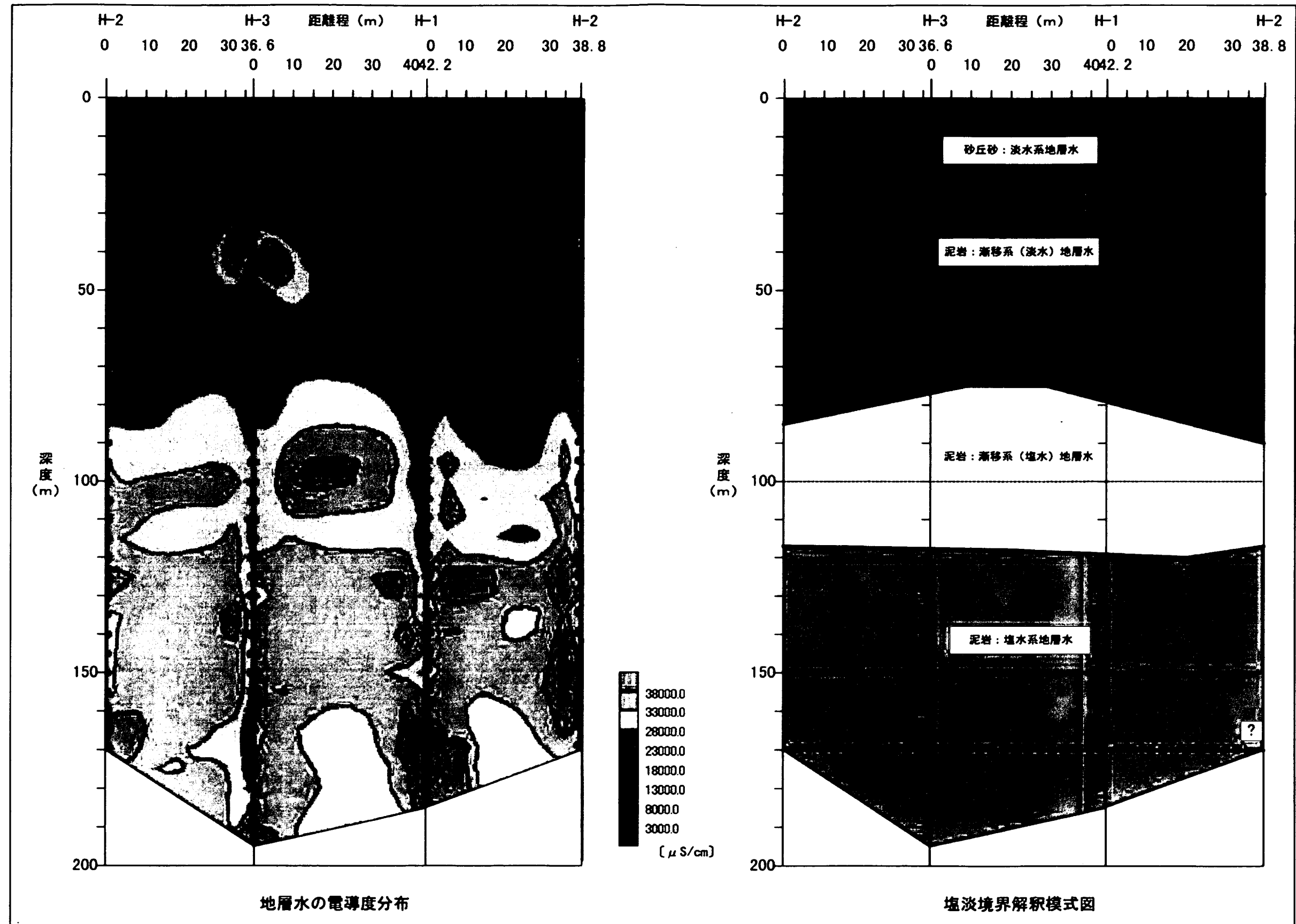


図 3.4-3 地層水の電導度分布と塩淡境界解釈模式図

今回の調査から得られた地層水の電導度値がどの程度の信頼性があるかどうかを検証するために、丸井・木山(1999)が実施したボーリングコア(H-1孔)から得られた間隙水の電導度と比較検討を行った。その結果を図 3.4-4 に示す。比較検討に用いたデータは、H-1孔×H-2孔断面およびH-3孔×H-1孔断面のうち水平方向のオフセットが0m(ジャストポイント)と2.5mのデータ(データは水平方向2.5m、鉛直方向5mのセルの値)とした。結果的に、H-1孔上のデータが2種類、H-2孔およびH-3孔両側に2.5m離れたデータということになる。

以下に各断面での結果を示す。

- ・H-1孔×H-2孔断面 : 間隙水の電導度と今回のデータは良い対応を示している。
ただし、深度60m以浅では今回のデータのほうが低い傾向を示す。
- ・H-3孔×H-1孔断面 : 今回のデータのうちオフセットの0m(H-1孔上)が全体的に間隙水の電導度よりも低い傾向を示す。この傾向は深度60m以浅ではより顕著となる。
- ・2断面の平均値 : 上記2断面の2データ、計4データを平均したものである。
このデータは間隙水の電導度と非常に良い対応を示している。

この結果、今回取得したデータは信頼性の高いデータであると考えられる。

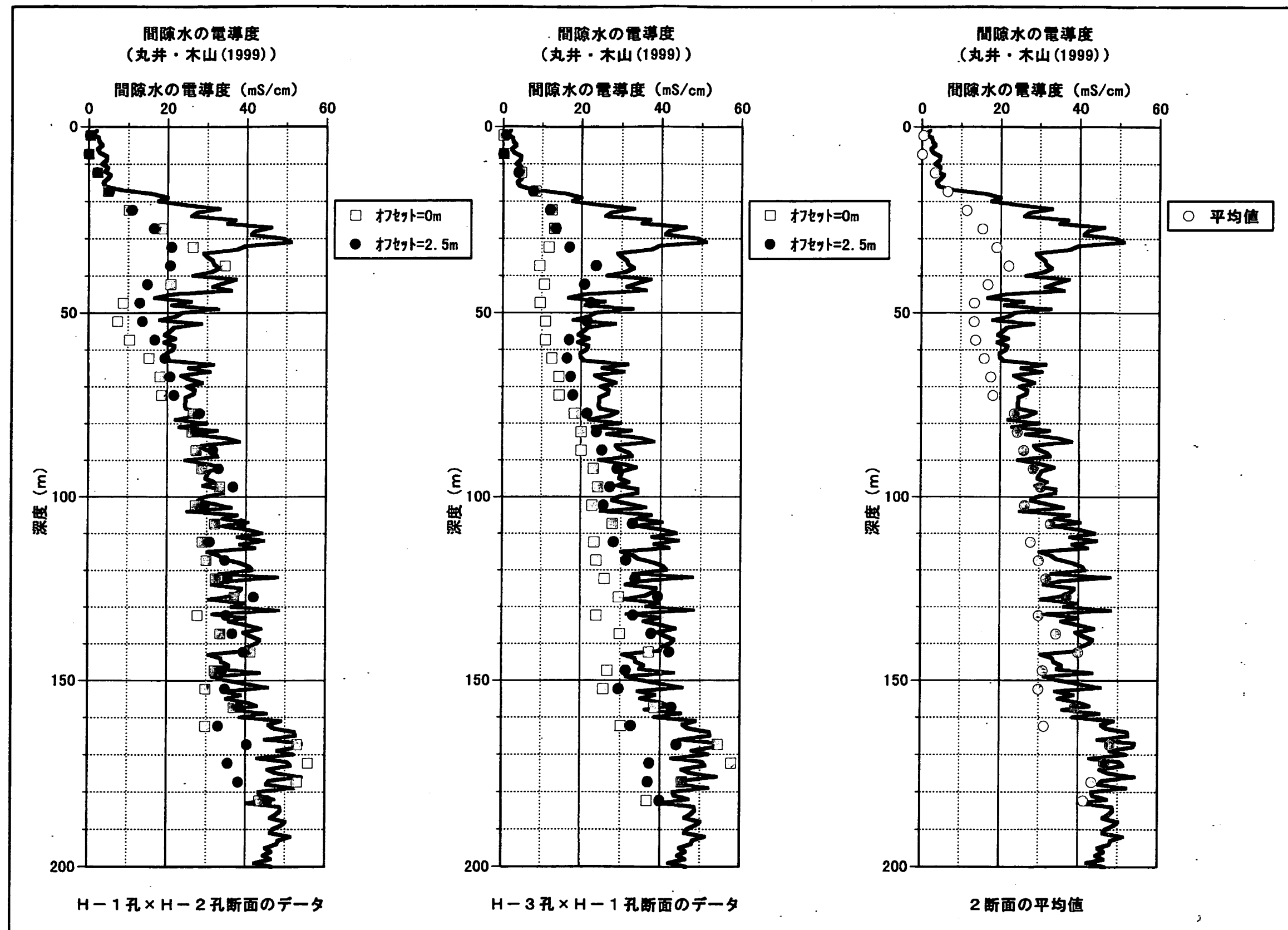


図 3.4-4 ボーリングコア (H-1 孔) から得られた間隙水の電導度と比抵抗トモグラフィ調査から得られた地層水の電導度との比較

3.4.3 調査解析手法の適用性および課題等の整理

(1) 電気探査手法について

電気探査(比抵抗法)において測定される電位は周辺の比抵抗値に比例する。

比抵抗が一樣であれば、地表で通電した場合に測定される電位は、比抵抗値 ρ 、電流値 I 、通電電極から電位測定電極までの距離 R を用いて、

$$V = I \cdot \rho / (2 \cdot \pi \cdot R)$$

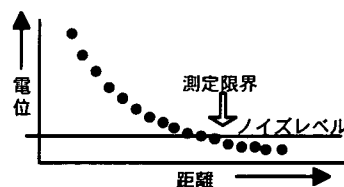
で表される。

地表部を除いてほぼ全域に渡って $1 \sim 2 \Omega m$ の非常に低比抵抗な地層が分布している本調査地での適用にあたっては、測定される電位が非常に小さいものになる事が予想され測定値の S/N が心配された。一般的な電気探査装置で通電する電流は $0.1 \sim 0.2 A$ の程度であるので、例えば電極間隔を $50 \sim 100 m$ とすれば、測定値は $0.15 \sim 0.6 mV$ の程度となる。 $0.1 mV$ 程度のノイズは一般的であるので、この場合 S/N は1程度となり、電気探査の適用は困難となる。そこで、本調査では大電流を流すことのできる通電装置を用いて $4 A$ の電流を通電することによって、良好な測定値を得た。実際に測定された電位データは、 $100 m$ の電極間隔で $4 mV$ 程度であった。本調査地のような低比抵抗領域においても、数 A の電流を通電すれば、 $40 m$ 程度の孔間距離の比抵抗トモグラフィが適用可能であることが確認できた。

本手法を、孔間距離およびボーリング孔深度の大きな探査に適用する場合には、以下のような問題が想定される。

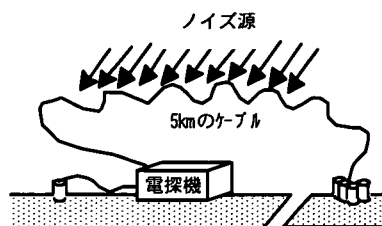
a) 電位の減衰に伴う S/N の低下

基本的には、電極間隔が10倍になれば電位は $1/10$ になる。同じノイズレベルであれば、 S/N が $1/10$ になることを意味する。



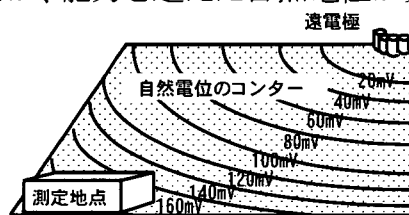
b) 遠電極ケーブルの延長に伴うノイズの増大

二極法の電極配置では最大電極間隔の10倍程度の距離が遠電極と測定点までに必要である。遠電極から測定点までケーブルを長距離張るということは、その間で外部から誘導されるノイズをより受けやすくなることを意味する。



c) 遠電極が離れることによる自然電位の増大

遠電極が離れると自然電位が大きくなる事が予想される。電探機には自然電位をキャンセルする能力が付加されているが、能力を超えた自然電位が発生する可能性がある。



それぞれに対する対応策としては、以下のように考える。

- ①電流値を増大する。本調査で使用した送信機は3KWの能力である。現状10KWの送信機が開発されており、3倍程度の電流を通電することは現実的である。

電流値に限界があれば、ノイズを減らす必要がある。電探機の改良(特にノイズキャンセルの能力)、スタッキング数の増加が考えられる。通電シグナルは現在ステップ状だが、これを低周波の交流にすることもノイズ除去には有効と考えられるが、送信・受信機とも開発する必要がある。

- ②遠電極ケーブルの材質の工夫(例えばシールド線にするなど)、電極配置の変更(二極法から三極あるいは四極法: (遠電極が不要))
- ③電探機(特に自然電位キャンセラー)の改良、電極配置の変更が考えられる。

(2) 地層水電導度分布の推定方法

本手法では、二次元平面内に電極を配置して測定を実施した。解析断面が平面であるの

で、二次元探査と呼ばれる。本調査地においては、堆積構造がきわめて水平成層に近かったため、解析断面の外の構造が与える影響(三次元構造の影響)は少なかったと考えられるが、地質構造がもっと複雑な場合は、三次元構造が解析結果に与える影響が大きくなることが予想される。三次元探査手法は一般にコストがかかるため実用的でないが、二次元探査結果を解釈する際に三次元構造の影響を考慮できる解釈技術が必要である。

また、逆解析手法の宿命ともいえる、解析結果の唯一性という問題がある。すなわち、測定データを満足する構造が一つではなくいくつか考えられる場合である。これに対しては、適切な電極配置(測定パターン)と解析パラメータの設定によって対応することになるが、確実な方法はなく、経験的あるいは試行錯誤的に対処するしかないのが現状である。

(3) 地層水電導度分布の推定方法

地層水電導度を地層の電導度と孔隙率と粘土含有率の関数と考えて、地層水電導度を推定する手法を適用した結果、既存資料(コアの間隙水の電導度)と調和的な結果が得られたことは、本調査地における本手法の適用性を示しているものと考ええる。

一方で、本調査地は、孔隙率・粘土含有率ともに変化の少ない均質性の高い地層が分布していたため、比抵抗分布の特徴はほぼそのまま地層水電導度分布の特徴を示しており、本調査地に限れば、孔隙率・粘土含有率の変化を考慮する必要性は低かったと言える。本手法を他の調査地にて適用できるかどうかは、ある程度孔隙率・粘土含有率ともに変化のある地層で適用して評価し判断するべきであろう。

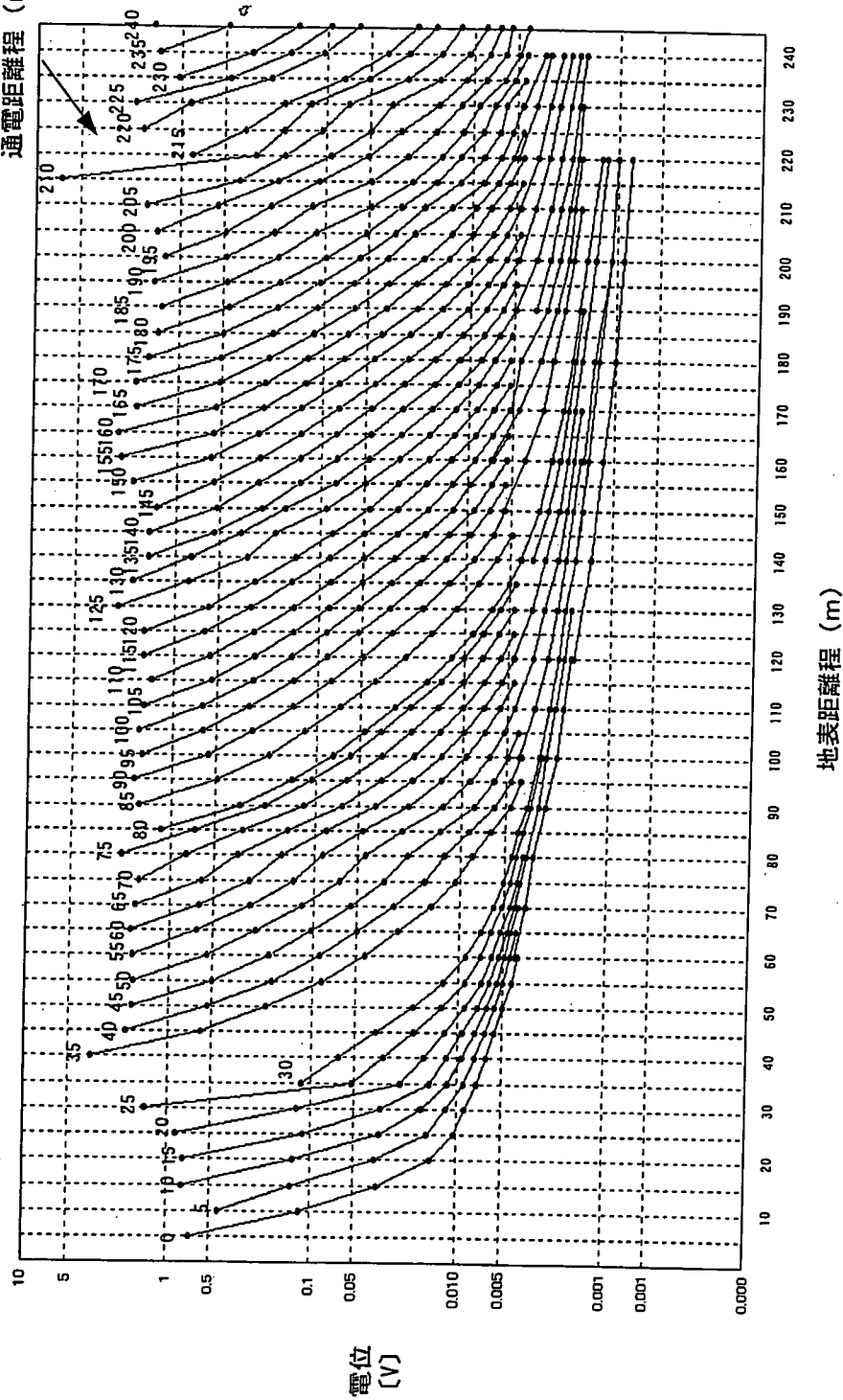
また、本手法では孔隙率・粘土含有率の二次元分布を捕らえる方法確立する必要がある。今回は、孔隙率・粘土含有率ともに断面両端の検層データによって二次元分布を推定したが、孔隙率の二次元分布には弾性波トモグラフィを利用できる可能性がある。粘土含有率の二次元分布を把握する有望な手法は現在のところ存在せず、今回のように検層データの補間等によって推定することになる。

卷末資料

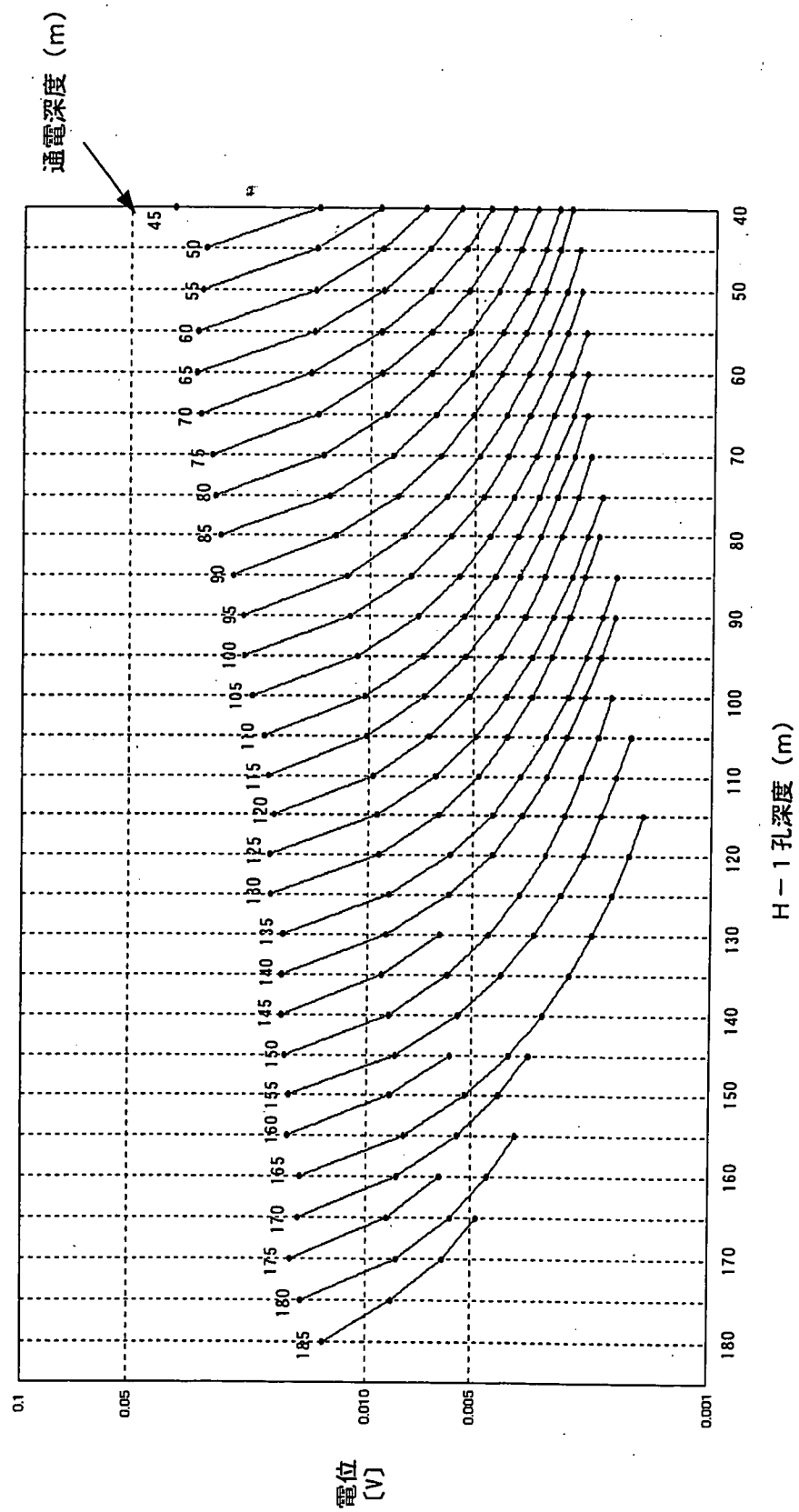
- 電位減衰曲線
- 測量結果

• 電位減衰曲線

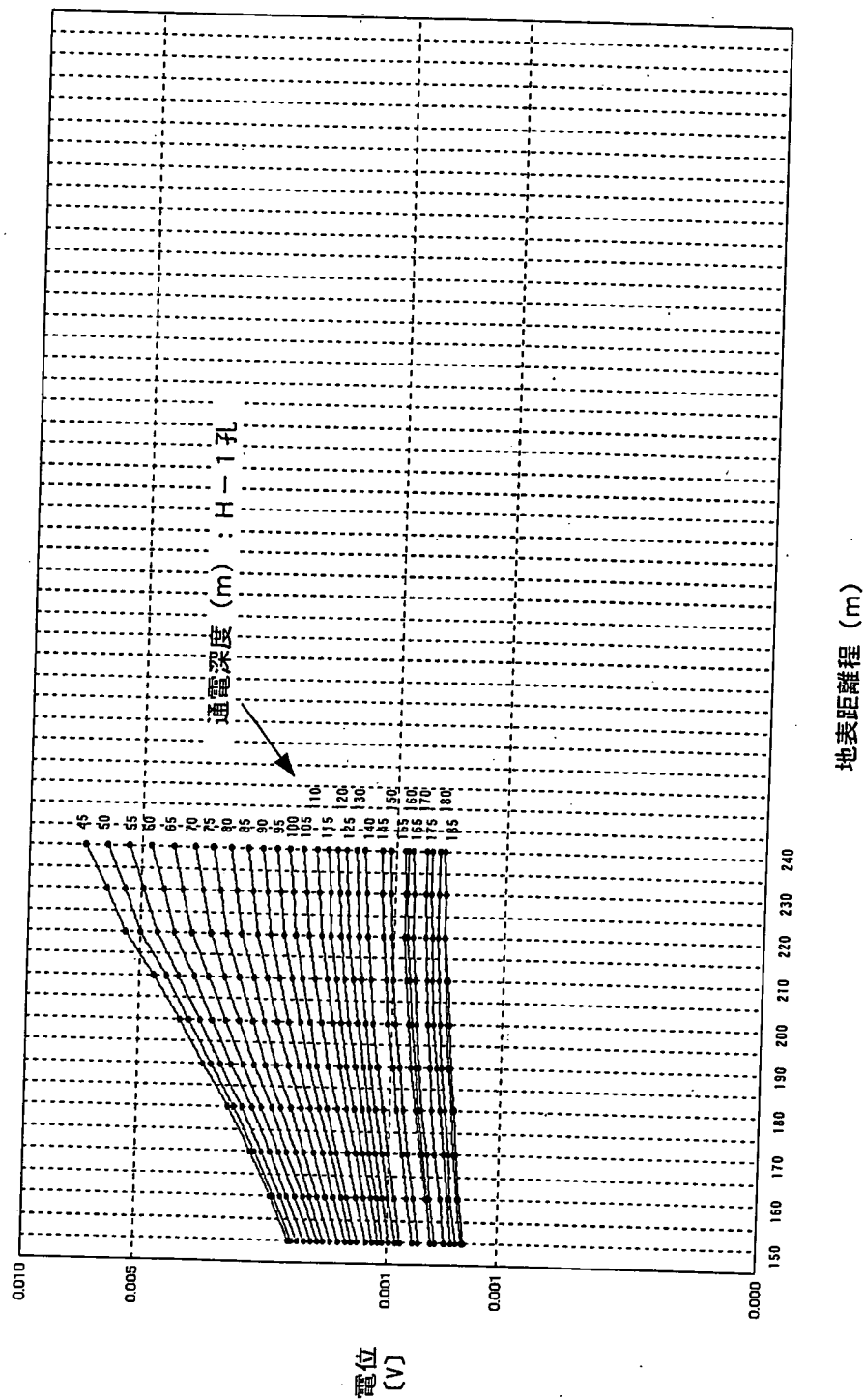
通電距離程 (m) : 地表



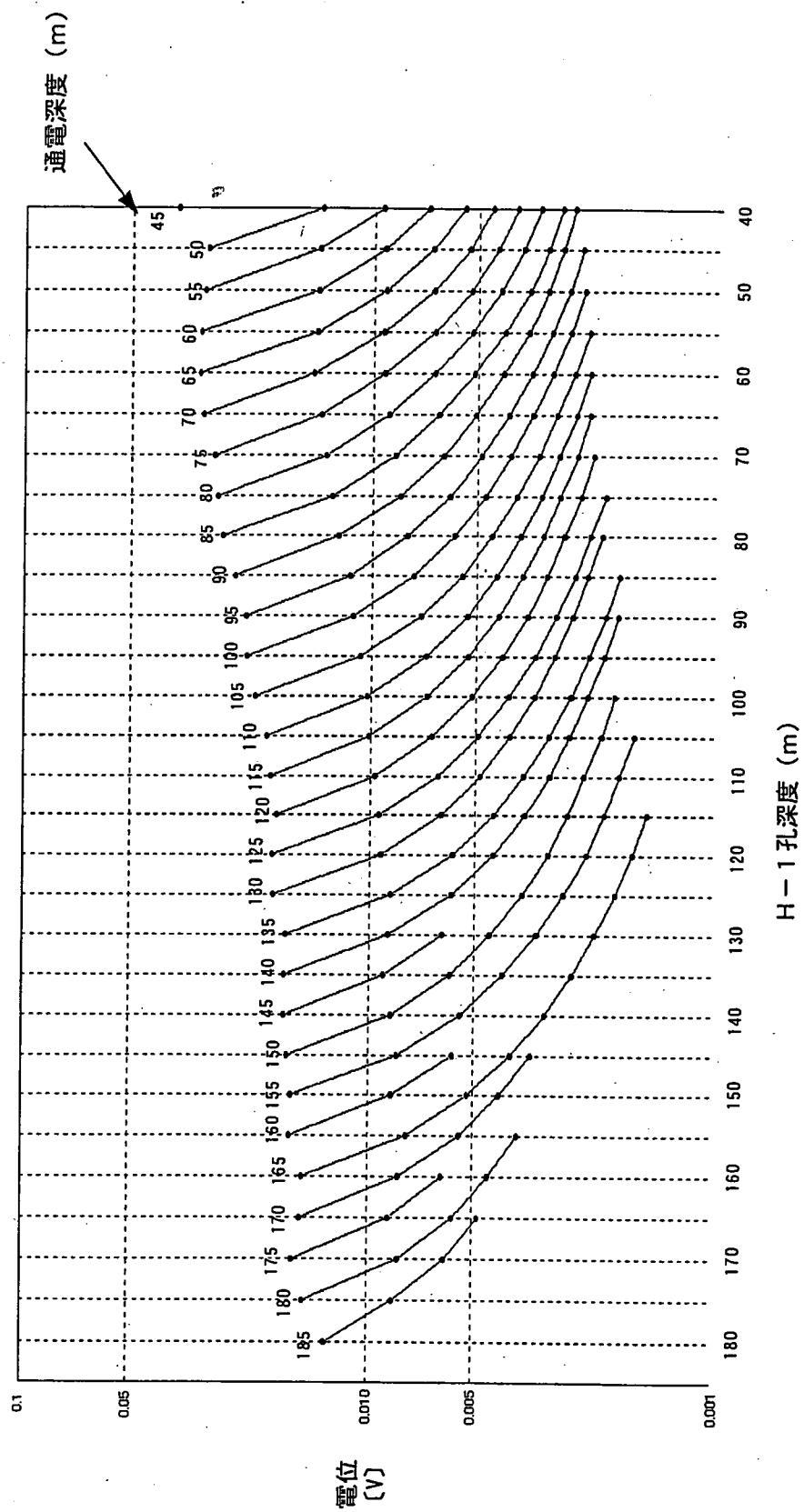
電位減衰曲線-1 (地表電氣探查 : 地表通電、地表電位測定)



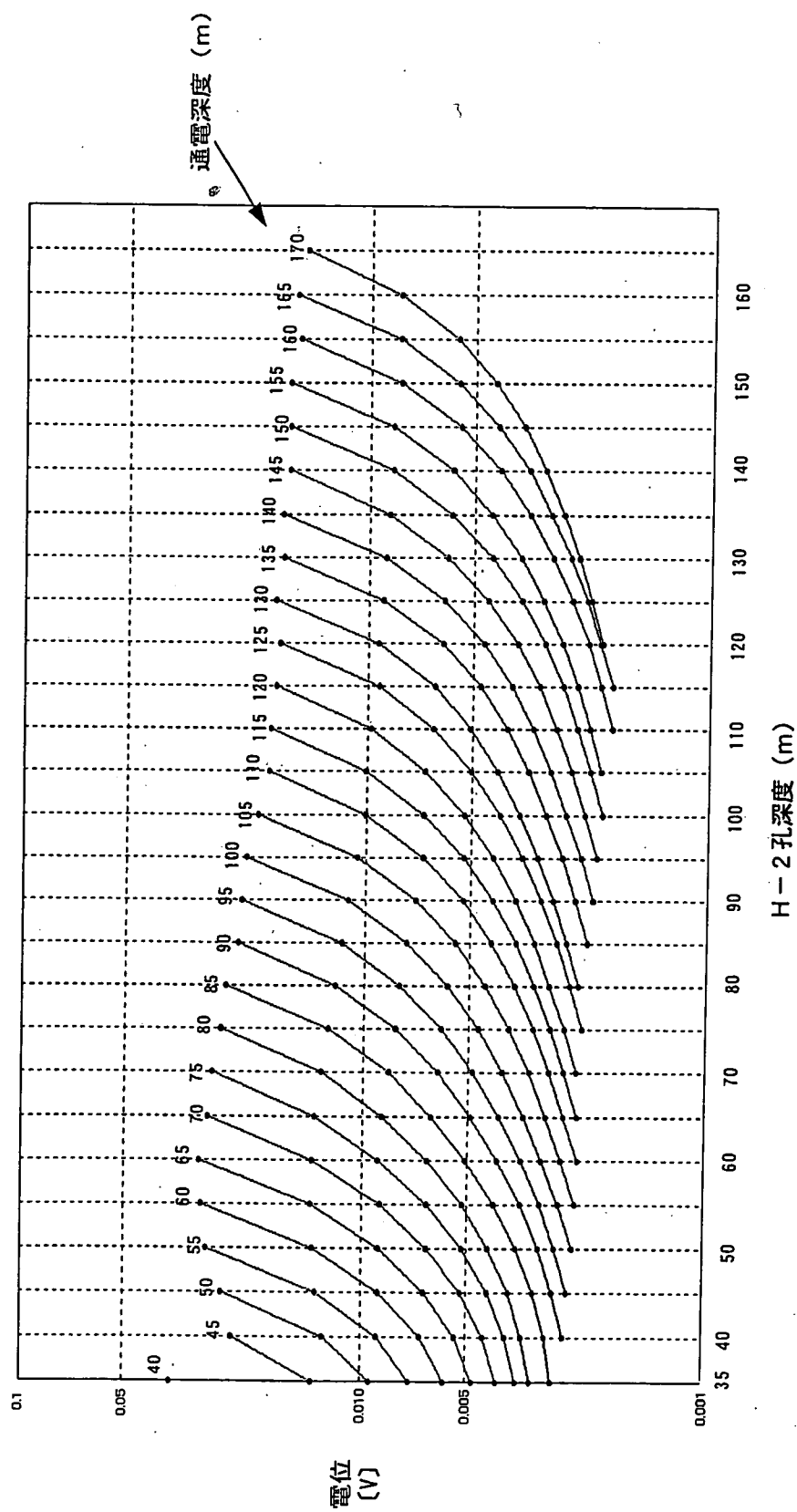
電位減衰曲線-2 (地表電気探査: H-1 孔インラインデータ)



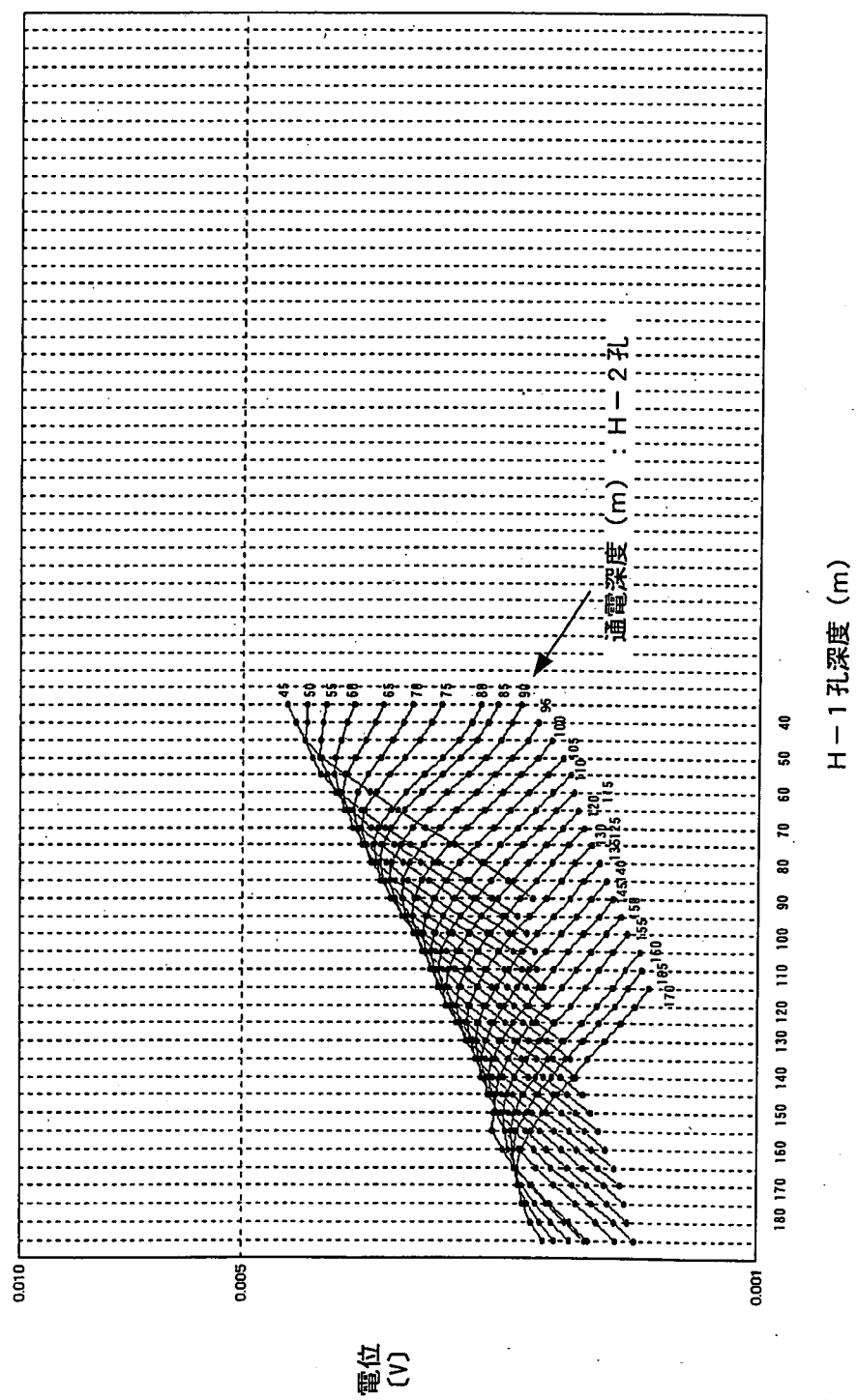
電位減衰曲線-3 (地表電氣探查: H-1 孔通電、地表電位測定)



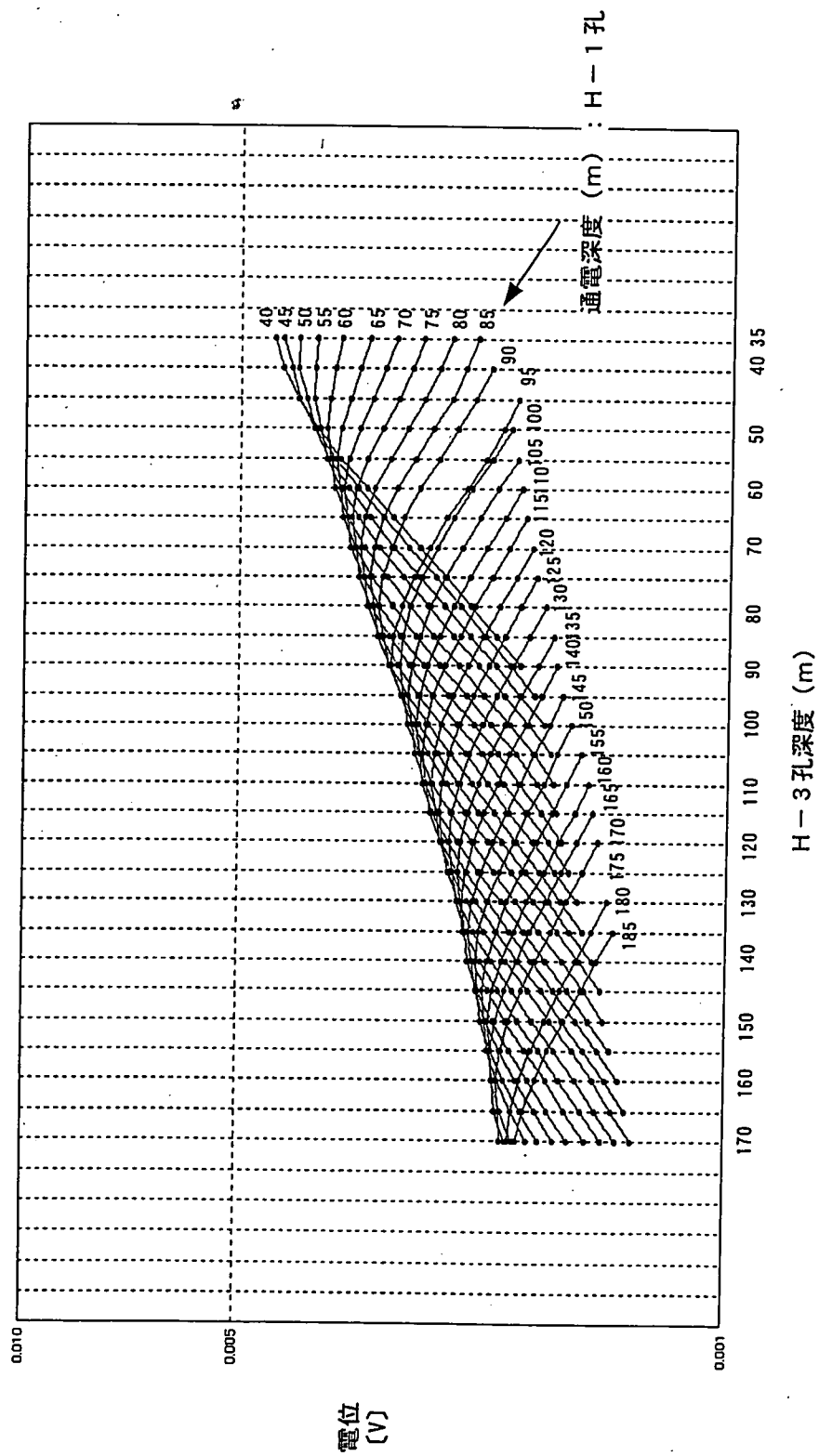
電位減衰曲線-4 (H-1孔×H-2孔断面、H-3孔×H-1断面：H-i孔インラインデータ)



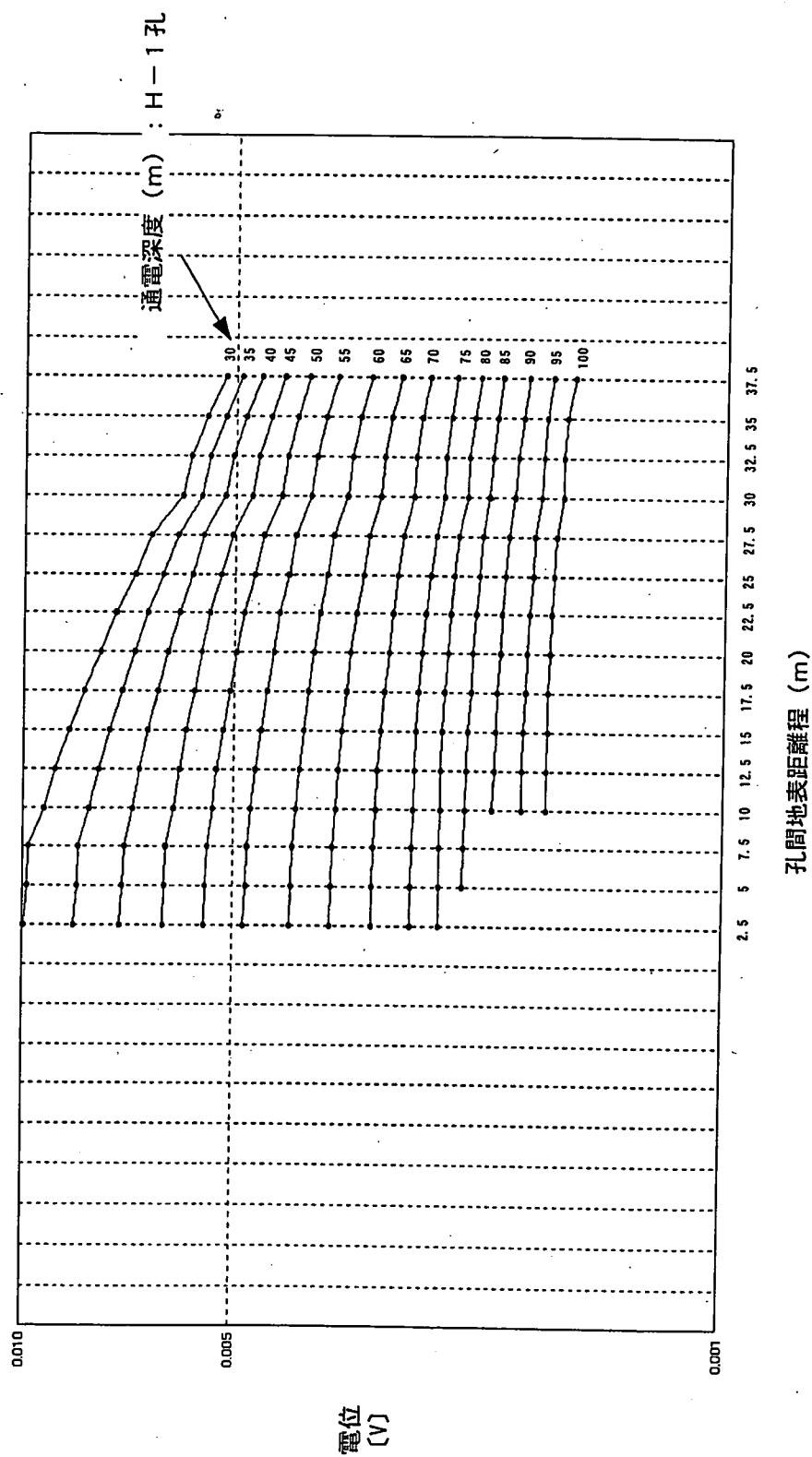
電位減衰曲線-5 (H-2 孔×H-3 孔断面、H-1 孔×H-2 断面：H-2 孔インラインデータ)



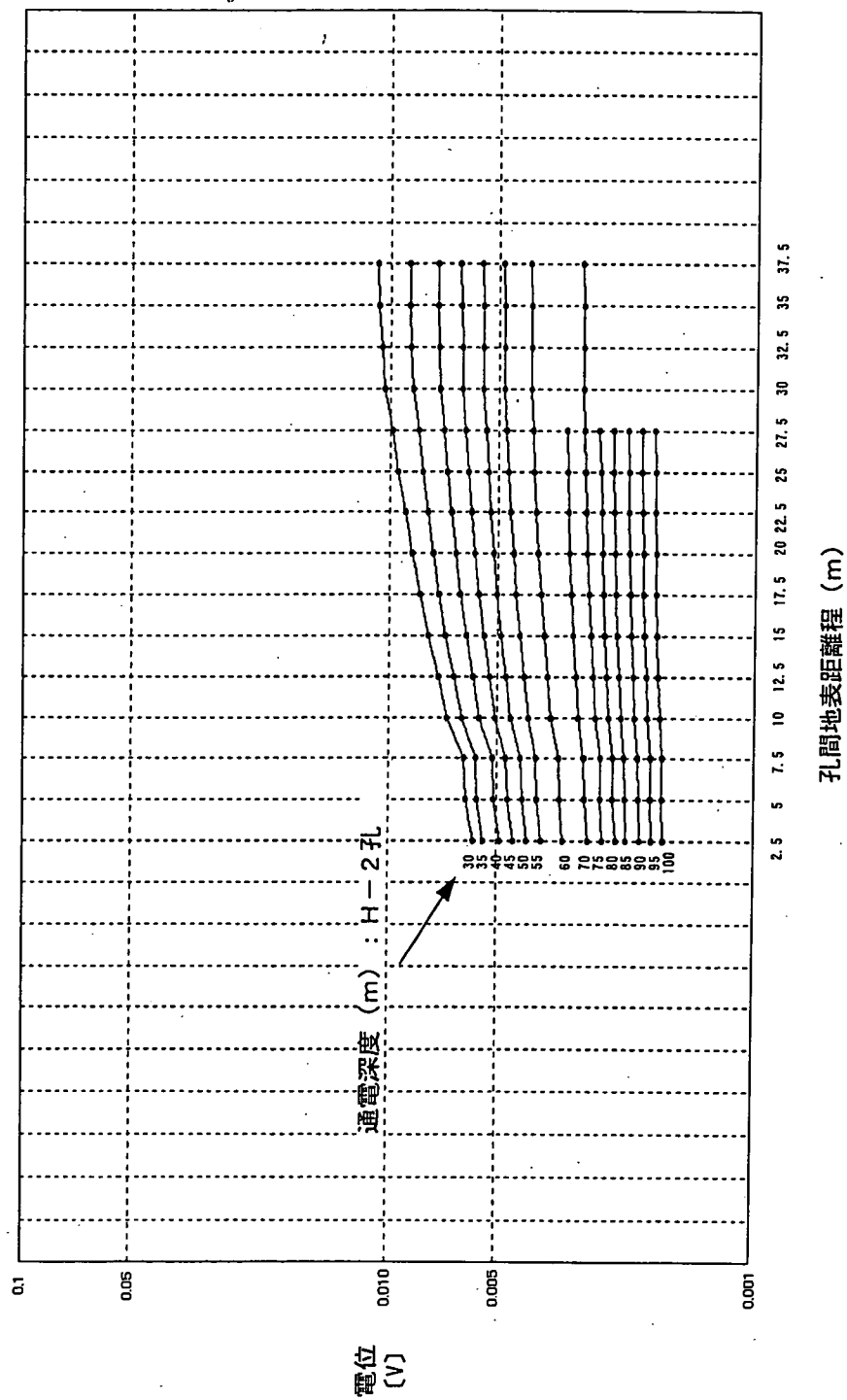
電位減衰曲線-6 (H-1 孔×H-2 断面 : H-2 孔通電、H-1 孔電位測定クロスライディングデータ)



電位減衰曲線-7 (H-1 孔×H-2 断面 : H-1 孔通電、H-2 孔電位測定クロスラインデータ)

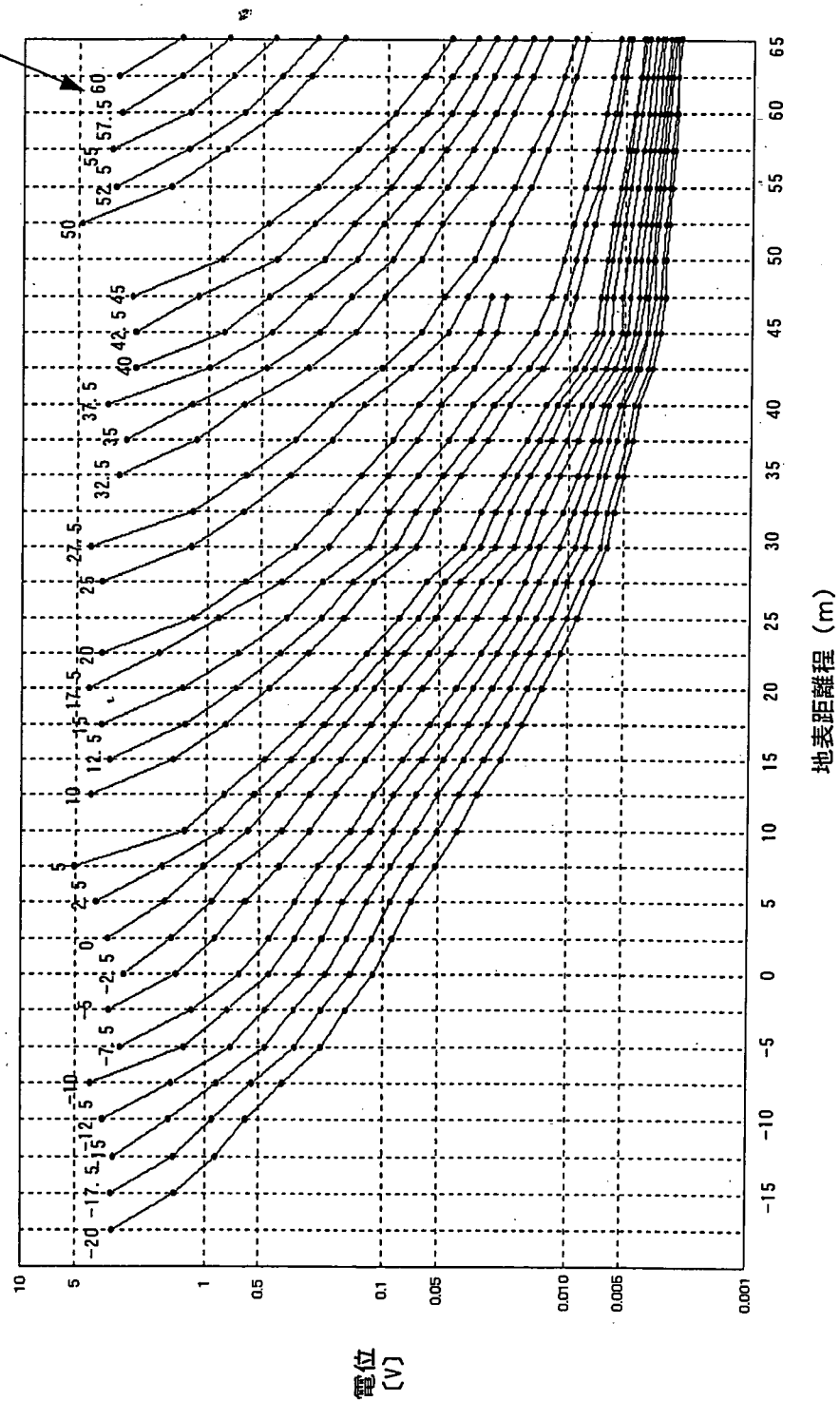


電位減衰曲線-8 (H-1 孔×H-2 断面 : H-1 孔通電、孔間地表電位測定データ)

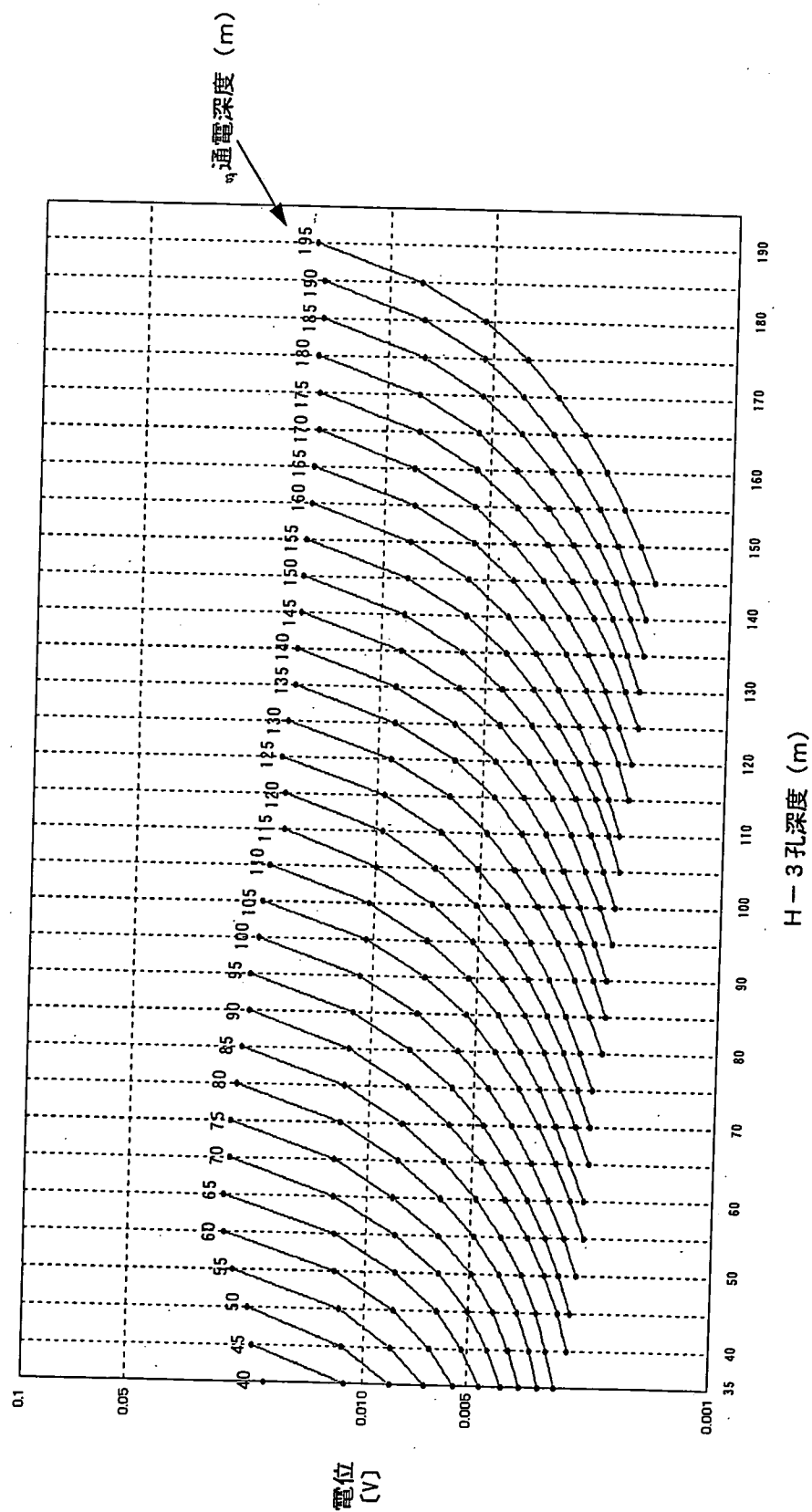


電位減衰曲線-9 (H-1 孔×H-2 断面 : H-2 孔通電、孔間地表電位測定データ)

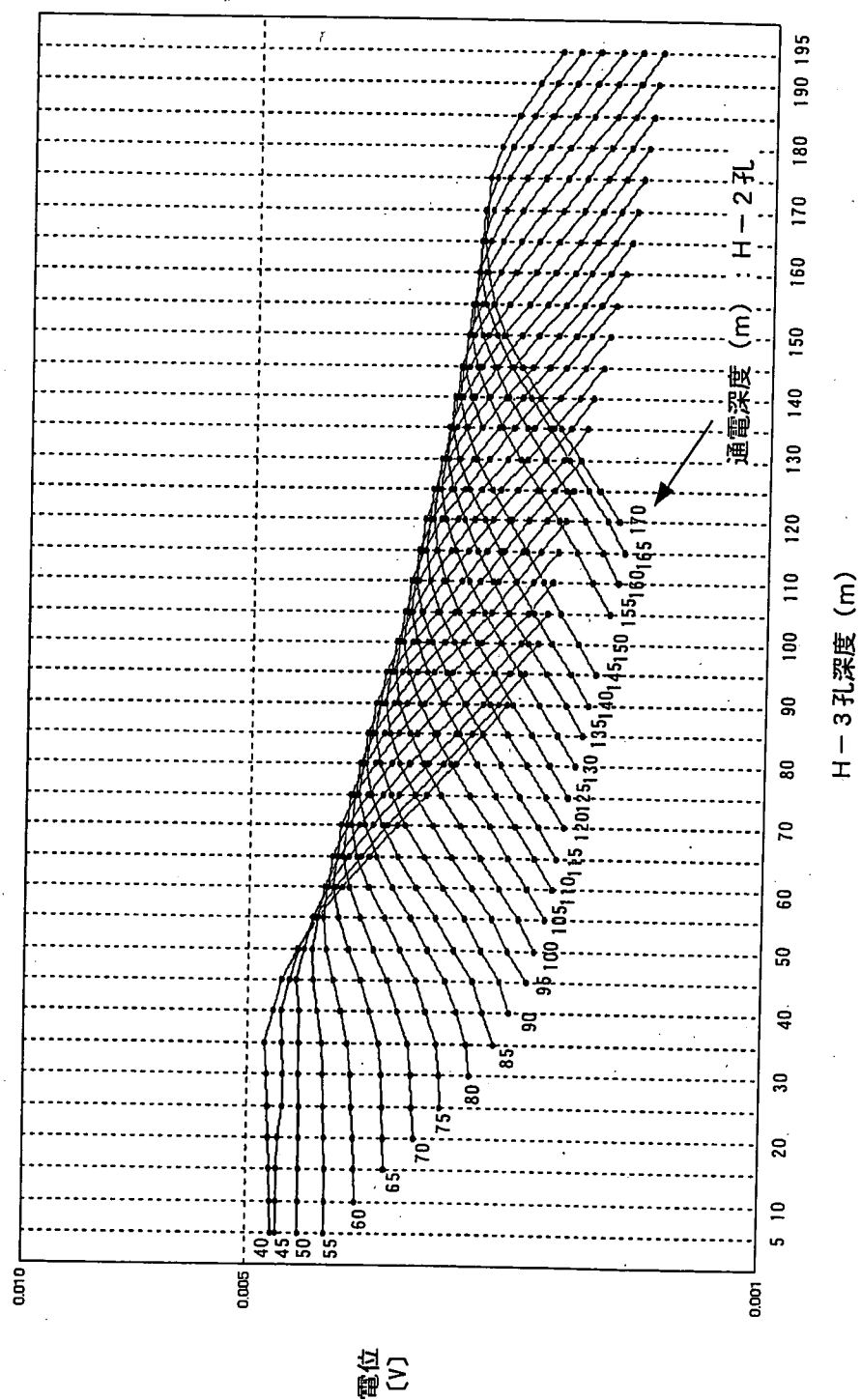
通電距離 (m) : 地表



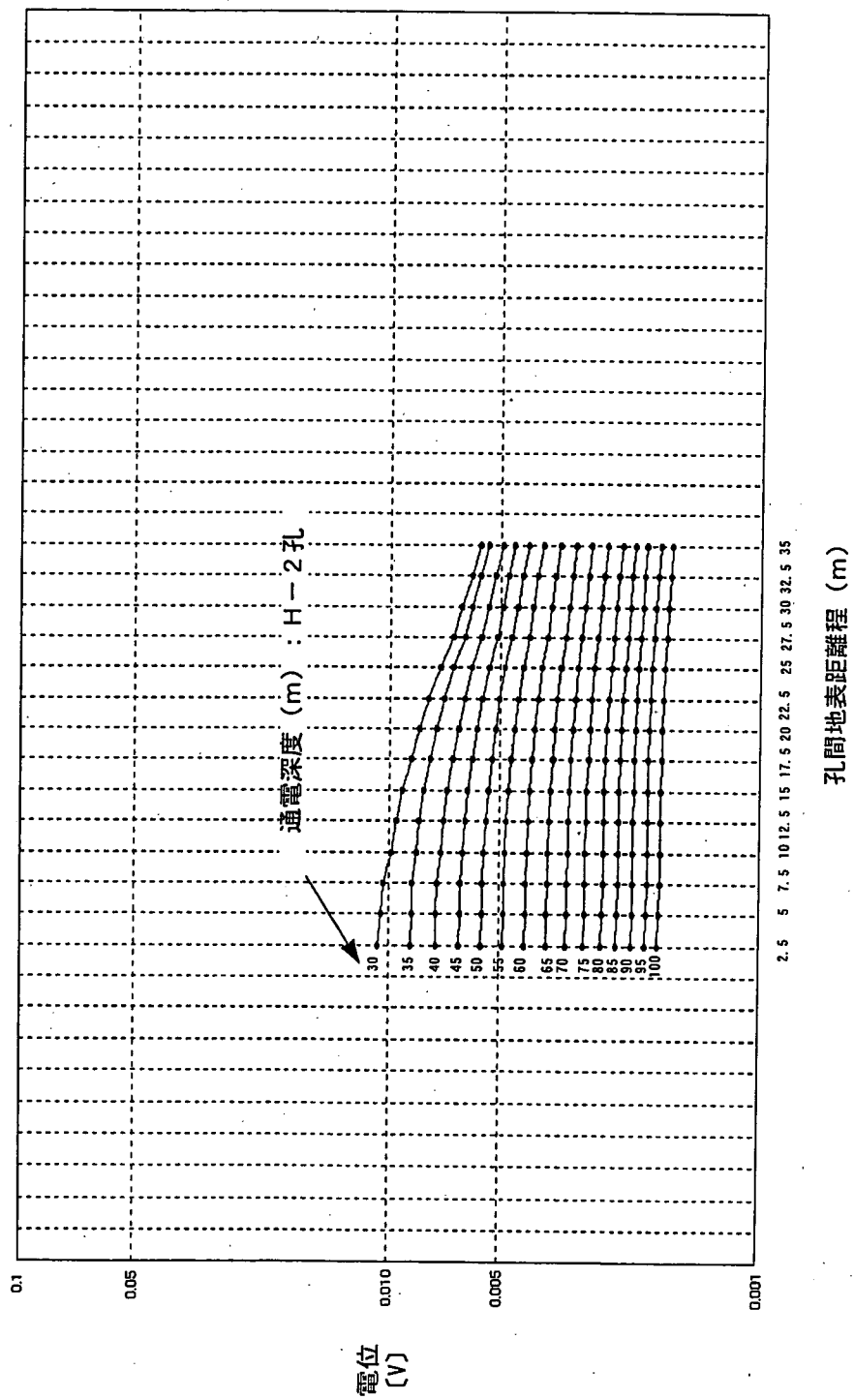
電位減衰曲線-10 (H-1孔×H-2断面 : 地表通電、地表電位測定)



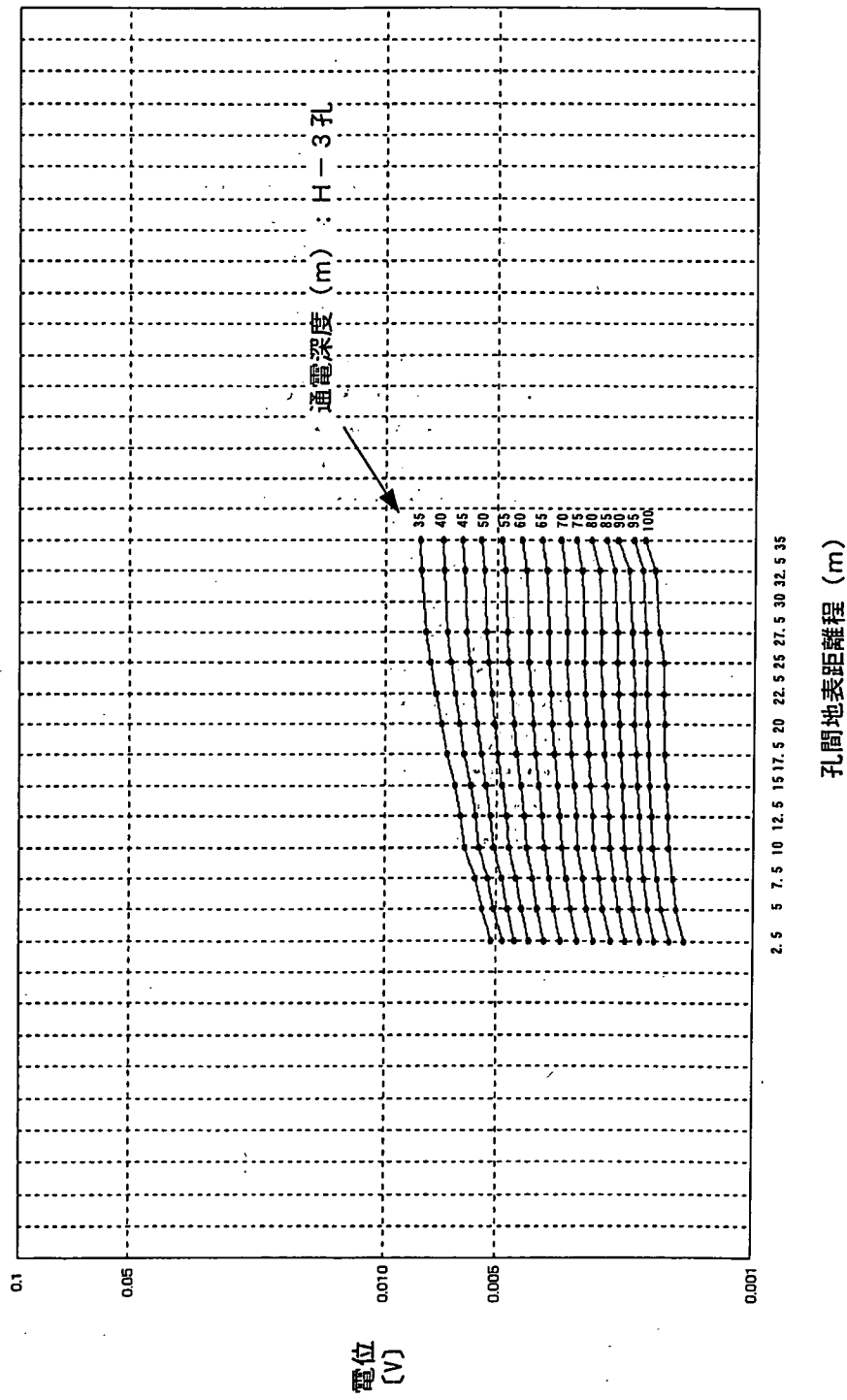
電位減衰曲線-11 (H-2孔×H-3断面、H-3孔×H-1孔断面：H-3孔インラインデータ)



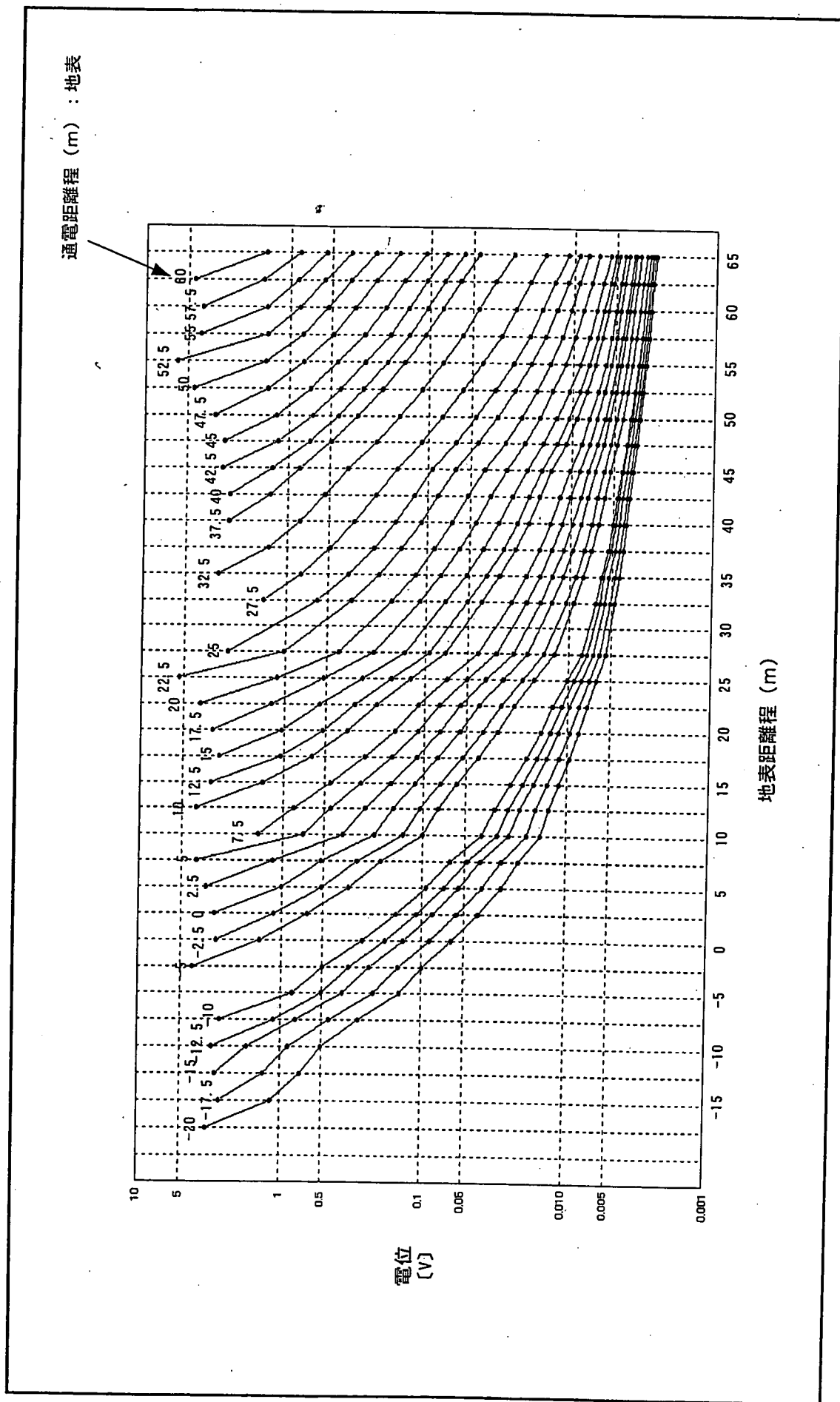
電位減衰曲線-12 (H-2孔×H-3断面 : H-2孔通電、H-3孔電位測定クロスラインデータ)



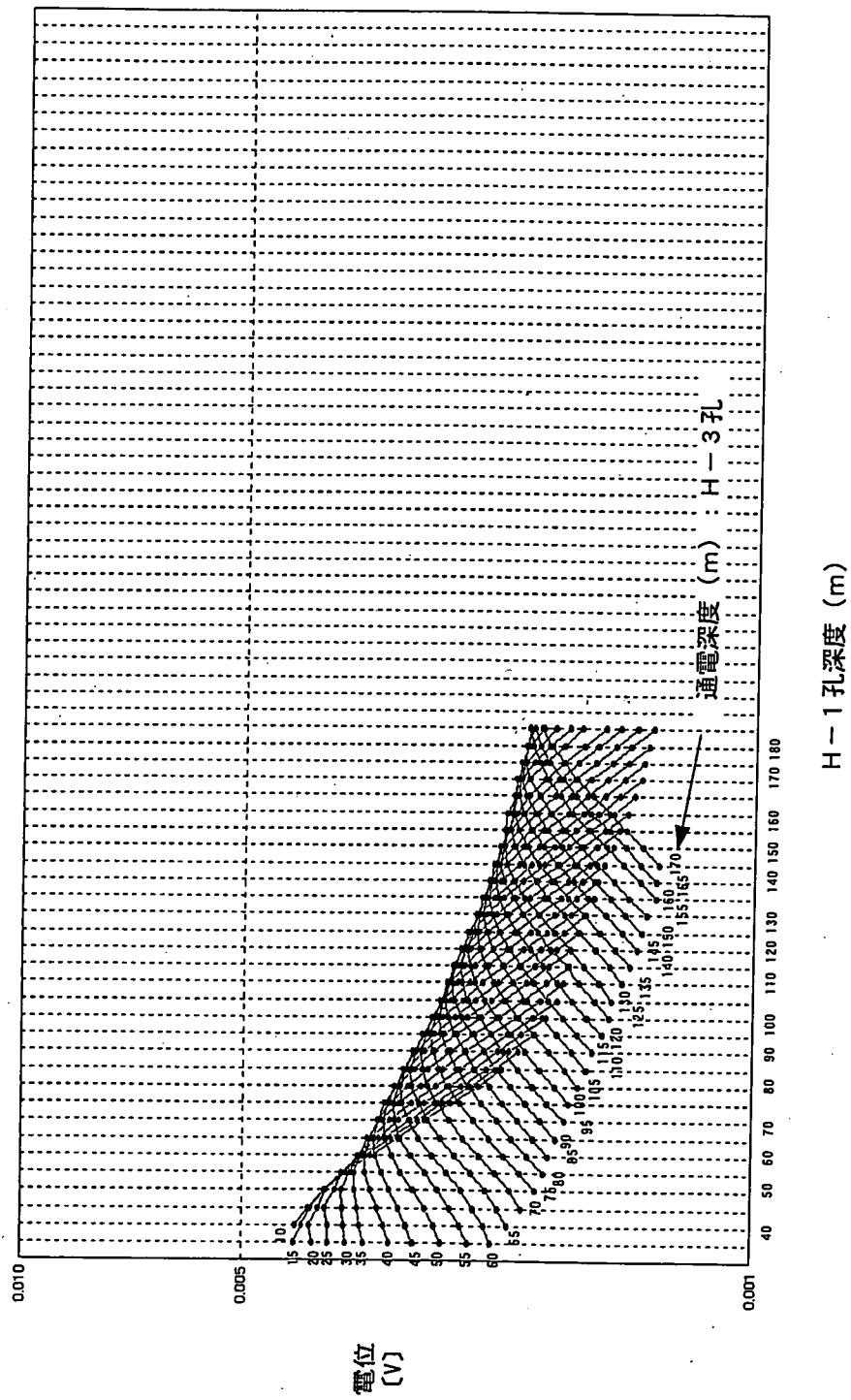
電位減衰曲線-14 (H-2孔×H-3断面 : H-2孔通電、孔間電位測定データ)



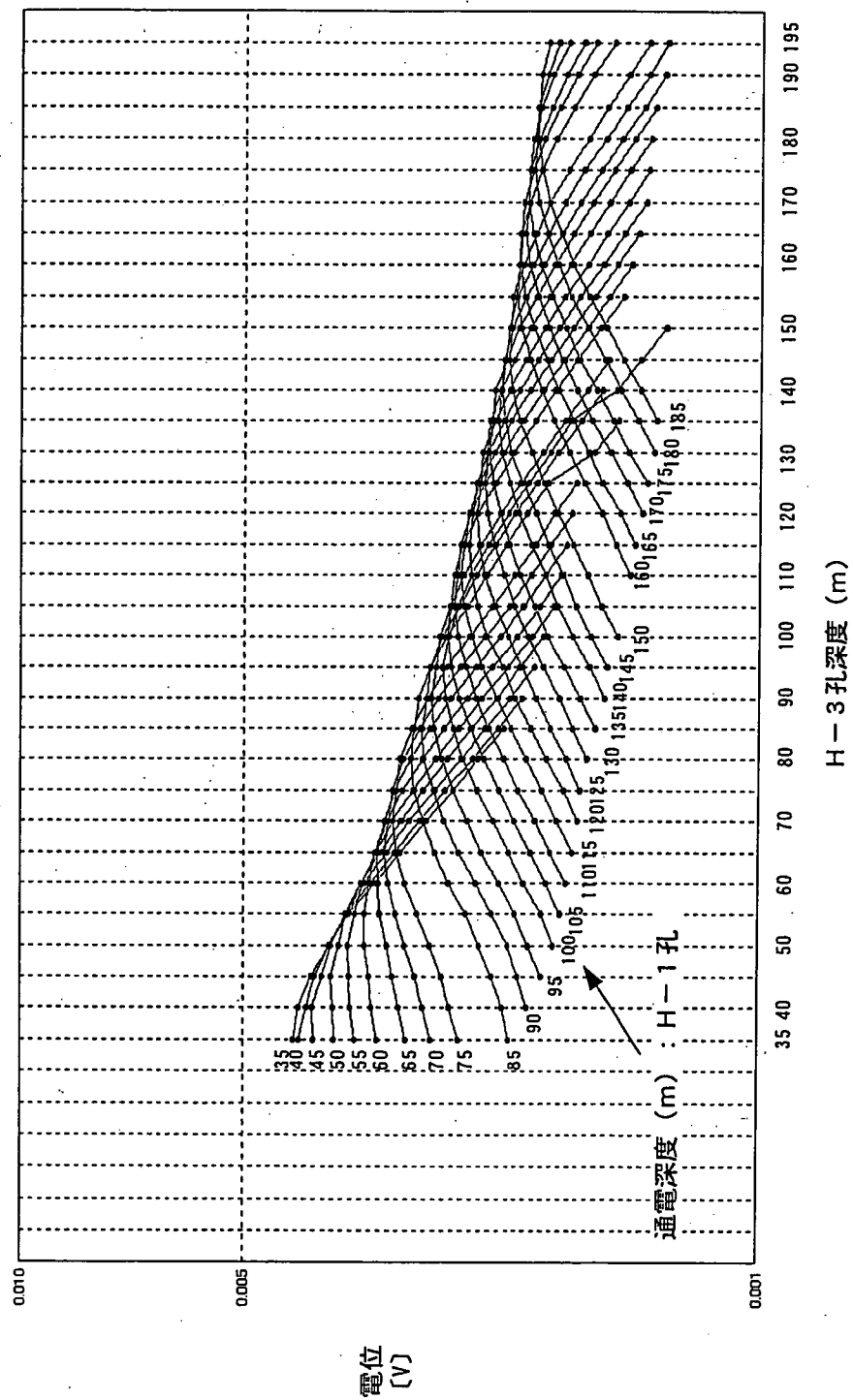
電位減衰曲線-15 (H-2孔×H-3断面 : H-3孔通電、孔間電位測定データ)



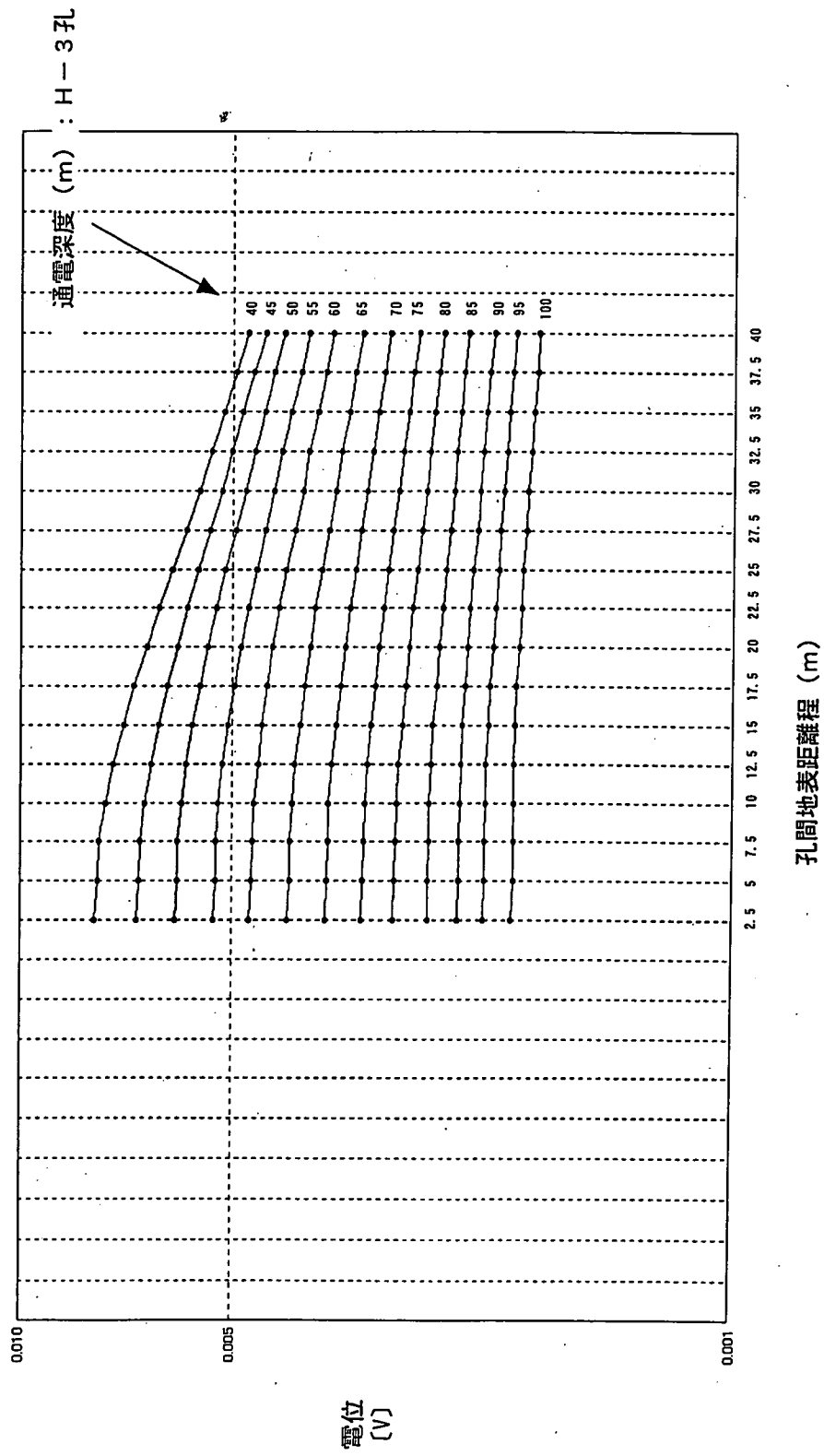
電位減衰曲線-16 (H-2孔×H-3断面：地表通電、地表電位測定)



電位減衰曲線-17 (H-3孔×H-1断面 : H-3孔通電、H-1孔電位測定クロスラインデータ)

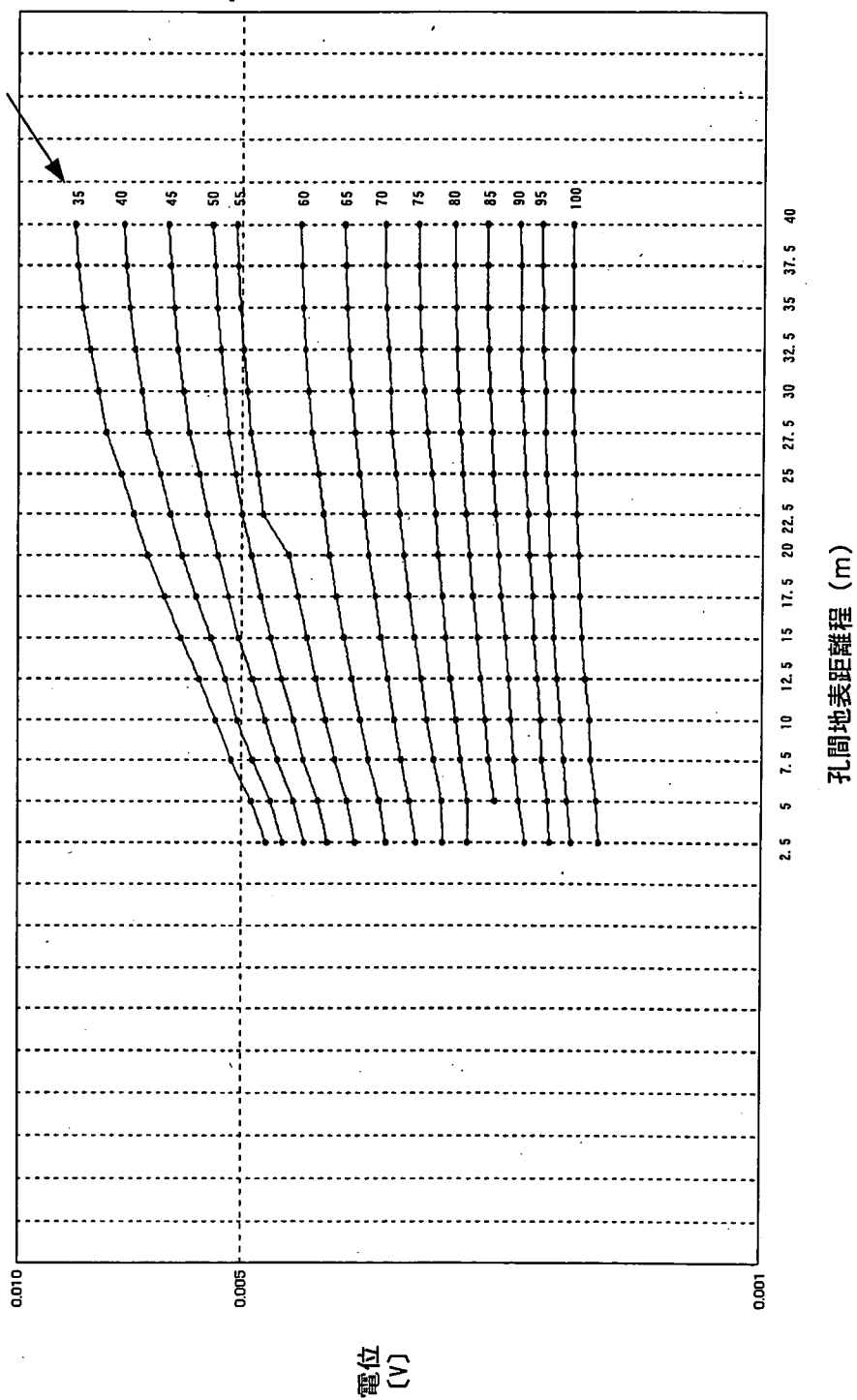


電位減衰曲線-18 (H-3 孔×H-1 断面 : H-1 孔通電、H-3 孔電位測定クロスラインデータ)



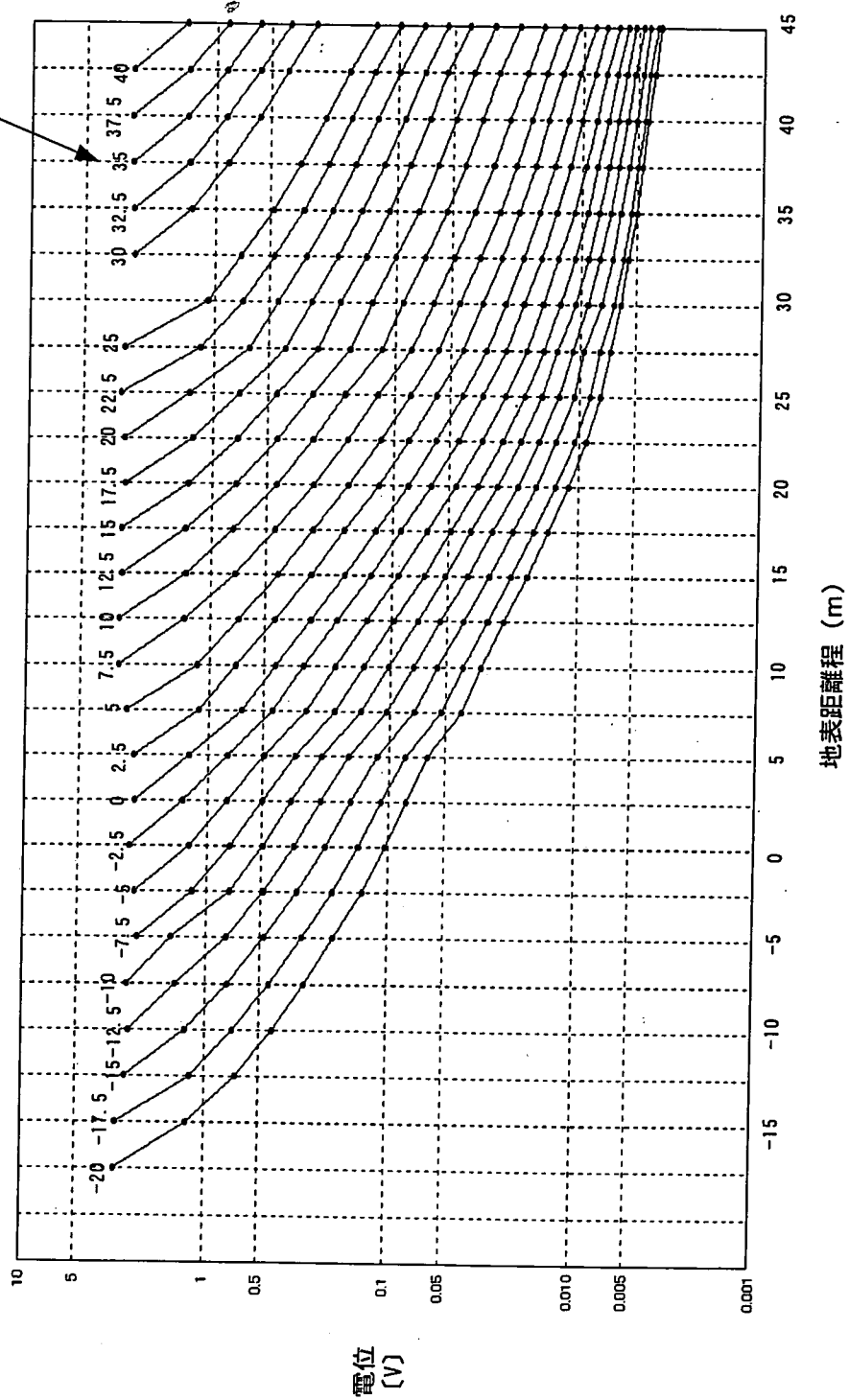
電位減衰曲線-19 (H-3 孔×H-1 断面 : H-3 孔通電、孔間地表電位測定データ)

通電深度 (m) : H-1 孔



電位減衰曲線-20 (H-3孔×H-1断面 : H-1孔通電、孔間地表電位測定データ)

通電距離 (m) : 地表



電位減衰曲線-21 (H-3孔×H-1断面: 地表通電、地表電位測定)

・ 測量結果

地表電気探査—地表測線測量結果一覧表

測定点番号	距離程(m)	標高(m)	備考
1	0	2.26	
2	5	2.25	
3	10	2.34	
4	15	2.33	
5	20	2.27	
6	25	2.17	25～30m間道路
7	30	2.16	30～35m間水路
8	35	1.53	
9	40	2.17	
10	45	2.20	
11	50	2.13	
12	55	2.19	
13	60	2.58	
14	65	2.57	
15	70	2.30	
16	75	2.22	
17	80	1.74	80～85m間道路
18	85	1.62	
19	90	1.44	
20	95	2.05	
21	100	1.46	
22	105	1.31	
23	110	1.34	
24	115	1.43	
25	120	1.48	
26	125	1.63	
27	130	1.57	
28	135	1.67	
29	140	1.64	
30	145	1.62	
31	150	2.67	
32	155	3.09	
33	160	3.16	160～165m間道路
34	165	3.22	
35	170	3.04	
36	175	2.95	
37	180	2.41	
38	185	1.85	
39	190	1.87	
40	195	1.86	

41	200	1.73	
42	205	1.77	
43	210	2.00	
44	215	1.68	210～220m間道路
45	220	1.92	
46	225	1.81	
47	230	1.76	
48	235	1.72	
49	240	1.77	
50	245	1.72	
51	250	1.66	H-1孔

比抵抗トモグラフィ調査一孔間地表測定点測量結果一覧表1

測定点番号	距離程(m)	標高(m)	備考
	0.0	1.47	H-1孔
1	2.5	1.66	
2	5.0	1.65	
3	7.5	1.56	6~9.7m道路
4	10.0	1.58	
5	12.5	1.69	
6	15.0	1.68	
7	17.5	1.64	
8	20.0	1.63	
9	22.5	1.52	
10	25.0	1.45	
11	27.5	1.55	
12	30.0	1.54	28.2~31.2m道路
13	32.5	1.54	
14	35.0	1.59	
15	37.5	1.65	
	38.8	1.63	H-2孔

比抵抗トモグラフィ調査一孔間地表測定点測量結果一覧表2

測定点番号	距離程(m)	標高(m)	備考
	0.0	1.63	H-2孔
1	2.5	1.68	
2	5.0	1.67	
3	7.5	1.58	
4	10.0	1.58	7.5～10.5m道路
5	12.5	1.62	13.2～14.7mアソウ
6	15.0	1.52	
7	17.5	1.55	
8	20.0	1.54	
9	22.5	1.39	21.5～22.8mクジラ
10	25.0	1.50	
11	27.5	1.36	
12	30.0	—	29～32.3m池
13	32.5	1.18	
14	35.0	1.50	33.1～36.6m道路
	36.6	1.55	H-3孔

比抵抗トモグラフィ調査一孔間地表測定点測量結果一覧表3

測定点番号	距離程(m)	標高(m)	備考
	0.0	1.55	H-3孔
1	2.5	1.52	1.4~14m道路
2	5.0	1.53	
3	7.5	1.54	
4	10.0	1.52	
5	12.5	1.52	
6	15.0	1.41	
7	17.5	1.44	
8	20.0	1.51	20~31.2m道路
9	22.5	1.55	
10	25.0	1.57	
11	27.5	1.57	
12	30.0	1.55	
13	32.5	1.56	
14	35.0	1.61	
15	37.5	1.63	
16	40.0	1.64	
	42.2	1.47	H-1孔