

## サスペンション型S波検層システムの開発（第2報）

小倉公雄・中西寿美雄

### DEVELOPMENT OF THE SUSPENSION S-WAVE LOGGING SYSTEM (Report No. 2)

Kimio OGURA and Sumio NAKANISHI

#### Abstract

Suspension S-wave logging is a new technique for measuring S-wave velocity that is carried out with a single sonde into which are built both the vibration source and the receiving unit. The sonde is simply lowered into a borehole with no necessity of fixing it to the borehole wall. In order to develop this technique into a practical system, OYO Corporation excavated a 400 meter test well at its Urawa Research Institute. The authors have used this well to conduct numerous experiments with the system. This report uses the data obtained from these tests, and also from in situ measurements taken using this equipment to demonstrate that the system may be used for practical purposes.

First, let us briefly summarize the functioning of the system itself (See Figure 4). Into a single sonde are built an indirect excitation source and two sets of floating geophones. The system includes a recording device that has a wave memory function. Each of the two sets of geophones consists of a horizontal and vertical floating geophone. The two sets are spaced one meter apart.

Each measurement operation is carried out in 3 steps. (See Figure 5):

- (1) Vibrations are radiated in a given direction that is designated N, the "normal" direction. The two horizontal geophones, which face in the same direction, pick up the vibrations. These waveforms are then stored.
- (2) Vibrations are sent in the reverse direction, designated R. The resultant waveforms are also picked up by the horizontal geophones, and are stored.
- (3) Vibrations are again sent in direction N. These are picked up by the vertical geophones and stored.

The three waveforms are simultaneously transferred to recording paper by an electromagnetic oscilloscope. Waveforms that show up as mirror-images of one another are easily identified as S-waves. The average velocity between the two components can be calculated from the time difference between them. The vertical components are used to measure P-waves and tube waves in order to assist identification of S-waves.

Measurements in the 400 meter test well began in May, 1979, and were completed in January of this year. Experiments are now under way with the object of dealing with a number of problems that must be solved in order to develop the system for practical use. These experiments include studies of different types of vibration sources, comparative efficiency of geophones and of vibration sources that simultaneously radiate P-and S-waves, and evaluation of the changing capacity for measuring S-waves in different layers, at different depths and with different borehole diameters.

By January 1980, about 1,600 records from 19 different logging experiments had been obtained. It is not possible all the data thus obtained here. Instead, we will cite a few records that have been used for specific objectives as illustrative examples.

Figure 6 shows examples of measurement records taken in different fine sand layers in order of increasing depth. Good S-wave records were obtained in all cases, regardless of depth. It may also be noted that by using recordings made from two geophones, the velocity over the interval between them can be accurately determined.

If S-wave velocity in the layer where the vibration source is located increases, observed amplitude decreases. An example of a record illustrating this is shown in Figure 7. This phenomenon serves as a major factor in limiting the measuring range of the system. The experiments, however, confirmed that the system is capable of simply and accurately measuring S-wave velocity up to speeds of around 1 km/sec. The data also indicates that frequency of S-waves changes with velocity in different layers. The greater the S-wave velocity, the higher the observed frequency (See Figure 10).

In carrying out measurements, such things as changes in borehole diameter, the presence or absence of a casing, etc. constitute significant factors to be considered. In the case of borehole diameter, a minor tendency for S-wave amplitude to decrease with diameter increases was noted (see Figure 11). Of course, this has no effect on measured S-wave velocity. Where a casing is used, the effect is the same as with the plate hammering or downhole method. If the casing is soft (i.e., PVC casing), S-wave velocity is somewhat higher (by several hundred meters per second), but when the casing fits well against the borehole wall, the presence of a casing does not interfere with S-wave logging (See Figure 2).

Examples (1) and (2) in Figure 13 compare wave records taken by the traditional plate hammering method to suspension S-wave velocity records made both in the 400 meter test well and in other areas. These examples clearly show a good correspondence between S-wave velocity measurements taken by the two systems. Furthermore, no discrepancy can be noted between results obtained by this system and previous findings concerning the relationship between N-value and S-wave velocity.

Thus, it is clear that by using this new system, measurements can be taken in formerly inaccessible depths easily and accurately, making possible the accumulation of a large volume of useful information.

That this system may be practically used up to depths of 400 meters has already been confirmed (See Figure 20). However, in principle, there is no reason why it cannot be used at greater depths.

This system is capable of taking measurements semi-automatically at 1-meter intervals at the rate of 100 meters per hour. It is expected that this performance level is capable of generally satisfying the present requirements in civil engineering, earthquake engineering, etc.

Much work remains to be done in improving the sensitivity of this system to weak or higher velocity S-waves, or in the upgrading of measuring accuracy through the introduction of electronic data processing techniques. However, the authors believe that all the fundamental information required for future development has already been obtained.

## 1はじめに

S波検層を行なう時、通常、受振点は孔井内に設けられるが、振源は孔井の外に位置している。このために、測定深度が大きくなるにしたがって、振源と受振器間の距離も大きくなる。したがって、測定可能深度に限界が生じる。また、観測される周波数は数10Hzであり、高い時間分解能を期待することができない。<sup>1)</sup>

サスペンション型S波検層法は、より深く、より精度良く、しかも簡便にという要求を満たすことができるS波検層法である。<sup>2)</sup>

この方法では、振源と受振器は一連のゾンデに組込まれ、このゾンデを孔井内に固着することなく、S波の伝播時間を計測することができる。したがって、測定可能深度に関しては、振源と受振器の間隔は常に一定であるために、この関係が変化する従来の方式と異なり、理論的にはいかなる深度にも対応できることになる。また、複数個の受振器を用いて波の伝播時間差を測定することによって、いかなる深度においても良好な時間分解能で

観測を行うことができる。

このサスペンション型S波検層システムの実用化のために、筆者等は株応用地質調査事務所の浦和研究所に深度400mの試験孔を掘削し、1979年5月より今日まで種々の実験を行なってきた。

この報告では、400mの試験孔での実験結果に基づいて、測定可能深度の評価、P-S振源の評価、他の検層法との比較等について述べる。

## 2 計測システムの概要

サスペンション型S波検層システムの特徴は、ゾンデに関しては、孔内水を介して孔壁に力を加える間接加振型振源と、孔内水の動きを検出する漂遊型受振器に見出すことができる。図-1に測定システムの概要を、図-2に間接加振型振源の1つの実用的方法であるソレノイド型電磁振源を、図-3に漂遊型受振器の断面図を示す。

図-4に測定系のブロック図を示す。主要部は、ゾンデ内に組みこまれた間接加振型振源と水平動受振器、上下動受振器の各1成分を一組として、相互の間隔を1m

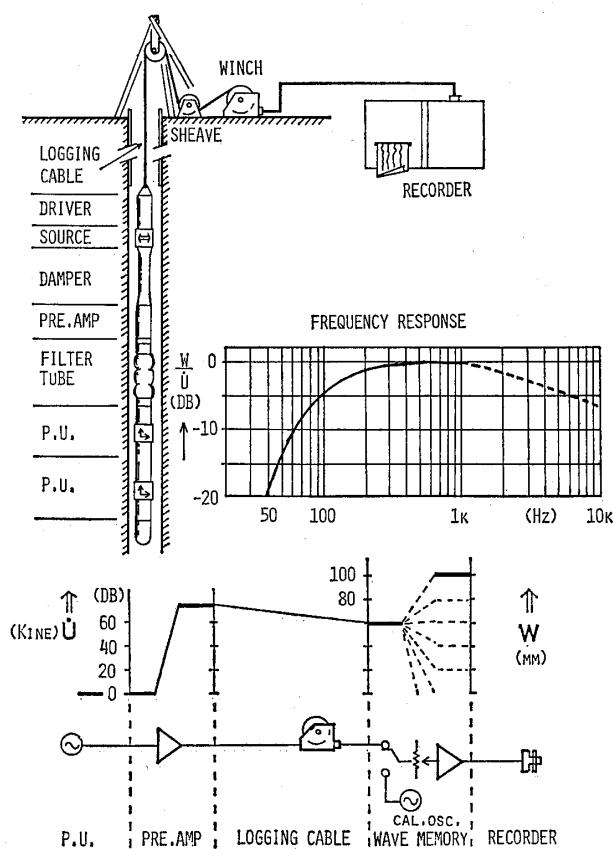


図-1 計測システムの概要  
Fig. 1 Schematic of measurement system.

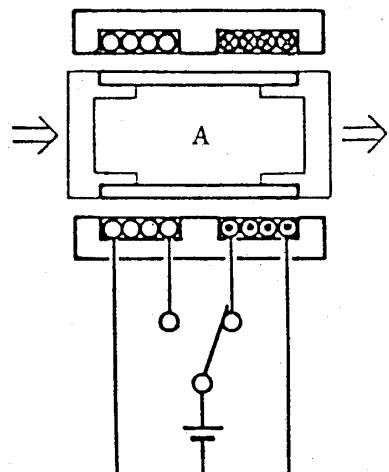


図-2 ソレノイド型S波用電磁振源  
Fig. 2 Solenoid type electromagnetic vibration source for S-wave.

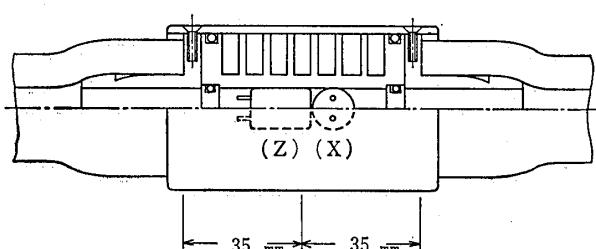


図-3 漂遊型受振器  
Fig. 3 Suspension type receiver (P. U.).

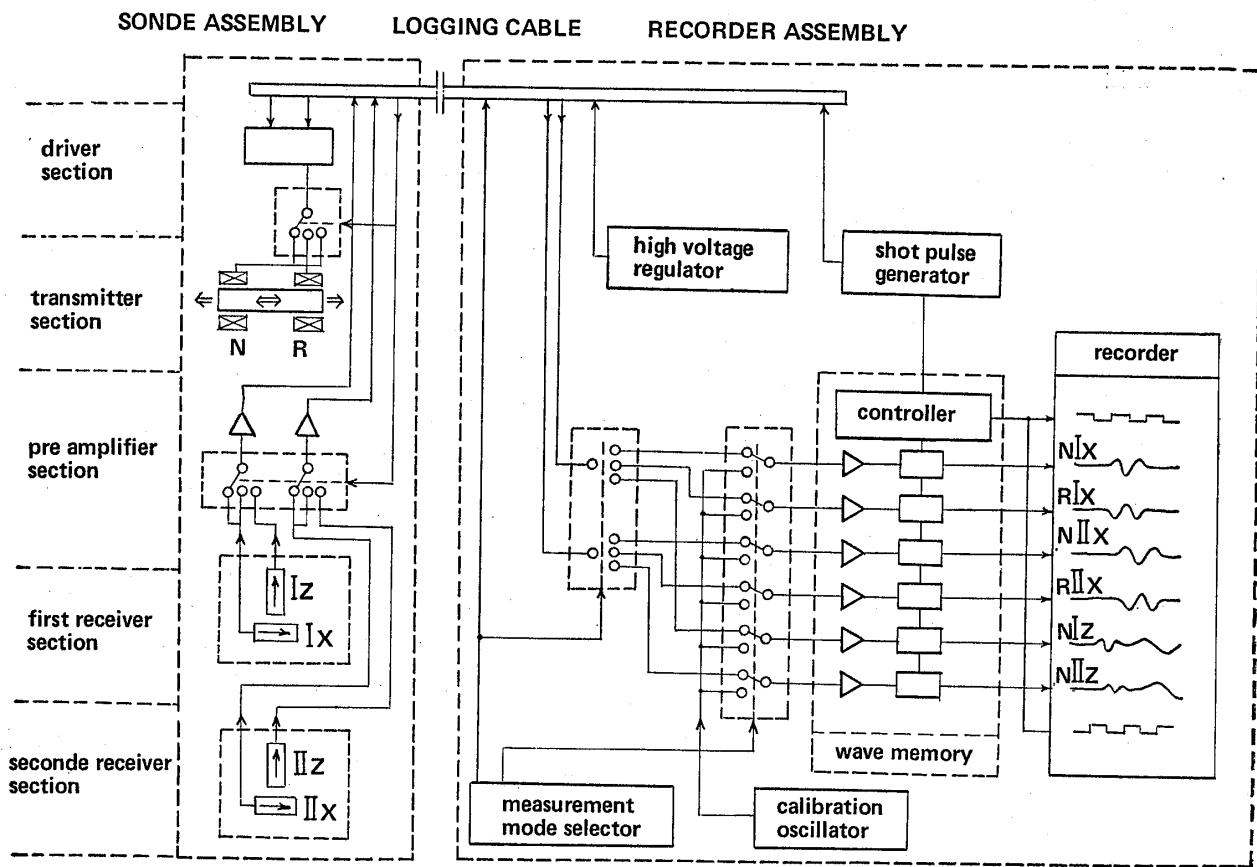


図-4 システムブロック  
Fig. 4 System block diagram.

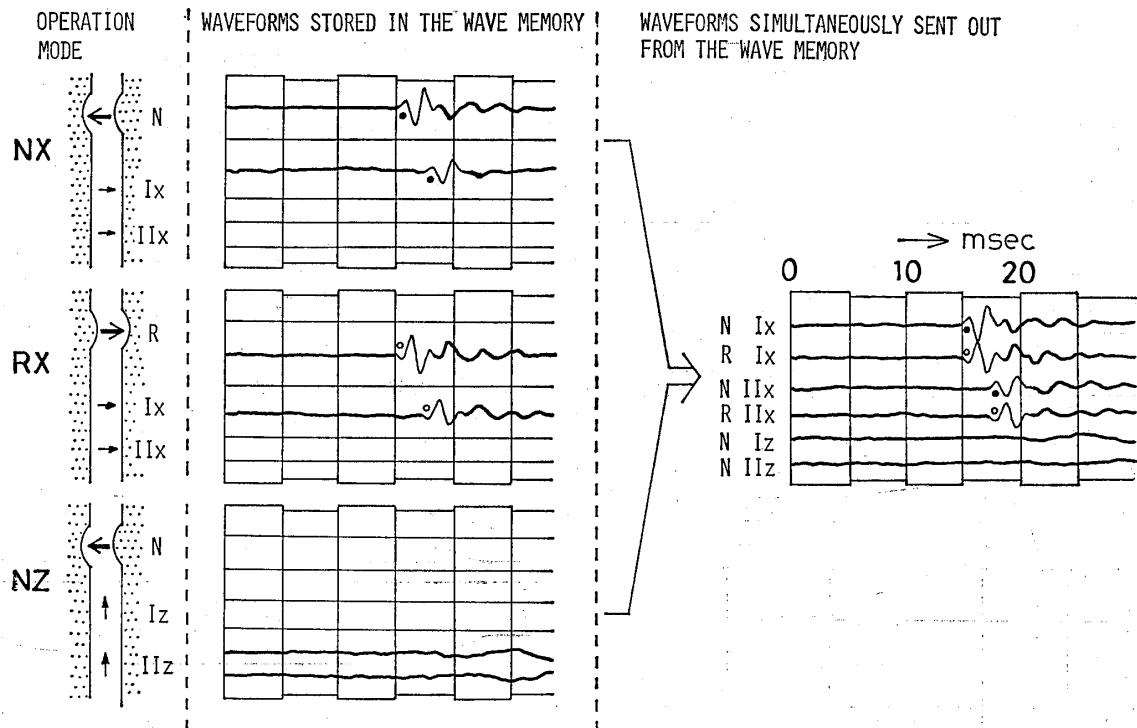


図-5 測定モードと記録状況  
Fig. 5 Measurement mode and recording pattern.

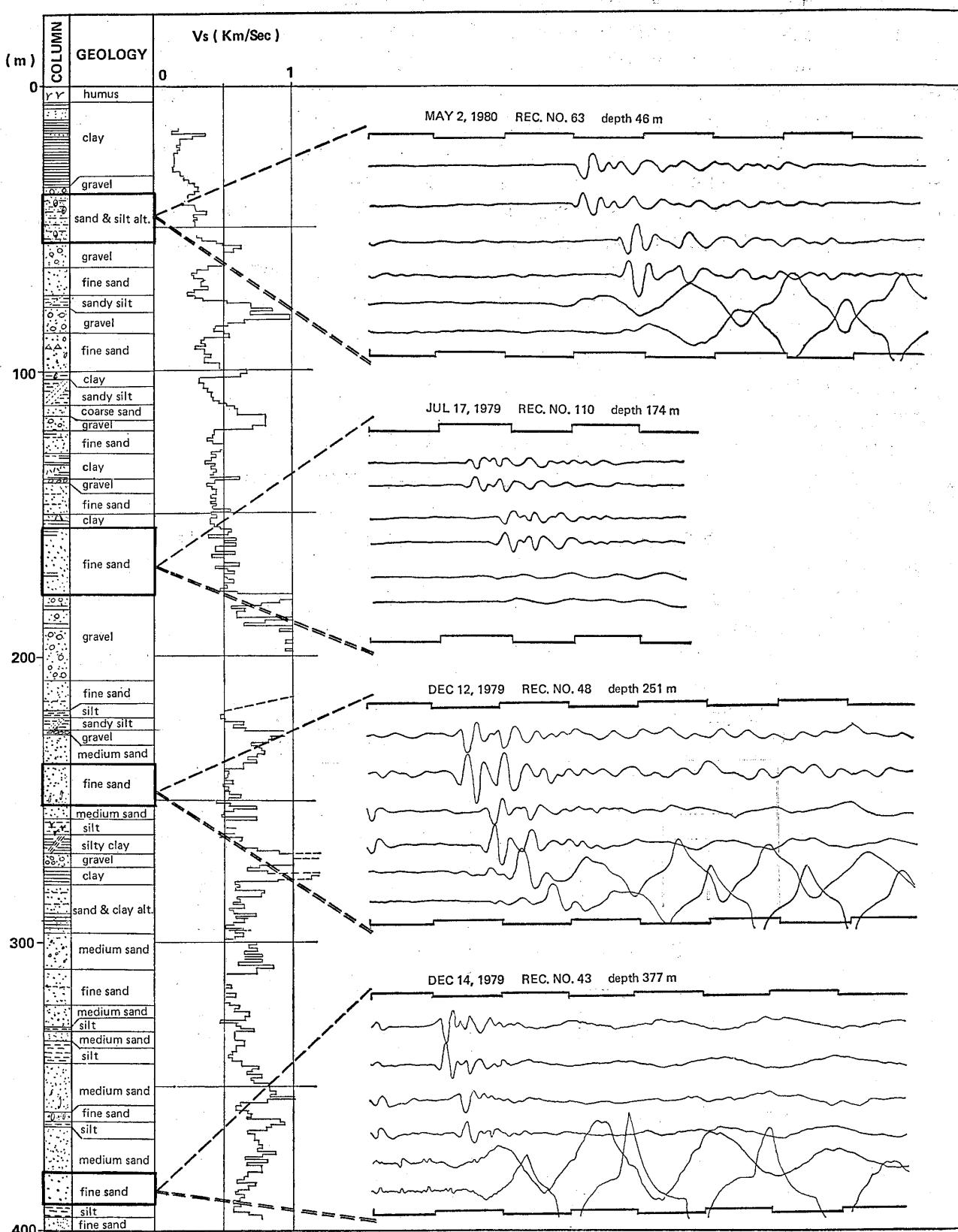


図-6 異なった深度の砂層の測定記録例  
Fig. 6 Measurement examples of different depths.

とした2個の漂遊型受振器および地表におかれた波形記憶機能をもった記録装置である。その他ゾンデ内には、受振信号を安定に地上に伝送するためのプリアンプおよび振源を駆動するためのドライバーが組みこまれている。記録部は、検層用ケーブルの限られた線数でより多くの情報を得るために、後述する3つのステップの測定モードを選択するためのモードセレクター、振源駆動用の高圧電源、加振時の同期を取るためのパルスジェネレータ、受振信号の振巾の較正用オシレータ、および電磁オシログラフから構成されている。その他、一般的な検層器同様、検層用ケーブルを巻きとるワインチ、深度を知るための深度計が必要である。

実際の計測作業は、おおむねつぎのように行なう。まず、ゾンデを測定深度に停止させ、つぎの3つのステップの測定を行う(図-5参照)。

① N(NORMAL)方向に振源を加振し、これと方向を同じに配置してある水平動成分の受振器で受振し、この波を記憶する。

② R(REVERSE)方向に振源を加振し、①と同一の水平動成分の受振器で受振し、この波を記憶する。

③ N(NORMAL)方向に振源を加振し、上下動成分の受振器で受振し、この波を記憶する。

これらの3回の測定波形を電磁オシログラフの記録紙

上に、ウェーブメモリーから同時に出力する。

この記録から、図-5に示すような位相が互に反転するS波を確認することができる。第1受振器と第2受振器のS波到達時間の差( $T$ )より、区間速度を算出する。上下動成分の受振器は、P波やチューブウェーブ等のモニターとして用い、S波の判定の助けとしている。また後述するP-S用振源を用いた測定に際しては、この上下動成分の受振波形よりP波の到達時間差を読み取り、P波の速度を算出する。このようにして、1測定点での測定を終えると、つぎの測定点までゾンデを移動する。さきに述べた3つのステップの測定に要する時間は、約5秒である。測定点の移動は、ゾンデが孔内水中を漂遊しているため、円滑容易に行なわれる。これまでの経験によれば、1時間あたり100点程度の測定が可能である。

### 3 測定結果

#### 3-1 深度に対する適応性

このシステムにおいて静水圧(孔内水圧)に対する配慮を最も必要とするのは間接加振型振源である。これは加振力を孔内水を介して孔壁に作用させる部分であり、深度に応じて増減する静水圧に耐える構造であることはもちろん、加振時に静水圧に起因した余分の仕事をさせないような構造が必要である。図-2のソルノイド型電

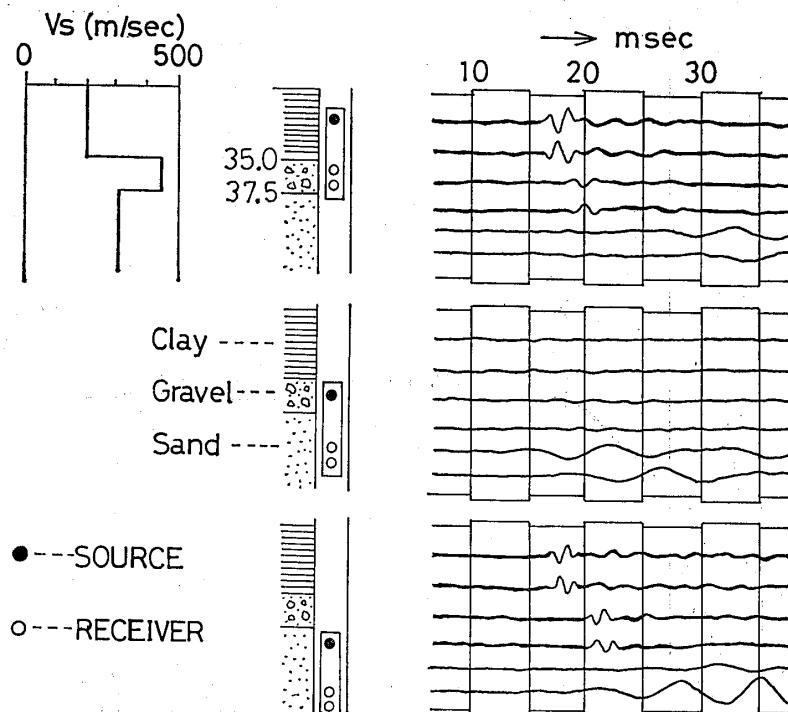


図-7 観測されるS波の振巾と、振源位置の三層の状況(S波速度)による変化を示す記録例  
Fig. 7 Record example showing how S-wave amplitude dramatically decreases, corresponding to its velocity increase at the source.

磁振源は、実際には薄いゴムで覆い、内部に水あるいは油を満たして振源内部と孔内水との間に差圧が生じないようにしてある。この方法が最も単純でかつ信頼性が高く、静水圧の増減、すなわち測定深度の増減にかかわらず一定の加振力を保持することができる。

図-6に400mの試験孔におけるおののおの深度の異なる細砂層での測定記録例を示す。測定深度にかかわりなく良好な記録が得られている。

### 3-2 測定能力

観測された波の振巾が、振源の位置する地層のS波速度の増加に従って、著しく減少するというデータがある。その特徴を典型的に示す記録例を図-7に示す。この記録は、S波速度450m/sec、層厚2.5mの砂礫層をはさんで、上方がS波速度200m/secの粘性土、下方がS波速度300m/secの砂層のところを下方よりゾンデを引上げながら、測定系の条件は同一にして観測し、その振巾を比較したものである。振源と受振器が共に砂層にある場合、および振源が粘性土に、受振器は砂礫層にある場合には、いずれもS波の振巾は読み取可能な程度に観測され

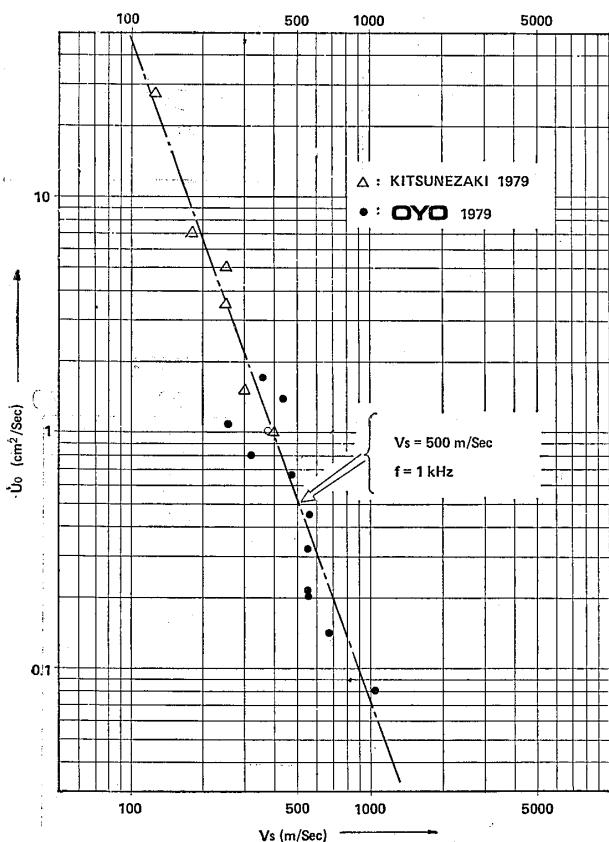


図-8 振巾特性

Fig. 8 Relation between S-wave amplitude and velocity at the source.

ている。しかし、振源が砂礫層中にある場合には、S波の振巾が著しく小さくなっている。図-8に一定の振源力によって発生する振源位置のS波の変位( $U_0$ )と、その位置のS波速度( $V_s$ )との関係を示す。この図は、感度較正のなされている2個の受振器で観測した、受振波形の振巾比から区間の減衰率を求め、各深度における地層の減衰率の分布図を作り、そして、減衰率分布図に従って受振波形のS波振巾から振源位置でのS波の変位を算出した値と、振源位置でのS波速度をプロットしたものである。この図によれば、振源の位置における地層の

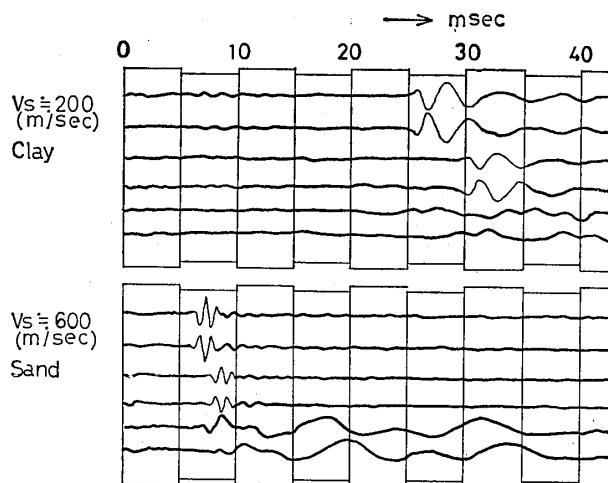


図-9 S波速度の増加に伴いS波の周波数が高くなることを示す記録例

Fig. 9 Record example showing the event that frequency of S-wave is heightened, keeping with its increased velocity.

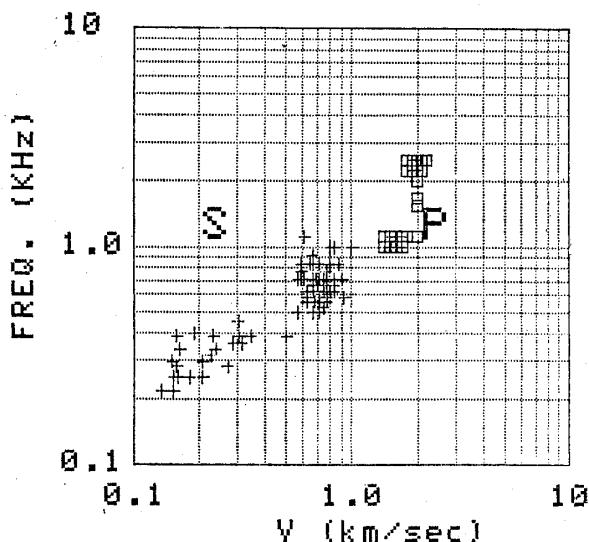


図-10 S波速度と周波数の関係

Fig. 10 Relation between S-wave velocity and its frequency.

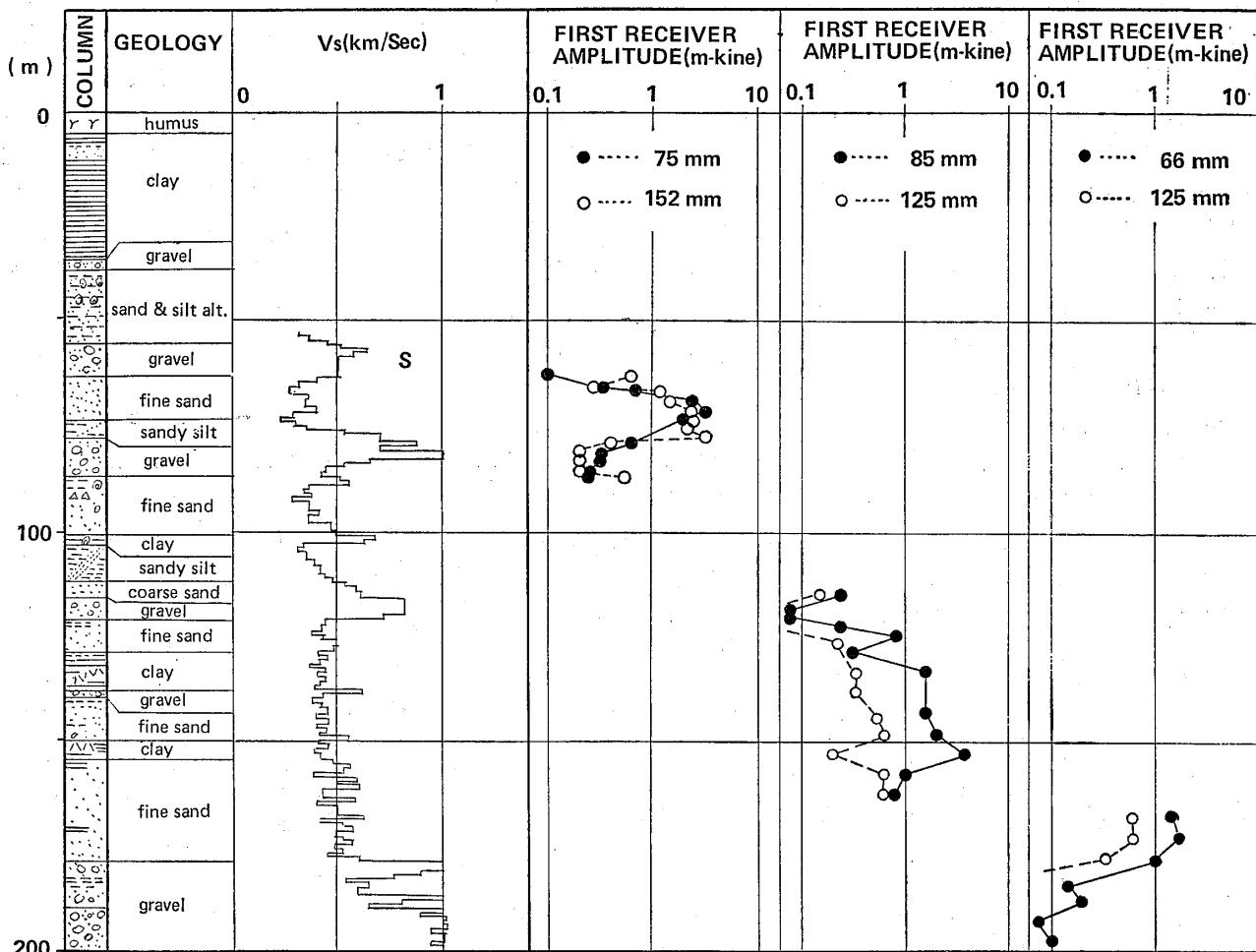


図-11 孔径とS波の振巾の関係

Fig.11 Relation between borehole diameter and S-wave amplitude.

S波速度の増加に伴って、S波の振巾が指数関数的に減少していることがわかる。

このことは、より速いS波速度をもった地層を測定対象とする場合、観測系の利得が同一であれば、より大きな振源力を必要とすることを意味する。現在試作したシステムは、S波速度1 km/sec程度までの地層への適用が可能であることを確認している。

### 3-3 S波の周波数

本システムで観測されるS波の周波数も、地層のS波速度によって変化する。図-9に、S波速度200m/secと、600m/secの地層において観測された記録の例を示す。この図に示すように、一般に加振条件が同じであっても、受振されるS波の周波数は、地層のS波速度の増加に伴って高くなることを示す。図-10は、S波速度と周波数の関係をプロットしたものである。参考までに、後述するP-S振源によって観測されたP波の周波数と

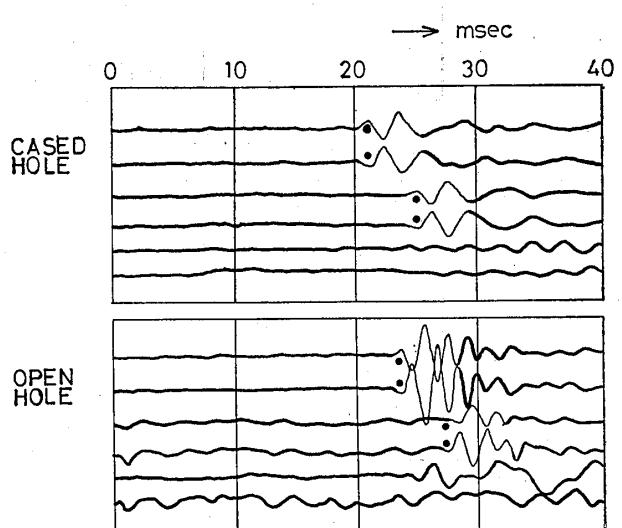


図-12 ケーシングが存在しても測定できた記録例

Fig.12 Measurement example in cased hole.

速度の関係もプロットしてある。この図における速度は、受振器の位置の速度を示す。振源位置の速度と周波数の関係も比較したが、ほぼ同様の結果が得られている。

### 3-4 孔径・ケーシングの影響

現場の測定の際に重要な要素である孔径の変化、ケー-

シングの有無に依存する S 波の測定能力に関するいくつかのデータも得られている。

試験孔の掘削に伴ってリミングが行なわれた。リミングの後に測定された記録と、リミング前の記録の S 波速度と振巾を比較すると、S 波の振巾は孔径が大きくなると若干小さくなる傾向が認められる。図-11に、

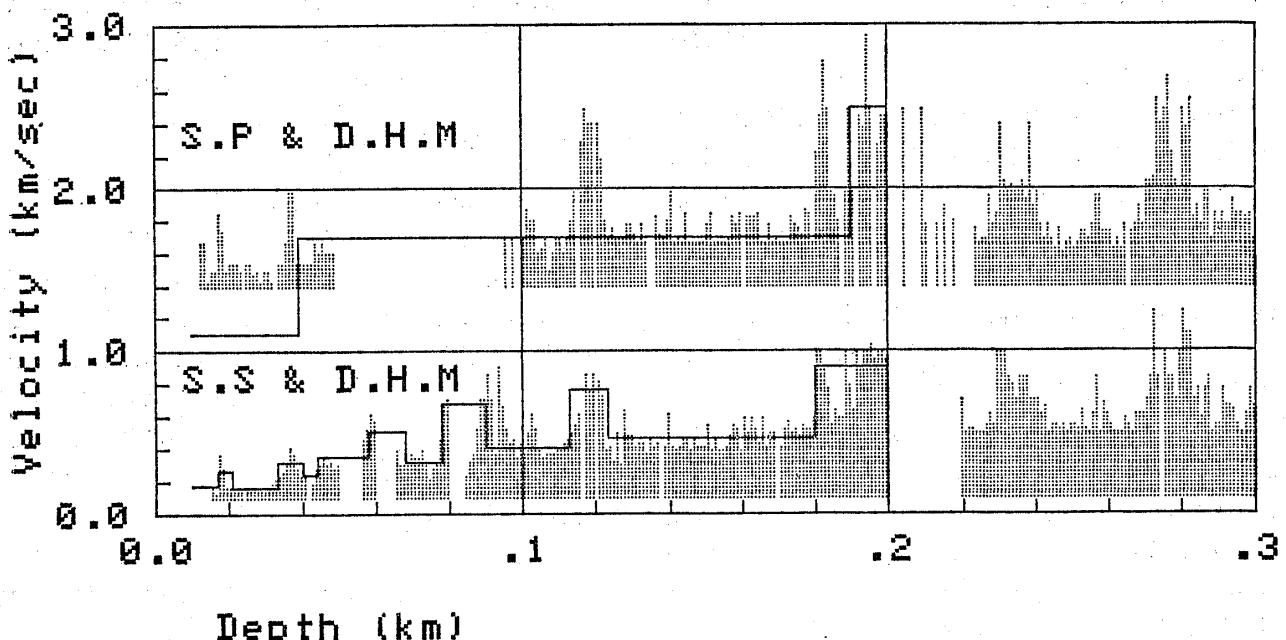


図-13 (1) DOWNHOLE 法で得られた記録との比較(1)  
Fig.13 (1) Comparison with record by downhole method. (1)

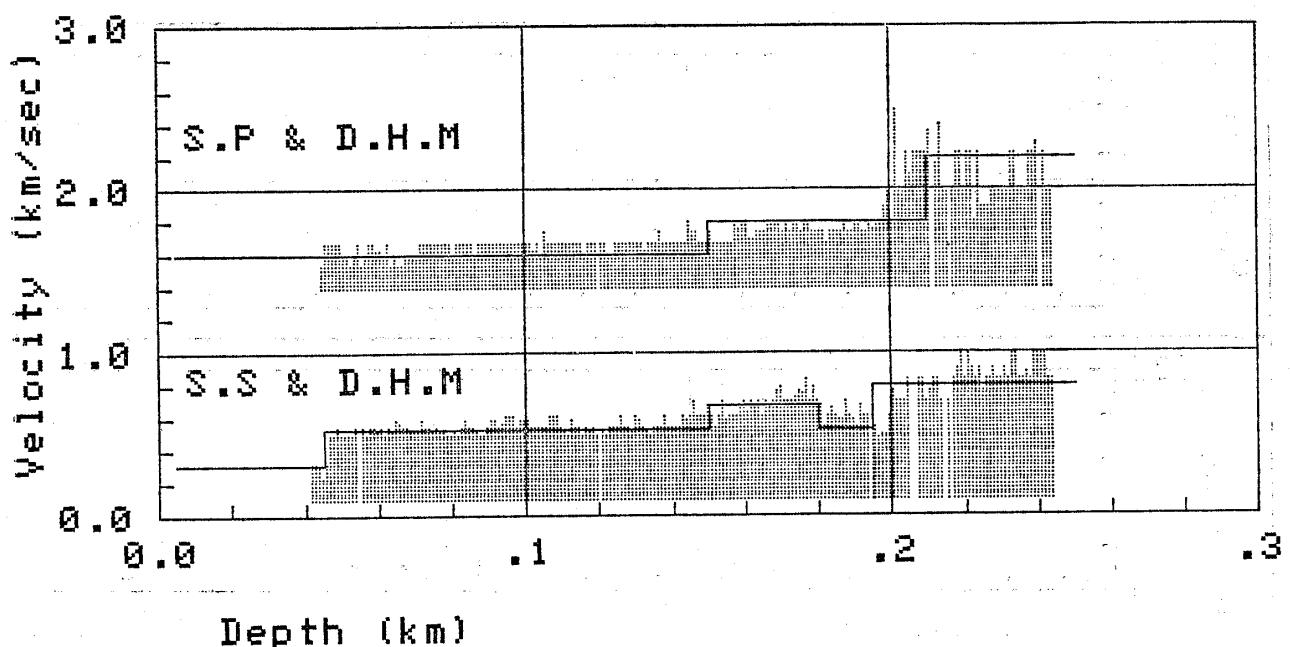


図-13 (2) DOWNHOLE 法で得られた記録との比較(2)  
Fig.13 (2) Comparison with record by downhole method. (2)

N方向に加振した際に得られた第一受振器の波の振巾を孔径別に示してある。一般的な傾向は、図-11の中央および右側に見るように、確かに振巾が小さくなるが、左側のデータのように最も孔径比が大きいにもかかわらず、ほとんど振巾が変化しない場合もあり、現在までのデータから普遍的な結論を求ることはできないが、今回の実験に用いた試験孔のようなS波速度分布のところでは、孔径によるS波測定能力への影響は小さいと言つても差支えないと考える。

ケーシングは、掘削作業上からは孔壁の崩壊を防ぐために必要であるが、検層にとっては大きな障害物として作用する。一般にケーシングが入ると、検層データは、なんらかの補正を行なうか、あるいはその影響を無視してよいようなケーシングの種類を選択しなければならない。本システムの場合も同様であり、その制限の種類は従来の DOWNHOLE 法と類似している。すなわち、PVC ケーシングのように材質が軟いものを用い、孔壁とケーシングの密着が良い場合で、さらに地層の S 波速度がある程度速い（数百 m/sec）場合には、ケーシングが在存しても S 波を測定することが可能である。このことを示す例を図-12に示す。測定条件は、ケーシング内径75 mm、肉厚 5.9mm の PVC ケーシングで、設置後約 4 ヶ月経過している。この条件でケーシングのたわみの波の速度は、周波数 200Hz とすれば、約 150m/sec 程度であり、測定された S 波速度は約 250m/sec である。図-12

の上は、ケーシングパイプがある場合に得られた記録であり、反転の良好な S 波が得られている。同図の下は、ケーシングパイプのない時の同一区間の記録である。約 30m の区間にわたってケーシングの有無による速度の相異を調べたが、図-12の上のような記録が得られていれば、ケーシングの有無にかかわりなく、測定される速度は一致することを確かめた。鉄製のケーシング内においては防害波が卓越し、データ処理などをほどこさない記録から直接 S 波を確認することはできない。

#### 4 他のデータとの比較

##### 4-1 板叩き法の記録との比較

より直接的なデータとして、板叩き法によって得られた S 波速度との比較を図-13に 2 例示す。図中、波線で柱状に示した S, S は本システムで得られた速度であり、実線で D. H. M と示したものは板叩き法によって得られた S 波速度である。なお、図中 S. P & D. H. M として示してあるものは、後述する P-S 振源によって得られた P 波速度と、地上のカケヤによる打撃を振源とする波の速度を示している。

板叩き法によって得られる S 波の周波数は、数 10Hz 程度である。一方、本システムによる S 波の周波数は数 100Hz である。このように波の波長は 10 分の 1 程度であるが、両者によって求められる S 波速度は良い一致を示している。

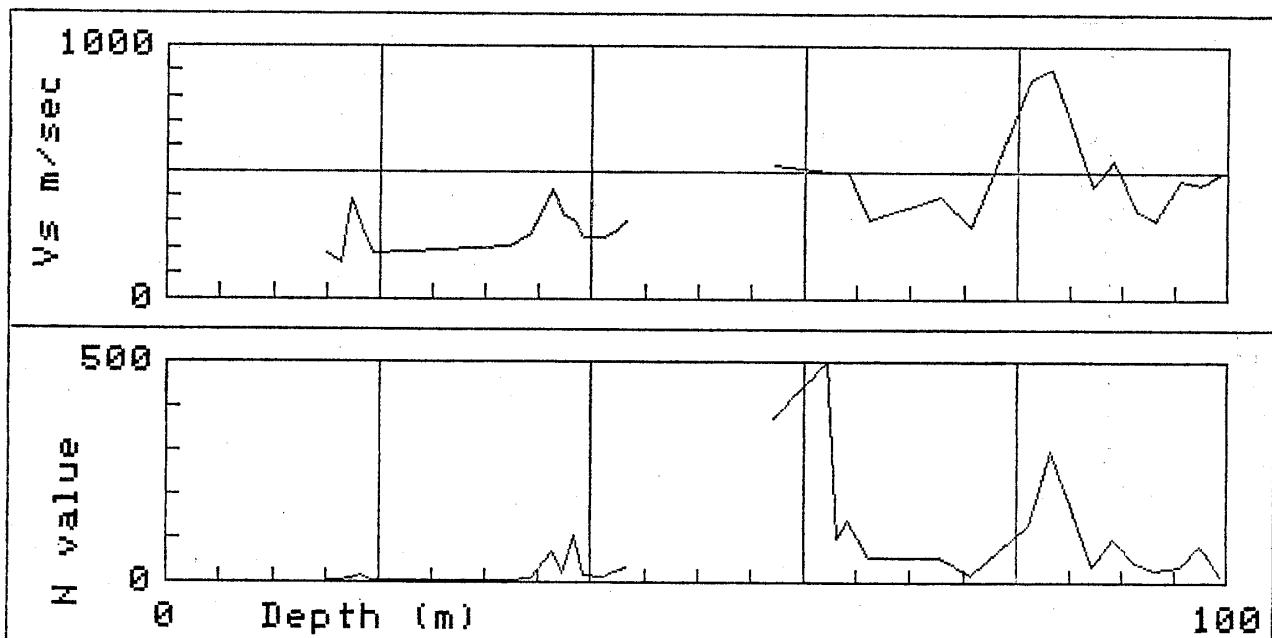


図-14 (1) S 波速度分布と N 値の分布の比較(1)

Fig.14 (1) S-wave velocity distribution and N value distribution. (1)

## 4-2 N値との対比

P S 検層によって求められた S 波速度と N 値の間には比較的良い対応があることは従来より言われている。そこで、本システムによって得られた S 波速度と、N 値の関係を整理した。図-14には、N 値の分布とその測定深度に対応する S 波速度の分布を 2 例示す。50 以上の N 値

は、50 回打撃時の貫入量から 30cm 貫入に要する打撃数に換算したものである。その他の深度等による補正是行なっていない。N 値と S 波速度の関係をプロットした結果を図-15 に示す。S 波速度と N 値との間には比較的良い対応が認められる。総計 107 個の今回の実験データから求められた  $V_s$  と N 値の関係を示す実験式を図中に示

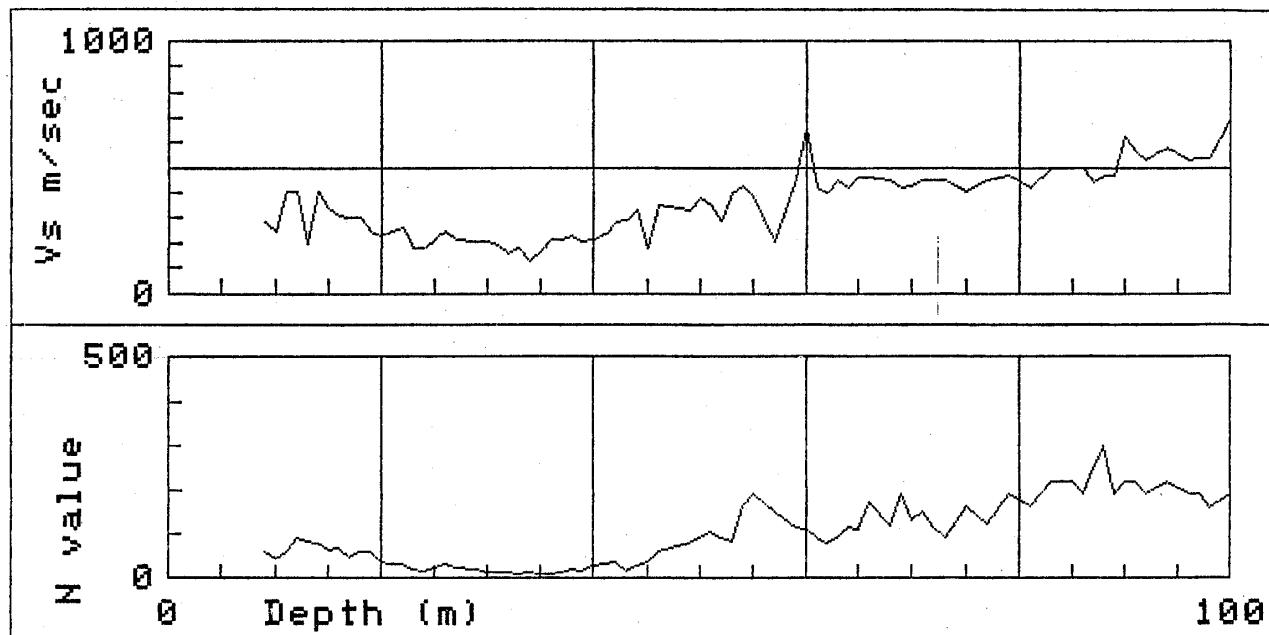


図-14 (2) S 波速度分布と N 値の分布の比較(2)

Fig.14 (2) S-wave velocity distribution and N value distribution. (2)

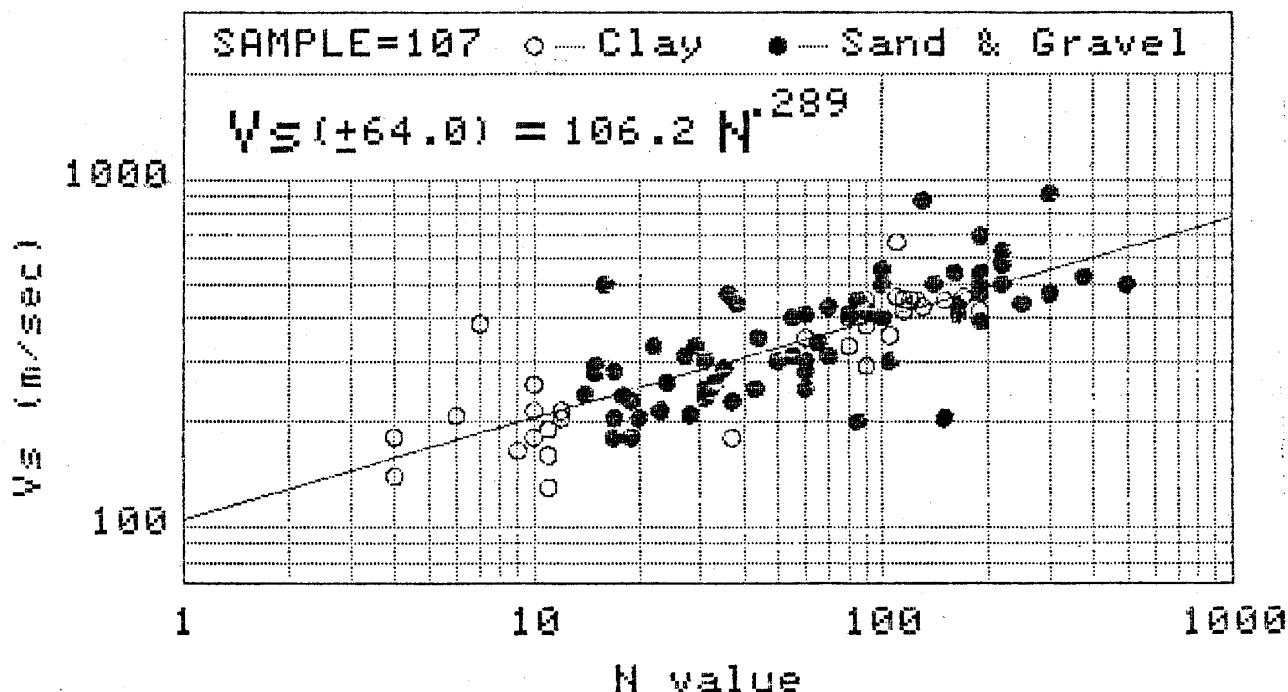


図-15 S 波速度と N 値の関係

Fig.15 Relation between S-wave velocity and N value.

しである。

#### 4-3 比抵抗との比較

今回の実験の一環として実施した電気検層による比抵抗とS波速度との比較を図-16示す。比抵抗は電極間隔1mの2極法で計ったものである。S波速度と比抵抗を直接関連づけることは困難と思われるが、分布の様子

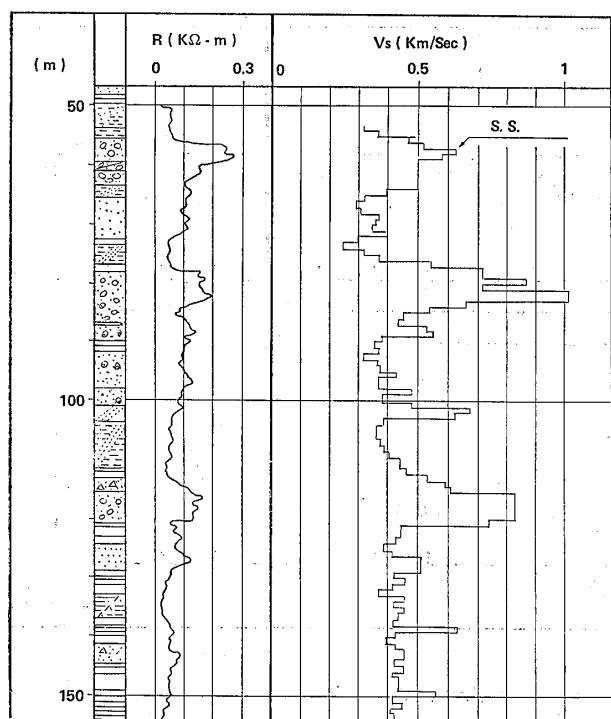


図-16 S波速度と比抵抗の関係

Fig.16 Comparison with resistivity.

は比較的良い対応を示している。

#### 5 ソレノイド型P-S用電磁振源

地層のS波とP波の速度を同じ測定器を用いて、しかも孔井内におけるゲンデの位置を全く変えることなく、すなわち、すべての測定条件を同一として測定することは、S波とP波の速度から地層の諸物理定数を算出したり、S波やP波の波形などを論じようとする場合には重要なことである。

このP-S用電磁振源は、図-2に示すソレノイド型電磁振源に剛な振動板を置き、これに可動部を衝突させる構造になっている。

このP-S用振源の模式図と記録例を図-17に示す。記録例中 S.P. と印したP波のチャンネルの時間軸目盛は、図中 X.S. と印したS波のチャンネルに対して2分の1になっている。これはP波の読み取り時間分解能をS波の場合とほぼ等しくするために、ウェーブメモリーへの書き込み速度を2倍にし、オシログラフに同時に表示したためである。

図-18には、図-2に示す振源を用いて測定したS波の速度 (S.S.) を点線の柱状様に、P-S用振源を用いて測定したS波の速度 (X.S.) を(+)印で示してある。

図-19は横軸に (S.S.)、縦軸に (X.S.) をとり、図-18に示す同一深度のそれぞれの測定値をプロットしたものである。本来、(S.S.) と (X.S.) は同一の値を示すものであるので、プロットした点は図中の45°の傾きをもつ直線上にのるべきものである。それにもかかわらず、図-19に示すように、45°の直線に対して若干のバ

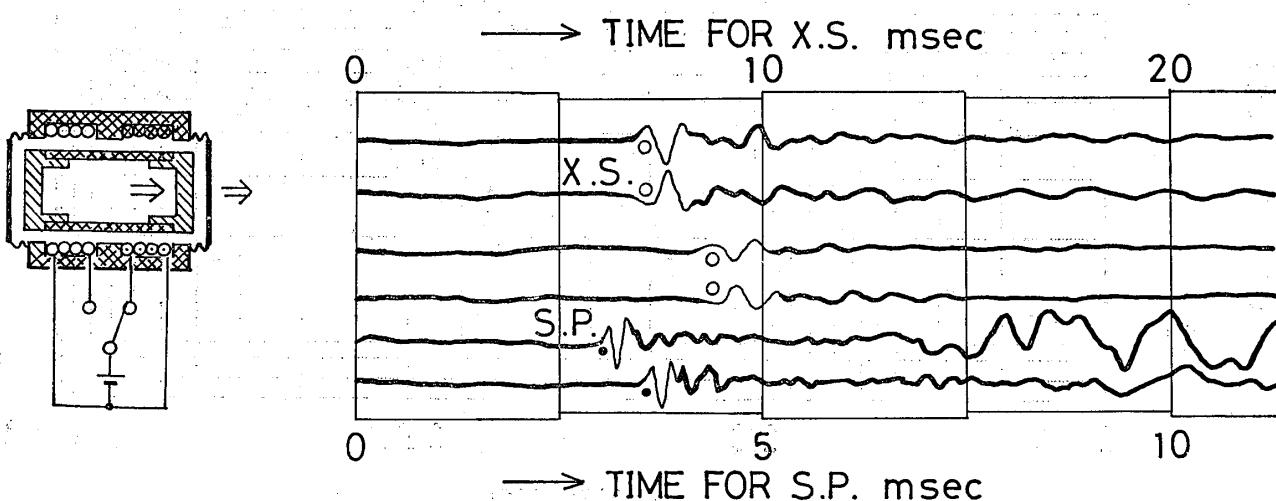


図-17 ソレノイド型P-S用電磁振源と記録例

Fig.17 Solenoid-type P-S vibration source and an example of record.

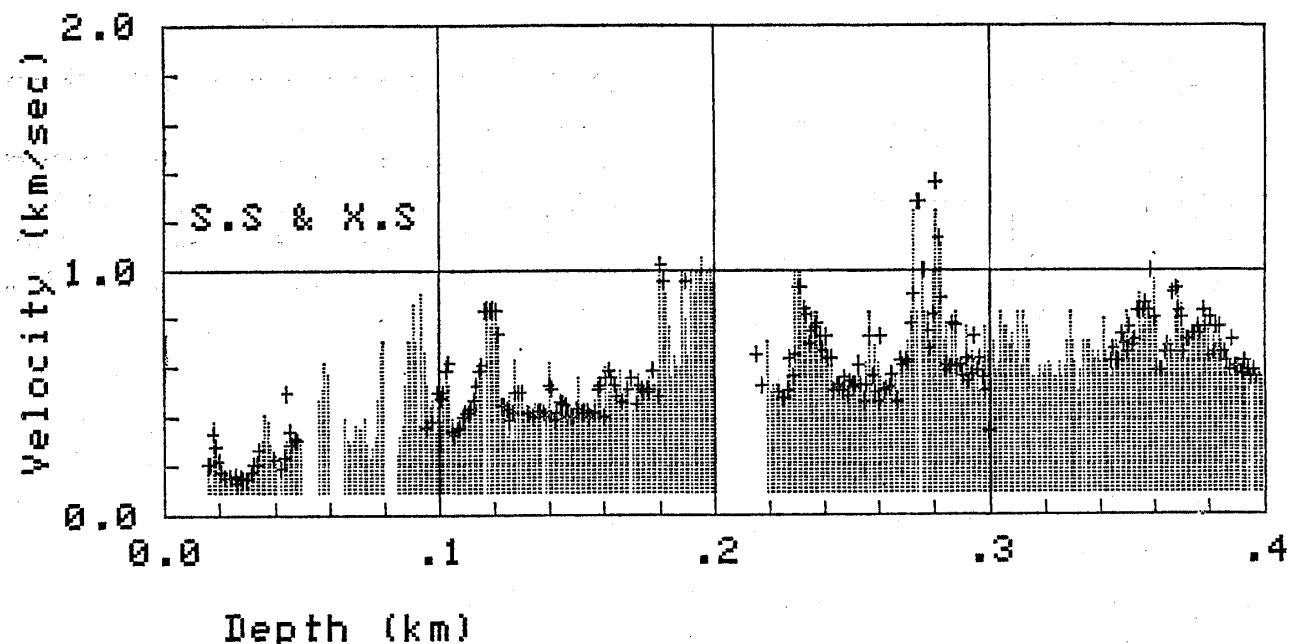


図-18 S波用振源で得られたS波速度(S. S)とP. S波用振源で得られたS波速度(X. S)の比較  
Fig. 18 Comparison between S-wave velocities obtained by the S-wave vibration source (....., S. S) and by the P. S vibration source (+, X. S).

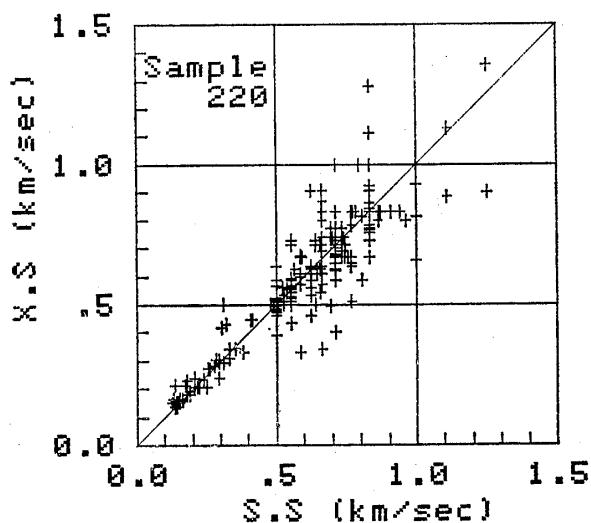


図-19 S波用振源で得られたS波速度(S. S)とP・S波用振源で得られた(X. S)波速度の関係  
Fig. 19 Relation between S-wave velocities measured by S-wave vibration source(S. S) and P.S vibration source (X. S).

ラッキを示している。これは、記録の読み取りの誤差によるものと考える。

なお、P波は、ボアホールP.U.を用い、地上のカケヤによる打撃を振源とするP波速度を実線でD.H.Mとし、またP-S振源を用いた本システムで得られたP波速度を実線で柱状様に図-13に示してある。

## 6 むすび

最後に400mの試験孔において、本システムによって得られたS波とP波の分布図を図-20に示す。このように本システムを用いることにより従来不可能であったより深い所まで、簡便に、しかも精度の良い情報が得られることが明らかとなった。

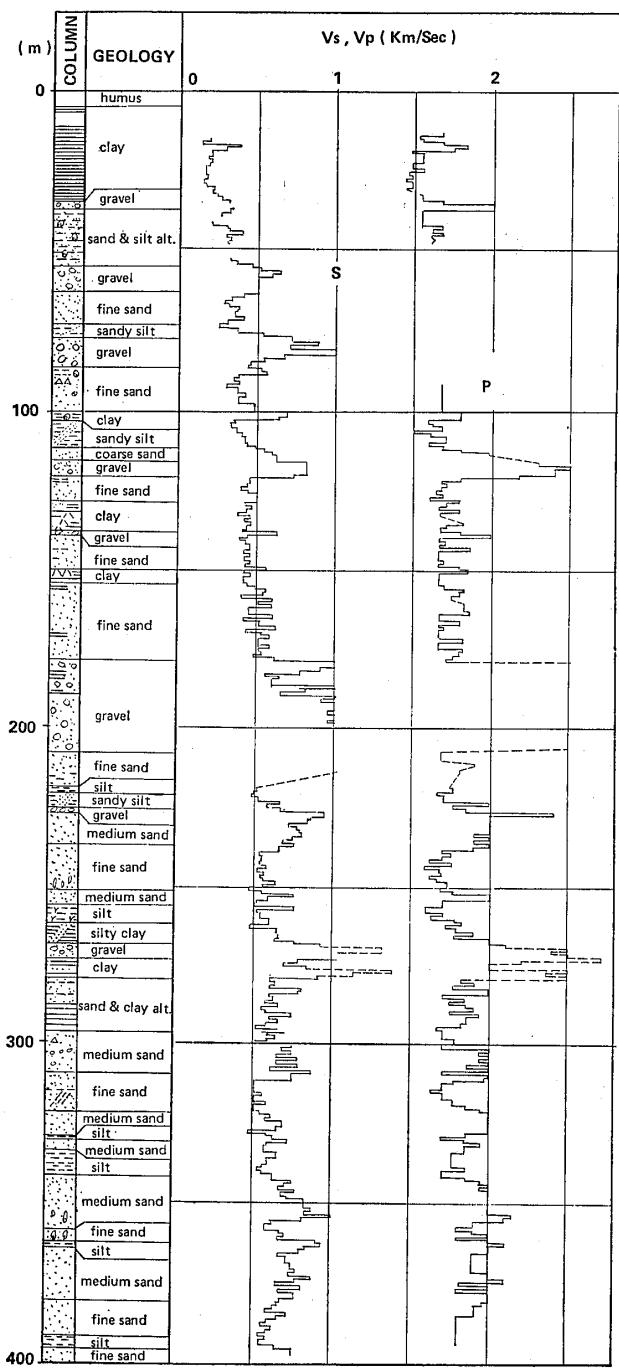
測定可能深度に関しては、今回の実験によって400mまでの深さに対しては確認済であり、システムの作動原理から考えて、さらに深い深度に対しても、何等無理なく使用することができると確信する。

末固結の軟弱地盤、あるいはやや固結した堆積層などを測定対象と考えた場合、S波の速度は1km/sec程度までであり、本システムは、土質工学や地震工学等の分野からの要求をほぼ満たすものと考える。

400mの試験孔における今回の実験は、1979年5月に始まり、本年の1月に終了した。しかし、さらに深く、さらに速いS波速度まで、さらに能率良く測定をおこなうために、機構や動作原理の異なった振源や受振器の評価、データ処理技術の利用など、実用化に伴う一連の課題に対する検討を行ないつつある。

## SUSPENSION TYPE P-S LOG

PERIOD : MAY 1979 - JANUARY 1980  
 LOCATION: URAWA, JAPAN



## 参考文献

- 1) 小倉公雄(1979)：サスペンション型S波検層システムの開発，応用地質調査事務所年報No.1
- 2) 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
- 3) Tsuneo Imai (1977) : P- and S-wave Velocities of the Ground in Japan, Proc. of IX I.C.S.M.F.E., 1977

図-20 400m試験孔における本システムの測定結果  
 Fig.20 Measurement results obtained by the system in a 400-meter test well.