

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

野村律夫¹・瀬戸浩二²・堀江 譲³・高田裕行²

Lake floor images in the central part of Lake Nakaumi (part 1) : wind speed impacts on bottom water motion

Ritsuo Nomura¹, Koji Seto², Yuzuru Horie³ and Hiroyuki Takata²

Abstract: A long-term monitoring waterproof camera was installed on the bottom of Lake Nakaumi at a depth of 6.5 m, in order to observe bottom water movements and the ecology of brackish organisms. Over a six day period, Nov. 4–Nov. 9 2006, brackish water dynamics changed from stable to unstable conditions. Under the prior stable conditions, the sediment surface was covered with a bacterial mat. Strong winds, over 15 m/s, mixed upper and bottom water masses and the halocline disappeared for a short time in the middle of this period.

We show that winnowing of bottom sediments occurs at wind speeds greater than 10 m/s at this location; a small piece of bacterial mat was stripped off from the bottom sediment. When wind speed increased to greater than 12–13 m/s, bottom water turbulence was increased, with larger pieces of bacterial mat and sediment particles several centimeters in diameter being resuspended. Water clarity decreased at this time. The bacterial mat was completely stripped off the sediment surface when wind speed exceeded 16 m/s. Suspended sediment caused water clarity to go to zero at this time.

Fish appeared in bottom waters soon after the wind-driven disruption of stratified water conditions, suggesting that oxygen-rich upper water were well mixed into oxygen-poor bottom water.

Key words: waterproof camera, long-term monitoring, bottom water, winnowing, wind speed

はじめに

汽水域の複雑な自然環境を保全するためには、より多くの自然現象を理解する必要がある。そのためには長期にわたって観測・観察が必要になる。宍道湖・中海では様々な調査機関で水質測定がなされており、詳しい水質の変動が理解できるようになっている。このような観測データは数値化されているが、特定の物理化学的指標の一部にすぎない。もし、長

期にわたって水中の変化を映像によって記録することができれば、複雑多岐にわたる自然の変化を視覚という感性の中で理解することができる。複雑な自然現象を限られた環境指標で代表することには限界のあることを我々は十分に理解しておく必要がある。

この計画は、現在進めている 2000 年より継続しているフラックス調査（湖水中の懸濁物の沈積量調査）と併せて、多様な生態系の存在や水質測定では

¹ 島根大学教育学部 Faculty of Education, Shimane University, Matsue, 690-8504

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

³ しまね産業振興財団 Shimane Industrial Promotion Foundation, Matsue, 690-0816

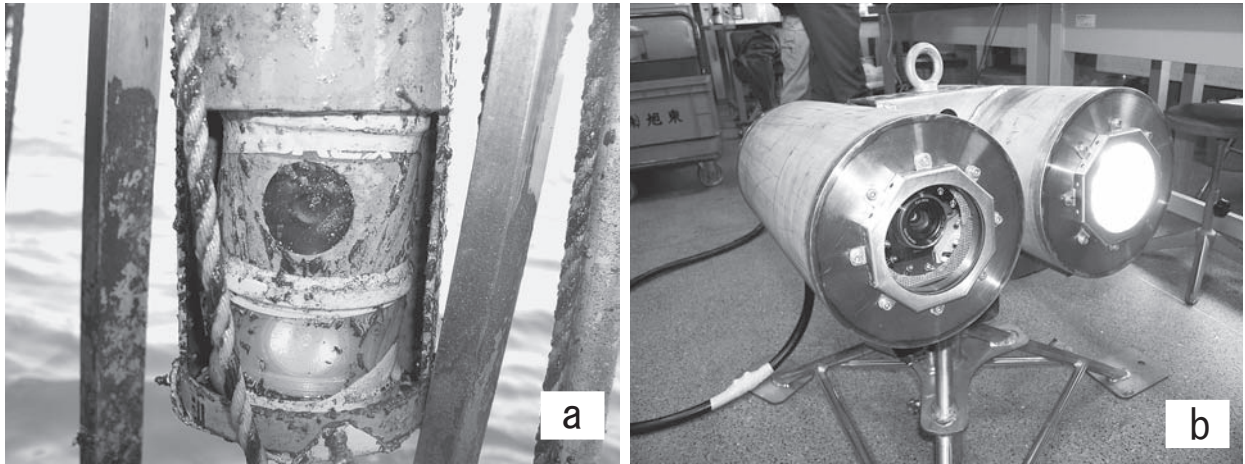


図1. a.ハウジング窓面に光触媒作用を施していない通常的水中カメラ(5月設置, 1ヶ月後の様子). 窓面への付着生物等のため, 適切な映像が得られない. b. 長期モニタリングのために光触媒作用を施した水中カメラのハウジング窓面.

Fig. 1. a. Waterproof camera without a photocatalysis. Housing window was covered with attached organisms and clay minerals after about one month in bottom water. b. Replacement waterproof camera with a photocatalysis for a long-term monitoring of water environment.

得ることのできない複雑な湖水の動態を明らかにすることに基づいている. 現在までに, 膨大な湖底の映像資料が記録されているが, 高解像度(80万画素, 3CCD)の映像は今回報告する2004年11月の設置から得られるようになった. しかし, 技術的問題で中断したため, 実質的に長期観測が可能になったのは2006年11月からである. これより映像から読み取ることのできる特徴的な水環境の動態についてシリーズとして紹介することにする.

本論文では, 中海の湖底堆積物が風速の変化に応じて, どのような挙動を示すのかに注目して観察を行った. 中海や宍道湖では, 風が湖の水質や生態系に与える影響を評価するために多くの研究者によって風速の変化に対する湖水の動態が議論されてきた(たとえば, 橋谷ほか, 1992; Kondo et al., 1990; Godo et al., 2001; 野村・瀬戸, 2004). 本報告は, このような議論に対して視覚的情報による解釈を提供するものである. ここで扱う映像は, カメラを設置して間もない2006年11月に低気圧の通過に伴って発生した軽風から強風状態の風速に対する湖底の動態である. 季節によっても, 風に対する反応は異なることも予想されるが, 従来の指摘を検証する機会になったといえる.

研究 方 法

1. 長期設置型水中ビデオカメラ

長期間にわたって水中カメラを湖底に設置した場

合, 季節による違いもあるが生物活動が活性化する夏季から秋季では約1週間で観察できなくなる(図1a). 付着生物によるカメラハウジング窓面への妨害が必ず起こる. 付着する生物には藻類とフジツボやヒドロ虫類のような大型生物があげられる. 藻類の付着は, 粘土鉱物とともに映像を曇らせ, 大型生物は映像撮影を不可能にする. このような問題を克服するために, 水中ビデオカメラレンズのハウジング窓面に酸化チタン光触媒技術を適用し, 生物忌避機能を備えた水中カメラを開発した(図1b). 酸化チタンを使った光触媒技術の応用は多方面で利用されている(橋本・藤島(監修), 2003).

この水中カメラではハウジング窓面に石英ガラスを使い, 非結晶型のペリオキソチタン酸を窓材に直接塗布し, 450℃の無酸化炉にてアナターゼ型の結晶化を行った. 380 nmの紫外線を照射するLEDを付置し, 石英ガラス表面でスーパーオキサイドアニオン($\cdot\text{O}_2^-$), ヒドロキシラジカル($\cdot\text{OH}$)を生成させている. スーパーオキサイドアニオンとヒドロキシラジカルの発生は, 藻類等の付着を阻害し, ガラス面での自浄作用(水和作用)を高めている.

2. 水中カメラの設置場所と記録

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. カメラ窓面の設置方向は東方向で, 湖底60 cm先の映像を記録している. 記録場所の湖底は, 観測所設置時の工事に伴う湖底の凹凸や観測塔の支

柱に付着していた貝類の殻が落下散乱し、“ヘドロ”堆積物と混在している状態である。

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。なお、上記時間帯でのリアルタイム映像の観察も可能であるが、現時点では受信にかかる画素数に制限があるため、DVD映像ほど鮮明ではない。

観 察 結 果

1. 水中映像の様子

水中の映像は、昼間は全体として黄緑色を呈し、夜間は左1方向からの照明のために左半分のみ湖底の様子が識別できる状態である。一般的に、濁りのために霞のかかった状態で観察されることが多く、透明感のある映像はこの時期には得られなかった。しかし、強く濁らない限り湖底表面の堆積物の様子は観察できる状態である。後述する極めて強い濁りが発生した場合や日照量が低い場合、湖底では昼間でも光量が低下し、暗くなってしまう。図2a, bには各映像のスナップ写真とその時間帯を示している。

11月4日12時から11月9日午前2時までの水中映像には極めて変化に富む湖底の様子が記録されている。主なものとして、湖底を広く網目状に覆う白色のバクテリアのマットがカメラの設置時に観察された(図2a-1)。このマットは停滞的な底層水が維持されている中で発達し続けていたものである(図2a-30)。しかし、11月7日の午前から午後にかけて完全に剥離してしまった。その後、湖底のくぼ地に新たなバクテリアマットがかすかに見られたのみであった。バクテリアのマットの剥離は、低気圧の移動に伴う10mを超す風速が夕方まで続いたことであったが、10m/sを超す風速が湖底表層堆積物に与える影響を評価する上で興味深い。

バクテリアのマットが発達し、底層水が停滞している環境では大型生物の出現はみられなかったが、底層水中の粒子の動きが活発化ようになって、生物の活動が頻繁に観察できるようになった。映像にはスズキ属(*Lateolabrax japonicus*)の遊泳が記録さ

れている(図2b)。

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、各層の水深は以下のものである。

上層水 水深 2.0 m

中層水 水深 3.5 m

下層水 水深 5.5 m

底層水 湖底上 0.5 m

【風速】11月4日12:00～11月5日14:00まで軽風状態にあったが11月5日15:00を過ぎると風速が5 m/sを超える西風が吹くようになる。11月7日1:00～16:00の15時間は風速が10 m/sを超え、とくに8:00～12:00の4時間は風速が15 m/sを超え、強風になった。11月7日22:00から11月8日10:00の12時間は風速が弱く(<5 m/s)、11月8日11:00からは5 m/sを超す風速が発生した(図3)。

【水位】中海湖心の水位と境港験潮所の水位(TP)を比較すると、この時期にはおもに順流が支配的であった。干潮時でも水位差は最大でも数cmほどであった(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、連動した変化をしている。11月5日15:00に5 m/sを超える風が発生するようになって底層の溶存酸素も増加し始める。しかし、風速と溶存酸素濃度との間には明瞭な相関はみられない。11月7日12:00を過ぎたころから湖底の酸素濃度が上昇し、7日の18:00～20:00の2時間と11月8日の17:00～19:00の1時間、濃度の高まりが起こっている。11月7日の高濃度の時には上層水から底層水にかけて濃度が一樣になっており、湖水が全体的に混合された状態となっている。約6時間後には徐々に各層ごとに分離していく(図5)。

【塩分】各層とも安定した状態であったものが、11月7日の4:00頃に上層水と中層水が類似の濃度になり、風速が15 m/sを超えて2時間たった11:00になると下層水と底層水と同じ約28 psuになる。すなわち、下層水と底層水は約31 psuから3 psu低下し、上層水は21 psu程度から7 psu増加したことになる。風速が10 m/sを下回った17:00以降になると、下層水と底層水は3時間ほどさらに塩分が低下(26 psu)しながらも、徐々に各層の塩分は分離していく(図6)。



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。

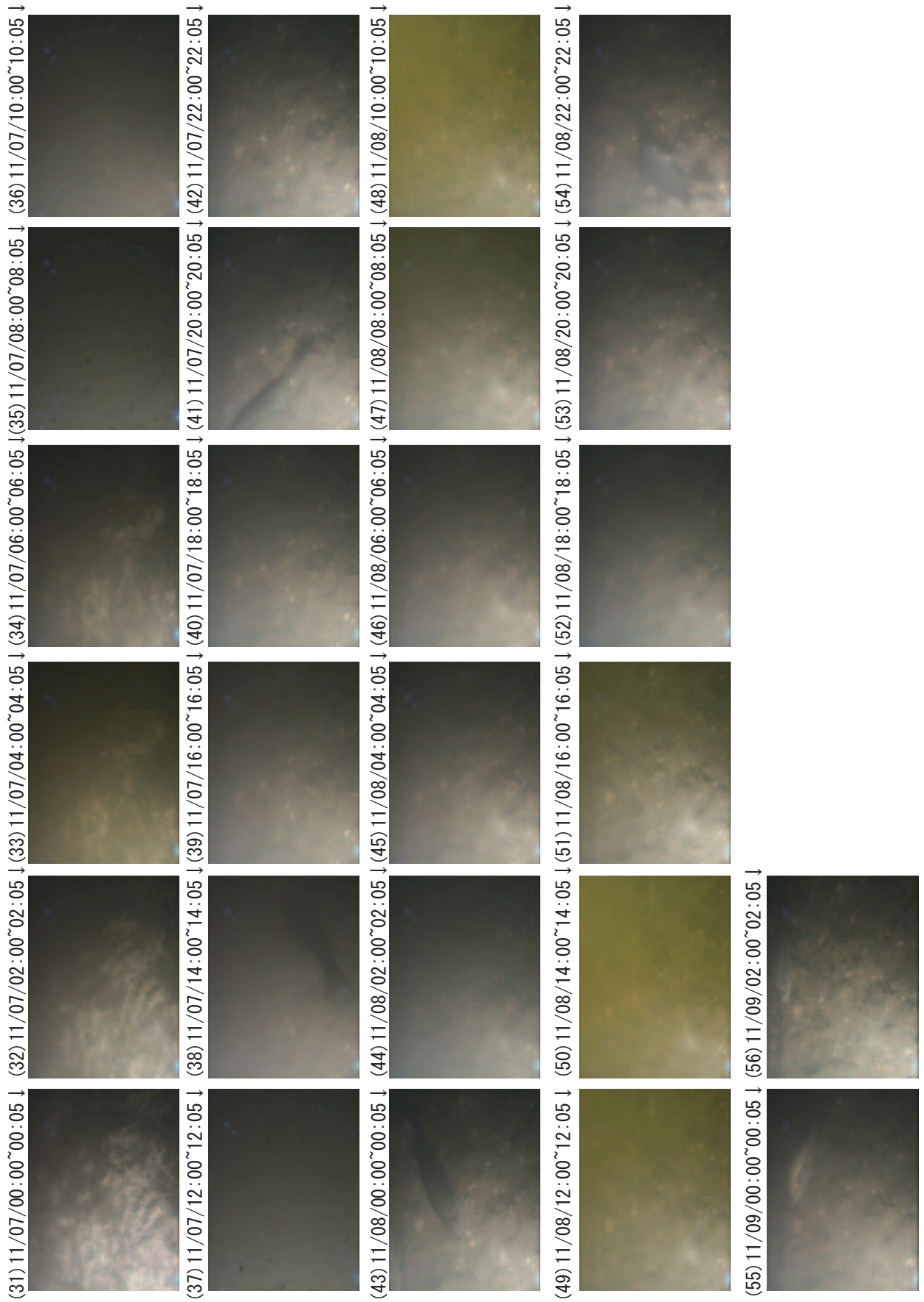


図2. 続き

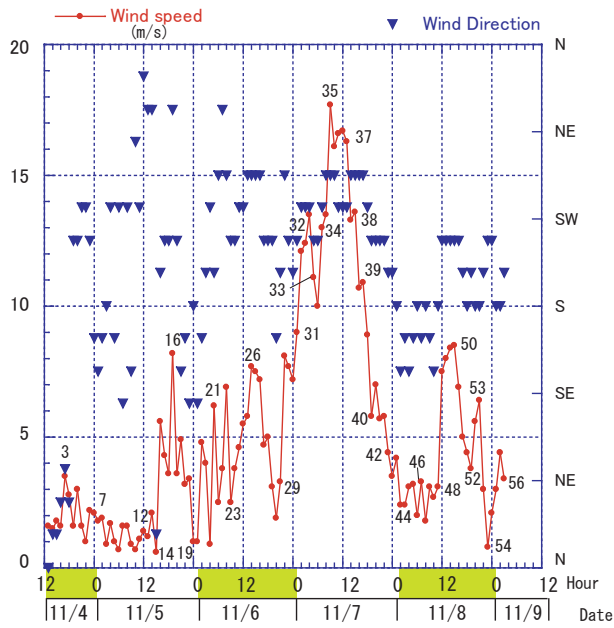


図 3. 風速の変化(出雲河川事務所による). 図中の番号は図 2a, b に示す映像番号.

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

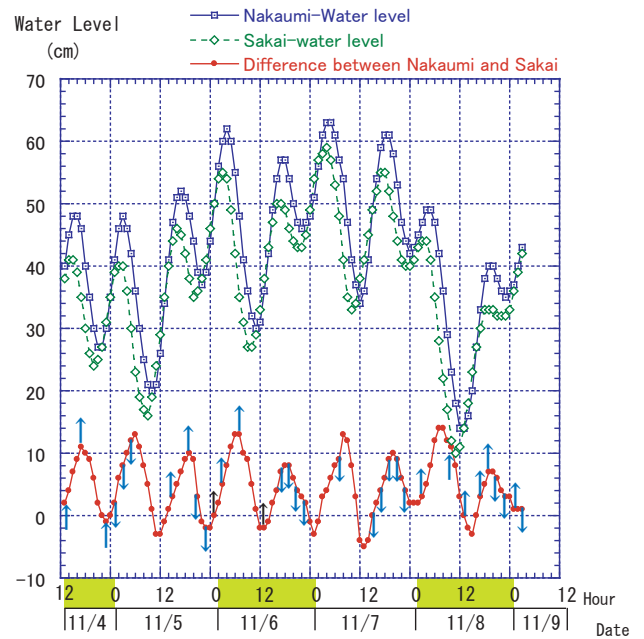


図 4. 中海湖心と境港の水位の変化(出雲河川事務所による). 図中の下の波動は中海湖心と境港の水位差を示し, 上下矢印は湖水の流れ方向を示す. ↑は南成分の流れ, ↓は北成分の流れ.

Fig. 4. 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 flow direction. ↑ indicating southern flow, ↓ indicating northern flow. Data from Izumo River Office.

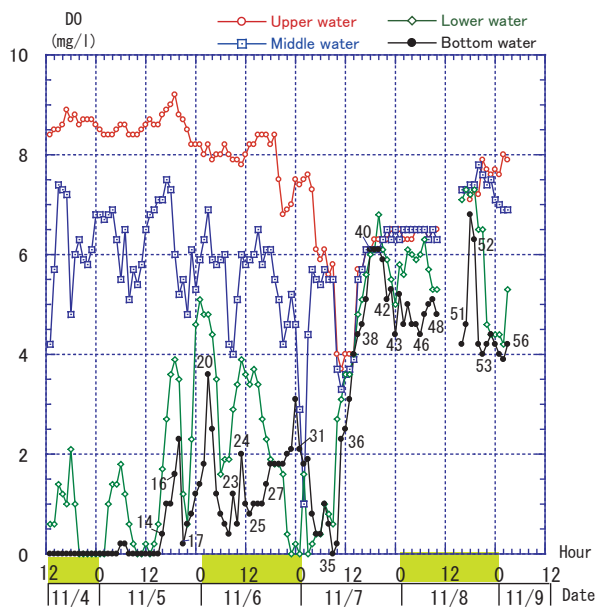


図 5. 溶存酸素濃度の変化(出雲河川事務所による). 図中の番号は図 2a, b に示す映像番号.

Fig. 5. Lake Nakaumi dissolved oxygen content. Data from Izumo River Office.

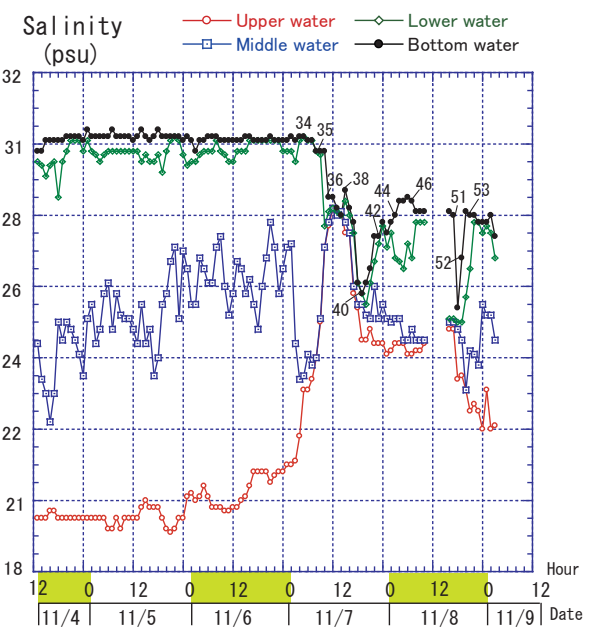


図 6. 塩分の変化(出雲河川事務所による). 図中の番号は図 2a, b に示す映像番号.

Fig. 6. Lake Nakaumi salinity. Data from Izumo River Office.

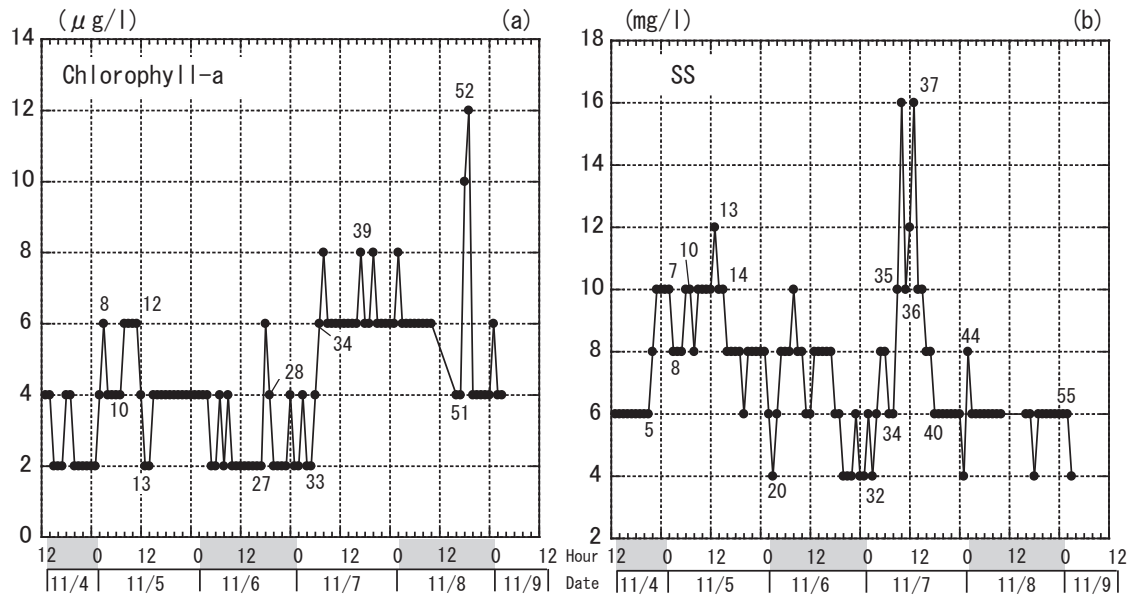


図7. a. 底層水のクロロフィル a の濃度変化(出雲河川事務所による). b. 底層水の濁度の変化(出雲河川事務所による). 図中の番号は図 2a, b に示す映像番号.

Fig. 7. a. Lake Nakaumi chlorophyll-a content in bottom water. Data from Izumo River Office. b. Suspended matter content in Lake Nakaumi bottom water. Data from Izumo River Office.

【底層水のクロロフィル】比較的高い量が 11 月 5 日の午前中と 11 月 7 日から 8 日にかけて継続的にみられる (図 7a).

【底層水の濁度】比較的高い濁度が 11 月 5 日の午前から午後にかけて, また 11 月 7 日の 9:00~15:00 にかけてみられる. 11 月 7 日の高い濁度は, 明らかに風速に関連しているが, 11 月 5 日の濁度は, 風速が比較的低い時にみられることから, 風による影響とは異なっている (図 7b).

考察：水中映像からみた気象・水質

ここでは, 前述した水中の映像を 1 時間ごとに記録されている気象・水質測定と直接比較を行ってみたい.

中海の水質が風によって影響を受けることは以前から指摘されている. Kondo et al. (1990) は強風にもなって浮遊物の増加が起こることを指摘し, 栄養塩類の上層への回帰と赤潮の発生要因を関連させている. 奥田 (1997) は塩分躍層附近での上層・中層の混合作用と下層水の這い上がり現象が起こることを報告している. 野村・瀬戸 (2004) は, 湖底の堆積物中に生息するメイオバントスの有孔虫が浮遊物中に多数見つかったことを報告し, 浮遊物の採取以前に 10 m/s を越す風速で湖底が擾乱を受けていたことを示した. 風速が強まることによって湖底堆積物

の攪乱が湖水中へ浮遊物を拡散せる証拠となっている. Godo et al. (2001) は, 風速・風向による躍層附近の水の流れの変化過程を明らかにしている. 以上のような調査から明らかに湖水と風速は密接に関連し, 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といえる.

11 月 7 日の 10 m/s を越す風速の時には, 水質から判断して上層水と中層水の混合が 3 時間後におきた (0~1 時→3~4 時). その間, 下層と底層水との混合は起こっていなかったが, 底層水は攪乱し, 湖底泥を巻き上げている (図 2b-32). そのため, 湖底を被覆していたバクテリアマットの剥離が少しずつ進んでいく (図 2b-33). 風速が 12~13 m/s を超えると濁りは著しくなり, バクテリアマットの剥離もさらに進行していく (図 2b-34). この時まだ, 下層・底層水と中・上層水との混合は起こっていない. そして, 風速が 15 m/s を超えて 2 時間後に下層・底層水と中・上層水との混合が起こった (7~8 時→9~10 時). 風速が 13~17 m/s になると, 湖底での攪拌は激しく, 湖底泥の巻き上げや粒径が 2~3 cm 程度の集塊状堆積物の舞い上がりも起こっている (図 8). したがって, このような風速が発生した場合, 湖底の表面は完全に巻き上がることを意味している. このことはバクテリアマットが完全に剥離していることから理解できよう (図 2b-39).

一方, 湖底泥の沈降は早めに進んでいくようであ

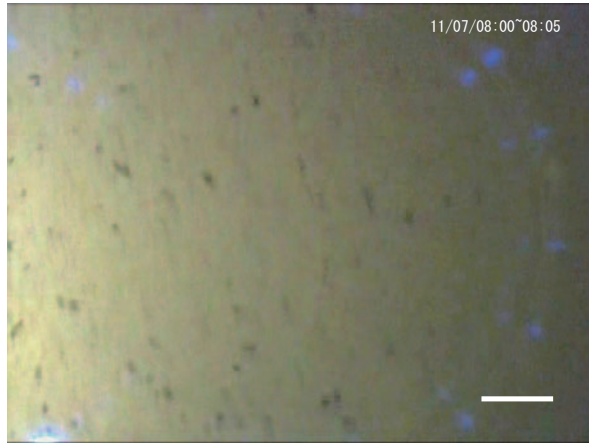


図8. 再浮遊した湖底堆積物の小片(図2b-35の画像調整). スケールは約6 cm.

Fig. 8. Sediment particles resuspended in bottom water. Modified from Figure 2b-35.

る。風速の17.7 m/sを最大とするアクメを経過すると13 m/sの風速があっても湖底の様子が判別できる状態になり、また魚類の遊泳も観察できる(図2b-38)。しかし、塩分や溶存酸素の混合作用は数時間ほど継続している。風によって表層の酸素が底層水へ供給されると、魚類の遊泳が頻繁に確認されるようになることも映像から確認される。

このように、風によって湖底の物理的・水質環境が大きく影響を受けることが実証されたといえる。しかし、風による影響とは別な要因による濁りの存在も確認された。11月5日朝4時から濁りはじめた底層水は8時から12時にかけて著しく濁り(濁度は10 mg/l程度)、湖底の状態を全く観察することができないほどであった(図2b-35)。12時から14時の2時間の間にこの濁りは解消されている。このような濁りは、この期間中以外にも午前から午後にかけて発生することが多く、頻繁に観察されている。視覚的に捉えることのできる湖水のこの濁りは、潮汐作用に直接反映されることはなく(図4)、風向を直接反映しているものではない。かなり複雑な要因が関係しているものと考えられる。

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2006年11月上旬に発生した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、気象・水質の観測データと比較検討することで、上層水から底層水の変化の様子とその動態が湖底の生態系へ与える影響についても実証することができた。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ている。水質保全課の湯浅丈司課長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.
- 橋本和仁・藤島 昭(監修), 2003, 図解光触媒のすべて. 工業調査会, 東京, 308 pp.
- 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.
- 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.