

# 電気探査法による水中作業ロボット用センサに関する研究

正員 木村 元\*  
正員 梶原 宏之\*

学生員 草場 卓哉\*\*

A Study of an Underwater Sensor for Working Robots  
Using an Electrical Geophysical Exploration Method

by Hajime Kimura, Member  
Hiroyuki Kajiwara, Member

Takuya Kusaba, Student Member

**Key Words:** Electrical Method, Underwater Sensor, Electrical Resistivity

## 1. 緒言

極限環境である水中作業の自動化・省力化への切り札の一つとして、水中作業ロボットや水中ビークルへの期待が高まりつつある。これら水中作業ロボットが高度な作業をこなすためには、周囲の状況を正確に把握するセンサが不可欠である。電磁波が使えない水中では、ビデオカメラや音響センサが実用化されているが、原理の異なる別のセンサを併用することにより、従来計測が難しかった情報も得られるようになり、水中ロボットで行える作業の種類や領域を飛躍的に拡大できることが期待できる。本研究では、ある種の魚類が行っていると考えられる電気によるセンシングに着目し、その可能性について検討する。地中探査において実績のある電気探査法の原理を利用したセンサを製作し、水槽中の絶縁体や導体を観測する実験を通じて、電気探査法による水中センサの特徴や限界について考察する。

## 2. 電気探査法

電気探査の一種である比抵抗法は、対象とするフィールドに電流を流して電位応答を測定し、フィールド内の比抵抗（電気の流れにくさ）の分布を求めるものである。連続体の比抵抗を測定するためには、電極の接触抵抗の影響を取り除く技術が必要である。本研究では代表的な電気探査法のひとつであるウェンナー法を用いて、水中での探査を試みる。

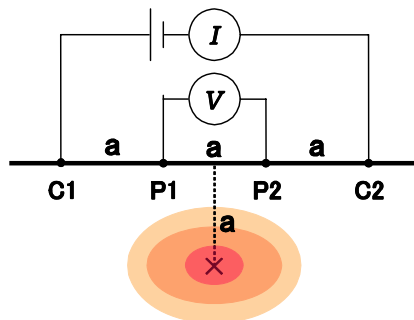


Fig.1 Arrangement of electrodes by the Wenner's method.

ウェンナー法の電極配置は Fig.1 のように電流極の間に電圧計測電極を等間隔  $a$  で配置する。電極が配置されている線（面）より上は空中（絶縁体）である。このとき、測定した電流と電圧がそれぞれ  $I$  と  $V$  で測定対象の媒質が均一ならば、比抵抗  $\rho$  は次の式で与えられる：

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (1)$$

実際に観測される  $\rho$  はある特定の点での比抵抗ではなく、電極周辺に分布する様々な比抵抗のコンボリューションである。よってこれを真の比抵抗と区別して見掛比抵抗  $\rho_a$  と呼ぶ。また計測値をプロットする場合は、電極の中心で深さ  $a$  の位置に配置する。一般に電極間隔を広げると、電極間隔と同程度の深さ位置の比抵抗情報を得られるが、検出可能な物体の解像度は落ちる。

電流と電圧の観測データから物体の配置を正確に推定するためには、膨大な逆解析計算が必要だが、本研究ではセンサの特徴を把握することが目的なので、データの解釈は見掛比抵抗分布を作成するのみに留める。

## 3. 実験

### 3.1 実験装置



Fig.2 Equipment of the experiment.

本実験では、16mm 間隔で  $16 \times 16$  の格子状に配置された多数の電極を自動的に切替えて比抵抗分布を計測する装置を設計・製作した(Fig.2)。実験システムの概要を Fig.3 に示す。本装置は LAN を介して PC と接続されており、遠隔操作によるデータ収集が可能である。装置は PC からの指令に応じて電流計と電圧計および電極を切り替える

\* 九州大学大学院工学研究院

\*\* 九州大学大学院工学部

スイッチャーを統括コントロールして任意の電極における比抵抗を計測し、PCヘータを送る。電流計と電圧計には VOAC7523 と VOAC7520 (岩通計測) を用い、電極の切替部分には電氣的絶縁と高速スイッチング速度を満足するため松下電工の AQV221 PhotoMOS リレーを適用した。電流計には直列に定電流ダイオードと 25V 直流電源が接続されており、測定電流は 10mA が最大である。

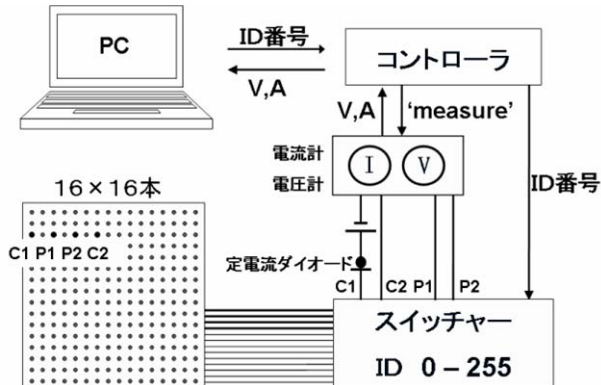


Fig.3 The measurement system.

### 3.2 金属球及びゴムボールの測定条件

水槽に水道水を満たし、Fig.4 に示すように水よりも高比抵抗なゴム球 (直径 32mm) と低比抵抗の金属球 (材質: 鉄, 直径 30mm) を Fig.5 に示すように配置した場合の見掛け比抵抗分布を測定する。Fig.5 の座標 (3,3) の位置から、電極は 24cm 四方の範囲に 16mm 間隔で配置される。測定対象物の球直径は電極間隔の約 2 倍で、電極間隔と同程度の深度に沈んでいる。



Fig.4 The targets of the measurement:  
A rubber ball and a metal ball.

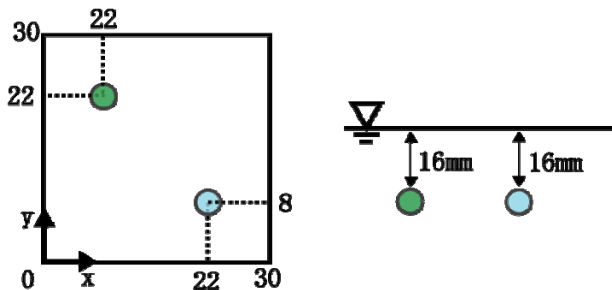


Fig.5 The layout of the rubber ball and the metal ball.

### 3.3 塩化ビニルパイプの測定条件

Fig.6 に示す外形 40 内径 32 長さ 87 (mm) の塩ビパイプを Fig.7 のように軸を水面と平行に配置した場合についての見掛け比抵抗分布を測定する。



Fig.6 The target of the measurement: A plastic pipe.

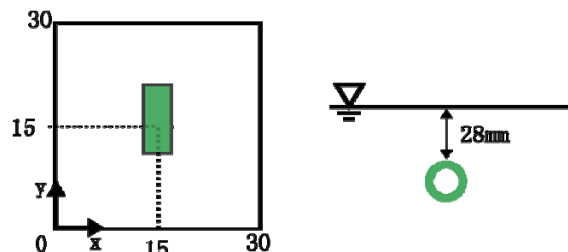


Fig.7 The layout of the plastic pipe.

### 3.4 金属球及びゴムボールの測定結果

Fig.8 および Fig.9 は、測定された比抵抗分布から、物体を配置せずに水だけの場合において測定した比抵抗分布を差し引いた後メディアンフィルタ処理を施した値を各深度別に表示している。Fig.8 は 4 電極を x 方向に並べて計測した値で、Fig.9 は電極を y 方向に並べて計測した値を示す。深い位置の比抵抗を測定する場合、深さに比例した電極間隔を要するが、16×16 の限られた電極を用いるため、深い位置の比抵抗ほど測定される範囲が狭くなる。測定対象が存在する深度付近でアノマリーが大きくなっており、高比抵抗体と低比抵抗体が存在し、それらを区別できることが観測できた。また、アノマリーが分布する大きさもほぼ物体の大きさを反映している。しかし対象とする物体が球であるため、電極の方向による比抵抗分布の大きな違いはなかった。

### 3.5 塩化ビニルパイプの測定結果

Fig.10 および Fig.11 は、測定された比抵抗分布から、物体を配置せずに水だけの場合において測定した比抵抗分布を差し引いた後メディアンフィルタ処理を施した値を各深度別に表示している。Fig.10 は電極を x 方向に並べて計測した値で、Fig.11 は電極を y 方向に並べて計測した値を示す。Fig.10 のようにパイプの軸方向と垂直な方向に電極を並べて計測すると単峰状の高比抵抗のアノマリーが観測されるが、Fig.11 のようにパイプの軸方向と平行な方向に電極を並べて計測するとパイプの中空部分で電気が流れるためラクダの背のような特異な高比抵抗のアノマリーが観測された。

## 3. 考察

- 本稿では紙面の都合上示していないが、メディアンフィルタを使わない場合はノイズが大きく、物体の位置を特定することは難しい。
- 探査できる物体の大きさは、電極間隔と同等以上でなければならない。探査深度が深くなると、検出可能な物体の解像度は低下する。

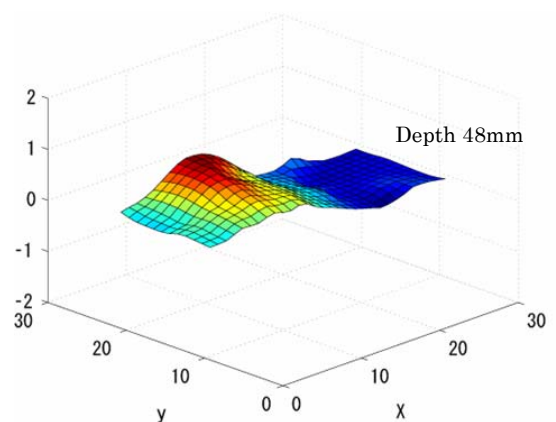
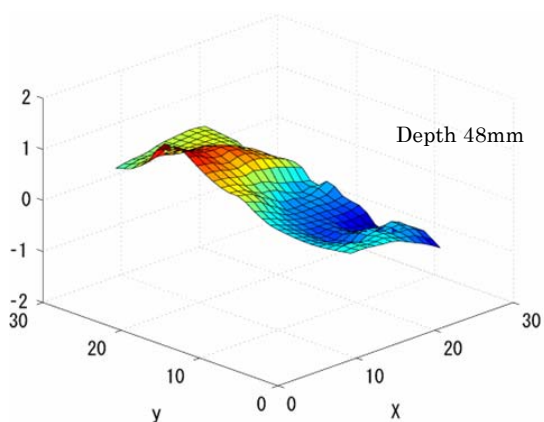
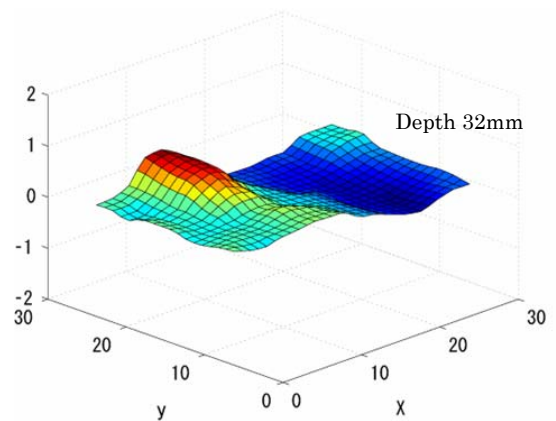
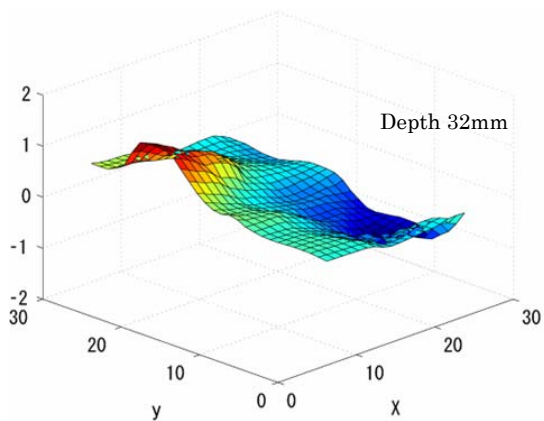
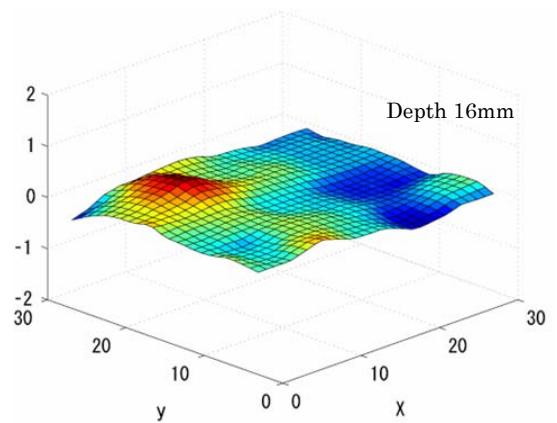
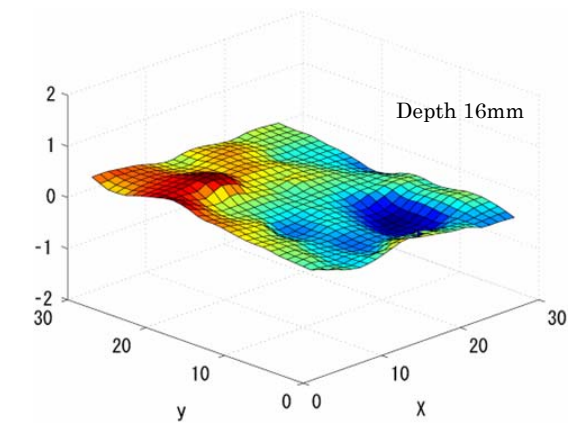


Fig.8 Anomaly of Electrical Resistivity survey with Wenner array in X-direction over rubber and metal balls.

Fig.9 Anomaly of Electrical Resistivity survey with Wenner array in Y-direction over rubber and metal balls.

- 見掛け比抵抗のアノマリー分布より、おおよその物体の位置・形状・良導体/絶縁体など材質に関する情報を得ることができる。
- 本稿では紙面の都合上省略したが、厚みが薄い板状の物体や細い棒状の物体は検出が難しい。特に、電極方向に対して電流を遮るように絶縁体の薄板を配置した場合においても、あまり際立ったアノマリーは観測されなかった。比抵抗のアノマリー検出には、物体の体積が必要だと考えられる。
- 本実験では単に測定された見掛け比抵抗のアノマリーをプロットしただけであり、このままでは位置検出精度は期待できない。見掛け比抵抗分布に逆解析をかけ、高い精度で位置推定を行う必要がある。

#### 4. 結論

本稿で示した Wenner 法による電気探査では、探査可能深度が浅く、必ずしも水中センサとして適しているとは言えないが、原理が単純な割に物体の材質や形状に関する情報を得られるなど、近接センサとして興味深い特徴を有する。他のセンサと組み合わせることにより、水中で行える作業の種類や領域の拡大が期待できる。

#### 参考文献

- 1) Gregory N.tskas and Oanagiotis Tsourlos : Transformation of the resistivity anomalies from archaeological sites by inversion filtering, geophysics vol62, No1,1997
- 2) 物理探査ハンドブック, 物理探査学会, 1998

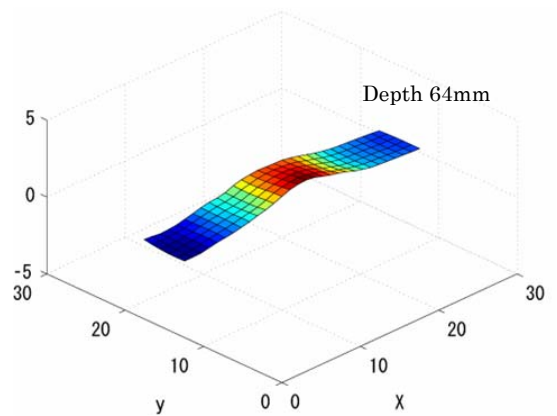
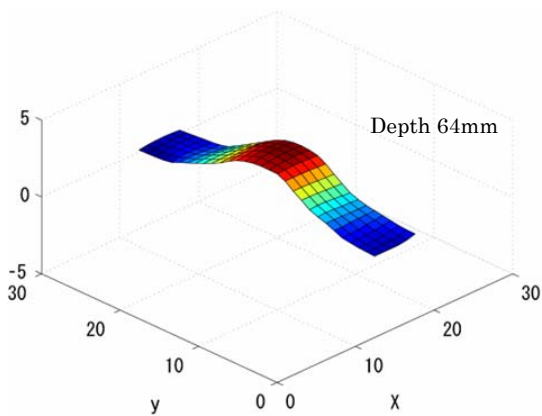
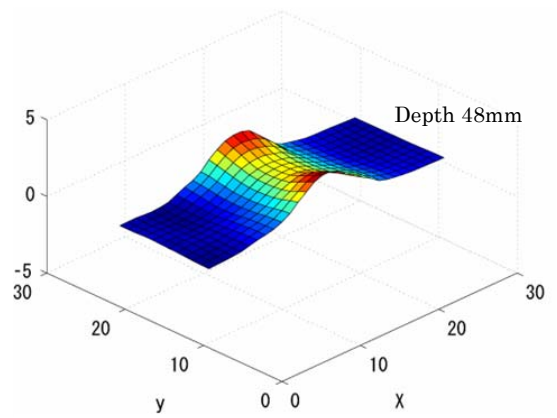
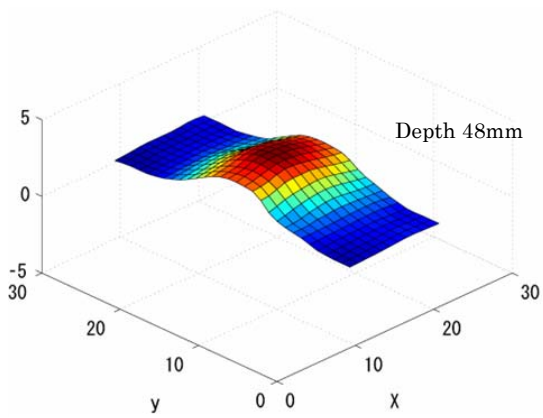
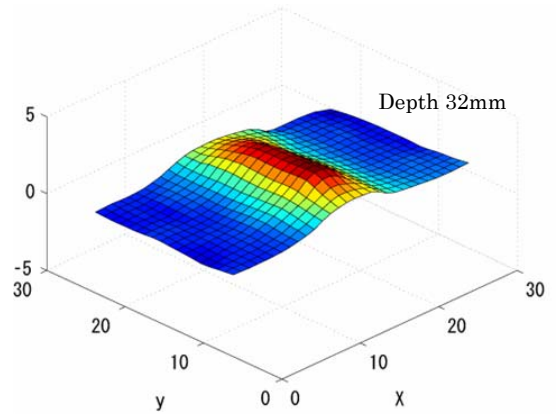
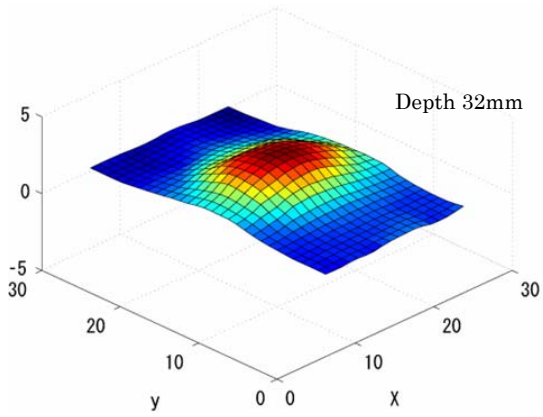
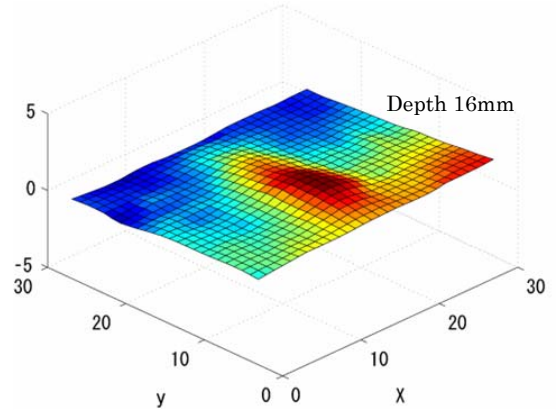
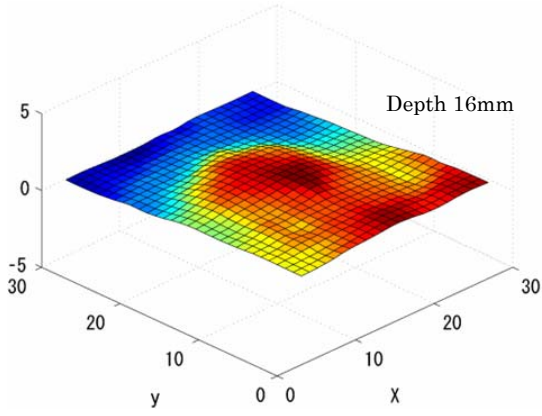


Fig.10 Anomaly of Electrical Resistivity survey with Wenner array in X-direction over the plastic pipe.

Fig.11 Anomaly of Electrical Resistivity survey with Wenner array in Y-direction over the plastic pipe.