

中海における貧酸素水塊の挙動に及ぼす 流れ場の影響

EFFECT OF FLOW FIELD ON BEHAVIOR OF THE LOW OXYGEN MASS IN LAKE NAKAUMI

福岡捷二¹・鈴木篤²・黒川岳司³・中村剛⁴

Shoji FUKUOKA, Atsushi SUZUKI, Takeshi KUROKAWA and Takeshi NAKAMURA

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

²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)

³学生員 工修 広島大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

⁴学生員 広島大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

Enclosed brackish waters has stratified layers of fresh and salty water, so that dissolved oxygen in the bottom layer tends to be lack. Low oxygen state is becoming a serious water quality problem. In lake Nakaumi which is an enclosed brackish lake, flow regime and water quality were measured using ADCP, STD and other equipments. We studied the effect of flow, especially tide and wind-driven current, on behavior of the low oxygen mass.

The following results were obtained; (1) stable density stratum is formed in all area, and the vertical distribution of dissolved oxygen is closely dependent on this density stratum. (2) intrusion of low oxygen water into the upper part of bottom layer is caused by current distribution which is associated with high turbidity layer over the bed. (3) behavior of the low oxygen mass is complicated, because of it's transportation by tide and wind-driven current.

Key words : enclosed brackish lake, low oxygen water mass, density stratum, dissolved oxygen, turbidity

1. はじめに

閉鎖性の内湾や湖沼では、その地形的特徴から、水域内の水が交換されにくく、富栄養化物質の滞留や底層水塊の貧酸素化等、好ましくない水質環境が起りやすい。このような閉鎖性水域のうち、中海のような海域に隣接し海水の侵入を受ける汽水湖では、密度分布が水温と塩分に依存するため、安定した密度躍層が形成される。このため、淡水湖に比べて上下層間での循環が起りにくく、底層部の貧酸素化を招きやすい。底層部の貧酸素化は、直接的に生態系に負の影響を与えるだけでなく、間接的にも底泥から窒素、リンなどの栄養塩類の溶出を促進して水域の富栄養化に影響を与える。中海においても、毎年のように赤潮や青潮などが発生し問題化してい

る。

このような水質問題は化学的、生物学的な解析のみならず、流れとの関連を明確にしなければ、効果的な対応策・解決策を講じることは出来ない。このような考えから、著者ら¹⁾²⁾は中海において ADCP, STD 等を用いた流れ場の観測を行い、外海（日本海）の水位変動や風が、そこでの流況にどのような影響を与えているか検討している。

そこで、汽水湖での水質と流れ場との関係を明らかにし、水質改善対策につなげることを最終目標に、研究をスタートさせた。すなわち、ADCP 等を用いた詳細な流動観測と、溶存酸素や濁度などの水質観測を行い、水質悪化に関わる貧酸素水塊の挙動に及ぼす流れ場の影響について考察した。

2. 観測概要

(1) 中海の地理・地形環境

中海は図-1 に示すように、主に宍道湖・大橋川から淡水が流入し、日本海から海水の侵入を受けている閉鎖性の汽水湖である。水面面積は 86.2km²で、わが国の湖沼では第 5 位、汽水湖ではサロマ湖に次いで 2 番目に大きい。水深は湖心において約 6.5m であるが、中浦水門から米子湾方向に谷地形が形成され、数カ所の窪地部分を有し、最深部では約 16m に達している。この谷地部分を除けば、大橋川方向に向かって勾配約 1/3000 で浅くなっている。

中海の南東部に細長くのびる米子湾は閉鎖性が高い上、米子市の生活排水の流れ込みがあるため、中海において最も水質の汚濁レベルが高い水域となっている。

(2) 観測方法

1996/11/29～30 の中潮期において 2 潮汐間の流動および水質観測を行った。図-1 は中海における観測断面を示す。流動については、St.1～10 (●印) の上層 (水面下 1m) と下層 (湖底面上 1m) に流向流速計、中海湖心と米子湾 (■印) に水位計を設置し観測を行った。また LineA, E, F, G に沿って ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) を用いて 2 時間毎に移動観測により断面流況を調査した。水質に関しては、LineA～G 上でそれぞれ 3～7 点ずつ観測点を設置して多項目水質センサー (以下、STD) を用いて塩分濃度、水温を、さらに観測点のうち St.1～10 では DO 計を用いて溶存酸素濃度および飽和度を、それぞれ 2 時間毎に計 13 回、鉛直分布を計測した。また、中海湖心および米子湾 (■印) では、溶存酸素濃度と濁度を鉛直方向 5 測点について連続観測を行った。風向・風速のデータについては、中海湖心での観測値を採用した。

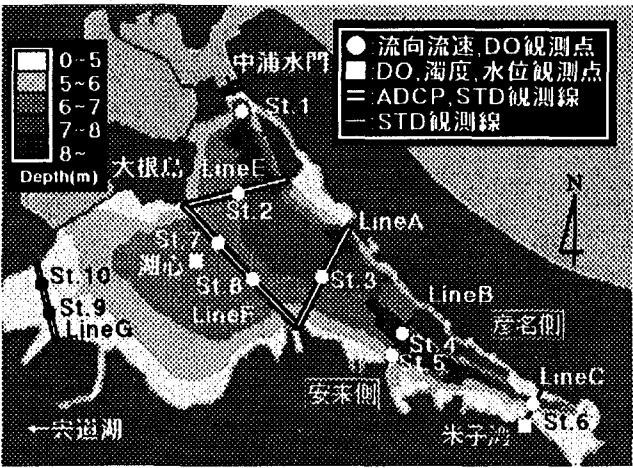


図-1 中海における観測断面

3. 観測結果および考察

(1) 中海における密度躍層および貧酸素水塊の分布状況

中海の各測点において、塩分濃度、水温および溶存酸素飽和度の鉛直分布を 2 時間毎に計測している。図-2 には、このうち 1996/11/30 1:30 頃における溶存酸素濃度および塩分濃度、水温から算出した密度の鉛直分布を代表的な観測点について、中浦水門から米子湾奥に向かう位置関係になるように、左側から配列し、示している。中海全域にわたり明瞭な密度躍層が存在し、密度について安定した成層構造を有していることが確認できる。また、St.1 を除き、これらの密度躍層界面の位置と溶存酸素濃度が大きく変化している水深がほぼ一致している。このことから、溶存酸素濃度の鉛直分布は密度分布への依存性が非常に高いことがわかる。ところが、St.2 では下層における溶存酸素濃度の鉛直分布が他の断面と異なっている。このような下層における溶存酸素分布の成層化は St.2 を中心に St.3, 7, 8 でしばしば観測されたが、その分布の持続性は低く、この観測

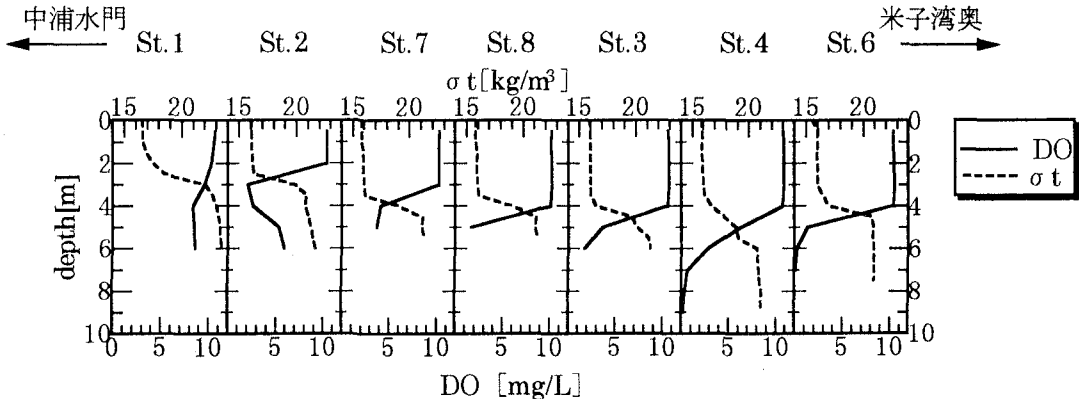


図-2 1996/11/30 1:30 頃における溶存酸素濃度と密度 σ_t の鉛直分布

期間中に刻々変化していた。

図-3は、図-2で挙げたのと同様の観測点について、上層（水面下1m）と下層（湖底上1m）における溶存酸素飽和度の13回にわたる観測値の平均値と標準偏差を示す。上層においては、中海全域にわたって溶存酸素はほぼ飽和状態で、変動も小さく安定している。これに対し、下層においては、米子湾奥に向かうほど溶存酸素は低下し、その変動量も米子湾内（St.4, 6）では小さいことから、この観測期間においては米子湾の下層部に安定した貧酸素水塊が存在していたことが確認できる。

(2) 貧酸素水塊の挙動に及ぼす潮汐の影響

図-2で示したように、11/30 1:30頃、St.2の下層では溶存酸素分布に強い成層化が観測されている。この時刻近く（11/30 0:40～1:15）でのADCPによるLineE（St.2上）でのライン直交成分の断面流速分布を図-4に示す。流向は正が外海への流出方向、負が流入方向を表している。なお、この時刻前後では、図-8に示すように風速が1.5～2.2m/s程度ではほぼ無風状態にあり、風の影響は小さいものと考えられる。

この時刻は上げ潮時であり、中浦水門から海水が流入しやすい時間帯である。そのため、LineEにおいても上層から下層にわたり全体的には流入傾向にある。しかし、水深3～4.5mあたりで逆に流出方向に流速を持っている。この位置は、図-2に示すようにSt.2（LineE上）での、この時刻における下層の上部に当たっており、溶存酸素濃度が極小となっている位置ともほぼ一致している。また、ここでの溶存酸素濃度が2mg/L程度とSt.7におけるそれよりも低いことなどから、米子湾内の下層に存在していた貧酸素水塊が潮汐に起因すると思われる下層の流れに乗って輸送されてきて、下層上部の溶存酸素濃度が低下したものと考えられる。

一般的に、中海のように密度が安定的に二層化した水域では、風や潮汐などの外力に励起され躍層界面が傾斜し、長周期の振動が起こることにより上層と下層で流向が反対となる二成層流となる³⁾。しかし、図-4に示すような溶存酸素の鉛直分布に影響を与える流向・流速分布が多層化する現象は、今回の観測期間中にもしばしば観られ、過去の観測においてもよく確認されている²⁾。また、この現象は主に下層でみられている。流向・流速分布の多層化は鉛直方向における密度変化に起因していることから、この水域の下層で鉛直方向に密度変化があることが考えられる。しかし、図-2を例にしても判るように、塩分濃度と水温から算出した密度分布からは下層に

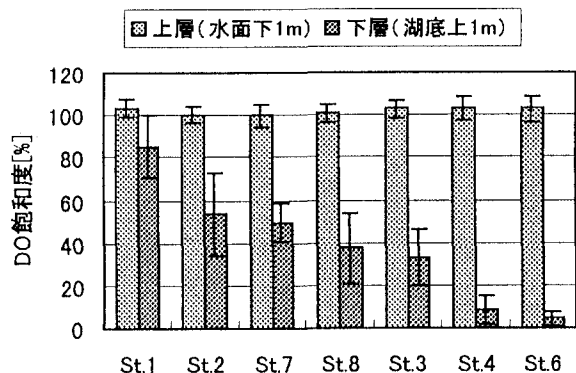


図-3 上層（水面下1m）および下層（湖底上1m）における溶存酸素飽和度の平均値

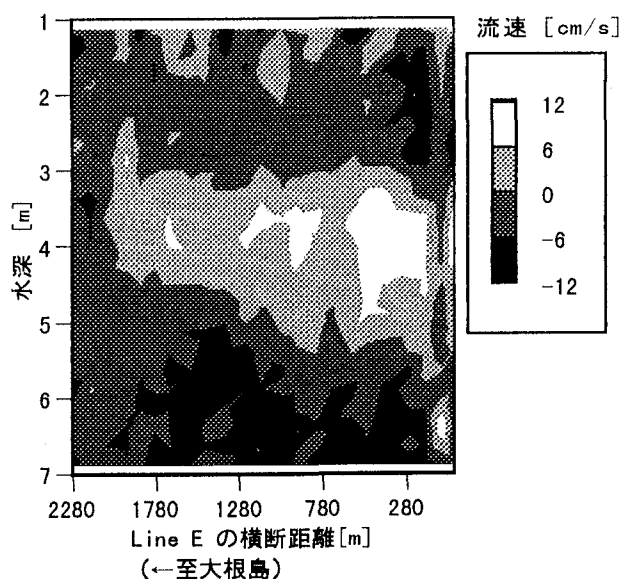


図-4 Line E でのライン直交成分の断面流速分布（11/30 0:40～1:15）

において大きな密度変化は見られない。したがって、塩分濃度と水温以外に密度変化を補償する存在があることが推測される。淡水湖などにおいては水温差によって成層した場合、巻き上げなどによって発生した濁水塊が、その密度に対応した深度に層を形成して水平貫入する現象が観られる⁴⁾。このように、汽水湖においても濁度が下層における密度変化に影響していると考えられる。図-5に中海湖心で観測された濁度の時系列グラフを示す。中海湖心において、日中に上層の濁度が下層より高くなっている。これは上層に多く存在する植物プランクトンの光合成による増殖が原因と考えられる。下層での濁度形成の過程の一つに、上層からの濁度成分（デトリタス）の沈降が考えられるが、これは沈降速度が一般に非常に遅いため、沈降途中、上層や躍層内で多くが分解されたり、流れによって時間的に一様化されて周期性は小さくなるなどのため、下層の濁度変化に対する上層の濁度変化の影響は小さいものと考えられ

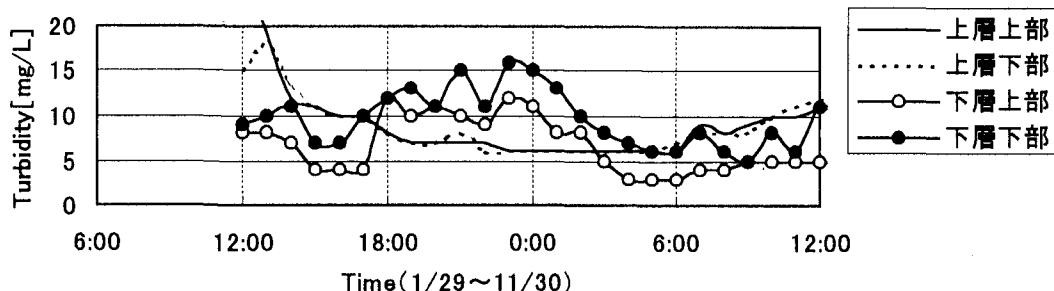


図-5 中海湖心における濁度変動

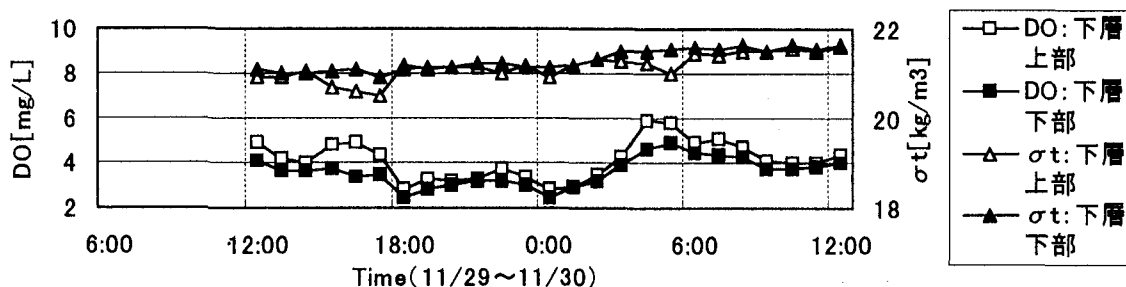


図-6 中海湖心における下層での溶存酸素濃度および密度変動

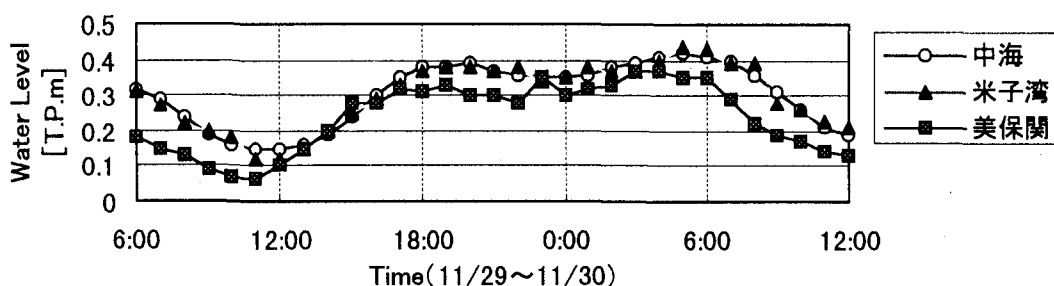


図-7 中海湖心、米子湾、中浦水門における水位変動

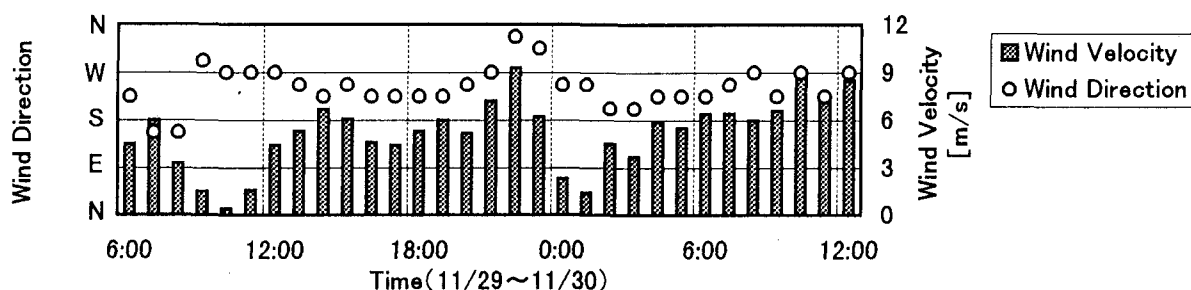


図-8 観測期間中の風向・風速

る。一方、下層においては、下層下部は下層上部に比べて常に濁度が高い。この結果から、中海湖心において下層下部に浮泥層といった層が存在することが確認できる。これは流れによる底泥の巻き上げによって生じていると考えられる⁵⁾。この浮泥層の存在が下層内における鉛直方向に密度変化を与え、流向・流速分布の多層化に起因していると考えられる。

また、今回の観測においては確認していないが、この下層下部での浮泥層がより貧酸素化すれば、底泥の巻き上げ以外にも、リン・窒素といった栄養塩類や鉄、マンガンなどの還元性の金属イオンが溶出

してくる。このような溶存性物質も高度に溶出してくると、濁度成分以外でも密度分布に影響を与えると考えられる。実際に、貯水池での例ではあるが、貧酸素化した底層から溶出した鉄、マンガン、栄養塩などが密度を増加させることにより水温逆転層を形成し、この不安定浮力勾配を補償している観測例が報告されている⁶⁾。

図-6 に図-5 と同様に中海湖心下層の上部、下部での溶存酸素濃度と密度の経時変化を示す。また、図-7 に観測期の中海湖心、米子湾および外海である美保関の水位変動を示し、図-8 に風向・風速の経時

変化を示す。図-5 および図-6 から、濁度と溶存酸素濃度の変動周期は同じである。さらに、図-7 に示すように外海からの海水の流入期である上げ潮時に濁度低下、溶存酸素上昇が起こり、逆に海水の流出期（下げ潮時）に濁度上昇、溶存酸素低下が起きている。例えば、上げ潮期の最後（海水の流入期）の11/29 17:00 頃と11/30 5:00 頃に、下層上部で顕著に溶存酸素濃度の上昇と濁度の低下が見られている。これらのことから、高濁度で溶存酸素が低い水塊と低濁度で溶存酸素が高い水塊が交互に中海湖心下層に去来している現象は、主に潮汐による往復流によって生じていると判断できる。

(3) 貧酸素水塊の挙動に及ぼす風の影響

中海のような成層状態にある閉鎖性水域に風が吹くと、上層水の吹き寄せ（吹送流）に起因して、下層水の湧昇や躍層の崩壊などが起こることがある。このような上層水と下層水の混合現象は貧酸素水塊の解消作用の一つとして重要と考えられる。また、中海では観測期間にも当たる中潮期においては、気象潮が天文潮より卓越しやすいことが明らかにされている²⁾。観測期間中は、図-8 に示すように全体的には2~6m/s 程度の南西風から西風が卓越していたが、11/29 23:00 頃においてのみ9m/s 程度の強い北西風が吹いていた。そこで、この強い北西風が卓越していた時刻について、貧酸素水塊の挙動に及ぼす風の影響を考察する。

図-9 に北西風が吹いていた11/29 23:00 頃のLineFでの密度と溶存酸素飽和度の鉛直分布を示す。図-10 にその時刻付近で ADCP より得た LineA, E, F における上層（水深2.37m）および下層（水深5.37m）での流速ベクトル図を示す。

この時の9m/s 程度の強い北西風によって、図-10 に示すように、流れ場全体において上層（水深2.37m）では南東方向、下層（水深5.37m）では北西方向に流速ベクトルを持っている。この時は高低潮に向かう潮位変動が小さい海水の流出期で、潮流の影響が小さい期間にあるため（図-7）、この流れは吹送流が卓越した流れと考えられる。この吹送流によって、図-9 に示すように、LineF において躍層の位置は北西方向（大根島方向）に向けて上昇している。この勾配上昇の大きさは、風速が小さい時（図-2；St.7 と St.8 の密度躍層の位置関係から勾配は小さい）との比較から明らかである。しかし、界面の状態は安定したままで、密度と溶存酸素飽和度の鉛直分布はともにあまり破壊されていない。

このような二成層化した湖沼に風が作用した場合に起こる密度界面の挙動や混合形態は、Spiegel・

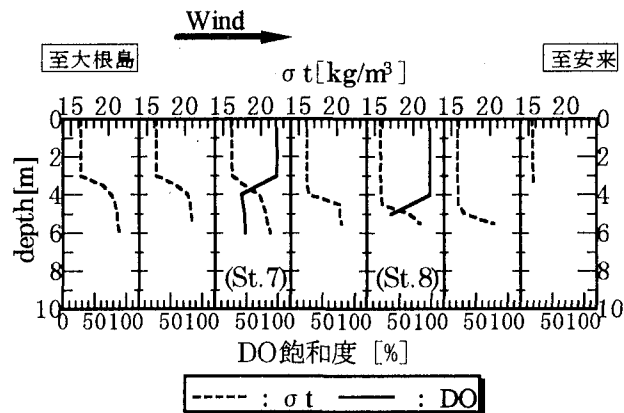


図-9 11/29 23:30 頃の Line F における密度と溶存酸素飽和度の鉛直分布

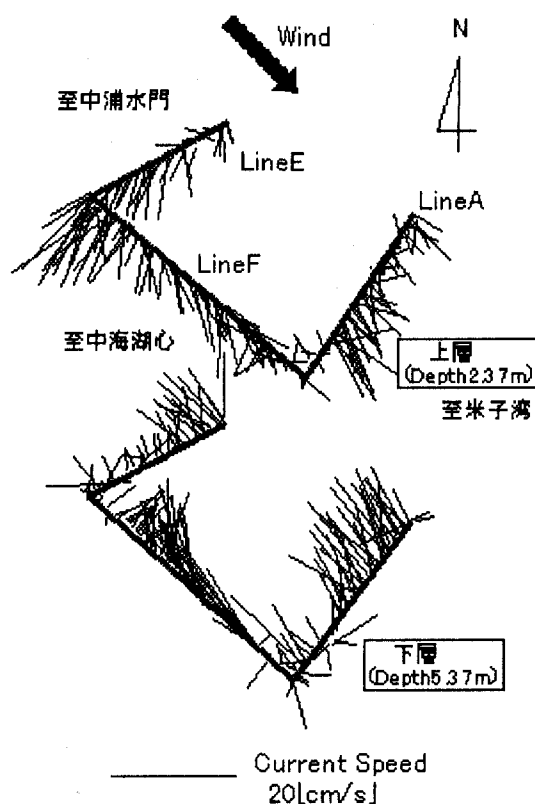


図-10 Line A, E, F における上下層の流速ベクトル図 (11/29 23:30 頃)

Imberger⁷⁾ によって分類、説明されている。これは成層度の指標であるリチャードソン数 Ri_* と湖沼形状を表すアスペクト比 L/h (L : 吹送距離, h : 水深) をパラメータとして、流動形態を4つに区分 (Regime A~D) したものである。リチャードソン数は $Ri_* = \Delta \rho \cdot g \cdot h_0 / \rho \cdot u_*^2$ で、吹送流の摩擦速度は $u_* = (C_D \cdot \rho_a \cdot U_{10}^2 / \rho)^{1/2}$ で定義される。式中の $\Delta \rho$ は上層水と下層水の密度差 (>0)、 g は重力加速度、 h_0 は上層水深、 ρ は上層水の密度、 ρ_a は空気密度、 U_{10} は

水面上 10m での風速, C_D は抵抗係数 (通常 1.3×10^{-3}) である. 観測された LineF ($L=4200\text{m}$, $h=7\text{m}$, $h_u=4\text{m}$, $\Delta\rho=5\text{kg/m}^3$, $\rho=2016\text{kg/m}^3$) 上において, 9m/s 程度の強い北西風が生じていた時の Ri_* はおよそ 2000 となる. これは流動形態の区分では Regime B ($L/2h < Ri_* < (L/2h)^2$) に分類される. なお, 吹送距離 L を中浦水門から米子湾奥に至る約 13km に設定しても Regime B の区分に入る. Regime B に分類される流動形態は, 躍層界面が傾斜することにより, 内部静振が誘発されて連行が促進されるが, その範囲は風上側に限られる. したがって, 上層水と下層水の混合はあまり活発ではないとされている⁹⁾. 本観測においても, 風上側 (大根島方向) ほど躍層が緩やかになっている (図-9).

また, この時の貧酸素水塊の輸送は, 下層における溶存酸素飽和度が 45~50% と比較的高いことから, これらの下層での水塊は米子湾下層部の貧酸素水塊が輸送されてきたものではない. これは, 安来沖で吹き寄せのため上層水が下層へ潜り込んで輸送されてきたか, あるいは lineF の下層での流向がライン上より北方向に向いていることから, 湖心付近に存在していた水が輸送されてきたこと等が推測される.

このように, 貧酸素水塊の挙動に及ぼす風の影響は, 風速 9m/s 程度の風による吹送流では, 上下層の密度差が高く, 安定した密度躍層はあまり破壊されなかった. したがって, この程度の吹送流では上層水と下層水の混合はあまり起こらず, 水平方向に流れに乗って貧酸素水塊は輸送されたと解釈できる.

4. おわりに

底層部の貧酸素化などの水質問題を抱える閉鎖性汽水湖である中海において, 1996/11/29~11/30 に ADCP 等を用いた詳細な流動観測とともに, 溶存酸素や濁度などの水質観測を行った. そこで, 密度躍層下部に存在する貧酸素水塊の挙動に及ぼす流れ場の影響, 主に潮汐と吹送流の影響について検討した. この結果, 以下のような知見を得た.

(1) 観測期間において, 中海全域で安定した密度躍層が形成されており, 溶存酸素の鉛直分布はその密度躍層への依存性が高い. その濃度は上層では全域でほぼ飽和に達している. 下層においては, 米子湾方向に徐々に低下し, 中海湖心や中浦水門付近では変動が激しく, 湾奥では安定した貧酸素水塊の存在が認められた.

(2) 貧酸素水塊の挙動に及ぼす潮汐の影響は, 潮汐による海水の流入によって, しばしば下層内で流向・流速分布の多層化が起こり, 溶存酸素の鉛直方

向分布が生じることがある. 下層において流向・流速分布が鉛直方向で多層化する原因の一つは, 下層下部の浮泥層が, 下層内の濁度の密度分布を形成するためと考えられる.

(3) 貧酸素水塊の挙動に及ぼす風の影響は, 風速 9m/s 程度の風では, 吹送流によっても安定した密度躍層はあまり破壊されないため上層水の下層への連行は少なく, 流れに乗って水平方向に貧酸素水塊は輸送される.

謝辞

本研究を行うにあたり, 運輸省港湾技術研究所の日比野忠史博士には有益な助言を頂いた. ここに記して, 深甚なる謝意を表します.

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, 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, Vol.39, pp.243-248, 1995.
- 3) 池永均, 山田正, 内島邦秀, 大島伸介, 向山公人, 平野道夫, 井出康朗, 田村圭司: 網走湖における塩淡水成層の形成と挙動に関する研究, 水工学論文集, Vol.40, pp.589-594, 1996.
- 4) 森川浩, 大久保賢治, 村本嘉雄, 江副哲: 成層湖における濁水貫入層の形成機構, 水工学論文集, Vol.41, pp.489-494, 1997.
- 5) 安田秀一, 高杉由夫, 奥村康昭, 大久保賢治, 熊谷道夫: 閉鎖性水域の底層における流動と濁度の変動特性—瀬戸内海と琵琶湖の流動・濁度観測調査から—, 海岸工学論文集, Vol.42, 1126-1130, 1995.
- 6) 道奥康治, 神田徹, 伊藤達平, 西川孝晴, 石川勝久, 東野誠: 底部に逆転水温層を有する部分循環貯水池の水質構成に関する研究, 土木学会論文集, No.572/II-40, pp.33-48, 1997.
- 7) Spiegel, R.H. and J.Imberger: The classification of mixed-layer dynamics in lakes of small to medium size, J. phys. Oceanogr., Vol.10, 1104-1121, 1980.
- 8) 中辻啓二, 長坂誠司, 村岡浩爾: 東京湾の青潮の発生機構に関する基礎実験, 水工学論文集, Vol.35, pp.89-94, 1991

(1997. 9. 30 受付)