

電気的特性を利用した孔内画像化技術の開発

佐野 康・大橋武一郎

Development of a Borehole Imaging System Based on Electrical Characteristics

Ko SANO and Takeichiro OHHASHI

Abstract

There are several kinds of borehole imaging techniques such as CCD imaging, acoustic imaging and electrical imaging techniques. These kinds of measurement systems have large probe diameters. Also, CCD imaging and acoustic imaging techniques cannot be used muddy water used to drill boreholes. To solve problems, we have developed an electrical imaging tool, named Elias, which is characterized by full coverage of a borehole wall and a slim diameter probe. This system uses a current intensity measurement technique instead of a resistivity measurement technique. We examined various micro electrode parameters, such as the current capacity and the size and structure of the micro electrodes, by laboratory tests, using an electrode unit model, theoretical calculation and field tests, using an engineering model, to further improve the system through minor changes. From these examinations we were able to determine the micro electrode parameters suitable for slim hole applications. The diameter of the probe is 50 mm. The number of electrodes is 32. The large number of electrodes leads to full circumference coverage with regular azimuthal sampling.

This system was evaluated by testing it in crystalline rocks, such as porphyrite, and in sedimentary soft rocks, such as mudstone. These results were compared with acoustic images and CCD images. In crystalline rocks, similar images were obtained by all methods. Those images show clear planar features such as fractures which are characterized by sinusoid patterns on the unwrapped view of the borehole. Thin arenaceous layers in the mudstone were also clearly observed in the electrical images obtained by the Elias system. At a sight where high molecular compounds were used as the drilling fluid, to prevent the borehole wall from collapsing, not only the CCD imaging system, but also the acoustic system wasn't able to get clear borehole images. However, the Elias system could obtain clear images of the borehole wall.

1 まえがき

ボーリング孔内のあるがままの状態を観察することが地盤状況を把握する上で有効であるために、孔内を画像化して観察する技術は、従来より多くの調査に利用されている。

これまでに、実際の調査や研究に使用されている孔壁を画像化する方法にはいろいろなものがあるが、原理上から大別すると、次の3題類に分けることができる。

- ① 孔内にテレビカメラを挿入し、孔壁に光を照射して、孔壁の光学的映像を得る方法
- ② 孔壁に超音波ビームを照射し、その反射時間や振

幅の大きさから、音響的に孔壁を画像化する方法

③ 孔壁の比抵抗あるいは電極と孔壁との接地抵抗を測定し、電氣的に孔壁を画像化する方法

これらの画像化技術のうち、①のボアホールカメラや②のボアホールテレビュアは分解能が高く、優れた方法であるが、泥水中では使用できないことが、適用上の制約となっている。また、③の方法では、泥水中でも使用できるが、装置自体が大型である。いずれの装置も大がかりであり、たとえば、測定中にプローブを移動する速度も、ボアホールカメラでは毎分1m以下、ボアホールテレビュアでは毎分3m以下に制限されており、土木・建築関連の調査においては、手軽に使えないことが障害となっている。

従来の画像化の方法は、適用条件が満たされれば、長い測定時間を要するとはいうものの、高い分解能の画像が得られる方法である。一方、調査の目的によっては、分解能はそれほど高くなくても、簡便に使用することができ、泥水中でも可能なような方法が必要となる。とくに、土木・建築の分野における調査では、このような要望が多い。たとえば、ケーシング挿入前や削孔の途中などに、泥水中で観察する必要がある場合が多く、泥水中で孔壁が画像化できる方法が求められている。しかも、測定ができるだけ短時間で終了することが望まれる。

そこで、上記の目的にそった孔内画像化装置を開発することにしたが、その方法としては、原理的に泥水中で適用することが難しいボアホールカメラやボアホールテレビュアよりも、比抵抗や接地抵抗などの電氣的特性を測定する方法が適していると考えられる。また、電氣的特性を測定する方法については、比抵抗を測定する方法よりも接地抵抗を測定する方法の方が、分解能が高いといわれている (Straub, et al, 1991)。さらに、プローブの構造を単純化し易いという点からも、接地抵抗を測定する方法が有望であると考えられる。したがって、この原理を考案したB.R.G.M.の協力を得て、接地抵抗を測定することによる孔壁を画像化するシステムを開発することにした。

2 開発の基本方針と目標

接地抵抗を測定して孔壁を画像化する方法は、最初にフランスのB.R.G.M.で研究された (Straub, et al, 1991)。その研究で試作されたプローブの概念図を図-1に示す。このプローブには、プローブを取りまくように、16個のパッドが配置されている。それぞれのパッドには、電流収束用の補助電極が付けられており、分解能

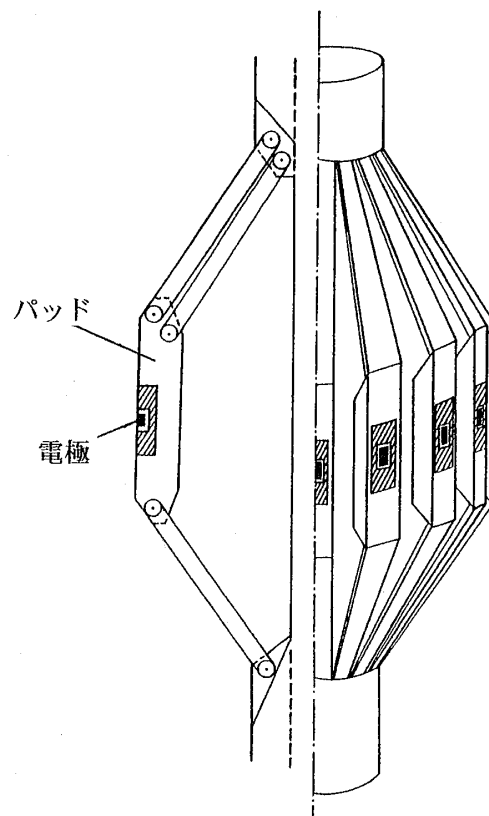


図-1 BRGMによる初期モデルの電極構造 (Straub, et al., 1991)

Fig. 1 Structure of the first model's electrodes made by BRGM (Straub, et al., 1991)

の向上を図っている。しかし、そのために機構が複雑になり実用化を困難にしている。また、全周を16個の電極で画像化しているため、深度方向の分解能は良くても、周方向の分解能は必ずしも十分とはいえない。

そこで、実用的なシステムを構築するために、以下の条件を満たすことを目標とした。

- ① 電極の圧着力を一定に保つこと……………この方法によって測定される接地抵抗は、孔壁に対する電極の圧着力によって影響を受けるので、測定ごとの圧着力を変わらないようにすることが必要である。できる限り種々の孔径に適用できることが望ましいが、土木分野でよく使用される孔径がφ66mmからφ80mmのボーリング孔に限ることとした。
- ② 一回の測定で孔壁全周が画像化できること……………従来の比抵抗を用いて孔壁を画像化する方法では、一回の測定で全周の画像は得られない。精度の良い情報を得るためには、一度に全周を画像化することが必要である。このためには、円周上にいかに多くの電極を配置できるかが重要な課題である。
- ③ 実用的な亀裂検出能力と分解能を有していること

……当然、分解能は高いほど良いが、プローブの構造を単純化することと両立させることは難しい。しかし、実用的なものであるためには、少なくとも幅が0.5mm程度の亀裂が検出でき、数ミリ程度の分解能が必要である。

- ④ プローブの回転による画像のゆがみを補正できること……孔内でプローブを上下方向に移動させると、それに伴って、多かれ少なかれ、プローブが回転するものである。したがって、正しい孔壁の展開画像を得るには、この回転を補正する必要がある。
- ⑤ プローブの構造が単純で扱いやすいこと……電極を孔壁に接触させながらプローブを移動して測定する方法では、電極部が破損したり、ジャミングを起こす危険がある。そのためには、ジャミングを起こしにくく、保守も容易であるようなできるだけ単純な構造が望ましい。

3 開発を進める上での検討

3・1 模型実験による基礎検討

前章に述べた5つの基本方針のうち、回転によるゆがみの補正は、孔内におけるプローブの回転を正確に測定

する方法を見いだす問題であるので、これは別に考えるとして、他の4つの項目を満たすためには、以下に示すような事項を明らかにすることが必要となる。

- ① 電極の圧着力が、実際に、測定結果にどの程度影響するか。
- ② 全周をカバーするためには、電極を周状に密に配置したとしても、その角度間隔は、最小で10°程度が限度である。これは孔径にもよるが、数mmの電極間隔に相当する。したがって、数mm程度の間隔で電極を配置して測定を実施することによって、十分な横方向（周方向）の分解能が得られるか。
- ③ 電流を収束させるガード電極がない簡単な構造の電極で、どの程度の亀裂を検出する能力があり、十分な分解能が得られるか。
- ④ 対象とする地盤の電気的特性のうち、接地抵抗に最も影響すると考えられる比抵抗は、数Ωmから数千Ωmの広い範囲にわたることが予想されるが、電源電圧や接地抵抗を求めるための電流検出用抵抗などは、どの程度の値が適当であるか。

そこで、以上のことを、プローブを設計する前に解決しておくために、電極部分のみの簡単な模型を作って、実験を行った。

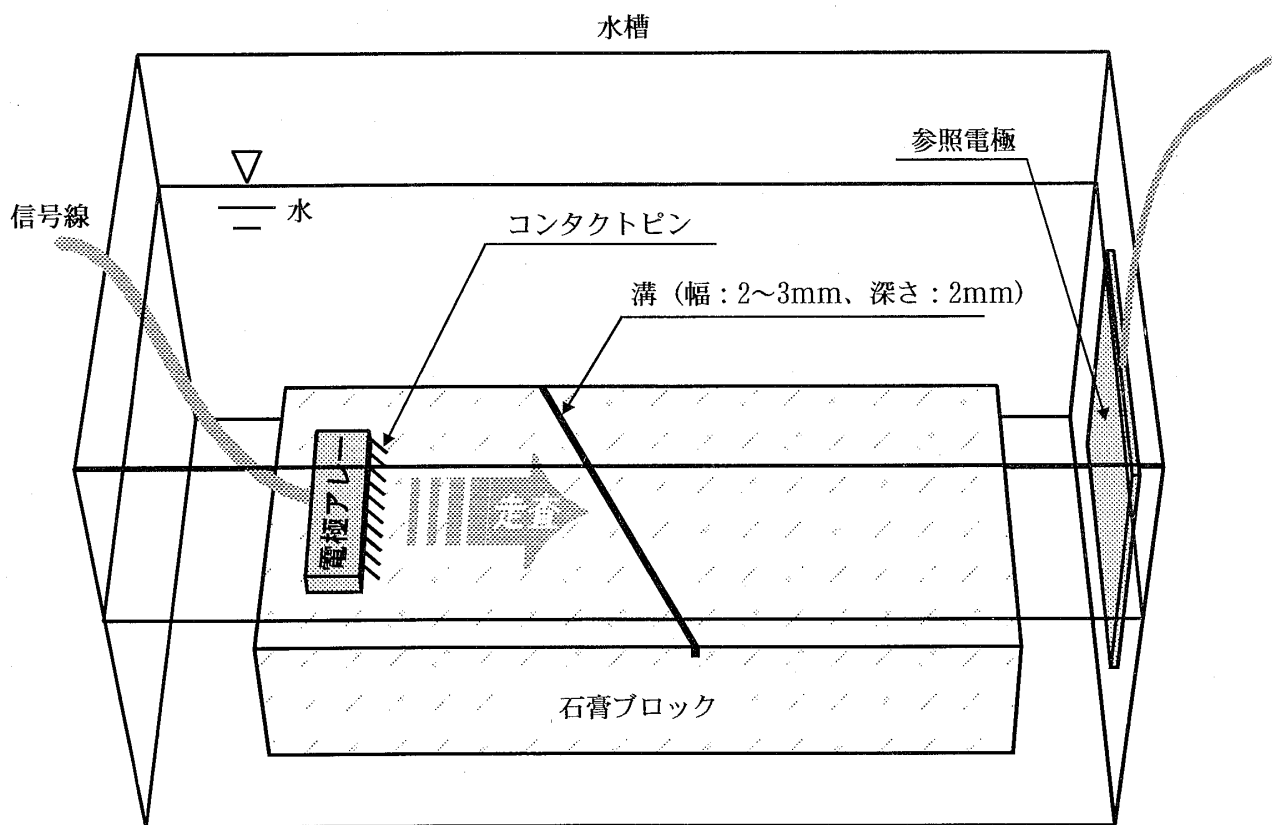


図-2 水槽による実験概念図

Fig. 2 The procedure of experiment using a water tank

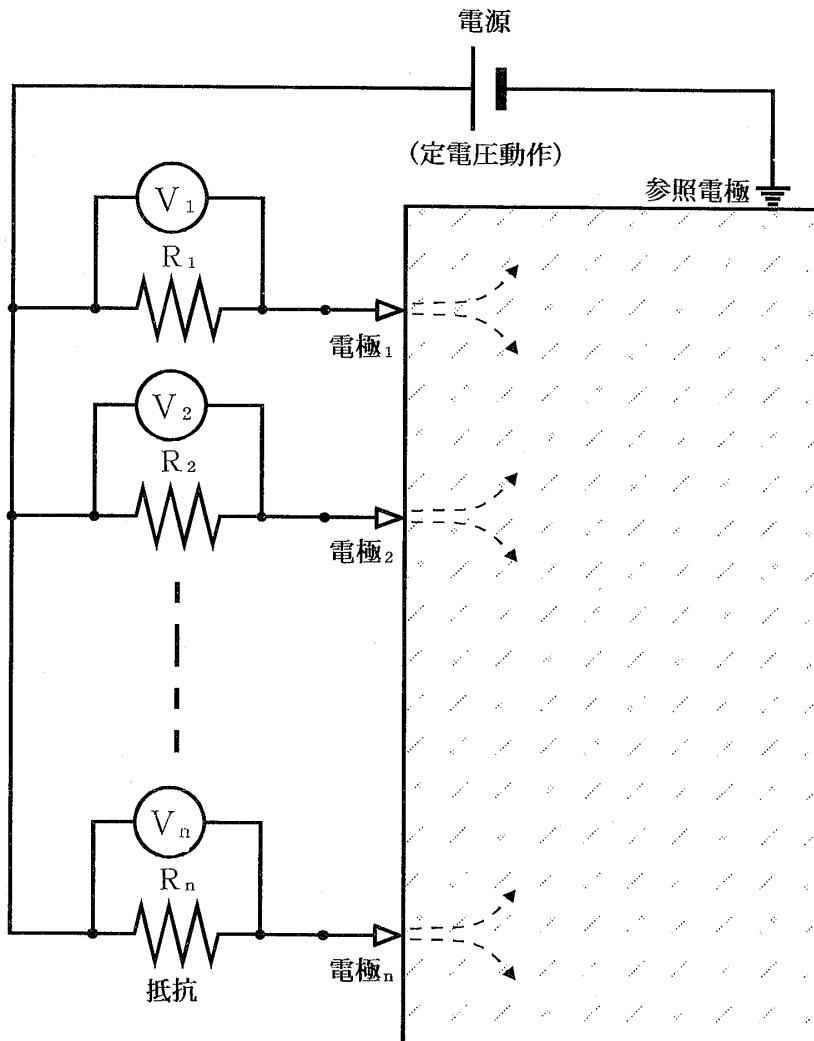


図-3 電流強度を利用した画像化手法の測定原理

Fig. 3 Principle of ground resistance measurement using this system

実験には、図-2に示すように、水槽を用い、水中に設置した試料の表面を模型電極で走査して、孔内測定をシミュレーションするものである。模型電極は、ピン状の電極を約5mm間隔に並べたもので、各電極の先端が試料と点接触する。孔壁の岩石の種類の違いによる検出の仕方の違いを評価するために、水槽内にいろいろな種類の材料のブロックを沈め、その表面を模型電極で走査して測定した。ブロックの表面には、亀裂を見立てた幅2~3mmの溝が付けられており、この溝がどのように検出できるか調べた。測定の原理を図-3に示す。ブロック表面に接する電極は、抵抗を介して定電圧電源に接続されており、水槽壁面に取り付けられた基準電極との間で電流を流す。各電極からブロック表面に流れ出る電流を抵抗の両端の電位差として計測し、各電極の電流強度を画像化する。電極の移動に伴って各電極から流れ出る電流強度が変化するので、電極の位置と移動位置を座標とした二次元平面上に、強度分布が画像として描か

れる。この電流強度は、接地抵抗に逆比例する。

実験の結果、亀裂を想定した幅2~3mmの溝を確実に検出することができ、本手法が基本的に利用可能であることが確認できた。さらに、以下のようなことが明らかになった。

- ① ガード電極を付加しなくても、実用上あまり問題はないと考えられる分解能が得られた。10本の電極が、相互にガード電極としての効果をもたらしていることもあるようで、電極の配置密度や電極の大きさを工夫することによって、単純な構造を実現し得ることが期待できた。
- ② ブロック表面の凹凸の影響によって、電極の押しつけ圧力が変化すると、接地抵抗が変わり、測定される電流値に影響を及ぼす。実用化にあたっては、電極を押しつけるようにして、圧力を一定に保つことが必要である。
- ③ 測定対象であるブロックの材質を、石膏で固めた

粘土あるいは花崗岩などのように、比抵抗の異なっていくつかの材料について実験を行った結果によると、各材料ごとに、適切と考えられる電源電圧や電流検出の抵抗の適正值などについての目安が得られた。したがって、システムを設計するに際して、実際の調査で適用する際に予想される接触抵抗を考慮しなければならないが、その際に、実験で得られた結果を参考にすることができる。

3・2 適切な電流と電圧の決定

孔壁におけるわずかな電流変化を検出するためには、高い分解能が必要であり、そのためには、印加電圧を高くする必要がある。しかし、プローブを簡易な構造にするためには、数十V程度が現実的である。また、接地抵抗は、地盤の比抵抗によって変化するが、数Ωから数十MΩの広い範囲にあると考えられる。そこで、印加電圧に対しては、2つのレンジを設け（定電圧モード）、低比抵抗帯では10Vレンジを、高比抵抗帯では40Vレンジを選択、使用できるようにした。印加電圧が10Vの場合に、要求される分解能は、電流に換算しておよそ $1\mu\text{A}$ となるため、電流検出用の抵抗を $1\text{k}\Omega$ とし、40dBのオートゲインアンプと14ビットのA/D変換器を採用することにした。

3・3 電極構造の検討

3・3・1 基本構造の検討

従来の比抵抗を測定する方法では、パッドを用いた複雑な電極が使用されている。すなわち、ゾンドの周囲には数個のパッドが取り付けられ、各パッドの上には多数の点状の電極が配置され、それらの電極は、電流を収束するためのガード電極で囲まれている。この電極構造は実績があり、接地抵抗を測定する方法においても有効と考えられる。しかし、パッドを用いるとプローブ全体の構造が複雑になり、小孔径のボーリング孔に対する適用が困難になると考えられる。そこで、パッドを用いずに、電極を孔壁に密着させる方法について検討した。その結果、図-4に示すように、バネの機能を持たせた棒状の弾力のある金属の先端に小さなピンを接着して、バネの力でピンを孔壁に密着させる方式を採用した。そして、アクチュエータによって、電極を開閉できる構造とし、ピンが測定時にのみ孔壁と接触するようにした。このような構造では、本格的なガード電極を付加することは難しく、小さな電極をピンの上下に付加する程度が限度である。

3・3・2 現場実験による電極形状の検討

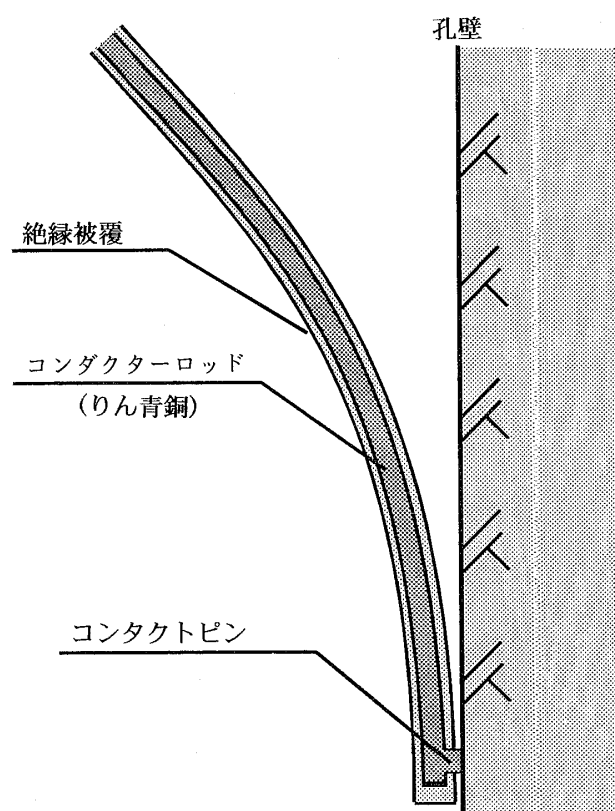


図-4 電極の構造

Fig. 4 Structure of the electrode

実現可能な構造で最適な電極形状を決定するために、4種類の電極を試作し、実際のボーリング孔において試用して、比較評価を行った。作製した電極の形状を図-5の下部に示す。

TYPE-Aは、分解能をできるだけ高くするためには、孔壁と接触する部分の面積をできるだけ小さくした方が良いと考えて、電極の直径を 1mm にした構造である。孔壁の微小な構造をとらえることを考えた分解能重視の型である。

TYPE-Dは、TYPE-Aとは反対に、孔壁との接触面積を現実的な範囲で大きくし、平均的な値を得ることによって、微細な凹凸などの影響を受けることが少ない電極とすることを目指したもので、電極の直径は 4mm である。

TYPE-Bは、電極の直径を 2.5mm とし、接触面積がTYPE-AとTYPE-Dのほぼ中間としたモデルである。これは、分解能とS/Nとのバランスがとれたものとして設計したものである。

TYPE-Cは、TYPE-Bに電流収束用の小さなガード電極を付加したもので、これは、簡便なガード電極の効果を把握するためのものである。

実験によって得られた各電極の電流強度変化と孔壁の

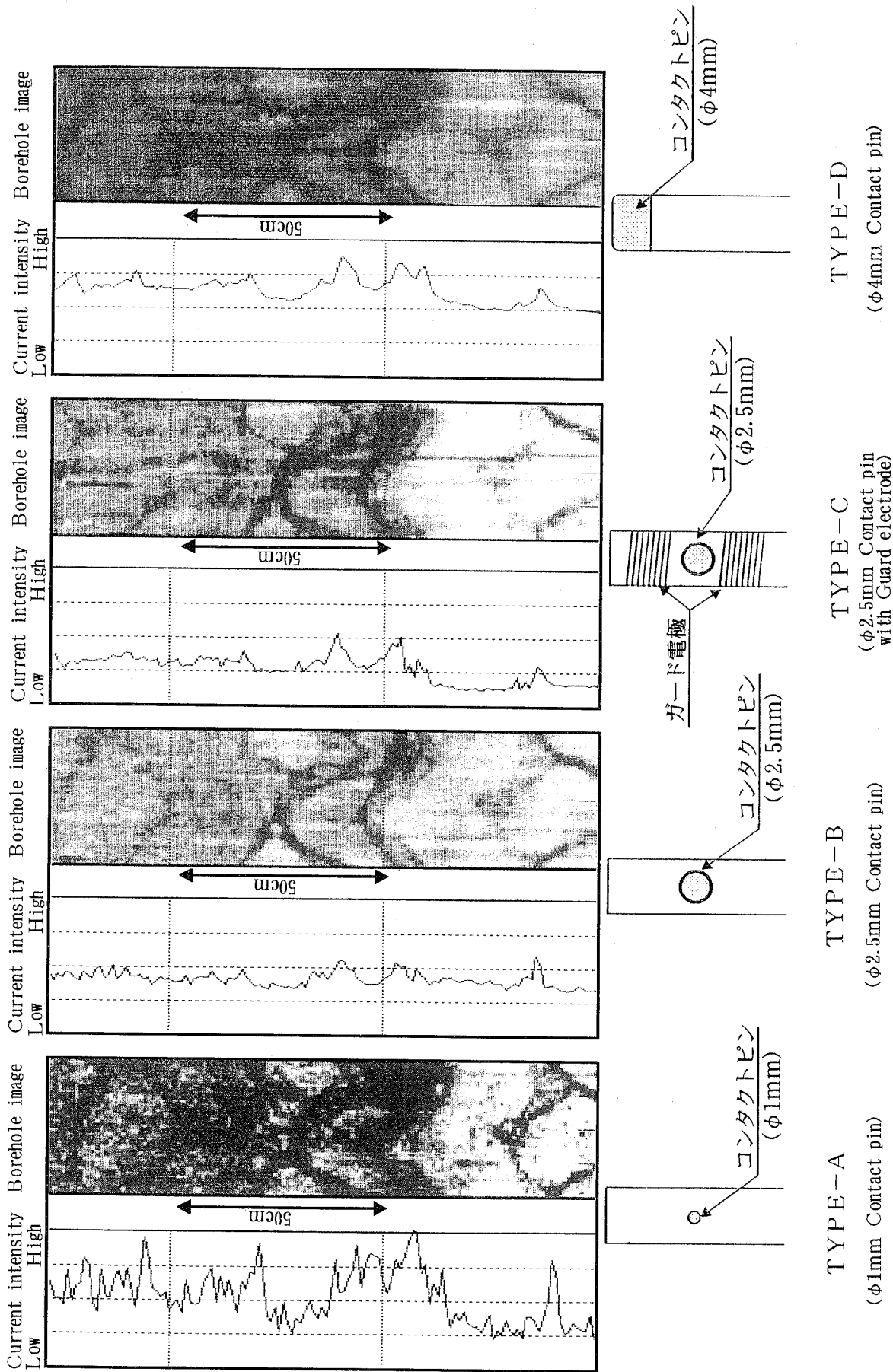


図-5 電極の構造と得られた画像との比較

Fig. 5 Structure of the contact pins on the conductor rod and an example of measured results

イメージを図-5の上部に示す。各記録の右側は花崗岩で得られた孔壁の展開画像であり、左側は一つの電極において測定された電流強度の変化をグラフ化したものであり、電極の感度やS/Nの比較を行う上で参考となるものである。すなわち、このグラフの振幅が大きいときは感度が高いことを表し、また、ピークの幅が狭く鋭く切り立っているほど分解能が高いことを示している。

TYPE-Aにおいては、電流強度変化のグラフに、狭い幅のピークが多数見られ、分解能は高いことがわかるが、展開画像は鮮明さに欠けている。これらのピークには、孔壁表面の凹凸の影響と考えられるものも多く、S/Nは小さいと判断せざるを得ない。

TYPE-Dにおいては、電流強度変化のグラフは、なだらかな曲線を描いている。展開画像は亀裂の境界が不

鮮明であり、あたかも、全体的にフィルタ処理を施したような記録になっており、分解能が不足していることがわかる。

TYPE-Bにおいては、亀裂の境界などは比較的明瞭に再現されており、予想通り分解能とS/Nとのバランスが良いことがわかる。

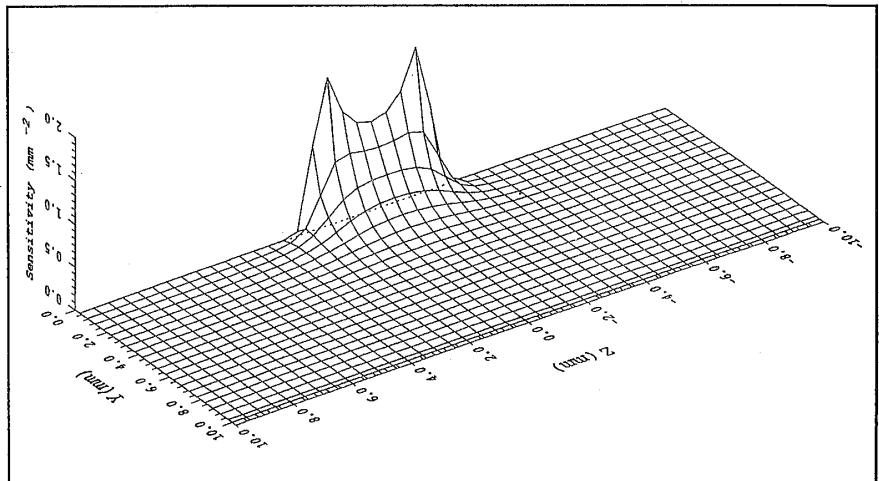
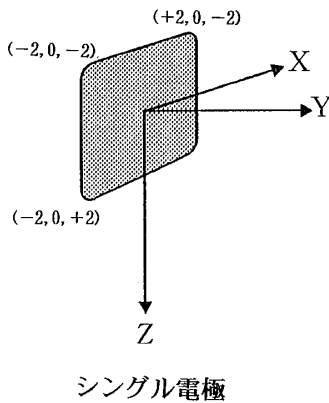
TYPE-Cについては、電流強度変化のグラフにおいて、若干感度が高くなった部分は見出せるけれども、大きな効果は見られなかった。

したがって、電極の形状については孔壁と接する部分の直径が2.5mmのものとするにことにした。

3・3・3 数値計算による電極感度の検討

上記の実験結果においては、TYPE-Cにおけるガード電極の効果はあまり見られなかったが、対象とする地

MODEL-1



MODEL-2

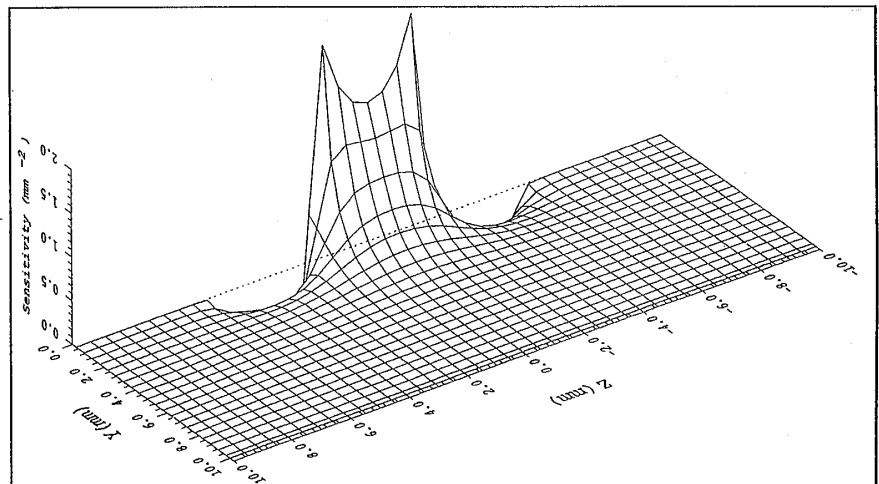
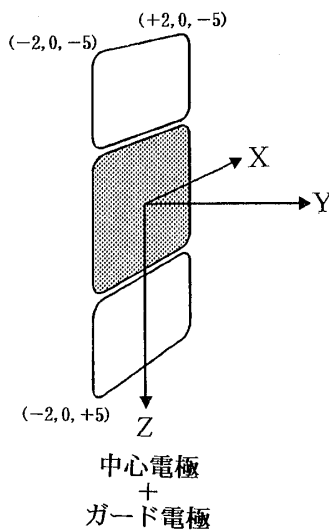


図-6 数値計算に用いた電極構造と得られた感度分布
Fig. 6 Models of electrodes and their calculated sensitivity maps

盤の性質によって、効果が異なることが考えられるので、理論的な検討も実施した。

電流強度を測定する方法が同じであっても、電極構造の違いによって、得られる画像の質が異なることは、以下のように説明できる。

図-3に示すような n 個の電極のうち任意の1つを考える。参照電極は、近似的に無限遠にあるものとして扱う。参照電極とプローブの電極間に電圧 V を印可するとき、電流 I は、電極から半無限平面内のあらゆる方向に流れ出し、参照電極に集まる。このとき、電流 I は、電極の配列や大きさおよび媒質の比抵抗によって決まるアドミッタンス Y によって、次のように求められる。

$$I = Y \cdot V$$

電圧 V が一定に保たれる場合には、電流 I は、アドミッタンスの大きさに応じて変化することになる。すなわち、定電圧の条件では、電流強度を測定することは、アドミッタンスを求めていることに他ならない。電極の構造が一定であれば、アドミッタンスは媒質の電気的特性によって決まるので、媒質の表面に沿って電極を走査することによって、媒質の比抵抗分布状況を把握できることになる。この時、媒質の比抵抗によって、アドミッタンスがどのように変化するかは、電極の構造によって決まることになる。比抵抗の変化に対するアドミッタンスの変化量は、電極の感度と考えることができる。可能な限り単純化するために、図-6の左側に示すような電極のモデルを使用した。MODEL-1がシングル電極、MODEL-2はMODEL-1の電極の上下にガード電極を加えたもので、それぞれ、試作した電極TYPE-BおよびTYPE-Cに対応している。

これらのモデルに対して、数値計算によって感度分布を計算した。電極の感度は、比抵抗 $1 \Omega \cdot m$ の均質な半無限媒質中の YZ 平面内に小さな完全導体の円盤を置いたときに生じる電極のアドミッタンスの変化率として定義した。

図-6の右側は、数値計算によって導かれた感度分布である。計算は、均質媒質中に低比抵抗のアノマリーを存在させ、モデルの電極が受ける感度分布を計算した。この図からわかるように、ガード電極の設置によって、ビーム幅は15%程度狭くなり、電流収束の効果が確認される。しかし、電極の周囲では、負の感度が存在することも明らかとなった。実際の孔壁はモデルとは異なり、不均質な分布をしているために、現場実験において、この負の感度をもつ部分が、ガード電極の効果を抑制したものと考えられる。

以上のように、数値実験結果では、ガード電極を付加することの効果は、明らかにあることが判明したが、その程度は、実用上の効果が大きいと見なせるほどではないことがわかった。また、負の感度が存在することは、疑像を発生させる原因にもなり、好ましくない。これらの点から、本装置においては、ガード電極を付加しない直径2.5mmの電極を採用することにした。

3・4 方位計測手法の検討

電流極度の画像を孔壁の展開図として得るためには、孔内におけるプローブの方位を把握しておかなければならない。方位の計測には、磁気方位センサが多く用いられているが、電極より流れ出す電流の影響を受けないようにするために、角速度センサ（振動ジャイロ）を採用した。回転角は、角速度センサより出力される角速度を積分して求める。このセンサにおいては、予め測定する基準方向を定めておき、最初、プローブをその方向に向け、その時点を起点として積分を行い回転角度を求めるものである。しかし、本システムの場合には、ボーリング孔内におけるプローブの静止を確認することができないので、ツインジャイロ方式を採用することにした（荏司ほか、1994）。これは、2つの角速度センサを互いに向かい合わせに配置することによって、ドリフト成分と回転成分を分離する方式で、正しい方位を求めることができ、正確な展開図が得られるようになった。

4 装置の概要

4・1 装置の構成

試作したシステムの構成を図-7に、外観を写真-1に示す。また、試作機の仕様は表-1に示した通りである。プローブは、電流強度計測ユニットおよび方位計測ユニットより構成される。このプローブによって測定されたデータは、地上のデータ収録装置に記録され、処理される。

1) 電流強度計測ユニット

電流強度計測ユニットは、プローブを取り囲むように配置された32本の電極と、電極を開閉するアクチュエータから構成されている。測定時にはアクチュエータで電極を開き、電極の先端部を孔壁と密着させる。そして、全電極から同時に電流を流し、各電極に流れる電流を計測する。

2) 方位計測ユニット

ツインジャイロ方式の角速度センサを内蔵し、プローブの回転を検出する。展開図の作図時には、この回転角

度に基づいて補正を行い、方位をそろえて、正確な展開図を得ることができる。

3) データ収録装置

データ収録装置は、測定モジュールを新に作成して、応用地質(株)製の多目的データ収録装置の Geologger 3030Mark-2 を使用できるようにした。測定モジュールは、通電電源部、電流検出部および電極開閉制御部より構成されており、測定時には、孔口に設置されたシーブ

に同期しながら、一定の深度間隔毎にデータを収録できるようにした。これに対して、一定の時間間隔でデータを収録する方法もあるが、この方法においては、歪みのない画像を得るためには、検層速度を一定に保たねばならないという制約があり、簡便に使えるようにするという方針からシーブ同期方式を採用したのである。

測定されたデータを現場で直ちに展開図として得るために、データ収録装置の内蔵プリンタによって、16階調

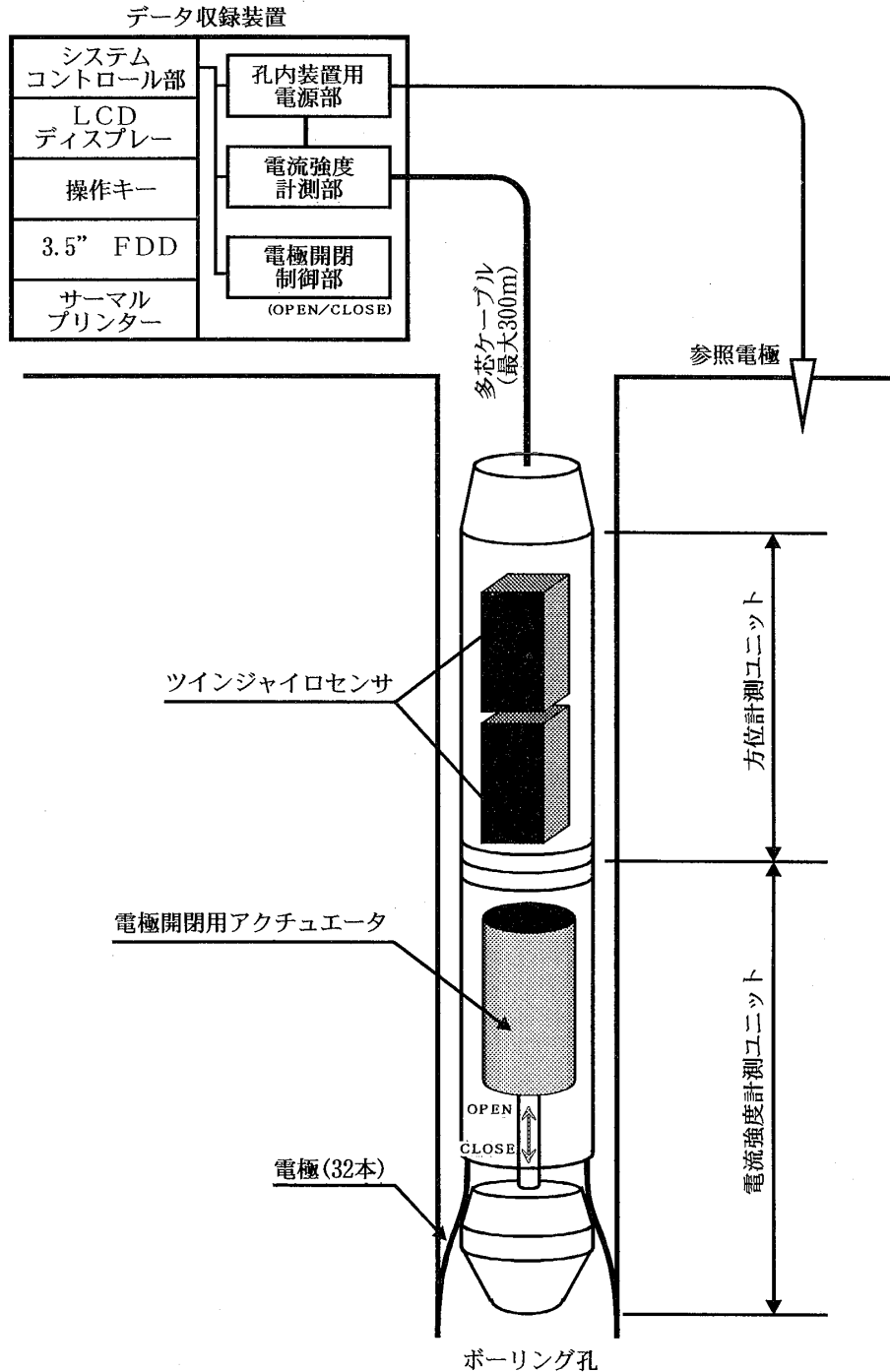


図-7 試作したシステムの構造図
Fig. 7 Block diagram of the developed system

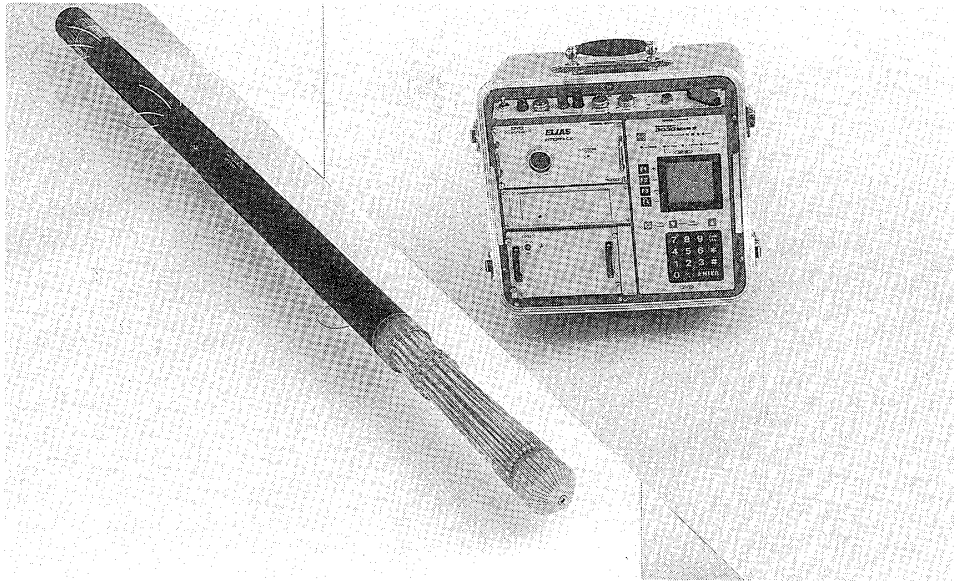


写真-1 試作したシステムの外観

Photo. 1 External view of the developed system

表-1 エリアスシステムの仕様

Table 1 Specification of the developed system

● 総合仕様

構成 成：孔内装置ならびに地上装置で構成
孔内装置は電流強度計測ユニット、方位計測ユニット

測定可能深度：300 m

電極数：32本

測定間隔：5, 10, 20, 30 mm から選択

深度分解能：5~10 mm 程度

周分解能：11.3°

適用孔径：φ66~φ90 mm

適用孔内水：清水・泥水など（無水孔は測定不能）

最大検層速度：6 m/min.

データ転送：多芯ケーブルによるアナログ伝送方式

● データ収録装置仕様

収録装置：Geologger-3030 Mark 2（専用M/Mが必要）

通電電源：定電圧動作 10V, 40V 切替式（MAX. 50mA）

電流測定感度：1 μA（Auto gain amp.）

フィルタ定数：3.5 Hz L. P. F.

A/D分解能：14 bit

再生方法：Geologger-3030 Mark 2 内蔵のサーマルプリンタに
16階調濃淡印刷

保存方法：MS-DOS形式フロッピディスクに保存

● 孔内装置仕様

電極開閉制御：電動アクチュエータによる

方位計測：ツインジャイロセンサ方式

寸法：φ50mm × 120mm

で表示できるようにした。しかし、質の高い展開図として表示することも重要であるので、内蔵の3.5インチフロッピーディスクに保存し、データをそのまま転送できるようにした。したがって、パソコンなどを利用してカラー表示やデータ処理が容易に行える。

5 孔内測定結果からみた適用性の評価

5・1 他の画像化法との比較

開発した装置（以下、エリアシステムと称す）を土木調査に利用する上での適用性を評価するために、同一孔内で、ボアホールカメラとボアホールテレビュアによる測定を併せて実施し、それらの結果を比較した。ここで得られた結果は、それぞれの装置の特徴を示しているものと考えられる。

比較実験を実施したサイトは2箇所で、それらの箇所の地質は、ひん岩および粘板岩である。

ひん岩における測定結果の中から代表的な例として、開口の大きな亀裂（開口幅5mm以上）、方解石脈および閉じた亀裂について、それぞれの装置で得られた結果を比較した。この場合、孔内水は清水である。

図-8においては、ボアホールカメラでは、分解能が高いために、亀裂内の細部にわたって情報を得ることが

できている。ボアホールテレビュアでは、亀裂の輪郭は確実につかむことができる。エリアシステムでは、ややぼやけた画像となっているが、亀裂の形状をつかむことはできている。しかし、この装置では、数mm以下の非常に狭い幅の多数の亀裂が集中しているところで、大きな亀裂が1つあるように観測されることもあった。これらのデータから、孔内水が清水であれば、分解能は、ボアホールカメラが最も高く、1mm以下の区別が可能であり、エリアシステムの分解能は、5mm程度と考えられる。ボアホールテレビュアの分解能はこれらの装置の間である。

図-9においては、亀裂面が密着しているために、ボアホールカメラでは、亀裂を明瞭に識別することが困難である。他の装置によって示されている亀裂の位置に注目するとき、かすかに亀裂の存在を示すパターンが見られるようであるが、通常では、気づかず見落としてしまう程度のかすかなパターンである。これに対して、ボアホールテレビュアやエリアシステムでは、亀裂が検出されている。このことは、これらの装置が物性変化をとらえる方法であるために、肉眼では見えなくても検出できることを表している。

図-10においては、ボアホールカメラでは、光学的な情報によって岩の色相が判断でき、物性値があまり変わら

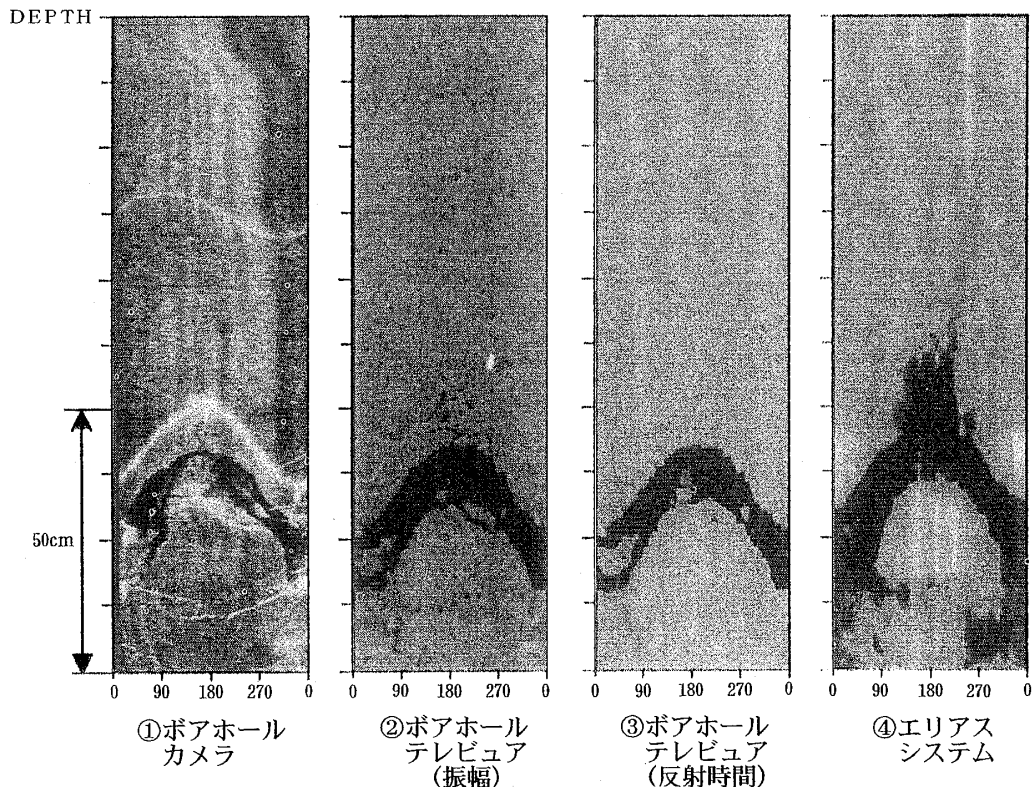


図-8 ひん岩中の大きな開口をもつ亀裂に対する画像の比較
Fig. 8 Unfolded section of wide open fractures in porphyrite

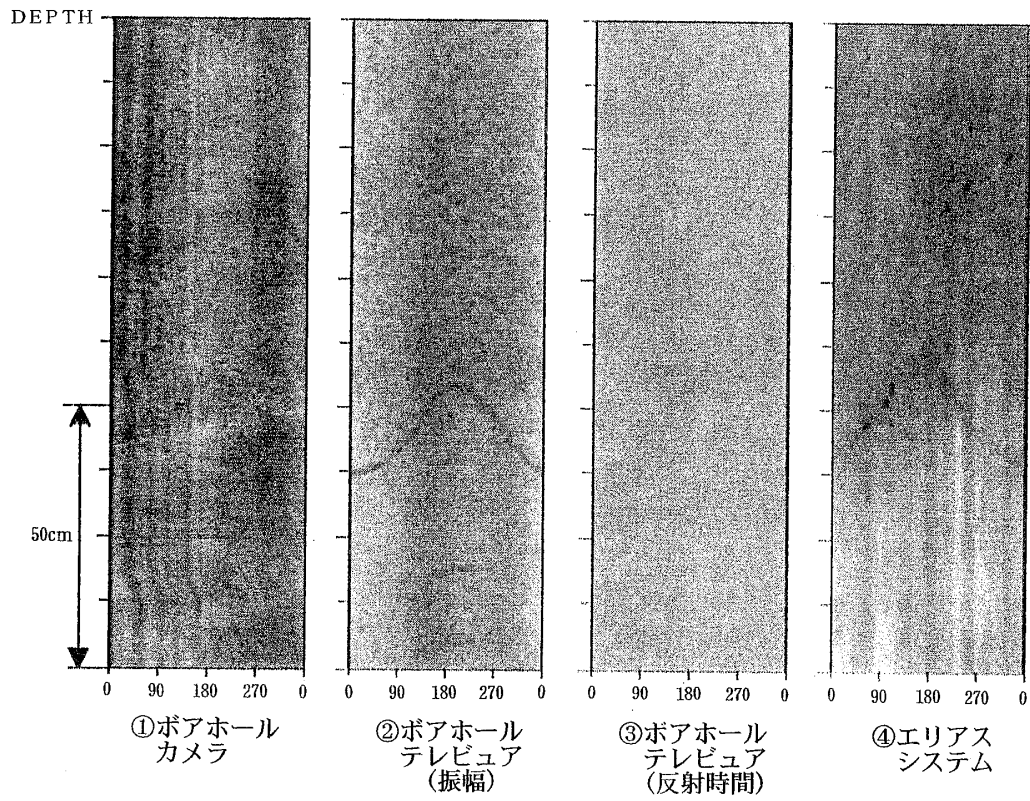


図-9 ひん岩中の密着した亀裂に対する画像の比較
Fig. 9 Unfolded section of closed fractures in porphyrite

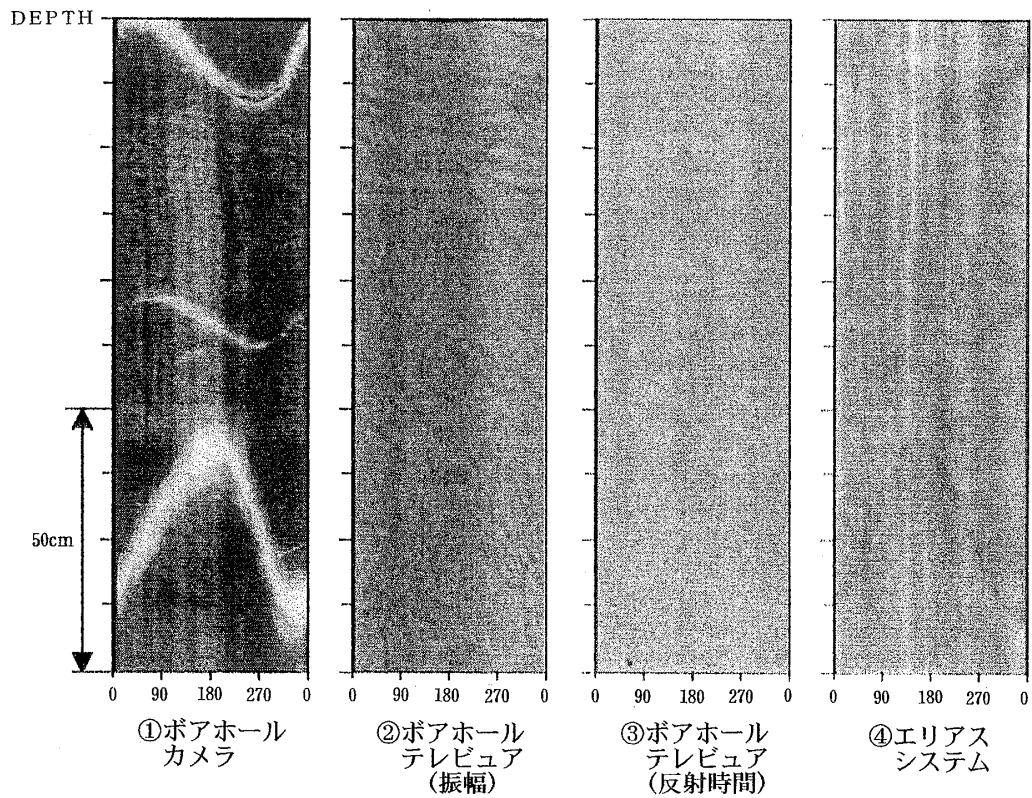


図-10 ひん岩中の岩脈に対する画像の比較
Fig. 10 Unfolded section of a vein in porphyrite

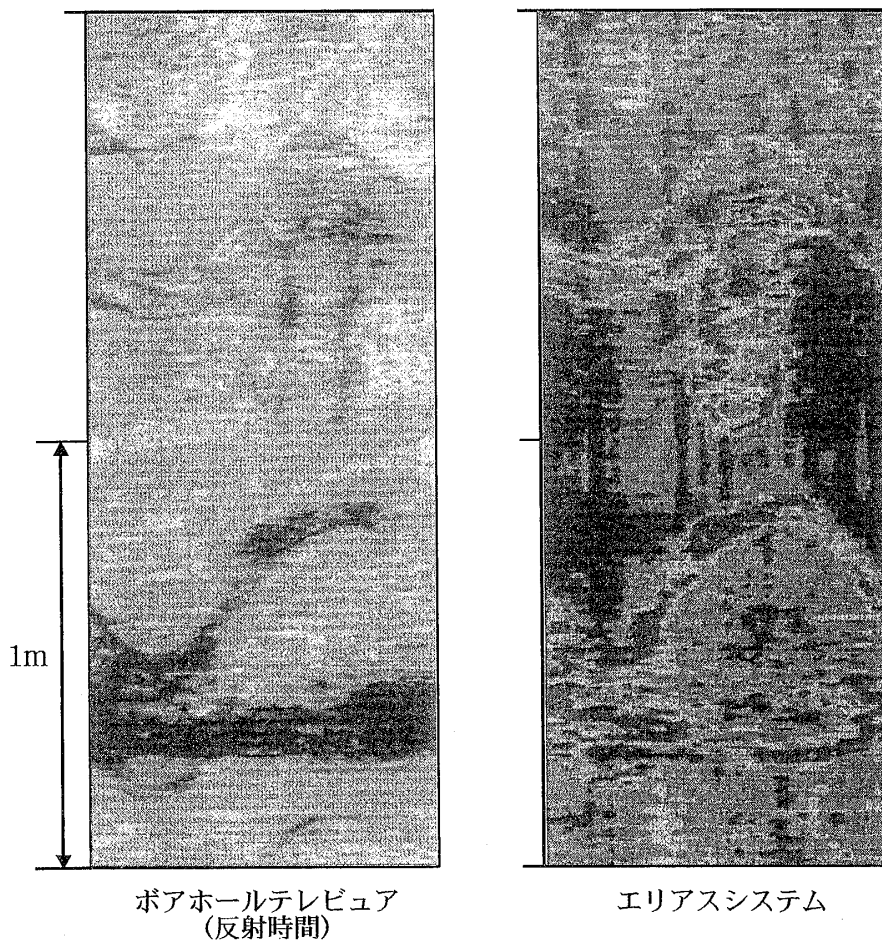


図-11 粘板岩の対する画像の比較
Fig.11 Unfolded section of a clay slate

ない場合でも、孔壁の色の変化や岩石脈が検出できるという特徴を有していることが確認された。この例においては、ボアホールテレビュアでは、振幅画像および反射時間画像のどちらからも方解石脈を検出することはできなかった。これは、母岩であるひん岩と方解石脈の音響インピーダンスの差がほとんどないことによると考えられる。エアラスシステムでは、画像は極めて薄弱で、ボアホールカメラの画像を参照すれば、方解石脈を検出できたということが出来るが、この記録だけから、これが脈であるのか、あるいは亀裂であるのかを判断することは難しい。

図-11は、ボアホールテレビュアとエアラスシステムによって得られた粘板岩についての画像を比較したものである。測定の当初、このボーリング孔には、高分子吸収体を用いた掘削泥水が使用されていた。この泥水中では、エアラスシステムは測定が可能であったが、ボアホールテレビュアでは明瞭な記録が得られなかった。これは、泥水中の粒子によって音波が散乱し、明瞭な記録が得られないためである。ここに示したボアホールテレ

ビューアの記録は、ボーリング孔を清水で洗浄した後に、収録したものである。したがって、エアラスシステムは、ボアホールテレビュアが適用困難な濃度の泥水中でも、実用上問題なく使用できることが明らかになった。

5・2 軟質地盤への適用例

さきに述べた計測は、比較的硬い岩盤を対象にしたものであったが、軟質岩盤への適用を検証するために、固結度の低い泥岩中に存在する砂層の薄層を調べた例を、図-12に示す。この砂層の層厚は、場所によって異なるが、おおむね10cm程度である。このサイトでは、この砂層がどのように連続しているかを把握することが1つの課題になっていたが、泥岩中の薄い砂層を識別することができることがわかり、したがって、エアラスシステムが、このような調査にも有効であることが判った。

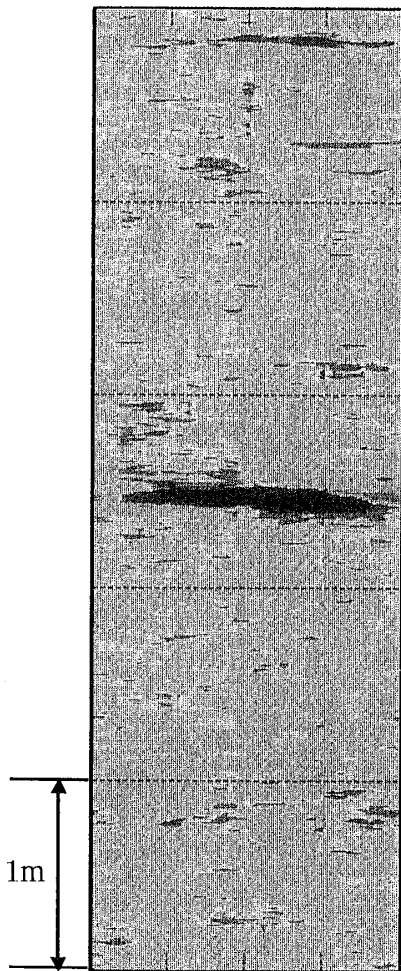
5・3 評価結果のまとめ

以上の結果を要約すると、各装置の特長は、表-2に示すとおりである。また、エアラスシステムの特徴は、

表一2 比較実験に使用した装置の特性

Table 2 Summary of tool characteristics used in the evaluation tests

項目	ボアホールカメラ	ボアホールテレビュア	エアラスプローブ
深度分解能	0.25~2 mm	2~5 mm程度	5~10 mm程度
周分解能	1° 以下 (1周 360点)	2.8° (1周 128点)	11.3° (1周 32点)
適用孔径	φ66~φ180 mm	φ67~φ150 mm	φ66~φ90 mm
適用孔内水	清水 (要透明)	不透明でも可	不透明でも可
適用深度	300 m	1500 m	300 m
最大検層速度	0.8m/min. (深度分解能 2mm)	標準で 3m/min.	標準で 5~6m/min.



図一12 エリラスシステムによる泥岩中の砂層の画像
Fig. 12 Unfolded section of mudstone obtained
by the Elias system

下記のようにまとめることができる。

- ① ボアホールカメラでは検出しにくい閉じた亀裂の検出が可能である。
- ② 比抵抗のコントラストが比較的薄い岩石脈の検

出が可能である。

③ 泥水中での測定が可能である。

④ 電気検層を実施すると同じように、簡便で速やかに実施できる。

これらの結論の中で、エアラスシステム泥水中で測定が可能なのは、土木分野において他の装置に比べて最も有利な点である。

6 あとがき

孔壁に流れ込む電流強度を測定して画像化するシステムを開発した。このシステムは、土木分野の調査に必要な精度を保ちながら簡便に利用できるものを目標に開発したが、評価試験を行った結果、初期の目標を達成できたと考えている。今後、この手法を実際に多くの現場で適用してデータを蓄積しながら、さらに制度の改善および適用範囲の拡大を計っていきたい。また、評価を行うにあたっては、ボアホールカメラやボアホールテレビュアとの比較を行っているが、それぞれが異なる特徴を有しており、目的に応じて活用すれば、より有効であることを改めて認識した。今後は、孔内を画像化する技術を総合的にとらえ、より有効に活用する方法を見出すことが重要であると考えている。

謝 辞

本研究においては、B. R. G. M. の Andre Straub 博士 (現 Erlangen-Nuremberg 大学) には、電極の数値計算をして頂いた。また、討議に加わって戴き、貴重な御意見も頂いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 佐野 康, 大橋武一郎, 荘司泰敬, Straub,A.(1993) : 孔内イメージングツールの開発 物理探査学会第88回学術講演会論文集, pp.109-113.
- 佐野 康, 大橋武一郎 (1994) : 開発した孔内可視化装置の実測データに基づく評価 物理探査学会第91回学術講演会論文集, pp.10-14.
- 荘司泰敬, 大橋武一郎 (1994) : 2つの角速度センサを用いた孔曲り計測装置 応用地質年報 第16号, pp.83-92.
- Straub, A., Krückel, U., and Gros,Y.(1991): Borehole electrical imaging and structural analysis in granitic environment. *Geophys. J. Int.*106, pp. 635-646.
- Straub, A., Sano,K., Imamura, S. and Ohhashi, T. (1995): Development of a Borehole Imaging System, the Elias probe. *The First Annual Well Logging Symposium of Japan.*
- 田中和宏 (1993) : 小特集 最新の調査技術 ボアホールテレビジョン (BTV) 地質と調査 第1号, pp.37-45.

