

大橋川を遡上する貧酸素水塊の実状と宍道湖に及ぼす影響

藤井智康¹・森脇晋平²・奥田節夫³

Actual Situation of Movement of Anoxic Water through the Ohashi River and Its Effects on Lake Shinji

Tomoyasu Fujii¹, Shimpei Moriwaki², Setsuo Okuda³

Abstract: It is well known that the highly saline water and anoxic water mass in the lower layer of Lake Nakaumi frequently creep up towards the Ohashi River, and this water sometimes directly flow into Lake Shinji through the Ohashi River (fujii, 1996, 1998), but the process of the encroachment of anoxic water mass through the Ohashi River is unknown in detail. Recently, many filed experiment are carried out as a countermeasure of anoxic water extinction in the Ohashi River, but little is known about the effect of countermeasure. As a beginning of the verification on its effects, we calculated the oxygen deficit amount based on observation results. Therefore, we found that the oxygen deficit amount was 242 kg in the period of less than $DO\ 1.5\ mg \cdot l^{-1}$, and dissolved oxygen concentration deviation flux changed in the range of from 0 to $50\ g \cdot sec^{-1}$. Consequently, it was found that the supply of oxygen was necessary for several $10\ g \cdot sec^{-1}$ to satisfy the inhabiting condition of the *corbicula japonica* PRIME.

Key words: tidal river, saline water intrusion, oxygen deficit amount.

はじめに

鳥根県東部から鳥取県西部に位置する宍道湖・中海は、大橋川によって連結水域を構成しており、さらに中海は境水道によって日本海とつながり、斐伊川から境水道に至る連続した水系を構成している汽水域である。宍道湖の水環境は、斐伊川からの流入河川水と中海から大橋川を通じて遡上する塩水によって大きく変化する。中海・宍道湖における水環境問題としては、とくに夏季の底層貧酸素化現象が顕著であり、この現象は水質、底質に大きな影響を及ぼし(伊達ほか, 1989, 神谷ほか, 2001)、水産資源にも悪影響を及ぼすことが知られている(中村, 1998)。また、宍道湖湖底貧酸素化の一要因として、

Fujii (1996) および藤井 (1998) の中海西部水域(水深 3 m)における塩分躍層振動調査および大橋川内航走観測の結果によれば、水深 1.5 m 付近に形成された塩分躍層の振動により、電気伝導度 $30\ mS \cdot cm^{-1}$ 以上(塩分 16 psu 以上)の塩水が大橋川を遡上し、塩分躍層が水深 50 cm の高いレベルまでに達したときには宍道湖付近まで流入している。またそれと同時に DO が $3\ mg \cdot l^{-1}$ 程度の貧酸素水が大橋川を遡上していることから、周期的に高塩分・貧酸素水が直接流入すること、および宍道湖の湖底堆積物による酸素消費(津田, 1995)などが考えられている。さらには、中海から宍道湖に至る間の大橋川の遡上塩水塊内での酸素消費によって貧酸素化し、宍道湖に流入することが考えられる。

¹ 奈良教育大学教育学部地学教室 Nara University of Education, Department of Earth Science, Nara 630-8528, Japan

² 鳥根県水産試験場 Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Hamada 697-0051, Japan

³ 奥田水圏環境研究所 Okuda Laboratory for Studies of Hydrosphere Environments, Okayama 700-0983, Japan

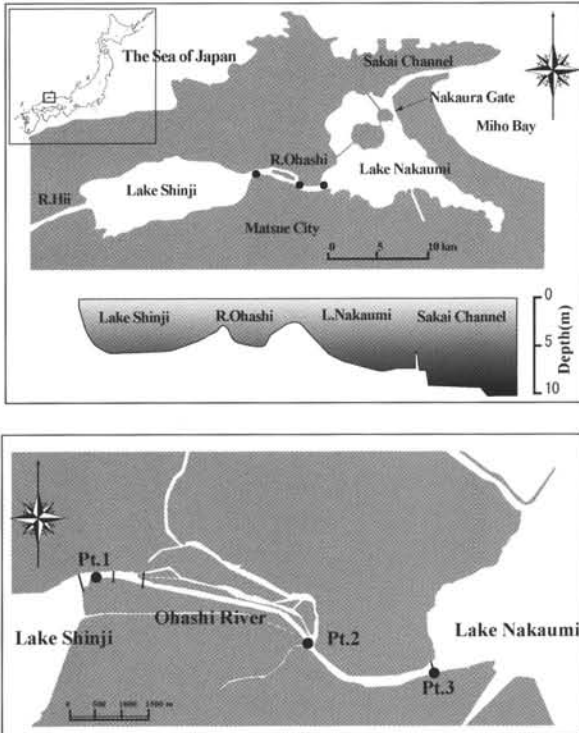


図1. 大橋川における調査地点

Pt.1: 島根県内水面水産試験場による水質自動監視システム、Pt.2およびPt.3: 定点連続観測地点を示す。

Fig. 1. Map showing the location of Lake Shinji, Ohashi River, Lake Nakaumi and Sakai Channel. Solid circles show the location of the automated water quality meter (Pt. 2, 3). Pt.1 shows the location of the automated water quality monitoring system by Shimane Prefectural Freshwater Fishery Experimental Station

近年、汽水湖の水環境に関連し、これら貧酸素水対策の一つとして、中海と宍道湖をつなぐ大橋川において、酸素吹き込みの実証実験等が多数実施されている。しかしながら、その効果について検証する第一段階として、大橋川を通じての塩水遡上形態を明らかにし、大橋川における水理条件を解析する必要がある。

そこで、本論文では中海から大橋川を通じて宍道湖へ流入する高塩分・貧酸素水の遡上形態の解析および貧酸素水の酸素欠損量を算出し、宍道湖に及ぼす影響について考察することを目的とする。

方 法

大橋川における水理条件

図1に示されるように、中海と宍道湖をつなぐ大橋川(全長7.5 km)において、塩水遡上過程を追跡するために、1999年9月8日~17日および2000年8

月8日~11日に2地点(矢田地点Pt.2および中海地点Pt.3)の底層(底上20 cm)にハイドロラボ社製多項目水質計 Sonde 4 (測定精度: 水温 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$; 塩分 $\pm 1\%$; 溶存酸素濃度 $\pm 0.2\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$)を設置し、それぞれ10分間隔で水温、塩分、溶存酸素濃度の定点連続観測を行った。

また、宍道湖と大橋川の境界である松江大橋下の大橋川地点のPt.1については、島根県内水面水産試験場水質自動監視システムの底層(底上1.5 m)の水溫、塩分、溶存酸素濃度の連続記録データを使用した。

溶存酸素濃度偏差フラックスの算定

図1に示される2000年7月にPt.1で得られた10分間隔の塩分、溶存酸素濃度データを用いて貧酸素水塊の宍道湖へのフラックスについて解析を行った。

通常、貧酸素水塊が水産生物に悪影響を及ぼす濃度は $3.0\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下とされているが、中村(1998)は、宍道湖に生息しているヤマトシジミは、溶存酸素濃度(以下DOと称す)が $1.5\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上あれば数日間は生息が可能であるという実験結果を示している。著者らは、この値を宍道湖における貧酸素水塊の臨界値として定義し、大橋川を通じて宍道湖に流入する貧酸素水流入量を算出することを試みた。

そこで、DOが $1.5\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を基準とし、溶存酸素濃度偏差を $\Delta\text{DO} = \text{DO}(\text{実測値}) - 1.5\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と定義した。また、次式に示すようにDOが $1.5\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の貧酸素水の流入量を溶存酸素濃度偏差フラックスと定義し、図2に示す下層(水深4 m以深)について、それぞれ解析を行った。

$$Q = \sum (\Delta S) \cdot V$$

$$F_{\Delta\text{DO}} = \sum (\Delta S) \cdot V \cdot (\Delta\text{DO})$$

ここで、Q: 流量($\text{m}^3\cdot\text{sec}^{-1}$)、 ΔS : 下層部断面積(m^2)、V: 断面に垂直な流速成分(東方流速をプラス)($\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$)、 ΔDO : 溶存酸素濃度偏差($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)、 $F_{\Delta\text{DO}}$: 溶存酸素濃度偏差フラックス($\text{g}\cdot\text{sec}^{-1}$)、 Σ は下層通水断面の全量を示す。

酸素欠損量の算出

松江大橋下においては中層より下層でDOが $1.5\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の値が頻繁に観測されることから底上2.5 mの中層から河床までの通過断面を考えるとした。そこで、2000年7月において、貧酸素水が大規模に遡上する期間を抽出し、DOが $1.5\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$

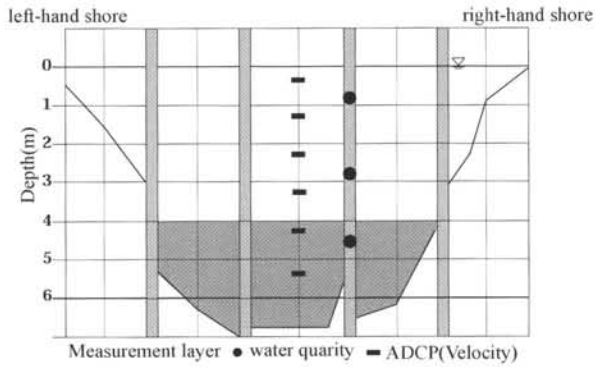


図2. 大橋川 Pt.1 における断面模式図

図中の●は水質観測層，■は ADCP による流速観測層をそれぞれ示す。

Fig. 2. Schematic diagram shows the cross section at Pt.1 in the Ohashi River. Solid circle shows the observation layer with water quality meter. Solid rectangle shows the observation layer with ADCP. Shaded portion shows the lower layer in the Ohashi River.

以下に低下し始めた時刻から $1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上に上昇した時刻までの期間において数値積分することによって酸素欠損量を算出した (図3)。

$$M_{\Delta DO} = \int_a^b F_{\Delta DO} dt$$

ここで、 $M_{\Delta DO}$: 酸素欠損量 (g), a : DO が $1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下に低下し始めた時刻, b : DO が $1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上に上昇し始めた時刻, $F_{\Delta DO}$: 溶存酸素濃度偏差フラックス ($\text{g} \cdot \text{sec}^{-1}$), t : 観測時刻を示す。

結果と考察

大橋川の塩水遡上形態

図4に示されるように、1999年9月11日には、1日2回 Pt.3 から時間遅れで Pt.1 まで高塩分水が到達している様子がわかる。これは、潮汐による両湖の水位差によって生じた潮流により生じていると考えられる。また、1999年9月13日においては大橋川中央部の Pt.2 まで高塩分水が到達しているものの、松江大橋の Pt.1 まで到達していない。同様に、2000年においては8月9日～10日、10日～11日にかけて Pt.1 まで高塩分水が到達している (図5)。したがって、実測された結果より大橋川の遡上パターンには、次のことが考えられる。

- (1) 高塩分水は、中海から大橋川を通じて宍道湖に到達して流入する
- (2) 高塩分水は、宍道湖まで到達する以前に、下げ潮あるいは水位差条件による大橋川の流れによって折り返す

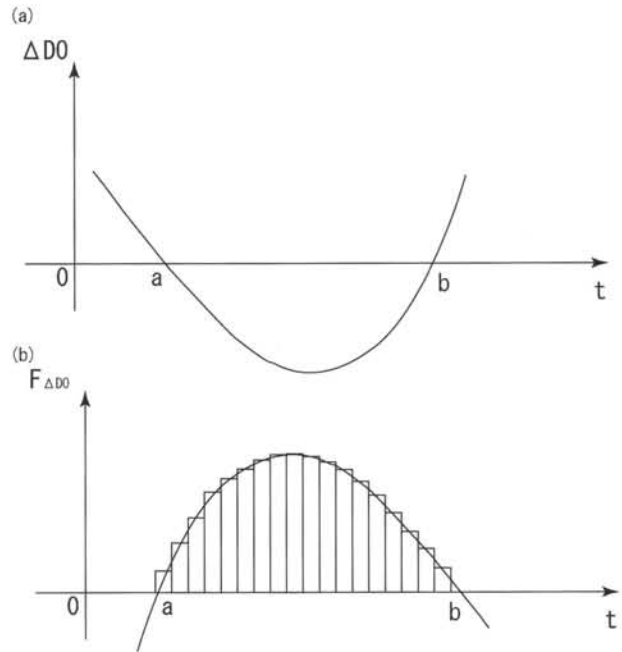


図3. 溶存酸素濃度偏差 (ΔDO) と溶存酸素濃度偏差フラックス ($F_{\Delta DO}$) の算出模式図

Fig. 3. Schematic diagram shows the fluctuation of dissolved oxygen concentration deviation (ΔDO) and dissolved oxygen concentration deviation flux ($F_{\Delta DO}$), respectively.

この2通りが考えられる。

一般に日本海のように潮位差が小さい感潮河川においては弱混合型の塩水くさび型として流入すると考えられるが (図6)、大橋川においては宍道湖・中海が連結しているために、両端の水位差のみに支配されるのではなく、中海における内部波の河口への這い上がりや、降水にともなう大橋川を通じての河川水の流出状態の変化などによって遡上パターンが変化すると考えられる。実際に過去の観測事例として、島根県衛生公害研究所 (1991)、吉村 (1993)、Fujii (1996) および森脇ほか (2003) においても、様々なパターンで高塩分水が大橋川を通じて宍道湖に流入しているという結果が得られている。今回の調査結果について、1999年9月では松江地点降雨量が 152.5 mm (平年値 202.4 mm) および2000年7月、8月では松江地点降雨量が、それぞれ 74.5 mm , 26.5 mm (平年値 240.5 mm , 144.4 mm) と平年に比べて降雨が少なく塩水遡上や貧酸素水塊が発生しやすい夏季の2ヶ年の調査であるが、同様に塩水遡上パターンには、時間や場所によって様々な形態を呈することがわかった。大橋川における遡上形態については、大橋川内の複雑な河床地形や中流部での河川の合流なども考慮し、さらに詳細な調査を行う必要が

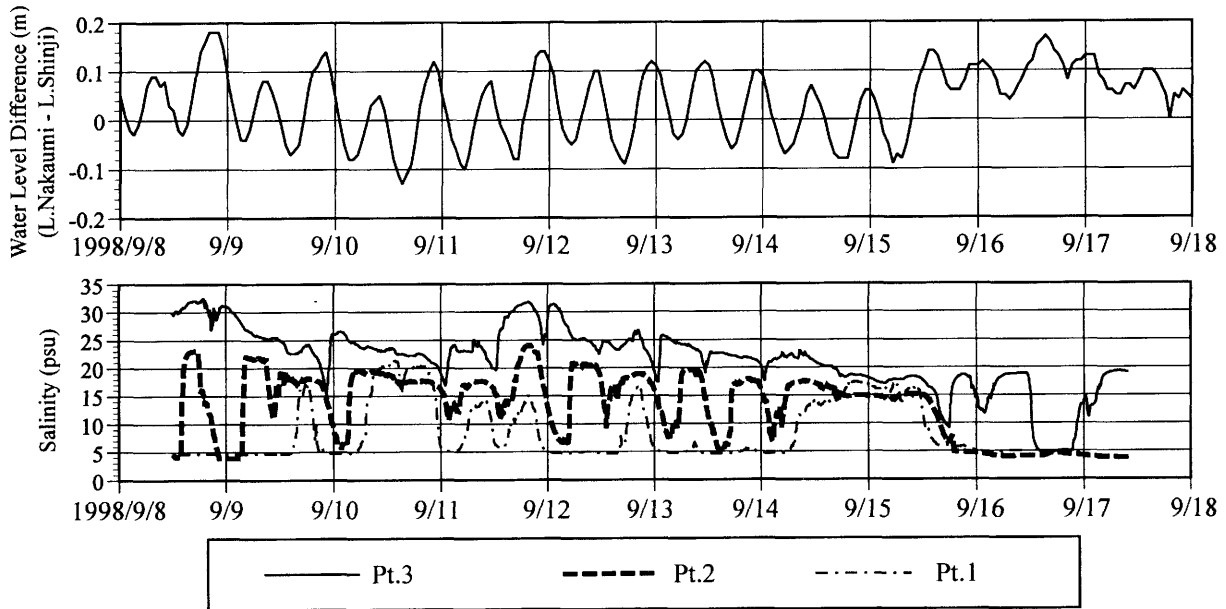


図4. 大橋川両端の水位差と大橋川底層における塩分の時系列変化 (1999年9月8日~17日)

Fig. 4. Temporal variations in water level difference between both lakes and salinity at the bottom of the Ohashi River from 8 to 17 September, 1999

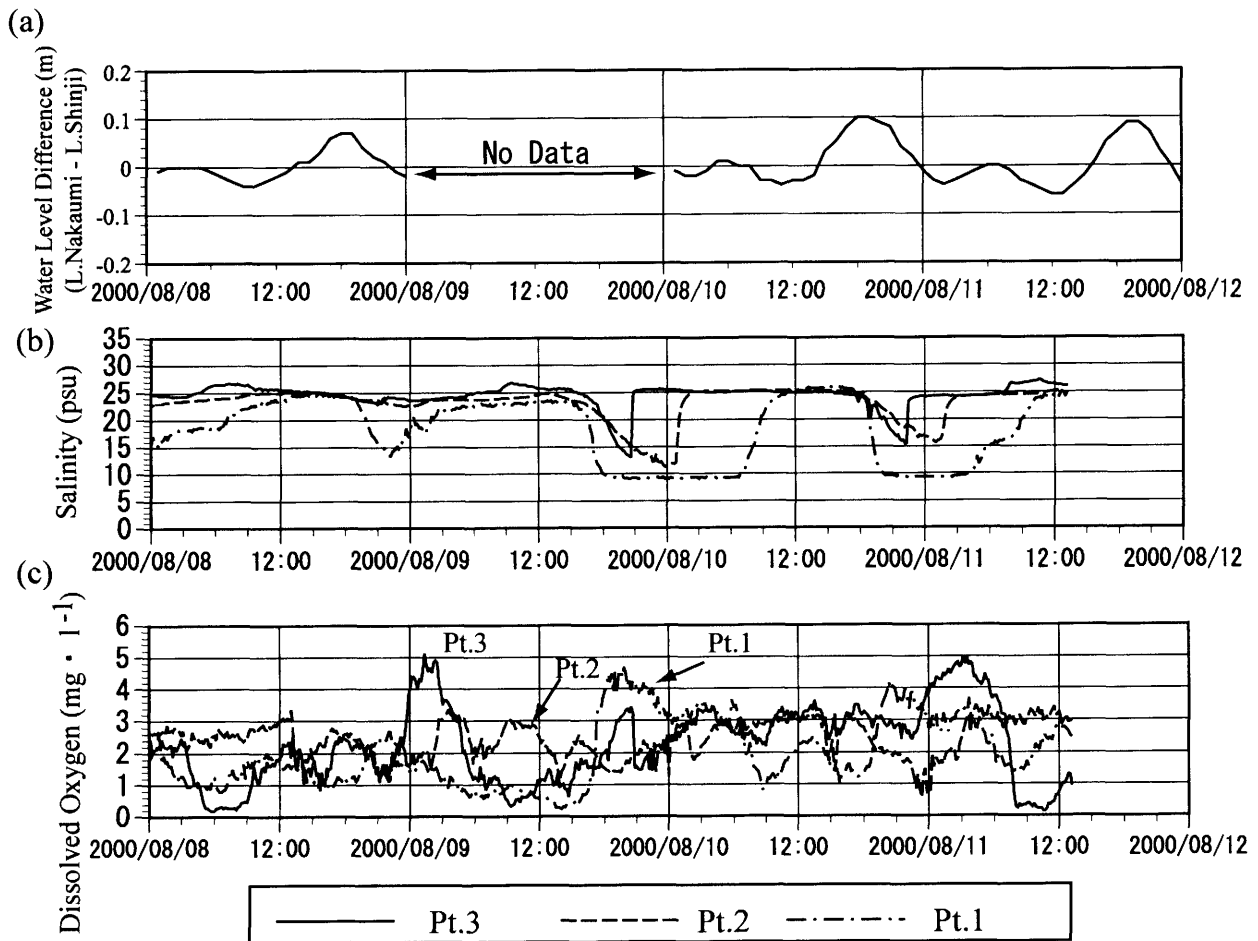


図5. 水位差・塩分・溶存酸素濃度の時系列変化 (2000年8月8日~11日)

(a) 両湖の水位差, (b) 塩分, (c) 溶存酸素濃度を示す.

Fig. 5. Temporal variation in (a) water level difference between both lakes, (b) salinity and (c) dissolved oxygen in the Ohashi River from 8 to 11 August, 2000

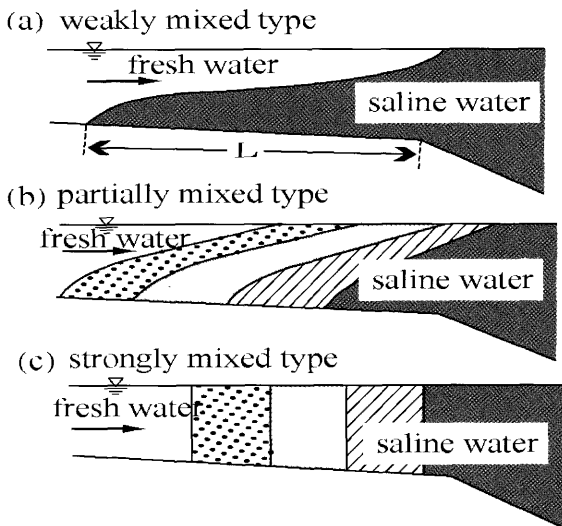


図 6. 感潮河川における塩水遡上パターン

Fig. 6. Schematic diagram showing the saline water inflow pattern in the tidal river

あると考えられる。

次に、松江大橋下を通過する水塊についての塩分と溶存酸素濃度について着目すると、底層の塩分と溶存酸素濃度には逆相関 ($r = -0.66$) の関係があり、25 psu 以上の高塩分水が観測される時には、 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の低溶存酸素濃度を示しており、宍道湖に貧酸素水が流入している可能性があると考えられる。(図 7)。

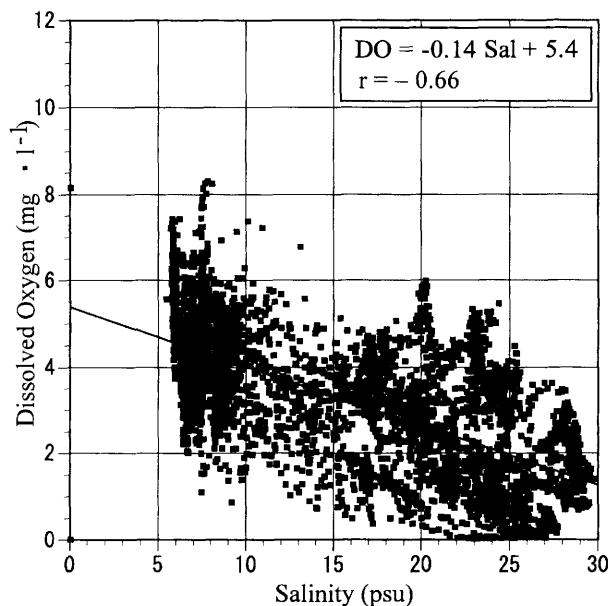


図 7. 大橋川 (Pt.1) における塩分と溶存酸素濃度の関係 (2000 年 7 月 1 日～31 日)

Fig. 7. Relationship between salinity and dissolved oxygen concentration (DO) at the bottom layer of Pt.1 from 1 to 31 July, 2000.

また図 8 に示されるように、1994 年の近畿大学グループ(津田, 1995)が、大橋川と宍道湖との境界付近の底層(底上 0.5 m と 1.5 m)に水質計を設置して行った調査結果をみると、電気伝導度と溶存酸素濃度の変動に逆相関の関係があることがわかる。

これらのことから、大橋川を遡上して、高塩分・貧酸素の水が宍道湖に流入し、水深の深い湖央部付近の底層でさらに貧酸素化するものと考えられる。ただし、大橋川内での貧酸素化については詳細な調査を実施し、塩水遡上期間中の酸素消費量について検討する必要がある。

遡上水が宍道湖に及ぼす影響

2000 年 7 月 1 日～31 日の期間について解析した結果(図 9)、この期間のうち溶存酸素濃度の欠測がなく、十分に機器メンテナンスが行われていた期間である 2000 年 7 月 17 日を抽出し、酸素欠損量の解析を行った。

表 1 および図 10 に示されるように、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の期間の酸素欠損量は 242 kg であり、1 回の貧

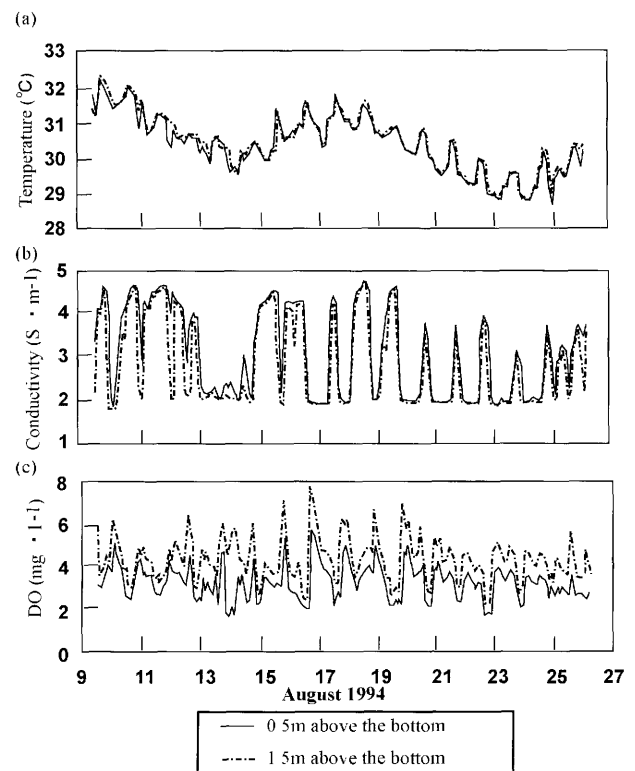


図 8. 大橋川西端における水温・電気伝導度・溶存酸素濃度の時系列変化(1994 年 8 月 9 日～26 日)。(津田, 1995 より)。

Fig. 8. Temporal variation in (a) temperature, (b) conductivity and (c) dissolved oxygen at western mouth of the Ohashi River from 9 to 26 August, 1994. (from Tsuda, 1995).

表 1. 大橋川を遡上する酸素欠損量

Table 1. Oxygen deficit amount through the Ohashi river.

unit: kg

Direction	DO deficit amount
L.Nakaumi → L.Shinji	1113.5
L.Shinji → L.Nakaumi	-871.5
total	242.0

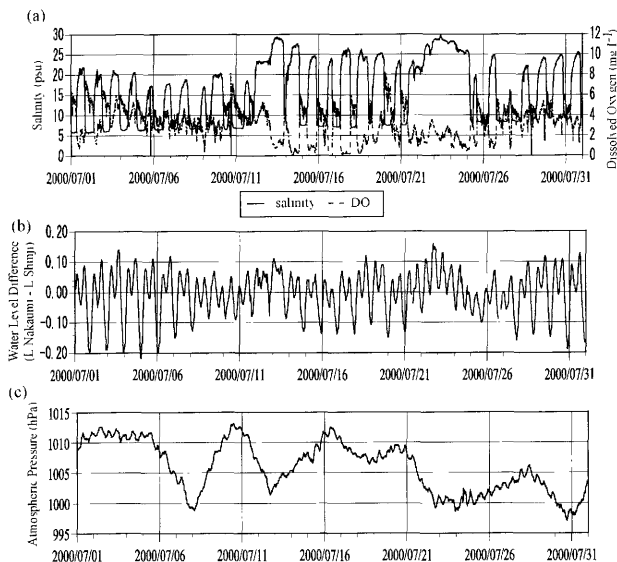


図 9. 大橋川 (Pt.1) における塩分・溶存酸素濃度, 水位差 (中海-穴道湖), 気圧の時系列変化 (2000 年 7 月).

Fig. 9. Temporal variation in (a) salinity and dissolved oxygen at the Pt.1 (b) water level difference between Lake Nakaumi and Lake Shinji, and (c) atmospheric pressure at the center of Lake Nakaumi in July, 2000.

酸素水塊の遡上期間中の酸素欠損量は数 100 kg 程度であることがわかった。また、溶存酸素濃度偏差フラックスは、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の時、 $0 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{sec}^{-1}$ の範囲で変動をしており、ヤマトシジミの生息条件を満たすためには数 $10 \text{ g} \cdot \text{sec}^{-1}$ 程度の酸素の供給が必要になることがわかる。

しかしながら、河川に酸素を注入することができたとしても河川の水利特性を十分に考慮し、対策を行う必要がある。大橋川のように両湖の水位差により変化する場合には、塩水遡上が途中で折り返す場合もあることから、詳細な調査によって対策場所や注入時間などを予測し、決定する必要がある。また、大橋川における塩水の拡散状況を把握し、対策場所や酸素の吹き込み量について検討する必要がある。

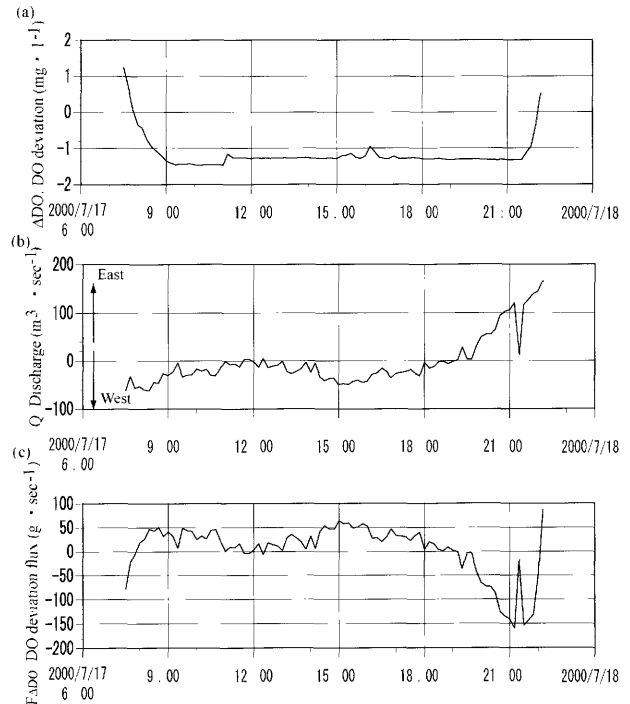


図 10. 酸素欠損量の計算結果

(a) 溶存酸素濃度の偏差, (b) 流量, (c) 溶存酸素濃度偏差フラックス。

Fig. 10. Calculation results of oxygen deficit amount.

(a) DO deviation, (b) discharge, and (c) DO deviation flux, respectively.

ま と め

今回の調査結果から次のことがわかった

(1) 大橋川の塩水遡上パターンとして、一つは、遡上塩水が穴道湖まで到達し、もう一つは途中で折り返すことが考えられる。

(2) 一回の貧酸素水塊の遡上期間中の酸素欠損量は、数 100 kg 程度であった。

(3) 一回の貧酸素水塊の遡上期間中、 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以上に保つためには、数 $10 \text{ g} \cdot \text{sec}^{-1}$ 程度の DO の供給が必要である。

大橋川における水利特性は、大橋川両端の水位差のみに支配されるのではなく、中海における内部波の河口への這い上がりや、降水にともなう大橋川を通じての河川水の流出状態の変化などによっても変化するために、様々な条件において詳細な調査を実施する必要がある。また、最近の干陸および淡水化中止により、中浦水門の撤去や締め切り堤防の開削などがあり、これまでの環境条件とは大きく異なることが予想され、高塩分水や貧酸素水塊の遡上に関しては、長期的なモニタリングが必要である。

引用文献

- 伊達善夫・橋谷 博・清家 泰・近藤邦男・奥村稔・藤永 薫 (1989) 12年間の定期調査から見た中海・宍道湖の水質—季節変化, 経年変化, 平年値—. 山陰地域研究 (自然環境), 5: 89-102
- Fujii, T. (1996) Relationship of internal waves with tidal and wind drift effects and propagation of internal Kelvin waves in a brackish lake-Nakaumi. Jpn. J. Limnol. 58: 241-260
- Fujii, T. (1998) Relationship between internal oscillation and movement of anoxic water in a connected brackish water region -Lake Nakaumi and the Ohashi River. Jpn. J. Limnol. 59: 1-12
- 神谷 宏・石飛 裕・井上徹教・中村由行・山室真澄 (2001) 富栄養化した汽水湖沼における高水温・貧酸素時の堆積物からの溶存態リン (DOP) とリン酸の溶出. 陸水学雑誌, 62, 1: 11-21
- 中村幹雄 (1998) 宍道湖におけるヤマトシジミ *Corbicula japonica* PRIME と環境との相互関係に関する生理生態学研究. 北海道大学博士論文: 59-95.
- 津田良平 (1995) 宍道湖内における環境要素の分布とその変動. 島根県委託 1994年度宍道湖湖底貧酸素化調査成果報告書: 9-13.
- 島根県衛生公害研究所 (1991) 大橋川における栄養塩フラックス調査報告書.
- 森脇晋平・藤井智康・福井克也 (2003) 大橋川における高塩分水塊の遡上現象, LAGUNA (汽水域研究), 10: 35-45
- 吉村 亮 (1993) 大橋川における塩水の遡上. 岡山理科大学理学研究科修士論文: 1-20.