

サスペンション型 S 波検層システムの開発

小倉 公雄

The Development of Suspension Type S-wave Log System

Kimio OGURA

Abstract

Recently S-wave logging has been widely employed to measure propagation velocity of P- and S-waves by means of a borehole fixing type receiving unit (Borehole Pick Unit) to obtain basic data for evaluating dynamic response ground characteristics. The unit has been used to predict ground and structure behavior during earthquakes, for design of earthfill for railway and road beds with a constant vibration load and for forecast and prevention of various kinds of pollution.

In the conventional approach, a vibration source is placed on the ground surface and geophones are installed in the borehole. The plate hammering method can be said to be the most typical method of producing vibrations. The wave propagation distance in such case is approximately 100 m. Also, because frequency of the wave to be observed is many tens Hz, we can not expect high time resolution.

The Suspension Type S-wave Log System is designed for insertion of both its vibration source and receiving unit (geophones) into the borehole for logging. The receiving unit consists of two geophones which are placed at 1 m interval and the distance from the source to each geophone is fixed. Accordingly, while a fixing type logger has to place its vibration source on the surface, the suspension type has the two in the borehole, keeping them at fixed intervals, and therefore can continue measuring in the borehole regardless of the depth.

In addition, the suspension type system is designed to measure sectional velocity at 1 m interval, so that it is able to detect fine velocity vibrations from soil to soil. It employs indirect excitation as a vibration source. It conveys the excitation force caused by hitting inhole water to the borehole wall using inhole water as a medium.

The receiving unit is so designed that the apparent specific gravity may be equal to 1. In this report the author describes the process of instrument development, outlines the system structure and gives the results of experiments on the newly developed "Suspension Type S-wave Log System" which is designed to measure S-wave far more deeply, precisely and simply than conventional S-wave logging as represented by the Borehole Pick Method.

This report may be summarized as follows:

1. The possibility of producing a practical instrument was confirmed.
2. A solenoid type electromagnetic source was newly devised for indirect excitation of the system and the device was confirmed to be practicable.
3. While the conventional indirect excitation device is able to detect only P-wave, the new excitation mechanism can detect two waves simultaneously. This device is also confirmed to be practicable.
4. The newly developed prepressured type filter tube proves its practicability in excluding obstructive tube waves.
5. Usability of this system up to a depth of 500 m would be available in our confidence. Further, layers whose S-wave velocity is around 1 km/sec were proved to be measurable.

1 はじめに

孔中固定型受振器によるS波検層法は、地震時の地盤および構造物の挙動の予測、振動荷重が常時作用する鉄道や道路の盛土の設計、各種振動障害の予測と防止など、つまり、地盤の動的応答特性を評価するための基本的データである地盤のP波およびS波の速度測定に広く用いられている。

この方法は、振源が地上にあり受振器が孔井内に配置される。振源としては板たたき法が一般に用いられている。この場合の波の到達距離は地盤の状況にもよるが、おおよそ100m程度である。また、板たたき法によって観測されるSH波の周波数は数10Hzで、高い時間分解能は期待できない。

最近、高層建築物などにおいて長周期の地震応答特性を把握することが重要になってきたので、より深部におけるS波速度に関する情報が必要となってきた。また、原子力発電所など重要構造物の基礎に関しては、より精度の高い詳細なP波・S波の速度情報を得る必要が生じている。

この報文は従来の孔中固定型受振器によるS波検層では不可能な、より深く、より精度良く、しかも、より簡便に測定を行ないたいという要請に応じて開発された新しい着想によるS波検層システムの開発の経過、方法、実験結果などについて述べるものである。

2 これまでの経過

孔中固定型受振器、ソレノイドハンマー方式の孔中振源、漂遊型受振器、間接加振型振源など受振部と振源部をとともに孔中に挿入するS波検層法に関する一連の研究は狐崎によって進められてきた。^{(1)~(10)}

ふりかえてみると、孔中固定型受振器は筆者らによって実用化設計および一連のシステムの開発が行なわれ **OYO** ポアホールピック3310型、3320型という名称で製品化がなされている。

孔中固定型受振器の利用技術に関しては、^{(11)~(19)} 今井を中心として実測ならびにデータの蓄積が精力的に行なわれ、S波の地震工学への利用方法を一般化し現在の普及をみるにいたっている。

「サスペンション型S波検層法」の研究に関しては、1977年度物理探鉱技術協会の秋季講演会において狐崎によって発表された。この発想は、後ほど詳述することになるが、従来の受振器および振源とは異質なもので独創的なものである。種々の問題点が予想されたが、狐崎は多くの問題を一つ一つ解決し、上記講演会およびその後

の論文によって実用性を立証したのである。

（株）応用地質調査事務所は1977年の狐崎の発表に先立つこと2年余り前、1975年より、同氏の実験に必要な超小型受振器の供給、孔内振源の設計、試作など狐崎と協力関係にあり、1978年からはサスペンション型S波検層システムを実用化するため設計、試作、実験を行なってきた。

1979年に入り、浦和研究所の敷地内に500mを目標とした試験孔を掘削し、狐崎の方式によるサスペンション型S波検層法の追試と試作したシステムの試験を実施してきた。

この実験によって、狐崎の方式で極めて良好なS波の記録が得られ、S波の検層法としての実用性を多数の測定記録によって裏づけることができた。なお、使用している間接加振型振源は原理的にP波が発生しにくく、S波のみの検層に限定されることも明確になった。

もちろん、このことは当初より予想していたことであり、P波に関しては、すでに確立している技術があるのでこれまではさほど重視することなくS波をとらえることに全力を傾けることを狐崎と筆者は考えていた。

しかし、まったく同一システムを用いてS波もP波もとらえることができないものか、という問題意識が常にあり、S波の記録が試作したシステムによって難なくとれる段階に到達すると新たな問題の出発点としてP波、S波の同時測定が意識のなかにクローズアップしてきた。

筆者は「P波とS波を同時に観測する」という命題に対する一つの着想について1979年6月21日、深度94~129mにおいて実験を行なった。その結果、P波、S波を同時に観測することが可能となった。

以上が現在までの経過のあらましである。参考までに「サスペンション型S波検層法」に関する特許申請、機器展示等について下記に示す。

OYO : Society of Exploration Geophysicist, 48th Annual International Meeting & Expositionにおいて試作ゾンデ及びスタッキング型観測装置を展示, 1978

狐崎長琅 : 日本特許申請, 1978

OYO : 米国特許申請, 1978

OYO : 物理探鉱技術協会昭和54年度春季講演会において試作ゾンデを展示, 1979

OYO : European Association of Exploration Geophysicist. 41st Meeting and Technical Exhibitionにおいて試作ゾンデ及び浦和研究所内における実験記録の一部を展示, 1979

3 サスペンション型S波検層法

サスペンション型S波検層法とは、孔内に固定することなく卓越したS波を発生する間接加振型振源と、孔内に固定することなく孔壁の動きを受振する漂遊型受振器とを、一連のゾンデとした装置を使用する検層である。

3-1 間接加振型振源

孔井内で孔軸に直交する方向に、孔径より小さな長さを有する剛な物体が自由な状態で設置されている。この物体を孔軸に直交する方向に急速に動かすことによって、周囲の水に正負の圧力が加えられ、この水を介して孔壁に物体の動いた方向と同じ方向に力が加えられる。発生する波の波長が孔径よりも十分大きければ無限媒質中における点振源とみなすことができる。しかもこの振源は膨張力を伴わない、いわゆる振源近傍に体積変化を生じない振源である。したがって、単純な一方向性の点振源とみなすことができる。ゆえにこの振源は、力の軸に直交する方向にはP波が伝播せずS波が孔軸方向に卓越することになる。

図-1にゾンデの概略図と孔壁付近の媒質の動きを模式図として示した。

3-2 漂遊型受振器

通常孔井内でS波を観測するとき、受振器を孔壁に固定するのが普通である。しかし、より深く、より簡便にという要請に対しては、観測の都度いちいち受振器を孔壁に固定していたのではこれに応えることは困難である。

孔井が水で満たされていて、孔井が孔軸と直交する方向に動くとき、この波長が孔径よりも十分長ければ中の水もまた孔井の動きと共に動く。したがって、水の動きを観測することは孔井の動きを観測することになる。

水と共に動く受振器、すなわち、受振器全体のみかけ比重を1にすればこの受振器は孔内水の動きを検出することになる。狐崎は、このような受振方式を漂遊型受振方式、この受振器を漂遊型受振器と名づけた。

3-3 ゾンデの構成

サスペンション型S波検層ゾンデは間接加振型振源と漂遊型受振器を基本構成要素としている。

加振によって発生する波は理想的モデルにおいては振源全体として体積変化を伴わないため tube wave は発生せず、孔軸方向には波のみが卓越する。しかし、現実には tube wave は存在する。したがってこの孔内水を伝わる tube wave を遮断する機構が必要となる。

また、各々の構成要素間の連結部は比重がほぼ1であり、しかも孔軸に直交する方向の動きに関しては抵抗の

ない、そして振源と受振器の方向を一定に保つのにねじれない材質を選択する必要がある。

したがって、ゾンデの様式は図-1に示すように、振源と受振器の間にはフィルターチューブがおかれており、受振器の連結部にはゴム製のチューブを使用している。

フィルターチューブ内には水圧によって押しつぶされない程度の空気圧を与えてある。

なお、図-1において孔軸方向の成分の受振器はP波および tube wave 検出用である。

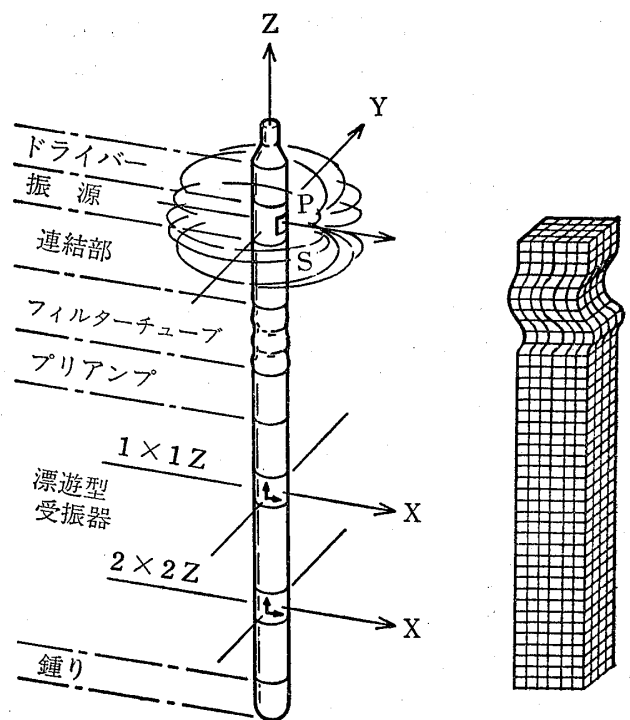


図-1 漂遊型S波検層ゾンデと模式化した孔壁の動き
Fig. 1 Suspension type S-wave log sonde and schematized movement of borehole wall

4 実用化への挑戦

現場において使用し得る実用的なシステムを開発するためにまず測定深度を500mに設定した。また、測定の対象とする地層のS波速度を1 km/sec以下とした。

深度500mにおける水圧は50kg/cm²になる。この圧力のもとで安定に動作する振源、取り扱いの容易なフィルターチューブ、漂遊型受振器、漂遊型受振器を連結するゴムチューブの実装、耐水コネクタ、記録方式等各々についての実用化設計を必要とした。

開発作業の流れは、理論→仕様設定→設計→試作→実験→評価→理論→というフィードバックループを構成する。このループの中で実験をいかなるかたちで行なうか、ということが開発の能率を大きく支配する。部分的には室内で行なうことが可能な実験もあるが、最終的には孔井内で測定し確認することが必要なことは言うまでもない。可能な限り早急に評価し次のステップに開発を進めるためには実験孔をつくることは不可欠なことである。

そのため、浦和研究所敷地内に深度 500m を目標とした実験孔を掘削することにした。

実験孔を使用して、測定実験を繰返す過程で、同一システムを用いて S 波のみでなく P 波も観測したいという課題に対しても、間接加振型である点では変りないが、振源自体が体積変化を伴う型の振源を新たに開発し、P 波、S 波を同時に観測し得るシステムを実用化し得る見通しを得た。

1979年7月10日現在のボーリングの掘削深度は 196m に達しており、この段階で上述のように、明るい見通しを持つことができたが、以後、深度が増加すると共に掘削口径の変化に対する適用性の問題、ケーシングの存在による測定限界の問題、さらにはケーシングの存在を許容する検層方式の開発へと研究を進めつつある。

5 装置

5-1 ゾンデの構造

図-2 にサスペンション型 S 波検層ゾンデを示す。各々のユニット毎にコネクタで結合されて一連のゾンデを構成している。

上部より駆動ユニット、振源部、ダンパーチューブ、プリアンプユニット、圧力調整部、フィルターチューブ、ダンパーチューブ付受振器部、重錘の順に接続されている。

駆動ユニット：振源を駆動する電源ならびに駆動方向を正負に切換える回路を内蔵している。振源の駆動信号および正負の方向切換は上部よりケーブルを介してコントロールされる。

振源部：間接加振型振源

ダンパーチューブ：振源部と受振器の間隔を調整すると共に ゾンデを伝わる波を吸収するために接続してある。

プリアンプユニット：信号をあらかじめ増幅して伝送ラインに送り出すと共に、上下に配置された受振器部の水平動成分と上下動成分を上部よりコントロールすることによって選択する機能を有している。

圧力調整部：測定深度の増減に応じてフィルターチューブの内圧を自動的に調整するためのものである。

フィルターチューブ：孔井内の水を伝わる tube wave を遮断するためのもので、測定深度に応じて内部空気圧を調整するようになっている。

受振器部：上下をゴム製のダンパーチューブで接続した漂遊型受振器、水平動成分、上下動成分を一組として 1 m 間隔に 2 ヶ配置されている。さらに、振源の駆動方向と受振器の検出軸は同一となるようにしてある。

重錘：孔中へゾンデを容易に挿入するための錘。

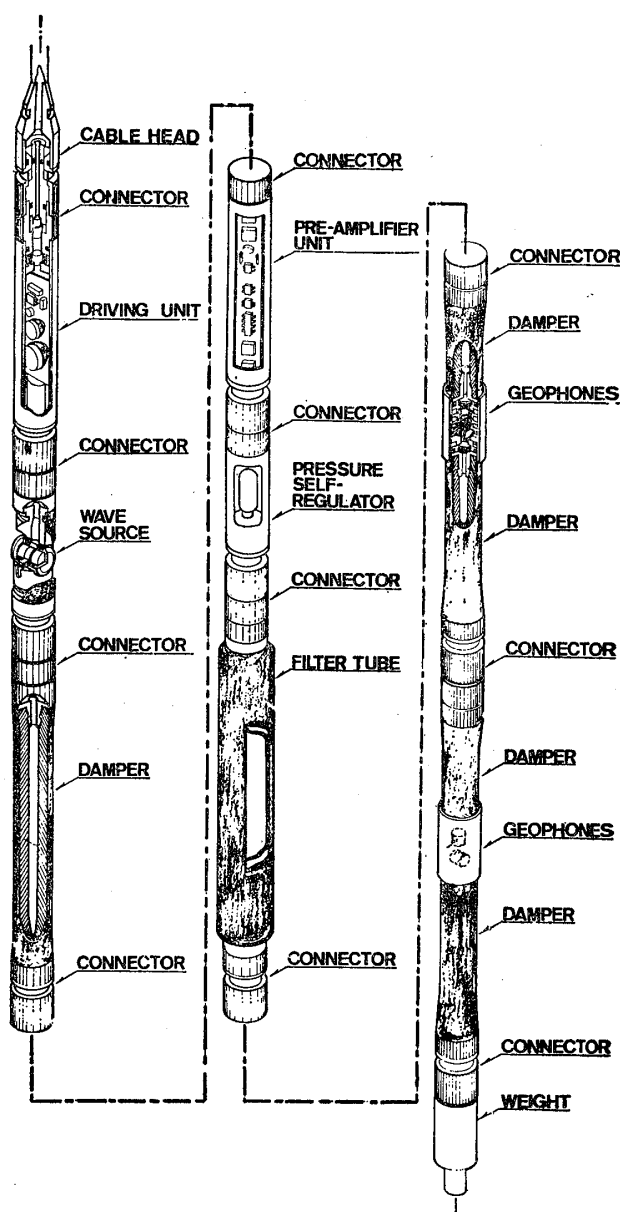


図-2 サスペンション型 S 波検層ゾンデ
Fig. 2 Suspension type S-wave log sonde

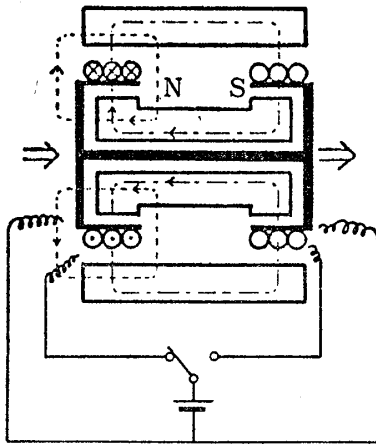


図-3 動コイル型電磁振源 (狐崎)
Fig. 3 Moving coil type electromagnetic vibration source (by Kitsunezaki)

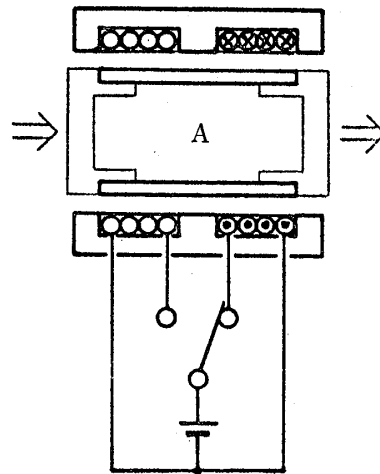


図-4 ソレノイド型電磁振源
Fig. 4 Solenoid type electromagnetic vibration source

5-2 振源部

(7)~(9)

動コイル型電磁振源：間接加振型振源として最初に考えたものがこの型の振源であり、図-3に原理図を示す。一般のスピーカーと同様に永久磁石によって作られる磁界の中にコイルを配置し、コイルに電流を流すことによってコイルのボビンを動かし、このボビンがピストン運動をする構造である。ボビンには2組のコイルが巻かれており、通電するコイルを選択することによってボビンの動く方向を、また通電する電流パルスの長短、強弱によって振源としての出力パルス幅、力の大きさを制御することができる。さらに、通電する電流の方向はコイルに流す瞬間的大電流によって永久磁石が消磁されないように配慮されている。

振源全体は薄いゴムチューブで被覆されており孔内水の侵入を防いでいる。

ソレノイド型電磁振源：振源を単にゴムチューブで覆っただけでは動コイル型電磁振源におけるボビンは孔内の水圧に抗して動くことになり、大きなエネルギーロスを生じることになる。したがって振源内部と外部との間に差圧を生じない工夫が必要である。この圧力バランスの方法については後述するが、最も簡易な方法として内部を流体で満たしてやれば良い。

この場合、動コイル型電磁振源ではボビンの移動に伴って内部流体の移動が必要であり、これはボビンの移動速度を阻害し、結局エネルギーの損失を伴うことを意味する。

さらに現場においては、振源を覆うゴムチューブが破損することを前提に考えておく必要がある。破損すれば

振源内部に孔内水が侵入することになる。このような場合、ごく簡単に修復できるか、水の侵入を許容する構造になっていることが望ましい。

しかし動コイル型電磁振源ではコイルのリード線は振源内部に露出しており、上記の要件を満たすことは非常に困難である。

以上のことから、動コイル型電磁振動と等価の働きをし、しかも水の侵入を許容する構造について模索した結果図-4に示すソレノイド型電磁振源の開発に到達した。

図中“A”の記号で示した部分が可動部である。可動部は鉄製の筒と両端をカバーした樹脂製の蓋から構成されている。みかけの比重は1.0に設計してある。コイルは左右2ヶ所に設けてある。これを覆う部分は鉄で作られており、可動部の鉄製の筒との間に磁路を形成している。コイルに電流を通じると、当然可動部は電流を通じたコイルの側に引きつけられて可動部全体としてピストン運動することになる。

コイルは非磁性のボビンにまかれており、その外周は鉄で覆われ樹脂で充填されている。したがって、可動部に水が侵入しても電気的には何ら影響がなく、水の侵入を許容する構造になっている。可動部の動く方向、出力パルス幅の制御に関しては動コイル型電磁振源と同様である。ただし、力の大きさに関しては可動部の鉄筒の飽和磁束密度によって限定される。

今回の実験にはこの型の振源を主として使用した。

ソレノイド型P・S用電磁振源：S波とP波の観測を同時に行なうことを目的として開発した振源である。

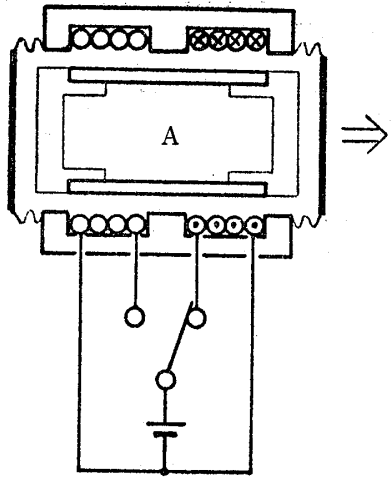


図-5 ソレノイド型P・S用電磁振源
Fig. 5 Solenoid type electromagnetic vibration source for P and S waves

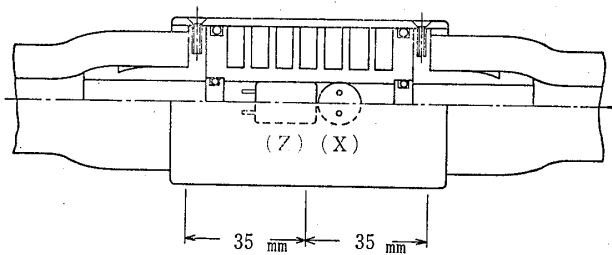


図-7 サスペンション型受振器
Fig. 7 Suspension type receiver (geophone)

これまでの振源に対する考え方と観点を改めて考えたものである。いま、孔軸に直交する方向に孔軸に対して一方の側だけにピストンを動かしたとすれば、無限媒質中において微小な部分がひとつの方向にのみ膨張したことになる。この結果、膨張した方向に対して直交する方向にはS波が伝播する。P波に関しては膨張した部分を点振源として伝播する。

図-5にこの型の振源の原理を示した。可動部の駆動に関しては5-2で述べたソレノイド型電磁振源と同様である。

可動部の外側に剛な振動板をおき、これに可動部を衝突させるようになっている。

このため衝突が発生した側には強い指向性を持った圧縮力が発生し水を介して孔壁に伝達される。

波形に関しては、可動部を外側の剛な振動板に衝突さ

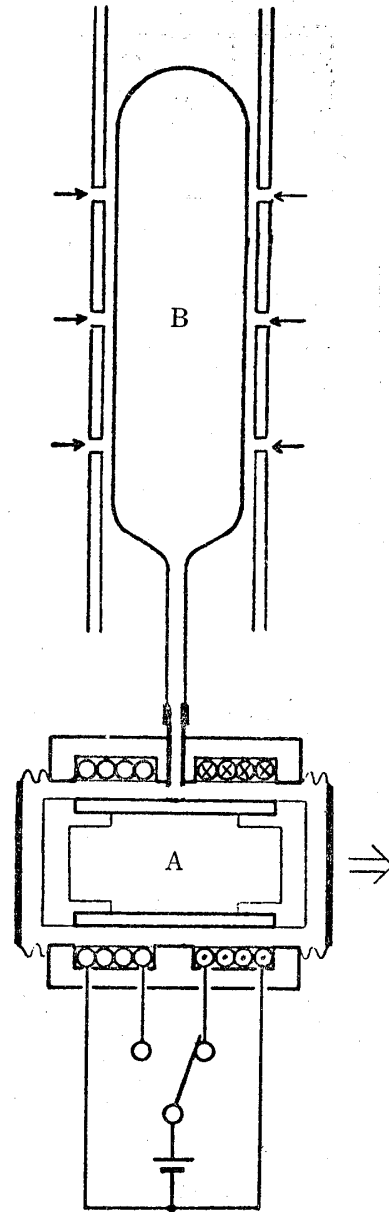


図-6 圧力バランスの方法
Fig. 6 Device for pressure equilibrium

せているので短周期の単純なものになり、P波とS波の良好な分離が期待できる。

また、衝突の速度を増大することによって強力な力を発揮することが可能であり、今後さらに硬い地層への適用を期待することができる。

圧力バランスの方法：図-6に振源内圧力のバランスの方法を示した。図中“B”は空気袋で孔内水と直接接している。したがって、振源の内部と孔内水は同一圧力となり、振源内部と孔内水との間に差圧は生じない。この方法は動コイル型電磁振源にも適用することができる。

5-3 フィルターチューブ

フィルターチューブは二つのタイプのものを実験に用いている。

一つは非常に軟らかい外径 50mmφ のゴム筒を 1 m の長さを実装したものである。このフィルターチューブは、上部より外径 6 mmφ、内径 4 mmφ のナイロンチューブで送気できるようになっている。したがって、測定深度に応じて内圧を任意に調整することができる。この形式のフィルターチューブは、実験段階では極めて便利であるが、送気用ナイロンチューブとケーブルを同時に孔内に挿入する必要があり作業性の上で難点がある。

ゾンデの振源部と受振部の間に体積弾性率の極めて小さい気体の層を介在させることがフィルターチューブを挿入する理由である。したがって、あらかじめ予圧しておいて、測定深度に達してもつぶれることのないフィルターチューブを用意すれば、送気用ナイロンチューブを省略することができる。この考え方で製作したのが予圧型フィルターチューブである。

外径 56mmφ、耐圧 40kg/cm² の油圧ホースを用いて、地表で窒素ガスを充填して孔井内に挿入する。

5-4 漂遊型受振器の構造

図-7 に断面図を示す。ポリカーボネート製の容器は水圧に耐えかつ軽くするためにリブを持った構造になっている。受振素子は、重量 14g、共振周波数 20Hz、内部抵抗 660Ω の仕様のもを使用している。

この受振器の体積は 519cm³、受振器を組み込んだ重量は 510g、みかけ比重は 0.98、耐圧は 50kg/cm² に十分耐える設計になっている。

5-5 測定システム

図-8 に測定システムの概要を示す。図-9 に信号系のブロック図を示す。図中 McSEIS 1400 は波形記憶と波形の加算を行なう機能を有しており、信号の微弱な地層においては加算機能を活用して S/N の良い記録を得るようにしている。また、加振方向の選択とメモリーチャンネルは同時に選択される機能を有し、オシログラフには一つの深度に対するデータが同時にメモリーより読み出して記録する方式になっている。

5-6 各部の諸元

振源ドライバー

- 長さ 60cm
- 直径 50mmφ
- 重量 3 kg
- 方式 コンデンサ充放電型
ソリッドステート制御

振源

- 長さ 20cm
- 最大径 50mmφ
- 重量 1.3kg
- 振源形式 水平単純力型、反転可能
(孔軸を垂直軸として)
- 加振力 80 Newton (Peak)
- 加振時間 0.1~1 mSec (水中 400 volt)
- コイル抵抗 20Ω (1 kHz)
- 可動部最大ストローク 2 mm

ダンパー

- 長さ 1 m
- 最大径 50mmφ
- 重量 1.3kg

プリアンプ

- 長さ 60cm
- 直径 50mmφ
- 重量 3 kg
- 入力インピーダンス 600Ω (平衡)

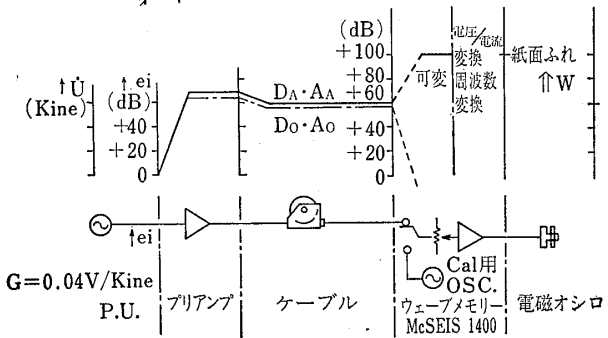
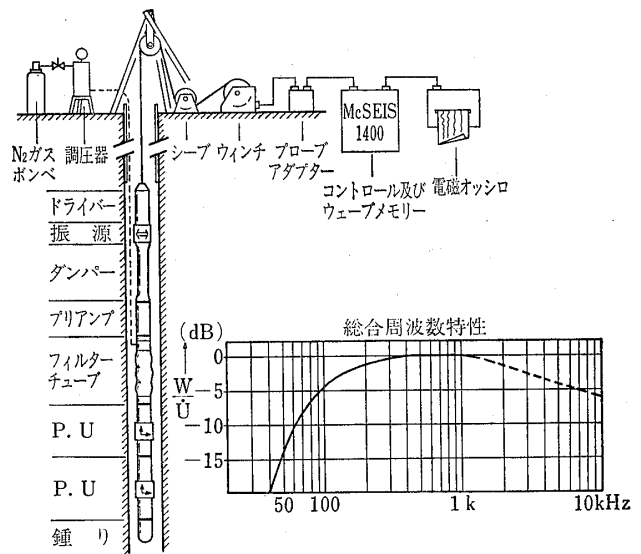


図-8 測定システム概要
Fig. 8 Outline of measurement system

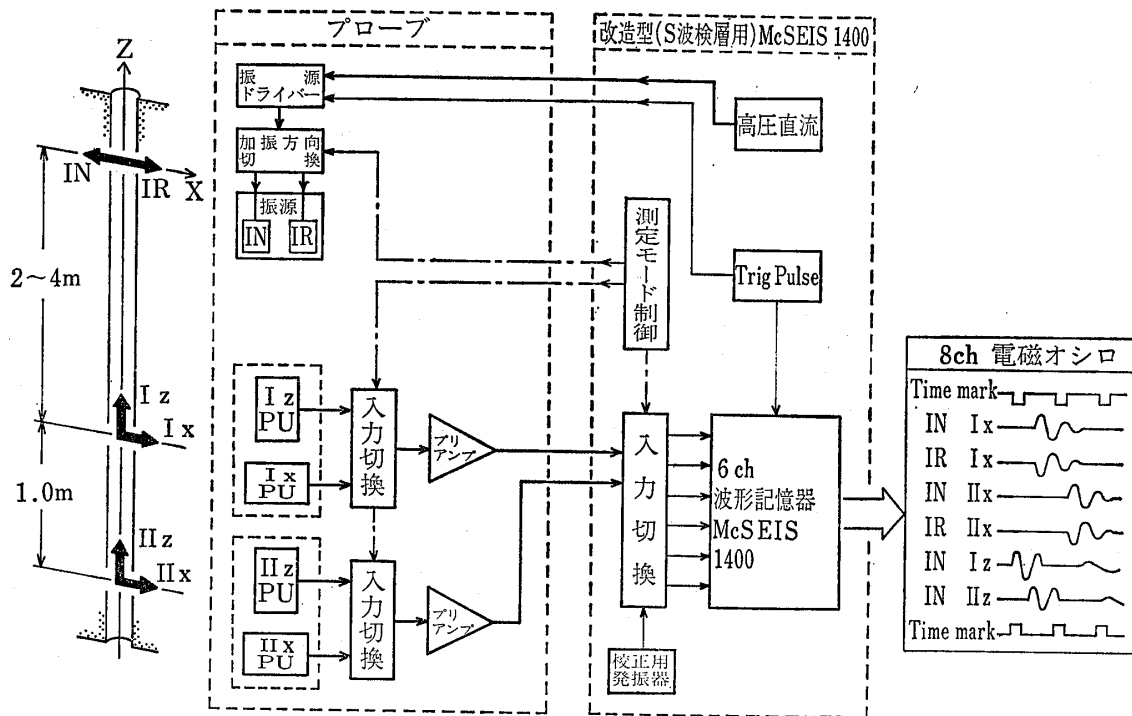


図-9 信号系ブロックダイアグラム
Fig.9 Signal system block diagram

- 増幅率 60dB (内部調整範囲 ± 6 dB)
- 入力換算ノイズ 2 μ volt (P-P)
- 周波数特性 200-5 kHz (カットオフ-18dB 位相平坦型)
- 電源電圧 8~15 volt (上記特性 12 volt 時)
- フィルターチューブ
 - 長さ 1 m
 - 重量 2 kg
- 受振器 (第1, 第2受振器は同じ構造)
 - 第1, 第2受振器の間隔 1.0m ± 5% (延長可能)
 - 長さ 1 m
 - 最大径 50mmφ
 - 受振方式 漂遊型
 - 帯域 20~300Hz
 - 感度 0.038 volt/kine 以上
- 重り
 - 最大径 50mmφ
 - 重量 3 kg 以内
- ケーブル
 - 特殊地震探鉱用ケーブル
 - 芯数 12芯 (6対ツイストペア)
 - 外径 7 mmφ

- テンションメンバー切断荷重 110kg
- 増幅・制御部 (McSEIS 1400)
 - アンプ・ユニット
 - 利得 80dB
 - 入力インピーダンス 600Ω
 - 周波数帯域 5 Hz~1 kHz
 - メモリーユニット
 - ビットサイズ 10ビット
 - データサイズ 1,024 word/ch
 - A/D変換時間 10ビット/20μSec
 - コントロールユニット
 - レコード長 50, 100, 200, 500, 1000, 2000mSec
 - サブリングレート 20k, 10k, 5k, 2k, 1k, 500サンプル/Sec
 - 時間精度 0.01% (水晶制御)
 - 遅延時間 0~9.99sec
 - 振源コントロールユニット
 - 最大充電電圧 400 volt
 - 充電時間 10秒以上
 - 加振方向切換 スイッチにより選択
 - 加振時間コントロール 0.1~1 mSec
 - 電源電圧 12 volt

○消費電流 5 A以内

6 実験結果

6-1 実験地の地質概要

実験は、浦和研究所構内で行なった。図-10に実験地の位置を示す。

実験地は、荒川・中川にはさまれた大宮台地の南部に位置する。大宮台地は、標高15m前後で、その地形面は下末吉面に対比されている。したがって立川ローム層、武蔵野ローム層および下末吉ローム層が台地を広く覆っている。

実験地は、大宮台地を侵食した小さな谷にあたるため、この谷を埋めて沖積層が堆積している。沖積層は腐植土と軟弱な粘性土からなっている。

実験地のボーリング柱状図を図-11にした。ボーリングは現在まだ掘進中であり、各地層の対比について詳細な資料は得られていない。したがって、試料の観察結果をもとに、既存ボーリング資料と比較して地質状況を概説するとどめたい。

第三紀と第四紀の境界問題は種々議論の多いところであるが、深度175mを境として粘性土層の固結度が著しく異なることから、一応、深度175m付近に第三紀と第四紀の境界があるものと考えた。

埼玉県内に分布する第四紀層について、森ら²⁰⁾は、所沢・新座のボーリング結果を分析して、次のように地層区分を行なっている。

- 武蔵野礫層
- 所沢礫層
- 芋窪礫層

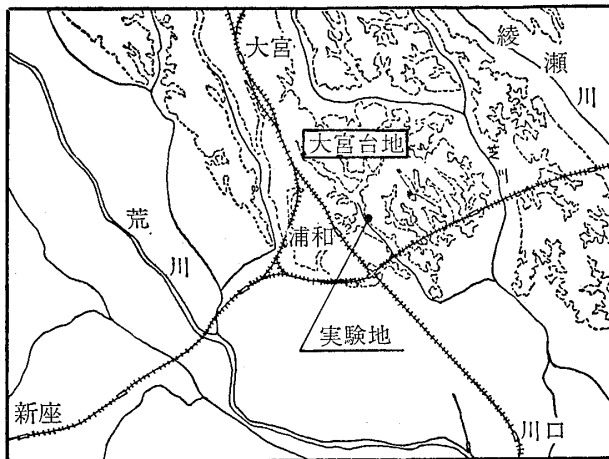


図-10 位置図
Fig. 10 The location of boring point

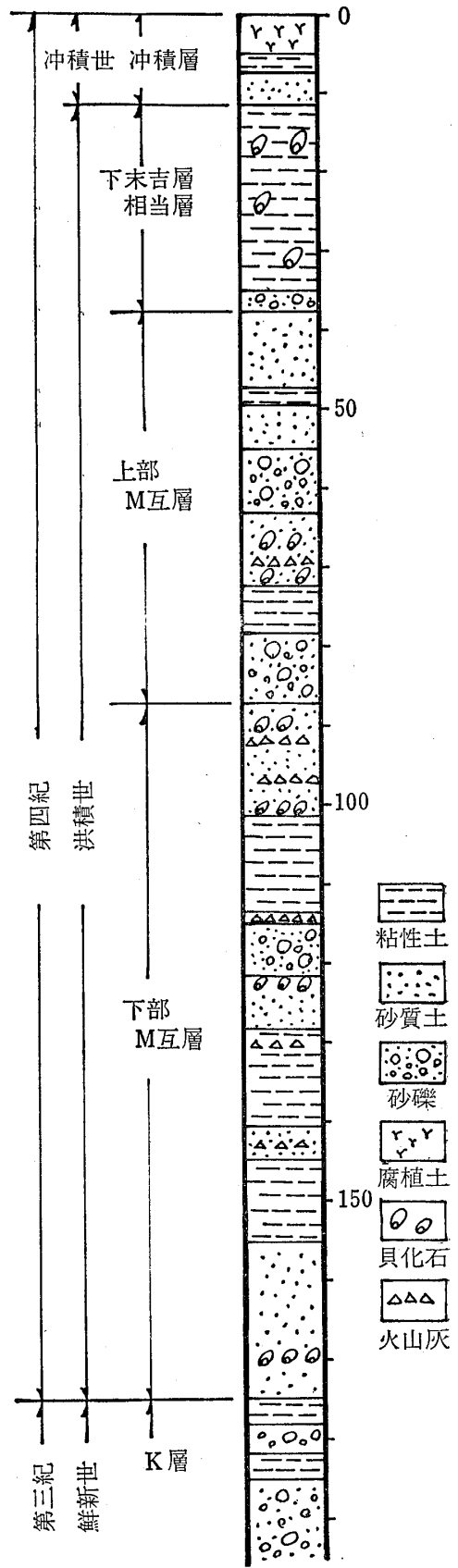


図-11 地質柱状図
Fig. 11 The geological column

上部M互層
下部M互層
K層 (第三系)

今回のボーリング結果と比較して考えると、深度175m以深に分布する地層がK層に相当し、それより上位の第四紀層は上、下部M互層に対比されるものと考えられる。

深度11m~38m間にやや軟質の海成粘性土層が発達しているが、これは下末吉期の海進による堆積物であろう。

6-2 S波の検証

図-12に記録の一例を示す。図中に“S”とした部分を、果してS波の初動と認定し得るか否かが議論の対象となるところである。

記録に“IN”, “IR”とするしてある記号は、記録の左端に図示した方向に間接加振型振源のピストンを動かした場合の波形である。図から明らかのように加振の方向によって極めてきれいに反転した波動がとられている。したがって振源力の反転に伴い、S波の位相が逆転しなければならないというS波の条件の一つを満している。

つぎに深度51mにおいて孔内条件、測定系の条件を全く同一にとって、受振器部のみを振源力の作用する方向に対して90度ずらして実験を行なった。その結果を図-13に示す。

図中“X”とした波形は振源力と受振軸が同一の場合、“Y”とした波形は振源力と受振軸が90度ずれている場合の記録である。この両者の記録から振動軌跡を描いてみると図に示したように加振力の方向との極めて良い一致が認められる。すなわち、振源力の方向とS波

の初動の向きが良く対応すること、および、S波の振動の卓越方向は加振力の方向とほぼ一致するというS波の条件を満たしていることになる。

上下動成分の挙動に関してはつぎのとおりである。図-14に深度55.1mにおいてフィルターチューブの内圧を変化させて得た記録を示す。もし、X方向の振動がtube waveにかかわるものであれば、当然、フィルターチューブの内圧の増減に応じて変化しなければならない。しかし、図に示したとおり、X方向の振幅の変化はほとんど認められず、上下動成分の動きが変化している。これは、孔内水を伝わってくるtube waveに対してフィルターチューブの効果を立証すると共に、上下動成分の振動はほとんど水平動成分の動きに無関係であることを示している。したがって、水平成分で観測されている波がtube waveによって干渉されていないということを確認したことになる。

図中、フィルターチューブの内圧の変化に応じて、相互の波形の間に位相のズレが認められる。これはフィルターチューブが内圧の増加に伴って伸びているために、振源部と受振部の間隔が若干増加し、その結果時間差を生じたものである。

振源力によって発生するS波の振幅は、地層のS波速度の影響を受ける。したがって、測定系の特性を明らかにしてあれば、振幅に関する検討を行なうことができる。

狐崎は「S波検層のための間接加振型振源⁽⁹⁾」および「振源部と受振部とを一連のゾンデとするS波検層方式⁽¹⁰⁾」の論文でこれを確認している。

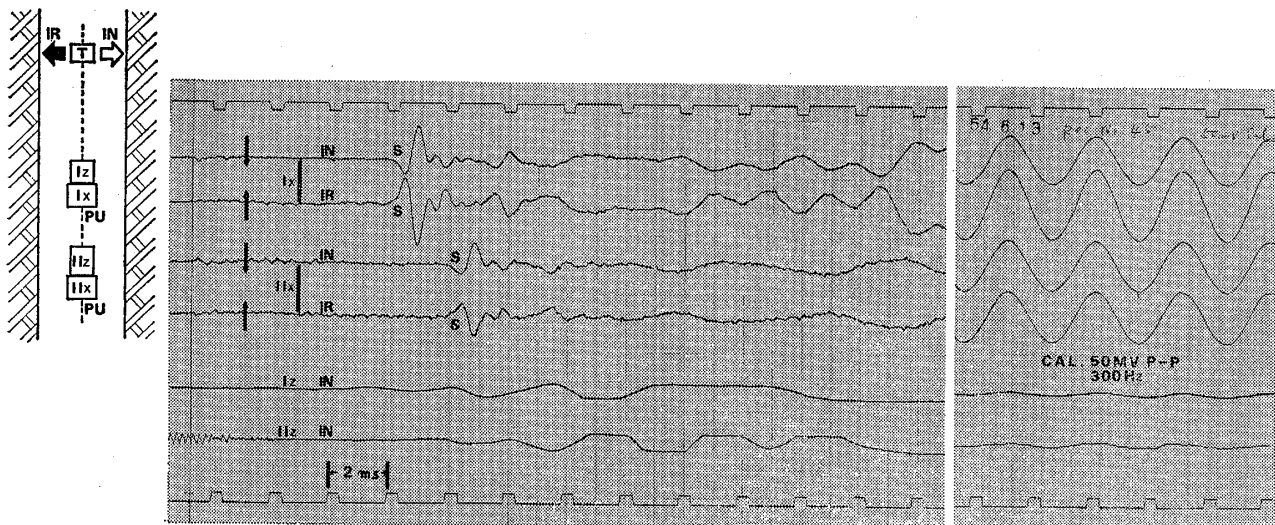


図-12 記録の1例(深度:114m, 1979-6-13, Rec. No. 46)

Fig. 12 An example of record (depth:114m, June 13, 1979 Rec. No. 46)

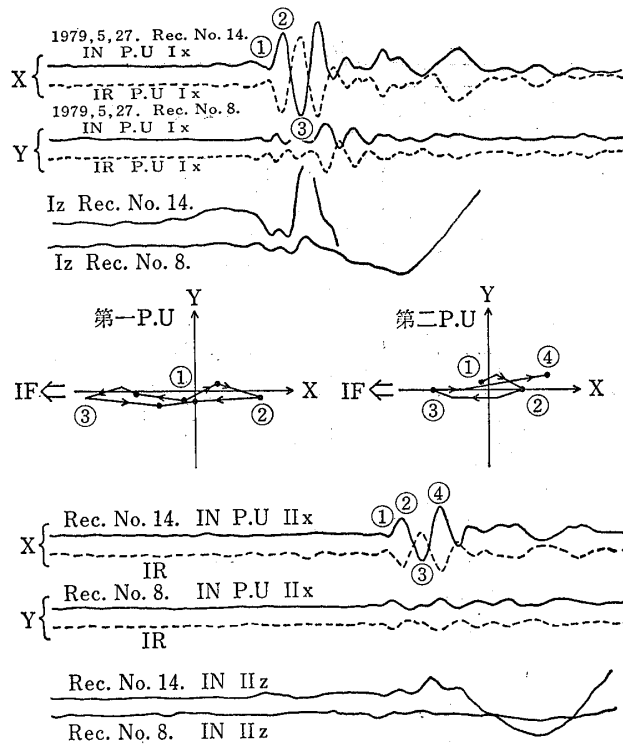


図-13 振動軌跡
Fig. 13 Vibration orbit

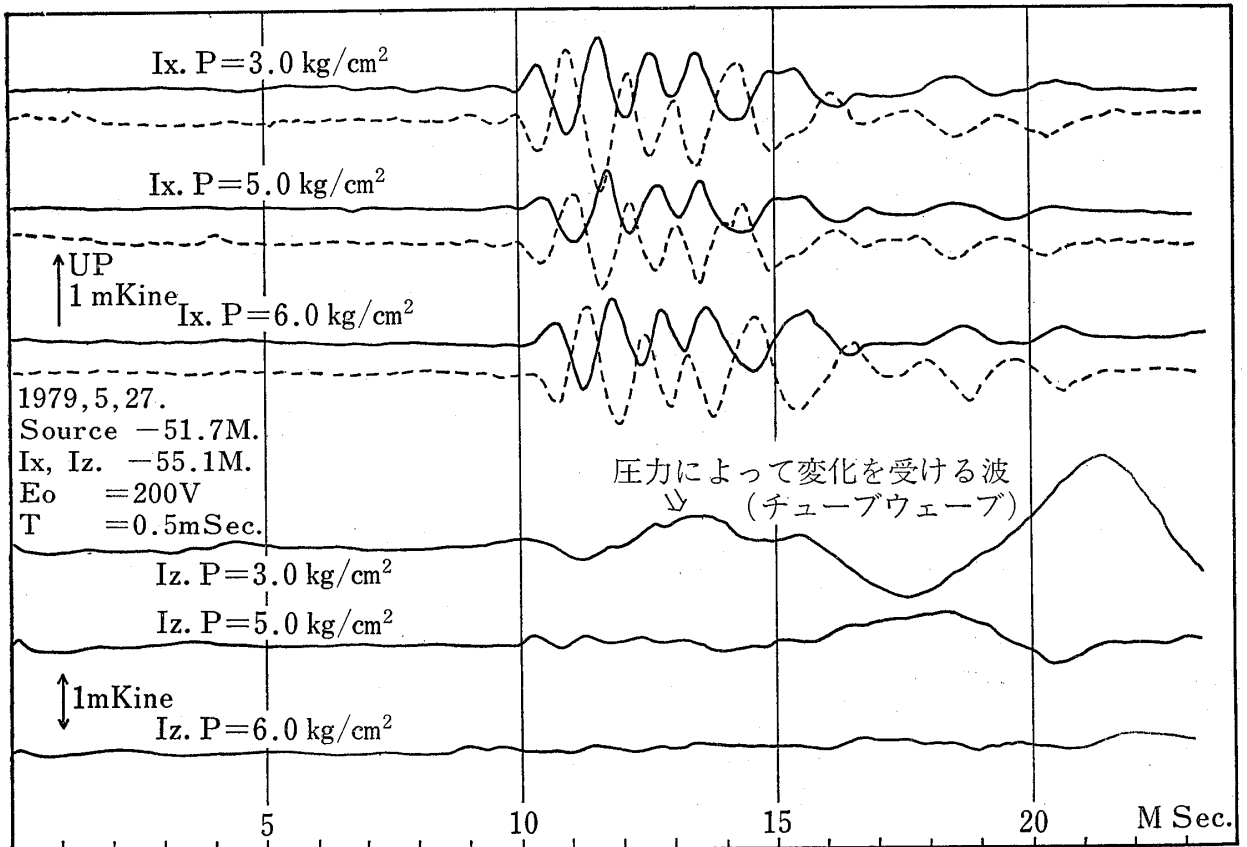


図-14 チューブウェーブのチェック
Fig. 14 Check of tube wave

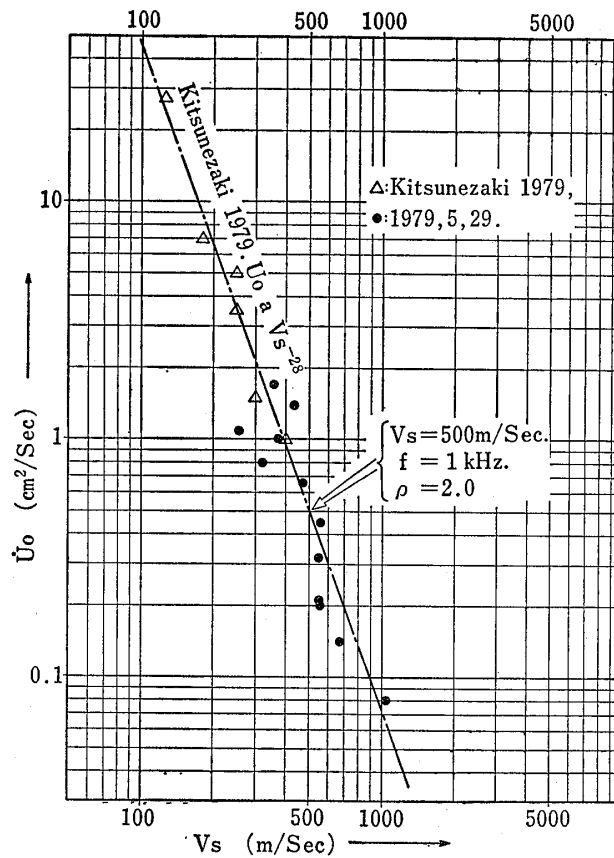


図-15 振巾特性
Fig. 15 Amplitude characteristics

得られた記録から振源の強さ U_0 を狐崎と同じ手法で計算した結果を図-15に示す。その結果は狐崎の結果とほぼ一致しており、理論的に期待されるS波の振幅に対してははずれていない。

ボアホールピックを用いた板たたき法による測定結果との対比は、6-3で述べるが、矛盾のない対応を示している。

以上の結果から今回観測された波は、S波であることは間違いない。

6-3 実験結果

図-16に地質柱状図、 N 値、比抵抗、S波速度分布を示す。

S波の測定結果はサスペンション型S波検層システムによるものを実線で、ボアホールピックを用いた板たたき法による測定結果を破線で示してある。この方法は周知のように、地表に振源をおき、ボアホールピックを2m間隔に孔中に固定して測定を行なった。したがってS波速度の細かい変化は検出されていないが、おおよそサスペンション型S波検層システムによる結果と良い対応を示している。

6-4 フィルターチューブ

内圧を自由に上部から、制御できる送気型フィルターチューブと予圧型フィルターチューブの2種類について実験を行なった。

図-17に同一深度における両者の記録例を示す。記録をみると予圧型フィルターチューブでは上下動成分の振幅が送気型のフィルターチューブに比して大きい。S波の観測に関しては支障のないことを示している。したがって現場においては予圧型のエアチューブを使用することが有利である。

6-5 ソレノイド型P・S用電磁振源

ソレノイド型電磁振源で観測した記録を図-18に、ソレノイド型P・S用電磁振源で観測した記録を図-19に示す。両者はいずれも深度108mにおける記録である。

S波の伝播時間に関しては両者共に差異はほとんどない。図-19にS波の前に、より短周期の波群が観測されている。この波群がP波か否かの検定を行なう必要がある。

これがP波であるためには、まず、加振力の方向にかかわらず位相が反転することは許されない。また、ケ

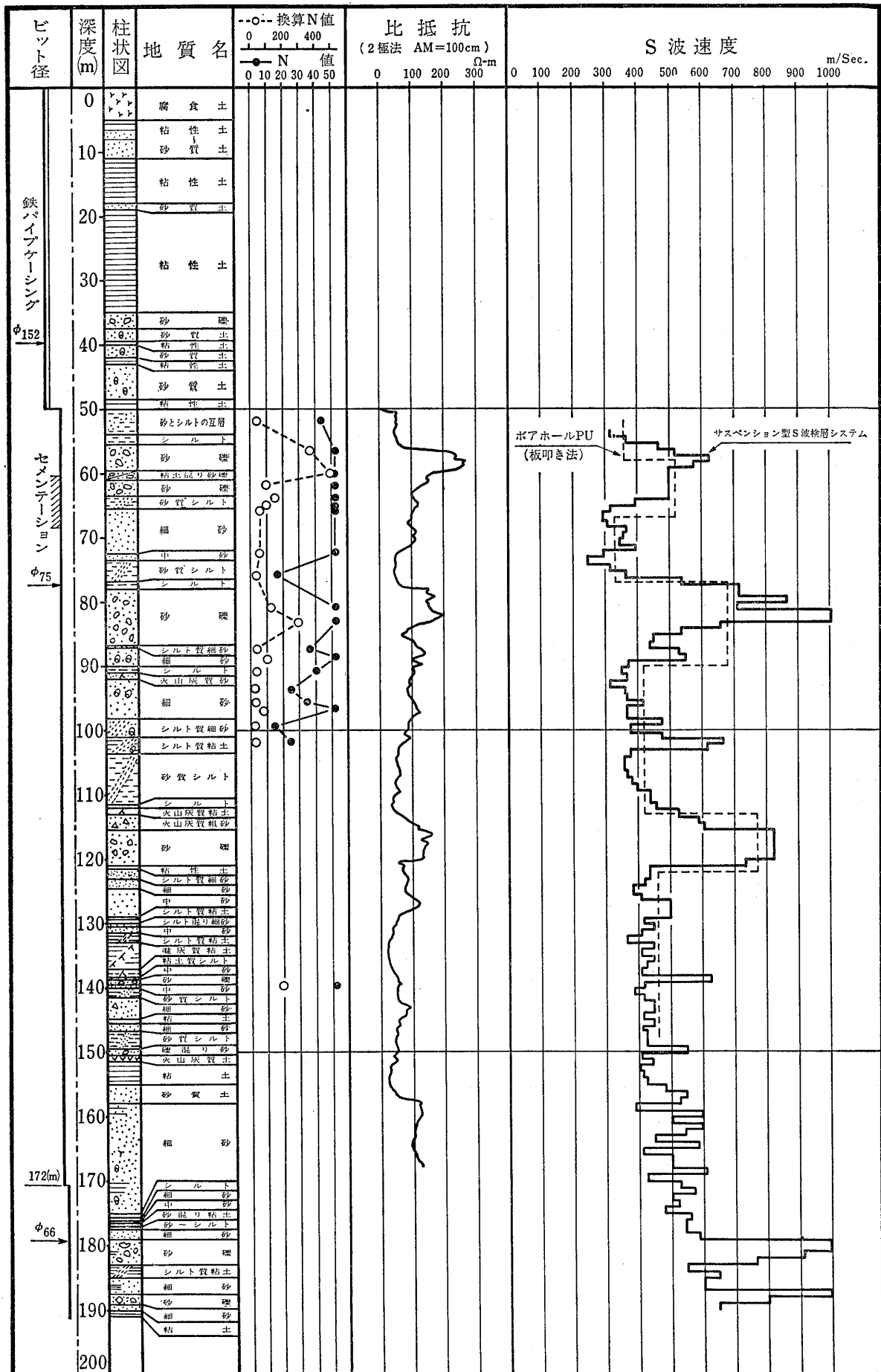


図-16 総合柱状図
Fig. 16 Synthetic geological column

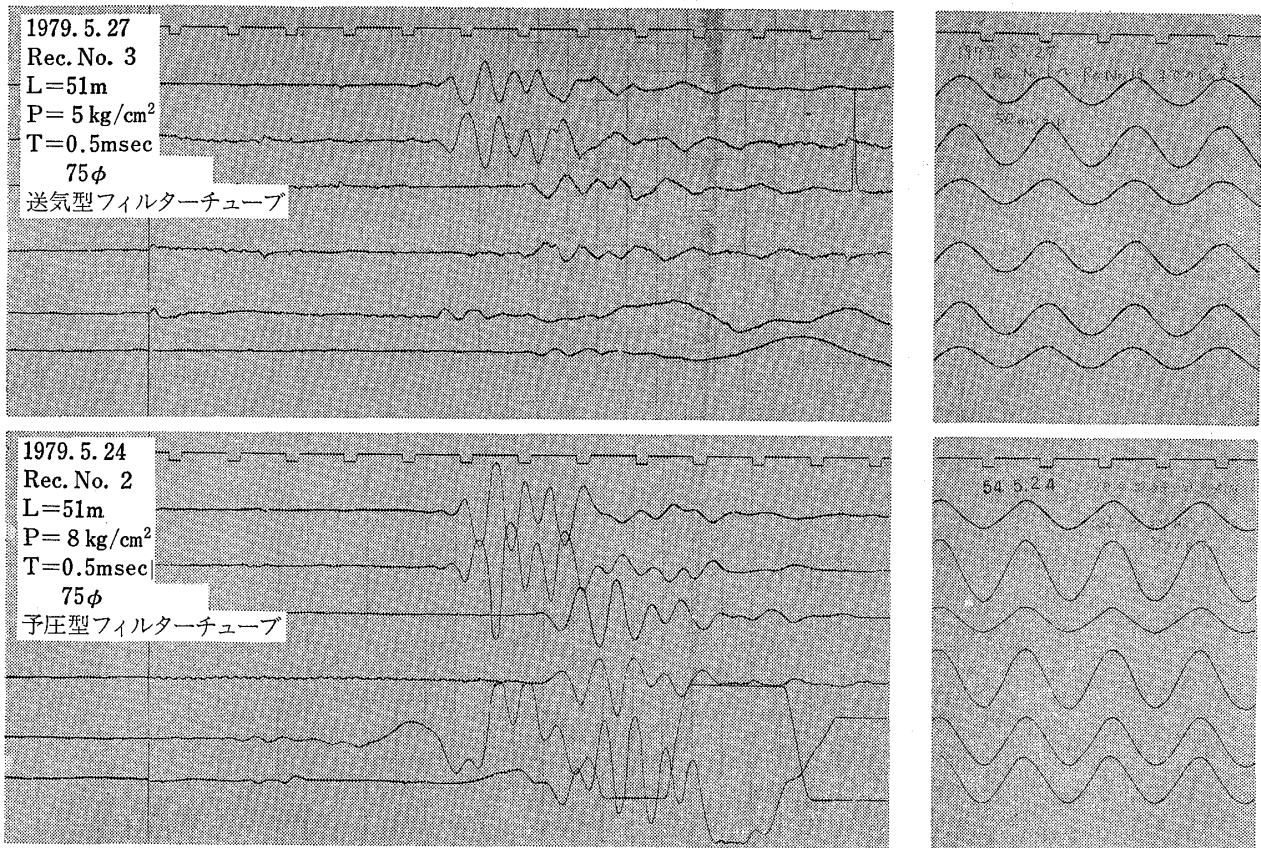


図-17 フィルターチューブのちがいによる受振波形の相異
 Fig. 17 Change in receiving wave form due to difference of filter tube

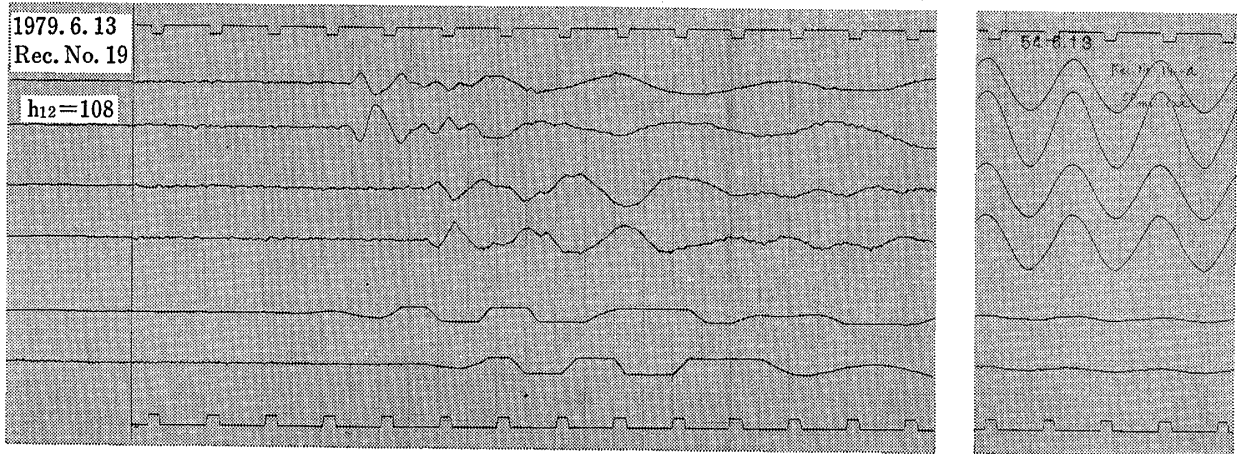


図-18 ソレノイド型電磁振源による測定記録の例
 Fig. 18 An example of measurement record by electromagnetic vibration source

ーシング内ではケーシングの速度を示すはずである。

図-20に深度104~105mの区間で観測した結果と深度79~80mの区間で観測した結果とを示す。この記録から加振力の作用した方向にかかわらず波の位相は変化していないことがわかる。また、伝播時間より79~80の区間速度はおおよそ5 km/secを示しており、鉄製ケーシ

ングの速度としてはばり妥当な値を示す。深度104~105mの区間速度は1.6km/secである。地層は締った砂質シルトでこれも妥当な値と認められる。

図-21に深度94mから129mの間で行なった実験結果を示す。図中“XS”と示したのは、本方式で得た結果である。“Sys C”はソレノイド型電磁振源によって得た結

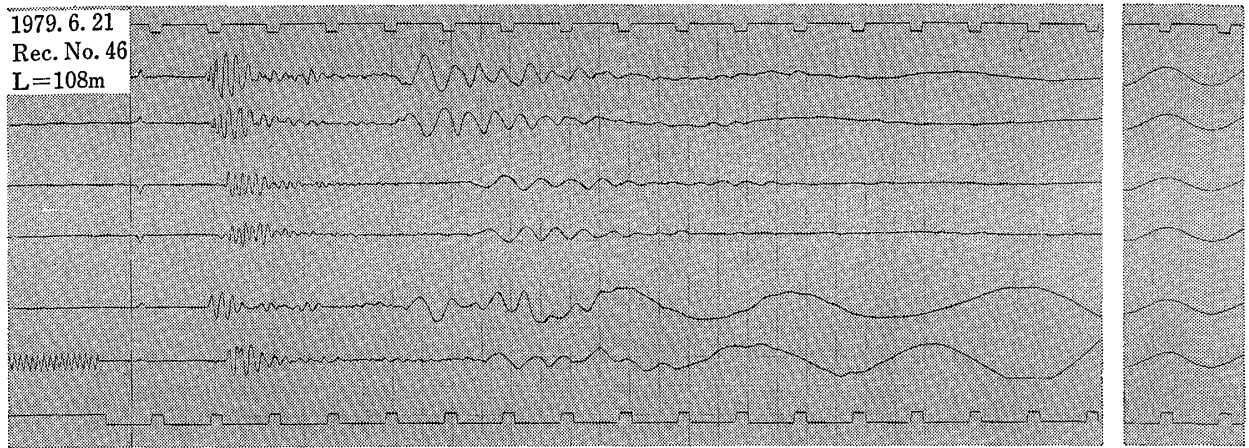


図-19 ソレノイド型P・S用電磁振源による測定記録の例

Fig. 19 An example of measurement record by solenoid type electromagnetic vibration source for P and S waves

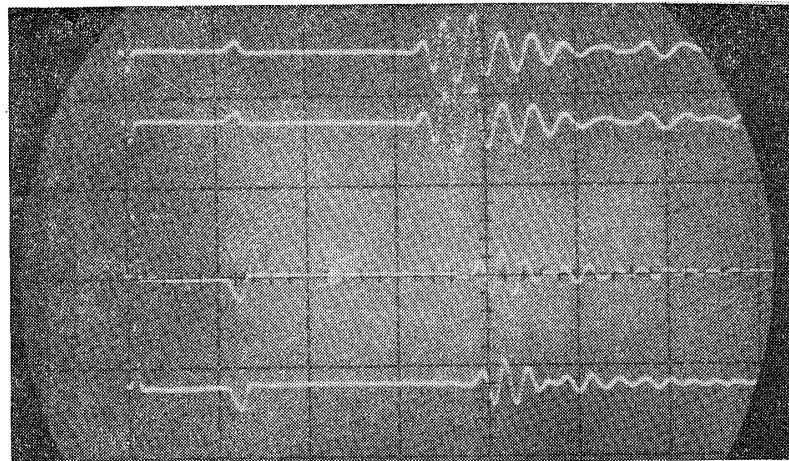
104~105m

N lz

R lz

N llz

R llz



79~80m (ケーシングパイプ中)

N lz

R lz

N llz

R llz

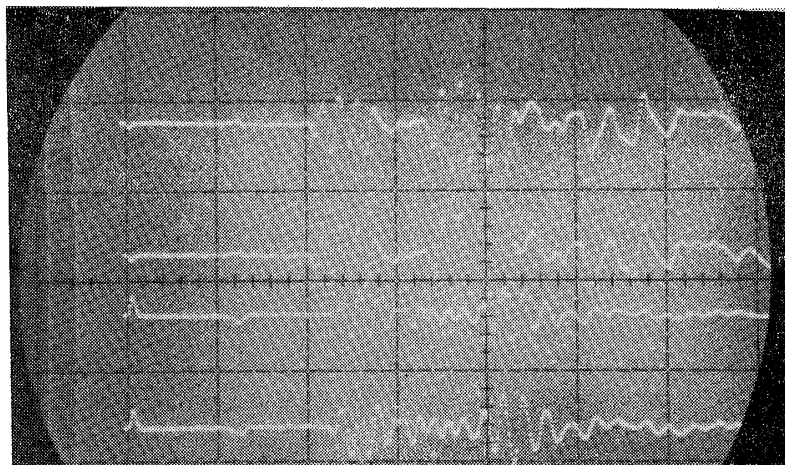


図-20 P波の記録 (P=10kg/cm², T=1 ms, 1 v/div, 1 ms/div)

Fig. 20 P wave record

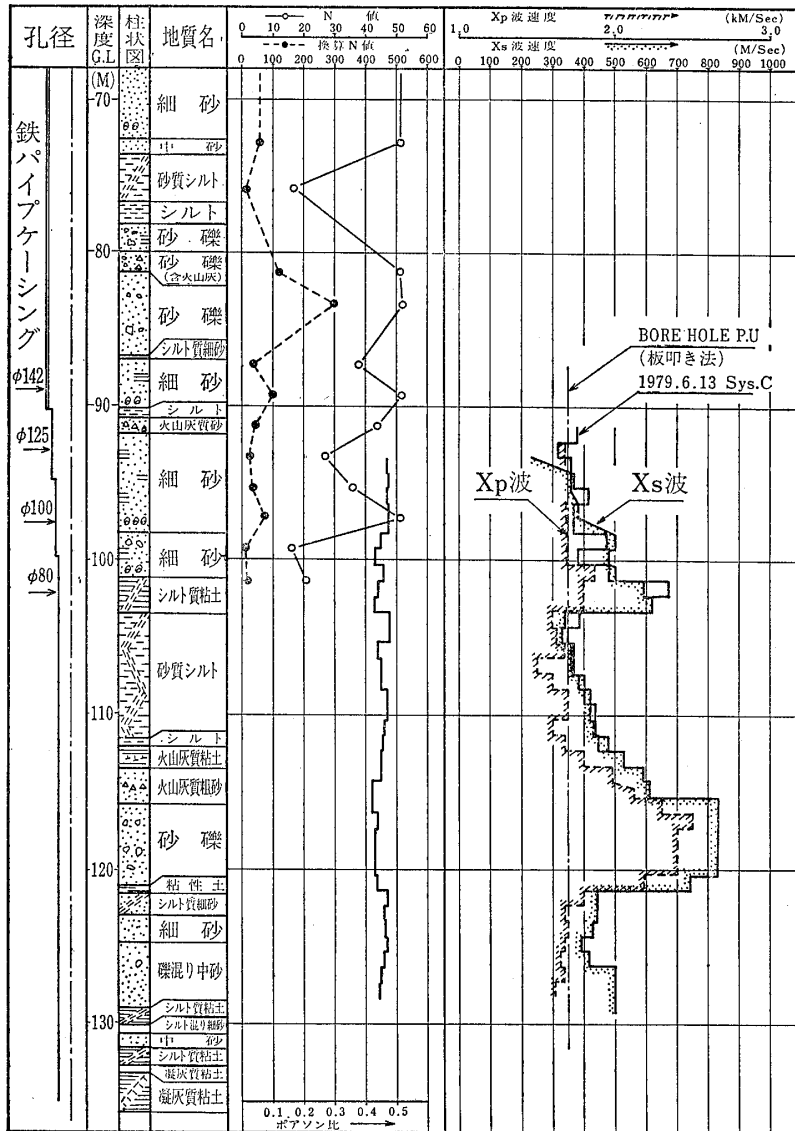


図-21 ソレノイド型振源およびその他の振源を用いた実験結果
 Fig. 21 Result of experiment using solenoid type vibration source and other vibration sources

果で両測定値は、非常によく一致している。したがって、本方式で観測した波をS波と認定することに何等、無理がないといえよう。

“XP”は、P波の速度である。ポアホールピックを用いた板たたき法により得た結果も併記してあるが、この結果は地上からのP波の伝播を計測しているの、読み取り精度が粗く細かい速度の変化はとらえることが不可能であるが、振源の違いによる問題はなく、ほぼ全体としては矛盾のない速度を示している。

7 むすび

①間接加振型振源と漂遊型受振器を一連のゾンデとし

たサスペンション型S波検層システムの実用化の見通しを得ることができた。

②ソレノイド型電磁振源が実用に供し得ることを確認した。

③ソレノイド型電磁振源を基本として、P波もS波も発生する振源機構についても実用に供し得ることを確認した。

④予圧型フィルターチューブが実用に供し得ることを確認した。

⑤この実験に使用したシステムでS波速度 1 km/sec 程度までの地層については、S波を観測できることを確認した。

⑥ソレノイド型電磁振源, 予圧型フィルターチューブを用いて, より簡易に深度500mの観測が可能である見通しを持つことができた。

⑦今後, 上部観測装置におけるデータ処理の問題, P波の読み取り時間分解能の問題などを解決し, より発展した総合的なシステムに仕上げていく必要がある。

参 考 文 献

- (1) 狐崎長琅(1967): 孔中固定式受振器によるS波の観測(I) 物理探鉱 第20巻 第1号
- (2) 狐崎長琅(1968): tube waveを利用した剛性検層法 物理探鉱 第21巻 第4号
- (3) 狐崎長琅(1970): S波検層に関する若干の問題 地震探鉱実験グループ会報 第54号
- (4) Kitsunezaki, C.(1971): Field-Experimental Study of Shear Waves and the Related Problems, Contrib. of Geophys. Inst., Kyoto Univ. No.11
- (5) 狐崎長琅(1975): 漂遊型受震方式によるS波の検層 (1) 物理探鉱 第28巻 第1号
- (6) 狐崎長琅, 中村研治, 菊池真市(1975): 漂遊型受振器によるS波の検層(2) 物理探鉱 第28巻 第3号
- (7) Kitsunezaki, C.(1978): A New Method for Shear Wave Logging, S. E. G. 48th Annual International Meeting
- (8) 狐崎長琅(1978): S波検層のための間接加振型振源 (1) 物理探鉱 第31巻 第6号
- (9) 狐崎長琅(1978): S波検層のための間接加振型振源 (2) 物理探鉱 第31巻 第6号
- (10) 狐崎長琅(1979): 振源部と受振部とを一連のゾンデとするS波検層方式 物理探鉱 第32巻 第1号
- (11) 今井常雄, 吉村正義(1970): 軟弱地盤における弾性波速度と力学特性 土と基礎 第18巻 第1号
- (12) 今井常雄, 吉村正義(1972): 地盤の弾性波速度と力学的性質 物理探鉱 第25巻 第6号
- (13) 今井常雄, 麓 秀夫, 横田耕一郎(1975): 日本の地盤における弾性波速度と力学的性質 第4回日本地震工学シンポジウム
- (14) 今井常雄, 麓 秀夫(1975): 地震波にみられる入射特性と地盤特性 地震学会春季講演会
- (15) 矢作 枢, 中川誠志, 和田克哉, 今井常雄(1975): 東京沖積地盤の地震時応答の予測 土と基礎 第23巻 第12号
- (16) 今井常雄, 麓 秀夫, 横田耕一郎(1975): 地盤の地震挙動の予測 第12回自然災害科学シンポジウム
- (17) Imai, T. (1977): P- and S-Wave Velocities of the Ground in Japan, Proc. of K. I. C. S. M. F. E.
- (18) Imai, T. (1977): P- and S-Wave Velocities in Subsurface Layers of Ground in Japan, Proc. of W. C. E. E.
- (19) 今井常雄, 麓 秀夫, 殿内啓司(1978): 沖積砂層のS波速度と土質特性 第5回日本地震工学シンポジウム
- (20) 森 和雄, 垣見俊弘, 大山 桂, 石田正夫, 阿久津純, 田尻貞治(1974): 埼玉県新座市・所沢市の試錐井とそれに関連する地表および地下地質 地質調査所月報 第25巻 第8号

