

塩分躍層 (塩水楔) 動態観測システムの開発

—汽水域の貧酸素水塊問題への貢献—

徳岡隆夫¹・三瓶良和¹・亀井健史¹・西村清和²・鈴木重教³・松田滋夫⁴
・久保田俊輔⁵・須崎 聡⁶・上野博芳⁷

**Development of long-term observation system for the study of halocline
(saline wedge) behaviour in brackish lakes and estuaries
- A contribution for the oxygen-poor water mass problem in coastal lagoons -**

**Takao Tokuoka¹, Yoshikazu Sampei¹, Takeshi Kamei¹, Kiyokazu Nishimura²,
Shigenori Suzuki³, Shigeo Matsuda⁴, Shunsuke Kubota⁵, Satoshi Suzaki⁶
and
Hiroyoshi Ueno⁷**

Abstract: The present writers' contributions for the development of a long-term observation system were briefly reviewed. The developed system consists of an acoustic observation system and a water bottom thermometry system using an optical fiber distributed sensor. The former measures acoustic reflection caused by the rapid change of acoustic impedance at the boundary of the halocline in water, and the latter detects movement of the lower part of the lake or river water by means of temperature change. The CT multi-sensor cable remodeled by XCTD probes for measurement of salinity and temperature has also been developed. Long-term observations using these equipments were successfully carried out in Lake Nakaumi, and River Gonokawa as well. The efficacy of applying this system for the observation of oxygen-poor water mass, especially in the case of its invasion to Lake Shinji via Ohasi River is proposed.

Key words: halocline, saline wedge, oxygen-poor water mass, coastal lagoon, tidal river

¹ 島根大総合理工学部

Faculty of Science and Technology, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

² 地質調査所海洋地質部

Marine Geology Department, Geological Survey of Japan

³ (株) 鶴見精機

The Tsurumi-Seiki Co. Ltd.

⁴ クローバテック (株)

Clovertech Inc.

⁵ (株) ワイ・オー・システム

Y.O.System Inc.

⁶ 千本電機 (株)

Senbon Denki Co. Ltd.

⁷ 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科

Japan Advanced Institute and Technology in Hokuriku

は じ め に

日本では、第二次世界大戦後、とりわけ1960年代以降の高度経済成長のなかでさまざまな開発事業が進められ、そのなかでもとくに汽水域・汽水湖の破壊が進んだ。一方で、1980年代以降になると、豊かな汽水域の自然環境とその存在が人類社会にとってかけがえのないものであることが知られるようになり、環境保全への意識が高まり、環境と開発の調和、持続可能な発展といった考え方が広がっていった。

1968年に本格的な工事が開始された中海・宍道湖の干拓・淡水化事業についても、このような視点からその是非を再考する段階にきている。中海干拓事業のなかで最大の事業である本庄工区の干陸については、これまで推進する立場であった農水省においても、干陸しての農地利用か、あるいは水域として残しての水産等での利用か、両面からの検討が進行中である。島根大学汽水域研究センターが開催した「本庄水域と中海・宍道湖」の討論会(1999. 1. 23)も、このような状況下で行われたものである。

ところで、汽水域の水産等への利用にあたっては、汽水域の特徴である塩分躍層の存在と、それによって引き起こされる底層水の貧酸素化の問題が考慮されねばならない。最近まとめられた島根県の中海・宍道湖水産振興計画においても、この問題が汽水域漁業の発展にとって不可欠のことであり、他の施策に先立って解決せねばならない問題とされている。

筆者らのグループは、これまで音波探査法の改良による汽水域の塩分躍層の探査法の開発を手始めとして、塩分躍層の連続観測システムの開発を行い、最近では河川における塩水楔の溯上についての長期連続観測システムをほぼ完成させた。この一連の開発研究のなかで、このシステムを用いて中海と宍道湖を繋ぐ大橋川で観測を行えば、高塩分層の通過を時空的かつ視覚的に捉えられるので、その宍道湖への流入予測に役立つのではないかと考えるに至った。また、高塩分層が貧酸素化しているかどうかの判定

については別の機器を併用する必要があるが、貧酸素化した高塩分層の通過を予測して、適当な場所でその貧酸素水塊を消失させる方法を講じることは生態系に好影響を与えるであろう。その結果、水質保全や水産振興にも寄与できることになる。この討論会ではこのような視点から筆者らのグループによってこれまでに行われてきた塩分躍層(塩水楔)の動態を把握するための観測機器の開発研究について紹介し、あわせて大橋川における若干の観測データをもとに貧酸素水塊の解消法の一つを提案した。上記の観測システムによる大橋川の調査はまだ行っていないが、この機会に各位の御批判を得たい。

音響による塩分躍層(塩水楔)探査装置の開発

1992, 1993年度に文部省科学研究費補助金(試験研究B)による「汽水域の塩水楔およびヘドロ層の音波探査法の開発」(代表者 徳岡隆夫)によって、既存の音波探査機(当時使用していたのは底質探査装置SH-20, 千本電機株式会社製)を改良して躍層を捉えることに成功した。一般に魚群探知機や測深機によって超音波散乱層がときに認められることは従来から良く知られていて、二つの層の間の音響インピーダンスの差によって反射面として捉えられる。水質測定をすると、中海においてこのような反射面が認められる水深で塩分(および温度)が急変することから、音響的に塩分躍層(塩水楔)が捉えられるのではないかとこの予測により、機器の開発が進められた(徳岡ほか, 1993)。

その後、千本電機株式会社製の101型測深機に改良を加え、また、アナログ探査記録をデジタル収録する装置を完成させることによって「塩水楔探査システム」(千本電機株式会社により製品化)を完成させた(西村ほか, 1994)。これを用いて宍道湖・中海での塩分躍層探査を行い、よい結果を得た(徳岡ほか, 1994)。図1はその例で、大橋川から高塩分層が宍道

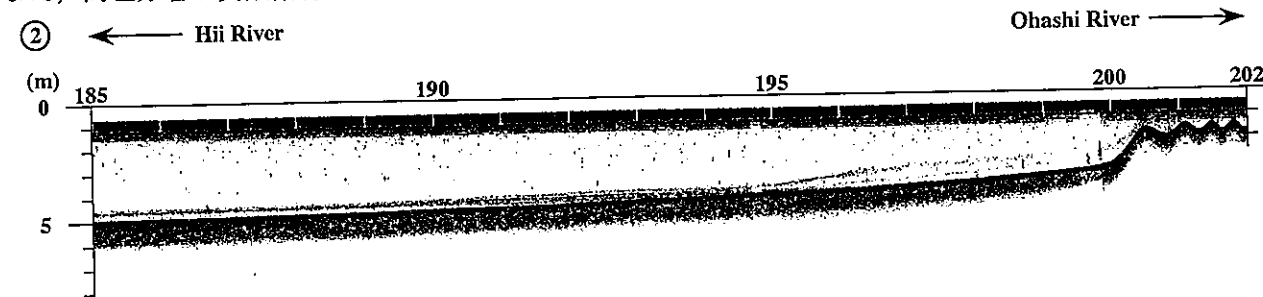


図1. 曳航式の音波探査による宍道湖の塩分躍層の観測例(1993.10.19)(徳岡ほか, 1994).
Fig. 1. Halocline in Lake Shinji by Echo-sounding survey equipped on a boat (October 19, 1993) (Tokuoka et al., 1994).

941105-1

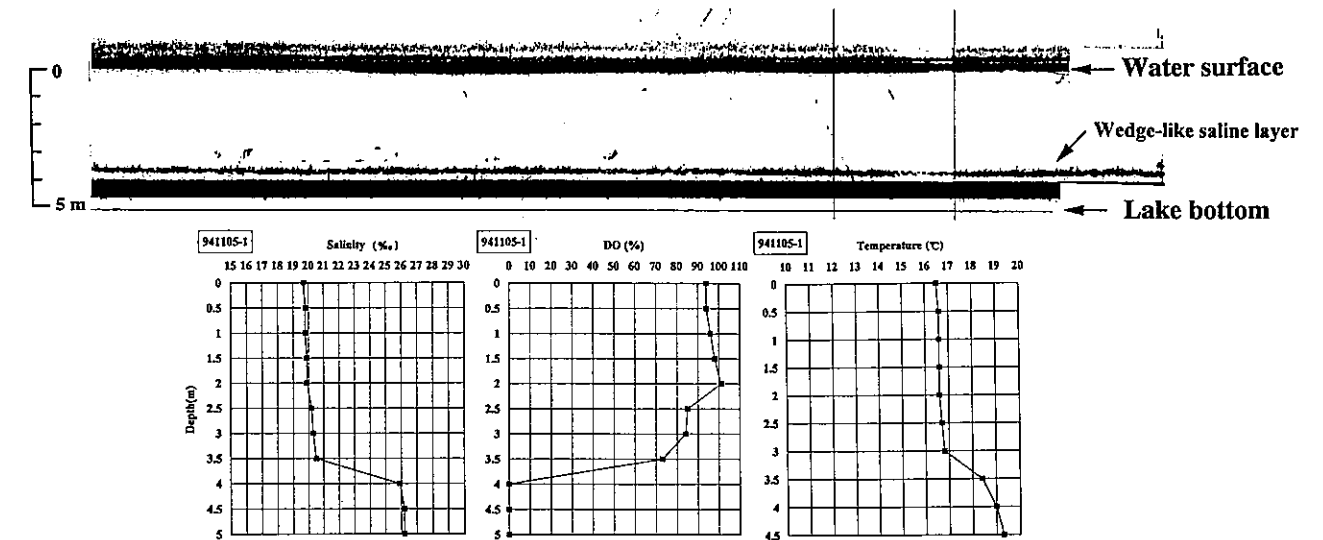


図2. 湖底設置型塩分躍層探査装置による941104-6地点における塩分躍層と同地点での塩分、溶存酸素および温度の垂直分布(徳岡ほか, 1995).

Fig.2. Echo-sounding record by the system fixed on the lake bottom at the survey point 941104-6, and the profiles of salinity, dissolved oxygen and temperature (Tokuoka et al., 1995).

湖にはいり込み、塩分躍層が形成されている状況を示している。

塩分躍層動態観測システムの開発

上記の研究を継承して、1994, 1995年度には文部省科学研究費補助金(試験研究B)による「音響トモグラフィを利用した汽水域塩分躍層の動態観測システムの開発」(代表者 徳岡隆夫)が行われ、上記で開発した機器をもとにして、水底設置型の探査装置を完成させた(徳岡ほか, 1995)。送受波器を水底に設置して水面に向けて音波を発信し、反射波を検出する方法はInverted Echo Sounderと呼ばれていて従来から知られているが、舟上からの探査に比べてより安定した記録が得られ、さらに天候に左右されずに記録を連続的に得られることになり、塩分躍層の動態観測に大きな進歩がもたらされた。徳岡ほか(1995)で報告された大橋川の流出口に近い中海での記録を図2に示す。その後、この装置に加えてYOシステム株式会社による光ファイバ分布型温度計を併用し、またこれらに合わせて流向流速計や水温計を使用して塩分躍層の動態を連続観測するシステムを完成させ、中海湖心と大根島入江沖での観測を行い、風によって塩分躍層が振動や移動する状況を連続的に捉えることに成功した(徳岡ほか, 1996; 西村・松

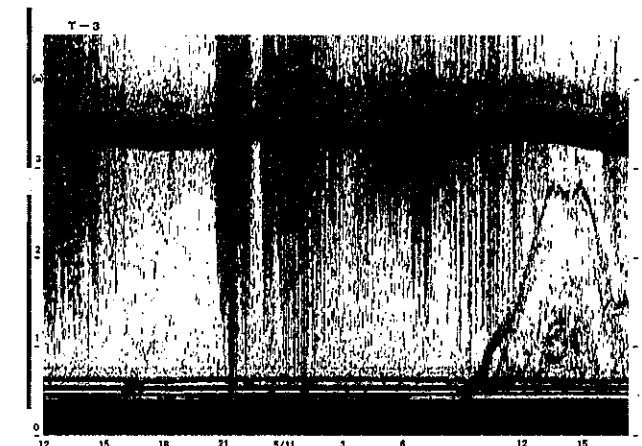


図3. 「強風時」1995年5月10-11日の大根島入江T-3地点における音響画像(徳岡ほか, 1996).
Fig.3. Strong windy day Graphics of the time series data of acoustic profile at the margin of Nakumi (Nyuko harbor, Daikon-Island) T-3, May 10-11, 1995 (Tokuoka et al., 1996).

林, 1996)。

大根島入江における観測例を図3に示す。この例では風速12m/s以上の強風が続くと、入江の南の3mより浅い沿岸部には中海湖心の方から高塩分層が這い上がってくることで、その進入速度は5~10cm/s、後退速度は4~7cm/sであることが明らかにされた。図4はその状況を模式的に示したものである。本システ

ムを実用化することによって、貧酸素化した高塩分層の沿岸部への溯上を予報することが可能である。

塩水溯上の長期連続観測システムの開発 —江ノ川での観測—

地中海で開発された観測システムは河口域の塩水楔にもそのまま適用が可能であることから、1997、1998年度には、これをもとにして江ノ川の塩水楔を対象に塩水溯上の長期連続観測を河川整備基金および建設省中国地方建設局浜田工事事務所の支援のもとに行った。使用した機器は、以下のとおりである。

- (1) 塩水楔音響探査システム（曳航式）
千本電気（株）により開発した従来のSC-1型を音響的に改良し、バッテリー内蔵として携帯に便利なSC-3型を試作した。これによって淡塩境界を、より鮮明に捉えることができたようになった。アナログ記録のデジタル化も可能である。
- (2) 塩水楔音響探査システム SC-2型（川床設置オンライン式）
- (3) 千本電気（株）により開発した塩水楔音響探査システム CL-1, 2型（川床設置オフライン式）
設置場所の制約を受けずに観測が可能のように、バッテリー内蔵の機器をクローバテック株式会社により開発した。
- (4) 光ファイバ式温度分布計測システム DTS80型（株）ワイ・オー・システムによるもので、光ファイバーにより1mごとの温度の連続観測ができる。
- (5) マルチCTセンサ
XCTD（Expendable Conductivity, Temperature & Depth Profiling System, 鶴見精機製）をもとに、水底設置型の機器として新たに開発されたものである（西村ほか、1999）。延長700mのケーブルに温度・電気伝導度センサ5個を付け、水温と塩分を連続測定する仕様になっている。
- (6) 流向流速計および水温計
既存の機器を使用して観測。

これらを江ノ川の河口から3.4、5.5、7.4km地点を基点として設置し、3回の長期連続観測を行った（徳岡ほか、1998、1999）。(1) および (2) による観測例を図5、6に示す。前者では塩水楔の侵入状況が、後者では設置地点を溯上する塩水が通過し、また降下する状況が時系列で、捉えられている。(4) では、これにより河床を這い上がり、あるいは後退する塩水

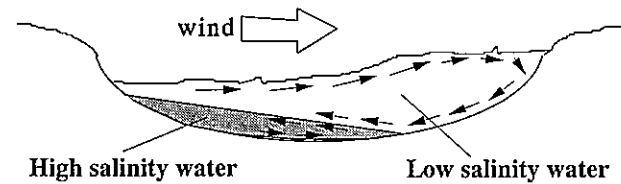


図4. 地中海における下層高塩分層の動きと関係した概念（徳岡ほか、1996）。

Fig.4. Schematic illustration of the relationship between the behavior of high salinity water in lake Nakami and wind (Tokuoka et al., 1996).

塊の速度を知ることができる（図7）。このシステムによって、従来は地点ごとに水質の垂直分布を観測することによってしか表現することのできなかった塩水楔の動態を時空間的かつ視覚的に捉えることが可能になった。

汽水域の貧酸素水塊問題への貢献 —大橋川から宍道湖への高塩分水塊（貧酸素水塊）の流入を捉える可能性—

大橋川から宍道湖への高塩分層（貧酸素水塊）の流入については宍道湖の漁業や水質の保全と密接な関係があり、これまでに建設省中国地方建設局出雲工事事務所、島根県内水面水産試験場により多くの調査がなされてきている。また橋谷ほか（1991）は気象との関係について指摘し、Fujii（1997）は中立ブイを用いた地中海での観測から、大橋川を経て宍道湖への流入について言及している。本研究グループは上記の（5）のマルチCTセンサを使用して大橋川（矢田の渡し西）で、センサ5つを川の横断面にそって水深（上から0.5、2.1、2.9、4.0、5.8m）ごとに設置して観測を行った（図8）。大橋川を溯上あるいは降下する高塩分層は宍道湖からの流出量、気圧、風、潮汐の総合的な作用によって決まるが、この観測結果からは、1) 地中海からの高塩分水の流入は間欠的であること、2) 流入時の温度・電気伝導度・塩分の変化傾向をみると、流入する高塩分層の水頭はかなり高いこと（厚い淡水層の下位に底を這うようにして流入するのではない）がわかる。

1998年4月から島根県内水面水産試験場は宍道湖に近い松江大橋において上・中・下の3層での水質の連続測定を開始し、リアルタイムでの水質情報の公開を始めた。両地点での上記の期間中の水深ごとの温度・塩分の時空間的变化を図版Iに示す。両者を比較すると、上記の1) と2) が裏付けられるとともに、

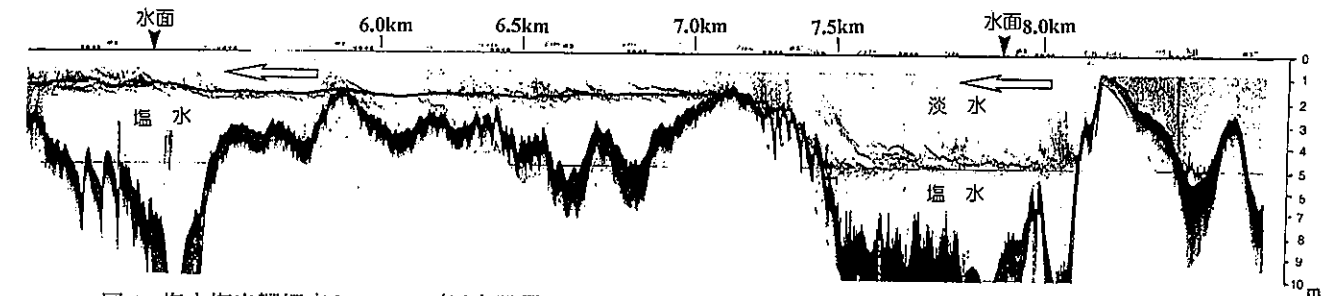


図5. 塩水楔音響探査システム（川床設置オンライン式、SC-3型、千本電気株式会社製）による江の川における塩水楔の観測例（徳岡ほか、1999）。

Fig.5. Saline water wedge at R. Gonokawa observed by echo-sounding system (SC-3, Senbon Denki Co.Ltd.) (Tokuoka et al., 1999).

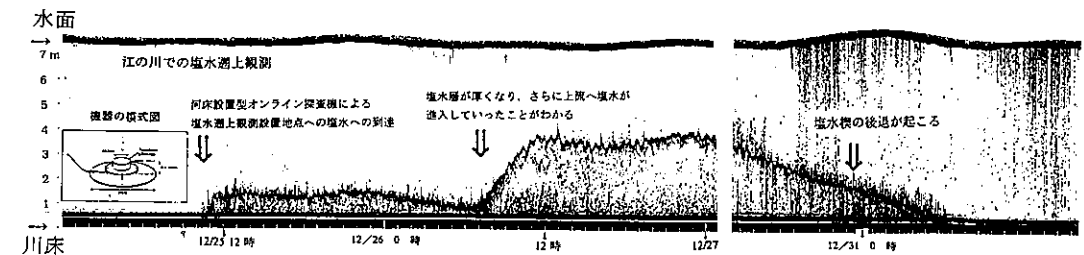


図6. 塩水楔音響探査システム（川床設置オンライン式、SC-2型、千本電気株式会社製）による塩水溯上観測（徳岡ほか、1998）。

Fig.6. Saline water invasion at R. Gonokawa observed by echo-sounding system (SC-2, Senbon Denki Co.Ltd.) (Tokuoka et al., 1998).

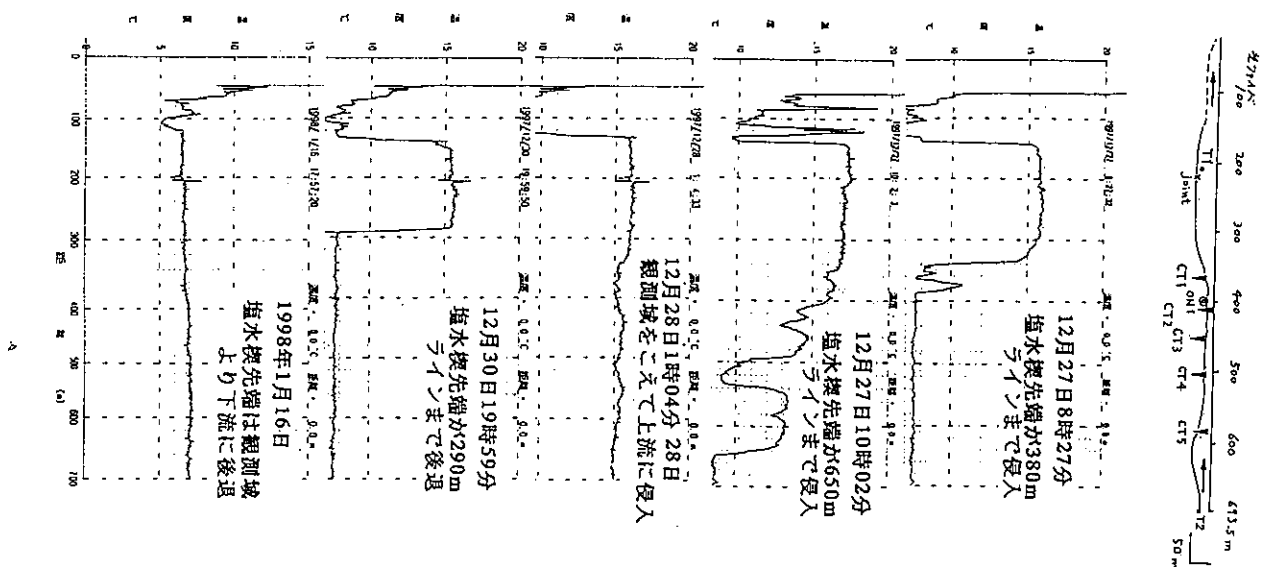


図7. 江の川における光ファイバ敷設範囲の川底地形と光ファイバによる川底温度分布状況（徳岡ほか、1998）。

Fig.7. Saline water invasion indicated by the time series data of temperature at R. Gonokawa on the basis of the optical fiber cable system (Y.O.System Co. Ltd) (Tokuoka et al., 1998).

観測地点まで流入した高塩分水塊17回のうち、6回のみが松江大橋まで到達し、それ以外の高塩分水塊はその途中で降下したことがわかる。塩水楔探査システムおよび光ファイバ分布型温度計による大橋川での観測はまだ行われていないが、これらを併用すれば、

溯上の状況を詳細に明らかにすることが可能である。

最後に、塩桶島付近における河床の縦断地形を図9Aに示す。塩桶島はその名の通り、古来から中海と宍道湖の境に位置しており（中村ほか、1996）、現

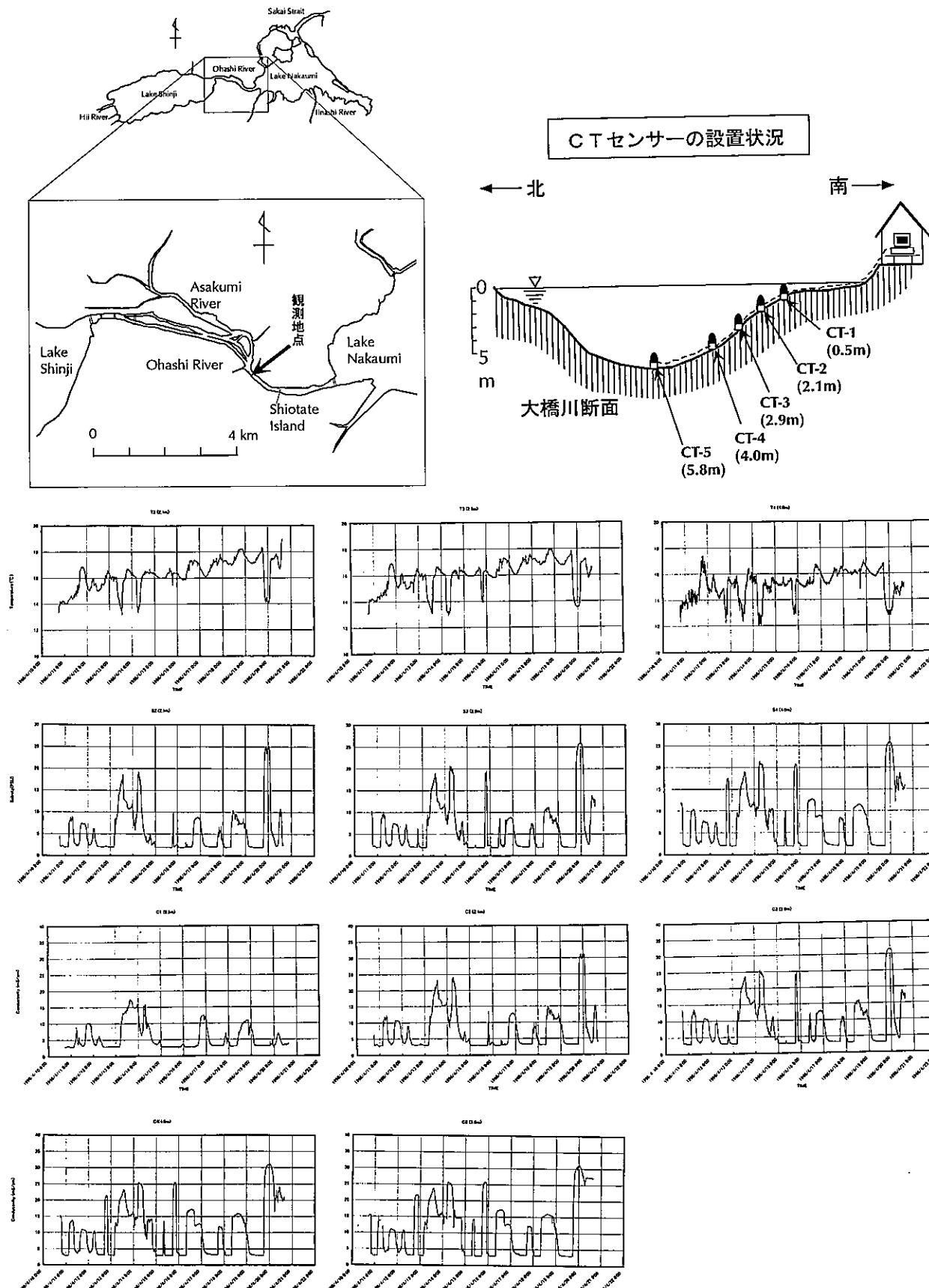


図8. 大橋川矢田の渡し西地点におけるマルチCTセンサ(鶴見精機株式会社)による水温・電気伝導度・塩分の深度ごとの連続測定(1998.4.10~4.21).

Fig.8. Time series data of water temperature, conductivity and salinity (April 10-20, 1998) at Oohashi River (west of Yatanowatashi) by the Mult-CT sensor (The Tsurumi-Seiki Co., Ltd.).

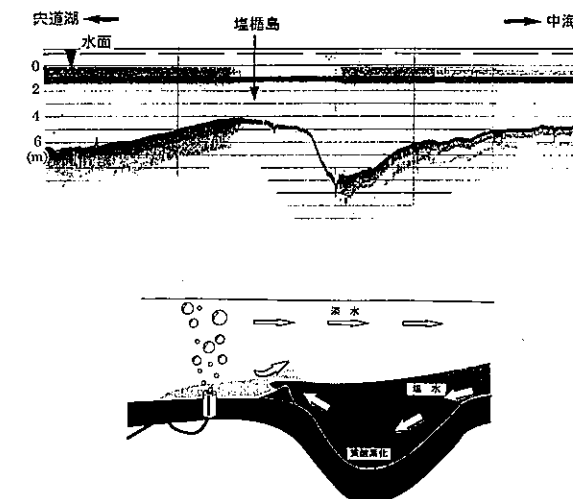


図9. 大橋川、塩橋島付近の河床地形(上)と湖上する貧酸素水塊の解消案のイメージ(下).

Fig. 9. Bottom topography of Ohashi River near the Shiotate-shima (top) and an idea to disseminate oxygen-poor water mass (bottom).

在でも中海と宍道湖の生物相の境界をなしている。島の下流側には深みがある。江ノ川では深みの手前では上を流れる淡水によって下位の塩水が引き剥がされる現象(連行)が認められるが(図5), この辺りにおいても同様の現象が起ることが予測される。図9Bに示すように, このような地形的条件を利用し, さらに曝気などの方法を併用すれば, 宍道湖へ流入する貧(無)酸素水塊をより効果的に解消あるいは減少させることが可能となる。

謝辞: 音響を利用した塩分躍層の動態観測については, 初期の研究に参加された川崎地質株式会社の安間 恵博士, 地質調査所の井内美郎博士(現愛媛大学教授)の御指導と御協力によるところが大きい。大橋川での観測にあたっては株式会社シマダ技術コンサルタントに観測場所を提供していただき, 便宜をはかっていただいた。島根県内水面水産試験場には本年4月から開始された大橋川の水質情報の提供を受けた。これらの各位と諸機関にお礼申し上げます。

文 献

Fujii, T. (1997) Relationship of Internal Waves with Tide

and Wind Drift Effects and Propagation of Internal Kelvin Waves in Brackish Lake Nakaumi. *Jpn. J. Limnol.*, 58, 241-260.

橋谷 博・奥村 稔・藤永 薫・近藤邦男・清家泰 (1991) 宍道湖への塩分の流入. 山陰地域研究(自然環境), 7: 83-92.

中村唯史・徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・高安克巳・竹広文明・会下和宏・西尾克巳・渡辺正巳 (1996) 島根県東部の完新世環境変遷と低湿地遺跡. LAGUNA (汽水域研究), 3: 9-11, 口絵1~8.

西村清和・安間恵・土屋洋一・松田滋夫・徳岡隆夫・井内美郎 (1994) 塩水楔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.

西村清和・松林 修 (1996) 光ファイバ分布型温度センサの海洋および湖沼調査への適用. 海洋調査技術, 8: 17-31.

西村清和・鈴木重教・徳岡隆夫 (1999) 多点型CTセンサケーブル測定システムの開発と汽水域での塩分・温度観測実験. 海洋理工学雑誌, 4, 1: 1-14.

徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村芳之・高安克巳・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.

徳岡隆夫・三瓶良和・亀井健史・玉里圭太郎・西村清和・松田滋夫・須崎聡 (1996) 汽水湖中海における塩分躍層動態の長期観測. LAGUNA (汽水域研究), 3: 73-90.

徳岡隆夫・三瓶良和・亀井健史・西村清和・須崎 聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教 (1998) 江ノ川の塩水楔—塩水湖上の長期連続観測システムの開発—(予報). LAGUNA (汽水域研究), 5: 197-208.

徳岡隆夫・三瓶良和・上野博芳・西村清和・須崎 聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教 (1999) 江ノ川の塩水楔—塩水湖上の長期連続観測システムの開発—(渇水期潮上例, 1998年12月~1999年2月). LAGUNA (汽水域研究), 6, 233-254.

徳岡隆夫・高安克巳・三瓶良和・瀬戸浩二・井内美郎・安間恵・須崎聡・松田滋夫・山中 正 (1995) 汽水域塩分躍層の動態長期観測システムの開発 (予報). LAGUNA (汽水域研究), 2: 21-27.

図版 I. 大橋川, 矢田の渡し(上)および松江大橋(下)での水深ごとの水温・塩分の時系列変化 (1998 年 4 月 10 日~21 日, 前者は本論文, 後者は鳥根県内水面水産試験場のデータによる)

