

中海-米子湾窪地における 内部波と流動との関連性

RELATIONSHIP OF INTERNAL WAVES WITH WATER MOVEMENT AT THE HOLLOW IN YONAGO BAY OF LAKE NAKAUMI

藤井智康¹・西村 明²・清水信夫³・田中秀宜⁴

Tomoyasu FUJII, Akira NISHIMURA, Nobuo SHIMIZU and Hidenori TANAKA

¹正会員 理博 日本ミクニヤ株式会社 広島事業所 (〒734-0015 広島県広島市南区宇品御幸4-4-7)

²正会員 国土交通省 中国地方整備局 出雲工事事務所 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有町5-1)

³非会員 国土交通省 中国地方整備局 出雲工事事務所 (〒693-0023 島根県出雲市塩冶有町5-1)

⁴正会員 日本ミクニヤ株式会社 広島事業所 (〒734-0015 広島県広島市南区宇品御幸4-4-7)

Average depth of Lake Nakaumi is 5.4m in depth, and a lot of hollows of 10m or more in depth exist in the Yonago bay. The deepest place is 16m in depth. In Lake Nakaumi, a stable stratification with a halocline is formed by the density difference between seawater flowing in through the Sakai Channel from the Sea of Japan and freshwater from the many rivers which flow into the lake. This stable two layer structure produces a peculiar aquatic environment. The highly saline water mass below this halocline can easily become anoxic due to both weak vertical mixing between the upper and lower layer, and generate the nutrient release in the lower layer. It is well known that internal waves with a large amplitude of 2-3m and period of 24 hours are often driven by tidal and wind drift effects around Yonago Bay of Lake Nakaumi (Fujii, 1997).

Then, we carry out the observation to detect the internal oscillation and flow and its effect on the vertical distribution of water properties, and found a dynamical relation between the internal oscillation and the anoxic water movement in the hollows. As a result, internal oscillation with a large amplitude of 2-3m and period of 20 hours are observed in the hollow and changed periodically. Therefore, it is thought that the water of the hollow periodically creeps up towards the neighboring water regions by internal oscillation, greatly affecting the general water quality and biological environment.

Key Words : *Neutral Buoy, Internal Waves, Brackish Lake, hollow, water movement*

1. はじめに

中海北東部に位置する米子湾は、中海の平均水深5.4mと比較して10m以上深い、窪地が数多く存在していることが知られている。最深部では16mにもおよぶ。窪地の底部では、有機汚濁の進んだ黒色の硫化泥が堆積している。また、夏季には塩分躍層の形成により貧酸素化による栄養塩の溶出が生じている。近年、この窪地内の水が、周辺水域へ及ぼす影響が懸念されている。夏季の安定成層期の米子湾周辺においては、水深4~5m付近に塩分躍層が形成され、風の吹送や潮汐に誘起され、振幅2~3m、周期24時間程度の内部振動（内部波）が頻繁に確認されている（Fujii, 1997, 1998）¹⁾²⁾。また、琵琶湖における窪地の鉛直循環現象については、洪水時の強流発生に

よって混合が生じることが示されている（奥田ほか, 1981）³⁾。

本論文では、米子湾に存在する最深部の窪地を対象に塩分躍層の振動の実態把握と、流況の連続調査をもとに、窪地内の流動のメカニズムについて検討を行った。

2. 調査方法

窪地内水の鉛直混合の過程を把握する上で、窪地内の流れは重要となる。とくに、夏季における塩分躍層の安定成層期の吹送流、塩分躍層の傾斜および内部波にともなう流速分布の変化が窪地内水の拡散に最も影響を及ぼすと考えられる。これらの現象を捉えるために流況調査を行った。調査は、図-1に示

す米子湾窪地（水深16m）におけるSt.1において、1999年8月17日～11月17日の3ヶ月間ADCP（超音波ドップラー流速プロファイラー）を用いた流動調査を実施した。また、この期間中8月27日～9月3日までの一週間において、観測期間中の風の吹き寄せにともなう塩分躍層の傾斜および内部波による塩分躍層の上下振動を捉え、塩分躍層の振動と窪地内水の隣接水域への這い上がりの可能性を把握するため、中立ブイを用いた塩分躍層の上下振動調査を行った。

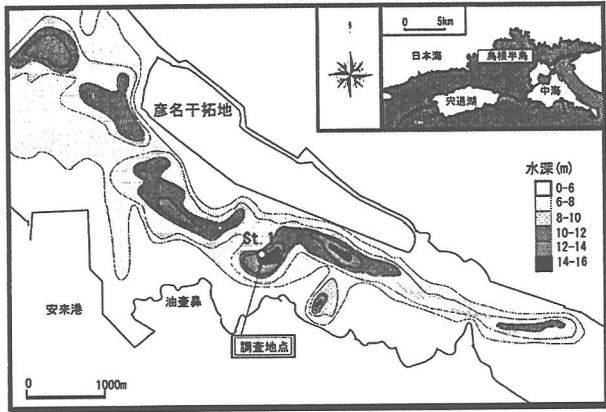


図-1 調査地点位置図

中立ブイは、汽水湖で使用できるように1994年に試作を行った (Fujii et al., 1996) ⁴⁾。中立ブイを用いた内部波の測定は、従来行われてきた水温や塩分測定などによる間接的な測定ではなく、任意の水深における内部波の直接測定を行うことが可能になった。

中立ブイの構造は、アルミニウム製の円筒形（直径15cm）の水密容器の中にはバッテリー（12V）、データロガー（TEAC社製；DL-100M）、圧力センサー（水深10mまで測定可能）が内蔵されている。中立ブイの全長は50cmで、上部には浮力調整用ブイ（直径15cm）があり、側方に取付けてある環（side link）の中心を鉛直に張られたワイヤーが通っていて、ブイはこのワイヤーに沿ってスムーズに上下に滑動できる（図-2、図-3）。

このブイは、塩分躍層付近に浮遊するようにブイの密度をステンレス製リングの加減によって試行錯誤的に調整して一定密度の層に浮遊させ、躍層の昇降にともなうブイの上下運動をその中に取付けてある圧力センサーによって自動測定する計測システムである。測定時間間隔は、データロガーの設定によって自由に設定できる。ただし、圧力センサーによって水面からブイまでの深さを計測しているため、データ処理の段階で水面変動値および気圧変動値を補正し、ブイの位置を湖底からの高さに換算する。

設置は、図-3に示すように、湖水中にワイヤーとブイを用いて行った。

図-4に示す設置時の塩分および溶存酸素濃度の鉛直分布から分かるように、水面下3.0m以深に塩分躍層の形成が見られた。したがって、調査地点で採水を行い水面下3.5～4.0m付近（塩分躍層付近の密

度：1.0185g/cm³）の塩分躍層に浮遊するようにおもりを調整した。

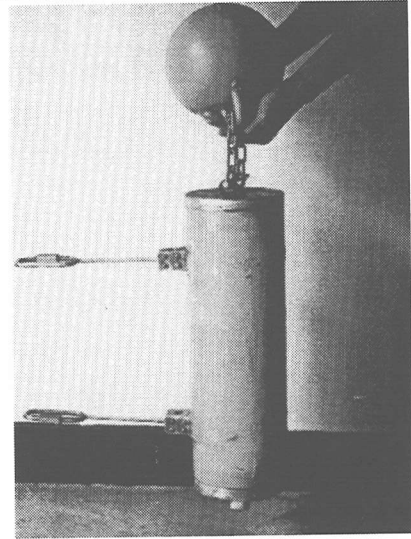


図-2 中立ブイ

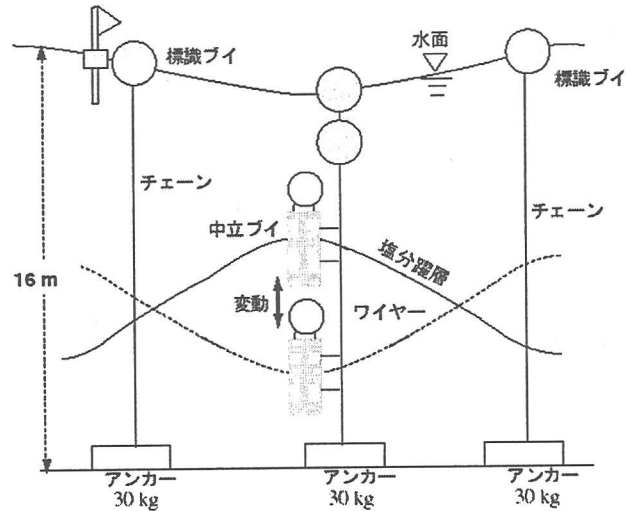


図-3 中立ブイ設置概略図

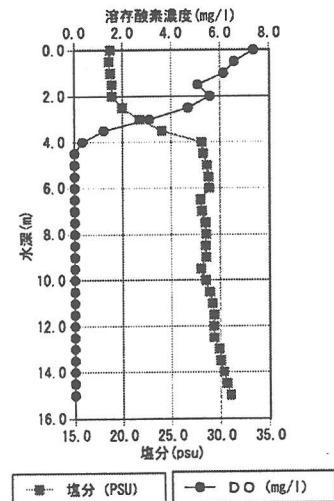


図-4 塩分・溶存酸素濃度鉛直分布（1999年8月27日）

ADCPを窪地内の湖底に設置し、流向・流速の連続観測を行った。流向・流速の計測は、鉛直方向 50cm 間隔で行い、計測は10分間隔で行った。また、調査に用いたADCPの設置概略図を図-5に示す。

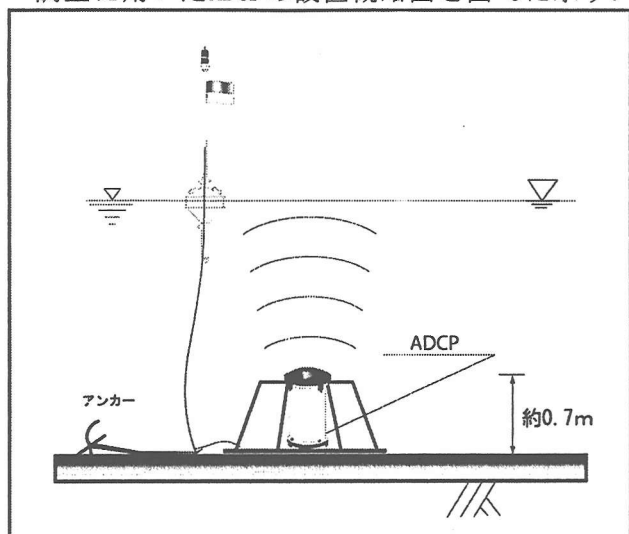


図-5 ADCP設置概略図

3. 結果及び考察

窪地に溜まった相対的に重い水（密度の大きい水）の停滞あるいは排除は、実用的にも興味ある問題である。そこで、米子湾の窪地を対象に行った、流況調査、塩分躍層の振動調査をもとに窪地内水が周辺水域に与える影響について解析を行った。

(1) 塩分躍層の振動

図-6の中立ブイを用いた塩分躍層の振動調査の結果に示されるように、窪地内の塩分躍層は、振幅2～4mの周期的な上下振動が見られた。

また、図-6に示されるように、塩分躍層下降時に底層付近の散乱強度が上層方向に高くなる傾向が見られること、および塩分躍層付近の鉛直流速が、塩分躍層の上下振動にともない卓越していることが分かった。これにより、窪地内水が周期的に上層まで湧昇する可能性が考えられる。

調査期間中の塩分躍層の卓越周期を求めるために、MEM法（Maximum Entropy Method）を用いたスペクトル解析を行った。

その結果、図-7に示されるように、塩分躍層の振動は、20.5時間の卓越周期が見られた。

これは、今回の観測結果から理論的に求めた米子湾の内部振動の周期23.2時間に近い周期であり、これらの固有振動によって、周期的に窪地内水が這い上がるものと考えられる。

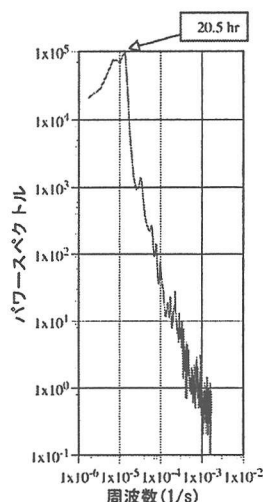


図-7 スペクトル解析結果

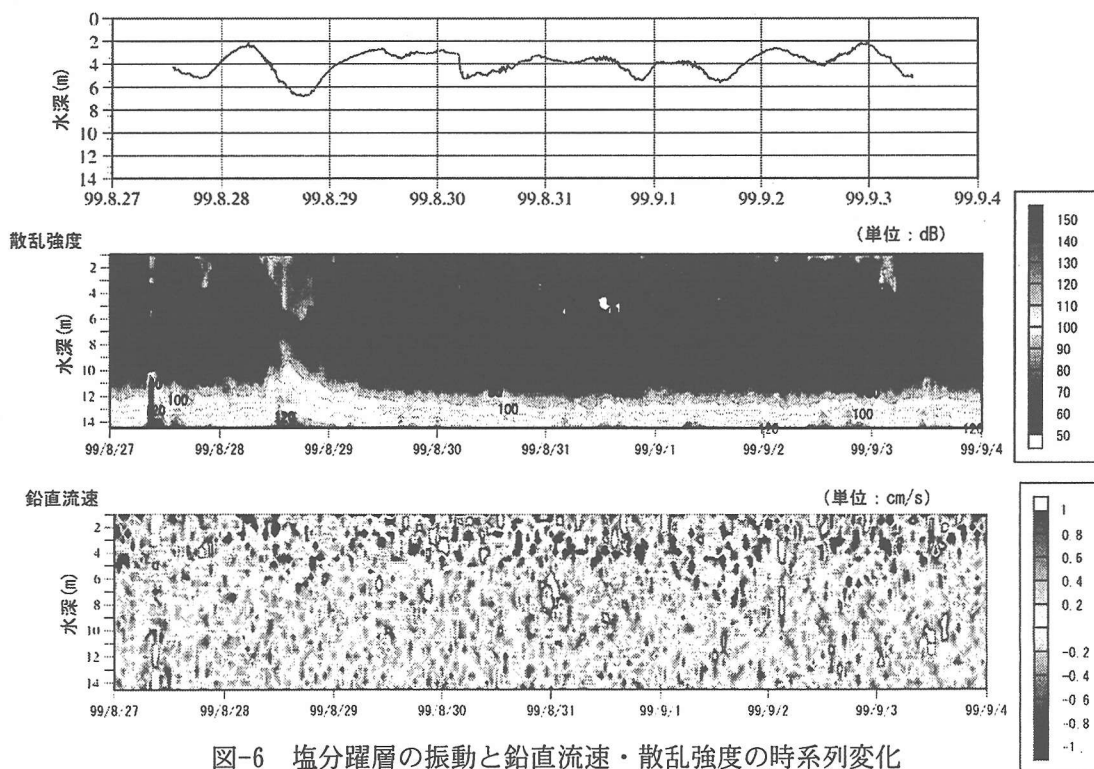


図-6 塩分躍層の振動と鉛直流速・散乱強度の時系列変化

(2) 窪地内の流況

図-6の塩分躍層の振動および図-8の各成分流速との関係について比較すると、米子湾方向に風が吹送した場合に塩分躍層が上昇し、一方、湖心方向に吹送した場合に下降していることが分かった。

したがって、風の吹き寄せに伴い塩分躍層が上昇および下降していることが分かった。

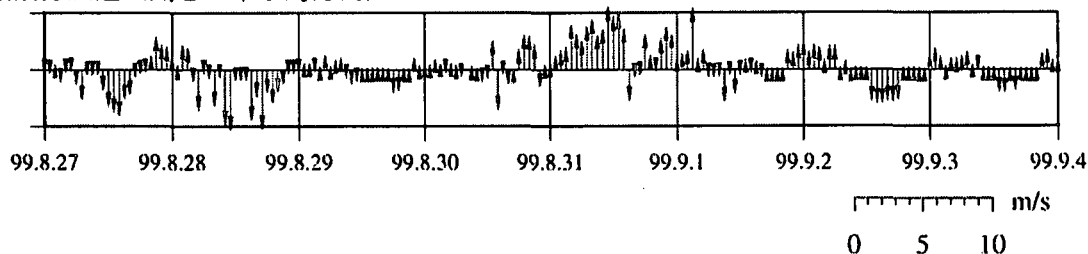
また、窪地内の流れについては、水面下1mでは風の吹送方向と流向が一致し、水面下4m以深では水面下1mの流向と逆になっていた。このことは、水面下

3.0m以深に形成された塩分躍層の上層と下層の密度差によって2層流となっていたものと考えられる。

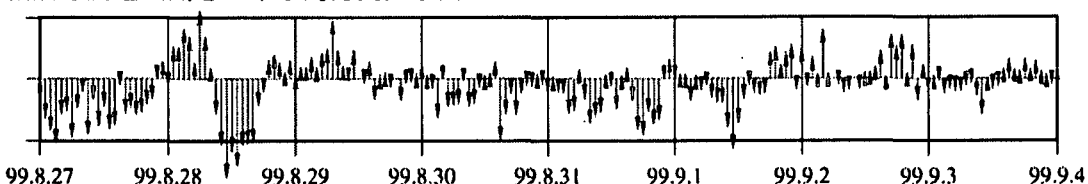
平均流速は、水面下1.0mで7.0cm/s、水面下14.5m(全水深15.5m)で2.0 cm/sであり、窪地内底層付近の流れは上層と比較して非常に小さく動きがほとんどみられないことが分かった。

したがって、塩分躍層より下層の窪地内底層水は、顕著な流動は見られず滞留時間が長く、水質に大きな影響を及ぼしているものと考えられる。

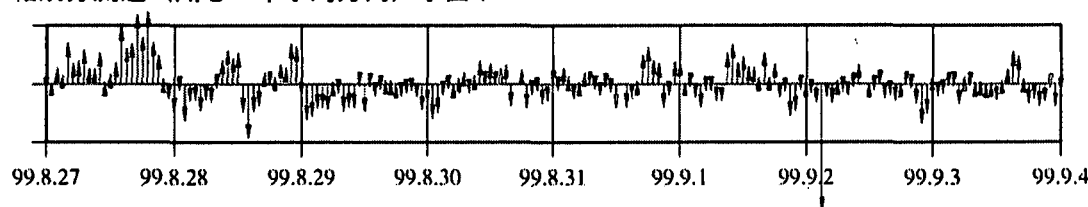
Y軸成分風速（湖心⇄米子湾方向）



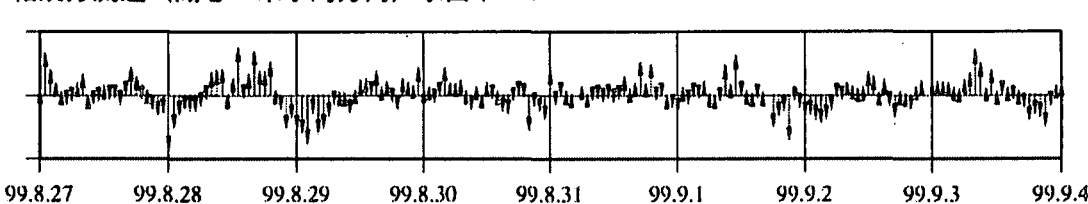
Y軸成分流速（湖心⇄米子湾方向）水面下1m



Y軸成分流速（湖心⇄米子湾方向）水面下4m



Y軸成分流速（湖心⇄米子湾方向）水面下6m



Y軸成分流速（湖心⇄米子湾方向）水面下10m

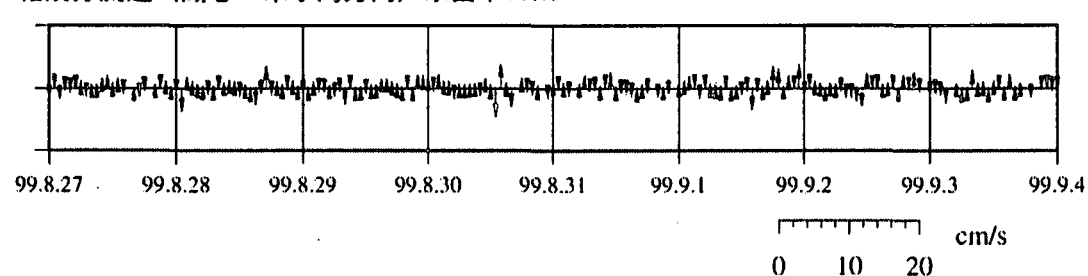


図-8 湖心－米子湾方向の風速と流速ベクトル図

(3) 吹送流発生にともなうSweeping現象および連行現象の可能性

窪地の上層に平均流速 u の流れが生じるとき、次に定義される無次元パラメータ F_i （内部フルード数；Internal Froude Number）について（図-9参照）

$$F_i \equiv \frac{u}{Nh} \quad (1a)$$

$$N \equiv \sqrt{-\frac{d\rho}{dz} \frac{g}{\rho}} \quad (1b)$$

（ N ；Brunt - Väisälä frequency）

ただし、 $-\frac{d\rho}{dz}$ は鉛直方向の密度勾配
 ρ は、流体の平均密度、 g は重力加速度

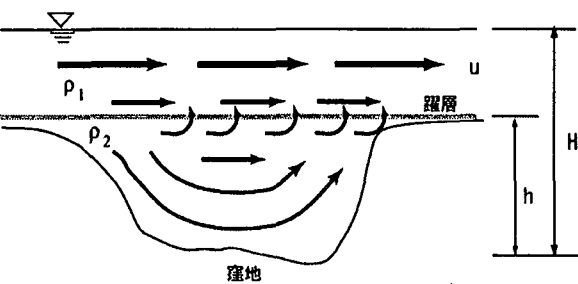


図-9 窪地内の流れ

この値 F_i が1.3を超えると、流れが窪地内の底まで拡がって下層水を一掃するSweeping現象が生じ、1.3以下のときは窪地内の重い水は溜まったままで上層を上すべりして流れることが示されている。また、全水深 H と窪地の厚み h の比 H/h が1.8より小さいときには、窪地の形状がSweeping現象の臨界値に効いてくることが知られている（奥田, 1981）³⁾。

いまここで、実際に調査から得られた値を用いて、米子湾窪地内でSweeping現象が生ずる可能性があるかを確かめた。

台風9917号通過時の強流発生時について計算し、表-1に示した。

表-1 台風9917号通過時の諸元

上層平均流速	$u = 0.219 \text{ m/s}$
平均密度	$\rho = 1.0204 \text{ g/cm}^3$
密度勾配	$-\frac{d\rho}{dz} = 0.00167$
窪地の厚み	11.0 m

この値を用いて計算すると

$$F_i = 0.16 < 1.3$$

と計算され、窪地内のSweeping現象を引き起こす臨界値1.3よりはるかに小さい値であり、今回の台風の規模では窪地内水の全面的交換は起こらない。

米子湾窪地においては全水深 $H=16.0\text{m}$ 、窪地の厚み $h=11.0\text{m}$ であり、 $H/h=1.5$ である。したがって、今回調査対象とした米子湾窪地では形状を考えた総合的な考察が必要であると考えられる。

しかしながら、中海の米子湾周辺には数多くの窪地が散在しており、窪地の規模によって異なった現象が生ずるものと推察される。

ここで、下記に示す条件を仮定し、窪地内水が入れ替わるSweeping現象が生ずるための流速を(1a)式より算出した。

表-2 計算結果

窪地の厚み	臨界値1.3を越えるための流速
11.0m (全水深15m)	1.80 m/sec
6.0m (全水深10.0m)	0.98 m/sec
4.0m (全水深8.0m)	0.66 m/sec
2.0m (全水深6.0m)	0.32 m/sec

表-2に示されるように、この程度の塩分成層がある場合には、調査対象地点の窪地では1.8m/sの上層流速が必要となる。今回の台風9117号通過時には上層の平均流速は、0.22m/sであり、Sweeping現象が生ずる可能性がある場所は、全水深が6.0mで窪地の厚みが2.0m程度と考えられる。したがって、今回の調査地点の窪地では水深6.0m程度までは上層に発生した流れによって影響があるものと推察される。

連行現象の可能性については、米子湾窪地では常に水深4.0m付近に安定した塩分躍層が形成され、この塩分躍層が風や潮汐によって振幅2.0～3.0m、周期20時間以上の長周期の内部振動となって上下振動していることは上述の結果よりわかる。

調査対象とした窪地では、平均的な中海湖底である水深5.0～6.0m付近が窪地の上端部と一致していることから、この上下振動によって窪地内水が上層部に湧昇し、内部振動の動きとともに長時間上層付近に停滞することになる。この間に潮汐による水位変動に伴う中海－米子湾方向の流れや風の吹き寄せに伴う吹送流により窪地内水が連行されることが考えられる。

4. まとめ

今回の流況調査および塩分躍層の振動調査より、窪地内水の流動として以下のことが考えられる。

- (1) 台風通過時の平均的な上層流速が30cm/s程度では、窪地内のSweeping現象を引き起こす臨界値 $F_i = 1.3$ より小さく、この程度の規模では窪地内水の全面的交換は発生しない。ただし、水深6.0m程度までは上層に発生した流れが影響を及ぼすものと推察される。
- (2) 連行現象の可能性については、塩分躍層が風や潮汐によって振幅2.0~3.0m、周期20時間以上の長周期の内部振動となって上下振動していることより、この上下振動によって窪地内水が上層部に湧昇し、窪地内水が連行されることが考えられる。
- (3) 塩分躍層の上下振動は、振幅2~4m、周期20~24時間の周期的な変動を繰り返しており、塩分躍層の上下振動にともない、窪地内水が周期的に這い上がっていると考えられる。
- (4) 窪地内の鉛直混合現象については、窪地内底層付近の流れに卓越した流向が見られず、流速値が小さいことから、窪地内部ではほとんど動きがみられないと考えられる。

参考文献

- 1) 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, pp.241-260, 1997.
- 2) Fujii, T. : Relationship between Oscillation and Movement of Anoxic Water in a Connected Brackish Water Regions - Lake Nakaumi and the Ohashi River, Jpn. J. Limnol., Vol. 59, pp. 1-12, 1998.
- 3) 奥田節夫：南湖における「くぼみ」内の水交換に関する観測と解析，昭和55年度南湖湖流解析報告書，滋賀県，pp.1-19, 1981
- 4) Fujii, T., T. Ueda, S. Okuda and K. Yokoyama : Observation of Internal Oscillation in Brackish Lakes with a Neutral Buoy, Jpn. J. Limnol., Vol. 57, pp.293-304, 1997.