

## 63. 海底地震計による爆破の観測

爆破地震動研究グループ

(昭和 45 年 7 月 21 日発表—昭和 45 年 9 月 24 日受理)

### 要 旨

海で爆破して陸の観測点で観測し、海から島への地殻構造を決定する方法は多くの利点を持つが、本邦では漁業問題のために海岸近くの浅い海で爆破出来ない場合が多く、地殻上部の速度情報に欠けることがある。この欠点を補うために海底地震計を製作し海に観測点を設置することにした。地震計は 4.5 Hz の上下動地震計を用い、記録方式は直接アナログ磁気録音方式を採用し、7 インチリールを用いると、0.5 mm/s の送り速度で 0.3~40 Hz の周波数帯域で 600 時間記録可能であり、深度 500 m までの耐圧容器に入れるようにした。この海底地震計は昭和 44 年 7 月、北海道積丹沖爆破の際に水深 116 m の地点に設置され、600 kg, 11 個; 300 kg, 2 個の海中爆破の観測を行なった。明瞭な初動と第 2 の位相が観測され、初動は 5.7, 6.5 km/s の見掛速度を与え、第 2 の位相は 1.47 km/s の速度を与え、直接水中音波によるものであることがわかった。従つて、本邦における海底地震計による最初の爆破の観測の結果は、海岸近くでの観測を可能にし地殻上部の速度情報を求めるのに有効であると同時に、爆破点、距離の決定にも有効であることを示した。

### 1. 序

Upper Mantle Project 開始以来、爆破地震動研究グループでは、海中で爆破を実施し、それより水中を伝わり、海底に入射し、地震動になった波を陸上の観測点で観測し、海から島への漸移地域を含む領域の地殻構造を求めて来た<sup>1)</sup>。この方法は、Moving shot point-fixed array method といわれ、Steinhart, Meyer らによって一時愛用されていた<sup>2)</sup>。短時日に多数の爆破が可能なこと、比較的小量の火薬で遠方まで資料が得られること、作孔が不必要であることなどの利点を有する。しかし、一方、幾つかの欠点を有するが、なかでも漁業問題から海岸近くで爆破が出来ず、近距離の走時資料、すなわち、地殻上部の情報に欠ける場合があることは、最大の欠点の一つである。このような欠点を補うために、本グループでは、海底地震計による観測点を海に設けることを計画した。

本邦における海底地震計による地震の観測は、岸上らによって始められ<sup>3)</sup>、南雲らによって磁気録音方式の深海用海底地震計が開発され、海底における地震観測が実施されて来た<sup>4)</sup>。今回、これらの知識と、浅田、島村らによる直接アナログ録音方式テープ・レコーダー開発技術によって、海底地震計を製作し<sup>5)</sup>、1969 年 7 月に実施された積丹沖爆破の観測を実施し、良好な結果を得たので報告する。

海底地震計による爆破の観測は、遠く、1937年にさかのぼり、M. Ewingらによって実施されたのが最初である<sup>6)</sup>。第2次大戦による中断、戦後、ハイドロホンによる屈折法の開発のための海底地震計の開発のおくれなどにより、1959~1961年、再びJ. Ewingらによってtelemeteringによる海底地震計を用いて爆破が観測された<sup>7)</sup>。1965年には、ソビエト科学アカデミー海洋研究所 Neprochnov, モスコウ大学 Ryknov, Sedovの協同で海底地震計による爆破の観測が黒海で行なわれ<sup>8)</sup>、以後、海底深部構造調査に用いられつつある。

なお、本グループの海底地震計は、浅田、小林(平)、一ノ瀬、島村、浅野、青木、南雲が中心となって製作し、一ノ瀬、浅野、堀田、坂尻らによって観測作業、一ノ瀬によって記録再生作業、浅野、一ノ瀬によって解析が行われた。耐圧容器は小林(平)が設計し、開発工業株式会社が製作した。増幅器、テープ・レコーダーその他のアセンブリーとしてのまとめは東京振動研究所 K.K. が担当した。繋留方法については、南雲、小林(平)の助言と援助を多くうけた。また、実際の設置に当っては、第17関丸の長田船長始め、船員各位の豊富な経験にもとづいた真剣な討議検討があり、成功の最大原因であったことを付記して感謝する。また、製作の費用は国際地球内部開発計画、人工地震部門経費の1部および地震研究所特別事業費の1部によった。記して感謝の意を表す。

## 2. 海底地震計

当時、本邦にあった海底地震計は、高価で重量も大きく、本グループで購入するわけにはいかなかった。また観測可能時間も、海況待ちなどの余裕を考えれば、やや短かすぎた。

しかし、製作の決定から観測すべき爆破まで約半年しかなかったために、陸上の観測ですでに使われ認められた機器を組み合わせ、できた測器にあわせて耐圧容器を作ることになった。この方針は、実験までの期間が短いこと、無人観測であるために信頼性が必要であることなどのために、ある意味では止むを得ないものであった。

耐圧容器の設計深度は500mとした。本邦の沿岸で、500mあれば、前述の目的の爆破観測をおこなうには十分であり、また、浅すぎて波や海岸からの雑音を拾うこともないと考えられたからである。

装置のブロックダイアグラムは陸上の観測装置と同じである。センサー(地震計)からの信号を増幅器、減衰器を通して、適当な大きさにしてデータレコーダに録音する。一方、時刻は水晶時計からの信号を刻時回路を通して録音する。電源はもちろん電池である。

地震計はGeo Space社製の4.5 Hz上下動換振器を用い(感度は約0.2 V/kine)、海底地震計が海底面で360°、いづれに傾いて着底しても地震計自体は上下方向の位置をとるように、ジンバル機構で吊られ、粘性の大きいシリコンオイル中に封じられた形のものを用いた。この方法は、1965年地震研究所で設計、試作し、開発されたもので<sup>9)</sup>、この海底地震計のためには小林(平)によって設計された。将来、3成分観測もできるように、3台分の空間が耐圧容器中にとられている。

増幅器はプッシュプル入力で、利得は約90 dBのものを東京振動研究所 K.K. で設計、製作した。データ・レコーダーは信号用に3チャンネル使えるので、信号に対するダイナ

ミックレンジを広げるために、今回は1成分よりの信号を、減衰器により利得を3通りにかえて(基準出力に対して-10, -20 dBの3通り)録音した。

データ・レコーダーは電池の消費が少なく、爆破の観測に必要な周波数帯域を長時間にわたって記録できる条件が必要であり、浅田、島村によって陸上観測用に開発されたレコーダーを用いた<sup>19)</sup>。録音方式は直接アナログ録音方式(DAR)をとり、交流バイアス用の発振器を内蔵している。テープ速度は4, 2, 1, 0.5 mm/sの4段階に切替が可能で、SCOTCH 290(7型テープ)を用い2 mm/sの送り速度のときは、1~160 Hzの周波数帯域の信号を150時間(6日6時間)、また0.5 mm/sの送り速度のときは0.3~40 Hzの帯域を600時間(25日間)、それぞれ記録することが可能である。なお、このデータ・レコーダーは $2V_{p-p}$ で飽和する。

テープの駆動には、電圧サーボ型の低速度直流モータを用いた。テープ走行のワウ・フラッタは1% r.m.s.以下であり、実用上の問題はまったくない。

録音ヘッドはインラインのチャンネル計測用のもので信号は4成分録音出来るが、今回は1成分を刻時用にあてた。

このデータ・レコーダーは前にものべたように本来、陸上観測用であり、陸上で最も扱いやすく、また観測期間も長くなるように設計されていて、7インチリールを用い、普通の家庭用テープレコーダーの大きさをもっている。したがって海底地震計向きの大きさをしていないのは止むを得ないであろう。しかし、一面では、テープの取り扱いやテープデッキの操作が簡単でわかりやすいという利点もある。

水晶時計は諏訪精工舎のものを用い、また電池は平5型を4個、12Vにして用いた。

耐圧容器は円筒を立てた形のもので、その内径は59 cm、高さは36 cmである。円筒の上端に円盤形の蓋がついており、これでOリングをおさえ水密を保つ。

この円筒型の耐圧容器の底面には、海底で地震計が転倒しないように、直径100 cmのガード・リングがとりつけられた。このように耐圧容器はやや大型になったので、その重量も200 kgに達した。

Fig. 1. には海底地震計の写真が示されている。

### 3. 爆破の観測および結果

この海底地震計は、昭和44年7月に実施された積丹沖爆破の際に、爆破船に用いた大洋漁業のキャッチャーボート、第17関丸(650 吨)によって観測点歪の西北西、約6.5 km、水深116 mの地点に設置した。Fig. 2 には、北海道における観測点と爆破点を示されている。昭和43年に実施された襟裳岬沖爆破の観測点、爆破点も示されている。Fig. 3の上図には、爆破点の位置が拡大して示されており、また、海底地震計の位置(O.B.S.)も与えられている。爆破点、海底地震計の位置はデッキによるもので、他の観測データ(例えば海底におけるハイドロホンによる観測データ)は用いられていない。また、Fig. 3、下図には、爆破船の観測から求めた海底地形が示されている。積丹沖は海底地形が複雑な所であるが、予め、出来るだけ、変化の少ない点を選んだが、この海底地形は、比較的単純である。

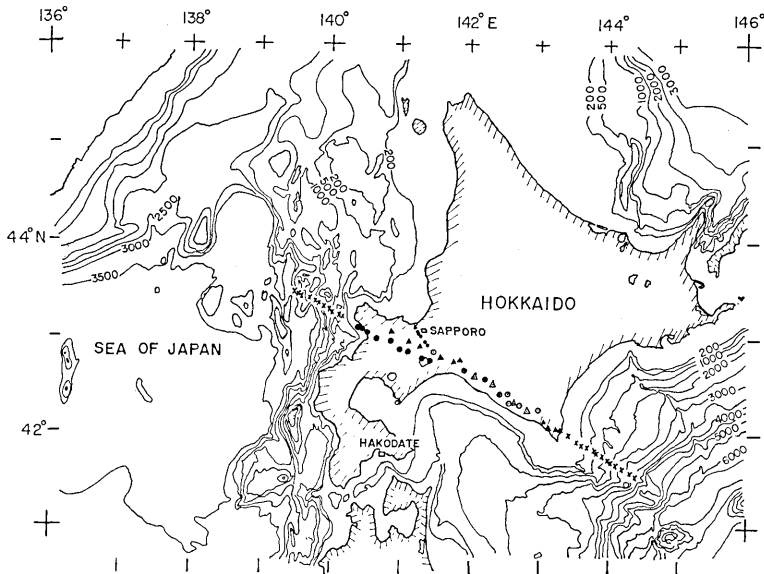


Fig. 2. Shot and observation points in and around Hokkaido for the Off Cape Erimo and the Off Shakotan explosions. Cross marks are shot points and other marks show observation points except for Sapporo and Hakodate in the case of the Off Cape Erimo and the Off Shakotan explosions. Water depth around Hokkaido is also shown in meters.

設置方式は南雲らによるアンカード・ブイ方式<sup>11)</sup>をとり Fig. 4 に示されている。

設置および揚収作業とも、好天に恵まれ、完了までに、それぞれ、約 20 分、約 30 分を要した。設置は 7 月 13 日午後に行かない、引続き、爆破を実施する予定であったが、爆破予定点付近においては海況不良であったので延期し、2 日後の 15 日から 16 日朝にかけて爆破を実施した。

爆破の薬量は、Shot No. 1~No. 11: 600 kg; Shot Nos. 12, 13: 300 kg; Test shot No. 1~No. 10: 1 kg であった。1 kg の薬量の爆破は、海底地震計のために行なったが、薬量が小さすぎ、海底地震計の S/N もよくないために、解析可能な記録は得られなかった。録音は、送り速度 0.5 mm/s で、5 インチリールのテープを用いて行なった。増幅器は S/N の関係で 20 dB しぼったので、70, 60, 50 dB の利得で行なった。

録音されたテープは陸上用データ・レコーダーの DAR テープ再生装置で再生された。再生は作業の能率、再生アンプの S/N、市販フィルタの帯域などの点から、通常の陸上のテープ再生と同じく、4000 Hz のガルバのビジグラフによって時間軸を 100 倍に圧縮して（つまり、テープスピードを録音時の 100 倍にして）行なわれた。可視記録を得るために、ビジグラフを用い、1 m/s の送り速度で再生した。Fig. 5 には、解析された再生記録の一部を示す。示された各記録とも、第 1 のトレースは水晶時計の出力を、第 2~第 4 のトレースには、地震計からの出力が約 10 dB づつ利得をかえて接続されており、上から中、低、高となっている。記録に示されているように、この海底地震計の S/N 比は改善

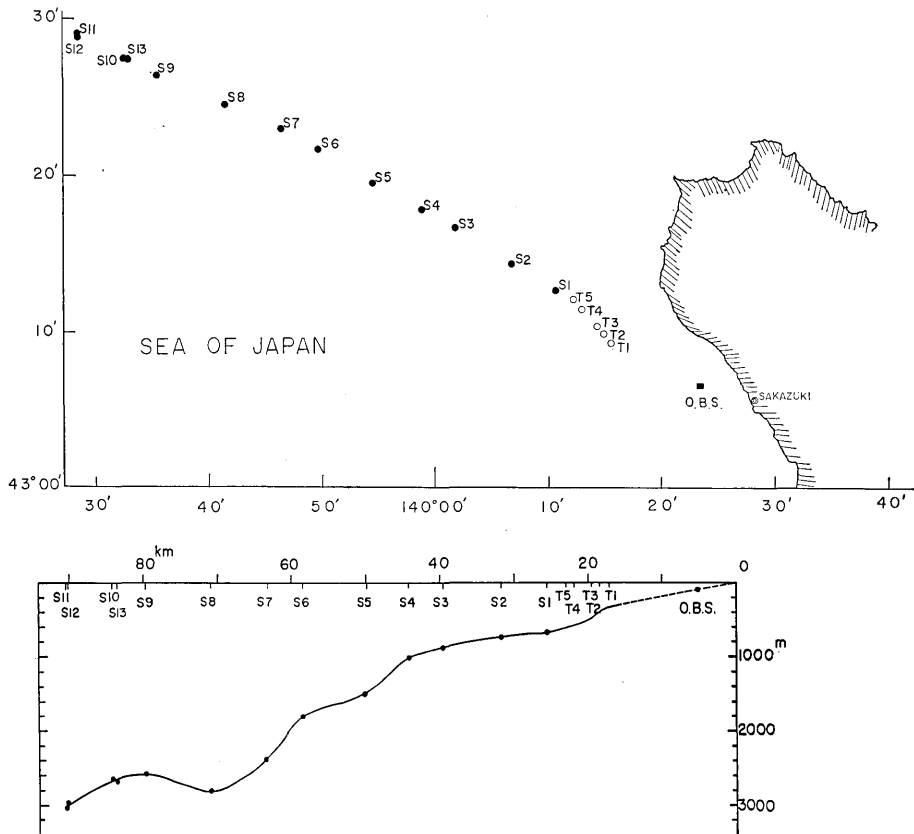


Fig. 3. Shot points and topography for the Off Shakotan explosion. The distance is measured from the shore station, Sakazuki.

の余地があるが、特に高利得のトレースはよく働いていない。読取には主として低利得のトレースを用い、中利得のトレースを参照した。初動と第2の位相は矢印で示されているが、何れの記録にも明瞭である。初動付近の最大振幅 (peak-peak) は 7 Hz で S2 では 1.9 m kine ( $\lambda=26.6$  km), S10 では 560  $\mu$ kine ( $\lambda=78.9$  km) である。

元来、この爆破では陸上の遠方観測点でも明瞭な初動を得るように大きい薬量を用いており、海底地震計には十分大きい信号を与えた。地殻構造に関係した詳しい解析は、他の陸上の観測点と併せて、現在行われつつあるが、本邦で実施された海底地震計による爆破の最初の観測として興味ある点について述べる。

まず第1に、水中音波が明瞭に記録されたことである。普通のハイドロホンを用いる方法では、爆破点からの距離は水中音波の走時の測定によるが、海底地震計の場合、果して、うまく水中音波が直接、記録されるかという問題がある。この点、Ewing ら、Nep-rochnov らの場合、必ずしも明瞭ではない。Fig. 6 にはハイドロホンによる調査の際、水中音波の性質を区別するためによく作る図であるが、縦軸は火薬投下時刻 (TOS) で、横軸は水中音波の走時である。図中、黒丸は海底地震計による第2の位相の走時を示し、白

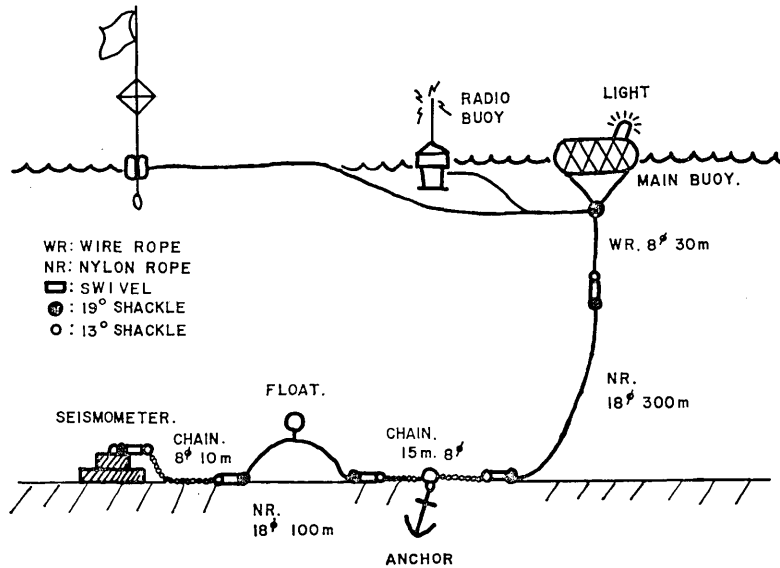


Fig. 4. Schematic illustration of actual installation of ocean bottom seismograph.

丸は、海岸のハイドロホンによって観測された水中音波の走時である。この線の傾斜は、水中音波速度を単位とした船の速度に当る。海底地震計による第2の位相は、この図からハイドロホンによる水中音波を参考にするることによって、水中音波であることが明瞭である。かくして、従来、爆破点の決定は、海岸でのハイドロホンによる爆発音の観測によっていたが、観測が必ずしも容易でなかった。従つて、海底地震計による観測は、本来、地殻上層に関する速度の情報を得るために実施を計画されたが、上述のように、水中音波がよく記録される可能性があるから、さらに海中爆発の爆破点決定にも有効と考えられる。

Fig. 7には海底地震計の位置を原点とした走時図が示されている。すなわち、縦軸に走時、横軸に海底地震計からの距離がとられている。前述のように、各爆破点の位置はデッカによるものをそのまま用いて距離を計算してある。この図において、水中音波の位相はDと示されており、観測値に合うように線をひくと、記入されているように、1.47 km/sの値が得られ、水中音波速度としては適当であり、再び、第2の位相が水中音波によるものであることが実証された。

次に興味のあることは、本来の目的である地殻上層部の速度情報を得る点で成功したことである。Fig. 7に小さい黒丸で示されたものは、初動の読取値をそのまま、プロットしたものである。これでも、かなりよく直線にのり、5.3 km/s, 6.4 km/sの速度が得られる。しかし、各爆破点における水深が得られているので、その水深を水中音波速度で割ったもの、すなわち鉛直に伝播する水中音波の走時をひいて近似的に水中の走時を補正してみると、白丸で示されるようになる。全体として、この方が直線によくのり、5.7, 6.5 km/sという線がひける。この2層のみとすると、5.7 km/s層の厚さは5.5 kmとなる。これらの値は、陸上でよく得られるものであり、地殻上層の速度情報が得られたことを示す。

前述のように、これらの値は陸上の他の観測データと一緒に解析され、近い将来、より信頼性の高い値が求められるであろう。従て、本論文ではこれ以上、立入った議論は行わず、地殻上層の速度が得られたことの指摘にとどめる。

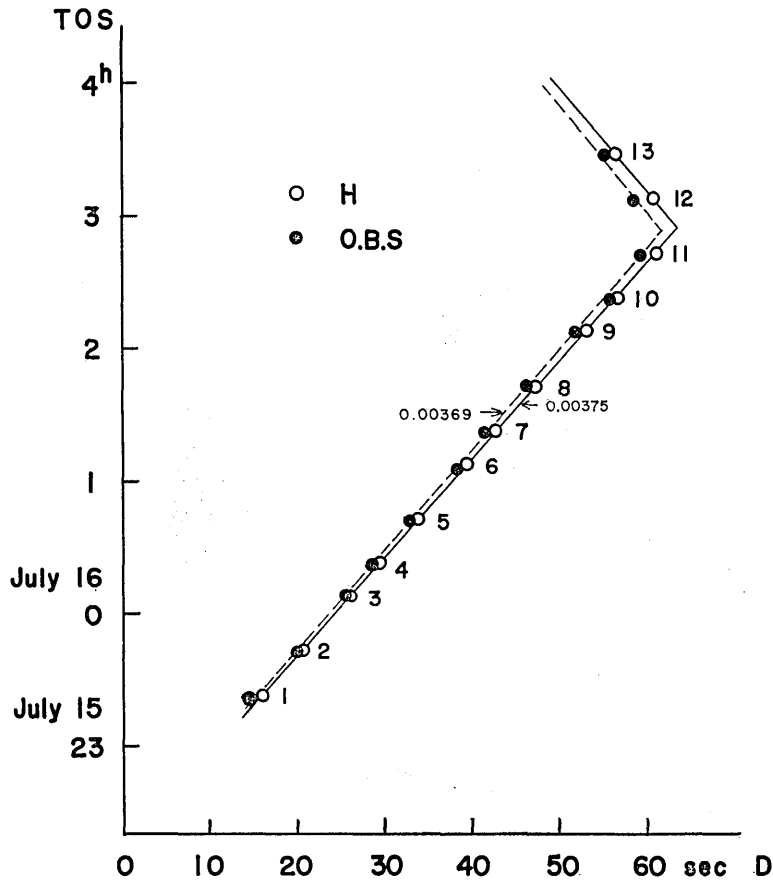


Fig. 6. Time of explosives over the side (TOP) and travel time of the second clear arrivals by the ocean bottom seismograph. Travel times of direct water waves recorded with hydrophone at the shore station is also plotted by the open circle.

#### 4. 結 び

海岸近くで爆破が出来ず、地殻上部の速度情報に欠けることの対策として、海底地震計を製作し昭和44年7月実施された積丹沖爆破の観測を行ない、良好な記録が得られた。初動と明瞭な第2の位相をよみとり、走時などを調べた結果、地殻上部の速度として5.7km/sの値が得られ、また、第2の位相は直接水中音波によるものであることがわかった。従つて、海底地震計による爆破の観測は、地殻上部の速度情報を得るのに有効であることを示すと同時に、直接水中音波による爆破点および距離の決定にも役立つことを示している。また、海底地震計は、ハイドロホンによる観測に比べて、漂流することがないという

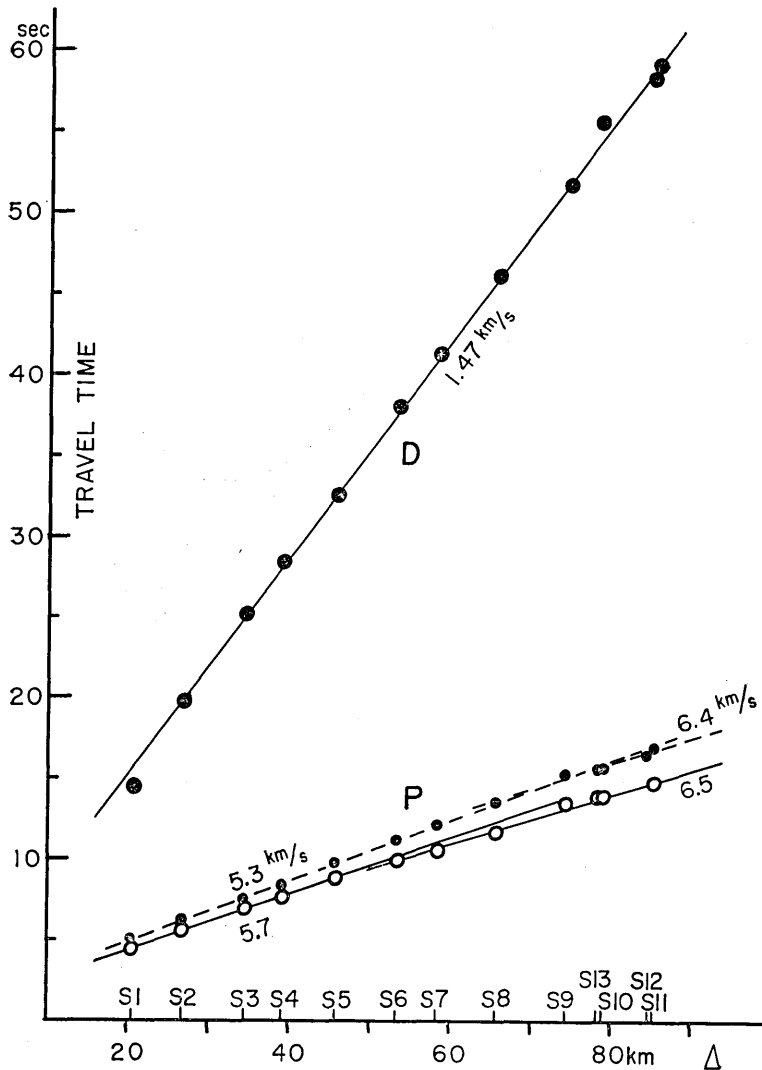


Fig. 7. Travel time graph

The abscissa,  $\Delta$ , is the epicentral distance measured from the ocean bottom seismograph. The travel times of the first arrivals are shown by small solid circles and those of the second clear arrivals, by large solid circles. The values corrected the vertical travel time within water are shown by open circles. The lines inserted are tentatively drawn for the reference although they are fitted satisfactorily.

利点を持っており、海底に直接設置される点と並んで、海底地形が複雑に変化している海域での地殻構造の詳細な研究や単純な構造の海域での深部の詳細な研究などに活用される可能性を持っている。



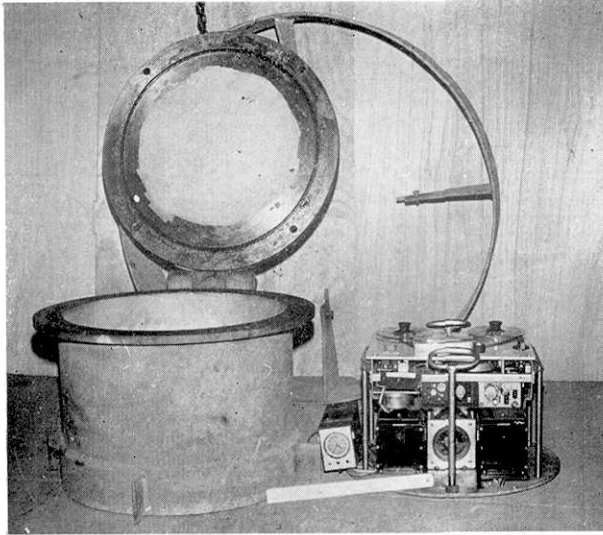


Fig. 1.

Fig. 1. Ocean bottom seismograph

Left: pressure vessel  
Right: Ocean bottom seismograph

upper part: tape recorder  
lower part: center; silicon oiled gimbal device maintaining seismometer  
both side; battery case

Fig. 5. Examples of seismograms

S2 means Shot No. 2. Most of the charge sizes are 600 kg. There are three levels of gain, i.e. high, medium and low. The output of one vertical seismometer is fed into these three channels. The gain of low level is 50 dB and the level difference is 10 dB. The channel with high gain did not work properly. The first and the second clear arrivals are shown by arrows.

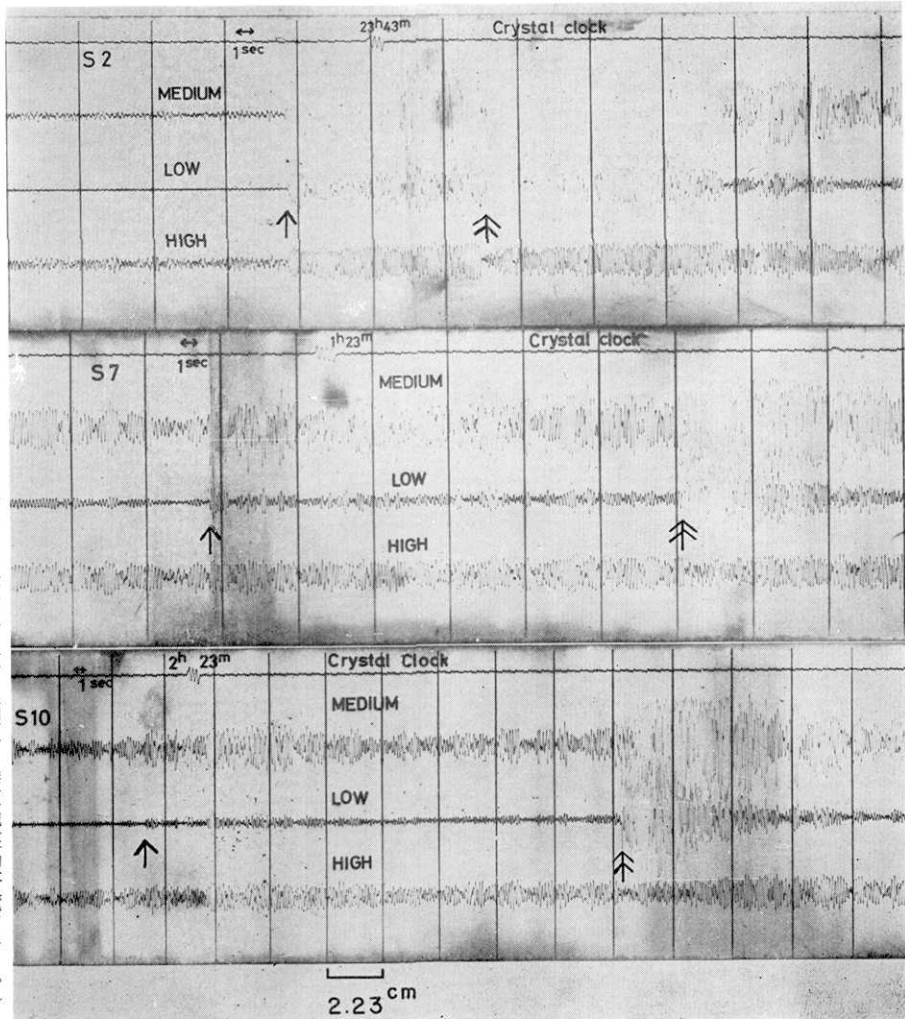


Fig. 5.

## Literature

- 1) RESEARCH GROUP FOR EXPLOSION SEISMOLOGY, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46** (1968), 529-605.  
M. HASHIZUME, K. OIKE, S. ASANO, H. HAMAGUCHI, A. OKADA, S. MURAUCHI, E. SHIMA  
and M. NOGOSHI, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46** (1968), 607-630.
- 2) For example,  
J. STEINHART, *J. Geophys. Res.*, **69** (1964), 5335-5352.
- 3) F. KISHINOUE, Y. YAMAZAKI, H. KOBAYASHI AND S. KORESAWA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **41** (1963), 819-824.
- 4) S. NAGUMO, H. KOBAYASHI, AND S. KORESAWA, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46** (1968), 861-875.
- 5) 島村英紀・浅田敏・高野健三, *うみ*, **8** (1970), 6-12.
- 6) M. EWING AND A. C. VINE, *Trans. Amer. Geophys. Union*, **1** (1936), 248-251.
- 7) J. EWING AND M. EWING, *J. Geophys. Res.*, **66** (1961), 3863-3878.
- 8) Y. P. NEPROCHNOV, L. N. RYKUNOV AND V. V. SEDOV, *Izv. Phys. Solid Earth*, **11** (1968), 71-77.
- 9) S. NAGUMO, H. KOBAYASHI AND S. KORESAWA, *loc. cit.*, 4).
- 10) 浅田敏・島村英紀, 昭和43年6月25日地震学会春季大会において講演.
- 11) S. NAGUMO, H. KOBAYASHI AND S. KORESAWA, *loc. cit.*, 4).

---

63. *Observation of Seismic Waves Generated by Explosions with  
an Ocean Bottom Seismograph.*

By THE RESEARCH GROUP FOR EXPLOSION SEISMOLOGY.

Observation of seismic waves in temporary stations on land from explosions at sea is a powerful method to obtain data on the crustal structure from the ocean to the island or to the continent. However, since it is difficult to fire explosives in shallow water around Japan because of fishing problems, the data on the upper part of crust could not be obtained fairly often. In order to improve this deficiency, observation with an ocean bottom seismograph was carried out in July, 1969 in the case of the Off Shakotan Explosion. The direct analogue recording technique was applied for the magnetic tape recording, so that the total recording time was extended to 600 hours with a 7 inch magnetic tape and with a tape speed of 0.5 mm/s for the frequency band 0.3-40 Hz. The geophone used was of vertical type with a natural frequency of 4.5 Hz manufactured by Geo Space Company. The maximum depth for this ocean bottom seismograph is 500 m and the actual observation was carried out at the depth of 116 m. The charge size for eleven shots was 600 kg and that for two shots was 300 kg. Clear first arrivals and direct water waves were recorded. The apparent velocities 5.7 and 6.5 km/s are derived from first arrivals by applying an approximate correction of water depth.

---