

中海における塩分躍層の動態についての新知見 — 1996 年度の湖底設置型音波探査装置による観測データから —

徳岡隆夫¹・三瓶良和¹・板坂尚孝¹・亀井健史¹

A new discovery on the halocline behaviour At Lake Nakaumi —from 1996 observation by the echo-sounding instrument settled on lake bottom

Takao Tokuoka¹, Yoshikazu Sampei¹, Naotaka Itasaka¹ and Takeshi Kamei¹

Abstract: To investigate the halocline behaviour and water quality in brackish lakes and estuaries, we have already developed a long-term observation system. The system consists of an acoustic observation system and it measures acoustic reflection caused by the rapid change of acoustic impedance at the boundary of the halocline in water. Long-term observations using the system were successfully carried out in Lake Nakaumi. Salinity, pH, dissolved oxygen, water temperature, and water flow rate and direction were also investigated by the other equipments. The results suggest that the halocline is easily moved and its behaviour is influenced by wind significantly. In addition, a simplified model of the halocline behaviour with the wind velocity and the distribution of salinity has been developed. Through the data presented in this paper, the importance of integrated studies of halocline behaviour, and the usefulness of the long-term observation system.

Key words: acoustic observation, brackish lake, halocline, Lake Nakaumi, Lake Shinji

1. はじめに

河口域では河川水と海水が接触混合することによって複雑な流れや水質の変化が見られる。そこには豊かな生態系が存在し、かつ維持されており、人間の生活環境とも深く関わっている。このような水環境を支配している重要な要素として、水の流れと水質が考えられるが、両者は潮汐、地形、水文条件等の変化により常に変動している。潮位差の小さい日本海側の河口では、海水と淡水の混合が弱く、海水と淡水はその密度差のために容易に混合すること

はなく、密度の大きな海水が淡水の下に潜り込む形でその境界には弱混合型の塩分躍層が形成される。

この塩分躍層は、夏季になると密度躍層に温度躍層が加わり、上層部と下層部の水塊が安定するという物理的影響と、下層において呼吸量および分解量が増加するという生物的影響が合わさることにより、容存酸素が少ないいわゆる貧酸素水塊が形成される。このような貧酸素水塊の形成は漁業或いは水質管理上重大な問題となる。

中海における塩分躍層は、大橋川からの淡水～低塩分水と境水道からの海水の流入に風・気圧・気温

¹ 島根大学総合理工学部地球資源環境学教室
Faculty of Science & Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan
E-mail: tokuoka@riko.shimane-u.ac.jp

が影響しあって形成や消滅が起こり、その挙動は極めて複雑である。また、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高塩分層が湖縁に遡上した場合、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恐れがある。

徳岡ほか(1993, 1994)は、貧酸素水塊の形成要因である塩分躍層を音波探査法で観測できることを示し、さらに小型船に探査機を搭載することにより中海における塩分躍層の広域的な分布を明らかにした。しかし、塩分躍層の形成過程とその後の挙動、さらには季節的変動特性と風・気圧・気温等といった自然条件との関係に関しては、実際の観測例が極めて少なく、不明な点が多かった。これは、湖水に大きく影響を与える台風などの荒天時には出航することができず、観測が不可能となるためであるが、塩分躍層はこの時に最も複雑な挙動をとることが考えられるからである。

上記の点に基づいて徳岡ほか(1995, 1996)は、荒天時においても観測可能な固定設置型音響探査装置(塩分躍層動態観測システム)の開発を行い、それを用いて中海において長期観測を行っている。その結果、風と塩分躍層の挙動には密接な関係があり、風速が速くなるにつれて下部高塩分層が移動することを報告している。

以上のような観点から、本研究では湖底の環境等を評価する際には、その湖水の水質および動態の連続的な観測が必要であると考え、水質計(塩分・水温・溶存酸素・pH)、流向流速計(塩分・水温・水深・濁度・流向・流速)および湖底設置型音響探査装置を用いて、中海における塩分躍層の挙動と水質および気象条件との相互関係を定量的な観点から解明することを試みた。

2. 観測場所および観測期間

中海は鳥取県西部から島根県東部にまたがる汽水湖であり、境水道によって日本海と、大橋川によって宍道湖とつながっており、その湖水面積は日本第5位(汽水湖としては北海道のサロマ湖について第2位)である。しかし湖水面積に対して平均水深は5.4 mと比較的浅く、最も深い所でも水深8 m前後(人工改変地を除く)である。

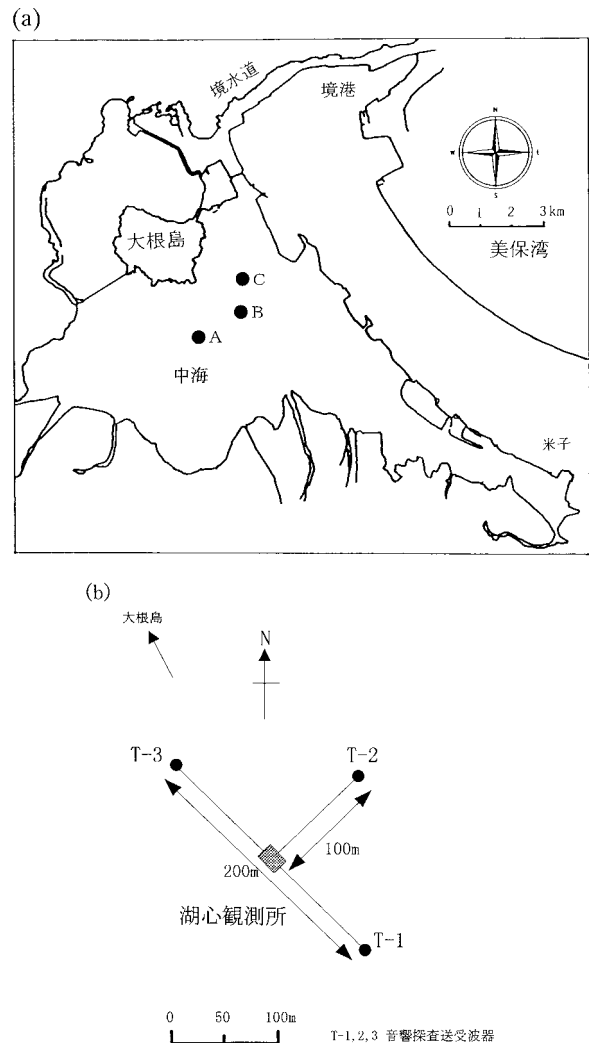


図1 (a) 観測水域, (b) A地点: 建設省中海湖心観測所。

Fig. 1 (a) Map showing the observation area, (b) Observation area A (The Lake Nakami Observatory of the Ministry of Construction).

今回の調査にける観測場所は、場所的な変化を考え、中海湖心から中浦水門にかけて順にA地点、B地点、C地点の3地点を設定した(図1a)。また、音響探査装置はA地点(中海湖心観測所)に設置し(図1b)、観測期間は1996年7月26日から10月29日までの約3ヶ月間である。

3. 観測方法の概要

3.1 湖底設置型音響探査装置(徳岡ほか, 1995, 1996)

本観測装置の概要は音響送受波器・送受信機・システム制御・データ収録器から構成され(図2)、送受波器の下部には沈下防止と固定のため直径50 cm

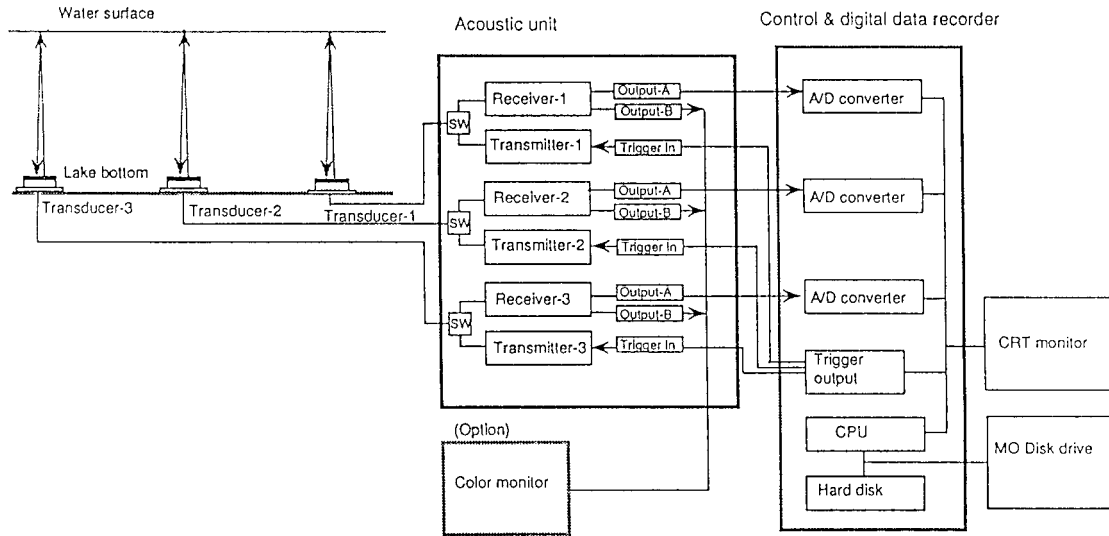


図2 塩分躍層動態観測システムの概要.

Fig.2 Concept of the observation system for halocline behavior.

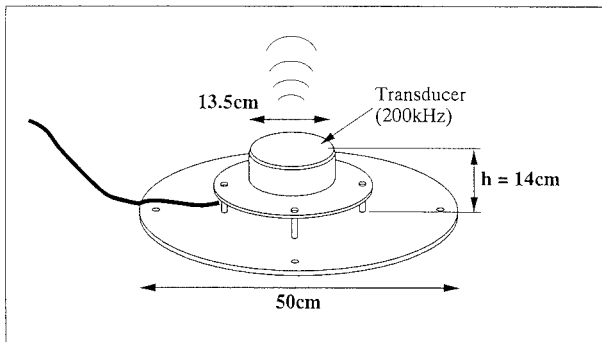


図3 湖底設置型音響送受波器の概観.

Fig.3 Appearance of the transducer fixed on the lake bottom.

の鉄板を取り付けてある(図3). また、送受波器は200 mのケーブルによって音響送受信機に接続され、送受波器により受信されたアナログ信号をシステム制御でデジタルに変換、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され、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。

本装置の原理は一般に使用されている魚群探知機や測深器と同様で、音波(トーン・バースト信号)を送信すると、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、透過波と反射波に分かれて反射波は戻ってくる。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。既に徳岡ほか(1993)および西村ほか(1994)で示さ

表1 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 15~110μs 感度調整 0~30dB
システム制御・データ収録器:	
	A/D変換器 12bit, サンプル周波数 1MHz
	光磁気ディスクドライブ 230Mbyte

れているように、入射波と反射波の振幅比は反射係数 r として

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

で示される。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表す。水中における密度および音速は、塩分と温度の関数で表すことができ、音速の変化は塩分と水温の両方の変化に依存し、密度の変化は主に塩分変化に依存する(西村ほか, 1994)。このことから反射係数は汽水域では主に塩分変化によって変化していると考えられる。本装置ではこの反射面をとらえることによって塩分躍層の動態観測を可能にした。

観測例として図4に10月11日のT-3地点の音響画像を示した。図中の縦軸は湖底からの距離を1 m 間隔で表示している。横軸は時間軸であり、特定の観測地点における時間的な変化をみることができる。この音響画像では反射強度は色によって分けられており、反射強度が増すにつれて淡青, 青, 黄

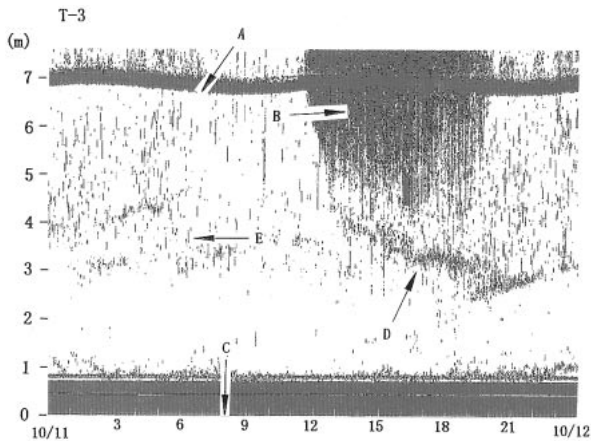


図4 1996年10月11日の湖心T-3地点における音響画像。

Fig.4 Graphics of a time series data of acoustic profile by the halocline behavior long-term observation system (Point T-3 at the center of the lake, Oct. 11, 1996).

緑，橙，赤，黒となる。

徳岡ほか(1996)によれば図中の矢印Aの赤い帯状の下面は水面を示し，矢印Bで示した赤色の反射画像は波による乱反射像である。矢印Cで示される最下部は湖底であり，湖底上90cmまでの赤い帯状の反射画像は機械的信号ノイズマスクである。矢印Dで示される幅30~100cmの帯状の反射面は塩分躍層を表している。その他，矢印Eで示される斑点状もしくは線状の反射画像は魚群および浮遊物によるものと思われる。

3.2 塩分，水温，溶存酸素，pH，水深，濁度，流向，流速

音響探査装置による記録と併せて湖水の動態を把握するため，B地点の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)を設置し観測を行った。この流向流速計には塩分計・温度計・圧力式深度計および濁度計が装備しており，それらの検出部は湖底上50cmに位置する。また3地点すべてにおいて塩分濃度，水温，溶存酸素，pHの水深50cm毎の変化を(株)堀場製作所製の水質チェッカーU-10を用いて約1週間毎に測定した。

4. 観測結果および考察

徳岡ほか(1996)は中海の湖心と湖縁において同システムによる観測を行い(図5)，塩分躍層の挙動は風の強弱によって「無風時」(3m/s以下)，「通常時」(中風)(3~12m/s)，「強風時」(12m/s以上)

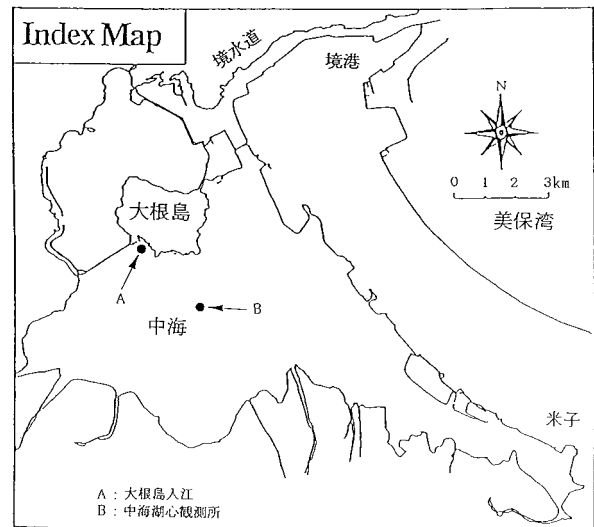


図5 観測水域(徳岡ほか, 1996)。

Fig.5 Observation site by Tokuoka *et al.* (1996).

の三種類のパターンに分けられると報告している(図6, 7)。

今回の観測期間中には12m/s以上の風は観測されなかったが，本研究では風速との関係を細分化して詳細に議論することができた。すなわち，風速を「無風時」(0~4m/s)，「微風時」(4~6m/s)，「弱風時」(6~8m/s)，「中風時」(8~12m/s)と定義し，それぞれに対応する塩分躍層の挙動を議論した。図8にそれぞれの風速時の湖心T-3地点の音響画像を示した。「無風時」には明瞭な塩分躍層の反射面は見られず，「微風時」には反射面が水深約3.5mに見られ，それが「弱風時」・「中風時」となるとそれぞれ水深約4.5mから5.5mへと移動している。ただし，ここでいう塩分躍層とは，徳岡ほか(1996)で示された音響探査装置の検出感度である3‰/50cm以上の変化である。以下にそれぞれの風速時の特徴と湖水の動態について考察する。

ただし，本研究において用いた風向・風速等の気象データは，全て建設省出雲工事事務所中海湖心観測所の1時間ごとの観測データである。

4.1 「無風時」

今回の調査期間中，中海において一日中ほとんど4m/s以上の風が吹かなかった日は8月26, 28, 29日，9月4, 5, 6, 25, 26日，10月12, 14, 18日であった。中海においてこのような状態はまれである。「無風時」の代表的な例として，9月6日0時~24時のT-3地点の音響画像を図8に示した。9月5日~9月6日18時にかけては風速4m/s以上の風が

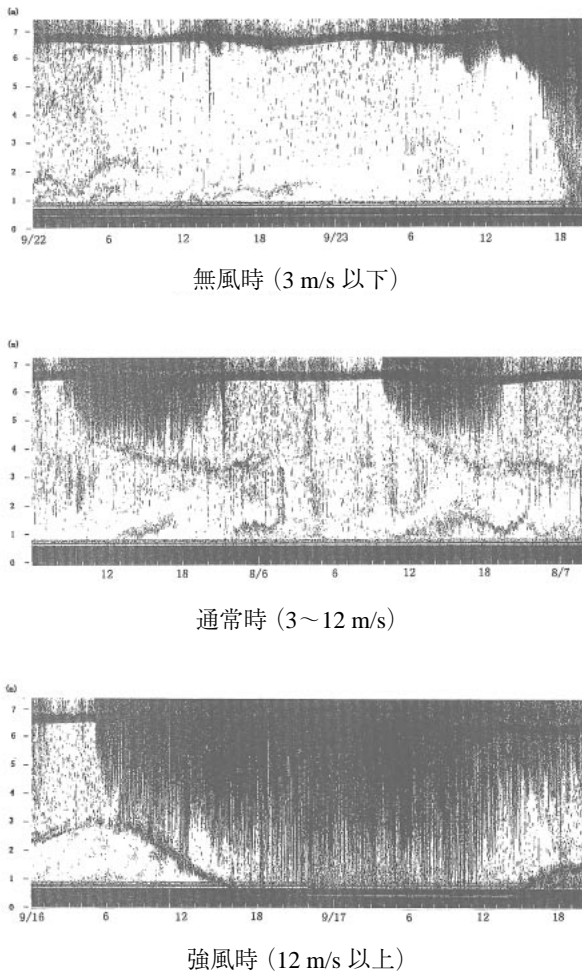


図6 中海湖心音響画像 (徳岡ほか, 1996).
Fig.6 Graphics of a time series data of acoustic profile at the center of the lake (Tokuoka *et al.*, 1996).

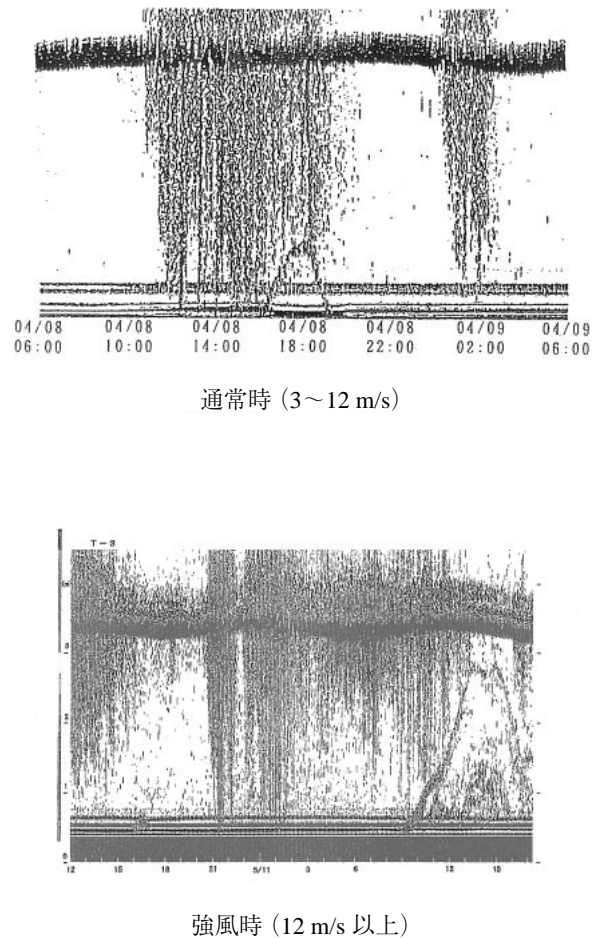


図7 中海湖縁音響画像 (徳岡ほか, 1996).
Fig.7 Graphics of a time series data of acoustic profile at the margin of the lake (Tokuoka *et al.*, 1996).

吹くことはほとんどなく、降雨は観測されなかった。このときの水質特性を図9に示した。塩分は表層の約17%から湖底の約31%までほぼ等勾配で増加している。音響画像においても塩分躍層の明瞭な反射面は見られていない。この理由としては、「無風時」には波がほとんどないため、拡散等の作用によって塩分勾配が均等に近くなり、塩分躍層は消滅し、音響画像で捉えられなかったと考えられる。このことは徳岡ほか(1996)でも指摘されている。

溶存酸素は水深3mまでは10 mg/l前後で、それ以下では水深が深くなるにつれて徐々に減少し、水深6mで無酸素となっている。水温は表層から湖底まで約26℃であった。

4.2 「微風時」

今回の調査期間中の中海において少なくとも半日以上4~6 m/sの風が吹き続けた日は9月1, 2日, 10

月2, 4, 5日であった。中海において4~6 m/sの風はほぼ毎日吹いているが半日以上吹き続けることはほとんどなかった。「微風時」の代表的な例として、10月4日15時~5日15時までのT-3地点の音響画像を図8に示した。この期間中は風速4~6 m/sの西南西の風が吹き続け、降雨は観測されなかった。音響画像では水深3.5m付近に塩分躍層の反射面が見られる。この理由としては、「微風時」になると波の伝播によって湖水が上方から混合され均一化される。このため混合した直下では塩分勾配が増加し、水深約3.5mに塩分躍層が形成され、音響画像で捉えることができたものとする。

塩分は湖面の21.2%から湖底6.7mでは32.4%まで増加し、水深3.5~4mで塩分勾配は最大の4.8%/50cmとなっている(図10)。また、溶存酸素は塩分躍層の存在する水深3.5mから急減し、水深4.5m以下ではほぼ無酸素となっている。水温は湖面

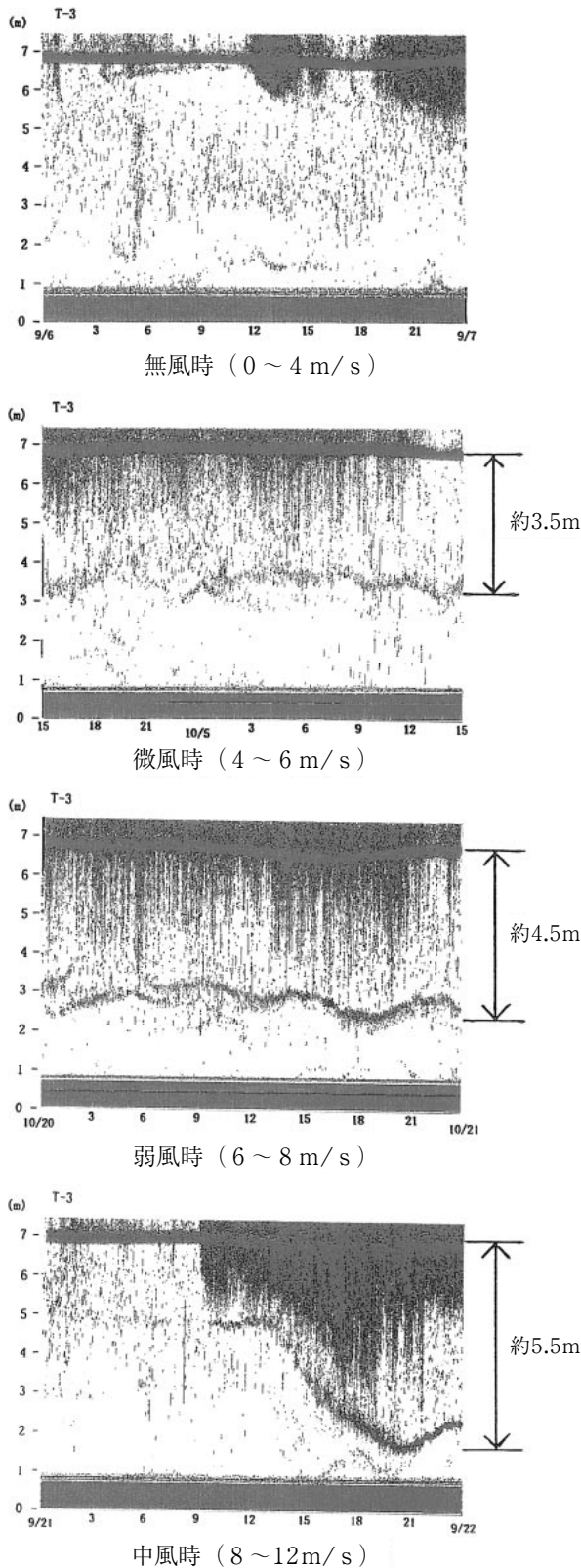


図8 「無風時」, 「微風時」, 「中風時」の中海湖心 T-3 地点における音響画像。

Fig.8 “Windless day”, “a breeze day”, “medium-windy day” Graphics of the time series data of acoustic profile at the center of the lake T-3.

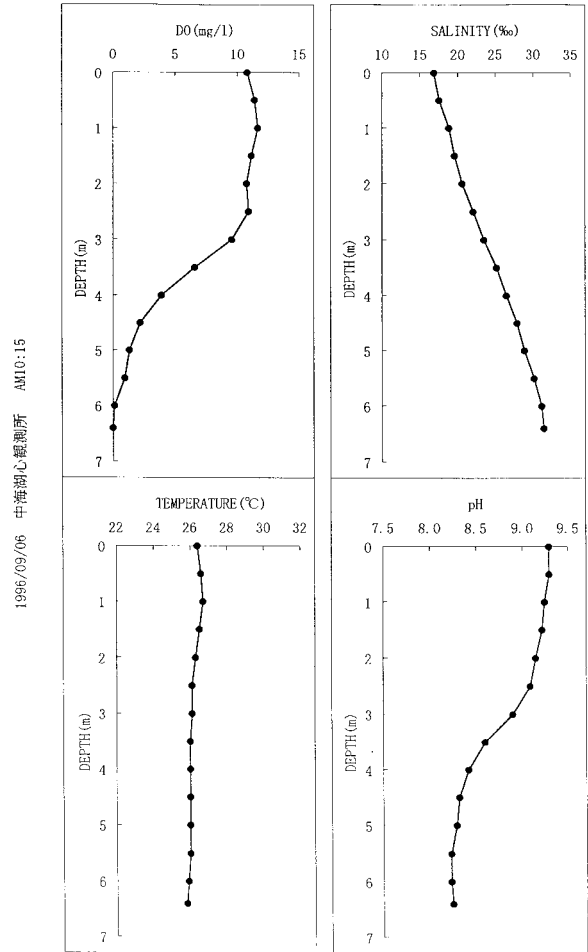


図9 「無風時」の湖心における塩分, 水温, 溶存酸素および pH の鉛直分布。

Fig.9 “Windless day” Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH.

の 20.6°C から湖底 6.7 m では 23.9°C まで増加し, 水深 3.5~4.5 m で水温勾配は最大となっており, 温度躍層の逆転が見られる。

4.3 「弱風時」

今回の調査期間中の中海において少なくとも半日以上 6~8 m/s の風が吹き続けた日は 9 月 7 日, 10 月 1, 20 日であった。中海において 6~8 m/s の風は頻繁に吹いているが半日以上吹き続けることはほとんどなかった。この中でも「弱風時」の代表的な例として 10 月 20 日 0 時~24 時の T-3 地点の音響画像を図 8 に示した。この期間中は風速 6~8 m/s の北の風が卓越し, 降雨は観測されなかった。音響画像において塩分躍層の反射面は 9 時には水深約 4 m に存在しているが, 19 時には水深約 4.5 m に移動している。これは 13 時から 20 時まで吹き続けた

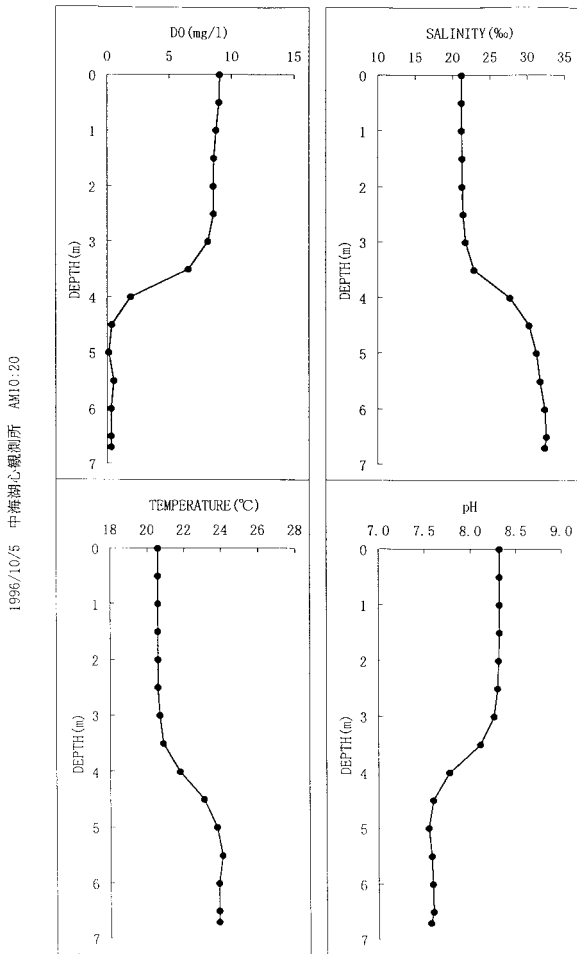


図10 「微風時」の湖心における塩分、水温、溶存酸素およびpHの鉛直分布。
Fig.10 “a breeze day” Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH.

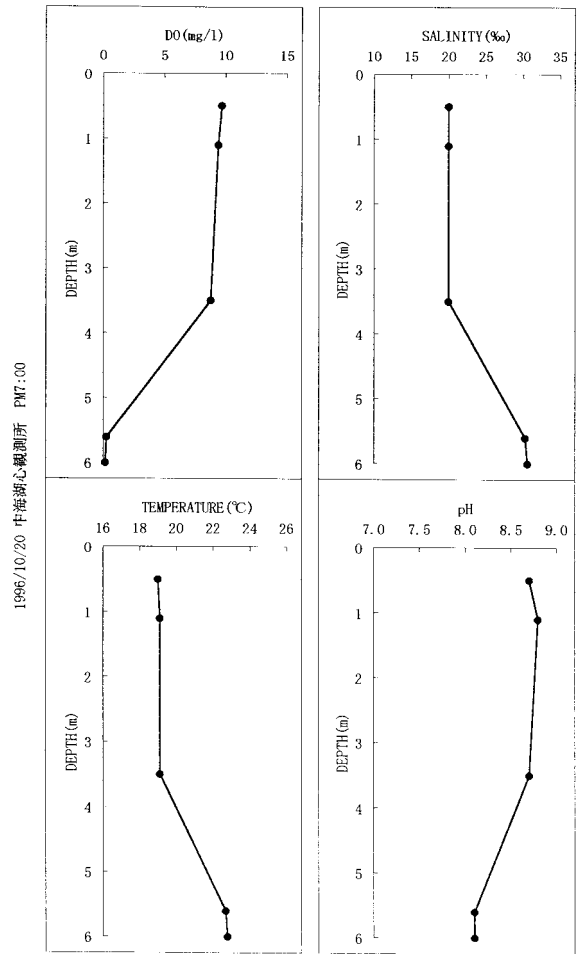


図11 「弱風時」の湖心における塩分、水温、溶存酸素およびpHの鉛直分布。
Fig.11 “Faint-wind day” Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH.

風速6~8 m/sの風によって、湖水が水深約4.5 mまで混合し、その直下に塩分躍層が形成され、音響画像に捉えられたと考えられる。

また、塩分・水温・溶存酸素は共に水深3.5 mまで一定であり、水深6 mではそれぞれ30.6‰、22.8℃、0.2 mg/lとなっており、鉛直的な測定点数が少ないため塩分躍層を確認することはできなかったが、反射面より浅い深度では湖水が均一化し、深い深度ではほぼ無酸素となっていた(図11)。このことから音響画像において反射面の見られる水深約4.5 mに塩分躍層が存在していることが考えられる。

4.4 「中風時」

今回の調査期間中の中海において少なくとも半日以上8~12 m/sの風が吹き続けた日は8月30, 31日, 9月21, 22日, 10月26日であった。中海にお

いて8~12 m/sの風が吹くことはあまりなく、半日以上吹き続けることはほとんどなかった。この中でも「中風時」の代表的な例として9月21日0時~24時のT-3地点の音響画像を図8に示した。9月21日は13時から風速8~2 m/sの北東の風が吹き、18時には11.9 m/s(同日最大風速)となった。また、降雨は観測されなかった。音響画像において塩分躍層の反射面は9時に水深2 mに現れ、13時から徐々に下方に移動し、20時には水深5.3 mにまで達した。これは13時から吹き続けた風速8~12 m/sの風によって、湖水が水深5.3 mまで混合し、その直下に塩分躍層が形成されたと考えられる。

また、塩分・溶存酸素は共に水深3.5 mまで一定であり、水深6.5 mではそれぞれ29.4‰、0.2 mg/lとなっており塩分躍層は確認できず、反射面より浅い深度では湖水が均一化し、深い深度ではほぼ無酸

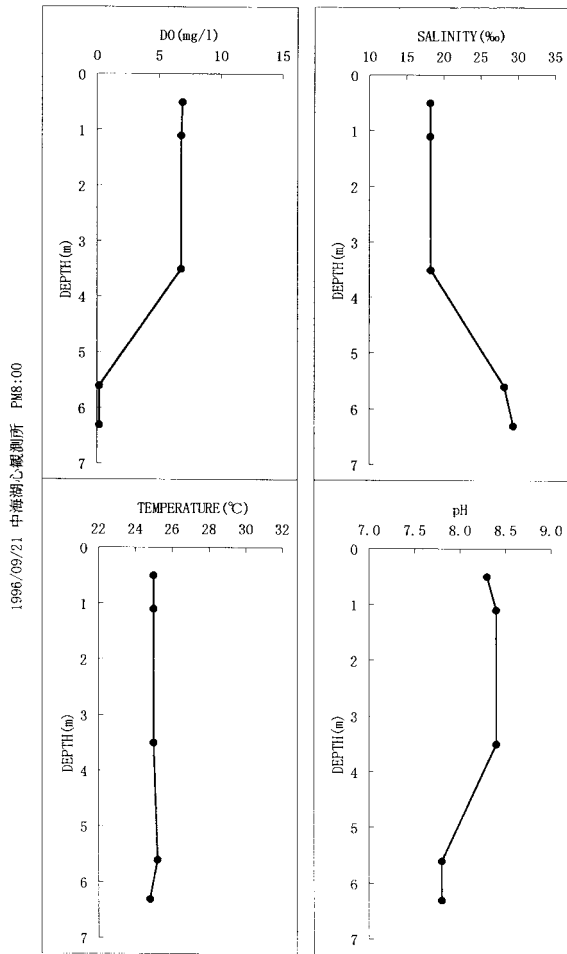


図12 「中風時」の湖心における塩分、水温、溶存酸素およびpHの鉛直分布。

Fig.12 “Medium-wind day” Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH.

素となっていた(図12)。水温は表層から水深6.5mまで約25°Cと一定であり、温度躍層は見られなかった。これらのことから「弱風時」と同様に音響画像において反射面の見られる水深5.3mに塩分躍層が存在することが考えられる

4.5 湖水のサイクル

図13に10月15日0時~10月21日0時の音響画像と風速・塩分およびDO(それぞれ水深1.1m・3.5m・5.6mにおける測定値)の経時変化を示した。10月15日12時頃から吹き始めた6~10 m/sの風によって音響画像では水深約3.5mに反射面が現れている。またそれと同時に塩分濃度は上層で18‰から21‰まで増加し、中層で25‰から21‰まで減少している。溶存酸素は上層ではほとんど変化はなく、中層では5.0 mg/lから上層と同じ値である9.0 mg/lまで増加している。このことから風が吹くことによって音響画像の反射面が見られる深度まで湖水が均一化したことがわかる。

しかし、その後風が弱まるとすぐに元の状態に戻っており、さらに「無風時」の状態が続いた10月18日0時から10月19日9時においては、塩分・DOとも上層と中層の差は広がり勾配が緩やかになっていることが明らかとなった。またその後10月19日15時から6~10 m/sの風が吹き始めると音響画像では反射波が水深4m前後に現れ、それと同時に塩分・DOは中層が上層に歩み寄る形で、湖水が少なくとも水深3.5mまで均一化されている。またこの時下層では無酸素となっていた。

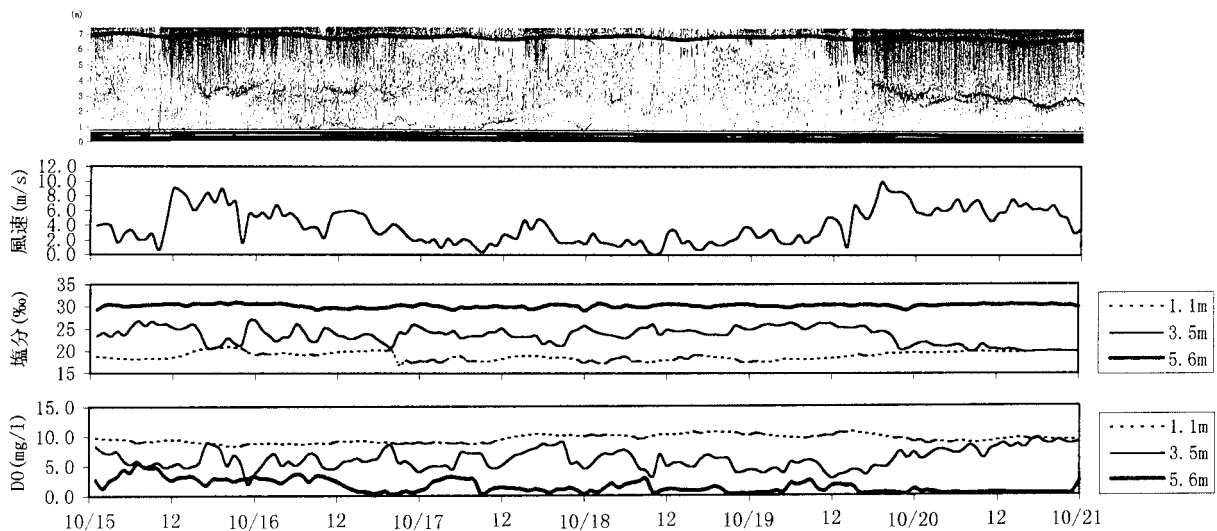


図13 1996年10月15-21日の湖心T-3地点における音響画像と風速、塩分および溶存酸素の経時変化。
Fig.13 Graphics of a time series data of acoustic profile, wind velocity, salinity and dissolved oxygen.

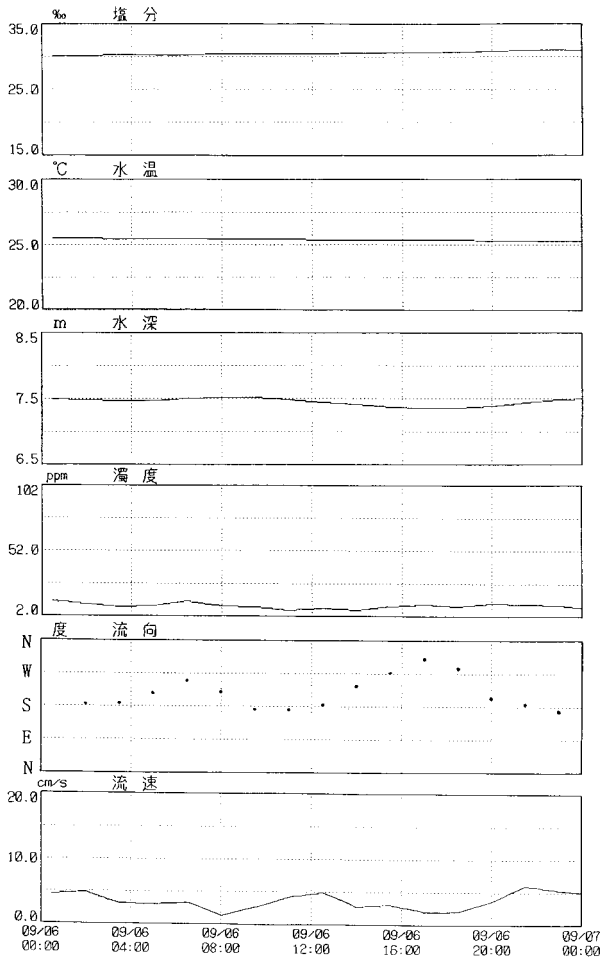


図14 「無風時」のB地点湖底における塩分、水温、水深、濁度、流向および流速の経時変化。

Fig.14 “Windless day” time series data of salinity, temperature, water depth, muddiness, water flow direction and waer flow rate at B point.

これらのことから中海においては、風が吹くと湖水が音響画像で反射面の見られる深度まで均一化し、風が弱まると元の状態に戻り、さらにまた風が吹くと均一化するというサイクルで湖水が挙動していることが明らかとなった。

4.6 水域による特徴

図14に「無風時」のB地点の湖底における水質の経時変化を示した。塩分濃度・水温はそれぞれ30.5‰、25.5℃とほぼ一定の値を示し、濁度変化はほとんど見られない。流向は上げ潮時にはSE~SWの南成分で、そこから下げ潮になるにつれてSW~W~NWと変化した。流速は満潮時・干潮時に遅くなる変化を示した。このことからB地点の湖底においては、潮汐に伴って海水が流出入していると考ええる。また、A、B、C地点における9月21日8時

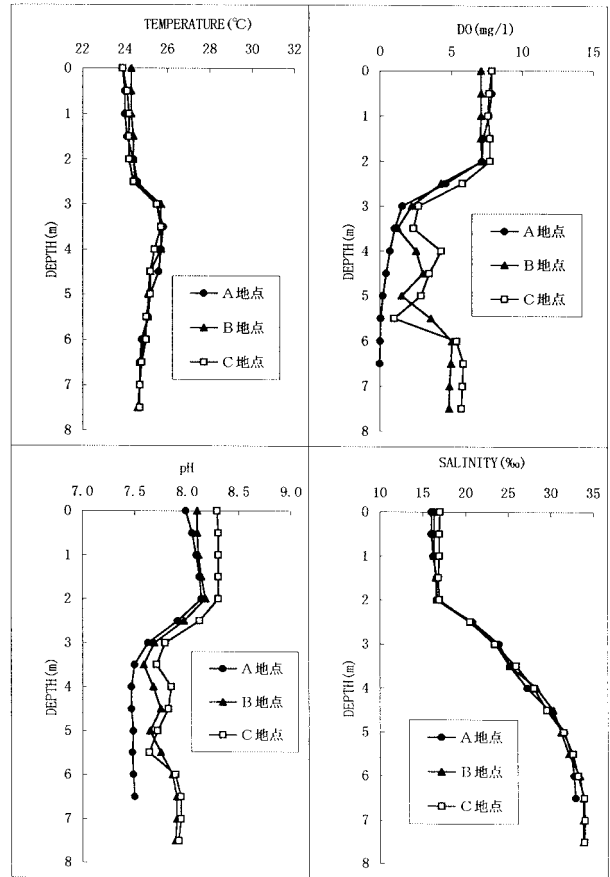


図15 1996年9月21日8時45分のA、B、C地点における塩分、水温、溶存酸素およびpHの鉛直分布。

Fig.15 Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH at 08.45, Sept. 21, 1999 at points A, B and C.

15~45分に測定した水質の鉛直変化を図15に示した。塩分濃度は3地点とも水深2mまで16~17‰とほぼ一定であり、そこから徐々に増加し、湖底では33~34‰となっている。

また、水温も3地点とも同様の変化を示し、表層・約24℃、中層・約26℃、下層・約25℃となっている。しかし、溶存酸素はA地点では湖底で無酸素となっているのに対し、B・C地点は湖底でそれぞれ4.86 mg/l、5.71 mg/lと高い値を示している。これらのことからB・C地点の湖底においては比較的高い溶存酸素を有する海水が潮汐に伴って流入していると考えられる。

以上のことから、中海における塩分躍層および下部高塩分層の挙動は、図16のように考えられる。すなわち、「無風時」には湖水はあまり大きな挙動をしないため、拡散等の作用により塩分勾配が均等に近くなり、塩分躍層は存在しない。ところが、「微風時」になると波の伝播によって湖水が上方から混

合され均一化される。このため混合した直下では塩分勾配が増加し、水深約 3.5 m に塩分躍層が形成される。

さらに風が強くなり「中風時」になると湖水の攪拌される深度は深くなり、湖心では水深約 5.5 m に塩分躍層が形成される。またこのとき下部高塩分層は湖心から湖縁に移動する。台風のような「強風時」では下部高塩分層の移動はさらに顕著である(徳岡ほか, 1996)。このことから中海においては、風による湖水の攪拌と湖水の振動は複合的に起こっていると考えられる。

また、B・C 地点の湖底においては潮汐に伴って海水が流入し、その海水は比較的高い溶存酸素を含んでいることが明らかとなった。

今後は、さらに湖水全体の動きを把握するため、広域的な長期同時観測を行うことが必要であると考えられる。

引用文献

- 西村清和・安間恵・土屋洋一・松田滋夫・徳岡隆夫・井内美郎(1994) 塩水楔のための水中音波探査機の開発, LAGUNA (汽水域研究) **1**: 1-9.
- 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(2). 汽水湖研究, **2**, 1-6.
- 奥田節夫・藤井智康・植田敏史(1994) 中海の物理特性. 汽水湖研究, **7**: 21-33.
- 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), **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.
- 徳岡隆夫・高安克己・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.
- 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.

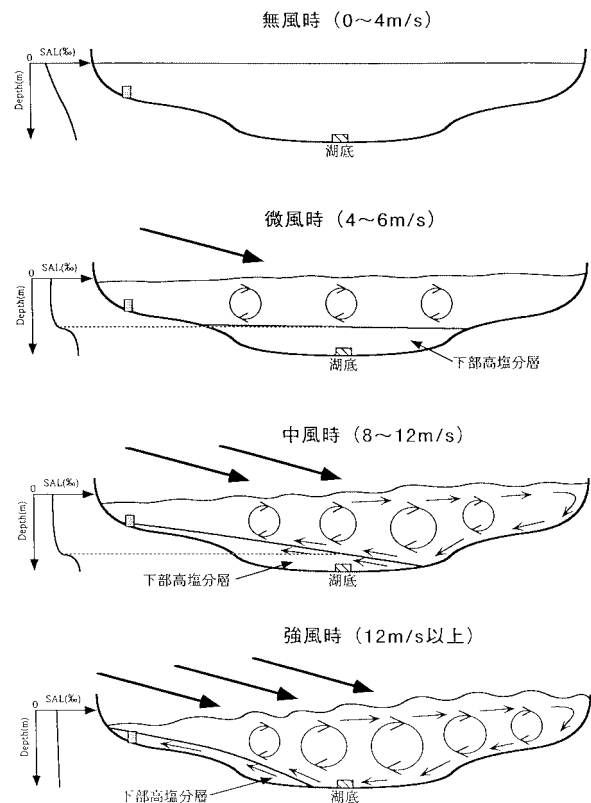


図 16 中海における風に伴う湖水の挙動。

Fig.16 Schematic illustration of the movement of lake water caused by wind in Lake Nakaumi.

追記：この研究は 1996 年度に島根大学理学部地質学科の板坂尚孝の卒業研究「汽水湖中海における塩分躍層の挙動と水質特性に関する研究」として観測を行い、まとめたものである。この後、このような研究に関連した観測機器開発のための観測の場を江の川に移したために、この研究成果を公表する機会を失ってきた。しかしながら、無風時が続いた場合には塩分躍層は消失し、微風時になるとともに塩分躍層が形成されていくことを観測データから指摘したことは 1 つの知見であるので、ここに報告することにした次第である。その後の研究の進展を取り入れずに報告をまとめたことについてはお詫び申し上げます。当時、観測機器の開発をともに行ってきた地質調査所西村清和氏、千本電気(株)須崎聡氏らをはじめとする塩水楔研究グループ各位、汽水域研究センターの高安克己教授、および中海湖心における観測データを利用させていただいた建設省出雲工事事務所にお礼申し上げます。(徳岡隆夫)