

# 小孔径対応型地下水流向流速計

株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング ○山口 寛央, 栗本 修史, 中道 翔太郎

## 1. はじめに

当社が開発した地下水流向流速計 (LD-60 型) は 30 年ほど前から実用されてきているが、近年の研究開発で装置の小型軽量化、適用条件の拡大し、小孔径対応型地下水流向流速計 (LD-40 型) を実用化している。

本発表は、これら機器改良の成果について発表するものである。

## 2. 測定機の概要

### (1) 測定原理

本測定器はトレーサー材として環境負荷の小さい精製水を使用し、地下水との電気比抵抗の差から流向・流速を計測する電位測定法を用いた独自技術である。

表-1 流向流速測定原理の比較<sup>1)</sup>

| 測定項目         | 粒子追跡型                                    | 画像計測法                                    | 熱流式による温度計測法                                  | 電位測定法                                    |                                          | 加殻型による温度測定法                              |
|--------------|------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|              |                                          |                                          |                                              | LD-60型                                   | 新型40mm                                   |                                          |
| 観測孔          | 裸孔、軽測井戸                                  | 裸孔、軽測井戸                                  | 軽測井戸                                         | 裸孔                                       | 軽測井戸                                     | 軽測井戸                                     |
| 仕上り径         | VP100                                    | 内径75mm                                   | φ50-100mm                                    | VP75                                     | VP50, VP65, VP75                         | φ50-100mm                                |
| トレーサー材       | 人工微粒子                                    | 専用固体トレーサー                                | 温度                                           | 精製水                                      |                                          | 温度                                       |
| 測定対象         | 土砂、岩盤                                    | 土砂、岩盤                                    | 土砂                                           | 土砂、岩盤                                    | 土砂                                       | 土砂                                       |
| 流速測定範囲 (m/s) | $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$ | $1.7 \times 10^{-4} \sim 1.7 \times 10^{-5}$ | $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-7}$ | $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-5}$ | $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-5}$ |
| 測定誤差         | 流速                                       | ±5%以内                                    | ±2%以内                                        | ±10%以内                                   | ±5%以内                                    | ±5%以内                                    |
|              | 流向                                       | ±12.5°以内<br>(写真で解像)                      | ±10%以内                                       | ±10%以内                                   | ±7.5°以内                                  | ±22.5°以内                                 |

測定器はセンサー内に図-1の左図に示すように、円周上の12本の電極と精製水の投入装置を兼ねる中心電極が配置 (写真-2) されており、右図に示す精製水投入後の各電極間の電位差の変化 (V-t 曲線) と曲線のピーク位置から流向・流速を求める。

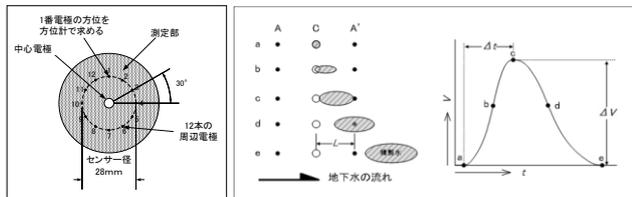


図-1 電極配置と測定原理図

### (2) 測定器の改良

#### ① 小孔径への対応

VP75⇒VP50 観測孔での測定を可能とした。

#### ② 軽量化

アルミ中空ロッドの採用、孔内上下流遮水パッカーをスポンジに変更、ケーブル類の統合、装置全体の軽量化により、深度 30m (地下水位 15m) の測定でも全重量が 6kg 程度とし、1名作業が可能な重量となった。

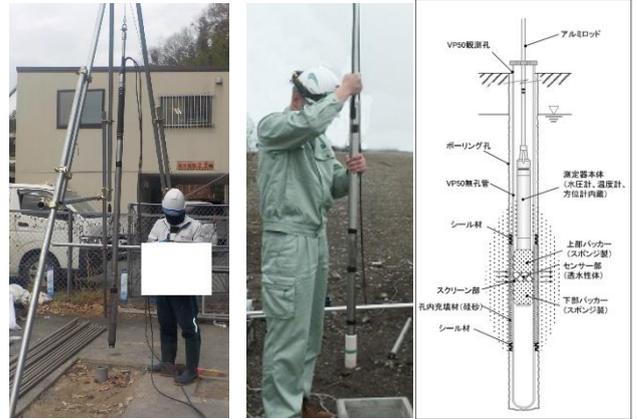


写真-1 左:従来型 右:新型及び装置全体図

#### ③ ユーザビリティの向上

従来型測定器は組立・測定に慣れとノウハウが必要であり、誰でもすぐに使用することが難しい面があった。

新型測定器ではケーブル類や地上計測器の統合により、測定器組立を簡略化し、測定時に最も重要であるセンサー周辺の人工透水体の充填をガラスビーズ+5号珪砂の充填⇒完全連泡体スポンジへ変更し、個人差を解消した。

これらの改良により、マニュアルに沿って計測を行えば誰でも成果が得られるものとなった。



写真-2 測定器写真

### 3. 適用範囲の拡大

#### (1) 背景

従来の地下水流向流速計は作成時の実験結果から、観測孔内での測定に必要なストレーナーの開口率を30%程度としていた。当時は丸穴型（開口率3～5%程度）のスクリーンが多く使用され、流向流速測定はできなかったが、近年はスリット型スクリーン（開口率12%前後）が開発・普及してきている。

そこで開口率が測定結果に与える影響を室内土層実験により確認した。

#### (2) スクリーンの選定

検証実験に用いたスクリーンの種類と形状を図-3に示す。

一般的に入手できるVP管に、開口率を12%程度に設定したスリット加工をしたものを使用した。なお、スクリーンの形状の差異が測定値に及ぼす影響を確認する目的で、横断面のスリット数やスリット形状（同列、重複）やスリットの向きが異なる3種類のスクリーンを用意した。これに加えて、従来型で測定する際に使用している開口率約30%の巻線型スクリーンを加え、計4種類のスクリーンで検証実験を実施した。

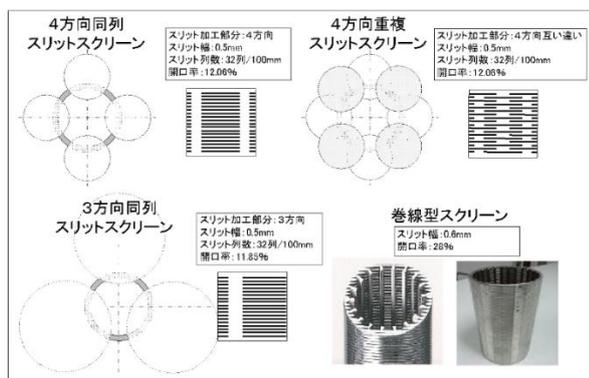


図-2 実験に用いたスクリーンの種類<sup>3)</sup>

#### (3) 室内土槽実験の結果

図-3に実験土槽のダルシー流速と流向流速計の計測流速との関係を示す。

巻線型スクリーンを用いた場合の計測流速は、流速に関わらず土槽のダルシー流速とほぼ一致しているが、スリットスクリーンの時は高流速ほど計測流速が土槽のダルシー流速よりも低く測定される傾向がみられた。

今回の実験で最も水頭差を大きく設定した条件（動水勾配 0.13）では、計測流速が30～50%程度減速するという結果となった。

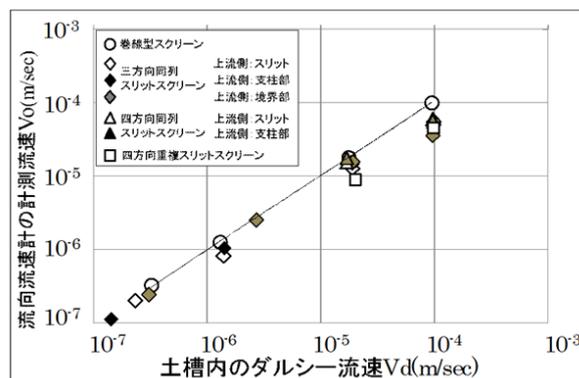


図-3 測定流速と土層のダルシー流速との関係<sup>2)</sup>

#### (4) 計測流速に対する補正係数(β)

その後、VP50 同列スリットスクリーン型を対象に追加実験を行い、図-3と同様の結果が得られ、開口率が約12%のスリットスクリーンでは、流速が早くなると観測孔への水の流れが阻害されていることが判明した。

計測流速を地盤内のダルシー流速へ変換する際は、土槽内のダルシー流速と計測流速の比である補正係数(β)によって補正する。

実験結果から、補正係数βは土槽内ダルシー流速でおよそ $1 \times 10^{-5}$  m/s（測定時のピーク時間で500秒）を境にして遅い流速側では平均0.7、早い流速側では平均0.9となることが判明し、補正係数の標準とした。

### 4. おわりに

今回行った地下水流向流速計の改良により、①VP50観測孔への適用、②ユーザビリティの向上、③測定の標準化、④スリット型スクリーン（開口率12%）への適用が可能となり、高品質でコンパクト、簡便な計測という目的を達成した。

今後はこれまで対応できなかった、さらに幅広いニーズへ対応を行っていく。

#### 《引用・参考文献》

- 1) 地盤調査の方法と解説（2013）：公益社団法人地盤工学会, pp. 632を引用加筆。
- 2) 後藤和幸, 牧野章也, 三浦巧也, 劉永明：小孔径対応型地下水流向流速計の開発(その1)－装置の開発と実証実験－, 平成29年度日本応用地質学会研究発表会論文集, pp. 177～178, 2017
- 3) 三浦巧也, 後藤和幸, 牧野章也, 劉和明：小孔径対応型地下水流向流速計の開発(その2)－観測孔スクリーンの検証実験とスクリーンの製作－, 平成29年度日本応用地質学会研究発表会論文集, pp. 179～180, 2017

## 地下水流動層検層装置の開発と適用事例

株式会社日さく ○井上 結衣  
株式会社ジオファイブ 鎌田 晋哉

### 1. はじめに

大深度地下開発等、各種土木工事に伴う地下水問題や地盤災害は大きな社会問題を引き起こす。この問題を未然に防止するためには、地下水の平面的・垂直的な賦存状況を正確に把握しておくことが重要である。その一助に資する目的で1本のケーブルに多数の電極を取付け、広範囲を一度に測定可能な電気抵抗法による地下水流動層検層装置を開発した。

ここではその構造・原理及び現場での測定事例を紹介する。

### 2. 開発した装置の概要及び構造・原理

#### (1) 装置の概要

本装置は、図-1に示すように1本のケーブルに25cm 毎に任意数の電極を取付け可能な電極プローブとデータロガーから構成される。即ち、電解質溶液に置換された孔内水の電気抵抗の経時変化から地下水流動層を把握するもので、測定中において電極プローブは一定深度に固定されている。測定は、データロガーに内蔵された時計機能により5分毎に測定レンジの切替等を行うことなく全自動で測定し、結果はSDカードにCSV形式で保存する。1電極あたりの測定時間は約1秒であるので100電極付の場合、約100秒で24.75mの範囲を測定する。測定終了後、データロガーは次回測定まで待機(sleep)状態となり、省電力化を図っている。本装置の外観を図-1に示す。



図-1 電極プローブ (左) とデータロガー (右)

#### (2) 構造・原理

少ないケーブル芯数で多数の電極を効率的に切替えるためには、各電極にマイコンを搭載し、ID番号を付与して制御する方法が一般的であるが、本装置ではコストと保守の観点からパルス伝送式を考案した。パルス伝送式とは、データロガーから1個のパルスを送ると1番目(最上位)の電極を測定し、更に1個のパルスを送ると2番目の電極を測定、更に1個のパルスを送ると3番目の電極を測定するもので送信パルス数により電極を順次切替える仕組みでフリップフロップ回路の応用である。したがっ

て、取付け可能な電極数に制限は無い。また、何らかの原因でパルスが伝送されない故障を想定し、逆方向(最下部電極)から測定することも可能な構造である。その概念は図-2のとおりである。

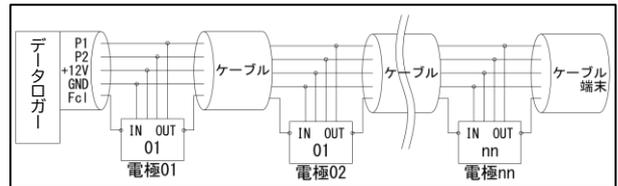


図-2 パルス伝送式電極切替の概念

電気抵抗の測定範囲は、塩分濃度が1%程度から地下水の比抵抗範囲を想定し、0~2,000Ωである。電極には周波数1,000Hzの正弦波を定電圧駆動方式で通電し、電極間の電位(V)と電極に流れる電流(I)を測定し、抵抗( $R=V/I$ )を算出する。電極部の外径はφ28mm、幅5mmで図-3にその外形を示す。また、データQCの視点から測定時のバッテリー電圧と各電極の消費電流を測定し、SDカードに保存している。

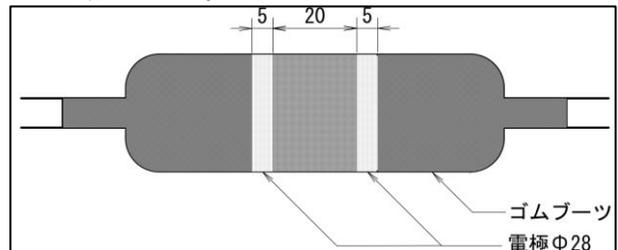


図-3 電極部の外形寸法

#### (3)仕様・性能の要約

本装置の仕様・性能を表-1に要約する。

表-1 仕様・性能

| 項目      | 仕様・性能        | 単位    | 備考       |
|---------|--------------|-------|----------|
| 電極プローブ部 |              |       |          |
| 測定範囲    | 0~2,000      | Ω     | 0~62Ωm   |
| 電極数     | 100          | 個     | 変更可能     |
| 電極部外径   | 28           | mm    |          |
| 測定周波数   | 1,000        | Hz    | 正弦波      |
| ケーブル長   | 110          | m     | 変更可能     |
| データロガー部 |              |       |          |
| 測定間隔    | 0, 5, 10, 15 | 分     | 5分毎に任意回数 |
| 測定時間    | ≒100         | 秒     | 100電極付の時 |
| データ容量   | 3,027        | Byte  | 100電極付の時 |
| 記録媒体    | 32           | GByte | SDHC     |
| 消費電流    | 320          | mA    | 測定時      |
|         | 50           | mA    | 待機時      |
|         | 0.1          | mA    | スリープ時    |
| 内蔵電池    | 12V5Ah       | -     | リチウムポリマー |
| 動作温度    | 0~50         | ℃     |          |

### 3. 適用事例

#### (1) 地下水開発の事例

通常の地下水調査では掘削孔に電気検層を実施し、地層比抵抗を把握し帯水層把握とすることが多い。特に地下水開発調査の場合は、長尺深度となることが多く、さらに地下水の流動速度が速いため、ピックアップ法では測定している間に回復するといったことが多くみられる。

今回は、測定間隔を短くすることで詳細な地下水流動傾向を把握することを目的とした。

##### ① 検層条件

- ・VP50 水位観測孔(オールストレーナ)
- ・地質条件：沖積礫質土層・洪積礫質土層
- ・実施方法：塩水希釈法
- ・測定間隔：5分間隔で180分測定

##### ② 検層結果

従来のピックアップ方式による解釈では沖積層内の帯水層では約30分で概ね回復するような解釈となるが、5分毎に計測することにより地層に合わせて段階的に比抵抗が回復していることが把握できる。さらに洪積層についても同様に地層状態により段階的に比抵抗が回復していることが把握することができた。

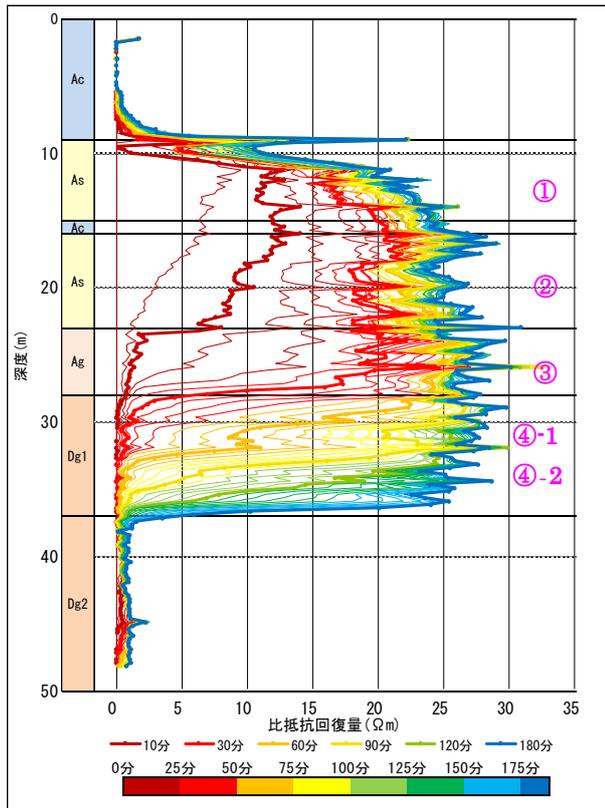


図-4 比抵抗回復量(地下水開発調査)

#### (2) 地すべり調査の事例

##### ① 検層条件

- ・VP50 水位観測孔(オールストレーナ)
- ・地質条件：第三紀層 安山岩質凝灰岩
- ・実施方法：塩水希釈法
- ・測定間隔：5分間隔で745分測定(最大24時間)

##### ② 検層結果

第三紀層地すべりを対象として実施した。第三紀層堆積岩類では、地盤の透水性は良好ではなく3時間程度の回復時間の場合、比抵抗回復量は微量となることが多い。

今回の地すべり地を対象とした結果、比抵抗は、下降流状の回復傾向を示し上位より深部方向へと段階上に回復していることが確認できた。

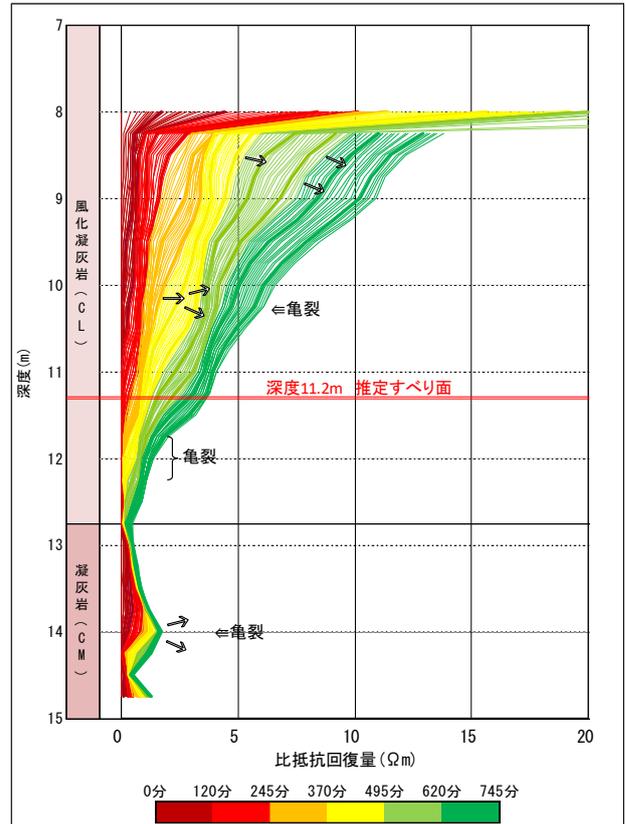


図-5 比抵抗回復量(地すべり調査)

### 4. おわりに

今回の地下水流動層検層装置を利用した地下水検層を実施した結果、本検層装置の利点として以下の事項が挙げられ、より詳細な調査解釈が可能となると考える。

- ① センサーの移動を行う必要がないため、労力軽減や孔内水の攪拌防止につながる
- ② 計測を短くすることができ、長時間の測定が可能である(約24時間)

本発表においては、孔内水を電解質溶液に置換し、電気抵抗の経時的変化から地下水流動層を把握した実例を述べたが、トレーサを用いることなく、例えば、沿岸域において潮汐による地下水流動調査や塩淡境界の経時的調査研究等やトレーサ試験時における検出孔としての適用可能であると考えられる。

## 3次元微動アレイ探査に活用しやすいサイズモグラフの開発と性能の検証

株式会社ジオファイブ    〇鎌田 晋哉, 高橋 亨  
 平塚地質株式会社        平塚 貴大

### 1. はじめに

地質の不均質性を深くまで効率的に把握できる3次元微動探査が注目されている<sup>1)</sup>。著者らは、その普及に資する目的で屈折法探査や表面波探査に多用されている24成分又は48成分型サイズモグラフにアドイン可能な微動探査モジュールを開発し、現場での実証試験を行った。

ここでは開発した装置の概要及び実証試験結果について紹介する。

### 2. サイズモグラフ用微動探査モジュールの概要

開発したサイズモグラフ用微動探査モジュールの概要と主な動作について、以下に述べる。

#### (1) 開発コンセプト

微動探査モジュールの開発コンセプトは以下のとおり。

- ① 汎用のテイクアウトケーブルを用いる
- ② 測定中、LCD上でリアルタイムに波動を観測できる
- ③ 連続1時間の収録が可能である
- ④ 多様性を図るためにフォーマットはSEG-2とする

表-1に微動モジュールを追加したサイズモグラフの主な仕様を、測定中の波動モニタ画面を図-1に示す。

表-1 サイズモグラフ 微動モードの主な仕様

|           | 仕様                        |
|-----------|---------------------------|
| ゲイン       | x16, x64, x256            |
| 周波数特性     | 0.3~5000Hz                |
| AD分解能     | 24bit                     |
| サンプルレート   | 2ms, 4ms                  |
| 記録時間      | 1min, 10min, 30min, 60min |
| 記録媒体      | SDHCカード                   |
| 表示画面      | 10.4インチ、800nits           |
| データフォーマット | BIN (SEG-2)               |
| 寸法・重量     | 390x308x171mm、5.4kg(48CH) |
| その他       | データフォーマット変換・分割ソフト付属       |

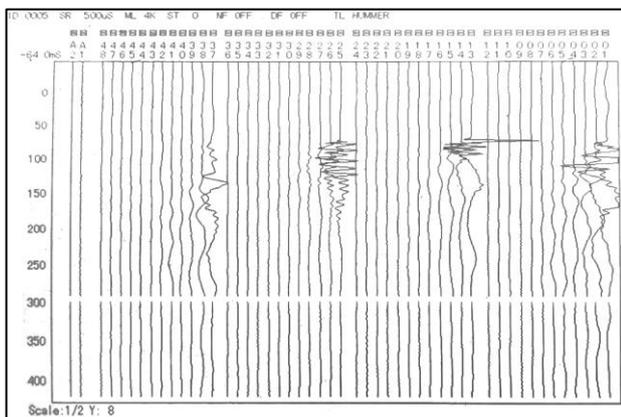


図-1 波動モニタ画面

#### (2) サイズモグラフの微動モード

微動モジュールを追加したサイズモグラフは、これまでの表面波探査等で用いられる“通常モード”と“微動モード”が装置のメニュー内で切り替え可能となっており、各モードに必要なパラメーターの設定が行える。図-2に設定メニュー画面を示す。



図-2 設定メニュー画面

微動モードでは、測定時間1分、10分、30分、60分のいずれかを選択可能になる。サンプリングについては、2msか4msのどちらかを目的に応じて選択できる。

#### (3) 微動モードの動作

“トリガ待ち”にして“ENTER”を押すと、微動計測が開始され、画面右下に経過時間が表示される。計測時間については、設定時間に満たなくてもキャンセルした時点までのデータを保存することが可能になっている。微動モードでは、計測データをバイナリ形式で直接SDカードに保存する方式を採用している。このバイナリデータをSEG-2フォーマットに変換する専用変換ソフトが付属しているので、既存の解析ソフトでの取り扱いも容易である。分割単位を1分、2分、5分、10分、20分、30分、60分の中から選択して、変換対象のバイナリファイルを選択するだけの操作で、ファイルの分割と変換が行われる。この分割ソフトの操作画面を図-3に示す。

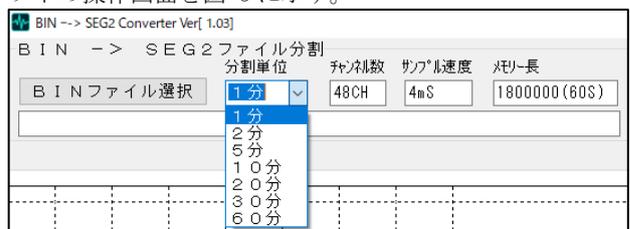


図-3 変換ソフトの操作画面

## 3. 3次元微動探査実験

### (1) 実験サイトの地盤条件

実験サイトの地質は第四紀更新統(大宮層)と完新統(腐食質土)を埋土・盛土が覆う軟弱地盤である。

図-4 の近隣ボーリング柱状図では、土質や N 値の水平連続性が低く、凹凸変化を示す不均質な地盤である。

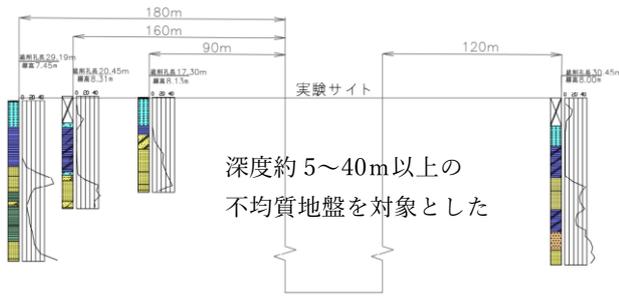


図-4 近隣ボーリング柱状図

(2) 測定方法

写真-1 に装置及び測定に使用した機材一式の写真を示す。



写真-1 サイスマググラフと使用機材の写真

図-6 に示す X24m×Y66m の範囲について、端から 12 成分のテイクアウトケーブルで受振点間隔 6m、測線間隔 4m の 4 測線を 1 展開として微動を約 20 分記録した。これを計 4 展開繰り返して終了とした。受振器は 2Hz の速度型を使用した。4 展開による全測定時間は約 2 時間であった。

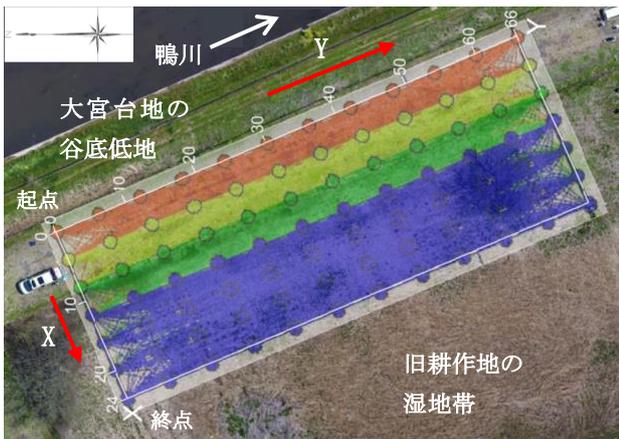


図-6 測定範囲図とジオメトリ

(3) 性能実証(解析)結果

解析は CMP-SPAC 法<sup>2)</sup>により、最小 CMP ビンサイズ X4m・Y6m 間隔で分散曲線を求めた。図-7 に示す分散曲線からわかるとおり、約 1.5~10Hz の周波数範囲で表面波を取得できた。この最大波長は約 140m であり、3 分の 1 波長則から、探査深度は約 45m となる。解析結果の S 波速度 3 次元モデルは、UAV 空撮画像より作成した地表サーフェスモデルと重ねて、図-8 に示す。

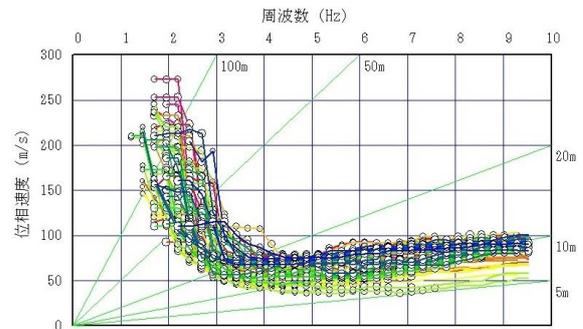


図-7 分散曲線

(4) S 波速度構造の応用地質学的解釈

$V_s$  約 100~250m/s の速度構造が、既存ボーリング柱状図 (N 値) と調和的に得られた。

$V_s$ 120m/s 以下の低速度層は、深度約 8m までの埋・盛土層 (N 値) と沖積層 (N 値) に、 $V_s$ 120m/s 以上の速度漸移帯が洪積層 (大宮層) の砂・粘土互層 (N 値) に対比できる。この速度漸移帯が上流側へ深まる構造は、既存ボーリング柱状図と整合し、表層地形からは想定し難い埋没谷や地質の不均質性を反映したものと解釈される。

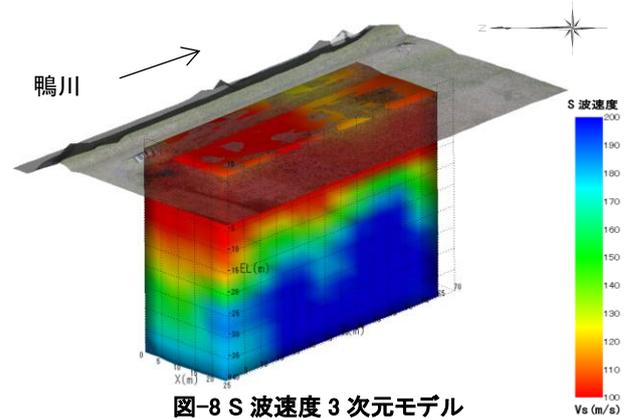


図-8 S 波速度 3 次元モデル

4. まとめ

微動探査への適用を目的に、広帯域・長時間測定を可能としたサイスマググラフを開発した。本装置を使用して実地盤にて 3 次元微動探査を実施し、3 次元 S 波速度構造を効率的に取得できることを確認した。今後は、さらに機器の特長を生かした探査方法で、地質調査の精度向上と効率化を目指したい。

《引用・参考文献》

- 1) 林 宏一, 小西 千里, Kent Falkenstein, Mitchell craig, Leong Toh Wong, 鈴木 晴彦, 劉 英, 田原 道崇 (2018) : 「二次元および三次元常時微動トモグラフィの開発と適用例」, 物理探査学会 第 138 回(平成 30 年度春季) 学術講演会講演論文集, 講演番号 21.
- 2) Koichi Hayashi, Mitchell craig, Takaho Kita, Tomio Inazaki (2015) : 「CMP spatial autocorrelation analysis of multichannel passive surface-wave data」, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015, 2200-2204.

# 大孔径対応型サスペンション検層器の開発

応用地質株式会社 ○東 勇伸、平出 亜

## 1. はじめに

着床式洋上風力事業における風力基礎の地盤調査では、耐震設計に必要な工学的基盤（せん断波速度  $V_s \geq 400\text{m/s}$  の地層）を調査することが重要となっている。洋上調査における  $V_s$  の測定は、サスペンション PS 検層（以下に susPS 検層と称す）に因っている。現在の洋上調査で使用されている susPS 検層器は陸上の地盤調査に多用される  $\phi 86\text{mm}$  程度のスリムホールを対象として開発されたものであり、大孔径の検層では良好な記録が得られないことが指摘されていた。一方で海底地盤調査の専用船を使用した海底地盤調査では、削孔径が  $\phi 200\text{mm}$  以上と大孔径となってしまう、適用孔径を超えた大孔径では、せん断速度を算出する波形が小さく読み取りが困難なケースが多くみられた。このため、susPS 検層器の起振エネルギーを大きくし、大孔径な調査孔にも適用可能な susPS 検層器を開発した。この改良器を使用して大孔径の孔で測定した結果を紹介する。

## 2. サスペンションPS検層装置の改良

調査船で実施した大孔径（削孔径250mm 程度、詳細不明）の孔内で従来の susPS 検層を実施した波形例を図- 1 に示す。大孔径の場合、P 波の振幅に対して S 波の振幅が相対的に小さく観測されるため、S 波到来前の高周波の P 波が目立つ記録になっていると想定される。また調査船は4000 t クラスの船が多く、定点保持のためのエンジン振動の影響も重なり、同図から S 波の初動を正しく読み取ることができない事例が多い。

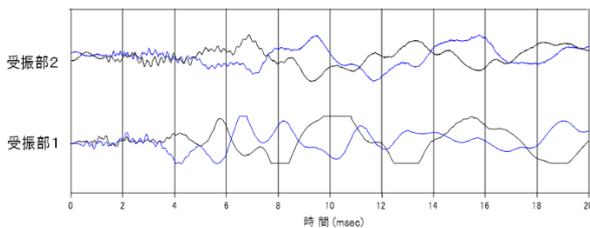


図- 1 大孔径で susPS を実施したせん断波の波形例<sup>1)</sup>

susPS 検層の理論を構築した狐崎(1975)の論文<sup>2)</sup>には、孔内水を非圧縮性とみなせる周波数範囲であれば地盤の S 波速度が測定可能だとしている。その周波数範囲は、「孔内の水の中に発生する音波の波長を  $\lambda$  とすると、実際上の目安としては孔の直径  $d$  に対して、 $\lambda > 10d$  であれば、水を非圧縮性とみなしてよい」としている。大孔径で行った susPS 検層の波形例（図- 1）の周波数は600Hz程度で、「 $\lambda = c / f$ （ $c$ は水の音速）」で、「 $f < 10^{-1} c / d$ 」の関係式に当てはめると、 $600 < 0.1 \times 1500 \div d$  から、 $d < 250\text{mm}$  となる。したがってこの程度の孔径の孔であ

れば susPS 検層の理論が適用できることになる。

一方、孔径が大きくなると、観測される波動の振幅が小さくなる現象（図- 2）は、細矢他（2010）<sup>3)</sup>にも「発信源と孔壁の間が大きくなることにより減衰が大きくなる影響と考えられる」と記載されている。

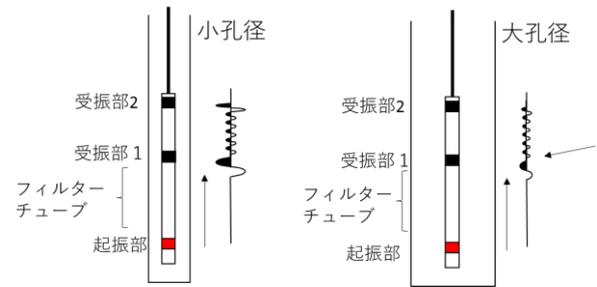


図- 2 波動の伝播図

susPS 検層器の改良は、従来の susPS 検層装置をベースにして試作した（表- 1）。改良に当たっては、振源の打撃力をパワーアップし、また筐体の径を大きくすることで発信波形の低周波数化を目指した。具体的には起振するためのコイル数を1対から2対に増やし、コイルにかける電圧を300V から420V にパワーアップした。写真- 1に改良器の写真を示す。外形としては振源部分の寸法が  $\phi 52\text{mm}$  から  $\phi 71\text{mm}$  になっている。

表- 1 振源の仕様比較表（従来器と改良器の差分仕様）

| 仕様     |               | 標準機                  | 改良機                  |
|--------|---------------|----------------------|----------------------|
| 振源     | 全体寸法mm        | $\Phi 52 \times 230$ | $\Phi 71 \times 230$ |
|        | 振動版寸法mm       | $\Phi 52 \times 110$ | $\Phi 71 \times 110$ |
| 振源駆動回路 | 電圧V           | 300                  | 420                  |
|        | エネルギーJ        | 14                   | 60                   |
| 打撃性能   | 放射パワー比（理論値）※1 | 1                    | 6.4                  |

※1 放射パワー比  $W$  は、応用地質年報「Development of Suspension P=S Logging System<sup>4)</sup>」の(6)式で評価した。

$$W = \frac{S^2 V^2 d^2}{12 \pi c^3} \cdot \rho \omega^4 \quad \dots (6) \text{式}$$

Where :

S : area of vibration plate

V : vibration velocity

$\omega$  : angular frequency

C : propagation velocity

$\rho$  : density of medium through which waves propagate.

The distance between the two vibration plants (d)



写真-1 大口径 susPS 検層器

### 3. 陸上ボーリングでの適用確認試験

応用地質（株）のつくば研究所の敷地に掘削ビット径φ86mmのボーリング孔を掘削し、従来器でsusPS検層を実施した。次に同孔をφ270mmのビットで拡幅した後、従来器と改良器によるsusPS検層を行った。なお削孔後に孔径検層を実施した結果、孔径の実測値はビット径の1.2~1.5倍であった。

図-3にφ86mmのボーリング孔で実施した従来器の結果およびφ270mmで実施した従来器と改良器の波形記録の例を示した。赤口で囲った部分がS波の初動であり、従来器ではφ86mmのボーリング孔と比較してφ270mmのボーリング孔では極めて振幅が小さく、ノイズの大きい環境では初動がマスクされてしまう可能性が高いことが示された。一方、改良器では従来器に比べ初動振幅が大きく、初動が読みやすい記録であることが確認できた。ただし、周波数については従来器と改良器の差はほとんど見られなかった。

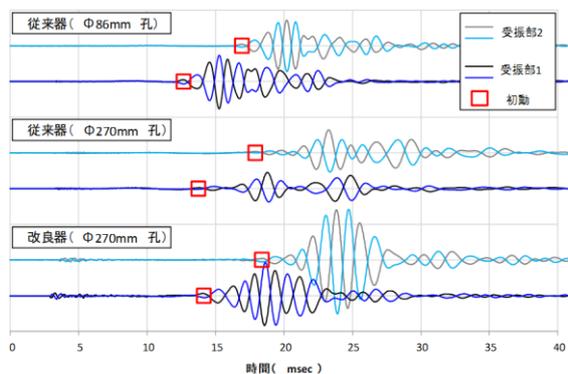


図-3 φ270mm孔の同一深度における従来器と改良器の測定波形例<sup>1)</sup>

図-4は従来器と改良器のS波初動振幅を深度ごとにプロットして比較したものである。深度により差があるものの初動振幅は改良器の方が大きく、装置改良の効果が表れていることが分かる。また、図-5にφ86mm孔で従来器を用いて得られた速度値とφ270mm孔で改良器を用いて得られた速度値をプロットした。両器によるP波・S波と速度値の違いは3%以下であり、大口径のボーリング孔であっても改良器を用いることで正しく地盤の速度が得られることが確認された。

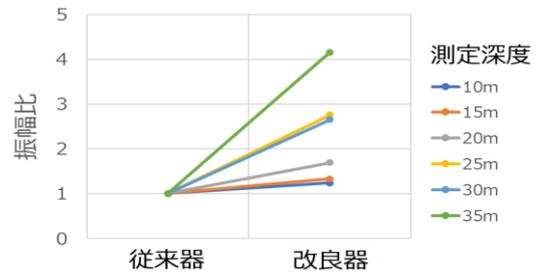


図-4 従来器と改良器のS波初動振幅比の比較<sup>1)</sup>

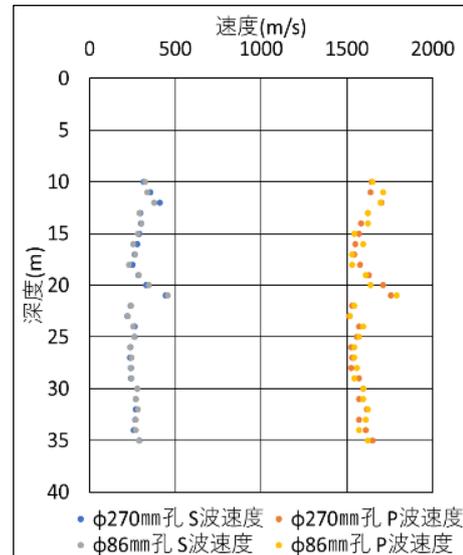


図-5 φ86mm孔の従来器とφ270mm孔の改良器の比較

### 4. おわりに

陸上での試験を経て、海域においても専用調査船上で大口径のボーリング孔におけるsusPS検層を行った。この結果、船上でも良好なS波速度波形を得ることができた。現在では様々な海域にて大口径susPS検層器を用いた調査が行われており、この3年間で30孔以上の調査実績を残している。一方でこれらの経験から、起振エネルギーを大きくした改良器で測定しても、およそGL-30m以浅では、波形が船体の定点保持のためのエンジン振動の影響を受けてしまうことが分かった。今後は、調査経験を元に検層器の更なる性能向上を目指したい。

### 《引用・参考文献》

- 1) 平出亜、松原由和、山本正人、小田佑介、坂田和宏：洋上風力発電事業における大口径ポアホールでのPS検層の実施事例、第58回地盤工学研究発表会
- 2) 狐崎長琅(1975)：漂遊型受震方式によるS波の検層  
(1) 原理と基礎的考察、物理探鉱、第28巻第1号、pp13~21
- 3) 細矢卓志、木村克己、竹村貴人(2010)：サスペンション式PS検層速度の孔径による影響の検討、全地連「技術フォーラム2010」那覇
- 4) Tanaka, K.; K. Ogura, Development of Suspension P=S Logging System. OYO Technical Report (1986), No. 8, 59-72.

# セシウム磁力計センサを用いた海上磁気探査の取り組み

日本物理探査株式会社 ○鈴木 匠, 佐々木 正徳, 愛甲 崇信, 吉川 秀人, 河野 秀紀, 天野 量稀

## 1. はじめに

当社は、危険物などの埋没鉄類を対象とした磁気探査業務に従事しており、両コイル型磁気傾度計、一軸差動型フラックスゲート磁力計など、磁気の傾度や差分を測定するセンサを使用してきた。全磁力計は動揺ノイズの小さいことが知られており、探査の信頼性向上を目的にその利用に取り組んでいる。本発表では、海上磁気探査においてセンサ枠に両コイル型磁気傾度計（以下、傾度計）とセシウム磁力計（以下、全磁力計）のセンサを付けて実験を実施したデータ例について紹介する。

## 2. 実験場所

実験は福岡県北九州市門司区田野浦海岸前の海域（関門航路近傍）で実施した。

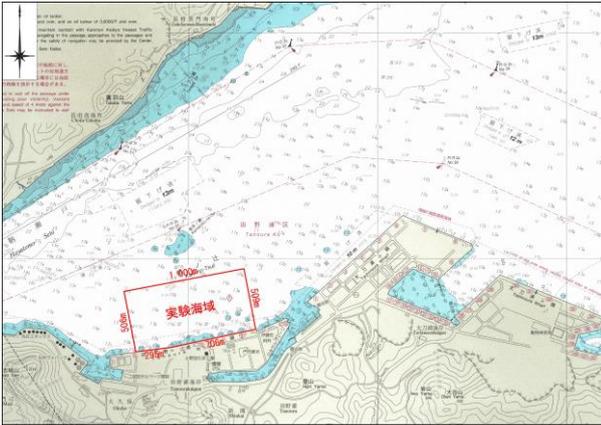


図-1 実験場所<sup>1)</sup>

## 3. 測定方法

### (1) 測定方式

測定は台船曳航方式により、探査台船から吊り下げたセンサ枠を曳航して測定した。センサ枠の高度（以下、枠高度）は、音響測深機によりセンサ枠と海底面が一定となるよう、ウインチ操作によって制御した。

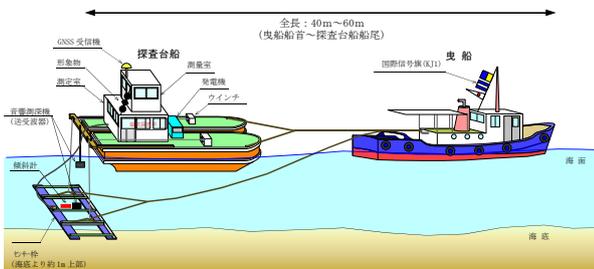


図-2 探査方法概念図

### (2) 測定機器

測定は、「船位、磁気傾度、全磁力、枠高度、センサ枠水深（以下、枠深度）、センサ枠傾斜角度」の6種類のデータを取得した。測定機器を表1に、センサ枠の概念図を図-3に示す。

表-1 測定機器一覧表

| 測定機器                  | 役割・測定                |
|-----------------------|----------------------|
| QZSS (CLAS)           | 誘導, 航跡測定             |
| 両コイル型磁気傾度計×5本         | 磁気傾度測定               |
| セシウム磁力計×4本            | 全磁力測定                |
| 水圧計                   | 枠深度測定                |
| 音響測深機 (送受波器: 台船1, 枠1) | センサ枠, 海底の監視<br>枠高度測定 |
| 傾斜計                   | センサ枠の姿勢監視<br>傾斜角度測定  |

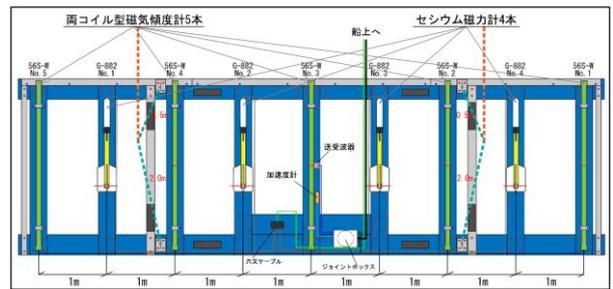


図-3 センサ枠概念図

### (3) 測線

測定は、枠高度を1m程度にして測線長=500mを44測線、このほかセンサ枠の水深を3~11mに階段状に変えて測線長=700mを2測線実施した。

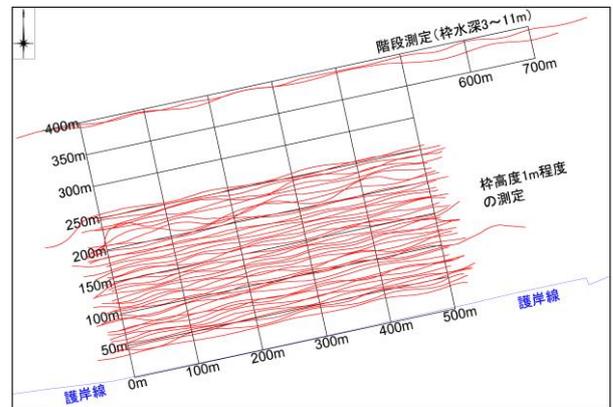


図-4 航跡図

## 4. データ例

### (1) 護岸近くの磁気データ例

護岸から32~40m離れた磁気データ例を図-5、図-6に示す。赤線の波形が全磁力データ、青線の波形が傾度計データである。図-5の全磁力データは、CH毎に中央値(48200nT程度)を差し引いている。全磁力データには護岸の長波長の異常が検知されている。図-6の全磁力データは、ハイパスフィルタを掛けて長波長の異常を除いたデータである。短波長の異常が傾度計のデータと整合する位置に検知されており、適当なハイパスフィルタを掛けることで、短波長の埋没鉄類の異常を明瞭に示すことができる。

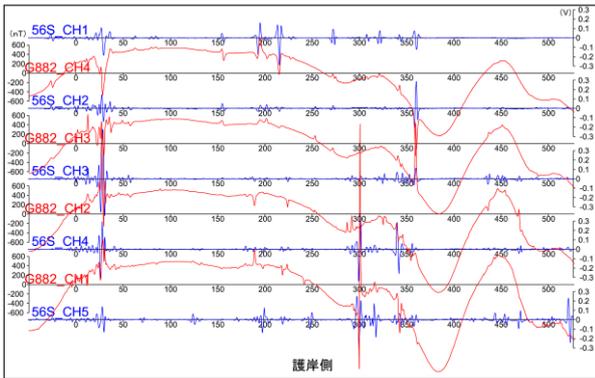


図-5 傾度計と全磁力計（中央値引き算）のデータ比較

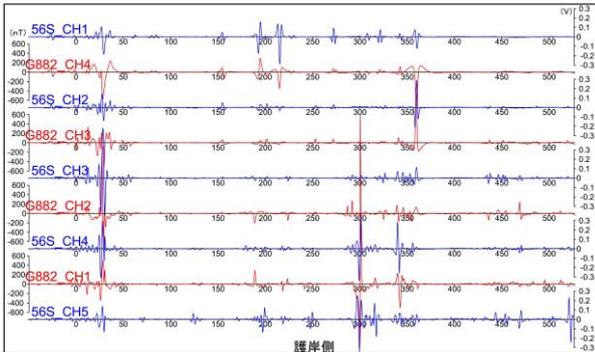


図-6 傾度計と全磁力計（フィルタ）のデータ比較

(2)全磁力コンターマップ

図-7, 図-8に全磁力コンターマップを示す。図-7は、護岸から100m 付近まで護岸の磁気異常の影響が強く反映された図になっているが、図-8ではハイパスフィルタを掛けることで埋没鉄類による個別の異常を確認しやすい図になっている。

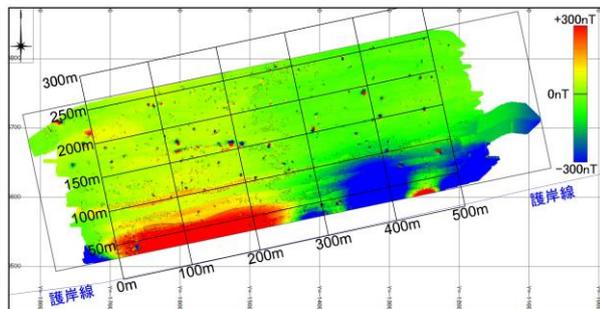


図-7 全磁力コンターマップ（中央値引き算）

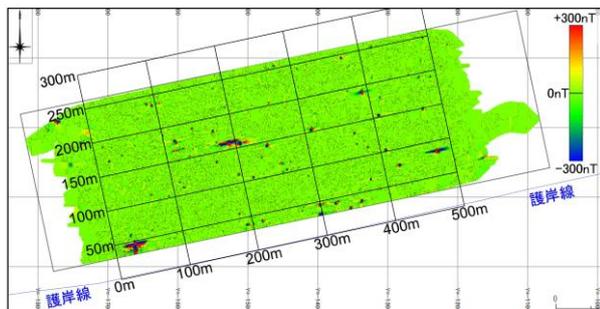


図-8 全磁力コンターマップ（フィルタ）

(3)階段測定データ例

センサ枠の傾斜角概念図を図-9に、階段測定データ例を図-10に示す（全磁力データはハイパスフィルタを掛けたデータ）。傾斜角のピッチは、正のときに枠が前上

がりに、負のときに前下がりに傾くことを意味する。

図-10のデータから、センサ枠は上昇時に前上がり、下降時に前下がりに10°程度動揺し、同時に磁気ノイズが生じていることが分かる。ノイズは傾度計で0.01~0.015V程度、全磁力計で3~5nT程度であった。傾度計の0.05Vが全磁力計の100nTに対応すると仮定すれば、全磁力計の動揺ノイズは傾度計の1/5程度と見ることができ、全磁力計は傾度計よりも動揺ノイズの影響を受けにくい結果となった。

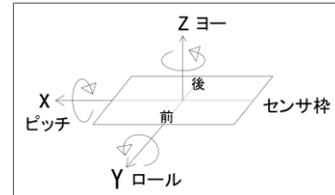
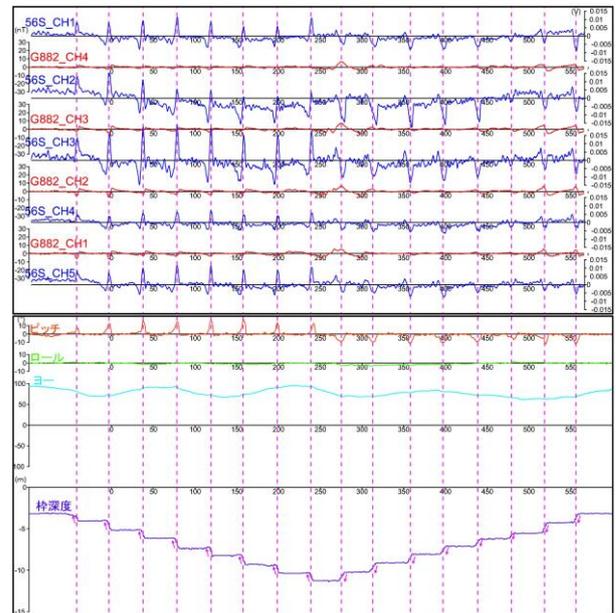


図-9 センサ枠の傾斜角概念図



上段：磁気データ，下段：センサ枠傾斜角，枠深度

図-10 階段測定データ例

5. まとめ

①全磁力データには、長波長の異常も含まれるため、埋没鉄類探査では、これを取り除く必要がある。本実験データでは、適当なハイパスフィルタを掛けることで、埋没鉄類の異常を明瞭にすることができた。

②枠の揺れは磁気データにノイズを生じる原因の1つと考えられる。枠の昇降に伴って発生する磁気ノイズの比較から、全磁力計のノイズは傾度計の1/5程度のため、データの品質向上が見込める。

③異なる種類の磁気データ（磁気傾度、全磁力）および枠高度・枠深度、枠姿勢データを同時に測定し、相互に比較することは磁気データのノイズとシグナルの判定に有効であり、探査の信頼性向上が期待できる。

《引用・参考文献》

- 1) 海上保安庁刊行海図 W1262 (を複製・加筆)。

# 新型フォトレーザーシステムの開発と 大谷地域における展示室の開設について

川崎地質株式会社 ○大村 猛, 遠矢 光, 槌谷 勝之, 藤原 盛光

## 1. はじめに

フォトレーザーシステムは、石材資源の採掘跡や特殊地下壕等の地下空洞の内部状況を把握するために開発・改良が行われた<sup>1)2)</sup>。従前の機器製作から10年以上経過し、使用部品の供給対応やメンテナンス性の向上、さらに撮影技術の進歩を取り入れた新しいシステム（以下、本システムとよぶ）を製作し、空洞調査への適用を開始した。本稿では、本システムの概要、特徴について述べるとともに、地下空洞調査機器等開発の母体となった栃木県宇都宮市大谷地域への社会的貢献として開設した展示室について述べる。

## 2. 新型フォトレーザーシステムの概要

本システムの概略仕様を表-1に示す。既存システムからの主な改良点は、以下のとおりである。

- ① 俯仰可能範囲を152° から180° に拡大した。
- ② コンパクトデジタルカメラとストロボによる静止画撮影と、ハロゲンランプを光源とする動画撮影方式から、LED ライトを光源とするフル HD 相当の動画および静止画撮影方式に変更した。
- ③ 方位センサを地磁気・ジャイロの2種類とした。

表-1 新型フォトレーザーシステム 概略仕様

|         |                  |                                                |
|---------|------------------|------------------------------------------------|
| 全体仕様    | 旋回機能             | 360° エンドレス回転<br>エンコーダ搭載                        |
|         | 俯仰機能             | 0~180°                                         |
|         | 方位センサ            | 地磁気、ジャイロセンサ<br>エンコーダ併用 表示単位 1°                 |
| プローブ    | 外形寸法             | L=1498~1786mm, φ78mm                           |
|         | 解像度              | 側視 500 万画素(2448×2048)<br>直視 230 万画素(1920×1200) |
|         | 動作温度             | -5~+45°C                                       |
|         | レンズ              | 側視 16mm/F1.6<br>直視 12mm/F2                     |
|         | 水平画角             | 側視 約 31° 直視 約 25°                              |
|         | ピント              | 固定(手動調整可)                                      |
|         | 照明               | 側視 45W 白色 LED(最大 4 灯)<br>直視 3W 白色 LED(2 灯)     |
|         | レーザー距離計          | 半導体レーザー<br>(側視用, 1 箇所)                         |
|         | レーザー波長           | 905nm(Class 1)                                 |
|         | 測距精度             | 0.1~1m(メーカー値)                                  |
|         | 測定レート            | 4Hz                                            |
| カメラケーブル | 光・メタル複合構成        |                                                |
| ケーブル長   | 200m(電動式ケーブルドラム) |                                                |
| 電源      | AC100V 50/60Hz   |                                                |

次に、本システムの機器構成を図-1に示す。本システ

ムは、カメラ・レーザーを内蔵して掘削孔から空洞内に挿入するプローブと撮影計測やプローブの旋回・俯仰操作を行うノート PC と動画レコーダを接続した制御装置、ケーブル（電動式か手巻き式を選択使用）、撮影計測深度管理用の距離カウンタを内蔵したシーブ、プローブとシーブを支持する三又等から構成されている。

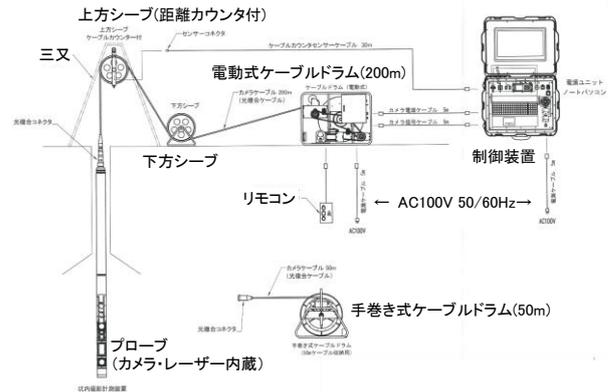


図-1 新型フォトレーザーシステム 構成図

プローブの先端部には、側視・直視カメラ、レーザー送受信部および LED ライトが内蔵されている。プローブ先端部の機器類接続にはアタッチメント方式を採用しており、空洞の広がり規模等に応じて LED ライトを最大4灯まで増設可能である（写真-1；参照）。

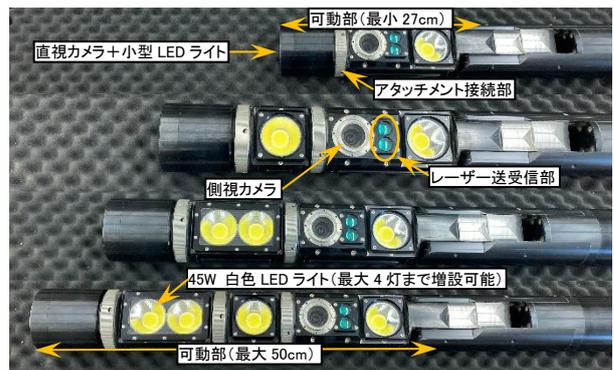


写真-1 アタッチメント方式のプローブ先端部

本システムにおけるプローブ先端の可動範囲を図-2に示す。プローブ先端の旋回によって全方位の撮影計測が可能であり、俯仰操作を行い鉛直上方から鉛直下方まで180°の範囲でフル HD 相当の高品質撮影計測が可能である。図-3に空洞内部の撮影計測概念を示す。本システムによって、従来記録が不可能だった斜め下方の陥没空洞や斜め上方の鍾乳洞などの鮮明な写真撮影と計測が可能になった（写真-2；参照）。水平・垂直の自動撮影計測モードでは、画角を考慮して対象物が重なるように一定の

角度間隔での自動撮影が可能であり、得られた写真をパノラマ合成して空洞内部の全体像を把握することができる。また、撮影時に複数の深度で対象物が重なるようにステレオ写真撮影を行い、実体視による荒廃状況の解析に使用している。

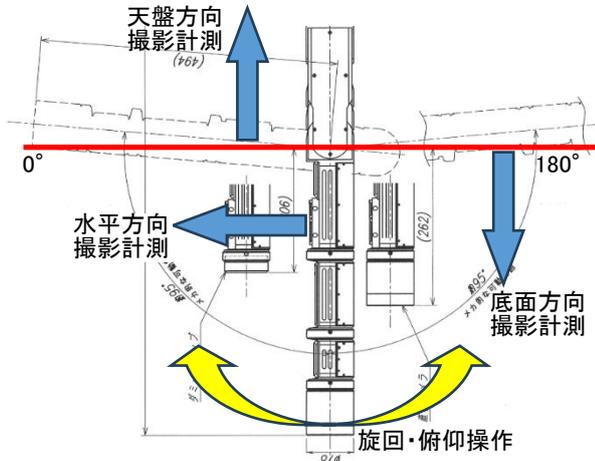


図-2 プローブ先端可動範囲

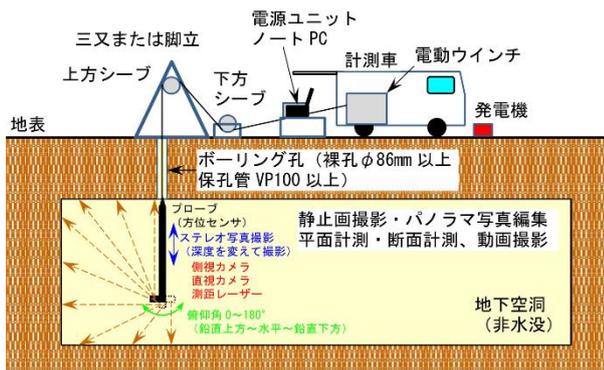


図-3 空洞内部の撮影計測概念



写真-2 空洞内部の写真撮影事例

### 3. 水没空洞における調査機器

本システムは、水没空洞では使用不可である。水没空洞では、水が濁っている場合が多く内部の写真撮影を記録することは困難であるが、形状計測には超音波の反射特性を利用した音響測深機探査で対応している。計測の要領はフォトレーザーシステムと同様であり、現在新型

機の開発と製作を行い、装置のテスト計測中である。

### 4. 大谷地域の展示室開設

1989年に発生した大谷地域における大規模の陥没事故を契機に、ボーリング調査と掘削孔を利用したステレオ写真撮影や空洞形状の計測のために必要な装置の開発と改良を行い、大谷地域における採取場跡地空洞の実態を把握することを目的とする調査を開始し、30年以上経過した現在も継続して遂行中である。

大谷地域におけるこれまでの調査資料を収集・整理して、開示可能な資料を展示する目的で2023年8月に展示室を開設した<sup>3)</sup>。本展示室には、空洞撮影計測装置や音響測深機探査装置のうち、調査開始初期に開発した機器類を中心に展示しているほか、地質調査によって得られた200m 級長尺コアや大谷石採取場跡地観測システムの概要、落盤疑似振動体験等の展示を行っている(写真-3; 参照)。本展示室は予約制により一般公開を行っている。



写真-3 初期に開発した空洞撮影計測装置の展示

### 5. まとめ

本システムにより、従来鮮明な画像を撮影できなかった空洞天盤などの画像情報を得ることで、空洞内部の荒廃状況等を詳細に把握することが可能になった。レーザーによる形状計測と組み合わせることで、空洞容積算出等、空洞対策工の基礎資料として活用できるものと考えられる。

### 《引用・参考文献》

- 1) 樋谷勝之, 藤原盛光 (2009) : フォトレーザーシステムの特徴と利用, 全地連技術フォーラム2009論文集, 論文 No. 111.
- 2) 大村猛, 赤澤貴, 山田茂治 (2010) : 連続波レーダ探査とフォトレーザーシステムを用いた特殊地下壕調査, 全地連技術フォーラム 2010 論文集, 論文 No. 27.
- 3) 野口静雄, 大村猛 (2023) : 会員施設紹介 大谷石採取場跡地観測所・大谷地下資源研究所展示室, 物理探査ニュース, No. 60, pp. 4-6.