

日々の気圧配置の変化に伴う閉鎖性汽水湖での流れ場

Current Fields in Enclosed Brackish Lake with Daily Pressure Distribution

日比野 忠史*, 福岡 捷二**, 池内 幸司***

By Tadashi Hibino, Shoji Fukuoka, Koji Ikeuchi

It was clear through our investigation that the water level in connected waters changed with condition of climate or atmospheric phenomena. In this paper, the relation between pressure distribution ~ wind field ~ water level change ~ internal flow were studied. The wind field and sea water level change were strongly effected by pressure distribution. And moreover, water level each lake was influenced by the change of sea water level. So, difference of water level grew among connected waters. This phenomena and wind field were combined and then currents in enclosed brackish waters occurred.

Key Words : Pycnocline, Atmospheric phenomena, Connected Waters, Pressure distribution, Internal current

1. はじめに

密度躍層を有する水域では、底層水塊の貧酸素化や富栄養化物質の滞留等、水質環境にとって好ましくない現象が起こりやすくなっているが、このような水域での富栄養化の問題は化学的、生物的な解析のみならず、流れとの関連を明らかにしていくことが重要である。本研究で対象とする中海は水深が浅く、10数kmスケールの閉鎖性汽水湖である。水域内では、潮汐、風浪、気圧変化等によって流れが複雑に生じている。著者らはこれまでの研究において様々な時間スケールでの気圧配置の変化が連結系水系での水位変化に及ぼす影響について明らかにしている¹⁾。本論文では、日スケールでの気圧配置(日々の天気)の変化に伴って生じる水位変化に応ずる水域内の流れ場を明らかにすることを目的としている。このため、高気圧や低気圧の去來～水位変化～流れ場の関係を観測結果から検討する。具体的には気圧変化や潮汐に伴う外海と中海との間の出入りの特性および中海と宍道湖との水位差や風を外力として起こる湖内部の流れや躍層界面の挙動等、閉鎖性汽水湖での流れ場の特性について明らかにしている。

2. 流れ場の特性

(1) 中海・宍道湖付近の地形と躍層の特性

図1に中海の概略地形を示している。中海は大橋川(幅約200m、長さ約7.6km)および境水道(幅約400m、長さ約8.7km)によって宍道湖と外海(美保湾)に連結された閉鎖性汽水湖である。中海は連結系水系の中間に位置していることから外海と宍道湖の両水域のダッシュポットのような働きをするために湖内の日スケールの流れは非常に複雑になっている。湖底地形は中浦水門(中海入口)付近で最も深くなってしまい、水深は季節によって異なるが、最深部約16m、湖心水深約6.5mである。中浦水門から米子湾方向に谷地形が形成されている。米子湾を除くと中海は約7km四方の正方形を形成しており、米子空港沖(中海北東側)から大橋川方向に向って勾配約1/3000で浅くなっている。塩分、水温、密度躍層の位置は年間を通じて大きく変化せず、湖内全域において水面下3~4mにある。中海下層の塩分濃度は25~30数

* 正会員 工博 広島大学助手 工学部第4類地域環境工学講座 (〒739 広島県東広島市鏡山1-4-1)

** 正会員 PhD, 工博 広島大学教授 工学部第4類地域環境工学講座 (〒739 広島県東広島市鏡山1-4-1)

*** 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 島根県出雲市塩冶有原町5-1)

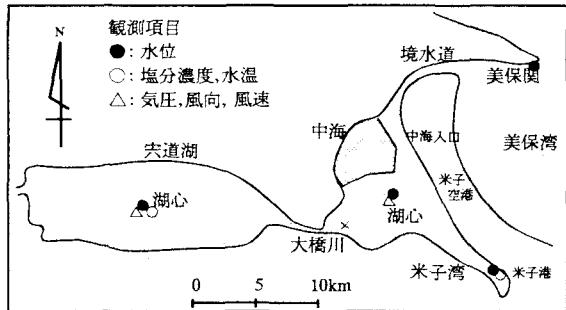


図1 中海周辺の地形

%である。上層の塩分濃度は約10~20%の範囲で変動をしている。水温は湖底で約10~28°C、水面で約6~30°Cまで変化するが、上下層での水温差は最大で5°C程度である。春と秋には上下層の水温の逆転が起こり、これに要する時間は2ヶ月程度である。夏に上層で水温が高く、冬になると下層で水温が高くなる。このため、密度躍層は夏に明瞭になり、冬になると密度勾配が緩やかになる傾向にある。

(2) 日々の気圧配置(天気)変化と水位との関係

外海～中海～宍道湖水位は1年周期の気圧配置(分布)の変化に良く追随しており、暖候期に高く、寒候期に低くなっている⁹⁾。日スケールでは、日々の天気の変化のみならず、天文潮や地形形状等の影響を受け、水位変化の振幅や位相が外海～中海～宍道湖の各々の水域で異なるため、様々な水理現象が現れている。図2は1993年11月に観測された美保湾(観測地点:美保関)、中海湖心、米子港口、宍道湖湖心での水位の経時変化を示している。図3は23日と24日の地上天気図である。観測期間は低気圧と高気圧が中海上空に交互に去来しており、約1010 hPa～約1030 hPaの範囲で気圧が変化している。これに伴って中海周辺水域の水位が変化している(図では30~50cm程度)のがわかる。また、地形の特性上、外海と中海では約2時間、中海と宍道湖では約6時間の水位変化の遅れがあり、宍道湖では天文潮による水位の変化量は数cmの程度である。このため、宍道湖と中海では低気圧、あるいは高気圧の通過に伴って数日間に亘り水位差が生じる場合がある。

(3) 水位変化に伴う中浦水門での流れの特性

図4は図2と同時期に観測された中浦水門での流向と流速(アンデラーフロー流向流速計(インペラ型)によって固定測定)を示している。観測地点の水深は約7mで測定点は湖底上1m(底層)と水面下1m(表層)である。表層の流向は○、流速は破線、底層の流向は●、流速は実線で示されている。表層の流れ(○)は観測期間を通じて流出方向(外海方向)にある場合が多く、流速(破線)は半日周潮の水位変化に依存している(流出時に流速は大)。底層においては流速は数cm/secの程度で流向はばらついているが、流向は流入傾向にある。低気圧の通過に伴って美保湾の水位の上昇が継続すると、表層においても中海へ海水が流入し、底層の流速は10cm/secを越えている。図5は1994.11/7 10:00~8.10:00の中浦水門での流速、流向の鉛直分布の経時変化(1.5時間間隔)を示している。流向・流速は1m毎に移動測定されている。また、同時期に観測された外海水位および風向・風速を図5(c)に示している。図5に示した期間は図4に示した期間と異なり、高

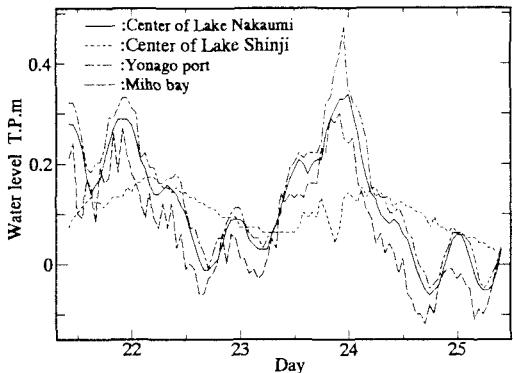
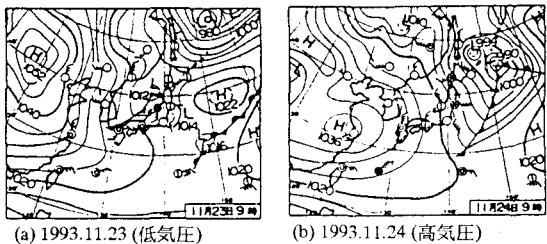


図2 美保湾、中海湖心、米子港口、宍道湖湖心における水位の経時変化(1993.11)



(a) 1993.11.23(低気圧) (b) 1993.11.24(高気圧)

図3 地上天気図(冬型の気圧配置)

(23日に日本海で発生した低気圧は発達しながら東進している。)

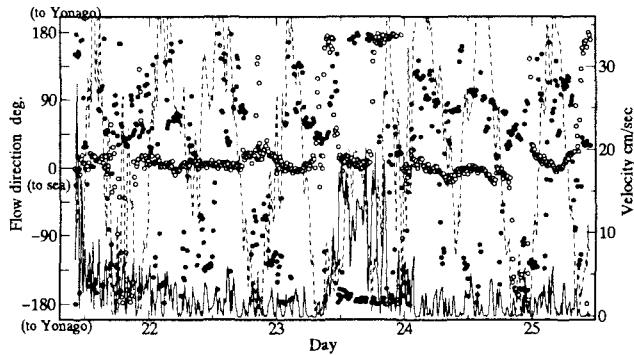
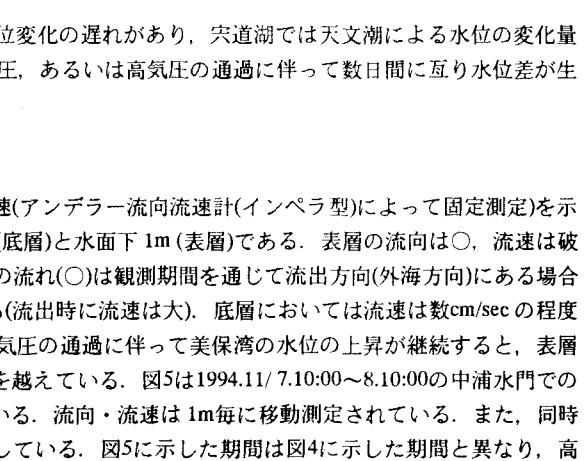


図4 中浦水門での流向・流速の経時変化(1993.11)

(○は表層の流向、●は底層の流向、破線は表層の流速、実線は底層の流速を表わしている。)



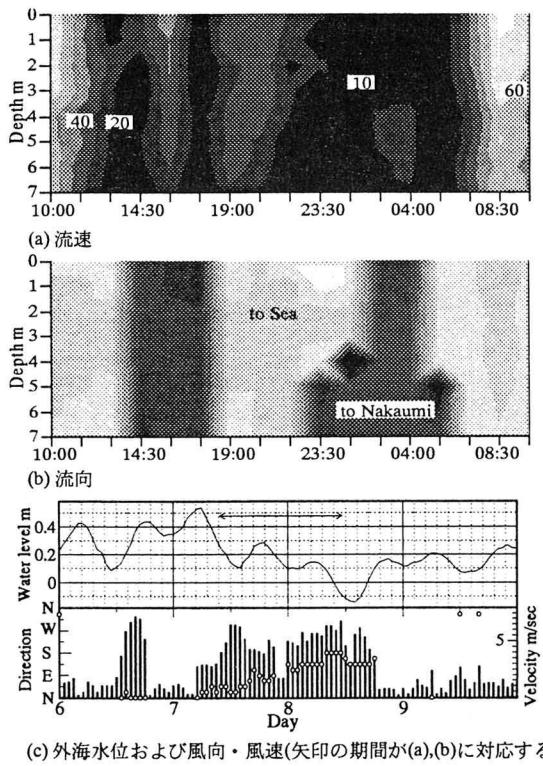


図5 流速、流向、塩分濃度の鉛直分布の経時変化
(1994.11.7 10:00-8.10:00, 中浦水門)

気圧が本州上空に発達(中海周辺での気圧は約1028hPa)しているため、水位は下降し(約60cm/30時間)、東成分の風が吹いている。この期間は水位が下降傾向にあるために全体として流出方向にある。しかし、図4の場合と同様に外海に湖水が流出する時には上層で流速が速く、海水が中海に流入する時には下層で流速が速くなる傾向にある。これらのことから中浦水門では外海水位の変化によって卓越する流れ方向はあるが、中海から日本海に湖水が流出する時には上層、海水が流入する時には下層が速い(海水は湖底から入り、淡水は上層から出る)傾向にあることがわかる。

3. 移動性の高・低気圧の去來に伴う中海内での流れ

(1) 高気圧の通過によって生じる中海での流れ

a) 中海と宍道湖湖間の水位差による流れ

図6に1994年11月に観測された中海湖心と宍道湖湖心での水位、図7には11月15日と17日の地上天気図を示している。高気圧の数日に亘る発達によって中海および宍道湖湖心の水位が50cm以上低下し、通過後(気圧の谷)に水位が上昇する

のがわかる。図8と10には中海湖心、宍道湖湖心および米子港口での塩分濃度(表層、中層、底層)の変化を示した。図6からわかるように15日02:00から16日12:00まで宍道湖湖心水位が中海湖心水位よりも高くなっている。宍道湖から中海への流れが生じていることが予想される。一方、中海湖心表層での塩分濃度は16日22:00から低下している。16日22:00以前に約22‰であった表層塩分濃度が約15‰となっており、宍道湖の塩分濃度が9‰(図8(b))であることから中海湖心上層(0~1.5m以内)に流入した低濃度の塩水は宍道湖から流入したものと考えられ、宍道湖出口から中海湖心までは約14kmであることから平均約9cm/secの速度の流れがあったと推定される。

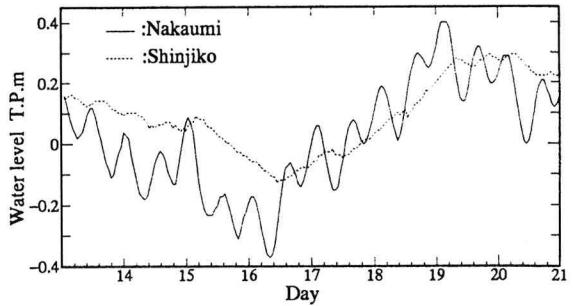


図6 中海及び宍道湖の水位変化(1994.11)

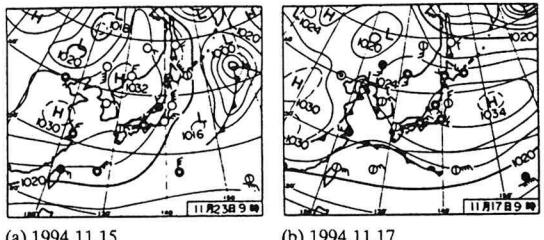


図7 地上天気図
(高気圧は13日頃から勢力を強め、16日頃から東進した。)

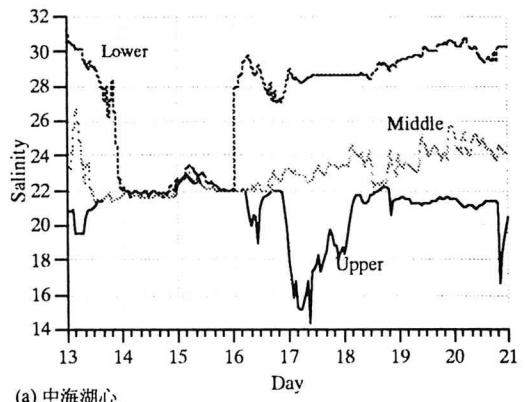


図8(a) 中海湖心

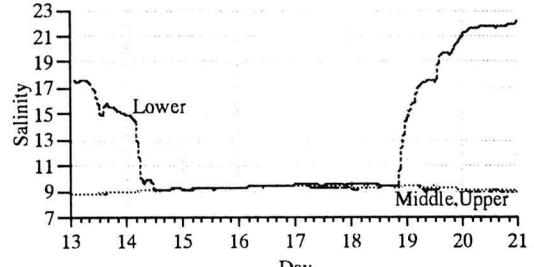


図8(b) 宍道湖湖心

図8 塩分濃度の経時変化(1994.11)

b) 界面の挙動

図9には米子湾の縦断方向の断面図が示されている。これまでの観測から無風時の米子湾での躍層の位置は図中の破線で示した付近であることがわかっている。なお、●は図9に示す米子港口での塩分濃度の観測地点である。図11と12には図6と同時期に中海湖心で観測された風向・風速および中海湖心と米子港口との水位差の経時変化が示されている。図12中の実線は実測値、破線は計算値を示しており、計算値は二成層の一次元振動量を風応力から非粘性で長波近似のもとで定常解として求められている。観測期前半(16日頃まで)は発達した高気圧が日本上空を覆っている(図7(a))ために東方向の風が卓越しており、風速は10m/secに達している。図11と米子港口(図10)および中海湖心(図8(a))での塩分濃度の変化を比較すると、風が10m/sec程度に達すると中海湖心では中層の塩分濃度は上層の塩分濃度まで低下し、米子湾では下層→中層と塩分濃度は風が吹く以前の湖心下層の塩分濃度まで上昇している。さらに、この風速が持続すると、中海湖心では下層の塩分濃度が上層の塩分濃度と等しくなり、米子港口においても上層と下層の塩分濃度が等しくなっている。また、図12から10m/sec程度の東方向からの風によって湖心の水位が米子港口に比較して約2cm高くなっているのがわかる。

次に塩分濃度の回復過程を検討する。米子港口と湖心の両地点において風速が5m/secを下回り、水位が上昇し始めると同時に塩分濃度はもとの状態に回復している。なお、米子湾で回復後に塩分濃度が高くなっているのは高気圧の通過に伴った水位上昇によって海水が米子湾に流入したためである²⁾。

中海での塩分濃度の上昇下降は強い風の吹いている期間の現象であること、塩分濃度の回復時間が早いことから塩分濃度の変動は界面の運動との関連が強いものと予想できる。米子湾では湾外に向かう吹送流によって図9中に実線で示すように界面が上昇すると予想できる。また、米子湾を除く水域においても米子湾の場合と同様に吹送流によって界面勾配が形成されるものと考えられる。しかし、中海湖心では低塩分濃度の領域が水深4.5~5.5m以上(中海湖心水深は約6.5m、宍道湖湖心水深は約5.5mで表層、底層の観測位置は各々水面下1mと湖底上1mである)にまで及んでおり、湖心下層まで淡水が及ぶには躍層界面は1/1000以上の勾配を維持することが必要である。米子湾での躍層の勾配を考えると湖心と米子港口での水位差が約2cmであるから米子港口での躍層の上昇は約1.5m、界面勾配は約1/500($\varepsilon=1/100$)と計算される(米子港口での実測された躍層の上昇量は約3.5m)。この勾配が米子湾を除いた水域においても形成されれば図8に示した塩分濃度の変化は躍層界面の運動によって起こっていると言うことができる。宍道湖においても中海と同様に界面の上昇下降が考えられるが、下層の塩分濃度が回復するのは図6と図8(b)の比較からわかるように宍道湖湖心水位がピークとなる19日0:00時頃で、風速が小さくなった後も底層の塩分濃度が表層の塩分濃度と等しい状態が継続している。このことは宍道湖においては風のみでなく、中海方向からの流れの影響が強いことを示している。現在までの観測からは湖心部において躍層が1/1000以上の勾配を維持する現象や水位変動等の外力による平面的な躍層界面の勾配の形成機構を観測できていないが、今後、平面的な躍層界面の挙動に重点をおいた観測を実施する予定である。

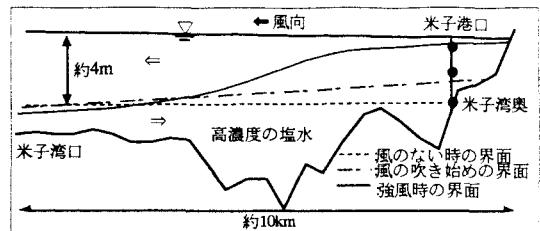


図9 米子湾の湖底形状と躍層位置
(●は塩分濃度の観測点を示す。)

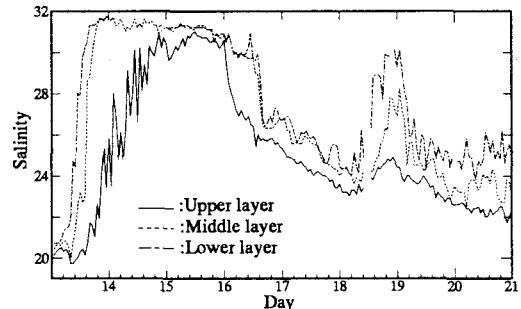


図10 米子湾奥(港口)での塩分濃度の経時変化 (1994.11)

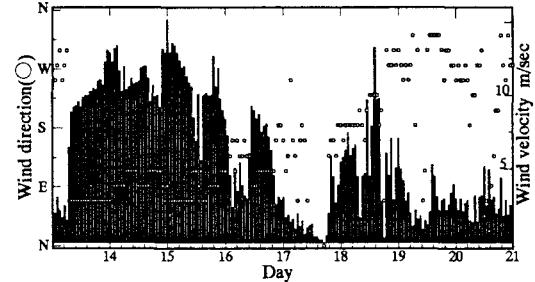


図11 風向・風速の経時変化 (1994.11)

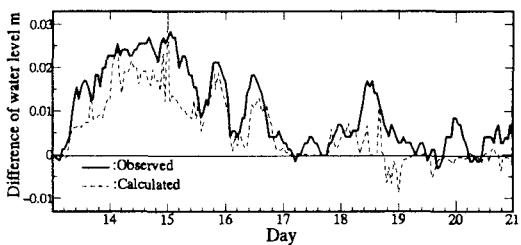
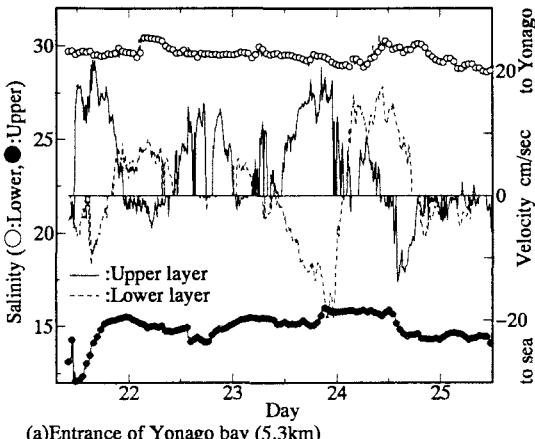
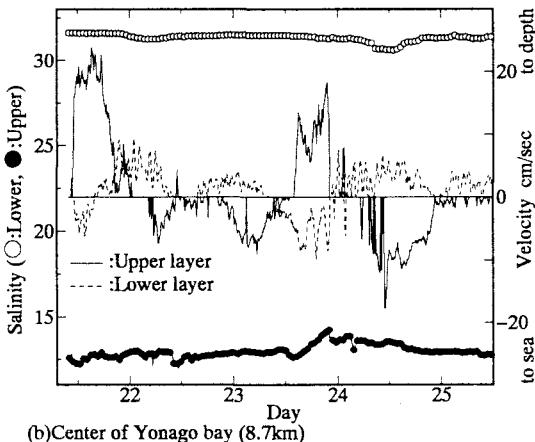


図12 中海湖心と米子港口の水位差 (1994.11)
(+側は中海湖心の水位が高い場合を表わす。実測値は6時間で移動平均されている(図15も同様。))



(a) Entrance of Yonago bay (5.3 km)



(b) Center of Yonago bay (8.7 km)

図16 米子湾内での流向・流速および塩分濃度の経時変化
(1993.11)

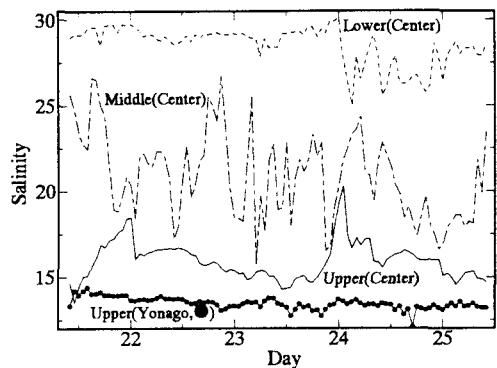


図13 中海湖心と米子港口での塩分濃度の経時変化 (1993.11)

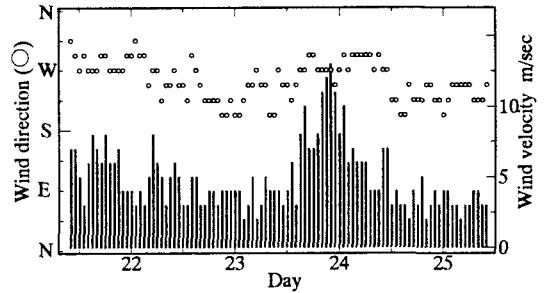


図14 風向・風速の経時変化 (1993.11)

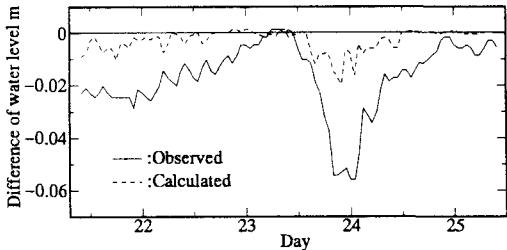


図15 中海湖心と米子港口の水位差 (1993.11)
(+側は中海湖心の水位が高い場合を表わす。図12と同様に整理した。)

(2) 低気圧の通過に伴う湖内の流れ

図13は図2に示した期間に中海湖心(底層:破線, 中層:一点鎖線, 表層:実線)と米子港口表層(●)で観測された塩分濃度の経時変化を示している。中層は躍層付近(水深は3.5~4m)

で測定されている。図14には中海湖心で観測された風向・風速、図15には中海湖心と米子港口での水位差(実測値:実線、計算値:破線)が示されている。図16は米子湾口と湾中央で固定観測された流向・流速(底層:破線、表層:実線)および塩分濃度(表層:●、底層○)の経時変化を示したものである。中浦水門からの距離は米子湾口まで約5.3km、湾中央までは約8.7kmである。図には湾奥方向(正)と外海方向(負)のみの流向・流速を示してある。

これらの図に示した期間には低気圧が日本上空に発達しながら東進し、高気圧の中心が九州南海上空を通過していくため(図3参照)、西成分の風が卓越し(図14)、かつ、中海周辺の水域では約30cm/20時間の範囲で水位が上昇下降している(図2参照)。図13と14から中海湖心の表層塩分濃度は、風速に呼応するように変化しているのがわかる。これに対し、底層塩分濃度は中海水位が下降(表層塩分濃度が低下)し始めたと同時に(24日00:00)低下し始めており、この塩分濃度の変化は混合ではなく、水位が低下したことと風が弱まったことによって湖心で躍層が下降したことによるものと考えられる。表層塩分濃度が水位、風速の増大とともに上昇するのは界面が上昇するためであり、これは中層塩分濃度が表層塩分濃度とともに上昇していることからもわかる。図15に示すように水位、風のピーク時には米子港口の水位は湖心水位に比較して約5cm高くなっている。水位差が高気圧に伴う場合の10倍程度あるにもかかわらず、界面の顕著な動きは観測されていない。低気圧に伴う水位差は計算によって求まる水位差よりも数倍大きいことや高・低気圧による界面運動の違いは中海の地形特性や水位変動に伴う米子湾への湖水の流入出によるものと考えられるが、水位変動や風が平面的な躍層の勾配の形成等に及ぼす影響については更なる検討を要する。

図2と図16を比較すると、水位の上昇期(流入期)には底層では湾外方向、表層では湾奥方向に向かう流れがあり、下降期(流出期)には底層で湾奥方向、表層では湾外方向に流れがあることがわかる。また、風も水位変化と密接に関連しており、西方向からの風は水位上昇期の流れを助長している。また、前述したように中浦水門では水位上昇期には底層から流入、表層から流出方向に向かう流れがあり、下降期には湖水は上層から美保湾に流出している(図4)。これらの流れをまとめると図17の様になる。(a)には水位上昇期、(b)には水位下降期の流れを示した。中海内の流れは、外海水位の変化の波形と風の強さによって決まるが、この2つの要因はいずれも気圧配置によっており、流れ場を明らかにするためには、気圧配置(日々の天気)の変化を見積もることが重要である。

4.まとめ

本論文では日スケールの気圧配置の変化が中海内での流れ場に及ぼす影響について検討し、中海内部の流れに対する気圧配置の変化に伴う水位変動と風の影響について明らかにした。これらの結果をまとめると以下のようになる。なお、ここでは11月の観測結果を用いており、これらの結果は本格的な冬型の気圧配置が安定する以前の気圧配置に基づく特性を有していることに注意を要する。

- (1)中海水位の変化は気圧配置に依存しており、中海内の流れ場は外海～中海～宍道湖の水位変化と風向・風速に依存している。
- (2)さらに、風は気圧配置によって決まっており、日々の天気の変化が中海の流れ場を支配すると考えられる。
- (3)中浦水門では外海水位の変化によって卓越する流れ方向はあるが、中海から日本海に湖水が流出する時には上層、海水が流入する時には下層が速い(海水は湖底から入り、淡水は上層から出る)傾向にある。

上記の結果に基づいて日々の天気変化によって起こる中海の流れ場についてまとめる。なお、ここでは天文潮の影響についてはふれていない。

(1)高気圧が発達した場合の流れ場

- a) 気圧が高くなると外海水位は低下し、湖水は外海方向へ主に上層から流出する。境水道(外海～中海間)と大橋川(中海～宍道湖間)では通水能力に差があるため宍道湖と中海との間に水位差ができる、宍道湖水の中海への流入が数日に亘って起こる。
- b) 高気圧が日本を覆うと東風が卓越し、中海上層では米子湾奥から湾外に向かう流れが生じる。この流れは水位変化による外海に向かう流れによってさらに助長される。この現象によって下層では米子湾奥に向かう流れが生じ、躍層界面は大きく傾く(湾奥で上昇する)。

(2)低気圧が発達した場合の流れ場

- a) 気圧が低くなると外海水位は上昇し、海水が中海へ下層から流入する。高気圧の発達期と同様に宍道湖と中海との間に水位差ができる、中海から宍道湖に向って流れが生じる。
- b) 日本上空に低気圧が移動してくると西風が卓越し、中海上層では宍道湖方向から湖心に向かう流れ、米子湾では湾奥に向かう流れ、下層ではその逆の流れが生じる。この流れによって中海湖心と米子湾奥では10cmを越える水位差が生じるが、これによる中海湖心での界面の変動量は高気圧の発達によって起こる場合に比較して小さい。

謝辞 本研究は河川環境管理財團河川整備基金助成の援助を受けている。ここに記して謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 日比野忠史: 連結系汽水域での流動 - 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.
- 2) 日比野忠史, 福岡捷二, 池内幸司: 連結系水系での水位変化と気圧配置, 土木学会論文集投稿中
- 3) 福岡捷二, 日比野忠史, 池内幸司, 徳山靖時: 閉鎖性汽水湖における物質の移動に関する考察, 平成8年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.183-184, 1996.
- 4) 気象年鑑 1994年版・1995年版, 気象庁監修, 日本気象協会編.

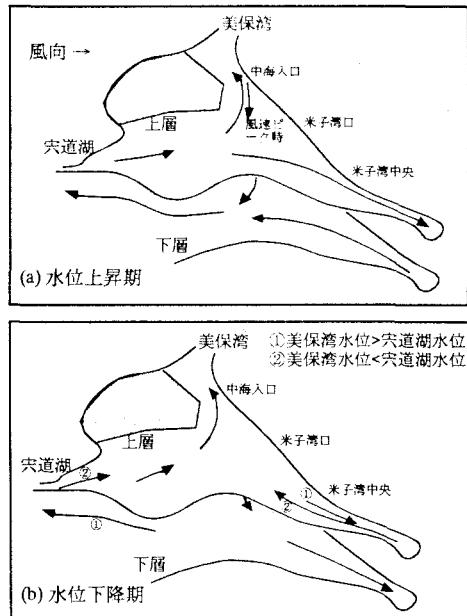


図17 低気圧の通過に伴う米子湾内での流れ