

宍道湖・中海貧酸素水調査

(宍道湖・中海水産振興対策検討調査事業)

向井哲也・石田健次・大北晋也・岩本壮平

1. 研究目的

宍道湖・中海においては湖底の貧酸素化現象が底生生物の生存に大きな影響を与えており、同水域の水産振興のためにはこの湖底貧酸素化を低減・解消することが重要な課題と考えられている。このため、宍道湖・中海の湖底貧酸素化現象を監視し、またそのメカニズムを解明して湖底貧酸素化の低減につなげてゆくこととし、平成10年度から同水域の貧酸素水のモニタリング調査を継続実施している。内容は、宍道湖・中海における貧酸素水塊の発生時期・広がり・規模を把握するため、毎月1回航走による広範囲な定点調査を行っている。また中海・宍道湖間の高塩分貧酸素水の移動を知るため、連続観測水質計を使用した宍道湖流入・流出水調査を実施している。さらに、貧酸素水による魚介類のへい死事例についても調査を実施している。

2. 研究方法

(1) 定期調査(宍道湖・中海定期観測)

宍道湖・中海の貧酸素水の発生時期・発生規模を平面的・空間的かつ量的に把握するため、毎月1回調査船の航走調査により図1、表1に示す宍道湖32点、中海29点、本庄水域10点において水質を調査した。調査項目は各地点における水深毎の水温・塩分・溶存酸素(DO)である。調査水深については、各地点において貧酸素化が認められない場合は表層と底層のみで測定を行い、貧酸素化が認められた場合宍道湖では水深0.5m毎、中海・本庄水域では水深1.0m毎に測定を行った。

調査結果から各水域における毎月の塩分・溶存酸素(DO)の分布図を作成した。分布図は水平分布図と図1に示したラインに沿った鉛直分布図を作成した。同時に各水域で発生した貧酸素水塊の体積を算出した。分布図作成と貧酸素水塊の体積計算方法の概要は下記のとおりである。

A. 塩分・溶存酸素(DO)の水平・鉛直分布図の作成

観測データから表層・底層の塩分・DOの水平・鉛直分布図を作成した(各地点において、測定を行っていない水深のデータについては前後の水深の測定値から線形補間により値を推測した)。図の作成にはカイプロット4.0(株式会社カイエンス)を用い、図の描画手法にはスプライン補間(薄板平滑化スプライン回帰)を用いた。

B. 貧酸素水塊の体積計算

Aと同様の方法で水深別(宍道湖・本庄水域は水深0.5m毎、中海は水深1.0m毎)の溶存酸素の水平分布図を作成した。作成した水深毎の水平分布図から各水深毎の貧酸素水(3mg/l未満)の分布面積を求め、貧酸素水塊の体積を計算した。

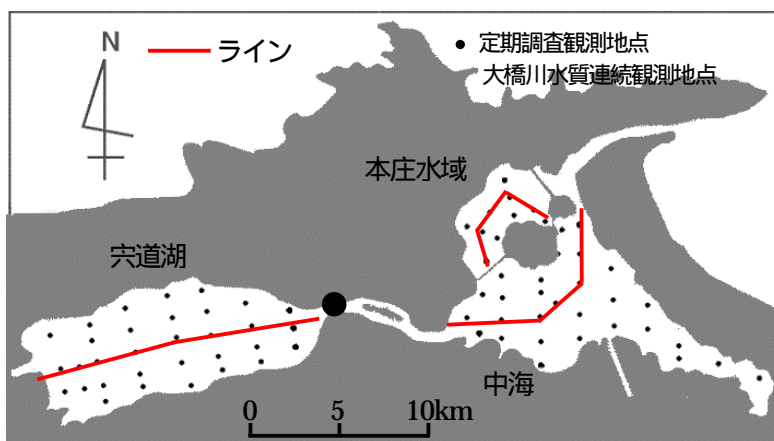


図1 宍道湖・中海貧酸素水調査地点

表1 宍道湖・中海貧酸素調査定期調査観測地点

| 宍道湖 | | | | 中海 | | | |
|--------|-------------|--------------|-------|--------|-------------|--------------|-------|
| St.No. | 緯度(N) | 経度(E) | 水深(m) | St.No. | 緯度(N) | 経度(E) | 水深(m) |
| 1 | 35° 27.149' | 132° 52.773' | 3.5 | 1 | 35° 27.689' | 133° 8.273' | 3.6 |
| 2 | 35° 26.082' | 132° 53.308' | 4.0 | 2 | 35° 28.483' | 133° 8.848' | 4.8 |
| 3 | 35° 25.325' | 132° 53.434' | 3.9 | 3 | 35° 27.149' | 133° 8.691' | 3.1 |
| 4 | 35° 26.174' | 132° 53.768' | 4.6 | 4 | 35° 28.954' | 133° 9.652' | 5.3 |
| 5 | 35° 25.422' | 132° 53.917' | 4.8 | 5 | 35° 28.325' | 133° 9.641' | 6.4 |
| 6 | 35° 27.374' | 132° 54.171' | 3.9 | 6 | 35° 27.634' | 133° 9.639' | 5.7 |
| 7 | 35° 27.008' | 132° 54.411' | 5.0 | 7 | 35° 27.039' | 133° 9.571' | 4.3 |
| 8 | 35° 26.347' | 132° 54.624' | 5.1 | 8 | 35° 30.299' | 133° 11.533' | 5.9 |
| 9 | 35° 25.584' | 132° 54.849' | 5.4 | 9 | 35° 29.497' | 133° 11.301' | 5.1 |
| 10 | 35° 25.006' | 132° 55.088' | 4.5 | 10 | 35° 28.900' | 133° 10.953' | 6.3 |
| 11 | 35° 27.921' | 132° 55.670' | 3.1 | 11 | 35° 28.325' | 133° 10.934' | 6.8 |
| 12 | 35° 27.296' | 132° 55.823' | 5.5 | 12 | 35° 27.979' | 133° 11.477' | 6.7 |
| 13 | 35° 26.595' | 132° 56.050' | 5.6 | 13 | 35° 27.566' | 133° 10.966' | 6.5 |
| 14 | 35° 25.901' | 132° 56.359' | 5.6 | 14 | 35° 26.714' | 133° 10.900' | 5.5 |
| 15 | 35° 25.598' | 132° 56.512' | 5.1 | 15 | 35° 26.130' | 133° 10.970' | 4.2 |
| 16 | 35° 28.304' | 132° 57.290' | 3.5 | 16 | 35° 30.411' | 133° 12.290' | 10.5 |
| 17 | 35° 27.654' | 132° 57.492' | 5.4 | 17 | 35° 29.610' | 133° 12.345' | 7.5 |
| 18 | 35° 26.988' | 132° 57.627' | 5.6 | 18 | 35° 28.684' | 133° 12.256' | 7.3 |
| 19 | 35° 26.165' | 132° 57.929' | 5.7 | 19 | 35° 27.881' | 133° 12.250' | 7.2 |
| 20 | 35° 25.518' | 132° 58.281' | 2.2 | 20 | 35° 26.919' | 133° 12.333' | 5.5 |
| 21 | 35° 28.549' | 132° 58.869' | 3.6 | 21 | 35° 29.182' | 133° 13.465' | 6.6 |
| 22 | 35° 27.769' | 132° 58.943' | 5.3 | 22 | 35° 28.274' | 133° 13.512' | 7.8 |
| 23 | 35° 27.100' | 132° 59.145' | 5.5 | 23 | 35° 27.291' | 133° 13.591' | 5.8 |
| 24 | 35° 26.396' | 132° 59.297' | 5.5 | 24 | 35° 27.942' | 133° 14.929' | 7.8 |
| 25 | 35° 25.991' | 132° 59.473' | 3.9 | 25 | 35° 26.977' | 133° 14.906' | 6.7 |
| 26 | 35° 28.245' | 133° 0.263' | 3.5 | 26 | 35° 26.791' | 133° 15.995' | 10.6 |
| 27 | 35° 27.386' | 133° 0.597' | 4.7 | 27 | 35° 26.385' | 133° 16.094' | 6.0 |
| 28 | 35° 26.720' | 133° 0.764' | 4.8 | 28 | 35° 26.122' | 133° 17.524' | 5.8 |
| 29 | 35° 26.331' | 133° 1.008' | 3.0 | 29 | 35° 25.606' | 133° 18.688' | 4.4 |
| 30 | 35° 27.684' | 133° 2.221' | 3.7 | | | | |
| 31 | 35° 27.253' | 133° 2.387' | 3.6 | | | | |
| 32 | 35° 26.902' | 133° 2.437' | 3.5 | | | | |

| 本庄水域 | | | |
|--------|-------------|--------------|-------|
| St.No. | 緯度(N) | 経度(E) | 水深(m) |
| 1 | 35° 29.123' | 133° 8.864' | 6.0 |
| 2 | 35° 30.368' | 133° 8.136' | 6.0 |
| 3 | 35° 30.161' | 133° 8.811' | 6.6 |
| 4 | 35° 30.124' | 133° 9.343' | 2.8 |
| 5 | 35° 30.805' | 133° 9.166' | 6.5 |
| 6 | 35° 31.909' | 133° 9.522' | 4.8 |
| 7 | 35° 31.172' | 133° 9.868' | 6.5 |
| 8 | 35° 30.711' | 133° 9.954' | 5.2 |
| 9 | 35° 30.693' | 133° 10.623' | 6.0 |
| 10 | 35° 30.345' | 133° 10.975' | 4.3 |

(2) 宍道湖流入・流出水調査（大橋川水質連続観測）

図2に示すように、松江市内大橋川に架かる松江大橋橋脚の水深1.0m、3.0m、水深4.3m部分にHydrolab社製多項目水質計 DateSonde - 4を、松江大橋直下の河川中央部の河床（水深6.5m）にはRD Instruments社製ドップラー式流向・流速計を設置し、年間を通じて20分毎の連続観測を行った。これらのセンサーにより収集されたデータは、図2に示すとおりインターネット経由で内水面水産試験場に設置された水質情報サーバーに転送され、この水質データを用いて下記の分析を行った。

A. データのグラフ化

大橋川水質情報システムで得られたデータを元に毎月、水温・塩分・溶存酸素・流速についてグラフを作成した。

B. 高塩分水塊の出現規模の定量化

中海からの高塩分水の影響の強さを知るため、中海からの高塩分水塊出現頻度を数値化した。数値化には高塩分水出現指数（HSI）と名付けた独自の指標値を用いた¹⁾。高塩分水出現指数の求め方は次のとおりである。10PSU以上の海水は宍道湖内部で生成されることはないと考えられ、10PSU以上の海水は大橋川を通じて外海から宍道湖に入ったものとみなすことができる。これを「高塩分水塊」とよぶことにする。監視システムの水深約4m深（下層）において、高塩分水塊が

出現した時間（継続時間）とその塩分値とから積算塩分値を求め、これを高塩分水出現指数（以下 HSI と呼ぶ）とした（式 1）。

$$\text{高塩分水出現指数} : \text{HSI} = (\text{Sh} \cdot t) \dots (\text{式 1})$$

ただし、Sh：10PSU 以上の塩分値， t：単位時間（10 分間）。

また HSI を月毎に積算して大橋川における高塩分水塊の季節的な変動を検討した。

C. 大橋川における酸素欠乏量の定量化

大橋川で中海から流入する高塩分水は高水温期には貧酸素化している傾向が強く、大橋川や宍道湖のヤマトシジミを初めとする底生生物の生存を脅かす。この貧酸素化の度合いを知るため、大橋川での酸素欠乏度を下記の指標を用いて数値化した（平成 12 年度宍道湖・中海貧酸素業務調査報告書より改変）。

溶存酸素濃度偏差フラックス

中海・宍道湖に生息する底生生物（アサリ、シジミなど）の生息条件を考慮し、溶存酸素濃度（以下 DO と略記）1.5mg/l をシジミの貧酸素耐性の境界と仮定する。そこで、DO 1.5mg/l を基準値とし、溶存酸素濃度偏差（DO = 測定値 - 1.5mg/l）を求めた。

DO：溶存酸素偏差

$$\text{DO} = (\text{測定値} - 1.5) \text{ (mg/l)}$$

また、大橋川断面を上層・中層・下層の 3 層に分け、各層の流量を、（各層部断面積：S）×（各層部東方流速：Vn）として求め、各層の溶存酸素濃度偏差フラックス F_{DO} を（ $F_{DO} = (S) \times \text{各層部 } V_n \times (\text{DO})$ ）として算出し、最終的に各層の値を合計して溶存酸素濃度偏差フラックスとした。

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

F_{DO} ：各層の溶存酸素濃度偏差フラックス

ΔS ：各層部の断面積

ΔDO ：溶存酸素濃度偏差 = 測定値 - 1.5mg/l

v_n ：面積素片に垂直な流速成分（東方流速）

酸素欠損量の算定

下記の積分を行い、酸素欠損量 M_{DO}

DO を算出した。

M_{DO} ：酸素欠損量

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

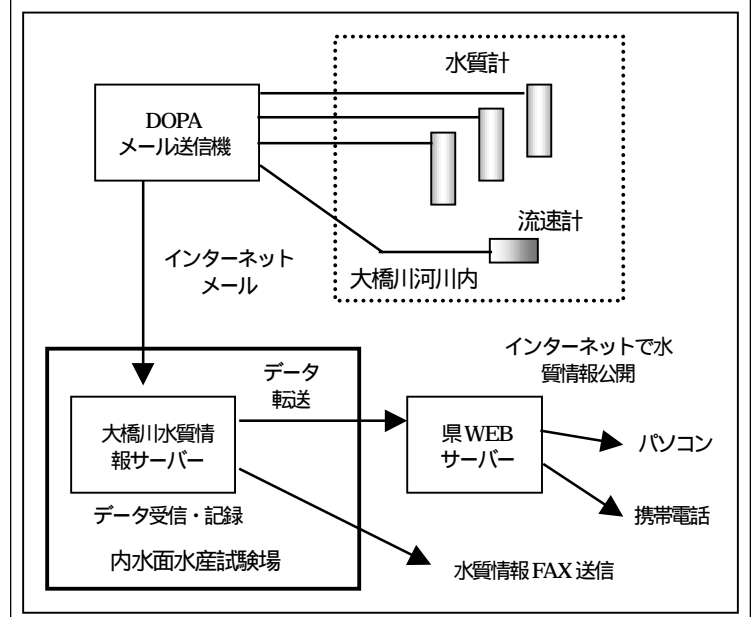
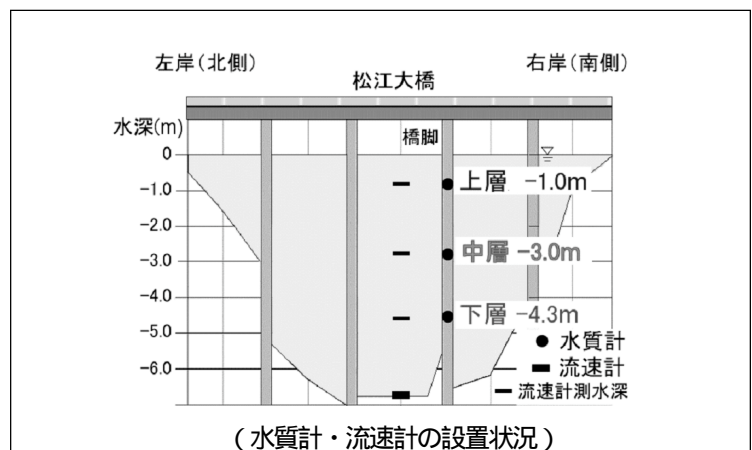


図 2 大橋川水質情報システムの概要

a : DO が 1.5mg/l 以下に下り始めた時刻

b : DO が 1.5mg/l 以上に上り始めた時刻

F_{DO} : 溶存酸素濃度偏差フラックス

t : 観測時刻

(3) 貧酸素水による魚介類のへい死調査

宍道湖・中海において貧酸素水が原因と考えられる魚介類のへい死が発生した場合は、現場に赴きへい死状況・水質などを調査した。

3. 研究結果と考察

(1) 宍道湖・中海定期観測 (図 9~12)

A. 宍道湖

平成 15 年度の宍道湖は全般に 0~3PSU と塩分が少なく、特に 4~9 月までは降雨が多かったため、0~2PSU と淡水に近い状態が続いた。月によっては底層に中海から流入した高塩分水の薄い層があったが、例年に比べるとその頻度・量は少なかった。貧酸素化については、7~12 月にかけて若干湖底が貧酸素化したが、その程度は昨年度よりかなり少なく貧酸素水塊の体積も最大となった 8 月でも湖容積の約 1% に過ぎなかった (図 3)。宍道湖における湖底貧酸素化は中海からの高塩分水の流入による塩分躍層の形成が大きな要因となるため、塩分の流入が少なかった今年度は湖底の貧酸素化も少なかったものと考えられる。ただし、今年度は水温が下がる秋季から冬季においても部分的に湖底の貧酸素化が観察された。

B. 中海

平成 15 年度前半、中海は宍道湖からの低塩分水流入が多かったため例年よりかなり塩分が少なくなり、8 月には上層では塩分が 6 PSU まで低下した。しかし、上層の低塩分化にもかかわらず水深 4 m 以深の下層の塩分が低くなることはほとんどなく、下層には年間にわたり 25-30PSU 程度の海水が滞留し強い塩分躍層が形成されていた。この下層の高塩分水はほぼ周年にわたり貧酸素化した状態になっており、このため中海は 2、3 月を除き周年ほぼ全域で湖底が貧酸素化していた。貧酸素水塊の体積は平成 13 年以降の 3 年間では最も大きい状態で推移し、年間で最大となった 9 月には中海容積の約 40% に達した (図 3)。このことから、中海における貧酸素化の程度は昨年・一昨年よりやや大きかったと考えられる。

C. 中海本庄水域

本庄水域も低塩分水の流入のため塩分が例年に比較してやや低く 12~20PSU 前後で推移した。本庄水域は中海と異なり表層~底層まで塩分はほぼ一様で塩分躍層はほとんど認められない。塩分躍層の形成が見られないにもかかわらず 6~11 月に湖底の貧酸素化が見られ、その程度は昨年度よりかなり大きかった。特に 8 月には水深 4 m 以深に大きな貧酸素水塊が形成され、その体積は湖容積の約 28% に達した (図 3)。

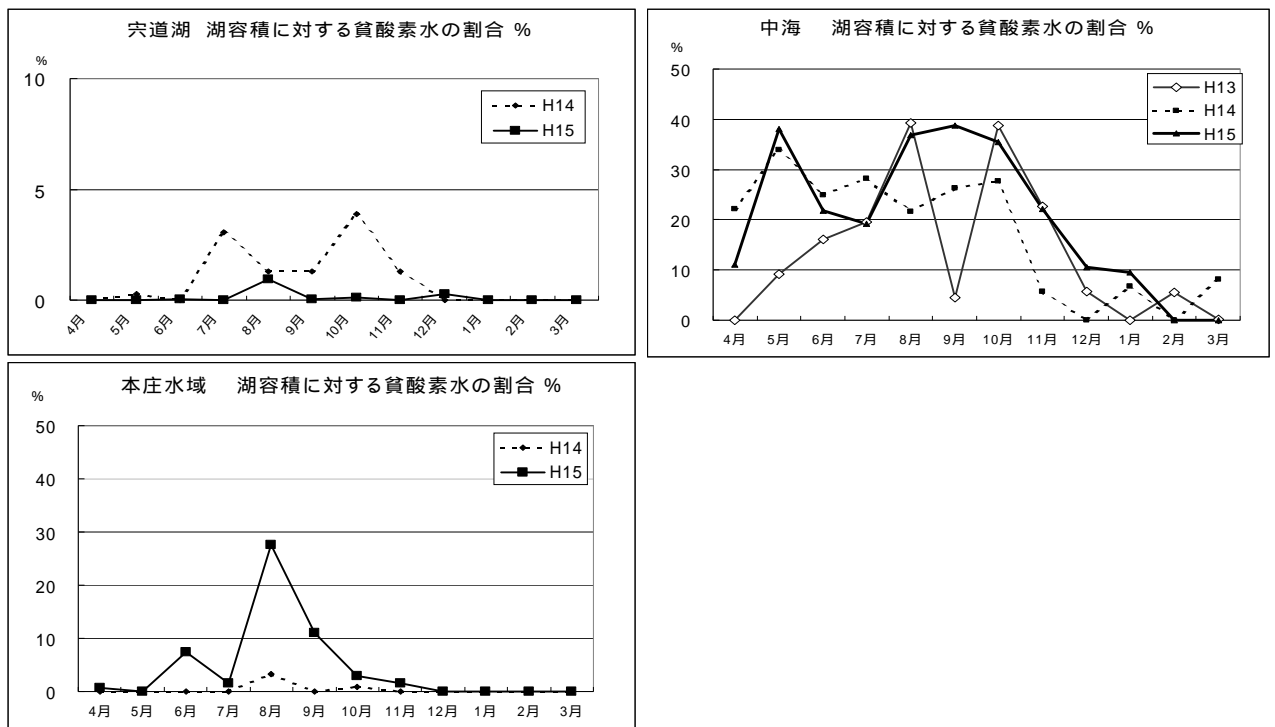


図3 各水域における貧酸素水塊の体積割合の推移
 (貧酸素水の割合(%)) = 貧酸素水塊体積 / 湖容積)

(2) 大橋川水質連続観測 (図13~16)

例年と同様、大橋川の流況は潮汐による往復流が卓越しており、それに加え雨量による穴道湖・中海の水位差、季節による海水位の高低、低気圧や台風の通過による気圧の変化が加わり、流況が変化しているものと考えられる。今年度は春季から夏季の降雨が多かったため、この時期は穴道湖 中海方向の流れが卓越していた。このため、大橋川の塩分は非常に低く特に7~9月は3PSU程度の低塩分状態が続いた。中海から塩水の流入は非常に少なく、高塩分水の流入を示す指標である高塩分指数も例年より非常に少ない値で推移した(図4)。

上記のように高水温期の塩分流入が少なかったこともあり、大橋川の下層の貧酸素化も例年に比較して非常に少なく、酸素欠乏の度合いを示す溶存酸素欠損量も昨年に比較して少なかった(図5)。

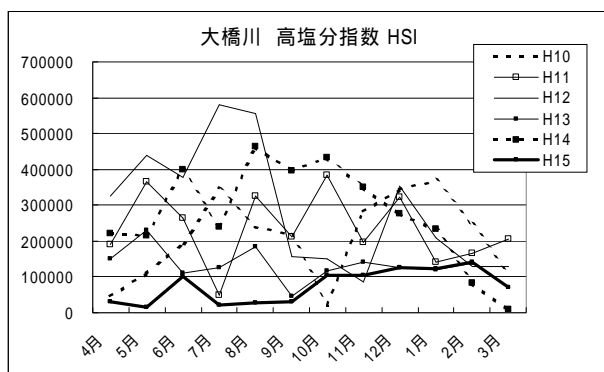


図4 大橋川の高塩分水出現指数

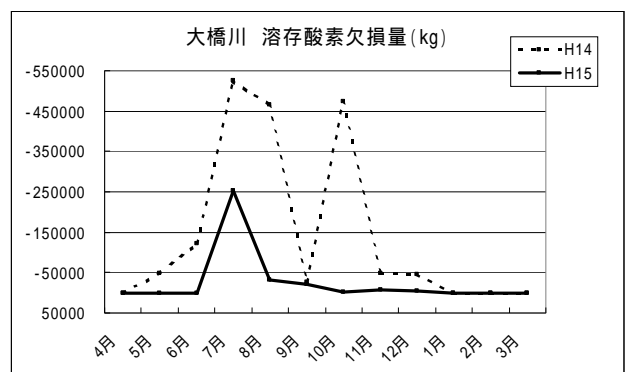


図5 大橋川の溶存酸素欠損量

(3) 貧酸素水による魚介類のへい死

平成 15 年 8 月 8 日夕、中海本庄水域北東部の森山堤防南部から江島の沿岸域において、ハゼ類エビ等の酸欠による接岸・鼻上げ・へい死が認められた（図 6）。原因は台風 10 号の影響で強い東北東の風が吹いたため、底層の貧酸素水が這い上がりを起こして浅場に到達したためと考えられる。

A. 状況

8 月 8 日 17:00 頃、漁業者からの情報に基づき現場に行ってみると本庄水域の江島～森山堤防にかけて広い範囲で水が赤褐色に変色しており、岸近くでは水が若干乳白色に濁っていた。

現場の森山堤防の付け根付近にある漁港ではハゼ類、シラタエビを中心とする魚介類が波打ち際に多数寄っているのが観察された（図 8）。魚類は水面近くまで上がってきており、鼻上げ状態も見られたが、まだ極端に弱った様子はなく死亡魚はわずかであった。波打ち際には死亡したアミエビが多数打ち上げられていた。魚類では数 cm のマハゼ稚魚が多く、その他チチブ類、不明ハゼ稚魚多数、5～8 cm のシラタエビ多数、その他 20 cm 程度のマゴチ、クサフグなども観察された。

現場の水質を計ったところ波打ち際の水深 20 cm 程度の所でも DO が 8.3% と貧酸素状態で、魚介類は明らかに酸欠状態にあった。他の項目は水温 24.8、pH 8.17、塩分 13.2PSU と通常の値であった。現場では、台風 10 号の影響で 12 時～17 時頃まで東北東の強風（風速 8～12m）が継続して吹いていた。その後台風の通過に伴い風が収まり、事態は収束した。



図 6 魚介類のへい死が起こった水域（赤色）

B. 考えられる原因その他

へい死が起こる 3 日前の 8 月 5 日の定期調査では本庄水域は水深 3～4m 以深が貧酸素化しており、湖容積の約 28% が貧酸素水となっていた（図 11）。この状態で台風 10 号の影響で強い東北東の風が吹いたため、表層水の移動に伴い底層の貧酸素水が「這い上がり」を起こし、魚介類が貧酸素水から逃避して接岸したと考えられる（図 7）。

同様の現象は平成 14 年 8 月 19 日にもこの同じ場所で起こって

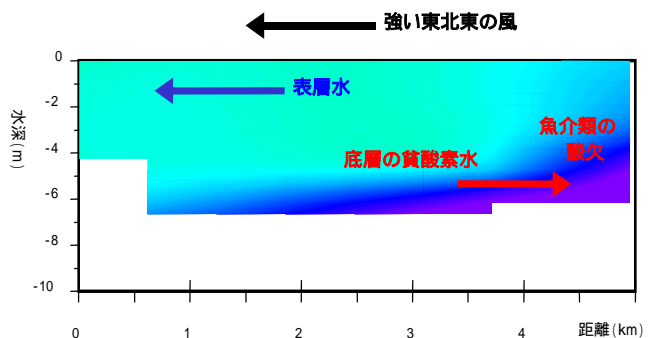


図 7 推定された当時の状況の模式図

り、この時はハゼ類をはじめとして多数の魚類がへい死した。現場の水が赤褐色であったのは、還元状態にあった湖底の鉄・マンガン分が表層に移動した結果酸化され、鉄やマンガンの酸化物を生成したためと考えられる。青白い濁りはいわゆる青潮時に見られる現象で、還元状態の湖底の硫化物が酸素に触れて硫黄分が析出した結果と考えられる。



図8 酸欠によりへい死したハゼ類（左）とシラタエビ（右）

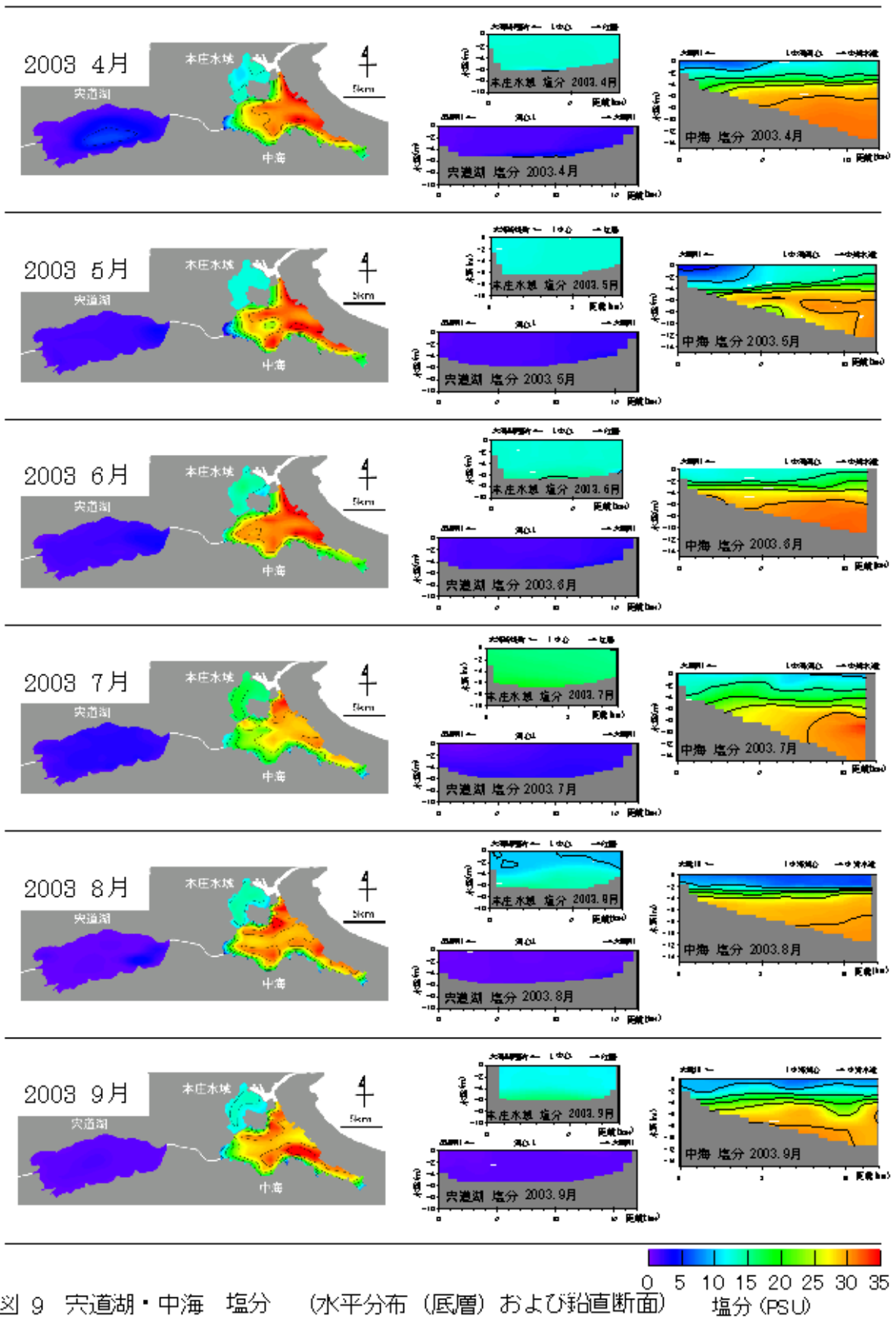


図 9 穴道湖・中海 塩分 (水平分布 (底層) および鉛直断面) 2003年4月～9月

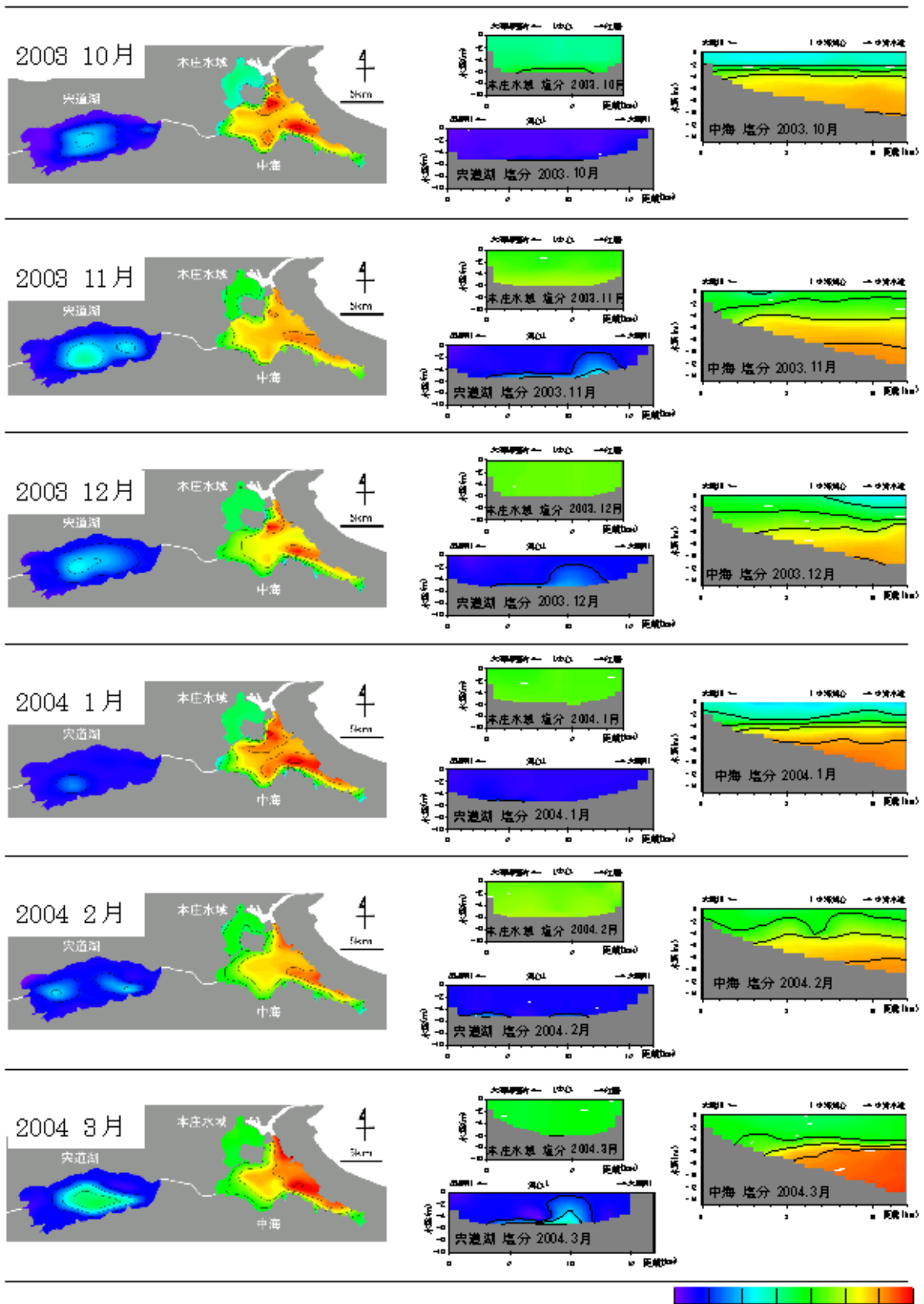


図 10 宍道湖・中海 塩分 (水平分布(底層)および鉛直断面)

2003年10月～2004年3月

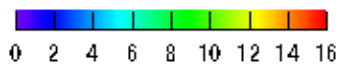
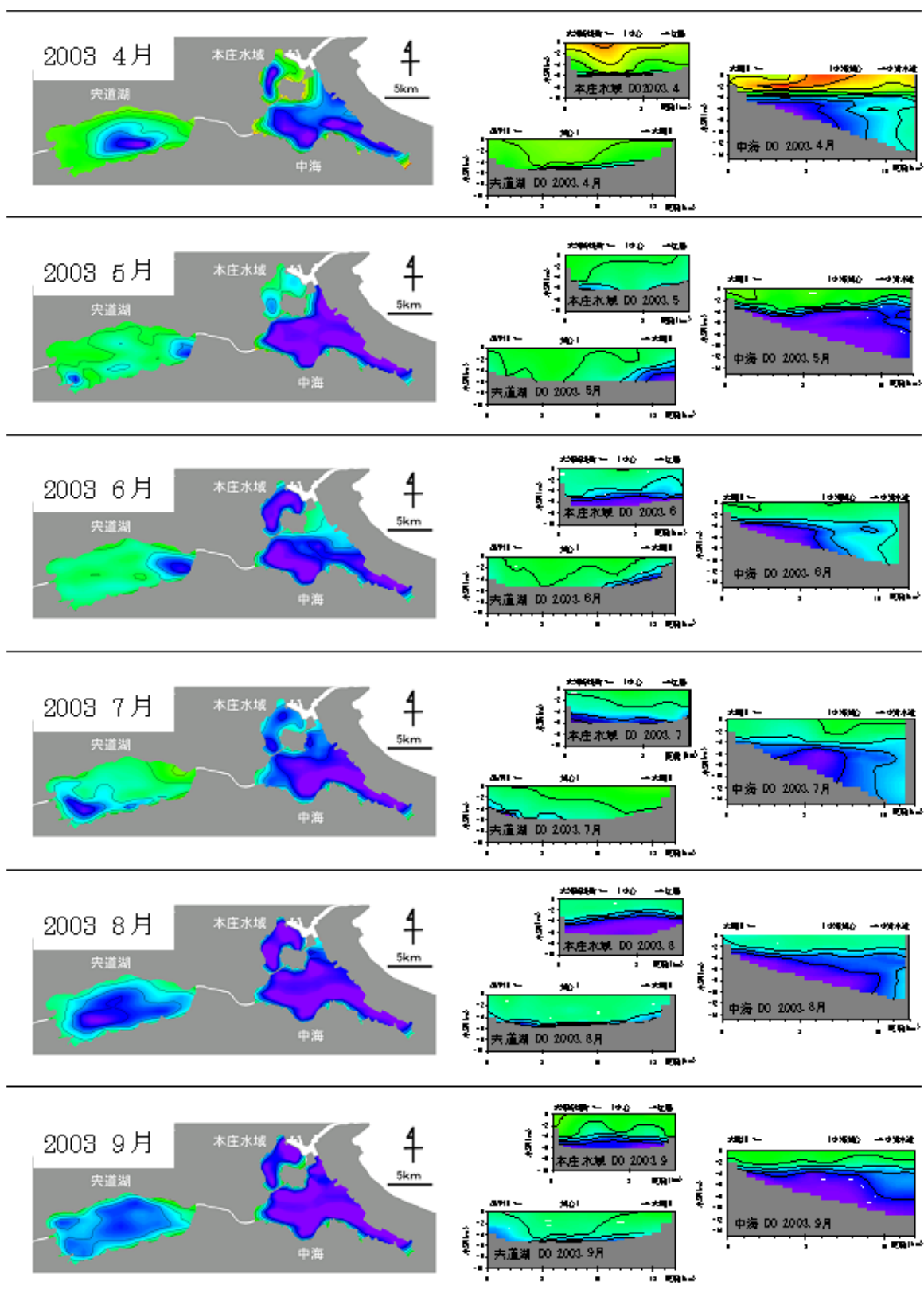


図 11 中央湖・中海 DO (水平分布(底層)および鉛直断面) DO(mg/l)
2003年4月～9月

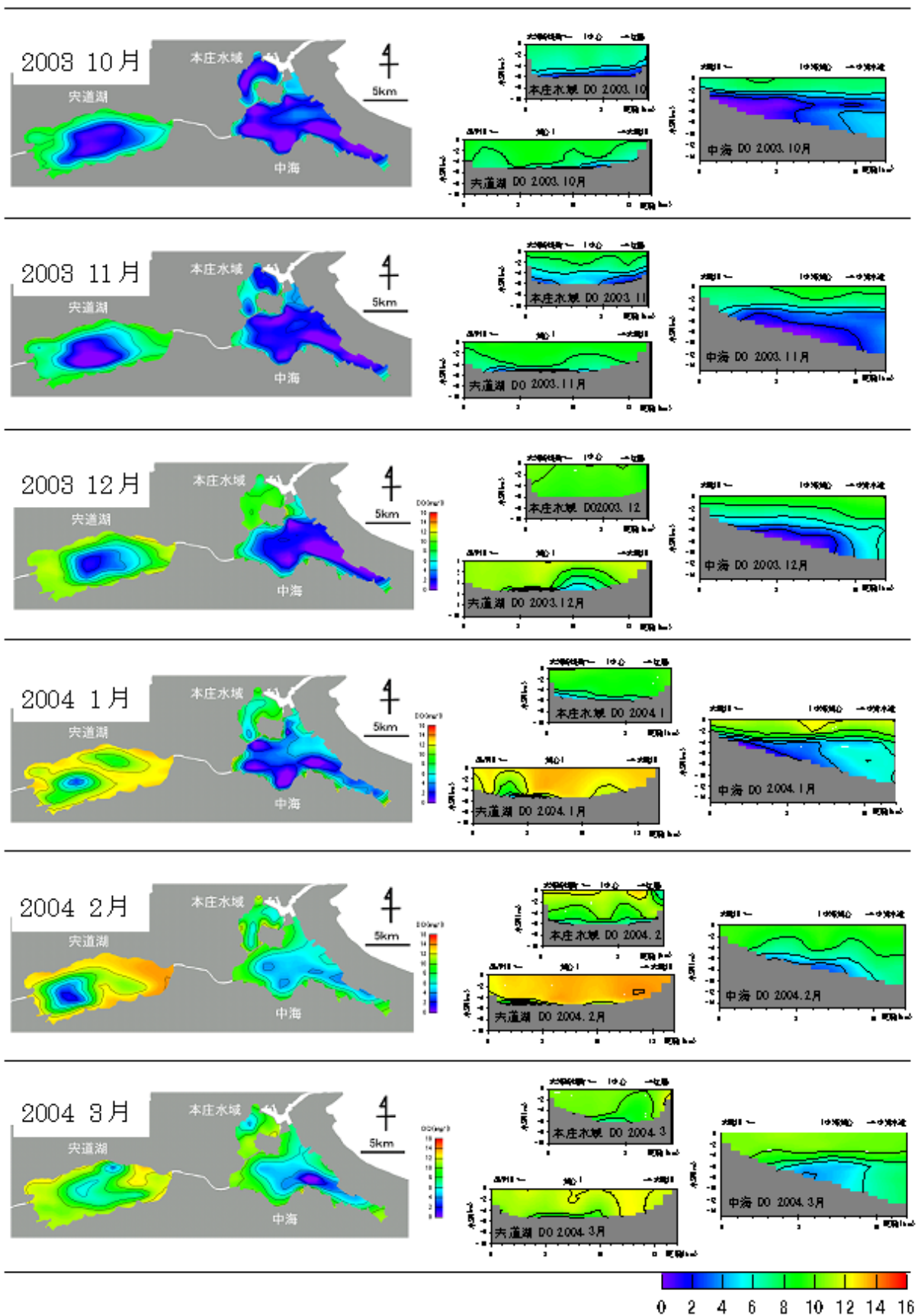


図 12 宍道湖・中海 DO (水平分布(底層)および鉛直断面) DO(mg/l)
2003年10月~2004年3月

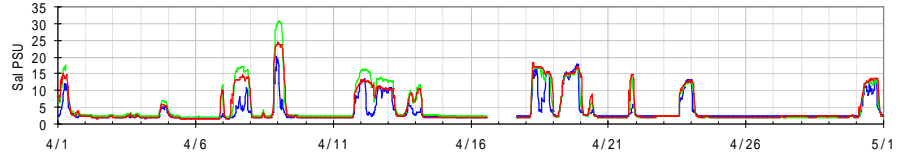
2003年4月

上層:水深 1.0m ——— 中層:水深 3.0m ——— 下層:水深 4.3m ———

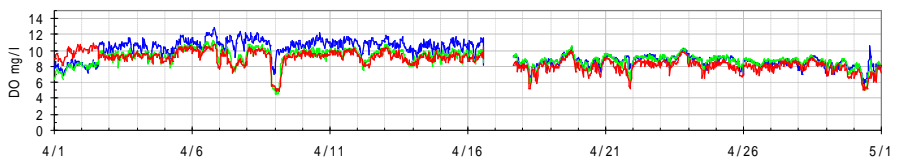
水温 ()



塩分 (PSU)



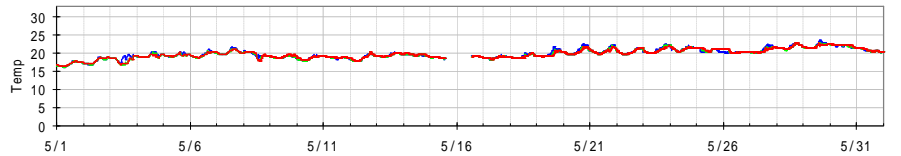
溶存酸素 (mg/l)



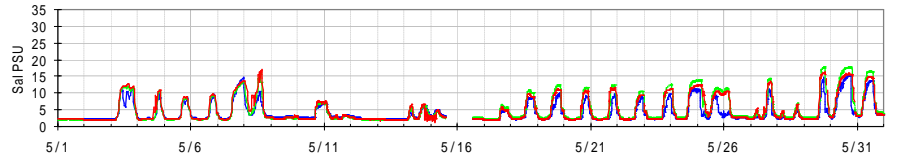
2003年5月

上層:水深 1.0m ——— 中層:水深 3.0m ——— 下層:水深 4.3m ———

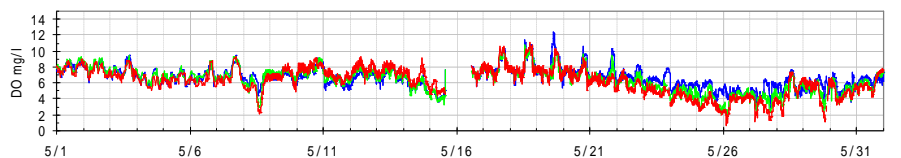
水温 ()



塩分 (PSU)



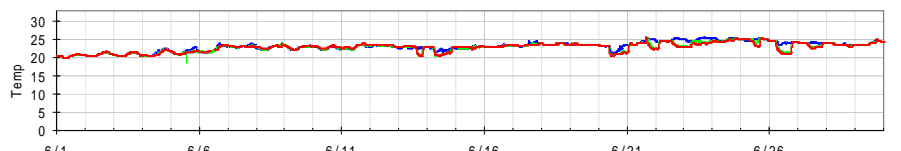
溶存酸素 (mg/l)



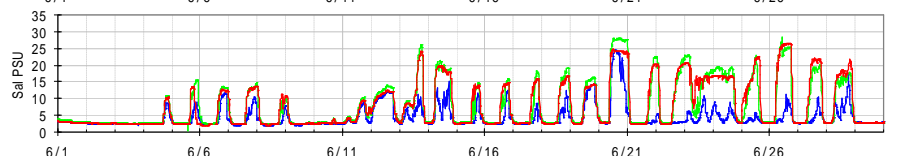
2003年6月

上層:水深 1.0m ——— 中層:水深 3.0m ——— 下層:水深 4.3m ———

水温 ()



塩分 (PSU)



溶存酸素 (mg/l)

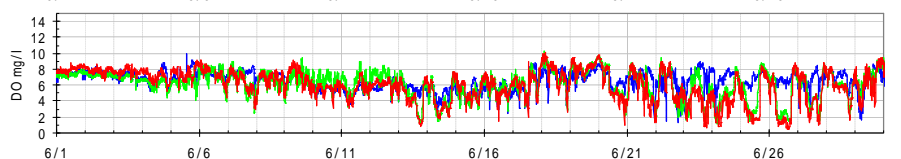
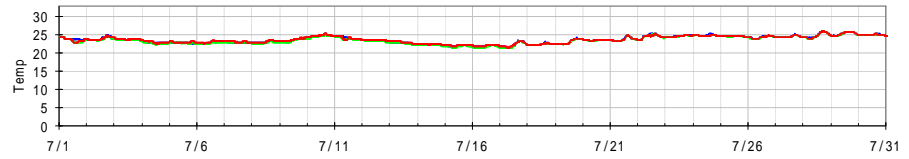


図 13 大橋川水質連続観測結果 2003年4月~6月

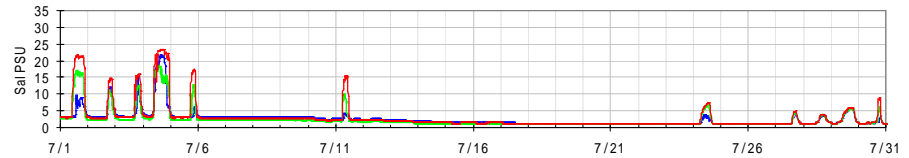
2003年7月

上層:水深 1.0m ——— 中層:水深 3.0m ——— 下層:水深 4.3m ———

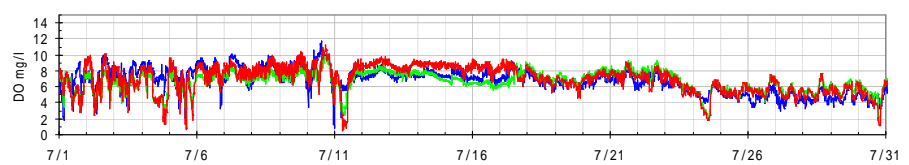
水温 ()



塩分 (PSU)



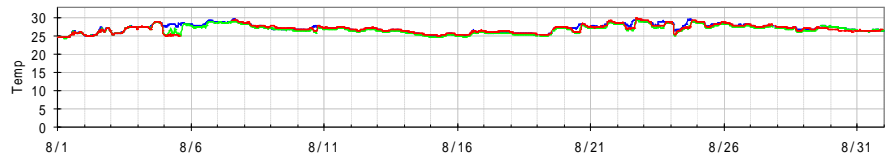
溶存酸素 (mg/l)



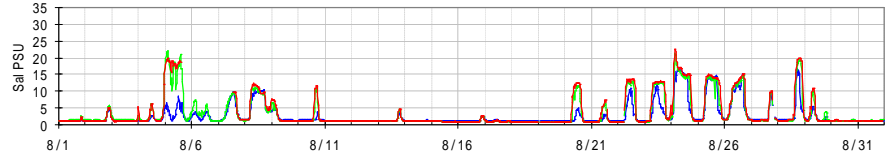
2003年8月

上層:水深 1.0m ——— 中層:水深 3.0m ——— 下層:水深 4.3m ———

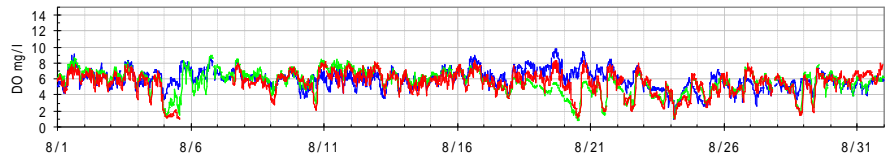
水温 ()



塩分 (PSU)



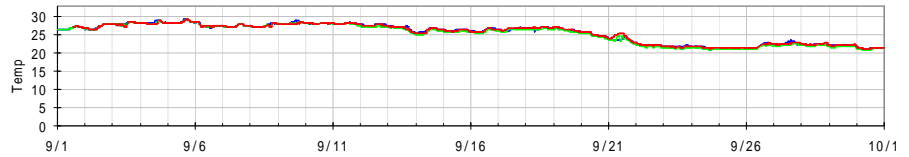
溶存酸素 (mg/l)



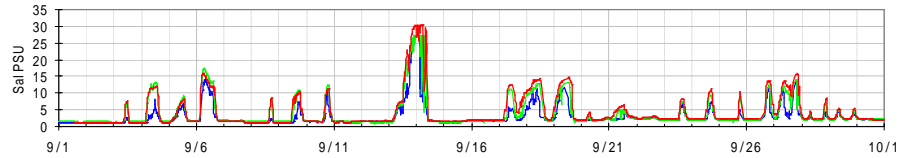
2003年9月

上層:水深 1.0m ——— 中層:水深 3.0m ——— 下層:水深 4.3m ———

水温 ()



塩分 (PSU)



溶存酸素 (mg/l)

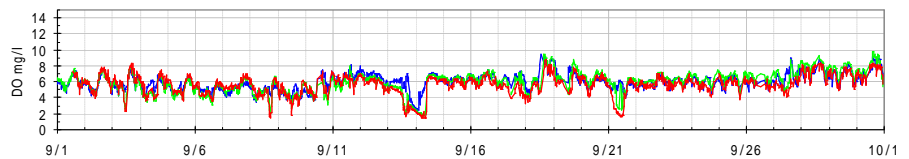
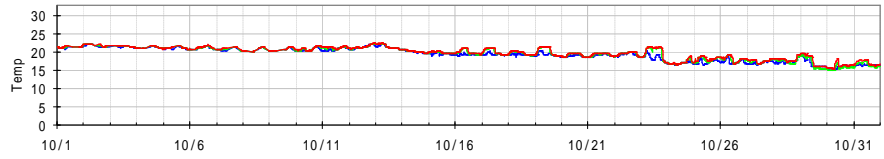


図 14 大橋川水質連続観測結果 2003年7月~9月

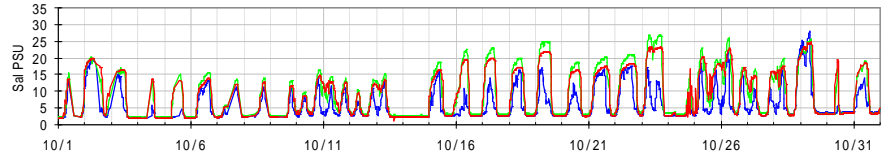
2003年10月

上層:水深 1.0m (blue line) 中層:水深 3.0m (green line) 下層:水深 4.3m (red line)

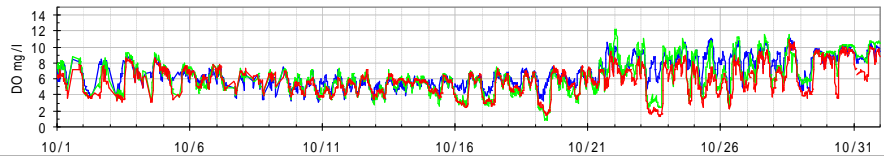
水温 ()



塩分 (PSU)



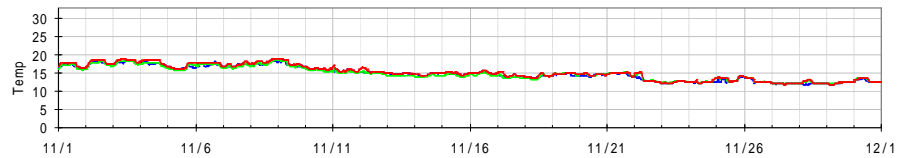
溶存酸素 (mg/l)



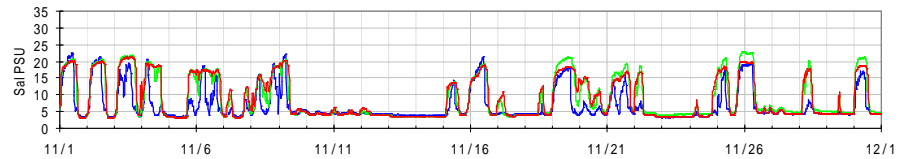
2003年11月

上層:水深 1.0m (blue line) 中層:水深 3.0m (green line) 下層:水深 4.3m (red line)

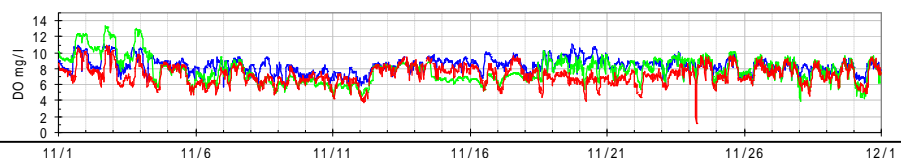
水温 ()



塩分 (PSU)



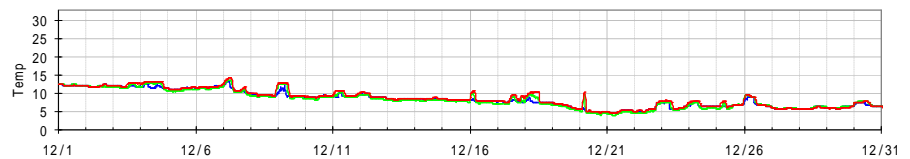
溶存酸素 (mg/l)



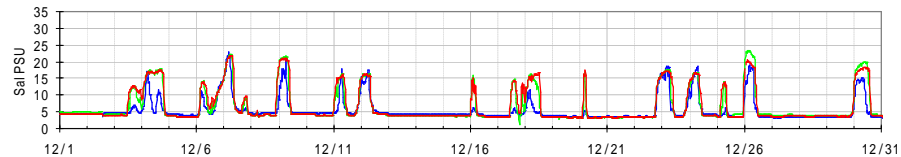
2003年12月

上層:水深 1.0m (blue line) 中層:水深 3.0m (green line) 下層:水深 4.3m (red line)

水温 ()



塩分 (PSU)



溶存酸素 (mg/l)

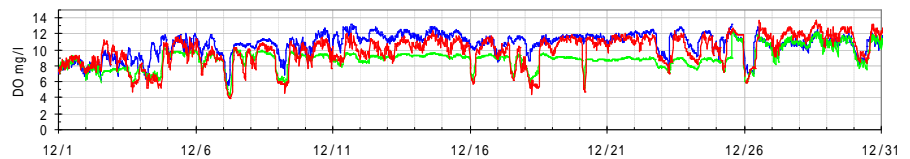
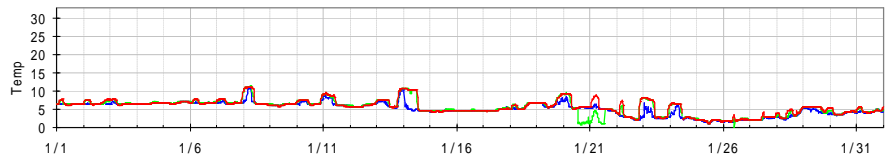


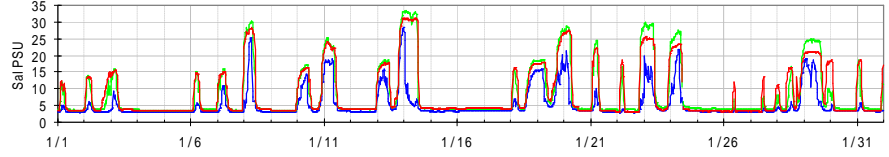
図 15 大橋川水質連続観測結果 2003年10月~12月

2004年1月

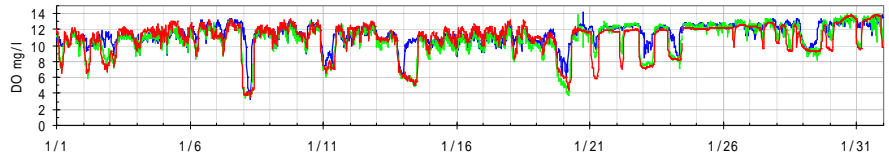
水温 ()



塩分 (PSU)



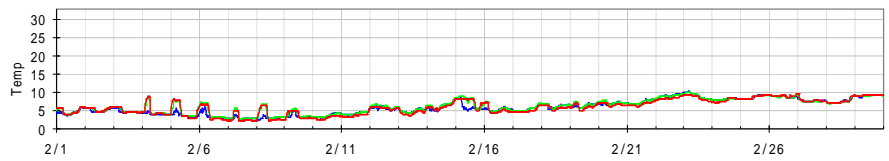
溶存酸素 (mg/l)



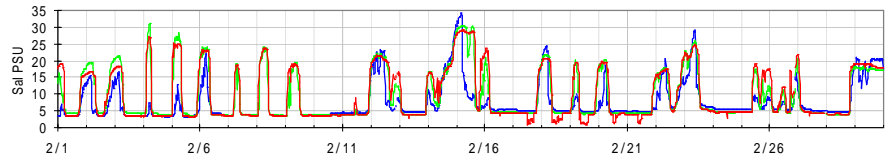
2004年2月

上層:水深 1.0m (blue line) 中層:水深 3.0m (green line) 下層:水深 4.3m (red line)

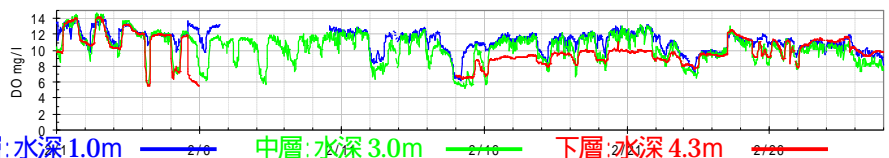
水温 ()



塩分 (PSU)



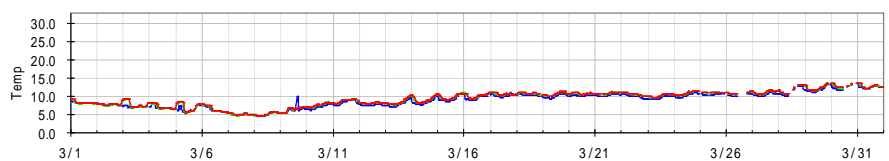
溶存酸素 (mg/l)



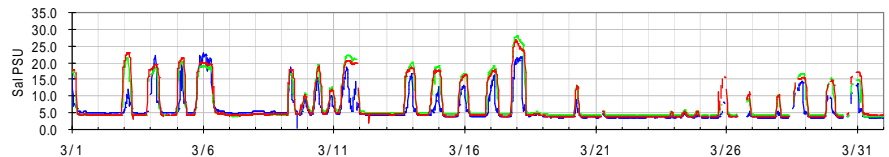
2004年3月

上層:水深 1.0m (blue line) 中層:水深 3.0m (green line) 下層:水深 4.3m (red line)

水温 ()



塩分 (PSU)



溶存酸素 (mg/l)

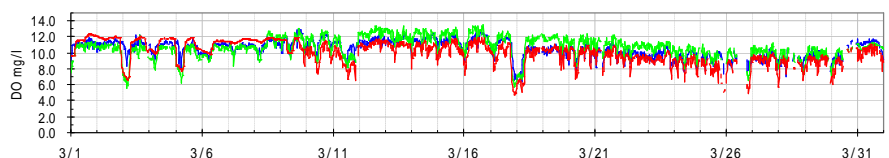


図 16 大橋川水質連続観測結果 2004年1月~3月

4. 研究成果

- 調査で得られた結果は、宍道湖・中海水産振興対策検討委員会及び内水面調査研究協議会で報告された。
- 平成 15 年度夏季に宍道湖でヤマトシジミの大量へい死が起こったが、本調査の結果はへい死原因を推定するための重要な論拠となった。
- この調査を今後も継続して行うことにより、宍道湖・中海の長期的な環境変化を量的に把握することが可能になる。
- 調査結果は島根県内水面水産試験場のホームページ (<http://www.pref.shimane.jp/naisuisi/>) や FAX、I - mode 等で紹介し、広く一般への情報提供を行った。

5. 文献

- 1) 森脇晋平 他．島根県内水面水産試験場事業報告書（平成 13 年度）2001；9 - 73．