

## 中海湖心部における湖底の水中映像 (その 2) : 冬季の季節風に対する底層水の動態

野村律夫<sup>1</sup>・瀬戸浩二<sup>2</sup>

### **Pictures of bottom surface in the central part of Lake Nakaumi (part 2): dynamics of bottom water with regard to a seasonal wind in winter**

**Ritsuo Nomura<sup>1</sup>, Kouji Seto<sup>2</sup>**

**Abstract:** We observed the bottom water movements and the ecology of brackish organisms over a five days of Feb. 13- Feb.17, 2007, by means of a long-term monitoring waterproof camera that installed on the bottom of Lake Nakaumi at a depth of 6.5 m. The winter organisms are occupied with a hydrozoan and cionid community. These organisms indicate the bottom water is enriched with dissolved oxygen and the condition is quite different from our first report that showed a bacterial mat covering the bottom floor.

Unstable condition was occurred by a strong south and westerly wind over the speed of 10 m/s in Feb. 14 and 15. Winnowing of bottom sediments occurred at wind speeds greater than 10 m/s, which supports the previous observation. Water clarity decreased in these days. However, we confirmed that the winter bottom sediment is easy to blown up even in the speed of ~7 m/s, which is supposedly due to the absence of bacterial mat. In contrast to the quick response of bottom turbulence to wind stress, waters of bottom and the upper waters were not easily mixed, despite of the wind speed of over 15 m/s. A mixing of the bottom and the upper waters was temporally occurred after the 20 hours continuous blow over 11~16 m/s, but soon after that the waters from different depths were separated while the strong wind continuing.

A number of fishes along with a school of unknown fry were frequently observed when the bottom water turbulence stopped. We are able to recognize the rich fish communities in this season.

**Key words:** wind speed, bottom turbulence, winnowing, sediment, water dynamics

### はじめに

筆者らは、平成 17 年 (2005 年) 度から 19 年 (2007 年) 度にかけて行われた島根大学重点プロジェクト研究によって中海の湖心部の湖底を映像に記録し、複雑多岐にわたる自然の変化を視覚という感性の中で捉えることを試みた。そのために、長期間にわ

たって水中に設置し、映像を記録できる水中カメラを作成した。本報告は、その 2 回目にあたる。

前回の報告では 2006 年 11 月下旬の風が中海の湖底や水質に与える影響について言及した。そのなかで風速が 13~17 m/s になると、底層水は激しく攪拌され、湖底泥の巻き上げが起こる。低酸素環境で湖底泥を被覆するバクテリアマットも剥離を受けて

<sup>1</sup> 島根大学教育学部・汽水域研究センター Faculty of Education/ Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue, 690-8504.

<sup>2</sup> 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University. Matsue, 690-8504.

湖底の表面が完全に巻き上がることを映像に記録することができた。しかし、風浪や潮汐作用には直接影響を受けない濁りの発生や強風環境でも濁りが低下する現象など、複雑な湖底の動態が観察できることも指摘した。このようなことから、現在までに得られている膨大な映像記録を克明に記述し、季節に応じた水質環境との比較を行い、湖底の実態を理解する必要がある。

本論文では、前回に続き冬季の湖底堆積物が季節風の変化に対して、どのような変化を示すのかに注目して観察を行った。冬季には湖水の水温は逆転現象を示しており、上層水が下層水より水温が低くなる特徴がみられる(図1)。また、水位は8月の平均水位より約40 cm低下した状態にある。冬季の気圧配置は西風が長時間継続することが多く、一定の風向が継続した場合の湖底への影響は、移動性低気圧に伴った風向変化とは異なった状況を呈するものと考えられる。

## 研究方法

本報告で使用している長期設置型水中カメラについては、すでに触れた(野村ほか, 2007)。水中カメラの窓面には酸化チタンの薄膜を焼成させており、酸化チタン光触媒作用によってヒドロキシルラジカルとスーパーオキサイドアニオンが薄膜表面で発生する。そのためカメラの窓面には強い酸化分解力と親水性が発現し、生物忌避機能や自浄作用が備わっている。

水中ビデオカメラの設置は、国土交通省が中海湖心部に設けている自動水質観測所(水深6.5 m)を利用した。カメラの窓面の高さは、湖底から約40 cmである。水中の映像記録は5分間を1コマとして、2時間間隔で実施した。1日当たり、12コマ計1時間の記録となっている。これらの映像記録(2007年2月13日~2月18日)は、現地に設置したDVDレコーダーに保存したもので、約1ヶ月後に回収し、再生と観察を行った。時間帯は、〈1〉0:00~0:05、〈2〉2:00~2:05、〈3〉4:00~4:05、〈4〉6:00~6:05、〈5〉8:00~8:05、〈6〉10:00~10:05、〈7〉12:00~12:05、〈8〉14:00~14:05、〈9〉16:00~16:05、〈10〉18:00~18:05、〈11〉20:00~20:05、〈12〉22:00~22:05である。

今回の映像は、前報(その1)と同じ地点・方位で継続して撮影したものであるが、湖底面にヒドロ虫の群体やユウレイボヤが繁殖した状態となってい

る。ヒドロ虫の群体はカメラの全面に位置し、視野の60%を占めている。このヒドロ虫は12月初旬には小さな群体を形成していたが、約2ヶ月の間に大きく成長したものである。このヒドロ虫の群体によってカメラの右側の約50%が覆われるため遮光となり映像の右半分は夜間には光が届きにくい状態で記録されている。しかし、このヒドロ虫の群体やユウレイボヤの揺れ動きが湖底での水の動きを捉えやすくしている。

カメラ窓面の設置方向は東~東南方向で、約60 cm先の湖底の様子を記録している。したがって、湖底での流れが左から右の場合は北方向からの流れとなっている。反対に右から左に流れがある場合は、南方向からの流れとなっている。このようなヒドロ虫やユウレイボヤの動きは、水の動きを反映しており、以下のように記述することにする。

強い流れ：ヒドロ虫やユウレイボヤの先端が湖底に接するように傾いた流れがある場合。

揺れ動きのある流れ：ヒドロ虫やユウレイボヤの先端が南北方向に揺れ動いている状態。

弱い流れ：浮遊粒子が一定した方向に流れている状態。

流れのない状態：浮遊粒子がほぼ一定して、あまり動かず浮遊している状態。

湖水の透明度は著しく変化に富み、全くヒドロ虫やユウレイボヤを見ることができないくらいになる状態もある。本報告では、このような濁りの程度について以下のように記述する。

著しく強い濁り：強く濁り、湖底堆積物の舞い上がりが見られる状態。

強い濁り：対象物が全く見えない状態。

強から中程度の濁り：対象物は見えるが、その詳細が区別できない状態。

弱い濁り：濁っているがユウレイボヤの輸卵管や輸精管が区別できる状態。

濁りのない状態：対象物が詳細に認識できる状態。このような表現は、国土交通省の濁度計による測定値と必ずしも一致するものではない。

水質については国土交通省出雲工事事務所から映像記録期間中の1時間ごとの資料の提供を受けて、映像との比較を行った。水質データ(水温、溶存酸素、塩分、濁度)は以下の通りである。

上層水 深度2.0 m

中層水 深度3.5 m

下層水 深度5.5 m

底層水 湖底上0.5 m

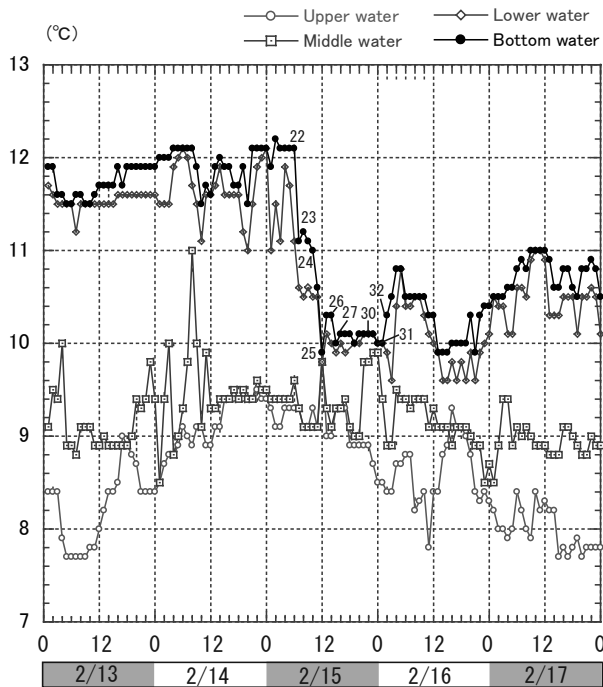


図1. 1時間ごとの水温変化. 冬季は上層(上層水と中層水)と下層(下層水と底層水)で水温が逆転している.

Fig. 1. Water temperature in every one hour. Notes that thermal structure of upper and lower waters is inverted in winter. Data from Izumo River Office.

## 観 察 結 果

### 1. 水中映像の様子

図2は2007年2月13日12時00分から2月18日午前0時までの映像のスナップショットを時系列に配置したものである。以下に、湖底の状態を簡単に記述する。

2月13日12時から16時まで、湖水の透明度は弱程度の濁りで推移し、13日18時から20時にかけては強く濁る。22時には強から中程度の濁りとなり、14日の0時から2時にかけて粒子の巻き上げを伴って著しく強く濁る。しかし、14日4時には濁りのない状態へ急変する。このときはユウレイボヤの入・出水口が閉鎖され湖底面と接触するように傾いていることから強い北方向からの流れが起こっている。14日6時になると強い濁りへと変化し、8時になると強から中程度の濁り、10時から12時まで弱い濁りへと一連の変化を見せる。

14日14時から15日14時までの24時間は湖底粒子の巻き上げを伴って強く濁った状態になる。この間、14日20時、15日6時、15日10時には弱い濁りへと変化する一時的ともいえる現象が起こって

いる。15日16時以降は、徐々に濁りがとれた状態へ変化していく。

16日は、終日弱く濁った状態から濁りのない状態となり、17日の2時には強から中程度の濁りが発生している。17日8時には弱い濁りとなり、10時以降は濁りのない状態へと変化していく。

水の動きについては次のようであった。2月13日は18時に弱い北方向からの流れが認められたほかは、顕著な流れは認められなかった。しかし、2月14日の2時には粒子の動きを伴った揺れのある動きが認められ、4時には強い北方向からの流れが発達する。6時から8時までは弱い揺れ動きがみられ、10時から12時は南方向からの弱い流れとなり、14時には北方向からの流れへと変化し、14日16時には揺れ動きが強く、顕著になる。強い揺れ動きは15日4時まで続いた。その後、12時まで緩やかな揺れ動きに変化した後、14時になると再度強い揺れ動きが発生した。この揺れ動きは徐々に弱まり、15日20時には流れが停止した状態になる。2月16日の0時には粒子の巻き上げが発生するが、顕著な流れへとは発展していない。16日の2時から14時まで弱い南方向からの流れが続き、16時以降になると、流れが停止した状態になる。このような停止した状態は18日まで続いた。

### 2. 設置期間中の気象・水位・水質

以下に示す気象・水質記録は、国土交通省の湖心観測所で1時間ごとに得られたもので、各観測項目は以下のものであった。

【風速】2007年2月13日午前中は軽風状態であったが、17時から19時まで6~7 m/sの北東風吹いた(図3)。その後軽風状態になったが、23時から2月14日10時まで10 mを超える南風へと変化した。2月14日5時には風速が18 m/sに達した。14日14時から18時まで10 m/s以下になったが、19時以降になると11 m/sを超す風速へと変化していく。この強風は西高東低の典型的な気圧配置に伴うもので2月15日19時まで24時間続いた。これ以降、2月16日16時から22時まで6 m/sの北東方向の風が吹いたが、2月18日まで東方向の軽風状態が続いた。

【水位】中海の水位は2月15日の0時に最も高く(+47 cm)なり、17日の12時に最も低下(-20 cm)している。中海湖心の水位と境港験潮所の水位(TP)を比較すると、約2時間遅れて水位が変化す

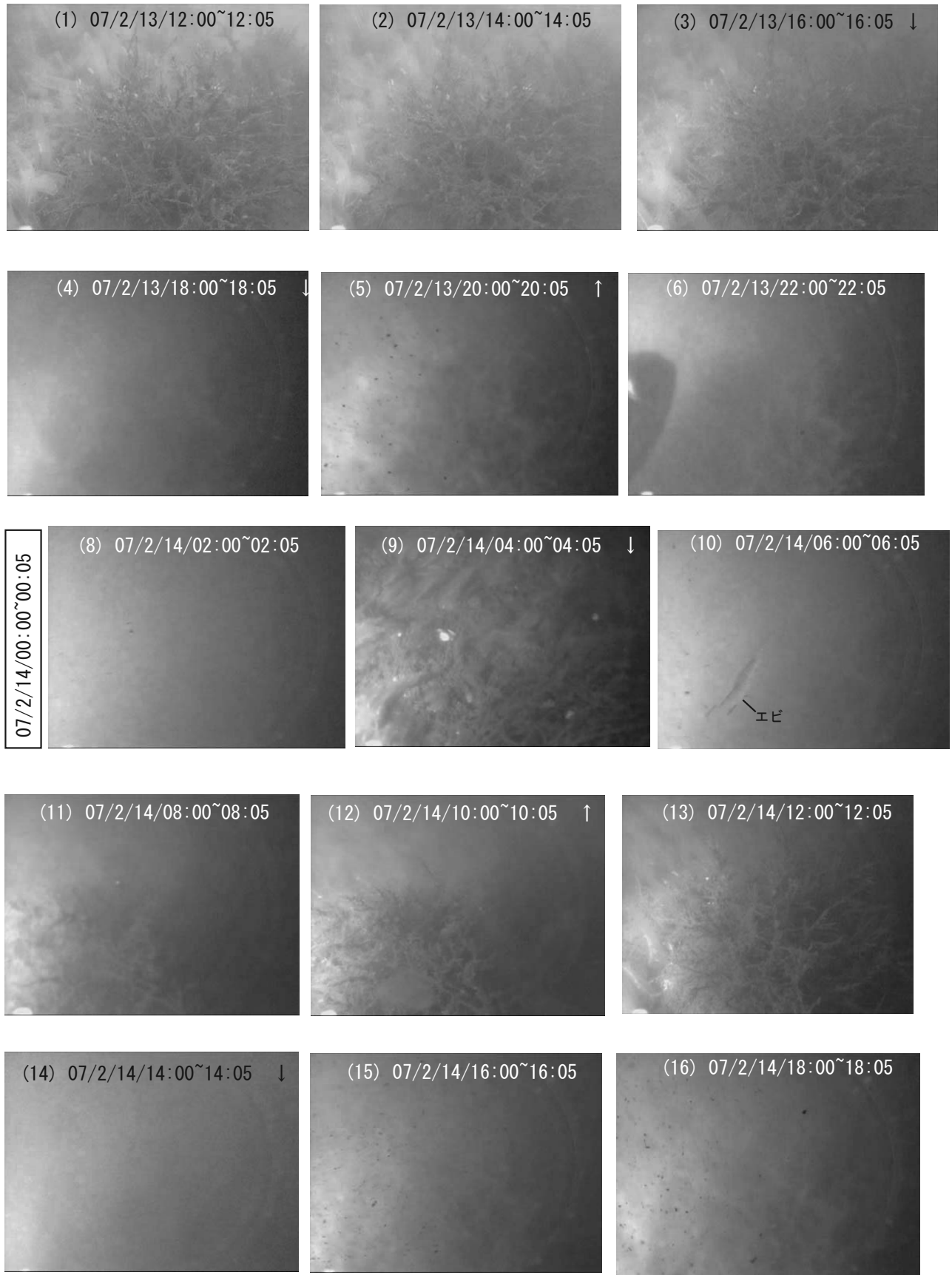


図 2. 5 分間の水中映像のなかのスナップ写真. 観察対象はカメラから約 60 cm 前方の湖底. 横方向で約 40~50 cm の視野を撮影している. 半透明の筒状のものはユウレイボヤ, 海草状のものはヒドロ虫の群体. ↑は南方向からの流れ, ↓は北方向からの流れを示す.

**Fig. 2.** A scene of picture showing about 40~50 cm wide bottom surface about 60 cm ahead of the camera. Hydrozoan and cionid community occupying the scene.

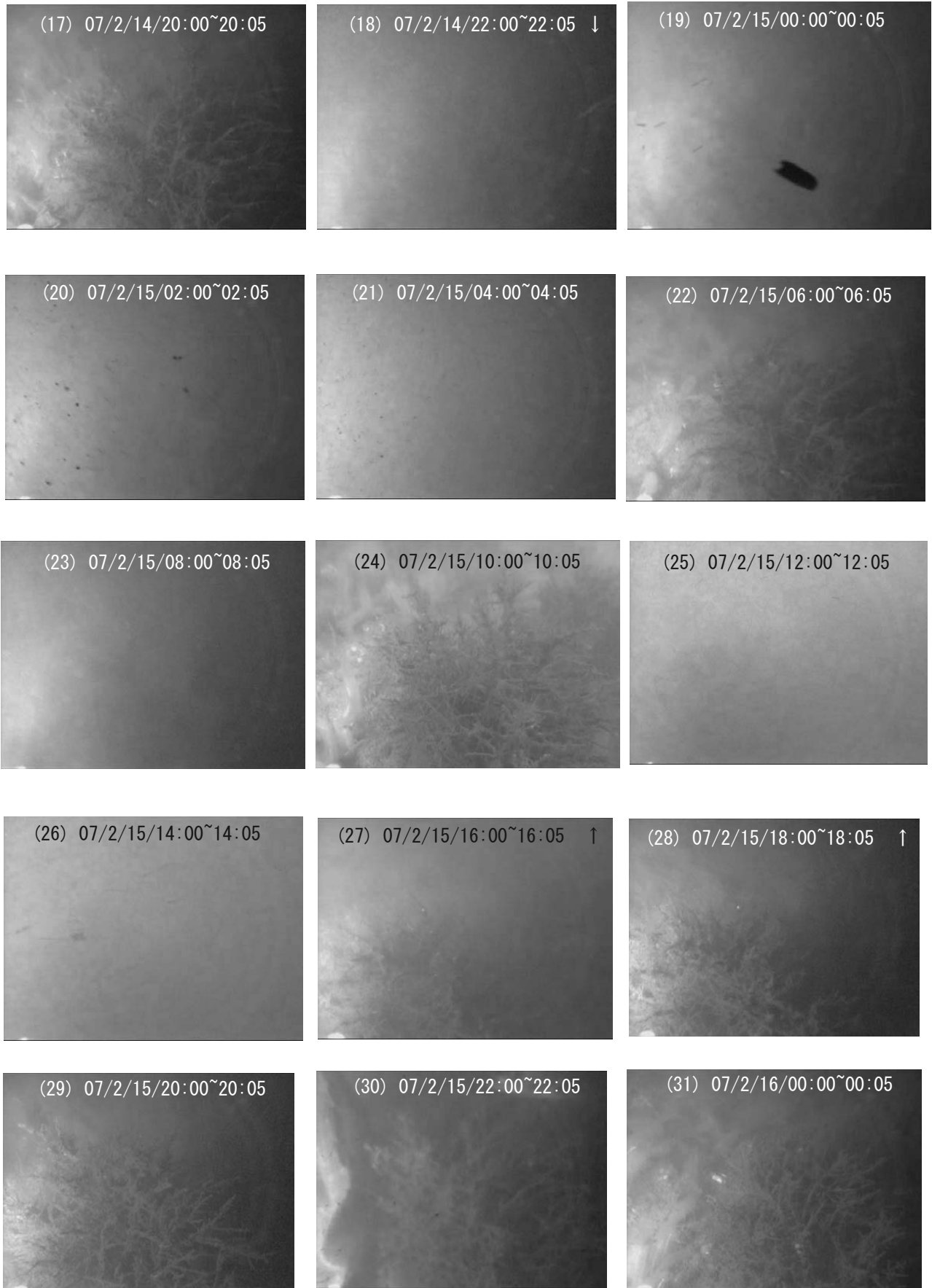


図 2. (続き)  
Fig. 2. (continued)

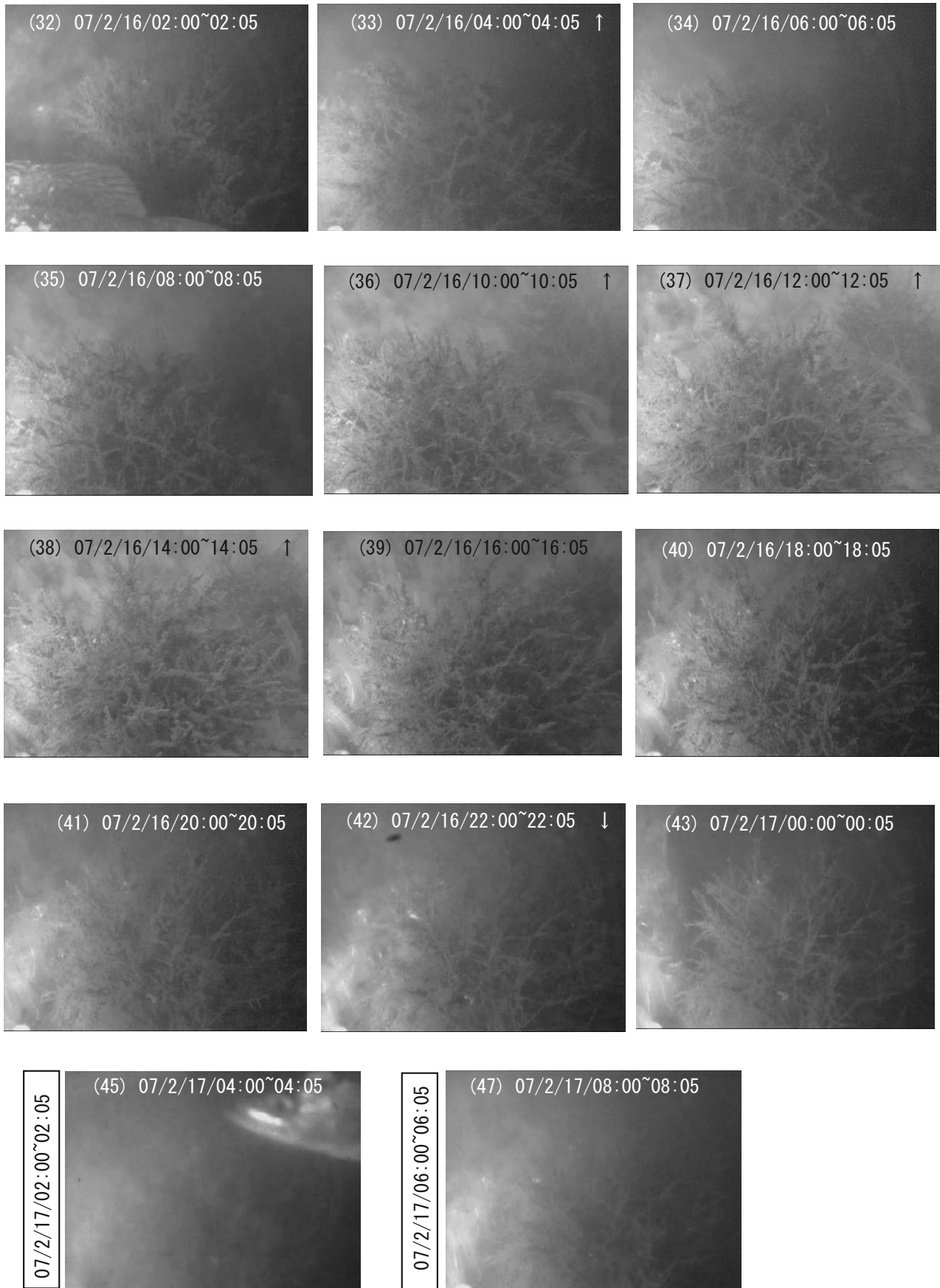


図 2. (続き)

Fig. 2. (continued)

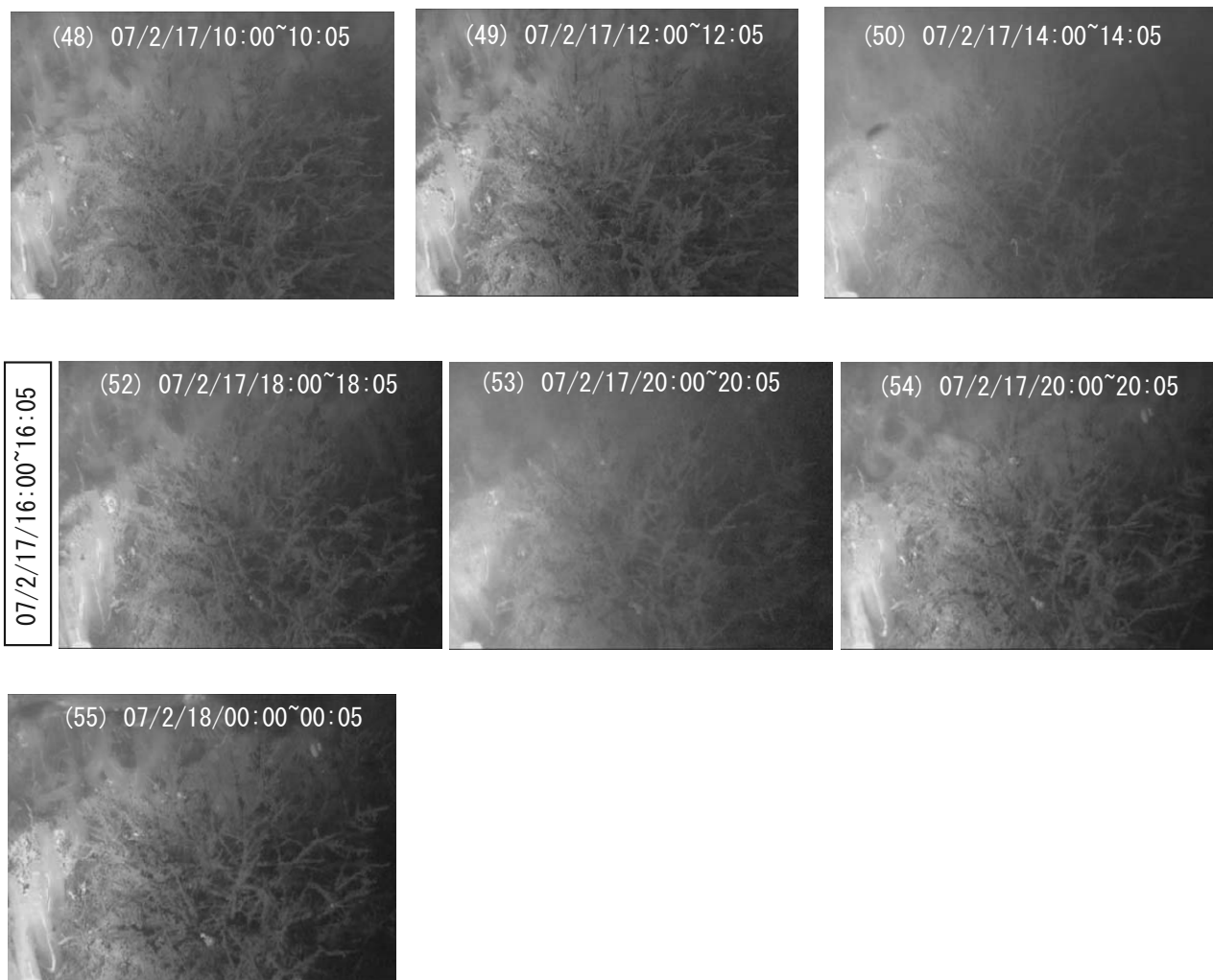


図 2. (続き)  
Fig. 2. (continued)

る。水位差は2月17日の6時頃で最大15 cm程度であった(図4)。図中の上向き矢印(↑)は、流れの強弱には関係なく、映像内で南側からの流れが認められる場合と下向き矢印(↓)は北側からの流れの認められることを示している。

【溶存酸素】溶存酸素濃度の変化は、上層水、中層水、下層水と底層水の間で密接に関連した変化を示している様子がみられる。とくに中層水の変化が著しい(図5)。2月13日にはやや低めであったが、2月14日に10 m/sを越す風が吹くようになると、明瞭に酸素濃度も上昇していく。13日午後から14日15時頃までの湖底の酸素濃度は、明瞭に風速の変化に対応した変化を示している。しかし、14日18時頃から15日にかけて強風が吹いたときには、必ずしも風速に対応した酸素濃度の増加は認められず、2月15日12時になって急激に高濃度へと変化する。10 m/sを越す風が吹き始めて18時間後であ

る。このとき、上層水から底層水まで似た酸素濃度になる。若干の濃度の差はあるものの似た酸素濃度で2月16日15時頃まで維持されているが、これ以降底層水以深と中層水以浅の酸素濃度が分離していく。10 m/sを越す風が弱まって、約20時間続いたことになる。なお、風速の低かった2月13日に起こった下層水の溶存酸素量が底層水のそれより高い特徴的な現象は、海水の逆流がクサビ状に流入してきたことによるものと考えられる(図5)。

【塩分】塩分の変化は、溶存酸素濃度の変化と似た変動を示していることが確認される。2月14日に10 m/sを越す南方向の強風が吹いたときには、中層水の塩分は大きく変動する(図6)。しかし、風向が西風へと変化し、少し風力が低下すると安定し、しかもその後の風力の増加に併せて中層水から上層水の塩分が増加していく。この間、底層水の塩分変動は顕著でない。しかし、溶存酸素濃度が急激

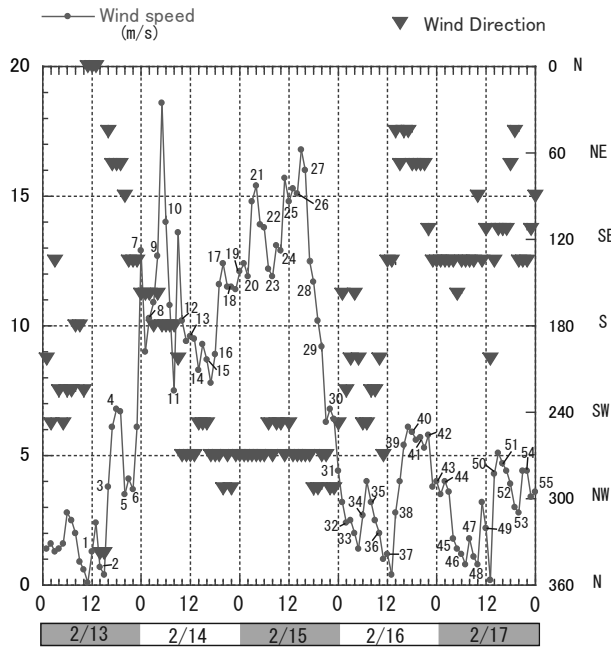


図3. 風速の変化(出雲河川事務所による). 図中の番号は図2に示す映像番号.

Fig. 3. Time-series changes of wind speed. Data from Izumo River Office.

に増加したのと同じ時に塩分も急変する. すなわち, 下層・底層水の塩分は低下し, 上層水・中層水の塩分は増加する. 湖水の塩分がほぼ一樣になる現象が2月15日12時にみられた. その後, 底層水・下層水の塩分は約4 psu程度低下したままで, 表層水も4 psu程度高くなったままでしばらく維持された.

【底層水のクロロフィル】底層水中のクロロフィル濃度は, 2月15日の塩分や溶存酸素濃度の変化と同じ時間に変化が起こっている(図7a). 各層の攪拌に伴う混合作用の結果によるもので上層~中層水起源のクロロフィルが混入したものとみられる.

【底層水の濁度】湖底の濁度は, 時間ごとの変化が激しく, 風力の変化に伴った変動を必ずしも示していない. しかし, 塩分や溶存酸素の変動にみられた2月15日12時以降になって, やや一定した変化を示すようになる(図7b). 軽風状態の2月17日4時から10時ごろまで高くなっている点で, 濁度の変動は風の営力とは別の要因が作用している.

#### 考察: 水中映像からみた気象・水質

これまでの研究から明らかのように, 湖水の動きと風力は密接に関連し, 湖水の化学的性質ばかりでなく, 生態系にとっても重要な環境変動要因になっている(Kondo et al., 1990; 奥田, 1997, Godo et al.; 2001; 野村・瀬戸, 2004; 野村ほか, 2007).

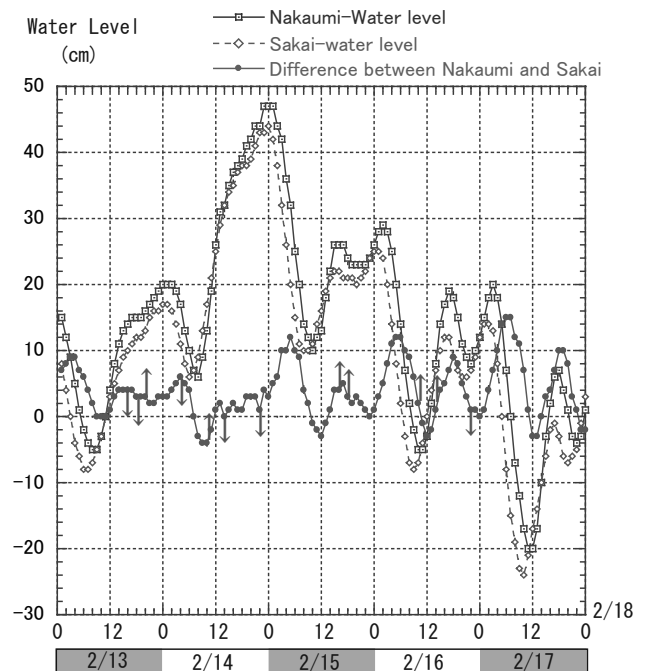


図4. 中海湖心と境港の水位の変化(出雲河川事務所による). 図中の下の波動は中海湖心と境港の水位差を示し, 上下矢印は湖水の流れ来る方向を示す. ↑は南方向からの流れ, ↓は北方向からの流れ.

Fig. 4. Time series changes of water level at Sakai tidal observatory and Nakaumi observatory in the central part of the lake. Water level difference between Sakai and Nakaumi is indicated in the lower half, with a flow direction. ↑ indicating southern flow, ↓ indicating northern flow. Data from Izumo River Office.

野村ほか(2007)は, 11月上旬の風速変化に伴う湖底の様子を観察したなかで, 風速10 m/sの風の発生から17 m/sに達するまでの湖底の状態と水質の変化を記録している. 風速10 m/sの風によって底層水の攪拌がはじまり, 風速が12~13 m/sを超えると濁りが著しくなり, バクテリアマットが剥ぎ取られるとしている. しかし, 下層・底層水と中・上層水との混合は風速が15 m/sを超えて2時間後におこると指摘している. そして, 風速が13~17 m/sになると, 湖底での攪拌は激しく, 湖底泥の巻き上げがより顕著になるとしている. 冬季の湖底は, 無~低酸素状態になることは少ないため, 硫酸還元バクテリアが湖底泥を被覆するようなマットを形成することはない. そのため湖底泥は露出している状態にあり, 底層水の動きに反応し易く湖底堆積物の拡散も容易な状態にあるとみられる. したがって, 2月13日の18時頃に吹いた風速7 m/sの風にも反応して, 顕著な濁りが発生している. 風速に対する湖底泥の動きは季節によって異なることが確認される.



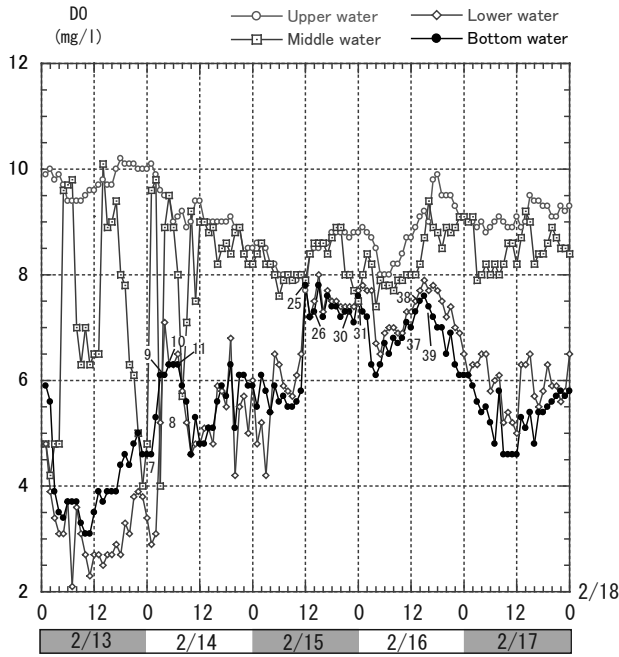


図5. 溶存酸素濃度の変化(出雲河川事務所による). 図中の番号は図2に示す映像番号.

Fig. 5. Time series changes of dissolved oxygen content. Data from Izumo River Office.

このように冬季には比較的小さい風速においても湖底泥の攪乱による濁りが発生しやすいのに対して、風速 10 m/s の風であっても濁りが発生しない場合が認められる。このときには、満潮時期と重なっているように見え、海水の逆流が濁りの発生を抑えているようにも見える。たとえば、2月14日0時があげられる。しかし、2月14日から15日のように10時間にわたって強風が長時間続いていた場合は、満潮時でもこの限りではないようである。

次に、各水層の混合の程度をみると、極めて安定しているとみえる底層水は 10 m/s を超す風が強弱を伴いながら吹き始めて18時間後に急激に混合することが塩分や溶存酸素濃度の変化から理解できる(図5, 6)。これは2006年11月に15 m/s の風が2時間継続して混合作用が確認された状況とは風速とその継続時間で異なっている。比較的弱い風速でも長時間攪拌されることによって混合作用が起りやすいものと考えられる。したがって、冬季の西高東低の気圧配置は弱い風力でも湖底へ酸素を供給しやすい環境を形成しているとみることができよう。一方で、2月15日12時から16時の間約15 m/s の風速が4時間続いても、強く混合作用が継続されていないことも確認される。これには2006年11月が東風であったのに2月は西風であることから風向が関係しているかもしれない。多様なケースを検討して、

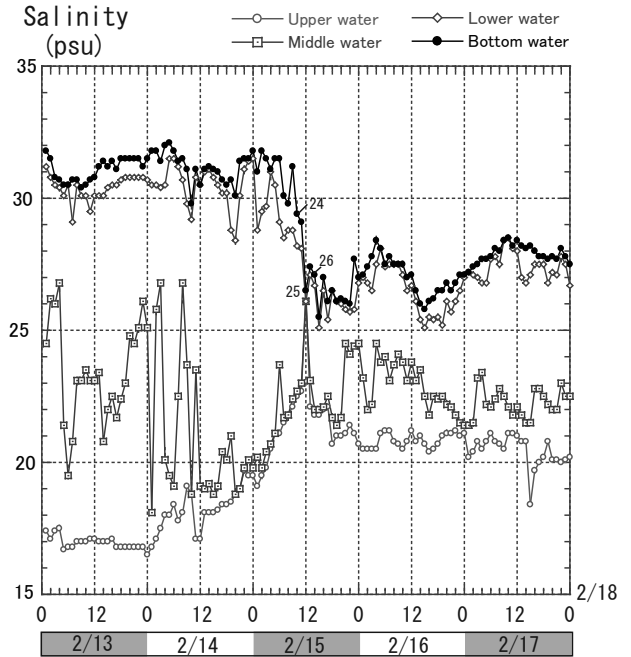


図6. 塩分の変化(出雲河川事務所による). 図中の番号は図に示す映像番号.

Fig. 6. Time series changes of salinity. Data from Izumo River Office.

混合作用の継続時間と風速、風向との関係を求める必要がある。

前報で指摘した風速の変化によらない濁りが、この期間にも発生していることを確認した。2月17日4時~8時頃には風速が2 m/s と微風状態となり、また底層水の動きはほぼ停止した状態であった。しかし、この期間は境水道と中海の水位差が14 cm と高くなり、しかも底層水の濁度が高くなっている時(18 mg/l) とほぼ一致した状況である。中層水のクロロフィル量はこの時期高くなるが、底層水での量は高くはない。したがって、プランクトンの移動による濁りとは考えにくく、水位差によって無機物質を含む底層水の緩慢な移動が起こっていたものとみられる(図7a, b)。

今回の記録された映像には、魚類の遊泳が頻繁に観察されたほか、膨大な数よりなる稚魚の群集が観察された(図8)。低酸素~無酸素環境へ変化して、無生物の環境へと変貌する夏季から秋季の湖底環境とは全く異なった環境が冬季にはみられる。

## ま と め

中海の湖心部に設置した長期観測水中カメラによって2007年2月13日から17日までの5日間の湖底の様子を観察した。14日から15日にかけては、

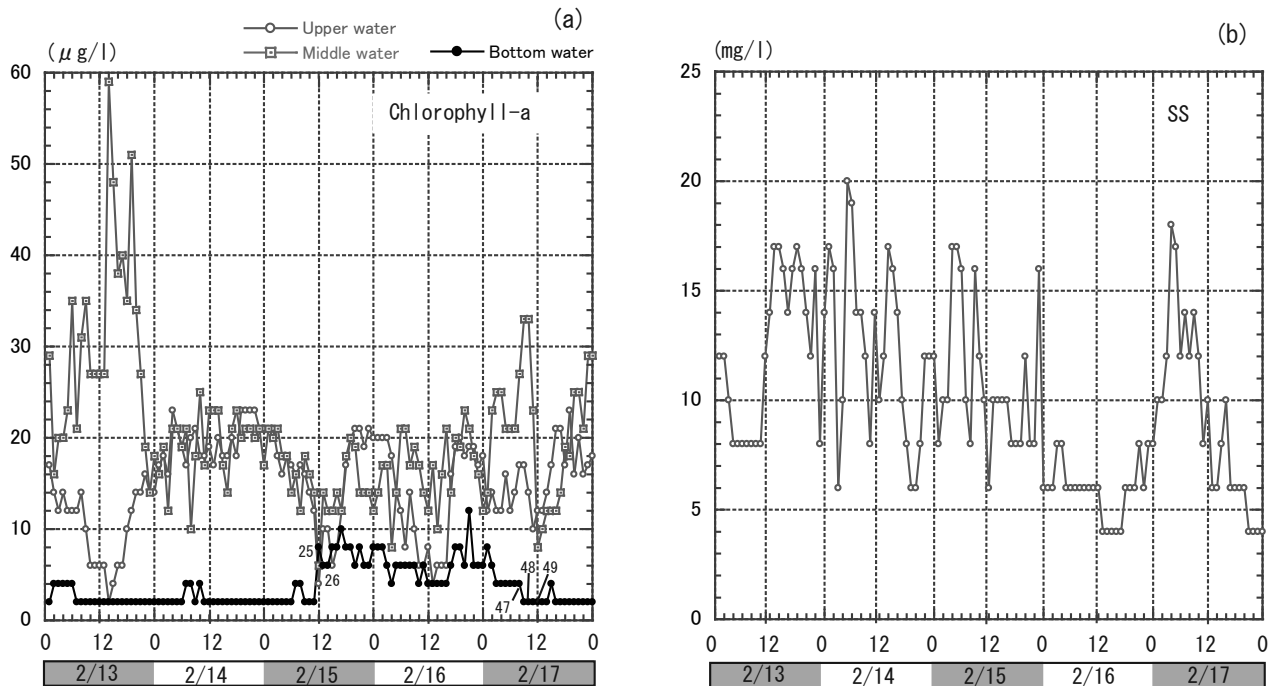


図7. a. 底層水のクロロフィル a の濃度変化(出雲河川事務所による). b. 底層水の濁度の変化(出雲河川事務所による). 図中の番号は図に示す映像番号.

Fig. 7. a. Time series changes of chlorophyll-a content in the bottom water. Data from Izumo River Office. b. Time series changes of suspended matter content in the bottom water. Data from Izumo River Office.



図8. 半透明な魚の群れが後方の湖底とヒドロ虫を覆い隠している様子 (a, b).

Fig. 8. Small translucent fishes covering bottom sediment.

風速が 10 m/s を超す状態であったが、冬季の湖底堆積物はより動きやすい状態にあるとみられ、風速 7 m/s でも風による濁りが発生していた。底層水と中・上層水の混合作用は、11 m/s を超す風速が 18 時間継続して急激に発生していた。冬季の各層の水は構造的に安定しているものと考えられる。このように、強風の時の湖底の動態を明らかにすることができた。また、冬季の湖底は生物の多様性が高く、豊富な生物資源の存在を確認することができた。ここで明らかにした水中映像は、DVD で配付するこ

とができる。また、映像のスナップショットは、<http://www.ipc.shimane-u.ac.jp/earth/> でもみることができる。

## 謝 辞

水中カメラの設置あたり国土交通省出雲工事事務所には施設面でご協力をいただいた。また、査読者には有益なコメントをいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

## 引用文献

- Godo, T., Kato, K., Kamiya, H. and Ishitobi, Y. (2001) Observation of wind-induced two-layer dynamics in Lake Nakaumi, a coastal lagoon in Japan. *Limnology*, 2: 137-143.
- 橋谷 博, 奥村 稔, 藤永 薫, 近藤邦男, 清家 泰, 山田佳裕 (1992) 宍道湖・中海の水質変動に与える気象・海象の影響 - (その2) 1982~1991年の水質変動と気象5因子. 山陰地域研究(自然環境), 8: 69-86.
- Kondo, K., Seike, Y. and Date, Y. (1990) Red tides in the brackish lake Nakaumi (II), Relationships between the occurrence of *Prorocentrum minimum* red tide and environmental conditions. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 37: 19-34.
- 野村律夫・瀬戸浩二 (2004) 有孔虫の産状からみた2003年春季の赤潮発生期の中海の海況. *Laguna* (汽水域研究), 11: 125-130.
- 野村律夫・瀬戸浩二・堀江 譲・高田裕行 (2007) 中海湖心部における湖底の水中映像(その1): 風速変化に対する底層水の動態. *Laguna* (汽水域研究), 14: 17-24.
- 奥田節夫 (1997) 汽水湖における水塊の移動と混合過程. 沿岸海洋研究, 35 (1) : 5-13.