

汽水湖中海における塩分躍層動態の長期観測

徳岡隆夫¹⁾・三瓶良和¹⁾・亀井健史¹⁾・玉理圭太郎¹⁾

西村清和²⁾・松田滋夫³⁾・須崎 聡⁴⁾

Long-term observation of the halocline in Nakaumi Lagoon

Takao Tokuoka¹⁾, Yoshikazu Sampei¹⁾, Takeshi Kamei¹⁾, Keitaro Tamari¹⁾,
Kiyokazu Nishimura²⁾, Shigeo Matsuda³⁾ and Satoshi Suzaki⁴⁾

Abstract: We have developed a long-term observation system for the study of halocline behavior in brackish lakes and estuaries. The system consists of an acoustic profiling unit, a digital recorder, and a digital play back system. By using this system, we have observed halocline behavior in the center and at the margin of Nakaumi lagoon, southwest Japan. Salinity, pH, dissolved oxygen, water temperature, and water flow rate and direction were checked by the other equipment. The results suggest that the halocline is easily moved, and its behavior is influenced by wind.

Key Words: halocline behavior, long-term observation system, acoustic profile, salinity, water flow rate and direction

1. は じ め に

汽水域は完新世の海面変動によって形成され、人間の生活環境に密接にかかわっている。そこには河川水と海水が出会うことにより豊かな生態系が存在し、豊富な魚介類や野鳥・植物等の生息・繁殖場が存在している。汽水域における水質の変化は周辺の自然環境・生活環境に直接影響を与えるために、近年、湖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る。

汽水域においては、河川水と海水はその密度差のため容易に混合することなく、前者が後者の上に乗

り上げる形でその境界には塩分躍層が形成される。その塩分躍層(密度躍層)は、夏季になるとさらに温度躍層が合わさることにより、安定した下部高密度層を形成し、溶存酸素の極めて少ない貧酸素水塊を形成する。一方、冬季には上層の水温が下層よりも低くなるため上下層の混合が起こりやすくなる。さらに、塩分躍層の挙動は、一日のうちでも潮汐、波浪、湖水の流れおよび内部振動等によって変化することが指摘されている(奥田ほか, 1994)。このような変化は上部低塩分層と下部高塩分層の動態の違いに起因しており、中海・宍道湖では、停滞した貧酸素下部高塩分層が湖縁に遡上した場合に湖棚に生息する魚介類を死滅させ、漁業に甚大な被害を与える。しかしながら、現在のところこのような塩分躍層の移動がいつどのように起こりその後どうなるかといった、ダイナミックな視点では実際の観測例はなく、不明な点が多い。この理由の一つとして、湖水動態観測の遂行が気象条件に左右されることが挙げられる。すなわち、強風のときには船による観測が不可能となるが、塩分躍層はこの時に最も複雑な挙動をとるためである。

著者らは、これまで塩分躍層を音波探査法で観測することに成功し(徳岡ほか, 1993; 1994a)、小型船に探査機を搭載することにより中海・宍道湖におけ

- 1) 島根大学総合理工学部地球資源環境学教室
Department of Geoscience, Faculty of Science and Engineering, Shimane University, 1060 Nishikawatsu, Matsue 690, Japan
- 2) 工業技術院地質調査所
Geological Survey of Japan, 1-1-3 Higashi, Tsukuba 305, Japan
- 3) クローバテック株式会社
Clovertech Inc., 3-25-26 Naka-machi, Musashino, Tokyo 180, Japan
- 4) 千本電気株式会社
Senbon Denki Co, Ltd., 1299-3 Okanomiya, Numazu 410, Japan

る塩分躍層の広域的な分布を明らかにしてきた。また、長良川においては同装置によって河口から16km上流にまで遡上した塩水くさびを捉えることができた(徳岡ほか, 1994b)。この装置は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、塩水くさび探査システムSC-1として商品化(千本電気株式会社)した。しかし、測定機を船に搭載する方法では、先述したように荒天時に出港するこ

とができず、湖水動態に大きく影響を与える強風や台風などの荒天時の観測が不可能であった。この点を克服するため徳岡ほか(1995)は、荒天の影響を受けない湖底設置型音響観測装置の開発を行い、天候によらずに長期間連続の観測記録を得ることを可能にした。今回は、その研究を実証的に発展させ、湖縁(大根島入江)と中海湖心(建設省出雲工事事務所中海湖心観測所)において、3月下旬~5月中旬・7月下旬~11月中旬の6ヶ月間、塩分躍層の連続観測・解析を行ったものである。また、音響観測の特性の検討と定量的な考察を行うため、流向・流速・塩分・水温・水深・濁度・pHの測定および光ファイバー分布型温度計による広範囲の湖底温度分布測定も併せて行った。その結果、中海における塩分躍層動態のある程度把握することができたので、以下にその概要を報告する。

2. 観測場所および観測期間

観測場所は、水深の変化と場所的な変化を考え、湖縁と湖心の2地点を設定した。電源供給とコンピュータ設置場所等の理由から、それぞれ大根島入江と中海湖心の建設省中海湖心観測所近辺を選定し、動態観測を行った。音響観測装置設置位置、光ファイバー敷設位置を図1a, b, cに示す。コンピュータおよび主電源部の設置には、大根島入江では元合同汽船待合所(現八束町門脇誠氏所有倉庫)、中海湖心では建設省出雲工事事務所中海湖心観測所を使用させていただいた。塩分躍層動態の把握のため

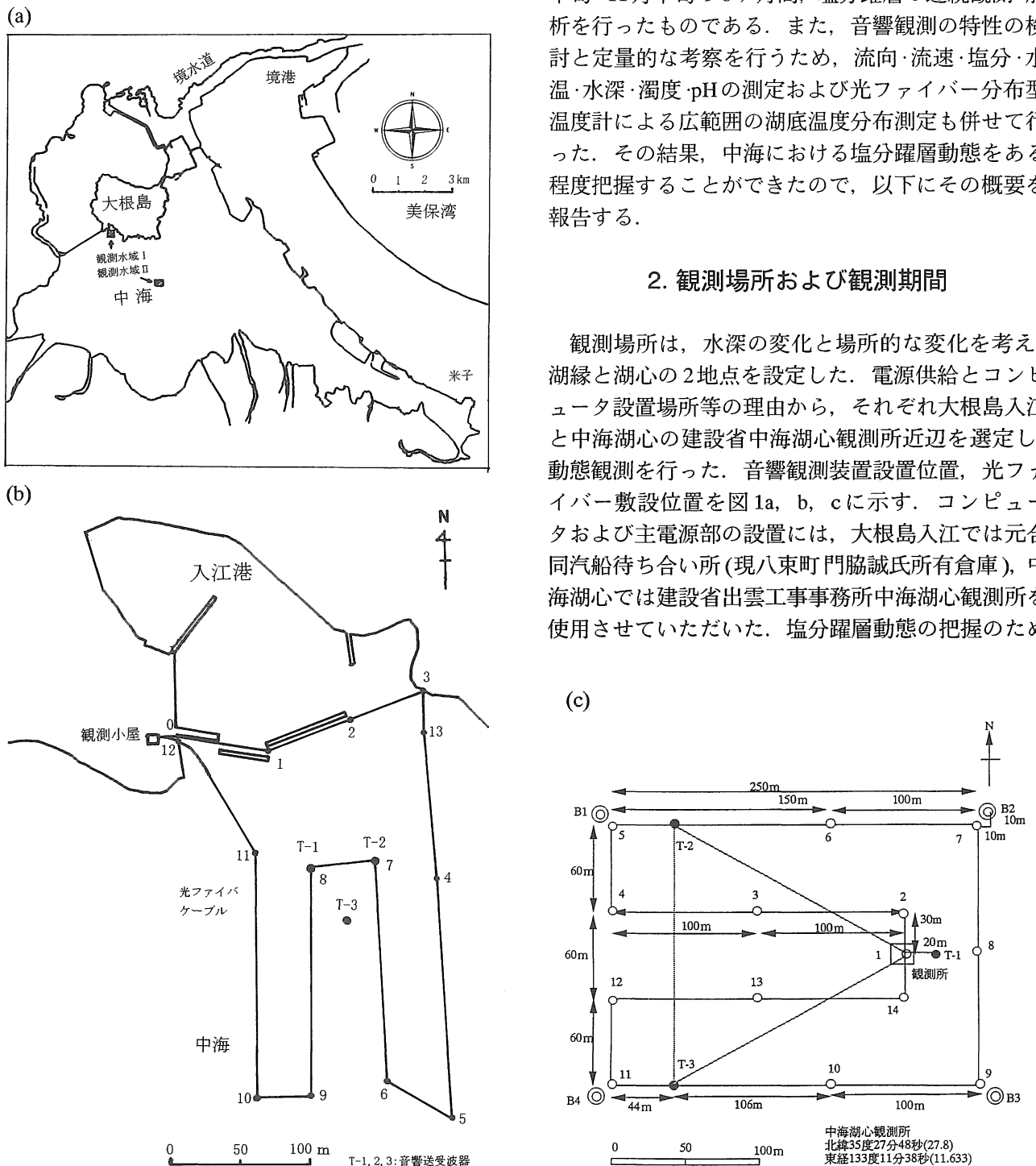


図1 (a)観測水域, (b)観測水域I:大根島入江, (c)観測水域II:建設省中海湖心観測所

Fig. 1. (a) Map showing the observation area I and II, (b) Observation area I: Nyuko harbor in Daikon-jima Island, and (c) Observation area II: The Lake Nakaumi observatory of the Ministry of Construction

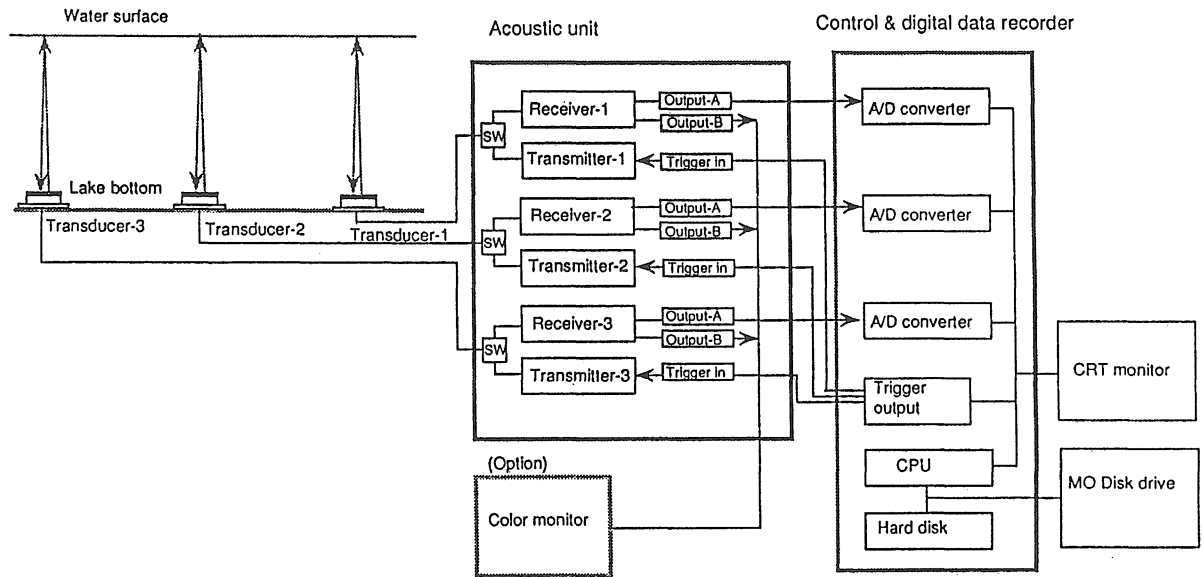


図2 塩分躍層動態観測システムの概念 (徳岡ほか, 1995)
 Fig. 2. Concept of the observation system for halocline behavior (Tokuoka et al., 1995)

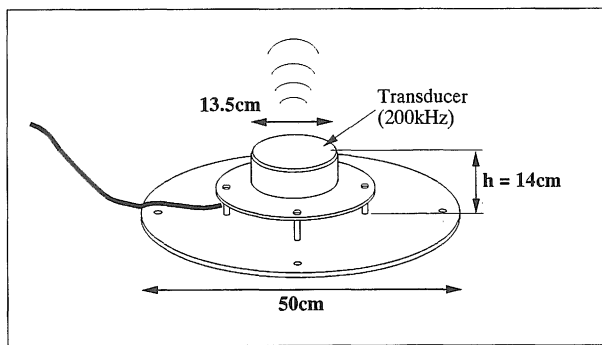


図3 湖底設置型音響送受波器の外観 (徳岡ほか, 1995)
 Fig. 3. Appearance of the transducer fixed on the lake bottom (Tokuoka et al., 1995)

表1 音響による塩分躍層動態観測装置の仕様
 Table 1. Specification of the halocline behavior observation system with acoustic profiler

送受波器: 周波数 200kHz 電歪式 指向角 半減角 約6度
送受信機: 送信パルス幅 15~110 μ s 感度調整 0~30dB
システム制御・データ収録器:
A/D変換器 12bit, サンプリング周波数 1MHz
光磁気ディスクドライブ 230Mbyte

には、本来は2地点で同時に観測を行うべきところであるが、今回新しく開発した機器ということもあって台数が十分でないため、まず最初に大根島入江で観測を行い、その後中海湖心で行った。観測期間は、大根島入江では1995年3月25日から5月19日の56日間、中海湖心では1995年7月29日から11月18日の113日間である。

3. 観測方法の概要

3-1. 湖底設置型音響観測装置

本システムの構成は既に徳岡ほか(1995)および西村ほか(1995b)が示したとおりであるが、以下にその概要を述べる。

システムの概念は図2に示したように音響送受波器、送受信機、システム制御・データ収録器から構成される。送受波器の下部には、沈下防止と固定のため50cm径の円形鉄板を台座として取り付けられている(図3)。送受信器は同時に3式を湖底に設置した。それぞれの送受波器は独立に音波を発信して反射波を受信し、アナログ信号をデジタルに変換、コンピュータで画像処理してモニターディスプレイ上に表示、同時にMOディスクに記録される。本装置の基本仕様は表1に示したとおりである。

大根島入江では図1bに示した3地点(T-1, 2, 3)に、また、中海湖心では図1cに示した3地点(T-1, 2, 3)に送受波器を湖底に設置した。設置は、船上よりロープを付けて水平を保ちながらゆっくりと湖底におろし、湖底に水平に設置され泥を被っていないことをスキューバダイビングによって全ての地点で確認した。設置した3地点の送受波器はそれぞれ正三角形の頂点の位置関係にあり、大根島入江では約50m間隔、中海湖心では約180m間隔である。中海湖心においては、次に述べる光ファイバー分布型温度計についても同時に位置計測をDGPS(DXアンテナ株式会社による)を用いて行った。これら3地点での音響画像の差を解析することにより、塩分躍

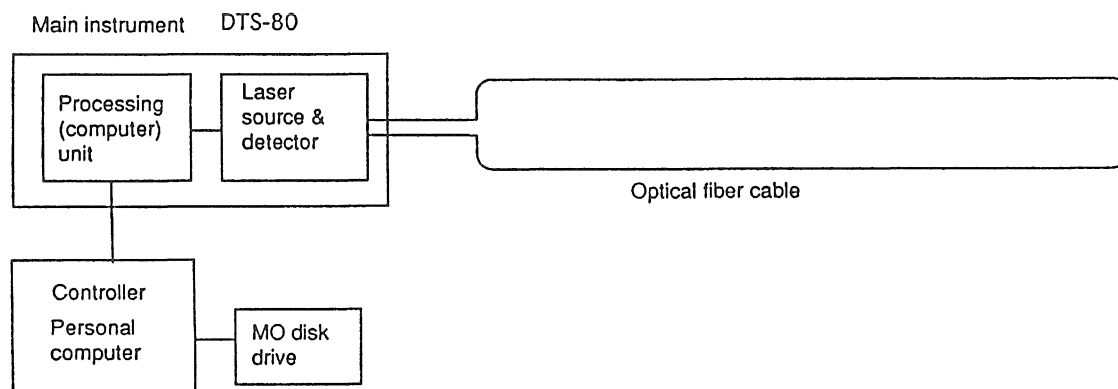


図4 光ファイバーセンサによる湖底水温分布観測装置の概念 (西村ほか, 1995b)

Fig. 4. The optical fiber cable system for the observation of lake bottom temperature distribution (Nishimura et al., 1995b)

表2 光ファイバーセンサによる湖底水温分布観測装置の仕様
Table 2. Specification of the optical fiber cable system for the observation of lake bottom temperature distribution

測定方法:	ループ方式
使用した光ファイバーケーブル:	全長2km, 外径3mmPVC被覆コード
距離分解能:	1m
最大測定距離:	8km/ループ
測定温度範囲:	-200~500℃(ファイバの仕様に依存する)
チャンネル数:	最大4チャンネル(ループ方式) 1チャンネルのみ使用
本体消費電力:	約200W
電源:	AC100V 50/60Hz

層の立体的分布, 移動方向, 移動速度等を把握することができる。音響データは, 10分毎の計測値である。

3-2. 光ファイバー分布型温度計

このシステムについては, 西村ほか(1995a, b)が報告しているように, (株)ワイ・オー・システム(旧日鉱計測システム(株))の陸上用光ファイバー式温度分布計測システム DTS-80 を水域に適用したものである。このシステムでは, 後部散乱光(ラマン散乱光)の温度依存性を利用して一本の長い光ファイバーケーブル全域が温度計として使用でき, 広域の連続的な温度分布を測定するのに有効である。距離分解能は1mで, 例えば2000mの光ファイバーでは, 2000点の温度データが得られる。装置の構成を図4に示す。本システムは, 全長2000メートル, 外径3mmのPVC被覆光ファイバーコード, 計測システム本体, パーソナルコンピュータから構成される。本システムの基本仕様は表2に示したとおりである。

3-3. 塩分・水温・pH・溶存酸素・濁度・水深・流向・流速
音響送受信機による記録と塩分・温度変化等の対応を明らかにするため, 音響観測装置を設置した場

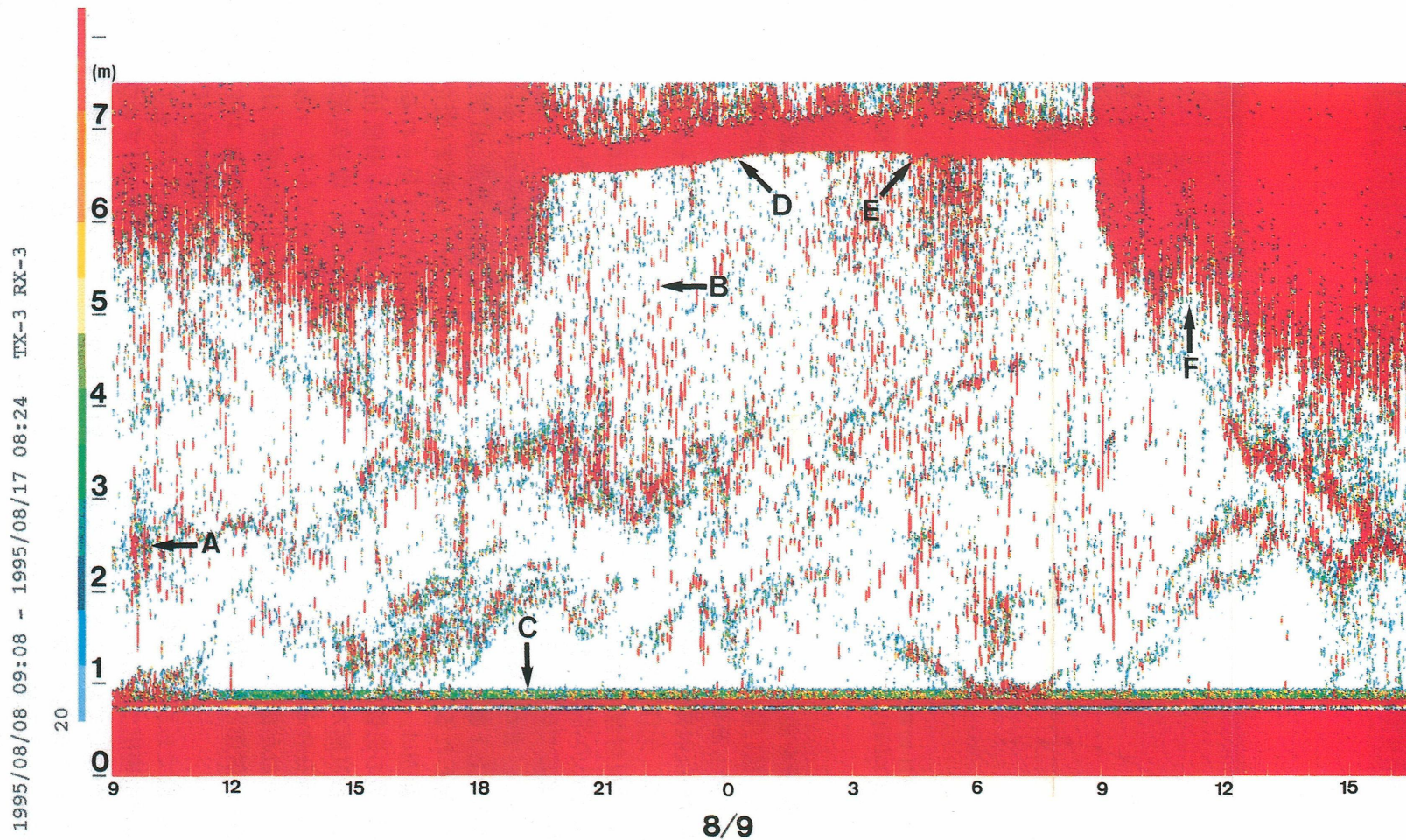
所における塩分, 水温, pH, 溶存酸素の水深50cm毎の変化を, WTW社(ドイツ)製OXI-196, LF-196, PH-196T可搬型計測機を用いてほぼ一週間毎に測定した。大根島入江での測定場所は送受信器T-1付近, 湖心の測定場所は中海湖心観測所である。

また, 音響観測装置による記録と併せて湖水の動態を把握するため, 湖底にアレック電子(株)製の電磁流向・流速計(検出部は湖底上60cm)を設置し, 大根島入江では, 3月25日~5月16日, 湖心では7月28日~10月24日の期間, 連続して観測を行った。この流向・流速計には塩分計, 水温計, 圧力式深度計および濁度計が内蔵されていて, それらの検出部は湖底上50cmに位置する。測定は20分に1回の計測で行った。1回の記録は30個の測定値の平均値である。また, 湖心では上部低塩分層の動態も併せて観測する目的で, AANDERAA社製流向・流速計を水面下1.5mの位置に設置した(ただし, この装置はフジツボ等の付着により8月9日以降は測定不能となった。測定期間は7月28日~8月8日である)。アレック電子(株)製電磁流向・流速計の設置場所は, 大根島入江, 湖心ともに送受信器T-3付近, AANDERAA製流向・流速計は中海湖心観測所直下とした。

4. 観測結果および考察

4-1. 音響画像の特徴と検出感度

新しく開発した湖底設置型音響送受信波器による画像の特徴について概要を述べる。図5(8月8-9日, 湖心T-3地点の音響プロフィール)に示したように音響画像の色は反射強度を表しており, 強度が強くなるに従って, 淡青, 青, 緑, 黄, 橙, 赤, 黒の順に画像表示される。図5の矢印Aは赤色の強い反射面を表しているが, その上下には緑, 青色を伴っている。これは上方から下方にかけて徐々に反射強度



1995/08/08 09:08 - 1995/08/17 08:24 TX-3 RX-3

図5 塩分躍層動態観測装置による音響画像 (1995年8月8日9時-9日16時の湖心T-3地点における例)
 縦軸の数字は、湖底(0m)からの水深で、Dの赤バンドの下限が水面をさす。説明は本文を参照。

Fig. 5. Graphics of a time series data of acoustic profile by the halocline behavior long-term observation system
 (Point T-3 in the center of, August 8 (9:00)~9 (16:00), 1995)

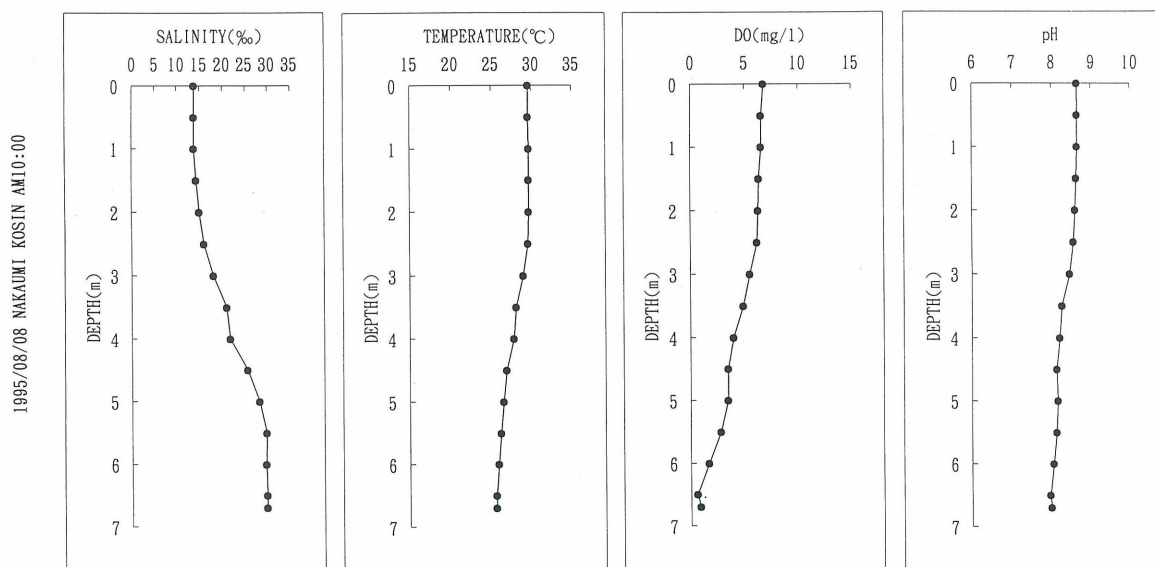


図6 1995年8月8日10時の湖心における塩分、水温、溶存酸素およびpHの鉛直分布
Fig. 6. Profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen (DO) and pH in the center of Nakaumi, 10:00 August 8, 1995

が増加して減少した様子を表している。このことは、水温があまり変化しない場合には、塩分躍層の勾配が赤色のところで最も高いことを示している。矢印Bのような斑点状の反射像は浮遊物またはノイズによるものと思われる。矢印Cの湖底から直上約90cmまでの赤い帯状の反射波は発信パルスの直接波である。矢印Dの赤色の帯は、水面反射波を示し、その下端が水面を表している。そのゆるやかなうねりは潮位変化を示し、また、反射面の細かな上下振動は波による水面の上下動を表している。ここでは10cm以下の波と思われる。矢印Eが示すやや幅広い不規則な赤色の範囲は、大きな波を表しており、矢印Fの散乱波は波の影響によるものと考えられる。このような厚い散乱層が生じる理由は必ずしも明らかではないが、現在のところ、波が水塊の上下振動を引き起こし、それが徐々に下向へ伝搬していくために水塊振動が反射像として捕らえられているものと推定している。

以上は音響画像の特徴であるが、本装置がどの程度の鋭敏さで塩分躍層を検出できるのか、いわゆる機器の検出感度を明らかにしておくことは重要である。本装置を含め、一般に音波測深機や魚群探知機では、発信された音波のうち音響インピーダンスの異なる境界(密度と音速の積： ρV)で反射し戻ってきた音波が検知され、画像化される。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)。徳岡ほか(1993)および西村ほ

か(1994)が既に示しているように、入射波と反射波の振幅比は反射係数 r として、次式で表される。

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

ここで ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれの媒体の密度、 V_1 、 V_2 はそれぞれの媒体の音速をあらわす。本装置での観測結果は色調で表れるため、 r と音響画像色調との関係を明かにしておく必要がある。図6に8月8日10時の塩分・水温・溶存酸素・pHプロファイルを示した。音響プロファイル画像(図5)での塩分躍層は、4~4.5mに反射面として見られる。塩分プロファイルでは0mの13.9‰から湖底(6.7m)の29.9‰まで徐々に変化しており、塩分勾配が最大となるのは4~4.5mで3.8‰/50cmである。 r もこの深度で最大値0.0020となる。水温・溶存酸素・pHそれぞれの表層および湖底の値はそれぞれ29.6・25.6°C、6.8mg/l(91%)・0.9mg/l(12%)、8.65・8.00である。一方、図7、8には9月6-7日の音響プロファイルおよび6日17時の塩分・水温・溶存酸素・pHプロファイルを示した。9月6日の音響プロファイル画像においては、塩分躍層は確認できない。塩分プロファイル(図8)は、8月8日よりもさらにゆるやかに変化しており、0mの16.1‰から湖底(6.7m)の29.3‰まで徐々に変化し、塩分勾配が最大となるのは3.5~4mで、2.6‰/50cmである。 r はこの深度で最大値0.0018となる。水温・溶存酸素・pHそれぞれの表層および湖底の値は、26.4°C・27.2°C、9.9mg/l(122%)・0mg/l

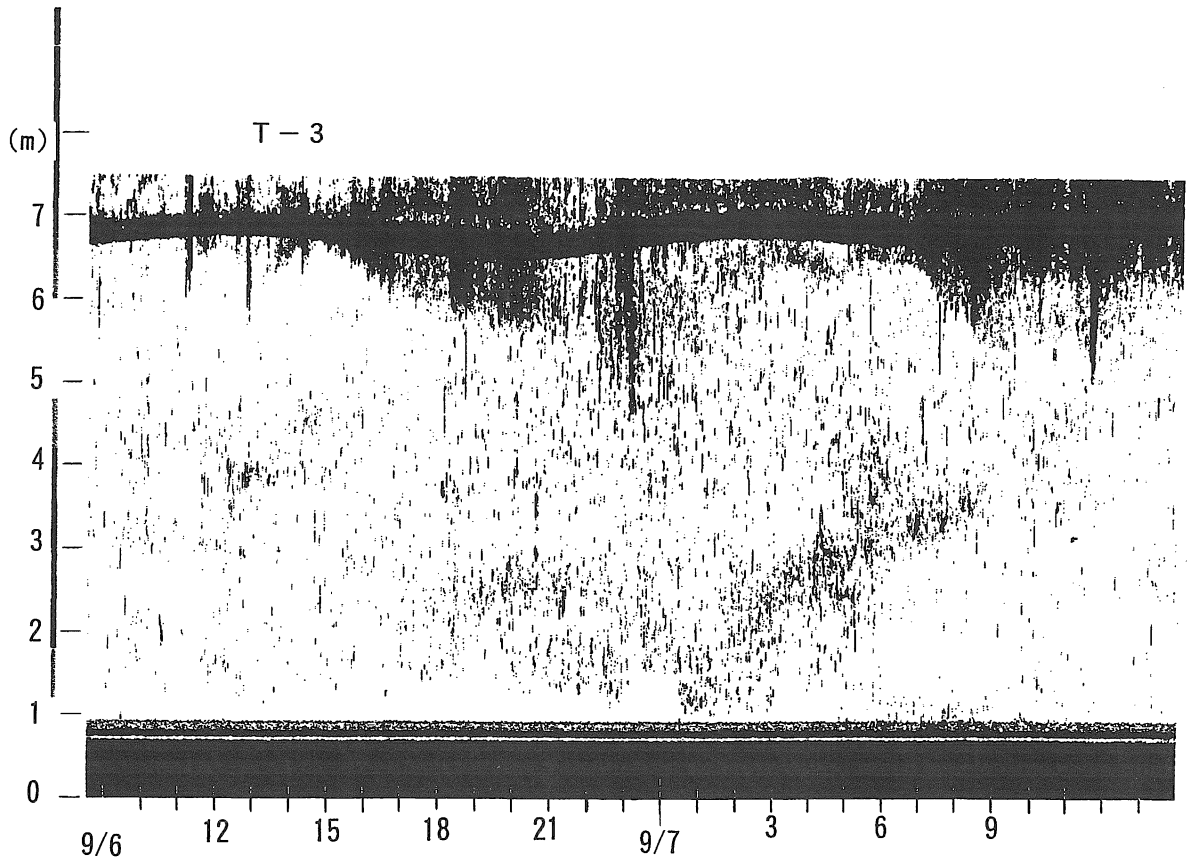


図7 1995年9月6-7日の湖心T-3地点における音響画像
 Fig. 7. Graphics of the time series data of acoustic profile in the center of Nakaumi T-3, September 6-7, 1995

1995/09/06 NAKAUMI KOSIN PM5:00

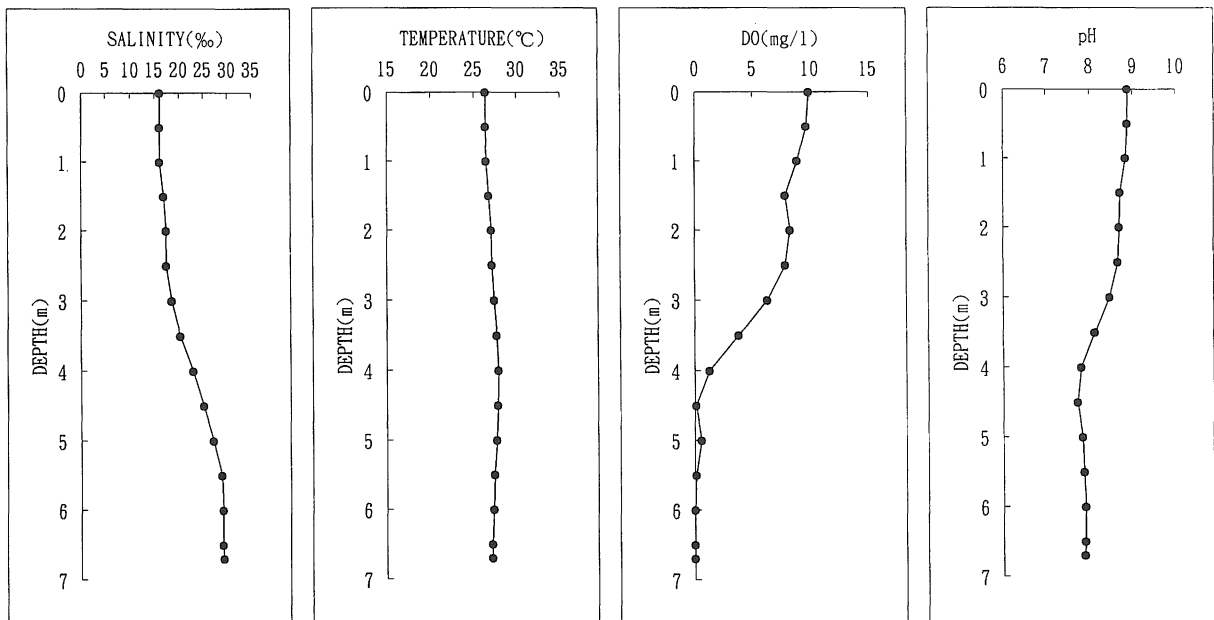


図8 1995年9月6日17時の湖心における塩分、水温、溶存酸素およびpHの鉛直分布
 Fig. 8. Profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen (DO) and pH in the center of Nakaumi, 17:00 September 6, 1995

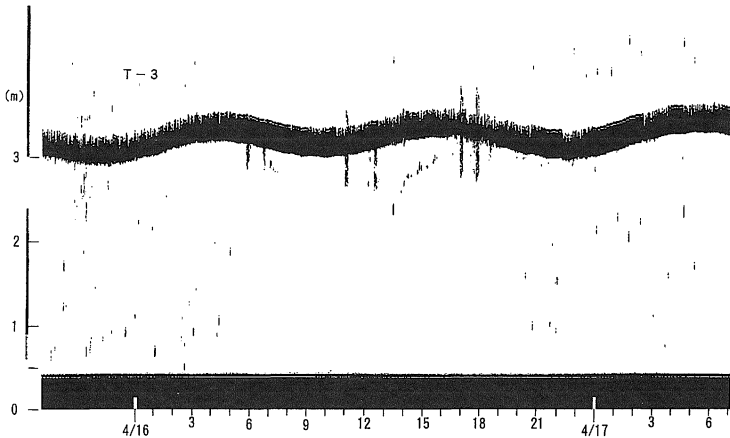


図9「無風時」1995年4月16-17日の大根島入江T-3地点における音響画像

Fig. 9. "Windless day" Graphics of the time series data of acoustic profile at the margin of Nakaumi (Nyuko harbor, Daikon-jima Island) T-3, April 16-17, 1995

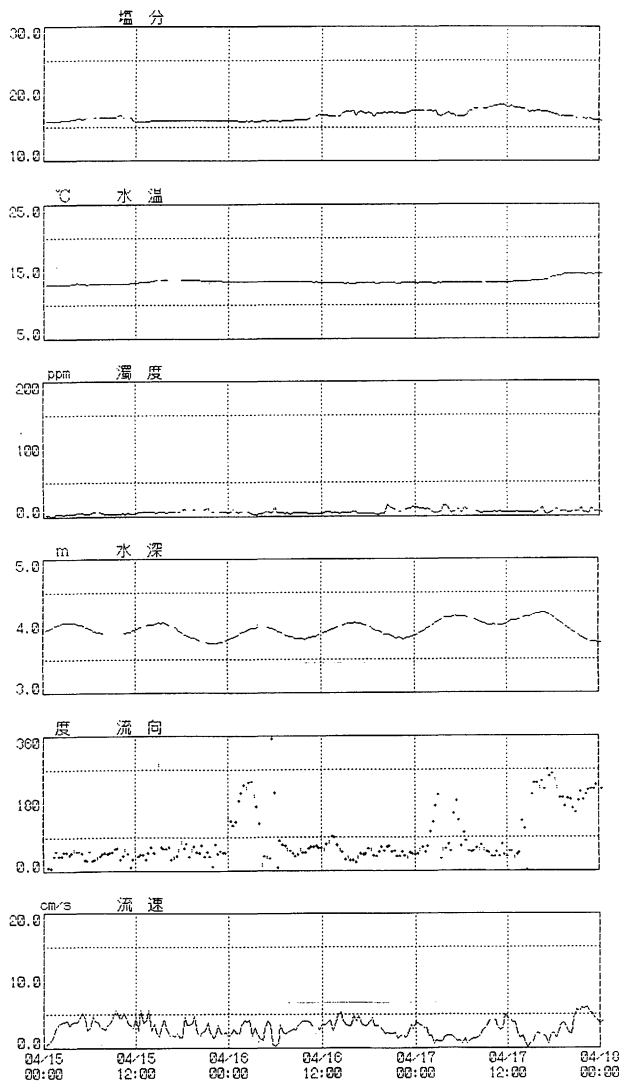


図10「無風時」1995年4月15-17日の大根島入江T-3地点の湖底における塩分、水温、濁度、水深、流向および流速の経時変化

Fig. 10. "Windless day" The time series data of salinity, temperature, muddiness, water depth, water flow direction and water flow rate in lower portion of the lake water at the margin of Nakaumi (Nyuko harbor, Daikon-jima Island) T-3, April 15-17, 1995

(0%), 8.89・7.90である。ここで9月6日の測定結果では温度がほぼ一定であったために、音響インピーダンスの差は主に塩分変化によっているものと判断できる。その結果、本音響観測装置での検出感度は、塩分勾配にして3‰/50cm程度、音響インピーダンスを用いた反射係数にして $r=0.002$ 程度であり、これ以上の値でないと、弱い反射面を表す青色の画点も表示されない。

4-2.「無風時」、「強風時」および「通常時」の塩分躍層動態

本研究の観測結果から、中海塩分躍層の動態は、天候、特に風と密接な関係があることが明らかとなった。このことは、浜田・藤田(1988)、奥田ほか(1992, 1994)らも指摘しているところではあるが、本研究では、塩分躍層動態を風速の強弱によって3つの特徴的なパターンに分けることができた。無~弱風、強風およびその中間の天候状態下においてである。本報では、中海での一日の平均風速が3m/s以下で波のない状態を「無風時」(気象庁風力階級表では、静穏および軽~軟風)、低気圧や台風等の荒天に伴って12m/s以上の風が観測された状態を「強風時」とした。また、その中間的な状態で中海で最も多く見られる状態を「通常時」とし、次のように定義した。すなわち、中海では普段、朝方はほとんど波がないが、昼近くになると西風によって波が立ち始める。この風速は4~8m/sであることが多い。このような荒天強風時でない場合に通常見られる波浪状態を、本報では中海における「通常時」(気象庁風力階級表では、軟~雄風)と呼ぶことにする。以下、それぞれの代表的な観測結果を示し、その特徴と湖水の動態について考察する。

(1)「無風時」

一日の平均風速が3m/s以下であったのは、大根島での観測期間中は3月29日、4月5, 16, 18, 24, 25, 27日、湖心での観測期間中は、7月28, 8月13, 14, 15, 17, 21, 22, 25, 30日、9月6, 7, 9, 10, 12, 13, 14, 22, 25, 26, 28, 29日、10月4, 7, 8, 14, 17, 29日、11月5, 6, 12, 13, 16, 18日(建設省出雲工事事務所中海湖心観測所記録)であった。このうち音響記録の湖水面状態から判断して、一日中波がほとんどなかった(10cm程度以下)のは4月16日、9月22日および10月14日のみであった。中海において波のない状態が継続する「無風時」はまれである。

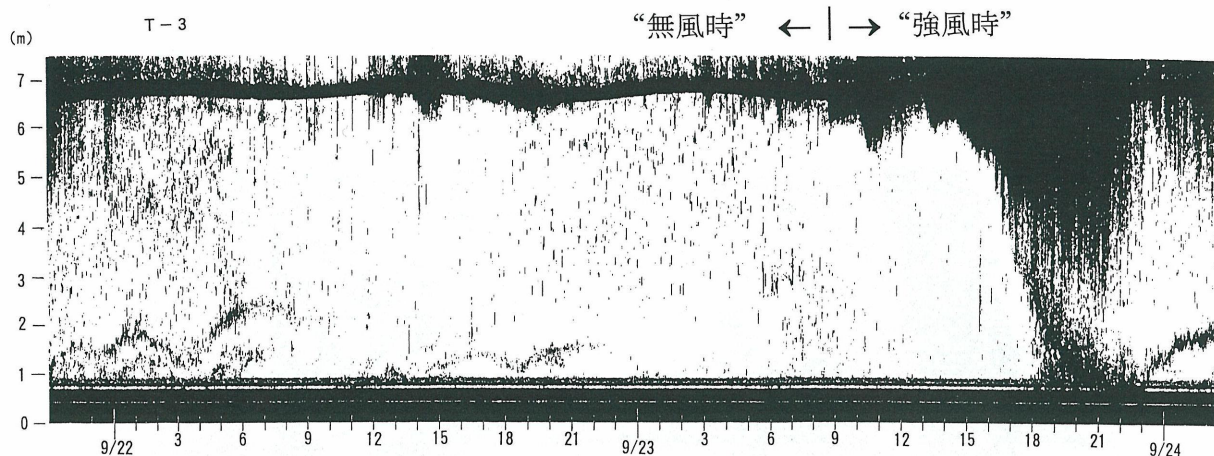


図 11 「無風時」 - 「強風時」 1995年9月22-23日の湖心 T-3 地点における音響画像
 Fig. 11. "Windless-strong windy day" Graphics of the time series data of acoustic profile in the center of Nakaumi T-3, September 22-23, 1995

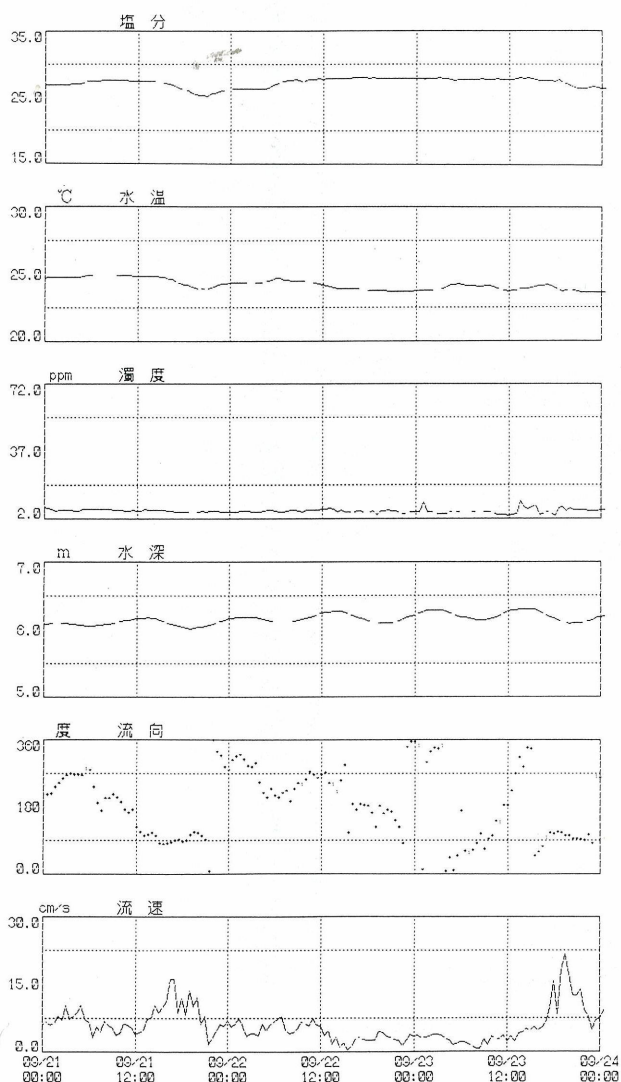


図 12 「無風時」 1995年9月21-23日の湖心 T-3 地点の湖底における塩分、水温、濁度、水深、流向および流速の経時変化

Fig. 12. "Windless day" The time series data of salinity, temperature, muddiness, water depth, water flow direction and water flow rate in lower portion of the lake water in the center of Nakaumi T-3, September 21-23, 1995

a. 「無風時」の湖縁 (大根島入江)

4月16日の大根島入江 T-3 地点の音響プロフィールを図9に示した。これは「無風時」の代表的な記録である。14-16時にかけて湖面から0.5-1mに弱い反射面が見られるが、そのほかは、まったく反射像が記録されていない。波はほとんどなく、12時間周期の干満を明瞭に記録している。

湖底での塩分・水温の経時変化(図10)は、それぞれ17‰、13℃と一定の値を示し、濁度の変化も認められない。また、水深変化は音響記録と一致していて潮位差約20cm、周期12時間の規則的な波形を示している(図10)。観測地点の水深は約3.5mであり、この時期の中海塩分躍層は約3.5mに存在しているので、潮位の上昇により塩分躍層が上位に移動すれば速やかに躍層を感知できるはずである。しかしながら、音響記録および塩分・水温記録には、20cm程度の潮汐による変位が塩分躍層に与える影響は確認されなかった。その原因の一つとして、本音響観測装置では、湖底より90cmまでは発信パルスの残響によって記録が得られず、また、湖底に設置した塩分計は湖底上約50cmに検出部が位置するため、0-50cm間の測定が行えなかったことが考えられる。

流向は、全般に北東向き(図10; 0°→360°:北-東-南-西-北)であるが、4月16日0-4時に変化しており、北東-東-南-南西、南西-南-東-北東と時計回りに180度回転して、反時計回りにもとに戻る。この観測結果は、「無風時」の大根島入江近辺の湖水がほぼ一定方向の流れを示し、時折何らかの理由で流向が変化することを示している。流速は平均3-4cm/s (108-144m/h)であった(図10)。

b. 「無風時」の湖心

9月22-24日の湖心 T-3 地点の音響プロフィールを

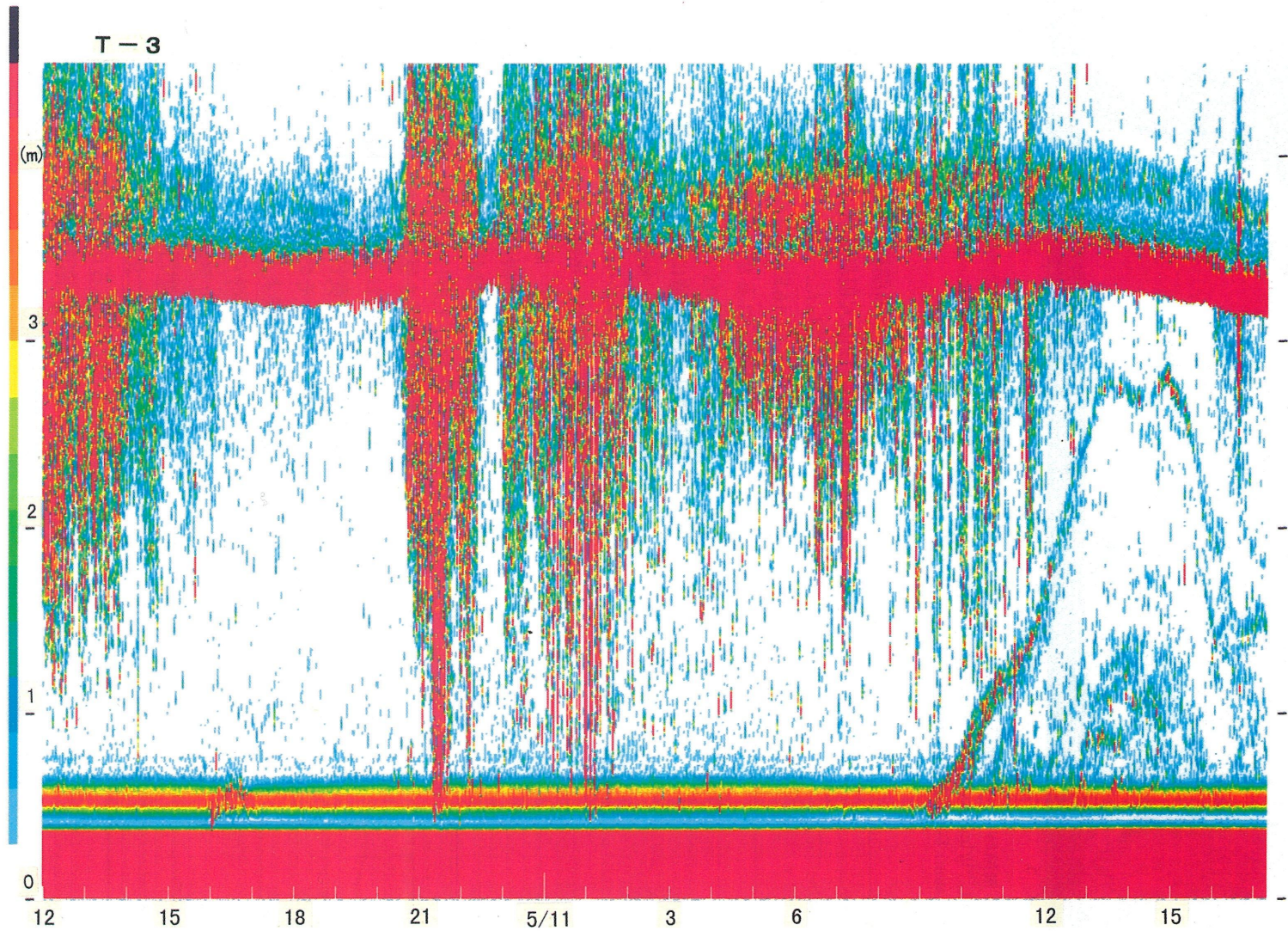


図13「強風時」1995年5月10-11日の大根島入江T-3地点における音響画像

Fig. 13. "Strong windy day" Graphics of the time series data of acoustic profile at the margin of Nakaumi (Nyuko harbor, Daikon-jima Island) T-3, May 10-11, 1995

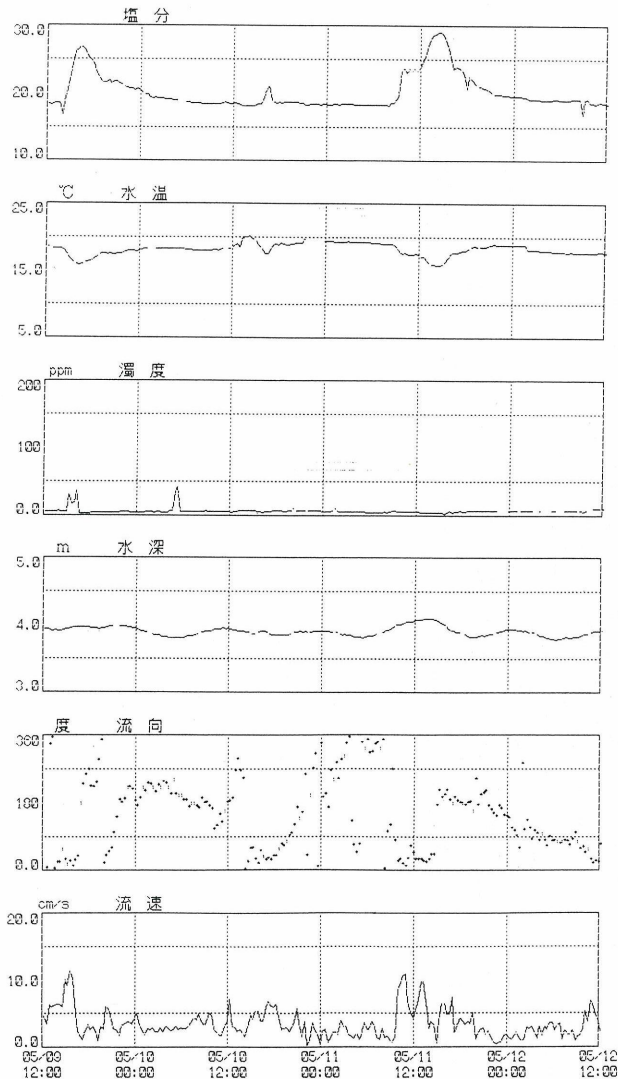


図 14「強風時」1995年5月9-12日の大根島入江 T-3地点の湖底における塩分、水温、濁度、水深、流向および流速の経時変化

Fig. 14. "Strong windy day" The time series data of salinity, temperature, muddiness, water depth, water flow direction and water flow rate in lower portion of the lake water at the margin of Nakaumi (Nyuko harbor, Daikon-jima Island) T-3, May 9-12, 1995

図 11に示した。22日 23時から 23日 17時までは塩分躍層による明瞭な反射面は記録されていない。この時の塩分プロファイルは測定していないが、先の図 8に示したように、塩分は湖水面から湖底に向かってゆるやかに徐々に増加しているものと推察でき、そのため明瞭な反射面が得られなかったものと考えられる。すなわち、「無風時」には、均等に近い塩分勾配によって塩分躍層が不明瞭になることが特徴と思われる。

湖底における塩分・水温の経時変化(図 12)はそれぞれ 26~28‰, 23~25℃のほぼ一定の値を示している。濁度は9月 23日 1~2時および 13~15時に小さなピークがあるものを除けば変化はない。水深変化

は、潮位差約 20cm, 周期 12時間の規則的な波形を示している。

流向は、反時計まわりの変化を示しており、上げ潮(9月 22日 2時)-下げ潮(8時)-上げ潮(14時)-下げ潮(20時)-上げ潮(9月 23日 2時)にあわせて北西(9月 22日 2時)-西-南西(8時)-西(14時)-南-南東(20時)-北(9月 23日 2時)と流向を変えている。流速は 1~5cm/s(36~180m/h)で、特に 22日の午後から 23日の午前にかけては全般に小さい。これらの結果は、「無風時」の下部高塩分層内の流向・流速が刻々と変化することを示しており、主な原因は潮汐にあるものと考えられる。ただし潮の上げ下げとの一定の関係は見られず、上部低塩分層の流向・流速が複雑に絡んでいるものと考えられる。

(2)「強風時」

観測期間中、中海で風速 12m/s以上の強風が吹いたのは、3月 25, 27日, 4月 1, 2, 12, 22, 23, 26日, 5月 3, 5, 6, 10日, 8月 9, 10, 27日, 9月 16, 17, 24, 27日, 11月 1, 2, 7, 8, 9, 11日であった。特に9月 16~17日と11月 8日は、それぞれ台風 12および冬型の気圧配置による荒天で、風速 12m/s以上の風がそれぞれ 20時間(9月 16日 15時~17日 10時)および 17時間(11月 8日 1時~17時)続いた。

a.「強風時」の湖縁(大根島入江)

5月 10-11日の大根島入江 T-3地点の音響プロファイルを図 13に示した。5月 10日 21時 30分には風による散乱波は湖底まで到達しており、5月 11日 11時まではこの散乱波が継続して記録されている。5月 11日 9時 30分に湖底から明瞭な反射面が上昇しはじめ、13時に水面下 60cmに達して 2時間停滞した後、上昇時とほぼ同様な勾配をもって下降している。

この反射面の変化と調和して塩分・水温の変化(図 14)が観測されている。塩分は5月 11日 9時の 18‰から増加しはじめて 14時-15時には 29‰となり、後に 19‰まで減少した。水温は 19.5℃から 16℃へ減少し、後に 18.5℃へと上昇した。この時期の中海は下部高塩分層のほうが上層よりも水温が低いので、これらの変化は、下部高塩分水が入江付近に進入して来た後、後退していった様子を示しているものと思われる。また、進入前と比べて後退後には塩分・水温がそれぞれ 1‰, 1℃変化しているので、一連の下部高塩分層の動きによって上層と下層がわずかに混合したことが考えられる。濁度の変化は特に観測されていない。水深は下部高塩分層が進入してきたときに高潮となり、平常よりも約 20cm 高かった。

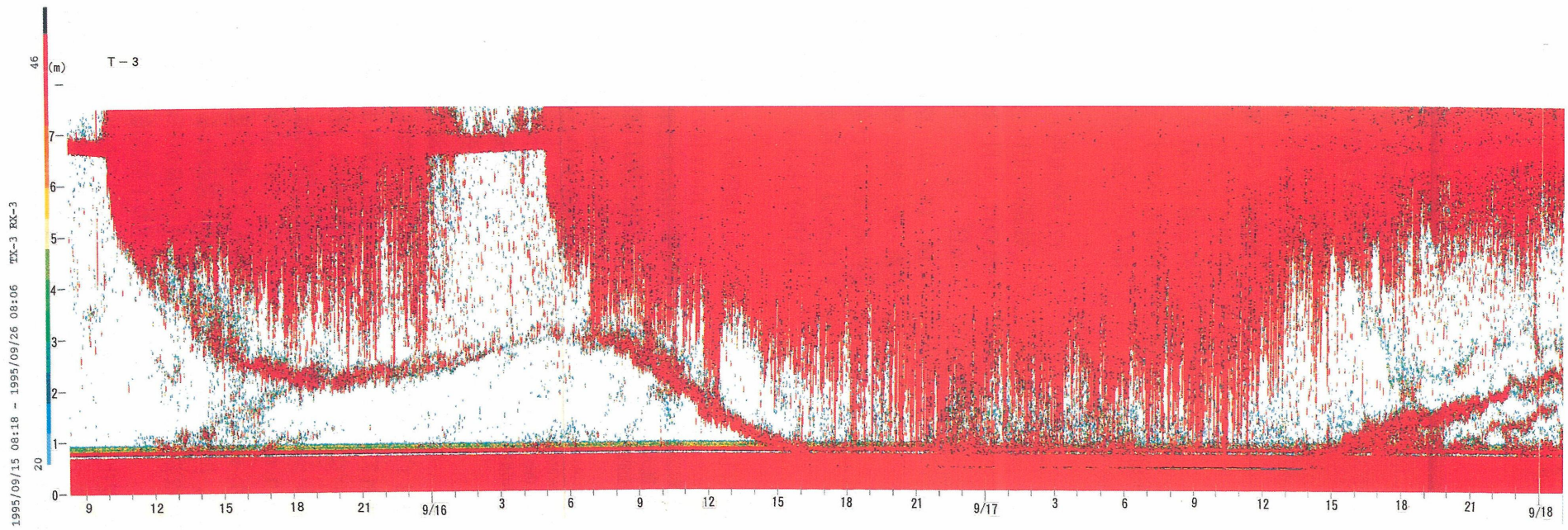


図 15 「強風時」 1995 年 9 月 15-17 日の湖心 T-3 地点における音響画像

Fig. 15. "Strong windy day" Graphics of the time series data of acoustic profile in the center of Nakaumi T-3, September 15-17, 1995

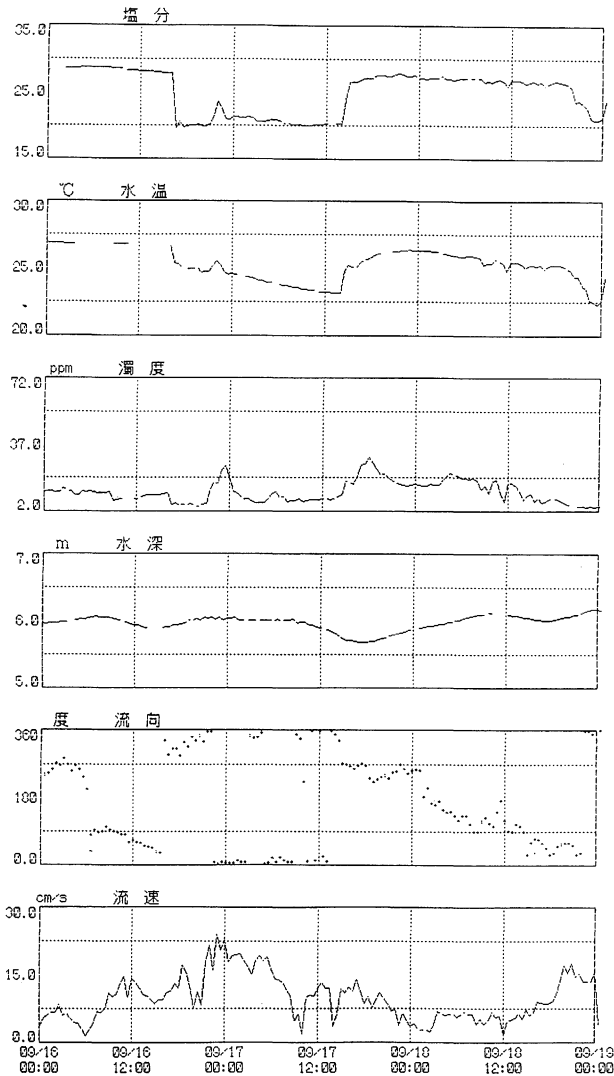


図16「強風時」1995年9月16-18日の湖心T-3地点の湖底における塩分、水温、濁度、水深、流向、および流速の経時変化

Fig. 16. "Strong windy day" The time series data of salinity, temperature, muddiness, water depth, water flow direction and water flow rate in lower portion of the lake water at in the center of Nakaumi T-3, September 16-18, 1995

流向は、下部高塩分層の進入時には北東～北、後退時には南向きであった。流速は進入時に5~10 cm/s (180~360m/h)、後退時には4~7cm/s (144~252 m/s)であった。これらの流速は、無風時の2~5倍である。

b. 「強風時」の湖心

9月15-17日の湖心T-3地点の音響プロファイルを図15に示した。9月15日の平均風速は5.3m/sで、午後からは東北東の風となった。12時から散乱波の下部(水深2.5m)に明瞭な反射面が表れはじめていた。12時から23時までは6.5~8.8m/sの風が継続していた。この反射面は一度風の弱まった9月16日0-4

時の間(風速1.0~3.5m/s)には徐々に上昇して水深3~3.5mとなるが、9月16日5時ごろからまた風が強まり、9月16日23時には北東の風が最大15.7m/sとなって、それと共に反射面も下降して湖底に達したものと考えられる。この時、波浪による散乱波層も湖底近くまで達している。9月16日8時から17日11時までの風速は10.1~15.7m/sで、風向は北東-東北東方向であった。その後風は徐々に弱まり、9月18日9時には風速5.0m/sとなり、それに伴って音響反射面も徐々に上昇して湖底上3mとなった。

一方、湖底における塩分・温度の経時変化(図16)は、それぞれ28.5‰、27℃のほぼ一定値であったものが、9月16日16時から急に20‰、25℃に減少し、以後9月17日14時まで塩分はほぼ一定、水温は23℃まで徐々に減少している。9月17日15時には、それぞれ27‰、25.5℃に上昇した。これらの結果は音響観測の結果と良く一致し、下部高塩分層の移動によって、上層が直接湖底にまで達した結果であると考えられる。濁度は上層が湖底に達した数時間後の9月16日23時30分に26ppmのピークを示し、湖底が一時的に懸濁したことを示している。水深は9月16-17日には規則的な下げ潮状態を示しておらず、特に、上部低塩分層が湖底に達している間の9月16日19時から9月17日10時には下げ潮状態がなくなっており、一様に高潮である。その後、下部高塩分層が戻るにしたがって低潮となる。

流向は、9月16日の下部高塩分層が移動して上層が湖底に達している間は、ほぼ一定の東～北向きとなって、風向きとほぼ反対方向となっているが、下部高塩分層がもどる9月17日16時から急に西向きに変化し、徐々に南西-南方向となる(図16)。流速は下部高塩分層が移動している間には10~15cm/s (360~540m/h)、上層が湖底に達している間は15~20 cm/s (540~720m/h)、下層が戻ってきた時には一時的に4cm/s (144m/h)、その後10~13cm/s (360~468m/h)となる。最大流速は、9月16日23時の24cm/s (864m/h)であった。これらの流速は無風時の4-20倍である。

光ファイバー分布型温度計の記録は、上記の観測記録と調和的である。図17に示したように、水温約27℃の下部高塩分層が南-南西方向へ戻ってきて水温約24℃の上部低塩分層との境界が南-南西方向へ移動している。図17中の点線は27℃と24℃の境界を表している。

以上の結果を総合すると、9月15-18日の一連の中海塩分躍層動態と風との関係は、図18のようにまとめることができる。すなわち、このような中海湖水の動態変化を生じさせた原因は一定方向に連続して吹いた強風であり、この風が、中海湖水上層の上

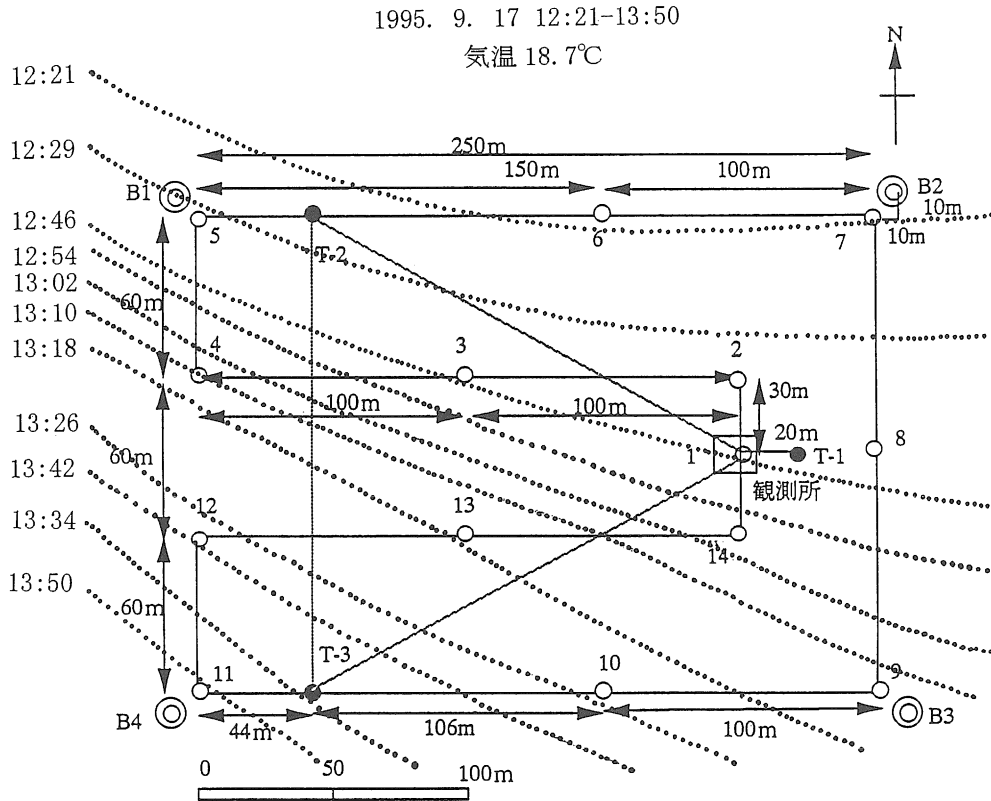


図17「強風時」1995年9月17日の湖心の湖底における、光ファイバーセンサ水温分布の経時変化(点線は、特定の時刻において水温が24℃から27℃に急変するpointを結んだ線である。移動の平均速度は、170m/h)
Fig. 17. “Strong windy day” The time series data of temperature high-gradient line of the lake bottom by the optical fiber cable system in the center of Nakaumi, September 17, 1995 (the average migration rate is 170m/h)

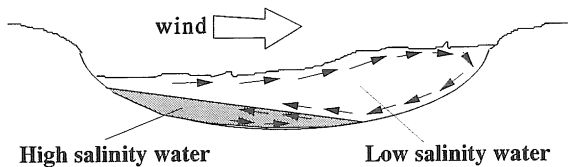


図18 中海における下層高塩分層の動きと風との関係を示した概念
Fig. 18. Schematic illustration of the relationship between the behavior of high salinity water in lake Nakaumi and wind

部で風と同方向の南西向きの流れを発生させた。これが湖岸付近で反転して上層の下部で北東向きの流れとなり、これとともに下部高塩分層も北～北東方向へ移動したものと考えられる。このような強風時の挙動は、夏季に現れる貧酸素水塊の動きを推察する上でも興味深い。

(3) 「通常時」

a. 「通常時」の湖縁(大根島入江)

4月8-9日の大根島入江T-3地点(T-2およびT-1を下に重ねて記載している)の音響プロファイルを図19に示した。4月8日11時ごろから波が立ちはじめ、音響散乱が時間とともに下部に向かって形成さ

れ、波の減少とともに数時間でこの散乱がなくなっている。この散乱層の後尾下部には、明瞭な山なりの反射面が表れている。4月8日は、「通常時」のうちでも比較的風の強い日(この日の平均風速は5.1m/s、この日の昼から夕刻にかけては西～北西の風)であったため、中海下部高塩分層が遡上し、その後、後退して行った様子が反射面として表れているものと考えられる。入江港から遠いT-3、2、1送受波器の順で下部高塩分層の反射面は早く表れ、遅く消える。入江港に近い送受波器T-1と遠い送受波器T-3は約50m離れており、T-1の下層反射面の検出時刻はT-3よりも約20分遅れているので、その差分から下部高塩分層は約150m/hで遡上してきたと推算される。

湖底での塩分・水温の変化(図20)は、4月8日11時に16‰の小ピーク、16~18時に28.5‰の大ピークを持ち、23時にまた18‰の小ピークを伴って、もとの15‰のレベルに戻っている。水温の凹型のパターンもこれにほぼ一致している。濁度はこれらの変化と一致せず、4月9日18時ごろに160ppmのピークを示しているが、この理由は明らかでない。な

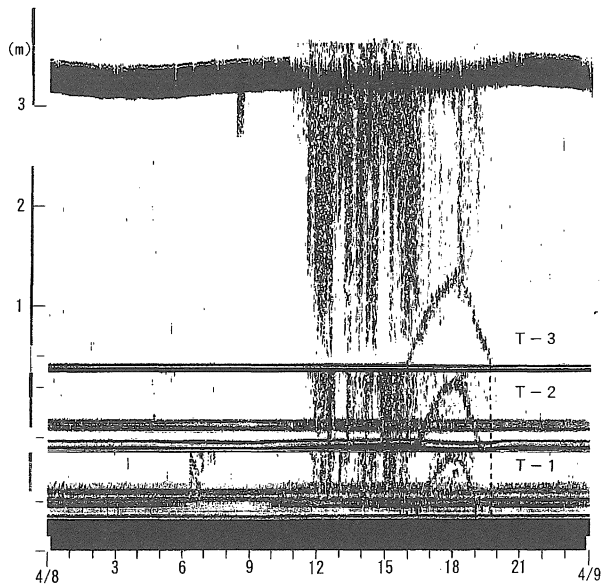


図19「通常時」1995年4月8日の大根島入江T-1, 2および3地点における音響画像

Fig. 19. "Normal windy day" Graphics of the time series data of acoustic profile at the margin of Nakaumi (Nyuko harbor, Daikon-jima Island) T-1, 2 and 3, April 8, 1995

お、水深変化は潮位差約20cm, ほぼ周期12時間の波形を示して変動している。

流向は、下部高塩分層が遡上してくる前の4月8日0~9時までは南向きであるが、塩分変化の3つのピーク時にはいずれも北東方向、下部高塩分層が後退する時(4月8日18時)には南西向きとなっている(図20)。その後は4月9日9時まで北東方向、9時以降はもとの南向きに戻っている。流速は、下部高塩分層の遡上時に速く、5~8m/s(180~288m/h)、遡上のない時は1~3m/s(36~108m/h)内で変動している。以上の結果より、「通常時」の上部低塩分層はゆっくりとほぼ南向きの一定方向に流れているが、下部高塩分層の流れは風速と風向に大きく影響されることを示している。しかし、上部低塩分層の流向も「無風時」とは異なっており、明らかに風の影響を受けているものと考えられる。

下部高塩分層の遡上・後退の様子は、光ファイバー分布型温度計でも捉えられた。図21に4月8日14~19時の湖底温度分布の経時変化を示す。水温の低い下部高塩分層の動きは、光ファイバーケーブルの湖心側に突き出た部分から検知されはじめ、全域に伝播している。

b. 「通常時」の湖心

8月5-7日の湖心T-3地点の音響プロファイルを図22に示した。湖心では図中のような変化パターンが観測期間中最も多く見られた。すなわち、10時ごろから少しずつ波が立ちはじめ、19時ごろに波

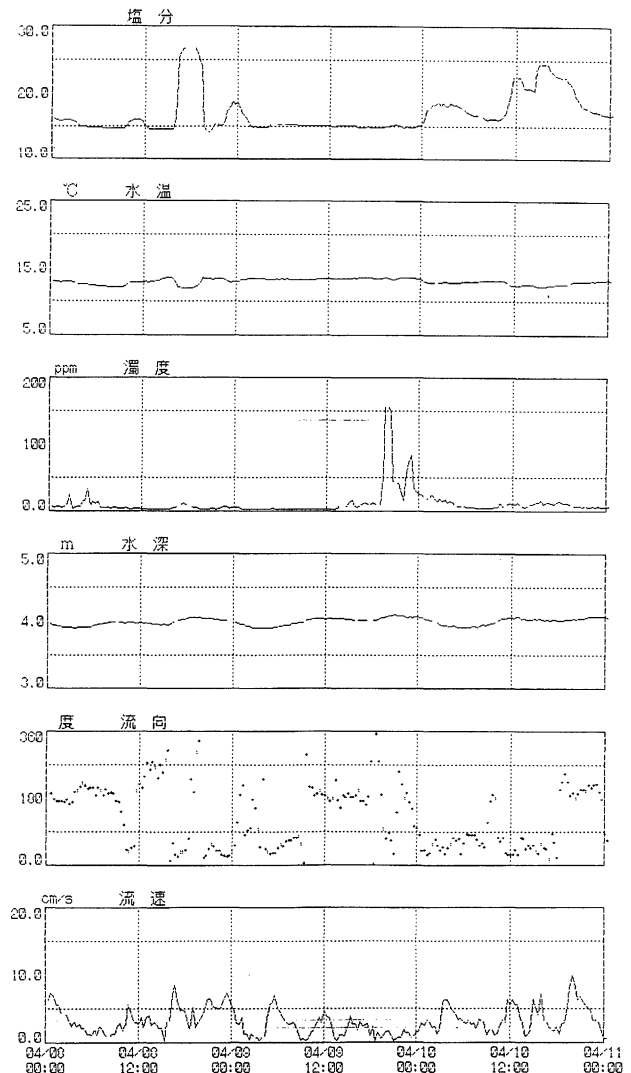


図20「通常時」1995年4月8-10日の大根島入江T-3地点の湖底における塩分、水温、濁度、水深、流向、および流速の経時変化

Fig. 20. "Normal windy day" The time series data of salinity, temperature, muddiness, water depth, water flow direction and water flow rate in lower portion of the lake water at the margin of Nakaumi (Nyuko harbor, Daikon-jima Island) T-3, April 8-10, 1995

が無くなる。この波は全般に西風に起因している(8月5, 6および7日の西風の風速はそれぞれ10m/s前後である)。図22では、波がない場合、塩分躍層による反射面は明瞭ではないが、波浪による水塊の上下振動に伴った散乱波が下方におよぶのに従い、その下に20-30cm幅の反射面が表れてきて、かつ徐々に下方へ(水深約2.5mから約3.5mへ)移動している。この移動する反射面は塩分躍層の移動によるものと考えられるが、水塊の上下振動によってこの反射面が明瞭になる理由は次のように考えられる。すなわち、波の伝播により水塊が振動すると上方から水塊の混合が起こり均一化してゆく。この時、混合した直下では塩分躍層の勾配が増加するので音響反

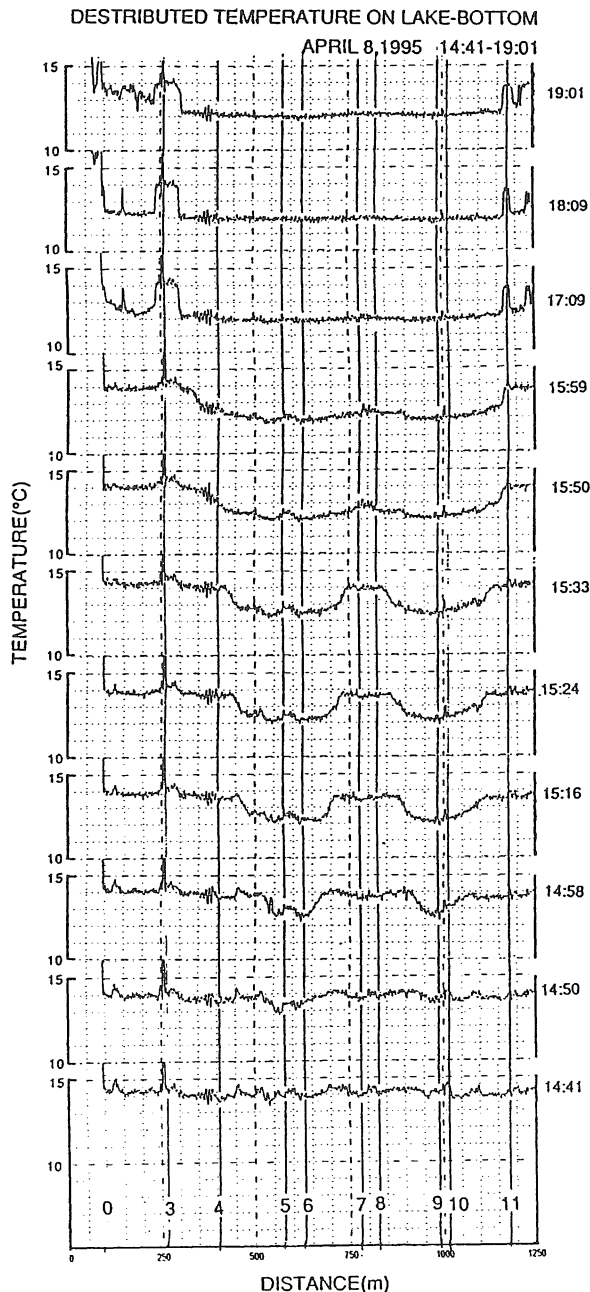


図21「通常時」1995年4月8日の大根島入江T-1, 2および3地点周辺の湖底における、光ファイバーセンサ水温分布の経時変化

Fig. 21. "Normal windy day" The time series data of temperature distribution of the lake bottom by the optical fiber cable system at the margin of Nakaumi (Nyuko harbor, Daikon-jima Island) around T-1, 2 and 3, April 8, 1995

斜面は明瞭になり、かつ、波の下方への伝播とともに移動することが考えられる。また、図22の下部にはもう一枚の反射面が表れている。これは、下部で塩分躍層がもうひとつ形成され、その層が動いている可能性を示唆している。

夏季の湖底における塩分・水温(図23)は、いずれも小さい振幅をもって周期的な変化を示しており、一周期内での最高値はそれぞれ30~31‰、25~26.5℃、最低値は29~30‰、24~26.5℃である。塩分と水

温の相関は良く、共に周期は約1日である。この周期中、高塩分を示す時間帯は、図22の下部第二反射面が表れる時間帯とほぼ一致しているように見える。濁度は、0~10ppm間で周期的に変動しており、濁度の高い時は上げ潮時にほぼ一致する。水深は12時間周期の単純な変化ではなく、一周期おきに高潮はやや低位に、低潮はやや高位となり、全体として約一日周期となっている。この波形は、奥田ほか(1992)が示した、半日潮成分と一日成分の合成された波形とよく似ている。この水深の一日周期のうち最高位の時刻が塩分・水温変動周期の最低値時刻に、最低位の時刻が塩分・水温周期の最高値時刻に一致する。すなわち、「通常時」の湖心においては、下げ潮時に湖水下部の塩分がやや高くなることになる。

流向は、図23に示したように反時計回りに回りながら方向を変えており、約一日で一回転する。一日のうち、上げ潮最高位時に西~南西向き、下げ潮最下位時には南~南東の流れになっており、速度は上げ潮時約3-10cm/s(108-360m/h)、下げ潮時約3-5cm/s(108-180m/h)である。上げ潮最高位時および下げ潮最下位時は、風が吹きはじめる時間帯および午後の最も波立つ時間帯とそれぞれ一致する。一方、湖水上部(水面下1.5m:図24)の流向は下部ほど規則的ではないが、上げ潮最高位時にはほぼ南西~東、下げ潮最低位時には東向きとなっていて、下部の流向と似た傾向を示している。

以上の結果は、夏季における境水道から中海に入ってくる新しい海水の動態を反映しているものと考えられるが、周期的な西風を機動力とした湖水全体の静水振動、内部振動あるいは回転振動等の影響が重なってあらわれている可能性があり、その挙動は単純ではないものと思われる。このような挙動は、今後、広域的に長期観測を行って明らかにして行かなければならないと考えている。

5. ま と め

中海塩分躍層の動態を把握するためには、平常時はもとより荒天時における挙動も含めた連続的長期観測が必要である。本研究では、音響観測装置と光ファイバー分布型温度計、流向・流速計および水質計を組み合わせた長期連続観測システムによって、これまでは捉えることのできなかった塩分躍層のダイナミックな動きを観測した。本研究結果をまとめると以下ようになる。

中海における塩分躍層の変化および湖水の動態は、天候(特に風向・風速)に大きく影響され、「無風時(一日の平均風速が3m/s以下で波のない状態)」,

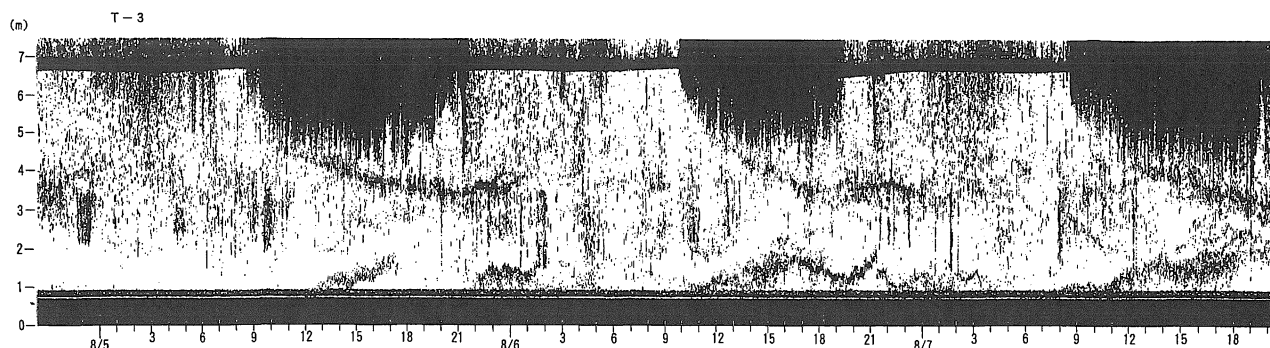


図 22 「通常時」 1995 年 8 月 5-7 日の湖心 T-3 地点における音響画像

Fig. 22. "Normal windy day" Graphics of the time series data of acoustic profile in the center of Nakaumi T-3, August 5-7, 1995

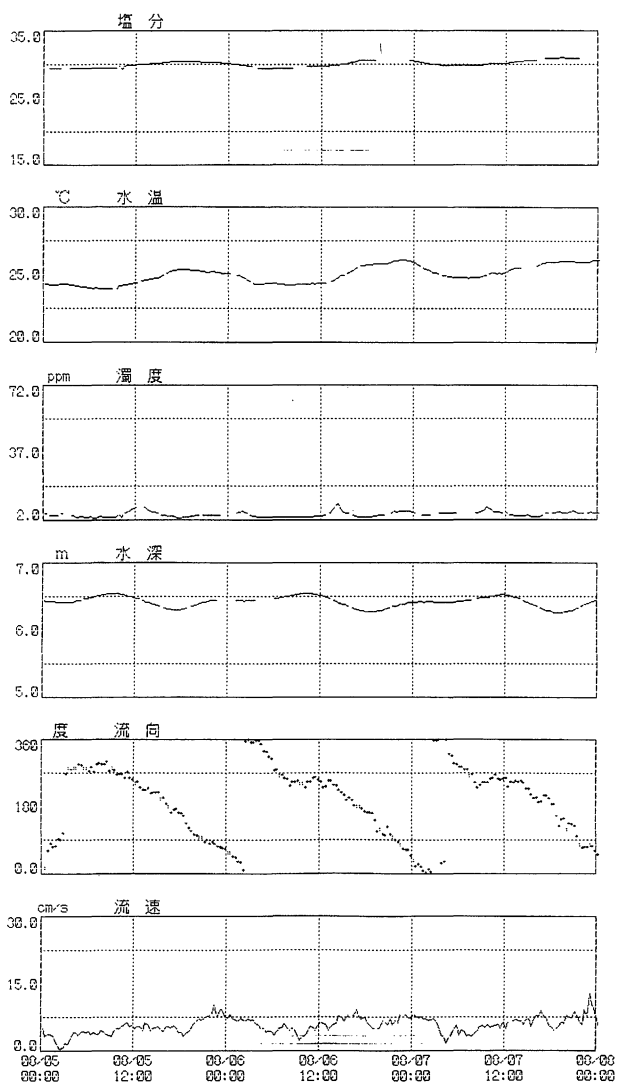


図 23 「通常時」 1995 年 8 月 5-7 日の湖心 T-3 地点の湖底における塩分、水温、濁度、水深、流向および流速の経時変化
Fig. 23. "Normal windy day" The time series data of salinity, temperature, muddiness, water depth, water flow direction and water flow rate in lower portion of the lake water in the center of Nakaumi T-3, August 5-7, 1995

「強風時(荒天に伴って 12m/s 以上の風が観測された状態)」および「通常時(中海で最も多く見られる状態)」でそれぞれ特徴的な傾向が観測された。

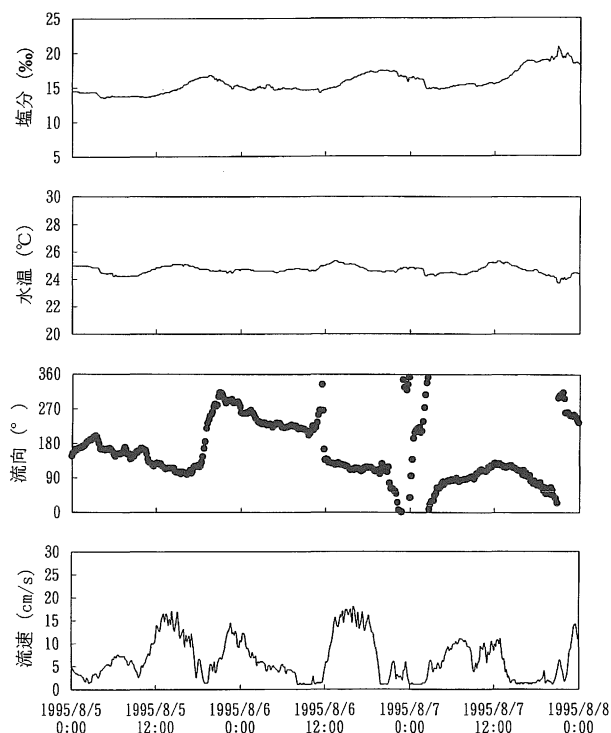


図 24 「通常時」 1995 年 8 月 5-7 日の湖心 T-1 地点の水面下 1.5m における塩分、水温、水深、流向および流速の経時変化

Fig. 24. "Normal windy day" The time series data of salinity, temperature, water depth, water flow direction and water flow rate in upper portion of the lake water (1.5m from the water surface) in the center of Nakaumi T-1, August 5-7, 1995

「無風時」には、塩分躍層は音響観測装置では明瞭に確認されなかった。流速は全般に遅く、入江でほぼ一定の流向(北東)を示していたのに対し、湖心下部の流向は反時計回りに変化していた。

「強風時」には、下部高塩分層が風向と反対方向に大規模に移動して塩分躍層がなくなる様子が観測され(9月16日台風12号)、風が止むと下部高塩分層が戻り、再び塩分躍層が形成された。

「通常時」には、10時ごろから吹きはじめる風速 4-8m/s の西風によって上層が東方向へ流れ、また、

波による下方向への水塊上下振動伝播によって水深3~4mに明瞭な音響反射面が形成された。水深は、12時間周期の単純な変化ではなく、一周期おきに高潮はやや低位に、低潮はやや高位となる、全体として約一日周期の変化を示した。8月5~7日には、この水深の一日周期のうち最低位が夕方表れ、同時に下層の塩分は一日のうちの最高値を示した。この時の流向は南~南東であった。さらに、下層の流向は連続して変化し、反時計回りに一日で一回転した。

今後は、さらに湖全体の動きを詳細に把握するため、広域的な長期同時観測が必要である。下部高塩分層の動きを湖全体でとらえることができれば、特に夏季に形成される貧酸素水塊の湖棚への遡上についても、ある程度、予測が可能となることが期待される。

謝 辞

本研究で用いた光ファイバー分散型温度計についてはワイ・オーシステム(株)(旧日鉦計測システム)の久保田俊輔・頼水星の両氏に、中海湖心部での調査で用いたDGPS装置についてはDXアンテナ(株)の石井真・秋定真の両氏にお世話になり、また現地において協力をいただいた。本研究を行うに際して、建設省中国地方建設局出雲工事事務所には、中海湖心観測所の使用と同所における気象・水質観測データの利用について便宜を図っていただいた。島根県水産試験場三刀屋分場とは一部調査を共同で行うとともに調査への協力をいただいた。中海漁業協同組合には、備船についてご協力いただいた。八束町門脇誠氏には、入江の元合同汽船待ち合い所を使用させていただいた。地質調査所海洋地質部の井内美郎博士、川崎地質株式会社の安間恵博士には本研究の企画の段階からご指導と御教示をいただいた。元松江気象台長の浜田周作氏には中海の気象データについて種々の御教示をいただいた。株式会社シマダ技術コンサルタントには送受波器台座の作成で御支援を受けた。以上の方々および機関に厚く御礼を申し上げます。

なお、本研究には、文部省科学研究費補助金(試験研究B, 06554019, 平成6-7年度, 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 徳岡隆夫)を使用した。記して謝意を表す。

文 献

- 浜田周作・藤田和正(1988) 中海の風と湖水の変動について。島根県地学会会誌, 3: 14-21.
- 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.
- 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.
- 西村清和・松林修・徳岡隆夫・三瓶良和(1995a) 光ファイバー分布型温度センサを用いた湖底湧水の探査。物理探査学会第92回(平成7年春季)学術講演会講演論文集, 320-324.
- 西村清和・徳岡隆夫・三瓶良和・亀井健史・須崎聡・松田滋夫・安間恵・井内美郎(1995b) 汽水域・塩分躍層動態観測システムの開発と長期観測。物理探査学会第93回(平成7年秋季)学術講演会講演論文集, 250-254.
- 奥田節夫・藤井智康・川上誠一(1992) 中海・宍道湖における水位変動性(2)。汽水湖研究, 2: 1-6.
- 奥田節夫・藤井智康・植田敏史(1994) 中海の物理的特性。汽水湖研究(特集, 中海), 7: 21-33.
- 徳岡隆夫・高安克巳・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・高安克巳・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・坂本亨・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.
- 徳岡隆夫・高安克巳・三瓶良和・瀬戸浩二・井内美郎・西村清和・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.