

## 海底音響測距計の開発†

長屋好治\*, 矢吹哲一朗\*, 小野房吉\*\*, 浅田 昭\*

### DEVELOPMENT OF THE SEA FLOOR ACOUSTIC RANGING SYSTEM †

Yoshiharu NAGAYA\*, Tetsuichiro YABUKI\*, Fusakichi ONO\*\*, Akira ASADA\*

#### Abstract

Acoustic ranging on the sea floor is one of hopeful methods by which the detection of crustal deformations could be realized in the deep sea. We have been developing a Sea Floor Acoustic Ranging system (SeaFAR) which will detect the strain for a baseline 1km long with accuracy of 1cm. SeaFAR repeats the measurement of propagation time of acoustic signal in two way as well as sound velocity in a period longer than a year. Sound velocity is not directly measured but derived from water temperature, salinity and water pressure observed.

We have developed one pair of prototypes which measure precise propagation time of acoustic signals, and carried out an experimental measurement on the sea floor 1250m deep in the Sagami Bay. The result shows that propagation time of acoustic signals can be measured with accuracy of  $2 \times 10^{-6}$  second and that propagation time varies more than  $200 \times 10^{-6}$  second because of the temperature variation in the order of  $0.1^{\circ}\text{C}$ . It is a next important theme to eliminate of influence of the temperature variation by means of precise measurement of temperature.

#### 1. はじめに

海底の2点間で音波の伝搬時間を長期間繰り返し測定することによって、地殻変動にともなう2点間の伸縮を検出できる可能性がある(長屋, 1995). 著者らは、年間10cm以上の拡大速度をもつといわれる東太平洋海膨の南部で拡大速度を実測することを目標として観測機器(音響測距計)の開発を始めた。水深3000mの海底で、長さ1000mの基線の伸縮を1cmの分解能で1年間連続測定する、これを可能とする機器の開発が目標である。

本稿では音響測距計の詳細と、相模湾の海底で行った測定試験の結果について報告する。

#### 2. 手法

海底の2点で音響信号の送受信を行い、2点間の音波の伝搬時間を測定する。これと同時に音速を測定し両者の積から伝搬距離を求める。測定を長期間繰り返すことによって伝搬距離の変化を検出する。これが音響測距による地殻変動観測の基本的な方法である(長屋, 1995)。ただし、音速を直接測定するのではなく、水温、塩分、水圧を測定し、これらから計算される音速を用いて伝搬距離を計算する。

音響信号の送受信は2点の双方で行い、双方向の伝搬時間を測定し、両者の相加平均から伝搬距離を求める。これによって海流に起因する伝搬時

† Received 1996 February 23rd Accepted 1996 March 13th

\* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory

\*\* 航法測地課 (現在, セナー株式会社) Geodesy and Geophysics Division (Present Address: Sena Co., Ltd.)

間の変動が除去される (長屋・他, 1994).

ケーブルを使って2点間を電氣的に接続する方法はとらない。双方に時計を内蔵させて、海底に設置する前に同期をとっておき、以降、時計から一定間隔で出力されるパルスを送受信を行う。電源やデータ収録部も双方に内蔵することによって、海底の2点に設置する音響測距計を、同一の機能を持ち同一の動作を行う2つの単体とする。さらに、傾斜計を内蔵させて機器の傾き角の変化も測定する。

音響測距計の海底設置および回収については、音響切り離し装置を組み込んで、海面から自由落下で海底に設置し、船上から送る音響信号の指示によって重錘を切り離し機器を海面に浮上させて回収する方法をとる。

### 3. 設計

#### (1) 仕様

音響測距計の仕様を Table 1 に示す。

海水中の音波の伝搬速度がおよそ1500 m/s であるから、伝搬距離の変化を1 cmの分解能で検出

するためには、伝搬時間を6 $\mu$ sより高い精度で測定する必要がある。そこで音響信号として直線周波数変調波 (リニア FM) を使い、パルス圧縮によって信号検出を行う。リニア FM の中心周波数は40kHz、変調幅は20kHzとする。40kHzの波の周期は25 $\mu$ sであるが、パルス圧縮によって周期の1/10程度すなわち2.5 $\mu$ s程度まで分解能を上げることができる (長屋, 1995)。

信号のパルス長は5msとする。周波数変調幅が20kHzでパルス長が5msであれば、伝搬損失のために受信信号レベルがノイズレベルまで減衰しても、パルス圧縮によってSN比を10:1まで上げることができる (長屋, 1995)。

送信レベルは148dB $\mu$ Pa以上とする。Urlick(1983)によると水深1000mを越える海水中の音響ノイズは、30kHzから50kHzの周波数帯で60dB $\mu$ Pa程度である。一方、長屋(1995)に従って伝搬距離1600mまでの伝搬損失を計算すると Fig. 1 となり、距離1 kmに対する伝搬損失は、30kHzから50kHzの周波数帯で最大78dB $\mu$ Paとなる。したがって、送信

Table 1. Technical specifications.

Transmitting signal	linear frequency modulated (FM) pulse
Center frequency	40kHz
Frequency band width	20kHz
Duration time	5ms
Power amplifier	
Output power	50watts
Acoustic transducer	Plumb-zirconate-titanate ceramic sphere (ITC-1083)
Transmitting response	129 (30kHz), 133 (40kHz), 138 (50kHz) in dB $\mu$ Pa/v
Maximum input power	100watts
Receiving response	-202 (30kHz), -204 (40kHz), -203 (50kHz) in dB v/ $\mu$ Pa
Directivity	Omni directional
Maximum operating depth	10,000m
Voltage amplifier	
Gain	variable 60~100dB (fixed before operation)
AD Converter	
Sampling frequency	500kHz
Resolution/Dynamic range	12 bit/ $\pm$ 5V -52~14dB v
Clock	quartz oscillation
Stability of frequency	$1 \times 10^{-5}$
Iteration interval of Pulse-A	variable 1~99,999s in 1s (fixed before operation)
Delay time of Pulse-B for Pulse-A	variable 0~99s in 1s (fixed before operation)
Delay time of Pulse-C for Pulse-B	variable 0~0.9s in 0.1s (fixed before operation)

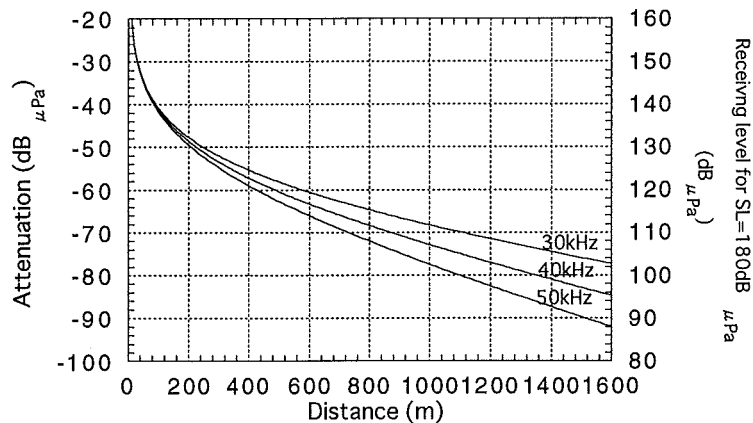


Fig. 1. Transmission loss of underwater sound.

レベルを148dB $\mu$ Pa以上に設定すれば、受信レベルは音響ノイズより10dB以上高くすることができる。

音響トランスデューサには無指向性のものを使う。これは、音響測距計を海面からの自由落下で海底に設置するため、設置時の機器の向きを制御することはできない。機器の向きに関係なく送受信を可能とするために、無指向性の音響トランスデューサを使用する。

パルス圧縮は受波をA/D変換してデジタル処理によって行う。前述したとおりパルス圧縮によって2.5 $\mu$ sの分解能が得られるから、A/D変換のサンプリング周期は2.5 $\mu$ sより短くする。

長期間の観測を可能にするために、測定は断続的に行い測定と測定の合間は電源をオフにする。このために主電源とは独立した電源で内蔵時計を動かす。時計が一定の時間間隔で出力する信号(Pulse-A)によって主電源をオンにしてシステムを起動する。1回の測定が終了したら主電源をオフにする。

時計は、音響信号の発信をトリガーするパルス(Pulse-B)と受波のA/D変換の開始をトリガーするパルス(Pulse-C)の出力もあわせて行う。これらのパルスが出力される時刻の精度は測定精度を決める要素のひとつであるから、時計の基準発振子には $1 \times 10^{-5}$ より高い周波数安定度が必要とされる(長屋, 1995)。

2台の音響測距計が音響信号を送信する時刻のずれを一定時間内に抑えるため、時計の進みや遅れを1msの刻みで修正する機能を時計に与える。

水温、塩分および水圧の測定には、それぞれ0.003 $^{\circ}$ C、0.01%および1 dbarより高い精度が必要であり(長屋, 1995)、高精度のCTDセンサを音響測距計に組み込む。また、機器の傾斜角の測定には0.6 $^{\circ}$ 程度の精度が必要であり(長屋, 1995)、傾斜角を静電容量の変化として検出する傾斜センサを組み込む。

## (2) 構成と機能

Fig. 2に音響測距計のブロック図を、また、Fig. 3にタイミングチャートを示す。これらの図中のローマ数字は動作の順序を表し、Fig. 2の中央に示される時計からPulse-Aが出力されることによって主電源がオンになり1回の測定が始まる。

ROMにはリニアFMを表すデータが書き込まれており、これがPulse-BをトリガーとしてD/A変換器に送られ、パワーアンプを通して音響トランスデューサから音響信号として送信される。Pulse-AとPulse-Bの時間間隔は、電源がオンになってからシステムが起動するまでの時間に依りて設定する。

受波のA/D変換が、Pulse-Cをトリガーとして開始される。A/D変換のサンプリング周期は2 $\mu$ sで、変換されたデータはバッファメモリに蓄積される。メモリは262,144個のデータを蓄積する容量をもち、524,288 $\mu$ sの時系列として受信データ

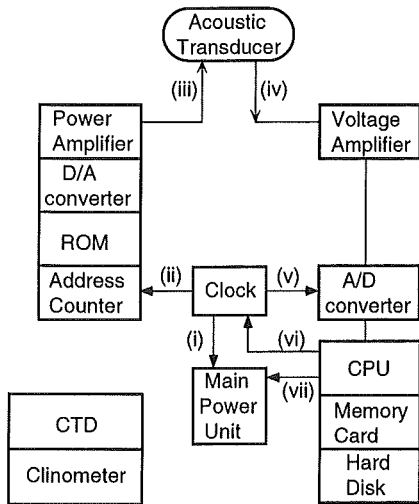


Fig. 2. A schematic of the SeaFAR.

が得られる。この524msの間に相手の音響測距計からの信号が捕捉できるように、基線長に応じて Pulse-B と Pulse-C の時間間隔を決める。

バッファメモリがフルになったら A/D 変換を終了する。続いて受信データと参照波形との相互相関関数を計算し、A/D 変換の開始から相関関数がピークを示すまでの時間  $T$  をメモリーカードに記録する。また、受信データをハードディスクに記録する。

2 台の音響測距計の内蔵時計に関して、これらの基準発振子の周波数の差によって Pulse-B や Pulse-C の発信時刻にずれが起り、結果として  $T$  が変化する。双方の基準発振子の周波数を  $f_1$ ,  $f_2$  として、例えば、 $(f_1 - f_2) / f_2$  が  $1 \times 10^{-5}$  程度であれば、 $T$  は 1 時間で 36ms 変化し、10 数時間経過すると  $T > 524\text{ms}$  となり、信号が受信データの時系列から外れることになる。そこで、測定毎に  $T$  と第 1 回目の測定値  $T_1$  とを比較し、 $|T - T_1|$  がある値  $\Delta T$  (ms) を越えたら、時計の進みを  $\Delta T$  だけ修正することにする。これによって双方の時計の同期のずれは  $\Delta T$  (ms) 程度に抑えられる。  $\Delta T$  はソフトウェアに与えるパラメータとして海底に設置する前に設定する。なお、時計を修正したら、その修正量をメモリーカードに記録する。ただし、この動作は一方の音響測距計のみで行う。

これで 1 回の測定が終了し、CPU の制御で主電源をオフにする。一定時間の後、時計から再び

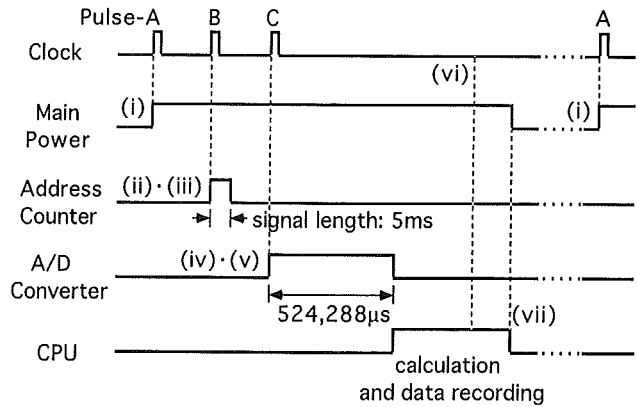


Fig. 3. A timing chart of the SeaFAR.

Pulse-A が出力されて次の計測が始まる。これら一連の動作が機器が回収されるまで繰り返される。

1 回目の測定動作が、音響測距計が海底に設置される前に行われてはいけない。このために、時計をスタートした後、一定時間  $T_0$  の間は Pulse-A の出力を抑制する機能を内蔵時計に与える。  $T_0$  はから 99,900 秒の間で予め設定する。

#### 4. 動作特性

試作した 2 台の音響測距計について、音響特性と時計の精度を評価するための試験を行った。2 台の音響測距計を区別するために、時計の進みを修正する機能をもつ方を SeaFAR-1、他方を SeaFAR-2 と呼ぶことにする。

##### (1) 音響特性

送信音圧と受信感度の取得、および、送信波形のサンプルを目的として、海洋科学技術センターの超音波水槽を利用して音響測定を行った。

送信音圧は、これによって基線長の最大値が規定されるから、音響測距計の基本性能の一つである。また、受信感度は受信アンプのゲインの最適値を知るために必要とされる。さらに、送信波形のサンプリングは、相関関数を計算するときの参照波形を得るために必要とされる。参照波形として Fig. 2 の ROM に書かれたリニア FM そのものを使うこともできるが、このリニア FM はパ

ワーンプや音響トランスデューサの応答特性によって歪むため、実際の送信波形を参照波形として相関関数を求めるほうが、より高いS/Nが得られると予想される。

試験に使った水槽は一辺9 mの立方体で、内壁および底の全面に吸音材が取り付けられている。また、水面にも同じ吸音材が浮かべられている。水槽の水は海水ではなく真水である。

音響測距計そのものを水槽に入れるのではなく、これを、送受信アンプを入れた耐圧球と、そこから3 mのケーブルでつながれた音響トランスデューサとに分解して測定を行った。送信音圧の測定および送信波形のサンプリングにおいては受信側として水中音圧計SW1020（沖電気工業株式会社）を使用した。水槽の中央に、音響測距計の

音響トランスデューサとSW1020のマイクロフォンを、水面から4.5 mの位置に2 m隔てて吊るし、信号の伝搬を行った。

Fig. 4 (a), (b), (c)に、SeaFAR-1の送信波形とそのパワースペクトルおよび位相特性を、また、(d), (e), (f)に SeaFAR-2のそれぞれを示す。位相特性としては、サンプルされた送信波形の立ち上がりからの位相角の積算と、リニア FM の位相角の積算との差をプロットしている。SeaFAR-1の出力波形は、SeaFAR-2に比べてやや強い振幅を示す反面、振幅に強弱がある。Table 2に送信レベルの平均値を後述する受信感度とともに示す。SeaFAR-1, SeaFAR-2ともに180dB $\mu$ Pa以上の送信レベルをもつことがわかる。

Fig. 4 (b), (e)のパワースペクトルについて31

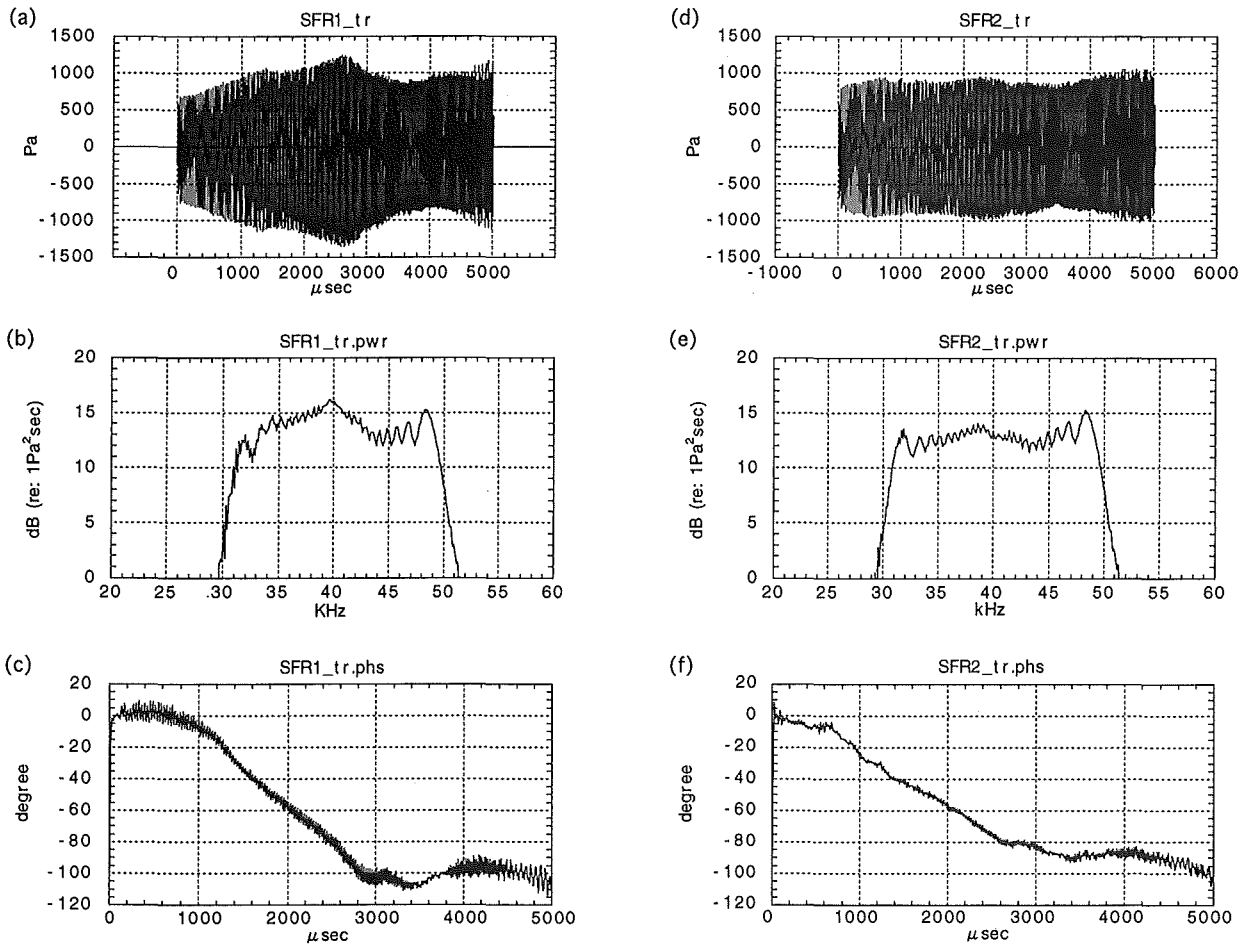


Fig. 4. Transmitting waves sampled in water tank ; (a) for SeaFAR-1, (d) for SeaFAR-2. Power spectra of transmitting waves ; (b) for SeaFAR-1, (e) for SeaFAR-2. Phase characteristics of transmitting waves. Differences of cumulated phase angle of transmitting waves for cumulated angle of LFM are shown ; (c) for SeaFAR-1, (f) for SeaFAR-2.

kHz から49kHz の範囲で両者を比較すると、SeaFAR-1では40kHz でパワーが最大となりこの範囲で6 dBの変化を示す一方、SeaFAR-2は48 kHz で最大、4 dBの変化を示し、両者の周波数特性は幾分異なっている。なお、パワースペクトルと送信波形の包絡線とが類似した形状を示すのは、リニア FM を信号としているためである。

位相特性については SeaFAR-1, SeaFAR-2 とも同様な位相遅れを示し、信号の後半で100°程度となっている。

受信感度の測定では、水中音圧計のハイドロフォンに代えて、これと同じ位置に基準音源を吊るし、30kHz, 40kHz および50kHz のバースト波を発信して、音響測距計の受信アンプの出力電圧を測定した。結果は Table 2 のとおりで、SeaFAR-1, SeaFAR-2 とも周波数に依らずほぼ等しい受信感度を示している。ただし、SeaFAR-1 の感度は SeaFAR-2 より平均して1 dBほど高い。なお、Table 2 の受信感度は、音響トランスデューサ単体の感度ではなく、音響トランスデューサの入力音圧に対するアンプの出力電圧の比であり、系としての感度を示している。音響測距計のアンプのゲインは60dBから100dBまで変えることができるが、このときは68dBに設定して測定を行った。

(2) 時計の精度

音響測距計の内蔵時計を恒温槽に入れ温度を0℃に設定して、時計が出力する毎秒信号をセシ

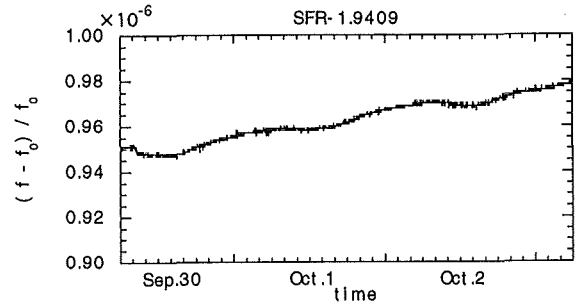


Fig. 5. Time variation of frequency deviation for the reference oscillator used in the clock of SeaFAR-1.

ウム原子発振器 MODEL5453A (富士通株式会社) の毎秒信号と比較した。

1994年9月30日から3日間、SeaFAR-1 の時計について測定した結果を Fig. 5 に示す。縦軸は、基準発振器 (水晶発振子) の周波数  $f$  の、設計上の周波数  $f_0$  (2.1MHz) に対する周波数偏差を表す。Fig. 5 には約1日を周期とする変動がみられる。これは恒温槽内の温度変化による変動であり、これを除いた右上がりのトレンドが時計のドリフトである。ドリフトレートを計算すると1日あたり  $+0.01 \times 10^{-6}$  となり、この値が変化しなければ、1~2年間は  $1 \times 10^{-5}$  の周波数安定度が維持されることになる。

基準発振器の製造からこの試験測定までは半年程度を隔てるに過ぎず、水晶発振子のエージングが不十分であるかもしれない。エージングを続けることによってさらにドリフトが小さくなる可能

Table 2. Transmitting level and receiving response.

	SeaFAR-1	SeaFAR-2
Transmitting sound pressure in average in dB $\mu$ Pa at 1meter	182.8	181.9
Receiving response in dB $v/\mu$ Pa	30kHz	-137.6
	40kHz	-138.4
	50kHz	-138.2
	Average	-138.1

Table 3. Frequency deviations and drift-rates for reference oscillators used in clocks inside SeaFARs.

	SeaFAR-1	SeaFAR-2
$(f - f_0) / f_0$	$+ 1 \times 10^{-6}$	$+ 1 \times 10^{-6}$
Drift of $(f - f_0) / f_0$ in a day	$+0.01 \times 10^{-6}$	$+0.01 \times 10^{-6}$

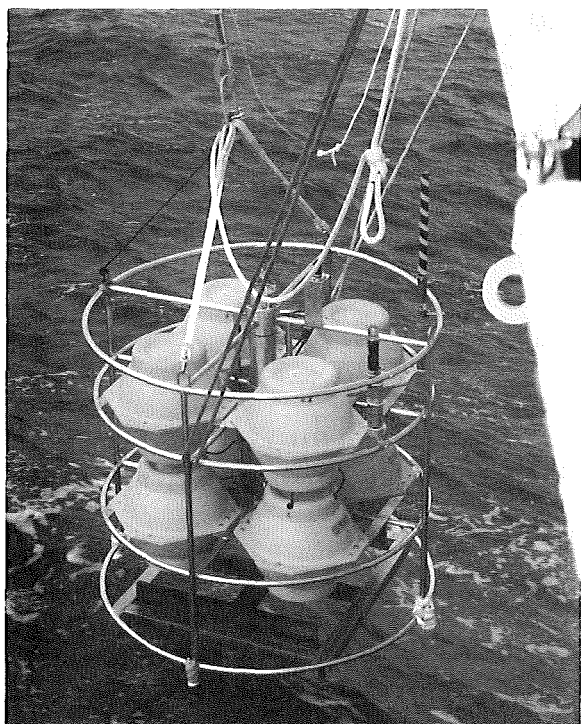


Fig. 6. SeaFAR being deployed from R/V Shoyo.

Table 4. Overall size of SeaFAR and parameters set in the experimental measurement in Sagami Bay.

Overall size (when lowered)	W151×H185cm
Weight in air	450kg
Weight in water	50kg
Weight of sinker	120kg
Descending/ascending speed	40cm/s
Gain of receiving amplifier	68dB
Iteration interval of Pulse-A	3,600s
Delay time of Pulse-B	30s
Delay time of Pulse-C	300ms

性があり、再度試験を行ってこれを確認する必要がある。

SeaFAR-2の時計については1994年8月23日に24時間の測定を行った。これも同程度のドリフトを示した。測定結果をまとめてTable 3に示す。

### 5. 海域試験

1995年4月に水路部の測量船「昭洋」によって、相模湾の海底（水深約1250m）に2台の音響測距計を設置し測定試験を行った（矢吹・他、1995）。試験の目的は、海底で音波の伝搬時間を $\mu$ 秒の精度で測定できることの確認である。このため

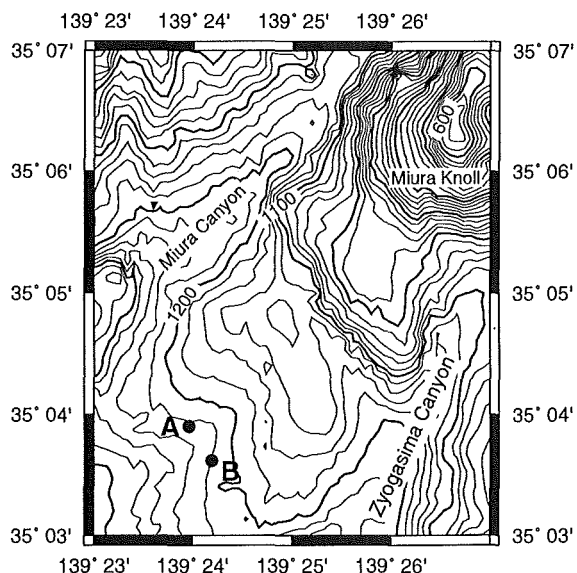


Fig. 7. Precise topography around the location where SeaFARs were deployed. Deployed positions are A (35°03.90'N, 139°23.96'E) for SeaFAR-1 and B (35°03.62'N, 139°24.19'E) for SeaFAR-2.

CTDと傾斜計は組み込まずに試験を行った。

Fig. 6に試作した音響測距計を、また、Table 4に機器の大きさと各種パラメータの設定値を示す。設置場所としては、直接波を伝搬させるために2点間が凹地となる場所を選び、三浦海丘の南西斜面の谷筋を挟んだ2点、すなわち、Fig. 7のA点にSeaFAR-1を、B点にSeaFAR-2を設置した。AB間の距離は約610mである。1時間間隔で測定を行い、18回の測定の後、機器を回収した。なお、先に述べた内蔵時計の同期のずれについては、Table 3に示されるように2つの時計の周波数偏差が $1 \times 10^{-6}$ より小さく、かつ、測定期間が1日弱と短いことから、ずれの量は十分小さいと予想され、今回の試験では時計の修正は行わなかった。

Fig. 8は測定結果の一例であり、(a)と(c)は受信波形を(b)と(d)はその相関関数を示す。相関関数の計算には、水槽試験でサンプルした波形を参照波形とした。つまり、SeaFAR-1の参照波形にはFig. 4(d)の波形を、また、SeaFAR-2の参照波形にはFig. 4(a)の波形を使った。Fig. 8から受信信号のS/Nは高く、相関関数のピークも容易に検出

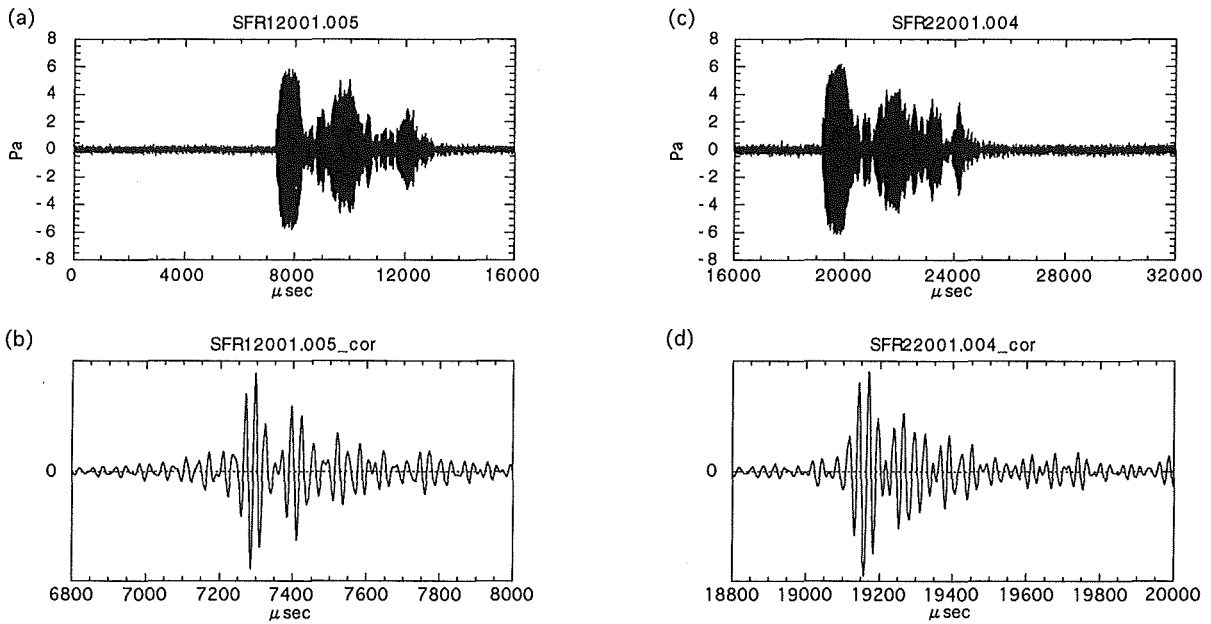


Fig. 8. Examples of acoustic signals received in the experimental measurement on the sea floor ; (a) for SeaFAR-1, (c) for SeaFAR-2. Cross correlation functions between the receiving signal and the reference signal ; (b) for SeaFAR-1, (d) for SeaFAR-2.

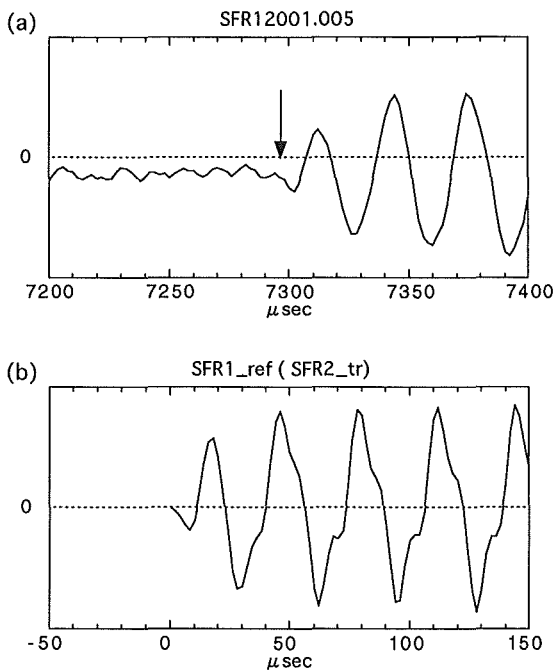


Fig.9. (a) : Initial portion of the receiving signal shown in Fig. 8(a). An arrow in the figure shows the time when the correlation function indicates a peak. (b) : Initial portion of the reference signal which is identical to the transmitting signal of SeaFAR-2 shown in Fig. 4 (d).

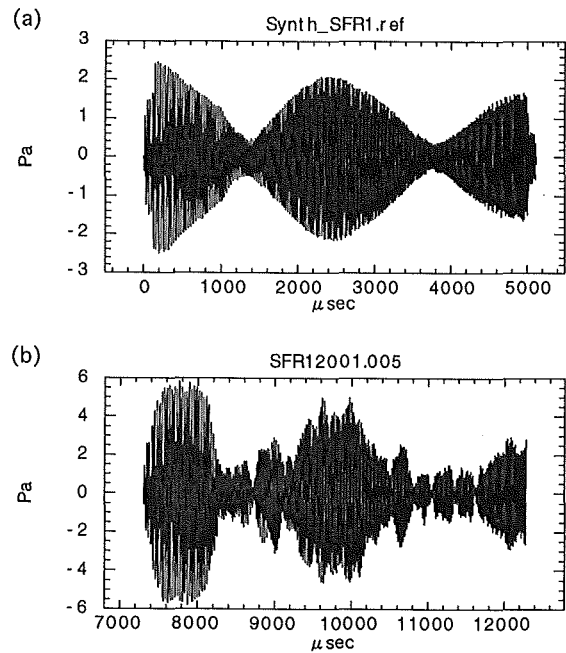


Fig.10. (a) : Synthesized wave form from the reference signal used in SeaFAR-1. (b) : Receiving signal of SeaFAR-1 in the measurement on the seafloor.

できることがわかる。

Fig. 9(a)に Fig. 8(a)の受信信号の立ち上がり部分を、また、Fig. 9(b)に参照波形の立ち上がり部分を拡大して示す。Fig. 9(a)の矢印は、相関関数がピークを示す時刻である。受信信号の立ち上がり



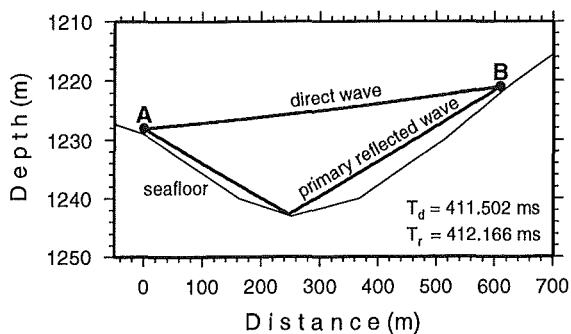


Fig.11. Cross section of topography along the baseline AB shown in Fig. 7 and sound rays of a direct wave and a primary reflected wave.  $T_d$  and  $T_r$  are theoretical travel-times for the direct wave and the primary reflected wave respectively.

は振幅が小さく、受波そのものから信号の到来時刻を正確に検出することは困難であるが、相関関数を計算することによって、受信信号の立ち上がり、すなわち、信号の到来時刻を数  $\mu\text{s}$  の精度で検出できることがわかる。

Fig. 8 (b), (d)の相関関数には、ピークを示す時刻から  $100\mu\text{s}$  遅れてやや強い相関が表れている。これは、第1波とは別の経路をたどった信号の到来を示していると予想される。そこで、Fig. 4 (d)に示される SeaFAR-2の送波について、伝搬距離610 mに対する伝搬損失を計算し SeaFAR-1に到達する直接波  $S(t)$  を求め、

$$T(t) = S(t) + \alpha \cdot S(t - 100\mu\text{s})$$

を計算した。ここで、 $\alpha$  は第1波に対する第2波の強度の比であり、Fig. 8 (b)の相関関数からその値を求めた。  $T(t)$  の計算結果が Fig.10(a)であり、Fig. 8 (a)に示される SeaFAR-1の受信波形を同じ時間スケールに拡大した Fig.10(b)と比較すると、包絡線の形状が両者でかなりよく一致している。これは受信波形が2つの信号の重ね合わせであることを示している。

水平方向に610m離れた2点間を伝搬する音波について音線を計算すると、音線の下方への湾曲は60cm程度となる。音響トランスデューサは機器の脚部から180cmの高さにあり、しかもA点、B点をその間が凹地になるように選定しているから、第1波は直接波である。第2波は、海底で1回反

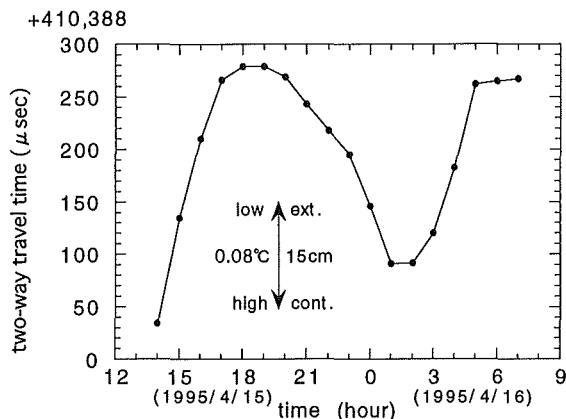


Fig.12. Time variation of propagation time measured by SeaFARs. Arrows in the figure show the scale for temperature variation and distance variation.

射した波か、もしくは音響測距計の一部分に反射した波であろう。

海底反射波と直接波とで走時の差がどの程度になるかを調べるために、Fig. 7から地形の断面を読みとり SEIS83 (Červený and Pšencík, 1983) を使って音線と走時の計算を行った。結果は Fig. 11のとおりで直接波と反射波の時間差は  $660\mu\text{s}$  とやや大きな値になった。音響測距計の設置位置は、船と音響測距計との斜距離を音響手法で数回測定して求めたものであるため、かなりの誤差が見込まれる。 Fig.11ではAとBの中間近くに谷底があるが、全体に左右どちらかにずれてA、Bの一方が谷底に近い位置に設置されていた可能性もある。その場合、直接波と反射波の伝搬距離の差はより小さくなる。したがって、走時から第2波が海底反射波であるか否かを判定することはできない。

一方、音響測定距計の一部に反射して音響トランスデューサに到達する波の走時については、海底での機器の配置が正確にわからないため、これを計算することはできない。

第2波の伝搬経路を特定することはできないが、時間幅5msの送信信号に対して、伝搬経路が異なる2つの信号が  $100\mu\text{s}$  の時間差で重なり受信波形が元の信号波形から大きく形状を変えても、相関関数を計算することによって第1波の到達時

刻を数  $\mu\text{s}$  の精度で検出できることは確認された。

## 6. 評価

海域試験で測定された音波の伝搬時間について、双方向の伝搬時間の相加平均を求め、これを測定時刻に対してプロットすると Fig.12が得られる。伝搬時間が周期的な変動を示し、変動幅は両振幅にして  $200\mu\text{s}$  以上に及んでいる。Fig.12の矢印は、音速を不変と仮定して縦軸を距離の変化とみなす場合のスケールを表すとともに、距離を不変と仮定して温度変化とみなす場合のスケールを表している。  $200\mu\text{s}$  以上に及ぶ伝搬時間の変化は、距離にして  $30\text{cm}$  以上の変化に、また、温度にして  $0.16^\circ\text{C}$  以上の変化に相当することになる。

機器の傾斜によって伝搬距離は変わるものの、周期的な変化はしないであろう。中西・他 (1995) によると、相模湾の水深  $1160\text{m}$  の海底における長期間の水温観測によって、10日から15日の周期を持つ両振幅約  $0.2^\circ\text{C}$  の変化に重なって約  $0.1^\circ\text{C}$  の短周期変化がみられることが報告されている。今回の試験では水温測定を行っていないため確認はできないが、潮流に起因する水温変動の影響が表れたものと推定される。

Table 2 に示される受信感度を使って Fig. 8 (a), (c) についてノイズレベルを計算すると  $102\sim 103\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  となる。これは Urick (1983) に示されるノイズレベル  $60\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  に比べてはるかに高い。ノイズのスペクトルを計算すると  $40\text{kHz}$  と  $80\text{kHz}$  に強いスパイクが表れるから、音響的な背景ノイズではなく電気的なノイズである。受信感度と A/D 変換器の分解能から、音響測距計の受信機としてのダイナミックレンジは  $86\sim 152\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  と計算されるが、 $100\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  以下は電気ノイズが卓越するため信頼性は低い。伝搬距離が  $1150\text{m}$  を越えると  $50\text{kHz}$  の波に対する信号レベルは  $100\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  を下回るから、これより長い基線で測定を行う場合は、電気ノイズのレベルを下げるための改善が必要である。

Fig. 8 (a) から相模湾の海底で実際に受信した信

号の音圧を計算すると、 $30\text{kHz}$  付近で  $132\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$ 、 $50\text{kHz}$  付近で  $126\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  となる。一方、音響測距計の送信レベルは  $182\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  であるから、距離  $610\text{m}$  に対する伝搬損失から計算される受信レベルは、 $30\text{kHz}$  の波については  $121\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$ 、 $50\text{kHz}$  については  $116\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  となる。実際の受信レベルの方が、伝搬損失から計算される受信レベルより  $10\text{dB}$  高い値となる。原因は不明であるが、相模湾の海底では音波の減衰が小さいのかもしれない。海域によって減衰率が異なるのであれば、将来予定している東太平洋海膨での観測では注意が必要となる。この海域について海底付近の海水の減衰率を予め測定することは事実上不可能である。伝搬損失に  $10\text{dB}$  程度の変動があるかもしれないことを考慮して各種パラメータを検討しなければならない。

## 7. まとめ

海底の2点で双方向の音波の伝搬時間と音速を繰り返し測定することによって、地殻変動にともなう2点間の水平距離の伸縮を検出する音響測距計の設計を行い、システムの主要部分である伝搬時間の測定部を試作した。試作機について水槽試験、時計の精度試験および海域試験を行い、機器の性能を評価した結果を以下にまとめる。

- (1) 音響信号の送波レベルは  $182\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$ 、また、受波の有効な測定レンジは  $100\sim 152\text{dB}_{\mu\text{Pa}}$  であり、基線長が  $200\text{m}$  から  $1100\text{m}$  の範囲にあるとき、信頼性の高い音響測距が可能である。さらに長い基線で測定を行うためには、受信アンプの電気ノイズを抑える必要がある。
- (2) 水槽試験によって2台の音響測距計の送信波形をサンプルし、これを参照波形としてパルス圧縮を行うことによって測定分解能の向上を図った。水深  $1250\text{m}$  の海底で基線長を  $610\text{m}$  として実施した相模湾での海域試験の結果から、 $\mu\text{s}$  オーダーの精度で信号の伝搬時間が測定できることを確認した。
- (3) 内蔵時計の基準発振器のドリフトは約  $1 \times 10^{-8}/\text{day}$  であり、1年程度は音響測距計に必要な

とされる周波数安定度  $1 \times 10^{-5}$  が維持される。  
ただし、基準発振器のドリフトは、エージング  
によってさらに小さくなる可能性があり、再度  
試験を行ってこれを確認する必要がある。

(4) 相模湾での海域試験では1時間に1回の測定  
を18回行った。得られた伝搬時間は周期的な変  
動を示し、周期は半日程度で変動幅は両振幅で  
 $200 \mu\text{s}$  を越えた。これは潮流にともなう水温変  
化に起因すると推定される。

伝搬時間の測定と同時に、精密な水温測定を  
行って音速の変動を正確に見積もることが今後の  
課題である。

#### 謝 辞

音響測距計の製作と各種試験を行うにあたり日  
油技研工業株式会社の田尻克之氏、堀克博氏、新  
垣直仁氏に献身的な協力をいただいた。内蔵時計  
に使った水晶発振器の選定についてはセイコー電  
子工業株式会社の川島宏文博士に便宜をはかって  
いただいた。水槽試験では海洋科学技術センター  
の土屋利雄氏、網谷泰孝氏に助言をいただいた。  
海域試験が成功裏に実施できたのは山川正船長を  
はじめ測量船「昭洋」乗組員の方々の協力のおか  
げである。さらに、査読者の方からたいへん有益  
なコメントをいただいた。これらの方々に深く感  
謝いたします。

なお Fig. 7 と Fig. 11 の作図には GMT version

3.0 (Wessel and Smith, 1991) を利用した。

#### 引用文献

- Červený V. and I. Pšencík : Program SEIS  
83, Numerical modeling of seismic wave  
fields in 2-D laterally varying layered  
structures by the ray method, Charles  
Univ., Prague, (1983)
- 中西正男・藤本博巳・村上英幸：初島南東沖シロ  
ウリガイ群集域の海底および海水の温度変  
化, 地震 2, 48, 71-79, (1995)
- 長屋好治・矢吹哲一郎・小野房吉・浅田昭・田尻  
克之：水路部における海底地殻変動観測へ  
の取り組み, 月刊地球, 16, (6), 309-314,  
(1994)
- 長屋好治：音波を利用した海底での歪測定に関す  
る基礎的考察, 水路部研究報告, 31, 67-76,  
(1995)
- 矢吹哲一郎・長屋好治・田尻克之：深海底での超  
音波による精密距離測定の試み—相模湾で  
の試験結果(速報)一, 海洋調査技術, 7,  
(2), 29-32, (1995)
- Urick, R. J. : Principles of Underwater Sound,  
3d ed., McGraw-Hill Inc., (1983)
- Wessel, P. and W. H. F. Smith : Free software  
helps map and display data, *EOS Trans.*  
*AGU*, 72, 441, (1991)