

「しんかい2000」用サブボトムプロファイラ の開発

土屋利雄*¹ 中西俊之*¹ 網谷泰孝*¹

サブボトムプロファイラは音響信号により海底下の地層情報を得るための装置であり、従来から海上船舶や曳航体に装備して、使用されてきた。しかし、このサブボトムプロファイラ装置を潜水船に装備できれば、分解能の向上などの点から多くのメリットがある。

潜水船に搭載可能な小型のサブボトムプロファイラ装置を開発し、さまざまなデータを得たので報告する。

Development of a Sub Bottom Profiler for the "SHINKAI 2000"

Toshio Tsuchiya *² Toshiyuki Nakanishi *² Yasutaka Amitani *²

A Sub Bottom Profiler (SBP) has been developed which makes observation of the Sub Bottom Layer by acoustic signal. Usually, the SBP is utilized equipped on shipboard or tow fish. In order to obtain better layer information than on shipboard or tow fish, we developed new, small-sized SBP equipment in order to equip the "SHINKAI 2000". During various tests in the anechoic tank and the sea, we had a little trouble, but it worked fairly well and provided good sub bottom layer information.

*¹ 深海開発技術部

*² Deep Sea Technology Department

1. はじめに

サブボトプロファイラ (Sub Bottom Profiler SBP) は音響信号により、海底下数十mまでの地層を精密に探査することを目的とする装置である。現在には主に、海底の鉱物資源調査海底土木工事に伴う基礎調査、海底ケーブルパイプライン等の敷設・埋設ルート調査等に用いられている。従来のSBPは、水上船舶に固定装備されるか、曳航体に装備されて使用されている。² しかしながら、このSBPを潜水船に搭載することができると、次のようなメリットが考えられる。

(1) SBPの送受液器の指向角がまったく同一でも海底に接近すればするほど、その分だけ海底に音波の当る面積が狭くなり、水平方向の分解能が改善される。

(2) 水上船舶から音波を送信する場合に比べて海中での音波の拡散や伝搬減衰が大幅に減少するので、実質的に音響出力を大きくしたのと同じの効果が得られる。

このようなメリットがあるにもかかわらず、現在までに有人潜水船にSBPを搭載した例は見あたらないが、これは、従来の装置では重量や大きさの点から搭載が不可能であったためと推察される。

われわれは上述のメリットを生かすように、「しんかい2000」に搭載可能な小型軽量のSBPを開発した。また、このSBPを実海域で試験を行い作動を確認し、海底下の情報を得ることができたのでここに報告する。併せて、実用化するにあたって生じたさまざまな問題点をも報告する。

2. SBPの概要

このSBP装置の開発に当たって留意した点は、潜水船の限られたスペース内に装置を収容するために小型化を図り、同様に潜水船のペイロードの範囲内に重量を抑えたことである。このため、SBPで最も容積の大きいグラフィックレコーダを使わないこととし、潜水船ではカセットデータレコーダにデータを記録し、母船上でグラフィックレコーダに再生する方法をとった。また、潜水船内でオペレータが、受信ゲインの調整など、細かい作業を行わなくても、適正レベルで受信できるような回路構成とした。さらに後でデータの照合

が行い易いように、タイムコードと音声アナウンスを同時に記録できるようにした。

図1に本装置の基本的なブロック図を示した。本装置の作動は、探査時と再生時に大別される。以下、その作動についてブロック図を基に説明する。

2.1 探査時の作動

図1(a)の装置が潜水船に搭載される。まず送信増幅器で作られた音響パルスPは、送波器で海中に放射される。この音響パルスは海中を伝搬し、一部はB₁の海底面で反射し、さらに一部は海底下のB₂、B₃の地層面で反射される。この反射信号はまた海中を伝搬して受波器により受波され、+10、+30、+50、および+70dBのそれぞれ増幅度の異なる増幅器で増幅され、それらの信号はデータレコーダにより、磁気カセットテープにそれぞれ別のチャンネル(ch 1, 2, 3および5)に記録される。図2に入出力特性を示した。

この方法をとることにより、データレコーダの四つのチャンネルのうち、どれかのチャンネルには適正レベルで受信信号が記録されることになり、潜水船内でレベル合わせ等の細かい作業が不要となり、貴重なデータを確実に記録できる。また、制御器のパネル面には、LEDのバーメータを設け、各チャンネルの受信状況が一目で分かるようにした。

また、送信制御器では、送信トリガおよび、タイムコードを作成し、それぞれデータレコーダへ出力している。データレコーダでは、これらの各信号を記録すると同時にマイクロフォンにより入力された、音声アナウンスを記録する。

2.2 再生時

再生時の作動を図1(b)に示した。まず、潜水船から船上に持ち帰った、カセットテープレコーダに磁気記録された各データはすべて制御器へ入力される。制御器は、データレコーダより入力された4種類のレベルの異なる受信信号データの中から適正レベルの信号を選択し、TVG機能および利得調整を行ったのち、A/D変換を行い、送信トリガでタイミングをとりながらICメモリへ記録する。いったんICメモリ上に格納されたデータはグラフィックレコーダからの基準パルスを基準として、読み出されてグラフィックレコーダへ出

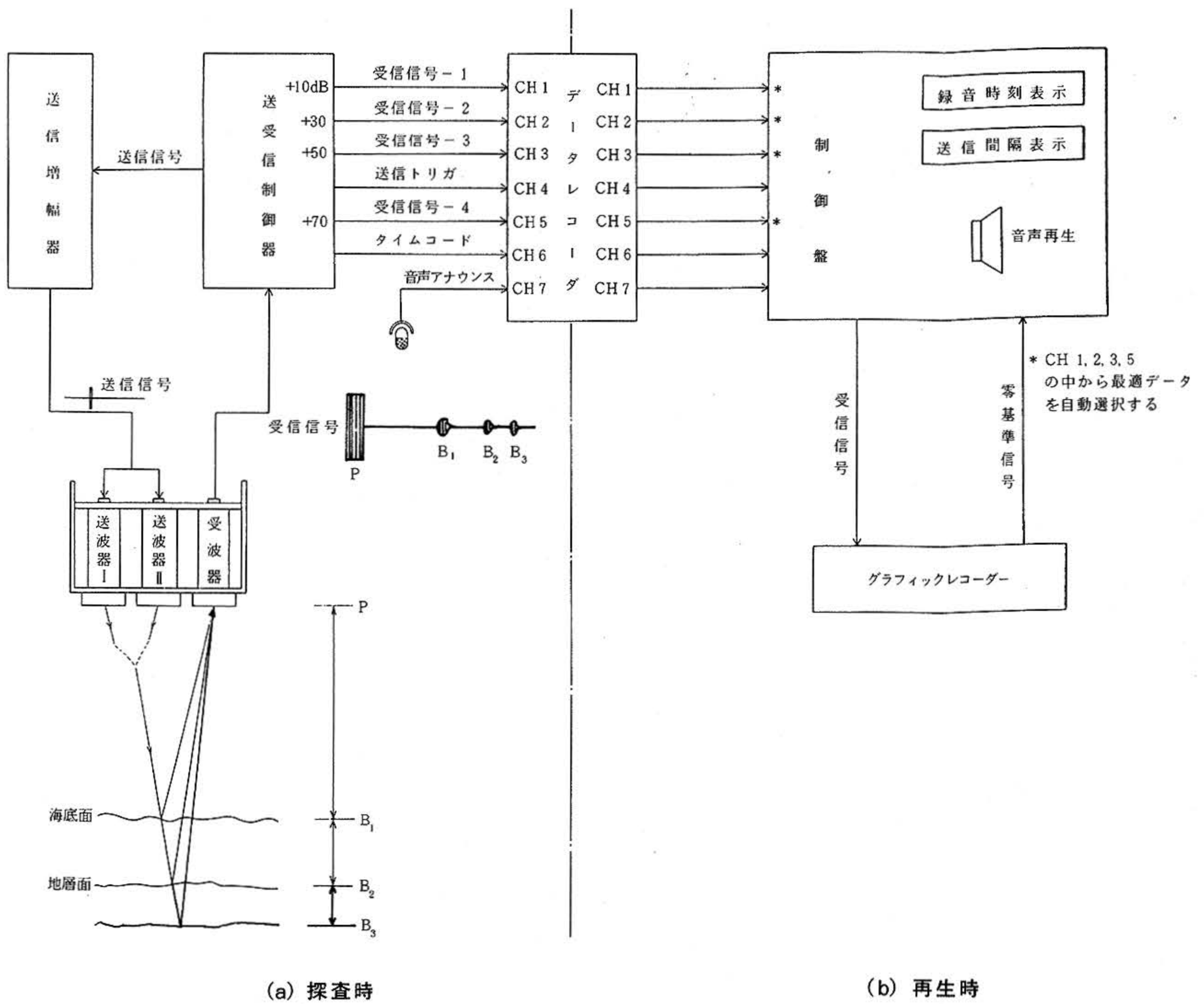


図1 SBP装置のブロック図
Block diagram of the SBP

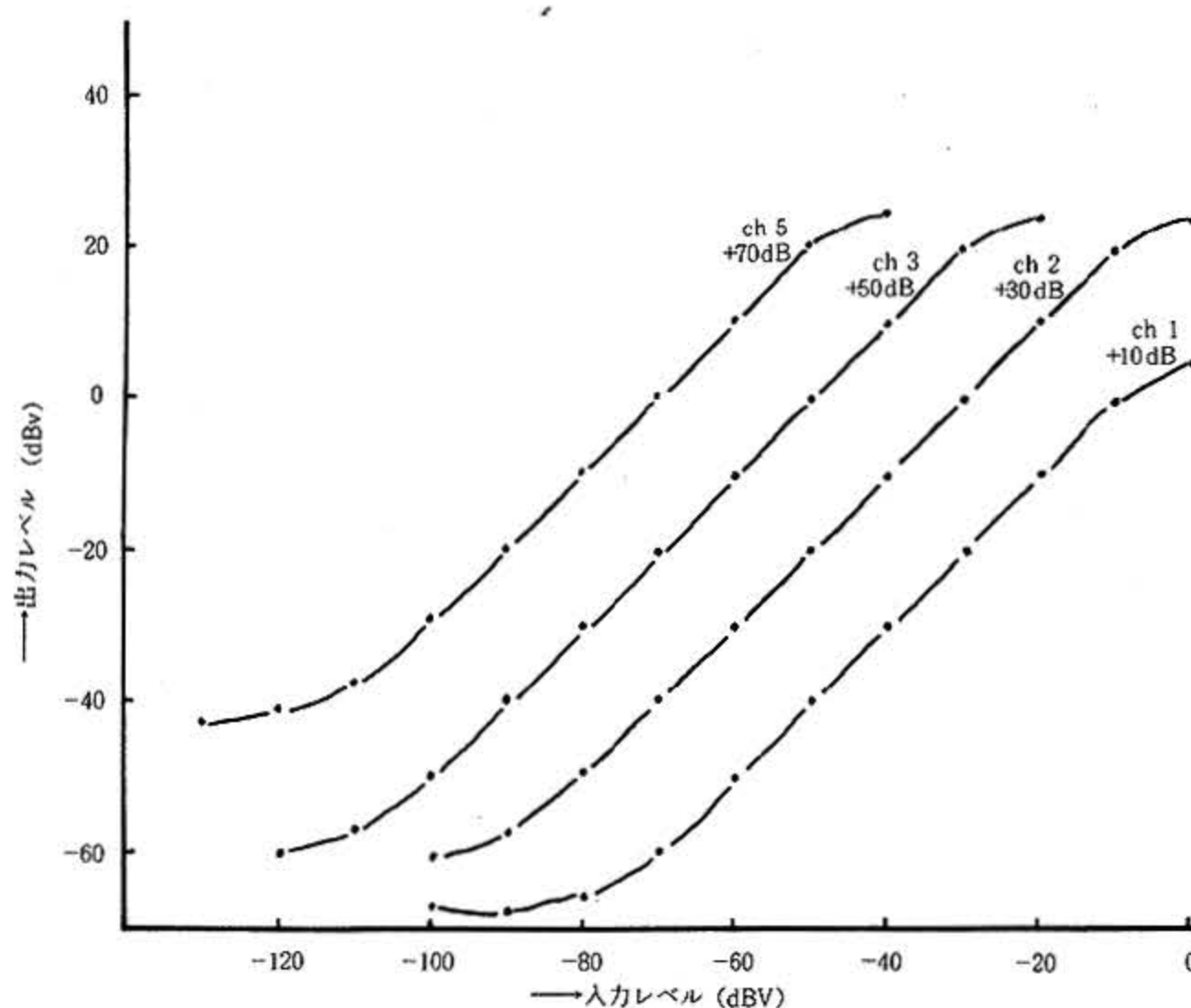


図2 プリアンプの入出力特性
I/O Characteristics of preamplifier

力される。その際、拡大や遅延などの操作が行われる。タイムコード信号は、制御器前面パネルのLEDで表示されると同時に、一定時間間隔でグラフィックレコーダ上の受信信号に割り込んで、年、月、日、時、分、秒の型で表示される。さらにアナウンス信号もスピーカで送出する。

2.3 装置の基本的な性能

本装置の基本的な性能を表1に示した。また図3に送受波器の指向性パターンを示した。送波器は2台並列で駆動されるため、方向により指向特性が異なっている。

2.4 装置の装備状況

写真1に潜水船内の装備状況、写真2に送受波器の取り付け状況を示した。

表1 S B Pの主要性能
Specification of the S B P

1. 一般性能

- | | |
|-------------|--|
| (1) 送信周期 | 0.25, 0.5, 1.0, 2.0±10%および手動切換 |
| (2) 送信出力周波数 | 4.5KHz±5% |
| (3) 送波音響レベル | 96dB以上 (パルス幅1.11mSecにおいて) 但しodB=1μbar at 1 m |
| (4) 再生記録範囲 | THRU モードおよびEXPAND モード (50, 100, 200mSec) 切換 |
| (5) 電 源 | 探査時 A C 115 V 50/60Hz 1φ 約52 V A
再生時 A C 100 V 50/60Hz 1φ 約59 V A |
| (6) 周囲温度 | 0~40°C (保存温度) |

2. 各機器の性能

A) 送受信制御器

- | | | | | | | | | | | |
|----------------|--|-------------------------------|-------|-------------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|
| (1) 送信パルス幅 | 0.22, 0.44, 0.67, 0.89, 1.11mSec切換 | | | | | | | | | |
| (2) 受信周波数帯域 | 4.5KHz±10% (-3dB幅) | | | | | | | | | |
| (3) 増幅度(標準値) | <table border="0"> <tr> <td>CH 1</td> <td>+10dB</td> <td rowspan="4">} それぞれ 3 dBステップで-21~+9 dB可変可能</td> </tr> <tr> <td>CH 2</td> <td>+30dB</td> </tr> <tr> <td>CH 3</td> <td>+50dB</td> </tr> <tr> <td>CH 5</td> <td>+70dB</td> </tr> </table> | CH 1 | +10dB | } それぞれ 3 dBステップで-21~+9 dB可変可能 | CH 2 | +30dB | CH 3 | +50dB | CH 5 | +70dB |
| CH 1 | +10dB | } それぞれ 3 dBステップで-21~+9 dB可変可能 | | | | | | | | |
| CH 2 | +30dB | | | | | | | | | |
| CH 3 | +50dB | | | | | | | | | |
| CH 5 | +70dB | | | | | | | | | |
| (4) 記録信号出力 | CH 1 受信信号-1
CH 2 受信信号-2
CH 3 受信信号-3
CH 4 送信トリガ
CH 5 受信信号-4
CH 6 タイムコード | | | | | | | | | |
| (5) タイムコード設定範囲 | 00年01月01日00時00分00秒~99年12月31日23時59分59秒 | | | | | | | | | |

B) 送信増幅器

- | | |
|------------|----------------|
| (1) 送信電気出力 | 最大500W以上 6段階可変 |
|------------|----------------|

C) 制 御 器

- | | |
|------------|--|
| (1) 遅延スタート | 0.00~1.99Sec (±10%) 0.01Secごとに切換 (EXPAND時) |
| (2) 再生記録範囲 | THRU モードEXPAND モード (50, 100, 200mSec) ±10%切換 |

D) データレコーダ

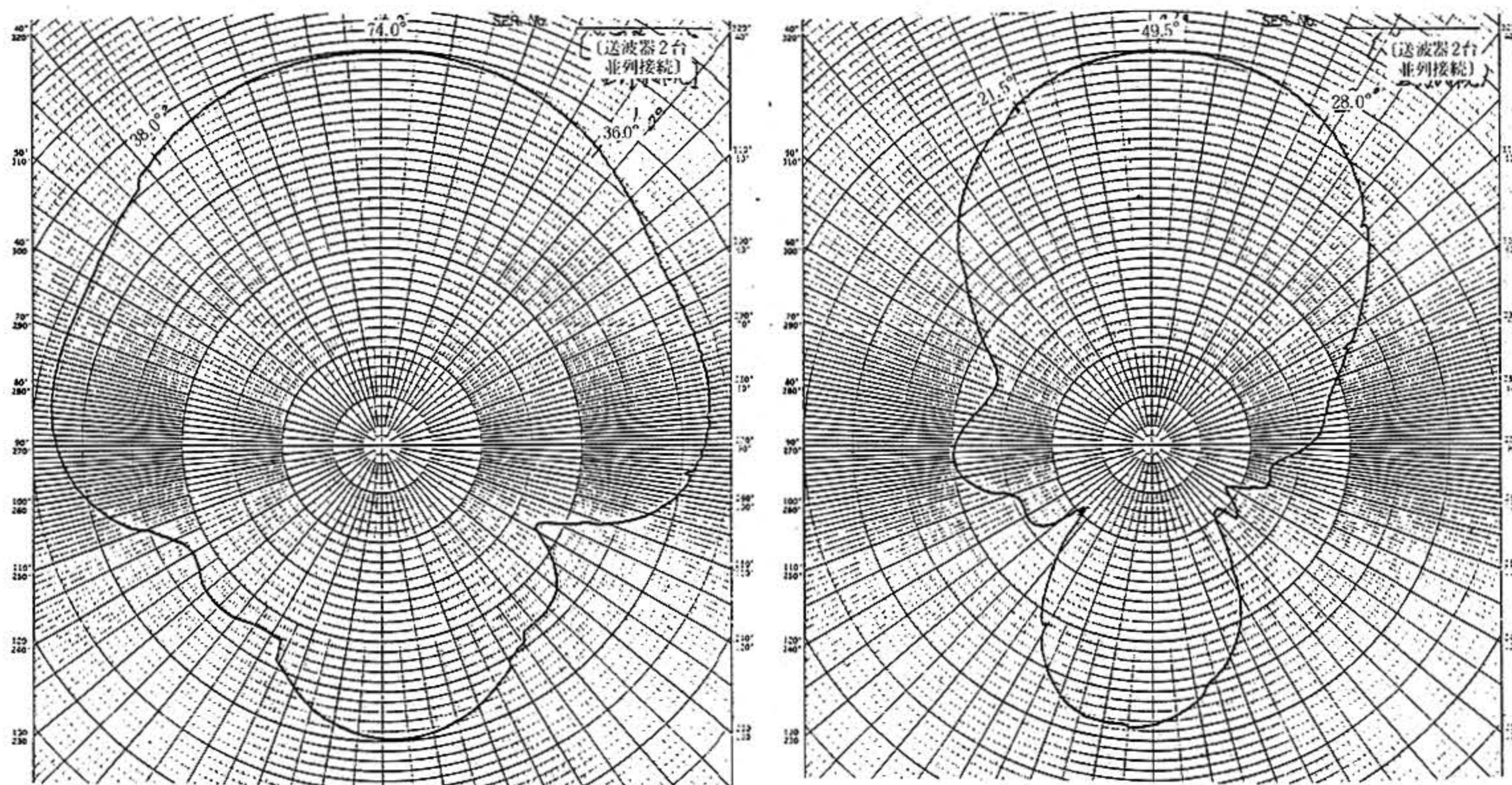
- | | |
|--------------|---|
| (1) 方 式 | カセット方式7チャンネル |
| (2) 記録再生方式 | CH 1~CH 3, CH 5.....DR方式
CH 4, CH 6, CH 7.....FM方式 |
| (3) テープスピード | 4.76cm/Sec |
| (4) 周波数特性 | FM...DC~1.25KHz |
| (5) | DR...50Hz~8KHz±3dB |
| (5) 連続記録再生時間 | 45分 |
| (6) 使用テープ | CT-90type-II |
| (7) 電 源 | AC 90~130V 50/60Hz |

E) 送 波 器

- | | |
|----------------|--------------------------------|
| (1) 指向幅(-3dB幅) | 50°×75° (±20°) (ただし4.5KHzにおいて) |
| (2) 耐 水 圧 | 300kg/cm ² 以上 |

F) 受 波 器

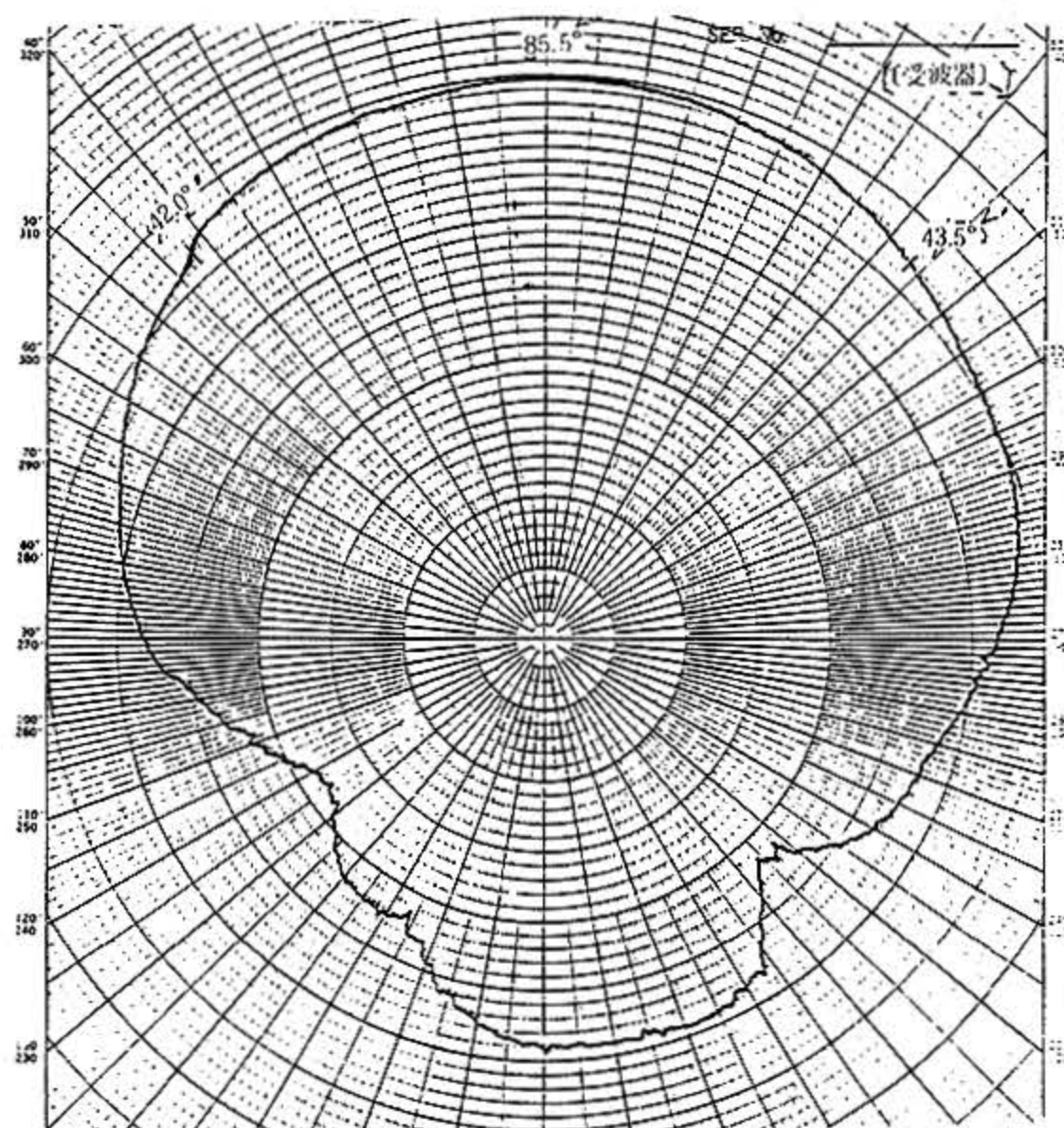
- | | |
|----------------|--------------------------------|
| (1) 指向幅(-3dB幅) | 75°×75° (±20°) (ただし4.5KHzにおいて) |
| (2) 耐 水 圧 | 300kg/cm ² 以上 |



① 垂直方向
vertical

② 水平方向
horizontal

1. 送波器 transmit transducer



2. 受波器 receive transducer

图3 送・受波器指向特性

Beam pattern of transmit and receive transducers

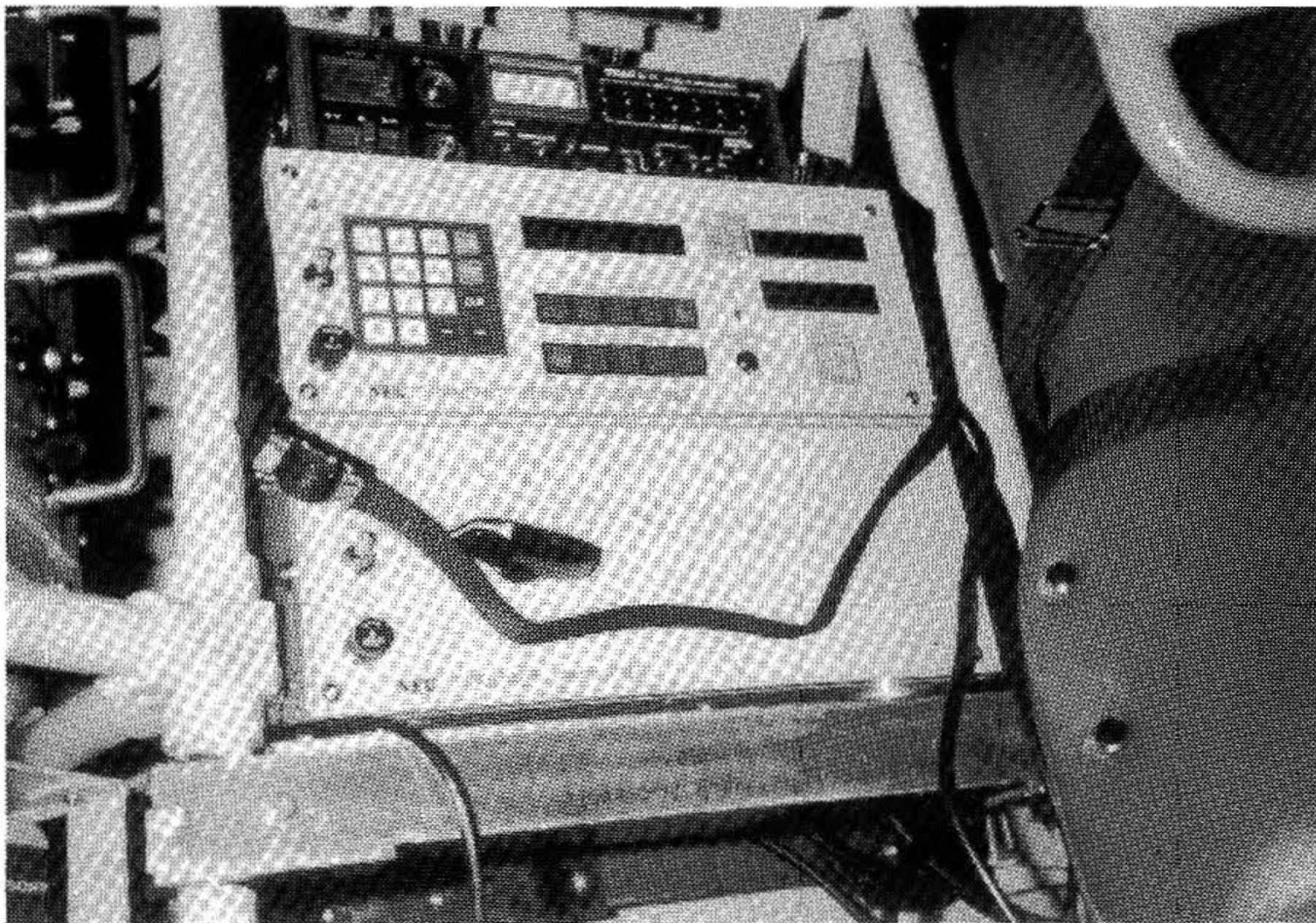


写真 1
船内機器の装備状況
Fitting of Equipments
in "SHINKAI 2000"

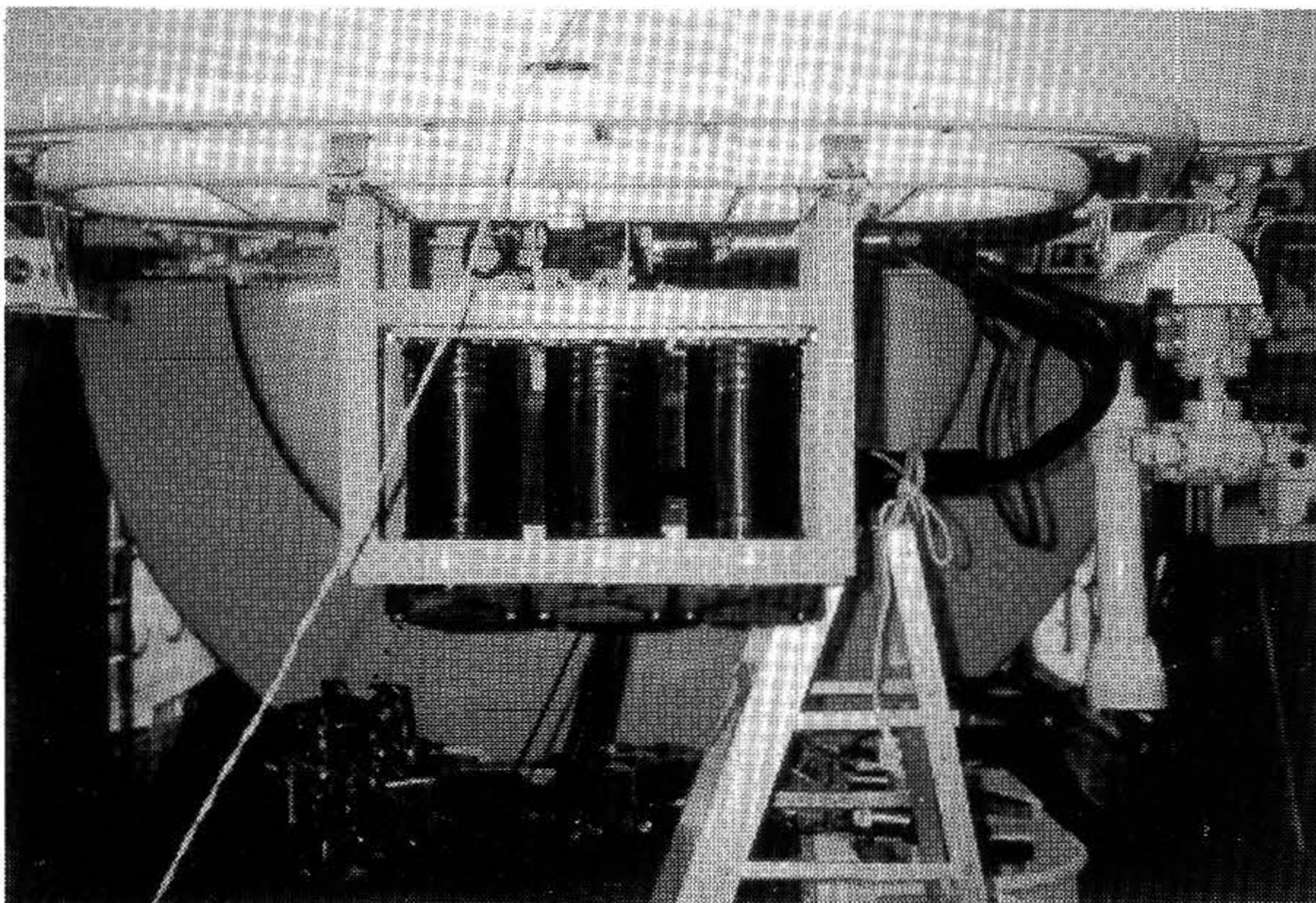


写真 2
トランスデューサの
取り付け状況
Fitting of Transducer

3. 性能確認試験

この SBP 装置は完成後、超音波水槽で基本的な特性を確認したのち、実海域試験を図 4 に示すように駿河湾 E 海域（水深約 1,000 m）で行い、さまざまなデータを得た。この試験結果の一例を図 5 に示す。この図で分かるように、音波を送信してから、約 40 m sec 程度まで、常に黒いスジが現れている。これは強力な残響による雑音と考えられ、この間では海底下の情報は強力な雑音にうもれて検出できないことが分かった。この距離は、音速を 1,500 m/sec として計算すると図のように約 30 m となる。つまり、海底から 30 m 以上離れないと海底下のデータが得られないことになり、潜水船に SBP を取り付ける大きな理由である海底

面を観察しながらデータを得るというメリットがなくなることになるので、その原因を調査し、改善を行うこととした。なお、海底下のデータは、図の 112 m sec ~ 125 m sec の間に良好に得られており、装置の基本的な作動には問題のない事が分かった。

4. 雑音の原因

3 項で述べた雑音の最も大きな原因は、潜水船自体から生ずる反射が要因と考えられる。この調査のために、実海域試験により得られたデータから潜水船の深度により変化しない反射波の時間を読み取った。この結果を図 6 に示す。この図から分かるように、2.0, 4.5, 7.0, 8.0, および 9.0

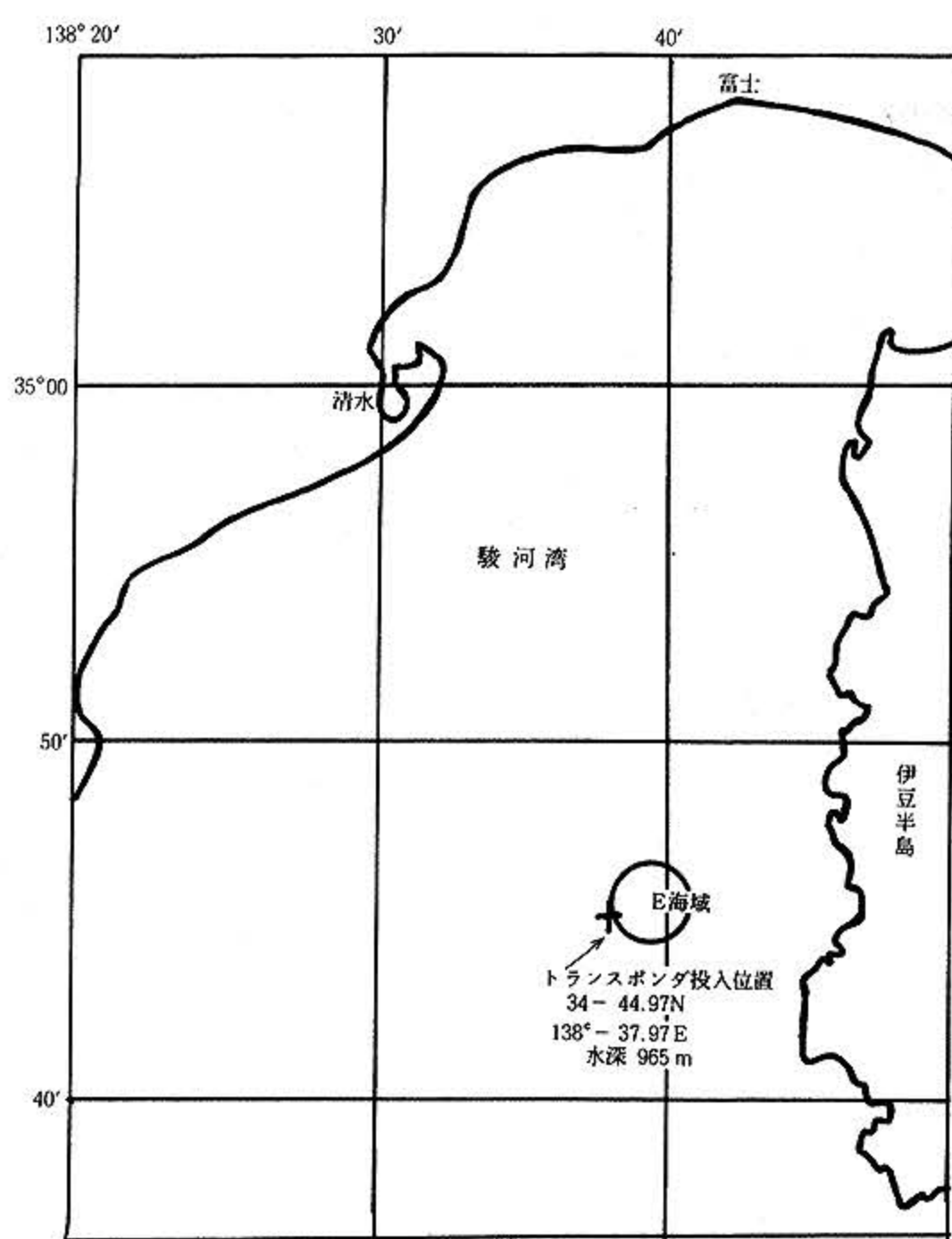


図4 試験海域
Sea trial area

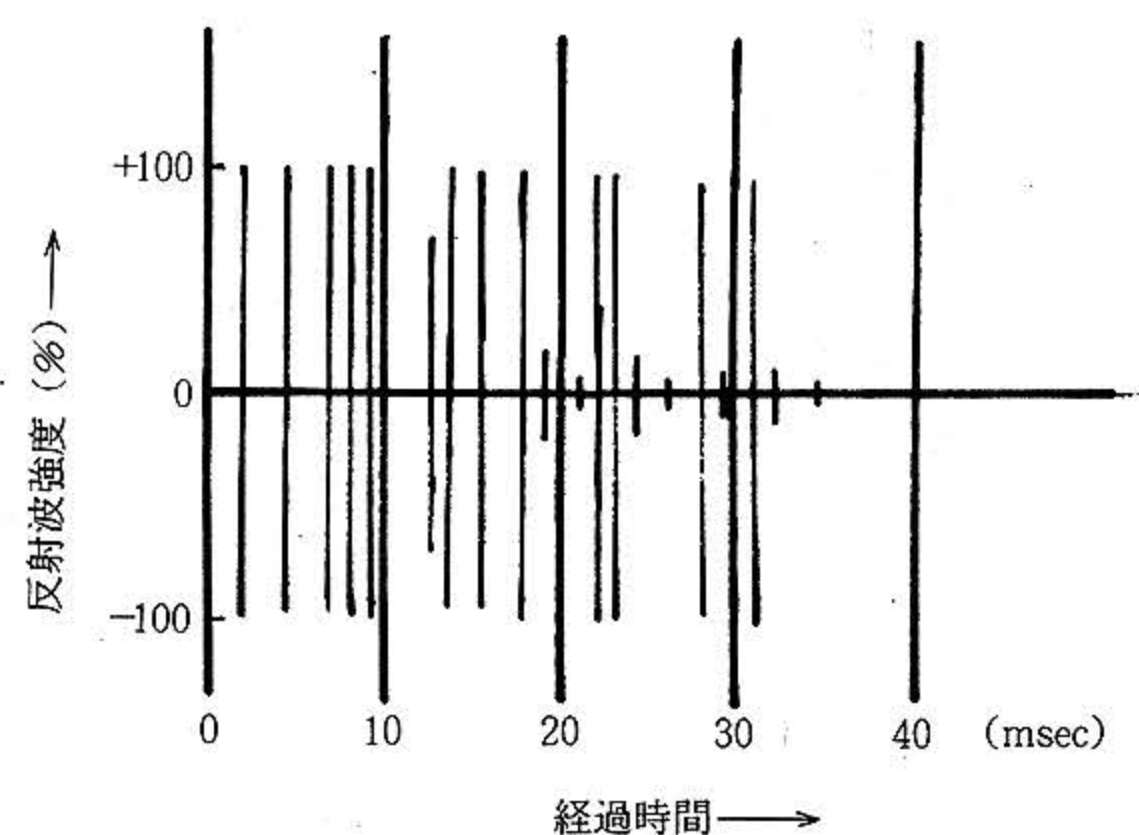


図6 反射波の経過時間と強度の関係
Relation of reflected wave strength
and time pass

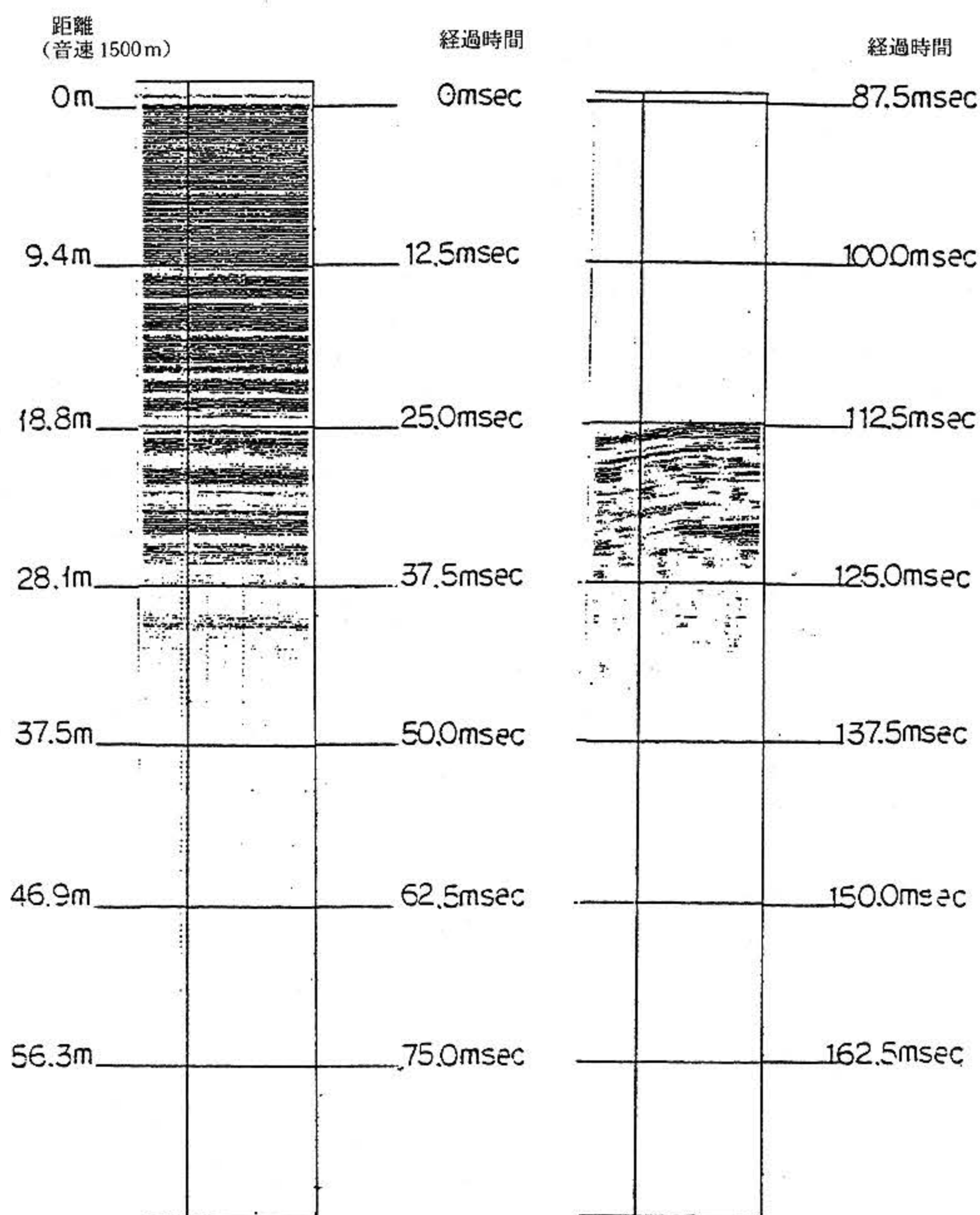
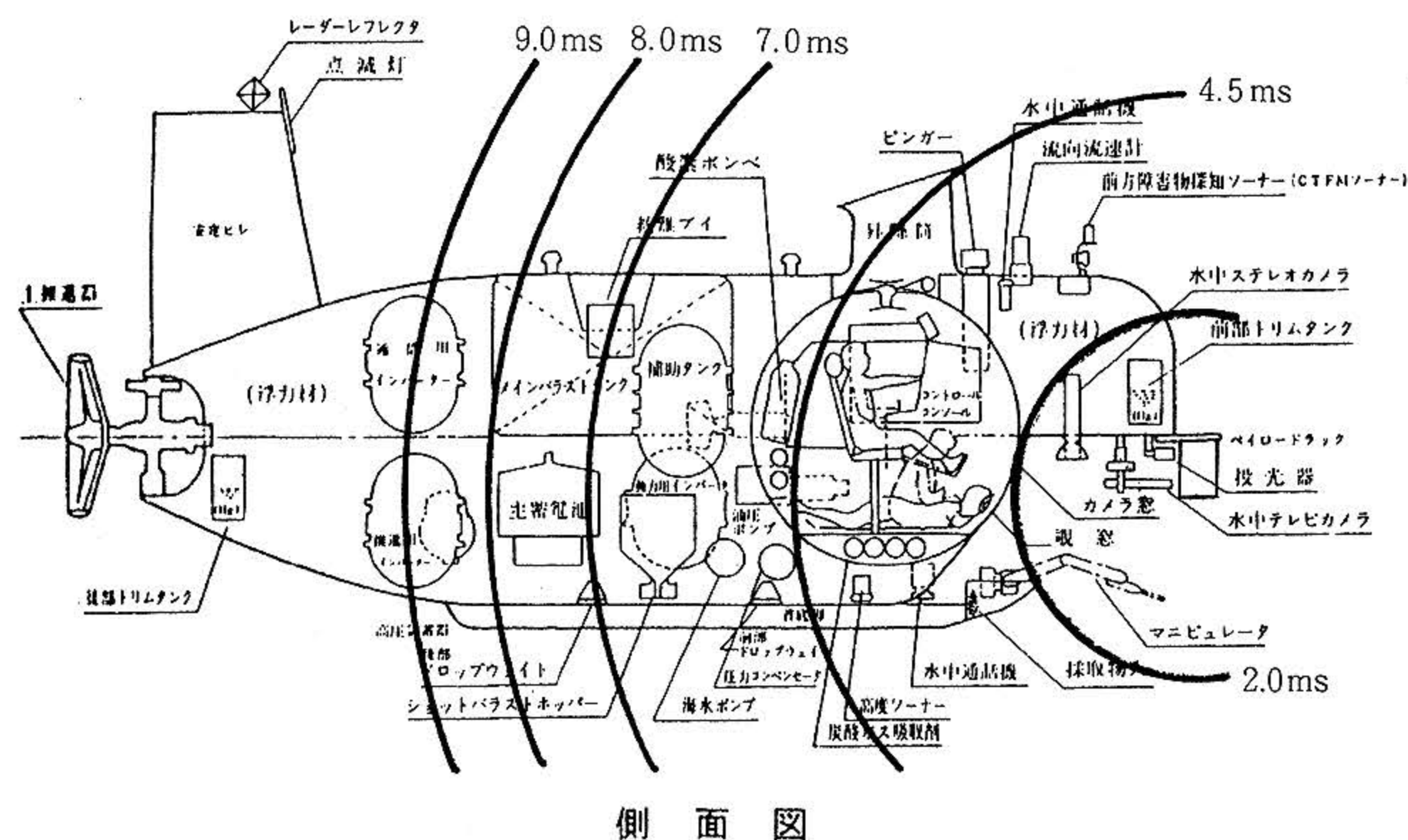
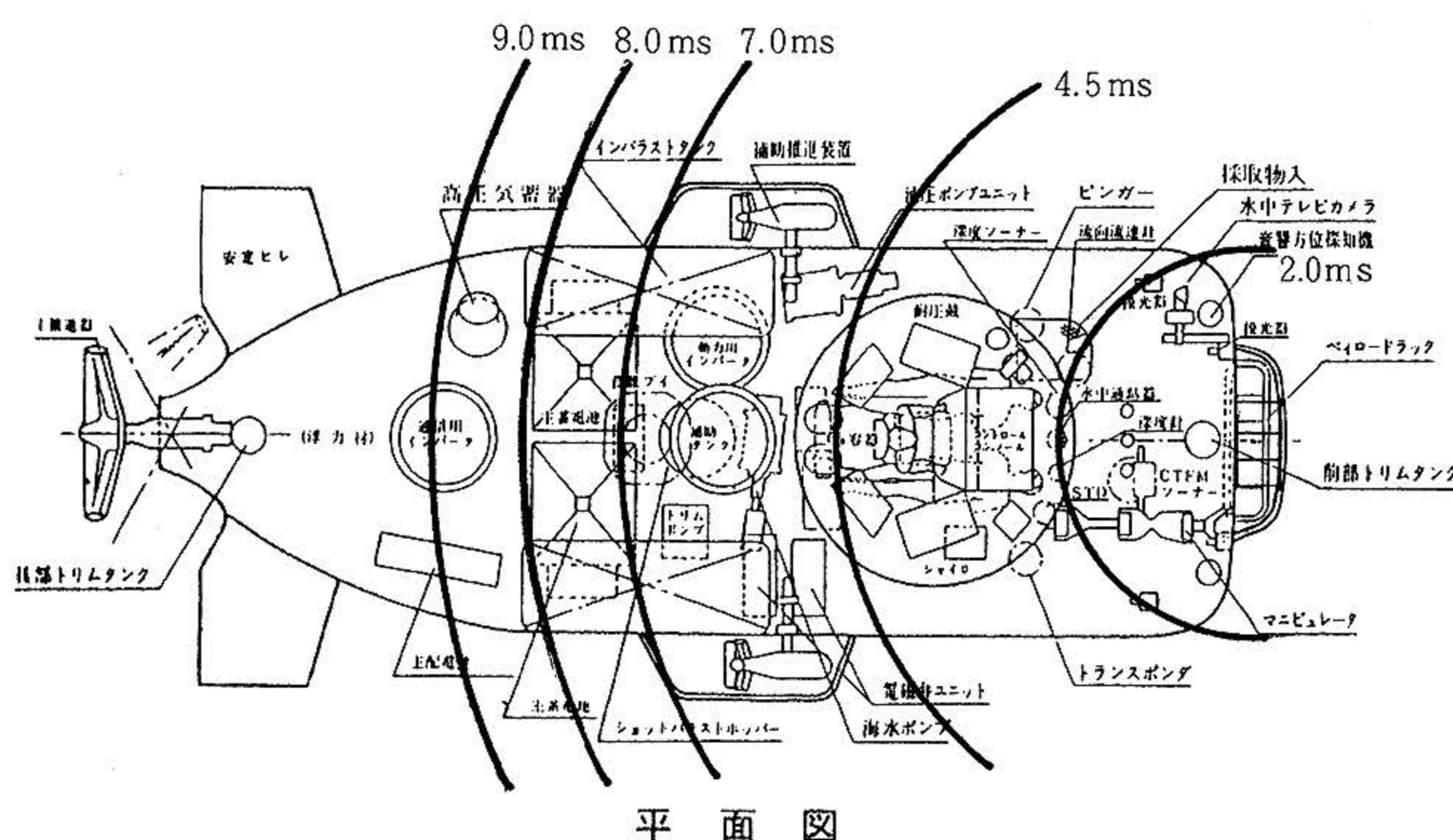


図5 実海域試験データの一例
Example of Sea trial data



側面図



平面図

図7 「しんかい2000」の機器配置と反射波の関係

Relation of equipment arrangement at "SHINKAI" and reflected wave

m sec 付近にレベルの大きい反射が見られる。送波器から送波された音響パルスは海水を伝搬して、潜水船の各部で反射されると仮定する。潜水船の外殻内側もかなりの部分が海水に浸されているので主な音波の伝搬経路が海水であると考えられる。音波を反射させる構造物と送波器との距離 l は次式より求められる。

$$l = \frac{1}{2} ct$$

ここで c は海中の音速で約 1,500 m/sec, t は反射の出ている時間を用いて計算した。図7は求めた l

を実際の潜水船のスケールに合わせて描いたものである。この図で分かるように反射波の発生している附近には、耐压殻や、インバータ容器等の中空の反射体がある。さらに 9 m s 以上の所にある反射波はこれらの反射体間を反射しながら、受波器に到達したものでないかと考えられる。

また、これらの残響を増加させている原因の一つに送波パルス幅の問題が考えられる。図8は送波器に印加した電圧波形と、送波器から送波される音響信号波形を示している(縦軸の対応はない)。この図中WNはWAVE NUMBERの意味で印加

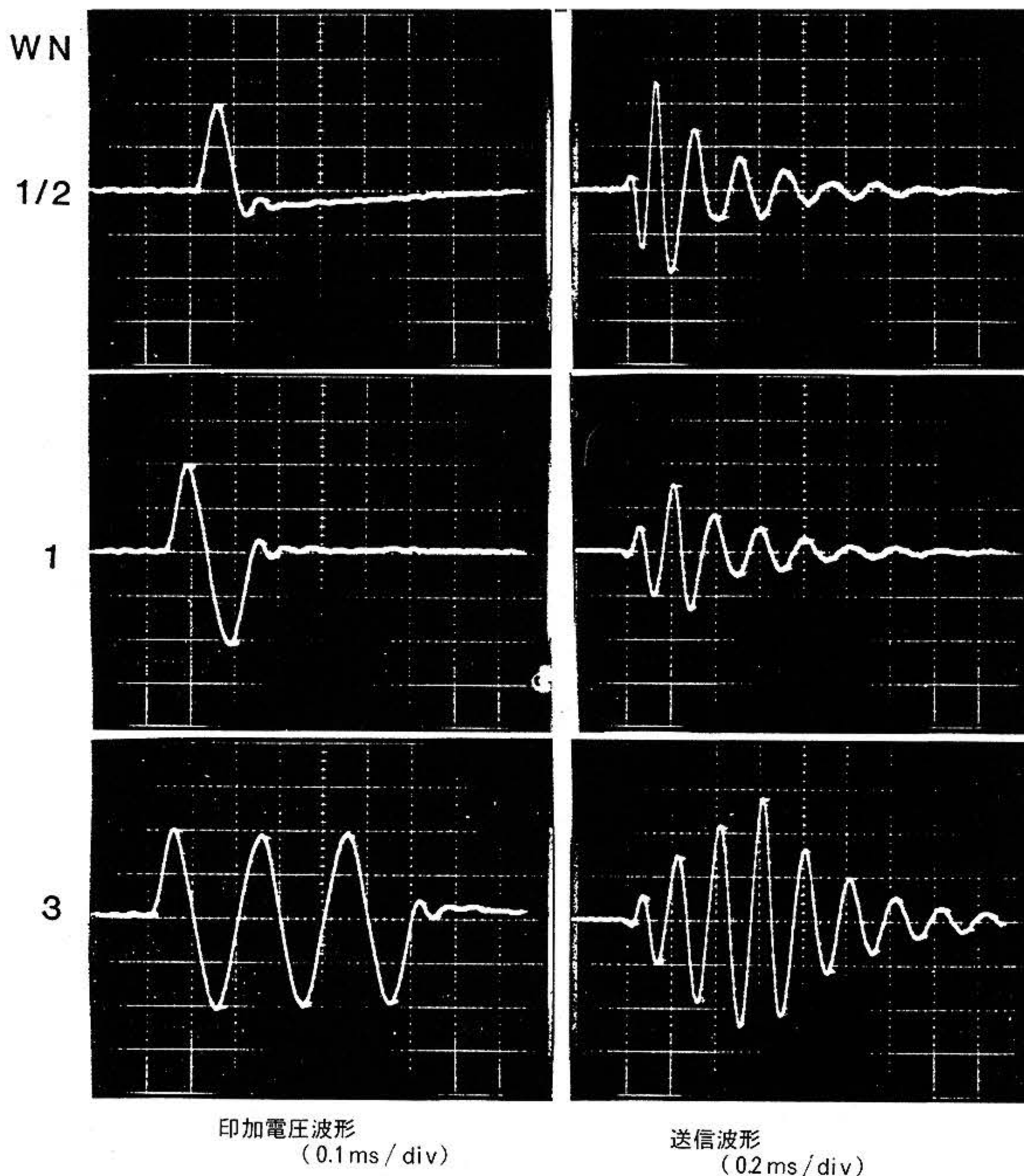


図8 印加電圧波形と実際の送波波形

Relation of voltage wave forms and real transmitted wave forms

電圧波形の波数を表わしている。この図で分かるように、たとえばWNが $\frac{1}{2}$ （パルス幅 0.11 m s—4.5 KHZ）の電圧を印加しても音響信号としては、約6サイクル（パルス幅 1.3 m sec）分送出される。これは送波器の共振点附近の機械的Qの高い（ $Q \div 5$ ）の周波数を送信周波数としているためであり、印加電圧がなくなっても振動がなかなか消えないためである。このことは1サイクルや2サイクルのパルスを送信できない事を意味しており、必要以上に長いパルスを送信するので残響の雑音が長びく要因の一つであると考えられる。

5. 雑音の対策

5.1 TVG回路の挿入

4項での検討の結果、潜水船自体からの残響と、送波パルス幅に問題があることが分かったが、こ

れらに対し直接対策を行うには、潜水船や、送受波器に指向特性の改造を加えなければならないが、今回は比較的容易にできる、受信回路にTVG（Time Varying Gain）を付加することにより残響などの雑音の影響を少なくする方法を試みた。これは、残響などを直接減少させるものではなく、記録上に現われた残響等を薄くし、必要なデータを見易くするためのものである。具体的には図9のように残響の残っている時間だけ受信器の増幅度を低下させ、データレコーダや、グラフィックレコーダで信号が飽和しないようにすることである。データ分析結果から、受信信号はすでに受波器直後のプリアンプで飽和しており、TVG回路は、プリアンプの前段に入れる必要があることが分かった。

実際のTVG回路の原理図を図9に示す。この

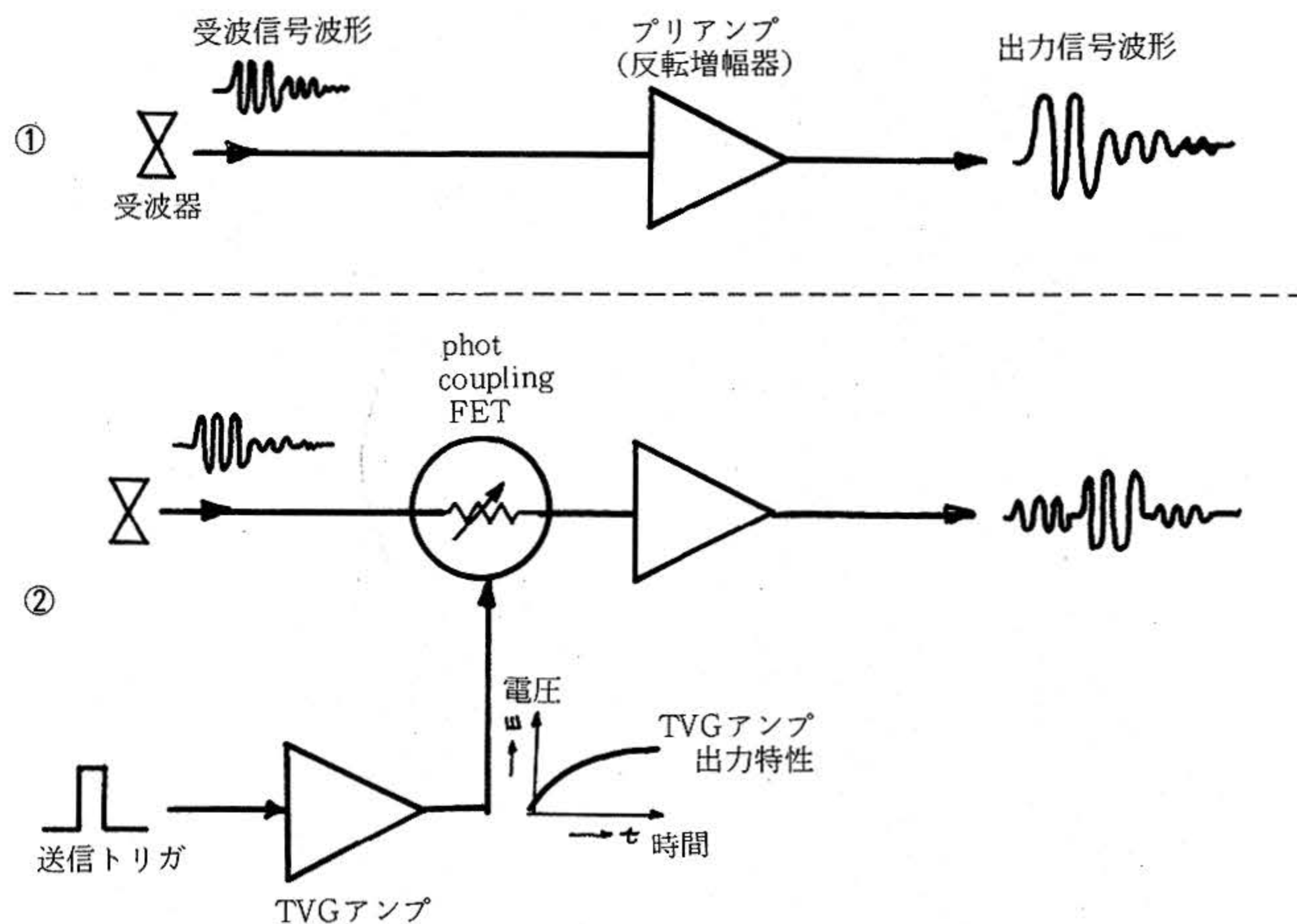


図9 TVG回路の原理図
Principles of TVG circuit

回路は送信のトリガ信号によってTVGアンプを作動させて、そのアンプの電圧増幅特性によりプリアンプの利得を制御する手法を使っている。この図でATTはTVGアンプの出力Vレベルにより、等価的に可変抵抗となるような素子（Photo Coupling FET）を使っており、この素子の $I_E - R_F$ （ダイオード電流に対するFETソース・ドレイン間抵抗特性）を利用し、プリアンプ（反転増幅器）の入力抵抗を変化させることにより、利得を変える方法である。図10にTVGアンプの出力特性およびこのTVGアンプにより駆動したプリアンプの出力特性を示したが、この図では入力に0.1 Vppの正張波を印加した時の出力特性を表わしており、送信トリガにより50 m secの間に約18 dBの利得変化が生じるように時定数を与えている。この値は、実海域データの残響時間から求めた値を基に設定している。

5.2 TVG回路による効果

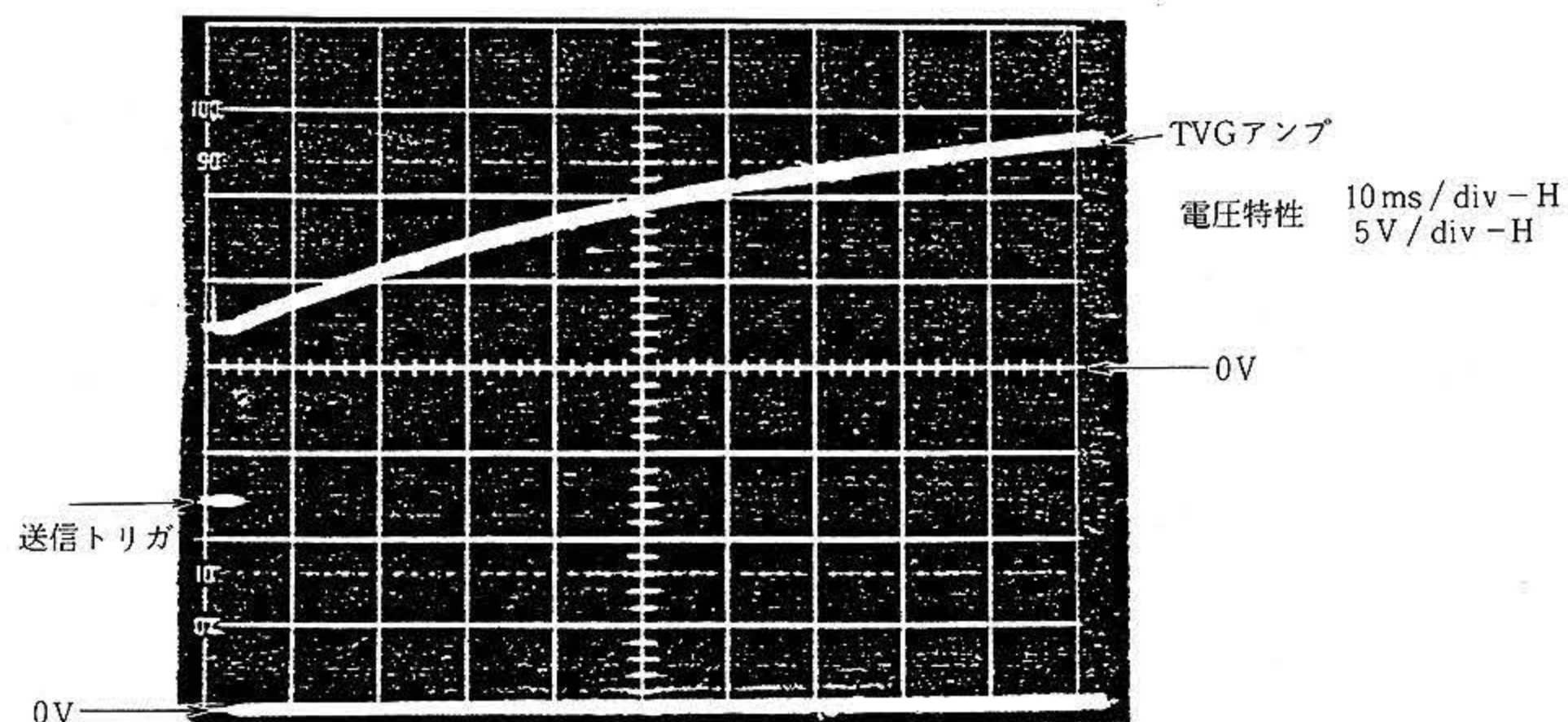
5-1項で述べたTVG回路を付加したSBP装置を、性能確認試験とほぼ同様の海域において試験を行い効果を調査した。その結果を図11に示す。左はTVGのない状態のデータであり、右はTVGを付加したものであり、TVGのないものに比較して残響などによる影響が著しく少なくな

っていることが分かる。

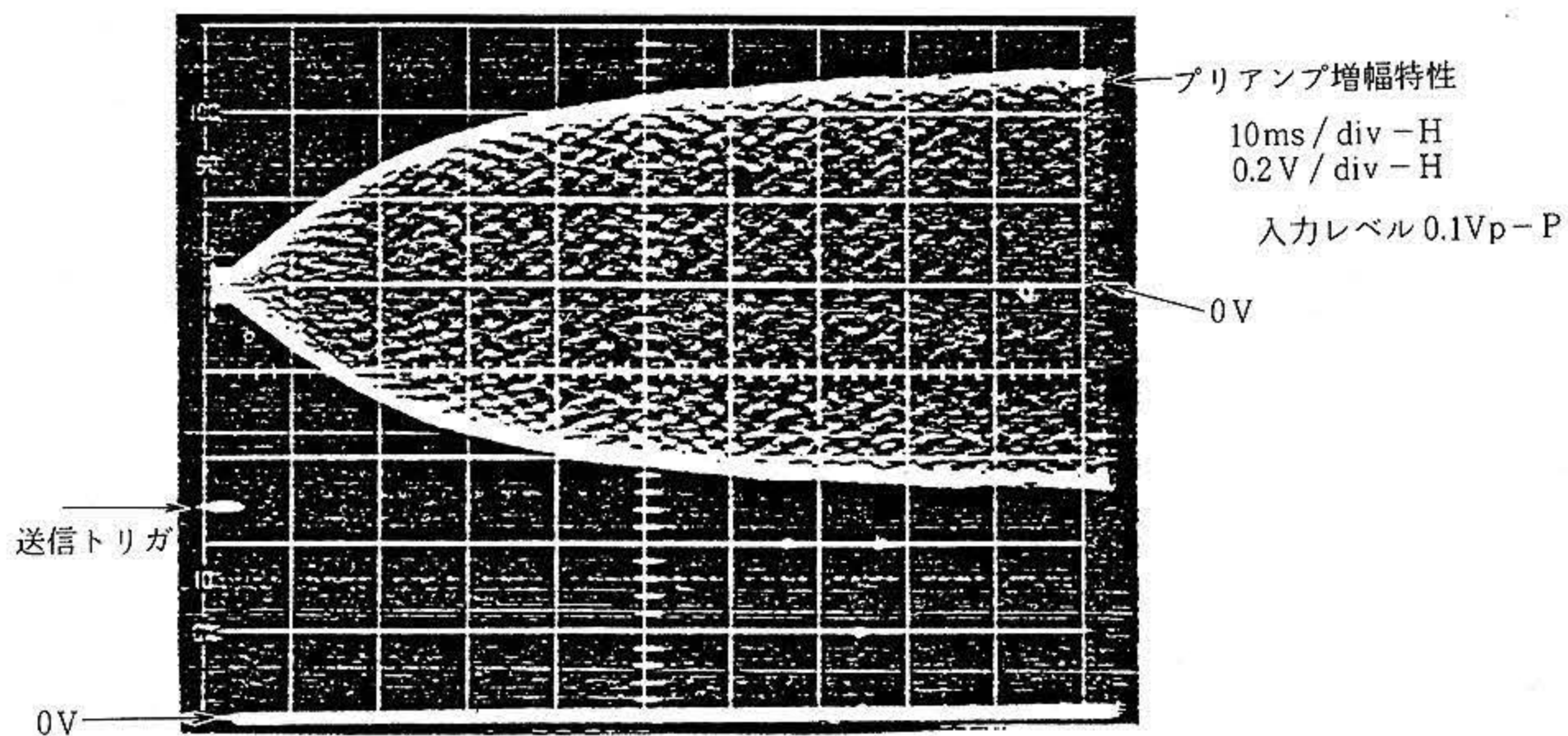
また、TVGを付加した状態での送波レベルとを変化した時のデータを図12に示す。当然のことであるが、送波レベル（SL）を増加していけば、海底下の深い所まで探査することができるのが分かる。さらにパルス幅を広くすれば、同様に音響エネルギーは増加するので深い所まで探査できるようになる。しかし、パルス幅を広くすることは同時に分解能が低下するので細かい地層がはっきり判別できなくなる。SLとWNを増加させると同時に残響も増加するので、なるべく海底に接近してデータを得ようとするならば、実用的にはSLを10 odB以下としWNを3（印加パルス幅0.66 m sec）程度に選択すれば、現状では海底から20 m程度離れた所からデータを得ることは可能であると考えられる。

6. 結 論

以上述べてきたように、TVG回路を付加することにより一定の効果は確認されたが、現状のままでは海底から20 m程度離れないと、きれいな海底下のデータを得ることはできない。したがって、SBPを潜水船に搭載する理由の一つである、海底面を観察しながら海底下の情報を得るという作



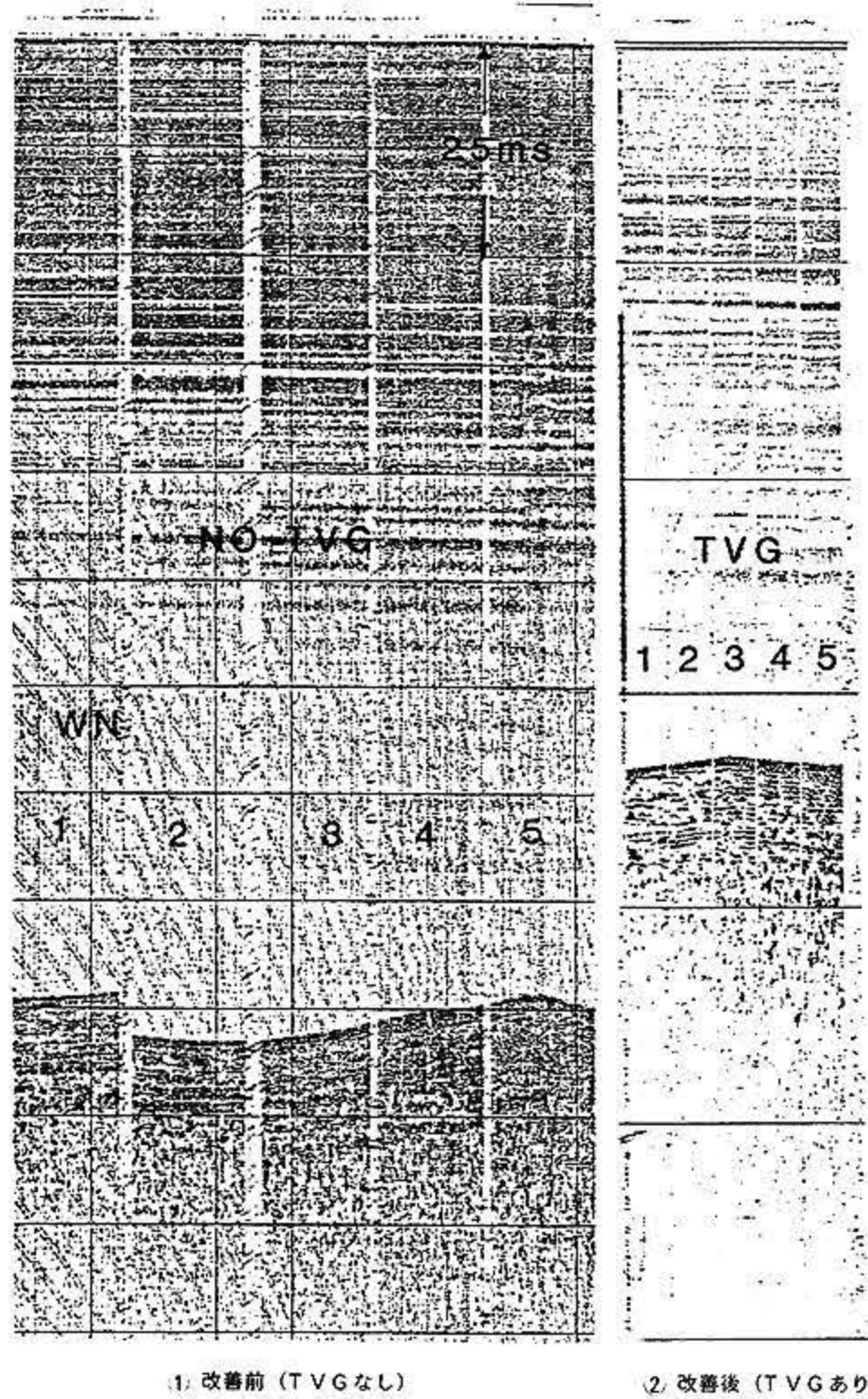
① TVGアンプ電圧特性



② TVG 作動時のプリントの増幅特性

図 10 TVGアンプ特性

Characteristics of the TVG amplifier



1. 改善前 (TVGなし)

2. 改善後 (TVGあり)

図 11 TVG回路による効果

Effect of the TVG circuit

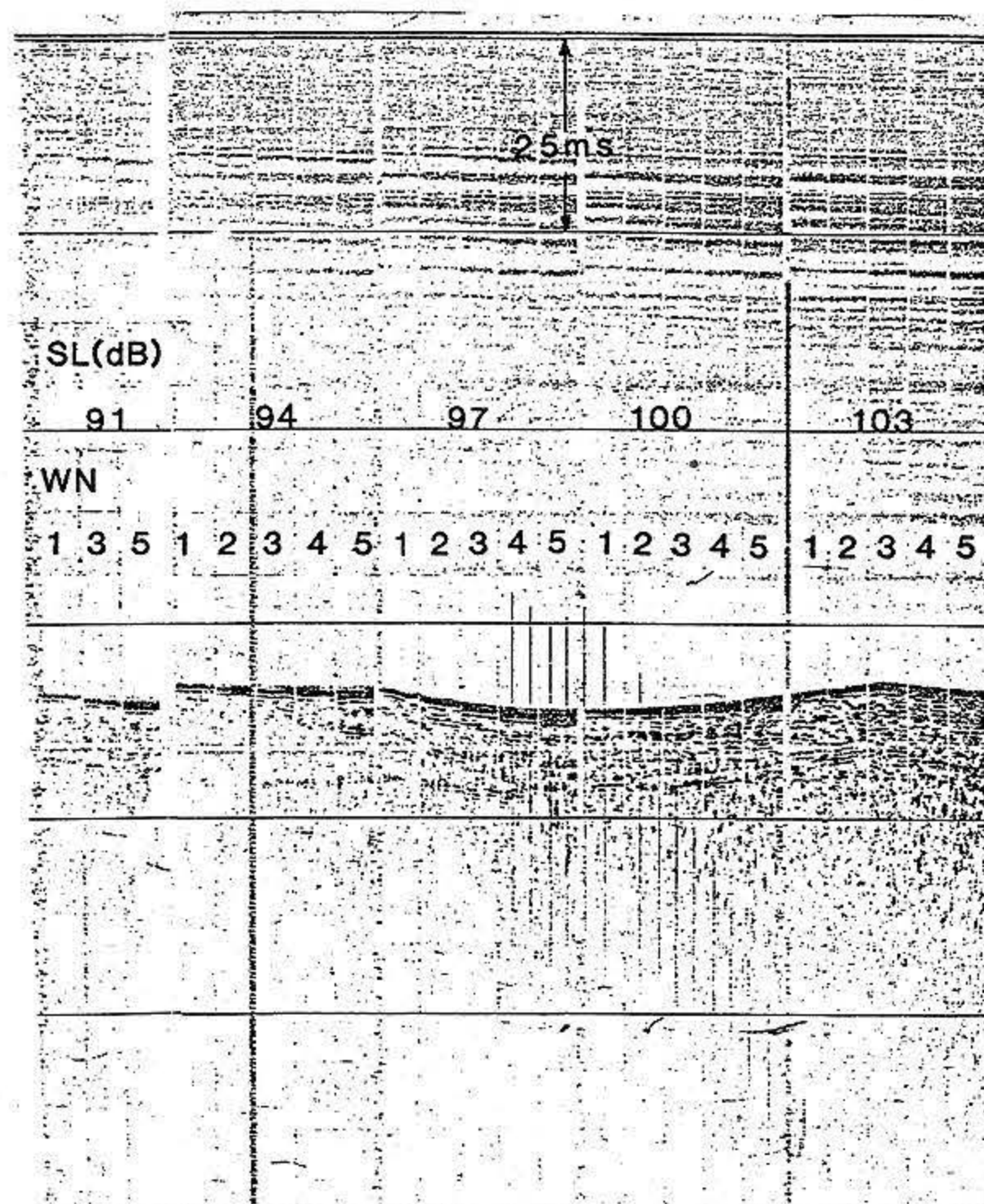


図 12 記録データの一例 (TVG付加等)

Examples of the recorded data (TVG)

業は現状ではできない。しかしながら、現状でも、実海域試験の結果では十分分解能の高い地層データが得られている。したがって、潜水船の上昇、下降時にSBPのデータを得てから海底の観察やサンプリング等を行うことにより、従来のSBPよりも良質のデータを得ることはできる。

今後は、できるだけ残響を減少させるために送受波器の研究や、遮音材、TVG回路の改良などを引き続き行う予定である。

おわりに、このSBP装置の試験は運航部の多大の協力を得たことを記する。特に、潜水船への実際の取り付け等に関して同部の段野副司令、渡辺整備士から配慮を得たのでここに深謝する。

文 献

- 1) 海洋音響研究会, “海洋音響—基礎と応用—”, (1984). 186 - 197
- 2) 大塚 清ほか, 1982, “曳航式深海底探索調査システムのソーナー”, JAMSTECTR(8) 1 - 28
- 3) 海洋科学技術センター, “2000 m 潜水調査船システム開発建造の記録(1分冊)”, (1984), 4 - 5

(原稿受理: 1985年5月24日)