

汽水湖に流入する塩水の流動特性

Behavior and Characteristics of Saline Water Advancing into a Brackish Lake

福岡捷二¹・松下智美²・岡村誠司³・今井修平⁴・船橋昇治⁵

Shoji FUKUOKA, Tomomi MATSUSHITA, Seiji OKAMURA, Shuhei IMAI, Shoji FUNABASHI

¹フェロー会員 Ph.D 工博 広島大学大学院教授 社会環境システム専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

²正会員 大阪市水道局 (〒545-0022 大阪府大阪市住之江区南港北 1-14-16)

³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)

²正会員 (株)日水コン 大阪水道事業部 技術第一部 (〒532-0004 大阪府大阪市淀川区西宮原 2-1-3)

⁴正会員 工修 国土交通省中国地方整備局出雲工事事務所所長 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原町 5-1)

Saline water flows into Lake Shinji from the Ohashi River, and the Ohashi River connects Lake Shinji with Lake Nakaumi. Such saline water impacts on the flow and water quality of Lake Shinji. This study focuses on the behavior and characteristics of the saline water advancing in Lake Shinji. For this purpose, it is necessary to understand the physical conditions controlling the flow of the Ohashi River. This study was based on the field observation performed under large and well organized plans. The field observation clarifies that dynamic behavior of the saline water is affected by the velocity and the direction of the wind, the difference of the water levels between Lake Shinji and Nakaumi, and distribution of atmospheric pressure.

Key Words : Lake Shinji, Ohashi River, connected brackish lake, salinity inflow, field observation

1. 序論

宍道湖は、全国有数の規模を持つ汽水湖である。しかし、外海に直接連結しておらず、宍道湖の塩分は、中海から大橋川を経由して供給される。つまり、宍道湖の水質は中海の水質の影響を大きく受ける。上流側からもたらされる河川流量と中海から遡上してくる塩水流量とのバランスが変化することで、宍道湖の湖内塩分値は常に変化している。中海から遡上した塩水は宍道湖上層塩分を 2~8psu 程度の値に保つ。また、宍道湖内で厚さ数 10 センチの下層を形成し、しばしば貧酸素化する。このような複雑な湖内環境は、四季を通じて宍道湖七珍など様々な魚介類の生息場としての役割を果たしており、豊かな魚場を形成している。特に、宍道湖はシジミの日本最大漁獲量を維持しており、流域には宍道湖を生活の糧としている住民も多く、その果たす役割は大きい。

近年、夏季にシジミやコノシロの大量死が発生しており、深刻な問題となっている。しかし、水深 3~4 メートル以浅の湖棚部に生息するシジミの大量死の原因が、

厚さ数 10 センチの貧酸素化した宍道湖下層水であるかについては、明らかにされていない。また、中海の高塩分水がどのような条件下で大橋川を遡上し、宍道湖に流入するのか、その形態についても明らかにされていない。

上下流に宍道湖・中海という大きな湖を連結している大橋川は宍道湖の水質を決定する上で重要である。また、その流過能力不足が課題である。過去に洪水流量が、大橋川の流下能力を超え、松江市市街地などに浸水被害を発生させている。現在、上流部のダム建設、中流部の斐伊川放水路建設が進行中であり、治水計画 3 点セットの他のひとつである下流部の大橋川改修が喫緊の課題となっている。このように大橋川の治水面・環境面に果たす役割は、非常に重要である。

以上の理由から、本研究では、大橋川を遡上する高塩分水の遡上条件と遡上形態、宍道湖流入後の、高塩分水の挙動について現地観測のデータから明らかにすることを目的とする。

2. 宍道湖の地形特性と現地観測概要

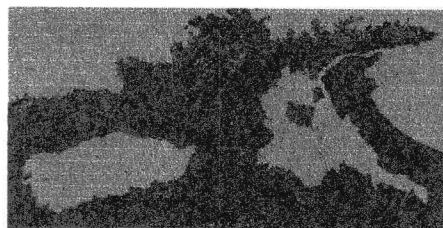


図-1 宍道湖－中海鳥瞰図

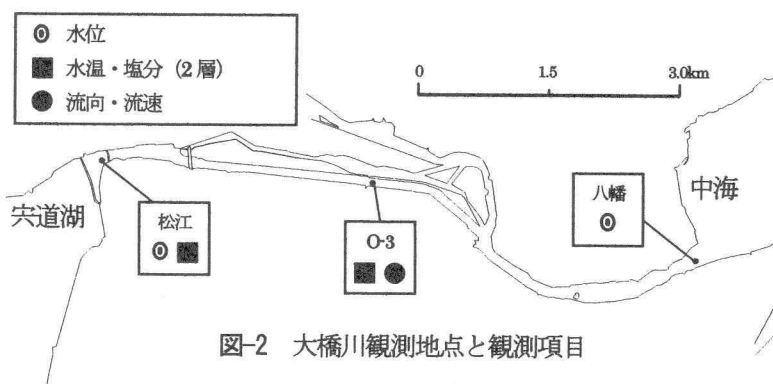


図-2 大橋川観測地点と観測項目

(1) 宍道湖の地形特性

図-1 に示すように、宍道湖は斐伊川水系（流域面積 2070km²）の下流部に位置している。その下流には流路距離約 7.6km の大橋川が接続している。大橋川の下流側は中海と連結している。中海は斐伊川水系の最下流部、島根県と鳥取県の県境に位置している。宍道湖には斐伊川から淡水が、中海から大橋川を経由して塩水が流入する。水面面積は中海 86.2km²、宍道湖 79.1km²であり、わが国の湖沼としてそれぞれ、5 番目、7 番目の大きさである。また、汽水湖としてもサロマ湖（北海道）に次ぐ大きさである。海跡湖であるため、宍道湖の平均水深は 4.5m と浅い。また、宍道湖は最大水深も 6.0m と浅く、非常に緩やかな勾配の湖底形状を有している。中海は長さ 8.7km の境水道を通じて日本海と連結している（図-2）。

宍道湖・中海は南北を標高約 400m の山地に挟まれた平野部に位置しており、低地が宍道湖・中海の東西に広がっている。この地理的要因から宍道湖上の風向は年間を通して東西方向に卓越する。

(2) 現地観測概要

(a) 常時定点観測

宍道湖湖心では、流動・気象・水質観測が行われている。また、図-2 に示すように松江で内水面水産試験場によって大橋川の流量・水質観測が行われており、松江と八幡で水位の観測が行われている。これらの観測は年間を通して行われており、年間変化を検討することができる。

また、2002/8/1～10/31 の 3 ヶ月間、宍道湖と大橋川の両水域において、集中観測を実施した。

図-2 に示す観測地点 O-3 では、水面下 1.0m と河床下 1.0m の 2 点に自記式多項目水質計を設置し水温、塩分を測定し、湖底設置型自記式 ADCP により流向・流速を測定した。

(b) 宍道湖流動・水質調査

中海から宍道湖内に高塩分水が流入し、下層が形成された期間のうち 6 日については、図-3 に示したラインに沿って船で航行した。船上より STD 水質計を垂下することにより、水温・塩分の断面分布を測定し、下層塩分水の挙動を追跡した。

(c) 宍道湖－大橋川高塩分水追跡調査

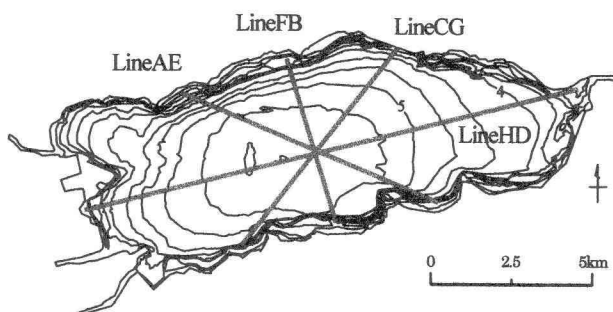


図-3 宍道湖湖床コンターと下層塩分の調査断面

この観測では、大橋川を遡上した高塩分水の先端部の追跡調査を行った。高塩分水先端部から縦断距離約 500m を約 50m 間隔（8 地点）、水深方向には 0.5m 間隔で水温・塩分を、およそ一時間以内に測定し、高塩分水先端部における水温・塩分分布を調べた。

3. 大橋川の塩水遡上条件

(1) 中海の塩水の遡上条件

大橋川の流動を決める要因が宍道湖と中海の水位差であり、この水位差は潮汐や気圧低下などの外力によって生じることがこれまでの研究で示されている。石飛ら¹⁾は、大橋川の流速とその両端の水位差の関係が 1/2 乗則に従うことから、大橋川の水位－流量の関係式を求めている。

図-4、図-5 は、中海の高塩分水が松江まで遡上するには、中海水位が宍道湖水位よりも高いことが必要条件であることを示している。

しかし、水位差がつき、流向が遡上になった場合でも、必ずしも高塩分水が宍道湖にまで到達するわけではない。本研究では、高塩分水が具体的にどのような条件下で大橋川を遡上し、宍道湖に到達するかについて明らかにする。

内水面水産試験場によって松江で観測された 1998 年 4 月から 12 月までの 8 ヶ月間の塩分データを用い、大橋川の一般的な高塩分水の遡上条件についての検討を行う。

八幡（中海）の水位が松江（宍道湖）の水位よりも高い状態を全て抽出し、その状態が何時間継続したか、各ケース毎にそれぞれ求めた。「中海水位＞宍道湖水位」の状態継続時間は 1～21 時間のケースが確認された。そこ

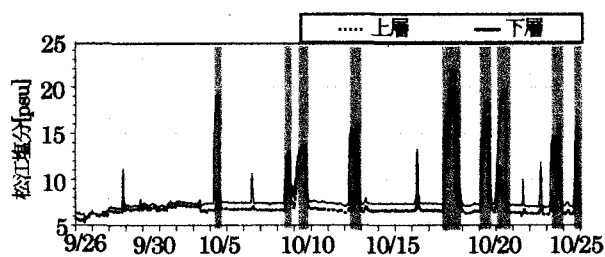


図-4 松江塩分経時変化
(2000/9/26-10/25)

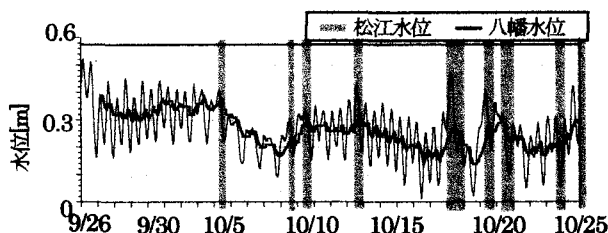


図-5 松江・八幡水位 (2000/9/26-10/25)

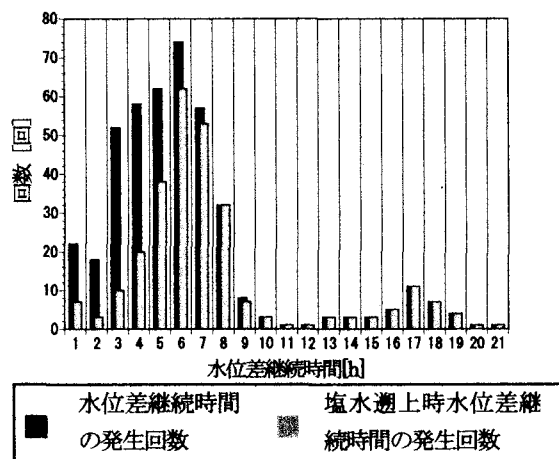


図-6 水位差継続時間の発生頻度と塩水遡上頻度
(1998/4/1-1998/12/31)

で、各遡上状態の継続時間が8ヶ月間にそれぞれ何回発生したかを数え、その発生回数を黒い棒グラフで図-6に示している。また、黒の棒グラフ中から高塩分水が松江で観測された場合を、同様に抽出し、薄い色の棒グラフで示している。

この図より、中海の水位が宍道湖の水位よりも7時間以上継続して高い状態となると、高塩分水が松江まで達する確率は90%を超えている。

そこで、ここでは7時間を基準ラインに設定し、(a) 中海の水位が宍道湖の水位よりも高い状態が6時間以下しか継続しなかったにもかかわらず塩水が遡上した場合と、(b) 中海の水位が宍道湖の水位よりも高い状態が7時間以上継続し、塩水が遡上した場合、(c) 中海の水位が宍道湖の水位よりも高い状態が7時間以上継続したにもかかわらず、塩水が遡上しなかった場合の3つの水位条件において、それぞれの塩水遡上条件と外力との関係について検討を行う。

ケース(a)を図-7に、ケース(b)を図-8に示す。上図は

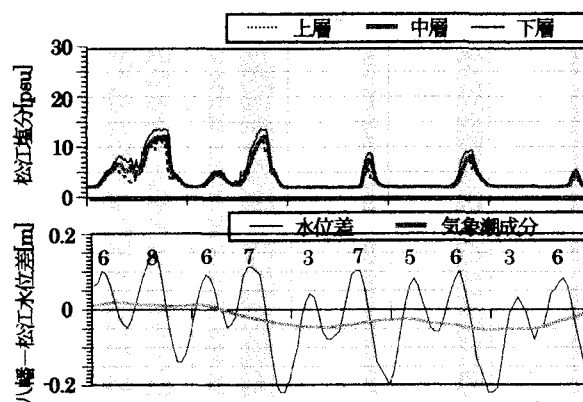


図-7 水位差継続時間と塩水遡上の関係
ケース (a) (1998/5/24-1998/5/28)

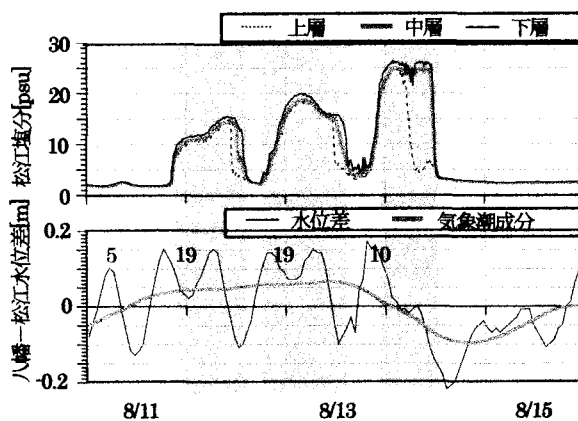


図-8 水位差継続時間と塩水遡上の関係
ケース (b) (1998/8/11-1998/8/15)

松江塩分、下図は八幡と松江の水位差を示す。水位差のグラフ上部に書かれている数字は「中海水位>宍道湖水位」の状態の継続時間である。これらのケースの違いは、気象潮成分による水位変動である。当然、気象潮成分についても中海水位が高い状態となっている方が塩水の遡上は発生しやすい。一方、両ケースに共通する遡上条件は、満潮から干潮への水位低下量が小さい時、次の満潮時に塩水遡上が発生することである。下げ潮時の水位低下量が大きき場合にはケース(b)の場合でも塩水の遡上は止まる。以上より、潮汐による水位変動が、連続的に大橋川の塩水の遡上条件を支配しているといえる。そして、気象潮成分が正のときに「中海水位>宍道湖水位」の状態が長時間継続し、塩水の遡上も長時間続くため、宍道湖への塩水の流入量が多くなると考えられる。ケース(c)の場合は、全て降雨直後にみられた。降雨後、大橋川内の塩水はすべて中海まで押し戻され、大橋川内部は宍道湖の水によって満たされるため、その直後の塩水遡上は発生していない。

(2) 20psu を超える高塩分水の遡上に及ぼす西風の影響

これまで、中海の高塩分水に着目し、その遡上条件を明らかにした。しかし、宍道湖に流入する塩水の濃度が高いほど宍道湖が受ける影響は大きいと考えられる。塩

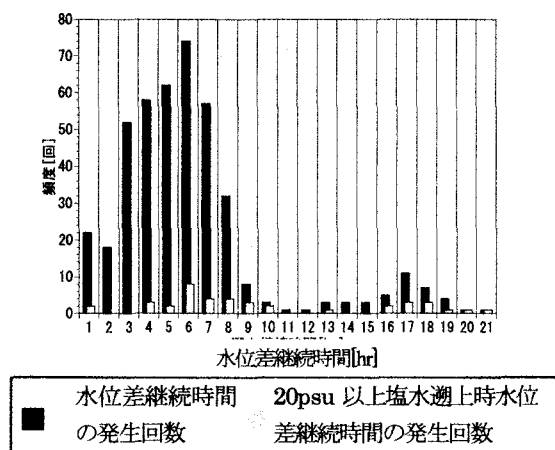


図-9 水位差発生頻度と松江まで20psuを越える高塩分水が松江地点に遡上したケース (1998)

分値が高いということは、中海下層水が宍道湖に到達したことを示し、その遡上水が貧酸素化している可能性もある。以上の理由から、20psuを超える高塩分水の遡上条件を明らかにする。

図-9は、図-6に示した水位差に関するデータのうち、松江で測定された塩分値が20psuを超えていた場合を抽出し、図中に加えたものである。この図より、遡上状態の継続時間が短い時にも20psuを超える塩水の遡上が生じていることが分かる。したがって、大橋川を遡上する塩水の濃度は、遡上時間や水位差以外に支配要因があると考えられる。

その支配要因とは、卓越した西風が長時間吹き続けることである。この理由は、長時間強い西風が吹き続けると、中海西部の界面位置が上昇し、大橋川に中海下層水が流入する²⁾ためであると考えられる。そこで、本研究では、風の気象潮成分に着目した。また、中海では、風速が5m/s以上で維持されると、1~2m程度の界面上昇が生じると推測できるため、風の気象潮成分が風速5m/s以上の西風発生時に着目した。

その結果、実際に20psuを超える塩水が松江まで遡上した日数は1998年の4月から12月の8ヶ月間中に37日あった。このうち、風の気象潮成分が5m/s以下にもかかわらず、20psuを超える塩水が観測されたのは、5日間だけであった。以上のことから、風の気象潮成分が5m/s以上の西風が湖上で卓越することで、より高い塩分濃度の水が大橋川を遡上すると言える。このうち、1ケースを図-10で例示する。図-10には風の気象潮成分、松江塩分、八幡と松江の水位差を示している。この時、風速5m/sを超える西風が吹いている期間に20psuを超える塩水が大量に松江まで遡上している。

4. 宍道湖流入後の高塩分水の挙動

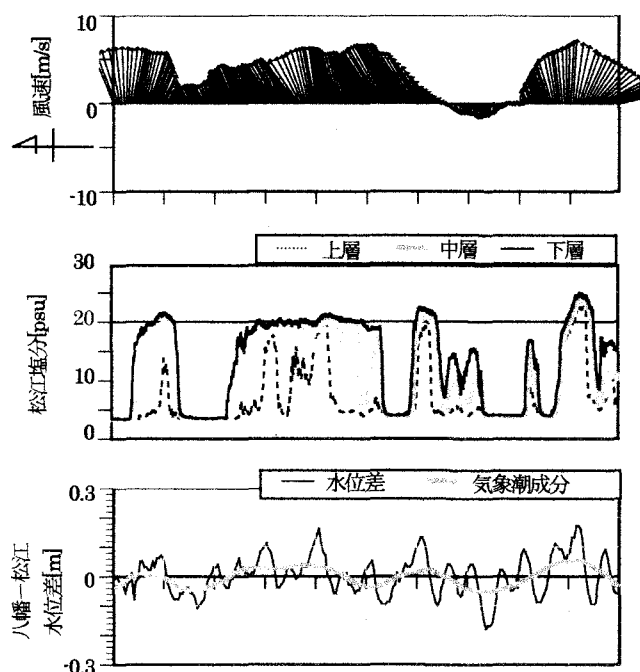


図-10 松江への塩分遡上と西風風速、水位差の関係 (1998/12/11-1998/12/20)

(1) 宍道湖一大橋川接続部における塩水進入形態及び流入特性

大橋川から宍道湖湖心に向けて移動する高塩分水の先端部に着目し、その追跡調査を行った。観測は1~3時間毎に1回行い、全8回を2日に分けて行った。観測は大橋川から開始し、高塩分水の移動と共に観測地点を移動しながら、宍道湖湖盆部まで高塩分水の移動を追った。

図-11は、第1回目の観測結果であり、図-2で示した大橋川内の観測地点O-3付近を遡上する塩水の先端部をとらえている。高塩分水先端部から縦断方向約500mの区間に約50m間隔で塩分の鉛直分布を測定した。図中の点で示しているのが、測定点であり、鉛直方向には0.5m間隔で測定している。ここで各観測地点における湖底直上の塩分を C_b 、水深を h とした。水面から鉛直下向きに z 軸を取り、水面下 $z[m]$ の地点における塩分値を $C(z)$ とした。そして、縦軸を z 、横軸は $C(z)/C_b$ をとり、塩分の鉛直分布を図-12に示している。なお、図-13中に今回用いたデータの観測地点を示している。(a)は大橋川内(8/20 9:00~10:00)、(b)は大橋川と宍道湖の接続部の滞筋を高塩分水の先端が通過しているとき(8/20 10:30~11:30)、(c)は滞筋部通過後(8/20 12:00~13:00)での結果である。図-14に示す八幡-松江水位差より(a)、(b)、(c)の観測期間は常に八幡水位が松江水位より高いことから、潮汐の影響は変わらないと考えられる。図-12の凡例の数字1~8は、1が高塩分水の先端を示し、8が最も中海側の観測地点を示す(図-11、図-13)。大橋川内では、下層と上層の境界が明瞭で、楔先端部で比較的高い界面を保持している。時間や場所が異なる他のケースについても、大橋川内においては、 $z=0$ (水面)

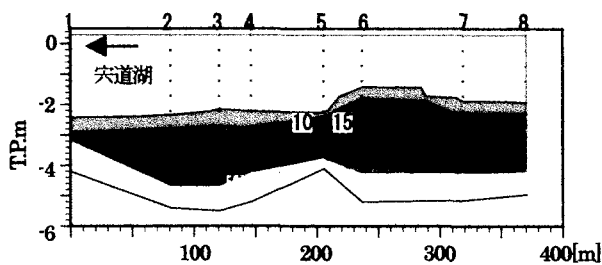
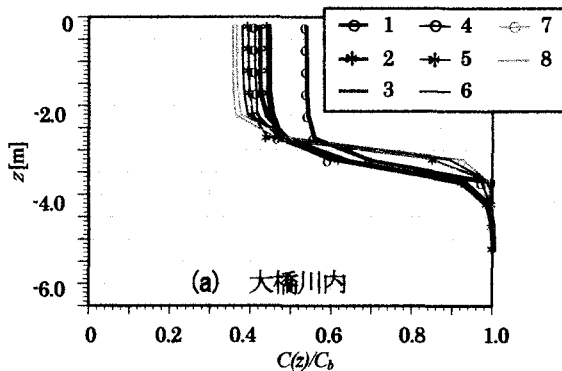
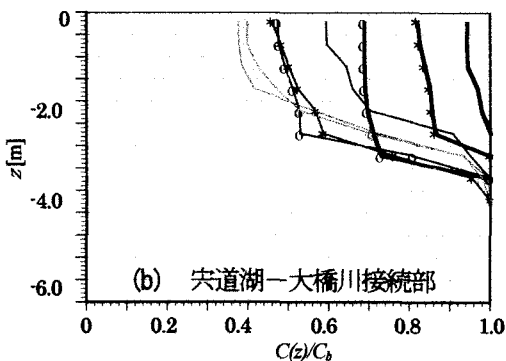


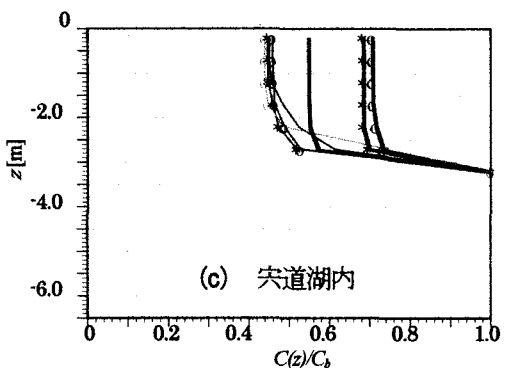
図-11 高塩分水先端部の塩分分布 (O-3 付近)
(2002/8/20 6:30-7:30)



(a) 大橋川内



(b) 矢道湖-大橋川接続部



(c) 矢道湖内

図-12 高塩分水先端部上層濃度分布の場所的变化
(2002/8/20)

での $C(0)/C_b$ は 0.4~0.7 の範囲に収まった。図-2 の地点 O-3 の流速と塩分の鉛直分布データを用いて求めた密度フルード数 F_I は、 $F_I=0.14\sim0.5$ となる。一般に、定常状態の塩水楔では、 $F_I=0.2\sim0.4$ の値を示し、 $F_I>0.7$ となるのは特別な河道条件を有する区間、および内部ジャンプ渦近傍に限られている³⁾ ことから、大橋川では定常状態の塩水楔が形成されていると考えられる。

一方、矢道湖と大橋川の接続部での場所的な濃度分布

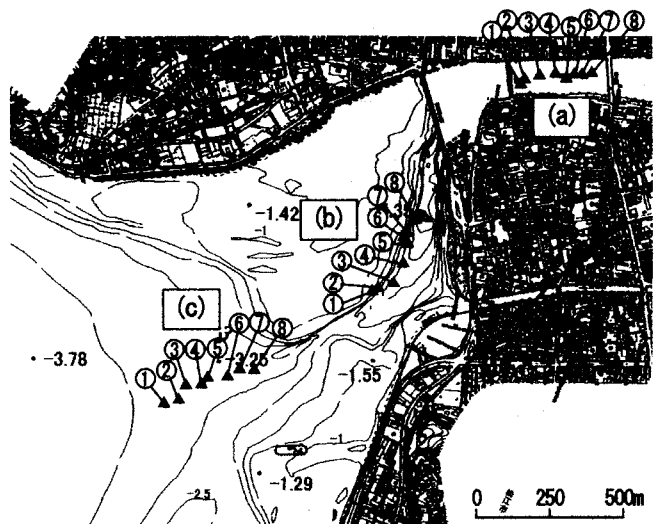


図-13 矢道湖東部深淺図

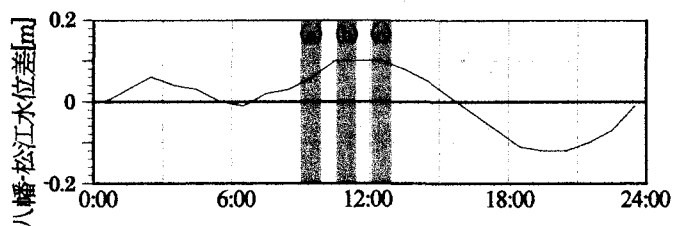


図-14 八幡-松江水位差 (2002/8/20)

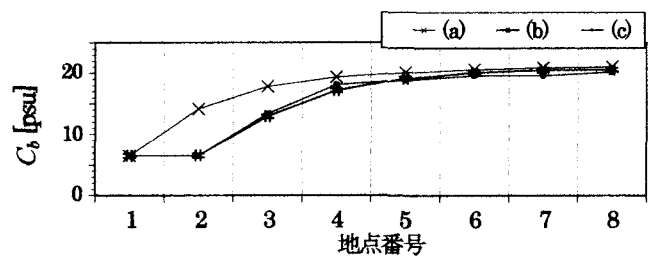


図-15 高塩分水の進入に伴う C_b の変化

の変動は矢道湖内・大橋川内と比較して大きい。矢道湖と大橋川の接続部では上層の $C(0)/C_b$ に緩やかな変化が見られる。そして、この矢道湖-大橋川の接続部を越え、ほとんど勾配のない矢道湖内に到達すると (図-12(c)), 下層の厚さは薄くなるものの、再び安定した状態となる。流路幅の広がりに伴い、下層厚さは薄くなり、特に先端部での周囲水との混合は大きく、塩分値が小さくなっている。図-15 より、(b) から (c) にかけて C_b は変化していない。このことから、(b) でのみ $C(0)/C_b$ が変化する原因は高塩分水の塩分濃度が変化するためではなく、矢道湖と大橋川の接続部では流路幅が急拡しているなど、複雑な湖底形状が、流速の空間的・時間的変化をもたらすためと考えられる。

(2) 矢道湖内における下層水の挙動

図-3 で示した4ライン上で測定した塩分の鉛直分布の結果を用い、風が矢道湖下層水に及ぼす影響について検討を行った。図-16 は、湖内に高塩分水が流入し、下層を形成した時の湖内の塩分分布である。この塩分分布測定時に、矢道湖上では強い東風 (10m/s) が卓越していた

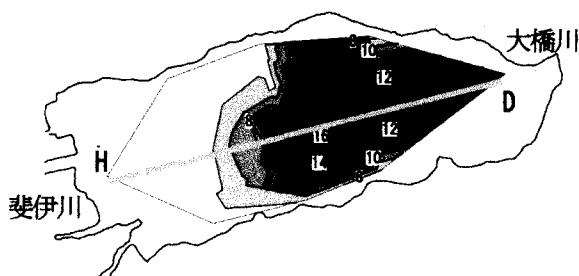


図-16 宍道湖下層の塩分分布 (2002/8/26 9:00~12:30)

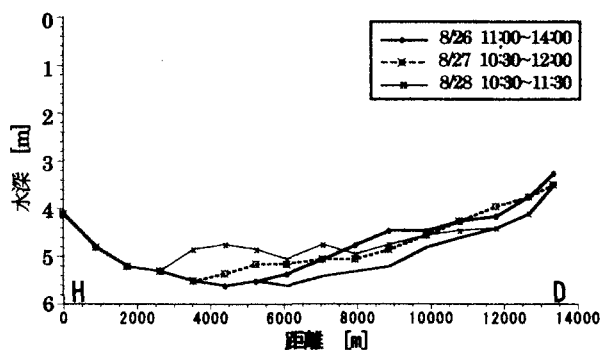


図-17 宍道湖界面形状 (2002/8/26-28)

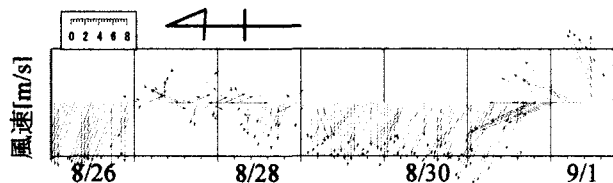


図-18 宍道湖湖心での風速 (2002/8/26-9/1)

(図-18). そのため、水面勾配が生じ、下層はそれに対応する形で宍道湖の東部に寄っている。

宍道湖内で下層が形成されている時の界面位置を、塩分の鉛直分布から算出した。図-17 は 8 月 26 日から 28 日に LineDH 断面内で観測された湖内の密度界面位置である。図-18 は、この時に宍道湖上で観測されていた風向・風速を示している。これらの図から、この期間、宍道湖下層塩分水は風応力によって宍道湖の東部に偏って存在していることが分かる。下層の厚さは、平均 0.4m であり、この薄い下層塩分水が宍道湖の水深 3m の地点にまで到達していることが確認できる。

界面位置のデータから最小二乗法を用いて界面勾配を求めた。界面勾配を縦軸に、風エネルギー EW を横軸にとり、風と界面勾配の関係を図-19 に示している。なお、風エネルギーは

$$EW = \sum_{i=0}^{36} (W(t) \cdot |W(t)| \times 3600)$$

EW : 風エネルギー [$\text{m}^2/\text{s}^2/36\text{h}$]

$W(t)$: 軸方向風速 [m/s]

を用いて求めている。風の影響は、瞬間的に吹く風によるものではなく、風応力が湖面に長期間働いた場合に寄与するものと考えられるので、塩分測定時から 36 時間前までの各ライン軸風速の和を与えた。図-19 上には、風の吹寄せによる水面せん断力 $\tau_s = \gamma_s \rho_a W|W|$ の式、水面上昇量が小さい時に水面勾配を与える式 $\frac{d\eta}{dx} = \frac{\tau_s}{\rho gh}$

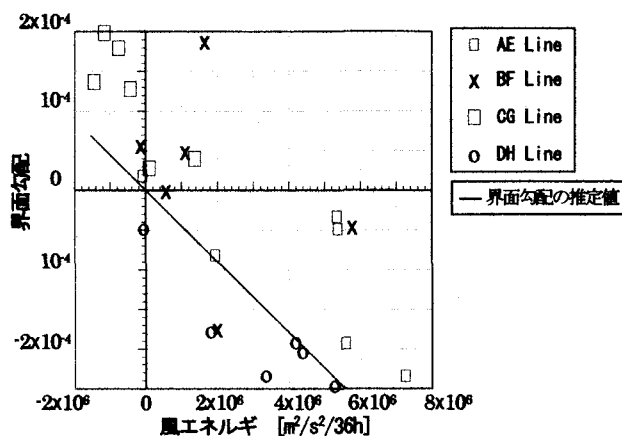


図-19 宍道湖下層水界面勾配と風エネルギーの関係 (2002/8/26-9/1)

そして、界面変位を求める式 $l = \frac{\rho_i}{\Delta \rho} \eta$ の 3 つの式から得られる風エネルギーと界面勾配との関係を直線で示している。なお、ここでは、係数を $\gamma_s^2 = 1.5 \times 10^{-3}$ で与えている。密度を求めるために必要な水温、塩分の値は観測を行った 6 日間の平均的な値である、上層 27 度、6.5psu、下層 27 度、15psu を与えて計算した結果、実測値と良い対応を示した。

5. 結果

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

1. 中海の高塩分水の遡上条件は両湖の水位差であり、中海水位が高い状態が 7 時間以上継続すると降雨直後でない限り松江では塩水の遡上を確認することができた。さらに、中海水位が高い状態が長時間継続するほど、塩水の遡上は長時間継続するため、宍道湖への流入量は多くなると考えられる。
2. 20psu を越える高塩分水の遡上は、上記の水位差の条件に加えて、強い西風 (気象潮成分が 5m/s 以上) が継続した場合に発生している。
3. 高塩分水の侵入形状は宍道湖内、大橋川内では安定した形状をしているが、接続部では周囲水との混合によって塩分分布は大きく変化する。
4. 宍道湖下層は数十センチと非常に薄い層を形成しており、風によって下層水は移動する。風による海面上昇量から求めた界面勾配の推定値は、実測値と良い対応を示した。

参考文献

- 1) 石飛裕・神谷宏・横山康二・熊谷道夫・奥田節夫：潟湖、宍道湖への塩水進入条件，陸水学会誌，60，pp.439-452，1999。
- 2) 松下智美・三浦心・福岡捷二・黒川岳司・船橋昇治：連結系汽水湖における流れと水質分布に及ぼす密度界面の役割，年次学術講演会講演概要集，第 57 巻，pp.271-272，2002。
- 3) 須賀堯三：感潮河川における塩水くさびの水利，土木研究所報告，第 160 号，1983。

(2003. 9. 30 受付)