

## 謝 辞

湖山池の湖沼調査を遂行するにあたり鳥取大学教養部宮腰潤一郎教授、塩崎一郎助教授、教育学部吉谷昭彦教授および岡田昭明助教授には調査に関する援助と様々なご教示をいただいた。鳥取大学教養部の福田啓子助教授には同生物学教室の調査船をお貸しいただき、船長として調査に同行いただいた。また、島根大学理学部の三瓶良和講師には有機地球化学の立場から、中山勝博博士には堆積学的な立場から分析結果について有益な助言をいただいた。島根大学の丹後雅憲氏には調査および室内作業で協力していただき、大学院生のNaryanto, H. S. 氏、畑中義人氏には室内作業で大変お世話になった。ここに感謝の意を表し、厚くお礼申し上げる。

## VI. 参 考 文 献

赤木三郎・豊島吉則・星見清晴・谷村美弥子(1993)湖山池の地質環境と地史の変遷. 地質学論集 39: 103-106.

Folk, R. L. and Ward, W. C. (1957) Brazos River bar: a study in the significance of grain-size parameters. *J. Sed. Petrol.*, 27: 3-26.

星見清晴(1990)湖山池の形成について. 鳥取県立博物館研究報告, 27: 19-31.

建設省中国地方建設局鳥取工事事務所(1990)千代川河口処理対策について. pp. 140-141, pp. 697.

中井信行・太田友子・藤沢 寛・吉田正夫(1982)堆積物コア炭素同位対比, C/N比およびFeS<sub>2</sub>含有量からみた名古屋港周辺の古気候, 古海水準変動, 第四紀研究, 21: 167-177.

高安克己・瀬戸浩二・赤木三郎・西田良平・田中善蔵・村田祐司・作野裕司(1994)鳥取県湖山池の湖底地形と底質(概報). LAGUNA, 1: 27-35.

高安克己・瀬戸浩二・三瓶良和・丹後雅憲(1994)小さな閉鎖的汽水湖の湖底堆積物にみられる洪水記録. 日本地質学会第101年学術大会講演要旨, 282p.

田中善蔵・上田那須雄・西田良平・福田啓子・島崎綾子(1990)湖山池の総合的な自然環境調査, 鳥取大学教養部紀要, 24: 63-91.

LAGUNA (汽水域研究) 2, 21~27頁 (1995年3月)  
LAGUNA 2, p. 21-27 (1995)

汽水域・塩分躍層の動態長期観測  
システムの開発(予報)

徳岡隆夫<sup>1)</sup>・高安克己<sup>2)</sup>・三瓶良和<sup>1)</sup>・瀬戸浩二<sup>1)</sup>・井内美郎<sup>3)</sup>・  
西村清和<sup>3)</sup>・安間 恵<sup>4)</sup>・須崎 聡<sup>5)</sup>・松田滋夫<sup>6)</sup>・山中 正<sup>7)</sup>

Development of the long-term observation system  
for wedge-like saline layer formation in Coastal lagoon  
(preliminary report)

Takao Tokuoka<sup>1)</sup>, Katsumi Takayasu<sup>2)</sup>, Yoshikazu Sampei<sup>1)</sup>, Koji Seto<sup>1)</sup>, Yoshio Inouchi<sup>3)</sup>,  
Kiyokazu Nishimura<sup>3)</sup>, Kei Anma<sup>4)</sup>, Satoshi Suzaki<sup>5)</sup>, Shigeo Matsuda<sup>6)</sup>  
and Tadashi Yamanaka<sup>7)</sup>

**Abstract:** We have developed the survey system for wedge-like saline layer formation and preliminarily checked the resolution of underwater acoustic records in Lakes Nakaumi and Shinji (Coastal lagoons) and Ohashi River. This survey system, which automatically provides a time-series of echo-sounding profiles, is different from the conventional type equipped on a boat. The transducer is fixed on the lake bottom. The echo-sounding record obtained by the new system is clear enough to distinguish the 5‰ halocline. Wedge-like saline layers have distinctly been observed at 1.0-1.5m above the lake bottom in Lake Nakaumi.

**Key words:** automatic echo-sounding survey, time-series profile, wedge-like saline layer, coastal lagoon

## はじめに

平成4, 5年度の文部省科学研究費補助金(試験研究(B))において, 塩分躍層を捉えるための水中音波探査機の開発を行い中海・宍道湖で適用したところ, 船舶による航走観測によって塩分躍層の分布・層厚の迅速な把握が行なえるなど, 予想以上の良好な結果を得た(徳岡ほか, 1994a; 西村ほか, 1994). また河口域での本装置の性能を評価するため長良川で使用したところ, 塩水楔を確実に捉えることができ, 河川下流から河口域での有効性を実証した(徳岡ほか, 1994b)\*. 音波を用いた塩分躍層の検出は, 魚群探知機や音響測深機と同様に媒質中の音響インピーダンスの異なる境界での音波の一部反射を捉えるもので, 基本原理はすでに知られたものであり, 魚群探知機などを利用した塩分躍層, 塩水楔の研究は行なわれている(福島ほか, 1971; 大島ほか,

- 1) 島根大学理学部地質学教室  
Department of Geology, Faculty of Science, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue 690, Japan
- 2) 島根大学汽水域研究センター  
Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue 690, Japan
- 3) 工業技術院地質調査所  
Geological Survey of Japan, 1-1-3 Higashi, Tsukuba 305, Japan
- 4) 川崎地質株式会社  
Kawasaki Geological Engineering Co. Ltd., 3-24-17 Omoriminami, Ota-ku Tokyo 143, Japan
- 5) 千本電機株式会社  
Senbon Denki Co. Ltd., 1299-3 Okanomiya, Numazu 410, Japan
- 6) クローバテック株式会社  
Clovertech Inc., 3-25-26 Naka-machi, Musashino, Tokyo 180, Japan
- 7) 株式会社シマダ技術コンサルタント  
Shimada Technical Consultants, Co. Ltd., 288 Hashima, Yasugi 692, Japan



1994)\*. これに対し、筆者等は、探査精度を向上させるため音響探査機の受信回路をあらたに設計するとともに、受信した反射波をデジタル化してコンピュータ処理を可能とした。その一つの成果は記録のカラー表示化であり、今まで表示できなかった微弱な塩分躍層も表示可能となった。またデジタル化により定量的な反射波の振幅データが得られることから、探査機の音源の音圧、受信部の利得を一定とし、常に同一の条件で探査を行えば、塩分躍層の時間変動を精度よく観測できることがわかった。さらに、塩分・温度の実測データから音波の反射係数を求め、種々条件を与えることにより、反射層の形成に塩分の変化が寄与しており、温度の変化は殆ど影響していないことが明らかになった(西村ほか, 1994)。こうした研究結果に基づき、その実態が明らかにされていない汽水域での塩分躍層の季節変動を、送受波器を水中固定した音響探査機を開発することにより、動的に捉えることが可能である見通しが得られた。このアイデアは、幸いにも平成6(および7)年度の試験研究(B)に採択された。塩分躍層の変動を動的に捉えることができれば、汽水域の環境保全や将来予測に重要な貢献をすることは疑いのないところである。本報告では平成6年度の予察的実験結果について述べる。

\* 上記の水中音波探査機の開発を1994年6月に発表したところ、音測深機や魚群探知機を用いての塩分躍層や塩水くさびについての研究が石狩川河口域や網走湖において以前から報告されていることを知った。これらの報文では、主に水理工学的な立場から論じられている。

塩分躍層の動態観測システムの提案

汽水域塩分躍層の時間および空間的な動態を把握する方法として、複数地点に送受波器を固定して、一定期間連続した音響探査を行ない反射波を記録する方法が考えられる。送受波器を水面付近に設け、湖底に向かって音波を発信すれば、先に開発した音

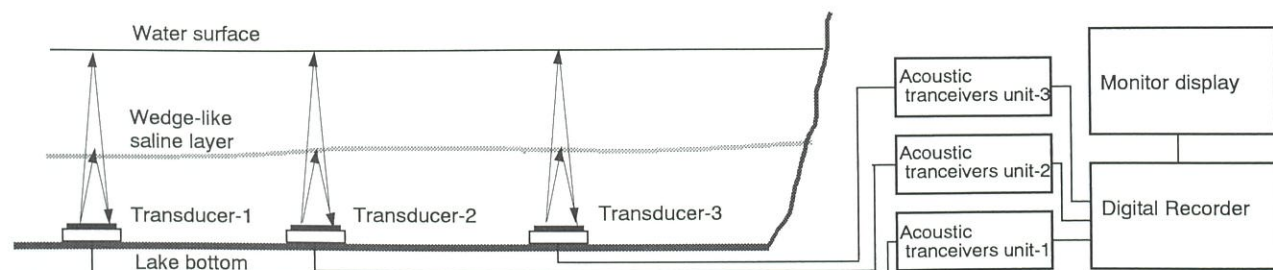


図-1. 塩分躍層動態観測システムの概念  
Fig. 1. Concept of the observation system for wedge-like saline layer formation

響探査機で得られる記録と同等のものが得られはざである。しかしながら、送受波器を水面付近に係留設置した場合、波浪の影響で安定した記録は得られない。安定な記録を得るにはやぐらを組むなど大掛かりな設置工事が必要であり容易ではない。そこで、送受波器を湖底に設置し、湖水面に向かって音波を発信し、塩分躍層での反射波を検出することを検討した。送受波器を湖底設置とすると、送受波器の固定は容易であり、その結果、常に安定した記録を得ることができる。この方式は Inverted Echo Sounder として知られている。

このような基本アイデアのもとに、図-1に示すような塩分躍層の動態観測システムの開発を計画した。システムは、複数個の湖底設置の送受波器、音響送受信機ユニット、デジタルレコーダおよびディスプレイから構成される。

システムの開発を進めるにあたり、必要な基礎データを得るため、水面および湖底設置の送受波器を用いた現場実験を宍道湖、中海および大橋川で行なった。

実験方法

実験に用いた機器の構成を図-2に示す。1992-93年の試験研究で開発した送受信周波数200kHzの水中音響探査機(千本電機製)、これに水面付近に設置した通常の送受波器Aおよび新たに製作した湖底設置型送受波器Bを切り替え接続する。送受波器Bは遠隔探査ができるように全長200mの接続ケーブルを備える。音響探査機の出力信号は新たに開発したデジタル収録・モニタ装置(クローバテック製)へ入力される。湖底設置型送受波器の下面土台には直径50cm、厚さ1cmの円形鉄板が敷かれており(図-3)、この四方にロープを付けて水平を保ちながらゆっくり湖底に降ろして行き、底泥が舞い上がらないように湖底に設置した。送受波器の発信面は鉄板上14cmの高さにある。また、水面付近の送受波器Aは水面下約50cmに設置した。

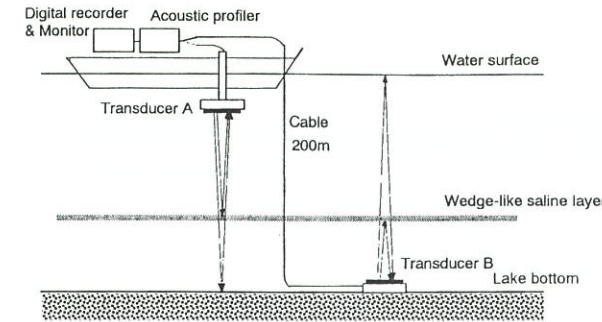


図-2 実験システム構成  
Fig. 2. Arrangement of the experiment system.

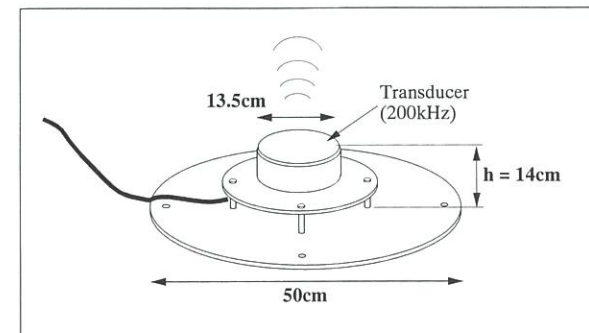


図-3. 湖底設置型音波送受波器の外観  
Fig. 3. Appearance of the transducer fixed on the lake bottom.

実験は、1994年11月4、5日に中海西域(測点番号941105-1, 941105-2: 図-4a)宍道湖東域(測点番号941104-5, 941104-6: 図-4b)および大橋川(測点番号941105-3: 図-4b)の5地点を中心に行なった。まず、送受波器Aを用い、従来の航走による音響探査により、各地域の塩分躍層の記録断面を求め、その中の特定地点(測点)において送受波器Bを湖底に設置し、塩分躍層の定点連続観測を行なった。また同時に各測点で水質計(OXI-196, LF-196, PH196T, ドイツWTW社製)を用いて、塩分、溶存酸素、水温およびpHの鉛直変化を50cm毎に測定した。送受波器の設置位置はGPS受信機(日本無線製)を用いて決定した。船は宍道湖漁協組合松本仁三郎氏の「松本丸」(0.2トン)、高安所有の「しじみちゃん号」(0.2トン)を用いた。

- この現場実験のポイントは以下の通りである。
- (1) 湖底設置の送受波器で塩分躍層を確実に検出可能かを調べる。また、反射波の記録の状態のチェックを行なう。
  - (2) 湖底設置と水面付近に送受波器を設置した場合との記録の比較を行なう。
  - (3) 水質計による各測定値と音響記録との相関の検討を行なう。

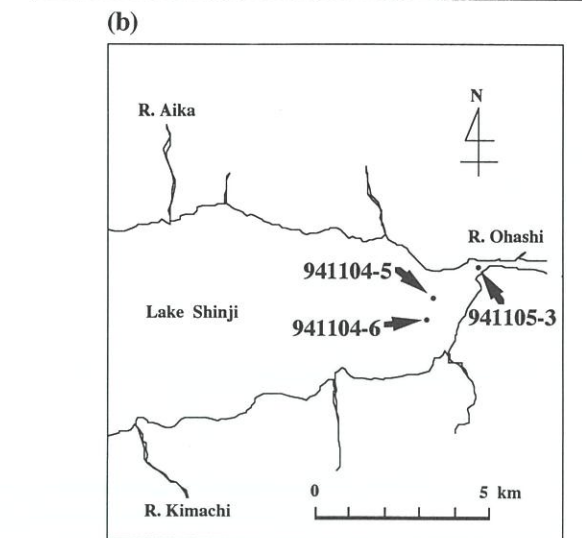
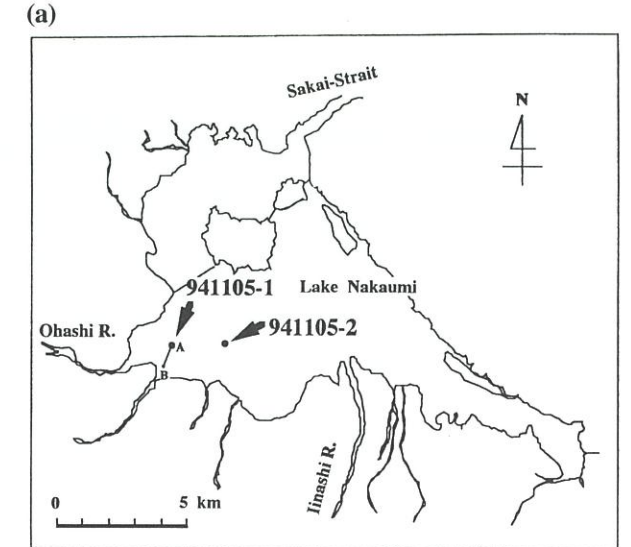


図-4. 中海(a)、宍道湖(b)および大橋川(b)における塩水くさび探査地点および測線  
Fig. 4. Survey point and track for prospecting of the wedge-like saline layer in Lake Nakaumi(a), Lake Shinji(b) and Ohashi river (b).

実験結果および考察

実験を行なった両日の湖水は宍道湖から中海に流れ出ており、大橋川では流速が数十cm/s(目視による)と速く、塩分躍層は確認されなかった。一方、宍道湖と中海ではそれぞれ水深約4mのところにも明瞭な塩分躍層が確認された。以下に宍道湖、中海および大橋川での湖底設置型送受波器による塩分躍層の探査実験の結果を述べる。音響探査の記録断面は水中音響探査機に内蔵されたアナログ式グラフィックレコーダで得た。

1. 宍道湖(1994年11月4日)  
測点 941104-5(N35° 27.266, E133° 2.304) におい



941104-5

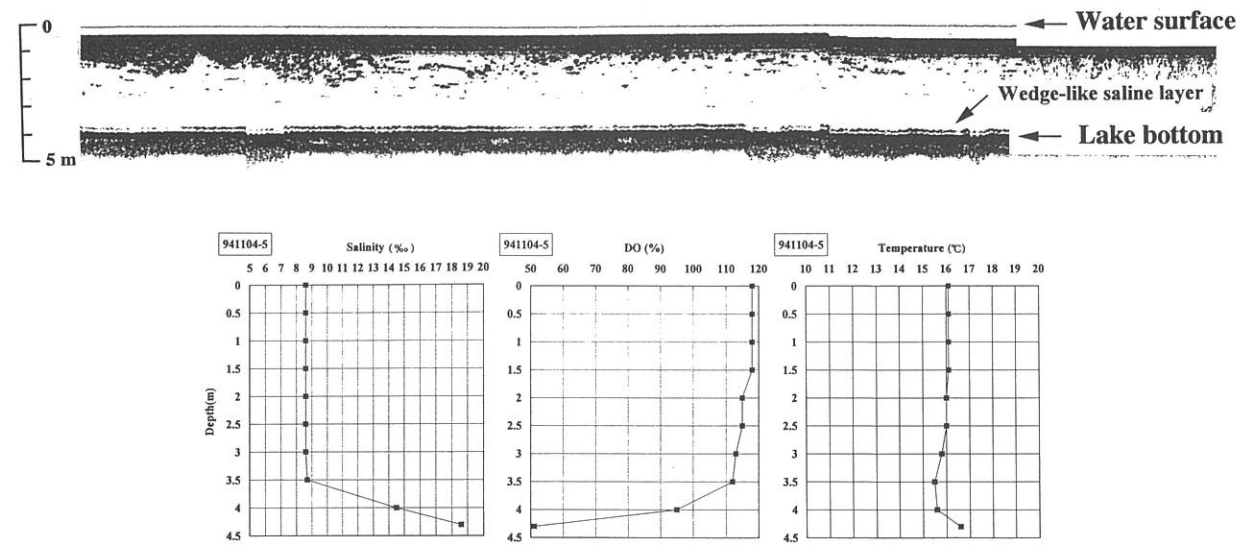


図-5. 941104-5地点における、船上に装備された従来型の音波送受波器による反射記録と塩分、溶存酸素および温度の鉛直分布  
 Fig. 5. Echo-sounding record by the conventional system equipped on a boat at the survey point 941104-5, and the profiles of salinity, dissolved oxygen and temperature.

941104-6

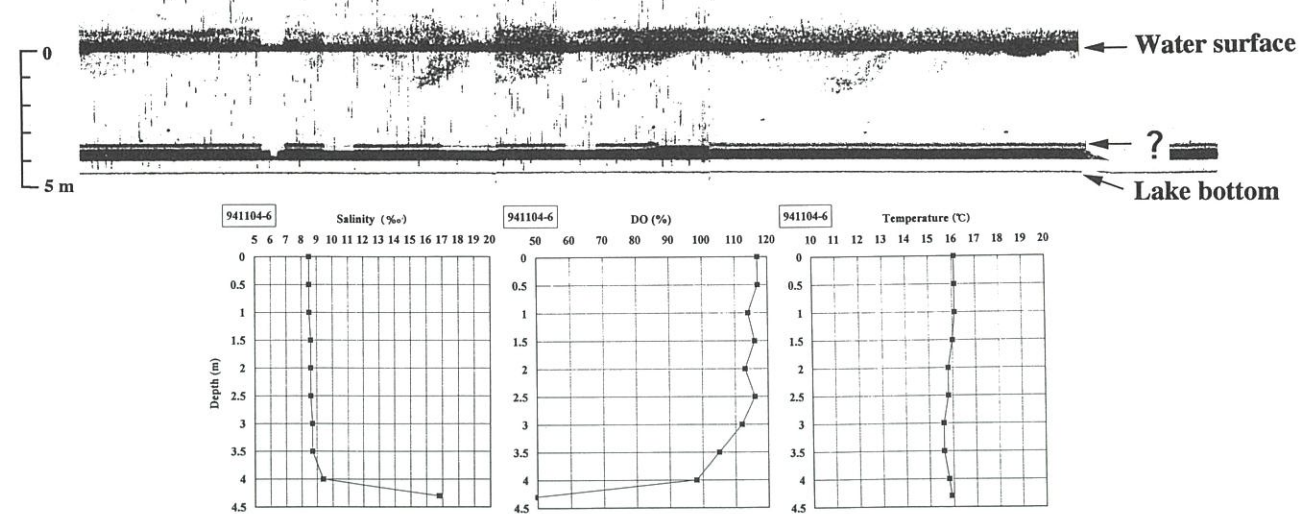


図-6. 941104-6地点における、湖底設置型の新音波送受波器による反射記録と塩分、溶存酸素および温度の鉛直分布  
 Fig. 6. Echo-sounding record by the new survey system fixed on the lake bottom at the survey point 941104-6, and the profiles of salinity, dissolved oxygen and temperature.

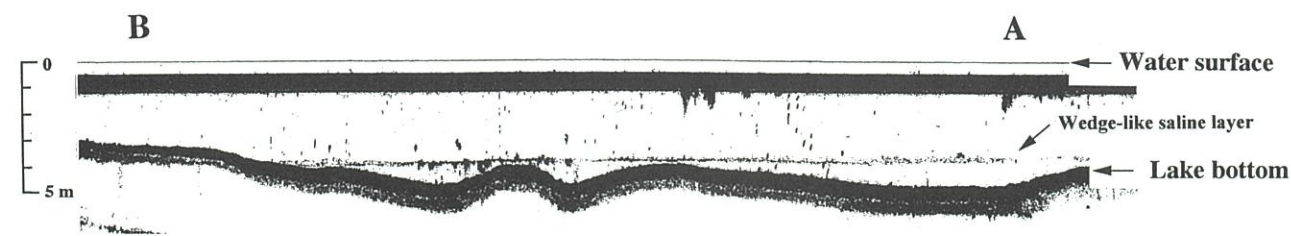


図-7. A-B測線における、船上に装備された従来型の音波送受波器による反射記録  
 Fig. 7. Echo-sounding record by the conventional system equipped on a boat at the survey track A-B.

941105-1

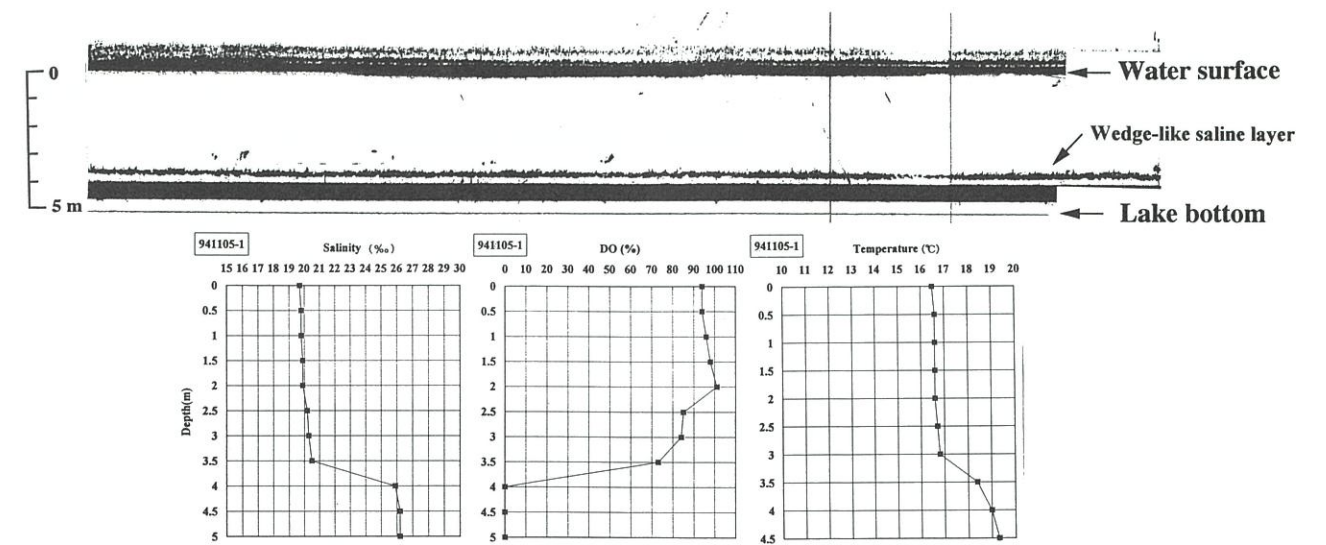


図-8. 941105-1地点における、湖底設置型の新音波送受波器による反射記録と塩分、溶存酸素および温度の鉛直分布  
 Fig. 8. Echo-sounding record by the new survey system fixed on the lake bottom at the survey point 941105-1, and the profiles of salinity, dissolved oxygen and temperature.

941105-2

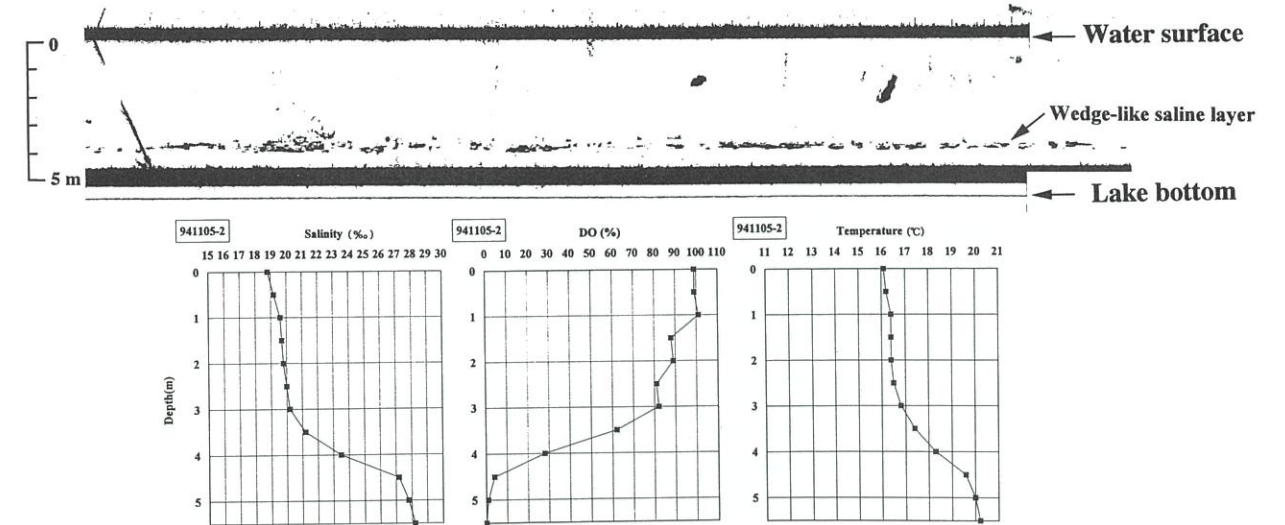


図-9. 941105-2地点における、湖底設置型の新音波送受波器による反射記録と塩分、溶存酸素および温度の鉛直分布  
 Fig. 9. Echo-sounding record by the new survey system fixed on the lake bottom at the survey point 941105-2, and the profiles of salinity, dissolved oxygen and temperature.

て、水深約4.0m(湖底上約0.3m)に塩分躍層が認められた。送受波器Aを水面付近に設置して行なった通常の音響探査の断面記録と水質計による塩分等の鉛直変化を図-5に示す。塩分の鉛直分布は、水面から水深3.5mまでは8.6~8.7‰でほぼ一定であるが、4.0mで14.5‰に増加している。音響断面図では水深4.0mに明瞭な反射面が見られ、塩分の変化する深度にほぼ一致している。図-6は測点941104-6(N35°

26.873, E133° 2.277)において送受波器Bを湖底に固定して得た連続的な反射記録断面である。記録の横軸は経過時間を示す。記録を見ると、音響インピーダンスの差の著しい水面と大気との境界面での反射が強く現われている。また湖底近傍には幅の広い直接波が記録されている。この直接波の上方(湖底上1m)に反射波が現われているように見えるが、機械的信号ノイズである可能性が高い。この実験では送



## 941105-3

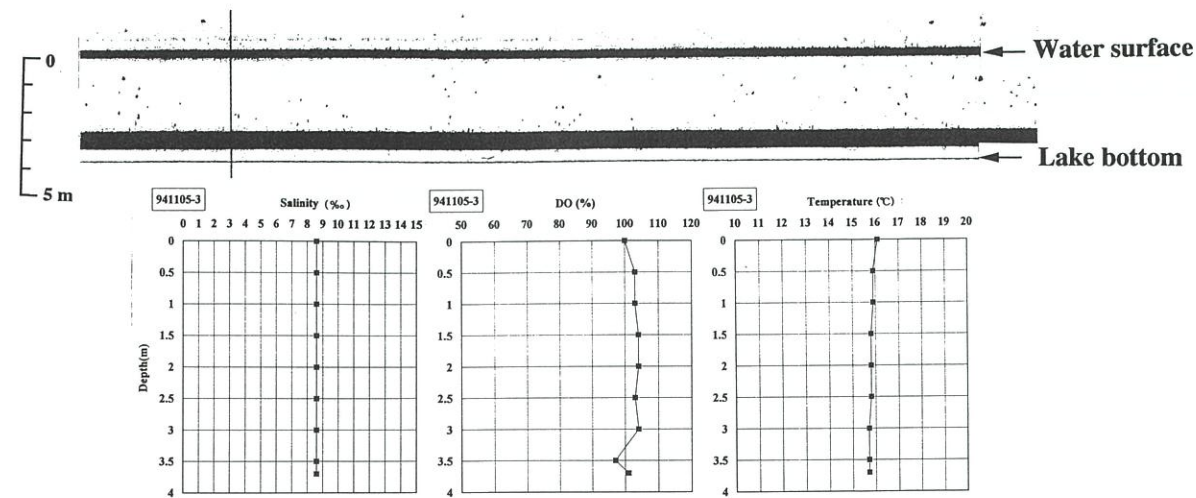


図-10. 941105-3地点における、湖底設置型の新音波送受波器による反射記録と塩分、溶存酸素および温度の鉛直分布  
Fig. 10. Echo-sounding record by the new survey system fixed on the lake bottom at the survey point 941105-3, and the profiles of salinity, dissolved oxygen and temperature.

受波器の設置位置と塩分躍層が近すぎて、躍層が音源の残響と重なってしまい、両者の識別は不可能と思われる。従って、非常に薄い塩分躍層を検出するには、湖底への送受波器の設置方法を改良し、送受波器を湖底面以下に埋め込む等の措置が必要となる。

## 2. 中海(1994年11月4日)

測線A-B(図-4a)の付近では、船舶航路の浚渫により湖底の起伏が見られる。測線はこの航路を横切っている。送受波器Aによる音響探査では湖底の窪地に沿って明瞭な塩分躍層が確認された(図-7)。図-8には、湖底設置型による反射記録と水質の鉛直変化を示した。図-8地点941105-1(N35° 27.179; E133° 8.807)の塩分は水深3.5~4.0m(湖底上1~1.5m)で19.7~20.3‰から25.9‰に変化しており、塩分躍層反射面(水深3.8m)と一致している。なお、溶存酸素は水深4.0m以下で0‰となり、塩分躍層が安定して比較的長く存在していたことを示唆している。この地点における湖底設置型の音波送受波器による反射記録は、図-7の従来型の音波送受波器によるそれと比較的良好一致を示している。ただし送受波器を湖底に設置したほうが塩水くさび反射面と送受波器の距離が短くなるため、より振幅の大きく明瞭な反射記録が得られている。

送受波器を湖底に設置した試験は地点941105-2(N35° 27.388; E133° 10.045)でも行った。この反射記録を図-9に示した。塩分躍層は水深約4m(湖底上約1.5m)に見られるが、図-8ほど明瞭ではない。この

場所の時系列変化では、反射深度の変化および不連続が見られる。このことは、水塊の振動等により塩分躍層の厚さが微妙に変化していることを示しているものと思われる。塩分の鉛直変化(図-9)でも塩分躍層の層厚は約1.5mと地点941105-1よりもやや厚くなっており、音波探査により得られた塩分躍層の反射記録の変動とはほぼ一致しているように見える。この塩分躍層の下位では溶存酸素濃度は1~28‰であり、無酸素状態にはなっていない。これらのことから、地点941105-2での塩水くさびは時系列に比較的動き易い状態にあるものと考えられる。

## 3. 大橋川(1994年11月5日)

大橋川では、観測を行った両日も塩分躍層は形成されていなかったが、対照記録を得るために湖底設置型の音波送受波器による音波探査を行った。地点941105-3(N35° 27.793; E133° 3.358: 図-4b)における塩分は図-10に示したように表層から川底(3.7m)まで8.6‰と変化なく、溶存酸素濃度も川底まで飽和しており、急な流れによって上下がよく混合されていることを示している。測定時間は、1時間(13:40~14:40; 図-10はそのうちの一部)である。図中の斑点は魚影あるいは浮遊物と思われるが、それらを除けばまったく水中の反射記録は見られず塩分の鉛直分布と一致している。

## ま と め

(1) 新しく開発した湖底設置型の音波送受波器を中

海、宍道湖および大橋川で設置したが、送受信の動作状態および音響記録とも良好で、中海での塩水くさびの反射面(湖底上1.0~1.5m)は従来型の反射記録よりも鮮明であった。これは、音源から反射面までの距離が短いことと音源が固定されていることによると考えられるが、さらにデータの蓄積が必要である。宍道湖では、塩分躍層は湖底上約0.3mにあり、その反射記録は残響のため識別が困難であった。今後は、0.3m以内の薄い塩水くさびの記録のために、音響エネルギーの調整や湖底への設置に工夫が必要である。

(2) 中海および宍道湖において、11月に塩分躍層が存在することを従来型および湖底設置型の音響探査記録により水深約4m下に確認した。この深度は、宍道湖において塩分が8.5から14.5‰に、中海において20から26‰に変化する深度にそれぞれ一致していた。

今回の実験により、湖底設置型の新音波送受信器を用いれば、時系列的に塩分躍層の動態を把握することが可能であることが明らかとなった。

## 文 献

大島伸介・来島知哉・宮島滋近・平野道夫・内島邦秀・

山田 正(1994)魚群探知機による網走湖の塩淡水境界層と網走川の塩水くさびの測定, 土木学会第21回関東支部技術発表会講演概要集, pp. 126-127, (株)土木学会関東支部編.

西村清和・安間恵・土屋洋一・松田滋夫・徳岡隆夫・井内美郎(1994)塩水くさび調査のための水中音響探査機の開発. LAGUNA(汽水域研究), 1: 1-9.  
福島久雄・八鍬 功・高橋 将(1971)石狩川河口における二, 三の問題 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 431-435

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くさびの検討(予報). 山陰地域研究(自然環境), 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(1994a)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.

徳岡隆夫・田村嘉之・西村清和・井内美郎・山内克典・小井土由光・坂本 享・松田滋夫・土屋洋一・安間恵(1994b)長良川の塩水くさび—音響探査機器の改良による塩分躍層のカラー表示—. 地質学雑誌 100(5) 口絵.