

中海中浦水道における水質動向

宇野誠高¹・田中秀典²・大塚泰介³・高安克己²・鮎川和泰⁴

Water quality tendency in Nakaura channel, the outlet of Lake Nakaumi, Japan

Nobutaka Uno¹, Hidenori Tanaka², Taisuke Ohtsuka³,
Katsumi Takayasu² and Kazuyasu Ayukawa⁴

Abstract: Salinity, dissolved oxygen and water temperature were continuously measured in the Nakaura channel, the outlet of the Lake Nakaumi, from April 1, 1999 to April 4, 2000. The measurements are carried out near the surface (1 m deep) and near the bottom (11 m deep). As a result, the salinity showed large daily and seasonal variation near the surface, whereas it was comparatively steady near the bottom. Fast Fourier transformation analysis detected its periodic fluctuation with the cycle of 12.52 hours near the surface, and 12.36- and 25.52 hours near the bottom, suggesting influence by tide. The salinity near the bottom also showed 14- and 28 days cycle, corresponding to the lunar tidal changes. Near the bottom, the temperature and the dissolved oxygen also showed periodic pattern corresponding to the tide. In contrast, they showed clear daily cycle near the surface.

Key words: Nakaura channel, continuously observation of water quality, daily and seasonal variation of water quality, tidal changes, Fast Fourier transformation analysis

はじめに

中海・宍道湖は島根県東部から鳥取県西部に位置する汽水湖である。図1は中海・宍道湖の位置関係を示したものである。中海は斐伊川水系の下部に位置し、大橋川を介し宍道湖と、中浦水道・境水道を介し日本海とそれぞれ連絡している。中海には下げ潮時に大橋川から低塩分水が流入し、上げ潮時に境水道・中浦水道から海水が流入する。日本海の潮位差は20~30 cmと小さいため、遡上してくる海水は低塩分水とあまり混ざらず、いわゆる塩水楔を形成

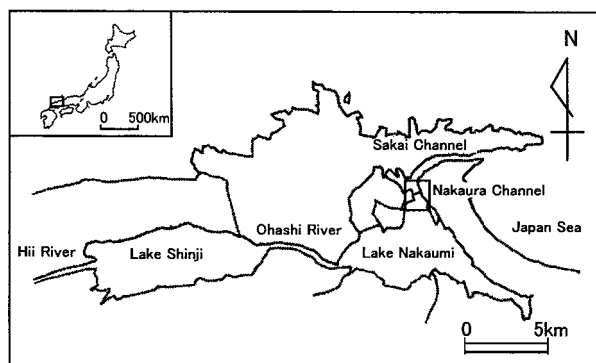


図1 中海・宍道湖周辺の概念図。
Fig.1 Location map of Lake Nakaumi and Lake Shinji.

¹ 筑波大学大学院環境科学研究科 Graduate School of Environmental Science, Tsukuba University, Tsukuba 305-8572, Japan
E-mail: nobutaka-u@mc.neweb.ne.jp

² 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

³ 滋賀県立琵琶湖博物館 Lake Biwa Museum, Kusatsu 525-0001, Japan

⁴ 環境システム株式会社 Environmental System Co. Ltd., Amagasaki 660-0893, Japan

する。

毎年夏季に中海・宍道湖湖盆に貧酸素水塊が形成され、これは漁業・環境上の大きな問題となっている。この貧酸素水塊の形成は、日本海から境水道・中浦水道を経て流入してきた海水と強いつながりがある(橋谷ほか, 1991)。中海湖底で形成された高塩分・低 DO 水は潮汐や気圧の影響を受けて、大橋川の河底を遡上し、宍道湖へと流れ込む(橋谷ほか, 1992)。したがって海水の流入口である境水道から中浦水道にかけての水塊動態は中海・宍道湖全体の環境に大きな影響を及ぼしていると考えられるが、高塩分水の動態について十分には解明されていない。

本研究では中浦水道を通過する水塊の動態を把握することを目的とした。そこで、中浦水道の一定点に水質計を設置し、水温・塩分・溶存酸素(Dissolved Oxygen, 以下 DO)に関して連続観測を行った。また大潮時と小潮時に、潮の干満による流向流速と水質の変化を把握するため、流向流速計と水質計を用いた流動集中観測を行った。

観測方法

2-1 調査地点

図2に中浦水道の拡大図を示す。中浦水道は、江島と弓浜半島の間に位置し、幅約0.5 km、全長1.5 km、平均水深は7 mである。中浦水道の中ほどには、かつての中海・宍道湖淡水化計画事業のひとつとして昭和48年に建設された中浦水門がある。中浦水門は密度流及び潮汐による下流から上流への流れを消失させ、下流向の一様な流れにすることを目的としていた(南ほか, 1983)ため、水門周辺の地形は人為的に変えられており、除塩のために塩水ポケット(塩水溜)が作られた。現在の水深は13~14 mであり、橋谷・奥村(1990)によれば塩水溜には褐色汚泥が約30 cmの厚さに堆積しており、その下は固い砂質層で構成されている。

2-2 調査方法

図2に示す地点において水質の連続観測と流動の集中観測を行った。以下にその内容を示す。

1) 水質連続観測

多項目水質計(ハイドロラボ社, データゾンダー3)を使用して、水温・電気伝導度・塩分・DO(溶存酸素)を測定した。水質計は農水省管理の観測塔

に設置し、水質計の設置深度は表層1 mと下層11 mの2点とした。表層の水質計は観測塔から垂下したロープに係留した。下層の水質計は、観測塔に結束された塩化ビニール製のパイプ内に投入し、ロープに係留した。パイプは水質計の保護、固定を目的としたもので、センサー部分には水を通すために多数の孔があげられている。測定間隔を10分に設定した。観測を開始したのは1999年4月1日である。本研究では2000年4月5日までの約1年分のデータを解析した。

3~4週間に1回、水質計のメンテナンスを行った。センサーおよびその周辺への生物(フジツボ、ヒドロ虫、ゴカイ、藻類など)の付着が表層において著しく、これが測定値に影響を及ぼすおそれがあった。そこで設置水質計の検定のために、メンテナンスの前後に、連続観測用の水質計2本と直読式多項目水質計(ハイドロラボ社, H-20型)とともに現場の表層水で満たしたバケツ中に入れ、水質を同時に測定した。

またメンテナンス時に、水深1 mごとの水温・電気伝導度・塩分・DOを直読式多項目水質計を用い

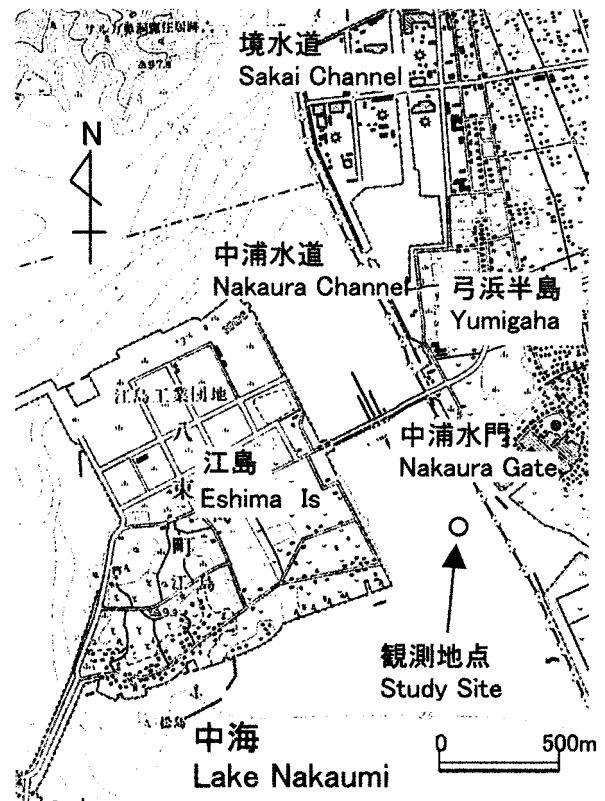


図2 中浦水道における観測地点(国土地理院地形図2万5千分の1「境港」より)。

Fig.2 Location map of study site of the Nakaura channel.

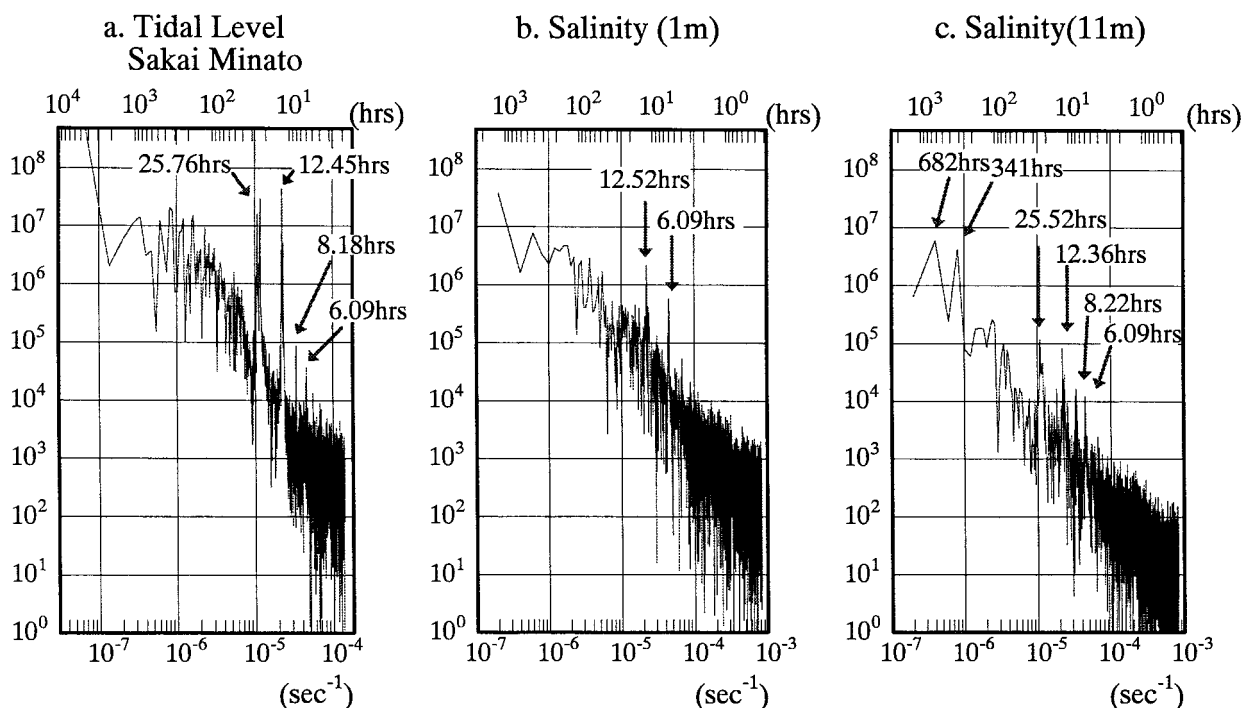


図3 中浦水道における表層と下層の塩分と境港の潮位のパワースペクトル。

Fig.3 Power Spectra of (a) tidal level at Sakaiminato, (b) 1 m deep and (c) 11 m deep salinity at the Nakaura Channel.

て測定し、それぞれの鉛直分布を調べた。

2) 流動集中観測

流動観測の測定項目は流向流速と水質（水温・電気伝導度・塩分・DO）である。流向流速の測定に、水中投下式で直読式の電磁流向流速計（アレック電子製 ACM 210-D）を使用し、水質測定に直読式多項目水質計（ハイドロラボ社 H-20 型）を使用した。

水質連続観測を行っている観測塔周辺の 1 地点に船を係留し、20 分間隔で測定を行った。流向流速計と水質計を船上から鉛直下向きに下ろし、表層 0 m から底まで 1 m 間隔で計測を行った。

小潮流動調査を 1999 年 11 月 30 日の午前 7 時 10 分から午後 4 時半まで、大潮流動調査を 12 月 24 日の午前 7 時 40 分から午後 2 時（強風のため途中で中止）まで行った。

3) パワースペクトル解析

一般に汽水湖では潮汐による強制振動と、湖の形状や密度成層状態による固有振動とが結びついた複雑な振動が出現する。振動の卓越成分を抽出するためには連続した水位・水質データを用いて、スペクトル解析を行う必要がある（奥田, 1991）。そこで中浦水道を通過する水の周期性を明らかにするため

に、連続観測データに対して FFT（Fast Fourier Transform）によるパワースペクトル解析を行った。1999 年 4 月 1 日 17 時から 1999 年 5 月 29 日 23 時までの表層・下層の連続水質データ 8191 点を解析に使用した。また、測定された水質データに影響を及ぼすと考えられた潮位について、中浦水道より日本海側に位置する境港のデータに FFT 解析を適用した。図 3 は表層・下層塩分と境港潮位の FFT 解析結果である。

なお、境港の潮位データは境測候所が測定したデータを使用させていただいた。

結 果

1) 使用データ

水質連続観測においては前ファイル未消去によるメモリー不足やバッテリー切れ、台風の影響による水質計・パイプの破損等による欠測がしばしばあった。図 4 に観測期間に得られたデータ期間を示す。

2) 連続観測季節変動

1999 年 4 月 1 日から 2000 年 4 月 4 日までの約 1 年間の表層と下層の水温、塩分、DO の時系列を図 5 に示す。

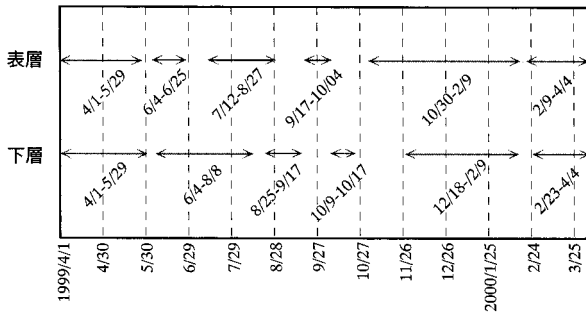


図4 水質連続観測期間.
Fig.4 The observation term of water quality.

水温は表層・下層ともに1999年4月から7月にかけて上昇し、8月は安定、9月から2000年1月まで低下し、2000年1月から4月まで安定していた。塩分は表層が8~25 psuの範囲で大きく変動したのに対し、下層は30~34 psuの範囲で安定していた。表層のDOは1年を通じて飽和状態(年平均109.8%)であった。下層のDOは1999年4月に平均100

%を超えていたが、夏に向かうにつれて値は徐々に下がり、6月と7月、9月にはDO値が10%を下回ることがあった。9月以降、下層のDO値は上昇し、50~100%の範囲で変動していた。

月周期変動

図6は1999年4月1日から5月29日までの下層の水温、塩分、DOの時系列図と同時期の境港の潮位を示したものである。

下層の塩分には、潮相に対応する半月周期の変動が見られた。すなわち中潮・大潮にかけて低下し、小潮・長潮・若潮にかけて上昇する周期的な変動が認められた。FFT解析では682時間と341時間の周期が検出された(図3)。これを日数に換算するとそれぞれ28日、14日である。

下層のDOについても塩分と同様に、中潮・大潮にかけて低下し、小潮・長潮・若潮にかけて上昇する傾向を示した。

短期変動

FFT解析の結果、1999年4月1日17時から1999年5月29日23時までの表層の塩分には、12.52時

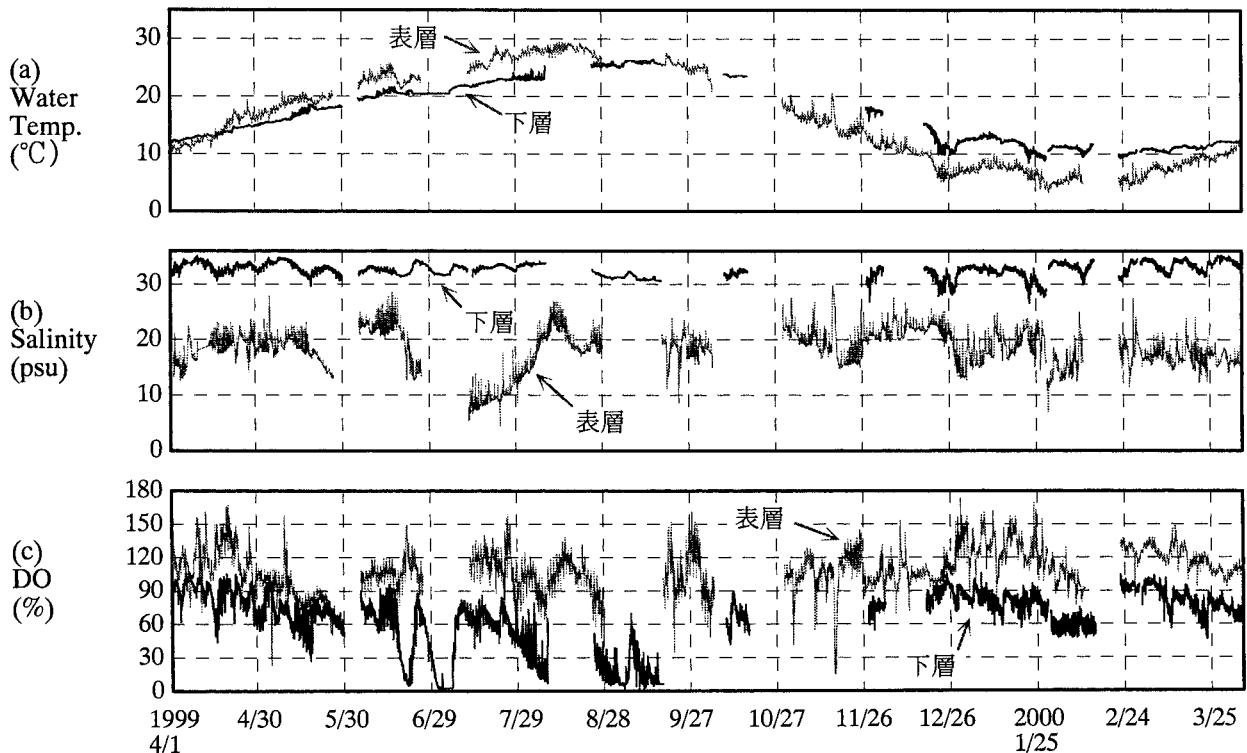


図5 中浦水道における表層(1m)と下層(11m)の水質連続観測結果(1999年4月1日~2000年4月4日)。(a)水温(細線、水深1m;太線、水深11m)、(b)塩分(細線、水深1m;太線、水深11m)、(c)DO(細線、水深1m;太線、水深11m)
Fig.5 Time series data of (a) water temperature (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep), (b) salinity (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep), (c) DO (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep) of the Nakaura channel (1 Apr 1999~4 Apr 2000).

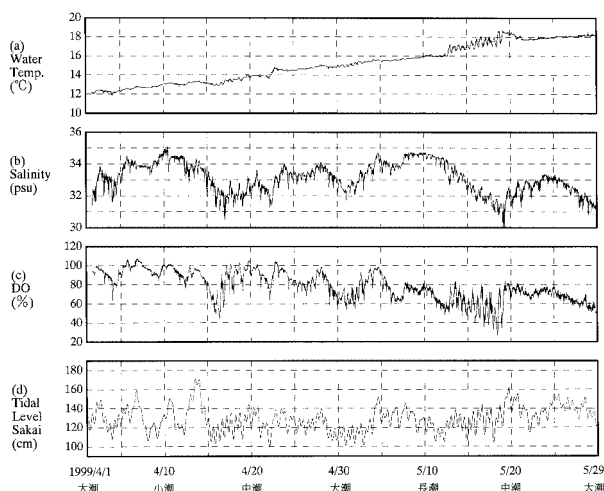


図6 中浦水道における下層（水深11m）の水質連続観測結果と境港の潮位（1999年4月1日～1999年5月29日）. (a) 水温, (b) 塩分, (c) DO, (d) 境港の潮位.

Fig.6 Time series data of (a) water temperature (11 m deep), (b) salinity (11 m deep), (c) DO (11 m deep) of the Nakaura channel, and (d) tidal level at Sakaiminato (1 Apr 1999～4 Apr 2000).

間と6.09時間の周期が検出され、下層の塩分には25.52時間、12.36時間、8.22時間、6.09時間の周期が検出された(図3). 下層の塩分の周期は、境港の潮位のFFT解析で検出された、25.76時間、12.45時間、8.18時間、6.09時間の周期とよく対応する.

図7に1999年6月5日から15日までの表層と下層の水温、塩分、DOの時系列と、同時期の境港における潮位を示す.

表層の水温には夜明けとともに水温が上昇し始め、昼過ぎに安定し夜半過ぎから下降し始める日変動がみられた. 下層の水温は上げ潮で上がり、下げ潮では下がる傾向が見られた. 表層の塩分は大潮・中潮の上潮時に塩分濃度がスパイク状に上昇する現象がみられた. 小潮・長潮・若潮時にはこの傾向は弱まるものの、大潮・中潮時と小潮から長潮時の塩分の平均値(大潮・中潮時:22.3 psu, 小潮～長潮時:22.4 psu)に大きな差はなかった.

表層のDOは夜明けから日没にかけて上昇し、翌日未明にかけて下降する日変動が見られた. 下層のDOは下層の塩分と同様に境港の潮位変動とよく対応していた. 潮相との対応では小潮から若潮・長潮にかけてDOの値の振幅は小さくなり、中潮から大潮にかけては値の振幅が大きくなる傾向がみられた.

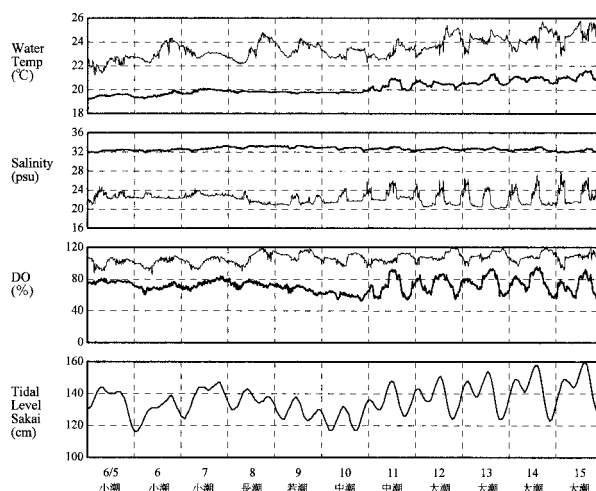


図7 中浦水道における表層（1m）と下層（11m）の水質連続観測結果と境港の潮位（1999年6月5日～1999年6月15日）. (a) 水温（細線、水深1m；太線、水深11m）, (b) 塩分（細線、水深1m；太線、水深11m）, (c) DO（細線、水深1m；太線、水深11m）, (d) 境港の潮位.

Fig.7 Time series data of (a) water temperature (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep), (b) salinity (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep), (c) DO (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep) of the Nakaura channel, and (d) tidal level at Sakaiminato (5 Jun 1999～15 Jun 1999).

3) 流動集中調査

3-1 小潮流動調査

小潮調査当日の境港における潮位と観測期間を図8(a)に、流速(主流向流速)と水温・塩分・DOの鉛直分布の時系列を図9に示す. 表層(0～3m)は観測期間を通じ中海から境水道方面へと流れていた. 水温、塩分ともに低く、DOは飽和状態であった. 水深4～8mでは観測を開始した7時から9時半までは水は境水道から中海に流れていた. 9時半を過ぎると水の流れは中海から境水道方面へと変

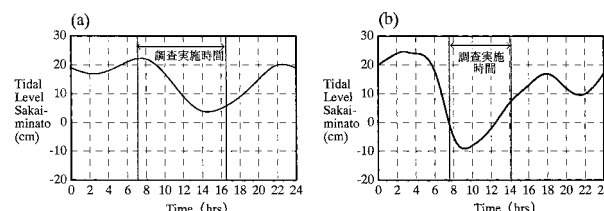


図8 流動集中調査実施時間と境港における潮位変動. (a) 小潮時, (b) 大潮時.

Fig.8 The term of observation of (a) the neap tide and (b) the spring tide at Sakaiminato, and tidal change at Sakaiminato (a:7:10～16:20, Nov.30, 1999 b:7:40～14:00, Dec.24, 1999).

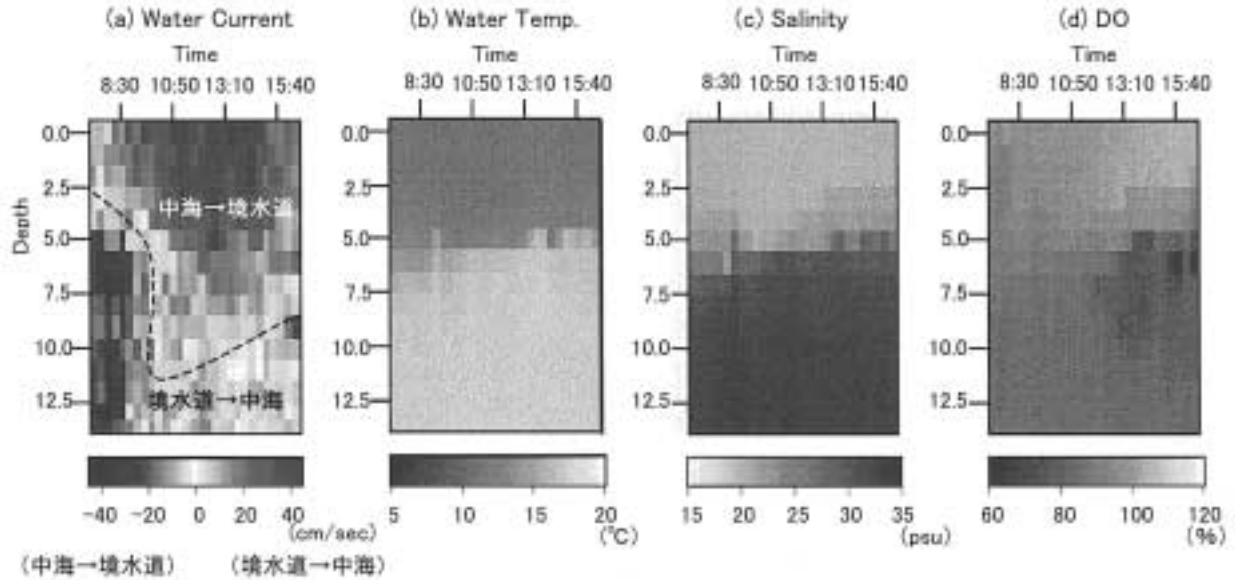


図9 小潮流動調査における流速，水温，塩分，DOの鉛直分布時系列図。

Fig.9 The time series of distribution of (a) current velocity, (b) water temperature, (c) salinity, (d) DO, of the Nakaura channel (7:10~16:20, Nov.30, 1999).

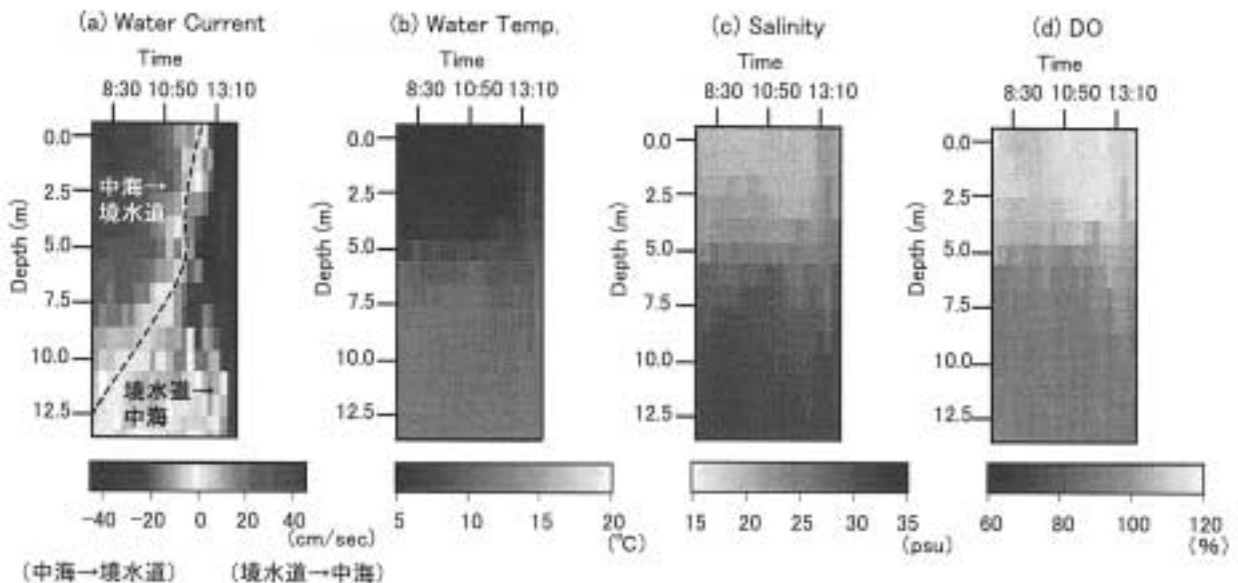


図10 大潮流動調査における流速，水温，塩分，DOの鉛直分布時系列図。

Fig.10 The time series of distribution of (a) current velocity, (b) water temperature, (c) salinity, (d) DO, of the Nakaura channel (7:40~14:00, Dec.24, 1999).

わった。水温，塩分，DOはいずれも水深4~5m付近で変化しており，躍層が存在していることを示している。14時から16時にかけて，水深6m付近のDOの低下が認められた。下層（水深8~13m）では7時から9時半までは水は境水道から中海に流れていた。9時半を過ぎると流速が10 cm/secを下回るようになり流向値の検出が難しくなった。水温，

塩分，DOいずれも値に大きな変動はなく安定していた。

3-2 大潮流動調査

大潮調査当日の境港における潮位と観測期間を示したものを図8(b)に，流速（主流向流速）と水温・塩分・DOの鉛直分布の時系列を図10に示す。表

層 0 m から水深 8 m までは、測定を開始した 7 時 40 分から 12 時かけて水は中海から境水道方面へ流れていた。12 時頃になると下層から徐々に流れは境水道方面から中海へと変わりはじめた。水温、塩分、DO のいずれも水深 5 m 付近で値は変化しており、躍層が存在していることを示している。境水道方面から中海への強い流れ（最大流速 65 cm/sec）を示した 13 時から 14 時にかけて、水深 0 m から 3 m の水温と塩分が上昇し、躍層付近との値の差は縮小した。水深 8 m から 11 m までは測定を通じ境水道方面から中海への水の流れを示していた。水温、塩分ともに 13 時から 14 時にかけて値が低下する傾向が見られた。水深 12 m から 13 m にかけての流向は、流速が 10 cm/sec 以下を記録したものが多く、流向ははっきりとした傾向を示さなかった。水温、塩分、DO のいずれも値は安定していた。

考 察

1) 塩分の日変動について

境港の潮位データの周期と塩分の周期が対応していたことから、中浦水道の塩分変動には潮汐が影響していると考えられる。特に下層の塩分変動は、境港の潮位変動とよく対応していた。

一方で表層水の塩分の日変動パターンは潮相によって異なり、大潮では上げ潮時に塩分がスパイク状に上昇する傾向を示したのに対し、小潮から若潮の上げ潮時では変動が小さくなる傾向がみられた。

大潮の上げ潮時に表層の塩分がスパイク状に上昇したのは、大潮の上げ潮時に境水道方面から中海へと高塩分水が流入してきたためと考えられる。実際、大潮流動調査では、上潮時、表層において境水道方面から中海への水の流れがおこり、それとともに塩分が上昇することが明らかにされた。

それに対し小潮時には、中浦水道の表層では上げ潮でも中海から境水道方面への流れが卓越していたため、大潮時のようなスパイク状の塩分変化がみられなかった可能性がある。ただし、小潮流動調査では上潮時に観測を行えなかったため、表層の流向と塩分動態との関係は明らかでない。

2) 塩分の月周期変動について

今回の観測結果から中浦水道の下層水の塩分には、小潮から長潮・若潮にかけて塩分が上がり、大潮から中潮にかけて塩分が下がる傾向がみられた。これらの周期は潮汐の月周潮・半月周潮に対応する

と考えられる。

小潮流動調査から、下層の水深 11 m では上げ潮時には境水道から中海への流れを示したが、下げ潮時は中海から境水道への水の流れは認められなかった。また上げ潮時には、表層と下層の塩分差は大きかった。大潮・中潮時と小潮・若潮・長潮時の潮位変動を比較すると（図 7,d）、大潮・中潮時には 1 日 2 回の上げ潮と下げ潮が確認できるが、小潮・長潮・若潮時には 1 日 2 回の下げ潮のうち、1 回は潮位変化が小さいため、潮が上がる時間が長い。そのため大潮・中潮時に比べ、小潮から長潮時には境水道方面から海水が流入してくる時間が長くなるため、塩分は高くなると考えられる。

1999 年 12 月の大潮時の調査結果から、上げ潮時に表層から下層までの塩分差は小さくなっていったことから、水の鉛直混合が起こっていたと考えられる。また、大潮の下げ潮時には中海の低塩分水が境水道方面へ流出するため、中浦水道の下層において低塩分水が観測されたと思われる。つまり、大潮から中潮にかけての塩分の低下は、下げ潮時の中海湖心からの低塩分水の流出と上げ潮時の鉛直混合が原因と考えられる。

ただし、観測地周辺では、かつての中海・宍道湖淡水化事業のために水道の底が掘り下げられている。中浦水道の平均水深が 7 m で、塩水ポケットの水深が 13~14 m であることを考えると、ポケットの存在による塩分への影響も無視できないと思われる。ポケットの形状などの正確な情報が不足していることもあって、ポケット内の水の塩分と、その周辺の水の塩分との関係には不明な点が残る。したがって今後ポケット外の塩分の動向について、ポケットの影響を考慮した詳細な調査が必要と思われる。

今後の課題

今回は中浦水道での水質変動について考察したが、今後国土交通省が中海湖心で計測を行っている水質データや、鳥根県内水面試験場が宍道湖大橋に設置している水質データと比較検討することで、宍道湖から中海にかけての水質動向がつかめると思われる。

また、流向流速調査の問題点として、今回行った 7 時から 17 時までの日中の調査では、日周潮・半日周潮のサイクルの全てを観測することができなかった。中浦水道の水の動向を正確に把握するため

には、流向・流速の連続的なデータが必要である。また表層の水質計はフジツボ、ヒドロ虫、ゴカイ、藻類などの付着が著しかったため、データの精度を向上させるために、メンテナンス期間の変更について検討の必要がある。

謝 辞

本報告は宇野の卒業論文の一部をまとめなおしたものである。島根県衛生公害研究所水質課の石飛裕氏には、FFT解析の解釈について有益なご助言を頂いた。本研究を進めるにあたり、島根大学汽水域研究センターの皆様にお世話いただいた。特に中海分室の松本雅夫氏には調査船の運転、水質計の設置などでお世話になった。中山大介氏には調査にご協力頂いたとともに、流向流速調査では調査方法などについて有益なご助言を頂いた。以上の方々に深く感謝します。

引 用 文 献

- 橋谷博・奥村稔・藤永薫・近藤邦男・清家泰(1991) 宍道湖への高塩分水の流入. 山陰地域研究(自然科学), **7**: 83-91.
- 橋谷博・奥村稔・藤永薫・近藤邦男・清家泰(1992) 宍道湖・中海に与える気象・海象の影響ー(その2) 1982~1991の水質変動と気象5因子. 山陰地域研究(自然科学), **8**: 79-81.
- 橋谷博・奥村稔・近藤邦男・清家泰(1990) 宍道湖・中海の湖底環境. 山陰地域研究(自然科学), **6**: 140-142.
- 南勲(1983) 宍道湖中海淡水湖化に関連する水理水質及び生態の挙動についてー中間報告ー. 農業土木学会, 4-16, 108-115.
- 奥田節夫(1991) 中海・宍道湖の水位変動特性(序報). 汽水湖研究, **1**: 22-23.