

中海における界面振動とそれに伴う流動

THE INTERFACE OSCILLATION AND THE FLOW WHICH ORIGINATES DUE TO THE INTERFACE OSCILLATION IN LAKE NAKAUMI

黒川岳司¹・福岡捷二²・日比野忠史³・上原 浩⁴・鈴木 篤⁵

Takeshi KUROKAWA, Shoji FUKUOKA, Tadashi HIBINO, Hiroshi UEHARA and Atsushi SUZUKI

¹学生員 工修 広島大学大学院 工学研究科環境工学専攻博士課程後期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

²フェロー 工博, Ph.D 広島大学教授 工学部第四類地域環境工学講座 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

³正会員 工博 運輸省港湾技術研究所主任研究官 海洋環境部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

⁴学生員 広島大学大学院 工学研究科環境工学専攻博士課程前期 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

⁵正会員 工修 建設省中国地方建設局出雲工事事務所所長 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有原 5-1)

Lake Nakaumi has a strong pycnocline. The interface oscillation characterizes the flow in the lake. Wind and tide are external force causing the interface oscillation. These external forces are classified by the diurnal period components from that over the day period components. We studied the interface oscillation and the flow which originates due to this oscillation in Lake Nakaumi. It was deduced from the results that; (1) The interface oscillation in the Yonago bay is different from that in the central part of the lake. Yonago bay has longer period and larger amplitude interface oscillation than the central part of the lake. (2) The astronomical tidal current is dominant near the Nakaura gate. But the flow due to the land and sea breeze is strong in the central part of the lake. (3) As the interface oscillation originates by the strong wind in the central part of the lake, it can easily propagate into the Yonago bay.

Key Words : brackish lake, Lake Nakaumi, pycnocline, interface oscillation, wind-driven current

1. はじめに

中海は我が国の代表的な汽水湖である。中海では赤潮の発生や底層水の貧酸素化などの水質問題が起こっている。中海の水質環境を支配する流動場は気象条件などによって規定され、外力条件～流れ場～水質環境の関係について研究が進められている^{1),2)}。

中海は外海と宍道湖に連結している。このため、海水、宍道湖水の流入によって湖内では堅固な密度躍層が形成されている。密度界面は潮汐や風などを外力として、内部静振や吹き寄せによる傾斜などによって常に揺れ動いている。(本論文では、これらの界面の動きを界面振動と総称する。)中海での流動は低気圧接近など気象変化に伴うものが最も急激であるが、界面振動は気象平穏時での湖内流動を特徴付ける因子のひとつである。著者らは、気象平穏時においては界面振動に伴う流れが水塊の移動に寄与し、米子湾内の水質変化に影響していることを観測から明らかにしている³⁾。また、湖内では水平循環流が生じているが、これと界

面振動に伴う流れの関係は明らかでない^{4),5),6)}。低気圧接近など急激な気象変化を伴う場合は、湖内の成層状態が変化し、これによって流動状態が変化する。

本研究では湖内流動を特徴づける界面振動とそれに伴う流動について検討する。

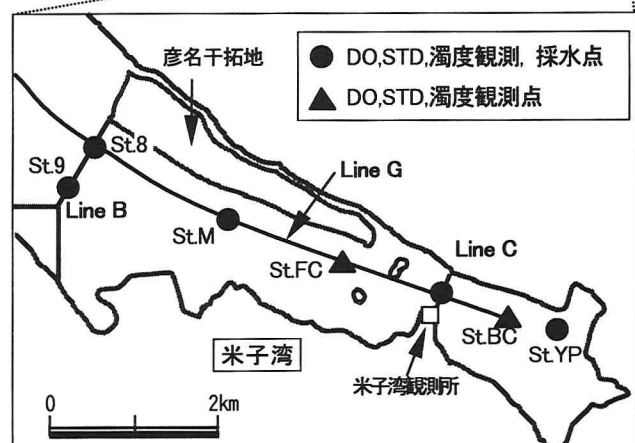
2. 中海の地形的特徴と現地観測の概要

(1) 中海の地形的特徴

中海は、図-1(a)に示すように大橋川から宍道湖湖水(海水の1/10程度の塩分をもつ)が流入し、中浦水門から日本海の海水が流入する汽水湖で、ほぼ全域で年間を通じて水深2~6m付近に安定した密度躍層を有している⁷⁾。水面面積は86.2km²でわが国の汽水湖としては2番目に大きい。南東部に存在する米子湾は細長く伸び、特に閉鎖性が高い。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。この谷地形を除けば、大橋川方向に向って勾配約1/3000で浅くなっており、湖心での水深は約6.5mである。



(a) 中海全域



(b) 米子湾

図-1 中海の水深分布と観測点

本論文では、米子湾（図-1(a) Line A 以奥）以外の広域な部分を中海中心部と呼ぶことにする。

中湖周辺は南部が内陸地、北部が標高 200m 以上の島根半島によって挟まれているが、東部が低地の弓浜半島、西部が穴道湖で、東西方向は低地で結ばれている。そのため、東西軸方向の風が卓越しやすい²⁾。

(2) 現地観測の概要

著者らは、1993 年度より中海の流動、水質について、半月から 1 ヶ月程度の連続観測を行っている。本論文では、1996～1998 年度に実施した観測結果を中心に考察をすすめる。

1996/11/18-12/18 (30 日間)、1997/9/22-10/6 (15 日間) および 1998/9/13-10/12 (30 日間) に連続観測を行い、また、それぞれの期間中の 1996/11/29-11/30、1997/10/3-10/4、1998/9/28-9/29 には 2 潮汐間の集中観測を行った。中海全体の観測点を図-1(a)に、米子湾内の観測点を図-1(b)に示す。連続観測では、1996 年度は St.1～4、6、8～10 (○印)、1997、1998 年度は St.1～10 (○印) の上層 (水面下 1m) と下層 (湖底

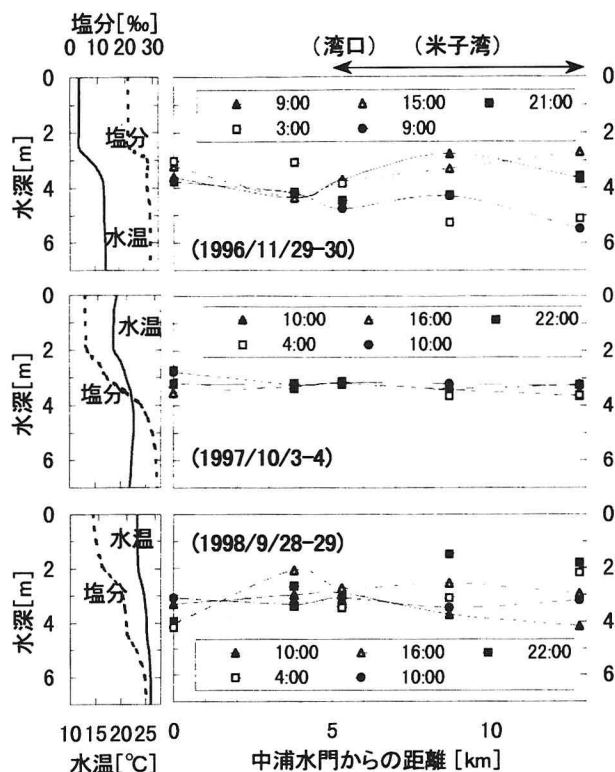


図-2 中浦水門から米子湾奥に至る密度界面位置の縦断変化と塩分、水温の鉛直分布

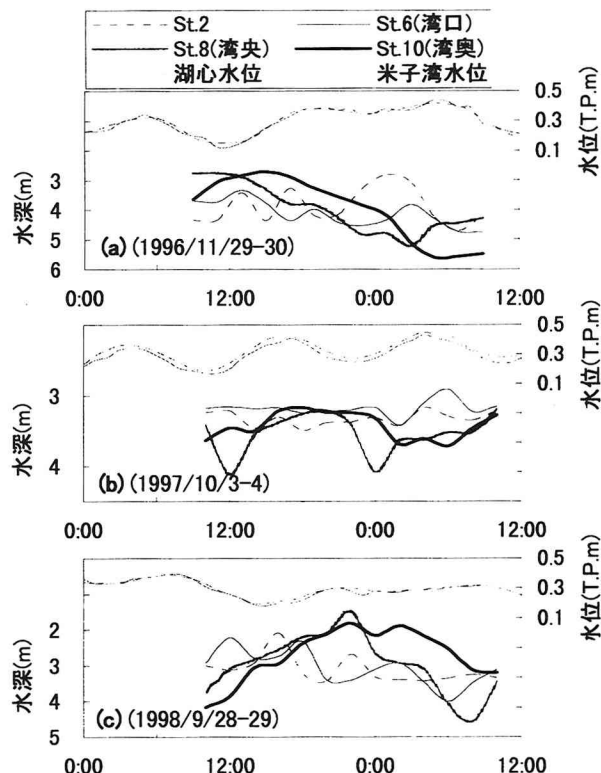


図-3 密度界面の経時変化

面上 1m) で流向・流速、水温、塩分を観測した。集中観測では、流動、水質をより詳細に検討するために、米子湾を中心に ADCP を用いた流況観測、魚群探知機

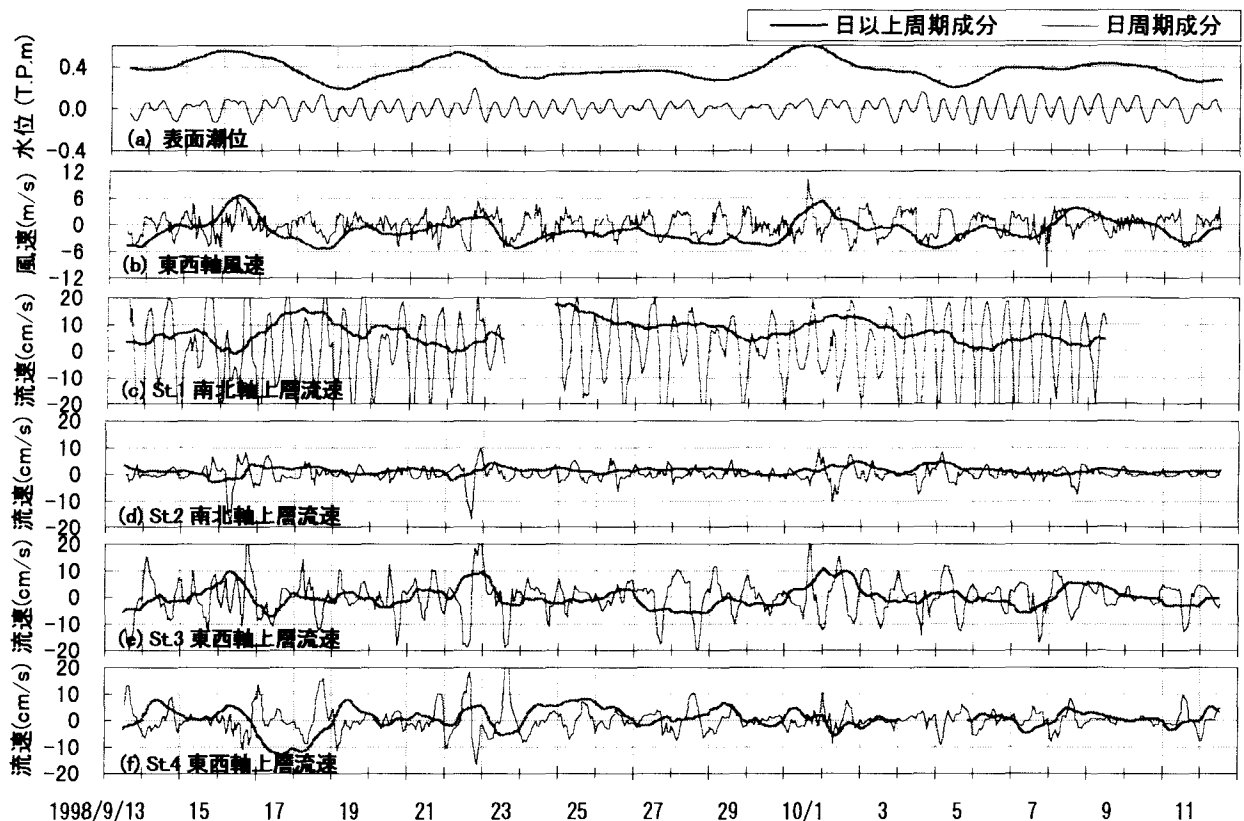


図-4 表面潮位、東西軸風速（中海湖心）と主流軸流速（St.1～4 上層）の日以上周期成分と日周期成分（1998/9/13-10/12）

による密度界面の可視化や塩分、DO など水質の鉛直分布の観測を行った。また、中海湖心および米子湾の両観測点（□印）においては年間を通じて水位、風向・風速および深さ方向に 5 点で塩分、水温、DO、濁度のモニタリングを行っている。

3. 湖内の界面振動と界面振動に伴う流動

図-2 に 1996/11/29-30, 1997/10/3-4, 1998/9/28-29 それぞれでの中浦水門から米子湾奥に至る (St.1, 2, 6, 8, 10) 密度界面位置の縦断変化を示す。併せて、各観測開始時の St.6 (米子湾口) での水温、塩分の鉛直分布を示す。なお界面位置は鉛直密度分布から上層、下層の各平均密度の中間値をとる水深位置とした。図-2 から、まず観測日によって界面振動の振幅が大きく異なることがわかる。これは、風向・風速の違い、潮汐振動などの外力と界面振動との共振、上下層の密度差に起因する界面変位に対する復元力の違いなどが考えられる。界面変位に対する復元力は有効重力 $\varepsilon \cdot g$ (ここで $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$, ρ_1 , ρ_2 は上層、下層密度) に比例するが、例えば 1997/10/3-4 での有効重力は 1996/11/29-30 での 3~4 倍で、振幅の差 (5~6 倍) を説明するには不十分である。したがって、風や潮汐の外力成分と界面振動との共振が起きている可能性がある。また、いずれの時も米子湾口付近を節として振

動しているが、中海中心部に比べて米子湾内の方が振幅は大きい。図-3 は図-2 を時間変化に表示し直し、表面潮位を加えたものである。表面潮位は中海湖心、米子湾内ともほぼ位相差は無く、湖内全域で同時に昇降している。密度界面の変位は 1996/11/29-30 での米子湾内以外はいずれも表面潮位との相関が低い。その上、中海中心部と米子湾内では明らかに周期と振幅が異なる。中海中心部では周期が短く振幅も小さいが、米子湾内では周期は長く振幅も大きい。また湾内では進行性を帯びている。そこで、中海中心部と米子湾内について別々に界面振動とそれの伴う流動を検討する。

(1) 中海中心部での界面振動と界面振動に伴う流動

中海では周辺の地形と海陸風の発生の影響から、東西軸方向の風が発達しやすい。また、中海中心部は東西に長いので東西軸の流動が卓越しやすい。そこで、中海中心部では東西方向の流動を中心に検討する。

図-4 に 1998/9/13-10/12 における中海湖心での表面潮位、東西軸風速および St.1, 2 上層での南北軸流速、St.3, 4 上層での東西軸流速の経時変化について、それぞれ生の記録を 25 時間（風速については 24 時間）移動平均したもの（日以上の周期成分）と生の記録から 25 時間移動平均値を差し引いたもの（日周期成分）に分けて示す。日周期成分はそれぞれ天文潮、海陸風、天文潮流を、日以上の周期成分はそれぞれ気象変化な

どに起因した変動成分を概ね示す．特に流れの日以上の周期成分は残差流として知られ，潮汐残差流，吹送流，密度流からなる．日周期成分では表面潮位は天文潮をよく表し，風は午前中に東への風（陸風，西風）午後に西への風（海風，東風）が吹いており海陸風を表している．日以上の周期の潮位と風はいずれも気象変化に起因しているため両者の対応がよく，概ね週周期の変動を示している．日周期の流れは St.1 で最も流速が大きく，St.2 で最も小さい．また，明らかに St.1 では潮位に対応して半日周期を示しているが，St.2～4 では周期性は明確でない．

図-5 に St.1～4 の各上層流速と潮位，風速それぞれの相互相関を示す．流動に対し外力となる潮位変化，風に対する流動のそれぞれの相関関係は各点で異なる．日周期の潮位変化と風に対しては，中浦水門付近の St.1 では潮位変化の影響が卓越するが，中浦水門から離れるほど風の影響が卓越している ((a), (b))．このことから，日周期の流動成分については，天文潮の影響が支配的なのは中浦水門付近のみで，中海中心部では天文潮より海陸風が流れの駆動要因として卓越していると言える．日以上の周期を持つ潮位変化と風に対する流動の応答性は各観測点で同程度である ((c), (d)) が，これはどちらも気象変化に対応しているためで，両者の寄与の割合は明確でない．しかし，ここで注目すべきは，湖心付近の St.3 と St.4 では外力に対する応答性が異なることにある．つまり，St.3 では正の相関を持つのに対し，St.4 では St.3 に対し 24 時間程度の時間差をもって負の相関を持っていることにある．これは，気象変化に起因した外力によって水平循環流を生じていることを示唆している．

この水平循環流の一因として，気象変化に起因した周期の長い外力によって生じた界面振動が，地球の自転の影響を受け，内部ケルビン波として反時計回りに伝播していることが考えられる．この観測期間での成層条件から，ロスビーの内部変形半径 $\lambda_i = C_i/f$ （ここで， C_i ：内部波速で $C_i = \{\varepsilon \cdot g \cdot h_1 h_2 / (h_1 + h_2)\}$ ， f ：コリオリパラメータ）を求めると約 4km となり，中海中心部の短軸（南北軸約 6 km）より小さいことから内部ケルビン波の発生条件を満たす．Fujii³⁾は中海において，界面付近に浮遊させる中立ブイを用いた内部波の観測から，内部ケルビン波として反時計回りに回転する内部波の存在を明らかにしている．

(2) 米子湾での界面振動と界面振動に伴う流動

図-6 に 1997/9/22-10/6 における中海湖心で観測された(b)湾軸方向の風速，米子湾奥（Line C；St.10，米子湾観測所）での(a)表面潮位，(c)上下層流速および(d)密度界面の時間変化を示す．ここで，密度界面

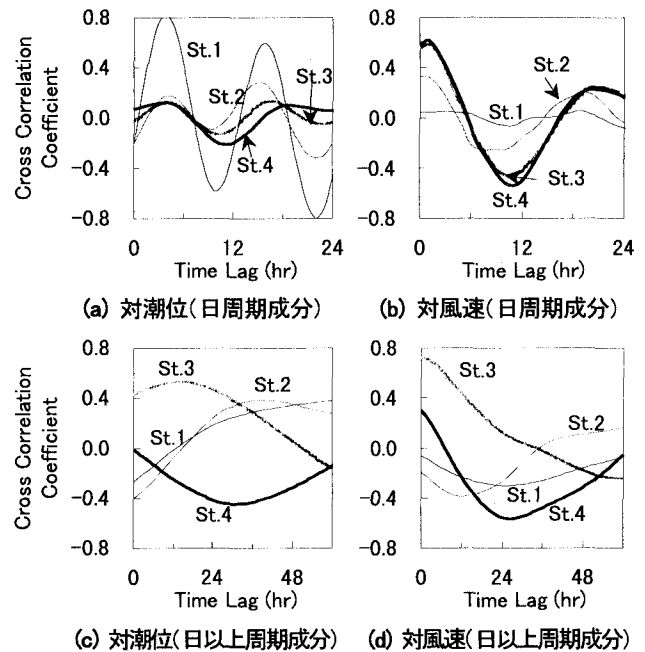


図-5 主流軸流速（St.1～4 上層）の表面潮位，風速との相互相関（1998/9/13-10/12）

の変位は界面付近に位置する測点（水深 3m）での塩分の経時変化から判断する．つまり，界面が上昇した時は界面付近の測点は下層側となり塩分が増加し，逆に界面が低下した時は上層側となり塩分は減少することを利用する．このため，実際に界面の昇降を捉えることができたのは観測の前後だけである．また，単純な鉛直断面内での二層モデルについて定常波として求めた内部静振の周期 $T_i = L_i/C_i$ （ここで， L_i ：湾長，約 8.5km）と有効重力の変化 ((e)) も示す．

表面潮位と風速の関係は，日周期以上の成分については相関が高い．例えば風の湾奥（南東方向）への吹き寄せによって湾奥水位が上昇していることがわかる．また両者の相関の高さは，共に気象変化に起因していることから，水位が上がる低気圧接近時に西風（東への風）が吹きやすく，水位が下がる高気圧に覆われる時に東風が吹きやすいことによって助長されていると考えられる．日周期成分については，風と表面潮位の相関は低い．しかし，日潮不等の大きさや潮位周期（24 時間 50 分）と風周期（24 時間）の差から，両者の位相差が小さくなって流動に対する効果が重なる 때가周期的に訪れる．9/22～25 がその例である．次に，それら外力と流速の関係をみると，湾軸流速の変化が表面潮位よりも風の変化に従っている．流速に対するそれぞれの相互相関係数は，潮位が 0.36，風速が 0.55 である．一方，流速と界面振動の関係は，90 度の位相差をもって対応（流速が 0 の時に界面位置が最高位（○印）または最低位（□印）を指す）していることから，ここでの流動は界面振動に従っていると言える．

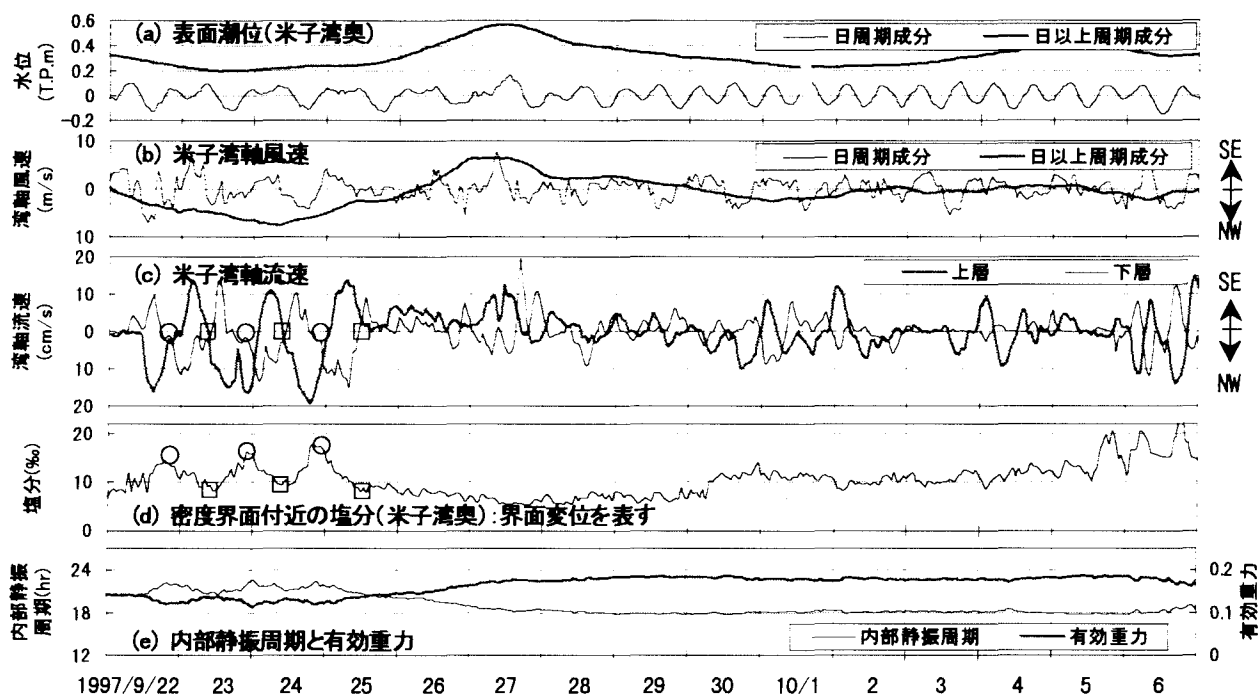


図-6 米子湾奥 (St.10, 観測所) での表面潮位, 湾軸方向風速, 湾軸方向流速, 界面振動および内部静振周期と有効重力の時間変化 (1997/9/22-10/6)

界面振動の大きさは、外力の大きさと共に湾の固有振動（内部静振）の周期との関係や界面変位に対する復元力に影響される。9/26 以前は固有振動周期が 22 時間程度で外力の周期 (24~25 時間) と近いため共振現象が起こりやすい上、有効重力も比較的小さいため振幅が大きくなりやすいと考えられる。その結果、流速（界面変位）が大きく周期性が高い。これに対して 9/26 以降は流速（界面変位）が小さく周期性も弱い。これは、9/25~26 頃に低気圧の接近があり、降雨や海水流入などによって密度の鉛直構造が変化したことによって固有振動周期が小さくなり、有効重力も大きくなったためと考えられる。

図-3 にも示したように、米子湾内の界面振動は進行波になりやすい。そこで、このことについて検討する。例として、図-7 に 1998/9/28-29 における中海湖心、米子湾奥での米子湾軸（北西-南東軸）風速と、米子湾内 (St.6, 8, 10) の湾軸上下層流速を示す。密度界面（図-3(c)）と流動（図-7(b) 矢印）の関係は、それぞれ各点で界面が最高位を示した時に流向が変化し、よく対応している。これらが湾口から湾奥へ 12~20km/h 程度で進行している。この時の内部波の波速は 16km/h 程度と求まり、よく対応する。

米子湾内の進行波の発生外力となるのは風や中海中心部での界面振動と考えられるが、風については湖内で風の吹き方が異なることが考えられる。図-7(a) に示すように周辺地形の影響から米子湾内では中海中心部より通常、風が弱くなる。このため、中海中心部

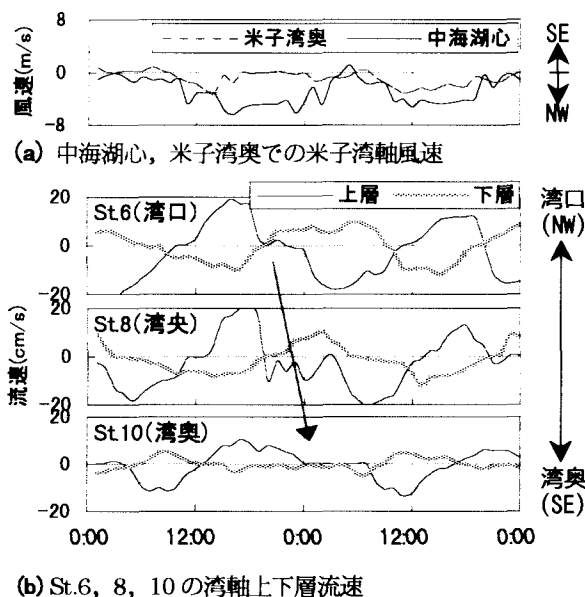


図-7 中海湖心、米子湾奥での米子湾軸（北西-南東軸）風速と、米子湾内の湾軸流速 (1998/9/28-9/29)

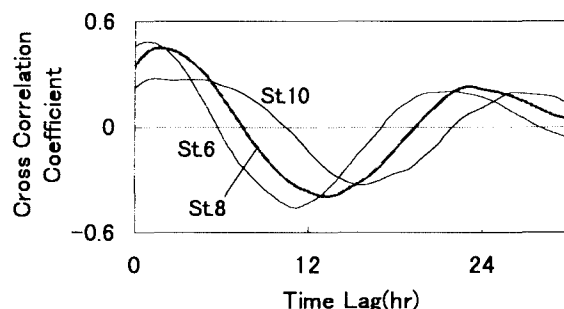


図-8 St.6, 8, 10 の湾軸上層流速の湾軸風速（中海湖心）との相互相関 (1998/9/13-10/12)

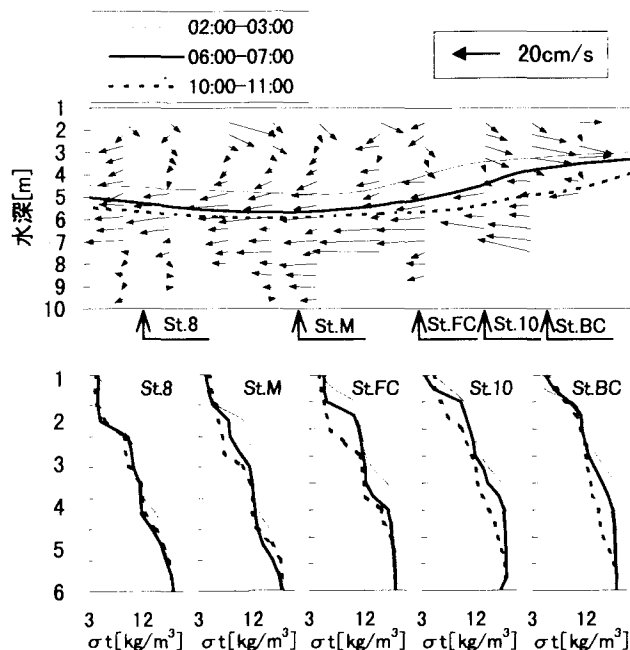


図-9 流速ベクトルの湾軸縦断分布 (1998/9/29 6:00-7:00) と密度躍層の変化 (2:00-3:00, 6:00-7:00, 10:00-11:00)

の方が風の吹き寄せに起因する界面振動が生じやすく、その振動が米子湾内に侵入してくるものと考えられる。図-8は St.6, 8, 10 上層の湾軸流速の中海湖心で観測された湾軸風速との相互相関を 1998/9/13-10/12 についてとったものであるが、風を外力とした振動が湾口から湾奥に 4~6 時間程度かけて、内部波の波速で進行 (12~18km/h) していることがわかる。

(3) 界面振動に伴う流動の鉛直構造

1998 年度の観測では、界面振動と流動の鉛直構造の関係を検討するために魚群探知機と ADCP を同時に用いて観測を行った。図-9 に密度界面が低下傾向にある 9/29 6:00~7:00 における流況の湾軸方向の縦断分布と、その前後 4 時間での密度界面位置を示す。また、下図にこの時の密度鉛直分布の変化も示す。界面は進行性を持っているため、流速の鉛直分布は縦断方向に異なる (図-8(b))。この時は St.8 では上層 (水面下 1m)、下層 (湖底上 1m) の流速は小さく、St.10 では反対に流速が最大の時である。しかし、流速の鉛直分布では密度躍層が幅を持っているために、St.8 では躍層付近で流速が大きくなり、三層的な流動を示している。これに対し、St.10 では二層的な流動を示している。また、この流れによって、躍層位置は全体的に低下している。また、9/29 2:00~3:00 では湾奥部で比較的明瞭、湾中央部 (St.8~M 付近) で不明瞭だった密度躍層が、湾奥部での上層から躍層への潜り込みと躍層内でも流動により、9/29 10:00~11:00 には密度躍層は湾奥部で緩やかになり、逆に湾中央部では階段

状態が強まっている。

4. おわりに

中海における界面振動とその界面振動に起因する流動を検討した。その結果、以下のような知見を得た。

- ① 中海中心部と米子湾内では界面振動の特性が異なり、米子湾内の方が周期性は高く、振幅も大きい。
- ② 日周期の流動成分については、天文潮の影響が支配的なのは中浦水門付近のみで、中海中心部では天文潮より海陸風が卓越した駆動要因である。
- ③ 気象変化に起因する日以上の周期の潮位変化と風によって生じた界面振動は、中海中心部で反時計回りに伝播しており、これが中海中心部で形成される循環流の一因と考えられる。
- ④ 米子湾内における界面振動は日周期の風や潮位が外力となって発生するが、風と潮位の位相差が小さくなったり、湾の固有振動 (内部静振) の周期が外力周期に近くなると周期性、振幅が増す。
- ⑤ 米子湾内における界面振動は進行性を帯びやすい。これは中海中心部での強い風の吹き寄せによる界面振動が湾内に伝播してくるためと考えられる。

参考文献

- 1) 日比野忠史, 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.
- 2) 福岡捷二, 黒川岳司, 日比野忠史, 鈴木篤, 中村剛, 上原浩: 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, 1999.
- 3) 福岡捷二, 鈴木篤, 黒川岳司, 中村剛, 上原浩: 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, 1998.
- 4) 藤井智康, 吉村亮, 三村敬, 奥田節夫, 横山康二: 超音波ドップラー流速プロファイラー (ADCP) を用いた感潮水域における流動観測例, 陸水学雑誌, 第 55 巻, pp.1-6, 1994.
- 5) Fujii, T.: Relationship of Internal Waves with Tide and Wind Drift Effects and Propagation of Internal Kelvin Waves in Brackish Lake Nakaumi, Jpn. J. Limnol., Vol.58, No.3, pp.241-260, 1997.
- 6) 福岡捷二, 中村剛, 池内幸司, 日比野忠史: 時空間同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.
- 7) 近藤邦男, 清家泰, 橋谷博: 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, 1994.

(1999.9.30 受付)