

# LAGUNA

汽水域研究 No.10 March 2003

SHIMANE  
UNIVERSITY



編集委員  
高安克己・國井秀伸

**Editorial Board**  
*Katsumi Takayasu & Hidenobu Kunii*

■ **Short note**

- Validation of water quality data measured using automatic monitoring sensor  
in Lake Shinji and Lake Nakaumi 101-107 *Takashi Nonaka, Tsuneo Matsunaga,  
Akira Hoyano, Daisuke Nakayama  
and Koji Seto*
- Field experiment on post-mortem dissolution of calcareous foraminifera in brackish to bay environment  
109-111 *Hiroyuki Takata*
- Foraminiferal assemblages in Aso-kai Lagoon, central Japan 113-118 *Hiroyuki Takata, Shun-suke Murakami,  
Koji Seto, Saburo Sakai, Satoshi Tanaka  
and Katsumi Takayasu*

■ **The Center's affairs**

LAGUNA (汽水域研究) No.10  
2003 年 (平成 15 年) 3 月発行

●編集・発行  
島根大学汽水域研究センター  
〒690-8504 松江市西川津町 1060  
TEL&FAX 0852-32-6099

●印刷  
(有)高浜印刷  
〒690-0133 松江市東長江町 902-57  
TEL 0852-36-9100

### Original Articles

- Characteristics of flushed dam sediments with dark sludge from Dashidaira Dam, Toyama, Japan  
 1-17 *Kazue Tazaki, Yukie Kunimine, Toshikazu Morikawa, Chaerun Siti Khodjah, Ryuji Asada, Koshiro Miyata, Rie Wakimoto, Yorimasa Ikeda, Kazuhiro Sato, Hiromi Segawa, Nanae Koji, Akiko Fujisawa and Shingo Moriuchi*
- Current fluctuations in Lake Nakaumi measured with the current drogue  
 19-26 *Shimpei Moriwaki, Shinya Ohkita, and Tomoyasu Fujii*
- Relation between hydrographic feature of the oxygen-deficient water mass and oceanographic structure in Lake Nakaumi, San'in District, west Japan  
 27-34 *Shimpei Moriwaki and Shinya Ohkita*
- Intrusion of high salinity water mass into Ohashi River, San'in District of Japan  
 35-45 *Shimpei Moriwaki, Tomoyasu Fujii and Katsuya Fukui*
- Water quality of Lake Kamo, Sado Island, northeast Japan, 1997 ~ 2001  
 47-56 *Katsuaki Kanzo, Niigata Prefectural Ryotsu High School Science Club, Iwao Kobayashi and Masaaki Tateishi*
- Estimation of surface chlorophyll-a concentration using multi-date Landsat/TM data in Lake Shinji and Lake Nakaumi  
 57-63 *Yuji Sakuno, Takeshi Yoshida, Masatomo Yamamoto, Tsuneo Matsunaga, Daisuke Nakayama, Katsumi Takayasu, Toshiaki Kozu and Toyoshi Shimomai*
- Estimation of water temperature and turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi using ASTER data, 2000-2002  
 65-72 *Yuji Sakuno, Masatomo Yamamoto, Takeshi Yoshida, Tsuneo Matsunaga, Daisuke Nakayama, Katsumi Takayasu, Toshiaki Kozu and Toyoshi Shimomai*
- High-resolution airborne SAR observation of a coastal lagoon environment : preliminary results  
 73-86 *Toshiaki Kozu, Nobuyuki Ikeuchi, Keisuke Ichikawa, Toyoshi Shimomai, Yuji Sakuno, Daisuke Nakayama and Katsumi Takayasu*
- Simulation experiments for renovation of hypolimnetic anoxic condition in Lake Nakaumi  
 87-99 *Morihiro Aizaki*

( continued on inside back cover )



### ■原 著 論 文

□富山県出し平ダムの排砂ゲートから排出された黒色濁水の特徴

1-17 田崎和江・國峯由貴江・森川俊和  
Chaerun Siti Khodjah・朝田隆二  
宮田浩志郎・脇元理恵・池田頼正  
佐藤一博・瀬川宏美・小路奈々絵  
藤沢亜希子・盛一慎吾

□漂流版追跡による中海の流動観測の一例

19-26 森脇晋平・大北晋也・藤井智康

□中海に出現する貧酸素水塊の海況学的特性と海洋構造

27-34 森脇晋平・大北晋也

□大橋川における高塩分水塊の遡上現象

35-45 森脇晋平・藤井智康・福井克也

□佐渡島加茂湖の水質 —1997～2001 年の水質断面図—

47-56 神蔵勝明・新潟県立両津高校理科部  
小林巖雄・立石雅昭

□多時期 Landsat/TM データによる宍道湖・中海の表層クロロフィル a 濃度分布推定

57-63 作野裕司・吉田武史・山本正智  
松永恒雄・中山大介・高安克巳  
古津年章・下舞豊志

□ASTER データを用いた宍道湖・中海の水温・濁度推定 (2000～2002 年)

65-72 作野裕司・山本正智・吉田武史  
松永恒雄・中山大介・高安克巳  
古津年章・下舞豊志

□高分解能航空機搭載合成開口レーダによる汽水域観測：初期解析結果

73-86 古津年章・池内伸行・市川啓祐  
下舞豊志・作野裕司・中山大介  
高安克巳

□貧酸素水塊解消のための中海水質シミュレーション

87-99 相崎守弘

■短 報

□宍道湖・中海における国土交通省自動観測水質データの検証

101-107 野中崇志・松永恒雄・梅干野晃  
中山大介・瀬戸浩二

□汽水～内湾環境における有孔虫殻の溶解実験（予報）

109-111 高田裕行

□京都府阿蘇海における底生有孔虫群

113-118 高田裕行・村上俊介・瀬戸浩二  
坂井三郎・田中里志・高安克己

■記 事

汽水域研究センター活動報告

LAGUNA 編集要項と執筆要項

投稿申込書／原稿整理カード

## 富山県出し平ダムの排砂ゲートから排出された 黒色濁水の特徴

田崎和江<sup>1</sup>・國峯由貴江<sup>2</sup>・森川俊和<sup>2</sup>・Chaerun Siti Khodjah<sup>2</sup>  
朝田隆二<sup>1</sup>・宮田浩志郎<sup>2</sup>・脇元理恵<sup>2</sup>・池田頼正<sup>2</sup>・佐藤一博<sup>2</sup>  
瀬川宏美<sup>2</sup>・小路奈々絵<sup>2</sup>・藤沢亜希子<sup>1</sup>・盛一慎吾<sup>1</sup>

### Characteristics of flushed dam sediments with dark sludge from Dashidaira Dam, Toyama, Japan

Kazue Tazaki<sup>1</sup>, Yukie Kunimine<sup>2</sup>, Toshikazu Morikawa<sup>2</sup>, Chaerun Siti Khodjah<sup>2</sup>,  
Ryuji Asada<sup>1</sup>, Koshiro Miyata<sup>2</sup>, Rie Wakimoto<sup>2</sup>, Yorimasa Ikeda<sup>2</sup>, Kazuhiro Sato<sup>2</sup>,  
Hiromi Segawa<sup>2</sup>, Nanae Koji<sup>2</sup>, Akiko Fujisawa<sup>1</sup> and Shingo Moriichi<sup>1</sup>

**Abstract:** Dashidaira Dam and Unazuki Dam at Kurobe River, Toyama, Japan are regularly flushed sediments since 1991. The flushing of sediments has been impacted on ecosystem of under stream and Toyama Bay. Parameter of river water, such as pH, Eh, EC and DO at four places, were measured. Clay mineralogical components of dam sediments conducted in the two reservoirs have made it possible to evaluate the characteristics of sedimentation. Biological data are also essential because they allow comparisons to be made with conditions upper and lower of the dam sediments. At 15:30 on July 14 th, 2002, dark sludge with low oxygen was flushed from Dashidaira Dam, which was collected from Ononuma Park. The dark sludge contains expandable clay minerals with strictly anaerobic bacteria, indicating pH 6.8, Eh -210 mV, EC 143  $\mu$ S/cm and DO 0.9 mg/l. Physical, mineralogical and biological properties of flushed dam sediments (dark sludge) from Dashidaira Dam differ from the upper clean stream cause strong negative in downstream of Kurobe River. It had better leave river alone.

**Key words:** dam sediments, dark sludge, flushing, river water, strictly anaerobic bacteria

### はじめに

現在、ダム貯水池内の堆砂が進行し、貯水容量の低下により本来の機能が果たせないダムが多数発生している。次世代に渡る水資源の技術的管理あるいは流砂系における総合的な土砂管理を実現させるためには、その要となる貯水池の適切な土砂管理が不

可欠である(角, 2000; 天野, 2001)。堆砂問題の解決策として、欧州諸国では、ダム貯水池に流入する土砂量を軽減するための排砂バイパストンネルの設置やダム貯水池に堆積した土砂を下流へ排出する排砂ゲートの設置を行っている(角, 1996, 1998; Kareiva et al., 2000; Mann and Plummer, 2000; Jackson et al., 2001)。日本においても、黒部川水系の出し平ダムや

<sup>1</sup> 金沢大学理学部地球学科 Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, 920-1192 Japan

<sup>2</sup> 金沢大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, 920-1192 Japan

宇奈月ダムにおける排砂，天竜川水系美和ダムや新宮川水系旭ダムなどにおける排砂バイパスの事例がある(角，2000)。

出し平ダムにおける排砂は，出し平ダムが建設されてから6年目の1991年12月に初めて行われた。その際，ダムからは砂や礫ばかりではなく多量のヘドロが排出され，下流域には悪臭がたち込め，生態系に大きな影響を与えた(小久保，2000)。しかし，その後も1999年までに計8回の排砂が行なわれた。1991年の排砂以降，黒部川河口沖から北東の泊沖にかけて行われている刺し網漁業や飯野沖のワカメ養殖場では，漁獲量，収穫量が急激に減少している(田崎ほか，2002)。2000年には出し平ダムの約6 km下流に同じく排砂ゲートを有する宇奈月ダムが建設され，2001年6月19日には出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂が行われた。なお，連携排砂とは，出し平ダムとその下流に位置する宇奈月ダムの排砂ゲートを同時期に開け，出し平ダムから排砂されたダム堆積物を宇奈月ダム貯水池に再堆積させないために行う操作である。その期間中，ある時間帯では河川水の酸化還元電位および溶存酸素量の著しい減少が認められた(田崎ほか，2001)。

2002年7月14日には，再度出し平ダムおよび宇奈月ダムによる連携排砂が行われた。この時の排砂量は約8万m<sup>3</sup>であり，2001年に行われた連携排砂時の約59万m<sup>3</sup>の1/7であった。また，本格的に排砂が行われるようになった1995年以降の年間排砂量と比較しても少ない。すなわち，2002年の連携排砂は，排砂量が極端に少ないことが特徴である。

本研究では，2002年7月14日に行われた連携排砂時に黒部川の出し平ダム上流，出し平ダム直下，宇奈月ダム直下の3地点において河川水の水質測定を行なったほか，出し平ダムより排出された黒色濁水を尾の沼公園前において採取することに成功した。その黒色濁水の特徴は還元的かつ貧酸素状態であり，さらに培養実験により偏性嫌気性細菌の生息を確認したので報告する。

## 試 料

本研究で用いた分析試料は，2002年7月14日より行なわれた連携排砂時の黒部川の河川水である。出し平ダム上流約2.5 kmに位置する黒部川第二発電所付近(①)，出し平ダム下流約0.3 km地点(②)(以降，出し平ダム直下とする)，宇奈月ダム下流約0.3 kmに位置する山彦橋付近(④)において30～60



図1 2002年7月14日に行われた出し平ダムおよび宇奈月ダムにおける連携排砂時の水質測定および試料採取地点。

Fig. 1 Locality map of sampling points during flushing dam sediments from Dashidaira and Unazuki Dam in July 14<sup>th</sup>, 2002.

分毎に水質測定を行なった(Fig. 1)。

また，2002年7月14日11:30，出し平ダム貯水池の水位が低下した際に下流の尾の沼公園前(③)において黄褐色～灰色の濁水を含む堆積物(以降，黄褐色堆積物とする)を採取した。濁水の一部は渦を巻きながら流下していた(Fig. 2 A 左)。また，出し平ダムにおいて自然流下状態となった2002年7月14日15:30には，黒褐色～暗灰褐色の濁水(以降，黒色濁水とする)が，尾の沼公園前(③)を，渦を巻き泡立ちながら蛇行して流下しているのが認められ，硫黄臭も漂うようになった(Fig. 2 B)。この黒色濁水も尾の沼公園前(③)において採取した。なお，自然流下状態とは，ダム貯水池の水位が河床近くまで低下し，上流から流入する河川水によってダム堆積物が押し出される状態のことを指す。出し平ダムと宇奈月ダム周辺の模式断面図を Fig. 3 に示す。2002年7月14日11:30に採取した黄褐色堆積物は，連携排砂中，尾の沼公園前(③)を流下した黄褐色の濁水中の懸濁物質が沈殿・堆積したものである。出し平ダム上流の黒部川第二発電所付近(①)では，連携排砂中河川水に濁りはほとんど認められず，川底の礫が目視でき



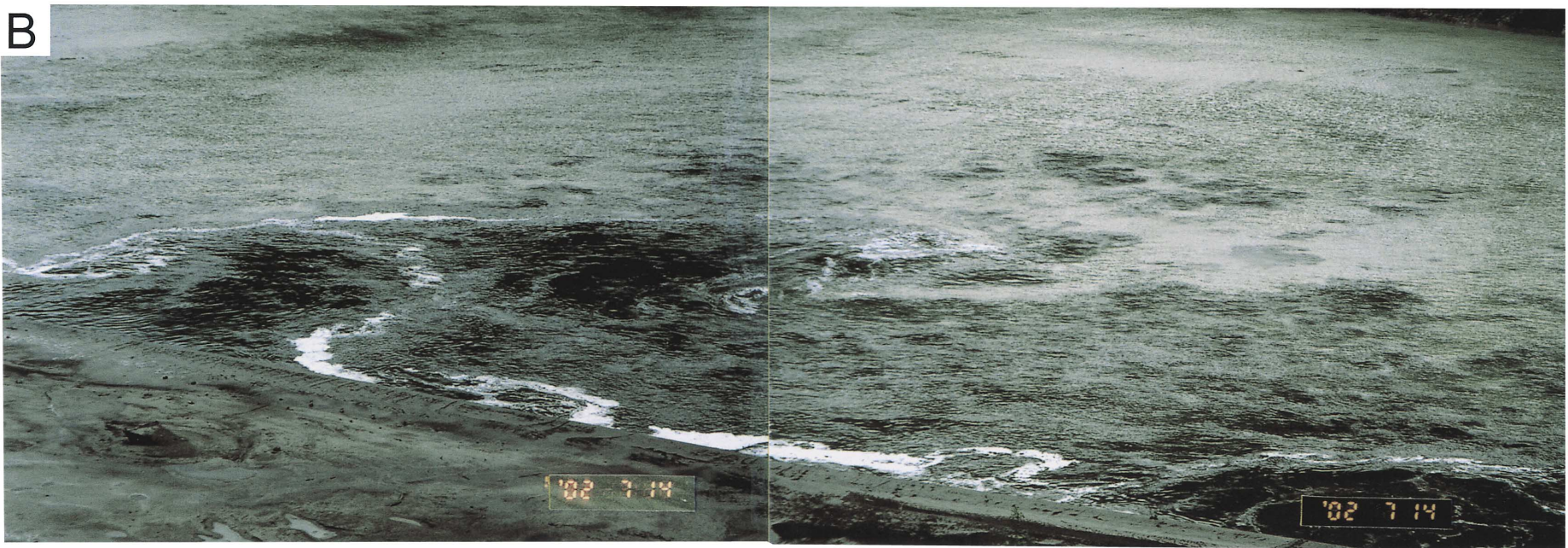


図2 連携排砂中の尾の沼公園からみた河川の様子。A; 2002年7月14日11:30, ダム堆積物の表層部分の懸濁物質を含む黄褐色河川水。B; 2002年7月14日15:30, 自然流下時に出し平ダムから排出された硫黄臭のする黒褐色～暗灰褐色の濁水(黒色濁水)。一部泡立ったり, 渦を巻きながら流下している。  
**Fig. 2** Field view at Ononuma Park showing yellowish brown muddy water at 11:30 on July 14<sup>th</sup>, 2002 (A). At 15:30 on July 14<sup>th</sup>, 2002, dark sludge with sulfurous stench flushed out from Dashidaira Dam (B).

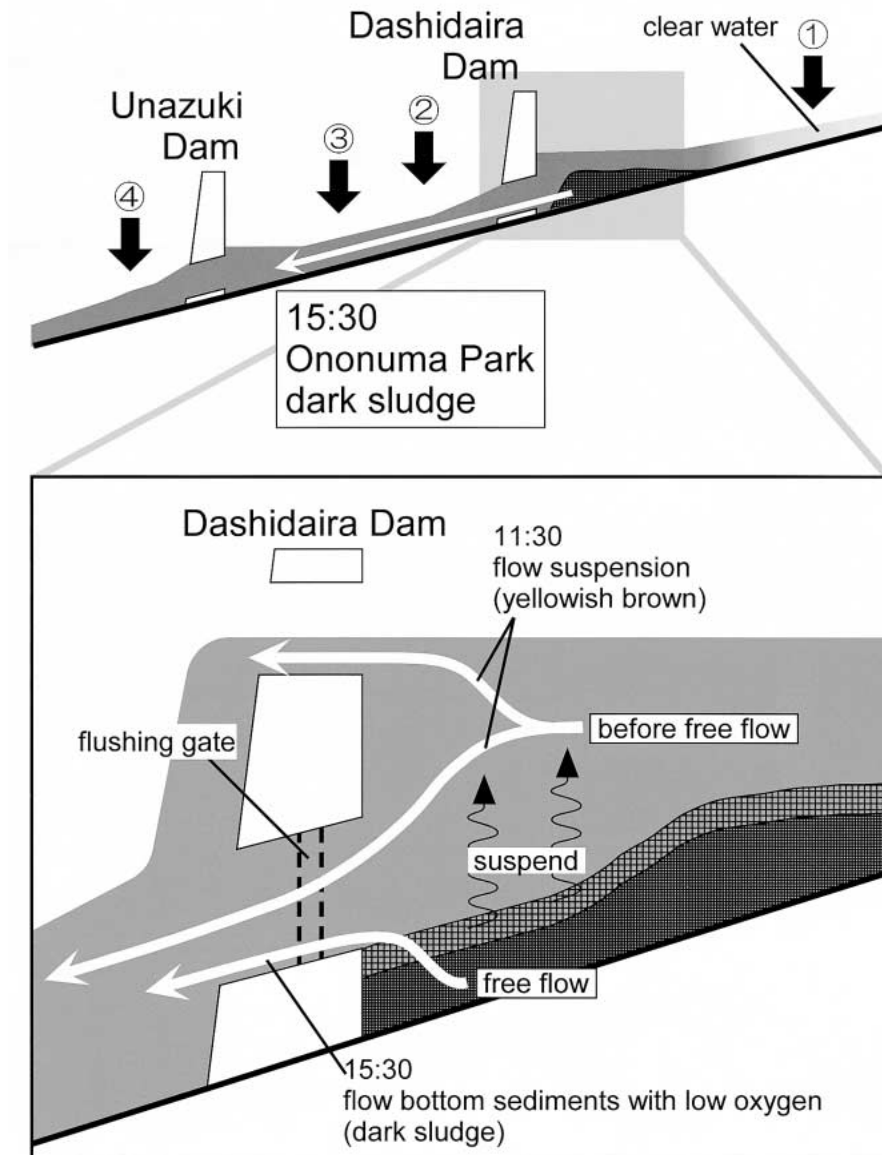


図3 出し平ダムおよび宇奈月ダムの模式断面図(①～④)は図1のサンプリング地点を示す。

**Fig. 3** Schematic cross section of Dashidaira Dam and Unazuki Dam (Symbols ①～④ are the same sampling points as those in Fig. 1). The structural cross section of Dashidaira Dam showing flow system of flushing suspension and dark sludge.

たことから、黄褐色の濁水中の懸濁物質は、出し平ダムの堆積物の表層が放水により生じた水流の乱れによってまきあがり、常用洪水吐または排砂ゲートより排出されたものである (Fig. 3, before free flow). 一方, 2002年7月14日15:30に尾の沼公園前(③)において採取した黒色濁水は、出し平ダム上流の黒部川第二発電所付近(①)では濁りがほとんど認められなかったことから、出し平ダムにおいて自然流下状態となった時に排出されたものであり、黄褐色堆積物よりさらに深部の出し平ダム堆積物と考えられる (Fig. 3, free flow).

## 実験方法

### 水質測定

出し平ダムおよび宇奈月ダムによる連携排砂が行われた2002年7月14日に現地において河川水のpH, 酸化還元電位 (Eh), 電気伝導度 (EC), 溶存酸素量 (DO)の測定を行った。さらに、懸濁物質の水質への影響を検討するために黒部川第二発電所付近(①), 出し平ダム直下(②)および山彦橋(④)において採水し, 500 ml ペットボトルに密閉した試料を研究室に持ち帰り, 2002年7月15日19:15より再度



測定を行った。それぞれの測定には HORIBA カスタニー LAB pH メーター F-24, HORIBA カスタニー ACT pH メーター D-13, HORIBA カスタニー ACT 導電率メーター ES-12, HORIBA ハンディ溶存酸素メーター OM-12 および TOA ポータブル溶存酸素計 DO-21 P を用いた。また、2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に、尾の沼公園前(③)において採取した黄褐色堆積物の間隙水および黒色濁水についても現地において同様の測定を行った。

#### 窒素、炭素、硫黄の定量分析

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に、尾の沼公園前(③)において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水の懸濁物質について、NCS 元素分析装置 (CE Instruments, NA 2500) を使用し、窒素、炭素、硫黄の定量分析を行った。試料は乾燥させ、粉末にしたものをそれぞれ約 2 mg ずつ用い、1 試料につき 2 回分析を行い、平均を求めた。検量線の作成は K-factor 法を採用し、標準試料には Sulfanilamide Standard ( $C_6H_8N_2O_2S$ , C; 41.84%, H; 4.68%, N; 16.27%, S; 18.62%) を使用した。

#### X 線粉末回折分析 (XRD 分析)

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に、尾の沼公園前(③)において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水の懸濁物質に含まれる粘土鉱物を、XRD 分析により同定した。分析には理学電機製 RINT 1200 型 X 線回折装置を使用し、 $CuK\alpha$  線を用いて電圧 40 kV, 電流 30 mA で分析を行った。定方位試料の分析には、風乾した試料 0.15 g をコクサン製卓上遠心機 H-26 F を用いて  $2\mu m$  以下  $0.2\mu m$  以上の粒子を分離・濃縮したものをスライドガラスに塗布し、乾燥させた後に分析を行った。さらに格子面間隔が約 14 Å (001) を示す試料は、エチレングリコール処理を施して分析を行った。エチレングリコール処理試料は、関東化学製 1 級エチレングリコールを使用し噴霧法で作成後、湿潤状態で分析した。

#### 光学顕微鏡観察

2002 年 7 月 14 日 15:30, 尾の沼公園前(③)において採取した黒色濁水中の懸濁物質を、微分干渉・落射蛍光顕微鏡を用いて観察した。また、DAPI (4',6-ジエチルピロニウム-2-フェニルインドール二塩酸塩,  $C_{16}H_{15}N_5 \cdot 2 HCl$ ) で DNA を染色した試料についても観察を行なった。蛍光顕微鏡では、Hg ランプから発生する光線のうち UV-1 フィルターを用いて波長

365 nm の紫外線のみを抽出して試料に照射し、試料の蛍光から波長 400 nm 以上の光のみを観察した。DAPI と錯体を作った微生物中の DNA が青色に蛍光を発することで生息する微生物の確認を行った。なお、観察にはニコン製 OPTIPHOTO-2 型光学顕微鏡に微分干渉装置 NTF 2 A および落射蛍光装置 EFD 3 を設置して使用した。

#### 嫌気培養

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に、尾の沼公園前(③)において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水中に生息する偏性嫌気性細菌を嫌気培養によって分離した。培養は血液寒天培地を用いて希釈平板法により行った。血液寒天培地は Difco 製血液寒天ベース粉末 40 g を 1 l の蒸留水に溶かし、 $121^\circ C$  で 15 分間オートクレーブにかけ、その後  $45^\circ C$  まで静置したものをを用いた。密閉容器内に試料を塗抹した培地および酸素吸収・二酸化炭素発生剤 (嫌気用) (三菱ガス化学株式会社製) を入れ、 $37^\circ C$  で 72 時間、インキュベーター内に静置した。培養期間中、密閉容器内に入れた嫌気指示薬で、容器内が嫌気状態であることを確認した。培養後、コロニーの計数が可能な培地を用いて、コロニーやそのコロニーを構成する微生物の形態を光学顕微鏡により観察した。

## 結 果

#### 河川水の水質測定結果

2002 年 7 月 14 日より行なわれた連携排砂時の黒部川河川水の水質測定結果を Fig. 4 に示す。黒部川第二発電所付近(①)では測定期間中、pH, Eh, EC および DO について大きな変化は認められず、pH は約 7.5, Eh は約 190 mV, EC は約  $33\mu S/cm$ , そして DO は約 11 mg/l (飽和率 108%) であった (Fig. 4 A)。また、この地点において測定期間中河川水に濁りはほとんど認められず、川底の礫が目視できた。

出し平ダム直下(②)においても、pH は約 7.0, EC は約  $42\mu S/cm$ , DO は約 11 mg/l (飽和率 110%) と、大きな変化は認められなかった。一方、Eh は測定当初ほぼ 160 mV と一定した値を示したが、出し平ダムにおいて自然流下状態になった 2002 年 7 月 14 日 15:20 の直後には約 100 mV に低下し、特に 17:30 には 48 mV まで低下した (Fig. 4 B)。また、河川水の色は、測定開始時には灰白色であったものが自然流下状態となった 2002 年 7 月 14 日 15:30 には暗灰色に変化し、硫黄臭も漂うようになった。

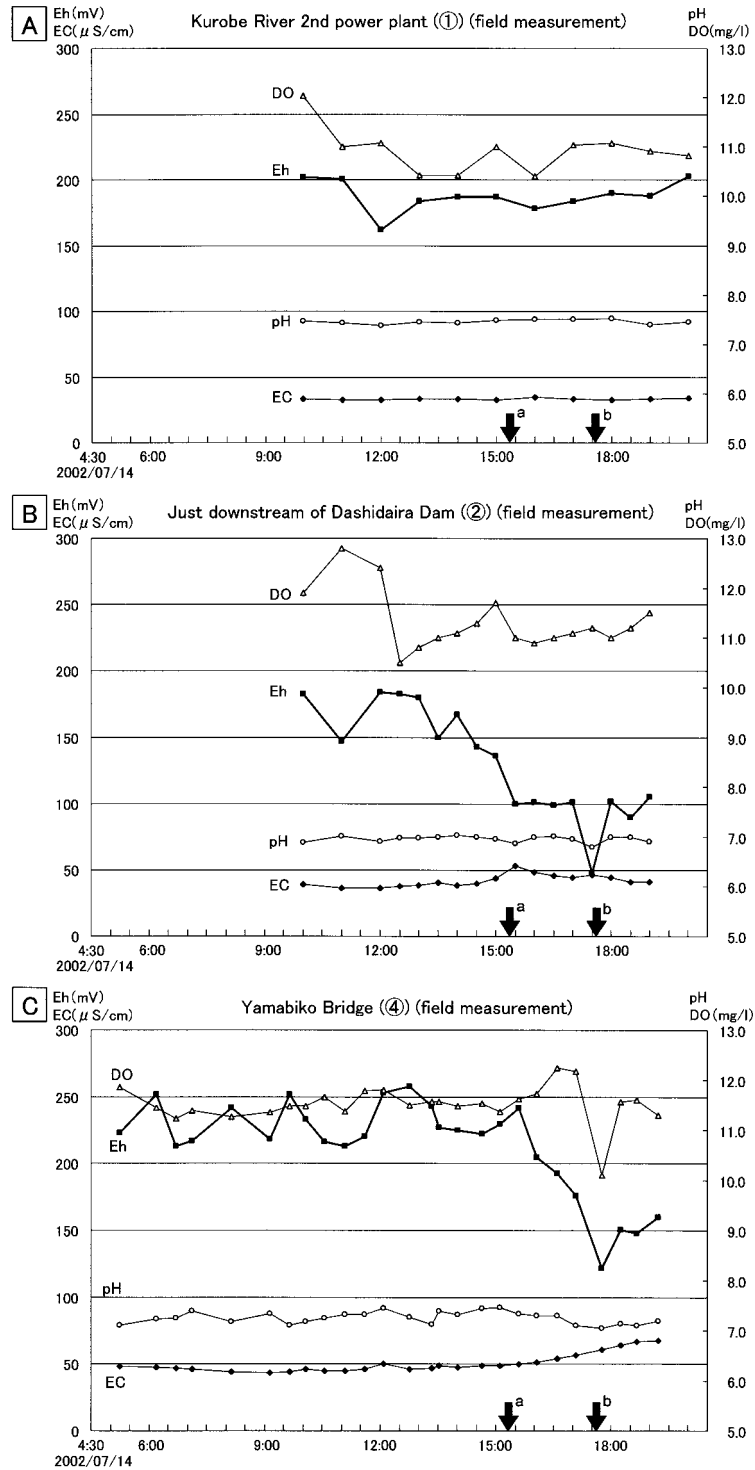


図4 2002年7月14日に行われた出し平ダムおよび宇奈月ダムにおける連携排砂時の黒部川河川水の水質 (pH, Eh, EC および DO) (①, ②および④は図1のサンプリング地点を示す)。A; 黒部川第二発電所(①), 測定期間中に大きな水質の変化は認められなかった。B; 出し平ダム直下(②), 出し平ダムにおける自然流下開始後, Ehが低下し始め, 特に17:30には48 mVまで低下した。C; 山彦橋(④), 宇奈月ダムにおける自然流下開始直前の17:00頃からEhの減少およびECの増加が認められた。

a; 出し平ダムにおける自然流下開始時刻(2002年7月14日15:20)。

b; 宇奈月ダムにおける自然流下開始時刻(2002年7月14日17:34)。

**Fig. 4** Characteristics of Kurobe River water showing pH, Eh, EC and DO during flushing dam sediments on July 14<sup>th</sup>, 2002 (Symbols ①, ② and ④ are the same as those in Fig. 1). A; At Kurobe River 2<sup>nd</sup> power plant (①). B; At just downstream of Dashidaira Dam (②), the Eh decreased to 48 mV at 17:30. C; At Yamabiko Bridge (④), after 17:00, the Eh was decreased whereas the EC was increased.

a; Free flow of river water started at Dashidaira Dam reservoir at 15:20 on July 14<sup>th</sup>, 2002.

b; Free flow of river water started at Unazuki Dam reservoir at 17:34 on July 14<sup>th</sup>, 2002.



表 1 尾の沼公園において採取した黄褐色堆積物と黒色濁水の水質および化学組成.

Table 1 Characteristics of yellowish brown sediments and dark sludge collected from Ononuma Park.

	sampling time	characteristics of water					chemical composition		
		pH	Eh (mV)	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	DO (mg/l)	WT ( $^{\circ}\text{C}$ )	N (wt%)	C (wt%)	S (wt%)
yellowish brown sediments	2002/7/14 11:30	7.0	30	197	1.6	23	0.13	4.11	0.05
dark sludge	15:30	6.8	-210	143	0.9	19	0.02	1.64	0.07

宇奈月ダムより下流の山彦橋 (④) において pH は約 7.3, DO は約 12 mg/l (飽和率 114%) とほぼ一定の値を示した. しかし, 出し平ダム直下 (②) と同様に Eh は当初約 240 mV であったが, 出し平ダムにおいて自然流下状態となった 2002 年 7 月 14 日 15:30 以降, 値が低下し続け, 宇奈月ダムにおいて自然流下状態となった 2002 年 7 月 14 日 17:34 の直後には 120 mV まで低下した. それ以降も約 160 mV と, 測定開始当初よりも低い値を示した. また, EC も自然流下状態開始から徐々に上昇し, 19:13 には  $68 \mu\text{S}/\text{cm}$  と最も高い値を示した (Fig. 4 C).

現地測定により, 出し平ダム直下 (②) および山彦橋 (④) において, 自然流下状態開始後に Eh の低下が認められたが, これは, 出し平ダムおよび宇奈月ダムの堆積物が河川へ流入したことに関連すると考えられる.

一方, 現地での水質測定値と, 実験室に持ち帰り, 約一日後に再度測定した値と比較することを試み, その結果を Fig. 5 に示した. なお, 現地と水温が異なるため, DO については飽和率 ( $\text{DO}_{\text{SAT}}$ ) で示した. 黒部川第二発電所付近 (①) において採取した試料について再度測定を行った結果, pH, Eh, EC および  $\text{DO}_{\text{SAT}}$  のいずれについても現地測定結果と大きな違いは認められなかった (Fig. 5 A). しかし, 出し平ダム直下 (②) の試料について,  $\text{DO}_{\text{SAT}}$  が現地測定では 110% とほぼ一定した値を示したのに対し, 再度測定を行なった結果, 自然流下状態開始前後の試料 (15:00, 16:00 および 17:00) は, 現地測定値に比べ低い値を示した. 特に, 2002 年 7 月 14 日 16:00 に採取した試料は最も低い値を示し, 現地では  $\text{DO}_{\text{SAT}}$  が 106% であったものが 72% に減少した (Fig. 5 B). 一方, 宇奈月ダム直下の山彦橋 (④) において採取した試料について, 再度測定を行なった結果, Eh は約 160 mV とほぼ一定の値を示し, 現地測定値よりも低い値を示した. また, pH, EC および  $\text{DO}_{\text{SAT}}$  は現地測定時と同様にほぼ一定した値を示した (Fig. 5 C).

#### 黄褐色堆積物および黒色濁水 水質測定結果

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に, 尾の沼公園前 (③) において採取した黄褐色堆積物の間隙水および黒色濁水の水質測定結果を Table 1 に示す. 黄褐色堆積物の間隙水の pH は 7.0, Eh が 30 mV, EC が  $197 \mu\text{S}/\text{cm}$  および DO が 1.6 mg/l であった. また, 黒色濁水は pH が 6.8, Eh が -210 mV, EC が  $143 \mu\text{S}/\text{cm}$  および DO が 0.9 mg/l であった. 両試料において, pH は黒部川第二発電所 (①), 出し平ダム直下 (②) および山彦橋 (④) における現地測定値と比較して大きな違いは認められなかったが, EC が比較的高い値を, Eh および DO が比較的低い値を示した. 両試料共に貧酸素状態であり, 特に黒色濁水はその傾向が著しい.

#### 窒素, 炭素, 硫黄含有量の定量分析結果

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に, 尾の沼公園前 (③) において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水の懸濁物質の, 窒素, 炭素, 硫黄含有量の定量分析結果を Table 1 に示す. 黄褐色堆積物の窒素, 炭素, 硫黄含有量は 0.13 wt%, 4.11 wt%, 0.05 wt% であり, 黒色濁水中の懸濁物質の窒素, 炭素, 硫黄含有量は 0.02 wt%, 1.64 wt%, 0.07 wt% であった. いずれの試料も, 2001 年 6 月 19 日から 22 日にかけて行われた連携排砂時の下黒部橋において採取した低 DO 値を示した河川水中の懸濁物質の窒素, 炭素, 硫黄含有量 (田崎ほか, 2001) と比較すると, ほぼ同様の値を示している. 検出された有機物は出し平ダム貯水池に堆積後, 嫌気環境下で変質し, 黄褐色堆積物および黒色濁水の Eh, DO の低下を引き起こしたことが示唆される.

#### XRD 分析結果

2002 年 7 月 14 日 11:30 および 15:30 に, 尾の沼公園前 (③) において採取した黄褐色堆積物および黒色濁水の懸濁物質について, XRD 分析を行った結果を Fig. 6 に示す. XRD 分析により, 黄褐色堆積物 (A)

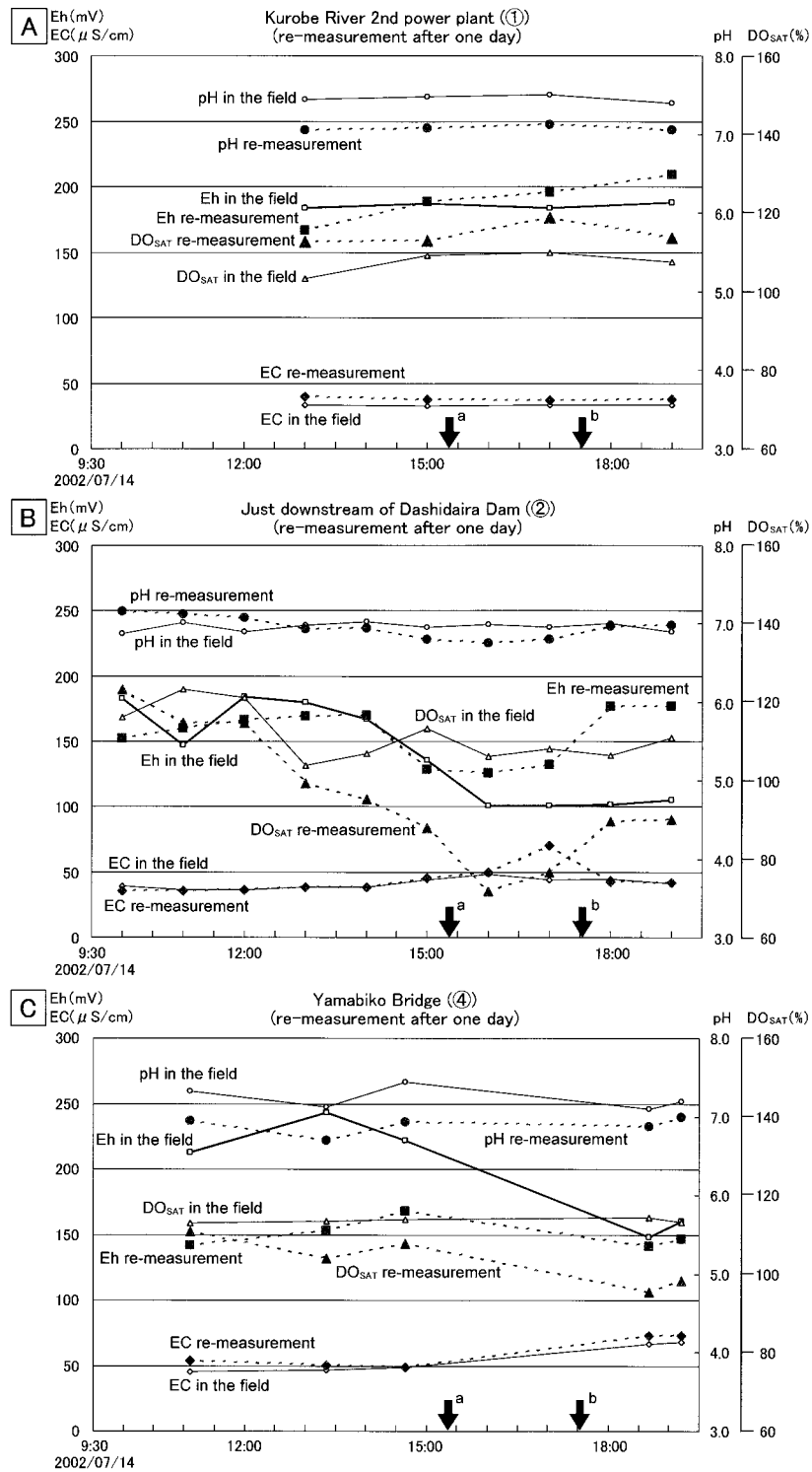


図5 2002年7月14日に行われた出し平ダムおよび宇奈月ダムにおける連携排砂時に採取した黒部川河川水の水質 (pH, Eh, EC, DO) の現地測定から約1日後の再測定結果(①, ②および④は図1のサンプリング地点を示す)。A; 黒部川第二発電所(①)。B; 出し平ダム直下(②), 出し平ダムにおける自然流下開始前後の試料について, DO<sub>SAT</sub>が現地測定値に比べ低下しており, 特に2002年7月14日16:00に採取した試料において著しい。C; 山彦橋(④), Ehは現地測定値よりも低い値でほぼ一定している。pH, ECおよびDO<sub>SAT</sub>は現地測定時と同様にほぼ一定した値を示した。

a; 出し平ダムにおける自然流下開始時刻(2002年7月14日15:20)。

b; 宇奈月ダムにおける自然流下開始時刻(2002年7月14日17:34)。

**Fig. 5** Re-measurement date of Kurobe River water (pH, Eh, EC and DO<sub>SAT</sub>) after one day in the field. (Symbols ①, ② and ④ are the same as those in Fig. 1). A; At Kurobe River 2nd power plant showing constant values (①). B; At just downstream of Dashidaira Dam (②) showing DO<sub>SAT</sub> decreased as much as 4%~26% to compare with the field measurement. C; At Yamabiko Bridge (④), Eh in the field was different from re-measured Eh whereas the other factors were constant.

Symbols "a" and "b" are the same as those in Fig. 4.

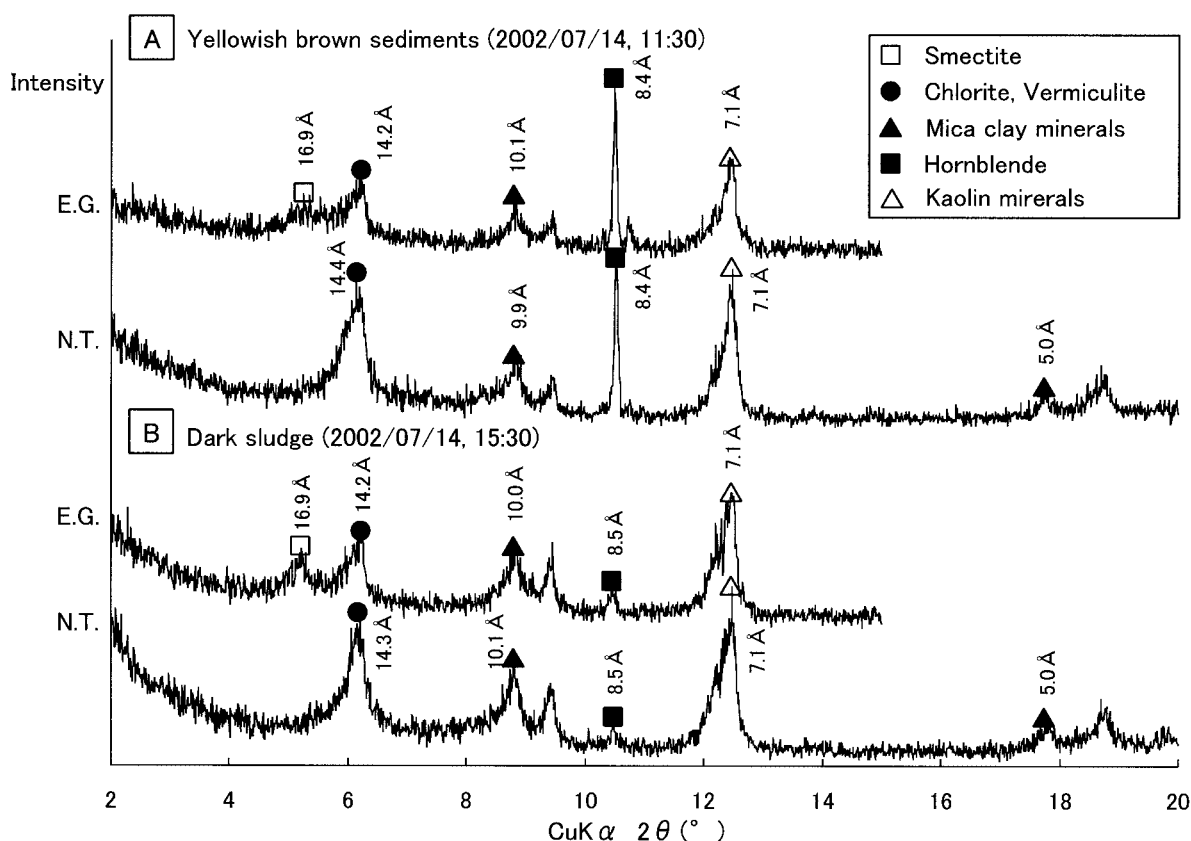


図6 2002年7月14日11:30に尾の沼公園において採取した黄褐色堆積物(A)および同日15:30に採取した黒色濁水(B)の粘土試料( $<2\mu\text{m}$ )のX線粉末回折(XRD)パターン. N.T.; 無処理, E.G.; エチレングリコール処理.

**Fig. 6** X-ray powder diffraction (XRD) patterns of  $<2\mu\text{m}$  fraction of yellowish brown sediments (A) and dark sludge (B) collected from Ononuma Park on July 14<sup>th</sup>, 2002. N.T.: non treatment, E.G.: ethylene glycol treatment.

中の粘土鉱物は、スメクタイト、14Åクロライトおよびバーミキュライト、10Å雲母類粘土鉱物、7Åカオリン鉱物である。また、黒色濁水中の懸濁物質(B)は、粘土鉱物としてスメクタイト、14Åクロライトおよびバーミキュライト、10Å雲母類粘土鉱物、7Åカオリン鉱物を含んでおり、黄褐色堆積物と類似している。しかし、黄褐色堆積物は、黒色濁水中の懸濁物質に比べ8.4Åの角閃石類が強い反射を示している。この粘土鉱物組合せは、田崎ほか(2001)および田崎ほか(2002)で報告している出し平ダムおよび宇奈月ダムの堆積物と同様の結果であった。

#### 光学顕微鏡観察

2002年7月14日15:30、尾の沼公園前(③)において採取した黒色濁水中の懸濁物質について、光学顕微鏡観察を行った結果、懸濁物質は主に、木片、葉や根などの植物破片や生物遺骸からなることが明らかとなった(Fig. 7 A~C)。また、この懸濁物質に

DAPI染色を施し蛍光下で観察を行ったところ、試料中に黄色や緑色の鉱物の自家蛍光が認められたほか、約 $1\mu\text{m}$ の球菌や桿菌の存在が多く確認された(Fig. 7 D)。

#### 嫌気培養結果

尾の沼公園前(③)において採取した低Ehおよび低DO値を示す黄褐色堆積物および黒色濁水中に生息する偏性嫌気性細菌について嫌気培養を行なった結果をFig. 8に示す。偏性嫌気性細菌がいずれの試料からも分離された。37°Cで72時間の培養により、血液寒天培地上にコロニーが形成され、得られた分離株をコロニーの形状、周縁、表面隆起、コロニーの色およびコロニーを形成する細胞の形態によってA~Eの5種に分類した。

Aはいずれの試料からも得られ、優先的な分離株である。これは連鎖した桿菌からなる白色び慢性で周縁が滑な円形コロニーを形成し、その直径は72

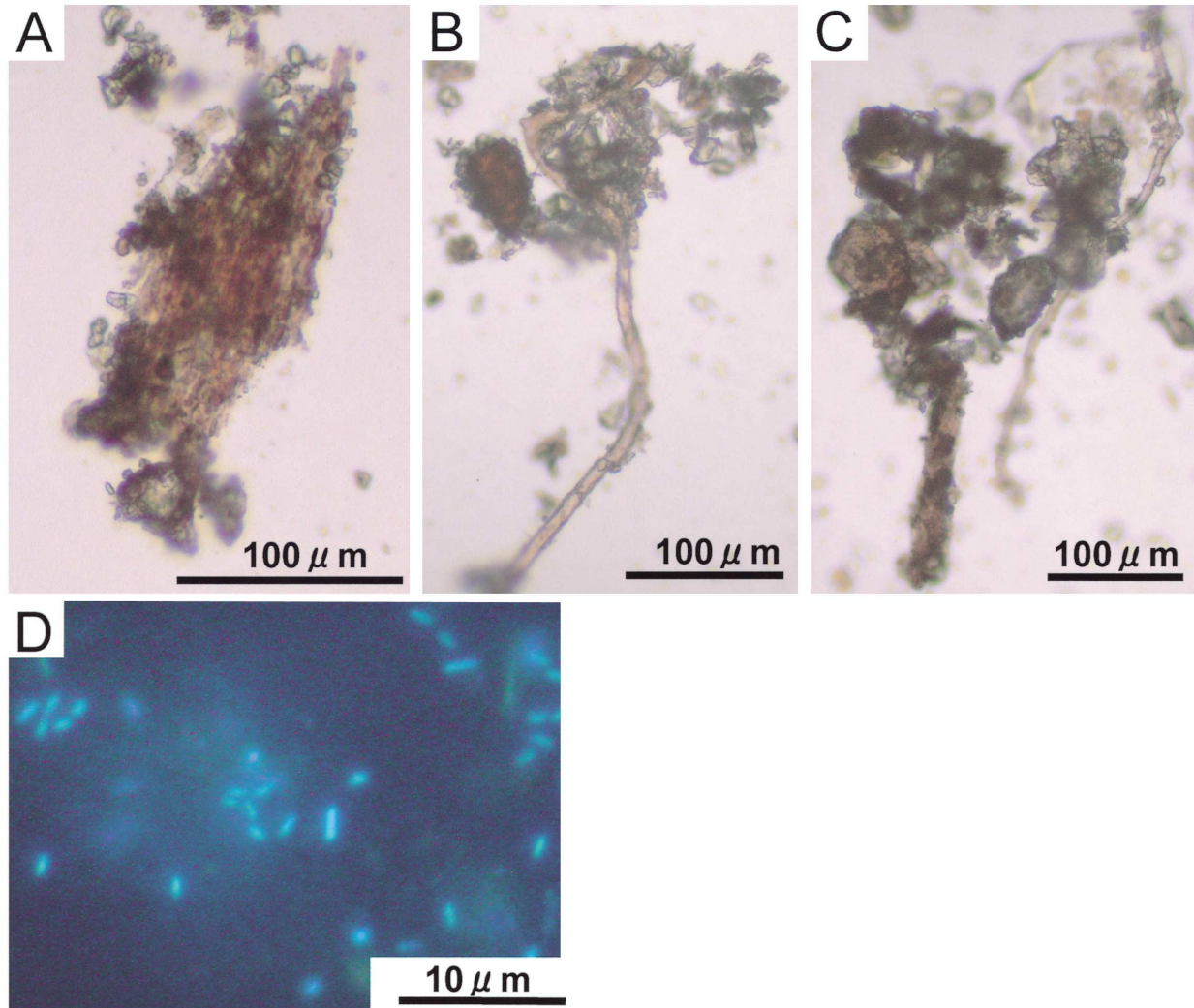


図7 2002年7月14日15:30に尾の沼公園において採取した出し平ダムより排出された黒色濁水中の懸濁物質の光学顕微鏡観察結果。懸濁物質中に認められた木片(A)、葉や根などの植物破片(B)および生物遺骸(C)。DAPI染色後の球菌や桿菌の蛍光顕微鏡写真(D)。

**Fig. 7** Optical micrographs of dark sludge collected from Ononuma Park at 15:30 on July 14 th, 2002 showing pieces of plants (A), roots (B) and organics (C). DAPI (4',6-diamidino-2-phenylindole) stained epifluorescence micrograph (D) showing abundance of cocci and bacillus typed bacteria in the dark sludge.

時間で約2 mmまで成長した。このコロニーを形成する連鎖した桿菌は、単一の長さが2~6 μmであり、それらが連鎖し長いもので60 μmの集合体を形成した。細胞数については、黄褐色堆積物中には $10^5$ - $10^6$  cells/ml、また、黒色濁水中には $10^6$ - $10^7$  cells/mlと黒色濁水中の方が一桁多い細胞数を示した。

Bは螺旋状の細菌からなる白色び慢性で周縁が葉状の円形コロニーを形成し、他の分離株と比べ細胞数は少ない。黒色濁水中の細胞数は20 cells/mlであったが、黄褐色堆積物中には認められなかった。

Cは球菌からなる白色び慢性の周縁が滑な円形コロニーを形成した。細胞数については、黄褐色堆積物中には400 cells/ml、また、黒色濁水中は10 cells

/mlと、黄褐色堆積物中の方が約40倍多いことが明らかになった。

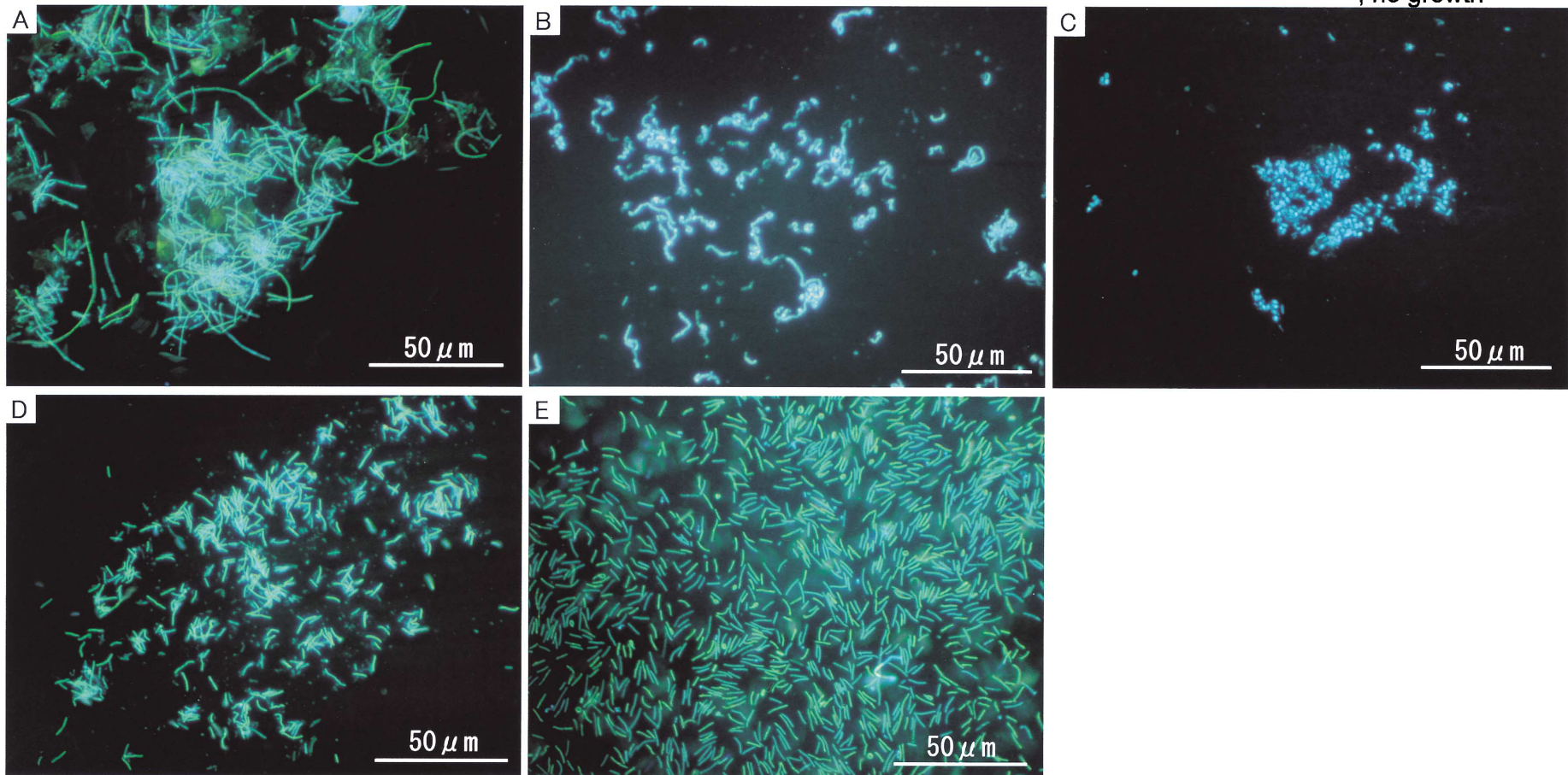
Dは、桿菌からなる白色凸レンズ型の繊維状のコロニーを形成し、いずれの試料についても細胞数は200 cells/mlであった。

Eは灰色び慢性で周縁が滑な円形コロニーを形成し、他の分離株と比べ細胞の大きさが3~11 μmと大きい。黄褐色堆積物中の細胞数は100 cells/mlであったが、黒色濁水中には認められなかった。

すなわち、いずれの試料からも4種の偏性嫌気性細菌が分離され、その大部分が白色び慢性で周縁が滑な円形コロニーを形成する連鎖した桿菌であった。しかし、培養された全偏性嫌気性細菌数は黒色



Isolate code	Characteristics of colonies on blood agar plate				Cell		Yellowish brown sediments	Dark sludge
	form	margin	elevation	color	form	size (μm)	cell number (cells/ml)	cell number (cells/ml)
A	circular	entire	flat	white	bacillus make chain	2 - 6	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>
B	circular	lobate	flat	white	spirilla	2 - 6	-	20
C	circular	entire	flat	white	coccus	1 - 2	400	10
D	rhizoid	filamentous	convex	white	bacillus	2 - 6	200	200
E	circular	entire	flat	grey	bacillus	3 - 11	100	-



富山県出し平ダムの排砂ゲートから排出された黒色濁水の特徴

図8 2002年7月14日11:30に尾の沼公園において採取した黄褐色堆積物および同日15:30に採取した黒色濁水から分離された偏性嫌気性細菌。

**Fig. 8** The isolated strictly anaerobic bacteria from yellowish brown sediments (11:30, sampling time) and dark sludge (15:30, sampling time) collected from Ononuma Park on July 14<sup>th</sup>, 2002, showing five kinds of strictly anaerobic bacteria.

濁水中の方が多く、細胞の形態も3種と黄褐色堆積物に比べ多様であった。また、BおよびEのようにそれぞれの試料からのみ培養されるものや、共通する微生物でもその細胞数が異なるなど、両試料の嫌気状態の差異を示しているといえる。

## 考 察

### 河川水の水質

河川水試料について、出し平ダム直下(②)および山彦橋(④)において自然流下状態開始後に採取した試料は、現地測定時および再測定時において、それぞれ特徴的な変化が認められた。

現地測定では、出し平ダム直下(②)および山彦橋(④)において、自然流下状態前後でEhの値が変化しており、出し平ダム直下(②)で特にその低下が認められた。このことは、河川水中に懸濁したダム堆積物がEhの低下を引き起こしたことを示唆している。

また再測定時において、黒部川第二発電所付近(①)において採取した試料のpHは、現地測定値とほぼ同様の値を示した。また、Eh、ECおよびDO<sub>SAT</sub>についても現地測定値との大きな違いは認められなかった。これは、現地から試料を持ち帰り再測定を行っても、水温の変化や試料採取から再測定までの時間による影響が小さいことを示している。また、出し平ダム直下(②)で採取した自然流下状態開始後の河川水試料について、再測定後にDO<sub>SAT</sub>が現地測定での値よりも低い値を示した。したがって、この再測定値の現地測定値との相違は、水温の変化や試料採取から再測定までの時間による影響ではなく、試料中の懸濁物質が与える影響を反映していると考えられる。つまり、再測定時におけるDO<sub>SAT</sub>の低下は、試料中に懸濁する出し平ダム堆積物の影響であり、田崎ほか(2001)で報告されているように、その影響は特に出し平ダム堆積物中の有機物によることが示唆される。また、田崎ほか(2001)で報告された2001年6月19日から6月22日に行われた排砂時と比べて、EhおよびDOの減少幅が小さい。これは、排砂量が2001年は59万m<sup>3</sup>であったのに対し、2002年は8万m<sup>3</sup>と少なく、DOの低下に影響をおよぼすとされる有機物量も少なかったためと考えられる。また、山彦橋(④)において採取した試料については、再測定時にDO<sub>SAT</sub>の減少が認められなかったことは、宇奈月ダム堆積物による影響がほとんどなかったことを示唆している。今回の連携排砂では、主に

出し平ダム堆積物が排出され、河川の水質に影響をおよぼしたと考えられる。

### 黒色濁水の特徴

尾の沼公園前(③)において採取された黒色濁水は、EhおよびDOが河川水や黄褐色堆積物と比べ非常に低い値を示した。またその懸濁物質は、出し平ダム堆積物を主とし、有機物として植物破片や生物遺骸を含んでおり、偏性嫌気性細菌が黄褐色堆積物中よりも多く生息していることが明らかとなった。ダム貯水池は、水理・水文的には河川と湖沼の両者の性格を併せ持つが、ダム湖としばしば呼ばれるように湖沼の性格のほうが強い(宗宮, 1990)。ダム貯水池に流入した物質は、吸着、沈降、分解、生物への変換などの物理的、化学的ならびに生物学的な相互作用を比較的長時間にわたって受け、それらの変化は湖沼における環境や生態系への変化に類似している(宗宮, 1990)。また、高等植物は堆積物中に集積する傾向があり、それらの分解生成物が堆積物の性質に大きく関与している(Timperly and Allan, 1974; Lisiecki and McNabb, 1975; Warren, 1981)。また、堆積物中の微生物数は、堆積物粒子の表面にある溶解した腐食物質や、沈降してきた有機物の破片の堆積によって支配されている。表面付近に生息する微生物が有機物を代謝することにより、表層の遊離酸素が急速に消費され、その結果、堆積物の深部において硫化水素が集積する。したがって、好気微生物数は、表面から下部になるほど急激に減少し、嫌気微生物の比率が増加する(McConnaughey, 1974)。嫌気性微生物のいくつかは酸素に対して耐性を持つものもあるが、多くの嫌気性微生物にとって酸素は毒としてはたらくことが知られている(Eweis et al., 1998)。

出し平ダム堆積物も、図7に示したように上流から流入する土砂および有機物や微生物の遺骸などで構成されている。2001年に行われた連携排砂からはほぼ1年が経過しており、その間に、微生物活動により堆積物の深部(Fig. 3下)が変質し、還元的で貧酸素状態となっていたと考えられる。

黄褐色堆積物が、出し平ダム堆積物のうち貯水池内の水流の乱れによってまきあがった表層部の堆積物が大部分を占めるのに対して、黒色濁水中には、自然流下状態で浸食された、より還元的な堆積物が多く含まれていたと考えられる。出し平ダム堆積物の表層は、比較的酸化的な値を示し、偏性嫌気性細菌がほとんど認められないことが予想される。一方、黒色濁水は、出し平ダム直下(②)で観測された自然

流下状態以後(2002年7月14日15:20以後)の河川水と比較して、EhおよびDOが非常に低く、さらに、偏性嫌気性細菌数の生息も確認された。これは、出し平ダム直下(②)で観測されたように、出し平ダム堆積物が排砂ゲートから排出される時、曝気により一時的にEhおよびDOが上昇するが、流下するにしたがい、堆積物中の有機物や還元物質は、再びEhおよびDOを低下させる。よって、出し平ダム堆積物は還元的な性質を長時間保持したまま流下するため、出し平ダム堆積物中に生息していた偏性嫌気性細菌は、曝気により死滅することなく宇奈月ダム貯水池へと流下してきたと考えられる。また、黒色濁水のDOは0.9 mg/lと非常に低く、岩魚の生息条件から設定された排砂中止のDOの基準値である4 mg/lを遙かに下回っている。さらに、DOが2 mg/lを下回ると魚の生命にとって重大な影響をおよぼすことが報告されており(Merle, 2002)、このような黒色濁水の流下は、河川の生態系に大きな影響を与えることが示唆される。

今回の連携排砂により排出されたダム堆積物は8万m<sup>3</sup>と、2001年に行われた連携排砂時における排砂量59万m<sup>3</sup>に比べ極端に少なく、また、本格的に排砂が行われるようになった1995年以降の年間排砂量と比較しても少ない。今回、黒色濁水のような低Ehおよび低DO値を示し、偏性嫌気性細菌の生息場となっているような濁水が、黒部川を流下していることが確認された。また、低Ehおよび低DO値を示す黒色濁水は、宇奈月ダムより下流の山彦橋(④)では観測されなかったものの、自然流下状態開始の前後で河川水のEhが低下するのが出し平ダム直下(②)および山彦橋(④)の両地点で観測された。これは、1年間で貧酸素かつ嫌気的な状態へと変化したダム堆積物を排出することは、排砂量の多少によらず、河川の水質に影響を与えることを示唆している。

## ま と め

2002年7月14日に行われた出し平ダムと宇奈月ダムの連携排砂において、以下のことが明らかとなった。

(1) 連携排砂中の黒部川河川水の水質について、出し平ダム直下および宇奈月ダム直下の山彦橋において、自然流下状態開始前後でEhの減少が観測された。

(2) 出し平ダム直下において自然流下状態開始後に

採取された河川水試料について、DO<sub>SAT</sub>が再測定時に現地測定値よりも減少しており、ダム堆積物による影響が示唆される。また、2001年に行われた連携排砂時の河川水と比較するとその減少幅は少ない。これは今回の排砂量が2001年に行われた連携排砂よりも少なかったためと考えられる。

(3) 尾の沼公園前において出し平ダム堆積物を主とする黒色濁水の流下が観測された。その水質は還元的で貧酸素状態、かつ偏性嫌気性細菌が4種認められ、連鎖した桿菌数が10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup>cell/ml認められた。これは、1年の間にダム貯水池の堆積物が貧酸素で嫌気的な堆積物へと変化したことを示し、排砂量の多少によらず、河川の水質に影響を与えることを示唆している。

## 謝 辞

本研究を行なうにあたり、黒部川第二発電所付近および出し平ダム直下での試料採取において関西電力株式会社、関電興業株式会社の許可を得た。また、山彦橋付近および尾の沼公園付近での試料採取において入善町の金谷敏行氏、佐藤宗雄氏、高倉正氏、脇山正美氏の協力を得た。以上の方々に、御礼申し上げます。なお、本研究の一部に文部科学省の研究補助金基盤A(代表田崎和江)を使用した。

## 文 献

- 天野礼子(2001)ダムと日本。岩波新書, 224 p.
- Ewies, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P. Y. and Schroeder, E. D.(1998) Bioremediation principles. McGraw-Hill Inc.Singapore, 66-98.
- Jackson, J. B. C., Kirby, M. X., Berger, W. H., Bjorndal, K. A., Botsford, L. W., Bourque, B. J., Bradbury, R. H., Cooke, R., Erlandson, J., Estes, J. A., Hughes, T. P., Kidwell, S., Lange, C. B., Lenihan, H. S., Pandolfi, J. M., Peterson, C. H., Steneck, R. S., Tegner, M. J. and Warner, R. R.(2001) Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. Science, 293 : 629-638.
- Kareiva, P., Marvier, M. and McClure, M.(2000) Recovery and management options for spring/summer chinook salmon in the Columbia River Basin. Science, 290 : 977-979.
- 小久保鉄也(2000)出し平ダムの排砂実績と黒部川の土砂流出に与える影響。貯水池土砂管理国際シン

- ポジウムワークショップ論文集, 99-115.
- Lisiecki, J. B. and McNabb, C. D. (1975) The dynamics of hazardous elements in waste water ponds. NTIS, Springfield, VA : PB-248 404.
- Mann, C. C. and Plummer, M. L. (2000) Can science rescue salmon ? Science, 289 : 716-719.
- McConnaughey, B. H. (1974) Introduction to marine biology, second edition. C. V. Mosby Company, St. Louis, 544 p.
- Merle, G. (2002) Some environmental aspects of flushing . International workshop and symposium on reservoir sedimentation management, 89-97.
- 宗宮功 (1990) 自然の浄化機構. 技報堂, 東京, pp.117-133.
- 角哲也 (1996) 流れ下る氷河—スイスにおける貯水池土砂管理. ダム技術, 118: 20-34.
- 角哲也 (1998) 欧州におけるダム排砂の試み. 河川, 628: 43-49.
- 角哲也 (2000) ダム貯水池土砂管理の将来. 貯水池土砂管理国際シンポジウムワークショップ論文集, 117-126.
- 田崎和江・國峯由貴江・森川俊和 (2001) ダム堆積物の連携排砂が黒部川の下流に与える影響, その2—連携排砂時の水質変動と懸濁物質の特性—. 粘土科学, 41: 64-74.
- 田崎和江・縄谷奈緒子・國峯由貴江・森川俊和・名倉利樹・脇元理恵・朝田隆二・渡辺弘明・永井香織・池田頼正・佐藤一博・瀬川宏美・宮田浩志郎 (2002) 黒部川出し平ダムおよび富山湾における堆積物の特性—懸濁粒子が魚類に与える影響の検討—. 地質学雑誌, 108: 435-452.
- Timperley, M. H. and Allan, R. J. (1974) The formation and detection of metal dispersion halos in organic lake sediments. J. geochem. Explor., 3: 90-167.
- Warren, L. J. (1981) Contamination of sediments by lead, zinc and cadmium: a review. Env. Poll. 2: 401-436.



## 付記一珪藻分析結果一

排砂前の出し平ダム堆積物、排砂中の黒部川河川水中の懸濁物質、排砂前の富山湾堆積物について、その中に含まれる珪藻の分析を行った。試料採取地点および採取日を Fig. 1 に示す。出し平ダム堆積物試料は、2002 年 5 月 22 日、出し平ダム貯水池内のダム堤体より上流 350 m (sample 1) および 80 m (sample 2) の 2 地点で採取した。また、黒部川河川水中の懸濁物質試料は、2002 年 7 月 14 日に行われた連携排砂中に、出し平ダム直下(16:00 採取; sample 3) および尾の沼公園前(黄褐色堆積物; sample 4, 黒色濁水; sample 5) で採取した。富山湾堆積物試料は、2002 年 6 月 9 日、黒部川河口に近いほうから sample 6(北緯 36° 55′ 478″, 東経 137° 25′ 623″, 水深 86 m), sample 7(北緯 36° 55′ 867″, 東経 137° 26′ 241″, 水深 40 m) を採取した。なお、これらの地域には、出し平

ダムからのたび重なる排砂により、ダム堆積物が堆積していることが示唆されている(田崎ほか 2002, Tazaki et al. 2003)。

試料の処理は、柳沢(1999)に記述した方法で行った。珪藻の頻度から C(common)と R(rare)の 2 段階に分類した。また、認められた種は、present(+)として産出表に記録した。さらに、破片として認められた種も同様に present(+)として記録した。珪藻の保存状態は、殻の破損したもの、溶解したものが多いが、中には頑丈な殻をもち、*Diatoma hiemalis* のように完全細胞も多く認められた。珪藻殻の産出量の評価は、+(present), C(common)の 2 段階に分けた。

珪藻分析結果を表 1 に示す。7 試料とも珪藻殻を含んでいるが、その含有量は sample 7 が普通程度(common)含んでいる以外は稀(rare)である。

Sample 1~5 は、いずれも淡水種(着生(benthic)・浮遊性(planktonic))のみから成り、化石種は含まれ

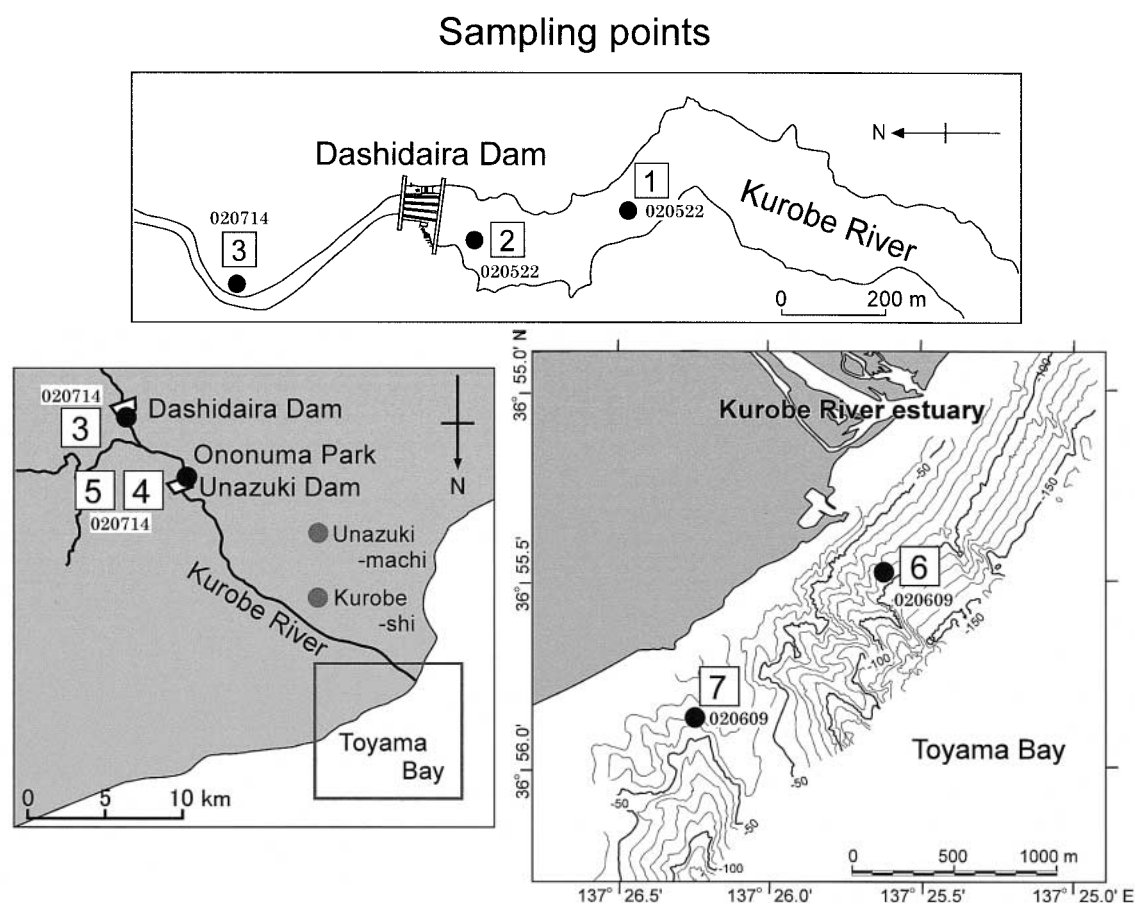


図 1 珪藻分析試料採取地点。

**Fig. 1** Locality map of sampling points (1~7) and the date.  
 020522; 22<sup>nd</sup> May 2002 (before flushing)  
 020609; 9<sup>th</sup> June 2002 (before flushing)  
 020714; 14<sup>th</sup> July 2002 (during flushing)

表1 珪藻の産出結果.

Table 1 Occurrence of diatom at Kurobe River and Toyama Bay.

			Sample number	1	2	3	4	5	6	7
			Abundance	R	R	R	R	R	R	C
<b>Nonmarin Diatoms</b>										
benthic	<i>Achnathes</i>	spp.			+	+				
benthic	<i>Cocconeis</i>	placentula var. euglypta	+		+				+	+
benthic	<i>Cymbella</i>	sinuata							+	
benthic	<i>Cymbella</i>	spp.	+			C	+	C	+	C
benthic	<i>Diatoma</i>	hiemalis	C	C	C	C	C	C	+	
benthic	<i>Eunotia</i>	spp.		+						+
planktonic	<i>Fragilaria</i>	spp.							+	
benthic	<i>Frustulia</i>	spp.	+							
benthic	<i>Gomphonema</i>	spp.		+			+			
planktonic	<i>Meloroisra</i>	octagona							+	
benthic	<i>Navicula</i>	spp. (small)					+		+	
benthic	<i>Navicula</i>	sp. (v. small, cf. contenta)	+							
benthic	<i>Navicula</i>	spp.	+					+		
benthic	<i>Navicula</i>	spp. (small)								+
benthic	<i>Nitzschia</i>	spp. (small)	+				+		+	+
benthic	<i>Pinnularia</i>	spp. (large)					+			
planktonic	<i>Synedra</i>	ulna-vaucheri complex	C	C	C	+	+	+	+	C
benthic	<i>Tabellaria</i>	spp.					+	+	+	
<b>Marine Diatoms</b>										
benthic	<i>Amphora</i>	spp.								+
benthic	<i>Biddulphia</i>	decipiens								+
planktonic	<i>Chaetoceros</i>	spp. (spores)							+	
benthic	<i>Cocconeis</i>	scutellum								+
planktonic	<i>Coscinodiscus</i>	spp.							+	+
benthic	<i>Diploneis</i>	spp.								+
benthic	<i>Grammatophora</i>	spp.								+
benthic	<i>Hyalodiscus</i>	spp.								+
planktonic	<i>Laudria</i>	sp.							+	+
benthic	<i>Navicula</i>	sp. (lyrate, small)								+
benthic	<i>Navicula</i>	sp. (lyrate, robust)								+
planktonic	<i>Odontella</i>	cf. sinensis								+
planktonic	<i>Odontella</i>	aurita								+
planktonic	<i>Skeletonema</i>	costatum							+	+
planktonic	<i>Thalassionema</i>	bacillis							+	+
planktonic	<i>Thalassionema</i>	nitzschoides							+	+
planktonic	<i>Thalassiosira</i>	spp.							+	+

Sample 1; upperstream of Kurobe River,  
 Sample 2; inside Dashidaira Dam,  
 Sample 3; just under Dashidaira Dam,  
 Sample 4; yellowish suspension in front of Ononuma Park,  
 Sample 5; dark sludge in front of Ononuma Park,  
 Sample 6; near estuary of Kurobe River,  
 Sample 7; faraway from estuary of Kurobe River.

C; common, R; rare, +; present.

ていない。それらの種構成は互いに類似している。一方、富山湾の堆積物である sample 6, 7 は、海水種のみならず淡水種（着生・浮遊性）と海水種（着生・浮遊性）との混合群集から成る。すなわち、出し平ダム、尾の沼公園の試料と富山湾の試料の群集は、それらの全体的な種構成から明瞭に互いに識別される。淡水種の種構成に関して、7 試料ではほぼ共通して *Cymbella* spp. (着生種), *Diatoma* spp. (着生種), *Synedra ulna-vaucheri* グループ (浮遊性種) の 3 種が比較的顕著に認められる。また、*Cocconeis placentula* var. *euglypta* (着生種), *Eunotia* spp. (着生種), *Nitzschia* spp. (着生種), *Tabellaria* spp. (着生種) も淡水域、海水域の両方で認められた。

排砂前の出し平ダム堆積物や、排砂中の黒部川河

川水中の懸濁物質に含まれる珪藻種、特に着生種が富山湾堆積物中にも含まれることは、排砂によって出し平ダムから排出されたダム堆積物が、富山湾の黒部川河口付近に堆積することを示唆している。また、排砂前の富山湾堆積物中に淡水域の珪藻種（着生・浮遊性）が含まれていたことは、出し平ダム堆積物は排砂により海底に堆積し、海流などの影響をほとんど受けず、1 年以上その場にとどまり続けることを示唆している。なお、排砂されたシルトサイズの堆積物が海底に沈殿するとともに硬くしまり、固結することからも裏付けられる。

なお、富山新港建設時に、富山湾内へ水中投棄された放生津潟のヘドロが海底にどのように拡散していくかの調査によれば、珪藻の組合せを指標とする

ことで、ヘドロの分布域が追跡できることが報告されている(藤井ほか 1991)。

## 謝 辞

本研究を行なうにあたり、珪藻の同定を秋葉文雄博士にお願いした。また、富山湾堆積物試料の採取において入善町の佐藤宗雄氏をはじめとする漁師の方々、脇山正美氏をはじめとする泊漁業協同組合の方々の協力を得た。関西電力株式会社より出し平ダム内の堆積物試料を提供していただいた。以上の方々に、御礼申し上げます。なお、本研究の一部に文部科学省の研究補助金基盤 A(代表田崎和江)を使用した。

## 文 献

- 藤井昭二・邑本順亮・武沢 正(1991)富山湾庄海底に投棄されたヘドロについて。金沢大学日本海域研究所報告, 23: 31-50.
- 田崎和江・縄谷奈緒子・国峯由貴江・森川俊和・名倉利樹・脇元理恵・朝田隆二・渡辺弘明・永井香織・池田頼正・佐藤一博・瀬川宏美・宮田浩志郎(2002)黒部川出し平ダムおよび富山湾における堆積物の特性-懸濁粒子が魚類に与える影響の検討-。地質学雑誌, 108: 435-452.
- Tazaki, K., Sato, M., Van der Gaast, S. V. and Morikawa, T.(2003) Flushing clayey dam sediments influence on downstream benthic life. Clay Minerals (in press).
- 柳沢幸夫(1999)金沢市南部地域に分布する中新統の珪藻化石層序。地調月報, 50: 49-65.

## 漂流版追跡による中海の流動観測の一例

森脇晋平<sup>1</sup>・大北晋也<sup>2</sup>・藤井智康<sup>3</sup>

### Current fluctuations in Lake Nakaumi measured with the current drogue

Shimpei Moriwaki<sup>1</sup>, Shinya Ohkita<sup>2</sup> and Tomoyasu Fujii<sup>3</sup>

**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

<sup>1</sup> 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

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

<sup>3</sup> 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

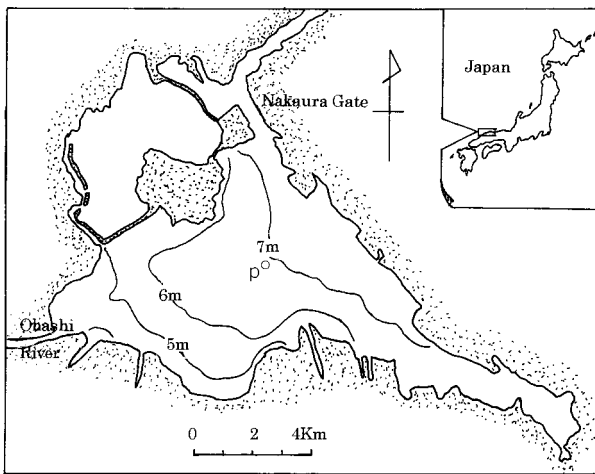


図 1. 調査研究場所の地理的概要.  
**Fig. 1.** Location of the study area.

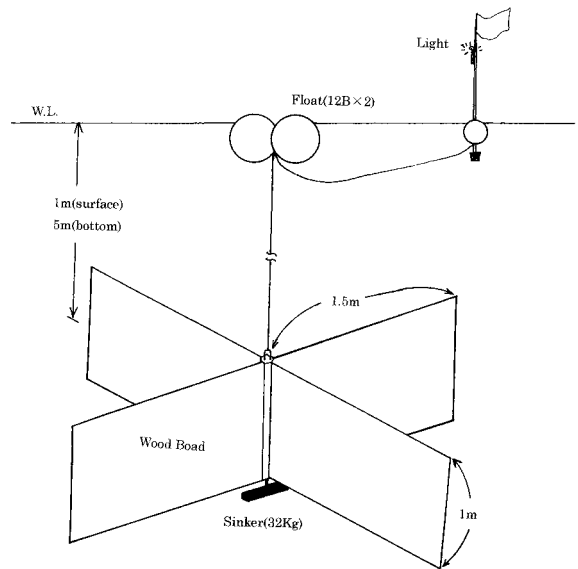


図 2. 調査に用いた漂流版の構造.  
**Fig. 2.** Schematic diagram of the current drogue used for Lagrangian current measurement in Lake Nakaumi.

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変わり、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変わり、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

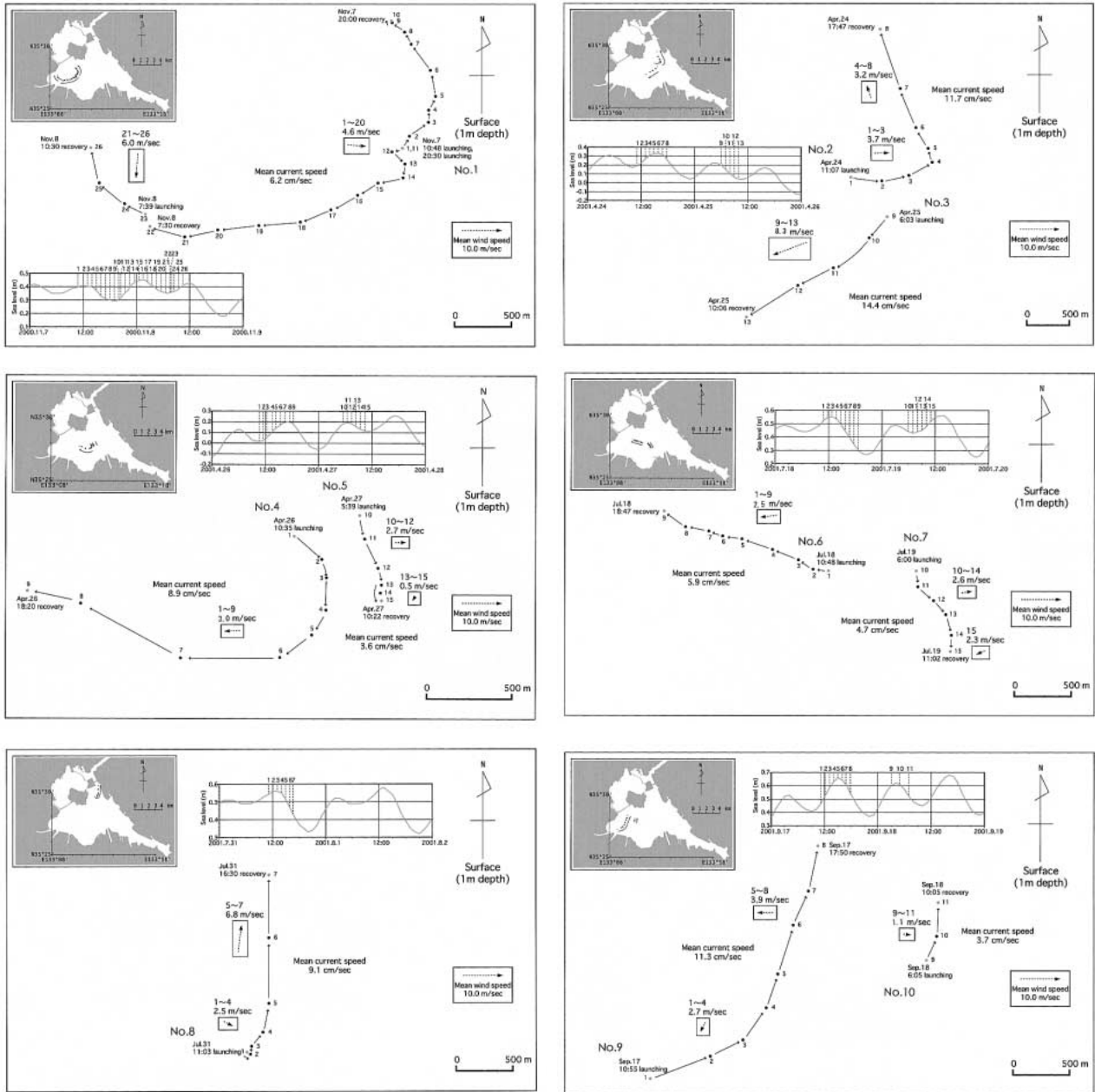


図3. 表層（1 m 深）における漂流版の流跡。  
**Fig. 3.** Trajectory of a current drogue at 1 m depth.

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

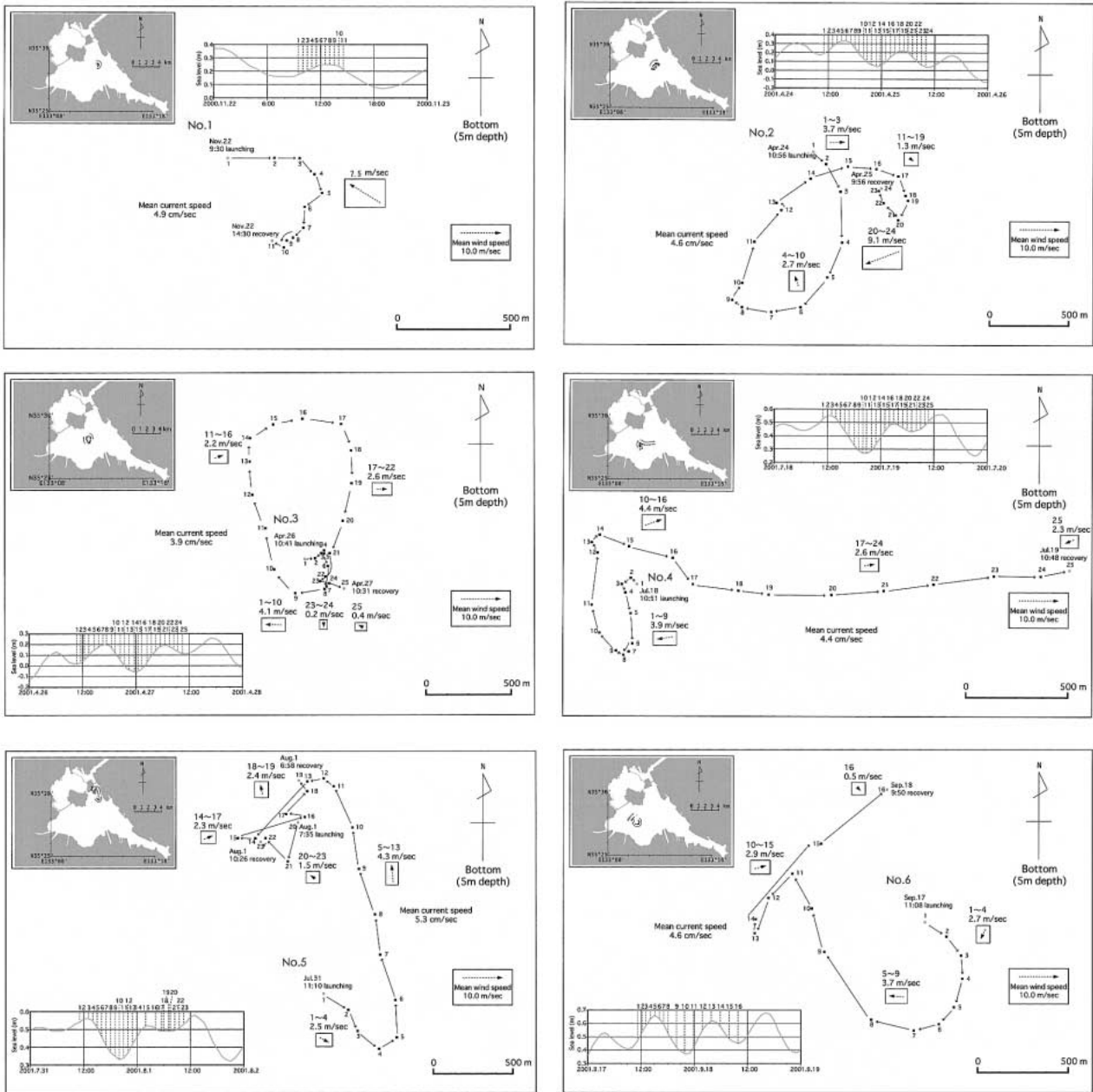


図4. 底層（5 m 深）における漂流版の流跡。

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



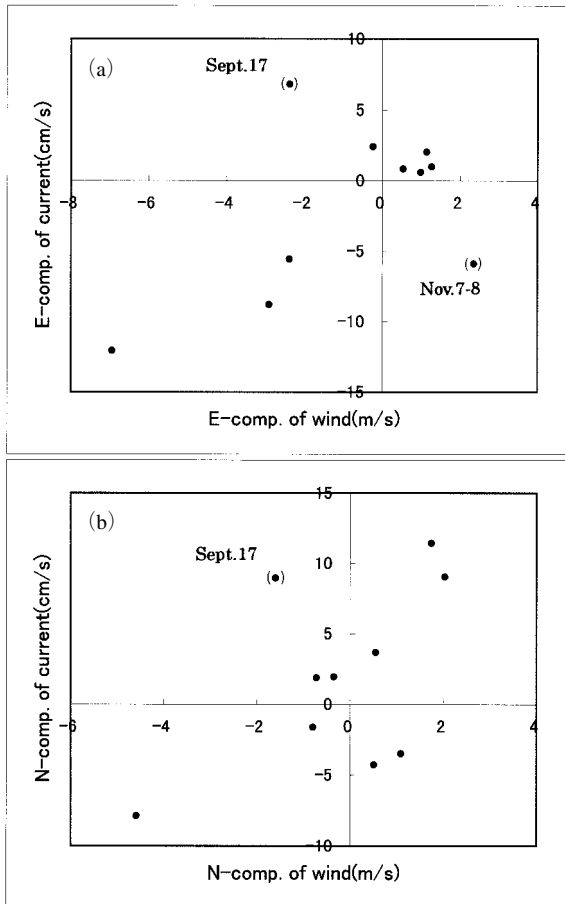


図5. 海上風の (a) 東及び (b) 北成分と表層流のそれらとの相関。

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

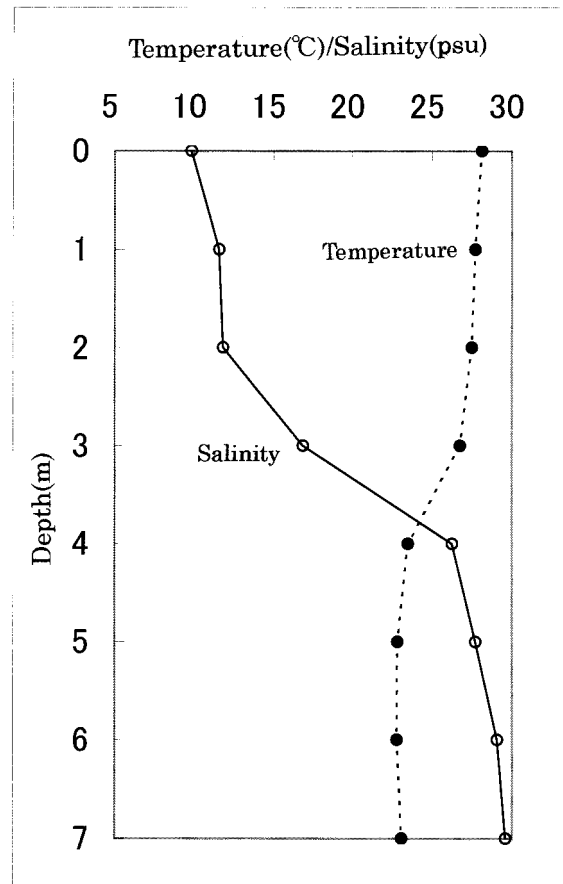


図6. 2001年7月18日、 $35^{\circ}27.72' N, 133^{\circ}11.14' E$ における水温・塩分の鉛直分布。

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

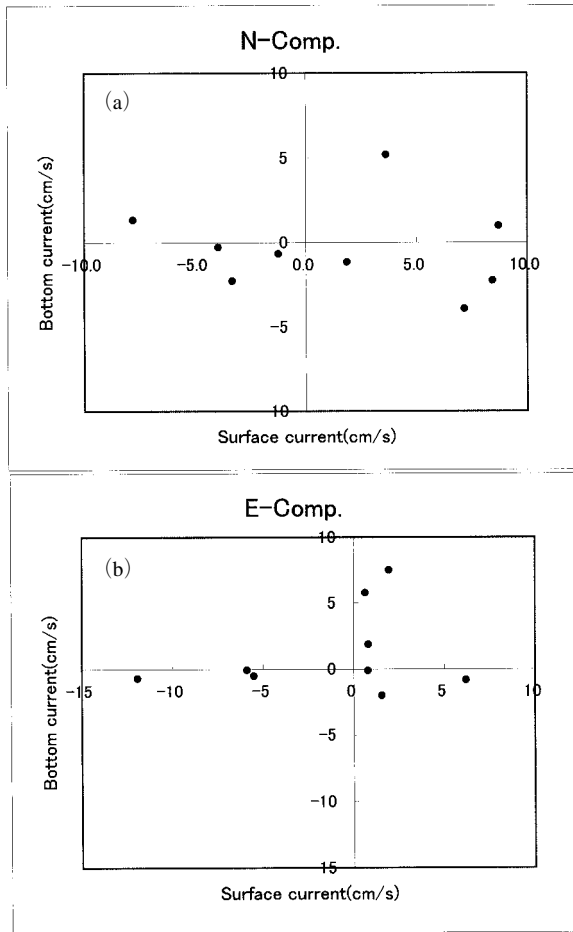


図7. 表層流の (a) 北及び (b) 東成分と底層流のそれらとの相関.  
**Fig. 7.** Correlation between surface current and bottom current. (a) northerly component and (b) easterly component.

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

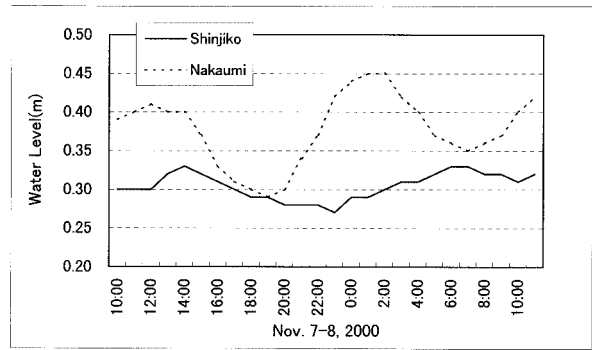


図8. 2000年11月7~8日の中海と宍道湖中央部における水位変動.  
**Fig. 8.** Changes of water level at the central part of Lake Nakaumi and Lake Shinji on Nov. 7-8, 2000.

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。

## 中海に出現する貧酸素水塊の海況学的特性と海洋構造

森脇 晋平<sup>1,2</sup>・大北 晋也<sup>1</sup>

### Relation between hydrographic feature of the oxygen-deficient water mass and oceanographic structure in Lake Nakaumi, San'in District, west Japan

Shimpei Moriwaki<sup>1,2</sup> and Shinya Ohkita<sup>1</sup>

**Abstract:** This paper attempts to describe the oceanographic structure of Lake Nakaumi, a semi-closed brackish water body connected to the Japan Sea, focusing on hydrographic feature of oxygen-deficient water mass. The study is based on monthly hydrographic observations made from April 2000 through to March 2001. The water mass characteristics were investigated by the station graph analysis. Three different types of water masses, namely, upper layer water, bottom layer water and riverine water appeared through the year. An oxygen-deficient water mass occurred from May to December. Its maximum volume was estimated to be c.40% of the entire volume of the Lake Nakaumi. The volume of the oxygen-deficient water mass increased from June to November corresponding to the occurrence of the bottom layer water mass, indicating that the bottom layer water induced from the Japan Sea rapidly turned into the oxygen deficient water mass during the high-temperature season. The decrease in volume of oxygen-deficient water mass in September was probably caused by the exchange of water mass due to the occurrence of a flush flood.

**Key words:** Lake Nakaumi, oceanographic feature, oxygen-deficient water mass

#### はじめに

中海は、日本海から境水道を通じて海水が遡上する一方で大橋川から宍道湖・斐伊川に由来する河川系水が流入している閉鎖的な水域である。この水域にはしばしば溶存酸素量の低い貧酸素水塊が発生し、生物の分布や生息に悪い影響を与えていることが指摘されている(例えば越川 1986, 石飛ほか 2000, 平塚 2001)。佐野 (1992) の総述によると中海における貧酸素水塊の存在および風による内部振動現象はすでに 1920~30 年代に指摘されており、当時からのこの水域で漁業生産を営む漁業者にとっては重大な関

心事のひとつであったと思われる。

しかしながら、この海域における貧酸素水塊が (1) 海洋構造とどのように関連し、どういう海水特性を示すのかといった基本的な海況学的特性や、(2) 季節的にどのような変動をしているのかという定量的な変化あるいは (3) 河川系水の与える影響についてはまだよく知られていない。それゆえ中海の海洋構造を貧酸素水塊の出現と関連してその海況学的特性を明らかにすることは重要な課題であると思われる。

そこで、島根県内水面水産試験場が中海の水産振興を図る目的で実施している調査のうち、月例定線

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

<sup>2</sup> 現所属：島根県水産試験場 Shimane prefectural Fisheries Experimental Station, Hamada, 697-0051, Japan

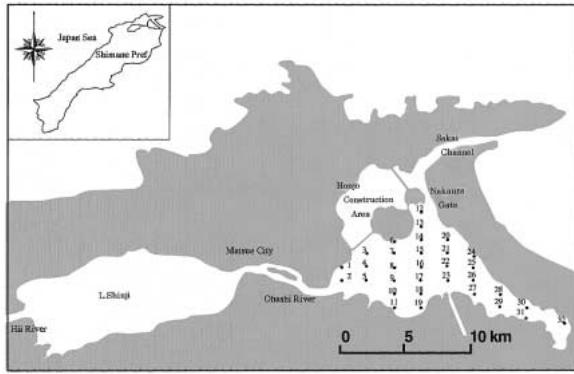


図1. 調査場所の地理的概要.

Fig. 1. Location map showing hydrographic stations.

海洋観測によって得られた資料を整理し、この水域の海洋構造の基本パターンを貧酸素水塊との関連で解析した。

## 資料と方法

用いた海洋観測資料は島根県内水面水産試験場が2000年4月から2001年3月にかけて中海の32測点(図1)において実施した月例定期観測から得られたものである。観測は原則として各月の中旬に、水産試験場所属調査船(8.5総トン)によって行い、ハイドロラボ社製水質計H-20を用いて表層から海底まで1mごとに水温、塩分、溶存酸素量を測定した。

宍道湖から大橋川を通じて中海に流入する淡水流入の影響を検討するため、斐伊川河口における流量を調べたが、この資料は国土交通省出雲河川事務所が収集しているものを用いた。

なお、「貧酸素水」の定義は明確ではない(柳, 1989)が、この報告では一般的にベントス分布が危うくなる3 mg/L未満(柳, 1989)を貧酸素水塊とした。

## 結果と考察

### 1. 海洋構造の季節変動と水塊特性値

#### (1) 季節変動

中海に出現する水塊の海水特性の差を各月ごとに測点グラフで対比した(図2)。

4月の水塊構造は水深5mを境界としてそれ以浅の水塊と以深の水塊との2つに大別できる。酸素量3 mg/L未満の貧酸素水塊は9m以深に出現し、最低水温を示している。観測された地点はSt.28で浚渫

窪地と思われる。他方9m以深でも溶存酸素量の豊富な水塊が存在しており、同時にこの水塊は塩分極大値を示している。この観測点は中浦水門近くのSt.12で、高塩分・豊酸素水塊の海水特性は中海の外部で獲得されたものと考えられる。

5月の水塊構造の特徴は、下層の一部水塊の貧酸素化が進んだために、3 mg/L未満の貧酸素水塊が5m以深に増大したことである。そのため下層では貧酸素水塊とそうでない水塊の2つに分かれ、全体として3つの水塊の存在が指摘できる。

6月の水塊構造は基本的には5月に出現した3つの水塊から構成されている。下層の貧酸素水塊は5m以浅の水域にも出現が増加した。またこの水塊は最低水温値に対応しているのに対して、下層の溶存酸素量の豊富な水塊は塩分極大値の水塊に対応している。このことは中海外部から流入した高塩分・豊溶存酸素の水塊が古い水塊—低水温水塊—となって貧酸素化することを暗示している。

7月には貧酸素水塊の規模はさらに増大し、5m以深での3 mg/L以上の豊酸素水塊は6月に比べ減少した。塩分極大値を示す水塊は最低溶存酸素水塊とほとんど一致しており、このことはこの時期に中海の外から流入した高塩分水塊は短時間で貧酸素化することを示唆している。

8月では5m以浅の豊酸素水塊が、2m以浅の酸素量6 mg/L以上の高酸素水塊と3~4m深の豊酸素水塊に分離する。前者は植物プランクトンによる旺盛な光合成活動の結果として表層に認められたものであろう。下層部の貧酸素化はさらに進み、5m以深では3 mg/L以上の水塊はまったく存在しない。逆に5m以浅においても貧酸素水塊が顕著に出現した。塩分極大値は最低溶存酸素水塊と一致した。

9月はそれまでは全層にわたってほぼ18 psu以上の塩分値であったが、それ以下の水塊が出現した。T-S曲線は「く」の字型を呈し、新しい水塊が出現して3つの水塊の存在を示している。これは大橋川からの河川系の淡水流入の影響と判断され、6m以浅の貧酸素水塊が減少した。しかし塩分極大値は最低溶存酸素で最高水温の水塊に一致する。

10月には5m以浅で再び貧酸素水塊が増加した。酸素—水深分布(O<sub>2</sub>-D)パターンは8月のそれに似るが、水温—塩分分布(T-S)パターンから理解できるように、上層から冷却が始まり上層の水塊より下層のそれが高水温である。上層水は低温・低塩、下層水は高温・高塩という現象が3月まで継続する。

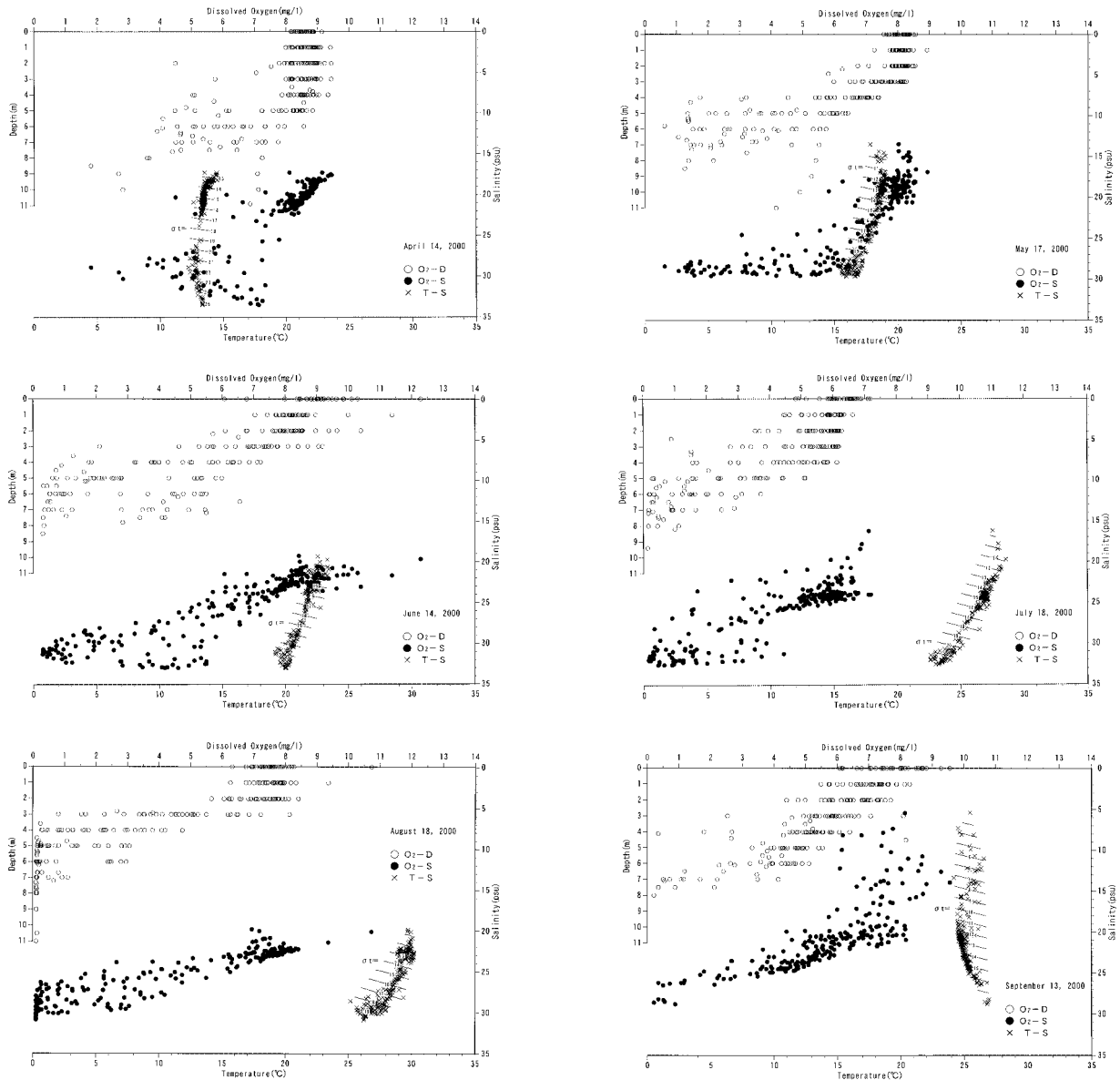


図 2. 測点グラフによる地中海の水質特性.

Fig. 2. Station graphs representing the temporal variations in water characteristics.

11月では河川系水に由来する8~14 psuの低塩分水が出現した。この水塊は3 m以浅に出現した高溶存酸素水塊に一致する。このため、4 m以浅で貧酸素水塊の出現が減少した。塩分極大値を示す水塊はしだいに酸素を多く含んだ水塊になり、地中海の外から流入した海水の酸素消費速度が小さくなっていることを示唆している。

12月になると上層を覆っていた8~14 psuの低塩分水は消滅した。また、底層の5 m以深の貧酸素化はしだいに解消されはじめ、貧酸素水塊の主体は6 m以深に衰退した。

1月になると等温層の厚さが増し、表層から水深5 m深にまで達している。貧酸素水塊は消滅し、最

深部まで4 mg/L以上の水塊に覆われる。塩分極大値を示す水塊の溶存酸素値は増加して5 mg/Lとなり、底層部では酸素を多く含んだ外海水が流入していることを示している。

2月から3月は基本的には同じ水塊構造になっている。水深4 m以浅ではほぼ塩分15 psu以下で10 mg/L以上の高酸素水塊に占められ、それ以深では高塩分化、低酸素化するものの最深部でも貧酸素水塊はみられない。ただ、水深4~6 mに貧酸素水塊が出現しており、最深部の塩分よりやや低い値を示している。水平的に存在場所を確認すると、南側沿岸部の底層部(St.10, 18, 23)であった。3月においてもこの貧酸素水塊はわずかに認められる。この貧酸素

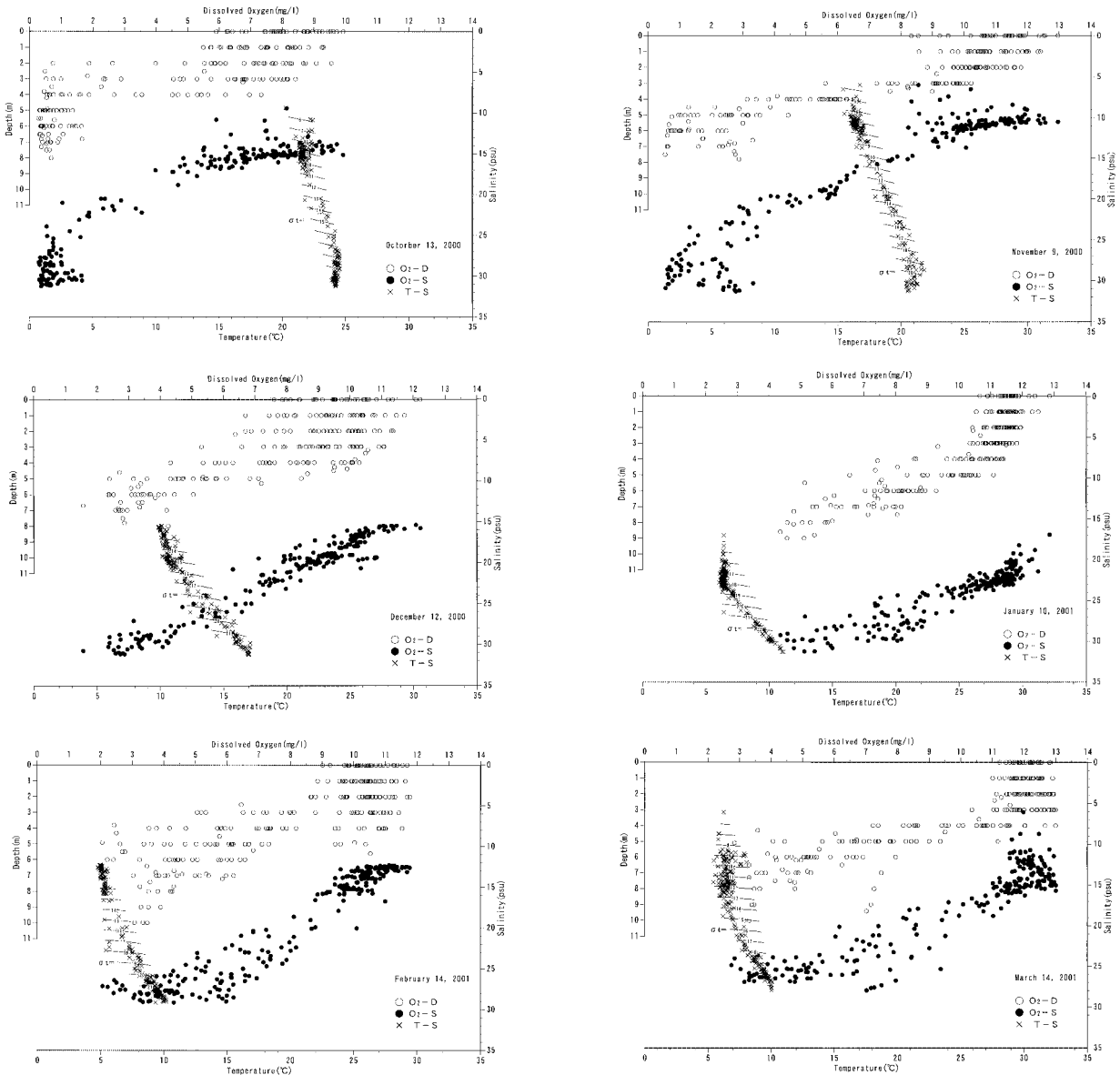


図 2. (続き)  
Fig. 2. (continued)

水塊の出現機構はよく分からないが、藤原ほか(2000)は東京湾において外洋系の水塊が底層に流入し湾内の貧酸素水塊が湾奥沿岸にもち上げられて中層の貧酸素状態になることを見出しており、これと類似の形成機構によるのかも知れない。

## (2) 海洋構造と水塊特性値

前節では2000年4月から2001年3月までの毎月の海洋観測結果に基づいて中海の水塊構造の季節的变化を記述したが、水塊としては(1)鉛直的に水深4~5mを境界としたそれ以浅(上層水)と以深(下層水)の水塊、(2)淡水流入の影響と判断される水塊(河川系水)、(3)すでに定義した溶存酸素量3mg/L未満の貧酸素水で構成されるとみなすことができ

る。それらの水塊特性値の出現範囲を表1に季節毎に示した。

## 2. 河川流量の季節変動

中海の海洋構造を検討する場合、陸上からの淡水の流入も重要な環境形成要因となることが明らかになった。大竹・伊達(1981)も降雨量が中海の環境変動に大きな影響を与えていることを指摘している。そこで中海において河川系水の源となると思われる斐伊川の流量を調べた。

斐伊川の河口付近における流出量の季節変動(図3)をみると梅雨期の7月、台風時期の9月および春季3月にピークがある。7月と9月のピークは年によ

表 1. 季節別水塊特性値.

Table 1. Seasonal water mass characteristics.

Water mass characteristic	Upper layer water	Bottom layer water	Oxygen deficient water	Riverine water
Temperature (°C)				
Spring (Apr.–June)	13–23.5	12.5–21.5	12.5–20	—
Summer (July–Sept.)	24.5–30	23.5–24.5	22.5–29	25–26.5
Autumn (Oct.–Dec.)	10–22.5	13–16.5	15–24.5	16–17.5
Winter (Jan.–Mar.)	5.5–7.5	7–11	5.5–6.5	5–7.5
Salinity (psu)				
Spring (Apr.–June)	13.5–28	24.5–33.5	28–32	—
Summer (July–Sept.)	17–28	29–31	24–33	7–15
Autumn (Oct.–Dec.)	12–25	25–30	20–32	8–13
Winter (Jan.–Mar.)	14–25	18–31.5	27–28	9–14
Dissolved Oxygen (mg/L)				
Spring (Apr.–June)	3.5–10.5	3–7.7	<3	—
Summer (July–Sept.)	3–8.5	3.5–4.5	<3	6–9.5
Autumn (Oct.–Dec.)	3–12	3–5.5	<3	8.5–13
Winter (Jan.–Mar.)	9–13	3–9.5	<3	9.5–13
Density				
Spring (Apr.–June)	13–19	18–25	19–23	—
Summer (July–Sept.)	9–17	19–21	15–22	2–8.5
Autumn (Oct.–Dec.)	7–19	19–22	13.5–22.5	4–9
Winter (Jan.–Mar.)	11.5–20	14.5–24	21–22	7–12

る変動が大きく、流出量は年により著しく異なることを示している。一方、3月のピークは相対的に安定している。

2000年4月から2001年3月までの特徴は4月以降、流出量は減少傾向であったが特に7月から8月にかけては極端に流出量が少なく、渇水状態であった。その後、9月と11月に流出量の増加を示して12月以降はほぼ平常並の水準で経過した。

### 3. 水塊の体積比の季節変動と貧酸素水塊の体積の季節変動

各水塊の出現規模の季節変動をみるため各水塊の月別の出現体積を推定した。最初に地中海の体積(V)を、海図第1174号に1m深ごとの間隔で等深線を描き各深度以深の面積(S<sub>n</sub>)を求め、

$$V = \sum (S_n + S_{n+1}) / 2 \times 1 \text{ m}^3 \dots\dots (1)$$

で算出した。ただし、この体積のなかには本庄水域は含まれていない。

次に、表1の水塊特性値のうち各水塊を代表する塩分値を基準にして、15 psu 未満を河川系水、15 psu 以上 25 psu 未満を上層水、25 psu 以上を下層水、今回の定義から溶存酸素量 3 mg/L 未満を貧酸素水塊とし、表面から1m深ごとに描いた塩分および溶存酸素量の等平面分布図を基に、地中海の体積を求めた手法の式(1)と同じように各深度間について積算した。

各水塊の現存量の季節変動(図4)をみると、4月

以降下層水の占める割合は8月まで増加しほぼ50%に達した。9月になると下層水の割合は著しく減少して上層水の占める割合が増加し、河川系水も出現して約10%に相当する量を占めた。10月以降2月までの下層水は20~30%の占有率を変動し3月には7%に低下した。他方、河川系水は11月には最大の59%に達した。12~1月には出現しなかったが、2~3月にはほぼ45%を占めた。

貧酸素水塊の出現体積の季節変動(図5)をみると、9月は低いものの、初夏から秋にかけての出現が高く、8月と10月には地中海の全容量の40%を占有した。冬から早春には低い傾向がある。気をつくもう一点は、貧酸素水塊の出現体積の季節変動は出現

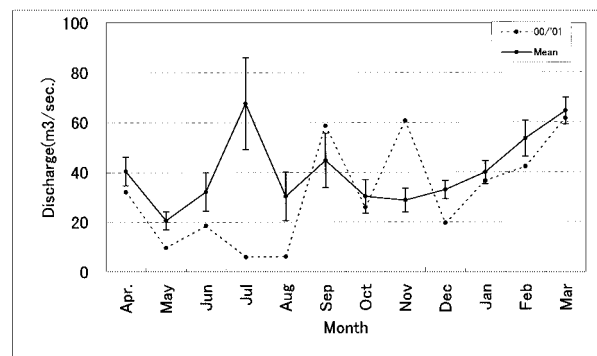


図 3. 斐伊川の流量の季節変動.

Fig. 3. Seasonal changes in discharge from Hii River (m³/s).



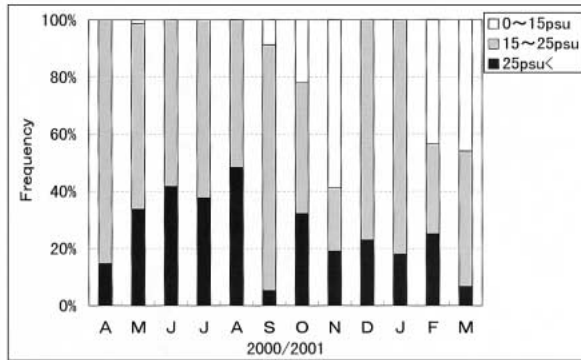


図4. 3つの水塊の季節的な量的変化。

Fig. 4. Seasonal changes in volume of the three water masses.

程度の低い12月から翌年の4月までの間を除けば、下層水の出現パターンとよく類似していることである。すなわち5月以降増加して9月にはいったん低下したが10月には回復しその後ふたたび低下していった点である。

#### 4. 若干の議論

2000年4月から2001年3月までの1年間、地中海の32測点において毎月実施した海洋観測結果に基づき、地中海の海洋構造について記述し、さらに貧酸素水塊の消長に焦点をあてて検討した。その結果、地中海の水塊構造は塩分の特性値を基準にして分類した(1)上層水、(2)下層水、(3)河川系水の3つで構成されていた。これらは徳岡ほか(2001)がそれぞれ中塩分水塊、高塩分水塊、低塩分水塊と呼んだものに相当するが、今回の調査ではこれらの水塊の特性値を明確にすることができた。さらに、貧酸素水塊も含め各水塊体積の季節変動を調べることができた。

貧酸素水塊は5月から形成され始め、下層水が貧酸素化していった。12月には貧酸素水塊はしだいに消滅していったが、その過程は下層水がしだいに酸素量を回復していったことを示している。貧酸素水塊形成の重要な要因のひとつとして成層による溶存酸素の鉛直輸送の障害が指摘されている(例えば佐々木ほか1977, 城ほか1978, 鬼塚1989, 神蘭ほか1996, 東ほか1998)が、地中海においても塩分躍層が鉛直混合を妨害することから底層の酸素消費量を補えないためであると考えられている(Ohtake et al., 1982)。この過程を塩分極大値を示す水塊の挙動からみると貧酸素水塊は外海から流入した海水が滞留し変質したものであると推定される。とくに7~10月の期間は塩分極大値の水塊と貧酸素水塊とが同一の水塊を形成し、外海から流入してきた酸素量の豊

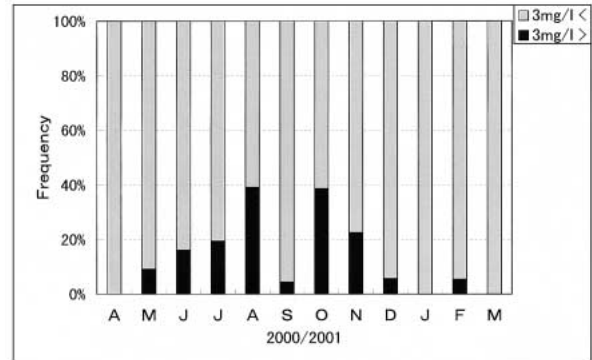


図5. 貧酸素水塊の季節的な量的変化。

Fig. 5. Seasonal changes in volume of the oxygen-deficient water mass.

富な海水が短期間のうちに貧酸素化することを示唆している。

下層水の体積と貧酸素水の体積とは高水温期(6月~11月)にはほぼ正相関していた。またこの時期は下層水の体積が増加していることから外海からの流入量は増大する季節でもある。さらにこの年の梅雨期から夏にかけては例年になく河川流量は少なく(図3)渇水状態であった。このことは地中海側の水位が低くて外海系水の流入量が増加することを示唆している。このように酸素濃度の高い外海系水が入り込みやすい条件にもかかわらず、外海系水の主体を占める下層水体積の大半以上が貧酸素化しているという事実は、地中海の底環境の酸素消費速度がいかに早いかを物語っている。ちなみに地中海の湾奥下層における酸素消費速度は0.9 mg/L/日(福岡ほか1999)である。他方、洞海湾で0.15~0.72 mg/L/日(東ほか1998)、周防灘で0.16~0.89 mg/L/日(神蘭1995)、三河湾で0.65 mg/L/日(Unoki et al.1985)、0.59 mg/L/日(鈴木ほか1998)など他海域の事例と単純に比較しても高めであると言えよう。

ところで9月には下層水、貧酸素水塊の両方の体積とも著しく減少した。これは9月前半の秋雨前線にともなう大量の降雨が原因であると考えられる。図6に9月上旬の松江と出雲における日降水量を示したが、9月13日の調査日の5日前までの累積降水量は147~156 mmを記録した。宍道湖・地中海への直接の降雨およびこれらの水系の流域面積に降った雨がそのまま地中海に流入したと仮定すると、地中海容量の約75~80%に相当する河川系水の流入があったと推算される。流出率も考慮しておらず大雑把な数値ではあるが、集中した多量の降雨に伴う洪水というイベントが地中海の海水交換を促進し、そのことが9月に貧酸素水塊が減少した原因である可能性はきわめ

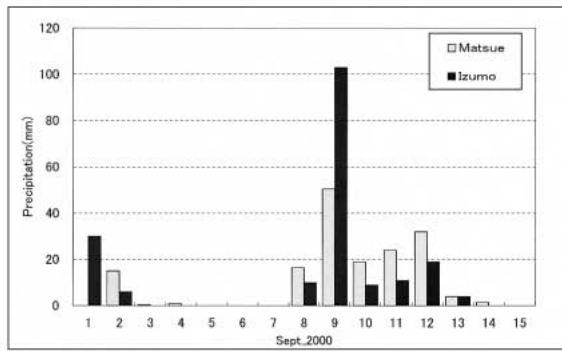


図6. 2000年9月前半の松江と出雲における降水量.  
**Fig. 6.** Precipitation at Matsue and Izumo during the first half of September, 2000.

て高い。奥田(1997)は洪水時における中海貧酸素水塊の記録を検討して下層部の溶存酸素濃度の上昇はほとんどないとしているが、中海中央部の下層1点のみの記録からの結果であり、全体を掌握したものではない。そういった意味で今回の結果は洪水直後の貴重な観測事例といえよう。

今回、1年間の結果であるが、中海の海洋構造を明らかにするとともに、中海に発生する貧酸素水塊の季節変動を定量的に検討する試みを行った。これまでこのような各水塊の体積の季節変動を明らかにした類似の事例はなく、中海の海水交換・貧酸素水塊の挙動などの物理過程を解明するにはこのような定量的な解析がかかせないであろう。藤原(1997)は従来、停滞性の強い水塊として取り扱われてきた貧酸素水塊の発達過程は、動的なものとして扱われる必要があることを指摘している。今後は、測点のモニタリングの継続とともに、中海環境を容量の変動として貧酸素水塊の発生・発達・持続・衰退・消滅の過程を定量的に取り扱っていくことが重要である。

## 謝 辞

島根県内水面水産試験場の向井哲也主任研究員には画像解析のデータ処理について有益な助言をいただいた。同職員の郷原照子さんと谷口いずみさんには資料整理に協力していただいた。また、国土交通省出雲工事事務所には河川流量の資料提供を受けた。ここに記して感謝します。

## 参 考 文 献

藤原建紀(1997)淡水影響域におけるエスチュアリー

循環流と生物・物質輸送. 海と空, 73: 23-30.  
 藤原建紀・高橋鉄哉・山田佳昭・兼子昭夫(2000)東京湾の貧酸素水塊に外洋の海況変動が及ぼす影響. 海の研究, 9: 303-313.  
 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貧酸素水塊の挙動. 土木学会論文集, 636: 61-79.  
 東 輝明・山田真知子・門谷 茂・広谷 純・柳 哲雄(1998)過栄養な内湾洞海湾における貧酸素水塊の形成過程とその特性について. 日水誌, 64: 204-210.  
 平塚純一(2001)パイプ方式による潮通しが閉鎖された中海本庄水域の魚類及び甲殻類相に与えた影響. 陸水学雑誌, 62: 61-73.  
 石飛 祐・平塚純一・桑原弘道・山室真澄(2000)中海・宍道湖における魚類および甲殻類相の変動. 陸水学雑誌, 61: 129-146.  
 城 久・矢持 進・安部恒久(1978)大阪湾における貧酸素水塊の発生状況. 大阪水試研報, 5: 71-84.  
 神蘭真人・磯部篤彦・江藤拓也・俵 悟・小泉喜嗣(1995)周防灘南西部における貧酸素水塊形成機構—酸素消費速度の変動要因. 沿岸海洋究, 32: 167-175.  
 神蘭真人・江藤拓也・佐藤博之(1996)周防灘南西部における貧酸素水塊形成と気象変動の関係. 沿岸海洋研究, 33: 179-190.  
 越川敏樹(1986)中海の魚類. 島根野生生物研究会報 4: 7-17.  
 大竹久夫・伊達善夫(1981)統計的にみた中海汽水環境の特徴について. 中海の干拓・淡水化が水圏環境に及ぼす影響に関する基礎的研究, 4: 7-23.  
 Ohtake, H., Y.Seike, A.Takeda, K.Kondo and Y.Date (1982) A quantitative analysis of phosphorus cycle in the shallow brackish lake Nakanoumi, Japan. Arch. Hydrobiol., 94: 286-301.  
 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: 5-13.  
 鬼塚正光(1989)東京湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, 26: 99-100.  
 佐野 茂(1992)学術論文にみる中海水質の変遷. 山陰地域研究, 8: 95-100.  
 佐々木克之・佐藤善徳・杉浦健三・松川康夫(1977)渥美湾の貧酸素水塊の形成機構—躍層下部の酸素収支—. 東海水研報, 89: 43-55.  
 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・今尾和正(1998)底層の貧酸素化が内湾浅海底生生物群集の変化に及

- ぼす影響. 海の研究, 7: 223-236.
- 徳岡隆夫・三瓶良和・上野博芳・西村清和・須崎 聰  
・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重敖 (2001) 大橋川  
における高塩分水塊の動態観察 (1999 年秋).  
LAGUNA (汽水域研究), 8: 79-90.
- Unoki S, Y.Saijyo, and S. Tawara (1985) In situ measure-  
ment of oxygen consumption rate in the bottom layer  
in Mikawa Bay. J.Oceangr.Soc.Japan, 41: 59-62.
- 柳 哲雄 (1989) シンポジウム「貧酸素水塊」のま  
とめ. 沿岸海洋研究ノート, 26: 141-145.

## 大橋川における高塩分水塊の遡上現象\*

森脇晋平<sup>1</sup>・藤井智康<sup>2</sup>・福井克也<sup>3</sup>

### Intrusion of high salinity water mass into Ohashi River, San'in District of Japan

Shimpei Moriwaki<sup>1</sup>, Tomoyasu Fujii<sup>2</sup> and Katsuya Fukui<sup>3</sup>

**Abstract:** Appearance of a high-salinity water mass that frequently intrudes into the Ohashi-River from the Lake Nakaumi and causes oxygen-deficient water mass in Lake Shinji in San'in District, western Japan, has been studied with special reference to the variations in water levels as well as wind patterns in Lake Nakaumi. Although no seasonal fluctuations in the high-salinity water mass index (HSI) were found, correlations seemed to exist between the monthly HSI and the water level differences as well as discharge of the Hii River. In a shorter time-scale, it was probable that the level of HSI increased when water level differences were large. The average velocity of the high-salinity water mass was estimated to be 0.44 m/s. Large HSI occurred more frequently during westerly winds than easterly ones, suggesting thereby that some of the HSI were associated with the rise of wind-induced halocline. Extensive HSI was likely to occur when the difference of water level was large and westerly winds prevailed.

**Key words:** high salinity water mass, Ohashi River, water level, wind

### はじめに

大橋川は宍道湖と中海を結んでいる全長約 8 km の河川である。中海から大橋川を通じてしばしば海水が宍道湖へ侵入しているが、この海水は低溶存酸素水状態の場合があることが報告されている(津田, 1995)。一方、浸入した海水は密度成層をつくりやすく、宍道湖の貧酸素水塊形成に関与していることが指摘されている(山室, 2001)。貧・低溶存酸素水塊は、海水として直接侵入してくるにしろ宍道湖内部で形成されるにしろ周辺水域の水産資源生物に短期的にも長期的にも悪影響を与えることが予想され

る。こういった観点から、大橋川を通じて海水が宍道湖へ侵入する条件や遡上機構の調査研究は重要な課題である。

橋谷ほか(1991)は宍道湖への海水の流入要因を低気圧による日本海側の海水位上昇であると指摘したが、その後 Ishitobi et al.(1999)や徳岡ほか(2001 a)の調査を除いてはほとんどなされていない。しかもそれらは調査期間が短かく、現象の地域的特徴を理解するためにはさらに水域全体を通して長期的に事例を検討する必要があるだろう。

一方、この海水の遡上現象の出現機構に関して中海の内部波の振動と関連する可能性が指摘されてい

<sup>1</sup> 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 Present address: Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Hamada, 697-0051, Japan

<sup>2</sup> 日本ミクニヤ(株) Mikuniya Corporation, Hiroshima, 734-0015, Japan

<sup>3</sup> 島根県内水面水産試験場 Shimane Prefectural Inland Fisheries Experimental Station, Hirata, 691-0076, Japan

現所属：島根県栽培漁業センター Present address: Shimane Prefectural Sea Farming Center, Nishinoshima, 684-0211, Japan

\* 2000 年度水産海洋学会で一部口頭発表

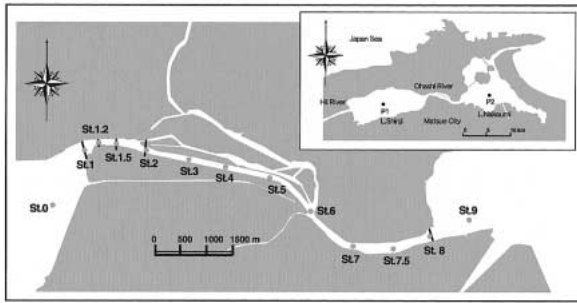


図1. 調査地点の概要. 連続観測は St.1.2 の水深 4 m で得られた. 水位変動は宍道湖と中海の中央部で, 風は中海の中央部でそれぞれ得られた資料である. また斐伊川の流量はその河口部で観測されたのもである.

**Fig. 1.** Location of survey points in the Ohashi River. Continuous data was obtained through the "Water Quality Observation System" (St.1.2) at 4 m depth in the central parts of Lake Shinji (P 1) and Lake Nakaumi (P 2). The flux of Hii River was observed at its mouth.

る (Fujii, 1998). 中海の内部波の変動は海上風と密接に相関していることが報告されているが (Fujii, 1997), 中海の海上風と海水の遡上現象との関連を取り扱った報告は皆無の状態である. 本報告ではこのような背景から, 大橋川での現地観測を実施し, あわせて大橋川の宍道湖入り口付近で得た長期間の連続観測資料を用いて, この現象の出現状況をとくに水位と風との関与に注目して調べた結果を報告する.

### 資料と解析の方法

今回取り扱った資料は大きく 2 つに分類できる. ひとつは島根県内水面水産試験場が調査船 (8.5 総トン) を使用して 1999 年 9 月 9 日~10 日に実施した観測である. 図 1 に示した観測点において, ハイドロラボ社製多項目水質計 (H-20) とアレック電子社製電磁流速計 (ACM-210 D) を用いて実施した反復観測によって延べ 9 シリーズの観測資料が得られたが, 今回は高塩分水塊の挙動に注目するため塩分と流れの資料を用いた. さらに高塩分水塊の遡上現象を捕捉するため上述の調査船による観測期間をはさむように図 1 の St.6 と St.8 に自記記録水質計 (ハイドロラボ社製データゾンデー 3 型) を設置し, それらから得られた塩分値も用いた.

他のひとつは島根県内水面水産試験場が松江大橋の橋脚 (図 1: St.1.2) に設置している水質監視システム (島根県内水面水産試験場, 1999) から得られた塩

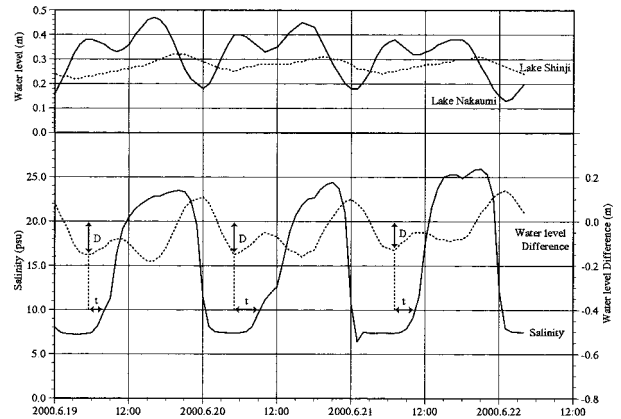


図2. 水質監視システム (図 1, St.1.2 の水深 4 m 深) から得られた塩分の観測記録と水位 (上段) および水位差 (宍道湖-中海; 下段) の一例.

**Fig. 2.** An example of data on salinity (lower) at St.1.2 and water level (upper) in the central parts of L. Shinji (P 1) and L. Nakaumi (P 2).

分観測値である. このうち 1998 年 4 月から 2000 年 3 月までの約 4 m 深における観測記録を使用した.

水質監視システムから得られた塩分値の観測例を図 2 に示した. 得られたデータを見ると塩分値は短期間に上昇・下降をくりかえし, 高塩分水塊が進入・後退していることを示している. 宍道湖中央部の周年を通じての平均塩分値は 2~7 psu である (伊達ほか, 1989) ので, 10 psu 以上の海水は宍道湖内部で生成されることはないと考えられ, 10 psu 以上の海水は大橋川を通じて外海から宍道湖に入ったものとみなすことができる. これをこの報告では「高塩分水塊」とよぶことにする. 高塩分水塊の出現規模を定量的に検討するため, 監視システムの水深約 4 m 深において, 高塩分水塊が出現した時間 (継続時間) とその塩分値とから積算塩分値を求め (図 3), 高塩分水塊出現指数 (以下 HSI とよぶ) を求めた (式 1).

$$\text{高塩分水塊出現指数: HSI} = \sum \text{Sh} \cdot \Delta t \quad (\text{式 1})$$

ただし, Sh: 10 psu 以上の塩分値,  $\Delta t$ : 単位時間 (10 分間). また HSI を月毎に積算 (式 2) して高塩分水塊の季節的な変動を検討した.

$$\text{月間の高塩分指数} = \sum_{d=1}^T \text{HSI} \quad (\text{式 2})$$

ただし, d: 日 (1, 2, 3..., T (月末))

図 2 には宍道湖と中海の中央部 (図 1: P 1, P 2) における水位変動も図示したが, 高塩分水塊が遡上する直前にはしばしば中海水位が宍道湖のそれを上回る水位の逆転現象がみられる. 今回この水位差 (図 2: "D") およびその時刻から高塩分水塊出現までの時間 (図 2: "T") とを計測した. さらに高塩分水塊出

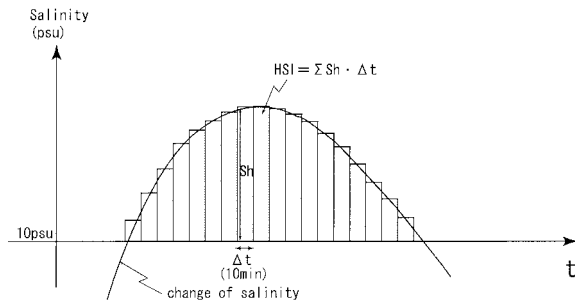


図 3. 高塩分指数 (HSI) の定義と計算の考え方.

Fig. 3. Scheme of the calculation of the High Salinity water mass Index (HSI).

現に及ぼす風の影響を検討するため出現開始時から6時間ごとに24時間前まで遡った風の状況を検討した。中海周辺の風の特徴としては年間を通じて東西軸方向に吹く風が卓越している(福岡ほか, 1999)ので, 中海中央部(図1:P2)における1時間ごとの風の東西成分を6時間ごとに平均算出したものを用いた。ただし, 風向については吹いていく方向を「風向」として東向きを「プラス」とした。

宍道湖中央部の水位, 中海中央部の水位と海上風および斐伊川河口部における河川流量値については建設省(現・国土交通省)出雲河川事務所が収集している資料を用いた。

## 結 果

### 1. 大橋川における高塩分水塊の分布と流動特性

#### 1) 航走調査から得られた塩分・流速縦断面

9月9日の第1回目~3回目の調査(図4)は中海の水位が宍道湖のそれより低下する時間帯に対応する。高塩分水は後退し鉛直的にも塩水楔は薄くなり, 底層部に高塩分水がへばりつくように分布している。流れも宍道湖から中海に向う成分が卓越し, 底部では高塩分水の分布に対応してごく弱い逆流がみられた。

9日の第4回目~5回目(図5)の調査は中海の水位が宍道湖のそれより高い時間帯に実施した。第3回目の調査(図4-(下))で下流部の底層部に薄く分布していた高塩分水は宍道湖方面へ遡上していった。流れは中海から宍道湖への成分が卓越していた。

10日の第6回目~7回目の調査時(図6)の水位状況は, 中海の水位は低下するが宍道湖のそれ以下には低下することなく, 水位が逆転した第1~2回目の状況(図4-(上), (中))とは異なる。高塩分水は遡上した状態を維持している。流れは停滞した状況

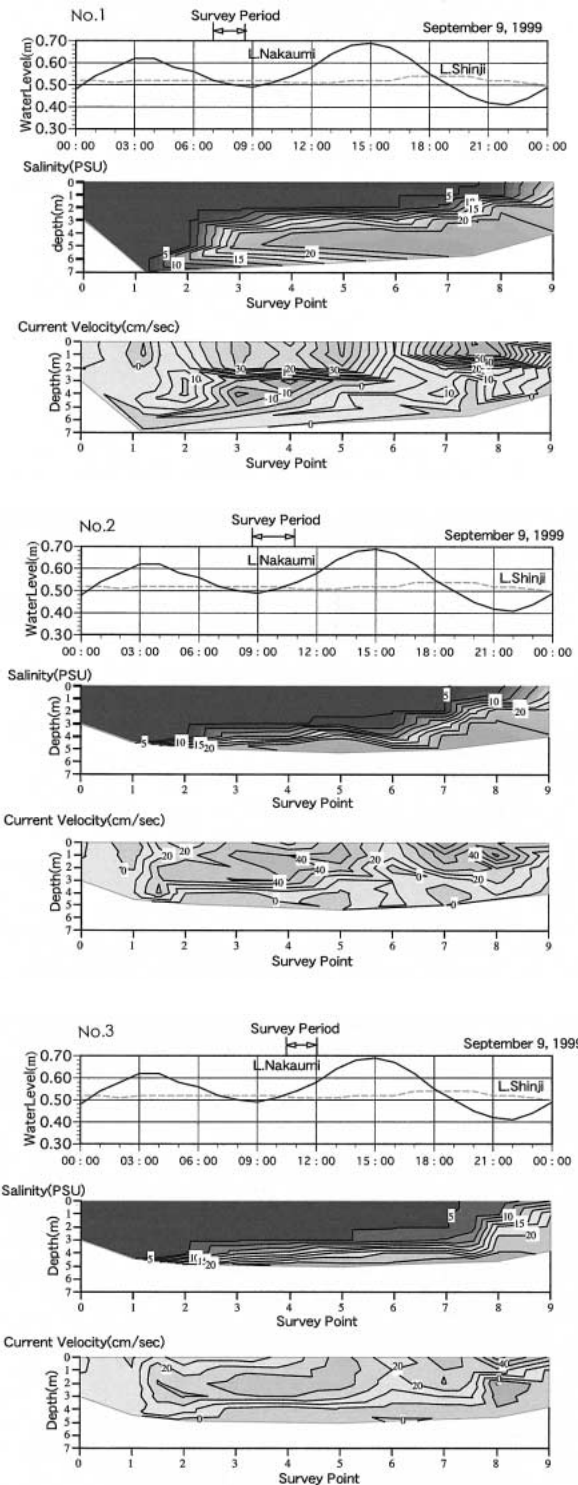


図 4. 大橋川における塩分(中段), 流速(下段)の鉛直縦断面と水位変動(上段)一第1回~3回一。

Fig. 4. Vertical sections of salinity (middle) and current velocity (lower) along the Ohashi River, and water level fluctuation (upper) -No.1~3-.

であり, 流速の絶対値は調査期間を通じて相対的に小さい。

8回目~9回目の調査(図7)は中海の水位がふた

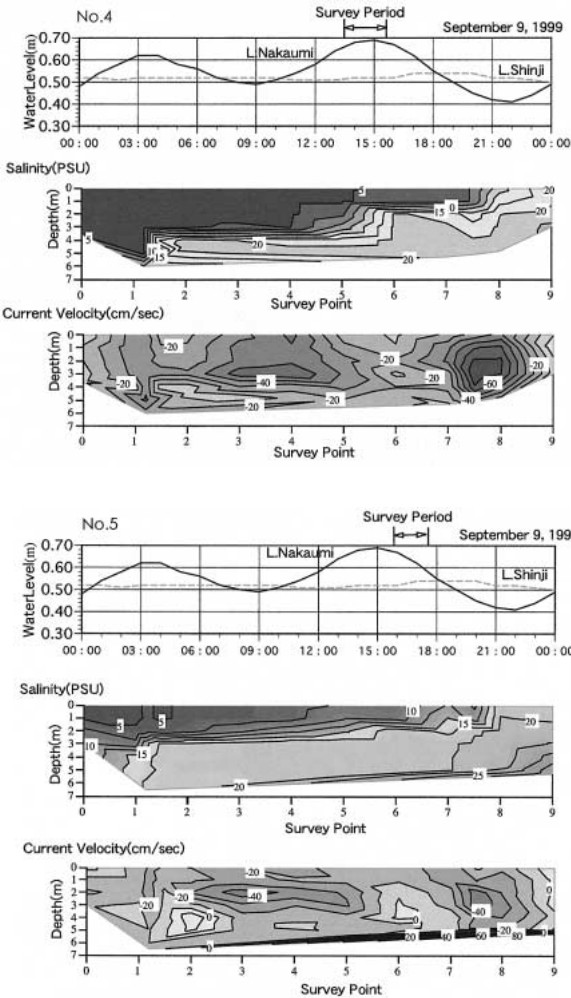


図 5. 大橋川における塩分(中段), 流速(下段)の鉛直縦断面と水位変動(上段) — 第 4 回~5 回 —.

Fig. 5. Vertical sections of salinity (middle) and current velocity (lower) along the Ohashi River, and water level fluctuation (upper) —No.4~5—.

び上昇に転じた時間帯で、4 回目~5 回目調査時(図 5-(上), (下))と水位変動は同じ状況であった。この時期は、第 6 回~7 回目の調査(図 6-(上), (下))でみたように停滞していた高塩分水が再び遡上していったため、高塩分水は調査断面のほとんどすべてを占め、最終的には宍道湖へ達している。

以上のように中海と宍道湖の水位差に伴う高塩分水の進入・後退と流れの実態の一部が明らかになった。

2) 遡上速度の推定

同時期に底層部に設置した自記記録水質計の連続観測記録と松江大橋に設置の水質監視システムの記録とに基づき高塩分水の遡上速度を推定した。

今回の調査のうちで高塩分水が遡上していく過程を航走調査と自動連続観測の記録とを対比してとら

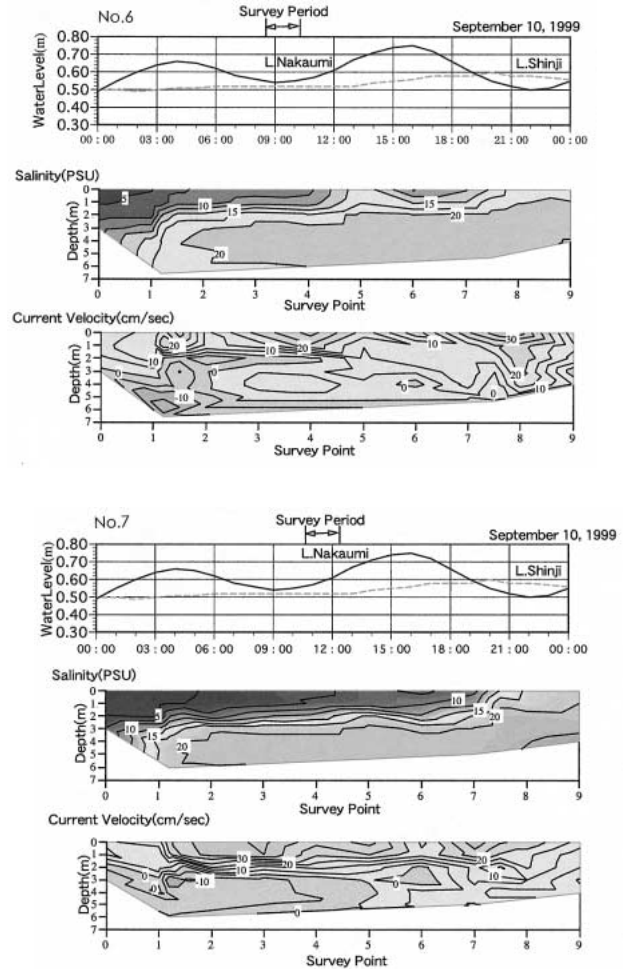


図 6. 大橋川における塩分(中段), 流速(下段)の鉛直縦断面と水位変動(上段) — 第 6 回~7 回 —.

Fig. 6. Vertical sections of salinity (middle) and current velocity (lower) along the Ohashi River, and water level fluctuation (upper) —No.6~7—.

えることができたのは 9 日の第 3 回目(図 4-(下))から 5 回目(図 5-(下))の調査である。中海大橋付近(図 1: St.8)まで後退していた高塩分水が徐々に遡上して宍道湖入り口にまで達する様子がみられた。この期間の連続観測記録をみると、St.6 では 10 時 40 分から塩分値は上昇をはじめ、一方 St.1.2 の下層部では 15 時 10 分から塩分値は上昇を開始した。

これらの塩分値の変動は航走調査の結果とよく対応している。すなわち、塩分の上昇時刻とその測点より上流の測点での塩分上昇時刻とから高塩分水の遡上時間が計測できる。今回の調査ではこのような事例が 15 回認められた(図 8)。

それぞれの測点間の距離を計測して高塩分水の遡上速度  $V$  を推定したところ、

$$V=0.44 \text{ m/s (0.31~0.56 m/s)}$$

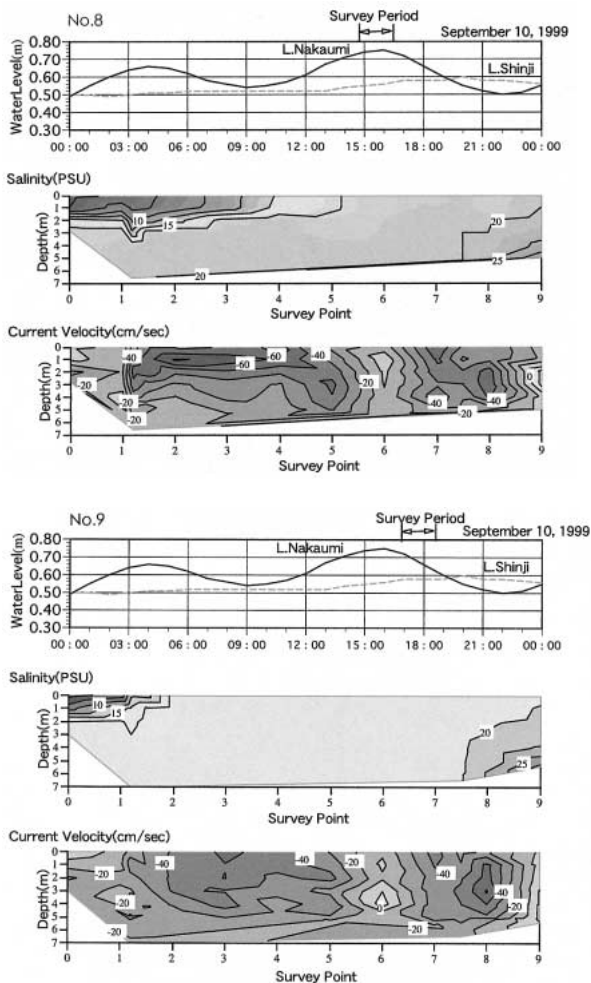


図7. 大橋川における塩分(中段), 流速(下段)の鉛直縦断面と水位変動(上段) —第8回~9回—.

Fig. 7. Vertical sections of salinity (middle) and current velocity (lower) along the Ohashi River, and water level fluctuation (upper) —No.8~9—.

を得た。( )内は95%信頼区間である。

## 2 高塩分水塊の出現状況

### 1) 季節変動

水質監視システム下層部(図1:St.1.2の4m深)における高塩分水出現指数の季節的変動をみるため3年間の月別の出現指数変化(図9)をみたところ, 少なくとも得られた結果からは一定の共通した季節的変動パターンは認められない。

これまで宍道湖に進入する高塩分水の季節的な変動に関する知見はほとんどない。今回連続して長期的な観測が可能となり, 周年を通じての定量的な把握が可能となった。その結果, 大橋川の宍道湖入り口付近における季節的な高塩分水の出現は年によって著しく異なることが明らかになった。

橋谷ほか(1991)は宍道湖への高塩分水の流入要因として両水域の水位条件を指摘した。そこで高塩分指数の変動に影響をおよぼすと想定される環境要因として, 中海・宍道湖の水位, その差(宍道湖-中海), 河川流量(斐伊川)をとりあげ, それぞれの月平均値との関連を検討した。この結果(表1)による

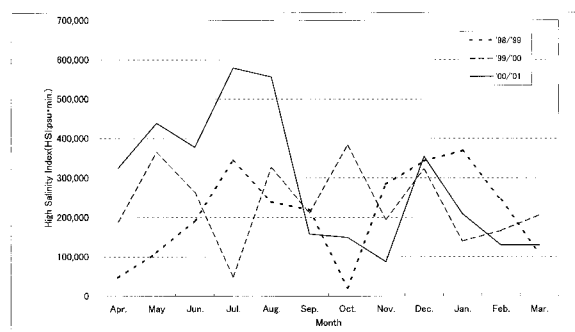


図9. 各年における月別高塩分指数の季節変化。  
Fig. 9. Seasonal changes of HSI during the year.

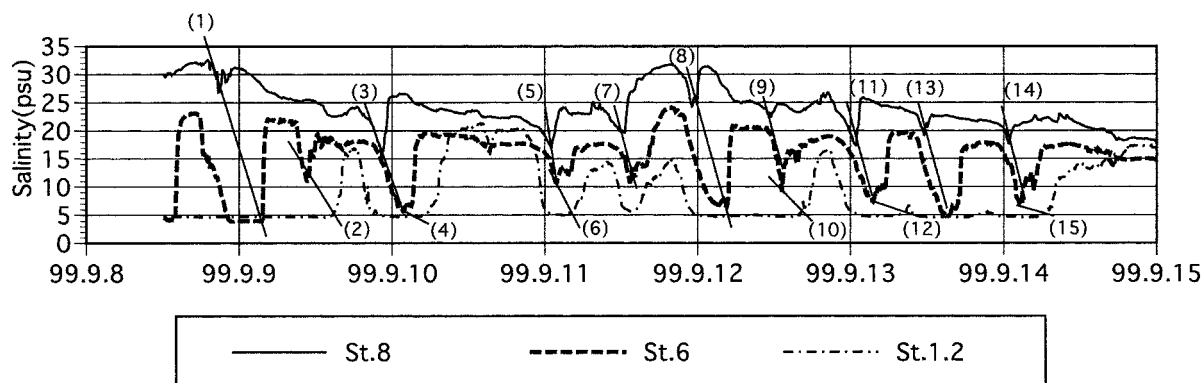


図8. 底層塩分の連続観測.1から15の斜線は高塩分水塊の進入を示している。

Fig. 8. Temporal variations in the bottom salinity at St.8,St.6 and St.1.2. Lines joining the two series indicate the high salinity water mass intrusion events.



表 1. 高塩分指数と環境要因(水位, 水位差, 河川流量)との相関係数. 下線の数字は 1% 有意水準で相関関係がある.

**Table 1.** Correlation coefficients between High Salinity Index and other environmental factors (water level, difference of water level, river discharge). Underlineds are significant at 1% level or more.

	H.S.I.	W.L.in Shinjiko	W.L.in Nakaumi	W.L.Difference	Mon. Discharge
High Salinity Index	1.00				
W.Level in Shinjiko	-0.02	1.00			
W.Level in Nakaumi	0.23	<u>0.97</u>	1.00		
W.Level Difference	<u>-0.75</u>	0.27	0.03	1.00	
Monthly Discharge	<u>-0.80</u>	0.19	-0.09	<u>0.85</u>	1.00

表 2. 高塩分水の出現規模と継続時間との関係.

**Table 2.** Relation between level of the high salinity appearance and the hours of duration.

hours of duration/scale	Level I	(%)	Level II	(%)	Level III	(%)	Level IV	(%)	Level V	(%)	Total	(%)
~6	189	31.3	1	0.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	190	30.6
6~12	110	18.2	46	7.6	0	0.0	0	0.0	0	0.0	156	25.2
12~18	2	0.3	137	22.7	28	4.6	0	0.0	0	0.0	167	26.9
18~24	0	0.0	13	2.2	23	3.8	3	0.5	0	0.0	39	6.3
24~30	0	0.0	0	0.0	9	1.5	6	1.0	0	0.0	15	2.4
30~	0	0.0	0	0.0	8	1.3	14	2.3	31	5.1	53	8.5
Total(%)	301	49.8	197	32.6	68	11.3	23	3.8	31	5.1	620	100.0

Level I:0~10,000psu・min. Level II:10,000~20,000psu・min. Level III:20,000~30,000psu・min. LevelIV:30,000~40,000psu・min. LevelV:40,000psu・min. ~

と, 高塩分水出現指数は水位差と河川流量との間に高い負相関がみられた. このことは, 河川の流量増加に伴う宍道湖水位の上昇が中海への流量を増大させることによって高塩分水の進入が阻害されることを示している.

松江大橋下 (St.1.2) に出現した海水のすべてが宍道湖の流入出に関与しているとは限らないであろうが, 月ごとの高塩分水出現指数(式 2)は大橋川を通じての宍道湖における海水の季節的な交換を示すひとつの指標になりえるであろう.

## 2) 短い時間スケールの変動

### ①規模と継続時間

今回観測された 620 回の高塩分水の出現をさらに短い時間スケールで検討するため, 出現規模と継続時間との関係を表 2 のように整理した. なお出現規模を次の 5 階級に分類して検討をすすめた. すなわち, 10,000 psu・min. 未満をレベル I, これ以上 20,000 psu・min. 未満をレベル II, これ以上 30,000 psu・min. 未満をレベル III, これ以上 40,000 psu・min. 未満をレベル IV, これ以上をレベル V とした.

出現規模としてはレベル I の頻度が約 50% で最も多く, 継続時間では 6 時間未満のものが約 30% を占めていた. 出現規模と継続時間との組み合わせで見るとレベル I で 6 時間未満のものが最も多く, 次いでレベル II で 12~18 時間が 22.7%, レベル I で 6~12 時間が 18.2% であった. レベル II, III では 12~18 時間, 18~24 時間の継続時間の出現頻度が高かった. レベル IV 以上の出現指数では 30 時間以上継

続する例がほとんどであった. このような長時間の継続は, いったん遡上した高塩分水塊が停滞したのちに再び遡上していくという過程によって発生したものである. こういった現象は実際に前節で述べた観測事例でみられている (図 6, 7).

### ②水位差と出現時間差

規模別に水位差の変化(図 2: "D")に対する出現頻度を図 10 に整理した. 出現の分布パターンをみると規模が大きくなるにつれて水位差の大きい方に出現分布が偏っていくという傾向がみられる. 実際, 水位差によって高塩分水出現規模における出現割合に差が認められた ( $p < 0.01$ ). したがって, 水位差の大きいときには規模の大きな高塩分水塊の出現が生じ

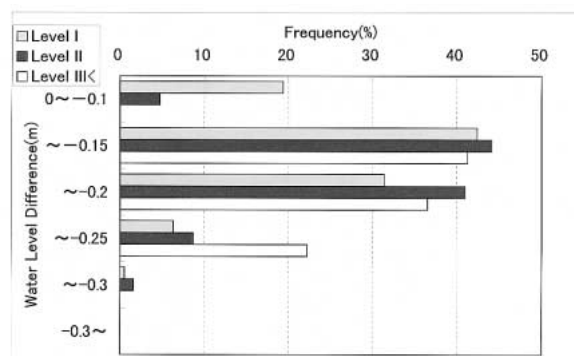


図 10. 水位差(図 2 の "D")に対する各レベル毎の HSI 頻度分布の比較.

**Fig. 10.** Comparison of the frequencies of HSI at each level of the water level difference ("D" in Fig.2).

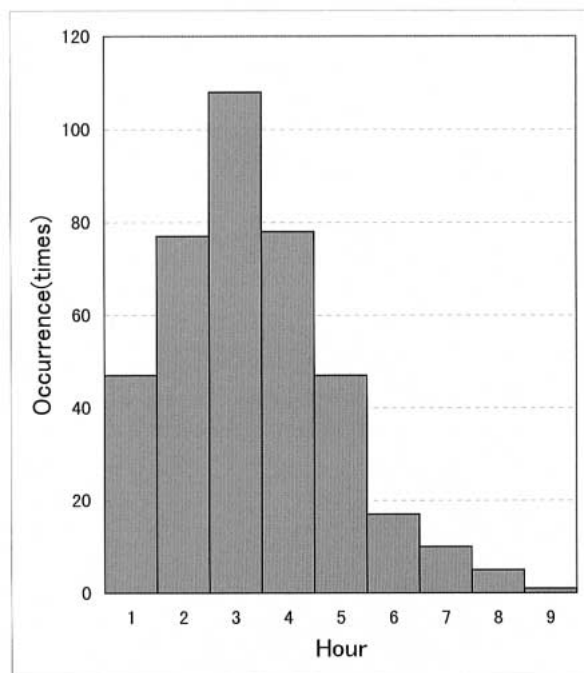


図 11. 水位差が最低になったときから塩分が 10 psu 以上に上昇するまでの時間(図 2 の"t")の頻度分布。

**Fig. 11.** Frequency distribution of time-lag "t" in Fig.2. A "t" is the period from the time when the water level difference reaches the minimum up to the time when the salinity rises up to 10 psu or more.

やすいといえる。

水位差の最大時刻と高塩分水塊の遡上開始時刻との差(図 2: "T")の頻度分布を図 11 に示した。620 例のうち 390 例を測定できたが、時間差のモードは 3 時間、平均値は 3.31 時間であった。

### ③風との関係

高塩分水の遡上と風との関係についてはひとつには長期間の観測資料が得られなかったため推測の域を出ていない。この点を今回詳しく検討した。なお、レベルⅣ以上については 30 時間以上継続するケースが多く、既に指摘したように停滞していた高塩分水塊が再び遡上したケースを多く含むと考えられ、別途検討したい。

まず、高塩分水の遡上が起こった時刻から 6 時間前までの中海中心部における海上風の東西成分の平均値(東方向をプラス成分とする)と高塩分水規模との関係を図 12 に示した。

該当する時間全体の組成(図 12: 下)は 0 から 5 m/s クラス(西風成分)の頻度が約 55% ともっとも高く、ついで 0 から -5 m/s クラス(東風成分)の頻度が 26% で前者のほぼ半数となっている。この全体の

頻度組成は高塩分水遡上時から 6 時間前までの風を統計したものであるが、3 年間の全季節を通じて得られたものであるので年間を通じた中海の海上風を代表していると判断してよいであろう。この全体の頻度とレベルⅠとレベルⅡともそれぞれの頻度には多少の差はみられるが顕著な分布パターンの差異はみられない。このことはこのレベルの高塩分水の遡上と風との間には密接な関係が乏しいことを示している。

ところが、レベルⅢの規模ではこれ以下の規模の風に対する出現頻度パターンとは異なっている。すなわち、5~10 m/s クラスの風(西風)に対する出現頻度は 24% で、その出現規模以下のクラスの 10% 前後に比較して 2 倍以上も大きくなっており、逆に東風の頻度は減少傾向にあり、出現頻度には統計的にも有意な差がある( $p < 0.05$ )。このことは、レベルⅢの高塩分水出現の規模が発生するときには、6 時間前までに 5~10 m/s のやや強い西風が吹いている場合が東風の吹いている場合に比べて多い、と言える。

つぎにどの程度の時間まで風が高塩分水遡上規模に影響を与えているかを検討した。レベルⅢについて遡上時刻から 6 時間前までの平均値のほかに、6-12 時間前、12-18 時間前、18-24 時間前のそれぞれの平均値に対する出現頻度を図 13 に示した。これによるとやや強い西風時に高塩分水遡上が見られる割合が高いのは 12-18 時間前までの風であることがわかる。すなわち 18 時間前までの風の影響が高塩分水の遡上に寄与していると言える。

## 考 察

大橋川における海水の流入・流出状況を検討するため調査船による反復観測を実施した結果、高塩分水塊の進入・後退は水位と密接に連動していることが分かった。その侵入速度は、徳岡ほか(2001 a)の結果の範囲内にあり同程度であった。ただ、今回の調査では観測事例が多く得られ、より信頼性が高いと言える。

松江大橋の橋脚に設置した水質監視システムから得られた塩分の連続データをもとに高塩分水塊出現単位を定義して、高塩分水塊出現の季節変動に及ぼす影響を検討した結果(表 1)からも水位差と高塩分水塊の遡上とは明瞭な相関関係がみられた。すなわち中海の水位が宍道湖のそれより高い場合には中海の水塊の遡上にとまって高塩分水が侵入してくる

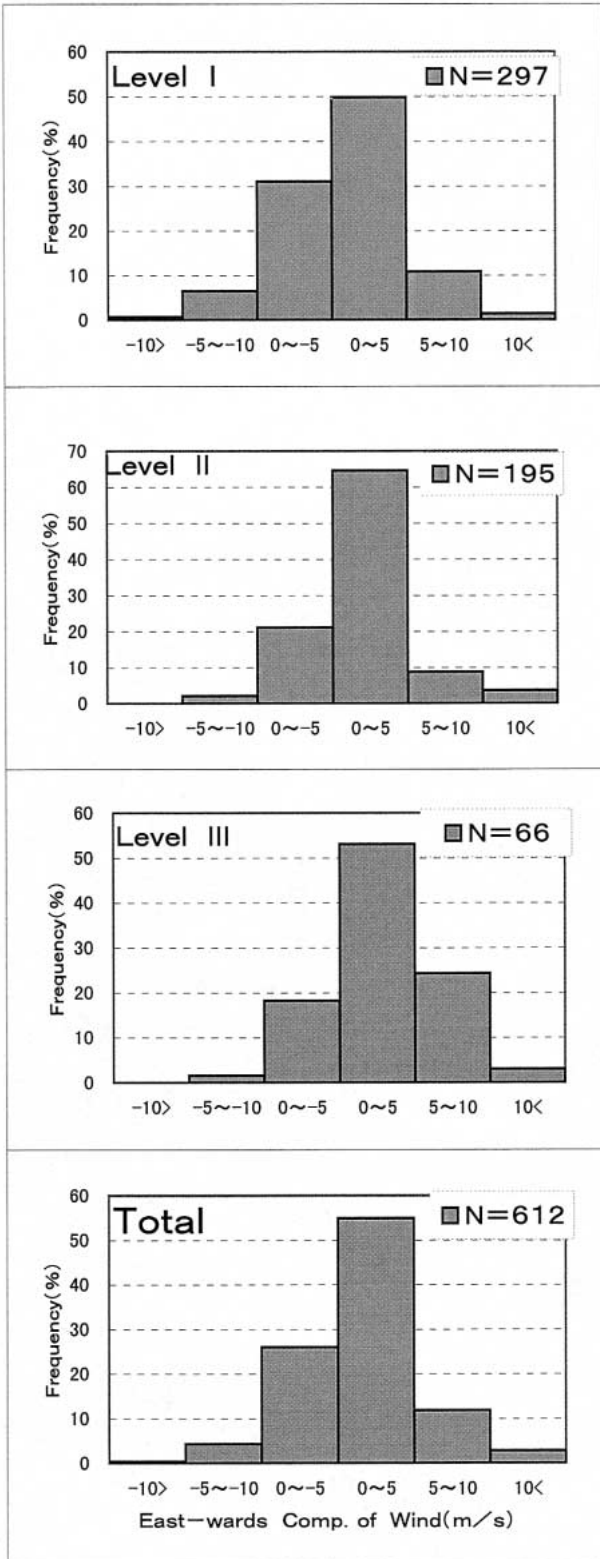


図12. 規模別のHSIの風(東西成分)に対する出現頻度分布. レベルⅢではそれ以下のレベルに比較してやや強い東向きの風(西風: 5-10 m/s)のときの頻度が高い.

**Fig. 12.** Frequency distribution of the ratio of occurrence of HSI with east-ward comp. of wind for each level. In level Ⅲ, a frequency of slightly strong easterly wind is high as compared with that of the level I or II.

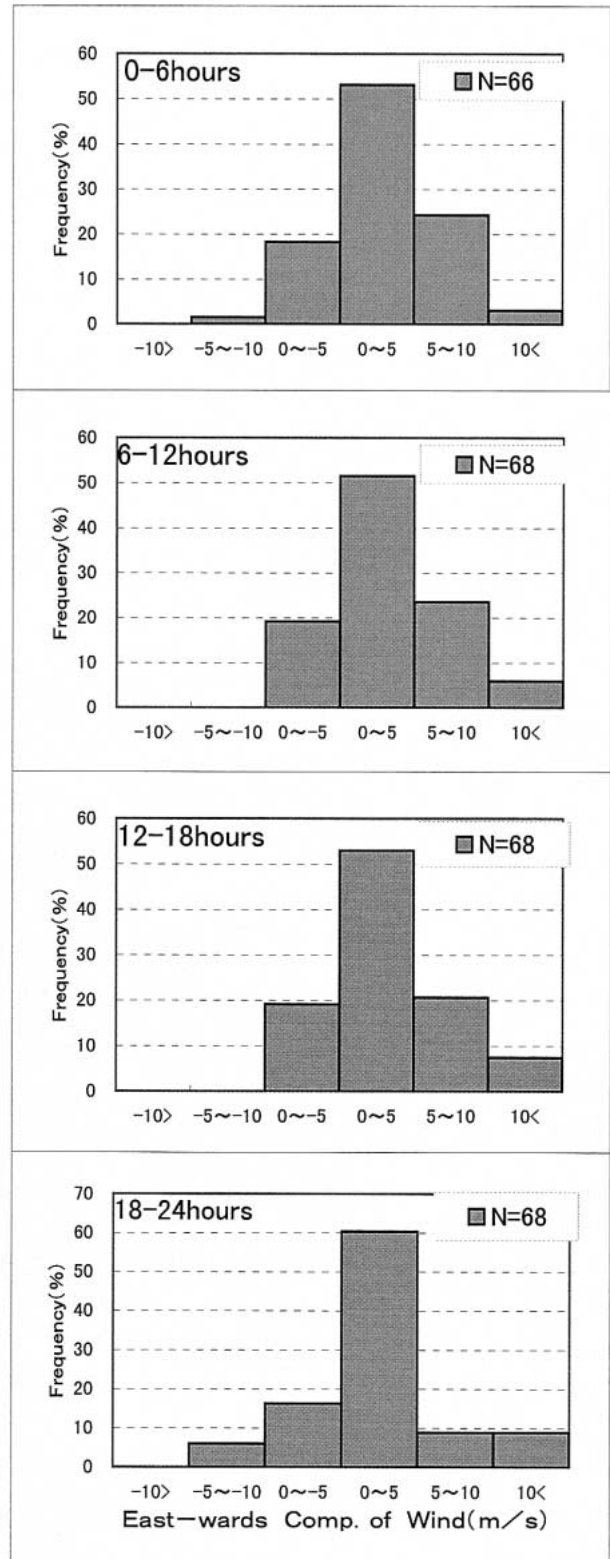


図13. レベルⅢの出現した6時間前ごとの風(東西成分)に対する出現頻度分布. 18-24時間前の分布はそれ以前とは明らかに異なっている.

**Fig. 13.** Frequency distribution of the ratio of occurrence of level Ⅲ HSI with east-ward comp. of the wind during a 24-hour period prior to the occurrence of the level Ⅲ HSI. Apparently, the distribution during 18-24 hour period is different from that of the other three time periods.

ことを示している。

短い時間スケールでみた場合においても、高塩分水塊の遡上と水位差との関係では水位差が大きくなると高塩分水塊の出現規模も大きくなるという傾向は認められる(図10)。ただ、どのクラスの出現規模も水位差が0.1~0.15 mのクラスのとときにモードがあり、いずれのレベルもほぼ同じ40%の出現割合を占めている。水位差によって明瞭な出現分布差の差異が生じない理由のひとつとして中海における塩分躍層の形成状況は気象・海況要因によって大きく変動する点にあると推測する。つまり、実際に個々の遡上高塩分水塊が水位差との関係でどのような発達程度の中海の塩分躍層時に遡上するのかは偶然性に依存するであろう。例えばある水位差の条件のもとで中海から大橋川への遡上が発生するとして、中海に高塩分水塊がまったく分布していなかったと考えても、一定量の水塊は遡上していったであろう。個々の高塩分水塊の遡上(高塩分出現単位)と水位差との関係を対応させた場合、明瞭な関係がみいだされるところは限らないという点に注意する必要がある。

発生要因に関するもう一つの結果は、規模の大きな高塩分水塊の出現がみられるほぼ半日前までにやや強い西風が吹いている場合が有意に多いことであって、この現象が風による塩分躍層の内部振動と関連があることが推測されることである。中海には風に伴う塩分躍層の振動が存在することはよく知られているが(例えば Fujii et al., 1996; 黒川ほか, 2000; Godo et al., 2001; 徳岡ほか, 2001 b), 大橋川への高塩分水塊の進入に関して Fujii (1998) は中海下層部の高塩分水が西岸にはい上がってきているときにこの現象が生じる可能性を指摘している。強い西風の連吹は中海塩分躍層の西側を上昇させるので、高塩分水の遡上のなかには西風の連吹の寄与によるもの確かに存在すると思われる。ただ規模の小さい場合(レベル I, II)では明瞭な関係はみいだせなかった。これは風による高塩分水塊の進入が起きないことを意味しない。レベル I, II の中にもやや強い西風の場合に進入がかなりの回数で生じているが、この中には風に伴うものも当然含まれているであろう。

ところで、西風の吹き出しから塩分躍層の上昇にまで要する時間は約3時間であり(Fujii, 1997)、一方大橋川河口部(St.9)から宍道湖入り口(St.1.2)にまで到達する高塩分水塊の時間は今回の調査で得られた遡上速度  $V=0.44$  m/s から推定して約5時間である。風の吹き出し開始から宍道湖入り口に高塩分水

塊が到達する時間を単純にこれらの合計とみなすと約8時間となる。これはほぼ半日前までに西風が吹いている場合が多いこと(図13)とを比較するとその範囲内に含まれる。

このことから西風の吹き出しによる塩分躍層の上昇、沿岸域への這い上がり、大橋川への遡上という一連の過程の存在が想定される。ただし、実際の高塩分水塊の出現機構はこのように単純ではなく、さまざまなケースが存在するであろう。その原因として、(1)水深が浅く地形の影響を受けやすい、(2)密度成層状態が一定ではなく気象・海象の変動の影響を受けやすい(日比野ほか, 1997; 黒川ほか, 2000)、(3)密度成層が内部振動として岸沿いに伝播する(Fujii, 1997)、などの中海の地理的特性が挙げられ、これらが現象を複雑にしていると考えられる。

これまで水位差と風の作用とを別々に考えてきたが、両者が合わさった場合を検討してみる。出現規模別に風と水位差とを比較して両者の組み合わせを整理すると表3のようになる。レベル III 出現時ではそれ以下に比較してより強い西風が吹いて水位差が大きい組み合わせのときの出現頻度が高い傾向にある。出現分布の重心位置を求めるとレベル III 出現時の風と水位差はそれぞれ 4.1 m/s, -0.18 m であるが、レベル II では 2.3 m/s, -0.15 m であり、レベル I

表3. 高塩分水の出現規模別に整理した水位差と風との組み合わせ。

Table 3. Combination of the water level difference with that of the east-ward comp. of wind. The numerals indicate the frequency of occurrence.

Water Level Difference (m)	Level I					
	10~	10~5	5~0	0~-5	-10~-5	-15~-10
0~-0.1	0	2	20	10	3	1
~-0.15	0	8	42	23	8	0
~-0.2	1	7	32	19	2	0
~-0.25	1	2	7	2	0	0
~-0.3	0	0	1	0	0	0
~-0.4	0	0	0	0	0	0

Water Level Difference (m)	Level II					
	10~	10~5	5~0	0~-5	-10~-5	-15~-10
0~-0.1	0	0	4	2	0	0
~-0.15	0	4	30	18	3	0
~-0.2	1	4	38	9	0	0
~-0.25	2	2	6	1	0	0
~-0.3	0	1	1	0	0	0
~-0.4	0	0	0	0	0	0

Water Level Difference (m)	Level III					
	10~	10~5	5~0	0~-5	-10~-5	-15~-10
0~-0.1	0	0	0	0	0	0
~-0.15	0	2	9	4	0	0
~-0.2	0	4	7	3	0	0
~-0.25	1	3	3	0	0	0
~-0.3	1	3	0	0	0	0
~-0.4	0	1	0	0	0	0

Water Level Difference (m)	Level IV					
	10~	10~5	5~0	0~-5	-10~-5	-15~-10
0~-0.1	0	1	0	0	0	0
~-0.15	0	0	7	7	1	0
~-0.2	0	1	9	1	0	0
~-0.25	1	0	1	0	0	0
~-0.3	0	0	0	0	0	0
~-0.4	0	0	0	0	0	0

では  $1.6 \text{ m/s}$ 、 $-0.14 \text{ m}$  となり、レベルが下がるにつれて風は弱く、水位差は小さくなった。すなわち出現規模が大きくなるほど西風が強かつ水位差が大きいつきに出現する傾向があるといえそうである。ただ両者の寄与の程度は明らかではなく、両要因が遡上に対して独立な要因かどうかとも問題となろう。一般に日本海に低気圧が発達して東進した場合、東風が時計回りに変化して強い西風になり、同時に気圧低下に伴う海面の上昇が生じるというパターンが想定できる。このように西風と水位差とはある程度連動した気象現象であると考えられ、こうした過程が表3の結果に反映された可能性がある。

中海から大橋川を通じて宍道湖の入り口付近にまで進入する高塩分水塊の出現状況をとりとまとめたが、今回の報告は現象の大まかな特徴の把握にとどまり、詳細な出現機構の解明はさらに今後の検討が必要である。

## おわりに

現地観測と3年間の長期間の資料を簡単な統計処理をした今回の調査から得られた結果を要約すると以下のようなになる。

1. 宍道湖入り口付近に出現する高塩分水塊の季節変動は年により大きく異なり、宍道湖と中海との水位差及び斐伊川の流量と相関していた。
2. 短い時間スケールの変動においても出現指数と水位差との間に対応関係が認められた。また水位差の最大値出現時刻から平均して約3時間後に宍道湖入り口付近に高塩分水塊の出現がみられた。
3. 高塩分水塊の進入速度として  $V=0.44 \text{ m/s}$  ( $0.31\sim 0.56 \text{ m/s}$ )を得た。( )内は95%信頼区間である。
4. 約半日前までにやや強い西風が連吹する場合は東寄りの風の場合よりも規模の大きい高塩分水塊遡上が出現しやすい。これは風による塩分躍層上昇が関与していることを示している。
5. 水位差と風とを組み合わせた場合、西風で同時に水位差の大きいときに規模の大きい高塩分水塊の遡上が発生しやすい傾向が認められた。

## 謝辞

島根県内水面水産試験場主任施設管理技師森山勝氏、同職員大北晋也氏、常磐保氏にはこの調査を遂行するに当たり、甚大なご協力をいただいた。また

国土交通省出雲工事事務所には資料の提供をいただいた。ここに記して感謝します。

## 参考文献

- 伊達善夫・橋谷 博・清家 泰・近藤邦雄・奥村 稔・藤永 薫 (1989) 12年間の定期調査からみた中海・宍道湖の水質-季節変化, 経年変化, 平均値-。山陰地域研究, 5: 89-102.
- Fujii, T., Ueda, T., Okuda, S., and Yokoyama, K. (1996) Observation of Internal Oscillation Brackish Lakes with a Neutral Buoy. *Jpn.J.Limnol.*, 57: 4, 293-304.
- Fujii, T. (1997) Relationship of Internal Waves with Tide and Wind Drift Effects and Propagation of Internal Kelvin Wave in Brackish Lake Nakaumi. *Jpn.J. Limnol.*, 58: 241-260.
- Fujii, T. (1998) Relationship between Internal Oscillation and Movement of Anoxic Water in a Connected Brackish Water Region-Lake Nakaumi and the Ohashi River. *Jpn.J.Limnol.*, 59: 1-12.
- 福岡捷二・黒川岳司・日々野忠史・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.
- 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 (1991) 宍道湖への高塩分水の流入。山陰地域研究, 7: 83-92.
- 日比野忠史・福岡捷二・池内幸司 (1997) 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, 579: 93-103.
- Ishitobi, Y., Kamiya, H., Yokoyama, K., Kumagai, M., and Okuda, S. (1999) Physical Conditions of Saline Water Intrusion into a Coastal Lagoon, Lake Shinji, Japan. *Jpn.J.Limnol.*, 60: 439-452.
- 黒川岳司・福岡捷二・日々野忠史・上原 浩・鈴木 篤 (2000) 中海における界面振動とそれに伴う流動。水工学論文集, 44: 999-1004.
- 島根県内水面水産試験場 (1999) 事業報告, No.1, pp.29-36 (宍道湖流入・流出調査)。
- 徳岡隆夫・三瓶良和・上野博芳・西村清和・須崎 聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教 (2001 a) 大橋川における高塩分水塊の動態観測 (1999年秋)。

LAGUNA (汽水域研究), 8: 79-90.

徳岡隆夫・三瓶良和・板坂尚教・亀井健史 (2001 b)  
中海における塩分躍層の動態についての新知見  
—1996 年度の湖底設置型音波探査装置による観  
測データから—。LAGUNA (汽水域研究), 8: 57-  
66.

津田良平 (1995) 宍道湖内における環境諸要素の分布  
とその変動。宍道湖湖底貧酸素化調査業務成果報  
告書, pp.9-13.

山室真澄 (2001) 沿岸域の環境保全と漁業。科学, 71:  
921-928.

## 佐渡島加茂湖の水質 — 1997~2001 年の水質断面図 —

神蔵勝明<sup>1</sup>・新潟県立両津高校理科部・小林巖雄<sup>2</sup>・立石雅昭<sup>2</sup>

### Water quality of Lake Kamo, Sado Island, northeast Japan, -1997~2001-

Katsuaki Kanzo<sup>1</sup>, Niigata Prefectural Ryotsu High School Science Club,  
Iwao Kobayashi<sup>2</sup> and Masaaki Tateishi<sup>2</sup>

**Abstract:** We have examined the water quality of the Lake Kamo over a 4-year period from August 1997 to August 2001 at 17 observation sites that were set up at 250-m intervals along a N-S line in the lake. Measurements on water temperature, salinity, density, transparency, dissolved oxygen and pH were made at all the observation sites for every depth interval of 50 cm. Thus the data were obtained from a total of 180 measurement points during the entire study period, except on certain stormy days. The data were analyzed and the results are summarized.

**Key words:** Kamo Lake, lagoon, monitoring, natural environment, water quality

#### はじめに

私たちは、1997年8月から2001年8月までの4年間、佐渡島加茂湖の水質を記録してきた。観測点は湖の南北方向に250 m 間隔で設けた17点で、測定した水深間隔は50 cm、測定日の間隔は約1ヶ月と精度の高いものである。毎月の測定結果は、測定項目ごとに加茂湖の南北方向断面図としてまとめた。冬期間の荒天のための観測中止をのぞいて、断面図は全部で180断面に達している。

環境の変化が激しく、生物生産量が大きな湖沼を注意深くモニターし、長期間の記録を残すこと、湖の環境保全と再生の具体的な議論に必要な基礎資料として非常に重要である。

調査は、4~11月を両津高校理科部が中心になり、気象条件の厳しい12~3月を自然環境に関心のある地元の方々に参加していただいて実施し、加茂湖の真の姿が地域の人々に実体験を通して広がるように

努力した。

#### 加茂湖の概要

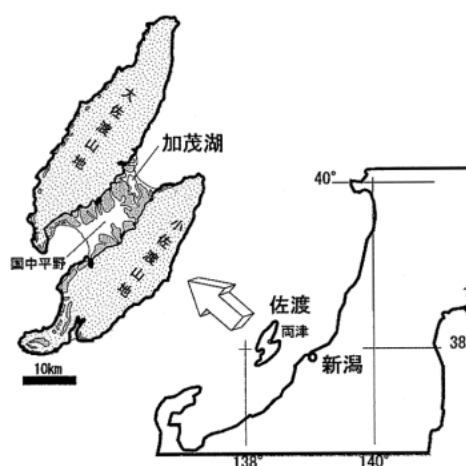


図1. 加茂湖位置図

Fig.1. Map showing the location of the Lake Kamo.

<sup>1</sup> 新潟県立佐渡高等学校 Niigata Prefectural Sado High School

<sup>2</sup> 新潟大学理学部 Faculty of Science, Niigata University

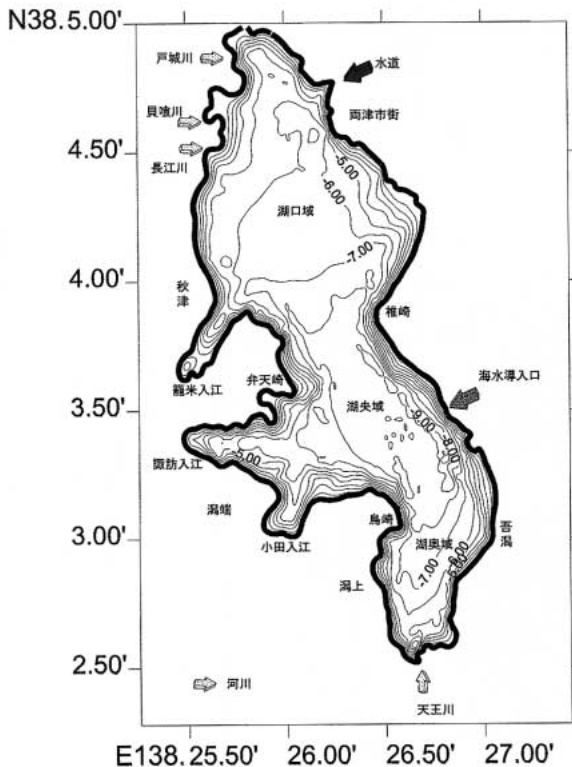


図2. 湖底地形図

Fig. 2. Bathymetry of Lake Kamo.

加茂湖は、新潟県佐渡島の国中平野北東に位置(図1)し、平坦な底をもつ海跡湖である。砂州の一部が明治30年の大水害のち人為的に掘削されて以降、海水が湖に流入している。湖の面積は約5 km<sup>2</sup>で、新潟県で最大、全国で第46位である。湖は南北方向で10 km、東西方向で最大2 kmをもつ(図2)。最大水深は約9 m、平均水深は約5 mの浅い湖で、湖水量は260万 m<sup>3</sup>に達する。海水は、深さ4 m、幅30 mの水道を通して、最大で0.9 m/secの速度(夏期)で6時間ごとの流入流出を繰り返している(加茂湖自然環境調査研究グループ, 1997)。この最大速度で6時間に流入する水量は、湖水量の約1/10にあたる。おもな流入河川は、北部の長江川(4.2 km)、外城川(4.2 km)、貝喰川(3.8 km)、南部の天王川(とじょうがわ)の4河川で、いずれも2級河川である。加茂湖に流れ込む河川の流域面積は5430 haで、湖の面積の約11倍である。その約1/3が水田等の耕地で、残りは大佐渡山地の森林で占められている。流域の農家は2,202戸、流域の人口は10,859人(平成5年)である。

加茂湖の湖底地形は、湖底地形図(図3、立石ほか, 1997)に見られるように4 m以浅の浅い部分が著しく少なく、湖岸から急に深くなり、湖底の大半は6~9 mの深さでほぼ平坦である。

加茂湖では、昭和初期よりカキ養殖が盛んで、加茂湖漁協の組合員数は167人にのぼり、カキの漁獲実績は160~250トン、漁業生産額は2~3億円である。1960年代から1970年代にかけて、やや富栄養化がすすんだため、新潟県によって海水を導入し湖水を若返らせる事業もおこなわれた。

過去30年間に全国的に見られる湖沼の人工改変にはさまざまなものがあるが加茂湖も例外でなく相当の改変が進められてきた。干拓には深すぎることで、離島にあること、湖の周辺の人口が少なかったことなどが幸いし、面積的には大きな変化はみられない。しかし、湖岸はコンクリートで固められ農道と水田の整備が進み、湖の周辺の湿地やアシ原はほとんど失われ、これらの果たしてきた湖水の浄化機能と、この部分に生育していた多種多様な生物のすみかは失われてしまっている。しかし、富栄養化は軽微であり、本格的な環境保全と自然環境の再生が望まれている。

## 水質観測位置

水質観測地点を図3に示す。観測点は約250 m間隔で、北から2 E, 3 D, 4 D, 5 D, 6 D, 7 E, 8 E, 9 E, 10 F, 11 G, 12 H, 13 H, 14 H, 15 H, 16 H, 17 H, 18 Hの17地点とした。気象状況によっては、2 E, 4 D, 6 D, 7 E, 9 E, 11 G, 12 H, 14 H, 16 H, 18 Hの10地点にとどめた。6 D, 11 G, 16 Hの3地点では、COD、亜硝酸イオン濃度、リン酸イオン濃度を測定したが、これらは別途報告する。観測点2 E~10 Fまでを湖口域、11 G~13 Hまでを湖中央域、14 H~18 Hまでを湖奥域と呼称する。観測点南端の18 Hは、天王川の河口に位置し水深が浅く川からの淡水の影響が大きい。また、観測点北端の2 Eは両津湾との水路に面し絶えず両津湾の海水が入りしている。

## 測定項目および測定機器

測定項目は溶存酸素量(単位:%)、透明度(単位:m)、水温(単位:℃)、塩分(単位:psu)、密度(単位:σ<sub>t</sub>)、pHである。調査に使用した機器は、水質測定にメディアン・インスツルメント・ファーマイースト社製 YSI-model 85,pH測定に東興化学研究所製パーソナルPHメーター TPX-90 iである。そのほかに、透明度板、プランクトンネット、採水器である。



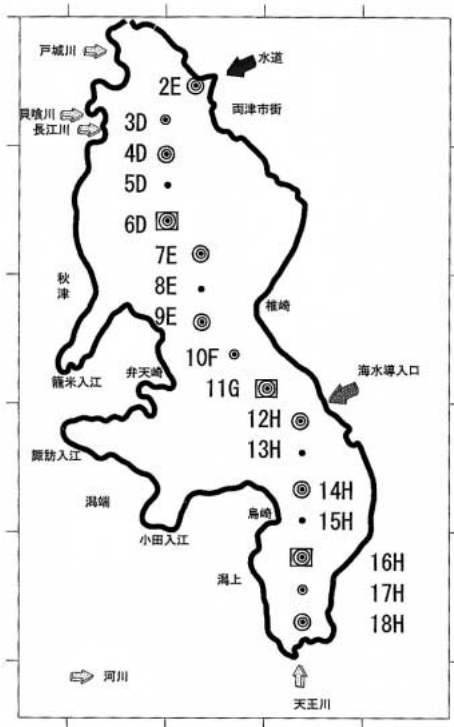


図3. 観測位置図.

- 17 水質観測地点 (1 日間 8 時間コース)
- ◉ 13 水質観測地点 (午前半日 5 時間コース)
- ◎ 10 水質観測地点 (午後半日 4 時間コース)
- ⊙ 3 水質観測地点 (COD, NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub>, MBAS)

Fig. 3. Location of observation sites.

- 17 sites where observations were made for 8 hours a day.
- ◉ 13 sites at which measurements were made for 5 hours in the morning.
- ◎ 10 sites at which measurements were made for 4 hours in the afternoon.
- ⊙ 3 sites where COD, NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub> and MBAS were measured.

## 観 測 日

観測は毎月第4土曜日に計画され、表1のとおり実施した。加茂湖は南北を山地で東西を海成段丘で囲まれた穏やかな湖である。しかし、冬期間など強風時には相当の波浪がみられ危険を感じることもある。さらに、冬期間はカキ養殖の最盛期で用船に困難な場合があること、観測が休業日でなければならないことなどの理由で1月中の観測ができなかった。同様の理由で2月、3月も観測回数が少なくなっている。これら観測日の不均一は観測項目の平均値に影響するので、平均値の算出と解釈には慎重を要する。本調査は、連続観測期間4年、観測位置間隔250 m、観測水深間隔50 cm、観測日間隔は約1ヶ月

表1. 観測日一覧.

\*, 荒天で途中で中止; \*\*, 荒天で採水のみ.

Table 1. Observation dates.

\*, days on which observations were stopped due to stormy weather; \*\*, days on which water sampling could not be made due to stormy weather.

1月				
2月	1998/2/28			
3月	1998/3/28			2001/3/24
4月	1998/4/25	1999/4/22	2000/4/25**	2001/4/28
5月	1998/5/23	1999/5/29	2000/5/20	2001/5/24
6月	1998/6/27	1999/6/26	2000/6/24	2001/6/23
7月	1998/7/25	1999/7/25	2000/7/22	2001/7/28
8月	1997/8/22	1998/8/5	1999/8/29	2000/8/26
9月	1997/9/23	1998/9/5		2000/10/1
10月		1998/10/24	1999/10/3	2000/10/28
11月	1997/11/2	1998/11/28	1999/11/25*	2000/11/25
12月	1997/12/13	1998/12/29*		2000/12/23
観測回数	4回	11回	7回	9回
				6回

と今までに報告されたことのない精度の高いものなので、あえて平均値を算出した。

## 平均値と時系列変化

上記のように観測日が一定していないという問題は残るが、加茂湖の水質全体像を知るため、図4に4年間における湖水表層、湖底、全水深の平均値を観測点別(北から南)図示した。図4aは湖水表層と湖底の区別をせずに各観測点での最高水温と最低水温を示した。時系列変化の特徴を知るため、図5に加茂湖中央(観測点11G)を湖水全体の代表する値と見なし、4年間における表層測定値、湖底測定値、表層値と湖底値の差の時系列変化を図示した。

### 気温

アメダス両津の記録によると4年間の日最高気温の最高値は、1991/8/1の35.3℃、日最低気温の最低値は、1999/2/3の-4.7℃である。日最高気温と日最低気温の平均値を気温として図5aに示した。この気温の平均値は13.7℃(図5aの破線)でほぼ3月と9月の気温に相当する。

### 水温

4年間における全観測点の最高水温は、1999/7の31.9℃(観測点10F, 表層)、最低水温は1997/12の6.0℃(観測点17H, 表層)である(図4a)。水温の全測定値の平均は19.6℃であるが、これは冬期間の観測中止時を考慮すると年間の平均値とはみなせない。年間の水温の平均値は17℃程度と推定され、気

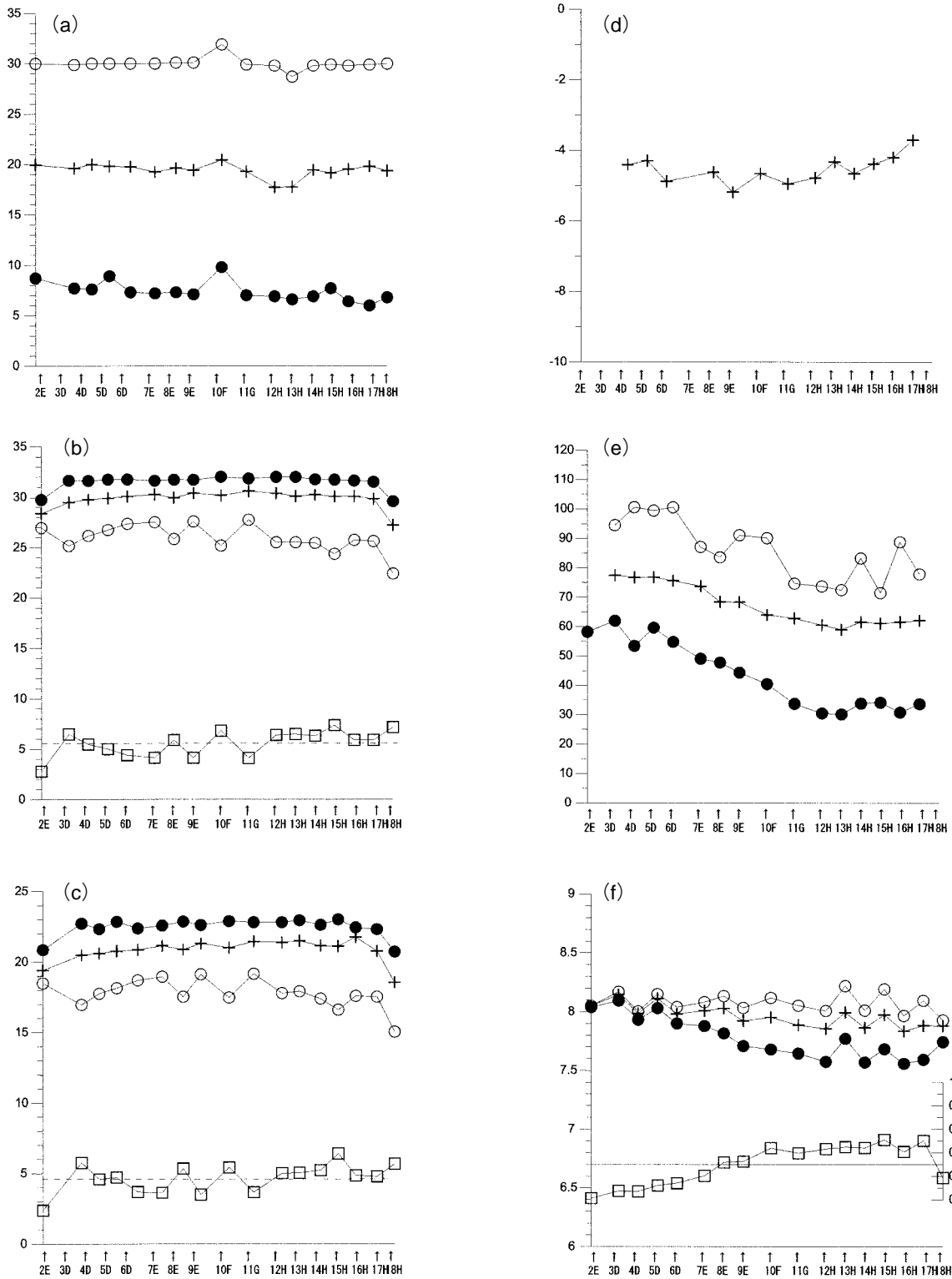


図4. 測定項目平均値の観測点別変化図(横軸は観測点(2Eが北端, 18Hが南端). 南北方向距離で10km). (a), 水温(°C); (b), 塩分(PFU); (c), 湖水密度( $\sigma_t$ ); (d), 透明度(m); (e), 溶存酸素量(%); (f), pH. —○—, 湖水表層の測定項目平均値; —●—, 湖底直上湖水の測定項目平均値; —+—, 表層から湖底までの平均値; —□—, 表層と湖底の平均値の差.

Fig. 4. Trends in water quality parameters.(a), temperature (°C); (b), salinity (PSU); (c), density ( $\sigma_t$ ); (d), transparency (m); (e), dissolved oxygen (%); (f), pH. —○—, average value of the surface measurements; —●—, average value of the bottom measurements; —+—, average of the measured values at all the points between the surface and bottom; —□—, difference in average of surface and bottom values.

温の平均値より約3℃も高い。

表層から湖底までの水温の平均値(以下、全層平均値と表記)は、水深の大きい湖央域でやや低くなっている(図4a)。最高水温には南北方向観測点別の差はほとんどみられない。最低水温は湖口域と湖奥域で約2℃の差がみられ、湖口域から順に湖奥域に向かって低くなる傾向がある(図4a)。

時系列変化にみられる表層水温の振幅は湖底水温の振幅に比べて大きい。気温が平均気温を超えるおおよそ3月~9月間で表層水温が高く、おおよそ10月~2月で逆に湖底水温が高くなっている(図5a)。しかし、後述の湖水密度で述べるようにこの水温の周期的な逆転は湖水密度の逆転とは直接結びついていない。

図5aに見られるように水温変化は年毎に変化が大きく、毎年同じ周期で繰り返していないが、大まかな傾向は以下のものである。1月をのぞくと、2~3月に表層と湖底の水温差は1度程度と小さい。4~9月では湖水表層の温度は湖底に比べ平均で3度ほど高く、10~12月では逆に湖底の水温が平均で3度ほど高い。年間の平均では湖水表層が湖底と比較して約0.7度高い。

### 塩分

表層における塩分の平均値は26 psu、湖底の平均値は32 psu、全層平均値は30 psuでいずれも高い値をしめす(図4b)。淡水の影響を強く受ける観測点18Hと両津湾の海水が出入りする観測点2Eをのぞいて、全層平均値と湖底平均値の南北方向の測線に沿う差はほとんど認められない。表層平均値は湖口・湖央域に比べ湖奥域で1 psu程度ほど低くなっている(図4b)。

湖底塩分についてみると、1 psu程度のわずかであるが塩分が7~8月の夏期に高くなる1年周期の変動が認められ(図5b)、これは表層塩分と湖底塩分の差が小さくなる時期に一致している。この現象は、年周期の湖の潮位が夏期に30 cm程度高くなることから、両津湾からの海水流入量の増大によると推定される。図5bにみられる極端に低い表層塩分値は1998/8/04の日総雨量200 mmに達する記録的大雨によるものである。

### 密度

表層における密度の平均値は17.8  $\sigma_t$ 、湖底の平均値は22.5  $\sigma_t$ 、全層の平均値は20.8  $\sigma_t$ でいずれも両津湾の海水に近い値を示す(図4c)。淡水の影響を強

く受ける観測点18Hと両津湾の海水が出入りする観測点2Eをのぞいて、湖底平均値と全層平均値の南北方向の測線に沿う差はほとんど認められないが、表層平均値は湖奥域で1  $\sigma_t$ 程度ほど低くなっている(図4c)。

湖底密度については、3~4月に密度が2  $\sigma_t$ 程度大きくなる1年周期の変動が認められる(図5c)。この現象は塩分の変動周期に水温の変動が重なったためと解釈できる。表層の密度と湖底の密度の差を見ると、年間を通じて湖底密度が大きく、密度の上下の逆転は起こっていない(図5c)。その差が小さくなる時期は、10~11月に多く、まれに密度が小さくなる年は8月である。図5cにみられる極端に低い表層密度は1998/8/04の日総雨量200 mmに達した記録的大雨によるものである。

### 透明度

水中に入った光は透明度の2~2.5倍の深さで1%までに減少しこの深さでプランクトンの光合成量と呼吸量が等しくなるとされている。したがって透明度が年間を通して4~5 m程度であれば、加茂湖の最大水深が約9 mなので湖底での光条件にとくに問題がおこらないことになる。

加茂湖における透明度の平均値は4.5 mで、水深の最大値の約50%に達し良好である。平均値は湖央域から湖奥域にかけてしだいに小さくなる(図4d)。湖口域では海水の出入り口(北に)に近くなるほど透明度が小さくなっているが(図4d)、これは海水の出入り口に近づくにつれ水深が4~5 mと浅くなり透明度の測定でセッキ板が湖底に届き、透明度の測定値のうち大きな値が平均から除かれるためである。湖口域の真の透明度は海水の出入り口に近いほど大きくなっているものと予想される。なお、2000年11月の観測では湖口域のほとんどで船上から湖底を見ることができるよう希な現象であった。

### 溶存酸素量

表層における溶存酸素量の平均値は88%、湖底の平均値は42%、全層の平均値は69%で良好である(図4e)。溶存酸素量の平均値は、観測点の南北端で水深がとくに浅いところをのぞくと、観測点から水道までの距離と観測点の水深に関係して変化し、湖口域、湖央域、湖奥域に対応して3グループに区分できる(図4e)。湖口域では全層の平均値が73%であり、年間を通じて溶存酸素量は非常に大きい。水道に近づくにしたがって溶存酸素量の平均が高く

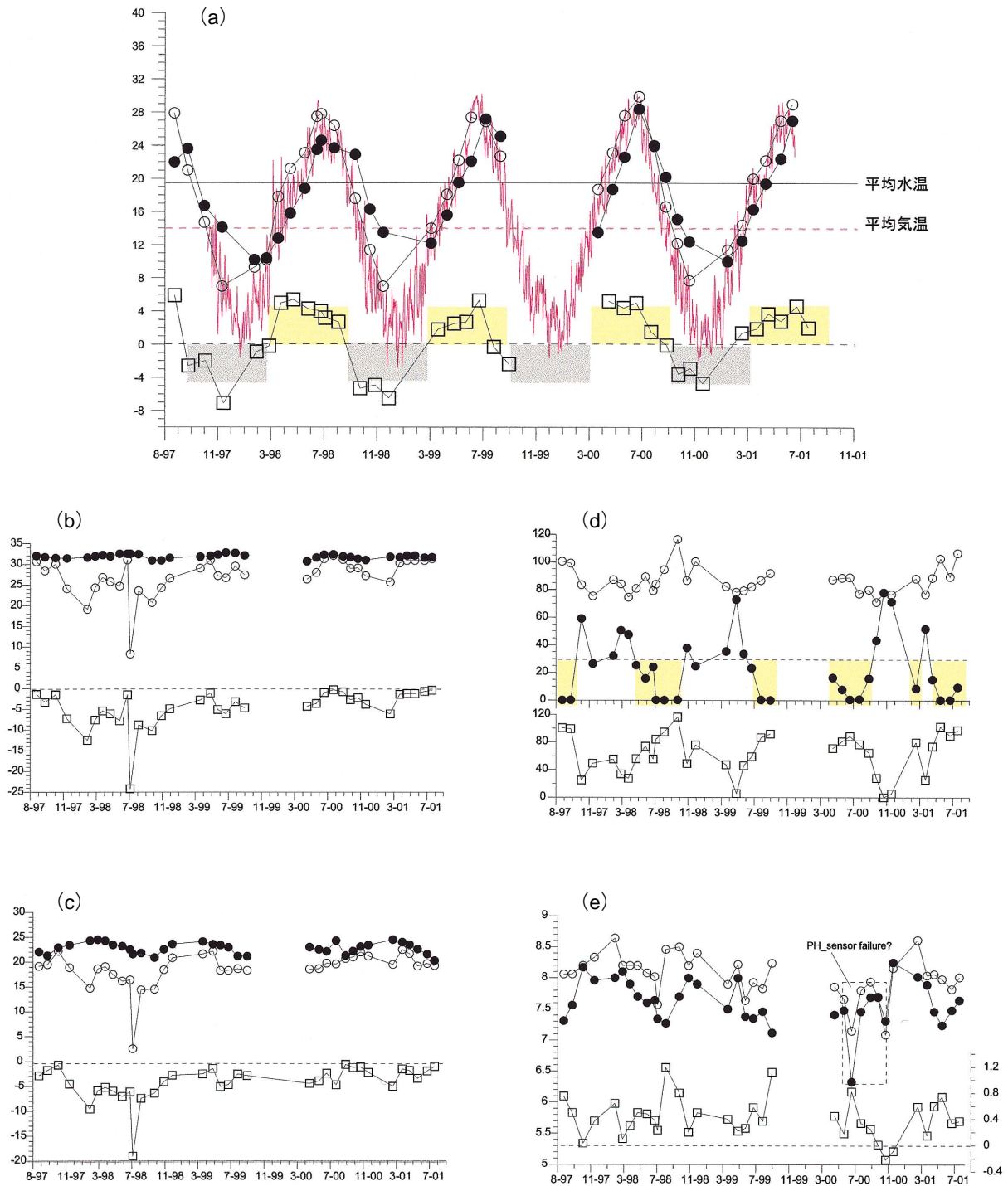


図5. 湖中央(観測点11G)での時系列変化図。横軸は観測年月(月-年)。(a), 気温および水温( $^{\circ}\text{C}$ ) (  $\color{red}{\text{||||}}$  , 日最高気温と日最低気温の平均値;  $\color{grey}{\square}$  , 表層水温が湖底水温より高い期間;  $\color{yellow}{\square}$  , 表層水温が湖底水温より低い期間); (b), 塩分 (PSU); (c), 湖水密度 ( $\sigma_t$ ); (d), 溶存酸素量 (%) ( $\color{yellow}{\square}$  , 溶存酸素量が30%より低い期間); (e), pH.  $\circ$ —, 湖水表層の測定値;  $\bullet$ —, 湖底直上湖水の測定値;  $\square$ —, 表層と湖底の差。

**Fig. 5.** Temporal changes in the water quality at the observation site 11 G in the central part of the Lake (month-year of observation on the horizontal axis; water quality parameter on the vertical axis). (a), air and water temperatures ( $^{\circ}\text{C}$ ) (  $\color{red}{\text{||||}}$  , average of the daily maximum and minimum temperatures;  $\color{grey}{\square}$  , period when the surface water temperature was higher than that of the bottom;  $\color{yellow}{\square}$  , period when the surface water temperature was lower than that of the bottom); (b), salinity (PSU); (c), density ( $\sigma_t$ ); (d), dissolved oxygen (%) ( $\color{yellow}{\square}$  , period when the DO is lower than 30%); (e), pH.  $\circ$ —, measured value of surface water;  $\bullet$ —, measured value of bottom water;  $\square$ —, difference between surface and the bottom.

なっている(図4e)。湖央域の全層の平均値は61%で3区域の中で最も低い。この部分の水深が深く夏期に30%以下の低酸素層が出現するので平均値が低くなっている。湖奥域の全層平均値は62%で湖央域より多少高い値を示すが、水深を考慮するとこの部分の溶存酸素量は実質的に最も低い。

湖底の溶存酸素量が30%以下になる現象が夏期に水深の深い湖央域で頻りにみられる。他の場所では例外的に見られるのみである(図5d)。1998/8/4の大雨のあと8～10月まで湖底の溶存酸素量は連続して0%であったのに対し表層の溶存酸素量は連続して上昇をつづけ10月には120%にたつ部分が見られ上層と下層のコントラストが明瞭であった。

#### pH

表層におけるpHの平均値は8.1、湖底の平均値は7.8、全層の平均値は8.0であり(図4f)、両津湾の海水と同程度である。pHの表層平均値と湖底平均値の差は、湖口域で海水の出入りする水路から遠ざかるほど大きくなり、湖央域と湖奥域で一定となる(図4f)。湖央域と湖奥域でのpHの低下はこの湖域で有機物の分解量が大ききことを示している。pHの変化は溶存酸素量の変化とよく似た動きを示す(図4e, f)。また、1999/6～1999/11の観測値はpHセンサー故障の可能性があり平均値の算出からのぞいた。

### 4年間の水質断面図について

4年間の加茂湖における湖水調査の記録を、180葉の水質断面図で示す。その概要を知るため、湖中央の吾潟沖(観測点11G)での4年間の記録を時系列等値線図として示した(図6)。図6aは両津でのアメダス記録から日最高気温を、図6cは同記録から月別降水量を示した。これら以外は水深を縦軸に時間を横軸にとり、図6bは水温、図6dは塩分、図6eは密度、図6fは溶存酸素量と透明度、図6gはpHの各測定値をそれぞれ等値線で表した。グラフの等値線が縦方向に立っていれば、湖底から表層までが同じ状態にあり、等値線が横方向伸びていればその期間に上下方向に成層構造が存在していることになる。

#### 水温について

図6aの水温は夏季と冬季をのぞくと等温線が縦に立っていることが多く、上下方向の温度差がすく

ないこと、および水温が気温変化によく同期していることを意味している。

加茂湖が完全な淡水湖であれば、温度差がない期間に湖水密度が一様となって、湖底と表層間の湖水の上下循環が起こることになるはずであるが、加茂湖には海水の流入があるので基本的にどの季節にも上下循環はなかなか起こらない。

温度差が小さくなる典型例は、1998/2、1998/3、2001/3などで冬期間に多く温度差は1度以下であるが、下層の塩分濃度がおおきため密度断面図に成層構造があらわれ、上下方向での湖水の循環はおきていない。

湖水下部の温度が低く、湖水上部の温度が高くなる水温の成層構造が4～9月にみられるが、この時期は下層の塩分が濃いことも関係して安定成層構造となる場合が多い。この安定成層構造の典型例は1997/8であり、このときの温度差は約6度であった。

湖水下部の温度が高く、湖水上部の温度が低くなる成層構造は10～12月に多く見られ、温度のみを考えると湖水下部が軽くなり、上下方向の循環がおこるはずであるが、下層に濃い海水が存在することによって湖水の上下方向循環は起こっていない。湖水下部の温度が高く上部の温度が低くなる成層構造の典型例は、1997/12であり温度差は約7度であるが、塩分濃度との関係で温度による安定成層構造にはなっていない。この観測値は温度差の大きさからして驚きである。

10～11月の湖水温度が逆転する時期で塩分濃度の条件がそろると湖水の上下方向密度差が小さくなる。この時期に強い北西季節風が吹くと湖水の上下方向の循環がおこる。この典型例は1997/11である。1998/8～1998/10では3ヶ月間も大きな成層構造が連続してみられた。これは1998/8/4水害時において大量の淡水が流入したためである。

#### 塩分について

加茂湖は全期間にわたり海水湖であるいえるほどに塩分は海水に近い。とくに6～9月には高濃度の海水が下半部に存在する。冬季から6月にかけて、降水の影響をうけて25～30psu程度のやや塩分が薄い層が表層に見られる年が多いが、2001年では認められなかった。2000/8では一ヶ月間の雨量が17mm、2001/7～2001/8では二ヶ月間の雨量が81mmと非常に少なかったこともあって表層近くまで高塩分濃度層が達している(図6d)。

塩分が10psu以下の低塩分湖水が、大規模に存在



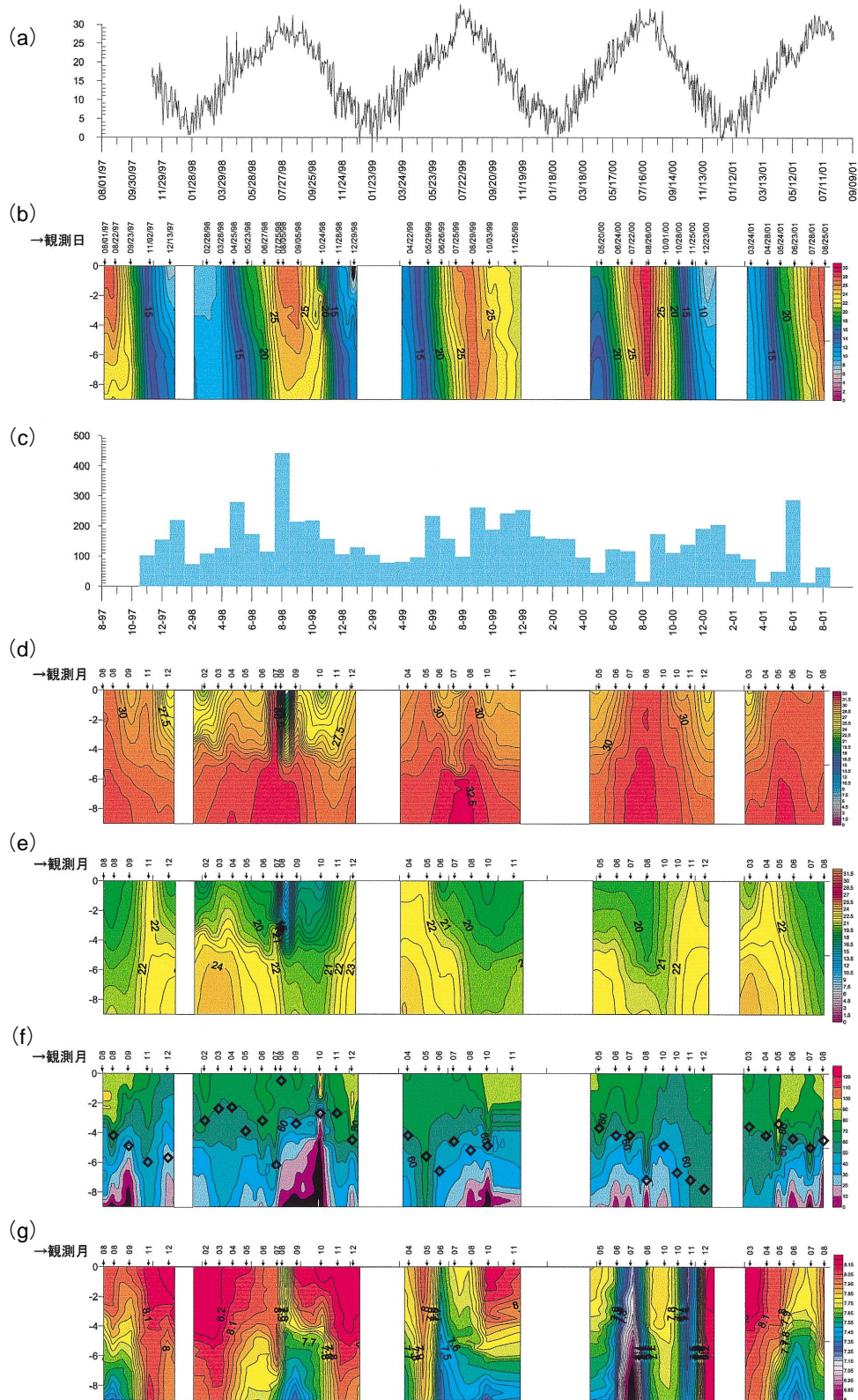


図 6. 湖中央(観測点 11 G)での時系列等値線図。横軸は観測月、縦軸は深度(m)。(a), 日最高気温(°C); (b), 水温(°C); (c), 月別降雨量(mm); (d), 塩分(PSU); (e), 密度( $\sigma_t$ ); (f), 溶存酸素量(%)と透明度( $\diamond$ , m); (g), pH.

**Fig. 6.** Time series isometric lines of water quality parameters at observation site 11 G in the central part of the Lake (date/month of observation on the horizontal axis and water quality parameter on the vertical axis). (a), maximum air temperature (°C); (b), water temperature (°C); (c), monthly precipitation (mm); (d), salinity (PSU); (e), density ( $\sigma_t$ ); (f), dissolved oxygen (%) and transparency ( $\diamond$ , m); (g), pH.

した例はすくない。例外は1998年8月である。1998/8/4に加茂湖の流域は24時間で約200mmの集中豪雨に見舞われた。大量の泥水が流れ込み、表層から1.5mの間にとどまった(図6dの緑部分)。このときでも1.5mより深い部分の塩分は大きく変わらなかった。

#### 密度について

湖水の密度はほとんどの時期を通じて下層が大きく、安定成層構造となっている。等密度線が立ち密度差が小さくなる時期は10~11月で年1回のことが多い(図6e)。この時期には北西の強風が吹くことも多く、季節風が吹き始めると湖水はいっきに均一となる。典型的な例として1998/8~1998/10の2ヶ月にわたる溶存酸素量の極端な減少は、1998/11月に見事に消えてしまった(図6f)。このような上下方向の循環は下層の低酸素層とそれに含まれることがある硫化水素を表層にもたらしことも多く、加茂湖の漁業に大きな影響を与えることになる。

温度の項にあるように、3月ごろにみられる湖水の上下方向の温度差が小さくなる時期に、湖水の上下方向循環が起らないことは注目される。塩分の濃い湖水が下層に存在すること、上層の湖水が冬期間の降雨降雪や梅雨時の降水で低塩分となっていることがその原因である。

1997/8は、夏期に湖水上層の温度は著しく上昇し上下の温度差がおおきくなって安定成層構造となった典型的な例である。逆に珍しい例として2000/8のように湖水が非常に高温で一様であり、かつ降水量が少なく塩分濃度も高く一様な場合には、夏期とはいえ湖水の密度がほぼ均一になることもある。

湖水全層にわたる循環のほかに、湖水の下半部の循環が、1998/3、1998/6、1999/4、1999/8、2000/5などにおこっている可能性もあり、これが湖底堆積物中の栄養塩類を上昇させていることも考えられるが詳細は不明である。

#### 溶存酸素量について

1998/8/4に加茂湖の流域は24時間で約200mmの集中豪雨に見舞われた。湖に大量の泥水が流れ込み、表層から深さ1.5mの間にとどまり、透明度が0.3~0.9mとなった。1998/7/25に50~70%を示していた溶存酸素量が1998/8/5には深度6m以深の溶存酸素量が10%以下となった。湖に大量の泥水が流れ込んだあとでのたった24時間での変化である。こ

れほどまでに光合成による酸素生産量は大きい。その後、泥水と一緒に流れ込んだ栄養塩類のため、表層を中心に、1998/9~1998/10にかけてプランクトンが大発生し、死滅プランクトンの分解による酸素消費のため酸素不足域が出現した。1998/11では溶存酸素量が、30~10%以下の場所とカキの死滅箇所がほぼ一致していた。1998/10の溶存酸素断面図はコントラストが非常に大きく、1.5mより深い部分は30~0%の酸素不足で死の世界であるのに対し、1.5mより浅い部分の溶存酸素量は100~120%であり、酸素が飽和~過飽和のプランクトン異常増殖の世界である。

以上のことから、湖水の溶存酸素量のコントロールは、植物性プランクトンの増殖をコントロールすること、すなわちチッソやリンなどの栄養塩類の流入量をコントロールすることであることがわかる。また、流入する栄養塩類の量は、1998/8のような洪水時の物質流入量が大きくかかわっていることに注意する必要がある。加茂湖での洪水時の栄養塩類の流入量の測定例をあまり知らないが、私たちのおこなった洪水時の水質分析の一例では、亜硝酸イオン濃度で30倍、リン酸イオン濃度で2倍、CODで30倍、メチレンブルー活性物質濃度は1/100以下であった。これらの濃度をもとにして、洪水量を考慮した栄養塩類の流入量は相当なものであり、洪水が湖に及ぼす影響は非常に大きい。

栄養塩類が豊富で光条件が良好であると、プランクトンが異常に増殖し、その光合成によって溶存酸素量が100%を越す場合がしばしば見られる。溶存酸素量が100%を越えた場所はプランクトンノ異常発生場所と考えてもよく、その例は、1997/8、1998/2、1998/10、1998/12、2001/5、2001/8であった。

図6fに見られように、低酸素層の出現する時期は、図6eの夏期の安定成層構造が発達する時期によく一致している。とくに水深の深い湖央域で著しい。低酸素層の例は、1997/8、1998/8、1998/9、1998/10、1999/8、1999/10、2000/7、2001/7、2001/8であった。

冬から初夏にかけて湖底に高密度の海水が長時間滞在するが、この時期の溶存酸素量は良好のことが多い。

1998/2では、3m以浅に溶存酸素量が100~120%の層が湖のほとんど地域で確認できた。この水域でプランクトンの異常増殖がおこっており、冬が終わって光条件が回復したことで、湖水の循環による栄養塩類の供給の結果と考えられる。さらに、湖

水温がほぼ均一であったが、溶存酸素の低い部分と pH の低い部分の一致し、溶存酸素の高い部分と pH の高い部分がみごとに一致している。溶存酸素の高い水域でプランクトンが異常に増殖していることが、透明度の値からもうかがえた。

#### pH について

pH の分布は、溶存酸素の分布にほぼ一致し (図 6 g), pH の低いところでは光合成による酸素の生成よりも呼吸による酸素の消費が大きく有機物の分解がすすんでいることを。また、pH の高いところは、光合成による二酸化炭素の消費が多く、光合成による酸素の生成が呼吸量を上回っていることを示している。このような例は多く見られ、典型的な例としては、1997/12, 1998/2, 1998/9, 1998/10 などであった。

### 4 年間の湖水断面図

湖水の水質断面図 180 個を観測日順に示す次の pdf ファイルは島根大学汽水域研究センターのホームページ (<http://www.kisuiiki.shimane-u.ac.jp>) で見る事ができる。

1 月				
2 月	199802.pdf			
3 月	199803.pdf		200103.pdf	
4 月	199804.pdf	199904.pdf	**	200104.pdf
5 月	199805.pdf	199905.pdf	200005.pdf	200105.pdf
6 月	199806.pdf	199906.pdf	200006.pdf	200106.pdf
7 月	199807.pdf	199907.pdf	200007.pdf	200107.pdf
8 月	199708.pdf	199808.pdf	199908.pdf	200008.pdf
9 月	199709.pdf	199809.pdf		200009.pdf
10 月		199810.pdf	199910.pdf	200010.pdf
11 月	199711.pdf	199811.pdf	199911.pdf*	200011.pdf
12 月	199712.pdf	199812.pdf*		200012.pdf

\* 荒天で途中で中止 \*\* 荒天で採水のみ

### おわりに

調査にあたり両津市秋津の浜松芳明氏には、調査船「マルヨ丸」を使用させていただいた。加茂湖漁業共同組合の皆さま、尾瀨恒雄氏、伊藤隆一氏、佐藤吉春氏、伊藤敏明氏、土屋富男氏には調査に特別の便宜を図っていただいた。調査に参加してくださった方々は、次の 55 名で、4 年間で延べ 179 人である。齋藤彰、鈴木昌仁、葉梨敦義、野口雅喜、本間充、本間幸子、本間一浩、福嶋亜美、桧田知子、土屋利紀、土屋壯論、土屋信人、土屋高宏、土屋貴裕、渡辺潤、仲川徹、中村辰也、中村寿樹、中山佐重、池野絵美、池田智彦、川上誉正、石田里美、松木菜穂、松本善人、市橋直輝、山崎一真、山口悠一、山下直行、佐合杏子、金子広明、野崎ますみ、高橋知智(以上、両津高校)、磯部浩伸(羽茂高校)、豊岡正通、高野将記(以上、佐渡農業高校)、神蔵沖夫(佐渡高校)、本間博昭、中原功志、森和人、市橋勝三郎(以上、佐渡地区理科教育センター)、兼子高志、グエンバンラップ(以上、新潟大学理学部)、藤井徳三、佐藤吉春、伊藤隆一(以上、加茂湖漁協)、尾瀨照一、畠山美緒、渡辺朝子、大地秀武、神蔵恵子、山田昭夫、加門俊行、加藤康雄(以上、両津市)、山本誠(金井町)。

### 引用文献

- 加茂湖自然環境調査研究グループ(1998)佐渡加茂湖の水質と底質環境. LAGUNA(汽水域研究), No.5, 137-152.
- 加茂湖自然環境調査研究グループ(1998)1996年8月, 加茂湖の水質・底質調査資料. 「海跡湖堆積物からみた汽水域の環境変化—その地域性と一般性—」に関する平成7-9年度科学研究費補助金(基盤研究 A-1)研究成果報告書(代表者高安克己), 83-136.
- 立石雅昭・田村嘉之・神蔵勝明・Nguyen Lap Van・小林巖雄・松岡和弘(1997)加茂湖湖底地形と浅層地下地質, 「湖底堆積物の堆積学的解析による佐渡島加茂湖の物質循環システムと環境変化」平成8-9年度科学研究補助金(基盤研究 C) 成果報告書(代表者立石雅昭), 5-34.



## 多時期 Landsat/TM データによる宍道湖・中海の 表層クロロフィル a 濃度分布推定

作野裕司<sup>1</sup>・吉田武史<sup>1</sup>・山本正智<sup>1</sup>・松永恒雄<sup>2</sup>  
中山大介<sup>3</sup>・高安克巳<sup>3</sup>・古津年章<sup>4</sup>・下舞豊志<sup>4</sup>

### Estimation of surface chlorophyll-a concentration using multi-date Landsat/TM data in Lake Shinji and Lake Nakaumi

Yuji Sakuno<sup>1</sup>, Takeshi Yoshida<sup>1</sup>, Masatomo Yamamoto<sup>1</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>2</sup>,  
Daisuke Nakayama<sup>3</sup>, Katsumi Takayasu<sup>3</sup>, Toshiaki Kozu<sup>4</sup> and Toyoshi Shimomai<sup>4</sup>

**Abstract:** An algorithm for the estimation of surface chlorophyll-a (chl-a) was developed and validated using the multi-date Landsat TM data as well as the conjunctive *in situ* data in Lake Shinji and Lake Nakaumi. This highly significant predictive algorithm for surface chl-a is obtained using the TM bands 1, 2, 3, 4, 5 and 7 after dark pixel subtraction as a simple atmospheric correction.

**Key words:** Landsat/TM, chlorophyll-a, multi regression analysis

#### 1. はじめに

汽水域は水産資源豊富な水域としてその価値が再評価されているが、一方で陸と海の接点にあるため富栄養化しやすいという欠点もある。このような水域において、富栄養化メカニズムの解明の基礎となる物質循環研究において、植物プランクトンの分布特性を定量的に明らかにすることは重要な課題の一つである。しかし、汽水域の植物プランクトン分布の時間的・空間的な変動は大きく、従来の調査船による現場観測の点データのみによってその三次元的な分布を捉えることは難しかった。一方人工衛星からの画像は広範囲の植物プランクトン分布を面的に明らかできる可能性があるが、現時点で宍道湖・中海のような湖の水質を専用に計る衛星センサはない。

以上のような背景から筆者らは、陸域観測用に開発された衛星センサデータを利用して、汽水域の水質をモニタリングするための研究を 1995 年から現在まで継続して行ってきた (例えば作野ほか, 1996)。そして、これまでに SPOT データを用いた宍道湖の一次生産量推定法等を報告している (作野ほか, 2001)。

本論では、宍道湖・中海においてまだアルゴリズムが確立されていない、Landsat/TM データによる表層クロロフィル a 濃度 (以下 Chl.a と略す) 推定式を作成し、別のデータを使って検証する。そして TM データから推定される両湖の表層 Chl.a 分布の特徴について考察を行った。

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

<sup>2</sup> 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-0053, Japan

<sup>3</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, Japan

<sup>4</sup> 島根大学総合理工学部 Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

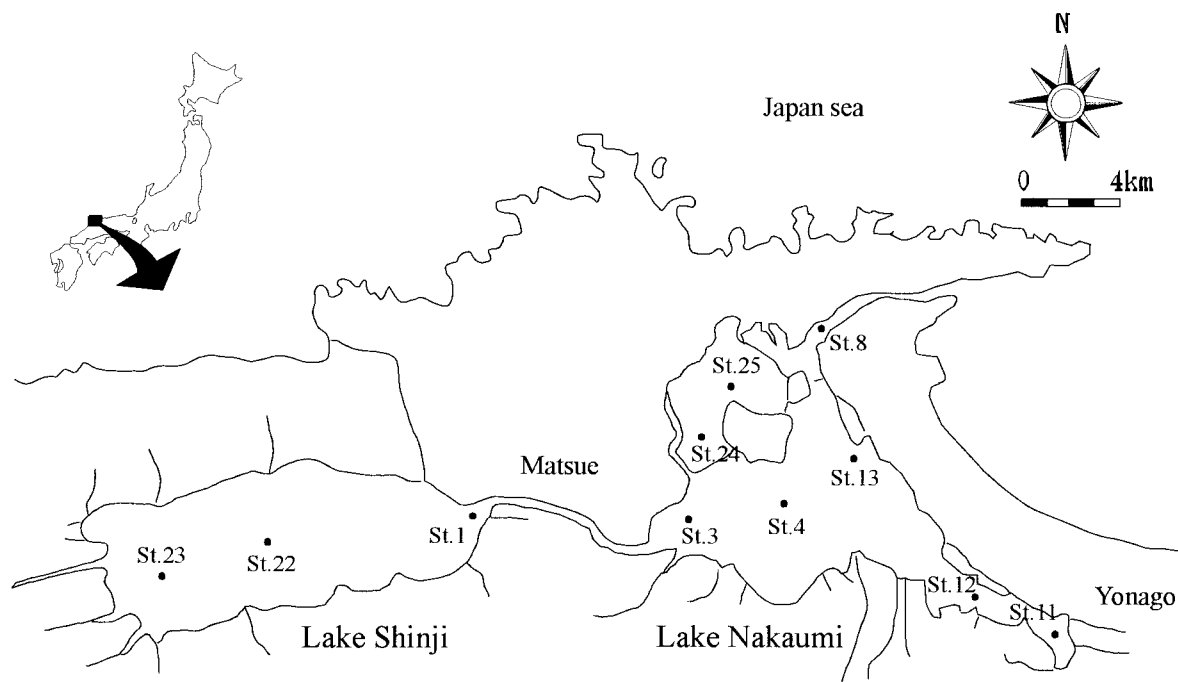


図1. 宍道湖・中海の現場データ取得位置（島根大学理学部の観測点）。

Fig. 1. Sampling points of *in situ* data in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

## 2. TMデータによる宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度推定式の作成

### 2.1 宍道湖・中海のクロロフィル a 濃度推定法及び使用データ

本論では、TMデータのChl.a推定に多く用いられる以下のような統計的なモデル<sup>1)</sup>を用いて、単回帰分析及び重回帰分析による表層Chl.a推定式の作成を行った。

<単回帰分析によるChl.a推定モデル>

$$Chl.a = aTM + b \quad (式1)$$

<重回帰分析によるChl.a推定モデル>

$$Chl.a = a'TM_1 + b'TM_2 + c'TM_3 + d'TM_4 + e'TM_5 + f'TM_6 + g \quad (式2)$$

ここで、Chl.aは表層Chl.aである（自然対数型を含む）。TMはLandsat/TMデータのデジタル値(DN)、1~6はTMのバンドをそれぞれ示す。またa, b, a', b', c', d', e', f及びgは定数で、現場Chl.aデータと衛星データの単回帰分析又は重回帰分析によって得られる回帰係数が入力される。

研究に使用したLandsat/TMデータは1990/5/9~1998/3/3の5時期に撮影された可視・近赤外データ（空間分解能：30 m）である。各日のChl.a観測値の

表1. 使用したクロロフィル a 濃度データの濃度レンジと測点数。

Table 1. Ranges of *in situ* chlorophyll-a and number of observation points.

No.	Date	Chl.a ( $\mu\text{g/l}$ )	Point
1	9 May 1990	26.5-78.3	7
2	1 July 1995	3.0-6.0	7
3	16 May 1996	2.6-8.5	6
4	12 May 1997	2.6-14.4	5
5	3 Mar.1998	5.2-11.7	12

濃度レンジ及び観測地点数を表1に示す。衛星データの処理は、観測点を中心に3×3ピクセルで平均しその地点の代表値とした。また簡易的な大気補正法として暗画素法を用いた。衛星が観測するDNは、大気上端で反射した光と対象物から反射した光の和で表される。画像上で暗い画素は対象物からの影響が小さく、大気上端で反射した光（パスラディアン成分）に最も近い値になると言われている。暗画素法とは、上述の関係を利用して、パスラジアンのみを除去する方法である。

さらに回帰式作成に用いた現場Chl.aは、島根大学理学部環境分析化学研究室が観測した宍道湖・中海における上層の値（計37点）を用いた（表1）。今回使用したデータの観測点位置を図1に示す。一方、

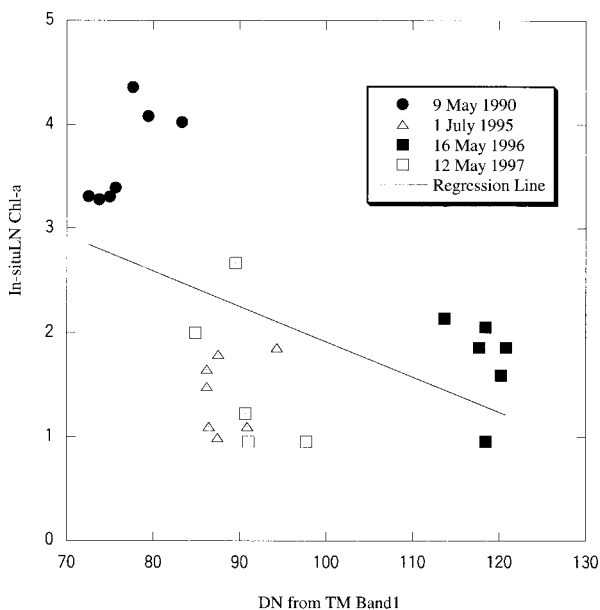


図2. TM バンド 1 とクロロフィル a 濃度(対数)の関係。  
Fig. 2. Correlation between TM Band 1 and LN chlorophyll-a.

表2. TM 各バンドの DN と現場クロロフィル a 濃度の相関係数。

Table 2. Correlation coefficient between *in situ* chlorophyll-a and DN of TM bands.

	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band7
Chl.a	-0.49	-0.15	-0.28	-0.34	0.06	0.11
LN Chl.a	-0.50	-0.16	-0.31	-0.41	-0.06	0.02

作成した回帰式の妥当性を調べるために、1998/3/3 に筆者らが行った衛星同期調査で得た衛星/現場データセットを用いて検証した。

## 2.2 回帰分析によるクロロフィル a 濃度推定式の検討結果

### 1) 単回帰分析結果

表2に1990/5/9~1997/5/12の4日間における各バンドのDNと現場Chl.aの相関係数を示す。また図2に単バンドで最も相関係数の高かったバンド1とLN Chl.a(Chl.aの自然対数をとった値)との関係を示す。これより単バンドごとの相関は最高でも0.50であり、衛星データからChl.aを推定することは困難であると考えられた。

### 2) 重回帰分析結果

次に、TMの6個のバンドを用いて重回帰分析を試みた。その結果得られたChl.a推定式を式3に示す。

$$\begin{aligned} LN\ Chl.a = & -0.11*TM\ 1 + 0.47*TM\ 2 - 0.18*TM\ 3 \\ & - 0.06*TM\ 4 + 0.05*TM\ 5 - 0.09*TM\ 7 \\ & + 3.33 \end{aligned} \quad (式3)$$

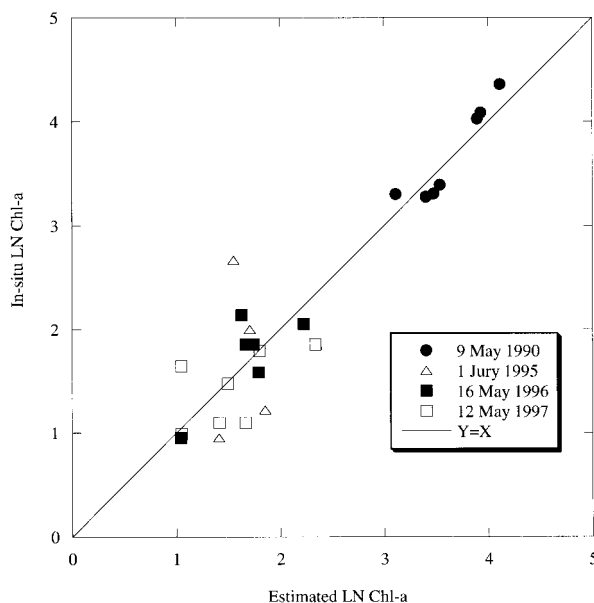


図3. 重回帰モデルを用いて推定した推定クロロフィル a と現場クロロフィル a の関係。

Fig. 3. Correlation between the estimated chlorophyll-a from TM data using multi-regression model and the *in situ* LN chlorophyll-a.

式3より推定されたChl.aと現場Chl.aの関係は相関係数 $R=0.93$ と非常に高かった(図3)。しかし前述した結果には大気効果を全く考慮していない。そこで暗画素法を衛星データに適用して同様の解析を行い、新たに次式も得た。

$$\begin{aligned} LNChl.a = & -0.28*TM\ 1 + 0.67*TM\ 2 - 0.34*TM\ 3 \\ & - 0.02*TM\ 4 - 0.07*TM\ 5 + 0.23*TM\ 7 \\ & + 3.20 \end{aligned} \quad (式4)$$

## 2.3 クロロフィル a 濃度推定式の検証

得られた式3及び式4を使って、任意のTMデータから宍道湖・中海の表層Chl.a推定がどの程度正確に行われるか、その妥当性を確かめるために、1998/3/3の衛星/現場データセットを用いて検証した。そのうち、式3を用いた場合の結果を図4に示す。これより、1998/3/3の推定Chl.aは明らかに実測値と大きく異なる値であることがわかった。そのため式3を使って、任意のTMデータから宍道湖・中海のChl.aを推定するのは危険であると考えられた。1998/3/3のデータが現場Chl.aと大きな誤差を生んだ原因の一つとして、季節により異なる大気(特にパステリアンス成分)の影響が考えられた。

そこで、大気の影響を簡易的に除去することによって得られた式4による推定表層Chl.aと現場

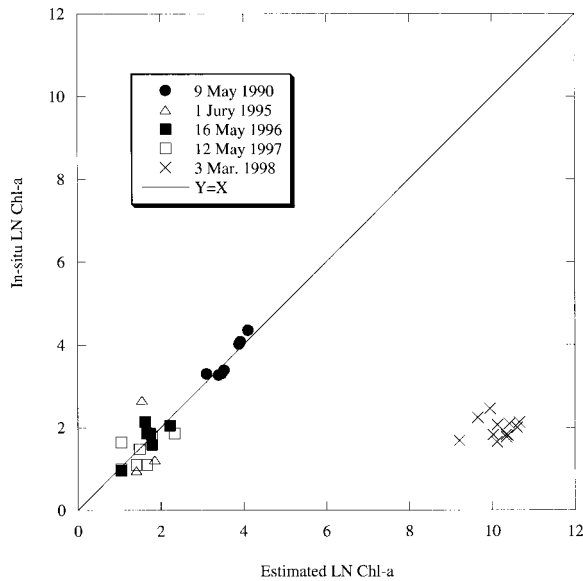


図4. 式3を用いて推定したクロロフィル a と現場クロロフィル a の関係。

Fig. 4. Correlation between the validated chlorophyll-a from TM data and the *in situ* chlorophyll-a using Equation 3.

Chl.a の関係に 1998/3/3 のデータを入力した結果を図5に示す。その結果、暗画素法を適用して式4から推定した1998/3/3の表層Chl.aは現場Chl.aとよく一致した。このことから宍道湖・中海においてTMデータを用いた表層Chl.a推定の際には暗画素補正後(簡易大気補正後)に式4を使用するのが現時点で最良の方法であると考えられた。

### 3. 宍道湖・中海の表層クロロフィル a 濃度分布の特徴

#### 1) 表層クロロフィル a 濃度分布特性

図6に式4を用いてTMデータから推定した宍道湖・中海のChl.a分布図を示す。これによると、宍道湖は中海よりChl.aが高いという傾向があることがわかる。また斐伊川河口部、中海本庄工区は相対的に低いことがわかった。宍道湖・中海における実測に基づくChl.aの水平的な分布については清家(2001)の報告等があり、米子湾が特に高い値を示す、あるいは冬期の中海でのChl.aが赤潮などの影響で高くなる等の傾向は、今回の少ないTM画像から判断することは難しかった。しかし今後、多くのTMデータにより両湖のChl.a分布図が作成されれば、実測データとの比較により、宍道湖・中海の3次元的なChl.a分布が明らかになる可能性が高いと考えられる。

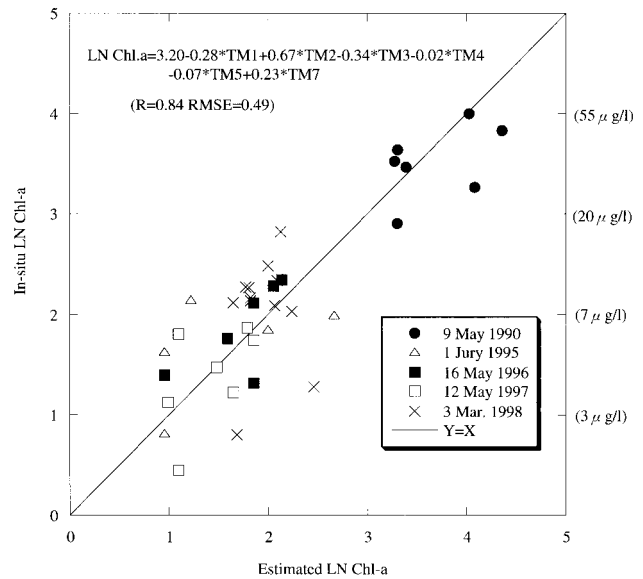


図5. 式4を用いて推定したクロロフィル a と現場クロロフィル a の関係。

Fig. 5. Correlation between the validated chlorophyll-a from TM data and the *in situ* chlorophyll-a using Equation 4.

#### 2) 表層水温分布特性

図7に図6と同じ日における宍道湖・中海の表層水温分布図(相対値)を示す。この図は熱赤外バンドであるTMバンド6(10.4~12.5 μm)を用いてシェードカラー画像を作成したものである。この図から斐伊川河口部で低温分布を示すことが多く、また中海の方が相対的に高温分布を示すことも多いことがわかる。ただしその水温差は1~2℃と低い。

#### 3) 表層クロロフィル a 濃度分布と表層水温分布の比較

図6と図7を比較すると、表層Chl.a分布と表層水温分布は逆相関的な分布を示している傾向がわかる。つまり表層Chl.aが高いと表層水温は低くなり、表層Chl.aが低いと表層水温は高くなるという傾向が見られた。このような表層Chl.aと表層水温の逆相関的な関係は國井(1996)、國井(1998)が宍道湖湖心及び中海湖心のデータからも読み取れる。今回の結果から、湖心で見られるような関係が湖全体にも同様に見られることが定性的に示された。ただし例外として、河口部では表層Chl.a分布、水温分布ともに低い値を示している場合が多かった。

## 4. ま と め

衛星/現場データセットを用いて、TMの6バンド

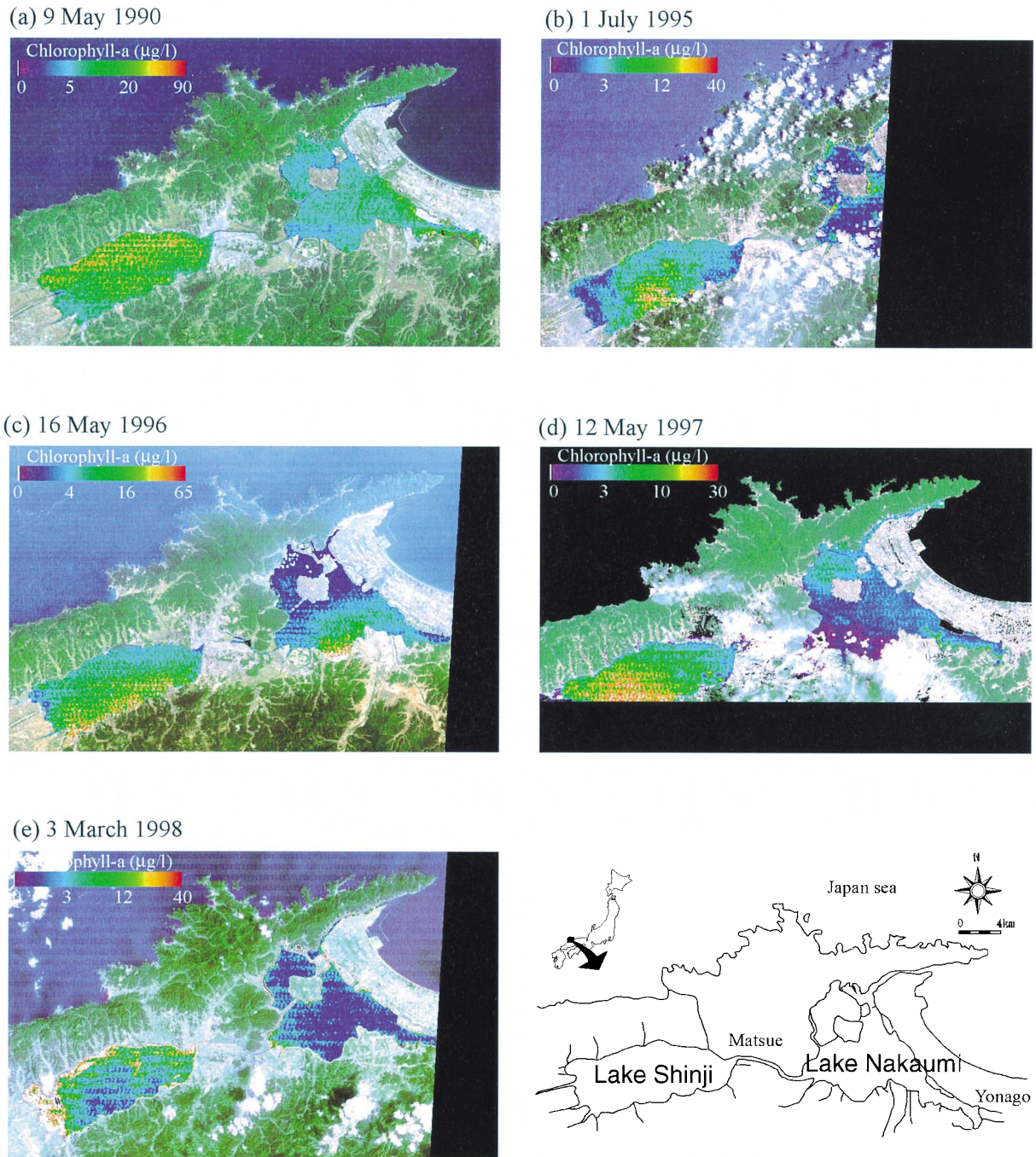


図 6. Landsat-5/TM データから推定した宍道湖・中海の表層クロロフィル a 濃度分布. 推定アルゴリズムは重回帰アルゴリズムを使用. (a) 1990 年 5 月 9 日, (b) 1995 年 7 月 1 日, (c) 1996 年 5 月 16 日, (d) 1997 年 5 月 12 日, (e) 1998 年 3 月 3 日.

**Fig. 6.** Horizontal distribution of surface chlorophyll-a concentration in Lake Shinji and Lake Nakaumi derived from Landsat-5/TM data using a multi regression algorithm. (a) 9 May 1990, (b) 1 July 1995, (c) 16 May 1996, (d) 12 May 1997, (e) 3 March 1998.

データによる表層 Chl.a 推定式(重回帰式)を作成し、別のデータセットを用いて、その推定式の妥当性を検証した。その結果、暗画素補正後(簡易大気補正後)に重回帰分析を行った Chl.a 推定式が現時点での最良の推定式であることがわかった。またこの推定

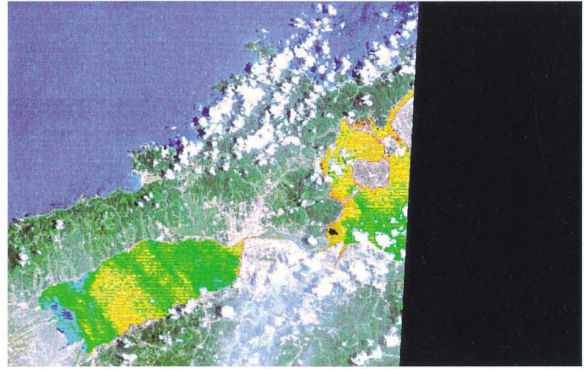
式を使用して、宍道湖・中海の表層 Chl.a マッピングを行い、表層水温分布図と比較した結果、表層 Chl.a 分布と表層水温分布は湖全体で逆相関的な分布を示していることが定性的に明らかになった。



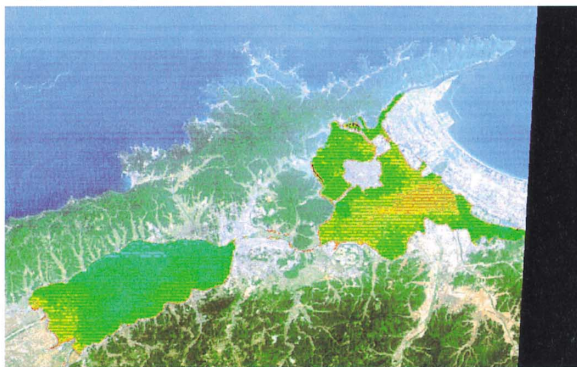
(a) 9 May 1990



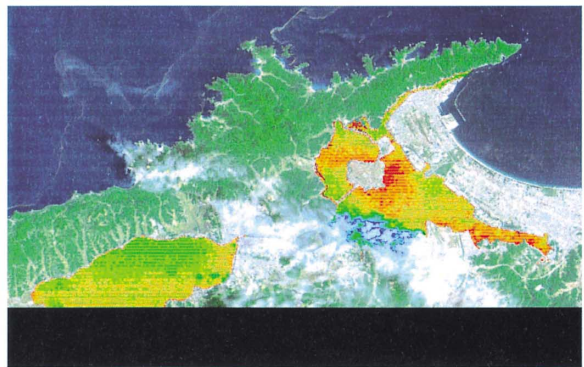
(b) 1 July 1995



(c) 16 May 1996



(d) 12 May 1997



(e) 3 March 1998

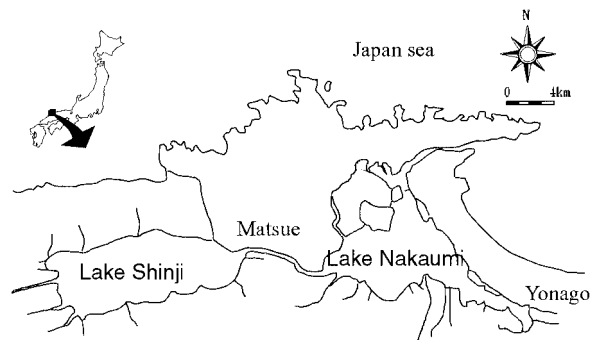


図7. Landsat-5/TM データから推定した宍道湖・中海の表層水温分布。低温で青く、高温ほど赤く示す。

(a)1990年5月9日, (b)1995年7月1日, (c)1996年5月16日, (d)1997年5月12日, (e)1998年3月3日。

**Fig. 7.** Horizontal distribution of surface water temperature in Lake Shinji and Lake Nakaumi derived from Landsat-5/TM data. Blue, low temperature; red, high temperature. (a) 9 May 1990, (b) 1 July 1995, (c) 16 May 1996, (d) 12 May 1997, (e) 3 March 1998.

## 謝 辞

本研究で使用した TM データは、ALOS 公募研究における支援として宇宙開発事業団から提供を受けた。関係機関に深く感謝します。

## 引用文献

- 1) 國井秀伸(1996)宍道湖湖心における水深別クロロフィル量と光合成速度の季節変化(予報), LAGUNA (汽水域研究), 3: 97-101.
- 2) 國井秀伸(1998)中海湖心および中海本庄工区にお

- ける 1996 年から 1998 年にかけての表層水の光合成速度の季節変化, LAGUNA (汽水域研究), 6: 1-11.
- 3) 作野裕司, 高安克己, 松永恒雄, 中村幹雄, 國井秀伸 (1996) 宍道湖における衛星同期水質調査 (その 1), LAGUNA (汽水域研究), 3: 57-72.
- 4) 作野裕司・松永恒雄・六川・高安克己・國井秀伸・中村幹雄 (2001) 多時期 SPOT/HRV データによる宍道湖表層の一次生産量モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, 21 (2): 141-149.
- 5) 清家泰 (2001) 汽水域の科学—中海・宍道湖を例として (高安克己編, 『汽水域の科学』講師グループ著), たたら書房, 19-37.
- 6) 安岡善文 (1983) リモートセンシングの湖沼汚濁監視への応用, 環境技術, 12: 317-322.

## ASTER データを用いた宍道湖・中海の 水温・濁度推定 (2000~2002 年)

作野裕司<sup>1</sup>・山本正智<sup>1</sup>・吉田武史<sup>1</sup>・松永恒雄<sup>2</sup>  
中山大介<sup>3</sup>・高安克巳<sup>3</sup>・古津年章<sup>4</sup>・下舞豊志<sup>4</sup>

### Estimation of water temperature and turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi using ASTER data, 2000-2002

Yuji Sakuno<sup>1</sup>, Masatomo Yamamoto<sup>1</sup>, Takeshi Yoshida<sup>1</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>2</sup>  
Daisuke Nakayama<sup>3</sup>, Katsumi Takayasu<sup>3</sup>, Toshiaki Kozu<sup>4</sup> and Toyoshi Shimomai<sup>4</sup>

**Abstract:** ASTER surface water temperature, which is based on the famous “Split Window method”, and turbidity algorithms, was validated using *in situ* surface water temperature and *in situ* turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi. The study revealed that the ASTER temperature estimated from 5 ASTER/TIR (Thermal Infrared) bands data has a good correlation with *in situ* surface water temperature from tower data in the lakes. And the DN of ASTER Band 3, after dark pixel subtraction, has a significant correlation with the *in situ* turbidity.

**Key words:** ASTER, MCSST, turbidity

#### はじめに

汽水域は陸と海の接点にあり、時空間的に水質変化の激しい水域である。一般に生物資源が豊富であり漁業が盛んであることも多いが、富栄養化しやすいという欠点を持つ。このような水域では、常に水質を監視して環境を保全する努力が必要である。

以上のような背景から、筆者らはわが国最大の汽水域を形成する宍道湖・中海において、衛星データを用いたモニタリングシステム構築の研究を行ってきた(例えば作野ほか, 2001), 本報告ではこれまで収集した衛星/現場データセットを元に、まだその精度又はアルゴリズムが確定していない Terra/ASTER を用いた宍道湖・中海の水温・濁度推定法

について検討した。

#### 方法

##### 1. ASTER データによる水温推定法

宍道湖・中海の水温推定には 1999 年 12 月にアメリカから打ち上げられた衛星 Terra に搭載された ASTER TIR (Thermal Infrared, 以下 TIR と呼ぶ) の 5 バンドデータ (観測波長帯: Band 10: 8.125–8.475  $\mu\text{m}$ , Band 11: 8.475–8.825  $\mu\text{m}$ , Band 12: 8.925–9.275  $\mu\text{m}$ , Band 13: 10.25–10.95  $\mu\text{m}$ , Band 14: 10.95–11.65  $\mu\text{m}$ , 空間分解能: 90 m, 観測幅 60 km) を用いた。

TIR データを輝度温度に変換するために、まずバンド 10~14 の 5 バンドデータの DN 値を次式に入力

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

<sup>2</sup> 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-0053, Japan

<sup>3</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, Japan

<sup>4</sup> 島根大学総合理工学部 Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan



表 1. 2002 年衛星同期水質調査結果の概要.

Table 1. Summary of simultaneous water quality survey with satellite observation.

Date	Satellite /Airborne	Path-Row	Time of satellite or airborne observation	Quality of satellite image	In-situ water quality data
2002/5/2	Terra/Landsat7	111-35	11:00/10:30	○/○	Appendix 1
2002/8/22	Terra/Landsat7	111-35	11:00/10:30	△/×	Appendix 2
2002/9/12	Airborne/Pi-SAR	-	13:20	-	Appendix 3
2002/9/14	Terra/Landsat7	112-35	11:05/10:35	△/×	Appendix 4

して放射輝度  $R$  を求めた.

$$R_i = (DN_i - 1) \times Cal_i \quad (1)$$

ここで  $i$  はバンドを表し,  $Cal$  は補正係数を表す. なお補正係数は ASTER ホームページに記載されている数値, 即ちバンド 10, 11, 12, 13, 14 に対してそれぞれ  $6.882 \times 10^{-3}$ ,  $6.780 \times 10^{-3}$ ,  $6.590 \times 10^{-3}$ ,  $5.693 \times 10^{-3}$ ,  $5.225 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{sr} \mu\text{m})$  を用いた. 得られた各バンドの  $R$  を次式で表されるプランクの逆関数式に入力して衛星高度 (Top of the atmosphere: TOA) 輝度温度 (TOA-T) を求めた.

$$TOA-T_i = \frac{C_2}{\lambda \log_e \left( \frac{C_1}{\lambda^5 R_i} + 1 \right)} \quad (2)$$

ここで,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\lambda$ ,  $i$  は, それぞれ第一放射定数, 第二放射定数, 波長, バンドを示す. ここで得られた 5 バンドの輝度温度値を, さらにスプリットウィンドウ法 (McMillin and Crosby, 1984) を変形した多チャンネル水温推定式 (松永, 1996) に入力する. この水温推定式は, 松永が大气計算コード LOWTRAN を使って各バンドの大气影響を理論的に計算し係数設定を行った理論式である. ASTER の 5 チャンネルを使った水温 (MCSST: Multi-channel sea surface temperature) の推定式は以下の通りである.

$$MCSST = 1.16 - 1.07 * T_{10} + 0.49 * T_{11} + 1.13 * T_{12} + 0.78 * T_{13} - 0.32 * T_{14} \quad (3)$$

ここで  $T_{10}$ ,  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{13}$ ,  $T_{14}$  の数値はそれぞれ ASTER のバンド 10, 11, 12, 13, 14 の TOA である. ただし水面の放射率は 1 と仮定する.

## 2. ASTER データによる濁度推定法

ASTER データによる濁度推定法はまだ確立されていない. しかし, 一般に可視・近赤外の領域において濁度が増加すれば, バンドに関係なく反射率も増加することが知られている. 従って, 今回は ASTER の可視・近赤外バンド (Band 1:  $0.52-0.60 \mu\text{m}$ , Band 2:  $0.63-0.69 \mu\text{m}$ , Band 3:  $0.76-0.86 \mu\text{m}$ , 空

間分解能:  $15 \text{ m}$ , 観測幅:  $60 \text{ km}$ ) における DN 値 (分光反射率に相当) と現場濁度データとの相関解析を行うことにより, ASTER データによる宍道湖・中海の濁度推定を試みた. その際, 衛星観測時期による大気の影響を考慮するために, 暗画素法を用いてパスラジアン成分 (PR) の除去処理の効果も調べた. 濁度 (Turb) と ASTER/VNIR 各バンド DN の関係式を次式に示す.

$$Turb = \alpha DN_i + \beta \quad (4)$$

ここで,  $\alpha$ ,  $\beta$  は定数,  $i$  はバンドの番号を示す. DN はデジタル値を示し, PR を除去しない場合と除去する場合の両方を試行する.

## 3. 使用データ

研究に使用した衛星データは, 2000 年 5 月 12 日, 8 月 7 日, 2001 年 8 月 3 日, 2002 年 5 月 2 日, 8 月 22 日, 9 月 14 日に撮影された ASTER データである. このうち, 2001 年と 2002 年のデータについては, 宍道湖・中海において衛星同期水質調査も行っている. 2001 年の調査に関してはすでに公表しているため (作野ほか, 2002), ここでは 2002 年の調査結果の概要について, 表 1 及び付表 1~付表 4 に示す. さらに, 2002 年に行われた衛星同期水質調査測点と取得された ASTER 画像をそれぞれ図 1, 図 2 に示す. ただし, これらの調査において取得した現場水質データは, 本論文では使用しないため, 結果の概要を示すのみとする.

一方, ASTER データによる水温/濁度推定の検証又は推定式作成に用いた現場水温/濁度データは, 国土交通省がタワー観測している宍道湖湖心 (北緯  $35^\circ 26' 50''$ , 東経  $132^\circ 57' 46''$ ), 中海湖心 (北緯  $35^\circ 27' 46''$ , 東経  $133^\circ 11' 38''$ ), 米子湾 ( $35$  度  $25$  分  $51$  秒,  $133$  度  $18$  分  $12$  秒) の上層 (水深  $1 \text{ m}$  地点) データ (時刻 11:00) である. なお, 同濁度データの測定方式は, 水没型積分球法に基づくものである.

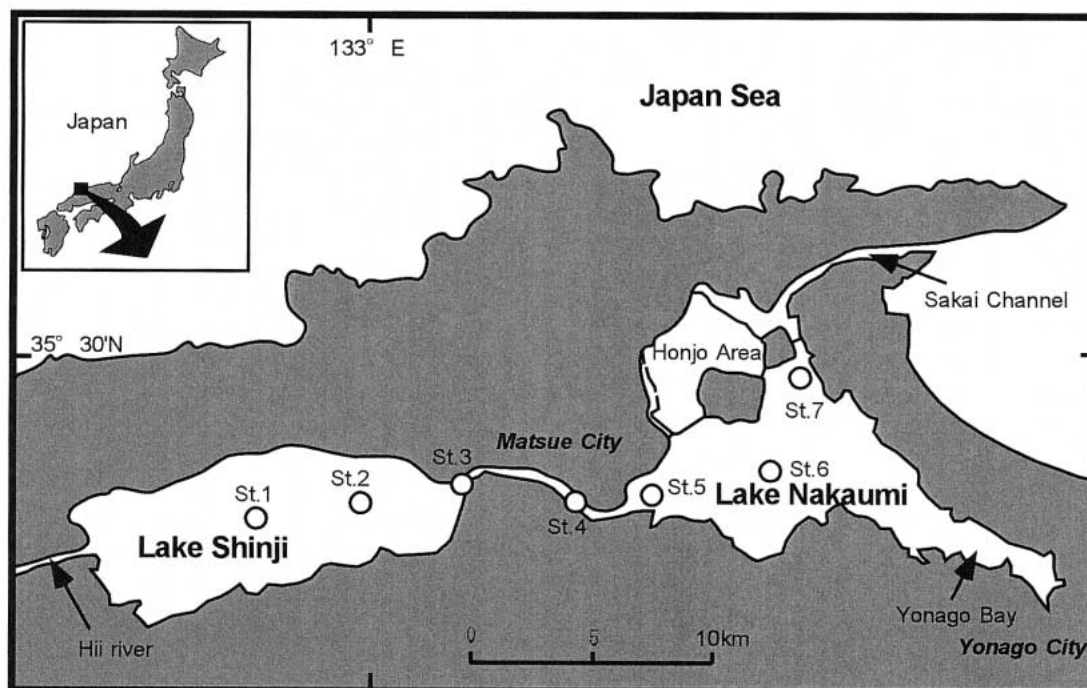


図 1. 宍道湖・中海における 2000~2002 年衛星同期水質調査の基本測点.

Fig. 1. Standard stations of simultaneous water quality survey with satellite observation in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 2000-2002.

## 結果及び考察

### 1. ASTER 水溫と現場水溫の比較

表 2 にそれぞれの宍道湖・中海における MCSST と現場水溫を比較した結果を示す。これより、両者の差は 0~2.6℃, 差の平均は 1.4℃, 標準偏差が 1.1℃であることがわかる。これは同様の方法で検証が行われた東京湾の結果 (ASTER 水溫と実測水溫の差及び標準偏差はそれぞれ 1.4℃, 0.9℃) (松永ほか, 2002) とほぼ同程度であり, 妥当な結果といえる。また図 3 には宍道湖・中海における MCSST と現場水溫の関係を示す。すでにその精度を検証している広島湾における ASTER 水溫と実測水溫の差 (Sakuma et al., 2002) が宍道湖・中海と比べ小さいのは, 鉛直方向の水溫差 (衛星データは表皮水溫を計っているが, タワーやブイは 1~2 m の水深で表層水溫を計っている) 等の問題があると考えられるが, 詳細な原因はまだ判明していない。

これらの結果より, ASTER データから求められた MCSST は, オフセット調整すれば約 1.1℃の誤差で宍道湖・中海の表層水溫を推定できることがわかった。

表 2. ASTER データから推定された水溫 (MCSST) と現場表層水溫との比較.

Table 2. Comparison between MCSST from ASTER and *in situ* water temperature.

Date	Station	MCSST (°C)	In-situ W.T. (°C)	Differ. (°C)
2000/05/12	SJ	19.1	18.3	0.8
2000/08/07	NU	28.0	29.5	-1.5
	YB	29.5	29.8	-0.3
2001/08/03	SJ	29.5	29.5	0.0
2002/05/02	SJ	15.2	17.2	-2.0
	NU	14.6	16.4	-1.8
	YB	14.8	17.6	-2.8
2002/08/22	NU	23.6	26.0	-2.4
	YB	23.0	24.6	-1.6
2002/09/14	SJ	25.5	25.9	-0.4
	NU	24.1	25.8	-1.7
	YB	24.1	26.7	-2.6
			Mean	-1.4
			SD	1.1

表 3. ASTER レベル 1b データと濁度データの相関係数と RMS 誤差.

Table 3. Correlation coefficient and RMS error between ASTER data (Level 1b) and turbidity.

	Level 1B (DN)			Level 1B (DN-D.P.)		
	Band1	Band2	Band3	Band1	Band2	Band3
r	0.88	0.87	0.76	0.68	0.22	0.75
RMSE	2.62	2.80	3.60	4.08	5.45	3.67

N=9

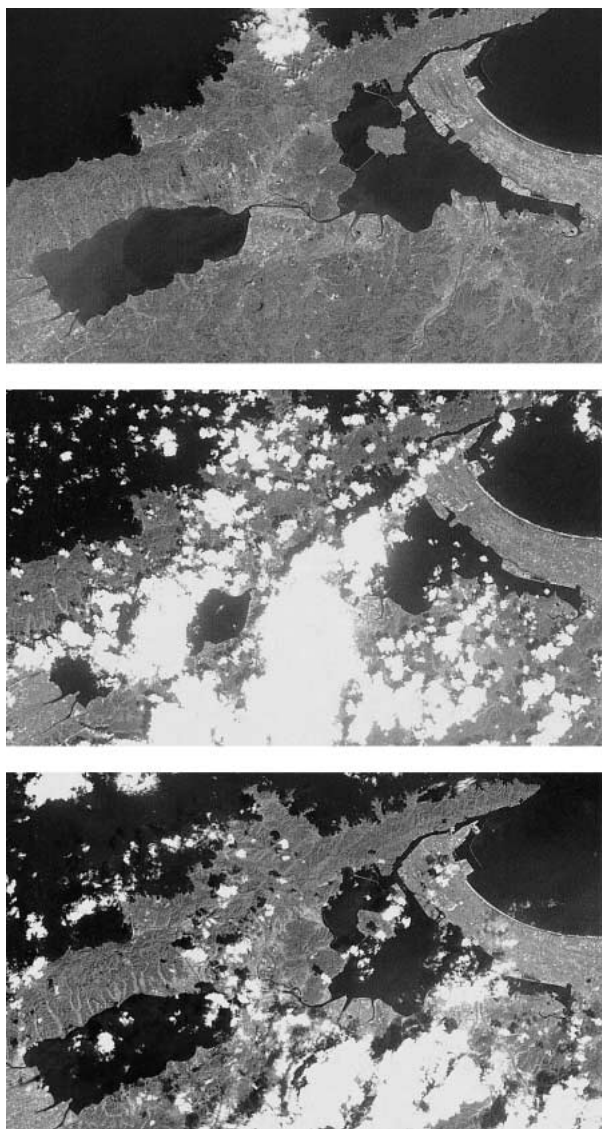


図 2. 2002 年に取得された宍道湖・中海の ASTER 画像 (a) 2002 年 5 月 2 日, (b) 2002 年 8 月 22 日, (c) 2002 年 9 月 14 日.

**Fig. 2.** ASTER images of Lake Shinji and Lake Nakaumi, 2002. (a) 2 May 2002, (b) 22 August 2002, (c) 14 September 2002.

## 2. ASTER データと濁度の関係

表 3 に ASTER データと現場濁度データの相関係数及び RMS 誤差を示す。また、その中でもっとも相関のよかった「ASTER バンド 1 (暗画素除去なし) と濁度の関係」, 「ASTER バンド 3 (暗画素除去あり) と濁度の関係」をそれぞれ図 4(a), 図 4(b) に示す。これらの結果より、暗画素処理前の ASTER と濁度の関係は、観測バンドに限らず相関係数が 0.76~0.88 と比較的良好。これに対し、暗画素処理後の結果は Band 3 を除きいずれも暗画素処理前より、かなり結果が悪くなっている。これは、暗画素法の設定値が

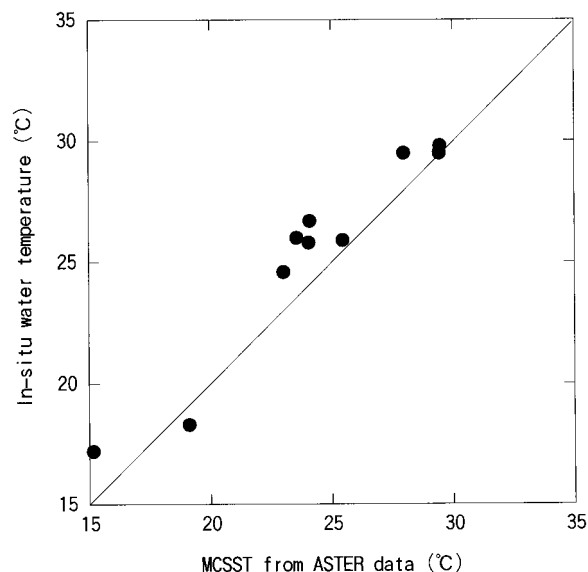


図 3. 宍道湖・中海における ASTER MCSST と表層水温の相関。水温データは宍道湖湖心, 中海湖心, 米子湾中央部における国土交通省タワーデータを使用。

**Fig. 3.** Correlation between ASTER MCSST and *in situ* surface water temperature in Lake Shinji and Lake Nakaumi. Data used from tower data of MLIT (Land, Infrastructure and Transportation Ministry) at the centers of Lake Shinji, Lake Nakaumi, and Yonago Bay.

ある時期のデータにおいて妥当ではなかったからだと考えられる。

一般に光の散乱を利用した濁度測定は、670 nm 付近で測定されることが多いが、色の影響をうけない長波長で測定した方がよりよいと言われている。また衛星データによる濁度 (SS を含む) 推定でも、赤～近赤外の波長帯 (ASTER バンド 2, バンド 3 に相当) が有効だったという研究が多い (例えば, Ritchie et al, 1987)。さらにこれまで筆者らの研究でも、宍道湖・中海における ASTER データと濁度の関係を調べてきた結果 (山本ほか, 2002), 常に「ASTER バンド 3 (暗画素除去あり) と濁度」の関係が比較的高い相関係数を示している。これより、ASTER バンド 3 (暗画素除去あり) を使った方法が、現時点で最も安定した宍道湖・中海の濁度推定が可能であると考えられる。この場合の濁度推定式は以下のようになり、その推定精度は約 3.7 mg/l (表 3 参照) と見積もられる。

$$\text{Turb.} = -23.5 + 0.44 * [\text{ASTER Band 3}] \quad (5)$$

ここで、[ASTER Band 3] は暗画素除去後の ASTER Band 3 の DN である。

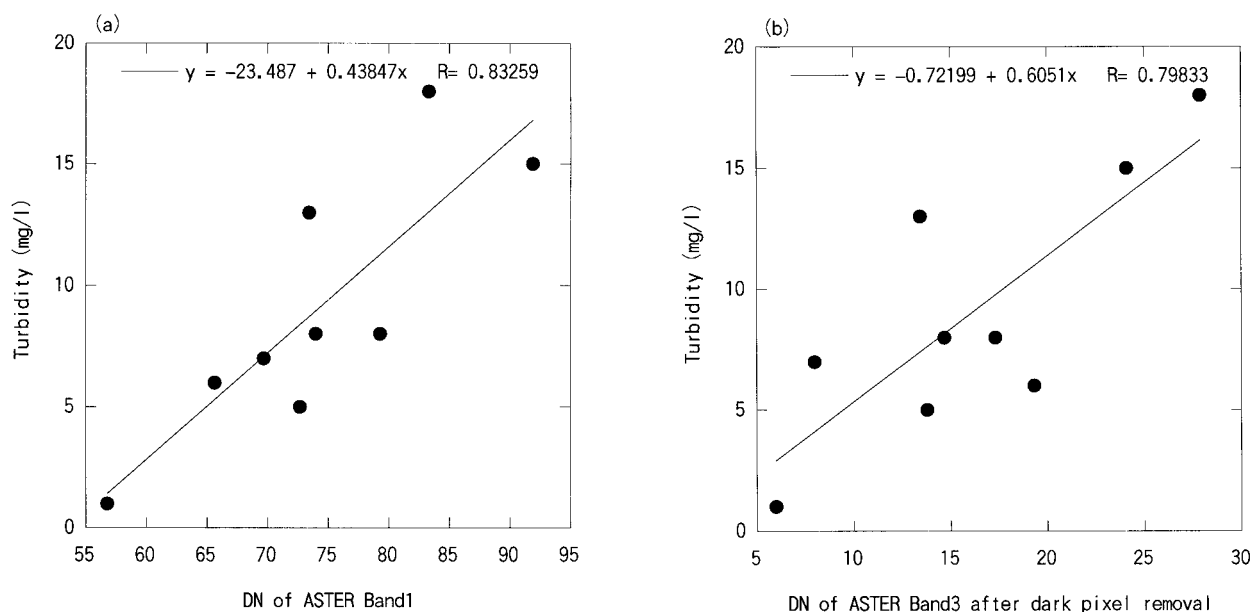


図4. 宍道湖・中海における ASTER Band 1 と Band 3(暗画素除去後)と濁度の相関. 濁度データは宍道湖湖心, 中海湖心, 米子湾中央部における国土交通省タワーデータを使用.

**Fig. 4.** Correlation between DN of ASTER Band 1 (a) and Band 3 (b) after dark pixel removal and turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi. Data used from tower data of MLIT (Land, Infrastructure and Transportation Ministry) at the centers of Lake Shinji, Lake Nakaumi, and Yonago Bay.

### 3. 宍道湖・中海における水溫・濁度分布の特徴

式(3)及び式(5)を使って ASTER データから推定した宍道湖・中海の表層水溫及び表層濁度の分布図を図5, 図6に示す.

まず図5の水溫分布図から, 時期により水溫分布パターンが大きく異なることがわかる. 特に2000年5月12日, 8月7日においては, 宍道湖・中海のそれぞれの水域において部分的な低水溫又は高水溫パターンが見られる. これまでの研究の多くは, 同じ日にちにおいて地点間水溫はほとんど変らなく, 湖心水溫を代表値として扱ってきた. また気溫の高い夏場においては, 湖水が成層化され, 両湖の表皮水溫の差は極めて小さい. しかし, 2000年8月7日の ASTER 水溫に見られるパターンの様に宍道湖と中海の湖心は同程度の水溫でも周囲の水溫は異なる場合があり, 厳密な温度を利用する研究を行うときには, 面的な水溫差を考慮する必要があると考えられた.

濁度に関しては図6に見られる様に, 全体的にほぼ均一の分布をしていることが多い. ただし, 斐伊川河口部から宍道湖北西岸に沿って高い濁度分布を示している. これは, 斐伊川から流出した土砂の影響が大きいと考えられる. 清家(2002)の実測に基づく結果によると, 宍道湖・中海の濁度は季節による違いが大きく, 地点間分布としては中海が低濁度に

なる場合が多く, 米子湾で高濁度になる場合が多い. 今回の ASTER データから推定した濁度分布では2002年9月のデータが他の季節のデータと比べて濁度が全体的にかなり低いことや, 2002年5月や9月のデータで米子湾が高濁度であること等, 実測に基づく結果と調和的である. さらに, 図5と図6を比較すると, 表層の水溫と濁度は互いに独立した分布パターンを示し, 両者の関係を見出すことはできなかった.

## ま と め

宍道湖・中海における ASTER 水溫と現場水溫を比較した結果, 両者の差は平均1.4℃, 標準偏差が1.1℃であることがわかった. また, ASTER データを使った濁度推定に関して, 暗画素除去(簡易大氣補正)後においては, ASTER Band 3が最も濁度との相関が高く, Band 3を使った濁度推定式による推定精度は約3.7 mg/lと見積もられた.

今後は衛星/現場データセットをさらに増やし, 特に ASTER データと濁度関係について検証を深め, ASTER データを宍道湖・中海における物質循環研究等に役立てたい.

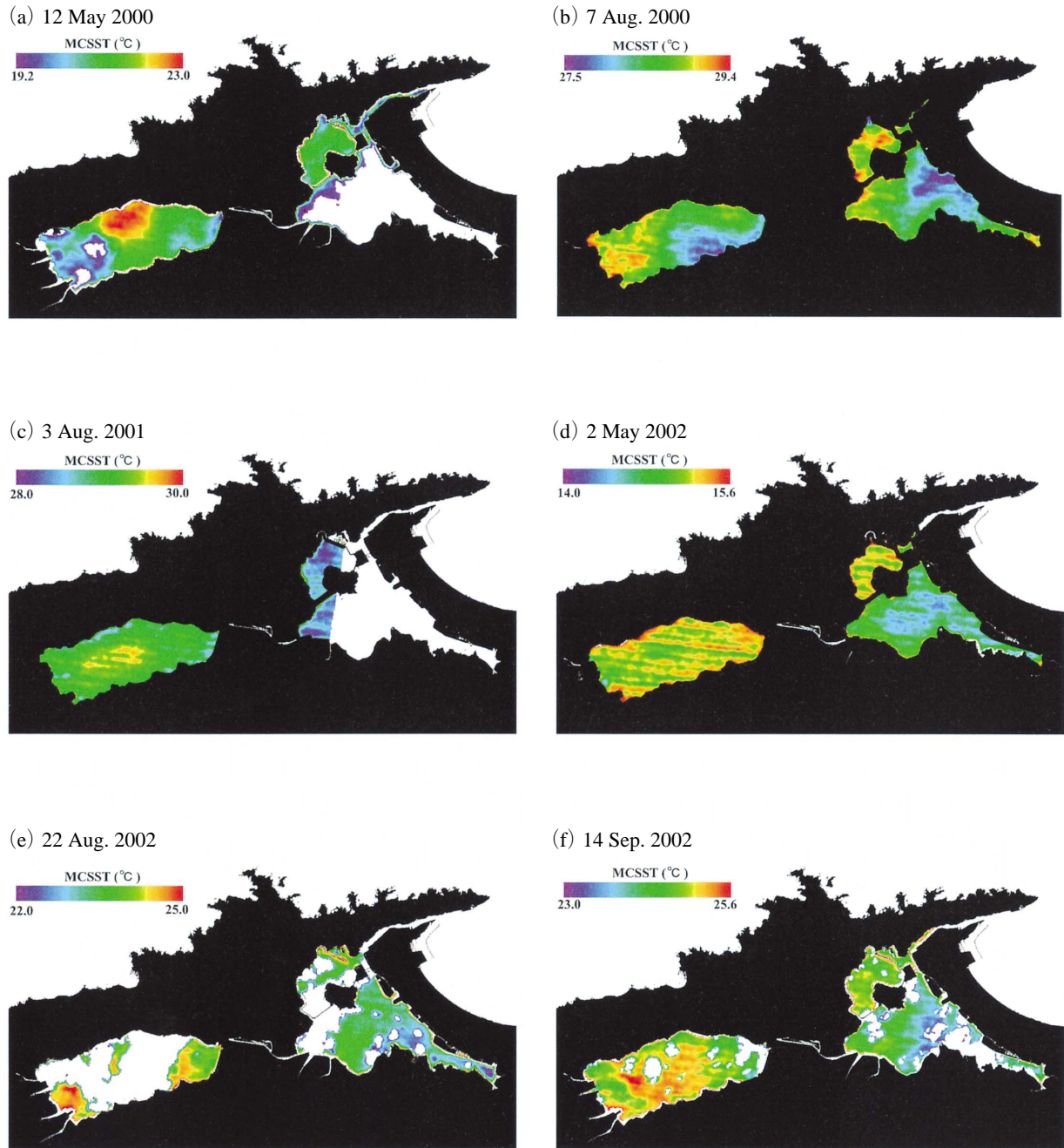


図5. ASTER データから推定した宍道湖・中海の表層水温分布.

(a) 2000年5月12日, (b) 2000年8月7日, (c) 2001年8月3日, (d) 2002年5月2日, (e) 2002年8月22日, (f) 2002年9月14日.

**Fig. 5.** Horizontal distribution of surface water temperature in Lake Shinji and Lake Nakaumi derived from ASTER data.

(a) 12 May 2000, (b) 7 Aug. 2000, (c) 3 Aug. 2001, (d) 2 May 2002, (e) 22 Aug. 2002, (f) 14 Sep. 2002.

## 謝 辞

本研究で使用したASTERデータの一部は「ASTERデータ利用に関する共同研究」により提供されたものである。また現場の水温・濁度データは国土交通省出雲河川事務所から提供していただいた。

た。関係機関に深く感謝する。

## 引用文献

- 1) McMillin and Crosby (1984) Theory and validation of the multiple window sea surface temperature



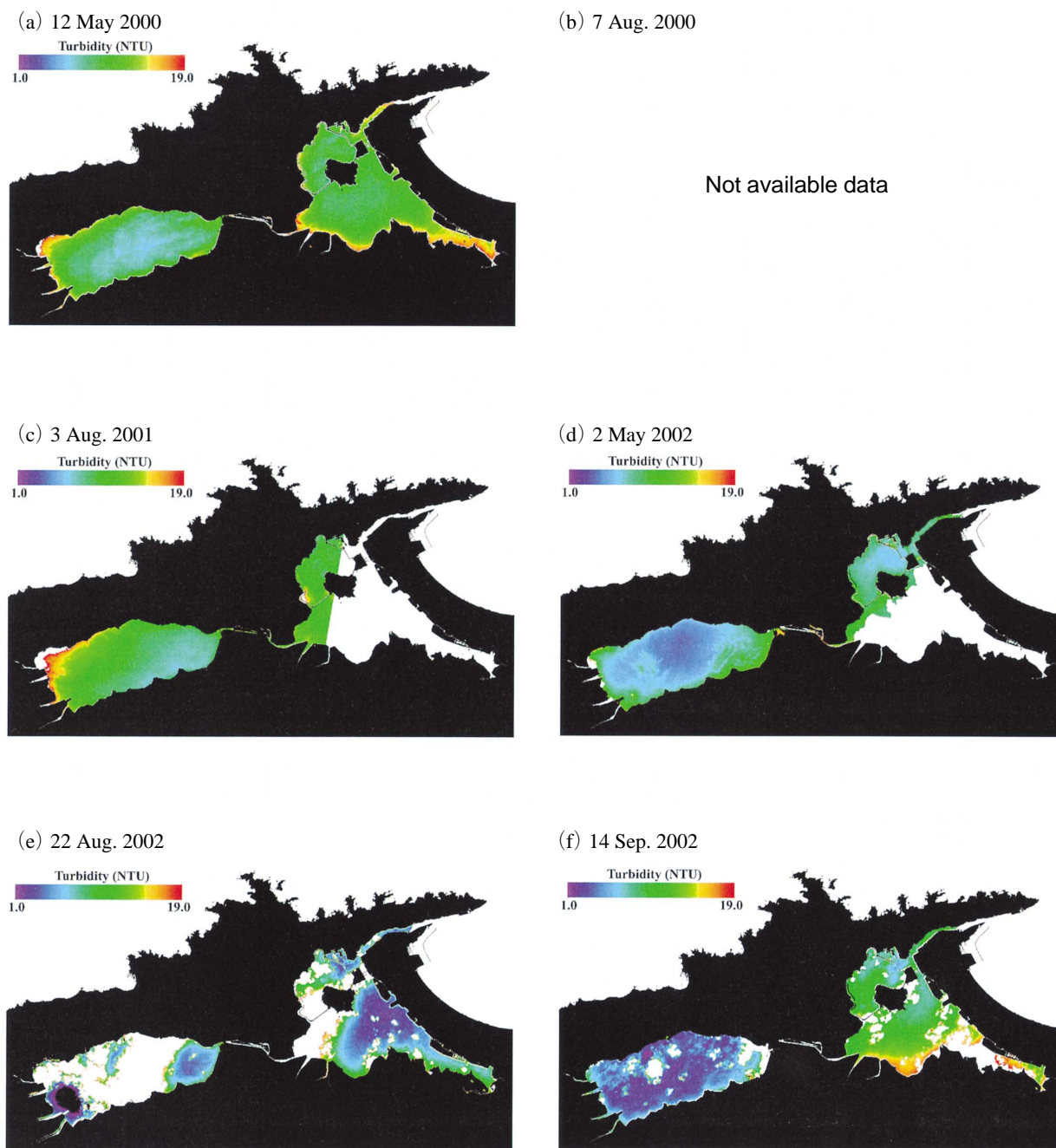


図 6. ASTER データから推定した宍道湖・中海の表層濁度分布.

(a) 2000 年 5 月 12 日, (b) 2000 年 8 月 7 日, (c) 2001 年 8 月 3 日, (d) 2002 年 5 月 2 日, (e) 2002 年 8 月 22 日, (f) 2002 年 9 月 14 日.

**Fig. 6.** Horizontal distribution of surface turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi derived from ASTER data.

(a) 12 May 2000, (b) 7 Aug. 2000, (c) 3 Aug. 2001, (d) 2 May 2002, (e) 22 Aug. 2002, (f) 14 Sep. 2002.

technique, JGR, Vol.89, No.C 3, pp.2655-3661.

- 2) 松永恒雄 (1996) ASTER TIR の観測輝度温度の線形式を利用した水温温度推定—日本周辺の気温及び湿度データを用いた推定誤差の予備評価, 日本リモートセンシング学会誌, 16 (5) : 2-13.
- 3) 松永恒雄, 植木俊明, 納谷美也子, 立川哲史

(2002) 東京湾のげんば水温データを用いた ASTER 水温アルゴリズムの検証, 日本リモートセンシング学会第 33 回学術講演会論文集, pp.191-192.

- 4) Ritchie, J.C., Cooper, C.M., Yonging, J. (1987) Using Landsat multi-spectral scanner data to estimate

suspended sediments in Moon Lake, Mississippi, Remote sensing of environment, 23: 65-81.

- 5) 作野裕司, 松永恒雄, 六川修一, 高安克己, 國井秀伸, 中村幹雄 (2001) 多時期 SPOT/HRV データによる宍道湖表層の一次生産量モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, 21: 141-149.
- 6) 作野裕司, 本井裕志, 松永恒雄, 古津年章, 高安克己, 下舞豊志, 中山大介 (2002) 衛星光学センサを用いた汽水域のクロロフィル濃度推定の可能性 - 宍道湖・中海における 2001 年の現場調査結果, LAGUNA (汽水域研究), 9: 55-61.
- 7) Sakuno, Y., Matsunaga, T., Kozu, T., and Takayasu,

K. (2002) Preliminary study of the monitoring for turbid coastal waters using a new satellite sensor, "ASTER", The 12 th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2002), Kita-Kyushu, Japan, CD-ROM (Vol.II), pp.341-347.

- 8) 山本正智, 吉田武史, 作野裕司, 松永恒雄 (2002) ASTER データを用いた宍道湖・中海の水質・濁度推定 (2000~2002 年), 日本リモートセンシング学会第 33 回学術講演会論文集, pp.181-182.
- 9) 清家泰 (2001) 汽水域の科学 - 中海・宍道湖を例として (高安克己編, 『汽水域の科学』講師グループ著), たたら書房, pp.19-37.

付表 1. 宍道湖・中海における衛星 (Terra/Landsat-7) 同期水質測定結果 (2002/5/2).

**Appendix 1.** Results of simultaneous water quality measurement with satellite (Terra/Landsat-7) observation, 2 May 2002.

No.	Station No.	Latitude	Longitude	Weather	Time	W.Depth(m)	Chl.a( $\mu$ g/l)	Trans.(m)	Turb.(NTU)	W.Temp.(°C)	Sal.(psu)	pH	DO(g/l)
1	NU01-1	35° 30'29.3"	133° 12'33.2"	Clear	8:36	13.5	7.3	1.6	26	16.3	23	8.55	7.8
2	NU2	35° 29'30.0"	133° 12'17.4"	Clear	9:00	6.9	13.4	1.1	8	16.5	21	8.70	8.9
3	NU01-2	35° 27'46.2"	133° 11'32.5"	Clear	9:25	6.5	10.7	1.1	9	16.5	20	8.71	9.0
4	YN-AP	35° 29'11.2"	133° 13'00.7"	Clear	10:07	7.3	13.8	1.0	8	16.5	23	8.55	8.4

付表 2. 宍道湖・中海における衛星 (Terra/Landsat-7) 同期水質測定結果 (2002/8/22).

**Appendix 2.** Results of simultaneous water quality measurement with satellite (Terra/Landsat-7) observation, 22 Aug. 2002.

No.	Station No.	Latitude	Longitude	Weather	Time	W.Depth(m)	Chl.a( $\mu$ g/l)	Trans.(m)	Turb.(NTU)	W.Temp.(°C)	Sal.(psu)	pH	DO(g/l)
1	SJ01-3	35° 26'48.6"	132° 57'45.6"	Clear	8:40	5.5	19.7	1.2	26	26.6	7	7.98	8.6
2	SJ01-2	35° 27'03.2"	132° 59'51.0"	Clear	9:26	4.9	18.7	1.1	8	26.6	7	7.85	8.6
3	SJ01-1	35° 27'30.6"	133° 03'09.5"	Clear	9:53	1.7	12.0	1.7+	9	25.9	8	7.64	8.4
4	NU01-3	35° 27'04.2"	133° 08'37.4"	Cloud	10:27	4.2	10.6	2.1	8	26.1	23	8.34	8.3
5	NU01-2	35° 27'45.3"	133° 11'31.7"	Clear	10:48	6.8	9.1	1.7	6	26	23	8.44	8.4
6	NU01-1	35° 30'29.3"	133° 12'33.2"	Clear	11:17	14.7	7.1	1.8	5	25.5	24	8.35	8.4

付表 3. 宍道湖・中海における航空機 (Pi-SAR) 同期水質測定結果 (2002/9/12).

**Appendix 3.** Results of simultaneous water quality measurement with aircraft (Terra/Landsat-7) observation, 12 Sep. 2002.

No.	Station No.	Latitude	Longitude	Weather	Time	SS(mg/l)	Chl.a( $\mu$ g/l)	Trans.(m)	Turb.(NTU)	W.Temp.(°C)	Sal.(psu)	pH	DO(mg/l)
1	S1	35° 27'00"	132° 55'16"	Clear	12:57	5.8	12.6	1.3	7	28.2	8	7.8	9.0
2	S2	35° 26'04"	132° 55'17"	Clear	13:18	4.2	3.6	1.1	10	28.2	7	8.0	9.5
3	S3	35° 25'09"	132° 55'15"	Clear	13:32	5.0	13.9	1.1	240	29.4	8	8.3	10.0
4	S4	35° 26'09"	132° 53'30"	Clear	13:53	7.6	13.7	1.1	16	28.4	8	7.9	9.3
5	NU1	35° 28'29"	133° 08'52"	Clear	13:30	7.6	11.0	ND	3	27.6	22	7.8	5.9
6	NU2	35° 27'46"	133° 09'38"	Clear	14:00	5.4	10.3	ND	1	27.7	22	7.9	8.6
7	NU3	35° 27'31"	133° 10'29"	Clear	14:30	7.0	9.9	ND	1	27.7	22	7.9	8.1
8	NU4	35° 27'48"	133° 11'33"	Clear	14:45	5.2	6.8	ND	1	27.5	22	7.8	9.0

付表 4. 宍道湖・中海における衛星 (Terra/Landsat-7) 同期水質測定結果 (2002/9/14)

**Appendix 4.** Results of simultaneous water quality measurement with satellite (Terra/Landsat-7) observation, 14 Sep. 2002.

No.	Station No.	Latitude	Longitude	Weather	Time	SS(mg/l)	Chl.a( $\mu$ g/l)	Trans.(m)	Turb.(NTU)	W.Temp.(°C)	Sal.(psu)	pH	DO(mg/l)
1	SJ01-3	35° 27'00"	132° 57'36"	Cloud	8:02	8	8.3	2	11	25.9	8	7.2	7.1
2	SJ01-2	35° 26'55"	132° 59'50"	Clear	8:27	10.6	14.0	1.6	12	25.9	8	7.5	7.2
3	SJ01-1	35° 27'48"	133° 03'04"	Cloud	8:45	9.8	2.2	3	8	25.9	8	7.3	6.4
4	OH01-1	35° 27'22"	133° 06'02"	Clear	9:28	11.6	2.1	2.3	7	25.7	8	7.3	7.8
5	NU3	35° 27'14"	133° 08'29"	Cloud	10:49	19.6	11.8	2	9	26.6	24	8.7	7.7
6	NU2	35° 27'58"	133° 11'24"	Clear	11:00	22.6	6.6	2.5	12	25.8	23	8.8	8.8
7	NU1	35° 30'43"	133° 12'20"	Clear	11:11	29	8.8	2.7	9	25.6	24	8.9	8.9

## 高分解能航空機搭載合成開口レーダによる 汽水域観測：初期解析結果

古津年章<sup>1</sup>・池内伸行<sup>1</sup>・市川啓祐<sup>1</sup>・下舞豊志<sup>1</sup>  
作野裕司<sup>2</sup>・中山大介<sup>3</sup>・高安克巳<sup>3</sup>

### High-resolution airborne SAR observation of a coastal lagoon environment: preliminary results

Toshiaki Kozu<sup>1</sup>, Nobuyuki Ikeuchi<sup>1</sup>, Keisuke Ichikawa<sup>1</sup>, Toyoshi Shimomai<sup>1</sup>,  
Yuji Sakuno<sup>2</sup>, Daisuke Nakayama<sup>3</sup> and Katsumi Takayasu<sup>3</sup>

**Abstract:** High-resolution airborne SAR observations were conducted over Lakes Shinji and Nakaumi area in 2001 and 2002 using the CRL/NASDA's "pi-SAR" that has the capability for a simultaneous dualfrequency (L-band and X-band) and multi-polarization observation. Coupled with the pi-SAR survey, extensive *in situ* field measurement were also made in order to detailed analyses of pi-SAR images and back-scattering coefficients ( $\sigma^0$ ). The preliminary analyse revealed that the SAR images L- and X-bands have somewhat different signatures suggesting that the X-band backscatter rapidly responds to fine structure of atmospheric turbulence as well as "average" wind field. Flow-like dark signatures are also found, suggesting the capabilities of SAR in detecting the surface slick and water flow patterns. Incidence angle, frequency and polarization dependences of  $\sigma^0$  obtained from the pi-SAR are also studied. The results indicate the potential of the SAR for high-resolution wind field mapping as well as the necessity of more detailed studies of wind-water surface interactions and surface wave spectra in coastal lagoon areas where water bodies are small and surrounded by land.

**Key words:** airborne sensor, Synthetic Aperture Radar (SAR), coastal lagoon, normalized radar cross-section

#### 1. ま え が き

汽水域環境の広域かつ迅速な把握において、リモートセンシングの重要性が認識されつつある。これまで衛星搭載可視～熱赤外分光放射計により、クロロフィル a, 濁度, 水温などの 2 次元マッピングの可能性が示されている (作野, 2000; 作野ほか, 2002; 山本ほか, 2002)。しかし光学センサは、天候

に左右され、また可視・近赤外域のリモートセンシングは太陽光の散乱を利用するため、観測時間帯が日中に限定されるという問題がある。特に季節に依っては、曇天のためほとんど観測ができない状況も生じ得る。そのため、近年マイクロ波センサ、特に汽水域のような狭い水域において、現在のところ使用可能な高い空間分解能を持つ唯一の衛星搭載マイクロ波センサである合成開口レーダ (SAR) を用い

<sup>1</sup> 島根大学総合理工学部 Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

<sup>2</sup> 広島大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

<sup>3</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, Japan



表 1. pi-SAR の主要諸元 (CRL, 2002 a).

Table 1. Major engineering parameters of pi-SAR (CRL, 2002 a).

項目	Xバンド SAR	Lバンド SAR
周波数	9.55 GHz	1.27 GHz
レンジ方向分解能	1.5 m/3 m	3 m/5 m /10 m/20 m (Variable)
アジマス方向分解能	1.5 m (4-look Processing)	3 m (4-look Processing)
雑音レベル等価 NRCS	-40 dB 以下	-40 dB 以下
SN 比	10 dB 以上	10 dB 以上
Polarimetry 位相精度	HH/HV/VV/VH 5 deg.以下	HH/HV/VV/VH 5 deg. 以下
入射角	10-75 deg.	20-60 deg.
NRCS 測定精度	0.5 dB 以下	0.5dB 以下
アンテナサイズ	105 cm (L) x 19 cm (W)	155 cm (L) x 65 cm (W)
アンテナタイプ	Slotted Waveguide Array	Microstrip Patch Array
ピーク送信電力	8.3 kW	3.5 kW
送信パルス長	10 microsec.	10 microsec.

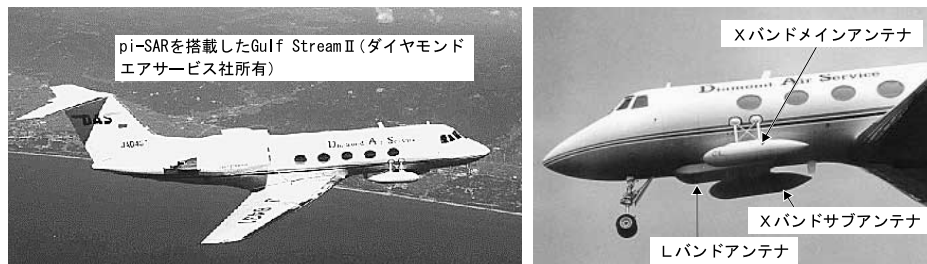


図 1. pi-SAR の外観 (左は pi-SAR を搭載した航空機, 右はアンテナ部の拡大写真).

Fig. 1. Picture of Gulf stream II airplane carrying the pi-SAR (left) and pi-SAR antenna (right).

たりリモートセンシングの使用可能性が研究されてきた。その結果、高分解能の風速分布推定の可能性が示唆されている (Ichikawa et al., 2002 ; 市川, 2003)。

従来の宍道湖・中海リモートセンシングの研究は, Matsunaga et al. (1999) による航空機搭載多波長分光計観測を除いて, 全て衛星搭載センサを用いたものであった。航空機観測は, 研究段階ではコスト面で実施が困難な面はあるが, 衛星センサに比べて多波長・高空間分解能など高性能の観測が可能のため, リモートセンシング技術開発の上で貴重な情報を提供し得る。また実用段階では, 衛星観測と比較して観測日時や場所の柔軟性・機動性, および研究段階と同様センサ自体の高性能化による高精度観測などの利点を有する。

このような観点から, 我々は 2001 年および 2002 年の計 2 回, 独立行政法人通信総合研究所 (CRL) および宇宙開発事業団 (NASDA) の協力を得て, これらの機関が所有する多偏波・干渉計型合成開口レーダ (pi-SAR) による汽水域観測を実施した (市川

他, 2002; Kozu et al., 2002)。pi-SAR の外観と主要諸元をそれぞれ図 1 および表 1 (CRL, 2002 a) に示す。pi-SAR は, 2 周波 (L バンド; 1.27 GHz, X バンド; 9.55 GHz) かつ垂直偏波 (V) および水平偏波 (H) の送信が交互に, また垂直・水平偏波の受信は同時に行える多偏波 SAR であり, 更に X バンドでは 2 台のアンテナを搭載することによる干渉計機能を有する。多偏波観測機能を具体的に示すと, H 送信・H 受信 (HH) および H 送信・V 受信 (HV) の組と V 送信・V 受信 (VV) および V 送信・H 受信 (VH) の組がそれぞれ同時に, HH/HV の組と VV/VH の組が交互に観測できることになる。また空間分解能は, 衛星搭載 SAR (10~20 m) に比べて極めて高く (X バンド; 1.5 m, L バンド; 3 m), 汽水域のような狭い水域では, 水面の微細構造を詳細に把握するのに有利である。

一方 pi-SAR は, 衛星搭載 SAR や, 風向・風速 (まとめて風ベクトルと呼ぶ) 測定用マイクロ波散乱計 (古濱他, 1986) の空間分解能 (数十 km) に比べて極

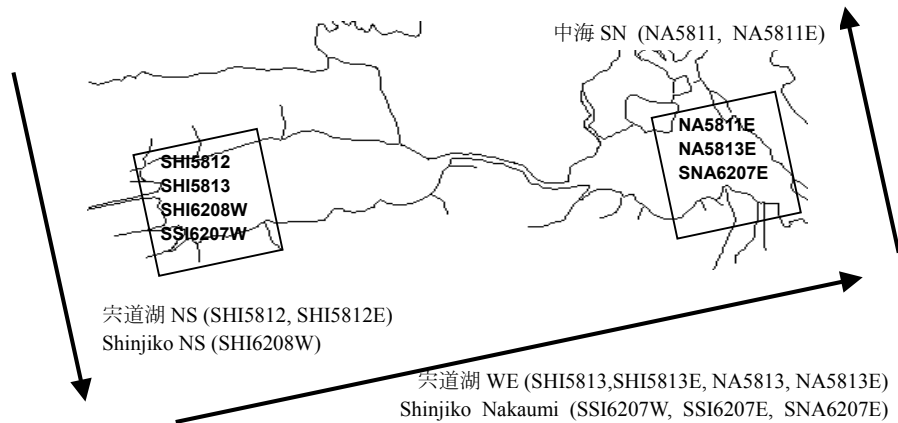


図2. 実験時のフライトコース(矢印)と解析に使用した映像領域の概略。フライトコースは実験1と実験2でほぼ同じ(ただし、実験2では中海SNは実施せず)。

**Fig. 2.** Outline of pi-SAR flight course (arrow) and imaged areas used in the present analysis.

Note that the Nakaumi SN flight was conducted only in Experiment 1 (Nov. 10, 2001).

めて狭い水域からの散乱波を受信するため、主に水面の「粗さ」によって決定される散乱係数の時空間変動特性が従来の広い水面からの後方散乱を受信するセンサと異なる可能性も否定できない。

一般に、SARのような斜め入射における後方散乱係数(Normalized Radar Cross-Section; NRCS)は、水面直上での乱流によると水との摩擦によって生じる風波によるブラッグ散乱によって決まると考えられる(古濱他, 1986)。水面直上に風の空間的乱れ(乱流)があると、空間的にランダムな圧力変動やせん断応力が水面高の微小な乱れを発生させる。水面高の乱れに対して風の水平成分が更に水面の乱れを促進させる役割を果たすことによって風波が発達する。直接励起される水面波は大気の流れのスケールに対応した波長を持つものであるが、風と波の相互作用の非線形性によって、他の水面波成分も次第に発達してくると考えられる(鳥羽, 1996)。上述のメカニズムから、(i)風波の発生・発達には、水の密度、摩擦力、粘性などの物理的特性が関係すること、(ii)風波エネルギーの2次元スペクトルは、風向との相対角に依存すること、(iii)水面流や油などによる水面汚染は風と水面の相互作用、すなわち風波の発生・発達度を変化させる要因となること、などの性質が理論的に、あるいは実験的に明らかにされている(増子, 1989; 鳥羽, 1996; 古津他, 1996)。航空機搭載SARが高空間分解能であることは、風波、水流、水面汚染などの2次元構造を詳細に観測できる可能性を持つことを意味している。

本論文では、上に述べたpi-SAR観測実験の概要

をまとめるとともに、本センサで得られたSAR映像やNRCSの周波数、偏波、入射角特性などを示し、これまでの海洋における観測結果や波浪スペクトルモデルなどと比較する。これらをもとに、高分解能SARによる汽水域観測の特徴や今後の研究課題について議論する。

## 2. 観測実験概要

### 2.1 pi-SAR 飛行および観測諸元

観測実験は、2001年11月10日(実験1)および2002年9月12日(実験2)の2回行われた。表2に、観測実験の概要をまとめて示す。また図2に、pi-SARの飛行コース概略と本論文で使用する映像(シーン)領域を示す。付録1には、今回の解析に使用したシーンの詳細をまとめる。飛行コース決定の基本的考え方は、映像およびNRCSの方位角特性を取得するために、同一領域を90度異なる方位角で2回観測することであるが、実験2では飛行時間の関係で中海の観測は1方向のみで行われた。また実験1ではpi-SARのアンテナビーム中心オフナディア角は入射角48度、実験2では52度となるように設定された。なお入射角とは、映像の各点における鉛直方向と電波入射方向のなす角と定義され、航空機観測の場合、SAR送信波のオフナディア角(航空機における鉛直方向と電波の発射方向のなす角)にほぼ等しい。アンテナビーム中心オフナディア角を除くと、実験1および実験2におけるSAR観測諸元は同一である。SARデータとして取得された領域のう

表 2. pi-SAR 同期観測実験概要.

Table 2. Outline of pi-SAR and simultaneous *in situ* observations.

2001 年 11 月 10 日 (実験 1)

パス諸元 SAR パス名	データ取得 時刻(JST)	データ取得航空機位置 Lon/Lat (deg:min)	飛行方向 (真方位)	アンテナ中心オフナ ディア角	航空機 高度
中海 SN	14:06 - 14:10	133:25.37 / 35:08.30 - 133:17.78 / 35:43.39	-11.4 deg	48 deg	12.16 km
宍道湖 NS	14:18 - 14:22	132:42.72 / 35:43.095 - 132:50.31 / 35:08.00	169.4 deg	48 deg	12.19 km
宍道湖 WE	14:34 - 14:40	132:32.39 / 35:15.17 - 133:32.61 / 35:23.83	77.7 deg	48 deg	12.20 km
現場観測項目	小型船舶 2 隻を使って、宍道湖・中海の水質（濁度、SS、クロロフィル a、透明度等）及び気象観測を行う。また湖岸で風ベクトルの測定を行う。				

2002 年 9 月 12 日 (実験 2)

パス諸元 SAR パス名	データ取得 時刻(JST)	データ取得航空機位置 Lon/Lat (deg:min)	飛行方向 (真方位)	アンテナ中心オフナ ディア角	航空機 高度
Shinjiko_ Nakaumi	12:46 - 12:52	132:32.39 / 35:15.17 - 133:32.61 / 35:23.83	79.6 deg	52 deg	12.71 km
Shinjiko_NS	13:06 - 13:09	132:42.72 / 35:43.095 - 132:49.56 / 35:11.51	169.8 deg	52 deg	12.78 km
現場観測項目	小型船舶 2 隻を使って、宍道湖・中海の水質（濁度、SS、クロロフィル a、透明度等）及び気象観測を行う。また湖岸で風ベクトルの測定を行う。				

ち、図 2 に示す 6 km×6 km のシーンを用いて、SAR 映像および NRCS ( $\sigma^0$ ) の諸特性を解析した。デジタル値 ( $DN$ ) から NRCS ( $\sigma_{dB}^0$ ;  $\sigma^0$  の dB 単位表現) への換算には次式を用いた。

$$\text{X-band HH: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN - 4.3 \quad (1 a)$$

$$\text{X-band VV: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN - 4.5 \quad (1 b)$$

$$\text{L-band HH: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN + 4.7 \quad (2 a)$$

$$\text{L-band VV: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN + 5.2 \quad (2 b)$$

上記は CRL で用いられている SAR 処理システム (NEC-SAR) による  $DN$  に対する校正式である (CRL, 2002 b)。なお参考のため NASDA で開発されたデータ処理システム (sigma-SAR) による  $DN$  から島田 (2002) による換算式

$$\text{L-band: } \sigma_{dB}^0 = 20 * \log 10 DN - 71 \quad (3)$$

で導出した  $\sigma^0$  との比較を行ったが、NEC-SAR/CRL

校正式を使用した方が  $\sigma^0$  が 2~3 dB 大きかった<sup>1</sup>。本論文では、議論の一貫性を保つため「NEC-SAR/CRL 校正式」による  $\sigma_{dB}^0$  を使用する。

## 2.2 現場観測

観測日には、2 隻の小型船舶を用い、水質および気象データを 18 地点 (実験 1) あるいは 8 地点 (2002 年) で取得した。また湖岸では風速計を用いて湖岸における風ベクトルを 9 地点 (実験 1)、7 地点 (実験 2) で測定した。更に、定常観測データとして、気象庁の出雲空港および美保空港出張所、国土交通省の宍道湖および中海湖心の観測タワーの測定値を使用した。これらのデータを付録 2 にまとめる。これらのデータより作成した現場風ベクトルマップを図 3 に示す。実験 1 においては、宍道湖、中海とも概ね北東の風 5~7 m/s、また実験 2 においては、概ね宍

<sup>1</sup> NEC-SAR からの  $DN$  と sigma-SAR からの  $DN$  は異なることに注意されたい。

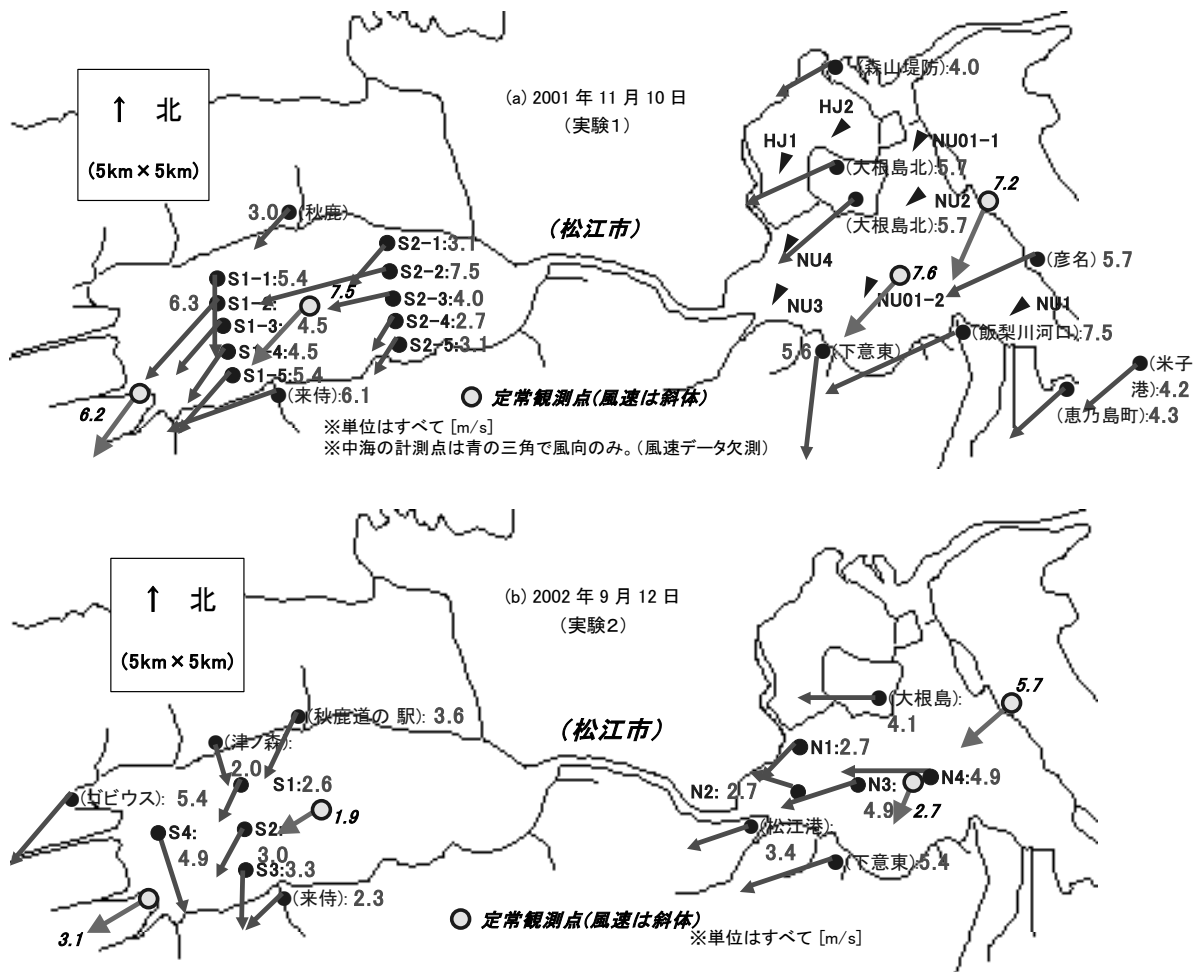


図3. 同期観測実験における現場データ取得地点と測定された風ベクトル概略.

Fig. 3. Location of *in situ* observation points and outline of wind vectors observed.

道湖では北北東の風、中海は東北東の風ともに約3~5 m/sであった。

### 3. SAR 映像の特徴

実験1および実験2における宍道湖西部(SHI 5812およびSHI 6208 W)の映像をそれぞれ図4(a), (b)に示す。これらの図から、Lバンド映像は湖面全体が一樣で、特徴的な“シグナチャ”<sup>2</sup>はほとんどみられないのに対し、Xバンド映像には湖面を雲が覆ったようなシグナチャがみられることがわかる。更に実験2では、Lバンド、Xバンドともに多くの“筋状シグナチャ”が存在していることが分かる。そのうちの2本は出雲空港滑走路を挟む五右衛門川と新建

川からの何らかの風波発達を抑える物質の流出とも考えられる。Xバンドの映像には実験1と同様“雲状シグナチャ”も表れている。

これらのシグナチャの原因は特定できていないが、湖面直上の乱流構造や湖面の汚染分布などを反映している可能性がある。

### 4. 後方散乱係数 (NRCS) の諸特性

#### 4.1 NRCS の一般的特性

斜め入射時(入射角 $\theta$ )の水面からのマイクロ波(波長 $\lambda$ )のNRCS( $\sigma^0$ )は、ブラッグ散乱条件:

$$\Lambda = \lambda / (2 \sin \theta) \quad (4)$$

を満たす波長( $\Lambda$ )の水面波の強度によって決定さ

<sup>2</sup> 本論文では“シグナチャ”とは、風に応答する短波長水面波によるとみられる比較的一様な映像濃淡とは異なる特異な濃淡パターンと定義する(市川, 2003)。

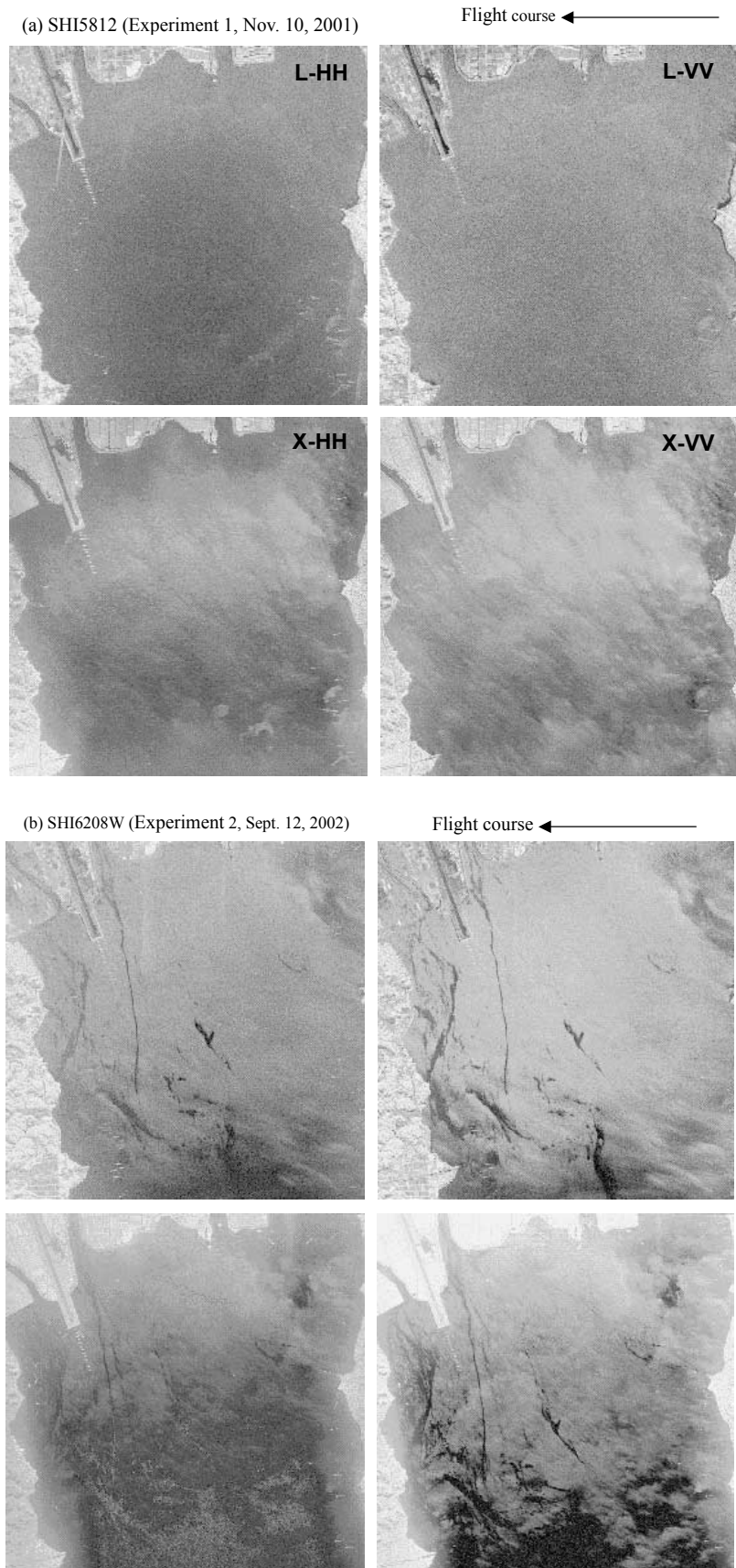


図4. 取得された pi-SAR 映像例. (a)実験1, (b)実験2, 共に宍道湖西部. (映像輝度は NRCS の対数に比例. 輝度値は任意.)

**Fig. 4.** Examples of pi-SAR images, Western part of Lake Shinji obtained in Experiment 1 (a) and Experiment 2 (b). (Note: Image brightness is proportional to the logarithm of NRCS, but the absolute brightness is arbitrary.)

れる (Ulaby et al., 1982). これは  $\lambda$  に比べて十分小さい波高と,  $\lambda$  と同程度のスケールの水平方向乱れ構造を持つ水面における電磁界の境界値問題を, 摂動法によって近似的に解き, 後方散乱電磁界を求めた結果である. その結果, 電磁波の波数を  $k(=2\pi/\lambda)$ , 水面波高の分散を  $s^2$  として

$$\sigma^0(\theta, \phi) = 8k^4 \cos^4\theta |\alpha_{pp}|^2 s^2 W(K, \phi) \quad (5)$$

で表せる (Ulaby et al., 1982). ここで,  $K$  は水面波の波数 ( $=2\pi/\Lambda$ ),  $\phi$  は風向からの相対方位角 (向かい風方向への電波入射時に  $\phi=0$ ),  $W(K, \phi)$  は水面波の規格化 2 次元波浪スペクトルである. また  $\alpha_{pp}$  ( $pp$  は偏波を表す指標) は, 水の複素比誘電率  $\epsilon_r(=\epsilon'_r - j\epsilon''_r)$  により次式で表せる.

$$\alpha_{HH} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta}} \quad (6a)$$

$$\alpha_{VV} = (\epsilon_r - 1) \frac{\sin^2\theta - \epsilon_r(1 + \sin^2\theta)}{(\epsilon_r \cos\theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta})^2} \quad (6b)$$

なお, 式 5 にある波浪スペクトル強度  $s^2 W(K, \phi)$  は, 式 4 の Bragg 散乱条件を満たす  $\Lambda$  に対応するものである. 式 5 および式 6 から以下のことがわかる.

(i)  $\sigma^0$  は波浪スペクトル強度に比例する. これが風速および方位角依存性を持てば, それを利用して  $\sigma^0$  から風ベクトル推定が可能となる.

(ii)  $\sigma^0$  の入射角特性は,  $\cos^4\theta$ ,  $|\alpha_{pp}|$  および Bragg 条件の  $\theta$  依存性によって決まる. 主に  $\cos^4\theta$  の効果により,  $\sigma^0$  は入射角とともに減少する.

(iii)  $\sigma^0$  の偏波依存性は  $|\alpha_{HH}|$  と  $|\alpha_{VV}|$  の違いによって決まる. 一般に VV 偏波の  $\sigma^0$  が大きく, その差は入射角と共に増加する. Xバンドでは入射角 45 度で 5 dB 以上の差になる.

(iv)  $\sigma^0$  の周波数依存性は,  $k$  (レーダ周波数の 4 乗に比例して増加) と Bragg 散乱に寄与する波浪スペクトル強度 (通常レーダ周波数の増加とともに減少) の積によってほぼ決まる. これらに比べて, 誘電率に関係する項  $|\alpha_{pp}|$  の周波数依存性は小さい.

Bragg 散乱に寄与する短波長の海洋波浪スペクトルについては, マイクロ波レーダによる海洋観測の研究が盛んになってから精力的に研究が行われ, これまでの散乱計観測などを元に, 海上風速・方位角をパラメータに取り込んだ実験式が提案されている (Fung and Lee, 1982).  $\sigma^0$  の計算では, 長波長 (数 m 以上) の重力波にマイクロ波 Bragg 散乱に寄与する数 cm 程度の短波長波が重畳しているとする “2 スケール” モデルを用いて, 長波長重力波による局所的な入射角変化を考慮した数値計算が行われ, 概ね

観測値と矛盾しない結果が得られている (Fung and Lee, 1982; Ulaby et al., 1986).

汽水域のような閉鎖水域でも, 水上風によって励起される短波長波が存在することは確かであり, それに応答するマイクロ波レーダによる風速・風向推定は基本的には可能であると考えられる. しかし吹送距離が短く, 岸の影響が無視できないと考えられる閉鎖水域では, 波浪スペクトルが海洋と異なることは十分予想できる.

#### 4.2 平均化によるフェージング雑音の軽減

ランダムに分布する物体からのレーダ受信信号強度は, 通常個々の散乱体からの電界の相互干渉のために大きな変動 (フェージング) を生じる (Ulaby et al., 1982). SAR 映像上ではいわゆる “ゴマ塩ノイズ” として現われる. これは  $\sigma^0$  測定における主なランダム誤差要因となる. この誤差を軽減するためには統計的に独立とみなせるデータを平均する必要がある. 通常 SAR では空間的な平均 (マルチルック処理) が行われる. 表 1 に示した空間分解能は既に 4 個のデータを空間的に平均した後の値である. ここでは  $\sigma^0$  を更に精度よく測定するため, アジマス方向 (航空機の進行方向に平行) に 10 ピクセル, レンジ方向 (航空機の進行方向に直交) に 10 ピクセルの平均を行っている. 表 1 の空間分解能を考慮すると約 300 個の独立サンプルを平均したことになる. Rayleigh フェージングを仮定すると, ランダム誤差の標準偏差は 0.3 dB 以下になると考えられる (岡本, 1999). 平均の結果, 空間分解能は X バンドで 13 m, L バンドで 26 m 程度になっている.

#### 4.3 pi-SAR で観測された NRCS 特性

実験 1 および 2 で観測された宍道湖西部 (図 4) の pi-SAR 映像のうち, 映像の中心付近からレンジ方向 (東西) に沿った線上のデータを用いて求めた  $\sigma^0$  の入射角特性を図 5 に示す. 但し図 5(a) の L バンド入射角特性と同図 (b) の X バンド入射角特性では, 南北方向に数 100 m ずれた位置のデータであり, 詳細な  $\sigma^0$  増減に関して (a) と (b) の比較はできないことに注意されたい.

他の領域や中海についても調べた結果, 以下のことが明らかになった.

(i) 図 5 にも示されるように,  $\sigma^0$  は大略入射角とともに減少する. しかし必ずしも一様に減少するのではなく, 入射角の増加に対して  $\sigma^0$  が緩やかな (1~2 km の空間スケール) 増減がみられる場合もある. これは湖面上における風速場の変化を反映しているものと思われる. しかし湖岸に近いところで X バンドと

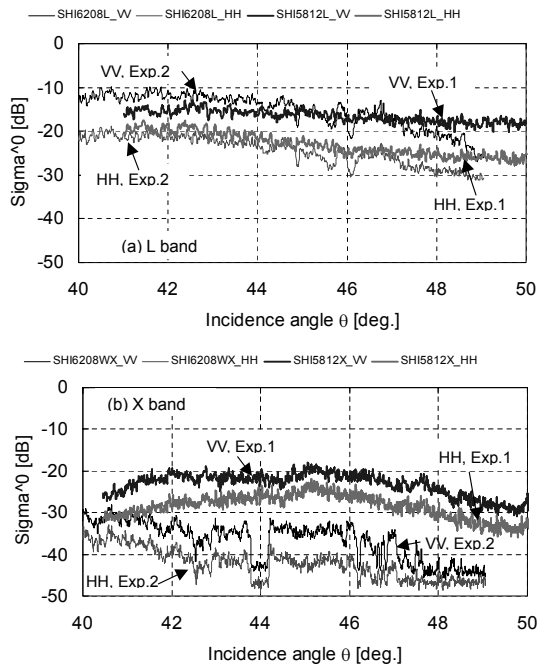


図 5. NRCS の入射角特性例。(宍道湖西側，実験 1 および 2 の比較)。

Fig. 5. Example of incidence angle dependence of NRCS. (Western part of Lake Shinji, the results from Experiments 1 and 2 are compared).

Lバンドの $\sigma^0$ 入射角特性が大きく異なっている(特に実験1)のは、後方散乱に寄与する水面波の水上風への応答速度の違いに加えて、湖岸に近い領域と湖心では一定風速場でも波浪スペクトル自体が異なるという可能性もあり、今後更に検討が必要である。

(ii) 実験2におけるXバンドの $\sigma^0$ 入射角特性(44度付近)には、図4(b)にみられる“筋状シグナチャ”によるステップ状の $\sigma^0$ 低下が存在する。

(iii) VV偏波とHH偏波を比較すると、VV偏波の $\sigma^0$ が5~10 dB程度HH偏波より大きい。これは5.1に示した $\sigma^0$ の偏波依存性と矛盾しない結果である。湖上風速への応答など、目的の物理量検出感度に偏波依存性が少なければ、感度の点ではVV偏波を用いた方が有利と言える。

(iv) 海洋における波浪スペクトルと汽水域の波浪スペクトルを比較するため、Fung and Lee (1982)らの提案した海洋波浪スペクトルモデルを用い、5.1に示した摂動法によって求めた $\sigma^0$ の値(以下“海洋モデル計算値”と呼ぶ)を、今回の観測結果と比較した結果を図6に示す。図中、海洋モデル計算値は $\sigma^0$ の方位角依存性を平均したものであり、Xバンドについては観測値(ほぼ向かい風; Up-wind)よりも2~3 dB低い値が妥当と考えられることを考慮され

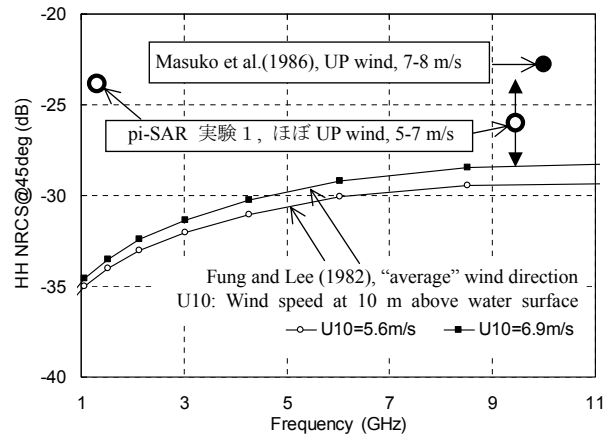


図 6. 入射角 45 度における NRCS の周波数特性：観測値と海洋モデル値の比較。

Fig. 6. Frequency dependence of NRCS values at 45-degree incidence: Comparison between observations and sea spectrum model results.

たい。この図から、Xバンドについては海洋モデル計算値、今回の観測結果および Masuko et al. (1986) による海洋上の観測結果は相互に矛盾しない結果であることがわかる。これに対しLバンドでは、pi-SAR から $\sigma^0$ を求める際の校正精度や $\sigma^0$ の方位角依存性を考慮しても、今回の観測値の方が6~8 dB程度大きい結果となった。市川(2003)によるLバンド衛星搭載 SARにより求められた宍道湖・中海の $\sigma^0$ も今回の観測結果と同程度である。これらの結果は十数 cm の波長を持つ水面波あるいはそれ以上の長波長領域において、汽水域の波浪スペクトルが海洋とは異なることを示唆している。

(v) 実験1と実験2における風速は、前者が5~7 m/s、後者が3~5 m/sであった。この差による $\sigma^0$ の変化は、湖面上の場所により異なり、更に詳細解析が必要であるが、図5に示すように、Xバンドでは全般に実験1の方が高く、場所によっては10 dB以上もの差が見出された。一方Lバンドにおいては、実験1と実験2で $\sigma^0$ に大きな差は認められなかった。これはXバンドにおけるNRCSが風速変化に対して感度がよく、Lバンドでは悪いことを示唆しており、海洋モデル計算結果や汽水域の衛星搭載 SAR 観測結果(市川, 2003)と矛盾しない。しかし風速の違いによる $\sigma^0$ 値の変化は、Masuko et al. (1986)の結果に比べ、2倍以上であり、今回の観測時における風速場の時空間変動や、低風速下における風波の生成について更に詳細な検討が必要と思われる。

## 5. む す び

高分解能航空機搭載 SAR による汽水域環境観測の可能性を検討するため、2001 年および 2002 年に pi-SAR による観測実験を実施した。本論文では、観測実験の内容や取得データの詳細をまとめるとともに、SAR 映像や NRCS 特性に関する初期解析結果を示した。

SAR 映像の定性的解析に加え、斜め入射の場合のマイクロ波帯での NRCS が風波からの Bragg 散乱によることを考慮して、今回は主な研究テーマとして NRCS と風ベクトルの関係を調べることにした。そのため現場観測も風ベクトルを中心として実施した。

2 回の実験で取得された pi-SAR 映像からは、周波数による“シグナチャ”の違いが明確に現われた。特に“雲状シグナチャ”はこれまでの衛星搭載 SAR では検出されなかった特徴である。その原因究明や関連物理現象解析への応用は今後の興味ある課題と言える。また“筋状シグナチャ”は、衛星搭載 SAR でも現われていた現象であるが、今回の実験ではこのシグナチャについて、周波数および偏波依存性が得られているので、今後詳細解析をすすめることで、シグナチャの成因などとの関連がつけられる可能性もある。

NRCS の入射角および偏波依存性については、これまでの海洋モデル計算値、海洋におけるレーダ観測値、汽水域における衛星搭載 SAR 観測値と概ね矛盾しない結果が得られた。しかし、XバンドとLバンドの NRCS 比較およびその空間分布の解析から、波浪スペクトルが汽水域の「場所」に依存する可能性、汽水域と海洋における十数 cm 程度の波長域でのスペクトル強度の違いなどが示唆された。今後、NRCS と現場観測風ベクトルの関連づけにおいて、風ベクトル観測値の時空間変動を考慮した比較が必要と思われる。更に、実験時の現場観測で得られている多くの水質データ（作野他、2002）と SAR 映像や筋状シグナチャとの関連についても今後検討が必要である。

## 謝 辞

本研究の推進に関し、ご教示頂いている国立環境研究所松永恒雄主任研究官、広島大学陸田秀実助手、通信総合研究所(CRL)pi-SAR グループ各位、宇宙開発事業団島田政信主任開発部員に深謝する。観

測実験実施にあたり、松江土建(株)環境部各位に多大な協力を頂いた。実験実施にはまた島根大学汽水域研究センター各位並びに広島大学工学部および島根大学総合理工学部学生諸氏の協力を得た。

pi-SAR 観測およびデータ処理は、通信総合研究所および宇宙開発事業団により行われ、幾何補正・ラジオメトリック補正済みデータが島根大学に提供されたものである。また気象および水質データは、国土交通省出雲工事事務所並びに気象庁出雲空港および美保空港出張所から提供を受けたものである。

## 参 考 文 献

- CRL(2002 a) <http://www2.crl.go.jp/dk/c215/PI-SAR/J/>.  
 CRL(2002 b) <http://www2.crl.go.jp/dk/c215/PI-SAR/J/CD/docs/readme-j.htm>.  
 Fung, A. K. and Lee, K. M. (1982) A semi-empirical sea-spectrum model for scattering coefficient estimation, *IEEE J. Oceanic Engineering*, OE-7, 166-176.  
 古濱洋治, 岡本謙一, 増子治信(1986)人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング, 電子通信学会, コロナ社, 東京, 275 p.  
 市川啓祐, 古津年章, 下舞豊志, 高安克巳, 作野裕司, 松永恒雄(2002)衛星搭載合成開口レーダによる汽水域の環境観測：湖上風速分布推定可能性の予備検討, *Laguna*, 9, 63-75.  
 Ichikawa, K., Kozu, T., Shimomai, T., Sakuno, Y., Matsunaga, T., and Takayasu, K (2002) Feasibility of spaceborne SAR monitoring of coastal lagoon environments, *Proc., 23rd International Symp. on Space Technology and Science*, Matsue, May 26–June 2.  
 市川啓祐(2003)衛星搭載合成開口レーダを用いた汽水域の環境観測, 島根大学総合理工学研究科電子制御システム工学専攻修士論文, 63 p.  
 古津年章, 浦塚清峰, 中村健治, 尾嶋武之(1996)改良型航空機搭載映像レーダによる海洋油汚染観測, *日本リモートセンシング学会誌*, 16, 23-35.  
 Kozu, T., Ichikawa, K., Shimomai, T., Nakayama, D., Takayasu, K., Sakuno, Y., and Matsunaga, T. (2002) Spaceborne SAR application to high resolution wind field mapping over coastal lagoons, *PISAR 2002 Workshop*, Aug.29-30, Comm. Res. Lab., Tokyo.  
 増子治信(1989)油膜/スリックによる海洋表面波の減衰とそのマイクロ波散乱特性, *通信総合研究所季報*, 35, 249-283.



- Matsunaga, T., Sakuno, Y., Nakayama, D., Takayasu, K., Kunii, H., Nakamura, M., Yamamuro, M., and Rokugawa, S. (1999) Water quality mapping using airborne and satellite multispectral sensors—Lake Shinji and Lake Nakaumi, Japan, *Proc., Fourth International Airborne Remote Sensing Conf. and Exhibition/21 st Canadian Symp. on Remote Sens.*, 21-24, Ottawa, Canada.
- 岡本謙一(編)(1999)地球環境計測, ウェーブサミット講座, オーム社, 324 p.
- 作野裕司(2000)衛星リモートセンシングによる宍道湖のクロロフィル a 濃度及び一次生産量のモニタリングに関する研究, 博士(工)論文, 東京大学, 190 p.
- 作野裕司, 本井裕志, 松永恒雄, 古津年章, 高安克巳, 下舞豊志, 中山大介(2002)衛星光学センサを用いた汽水域のクロロフィル濃度推定の可能性—宍道湖・中海における 2001 年の現場調査結果—, *Laguna*, 9, 55-61.
- 作野裕司, 吉田武史, 山本正智, 松永恒雄, 中山大介, 下舞豊志, 高安克巳(2002)多時期 Landsat/TM データによる汽水域の鉛直クロロフィル a 総量の推定, 日本リモートセンシング学会, 第 33 回学術講演会論文集, 11 月.
- 島田政信(2002)私信, 宇宙開発事業団.
- 鳥羽良明(編)(1996)大気・海洋の相互作用, 東京大学出版会, 336 p.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1982) *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. II*, Artech House, Norwood MA, 1064 p.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. (1986) *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Vol. III*, Artech House, Norwood MA, 2162 p.
- 山本正智, 吉田武史, 作野裕司, 松永恒雄(2002) ASTER データを用いた宍道湖・中海の水温・濁度推定(2000~2002)年, 日本リモートセンシング学会, 第 33 回学術講演会論文集, 11 月.

付録1. 取得された X バンド pi-SAR 映像データ (CRL 提供データの“info ファイル”抜粋. L バンドデータ諸元も, IMAGE\_SIZE が 2400 となる以外はほぼ同じ.)

2001 年 11 月 10 日 中海 SN

NA 5811	NA 5811 E
SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:07:00	SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:06:51
SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:07:38	SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:07:29
LATE_NEAR_LAT = +035:29:59.635	LATE_NEAR_LAT = +035:29:49.451
LATE_NEAR_LONG = +133:10:58.221	LATE_NEAR_LONG = +133:14:23.542
LATE_FAR_LAT = +035:29:21.244	LATE_FAR_LAT = +035:29:11.521
LATE_FAR_LONG = +133:07:04.816	LATE_FAR_LONG = +133:10:30.068
EARLY_NEAR_LAT = +035:26:48.756	EARLY_NEAR_LAT = +035:26:38.479
EARLY_NEAR_LONG = +133:11:45.184	EARLY_NEAR_LONG = +133:15:09.932
EARLY_FAR_LAT = +035:26:10.365	EARLY_FAR_LAT = +035:26:00.549
EARLY_FAR_LONG = +133:07:51.779	EARLY_FAR_LONG = +133:11:16.458
GROUND_RG_NEAR = 1.4235430 e+04	GROUND_RG_NEAR = 9.2293400 e+03
GROUND_RG_CENTER = 1.7234805 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.2228715 e+04
GROUND_RG_FAR = 2.0234180 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.5228090 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 4.9485766 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 3.7176320 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 5.4785561 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 4.5138712 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.8986684 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.1369627 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

2001 年 11 月 10 日 宍道湖 NS

SHI 5812	SHI 5812 E
SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:20:22	SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:20:16
SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:20:57	SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:20:52
LATE_NEAR_LAT = +035:24:06.226	LATE_NEAR_LAT = +035:25:01.404
LATE_NEAR_LONG = +132:53:05.318	LATE_NEAR_LONG = +132:56:14.988
LATE_FAR_LAT = +035:24:42.472	LATE_FAR_LAT = +035:25:37.212
LATE_FAR_LONG = +132:56:58.971	LATE_FAR_LONG = +133:00:08.771
EARLY_NEAR_LAT = +035:27:17.528	EARLY_NEAR_LAT = +035:28:12.788
EARLY_NEAR_LONG = +132:52:21.029	EARLY_NEAR_LONG = +132:55:31.229
EARLY_FAR_LAT = +035:27:53.774	EARLY_FAR_LAT = +035:28:48.596
EARLY_FAR_LONG = +132:56:14.682	EARLY_FAR_LONG = +132:59:25.012
GROUND_RG_NEAR = 1.0083989 e+04	GROUND_RG_NEAR = 1.5107395 e+04
GROUND_RG_CENTER = 1.3083364 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.8106770 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.6082739 e+04	GROUND_RG_FAR = 2.1106145 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 3.9603097 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 5.1101424 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.7028888 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 5.6051487 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.2843776 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.9992116 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

2001 年 11 月 10 日 宍道湖 WE (宍道湖側)

SHI 5813	SHI 5813 E
SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:36:09	SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:36:29
SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:36:37	SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:36:57
LATE_NEAR_LAT = +035:24:41.423	LATE_NEAR_LAT = +035:25:35.751
LATE_NEAR_LONG = +132:56:57.902	LATE_NEAR_LONG = +133:00:07.342
LATE_FAR_LAT = +035:27:53.022	LATE_FAR_LAT = +035:28:47.551
LATE_FAR_LONG = +132:56:15.890	LATE_FAR_LONG = +132:59:26.719
EARLY_NEAR_LAT = +035:24:06.978	EARLY_NEAR_LAT = +035:25:02.449
EARLY_NEAR_LONG = +132:53:04.110	EARLY_NEAR_LONG = +132:56:13.281
EARLY_FAR_LAT = +035:27:18.577	EARLY_FAR_LAT = +035:28:14.249
EARLY_FAR_LONG = +132:52:22.098	EARLY_FAR_LONG = +132:55:32.658
GROUND_RG_NEAR = 1.0981778 e+04	GROUND_RG_NEAR = 1.1813889 e+04
GROUND_RG_CENTER = 1.3981153 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.4813264 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.6980528 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.7812639 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 4.1975599 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 4.4057126 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.8875776 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 5.0504276 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.4288424 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.5572225 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

## 2001年11月10日 宍道湖 WE (中海側)

NA 5813	NA 5813 E
SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:37:39	SCENE_START_TIME = 2001/11/10/05:38:00
SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:38:07	SCENE_END_TIME = 2001/11/10/05:38:28
LATE_NEAR_LAT = +035:26:46.525	LATE_NEAR_LAT = +035:26:37.033
LATE_NEAR_LONG = +133:11:43.048	LATE_NEAR_LONG = +133:15:08.491
LATE_FAR_LAT = +035:29:58.091	LATE_FAR_LAT = +035:29:48.442
LATE_FAR_LONG = +133:11:00.808	LATE_FAR_LONG = +133:14:25.198
EARLY_NEAR_LAT = +035:26:11.909	EARLY_NEAR_LAT = +035:26:01.558
EARLY_NEAR_LONG = +133:07:49.192	EARLY_NEAR_LONG = +133:11:14.802
EARLY_FAR_LAT = +035:29:23.475	EARLY_FAR_LAT = +035:29:12.967
EARLY_FAR_LONG = +133:07:06.952	EARLY_FAR_LONG = +133:10:31.509
GROUND_RG_NEAR = 1.0917423 e+04	GROUND_RG_NEAR = 9.6823402 e+03
GROUND_RG_CENTER = 1.3916798 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.2681715 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.6916173 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.5681090 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 4.1813818 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 3.8420651 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.8750363 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 4.6092624 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.4190600 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.2100827 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

## 2002年9月12日 Shinjiko\_Nakaumi (宍道湖側)

SSI 6207 W	SSI 6207 E
SCENE_START_TIME = 2002/09/12/03:47:30	SCENE_START_TIME = 2002/09/12/03:47:51
SCENE_END_TIME = 2002/09/12/03:47:59	SCENE_END_TIME = 2002/09/12/03:48:20
LATE_NEAR_LAT = +035:24:41.848	LATE_NEAR_LAT = +035:25:36.808
LATE_NEAR_LONG = +132:56:58.257	LATE_NEAR_LONG = +133:00:08.236
LATE_FAR_LAT = +035:27:53.316	LATE_FAR_LAT = +035:28:48.288
LATE_FAR_LONG = +132:56:15.368	LATE_FAR_LONG = +132:59:25.427
EARLY_NEAR_LAT = +035:24:06.684	EARLY_NEAR_LAT = +035:25:01.712
EARLY_NEAR_LONG = +132:53:04.632	EARLY_NEAR_LONG = +132:56:14.573
EARLY_FAR_LAT = +035:27:18.152	EARLY_FAR_LAT = +035:28:13.192
EARLY_FAR_LONG = +132:52:21.743	EARLY_FAR_LONG = +132:55:31.764
GROUND_RG_NEAR = 1.1338032 e+04	GROUND_RG_NEAR = 1.2138929 e+04
GROUND_RG_CENTER = 1.4337407 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.5138304 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.7336782 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.8137679 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 4.1749490 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 4.3678780 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.8457990 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 4.9978816 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.3768134 e+01	INC_ANGLE_FAR = 5.4974685 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

## 2002年9月12日 Shinjiko\_Nakaumi (中海側) および Shinjiko\_NS

SNA 6207 E	SHI 6208 W
SCENE_START_TIME = 2002/09/12/03:49:26	SCENE_START_TIME = 2002/09/12/04:08:06
SCENE_END_TIME = 2002/09/12/03:49:55	SCENE_END_TIME = 2002/09/12/04:08:36
LATE_NEAR_LAT = +035:26:37.457	LATE_NEAR_LAT = +035:24:06.933
LATE_NEAR_LONG = +133:15:08.843	LATE_NEAR_LONG = +132:53:04.069
LATE_FAR_LAT = +035:29:48.733	LATE_FAR_LAT = +035:24:41.445
LATE_FAR_LONG = +133:14:24.679	LATE_FAR_LONG = +132:56:58.099
EARLY_NEAR_LAT = +035:26:01.267	EARLY_NEAR_LAT = +035:27:18.555
EARLY_NEAR_LONG = +133:11:15.321	EARLY_NEAR_LONG = +132:52:21.901
EARLY_FAR_LAT = +035:29:12.543	EARLY_FAR_LAT = +035:27:53.067
EARLY_FAR_LONG = +133:10:31.157	EARLY_FAR_LONG = +132:56:15.931
GROUND_RG_NEAR = 9.8165677 e+03	GROUND_RG_NEAR = 8.6626552 e+03
GROUND_RG_CENTER = 1.2815943 e+04	GROUND_RG_CENTER = 1.1662030 e+04
GROUND_RG_FAR = 1.5815318 e+04	GROUND_RG_FAR = 1.4661405 e+04
INC_ANGLE_NEAR = 3.7671457 e+01	INC_ANGLE_NEAR = 3.4266311 e+01
INC_ANGLE_CENTER = 4.5228244 e+01	INC_ANGLE_CENTER = 4.2526567 e+01
INC_ANGLE_FAR = 5.1203525 e+01	INC_ANGLE_FAR = 4.9066698 e+01
SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_AZ = 6.0000000 e+03
SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03	SCENE_SIZE_GR = 6.0000000 e+03
IMAGE_SIZE_AZ = 4800	IMAGE_SIZE_AZ = 4800
IMAGE_SIZE_GR = 4800	IMAGE_SIZE_GR = 4800

付録2. 観測時の現場気象データ.

(1) 気象庁および国土交通省湖心タワーデータ (測定位置, 高度については市川他 (2002) 参照).

2001年11月10日

		(a) 美保空港			(b) 出雲空港		
時 間	hour:min	13:00	14:00	15:00	13:00	14:00	15:00
風 向	deg.	30	30	40	40	—	—
風 速	m/s	6.7	7.2	6.2	6.2	—	—
気 温	℃	19	17	18	15	12	14
気 圧	hPa	1019	1019	1019	1020	—	—
		(c) 中海湖心			(d) 宍道湖湖心		
時 間	hour:min		14:00	15:00		14:00	15:00
風 向	deg.		45	67.5		45	45
風 速	m/s		7.6	6.9		7.5	7.5

2002年9月12日

		(a) 美保空港			(b) 出雲空港		
時 間	hour:min	13:00	14:00	15:00	13:00	14:00	15:00
風 向	deg.	60	60	50	ENE	N	N
風 速	m/s	5.7	6.2	6.2	3.1	4.6	5.1
気 温	℃	28	28	28	28	28	27
気 圧	hPa	1012	1012	1012	1012.2	1012.0	1012.2
		(c) 中海湖心			(d) 宍道湖湖心		
時 間	hour:min	12:00	13:00	14:00	12:00	13:00	14:00
風 向	deg.	—	22.5	67.5	67.5	—	—
風 速	m/s	3.5	2.7	5.6	1.9	2.5	6.4

(2) 船舶・湖岸データ (2001年11月10日については市川他 (2002) を参照).

2002年9月12日

(a) 宍道湖

測 定 点	s 1	s 2	s 3	s 4
測定時間 [hour:min.]	13:00	13:20	13:36	13:56
舳先の向き [deg.]	25	10	30	22.5
風向 (コンピュータ読み値) [deg.]	5	12.5	325	325
実際の風向 [16 方位]	NNE	NNE	N	NNW
風 速 [m/s]	2.6	3	3.3	4.9
気 温 [℃]	(inside)			
	(outside)	29		29
湿 度 [%]	(inside)			
	(outside)	53		46
気 圧 [hPa]	1015.1		1015.6	1014.5
東 経 [deg:min:sec]	132:55:16	132:55:17	132:55:15	132:53:30
北 緯 [deg:min:sec]	35:26:60	35:26:04	35:25:09	35:26:09
湖面からの高さ [m]	1.9			

(b) 中海

測 定 点	n 1	n 2	n 3	n 4
測定時間 [hour:min]	12:50	13:09	13:27	13:48
舳先の向き [deg.]	-20	70	60	80
風向 (コンピュータ読み値) [16 方位]	ENE	NE	N	NNE
実際の風向 [16 方位]	NE	ESE	ENE	E
風 速 [m/s]	3.1	2.7	4.9	4.9
気 温 [℃]	(inside)	38	42	34
	(outside)	29	30	29
湿 度 [%]	(inside)	51	43	57
	(outside)	57	53	58
気 圧 [hPa]	1014.9	1014.2	1014.5	1014.2
東 経 [deg:min:sec]	133:08:53	133:09:37	133:10:29	133:11:33
北 緯 [deg:min:sec]	35:27:29	35:27:46	35:27:31	35:27:48
湖面からの高さ [m]	1.7			

## 湖岸風速・風向（風速の単位は m/sec）

		(c) ゴビウス付近		(d) 津の森				(e) 秋鹿道の駅		(f) 来侍	
時刻	風向	風速	風向	風速	時刻	風向	風速	風向	風速		
13:15	NNE	3.6	NNW	1.9	13:15	NNW	1.4	NE	2.1		
13:17	NNE	5.2	NNW	2.0	13:17	N	1.0	NE	3.0		
13:19	NNE	5.1	—	0	13:19	NNE	3.1	NE	3.0		
13:21	NNE	5.6	NNW	1.5	13:21	NNE	3.8	NE	3.2		
13:23	NE	5	N	2.5	13:23	NW	3.1	NE	2.8		
13:25	NE	4.3	NNW	2.5	13:25	NE	2.6	ENE	3.4		
13:27	NNE	6	N	1.5	13:27	N	3.9	ENE	2.5		
13:29	NNE	5.7	N	1.9	13:29	NNE	3.5	NE	2.8		
13:31	NE	5.6	N	1.9	13:31	NNE	3.0	NNE	0.8		
13:33	NE	4.9	N	2.5	13:33	NW	1.3	NNE	0.2		
13:35	NE	4.5	N	1.5	13:35	NW	1.1	NE	2.0		
13:37	NE	4.5	N	1.0	13:37	NNW	1.9	NE	2.6		
13:39	NNE	5.1	N	2.5	13:39	WNW	2.0	NE	0.9		
13:41	NNE	6.4	NW	2.5	13:41	N	2.3	NE	0.5		
13:43	NNE	5.4	N	3.3	13:43	N	2.9	NE	2.3		
13:45	NE	5.1	NW	2.0	13:45	NW	2.7	NE	3.1		
13:47	NNE	5.2	NW	1.8	13:47	N	3.1	ENE	2.3		
13:49	NE	5.8	—	0	13:49	NNW	2.0	ENE	1.6		
13:51	NE	5.4	NW	3.2	13:51	NW	3.1	NNE	2.8		
		(高さ 3 m)						(高さ 3.5 m)			
		(g) 大根島南		(h) 松江港				(i) 下意東			
時刻	風向	風速	風向	風速	時刻	風向	風速				
13:15	SE	4.5	E	3.4	13:15	NE	3.6				
13:17	E	3.8	ENE	3.4	13:17	ENE	5.2				
13:19	ENE	4.1	ENE	3.1	13:19	ENE	5.1				
13:21	ENE	4.1	ENE	4.2	13:21	NE	5.6				
13:23	NE	3.4	E	3.4	13:23	ENE	5.0				
13:25	ESE	4.5	ENE	4.1	13:25	NE	4.3				
13:27	E	4.1	ENE	5	13:27	ENE	6.0				
13:29	E	5.2	ENE	4.6	13:29	ENE	5.7				
13:31	ESE	4.8	E	4.5	13:31	ENE	5.6				
13:33	ESE	5.5	ENE	4.8	13:33	ENE	4.9				
13:35	ENE	4.6	E	5.3	13:35	ENE	4.5				
13:37	E	4.8	ENE	5.5	13:37	E	4.5				
13:39	E	5.3	E	4.9	13:39	ENE	5.1				
13:41	E	5	ENE	5.2	13:41	ENE	6.4				
13:43	ENE	4.2	ENE	4.8	13:43	E	5.4				
13:45	NE	4.9	ENE	5.1	13:45	ENE	5.1				
13:47	NE	4.3	E	5	13:47	ENE	5.2				
13:49	ENE	4.6	ENE	5.2	13:49	ENE	5.8				
13:51	NE	5.3	ENE	5.6	13:51	ENE	5.4				
		(高さ 2 m)		(高さ 2 m)				(高さ 3 m)			

## 貧酸素水塊解消のための中海水質シミュレーション

相崎守弘<sup>1</sup>

### Simulation experiments for renovation of hypolimnetic anoxic condition in Lake Nakaumi

Morihiro Aizaki<sup>1</sup>

**Abstract:** The effects of renovation measures for improving the hypolimnetic anoxic condition in Lake Nakaumi were simulated using the two existing models. The first simulation experiment was carried out with the following premises: 1) a 200-m cut in the Moriyama and Omisaki dikes to the bottom, 2) construction of a tide dike in the place of Nakaura tide gate and 3) filling up of the deep holes created by dredging in the eastern side of the lake to the bottom level. The simulation data were used in 1992. The second simulation experiment was conducted by changing only the second of the above three premises, i.e., instead of construction of a tide dike, the existing Nakaura tide gate was used, while the remaining two premises were kept similar as in the first case. The simulation data were used in 1998. The third simulation was conducted with another change in the second premise, i.e., the Nakaura tide gate was opened for navigation. All the simulation results showed effective improvements in the hypolimnetic condition in the western part of the lake where the anoxic condition disappeared throughout the year. However, the anoxic condition still persisted in the eastern part of the lake in these simulation studies.

**Key words:** Lake Nakaumi, hypolimnetic anoxic condition, simulation analysis, effect of cut the dikes

#### はじめに

2002年12月、中海・宍道湖の淡水化事業が中止になり、工事が開始されて以来34年の年月を経て国営中海土地改良事業が全て終了した。その間、淡水化をめぐる議論や本庄工区干陸の是非をめぐる議論など様々な論議が戦わされ、大きな混乱が続いた。淡水化事業や本庄工区の干陸化の議論では中海や宍道湖の水質変化が大きな争点となった。本庄工区の干陸化再開の判断にあたっては、島根県が行った水質シミュレーションにより、「干陸してもしなくて

も、また堤防を開削してもしなくても中海や宍道湖の水質に変化がない」という結果が、工事再開要請の1つの根拠となった(島根大学汽水域研究センター, 1995)。このシミュレーション結果については多くの疑義が出され、環境庁の指示により追加調査やモデルの改良が行われたが、シミュレーション結果に変更はなかった。

堤防を開削してもしなくても中海水質に変化がないという結果は、中海の研究に携わっている研究者や漁業関係者の感覚とはかなり異なるものであった。そこで、その原因について考えた結果、下記に

<sup>1</sup> 島根大学生物資源科学部 Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan  
E-mail: aizaki@life.shimane-u.ac.jp

示すように、干拓事業によって中浦水道を拡幅・浚渫し、また境水道および中海東側も深く掘られ結果、強い密度流が中海に流れ込む構造になったためと推測された。このような構造である以上、単に堤防を開削しても中海の水質に変化が現れないことは理解できたが、現在夏季を中心に中海底層水の大半が貧酸素状態になった原因も、このような地形改変に起因すると考えられた。このような状況を変えるためには、堤防開削に併せて、中浦水道を通る強い密度流を止める必要があることが推測された(相崎, 2000)。密度流を止める方法として、既存の中浦水門を活用する方法と、潜堤などを設けて浅くする方法が考えられた。しかしこれを実証するためには、シミュレーションモデルによる検討か模型実験による検証など限られた手段しかない。

1997年に設置された農水省、本庄工区水産調査専門委員会では漁場環境変化予測として、堤防開削による潮通しの効果について検討を行った。その中で、委員からの要望として中浦水門を操作する条件でのシミュレーションが付け加えられたが、このケースについては最後まで参考として取り扱われた(中国四国農政局, 1999)。

2000年8月に国レベルでの政治的判断により本庄工区の干陸事業については無駄な公共事業の代表として中止されることとなった。それに併せて、堤防を開削し流れを従前のように戻すよう強い要望が出されたが、島根県はこれまでの水質シミュレーション結果をもとに堤防開削について効果が期待できないとし、積極的対応を示さなかった。これに対し、民間の任意団体である環境イニシアティブから対応策の検討を求められ、下記に示すようなシミュレーションを提案した。また、その後、財団法人「宍道湖・中海汽水湖研究所」(以下汽水湖研究所と略す)からもシミュレーションにより水質改善効果を明らかにしたいとの相談を受け、上記モデルとは異なったモデルで並行的に検証した方が科学的信憑性が高まることから、すでに開発が進んでいた生態系モデル(Nakata et al. 2000)を用いて検討することを提案した。

中海では干拓工事に伴う地形改変のため、強い密度流が下層を下流側から上流側へ逆流している。多くの酸素を含む日本海の海水であるが、逆流過程で消費され、中海の大半は半年以上貧酸素状態におかれている。そのため下層水や湖底では生物が生息できず、死の湖となっている。干拓事業開始以前の中海の漁業生産は主にサルボーなどの貝類や海藻類な

ど底生生物に依存するものであった。中海の大半が貧酸素化することによって失われた損失は計り知れないものである。干拓事業が中止になった現在、中海下層の貧酸素状態を解消することが何よりも望まれる。ここでは、なぜ堤防を開削しても水質変化が起らなかったのか、また、環境イニシアティブや汽水湖研究所が行ったシミュレーションはどのような内容で結果はどうであったか、について報告する。

## 堤防を開削しても水質変化が起きないのはなぜか？

中海では干拓工事の進行に伴い、大幅な地形改変を行った。すなわち、水交換の主要ルートであった本庄水域を大海崎堤防及び森山堤防で閉鎖し、境水道、中浦水道を拡幅し、さらに水深10mまで浚渫した。さらに中海側の弓浜半島地先を水深7m、深いところでは14~15mまで掘り下げた(図1)。その結果、海水と湖水の水交換は全て中浦水道を通して行

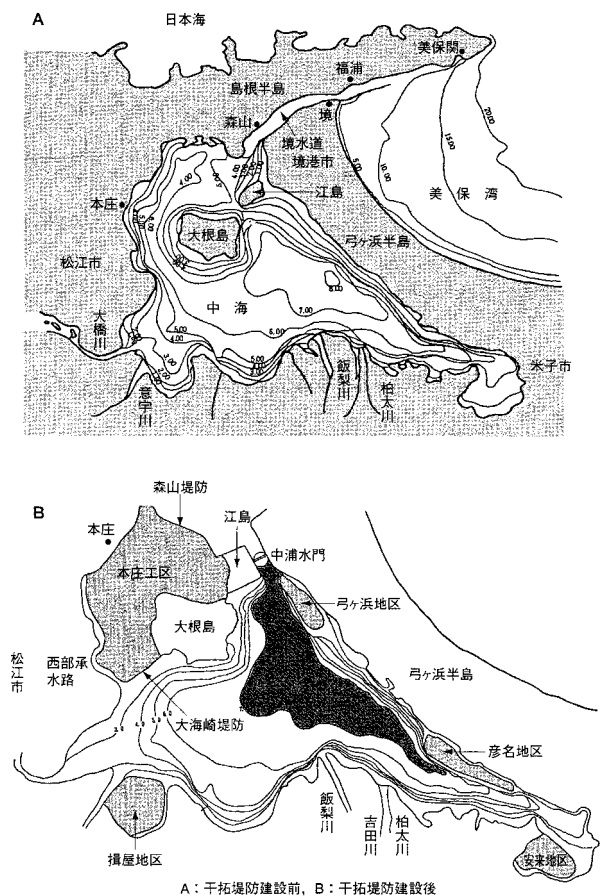


図1. 干拓堤防建設前後での中海の地形変化。  
Fig. 1. Map showing the changes in the bathymetry of Lake Nakami by the reclamation works. (A) before the reclamation and (B) after the reclamation.



表 1. 中潮時の現状及び対策後の各断面における予測通過流量の比較. 環境イニシアティブによるシミュレーション.

**Table 1.** Simulation results in the exchange of water amount in the case of middle tide at the Sakai channel, Nakaura tide gate, Moriyama dike and Omisaki dike by Kankyo Inisiatibu.

[単位: m<sup>3</sup>/s]

ケース	境水道	中浦水門	森山堤防	西部承水路+大海崎堤防
対策あり	1,113	502	556	372
対策なし	898	861	0	142 <sup>注)</sup>

注)：西部承水路のみ

われることとなり、現在の状況となった。海水は境水道、中海、大橋川と塩水クサビとなって淡水の下に潜り込み上流向きに逆流している(奥田, 1997)。このため、鉛直方向で見ると上層は下流向き、下層は上流向きの2層流が形成されている。この界面に塩分濃度が急激に変化する塩分躍層が形成されている。このような強い密度流の流れが出来た原因としては境水道、中浦水道および中海側の浚渫による水深の増加の効果が大きい。すなわち、流入海水の大部分は水深5m以下の下層を通過して中海に入っている。そのため、森山堤防や大海崎堤防を底まで、すなわち5mまで開削しても海水の流れは変化せず、中海の水質に大きな変化が見られない結果となっている。

すなわち、堤防を開削してもしなくても中海の水質が変わらないのは、干拓工事により、境水道、中浦水道及び中海を深く浚渫したため、それを干拓前のように浅くすることができれば、堤防開削の効果が現れると考えられた。

## 中海の貧酸素水塊解消のための中海水質シミュレーション, その1

### モデルでの検討条件

環境イニシアティブでは堤防の開削による貧酸素水塊の解消効果を検証するため、水質シミュレーションを行った(環境イニシアティブ, 2001)。ここでは、その結果をそれ以前に農水省の本庄工区水産調査専門委員会(以下、委員会と略す)(中国四国農政局, 1999)が行ったシミュレーション結果と比較しながら紹介する。ここで用いたモデルやデータは全て農水省の委員会で用いたものと同じである。すなわち、水平的には1/3 kmメッシュに、鉛直的には8層(0-2 m, 2-3 m, 3-3.5 m, 3.5-4 m, 4-4.5 m, 4.5

-5 m, 5-6 m, 6-湖底)に分割した各ボックスについて流動と水質変化について計算を行った。このシミュレーションでは現状(対策無し)と水質改善を目的として以下のような条件を与えた「対策有り」との条件で計算を行い、両者を比較することで対策効果を検討した。

1) 中浦水門の位置に潜堤(-3 m)を設ける。

中浦水道を通過する海水の流入を抑えるために中浦水門の位置に潜堤を設ける条件とした。潜堤は現在の塩分躍層が3~4 m付近にあるところから-3 mの水深とした。

2) 大海崎堤防を濡すじ部分を200 m, 湖底(-5 m)まで開削する。

3) 森山堤防を濡すじ部分200 m開削し、本庄側に勾配を付ける形で10 mまで掘り下げる。

境水道が10 mまで掘り下げられているところから本庄側も10 mまで掘り下げスムーズな潮の流れとなるようにした。また、大海崎堤防は当初水深3 mまでの開削で検討を行ったが、中海が淡水化してきたため、湖底(-5 m)まで開削する条件とした。

4) 中海の浚渫窪地などの深く掘られた地形を埋め戻し、中浦水門から米子湾にかけて-6 m程度の水深とする。

この水域に違法に掘り下げられた浚渫窪地が点在し、貧酸素化がそこから始まっている傾向が見られるところから、埋め戻す条件とした。

また、予算の制約により予測項目は塩分(塩素イオン濃度)、溶存酸素および開削面と中浦水門地点での交換流量とした。また同様な理由で対象とした時期は夏季(6-8月)のみとし夏季の平均水質で表した。対象とした年は農水省の専門委員会と同じ1992年とした。また予測範囲は宍道湖・中海及び美保湾の一部水域とした。

### 結果

表 2. 農水省本庄工区水産調査専門委員会で行った水質予測の予測ケース.

Table 2. Simulation case by the committee of Agriculture Ministry.

ケース	潮通し工の規模		西部承水路 堤防の条件	中浦水門の 操作	増殖場造成 の条件
	森山堤防	大海崎堤防			
1	現況地形	現況地形	現況地形	無	無
2	150 m (海底まで)	現況地形	現況地形		現況の水深 5 m 区域を 4 m まで浅 場造成
2-2	150 m (-4 m 潜堤)				
3	150 m (海底まで)	150 m (-3 m 潜堤)	現況地形		
3-2	150 m (-4 m 潜堤)				
4	150 m (海底まで)	150 m (海底まで)	現況地形		
参考 5	200 m (海底まで)	200 m (海底まで)	現況地形	上潮時全閉 下潮時全閉	

## 1) 通過断面流量

表 1 に対策有りと現状での中潮時における境水道、中浦水門、森山堤防及び大海崎堤防を通過する流量を比較して示す。現状に比べて境水道を通過する流量は約 24% 増加している。また、中浦水門を通過する流量は 58% に低下しており、森山堤防や大海崎堤防の開削部分を通過する流量とほぼ同じになっている。すなわち、堤防開削により通過流量が増大し、水質改善や、洪水対策などで改善効果が期待できると予測された。

## 2) 塩分濃度

図 2 に塩分の現状及び対策後の縦断面分布図を示す。現状の塩分濃度を見ると中海では水深 4 m 付近に強い塩分躍層が形成され、表層では 10–18 psu、下層では 20–28 psu の塩分濃度となっている。対策有りのケースでは強い塩分躍層は解消され、表層で 8–14 psu、下層で 14–16 psu の塩分濃度となっている。米子湾にかけても同様な塩分分布となっており、対策をとることによって強い塩分躍層が解消される。一方本庄工区においては対策をとることにより海水が流入しやすくなり強い塩分躍層が形成される。しかし、表層は中海表層との水交換により 14 psu 程度と予測され、下層も現在の中海と同程度の 18–28 psu と予測されている。

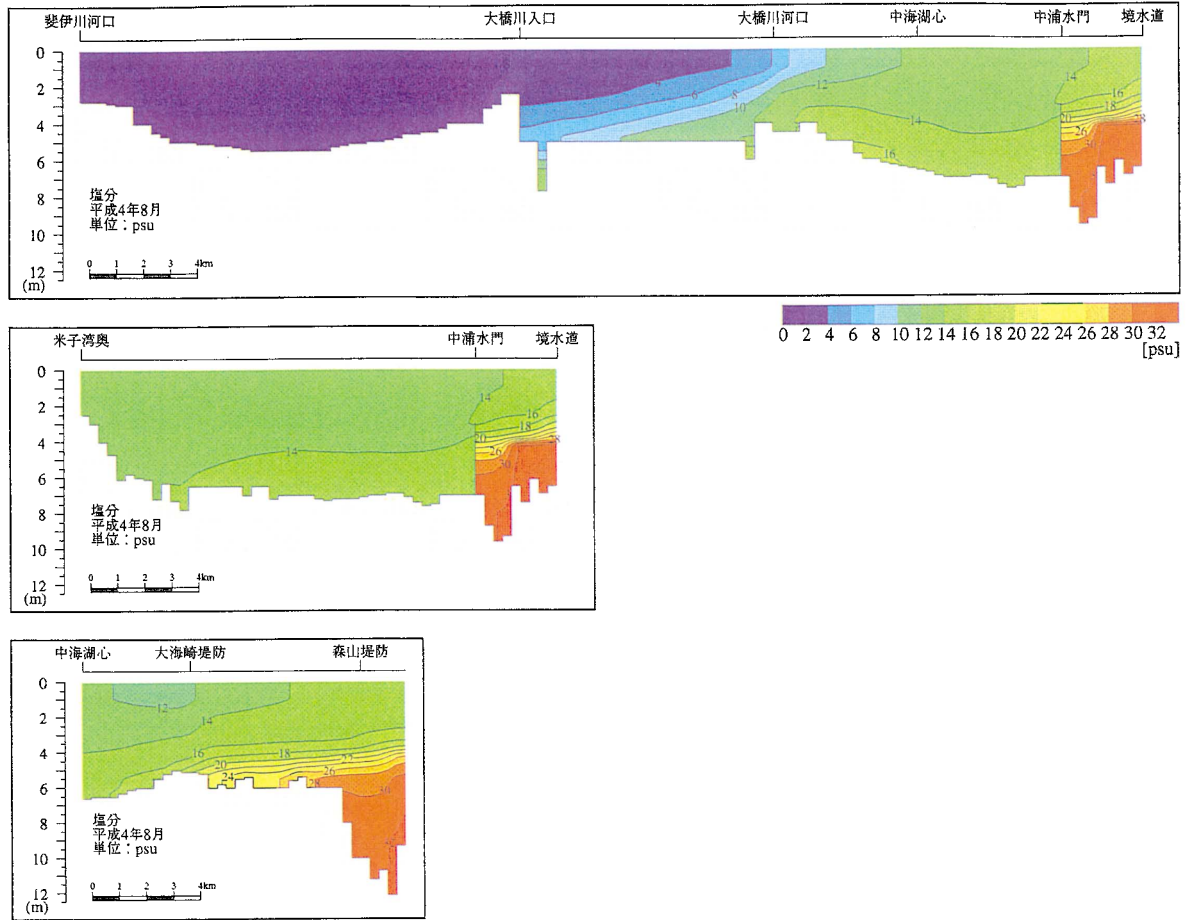
中海表層の塩分濃度が対策をとった後も現状と大差ないところから宍道湖における塩分濃度は対策をとった後も現状と変わらず、現状程度の汽水環境が維持される。

委員会で行った 7 つの予測ケースを表 2 に示す。また各ケースでの中海最下層での塩分濃度分布を図 3 に示す。どのケースでも塩分濃度は中浦水門から

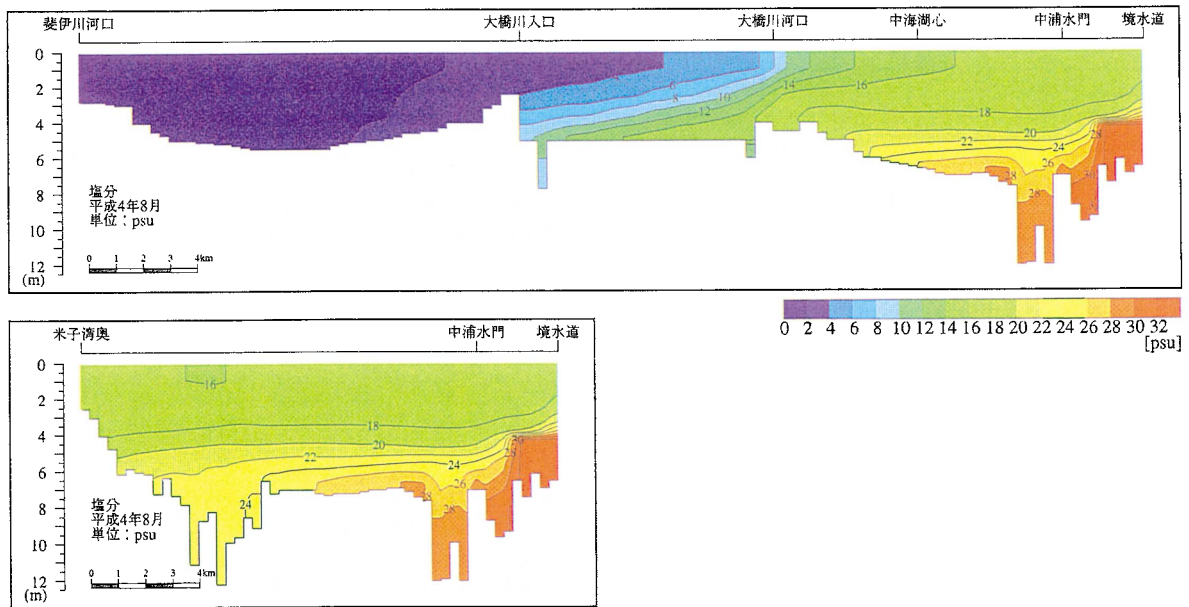
大橋川に向けて濃度勾配が見られており、参考ケース 5 を除き現状とほぼ同じ分布を示している。参考ケース 5 では上げ潮時に水門を閉め切り、下げ潮時には水門を開放するという操作を行っているが、このような操作を行っても塩分濃度分布の傾向は現状と同じである。しかし、最高濃度は現状の 28 psu から 25 psu へ低下しており、等濃度線の間隔が広がっている。このため表層と底層の塩分格差は 7 psu 程度まで減少すると予測された。参考ケース 5 を含め委員会予測ケースと今回の「対策有り」ケースを比較すると大きな違いが見られる。委員会予測ケースでは海水が中浦水道を通過して中海に流入しているのに対し、「対策有り」ケースでは本庄工区を通過して流入していることが分かる。

## 3) 溶存酸素濃度

図 4 に溶存酸素の縦断面分布図を示す。現状の DO 濃度分布を見ると中浦水門から湖心部手前までは美保湾から流入する海水に含まれる酸素により好気的狀態が維持されているが、湖心から大橋川河口、米子湾にかけては 4 m 以深では貧酸素から無酸素状態になっている。宍道湖でも最低層は貧酸素状態が予測されている。これに対して「対策有り」では湖心から大橋川にかけて貧酸素状態が解消し、良好な環境になると予測されている。しかし中浦水門から湖心にかけては 6 m 以深で貧酸素状態が残ると予測されている。宍道湖の溶存酸素濃度は現状とほとんど変化が見られない。本庄工区では強い塩分躍層が形成されるが、水の交換が早いいため、貧酸素状態とはならず、下層まで良好な酸素状態が維持される。米子湾では 4 m 以深に貧酸素水塊が形成される。「対策」をとることにより水の交換が良くなる中



縦断面分布（塩分、対策あり）



縦断面分布（塩分、対策なし）

図2. 中海における現状(下段)と対策後(上段)の塩分の予測鉛直縦断面分布図。環境イニシアティブによるシミュレーション。

Fig. 2. Simulation results of vertical distribution of salinity in Lake Nakaumi in August in 1992 by the Kankyo Inisiatiibu. Upper; after the measure of renovation, lower; Current state.

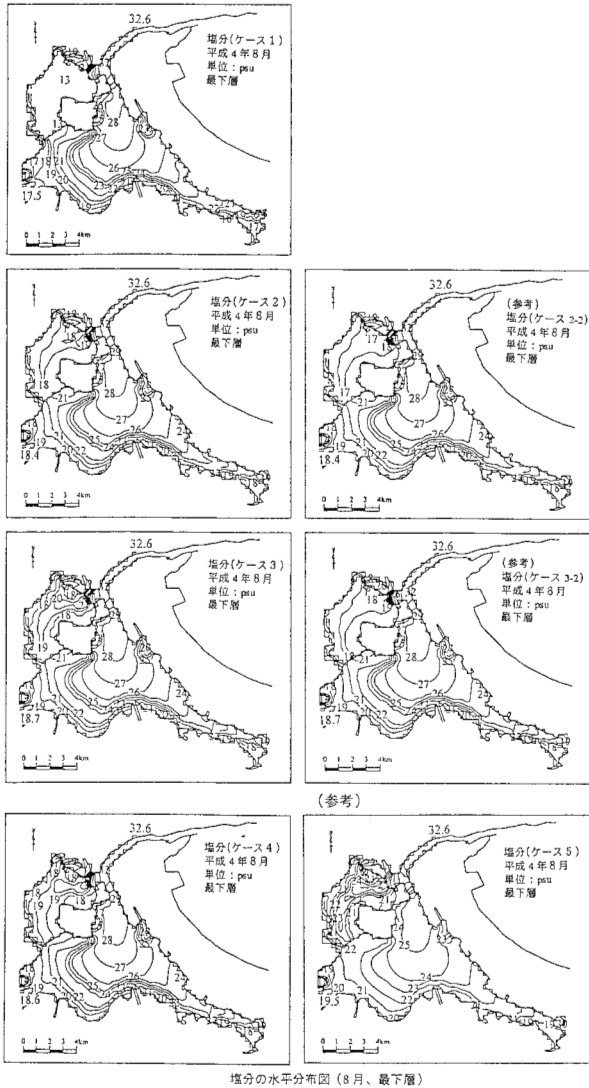


図3. 中海最下層の8月の予測塩分濃度水平分布図。農水省委員会予測。

**Fig. 3.** Simulation results of horizontal distribution of salinity in hypolimnetic layer in Lake Nakaumi in August in 1992 by the committee of Agriculture Ministry.

海の西側や本庄工区では酸素環境が大幅に改善するが、東側や米子湾ではあまり変化しない結果となった。

委員会予測ケース結果を図5に示す。溶存酸素分布は参考ケース5を除き現状とほとんど変化なく、塩水くさび上に遡上する海水の挙動が、単に森山堤防や大海崎堤防を開削しても変わらないことを示している。参考ケース5では溶存酸素が1 mg/l以下の水域はほとんどなくなり、大半が2 mg/l以上の濃度まで改善されている。このケースでも塩分分布は現状と類似しているところから、海水流入は中浦水門を通して行われているものと考えられるが、上げ潮時に水門を閉じているところから強い塩水くさび状

とはならず、中海西側では上下混合が促進される可能性が示されている。

以上の結果、島根県が開発し、農水省の委員会で解析に使われた同じシミュレーションモデルを用い、流入負荷や気象などの外部条件を同一とした場合においても、中浦水道を浅くすることや水門操作を行うことにより、堤防開削効果が現れることが明らかになった。この結果は、本庄工区の干陸化にあたり島根県が示した、「堤防を開削してもしなくても中海の水質に変化がない」という結果とは明らかに異なっており、島根県はこれまでの論拠を零に戻し、中海環境再生にあたって再検討を行うべきであろう。

## 中海の貧酸素水塊解消のための中海水質シミュレーション、その2

### モデルでの検討条件

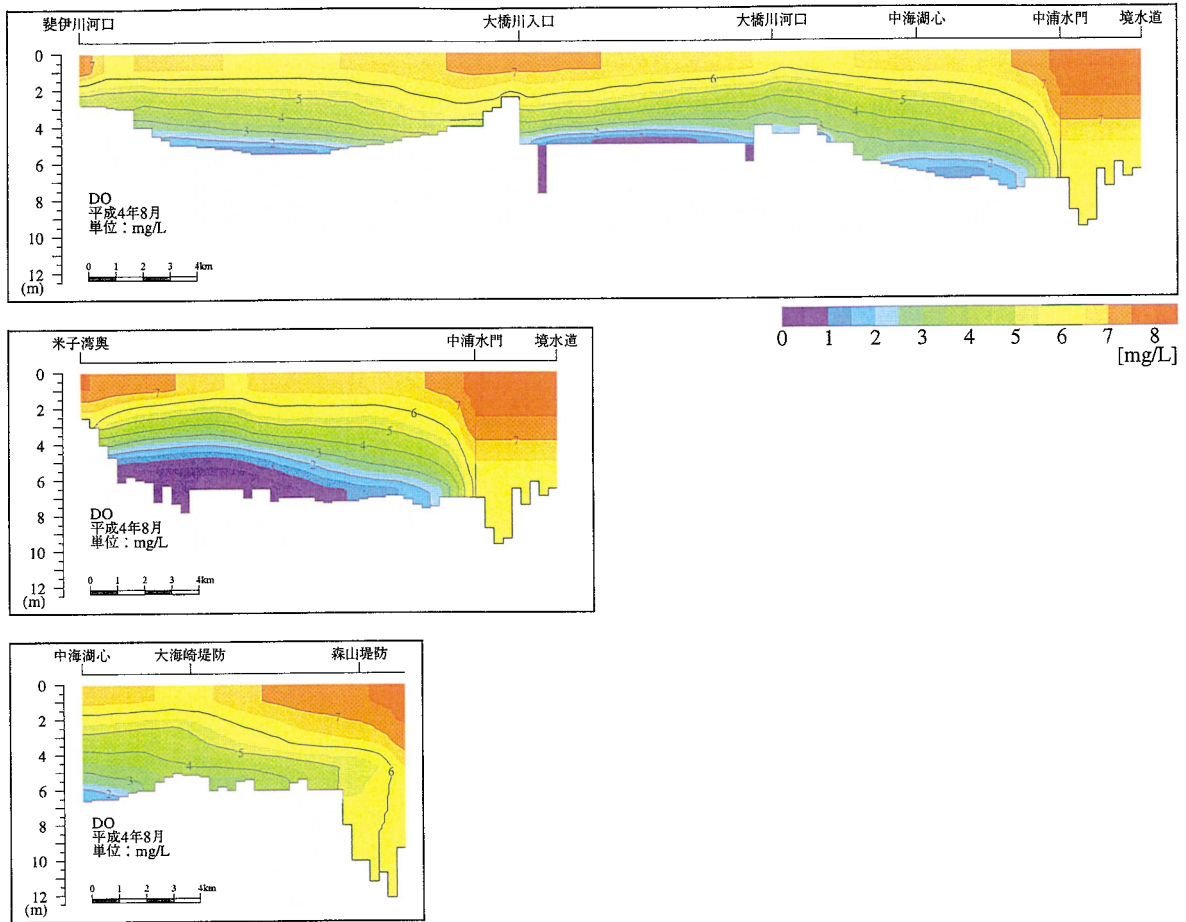
「汽水湖研究所」では中海の環境復元を図る目的で、中海の貧酸素水塊解消を目指した水質シミュレーションを行った(宍道湖・中海汽水湖研究所, 2002)。ここで用いたシミュレーションモデルは中海・宍道湖の生態系モデルとして新たに開発されたモデルである(Nakata et al. 2000)。対象流域を水平的には250 m~500 mの格子、鉛直方向には1.5 m間隔で6層に区切り、各ボックスについて計算を行っている。特色としては宍道湖に優占するヤマトシジミや中海のホトトギス貝などの二枚貝の水質へ与える影響を組み込んでいる点にある。また対象年を1998年としており、1998年の流入負荷、気象条件などをもとに解析を行っている。

ここでは、島根県が使っているモデルと異なったモデルを用い、異なった年を対象として、堤防開削の効果が現れるかどうかについて検証を行った。

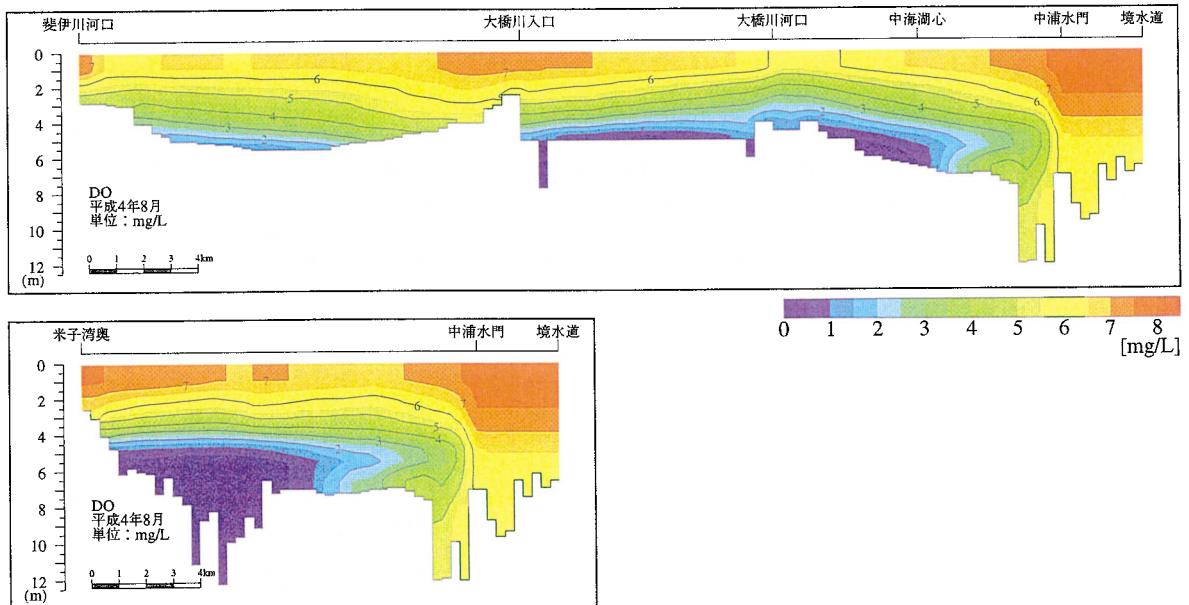
### シミュレーションの再現性の検証

まず初めに、水温・塩分について、島根大学の宍道湖・中海水質月報を利用し流動シミュレーションの再現性を検証した。結果を図6に示す。観測値と予測値に概ね1:1の関係が見られ、相関係数も0.95以上と高い。次に水質シミュレーション結果を図7に示す。

溶存酸素を除き、実測値と予測値で1:1の関係が見られておらず、クロロフィルaや硝酸態窒素濃度では相関係数も低い。溶存酸素に関しては1:1の関係があり、相関係数も0.76とまずまずの値である。したがってこのシミュレーションでは、流動に



縦断面分布 (DO、対策あり)



縦断面分布 (DO、対策なし)

図4. 中海における現状(下段)と対策後(上段)の溶存酸素濃度の予測鉛直縦断面分布図。環境イニシアチブによるシミュレーション。

Fig. 4. Simulation results of vertical distribution of dissolved oxygen in Lake Nakaumi in August in 1992 by the Kankyo Inisiatibu. Upper; after the measure of renovation, B; Current state.

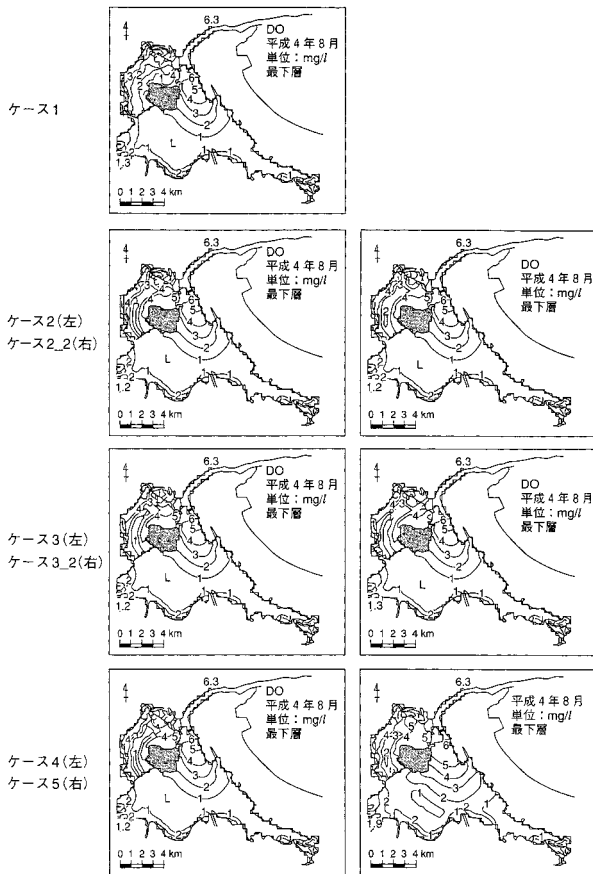


図5. 中海最下層の8月の予測溶存酸素濃度水平分布図. 農水省委員会予測.

Fig. 5. Simulation results of horizontal distribution of dissolved oxygen in hypolimnetic layer in Lake Nakaumi in August in 1992 by the committee of Agriculture Ministry.

関する部分については良く再現されていると判断され、水質については溶存酸素についてはかなり良く再現されるものの、他の水質、特に硝酸態窒素やクロロフィルaについてはさらに検討が必要であることが示された。

したがって、以後対策効果に関しては、塩分と溶存酸素についてのみ議論する。

環境修復条件

環境修復効果を予測するため以下のような対策案についてシミュレーションを行った。

1) ケース1

環境イニシアティブで行った検討条件と同じ検討条件とした。すなわち、

- ①中浦水門の位置に-3 mの潜堤を設置
- ②本庄工区堤防の開削

森山堤と大海崎堤防を濤すじ部分 200 m を底まで開削。このとき森山堤防は本庄側に勾配を付ける形で 10 m まで開削、大海崎堤防は-5.5 m まで開削。

- ③中海東部浚渫後窪地を-6~8 m まで埋め戻す。

2) ケース2

中海西部に浅場造成を施す、

3) ケース3

ケース1とケース2を複合したケースをケース3とした。

対策効果の予測

底層における流速ベクトルを見るとケース1及び

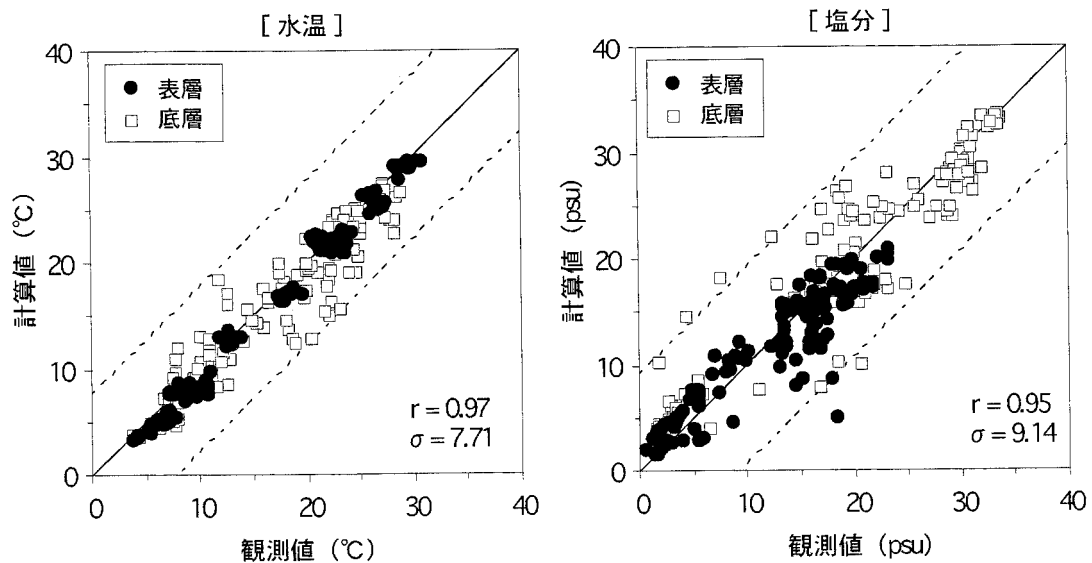


図6. 中海・宍道湖における塩分及び水温の予測値と実測値の関係. 汽水湖研究所によるシミュレーション.

Fig. 6. Relationships of estimated and observed values of water temperature and salinity in 1998 in Lakes Nakaumi and Shinji by the simulation of the Institute of Brackish Lakes.

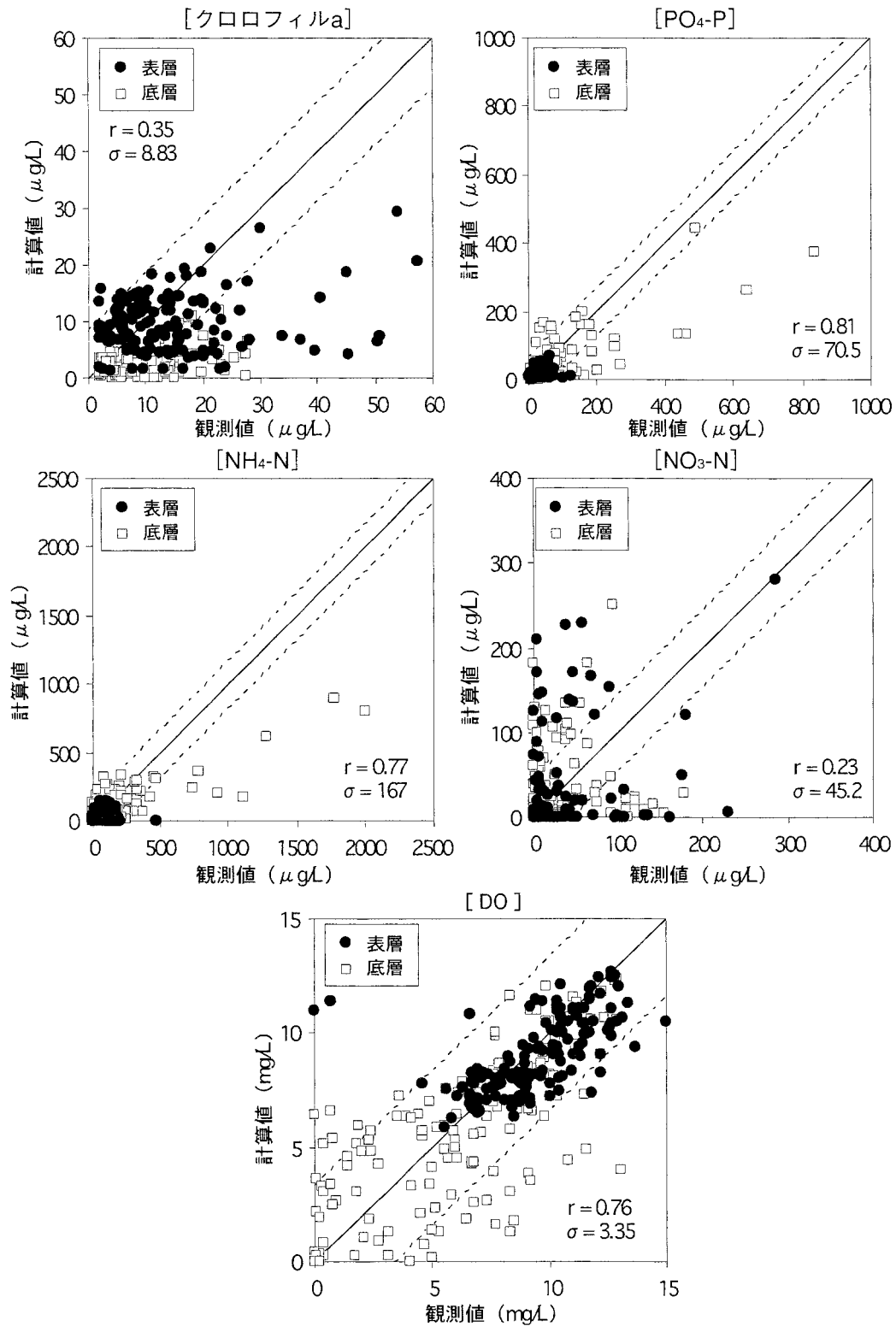


図7. 中海・宍道湖におけるクロロフィル a, PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N および溶存酸素(DO)予測値と実測値の関係. 汽水湖研究所によるシミュレーション.

**Fig. 7.** Relationships of estimated and observed values of Chlorophyll-a, PO<sub>4</sub>-P, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N and Dissolved Oxygen in 1998 in Lakes Nakaumi and Shinji by the simulation of the Institute of Brackish Lakes.



3においては現況の中浦水道を通過して中海に流入する状況から、森山堤防の開削部を通過して本庄工区へ入り大海崎堤防の開削部分を通過して中海に流入する状況へと変化した。中海に流入後は大橋川河口方向と米子湾方向へ分流する流れとなった。ケース2においては浅場造成区を除いて現況と変化無かった。

塩分濃度は季節により異なるが、ケース1及び3において底層で中海湖心から東部にかけて約10 psu程度減少し、ほぼ全底層が20 psu程度の塩分濃度となった。表層の塩分濃度は現況との変化が少ないことから、塩分躍層が弱まる結果となった。本庄工区においては底層で10-15 psu程度の塩分上昇が予測された。ケース2においては浅場造成した部分で底層の濃度低下が見られたが、その地点以外は現況と同じであった。

溶存酸素濃度の予測結果を図8に示す。これは中海及び本庄工区の定点での濃度変化を予測したものである。中海西部のSt.3ではケース1及び3において年間を通して2~3 mg/l程度の濃度上昇が見られており、年間を通して貧酸素水塊の形成は見られなくなった。湖心のSt.4においては無酸素になる時期が遅れ、特に秋季で著しい改善効果が見られた。米子湾のSt.12では中海湖心とほぼ同様な傾向を示した。中浦水門に近いSt.13では春期から夏季にかけて現況より幾分濃度低下が見られたが、秋季には改善した。本庄工区内のst.25では春期から夏季にかけては濃度上昇が、秋季には濃度低下が見られたが、年間を通して貧酸素状態にはならないと予測された。浅場造成をしたケース2では対象とした地点での状況は現在とほぼ同じと予測されたが、浅場造成した水域では顕著な改善効果が見られた。水平分布を見ると、堤防開削することにより中海西部と浅場造成区では溶存酸素濃度の上昇が見られ、貧酸素水塊の解消に著しい効果が見られる結果となった。浅場造成については造成した水域については著しい改善効果が見られたが、中海全体へおよぼす効果は少なかった。

## 中海の貧酸素水塊解消のための中海水質シミュレーション、その3

### 検討条件

「汽水湖研究所」では上記のシミュレーションに引き続き、潜堤の代わりに既存の中浦水門を操作する条件で、シミュレーションを行った(宍道湖・中海汽水湖研究所, 2003)。また、中浦水門は大型の船舶

が通行できる構造になっているところから、航路部を常時開放する条件で検討を行った。中浦水門の構造を図9に示す(中国四国農政局, 1984)。中浦水門は上部ゲートと下部ゲートが別々に作動する構造になっている。また航路部分は中央部に幅20 mの航路があり、その両脇にサブゲートが設けられており、全体で70 mの幅がある。検討ケースとしては潜堤の代わりに下段ゲートを閉めきりにしたケースと、水門操作を行い上げ潮時には水門を全面閉鎖、下げ潮時には全面開放の条件で検討した。検討の初めとして航路部70 mを常時開放の条件で計算を行ったところ、底層部の流況は現況とほとんど変化せず、主として中浦水道を介して水の交換が行われ、その結果塩分濃度分布や溶存酸素に改善傾向が見られなかった。そこで以後は中央部の20 mのみを常時開放する条件で検討を行った。すなわち検討条件としては上記ケース3の設定条件の内、潜堤部分を以下のケースに変更して計算を行った。

ケース4：航路中央部20 mを常時開放とし、それ以外の中浦水門については下段ゲートを常時閉めきりとする。

ケース5：航路中央部20 mを常時開放とし、それ以外の水門については、上げ潮時には全面閉鎖、下げ潮時には全面開放とする。

### 結果

溶存酸素の改善効果について図10に示す。ケース4では航路部分20 mを常時開放した条件においても、ケース3の-3 m位置に潜堤を設けたケースとほぼ同様な改善効果が見られた。すなわち、中海西部水域で顕著な溶存酸素濃度の上昇が予測され、また浅場造成区でも濃度上昇が予測された。ケース5においては浅場造成区においては同様な効果が予測されたが、中海全体では西部水域の改善効果はケース4より少なかった。しかし、ケース4では改善効果が主に西部水域に限られていたのに対し、ケース5では全域にわたって1~2 mg/l程度の改善効果が予測された。

## ま と め

これらのシミュレーション結果から、「堤防を開削してもしなくても中海や宍道湖の水質に変化がない」という1996年出された結論は、干拓事業により境水道、中浦水道及び中海東部が深く掘られた地形改変による影響であることが明確になった。このような地形改変に伴う強い密度流の流入が中海底層の

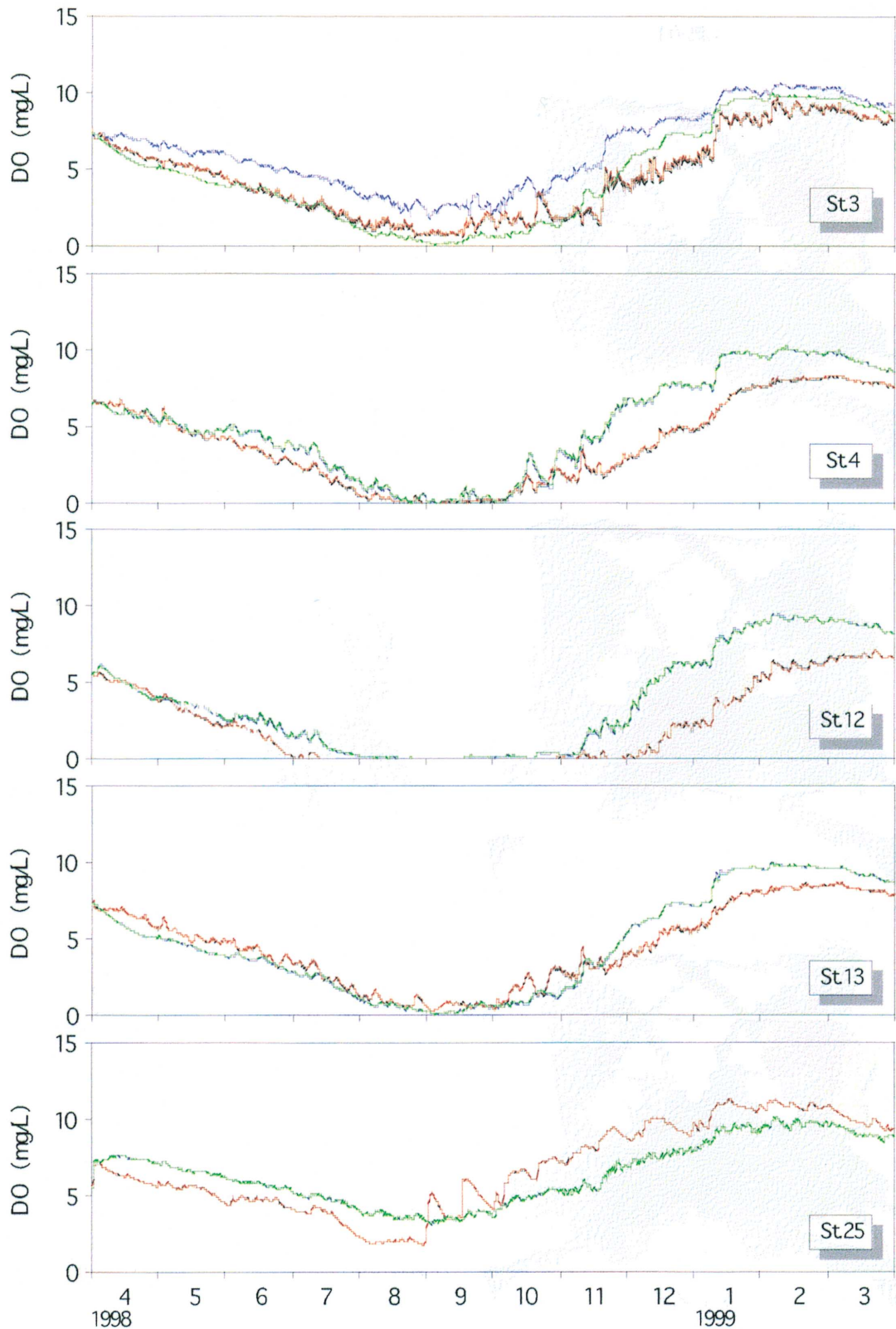
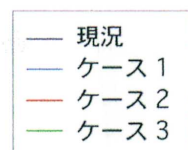


図 8. 中海の各定点の底層における溶存酸素季節変動の現状と対策後の予測図. St.3; 大橋川河口付近, St.4; 中海湖心, St.12; 安来沖, St.13; 中浦水門付近, St.25; 本庄工区. 汽水湖研究所による 2001 年度予測.

**Fig. 8.** Simulation results of seasonal change of hypolimnetic oxygen concentration at each site of Lake Nakaumi in 1998 by the Institute of Brackish Lakes in 2001. St.3; Near the mouth of Ohashi River, St.4; Central part of Lake Nakaumi, St.12; Offshore of Yasuki, St.13; Near the Nakaura Gate, St.25; in Honjo area.



中浦水門の構造図

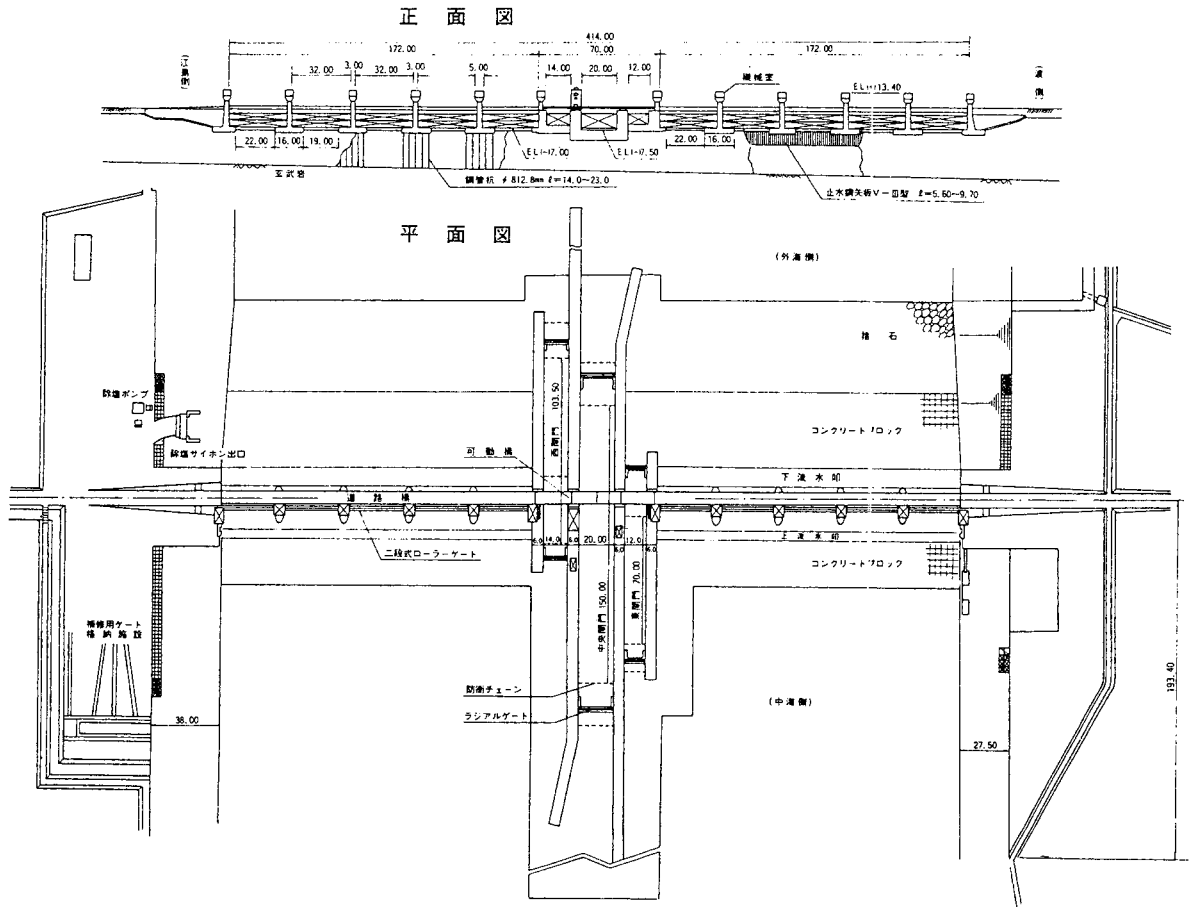


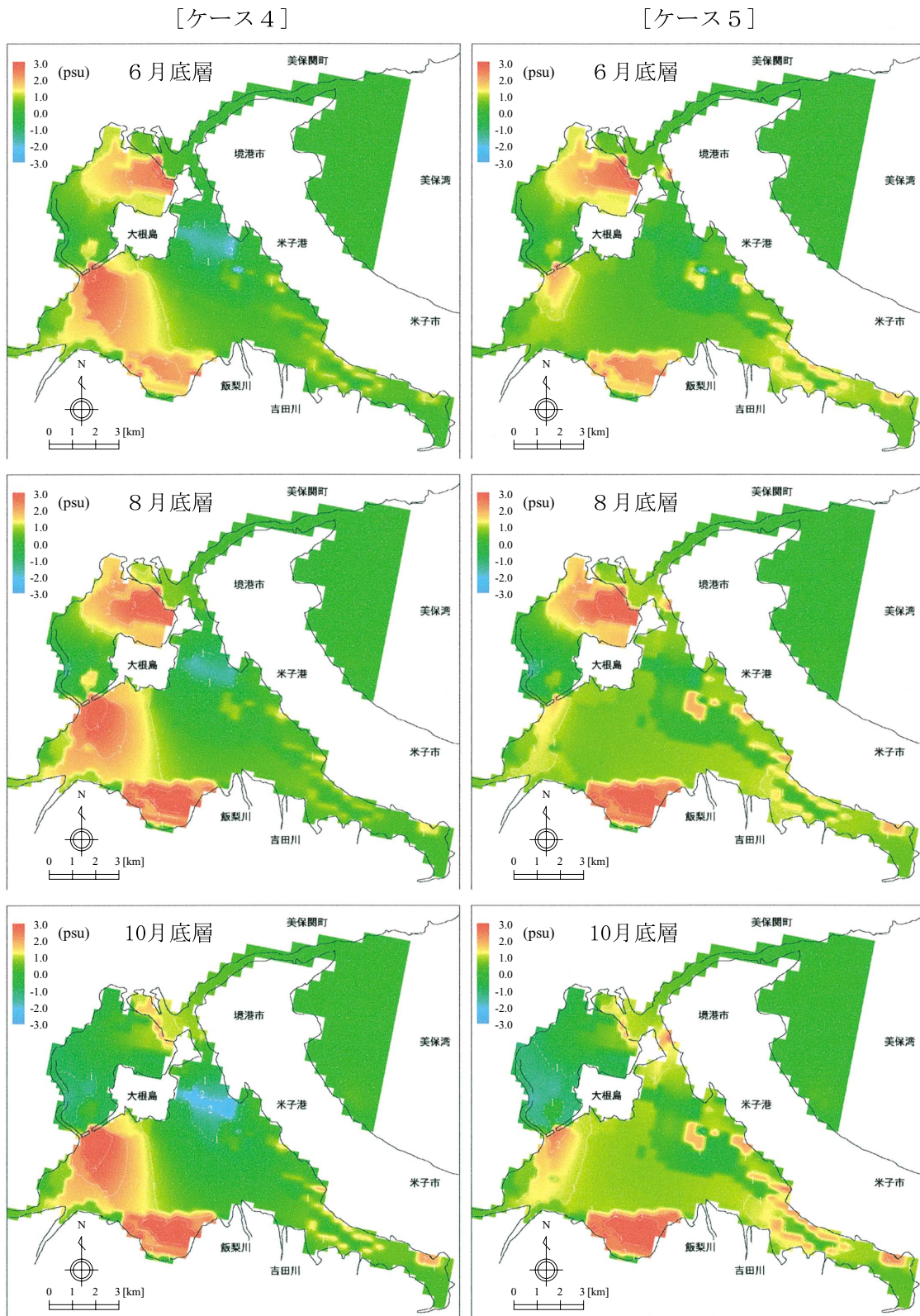
図9. 中浦水門の構造図.  
 Fig. 9. Structural diagram of Nakaura Tide gate.

貧酸素水塊形成の主たる要因となっている。  
 干拓事業が中止となった現在、失われた環境の回復は次世代への責務である。今回の一連のシミュレーションから堤防開削による貧酸素水塊解消の可能性が示され、また現状に即した中浦水門活用の可能性についても明らかにされた。このような結果を受け、より詳細な検討を行い、貧酸素水塊解消へ向けた取り組みが行われることを期待したい。

引用文献

相崎守弘 (2000) : 湖沼生態系の保全と管理, (環境修復のための生態工学, 須藤隆一 (編)) pp 113-138, 講談社サイエンティフィック.  
 中国四国農政局 (1984) : 中海干拓と淡水化 (パンフレット), pp 51, 中国四国農政局中海干拓事務所.  
 中国四国農政局 (1999) : 水産利用の方向について, pp 44, 中国四国農政局.  
 環境イニシアティブ (2001) : 中海水質シミュレ-

ション報告書 (汽水域を活かした地域振興 (提言II) & 中海水質シミュレーション, 資料3) pp 37.  
 Nakata K., F. Horiguchi and M. Yamamuro (2000): Model study of Lakes Shinji and Nakaumi-a coupled coastal lagoon system, J. Mar. Syst., 26: 145-169.  
 奥田節夫 (1997) : 汽水湖における水界の移動と混合過程, 沿岸海洋研究, 35: 5-13.  
 島根大学汽水域研究センター (1995) : 中海干拓と水環境-宍道湖・中海水質予測事業中間報告書 (本庄工区水質予測結果) についての検討一, 島根大学汽水域研究センター特別報告第2号, 島根大学汽水域研究センター.  
 宍道湖・中海汽水湖研究所 (2002) : 宍道湖・中海環境修復案検討シミュレーション, 汽水湖研究, 7: 1-66.  
 宍道湖・中海汽水湖研究所 (2003) : 宍道湖・中海環境修復案検討シミュレーションII, 汽水湖研究, Vol.8 (印刷準備中).



中海における底層の DO 変化  
 検討ケース—現況

図 10. 中海における各種対策後の底層での溶存酸素の対策効果の水平分布図. 汽水湖研究所 2002 年度シミュレーションによる.

**Fig. 10.** Simulation results of renovation effect of hypolimnetic dissolved oxygen in Lake Nakaumi in 1998 by the Institute of Brackish Lakes. Figure shows the subtraction concentration of dissolved oxygen after the renovation and current concentrations.



## 宍道湖・中海における 国土交通省自動観測水質データの検証

野中崇志<sup>1</sup>・松永恒雄<sup>2</sup>・梅干野晁<sup>1</sup>・中山大介<sup>3</sup>・瀬戸浩二<sup>3</sup>

### Validation of water quality data measured using automatic monitoring sensor in Lake Shinji and Lake Nakaumi

Takashi Nonaka<sup>1</sup>, Tsuneo Matsunaga<sup>2</sup>, Akira Hoyano<sup>1</sup>, Daisuke Nakayama<sup>3</sup> and Koji Seto<sup>3</sup>

**Abstract:** Data on water quality of Lake Shinji and Lake Nakaumi were obtained at one hour intervals using an automatic water quality monitoring device provided by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Government of Japan. Out of the various parameters measured, the data on water temperature, salinity and chlorophyll-a were validated by comparing with the field data obtained through *in situ* measurements during 1999–2001. The difference between the automatically measured sensor data and the field data was estimated by comparing these data without considering the vertical variations. The results show that the difference between the two datasets of water temperature is  $0.0 \pm 0.4^\circ\text{C}$  in Lake Shinji and  $-0.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$  in Lake Nakaumi, that of salinity is  $0.2 \pm 0.1$  psu in Lake Shinji and  $0.0 \pm 0.3$  psu in Lake Nakaumi and that of chlorophyll-a is  $0.3 \pm 2.1$  mg/m<sup>3</sup> in Lake Nakaumi (excluding the middle layer value).

**Key words:** validation, automatic water quality measurement data, Lake Shinji, Lake Nakaumi

#### はじめに

宍道湖と中海をあわせた一連の水域は、我が国最大の汽水域を形成している。境水道を通じて中海に流入する海水は、陸域からの有機物や栄養塩が豊富に含まれた河川水と混合される。そのため、湖は富栄養化しており、中海では赤潮が、宍道湖ではアオコが発生することもある。このように陸と海の接点である汽水域は、環境の時空間変動が非常に激しい。そのため宍道湖や中海では、時空間分解能が高い湖の水質データを得ることが必要とされてきた。

水質の空間変動の把握については、リモートセン

シングを利用したクロロフィル a 濃度推定のアルゴリズムの構築が近年なされており、可能になってきている(作野ほか, 1999 a; 作野ほか, 1999 b)。一方で、水質の時間変動の把握については、宍道湖では 1988 年より、また中海では 1993 年より 1 時間おきに自動観測を行い始めたことによって可能となってきている。

本研究では、1999 年から 2001 年までの宍道湖と中海における現地調査データを利用して、これらの国土交通省自動観測データのうちで水温、塩分、クロロフィル a 濃度の検証を行ったので、その報告をする。なお本研究で使用したデータとは異なるが、

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院総合理工学研究所 Department of Environmental Science and Technology, Tokyo Institute of Technology, Yokohama 226-8502, Japan

<sup>2</sup> 国立環境研究所社会環境システム研究領域 Social and Environmental System Division, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506, Japan

<sup>3</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, Japan

表 1. 国土交通省自動観測水質観測サイトの位置と測定水深。

Table 1. Locations and depths where data on water quality were obtained using automatic monitoring sensor.

Site	Position	Depth
Lake Shinji	N35° 26' 50", E132° 57' 45"	0.5m, 1.0m, 3.0m, 4.96m, 5.26m (at 0.2m water level)
Lake Nakaumi	N35° 27' 48", E133° 11' 38"	0.5m, 1.0m, 3.5m, 5.5m, 6.0m (movable)
Yonago Bay	N35° 25' 44", E133° 18' 10"	0.5m, 1.0m, 2.1m, 3.2m, 3.7m (movable)
Matsue Ohashi	N35° 27' 45", E133° 03' 21"	1.0m (at 0.3m water level)

国土交通省河川局は、2001年6月1日よりインターネットや携帯電話を通じて、リアルタイムデータとして、1時間おきの水質データの公開も始めている(河崎, 2001)。

## 国土交通省データとその仕様

### 1. 宍道湖と中海における観測地点

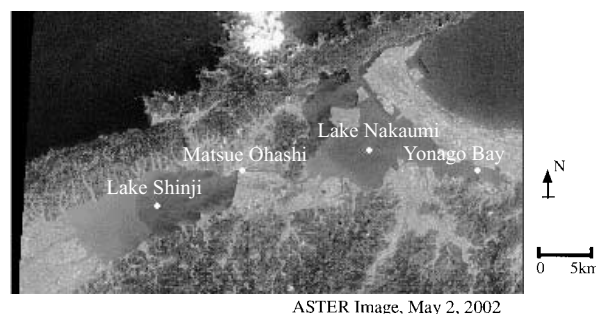
建設省(現国土交通省)は、宍道湖湖心では1988年より、中海湖心では1993年より1時間おきの水質データの取得を始めた(以後、中海、宍道湖と略して記述する)。当初の目的は、河川環境の計画立案、河川工事の実施、河川の維持管理に必要な水文データを得ることであった。測定項目は、水温、電気伝導度、pH、溶存酸素、濁度、COD(宍道湖のみ)、クロロフィル a 濃度である。

本研究で検証は行わないが、この他にも米子湾や松江大橋においても観測を行っている。これらの観測位置を図1に示す。

測定水深は、観測サイトによって異なる表層から底層までの5水深(松江大橋は表層のみの1水深)である(以下、これらの5水深を水面から順に表層、上層、中層、下層、底層という)。表1に各観測サイトの測定位置と水深を示す。中海と米子湾では、水位によって採水深度を調整する移動式採水を行い、測定水深を水面からの高さで一定となるように調整している。一方で、宍道湖と松江大橋では測定水深は固定されているため(表中の測定水深は、宍道湖の水位が0.2m、松江大橋の水位が0.3mのときの水面からの深度である)、潮汐などに起因する水位変動によって水面からの深度は変化する。

### 2. 国土交通省データの仕様

表2に中海と宍道湖に米子湾と松江大橋も加えた国土交通省データの仕様(国土交通省中国地方整備局出雲工事事務所)を示す。中海と宍道湖では、測定項目によっては機器の設置時期等の違いにより、異



ASTER Image, May 2, 2002

図 1. 宍道湖・中海における水質の自動観測地点。

Fig. 1. Automatic water quality measurement points in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

なる機器を使っている。そのため測定範囲や精度に違いが見られる。なお塩分は、中海では電気伝導度と水温から UNESCO (1981) に基づき塩分に換算されるのに対し、宍道湖では一度塩素量を推定した後に、塩分に換算 (UNESCO, 1962) される。

次に水温、電気伝導度、クロロフィル a 濃度について、その測定方法と校正方法を簡単に説明する。水温は白金抵抗法により測定し、1点校正を行っている。校正頻度は、水温に限らず全ての項目で月1回である。電気伝導度は、中海では電磁誘導法による測定であるのに対し、宍道湖では交流4極法を用いている。電磁誘導法は、塩化カリウム標準液による校正、または電気伝導度計・卓上型塩分計による校正を行っている。一方で交流4極法は空気中と塩化カリウムによる2点校正を行っている。クロロフィル a 濃度は、蛍光光度法による測定を行い、純水によるゼロ校正と標準液によるスパン校正を行っている。なお本研究で使用した宍道湖と中海のデータは、国土交通省出雲工事事務所より提供を受けた検定前の水温、塩分、クロロフィル a 濃度(中海のみ)の各水深のデータである。

## 検証方法

### 1. 測定機器

表 2. 国土交通省自動観測水質データの仕様.

**Table 2.** Specifications of the automatic water quality measurement data.

Parameter	Site	Range	Accuracy
Water Temperature	S	-5~50℃	±0.2℃
pH	S	0~14pH	±0.2pH
	N, Y, M	2~12pH	
DO	S, M	0~20mg/l	±1%FS
	N, Y		±0.4mg/l
Turbidity	S, M	0~200mg/l	0~100mg/l ±5%FS,
			100~200mg/l ±10%FS
	N, Y	0~200mg/l	0~100mg/l ±2%FS,
			100~200mg/l ±5%FS,
Electric Conductivity	S	0~30mS/cm	±2%FS
Chloride	N, Y	0~60mS/cm	±3%FS (NaCl at 25℃)
	M	0.10~25.00g/l	±0.1g/l
COD	S	0~0.5	±2%FS
		0~1.0 · 0~2.0	
Chlorophyll -a	N, Y	0~200µg/l	0~50µg/l ±10%FS,
			50~200µg/l ±5%

S:Lake Shinji, N:Lake Nakaumi, Y:Yonago Bay, M:Matsue Ohashi.

本報告で検証のために使用した機器は、水中投下式クロロフィル測定装置（アレックス電子製、ACL 1151-DK、島根大学汽水域研究センター所有）である。表 3 に機器の仕様を示す。

本装置には、水深、水温、電気伝導度、光量子、及びクロロフィルセンサが装着されており、水深 0.1 m ごとに各種水質データを取得することができる。クロロフィル a 濃度は、中山ほか(1999)に従い、クロロフィルセンサが測定した蛍光強度と現場で採水した水をアセトン抽出・吸光度法により測定した値を使って検量線を作成し、その換算式より推定した。本手法によるクロロフィル a 濃度の推定精度は 2.7 mg/m<sup>3</sup> 程度である(作野ほか, 1999), なお中山ほか(2000)は、宍道湖において本手法で用いた蛍光光度法と吸光度法によるクロロフィル a 濃度の鉛直分布を比較して、蛍光光度法の有効性を示している。

表 3. ACL 1151-DK の仕様.

**Table 3.** Specifications of ACL 1151-DK.

Parameter	Range	Accuracy
Depth	0~30m	±0.06m
Water Temperature	5~40℃	±0.05℃
Electric Conductivity	0~60mS	±0.05mS
Photon	0~2000	±0.5%
Chlorophyll	0.1~200µg/l	-

表 4. 検証に使用したデータと測定時刻.

**Table 4.** Date and time of field data obtained for the validation of the automatic water quality measurement data.

Date	Time	
	L. Shinji	L. Nakaumi
Jul. 15, 1999	7:59	13:53
Aug. 13, 1999	9:58	16:30
Sep. 13, 1999	8:14	11:40
Oct. 7, 1999		12:02
Dec. 12, 1999	8:55	
Jan. 10, 2000		12:45
Feb. 13, 2000	8:57	12:28
Mar. 14, 2000	8:43	12:25
Jun. 8, 2000	8:34	12:53
Mar. 14, 2001	8:46	10:52
Apr. 9, 2001	8:29	10:53
Jul. 15, 2001	8:27	11:46

## 2. 使用したデータの概要

表 4 に検証に用いたデータとその測定時刻を示す。1999年7月から2001年7月までの12回にわたる調査によって取得したデータを利用した。なお表中の空欄は、国土交通省データが得られなかったため、検証を行わなかったことを表している。測定位置は、湖底の光ケーブルの都合により、宍道湖では自動観測を行っている地点の南側で、また中海では北～東側であり、ともに数 10 m (最大で 50 m 程度) 離れている。

図 2 に宍道湖、中海それぞれについて、水温、塩分、クロロフィル a の鉛直方向の変化を示す。これらのデータには、表 4 に示した観測日のデータで、



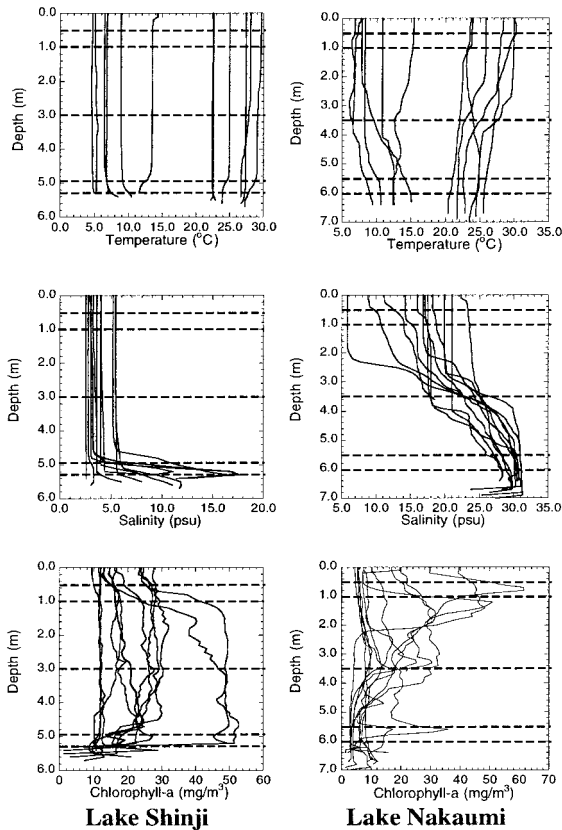


図2. 宍道湖・中海における水温、塩分、クロロフィル a 濃度の鉛直分布。

Fig. 2. Vertical profiles of water temperature, salinity, and chlorophyll-a in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

国土交通省データが得られなかったために、検証には使用しなかったデータも含まれている。点線は各観測サイトにおける国土交通省データの測定水深を示す(宍道湖は水位が0.2 mの場合)。

宍道湖の水温は、表層から底層にかけてほとんど変化が見られず一定である、塩分は下層から底層にかけて、中海からの高塩分水の流入による塩分躍層が見られる場合がある。一方で、中海の水温、及び塩分の鉛直変化は宍道湖よりも大きい。特に塩分は、中層付近において顕著な塩分躍層が見られる。

クロロフィル a 濃度は、宍道湖では表層から底層までほぼ均一であるパターンが多いのに対し、中海では表層や亜表層においてピークがあるパターンが多い。これらの傾向は、中山ほか(1999)と整合している。

### 3. 検証方法

宍道湖、及び中海における国土交通省データの検証は、以下の方法によって現地調査データと比較することによって行う。

1) 測定機器の水深測定誤差やデータのノイズ等も考慮し、国土交通省データの測定水深の前後0.1 m (ACL 1151-DKの深度精度相当)のデータも含めた平均値を計算し、各水深における現地調査データとする。

2) 毎時の国土交通省データのうち、測定を行った時刻に近い方のデータと比較する。

測定を行っている場所が実際の観測位置と最大で50 m程度離れているため、水平方向に変動がある場合は、誤差が生じる。また前節で述べたように、宍道湖の塩分は下層から底層で、また中海の塩分は中層付近で変動が特に大きいことや、クロロフィル a 濃度の鉛直方向の変動のパターンに注意する必要がある。なお今回は図2に示すように宍道湖において、下層から底層の塩分を除き、鉛直方向に大きな変化が見られなかったため、水位による影響は小さいと仮定し、測定水深の水位による補正は行わない。

## 結 果

図3に宍道湖と中海の各深度における水温、塩分、クロロフィル a 濃度の国土交通省データと現地調査データの関係を示す。また表5に測定項目、水深ごとに国土交通省データと現地調査データの差の平均値及び標準偏差を、さらに図4に測定項目ごとの両データの差の頻度分布を示す。また参考のために、表6に検証日の12時の松江の気象条件を示す(全日射のみ米子のデータ)。

なお2001年7月15日の中海の塩分は、各深度において他の観測日より大きい系統的な差があったので、解析から除外する。以下、検証結果及びその考察を項目ごとに記述する。

#### 1) 水温

国土交通省データと現地調査データの温度差は、宍道湖において $0.0 \pm 0.4^\circ\text{C}$ 、中海において $-0.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$ である(ただし以下に述べる99年8月13日の中海中層のデータと01年3月14日の宍道湖のデータは取り除く)。以下、宍道湖と中海の結果を個別に検討する。

宍道湖において、国土交通省データと現地観測データの温度差は、01年3月14日のみ全ての水深で $1^\circ\text{C}$ 程度と大きかった。この原因として、水温に鉛直方向の大きな変化が見られなかった(図2)ことから、自動観測機器、あるいは検証に使用したクロロフィル測定装置の不調などが考えられる。

表 5. 国土交通省データと現地調査データの差.

**Table 5.** Difference between the automatic water quality measurement data and field data.

**Lake Shinji**

	W. Temp. (°C)	Salinity (psu)	Chlorophyll-a (mg/m <sup>3</sup> )
All Layer	0.0±0.5	0.0±1.9	
Top	0.0±0.6	0.2±0.1	
Upper	0.0±0.6	0.2±0.1	
Middle	0.1±0.5	0.3±0.3	×
Lower	-0.1±0.6	0.0±2.6	
Bottom	-0.1±0.5	-0.4±3.7	

**Lake Nakaumi**

	W. Temp. (°C)	Salinity (psu)	Chlorophyll-a (mg/m <sup>3</sup> )
All Layer	-0.2±0.3	0.2±0.8	0.3±2.1*
Top	-0.2±0.1	0.3±0.7	-1.0±3.2
Upper	-0.2±0.3	0.1±0.3	0.7±2.2
Middle	-0.2±0.5	0.8±1.1	6.0±6.0
Lower	-0.1±0.2	-0.4±0.6	0.7±1.1
Bottom	-0.2±0.3	0.3±0.7	0.7±0.5

\*without middle layer.

次に宍道湖における水位変動による両データの測定水深の違いの影響を評価するために、各測定水深の前後 0.3 m の水温の変動と両データの温度差の関係を調べた。水温の変動は下層と底層で平均 0.5°C の変動が見られたが、それ以外では 0.1°C 以下と極めて小さい。さらに図 4 や表 5 より両データの温度差に水深依存性が見られないことから、宍道湖においては水温の鉛直変動によって生じる温度差は小さいといえる。

一方中海では、99年8月13日のみ国土交通省データと現地調査データの温度差が 1°C を超えた (1.6°C)。この理由は、観測時刻において、中層 (水深 3.5 m) の上下 0.3 m 間に 2°C を超える温度変化があることから説明することができる。

2) 塩分

塩分については、宍道湖と中海では傾向が異なる。

表 6. 検証を行った日の気象条件.

**Table 6.** Meteorological conditions at 12:00 on the validation day in Matsue (Solar radiation data are from Yonago).

Date	Air Temperature (°C)	Wind Direction	Wind Speed (m/s)	Solar Radiation (MJ/m <sup>2</sup> /hr)
Jul. 15, 1999	25.5	W	5.9	1.35
Aug. 13, 1999	28.5	WNW	2.8	3.26
Sep. 13, 1999	30.5	W	1.9	2.60
Oct. 7, 1999	24.1	W	4.8	2.42
Dec. 12, 1999	11.0	W	7.1	1.09
Jan. 10, 2000	9.9	NW	7.7	0.74
Feb. 13, 2000	9.0	WSW	1.5	1.06
Mar. 14, 2000	10.8	WNW	5.8	1.45
Jun. 8, 2000	27.9	W	2.8	1.85
Mar. 14, 2001	17.9	SW	5.7	2.93
Apr. 9, 2001	20.5	ENE	3.1	1.20
Jul. 15, 2001	31.8	S	2.5	2.83

宍道湖では、下層と底層において、国土交通省データと現地調査データの差が大きい点が見つかる。図 5 に宍道湖の下層～底層間の塩分の最大値と最小値の差との関係を示す。この結果より、塩分躍層の大きな日は、国土交通省データと現地調査データの塩分に大きな差が生じる場合があることが分かる。

また中海では、中層において両データの差が他の深度よりも若干大きい値となっているが、全体に深度依存性が小さい (図 4)。これは、中海では測定水深を水位とともに変化させていることに起因する。よって塩分躍層を形成する中層においても、宍道湖と比較して国土交通省データと現地調査データの差が小さい。

最後に国土交通省データの精度を塩分の鉛直変化が見られない日の表層と上層のデータから評価した結果、宍道湖が 0.2±0.1 psu、中海が 0.0±0.3 psu 程度である。これらの値は、自動観測機器の精度 (それぞれ塩分換算で、0.4 psu, 1 psu 程度) より小さい。

3) クロロフィル a 濃度

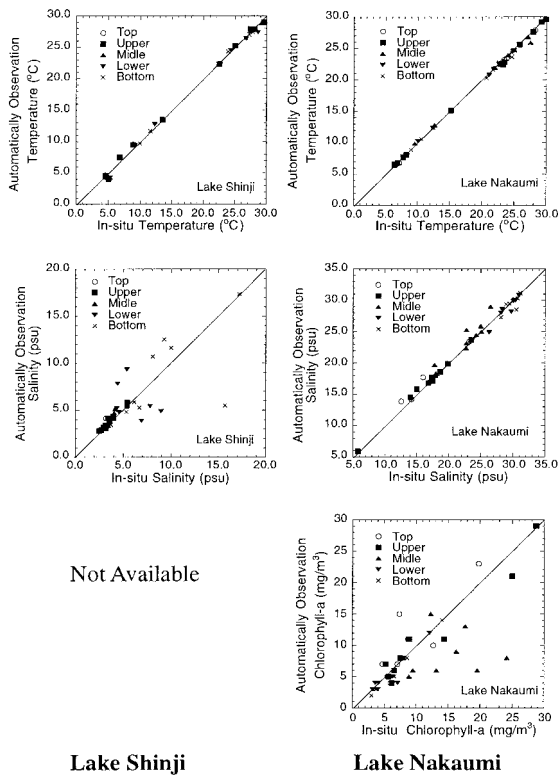


図3. 宍道湖・中海における水温、塩分、クロロフィル a の国土交通省データと現地調査データの比較。  
**Fig. 3.** Comparison of water temperature, salinity, and chlorophyll-a between automatic measurement data and field data in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

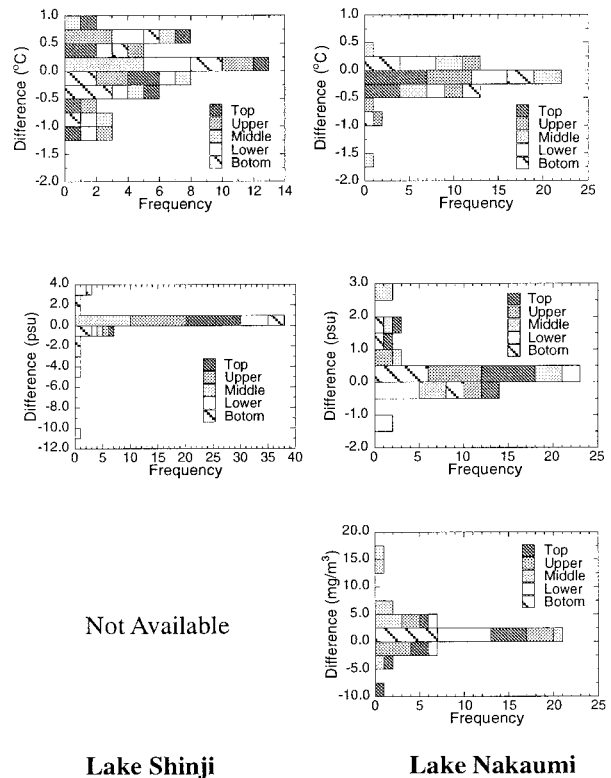


図4. 国土交通省データと現地観測データの差の頻度分布。  
**Fig. 4.** Frequency of the difference between automatic measurement data and field data in Lake Shinji and Lake Nakaumi.

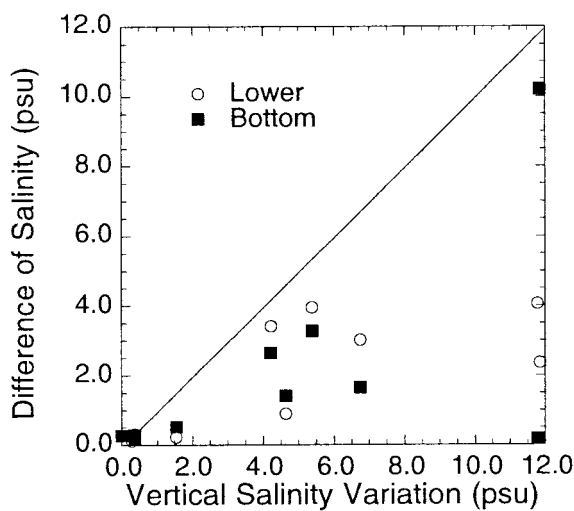


図5. 宍道湖における(下層底層間の)塩分の変動と国土交通省データと現地調査データの差の関係。  
**Fig. 5.** Relationship between vertical variation of salinity (between lower layer and bottom layer) and the difference of the salinity between automatic measurement data and field data in Lake Shinji.

クロロフィル a 濃度は、中海のみの比較である。データ数が十分ではないが、国土交通省データと現地調査データの差は  $0.3 \pm 2.1 \text{ mg/m}^3$  (中層を除く) であった。これは、国土交通省データの精度  $5 \text{ mg/m}^3$  ( $0 \sim 50 \text{ mg/m}^3$  では FS の 10%) や現地調査データの精度  $2.7 \text{ mg/m}^3$  から説明できる。また全体的な傾向として、高濃度になるほど両データの差が大きくなっている。

中層では、国土交通省データが現地調査データよりも低い傾向が見られる。これらの差が大きいときには、次の2つの場合があった。

- a) 表層で高濃度であり、下層で急速に減少している場合に、中層で国土交通省データが現地調査データより低く見積もる。
- b) 中層にピークがあるときに、国土交通省データがそのピークを反映せずに、低く見積もっている。

これらの要因については、データを増やすなどして、さらに検討が必要である。

## ま と め

宍道湖と中海の湖心で測定した水温、塩分、クロロフィル a 濃度の鉛直データを利用して、国土交通省の自動観測データの検証を行った。検証データは少ないが、以下のような知見が得られた。

- 1) 水温は、国土交通省データと現地調査データの差は宍道湖では  $0.0 \pm 0.4^\circ\text{C}$ 、中海では  $-0.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$  以下であり、深度による依存はなかった。
- 2) 塩分は、宍道湖において下層、底層で国土交通省データと現地調査データの差が大きかった。これは塩分躍層の影響であると考えられる。塩分の精度を躍層が見られなかった表層や上層の結果から評価した結果、宍道湖、中海ともに  $0.3 \text{ psu}$  程度であった。
- 3) クロロフィル a 濃度の国土交通省データと現地調査データの差(中海のみ)は、中層を除き測定機器の精度である  $5 \text{ mg/m}^3$  以下であった。

## 謝 辞

宍道湖と中海における国土交通省データは、国土交通省中国地方整備局出雲河川事務局から提供して頂いた。ここに深く感謝の意を示す。

## 引 用 文 献

河崎和明 (2001) IT を活用した防災。建設オピニオ

ン, 10月号: 36-39.

国土交通省中国地方整備局出雲工事事務所. 水質自動観測装置管理台帳.

中山大介・作野裕司・松永恒雄・高安克己・國井秀伸 (1999) 宍道湖・中海の鉛直クロロフィル a 濃度分布特性. LAGUNA (汽水域研究), 6: 217-222.

中山大介・大塚泰介・瀬戸浩二・山口啓子 (2000) アオコ発生時における現場蛍光法によるクロロフィル濃度測定の問題点. LAGUNA (汽水域研究), 7: 71-76.

作野裕司・中山大介・松永恒雄・高安克己・六川修一・中村幹雄・國井秀伸 (1999 a) 衛星リモートセンシングによる中海・宍道湖の水質マッピング (その2) - 1998年3月の調査 -. LAGUNA (汽水域研究), 6: 205-216.

作野裕司・松永恒雄・中山大介・六川修一・高安克己・國井秀伸・中村幹雄・山室真澄 (1999 b) SPOT/HRV データによるアオコ発生時の宍道湖表層のクロロフィル a 濃度分布の推定. 日本リモートセンシング学会誌, 19. 2: 20-36.

UNESCO (1976) First and second reports of the Joint Panel on the Equation of State of Seawater

UNESCO (1981) Tenth report of the Joint Panel Oceanographic Tables and Standards, Sidney, B. C., September 1980. Unesco Technical Papers in Marine Science, 36: 25.

## 汽水～内湾環境における有孔虫殻の溶解実験 (予報)

高田裕行<sup>1</sup>

### Field experiment on post-mortem dissolution of calcareous foraminifera in brackish to bay environment

Hiroyuki Takata<sup>1</sup>

**Abstract:** An experiment was conducted on the post-mortem dissolution of calcareous foraminifera in situ at a fixed station (water depth 2.4 m) in Lake Saroma, northern Japan on the specimens of *Ammonia beccarii* forma 1, which is a typical taxon of the brackish water and bay environment. The study revealed that the species undergone significant dissolution within one month's time, indicating thereby that the foraminiferal calcareous material may be rapidly dissolved in brackish and bay setting.

**Key word:** *Ammonia beccarii* forma 1, in situ experiment, Lake Saroma

#### 緒 言

有孔虫の多くは、石灰質の殻をもつ。この石灰質殻が化石となる過程で、どの程度溶解をうけるかを知ることは、有孔虫化石の群集解析にもとづく、古環境復元をおこなう上で重要である。これまで、外洋域での浮遊性有孔虫殻の溶解については、古環境復元の必要から多くの研究が行われてきた。一方、汽水～内湾域においても、石灰質殻の溶解が顕著であることが指摘されている (Bradshaw, 1961; Goldstein and Watkins, 1999)。

本研究は、汽水～内湾域で石灰質有孔虫殻の溶解が、どの程度の時間で起こりえるかを評価するために、現地において実験したものである。本論では、北海道東部のサロマ湖において、石灰質有孔虫 *Ammonia beccarii* forma 1 の殻の溶解を観察した結果について、報告する。

#### 調 査 地 域

研究地域は北海道東部のサロマ湖である。サロマ湖はオホーツク海に面した海跡湖で、最大水深は約 20 m である。実験を行った調査地点はサロマ湖南東部の佐呂間別川河口付近の潮下帯上部 (最大水深 2.4 m) である (Takata, 2000 の St. D 4 と同じ)。本地点の底層における水温・塩分・溶存酸素量は、それぞれ  $-0.1 \sim 22.2^{\circ}\text{C}$ , 21~34 psu, 2.5~18.5 mg/l にわたる (Takata, 2000)。塩分は、4-5 月の融雪に伴う河川流量の増加で一時的に 20 psu 前後に低下するものの、それ以外の時期ではほぼ海水のものと同様である。溶存酸素量は、夏季に一時的に 2.5 mg/l 程度に低下するものの、概して 6 mg/l 以上と高い。

実験を行った地点の底質は、泥から泥質極細粒砂からなる。本地点で産出する底生有孔虫は、*Ammonia beccarii* forma 1, *Trochammina* cf. *japonica* が多産し、*Elphidium subincertum*, *Quinqueloculina* spp.

<sup>1</sup> 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Nishikawatsu 1060, Matsue, 690-8504, Japan

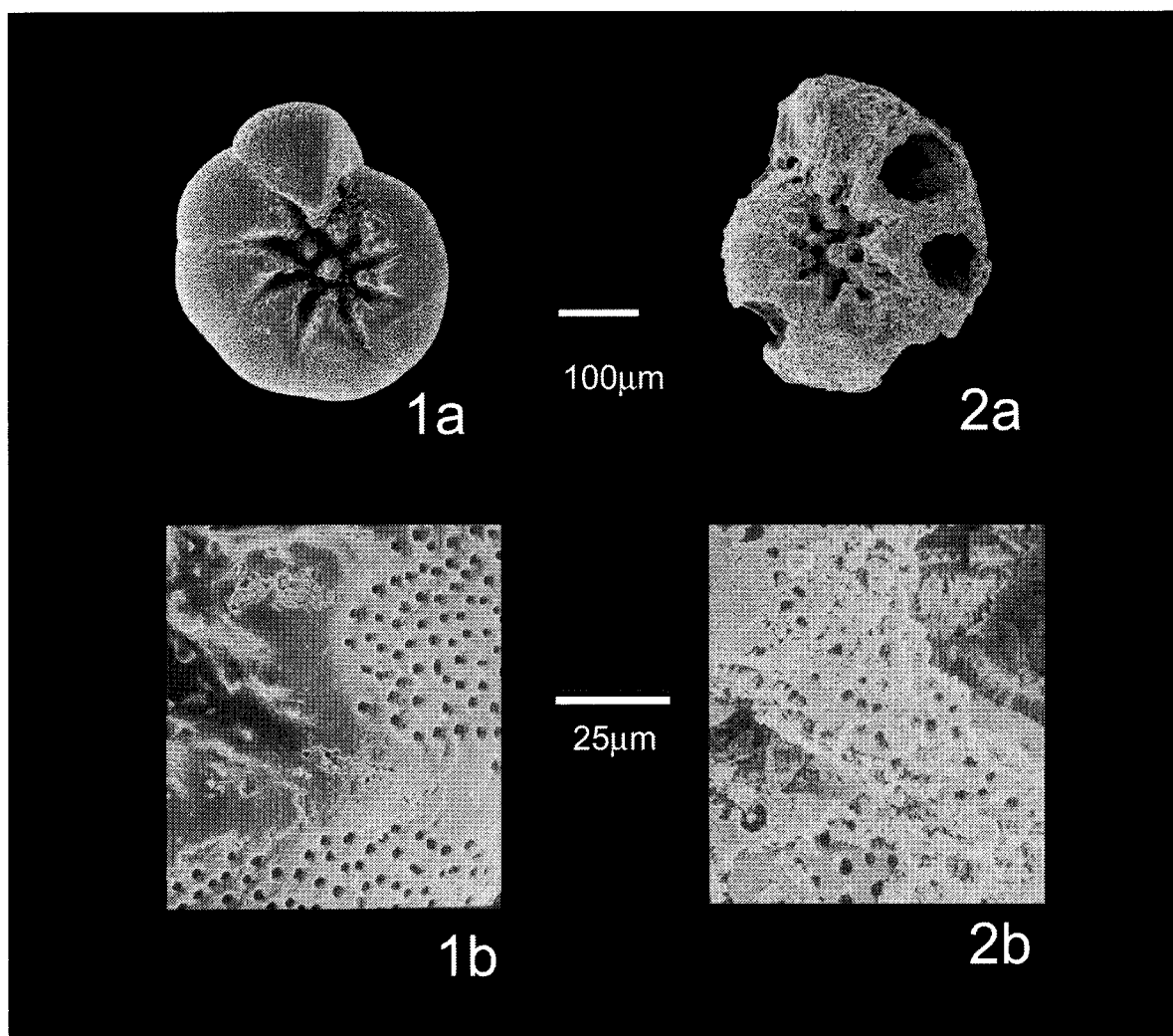


図 1. *Ammonia beccarii* (Linne) forma 1 の走査型電子顕微鏡写真.

Fig. 1. Scanning electron micrographs of *Ammonia beccarii* (Linne) forma 1.

1. Specimen observed in *in-situ* dissolution experiment. (a), umbilical view; (b), close-up of umbilicus.
2. Specimen observed in *in-situ* dissolution experiment after one month. (a), umbilical view; (b), close-up of umbilicus.

が随伴する.

## 研究 方 法

実験は、調査地点で、2002年6月から7月にかけて行った。実験に用いた有孔虫個体は、2002年5月に地中海で採取した *Ammonia beccarii* forma 1 である (図1の1a, b)。これらは、野外で採取した堆積物試料に中性ホルマリンを添加して保存していたものから、本実験開始前に湿潤状態で抽出した個体である。この *A. beccarii* forma 1 の殻をナイロン製メッシュ (開口径  $45\mu\text{m}$ ) を整形した封筒状の袋 ( $4\text{cm} \times 1\text{cm}$ ) に20個体入れたのち、袋を接着剤によって閉じた。このような容器を計4組作成した。

ナイロン製メッシュの容器を、湖底に設置するための塩化ビニール製のパイプに取り付けた。この塩化ビニール製のパイプは、直径  $9\text{cm}$ ・長さ  $8\text{cm}$  であり、パイプ側面におもりをつけることで一側面が常に湖底に横倒しになるようにしたものである。ナイロン製メッシュの袋は、パイプ内面の下端および上端に取り付けた。

このように準備した機材を、2002年6月17日に、調査地点に設置し、約1ヶ月後の7月15日に回収した。回収したナイロン製メッシュの容器より有孔虫個体を拾い出して観察し、溶解の有無や程度について、電子顕微鏡で観察した。

## 結果と考察

回収時に観察したところ、パイプの下端に設置したナイロン製メッシュの容器周辺には泥質堆積物が付着していたのに対して、上端に設置したものには堆積物の付着は認められなかった。このことから、下端・上端に設置していた容器は、それぞれ堆積物中・底層水中にあったと考えられる。回収したナイロン製メッシュの容器内を開封したところ、いずれにも多量の泥粒子が含まれていたが、メイオベントスなどの肉眼的に観察される生物は、認められなかった。

回収した *Ammonia beccarii* forma 1 の個体数に、いずれの容器でも減少は認められなかった。しかし、すべての容器において、殻表面に顕著な溶解が観察された(図1の2a, b)。また、部分的に殻が破損している個体も、観察された。これは溶解の進行に伴って、殻の一部が脱落したものである。

こうした観察結果は、調査地域で約1ヶ月間に、*A. beccarii* forma 1 の石灰質殻が、消失に至らないものの、明瞭な溶解を被ったことを示唆する。筆者は1997年2～3月に、同一地点で、本種の遺骸殻サイズ組成を検討した際に、約20日間で殻径400 $\mu$ m以下の遺骸殻がみられなくなったのを観察している(Takata and Hasegawa, in prep.)。以上のことから、汽水～内湾域での石灰質有孔虫殻の溶解は、約1ヶ月間という短期間でも速やかに起こり得るといえる。

本実験では、有孔虫殻をナイロン製メッシュの袋に入れていたため、検討した個体は、マクロ・メイオベントスによる生物擾乱の影響を、ほとんど受けていなかったと思われる。しかし、実際の堆積物表層付近は、底生生物によって攪拌されており、有孔

虫殻の化学的溶解・機械的破損は、今回、評価したものより顕著である可能性が高い。殻の溶解を引き起こした直接の要因については、今回の実験では特定に至っていない。これらの要件を考慮して、有孔虫殻の溶解を検討することは、今後の課題である。

## 謝 辞

実験に用いた底生有孔虫の採取および電子顕微鏡写真の撮影にあたって、島根大学汽水域研究センターの瀬戸浩二助教授と同大学教育学部の野村律夫教授に、ご助力いただいた。また、産業技術総合研究所の板木拓也博士には、本実験を計画するにあたって、ご意見をいただき、資材の一部を提供していただいた。熊本大学理学部の長谷川四郎教授には、本稿の執筆をお奨めいただいた。以上の方々には心よりあつくお礼申し上げます。

## 引用文献

- Bradshaw, J. S. (1961) Laboratory experiments on the ecology of foraminifera. *Contributions from the Cushman Foundation for Foraminiferal Research*, 12: 87-106.
- Goldstein, S. T. and Watkins, G. T. (1999) Taphonomy of salt marsh foraminifera: an example from coastal Georgia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 149: 103-144.
- Takata, H. (2000) Distribution and seasonal change of living benthic foraminifera in Lake Saroma-Response of foraminifera to cool brackish environment. *Ph.D dissertation*, 108 p., Hokkaido University, Japan.



## 京都府阿蘇海における底生有孔虫群

高田裕行<sup>1</sup>・村上俊介<sup>2</sup>・瀬戸浩二<sup>1</sup>・坂井三郎<sup>3</sup>・田中里志<sup>4</sup>・高安克己<sup>1</sup>

### Foraminiferal assemblages in Aso-kai Lagoon, central Japan

Hiroyuki Takata<sup>1</sup>, Shun-suke Murakami<sup>2</sup>, Koji Seto<sup>1</sup>,  
Saburo Sakai<sup>3</sup>, Satoshi Tanaka<sup>4</sup> and Katsumi Takayasu<sup>1</sup>

**Abstract:** Benthic foraminifera are investigated in Aso-kai Lagoon, central Japan, to understand the habitat of the anoxic environment. The condition of the deep bottom is anoxic almost throughout the year. Five taxa are commonly found in this lagoon, of which *Virgulinitella fragilis* dominates the inner to central area and the deeper parts of the lagoon. The occurrence of the other common taxa, such as *Trochammina* cf. *japonica*, *Ammonia* cf. *A. beccarii* forma 1, *Rosalina* spp. and *Elphidium* sp.A, is restricted to the adjacent part of the sand bar, called "Amano-hashidate". *V. fragilis* has a very high tolerance to almost year-round anoxic condition. The results suggest that the seasonal changes in the dissolved oxygen levels of the bottom waters mainly control the distribution of benthic foraminifera in this lagoon.

**Key words:** Aso-kai, *Virgulinitella fragilis*, seasonal change of dissolved oxygen

### 緒 言

阿蘇海は京都府北部に位置する海跡湖である。筆者らは、2001年～2002年にかけて、阿蘇海の現行環境ならびに過去の環境変遷を明らかにする目的で、堆積学・地球化学・古生物学的な研究を行ってきた。

この調査で、阿蘇海の表層堆積物より、底生有孔虫 *Virgulinitella fragilis* の産出が認められた。本種は、ニュージーランドの沿岸域で記載された種で (Grindell and Collen, 1976), 貧酸素環境に強い耐性を持つ種と考えられている。

貧酸素状態に対して強い耐性を持つ底生有孔虫化

石の産出状況は、中～深層水塊の循環や酸素極小層の発達などの古海洋環境を推定するのに貢献している。一方で、このような貧酸素耐性種には、溶存酸素レベルなどを反映して様々な種が認められ、適応様式も様々である。

貧酸素環境は汽水～内湾域では普遍的に認められるものであり、そこでの現生種の検討は貧酸素耐性種の生態を理解する上で有用である。筆者らは、日本各地の汽水～内湾域の貧酸素環境における現生底生有孔虫の生態を検討してきた (高田・高安, 2001; Takata *et al.*, in prep.). 阿蘇海は調査・研究が比較的容易な地域であり、そこでの *Virgulinitella fragilis* の生態の検討は貧酸素環境における底生有孔虫の生

<sup>1</sup> 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Nishikawatsu 1060, Matsue, 690-8504, Japan

<sup>2</sup> 島根大学総合理工学部地球資源環境学科 Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Nishikawatsu 1060, Matsue 690-8504, Japan

<sup>3</sup> 海洋科学技術センター 固体地球統合フロンティア研究システム Institute for Frontier Research on Earth Evolution, Japan Marine Science and Technology Center, 2-15 Natsushimacho, Yokosuka 237-0061, Japan

<sup>4</sup> 京都教育大学 Kyoto University of Education, Fujinomori 1, Fukakusa, Fushimi, Kyoto 612-8522, Japan

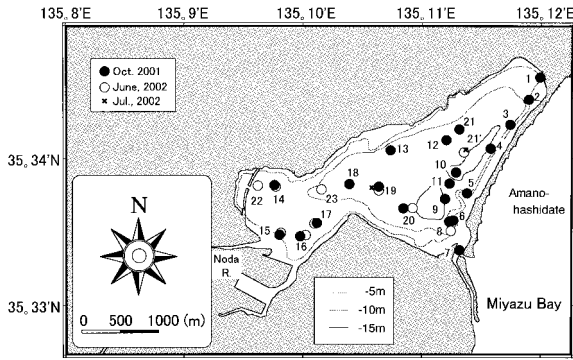


図 1. 阿蘇海の位置図と調査地点.  
**Fig. 1.** Map of Aso-kai Lagoon and with sampling localities.

態を理解する上で有用な知見をもたらすと考えられる。

本稿では、おもに 2001 年 10 月に湖内 20 地点で採取した表層堆積物に含まれる現生底生有孔虫について、その分布を検討した結果を報告する。それにもとづき、これまで研究が行われていない阿蘇海にお

ける底生有孔虫群の種組成とその分布を明らかにすることを目的とした。なお、詳細な考察については、別稿にて行う予定である。

### 調査地域

阿蘇海は京都府北部に位置する海跡湖である(図 1)。湖内の最大水深は約 15 m である。北東から南西方向に伸長した砂州(天橋立)によって、外海である宮津湾と隔てられている。宮津湾とは、南東部の湖口の 1 カ所のみで連絡する。湖内への主要な流入河川として野田川があり、南西部より湖内に流入している。

湖内中央部(図 1 の Aso-21 および 21')で、2001 年 11 月、2002 年 6 月、7 月に観測した水温・塩分・溶存酸素量の鉛直分布を図 2 に示す。阿蘇海の水塊構造は、これらの観測項目の特徴から、3 層に区分される；a) 水温・塩分の季節変動が著しい表層付近(水深 4 m 以浅)；b) 溶存酸素量の季節変動が著しい

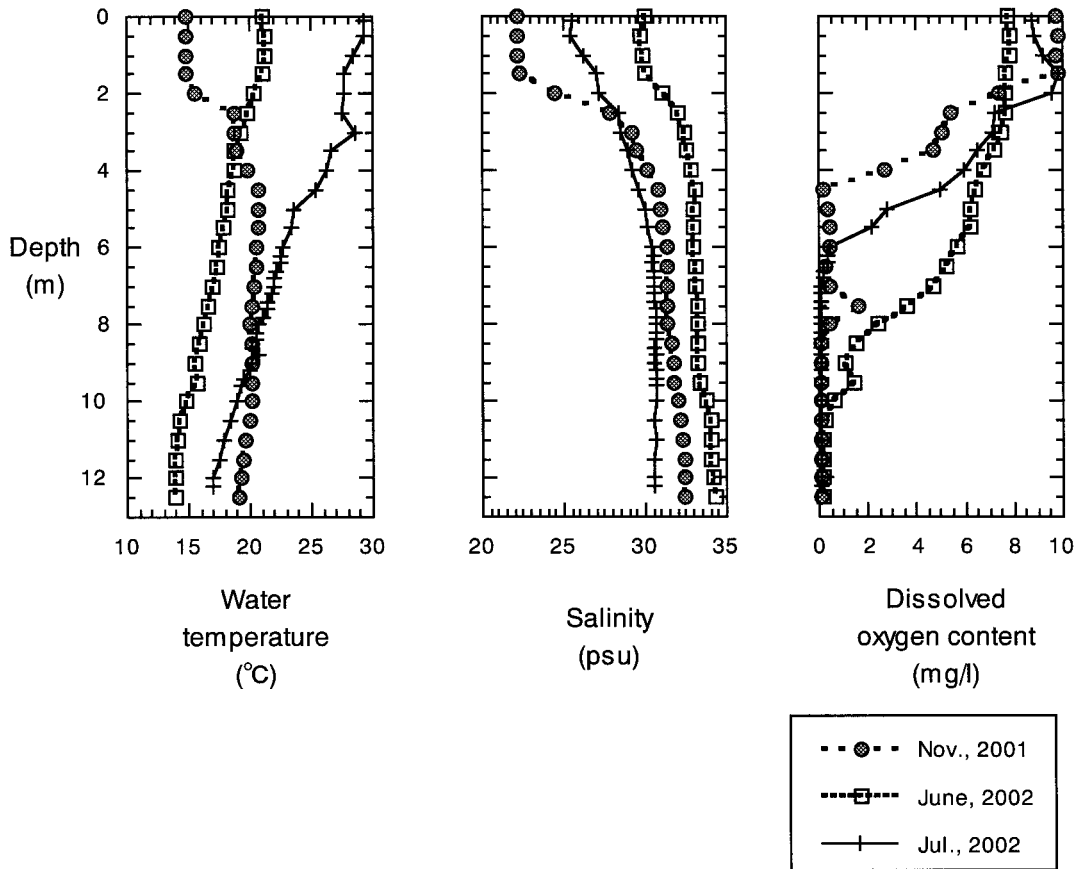


図 2. 阿蘇海 Aso-21 および 21'における水温・塩分・溶存酸素量の鉛直分布。

**Fig. 2.** Vertical distributions of water temperature, salinity and dissolved oxygen content at Aso-21 and 21'. The data of November, 2001 was observed at Aso-21, whereas those of June and July, 2002 were carried out at Aso-21'.

中層付近(水深4-8 m); c) 水温・塩分がほぼ一定で、溶存酸素量もほぼ0 mg/lの底層付近(水深8 m以深). 11月には、湖水の溶存酸素量がもっとも低下し、底層付近の硫化水素濃度も高くなる.

阿蘇海の表層堆積物は、湖内中央~奥部では黒色の泥からなるが、砂州近傍のみは極細粒~粗粒砂からなる.

## 研究方法

現生底生有孔虫の調査は、2001年10月に湖内20地点(Aso-1~20)で行った(図1). また、補足的な調査を、2002年6月、7月に、それぞれ9地点、2地点で行った. 表層堆積物はエクマン・バージ式採泥器を用いて採取し、その表層約1 cmを分析用試料として分取した.

採取した試料を、実験室に持ち帰り、堆積物・有孔虫・その他(珪藻・花粉など)の分析用に分割した. これらの試料の湿潤重量を、分割時に秤量した. 堆積物分析用試料は恒温乾燥機(70°C)で乾燥させて乾燥重量を秤量し、含水率を算出した. これにもとづき、有孔虫・その他の分析用試料の乾燥重量を算出している. 有孔虫検討用試料は、開口径75 μmのふるいを用いて水洗した. その残査に0.5% ローズベンガル水溶液を添加して一昼夜おいた後、それらを適宜温水洗して余剰なローズベンガルを除去した. 洗浄後、残査を恒温乾燥機にて乾燥させた.

乾燥した残査を、試料分割器を用いて、底生有孔虫が約200個体になるよう適宜分割し、それらから有孔虫を拾い出した. これらの有孔虫について種を同定し、計数した. また、ローズベンガルによる染色の有無で、生体・遺骸の識別も行った. これらの結果にもとづき、各試料ごとの、有孔虫各種の産出頻度および堆積物1 g(乾燥重量)あたりの個体数を計算した.

## 結果と考察

表層堆積物より抽出した有孔虫の産出結果を、表1に示す. 検討の結果、32属67種を同定した(表1). 得られた有孔虫個体は大部分が、遺骸からなり、生体(染色)は極めて少なかった. そのため、本論では生体・遺骸個体を合わせた全体群にもとづいて、有孔虫の分布を議論する.

阿蘇海では、底生有孔虫 *Virgulinea fragilis*, *Trochammina* cf. *japonica*, *Ammonia* cf. *A. beccarii*

*forma* 1, *Rosalina* spp., *Elphidium* sp.A の5タクサが卓越する(図3). これらのタクサの2001年10月における分布を図4に示す. *V. fragilis* は阿蘇海内で砂州付近を除く広い範囲に産出し、水深8 m以深で多産する傾向がある. 一方、*T. cf. japonica* は、砂州付近の限られた範囲で産出し、水深約8 m以深ではほとんど産出しない. 本種と同様に、*Ammonia* cf. *A. beccarii* *forma* 1, *Rosalina* spp., *Elphidium* sp.A も砂州近傍でのみ産出し、湖内中~奥部ではほとんど認められない. こうした産出傾向は、2002年6月も同様である(表1).

*Virgulinea fragilis* が多産する水深8 mとりわけ10 m以深は、年間を通してほぼ貧酸素状態にあることから(図2)、本種は阿蘇海内のほぼ周年的な貧酸素環境に適応していることが示唆される. 一方、汽水~内湾域奥部の貧酸素環境では、通常、*Trochammina* cf. *japonica* が多産することが知られているが(例えば、Nomura and Seto, 1992)、阿蘇海における本種の分布は外洋側の砂州近傍で水深が浅い地点に限られている. Kitazato and Mtasushita (1996)によると、*Trochammina hadai* (筆者らの *T. cf. japonica* に相当)は、繁殖に一定の高溶存酸素(5 ml/l; 約7 mg/l以上)の期間が必要であるとされている. よって、本種の生息は、個体群維持の必要上、季節的に溶存酸素が富む水域(水深約8 m以浅)に、制限されていると推定される. したがって、阿蘇海に生息する底生有孔虫群の分布は、溶存酸素量とその季節変化に強く規制されていると考えられる.

*Virgulinea fragilis* は、本研究と同様に溶存酸素が極めて乏しい環境で、相次いで見出されている. Altenbach(2002)は、本種が大西洋ナミビア沖などの生産性の高い海域や汚染された海域における無酸素状態で脱窒が起るような環境で、生息するとしている. また、Bernhard(2002)は大西洋カリコ海盆の無酸素環境で本種が優占することを報告している. 一方、彼女は、本種が細胞内に“sulfide-oxidizing bacteria”を共生させ、無酸素環境に適応している可能性を指摘している. このような有孔虫細胞内での微生物の共生は、有孔虫の生態・進化を考える重要な視点として、着目されている(北里, 2002). 最近、北東太平洋のSanta Barbara海盆の貧酸素環境に生息する底生有孔虫 *Nonionella stella* が、深海域であるにも関わらず、細胞内に葉緑体と思われる組織を持っているなど、興味深い事例も報告されている(Gryzyski et al., 2002). こうした研究課題に取り組む上でも、調査研究が比較的容易な阿蘇海に産出す

表 1. 阿蘇海の底生有孔虫の産出表.  
Table 1. Faunal list of benthic foraminifera in Aso-kai Lagoon.

	Oct. 2001																				June 2002							Jul. 2002																																																																																																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	8	14	15	16	17	19	20	22	23	19	21																																																																																																		
<b>Agglutinated Foraminifera</b>																																																																																																																																	
<i>Eggerelloides advena</i>						1	2																								4																																																																																																		
<i>Textularia</i> sp.																									1										3																																																																																														
<i>Tiphotrocha kelleltae</i>																									1																	2		2																																																																																					
<i>Trochammina</i> cf. <i>japonica</i>	37	56	2	1	6	64	92	27	1	9	1	1					1	2	2		7					2	1	2	6	5	2		2																																																																																																
<i>Trochammina iriflata</i> ?																									1																																																																																																								
<i>Trochammina pacifica</i>																									1																																																																																																								
<i>Trochammina</i> sp. A																									1																																																																																																								
Agg. Foram. gen. et sp. indet.																									1																																																																																																								
<b>Calc. Porcellaneous Foraminifera</b>																																																																																																																																	
<i>Cyclogure planorbis</i>																									1																	1																																																																																							
<i>Massilina</i> ? sp.																									1																	2																																																																																							
<i>Milolinella</i> sp.																									1																	2																																																																																							
<i>Quinqueloculina</i> sp. A	6				1	3	2	5	6	5	8	2					2								5							2																																																																																																	
<i>Quinqueloculina</i> sp. B	2	21	8	2	6	2					2	14					3	1								5																																																																																																							
<i>Quinqueloculina</i> sp. C	3	4	1			6	3					1												5																																																																																																									
<i>Quinqueloculina</i> sp. D																									2																																																																																																								
<i>Quinqueloculina</i> sp. E																									1																																																																																																								
<i>Quinqueloculina</i> sp. F																									1																																																																																																								
<i>Quinqueloculina</i> sp. G																									1																																																																																																								
<i>Quinqueloculina</i> sp. H																									4																																																																																																								
<i>Quinqueloculina</i> sp. I																									1																																																																																																								
<i>Triloculina</i> sp.																									1																																																																																																								
Calc. Porc. Foram. gen. et sp. indet.	3	1	2			1	3	5	3	2	3	4												5	3			1	2	3	4	1	3	1																																																																																															
<b>Calc. Hyaline Foraminifera</b>																																																																																																																																	
<i>Allanahacockia</i> ? sp.																									1																																																																																																								
<i>Ammonia beccarii</i> forma 1																									1																																																																																																								
<i>Ammonia</i> cf. <i>A. beccarii</i> forma 1	21	23																								2		2	3																																																																																																				
<i>Ammonia</i> cf. <i>A. beccarii</i> forma 2																									1																																																																																																								
<i>Ammonia japonica</i>																									1																																																																																																								
<i>Ammonia</i> sp. A																									1																																																																																																								
<i>Ammonia</i> ? sp. indet.	1	3																																																																																																																															
<i>Bolivina striata</i>																									1																																																																																																								
<i>Bolivina tokiokai</i> ?																									1																																																																																																								
<i>Bolivina</i> sp. A																									1																																																																																																								
<i>Bolivina</i> sp. B																									2					1																																																																																																			
<i>Brizalina seminuda</i>																									1					3										1		3	1	1																																																																																					
<i>Bulminella elegantissima</i>																									1																																																																																																								
<i>Cassidulina</i> sp.																									1																																																																																																								
<i>Cibicides lobatulus</i>																									1																																																																																																								
<i>Cibicides</i> cf. <i>lobatulus</i>																									1																																																																																																								
<i>Cibicides subdepressus</i>																									2					2										1																																																																																									
<i>Cibicides</i> sp. indet.																									1																																																																																																								
<i>Cibicidoides</i> sp.																									2																																																																																																								
<i>Cymbalopollsetta</i> sp. A																									4					6					2					1																																																																																									
<i>Ephidium advenum</i> ?																									2																																																																																																								
<i>Ephidium crispum</i>																									1																																																																																																								
<i>Ephidium jensenii</i>	3				4	1	3	1	1																	1																																																																																																							
<i>Ephidium kushiroense</i>																									3																																																																																																								
<i>Ephidium</i> cf. <i>subarcticum</i>																									3																																																																																																								
<i>Ephidium subincertum</i>	1	1							1																																																																																																																								
<i>Ephidium</i> sp. A	1	29			1	8	2	3	2	3																	2		1																																																																																																				
<i>Ephidium</i> sp. B	1	3							1																																																																																																																								
<i>Ephidium</i> sp. C																									1																																																																																																								
<i>Ephidium</i> sp. D																									1																																																																																																								
<i>Ephidium</i> sp. E																									1																																																																																																								
<i>Gavelinopsis</i> ? sp.																									1																																																																																																								
<i>Glabratella</i> sp. A	2				1	1	2					3									1	4						1																																																																																																					
<i>Glabratella</i> sp. B																									3																																																																																																								
<i>Hanzawaia nipponica</i>																									1																																																																																																								
<i>Haynesina</i> sp.																									3																																																																																																								
<i>Hyalinea</i> ? sp.																									1																																																																																																								
<i>Nonionella stella</i>																									1																																																																																																								
<i>Nonionella</i> ? sp.																									1																																																																																																								
<i>Paracassidulina</i> ? sp.																									1																																																																																																								
<i>Pararotalia</i> ? sp.																									1																																																																																																								
<i>Planoglabratella subaerularis</i>																									1																																																																																																								
<i>Rosalina bradyi</i>																									3																																																																																																								
<i>Rosalina</i> sp. A	3				10	16	30	23	11	10	23																	6		1	1	3	1																																																																																																
<i>Rosalina</i> sp. B																									3																																																																																																								
<i>Rosalina</i> sp. C																									6																																																																																																								
<i>Rosalina</i> sp. indet.	1	1			1	2																						9		1																																																																																																			
<i>Trifarina</i> sp.																									1																																																																																																								
<i>Valvulineria hamanaoensis</i>	5	8			1																																																																																																																												
<i>Virgulineria fragilis</i>																									7					18					46					195					86					74					4					5					65					99					126					52					211					41					83					269					102					176					173					271					173				
Calc. Hyaline Foram. gen. et sp. indet.	1	5			4	3	3	7	3	2	5																																																																																																																						
<b>Total</b>	87	203	49	18	51	117	53	168	80	53	139	204	93	77	6	6	68	99	131	57	74	217	0	44	85	274	119	191	175	285	181																																																																																																		
Sample weight (g)	0.4	7.7	5.5	4.9	9.3	0.7	85	0.9	1.3	2.9	4.2	5.1	6.1	4.8	8.8	18	7.2	4.3	6.1	4.8	0.4	6.8	1.5	7.3	4.2	6.6	4.2	4.9	4.3	8.0	2.2																																																																																																		
Foraminiferal number (/g)	199	26	8.9	3.7	5.5	178	0.6	195	63	18	33	40	15	16	0.7	0.3	9.4	23	22	12	165	32	0	6	20	42	28	39	41	36	82																																																																																																		

る *Virgulineria fragilis* の知見は、有用な視点を提供するに違いないと我々は考える。

謝 辞

阿蘇海における野外調査では、溝尻の漁業協同組合の廣野薫参事と内藤十三生代表理事・組合長にご協力いただいた。鳥根大学教育学部の野村律夫教授には、電子顕微鏡写真の撮影にご助力いただいた。

本研究の一部は文部省科学研究補助金 奨励研究 (A) (代表者 田中里志, 課題番号 12740282) を用いて行われた。以上の皆様に心より厚くお礼申し上げます。

引用文献

Altenbach, A.V., Struck, U., Graml, M. and Emeis, K. (2002) The genus *Virgulineria* in oxygen deficient,

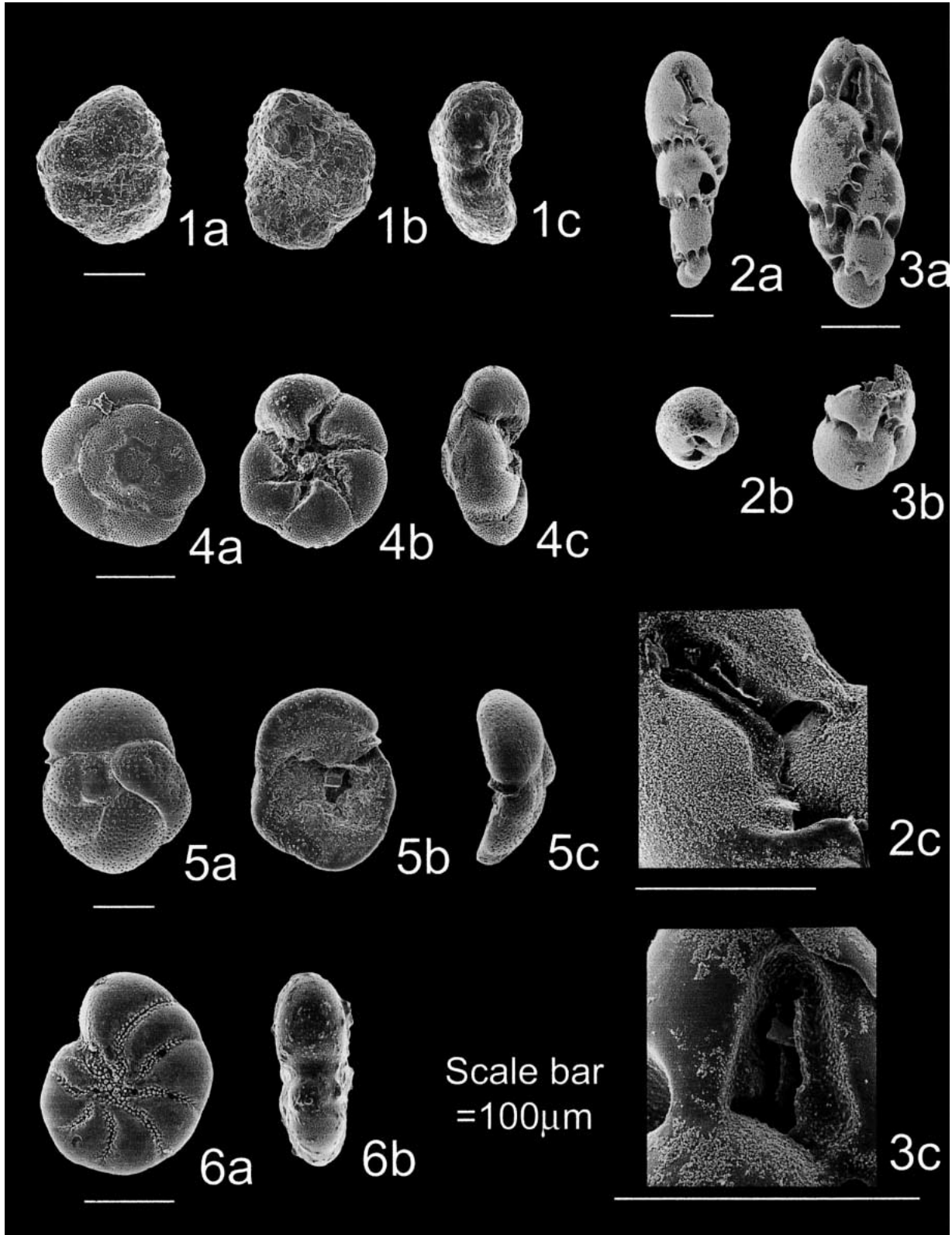


図 3. 阿蘇海における底生有孔虫の走査型電子顕微鏡写真.

**Fig. 3.** Scanning electron micrographs of benthic foraminifera in Aso-kai Lagoon.

1 a-c. *Trochammina* cf. *japonica* Ishiwada

2 a-c, 3 a-c. *Virgulinitella fragilis* Grindell and Collen

4 a-c. *Ammonia* cf. *A. beccarii* forma 1

5 a-c. *Rosalina* sp.A

6 a,b. *Elphidium* sp.A

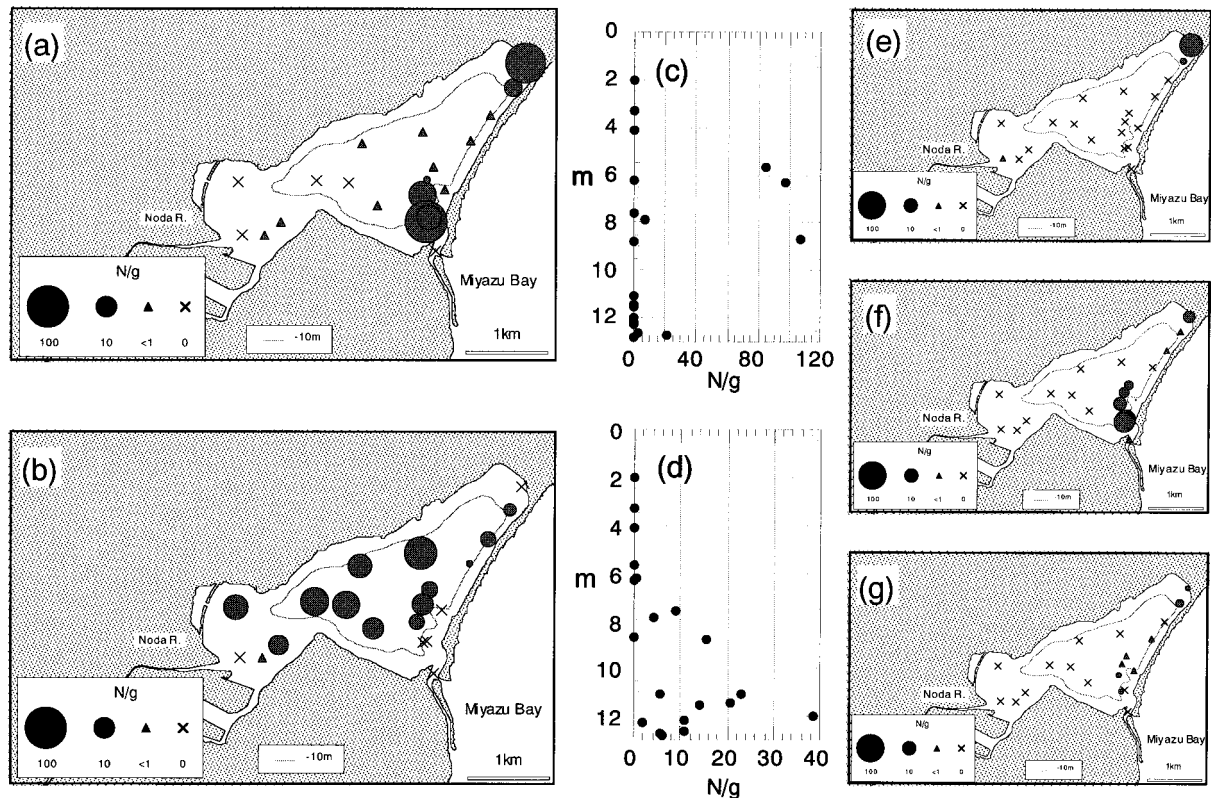


図4. 阿蘇海における底生有孔虫の平面・深度分布。

**Fig. 4.** Geographic distribution of abundance of *Trochammina* cf. *japonica* (a), *Virgulinitella fragilis* (b), *Ammonia* cf. *A. beccarii* forma 1 (e), *Rosalina* spp. (f) and *Elphidium* sp.A (g), and vertical distribution of abundance of *T.* cf. *japonica* (c) and *V. fragilis* (d) in Aso-kai Lagoon.

oligotrophic, or polluted sediments. In *Forams 2002 Abstract*, (ed.) S.A. Revets, International Symposium on Foraminifera: 20.

Bernhard, J.M. (2002), The anoxic Cariaco Basin has benthic foraminifera: Preliminary observations on the ecology and ultrastructure of *Virgulinitella fragilis*. In *Forams 2002 Abstract*, (ed.) S.A. Revets, International Symposium on Foraminifera: 24-25.

Grindell, D.S. and Collen, J.D. (1976) *Virgulinitella fragilis* n. sp. (Foraminiferida) from Wellington Harbour, New Zealand. *Revista Espanola de Micropaleontologia*. 8 (2): 273-278.

Grzymski, J., Schofield, O.M., Falkowski, P.G. and Bernhard, J.M. (2002) The function of plastids in the deep-sea benthic foraminifer, *Nonionella stella*.

*Limnology and Oceanography*, 47 (6): 1569-1580.

北里洋 (2002) 微生物がかかわった地球と生物の進化. 月刊地球, 24 (6), 437-443.

Kitazato, H. and Matsushita, S. (1996) Laboratory observation of sexual and asexual reproduction of *Trochammina hadai* Uchio. *Trans. Proc. Paleont. Soc., Japan, N. S.*, (182): 454-466.

Nomura, R. and Seto, K. (1992) Benthic foraminifera from brackish Lake Nakaumi, San-in District, southwestern Honshu, Japan. In *Centenary of Japanese Micropaleontology*, (eds.) K. Ishizaki and T. Saito, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo: 227-240.

高田裕行・高安克己 (2001) 汽水域奥部に優占する特異な底生有孔虫群. 月刊海洋, 33 (6): 425-430.



## 活動日誌

### 2002年(平成14年)

4月1日 竹廣文明助教授の後任として、堀之内正博助教授着任。森山和子事務補佐員の後任として、福原千晴事務補佐員着任。

4月5日 運営委員会

4月22日 管理委員会

4月30日 運営委員会

5月10日 第46回『汽水域懇談会』

埼玉大学理工学研究科の浅枝隆教授が「モデル解析による抽水植物群落における栄養塩循環の定量評価」と題して話題提供。

5月 中海分室の改装工事完了

5月15日 拡大管理委員会

6月1日 総合理工学部から瀬戸浩二助教授異動着任。

6月20日 特別講演会「未踏の地球深部への挑戦ー統合国際深海掘削計画ー」

海洋科学技術センター深海地球ドリリング計画(OD21)推進本部長平朝彦氏講演。

7月 建物改修工事のため、総合理工学部1号館全学共有スペースに仮移転(2003年2月まで)。

7月22日 運営委員会

8月1日 拡大(教員資格審査)管理委員会・管理委員会

8月9日 管理委員会

9月4日 拡大(教員資格審査)管理委員会・管理委員会

10月5日 しまね県民大学(専門講座・環境)を神

西湖において開催。参加者39名。

10月16日 5人目の専任スタッフとして倉田健悟助教授着任。

10月28日 拡大管理委員会・管理委員会

11月2・3日 応用生態工学会主催の現地見学会とフォーラム、「自然再生事業と市民活動ー霞ヶ浦・琵琶湖・宍道湖・中海ー」を共催。



11月3日のフォーラム(松江テルサ)

11月 研究機関研究員(非常勤講師)として高田裕之氏と宮本康氏着任。

11月15日 「大学等地域開放特別事業」

八束町教育委員会及び国土交通省境港湾事務所の協力を得て、八束中学校の生徒を対象に中海の湖上観察会開催。

11月22日 第47回『汽水域懇談会』

堀之内・倉田両助教授が、それぞれ「アマモ場の魚類群集構造の形成機構」および「汽水域の沿岸部を利用する人間と生息場所とする生物の共存」と題して話題提供。

### 2003年(平成15年)

1月6日 運営委員会

1月11日 第10回新春恒例「汽水域研究発表会」を島根県会館で開催(県内外から75名が参加)。

1月20日 拡大管理委員会

2月2日 「おもしろ環境フェスティバル」(財島根ふれあい環境財団21, 松江市環境フェスティバル実行委員会, 島根大学社会連携推進本部主催)に参加(於松江くにびきメッセ)。

2月3日 センターの客員Ⅲ種研究員(教授)として、インドのカカニ・ナゲスワラ・ラオ氏着任。

2月 建物の改修が1月末に完成し、2月中旬引っ



しまね県民大学での湖上観察(神西湖)





おもしろ環境フェスティバル(くにびきメッセ)

越し完了。

2月27日汽水域研究センター研究推進協議会開催。

2月28日 新センターお披露目会。

3月4日 「しまね産学官研究交流会」(主催、島根大学ほか)にてポスター展示および施設案内(堀之内・倉田)。会場；島根大学学生会館

3月8日 学長裁量経費による「ウェルカム島大」企画の一環として、白鳥号による早春宍道湖クルージング開催。

3月31日 吉田洋子さん退職。

## 平成14年度科学研究費補助金

基盤研究(A)(2)「中海干拓中止後の汽水環境の修復および保全に関する研究」(継続, 研究代表者；高安克巳 研究分担者；國井秀伸, 瀬戸浩二)

基盤研究(B)(2)「汽水域における水生絶滅危惧植物の保全と修復」(継続, 研究代表者；國井秀伸

研究分担者；高安克巳)

若手研究(B)「南極湖沼に記録された完新世の古気候変遷史」(新規, 研究代表者；瀬戸浩二)

基盤研究(A)(1)「長良川河口堰が汽水域生息場の特性に与えた影響に関する研究」(継続, 研究分担者；國井秀伸 研究代表者；金沢大学工学部玉井信行)

## 公共団体、民間企業等との 共同研究、受託研究など

(受託研究)

「中海・宍道湖における水生植物の保全と修復に関する調査研究」(國井秀伸, 委託者；国土交通省出雲工事事務所)

「宍道湖・中海周辺の水域における絶滅危惧植物の実態調査」(國井秀伸, 委託者；ホシザキグリーン財団)

(共同研究)

「中海宍道湖における汽水環境と貧酸素化の研究」(高安克巳+(有)徳岡汽水環境研究所)

(奨学寄附金)

「沿岸域環境の衛星リモートセンシングの応用」(高安克巳, 寄附者；(財)島根県環境保健公社)

「北浦・古浦における魚類相の調査」(堀之内正博, 寄附者；(財)島根県環境保健公社)

(その他研究助成金)

「沿岸生態系におけるヨシ帯の役割—ヨシ帯の衰退・消滅は魚類群集にどのような影響を及ぼすか—」(堀之内正博, 住友財団研究助成)

## 編集後記

3月発行の予定がだいぶ遅くなってしまいました。初校は3月12日に終え、英文校正を除いて年度内には印刷へ回せる状態だったのですが、ラグナ用の予算をセンターの引越しの費用に使ってしまったため、年度を越えての発行となりました。早くに原稿を提出していただいた著者の皆様に、この場を借りてお詫びいたします。ラグナの発行形態に関しては以前から論議しているところですが、今号までは従来そのままの形態での発行となりました。センターの専任スタッフ5名が昨年秋によく揃いましたので、次号以降の発行形態についてもそろそろ結論を出そうと思っております。ご意見等、引き続きお待ちしております。

## 編集要項

1. LAGUNA (汽水域研究) は、島根大学汽水域研究センターにおいて、年1回発行する。
2. 本誌には、本センターの専任研究部門と共同研究部門の教官、研究員、客員研究員、および編集委員会が特に認めた者が投稿することができる。
3. 編集委員には本センターの専任教官があたる。
4. 本誌の内容は、原著論文 (original article)、短報 (short note)、資料・解説 (review) など、広く汽水域に関わるもの、および本センターの活動に関わるものとする。
5. 執筆者は次項の執筆要項に従うものとする。
6. 投稿原稿の掲載の可否については、関連する研究者の査読を経た後に、編集委員会が決定する。
7. 別刷は50部を本センターの経費から負担する。

## 執筆要項

1. 投稿原稿の本文の用語は日本語または英語とする。原稿の長さについては特に規定しないが、大部の場合は編集委員が縮小を要求する場合もある。
2. 原稿はできるだけワープロを使用することとする。その場合、1行23文字(半角46字)、1ページ23行、上下左右のマージンを2.5cm以上空けること。句読点は“,”と“.”を用いること。また、文字指定はプリントアウトした原稿に行い、ワープロ原稿には特殊文字を用いないこと。  
手書き原稿の場合は、400字詰めA4版横書き原稿用紙を用いること。  
なお、刷り上がり1ページは、横書き1行23字、46行の2段組(約2,100字)を基本とする。
3. 数字はアラビア数字、生物和名はカタカナを用い、学名はイタリック指定のこと。時間、濃度、速度などを表す場合には、SI単位を用いること。
4. 報文の構成は以下の通りとする。  
日本語原稿の場合：表題、著者名・所属、英文表題、英文著者名・所属、英文摘要 (Abstract, 200語以内程度)、英文キーワード(アルファベット順に5語以内)、本文、謝辞、引用文献。  
英語原稿の場合：表題、著者名・所属、日本語表題、日本語摘要、キーワード、本文、謝辞、引用文献。  
原稿の第1枚目は表紙とし、その上半部には表題から英文所属までを書く。原稿第2枚目には摘要とキーワードを書き、本文は第3枚目から始める。表紙を含め、通しページ番号を打つこと。
5. 本文中での文献の引用は次の例に従う。また、3名以上のものについては、「・・ほか」または「・・et al.」とする。  
・・・山田・松井(1993)は宍道湖・中海の魚類について・・・  
・・・and Avise et al. (1987) speculate that this may have arisen from・・・  
・・・植物生態学分野について記述している(吉田, 1992; 佐藤, 1993)。

6. 引用文献は謝辞の次にアルファベット順にまとめ、各文献は次の例に従う。

(論文)

Andrew, N.L. and Jones, G.P. (1990) Patch formation by herbivorous fish in a temperate Australian kelp forest. *Oecologia*, 85: 57-68.

樋口利雄 (1971) 東北地方の風穴地における鮮類植生. 鮮苔地衣雑報, 5: 174-178.

Iwakuma, T., Shibata, K. and Hanazato, T. (1989) Production ecology of phyto- and zooplakton in a eutrophic pond dominated by *Chaoborus flavicans* (Diptera: Chaoboridae). *Ecol. Res.*, 4: 31-53.

八木正一 (1984) 水道におけるかび臭障害の現状. 用水と排水, 26: 813-822.

山本進一 (1984) 森林の更新 - そのパターンとプロセス -. 遺伝, 38: 43-50.

(単行本)

北村四郎・村田源 (1971) 原色日本植物図鑑・木本編 I. 保育社, 大阪, 453p.

Parsons, T.R., Maita, Y. and Lalli, C.M. (1984) *A manual of chemical and biological methods of seawater analysis*. Pergamon Press, New York, 173p.

(章)

Dayton, P.K. and Tegner, M.J. (1984) The importance of scale in community ecology: a kelp forest example with terrestrial analogs. In: *A new ecology: novel approaches to interactive systems*. (eds.) Price, P.W., Slobodchikoff, C.N. and Gaud, W.S. pp. 457-481. Wiley, New York.

7. 図(写真を含む)と表は1つずつ別紙に書き、右上端に図・表の番号と著者名を鉛筆書きすること。また、日本語原稿の場合でも、図・表中の言語は、なるべく英文を用いることとし、説明文は英語と日本語の2通りで書くこと。なお、説明文は別紙にまとめて書き、本文に続くページ番号を打っておくこと。

図と表は原則としてそのまま製版できる状態とし、縮小率または縮小した場合

の横の長さを指定すること。なお、刷り上がりの図・表の大きさは、原則として横 17cm, または 8 cm, 縦は 24cm 以内となるので、これを考慮して製図、および縮小率の指定を行うこと。

表は、縦の罫線は使わず、横罫線も最小限にとどめること。写真は本文中に掲載する場合は図と同様な番号を用いてよい。独立した写真図版とする場合には、横 17cm, 縦 24.5cm の版面にバランス良く配置し、なるべく原寸大の印刷指定とする。図版中の図を本文中で引用するときには、(図版 I, 図 1), または (Plate I, Fig. 1) のようにする。

8. ワープロ原稿の場合は、なるべくテキストファイルとして保存したフロッピーディスク(使用したソフト名を明記すること)、A 4 版にプリントアウトした原稿 1 部、および図表原稿とそのコピー 1 部を提出すること。フロッピー原稿中では半角以外の文字指定は避けること。プリントアウトした原稿には、字体の指定と図表の挿入位置を赤色で印すこと。

手書き原稿の場合には、本文、図表ともオリジナルとそのコピー 1 部を提出すること。本文原稿には字体の指定と図の挿入位置を赤色で印すこと。

字体の指定は、本文の見出し項目(たとえば「はじめに」、「材料と方法」、「結果」、「考察」、または「結果と考察」)などは波下線でゴシック指定、学名など、イタリックの指定は下線を引いて行う。

9. 原稿は必要事項を記入した原稿整理カードとともに提出すること。

提出された原稿は原則として返却しない。返却希望者はその旨申し出ること。

◎原稿募集時に次のページのコピーを投稿申込書として使用してください。また、原稿投稿時には次々ページのコピーを原稿整理カードとして使用してください。

原稿募集時に提出してください

LAGUNA (汽水域研究)

## 投稿申込書

●以下の通りLAGUNA (汽水域研究) に投稿を予定しています。

年 月 日

---

著者名

本文は 英文 / 和文 (どちらかに○)

---

表 題

---

英文表題

---

予定原稿枚数	400字×	枚	図表枚数	
	または刷上り	枚程度		枚

---

連絡先：住所

氏名

TEL.

FAX.

E-mail

---

(編集委員会記入欄)

原稿提出時に添付してください

LAGUNA (汽水域研究)		原稿整理カード		受付番号	
著者氏名	和文				
	英文				
連絡責任者氏名	☎				
連絡先	Tel.	Fax.	E-mail		
表題	和文				
	英文				
用語種別 (○で囲む)	日本語文 英語文	原著論文, 総説, 短報, ノート, 討論, 紹介, 用語解説, 資料, 書評, 講演記録, その他			
原稿	フロッピーディスク; ファイル名 _____ 使用ソフト名 _____ プリントアウト原稿; A4 _____ 枚 (表紙, 要旨, 本文, 図表説明を含む) 図; _____ 枚 表; _____ 枚 図版; _____ 枚 手書き原稿; 400字詰め原稿用紙 _____ 枚 (表紙, 用紙, 本文, 図表説明を含む)				
別刷	_____ 部 (自己負担) + 50部 (センター負担) = _____ 部				
備考			原稿発送日 年 月 日		
編集委員会メモ					
原稿受付	査読	受理日	校正		校了
			著者		