

震源域直上でのハイドロフォンによる海中音響観測の試み

—1984年8月30日に発生した伊豆東方沖の群発地震活動の観測結果—

春日茂*, 加藤茂*, 浅田昭*, 高橋道夫**, 吉田弘***

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF ACOUSTIC WAVES BY A HYDROPHONE ABOVE THE FOCAL AREA OF THE EARTHQUAKE SWARM

Occured on August 30th, 1984 at Sea off the East Coast of the Izu Peninsula.

Shigeru kasuga*, Shigeru Kato*, Akira Asada*, Michio Takahashi** and Hiromu Yoshida***

Abstract

On August 30 1984, an earthquake swarm activity occurred at sea off the east coast of Izu Peninsula. An experimental observation of the acoustic wave of the swarm was carried out by the survey ship TENYO with a hydrophone at sea just above the focal area during the active period of the swarm. The hydrophone was hanged from the ship down to a deep water, to a few hundred meters above the seabottom. A large number of seismic events were recorded and their arrival times were measured precisely. The hypocenters determined from the land observation data and additional hydrophone data were compared with the tentative hypocenters determined from only the land observation data by JMA (Japan Meteorological Agency). The comparison clearly pointed out that the hydrophone data had largely contributed to improve the accuracy of the determined hypocenters, especially in the accuracy of depth determinations.

The most beneficial point of the hydrophone observation is its capability of real-time monitoring which allows evaluations of the activity of earthquake swarms on a real-time basis. The other significant advantage is its mobility which enables to keep the observation point within the area just close to the epicenters, even when they migrate considerably. These advantages seem to pave the way to establish a new method of real-time monitoring of earthquake swarms at sea.

* 海洋調査課 Ocean Surveys division

** 気象庁福岡管区気象台 Fukuoka District Meteorological Observatory, Japan Meteorological Agency.

*** 気象庁地震火山部地震火山業務課 Seismological and Volcanological Management Division, Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency

1. はじめに

昭和59年(1984年)8月30日より伊豆半島東方沖の海底で、顕著な地震活動が始まった。水路部は、この群発地震活動がまだ活発であった9月8日から9日にかけて、測量船「天洋」(121トン)を使い、震源域直上の海中に hidroフォンを垂らして地震波の海中音響観測を実施した。今回の観測の当初の目的は次の2点であった。

- (1) 震源域から離れた陸上の地震計では感知できないような微小地震動(特に高周波の振動)を検出する。
- (2) 陸上の地震計でも記録が得られた比較的大きな地震に対して、震源直上で記録された hidroフォン の観測データを加えることにより、震源決定精度の向上に寄与させる。

(1)に関しては、通常の低周波帯域の陸上地震観測網では捕えることのできない微小地震動を hidroフォン で検出できれば、地震予知の観点からも非常に興味深いことである。水路部では、東京大学地震研究所の茂木教授と共同で、昭和55年(1980年)伊豆半島東方沖群発地震(M6.7)の余震や高周波微小地震動を、震源域の直上で hidroフォン により観測した経験がある(浅田他, 1980; 大島, 1980; 茂木・望月, 1980)。この観測では、50Hz以上の高周波振動のイベントを多数記録することができた。ただし、受信器として使用した hidroフォン がひとつであったため、地震波の到来方向が決められなかった。また、絶対時刻の測定も行えず、地震に伴う高周波振動と、船体等から発生した機械的・電気的ノイズとの識別が難しかった等の観測上の問題が多かった。そこで、今回は、波の到来方向を決めることを意図して、2つの hidroフォン を異なる深さに置いて、2点に到着した高周波振動の時間差の測定を試みることにした。しかしながら、ひとつの hidroフォン が不調であったため、この試みは成功していない。一方、もうひとつの hidroフォン にはノイズレベルを越える顕著な地震音響が多数捕えられた。しかも、JJY信号も同時収録していたので、高精度で地震動の到着時間を決定することが出来た。そこで、今回は陸上観測点の地震動記録と明確に対応が付き、かつ初動の明瞭な比較的低周波数(20~30Hz)の卓越する地震音響を選んで、上記の(2)項を目的として解析を進めた。高周波振動の解析は今後の課題として残し、本論では、陸上の観測データに hidroフォン のデータを加えて震源を再決定した結果と、今回のような観測方式の有効性について言及する。

一般に、震源位置を複数点の観測データから決定する場合、観測点がいずれも震源から遠く離れていることが多く、地震波の伝播速度構造が確実にわかっていない限り、精度良い震源決定はできない。1点でも震源のごく近傍にあると、決定精度は大きく向上される。また震源直上での観測が加えられるならば震源の深さの決定精度が大きく向上する。こうしたことから、陸上のある地域で地震活動が活発になった時には、直ちに活動域の近くに臨時の観測点を設置してデータを収集することがしばしば試みられてきた。活動域が陸上の観測点から遠い海域の場合には、震源決定精度が悪いので、震源近傍のデータがぜひとも必要となってくる。最近では、長時間地震観測のできる海底地震計を震源域の海底に投入し、数週間後に回収して記録を解析することもできるようになってきた。例えば、1983年の日本海中部地震(M7.7)の発生後、余震の震源域に海底地震計が投入されている(Urabe et al., 1985)。このように震源近傍に投入された海底地震計による観測は、海域で発生した地震の震源決定に最も有効な手段であると思われるが、ひとつの大きな欠点がある。それは、リアルタイムでデータが得られないという点である。

今回、我々が試みた観測方式は、Fig. 1に示されるように、震源域の直上に観測船を漂泊させ、 hidroフォン をケーブルにより海中に垂らし、船上のデータレコーダに地震音響を収録しようとするものである。この方式は、リアルタイムでデータが得られるので、地震活動の状況を刻一刻把握することができる。また、地震活動域が時間の経過を共に大きく移動していくような場合、観測場所も簡単に移動させることができる。

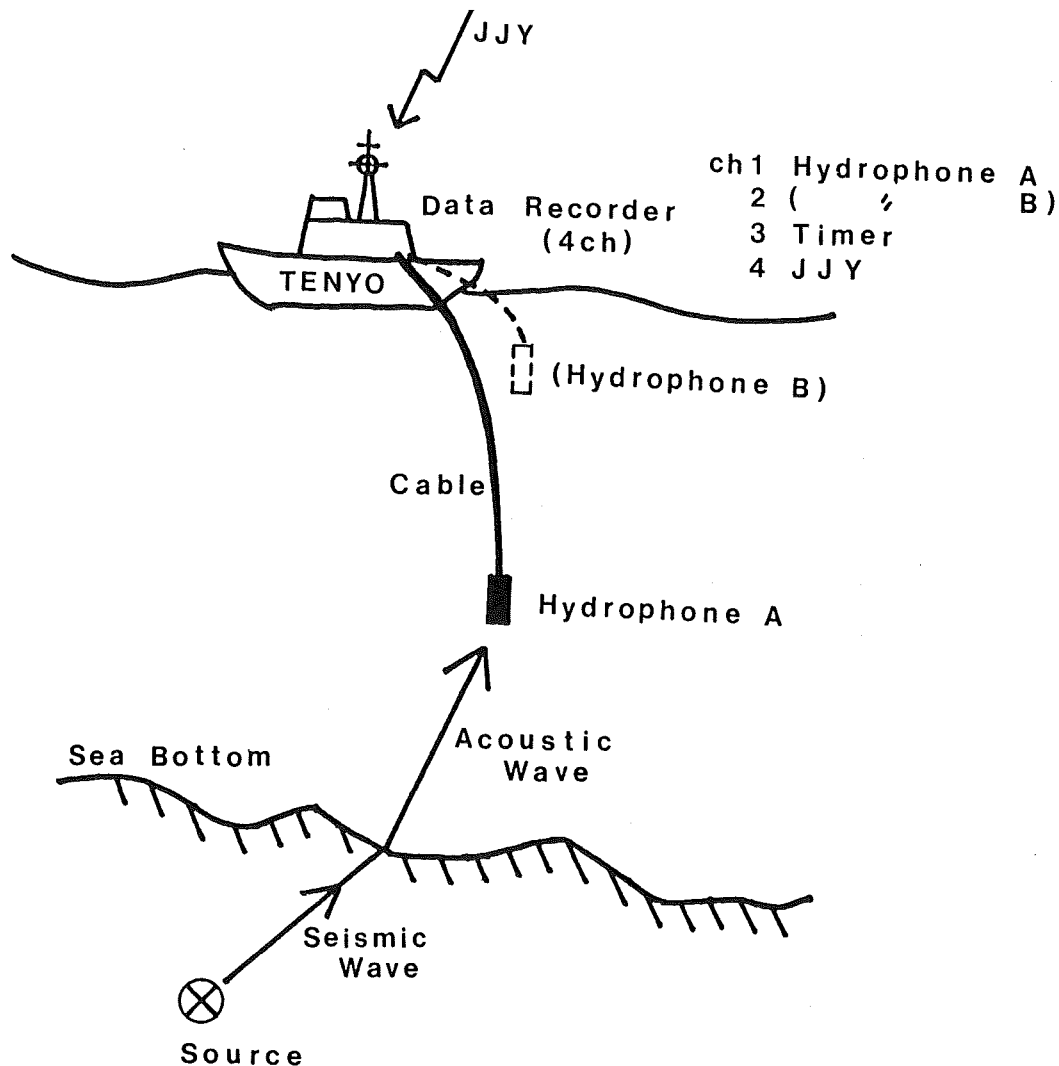


Figure 1 Schematic diagram of the hydrophone observation. One sensor (hydrophone A) was hanged down to the deep water, above 330m to 730m from the sea bottom. Another sensor (hydrophone B) was hanged down below several meters from the surface, however, its data were not available.

すなわち、機動性という面でも、海底地震計観測より勝っている。このような特長を生かせば、ハイドロフォンによる観測は、海域で発生した地震活動を監視する一手法として、十分意味を持つものと言えよう。

2. 観測の方法

観測は、1984年9月8日11時から9日12時までの25時間にわたり、測量船「天洋」を伊豆半島東方沖の群発地震活動域の直上に停泊させ、先端にハイドロフォンを装着した800mのケーブルを舷側から垂らすことにより行った(Fig. 1)。船は潮流などにより南南西に流されたが、幾度かエンジンをかけて移動させた結果、常に震央距離10km未満に保つことができた。航跡をFig. 2に示す。船位はロランCとレーダーにより測定した。この図には9月末までの気象庁地震月報による震央も同時にプロットしてある。船が流されるにつれて

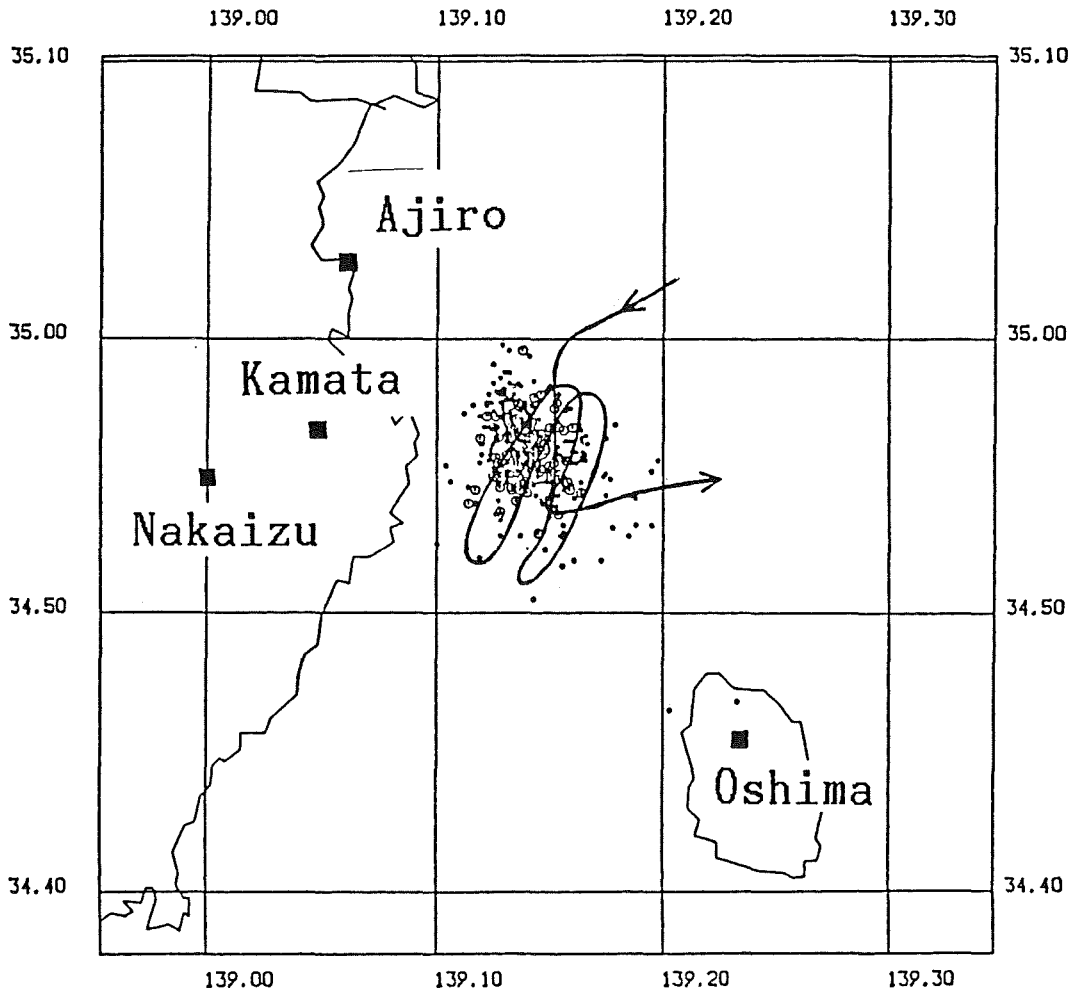


Figure 2 Location of survey vessel Tenyo together with epicentral distribution (until the end of September), and seismograph stations (Ajiro, Kamata and Oshima; Japan Meteorological Agency, Nakaizu; National Research Center for Disaster Prevention).

水深も650mから1,360mの間で変化した。また、くりだしたケーブル長は100~600mであり、ハイドロフォンの海底からの高さは330mから730mの間で変化したと推定している。

用いたハイドロフォンがカバーする周波数帯域は数Hz~数KHzである。船上ではアナログデータレコーダに記録すると共に、リアルタイムで地震活動を監視するため、ペンレコーダ、スペクトルアナライザーに常時ハイドロフォンの信号を出力させた。位相の読みとり精度をあげるため、データレコーダには水晶時計からの秒信号、JJY放送も同時に収録した。

スペクトルアナライザーのCRTに出力された観測波形の例をFig. 3に示す。陸上の気象庁他の観測網でも検知されている64個のイベント(8日14時39分から9日10時30分まで)について今回収録したデータから1/100秒の分解能で初動到着時刻を測定した。なお、この64個のイベントの内、地震月報に掲載されている比較的大きな地震は14個で、残りの50個は、網代、鎌田、中伊豆、富士川のデータを用いて震源決定された

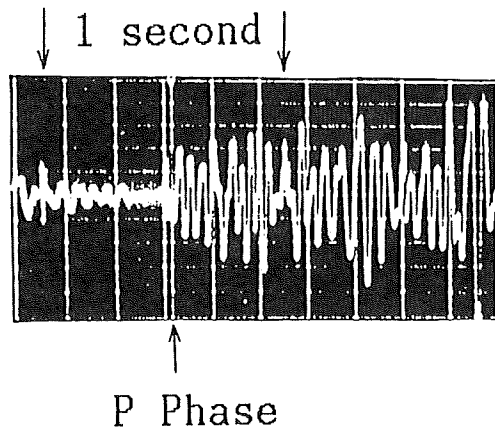


Figure 3 Example of CRT display of acoustic wave of the earthquake swarm detected by the hydrophone.

小地震である。

3. 観測結果

<震源再計算>

伊豆地域は気象庁の地震観測網の中で最も密な地域に位置しており、地震月報に掲載されている地震はかなり精密な震源決定がされていると期待できる。14個の地震のうち、 $M \geq 3$ のものは6個を数えるがいずれも10地点以上の観測所で観測値が得られている。

解析にあたっては、まず、ハイドロフォンによる観測値を上で述べた6個の $M \geq 3$ のイベントの震源事項を用いて検証した。すなわち、ハイドロフォンの観測環境は陸上の観測点と違って海水という数100mの厚さの低速度層の上のあり、またこの海域の地殻構造は、他の地域の構造と異なることも考えられる。これらの効果を一括して観測点補正值という形で導入する。Fig. 4に示したのは地震月報による14個のイベントの震源を基準とした時のハイドロフォンによる初動到着時刻の残差を、震央距離に対してプロットしたものである。 $M \geq 3$ のイベントに注目すると補正值は+0.3秒(おそい)が適切と思われる、この値をハイドロフォン観測値に対する補正值として採用した。

補正されたハイドロフォンのデータも含めて上の14個のイベントの震源再計算を気象庁ルーチンの方法で行った。震央位置はなかには2~3km動くものもあるが、ほとんどは1km以内の移動にとどまる(Fig. 5)。このことは必ずしも、真に正確な震源位置からの誤差がその程度であることを意味するものではないが、地震月報に掲載されている震源の精度が高かったことを示唆している。

次に、前章で述べた気象庁他の陸上観測網でも検知された64個のイベントの内、地震月報に掲載された14個を差し引いた残りの50個のイベントについて、ハイドロフォンのデータを加えて震源再計算を行ってみた。これらのイベントについては、地震月報に掲載されたものに比べると、観測できた観測点の数も少いため、陸上観測網のみで決めた震源ではやや精度が落ちるものと思われる。陸上データのみで決定した震源から再計算結果による震源に向けてベクトルをひき、その終点をプロットしたのがFig. 6である。この図からわかるように震央は平均して北西に1~2kmずれている。一方、垂直方向については深さ0~15kmに散らばっ

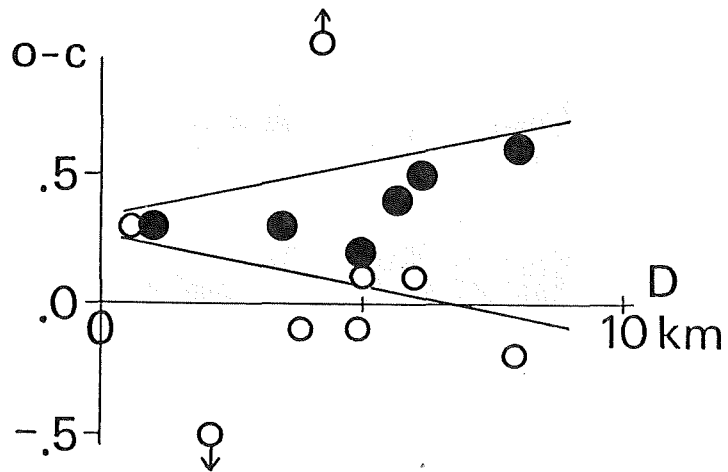


Figure 4 Residuals of the P phase time (O-C:observed minus calculated) plotted against epicentral distance (D). Hypocentral parameters are plotted based on the data of Seismological Bulletin, JMA. Closed and open circles correspond to events with $M \geq 3$ and $M < 3$, respectively. Appropriate station correction for hydrophone data can be considered as +0.3 sec from this figure.

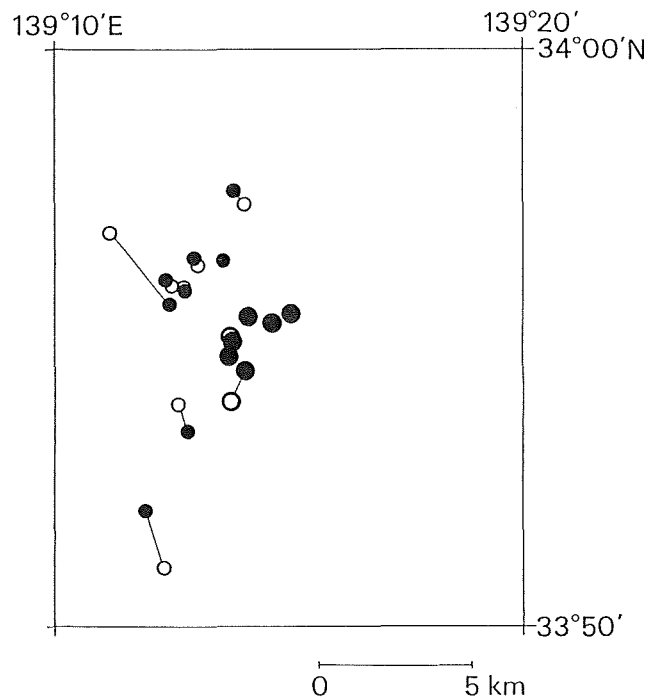


Figure 5 Epicenters given in the Seismological Bulletin, JMA (closed circles) are re-determined (open circles) by use of additional hydrophone data. Large and small circles correspond to events with $M \geq 3$ and $M < 3$ respectively. Differences between the two determinations of epicenters are less than 1km for almost all the events shown in the figure.

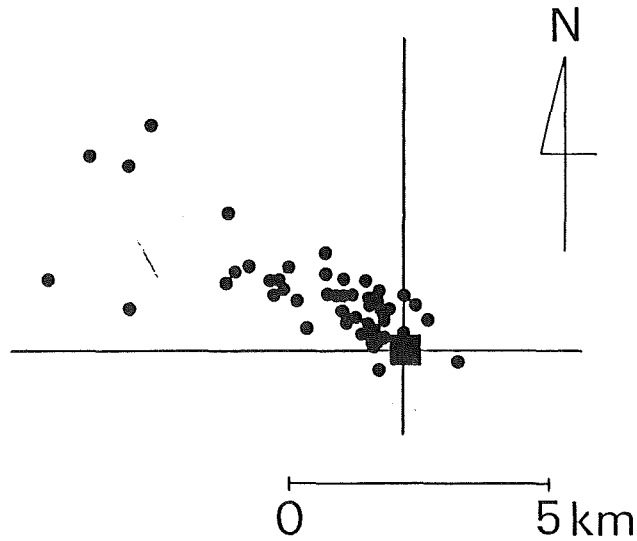


Figure 6 Tentative epicenters determined by JMA in quasi-real-time basis (square) and the re-determined epicenters (closed circles) by use of additional hydrophone data. The shift is 1–2km in average. This shows relative difference of epicenters for many events, with JMA's epicenters fixed.

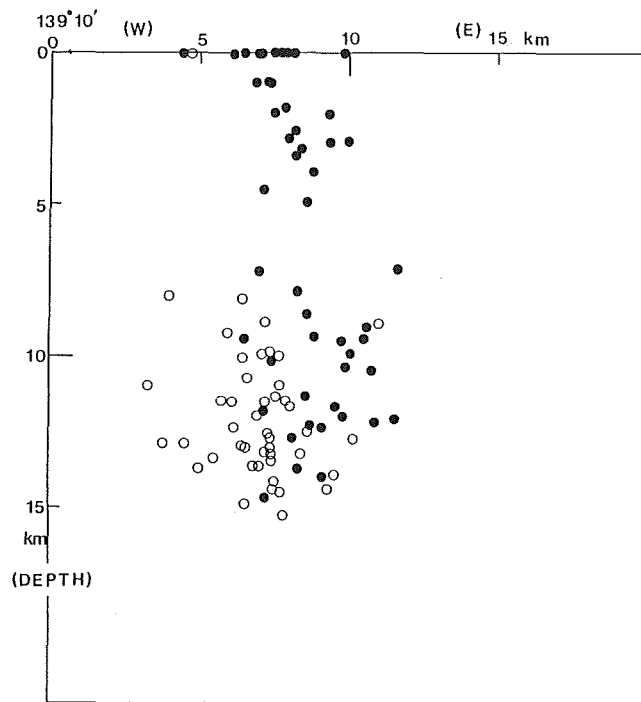


Figure 7 E-W vertical section of hypocenter distribution. Tentative hypocenters determined by JMA (closed circles) and re-determined hypocenters by use of additional hydrophone data (open circles).

ていた震源が再計算により8~15kmの範囲にまとまってきた(Fig.7). したがって、ハイドロフォンのデータを加えることにより、震源の深さ方向の精度が大きく向上したと考えられる。

<後続波群について>

Fig. 8 Aは、ハイドロフォンで観測されたイベントの記録例である。波形をみると、初動のP波の立ち上がりが続いて、顕著な位相を認められる。図のpP波は、初動の0.6~0.7秒後に現われる相で、振幅は初動よりやや小さい。この時のハイドロフォンの海面からの深さは500m前後であったことから、初動との時間

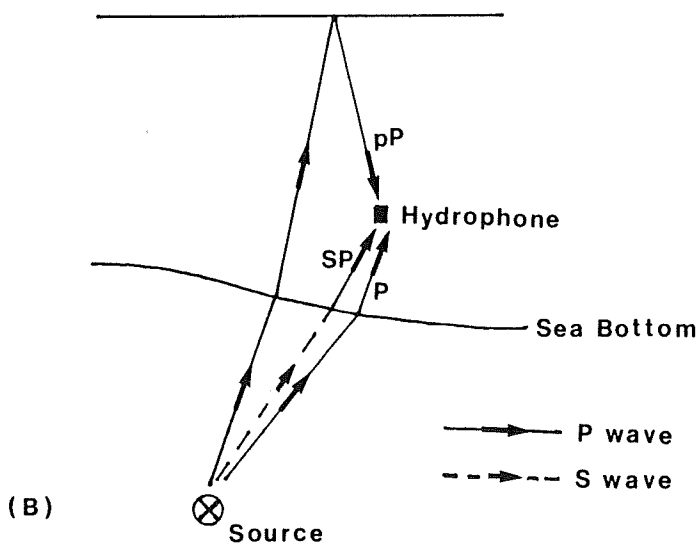
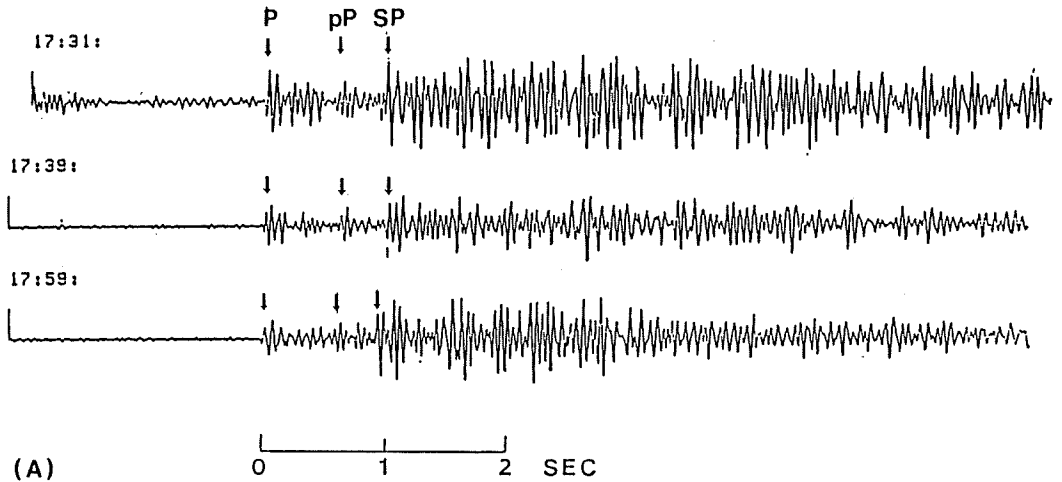


Figure 8 (A) : Example of wave forms.

(B) : Assumed propagation paths of P, pP, SP phases.

差から考えて、この相は海面で1度反射してからハイドロフォンに到達した波ではないかと思われる。次に、初動の約1秒後には、SPとマークを付けた顕著な相が認められる。この相は、初動の波群よりも振幅が大きく、継続時間も長いことから、1回だけの反射波とは考えにくい。震源距離が近いことから、多重反射波的な波とも考えにくい。ひとつの可能性として、この顕著な相は、地殻内部をS波として伝播し海底面もしくは海底下のやわらかい堆積層でP波になった変換波と考えられないだろうか(Fig. 8 B)。海底面又は堆積層と基盤との境界のように、速度差の大きい境界面で変換した波は振幅も比較的大きいことが期待される。もし、この解釈が正しいとすれば、P波速度、S波速度をそれぞれ V_p 、 V_s とおき、初動と変換波の時間差を ΔT として、変換点から震源までの距離 L は、次の式で計算される。

$$L = V_p \cdot V_s \cdot \Delta T / (V_p - V_s)$$

今回の観測域を含む伊豆半島東方沖の海底下の地殻構造は、屈折法地震探査の結果によると、P波速度3.0 km/sの薄い表層の下に、厚さ約15kmの6.0km/s層が存在している(Ikami, 1978)。 $V_p = 6.0$ km/sとし、S波速度のデータはないので、標準的な地殻モデルとして $V_s = 3.5$ km/sと仮定すると、 $\Delta T = 1$ 秒に対して距離 L は約8.4kmとなる。このような計算は、陸上の地震記録のP波とS波の時間差から震源距離を求めると類似した方法である。Fig. 9には1例として9月8日17h 18mから17h 33mまでの15分間に得られたイベントの記録を並べてある。波群を見やすくするため、10Hz~20Hzのバンドパスフィルターがかけられている。イベント毎に波形の様相はかなり異なるが、初動の1.0秒~1.5秒後に振幅の大きい相が現われているものが多い。この相が上で述べたような変換波であるとすれば、震源距離は、約8~13kmとなる。ハイドロフォンは、群発地震の活動域の海中にあったことから、この距離は海底面からの震源の深さにはほぼ相当するものと思われる。このようにして波形から推定された震源の深さは、陸上観測点にハイドロフォンのデータを加えて再計算した震源の深さ(Fig. 7参照)とよく調和している。

4. まとめ

今回のハイドロフォンによる観測データは、群発地震の震源位置、特に深さの決定に大きな効果があった。また、地震音記録の後続波群からも、震源の深さを推定するうえで役立つと思われる情報が得られた。今度の群発地震の活動域は、非常に密な陸上地震観測網のすぐ沖合の海域に位置していたことから、気象庁のこの海域での震源決定精度の評価にも役立つ。今後、陸上の観測網から遠く離れた海域で地震活動が活発になった場合、今回のようなハイドロフォンによる観測は、震源決定にさらに有効性を発揮することが期待される。しかも、この観測手法により、船上でリアルタイムで活動状況の推移を監視できるという利点も生まれてくる。もし船の位置と地震波の到着時刻データを陸上に送信し、陸上観測網のデータに追加して解析できれば、準リアルタイムで震源を精度良く決定することも可能になってくる。例えば、陸から遠く離れた海溝付近で地震活動が発生した場合、このような観測方式により、震源域が陸側プレート内であるか、あるいは海洋プレート上面か下面か等の問題を早い段階で正確に決定することができ、大地震の発生予測にも大いに貢献できる可能性があるだろう。

今回の観測では、通常陸上観測網の低周波帯域の地震計では感知できないような微小高周波地震動を検出するという当初の目的のひとつは達成できなかった。これは冒頭で述べたように、波動の到来方向が判明できず、地震に伴う高周波振動とノイズ等との識別が困難であったことによる。他に原因として、震源減が8~15kmと比較的深かったため、高周波地震動が地殻内で減衰してしまったことも考えられる。断面が海底まで達しているような浅い地震活動域の直上で観測した場合は、地震発生に先行する前兆的微小高周波

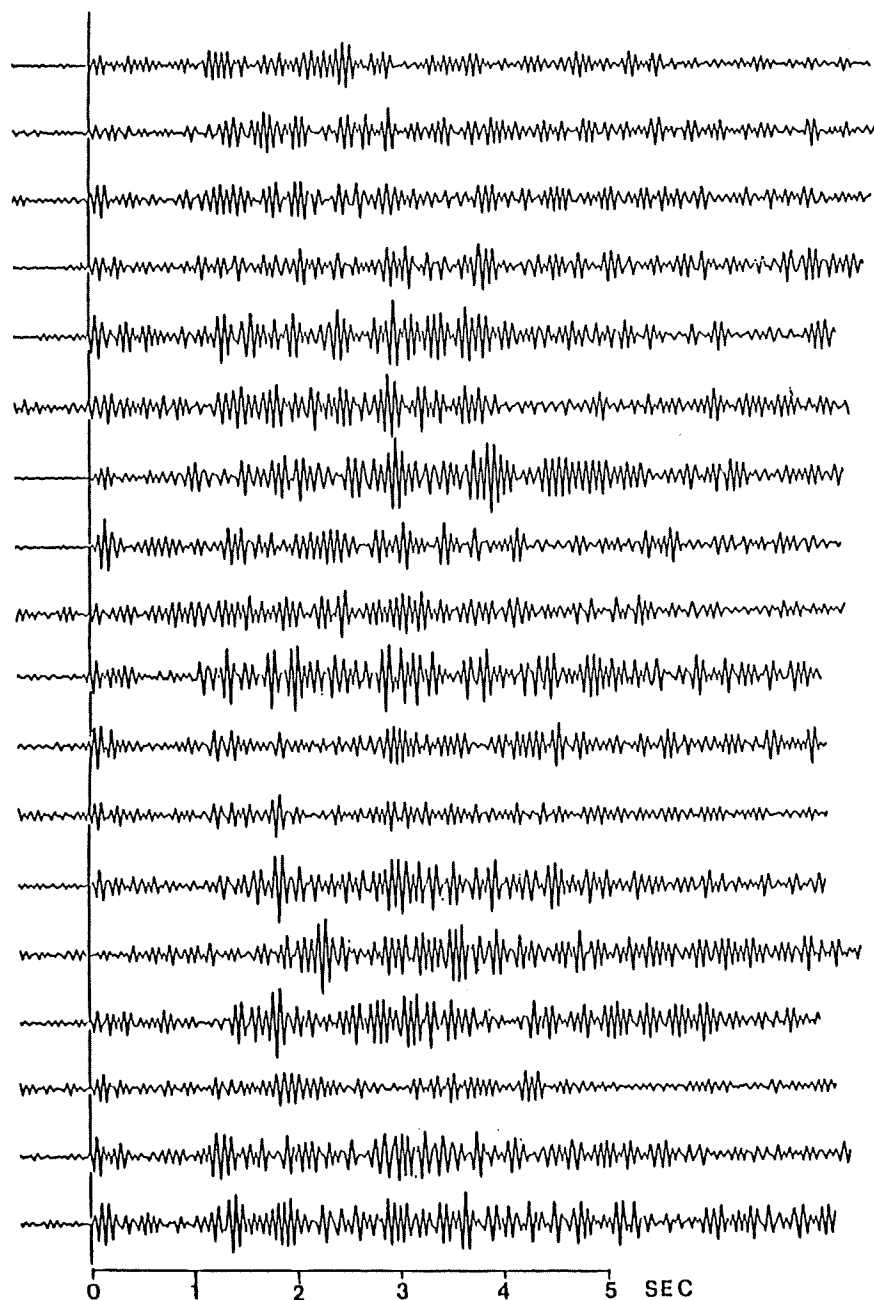


Figure 9 Example of events detected by the hydrophone. The period of observation for these events in this figure is about 15 minutes.

振動が、ハイドロフォンにより捕えらることも十分期待できる。

以上のように、ハイドロフォン観測は、地震活動域の空間分布及び、高周波微小地震を含めた地震発生の時系列分布をリアルタイムで監視する新しい観測手法として、今後も発展させていきたいと考えている。

謝 辞

この研究は海上保安庁・気象庁共同の「地震・津波解明のための海底地殻変動調査研究プロジェクト」の一環として実施されたものである。研究の機会を与えていただいた運輸政策局，海上保安庁水路部，気象庁の関係者に深く感謝する。水路部の土出昌一氏からは観測方法に関して助言をいただいた。観測の際は，測量船「天洋」の加賀山哲男船長をはじめ，乗組員の皆様にお世話になった。水路部の大島章一氏には本稿を読んでいただき，有益なご指摘を賜った。以上の皆様に厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 浅田昭，土出昌一，加藤茂，平野賢治，大島章一 1980：伊豆半島東方沖群発地震で観測された高周波スペクトルについて 地震学会昭和55年度秋季大会講演予稿集，11ページ
- Ikami, A. 1980：Crustal structure in the Shizuoka district, central Japan as derived from explosion seismic observations, *J. Phys. Earth*, 26, p.p. 299-331
- 茂木清夫，望月裕峰 1980：1980年伊豆東方沖地震の震源直上でのハイドロフォンによる高周波振動の観測とそれによる地震断層の位置の推定，地震研究所彙報，No.55，1017-1041ページ
- 大島章一（1980）：地震活動と水中音響 水路，No.35，12-18ページ
- Urabe, T, K. Suyehiro, T. Iwasaki, N. Hirata T. Kanazawa, A. Nishizawa, and H. Shimamura 1985：Aftershock distribution of the 1983 Japan Sea Earthquake as determined from helicopter-dispatched OBS observation, *J. Phys. Earth*, 33, p.p. 133-147