

塩水楔調査のための水中音響探査機の開発

西村清和¹⁾・安間 恵²⁾・土屋洋一³⁾
松田滋夫⁴⁾・徳岡隆夫⁵⁾・井内美郎¹⁾

Development of an underwater acoustic profiler for survey of wedge-like saline layer

Kiyokazu Nishimura¹⁾, Kei Anma²⁾, Youichi Tuchiya³⁾, Shigeo Matsuda⁴⁾
Takao Tokuoka⁵⁾ and Yoshio Inouchi¹⁾

Abstract:We have developed an underwater acoustic profiler equipped with a digital recorder. This system quantitatively measures reflection amplitude and detects the weak reflector caused by the rapid change of acoustic impedance at the boundary of the halocline in water. Consequently, a survey of wedge-like saline layer is possible in brackish water lake and estuary.

The system consists of the following components.

(1) Acoustic profiling unit

This component was made by modification of a 200 kHz precision echo sounder (Model 101, Senbon Denki Co., Ltd.). The receiving circuit was modified to use straight amplifiers to maintain the linearity and fidelity of signals. In addition, the receiving circuit is equipped with signal output for digital recording.

(2) Digital recorder

The recorder consists of a 12 bit high-speed A/D converter at 1MHz sampling rate and an EXABYTE tape drive using 8 mm tape (max. 2.2GByte).

(3) Digital playback system

This component is used to obtain a profile records from digital data. It consists of an EXABYTE tape drive, a personal computer and an inkjet color printer.

The reflecting waves were recorded without distortion by using the straight amplifiers and the high-speed A/D converter of the system.

In a field experiment in Lake Nakaumi, digital reflection data in water were successfully obtained. The reflection data in the profile records show that resolution and dynamic range were improved in comparison with conventional analog records.

Key words: acoustic impedance, brackish water, digital recorder, wedge-like saline layer

¹⁾工業技術院地質調査所
Geological Survey of Japan, 1-1-3 Higashi, Tsukuba, Ibaraki,
305 Japan
²⁾川崎地質株式会社
Kawasaki Geological Engineering Co.Ltd., 3-24-17
Omoriminami, Ota-ku, Tokyo, 143 Japan
³⁾千本電機株式会社
Senbon Denki Co. Ltd., 1299-3 Okanomiya, Numazu,
Shizuoka, 410 Japan
⁴⁾クローバテック株式会社
Clovertech Inc., 3-25-26 Naka-machi, Musasino, Tokyo, 180
Japan
⁵⁾島根大学理学部地質学教室
Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane,
690 Japan

はじめに

河川河口部では、干満による海面高度の変動に伴って河口から河道内に海水が侵入する現象がみられ、海水は川底を這って上流へ伸び、河川水はその上を流れて河口から海へ流れていく。正の勾配をもつ川底を遡上する海水はある点以上にはいかないが、海水の層はその形状から塩水楔と呼ばれる(柏村, 1970)。同様

に汽水湖の中海・宍道湖でも海水の流入と周辺河川からの淡水の供給により、塩水と淡水の2層構造が見られる。汽水域における環境保全、水産資源の確保を行なう上で塩水層の把握は重要であり、その分布状態や流入経路などを迅速に把握することが望まれている。

従来の塩水楔の調査方法は、各測点で塩分や水温の垂直分布を測定するもので、能率的なものではなく短時間に湖面全体を網羅することは不可能であった。

中海の湖底堆積層については、これまでに各種の音響機器を用いて探査が実施され、その構造や形成史が明らかにされた(三梨・徳岡編, 1988; 徳岡・高安編, 1992など)。このような音響機器による探査の最中、探査記録の水中部分に、調査目的からすると雑音としてとらえられる散乱や反射層がしばしば観察された。そして、これらが塩分等の変化や懸濁物により生じることが経験的に明らかになってきた。こうしたことから、既存の音響測深機を改良することにより、塩水楔等の探査が可能である見通しを得て(徳岡ほか, 1993)、塩水楔調査用の水中音響探査機の開発を行なった。音響による遠隔探査が可能となると、従来の方法に比べ、はるかに調査効率、調査精度が向上する。

音波による塩水楔の探査

測深機や魚群探知機では、トーン・バースト信号を海底に向けて送信すると、送出された音波は音響インピーダンス(密度と音速の積)の異なる境界で一部反射し反射波がもどってくる。音響インピーダンスの異なる境界は水と海底、水と魚、水とプランクトン、暖流と寒流などが知られている(海洋音響研究会, 1984)。

図1に示すように、広い平面で相接する2つの音響的性質の異なった媒質I(密度 ρ_1 , 音速 V_1)および媒質II(密度 ρ_2 , 音速 V_2)があり、音波が媒質Iを通り境界面に垂直入射すると音波の一部は反射され反対方向にもどるが、他は媒質IIの中を透過していく。徳岡ほか(1993)ですでに示したが、入射波と反射波の振幅比は反射係数 r として

$$r = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)$$

で示される。反射係数 r の最大値は1(-1)であり、値が大きいほど強い反射を示す。媒質IとIIの音響インピーダンスの差が著しいほど反射係数 r が大きくなり、強い反射が生じる。

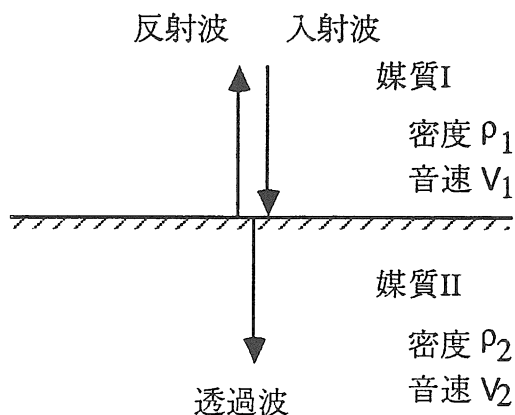


図1. 平面境界における反射
Fig. 1. Reflection on plane interface.

反射係数を求めるには2層の音響インピーダンスすなわち密度と音速の値が必要であるが、水中での密度および音速は塩分および温度の関数である。従って、塩分および温度の両方か、あるいは2つのうちどちらかが大きく変わることにより2層間の反射係数が大きくなり、反射が生じることになる。塩水楔の探査において、音波を用い、水中に生じる反射面を捉えることにより塩分等の異なる境界の検出が可能となる。

音速および密度は直接の実測以外に他の測定値を用いて計算により求めることができる。音速は、例えばMackenzieの式で温度・塩分・水深から計算できるし(Mackenzie, 1981)、密度は、例えば、"国際海水状態方程式1980"で塩分・温度から計算できる(海洋資料センター, 1983)。これらを用い、塩分および温度の変化が、密度および音速にどのように反映するかを調べ、図示した。図2-A, C, Eでは、実際の塩分の変化幅を考慮し、塩分が15%~30%変化するものとし(水温8℃一定)、塩分と密度、音速、音響インピーダンスとの関係をそれぞれ示した。また図2-B, D, Fでは実際の変化幅を考慮し、水温が5℃~10℃変化するものとし(塩分20%一定)、水温と密度、音速、音響インピーダンスとの関係をそれぞれ示した。それらによると密度の変化は、塩分の変化に大きく依存するが(図2-A)、温度変化に対しては僅少であることがわかる(図2-B)。また音速の変化は塩分および温度変化の両方に依存することが明らかになった(図2-C, D)。図2-E, Fに示すように音響インピーダンスは、音速と密度の積で効いてくることから、その変化の傾きは水温より塩分が変化した場合のほうが大きい。このことから塩分が変化した場合の方が、水温が変化した場合に比べ、より2層間の反射係数 r が大きくなり、反射が生じやすいといえる。

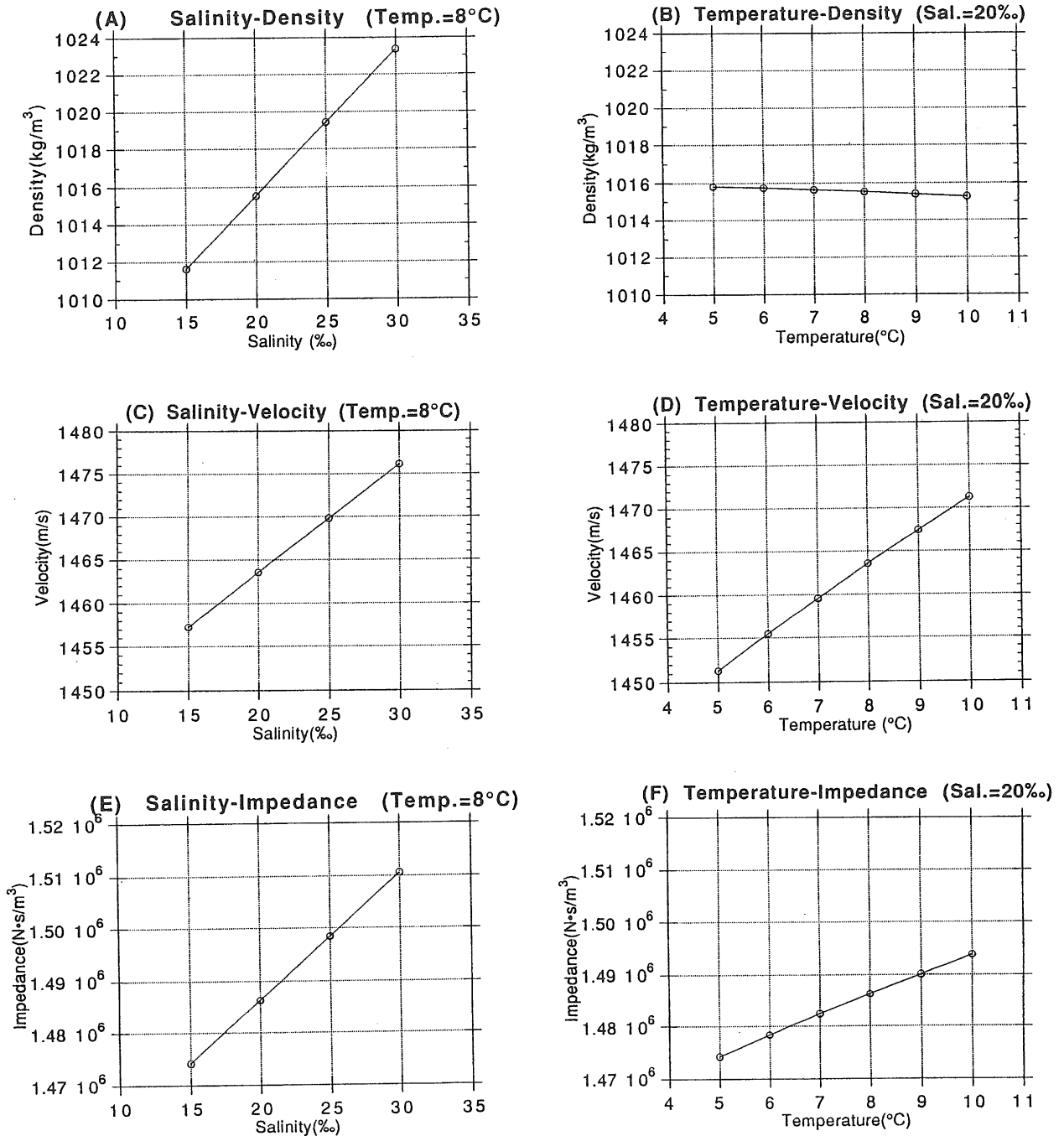


図2. 塩分・水温の変化と密度・音速・音響インピーダンスの関係
 Fig. 2. Relation between variation of salinity and water temperature, and density, sound velocity and acoustic impedance.

水中音響探査機の開発

本研究の塩水楔調査用水中音響探査機は、水面付近から湖底に向かって音響信号を送信して、音響インピーダンスの異なる躍層の境界で生ずる反射波を受信するもので、原理的には音響測深機や魚群探知機と変わらない。しかし通常の音響測深機は、海底地形の反射面を強調して記録するように回路設計されているため、水中の微弱な反射面を検出するのに

は、向いていない。また魚群探知機は、水中での魚群などの反射情報を得るには適しているが、反射面の正確な位置を測定する精度は備えていない。そこで、精密音響測深機をベースに改良を加え、受信した反射波形を歪ませることなく忠実に記録できるようにした。

また探査の分解能を上げ、音響インピーダンスの差の小さい躍層境界で反射波を検出するには、できるだけ高い周波数の音波を使用すればよいが、逆に水中での吸収減衰が大きくなり探査能力が低下して

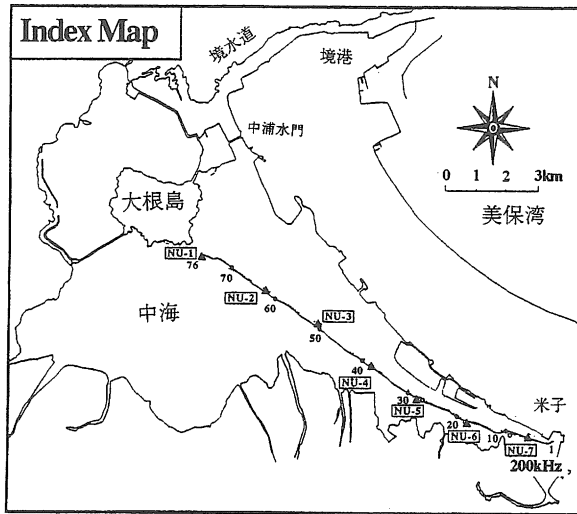


図3. 中海における塩水楔探査測線

Fig. 3. Survey track for prospecting of wedge-like saline layer in Lake Nakaumi.

しまう。今回は浅海域での測深や魚群探知で多く使用されている200kHz付近の周波数を選び、精密音響測深機101型（千本電機）をベースにアナログ式の音響探査機の開発を進めた。

その後、アナログ式では、取得データの定量的な解析、議論が困難であることから、塩水楔等で生じる反射波の振幅等を数値化できるようにデジタル式の探査システムの開発を行なった。

水中音響探査機の開発にあたっては、現場実験を重視した。まず、既存の音響測深機で中海において現場実験（1992年11月）を行ない、躍層が検出できることを確認した。その後、音響測深機の受信部の改良を進めアナログ式水中音響探査機とし、再び中海で現場実験（1993年2月）を行ない、その性能の確認をした。一方、受信信号のデジタル収録を行なうため、大容量のデジタルレコーダの開発を進め、改良された音響測深機とデジタルレコーダを組み合わせ、デジタル式水中音響探査機を完成させ、最終の現場実験（1993年8月）を中海で行なった。

現場実験は、中海の大根島から米子まで測線を設定して行なった。1992年11月、1993年2月、1993年8月に、ほぼ同一の測線で実験を行なっている。これらのデータについては徳岡ほか(1994)で、本誌において同時に報告される。図3は1993年2月の測線を示す。図中NU-1～7は、探査記録と比較検討するための塩分、水温等の測点である。停船して、水質計(WTW社、ドイツ)を用い、塩分、水温、pHを水面から50cm間隔で湖底まで測定した。

アナログ式水中音響探査機

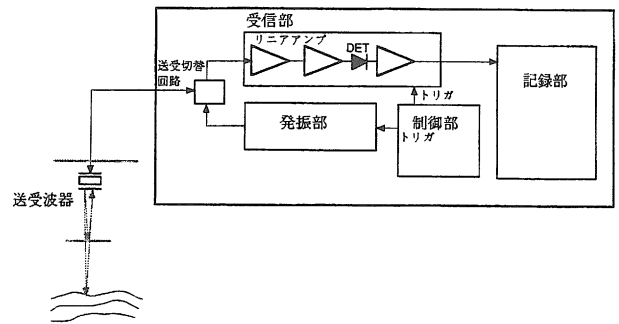


図4. アナログ式水中音響探査機のシステムブロック図
Fig. 4. Block diagram of analog underwater acoustic profiler.

1. システム構成

最初に開発したアナログ式水中音響探査機のブロック図を図4に示す。探査機は発振部、受信部および記録部等から構成される。周波数200kHzの音波を電歪式送受波器から送信し、水中の音響インピーダンスの変化する境界面で、音波の一部が反射し送受波器に戻ってくる。これを受信部の中の増幅器で増幅し、検波し、記録する。既存の101型測深機では、200kHzの受信信号を一旦約125kHzの中間周波数に変換して増幅するスーパーヘテロダイン方式を使用しているが、この方式では受信信号に歪みが生じる。本装置では、受信信号の精度と直線性を維持するため受信部を200kHzの高周波信号のまま増幅するストレート方式に改造した。

2. アナログ探査記録の取得とその検討

1993年2月の探査実験では本装置を用いアナログ探査記録を取得した。ここではアナログ探査記録について測点の塩分・水温データとともに検討を行なう。

この探査実験では、測線の全体にわたり探査記録の水中部分に強い反射面が記録された。2本または1本の反射面があり、ところによっては反射面が多数現われているところや記録されていないところもある。図5に記録の一部と測点NU-1における塩分と温度の垂直分布を示す。塩分の変化と水中での反射面が良く対応していることがわかる。図6には、探査記録と実測値との関係を検討するため、測点NU-1の塩分(図6-A)、温度(図6-B)および計算された音速(図6-C)、密度(図6-D)、音響インピーダンス(図6-E)等を示した。いずれも塩分の変化と同様のパターンを示す。それぞれの値は水面から水深3mまで漸増し、水深3mから3.5mで急激に増加し、その後は増加の傾きが少し緩やかになり水深6mで一定値になる。塩分等の測定間隔が50cmと、粗いので、必ずしも実際の値とは合わないと思われるが、50cmの厚さの層が重なっていると仮定し、各層の境界面の反射係数を求めると図6-Fのようになる。これに

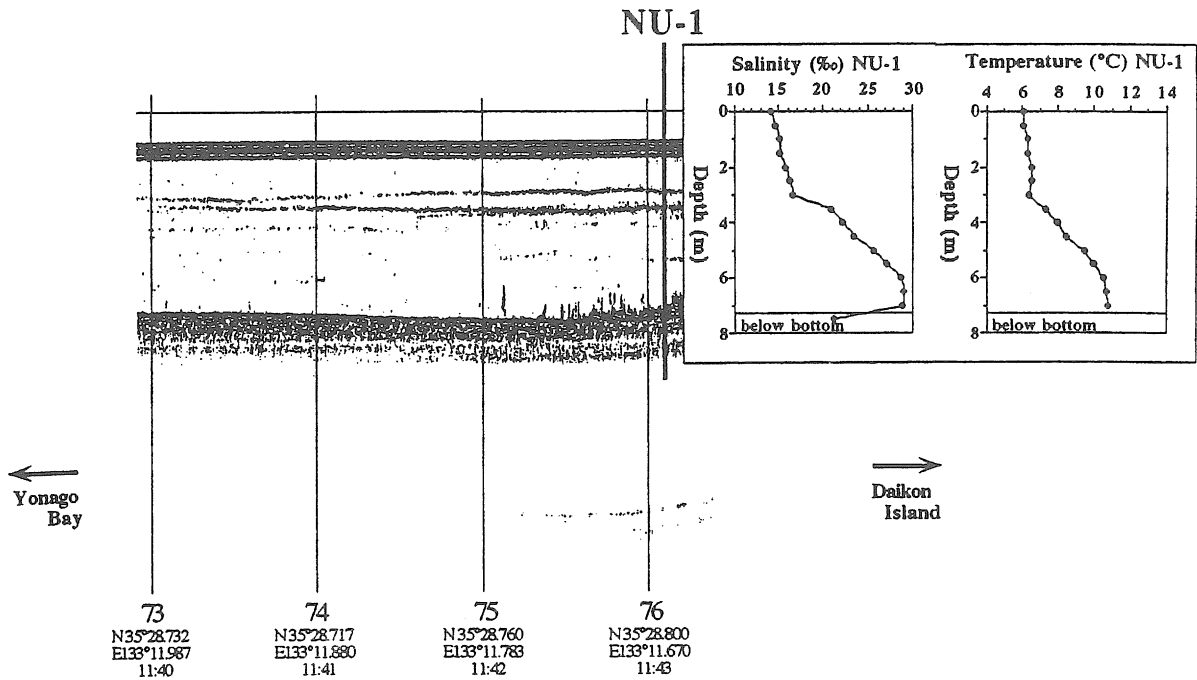


図5. 水中音響探査機によるアナログ記録例および塩分・水温測定結果 (1993年2月)
 Fig. 5. Example of analog acoustic profiling record and measured results of salinity and water temperature (February, 1993).

よると3m付近に最も強い反射があり、次に5m付近にも強い反射がある。また水面から水深3mまでおよび水深6mから7mまでの各層の反射は弱いことがわかる。図5のNU-1付近の探査記録を見ると3m付近に強い反射があり、また3m付近にも弱い反射面があり、図7-Fの計算された反射係数とほぼ一致する。しかしながら、探査記録によると5m付近には2本の強い反射面が見られるが、水質計の測定間隔が粗いので、図6-Fの反射係数のグラフには現われていない。

塩分と水温の変化のどちらが、水中での反射波の発生に関与しているのか検討した。まず、NU-1の塩分および水温データのうち、水温の値が一定で水面から湖底まで変化せず、塩分のみ変化するものとして音速、密度、反射係数を算出した。水温は8°C一定と仮定した。それによると音速、密度とも図6-C, Dと同様のパターンを示す。また反射係数は図6-Gに示すように値が少し小さくなるが、図6-Fと同様のパターンを示す。次に、塩分の値が水面から湖底まで一定値で水温のみが変化するものとして、音速、密度、反射係数を算出した。塩分は20%と仮定した。それによると、音速は水温と同様のパターンであるが、密度の変化は小さくなる。反射係数は図6-Hに示すように値および変化が小さくなり、大きな反射は生じないように見える。このことから、水温よりも塩分の変化が、反射波の発生に大きくかかわっていることが、おおよそ推定できる。

前々節で、水温の変化より塩分の変化の方が反射

波の発生に、より大きく効いていることを示したが、このように実際のデータでも確かめられた。

デジタル式水中音響探査機

1. システム構成

上述のアナログ式水中音響探査機による探査記録では水中の反射面の有無を判別するにとどまり、また振幅の小さい反射波は記録されていない。これに対し、データ収録をデジタル化することにより、忠実な波形記録が行なえ反射波の振幅も定量データとして保存することができ、より詳しい解析、議論が可能となる。またデジタル化によりダイナミックレンジが広くなり、アナログ記録では表示困難であった微弱な信号の表示が可能となる。さらに磁気媒体に収録することによって各種のコンピュータを使った様々なデータ処理ができる。そこでアナログ式水中音響探査機をベースに水中反射波のデジタル収録が可能なデジタル式水中音響探査機の開発を行なった。

開発したデジタル式水中音響探査機のシステム構成および主な仕様は表1の通りである。またシステムブロック図を図7に示した。

デジタル式水中音響探査機は、受信部を改良したアナログ式水中音響探査機本体とデジタル収録装置から構成される (図8)。探査機本体に付属するグ

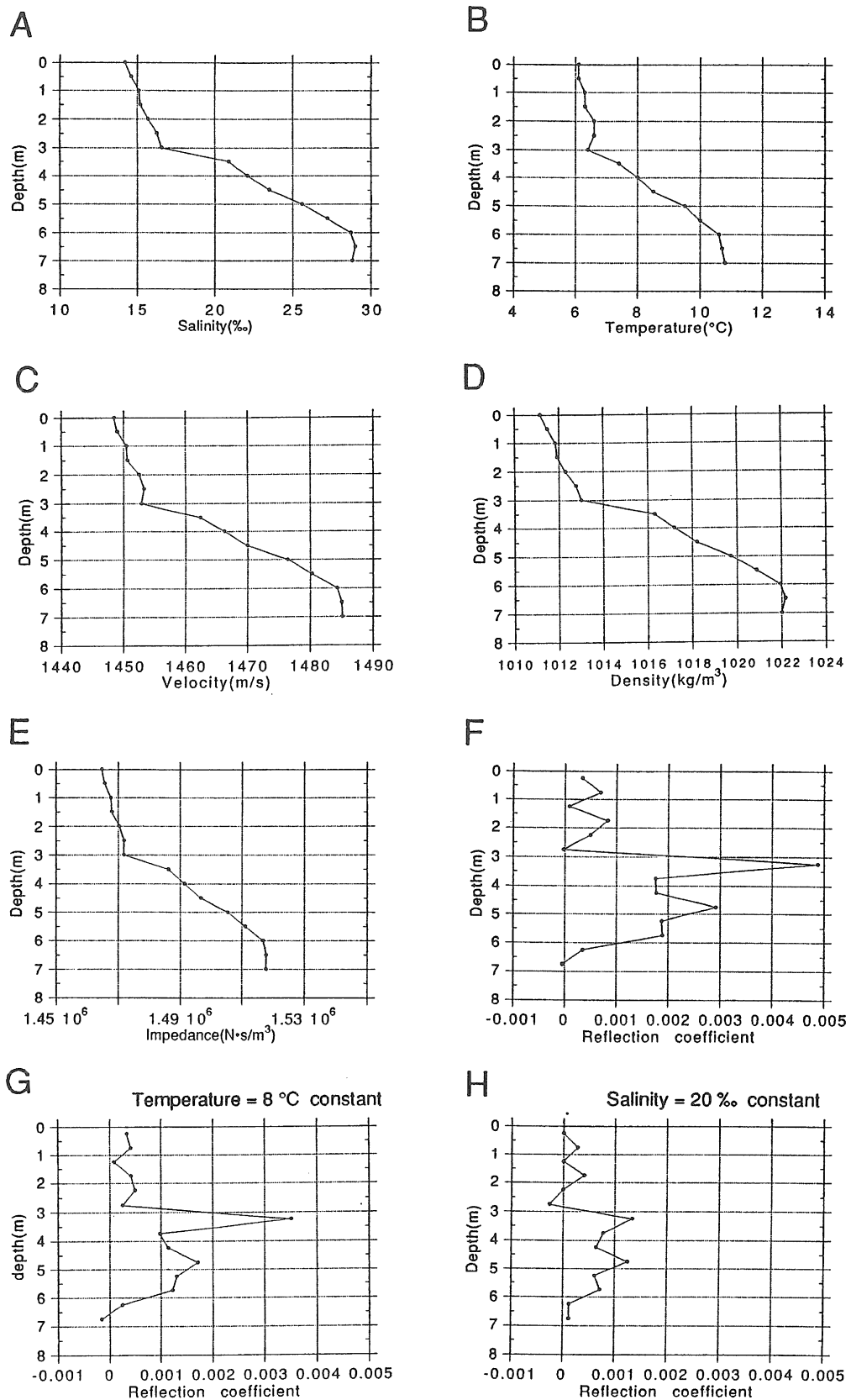


図6. 測点NU-1における塩分(A), 水温(B), 音速(C), 密度(D), 音響インピーダンス(E)および反射係数(F)を示すグラフ。Gは水温を8°C一定と仮定した場合の反射係数, Hは塩分を20‰と仮定した場合の反射係数を示すグラフ。

Fig. 6. Graphs of salinity (A), temperature (B), sound velocity (C), density (D), acoustic impedance (E) and reflection coefficient (F) on station of NU-1. G shows reflection coefficient when water temperature was assumed fixed temperature of 8°C. H shows reflection coefficient when salinity was assumed fixed salinity of 20‰

表1. システムの仕様
Table 1. System specifications.

水中音響探査機本体：精密音響測深機101型の改良型，送受波器 周波数 200 kHz 電歪式 (千本電機製)
デジタル収録装置：A/D変換器 12 bit サンプリング周波数 1 MHz (川崎地質・EXABYTE テープドライブ (8mmテープ) 最大容量 2.2 GByte クローバテック製)
デジタル再生装置：EXABYTEテープドライブ，IBM-PC/AT互換パソコン，(クローバテック製) インクジェット式カラープリンタ

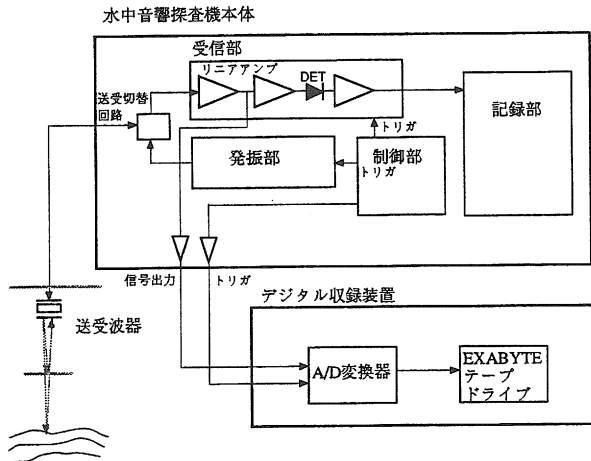


図7. デジタル式水中音響探査機のシステムブロック図
Fig. 7. Block diagram of digital underwater acoustic profiler.

ラフィックレコーダ(記録部)では、16階調のアナログ式濃淡表示しかできず、広い範囲の反射信号を飽和させることなく表示させることは不可能である。そこで探査機本体にデジタル収録装置用の外部出力端子を設け、振幅の小さい反射信号もデジタルで記録可能とした。

デジタル収録装置は12ビットのA/D変換器とEXABYTEテープドライブから構成される。探査機本体からの200kHzの信号をそのままの波形で高速A/D変換し(サンプリング周波数:1MHz)記録する。1掃引の記録長は128KByteの記憶容量となる。高速サンプリングを行なっているためA/D変換およびバッファの処理能力に限界があり、音響探査機本体では7掃引/1秒であるが、デジタル収録は3掃引/2秒の割合に間引いて、8mmビデオテープと同型のEXABYTE磁気テープに収録している。EXABYTEテープは大容量のデータを記録でき、またUNIXワークステーション等による後処理が容易に行なえる。

収録したデジタルデータは、デジタル再生装置で再生し、カラープリンタを用い、グラフィック表示を行なう。デジタルデータはEXABYTEテープから磁気ディスクや光磁気ディスクに媒体変換し、各種のパーソナルコンピュータやワークステーションで処理が行なえる。

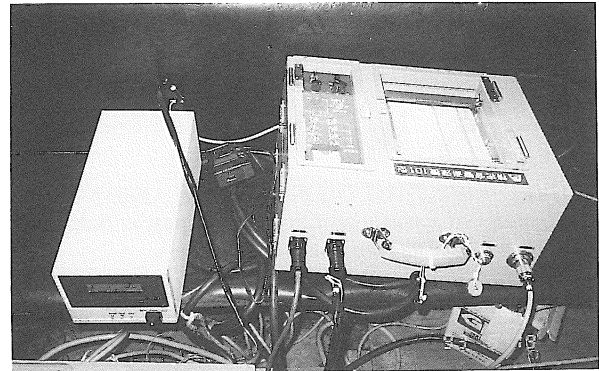


図8. デジタル式水中音響探査機の外観 左はデジタル収録装置、右は水中音響探査機本体を示す。

Fig. 8. Appearance of digital underwater acoustic profiler. It consists of a digital recorder (left) and an acoustic profiling unit (right).

2. デジタル探査記録の取得とその検討

1993年8月の探査実験では、デジタル収録装置の動作試験を兼ね、デジタルおよびアナログで探査記録を取得した。探査測線は図5に示す1993年2月のものとはほぼ同一である。

図9には 中海、中浦水門付近の探査記録のアナログ表示およびデジタル表示を示す。アナログ記録では塩分躍層の境界と考えられる水平な反射面が水中に見られるが、一部反射面が消失している。これに対しデジタル記録では反射面が記録全体に表われており、さらに、この反射面より上方では懸濁物の存在を暗示する音波の散乱が顕著で、アナログ記録に比べ記録のダイナミックレンジが大きくなっていることが明らかである。

図10に中浦水門付近の1掃引のデジタル探査記録を示す。記録では直接波と海底反射波の間に多くの反射波が記録されおり、浅所の左3分の2の範囲は反射や散乱が顕著であり、深い方の右3分の1は反射が少ない。反射波の振幅も電圧値(A/D変換器の入力電圧)として得ることができる。

図11は中海において、大根島側から米子湾に向かって探査した本装置による記録の一例である。この記録はEXABYTEテープに収録したデジタルデータをインクジェット式カラープリンタに出力したもので、原

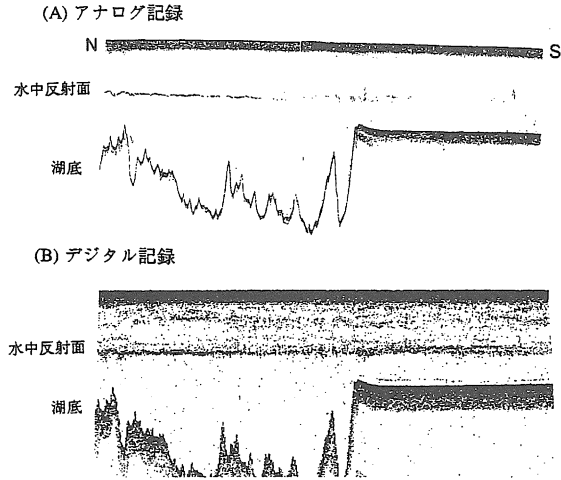


図9. 中海, 中浦水門付近の塩水楔の記録例 (1993年8月)
Fig. 9. Example of acoustic profiling records nearby Nakaura-Suimon in Lake Nakaumi (August, 1993).

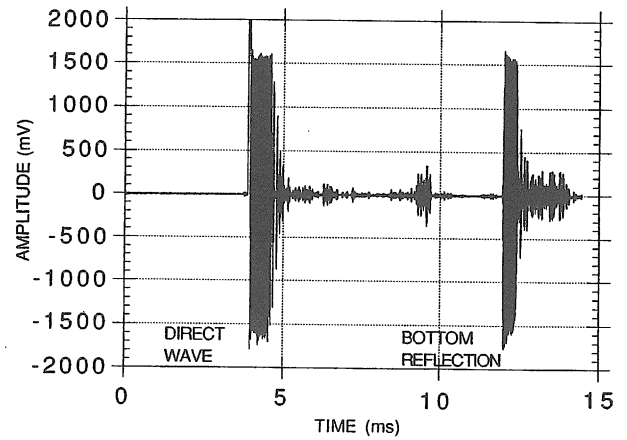


図10. 中海, 中浦水門付近の1掃引のデジタル探査記録
Fig. 10. Digital record of a trace nearby Nakaura-Suimon.

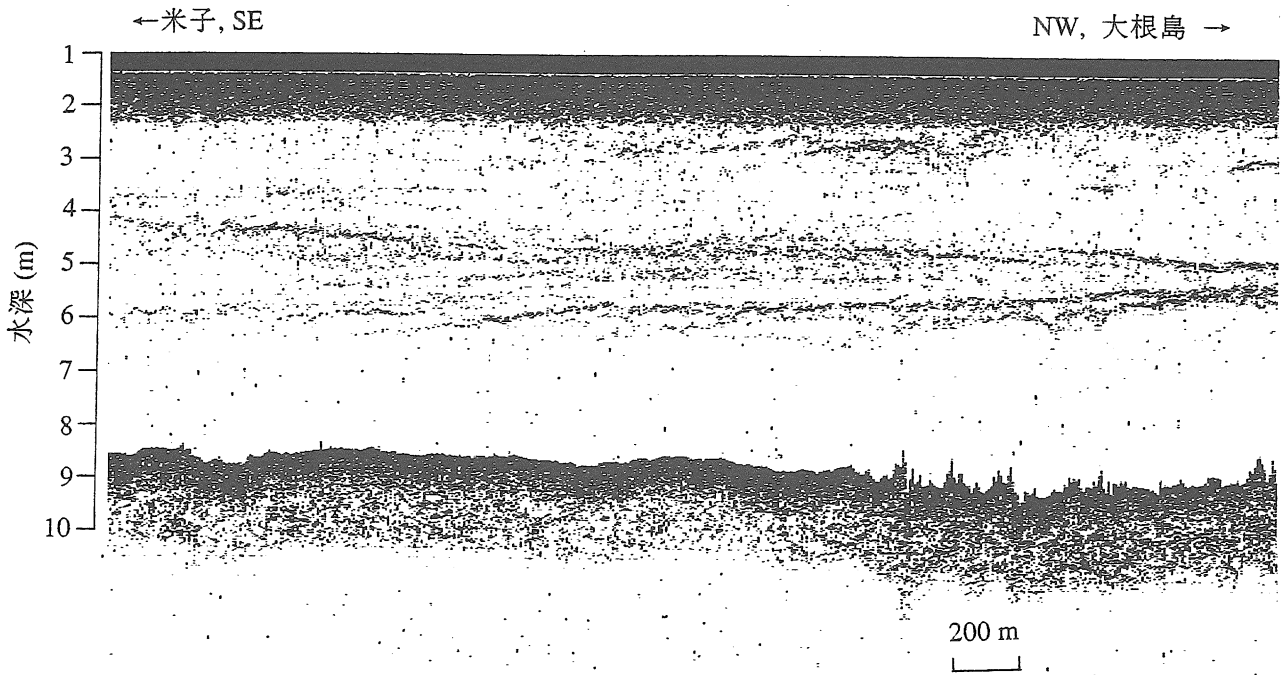


図11. 米子湾奥部 (NU-6付近) の水中の成層状況を示すデジタル記録断面
 本装置で得たデジタルデータをインクジェット式カラープリンタに出力したものである。原図はカラー表示され、反射強度を色調で示してある。
Fig. 11. Digital profiling record that indicates stratified layers in water in back of Yonago Bay (nearby station of NU-6). The record was printed out by inkjet color printer using digital data obtained by the acoustic profiler. The original is a color figure and intensity of reflection is expressed by various colors.

図はカラーである (カラー記録は徳岡ほか, 1994の図11参照)。記録例では全般的に成層構造が認められ, 2層に大区分される。この境界は塩分の急変する層準にあっている。上半分は懸濁物を含んでいて, 成層構造をなしている。一方, 下半分はあまり懸濁物が含まれていない海水で占められているように見える。デジタル化により記録のダイナミックレンジが広くなり, また反射強度のスケールが加わり, より定量的な記録の検討が可能となったといえる。

まとめ

本研究による水中音響探査機の開発についてまとめると, 以下のとおりである。

- (1) 本調査機器の開発により塩水楔等の面的な分布を迅速かつ広範に調査することが可能になった。汽水湖のみならず, 河川河口部でも使用可能である。
- (2) 探査記録と水質計で測定した塩分・水温データ

等との対応を検討したところ、水温よりも塩分の変化が反射面形成に寄与していることが、おおよそ明らかになった。さらにより詳しく検討するためには、塩分・水温の深さ方向の密な測定が必要である。

(3) デジタル化によりアナログ記録では表示できない振幅の小さい反射波も表示できるようになった。またデジタル化により定量的な振幅データが得られるようになったので、探査機本体の音源の音圧、受信部のアンプのゲイン調整を固定とし常に同一の条件で音響探査を行えば、塩分躍層の季節変化を精度よく求めることが可能である。

(4) デジタル化によりコンピュータを用いたマッピングが容易となり、例えば塩水楔の分布図などの自動作成が可能となる。より記録の質を向上させるためにはフィルター処理などソフトウェアの開発も必要となる。

(5) 今後の研究課題として、取得した反射データから塩分のパターンを復元することが挙げられる。

探査実験で使用した水質計は島根県水産試験場三刀屋分場（分場長 中村幹雄氏）から借用した。また本論の図3および図5は島根大学大学院田村嘉之君の作成した図を使用させていただいた。地質調査所海洋地質部石原丈実課長には、原稿を読んでもいただき、有益なご助言とご意見を賜った。これらの方々にお礼申し上げます。

本研究は主に文部省科学研究費補助金（試験研究

B) 「汽水域の塩水楔およびヘドロ層の音波探査法の開発」（課題番号04554031, 平成4,5年度, 代表者 徳岡隆夫）によって行なったものである。

文献

- 海洋音響研究会(1984) 海洋音響－基礎と応用－. 海洋音響研究会（現海洋音響学会）, 259pp.
 海洋資料センター(1983) 実用塩分と国際海水状態方程式. JODCニュース増刊, No.14, 102pp.
 柏村正和(1970) 川と海との相互作用. 自然, 25-3: 31-39
 Mackenzie, K. V.(1981) Nine-term equation for sound speed in the ocean. *Journal of the Acoustical Society of America*, **70**, 807-812.
 三梨 昂・徳岡隆夫(1988) 中海・宍道湖, 一地形・底質・自然史アトラス. 島根大学山陰地域研究総合センター, 115pp.
 徳岡隆夫・高安克己(1992) 中海北部（本庄工区）アトラス. 島根大学山陰地域研究総合センター, 92pp.
 徳岡隆夫・高安克己・三瓶良和・土屋洋一・安間 恵・松岡弘和・井内美郎・西村清和(1993) 音波探査による中海の浮泥層と塩水楔の検討（予報）. 山陰地域研究（自然環境）, 島根大学山陰地域研究総合センター, 9:9-17.
 徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村嘉之・高安克己・安間 恵・土屋洋一・松田滋夫・井内美郎・西村清和(1994) 音波探査による中海宍道湖の塩分躍層の検討とその意義. LAGUNA(汽水域研究), 1:11-26.