

漂流版追跡による中海の流動観測の一例

森脇晋平¹・大北晋也²・藤井智康³

Current fluctuations in Lake Nakaumi measured with the current drogue

Shimpei Moriwaki¹, Shinya Ohkita² and Tomoyasu Fujii³

Abstract: We report the current fluctuations in Lake Nakaumi, an enclosed brackish water body with a two-layered structure in western Japan. The study is based on the data derived from velocity measurements made by a method employing a current drogue placed in water and following it on a ship. In spite of a few exceptions that occurred under certain geographical or hydraulic conditions, the following inferences were made from the study: (1) remarkable changes in the surface current occurred with fluctuations in the sea wind, (2) surface water flowed in the direction of wind at a speed of c. 2% of the sea wind velocity, (3) the bottom currents moved clockwise under the influence of the tidal changes, and (4) the velocities of the bottom currents ranged between 3.9 and 5.3 cm/s.

Key words: Nakaumi, current, wind, water level, current drogue

はじめに

中海は中浦水門から進入する日本海由来の海水と大橋川から流入する河川系水とによって、周年にわたって強固な密度躍層を形成する特異的な海洋構造を示す。この躍層は強風によっても破壊されることはない(福岡ほか 1999)。このため暖候期には中海下層に進入した海水は有機物の分解による酸素消費により急速に貧酸素化する(例えば森脇・大北 2003)。貧酸素化した水塊は漁場の劣化に影響をおよぼす最も大きな要因のひとつであり、今後の環境修復を積極的に推進していくためにもその実態を解明していく必要がある。

この貧酸素水塊の挙動を明らかにするためには中海の流れ場の実態—海水交換の過程—を解明することが重要な課題のひとつである。流れの構造を把握するにはいくつかの方法があるが、その中のひとつ

の漂流版を追跡するいわゆるラグランジュ的観測は、「もの」の行方や変質を把握する場合には確実に有効な手法である(杉本・森永 1991)。しかしながら、中海においてラグランジュ的測定が実施されたのは数例であり(横山ほか 1997, 福岡ほか 1997)、得られた知見も断片的なものにとどまる。このような背景から、筆者らは中海において漂流版追跡調査を実施したが、今回その結果を報告する。

調査方法と資料

調査対象海域の中海の地理的概要を図 1 に示した。

今回の調査で用いた測流方法は試験船で漂流版を追跡するラグランジュ法である。各調査期間中、島根県内水面水産試験場所属の調査船(8.5 総トン)によって漂流版を投入し、これを追跡することによ

¹ 島根県内水面水産試験場 Shimane Prefectural Inland Fisheries Experimental Station, Hirata, 691-0076, Japan

現所属：島根県水産試験場 Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Hamada, 697-0051, Japan

² 島根県内水面水産試験場 Shimane Prefectural Inland Fisheries Experimental Station, Hirata, 691-0076, Japan

³ 日本ミクニヤ(株) Mikuniya Corporation, Hiroshima, 734-0015, Japan

表 1. 1 m 深における漂流版追跡の概要.

Table 1. Data on the current drogue tracking at 1 m depth in Lake Nakaumi.

Series No.	Date	Launching		Recovery		Duration (h)	Direction (T°)	Mean speed (cm/s)	N-Comp. (cm/s)	E-Comp. (cm/s)
		(N)	(E)	(N)	(E)					
1	7-8 Nov.2000	35° 27.690'	133° 10.498'	35° 27.669'	133° 08.670'	23.1	288	6.2	1.9	-5.9
2	24 Apr. 2001	35° 28.579'	133° 12.406'	35° 29.513'	133° 12.629'	6.7	12	11.7	11.4	2.4
3	25 Apr. 2001	35° 28.318'	133° 12.680'	35° 27.695'	133° 11.601'	4.1	237	14.4	-7.9	-12.0
4	26 Apr. 2001	35° 27.936'	133° 11.784'	35° 27.767'	133° 10.747'	7.8	260	8.9	-1.6	-8.8
5	27 Apr. 2001	35° 28.031'	133° 12.024'	35° 27.738'	133° 12.103'	4.7	167	3.6	-3.5	0.8
6	18 Jul. 2001	35° 27.778'	133° 11.212'	35° 28.068'	133° 10.243'	8.0	289	5.9	1.9	-5.5
7	19 Jul. 2001	35° 27.776'	133° 11.712'	35° 27.392'	133° 11.917'	5.0	155	4.7	-4.3	2.0
8	31 Jul. 2001	35° 29.648'	133° 12.343'	35° 30.485'	133° 12.448'	5.5	6	9.1	9.1	1.0
9	17 Sept.2001	35° 27.256'	133° 08.783'	35° 28.375'	133° 09.744'	6.9	37	11.3	9.0	6.8
10	18 Sept.2001	35° 27.819'	133° 10.380'	35° 28.105'	133° 10.433'	4.0	9	3.7	3.7	0.6

表 2. 5 m 深における漂流版追跡の概要.

Table 2. Data on the current drogue tracking at 5 m depth in Lake Nakaumi.

Series No.	Date	Launching		Recovery		Duration (h)	Direction (T°)	Mean speed (cm/s)	N-Comp. (cm/s)	E-Comp. (cm/s)
		(N)	(E)	(N)	(E)					
1	22 Nov.2000	35° 28.795'	133° 12.545'	35° 28.592'	133° 12.649'	5.0	156	4.9	-4.4	2.0
2	24-25 Apr. 2001	35° 28.560'	133° 12.392'	35° 28.457'	133° 12.652'	23.0	114	4.6	-1.9	4.2
3	26-27 Apr. 2001	35° 27.913'	133° 11.807'	35° 27.815'	133° 11.963'	23.8	126	3.9	-2.3	3.2
4	18-19 Jul. 2001	35° 27.735'	133° 11.161'	35° 27.683'	133° 12.563'	23.9	92	4.4	-0.2	4.4
5	31 Jul.-1 Aug. '01	35° 29.672'	133° 12.377'	35° 30.181'	133° 12.135'	22.6	343	5.3	5.1	-1.6
6	17-18 Sept.2001	35° 27.760'	133° 10.847'	35° 28.174'	133° 10.773'	22.7	351	4.6	4.6	-0.7

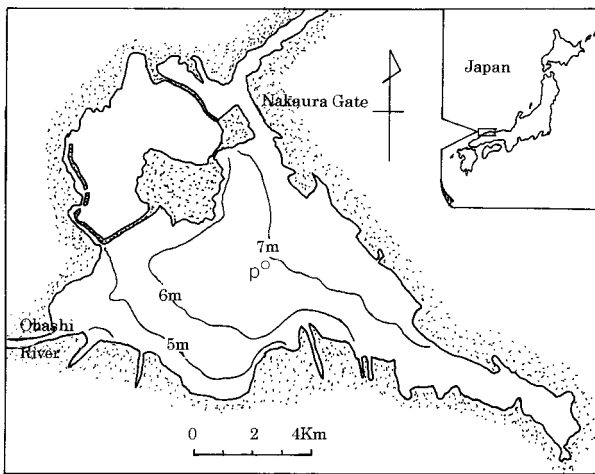


図 1. 調査研究場所の地理的概要.

Fig. 1. Location of the study area.

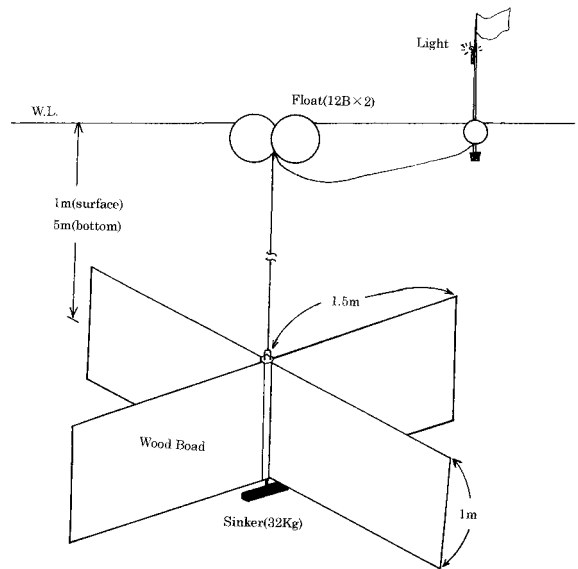


図 2. 調査に用いた漂流版の構造.

Fig. 2. Schematic diagram of the current drogue used for Lagrangian current measurement in Lake Nakaumi.

て流況を調べた。漂流版の位置は原則として投入後 1 時間ごとに試験船装備の GPS およびレーダーを併用して決定した。

測流に使用した漂流版の概要を図 2 に示したが、表層の測流には抵抗版の中心位置が水面下 1 m、底層の測流には水面下 5 m に設定した漂流版を用いた。漂流版を追跡できたのは表層で 10 シリーズ(表 1)、底層で 6 シリーズ(表 2)であった。漂流版の位置を決定するときに試験船に装備した風向風速計(海面上 4 m)によって海上風を観測した(表 3&4)

が、風向については流れの変動と対比するため「風の吹いていく方向」を風向として算出表示してある。

水位変動については中海中央部の P 点(図 1)において国土交通省出雲工事事務所が測定した資料を用いた。

結 果

(1) 表層の流れ

抵抗版の中心位置を水深 1 m に調節した漂流版を

表3. 表層の漂流版追跡時における海上風の状況.
Table 3. Surface wind conditions during the current drogue tracking in Lake Nakaumi.

Date	Direction (T°)	Mean speed (m/s)	N-Comp. (m/s)	E-Comp. (m/s)
7-8 Nov.2000	98	2.4	-0.4	2.4
24 Apr. 2001	352	1.8	1.7	-0.2
25 Apr. 2001	237	8.3	-4.6	-6.9
26 Apr. 2001	255	3.0	-0.8	-2.9
27 Apr. 2001	26	1.2	1.1	0.5
18 Jul. 2001	253	2.5	-0.7	-2.4
19 Jul. 2001	66	1.2	0.5	1.1
31 Jul. 2001	32	2.4	2.0	1.3
17 Sept.2001	236	2.9	-1.6	-2.4
18 Sept.2001	61	1.1	0.6	1.0

追跡し、得られた流跡を図3に示した.

1 回次調査では、投入後漂流版は北上した. 10 時間後、漁具との接触により停止したので回収し、再びもとの地点に投入した. その後は西向きに移動していったが、流跡と中海の水位変動との関連性は認められない. 海上風は最初の投入後20時間は西風であり、その後はやや強い北風に変わった.

2 回次, 3 回次調査の流跡は海上風の変動とよく対応している. 4 月 24 日の投入後 2 時間は西風であったがその後は北向きの風になり、それに追従するように流跡も北向きに転進した. 25 日は南西向きの強風が卓越しており漂流版はそれに沿って平均流速 14.4 cm/s の観測期間中では最も早い流速を示した.

4 回次調査では上げ潮には南下しその後の西向きの風で西に進んだ. 5 回次調査の流跡は弱い南下傾向を示したが、風速は弱くて風向も安定せず、また水位変動も小さく、両者とも明確な関係はみられなかった.

6 回次調査の期間は下げ潮時であったにもかかわらず西向きの風に沿う流跡を示した. 7 回次調査では 5 回次調査とほぼ同じ流跡を示した. 水位は上げ潮であったが、海上風は弱く一定しなかった.

8 回次調査は中浦水門近くの水域で行った. 転潮時は海上風も弱かったが下げ潮時には北向きのやや強い風になり、潮と風とが共に作用するかたちで急速にスピードを増して北上していった.

9 回次調査と 10 回次調査は中海西部の大橋川河口部で実施した. 9 回次は調査期間中一定して北東方向の流跡を示し、水位変動や海上風の変動とも関連性は指摘できない. 10 回次調査では流跡は北上を示した. 風は弱く、水位は転潮時から下げ潮にかけてであった.

以上のように、表層の追跡調査は 1 回次を除いて 4~8 時間と短時間であったが、(1) 流跡は海上風の

表4. 底層の漂流版追跡時における海上風の状況.
Table 4. Bottom wind conditions during the current drogue tracking in Lake Nakaumi.

Date	Direction (T°)	Mean speed (m/s)	N-Comp. (m/s)	E-Comp. (m/s)
22 Nov.2000	280	7.5	1.4	-7.3
24-25 Apr. 2001	265	1.5	-0.1	-1.5
26-27 Apr. 2001	291	1.0	0.4	-0.9
18-19 Jul. 2001	51	0.6	0.4	0.5
31 Jul.-1 Aug. '01	314	0.8	0.6	-0.6
17-18 Sept.2001	278	0.6	0.1	-0.6

変動にตอบสนองしているように認められる場合もあるが、必ずしもそうとはいえない事例もあった. また (2) 水位変動との関連では特に顕著な関連性を指摘することはできなかった.

(2) 底層の流れ

抵抗版の中心を水面下 5 m に調節した漂流版を追跡した結果 (図 4) は以下のとおりである.

1 回次調査では追跡時間は 5 時間に留まったが、漂流版は時計回りに約半周の軌跡を示した. 風は強い南東風であった.

2 回次調査では 23 時間追跡した. 流跡は時計回りのループ状を呈した. 水位と流跡との関連をみると、転潮の時刻と流向が変わる時刻との間に数時間の遅れがあるがほぼ対応しており、上げ潮時には南下し、下げ潮時には北上するという傾向がみられる. 海上風との関連性は特には認められない.

3 回次調査は約 24 時間の追跡ができた. 漂流版は時計回りの円周の軌跡を描いた. 1 周に要する時間は 21~22 時間であった. 上げ潮時に南下して下げ潮時に北上するという傾向は今回も認められる. 海上風は投入直後から 10 時間は東寄りの 4 m/s 台であったが、その後は 2 m/s 台以下で経過した.

4 回次調査の流跡は、漂流版投入後 12~13 時間までは時計回りの楕円軌跡を描いたが、その後は東進し続け、従来の流跡パターンとは異なった. 東進時の海上風は西寄りの 2 m/s 台と弱かった. 水位変動との対応関係は指摘できない.

5 回次調査は中海北部海域の中浦水門付近で行った. この回次では流跡と水位変動との強い関連性が認められた. 投入直後の 3 時間は下げ潮に転じる直前であったが漂流版は南東方向に進み、下げ潮になると速度を増して転潮時まで北上していった. 上げ潮になると南下傾向を示したが、その後の日潮不等の緩やかな水位変動にตอบสนองして短時間に北上、南下の移動がみられた. 海上風は北上時には北向きの風で漂流版の進行方向と同じであったが、それ以外は

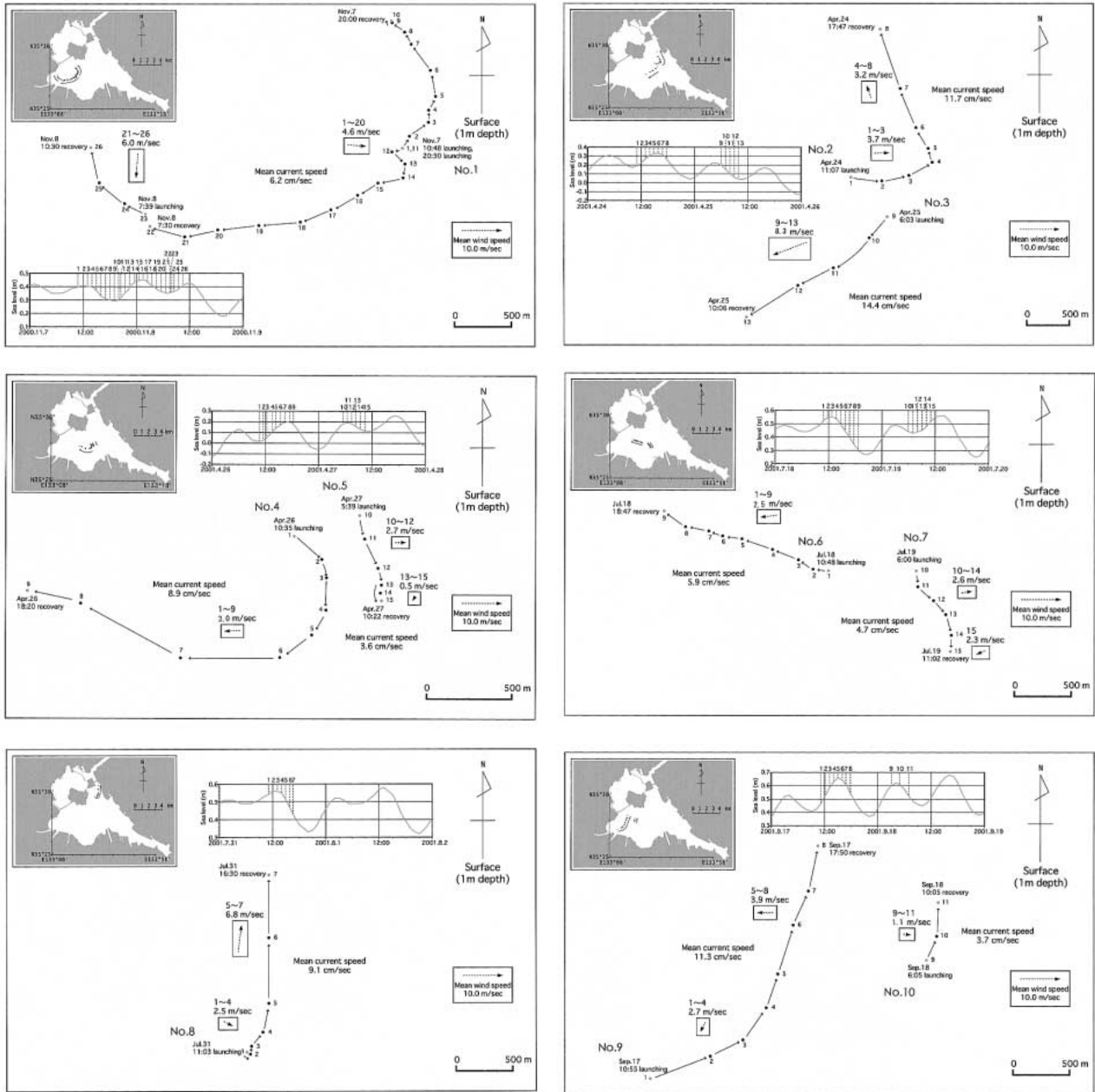


図3. 表層（1 m 深）における漂流版の流跡。
Fig. 3. Trajectory of a current drogue at 1 m depth.

風速は 1~2 m/s 台と弱く風向も安定しなかった。

6 回次調査は中海の西部寄りの水域で実施した。投入後約 10 時間で時計回りに 3/4 周したのちに北西方向へ移動した。その後上げ潮に転じると南下傾向を示し、下げ潮になると北東へ逆転した。このようにこの回次も流況は水位変動と連動傾向がみられ、上げ潮時には南下、下げ潮時には北上傾向を示した。海上風は 3 m/s 台以下で卓越した風ではなかった。

底層に設置した漂流版追跡から得られた流跡によ

ると、(1) 上げ潮時には南下、下げ潮時には北上傾向がみられ、(2) 移動方向が変化した時刻は水位変化の時刻と対応する場合がしばしばみられ、(3) 時計回りにループ状の弧を描いて移動するケースが多い。(4) 海上風との関連性は特に認められず、(5) 24 時間近く追跡できた調査結果から推定した平均速度は 3.9~5.3 cm/s の範囲にあった。

(3) 海上風と流れの関係

表層の漂流版の流跡は海上風との関連がうかがわ

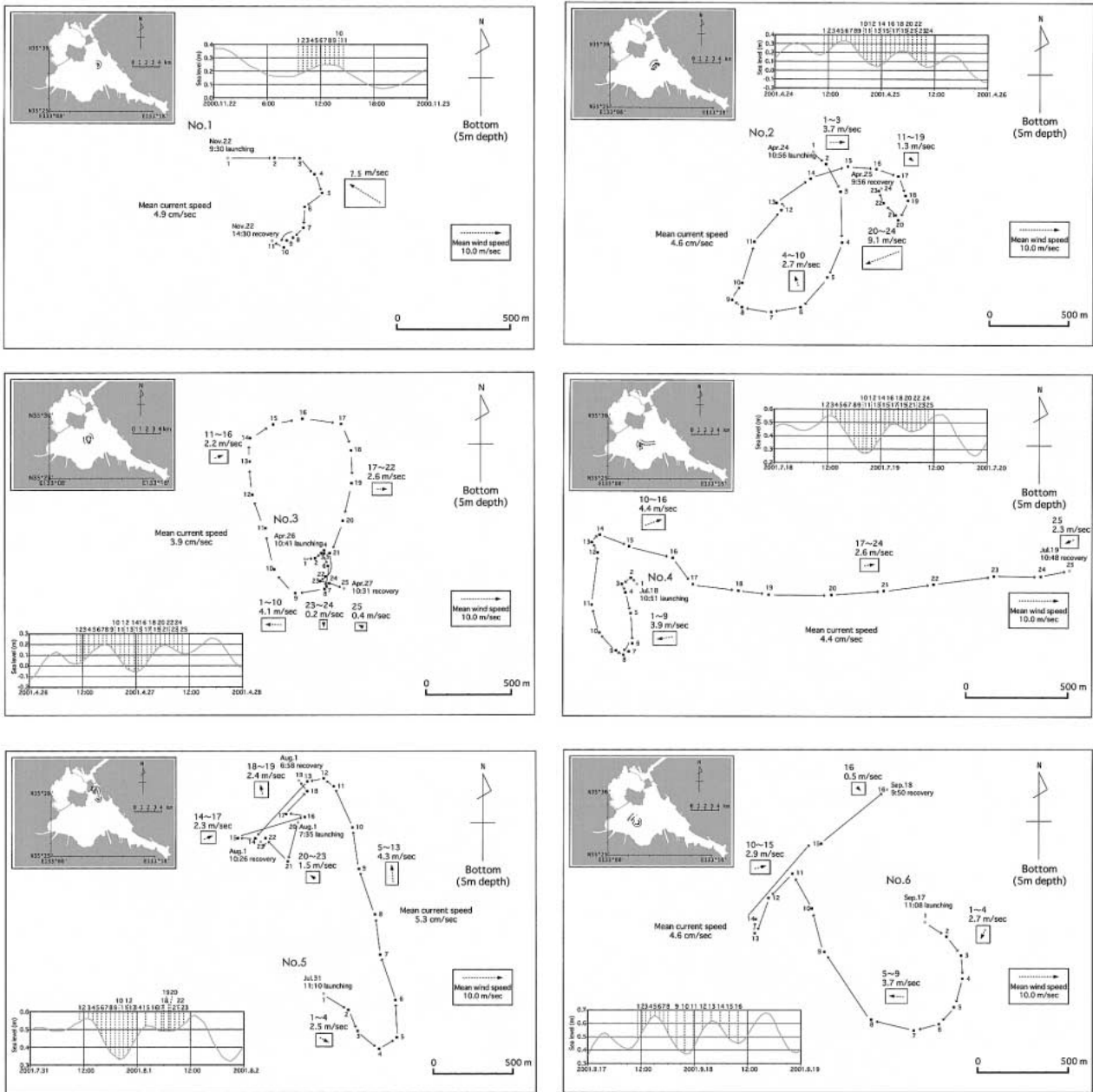


図4. 底層（5 m 深）における漂流版の流跡。

Fig. 4. Trajectory of a current drogue at 5 m depth.

れたので、平均流速の北成分と東成分をそれぞれ海上風(吹いていく方向を風向とした)の北成分と東成分とで対比した(図5)。測定海域の水深がエクマンの摩擦深度に比べて充分小さいなら風によって引き起こされる流れはほぼ風の吹いていく方向に向かう(例えば永田 1981, 能沢 1985)。測定された海上風の条件から摩擦深度を推定すると 25~70 m 程度である。中海の平均水深 (D) は 5.4 m であるので、摩擦深度 (D_E) より充分浅く ($D < 0.25 D_E$)、流れは風の吹いていく方向に従うことが予想される。

この予想から大きく外れる点は東成分(図5、上)では2つ、北成分(図5、下)では1つあった。これらの点はいずれも調査海域西部の大橋川河口近辺で実施されたという共通点がある。これらの点を除いて両者の間の回帰直線には有意な相関が認められた(北成分： $P < 0.05$ ，東成分： $P < 0.01$)。北成分では風の弱い日の流速は予想される回帰直線から外れる傾向があり、流れの変動場に海上風以外の要因が作用していることを示唆している。また、一般に広い海域では風速の2~3%が吹送流となることが知ら

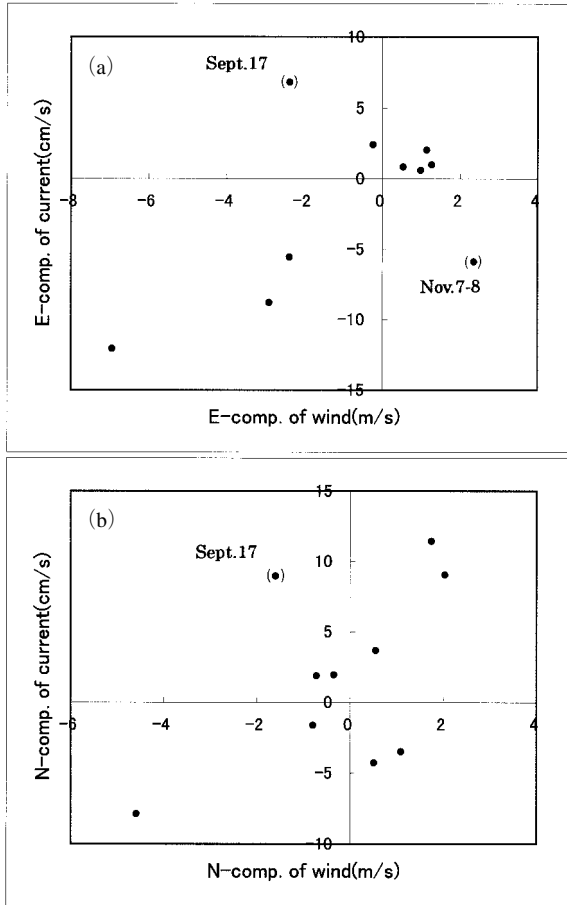


図5. 海上風の (a) 東及び (b) 北成分と表層流のそれらとの相関。

Fig. 5. Correlation between directions of wind and surface current. (a) easterly component and (b) northerly component.

れている (宇野木 1993) が、回帰直線の傾きは北成分で 0.023, 東成分で 0.018 となり、中海でも海上風速の約 2% の表層流が生じていることが観測された。

一方、海上風と底層流との関係には表層で観測されたような明瞭な相関関係は認めがたい。良く知られているように、中海には強い密度躍層が存在する。今回の調査において得られた水温・塩分の鉛直分布の一例を図 6 に示したが、水深 2~4 m 付近に強固な躍層が認められる。海上風あるいは後で述べるように表層流と躍層以深との流れとの間に明瞭な対応関係がみられないのはこの躍層の存在が無視できないであろう。

(4) 躍層の上下での流れの差異

すでにみたように表層と底層では流れのパターンは異なっているが、両者の関係をさらに詳しく検討するため表層の流れの北、東成分とその観測時間に

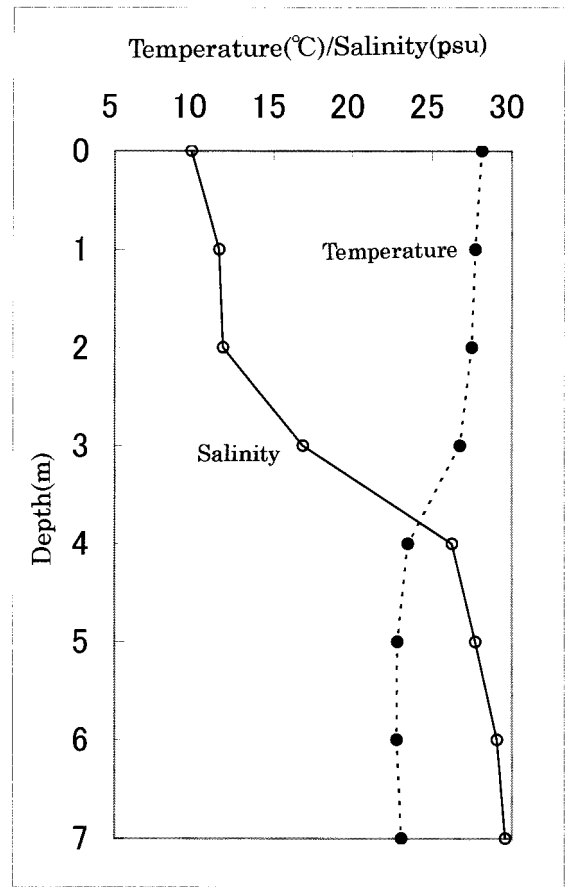


図6. 2001年7月18日、 $35^{\circ}27.72' N, 133^{\circ}11.14' E$ における水温・塩分の鉛直分布。

Fig. 6. Vertical distributions of water temperature and salinity at the point ($35^{\circ}27.72' N, 133^{\circ}11.14' E$) on July 18 in 2001.

対応する底層の流れの北、東成分とを対比した (図 7)。北成分、東成分とも表層と底層の流れには一定の傾向はみられない。海上風と表層流動との関係 (図 5) でみたような特異点の存在も指摘しにくい。

表層と底層が同時に観測できたのは 4~8 時間と短い、今回の調査からは躍層の上下で流れは大きく異なっていることが明らかになった。

若干の議論

今回の漂流版追跡調査では表層が 10 シリーズ、底層が 6 シリーズの観測を行うことができた。各シリーズの観測で 24 時間近く追跡できたのは表層で 1 回、底層で 5 回であったが、従来の中海におけるラグランジュ観測 (横山ほか 1997, 福岡ほか 1997) に比べて充実したものといえよう。観測手法としては調査船で漂流版に追隨して観測情報を収集するとい

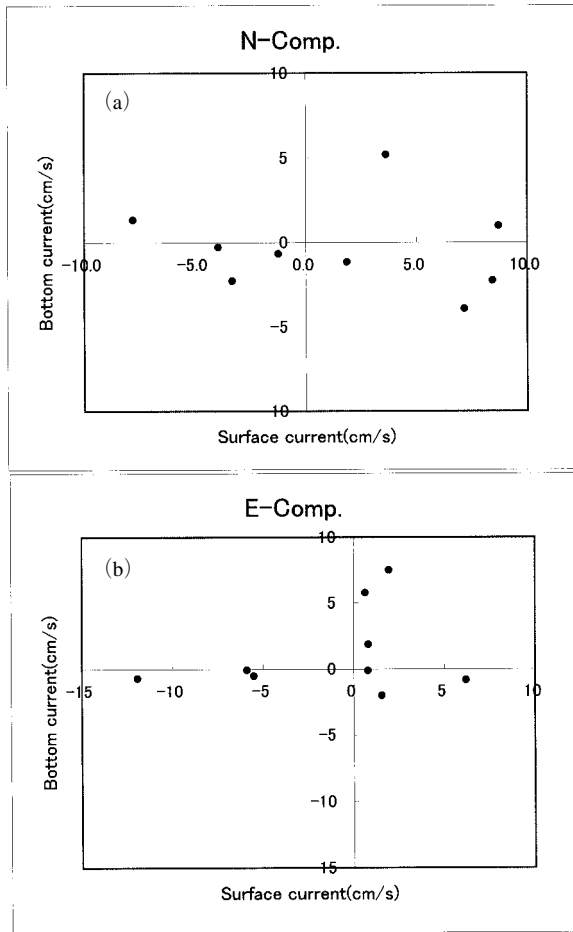


図7. 表層流の (a) 北及び (b) 東成分と底層流のそれらとの相関.
Fig. 7. Correlation between surface current and bottom current. (a) northerly component and (b) easterly component.

うベーシックな手段であったが、測器は比較的安価に製作できて自動測位記録器による誤差を考慮する必要はなく、漂流版の接触状況の確認も可能であり精度のよいデータを得ることができた。

表層流は海上風と密接に関連しており (図5)、海上風の変動に应答して流動していることが明らかになった。ただし、海上風だけでは説明できない事例も観測された。1回次はそのような特異日のひとつであったが、当日の水位変動を宍道湖のそれも考慮してみると、全調査時間中において中海の水位が宍道湖のそれより高い状態を保持していた (図8)。この水理条件により漂流版は海上風には従わず終始西向きに進んだものと思われる。9回次調査も海上風の変動に従わない例外の観測事例であるが、1回次のように宍道湖水位と関連づけて検討しても説明できなかった。大橋川河口のごく近傍という特別な地理的な影響があるのかも知れない。このような水理

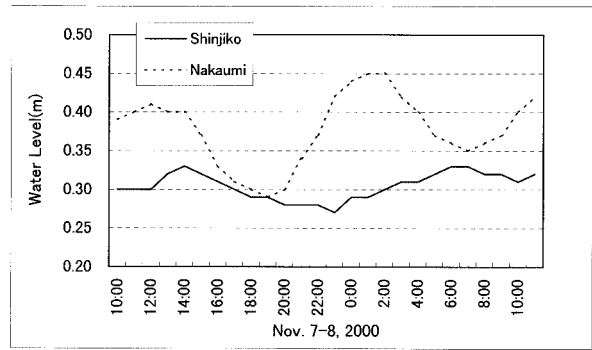


図8. 2000年11月7~8日の中海と宍道湖中央部における水位変動.
Fig. 8. Changes of water level at the central part of Lake Nakaumi and Lake Shinji on Nov. 7-8, 2000.

的、地理的条件を除けば中海の表層流は海上風の吹き去る方向に進行し、その速度は海上風の約2%程度であると推定できる。

他方、底層の流れは表層のそれとは異なっている (図7)。これは強い躍層の存在 (図6) が影響していることは間違いないが、これまで表層と底層とを同時に測流した事例はなく貴重な観測といえよう。

底層流は水位変動との対応が指摘できる。すなわち上げ潮時には南下、下げ潮時には北上の流跡の傾向がみられ、流向が変わる時点は転潮時である場合が多く、また日潮不等が大きくて水位差が少なかった場合には流跡変動も不安定になることもあった。ただ水位変動との対応関係がみられない事例もあった。4回次観測がそれに相当するが、この原因についてはよく分からない。

流速は3.9~5.3 cm/sの範囲にあり、横山ら (1997) の結果と同程度であったが、流跡にはこれまでの報告にはみられないループ状や時計回りの円周状のパターンが出現した。時計回りの流跡を描いていることに対応して流動成分の中には慣性振動による変動の含まれている可能性が考えられる。得られた事例から周期はおおよそ20時間であり、中海の緯度に対応する慣性周期は20.7時間でほぼ一致するが、観測例が少なく得られた資料の精度からして日周潮周期による流動変動との分離はきわめて困難である。

以上のように、表層の流動は海上風の変動に、底層のそれは水位変動にそれぞれ呼応して変動している傾向が強いが、水理的条件や地理的条件あるいはそれらの組み合わせによってはまったく異なった流動を示すことも観測され、今後も事例の蓄積が重要であるように思われる。

謝 辞

漂流版の作製には島根県内水面水産試験場主任施設管理技師森山勝氏に全面的にお世話になった。水位変動の資料は国土交通省出雲河川事務所から提供いただいた。ここに記して深謝する。

参 考 文 献

福岡捷二・中村剛・池内幸司・日比野忠志(1997)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 44: 431-435。
 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 636: 61-79。

森脇晋平・大北晋也(2003)中海に出現する貧酸素水塊の海況学的特性と海洋構造。LAGUNA (汽水域研究) 10: 27-34。
 永田 豊(1981)海流の物理。講談社ブルーバックス (B-456), 227 pp。
 能沢源右衛門(1985)新しい海洋気象学。成山堂書店, 307 pp。
 杉本隆成・森永健司(1991)漂流系による調査法。水産海洋特論(川合英夫編著)京都大学学術出版会, 329-343。
 宇野木早苗(1993)沿岸の海洋物理学。東海大学出版会, 672 pp。
 横山康二・津田良平・石飛裕(1997)漂流ブイによる中海底層水塊の移動と水質変化。中海湖底貧酸素化調査業務調査成果報告書(関西水圏環境研究機構) 47-80。