

マングローブ干潟における地下断面— 西表島の船浦湾を例に

田中秀典¹

The subsurface section of the mangrove tidal flat at the Funaura Bay, Iriomote Island

Hidenori Tanaka¹

Abstract: The mangrove sediment was observed by a core (8 sampling points) and trench (3 sampling points) investigation at the Funaura Bay, Iriomote Island, Okinawa Prefecture. The age of a mangrove roots or shells including the core samples were measured by the ¹⁴C method. Fine sand with abundant mangrove roots underlies the soil in the Backshore. The sediment of the mangrove swamp is mainly composed of weakly laminated mud. Tidal flat deposits consist of massive fine to medium sand. The section of the Funaura Bay is drawn based on these observations.

Key words: mangrove, tidal flat, Iriomote, Okinawa

1) はじめに

熱帯や亜熱帯の海岸線に見られるマングローブ林は潮間帯にしか成立できないため、海水準変動の影響を強く受ける。過去2万年以降に限ってみても、約130m程度の海面の上昇が見られ、それにともない潮間帯の位置も変化している。この潮間帯の移動にともない、マングローブ林も移動していると考えられる。そのためマングローブ堆積物は、海水準変動の指標とすることができる。Thom (1975), Woodroffe (1988, 1992, 1993), 菊池ほか (1978, 1980), 宮城・マキシミノ (1989), Miyagi and Fijimoto (1989) によるマングローブ林の研究により、完新世の地形形成過程とマングローブ林の成立とは密接な関連があることを示している。そこで、西表島北部の船浦湾のマングローブ干潟でコアの採集を行い、この湾におけるマングローブ干潟の地下

構造について観察をおこなった。

2) 調査地と方法

調査は1998年5月の大潮時に、沖縄県八重山郡にある西表島においておこなった(図1)。西表島は日本の中でもっとも広くマングローブ林が分布しており、大きい河川の河口にはかならずマングローブ林を観察することができる。特に、島の北側にある船浦湾は、川幅が20mほどの西田川が流れ込み、湾の縁にそってマングローブ林が帯状に分布しており、マングローブ林を構成する植物も7種類と日本の中ではもっとも多い。そのためこの湾は日本における典型的な亜熱帯の海岸線と考えられる。

この湾の環境は、干潟表層の堆積物の粒度組成や生物の分布などから、後背地、マングローブ林、前浜干潟の3つに大別できる(田中・前田, 1999)。3

¹ 財団法人島根県環境保健公社 Shimane Prefecture Environment and Health corporation, Matsue 690-0012, Japan
E-mail: t_hidenori@nifty.com

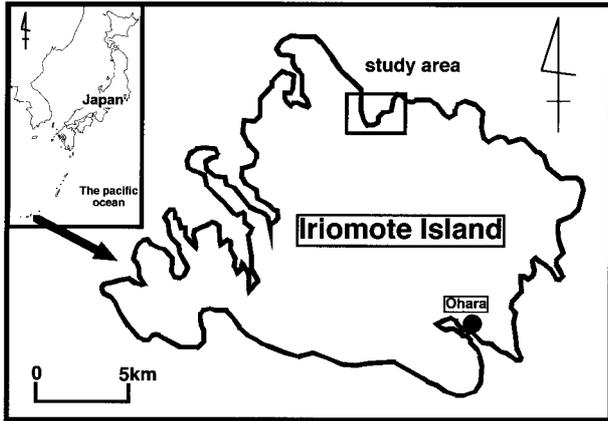


図1 調査地
Fig. 1 Location map

つの環境を全て含むように、全体で11ヶ所（マングローブ林と前浜干潟で8ヶ所・後背地で3ヶ所）において試料採集を行った。マングローブ林と前浜干潟の試料採集地点では、長さ1 m、直径8 cmの塩化ビニールパイプを打ち込み、表層から1 mの深さまでの堆積物を回収した（図2）。コアの回収率は70%から100%であった。また、後背地（Locs.3~5）ではコアによる堆積物の回収ができなかったため、現場において表層から1 mの深さまでトレンチを掘り、堆積物の観察を行った。さらに、マングローブ干潟の形成プロセスを観察するためにコア中に含まれるサンゴ片、貝殻片、マングローブの根を、炭素同位体法を用いて年代測定をおこなった。この論文においては、それぞれの環境において典型的と思われるコアのみについて述べる。

3) 結果

(1) マングローブ林（図3）

図3は、マングローブ林内のLoc.1で採集したコアの断面写真である。この地点は、今回採集したコアの中で、もっともマングローブ林の奥に位置している。ここでは、表面から70 cmまでの堆積物を採集することができた。堆積物の粒度はコアの中で変わらず、シルトサイズのもので構成されおり、深さによっては弱いラミナが見られた。また、マット状のマングローブの根が各所に見られた。このコアの深さ20 cmと40 cmあるマングローブの根を採集し、年代の測定をおこなった。その結果、20 cmでは 650 ± 70 Y.B.P.、40 cmでは 470 ± 70 Y.B.P.の値を示し、深さが浅い場所にあった根の方が古い年代を示した。現在のマングローブ林の根が深さ30 cmぐら

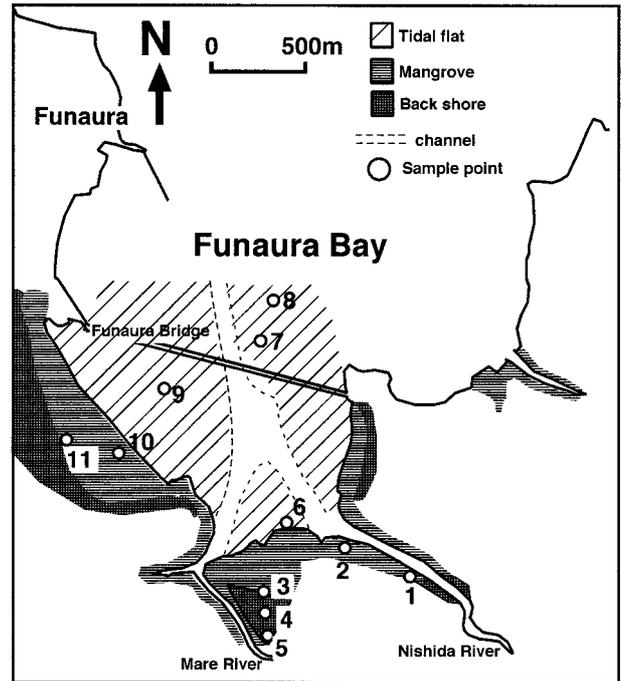


図2 試料採集地点
Fig. 2 Sampling points

いのところに見られることから、年代の新しいマングローブの根が古いマングローブの根を越えて成長したものと思われる。

図4は、マングローブ林内のLoc.10で採集したコアの断面の写真である。この地点は、マングローブ林の環境と前浜干潟の境界付近であり、Loc.1より海側に近い。ここでは、表面から80 cmからまでの堆積物を採集することができた。このコアは堆積物の粒度組成から、1) 表層から40 cmまでの中粒から粗粒のマングローブ堆積物、2) 40 cmから80 cmまでの極粗粒～小レキサイズで上方細粒化した堆積物の2つに分けることができる。この下部の粗い堆積物の中には、破損した貝殻や枝サンゴの破片が含まれていた。これらの貝殻片は、マングローブ干潟に生息していない貝類の殻で、殻の破損の程度は大きい。また、深さ40 cmと80 cmの場所には、厚さ2 cm程度のマングローブの根のマットが見られた。深さ80 cmのマングローブ根と深さ60 cmの深さに含まれる貝殻の年代を炭素年代法で測定した。その結果、マングローブの根では、 330 ± 60 Y.B.P.、貝殻の年代は 2570 ± 80 Y.B.P.を示し、約330年前のマングローブ堆積物を、はるかに古い堆積物が覆っていることがわかった。

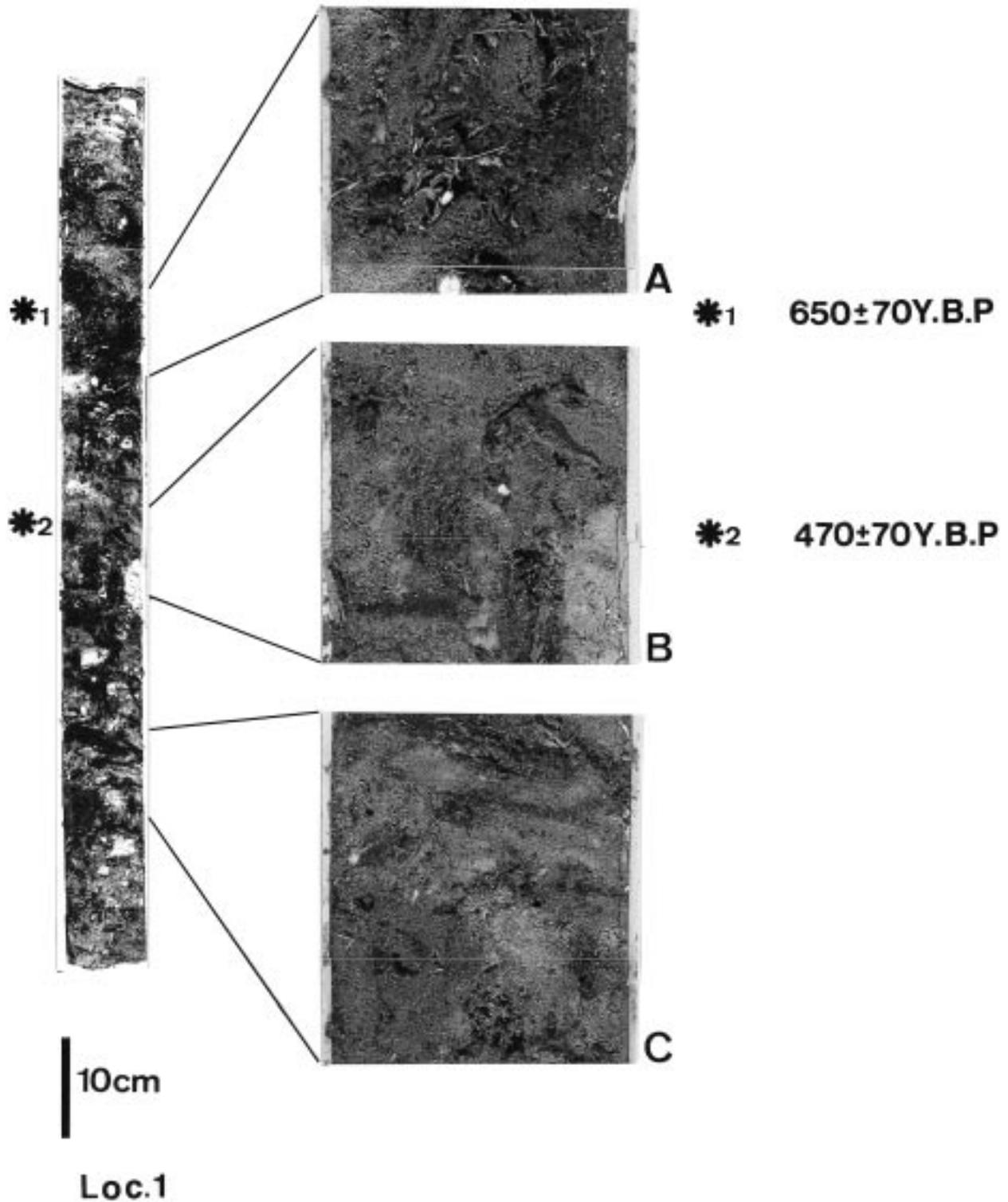


図3 コアの断面写真 (Loc.1)

Fig. 3 Core section of Loc.1

(2) 前浜干潟 (図5)

図5は、前浜干潟のLoc.9で採集されたコアの断面の写真である。ここでは、干潟表面から深さ95cmまでの堆積物を採集することができた。これは、深さ95cmで基盤の珊瑚礁があったためであ

る。採集された堆積物の粒度はほとんど均質で、細粒から中粒砂で構成されていた。また、細かく破損したサンゴ片や貝殻片がコア全体に分布していた。基盤岩の珊瑚礁の年代を測定すると 3470 ± 50 Y.B.P. の値を示した。これ以外の前浜干潟において採集

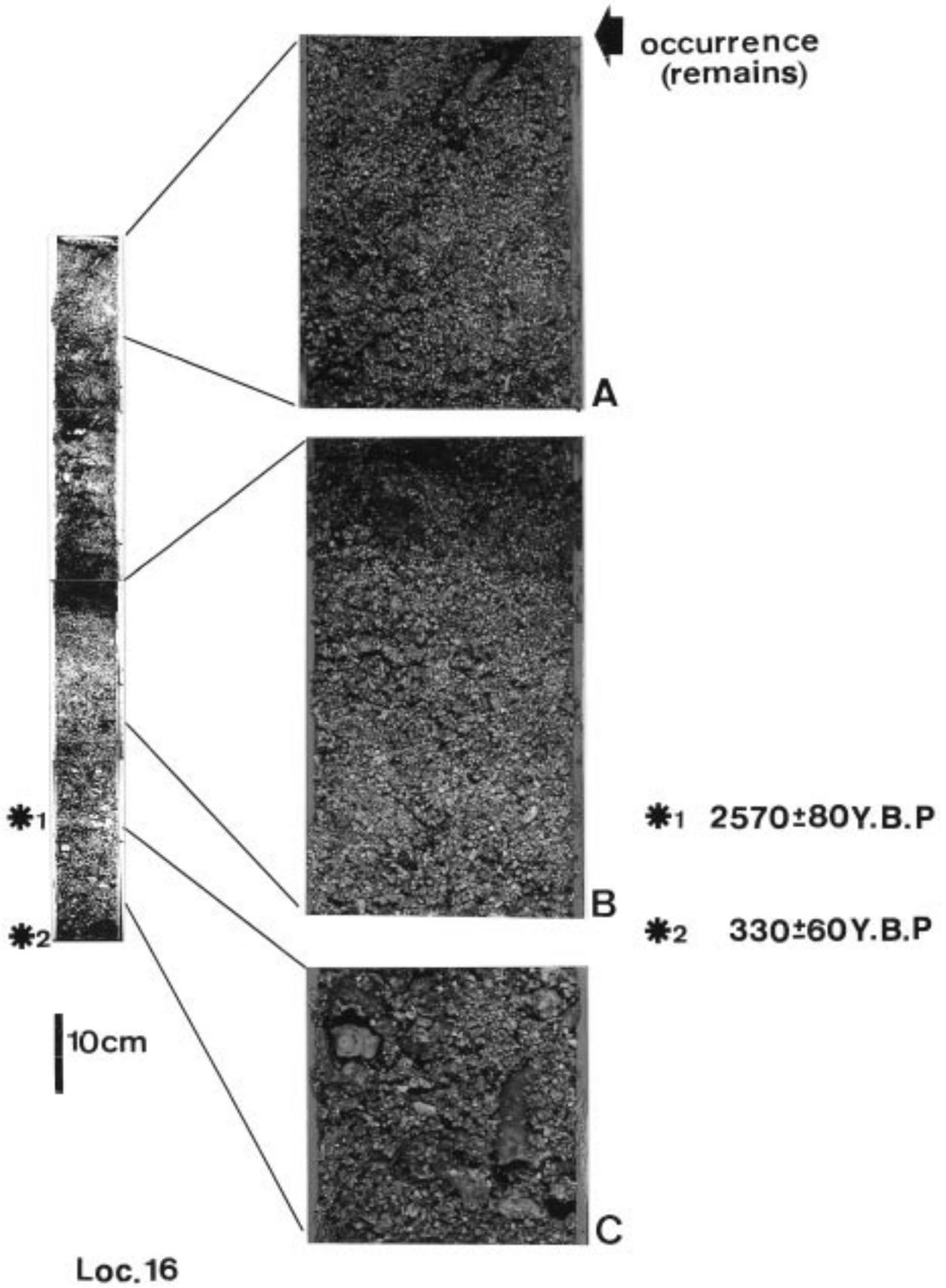
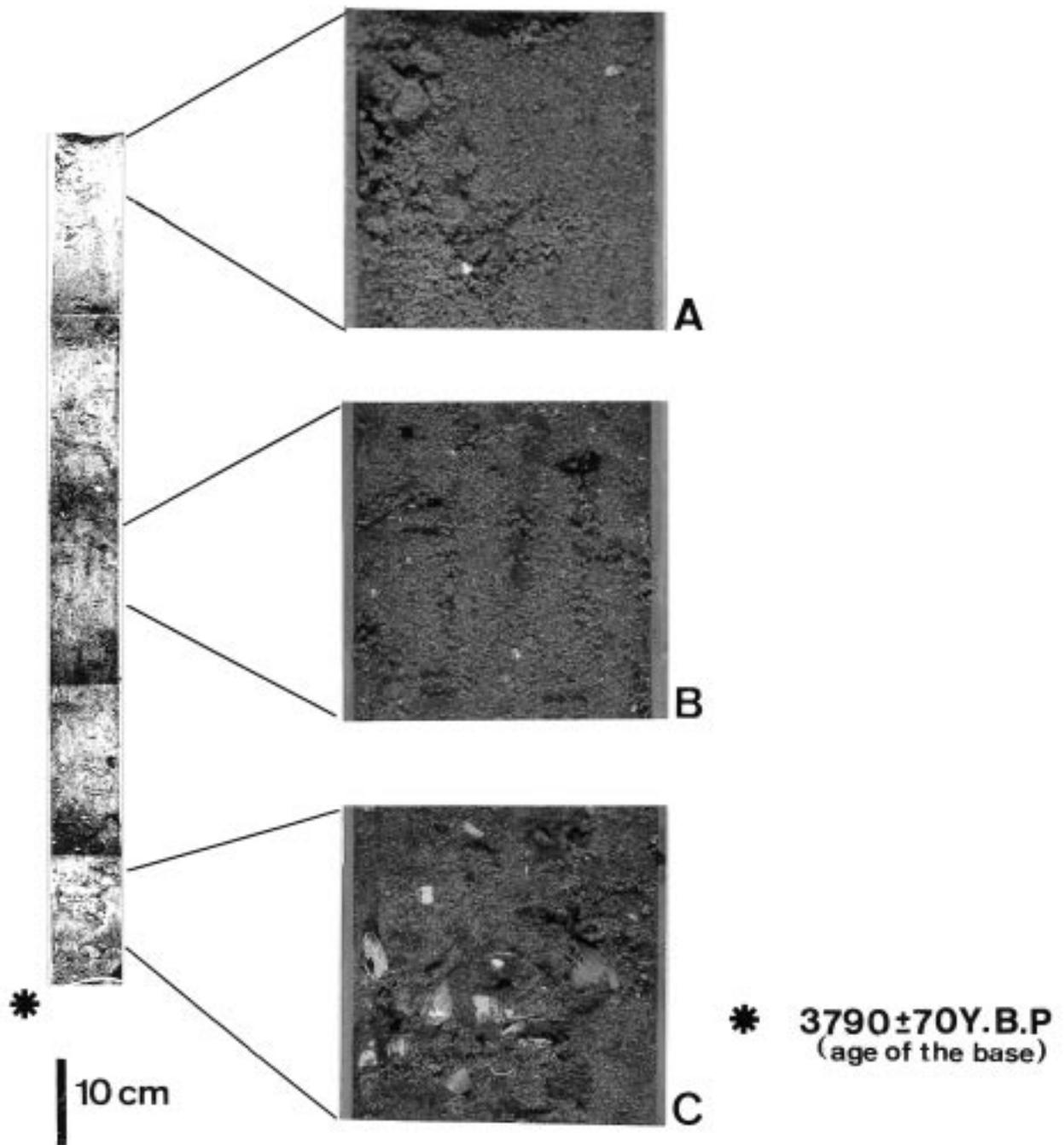


図4 コアの断面写真 (Loc.10)
Fig. 4 Core section of Loc.10



Loc.11

図5 コアの断面写真 (Loc.9)
Fig. 5 Core section of Loc.9

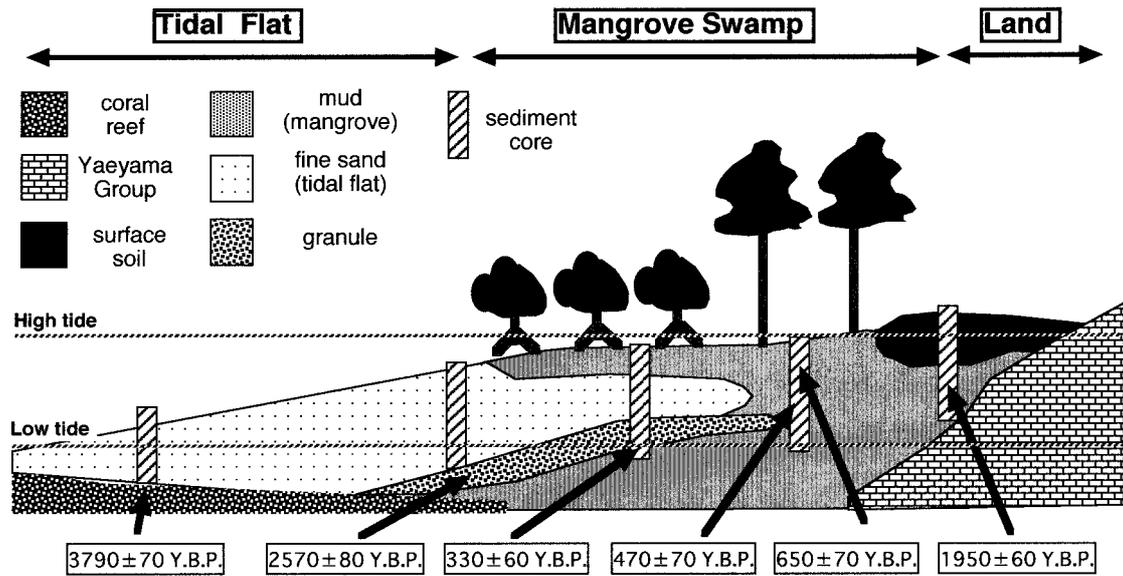


図6 船浦湾の模式断面図

Fig. 6 The section of the Funaura Bay based on trench survey and core sampling.

されたコアにおいても、基盤までの深さが違うのみで、ほぼ同じ特徴を示した。基盤の深さは、船浦橋に向かって浅くなる傾向を示した。

(3) 後背地

マングローブ林より陸側の場所で、表面は陸生の植物群落に覆われている。満潮時でも冠水せず、最大海面より 50 cm ほど高い。真っ黒な表土が Loc.3 では表面から深さ 60 cm まで続いており、それより深い場所はマングローブ堆積物で構成されていた。Locs.4, 5 と陸に近づくにつれて表土の厚さは薄くなり、もっとも奥部では基盤の中新統の八重山層群が剥き出していた。また、表土と同じようにマングローブ堆積物も陸側に向かって薄くなっていった。Loc.3 の深さ 60 cm のマングローブの根を年代測定すると 1950±70 Y.B.P. の値が得られた。

4) ま と め

図6は、今回の調査で採集した8本のコアと3ヶ所のトレンチ調査に基づいて描いた船浦湾におけるマングローブ干潟の模式的な断面図である。今回の調査は表層1mの堆積物の観察のみであるため、船浦湾におけるマングローブ林の発達についての詳細なことはわからないが、この図から以下のようなシナリオが考えられる。約2000年前の船浦湾は、現在のマングローブ林よりも内陸（現在の後背地）に林

が発達していて、約330年前までには現在とほぼ同じところまでマングローブ林が発達した。その後、粗粒な堆積物が堆積する環境に変化し、マングローブ林は陸側にいったん後退したが、再び現在の位置まで発達した。このような変遷が地域的なものかどうかは、さらなる研究が必要である。

5) 謝 辞

この論文をまとめるにあたり、京都大学大学院理学研究科の前田晴良助教授には、現場における試料採集から分析まで終始ご指導いただいた。京都大学大学院理学研究科の増田富士雄教授には、コア中に見られる堆積構造についてのアドバイスいただくとともに、炭素年代の測定に関してお世話になった。当時京都大学大学院の院生であった、辻野匠、坂倉範彦、斎藤良、関口智宏の各氏には、コア採集の際に多大なご協力をいただくとともに、現地で色々と議論していただいた。井川浩子さんには、論文作成のさいに色々と手伝っていただいた。

6) 引用文献

菊池多賀夫・田村俊和・牧田 肇・宮城豊彦 (1978): 西表島仲間川下流の沖積平野にみられる植物群落の配列とこれにかかわる地形 I マングローブ林. 東北地理, 30, 71-80.

- 菊池多賀夫・田村俊和・牧田 肇・宮城豊彦
(1980): 西表島仲間川下流の沖積平野にみられる
植物群落の配列とこれにかかわる地形Ⅱ サガリ
バナ林・アダン林. 東北地理, **32**, 185-193.
- Miyagi, T. and K. Fujimoto (1989): Geomorphological
situation and stability of mangrove habitat of Truk
Atoll and Ponape Island in the Federated States of
Micronesia. *Sci. Repts. Tohoku Univ.*, Ser. 7 (Geogr.),
39, 25-52.
- 宮城豊彦・G. Maximino (1989): フィリピン, ルソ
ン島におけるマングローブ的環境の成立とその人
為的破壊の実証的研究および修復への提言. 国際
協力推進協会助成研究報告書, 45 p.
- 田中秀典・前田晴良 (1999) 現生マングローブ干潟
におけるキバウミニナの殻の保存状態と分布. 地
質学論集, **54**: 151-160.
- Thom, B. G., L. D. Wright & J. M. Coleman (1975):
Mangrove ecology and deltaic estuarine geomorphology,
Cambridge Gulf-Ord River, Western Australia. *J.
Ecol.*, **63**, 203-222.
- Woodroffe, C. D. (1988): Mangroves and sedimentation
in reef environment of past sealevel changes, and
present sea-level trends? *Proceeding of the 6 th
International Coral Reef Symposium*, Australia, **3**, 535
-539
- Woodroffe, C. D. (1992): Mangrove sediments and
geomorphology. In: A. I. Robertson and D. M. Alongi
eds. *Tropical Mangrove Ecosystem* (Coastal and
estuarine series; 41), American Geophysical Union,
329 p, 7-41.
- Woodroffe, C. D. (1993): Geomorphological and climatic
setting and the development of mangrove forests. In:
H. Lieth and A. Al Masoom eds. *Towards the Rational
Use of High Salinity Tolerant Plants*, **1**, 13-20.

湖山池の湖底堆積物に包埋される珪藻からみた古環境変遷

浜田哲弘¹・作野裕司²・高安克己³・瀬戸浩二⁴・赤木三郎⁵
西田良平⁶・田中善蔵⁷・村田祐司⁸・浅村久志⁸・福田啓子⁹

Diatom remains and its vertical change of the core samples from Lake Koyama-ike, Tottori Pref., southwest Japan.

**Tetsuhiro Hamada¹, Yuji Sakuno², Katsumi Takayasu³, Koji Seto⁴,
Saburo Akagi⁵, Ryohei Nishida⁶, Zenzo Tanaka⁷, Yuji Murata⁸,
Hisashi Asamura⁸, Keiko Fukuta⁹**

Abstract: Abstract: For understanding paleoenvironmental changes, an analysis of diatom of a core KY 9401 from Lake Koyama-ike was carried out. The results are summarized as follows: 1) 23 species in 41 genera were identified in diatom in the core. 2) Most dominant species of diatoms in the core are a limnetic *Melosira granulata*, and other diatoms are also limnetic species. 3) That many kinds of diatoms in the core are limnetic or brackish species indicates that the environments of the lower part of the core had slightly higher saline than the present environments have. 4) Since the number of diatoms found in the layer upper than 54 cm from the top and the number of diatoms found in the layer lower than that differ markedly, it is considered that water quality environments in Lake Koyama-ike changed at that time. 5) Many species living in the moderately polluted environments are found in the part upper than 20 cm in the core, which reflects the recent pollution of the lake.

Key words: diatom remains, paleoenvironmental change, core sample, Lake Koyama-ike

はじめに

湖山池は鳥取市の北西部に位置する海跡湖である。流入河川は長柄川、福井川、三山口川等であり、唯一の流出河川である湖山川を通じて日本海とつながっている。湖山池の塩分濃度は日本海からの海水流入に影響されるが、湖山川下流にある水門操作に

より海水の逆流が防がれ、現在の湖山池の水質はほぼ淡水である(高安ほか, 1990)。

湖山池の地質学的研究として、これまで星見(1990)、赤木ほか(1993)らが湖山池周辺から得られたボーリングデータやトレンチデータ等を用いて、更新世から現代までの地質環境及び地誌的環境を論じている。また最近では湖底堆積物の試料を用

¹ 青谷町役場 Town office of Aoya, Tottori 689-0592, Japan

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

³ 鳥根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environments, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

⁴ 鳥根大学総合理工学部 Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

⁵ 放送大学 The university of the air, Tottori Study Center, Tottori 680-0947, Japan

⁶ 鳥取大学工学部 Faculty of Engineering, Tottori University, Tottori 680-0945, Japan

⁷ 元鳥取大学教養部

⁸ 元鳥取大学教育学部

⁹ 元鳥取大学農学部

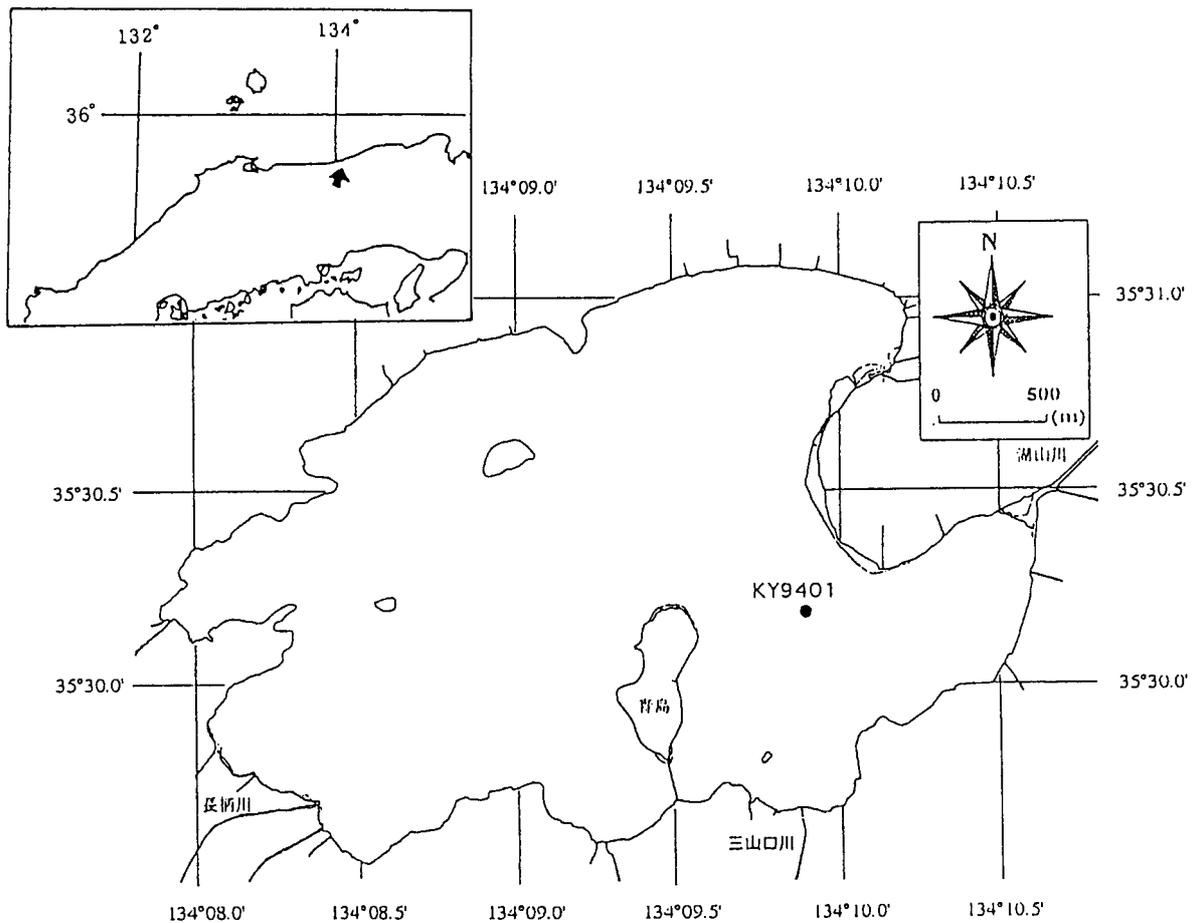


図1 試料採取地点
 Fig. 1 Sampling station

いて、比較的新しい(少なくとも完新世以降の)湖山池における環境変遷の推定が試みられている(高安ほか, 1994; 作野ほか, 1995)。これらは主に堆積物の粒度分析や化学分析によるものであるが、古環境を論じる際に重要な珪藻遺骸の分析や花粉分析に代表される生物分析を行った例は少ない。

本研究で扱う珪藻の特性としては、わずかな水質の変化に反応して、その群集構成を大きく変えてしまうことがあげられる。また珪藻はその殻(遺骸)を湖底や海底に堆積させるため、湖底堆積物中に残された珪藻殻を観察することによって、堆積当時どのような珪藻種がその場所で優占したかを、そしてその構成から堆積時の古環境を復元することができる(鹿島, 1998)。

このような背景から、湖山池の古環境変遷をより明らかにするため、1994年に湖山池(青島東部)から湖底堆積物の柱状試料(以下、コアと呼ぶ)を取得して珪藻の遺骸分析を行った。そして粒度分析や

化学分析の結果及び現生の珪藻分布(例えば田中ほか, 1990)と比較することにより、湖山池の古環境変遷について考察を行ったので、ここに報告する。

方 法

1. 湖底堆積物の採泥及び分割方法

湖底堆積物の採泥は、1994年5月13日、青島の北端から東へ約500m沖合いの地点(北緯 $35^{\circ}30.195'$ ・東経 $134^{\circ}9.984'$ 、水深3.3m)で行った(図1)。採泥地点の位置決定はGPSプロッター(日本無線社製JLU-121P, 島根大学汽水域研究センター所有)を用い、水深決定には魚群探知機(島根大学汽水域研究センター所有)を用いた。湖底堆積物は2隻の小型船舶を横向きに連結し安定させた後、60kgの重りを装着した松本・青木式不攪乱採泥器(内径5.5cm, 長さ2m, 島根大学汽水域研究センター所有)を垂直落下させることにより取得した。採泥

の結果全長 92 cm の柱状試料が得られた。

採泥した柱状試料は、実験室に持ち帰り垂直方向に 1 cm づつの間隔で粒度分析用、含水率・含砂率の測定用、化学分析用、微化石（珪藻・花粉）分析用に分割した。微化石分析遺骸の分析方法及び結果についてはすでに作野ほか（1995）が報告しているので、ここでは微化石分析のうち珪藻分析のみの方法について次節で述べる。

2. 湖底堆積物の珪藻分析方法

珪藻試料の処理は、1 試料につき 2 枚作成し、計 184 枚の珪藻分析用スライド（スミヤスライド）を作成した。なお、スミヤスライドの作成方法は、鹿島（1998）を参考にされたい。作成したスミヤスライドを使って、下記の手順により珪藻分析を行った。

1) 検鏡

検鏡は生物顕微鏡（OLYMPUS VANOX、鳥取大学教養部生物学教室所有）を使用して行った。顕微鏡の倍率は 10×40 倍を用い、1 プレパラートにつき、殻片数 200 個を数えて種の同定を行った。

2) 珪藻の顕微鏡写真撮影

珪藻の顕微鏡写真撮影は顕微鏡写真装置（OLYMPUS PM-10 A、鳥取大学教養部生物学教室）を使用して行った。撮影倍率は 5×40 倍である。

3) 珪藻の同定

珪藻の同定は、主に Hustedt (1930 a) *Susswasser-Flora Mitteleuropas*, Heft 10, Bacillariophyta と水野（1971）日本淡水プランクトン図鑑を使用し、殻の形態、模様、大きさに基づいて同定を行った。ただし、種まで明確に特定できる場合と、属までしかわからない場合があったため、珪藻の相対頻度は属構成の比率として算出した。

結果及び考察

1. 珪藻遺骸の出現状況

KY 9401 コアから同定できた珪藻の種類は 23 属、41 種であった。これらの珪藻の顕微鏡（5×40 倍）写真を付図 1、付図 2 に示す。また図 2 に珪藻分析結果（属毎に相対頻度分布を表す）を示すととも

に、以下に珪藻の鉛直的な出現状況を記載する。

1) *Melosira* 属（淡水～汽水生種）

この属は、全試料中に分布していた。また相対比は他の属に比べ圧倒的に高い値を示した。深さ 1 cm～56 cm までは 50% 以上だが、57 cm から下で 50% を下回る所が現れ、77 cm での 28.5% を最低に、92 cm まで 30～40% 前半の値を示した。

2) *Cyclotella* 属（淡水生種）

この属は全試料中に分布していた。相対比は深さ 41～42 cm の所で 6%、89 cm の所で 5.25% であったが、ほとんどが 5% 未満を示した。

3) *Coscinodiscus* 属（淡水～汽水生種）

この属は、全試料中に分布していた。相対比は深さ 24 cm までは 12% 前後、25～54 cm では 17% 前後の値を示した。55 cm の所で最低値 7.6% を示した後、徐々に値が高くなり 75 cm から 40% 以上の値を示し、84 cm の所で最高値 52% を示した。総じて見ると、相対比は上方から下方へ向って高くなる傾向を示し、75～84 cm では *Melosira* 属よりも *Coscinodiscus* 属の方が相対比で上回った。

4) *Tabellaria* 属（淡水生種）

この属は、35 試料でまばらに分布していた。相対比はすべて 1% 未満を示した。

5) *Meridion* 属（淡水生種）

この属は、深さ 89 cm の所に分布していた。相対比は 0.25% を示した。

6) *Fragilaria* 属（淡水生種、浮遊性）

この属は、ほぼ全試料中に分布していた。相対比は 1% 前後であるが、深さ 54～64 cm、75～81 cm で 20% 前後の高い値を示した。そこでは、*F. construens* var. *exigua* が特徴的に見られた。

7) *Synedra* 属（淡水生種）

この属は、ほぼ全試料中に分布していた。相対比は深さ 55 cm の所で最高値 6.5% を示したが、ほとんど 5% 未満であった。

8) *Eunotia* 属（淡水生種）

この属は、28 試料にまばらに分布していた。相

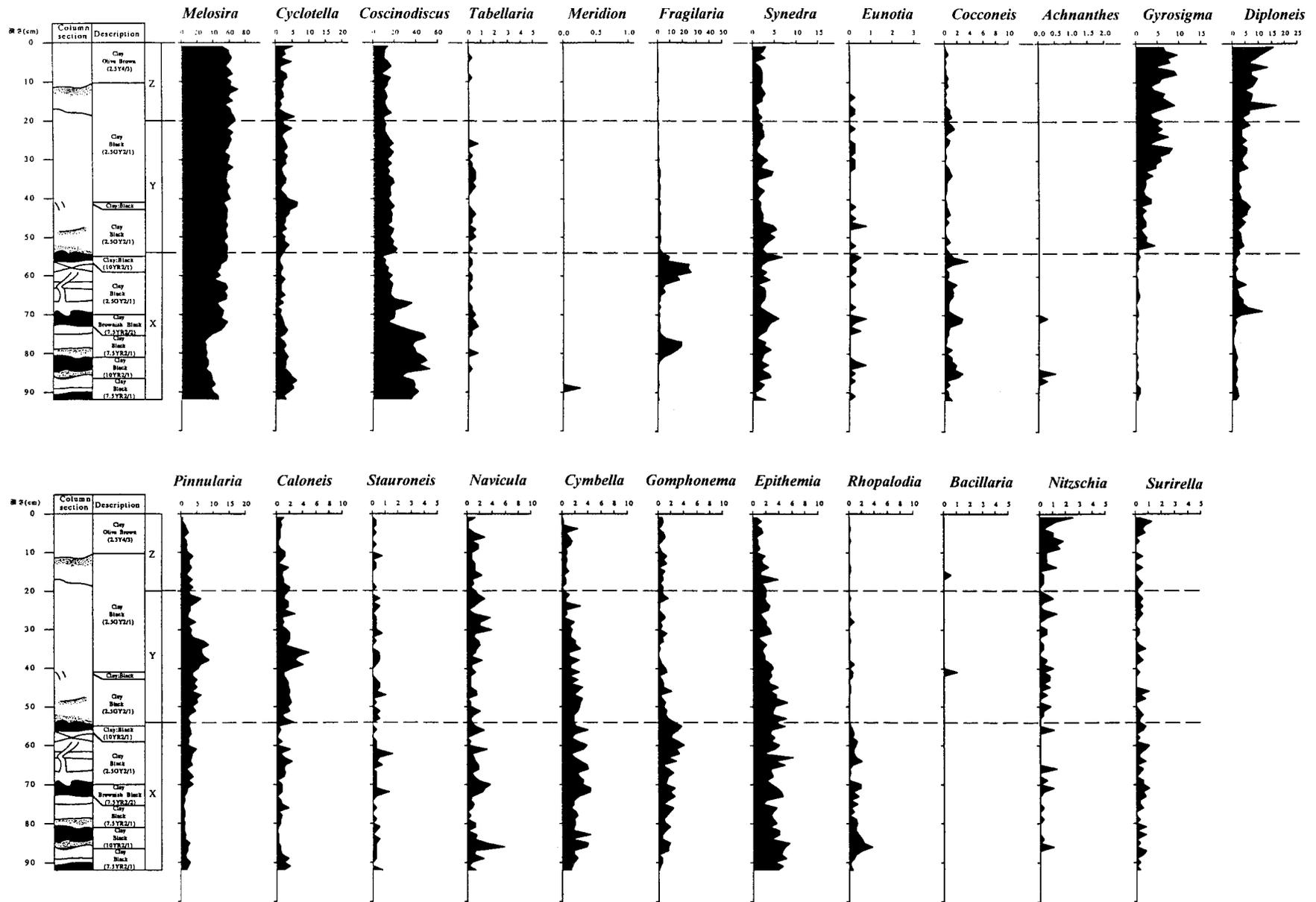


図2 湖山池 KY 9401 コアの珪藻分析結果
Fig. 2 Diatom assemblages in KY the core 9401 from Lake Koyama-Ike

対比はすべて1%未満であった。

9) *Cocconeis* 属 (淡水生種)

この属は、ほぼ全試料に見られた。相対比は1%前後であるが、深さ56 cm, 71~72 cm, 85~86 cmで3%前後の値を示した。

10) *Achnanthes* 属 (淡水~汽水生種)

この属は、深さ71 cm, 85 cm, 87 cmのところに分布していた。相対比はすべて1%未満であった。

11) *Gyrosigma* 属 (淡水生種)

この属は、ほぼ全試料中に分布していた。相対比は深さ32 cmまでは若干の波はあるが5~10%の値を示し、33~52 cmは3%前後の値を示した。53 cm以降は、ほぼ1%未満であった。総じて見ると、相対比は上方から下方へ向って低くなる傾向を示した。

12) *Diploneis* 属 (淡水生種)

この属は、全試料中に分布していた。相対比は深さ1 cm, 16 cmで16%, 69 cmで11%の値を示したが、総じて見ると、上方から下方へ向って緩やかに低くなる傾向を示した。

13) *Pinnularia* 属 (淡水生種)

この属は、全試料に分布していた。相対比は深さ38 cmの8.7%まで緩やかに高くなり、それ以降ゆるやかに低くなる傾向を示した。

14) *Caloneis* 属 (淡水生種)

この属は、ほぼ全試料中に分布していた。相対比は深さ36 cmの4.9%まで緩やかに高くなり、それ以降緩やかに低くなる傾向を示した。

15) *Stauroneis* 属 (淡水生種)

この属は、56試料でまばらに分布していた。相対比は深さ62 cmで1.5%, 72 cmで1.3%の他は1%未満であった。

16) *Navicula* 属 (淡水生種)

この属は、ほぼ全試料中に分布していた。相対比は深さ86 cmの5.8%が最高で、27 cm, 30 cm, 70 cmで3.5%を示す以外は、すべて3%以下の値であった。

17) *Cymbella* 属 (淡水生種)

この属は、ほぼ全試料中に分布していた。相対比は深さ71~72 cmの4.3%まで徐々に高くなり、その下方は2%前後と低くなっている。そして深さ83 cm, 85 cmで再び4%前後の値を示した。総じて見ると、相対比は上方から下方へ向って緩やかに高くなる傾向を示した。

18) *Gomphonema* 属 (淡水生種)

この属は、ほぼ全試料中に分布していた。相対比は深さ53 cmまで1%前後の低い値を示すが、深さ54~62 cmで4%前後の値となり、それ以降徐々に低くなる傾向を示した。

19) *Epithemia* 属 (淡水生種)

この属は、全試料中に分布していた。相対比は深さ49 cm, 53 cmで5%を超え、深さ63 cmで最高値6%を示した。それ以降は4%前後の値を示した。総じて見ると、相対比は上方から下方に向って高くなる傾向を示した。

20) *Rhopalodia* 属 (淡水~汽水生種)

この属は、47試料に分布していた。深さ54 cmまではまばらに分布し、55 cmより下方ではほぼ連続的に分布していた。相対比もそれに対応し、深さ54 cmより上方では1%未満だが、55 cmより下方は2%前後の値もあり、深さ86 cmではこの属の最高値3.5%を示した。総じて見ると、相対比は上方から下方へ向って高くなる傾向を示した。

21) *Bacillaria* 属 (淡水~汽水生種)

この属は、深さ16 cm, 41 cmの2試料に見られた。相対比は2試料とも1%以下と非常に少ない。

22) *Nitzschia* 属 (淡水~汽水生種)

この属は、48試料に見られた。深さ52 cmまでは、ほぼ連続的に分布し、53 cm以降はまばらに分布していた。相対比は深さ1 cmの所の2.5%が最高値であり、1%以上の値が深さ9 cmより上方に集中し、それより下方は1%未満の値を示した。総じて見ると、相対比は上方から下方に向って低くなる傾向を示した。

23) *Surirella* 属 (淡水生種)

この属は、58試料でまばらに分布していた。相

対比は全体を通して、ほぼ1%未満であった。

2. 現生する珪藻と柱状試料中の珪藻との比較

現在の湖山池で見られる珪藻は、福田(1994)によると19属44種であるのに対し、柱状試料から得られた珪藻は23属41種でほぼ同程度であった。柱状試料にはみられ、現在の湖山池には見られない珪藻としては、淡水生の *Tabellaria* 属, *Meridion* 属, *Cocconeis* 属, *Caloneis* 属, *Stauroneis* 属, 淡水~汽水生の *Rhopalodia* 属 (*R. gibberula*), *Achnanthes* 属があげられる。

また、現在の湖山池における珪藻の優占種は淡水生の *Melosira granulata* であるが、柱状試料から得られた珪藻についても深さ74 cmまでは *Melosira granulata* が相対比50%前後を示しており、今回の試料の大部分が堆積した時代は、現在と同様の環境であったと考えられる。しかし、深さ75~84 cmでは淡水~汽水生の *Coscinodiscus lacustris* が相対比50%前後を示し、*Melosira granulata* を逆転することから、現在とかなり水質環境が異なる時期があったと推定される。さらに、塩分濃度・付着基物・生活型により特徴付けられる小杉(1988)の環境指標群にあてはめると、湖山池の珪藻は「F 淡水底生種群」、もしくは「G 淡水浮遊性種群」ということになる。

3. 粒度分析及び化学分析結果と珪藻分析結果の比較

珪藻分析結果から推定される古環境変遷をさらに詳しく解明するために、浅村(1995 MS)が粒度分析及び化学分析結果から分けたX, Y, Zの3層(作野ほか(1995)のC, B, Aの各層に相当)との比較を行った。また、各層ごとに粒度分析及び化学分析結果と珪藻分析結果を比較した結果を以下に述べる。

a) X層

柱状試料の深さ54 cmより下位の層であり、含水率の低下、大きな粒度変化、全有機炭素濃度(TOC)の増加、C/N比の増加等が繰り返し見られる層である。

この層では、淡水~汽水生の *Coscinodiscus lacustris* が下位に向って多くなり、同時に淡水生で優占種の *Melosira granulata* が少なくなり、75~84 cmで *Coscinodiscus* が優先的になる。また、淡水~汽水生の *Rhopalodia gibberula*, 同じく淡水~汽水生の *Achnanthes brevipes* var. *intermedia* がほぼこの層だけに特徴的に見られる。これらのように淡水~汽水

生のものが特徴的に見られることから、このX層では、特に深さ75 cmより下位では、塩分が現在よりはわずかに高く、湖山池はより汽水湖に近い状態だったと考えられる。

また、この層では淡水生の *Cocconeis placentula* var. *klinoraphis* が深さ56 cm, 71~72 cm, 85~86 cmで特徴的に多く含まれる。これはC/N比の増加している所とよく一致している。また、淡水生の *Fragilaria construens* var. *exigua* が深さ54~64 cm, 75~81 cmでかなり特徴的に多く見られる。これは、どの分析結果とも異なる推移を見せ、その他の珪藻においてもこれと同傾向を示すものはない。

b) Y層

柱状試料の深さ20~53 cmの層であり、各種分析の結果をみると、このY層では含水率、粒度、TOC、C/N比はいずれも比較的安定している。

この層では、淡水生の *Melosira granulata* が優占し、淡水~汽水生の *Coscinodiscus lacustris* がそれに随伴している。そしてどちらも安定した状態を示す。また、X層ではあまりみられなかった淡水生の *Gyrosigma acuminatum* が突然見られるようになり、X層で特徴的に見られたものは、このY層ではほとんど見られなくなる。

この層は、各種分析の結果と同様に比較的安定している。そして各種分析の結果でも見られるように、珪藻分析の結果においても、X層とY層の境界にあたる深さ54 cm付近で顕著な変化が見られる。この時期に湖山池及びその周辺で環境の変化があったことがうかがえる。

c) Z層

柱状試料の深さ20 cmより上位の層である。このZ層では含水率は上昇し、粒度は粗粒化する。またTOCが徐々に上昇し、C/N比は緩やかに低下する。

この層では、Y層と同様に *Melosira granulata* が優占、*Coscinodiscus lacustris* が随伴し、ともに安定している。*Gyrosigma acuminatum* もY層と同様に増加傾向を示す。

Y層と異なる点は、淡水生の *Diploneis ovalis*, 淡水~汽水生の *Nitzschia tryblionella* が特徴的に多く見られることである。淡水生の珪藻が多くを占める中、この層でなぜ淡水~汽水生のものが増加傾向を示すのか不明であるが、*Diploneis ovalis*, *Nitzschia tryblionella* はともに中汚濁性、耐汚濁性の珪藻であることから、湖山池の塩分ではなく、むしろ湖山池

の汚濁を反映した結果とも受けとめられる。

ま と め

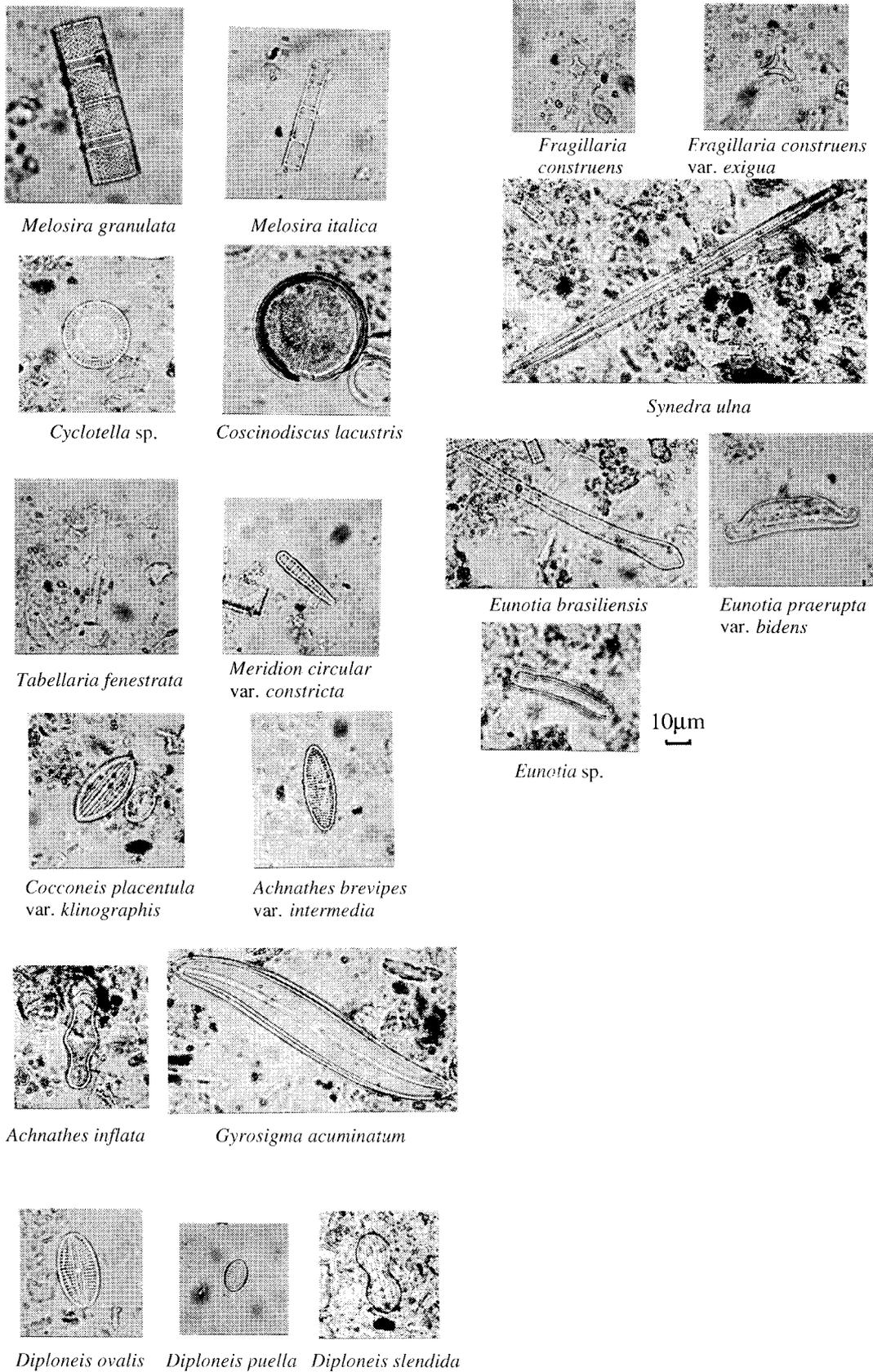
湖山池において約 1 m の柱状試料 (KY 9401) を採取して、珪藻遺骸分析を行った。その結果を以下にまとめる。

- 1) 柱状試料から得られた湖山池の珪藻化石は 23 種 41 属であった。
- 2) 柱状試料の上位から最も優占的に見られた珪藻は淡水性の *Melosira granulata* であり、試料の最下層までほとんどが淡水性の種であった。
- 3) 柱状試料の下位で淡水～汽水性の種が比較的多数存在することから、下位の試料が堆積した時代は、塩分が現在よりわずかに高かったものと考えられる。
- 4) 柱状試料の深さ 54 cm の上位と下位では明らかに珪藻化石の出現傾向が異なることから、この時期に湖山池の水質環境に変化があったものと考えられる。
- 5) 柱状試料の深さ 20 cm より上位で中汚濁性、耐汚濁性の種の相対比が高くなるのは、近年の湖山池の汚濁を反映した結果だと考えられる。

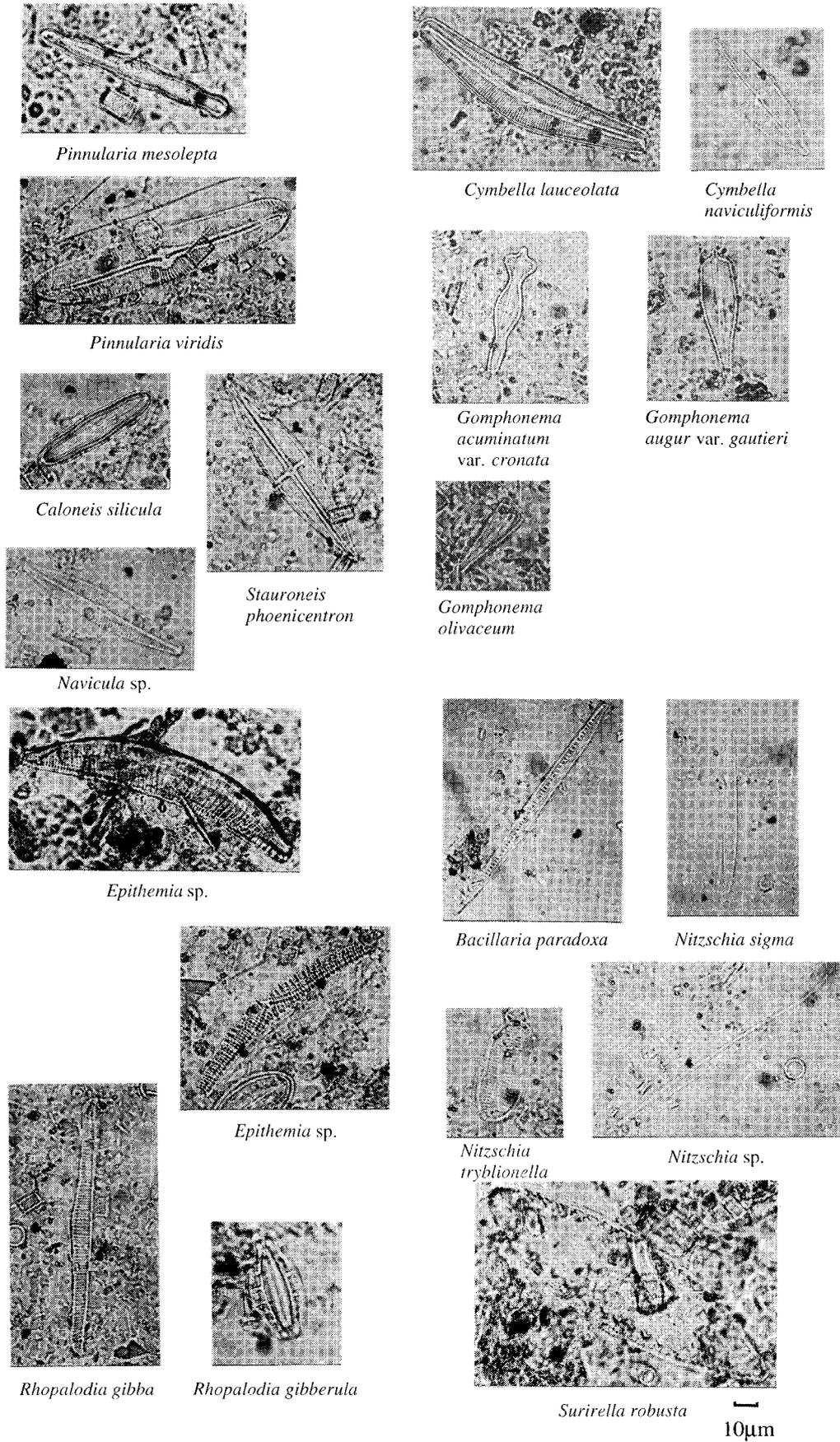
珪藻分析では、相対的な古環境の変遷を追うことができるが、試料が堆積した年代を推定することは難しい。従って今後は柱状試料が堆積した時期について推定し、湖山池の古環境変遷の全容を明らかにしていきたい。

引用文献

- 赤木三郎・豊島吉則・星見清晴・谷村美弥子 (1993) 湖山池の地質環境と地誌の変遷. 地質学雑誌, 39: 103-116.
- 福田啓子 (1994) 湖山池におけるプランクトン個体群の動態, 鳥取大学教養部紀要, 28: 245-256.
- 星見清晴 (1990) 湖山池の形成について. 鳥取県立博物館研究報告, 27: 19-31.
- Hustédt, F. (1971) Bacillariophyta. A. Pacher (ed.) Süßwasser-Flora Mitteleuropas, Heft 10, Gustav Fischer, Jena.
- 鹿島薫 (1998) 珪藻遺骸を用いた汽水域の古環境復元に関する現状と今後の課題—分析方法, 高精度化, 定量化, データベースの整備—. LAGUNA (汽水域研究), 5: 75-79.
- 小杉正人 (1988) 珪藻の環境指標群の設定と古環境復元への応用, 第四紀研究, 27: 1-20.
- 水野寿彦 (1971) 日本淡水プランクトン図鑑, 保育社, 125-180.
- 作野裕司・高安克己・瀬戸浩二・赤木三郎・西田良平・田中善蔵・村田祐司・浅村久志・浜田哲弘 (1995) 湖山池底質柱状試料の粒度, 全有機炭素濃度および C/N 比変化. LAGUNA (汽水域研究), 2: 11-20.
- 高安克己・瀬戸浩二・赤木三郎・西田良平・田中善蔵・村田祐司・作野裕司 (1994) 鳥取県湖山池の湖底地形と底質. LAGUNA (汽水域研究), 1: 27-35.
- 田中善蔵・上田那須雄・西田良平・福田啓子・島崎綾子 (1990) 湖山池の総合的な自然環境調査, 鳥取大学教養部紀要, 24: 63-92.



付図 1 湖山池 KY 9401 コア中に含まれる珪藻の顕微鏡写真 (1) (スケールバーで示す)
Appendix 1 Photographs showing diatoms in the core KY 9401 core from Lake Koayama-Ike



付図2 湖山池 KY 9401 コア中に含まれる珪藻の顕微鏡写真(2) (スケールバーで示す)
Appendix 2 Photographs showing diatoms in the core KY 9401 core from Lake Koayama-Ike

サロマ湖の多毛類群集の構造特性と漁場環境 ：過去 20 年間の変化傾向

園田 武¹・中尾 繁¹・高安克己²

Polychaete community structure and its temporal change through last 20 years in the intensive scallop culture area, Saroma Lagoon, northern Japan.

Takeshi Sonoda¹, Shigeru Nakao¹ and Katsumi Takayasu²

Abstract: The accumulative impact of the intensive scallop culture on the bottom environment and polychaete community structure were studied in Saroma Lagoon, northern Japan. The bottom sampling was carried out in 1995, and the multivariate analysis have been used to compare 1975, 1987 data with 1995 data. 55 species were identified in 1995 samples, among them the dominant species were *Maldane cristata*, *Lumbrineris longifolia* and *Scalibregma inflatum*, which were typical species in Japanese eutrophic coastal bays. The result of comparative analysis of the polychaete community structure during period of the past 20 years showed marked changes in species number, density and species composition. The species composition of polychaete community in 1995 indicates that the lagoon environment may not be in the state of heavily organic pollution. But clear temporal changes in the community structure and frequent occurrence of spreading hypoxic water and red tides in recent time suggest the accumulative organic loading by the intensive scallop culture in the lagoon may cause severe bottom hypoxia, eutrophication of water and stressful disturbances to the benthic community.

Key words: community structure, disturbance, organic loading, polychaete, scallop culture

緒 言

沿岸域の生物群集の構造形成プロセスにおいて、近年ますます増大する人間活動は重要な作用因の一つになっている。そのような沿岸域での人間活動の一つに漁業があげられる。沿岸漁業による生態系への影響については様々な角度から検討されてきているが (Dayton et al., 1995; Jennings & Kaiser, 1998; Eleftheriou, 2000), 漁業生産にもネガティブな影響を与えているものとして、乱獲や混獲、投棄魚の間

題 (松宮, 1998), トロールやドレッジによる海底の攪乱 (Collie et al., 2000), さらに集約的増養殖事業に由来する周辺海域の富栄養化や海底の有機汚染があげられる (代田, 1990; Omori et al., 1994; Wu, 1995; 横山, 2000)。

水産増養殖は過去 20 年間に世界中の沿岸域で急激に拡大し、生産量は 2 倍以上に増加して、人間が消費する魚介類の 1/4 を占めるにいたっている (Naylor et al., 2000)。こうした活動の増大にともなって沿岸生態系への影響についての関心が深ま

¹ 北海道大学大学院水産科学研究科 Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hakodate 041-0821, JAPAN

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

り、増大する需要に質的・量的に応え、かつ持続可能な生産をおこなう水産増養殖のありかたについての活発な議論が展開されてきている (Wu, 1995; Naylor et al., 2000)。

ホタテガイ *Patinopecten (Mizuhopecten) yessoensis* はわが国北方沿岸域においてきわめて重要な水産資源の一つであり、近年の漁業生産量は年間約 50 万トン、生産額は約 800 億円に達している (農林水産省統計情報部, 2000)。ホタテガイは垂下式養殖または地まき放流により生産される典型的な水産増養殖種である。このうち垂下式養殖は地まき放流稚貝の養成または採苗から漁獲までの一貫した養殖生産方法として採用されている。このような養殖生産水域は大量のホタテガイを集約的に配置・管理しやすい特性を持つことが求められるため、内湾や沿岸海跡湖などに選定されるのが一般的である。

沿岸海跡湖は、陸域と海域をつなぐ連絡・境界面として位置しており、日本の沿岸生態系において重要な構成要素の一つである。一方、北海道には 61 の海跡湖沼があり、そのうち 22 が汽水湖で、日本列島に分布する汽水性沿岸海跡湖のほぼ半数が存在する。とくに北海道オホーツク海側沿岸は「海跡湖銀座」と呼ばれ、我が国の主要な沿岸海跡湖が分布している (小疇ほか, 1994)。このなかでもサロマ湖は湖面積 150.4 km²、最大水深 19.6 m、平均水深 8.7 m の我が国最大の多鹹性・海水性沿岸海跡湖で、ホタテガイの種苗生産・垂下養殖漁場として利用されている重要な水域である (西浜, 1994)。

サロマ湖におけるホタテガイ垂下養殖は 1960 年代後半から飛躍的に増大し、近年では年間約 7000 トンの生産量に達している。養殖水面は湖内全域に及び、養殖漁場面積は約 72.5 km² で湖面積の約 48 % を占めている。湖内ではホタテガイの他にカキ養殖施設も設置されており、これとあわせると養殖漁場面積は約 79.3 km² で湖面積の約 53 % が二枚貝垂下養殖水面として利用されている (中尾・園田, 2000)。

このように集約的な養殖漁場として利用されている水域で一般的な問題となるのは、水域の富栄養化や有機汚染である。二枚貝垂下養殖の場合は無給餌養殖であり、給餌式の魚類養殖に比べると有機汚染の顕在化の速さは遅く、初期の影響は小さいものと考えられる。しかしながら、生態的物質循環系の特定位置への物質停滞が引き起こす問題は、すでにカキ養殖漁場においては biodeposit による漁場老化 (Ito & Imai, 1955; 荒川ほか, 1971) や自家汚染

(森, 1999) の問題として慢性化しており、サロマ湖のホタテガイ垂下養殖においても、ここ 30 年間に飛躍的に増大した養殖生産の累積的影響が水底環境にさまざまな変化を引き起こしていることが予想される。

サロマ湖の湖沼環境と生物群集に関する調査・研究は長年に渡り様々な角度から取り組まれているが、垂下養殖による湖底環境への影響を群集生態学的観点から検討した例はない。とくに湖底環境を有効に指標しうるベントス群集に関する研究は少ないのが現状である。しかしながら、ベントス群集の構造特性に関する研究は水域環境の状態をより正確に把握する上で有用な情報を提供するものである (Nakao, 1982; 中尾, 1989, 1997)。

一方、環形動物多毛類は軟体動物・甲殻類と共に軟泥底マクロベントス群集で種数・密度・生物量において優占する分類群であり、その生活様式と生態は極めて多様性に富んでいる。多毛類に関しては様々な面からの研究が進んでいるが、とくに近年は、人間活動の増大による沿岸環境の人為的攪乱と悪化が深刻化する中で、多毛類の環境指標性の価値が改めて認識されるようになってきている (Reish, 1979; 中尾, 1983; Pocklington and Wells, 1992)。

そこで本研究は、二枚貝養殖漁場として高度に利用されてきているサロマ湖において、マクロベントス群集で優占する多毛類を対象とし、(1) 現状の多毛類群集の構造特性をあきらかにすること、(2) 過去の同様な調査結果と比較検討することで、多毛類群集の構造に特定の変化傾向があるかどうかをあきらかにすること、(3) 以上の結果をもとにサロマ湖の湖底環境の現状と変遷過程を考察することを目的とした。

材料と方法

1 現地調査およびサンプル分析

調査はサロマ湖に 55 地点を設定して 1995 年 10 月におこなった (Fig.1)。ベントスの採集は、Smith-McIntyre 型採泥器 (採集面積 1/10 m²) を用いて、1 地点 1 回おこなった。採集した湖底堆積物サンプルは、1 mm メッシュの篩を用いてふるい、篩上に残ったベントスを 10% 中性ホルマリンで固定・保存した。

ベントスサンプルは実験室でソーティングした後、多毛類サンプルについて可能な限り種レベルまでの分類同定をおこない、種毎の個体数を計数した。

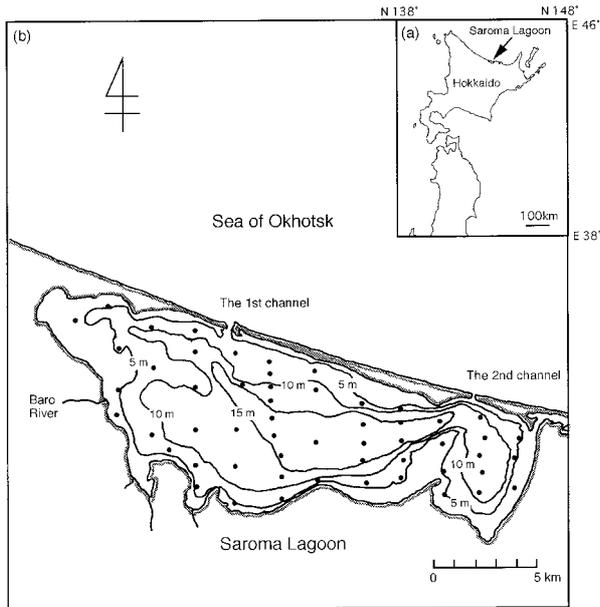


図 1 (a) サロマ湖位置図 (b) 調査地点および水深
Fig. 1 (a) Map of Saroma Lagoon on the northeast coast of Hokkaido. (b) sampling stations (closed circle) and depth contour in Saroma Lagoon.

2 データ解析

(1) 多毛類群集の構造特性と湖底環境

群集構造の特性について、種構成と優占種、優占種の分布パターンをあきらかにした。ついで各調査地点の種構成と密度から地点間の構造的類似性を検討し、群集型分析をおこなった。データ解析には解析プログラム PRIMER 4.0 (Clarke & Warwick, 1994) を用いて、Bray-Curtis 類似度指数行列に基づく非加重群平均方式のクラスター解析をおこなった。ついで検討された群集型がどのような底質環境に対応しているかを、本調査と同時に実施された底質分析結果 (三瓶ら, 1997) から検討した。

(2) 多毛類群集の変遷過程

サロマ湖でのベントス調査は、中川 (1977) が 1975 年から 1976 年に実施した詳細な調査が定量的に比較可能な最初の調査である。ついで北海道開発庁 (1988 a, b) が 1987 年におこなっている。サロマ湖でのホタテ養殖生産が本格化してきた 1965 年以後に実施されたこれら 2 つの調査結果に本調査結果をあわせると、ほぼ 10 年間で 20 年間の比較検討が可能となる。そこで、これらの調査データを整理し、サロマ湖の多毛類群集の構造特性について次の解析をおこなった。

まず、データ解析に先立ち、調査方法を比較した。中川 (1977) は採集面積 $1/17 \text{ m}^2$ の田村式採泥器で 1

地点 2 回計 23 地点で 1975 年 5 月, 8 月, 10 月および 1976 年 5 月に、北海道開発庁 (1988 b) は採集面積 $1/20 \text{ m}^2$ の Smith-McIntyre 型採泥器で 1 地点 1 回計 29 地点を 1987 年 7 月に、本研究では採集面積 $1/10 \text{ m}^2$ の Smith-McIntyre 型採泥器で 1 地点 1 回計 55 地点を 1995 年 10 月に採集している。ふるいのメッシュサイズはどれも 1 mm で共通していた。1 地点当たりの採集面積は中川 (1977) と本研究ではほぼ等しく、北海道開発庁 (1988 b) で本研究の $1/2$ である。したがって、密度は比較可能なように標準化した。出現種数も採集面積によって影響を受けるが、ここではデータを直接用いた。

群集構造の多様性について、種数、密度、Shannon-Wiener 関数による種多様度 H' および Pielou の均等度 J' ならびに Simpson の優占度 D を調査時点毎に求めた。これら群集構造特性を表現する単変量測度のデータは、 $\ln(x+1)$ 変換した後に、一元配置分散分析 (1 way-ANOVA) により調査時点間で違いがあるかどうかを検討した。なお、この際に中川 (1977) についてはほかの調査年と同様の季節である 1975 年 10 月の結果を用いた。調査時点間の群集構造パターンを検討するために、解析プログラム PRIMER 4.0 (Clarke & Warwick, 1994) を用いて、Bray-Curtis 類似度指数行列に基づく非加重群平均方式のクラスター解析および非計量の多次元尺度構成法 (MDS)、および調査時点間の群集構造の類似性に差異があるかどうかを検討するために類似度行列分析 (ANOSIM, Clarke & Green, 1988; Clarke, 1993) をおこなった。なお、個体数データは正規性を確保するために 4 乗根変換をおこなった。ANOSIM により類似度行列間に有意差が認められた場合は Bonferroni の多重比較をおこない、群集構造類似度の差異にどの種群が寄与しているかを検討するため類似度百分率分析 (SIMPER, Clarke & Ainsworth, 1993) をおこなった。

また、多毛類群集の構造特性を摂餌様式から検討するため、Fauchald & Jumars (1979) にしたがって出現種の摂餌様式を分類し、各群に属する種群の密度から、それぞれの生態的機能群の構成とその変化を検討した。ただし、表層下堆積物食者にはタケフシゴカイ科 (Maldanidae, bamboo-worms) のように堆積物表層から 30 cm 程度まで潜って摂餌する種群もいるため、このような種群は深表層下堆積物食者として分類した (Holte, 2001)。また、堆積物表層で摂餌する種群にはスピオ科 (Spionidae) のように環境条件に応じて摂餌様式を堆積物食から懸濁物食へ転換

表1 1995年のサロマ湖の多毛類相. RA%:相対優占度, mean:個体数/m², SE:1標準誤差.

Table 1 List of polychaete species found in Saroma Lagoon, 1995. RA %: relative abundance of species, mean: ind./m², SE: 1 standard error of mean.

	RA%	mean	SE
<i>Maldane cristata</i>	14.47	48.54	11.63
<i>Lumbrineris longifolia</i>	12.57	42.18	9.00
<i>Scalibregma inflatum</i>	9.05	30.36	10.25
<i>Glycinde</i> sp.	7.26	24.36	5.60
<i>Dorvillea</i> sp.	6.93	23.27	9.28
<i>Laonice cirrata</i>	6.72	22.54	4.19
<i>Cirriformia tentaculata</i>	6.66	22.36	7.59
<i>Heteromastus</i> sp.	6.61	22.18	3.87
<i>Pista</i> sp.	3.63	12.18	3.90
<i>Harmothoe imbricata</i>	2.60	8.72	2.89
<i>Sigambra tentaculata</i>	2.60	8.72	2.88
<i>Nicomache minor</i>	2.43	8.18	6.87
<i>Polydora</i> sp.	2.38	8.00	3.70
<i>Haploscoloplos elongatus</i>	1.78	6.00	2.78
<i>Lagis bocki</i>	1.57	5.27	1.72
Pilargidae sp.	1.57	5.27	5.22
<i>Cirratulus</i> sp.	1.08	3.63	1.39
<i>Praxillella</i> sp.	1.08	3.63	1.04
<i>Melinna</i> sp.1	0.97	3.27	1.40
<i>Goniada maculata</i>	0.81	2.72	2.52
<i>Glycera capitata</i>	0.70	2.36	0.88
<i>Scoloplos armiger</i>	0.65	2.18	0.84
<i>Amaeana trilobata</i>	0.48	1.63	1.14
<i>Chone</i> sp.	0.48	1.63	0.88
<i>Aricidea</i> sp.	0.27	0.90	0.46
<i>Maldanella</i> sp.	0.27	0.90	0.59
<i>Nephtys caeca</i>	0.27	0.90	0.46
<i>Owenia fusiformis</i>	0.27	0.90	0.73
<i>Pherusa plumosa</i>	0.27	0.90	0.90
Cirratulinae sp.	0.21	0.72	0.72
<i>Euclymene</i> sp.	0.21	0.72	0.72
<i>Eularia</i> sp.	0.21	0.72	0.35
<i>Genetyllis castanea</i>	0.21	0.72	0.72
<i>Onuphis holobranchiata</i>	0.21	0.72	0.72
<i>Potamilla</i> sp.	0.21	0.72	0.35
<i>Spio</i> sp.	0.21	0.72	0.43
<i>Terebella</i> sp.	0.21	0.72	0.56
<i>Anaitides maculata</i>	0.16	0.54	0.39
<i>Nereis</i> sp.	0.16	0.54	0.39
<i>Sigambra</i> sp.	0.16	0.54	0.30
<i>Typosyllis</i> sp.	0.16	0.54	0.39
<i>Apoprionospio</i> sp.	0.10	0.36	0.25
<i>Glycera</i> sp.	0.10	0.36	0.36
<i>Nereis vexillosa</i>	0.10	0.36	0.36
<i>Nereis virens</i>	0.10	0.36	0.36
<i>Ophelia limacina</i>	0.10	0.36	0.36
<i>Thelepus</i> sp.	0.10	0.36	0.25
<i>Ampharete</i> sp.	0.05	0.18	0.18
<i>Eteone longa</i>	0.05	0.18	0.18
Hesionidae sp.	0.05	0.18	0.18
<i>Lepidonotus</i> sp.	0.05	0.18	0.18
<i>Melinna</i> sp.2	0.05	0.18	0.18
<i>Spiophanes bombyx</i>	0.05	0.18	0.18
Syllinae sp.	0.05	0.18	0.18
<i>Tharyx</i> sp.	0.05	0.18	0.18

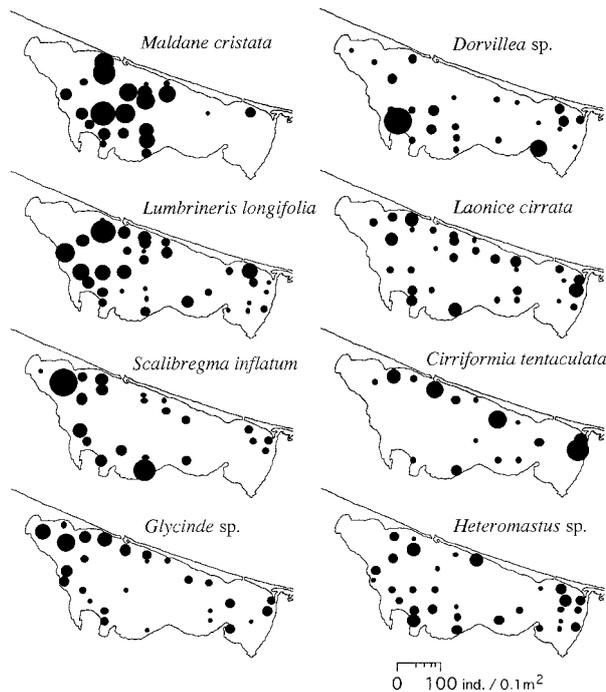


図2 1995年10月の優占種の空間分布

Fig. 2 Spatial distribution of the dominant species in Saroma Lagoon, 1995.

する独特の摂餌様式を持つものがあるため、これを条件の表層懸濁物・堆積物食者として分類した (Holte, 2001).

結 果

1 多毛類群集の構造特性と湖底環境

種類相: 95年調査で確認された多毛類は計11目25科55種であった (Table 1). もっとも優占していたのはタケフシゴカイ科のホソタケフシ *Maldane cristata*, ついでギボシイソメ科の *Lumbrineris longifolia* であった. 1地点当たりの平均種数は8.4, 最大値は16種で, 平均密度は384.3個体/m², 最大値は1030個体/m²であった.

優占種の分布: Table 1で示した優占度が6%以上の8種の分布様式をみると (Fig.2), 各々の種で異なる分布傾向が認められた. 最優占種である *Maldane cristata* は第1湖口がある湖中西部の水深5mから15mまでの範囲に集中的に分布し, 第2湖口付近に一部分布していたものの湖西端部と東部湖盆にはほとんど分布していなかった. *Lumbrineris longifolia*, イトゴカイ科の *Heteromastus* sp. は *Maldane cristata* と類似した分布パターンを示すが, 第2湖口のある湖東部湖盆にも分布している.

表 2 1995 年の各群集型の優占種. RA%:相対優占度, mean:個体数/m², SE:1 標準誤差.

Table 2 Dominant species of each community type in Saroma Lagoon, 1995. RA%: relative abundance of species, mean: ind./m², SE: 1 standard error of mean.

A1 type				A2 type				B type			
	RA%	mean	SE		RA%	mean	SE		RA%	mean	SE
<i>Sigambra tentaculata</i>	23.25	33.30	10.10	<i>Maldane cristata</i>	21.24	108.50	23.40	<i>Cirriformia tentaculata</i>	16.63	84.00	30.00
<i>Maldane cristata</i>	20.15	28.80	18.00	<i>Lumbrineris longifolia</i>	19.29	98.50	17.00	<i>Glycinde</i> sp.	13.46	68.00	19.50
<i>Dorvillea</i> sp.	19.37	27.70	19.20	<i>Scalibregma inflatum</i>	9.50	48.50	14.40	<i>Scalibregma inflatum</i>	12.47	63.00	43.20
<i>Heteromastus</i> sp.	13.95	20.00	5.20	<i>Dorvillea</i> sp.	8.66	44.20	21.80	<i>Pista</i> sp.	9.70	49.00	16.00
<i>Glycinde</i> sp.	8.52	12.20	6.90	<i>Heteromastus</i> sp.	8.20	41.90	7.10	<i>Laonice cirrata</i>	8.51	43.00	10.40
<i>Lumbrineris longifolia</i>	7.75	11.10	2.90	<i>Laonice cirrata</i>	6.98	35.70	7.30	<i>Nicomache minor</i>	8.51	43.00	35.70
<i>Laonice cirrata</i>	2.32	3.30	2.20	<i>Glycinde</i> sp.	4.28	21.90	7.10	<i>Harmothoe imbricata</i>	7.72	39.00	11.20
<i>Polydora</i> sp.	1.55	2.20	2.00	<i>Polydora</i> sp.	2.23	11.40	5.30	<i>Heteromastus</i> sp.	3.16	16.00	6.90
<i>Scalibregma inflatum</i>	1.55	2.20	2.00	<i>Lagis bocki</i>	2.14	10.90	3.60	<i>Goniada maculata</i>	2.97	15.00	13.20
<i>Apopriospio</i> sp.	0.77	1.10	1.00	<i>Cirriformia tentaculata</i>	1.86	9.50	3.90	<i>Melinna</i> sp.1	2.77	14.00	6.00
Species number		4.33	0.38	Species number		11.1	0.55	Species number		9.9	0.99
Total density		143	23.98	Total density		510.9	43.11	Total density		505	79.43

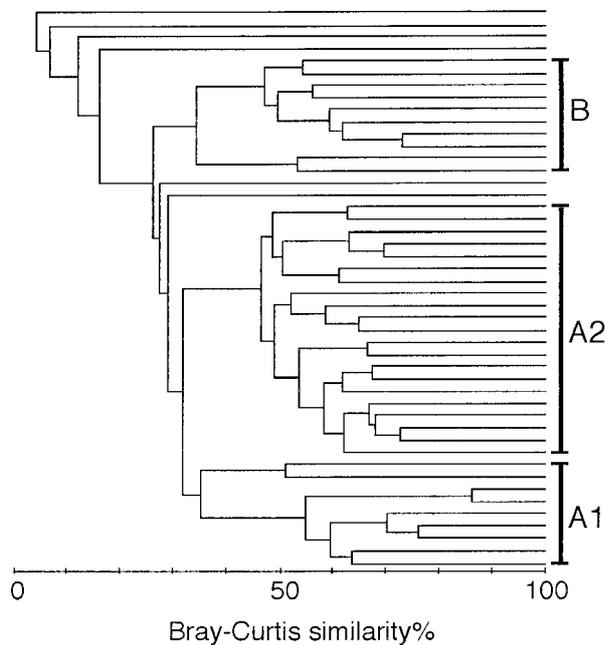


図 3 1995 年の多毛類群集構造のクラスター解析結果
Fig. 3 Result of cluster analysis for the polychaete community structure in 1995.

これら 3 種の分布パターンとは対照的にトノサマゴカイ *Scalibregma inflatum*, ニカイチロリ科の *Glycinde* sp. は水深の浅い水域に分布し, 湖西端部でも高密度に分布していた。また, スピオ科の *Laonice cirrata*, ミズヒキゴカイ科のミズヒキゴカイ *Cirriformia tentaculata* も比較的浅い水域に分布し, とくに湖口よりの水域に多い傾向がみとめられた。これに対し, コイソメ科の *Dorvillea* sp. は第 2 湖口付近に分布が認められたが, 湖の南側に多い傾向があった。

群集型解析: 群集構造の特性を地点間の構造類似度からクラスター解析した結果, 3 つの群集型が認

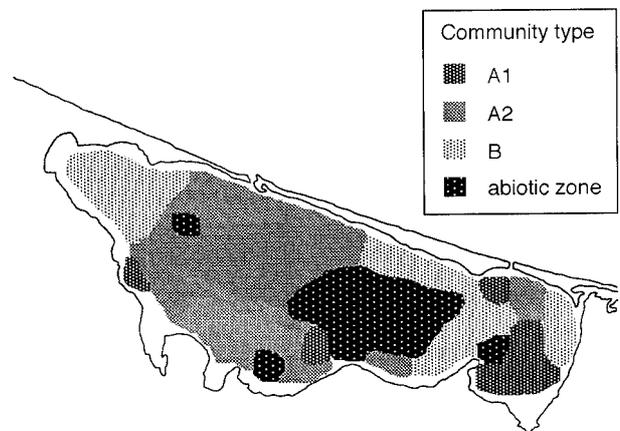


図 4 1995 年の群集型の空間分布 (無生物域を含む)
Fig. 4 Spatial distribution of each community type, including abiotic zone in 1995.

められた (Fig.3). それぞれの群集型の種組成を Table 2 に, それらの空間分布パターンを Fig.4 に示した。なお, Fig.4 にはマクロベントスが確認できなかった地点を無生物域として同時に示した。A1 は湖南側東部に分布し, 3 タイプのなかでは種数, 密度がもっとも小さかった。構成種はカギゴカイ科の *Sigambra tentaculata*, および *Maldane cristata*, *Dorvillea* sp., *Heteromastus* sp. で相対優占度 76% を占めていた (Table 2, Fig.4)。A2 は *Maldane cristata* と *Lumbrineris longifolia* で特徴づけられ, これら 2 種の主要な分布域に A2 分布域が対応していた。種数・密度と分布域はもっとも大きかった (Table 2, Fig.4)。B は湖西端部, 東部にみられ, A2 について種数・密度が大きく, *Cirriformia tentaculata*, *Glycinde* sp. および *Scalibregma inflatum* で特徴づけられ, A1・A2 で優占していた *Maldane cristata* と *Lumbrineris longifolia* の優占度は非常に低くなって

いた (Table 2, Fig.4). また, 無生物域は湖東部の水深 10 m 以深を中心として広がっていた.

底質環境: これらの各群集型が環境傾度とどのような対応にあるかを, 各群集型に含まれる地点群の底質特性から検討した (Fig.5). 各群集型は水深・泥分含量・有機炭素・窒素・イオウ濃度から表される底質特性とよく対応しており, A1 から B にかけてこれらの特性値が小さくなる傾向にあった. すなわち, B は水深が浅く砂質で有機物量が少ない酸化的環境であり, A1 は水深が深く泥質で有機物量が多くやや還元的環境に対応し, A2 がこの中間的特性を示していた. 3 タイプの各々の間で有意に異なっていた底質特性は泥分含量であり (1-way ANOVA, Scheffe's test, $p < 0.05$), 有意差がなかったのはイオウ濃度であった. また, 主要な群集型である A2 と B 間で有意差があったのは水深および泥

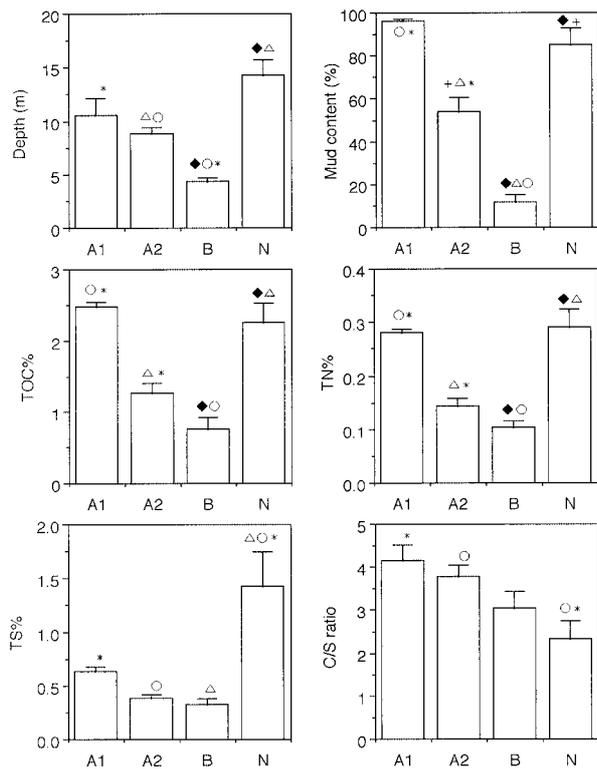


図5 各群集型に対応する底質環境特性. カテゴリー N は無生物地点群. 値は平均値±標準誤差. シンボル (*○△◆+) は群間の有意差 ($p < 0.05$) を示す (データは三瓶ほか, 1997 から引用).

Fig. 5 Sediment characteristics of each community type. See text for A 1, A 2, B. The category N means abiotic stations. Values are mean \pm SE. Symbols (*○△◆+) indicate significant differences ($p < 0.05$) of each pair of the community type. (Data cited from Sampei et al. (1997)).

分含量であった (1-way ANOVA, Scheffe's test, $p < 0.05$).

2 多毛類群集の変遷過程

構造パラメータの比較: 本研究であきらかにした 1995 年の結果を 1975 年, 1987 年の結果と比較した. 各調査年における多毛類群集の種数, 密度, 多様度指数について比較した結果 (Fig.6), 種数と密度は時間経過とともに減少する傾向があり, 1975 年と 1995 年で有意差が認められた (1-way ANOVA, Scheffe's test, $p < 0.05$). とくに密度の低下は著しく 1975 年では 1600.5 個体/ m^2 であったのが 1995 年には 384.3 個体/ m^2 と約 1/4 に減少している. 種多様度指数の H' と D には調査年間に有意差は認められなかった. しかし均等度 J' では 1975 年と他の調査年間に有意差が認められ (1-way ANOVA, Scheffe's

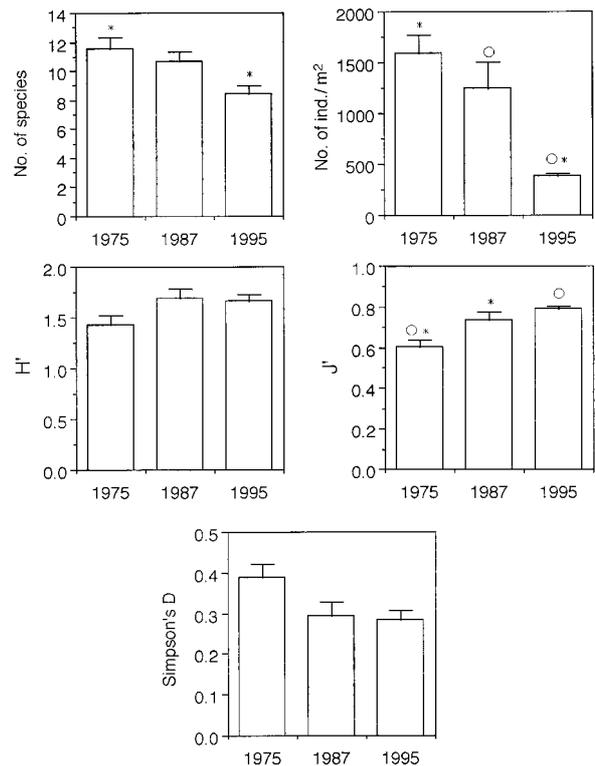


図6 各調査年毎の種数, 密度, 多様度指数 H', 均等度 J', 優占度 D 値. シンボル (*○) は調査年間の有意差 ($p < 0.05$) を示す. 値は平均値±標準誤差.

Fig. 6 The number of species, density, Shannon's index H', Pielou's J' and Simpson's D in each sampling time. Symbols (*○) indicate significant differences ($p < 0.05$) of each pair of time. Values are mean \pm SE.

test, $p < 0.05$), 1975 年と比較して 1995 年ではやや均等度が高くなっていました。

構造類似度の比較: 群集構造の類似性について検討した結果, クラスタ解析では各々の調査年は異なるサブクラスターを形成し, それぞれの調査年の群集構造は異なっていることが示唆された (Fig.7). また MDS による結果もそれぞれの調査年のプロットは相互にはほぼ重ならず位置しており, 類似度行列分析の結果, 各々の調査年は相互に有意に異なる群集構造を示していた (1-way ANOSIM, Global $R = 0.30$, $p < 0.001$).

ここで, 各調査年の地点データをプールして, 1975 年の 5 月, 8 月および 1976 年 5 月の結果を加えて構造類似性の解析をおこなったのが Fig.8 であ

る。この結果, 1975・76 年調査は 1975 年 5 月がやや離れたプロットになるが, 1987 年, 1995 年の位置から比較して相互にまとまっており, 1975・76 年の調査期間中の群集構造変化, すなわち季節的变化は調査年間の変化よりも小さいことが示唆された。

種構成の比較: 20 年間の各調査時期で群集構造が変化してきたことが示されたが, そのような構造変化がどの群集構成種の変化によってもたらされたのかを類似度百分率分析で検討した。各調査年における優占種構成と優占度, 平均密度を Table 3 に示した。調査年間の群集構造の平均非類似度は, 1975 年・1987 年の間で 71.93, 1987 年・1995 年の間で 70.13, そして 1975 年と 1995 年の間では 75.77 で, 1975 年と 1995 年の間でもっとも大きかった。

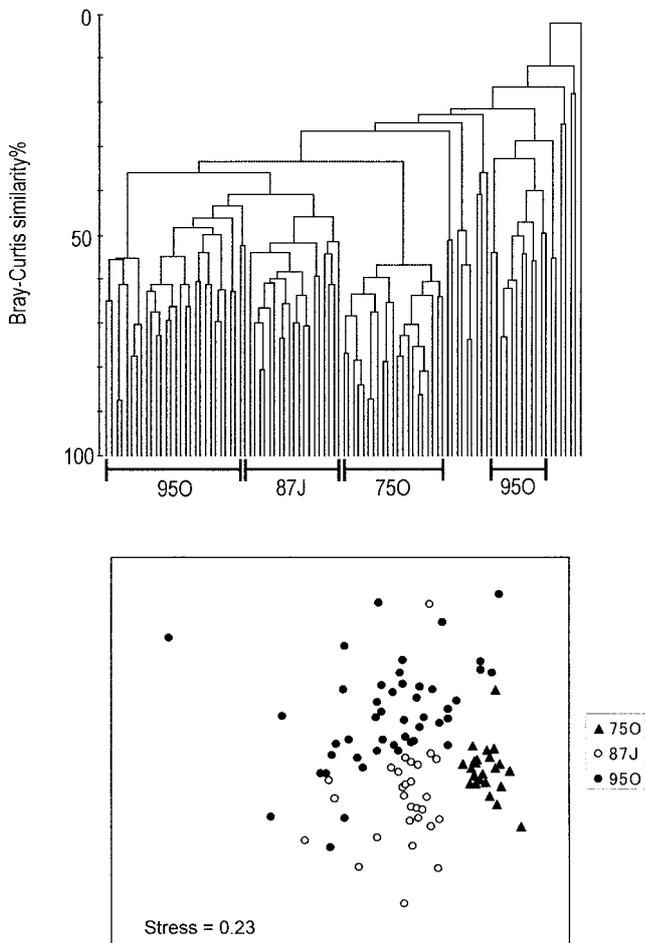


図7 各調査年の群集構造のクラスター解析と MDS の結果. データは 1975 年 10 月 (75 O), 1987 年 7 月 (87 J), 1995 年 10 月 (95 O).

Fig. 7 Results of cluster analysis and MDS ordination for each sampling time. Data are October 1975 (75 O), July 1987 (87 J) and October 1995 (95 O).

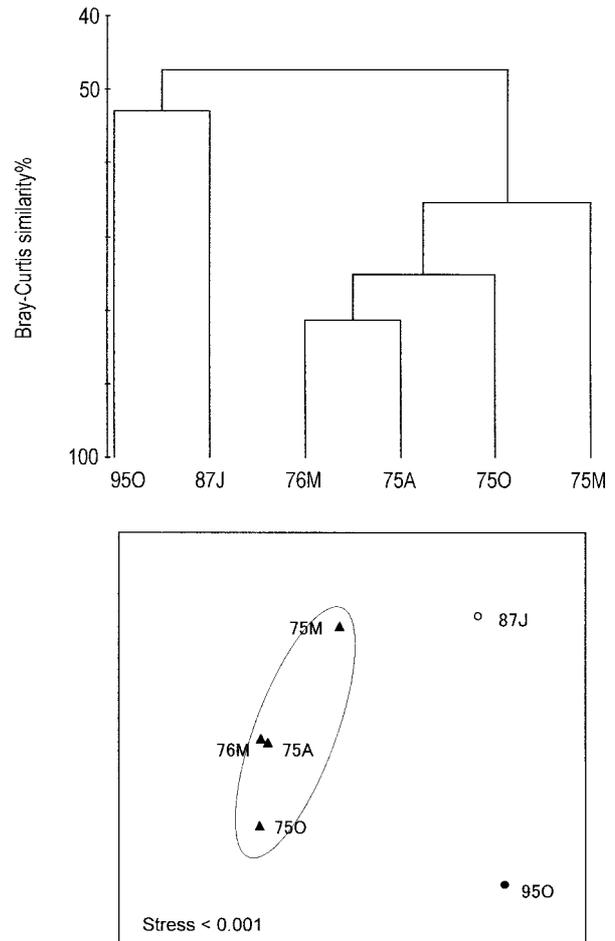


図8 各調査年の群集構造のクラスター解析と MDS の結果. 1975・76 年データは調査月毎にまとめて解析した。

Fig. 8 Results of cluster analysis and MDS ordination for each sampling time. Data are summarized monthly in 1975-76.

表3 各調査年の優占種. RA%:相対優占度, mean:個体数/m²,SE:1標準誤差.Table 3 The top 10 dominant species of each sampling time in Saroma Lagoon. RA %: relative abundance of species, mean: ind./m², SE: 1 standard error of mean.

1975	RA%	mean	SE	1987	RA%	mean	SE	1995	RA%	mean	SE
<i>Lumbrineris longifolia</i>	45.20	723.61	169.30	<i>Sabellides</i> sp.	20.44	246.20	240.50	<i>Maldane cristata</i>	14.47	48.54	11.63
<i>Dodecaceria concharum</i>	14.22	227.63	64.73	<i>Lumbrineris longifolia</i>	15.63	188.20	39.53	<i>Lumbrineris longifolia</i>	12.57	42.18	9.00
<i>Sigambra tentaculata</i>	7.36	117.81	23.43	<i>Maldane cristata</i>	9.50	114.40	43.88	<i>Scalibregma inflatum</i>	9.05	30.36	10.25
<i>Dorvillea japonica</i>	7.22	115.60	28.54	<i>Ampharete</i> spp.	9.16	110.20	85.96	<i>Glycinde</i> sp.	7.26	24.36	5.60
<i>Notomastus</i> sp.	5.14	82.36	19.79	<i>Dorvillea japonica</i>	7.67	92.40	64.36	<i>Dorvillea</i> sp.	6.93	23.27	9.28
<i>Paraprionospio pinnata</i>	4.15	66.47	22.05	<i>Capitella capitata</i>	3.83	46.20	40.57	<i>Laonice cirrata</i>	6.72	22.54	4.19
<i>Scalibregma inflatum</i>	2.53	40.63	20.85	<i>Laonice cirrata</i>	3.55	42.60	10.26	<i>Cirriformia tentaculata</i>	6.66	22.36	7.59
<i>Maldane cristata</i>	2.30	36.89	11.62	<i>Notomastus</i> sp.	3.55	42.60	11.85	<i>Heteromastus</i> sp.	6.61	22.18	3.87
<i>Scoloplos</i> spp.	2.30	36.89	9.81	<i>Glycinde</i> sp.	3.43	41.20	6.31	<i>Pista</i> sp.	3.63	12.18	3.90
<i>Goniada maculata</i>	2.23	35.78	6.65	<i>Sigambra tentaculata</i>	3.37	40.60	9.87	<i>Harmothoe imbricata</i>	2.60	8.72	2.89

1975年と1995年を比較した場合, 両時期の群集構造の非類似性にもっとも寄与していた上位5種は, ミズヒキゴカイ科の *Dodecaceria concharum*, ギボシイソメ科の *Lumbrineris longifolia*, カギゴカイ科の *Sigambra tentaculata*, ニカイチロリ科の *Goniada maculata*, コイソメ科の *Dorvillea japonica* で, これら5種の非類似性への累積寄与率は33.57であった.

各調査年間の優占種構成の変化をみると (Table 3), 1975年で最優占種であった *Lumbrineris longifolia* は優占順位ではほぼ変わらないものの, 優占度・密度が低下していた. また *Sigambra tentaculata* も同様に密度が低下していた. これに対して *Maldane cristata* は密度が1987年で高かったものの優占度では徐々に増加し, 1995年では最優占種となっていた.

摂餌様式の構成と変化: 群集構成種の摂餌様式を砂泥底における餌資源の利用方法からまとめ, その構成比の時間変化を検討した (Fig.9). その結果, 表層下堆積物食者は1975年以後減少し, 深表層下堆積物食者は時間経過とともに増加したことが認められた. 表層堆積物食者は1987年に密度が高いものの1995年では減少していた. 1995年ではやや肉食性種が増えたものの雑食者や懸濁物食者, 条件的表層懸濁物・堆積物食者の割合に大きな変化は認められなかった.

考 察

沿岸浅海域での富栄養化・有機汚染の進行にともない堆積物および底層水の物理・化学的性状は変化していく. 増大する沈降有機物の分解は堆積物中の溶存酸素の欠乏と硫化物の生成を促進し, さらにこうした還元的堆積物に接する底層水の貧酸素化

と, 水中への硫化物とくに硫化水素の溶出によって, 堆積物を生息場所や餌資源として利用するベントス群集へ攪乱要因かつ強いストレスとして作用するようになる. 一般に強度の攪乱と環境ストレスにさらされている生物群集の構造特性は, 種多様性の低下と特定種群の優占度増加, 総個体数密度や生物の体サイズの減少, 'r-戦略者'の増加などの傾向を示すといわれている (Odum, 1985; Hall, 1994).

このような富栄養化・有機汚染の進行にともなう軟泥底ベントス群集の変化・遷移過程についても多くの研究がなされてきており (e.g. 堤・井上, 1996; Karakassis et al., 1999), (1) 多毛類の増加, 甲殻類

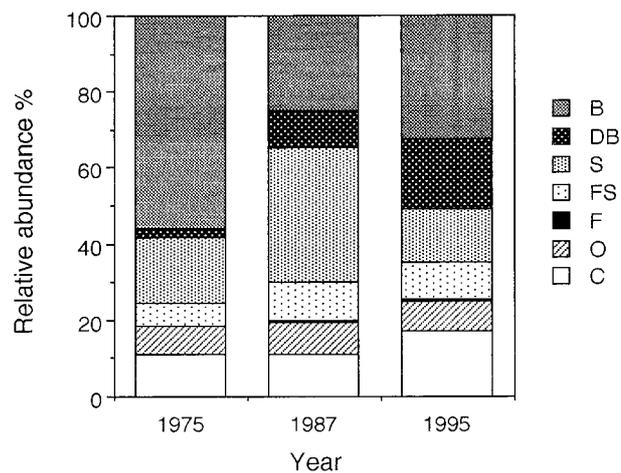


図9 サロマ湖の多毛類群集における摂餌様式組成の時間変化. B: 表層下堆積物食者, DB: 深表層下堆積物食者, S: 表層堆積物食者, FS: 条件的表層懸濁物・堆積物食者, F: 懸濁物食者, O: 雑食者, C: 肉食者.

Fig. 9 Temporal changes in feeding mode composition of the polychaete community in Saroma Lagoon. B: subsurface detritivores, DB: deep subsurface detritivores, S: surface detritivores, FS: facultative surface suspensivores/detritivores, F: suspensivores, O: omnivores, C: carnivores.

と棘皮動物の減少・消滅, (2) 種数の減少, 多様度の低下, (3) 大型長命種の減少, 小型短命種の増加, (4) 汚染指標種の相対優占度の増加, (5) 底層水の貧酸素化にともなう無生物域の出現, という一般的傾向が指摘されている(北森, 1975; 菊池, 1975・1982; Pearson & Rosenberg, 1978; 玉井, 1990). これらの傾向は強度の攪乱と環境ストレスにさらされている生物群集一般の構造特性に一致する. 多毛類はこうした有機汚染が進行した環境条件においても優占し, 他のベントスの生息が認められないような状態でも特定種の生息が認められることから, その群集構造特性の検討は有機汚染の進行状況を考察する上で有用な情報を提供すると考えられる.

サロマ湖の多毛類群集の優占種群は他の内湾ホタテ漁場と非常に類似しており(陸奥湾, 中尾ほか, 1989; 高橋ほか, 1991; 噴火湾, 中尾, 1997; 三陸内湾群, 中尾ほか, 投稿準備中), これらの漁場に共通する群集型であると考えられる. とくにギボシイソメ科の *Lumbrineris longifolia*, ホソタケフシ *Maldane cristata*, トノサマゴカイ *Scalibregma inflatum* は日本列島の内湾ホタテ漁場で優占度が高い種群である. また, *Lumbrineris longifolia*, *Maldane cristata* や *Cirriformia tentaculata*, *Dorvillea* sp., *Heteromastus* sp. は有機汚染にともなって増加する種群として, また日本列島の内湾における指標種として指摘されている(Pearson & Rosenberg, 1978; 菊池, 1982). 一方, 有機汚染が極度に進行した沿岸浅海域で優占する多毛類, すなわち汚染指標種としては, イトゴカイ科の *Capitella capitata*, スピオ科の *Paraprionospio pinnata* (A 型) などが指摘されているが(菊池, 1982), 1975 年・1987 年のサロマ湖調査では確認されているものの, 1995 年 10 月においては両種とも生息が確認できなかった.

1995 年 10 月のサロマ湖の多毛類群集は 3 つの群集型を示し(Fig.3), 湖底の大部分は構造多様度の高い A 2, B 型の群集型が分布していた(Fig.4). 両タイプは種構成に違いがあるものの, 種数・密度・生物量などの構造類似性は高く(Table 2), また底質の泥分含量の差異によく対応しており(Fig.5), A 2 型が砂泥質底, B 型が砂質底に対応した群集型となっていた. 構造多様度が低く密度・生物量ともに小さい A 1 型は, 芭露川河口域, 東部湖盆と無生物域周辺に分布し, 泥分含量や有機物量で他の 2 タイプとは異なる底質に対応していた. もっとも分布域が広く *Maldane cristata* と *Lumbrineris longifolia* が優占する A 2 型は, 他の内湾ホタテガイ漁場でも

優占する群集型であり(中尾ほか, 1989; 中尾, 1997), 対応する底質環境も類似性が高い. したがって種組成と汚染指標種の優占度, および群集型パターンからは, サロマ湖の湖底環境は他の内湾ホタテガイ漁場と類似した群集構造を示し, 極度の有機汚染の進行を指標する状態にはなっていないと考えられる.

一方, 1975 年から 1995 年にかけて, サロマ湖の多毛類群集の構造が変化してきたことがあきらかになった. 種数・総個体数密度は減少し(Fig.6), 優占種構成は変化した(Table 3). 群集構造は長期的傾向を持つ変化と一年の季節的な環境変動に対応した周期的変化を示す. したがって, 群集構造における長期的傾向をもつ変化パターンの検出には季節的な変動パターンを考慮して, 時系列データにもとづく解析が必要である. 本研究で用いたデータは 1987 年・1995 年データが一季節に限定したものであるが, 1975・76 年の周年データと比較して明確に異なることが示されたことから(Figs.7,8), これらの構造変化は長期的傾向を反映したものと考えられる.

優占種構成の変化で顕著なのは *Lumbrineris longifolia* の密度・優占度の低下と *Maldane cristata* の相対的な優占度の増加である. *Maldane cristata* の密度は 1975 年と 1995 年の比較では大きな変化が認められないが, *Lumbrineris longifolia* の個体群密度は 1975 年から 1995 年にかけて約 1/15 に低下した. また, 類似度百分率分析の結果からは, ミズヒキゴカイ科の *Dodecaceria concharum*, カギゴカイ科の *Sigambra tentaculata* なども群集構造類似度の変化に寄与した種群であることが示された.

このような優占種構成と密度の変化について, 高橋ほか(1991)は陸奥湾における多毛類群集の 10 年間の経時調査から, 密度の年変動の大きさと最優占種の交替現象を指摘し, この要因として種間相互作用, とくに競争的排除作用の可能性を指摘している. 本研究であきらかになった優占種構成の変化も同様の可能性を否定できない. しかしながら, タケフシゴカイ科とギボシイソメ科多毛類の種間関係には, タケフシゴカイ科多毛類による易分解性有機物を豊富に含む表層堆積物の表層下への輸送行動が, ギボシイソメ科多毛類を含む他の表層下堆積物食者に餌資源を供給し, gardening 仮説(Hylleberg, 1975)を支持しているとの指摘もある(Levin et al., 1997). また, Holte (2001)はタケフシゴカイ科多毛類の生物攪拌による堆積物の再懸濁化や堆積物表層への糞粒の堆積による微生物密度の増加が表層堆積

物食者に正の効果と及ぼす一方、高密度の棲管形成と堆積物攪拌作用などで表層下堆積物食者には負の効果と及ぼすとしている。しかし、サロマ湖の多毛類群集構成種の摂餌様式組成 (Fig.9) からはこのような機能群間との関係を推測できるような明瞭な傾向は見出せなかった。密度と優占種構成の変化における生物間相互作用の解明にはさらなる研究が必要であると思われる。

サロマ湖でのホタテ垂下養殖が本格化したのは1965年以後で、中川 (1977) が調査をおこなった1975年はサロマ湖でのホタテ垂下養殖生産がそれまでの10年間で飛躍的に増大した時期にあたる。1975年以後、ホタテ生産量は1980年まで7000-9000トン/年を推移したが、その後、大量斃死現象が起り生産量が低下、1985年から再び回復した。この間、1978年12月に第2湖口が人工開削されている。北海道開発庁 (1988 a, b) が実施した1987年調査はそれらのイベント後にあたる。

サロマ湖でコア試料を分析した菊池ほか (1984) は、1929年の第1湖口開削後の堆積速度増加と、1965年以後1982年までの有機物量の増加傾向をあきらかにし、1965年以後の堆積有機物の増加は増大したホタテ垂下養殖量と関係することを指摘している。ついで1988年に表層堆積物を分析した西浜・干川 (1992) は、1965年の大島ほか (1965) によるサロマ湖底質の調査結果と比較して、砂質で有機炭素含有率が低い底質が拡大していることを指摘し、この現象は、第1・第2湖口の開削後の影響によりサロマ湖内の潮流と堆積環境の変化が続いていると考えられることから、シルト・粘土質粒子と有機沈積物が湖外や湖内深底部に移送・再集積されているためと考察している。

一方、1965年以降のサロマ湖の底質環境を検討した中尾・園田 (2000) は、1978年の第二湖口の開削以後に湖底有機物量は減少したが、近年再び増加する傾向にあり、また硫化物を多く含む還元的底質の分布が拡大傾向にあることをあきらかにしている。サロマ湖では1974年以後赤潮の発生が確認され、また夏期には水深15m以深での貧酸素化が確認されている (西浜, 1994)。しかし近年は水質の富栄養化傾向が明確になり、また貧酸素水塊の形成が深部のみならず沿岸域でもみられることが報告されている (サロマ湖養殖漁業共同組合, 1999)。

群集構造の変化における生物的要因の重要性はいうまでもないが、総個体密度の顕著な低下は (Fig.6)、群集構成種の個体群密度の年変動が大き

いことに起因するものと判断するにはなお検討が必要であると考えられる。過去20年間のサロマ湖における底質と水質の変化傾向を考慮すると、1995年の群集構造と無生物域の存在はサロマ湖の富栄養化現象を反映し、顕著な密度低下は貧酸素水塊の発生頻度と形成スケールの増大に影響を受けた可能性が考えられる (Diaz & Rosenberg, 1995)。サロマ湖の垂下養殖ホタテガイの排泄量は春から夏にかけて増加し、10月下旬にピークに達した後減少することがあきらかにされている (蔵田ほか, 1991)。養殖生物の排泄物に由来する沈降有機物量もこのような変動を示し、夏から秋にかけて生物の酸素要求量が増大する時期に底層水の貧酸素化を導いてきたと考えられる。近年はサロマ湖と同様なホタテガイ垂下養殖の発展過程をもつ噴火湾でも底層水の貧酸素化現象が確認されるようになり、ホタテガイ養殖との関係が検討されている (中尾・園田, 2000)。

二枚貝垂下養殖漁場における貧酸素水塊の形成と赤潮の発生、底質中の硫化物の増加はすべて漁場老化現象の兆候である。このような兆候を把握するための養殖漁場の環境基準についてはすでに水質や底質から基準値が定められているが、近年はベントスによる指標性とその有機物分解作用を考慮に入れた基準も検討されている (横山, 2000)。この問題の基本点は養殖生物による底質への有機物負荷と底生生物による分解の平衡維持という観点であり、これを指標する生物学的・化学的特性のより正確で簡潔な把握が重要になる。今後、サロマ湖の多毛類群集構造から推測された環境変化をさらに検討し、持続的な養殖生産をはかる漁場環境を保全していく上では、多毛類をはじめとするベントス群集と底質環境のモニタリング調査、ならびに両者の関係を解明する研究の継続が極めて重要であると考えられる。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費総合研究A (課題番号07309009) 「海跡湖堆積物からみた汽水域の環境変化」 (研究代表者・高安克己) の調査の一環としておこなわれました。現地調査では「汽水域総研」メンバーの方々ならびにサロマ湖養殖組合の藤芳義裕氏に大変お世話になりました。特に採集とサンプル処理には島根大学理学部の丹後雅憲氏、立見博俊氏、梅木信宏氏にご協力いただきました。また、本研究について北海道大学大学院水産科学研究科多様性生物学講座 (ベントスグループ) の皆さんには非

常に有意義なご意見をいただきました。記して以上の皆様に心から感謝いたします。

引用文献

- 荒川好満・楠木豊・神垣正昭(1971) カキ養殖場における生物源堆積現象 (Biodeposit) の研究 (1) 養殖適正密度について. *Venus*, 30: 113-128.
- Clarke, K. R. (1993) Non-parametric multivariate analysis of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18: 117-143.
- Clarke, K. R. and Green, R. H. (1988) Statistical design and analysis for 'biological effects' study. *Marine Ecology Progress Series*, 46: 213-226.
- Clarke, K. R. and Ainsworth, M. (1993) A method of linking multivariate community structure to environmental variables. *Marine Ecology Progress Series*, 92: 205-219.
- Clarke, K. R. and Warwick, R. M. (1994) Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. Plymouth Marine Laboratory, Plymouth, 144 pp.
- Collie, J. S., Hall, S. J., Kaiser, M. J. and Poiner, I. R. (2000) A quantitative analysis of fishing impacts on shelf-sea benthos. *Journal of Animal Ecology*, 69: 785-798.
- Dayton, P. K., Thrush, S. F., Agardy, T. M. and Hofman, R. J. (1995) Environmental effects of fishing. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5: 205-232.
- Diaz, R. J. and Rosenberg, R. (1995) Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 33: 245-303.
- Eleftheriou, A. (2000) Marine benthos dynamics: environmental and fisheries impacts: introduction and overview. *ICES Journal of Marine Science*, 57: 1299-1302.
- Fauchald, K. and Jumars, P. A. (1979) The diet of worms: A study of polychaete feeding guilds. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 17: 193-284.
- Hall, S. J. (1994) Physical disturbance and marine benthic communities: life in unconsolidated sediments. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 32: 179-239.
- 北海道開発庁 (1988 a) サロマ湖の水質・底質環境. 寒冷地圏域の海跡湖における環境保全に関する研究, 昭和 62 年度研究成果報告書, 北海道開発局土木試験所第 1 研究部水産土木研究室, pp.52-76.
- 北海道開発庁 (1988 b) サロマ湖の生物環境. 寒冷地圏域の海跡湖における環境保全に関する研究, 昭和 62 年度研究成果報告書, 北海道開発局土木試験所第 1 研究部水産土木研究室, pp.77-82.
- Holte, B. (2001) Possible ecological effects from Maldanid (Annelida, Polychaeta) "super-dominance" in a small north Norwegian sill system. *Ophelia*, 55: 69-75.
- Hylleberg, J. (1975) Selective feeding by *Arenicola pacifica* with notes on *Abarenicola vagabunda* and a concept of gardening in lugworms. *Ophelia*, 14: 113-137.
- Ito, S. and Imai, T. (1955) Ecology of oyster bed I. On the decline of productivity due to repeated cultures. *Tohoku J. Agc. Res.*, 5: 9-26.
- Jennings, S. & Kaiser, M. J. (1998) The effects of fishing on marine ecosystems. *Advances in Marine Biology*, 34: 201-352.
- Karakassis, I., Hatziyami, E., Tsapakis, M. and Plaiti, W. (1999) Benthic recovery following cessation of fish farming: a series of successes and catastrophes. *Marine Ecology Progress Series*, 184: 205-218.
- 菊池和夫・野沢靖・松本英二 (1984) 堆積物からみたサロマ湖の環境変化について. 北水試報, 26: 11-24.
- 菊池泰二 (1975) 環境指標としての底生動物 (2) 群集組成を中心に. 日本生態学会環境問題専門委員会 (編), 環境と生物指標 2 (水界編), 共立出版, 東京, pp. 255-264.
- 菊池泰二 (1982) 海域における富栄養化と底棲生物の指標性. 日本水産学会 (編), 沿岸海域の富栄養化と生物指標, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 84-100.
- 北森良之介 (1975) 環境指標としての底生動物 (2) 指標生物を中心に. 日本生態学会環境問題専門委員会 (編), 環境と生物指標 2 (水界編), 共立出版, 東京, pp. 265-273.
- 蔵田護・干川裕・西浜雄二 (1991) サロマ湖における垂下養成ホタテガイの摂餌量. 北水試研報, 37: 37-57.
- Levin, L., Blair, N., DeMaster, D., Plaia, G., Fornes, W.,

- Martin, C. and Thomas, C. (1997) Rapid subduction of organic matter by maldanid polychaetes on the North Carolina slope. *Journal of Marine Research*, 55: 595-611.
- 松宮義晴 (1998) 水産資源の保全へ向けての新たな展開. 月刊海洋, 30: 183-188.
- 森勝義 (1999) カキ養殖場の自家汚染の現状と対策 (総説). 水産増殖, 47: 173-180.
- 中川義彦 (1977) 漁業開発振興調査 ホタテガイ養殖許容量調査 1. 底質・大型底生動物調査. 昭和51年度北海道立網走水産試験場事業報告書, 北海道立網走水産試験場, pp.119-151.
- Nakao, S. (1982) Community structures of the macrobenthos in the shallow waters in northern Japan. *Memoirs of the Faculty of Fisheries, Hokkaido University*, 28: 225-304.
- 中尾繁 (1983) 多毛類の種多様度と底質環境. ベントス研究会誌, 24: 54-59.
- 中尾繁 (1997) 噴火湾八雲町沿岸域におけるマクロベントスの群集構造と底質環境. 水産学術研究・改良補助事業報告, 平成8年度, 北水協会, pp. 27-37.
- 中尾繁・五嶋聖治・野村浩貴・山口宏史・吉武誠司 (1989) 陸奥湾の軟泥底マクロベントス群集と底質との関係. 北大水産彙報, 40: 159-168.
- 中尾 繁・園田 武 (2000) ホタテガイ養殖漁場および周辺水域の海底環境 全国漁業協同組合連合会報告書, 19 pp.
- Naylor, R. L., Goldberg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. and Troell, M. (2000) Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature*, 405: 1017-1024.
- 西浜雄二 (1994) オホーツクのホタテ漁業 北海道大学図書刊行会, 札幌, 218 pp.
- 西浜雄二・干川裕 (1992) サロマ湖における底泥の粒度組成と有機炭素含有率の分布. 北水試研報, 39: 1-9.
- 農林水産省統計情報部 (2000) 第75次農林水産省統計表 平成10~11年, 農林統計協会, 613 pp.
- 小疇 尚・福田正己・石城謙吉・酒井 昭・佐久間敏雄・菊池勝弘 (編) (1994) オホーツク海沿岸の湖沼群. 日本の自然地域編1, 北海道, 岩波書店, 東京, pp.70-72.
- Odum, E. P. (1985) Trends expected in stressed ecosystems. *Bioscience*, 35: 419-422.
- Omori, K., Hirano, T. and Takeoka, H. (1994) The limitations to organic loading on a bottom of a coastal ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 28: 73-80.
- 大島和雄・渡辺浩・佐竹俊孝・塩沢孝之・小原昭雄・丸邦義 (1965) 北海道サロマ湖の生態学的研究: 形成史と底質について. 北水試報, 6: 1-32.
- Pearson, T. H. and Rosenberg, R. (1978) Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 16: 229-311.
- Pocklington, P. and Wells, P. G. (1992) Polychaetes: Key taxa for marine environmental quality monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 24: 593-598.
- Reish, D. J. (1979) Bristle worms (Annelida: Polychaeta). In, *Pollution ecology of estuarine invertebrates*, Hart Jr, C. W. and S. L. H. Fuller (eds), Academic Press, 406 pp.
- 三瓶良和・倉門由希子・清水紋・高安克己・石田聖 (1997) サロマ湖・網走湖底質の有機炭素・窒素・イオウ濃度. *Research in Organic Geochemistry*, 12: 51-60.
- サロマ湖養殖漁業協同組合 (1999) サロマ湖における環境保全対策: 水質・底質環境調査解析資料. 10 pp.
- 代田昭彦 (1990) 養魚場の汚染と被害の現状. 渡辺競 (編), 海面養殖と養魚場環境, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 11-27.
- 高橋豊美・河村卓・藤岡崇 (1991) 陸奥湾における夏季のマクロベントスの密度と群集型の経年変動. 日本ベントス学会誌, 41: 15-27.
- 玉井恭一 (1990) 底生生物. 渡辺競 (編), 海面養殖と養魚場環境, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 69-78.
- 堤裕昭・井上貴子 (1996) 約20年間にわたる魚類養殖漁業による大量の有機物が堆積した内湾域の海底環境と底生生物群集の特徴. 日本ベントス学会誌, 50: 39-49.
- Wu, R. S. S. (1995) The environmental impact of marine fish culture: towards a sustainable future. *Marine Pollution Bulletin*, 31: 159-166.
- 横山寿 (2000) 海面魚類養殖漁場の環境基準—その施策と問題点—. 養殖研究所研究報告, 29: 123-134.

中海の渦鞭毛藻 (予報)

小島夏彦¹・三浦常廣²・中村幹雄²

A Preliminary study of the dinoflagellates of Lake Nakaumi, west Japan.

Natsuhiko Kojima¹, Tsunehiro Miura² and Mikio Nakamura²

Summary: Thirty seven dinoflagellate species are described from the sample water collected from August 1998 to July 2000 at Lake Nakaumi, brackish lake, west Japan. The assemblage consists of three main groups, *Prorocentrum minimum*, *Heterocapsa rotundata* and “small *Gymnodinium* complex”. These dinoflagellates are present in the lake all the year around. They are adapted themselves to intense environmental changes of brackish water lake.

Key words: brackish water, dinoflagellate, *Gymnodinium*, Lake Nakaumi, unarmored species

はじめに

島根, 鳥取県境の汽水湖, 中海は西暦 1600 年以降急速に閉鎖環境が進行し, 現在の湖の原型ができあがったと考えられている (徳岡ら, 1989). このような汽水湖は海と陸の双方の影響を受け, その環境は短期間に極めて大きく変動する. したがってそのような環境に生息する生物はその環境変動に適応できる生理的性質や生態的な戦略を持つものが多い. プランクトンの世界, 特に植物プランクトンの仲間では多くの水域で珪藻が大きな役割を果たしており汽水湖も例外ではない. 中海でも *Skeletonema costatum*

が大量発生したり, 小型の中心目珪藻が優占種になっていることが報告されている (大谷, 1998). 一方, 水域における一次生産者として珪藻とともに重要な位置占める分類群に渦鞭毛藻がある. 渦鞭毛藻は赤潮・貝毒の原因生物として知られていることから, 直接それらの害を引き起こす種については多様な研究が進んでいるが渦鞭毛藻という分類群全体を対象にした研究はあまり多くない. 中海でもこの状況はあてはまり未だに中海の渦鞭毛藻群集の全体像

はわかっていない. 本研究は 1998 年 8 月から 2000 年 7 月までの間に行われた定期調査の中で採取された無固定試料の中で認められた渦鞭毛藻を明らかにし, その群集の性質について検討したものである. ただし, 今回は薬品による固定に極めて弱い無殻渦鞭毛藻のことを考慮し, 採水試料をそのまま観察した結果であるうえ濃縮試料ではない. そのため, 固定試薬を用いた濃縮試料による検鏡結果と比べた場合, 本研究のリストからもれている種が少なからず存在することが推測される. また, 生試料での同定作業のため高倍率での観察ができないために種名まで明らかにならない個体が多数存在することになった. したがって本研究は中海の渦鞭毛藻群集の大枠を明らかにすることを第一の目的とし, 詳細な群集リストと記載については次稿に譲ることとする.

試料採取測点と環境

採取測点は島根県内水面水産試験場の中海観測測点 St.5, 6, 7, 10 (現在は St 8 に変更) (図 1) である. 水深は St.5 で 4 m, St.6 で 6 m, St.7 で 6 m,

¹ 大阪工業大学生物学研究室 Laboratory of Biology, Osaka Institute of Technology, Osaka, 535-8585, Japan

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

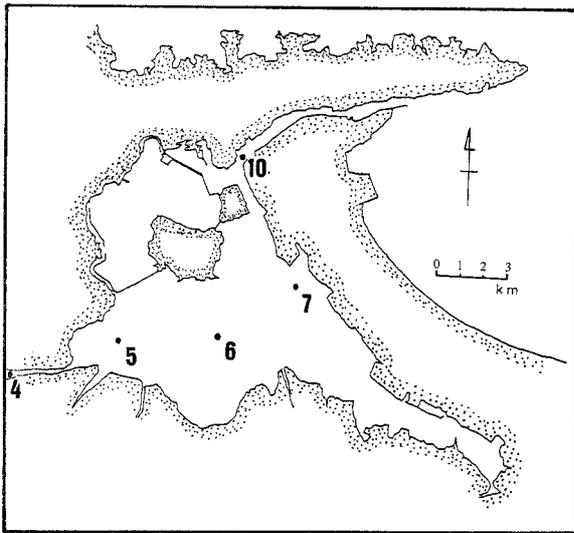


図1 中海のサンプル採取地点図
Fig. 1 Location map of sampling site

St.10で8mである。水温については季節的な規則的な変化が認められるが、塩分濃度については極めて変動的でこれは降水により大橋川をはじめとする諸河川から流れ込む淡水による影響を強く受けるためである。最高水温は29.2℃(1998年8月, St.6表層), 最低水温は4.1℃(2000年2月, St.7水深3m), 最高塩分濃度は34.4‰(1999年1月, St.10底層), 最低塩分濃度は3.5‰(1999年7月, St.5表層)となっており, 夏期には明瞭な塩分躍層が発達する場合がある。ここでは湖中央部(St.6)における1999年度の水溫, 塩分濃度変化を各層順に示したも

のを例示する(図2)。

試料採取方法と検鏡法

採水はバンドン採水器を用いて表層水と底層水を採取し, それぞれ無固定のままの試水とグルタルアルデヒドで固定した試水の2種類のサンプルを用意し本研究では無固定水の方を用いた。採取した試料24時間以内に検鏡しプランクトンの同定をおこなった。試料0.2mlを金枠付き界線入計数板上に滴下し, 倒立顕微鏡でそこに含まれるすべてのプランクトンの同定を行い, これを3回繰り返して平均をとった。

中海の渦鞭毛藻記載

ここでは調査期間中に無固定サンプル中で観察された渦鞭毛藻類の簡略な記載を行う。分類体系はFensome *et al.*(1993)をもとにして千原(1999)が一部改変したものをを用いる。また写真図版の中には同一サンプルのグルタルアルデヒド固定試料から撮影したものも含まれているとともに, 写真, スケッチとも記録できなかったものも多くあることを付記しておく。なお, 表1, 2に月別の渦鞭毛藻産出状況を示す

記載
 渦鞭毛植物門 DINOPHYTA

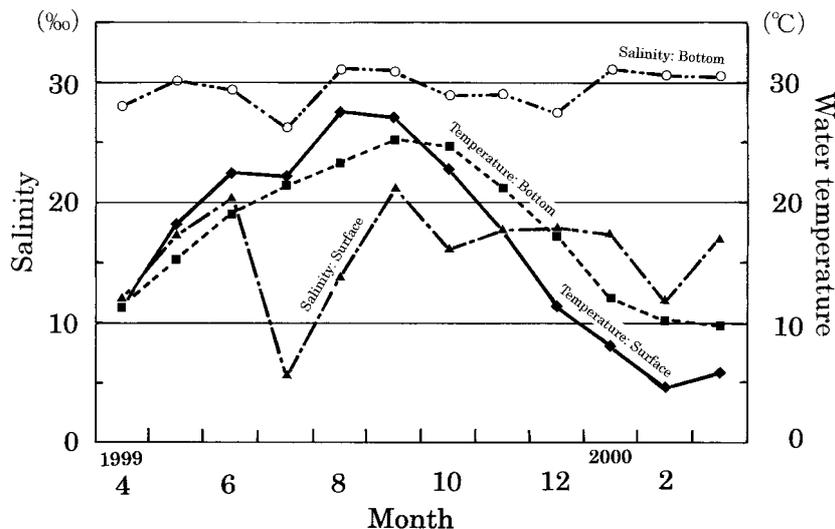


図2 中海の水溫, 塩分濃度の年変化(1999年度の例)
Fig. 2 Seasonal changes (April 1999~March 2000) of water temperature and salinity in Lake Nakaumi (St.6)

表1 中海における月別渦鞭毛藻産出状況①
Table 1 Monthly change of dinoflagellate assemblage in Lake Nakaumi①

SPECIES	YEAR AND MONTH											
	1998 Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	1999 Jan.,	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.
<i>Prorocentrum micans</i>												
<i>Prorocentrum minimum</i>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Dinophysis acuminata</i>												●
<i>D. sp.1</i>							●					
<i>Oxyphysis oxytoxoides</i>				●	●	●	●					
<i>Gymnodinium catenatum</i>				●								
<i>Gymnodinium mikimotoi</i>				●								
small <i>Gymnodinium</i> complex	●	●	●	●	●		●	●	●		●	●
<i>Gym. sp.1</i>						●	●					●
<i>Gym. sp.2</i>												
<i>Gym. sp.3</i>									●			
<i>Gym. sp.4</i>										●		
<i>Gym. sp.5</i>									●			
<i>Gym. sp.6</i>												
<i>Gym. sp.7</i>				●			●				●	
<i>Amphidinium</i> spp.												
<i>Gyrodinium dominance</i>			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Gyr. Impudicum</i>		●	●									
<i>Gyr. instriatum</i>		●		●								
<i>Gyr. Spirale</i>												●
<i>Gyr. pepo?</i>			●									
<i>Gyr. britannia?</i>												
<i>Gyr. sp.1</i>											●	
<i>Katodinium glaucum</i>				●								
<i>Polykrikos schwartzii</i>			●									
<i>Nematodinium armatum</i>					●	●				●		
<i>Noctiluca scintillans</i>								●		●		
<i>Ceratium furca</i>												
<i>Gonyaulax spinifera</i>							●					
<i>G. venior</i>		●										
<i>Alexandrium</i> sp.	●								●			
<i>Heterocapsa rotundata</i>	●		●	●		●	●	●	●		●	●
<i>Protopendinium bipes</i>	●			●			●				●	●
<i>Proto. leonis</i>			●									
<i>Proto. pellucidum</i>		●			●	●	●				●	
<i>Proto. pentagonum</i>												
<i>Proto. pyriforme</i>				●								
<i>Proto. spp.</i>		●				●	●					
<i>Scrippsiella trochoidea</i>												
<i>S. spinifera</i>												

渦鞭毛藻綱 *Dynophyceae* Pascher 1914
 プロロセントルム目 *Prorocentrales* Lemmermann
 1910
 プロロセントルム科 *Prorocentraceae* Stein 1883
 プロロセントルム属 *Prorocentrum* Ehrenberg 1834

Prorocentrum micans Ehrenberg 1834 (図版 I, 3)
 記載: 平坦な 2 枚の殻を合わせた皿状構造からなる。形は楕円形で大きさは体長 30~40 μm, 体幅約 20 μm。細胞前端部には凹部があり, そこから 2 本の鞭毛がでる。後端部は尖る。細胞前端部には頂刺

表2 中海における月別渦鞭毛藻産出状況②
 Table 2 Monthly change of dinoflagellate assemblage in Lake Nakaumi②

YEAR AND MONTH SPECIES	1999					2000						
	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.
<i>Prorocentrum micans</i>					●							
<i>Prorocentrum minimum</i>	●	●	●	●	●	●	●					
<i>Dinophysis acuminata</i>						●						
<i>D. sp.1</i>												
<i>Oxyphysis oxytoxoides</i>			●	●		●						
<i>Gymnodinium catenatum</i>											●	
<i>Gymnodinium mikimotoi</i>												
small <i>Gymnodinium</i> complex	●	●		●	●	●		●	●	●	●	●
<i>Gym. sp.1</i>	●				●	●		●	●	●		
<i>Gym. sp.2</i>						●						
<i>Gym. sp.3</i>					●				●	●		
<i>Gym. sp.4</i>					●				●			
<i>Gym. sp.5</i>		●			●	●				●		
<i>Gym. sp.6</i>										●		
<i>Gym. sp.7</i>				●								
<i>Amphidinium</i> spp.					●							
<i>Gyrodinium dominance</i>	●	●	●	●						●	●	●
<i>Gyr. Impudicum</i>			●	●								●
<i>Gyr. instriatum</i>												
<i>Gyr. Spirale</i>										●		●
<i>Gyr. pepo?</i>												
<i>Gyr. britannia?</i>												●
<i>Gyr. sp.1</i>				●								
<i>Katodinium glaucum</i>				●	●	●		●			●	●
<i>Polykrikos schwartzii</i>											●	●
<i>Nematodinium armatum</i>				●	●						●	●
<i>Noctiluca scintillans</i>							●	●		●		
<i>Ceratium furca</i>												
<i>Gonyaulax spinifera</i>												
<i>G. verior</i>												
<i>Alexadrium</i> sp.					●							
<i>Heterocapsa rotundata</i>			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<i>Protopendinium bipes</i>	●	●		●								
<i>Proto. leonis</i>												
<i>Proto. pellucidum</i>			●	●	●					●		
<i>Proto. pentagonum</i>												
<i>Proto. pyriforme</i>												
<i>Proto. spp.</i>					●						●	●
<i>Scrippsiella trochoidea</i>		●			●			●				●
<i>S. spinifera</i>		●										

がある。細胞表面は光学顕微鏡下では網目状に見えるが、走査型電子顕微鏡ではこれらの構造が細かなディンプル状構造であることがわかる。

出現特徴: 中海で観察される *Prorocentrum* 属では次

項の *Proro. minimum* が圧倒的に多いが、本種はこの *Proro. minimum* のブルームの中に認められることが多く、単独で観察される例は少ない。

Prorocentrum minimum (Pavillard) Schiller 1933 (図版 I, 1, 2)

記載: 平坦な 2 枚の殻を合わせた皿状構造からなる。体長, 体幅は 15~25 μm で, 外形は三角形, ハート形, 五角形, ある細胞は円形に近いものもあり変異が大きい。細胞の前部に僅かな凹みがあり, そこから 2 本の鞭毛が出ている。細胞は黄褐色を呈す。

注記: *Prorocentrum* の中では小型のため, 他の *Prorocentrum* と比較するときは識別しやすい。しかし, *P. minimum* と呼ばれているものの中では形態変異の幅が大きいので遺伝的バックグラウンドの比較が必要とされている (堀口 1990)。光学顕微鏡観察 (微分干渉像) では表面に小さな粒状構造が認められるが, これらの構造は走査型電子顕微鏡観察では短い棘状構造の集まりであることがわかる。ゆっくり回転しながら泳ぐ。

出現特徴: 本種は近年中海で頻繁に赤潮を起している。中海東部水域で赤潮をおこしやすく, 特に米子湾で高濃度パッチ状赤潮が観察される。1 年を通じて中海で観察されるが, 秋から春にかけて高濃度になる (濃茶褐色)。

ディノフィシス目 Dinophysiales Kofoid 1926

ディノフィシス科 Dinophysiaceae Stein 1883

ディノフィシス属 *Dinophysis* Ehrenberg 1839

Dinophysis acuminata Claparade et Lachmann 1859 (図版 I, 4)

記載: 細胞は体長約 40 μm , 体幅 25~30 μm 。体側方向から観察すると卵形であるが, 正面から見ると左右に偏圧されている。横溝は細胞上部に偏り, 上殻が極めて小さく下殻の占める部分大きい。横溝に沿って前方環状翼片と後方環状翼片が発達している。前方環状翼片は杯状に上を向いている。縦溝に沿っても左右に翼状構造が発達しているが左縁翼片は右縁翼片より長く, その表面には 3 本の肋が認められる。光学顕微鏡では細胞表面に網目状構造が観察される。

注記: 本種は *D. fortii* に似るが, 体側方向から観察すると前種が左右対称に近い卵形を示すのに対し, 後種は細胞前方部の縁が直線状になっている。下痢性貝毒種。

中海での産出状況: 調査期間中は夏と冬に一度ずつ観察されたが, 観察されるときは比較的まとまった個体数で出現する。

D. sp.1 (図版 I, 5)

記載: 体長 30~40 μm の細長い卵形細胞。左右に扁平。細胞前面に翼片が発達する。表面に網目状構造が観察される。細胞前面に発達する翼片が細胞下部まで伸長している。背腹方向からの細胞形態等是不明。

注記: 本種は *D. acuminata* に似るが細胞が縦に細長い点で異なる。*Dinophysis* 属であることは確認できたが, 背腹方向から観察できなかつたため種まで認識できなかった。

オキシフィシス科 Oxyphysiaceae Sournia 1984

オキシフィシス属 *Oxyphysis* Kofoid 1926

Oxyphysis oxytoxoides Kofoid 1926 (図版 II, 8)

記載: 本種の外形は紡錘形をなし, 上殻頂部から 2/3 付近に横溝がある。体長は 40~55 μm , 体幅は 20~25 μm (体側観)。上下の横溝翼片はそれほど発達しない。細胞前部の横溝から縦溝につながる部分には縦溝を縁取るようにやや翼状部が発達するが, 他の *Dinophysys* 類に比べると小さい。普通は上殻, 下殻部ともその先端は尖るが, 間帯形成が顕著になると左右幅が広がり, 下殻部の背腹観が台形状になることから全体の形状に大きな差異が生じることになる。

注記: 本種は *Oxytoxum* 属の各細胞に形態が似るが, 前者が左右に大きく構造が二分された構造をもつことと, 本体を形成する鎧版の数が上殻, 下殻とも 2 枚ずつしかないことから区別は容易である。また間帯の発達の程度により形態上の個体差が大きくなる。

出現特徴: 10 月~2 月の間に出現する。

ギムノディニウム目 Gymnodiniales Apstein 1909

ギムノディニウム科 Gymnodiniaceae (Bergh)

Lankester 1885

ギムノディニウム属 *Gymnodinium* Stein 1878

Gymnodinium catenatum Graham 1943

記載: 縦長で背腹方向にやや偏圧された細胞。上錘は下錘よりやや短く, 上錘頂端はやや平坦。横溝は細胞中央部よりやや上方に位置し, 腹部で横溝幅の 2~3 倍の段差を示す。縦溝は上錘の頂部直下から始まり, 下錘下部にまで達する。

注記: 本種は *Gyrodinium instriatum* に似るが, 前者の横溝が細胞中央に近い場所にあること, さらに横溝の段差が後者ほどないことなどから区別される。また本種は連鎖細胞を作ることが多く, しかも連鎖すると細胞形態が変わることが知られている。特に

連鎖状態では *Gyrodinium impudicum* に似るが、後者の中間細胞が樽状になることや両端の細胞が円錐状であること、さらに *Gymnodinium* 属と *Gyrodinium* 属の基本的な違いである横溝の段差の程度から区別される。

Gymnodinium cf. *mikimotoi* Miyake et Kominami ex Oda 1935

記載: 本種は背腹方向からみると円形に近く見えるが、体側方向からみると顕著に扁平である。細胞表面に鎧板は認められない。背腹観は上錘が扁平なドーム状をしており、下錘部は縦溝が下端部まで伸長しているために底部には明瞭な凹部が認められる。縦溝は僅かに上錘に進入している。体長約 30 μm 、体幅約 30 μm 。

注記: 本種は *Gyrodinium aureolum* に似ておりその識別はやさしくない。ここでは横溝の始端部がわずかに上錘部に進入しているため *G. mikimotoi* に近いものとしたが、上錘溝がはっきり観察されなかったり、下錘部右部と左部の相違も明瞭でなかった。故に、*Gyr. aureolum* あるいは *Gym. mikimotoi* に近い形態の別種である可能性は捨てきれない。

Gym. spp. (small *Gymnodinium* complex) (図版 I, 13, 14, 15)

注記: 10 μm 程度の小型の *Gymnodinium* が複数種含まれる。下記 *Gymnodinium* 属中の小型種を一部含んでいる可能性あり。詳細は不明。

Gym. sp.1

記載: 体長 15 μm ほどの小型細胞。上錘部は縦長のドーム状。下錘部は左部が右部より長く背腹観では非対称になる。

注記: 下錘部の形態が特徴的なため見分けがつく。しかし、小型のため光学顕微鏡では詳しい特徴は押さえきれない。停止細胞による高倍率観察と SEM による観察が必要である。本種と同様の理由から *Gym. sp. 3, 4, 5, 6, 7* についても SEM による観察が必要である。

Gym. sp.2

記載: 体長 40 μm ほどの中型細胞。縦長の紡錘形をなす。上錘部はドーム状で、下錘部は縦長の円錐状。下錘部が長く、横溝は細胞の上方に片寄っており、腹部ではほとんど段差は認められない。縦溝は横溝から下方へ伸び、先細るように見える細胞全体に縦

方向に線状の模様がある。

Gym. sp.3

記載: 体長 15 μm 程度の小型細胞。上錘部はドーム状で、下錘部は右部と左部で大きさに差がある。左部、右部とも球状であるが左部の方が大きい。

注記: 小型のため詳細不明。

Gym. sp.4

記載: 体長 10 μm ないしはそれ以下の非常に小さな細胞。上錘部はドーム状で、下錘部は球状構造物が横に並列状態にならんでいるような形状をなす。下錘部の2つの球状構造は右部の方がやや大きい。横溝がよく発達しており幅が広い。縦溝は横溝から下方へ伸長し下部末端へ達する。

注記: 小型のため詳細不明。

Gym. sp.5

記載: 体長 15 μm ほどの小型細胞。典型的な *Gymnodinium* 型細胞の形態を示す。上錘、下錘ともドーム状を示し、縦と横の長さの比は等しいかやや縦長。横溝は広く発達している。縦溝は横溝から下方へ伸び、下部まで達し、その部分が下錘部では凹部として認められる。

注記: 小型のため詳細不明。

Gym. sp.6

記載: 体長 10 μm ないしはそれ以下の非常に小さな細胞。上錘部は縦長の円錐形、下錘部はドーム状をなす。横溝は細胞中央部よりやや下方に位置する。縦溝は不明。

注記: 小型のため詳細不明。

Gym. sp.7

記載: 体長 15 μm ほどの小型細胞。非常に縦長の細い細胞で、上錘部、下錘部とも棒状。上錘部が下錘部より大きく、横溝は細胞中央部よりやや下方に位置する。

注記: 小型のため詳細不明。

アンフィディニウム属 *Amphidinium* Claparede et Lachmann 1859

Amphidinium spp.

記載: 横溝が上部に片寄る。上下方向に長い。体長 20~25 μm 。

注記: 典型的な *Amphidinium* の形態をなすが細かな

特徴は不明.

ギロディニウム属 *Gyrodinium* Kofoid et Swezy 1921

Gyrodinium dominance Hulburt 1957 (図版 I, 6, 9)

記載: 細胞外形は紡錘形をしており, 表面には縦方向に条線がはしっている. 無殻種である. 上錘の頂部はドーム状であるが, 下錘の先端部は上錘部より尖ることが多い. 横溝は腹部で段差を生じ, その差は細胞の長さの 1/3 程度である. 縦溝は上錘頂部下あたりから始まり下錘部端部まで達するが, 横溝の段差箇所を生じるハンクに沿って通るために屈曲する. 体長 20~40 μm , 体幅 10~20 μm . サイズは変異に富む.

注記: 中海では *Prorocentrum minimum* と共産する場合が多かった.

出現特徴: 中海全域で認められる.

Gyr. impudicum Fraga et Bravo 1995 (図版 III, 3, 4)

記載: 細胞は無殻の連鎖細胞, 特に 4 連鎖細胞の状態が多い. 末端細胞と間に挟まれた細胞では形態に大きな違いがある. 末端細胞は背腹観が三角形をなすが, その他の細胞は横幅の広い長方形をなす. 横溝は腹部で段差を生じ, その差は細胞長の約 1/4 である. 縦溝は上下とも端部まで達し, 特に上錘の頂部では反時計回りにその先端部が巻いている. 体長 20~25 μm , 体幅約 20 μm .

注記: 本種は 4 連鎖細胞で出現することが最も多いが, その他には単体, 2 連鎖, 8 連鎖, 16 連鎖のものが認められる. 本種はシストも形成し, 中海底質中からも検出されている (Kobayashi *et al.*, 2001). 培養するとゼラチン状物質を大量に分泌する.

出現特徴: 9~11 月を中心に出現するが, 7 月にも一度観察されている.

Gyr. instriatum Freundenthal et Lee 1963 (図版 III, 6)

記載: 濃い茶色の中型細胞で背腹方向にやや偏圧されている. 上錘は台形をしていて頂部は平らである. 下錘も台形であるが縦溝の延長部が底部にまで達しているため, 底部には凹部が認められる. 腹部における横溝のズレは細胞長の 2/1 から 1/3. 縦溝は上錘に深く入り込み頂部直下に達しており, 下錘には底部を回り込み一部僅かに背面に達している. 大型の核が上錘中央部に認められる. 形態は変異が大きい. 体長 30~40 μm , 体幅: 約 25 μm .

注記: 中海底質では米子湾のように本種のシストが塊状になって集中産出する場所が認められている

(Kojima *et al.* 1994). その割には調査期間中の遊泳体の観察個体数は多くない. 本邦では本種の赤潮も知られていることを考えると, 条件が揃えば中海でもブルームを起こしてもおかしくない.

出現特徴: *Gyr. impudicum* と同様に 9~11 月と 7 月に観察されている.

Gyr. spirale (Bergh) Kofoid et Swezy 1921

記載: 紡錘形をした大型の細胞である. 顕微鏡下では無色で縦方向に条線が何本も認められる. 細胞長が幅の 2 倍以上あるため全体が細長い. 側方, 背腹方向とも偏圧はなく, 細胞の横断面はほぼ円形である. 背腹観は非対称で, 上錘頂部がやや右に傾いた形になっている. 頂部は尖る. 下錘部も右部がやや長い. 横溝の腹部での段差は顕著で, 細胞長の約 1/2 で, 腹部でオーバーハンクしている. 体長約 60 μm , 体幅約 25 μm .

注記: 今回の調査では *Gyr. dominance* が多産する場合に共産する場合が多かった.

Gyr. cf. pepo (Shutt) Kofoid et Swezy 1921

記載: 紡錘形をした大型の細胞である. 無色で縦方向に条線が何本も認められる. 背腹観は非対称で, 上錘部は右部に傾ぎ, 下錘部は逆に左部へ傾ぐような形になり逆 S 字状になる. 上錘部, 下錘部とも末端部は尖る. 横断面はほぼ円形である. 横溝は段差を持ち, 細胞長の 1/3 ほどになる. 縦溝は上錘部の途中からはじまり, 下錘部の下方まで続いている. 体長 60 μm , 体幅 35 μm .

注記: 本種は *Gyr. pepo* の元記載と比較すると外形こそ似ているが, 細胞長が短く, 上錘部末端部が尖っているという点で異なっている.

Gyr. cf. britannia Kofoid et Swezy 1921

記載: 紡錘形をした縦長の大型細胞である. 無色で縦方向に条線が何本も認められる. 上錘は下錘より小さい. 上錘末端部は尖るが, 下錘末端部は丸い. 横溝は細胞中央よりやや上にあり, 腹部における段差は細胞長の 1/3 程度である. 細胞横断面はほぼ円形. 体長 60~70 μm , 体幅 25 μm .

注記: 本種は *Gyr. britannia* に似るが, 元記載と比較すると細胞長が約半分ほどしかなくサイズの差が大きい. その他の特徴もはっきり後者に断定するものがない.

出現特徴: 1999 年 6 月に 1 度観察.

Gyro. sp.1

記載: 体長 30~35 μm , 体幅約 15 μm 程度の中型細胞。上錘部はやや縦長の円錐状。下錘部は右部が発達し、背腹観からは左右非対称になる。横溝は水平面からはかなり傾斜しつつ細胞周囲を回るが、腹部での段差は体長の 1/4~1/5 程度。縦溝は上錘頂部下から始まり、下錘末端部まで伸びる。下錘部左部に眼点様ないしは貯蔵物のようなものが見える。

注記: 横溝の段差があまり著しくなく、*Gymnodinium* に属する細胞の可能性もある。

カトディニウム属 *Katodinium* Fott 1957*Katodinium glaucum* (Lebour) Loeblich III 1965

記載: 紡錘形をした中型細胞で、細胞横断面はほぼ円形。横溝が下錘部へ極端に偏った部分に位置する。上錘の上部はやや捩れているものが多い。横溝の段差は横溝幅の 1/3 程度で、縦溝は短い下錘部末端部まで伸びている。細胞自体は無色で、核は細胞のやや下部にある。体長 40~50 μm , 体幅約 15~20 μm 。

ポリクリコス科 Polykrikaceae Kofoid et Swezy 1921

ポリクリコス属 *Polykrikos* Butschli 1873*Polykrikos schwartzii* Butschli 1873

ウォルノビア科 Warnowiaceae Lindemann 1928

ネマトディニウム属 *Nematodinium* Kofoid et Swezy 1921*Nematodinium armatum* (Dogiel) Kofoid et Swezy 1921

記載: 楕円形をした中型細胞。上錘部はドーム状、下錘部は先が細くなる。横溝は 1 回転以上して段差は体長の 0.5 倍程度ある。縦溝は上錘から左回りに降りて、1 周と少し回っている。下錘部にはレンズ眼が明瞭に観察される。体長 50~70 μm , 体幅 25~30 μm 。

ノクテルカ目 Noctilucales Haeckel 1894

ノクテルカ科 Noctilucaceae Saville-Kent 1881

ノクテルカ属 *Noctiluca* Suriray in Lamarck 1816*Noctiluca scintillans* (Macartney) Ehrenberg 1934

記載: 背腹面から見ると円形の大型細胞。巨大な袋状構造を持ち、その中央部が凹んでいる部分が縦溝にあたる。縦溝の端から長くはっきりした触手が伸びている。触手の付け根付近の縦溝には横溝の痕跡と言われている歯状突起や短い鞭毛がみられる(縦鞭毛)。細胞表面には網状の構造が見られ、細胞全体はうすいピンク色を呈す。

注記: 他の渦鞭毛藻類と比較してサイズ、形態とも大きく異なるため同定はしやすい。

出現特徴: 本種は赤潮形成種の代表的なものである。しばしば沿岸域表層でトマトジュースのような色のブルームを引き起こすが、中海では塩分躍層下部、すなわち塩分濃度が高い部分で増殖しているのがしばしば観察される。

ゴニオラクス目 Gonyaulacales Taylor 1980

ケラチウム科 Ceratiaceae Willey et Hickson 1909

ケラチウム属 *Ceratium* Schrank 1793*Ceratium furca* (Ehrenberg) Claparede et Lachmann 1859 (図版 III, 1, 2)

記載: 細胞は前後に細長く、体長約 180 μm , 体幅 30 μm (中央部) で明瞭な 1 本の前角と 2 本の後角からなる。上殻は下殻よりもやや長く頂部に向かって細くなっている。下殻の 2 本の後角は左側の方が太くかつ約 2 倍の長さを持つ。縦溝は明瞭で、幅が広く深い。

注記: 本種は *C. kofoidii*, *C. boehmii*, *C. belone* に似るが、前記 2 種は背腹方向に偏圧を受けている点で異なり、*C. belone* は細胞全体の太さで本種と区別される。また、ケラチウム属の中には形態変異が著しいものも知られており (*C. fusus*, *C. tripos*)、同一種の形態が極めて大きく変わることが知られている (Hasle and Nordli, 1951; Nielsen, 1956)。その要因については塩分濃度や水温などが関係しているとも言われており、中海のような環境変動の激しい汽水湖ではこの点で注意する必要がある。

ゴニオラクス科 Gonyaulacaceae Lindemann 1928

ゴニオラクス属 *Gonyaulax* Diesing 1866*Gonyaulax spinifera* (Claparede et Lachmann) Diesing 1866

記載: 球ないしは亜球形の細胞。下殻の末端部には 2 本の棘が見られることが多いが、欠く場合もある。上殻先端部には頂角がある。横溝はほぼ細胞中央部を走っているが、腹部で横溝幅の 2 倍程度の段差があり、両端部がオーバーハングしている。横溝は下殻部にのみあり、下部へいくほど横溝が広がる。体長 30 μm , 体幅 25 μm 。

G. verior Sornia 1984

記載: 細胞はやや前後に長く、背腹方向に偏圧されている。背腹方向から見ると、上殻は二等辺三角形に近く、等辺は真っ直ぐかやや内側に湾曲してい

る。下殻後端部には2本の顕著な後角が発達している。鎧版の表面は網目状構造を示す。横溝は細胞のほぼ中央部を走り、縦溝は腹部横溝より後端部へむけて幅広く伸長している。縦溝は下部へいくほど幅広くなる。

注記: 本種は *Alexandrium* 属のそれと類似したシストを形成するが、中海では今のところ観察されていない。しかし、底泥を用いた発芽実験で本種の遊永体が認められたことからシストの存在もほぼ間違いない。

アレキサンドリウム属 *Alexandrium* Halim 1960

Alexandrium sp.

記載: 細胞は球形に近く、上殻はドーム状、下殻は台形状をなす。体長、体幅はほぼ等しく、体のほぼ中央部に明瞭な横溝が見られる。体長、体幅 30~35 μm 。

注記: *Alexandrium* 属は頂孔板と頂板との関係や腹孔の位置など極めて微小な部分の観察が必要で、本種の場合はその部分の観察ができなかったため種まで明らかにできなかった。

ペリディニウム目 Peridinales Haeckel 1894

ヘテロカプサ科 Heterocapsaceae Fensome et.al 1993

ヘテロカプサ属 *Heterocapsa* Stein 1883

Heterocapsa rotundata (Lohmann) Hansen 1995

記載: マッシュルーム状の形態をした極めて小さな細胞。上殻が極めてよく発達し、下殻の2, 3倍ある(下殻部は極めて小さく光学顕微鏡下では幅の広い横溝の部分と区別がつかない)。サイズの変異幅が極めて大きく、体長 6~16 μm 、体幅 4~10 μm 。

注記: 特徴的な外形から超小型ながら認識はしやすい。しかし、サイズの幅が大きいことからこれらをすべて同じ範疇に入れてよいかは、その生活環が明らかにならないとはっきりしたことは言えない。

ペリディニウム科 Peridiniaceae Ehrenberg 1831

プロトペリディニウム属 *Protoperidinium* Bergh 1881

Protoperidinium bipes (Paulsen) Balech 1974

記載: 背腹方向に偏圧された小型の細胞。背腹方向からみると上殻は三角形をなし、下殻は背の低い台形をなす。下殻部後端から顕著な2本の棘が発達している。横溝は幅が広く腹部での段差はほとんどない。縦溝は短い。体長 15~22 μm 、体幅 15~20 μm 。

Proto. leonis (Pavillard) Balech 1974 (図版Ⅱ, 4)

記載: 背腹方向に偏圧された中型細胞。背腹方向からみると体長と体幅はほぼ等しく、左右はほぼ対称。上殻は三角形、下殻は2つのよく発達した後角からなるがそれらは形の整った2つの三角形をなす。後角先端部は尖る。横溝は腹部で溝幅の1/2程度ずれる。縦溝はやや深い。体長 50~60 μm 、体幅 50~60 μm 。

注記: 本種は元記載が十分でないため同定が混乱しているとされている。特に類似種の *P. obtusum* は外形や鎧版の一部模様の違いで区別されている場合があるが、同一種であるとする見解もある。

Proto. pellucidum Berch 1881 (図版Ⅱ, 1)

記載: 球形の中型細胞。上下方向にやや偏圧されている。頂角は顕著で、下殻部末端には2本の後棘がある。棘には翼片をともなう。横溝は細胞中央部ないしはこころもち下部に位置する。腹部における段差は溝幅の1/2程度。縦溝は幅が広く横溝から下部にかけて伸長している。縦溝部分の翼片がやや発達している。

注記: 本種は近縁の *P. mite*, *P. pyriforme*, *P. steinii*, *P. latispinum* に似るが、後棘の位置、大きさなどで区別できるものもある。しかし、光学顕微鏡下では最も根本的な違いである鎧版配列を遊泳している個体で確認することは難しく、採水直後の生体細胞の確認では同定を誤る可能性がある。

Proto. pentagonum (Gran) Balech 1974

記載: 背腹方向から見ると五角形の細胞。上殻は二等辺三角形、下殻は二つの後角があるが、角の間が平坦さみのため全体として台形に近い。横溝は細胞中央部をほぼ水平に走っているが、腹部付近で左からの横溝が横溝幅の2倍程度段差を生じさせる。縦溝は腹部の横溝左端部から生じ、下殻部下部にまで達する。体長 70 μm 、体幅 80 μm 。

注記: 本種は *Proto. latissimum* と似るが、頂板1'と周辺鎧版との関係から区別がつく。ただし、光学顕微鏡で、しかも生体細胞で確認するのは難しい。

Proto. pyriforme (Paulsen) Balech 1974 (図版Ⅱ, 2)

記載: 球形の中型細胞。背腹方向にやや偏圧されている。体長が体幅よりやや大きい。下殻末端部には2本の後棘がほぼ平行に存在する。後棘には翼片が認められる。2本の後棘の間は近接している。横溝は細胞中央部を走り、腹部における段差はあまり見

られない。縦溝の幅は2本後棘の幅にほぼ等しい。体長約40 μm 、体幅約40 μm 。

注記: 本種は *P. pellucidum*, *P. mite*, *P. seinii*, *P. latispinum* に似るが、外部形態、後棘の特徴分類できることもあるが、鎧板の確認が必要な場合は光学顕微鏡では難しい状況もある。

Proto. subinerve (Paulsen) Loeblich III 1970 (図版 II, 9)

記載: 体長、体幅はほぼ等しい。背腹方向から見て、上殻は二等辺三角形、下殻はほぼ台形状をなす。頂角、後角とも短い。縦溝は深く、後角に向かって開いている。横溝の段差はほとんど見られない。体長約60 μm 、体幅60 μm 。

注記: 本種は *Proto. obtusum*, *Proto. leonis* に似るが、前者は縦溝が斜めに傾き、後角先端部に短い棘があることで区別され、後者は細胞自体が背腹方向にかなり扁平をうけているとともに、後角先端部に短い棘があることでこれも区別できる。

Proto. spp.

記載: 球状ないしは上下方向に偏圧されている。横溝はほぼ中央に位置する。

注記: *Protoperidinium* 属であることはわかるが、遊泳速度が速いことと死後すぐに分解してしまったため種までの同定ができなかった。

スクリプシエラ属 *Scrippsiella* Balech 1959 ex Loeblich III 1965

Scrippsiella trochoidea (Stein) Loeblich III 1976 (図版 II, 5)

記載: 洋なし型の小型細胞。黄色がかった褐色を呈す。上殻は丸みのある円錐形で頂部に顕著な突起がある。下殻は半球形をなす。横溝は浅く、腹部で溝幅と同程度かその1/2程度ずれる。縦溝は横溝から下殻末端部の手前までの間に存在する。体長18~30 μm 、体幅約20 μm 。

注記: 本種は石灰質のシストをつくる。シストは表面に特徴的な突起をもち、底泥中でも比較のみつけやすい。本種の近縁種は分類学的に混乱しており、近縁種が共産する場合は同定に注意が必要である。

Scrippsiella spinifera Honsell et Cabrini 1991 (図版 II, 6)

記載: 背腹観が五角形状の中型細胞。上殻部は正三角形に近く、下殻部はほぼ台形状である。背腹面か

ら見ると上殻部の方が下殻部のほうより長い。後端部に短い2本の棘状構造が認められる。体長30~38 μm 、体幅25~30 μm 。

結果と考察

全体で37種が確認された。今までの中海におけるプランクトン群集の調査では渦鞭毛藻は極めて限られた種群しか同定されてこなかった。その意味では今回のリストは初めて中海の渦鞭毛藻群集の全体像をまだ不完全ながらも提示できたことになる。

群集全体の種組成を見た場合に気がつくことは無殻渦鞭毛藻が極めて多いことである。特に *Gymnodinium* 属, *Gyrodinium* 属に含まれる種が多い。 *Gymnodinium* 属の種には正確に同定できていないものも多い。また小型の *Gymnodinium* に属すると思われる一群も存在し、これを small *Gymnodinium* complex とした。このグループには複数種が含まれているものと考えられる。これらに次いで多いグループが *Protoperidinium* 属である。

構成種の特徴は上記のとおりであるが、数量的な面を見ると全く違った様相を示す。すなわち、1年を通じて優占する種としては *Prorocentrum minimum*, *Heterocapsa rotundata*, が多く、small *Gymnodinium* complex がこれに次いでいる。これら3つのグループの多くは (*Gymnodinium* の中で不明のものがある) 1年を通じて中海水域に存在し、環境変動にうまく適応しながら増減を繰り返している。また共通の特徴としてすべて小型種ということもあげられる。

1950年代くらいまでは渦鞭毛藻として報告されているのは *Ceratium* 属 (種までの同定はなし) が主体だった (石井 1931, 倉茂喜多 1933 など)。これが変化しだしたのが記録の上からは千田 (1959) が報告している *Exuviaella apora* の大発生である。 *E. apora* は現在ではおそらく *Prorocentrum minimum* のことと推定されるので、中海の現在型群集の主体をなす種がこの時期に出現しだしたと考えられる。その後はっきりとこの傾向が見られ始めたのが伊達 (1975) により報告された *Prorocentrum minimum* の1974年における大発生である。この年から現在まで、基本的なプランクトン組成は変わっていないと考えられる。

このような群集の形成にはどのような環境要因が大きく関わっているのかについては、環境変動が激しく複雑な汽水域ではその要因を明瞭にあぶり出す

のは難しいが、近藤 (1990), Kondo *et al.* (1990) では塩分濃度がプランクトンの分布の決定要因として報告されている。

渦鞭毛藻は水産学的には赤潮や貝毒の原因生物として重要視されてきた。そのために赤潮、貝毒原因種の研究はそれ以外の種に比べ進んでいると言っている。今回の調査でも関係種が出現している。まずは *Gymnodinium mikimotoi* であるが 1998 年の 11 月に 1 度だけ 1 個体のみ観察した。その前後とも観察はなくブルームをおこした形跡はない。本種は西日本を中心に漁業被害を起こしてきた種で日本海の北限は舞鶴湾なので (山口 2000), 中海で観察されてもおかしくはない。*Gymnodinium catenatum* は貝毒原因種として知られているが (福代 2000), 本種も 2000 年 6 月に 1 度だけ観察されたのみである。*Dinophysis acuminata* は 1999 年 7 月と 2000 年 1 月に観察されている。本種も貝毒原因種であるが、東北地方のものは有毒で東京湾のものは無毒というような例があり (Lee *et al.* 1989), 場所により毒化するものしないものがあるようだ。また *Alexandrium* 属と思われる種も観察されたが種まで同定できなかったため有毒種であるかどうかは不明である。さらに渦鞭毛藻ではないが同じく赤潮原因藻であるラフィド藻類の *Heterosigma akashiwo* も検出されており、この種は底質の発芽実験からも見つかっている (小島, 未発表)。本種は単離して中海の滅菌濾過海水に接種したところ急速に増殖したところから中海でも条件が揃えばブルームを引き起こす可能性もある。以上中海の渦鞭毛藻群集は今までの報告からは考えられないくらい多様であることが明らかになった。またその中には赤潮・貝毒原因種も少ないながらも含まれている。水域の漁業振興を考える上で今後、渦鞭毛藻を含んだ植物プランクトンの定期的なモニターが重要になってくるのではなかろうか。

Kobayashi, S., Kojima, N., Itakura, S., Imai, I. and Matsuoka, K. 2001. Cyst morphology of a chain-forming unarmored dinoflagellate *Gyrodinium impudicum* Fraga et Bravo. *Phycological Research*, 49: 61-65.

Kojima, N., Seto, K., Takayasu, K. and Nakamura, M. 1994. Dinoflagellate cysts assemblage found in the surface sediments of Lake Nakauimi, western Japan. *Laguna*, 1: 45-51.

近藤邦男 1990. 中海における植物プランクトンの

謝 辞

中海調査では島根県内水面水産試験場の大北晋也氏、常盤 保氏にご協力いただいた。また本研究の一部は文部省科学研究補助金 (課題番号 10640454) を用いて行われた。記して関係者各位に感謝の意を表する。

引用文献

千田哲資 1959. プランクトン. 中海干拓基本調査報告書. 鳥取県水産試験場 pp.105-137.

千原光雄 1999. 藻類の多様性と分類体系. 藻類の多様性と系統. 裳華房, 東京 346 pp.

伊達善夫 1975. 富栄養化に関する実験的研究と将来予測. 中海・宍道湖の水質保全に関する調査報告書. (第 1 報) 島根県. pp.1-30.

Fensome, R.A., Taylor, F.J.R., Norris, G., Sarjeant, W.A. S., Wharton, D.I. and Williams, G.L. 1993. *A classification of living and fossil dinoflagellates*. American Museum of Natural History, Salem 351 p.

福代康夫 2000. 有毒プランクトンによる漁業被害の現状と研究の問題点. 有害・有毒赤潮の発生と予知・防除. 日本水産資源保護協会, 東京 260 p.

堀口健雄 1990. *Prorocentrum minimum*. 日本の赤潮生物. 内田老閣圃, 東京 407 pp.

Hasle, G. R. and Nordli, E. 1951. Form variation in *Ceratium fusus* and *tripos* populations in cultures and from the sea. *Mat. Naturv. Klasse*, 4: 1-25.

石井省一郎 1931. 中海赤潮についての調査. 海洋時報 3: 195-198.

倉茂英次郎, 喜多村一男 1933. 中海における硅藻と赤潮 (昭和 8 年夏期中海海洋調査報告第 II 部). 気象集誌 12: 287-300.

出現を支配する環境要因. 国際生態学シンポジウム'90. 汽水域・その豊かな生態系を求めて. 報告集. pp.19-28.

Kondo, K., Seike, Y. and Date, Y. 1990. Relationship between phytoplankton occurrence and salinity or water temperature in brackish lake Nakanoumi, 1979-1986. *Jpn. J. Limnol.* 51: 173-184.

Lee, J-S., Igarashi, T., Fraga, S., Dahl, E., Hovgaard, P. and Yasumoto, Y. 1989. Determination of diarrhetic shellfish toxin in various dinoflagellate species. *J.*

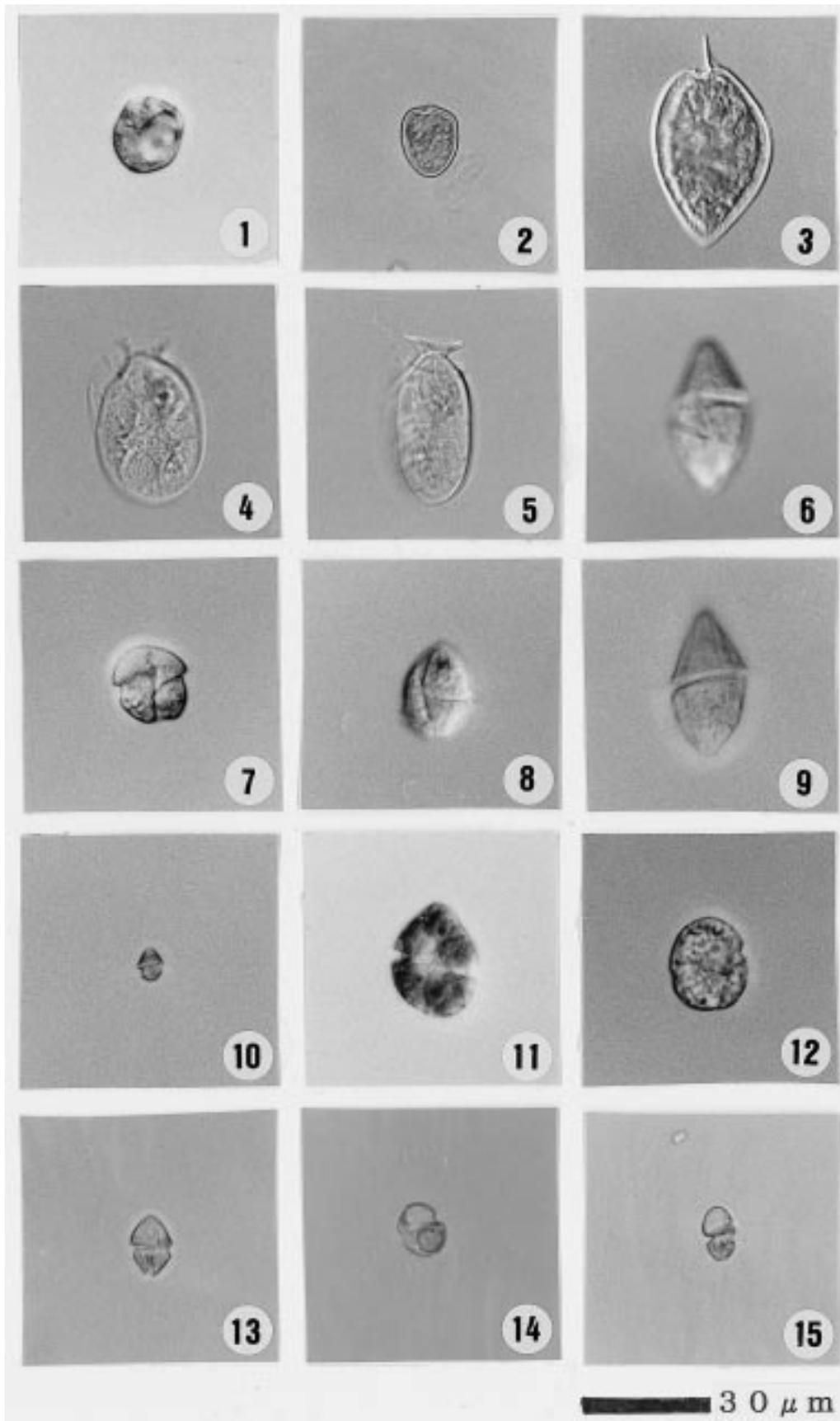


Plate I

1. *Prorocentrum minimum* 2. *Prorocentrum minimum* 3. *Prorocentrum micans* 4. *Dinophysis acuminata* 5. *Dinophysis* sp.
 6, 9. *Gyrodinium dominance* 7. *Gyrodinium* sp. 8. *Gyrodinium* sp. 10. *Heterocapsa rotundata* 11. *Gymnodinium* sp.
 12. *Gymnodinium* sp. 13. *Gymnodinium* sp. (small *Gymnodinium* complex)
 14. *Gymnodinium* sp. (small *Gymnodinium* complex) 15. *Gymnodinium* sp. (small *Gymnodinium* complex)

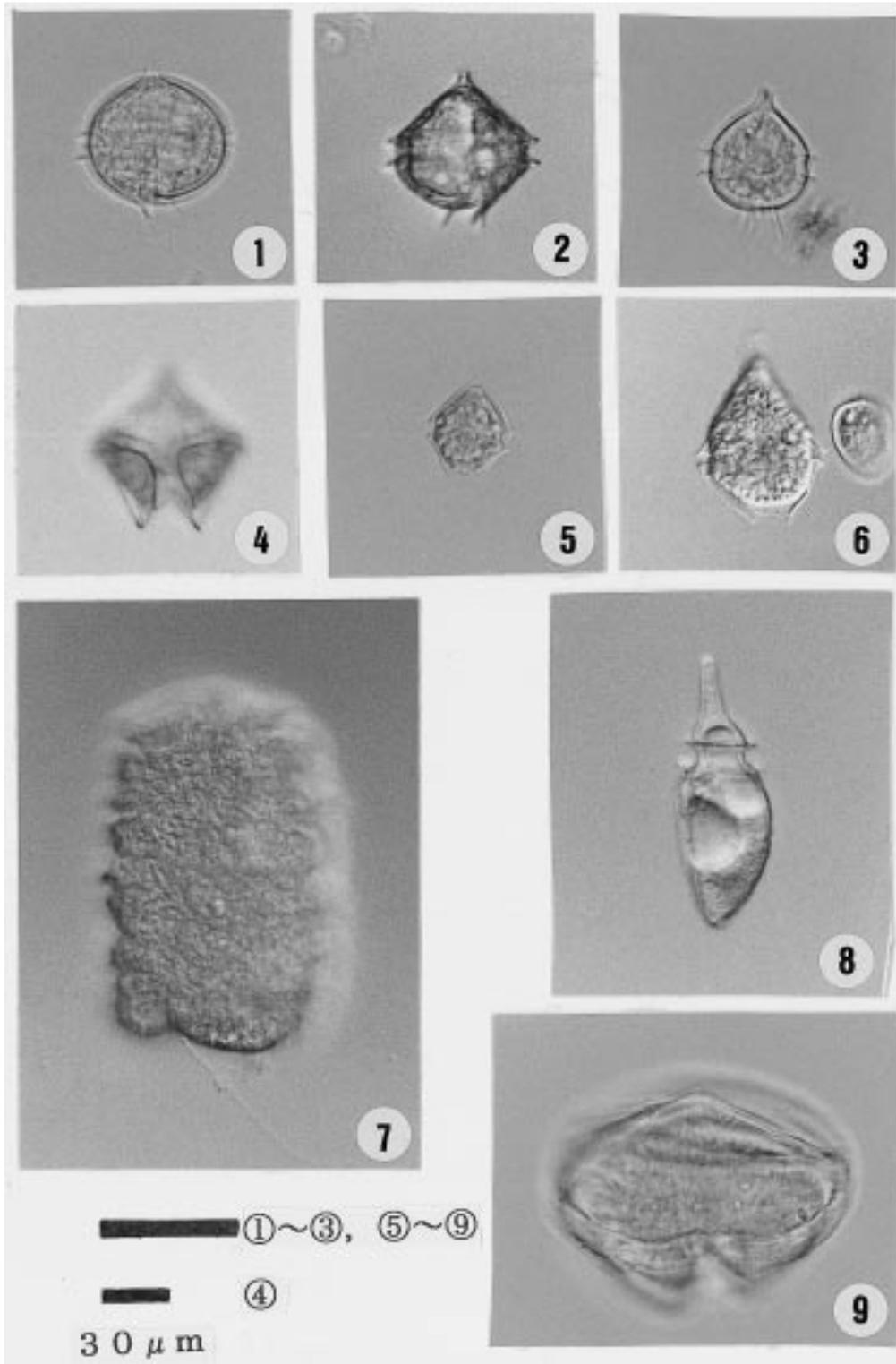


Plate II

1. *Protoperidinium pellucidum* 2. *Protoperidinium pyriforme* 3. *Protoperidinium* sp. 4. *Protoperidium leonis*
 5. *Scrippsiella trochoidea* 6. *Scrippsiella spinifera* 7. *Polykrikos schwartzii* 8. *Oxyphysis oxitoxoides*
 9. *Protoperidinium subinerme*

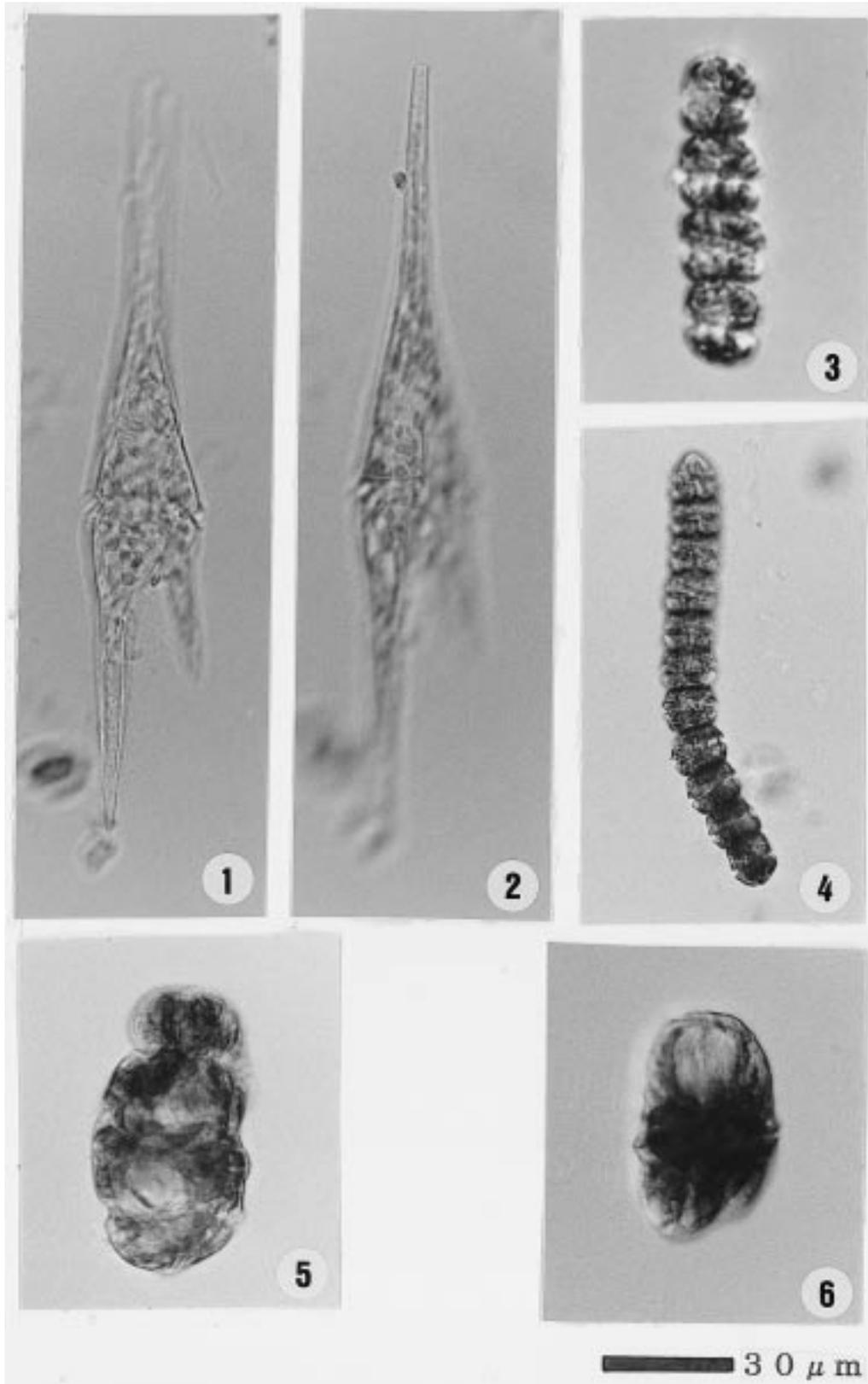


Plate III

1, 2. *Ceratium furca* 3, 4. *Gyrodinium impudicum* 5. *Warnowia?* sp. 6. *Gyrodinium instriatum*

- Appl. Phycol*, 1: 147-152.
- Nielsen, J. 1956. Temporary variations in certain marine Ceratia. *Oikos*, 7: 256-272.
- 大谷修司 1998. 汽水湖における微小珪藻類の分類学的研究. 文部省科学研究補助金研究成果報告書 (課題番号 08640889). 67 pp.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・高安克己・三梨 昂 1990. 中海・宍道湖の地史と環境変化. 地質学論集, 36: 15-34.
- 山口峰生 2000. 有害赤潮渦鞭毛藻 *Gymnodinium mikimotoi* の生理・生態学的特性と赤潮発生機構及び発生予察の現状. 有害・有毒赤潮の発生と予知・防除. 日本水産資源保護協会, 東京, pp.101-136

トルコの強塩性内陸湖沼から産出する「汽水性」珪藻種

鹿島 薫¹

The finding of some diatom species, which are known as brackish species, from hyper-saline inland lakes in Turkey

Kaoru Kashima¹

Abstract: There are a lot of inland saline lakes in the central part of Turkey. We found diatoms which were known as "brackish diatom species", from the inland hyper-saline lakes whose salinities exceeded twice or third as much as the marine salinity.

The diatoms from the hyper-saline lakes were divided into following four species groups.
Group a; the species which were reported coastal areas and brackish lagoons in Japan (*Cyclotella hakansoniae*, *Nitzschia compressa*, *Nitzschia constricta*, *Amphora coffeaeformis*, *Entomoneis alata*)
Group B; the species which were reported from freshwater areas and low saline areas in Japan (*Fragilaria fasciculata*, *Navicula cincta*)
Group C; the species which was not reported before in Japan (*Cymbella pussila*)
Group D; the new finding species which should be described as a new specie (*Cocconeis* sp.-1)

The geological surveys presumed that the inland saline lakes in Turkey had been formed by glacial and interglacial climatic changes during the Quaternary. Therefore, the adaptation of "brackish species" into the hyper-saline environment occurred during the Quaternary. It indicated that some of brackish diatoms have high ability to change of salinity.

Key words: adaptation, brackish species, inland saline lake, Quaternary, Turkey

はじめに

汽水域には、その環境に適応した特有の珪藻種が生息している。例えば、宍道湖においては *Cyclotella hakansoniae* が優占して産出しており、湖の多くの地点で湖底表層堆積物中に含まれる全珪藻殻の 80-90% 以上を占めている (鹿島, 1994)。同様の現象は、北海道網走湖 (鹿島 1996)、鹿児島県上甕島汽水性湖沼群の貝池 (久保ほか, 1999) などにおいても観察され、表層の塩分が 10% 以下の汽水湖沼に共通してみられることが分かった。

このような珪藻分布と塩分との特徴的な関係は、

珪藻が汽水域における古環境変動の復元のために、汽水性の珪藻種群が極めて有効な指標となることを示している (鹿島, 2001)。例えば、現在は海水との交換が大きく湖水の塩分の高い浜名湖でも、過去に *Cyclotella hakansoniae* が優占するような低塩分期が繰り返し存在したことが、ボーリングコア試料の分析より推定されている (本田・鹿島, 1997; 森田ほか, 1998)。

一方、著者は 1991 年よりトルコ内陸部の湖沼堆積物の古環境復元に関する研究を継続している。そして、古環境復元のための基礎資料として、同地域の内陸湖沼における珪藻群集の分析を行ってきた。

¹ 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

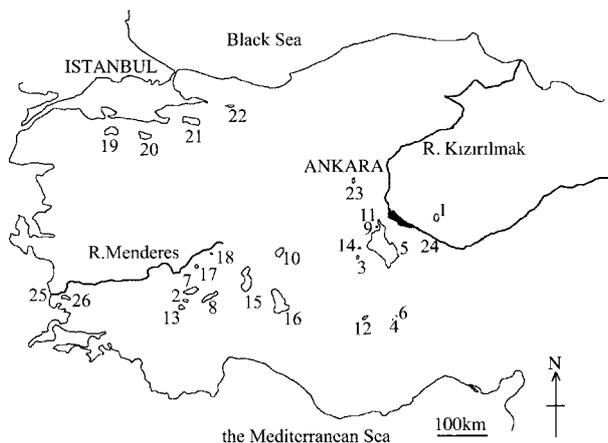


図1 トルコにおける調査地点位置図
図中の番号は、表1における地点名を示す。

Fig. 1 Research areas in Turkey

The numbers in this figures indicated the site number shown in Table 1.

その中で、塩分が海水の2~3倍を越えるような強塩性湖沼から、汽水性の珪藻種と類似した珪藻種群を観察することができることが分かった。例えば、前出の *Cyclotella hakansoniae* が、塩分100%を越す塩性湖沼からも産出が確認された。約10年における観測の結果、同様な特徴がいくつかの珪藻種において継続的に観測できたことから、本論文でその詳細を報告する。

さらに、塩分環境の大きく異なる、しかも地理的に離れた地域からの同一種が産出したことから、汽水性珪藻の進化と環境適応に関する考察を行う。

試 料

トルコにおける現生珪藻類の採取は、1991年、1992年、2000年、2001年に行った。試料の採取を行った主な湖沼・河川は以下の通りである(図1, 表1)。直接に海域とのつながりのない内陸性の塩性湖沼のうち、塩分が40%を越える強塩性湖沼を7湖沼、塩分が40%以下の弱塩性湖沼を7湖沼について計藻類の採取と水質測定を行った。さらにこれらの湖沼との比較のため、淡水域で8湖沼と2河川で、海岸に面した汽水性湖沼の2湖沼で調査を行った。

分 析 方 法

(珪藻試料の採取)

湖沼における珪藻試料として、表層水、表泥、湖

表1 トルコにおける珪藻試料

Table 1 Diatom samples from inland saline lakes, freshwater lakes and rivers and brackish lagoons in Turkey

	Salinity	1991	1992	2000	2001
(Hyper Saline Lakes)					
1	Lake Seyfe >100		○	○	*
2	Lake Ak >100		○	*	*
3	Lake Bolluk >100			○	
4	Lake Meke >100			○	
5	Lake Tuz 92	○	○	*	*
6	Lake Krater(Aci) 61	○	○	○	
7	Lake Aci 40		○	*	*
(low Saline Lakes)					
8	Lake Burdur 25		○	○	○
9	Lake Duden 19			○	○
10	Lake Akshehir 17		○	○	○
11	Lake Kucuk Duden 9			○	○
12	Lake Aci (Konya) 8	○			
13	Lake Salda 8		○	○	○
14	Lake Ilca 4			○	○
(Fresh Water Lakes)					
15	Lake Egridir 0		○	○	○
16	Lake Beyshehir 0	○		○	
17	Lake Isikli 0		○		○
18	Lake Karakuyu 0		○		
19	Lake Kus 0		○		
20	Lake Uluvat 0		○		
21	Lake Iznik 0		○		
22	Lake Sapanca 0		○		
23	Lake Mogan 0			○	
24	River Kizilirmak 0		○	○	
(Brackish lagoons)					
25	Lake Dil 20-36				○
26	Lake Bafa 19		○		○

○ sampling sites of diatoms

* samples could not be taken because lake level became very shallow

岸付着の採取を行った。

表層水は、紫外線の影響を避けるため、水深50cmにおいて、各地点2リットルを採取した。すぐ、中性ホルマリンを加えたのち、冷暗所に保管した。数日後、珪藻がサンプル瓶の下部に沈下したのち、ゆっくりと上部の水を除去した。その後、遠心分離器によって20ccのサンプル瓶に保管した。

表泥は、へらを用いて湖底表層2~3mmを剥ぐようにして採取し、サンプル瓶に入れ、中性ホルマリンを加えた。

付着試料は、その付着基物の差異を留意し、同一地点においても、礫、水草、大型藻類など分けて採取した。いずれの場合も採取した試料はサンプル袋に若干の湖水と共に入れ、サンプル袋の表面から注意深く試料表面をもみ、付着する珪藻を分離した。その後、中性ホルマリンを加え、珪藻試料のみをサンプル瓶に入れ保管した。

(水質測定)

試料採取地点の水質は、水温、塩分およびPhについてのみ、サンプル採取時に計測した。長期間の海外調査のため、簡便性および機械の耐久性を重視

し、以下のように計測した。塩分は屈折式の光学式塩分計を用い、塩分を千分比で読みとった。また、phは携帯Phメーターを用い、小数点一桁まで計測した。水温は寒暖計による測定を行った。

(珪藻試料の処理と封入)

トルコ国外への試料の持ち出しには、トルコ政府の許可が必要なため、試料の処理と検鏡用プレパラートの作成は、トルコ中部のアナトリア考古学研究所で行った。

採取した試料は、定量分割の後、過酸化水素水を加えて過熱し、珪藻殻の分散と有機物等の分解を行った。その後、遠心分離器によって洗浄し、カバーガラス上に滴下し、乾燥の後、マウントメディアを加え、永久プレパラートとして封入した。

顕鏡は光学式顕微鏡を用い1000倍で観察した。各試料200-500個体を同定した。

強塩性内陸湖沼から産出した「汽水性」珪藻種

内陸塩性湖沼の試料から96種の珪藻が観察された。同定は、主にKrammer and Lange-Bertalot (1991, 1997 a, 1997 b, 2000), Krammer (2000), Lange-Bertalot (2001)を用いた。ただし、これらの文献では、乾燥域におけるデータが充分ではないため、アフリカの内陸湖沼を記載したGasse (1986), イスラエルの内陸湖沼を記載したHerlich (1995)を参照した。また、珪藻の生息環境については、上記の文献のほか、それまでの既存の文献による記載をまとめたLowe (1976)のデータベース、および著者による最近の研究などを参照した。

内陸塩性湖沼から産出した代表的な珪藻種について、その生息環境の記載を上記の文献によって確認すると、いずれの種もこれまでは内陸塩性湖とは全く異なる環境下での産出が報告されているものであった。そして、そのほとんどはこれまで「汽水性種」とされていたものであった。

以下、塩分が40%を越える強塩性内陸湖沼から産出した代表的な珪藻種について記述する(表2, 図版1)。

(1) *Cyclotella hakanssoniae*

本種は、宍道湖で最も優占する浮遊生珪藻であり、湖底表層堆積物から産出する珪藻遺骸の80%以上を占めている。同様の現象は、網走湖、貝池(上甕島汽水性湖沼群)などでも観察され、塩分が10%以下の低塩分の汽水湖沼で特徴的に産出している種

表2 強塩性湖沼から産出した主要珪藻種における産出状況

参考のため、弱塩性湖沼、淡水湖沼・河川、海岸汽水湖沼における産出状況も示した。

Table 2 the distribution of hyper-saline diatoms in Turkey

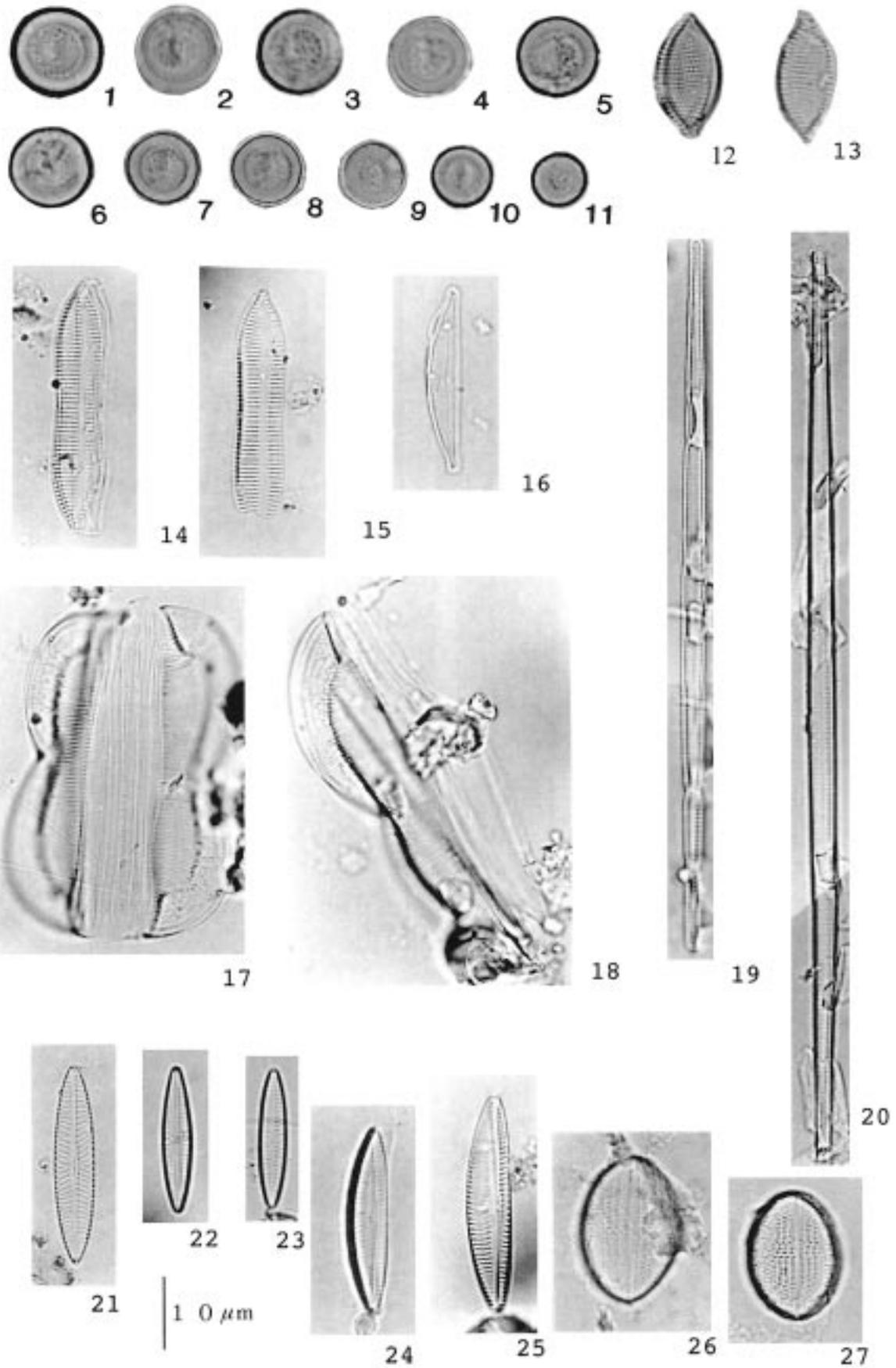
	salinity (‰)	<i>Cyclotella hakanssoniae</i>	<i>Nitzschia compressa</i>	<i>Nitzschia constricta</i>	<i>Amphora coffeaeformis</i>	<i>Entomoneis alata</i>	<i>Fragilaria fasciculata</i>	<i>Navicula cincta</i>	<i>Cymbella pussilla</i>	<i>Cocconeis</i> sp.-1
(Hyper Saline Lakes)										
Lake Seyfe	>100	○	+	+	◎			+	○	
Lake Ak	>100									
Lake Bolluk	>100									
Lake Meke	>100			+	+					○
Lake Tuz	92			○	+	◎		○	+	
Lake Krater(Aci)	61				+		◎	+	+	◎
Lake Aci	40					+			+	
(low Saline Lakes)										
Lake Burdur	25			+		◎			+	
Lake Duden	19									
Lake Akshehir	17					○			○	
Lake Kucuk Duden	9			◎	◎				◎	
Lake Aci (Konya)	8							+		
Lake Salda	8									
Lake Ilca	4			+				+		
(Fresh Water Lakes)										
Lake Egridil	0							+		
Lake Beyshehir	0				+	+		+		
Lake Isikli	0			+						
Lake Karakuyu	0									
Lake Kus	0									
Lake Uluavat	0									
Lake Iznik	0									
Lake Sapanca	0									
Lake Mogan	0						+			
River Kizilirmak	0			+						
(Brackish lagoons)										
Lake Dil	20-38		◎	+			+			
Lake Bafa	15	+	+	+	+	◎	+			

◎ dominant (>30%)
○ abundant (10-39%)
+ rare (<10%)

といえる(鹿島, 1994, 1996; 久保ほか1998)。これまでは、南雲・小林(1985)に基づいて、*Cyclotella caspia* という種名を用いてきたが(鹿島, 1994, 2001), 汽水産の*Cyclotella*については、その分類については1990年代以降、国際珪藻学シンポジウムなどでの議論が続けられてきた。Krammer and Lange-Bertalot (2000)によると、本種が*Cyclotella caspia*のタイプ標本とは明らかに殻の形態が異なること、また*Cyclotella hakanssoniae*という種名が定着してきたことにより、以後の論文では、*Cyclotella hakanssoniae*を用いる。

トルコでは、1992年における観測で、湖水の塩分が100%を超えるSeyfe湖から多産した。近年、Seyfe湖では顕著な水位の低下が生じ、2000年、2001年の観測では本種を採取することはできなかった。

トルコのSeyfe湖から産出した標本は、殻の大き



1-11: *Cyclotella hakanssoniae* 12-13: *Nitzschia compressa* 14-15: *Nitzschia constricta*
 16: *Amphora coffeaeformis* 17-18: *Entomoneis alata* 19-20: *Fragilaria fasciculata* 21-23: *Navicula cincta*
 24-25: *Cymbella pussila* 26-27: *Cocconeis* sp. -1

さ、条線の密度、殻面のうねりの状態などを、新種の可能性をも含めて検討したが、現時点では、宍道湖などから産出したものと同じ *Cyclotella hakanssoniae* と同種とするのが適当と判断された。さらに、トルコ西部の沿岸汽水湖沼である Bafa 湖 (塩分 15%) から同種の産出が確認された。

(2) *Nitzschia compressa*, *Nitzschia constricta*, *Amphora coffeaeformis*

本種は海岸・汽水域で、多く産出する珪藻である。干潟、汽水湖の湖岸などに生息しており、沖積層や湖成堆積物のボーリングコア試料からもよく見られ、海岸汽水環境の指標種として用いられる。

トルコでは、*Nitzschia compressa* は Seyfe 湖で、*Nitzschia constricta* と *Amphora coffeaeformis* は Seyfe 湖、Tuz 湖、Meke 湖などの、強塩性湖沼で多産することが確認された。さらに後者の 2 種は、Akshehir 湖・K.Duden 湖など塩分が 40% 以下の弱塩性内陸塩性湖沼でも多く産出し、内陸塩性湖沼から産出する代表的な珪藻種を構成している。

そこで、比較のため、トルコ西部の沿岸汽水湖沼である Dil 湖 (塩分 20-38%) で試料との比較を行った。Dil 湖からは、上記の 3 種に加えて、*Nitzschia granulata*, *Achnanthes hauckiana*, *Achnanthes brevipes*, *Cocconeis scutellum*, *Amphora holsatica*, *Amphora ventricosa* などが産出し、この種構成は、日本の汽水湖沼とほぼ共通する。しかし、後者の 6 種は塩性内陸塩性湖沼から産出することはなかった。

(3) *Entomoneis alata*

本種は、独特の形態を呈する珪藻種である。海岸付近の塩性水域、高伝導度水域に産出することが報告されている (Krammer and Lange-Bertalot, 1997 a)。日本の汽水湖沼でも、サロマ湖の表層堆積物試料からの産出が確認されているが、その産出は少ない。トルコでは、Aci 湖、Tuz 湖などの強塩性湖沼、Akshehir 湖などの弱塩性湖沼で産出した。

(4) *Fragilaria fasciculata*

本種は、これまで *Synedra fasciculata* として、記載してきたが、Krammer and Lange-Bertalot (2000) に基づき、本種を *Synedra* から *Fragilaria* 属に移属し、*Fragilaria fasciculata* という属種名を以後用いる。本種は、好塩性～中塩性種とされ (Lowe, 1974)、淡水域から若干塩分の混じる水域での生息が知られてきた (Krammer and Lange-Bertalot, 2000)。

トルコにおいては、塩分 54~65% の Krater (Aci) 湖で優占的に産出した。同湖沼では、1991 年、1992 年、2000 年の 3 回試料を採取したが、いずれの場合

でも優占種として観察された。さらに、沿岸汽水湖沼の Bafa 湖 (塩分 15%) においても、1992 年と 2001 年の両調査時とともに産出した。

(5) *Navicula cincta*

本種は、淡水の富栄養域・汚染の進んだ水域、若干の塩分を含んだ地域に生息するとされ (Krammer and Lange-Bertalot, 1997 a)、日本各地でも多くの産出報告が認められる。トルコの内陸塩性湖沼では、強塩性の Seyfe 湖、Tuz 湖、弱塩性の Akshehir 湖、Ilca 湖などで、ひろく産出した。本種は、このほか淡水湖沼・河川、沿岸汽水湖沼の Bafa 湖からも分布が確認された。

本種には多くの近縁種があり、その分類は難しかった。最新の文献 (Lange-Bertalot, 2001) を用いて、殻長、殻幅、条線の形態とその密度などを検討したが、現時点では本種名とするのが適当と判断した。

(6) *Cymbella pussila*

本種はこれまで、若干の塩分を含んだ電気伝導度の高い水域、石灰分を多く含んだ水域に産出することが報告されている (Krammer and Lange-Bertalot, 1997 a)。日本国内では、著者が知る限りでは産出の報告は見られず、また Lowe (1974) のリストにも生息環境の記載のないことから、通常はその出現頻度の小さい種であると考えられる。

しかし、トルコの内陸塩性湖沼では、強塩性の Meke 湖、Tuz 湖、Seyfe 湖、Krater (Aci) 湖、弱塩性の Aci 湖、Akshehir 湖、K.Duden 湖で多産した。本種は (1) ~ (6) で記載した各種と異なり、トルコの淡水域や海岸汽水域の試料からは観察できなかった。

(7) *Cocconeis* sp. -1

本種は、*Cocconeis placentula* と極めて類似している。*Cocconeis placentula* に比べて殻の外形がやや角ばっていることをのぞくと、殻の大きさ・条線密度などの諸特徴は *Cocconeis placentula* のこれまでの記載 (Krammer and Lange-Bertalot, 1991) とほぼ一致する。後述するように、生息環境があまりにも従来の記載と離れていたこともあり、本稿では便宜的に *Cocconeis* sp. -1 として記載した。

Cocconeis placentula は、淡水生の珪藻であり、湖沼・河川などで多産する種である (Lowe, 1974)。日本においても、淡水湖沼そして塩分の低い汽水湖沼での産出が認められた。トルコにおいても日本と同様に、Beyshehir 湖などの淡水湖、Ilca 湖、Akshehir 湖などの弱塩性の内陸塩性湖沼、Bafa 湖などの海岸汽水湖沼からも産出が認められた。これに対して、

Cocconeis sp. -1 は Krater (Aci) 湖 (塩分 54~67%) で優占的に産出した。Krater (Aci) 湖では 1991 年, 1992 年, 2000 年の 3 回試料を採取したが, いずれの場合もこの *Cocconeis* sp. -1 が優占する群集構成が観察された。

内陸の強塩性環境に対する珪藻の適応性

トルコの内陸には, 海水の 2 倍~3 倍という高濃度の塩分を呈する強塩性環境の湖沼が分布している。これらの湖沼から多数の, しかも特徴的な珪藻群集が産出したが, それらの珪藻種のすべては, 他地域では全く異なる環境下での生息が知られてきたものであった。

トルコの内陸塩性湖沼は, 第四紀の地球規模の気候変動の中で形成されたものであることが知られている (Kashima, 2000)。トルコ中部のコンヤ盆地・トウズ湖におけるボーリング調査の結果より, この地域は大きく見ると氷期には湿潤, 間氷期には乾燥となる気候変動の傾向が認められ, それに伴って, 大規模な湖水環境の変動が生じたことが知られている。両湖盆の場合, 2~3 万年前の最終氷期最盛期には, 湖水位は 30 m 近くも上昇し, 湖水の塩分は淡水に近かった。その後, 後氷期の温暖化に伴い, 湖水位は低下し, 湖水の塩分も 50% 以上増加したことが推定された (Kashima, 2000)。

このことから, トルコにおける強塩性湖沼は, 第四紀後期に, 地理的に隔離された状態で形成された環境であるといえる。そして, 周辺の湖沼・河川・汽水湖沼などから, 珪藻が移動・運搬され, 高塩性環境下での独自の生態系を形成したと推定される。この過程で, 珪藻種の明らかな選別が行われており, これは珪藻の潜在的な塩分適応能力によるものと考えられる。今回, トルコの淡水湖沼・河川などから産出した 107 種のうち, 40% を超えるような強塩性環境からも産出したのは 26 種, 海岸汽水湖沼から産出した 41 種のうち強塩性環境においても産出したのは 18 種であった。

強塩性内陸湖沼から産出した珪藻種の多くは, 日本を含めた他地域の研究では, これまで汽水域に生息する種として知られていたものであった。それらは (a) 海岸汽水湖沼での生息が知られていた種 (*Cyclotella hakanssoniae*, *Nitzschia compressa*, *Nitzschia constricta*, *Amphora coffeaeformis*, *Entomoneis alata* など), (b) 淡水域から若干の塩分を有する水域での生息が知られていた種 (*Fragilaria fasciculata*,

Navicula cincta など), (c) 淡水域から若干の塩分を有する水域での生息することが記載されてはいるものの, その産出が極めて稀であった種 (*Cymbella pussila* など) に区分された。さらに, (d) わずかではあるが殻形に変異が見られ, 別種としての記載が適当と判断された種 (*Cocconeis* sp. -1 など) も見られることが分かった。

このうち, (a)・(b)・(c) の各種群はこれまで同一の地点からは一緒に生息することはない種と考えられてきた。しかし, トルコの強塩性湖沼からは同一湖沼からの産出が確認され, 他地域では見られない特別な種構成が形成されている。

従来, 汽水性の生物群については, 海水と淡水の中間の環境に生息するという特徴から議論されることが多かったように思える。しかし, 汽水域にはもうひとつ, 潮汐などにより塩分変動が頻繁に生じ, しかもその変動幅が大きいという特性がある。そのため, 汽水性生物は淡水性種や海水性種に比べて, より広範囲な塩分に対する耐性を持っていると考えられる。今回, トルコの内陸塩性湖沼に見られた汽水性種の高塩性環境への適応は, この塩分変動に対する汽水性種の強い耐性によるものであり, 特にいくつかの種では, 100% を越える塩分下での生息も可能であることを示している。

このように広範囲の塩分耐性を有する種が, 日本のような地域では通常は汽水域という限られた環境下のみで産出するののかという点については, 淡水域や海域ではそれぞれに固有の種のほうが生息により適しており, 競合する種が少ない汽水域と高塩性域という環境下でその生息域を確立したと考えられる。そのため, 汽水域と高塩性域という, 一見, かけ離れた環境下より類似した群集が観察されることになった。

ま と め

トルコ中部に分布する内陸塩性湖沼の試料から 96 種の珪藻が観察された。これらの種のほとんどはこれまで「汽水性種」として, 汽水域に特徴的な珪藻種として記載されてきたものである。

この現象は, 汽水域珪藻の持つ塩分変動に対する耐性の強さによるものであり, 汽水性の生物の特徴のひとつを示しているものと考えられる。

塩分環境が大きく異なり, そして地理的にも離れた地域で類似した珪藻群集が見られたことについては, 今後培養実験などの加えて, さらに検討を続

けていく予定である。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、汽水域での研究を支えてくださった、高安克己教授をはじめとする島根大学汽水域研究所の方々に感謝をいたします。さらに、トルコにおける学術調査を支援してくださった、大村幸弘所長をはじめとする財団法人中近東文化センター・アナトリア考古学研究所の方々に感謝を致します。なお、本研究は、2000年度昭和シェル石油環境研究助成金「半乾燥地域における強塩性内陸湖沼における生物の多様性とその変遷」によりました。記して感謝を致します。

引用文献

- Ehrlich, A. (1995) *Atlas of the Inland-water Diatom Flora of Israel*. Publications of the Israel Academy of Sciences and Humanities, Jerusalem, p.166.
- Gasse, F. (1986) *East African Diatoms, Taxonomy, ecological distribution*. Bibliotheca Diatomologica, Band 11. J.Cramer, Berlin · Stuttgart, p 201.
- 本田秀一・鹿島 薫 (1997) 湖底堆積物から見た浜名湖の最近 1000 年間の古環境変遷. LAGUNA (汽水域研究), **4**, p.69-76
- 鹿島 薫 (1994) 中海・宍道湖における現生および化石珪藻群集に関する最近の話題. LAGUNA (汽水域研究), **1**, 37-43.
- 鹿島 薫 (1996) 網走湖・サロマ湖の湖底堆積物から得られた珪藻遺骸群集. LAGUNA (汽水域研究), **3**, p.33-39.
- Kashima, K. (2000) The geo-archaeological program for the environmental reconstruction during Late Quaternary at central Anatolia in 1995-1999, *Anatolian Archaeological Studies*, **9**, 177-192.
- 鹿島 薫 (2001) 日本各地の沿岸性汽水湖沼における完新世後半の塩分変動, LAGUNA (汽水域研究), **8**, 1~14
- 久保尚子, 沢井祐紀, 鹿島 薫 (1999) 鹿児島県上甕島汽水性湖沼群の湖水環境. LAGUNA (汽水域研究) **6**, 261-271
- Krammer, K. (2000) *The genus Pinnularia*, Diatom of Europe (Edited by H. Lange-Bertalot), vol. 1, A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, p.703.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1991) *Bacillariophyceae Teil 4: Achnantaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis Teil 1-4*. Süßwasserflora von Mitteleuropa (Ettel et.al. edi), Teil 4/2, p 437, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1997a) *Bacillariophyceae Teil 1: Naviculaceae, Durchgesehener Nachdruck der 1. Auflage*. Süßwasserflora von Mitteleuropa (Ettel et.al. edi), Teil 1/2, p 876, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1997b) *Bacillariophyceae Teil2: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae, Ergänzter Nachdruck der 1. Auflage*. Süßwasserflora von Mitteleuropa (Ettel et.al. edi), Teil 3/2, p 611, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (2000) *Bacillariophyceae Teil 3: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, Unter Mitarbeit von H. Håkansson und M.Nörpel*. Süßwasserflora von Mitteleuropa (Ettel et. al. edi), Teil 3/2, p 599, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/Jena.
- Lange-Bertalot, H. (2001) *Navicula sensu stricto 10 Genera Separated from Navicula sensu lato Frustulia*. Diatom of Europe (Edited by H. Lange-Bertalot), vol. 1, A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, p.703.
- Lowe, R. L. (1974) *Environmental Requirements and Pollution Tolerance of Freshwater Diatoms*. National Environmental Research Center, Office of Research and Development, U. S. Environmental Project Agency, Cincinnati, Ohio, p.333.
- 森田英之・鹿島 薫・高安克美 (1998) 湖底堆積物の珪藻遺骸群集から復元された浜名湖・宍道湖の過去 10000 年間の古環境変遷, LAGUNA (汽水域研究), **5**, 38-47.
- 南雲 保・小林 弘 (1985) 淡・汽水産珪藻 Cyclotella 属の 3 種, *C. atomus*, *C. caspia*, *C. meduanae* の微細構造. 日本プランクトン学会報, **32**, 101-109.

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

作野裕司¹・本井裕志¹・松永恒雄²・古津年章³
高安克己⁴・下舞豊志³・中山大介⁴

Feasibility study for the estimation of chlorophyll concentration in coastal lagoon environments using satellite optical sensor —Results of sea truth in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 2001

Yuji Sakuno¹, Tsuneo Matsunaga², Toshiaki Kozu³,
Katsumi Takayasu⁴, Toyoshi Shimomai³ and Daisuke Nakayama⁴

Abstract: In order to estimate chlorophyll-a concentration (Chl.a) for coastal lagoon environments using satellite optical sensor, simultaneous water quality surveys with satellite observation were conducted from July to November 2001 in Lake Shinji and Lake Nakaumi. Thermal infrared image of Terra/ASTER at night in August 2001, and a radar image of ERS 2/SAR, a visible image of SPOT-2/HRV, and in-site water quality datasets in November 2001, were obtained. Comparison between the simulated ASTER data using spectral reflectance data obtained from the lakes on boat, and in-situ Chl.a was performed. Consequently, “Band ratio of Band 1 and Band 2” or “Band ratio of Band 1 and Band 3”, and “Logarithm of Chl.a” had comparatively high correlation. It was suggested that Chl.a distribution in the lakes may be able to be estimated using ASTER data.

Key words: optical sensor, ASTER, coastal lagoon, chlorophyll-a

はじめに

宍道湖・中海は時間的・空間的な水質変動の激しい、富栄養化した汽水域である。また、しじみやアサリ等に代表される水産資源の豊富な水域でもある。このような水域を保全するためには、現状の水質や気象を正確に把握したデータが必要である。リモートセンシングは、宍道湖・中海全体の環境をモ

ニタリングするための技術の一つとして、その研究が急がれている。

宍道湖におけるリモートセンシング研究は、1995年から本格的に始まり、これまでいくつかの成果を報告してきた。作野ほか(1996)は、宍道湖における衛星同期水質調査法を確立するとともに、この年のクロロフィル分布とその時期的変化を明らかにした。また、松永ほか(1996)は、宍道湖の分光特性に

¹ 広島大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

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

³ 島根大学総合理工学部 Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

⁴ 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

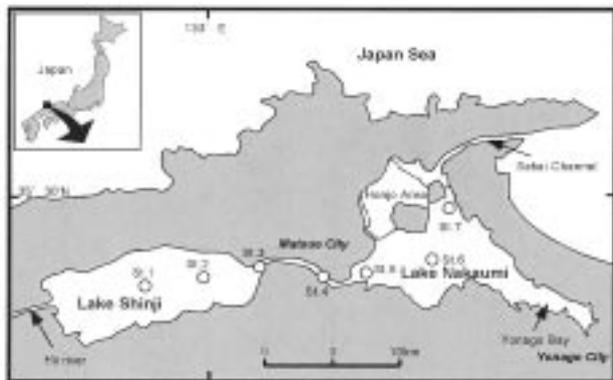


図1 宍道湖・中海における2001年衛星同期水質調査の基本測点

Fig. 1 Standard stations of simultaneous water quality survey with satellite observation in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 2001

ついて考察し、670 nm 前後の波長帯と現場で測定したクロロフィル a 濃度（以下 Chl.a と略す）と高い相関があることを示した。さらに松永ほか（1999）及び作野ほか（1999）は、宍道湖におけるクロロフィル濃度分布を航空機センサ及び衛星センサのデータから推定し、アオコ発生時間帯の水平的な Chl.a 分布を明らかにした。さらに、作野ほか（2001）は、人工衛星 SPOT データを用いて、宍道湖表層における一次生産量の時期的変化を推定するアルゴリズムを構築した。しかし、SPOT データが高価であること、観測周期が2週間程度であること、悪天候時の観測が難しい等の問題点があり、リモートセンシングデータを使った定常的なモニタリングができる状態は整っていない。

以上のような背景から、SPOT 以外の衛星データも組み合わせた水質推定法の確立、悪天候時に利用が期待されているレーダデータと従来用いてきた光学センサを組み合わせた水質推定法の確立を目指す必要がある。本論文では、このような目的を果たすための基礎データを取得するために行った2001年の衛星同期水質調査結果と、新しい衛星光学センサである Terra/ASTER のデータを使った Chl.a 推定についての初期的な検討結果を報告する。

方 法

1. 衛星同期調査法の概要

2001年における宍道湖・中海の衛星と同期した船舶調査は、図1に示す基本測点で10回程度行った。調査項目は透明度、水温、塩分、溶存酸素

(DO), pH, SS, Chl.a, 濁度, 水の分光反射率, 大気混濁度である。ただし、天候や調査船、人員及び測器の事情等により、測点場所（又は測点数）や測定項目が異なる。各種水質項目の測定方法については、作野ほか（1999）に準ずる。水の分光反射測定には、島根大学総合理工学部電子制御システム遠隔計測研究室所有の分光放射計（オプトリサーチ社製、HSR-8100/HD）及び99%又は5%の反射率を有する標準白色板を用いた。HSR-8100/HDの測定波長範囲は300～1100 nm、波長分解能3.6～10 nm（波長依存あり）である。大気混濁度測定には同研究室所有のサンフォトメータ（栄弘精機社製、MS-120）を、位置決定には小型のGPSをそれぞれ使用した。

2. 分光放射率測定データの取得方法とデータ処理法

分光放射率測定は、船上において分光放射計 HSR-8100/HD を鉛直下向き 90 度の方向に向けて、水面及び船上に置いた標準白色板を観測するようにした。ただし、狭く、不安定な小型船上における作業のため、太陽とセンサの位置関係を一定にする作業はできなかった。1点あたりの測定は水面と白色板のそれぞれ3回ずつ行い、互いの平均放射輝度値（デジタルカウントとして記録）の比を反射率として算出した。そして、衛星センサ ASTER の可視・近赤外波長帯における反射率の平均値を擬似 ASTER データとした。さらに、この擬似 ASTER データは湖面観測時と標準白色板観測時の入射光量のばらつきや湖面反射光の影響を軽減するために、各バンドにおける反射率の比演算を行い、その比演算値と Chl.a データの比較を行った。

結果及び考察

1. 2001年衛星同期調査結果の概要

表1に2002年に行った衛星同期水質調査結果の概要を示す。このうち、2001年7月23日と8月8日は Terra/ASTER の夜間データ、8月3日には昼間の Terra/ASTER データが得られ、その画像を図2に示す。現時点で、これらの衛星データと現場データの比較は行っていないが、宍道湖・中海の夜間の赤外データは、今までほとんど知られていない夜間水温の分布を知る上で有効なデータであるといえる。また、これらの Terra/ASTER データと同期した現場観測値は、国土交通省タワー（宍道湖湖心、松江、中海湖心、米子湾の計4点）において観測した値と比較することが可能であると考えられ、そのタワー

表 1 2001 年衛星同期水質結果の概要

Table 1 Summary of simultaneous water quality survey with satellite observation in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 2001

Date	Satellite /Airborne	Path-Row	Time of satellite / airborne observation	Quality of satellite image	Water quality data on the boat	Water reflectance	Atmospheric transmittance
2001/7/23	Terra	210-209	22:27	○	Table 2	×	×
2001/7/25	Terra/Landsat7	112-35	11:12/?	×/×	Appendix 1	△	×
2001/8/3	Terra	111-35	11:06	○	Table 2	×	×
2001/8/8	Terra	210-209	22:26	△	Table 2	×	×
2001/8/10	Terra/Landsat7	112-35	11:12/?	×/×	Table 2	×	×
2001/8/11	SPOT4	317-279	11:21	×	Appendix 2	○	○
2001/9/4	Terra/Landsat7	111-35	11:12/10:11	×/×	Appendix 3	○	×
2001/9/6	SPOT2/ERS2	317-279/77-241	11:12/10:47	×	×	×	×
2001/10/30	SPOT2/ERS2	317-279/77-241	11:12/10:47	○	Appendix 4	○	○
2001/11/10	Airborne (Pi-SAR)	-	14:30±15	×/○	Appendix 5	×	×
2001/11/15	SPOT2/ERS2	317-279/77-241	10:47/11:12	×/○	×	×	×
2001/12/1	SPOT2/ERS2	317-279/77-241	10:47/11:12	×/○	Appendix 6	△	×

データ（表層水温）を表 2 (a) に示す。

また、2001 年 10 月 30 日は、良好な ERS-2/SAR データとともに SPOT-2/HRV データを同時に取得することができた。マイクロ波画像データ、可視に貴重なデータを同時に得られるという機会は非常に稀であるため、夜間画像とともに非常に貴重である。しかし本論文執筆時には ERS-2/SPOT-2 データを未入手のため、本誌ではそれらの画像を示すことができなかつた。

さらに、2001 年 8 月 3 日と 10 月 30 日の ASTER 及び HRV データは、濁度推定に使えると考えられるため、同日の国土交通省タワーで計られた濁度の値を表 2 (b) に示す。

2. 宍道湖・中海におけるクロロフィル a 濃度推定の可能性

2001 年 8 月において宍道湖・中海で取得された分光反射率測定結果を図 3 に示す。他の日のデータも類似した形状であった。宍道湖・中海において最大の反射率を示す波長は 500~580 nm で、反対に反射率が最小となる波長は 450 nm より短い波長あるいは 700 nm より長い波長である。Matsunaga et al

(1996) は、約 650-690 nm 付近における反射率吸収帯の深さは Chl.a と高い相関があることを指摘している。しかし、今回の測定では、St 4 (大橋川中部) を除いて同様の吸収確を見つけることができなかった。この結果は、測定場所の Chl.a 値が比較的

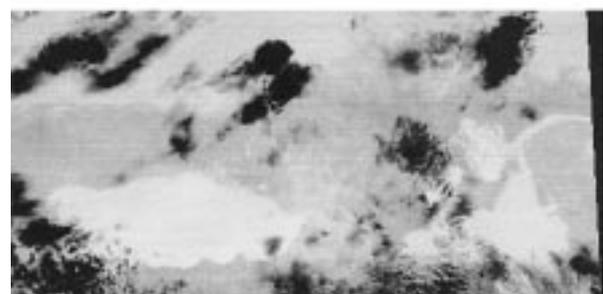
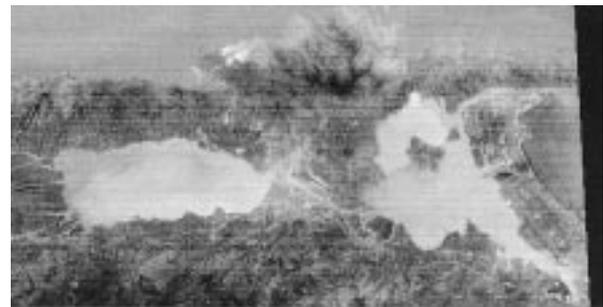


図 2 2001 年に取得された宍道湖・中海の ASTER 画像
 (a) 2001 年 7 月 23 日 22 時 27 分 (日本標準時) の熱赤外画像
 (b) 2001 年 8 月 3 日 11 時 12 分 (日本標準時) の可視画像
 (c) 2001 年 8 月 8 日 22 時 26 分 (日本標準時) の熱赤外画像

Fig. 2 ASTER images in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 2001
 (a) Thermal infrared band image, 23 Jul. 2001 (22:27 JST)
 (b) Visible bands image, 3 Aug. 2001 (11:12 JST)
 (c) Thermal infrared band image, 8 Aug. 2001 (22:26 JST)

表2 国土交通省タワーで観測された宍道湖・中海の表層水温/濁度データ

Table 2 Water temperature/turbidity data at the surface of Lake Shinji and Lake Nakaumi. Data from towers owned by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

(a) Water temperature

Date	Time	L.Shinji (center)	Matsue	L.Nakaumi (center)	Yonago Bay
2001/7/23	22:00	29.5	30.1	29.8	30.7
	23:00	29.5	30.2	30.0	30.7
2001/8/3	11:00	31.2	31.9	31.8	30.9
2001/8/8	22:00	31.0	31.0	30.2	29.8
	23:00	31.0	30.9	30.2	29.8

Unit (°C)

(b) Turbidity

Date	Time	L.Shinji (center)	Matsue	L.Nakaumi (center)	Yonago Bay
2001/8/3	11:00	5	2	4	9
2001/10/30	11:00		7	7	7

Unit (mg/l)

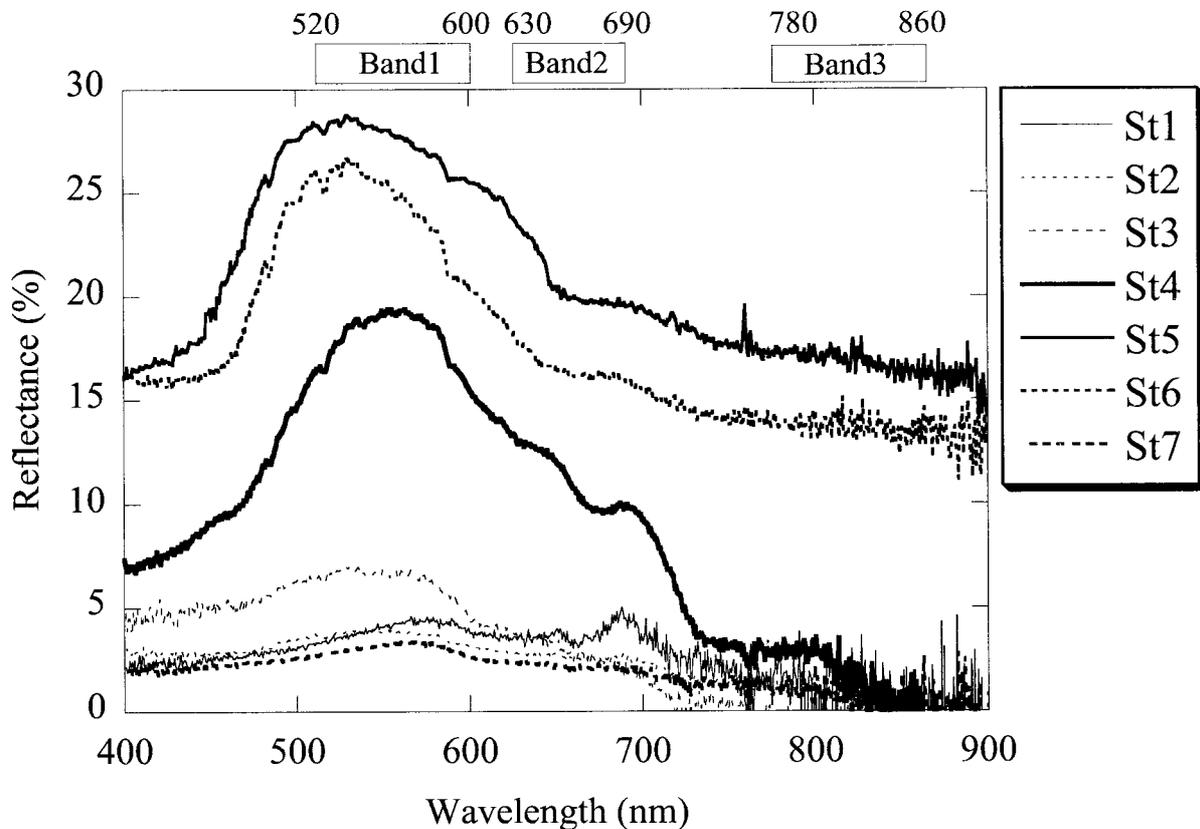


図3 宍道湖・大橋川・中海における現場分光反射率データの例

Fig. 3 Example of in-situ spectral reflectance in Lake Shinji, Ohashi River, and Lake Nakaumi

表3 使用したクロロフィル a 濃度データと透明度データのレンジ

Table 3 Data ranges of chlorophyll-a and transparency

Date	Chl.a ($\mu\text{g/l}$)	Tr (m)	N
25 Jul 01	4.0	2.4	1
11 Aug 01	7.8-18.6	1.3-1.9	6
4 Sep 01	11.7-37.9	0.6-1.5	4
Total	4.0-37.9	0.6-2.4	11

表4 現場分光反射率データから計算された ASTER データのバンド比と現場クロロフィル a 濃度の関係

Table 4 Correlation coefficients between the simulated ASTER band ratio from the in-situ spectral reflectance and the in-situ chlorophyll-a concentration

Band ratio	B1/B2	B1/B3	B2/B3
Chl.a	-0.42	-0.37	-0.24
Ln Chl.a	-0.65*	-0.64*	-0.45

* denotes significance at 0.05

少なかったこと、植物プランクトン以外の懸濁物質量の影響が大きかったこと等が考えられる。また、水面反射光等の影響等により水中光の情報を感度よく捉えられなかった等、測定方法事態の問題点もあり、今後の課題となった。

現場の分光反射率データを使用して計算した擬似 ASTER データの反射率比率と Chl.a の間の相関関係を調べるために使用したデータのレンジを表3に、両者の相関係数を表4に示す。これより「Band 1 と Band 2 の比」あるいは「Band 1 と Band 3 の比」と Chl.a の対数値は比較的高かった。Chl.a との相関が最も高かった「Band 1 と Band 2 の比」との関係（相関係数 0.65）を図4に示す。これらの結果から ASTER データにより宍道湖・中海の Chl.a 分布を推定できる可能性があることが示唆された。しかし、2001 年7月の1データを削除した場合、相関は著しく悪くなる。したがって、今後のデータセットの蓄積により、両者の相関についてさらに議論する必要がある。

衛星データを使った Chl.a 推定については、これまで多数の研究がある（例えば Lathrop et al, 1991）。しかし多くの場合、季節や場所が異なると Chl.a 推定アルゴリズムは使えないという欠点がある。わが国では、比較的古くから衛星データによる Chl.a 推定のアルゴリズム開発が試みられているが（例えば 安岡・宮崎, 1979）、現在でもその方法は確立して

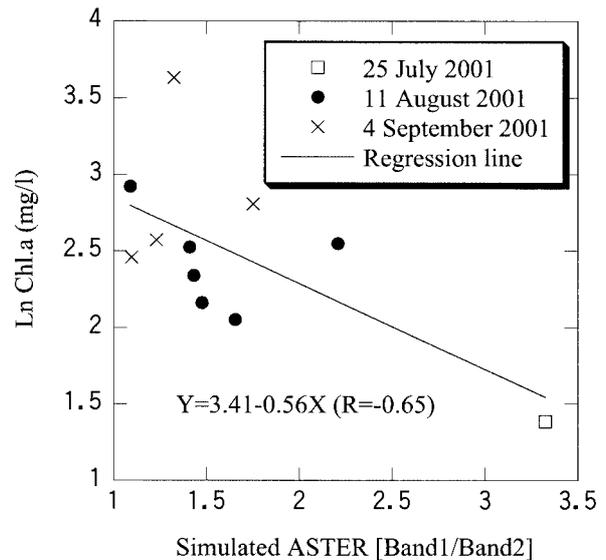


図4 ASTER バンド比 (Band 1/Band 2) の計算値とクロロフィル a 濃度 (対数) の関係

Fig. 4 Correlation between the simulated ASTER [Band 1/Band 2] and log chlorophyll-a concentration

いない。最近、沖ほか (2001) は、霞ヶ浦における分光測定結果より、Chl.a 推定に近赤外域のデータが有効であることを報告している。霞ヶ浦と同様な水質である宍道湖・中海においても近赤外域のデータを使える可能性も考えられ、その利用可能性については今後の課題である。

まとめ

宍道湖・中海において衛星光学センサによる Chl.a 推定法の確立を目指す目的で、2001 年の7月～11月にかけて衛星同期水質調査を行った。その結果、2001 年8月に夜間の赤外画像 (Terra/ASTER)、2001 年11月にはレーダ画像 (ERS 2/SAR) と可視画像 (SPOT-2/HRV) 及び現場水質のデータセットを同時に得ることができた。また、船上から観測した分光反射率データを使って、擬似 Terra/ASTER データと Chl.a データの比較を行った。その結果、「Band 1 と Band 2 の比」あるいは「Band 1 と Band 3 の比」と「Chl.a の対数値」は比較的高く、ASTER データにより宍道湖・中海の Chl.a 分布を推定できる可能性があることが示唆された。

謝辞

本研究の経費の一部は、文部科学省科学研究費補

助金の基盤研究 A (研究代表: 高安克己) を使用した。また本研究で使用した ASTER データ「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り、データの権利は経済産業省に帰属する。本研究にあたり、調査全般にあたりご協力いただいた株式会社松江土建環境部の皆様、島根大学総合理工学部院生の市川氏、広島大学工学部 4 年生の吉田武史・山本正智、両氏に深く感謝いたします。

引用文献

- Lathrop, R. G., Lillesand, T. M., and Yandell, B.S. (1991) Testing the utility of simple multi-date Thematic Mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters. *Int. J. Remote Sensing*, **12** (10): 2045-2063.
- 松永恒雄・作野裕司・高安克己・松永恒雄・中村幹雄・国井秀伸 (1996) 宍道湖における水面の分光特性と水質. 日本リモートセンシング学会第 20 回学術講演会論文集, 東京, 67-68.
- 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. *Proceedings of Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition/21 st Canadian Symposium on Remote Sensing*, 21-24.

- 沖一雄・安岡善文・田村正行 (2001) 高濃度水域における水質リモートセンシング, 日本リモートセンシング学会誌, **21** (5): 449-457.
- 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) SPOT /HRV データによるアオコ発生時の宍道湖表層クロロフィル a 濃度分布の推定. 日本リモートセンシング学会誌, **19**: 20-36.
- 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総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.
- 安岡善文・宮崎忠国 (1979) 遠隔計測に霞ヶ浦の定量的水質計測 (クロロフィル a の定量), 国立公害研究所研究報告, **6**: 85-93.

付表 1 宍道湖・中海における水質測定結果 (2001/7/25)

Appendix 1 Results of water quality measurement in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 25 Jul. 2001

No.	Station	Latitude	Longitude	Weather	Time	Tr.(m)	W.Temp(°C)	Sal(psu)	DO(mg/l)	Chl.a(µg/l)
1	SJ01-3	35°26'50"	132°57'45"	Clear	8:27	1.5	17.3	2.3	6.7	6.0
2	SJ01-2	35°27'02"	133°00'48"	Clear	9:05	1.8	17.6	2.8	6.9	5.6
3	SJ01-1	35°27'01"	133°00'49"	Clear	9:20	2.2	17.6	3.1	4.7	5.6
4	OH01-1	35°27'11"	133°06'09"	Clear	9:40	1.5	17.4	8.1	4.6	7.1
5	NU01-1	35°27'02"	133°08'03"	Clear	9:52	1.8	18.2	15.4	6.6	4.0
6	NU01-2	35°27'47"	133°11'35"	Clear	10:08	2.4	18.5	14.3	6.8	4.0
7	NU01-3	35°30'30"	133°12'24"	Clear	10:35	2.3	18.0	12.1	12.1	4.7

付表 2 宍道湖・中海における水質測定結果 (2001/8/11)

Appendix 2 Results of water quality measurement in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 11 Aug. 2001

No.	Station	Latitude	Longitude	Weather	Time	Tr.(m)	W.Temp(°C)	Sal(psu)	DO(mg/l)	Chl.a(µg/l)
1	SJ01-3	35°26'48"	132°57'44"	Clear	8:30	1.3	29.3	2.9	7.4	18.6
2	SJ01-2	35°26'59"	133°27'43"	Clear	9:00	1.3	29.2	2.8	6.7	12.5
3	SJ01-1	35°27'01"	133°03'13"	Clear	9:30	1.5	28.9	2.9	5.9	12.8
4	OH01-1	35°27'09"	133°06'12"	Cloudy	9:50	1.7	27.9	2.4	5.4	14.7
5	NU01-1	35°26'56"	133°07'48"	Clear	10:30	N.D.	27.9	3.5	6.1	N.D.
6	NU01-2	35°27'45"	133°11'36"	Clear	11:00	1.7	28.3	17	7.2	8.7
7	NU01-3	35°30'19"	133°12'28"	Clear	11:30	1.9	27.9	18	7.3	10.4

N.D.=No data

付表 3 宍道湖・中海における水質測定結果 (2001/9/4)

Appendix 3 Results of water quality measurement in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 4 Sep. 2001

No.	Station	Latitude	Longitude	Weather	Time	Tr.(m)	W.Temp(°C)
1	SJ01-3	35°26'49"	132°57'48"	Cloudy	9:12	1.3	11.7
2	SJ01-2	35°26'56"	132°59'52"	Cloudy	10:00	1.4	13.1
3	SJ01-1	35°27'23"	133°03'01"	Clear	10:25	1.0	14.4
4	OH01-1	35°27'09"	133°06'11"	Clear	11:10	0.6	37.9
5	NU01-1	35°26'56"	133°07'59"	N.D.	11:35	2.0	5.6
6	NU01-2	35°27'46"	133°11'33"	N.D.	12:05	1.5	13.9
7	NU01-3	35°30'31"	133°12'27"	Cloudy	12:40	1.6	9.4

N.D.=No data

付表 4 宍道湖・中海における水質測定結果 (2001/10/30)

Appendix 4 Results of water quality measurement in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 30 Oct. 2001

No.	Station	Latitude	Longitude	Weather	Time	Tr.(m)	W.Temp(°C)	Sal(psu)	DO(mg/l)	Chl.a(µg/l)	pH	SS(mg/l)	Turb.(NTU)
1	SJ01-3	35°26'49"	132°57'45"	Clear	8:50	1.2	N.D.	3	6.5	16.0	7.1	2.8	5
2	SJ01-2	35°27'00"	132°59'52"	Clear	9:23	1.3	N.D.	3	6.8	17.0	7.8	3.6	5
3	SJ01-1	35°27'38"	133°03'15"	Clear	9:50	2.4	N.D.	3	6.4	9.8	6.9	2.4	4
4	OH01-1	35°27'09"	133°06'09"	Clear	10:15	1.8	N.D.	3	6.7	9.0	6.7	4.2	5
5	NU3	35°27'19"	133°09'07"	Clear	10:35	1.4	N.D.	8	7.8	6.4	7.8	2.2	48
6	NU2#	35°27'42"	133°09'59"	Clear	10:50	1.3	N.D.	9	8.3	4.6	8.3	1.8	3
7	NU01-2	35°27'46"	133°11'36"	Clear	11:00	1.3	N.D.	10	8.0	4.1	8.0	3	3
8	NU01-1	35°30'30"	133°12'24"	Clear	11:20	1.2	N.D.	14	8.4	11.7	8.4	3	5

NU 2# は NU 3 と中海湖心の間地点 (NU 3 寄り)

付表 5 宍道湖・中海における水質測定結果 (2001/11/10)

Appendix 5 Results of water quality measurement in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 10 Nov. 2001

No.	Station	Latitude	Longitude	Weather	Time	Tr.(m)	W.Temp(°C)	Sal(psu)	DO(mg/l)	pH	SS(mg/l)	Turb.(NTU)
1	S1-1	35°27'13"	132°57'50"	Clear	13:02	N.D.	14.4	2	6.7	7.8	11.2	19
2	S1-2	35°26'47"	132°55'06"	Clear	13:18	N.D.	14.6	2	7.4	8.4	6.9	10
3	S1-3	35°26'17"	132°55'09"	Clear	13:35	N.D.	14.7	2	7.6	8.6	5.4	6
4	S1-4	35°25'53"	132°55'12"	Clear	13:46	N.D.	14.8	2	7.2	8.3	4.6	9
5	S1-5	35°25'23"	132°55'18"	Clear	13:58	N.D.	14.7	2	7.2	8.3	6.2	8
6	S2-1	35°28'01"	132°59'36"	Clear	15:09	N.D.	14.6	3	6.9	8.2	7.2	9
7	S2-2	35°27'33"	132°59'39"	Clear	15:20	N.D.	14.6	3	6.8	7.9	5.2	9
8	S2-3	35°27'04"	132°59'49"	Clear	15:32	N.D.	14.6	3	7.2	8.3	7.2	12
9	S2-4	35°26'33"	132°59'58"	Clear	15:42	N.D.	14.6	3	7.3	8.5	5.6	9
10	S2-5	35°26'05"	133°00'04"	Clear	15:53	N.D.	14.5	2	7.4	8.5	6	8
11	HJ2	35°30'27"	133°08'45"	Cloudy	N.D.	1.6	15.3	15	9.5	ND	6.4	N.D.
12	HJ1	35°30'24"	133°08'43"	Cloudy	N.D.	2	15.3	15	8.9	ND	4.2	N.D.
13	NU4	35°28'30"	133°08'51"	Cloudy	13:46	2.5	15.2	14	8.0	ND	3	N.D.
14	NU3	35°27'45"	133°09'37"	Cloudy	14:00	1.5	15.0	13	10.3	ND	4	N.D.
15	NU01-2	35°27'47"	133°11'32"	Clear	14:20	1.4	14.8	15	10.0	ND	7.4	N.D.
16	NU1	35°27'46"	133°11'33"	Clear	N.D.	1.3	15.0	14	10.6	ND	ND	N.D.
17	NU2	35°29'30"	133°12'19"	ND	N.D.	1.4	15.1	15	9.8	ND	6.8	N.D.
18	NU01-1	35°30'32"	133°12'28"	ND	N.D.	N.D.	15.5	17	9.7	ND	4.8	N.D.

N.D.=No data

付表 6 宍道湖・中海における水質測定結果 (2001/12/1)

Appendix 6 Results of water quality measurement in Lake Shinji and Lake Nakaumi, 1 Dec. 2001

No.	Station	Latitude	Longitude	Weather	Time	Tr.(m)	W.Temp(°C)
1	SJ01-3	35°26'49"	132°57'45"	Clear	8:55	1.1	21.9
2	SJ01-2	35°27'00"	132°59'52"	Clear	9:20	1.1	N.D.
3	SJ01-1	35°27'37"	133°03'17"	Clear	9:42	1.0	12.4
4	OH01-1	35°27'09"	133°06'09"	Clear	10:03	0.6	16.5
5	NU3	35°27'18"	133°09'39"	Cloudy	10:23	1.0	23.8
6	NU01-2	35°27'46"	133°11'34"	Cloudy	10:38	1.1	23.9
7	NU1	35°27'45"	133°13'41"	Cloudy	10:55	1.1	12.8
8	NU2	35°29'30"	133°12'20"	Cloudy	11:12	1.2	14.7

N.D.=No data

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

市川啓祐¹・古津年章¹・下舞豊志¹・高安克己²・作野裕司³・松永恒雄⁴

Preliminary study of SAR monitoring of coastal lagoon environments: Possibility of wind speed estimation

**Keisuke Ichikawa, Toshiaki Kozu, Toyoshi Shimomai, Katsumi Takayasu
Yuji Sakuno, Tsuneo Matsunaga**

Abstract: Coastal lagoon is more directly affected by surrounding environment than open ocean areas, so it is important to continuously monitor its environment. The Synthetic Aperture Radar (SAR) is an active microwave sensor having a high spatial resolution and all-weather monitoring capability. Thus it should be especially useful to observe narrow water areas like coastal lagoon. We have been studying the feasibility developing a satellite remote-sensing system to explore the possibility of wind of utilizing a satellite SAR (Synthetic Aperture Radar) as a part of monitor the environment of Lake Shinji and Lake Nakaumi. In this paper, we analyze JERS 1/SAR data, acquired until now for several years, as a preliminary an examination of wind speed estimation with the SAR. As a result, good correlations are obtained between in-situ wind speed and NRCS observed by the SAR in moderate to high wind conditions. We have conducted a series of coincident satellite and in-situ observation experiments at Lake Shinji and Lake Nakaumi in 2001. We also summarize these observations.

Key words: Synthetic Aperture Radar, JERS-1, SAR, coastal lagoon, wind

1. はじめに

衛星を用いた環境観測には、広い範囲のデータを同時に取得できるという利点がある。また、マイクロ波帯のセンサには、夜間や悪天候時においても観測が可能、水面上の風向・風速を推定可能、という可視・赤外線センサにはない利点がある。

一方で、マイクロ波帯のセンサには可視・赤外線センサに比べ、分解能が大きく劣るという欠点がある。このことは特に汽水域のような狭い範囲の水域を観測する際には問題となる。しかし合成開口レー

ダ (SAR) は、合成開口処理により可視センサと同等の高い空間分解能を得ることができる唯一の衛星搭載マイクロ波センサであり、狭い水域の観測を行うことが可能である。SAR による環境観測の可能性としては風速推定、油汚染、潮目の検出などある。風速の推定はこれまでに同様のことが海上風に関しては行われてきており (古濱他, 1986), 実現の可能性は高く、衛星を用いた汽水域の環境観測の初期段階には適していると考えられる (Kozu et al, 2001)。

最近島田ら (2001) は JERS 1/SAR を用いた Geophysical Model Function (GMF) を提案した。ま

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

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

³ 広島大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739-8527, Japan

⁴ 国立環境研究所 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, 305-0053, Japan

表1 2001年までに打ち上げられた搭載衛星散乱計および地球観測用 SAR

Table 1 List of satellite scatterometers and SARs for Earth observation launched by the end of 2001.

(a) Scatterometer

	Frequency(GHz)	Year of Launch
Seasat1/SASS	14.6 (Ku-band)	1978
ERS1/SCAT	5.3 (C-band)	1991
ERS2/SCAT	5.3 (C-band)	1995
ADEOS/NSCAT	13.995 (Ku-band)	1996

(b) SAR

	Seasat1/SAR	ERS1/AMI	ERS2/AMI	JERS1/SAR	Radarsat1/SAR
Frequency (GHz)	1.28 (L-band)	5.30 (C-band)	5.30 (C-band)	1.275 (L-band)	5.30 (C-band)
Wavelength (cm)	23.5	5.66	5.66	23.5	5.66
Polarization*	HH	VV	VV	HH	HH
Look Angle (deg.)	20	20	20	35	20-49
Swath Width (km)	100	100	100	75	100-500
Resolution (m)	25×25	30×30	30×30	18×18	25-150
Look	4	3-4	3-4	3	
Year of Launch	1978	1991	1995	1992	1995

* H: Horizontal, V: Vertical, HH (VV): Horizontal (Vertical) transmit and receive.

た磯口(2001)は、地球資源衛星1号(JERS-1)搭載 SAR(以下 JERS-1/SAR と略す)イメージに島田ら(2001)の GMF を適用し、海上の風速分布図を求めた。しかし一般に、海上風推定のためのマイクロ波センサには C バンド以上の高い周波数を用いられており、JERS-1/SAR のような L バンドにおいて海上風と SAR データの関係性を調べた例は少ない。

そこで今回は、汽水域における SAR データを使った風速分布推定の第 1 段階として、過去(1992~1997 年)に取得された JERS-1/SAR データの解析を行った。これは、現在我々が進めている陸域観測技術衛星(ALOS)搭載合成開口レーダ(PALSAR)および高性能可視近赤外放射計 2 型(AVNIR-2)を用いた光・電波センサ複合観測による汽水域環境モニタ技術の研究(Kozu et al., 2001)の予備検討としても位置付けられる。

JERS-1/SAR データの解析に用いた風向風速データは、気象庁や国土交通省の定常観測点で観測されたデータのみであった。そのため 2001 年には衛星観測時に同期して地上観測を行い、より細かな現場データを取得することとした。本論文では、この同期観測の概要および初期結果も併せて報告する。

2. レーダによる水域観測の原理と本研究で使用した SAR の概要

レーダの受信電力から直接測定されるのは基本的

に単位面積当たりの後方散乱断面積(NRCS)(古濱他, 1986)であり、風速を直接測定することはできない。しかし、既に C バンド(5 GHz 帯)から Ku(14 GHz 帯)ではマイクロ波センサを用いた風速推定手法は実用化の域にある(古濱他, 1986; Liu, 2001)。

水面上の表面張力波~短波長重力波は水面直上の風と水面との相対速度の差による摩擦力と水面の張力・粘度による相互作用によって励起される。マイクロ波帯の電波の波長(10~30 cm)と風に対する応答の良いこれらの水面波の波長との間に次式で示される Bragg 散乱の条件が成立する。

$$2\Delta \sin \theta = n\lambda \quad (n=0, 1, 2) \quad (1)$$

ここで、 Δ は海洋波浪の波長、 λ はレーダ波の波長、 θ はレーダ波が水面に入射するときの入射角である。この時観測される NRCS は基本的に風によって励起される水面波スペクトル強度に強く依存することになる。風速に対する波の応答が定常状態に達するには吹送距離や吹送時間が関係するが、短波長水面波は一般に応答が早く、汽水域における NRCS による風速推定の可能性は十分考えられる。

SAR による風速推定における問題の一つは観測方向が単一であることである。斜め入射の場合、アンテナの視線方向の地表に水平な成分の方向と風向との間には、0 度、180 度で極大、90 度、270 度で極小になるという関係がある(Ulaby et al., 1982)。こ

表2 Pi-SAR の諸元
Table 2 Characteristics of Pi-SAR.

	X-band SAR			L-band SAR	
Frequency (GHz)	9.55			1.27	
Wavelength (cm)	5.6			23.6	
Off-nadir Look Angle (deg.)	10-75(Variable)			20-60(Fix)	
Obdervation Mode	2-ch. ^{*2} Pol./Interfero	4-ch. ^{*3} Polarimetry	6-ch. ^{*4} Pol.&Interfero	1-ch. ^{*1}	4-ch. ^{*3} Polarimetry
Swath Width (Observed from 12,000m Altitude)	19.6/42.5km	8.2/19.6km	4.3/11.9km	42.5km	19.6km
Slant Range Resolution	1.5/3m	1.5/3m	1.5/3m	3/5/10/20m	3/5/10/20m
Azimuth Resolution (4/8-look)	1.5/3m			3/6m	

*1 1-ch [L] (HH) or (VV)

*2 2-ch [X] Polarimetry: (HH,HV) or (VV,VH)/Interferometry:(Vmain, Vsub)

*3 4-ch [X,L] Polarimetry: (HH,HV,VH,VV)

*4 6-ch [X] Polarimetry & Interferometry: (HH,HV,VH,VV,Vmain,Vsub)

れまでに打ち上げられた衛星搭載型の風速推定用散乱計では複数方位の観測を行い風速と風向の同時推定を行っている (Elachi, 1987). また表 1 に示すように、風に対する応答の速い C バンド以上の高い周波数を用いている。一方、表 1 に合わせて示す SAR は L~C バンドである (Elachi, 1987; Li and Raney, 1991; JPL, 2002; Li and Raney, 1991; NASDA, 2002). これまでの、また現在運用中の SAR は一方向からの観測しかできないため、風向の不確定性によって風速の推定も SAR データのみでは精度的に問題がある。そのため現在のところ、周辺の現場データや気象モデルによる風向情報の併用が必要である。しかし航空機搭載 SAR のように短時間で複数方向からの観測が可能な場合は、風向推定も可能と考えられる。

前章で述べたように、今回主に解析に使用したのは、L バンド (波長 約 24 cm) HH 偏波 (水平偏波送信, 水平偏波受信) の JERS-1/SAR である。一方、2001 年度の衛星同期実験に使用した SAR は、衛星搭載 SAR としては Radarsat-1/SAR と ERS-2/AMI, 航空機搭載型 SAR としては Pi-SAR である。

Radarsat-1 は 1995 年にカナダが、また ERS-2 は 1995 年に ESA (European Space Agency) が打ち上げた SAR 搭載の地球観測衛星である。Radarsat-1/SAR, ERS-2/AMI (映像取得モード)¹ の諸元は表 1 に示した通りである。また表 2 に Pi-SAR の諸元を示す。共に周波数帯は C バンドであり電波の波長は約 5.6

cm である。前者は偏波が HH, 後者が VV (送受信とも垂直偏波) である。このため、Bragg 散乱の成立する水面波の波長が JERS-1/SAR とは異なり、ERS-2 と Radarsat-1 では偏波の違いも存在する。このため Radarsat-1, ERS-2 では JERS-1 とはそれぞれ異なる特徴を持つイメージ、データが取得されると期待される。

Pi-SAR は郵政省通信総合研究所 (CRL) と宇宙開発事業団 (NASDA) が共同して開発した航空機搭載高分解能マルチパラメータ SAR であり、L バンドと X バンド、HH, VV, HV, VH の 2 バンド 4 偏波での観測が可能などの特徴を持つ多機能の映像レーダである (CRL/NASDA, 1998)。ほぼ同時に X と L バンド、様々な偏波における観測が可能のため、異なる周波数、異なる偏波のデータを高精度で比較できる。そのため、今後、周波数や偏波の違いによる NRCS の風速依存性の違いを研究する上で非常に有用であると考えられる。

3. JERS-1/SAR データおよび解析方法

3.1 雑音レベル NRCS の推定方法

今回解析を行ったのは、1992 年から 1997 年にわたる 15 シーンの JERS 1/SAR データ (Level 2.1) である。Level 2.1 に格納されているデータは SAR の受信電圧に比例したカウント値 (DN) であるので、定量的な解析を行うため、次式の NASDA による変換式 (NASDA, 1992) を用い、規格化後方散乱断面積 (NRCS; $\bar{\sigma}^0$) を求めた。

$$\bar{\sigma}^0 = 20 \log_{10}(DN) + CF \quad (2)$$

¹ AMI (Active Microwave Instrument) は、複数の機能を持つ C バンドレーダであり、映像、波浪、風の 3 つの観測モードを持つ。

表3 解析に用いた JERS-1/SAR データおよび観測日の風向風速データ

Table 3 Outline of JERS-1/SAR data and wind speed/direction data used for the analysis.

Date	Path-Row	Izumo Airport			Center of Lake Shinii			Center of Lake Nakaumi			Miho Airport		
		Direction (deg.)	Relative Direction	Velocity (m/s)	Direction (deg.)	Relative Direction	Velocity (m/s)	Direction (deg.)	Relative Direction	Velocity (m/s)	Direction (deg.)	Relative Direction	Velocity (m/s)
1992/10/27	77-241	VRB	-	1.5	SSE	Cross	1.8	No data	Cross	1.0	210	Cross	2.1
1992/12/10	77-241	60	Up	1.0	SW	Cross	1.9	No data	Cross	0.0	200	Cross	1.0
1993/1/23	77-241	60	Up	2.6	SSE	Cross	0.8	No data	Cross	0.4	VRB	-	0.5
1993/3/8	77-241	340	Cross	3.6	SSW	Down	6.8	No data	Cross	2.9	350	Cross	4.6
1993/4/21	77-241	70	Up	3.6	SE	Up	5.2	ENE	Up	5.8	70	Up	7.2
1993/6/4	77-241	260	Down	6.7	SSW	Down	9.0	WNW	Down	7.9	280	Down	7.2
1993/7/18	77-241	300	Down	1.5	SSW	Up	2.6	NE	Cross	4.2	40	Cross	3.6
1993/8/31	77-241	40	Cross	3.1	ESE	Up	2.2	NNE	Up	1.0	60	Up	3.1
1996/7/22	77-241	240	Down	4.6	W	Down	4.4	WNW	Down	2.8	250	Down	3.6
1996/10/18	77-241	VRB	-	1.5	WNW	Down	2.4	NE	Up	0.5	190	Cross	2.6
1997/1/14	77-241	230	Cross	4.6	No data	Down	No data	SW	Down	9.3	250	Down	7.7
1997/4/12	77-241	260	Down	8.2	W	Down	8.4	WNW	Down	7.0	270	Down	6.7
1997/7/9	77-241	40	Cross	1.5	NE	Cross	0.8	NNW	Down	2.5	340	Cross	2.6
1997/8/22	77-241	250	Down	8.7	W	Down	10.9	WNW	Down	8.1	260	Down	7.7
1997/11/18	77-241	260	Down	7.7	W	Down	12.5	WSW	Down	13.2	260	Down	12.3

表4 JERS-1/SAR データ解析に用いた風向風速データ観測点 (国土交通省湖心観測所と気象庁測候所) の位置

Table 4 Location of wind vector observation stations operated by Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (MLIT) and Meteorological Agency used for the JERS-1/SAR data analysis.

	Izumo Airport	Center of Lake Shinji	Center of Lake Nakaumi	Miho Airport
North latitude	35° 24' 38"	35° 26' 50"	35° 27' 48"	35° 29' 21"
East longitude	132° 53' 33"	132° 57' 45"	133° 11' 38"	133° 14' 21"
Altitude	10.3	5.7	14.1	7.2

ここで、CF (Conversion Factor) は -85.34 (dB) (NASDA 島田政信氏 私信, 2001) であり, 求まる σ^0 はデシベル単位である. しかし, 式 (2) で求められる σ^0 には, 雑音電力も含まれているため, SN 比の悪い場合には注意が必要である.

JERS-1/SAR 観測日と衛星飛来時刻に近い当日の午前 11 時における定常観測点の風向風速データを表 3 に, また定常観測点の位置を表 4 に示している. そのうちの強風時 (風速, 約 $12 \sim 13$ m/s) (97 年 8 月 22 日) と弱風時 (風速, 約 $1 \sim 2.5$ m/s) (92 年 10 月 27 日) の代表的な 2 イメージを図 1 に示す. 図からは強風時のほうが全体的に明るい (NRCS が大きい). また, 特に宍道湖においては明るい場所と暗い場所が識別できることがわかる.

JERS 1/SAR は感度の問題で, NRCS の小さい水域では雑音が支配的になっている可能性がある. そのため以下の方法で雑音レベルの差引きを行った.

雑音レベルを推定するため, 今回は宍道湖・中海の水域をそれぞれ細かく分割し (1 ブロック約 2000 m²), それぞれのブロックにおける平均 NRCS を算出した. その各ブロックのうち, 15 シーンにおける最小平均 NRCS を雑音等価 NRCS とした. これは, 細かく分割されたブロックの中には, NRCS が

非常に小さく雑音が支配的なブロックが存在すると考えられるためである. この結果, 雑音等価 NRCS (σ_{noise}^0) は -19.8 [dB] となった. σ_{noise}^0 の差引きを行うことで, より定量的な解析を行うことが可能となる. 以降解析に使用する NRCS (σ^0) は σ_{noise}^0 を差し引いたものであり, 次式により算出した.

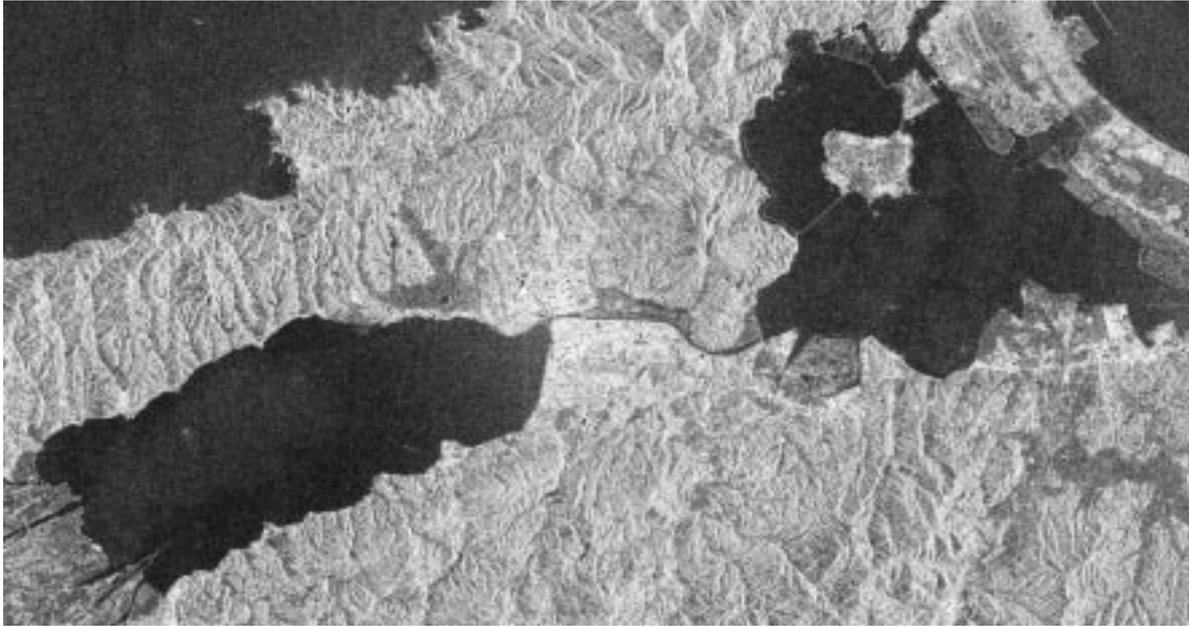
$$\sigma^0 = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{\bar{\sigma}^0}{10}} - 10^{\frac{\sigma_{noise}^0}{10}} \right) \quad (3)$$

水面風速と σ^0 の相関解析においては, 風向と SAR 視線方向の地表に水平な成分の方向との相対角度による風速と σ^0 の関係の依存性を併せて調べた. これは, 先に述べたようなレーダ波入射方向と風向の相対角度の関係が汽水域においても成立するのかわを確認するためである. なお, 風向風速データは宍道湖・中海とも湖心のデータを使用し, 平均 NRCS も湖心付近 1 km 四方におけるものである.

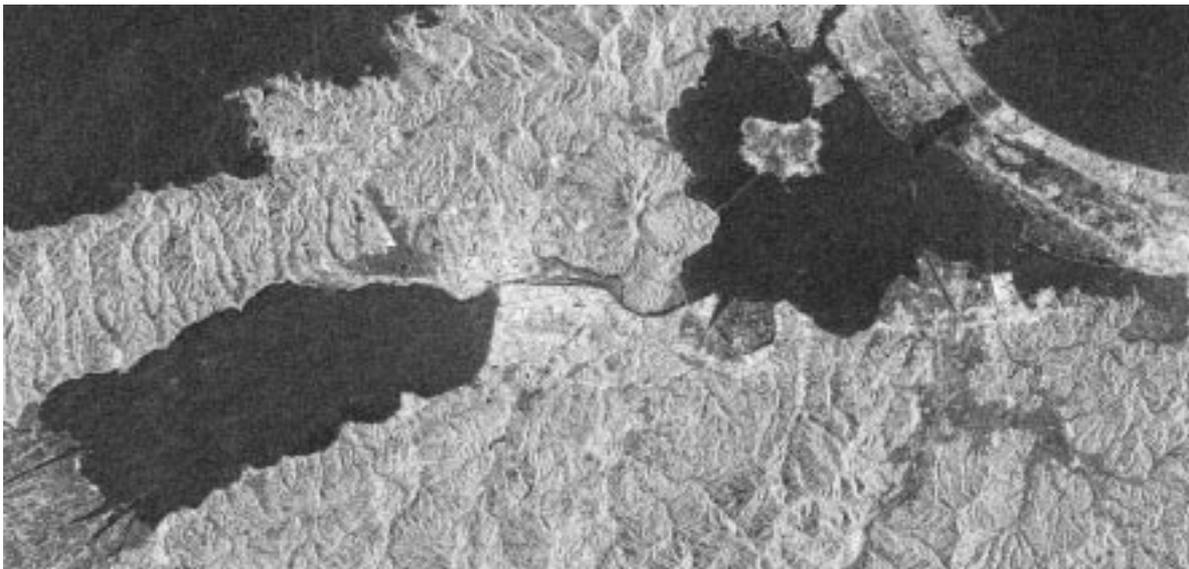
4. 2001 年 SAR 搭載衛星同期観測実験

4.1 実験概要

2001 年 3 月から 12 月にかけて合計 9 回の衛星同期風向風速観測実験を行った. 表 5 に同期観測実験の概要をまとめる. 9 月の観測からは湖岸にも人員



(a) October 27, 1992



(b) August 22, 1997

図1 JERS-1/SARの宍道湖映像の例(1992年10月27日および1997年8月22日)

Fig. 1 Examples of JERS-1/SAR image of Lake Shinji (October 27, 1992 and August 27, 1997). (c) METI/NASDA

を配置し風向風速観測を開始した。2001年の風向風速観測実験は中海を中心に行った。同期調査に使用した衛星搭載SARはRadarsat-1/SARおよびERS 2/AMI、可視・近赤外波長帯の光学センサはSPOT 2である。また、11月10日には航空機搭載のPi-SARとの同期観測を行った。なお、若干日時がずれるが、9月4日午前にはLandsat 7およびASTER、11月11日午前にはSPOT-1、11月14日午前にはLandsat 7およびASTERの観測が行われた。

同期実験において、船上では衛星の飛来する時刻とその前後10分の3ポイントで、船に固定されたデジタル式の風向風速計(ウェザーモニターⅡ)で風向風速ともに30秒間の値の平均値を記録した。また、ウェザーモニターⅡは風向風速の他に温度(室内、屋外)、気圧、湿度(室内、屋外)、露点、体感温度が観測でき、これらの観測値は1分毎にメモリに記録される。一方、湖岸では携帯用の風向風速計を用いて、30秒間風向風速を観測した。この作業

表5 2001年に実施した宍道湖・中海衛星および航空機搭載 SAR 観測、並びに同期現場観測の概要
Table 5 Summary of satellite and airborne SAR observations of Lake Shinji and Lake Nakaumi, and simultaneous in-situ observations conducted in 2001.

Date	Satellite	Observation time	Number of point		Observed data										
			Coast	Over water	Met. data (※2)	Spectral reflectivity at visible wavelength	Chl.a	Secchi depth	Turbidity	SS	Water temp.	Salinity	pH	DO	
3/14	Radarsat1	6:16	0	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9/4	Radarsat1	17:56	10	6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9/6	ERS2/SPOT2	10:47/11:12	10	7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10/30	ERS2/SPOT2	10:47/11:12	9	3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11/10	Pi-SAR	13:57~14:35	10	20(12)※1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11/15	ERS2/SPOT2	10:47/11:12	9	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12/1	ERS2/SPOT2	10:47/11:12	10	4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

※1 Only wind direction was obtained at eight points because of the failure of the Instrument

※2 Meteorological data include air temperature, humidity and pressure.

を衛星の飛来する前後 10 分の計 21 分間、1 分毎に繰り返し行った。今回湖岸での観測で用いた風速計は、風速に応じ風杯が回転する軸回転を利用したものであり、歯車伝導機構により 30 秒間の平均風速値が直示できるものである。また風向は目視により 30 秒間の平均値を 16 方位で記録した。宍道湖・中海上空への衛星飛来時間は日本標準時で、朝あるいは夕方が飛来時刻である Radarsat の場合、3 月 14 日が午前 6 時 16 分、9 月 4 日が午後 5 時 56 分、その他の太陽同期衛星 (ERS-2, SPOT など) は午前 11 時前後である。また Pi-SAR による観測は午後 2 時からであった。湖岸および船舶観測は、基本的にこれら飛来時刻に合わせて実施した。

観測地点としては、湖岸では図 4 に示す非定常観測地点のうちから最大 10 地点を選び観測を行った。観測地点は事前に下見をし、周囲の地形や建造物の影響を受け難い場所を選択した。また、湖上の観測地点は基本的に場所よりも衛星の飛来時間に合わせることを優先し、衛星の飛来時間とその 10 分前、10 分後の 3 地点で観測を行った。その際、今後の解析で観測地点の高度も必要なため船上、湖岸ともに風向風速計を設置した高度も記録した。また、衛星画像には船舶の航跡が映ることも考えられるため、観測時には移動する船舶の有無や水面の様子なども記録した。

ただし、Pi-SAR の同期実験時には以下の理由から若干方法を変え観測を行った。Pi-SAR は航空機搭載型であるため衛星に比べ速度が遅く、また今回の観測では中海上空を南から北へ、宍道湖上空を北から南へ、中海上空を西から東への 3 つのコースを通り観測を行ったため、観測開始から終了まで約 40 分かかる。このため、中海に加えて宍道湖においても同期観測を行い湖上では 20 地点で観測

を行った。一方、湖岸での観測地点数は 10 地点であるが、1 分毎ではなく 2 分毎に観測を行った。

4.2 取得データの概要

同期観測によって得られた風向風速データのうち湖岸におけるものを表 6 に、船上におけるものを表 7 に示す。2001 年 3 月 14 日については、湖岸における携帯風向風速計観測は実施しておらず、気象庁などの定常観測点におけるデータを入手済であるので、他の観測日とは別に表 8 にまとめる。なお、風向の決定において、単純にその平均値を取ると、変動が大きい場合には適切でない方向が風向となる可能性がある。そのため、1 つの観測点の観測データにおける 16 方位のうちの最頻値を風向とした。ただし、風向が 180 度以上変動している場合には VRB (Variable) とした。

なお、水質、分光関係のデータ取得についての詳細は (作野他, 本誌中) を参照されたい。

また、2001 年 9 月以降の観測についても、周囲の気象庁測候所や国土交通省観測タワーなどの定常観測点の風向風速観測を今後入手し、併せて解析をすすめる予定である。

5. NRCS と風速の相関解析結果

相対角度が (1) 0 ± 45 度 (Up) および 180 ± 45 度 (Down), (2) 90 ± 45 度および 270 ± 45 度 (Cross) の場合の 2 つに分類し、それぞれの場合における風速と NRCS の相関を調べた結果を図 2 に示す。

図 2 は横軸に風速の対数を、縦軸に雑音を除去した NRCS をとったものであるが、図 2 からは相対風向が Up 及び Down の場合には良い相関があることわかる。このことは、汽水域における風速推定モデル作成の可能性を示している。しかし、低風速域で

表 6 2001 年衛星・航空機同期観測実験時の風向風速測定結果（湖岸）

Table 6 Results of wind speed and direction measurements simultaneous with satellite and airborne SAR observations in 2001 (at the coast of Lake Shinji and Lake Nakaumi).

(a) 9/4/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	1.5	0.6	3.2	2.9	1.3	2.4	3.9	3.9	3.5	3.8	No data	No data
	Max	2.0	1.3	4.5	3.8	2.2	3.4	4.5	4.5	4.0	4.5		
	Minimum	0.5	0.0	2.3	2.0	0.1	1.0	3.5	3.5	3.0	2.0		
Wind direction		NNE	NNE	NE	ENE	ENE	E	ENE	ENE	ENE	NE		
ASL[m]		2.0	1.0	1.0	2.0	3.2	2.5	3.0	7.0	3.0	2.5		

ASL: Above Sea Level

(b) 9/6/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	1.2	0.0	0.1	3.2	7.5	5.9	3.1	4.0	0.3	2.2	No data	No data
	Max	2.0	0.3	0.8	4.5	9.0	7.0	4.0	5.5	1.9	4.0		
	Minimum	0.5	0.0	0.0	2.0	5.2	4.8	2.0	3.0	0.0	0.5		
Wind direction		ENE	VRB	VRB	S	S	SW	SSW	S	SW	VRB		
ASL[m]		2.0	1.0	1.0	2.0	3.2	2.5	3.0	7.0	3.0	2.5		

(c) 10/30/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	No data	0.2	0.7	1.8	2.7	0.4	1.5	1.2	0.9	2.2	No data	No data
	Max		1.4	2.1	3.2	3.4	1.5	2.2	1.9	2.9	2.8		
	Minimum		0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.2	0.1	1.9		
Wind direction		No data	VRB	NNE	ESE	W	WSW	NE	N	N	ENE		
ASL[m]			1.0	1.0	2.0	3.2	2.5	3.0	7.0	3.0	2.5		

(d) 11/10/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	No data	3.8	5.7	5.1	3.5	4.1	4.2	6.4	5.4	No data	3.2	6.0
	Max		4.9	6.6	6.1	4.3	5.0	5.3	7.8	6.3		4.7	7.1
	Minimum		2.9	4.8	3.8	2.2	3.1	3.5	4.0	4.0		2.3	4.8
Wind direction		No data	NE	ENE	NE	NNE	NE	NE	NE	N	No data	NE	ENE
ASL[m]			1.0	1.0	2.0	3.2	2.5	3.0	7.0	3.0		2.0	4.0

(e) 11/15/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	No data	0.2	0.9	0.6	0.3	No data	1.4	2.0	0.7	No data	0.7	3.3
	Max		1.0	2.1	2.8	1.6		2.1	2.9	2.0		2.0	3.7
	Minimum		0.0	0.0	0.0	0.0		0.1	0.2	0.0		0.0	0.0
Wind direction		No data	VRB	NNE	WSW	WNW	No data	NNW	NNW	WSW	No data	WSW	E
ASL[m]			1.0	1.0	2.0	3.2		3.0	7.0	3.0		3.0	2.5

(f) 12/1/2001

Observation Point		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wind velocity [m/s]	Average	No data	6.0	2.7	5.9	2.4	2.4	6.1	0.4	2.2	No data	0.1	1.3
	Max		6.5	4.5	6.6	3.2	4.0	6.5	1.4	4.0		0.6	2.1
	Minimum		5.2	1.7	5.0	1.5	1.0	5.3	0.0	0.5		0.0	0.1
Wind direction		No data	SW	W	W	W	WSW	W	VRB	SW	No data	WSW	SW
ASL[m]			1.0	1.0	2.0	3.2	3.2	3.0	7.0	3.0		3.0	2.5

表7 2001年衛星・航空機同期観測実験時の風向風速測定結果(湖上, 小型船舶による観測)

Table 7 Results of wind speed and direction measurements simultaneous with satellite and airborne SAR observations in 2001 (on Lake Shinji and Lake Nakaumi, measurements with small boats).

(a) 9/4/2001

Observation Time(JST)	17:46	17:57	18:07	17:45	17:57	18:07
North latitude	35° 27' 41.8"	35° 28' 29.7"	35° 29' 18.6"	35° 26' 53.5"	35° 27' 46.4"	35° 28' 25.5"
East longitude	133° 13' 30.8"	133° 13' 02.8"	133° 12' 32.4"	133° 11' 17.1"	133° 11' 35.7"	133° 11' 43.1"
Wind velocity [m/s]	2.4	3.7	2.8	4.1	2.6	2.7
Wind direction [deg.]*	71	81	57	87	90	96
ASL[m]	1.6	1.6	1.6	2.0	2.0	2.0

*: From Mag. North

(b) 9/6/2001

Observation Time(JST)	10:36	10:47	10:57	10:34
North latitude	35° 27' 47.5"	35° 27' 47.6"	35° 29' 46.8"	35° 30' 59.4"
East longitude	133° 09' 37.9"	133° 12' 23.7"	133° 12' 22.8"	133° 09' 40.0"
Wind velocity [m/s]	0.9	4.5	6.0	0.6
Wind direction (deg.)	270	180	340	324
ASL[m]	1.7	1.7	1.7	1.6

Observation Time(JST)	10:47	10:57	11:13
North latitude	35° 29' 39.9"	35° 28' 29.2"	35° 28' 39.6"
East longitude	133° 09' 02.2"	133° 08' 57.0"	133° 11' 59.9"
Wind velocity [m/s]	0.9	1.3	2.2
Wind direction (deg.)	80	182	146
ASL[m]	1.7	1.6	1.6

(b) 10/30/2001

Observation Time(JST)	10:37	10:50	11:01
North latitude	35° 27' 19.1"	35° 27' 41.6"	35° 27' 46.4"
East longitude	133° 09' 07.3"	133° 09' 58.5"	133° 11' 35.7"
Wind velocity [m/s]	3.0	1.5	1.5
Wind direction (deg.)	326	65	10
ASL[m]	1.8	1.8	1.8

(d-1) 11/10/2001(Lake Shinji)

Observation Time(JST)	13:04	13:17	13:36	13:49	14:01	14:23
North latitude	35° 27' 13.3"	35° 26' 47.2"	35° 26' 16.7"	35° 25' 53.3"	35° 25' 23.2"	35° 25' 50.6"
East longitude	132° 54' 49.9"	132° 55' 06.1"	132° 55' 08.8"	132° 55' 12.0"	132° 55' 17.8"	132° 56' 39.5"
Wind velocity [m/s]	5.4	6.3	4.5	4.5	5.4	4.0
Wind direction (deg.)	0	40	40	30	40	40
ASL[m]	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

Observation Time(JST)	14:42	15:12	15:24	15:34	15:44	15:54
North latitude	35° 26' 20.8"	35° 28' 00.7"	35° 27' 33.1"	35° 27' 03.8"	35° 26' 32.6"	35° 26' 04.9"
East longitude	132° 57' 42.8"	132° 59' 35.9"	132° 59' 39.4"	132° 59' 48.5"	132° 59' 57.6"	133° 00' 04.1"
Wind velocity [m/s]	6.3	3.1	7.5	4.0	2.7	3.1
Wind direction (deg.)	30	40	60	60	30	30
ASL[m]	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6

の相関は良いとは言えない。これは、風速による湖面の応答が十分でないことや、有機物などによる水面汚染、水流などの影響が考えられる。今回取得したシーンに対応する Cross の場合のデータ数は少なく、はっきりとその相関を確認することはできな

い。しかし全体的に Up, Down 時よりも NRCS は低い傾向があり、定常的にはこれまでの観測結果と矛盾していない。今後のデータ入手の際には Cross のものを優先的に入手し、解析を行う予定である。

また、図2には JERS 1/SAR と同じ水平偏波で航

表7 続き

(d-2) 11/10/2001 (Lake Nakaumi)

Observation Time(JST)	13:15	13:30	13:47	14:05
North latitude	35° 30' 26.5"	35° 30' 23.5"	35° 28' 30.1"	35° 27' 45.4"
East longitude	133° 10' 45.0"	133° 08' 43.3"	133° 08' 51.1"	133° 09' 37.1"
Wind velocity [m/s]	No data	No data	No data	No data
Wind direction (deg.)	45	20	30	30
ASL[m]	2.0	2.0	2.0	2.0

Observation Time(JST)	14:21	14:40	15:03	15:21
North latitude	35° 27' 47.0"	35° 27' 46.3"	35° 29' 30.2"	35° 30' 31.9"
East longitude	133° 11' 32.0"	133° 13' 38.2"	133° 12' 19.2"	133° 12' 28.2"
Wind velocity [m/s]	No data	No data	No data	No data
Wind direction (deg.)	30	50	50	45
ASL[m]	2.0	2.0	2.0	2.0

(e) 11/15/2001

Observation Time(JST)	10:25	10:47	10:56	11:14
North latitude	35° 27' 46.4"	35° 27' 46.5"	35° 27' 46.6"	35° 29' 30.1"
East longitude	133° 09' 41.5"	133° 11' 32.3"	133° 13' 38.8"	133° 12' 17.0"
Wind velocity [m/s]	0.5	2.5	1.8	0.4
Wind direction (deg.)	19	315	300	260
ASL[m]	2.0	2.0	2.0	2.0

(f) 12/1/2001

Observation Time(JST)	10:32	10:44	11:03	11:21
North latitude	35° 27' 48.1"	35° 27' 46.6"	35° 27' 45.4"	35° 29' 29.8"
East longitude	133° 09' 38.9"	133° 11' 33.5"	133° 13' 41.3"	133° 12' 20.0"
Wind velocity [m/s]	3.0	2.0	0.4	2.7
Wind direction (deg.)	280	285	VRB	270
ASL[m]	2.0	2.0	2.0	2.0

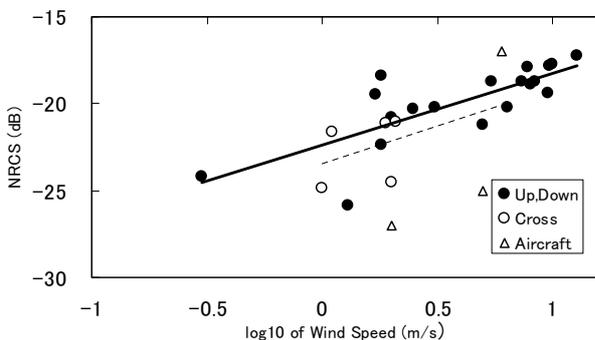


図2 宍道湖および中海中心部における風速(国土交通省タワーにおける観測)とJERS-1/SAR NRCSの相関

Fig. 2 Correlation between wind speed measured at Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) stations and JERS-1/SR NRCS at Lake Shinji and Lake Nakaumi.

空機搭載のレーダを用いて観測された NRCS (Δ) (Guinard and Daley, 1970) が併せて示してある。これと今回算出した NRCS との差は数 dB ほどであった。一方で、今回求めた NRCS は島田らによる GMF から算出したものと比較すると 4~10 dB ほど大きい。これは雑音推定方法の違いなどが原因として考えられる。

6. SAR 画像に見られる特徴的なシグナチャ

6.1 JERS-1/SAR 画像

図3には今回解析を行った15シーンのJERS 1/SAR イメージの中で、特に特徴的なシグナチャが現れていた1993年1月23日、8月31日の宍道湖のイメージを示す。図3(a)では西岸の斐伊川などから、

表 8 2001 年 3 月 14 日の Radarsat-1 飛来時間帯における風向風速データ

Table 8 Wind speed and direction data on and around the time of Radarsat-1/SAR observation on March 14, 2001.

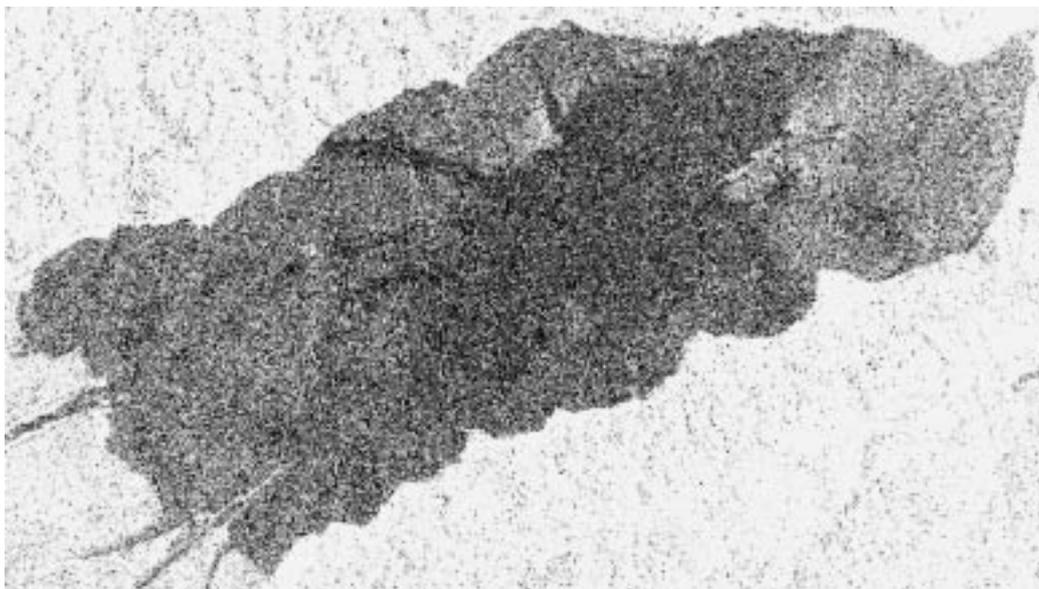
Observation Time(JST)	6:02	6:19	6:35
North latitude	35° 27' 66.7"	35° 27' 68.3"	35° 29' 30.0"
East longitude	133° 10'	133° 14' 02.4"	133° 12'
Wind velocity [m/s]	2.4	2.7	1.3
Wind direction[deg.]*	270	205	52

*: From Mag. North



(a) January 23, 1993.

(Example showing possible water flow from Hii River).



(b) August 31, 1993

(Example showing possible water floats from small rivers)

図 3 宍道湖の JERS-1/SAR NRCS 映像: 特徴的なシグナチャを持つ例

Fig. 3 Example of NRCS image derived from JERS 1/SAR data at Lake Shinji (examples showing peculiar signatures). ((c) METI/NASDA)

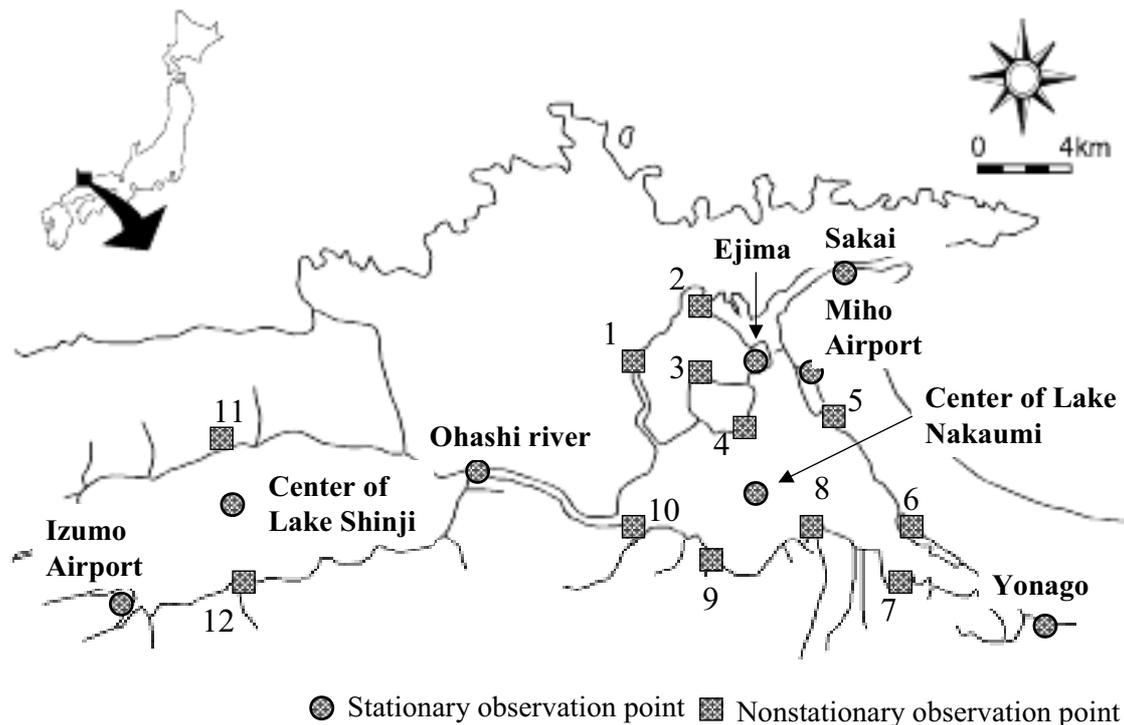


図4 湖岸における風向風速観測点

Fig. 4 Location of wind speed and direction measurement around the coast line of Lake Shinji and Lake Nakaumi.

図3 (b) では北岸の河川からの流入を示すようなシグナチャを見ることができる。なお両日とも風速は弱く、1月23日は宍道湖における風速約2 m/s、8月31日は約1~3 m/sである。また、当日を含め過去10日間の国土交通省出雲工事事務所鳥上観測所(仁多郡横田町鳥上)において合計27.8 mmの降雨が、8月31日も同様に過去10日間で27.5 mmの降雨が観測されており、シグナチャの現れる原因に関係している可能性もあるが、原因の解明には至っていない。また、宍道湖は中海に比べ特徴的なシグナチャが現れることが多く、今後、気象、水質などのデータを集め、シグナチャの原因を調査する予定である。

6.2 Radarsat-1/SAR 画像

図5に2001年3月14日の観測時のRadarsat 1/SAR画像を概略の風ベクトルと合わせて示す。図からは宍道湖・中海両湖において特徴的なシグナチャを確認することができる。当日湖上で観測された風速は1~3 m/s程度の極めて弱いものであり、風波はほとんどなかった。中海中心部や本庄工区におけるシグナチャは波によるものとしては不自然であり、なにか他の原因が考えられる。これまでにRadarsat 1/SARを用い、船舶の航跡がシグナチャ

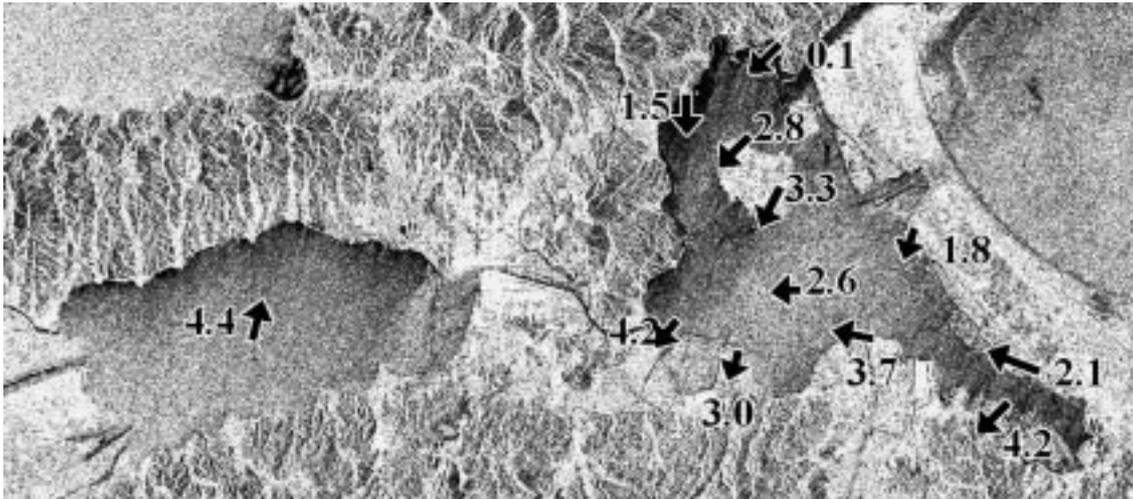
として現れるのを利用し船舶の検出を試みた例(Vachon, Olsen, 2000)があるが、当日は観測船以外にほとんど船舶は確認されておらずその可能性は低い。また海底地形との対応もなく、現在の所原因は解明できていない。

図5 (b) に示される2001年9月4日のイメージは、3月14日のイメージと比較すると全体的に明るく、特徴的なシグナチャを見ることはできない。当日の風速は2~5 m/s程度で3月14日の観測に比べ風は強かった。このことがイメージの違いに現れている可能性があるかと推測できる。

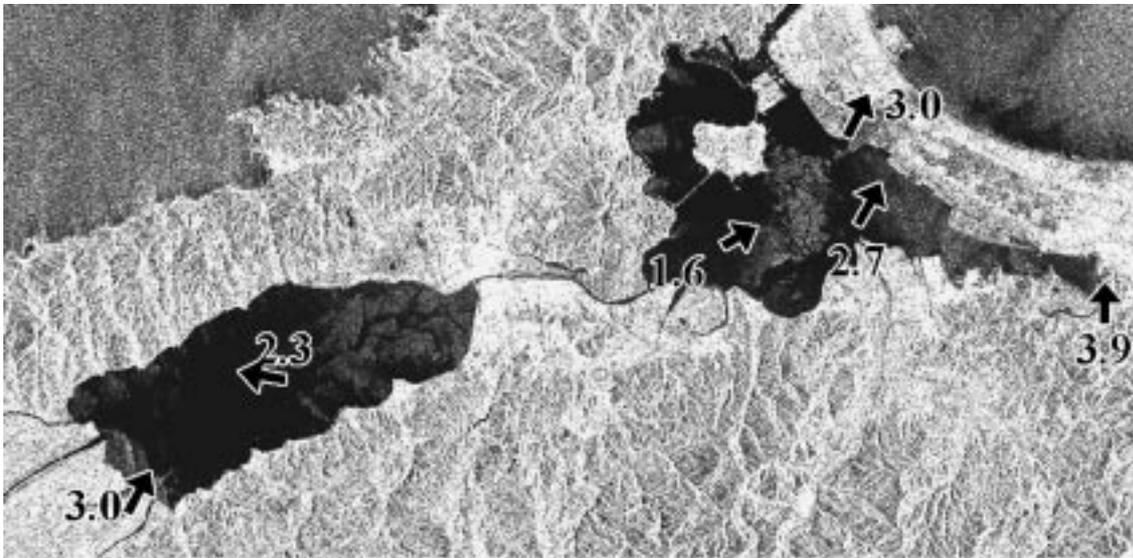
7. ま と め

汽水域における環境観測手法の一つとして風速推定手法の開発を目指し、その初期検討として過去の衛星データを用い、湖心タワーで観測された風向風速とNRCSの相関を調べた。また、更に詳細に汽水域のSAR観測の可能性を検討するため、2001年度に実施した衛星・航空機同期実験の概要を報告した。その結果、以下の結論を得た。

(1) 1992~1997年に取得されたJERS-1/SARデータを解析した結果、風速がある程度強い場合には、



(a) 3/14/2001, 6:16 AM (JST)



(b) 9/4/2001, 5:56 AM (JST)

図5 2001年3月14日および9月4日に取得された Radarsat 1/SAR 映像，並びに湖上および湖岸の風ベクトル。

Fig. 5 Radarsat 1/SAR images on March 14 and September 4, 2001. ((c) Canadian Space Agency (2001); provided from NASDA), superimposed by wind vectors measured simultaneously with the SAR observations.

風速と NRCS の間に良い相関があることが確認できた。これは、汽水域における風速推定の可能性を示すものである。

- (2) 一方で風速の弱い場合には，風速と NRCS の相関は低い。また，風速の大きい場合には見られない特徴的なシグナチャを確認できることが多い。
- (3) (1)，(2) は結果を考慮すると，SAR データの利用に際し，「使い分け」が必要であると推測される。風速の強い場合には水面の風に対する応

答が良く，それに従い NRCS と風速の相関も良くなるが，風速の弱い場合には応答が不十分である。そのため水質等の影響によるシグナチャが出現しやすいのだと推測できる。このため，強風域においては風速分布推定に，弱風域においては特徴的なシグナチャを抽出することで，水質汚染検出，水流検知などに SAR データの利用が考えられる。

今後さらに 2001 年度の衛星同期観測実験時のデータ解析をすすめると共に，種々の気象・水象条

件下における衛星データ，SAR の汽水域環境観測手法の検討を行う予定である。

謝 辞

JERS 1/SAR データは「経済産業省/宇宙開発事業団」が所有し，宇宙開発事業団から提供を受けたものである。気象データは国土交通省出雲工事事務所，気象庁松江地方气象台・出雲空港および美保空港出張所，境および米子測候所から提供を受けた。また，Pi-SAR による観測は通信総合研究所および宇宙開発事業団により行われた。

広島大学陸田秀実助手からは水面波と風の相互作用について，また東北大学川村宏教授並びに島田照久氏からは，GMF や SAR による風速推定の諸問題についてご教示を受けた。徳岡汽水環境研究所 徳岡隆夫所長，島根県内水面水産試験場中村幹雄場長，並びに島根大学の汽水域関係研究者各位からは，汽水域環境に関する有益なコメントや資料を頂いた。

同期実験実施に際し，松江土建(株)環境部の多大な協力を得た。中山大介氏には水質データの取得と処理に，また島根大学の多くの学生諸氏には，湖岸における風向風速観測に協力頂いた。

参 考 文 献

CRL/NASDA (1998) 航空機搭載高分解能マルチパ
ラメータ SAR (Pi-SAR) パンフレット. 通信総合
研究所.
Elachi, C. (1987) *Spaceborne radar remote sensing:
Applications and techniques*. IEEE Press, New York,
255 p.
Guinard, N. W., and J. C. Daley (1970) An Experimental
study of a sea clutter model, *Proceedings of the IEEE*,

58: 543-550

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, (社)電子情報
通信学会, 東京.

磯口治 (2001) SAR データを用いた沿岸域の海象現
象把握の検討, *RESTEC*, 47 号, 東京, 23-36.

JPL (2002) Missions-SeaWinds on QuikSCAT. [http://
winds.jpl.nasa.gov/](http://winds.jpl.nasa.gov/).

Kozu, T., K. Takayasu, Y. Sakuno, T. Matsunaga and H.
Kobayashi (2001) Feasibility study of combined use
of microwave and optical sensing for coastal lagoon
environment monitoring, *Proceedings of the First
ALOS PI Workshop*, Tokyo.

Li, F. K. and R. K. (1991) Special section on spaceborne
radars for Earth and planetary observations, *Proceedings
of the IEEE*, **79**: 773-880.

Liu, W. T. (2001) Wind over troubled water. *Backscatter*,
AMRS Association, **12**, No.2: 10-14.

NASDA (2002) 地球観測衛星の紹介. 宇宙開発事業
団地球観測センター (EOC) Web page [http://www.
eoc.nasda.go.jp/](http://www.eoc.nasda.go.jp/).

Shimada, T., H. Kawamura and M. Shimada (2001)
Study on L-band Geophysical Model Function for
ocean surface for ocean surface wind retrieval using
JERS-1/SAR, *Proceedings of the First ALOS PI
Workshop*, Tokyo.

Ulaby, F. T., R. K. Moore and A. K. Fung (1982)
*Microwave remote sensing Vol.II: Active and passive.
-Radar remote sensing and surface scattering and
emission theory-*, Artech House, Norwood, MA, 1660-
1684.

Vachon, P. W., R. B. Olsen (2000) Ship detection with
satellite-based sensors: A summary of workshop
presentations, *Backscatter*, AMRS Association, **11**,
No.4: 23-26.

江の川における塩水遡上域より上流の地下での 淡塩境界変動の連続観測 (2000 年 10~11 月)

徳岡隆夫¹・上野博芳²・三瓶良和³・西村清和⁴・鈴木重教⁵

The long-term observation of the boundary between saline and fresh water in subsurface aquifer system beyond the saline water invasion area at River Gonokawa, Shimane Pref., Japan (October to November, 2000)

Takao Tokuoka¹, Hiroyoshi Ueno², Yoshikazu Sampei³,
Kiyokazu Nishimura⁴ and Shigenori Suzuki⁵

Abstract: A groundwater well was installed at the river bank for the observation of groundwater system. The well is 50 m in length and penetrates the alluvial sand and gravels. The long-term observation of the freshwater and saltwater boundary using the monitoring sensor of temperature and conductivity as well as the water table was successfully carried out from Oct. 10 to Nov. 30, 2000.

Key words: saline wedge, halocline, groundwater, Gonokawa

1. はじめに

江の川は弱混合型(塩水楔型)の感潮河川の日本における代表例として知られている。江の川では、塩水は通常は河口から4~7kmの範囲で、また渇水期には河口から8.2kmの赤栗の瀬を越えて10kmに至るまで遡上することがあり、その観測は西條・奥田(1996)で1960年代に行われた例が報告されていて、最近では著者らが報告している(徳岡ほか, 1998, 1999 および 2001)(図1)。通常は赤栗の瀬より上流では塩水遡上は起こらないが、ここでは川床下に厚く堆積している沖積砂礫層中には高塩分水が常に存在していて、渇水期や地下水の過剰汲み上

げによってこれまでに塩害が発生したことがあり、この高塩分層の実態や塩水遡上とどのような関係にあるのかを把握しておくことは地下水利用の上からも明らかにしておくべき課題であった。そのために、1999年度には河口からの距離8.65kmの江の川右岸の堤防上に深度50mの観測井が設置され、淡塩境界を含む地下水観測がなされ、その結果、河川流量・水位が増大(遡上した塩水の後退と一致する)するとともに、赤栗より先の地下に貯留された塩水塊の水位が下がったことが観測され、塩水遡上とその先の地下に貯留された塩水塊とはなんらかの関係があることが確かめられた(徳岡ほか, 2001)。

¹ 徳岡汽水環境研究所(鳥根大学名誉教授) Tokuoka Laboratory for Studies of Brackish Water Environments (Professor Emeritus, Shimane University)

² 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 Japan Advanced Institute of Science and Technology in Hokuriku

³ 鳥根大学総合理工学部 Faculty of Science and Technology, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

⁴ 産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門 Marine Geology Department, Geological Survey of Japan

⁵ (株)鶴見精機 The Tsurumi-Seiki Co. Ltd.

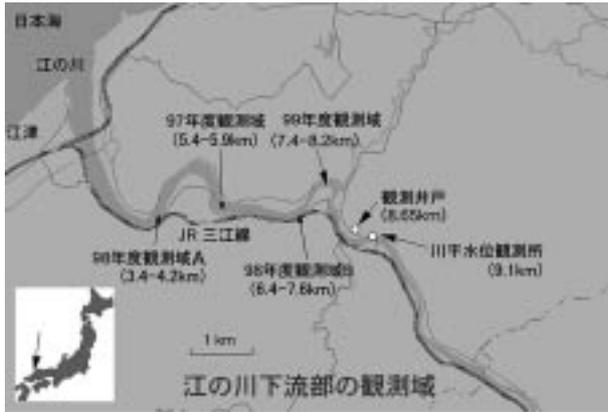


図1 江の川と市村観測井の位置

Fig. 1 Index map showing observed area of the lower stream of R. Gonokawa and the site of the observation well.]

このような興味ある観測結果は、今後起こりうる渇水の際の対策を検討する上で重要であること、また、さらに言えば、地球温暖化による海面上昇に伴って起こる地下水の塩水化の問題を考える上で貴重なデータを提供することにもなることから、さらに詳しい観測を行うことにした次第である。調査地域は図1に示すとおりである。

謝辞：この研究は国土交通省中国地方整備局浜田工事事務所のご協力とご支援のもとに行われたものである。記してお礼申し上げます。

2. 市村観測井と観測機器の設置、観測方法、観測期間

前年度と同じ松川町市村（右岸 8 k 650）の既設観測井を利用して、温度・電気伝導度・塩分センサ5台（マルチCTセンサについては西村ほか、1998を参照）および水位計1台を設置して30日間の連続観測を行った。前年度は淡塩境界の変動幅が明らかでなかったことから、5つのセンサの間隔を3, 1, 1, 3 mとして8 m間での観測を行ったが、今回はおおよその変動幅がわかっていたこと、また、淡塩境界の変動をより詳しく捉えるために5つのセンサを1 m間隔とし、この間で淡塩境界の上下の動きを捉えることにした。なお、観測開始前に淡塩境界がどの深さにあるかを観測した上で、新たに制作された井戸用マルチCTセンサ（鶴見精機製、各センサ位置は-40, 41, 42, 43, 44 m,）を設置することとした（図2および3）。観測は2000年10月11日～11月30日の計51日行った。なお、水質計（YSI, 600

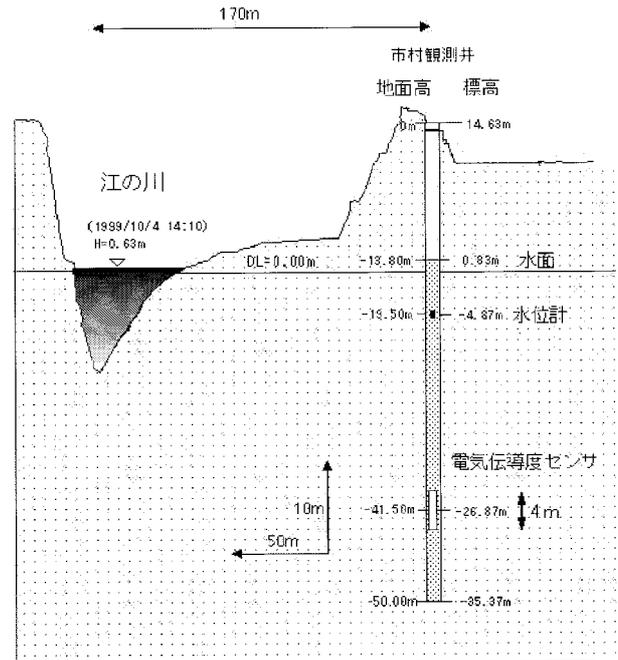


図2 市村観測井の位置と概要

Fig. 2 Configuration of the Ichimura observation well at 8.65 km from the river mouth.

XL) による1 mごとの水質（水温、塩分、電気伝導度）の観測は機器設置前と撤去後、およびその後1回行った。

なお、徳岡ほか（2001）で記述されているように、地下の地質は一連の砂礫層からなり、すべて沖積層と考えられ、この間に有効な不透水層は存在しない。井戸は径110 mmで、ケーシングには適当な間隔に孔をあけて地下水の移動がフリーとなるような仕上げとなっている。

3. 水質計による深度1 mごとの水質測定

地下水の連続観測直前の10月11日と機器の撤去（11月30日）の数時間後、および12月19日の3回の観測を行った。結果を図4, 5, 6に示す。淡塩境界はTP-24～27 mの位置にあり、観測日ごとに異なっている。しかし、どの場合も淡塩境界はシャープであり（ただし、温度の変化はごくわずかである）、厚さ1 m以内で急激に移り変わっている（11月30日のデータではやや乱れが認められるが、これは約3時間前に井戸中に吊り下げていた機器を撤去した影響が表れているためである）。これは前年度の観測でも同様であった。下位の塩水は22～25 PSUであり、最深部の約2 mでは急激に塩分が減少する傾向がどの場合にも認められる。この現象はこ

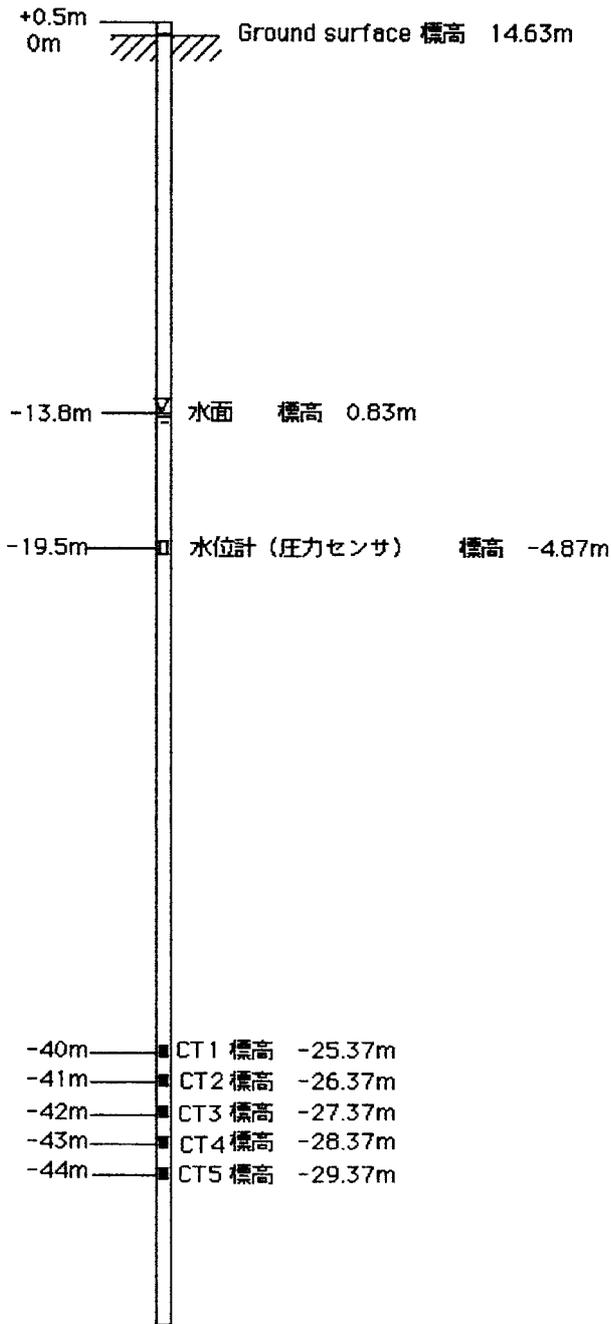


図3 市村観測井の概要と温度・電気伝導度センサ (CT1~CT5) の位置

Fig. 3 Configuration of monitoring sensors installed in the Ichimura observation well.

れより深部に被圧された地下水が存在していて、その影響によるものと推定される。しかしながら井戸の深さがここまでであるので、判断はできない。

4. 江の川の流量と水位のデータ

江の川の流量と水位については国土交通省浜田工

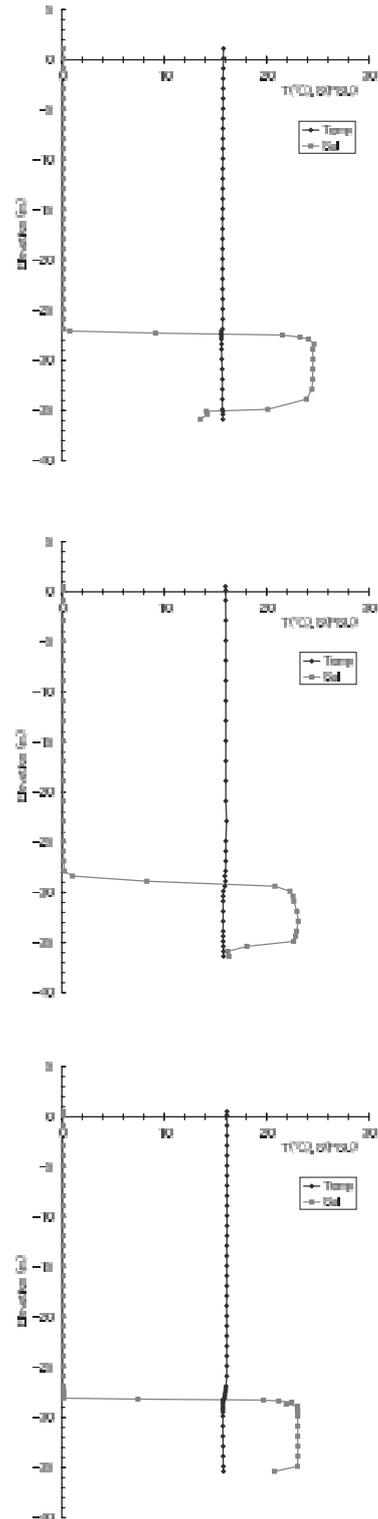


図4 観測井での温度・塩分の垂直分布 (2000.10.11)
Fig. 4 Temperature and salinity distribution at the observation well (Oct. 11, 2000).

図5 観測井での温度・塩分の垂直分布 (2000.11.30)
Fig. 5 Temperature and salinity distribution at the observation well (Nov. 30, 2000).

図6 観測井での温度・塩分の垂直分布 (2000.12.19)
Fig. 6 Temperature and salinity distribution at the observation well (Dec. 19, 2000).

事務所によって各地で観測が長期にわたって続けられている。観測井にもっとも近い位置にある川平（河口からの距離 9.1 km）の流量を図 7, 8 に、水位を図 9, 10 に示す。

5. 観測井における地下水位の連続観測

水位計を水質観測センサとともに地下水面より約 4 m 下位に設置して連続観測（測定は 5 分ごと）を行った。結果を図 11, 12 に示す。水位は潮汐を反映した規則的な変動をしている。11 月 2 日からの急激な水位の上昇は江の川の水位・流量の増大を直接反映したものと考えられる。

6. 観測井における 5 点での水質（温度・塩分・電気伝導度）の連続観測

温度および電気伝導度のセンサを 1 m おきに 5 個（深度 TP-40, -41, -42, -43, -44 m；図 3）を淡塩境界がほぼ中心にくるように設置して、2000 年 10 月 11 日～11 月 30 日に連続観測を行った。測定時間間隔は 5 分である。深度ごとの温度変化をそれぞれ図 13, 14 に、塩分の変化を図 15, 16 に示す。

水温の変動：図では各深度ごとに温度が異なっているが、値の違いは小さく、各機器の特性によるものと見なすのが適当であり、機器間の違いを議論することはできない。しかし、各機器ごとの温度変化については信頼できる値が得られていると考えてよい。いずれの深度においても 11 月 2 日のから 3 日にかけて大きな変化がみられる。これらの変化は塩分の変化と対応している。

塩分の変動：深度 S 1～S 5（-40, -41, -42, -43, -44 m）ごとの塩分変化をみると、11 月 2 日から 3 日にかけて大きな変化が認められる。10 月 11 日以降、S 1, S 2, S 3 のセンサは淡水中にあり、S 3 と S 4 の間に淡塩境界が位置している。10 月 18 日以降はセンサ S 4 は淡塩境界の上に出ることがあり、10 月 29 日以降はこれが頻繁になっている。11 月 2 日には淡塩境界は急激に変化し、11 月 3 日未明には全てのセンサが淡水中に入っている。これは江の川の水位・流量の増大と関係していると判断される。ただし、11 月 2 日には一時深度 1～5 の全てのセンサが塩水中に入っていて、淡塩境界が一時的に下降したことを示している。

7. まとめと考察

1. 市村観測井（河口からの距離 8 k 650, 深度 50 m）で水位計と井戸用マルチ CT（電気伝導度・温度）センサ（5 個のセンサを 1 m おきに設置）を用いて淡塩境界を中心に 51 日間の連続観測を行った。その結果、1999 年 12 月～2000 年 1 月の観測（徳岡ほか、2001）と同様に、江の川の塩水溯上とその先の地下に貯留された塩水との間には関係があつて、江の川の流量が増加（塩水が降下）した場合に、地下の淡塩境界は時間差をおいて降下することが確かめられた。ただし、江の川の流量が減少した場合（塩水が溯上）した場合の挙動については、今回の観測でも良いチャンスが得られず、明らかにすることができなかった。
2. 今回の観測では、江の川の急激な流量・水位の上昇の直後に淡塩境界は一時的に上昇するという興

川平流量：2000.10.11-11.30

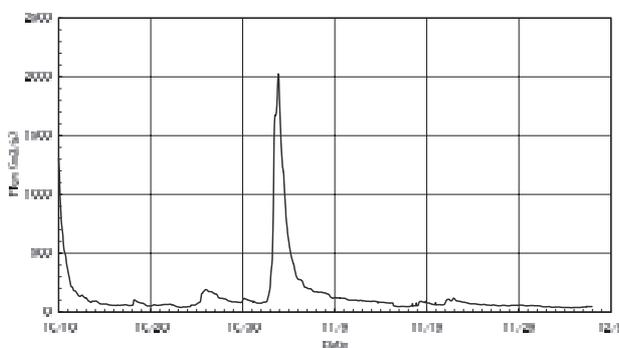


図 7 川平観測所における江の川の流量変化（2000.10.10～12.6）

Fig. 7 Discharge rate (m^3/s) at Kawahira Observation Site (Oct. 10～Dec. 6, 2000)

川平流量：2000.10.11-11.30 (4)

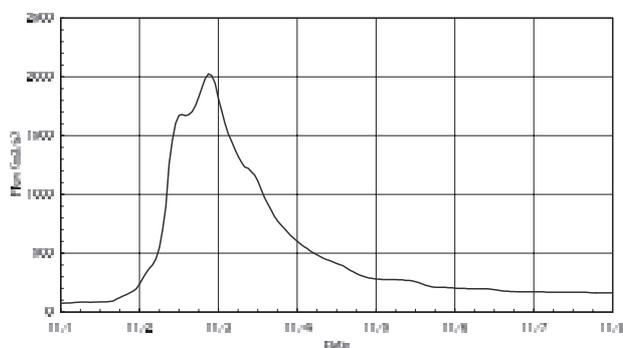


図 8 川平観測所における江の川の流量変化（2000.11.1～11.7）

Fig. 8 Discharge rate (m^3/s) at Kawahira Observation Site (Nov. 1～Nov. 7, 2000)

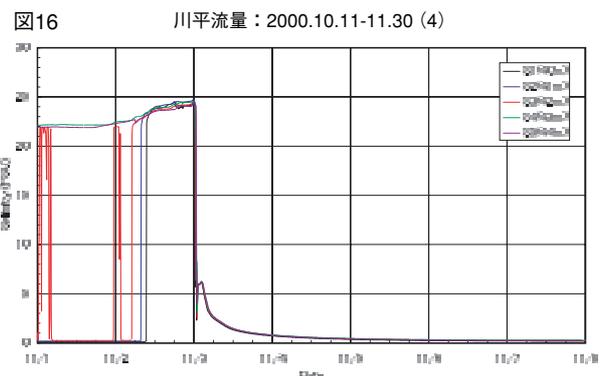
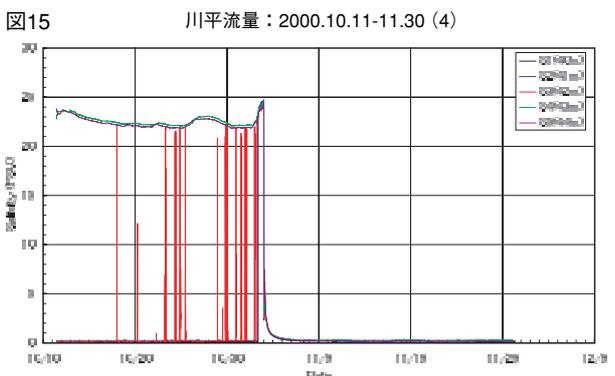
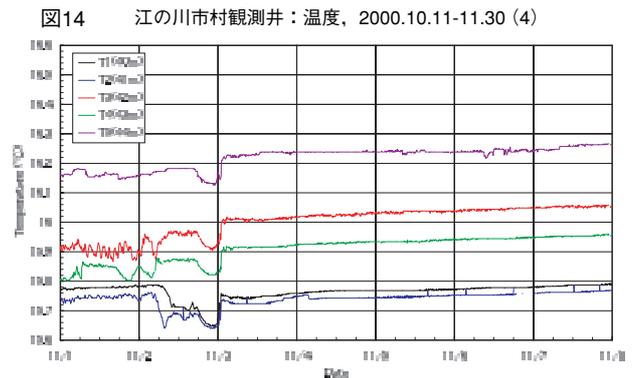
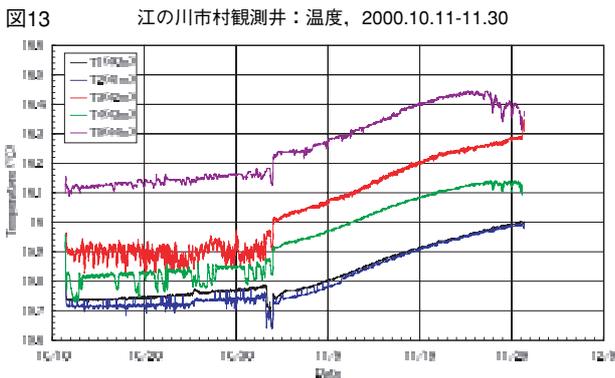
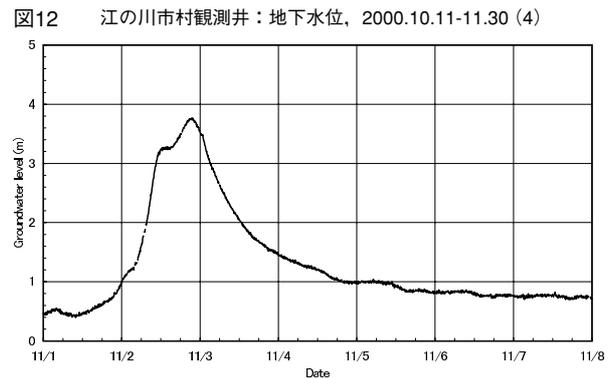
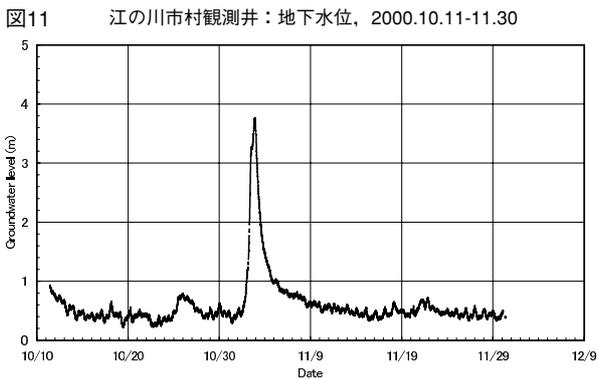
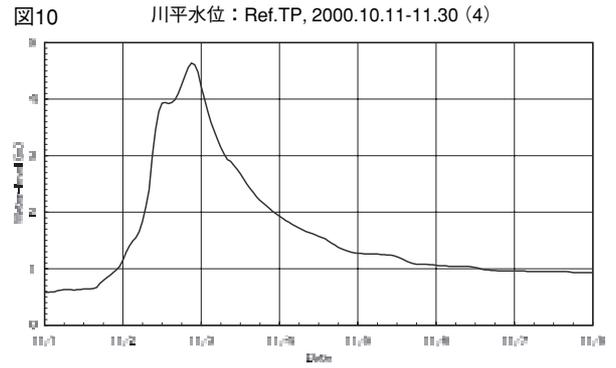
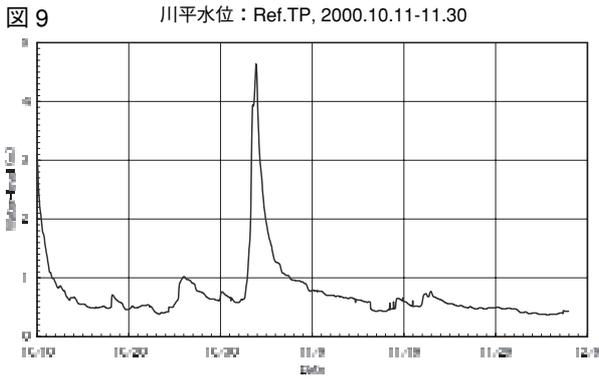


図9 川平観測所における江の川の水位変化 (2000.10.10~12.6)

Fig. 9 Water level at Kawahira Observation Site (Oct. 10~Dec. 6, 2000)

図10 川平観測所における江の川の水位変化 (2000.11.1~11.7)

Fig. 10 Water level at Kawahira Observation Site (Nov. 1~Nov. 7, 2000)

図11 観測井における地下水位変化 (2000.10.10~11.30)

Fig. 11 Water table at the observation well (Oct. 10~Nov. 30, 2000)

図12 観測井における地下水位変化 (2000.11.1~11.7)

Fig. 12 Water table at the observation well (Nov. 1~Nov. 7, 2000)

図13 観測井における各深度ごとの温度変化 (2000.10.10~11.30)

Fig. 13 Variation of temperature at each monitoring level at the observation well (Oct. 10~Nov. 30, 2000).

図14 観測井における各深度ごとの温度変化 (2000.11.1~11.7)

Fig. 14 Variation of temperature at each monitoring level at the observation well (Nov. 1~Nov. 7, 2000).

図15 観測井における各深度ごとの塩分変化 (2000.10.10~11.30)

Fig. 15 Variation of salinity at each monitoring level at the observation well (Oct. 10~Nov. 30, 2000).

図16 観測井における各深度ごとの塩分変化 (2000.11.1~11.7)

Fig. 16 Variation of salinity at each monitoring level at the observation well (Nov. 1~Nov. 7, 2000).

味ある事実が明らかになった。2000年11月2～3日に起こったことで、流量・水位の変化(1時間ごとの測定)とほぼ同調して起こっている。このような特異な現象の解明は今後の課題としたい。

3. 淡塩境界の変動を1m間隔で設置した温度・塩分センサで捉えるという今回用いた方法では、その動きを捉えるには限界がある。今後はより狭い間隔で淡塩境界を捉えるか、あるいは直接検出する方法を検討する必要がある。

4. 市村観測井が設置されて以降に水質計による1mごとの観測は1999年12月から2000年11月までに計10回行われた。ほぼ年間を通しての地下水の変動を観測したことになり、これらを整理すると、以下の点が指摘できる。1) 地下水位の変動幅は約4m以上である。2) 淡塩境界の変動は地下水位の変動と同じ規模である。3) 地下水(淡水)は季節ごとに温度が異なり、秋から冬にかけては上昇傾向にあり、春から秋にかけて下降傾向にある。とくに、3)の現象は地下水の流動にはかなりの時間がかかっていることを示唆しており、上記の1と2で示した淡塩境界の変動ともどのような関係にあるのかを、市村観測井での年間を通した観測や別途観測井を設置してそれらの間の応答を調べるなどによって今後解明する必要がある。

引用文献

- 西村清和・鈴木重教・徳岡隆夫(1998)多点型CTセンサケーブル測定システムの開発と汽水域での塩分・温度観測実験－. *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci.*, 4, 41-54.
- 西條八東・奥田節夫(1996編)河川感潮域. 名古屋大学出版会, 248 p.
- 徳岡隆夫・三瓶良和・亀井健史・西村清和・須崎聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教(1998)江の川の塩水楔－塩水溯上の長期連続観測システムの開発－(予報). *LAGUNA* (汽水域研究, 島根大学汽水域研究センター), 5号, 197-208.
- 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(1999)江の川の塩水楔－塩水溯上の長期連続観測システムの開発－(湧水期溯上例, 1998年12月～1999年2月). *LAGUNA* (汽水域研究, 島根大学汽水域研究センター), 6号, 233-245.
- 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・池田龍彦(2001)江の川の塩水楔－塩水溯上とその上流の地下塩水との関係－(1999年12月～2000年2月). *LAGUNA* (汽水域研究, 島根大学汽水域研究センター), 8号, 67-78.

大橋川～宍道湖における高塩分水塊の動態観測 (2000 年夏)

徳岡隆夫¹・上野博芳²・三瓶良和³・西村清和⁴・須崎 聰⁵
松田滋夫⁶・久保田俊輔⁷・鈴木重教⁸

Long-term observation of high-saline watermass at R. Oohashigawa-Lake Shinji area, Shimane Pref., Japan (Observation in Summer, 2000)

Takao Tokuoka¹, Hiroyoshi Ueno², Yoshikazu Sampei³, Kiyokazu Nishimura⁴,
Akira Suzaki⁵, Shigeo Matsuda⁶, Shunsuke Kubota⁷ and Shigenori Suzuki⁸

Abstract: A long-term observation was performed during the summer season in 2000. The observation system developed by the present writers' contributions consists of several sub-systems such as an acoustic reflection profiling system for spatial distribution survey of halocline (Model SC-3), an underwater acoustic reflection measurement systems for long-term observation of halocline behaviour (On-line mode model SC-2 and Off-line mode CL-3), a thermometry system using optical fiber distributed temperature sensor (MOodel DTS-80) and a temperature salinity measurement system using multiple CT sensors (Model MCTH-2). The observations were successfully carried out from July 11 to 28.

Key words: saline wedge, oxygen-poor water mass, coastal lagoon, LakeShinji, Ohashigawa

1. はじめに

中海から大橋川を経て宍道湖へ流入する高塩分層はさまざまな条件によって貧酸素化していることがあり、環境へ悪影響を与えることがある。貧酸素水塊の問題は社会的にも注目を集めているが、それへの対策を考えるにあたっては、まず高塩分層の挙動を明らかにしておく必要がある。筆者らの塩水楔研究グループは 1992 年以来、塩水楔 (塩分躍層) の動態観測法の開発を行ってきたが、それらについては

徳岡ほか (2001 a) で、まとめて紹介している。また、大橋川における観測についてはこれまでに徳岡ほか (1999, 2001 b) で報告している。今回は大橋川から宍道湖にかけて、高塩分水塊がどのように流入するかについて 2000 年夏に観測を行った結果について報告する。大橋川から宍道湖へ流入する高塩分水塊は時に貧酸素化していて、それがとくに夏場に向かう時期に起こるコノシロの大量死やヤマトシジミの斃死と関係があるのではないかという指摘がなされていて、このような観測で実態を明らかにする

¹ 徳岡汽水環境研究所 (島根大学名誉教授) Tokuoka Laboratory for Studies of Brackish Water Environments (Professor Emeritus, Shimane University)

² 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 Japan Advanced Institute of Science and Technology in Hokuriku

³ 島根大学総合理工学部 Faculty of Science and Technology, Shimane University, Matsue 690-8504, JAPAN

⁴ 産業技術総合研究所海洋資源環境研究部門 Marine Geology Department, Geological Survey of Japan

⁵ 千本電機(株) Senbon Denki Co. Ltd.

⁶ クローバテック(株) Clovertech Inc.

⁷ OCC Corporation

⁸ (株)鶴見精機 The Tsurumi-Seiki Co. Ltd.



図1 大橋川から宍道湖にかけての連続観測の機器設置位置と湖底地形(地形は島根県土木部による宍道湖大橋改修工事測深図および1万分の1湖沼図宍道湖をもとに作成)

Fig. 1 Observation area for the behavior of high-saline water at R. Oohashigawa

ことが社会的にも求められていたことから、国土交通省(当時は建設省)出雲工事事務所の協力・支援を得て行ったものである。

謝辞: 国土交通省出雲工事事務所および調査に御協力をいただいた宍道湖漁業協同組合、大橋での水質連続観測データを参照させていただいた島根県内水面水産試験場にお礼申し上げます。

2. 観測場所と観測内容

宍道湖に近い大橋川の松江大橋から宍道湖の東部(嫁ヶ島の北方まで)について、大橋川を経て宍道湖に高塩分水塊がどのように流入するかを捉えることを目的に観測網を設置した。陸上基地局は宍道湖大橋の南側にある国土交通省の宍道湖流量観測所に置いた。これらについてまとめて図1に示す。

観測機器と観測期間は以下のとおりである。

・塩水楔音響プロファイリング装置(SC-3型)と水質計(YSI, 600 XL)による船上からの観測: 高塩分水塊が宍道湖に流入しているタイミングを捉えて2000年7月14, 23, 28日に行った。

・各種機器を川床に設置しての連続観測: 2000年7月11~28日に塩水楔音響動態観測システム(オンライン式SC-2型, オフライン式CL-3型), マルチCTセンサー温度塩分計測システム(MCTH-2型), 光ファイバ温度分布計測システム(DTS-80型)による連続観測で, 設置条件は以下のとおりである。

(1) 塩水楔音響動態観測システム(オンライン式SC-2型)

3地点, 測定時間間隔: 1分

設置条件(位置, 水深)及びデータ収集期間(表示は月.日.時)

- ・ON1 3.2m
- ・ON2 4.1m
- ・ON3 5.1m

(2) マルチCTセンサー温度塩分計測システム(MCTH-2型)

5地点, 測定時間間隔: 5分

- ・CT1 4.8m
- ・CT2 4.5m
- ・CT3 4.7m
- ・CT4 3.6m
- ・CT5 3.5m

(3) 光ファイバ温度分布計測システム (DTS-80 型)

F1～F15 までの延長距離 1500 m 間の湖底に光ファイバを敷設して、観測をおこなった。

なお、流向流速計はこれらに合わせて 1 台を川床に設置したが、転倒により、比較できる記録は得られなかった。

観測期間は宍道湖大橋の改修工事とこの付近を中心に行われる松江水郷祭を勘案して決められたものである。また、機器の設置場所は日常的に漁業（主にシジミ漁）が行われている水域であるために宍道湖漁業組合と現地で協議を行い、また潮の流出入についての現場の経験を参考にして機器の設置場所を設定することとした。とくに光ファイバについては宍道湖側に長距離にわたって設置することになるために、そのルートにそっては旗で標示することとして、漁業者に観測期間中は十分に注意してもらうこととして行った。なお、ダイバーにより機器の設置状況の確認を行った。

3. 音探機器と水質計による船上からの観測結果

高塩分水塊が宍道湖に流入しているタイミングに合わせて塩水楔音響プロファイリング装置 (SC-3 型) により船上からの観測を行い、その後引き返しながら、水質計を用いて音探記録を照合しながら適当な地点を選定して水深 1 m ごとに水質（温度・塩分・溶存酸素・電気伝導度・pH）を測定した。7 月 23 日と 28 日の結果をそれぞれ図 2, 図 3 に示す。

(1) 7 月 23 日 (図 2)

中海の大橋川への航路の深みになっている辺りから大橋川、宍道湖湖心までの観測を行った。この期間は強風が続き、高塩分層が大橋川に大規模に流入していた時であり、貴重な記録が得られた。中海から大橋川の大橋あたりまでは全体が一様であり、その先でやや混合が起り、宍道湖に入った赤ブイ 12 の地形的高まりの辺りからこの一様な水塊が宍道湖の湖底平原に向けて薄く入り込んでいる状態が観察される。この層は湖心の東（地点 20, 丸数字 2 の左）まで続くが、その先では無くなり、全体が一様となる。上記の結果は同じく図 2 に示した 7 地点での水質測定の結果と調和的である。中海と大橋川では全体が 26 PSU 程度であり、宍道湖の赤ブイ 10 あたりから下位の薄い中塩分層と上位の低塩分層に分かれ、さらに宍道湖湖心では一様な低塩分層からなっていて、上記の記録を裏付けている。

(2) 7 月 28 日 (図 3)

上記の大規模な高塩分層の宍道湖への流入が終わり、通常の状態に戻った時であり、機器撤収日に観測を行った。大橋川では表層部とその下位との間でやや成層していて、宍道湖の赤ブイ 12 あたりから西では宍道湖の底そって湖心にまで入り込む水塊が認められる。湖底近くでは音響的に 2 つの水塊に分かれているのが観察される。上記の結果は同じく図 3 に示した 5 地点での水質測定の結果と調和的である。

4. 水底に設置した各種機器による連続観測

7 月 11 日から 28 日（マルチ CT センサの 7 月 18 日 11.40～19 日 15.00 までの欠測を除く）にかけての観測結果について以下に述べる。

(1) 塩水楔音響動態観測システム（オンライン式 SC-2 型）による観測

図 1 に示す 3 地点に機器を設置した。ON 1 がケーブル長 400 m であるので、もっとも離れた宍道湖側に、あとの 2 つ（ケーブル長 200 m）を下流側に設置している。ON 2（宍道湖大橋西、水深 4.1 m）の記録を図 4 に示す。図中で水面近くから水中に向かう濃いノイズが各所に見られるが、これらは風によって表層近くでの攪拌が音響的に捉えられているものである。湖底から立ち上がり、時間の経過とともに変化する濃い反射面が水中の大きな密度差の部分での反射であり、すなわち塩分の変化するところで、ON 2 地点を通過し、また後退する高塩分水塊の動きを捉えている。7 月 21 日午後から 7 月 25 日にかけては高塩分水塊がこの地点を通過して宍道湖側に流入が続いていることがわかる。ON 1 および ON 3 の記録はここに示していないが、上記とほぼ同様の記録が得られた。

(2) 塩水楔音響動態観測システム（オフライン式 CL-3 型）による観測

オフライン式 CL-3 型はバッテリー駆動でオンライン式とことなって設置場所をフリーとした機器である。今回は新たに温度センサについても組み込んでいる。2 器をそれぞれ宍道湖側の航路中（OFF 3）と航路より南の湖底（OFF 2）に設置した。深度はともに 3.3 m である。7 月 11 日～18 日の OFF 3 の記録を図 5 に示す。オンライン式と同様に高塩分水塊の流出入が捉えられている。水面近くでの垂直方向の反射は同様に風によるノイズである。水温を同時

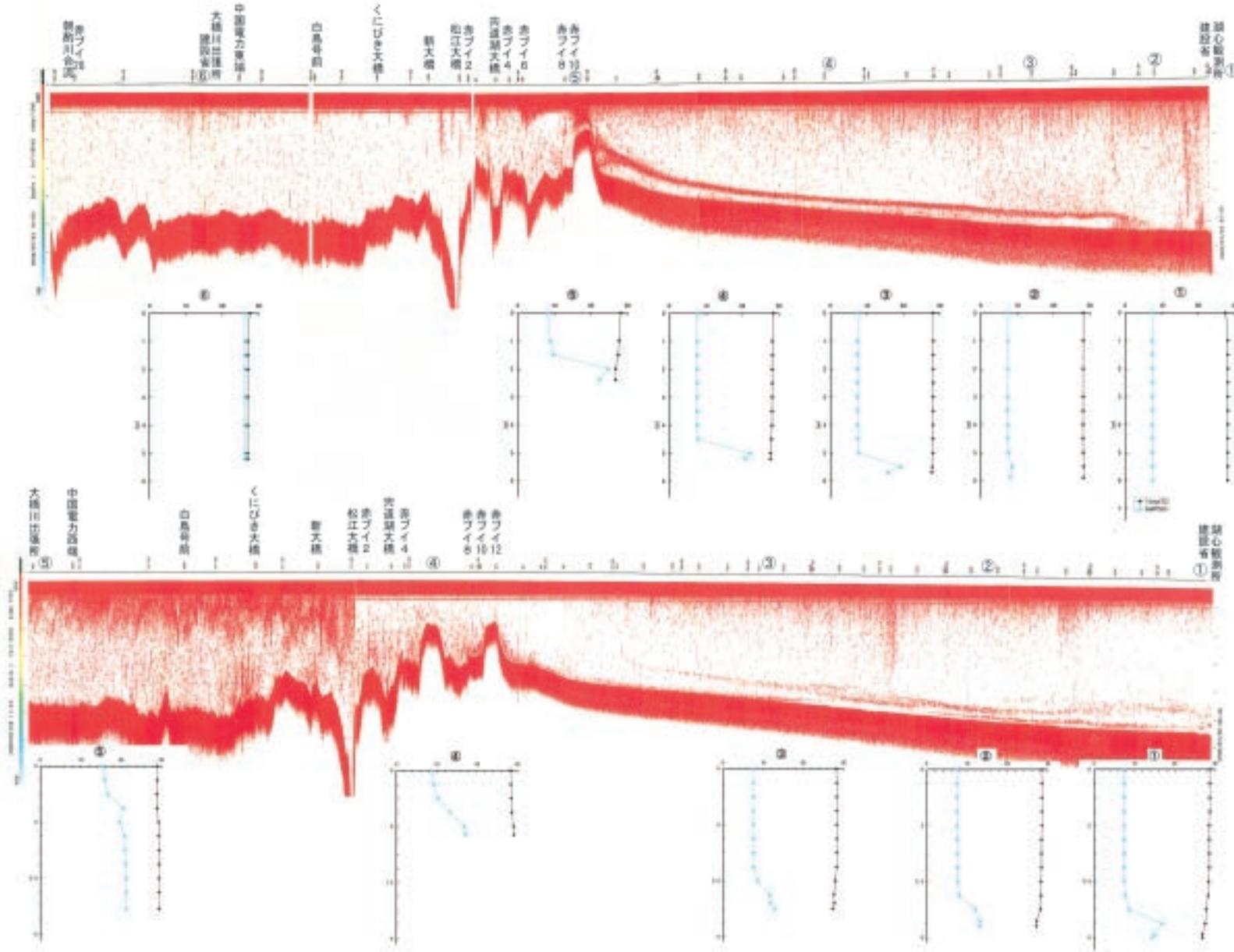


図2 (上図) SC-3型による大橋川～穴道湖高塩分水塊の動態観測 (2000.7.23). グラフは地点(丸数字)の水深(m)ごとの温度(°C)と塩分(PSU)分布を示す.

Fig. 2 A record of spatial distribution of high-saline water between Oohashi River and Lake Shinji by acoustic reflection profiling system (Model SC-3, July 23, 2000)

図3 (下図) SC-3型による大橋川～穴道湖高塩分水塊の動態観測 (2000.7.28). グラフは地点(丸数字)の水深(m)ごとの温度(°C)と塩分(PSU)分布を示す.

Fig. 3 A record of spatial distribution of high-saline water between Oohashi River and Lake Shinji by acoustic reflection profiling system (Model SC-3, July 28, 2000)

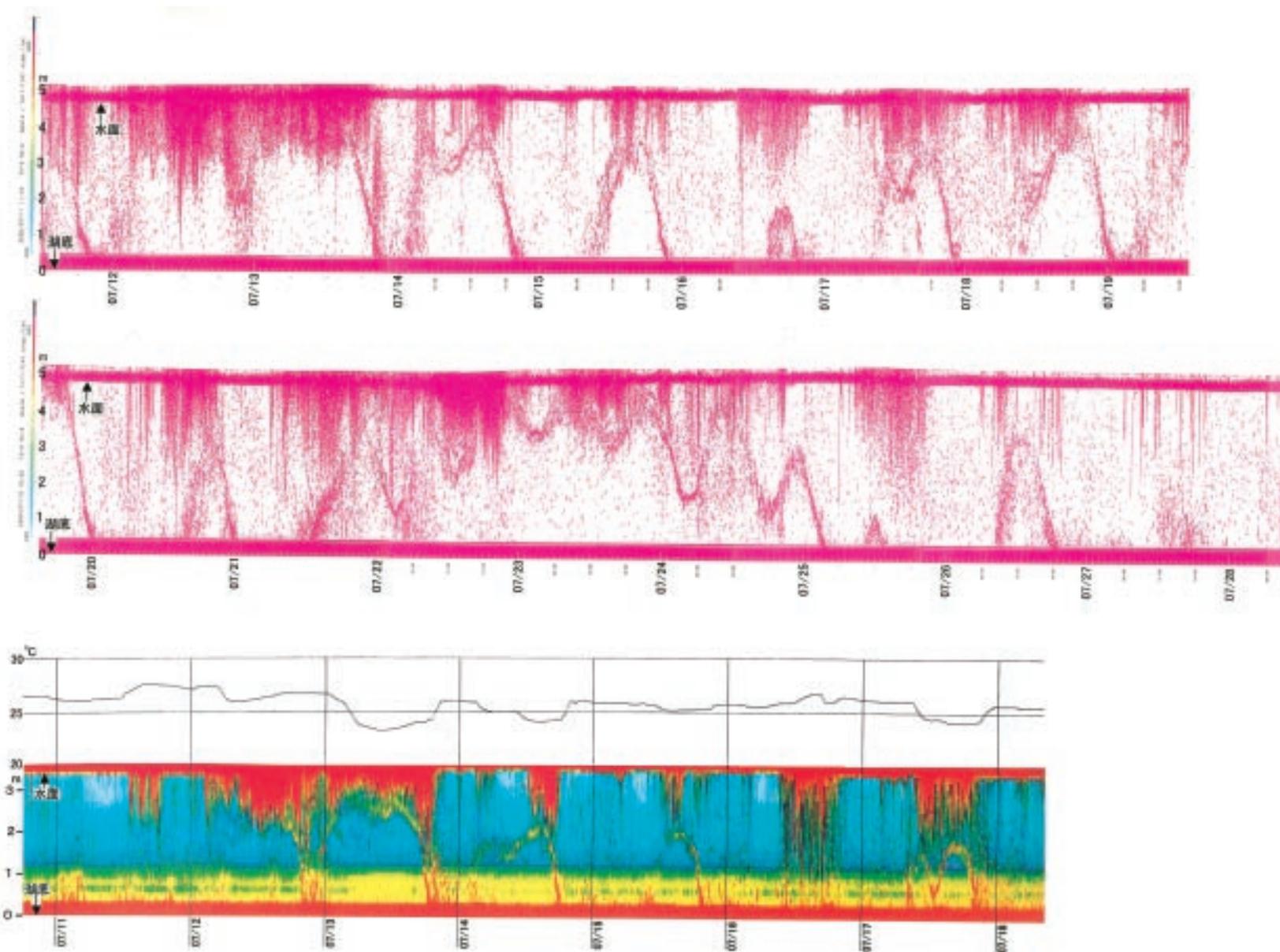


図4 (上図) 塩水楔音響動態観測システム (オンライン式 SC-2 型) による高塩分水塊の進入・後退の記録 (2000年7月11日～28日, ON 2)

Fig. 4 A record of the behavior of high-saline water mass at ON 2 (Lake Shinji) by SC-2 (July 11～28)

図5 (下図) 塩水楔音響動態観測システム (オフライン式 CL-3 型) による高塩分水塊の進入・後退の記録 (2000年7月11日～18日, OFF 3)

Fig. 5 A record of the behavior of high-saline water mass at OFF 3 (Lake Shinji) by CL-3 (July 11～18)

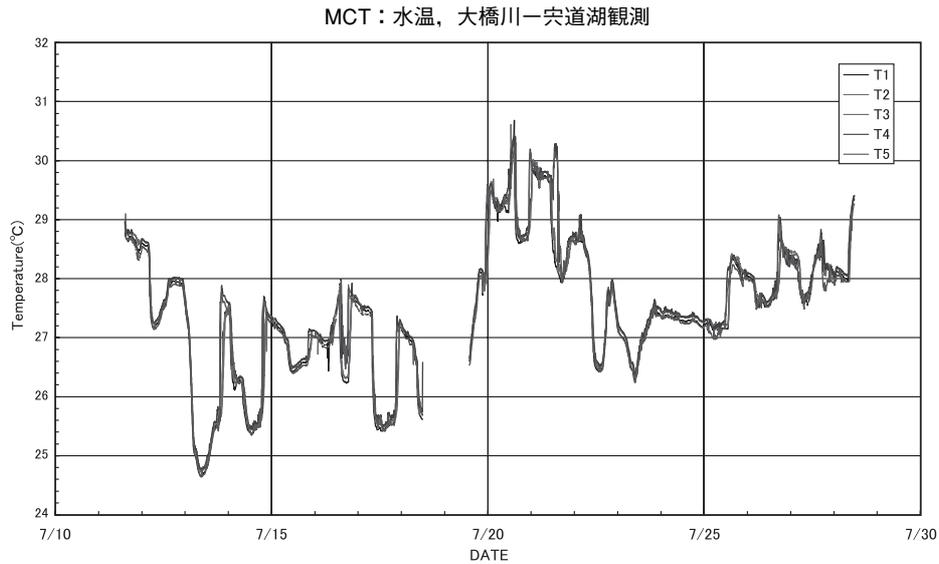


図 6-1 マルチ CT センサによる川床 5 地点での温度連続観測記録 (2000 年 7 月 11 日~7 月 28 日)

Fig. 6-1 Time series data of temperature at the bottom 5 points of R. Oohashi by Multi-CT sensor (July 11~28, 2000)

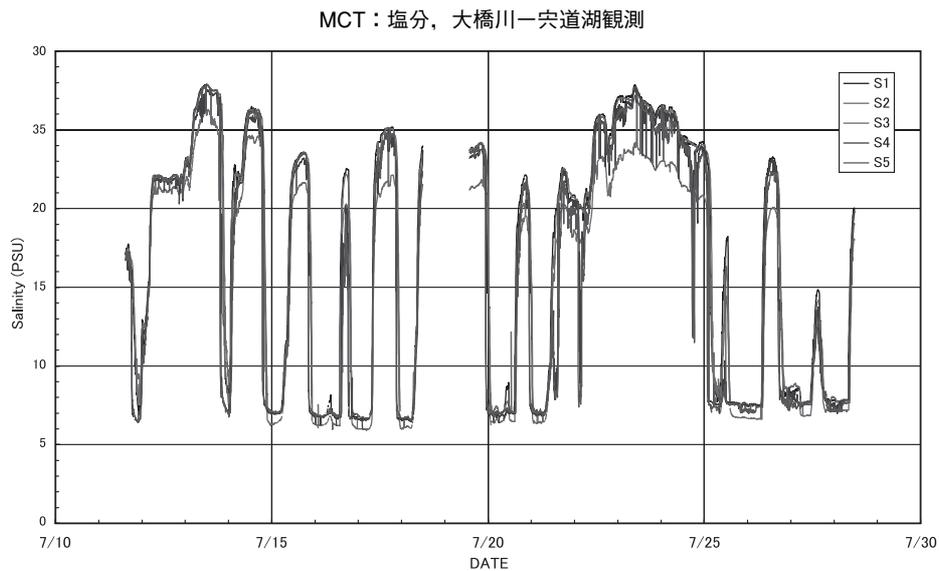


図 6-2 マルチ CT センサによる川床 5 地点での塩分連続観測記録 (2000 年 7 月 11 日~7 月 28 日)

Fig. 6-2 Time series data of salinity at the bottom 5 points of R. Oohashi by Multi-CT sensor (July 11~28, 2000)

に測定していることから高塩分水塊がその上位の低塩分水塊よりも温度が低いことがわかる。

(3) マルチ CT センサー温度塩分計測システム (MCTH-2 型) による観測

本機は温度と電気伝導度 (塩分に換算) を連続して多点で測定する目的で開発されたものである。700

m 長のケーブルで接続されたセンサ 5 つ (CT 1, CT 2, CT 3, CT 4, CT 5) を図 1 のように設置して観測を行った。各センサ間はそれぞれ 100 m である。CT 4 と CT 5 とは航路中ではあるがやや浅い所に設置された。全体の温度と塩分の記録を図 6-1, 6-2 に、宍道湖に高塩分水塊が連続的に流入した 2000 年 7 月 21 日~23 日の記録を図 7-1, 7-2 に示す。こ

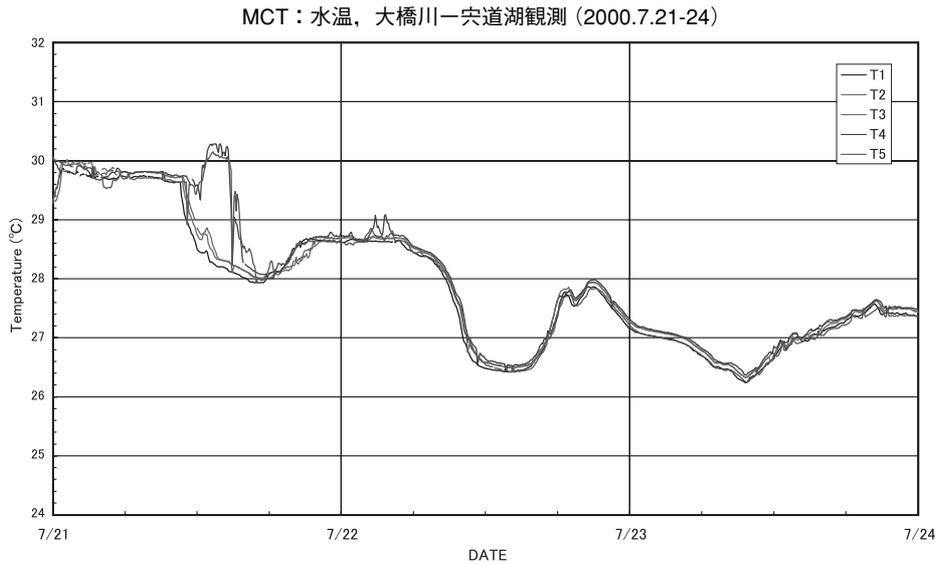


図 7-1 マルチ CT センサによる川床 5 地点での温度連続観測記録（2000 年 7 月 21 日～23 日）

Fig. 7-1 Time series data of temperature at the bottom 5 points of R. Oohashi by Multi-CT sensor (July 21~23, 2000)

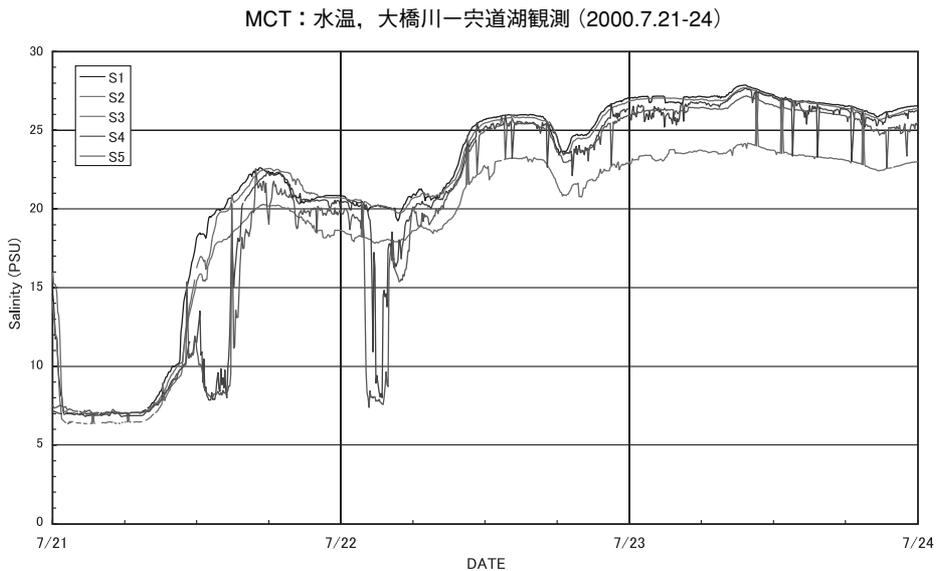


図 7-2 マルチ CT センサによる川床 5 地点での塩分連続観測記録（2000 年 7 月 21 日～23 日）

Fig. 7-1 Time series data of salinity at the bottom 5 points of R. Oohashi by Multi-CT sensor (July 21~23, 2000)

これらの図で明らかなように、温度と塩分の変化が完全に対応していることから、温度・塩分のことなる水塊が動いていることがわかる。ただし、水塊ごとの塩分の違いは大きいですが、温度の違いはそれほど大きくはない。各センサともほぼ同調して変化していることから、水塊の動きが比較的速いことがわかる。各センサ間はそれぞれ 100 m であるので、原

データから、例えば塩分が急激に変化する時間を比較すれば、水塊の移動速度を計算することができる。

- (4) 光ファイバ温度分布計測システム (DTS-80 型) による観測
1500 m の光ファイバケーブルを図 1 のように設

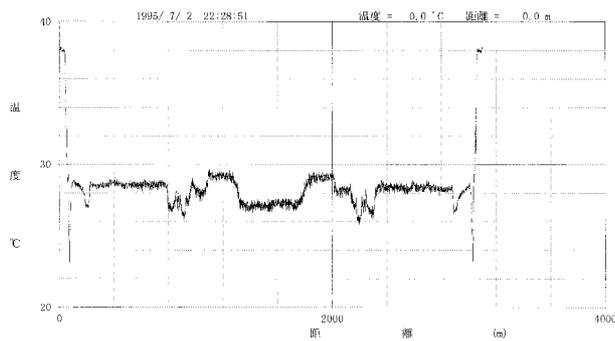


図8 光ファイバ温度分布計測システム (DTS-80 型) による測線 1500 m 間の温度分布測定例 (2000 年 7 月 2 日 22:28:51)

Fig. 8 A case of temperature distribution obtained by Optical fiber sensor DTS-80 along 1500 m optical fiber cable (time, 22:28:51, July 2, 2000)

置して (宍道湖大橋東から宍道湖の湖底平原に移る水深 3 m を越えた地点まで), 各 1 m ごとの温度分布を計測した. 今回は 5 分ごとに観測を行った. 観測記録の 1 例を図 8 に示す. 光ケーブルはループになっているので, 1500 m のところで折り返し, 測線上では各点で 2 度計測していることになる. 今回の観測ではできるだけ長い距離を確保するために種類の異なる 2 本のケーブル (1000 m および 500 m) が使用された. 図 1 でわかるように観測基点から約 1000 m の距離の辺りが宍道湖の地形の急変点にあたっていて, ケーブルの継ぎ目がほぼその位置にきている. ケーブルの継ぎ目では機械的な理由によって温度変化が生じるので, 上記のことと合わせて, 温度変化が図では強調して現れることがある. しかし, 光ファイバの基点に近い位置と終点には小型温度計 (WaDaR) を設置していて, これらにより光ファイバの温度補正を行っているので, データの信頼性については問題はない. WaDaR による温度データを図 9-1, 9-2 に示す.

(2) のマルチ CT センサで示したように川床での温度の変化は塩分の変化と一致していることから, 温度の測定によって異なる水塊の動きを知ることができる. 観測基点からケーブル長 100 m (宍道湖大橋東の航路部) の位置からケーブル長 1500 m までの 7 月 11 日から 28 日までの 1000 地点の 5 分ごとの温度データを 1°C ごとに区分してデータ処理した結果を図 10 に示す. 縦軸が距離, 横軸が時間である. この温度分布のパターンから温度 (および塩分) の異なる水塊が早い速度で宍道湖に流入することがわかる. 一方, 宍道湖から流出する場合については

温度変化はそれほど規則的ではない.

5. 考 察

建設省による宍道湖湖心観測所における観測データおよび島根県内水面水試による大橋での観測データを参照して, 以下に考察する.

1) 高塩分層動態観測 (集中観測) を 7 月 14, 23, 28 日の 3 回行った. 内水面水試の大橋の水質情報と本調査の SC-2 観測システムとマルチ CT センサによるリアルタイムのデータを参考にして舟を走らせることとした. しかし, 高塩分層が宍道湖へ流入するのはとくに西風が強いときであるので, 実際に可能であったのは上記の 3 回で, SC-3 による調査で大橋川から宍道湖にかけての水塊の成層構造を全体として可視化して捉えることができた. とくに 7 月 23 日 (図 2) と 28 日 (図 3) の記録を比較すると, 前者では高塩分水塊が宍道湖に大規模に流入していた時であり, 後者はそれが終わって平常の状態に戻った時である. 前者では宍道湖の底にそって流入した高塩分層が湖心の手前まで到達している. 後者ではそれが湖心にまで達したことがわかるが, 同時に底層付近では 2 つの水塊に分かれていて, 高塩分水塊が入りこんだ後の複雑な動きがあることがわかる. 宍道湖での SC-3 による観測は初めて行われたことであり, この方法で成層構造を捉えることができることが明らかになった.

2) 塩水楔音響動態観測システム (オンライン式 SC-2 型) は図 1 に示すように 3 点に設置され, 大橋川を経て宍道湖に流入する高塩分水塊の時間的空間的な動態が明らかにされた. これらの記録をみると大橋川での高塩分水塊の動きは弱いまあいには弱混合の塩水楔型になるが, 一般的には弱混合から緩混合型である. また, 1) で明らかのように, 宍道湖の赤ブイ 10, 12 を越えて湖底平原に入るところでは宍道湖側からの低塩分水塊の下に潜り込む形となる.

3) マルチ CT センサ温度塩分計測システム (MCTH-2 型) による観測では 700 m 長のケーブルで接続されたセンサ 5 つにより, 川床を移動する水塊の温度と塩分が測定される. 図 6-1, 2 では各センサともほぼ同調して変化していることから, 水塊の動きが比較的速いことがわかる.

4) 光ファイバ温度分布計測システム (DTS-80 型) による観測では 1500 m の光ファイバケーブルを用いて, 各 1 m ごとの温度分布の観測を行った. マルチ CT センサによる観測で明らかのように川床での

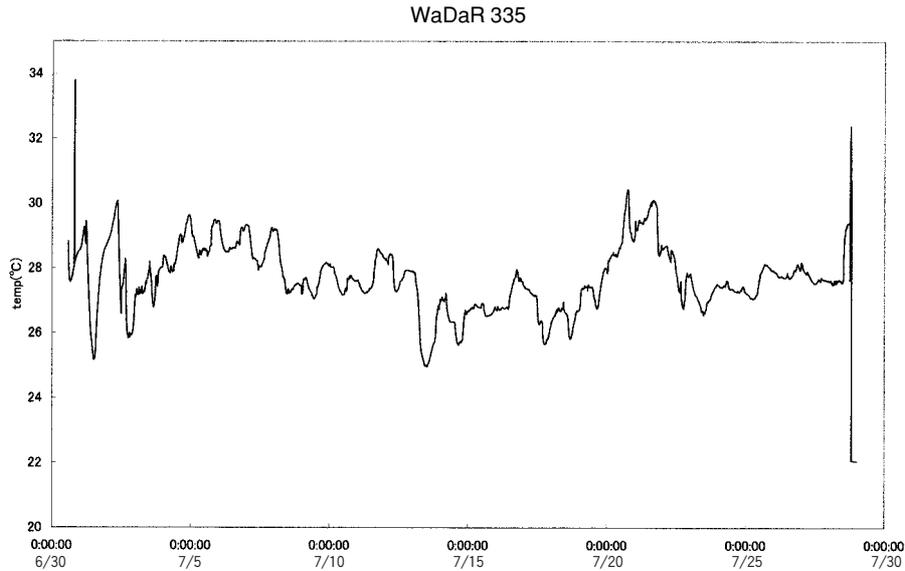


図 9-1 小型水温計 (WaDaR) による光ファイバ 100 m 地点の温度記録 (2000年7月11日~7月28日)

Fig. 9-1 Time series data of temperature at the 100 m point of Optical fiber sensor (July 11~28, 2000)

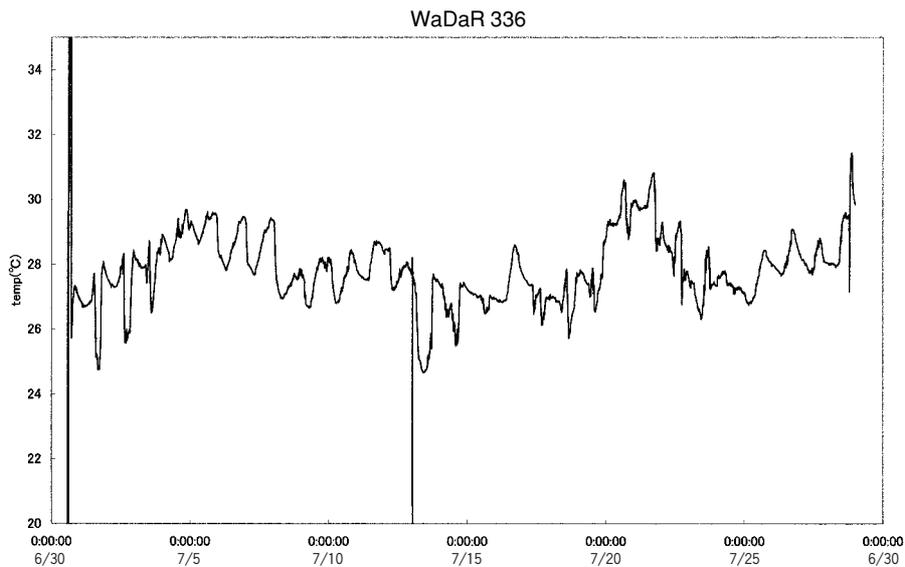


図 9-2 小型水温計 (WaDaR) による光ファイバ 1500 m 地点の温度記録 (2000年7月11日~7月28日)

Fig. 9-2 Time series data of temperature at the 1500 m point of Optical fiber sensor (July 11~28, 2000)

温度の変化は塩分の変化と一致することから、温度の測定によって異なる水塊の動きを知ることができる。全体としてみると、温度の降下はまず下流側で起こり、急速に上流側に及ぶこと、一方、温度の上昇はこの逆の方向で起こるので、このことは高塩分水塊が上流に向かって侵入し、また降下することを示していることが分かる。1400 m 間の各 1 m ごと、5 分ごとの温度データを 1°C ごとに区分してデータ

処理した結果を示した図 10 では、温度（および塩分）の異なる水塊が速い速度で宍道湖に流入し、一方、宍道湖から流出する場合には温度変化はそれほど規則的ではないことから流下する低塩分水塊との間で混合が起こっていることが推定される。このように光ファイバの利用によって、水塊の時間的空間的な動きを捉えることができる。

5) 大橋川から宍道湖への高塩分層の流入は航路の

表 1 オンライン音探 (ON 2-ON 3 間) およびマルチ CT センサ (CT 5-CT 1 間) での高塩分水塊の移動速度の算出

Table 1 Travel speeds of high saline watermass calculated by SC 2 (between ON 2 and ON 3) and Multi CT sensor (between CT 5 and CT 1)

case#	Flow	Date	point 1	Time 1	point 2	Time 2	distance (m)	velocity (m/h)
1	up-stream	2000/7/14	ON 2	1:30	ON 3	1:00	190	-380
			CT 5	1:25	CT 1	0:30	392	-428
2	down-stream	2000/7/14	ON 2	20:20	ON 3	21:10	190	228
			CT 5	19:05	CT 1	21:15	392	181
3	up-stream	2000/7/15	ON 2	9:40	ON 3	9:00	190	-285
			CT 5	6:35	CT 1	5:20	392	-314
4	down-stream	2000/7/15	ON 2	21:40	ON 3	22:20	190	285
			CT 5	20:55	CT 1	22:40	392	224
5	up-stream	2000/7/16	ON 2	14:20	ON 3	13:50	190	-380
			CT 5	14:35	CT 1	13:40	392	-428
6	down-stream	2000/7/16	ON 2	19:50	ON 3	20:40	190	228
			CT 5	18:50	CT 1	20:40	392	214

深みに沿って進むことが確かめられ、また宍道湖においては赤ブイ 10 から 12 にかけての地形の高まり (水深 2 m 弱) が大きな役割を果たしていることが明らかになった。大橋川からこの位置まで流入してきた水塊は、ここから先では湖底地形にそって言うように侵入している。

6) 宍道湖の湖底平原に入った高塩分水塊はそれまでの早い速度から減じて緩やかに湖底に沿って侵入していくことが SC-2 による観測で明らかになった。

7) 図 1 に示すように、松江大橋から宍道湖にかけての湖底地形をみると、嫁が島の北東の所までは航路維持のための浚渫が行われていて、ほぼ 4 m の深みが続いているが、その先の宍道湖の湖底平原に緩やかに移行する間には水深 2 m の高まりが存在する。大橋川から宍道湖にかけての高塩分水塊の流入は基本的にはこの深みにそって起こっていて、各種の観測機器はそれにそって設置された。観測期間中で高塩分水塊が移動した典型的な例である 2000 年 7 月 14, 15, 16 日の流入と流出についてオンライン音探 (ON 2~ON 3 間) とマルチ CT センサ (CT 2~CT 5 間) での速度を計算すると、表 1 のようになる。流入の速度はその時々潮位・風・気圧によってさまざまに変化するが、これらの値はおおよそその高塩分水塊の動く速度を示していると云ってよい。一方、光ファイバのデータ (図 10) をみると、上記の数値の得られた松江大橋から宍道湖大橋に至る範囲でみると、1°C ごとに示した色のパターンから流入速度を計算することができるが、それより宍道湖側では規則的な変化を示さないことから、水塊が複雑な動きをしていることがわかる。とくに嫁が島北東の地形の高まりの所では水塊の動きが断たれているものと判断される。

8) 本調査によって大橋川から宍道湖に流入しようとする高塩分水塊は嫁が島の北東に位置する地形的な高まりによってしばしば阻止され、容易には宍道湖の湖底平原にまで流れ込まないことが推測されるに至った。宍道湖にまで貧酸素化した水塊が入り込んだ場合にはそれが容易には解消されず、水環境に大きな悪影響を与える可能性があることから、このことは重要な意味をもっている。嫁ヶ島は新第三紀の松江層の玄武岩からなっていて、その対岸の松江温泉付近にも同じ時代の玄武岩が分布しているので、上記の高まりも一連の玄武岩からなることが推定される。

引用文献

- 徳岡隆夫・三瓶良和・亀井健史・西村清和・鈴木重教・松田滋夫・久保田俊輔・須崎 聡・上野博芳 (1999) 塩分躍層 (塩水楔) 動態観測システムの開発 - 汽水域の貧酸素水塊問題への貢献 - . LAGUNA (汽水域研究, 島根大学汽水域研究センター), 6号, 179-187.
- 徳岡隆夫・三瓶良和・西村清和・須崎聡・松田滋夫・久保田俊輔・鈴木重教・上野博芳 (2001 a) 塩水楔観測システムの開発 (テクノオーシャン 2000 ポスター展示の紹介). LAGUNA (汽水域研究, 島根大学汽水域研究センター), 8号, 101-110.
- 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 b) 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, 島根大学汽水域研究センター), 8号, 79-90.

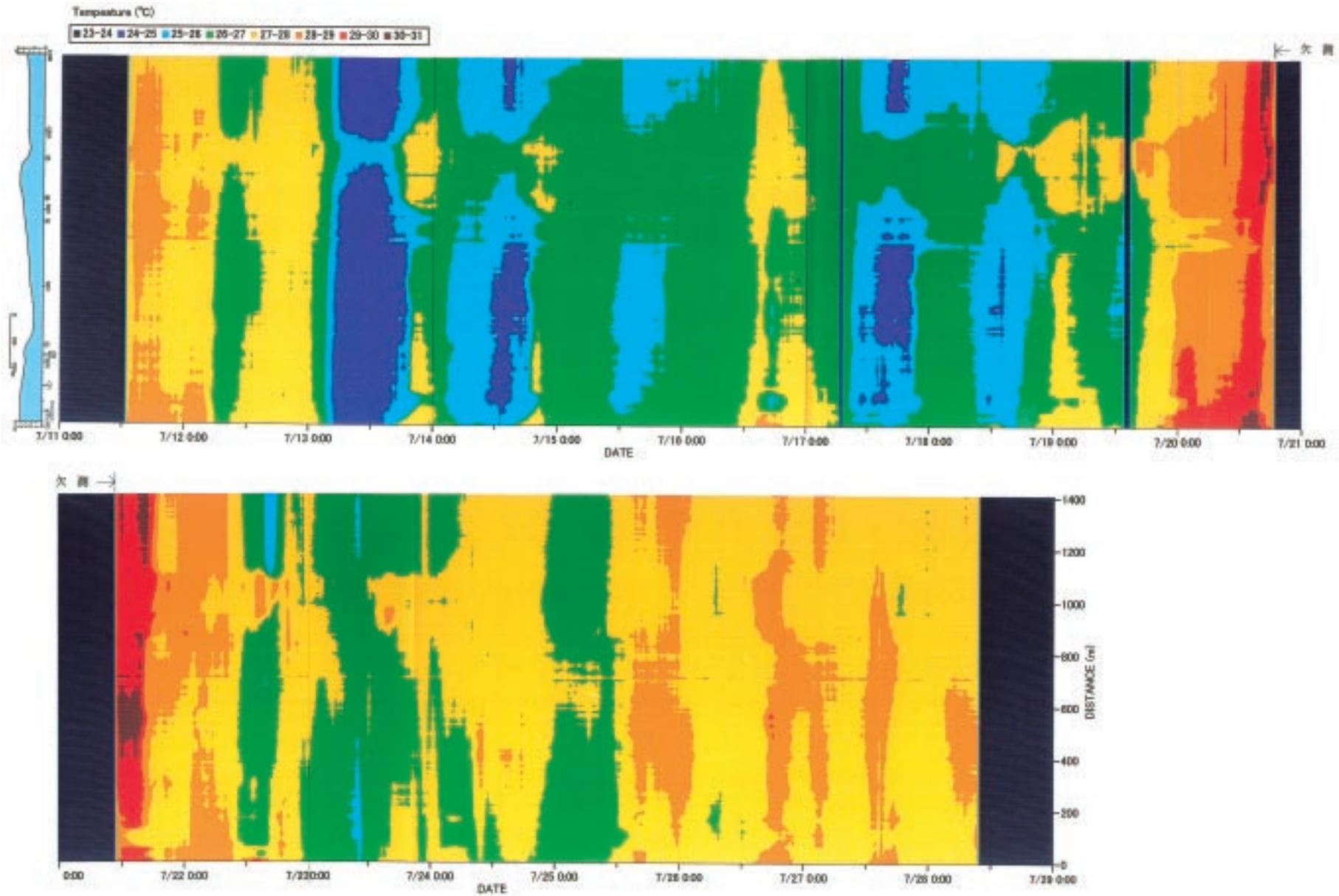


図 10 光ファイバ温度分布計測システム (DTS-80 型) 記録をデータ処理して得られた温度分布と時間変化のカラーマップ (ケーブル長 100 m ~ 1500 m 間). 図の下側が大橋川 (東) 側, 上側が宍道湖 (西) 側で, 川床の地形を上図の左, ケーブル長を下図の右に示す.

Fig. 10 Color mapping of time series data of temperature at the bottom of R. Oohashi by Optical fiber sensor DTS-80 (July 11 ~ 28, 2000)

中海北東部水域の魚類相 — 森山堤防で隔てられた 2 つの水域の比較 —

越川敏樹¹

Fish fauna of northeastern part of Lake Nakaumi —a comparison of two adjacent water bodies separated by Moriyama dyke—

Toshiki Koshikawa¹

Abstract: Moriyama dyke, situated at the northern part of Lake Nakaumi, generates two different large water bodies, one being connected directly with the Sea of Japan, and the other being disconnected. The author compared the fish fauna collected with the set nets settled at both connected (Shimo-ubeo) and disconnected region (Honjou area), and found that fish fauna differed significantly between them. Some species such as swimming crabs, squids and octopuses seldom or never occurred in the catches of the set nets in Honjou area, whereas they frequently appeared in Shimo-ubeo region. Such phenomenon suggests that there occurred a drastic change in fish fauna in Honjou area.

Key words: Moriyama dyke, current, sea fish

はじめに

中海北東部は島根半島と大根島の間に位置する水域であり、現在は東部の森山堤防と西部の大海崎堤防によって囲まれている。かつては境水道を通った外海水が直接流入する水域であったが、昭和 53 年に森山堤防が完成し、この水域は大海崎堤防に残されている 2 箇所の開削部分を通じてのみ中海を経由した水が交換されるようになっており、それに伴って魚介類の出入りがある。

このような地形の改造に伴う水流の変化は、魚介類の生息に大きな変化をもたらしている。特に回遊性の魚介類が大多数を占める中海において、半閉鎖的となった本水域においては生息状況の激変がみられた。そのことは、多くの漁業関係者によって感覚的に指摘されていることであるが、今回、その実態

を量的に把握することができたのでここに報告することとした。

調査方法

魚介類の把握には、本水域に設置されている小型定置網（以下「ます網」とする）の漁獲物の出荷内容に基づいて行った。ます網によって漁獲された魚介類は、小型のもので量的にまとまらないものを除いて、大部分は本庄町の鮮魚商に引き取られるので、取引内容は漁獲内容をほぼ反映したものと考えられる。

今回比較の対象として選定したます網は、森山堤防によって内と外に隔てられた水域にそれぞれ設置されたものである。それらは、堤防の外側（下宇部尾）と堤防の内側（本庄工区内）である。これらのま

¹ 島根野生生物研究会 Shimane Wildlife Society

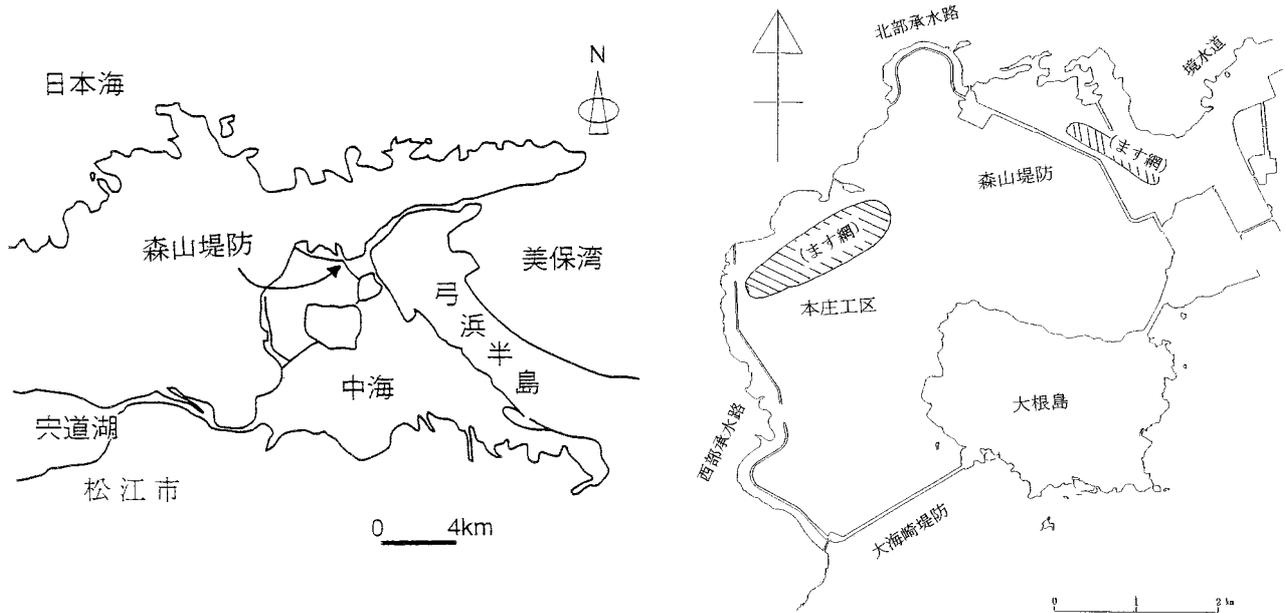


図1 森山堤防と定置網(ます網)設置場所.

す網は、専門の漁師が操業するもので、特別な都合のない限り毎日網揚げが行われ、鮮魚商に出荷されている。鮮魚商では、その日の水揚げを種類ごとに数量と金額が伝票に記される。ここでは、種類と量を抜き出して魚介類の出現状況を整理した。

結果と考察

今回は、2001年3月26日から8月25日までの5ヶ月間の取引内容から魚介類の違いを比較した(表1)。この中には漁師の都合によって連続して漁を休んだ期間があるが、内容の傾向を捉える上での支障はないものと思われる。以下、この結果をもとに考察を行う。

異なる二水域における魚種構成

森山堤防を隔てた2つの水域における上の期間に、漁獲し出荷された魚介類は表1に示されている。堤防内水域の本庄工区(以下、「堤防内」)では、魚類15種であったのに対し、堤防外水域(以下、「堤防外」)では、魚類27種、甲殻類5種、軟体類8種が漁獲されて取引された。

この2つの水域における漁獲物で共通して量的に多い種は、コノシロ・サツパ・スズキの3種であった。これら3種は、厳寒期を除く中海・宍道湖全域における優占種である。やや多い種としてアカエイが両水域で見られた。

堤防内外の水域で片方に多い種として、堤防内ではマハゼ・ビリンゴ・クロソイの3種で、堤防外ではガザミ(タイワンガザミ)であった。やや多い種として、堤防内でウロハゼ・マゴチ・イシガレイ、堤防外でマルアジ・マアジ・ヒイラギ・ウミタナゴ・クロソイ・ヨシエビ・アユ(幼魚)・イカ類(ジンドウイカ)・イイダコなどがあつた。

また、1回の漁獲量は僅少であっても、出現頻度の高い魚種は堤防外の方に多く、マアナゴ・シマイサキ・キス・ヒラメ・シャコ・コウイカ・マダコなどが見られた。

以上から、堤防内は共通種に加えて、ビリンゴ・クロソイ・イシガレイ・ハゼ類など、典型的な内湾性の強い魚種で占められている。それに対して、堤防外は、共通種に量的には少ないが多くの海洋性の魚介類が混じってくる。特に、タコ類やイカ類が多く出現する状況から、美保湾および境水道の環境の延長にあるといえる。

かつてはひと続きであったこれらの2つの水域は、魚類生態の面から見ると、現在は森山堤防によって、閉鎖性の強い内湾的と開放された海洋的な2つの異なった水環境が形成されている。

種ごとの出現状況

2つの水域の共通種と堤防外でのみ漁獲された魚種のそれぞれの出現状況を表2に示す。以下、主な種ごとの出現状況から、生態を推察する。

表1 森山堤防内外の魚類の漁獲取引情況(2001年3月26日~8月25日).

●, 特に多い; ◎, やや多い; ○, 少ない.

学名	標準和名	対照水域		地名
		本庄工区	森山堤防外	
<i>Dasyatis akajei</i>	アカエイ	○	○	あかえ
<i>Konosirus punctatus</i>	コノシロ	●	●	このしろ
<i>Sardinella zunasi</i>	サツパ	●	●	かわこ・まあかれ
<i>Oncorhynchus masou</i>	サクラマス		○	ます
<i>Plecoglossus altivelis</i>	アユ	○	◎	あゆ
<i>Astroconger myriaster</i>	マアナゴ		○	はも
<i>Mugil cephalus</i>	マボラ		○	ぼら
<i>Decapterus maruadsi</i>	マルアジ		◎	まるあじ
<i>Trachurus japonicus</i>	マアジ		◎	あじ
<i>Leiognathus nuchalis</i>	ヒイラギ		◎	えのは
<i>Lateolabrax japonicus</i>	スズキ	●	●	すずき・ちゅうはん・せいご
<i>Lobotes surinamensis</i>	マツダイ		○	まつだい
<i>Rhyncopelates oxyrhynchus</i>	シマイサキ		○	ふえふき
<i>Mylio macrocephalus</i>	クロダイ		○	ちぬ
<i>Rhabdosargus sarba</i>	ヘダイ		○	へいずだい
<i>Sillago japonica</i>	キス		○	きす
<i>Ditrema temmincki</i>	ウミタナゴ		◎	のい
<i>Halichoeres poeciloterus</i>	キュウセン		○	べら
<i>Enedrias nebulosus</i>	ギンボ		○	なきり
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	マハゼ	●	○	ごず・はぜ
<i>Glossogobius giurus</i>	ウロハゼ	◎		あなごず・あな
<i>Chaenogobius castaneus</i>	ビリングゴ	●		ごまめ
<i>Toridentiger bif/obu</i>	シマハゼ・チチブ	○		ほっか
<i>Sebastes inermis</i>	メバル		○	きんめばる
<i>Sebastes schlegeli</i>	クロソイ	●	◎	めばる
<i>Platycephalus indicus</i>	マゴチ	◎	○	こち
<i>Paralichthys olivaceus</i>	ヒラメ	○	○	ひらめ
<i>Kareius yokohamae</i>	イシガレイ	◎	○	いしがれ
<i>Fugu rubripes</i>	トラフグ	○	○	ふぐ
<i>Takifugu pardalis</i>	ヒガンフグ		○	なめふぐ
<i>Tkifugu niphobles</i>	クサフグ	○		もばふぐ
甲殻類				
<i>Penaeus japonicus</i>	クルマエビ		○	くるまえび
<i>Metapenaeus monoceros</i>	ヨシエビ		◎	えび・もろげ
<i>Oratosquilla oratoria</i>	シャコ		○	しゃこ
<i>Portunus pelagicus</i>	ガザミ類		●	かに
<i>Chrybdis japonica</i>	イシガニ		○	いしがに
軟体類				
	コウイカ		○	こういか
	アオリイカ		○	あおりいか
	イカ類A		○	しりいか
	イカ類B(ジンドウイカ)		◎	しまめいか
	マダコ		○	たこ
	イイダコ		◎	いいだこ
	ミズダコ		○	みずだこ
	タコ類		○	(種不明)

表2 森山堤防内外の種別の漁獲内容。表中の数字は漁獲の回数を示し、重量(kg)は目安の重量を示す。

<両水域で漁獲された種>

種	コノシロ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	1	2	0		0	0	2	
4月	16	8	0		0	0	0	
5月	6	3	0		0	7	4	
6月	0	0	0		0	0	4	
7月	3	0	0		0	0	4	
8月	0	1	2		0	0	0	

種	スズキ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	4	0		1	3	0	
4月	4	16	0		0	8	0	
5月	0	13	2		1	9	2	
6月	0	0	0		0	0	1	
7月	0	0	3		5	3	2	
8月	1	1	1		1	2	2	

種	サツパ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	
4月	0	2	1		1	1	1	
5月	0	12	0		0	0	1	
6月	0	10	1		0	0	0	
7月	7	4	11		0	2	3	
8月	6	8	0		0	5	3	

種	クロソイ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		1	0	1	0
4月	0	10	1		0	0	1	1
5月	14	7	0		0	0	1	0
6月	0	3	0		2	0	0	0
7月	0	0	2		0	0	0	0
8月	0	2	4		0	1	0	0

種	イシガレイ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	0
4月	0	0	0		18	0	0	3
5月	0	0	0		6	0	0	3
6月	0	0	0		3	0	2	1
7月	0	0	2		1	0	0	0
8月	0	1	3		0	0	0	0

種	アカエイ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	0
4月	0	1	0		1	0	0	0
5月	0	3	0		2	0	2	2
6月	0	3	1		0	0	1	2
7月	0	0	0		0	0	1	0
8月	0	2	1		1	0	2	4

<堤防外でのみ漁獲された魚種>

種	ヨシエビ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	0
4月	0	0	0		0	0	0	0
5月	0	0	0		0	0	0	0
6月	0	0	0		0	0	0	0
7月	0	0	0		0	0	3	2
8月	0	0	0		2	1	0	0

種	ガザミ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	0
4月	0	0	0		0	0	0	0
5月	0	0	0		0	0	1	3
6月	0	0	0		2	12	4	1
7月	0	0	0		4	17	6	0
8月	0	0	0		0	8	6	0

種	ヒイラギ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	0
4月	0	0	0		0	0	0	2
5月	0	0	0		1	4	7	1
6月	0	0	0		0	0	0	0
7月	0	0	0		0	0	0	1
8月	0	0	0		0	0	0	0

種	ウミタナゴ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	4
4月	0	0	0		0	2	1	2
5月	0	0	0		0	0	0	5
6月	0	0	0		0	0	0	4
7月	0	0	0		0	0	0	4
8月	0	0	0		0	0	0	1

種	マアジ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	0
4月	0	0	0		0	0	0	0
5月	0	0	0		0	0	0	0
6月	0	0	0		0	0	1	0
7月	0	0	0		2	1	12	1
8月	0	0	0		1	4	4	0

種	マルアジ							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	0
4月	0	0	0		0	0	0	0
5月	0	0	0		0	1	0	0
6月	0	0	0		0	5	1	1
7月	0	0	0		4	7	2	0
8月	0	0	0		0	0	0	0

種	イカ類							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	1
4月	0	0	0		0	0	0	5
5月	0	0	0		0	2	7	9
6月	0	0	0		0	0	2	9
7月	0	0	0		0	0	1	3
8月	0	0	0		0	0	0	0

種	タコ類							
	本庄工区内				森山堤防外			
	10kg	3kg	1kg	僅少	10kg	3kg	1kg	僅少
3月	0	0	0		0	0	0	0
4月	0	0	0		0	0	0	1
5月	0	0	0		0	0	0	3
6月	0	0	0		0	0	0	0
7月	0	0	0		0	0	1	1
8月	0	0	0		1	0	0	2

〈双方の水域で漁獲されるタイプの魚種〉

コノシロ

堤防内では、4月に漁獲量が最大になる一方、堤防外では極端に少なかった。これは、外海から中海への遡上が概ね終わったことを表わしている。つまり、堤防外は遡上の通過点の位置にあって残留する個体は少ないと思われる。しかし、5月には、堤防内、堤防外ともやや多かった。このことは、いったん中海に入った群れの一部は外海の方角に行きつ戻りつする行動をとると思われる。そして、6月以後は双方とも大幅に減少した。このことから、早春に美保湾から中海に遡上する本種は、3月末には本庄工区を含む中海にすでに遡上を終え、4月から5月中旬ごろまでは中海を中心に宍道湖や逆な方向の境水道を広範に移動しており、5月中旬以降には多くの群れは宍道湖に向かうものと推定される(末尾の付表参照)。そして、6月には、多くが宍道湖に遡上し、中海全体で生息量が極めて少なくなる。しかし、堤防内で6、7月に再びややまとまって漁獲されていることは、宍道湖からの戻りが考えられるが群れの動きについては今後の調査を必要とする。

スズキ

コノシロ同様な回遊のパターンであり、4月に堤防内で漁獲量が最大となるが、堤防外でもコノシロのようにほぼ姿を消すようなことはなくそこそこの漁獲があった。5月には、工区内で減少傾向を示し、堤防外では変化が少なかった。しかし、5月は中旬以降、双方とも減少することから、宍道湖への遡上が本格的になったものと推定される(末尾の付表参照)。6月には双方とも激減した。このことは、宍道湖への大量の遡上による影響と思われる。しかし、7、8月には堤防で少量が再び漁獲されており、また堤防外においては、7月には最大の漁獲量となっており、8月もやや多い漁獲量であった。このことは、高水温時期に本種が宍道湖・中海・美保湾にかけて広範に回遊しているものと推察される。その移動の過程において、西部承水路を通過して本庄工区内にまで、進入する個体は少ないものと思われる。

サッパ

出現は4月から両水域とも見られるが、漁獲量は共にともに少ない。5、6月は、堤防内は堤防外に比較して著しく多かった。また、堤防内では、5月中旬が過ぎても、コノシロやスズキのように5月以降に漁獲量が急激に減ずることはなく、むしろ、7、8

月には、10 kg以上が7月に7回、8月に6回と極めて多かった。また、堤防外でも全体量は少ないものの、7、8月にはむしろ増加している。このことから、本種の回遊は、スズキやコノシロのように高密度な状態から大群が一斉に他水域に移動するようなものではなくて、中海を中心にして宍道湖や境水道一体を常に回遊しているものと推定される。

クロソイ

堤防内が堤防外よりも著しく多い。特に、4、5月が多く、5月が最大の漁獲量であった。6月以降は急減しているが、大群で広範に移動する可能性とともに、他の生態的な理由も考慮しながら、この時期における減少の理由について、今後の調査分析が必要である。魚価の高い魚だけに、資源量と共に生態調査が早急に必要である。堤防外で少量しか漁獲がないのは、本種が内湾性の強いタイプであることが伺える。1960年代の京都大学による生息調査では、当時の中海北部におけるメバル類は、メバルやタケノコメバルなどが優占し、クロソイが極めて少なかったことが記録されている。ところが、森山堤防が構築された現在は、クロソイが最優占種となり、他のメバル類は、タケノコメバルが時折漁獲されるような状況に変化している。このことと、現在堤防外に少ないことを考え合わせると、本種が内湾性の環境となった工区内の水域に多産することは自然なことといえる。

イシガレイ

両水域とも漁獲量は少ないが堤防内の方が多かった。堤防内においては、4月に18回と漁のたびに少量ずつではあるが漁獲されていた。また、8月には1回ではあるが3 kg以上のややまとまった漁獲があった。堤防外では4、5、6月に少量ずつ漁獲され手はあるが、7、8月に堤防内で増加しているのと逆に漁獲はほとんどなかった。このことから、本種は内湾性の環境を好む魚種であることが伺える。

アカエイ

両水域で同様な漁獲の量および出現傾向を示している。双方ともに5、6月が量的に最大になっている。また7月に双方とも漁獲が減少し、堤防内で皆無、堤防外で1回だけ3 kg以上があった。そして8月には両水域とも5、6月に近い漁獲量に戻っている。本種は、森山堤防ができる以前は、本庄水域を主な産卵場とし、春に美保湾から多くの親魚の遡上

があった。森山堤防で外海と遮断された現在は、専門漁師の観察によると、産卵期の春には本庄工区の西側にある西部承水路で堤防内に向かう本種の親魚の姿が見られるという。量的には比較にならないほどではあるが、現在においても堤防内（本庄工区内）は、本種の産卵場として機能は維持している。よって、外海と中海および本庄工区の産卵回遊および当歳魚の回遊経路上にある双方の水域で同様な漁獲内容となるものと思われる。

〈森山堤防外でのみ漁獲された魚種〉

アジ類

マアジとマルアジが該当し、マアジは6, 7, 8月に漁獲され、7, 8月に急激に増加した。特に7月は、幼魚と未成魚が毎回のように漁獲され、2回は10 kg以上の日があった。マルアジは、マアジより約一月早く出現し、姿を見なくなった。よって、5月から7月にかけて漁獲され、7月がピークであった。7月には、10 kg以上の日が4回、7 kg以上が7回あることから当水域において、7月はマアジ・マルアジのアジ類の棲息量はかなり多いものと推定される。

ヒイラギ

本種は、かつては中海を代表する魚種であったが、現在の漁獲量は極めて少ない。今回は、堤防内での漁獲は皆無に近いものであった。一方、堤防外では5月に多く漁獲され、10 kg以上の漁獲が一回あった。しかし、6月以降はほとんど漁獲されていないことと堤防内への進入もないことから、中海の他水域への移動や美保湾へ戻ったことが推察されるが、今後の調査が必要である。

ウミタナゴ

漁獲量の少ない反面、全体的に出現頻度の高い種である。量的には、4月にややまとまって漁獲され、2 kg以上が2回あった。本種は、美保湾から境水道一帯に多い魚種であることから、本水域が海洋性の影響の強い場所であることがうかがえる。

甲殻類

表のヨシエビとガザミが該当する。ガザミは5月から獲れ始め6, 7月と漁獲量が急増している。特に7月は、10 kg以上が4回あり、3 kg以上が17回あることから、当水域の棲息量の多さが伺える。ヨシエビは、7月と8月に漁獲された。8月に10 kg以上が2回あるものの量は少ない。本種は、地方の呼び

名を「ホンジョウエビ」と呼ばれるほど、かつては本庄水域に多産していた種である。現在において、本庄工区内での漁獲の少なさは、美保湾・中海・時に宍道湖と本種の回遊するルートが森山堤防によって遮断された結果といえる。

軟体類

ここではイカ類とタコ類が該当し、前者はコウイカやジンドウイカなど5種類程度に分けて取引されているが、種が定かでない場合も多い。タコ類はマダコ・ミズダコ・イイダコが主なものである。イカ類は3月から7月にかけて漁獲され、5月がピークである。もっとも多く漁獲されているのは、伝票で単に「イカ」と記されている小型の種であり、ジンドウイカと思われるが今後の同定が必要である。タコ類は、4月から8月にかけて漁獲されており、漁獲量は僅かであるが、8月に1回イイダコが10 kg以上獲れている。これまで、堤防内ではジンドウイカが時々網に入ることがあるが、タコ類の漁獲は聞かない。かつては、本庄工区内にはタコ類が多産しており、赤貝（サルボウガイ）を獲るケタ漁のうちに、ケタの刃にタコがよく刺さっていたという。現在、森山堤防によって潮の流れが遮断され、タコ類は皆無となり、イカ類は気まぐれ的な出現の状態となっている。

おわりに

森山堤防によって、潮流が遮断された本庄工区水域は、当初クロソイやトラフグなど魚価の高い魚種の棲息量が増えて、新たな漁場が形成されたかに見えた。しかし、時が経つとともに閉鎖性の濃い環境が魚介類の生態に現れてきた。つまり、本来の閉鎖的な水域のもつ環境に安定してきた。

となると、よほどの人工的な管理の下で計画的な放流事業などがなされない限り、かつて本水域が有していた高い漁業生産性を取り戻すことは難しいと思われる。

今回の調査は、短期間のものでしかも考察も不十分であるが、少なくとも堤防外における漁獲は、かつての本水域の様子を色濃く残していることがわかった。

特に、タコ類やイカ類が多く見られ、かつて本庄水域に多産していたガザミが、今なお堤防外にまでは多く進入しているという現実、魚介類そのものの減少はまだそう深刻ではないと思われる。深刻な

のは、言うまでもなく本庄水域の漁業の衰退であり、かつて高い漁業生産性を誇っていた本庄水域に美保湾からの魚介類を呼び込むことが必要である。そのことは、中海全体さらに宍道湖にも好影響を及ぼすと思われる。

例えば、かつて中海においてガザミは、なぎさで遊ぶ折によく足で踏むほどの生息があったが、現在は極めて少量しか漁獲されていない。しかし、今回の調査では、堤防外の水域までは多量に進入していることが判明した。そのガザミ類は、中浦水門を通過して中海にさらに進入することが期待されるが、現実にはその様にはなっていない。

やはり中海の本来の潮流が、魚介類にとって必要なことを示唆しているように思われる。

謝 辞

この報文をまとめるにあたって、島根大学汽水域研究センター國井秀伸助教授には、全体にわたるご指導とともに、発表の機会を与えていただいた。松

江市本庄町の三代鮮魚商の三代富代氏には、漁獲取引の伝票の整理に多大なご協力をいただき、夫君の祐司氏には、各方面における漁獲状況を詳しく提供いただいた。心より感謝申し上げます。次第です。

参 考 文 献

- 宮地傳三郎他(1962) 中海干拓・淡水化事業に伴う魚族生態調査報告。
- 越川敏樹(1986) 中海の魚類。島根野生生物研究会会報. **4**: 7-17.
- 越川敏樹(1997) 中海本庄水域の魚類。LAGUNA(汽水域研究). **4**: 19-27.
- 越川敏樹(1999) 中海南岸域における魚介類の生息状況—安来市論田における小型定置網の漁獲内容から—。ホシザキグリーン財団研究報告. **3**: 239-249.
- 越川敏樹(2000) 中海における魚介類の生息状況—小型定置網漁の10数年間の变化より—。ホシザキグリーン財団研究報告. **4**: 203-214.

付表 2001年3月26日から8月25日における本庄工区内と森山堤防東部水域(堤防外)の小型定置網による漁獲内容の比較(重量は目安).

m; 成魚, s; 未成魚, y; 幼魚(スズキの場合, sは大・小). 海産魚は外海を主たる生息場所とする魚種を示す.

月 日	本 庄 工 区 内				森 山 堤 防 外 側			
	10 kg 以上	3 kg 以上	1 kg 以上	海産魚	10 kg 以上	3 kg 以上	1 kg 以上	海産魚
3月26日					スズキ ms			ウミタナゴ
27		スズキ ms コノシロ m				スズキ ms	コノシロ m	ウミタナゴ
28		スズキ s コノシロ m		クロソイ m		スズキ ms	コノシロ m	ウミタナゴ トラフグ
29		スズキ s						
30	コノシロ	スズキ ms				スズキ ms クロソイ		ウミタナゴ ヒガンフグ コウイカ
31								
4月1日		スズキ s						
2		コノシロ スズキ s	クロソイ m			スズキ s	サッパ m	コウイカ
3		スズキ s		クロダイ イシガレイ クロソイ m		スズキ s		イシガレイ コウイカ ウミタナゴ
4	スズキ s	クロソイ m コノシロ		イシガレイ		サッパ m アユ y	クロソイ s	ウミタナゴ コウイカ クロダイ
5	コノシロ			クロソイ イシガレイ		スズキ s		マダコ シマイサキ コウイカ
6	スズキ s	コノシロ クロソイ m						
7	コノシロ	スズキ ms		イシガレイ				
8	コノシロ	スズキ s						
9	スズキ s コノシロ			トラフグ		スズキ m スズキ s	ウミタナゴ s	ヒガンフグ ヒラメ イシガレイ
10	コノシロ	アカエイ スズキ s クロソイ m		イシガレイ				
11	スズキ ms コノシロ	トラフグ m		イシガレイ	スズキ s サッパ m	ウミタナゴ		クロソイ ヒガンフグ
12	コノシロ	クロソイ ms		イシガレイ		ウミタナゴ		イカ類
13	コノシロ	クロソイ ms スズキ s		イシガレイ シマイサキ				
14		スズキ s クロソイ m		ヒラメ イシガレイ		スズキ m		クロダイ イシガレイ

4月14日				アカエイ				アカエイ
16	コノシロ	スズキ m		イシガレイ ヒラメ				
17	コノシロ			イシガレイ				
18		コノシロ スズキ s						
19	コノシロ	スズキ m		クロソイ ms イシガレイ				
20	コノシロ	クロソイ	サツパ	イシガレイ				
21	コノシロ	スズキ s クロソイ		イシガレイ シマイサキ				
22		スズキ ms クロソイ コノシロ		イシガレイ				
23	コノシロ	クロソイ サツパ		イシガレイ				
24	コノシロ	スズキ m サツパ		クロソイ				
25		コノシロ						
26		アユ						
27		スズキ m コノシロ		トラフグ イシガレイ				
28		スズキ m アカエイ		イシガレイ クサフグ トラフグ s				
29				クサフグ		スズキ ms		タコ類 ウミタナゴ ウミタナゴ
30	コノシロ	クロソイ		クサフグ		スズキ ms		ヘイズダイ ウミタナゴ シマイサキ アユ ヒイラギ
5月1日	コノシロ	サツパ クロソイ スズキ m アカエイ		クサフグ				
2				クサフグ		スズキ ms		アナゴ クロソイ イシガレイ ウミタナゴ ヒイラギ キス

5月3日								
4		クロソイ サッパ		サッパ		スズキ M		アナゴ クロソイ ヒイラギ ウミタナゴ
5		アユ		クサフグ イシガレイ				
6		スズキ クロソイ		アカエイ クサフグ イシガレイ	ヒイラギ スズキ s		コノシロ	アナゴ ヒラメ アカエイ イカ類
7	コノシロ	スズキ m クロソイ s サッパ		クサフグ		アカエイ スズキ s コノシロ		イカ類 アナゴ
8		サッパ		イシガレイ クサフグ クロダイ				
9				クサフグ		コノシロ	ヒイラギ	イア類
10	クロソイ ms	スズキ ms				スズキ ms	アカエイ アオリイカ	ウミタナゴ
11	クロソイ コノシロ							
12	クロソイ s コノシロ		シマハゼ類	アカエイ		スズキ ms コノシロ	ヒイラギ	イカ類 アナゴ ヒラメ クロソイ イシガレイ
13	クロソイ s					スズキ m ヒイラギ コノシロ	ギンポ アカエイ	マダコ コウイカ イシガレイ アナゴ
14	クロソイ s コノイシロ					スズキ ms	ヒイラギ	コウイカ アナゴ・アユ ミズダコ アカエイ m
15	クロソイ ms	スズキ s コノシロ		クサフグ シマイサキ				
16	コノシロ クロソイ ms	スズキ s サッパ		トラフグ s		スズキ s イカ類	アユ y	アナゴ s
17	クロソイ ms	コノシロ シマハゼ類 スズキ s	マハゼ m	イシガレイ トラフグ s		イカ類 ヒイラギ	クロソイ	ガザミ
18	クロソイ s	スズキ s				アユ y	アカエイ	コウイカ

5月18日		サッパ				ヒイラギ		イカ類
19		クロソイ s サッパ スズキ ms						
20	クロソイ s	サッパ スズキ s				コノシロ スズキ s	アユ y アカエイ イカ類 クロダイ	ウミタナゴ アナゴ s
21		コノシロ サッパ クロソイ s	スズキ s	イシガレイ		コノシロ	スズキ s イカ類 (シリイカ) ヒイラギ	ガザミ ウミタナゴ
22		クロソイ s サッパ	スズキ m				ヒイラギ	
23		クロソイ ms スズキ s アカエイ		イシガレイ		コノシロ	ヒイラギ アカエイ イカ類 スズキ s	ヒラメ ウミタナゴ アナゴ s
24	クロソイ s	スズキ s					ヒイラギ コノシロ	ガザミ
25		スズキ s	ビリンゴ					
26	クロソイ s	サッパ ビリンゴ アカエイ						
27		サッパ ビリンゴ	マハゼ m			ヒイラギ マルアジ	サッパ アカエイ ガザミ コノシロ	アナゴ クルマエビ
28	クロソイ s ビリンゴ コノシロ		マハゼ m					
29	ビリンゴ						コチ ヒイラギ	ヒラメ イカ類 クルマエビ
30	クロソイ s ビリンゴ		マハゼ m					
31		ビリンゴ				ヒイラギ アカエイ	イカ類 コノシロ スズキ ms	マダコ
6月1日		マハゼ サッパ ビリンゴ クロソイ ms						

6月23日							マルアジ	
24								
25		アカエイ サッパ		トラフグ	マルアジ	ガザミ		
26						ガザミ	イシガレイ	
27						マルアジ		イシガニ アナゴ
28		サッパ		クロソイ イシガレイ	マルアジ	ガザミ		
29						ガザミ マルアジ		
30						ガザミ マルアジ	マアジ s	
7月1日					マルアジ	ガザミ	ボラ	ヒイラギ ウミタナゴ
2			サッパ		マルアジ	ガザミ		
3			サッパ		マルアジ ガザミ			イカ類 クルマエビ
4					ガザミ	マルアジ	スズキ m マアジ s	ウミタナゴ イカ類
5			サッパ		ガザミ	マルアジ		クルマエビ イシガニ
6			サッパ			ガザミ マルアジ	マアジ s コノシロ スズキ s	
7			ビリンゴ			マルアジ マアジ		
8			ビリンゴ		マルアジ	ガザミ s	マアジ s	
9			ビリンゴ サッパ			ガザミ マルアジ		
10						ガザミ マルアジ	マアジ s	
11			サッパ クロソイ ウロハゼ			ガザミ マルアジ	マアジ s	
12						ガザミ	マルアジ マアジ s	アナゴ
13			ビリンゴ サッパ モエビ				ガザミ	ヨシエビ
14			ビリンゴ				ガザミ マルアジ マアジ s	ヨシエビ

7月15日			ビリング サッパ		ガザミ		マルアジ マアジ s サッパ	ヒラメ
16			マハゼ ビリング サッパ			ガザミ	マアジ s ヨシエビ	イシガニ
17		ビリング	マハゼ			ガザミ		
18		ビリング	マハゼ				ガザミ ヨシエビ	ウミタナゴ
19		ビリング	クロソイ s サッパ	イシガレイ		ガザミ	ヨシエビ	メバル ウミタナゴ コウイカ
20		ビリング	サッパ マハゼ			ガザミ		
21		ビリング サッパ				ガザミ		
22	コノシロ	サッパ	マハゼ			ガザミ スズキ s		クルマエビ キス
23	コノシロ サッパ		マハゼ		スズキ ms		ガザミ コノシロ	
24	サッパ コノシロ	マハゼ	イシガレイ				ミズダコ	マダコ シマイサキ
25	サッパ	マハゼ	イシガレイ		スズキ s	ガザミ	コノシロ	
26	サッパ	マハゼ			スズキ s	ガザミ	コノシロ マハゼ	
27	マハゼ	サッパ			スズキ s	サッパ	ガザミ マアジ y	シマイサキ
28	マハゼ	サッパ ビリング				サッパ	ガザミ スズキ s	マアジ y
29	サッパ	マハゼ	ビリング スズキ s		スズキ ms		マアジ sy サッパ マアジ y	
30	サッパ	マハゼ	スズキ s		マアジ sy	スズキ s	サッパ イカ類	アナゴ シマイサキ
31	サッパ	マハゼ	ビリング スズキ s ウロハゼ		マアジ sy	ガザミ アカエイ スズキ ms		
8月1日	サッパ	ビリング マハゼ	イシガレイ			マアジ sy マアジ sy アカエイ	サッパ	キス
2		サッパ イシガレイ	ビリング コノシロ	ガザミ	マアジ sy	ガザミ サッパ	アカエイ	キス
3	サッパ	ビリング	イシガレイ			サッパ	ガザミ	

