

強固な密度成層を有する水域における下層内の流動と水質変化

福岡捷二*・三浦心**・黒川岳司***
松下智美****・船橋昇治*****

強固に成層化した中海では密度界面の振動が下層の流動に影響する。中海には窪地が点在しており、窪地内は貧酸素化しやすい。また、大橋川へ流入する中海の塩水が宍道湖の水質に関係している。そこで、下層流れと界面の挙動との関係に着目し、窪地内の流動と、下層塩水の大橋川への流入機構を検討した。そこで次の知見を得た。①葭津沖の窪地は狭く深いため流動が生じにくいのにに対し、米子湾の窪地は比較的大きいため流動性が高い。ただし、窪地内の水質には界面振動による水交換の影響は小さい。②気象平穏時には下層塩水は浅水域を乗り越えられず大橋川に流入しないが、低気圧通過に伴う西～北西風によって大橋川側で界面が上昇し流入する。

1. はじめに

中海は中国山地を源流とする斐伊川水系の最下流部に位置する汽水湖である。近年では周辺部の都市化や、閉鎖性の強い地形特性から富栄養化などの水質問題が生じている。また、中海の高塩分水が大橋川を通じて宍道湖へ流入することで宍道湖の水質にも影響を与えている。著者ら(日比野ら, 1997; 福岡ら, 1999; 黒川ら, 2000)は中海湖内で詳細な現地観測を行い、数々の中海に特有な水理・水質現象を解明してきた。強固に成層化した中海では、下層内の流れは密度界面の動きとの関係が非常に強い。例えば、南東部に位置する米子湾内で出現する貧酸素水塊は、密度界面の振動に伴う流動によって輸送されることが確認されている。また、中海湖内には米子湾内などに窪地が点在しており、そこでは滞留しやすいため貧酸素化が進みやすい。しかし、窪地内の流動と界面の挙動との関係について検討された研究は少ない。

また、大橋川への塩水遡上は、気圧変化などによって生じる中海・宍道湖間の水位差に基づいて起こることが知られているが(石飛ら, 1999)、中海で常に昇降している密度界面の位置によっても遡上する塩水量は異なると考えられる。

そこで、本研究では、現地観測データを用いて、中海における下層流れについて密度界面の挙動との関係に着目して検討し、下層の水交換を阻害している浅渚窪地内の流れと、中海から大橋川へ高塩分水が流入する条件について明らかにすることを目的としている。

2. 中海の概要

中海は表面積 86.2 km²でサロマ湖に次いでわが国で 2 番目に大きな汽水湖である。図-1 に中海・大橋川の概

略を示す。上流には宍道湖を有し、斐伊川本川から宍道湖、大橋川(延長 7.6 km)を経て中海に流下する。さらに、湖北部の境水道(延長 8.7 km)から日本海に通じている。中海では斐伊川・宍道湖から淡水が流入する一方で日本海から境水道を通じて海水が流入するため、年間を通じて上層密度 $\sigma_t=10$ 程度、下層 $\sigma_t=20$ 程度で、強い成層状態が維持されている。密度界面の位置は水面下 2~6 m である。これは、河川などからの淡水供給と気圧配置の変化などによる海水供給のバランスが季節的に変化することや、季節および日々の風の作用などによって常に変動している(近藤ら, 1994; 日比野ら, 1997)。中海は海跡湖であるため平均水深は 5.4 m と浅い。南東部には細長く伸びる米子湾を有する。湖底形状は、中浦水門から米子湾にかけて谷地形が形成されている。ここを除けば、大橋川方向に向かって勾配約 1/3000 で浅くなっている。図-2(b) に中浦水門から米子湾奥にかけて(Line A)の縦断湖底形状を示す。この区間は水深 8 m 以上の窪地が点在しており、起伏に富んだ湖底形状を形成している。図-2(a)に中海と大橋川の接合部付近から大橋川内にかけて(Line B)の縦断河床形状を示す。大橋川では局所的に 7 m 程度の水深になる場所もあるが大部分は滑らかな河床形状をしている。それに対して、中海との接合部では水深が比較的浅く、最も浅い断面になると水深が 3.7 m 程度である。

3. 現地観測の概要

図-1 中に本論文で説明に用いる観測点の配置を示す。中海には湖心観測所と米子湾観測所が設置され、年間を通じて気象と水質の常時観測が行われている。また、湖内 4 地点(図中△印)で水位観測がされている。

さらに、1993 年度から定期的に一ヶ月連続観測が実施している。湖内に約 10 地点を観測点に選定し、それぞれ水面下 1 m (上層)と湖底上 1 m (下層)を中心に鉛直方向 2~4 点において、プロベラ式流向流速計と自記式の水温・塩分・DO 計を配置して上・下層の流動・水質データを取得している。また、各観測点において 3 日毎に STD に

* フェロー 工博 広島大学教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻
** 正会員 工修 (株)建設技術研究所
*** 正会員 工博 呉工業高等専門学校講師 環境都市工学科
**** 学生会員 広島大学大学院工学研究科博士課程前期
***** 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

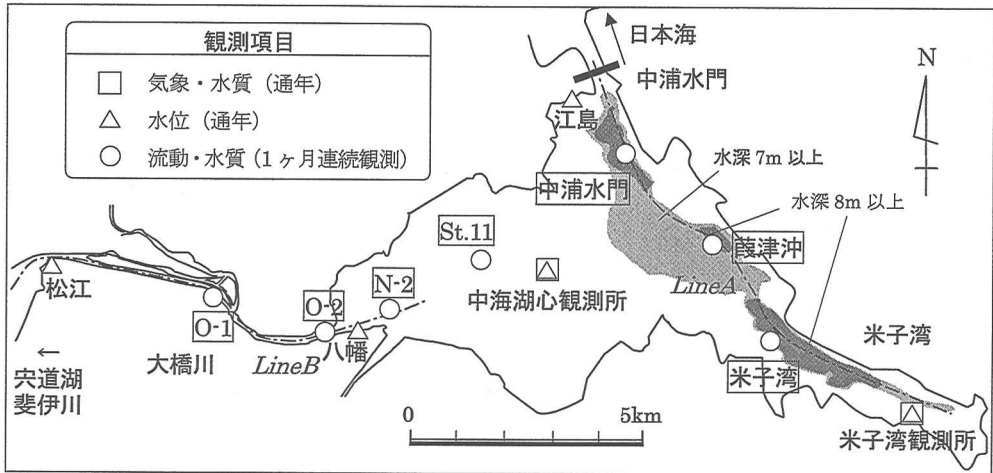


図-1 中海・大橋川の概略と観測点の配置 (2001 年度, ただし St. 11 は除く)

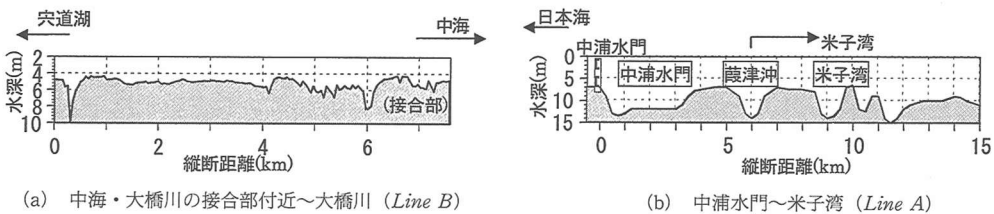


図-2 中浦水門～米子湾 (Line A) および中海～大橋川 (Line B) の縦断形状

よる水温, 塩分の鉛直分布の測定も行なった。

4. 窪地内の流動と水質変化

中海では大きく分けて中浦水門付近, 葭津沖と米子湾に水深 8 m を超える窪地を有する (図-2(b))。これらの窪地はそれぞれ独立して存在しているため, 内部の流動と, 流動に伴う水質の変化特性は異なる。図-3 にそれぞれの窪地内の主軸方向流速と DO の経時変化を示す。日本海に近い中浦水門付近の窪地は外海水流入の影響を直接受けるため, 比較的流動性が高く, DO も高い。しかし, 米子湾の湾口部に位置する葭津沖の窪地は狭く, 深いために流動がほとんど生じず, 停滞性が非常に強い。したがって, DO も低い。米子湾の窪地は比較的流動性が高い。これは葭津沖の窪地に比べて広く, 界面振動などに伴う流動による。しかし, 外海から遠く離れているために夏季から秋季には恒常的に貧酸素化している。

低気圧の到来など数日スケールの外海水位上昇に応じて外海水の大規模な流入が生じ, 中海下層の貧酸素化が一時的に解消されることが知られている (福岡ら, 1998)。しかし, 中海に特徴的な界面振動に伴う流れが窪地内の水質に与える影響は明らかにされていない。ここでは, 界面振動に伴う流れが窪地内の水質に与える影響につい

て考察する。

図-4 に界面振動が生じた際の流れの概略を示す。界面振動は風による吹き寄せや潮汐などに伴って生じ, 特に米子湾内では, 湾口付近 (葭津沖付近) を節とした基本モードの界面振動が比較的大きな振幅で生じることが明らかにされている (日比野ら, 1997; 黒川ら, 2000)。(a) のように米子湾で界面が低下する場合, 上層は米子湾方向へ, 下層では中浦水門方向へ上下層で逆向きとなる流れが生じる。逆に (b) のように米子湾で界面が上昇する場合には上層は中浦水門方向へ, 下層は米子湾方向へ流れが生じる。

図-5 に界面振動が生じている期間の流動と DO の経時変化を示す。図-4 に示した (a) 米子湾内で界面が低下する場合を灰色で示している。この期間では, 中浦水門付近の窪地は比較的 DO が高いのに対し, 米子湾の窪地では酸素が欠乏しており, ほとんど無酸素状態となっていた。このとき, 図-5(a) に示す葭津沖の主軸方向流速は上下層で対となる流れが界面振動により生じており, 下層でも 10 cm/s を越える流速が生じていた。これに合わせて図-5(b) に示した DO の経時変化をみると, 下層流速が米子湾から中浦水門方向へ向かう (a) で示した期間においては中浦水門付近, 葭津沖でも DO が低下して

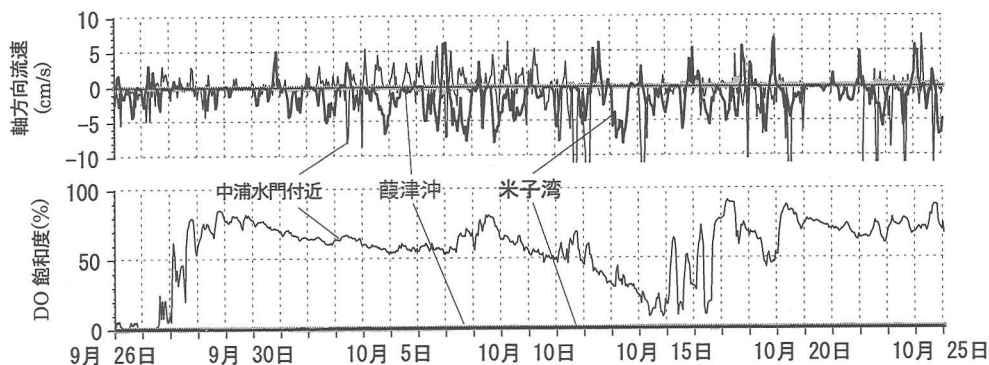


図-3 窪地内の流動と DO の経時変化 (2000 年 9 月 26 日～10 月 25 日)

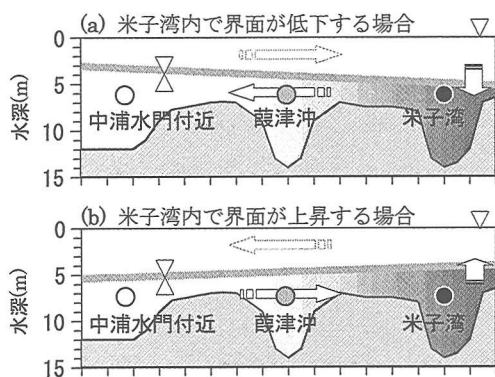


図-4 内部波に伴う流動

いる。米子湾の窪地内の貧酸素化した水塊が界面振動に伴う流動により、米子湾の窪地から中浦水門方向へ流出したために葭津沖、米子湾では DO が低くなっている。逆に(b)で示した期間においては中浦水門付近、葭津沖でも DO が上昇している。これは、DO の高い中浦水門付近の水塊が米子湾に向けて流動したために、葭津沖でも DO が上昇した。しかし、米子湾の窪地内では DO の上昇はみられず、水質にそれほど大きな影響を及ぼすものではないと考えられる。窪地内は非常に閉鎖的であるため、このような界面振動に伴う流動は比較的大きな流動であるが、それでも米子湾の窪地内の貧酸素化を解消するためには効果が小さい。中海のように、鉛直方向の拡散・混合が小さく、下層への DO の供給が望めない水域では、水交換の促進、例えば曝気による酸素挿入や鉛直流発生による強制混合などが、下層の水質を改善させる有効な手段である。

5. 大橋川への中海下層塩水の流入機構

(1) 大橋川に流入する高塩分水の特徴

図-6(a) に中海湖心上・下層の塩分と中海・大橋川接合部 (O-2) の塩分の経時変化を示す。(▲) で示した期

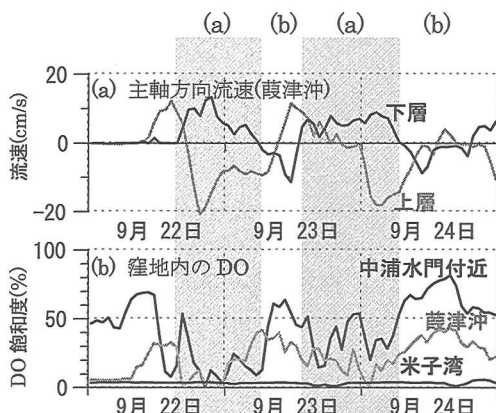


図-5 内部波に伴う流れと DO の経時変化 (1997 年 9 月 22 日～9 月 24 日)

間だけ大橋川の塩分が中海下層の塩分に近い値を示しており、中海下層の塩水が大橋川に流入していることがわかる。しかし、他の大部分の期間では大橋川内の塩分は中海上層の塩分と同程度の値を示しており、通常は中海の上層水が大橋川に流入していることがわかる。この理由は、図-2(a) に示すように中海・大橋川接合部において断面の水深が 3.7 m 程度であるのに対し、中海の密度界面位置は水面下 2～6 m、平均的には水面下 4～5 m 程度であるので、気象平穏時にはこの浅水域を乗り越えて中海下層の塩水が大橋川に流入することができないためである。図-7 にこの期間中で下層塩水が大橋川に流入していた 7/13 17:00 と下層塩水が流入していない期間の 7/27 17:00 での中海・大橋川接合部 (N-2) における塩分の鉛直分布を示す。7/13 では界面位置が浅水域の水深程度まで上昇しており、7/27 では浅水部分乗り越えることができない程度まで界面が低下していることがわかる。以下では、(▲) で示した期間において中海下層の塩水が大橋川に流入する条件について考察する。

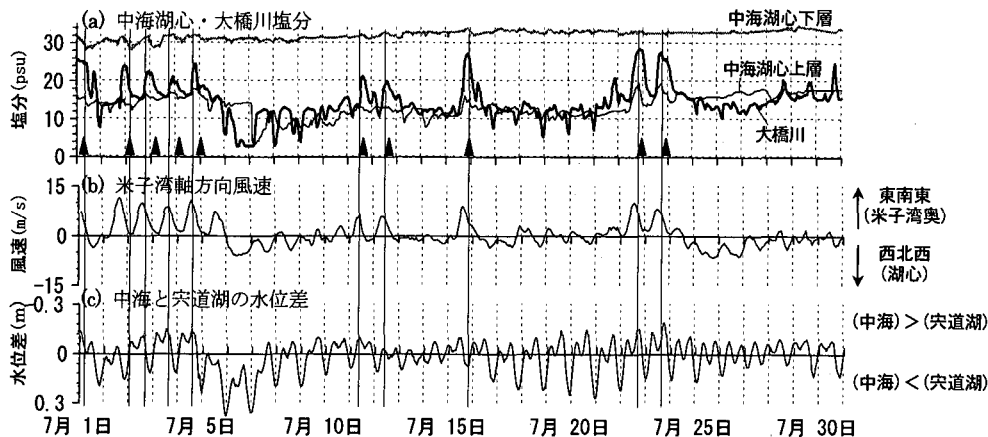


図-6 外力に伴う大橋川に流入する塩分の特徴 (2001 年連続観測期間中)

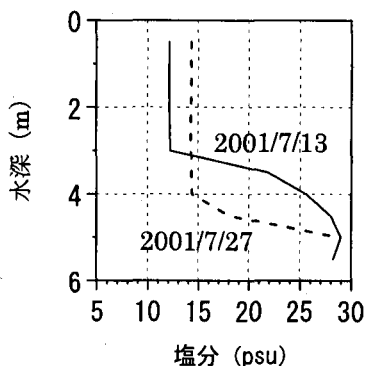


図-7 密度界面位置の変化 (2001/7/13 17:00, 2001/7/27 17:00)

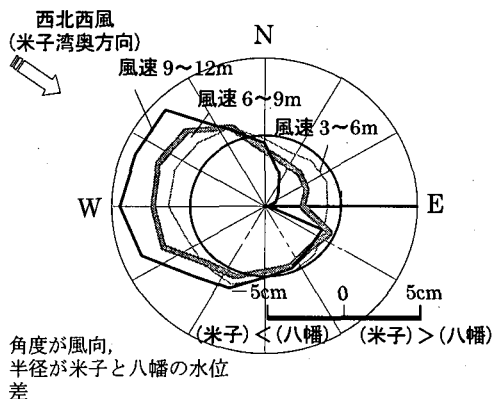


図-8 八幡と米子湾の水位差と風向 (1998 年間データ)

(2) 大橋川に中海下層塩水が流入する条件

図-6(b)に米子湾軸方向の風速の経時変化を示す。米子湾奥方向(東南東方向)に強風が吹く場合と、大橋川内(O-2)で中海下層に近い塩分が観測される期間はほぼ一致している。これは、米子湾奥方向の風によって中海・大橋川接合部付近で界面が上昇したためと考えられる。図-8は大橋川河口(八幡)と米子湾の水位差を風向ごとに示している。角度が風向を示し、半径方向に水位差を示している。風速9~12 m/sの西風~西北西風が吹く場合に米子湾の水位が4.5 cm程度高くなる。大きな水位差が生じる軸が西北西~東南東にずれているのは、米子湾がこの方向に細長く存在し、吹送距離が長くなるためである。

図-9に塩分の経時変化と3日ごとに観測されているこの地点の塩分の鉛直分布から推定した中海・大橋川接合部(St. 11)の密度界面の変位と西北西風速との関係を示す。なお、密度界面変位は図-10に示すように、密度界面付近(水深約4 m)で測定された塩分の経時変化と3

日ごとに観測されたこの地点での塩分の鉛直分布から推定した。西北西風に伴って中海・大橋川接合部付近の界面が1.5 m以上上昇していることが確認できる。このように中海・大橋川接合部の密度界面が上昇すれば、大橋川に流入する流れによって接合部の浅水域を乗り越えて中海下層の塩水が大橋川に流入すると考えられる。

ところで、大橋川内の流れは中海と宍道湖の水位差の影響が卓越している(石飛ら, 1999)。つまり、低気圧通過などによる中海水位上昇も塩水流入の条件となる。図-6(c)に中海と宍道湖の水位差を示す。一方、強い西風や北西風が吹くのもまた、低気圧通過時に多い(福岡ら, 1999)。以上より、低気圧通過などにより米子湾奥方向に強い風が吹き、さらに中海の水位が宍道湖よりも高くなった場合に、大橋川に中海下層の高塩分水が流入することが明らかである。

6. おわりに

本研究では、中海における下層流れについて密度界面

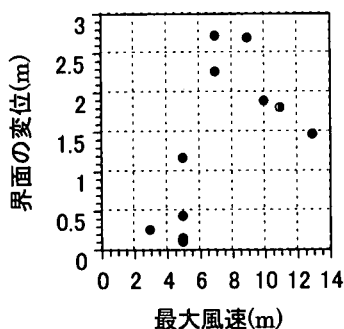
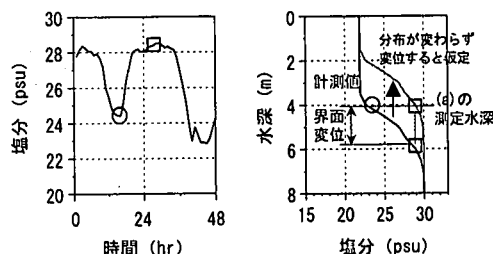


図-9 西北西風速と中海・大橋川接合部付近 (St. 11) の界面変位の関係



(a) 密度界面付近の塩分の経時変化 (b) 塩分の鉛直分布

図-10 密度界面の変位量の推定方法

の挙動との関係に着目して、中浦水門から米子湾にかけて形成されている窪地内の流動および流動に伴う水質変化と、中海から高塩分水が大橋川へ流入する機構について検討を行なった。その結果、以下のような知見を得た。

1) 葭津沖の窪地は小さく深いため、流動がほとんど生じないのに対し、米子湾内の窪地は面積が比較的大きいため流動性が高い。窪地内の水交換は界面振動によっても生じるが、窪地内の水質に及ぼす影響は小さく、米子湾内の貧酸素化を解消するには至らない。

2) 気象平穏時には中海下層の高塩分水塊は中海・大橋川接合部付近の浅水域を乗り越えて大橋川に流入することができないが、低気圧通過による西～西北西の風によって中海・大橋川接合部付近の密度界面が上昇し、大橋川の流れに伴って中海下層の高塩分水が大橋川に流入

する。

参考文献

- 石飛 裕・神谷 宏・横山康二・熊谷道夫・奥田節夫 (1999): 潟湖、宍道湖への塩水進入条件, 陸水学会誌, 60, pp. 439-452.
- 黒川岳司・福岡捷二・日比野忠史・上原 浩・鈴木 篤 (2000): 中海における界面振動とそれに伴う流動, 水工学論文集, 第44巻, pp. 999-1004.
- 近藤邦男・清家 泰・橋谷 博 (1994): 汽水湖中海における栄養塩類および植物プランクトンの鉛直分布を支配する塩分躍層の役割, 陸水学雑誌, 第55巻, pp. 44-60.
- 日比野忠史・福岡捷二・池内幸司 (1997): 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.
- 福岡捷二・鈴木 篤・黒川岳司・中村 剛・上原 浩 (1998): 中海における流れと貧酸素水塊の消長, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 976-980.
- 福岡捷二・黒川岳司・日比野忠史・鈴木 篤・中村 剛・上原 浩 (1999): 中海における気象変化に伴う流れと貧酸素水塊の挙動, 土木学会論文集, No. 636/VII-13, pp. 61-79.