

JAERI-Tech  
94-032



比抵抗トモグラフィの物理モデル実験  
—実験水槽と2極法電極配置の検出限界—

1994年11月

熊田政弘・飯 博行

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

---

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

比抵抗トモグラフィの物理モデル実験  
－実験水槽と2極法電極配置の検出限界－

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部  
熊田 政弘・飯 博行

(1994年10月27日受理)

高レベル廃棄物地層処分において地下水理は重要な評価項目である。亀裂性岩盤内における水理に重要な役割を果たす岩盤亀裂の評価技術開発の一環として、比抵抗トモグラフィの基礎的な研究を実施するため、物理モデル実験用の2m立方の水槽を製作して検出限界、分解能等について検討を行っている。水槽に電解質溶液を満たして均質な地質媒質を表わすとともに、野外における比抵抗トモグラフィで想定される2本のボーリング孔と孔間の地表に設けた多数の電極を多点電極で模擬し、角柱状の模擬亀裂を用いて物理モデル実験を行うとともに、数値シミュレーション実験を実施し、2極法電極配置の場合の検出限界について検討したのでこれを報告する。

Physical Model Simulation for Resistivity Tomography  
- An Experimental Tank and Detection Limit for a Pole-pole Array -

Masahiro KUMATA and Hiroyuki II

Department of Environmental Safety Research  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 27, 1994)

Underground hydrology is one of important items for the assessment of the high-level radioactive waste disposal. Rock fractures play an important role in local hydrology in fractured rock mass. In order to develop the technique of rock fracture survey, basic study on resistivity tomography has been carried out using an experimental tank 2×2m square and 2.2m in depth. The tank was filled with a NaCl solution to represent a homogeneous geologic media. A multi-electrode representing electrodes that will be arranged in field was used in the tank for a physical model simulation with 4 different sized fracture models. The detection limit of the resistivity tomography using a pole-pole array was discussed based on the results of both the physical and numerical model simulations.

Keywords : High-level Radioactive Waste, Underground Disposal,  
Hydrology, Fractured Rock, Detection Limit, resistivity  
Tomography, Tank Test, Physical Model Simulation, Numerical  
Simulation, Pole-pole Array

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験水槽 .....	2
3. 解析コード .....	3
3.1 測定データ処理プログラム (RESEDT) .....	3
3.1.1 映像法 .....	4
3.2 再構成プログラム (RESINV2) .....	6
3.2.1 フォワード計算法 .....	6
3.2.2 インバージョン計算法 .....	8
3.3 画像化プログラム (Transform) .....	10
3.4 モデリングプログラム (RESMOD2) .....	10
4. 数値シミュレーション実験 .....	10
4.1 設定条件 .....	11
4.2 水槽内電位分布 .....	11
4.3 ブランクテスト .....	12
4.4 亀裂モデル数値シミュレーション .....	12
4.5 検出限界の検討 .....	14
5. 水槽を用いた物理モデル実験 .....	14
5.1 電解質溶液 .....	15
5.2 実験有効領域 .....	15
5.3 模擬電極 .....	17
5.4 ブランクテスト .....	17
5.5 亀裂モデル実験 .....	17
6. まとめ .....	20
引用文献 .....	21

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Tank .....	2
3. Analytical Code .....	3
3.1 Program for Resistivity Data Editing(RESEDT) .....	3
3.1.1 Theory of Images .....	4
3.2 Program for Inversion(RESINV2) .....	6
3.2.1 Forward Calculation .....	6
3.2.2 Inversion Analysis Techniques .....	8
3.3 Program for Reconstructed Resistivity Image(Transform) .....	10
3.4 Program for Numerical Modelling(RESMOD2) .....	10
4. Numerical Experiments .....	10
4.1 Boundary Condition .....	11
4.2 Potential Field in the Experimental Tank .....	11
4.3 Blank Test .....	12
4.4 Numerical Simulation for Fracture Models .....	12
4.5 Consideration on the Detection Limit .....	14
5. Model Tank Experiments .....	14
5.1 Electrolytic Solution .....	15
5.2 Area for a Physical Model Simulation .....	15
5.3 Multi-electrode .....	17
5.4 Blank Test .....	17
5.5 Physical Model Simulation for Fracture Models .....	17
6. Summary .....	20
References .....	21

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全性評価では、深地層における放射性核種の移行挙動の解析が重要な課題となっている。核種の移行挙動に影響を与える深層地下水の流動状況を把握するためには、岩盤内の亀裂分布を詳細に知ることが重要である。そのような岩盤調査技術の中では、非破壊調査としてのジオ＝トモグラフィ技術が注目されており、特に比抵抗トモグラフィは地下水との関連において、現時点で最も有効な手法の一つであると考えられている。

トモグラフィは元々医療の分野におけるレントゲン写真技術であり、身体内部を傷つけないでより詳しい情報を得なければならない医療上の制約を背景にめざましい発展を遂げている<sup>1)</sup>。トモグラフィ技術は、送信源及び受信位置を連続的に変えていくことによって多数の経路に沿ったデータを取得し、密度などの調査領域内の物性分布を再構成する方法である。基本的には、測定データは送信源から受信点までの信号伝達経路に沿った媒体の物性値の積分で表される量となっており、トモグラフィの解析では、送・受信の位置関係の変化と積分量の変化から内部の物性分布を推定する。積分経路の明確なもの、あるいは物性値のコントラストの明確なもの程トモグラフィに適している。例えば、医療等に用いられるX線CT等では、その積分経路は完全な直線であるのでトモグラフィ解析に最適な手法であるといえる。このような物体内部を可視化する技術が医療に限らず、材料工学、機械工学、地球科学等のさまざまな分野で用いられてきている。放射性廃棄物地層処分においても、地下の岩盤を可視画像化するジオ＝トモグラフィ技術が、処分場周辺の岩盤評価に有効な技術として注目を浴び、適用性に関する検討が行われてきている<sup>2-10)</sup>。岩盤を対象とするジオ＝トモグラフィ技術には、弾性波の伝播を利用する弾性波トモグラフィ、レーダ波の伝播を利用するレーダトモグラフィ、電流を流した時の電気応答を利用した比抵抗トモグラフィ等があり、これまでは主に石油探鉱を中心に弾性波トモグラフィの技術が開発されてきた。

地下深部における核種の移行挙動に影響を与える岩盤亀裂の調査手段のひとつである比抵抗トモグラフィは、岩盤割目の分布を岩盤内の比抵抗分布として検出するものであり、高比抵抗体である岩盤の中から、地下水及び粘土等の断層、亀裂、破碎帯に関連した低比抵抗体を検出する間接的な探査方法である。岩盤と亀裂関連部の比抵抗コントラストは大きく、岩盤に対するトモグラフィとして最適な手段の一つである。比抵抗トモグラフィ技術は1980年代になって始まった技術<sup>11,12)</sup>で、他の岩盤調査技術に比べて新しく、ジオ＝トモグラフィ技術の中でも研究開発が遅れている。比抵抗トモグラフィ技術についての精度や分解能に関するいくつかの報告<sup>13-15)</sup>はあるが、検出限界等についての十分な検討はなされていない。また、比抵抗トモグラフィでは断面内の平面的な比抵抗分布状態を可視化することを目的としているが、解析の都合上、断面に直行する方向に無限に連続する比抵抗分布を仮定している。実際には、3次元に有限な広がりを持つ比抵抗分布のある断面内の情報であり、断面で捉えた比抵抗分布が断面に直行する方向に連続しているわけでは必ずしもない。このような解析上の仮定と実際の比抵抗分布との関連についてもまだ十分な研究はなされていない。そこで、比抵抗トモグラフィで用いられる、2極法、3極法及び4極法電極配置について、3次元空間における2次元断面内での検出限界、分解能等の基礎的な研究を実施するため、物理モデル実験用の2m立方の水槽を製作して単純な形状の模擬亀裂を用いた実験を行った。

比抵抗トモグラフィ実験用水槽の製作及び解析コードの作成並びに、2極法電極配置での物理モデル実験、及び数値シミュレーションを平成4年度に住友金属鉱山株式会社に委託して実施した。本報は、これらの結果をまとめ、検出限界について検討したものである。なお、本研究の一部は米国物理探査学会の第63回年会（1993年9月、ワシントン）で報告した<sup>16)</sup>。

## 2. 実験水槽

一般的に、野外では2本のボーリング孔及び孔間の地表に多数の電極を設置し、電極で囲まれた領域を解析領域として比抵抗トモグラフィが実施されることが想定される。解析領域内に水平に連続する一本の亀裂帯が存在する場合の比抵抗トモグラフィの検出限界について検討するため、水槽内に満たした電解質溶液(NaCl溶液)で均質な地質媒体を表わし、61個の電極からなるコの字型の多点模擬電極及び角柱状の模擬亀裂を用いた物理モデル実験(Fig.1)を実施するための実験水槽を製作した。実験水槽の製作においては、①実験領域が広く、精度の高い実験を行うことができる。②実験中水槽壁面が地盤振動により共振して液面変動を起こすことがない。③実験者の実験作業に伴う振動を受けないよう物理的に隔離されている。また、④恒久的なものでなく可搬的なものである。などの点を考慮した。水槽など限られた大きさの装置を用いた実験では、電極を地中に相当する電解質溶液中に配置させると実験に有効な範囲は深度方向で極端にせまくなる<sup>17)</sup>ので、本研究では、2(L)×2(W)×2.2(D) mの可搬式の実験水槽を製作した。試験中は、8トン程度の溶液が水槽に満たされるので、水槽側壁及び底板には板厚9mmの鋼板を使用し、振動及び膨らみを防止するため、鋼板の周囲を7.5 - 200 × 80溝型鋼で補強するとともに、水槽上部縁端は、9 - 130 × 130の山形鋼で補強した。実験作業を円滑にするとともに、作業中の振動が水槽に伝わらないようにするため、転落防止のための柵を設けた回廊を水槽本体とは切り離して水槽の周囲に巡らせた(Fig.2)。

比抵抗トモグラフィの基本技術となっている電気探査比抵抗法（以下、比抵抗法と記述）に関しては、1950年代から水槽を用いた試験研究が報告され<sup>18-25)</sup>、比抵抗測定に際しての水槽壁面の影響をできるだけ少なくするために水槽壁面に十分な注意を払う必要があることが指摘されている<sup>18)</sup>。水槽内の電解質溶液で均質な地質媒質を模擬する場合、実際の大地にはない境界条件として水槽壁が問題となるが、境界の比抵抗を全てゼロにするか、または、全て無限大にすることで境界条件の取り扱いが容易になる<sup>26)</sup>。2極法の電極配置では、対象領域から遠電極を無限遠と見なせる位置まで遠ざけ、かつ電位遠電極と電流遠電極との電位差が無限大と見なせるようにそれぞれの遠電極を置く必要があるが、水槽壁の比抵抗がゼロの場合には、有限な大きさの水槽内で2極法に適した位置に遠電極を置くと実験有効領域が極めて小さくなるので、境界条件として境界の比抵抗を無限大とすることとし、水槽壁と電解質溶液との間を電氣的に絶縁した。水槽壁面は、比抵抗がゼロに近い鋼板であるので絶縁のためには内壁を絶縁性材料で覆わねばならない。ゴム板を内張する方法では、高価な割にはゴムの劣化や接着部の隙間のために十分な絶縁が確保できず、内壁面を絶縁性の高いエポキシ系塗料で塗装することとした。塗料の絶縁性、作業性、鋼板への密着性、耐久性等を考慮し、Table 1 に示す塗料を採用して、表の上から下の順に塗装作業を行った。絶縁性を向上させるため、約2週間後に追加



比抵抗トモグラフィ実験用水槽の製作及び解析コードの作成並びに、2極法電極配置での物理モデル実験、及び数値シミュレーションを平成4年度に住友金属鉱山株式会社に委託して実施した。本報は、これらの結果をまとめ、検出限界について検討したものである。なお、本研究の一部は米国物理探査学会の第63回年会（1993年9月、ワシントン）で報告した<sup>16)</sup>。

## 2. 実験水槽

一般的に、野外では2本のボーリング孔及び孔間の地表に多数の電極を設置し、電極で囲まれた領域を解析領域として比抵抗トモグラフィが実施されることが想定される。解析領域内に水平に連続する一本の亀裂帯が存在する場合の比抵抗トモグラフィの検出限界について検討するため、水槽内に満たした電解質溶液(NaCl溶液)で均質な地質媒体を表わし、61個の電極からなるコの字型の多点模擬電極及び角柱状の模擬亀裂を用いた物理モデル実験(Fig.1)を実施するための実験水槽を製作した。実験水槽の製作においては、①実験領域が広く、精度の高い実験を行うことができる。②実験中水槽壁面が地盤振動により共振して液面変動を起こすことがない。③実験者の実験作業に伴う振動を受けないよう物理的に隔離されている。また、④恒久的なものでなく可搬的なものである。などの点を考慮した。水槽など限られた大きさの装置を用いた実験では、電極を地中に相当する電解質溶液中に配置させると実験に有効な範囲は深度方向で極端にせまくなる<sup>17)</sup>ので、本研究では、2(L)×2(W)×2.2(D) mの可搬式の実験水槽を製作した。試験中は、8トン程度の溶液が水槽に満たされるので、水槽側壁及び底板には板厚9mmの鋼板を使用し、振動及び膨らみを防止するため、鋼板の周囲を7.5 - 200 × 80溝型鋼で補強するとともに、水槽上部縁端は、9 - 130 × 130の山形鋼で補強した。実験作業を円滑にするとともに、作業中の振動が水槽に伝わらないようにするため、転落防止のための柵を設けた回廊を水槽本体とは切り離して水槽の周囲に巡らせた(Fig.2)。

比抵抗トモグラフィの基本技術となっている電気探査比抵抗法（以下、比抵抗法と記述）に関しては、1950年代から水槽を用いた試験研究が報告され<sup>18-25)</sup>、比抵抗測定に際しての水槽壁面の影響をできるだけ少なくするために水槽壁面に十分な注意を払う必要があることが指摘されている<sup>18)</sup>。水槽内の電解質溶液で均質な地質媒質を模擬する場合、実際の大地にはない境界条件として水槽壁が問題となるが、境界の比抵抗を全てゼロにするか、または、全て無限大にすることで境界条件の取り扱いが容易になる<sup>26)</sup>。2極法の電極配置では、対象領域から遠電極を無限遠と見なせる位置まで遠ざけ、かつ電位遠電極と電流遠電極との電位差が無限大と見なせるようにそれぞれの遠電極を置く必要があるが、水槽壁の比抵抗がゼロの場合には、有限な大きさの水槽内で2極法に適した位置に遠電極を置くと実験有効領域が極めて小さくなるので、境界条件として境界の比抵抗を無限大とすることとし、水槽壁と電解質溶液との間を電氣的に絶縁した。水槽壁面は、比抵抗がゼロに近い鋼板であるので絶縁のためには内壁を絶縁性材料で覆わねばならない。ゴム板を内張する方法では、高価な割にはゴムの劣化や接着部の隙間のために十分な絶縁が確保できず、内壁面を絶縁性の高いエポキシ系塗料で塗装することとした。塗料の絶縁性、作業性、鋼板への密着性、耐久性等を考慮し、Table 1 に示す塗料を採用して、表の上から下の順に塗装作業を行った。絶縁性を向上させるため、約2週間後に追加

上塗りを行った。全ての水槽壁について抵抗測定を行った (Fig.3) が、いずれの測定値も500k $\Omega$ 以上であり、絶縁性は十分確保された。

最大100kgまでの模擬亀裂 (後述) を水槽内に保持できるように手動チェーンブロックを水槽直上の中心線上に設置した。また、模擬亀裂及び多点模擬電極等を固定するため、水槽中央部に $\phi 48.6\text{mm} \times \text{厚}2.6\text{mm} \times \text{標準長}2.5\text{m}$ 及び $0.5\text{m}$ の一般構造用炭素鋼鋼管 (主部材) 3本を渡し、直交クランプで結合した。水槽中央を明確にするため、向かい合った1組の水槽側壁の上辺の中央にV字型に加工した左右対称な支持台を設置した。主部材の一本をこの支持台に固定し、軸に沿って1mm目盛のメジャーを張り付け、模擬亀裂や多点模擬電極の固定位置を決定した。水槽上部縁端の四角には、他の主部材を固定、あるいは支持するためコーナーポストを設けた。水槽底面には、工具等不意の落下物による塗装面の損傷を防ぐため、厚さ3mmのゴム板を敷いた。

### 3. 解析コード

物理モデル実験及び数値シミュレーションによる比抵抗トモグラフィの解析コードでは、測定電位データから見掛比抵抗を計算した後、設定条件とともに再構成プログラムに入力し、出力された比抵抗分布から画像化プログラムでコンターマップを描くことにより比抵抗トモグラフィ断面図を得る (Fig.4)。解析コードに用いた個々のプログラムは、測定データ処理プログラム (RESEDT)、再構成プログラム (RESINV2) 及び画像化プログラム (Transform) である。数値シミュレーションのためには、入力データを作成するモデリングプログラム (RESMOD2) を別途用意した。再構成プログラム及びモデリングプログラムは、住友金属鉱山が保有する関連技術の解析コードを基本として制作し、画像化プログラムは、市販のアプリケーションソフトを適用した。プログラム言語は、アプリケーションソフトを除いてFORTRANを用いた。

#### 3.1 測定データ処理プログラム (RESEDT)

測定電位データから見掛比抵抗等を計算し、再構成プログラムへの入力データを編集するプログラムである。

見掛比抵抗  $\rho_a$  [ $\Omega\text{m}$ ] は、電流電極間に流した電流  $I$  と電位電極間で測定した電位差  $V$ 、及び電極相互の幾何学的位置関係で決まる電極配置係数  $K$  を用いて次式のように求められる。

$$\rho_a = K \frac{V}{I} \quad (1)$$

調査領域が均質等方媒質の場合には見掛比抵抗  $\rho_a$  は媒質の比抵抗  $\rho$  と等しくなる。一定の電極配置を用いる比抵抗法では、電極間隔等から簡単な式により電極配置係数  $K$  を得ることができるが、比抵抗トモグラフィでは、電極配置が限定されないため、採用した電極配置について個々に計算する必要がある。RESEDTでは、映像法を用いて計算している。

上塗りを行った。全ての水槽壁について抵抗測定を行った (Fig.3) が、いずれの測定値も500k $\Omega$ 以上であり、絶縁性は十分確保された。

最大100kgまでの模擬亀裂 (後述) を水槽内に保持できるよう手動チェーンブロックを水槽直上の中心線上に設置した。また、模擬亀裂及び多点模擬電極等を固定するため、水槽中央部に $\phi 48.6\text{mm} \times \text{厚}2.6\text{mm} \times \text{標準長}2.5\text{m}$ 及び $0.5\text{m}$ の一般構造用炭素鋼鋼管 (主部材) 3本を渡し、直交クランプで結合した。水槽中央を明確にするため、向かい合った1組の水槽側壁の上辺の中央にV字型に加工した左右対称な支持台を設置した。主部材の一本をこの支持台に固定し、軸に沿って1mm目盛のメジャーを張り付け、模擬亀裂や多点模擬電極の固定位置を決定した。水槽上部縁端の四角には、他の主部材を固定、あるいは支持するためコーナーポストを設けた。水槽底面には、工具等不意の落下物による塗装面の損傷を防ぐため、厚さ3mmのゴム板を敷いた。

### 3. 解析コード

物理モデル実験及び数値シミュレーションによる比抵抗トモグラフィの解析コードでは、測定電位データから見掛比抵抗を計算した後、設定条件とともに再構成プログラムに入力し、出力された比抵抗分布から画像化プログラムでコンターマップを描くことにより比抵抗トモグラフィ断面図を得る (Fig.4)。解析コードに用いた個々のプログラムは、測定データ処理プログラム (RESEDT)、再構成プログラム (RESINV2) 及び画像化プログラム (Transform) である。数値シミュレーションのためには、入力データを作成するモデリングプログラム (RESMOD2) を別途用意した。再構成プログラム及びモデリングプログラムは、住友金属鉱山が保有する関連技術の解析コードを基本として制作し、画像化プログラムは、市販のアプリケーションソフトを適用した。プログラム言語は、アプリケーションソフトを除いてFORTRANを用いた。

#### 3.1 測定データ処理プログラム (RESEDT)

測定電位データから見掛比抵抗等を計算し、再構成プログラムへの入力データを編集するプログラムである。

見掛比抵抗  $\rho_a$  [ $\Omega\text{m}$ ] は、電流電極間に流した電流  $I$  と電位電極間で測定した電位差  $V$ 、及び電極相互の幾何学的位置関係で決まる電極配置係数  $K$  を用いて次式のように求められる。

$$\rho_a = K \frac{V}{I} \quad (1)$$

調査領域が均質等方媒質の場合には見掛比抵抗  $\rho_a$  は媒質の比抵抗  $\rho$  と等しくなる。一定の電極配置を用いる比抵抗法では、電極間隔等から簡単な式により電極配置係数  $K$  を得ることができるが、比抵抗トモグラフィでは、電極配置が限定されないため、採用した電極配置について個々に計算する必要がある。RESEDTでは、映像法を用いて計算している。

## 3.1.1 映像法

電極配置係数Kを求めるために用いた映像法は、境界条件を満足するように真の電流源以外に仮想電流源をおいて電位分布を求める方法であり、仮想電流源の置き方が鏡に現れる鏡像と同じであるために鏡像法とも呼ばれる。水槽を用いた物理モデル実験の場合には、水面、底面、及び4つの側面を境界面として考慮する必要がある。

映像法では、基本的に半無限媒質内に置かれた点電流源 $C_0$ によって生じる媒質内の電位を任意の点において求め、媒質全体の電位分布を得る<sup>27)</sup>。比抵抗トモグラフィでは、地表面を水平な境界面、境界面下側の半無限媒質を比抵抗 $\rho = \rho_0$ の均質な地層、上側の半無限媒質を電氣的に絶縁物( $\rho = \infty$ )である大気層と考える。比抵抗 $\rho_0$ の地層内におかれた点電流源 $C_0$ から電流Iが流入する場合、電流源 $C_0$ の境界面に関する面対称の位置に置いた仮想電流源 $C'$ からも電流Iが流入すると考えれば、境界面を横切って流れる電流はない(Fig.5)ので、境界面を流れる電流成分に境界面に直交する成分はないという映像法の境界条件を満足する。従って、地層内の任意の点Pの電位は大気層を含めて、比抵抗 $\rho$ の均質な無限空間で2つの電流源から生ずるそれぞれの電位の合成として求めることができる。無限媒質中の電位は、点電流源からの距離の逆数の関数で表されるので、求める点Pの電位は(2)式のように表される。

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (2)$$

- $r$  : 電位計算点Pから電流源 $C_0$ までの距離  
 $r'$  : " から仮想電流源 $C'$ までの距離  
 $\pi$  : 円周率

実験に用いた水槽の壁面は電氣的な絶縁処理を施したので、水槽内の電解質溶液は半無限媒質ではなく、水面も含めて、互いに直交する6つの平面に境された媒質と捉えなければならない。この場合は次のような仮想電流源の置き方に関するいくつかの原則を組み合わせると多数の仮想電流源を置くことにより、無限空間での電位計算と同様に取り扱うことができる。

①水面と水槽側面のように互いに直交する2つの境界面で囲まれた媒質内に電流源 $C_0$ がある場合をFig.6に示す。まず、半無限媒質の境界面と同じように、境界面1に関して電流源 $C_0$ の面対称の位置に仮想電流源 $C'_1$ を、境界面2に関して電流源 $C_0$ の面対称の位置に仮想電流源 $C'_2$ を置く。次に、仮想電流源 $C'_1$ の境界面2に関して面対称の位置に仮想電流源 $C'_3$ を置く。仮想電流源 $C'_2$ の境界面1に関して面対称の位置には、既に仮想電流源 $C'_3$ があり、境界面における境界条件は既に満足しており、これ以上の仮想電流源を考慮する必要はない。結果的に、仮想電流源 $C'_3$ は2つの境界面の交線に関して電流源 $C_0$ の線対称の位置にある。したがって、2つの境界面だけの場合は仮想電流源の個数は3個であり(3)式で求められる。

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^3 \frac{1}{r'_n} \right) \quad (3)$$

- $r$  : 電位計算点Pから電流源 $C_0$ までの距離  
 $r'_n$  : " から仮想電流源 $C'_n$ までの距離

②これらの2つの境界面に直交する別の境界面がある場合には、2つの境界面の場合と同様に、3つの境界面に対して面対称の位置に3個、3つの境界面の交線に対して線対称の位置に3個の仮想電流源を置く。さらに、線対称の位置に置いた3個の仮想電流源の3つの境界面に対して面対称の位置の仮想電流源を考えると、新たな仮想電流源は3つの境界面の交点に対して本来の電流源の点対称の位置だけとなり、全部で7個の仮想電流源を置くことになる。立方体の水槽では、6つの境界面が交わる12本の交線(辺)、8個の交点(頂点)があるので、境界面の数と交線の数及び交点の数を合計した26個の仮想電流源が必要となる。測定断面に平行な側壁の影響を無視できる、すなわち、測定断面に垂直な方向には水槽が無限の大きさを持つと見なすことができる場合には、4つの境界面と4本の交線だけを考慮すればよいので、合計8個の仮想電流源を置けばよい。

③水槽における水面と底面あるいは側壁同士のように、平行な2つの境界面の間の媒質に電流源 $C_0$ がある場合は、Fig.7に示すようになる。まず、境界面1に関して電流源 $C_0$ の面対称の位置に仮想電流源 $C'_1$ を、境界面2に関して電流源 $C_0$ の面対称の位置に仮想電流源 $C'_2$ を置く。次に、仮想電流源 $C'_2$ の境界面1に関して面対称の位置には2次的な仮想電流源 $C'_3$ 、仮想電流源 $C'_1$ の境界面2に関して面対称の位置に2次的な仮想電流源 $C'_4$ を置く。さらに、2次の仮想電流源 $C'_4$ の境界面1に関して面対称の位置には3次的な仮想電流源 $C'_5$ 、2次の仮想電流源 $C'_3$ の境界面2に関して面対称の位置に3次仮想電流源 $C'_6$ を置く。このように、 $n$ 次の仮想電流源から遠い方の境界面に対して面対称の位置に $(n+1)$ 次の仮想電流源を置くと、 $(n+1)$ 次の仮想電流源は既存の仮想電流源に一致しないので、 $n$ が無限大まで考慮しなければならないことになる。したがって、平行な2つの境界面の間の媒質内の点 $P$ の電流源 $C$ による電位は(4)式のような仮想電流源との距離の逆数の漸化式を取り込んだ式として表される。

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \left\{ \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{r'_{2n-1}} + \frac{1}{r'_{2n}} \right) \right\} \quad (4)$$

$r$  : 電位計算点 $P$ から電流源 $C_0$ までの距離

$r'_{2n-1}, r'_{2n}$  : " から $n$ 次の仮想電流源 $C'_{2n-1}, C'_{2n}$ までの距離

(4)式の右辺にある無限級数和の項では、 $n$ が大きくなるに従って電位計算点 $P$ から仮想電流源までの距離 $r'_{2n-1}$ 及び $r'_{2n}$ は大きくなるので、その逆数は0に漸近し、実用上は $n$ をある有限な値で打ち切っても電位の計算に与える影響を無視することができる。実際、4次以上の仮想電流源による影響は計算電位の1%以下であり、3次的な仮想電流源までを考慮すれば誤差は5%以内に十分収まる。

立方体の水槽の場合には、すでに26個の仮想電流源を置いているので、これらの仮想電流源に対しても(4)式を適用すると、電流源 $C_0$ による仮想電流源も含めた $n=3$ までの仮想電流源は342個となる。また、解析断面に平行な水槽壁を考慮しなければ48個(Fig.8)の仮想電流源を考慮して(5)式により水槽内の点 $P$ の電位を求めることができる。

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^m \frac{1}{r'_n} \right) \quad (5)$$

- $r$  : 電位計算点Pから電流源C0までの距離  
 $r'_n$  : " から仮想電流源C'nまでの距離  
 $m$  : 考慮する仮想電流源の個数(342または48)

このようにして得られた電位と電流値及び水槽内に満たした電解質溶液の比抵抗値を用いて(1)式から、電極配置毎に電極配置係数を求めた。任意の点における電位計算のために使用した仮想電流源の数は、解析断面に直交する境界面だけを考慮する場合は48個、平行な境界面も考慮する場合は342個とした。

### 3.2 再構成プログラム (RESINV2)

画像化プログラムとともに解析コードの主要部分をしめる再構成プログラムでは、インバージョン(逆解析)により対象領域で測定された電位データから対象物内部の比抵抗分布を計算する。インバージョンとは数学的手法<sup>28)</sup>であり、測定データ数等において制約の多いジオトモグラフィにおいて最も重要な技術である。比抵抗トモグラフィのインバージョンでは、測定電位データまたは見掛比抵抗から一度で比抵抗構造を再構成することは通常容易でなく、見掛比抵抗分布に対して適当な初期構造モデルを設定し、初期モデルに対する見掛比抵抗の理論計算値と実際の見掛比抵抗値を比較し、その差が小さくなる方向にモデルを反復して修正していく方法をとる。設定した構造モデルに相当する見掛比抵抗の理論計算値を求める過程は、物理探査ではインバージョンに対してフォワード(順解析)またはモデリングと呼んでいる。構造モデルから電位分布を計算する影像法もフォワード計算法の一つである。

比抵抗トモグラフィで取扱うデータの性質は比抵抗法と同じであり、比抵抗法のインバージョンの考え方をそのまま再構成プログラムに用いることができる。比抵抗トモグラフィでは地表以外にも電極を置いて測定を行うので精度や感度が比抵抗法とは異なるが、本再構成プログラムでは既存の比抵抗法インバージョンプログラムを基本としている。

#### 3.2.1 フォワード計算法

比抵抗トモグラフィにおけるフォワード計算とは、地下に電流を流した時、仮想的な比抵抗モデルによって生ずる電位分布を求めることである。見掛比抵抗は測定点の相対位置と電位から求めることができるので、見掛比抵抗を計算することは電位分布を求めることに帰着する。

比抵抗トモグラフィや比抵抗法では、2本の電流電極を設置して送信系に接続し、回路を形成する。地質媒体を電気抵抗R、2本の電極を抵抗の両端と見なすと、回路的には電気抵抗Rに直流電圧Vを印加して電流Iを流すことになるが、媒体から見れば、一方の電極から電流Iが流入し(ソース電極;C1)、他方の電極から電流Iが流出する(シンク電極;C2)ことになり、シンクにおける電流Iの流出を電流-Iの流入とする。電位はある基準点(通常は無限遠点)に対するものであるが、実際に測定される電位データVは任意の2点に設定した電位電極(P1, P2)間の電位差であり、次式で求められる。

$$V = (V_{11} + V_{21}) - (V_{12} + V_{22}) \quad (6)$$

$V_{11}$  : C1に流入する電流Iによって生ずるP1での電位

$V_{12}$  : " " P2 "

$V_{21}$  : C2に流入する電流-Iによって生ずる $P_1$ での電位

$V_{22}$  : " "  $P_2$  "

(6)式の各項は互いに独立しているので、それぞれの電流電極に電流Iを流した時の各電位電極での電位を計算すれば、測定電極配置に相当する電位分布を求めることができる。実際に野外の測定で用いる電流電極は点電極ではないが、再構成したい構造モデルとの相対的な関係から3次元的な点電極と見なすことができる。3次元空間の電界はラプラス方程式やポアソン方程式で表されるので、電位分布を求めるためには境界条件を満足してこれらの方程式を解けばよい。これらの方程式は、適当な境界条件の下では映像法や等角写像法等の特殊な解析法を用いて解くことができるが、一般的には有限要素法(FEM)のような数値解析法を用いなければ解くことはできない。

FEMは、ある境界条件が与えられた有限な領域内の微分方程式を解く数値解法で、要素の形状、大きさ、物性を任意に設定することができるので、対象領域の形状にとらわれず、要素方程式の非線形性や要素間の相互作用などの取扱い困難な事項に対する融通性が他の計算手法に比べて高い。比抵抗トモグラフィや比抵抗法の解析にFEMを用いた報告が多い<sup>12,14,29-34</sup>等のもこのためである。

微分方程式の数値解析法としては、他に有限差分法(FDM)がある。FDMはFEMに比べて、計算が簡単で使い易く、ボーリング孔に電極をおいた場合の数値計算では、FDMの方が精度的に有利な結果が出た例<sup>29)</sup>もあるが、一般的に、FEMに比べて境界条件や領域の形状等に対する融通性が劣るために計算精度が劣ると言われており、RESINV2ではFEMを採用し、解析断面内を三角形の要素に分割している。

比抵抗トモグラフィや比抵抗法では、ある断面に直交する方向に無限に延びる2次元構造がある場合に、点電流源による電位分布計算を行うことを2.5次元の電位計算と呼んでいる。2.5次元の考え方としては、比抵抗構造は2次元であるにもかかわらず、電流源が3次元的に有限な構造であるために電位分布は3次元となるという捉え方、電位の計算は2次元で行って数学的処理により3次元的な電位分布を求めるという捉え方、あるいはその両者とする捉え方があり、まだ統一されていない。具体的には、地表面に垂直な解析断面の走行方向をx軸、断面に直交する方向をy軸、深度方向をz軸とした場合、y軸方向に無限に延びた構造に対してy軸方向にフーリエ変換した波数 $\lambda$ の領域で、x-z平面に関するポテンシャルを計算して逆フーリエ変換することにより解析断面上の電位分布を求める<sup>30)</sup>。波数領域におけるポテンシャルは、波数 $\lambda$ に関して単調減少関数となり<sup>35)</sup>、適当な $\lambda$ について求めたポテンシャルを内挿補間したポテンシャル関数をフーリエ積分する場合、ポテンシャルを求める波数の数により精度が決定される。比抵抗法では計算する波数の数は、 $5^{35)} \sim 7^{31)}$ 程度と考えられているのに対して、比抵抗トモグラフィでは、フォワード計算の計算誤差を2~3%以内に抑えるために、計算する波数の数を9とした場合と22とした場合の計算誤差の比較から、波数を十分細かくとる必要があることが指摘されている<sup>32)</sup>。しかしながら、適当な波数を選べば9個でも誤差は1%程度にしかならない<sup>29)</sup>という報告もあり、波数は一般的に定まっていない。比抵抗トモグラフィでは数千回以上の電位分布計算を行うことが多く、波数 $\lambda$ の数の多少は計算時間やメモリ量に大きく影響するので実用上の大きな問題である。計算精度と考え合わせて最適な $\lambda$ の数や取り方、少ない $\lambda$ の取り方でも計算精度が落ちないような内挿補間法を用いた例<sup>29)</sup>もあり、RESINV2では、16個の波数に

ついて有限要素法で求めたポテンシャルを指数関数の補間を用いて数値積分して点電流源での電位分布を求めている。

FEMで電位分布を求める計算を行う場合、FDMと同様に計算対象領域の外周面における境界条件の取り方が計算精度に大きく影響する<sup>30)</sup>。境界条件の取り方には、地表面以外の外周面において、電位が一定であるとする第1種(ディリクレ型)境界条件、境界面において電界の法線方向成分が0とする第2種自然(ノイマン型)境界条件があり、比抵抗法や比抵抗トモグラフィでは後者を採用することが多い。本物理モデル実験では、水槽壁を電氣的に絶縁したので、自然(ノイマン型)境界条件を採用した。しかしながら、既報の数値実験<sup>12,30,36)</sup>の結果では、第1種境界条件を用いると解析解より小さくなる傾向があり、また、自然境界条件を用いると解析解より大きくなる傾向があることが指摘されており、電流源から十分遠い距離においては、電位は距離の逆数に比例することを利用した混合境界条件も提案されている<sup>37)</sup>。混合境界条件を用いると計算精度は向上する<sup>29,36)</sup>とともに、対象範囲外に設定する要素や格子の数を減らすことができ、メモリや計算時間の節約ができると期待されるので今後検討する必要がある。

### 3.2.2 インバージョン計算法(逆解析法)

比抵抗トモグラフィの場合には、弾性波トモグラフィの考え方を導入したRBPT法(Resistivity Back Projection Technique: 比抵抗逆投影法)及びSIRT法(Simultaneous Iterative Reconstructive Technique)等のインバージョン計算法があるが、本再構成プログラムRESINV2では、比較的よく用いられるILST法(Iterative Least Square Technique: 反復最小二乗法)を改良したDLST法(Damped Least Squares Technique)を用いた。以下にその概要を述べる。

非線形な多変数関数  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  の最小値を求める場合に用いられる非線形最小二乗法の一つであるILST法は、方程式の非線形性が弱い場合には有効な方法であるが、非線形性が強い場合には解が安定せず、発散することがある。DLST法では、方程式に人工的なノイズを加えて解の安定化を図っている<sup>38)</sup>。この人工ノイズを加えて解く方法は使われる分野によってレーベンバーグマルカート法<sup>38)</sup>、リッジレグレション法<sup>39)</sup>、プレホワイトニング法<sup>40)</sup>等と呼ばれているが基本的な考え方は同じである<sup>41)</sup>。ジオトモグラフィでは、最初にこの手法を導入したAki他(1976)<sup>42)</sup>に従いDLST法と呼ばれている。

最小二乗法は、二乗和の形の目的関数

$$S(x) = \sum_{i=1}^m f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)^2 \quad (7)$$

の最小値を求める計算法で、関数  $f_i$  が変数  $x_1, x_2, \dots, x_n$  に関して線形であれば、

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)^2 = \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - y_i \right)^2 = A x - y \quad (8)$$

と表すことができ、最小二乗法の解は次式で示される正規方程式の解として与えられる<sup>43)</sup>。

$$A^T A x = A^T y \quad (9)$$



但し、 $A^T$ は $A$ の転置行列である。

通常、見掛比抵抗とブロックの比抵抗とは線形の関係ではないが、見掛比抵抗の微小変化 $\Delta \rho_a$ とブロックの比抵抗の微小変化 $\Delta \rho_u$ との関係は線形であると仮定すると、1次のテイラー展開から線形の関係を導いて(9)式を適用し、次式のような正規方程式を得ることができる。

$$A^T A \Delta \rho_u = A^T \Delta \rho_a \quad (10)$$

(10)式の $A$ は各成分が感度係数 $\partial \rho_{aj} / \partial \rho_u$ からなるヤコビアン行列である。(10)式で求めた各ブロック修正量を基に各ブロックの比抵抗の修正作業を、各ブロックの比抵抗から、フォワード計算によって計算した見掛比抵抗と実測値との差が最小となるまで反復する。従来、連立方程式である(9)式はガウス・ザイデル法等の直接的な解法で解かれてきたが、コンピュータで大量のデータを用いて最小二乗法が行われるようになると、連立方程式を直接的に解くことは数値的に不安定で誤差が大きいことが明らかになったので、グラム・シュミット法、特異値分解法等の新しい計算法が提案されている<sup>44,45)</sup>。

比抵抗トモグラフィにおけるDLST法では、(10)式に代わって次に示す正規方程式を用いている。

$$(A^T A + \lambda I) \Delta \rho_u = A^T \Delta \rho_a \quad (11)$$

ここに $I$ は単位行列、 $\lambda$ はマルカート係数、ラグランジェ係数、あるいはダンピング係数と呼ばれる0または正の数である。 $\lambda$ の値の選び方に決まった方法はなく、一般には測定値と計算値の差が少ない場合は小さい数を、差が多い場合は大きい数を用いる。反復の間、 $\lambda$ の値を一定の値に固定することが多いが、測定値に含まれる誤差や収束状況に応じて、反復ごとに変化させた例もある<sup>32,33)</sup>。数学的には(11)式により解の安定を図ることができるが、物理モデルとして必ずしも最適なモデルに収束するとは限らない。そこで場合によっては、最も滑らかな解を求める制約条件を設ける重み付最小二乗法、制約付き最小二乗法が用いられる<sup>41,46)</sup>。比抵抗法や比抵抗トモグラフィでは平滑化の制約条件にブロック間の比抵抗変化を平滑化しようとする働きを持つ2次の差分行列 $C$ (ラプラシアン)<sup>47,48)</sup>を用いることが多く、この場合は、次の正規方程式を解くことになる。

$$(A^T A + \lambda CTC) \Delta \rho_u = A^T \Delta \rho_a \quad (12)$$

最近では統計学的情報評価理論を取り入れて、最適な制約条件を自動的に設定する試みが行われている<sup>49)</sup>。

RESINV2では、測定精度をほぼ5%と想定して、(12)式においてマルカート係数を0.05とし、制約条件にはラプラシアンを用いている。また、(12)式のヤコビアン行列 $A$ の成分とした感度係数には次式で示される対数偏微分を用いた。

$$\frac{\partial \ln \rho_a}{\partial \ln \rho_u} = \frac{\rho_u}{\rho_a} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_u} \quad (13)$$

(13)式の右辺の偏微分には、あるブロックの比抵抗を10%変化させた時の見掛比抵抗と変化させ

ない場合の見掛比抵抗の差を用い、全てのブロックについてブロック毎の偏微分を求めヤコビアン行列Aを作成した。

### 3.3 画像化プログラム (Transform ; SPYGLASS<sup>TM</sup>)

再構成プログラムで比抵抗分布として出力された構造モデルを画像化して出力するプログラムである。コンピュータ・グラフィックスの発達により、さまざまな画像処理技術が開発されているが、比抵抗トモグラフィでは、通常、再構成された平面的な比抵抗分布をコンターマップや3次元的な立体図で表現する<sup>50)</sup>。画像化に関しては出力機器の機能に負うところが多く、出力機器を使いこなせるアプリケーションまたは自作のプログラムが必要である。自作のプログラムでは各種の出力機器に対応することは容易ではないので、当面、既存のグラフィック・アプリケーションソフトを利用して画像化プログラムとすることとした。比抵抗トモグラフィでは、コンターマップや立体図を描くので、格子点値計算法、描画法、及び彩色法が画像化に関する基本となり、特に、画像化された断面で検出限界や分解能等を検討する場合に重要な要因となる。なお、地質調査のための画像化に関する研究は、国内では情報地質学会を中心に行われている。

コンターマップ等を作成する描画プログラムでは、基本的にデータは等間隔の格子点値として与えられる。比抵抗トモグラフィでは解析ブロックを矩形にとることが多く、格子点上に並ぶデータも多いが、画像化する領域に対して格子が粗く、既存データから画像化するための画像データとして補間格子の格子点値へ変換する計算が必要である。Transformでは、格子点値計算法として、近傍値置換法<sup>51)</sup>、移動平均法、重み付平均法<sup>52,53)</sup>、線形補間法<sup>54,55)</sup>、クリッキング法<sup>56,57)</sup>を選択することができ、格子点データとして欠落のあるデータ群からコンターを描くトモグラフィに適している。また、Transformでは、カラーコンターマップ、塗りつぶし図、立体視図等多数の描画法を使い分けることができるほか、濃淡、レインボー、サイスミックなど21種類のカラースケールを備えている。

### 3.4 モデリングプログラム(RESMOD2)

地質構造に対応する比抵抗モデルを入力して、電位や見掛比抵抗を計算し、数値シミュレーション用データを作成するプログラムである。RESMOD2では、2.5次元有限要素法を使って電位計算を行い、映像法を使って見掛比抵抗を算出する。用いたアルゴリズムは、基本的には再構成プログラムのフォワード計算と同じである。モデルの比抵抗は、再構成プログラムに用いた解析ブロックをさらに分割した各有限要素法用三角形要素に与えることができる。扱うことのできる最大有限要素法節点数は、水平方向に101点、鉛直方向に41点である。また、再構成プログラムに比べて計算時間が短く、メモリー使用量も少ないので、ポテンシャルを計算する波数の数は最大21まで拡大可能としたほか、第1種境界条件、第2種境界条件のどちらも選択可能とした。

## 4. 数値シミュレーション実験

ない場合の見掛比抵抗の差を用い、全てのブロックについてブロック毎の偏微分を求めヤコビアン行列Aを作成した。

### 3.3 画像化プログラム (Transform ; SPYGLASS<sup>TM</sup>)

再構成プログラムで比抵抗分布として出力された構造モデルを画像化して出力するプログラムである。コンピュータ・グラフィックスの発達により、さまざまな画像処理技術が開発されているが、比抵抗トモグラフィでは、通常、再構成された平面的な比抵抗分布をコンターマップや3次元的な立体図で表現する<sup>50)</sup>。画像化に関しては出力機器の機能に負うところが多く、出力機器を使いこなせるアプリケーションまたは自作のプログラムが必要である。自作のプログラムでは各種の出力機器に対応することは容易ではないので、当面、既存のグラフィック・アプリケーションソフトを利用して画像化プログラムとすることとした。比抵抗トモグラフィでは、コンターマップや立体図を描くので、格子点値計算法、描画法、及び彩色法が画像化に関する基本となり、特に、画像化された断面で検出限界や分解能等を検討する場合に重要な要因となる。なお、地質調査のための画像化に関する研究は、国内では情報地質学会を中心に行われている。

コンターマップ等を作成する描画プログラムでは、基本的にデータは等間隔の格子点値として与えられる。比抵抗トモグラフィでは解析ブロックを矩形にとることが多く、格子点上に並ぶデータも多いが、画像化する領域に対して格子が粗く、既存データから画像化するための画像データとして補間格子の格子点値へ変換する計算が必要である。Transformでは、格子点値計算方法として、近傍値置換法<sup>51)</sup>、移動平均法、重み付平均法<sup>52,53)</sup>、線形補間法<sup>54,55)</sup>、クリッキング法<sup>56,57)</sup>を選択することができ、格子点データとして欠落のあるデータ群からコンターを描くトモグラフィに適している。また、Transformでは、カラーコンターマップ、塗りつぶし図、立体視図等多数の描画法を使い分けることができるほか、濃淡、レインボー、サイズミックなど21種類のカラースケールを備えている。

### 3.4 モデリングプログラム(RESMOD2)

地質構造に対応する比抵抗モデルを入力して、電位や見掛比抵抗を計算し、数値シミュレーション用データを作成するプログラムである。RESMOD2では、2.5次元有限要素法を使って電位計算を行い、映像法を使って見掛比抵抗を算出する。用いたアルゴリズムは、基本的には再構成プログラムのフォワード計算と同じである。モデルの比抵抗は、再構成プログラムに用いた解析ブロックをさらに分割した各有限要素法用三角形要素に与えることができる。扱うことのできる最大有限要素法節点数は、水平方向に101点、鉛直方向に41点である。また、再構成プログラムに比べて計算時間が短く、メモリー使用量も少ないので、ポテンシャルを計算する波数の数は最大21まで拡大可能としたほか、第1種境界条件、第2種境界条件のどちらも選択可能とした。

## 4. 数値シミュレーション実験

水槽を用いた物理モデル実験を想定した数値シミュレーション実験により、検出限界に関する予備的検討を行うとともに、物理モデル実験に関する予察を行った。

#### 4.1 設定条件

##### (1)座標軸

原点を液面中央に置き、液面上の解析断面方向をx軸、断面に直交する方向をy軸、深度方向をz軸とした。2m立方の水槽の中央を横断する断面を解析断面としたので、各座標の取り得る範囲は $-1 \leq x \leq 1$ 、 $y=0$ 、 $0 \leq z \leq 2$ である。解析断面内の座標位置は、(X,Z)として表現する。

##### (2)電極配置

電極配置は2極法とし、電流遠電極 $C_2$ は(-1,0)、電位遠電極 $P_2$ は(1,0)に固定した。遠電極は水槽内部に置いたので、 $C_2$ 及び $P_2$ は無遠点とは見なさず、単なる固定電極として電位分布や見掛け比抵抗の計算に利用した。

##### (3)亀裂モデルの比抵抗

岩盤のシミュレーションとして、均質地質媒質の比抵抗値は物理モデル実験で用いたNaCl溶液の比抵抗値(30Ωm)を採用した。亀裂部をシミュレートする亀裂モデルとして、物理モデル実験で用いた模擬亀裂の銅の比抵抗値 $10^{-6}$ Ωmを用いると桁落ちしてしまうので、桁落ちのしない比抵抗の最小値を試行錯誤して求め、0.5Ωmの値を亀裂モデルの比抵抗値として採用した。

##### (4)電流及び電位分布

水槽内の電流源は $C_1$ 、 $C_2$ の2点であり、一方の電流源から流れ込む電流と同じ量の電流が他方の電流源から外部に流れ出るので、水槽内の電位は電流量に比例し、電位分布形態は変わらない。そこで、数値シミュレーション実験では、電流量を1mAに固定した。

#### 4.2 水槽内電位分布

電流源 $C_1$ を液面中央(0,0)に置いた時の水槽全体(解析断面)の電位分布を求めるため、モデリングプログラムRESMOD2を用いて、Fig.9に示した節点における電位を映像法を使って計算した。得られた電位分布をFig.10に示す。電位分布としては、 $C_1$ 近傍に50mV以上の極大値があり、 $C_1$ から半径15cm以内では $C_1$ を中心とする同心円状に20mVまで減衰している。 $C_1$ から15cm以上離れた $P_2$ 側では、電位は $P_2$ に近づくにつれて緩やかに減衰している。一方、 $C_2$ 側では、電位は急速に減少し、 $C_1$ から約30cmのところに零電位が現れ、 $C_2$ に向かってさらに電位は低くなり、 $C_2$ では-20mV以下の極小値となった。従って、 $x > -0.3$ 、 $z < 0.5$ の範囲が、正の電位を示す領域となった。 $C_1$ や $C_2$ に近い一部を除くと電位の絶対値は、5mV以下の微小な値となった。

負の電位の現れない $C_1$ から約30cmの範囲を細かく調べるため、物理モデル実験で精査領域とした26cm×26cm ( $-0.13 \leq x \leq 0.13$ 、 $0 \leq z \leq 0.26$ )の範囲の電位分布を映像法を使って計算した。得られた電位分布をFig.11に示す。この範囲内では、等電位線は $C_1$ を中心とする同心円を描いている。 $C_1$ 付近では200mV以上の電位となったが、 $C_1$ から遠ざかるにつれて指数関数的に減少し、約24cm以上の領域では10mV以下となった。

### 4.3 ブランクテスト

水槽を用いた物理モデル実験では、水槽中央部断面内の20cm×20cmの範囲を比抵抗トモグラフィ解析領域とするので、同様の範囲について模擬亀裂を入れない状態での数値シミュレーション実験を行った。

2極法の比抵抗トモグラフィでは、任意の電流源 $C_1$ から電流を流したときの電位を電位電極 $P_1$ の位置を変えて測定する。電流源 $C_1$ の位置を次々と変えて電流を流し、その度に $P_1$ の位置を変えて電位を測定するので、電極配置及び電極間隔が一定でなく、測定した電流や電位をそのまま画像化のデータとするのは不適當である。通常は、測定した電位及び電流から求めた見掛比抵抗を画像化用入力データとし、解析プログラムを用いて対象領域の比抵抗構造図を得ている。最終的な比抵抗構造図が得られるまでには時間がかかるので、見掛比抵抗の分布を用いて比較的短時間で概略的な比抵抗構造が予測できると便利であるが、比抵抗トモグラフィの場合には、これまで見掛比抵抗分布を得るためのプロット方法がなかった。近年、早い段階で解析断面の概略的な比抵抗分布を知りたいという要求に応えるために、各電極配置に対して最も感度の高い位置に見掛比抵抗をプロットして擬似断面図を作成する方法が提案された<sup>57)</sup>。見掛比抵抗分布図が得られると、概略的な比抵抗分布だけでなく、全体的な見掛比抵抗分布を基に目視的に判断して測定データの品質管理を行うことができる。品質管理用の図面として、電流点毎に電位曲線を作って並べる方法もあるが、ここでは、 $\rho_a - \rho_u$ 探査法による多点表示立体電極配列比抵抗疑似断面の検討<sup>58)</sup>で用いられた、縦軸に電流点番号、横軸に電位測定点番号をとって比抵抗値をプロットする方法を参考にして、横軸に電流電極番号、縦軸に電位電極番号をとって測定値をプロットした見掛比抵抗分布図を作成した(Fig.12)。図は、解析領域内の見掛比抵抗が、29~31  $\Omega m$ のほぼ一様な分布となっていることを示している。

### 4.4 亀裂モデル数値シミュレーション

多点模擬電極で囲まれた20cm×20cmの範囲のほぼ中心に、解析断面と直交する方向に模擬亀裂を置いた物理モデル実験の数値シミュレーションとして、一辺が2、4及び8cmの3種類の亀裂モデルを無限の長さを持つ2次元構造として解析断面に直交する方向に置いた場合の計算を行った。再構成プログラムRESINV2への入力データとしては、各モデル毎にモデリングプログラムRESMOD2で計算した見掛比抵抗を用いた。得られた見掛比抵抗分布図をFig.13に示す。

#### (1)見掛比抵抗

各モデルにおける低見掛比抵抗異常部の最小値と均質媒質の比抵抗30  $\Omega m$ との差は次の通りであり、断面積の大きなモデルの方が差が大きくなった。

- ・ REC8HNモデル (断面は8cm×8cmの正方形)     18  $\Omega m$
- ・ REC4HNモデル ( " 4cm×4cm " )             10  $\Omega m$
- ・ REC2HNモデル ( " 2cm×2cm " )             4  $\Omega m$

いずれのモデルの場合も図の右下には、対角線と平行に左下から右上へ延びる低見掛比抵抗異常が認められる。この低見掛比抵抗異常の位置は、電位電極番号を $R_x$ 、電流電極番号を $T_x$ とすると、 $45 \leq T_x \leq 61$ の範囲でほぼ次の式で表される。

$$R_x = T_x - 44 \quad (14)$$

断面積の大きなモデルでは、見掛比抵抗分布図(Fig.13 a)の左上にも、対角線と平行に左下から右上へ延びる低見掛比抵抗異常が認められるが、この見掛比抵抗異常の最小値は右下の低見掛比抵抗異常の最小値ほど小さくない。見掛比抵抗の分布は、いずれの場合も図の左下から右上へ向かう対角線に対して線対称になっておらず、電流電極と電位電極を取り替えて測定すると、遠電極としたC<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>の影響のため見掛比抵抗は等しくならず、相反定理が成り立たないことを示している。

## (2) トモグラフィ解析結果

物理モデル実験では、多点電極で取り囲まれる20cm×20cmの範囲を解析領域とするが、数値シミュレーションでは、少し広い24cm×22cmの領域を12個×11個の132個のブロックに分割して再構成解析を行い、20cm×20cmの範囲について画像出力した。各解析ブロックは2cm×2cmの正方形で、有限要素法の要素が16個含まれる。設定した亀裂モデルと解析ブロックとの位置関係をFig.14に示した。解析領域中の数字はブロック番号で、斜線部が亀裂モデルを表わしている。各亀裂モデルについての比抵抗トモグラフィ解析結果をFig.15に示す。

REC8HNモデル(Fig.15 a)では、断面中央部のモデルに相当する位置に低比抵抗部が矩形に近い画像として再構成された。低比抵抗部の画像は正方形に近いが、深度方向に長く、頂点が面取りされた形になっている。低比抵抗部の上面では背景の高比抵抗から低比抵抗へと鋭く変化しており、直線的な境界が明確に現れたのに対し、下面では変化が相対的に鈍く低比抵抗部がやや下方に延びた形となった。

REC4HNモデル(Fig.15 b)では、断面中央よりやや上方に、REC8HNモデルよりも小さな低比抵抗部が再構成された。低比抵抗が下方にずっと延びた、矩形に近いおたまじゃくしのような画像となった。

REC2HNモデル(Fig.15 c)では、REC4HNモデルよりもさらに小さな低比抵抗部が、断面中央よりやや上方に再構成された。REC4HNモデルと同様、上部から下部に向かって尾が延びるような画像となった。低比抵抗部の最低比抵抗値は亀裂モデルに与えた比抵抗値より高く、他のモデルよりも高かった。

いずれの場合も、断面中央に設定した亀裂モデルはトモグラフィ断面中央部に低比抵抗部として再構成されたが、低比抵抗部の比抵抗値はモデルの値より高く、比抵抗値に関してのみいえば、モデルは再現されないことになった。再構成された低比抵抗部の面積や中心位置は、外周を何 $\Omega$ mとするかによって異なる。そこで、各モデルについて外周比抵抗5 $\Omega$ m毎に低比抵抗部の面積、モデルの実断面積との比及び中心位置を求めてみた。その結果をTable 2に示す。断面積の大きな亀裂モデルでは、ほぼモデルを置いた中央部に低比抵抗部が再構成されたが、モデルが小さくなるとトモグラフィでは低比抵抗部の中心位置はやや上方へ移動するとともに、低比抵抗部が下方に延びるようになった。

再構成された低比抵抗部が下方に延びる理由としては、ほとんどの測定値が解析断面下部における亀裂モデルに対する感度が低いために偽像が生じたものと考えられる。この偽像を防ぐ最も良い方法は、解析断面を取り囲むように断面下端にも電極を配置することである<sup>13)</sup>が、現場では非常に適用しにくい配置である。また、2本の鉛直電極の間隔を狭めて、下部の感度を相対的に上げることも一方法であるが、これは、野外においてボーリング孔間の幅を狭くして比抵抗トモグラフィを行ったと同様になってしまう。むしろ、解析プログラムのアルゴリズム

ムを改良して偽像を生じないようにすることが望まれる。

#### 4.5 検出限界の検討

当初、亀裂モデルの比抵抗に対して誤差5%以内となるような再構成画像の領域を検出モデルの領域とするという設定を行ったが、数値シミュレーション実験では、このような領域を検出することはできなかった。これまでに発表された数値シミュレーションによる比抵抗トモグラフィの結果<sup>14,15,32,49,58,59)</sup>でも、画像的には再構成されているものの比抵抗値までモデルと一致したケースはほとんどない。実際の比抵抗トモグラフィの場合には地質構造の物性のコントラストが大きく、100倍以上になることも少なくないが、これまでに報告されているものは、コントラストが10倍程度のもが多い。コントラストがあまり大きくなくても比抵抗値は再現されていないのが現状である。再構成モデルの比抵抗が元のモデルの比抵抗に戻らない理由としては、計算の過程で数学的に安定なモデルが必要なため、隣接する解析ブロック間において比抵抗の平滑化を行っていることが原因と考えられる。

今回の数値シミュレーションではコントラストが60倍であり（媒質 $30\ \Omega\text{m}$ に対して亀裂部 $0.5\ \Omega\text{m}$ ）、物理モデル実験では100倍以上（媒質 $30\ \Omega\text{m}$ に対して亀裂部 $10^{-6}\ \Omega\text{m}$ ）となる。比抵抗を用いた解析の場合には、大地に電流を流した時に、異なる比抵抗を持つ2つの地層によって生じる応答が、別の比抵抗を持つ1つの地層からの応答と識別がつかない。すなわち、2つの層と電氣的に等価な1つの層、いわゆる等価層との識別ができず、測定データに対する解は一意的ではない。しかも、数値解法には計算誤差が含まれることは避けられない。これらのことから、物理的に整合性のあるモデルを再構成するためには平滑化手法に頼らざるを得ないのが現状である。従って、比抵抗トモグラフィでは比抵抗値まで再構成されることは期待せず、画像的に構造を捉えることに重点を置く方が実用的ではないかと考えられる。

画像的に構造を捉えるということは画像処理の分野である。すなわち、単にコンターを描く数値や間隔の設定に依存することになる。数値シミュレーション結果では、断面がREC8HNモデルの場合でも、REC4HNモデルの場合でも $10\ \Omega\text{m}$ 以下の領域が亀裂モデルの断面積にほぼ一致するが、REC2HNモデルでは $10\ \Omega\text{m}$ 以下の領域は元のモデルの1/4程度しかない（Table 2）。すなわち、60倍程度の比抵抗コントラストを持つ低比抵抗異常構造は、それが解析断面の1/25程度の断面積を持つならば、ほぼ元のモデルに再構成することができる、すなわち元のモデルとして検出され得ると考えられる。解析断面の1/100以下の断面積では元のモデルに再構成されていないので、検出限界は1/100~1/25の間にあると思われる。しかし、解析断面の1/100程度の断面積を持つ低比抵抗構造の再構成モデルでも、低比抵抗モデルを表す低比抵抗異常が再構成されており、低比抵抗体としての検出は実用上可能であるとみなすこともできる。

## 5. 水槽を用いた物理モデル実験

実験は、まず、水槽壁面の影響が無視できるような有効領域を抽出し、抽出された有効領域を基に模擬電極の電極間隔を決定し、次に、模擬電極だけの場合のブランクテストを行い、続いて模擬電極と4種類の模擬亀裂を使った比抵抗トモグラフィの物理モデル実験（亀裂モデ

ムを改良して偽像を生じないようにすることが望まれる。

#### 4.5 検出限界の検討

当初、亀裂モデルの比抵抗に対して誤差5%以内となるような再構成画像の領域を検出モデルの領域とするという設定を行ったが、数値シミュレーション実験では、このような領域を検出することはできなかった。これまでに発表された数値シミュレーションによる比抵抗トモグラフィの結果<sup>14,15,32,49,58,59)</sup>でも、画像的には再構成されているものの比抵抗値までモデルと一致したケースはほとんどない。実際の比抵抗トモグラフィの場合には地質構造の物性のコントラストが大きく、100倍以上になることも少なくないが、これまでに報告されているものは、コントラストが10倍程度のもが多い。コントラストがあまり大きくなくても比抵抗値は再現されていないのが現状である。再構成モデルの比抵抗が元のモデルの比抵抗に戻らない理由としては、計算の過程で数学的に安定なモデルが必要なため、隣接する解析ブロック間において比抵抗の平滑化を行っていることが原因と考えられる。

今回の数値シミュレーションではコントラストが60倍であり（媒質 $30\ \Omega\text{m}$ に対して亀裂部 $0.5\ \Omega\text{m}$ ）、物理モデル実験では100倍以上（媒質 $30\ \Omega\text{m}$ に対して亀裂部 $10^{-6}\ \Omega\text{m}$ ）となる。比抵抗を用いた解析の場合には、大地に電流を流した時に、異なる比抵抗を持つ2つの地層によって生じる応答が、別の比抵抗を持つ1つの地層からの応答と識別がつかない。すなわち、2つの層と電氣的に等価な1つの層、いわゆる等価層との識別ができず、測定データに対する解は一意的ではない。しかも、数値解法には計算誤差が含まれることは避けられない。これらのことから、物理的に整合性のあるモデルを再構成するためには平滑化手法に頼らざるを得ないのが現状である。従って、比抵抗トモグラフィでは比抵抗値まで再構成されることは期待せず、画像的に構造を捉えることに重点を置く方が実用的ではないかと考えられる。

画像的に構造を捉えるということは画像処理の分野である。すなわち、単にコンターを描く数値や間隔の設定に依存することになる。数値シミュレーション結果では、断面がREC8HNモデルの場合でも、REC4HNモデルの場合でも $10\ \Omega\text{m}$ 以下の領域が亀裂モデルの断面積にほぼ一致するが、REC2HNモデルでは $10\ \Omega\text{m}$ 以下の領域は元のモデルの1/4程度しかない（Table 2）。すなわち、60倍程度の比抵抗コントラストを持つ低比抵抗異常構造は、それが解析断面の1/25程度の断面積を持つならば、ほぼ元のモデルに再構成することができる、すなわち元のモデルとして検出され得ると考えられる。解析断面の1/100以下の断面積では元のモデルに再構成されていないので、検出限界は1/100~1/25の間にあると思われる。しかし、解析断面の1/100程度の断面積を持つ低比抵抗構造の再構成モデルでも、低比抵抗モデルを表す低比抵抗異常が再構成されており、低比抵抗体としての検出は実用上可能であるとみなすこともできる。

## 5. 水槽を用いた物理モデル実験

実験は、まず、水槽壁面の影響が無視できるような有効領域を抽出し、抽出された有効領域を基に模擬電極の電極間隔を決定し、次に、模擬電極だけの場合のブランクテストを行い、続いて模擬電極と4種類の模擬亀裂を使った比抵抗トモグラフィの物理モデル実験（亀裂モデ



ル実験)の順で実施した。

### 5.1 電解質溶液

均質な岩盤を模擬するために水槽内に満たす電解質溶液として、溶質をNaCl試薬、溶媒を純水としたのでは、水槽内に満たす溶液量8,000リットルを確保することは容易でないで、溶質には食塩、溶媒には水槽設置場所の水道水を用いた。実験水槽の溶液の比抵抗は、溶媒である水道水の比抵抗約100Ωmより低いこと、比抵抗の管理が容易であること、及び受信電位ができるだけ大きくとれるように高い比抵抗であること等から30Ωmとした。水槽内のNaCl溶液の比抵抗は、東亜電波工業株式会社の電導度計CM-11Pを使って各測定の前前後で温度とともに測定した。実験期間中の電導度の値は333~338μS/cm(30.0~29.6Ωm)の範囲であり、溶液の比抵抗に対して、1.3%の誤差であるので測定結果に対して特に補正はしなかった。

### 5.2 実験有効領域

有限な水槽内で、半無限媒質とみなしている実際の地下を模擬するためには、水槽壁の影響を無視できる領域(実験有効領域)を抽出する必要がある<sup>26)</sup>ので、亀裂モデル実験に先立ち実験有効領域を決定した。電解質溶液の比抵抗30Ωmから誤差5%以内(28.5~31.5Ωm)の領域を有効領域と設定し、電流源C<sub>1</sub>を水槽中央に設定したときの垂直断面全体の電位分布(概査)、及び電流源C<sub>1</sub>近傍の電位分布(精査)を行った。

概査のため、水面下180cmまで届く多点垂線式電極(Fig.16)を製作し、断面に沿って水平に移動させながら、多電極用電気探査器McOHM-21(応用地質社製)を用いて、水槽内の1310点において電位を測定した。電位測定点をFig.17に示す。電流電極C<sub>1</sub>を液面中央に、電流遠電極C<sub>2</sub>を測定断面端の液面に、電位遠電極P<sub>2</sub>をC<sub>2</sub>とは逆の測定断面端の液面に設置し、多点垂線電極を電位電極P<sub>1</sub>とした。多点垂線式電極はテフロン加工した電線の周囲に2または3mm幅の銅テープを巻いたもので、水槽内で鉛直に保つために錘を下げた。2つの電流電極には6mm径の電気探査用ステンレス電極の先端を用い、電位遠電極P<sub>2</sub>には外径13mmの塩化ビニールパイプの先端から50mmの所に厚さ1mm×外径13mmの真鍮環が露出するように取り付けられた全周型電極を用いた。電極の切り替えには専用スキャナーを用いた。概査で得られた水槽中央の垂直断面全域の電位分布をFig.18に示す。

電流源近傍の26cm×26cmの範囲は、測点を十分多くするとともに、電極の位置精度を上げ、精査領域として精度の良い測定を行った。精査では、電位電極P<sub>1</sub>に、XYプロッタのペン先に取り付けたピトー型電極を用い(Fig.19)、0.1mmの精度で5mmずつ電極P<sub>1</sub>を移動させながら電位分布を測定した。ピトー型電極は、外径13mmの塩化ビニールパイプの先端に外径1.4mmのステンレスパイプを埋め込み、さらにその先端に直径0.5mm×長さ10mmの金線を埋め込んで、全体にエポキシ塗料を塗布して製作した電極である。ピトー型電極の金線の先端は円錐状に研磨仕上げをして、円錐露出部を点電極とした。ステンレスパイプを先端から約100mmの位置で直角に曲げて使用した。電位の測定には、ペンの移動の制御に用いた日本電気製パーソナルコンピュータの拡張スロットに取り付けた12bitA/Dコンバータを用いた。精査で得られた電位分布図をFig.20に示す。精査領域について、(1)式及び(2)式を用いて2極法の係数を使って見掛比抵抗の分布を求めたものがFig.21である。図では電流電極C<sub>1</sub>から半径5~6cmの領域の見掛比抵抗

抗は40Ωm以上で、C<sub>1</sub>から離れるほど見掛比抵抗が低くなっており、x軸の負側は正側に比べて低く、(13,26)付近では22Ωm、(-13,25)付近では16Ωm以下の最小値を示している。水槽の溶液の比抵抗30Ωmに対して誤差5%以内(28.5~31.5Ωm)の領域は、C<sub>1</sub>から15~17cm離れた環状のわずかな範囲だけであった。電流電極C<sub>1</sub>から離れるにつれて見掛比抵抗が低くなるのは、遠電極としたC<sub>2</sub>及びP<sub>2</sub>が測定に用いた電極C<sub>1</sub>及びP<sub>1</sub>から無限遠と見なせるほど離れていないためであると考えられた。そこで、壁面の影響を考慮するため、4極法の電位計算式である(6)式と映像法による電位計算式である(3)式、(4)式との組合せを用いて求めた電極係数を使って改めて見掛比抵抗を求めた。求め直した見掛比抵抗分布図をFig.22に示す。見掛比抵抗は、精査範囲全体にわたって47~50Ωm前後のほぼ一定値になった。これは、実際の溶液の比抵抗30Ωmの約1.56倍である。

測定電位分布(Fig.18, 20)と数値シミュレーションによる計算電位分布(Fig.10, 11)を比較してみると、測定電位は計算電位の約1.52倍となっている。見掛比抵抗や電位分布計算では映像法を利用しているので、電界強度Eと電流密度Jの関係を用いて、映像法を利用しない方法で媒質の比抵抗ρを求めてみると、均質媒質では一般に次式で示される拡張したオームの法則が成立する。

$$\mathbf{E} = -\rho \cdot \mathbf{J} \quad (15)$$

液面中央に置いた電流源C<sub>1</sub>の近傍では、電界強度EはC<sub>1</sub>を中心とする半球面に直交してC<sub>1</sub>に向かうベクトルとなり、電流密度Jは同じ半球面に直交してC<sub>1</sub>から離れるベクトルとなるのでこの球面上では、(15)式は次式のようなスカラーの関係式になる。

$$|\mathbf{E}| = -\rho \cdot -|\mathbf{J}| = \rho \cdot |\mathbf{J}| \quad (16)$$

C<sub>1</sub>に流した電流は電解質溶液内を半球面上に伝播していくので、1Aの電流を流した場合、C<sub>1</sub>から10cmの距離における|J|は、半径10cmの半球の表面積0.063 m<sup>2</sup>で1Aを除した15.9 A/m<sup>2</sup>となる。|E|は精査領域で測定した電位分布から得られる。実測値を1A当たりの値に換算した格子点上の電位データからx軸方向及びz軸方向について格子点間の電位差を格子点間隔で除して求めた各格子点における電位傾度のx成分、z成分を使って、C<sub>1</sub>から10cmの距離における点の|E|を求めると約726 V/mとなった。これらの値を(16)式に代入すると電解質溶液の比抵抗ρは45.6Ωmとなる。電界強度と電流密度から得られた比抵抗45.6Ωmと電解質溶液の比抵抗30Ωmとの比は、測定電位分布と計算電位分布の比と同じく1.52であり、数値シミュレーションによる電位分布と実測した電位分布との違いに整合する。したがって、見掛比抵抗が約1.5倍になるのは、2極法の物理モデル実験ではいわゆる容器係数とでも言うべきものと考えることができる。

すなわち、幅2mの水槽の中央部断面における26cm×26cmの範囲においてさえも壁面の影響は無視することができなかつたが、壁面を考慮した計算を行うことにより精査領域はほぼ均質な領域として見なされることがわかった。そこで、映像法と4電極法を組み合わせた電極係数を用いて見掛比抵抗を計算することにした。基本的にはこの計算式を使えば水槽のあらゆる領域を有効領域として用いることができることになるが、電流電極C<sub>1</sub>から電流遠電極C<sub>2</sub>側に約30cm以上離れると水槽壁面の影響のため、負の電位領域となってしまう(Fig.18)。野外におけ

る測定では、負の電位領域は現れないので現場を模擬することにならない。そこで、この負の電位領域を含まない範囲で余裕を見て液面中央部の20cm×20cmを実験有効領域とすることにした。これに合わせて、多点模擬電極の電極間隔を1cmとした。

### 5.3 模擬電極

地表面と2本の垂直ボーリング孔を用いた場合の野外における比抵抗トモグラフィを想定して、地表電極を模擬するため19個の電極を取り付けた水平電極を用意し、これにボーリング孔内に設置された電極を模擬するため、21個の電極を取り付けた垂直多電極2本を組み込むとともに、部材固定用の支持桿と電線接続用の2個の電線接続器を取り付けて物理モデル実験用の模擬電極を製作した(Fig.23)。

電極性能試験<sup>60)</sup>において、電極の材質として金、真鍮、黒鉛、及び鉛の間では大きな差異が認められなかったので、化学的に安定している金より経済性の点で真鍮電極とした。ただし、水平電極の端子には金メッキした直径1mm×長さ5mmの真鍮製の針を用いた。水平電極は、幅10cm、長さ23cm、厚さ1cmの塩化ビニール製の基板にコンピュータ加工により板に直交するように1cm間隔で19カ所に端子取り付け孔を開け、針状の電極端子を挿入して接着剤で固定した。垂直多電極は、外径6mmの塩化ビニールパイプに厚さ0.4mm×外径6mmの真鍮環を1cm間隔で21個取り付け製作した。2本の垂直多電極の間を20cm離して水平電極を含む基板に直交させて固定した。水平電極及び2本の垂直多電極を取り付けた基板は、水槽中央に渡した主部材及びアーム部材を用いて水面中央に固定した(Fig.21)。基板の位置、高さ、向き、傾斜を調整して目視により全ての水平電極が液面直下で水平となるように固定した。

### 5.4 ブランクテスト

模擬電極を水槽中央部に設置し(Fig.1)、McOHM-21を用いて、模擬亀裂を置かない状態の均質媒質を対象とした比抵抗トモグラフィ(ブランクテスト)を行った。得られた見掛比抵抗分布図をFig.24に示す。

電流電極番号20~21及び40~41付近には、上下方向に延びる高い見掛比抵抗の異常が現れている。異常部の最大値は33~35Ωm以上であり、NaCl溶液の比抵抗30Ωmに対する誤差は10~20%であった。異常部を除くと見掛比抵抗は29~32Ωmの範囲にあり、NaCl溶液の比抵抗に対する誤差は10%未満であった。上下方向に延びる高見掛比抵抗異常が発生した電流電極は、模擬電極の水平電極部と垂直電極部の接合部に相当している。電位電極でも同じ位置で弱い見掛比抵抗境界が現れており、水平電極部と垂直電極部の構造の差による影響が現れているのではないかと考えられる。数値シミュレーション実験(Fig.12)でも同じような位置に高見掛比抵抗異常が現れており、模擬電極の構造上、電極の幾何学的位置に起因する誤差が強調されたためと考えられる。また、電流電極から離れた位置に現れた高見掛比抵抗は、電極位置が電流源から遠いために電位が相対的に小さく、測定精度が悪いためと考えられる。

### 5.5 亀裂モデル実験

単純な模擬亀裂として断面の一辺が1cm、2cm、4cm、及び8cmの4種類の角柱を、多点模擬電極が囲む範囲の中央に置いて比抵抗トモグラフィの物理モデル実験を行った。一般に、岩盤

自体は高比抵抗体であり、亀裂は岩盤と比較して比抵抗の低い粘土や地下水で満たされているため、亀裂部は低比抵抗異常として検出されるので、模擬亀裂の材質には低比抵抗物質として、比抵抗が $10^{-6} \Omega \text{m}$ 程度で、加工や入手の容易な純銅を採用した。また、模擬亀裂の形状として、解析断面では再構成プログラムの比抵抗ブロックで表現し易く、全体的には2次元構造モデルが仮定できるということを考慮して、長さが断面の大きさと比べて十分長い120cmの角柱を用いた。模擬亀裂は、2.5次元のモデル計算を行う場合の仮定となっている2次元構造と見なせるよう、最も長い辺が模擬電極断面に対して直交する方向に延びるように設置した。比抵抗 $30 \Omega \text{m}$ のNaCl溶液内に各模擬亀裂を置いた地質構造モデルをそれぞれ次のように呼ぶことにした。

- ・ REC8HLモデル (断面8cm×8cmの模擬亀裂に対応)
- ・ REC4HLモデル ( " 4cm×4cm " )
- ・ REC2HLモデル ( " 2cm×2cm " )
- ・ REC1HLモデル ( " 1cm×1cm " )

測定した電位及び電流データから、測定データ処理プログラムRESEDTにより見掛比抵抗分布を求め、データ編集した後、再構成プログラムRESINV2及び画像化プログラムTransformを用いて画像化した。

#### (1)見掛比抵抗分布

各地質モデルの測定結果から得られた見掛比抵抗分布図をFig.25に示す。これらの見掛比抵抗分布には次のような傾向が認められた。

①どの見掛比抵抗分布図においても、ブランクテストの見掛比抵抗分布(Fig.24)と同様に、電流電極番号21～22及び40～41付近には、上下方向に延びる高見掛比抵抗異常が現れた。

②見掛比抵抗分布図の右下には、対角線と平行に左下から右上へ延びる低見掛比抵抗異常がある。この低見掛比抵抗異常の位置はいずれのモデルでも変わらず、数値シミュレーション実験の場合と同様に(14)式で表すことができる。

③各モデルにおける低見掛比抵抗異常の最小値と均質媒質の比抵抗 $30 \Omega \text{m}$ との差は以下の通りであり、断面積の大きなモデルの方が差は大きい。

- ・ REC8HLモデル 20  $\Omega \text{m}$
- ・ REC4HLモデル 11  $\Omega \text{m}$
- ・ REC2HLモデル 5  $\Omega \text{m}$
- ・ REC1HLモデル 4  $\Omega \text{m}$

④断面の大きな模擬亀裂では、見掛比抵抗分布図 (Fig.25a) の左上にも、対角線と平行に左下から右上へ延びる低見掛比抵抗異常がある。しかし、この見掛比抵抗異常の最小値は右下の低見掛比抵抗異常の最小値ほど小さくない。

⑤どのモデルの場合も見掛比抵抗の分布は、図の左下から右上へ向かう対角線に対して線対称になっていない。すなわち、電流電極と電位電極を取り替えて測定すると見掛比抵抗は等しくならず、相反定理が成り立たない。これは、遠電極が十分離れていないため、電流電極と電位電極を取り替えると遠電極と各電極との幾何学的配置が等価と見なせないことを示している。

これらの特徴は、数値シミュレーション実験結果(Fig.13)にも現われており、物理モデル実験では、見掛比抵抗異常がより強調された結果となった。高見掛比抵抗異常を残したままで再構成すると画像に偽像が生じるので、異常部のデータを除去した見掛比抵抗分布を入力データ

として再構成画像化した。

## (2) トモグラフィ解析

見掛比抵抗分布図の検討結果から、高見掛比抵抗異常部のデータを除去して再構成画像化した。画像化された低比抵抗部は画像の中心に現れず、電極に沿って中心部を取り囲むように再構成された。数値シミュレーション実験と物理モデル実験の見掛比抵抗分布を比較すると、数値シミュレーション(Fig.13)では左下から右上に向かう対角線にほぼ平行で滑らかなコンターが卓越しているのに対し、物理モデル実験の見掛比抵抗分布(Fig.25)には必ずしも同じようなコンターが卓越していない。これは、物理モデル実験の測定値に誤差が含まれているためと考えられた。このような誤差を含むデータに対して、分解能が向上し、画像が安定するように、入力データを制限して画像化することにした。入力データとしては、見掛比抵抗分布図において低見掛比抵抗異常が良く現れている右下半分、すなわち電流電極が電位電極と電位遠電極との間に位置した時の見掛比抵抗を使用した。亀裂モデルを含んだ数値シミュレーションの場合には、入力データを制限して再構成した画像と全データを使った再構成画像にはあまり差が見られなかったが、物理モデル実験では、入力データを制限した方が全データを使った場合より良好な画像が得られた。これは、測定データに誤差が含まれると感度係数の小さな電極配置を用いた場合、計算誤差が大きく方程式の解が不安定になるためと思われる。

また、インバージョンの計算に用いたDLST法の(14)式における安定化のためのマルカート係数 $\lambda$ と平滑化行列Cに適当なものを選択することで解を安定させることを図った。これらの係数は、一般に、誤差が大きい場合には強い値を採用するが、組合せ方法によっても有効性が変化するようである。本研究では、検出限界の検討に重点を置いたので、組合せについての検討は行わず、試行錯誤で選んだ $\lambda$ とCで再構成したいくつかの計算結果の中から、解が発散せず、中央部に低比抵抗が再構成された画像を採用した。再構成画像をFig.26に示す。

REC8HLモデル(Fig.26a)では、断面中央部の模擬亀裂に相当する位置に低比抵抗部が再構成されている。しかし、再構成画像上の低比抵抗部は、数値シミュレーション実験の再構成画像と比べてシャープな画像にはならず、比抵抗の値は実際のモデルの比抵抗 $10^{-6}\Omega\text{m}$ よりはるかに大きな $1\Omega\text{m}$ 以上であった。低比抵抗部の上部は横長の楕円形で、下部は下に向かって延びている。中心点位置は解析断面のほぼ中央にあり、 $15\sim 20\Omega\text{m}$ 以下の領域が模擬亀裂REC8Hの断面積とほぼ同じとなった。

REC4HLモデル(Fig.26b)では、断面中央より下方に、REC8HLモデルよりも小さな低比抵抗部が再構成され、断面中央上方にも弱い低比抵抗部が再構成された。また、垂直電極部の下部にも、電氣的に等価な偽像が再構成されている。これは、測定データに含まれるノイズの影響が大きいためではないかと考えられる。画像の評価には断面中央下部の低比抵抗部を用いることとしたが、模擬亀裂REC4Hの断面積に相当する領域は、 $20\Omega\text{m}$ 以下の領域であった。

REC2HLモデル(Fig.26c)では、REC4HLモデルよりも大きな低比抵抗部が断面中央に再構成された。低比抵抗部の形状は上に凸のおむすび形で、断面左下及び右下に延びる偽像も現れている。評価には中央部分のみを使うこととすると、模擬亀裂の断面積に相当する領域は、 $5\sim 10\Omega\text{m}$ 以下の領域となった。

REC1HLモデルでは、解が発散しないような $\lambda$ とCが得られなかったため、再構成画像を得ることはできなかった。

これらの再構成画像には数値シミュレーションのようなモデルの断面積に関連した傾向は見られなかったが、数値シミュレーション実験と同様な手法を用いて、各モデルについて外周比抵抗 $5\Omega\text{m}$ 毎に低比抵抗部の面積、モデルの実断面積との比及び中央位置を Table 3 にまとめた。

物理モデル実験では、REC8HLモデルのみに数値シミュレーションと同じような低比抵抗部が現れたが、それ以外のモデルでは低比抵抗部は画像化されたものの、あまり明確な像とはならなかった。これは測定データの多くが誤差を含んだものであり、再構成画像を得るために強い平滑化条件を与えなければならなかったためと考えられる。REC8HLモデルにおいて、再構成画像の低比抵抗部が実際のモデルの面積とほぼ等しくなる領域を Table 3 から内挿すると $18\Omega\text{m}$ 以下の領域となる。これを基準にして、他のモデルの再構成画像において $18\Omega\text{m}$ 以下の領域の面積と実際のモデルの面積との比を求めると、REC4HLモデルでは0.77、REC2HLモデルでは12.67となった。REC8HLモデルでは、合理的な画像が現れており、本実験システムが持っている誤差の範囲では、解析断面の1/6程度の面積があればほぼ元のモデルを検出できると考えられる。

## 6. まとめ

比抵抗トモグラフィの検出限界、あるいは分解能等の基礎的研究のため、3次元立体構造を模擬した物理モデル実験を行うことのできる実験水槽を準備し、模擬電極及び模擬亀裂等を用いて2電極配置法について物理モデル実験を行うとともに、測定データ処理プログラム、再構成プログラム等から成る比抵抗トモグラフィ解析コードを開発して数値シミュレーション実験を行い、検出限界について検討した。

数値シミュレーションでは、想定した亀裂モデルが大きい( $8\times 8\text{cm}$ )場合は、再構成画像(解析画像)として矩形に近い低比抵抗部が得られたが、モデルが小さい場合には低比抵抗部が下方に伸びた偽像を伴った形となった。また、解析画像で得られた低比抵抗部の比抵抗値は、入力した亀裂モデルの値より高い値となり、解析コードのアルゴリズムを改良する必要があると考えられた。しかしながら、解析画像の低比抵抗部と亀裂モデルの断面積とから、低比抵抗異常体の比抵抗値が周辺の地層の比抵抗値の1/60程度であれば、解析断面の1/25程度の断面積を持つ異常体が検出できることが予想された。

物理モデル実験では、水槽中央部の $26\text{cm}$ 平方の断面内においても水槽壁面の影響を受けていることが明らかとなり、遠電極を含む4電極及び影像法とを用いて壁面の影響を考慮することにより水槽内を均質な地質媒質として近似が可能となった。多点模擬電極及び模擬亀裂を用いた実験では、良好な解析画像が得られなかった。その原因として、多点模擬電極の個々の電極を点電極として扱う場合、データに多くの誤差が含まれることが考えられる。電極位置の精度を向上させるためには、有効領域の精査測定で用いた単電極をコンピュータコントロールにより制御する方法が有効と考えられる。

今後は、これらの知見を基に、解析コードの改良を行うとともに、電極位置の精度向上を目指した水槽の改良を行い、比抵抗トモグラフィで用いられる3極法及び4極法などの他の電極配置についても検出限界についての検討を進めていく予定である。

これらの再構成画像には数値シミュレーションのようなモデルの断面積に関連した傾向は見られなかったが、数値シミュレーション実験と同様な手法を用いて、各モデルについて外周比抵抗 $5\Omega\text{m}$ 毎に低比抵抗部の面積、モデルの実断面積との比及び中央位置を Table 3 にまとめた。

物理モデル実験では、REC8HLモデルのみに数値シミュレーションと同じような低比抵抗部が現れたが、それ以外のモデルでは低比抵抗部は画像化されたものの、あまり明確な像とはならなかった。これは測定データの多くが誤差を含んだものであり、再構成画像を得るために強い平滑化条件を与えなければならなかったためと考えられる。REC8HLモデルにおいて、再構成画像の低比抵抗部が実際のモデルの面積とほぼ等しくなる領域を Table 3 から内挿すると $18\Omega\text{m}$ 以下の領域となる。これを基準にして、他のモデルの再構成画像において $18\Omega\text{m}$ 以下の領域の面積と実際のモデルの面積との比を求めると、REC4HLモデルでは0.77、REC2HLモデルでは12.67となった。REC8HLモデルでは、合理的な画像が現れており、本実験システムが持っている誤差の範囲では、解析断面の1/6程度の面積があればほぼ元のモデルを検出できると考えられる。

## 6. まとめ

比抵抗トモグラフィの検出限界、あるいは分解能等の基礎的研究のため、3次元立体構造を模擬した物理モデル実験を行うことのできる実験水槽を準備し、模擬電極及び模擬亀裂等を用いて2電極配置法について物理モデル実験を行うとともに、測定データ処理プログラム、再構成プログラム等から成る比抵抗トモグラフィ解析コードを開発して数値シミュレーション実験を行い、検出限界について検討した。

数値シミュレーションでは、想定した亀裂モデルが大きい( $8\times 8\text{cm}$ )場合は、再構成画像(解析画像)として矩形に近い低比抵抗部が得られたが、モデルが小さい場合には低比抵抗部が下方に伸びた偽像を伴った形となった。また、解析画像で得られた低比抵抗部の比抵抗値は、入力した亀裂モデルの値より高い値となり、解析コードのアルゴリズムを改良する必要性があると考えられた。しかしながら、解析画像の低比抵抗部と亀裂モデルの断面積とから、低比抵抗異常体の比抵抗値が周辺の地層の比抵抗値の1/60程度であれば、解析断面の1/25程度の断面積を持つ異常体が検出できることが予想された。

物理モデル実験では、水槽中央部の $26\text{cm}$ 平方の断面内においても水槽壁面の影響を受けていることが明らかとなり、遠電極を含む4電極及び影像法とを用いて壁面の影響を考慮することにより水槽内を均質な地質媒質として近似が可能となった。多点模擬電極及び模擬亀裂を用いた実験では、良好な解析画像が得られなかった。その原因として、多点模擬電極の個々の電極を点電極として扱う場合、データに多くの誤差が含まれることが考えられる。電極位置の精度を向上させるためには、有効領域の精査測定で用いた単電極をコンピュータコントロールにより制御する方法が有効と考えられる。

今後は、これらの知見を基に、解析コードの改良を行うとともに、電極位置の精度向上を目指した水槽の改良を行い、比抵抗トモグラフィで用いられる3極法及び4極法などの他の電極配置についても検出限界についての検討を進めていく予定である。

## 引用文献

- (1) 南部恭二郎(1989) : 医療分野におけるトモグラフィー, ジオトモグラフィーシンポジウムテキスト, p.29~37.
- (2) Cosma C., Korhonen R., et al.(1988) : Site characterization and validation - Results from seismic crosshole and reflection measurements, Stage 1, STRIPA project internal report 88-07.
- (3) Olsson O., Erikson J., et al.(1988) : Site characterization and validation - Borehole rader investigation, Stage 1, STRIPA project internal report 88-03.
- (4) 佐久間秀樹, 坪田浩二(1988) : 土岐花崗岩におけるRAMACシステムの適用試験, 物理探査学会第78回学術講演会講演論文集, p.305~309.
- (5) 坪田浩二, 則竹和光, 伊藤慎司, 落合竜夫(1988) : Geotomographyにおける再構成手法評価(その1), 物理探査学会第79回学術講演会講演論文集, p.49~54.
- (6) 坪田浩二, 則竹和光, 登内正治, 広瀬雅信(1989) : 岩石に対する電磁波特性基礎実験(その2), 物理探査学会第80回学術講演会講演論文集, p.292~297.
- (7) Nickel H., Sender F., Thierbach R. and Weichart H.(1983) : Exploring the interior of salt domes from boreholes, Geophysical prospecting, Vol.31, p.131~p.148.
- (8) Wong J., Bregman N., West G., Hurley P.(1987) : Cross-hole seismic scanning and tomography, Leading edge, Vol.6, No.1, p.36~p.41.
- (9) 二宮康郎, 杉原弘造, 伊藤克夫, 亀村勝美, 青木智幸(1990) : ジオトモグラフィーによる地下空洞周囲緩み領域の評価について, 第22回岩盤力学シンポジウム講演論文集, p.476~p.480.
- (10) 杉原弘造, 吉岡尚也, 森田隆三郎, 川上純(1992) : 弾性波トモグラフィーによる地質構造調査 - 断層のある堆積岩盤への適用例 -, 第24回岩盤力学シンポジウム講演論文集, p.454~p.458.
- (11) 島裕雅, 坂山利彦(1986) : 比抵抗トモグラフィーに関する基礎的検討, 昭和61年度物理探査学会秋季講演会講演論文集, p.96~97.
- (12) Zhao J.X., Rijo L. and Ward S.H.(1986) : Effect of Geologic noise on cross- borehole electrical survey, Geophysics, Vol.51, No.10, p.1978~p.1991.
- (13) 島裕雅(1987) : 数値実験による比抵抗トモグラフィの精度・分解能の検討, 物理探査学会第77回学術講演会論文集, p.171~176.
- (14) 佐々木裕(1992) : 比抵抗トモグラフィの精度・分解能 - 電極配置の影響について -, 物理探査学会第81回学術講演会論文集, p.212~215.
- (15) 島裕雅(1992) : 比抵抗トモグラフィの精度と分解能の向上について, 物理探査学会第86回学術講演会論文集, p.407~412.
- (16) Kumata M. Chiba A. and Kubota R. (1993) : Model Tank Experiments for Basic Study on Resistivity Tomography, Expanded Abstracts, SEG 63rd Annual Meeting, September 26-30, Washington, pp.1309~1311.
- (17) 野口康二, 妹尾宗明, 熊田政弘, 千葉昭彦 (1993) : 岩盤物性と地下水流動に関する研究、



- プロジェクト共同研究成果報告書 I-7、p.81~p.95.
- (18) Goudswaard W. (1957) : On the Effect of the Tank Wall Material in Geoelectrical Model Experiments, *Geophysical Prospecting*, Vol.5, p.272~p.281.
- (19) 福沢寛、有馬純照 (1960) : 試錐孔および坑道を利用する人工電位法に関する模型実験、*物理探鉱*、Vol.13, No.3, p.36~43.
- (20) 百瀬寛人、角田晴信 (1969) : 水槽実験による I P 法の研究、*物理探鉱*、Vol.22, No.6, p.15~22.
- (21) Roy A. and Apparao A. (1976) : Laboratory Results in Resistivity Logging, *Geophysical Prospecting*, Vol.24, p.123~p.140.
- (22) Apparao A. (1977) : Model Tank Experiments on Resolution of Resistivity Anomalies Obtained Over Buried Conducting Dykes - Inline and Broadside Profiling, *Geophysical Prospecting*, Vol.27, p.835~p.847.
- (23) Karwatowski J. and Habberjam G.M. (1981) : A Tunnel Resolution Investigation Using an Automated Resistivity Tank Analog, *Geophysical Prospecting*, Vol.29, p.891~p.905.
- (24) 水永秀樹、田中俊昭、上村義則、牛島恵輔 (1989) : 坑井間電気探査法の水槽モデル実験、*物理探査学会第80回学術講演会講演論文集*, p.246~p.250.
- (25) 牛島恵輔、水永秀樹、井上貴志、井上幹邦 (1990) : パソコンを用いた水槽モデル実験、*物理探査学会第82回学術講演会講演論文集*, p.344~p.345.
- (26) Gouswaad W.(1959) : On the effect of the tank wall material in geoelectrical model experiment, *Geophysical Prospecting*, Vol.5, p.272~p.281.
- (27) 清野武(1955) : 電気探鉱学(I), 北斗プリント社, p.8~12.
- (28) 石井吉徳(1986) : インバージョン : その理論と背景について, *物理探査*, Vol.39, No.6, p.329~339.
- (29) 藤崎修, 金喜俊, 竹内睦雄, 川本治(1992) : 試錐孔電気探査のための数値モデリングの離散化誤差, *物理探査学会第87回学術講演会論文集*, p.227~230.
- (30) Coggon J.H.(1971) : Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method, *Geophysics*, Vol.36, No.1, p.132~p.155.
- (31) Pelton W.H., Rijo L. and Swift C.M.(1978) : Inversion of two-dimensional resistivity and induced-polarization data, *Geophysics*, Vol.43, No.4, p.788~p.803.
- (32) 内田利弘(1991) : 坑井利用比抵抗法における最小二乗法2次元インバージョンの分解能, *物理探査学会第85回学術講演会講演論文集*, p.238~p.239.
- (33) 新村造成, 野口康二, 西田薫, 杉本芳博(1989):有限要素法による比抵抗トモグラフィの数値解析(II),*物理探査学会第80回学術講演会講演論文集*, p.255~p.258.
- (34) Hatano K., Noguchi K., Nishida K. and Sugimoto Y.(1990) : Numerical experiments and application of resistivity tomography by the finite element method, *Proceedings of the first SEGJ international symposium on geotomography*, p.219~p.230.
- (35) Snyder D.D.(1976) : A method for modeling the resistivity and IP response of two-dimensional bodies, *Geophysics*, Vol.41, No.5, p.997~p.1015.
- (36) 羽竜忠男, 西川貢(1991) : 地形に対して柔軟な比抵抗及びリフラクションインバージョン

- (その1)－電位計算精度の検討－, 物理探査学会第84回学術講演会講演論文集, p.236～p.240.
- (37) Dey A. and Morison H.F.(1979) : Resistivity modelling for arbitrarily shaped two-dimensional structures, *Geophysical prospecting*, Vol.27, p.106～p.136.
- (38) Marquardt D.W.(1963) : An algorithm for least-squares estimation of Nonlinear parameters, *J.SIAM*, Vol.11, p.431～p.441.
- (39) Inman(1975) : Resistivity inversion with ridge regression, *Inversion of Geophysical Data*, reprinted *Geophysics*, Vol.50, No.11, p.2112～p.2130.
- (40) Treitel S. and Wang R.J.(1975) : The determination of digital Wiener filters from an ill-conditioned system of normal equations, *Geophysical prospecting*, Vol.24, p.317～p.327.
- (41) 松岡俊文(1986) : インバージョンにおける数値解法, *物理探査*, Vol.39, No.6, p.340～356.
- (42) Aki K. and Lee W.H.K.(1976) : Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first arrival times from local earthquakes, 1.A Homogeneous initial model, *Journal of Geophysical Research*, Vol.81, p.4381～p.4399.
- (43) 渡辺力, 名取亮, 小国力(1989) : FORTRAN77による数値計算ソフトウェア, 丸善株式会社, p.221～247.
- (44) 斉藤正徳(1983a) : 最小二乗法の計算法, *物理探査*, Vol.36, No.2, p.72～86.
- (45) 斉藤正徳(1983b) : 特異値分解と最小二乗法, *物理探査*, Vol.36, No.3, p.146～158.
- (46) Constable S.C., Parker R.L. and Constable C.G.(1987) : Occam's inversion : A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, Vol.52, No.3, p.289～p.300.
- (47) Lytle R.J., Dines K.A.(1980) : Iterative ray tracing between boreholes for underground image construction, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol.GE-18, No.3, p.234～p.239.
- (48) 佐々木裕(1986) : 比抵抗法 2次元インバージョンの改良, *物理探査*, Vol.41, No.2, p.111～115.
- (49) 内田利弘(1992) : ABIC 2次元インバージョンの比抵抗実測データへの適用, 物理探査学会第87回学術講演会講演論文集, p.231～p.234.
- (50) 塩野清治, 升本眞二, 弘原海清(1988) : BASICによるコンターマップ I.基礎編, 共立出版株式会社, p.1～p.111.
- (51) 塩野清治, 升本眞二, 弘原海清(1985) : パソコンで不規則に分布するデータを格子データに変換してコンターマップを作成する方法(1)－加重一次補間法－, No.10, p.65～p.78.
- (52) La Porte M.(1962) : Elaboration rapide de cartes garvimetriques deduites de l'anomalie de Bouguer a l'aide d'une calculatrice electronique, *Geophysical Prospecting*, Vol.10, p.238～p.257.
- (53) 野藤孝裕, 升本眞二, 弘原海清, 塩野清治(1985) : 測線データの格子データへの変換による三次元的な地質構造の復元－指向性を持つWeighted least square methodによる方法－,

- No.10, p.135~p.144.
- (54) Briggs I.(1974) : Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, Vol.39, No.1, p.39~p.48.
- (55) 塩野清治, 升本眞二, 弘原海清(1985) : パソコンで不規則に分布するデータを格子データに変換してコンターマップを作成する方法(2)-曲線最小化原理-, No.10, p.79~p.104.
- (56) David M.(1979) : Geostatistical ore reserve estimation, Elsevier Scientific Publishing Company, p.237~p.300.
- (57) Davis J.(1986) : Geostatistics and data analysis in geology, Second edition, Jhon Wiley & sons, p.383~p.405.
- (58) 菅野強, 荒井英一, 佐々宏一(1991) : 立体電極配列法電気探査における多点表示比抵抗擬似断面, 物理探査学会第85回学術講演会講演論文集, p.226~p.231.
- (59) 新村造成, 野口康二, 西田薫, 杉本芳博(1989) : 有限要素法による比抵抗トモグラフィの数値解析(Ⅲ), 物理探査学会第81回学術講演会講演論文集, p.206~p.211.
- (60) 岩石比抵抗測定報告書, 住友金属鉱山(1992).

Table 1 水槽壁塗装仕様

	品名	品番	比率	備考
エッチング プライマ	ウォッシュプライマ	051-0006	4	1回塗り、厚さ1 $\mu$ m
	硬化剤	051-0008	1	
	シンナー	(一般品)	5	30分~1時間放置
下塗り	ジンクロメートプライマ	061-2111	4	1回塗り
	硬化剤	061-2910	1	
	エポキシシンナー	016-0061	0.3~0.4	
中塗り	「白」塗料	061-2205	4	1回塗り
	硬化剤	061-2910	1	
	エポキシシンナー	016-0061	0.3~0.4	顔料：沈降性Ba+TiO <sub>2</sub>
上塗り	「白」塗料	061-2205	4	2~3回塗り
	硬化剤	061-2910	1	
	エポキシシンナー	016-0061	0.3~0.4	顔料：沈降性Ba+TiO <sub>2</sub> 若干

注) 塗料の品名、品番は「ロックペイント株式会社」のものを使用

Table 2 各数値モデルと構成画像化された低比抵抗部との関係

数値モデル	外周比抵抗 ( $\Omega$ m)	面積 ( $\text{cm}^2$ )	モデルの断面積に 対する面積比	中心座標(x, y) (cm, cm)
REC8HN 断面積 $64\text{cm}^2$ 中心点(0, -10)	5	44.4	0.69 ( 0.11 )	(-0.5, 9.0)
	10	65.2	1.02 ( 0.16 )	(-0.6, 9.2)
	15	83.9	1.31 ( 0.21 )	(-0.6, 9.2)
	20	105.5	1.65 ( 0.26 )	(-0.6, 9.2)
	25	134.6	2.10 ( 0.34 )	(-0.2, 9.4)
REC4HN 断面積 $16\text{cm}^2$ 中心点(0, -10)	5	5.9	0.37 ( 0.01 )	(-1.3, 7.9)
	10	22.3	1.39 ( 0.06 )	(-0.8, 9.1)
	15	37.2	2.33 ( 0.09 )	(-0.9, 9.5)
	20	57.2	3.58 ( 0.14 )	(-0.9, 9.8)
	25	78.6	4.91 ( 0.20 )	(-0.9, 10.5)
REC2HN 断面積 $4\text{cm}^2$ 中心点(0, -10)	5	---	---	---
	10	1.1	0.28 ( 0.003 )	(-3.5, 7.4)
	15	9.7	2.43 ( 0.02 )	(-1.5, 8.0)
	20	24.0	6.00 ( 0.06 )	(-1.1, 8.5)
	25	54.3	13.58 ( 0.14 )	(-1.0, 8.9)

注：面積比の項 ( ) 内は解析断面積( $400\text{cm}^2$ )に対する面積比

Table 3 各物理モデルと構成画像化された低比抵抗部との関係

物理モデル	外周比抵抗 ( $\Omega$ m)	面積 ( $\text{cm}^2$ )	モデルの断面積に 対する面積比	中心座標(x, y) (cm, cm)
REC8HL 断面積 64 $\text{cm}^2$ 中心点(0, -10)	5	1.4	0.02 (0.004)	(-0.8, 9.2)
	10	13.9	0.21 (0.03)	(-0.8, 9.2)
	15	42.4	0.66 (0.11)	(-0.5, 9.8)
	20	90.4	1.41 (0.23)	(-0.3, 10.2)
REC4HL 断面積 16 $\text{cm}^2$ 中心点(0, -10)	5	1.2	0.08 (0.003)	(0.1, 15.1)
	10	4.4	0.28 (0.01)	(0.3, 15.3)
	15	8.6	0.54 (0.02)	(0.3, 15.3)
	20	14.8	0.93 (0.04)	(0.5, 15.2)
REC2HL 断面積 4 $\text{cm}^2$ 中心点(0, -10)	5	0.1	0.03 (0.0003)	(-0.8, 11.0)
	10	13.0	3.25 (0.03)	(-0.5, 10.1)
	15	32.8	8.20 (0.08)	(-0.3, 10.3)
	20	62.6	15.65 (0.16)	(-0.3, 10.5)

注：面積比の項 ( ) 内は解析断面積(400 $\text{cm}^2$ )に対する面積比

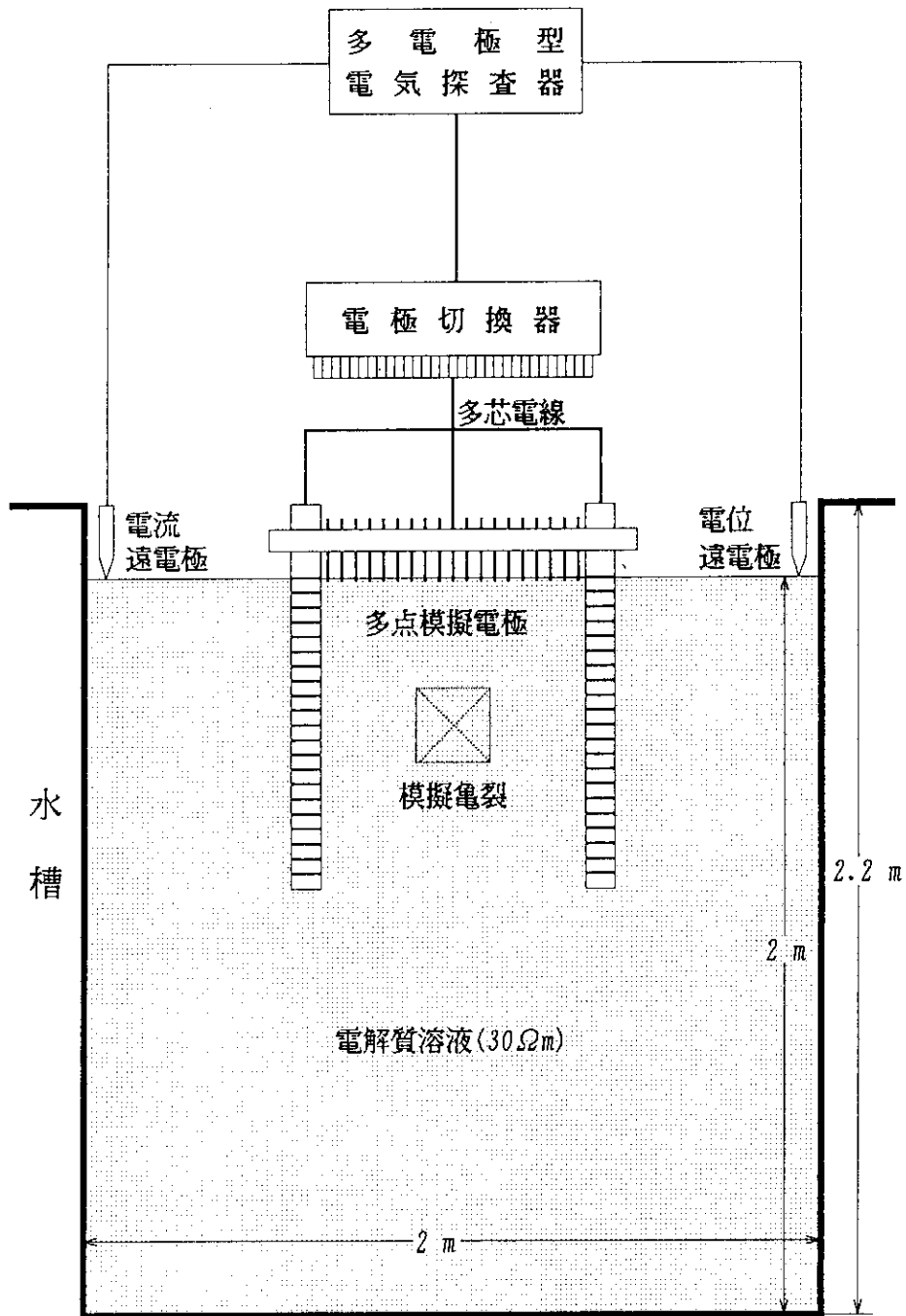


Fig.1 物理モデル実験概略図

多点模擬電極で囲まれた解析領域中央に設定した模擬亀裂は、紙面に垂直な方向に伸びている。

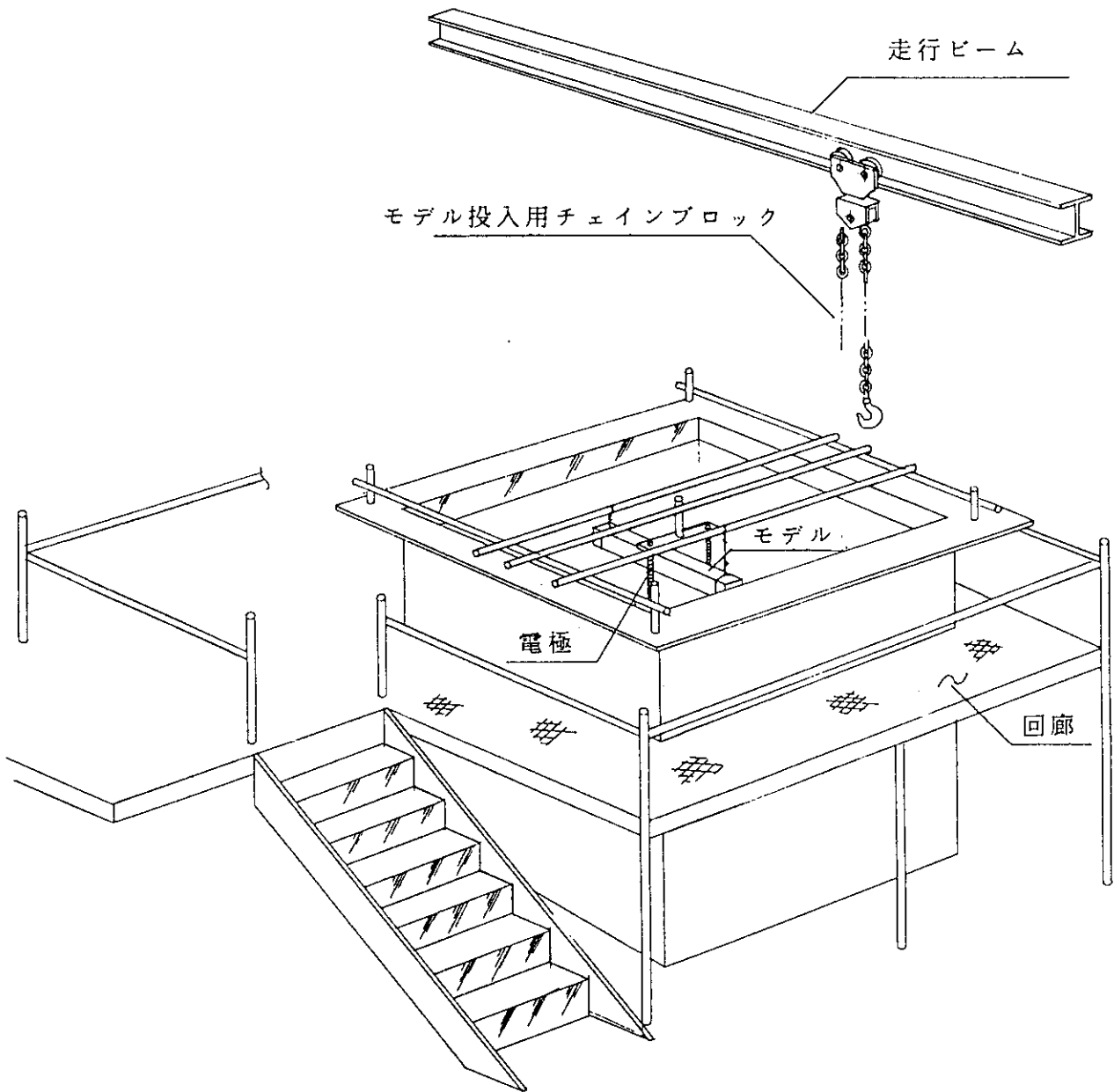


Fig.2 水槽を用いた物理モデル実験設備の概略図



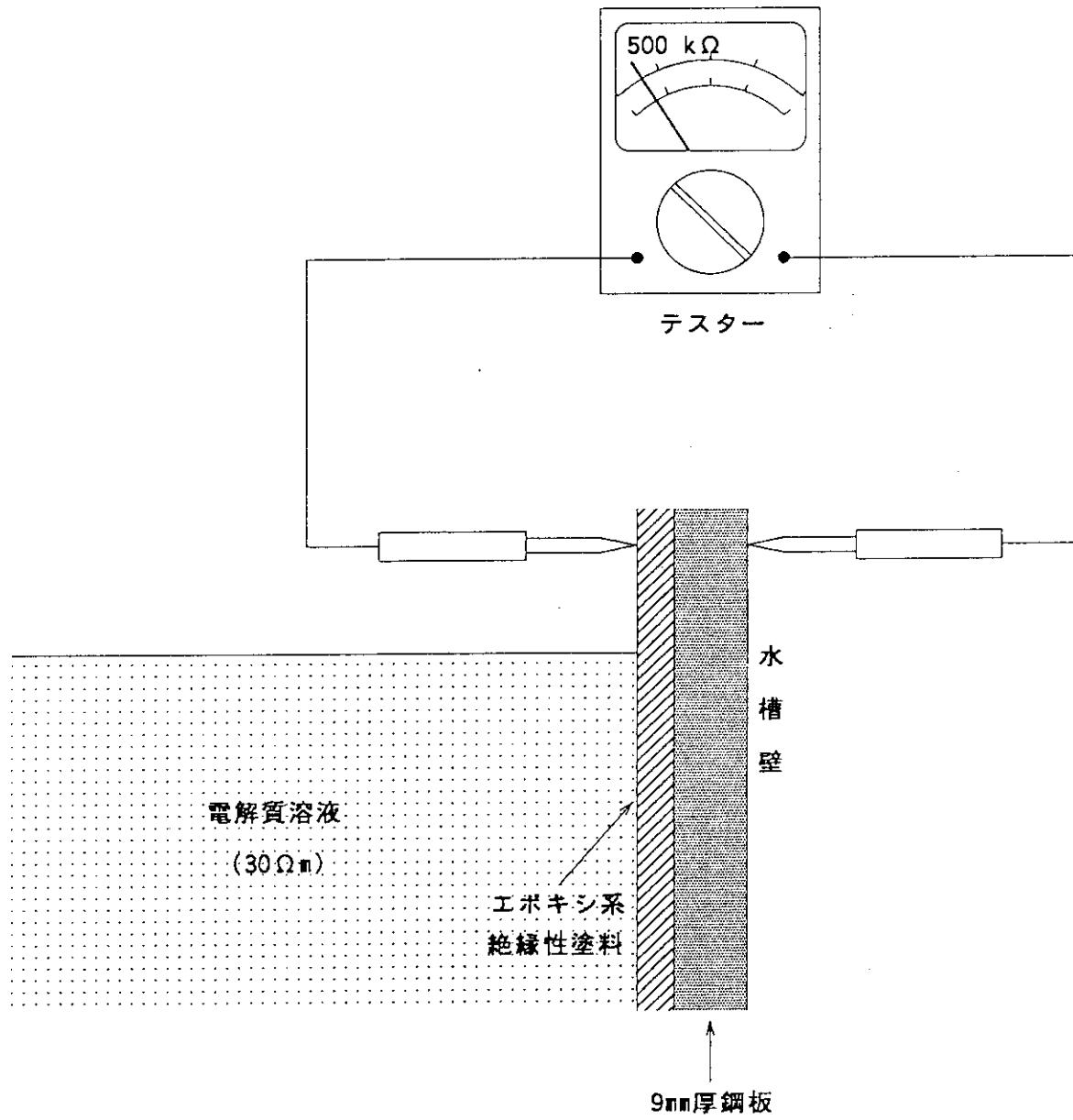


Fig.3 水槽壁面の絶縁性テスト

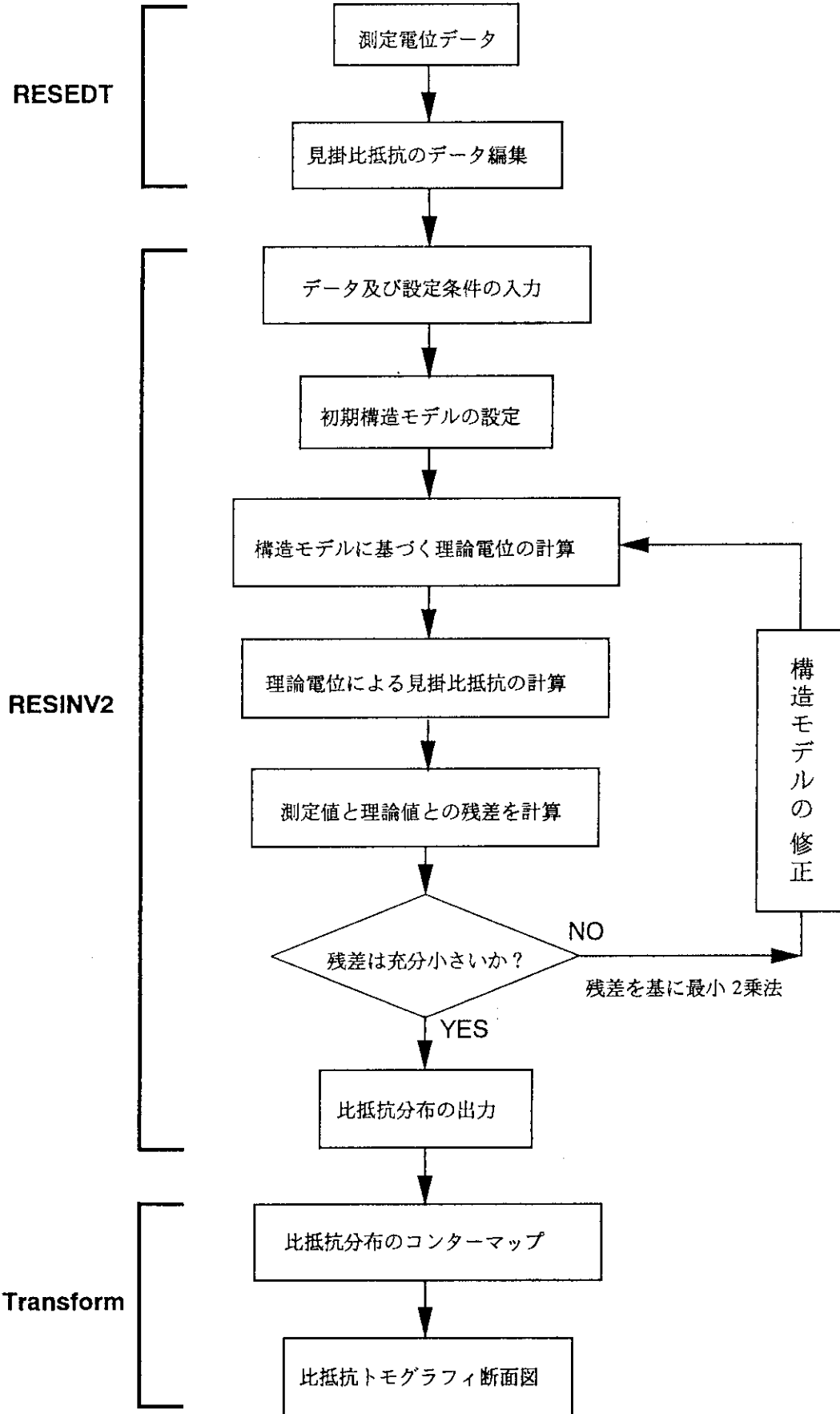
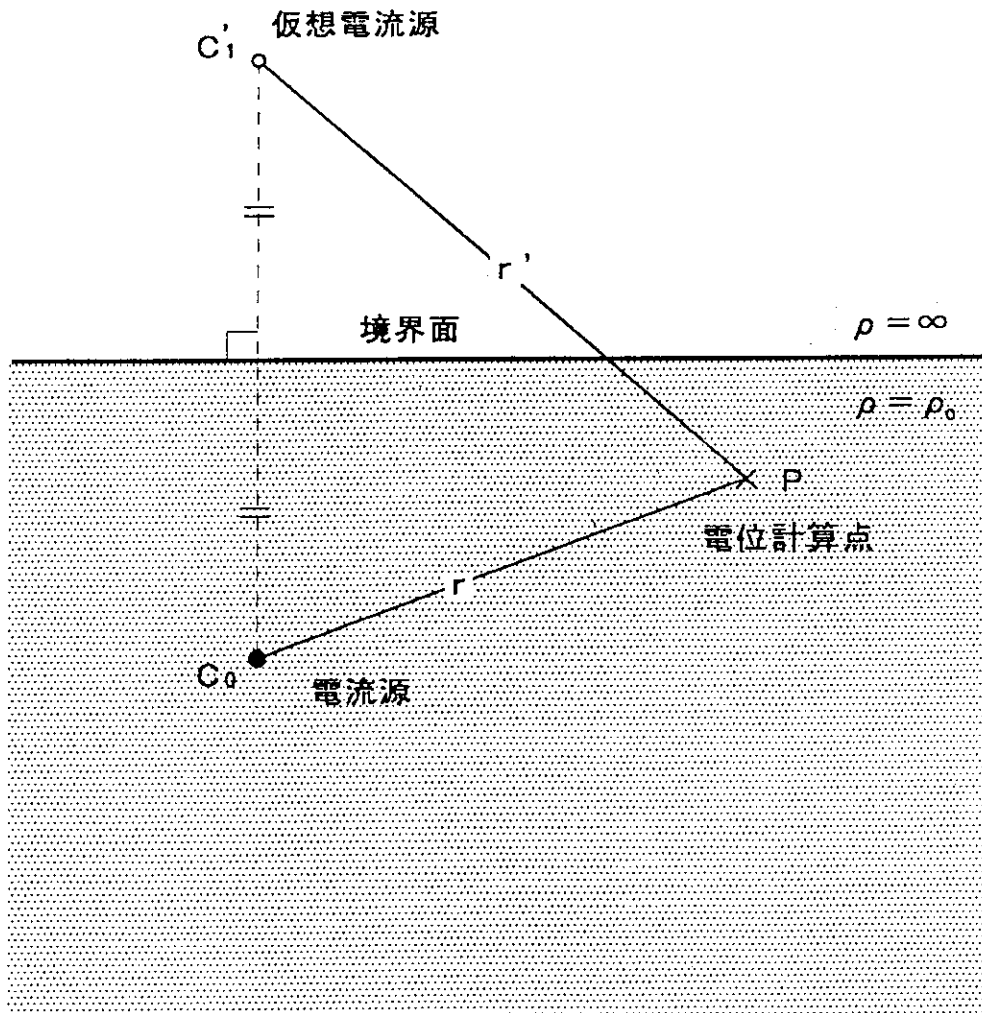
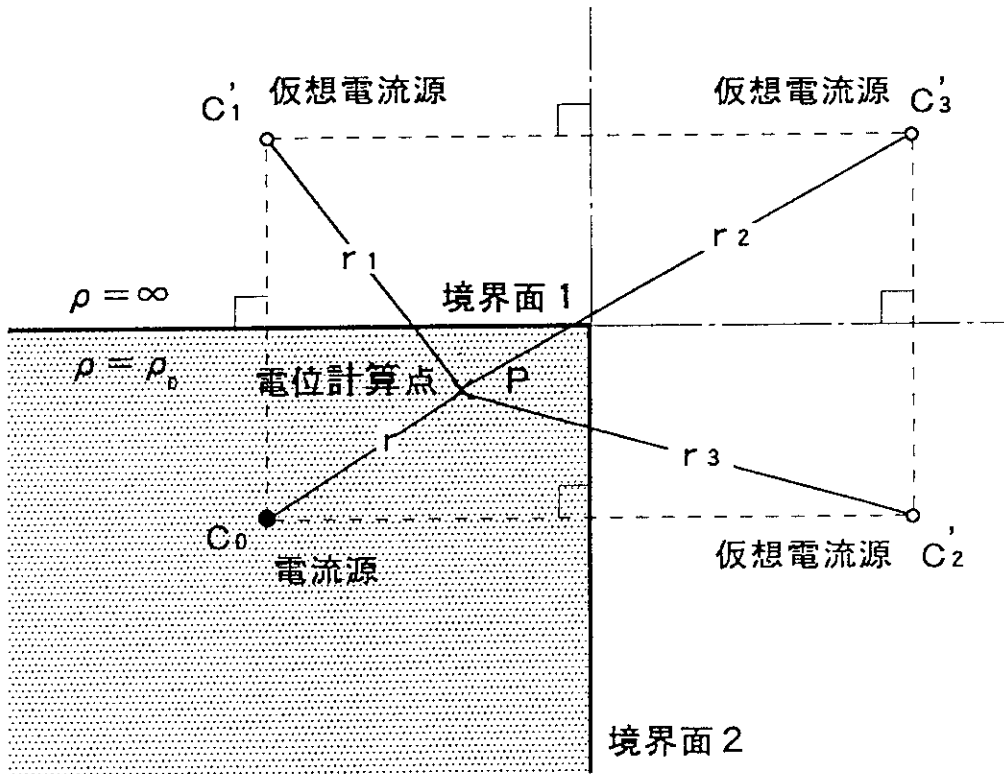


Fig.4 比抵抗トモグラフィ解析コードのフローチャート



$$V_P = \frac{\rho_0 I}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right)$$

Fig.5 影像法の基本概念 (半無限媒質の場合)



$$V_P = \frac{\rho_0 I}{4\pi} \left( \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^3 \frac{1}{r_n'} \right)$$

Fig.6 媒質が直交する2つの境界面で囲まれている場合の映像法概念図

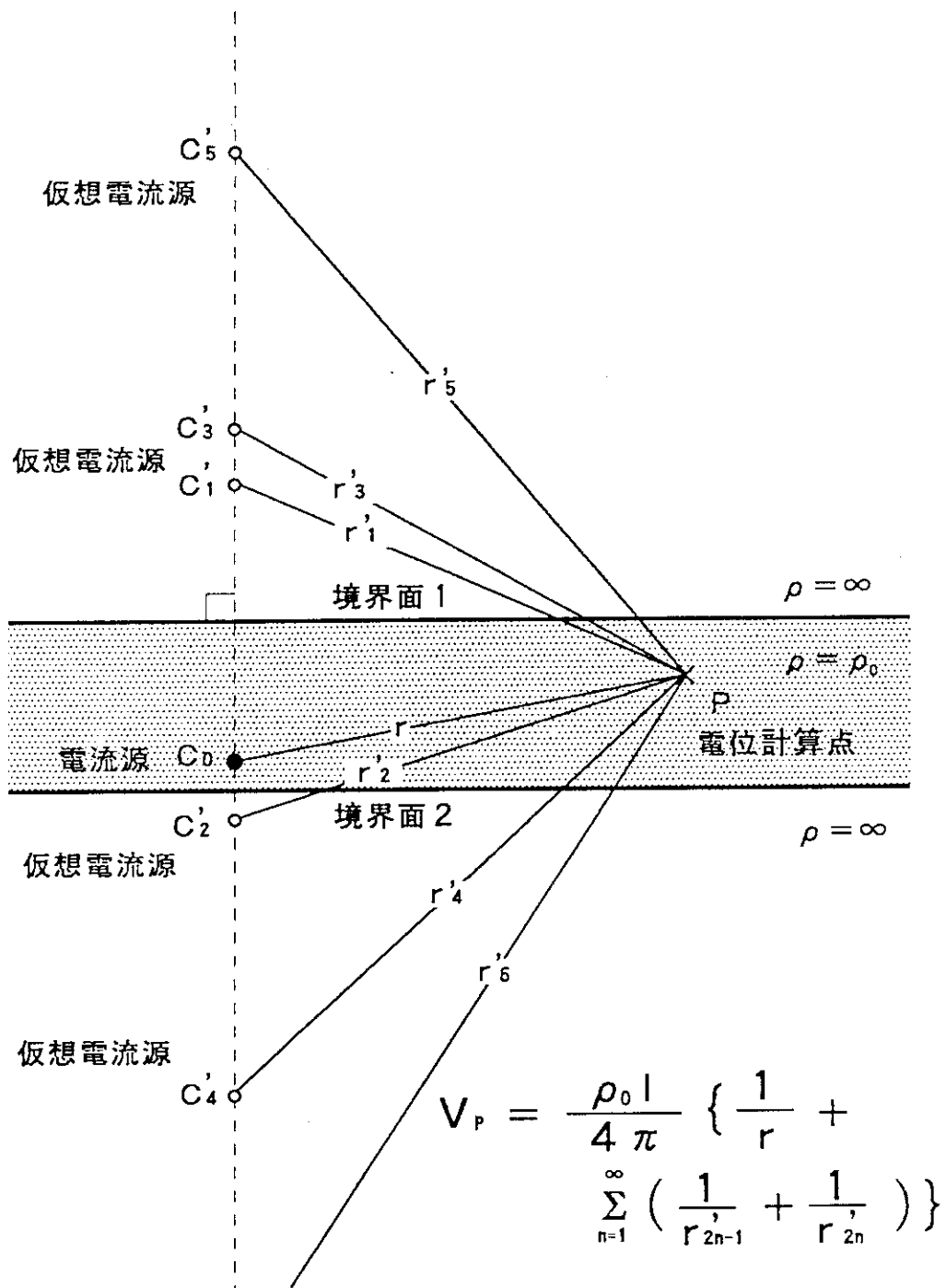
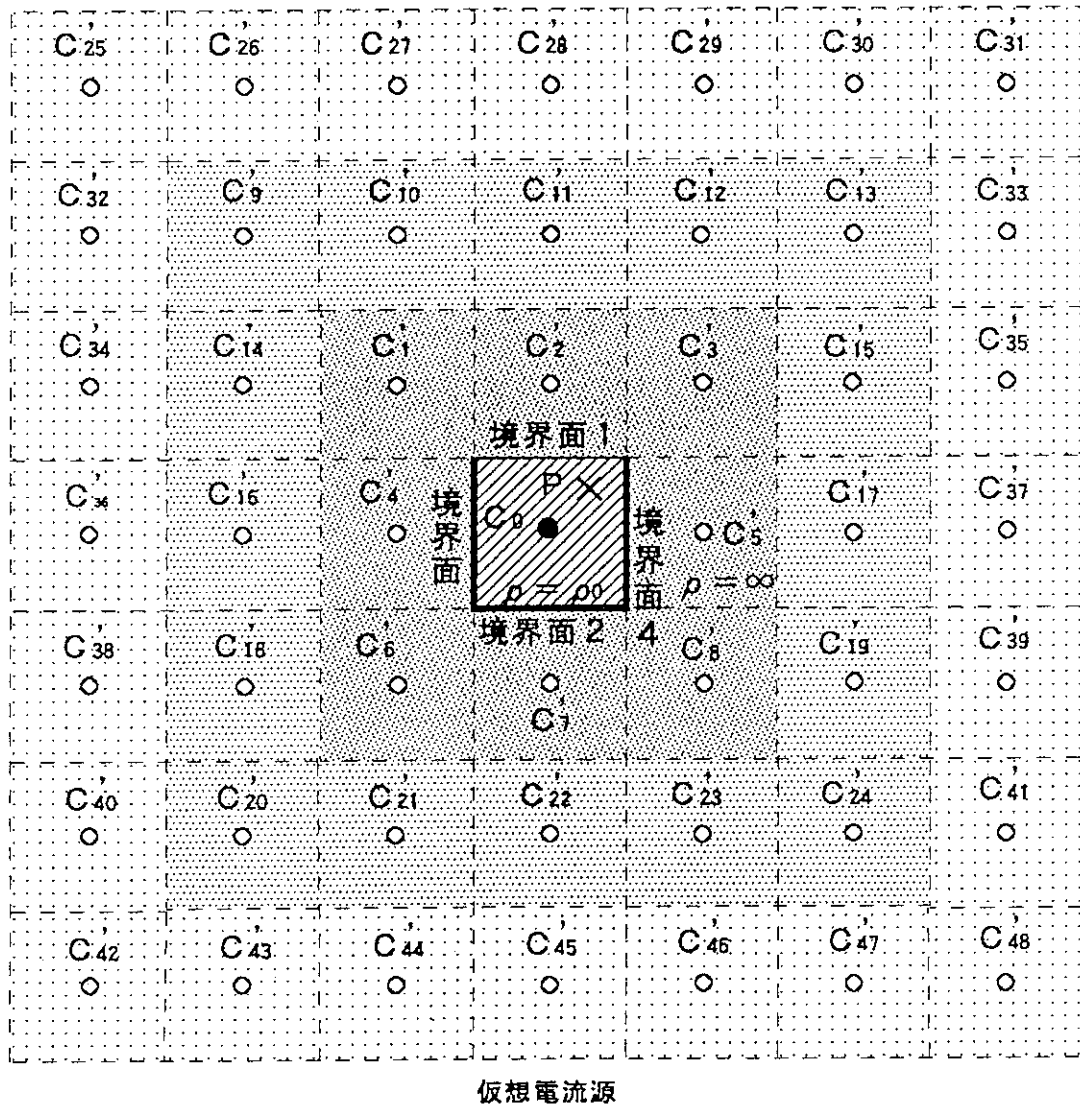


Fig.7 媒質が平行な2つの境界面で挟まれている場合の映像法概念図



- 電流源
- 仮想電流源
- × 電位計算点

$$V_P = \frac{\rho_0 l}{4 \pi} \left( \frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{48} \frac{1}{r'_n} \right)$$

Fig.8 水槽中の電位分布を計算するための映像法仮想電流源  
(解析断面に直交する境界面のみを考慮した場合)

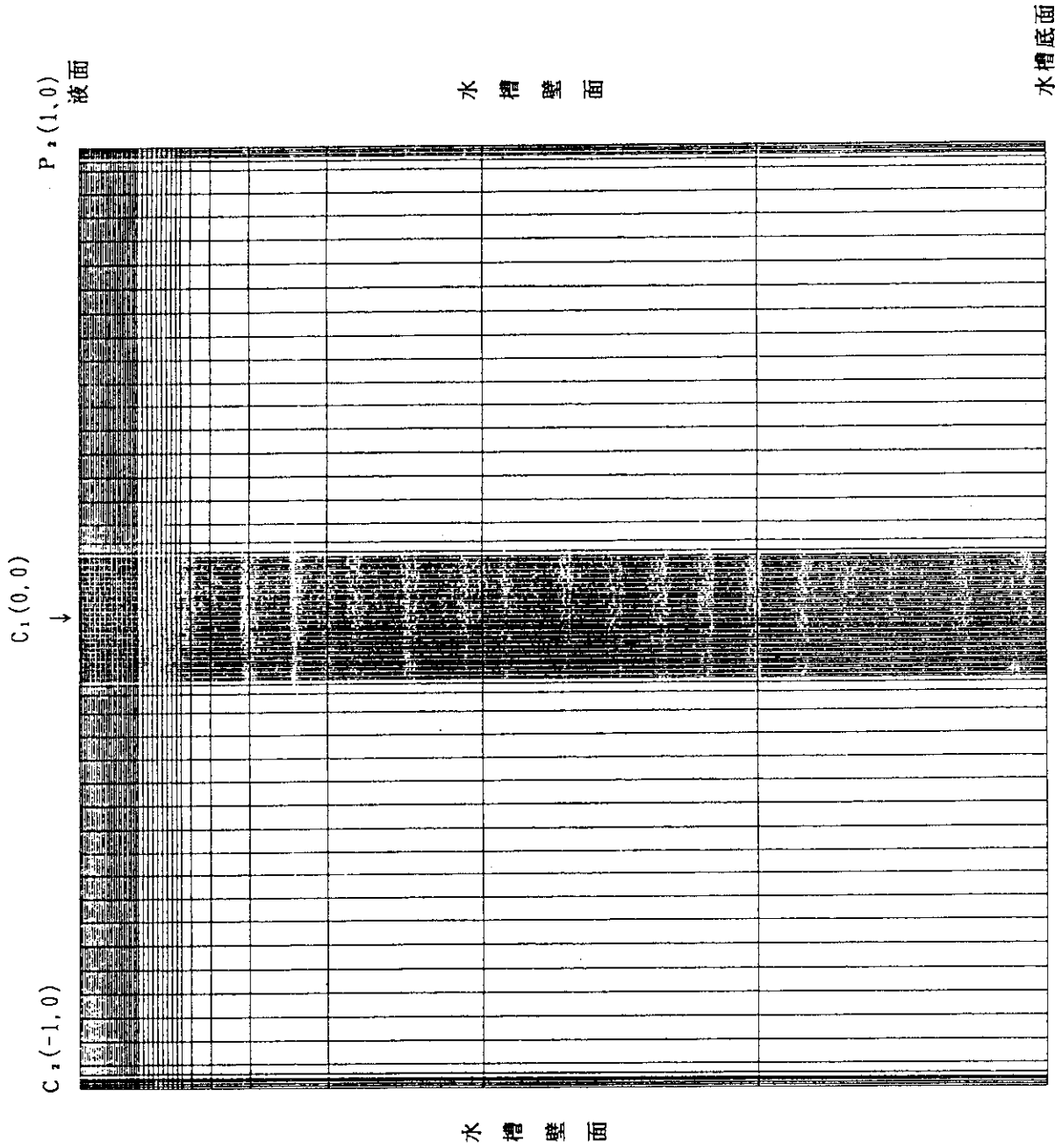


Fig.9 フォーワードプログラム中の有限要素法に用いた水槽内の計算グリッド

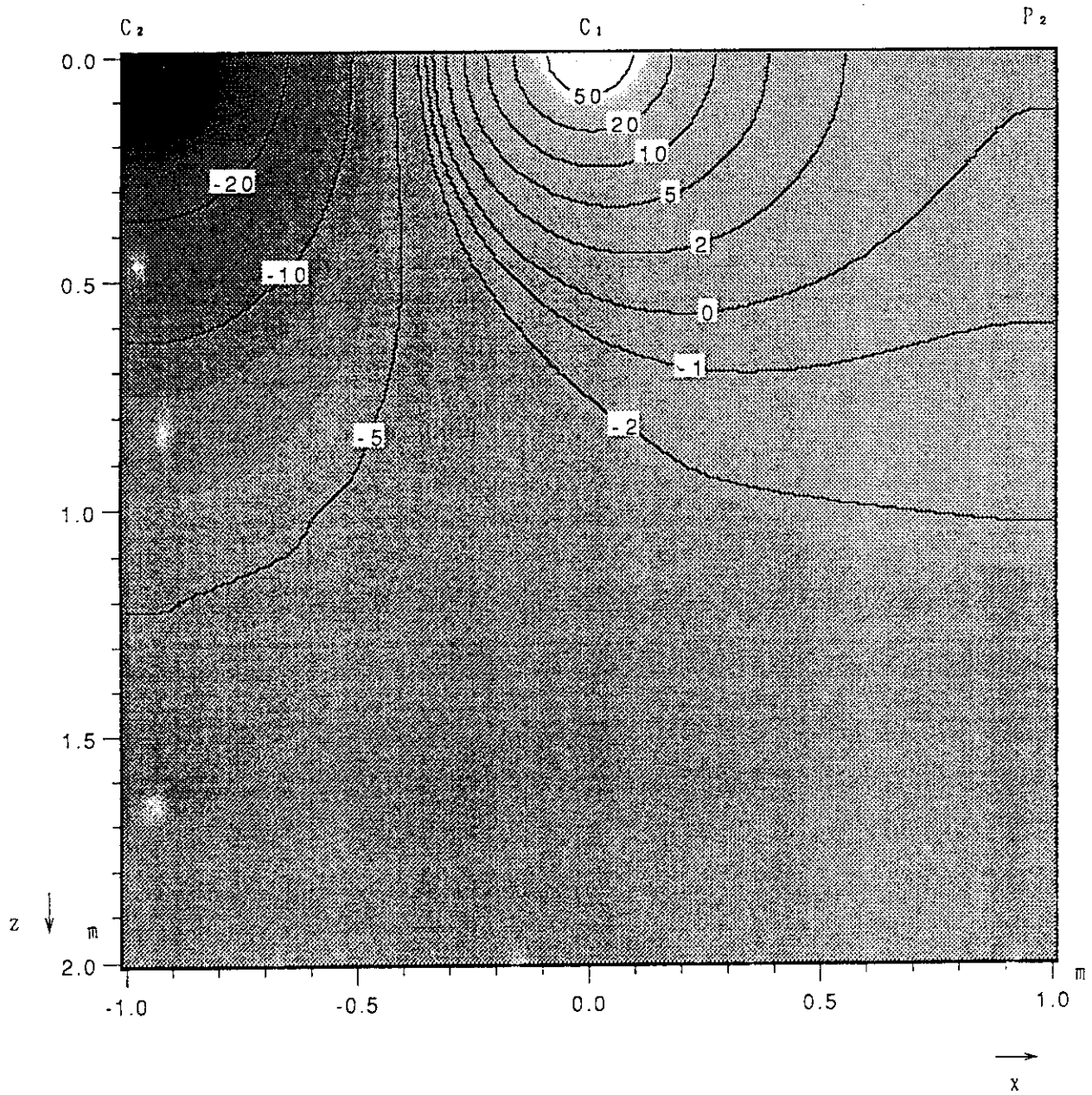


Fig.10 水槽中央断面全域の計算電位



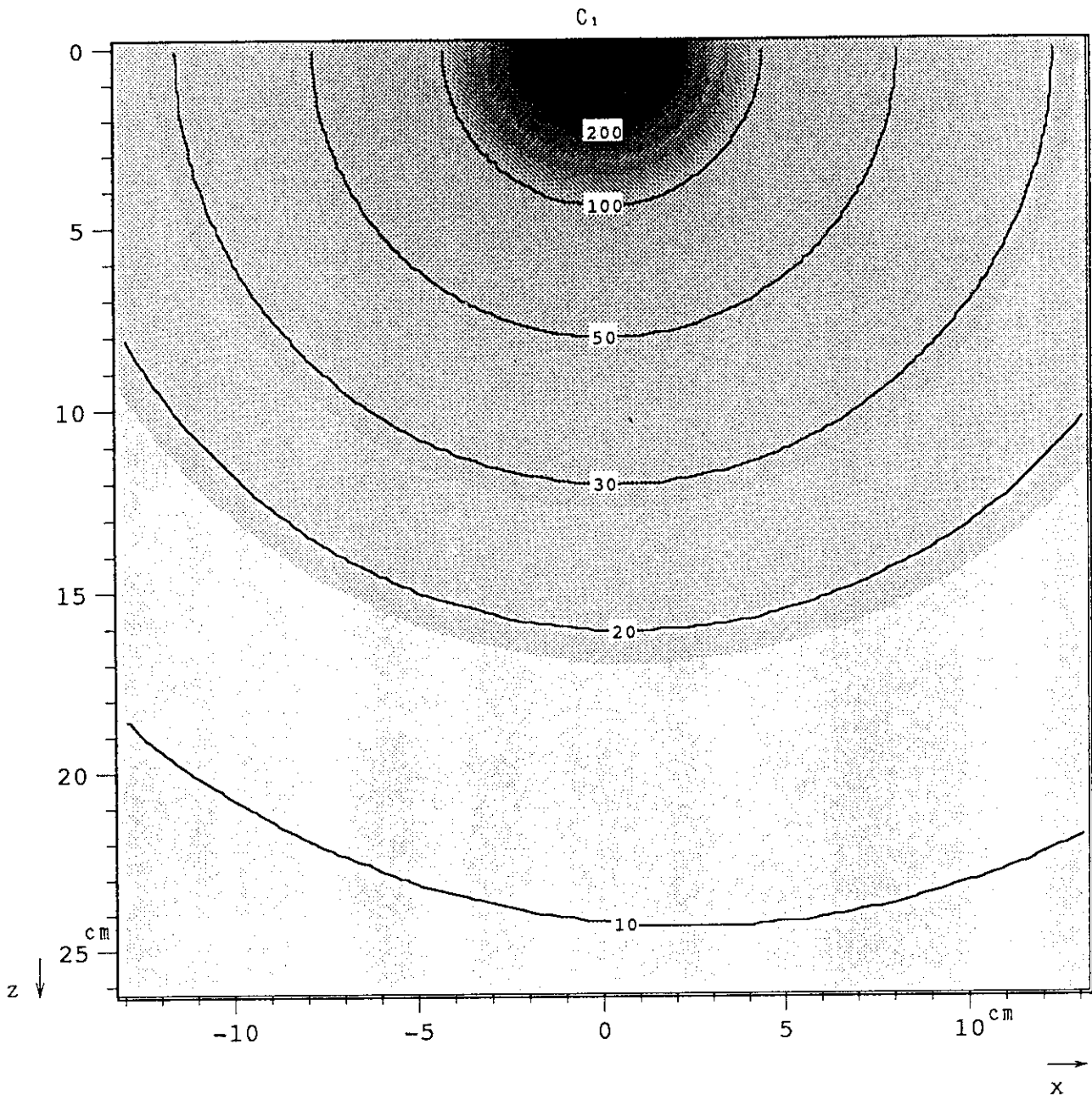


Fig.11 電流電極C1近傍の26cm×26cm範囲の計算電位

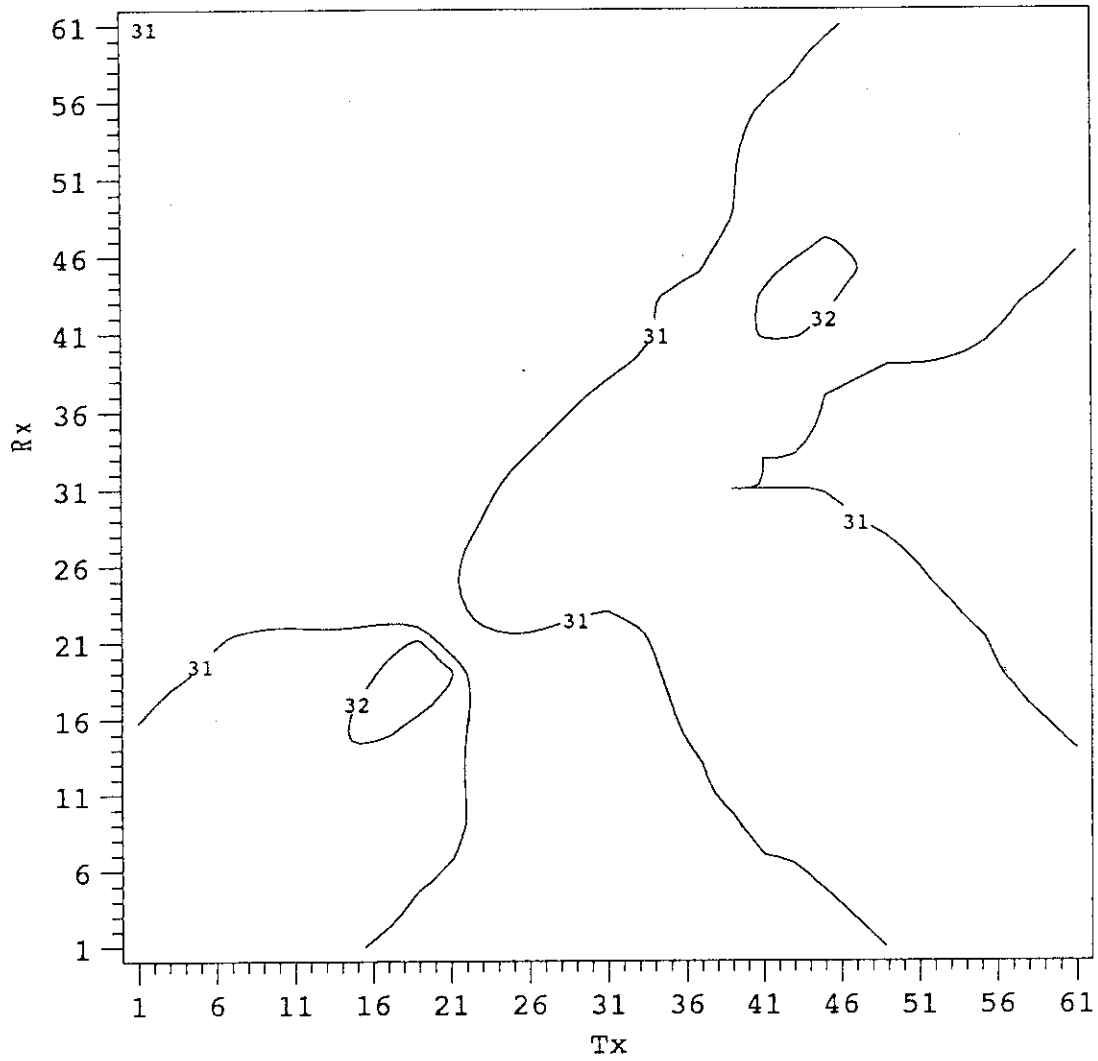


Fig.12 多点模擬電極を用いたトモグラフィの数値シミュレーションによるブランクテスト見掛比抵抗分布図  
 図の縦軸 (Rx) は電位電極番号, 横軸 (Tx) は電流電極番号。コンター上の数字は比抵抗値 (単位:  $\Omega$  m) を表わしている。

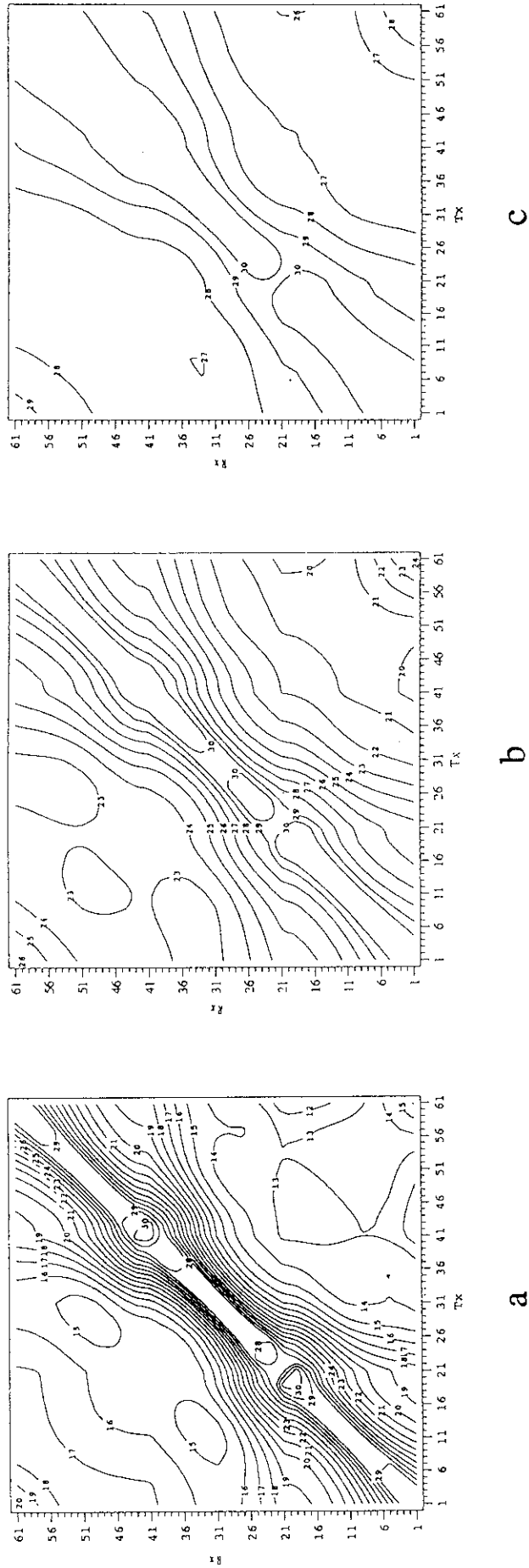


Fig.13 亀裂モデルを含むトモグラフィの数値シミュレーションによる見掛け抵抗分布図

a ; REC8HN モデル, b ; REC4HN モデル, c ; REC2HN モデル  
 各図の縦軸 (Rx) は電位電極番号, 横軸 (Tx) は電流電極番号。コンター上の数字は比抵抗値 (単位:  $\Omega$  m) を表わしている。

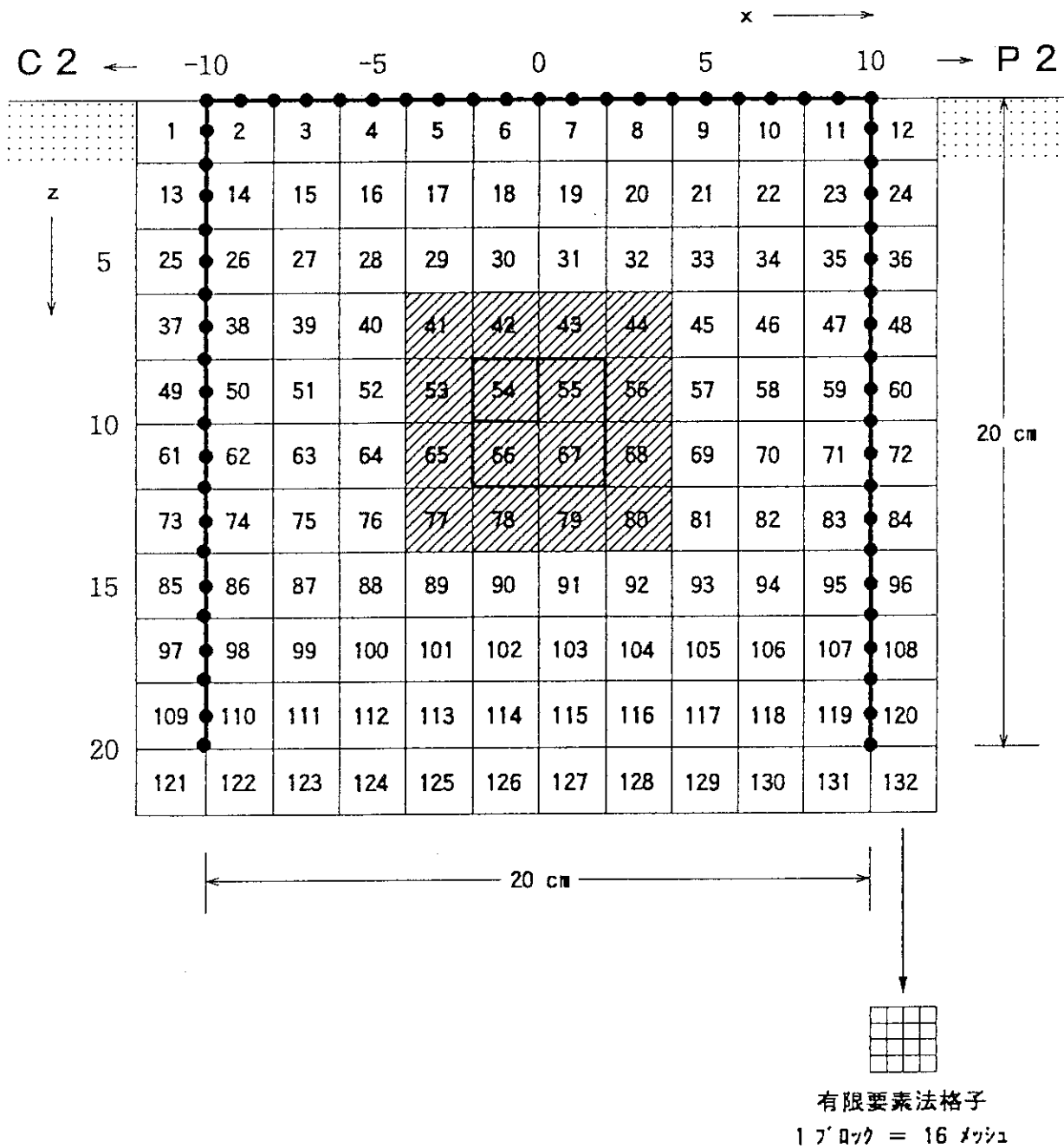


Fig.14 解析比抵抗ブロックと亀裂モデル位置

各分析ブロックは2×2cmの範囲を表わしている。中央の16ブロックがREC8HNモデル、その内側の4ブロックがREC4HNモデルを表わしており、REC2HNモデルはNo.54のブロック位置で計算した。解析ブロックの比抵抗は、亀裂モデル部が0.5 Ω m、他は30 Ω mである。

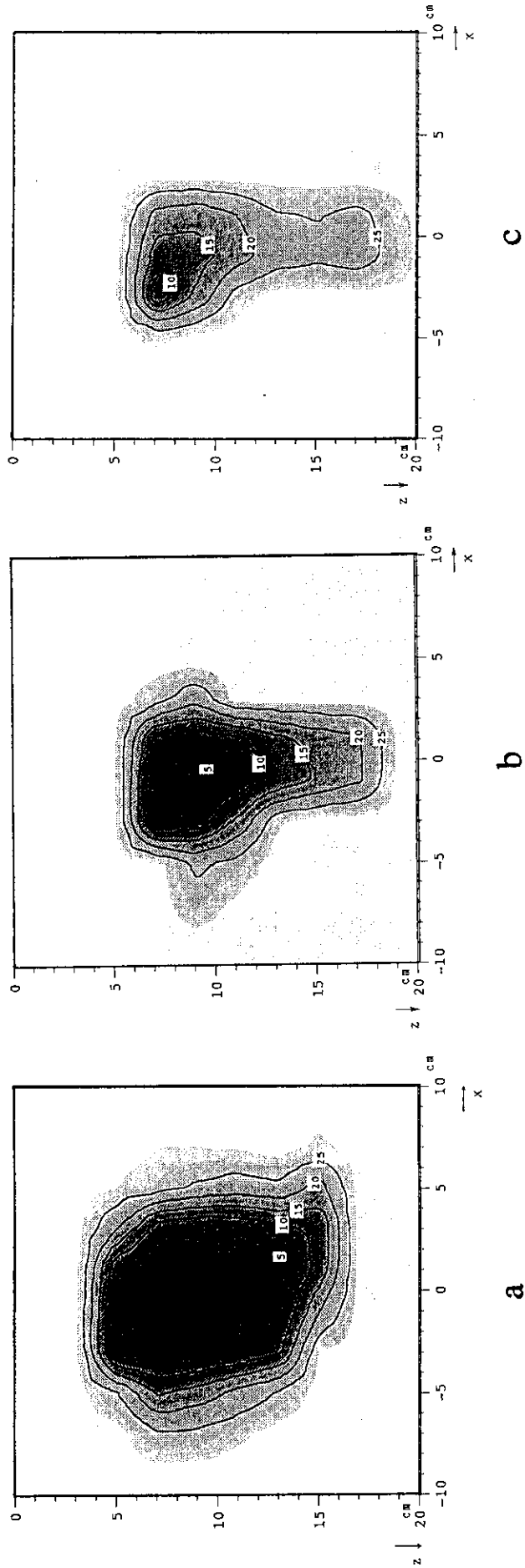


Fig.15 数値シミュレーションによる再構成画像  
 a; REC8HN モデル, b; REC4HN モデル, c; REC2HN モデル  
 コントナー上の数字は比抵抗値 (単位:  $\Omega m$ ) を表わしている。

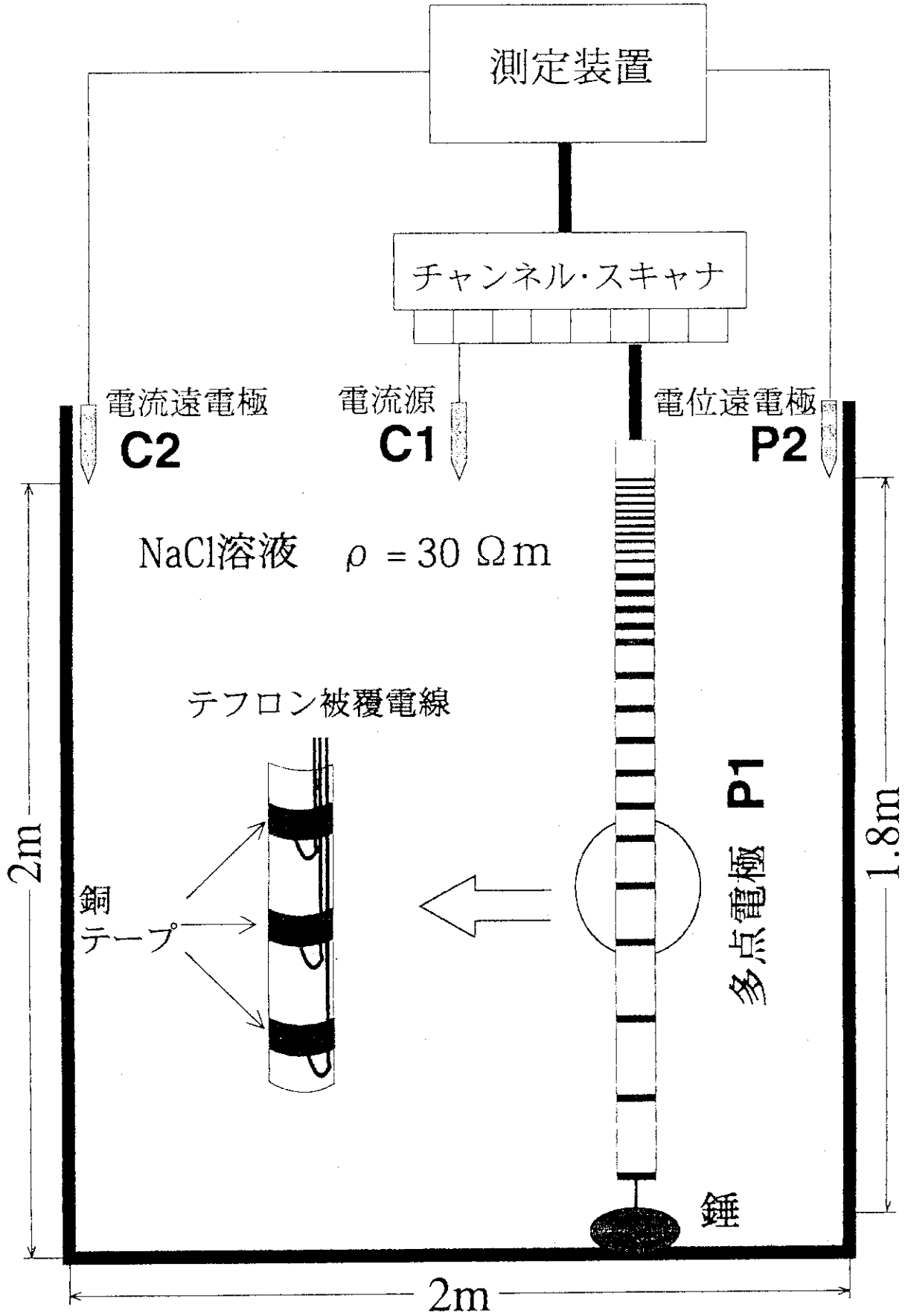


Fig.16 水槽中央垂直断面全域の電位分布測定システム

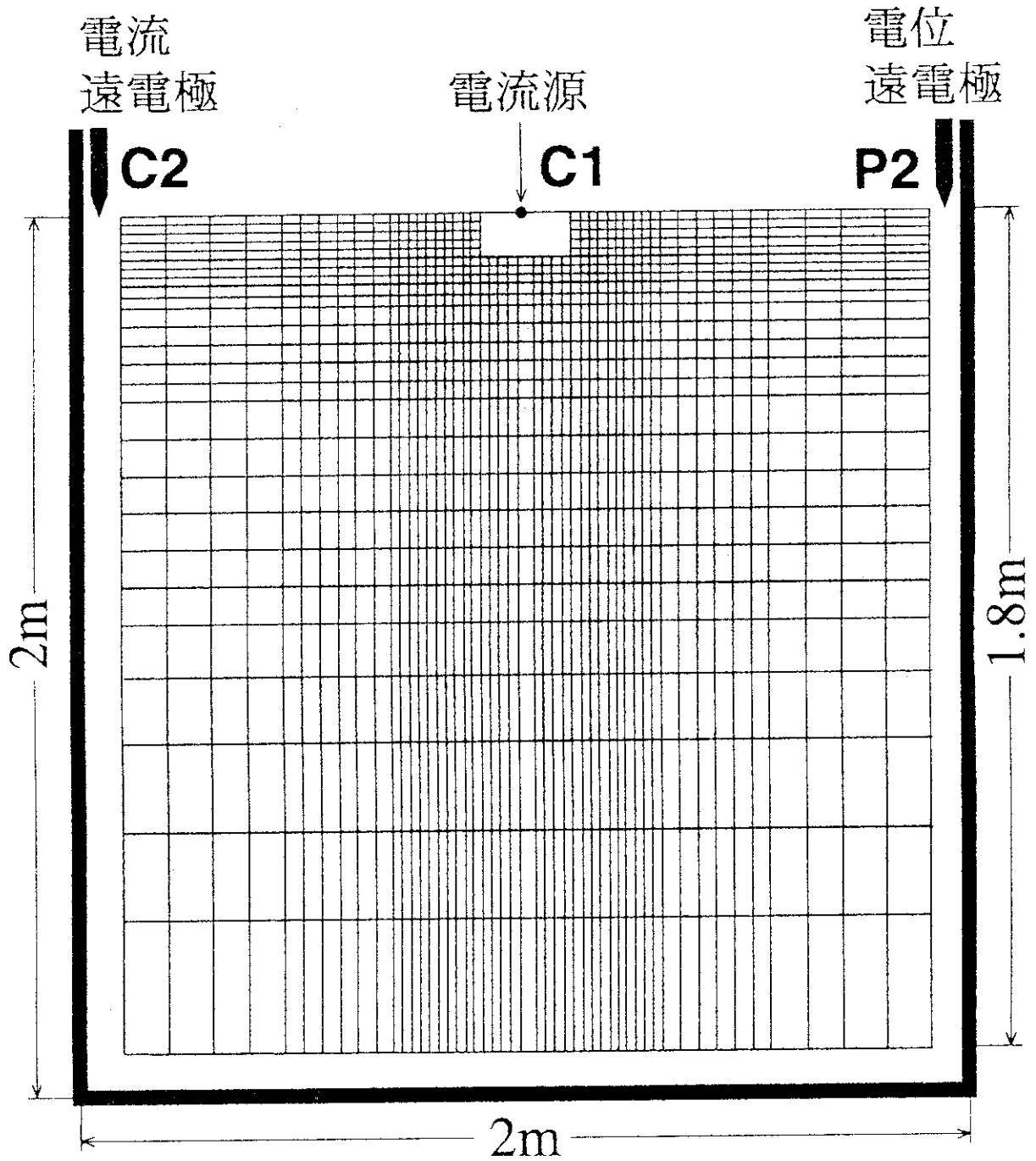


Fig.17 水槽中央垂直断面全域の電位分布測定格子点

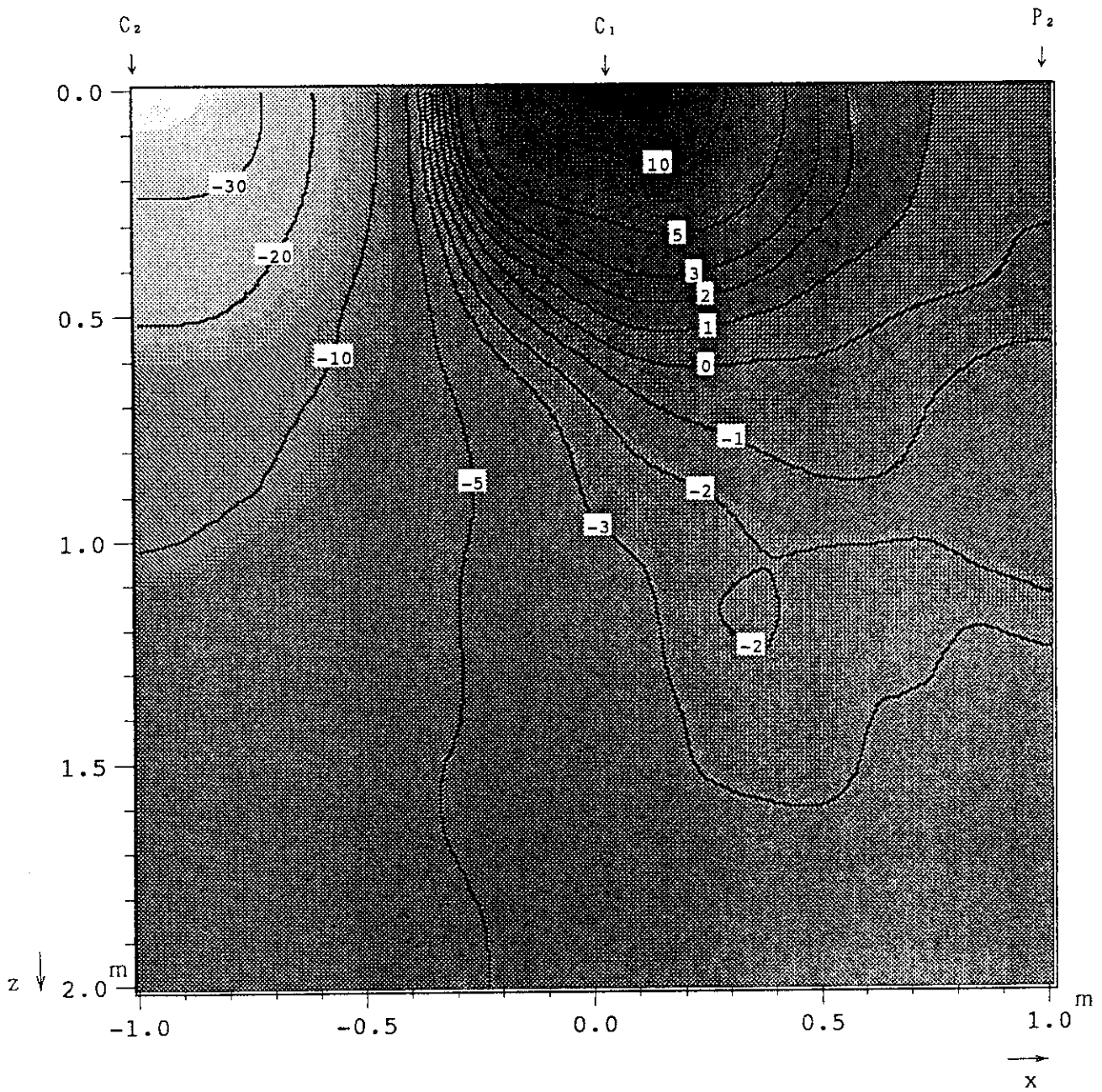


Fig.18 水槽中央垂直断面全域の電位分布 (概査)



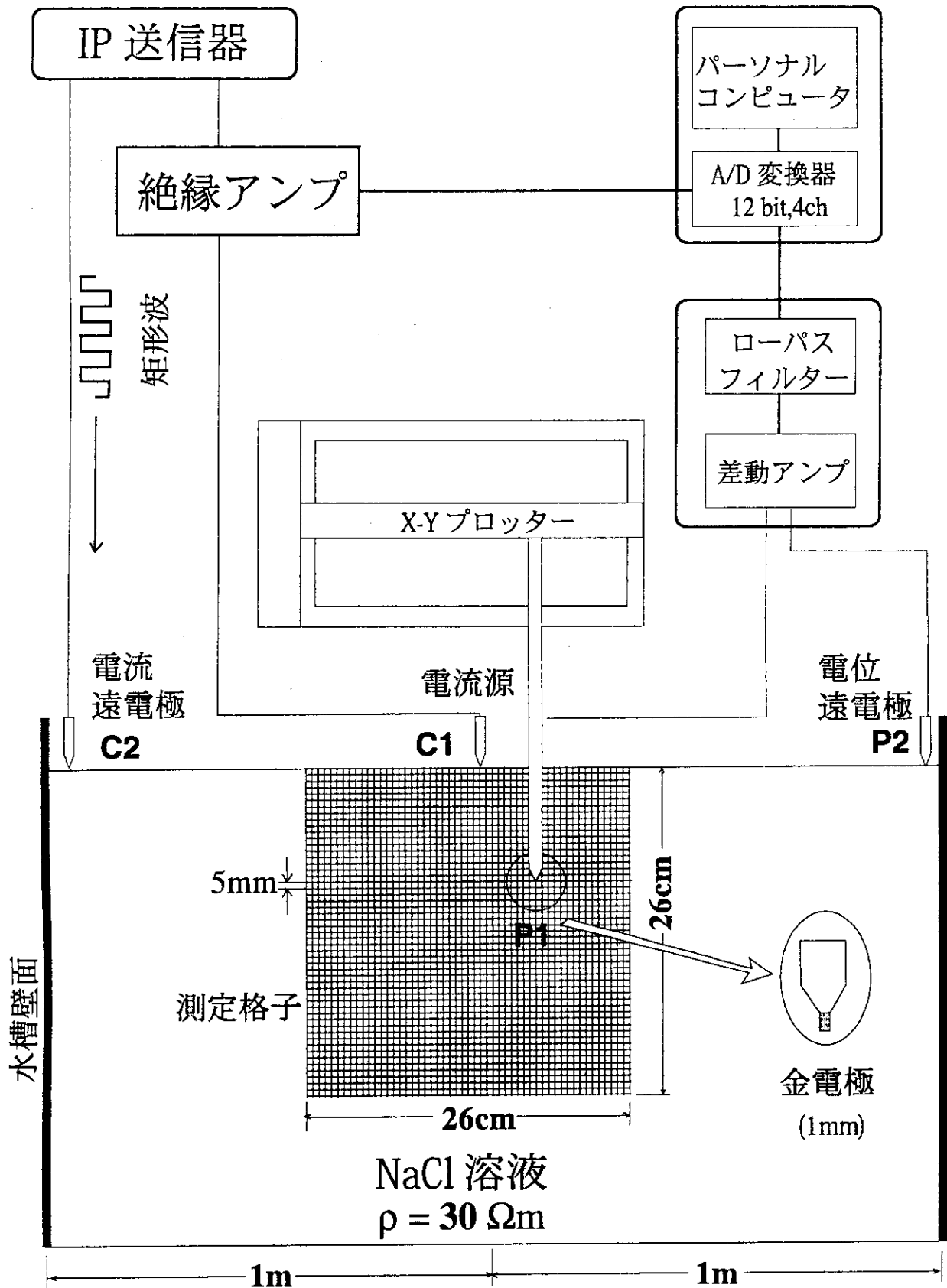


Fig.19 精査領域測定システムと測定格子点

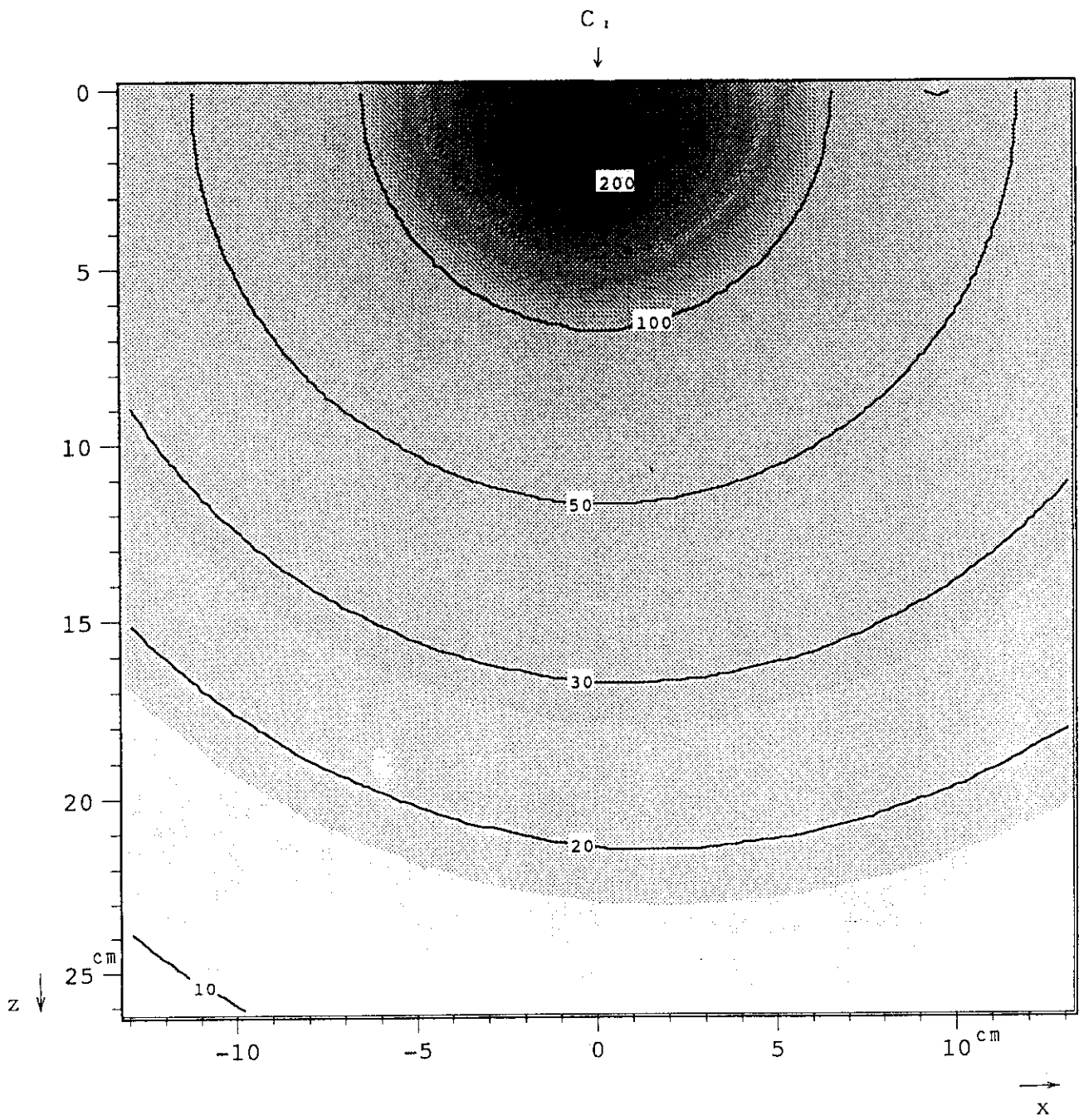


Fig.20 精査領域の電位分布

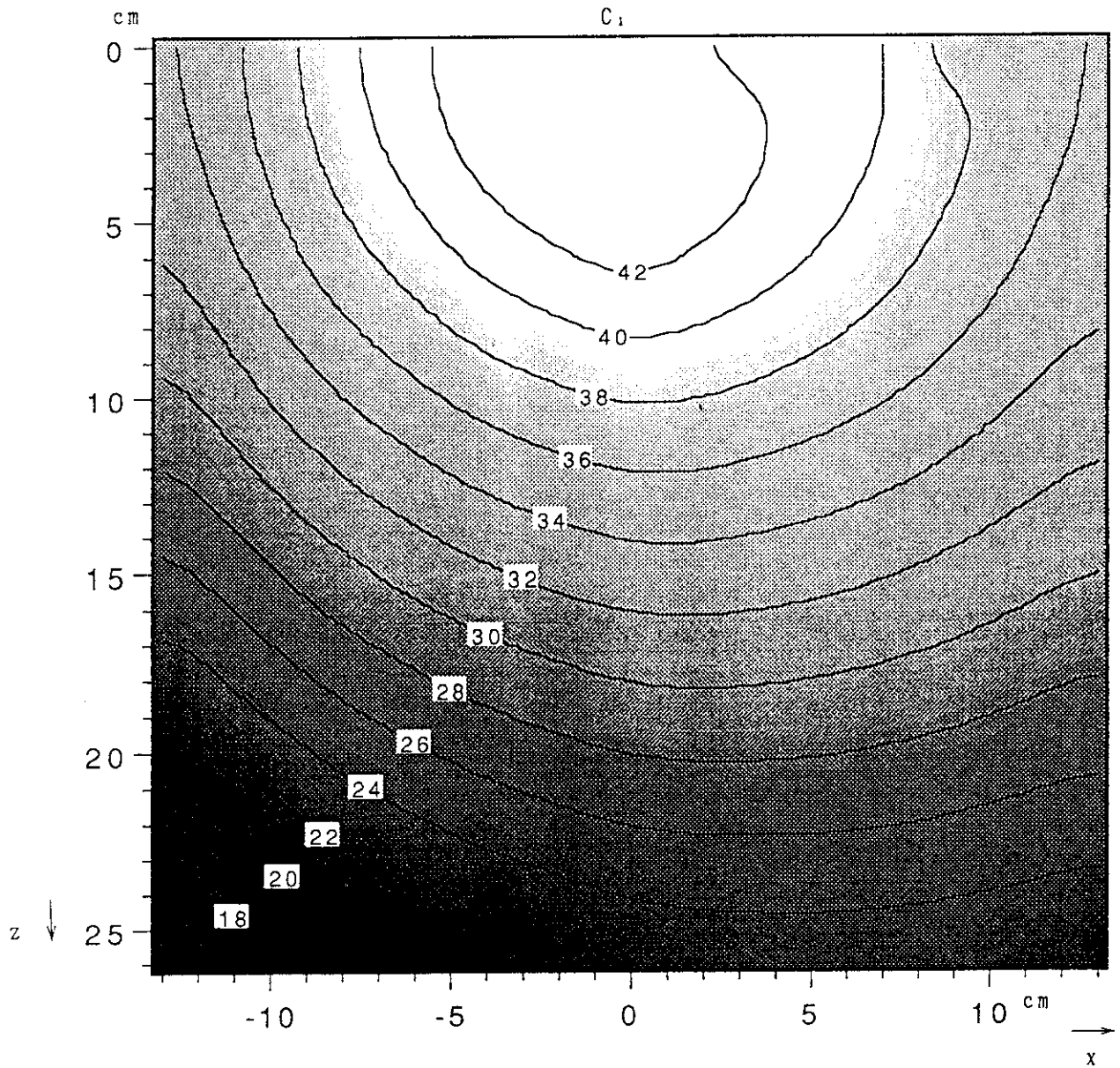


Fig.21 2極法で求めた見掛比抵抗分布

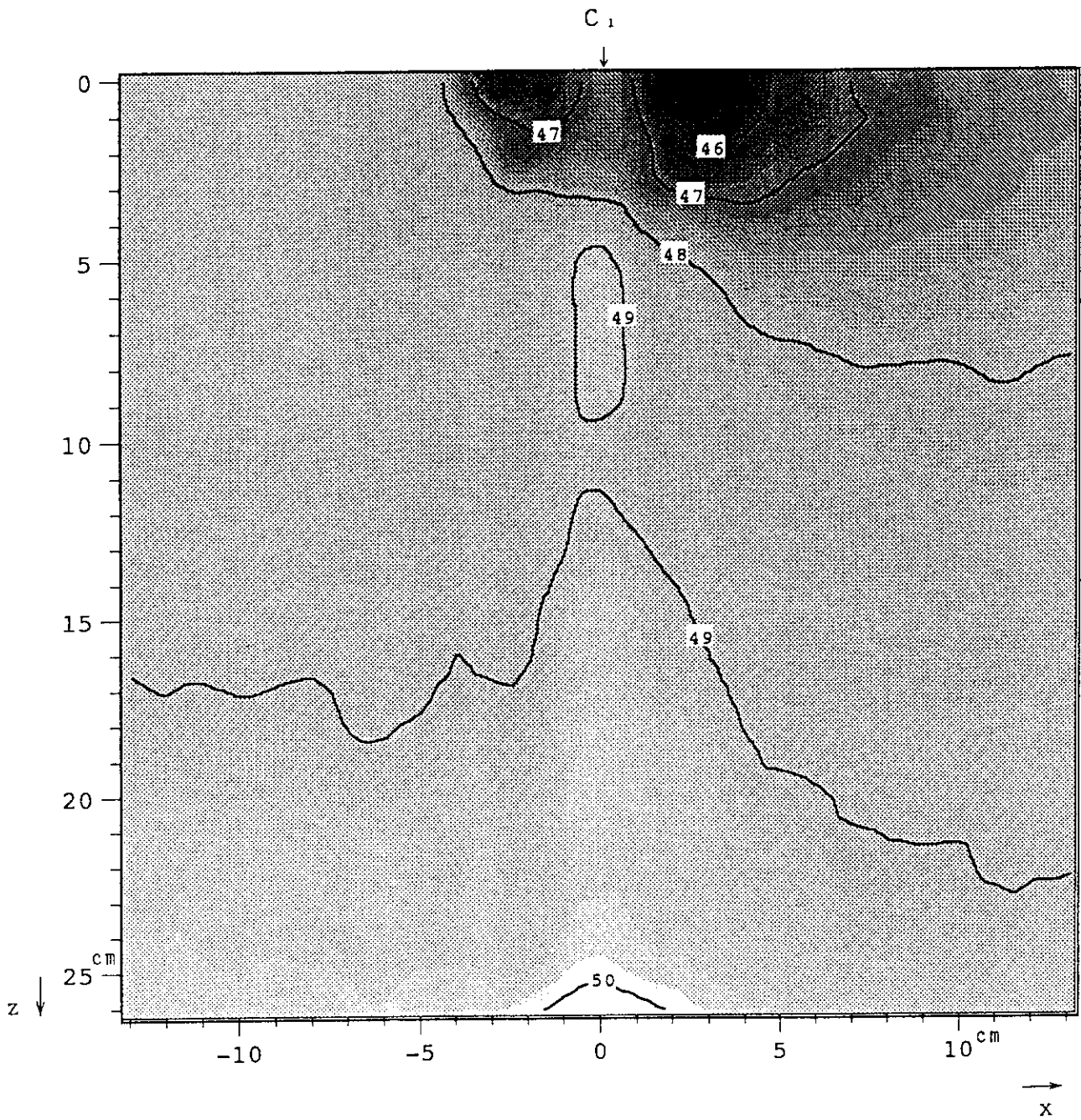


Fig.22 4極法と影像法との組み合わせから求めた見掛け比抵抗分布図

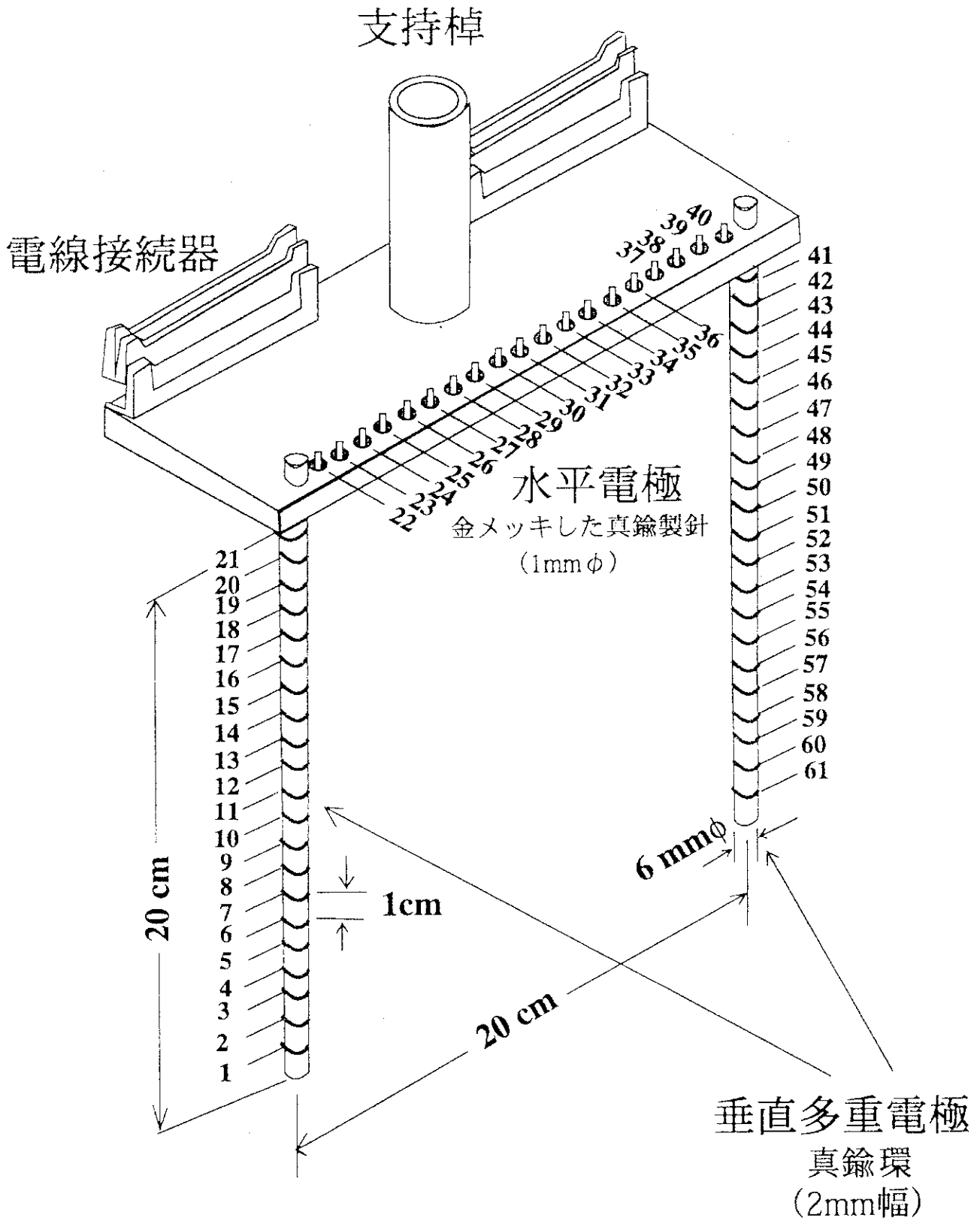


Fig.23 模擬電極構成図

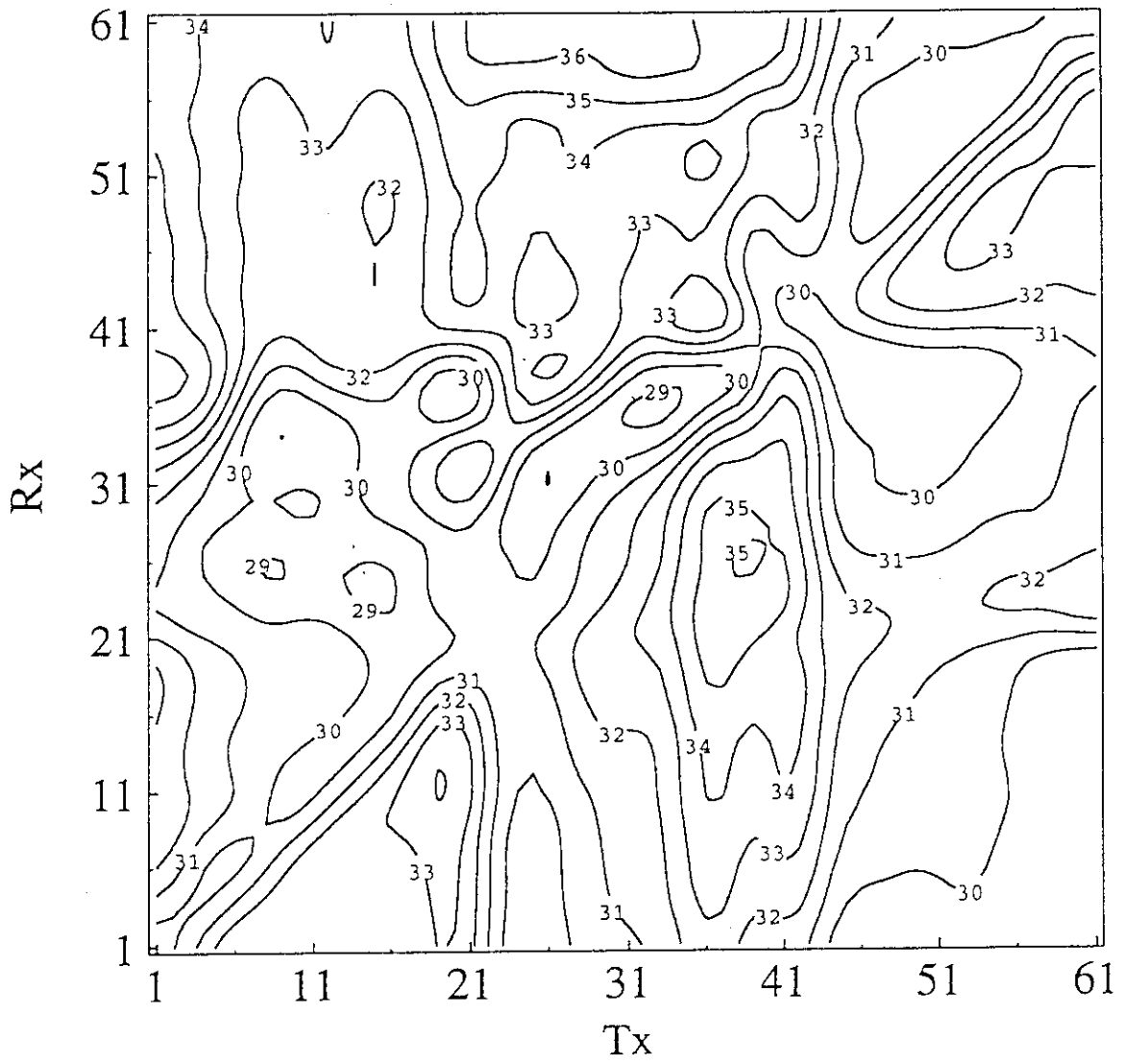


Fig.24 物理モデル実験ブランクテスト見掛比抵抗分布図

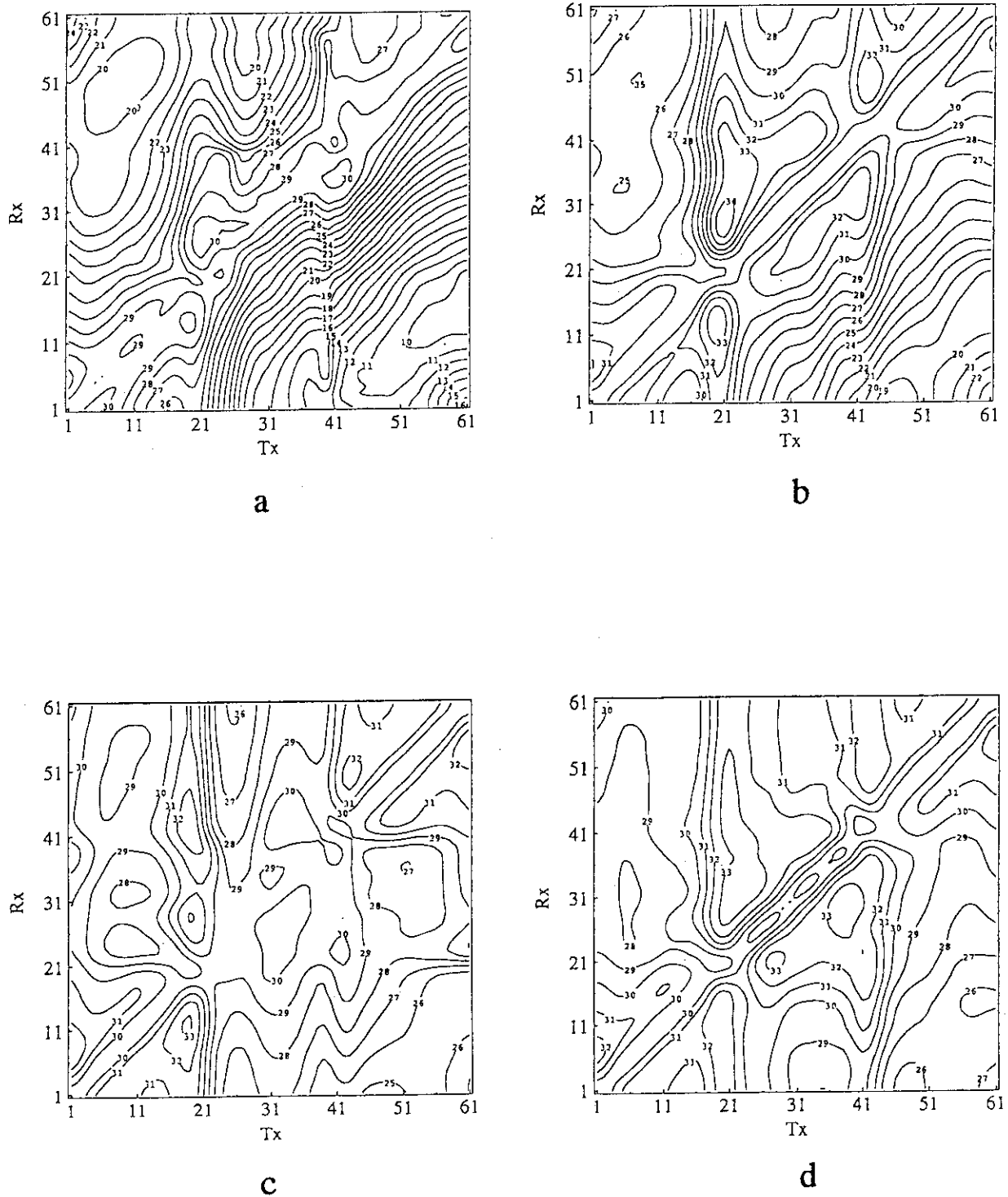


Fig.25 模擬亀裂を用いた物理モデル実験の見掛け比抵抗分布図

a ; REC8HL モデル, b ; REC4HL モデル

c ; REC2HL モデル, d ; REC1HL モデル

各図の縦軸 (Rx) は電位電極番号, 横軸 (Tx) は電流電極番号。コンター上の数字は比抵抗値 (単位:  $\Omega m$ ) を表わしている。

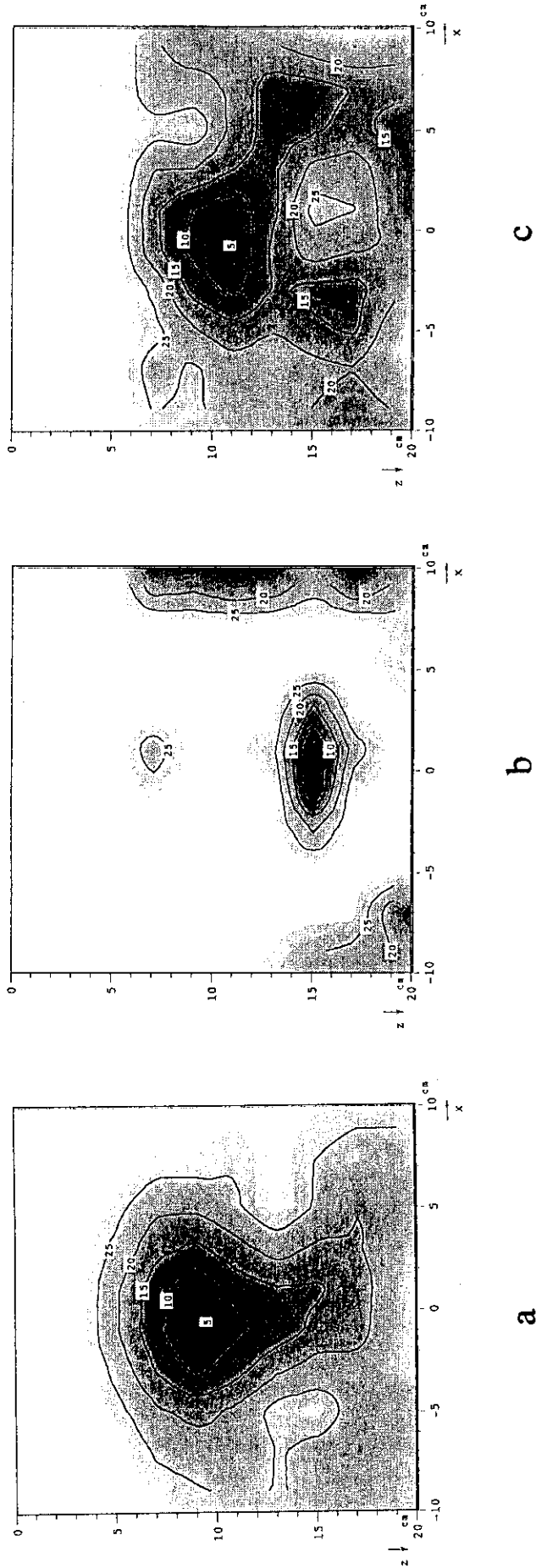


Fig.26 模擬亀裂を用いた物理モデル実験の再構成画像

a; REC8HLモデル, b; REC4HLモデル, c; REC2HLモデル  
 コンター上の数字は比抵抗値 (単位:  $\Omega m$ ) を表わしている。