

汽水域の水の動きをしらべる

西村 清和¹⁾・徳岡 隆夫²⁾

1. はじめに

2000年10月の山陰地質情報展の宍道湖・中海のコーナーでは、「中海湖底下の地質と水環境」をメインタイトルに汽水湖中海を中心としたポスターの展示を地質調査所、島根大学共同で行いました。ポスターのタイトルは次の通りです。

(1) 音波で中海湖底下の地質をしらべる。

(その1) 中海調査で使用した地層探査機器, (その2) 湖底下に広がる大根島火山, (その3) 湖底下に活断層は存在するか?

(2) 汽水域の水の動きをしらべる。

(その1) これまでに開発した観測機器, (その2) 中海での塩分躍層の観測, (その3) 大橋川の高塩分水塊の観測。

このようにポスターの内容は多岐にわたりますが、ここでは汽水域の水環境観測を中心にご紹介いたします。これらは島根大学、地質調査所およびメーカー各社による「塩水楔観測システム研究開発グループ: 徳岡隆夫(島根大学総合理工学部)・三瓶良和(同)・西村清和(地質調査所)・須崎 聡(千本電機(株))・松田滋夫(クローバテック(株))・久保田俊輔((株)ワイ・オー・システム)・鈴木重教((株)鶴見精機)・上野博芳(北陸先端科学技術大学院大学)」によって1992年以来実施してきた汽水域の水環境観測のための各種機器の開発およびそれを使用した中海、宍道湖および大橋川における観測・データ解析の成果です。

2. これまでに開発した観測機器

2.1 汽水域での観測の意義と機器開発

陸と海の接点に存在する汽水域はどこでも数千年の歴史を経て成立したもので、そこには環境変化の試練を受けた豊かな生態系がみられます。山陰地方の汽水域として宍道湖、中海、それらをつなぐ大橋川があります。淡水と塩水の二層構造は汽水域の特徴で、その分布や移動方向などを知るとは、汽水域の環境保全および将来予測に重要です。例えば、塩水の流動により良好な水底環境が生じる一方で、酸素が消費された貧酸素水塊が漁場へ侵入して魚介類が死滅するなどの被害が生じます。またグローバルな環境問題に目を向けた場合、地球温暖化による海面上昇の影響が汽水域へ顕著に現れるので、汽水域は地球環境研究のモニタリングポストとしてふさわしい場所と言えます。近年、こうした汽水域における水の挙動を定量的かつ時系列的に把握することが急務となってきていますが、従来の観測方法は地点毎の水質(主に塩分)の測定のみであり、その実際の挙動をとらえることは困難でした。そこで私たちのグループは、8年前から、音波、光ファイバ温度センサ、高精度の塩分・温度センサ等を用い、広範囲・長期連続測定可能な観測機器を新たに開発し、観測を行い、水環境の保全や創造のために必要な基礎的データの取得を行っています。

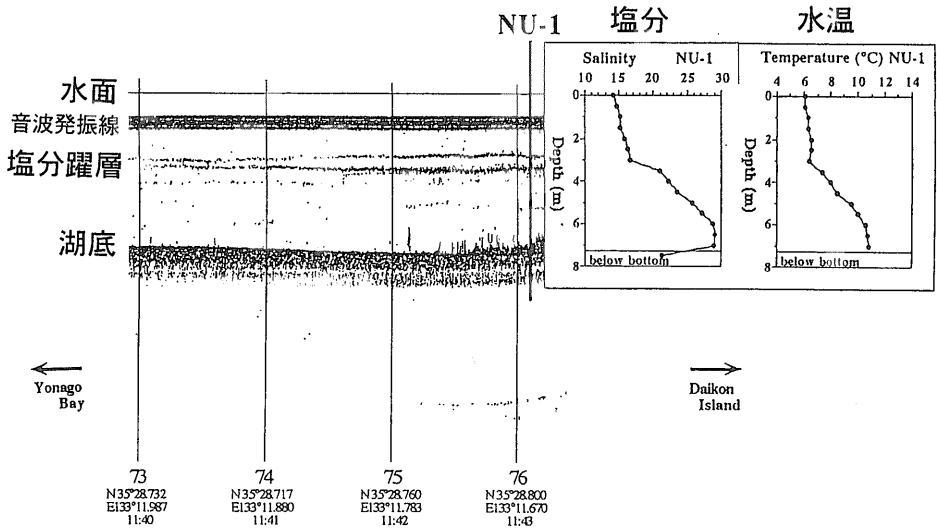
2.2 汽水域で起こる現象

汽水域では塩水と淡水(または高塩分水と低塩分水)の密度差から、両者が容易に混じり合わず、その境目に、塩分が急激に変化する塩分躍層が生じます。これに超音波を当てると魚群探知器が魚をとらえるのと同じように強い反射が生じます(第1図)。塩分の急変するところでは、水の音響インピ

1) 産業技術総合研究所 海洋資源環境研究部門

2) 島根大学総合理工学部

キーワード: 汽水域, 塩分躍層, 観測機器, 中海・宍道湖・大橋川, 水環境



第1図 音響探査で生じる塩分躍層と塩分・水温の実測値(中海).

ーダンス(密度×速度)が急変するからです。この測定原理を利用して塩分躍層の分布や塩水層の層厚を調べることができます。また海水が流入する河川(感潮河川)では上流に遡上した海水の先端部(これを塩水楔くまびといいます)を超音波で同様にとらえることができます。このようにして、塩水楔(塩分躍層)音響プロファイリングシステムと塩水楔(塩分躍層)音響動態観測システムが生まれました。

塩水と淡水では塩分が大きく違いますが、水温を測ってみると、やはり違ってきます。しかも塩分が急変するところで水温も急変します。このことは、水温を測れば、ある程度塩分を推定できることを意味し、水底で水温を連続的に測れば、塩水、淡水の流動を捉えることができます。光ファイバ式温度分布計測システムはこれを応用し、塩水塊の分布や動きを観測します。

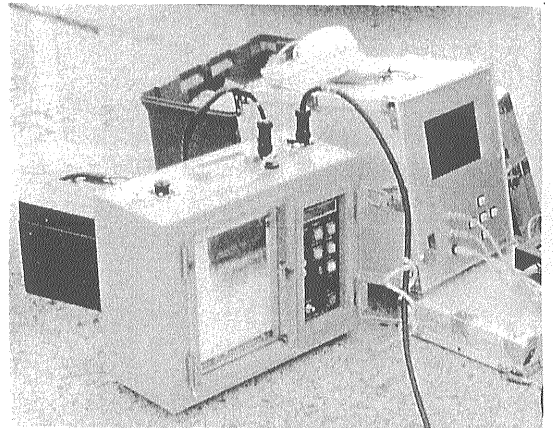
2.3 新たに開発した観測機器

(1) 塩水楔音響プロファイリングシステム(航走式, SC-3型)

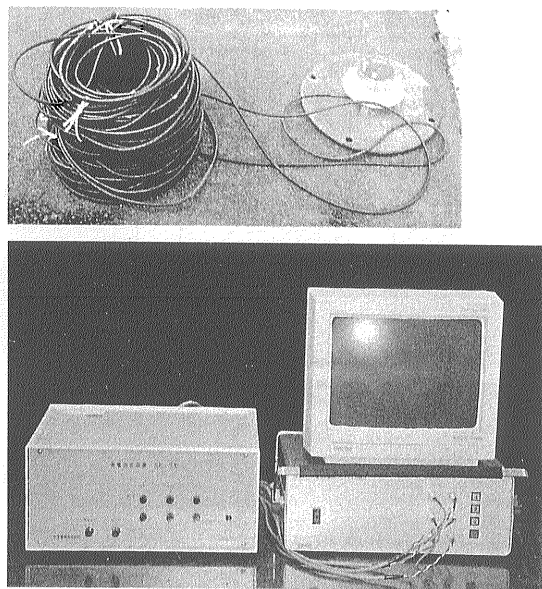
航走しながら200kHzの超音波を水面から水底に向かって発信し、塩分躍層で生じる反射波を受信し、塩分躍層の分布、形状を記録断面として捉えることができます。反射信号はデジタル化されデータ収録器に記録されます(第2図)。大橋川での記録例を口絵(8ページ)に示します。

(2) 塩水楔音響動態観測システム(オンライン式, SC-2型, オフライン式, CL-3型)

200kHzの超音波を発信する送受波器を水底に固定し、水面に向かって音波を発信します。塩分躍層で生じる反射波を連続的に記録し、時間、空間的な動態を捉えます。オンライン方式の装置では、送受波器は3台あり、最長400mのケーブルで陸上の記録部に接続され、リアルタイムの測定が可能です(第3図, 第4図)。第9図, 第13-14図に記録例を示します。またオフライン方式の装置はバッテリー駆動ですので、設置場所がフリーとなる利点があります。



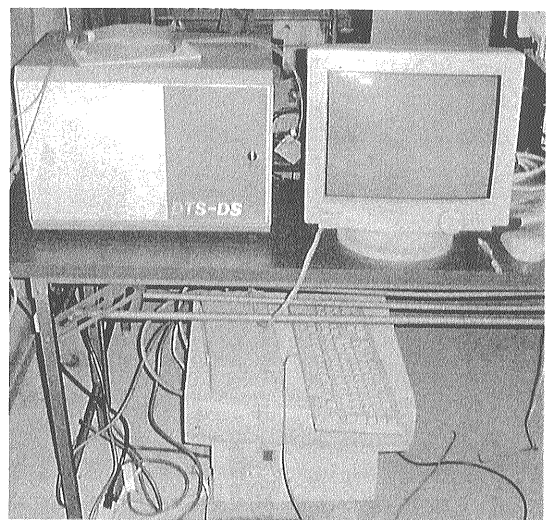
第2図 塩水楔音響プロファイリングシステム(SC-3型)の外観(左: 本体, 右: デジタル記録器)。



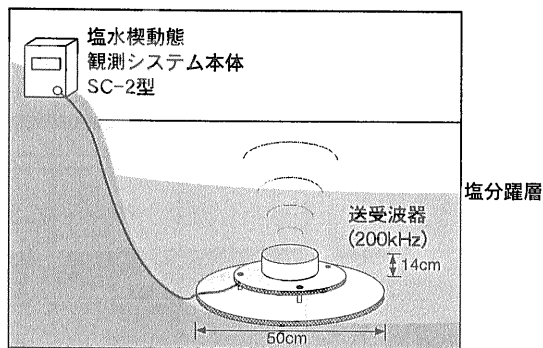
第3図 塩水楔音響動態観測システム(SC-2型)の外観(左下:本体, 右下:デジタル記録器)および送受波器, ケーブル(上).

(3) 光ファイバ式温度分布計測システム(DTS-80型)

光ファイバケーブル自体を温度センサとして利用する温度計(光ファイバ分布型温度センサ)です(第5図). 光ファイバケーブルの全長は最大4kmで, 1m間隔で4,000点のケーブルに沿った温度分布が得られます. 温度精度は±0.2℃程度です.



第5図 光ファイバ式温度分布計測システム(DTS-80型)の外観.

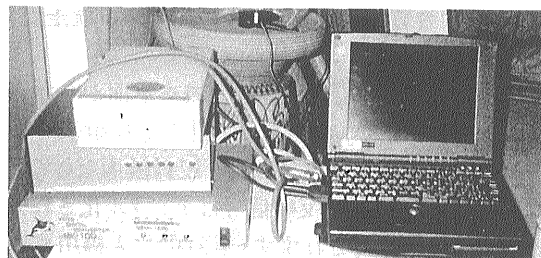
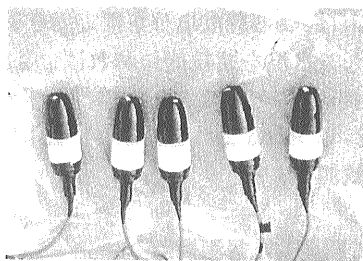


第4図 塩水楔音響動態観測システムの設置.

汽水域の湖や河川では淡水と塩水に温度差があり, 水温の変化を捉えることにより塩水塊の分布や動きを知ることができます. 第10図に記録例を示します.

(4) マルチCTセンサ水温・塩分測定システム(MCTH-2型)

海洋での水温・塩分測定用の投下式測器であるXCTD (Expendable Conductivity, Temperature and Depth Profiling System) をベースにして, 湖底や川床の温度, 電気伝導度(塩分)を広範囲に測定できるようにした測定システムです(第6図). XCTDプローブを改造したCTセンサを100m間隔で5個つなぎ, 湖底の近くの塩分と水温を高精度に連続的(5分毎)に測定できます. 記録例を第15図に示します.



第6図 マルチCTセンサ温度塩分計測システム(MCTH-2型)の外観(下)およびCTセンサ(上).

3. 中海での塩分躍層の観測

3.1 はじめに

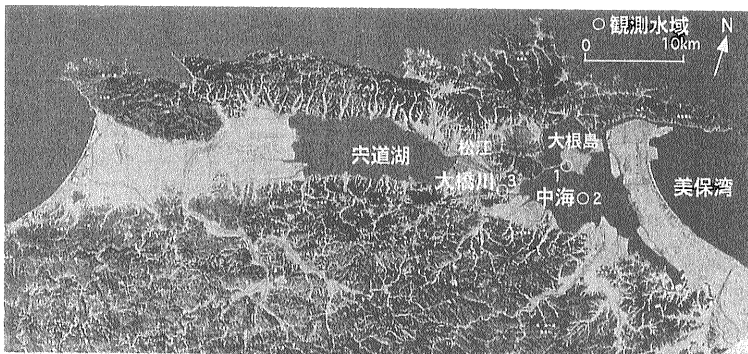
汽水湖では塩分層(または高塩分層)が下に、淡水層(または低塩分層)が上に重なり、その間に塩分が急変する塩分躍層ができています。これは2つの層の密度差から起こることで、なかなか混じり合いません。特に夏になって上層の水温が高くなると、密度差はさらに大きくなるので、下の高塩分層は底のほうに停滞し、有機物の分解や生物によって含まれている酸素がしだいに減っていき、貧(無)酸素の高塩分水塊を生じさせ、このような還元的な環境下では、湖底からのリンの溶出をもたらすなどして水質を悪化させます。また、この水塊が潮位・気圧・風の吹き方によって湖の底を這うように移動することが宍道湖・中海のコンシロやヤマトシジミの大量死と関係があるのではないかと考えられています。

これまで塩分躍層は船上から水質計を降ろして水質(塩分)を測定することによって行われてきました。しかし、この方法だと、天気が悪い時には観測ができません。詳しくデータをとろうとすると、観測点や観測の回数を増やさなければならず、経費もたくさんかかることになります。私たちの研究グループは、第2章で述べた観測機器を湖底に設置して塩分躍層の動きを昼夜を問わず、また天候にとらわれずにその動きを連続的にとらえる方法を開発しました。これによって、中海では強い風が長時間にわたって吹くと塩分水塊が移動を始め、陸に近い湖棚にはい上がってくる現象や、台風のような強風で湖が荒れた時には塩分躍層は消失するのでは

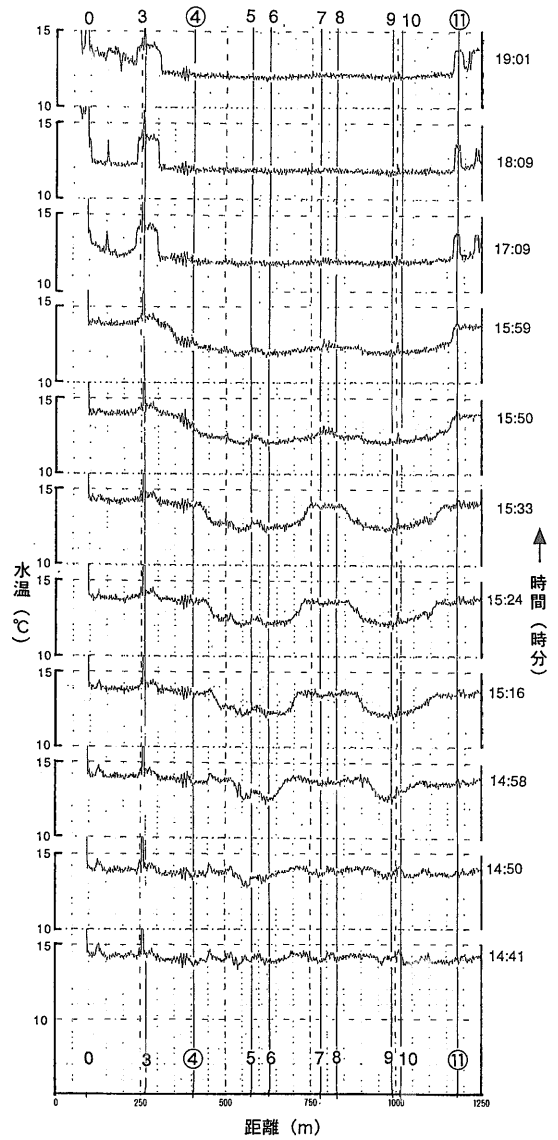
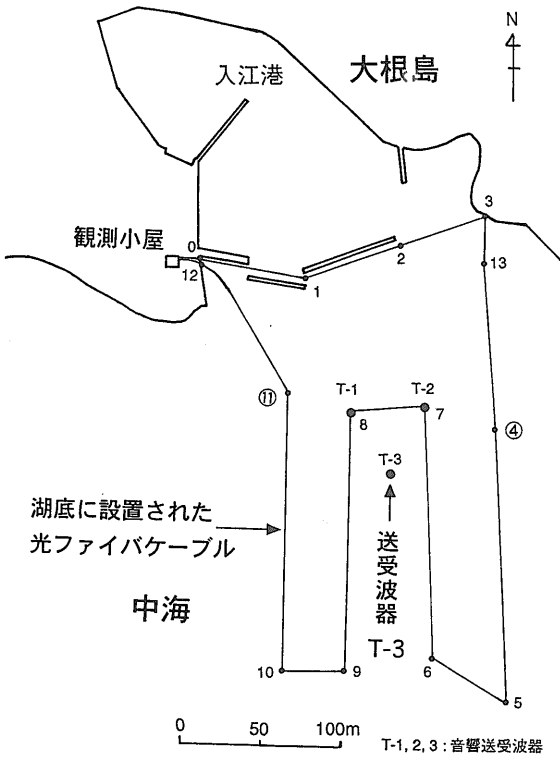
なく、大きく振動して、風が弱まるとまたもとに戻るといった驚くべき現象が明らかになっています。以下に中海大根島湖岸付近(第7図、観測水域1)および中海湖心付近(第7図、観測水域2)での観測結果をご紹介します。

3.2 強い風が吹くと高塩分水塊が湖棚へはい上がってくる(大根島入江での観測例 1995年5月)。

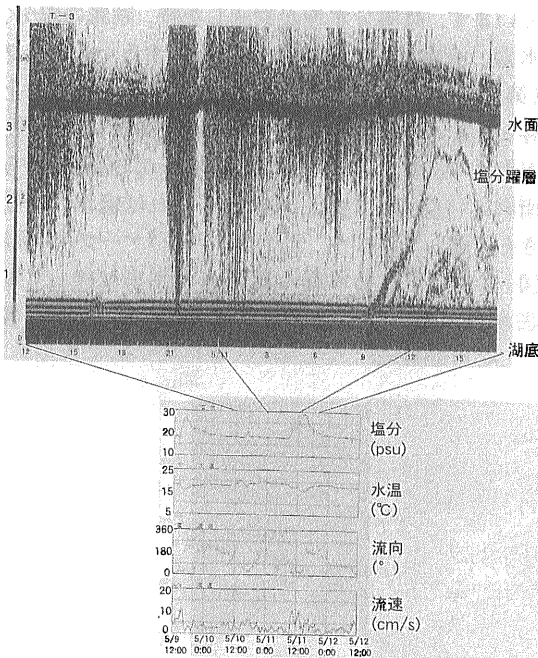
中海の大根島入江港の沖合約200m先に塩水楔音響動態観測システムの送受波器3台を設置しました。送受波器を設置した場所の水深は3.5m程度で、通常、水面から湖底まで低塩分力で満たされており、塩分躍層は存在していません。水温、塩分、塩分層の動きを把握するため、温度塩分センサを備えた流向流速計や光ファイバ分布型温度センサも同時に湖底に設置しました(第8図)。観測データの中で、典型的な塩分躍層の現れた音響画像断面(送受波器T-3)を第9図に示しました。この記録では、5月11日8時頃から送受波器T-3付近に沖合いから高塩分水塊が到来し12時~14時には水面下約50cmまで塩分躍層が上昇したことを示しています。高塩分水塊が到来した時、湖底の塩分、水温、流向流速はどのように変化するかをグラフ(第9図)に示しました。音響記録の塩分躍層の上昇と、塩分の上昇、水温の低下が相関していることがわかります。また、流向は北向き(0, 360度)から南向き(180度)に変化しますが、これは塩分水塊の動きを反映しています。また光ファイバケーブル(第8図)には、高塩分水塊の湖岸への到来に伴って湖底水温が低下する様子が光ファイバケーブルの各



第7図 中海・大橋川・宍道湖(白丸マークは観測水域)。



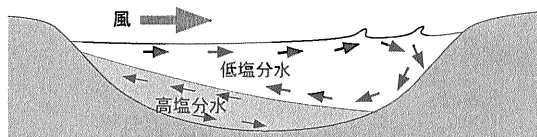
第10図 光ファイバ分布型温度センサによる湖底水分分布とその時系列変化(中海大根島入江湖岸)。



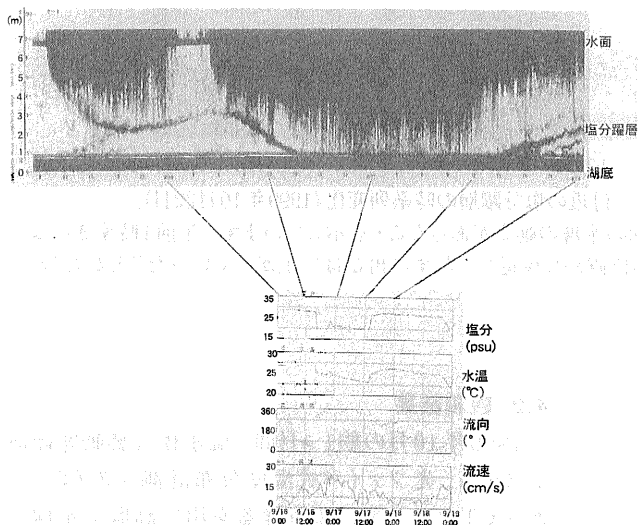
第9図 音響動態視測システムによる強風時の大根島入江における音響画像(上図)および温度塩分センサ付き流向流速計による塩分、水温、流向、流速の時系列変化(下図)。

地点で検知されています(第10図)。光ファイバケーブルの南端から順次水温が低下して低温の高塩分水でみだされることがわかります。

この長期観測により、湖岸付近では、主に強風(観測域付近では西風)が吹いた後、湖水下層の高塩分水塊が湖岸(湖棚)に到来することがわかりました(第11図)。



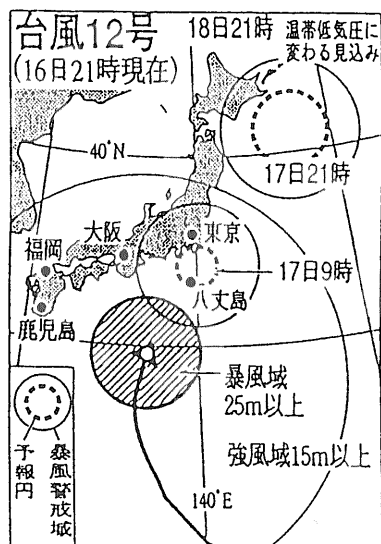
第11図 強風による湖水の流動.



第13図 音響動態観測システムによる強風時の中海中心部における音響画像(上図)および温度塩分センサ付き流向流速計による塩分、水温、流向、流速の時系列変化(下図).

3.3 台風るとき、塩分躍層は消失されずに大きく振動する(中海中心部での観測例 1995年9月)

中海の湖心に設置された建設省(現国土交通省)中海湖心観測所を中心に、音響送受波器3台、光ファイバ分布型温度センサ、流向流速計、小型サーミスタ水温計を湖底に設置し、長期観測を行いました。観測水域の水深は6.5m程度で、通常、水面下3m付近に塩分躍層が存在しますが、天候により塩分躍層と湖水の動態は大きく変化することがわかりました。1995年9月15-17日の大型台風12号(第12図)が接近したときの塩分躍層動態観測の記録を示します(第13図)。台風12号の接近により、風が強まり、それに従い、水中に音響ノイズが現れ、音響反射面(塩分躍層)が下降して行きました。9月16日23時には風速15.7m/sに達し、それとともに反射面も湖底に達したものと思われます。同時観測の湖底の塩分測定結果では、塩分が急激に低下しています。これは下層の高塩分層がこの



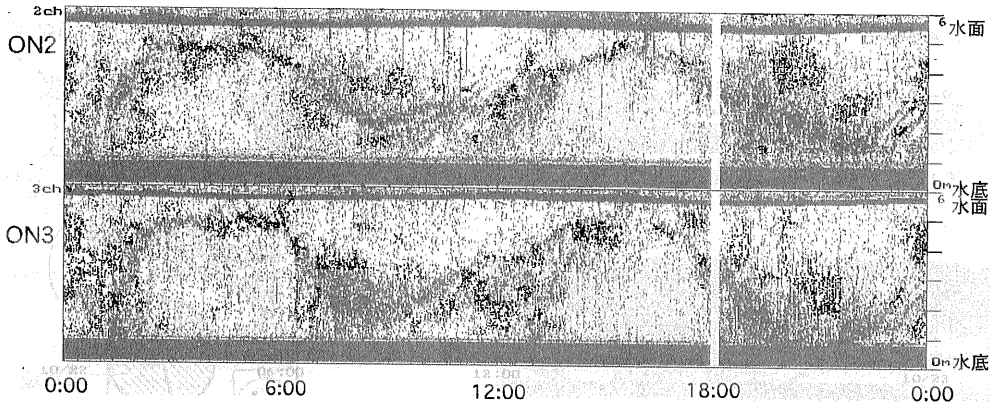
第12図 台風12号の接近(1995年9月16日).

付近から移動し、上層の低塩分水が湖底まで満たされたことを示しています。また光ファイバ分布型温度センサは、温度の高い高塩分水塊が戻ってきた時の温度変化を刻々と記録しています。

4. 大橋川の高塩分水塊の観測

4.1 はじめに

汽水湖中海では下層の高塩分層と上層の低塩分層の間に塩分躍層があります。これは境水道から中浦水門を経て入ってくる海水と斐伊川→宍道湖→大橋川を経て中海に入ってくる水塊が密度差からたやすくは混じり合わないことから起こります。湖底付近の高塩分水はとくに夏場には停滞して貧(無)酸素化し、気象条件によっては大橋川を溯上して、宍道湖にまで入りこみます。大橋川を生活の場としている漁師は、「川底を這うように澄んだ、冷たい水が上がってくるのがそれだ!」と言っています。この水には魚はおらず、この水が上がってくるとまったく魚にならないとのこと。私たちは大橋川の高塩分水塊の動きを調べるため、第2章で述べた観測機器を大橋川の矢田の渡し付近(第7図、観測水域3)に設置して観測を行いました。



第14図 音響動態観測システムによる大橋川矢田の渡し付近の塩分躍層の時系列変化(1999年10月22日)。
川床に設置した2つの送受波器が同様に2回の水塊の動きがあったことを示しています。午前1時すぎにはい上がった水塊は昼前に後退しましたが、この位置から後退しきれずに再びはい上がっていったことがよくわかります。

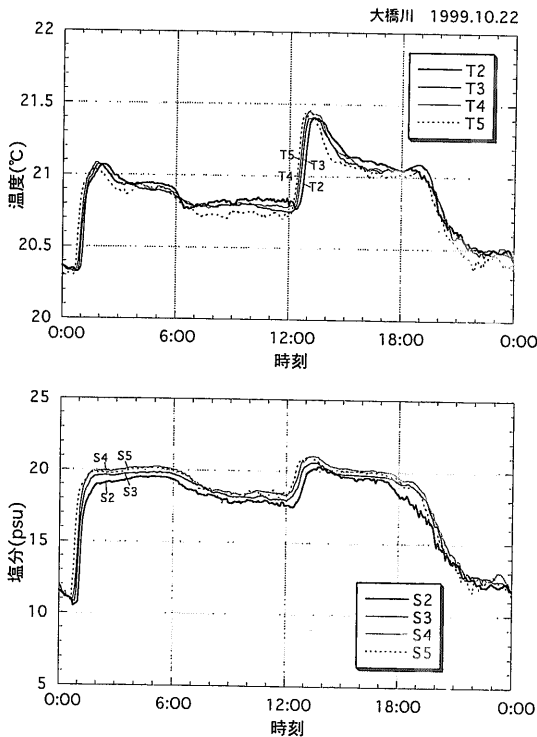


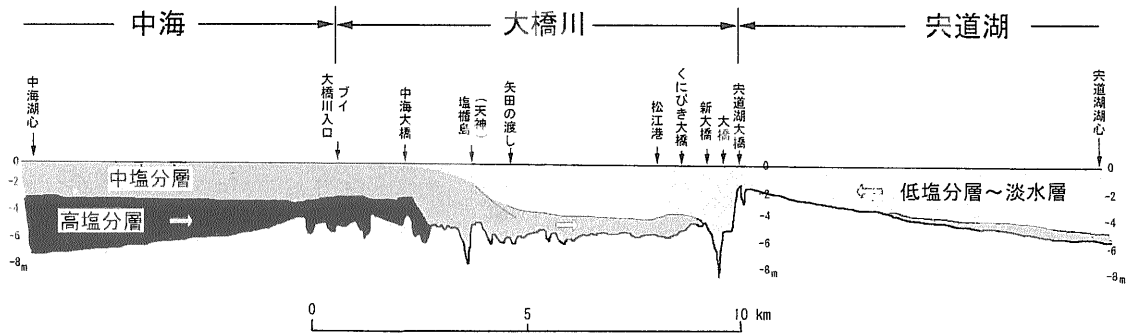
図15 マルチCTセンサによる大橋川矢田の渡し付近での温度塩分測定(1999年10月22日)。
4つのセンサが川床に約100mおきに設置されています。塩分および温度の変化から水塊の動きを知ることができます。S2からS5までは240mであるので、高塩分水塊の最初のはい上がり速度は約0.17m/s (0.63km/h)、二度目は約0.11m/s (0.39km/h)となります。

4.2 観測結果

1999年10月の約1ヵ月間、塩水楔音響動態観測システム、光ファイバ式温度分布計測システム、マルチCTセンサ等の観測機器を用い高塩分水塊の動態観測を行いました。また、塩水楔プロファイリングシステムを用い大橋川の中海河口側から宍道湖河口側まで数回の音響探査を行い、水中の音響断面を得ました。口絵(8ページ)および第14, 15図には、1999年10月22日の各観測機器による記録を示しました。また観測結果から得られた中海～大橋川～宍道湖にかけての水塊の分布概念を第16図に示します。中海では下位の高塩分層が上位の中塩分層と塩分躍層で接し、宍道湖では湖底付近に中塩分層がうすく広がりますが、大部分は低塩分～淡水層からなっています。大橋川では中海側からの中塩分水塊と宍道湖側からの低塩分～淡水塊が斐伊川の流量、潮の干満・風・気圧などによって複雑な出入りをします。中海の高塩分水塊は通常は大橋川の塩楯島を越えることはありませんが、気象条件によっては大橋に至り、さらに宍道湖にまで流入します。

4.3 今後の展望

この観測システムによって高塩分水塊の動きを目で見えるようにリアルにつかまえることに成功しましたが、酸素(DO)の測定が組み込まれていないこともあって、かんじんの無酸素水塊の宍道湖への来



第16図 中海～大橋川～宍道湖にかけての水塊の分布(概念図).

襲はまだとらえられていません。さらに改良を加えて、大橋川で長期の観測を続ければ、高塩分水塊が中海から宍道湖にどのようなタイミングで入り込むのかを明らかにすることが可能です。また、光ファイバをはじめとしてこれらの観測機器を中海から宍道湖まで連続して系統的に設置すれば、全体の水の動きをつかまえることもできるでしょう。大橋川をさかのぼる高塩分水塊の速度は、今回観測した矢田の渡しから松江大橋の間まででみると時速1～2km程度でゆっくりしたものですから、それが無酸素で、まわりの水環境に悪影響を与えるおそれがあるときに工学的な手段を使って水質の改善を図ることも夢ではありません。

文 献

西村清和・安間 恵・土屋洋一・松田滋夫・徳岡隆夫・井内美郎 (1994) : 塩水楔探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(1998) : 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-. 海洋理工学会誌, 4, 41-54.
 徳岡隆夫・三瓶良和・亀井健史・玉理圭太郎・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・上野博芳・西村清和・須崎 聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教(1999a) : 江の川の塩水楔-塩水湖上の長期連続観測システムの開発-(渇水期湖上例, 1998年12月～1999年2月), LAGUNA(汽水域研究), 6, 233-245.
 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・上野博芳(1999b) : 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-, LAGUNA(汽水域研究), 6, 179-187.
 徳岡隆夫(2000) : 汽水域をとらえる-江の川の塩水楔観測. 月刊「水」, 11月号, 16-23.

NISHIMURA Kiyokazu and TOKUOKA Takao (2001) : Investigation on water movement in coastal lagoons.

<受付: 2001年1月31日>