

連結系汽水湖における塩分変化特性

ON SALINITY VARIATION IN CONNECTED BRACKISH LAKE

福岡捷二¹・松下智美²・三浦心²・黒川岳司³・船橋昇治⁴・中村幹雄⁵
Shoji FUKUOKA, Tomomi MATSUSHITA, Takeshi KUROKAWA, Shin MIURA,
Shoji FUNABASHI and Mikio NAKAMURA

¹フェロ-会員 工博, Ph. D 広島大学大学院教授 工学研究科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学生員 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 (同上)

³正会員 工博 呉工業高等専門学校講師 環境都市工学科 (〒737-8506 広島県呉市阿賀南2-2-11)

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5-1)

⁵島根県内水面水産試験場場長 (〒691-0076 島根県平田市園町1659-1)

We are faced with water quality problems at Lake Shinji. Therefore, in order to solve these problems, we are required to understand the mechanism controlling the environment in this lake. River Ohashi connects Lake Shinji with Lake Nakaumi, so that the water exchange between these two brackish lakes, makes the problem even more complex internally. In this study, we analyzed a one-year data set to understand the dependence of water quality, specifically the variation of salinity, in function of external forces like weather and atmosphere pressure. Also, from a detailed observation at Lake Shinji, Lake Nakaumi and Ohashi River from September 26th to October 25th, we concretise important water exchange attributes between Ohashi River and Lake Shinji.

Key Words : Lake Shinji, connected brackish lake, weather variation, water influx
atmospheric pressure variation, salinity variation

1. 序論

中海と宍道湖は全国有数の汽水湖である。この2つの汽水湖は大橋川で連結しており、湖内流動・水質に互いに影響を及ぼしあっている。湖内に形成された複雑な水質環境は、四季を通じて様々な魚介類の生育場としての役割を果たすため、宍道湖・中海は水産資源の豊富な湖である。しかし、その閉鎖性の高さから、富栄養化・貧酸素化を起こしやすい。中海では赤潮、宍道湖ではアオコが発生する。また、宍道湖では6・7月にコノシロが大量死しており、中海側からの貧酸素水塊の遡上による宍道湖の水質悪化が原因であると推測されている。このような水質問題の解明は非常に重要な課題であり、その原因究明が急がれている。

この問題の本質を理解するためには、風・気圧・降水・河川からの流入水などの外力が、宍道湖湖内環境に及ぼす影響を把握する必要がある。

これまでの研究により、中海における流動・水質場の

支配機構が気象・潮汐などとの関係より明らかにされてきた^{1)~4)}。流れの生じにくい浅渚部での水質悪化・貧酸素化などの水質環境問題に関しても、流れ場との関係から物理的、生物化学的な考察が行われている⁵⁾。しかし、連結系汽水湖である宍道湖の水質問題を考えるには、中海・大橋川・宍道湖の連結系汽水湖としての特性を考えなければならない。宍道湖湖内の塩分変化とそれをもたらす外力との関係を明確化するにあたっては、まず、中海から流入する塩水の水質変化特性の把握、大橋川の塩水遡上特性の把握を行うなど、地形的な関係をふまえ、斐伊川流域全体を視野に入れた考察が必要となる。本研究では、宍道湖湖内流動・水質の重要な支配要因の1つである大橋川の流動・水質特性を明らかにし、その上で、宍道湖湖内の塩分変化特性を外力との関係から明確化する。

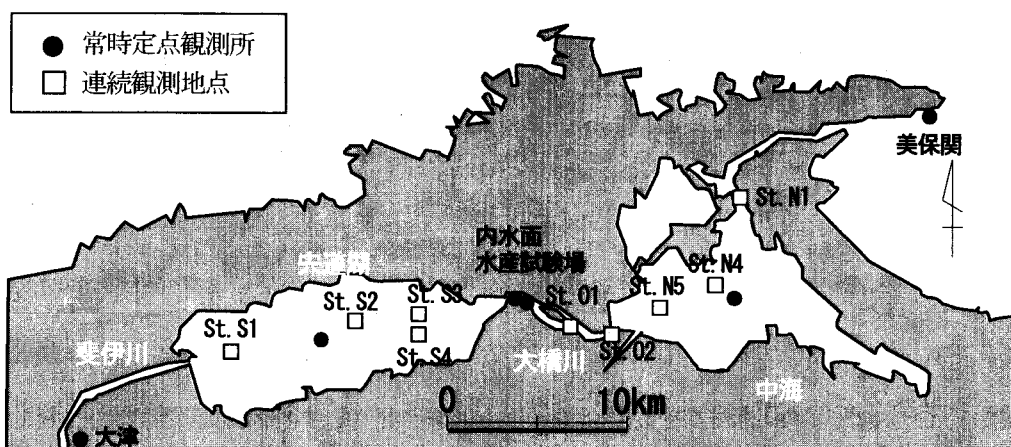


図-1 宍道湖・大橋川・中海と観測地点

2. 宍道湖の地形特性と現地観測概要

(1) 宍道湖の地形特性

図-1に示すように、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。宍道湖は中海の上流に位置し、流路距離7.6kmの大橋川によって中海と接続している。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86.8km²、宍道湖79.2km²であり、わが国の湖沼として5、7番目の規模である。また、汽水湖としては2、3番目の大きさを持つ。海跡湖であるため、平均水深はそれぞれ6.0m、4.5mと浅い。さらに、宍道湖は最大水深が6.0mと浅く、緩やかな勾配の湖底形状を有する。

宍道湖の上流には流域面積2070km²の斐伊川が接続している。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。

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で観測される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

宍道湖湖心・中海湖心において、流動・気象観測が行われている。また、水質観測が水深方向に5測定点設けられ、塩分・水温・DOなどの観測が行われている。大津・松江では斐伊川・大橋川の流量観測が行われている。大橋川では島根県の内水面水産試験場により流動・水質の観測が年間を通して行われている。

2000/9/26-10/25の30日間に1ヶ月連続観測を行った。この観測では大橋川の塩水遡上現象を明らかにすること、中海から遡上してきた塩水が宍道湖に及ぼす影響を把握することを目的としている。図-1に示したように宍道湖

4点・大橋川2点・中海5点の計11地点において、上層（水面下1.0m）と下層（湖底上1.0m）の2測定点を設け、流動・水質の固定点観測を行った。さらに、大橋川における塩水塊の遡上形態、流動特性を明らかにするため、1ヶ月連続観測期間中の2000/9/29 10:00-9/30 10:00には、1昼夜連続で、2潮汐間のADCPによる流況調査・水質調査などを行った。

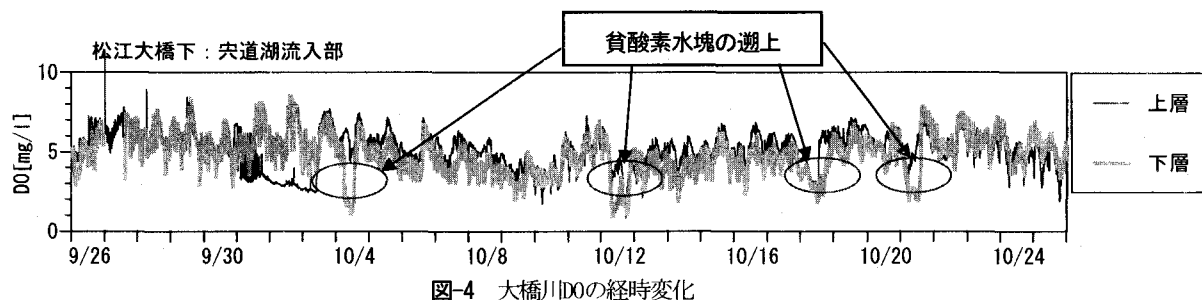
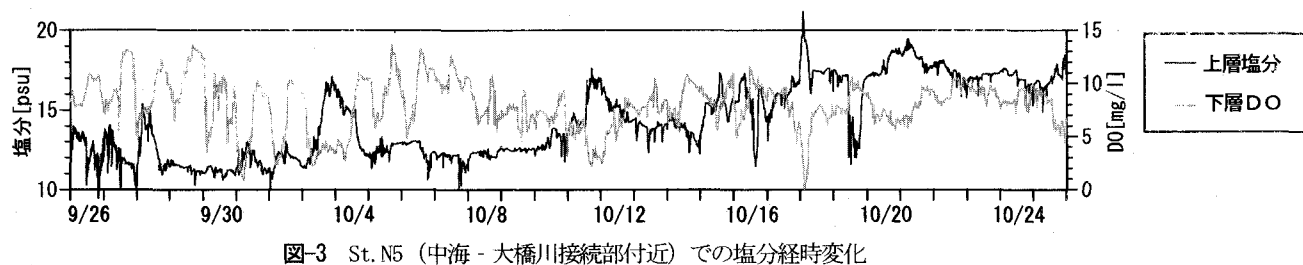
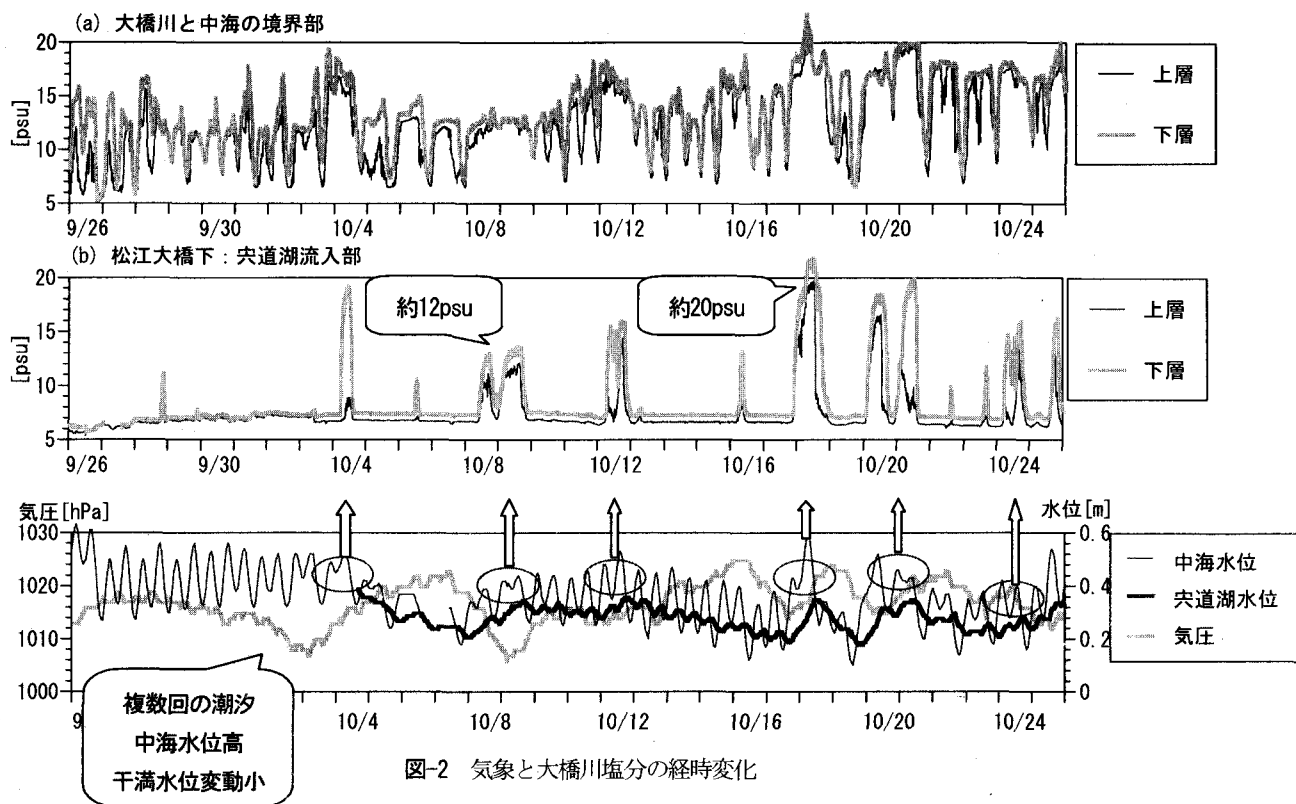
3. 中海の大橋川接続部での水質特性

大橋川を経由して宍道湖へ遡上する塩分に着目する。図-2は、連続観測期間中に大橋川の2観測地点で測定された塩分と、気圧・水位の経時変化を示す。図-2(a)は大橋川と中海の境界部での塩分として、図-1でSt. 02と表示されている観測地点で測定した塩分を示している。(b)には松江大橋下で島根県内水面水産試験場により測定されている塩分を示しており、図-1で、内水面水産試験場と表示した点での測定値である。

図-2(b)より、流動、気圧、水位差などの外力には大きな違いはないにもかかわらず、大橋川を遡上し、宍道湖にまで到達した高塩分水塊の塩分濃度には大きな違いが見られる。10/8、9に大橋川を遡上した塩分水塊に着目すると塩分が約12psuである。一方、10/18に遡上した水塊は塩分が約20psuある。

この塩分濃度の違いがもたらされる要因について検討を行う必要がある。そこで、中海における大橋川付近の水質に着目する。

図-1に示すように、連続観測期間中に大橋川と中海の接続部付近に観測地点St. N5を設置した。このSt. N5が設置されている地点の水深は3.1mである。大橋川と中海の接続部には、このような水深の浅い水域が広がっている。このSt. N5で観測されている塩分に着目する。図-3に



連続観測期間中のSt. N5での塩分経時変化を示す。この図より、10/8にはSt. N5でも塩分は13psuであり、10/18では21psuの値をとることが確認できる。他の高塩分水塊の場合でも、St. N5の塩分値は大橋川を遡上する高塩分水塊の塩分値とほぼ一致する。したがって、大橋川と中海接続部にあたるSt. N5付近の浅い水域での、水質を支配する要因を明らかにすること、水質の変化を把握することは大橋川の水質及び宍道湖の水質を把握する上でも重要である。

4. 大橋川流動特性

(1) 大橋川の高塩分水遡上特性

石飛ら⁶⁾により、大橋川における流動について、検討がなされている。大橋川の流速とその両端の水位差の関係が1/2乗則に従うことや、水位差がゼロとなっても、しばらくの間は流れが維持されることなどが示されている。これらから、大橋川における流動に関する経験式を求めている。

また、宍道湖への塩水遡上の特性として、低気圧の日本海通過などにより、中海水位が上昇しつつある時に1回潮が重ると、中海塩水が大量に宍道湖へ流入することを示している。

本論文では、石飛らの研究に関連して著者らが行った

観測・解析から、新たに明らかになった知見について示す。

図-2(a)より中海から大橋川への高塩分水の流出入は、天文潮に依存しており、遡上は満潮時に発生する。そして、流入した高塩分水は潮汐により生じる往復流によって大橋川内を移動する。しかし、(a)、(b)両図について比較を行うと、(a)では潮汐毎に観測されている高塩分水が、(b)では数回しか観測されておらず、中海から大橋川内に流入した高塩分水が、宍道湖にまで到達するケースは少ないことが分かる。連続観測期間中に高塩分水塊が宍道湖にまで到達したのは、10/4、10/8・9、10/12、10/16、10/20・21、10/23・24・25 と数回である。

高塩分水塊が宍道湖まで遡上する時の条件は、気圧の低下などで中海水位が上昇し、宍道湖水位に対して中海水位の高い状態が継続することである。ただし、気圧低下時に必ず宍道湖への塩水流入が生じるとは限らない。この気象条件下で満潮になると高塩分水は宍道湖にまで遡上している。しかし、高塩分水が一度の上潮で7.6kmの大橋川を遡上し、宍道湖にまで到達する事は殆どなく、通常、複数回の上潮を経て宍道湖にまで到達している。このことから、6時間程度の上潮では高塩分水が宍道湖にまで遡上することは難しいことが分かる。

ただ複数回の満潮を経さえすれば高塩分水が宍道湖にまで遡上しているわけではない。1日に2度ある満潮と干潮の時間間隔、高さは同じではない。水位の高い干潮の間に挟む2回の満潮の間に高塩分水が宍道湖にまで到達していることが多い。つまり、満潮時と干潮時とで水位変動が小さいときに、塩水の遡上が発生しやすい。1度目の上潮後の下げ潮量が小さいほど塩水が大橋川を遡上しやすい状況となる。これは、1度目の上潮時に大橋川の途中まで遡上した高塩分水塊が、下げ潮時に中海にまで完全に押し下げられず、大橋川内に留まるため、次の上潮時に高塩分水塊は宍道湖にまで到達することができると考えることができる。

(3) 大橋川の貧酸素水塊遡上

図-4は連続観測期間中に大橋川の松江大橋下で観測されたD0の経時変化を示している。図-1で内水面水産試験場と表示された地点での連続観測データである。貧酸素水塊の大橋川から宍道湖への遡上は、連続観測期間中に10/4、10/12、10/18、10/21の4回観測されており、高塩分水の遡上時と一致している。つまり、貧酸素化した高塩分水塊が大橋川を遡上し、宍道湖に流入し、宍道湖湖内環境に対して影響を及ぼしていることが分かる。したがって、大橋川と中海の接続部付近の浅い水域に存在する水質特性の把握は、宍道湖へ流入する塩水のD0特性を把握する上でも重要となることが考えられる。

しかし、大橋川を遡上する高塩分水塊が必ず貧酸素化

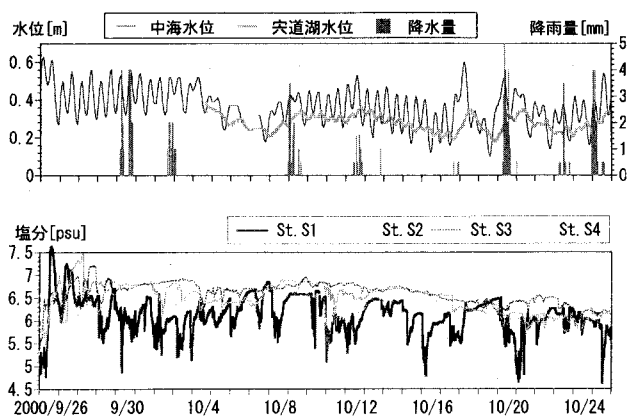


図-5 塩分の分布と宍道湖・中海水位と松江降水量 (2000/9/26-10/26)

しているわけではない。10/8・9、10/16、10/20、10/23・24・25には、高濃度塩分水塊の遡上が大橋川で観測されているが、そのD0値は高い。このように、中海からもたらされる水質の全てが高塩分、貧酸素な水ではない。

そこで、高塩分濃度で貧酸素な水塊の遡上条件について検討を行う。図-2より、気圧が低下している時期に着目する。気圧が10/3、10/9、10/17、10/20に最低のピークを持つ。一方、図-4より、貧酸素水塊が松江大橋下で観測されたのは先に示したように、10/4、10/12、10/18、10/21の4回である。このように貧酸素水塊の遡上は、いずれも急激な気圧低下後の気圧の回復期に発生している。また、この、貧酸素水塊の遡上時は図-3より、St. N5下層に高塩分濃度・貧酸素の水塊が存在していることが分かる。これより、この水塊が大橋川を遡上し、宍道湖にまで到達したことが考えられる。

以上のことから、気圧の急激な低下が発生した後の気圧回復時に中海の貧酸素化した高塩分濃度の水が大橋川付近にもたらされる。この時、気圧は低い状態であるため、斐伊川からの河川流入量が多くなれば中海水位が宍道湖水位よりも高い状態に保たれるため、St. N5付近に存在した高塩分濃度・貧酸素な水塊は、潮汐の作用により大橋川を遡上し、宍道湖にまで到達する事が分かる。つまり、気圧低下後の潮汐による遡上流の発生が、宍道湖に中海から貧酸素水塊をもたらす要因の1つであることがわかる。

5. 宍道湖の上層塩分特性

(1) 上層塩分の湖内分布

宍道湖下層の高塩分層の厚さは極めて薄く存在しており、密度界面の位置は湖底から約数十センチの高さにある。上層の塩分濃度は約4psu、下層は約20psuである。しかし、過去10年の間には、上層塩分は最大12.1psu、最小0.3psuが観測されている。これは、気象条件に依存し

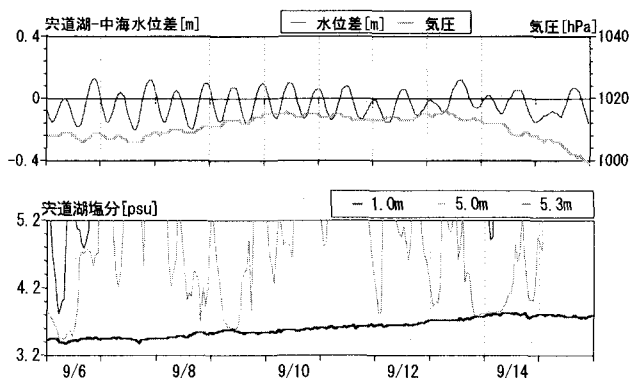


図-6 気象平穏時の宍道湖-中海水位差・気圧と塩分変化 (1998/9/6-1998/9/15)

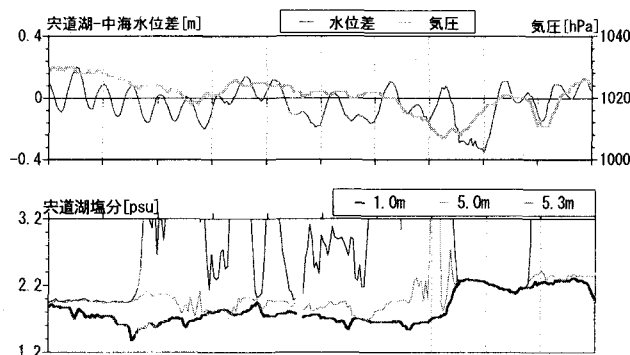


図-7 気圧低下時の宍道湖-中海水位差・気圧と塩分変化 (1998/2/1-1998/2/10)

て、湖内流動や斐伊川・中海からの流入量が大きく変化するために生じたものであり、宍道湖上層塩分は外力の影響を受けて大きく変化する。

図-5に連続観測期間中に観測された降水量と宍道湖と中海の水位の経時変化、同じ期間内での宍道湖4観測地点での上層塩分の経時変化を示す。

降雨のあった9/30、10/3、8、12、20、25に、観測地点St. S1で塩分が急激に減少している。特に、9/30の7:40には、St. S1とSt. S2の間に、瞬間的に1.88psuもの塩分差が発生している。St. S1は図-1より、最も斐伊川に近い観測地点である。降雨後に斐伊川から河川水が流入し、一時的に宍道湖西側の塩分を低下させるが、湖心以東における降水の直接的な影響はごく小さいことが分かる。湖内に生じた塩分分布は数時間程度かけて回復し、最終的に湖内でほぼ様な塩分値となり、安定する。

(2) 宍道湖の湖内上層塩分変化と外力

宍道湖の湖内水環境の支配外力として天文潮、気圧、降雨を考え、これらの外力が作用した結果生じた宍道湖湖内の水質変化について示す。

気象平穏時における宍道湖-中海水位差と気圧、宍道湖上層の塩分変化を図-6に示す。この期間は、安定した

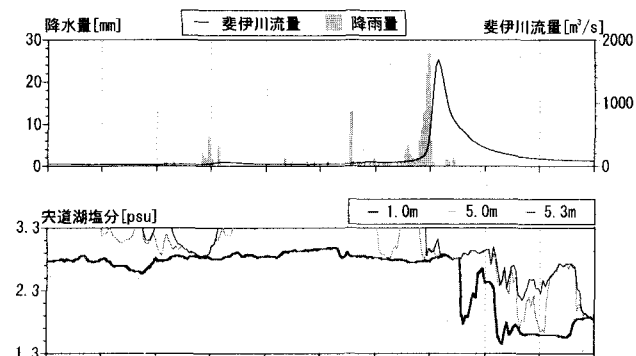
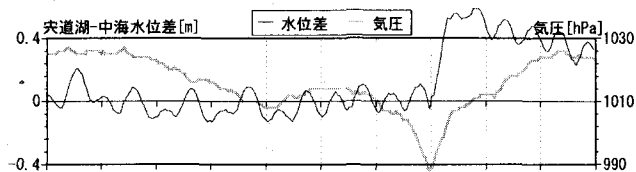


図-8 降水時の宍道湖-中海水位差・気圧・降雨・斐伊川流量と塩分変化 (1998/10/11-1998/10/20)

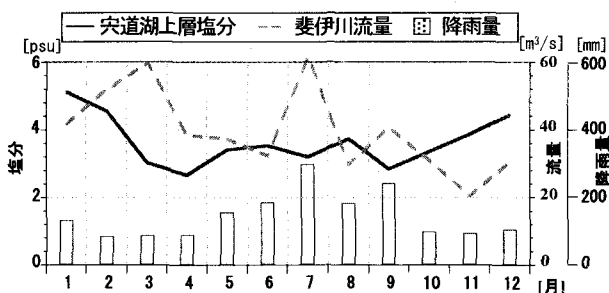


図-10 宍道湖塩分・降水量と斐伊川流量年間変化 (1994年-1998年)

気圧状態であった。期間中は非常に弱い風速しか観測されておらず、特に卓越した風向も持たない。降雨もなく斐伊川流量も少なかった。この時、両湖に作用する外力は天文潮により生じた水位差である。宍道湖水位に対する天文潮の影響は、宍道湖に伝わるまでに減衰し、気象潮と比較して宍道湖水位変動に与える影響は小さい⁷⁾。そのため、気象平穏時には天文潮によって宍道湖・中海間で水交換が行なわれる。中海の塩水が宍道湖へ輸送されることで宍道湖塩分に緩やかな上昇がもたらされるが、この塩分上昇が宍道湖に及ぼす影響は小さい。

これに対して、図-7で、気圧低下時での2湖の水位差と気圧、宍道湖塩分変化を示す。2/7から2/8に気圧が急激に低下し、強風と中海水位上昇がもたらされた。宍道湖塩分は2/7 15時頃から急激に上昇を始め、27時間かけて約1.5倍に(0.75psu)上昇した。気圧低下に伴う中海水位の上昇による急激な高塩水の宍道湖下層への流入・混合が、宍道湖上層塩分を急激に上昇させていると考えることができる。

降雨時の斐伊川流量、2湖の水位差、気圧、宍道湖塩

分変化を図-8に示す。気圧は10/13から低下傾向を示し始め、10/17-19に急激に低下している。また、この6日間には降雨が観測されており、特に17日には114mmの降雨が観測されている。降雨により増加した河川水が流入するために、宍道湖水位が上昇している。気圧が低下しているため、中海水位も上昇するが、宍道湖の水位の上昇量が中海水位の上昇量を上回るため、宍道湖の水位が中海よりも高い状態が数日継続し、大橋川流量は流下が卓越する。河川水の流入量に対応し宍道湖塩分は低下する。降雨に伴う河川水流入の増加量は、気圧低下時に生じる中海からの流入量よりも遥かに多量であり、宍道湖湖内環境の変化に及ぼす影響は、河川水流入が他の外力より卓越する。

(3) 湖内塩分の年間変化特性

図-9は宍道湖塩分、斐伊川流量、降水量について、1994年から1998年までの5年間の月平均値を年間変化として示した図である。宍道湖塩分は年間に3度減少する傾向が見られる。宍道湖上層塩分は夏季をピークとし、9-10月の秋季にかけて減少する。これは、夏季から秋季にかけて、梅雨や台風が大量の降雨を斐伊川流域にもたらすためである。宍道湖塩分は斐伊川流量に依存するため、降水量の少ない渇水年・月には減少量は少なく、大量の雨がある年・月には宍道湖塩分の減少量も大きい。

11月から1月の間は降水量が少なく、斐伊川流量も減少するため、低気圧や潮汐による中海からの逆流が宍道湖塩分を徐々に上昇させる。1月から4月の間は降水量は少ないが、融雪水の影響で、斐伊川流量が増加するため、宍道湖塩分はこの時期にも再び減少する。このように宍道湖塩分は1年の周期的な変動特性を持つ。

6. 結果

貧酸素化など水質悪化が問題となっている汽水湖である宍道湖において、湖内の塩分変化特性を明らかにすることを目的とし、中海と宍道湖を連結している大橋川に着目し、様々な外力が作用した時の各水域の流動特性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) 大橋川を遡上する塩水の水質は、中海と大橋川の接続部付近の浅い水域に存在する水質とほぼ一致する。したがって、この水域の水質変化の形成過程を明確化することが、宍道湖へ流入する塩水の水質を把握する上で重要となる。

(2) 大橋川の高塩分水塊の宍道湖への遡上条件は、気圧低下などの作用により、宍道湖水位に対して中海水位の高い状態が継続すること、中海水位が高い間に複数回の満潮を迎えること、この間、満潮と干潮による水位変動が小さいことなどが挙げられる。

(4) 気圧が急激に低下した後の気圧の回復期に、大橋川と中海の接続部に当る浅い水域に高塩分濃度・貧酸素な水塊がもたらされる。この時、気圧は低い状態にあるため、斐伊川からの河川流入量が多くなければ、中海水位が高い状態が保たれているため、満潮時にこの高塩分濃度・貧酸素の水塊の大橋川遡上が発生している。

(5) 宍道湖の塩分分布は、降雨による斐伊川流量の増加のため、湖心以西で一時的に塩分濃度が減少する。しかし、塩分の分布は時間と共に消滅し、数時間後には湖内でほぼ様な塩分濃度となる。

(6) 気圧が安定し、降雨や強風が観測されていない気象平穏時には、天文潮の影響が卓越するため、中海から塩水が遡上し、宍道湖上層の塩分が極めて緩やかに上昇する傾向は見られるが、気象平穏時における宍道湖湖内への影響は他の外力による変化に比べて極めて小さい。一方、急激な気圧低下・強風時には、宍道湖上層の塩分は急激に変化する。宍道湖下層への流入・混合が生じたためと考えることができる。また、降雨に伴う河川水流入の増加量は、気圧低下に伴う塩水逆流入量よりもはるかに多量であり、宍道湖に急激な塩分低下、水位上昇をもたらす。このように宍道湖塩分の変化は気象変化に応じた塩分変化を生じるため、1年の周期的な変動特性を持つ。

参考文献

- 1) 福岡捷二・松本直也・溝山勇・山根伸之：汽水湖における閉鎖性水域の流動観測と流動モデルの適合性，水工学論文集，第39巻，pp. 243-248，1995.
- 2) 日比野忠志・池内幸司・福岡捷二：閉鎖性汽水湖における流れ場の観測，水工学論文集，第40巻，pp. 461-466，1996.
- 3) 日比野忠志・福岡捷二・池内幸司：季節および日々の気圧配置の変化に伴う閉鎖性汽水湖内部での流れ場の特性，土木学会論文集，No. 579/II-41，pp. 93-103，1997.
- 4) 福岡捷二・中村剛・池内幸司・日比野忠志：時空間どう時測位装置を用いた閉鎖性汽水湖内部の流れ場の観測と解析，海岸工学論文集，第44巻，pp. 431-435，1997.
- 5) 福岡捷二・鈴木篤・黒川岳司・中村剛：中海における貧酸素水塊の挙動に及ぼす流れ場の影響，水工学論文集，第42巻，pp. 763-768，1998.
- 6) 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.
- 7) 日比野忠志：連結系汽水湖での流動・気候・気象の変化が流れに及ぼす影響 -，1996年度（第32回）水工学に関する夏季研修会講義集，Aコース，pp. A-7-1-20，1996.

(2001. 10. 1受付)