

孔内ゾンデの方位制御と固着のシステムの開発

小倉公雄・大橋武一郎

Development of System for Azimuth Control and Fixing of Sonde in Borehole

Kimio OGURA and Takeichiro OHASHI

Abstract

For the various measurements through utilizing the borehole, the establishment of the method, if successfully made, to effect the directional control with the sensor and the transmitter in the borehole and to fix them in sure manner may not only save to attain the desirable qualitative improvement with the various measurements being currently conducted but also play an important role in the expected development of the new measuring method by improving S/N ratio through, for instance, utilizing the transmitter and the sensor, both with high directionality,

With such prospect fully in our mind, we have developed the system for the borehole seismic survey capable of controlling the above units and of fixing them to the borehole wall. As indicated in Fig.1, this system is constituted by the surface unit with the functions to control the azimuth along with the arms for fixing purpose, to measure the azimuth, and to acquire the seismic data, and further by the units in the borehole. The units in the borehole are structurally composed of the sonde for fixing purpose having plural linkage feasibility, the unit to rotate them and effect the azimuth control, and the azimuth sensor. Fig.2 through Fig.4 illustrate the structures of the sonde along with the surface units.

For evaluating the system thus developed, on one hand the blow test was given by using the acrylic pipe as indicated in Fig.5, and on the other hand the vibration test was performed with the system through the use of the vibration platform as indicated in Fig.9 and Fig.10.

As for the waveforms obtained from the blows given to the acrylic pipe, such steps taken as the calculation with the power spectra and the comparison of the results from the geophone in direct contact with the acrylic pipe with those from the geophones in the sonde, led us to learn of the obtainment feasible from any of the three components in the sonde of the results almost identical to those from the geophones in direct contact with the acrylic pipe, providing the arrangement be made for the attachment of the bar-shaped protrusions to the back part of the sonde for attaining the furtherance of the tight fixing, as indicated in Fig.6 through Fig.8.

Fig.11 indicates the results from the vibration test effected in the frequency range of 15~500Hz through the use of the vibration platform. Despite the minor dip perceived in the vicinity of 300Hz with Y direction and the tendency recognized with the amplitude ratio

getting somewhat larger in the zone exceeding 300Hz with Z direction, the frequency characteristic was proved to be almost the flat one as a whole.

In addition to the above, we have performed actually in the ground the offset VSP for verifying whether the sensors are surely in tight fixed and further the field test to determine the radiation pattern with the dipole source for verifying whether the azimuth control in the borehole is being extended in proper manner.

As indicated in Fig.12, the determination on the hodogram was sought after from the waveforms obtained from the offset VSP, followed by the step to determine the vertical angle, that is, the angle formed by the principal axis against the vertical axis, resulted in the indicated tendency that the deeper the depth goes on, the smaller the vertical angle gets. As indicated in Fig.14, this tendency can be regarded as the general one not contradictory to the geometric placement of the shot point and the receiving points, while making one of the supporting evidences to prove the ground vibration captured with high fidelity by the geophones in the sonde.

The radiation pattern with the dipole source was measured through adoption of the method to rotary the source as indicated in Fig.15. The measured waveforms showed the variation with their amplitudes according to the azimuth undergoing its change as indicated in Fig.16. Plotting the intensity with the amplitudes tells the agreement in approximate sense of the eventual plot to the continuous line formed by the theoretical values as indicated in Fig.17. From such result, the deduction can be reached with the azimuth control extended in the borehole almost appropriately.

The system thus developed is referred to as "Borehole Shuttle" currently being utilized in various fields with its effectiveness being verified by the users, while on our part would exert continuous efforts for its further betterment.

1 まえがき

ボーリング孔を利用する各種の測定において、センサやトランスミッタを孔壁に固着すること、また、固着する方向を制御し、その方向を計測する技術を確認することができれば、現在実施されている種々の測定の質的な向上を望むことができ、さらには、より進歩した測定技術を開発する上で重要な役割を期待することができる。

たとえば、サイスマックトモグラフィや VSP などの孔内測定において、波の到達方向や振幅が正しく把握できるならば、地層の異方性や減衰特性あるいは地層境界の状態などを解明することに役立つものと考えられる。また、AE における振源モニタリングや、さらには、指向性の強い振源およびセンサを用いて S/N 比を向上させることによって、PS 検層、クロスホール測定などに使用することができるであろう。

ゾンデを孔壁に固定するための装置および方位を測定する装置については既製のものがあるが、孔内においてゾンデの方位を制御する装置については、満足なものはないようである。そこで、複数個のゾンデを連結したまま方位を制御することができ、その方位においてゾンデを固着できるシステムとして、ボアホールシャトルと命

名したシステムを開発した。

2 開発方針

開発に当たっては、つぎの条件を満たすシステムとすることを目標とした。

- ① 対象とするボーリング孔の孔径は最小 $\phi 66\text{mm}$ とし、最大は $\phi 200\text{mm}$ 程度とする。
- ② ゾンデ内のセンサは必要に応じて交換できるようにする。
- ③ 複数個のゾンデをケーブルで連結した多連式で用いることができるようにする。
- ④ ゾンデの方位は地表から制御できるようにする。
- ⑤ サイスマック用センサを搭載した場合、できるだけ高い周波数まで応答できるようにする。

上記の条件を満たすために、システムの概略設計に対して、つぎのような方針を定めた。

- ① 孔径が $\phi 66\sim 200\text{mm}$ の範囲にあるボーリング孔に対して、1つのサイズのゾンデを用いることは困難であることが考えられたので、 $\phi 66\sim 100\text{mm}$ の孔径用のゾンデと $\phi 100\sim 200\text{mm}$ の孔径用の2種類にわけることとした。

- ② ゾンデは、特定のセンサを埋め込んだコンテナが着脱可能であるような構造とし、種々のセンサを搭載することができるようにする。
- ③ ゾンデの固着は剛体アームによる方式とし、アームはモータで駆動する機構とする。
- ④ ゾンデはできるだけ軽量化するが、機構部に差圧が生じない構造とする。
- ⑤ ゾンデをケーブルで接続して多連式としたとき、ケーブルを伝わる波の影響を受けないようにする。
- ⑥ 方位制御のために、孔内でゾンデを回転させるためのユニットを設け、回転した相対角度を計るセンサを内蔵するようになる。また、ゾンデを固定したときの方位を明確にするために、方位センサを内蔵するユニットをも併せて開発する。
- ⑦ 使用可能な深度としては、最大 1000m (10MPa) とし、使用可能温度は最高125℃とする。
- ⑧ ゾンデはそれぞれの機能ごとにユニット化して使用できるようにし、その目的に対応したシステムを構築できるようにする。
- ⑨ 現時点においては、サイスミック用センサを搭載

して使用することが多いと考えられるので、サイスミック用のデータ収録装置を開発することにする。

3 システムの概要

3.1 システムの構成

このシステムにおいては、図-1 に示すように、孔内でセンサなどを固定するためのゾンデ (ボアホールシャトルと命名)、このゾンデを回転させるための回転ユニットおよび方位測定用の方位計が孔内に配置され、地表には、回転を制御し方位を測定する機能とサイスミックデータを収録する機能を有する地上装置 (ボアホールシャトル 170) が置かれている。なお、ゾンデは、最大 4 台をケーブルで接続して使用することができる。

3.2 システムを構成する各ユニットの概要

(1) センサなどの固定用ゾンデ

図-2 に示すように、ゾンデは、2本の剛体アームによって孔壁に押しつけて固定するようになっている。アームの開閉は小型のモータとスプラインシャフトによっ

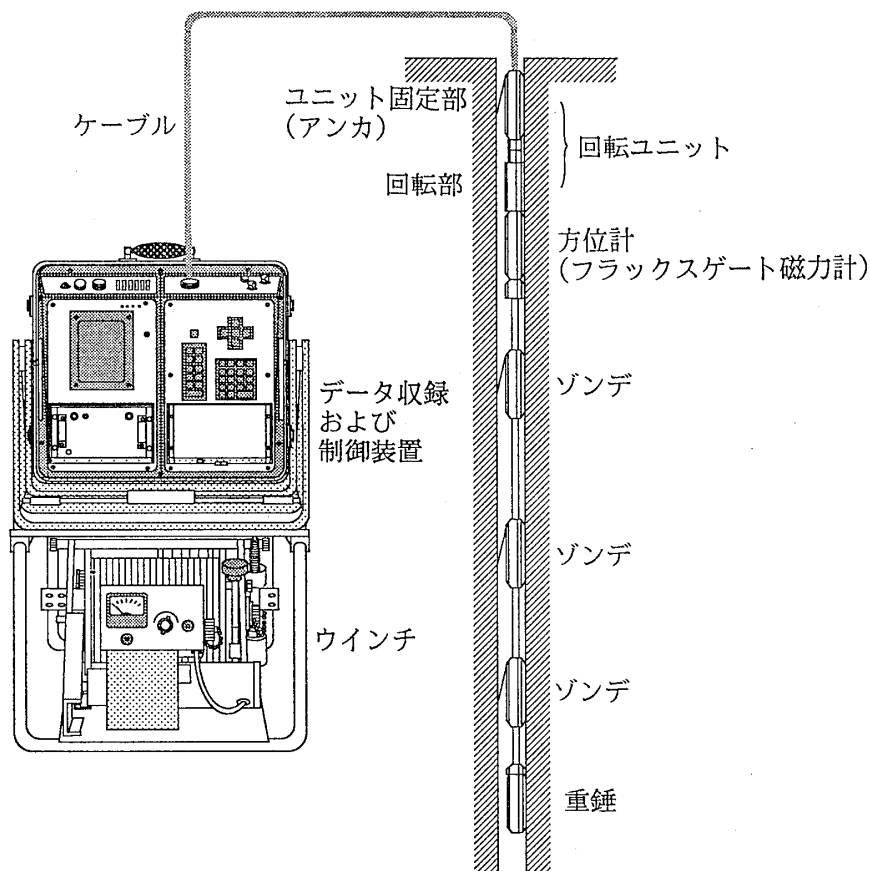


図-1 システムの構成
Fig.1 System structure

て行う。

ゾンデには、小孔径用 ($\phi 66\sim 100\text{mm}$) と大孔径用 ($\phi 100\sim 200\text{mm}$) の2種類がある。小孔径用のゾンデは、直径51mm、重量2kgで、アームによる押付け力は最大1000N (約100kgf)である。一方、大孔径用のゾンデは、直径92mm、重量7.7kg、アームによる押付け力は最大6000N (約600kgf)である。

ゾンデは、図-3に示すように、センサを内蔵したコンテナを交換することができるようになっている。

(2) 回転ユニットおよび方位計

回転ユニットは、図-1に模式的に示すように、回転ユニットを固定するための固定部 (アンカ) と、その下方に吊されているゾンデなどを回転させるための回転部から成る。回転ユニットは、小型モータを用いて360°回転することができるようになっている。

方位計は、回転ユニットの直下に接続されるようになっており、地磁気の水平成分を測定して方位を検出する

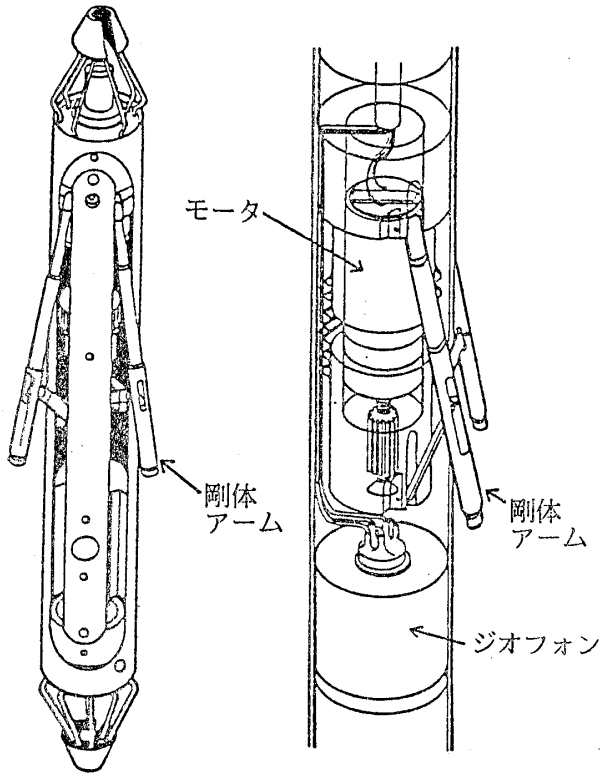


図-2 ゾンデの構造
Fig. 2 Snde structure

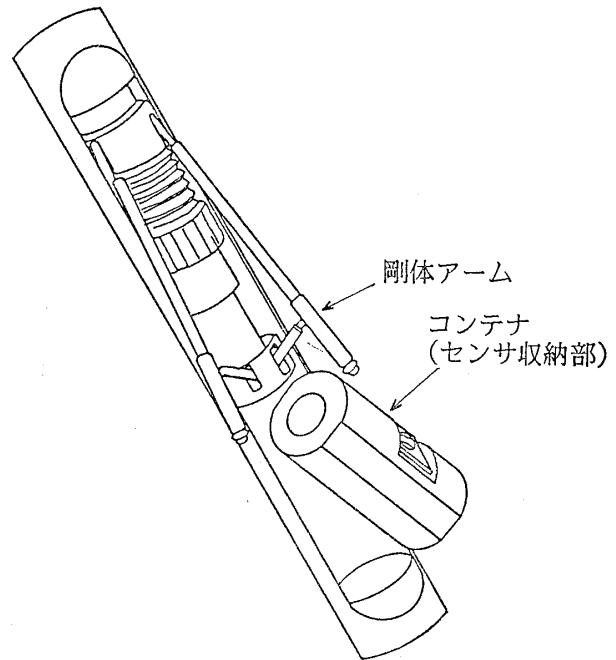


図-3 センサ収納部の構造
Fig. 3 Structure of section housing sensor

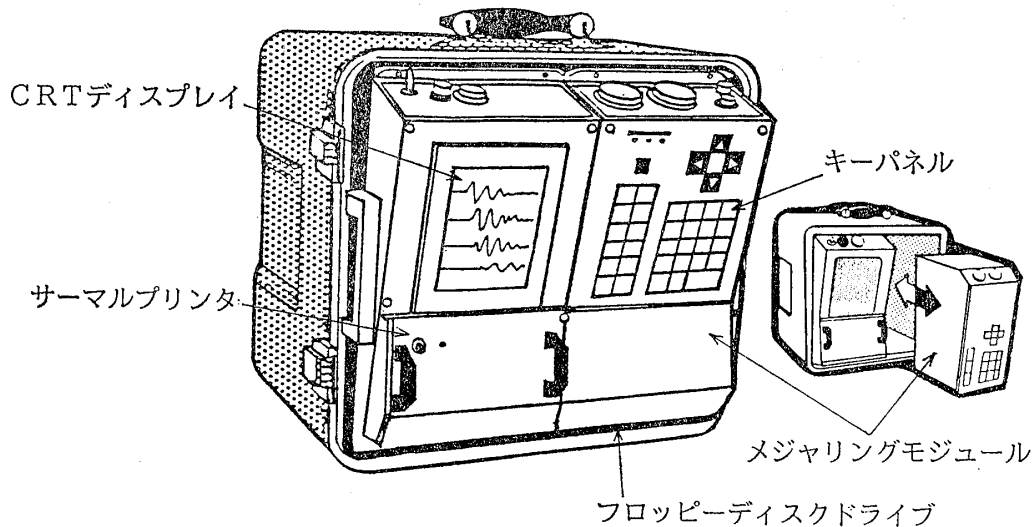


図-4 地上装置の外観
Fig. 4 Data acquisition unit

フラックスゲート型磁力計を用いている。したがって、
 メタルケーシングが挿入されている孔や局所的な磁気異
 常が生じているような場合には、この方位計を使用する
 ことはできない。しかしながら、回転ユニットを制御す
 る地上装置には、方位を設定するためにゾンデの基準方
 向に対する相対的な角度が表示されるので、メタルケー
 シング孔であっても、この回転ユニットによって、必要
 な角度だけセンサを回転させることができる。

(3) 地上装置

地上装置は、アームの開閉およびゾンデの向きを地表
 において制御するための機能とサイスマックデータを収
 録する機能を有する装置である。ゾンデの向きに関して
 は、任意の一方向を基準として、所定の回転角度だけゾ
 ンデを回転させる機能と、方位計によって測定された方
 位を磁北からの方位角で表示する機能を有している。

サイスマックデータの収録においては、起振源をトリ
 ガとする信号を発生させ、それに同期してデータが収録
 されるようになっている。図-4に示すように、波形を
 表示するCRT、プリンタ、ディスクドライブなどを内
 蔵しており、データ収録部はモジュール化されている。
 このモジュールを交換することによって、他のシステム
 に変更できるようになっており、将来は、固定用ゾンデ
 内のコンテナを他のシステムと交換して使用する場合
 にも使用できるようにしてある。

4 室内実験による固定システムの評価

作製したゾンデにジオフォンを搭載して、システムを
 ボアホールサイスマック用として使用する場合、最も重
 要なことは、地盤における振動が忠実にジオフォンに伝
 達されていなければならない。したがって、ゾンデの振
 動伝達特性を確認するために、アクリルパイプを用いた
 打撃実験と振動台による振動実験を行った。

4・1 アクリルパイプを用いた打撃実験

この実験は、アクリルパイプ内にゾンデを固定し、パ
 イプ上端を打撃して振動を測定するものである。

図-5に示すように、ゾンデはアクリルパイプ内に固
 定されており、ゾンデには3成分(X, Y, Z方向)の
 ジオフォンを収納したコンテナが搭載されている。この
 ズンデが接しているアクリルパイプの内側に対応するパ
 イプの外側表面には、コンテナ内のジオフォンと同型の
 ジオフォンを接着した。

打撃は、アクリルパイプ上部においてX, YおよびZ
 方向に加えた。

ここに、振動を検出する方向とゾンデとパイプ内壁と
 の接触状況について考察すると、つぎのようになる。

- ① Z方向：Z方向はパイプの軸方向であり、ゾンデ
 の背板がパイプの内壁に添って接触しているの

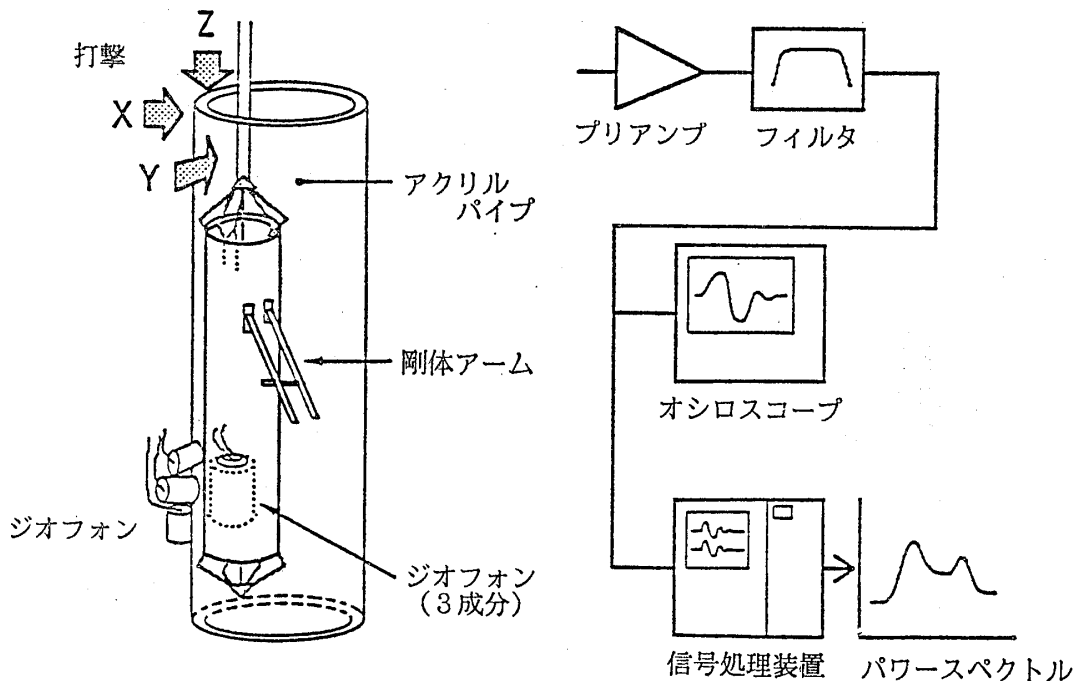


図-5 アクリルパイプを用いた打撃実験

Fig.5 Blow test using acrylic pipe

ゾンデとパイプの間に大きな摩擦力が作用する。したがって、振動伝達に対しては良い条件にあるといえる。

② X方向：X方向はパイプ軸に直角な面内で、ゾンデとパイプの接触点とゾンデの中心を結ぶ方向であり、接点に作用する力は重心を通る方向である。したがって、剛体アームによる押付力がゾンデの重量に比べて大きいときには、振動は、比較的効率よく伝達される方向であるといえる。

③ Y方向：Y方向はX方向に直交する方向で、ゾンデとパイプの接点とゾンデの重心の位置関係から考えると、偶力が発生するような条件にある。

X, Y, Zそれぞれの方向について、ゾンデ内とパイプ外側のジオフォンのそれぞれの成分によって受振され

た記録波形、およびそれから得られるパワースペクトルを比較すると、つぎのようになる。

(1)Z方向における測定結果は図-6に示す通りである。左側の図はパイプの外側表面に接着したZ方向のジオフォン(E)によるものであり、右側の図はゾンデ内のZ方向のジオフォン(F)によるものである。両者を比較すると、細部においてわずかな違いが見られるとはいえ、波形およびパワースペクトルともにほとんど同じ形状を示している。したがって、Z方向については、ゾンデ内のジオフォンは、パイプを伝播した波を忠実に検出していると考えられることができる。

(2)X方向における測定結果は図-7に示す通りである。左側の図はパイプの外側表面に接着したX方向のジオフォン(A)によるもの、右側の図はゾンデ内のX方

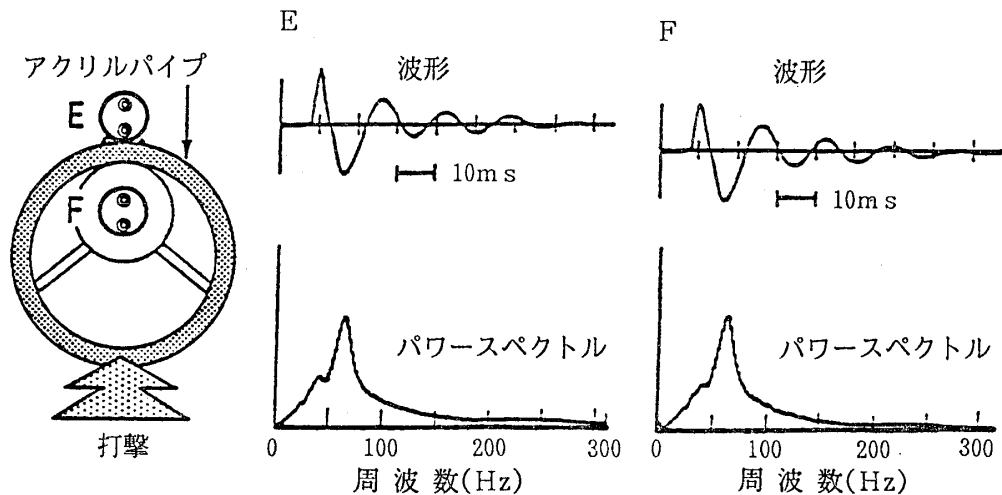


図-6 打撃実験による波形およびパワースペクトル (Z方向)

Fig.6 Waveforms and power spectra by blow test (Z direction)

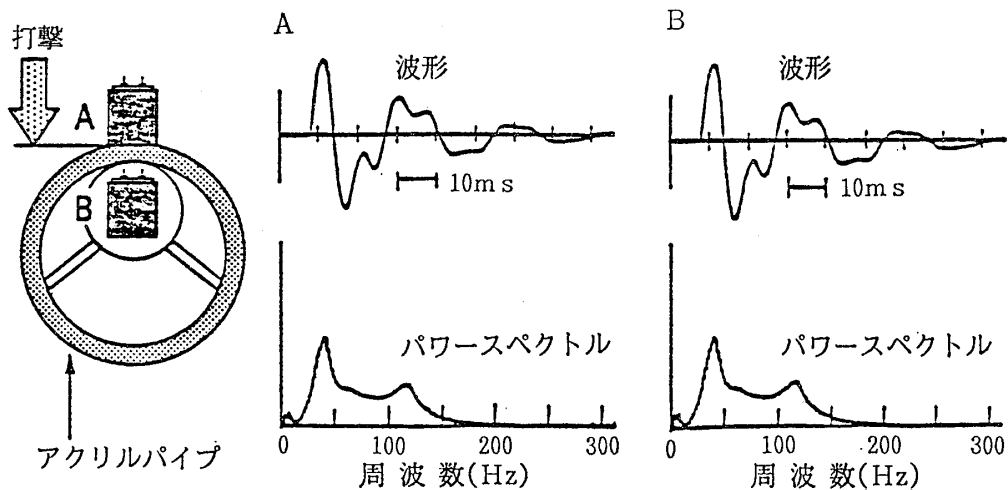


図-7 打撃実験による波形およびパワースペクトル (X方向)

Fig.7 Waveforms and power spectra by blow test (X direction)

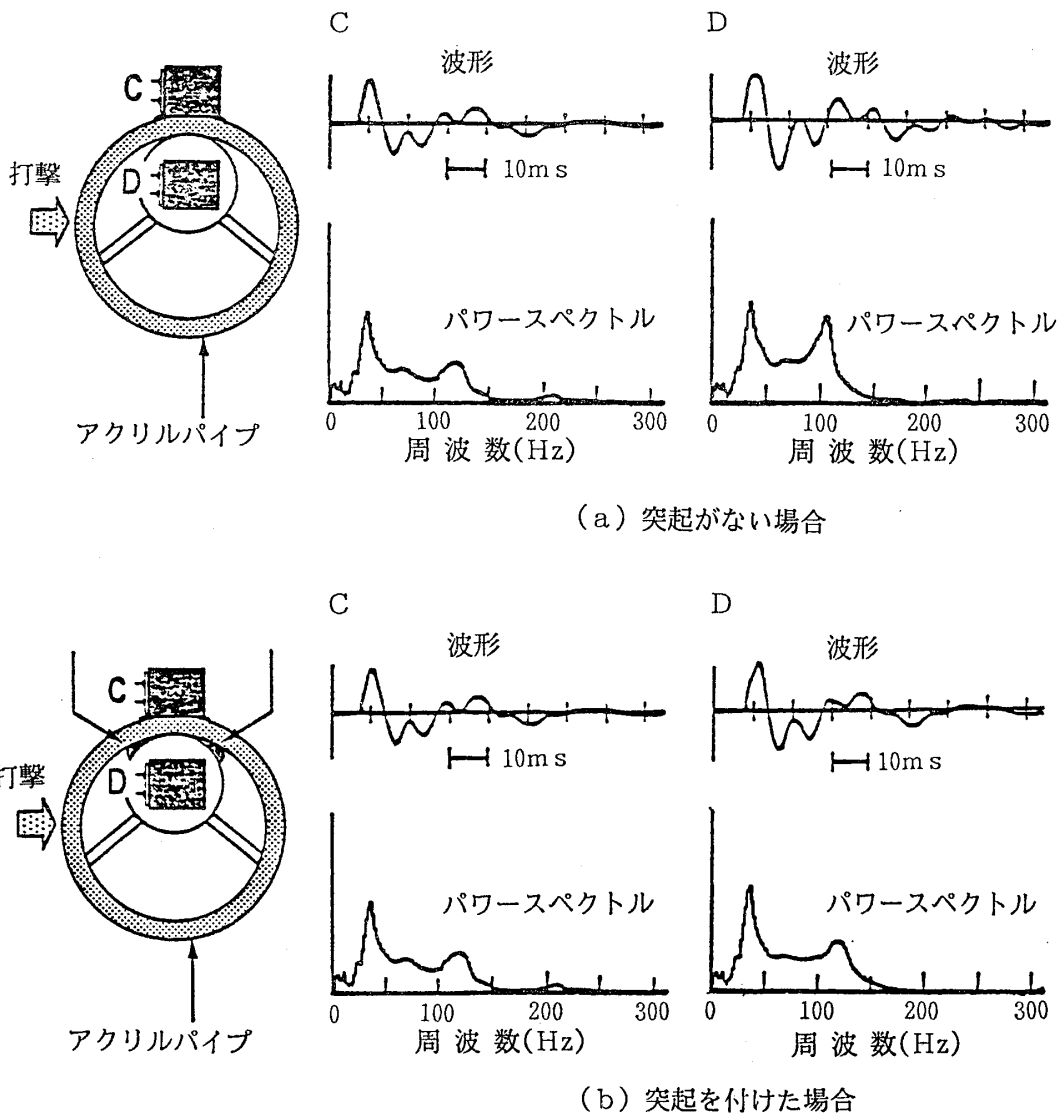


図-8 打撃実験による波形およびパワースペクトル (Y方向)
 Fig.8 Waveforms and power spectra by blow test (Y direction)
 (a) case of no protrusion (b) case of protrusion attached

向のジオフォン(B)によるものである。両者は、波形およびパワースペクトルともにほとんど同じ形状を示している。したがって、X方向については、ゾンデ内のジオフォンは、パイプを伝播した波を忠実に検出しているものと考えられる。

(3)Y方向については、図-8の(a)に示すように、パイプの外側に接着したY方向のジオフォン(c)およびゾンデ内のジオフォン(D)によるそれぞれの波形およびパワースペクトルを比較すると、明らかな相違が認められる。これは、さきに述べたように、ゾンデとパイプの接点とゾンデの重心の位置関係から、ゾンデとパイプの接点を支点とした振動が生じたためと考えられる。この現象を除くために、図-8の(b)に示すように、ゾンデの背部に軸方向に棒状の突起を付け、再度測定を実施した。その結

果を図-8の(b)に示す。

(a)の場合と(b)の場合を比較すると、パイプの外側のジオフォン(c)による波形およびパワースペクトルは、ともに全く同じ形を示しているが、ゾンデ内のジオフォン(D)の場合は両者ともに異なる形状を示している。しかし、ゾンデに突起を付けた場合には、パイプの外側のジオフォンによる結果と良く一致している。したがって、Y方向については、ゾンデに突起を付けることによって、振動がゾンデ内のジオフォンに忠実に伝達されるようになったと考えられる。

4・2 振動台による振動実験

ゾンデに連続的に振動が加えられる場合のゾンデ内のジオフォンの挙動を調べるために、振動台を用いて加振

する実験を行った。

図-9に示すように、弱いバネで鉛直に吊された内径105mm、長さ50cmのスチールパイプの中に、アームを開いてゾンデを固定し、ゾンデ内のジオフォンの位置に対応するパイプの外側表面に、これと同型のジオフォンを接着した。このパイプを図-9に示すように、X、Y、Zの3方向に振動させ、パイプの外側に直接固定したジオフォンによる振幅の二乗平均値に対するゾンデ内のジオフォンによる振幅の二乗平均値の比を求めて、伝達特性を評価することにした。

この実験に使用したシステムの概要は図-10に示す通りで、ジオフォンによって検出された波形信号は検波回

路を通り、振幅を二乗平均した値として収録されるようになっている。加振波形は15Hzから500Hzの間をおよそ250秒で対数掃引する正弦波とし、パイプに固定したジオフォンの振幅が一定になるように自動的に制御した。この制御は、パーソナルコンピュータをコントローラとし、GP-IBを介してフィードバック・ループを形成して行い、振幅の二乗平均値の変動が $\pm 0.5\%$ となるようにした。

図-11は、計測された振幅の二乗平均の比と加振周波数との関係を示したものである。

図-11(a)に示すように、X方向については、周波数が300Hzから450Hzの間において、比の値がやや小さくな

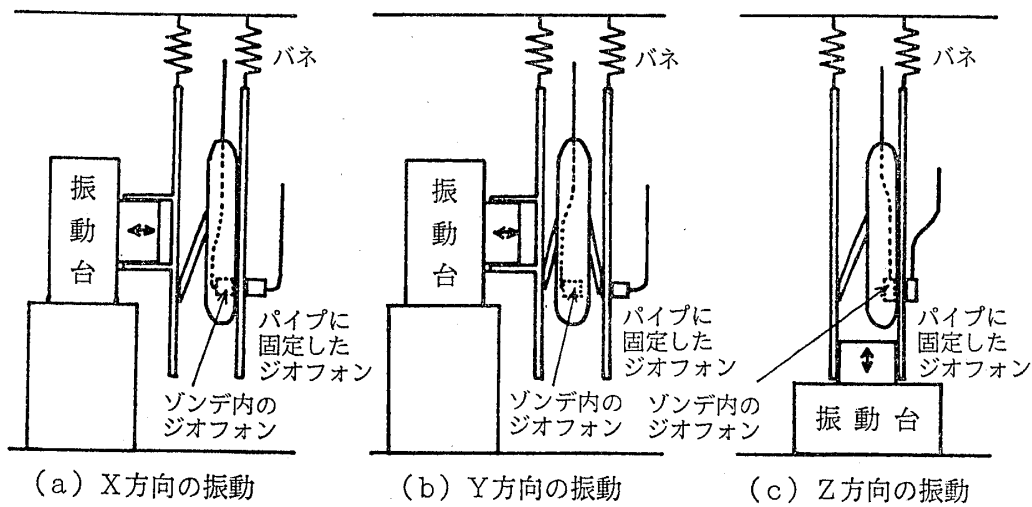


図-9 振動台による加振実験の方法
Fig.9 Vibrating method through the use of vibration platform

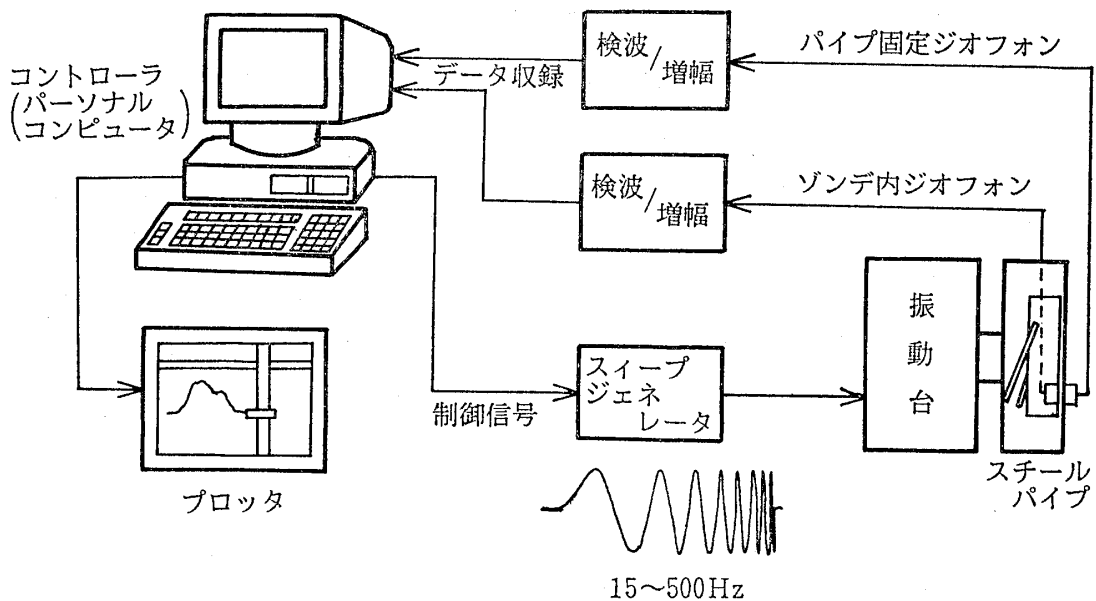


図-10 振動台による加振実験システム
Fig.10 Block diagram of vibration test system

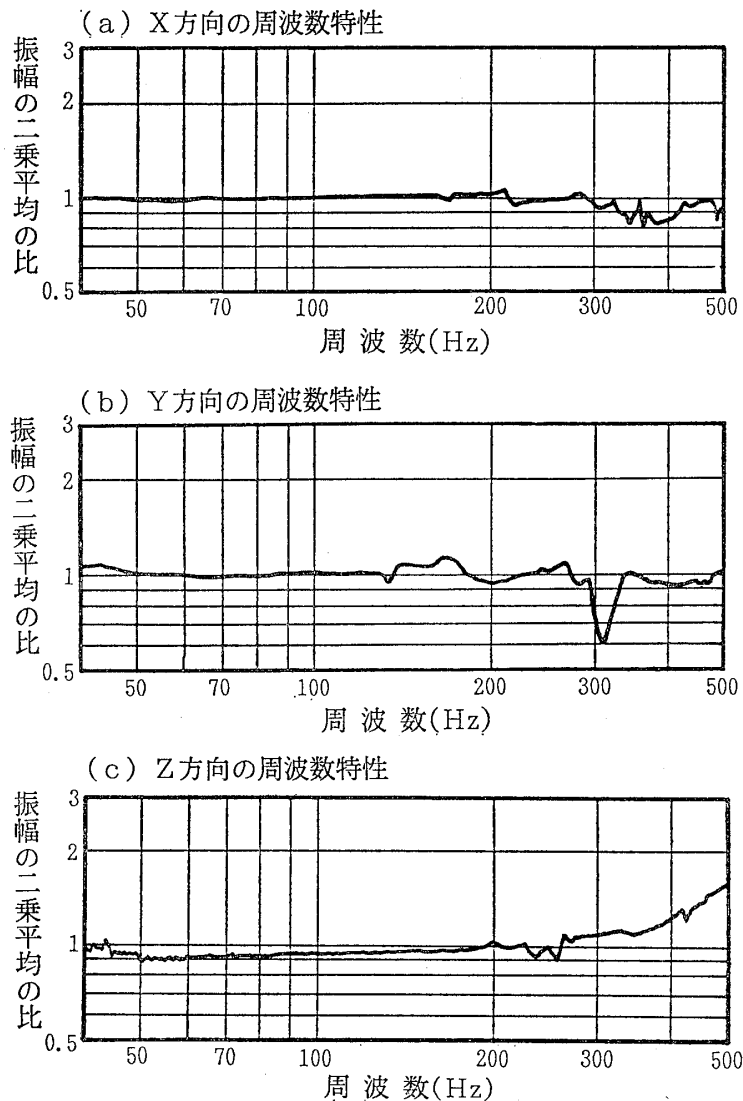


図-11 加振実験による周波数特性

Fig.11 Frequency characteristics determined from vibration test

っているが、ほぼフラットな特性を示している。また、Y方向については、周波数が300Hz付近に共振によるものと思われる小さいディップが見られる。このディップにおける比の値は約0.6であり、一般に共振点において見られる変動に比べると小さい変動幅であるといえる。このディップ付近を除けば、X方向と同じ程度において、フラットであるといえる。これらに対して、Z方向においては、周波数が300Hz以下のときにはフラットであるが、300Hz以上になると、比の値は徐々に大きくなり、500Hzにおいては約1.5となっている。

5 固定システムおよび方位制御の評価のための野外実験

アクリルパイプを用いた室内実験によって、固定システムの特徴を調べたが、実際の孔壁の状態はアクリルパイプと異なり、より粒子の粗い岩盤あるいは砂、シルト、粘土のような軟弱な地盤などに掘削されたボーリング孔における有性怖を確かめるために、オフセットVSPの測定を実施した。一方、回転ユニットによる方位制御の確実性を検証するために、ダイポール振源による孔間測定を実施した。

5・1 アームによる固着評価のための実験

ボーリング孔内においてゾンデが確実に固定され、ゾンデ内にある三方向のジオフォンが地盤の振動を忠実に検出していることを確認するために、オフセットVSPの測定を行った。

実験を行った地点の地盤は花崗岩からなり、振源とし

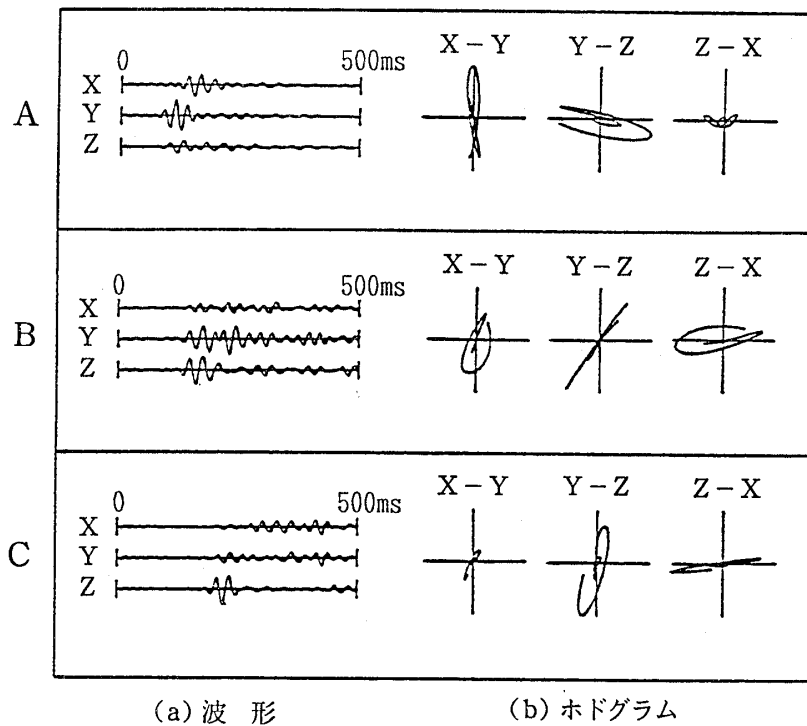


図-12 測定された波形およびホドグラムの例
Fig.12 Example of measured waveforms and hodograms

ては重錘落下による方法を用い、孔口からのオフセット距離は200mとした。

測定は、地表から深度840mまでの間で合計32点について実施した。得られた代表的な波形の例を図-12(a)に示す。得られた波形の初動に着目し、これによって図-12(b)に示すようなホドグラムを描き、その主軸方向が鉛直となす角度をバーチカルアングルとして求めた。

各測点についてバーチカルアングルと深度との関係をプロットすると図-13のようになる。この結果によると、バーチカルアングルは深度が深くなるにしたがって小さくなる傾向を示している。図-14は代表的な点について、振源と測定点を結ぶ方向とバーチカルアングルとの関係を示したものである。この図に示すように、ホドグラムの主軸方向は、振源と測定点を結ぶ方向よりも水平に近い方向（鉛直となす角度が大きく）になっており、一般に予想される結果と一致している。したがって、ゾンデ内のジオフォンで検出された振動の成分の大小関係は、一般的な傾向と矛盾しないということができ、このことは、ゾンデ内のジオフォンは、地盤の振動をおおむね忠実にとらえていると考えられる。

5・2 回転ユニットの動作評価のための実験

ボーリング孔内において、回転ユニットによってゾンデの制御が正確に行われることを確認するために、ダイ

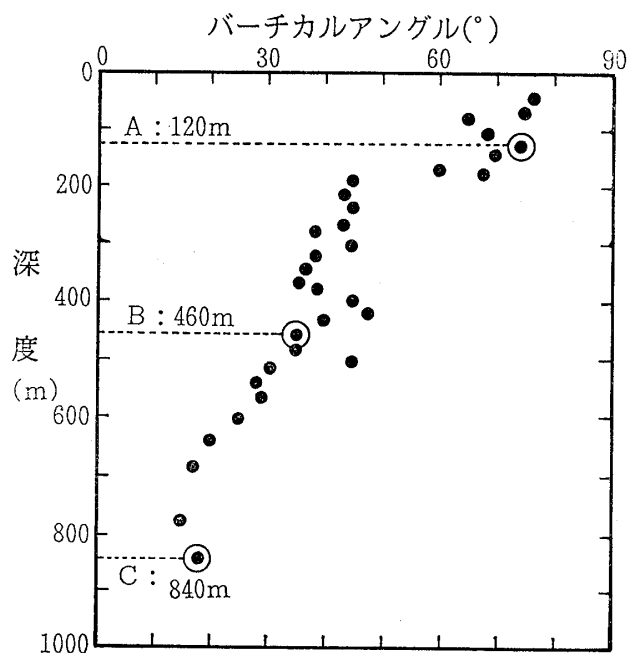


図-13 バーチカルアングルと深度との関係
Fig.13 Relationship between vertical angle and depth

ポール振源の放射特性を測定した。この実験においては、回転ユニットをダイポール振源の上部に取り付け、振源に所定の回転を与えた。

測定に当たっては、図-15に示すように、約3m離れた2つのボーリング孔の一方に電磁ハンマーを用いたダイ

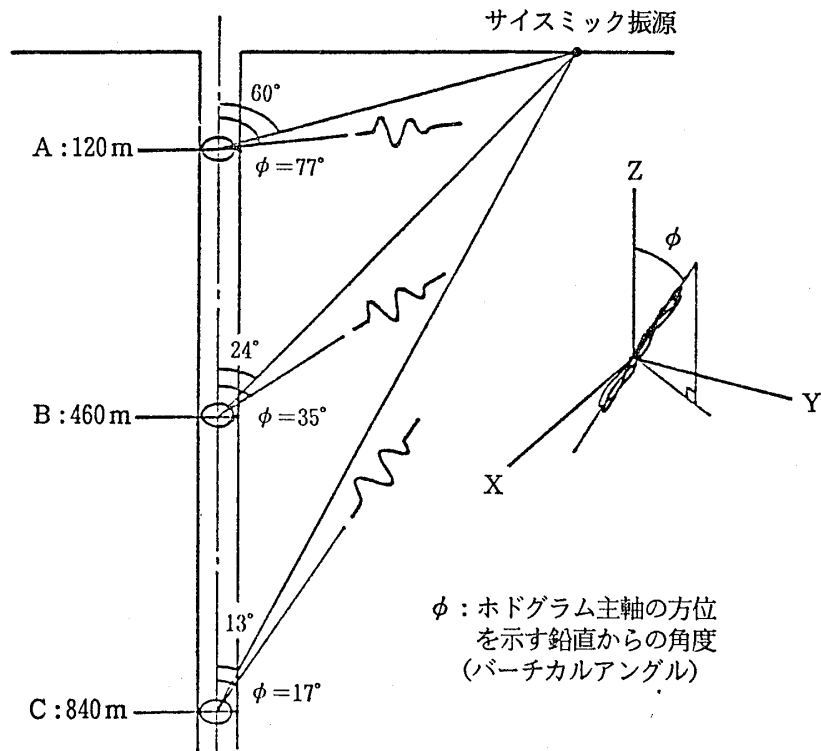


図-14 バーチカルアングルと幾何学的アングルとの関係
 Fig.14 Relationship between vertical angle and geometrical angle

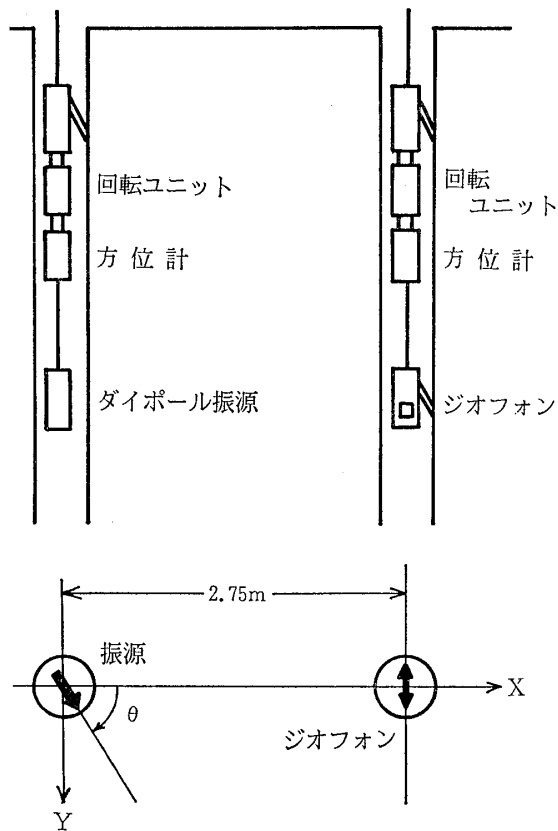


図-15 クロスホール測定の様式図
 Fig.15 Schematic diagram of cross-hole measurement

ポール振源を置き、他方の孔にジオフォンを搭載したゾンデを同じ深さに固着した。このとき、ジオフォンは、2つのボーリング孔を結ぶ方向（X方向とする）に直交する水平面内の方向（Y方向とする）の振動を検出するように配置した。したがって、振源を原点とした極座標で考えると、ジオフォンは振動の接線方向の成分を測定することになる。実験を行った地盤は砂、シルト、粘土の互層からなる沖積層で、測定された波形記録によれば、P波速度は約 900m/s、周波数はおよそ 1 kHz である。これから計算される波長は 0.9m で、孔間距離は波長の約 3 倍となっている。したがって、過渡解に相当する波の振幅は、 $1/r$ で減衰する波に比べて相対的に小さくなっていると考えられ、接線方向の成分は、S波速度で伝播する波が卓越していることが予測される。

振源を種々の方向に回転し、それぞれの方向について波形を測定する。測定された波形の例を図-16に示す。図中の角度は、振源の起振がX方向となす角度である。測定された波形から振幅を求め、プロットすると図-17に示す黒丸のようになる。ダイポール振源として理論的に計算した結果（実線で示した円）と比較すると、極めて良好な一致が見られる。このことは、回転ユニットが正確に動作したことを示している。

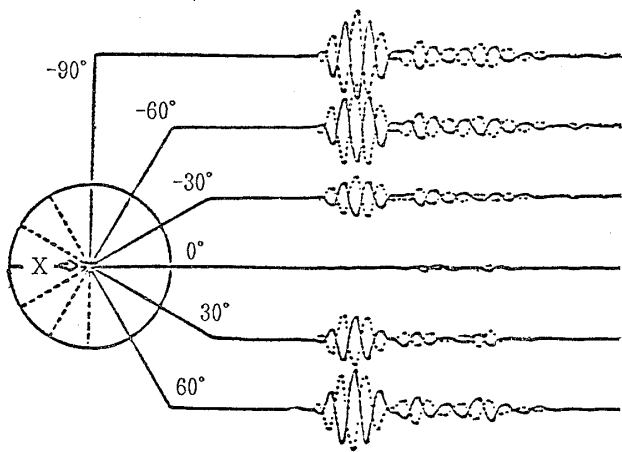


図-16 振源のいろいろの方位に対する波形 (Y方向成分)
 Fig.16 Waveforms obtained from sources of various directions (Y component)

6 あとがき

ボーリング孔内において、ゾンデの方位を制御して固着するシステムを開発し、室内実験および野外における試用を行って、その適用性についての確認を行った。今回開発したシステムの性能を検証するために、室内および野外における若干の実験を行ったが、さらに適切な方法もあることと思われる。

本システムは、いろいろの地盤に関して種々の条件の下での計測の結果をふまえ、性能向上のための改良を行いつつあるが、その適用性の評価を行う実験についても検討してゆきたいと考えている。

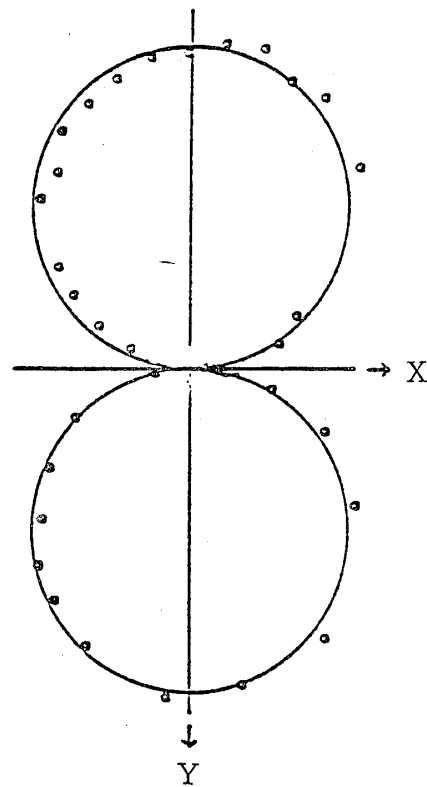


図-17 接線方向成分の放射特性 (Y方向成分)
 Fig.17 Radiation pattern for tangential component (Y component)