

宍道湖に流出入する塩分フラックスと 湖内塩分濃度の変化

ESTIMATION OF SALINITY FLUX AND VARIATION OF SALINITY IN LAKE SHINJI

福岡捷二¹・山本絢子²・岡村誠司³・溝山勇⁴

Shoji FUKUOKA, Ayako YAMAMOYO, Seiji OKAMURA, and Isamu MIZOYAMA

¹フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²学生会員 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻博士課程前期
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 日本建設コンサルタント株式会社 (〒730-0037 広島市中区中町7-32)

⁴正会員 国土交通省 中国地方整備局出雲河川事務所水質保全課長
(〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原町5-1)

Lake Shinji has a distinctive environment based on the inflow, which the astronomical and meteorological tide causes, of the salt water from Lake Shinji, and the inflow from the Hii River. Recently, the extension construction is planned to defend from overflowing in the Ohashi River that connects Lake Nakaumi and Lake Shinji. It is the important problem that we study about the present mechanism of water environment in Lake Shinji. So, we calculate the estimation of water quantity and salinity fluxes, based on the data observed from summer to autumn in 2003, and examine them in various weather conditions. Furthermore this study focuses on the cause of the variation of the salinity concentration in Lake Shinji. Also, after the inflow of much salt water, it makes the halocline, DO under the halocline often disease in the lake, we state the phenomenon of the variation of DO and the salinity concentration.

Key Words : Lake Shinji, connected brackish lake, variation of salinity, salinity flux, DO

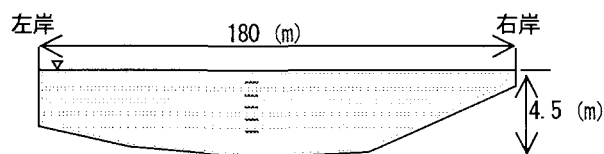
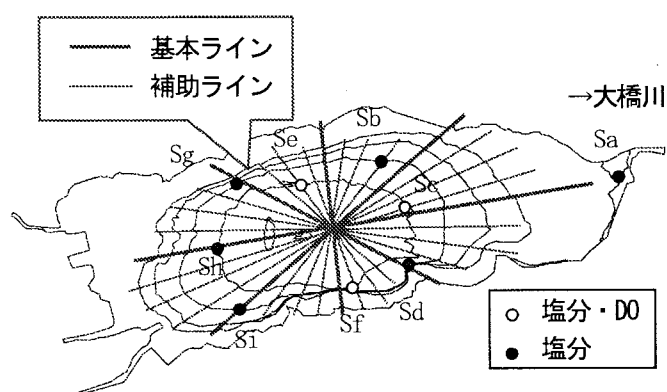
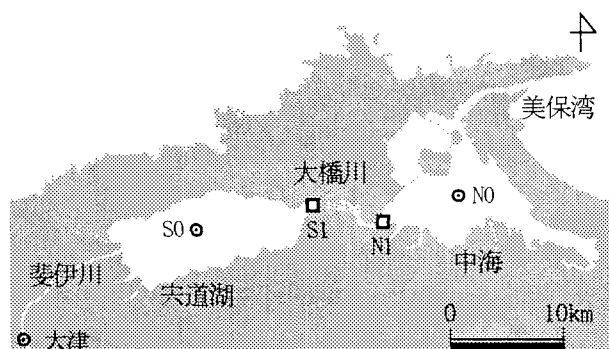
1. 序論

図-1に示すように宍道湖は斐伊川水系の下流に位置し大橋川をはさんで中海とつながった連結系汽水湖である。水域には天文力や気圧変化に起因する外海水位変動、風、降雨などの外力が作用し複雑な水位変動や湖水交換、流動が生じる。このため宍道湖は斐伊川からの淡水流入や中海からの塩水流入の影響を受け、全国的にも珍しい低塩分の汽水環境であり、汽水湖特有の水生生物による生態系を形成している。

一方、宍道湖は洪水時の水位上昇が治水上の課題であり、上流の尾原ダム、斐伊川放水路の流域対策に加え大橋川改修計画が必要とされている。このため、宍道湖と中海の塩分濃度や水質などの現象を解明することが緊急の課題である。

これまで中海から宍道湖への塩水流入について、気象力や天文力による水位変動との関係が研究されているが^{1)~4)}、定量的な検討はされていない。本研究では、まず宍道湖の流出入塩分フラックスを算出し、低気圧や台風、気象平穏時などの気象外力と2つの湖で交換される流量の関係を検討する。次に、実際湖内の塩分濃度が増加する期間に着目しその要因について述べ、湖内に密度界面が形成される条件について天文力スケールで検討を行う。

密度界面によって宍道湖内の鉛直方向の流動がさげられ、密度界面以下の高塩分水は貧酸素化する傾向にある。しかし、宍道湖は最大水深5.4m程度の浅い湖であるため、強風が吹くことで湖水の混合が見られる。このような流入後の高塩分水の水質変化について、特に塩分濃度とDOに着目して検討を行う。



2. 現地観測概要

図-1に宍道湖・大橋川・中海の地図と観測地点を示す。S0（宍道湖湖心）地点とN0（中海湖心）地点において常時、水質、気圧、風向・風速などの気象観測が行われている。また、S0地点の水質観測水深は湖底上0.3m（底層）、0.6m（下層）、TP-2.8m（中層）、TP-0.8m（上層）TP-0.3m（表層）の5測定点設けられ、毎正時、塩分・水温・DOなどの自動観測が行われている。大津地点では斐伊川の水位、流量観測が行われている。大橋川におけるS1（松江）地点とN1（八幡）地点ではH-ADCPを利用した流向・流速観測と塩分・水温・DO・水位が15分毎に観測されている。

宍道湖の流出入塩分フラックスは、図-2に示す宍道湖と大橋川の接続部に存在するS1断面の流速を用い、5つの分割断面で算出した流量に各断面の塩分を乗じたものである。S1断面は幅約180m、水深約4.5mであり、流向・流速は横断方向5.0m毎、水深方向0.5m毎に測定され、塩分・DOは水深1.5mから鉛直方向に0.5m毎測定されている。

また2003年8/1～11/30の期間で、図-3に示した宍道湖と大橋川の接続部に存在する水深の浅いマウンド上のSa地点と、流入した高塩分水の湖盆部における挙動を把握するためSb～Si地点において15分毎に湖底上0.3mの塩分とD0の自動観測が行われた。この他、密度界面が存在する期間中、湖盆部における高塩分水の外縁を把握する観測を1日1回行った。船上よりSTDを垂下し、図-3における基本8ライン上で塩分濃度10psuと5psuの位置を調査した後、外縁位置を予測した上で補助24ラインにおいて塩分・D0を測定した。

3. 各気象条件における水交換

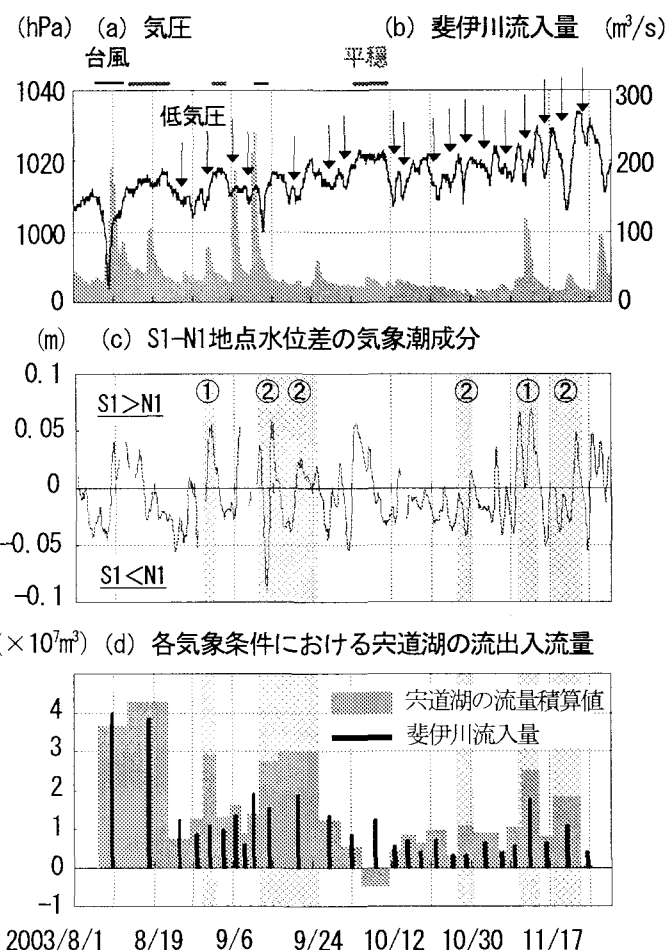


図-4 水位・気圧の変化と宍道湖への流入量

図-4に2003年8/1～11/30の期間中に(a)S0地点で観測された気圧，(b)斐伊川からの流入量，(c)S1-N1地点の水位差気象潮成分，(d)各気象条件における宍道湖の流出入流量積算値を示す

まず気象条件として低気圧・台風通過時・平穏時の3つが考えられ、(d)に着目すると天文潮の時間スケールでは流入・流出を繰り返しているものの、どの気象変化による時間スケールにおいても流出傾向となっている。各気象期間の真ん中に示した濃い色の線は期間中の湖内への斐伊川からの流入量積算値であり、この値と宍道湖の流量積算値が同程度であり、宍道湖は斐伊川の影響を

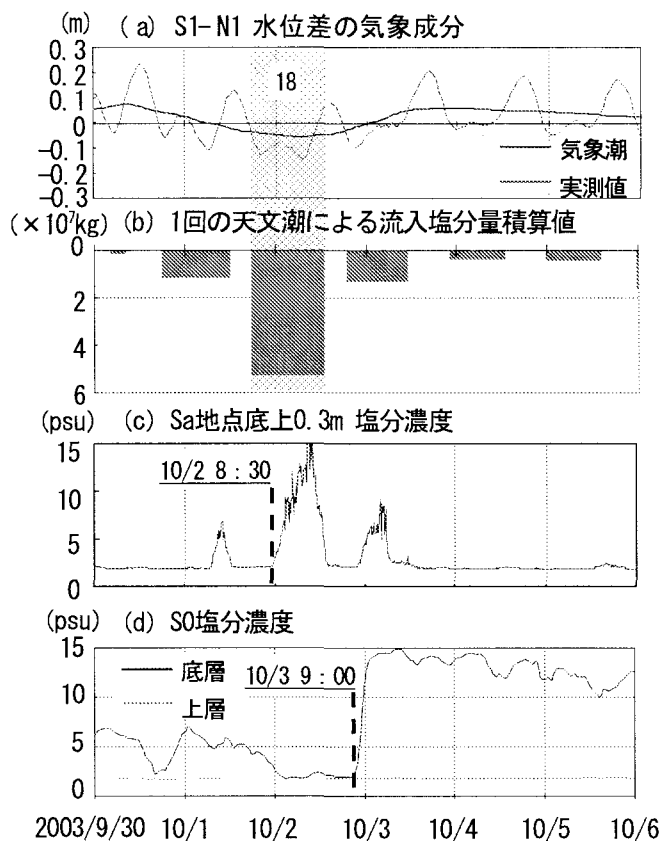


図-5 密度界面の形成と流入塩分量

大きく受けていることがわかる。また (c) (d) 上に帯で示したように斐伊川流入量以上の流出が生じている期間も存在する。この要因として、①地中海の水位の上昇より宍道湖の水位のほうが大きく上昇したこと、②気圧低下後の気圧回復期に地中海の水位が大きく低下し、宍道湖水位>地中海水位の継続時間が長くなることが考えられる。

4. 密度界面形成による湖内塩分濃度の変化

図-5に2003年9/30～10/6の低気圧通過期間における (a) S1-N1地点水位差の実測値と気象潮成分、(b) 1回の天文潮による宍道湖への流入塩分量積算値、(c) Sa地点底上0.3m (底層) の塩分濃度、(d) S0地点の上層と底層の塩分濃度を示す。図-6に2003年8/1～11/30の4ヶ月間で観測したS0地点における (a) 風向・風速、(b) 上層の塩分濃度、(c) 底層の塩分濃度、(d) Sa地点底層の塩分濃度、(e) 1回の天文潮で生じる宍道湖への流入塩分量を示す。

気圧が低下することでN1水位がS1水位より高くなり、宍道湖内に流入をもたらす。図-5 (a) では、低気圧通過期間中に同様の水位変動が生じている。帯で示した10/2に天文潮による水位変動がありS1水位<N1水位の状態が18時間継続する。このときに生じた流入塩分量は図-5 (b) において他の天文潮による流入塩分量より多

く、この18時間の塩水流入によって湖内には密度界面が形成されている。(c) (d) において 10/2/8:30 にSa地点で観測された16.4psuの高塩分水が24.5時間後の10/3/9:00に宍道湖湖心に達している。この時間と松江から宍道湖湖心までの距離約10kmから逆算すると湖棚部では重力の作用によって10cm/s程度のゆっくりとした速度で湖心へ侵入することが確認できる。2003年8/1～11/30の期間において他のケースについても同様に高塩分水侵入速度を算出すると、図-6 (c) の上に書かれた数字が各侵入時における流速であり、ほぼ10cm/s程度の流速であることがわかる。期間Aで流速が通常より早いのは、流入時の塩分濃度が高いためであり、期間Bで遅いのは11/9～11/13にかけて10m/sの東風が長時間卓越したため、湖内では高塩分水の侵入と逆向きの流れが生じ塩水の流れが妨げられたものと考えられる。

福岡らは⁴⁾ 中海から高塩分水が遡上し、S1で確認できる条件として主に①気圧低下によって大橋川下流の水位が上昇した時と、②日潮不等によって直前の水位の戻りが小さいときであることを示している。

図-5 (a) (b) を参照すると、湖内に密度界面が形成されるときは低気圧と日潮不等の作用が重なったときであることがわかる。図-6 (c) (d) に実線の矢印で示した箇所が同じケースであり、このとき流入する塩分量は 5×10^7 kg以上最大で 1.1×10^8 kgである。また破線の矢印で示した低気圧と12.5時間周期の天文潮による流入によっても下層が形成されている。しかし、このときの流入塩分量は 5×10^7 kg以下であり、下層の塩分濃度はほぼ一定で底層だけが変化しているため、12.5時間周期の場合は日潮不等時ほど密度界面形成に寄与しないと言える。

図-6 (c) によれば、宍道湖内に密度界面が形成されそれらが強風によって混合する際に (b) の湖内上層塩分濃度が急激に増加している。4ヶ月間で上層の塩分濃度は3.0psu程度増加しており、宍道湖塩分濃度は湖底に侵入した厚さ30～60cm程度の高塩分水が湖面風等の攪乱により湖水全体と混合しながら徐々に増加していくことがわかる。

5. 宍道湖内における下層水の貧酸素化

(1) 流入する塩水の溶存酸素量

表-1 宍道湖への塩水流入回数

2003年8/1～11/30	全回数	D01.5 (mg/l)	D03.0 (mg/l)
宍道湖への 塩水流入回数	135	12 (9%)	35 (26%)
密度界面を形成 する塩水流入回数	16	2	7

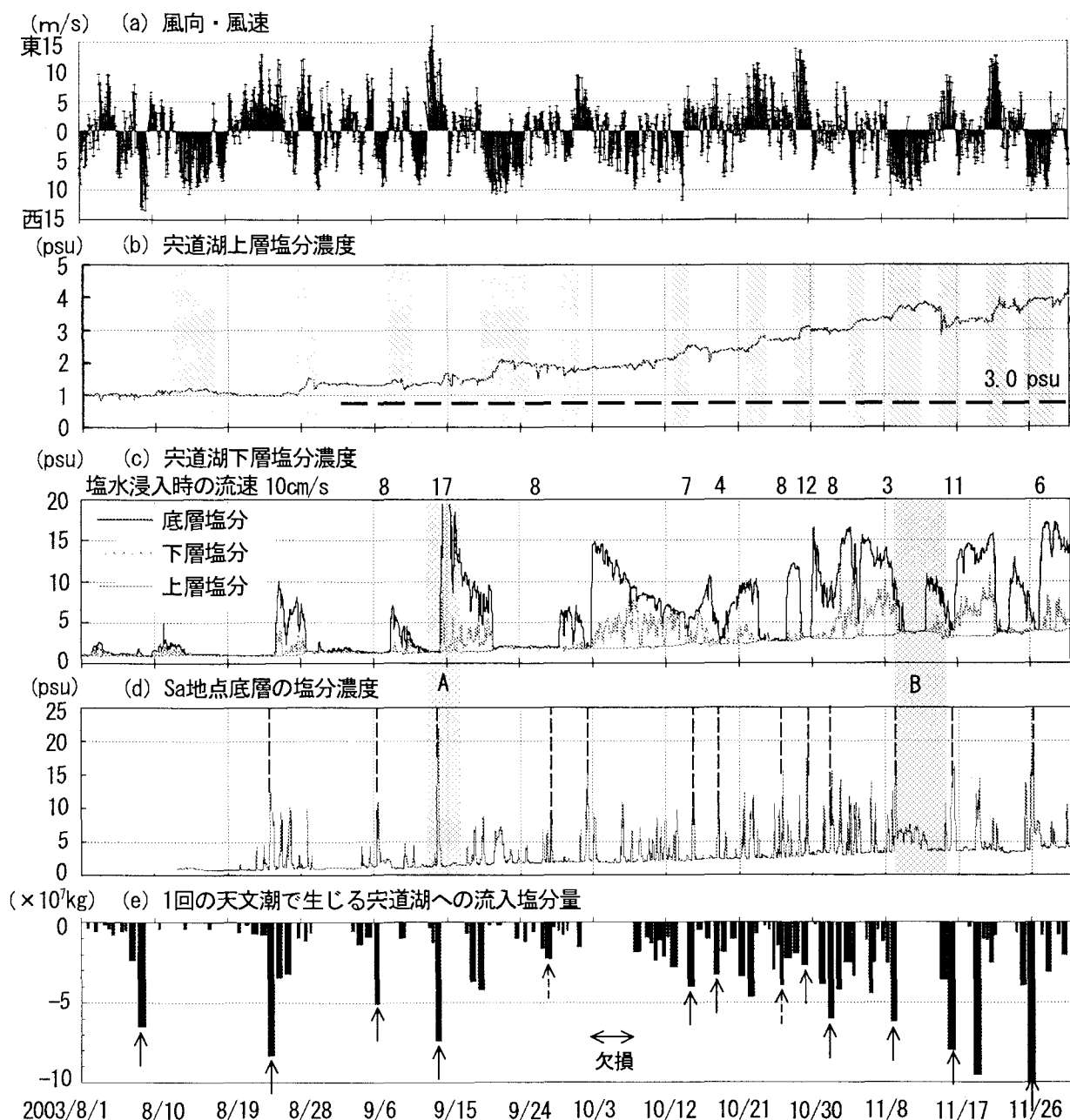


図-6 2003/8/1～11/30における宍道湖塩分濃度の変化と流出入塩分量

密度界面が形成されると、鉛直方向の流動が抑制されるため界面以下の高塩分は貧酸素化する。このとき水深4.0m以下の湖底部に存在する生物に影響を与えている。湖内の下層水が貧酸素化することには、大橋川から貧酸素化した塩水が流入する場合と湖水と湖底泥の酸素消費による場合の2つのケースが考えられる。まず流入時の貧酸素状況について述べる。

表-1にあるように2003年8月～11月の期間において、宍道湖への塩水の流入が生じる回数は135回である。そのうちD01.5mg/l以下の貧酸素水が確認されたのは12回、全体の9%程度であり、D03.0mg/l以下の場合は35回、全体の26%程度で、中海からの貧酸素水塊の宍道湖への遡

上は頻繁に生じていない。ここでD01.5mg/lを貧酸素水としたのは、中村ら⁵⁾によるしじみの耐久実験の結果に基づいており、一般的な貧酸素水は魚類に悪影響を及ぼすD03.0mg/l以下のものをいう。次に宍道湖内に密度界面を形成する程の量の塩水流入と貧酸素化の関係を検討する。このような塩水の宍道湖への流入の回数は16回であり、そのうちD01.5mg/l以下は2回生じ、D03.0mg/l以下は7回生じた。他の1つの貧酸素化の原因である湖水と湖底による酸素消費については、今後の課題である。

(2) 湖内の貧酸素化進行状況

図-7に2003年9/30～10/26における (a) S1-N1地点水位差の実測値、(b) S1地点底層のD0と (c) 塩分濃度

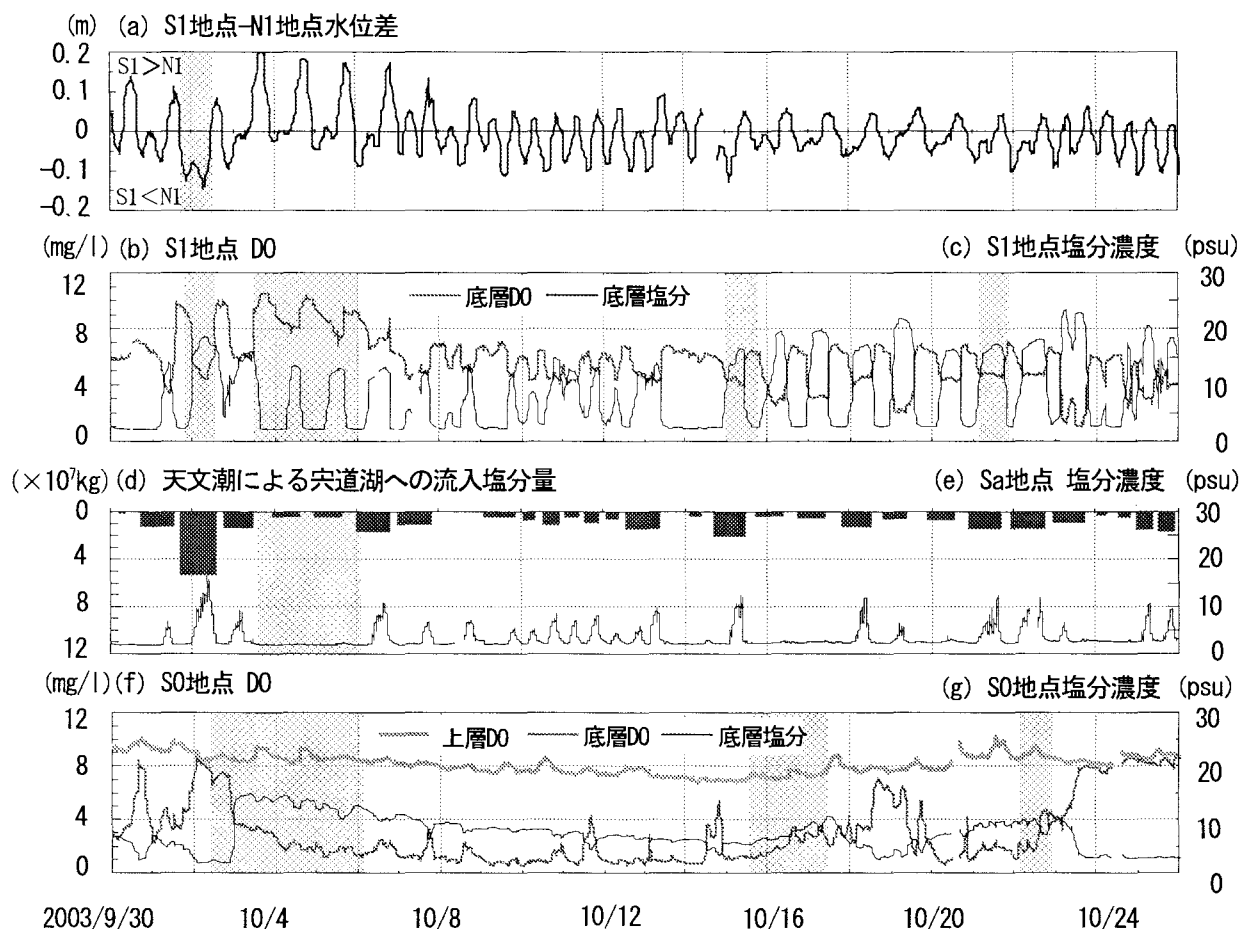


図-7 密度界面存在時のDO変化

(d) 1回の天文潮で生じる宍道湖への流入塩分量と (e) Sa地点の底層の塩分濃度、(f) S0地点のDOと (g) 塩分濃度を示す。また図-8は10/2, 10/3, 10/6, 10/10に観測した宍道湖湖盆部の湖底上0.3mのDOと塩分濃度であり、湖底上0.3mを示す。

10/2に図-7 (a) において日潮不等と気象潮の作用で S1水位<N1水位の状態が継続し、(c) と (d) より高濃度で多量の塩分が宍道湖に流入している。このときの (b) S1地点のDOは4.2mg/lであり、(f) と (g) のS0地点まで流入塩水が達し塩分濃度が増加すると同時にDOも3.6mg/lまで急激に減少する。その後、密度界面が存在し続けると湖心のDOは徐々に減少し10/6には1.0mg/l程度に達する。この間S1地点では高塩分水の遡上が確認できるが (e) を見ると高塩分水がSa地点のマウンドを越える流入は生じていないため、宍道湖下層への新しい流入はなく、下層水のDO1.0mg/lまでの消費は宍道湖へ侵入後に進んだと考えられる。また図-8に示したDOにおいては、10/3~10/6~10/10にかけて下層水の貧酸素化が進行し、湖底を覆う面積も拡大している。塩分濃度においては、10/3には10psu以上の高塩分水が多く存在していたが、図-6 (a) にあるように5~10m/s程度の風が吹くことで、10/10には減少している。したがって、密度

界面以下の塩分濃度が徐々に薄まり上層の濃度に近づいても、DOの消費は進行することがわかる。

(3) 貧酸素化した高塩分水の消滅

図-7 (f) (g) の10/16と10/22において貧酸素化していない新しい塩水の流入に伴い湖心の塩分濃度とDOは増加している。したがって、湖内の下層水が貧酸素化しているとき新しい高塩分水の流入によって密度界面は存在したままであるがDOは回復することがある。

その後10/22から10m/s以上の西風が長時間卓越することで、宍道湖上層と下層が混合し密度躍層が破壊され塩分濃度、DOともに上層と同じ値になっている。

6. 結論

気象変化に伴う宍道湖の塩分濃度やDOの変化を解明するため、中海との湖水の交換を中心に、湖内の貧酸素化現象について検討を行った。この結果、以下のような知見を得た。

(1) 気象条件には低気圧・台風・平穏時等が挙げられるが、どの期間においても宍道湖湖水は流出傾向にある。

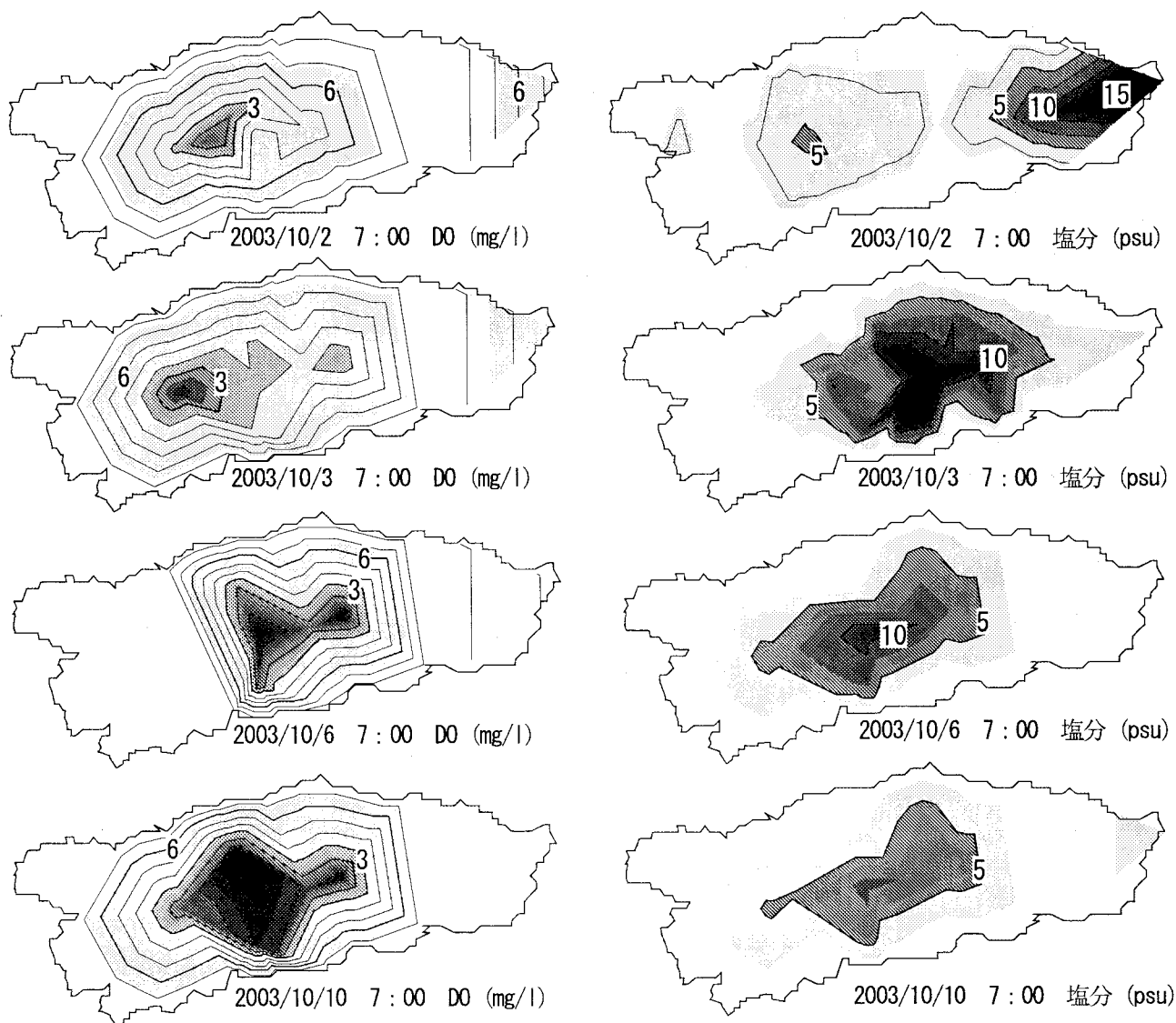


図-8 宍道湖湖盆部における湖底上0.3mの塩分濃度とDO

この湖水流出量は期間中の河川流入量とほぼ等しい。

(2) 湖内に密度界面が形成されるのは、日潮不等の天文潮と低気圧通過期間中の宍道湖水位＜中海水位の状態が重なった際に多い。12.5時間周期の天文潮においても形成されるが、密度界面形成にそれほど寄与しない。また界面が形成した後、下層水が風によって上層水と混合するとき上層の塩分濃度を増加させ、この現象が宍道湖の塩分濃度を増加させる要因の一つとなる。

(3) 湖内の下層水が貧酸素化の原因の一つとして大橋川から貧酸素化した塩水が流入する場合があるが、この現象は頻繁には生じていない。もう一つの原因として侵入後の湖水と湖底による酸素消費があり、これについては今後の課題である。

また高塩分濃度の下層水は時間が経つにつれて濃度が薄くなっていくが、密度界面は存在し続けるため貧酸素化現象は進行していく。貧酸素化した下層水は高いDOの新しい高塩分水の流入か、風による密度界面の破壊が生じない限り回復しない。

参考文献

- 1) Ishitobi, Y., Kamiyama, H. and Itogawa, H. : Tidal, Meteorological and Hydrological Effects on the Water Level Variation in a Lagoon, Lake Shinji, Jpn. J. Limnol, Vol.54, No.1, pp.69-79, 1993.
- 2) 福岡捷二, 黒川岳司, 上原 浩, 三浦 心, 船橋昇治: 低気圧および台風の移動の違いが汽水湖の流動・水質場に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 712/Ⅱ-60, pp137-150, 2002.
- 3) 石飛 祐, 神谷 宏, 横山康二, 熊谷道夫, 奥田節夫: 潟湖, 宍道湖への塩水侵入条件, 陸水学会誌, 60, pp439-452, 1999.
- 4) 福岡捷二・松下智美・三浦 心・黒川岳司・船橋昇治・中村幹雄: 連結系汽水湖における塩分変化特性, 水工学論文集, 第46巻, pp1405-1410, 2002.
- 5) 中村幹雄: 日本のシジミ漁業 その現状と問題点, 米子たたら書房, p5-14, 2000. 2.

(2004.9.30 受付)