

## 中海における炭酸塩殻生物の潜在的分布能力

瀬戸浩二<sup>1</sup>・山口啓子<sup>2</sup>・田中源吾<sup>3</sup>

### Capacity of carbonate shell animals for distribution in Lake Nakaumi, Shimane Prefecture, Southwest Japan

Koji Seto<sup>1</sup>, Keiko Yamaguchi<sup>2</sup> and Gengo Tanaka<sup>3</sup>

**Abstract:** Lake Nakaumi is a brackish estuary showing the high to medium range of salinity. Benthic animals resisting to anoxic environments are distributed in the deep bottom of Lake Nakaumi. In contrast, surface water is good condition for normal brackish animals. To clarify the capacity of carbonate shell animals for distribution in the Lake Nakaumi, the vertical distribution of carbonate shell animals on the artificial columns was investigated. On the basis of this result, it was considered the controlling factors and spreading mechanism of the carbonate shell animals such as Mollusca, Ostracoda and Foraminifera. They are summarized as following: 1) The carbonate shell animals inhabit to shallower zone than the lower limit of fluctuation zone of halocline (around 4.5 m depth) in the central Lake Nakaumi. 2) Many species are adapted to a wide range of salinity (at least 10-30psu). Species adapted to low salinity distribute around the mouth of Ohashi River. 3) The meio-fauna are able to inhabit after the formation of the macro-faunal colonies. 4) Although the meio-benthos living to columns spread the distribution area from bottom, they can not distribute over the halocline. 5) The species distributed to upper part of fluctuation zone of halocline may be carried by bottom current from the lower reaches during the larval stage. 6) The species distributed to upper column may be carried by surface current during the larval stage. On the basis of the control factors and spreading mechanism, main species of Mollusca, Ostracoda and Foraminifera are illustrated the capacity for distribution in the Lake Nakaumi. *Musculista senhousia*, having a wide capacity, can inhabit everywhere except for bottom water zone showing anoxic condition.

**Key words:** brackish estuary, carbonate shell animals, Mollusca, Ostracoda, Foraminifera

---

1 島根大学総合理工学部地球資源環境学科

Department of Geoscience, 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 静岡大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, JAPAN

## はじめに

中海は境水道を通じて日本海に接する中～高塩分の汽水湖である。中海の北部水域(本庄水域)は、1960年代以降の国営の干拓事業の一環としてその周囲に堰堤がつくられ、1980年代後半に閉鎖された。本庄水域の閉鎖により、中海の南部水域の水質環境の悪化およびそれに伴う生態系の変化が懸念されている。現在の中海の底層域では、貧酸素あるいは無酸素状態にあるため、そのような状態に耐性のある底生生物群しか分布していない。一方、中海の表層水の影響の強い浅い水域には、ホトトギスガイやナミマガシワガイなどの様々な生物が多量に生息している。そのような水域は中海全体としては非常に少なく、大部分が底生生物の生息にとって不利な状態であるといえる。しかし、中海の表層水塊のように生物が生息するために比較的好条件である部分もあり、中海を水産増殖あるいは水質を浄化する場として活用することも可能である。そのためには、その表層水塊をはじめ中海全体としてどのような生物群を生息させることができるかを知る必要がある。その第一歩として、中海の流入側、中心部、流出側に設置されている人工建造物に生息する生物に着目した。特に湖心の建造物は沿岸から隔離された島状の生息場という特徴があり、興味深いものである。人工建造物に生息する生物の中で比較的多く生息し、生存率を推定しやすい炭酸塩殻を有する生物(炭酸塩殻生物)を中心に分布調査を行った。また、多様な分布を広げるメカニズムを検討するため、大型の炭酸塩殻生物と共に介形虫や底生有孔虫などのメイオフォナーナについても調査を行った。

本研究では、このような調査で得られた結果にもとづき、炭酸塩殻生物の分布条件や分布を広げるメカニズムを検討し、炭酸塩殻生物の分布に伴う底質の影響や潜在的な分布について若干の考察を行う。

## 調査地概要

中海は、総面積86.2km<sup>2</sup>の汽水湖である。西側では大橋川を通じて宍道湖と接し、また、東側は境水道を通じて美保湾と接している。それらは一連の水系と考えられている。中海北部には堰堤によって囲まれた本庄水域があり、その水塊は一連の水系からほぼ独立して存在している。

中海では、顕著な塩分躍層によって表層の中塩分水塊(10～20psu)と底層の高塩分水塊(20psu以上)

が見られる。風のない時には、宍道湖からさらに低塩分の表層水塊が流入し、3層の水塊が比較的安定して存在することもある。また、それらが混合することによって多数の塩分躍層が存在することも知られている。このような塩分躍層は、潮汐、淡水の流入量、気圧、内部振動によって上下し、その上下幅は、2m以上と見られている(Fujii, 1998など)。表層の中塩分水塊は溶存酸素に富んでいるが、底層の高塩分水塊は貧酸素あるいは無酸素状態(3mg/l以下)である。このような溶存酸素の分布は、湖底に生息する生物に大きな影響を与え、それらの分布を規制している。

中海の底質はほとんどが泥質堆積物で、大橋川河口や沿岸付近では砂質である。また、大根島周辺では、玄武岩が露出しているところもある。

そのような底質には、軟体動物、甲殻類、多毛類、有孔虫類などの底生動物が生息している。中海の泥底の軟体動物は、主にシズクガイ(*Theora lubrica*)、チヨノハナガイ(*Raeta rostralis*)で、大橋川河口や中海沿岸の砂底には、ホトトギスガイ(*Musculista senhousia*)、コウロエンカワヒバリガイ(*Limnoperna fortunei kikuchii*)、アサリ(*Ruditapes philippinarum*)、ソトオリガイ(*Laternula marilina*)などが分布する(清川ほか, 1998; 山根ほか, 1998など)。さらに堰堤、露岩、巨大な礫には、マガキ(*Crassostrea gigas*)やナミマガシワガイ(*Anomia chinensis*)が固着して生息している。中海の泥底に生息する甲殻類は、主に介形虫で、*Bicornucythere bisanensis*がほぼ独占的な群集を示している。また、大橋川河口付近では*Propontocypris* sp., *Dolerocypris mukaishimense*, *Candonocypris assimilis*などの介形虫が分布している(田中ほか, 1998)。多毛類は、ヨツバネスピオ(*Paraprionospio pinnata*)、ミナミシロガネゴカイ(*Nephtys polybranchiata*)など6種が優勢して生息している(園田ほか, 1998)。有孔虫類は、中海の泥底では、*Trochammina hadai*と*Ammonia beccarii*が優勢であるが、湖心より東側では*T. hadai*が独占的に分布する(Nomura and Seto, 1992)。大橋川河口付近では、*A. beccarii*を主体とする群集である(野村・遠藤, 1998)。

## 試料の採取および分析方法

調査は、大橋川河口(Site A)、湖心(Site B)、江島沖(Site C)の3地点の柱状の人工建造物で1998年9月9日に行った(図1)。Site Aは、中海大橋の橋げたでコンクリートで建造されている。Sites B, Cは櫓様の建造物で、塗料で塗られた鉄製の円柱状の柱で

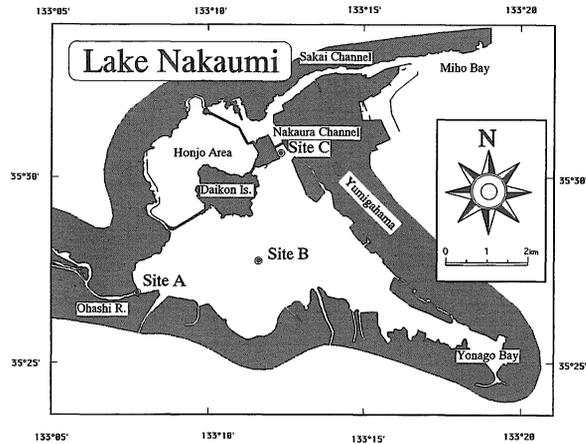


図1. 調査位置図.

Fig. 1. Index map.

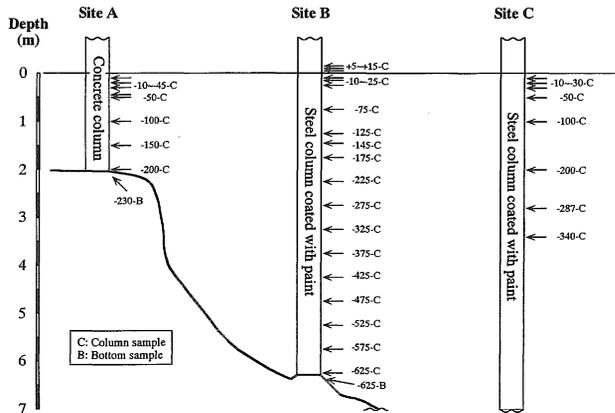


図2. 中海の人工建造物におけるサンプリング位置図.

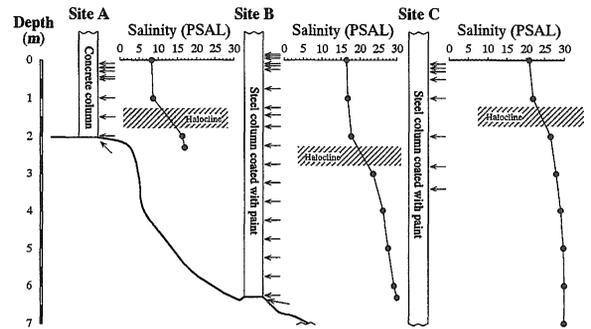
Fig. 2. Sampling points on the artificial columns of the Lake Nakaumi.

ある。

観察及び試料採取は、スキンドビングで直接行った。試料採取は、人工建造物の表面が可能な限り傷つかないように、へらで生物体のみを削って行い、表層付近から水深50cmまでは約10cm間隔、水深50cm以下では約50cm間隔で採取した(図2)。また、その直下の底質も採取している。Site Cは生物体が少ないため、1m以下では定間隔で試料採取ができなかった。また、非常に深く、流れもあることから、4m以下の潜水は行わなかった。試料採取とほぼ平行して調査時の水質環境を把握するため、水質調査を行っている。

持ち帰った試料は、直ちに2mmと75μmのふるいで水洗し、2mmのふるいの残渣は、メタノールで固定した。75μmの残渣は、ローズベンガルで染色後、乾燥させた。これらの試料から、炭酸塩殻を持つ分類群(貝類, 介形虫類, 有孔虫類など)の産出状況を分析した。今回の試料採取法では厳密な定量はできない

### Salinity



### Dissolved Oxygen

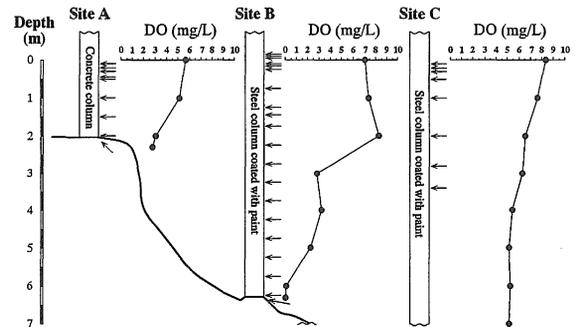


図3. 中海の人工建造物付近の塩分と溶存酸素量の鉛直分布.

Fig. 3. Profiles of salinity and dissolved oxygen (DO) around the artificial column of the Lake Nakaumi.

ので、相対的な産出比から概略的に産出量を記載した。貝類などの分析は2mm以上の固定試料を用い、軟体部の有無によって生死を判別した。介形虫と有孔虫は、2mm~75μmの試料を用いた。介形虫類は、ローズベンガルで染色されて付属肢があるもの、染色されているが付属肢がないもの、そして染色されていないものに分け、染色されて付属肢があるもののみを生体として扱った。有孔虫類は、ローズベンガルで染色されて比較的破損の少ないものを生体として扱った。したがって本論で言う生体は、厳密に試料採取の時に生きていた個体を指さない。

### 調査時の水質環境及び柱面の観察結果

#### 1) 調査時の水質環境

調査時の表層水の塩分は、中海大橋下 (Site A) で8psu、湖心付近 (Site B) では16psu、江島沖 (Site C) では21psuと下流方向に高くなる傾向が見られた(図3)。表層下にはいずれの地点も塩分躍層が存在し、4.5~7.8psu/mの塩分勾配を示す。底層水の塩分は、Site Aで21psu、Sites B, Cでは25~30psuであった。湖心付近のSite Bでは、塩分躍層は水深2~3mの間

に存在した。これまでの調査では、3.5～4.5mの水深に位置することが多い(徳岡ほか, 1995; 1996など)。塩分躍層は内部振動によって2mの上下があることが知られている(Fujii, 1998など)。今回の調査時の塩分躍層の位置は通常範囲にあるといえるが、ほぼ上限に相当している。ここでは水深2.5m～4.5mを塩分躍層の変動帯(fluctuation zone of halocline)と呼ぶことにする。

溶存酸素量は、塩分躍層を境界として底層方向に減少する(図3)。特にSite Bでは顕著に減少し、表層では7mg/l程度であるのに対し、躍層直下では3mg/l前後となる。それ以深でも徐々に減少し、湖底付近ではほとんど無酸素状態になる。Site Cでも底層方向に緩やかに減少しているが、湖底でも5mg/l以上である。

水温は27～28℃で、地域差はほとんど見られなかった。しかし、表層がやや高い傾向にある。

## 2) 柱面の観察結果

中海大橋下のSite Aは、水深2mまで柱状にコンクリートの壁面がある。水面から30cmまではマガキが多く固着しており、ときおりフジツボが見られる。マガキは下位方向に減少する傾向にある。それ以深では、樹状のヒドロ虫が密集して生息し、それに絡み付くように足糸を持つホトトギスガイやコウロエンカワヒバリガイが密集して生息している。そのすき間に、マガキやフジツボが分布している。それらの中には、樹状のヒドロ虫に覆われているものがあるが、そのような個体はほとんど死んでいる。河床には、ホトトギスガイとコウロエンカワヒバリガイのコロニーがマット状に広がり、そのほとんどを覆っている。その中に樹状のヒドロ虫のコロニーが見られる。

湖心付近のSite Bは青色の塗料で塗られた鉄製の円柱で、水深は6.25mである。水面付近は、主にマガキやフジツボが壁面に固着している。それより下位では、主にナミマガシワガイが柱面を覆うように固着し、その間にホトトギスガイとコウロエンカワヒバリガイが密集して生息している。50cmより下位では、樹状のヒドロ虫が密集して生息し、それに足糸を絡ませてホトトギスガイやコウロエンカワヒバリガイなどがコロニーを形成している。水深3～4m付近では、そのようなコロニーが垂れ下がり、重みによってはがれているところも見られた。そのような場所にはフジツボなどが固着している。コロニーのすき間には、イソギンチャクやポリプなどの腔腸動物も固着している。4.5m以深では、殻を持つ大型生物は

見られず、比較的硬質で厚さ5cm程度の有機質の棲管群がすき間なく覆っている。湖底には、貝殻片を主体とする堆積物が厚く堆積している。

江島沖のSite Cは赤褐色の塗料で塗られた鉄製の円柱で、水深は9mである。水面付近は、マガキ、ナミマガシワガイ、フジツボに覆われている。そのすき間に、ホトトギスガイとコウロエンカワヒバリガイなどが密集して生息している。50cm以深では、生物コロニーは散在的にしか分布していない。この鉄柱は汚損防止処理が施されているかも知れない。

## 炭酸塩殻生物相

### 1) 貝類相

Site Aでは、マガキ(*Crassostrea gigas*)、ホトトギスガイ(*Musculista senhousia*)、コウロエンカワヒバリガイ(*Limnoperna fortunei kikuchii*)が主要種で、ヤマトシジミ(*Corbicula japonica*)やウネナシトマヤガイ(*Trapezium liratum*)が随伴する(図4)。水面付近～水深0.5mまではマガキが卓越し、それ以深ではホトトギスガイとコウロエンカワヒバリガイが主要種となる。マガキは、水深1.5m付近でも比較的多く見られる。また、1.5m以深でヤマトシジミも比較的多く見られる。河床は、ホトトギスガイが優勢で、コウロエンカワヒバリガイやヤマトシジミが随伴する。この地点での大型貝類は、遺骸より生体の方が卓越している。特に表層部ではほとんどが生体である。

Site Bでは、マガキ、ナミマガシワガイ(*Anomia chinensis*)、ホトトギスガイ、コウロエンカワヒバリガイ、ムラサキガイ(*Mytilus galloprovincialis*)が主要種で、ウネナシトマヤガイやイボニシ(*Thais clavigera*)などが随伴する。水面付近～水深0.2mまではマガキが優勢であり、ホトトギスガイ、コウロエンカワヒバリガイ、ナミマガシワガイが随伴する。それ以深ではマガキは見られない。水深0.2mから1.4m付近まではホトトギスガイ、コウロエンカワヒバリガイ、ナミマガシワガイが優勢であり、ムラサキガイが随伴する。水深1.4m付近から3mまではホトトギスガイとナミマガシワガイが優勢であり、水深3.5m付近ではホトトギスガイが独占する。水深3.5～4.5m付近では、ムラサキガイ、ホトトギスガイ、コウロエンカワヒバリガイが優勢である。この水深までは、ほとんどが遺骸より生体の方が卓越し、遺骸は足糸に絡まって保持されていた。水深3.5～4.5m付近のホトトギスガイは遺骸の方が卓越する。4.5m以深では、大型の貝類は生体・遺骸ともに見られず、わずかに貝

# Mollusca

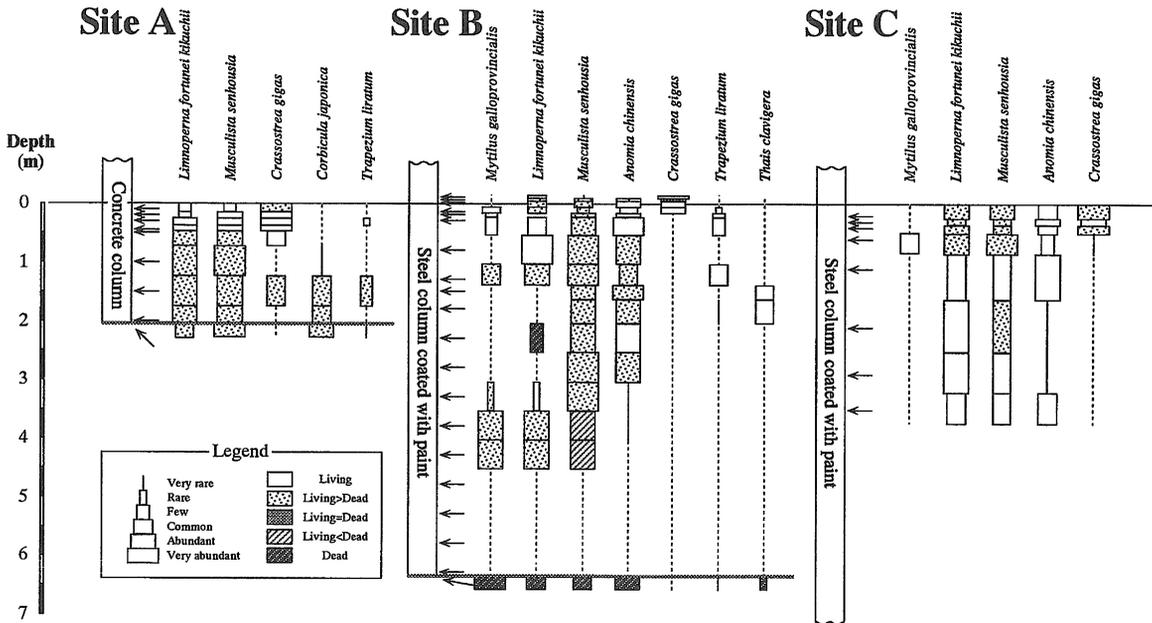


図 4. 中海の人工建造物に生息する軟体動物の産出頻度と生存率。

Fig. 4. Vertical distribution of Mollusca on the artificial columns of the Lake Nakaumi.

殻片が残っているだけである。湖底では、ナミマガシワガイとムラサキガイが優勢で、ホトトギスガイとコウロエンカワヒバリガイが随伴する遺骸群集である。

Site Cは、マガキ、ナミマガシワガイ、ホトトギスガイ、コウロエンカワヒバリガイ、が主要種で、ムラサキガイなどが随伴する。水面付近～水深0.4mまではマガキが優勢であり、ホトトギスガイ、コウロエンカワヒバリガイ、ナミマガシワガイが随伴する。それ以深ではマガキは見られず、ホトトギスガイ、コウロエンカワヒバリガイ、ナミマガシワガイが優勢である。この地点での大型貝類はほとんどが生体であるが、表層部で遺骸がやや多い。

## 2) 介形虫相

Site Aでは、*Sanyuania* sp., *Paradoxostoma lunatum*が主要種で、*Propontocypris* ? sp. が随伴する (図5)。表層20cmまでは介形虫は見られない。それ以深では*Sanyuania* sp., *P. lunatum*が優勢であるが、水深1m付近を境に上位では*P. lunatum*が、下位では*Sanyuania* sp. が卓越する。水深1.5m付近では*Propontocypris* ? sp. が見られる。河床では、*Sanyuania* sp. が優勢で、*P. lunatum*, *Propontocypris* ? sp. が随伴する。*P. lunatum*は、生体より遺骸が卓越しているが、遺骸の多くは染色されている。それ以外の介形虫は、遺骸より生体の方が卓越している。

Site Bでは、*P. lunatum*が主要種で、*Bicornucythere bisanensis*が随伴する。この地点では介形虫の産出量が全体的に低い。*P. lunatum*は、水深1～2m及び3～4.5mに比較的多く産出する。本種は多くの試料で遺骸が卓越したが、4.5m付近を除いてほとんどの個体が染色されている。*B. bisanensis*は水深3～4.5mから産出し、本種は多くの試料で生体が卓越している。湖底では、*B. bisanensis*が独占し、*P. lunatum*や*Spinileberis quadriaculeata*がわずかに随伴する。それらすべてが遺骸であるが、染色された個体がわずかに見られる。

Site Cでは、*P. lunatum*がほとんど独占し、わずかに*Xestoleberis*属が随伴する。*P. lunatum*は水面付近で非常に少ないが、水深50cm付近では非常に多い。1m以深では、見られなくなる。この地点でも本種は遺骸が卓越するが、ほとんどの個体が染色されている。

## 3) 有孔虫相

Site Aでは、*Ammonia beccarii*が独占的に産出し、全有孔虫の80%以上を占めている (図6)。その他に膠着質有孔虫の*Miliammina fusca*が随伴する。*A. beccarii*は、水面から水深20cmまでは非常に産出量が少なく、250μm以下の小さな個体がほとんどである。それ以深では産出量も多く、500μmを越える比較的大きな個体も産出している。Site Aでは生体が卓越しているが、生存率は河床方向に減少する傾向にある。河床で

## Ostracoda

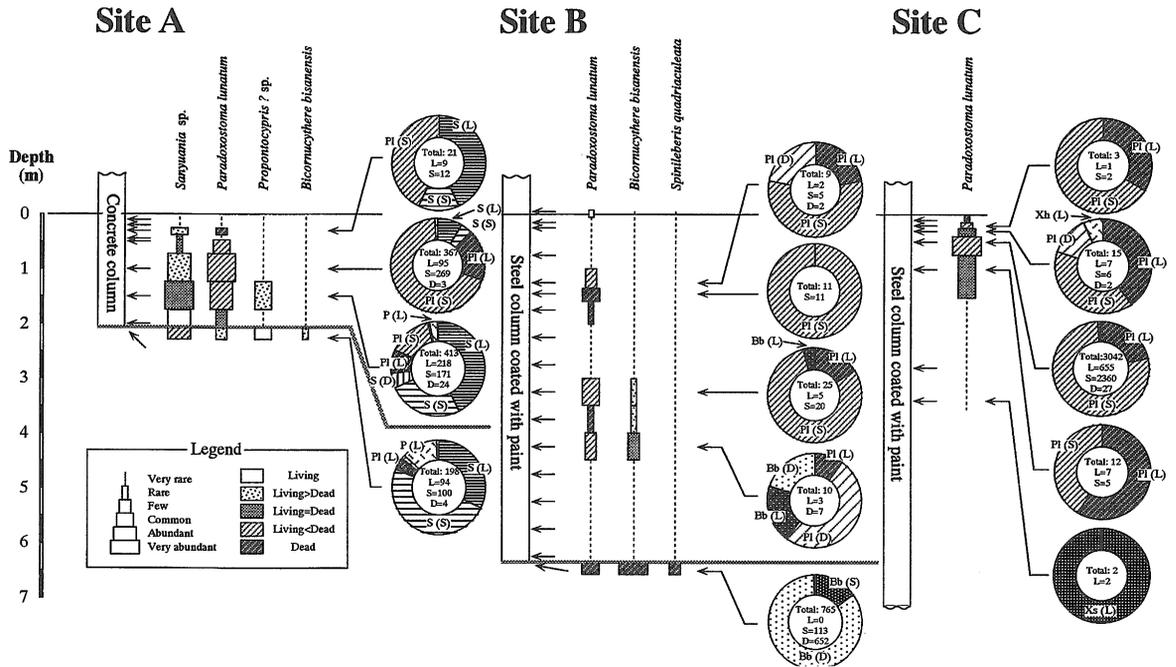


図 5. 中海の人工建造物に生息する介形虫組成と産出頻度分布。

Fig. 5. Vertical distribution and composition of Ostracoda on the artificial columns of the Lake Nakaumi.

## Foraminifera

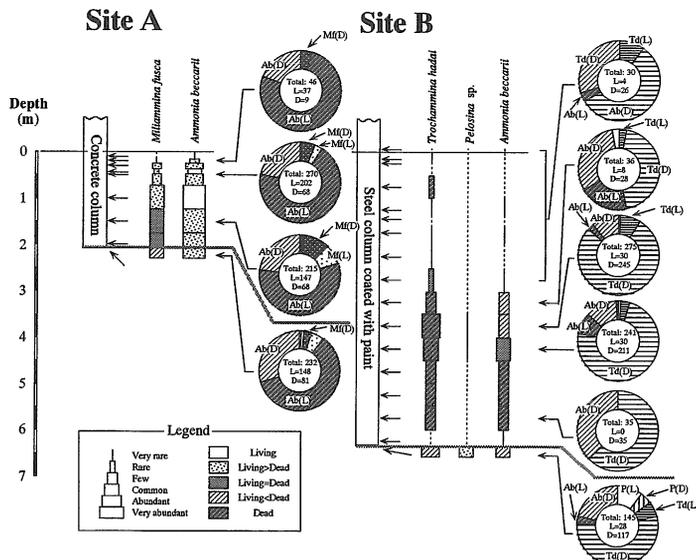


図 6. 中海の人工建造物に生息する有孔虫組成と産出頻度分布。

Fig. 6. Vertical distribution and composition of foraminifera on the artificial columns of the Lake Nakaumi.

も同様に *A. beccarii* が独占的に産出し、*M. fusca* が随伴した。

Site B では、膠着質有孔虫の *Trochammina hadai* が優勢で、*A. beccarii* が随伴している。水面から水深3mまでは両種ともほとんど産出しない。水深3.25m付近では、*A. beccarii* がやや優勢であるが、それ以深では *T. hadai* が卓越している。また、4.5m以深では産出量

が少ない。両種ともほとんどが遺骸であるが、水深3m～4.5mの *A. beccarii* は生体が比較的多い。湖底では、*T. hadai* が優勢であり、*A. beccarii* と *Pelosina sp.* が随伴している。*Pelosina sp.* のみ生体が卓越し、その他の2種は遺骸が卓越する。

Site C では、有孔虫は産出しなかった。

#### 4) その他の炭酸塩殻生物相

その他の炭酸塩殻生物は、フジツボ（蔓脚類）、管棲ゴカイ（多毛類）、コケムシ類などである。フジツボは、Site A では水深 0.5m 付近からしか産出して見られない。Site B では、4.5m 以浅のほとんどの試料で見られ、特に水面～水深 30cm および 2.5～4m で多く見られる。しかし、水面付近を除いて遺骸が卓越する。Site C では、水深 50cm 付近を除いてほとんどの試料で見られる。0.5m 以浅では遺骸が卓越するが、それ以深では生体が卓越する。石灰質殻を有する管棲ゴカイは、Site A では見られないが、Sites B, C でわずかに見られる。

### 炭酸塩殻生物の分布を規制する条件

柱状人工物に定着している炭酸塩殻生物群の分布と中海の水質特性などから、それらの分布を規制する条件や分布を広げるメカニズムについて議論する。ここでは便宜上、2mm 以上の大型の炭酸塩殻生物群をマクロフォーナ、75 $\mu$ m 以上 2mm 以下の中型の炭酸塩殻生物群をメイオフォーナとして議論する。

#### 1) マクロフォーナ

今回みられた大型の炭酸塩殻生物は全て中海沿岸の浅い水域に主に分布する種で、Site A 下部・湖底のヤマトシジミを除くとすべて表生の固着性・付着性貝類である。湖心部である Site B においては、シズクガイ、チヨノハナガイのような内湾停滞水域に優占しやすい種は遺骸すらみられなかった。

一般に岩礁潮間帯では、表生二枚貝などが主に潮位によって帯状分布をすることが知られ、干出などの物理的要因や捕食・競争などの生態学的要因との関わりが研究されている（Connell, 1972; 細見, 1989; Iwasaki, 1995 など）。しかし、中海では潮位差が小さく、夏期の大潮時で 20～30cm である。潮間帯に主な分布を見せたのはマガキのみである。マガキ以外の貝類の分布は潮下帯が中心で、特に Site B では捕食者も少ないことから、その分布は主に水質と空間の占有に関する競争に規制されていると考えられる。

今回の調査では、Site B の 4.5m 以深を除いて、大型の炭酸塩殻生物の生体が見られた。Site B の 4.5m 以深の柱面および底質では、遺骸片のみで、2mm 以下の貝類の稚貝でさえ生体は見られなかった。これは中海の 4.5m 以深では、それ以浅で多数生息する生物群が着底・生存できないことを示している。水深 4.5m 付近は中海の塩分躍層の変動帯の下限であり、それ

以深は常に無酸素あるいは貧酸素状態にある水塊である。今回の調査においても、4.5m 以深で 2.2mg/l を示している（図 3）。したがって、塩分躍層の変動帯の下限以深では大型の炭酸塩殻生物は着底・生存はできないといえることができる。

マクロフォーナの中でもっとも広く分布しているのは、ホトトギスガイとコウロエンカワヒバリガイである。これらは多数の足糸を他のものに付着させて殻を保持する足糸付着性の表生二枚貝である。ホトトギスガイは足糸を絡ませてマット状のコロニーを作り、中海の 4.5m 以深の底層域を除く浅部や沿岸に広く生息している。コウロエンカワヒバリガイは沿岸の護岸表面などに主に生息する。これらの種は大橋川から境水道まで分布し、広塩性の貝類とされている。しかし、コウロエンカワヒバリガイは Site B の水深 1.5～3.5m の中層域から産出していない。この中層域は、ちょうど塩分躍層の上部が上下している水深帯である。このことからコウロエンカワヒバリガイは、広塩性ではあるが塩分の変動域を好まないと思われる。ホトトギスガイは、3.5～4.5m の塩分躍層の変動帯の下限付近では、それ以上の水深帯より産出比が少なく、また、生体より遺骸の方が多い。それに対してコウロエンカワヒバリガイは遺骸より生体の方が多い。これは、ホトトギスガイがコウロエンカワヒバリガイと比較して貧酸素状態に対する耐性がやや弱いことを示している。これらの種は幼生期に浮遊して Site B の柱面に到達したものと思われる。しかし、B の柱面の変動帯下限まで生息し、中海全体で上流側でも下流側でも多数生息しているため、供給源を特定することはできない。

一方、ムラサキイガイも足糸付着性二枚貝であるが、Site A には分布せず、Site B でも低塩分を示す上位の水深帯で数が少ない。これは塩分の低い水域を好まないことを反映していると考えられる。また、分布が下流側に偏っていることと 3.5～4.5m の塩分躍層の下限付近に多産することは、浮遊幼生が高塩分の底層流によって下流側の水域から浮遊してきたことを示唆している。また、3.5～4.5m の塩分躍層の下限付近でも生体の方が多いことから、上記のホトトギスガイと比較して貧酸素状態に対する耐性がやや強いものと思われる。

以上の3種は足糸を鉄柱などに直接付着させるだけでなく、ヒドロ虫に絡ませて、コロニーを形成していた。樹状のヒドロ虫に絡ませる方が表面積が大きいいため、大きなコロニーを形成することができる。したがって、それらの生産量はヒドロ虫の分布にも規制

されている。足糸付着性二枚貝のコロニーがヒドロ虫に付着して垂れ下がっていることが観察されているが、ヒドロ虫への負荷が大きくなるあるいはヒドロ虫が死ぬと、基盤からはがれたり、底層部に落ちたりして空間ができる。ヒドロ虫コロニーの存在は、マガキやナミマガシワガイのような成長にある程度の面積の基盤を必要とする固着性二枚貝にとっては定着の障害となるが、ヒドロ虫が脱落してできた空間にはこれらを含め新たな生物が定着し、成長することができる。今回の観察では、ヒドロ虫のコロニーの存在がこれら表生二枚貝にとって一つの重要な生息規制要素となっていることが指摘できる。

マガキは地中海全域に分布しているが、いずれも水面付近に集中している。特に Sites B, C では分布深度幅が短く、水深 20~30cm までしか見られない。マガキは一般に潮間帯に分布しているが(新川, 1988 など)、地中海では潮間帯が狭いため、このような分布形態を示している。しかし、Site A では水深 50cm まで多く生息し、水深 1.5m でも少なからず生息している。これらのことは、地中海の水質特性から考えると、マガキが塩分の低いところに選択的に生息していると解釈できる。すなわち、マガキは本水域でも他の生物群に占有されにくい厳しい水質環境として、低塩分あるいは干出水位に多く生息していると考えられる。特に日本海につながる地中海では、夏季は全般に水面が高く潮汐による干出は少ないが、冬季には日本海の海面低下により干出する期間が長く、範囲も大きい。地中海沿岸ではマガキは潮間帯というよりも、冬季に干出する可能性の高い水位に集中して生息している。

これに対して、ナミマガシワガイの成貝は、地中海沿岸でマガキより下位の水位に生息している。ナミマガシワガイは、Site A には分布せず、Sites B, C の上位の水深帯に多量に分布する。また、水面付近は比較的少ない。これはナミマガシワガイがマガキと対照的に低塩分水域および干出を避けて生息していることを示している。ナミマガシワガイの下限は塩分躍層の変動帯の中間付近である。これはナミマガシワガイが前に述べた足糸付着性二枚貝3種よりも貧酸素に対する耐性が弱いことを示している。マガキやナミマガシワガイは地中海の沿岸浅部に広く分布し、Site B での定着分布は、幼生時に中海上層の水塊を浮遊して分布域を広げることを反映している。

ヤマトシジミは、より上流の宍道湖および大橋川に優占する種で、低塩分水塊の影響の強い底質に内生生活している。Site A では、底質及び 1m 以深の柱

面から産出した。1m 以深の柱からの産出は、浮遊していた幼生がヒドロ虫のコロニーに着底して成長したものである。

フジツボは、幼生期に浮遊・遊泳して比較的堅質の底質に固着する。Site B での多産は、幼生が中海全域に浮遊・遊泳して分布域を広げていることを示している。Site B では、水面~水深 30cm および 2.5~4m で多く見られている。水深 2.5m~4m は塩分躍層の変動帯にあたり、フジツボの幼生が高塩分の底層流によって下流側の水域から浮遊してきたものと思われる。一方、水面~水深 30cm における多産は、ここに出現する種が潮間帯を好むタイプである可能性が考えられる。水面付近を除いて遺骸が卓越するのは、貧酸素に対する耐性が弱いことを示している。

## 2) メイオフォーナ

ここで議論するメイオフォーナは、主に介形虫と有孔虫である。地中海で産出するこれらの動物群は底生生活者で、一部を除いて浮遊しない。

*Paradoxostoma lunatum* は、低塩分水域の大橋川河口~高塩分水域の中浦水道までの表~中層域に幅広く分布する広塩性種である。これまで宍道湖・地中海で底質を中心とした介形虫の分布調査が行なわれてきたが(Ishizaki, 1969; 高安ほか, 1990; 田中ほか, 1998)、本種の産出報告はない。本属は、瀬戸内海では海藻や藻場状の生息するが(Okubo, 1980 など)、地中海では樹状のヒドロ虫のコロニー中に生息している。よって、ヒドロ虫のコロニーの見られない Site B の水面付近や Site C の下位の水深帯には分布していない。しかし、Site A では底質試料からも産出している。この地点の底質はホトトギスガイのマット状のコロニーであるが、樹状のヒドロ虫のコロニーが所々に見られるために産出していると思われる。本種は底質には生息せず、少なくとも地中海の湖底には分布しない。しかし、完全に孤立しているはずの Site B から少ないながら産出している。これまでの議論から本種が底質を這ってきたとは考えにくいので、船などで人為的に運搬されてきた、あるいは幼生期に浮遊してきたことが可能性として挙げられる。前者の場合、進入経路は水面付近からなので表層から下位方向に分布するはずであるが、そのような分布パターンを示していない。後者であると仮定し、分布パターンを考慮すると、下位の水深帯に分布しているものは高塩分の底層流によって下流側の水域から浮遊して移入し、上位の水深帯に分布するものは表層流によって上流側の水域から移入したと考えられる。その場合、本種は

塩分躍層を越えることができなかつたと考えられるが、今後、更なる生態観察が必要である。

Site Aのみで見られた*Sanyuania* sp. (田中ほか, 1998のGen et sp. indet.) や *Propontocypris* ? sp. は、中海には見られず、低塩分の水域を好んで生息している (田中ほか, 1998)。Site A では底質中あるいは下位の柱面に多く見られることから、底生生活者と考えられる。恐らく、下位の柱面に見られたものは底質から這い上がってきたものであろう。Sites A, Bの底質及びSite Bの水深3~4.5mで見られた*Bicornucythere bisanensis* は、中海や境水道の底質に広く分布し (Ishizaki, 1969; 高安ほか, 1990; 田中ほか, 1998)、広塩性で貧酸素状態に耐性を持つと考えられている。Site Bの水深3~4.5mから産出したものは、恐らく底質から這い上がってきたものが底質化したヒドロ虫のコロニーに生息していたと考えられる。また、分布が塩分躍層の変動帯の下部に限られていることから塩分躍層を越えて分布することができなかつたと考えられる。4.5m以下からは産出しなかつた。この水深帯は硬質の棲管群が見られるところであり、そのような底質には生息しにくいのであろう。Site Cのみで見られる*Xestoleberis hanai* や *X. setouchiensis* は、低~中塩分の水域には適応していないと考えられる。しかし、鉄柱の上位の水深帯に見られることは、浮遊・遊泳あるいは這って分布域を広げる能力があることを示唆している。

石灰質殻を持つ底生有孔虫の*Ammonia beccarii* は、宍道湖から中海まで広範囲の底質中に分布する (Nomura and Seto, 1992; 中海・宍道湖自然史研究会, 1985)。しかし、中海の貧酸素状態の水域では、*Trochammina hadai* が独占する群集に随伴している (Nomura and Seto, 1992)。今回の調査においてもほぼ同様な分布が得られている。Site Aでは、底質中及び柱面のヒドロ虫のコロニー中から*A. beccarii* が多産した。柱面のヒドロ虫のコロニー中のものは、配偶子や接合子の時期や幼期に浮遊し、ヒドロ虫のコロニーに着底したものと考えられる。しかし、水面付近のものは小さな個体が多いことから、水面付近では着底しても余り成長しないなど生存になんらかの制約を受けていると考えられる。柱面上部の*A. beccarii* は底質中のものと比較して生体が多い。このことは、*A. beccarii* が死ぬとすぐに流されてしまうことを示唆している。Site Bの底質および柱面では、多くの場合、*T. hadai* が独占する群集に随伴している。水深3~4.5mでは、*A. beccarii* の生存率は底質のものと比較して全体的にやや高い。これは*A. beccarii* が貧酸素状態

の水域より生息しやすいことを示唆している。4.5m以深の柱面では産出量が低く、生存率も低い。管棲生物が密集する硬質の底質には生息しにくいためであろう。3m以浅では、Site Aの生息環境とほとんどかわらないにもかかわらず、*A. beccarii* はわずかしき見られない。水深3m付近は塩分躍層の変動帯のほぼ上限にあたることから、本種は塩分躍層を越えて分布域を広げることができないことが示唆される。また、Site Aではある程度浮遊して分布を広げることが示唆されたが、表層水の流れを利用して分布域を大きく広げることができないと考えられる。これらはSite Cの上位に有孔虫が見られないことも説明できる。

*T. hadai*, *Miliammina fusca*, *Pelosina* sp. は炭酸塩殻を持たないが、*A. beccarii* との関連をみるため多少議論しておく。今回、Site Aでのみで見られた*M. fusca* は、低塩分を示す宍道湖に多く生息している (中海・宍道湖自然史研究会, 1985)。本種は、Site Aの壁面でも*A. beccarii* より少ないが、安定して産出している。しかし、Site Bの柱面などを含めて中海には見られないことから、中海の中塩分水域まで生息域を広げることができないと思われる。一方、*T. hadai* は中海の底質に普遍的に分布し、中~高塩分に適応している (Nomura and Seto, 1992)。本種も*A. beccarii* 同様に3m以浅ではほとんど産出しなかつた。本種も分散機構が*A. beccarii* と同様であると思われる。*Pelosina* sp. は、中海湖心周辺に分布している (Nomura and Seto, 1992)。本種は、底質には産出したが、柱面では極めて稀であった。これは、本種が上方に分布域を広げる能力を持たないためと思われる。

### 炭酸塩殻生物の定着に伴う底質の変化

人工物が設置された場合、多量の炭酸塩殻生物が生産されるが、それらが死ぬと底質に炭酸塩堆積物として堆積する。中海の底層域では、一般にpHが低く、炭酸塩類は溶出する状態である。今回の調査においても底層域で得られた貝片は一部が溶けた状態のものであった。しかし、人工物の直下の底質では、過剰に炭酸塩が堆積しているため、溶けにくくなっている。図7は1994年と1996年の8月にSite B付近の泥底で採取した底質に含まれる底生有孔虫の組成である。石灰質殻を有する*A. beccarii* と膠着質有孔虫の*T. hadai* や*Pelosina* sp. のと比をみると、人工物の直下の炭酸塩堆積物で得られた比は泥底中から得られた比より明らかに大きい。これは、炭酸塩が豊富にある状態が

炭酸塩殻生物にとって有利な生息状況であることを反映しているものと思われる。今回は生息を確認できなかったが、貧酸素あるいは無酸素状態に耐性のある大型の炭酸塩殻生物にとっても生息しやすい状態であり、底質改善の第一歩であるかもしれない。

炭酸塩殻生物の潜在的分布能力

これまで中海の人工建造物に生息する主要な炭酸塩殻生物の分布・生存条件について議論してきたが、一般化させてまとめると以下ようになる(図8)。

- 1) 中海の湖心付近の柱面では、塩分躍層の変動帯の下限(水深4.5m付近)より浅いところで生息する。
- 2) 多くの種は広塩性(少なくとも10~30psu)であるが、低塩性種は大橋川河口付近までしか分布しない。
- 3) メイオフォーナは固着生活をするものが分布していないのでヒドロ虫やマクロフォーナのコロニーが形成された後にそれを底質として生息を始める。
- 4) 底生メイオフォーナは、湖底側から分布域を広げるが塩分躍層を越えて分布できない。
- 5) 塩分躍層の変動帯の下部に特徴的に生息するものは、底層流によって下流側から浮遊して分布域を広げる可能性が高い。
- 6) 表層部のものは上層の水塊から浮遊して分布域を広げる可能性が高い。

これらの分布条件と現在の分布を考慮して、主要な貝類、介形虫類、有孔虫類について潜在的な分布を図9に示した。これは、もし同様な人建造物が設置されたときにこのような炭酸塩殻生物が生息するであろうと予測するものである。もっとも潜在的に広く分布しているのはホトトギスガイである。ホトトギスガイは水質浄化に役立つ可能性を指摘されている

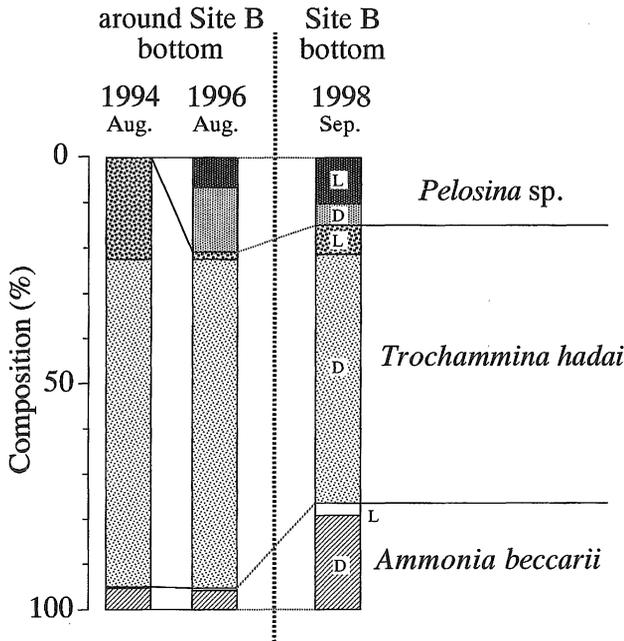


図7. Site B直下の底質中の有孔虫組成とSite B付近の泥底の有孔虫組成。

Fig. 7. Foraminiferal composition in the substrata just below Site B column and near Site B.

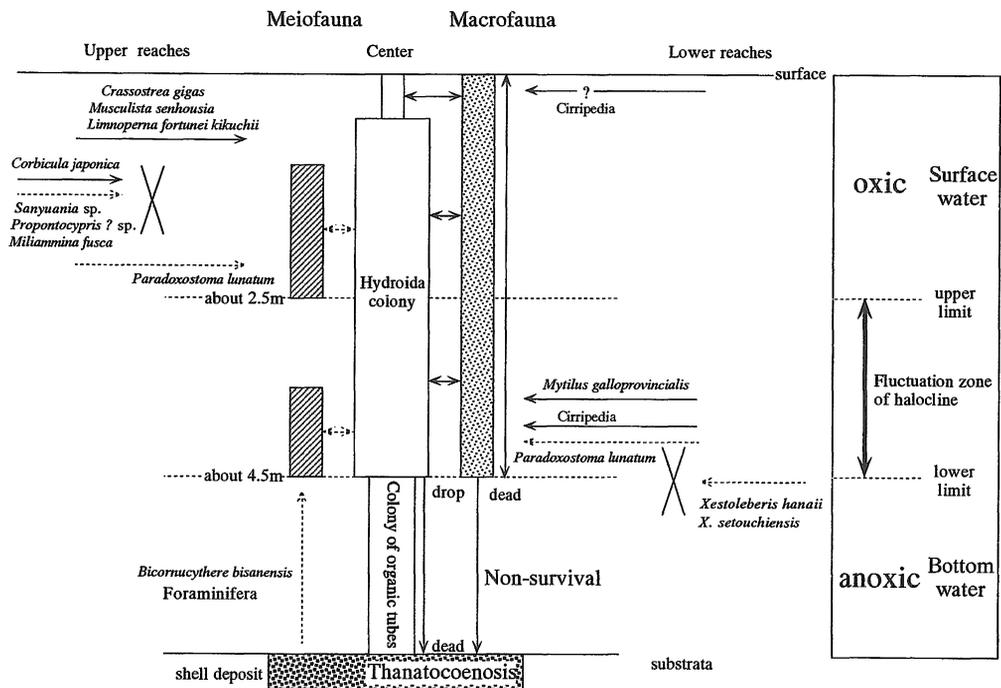
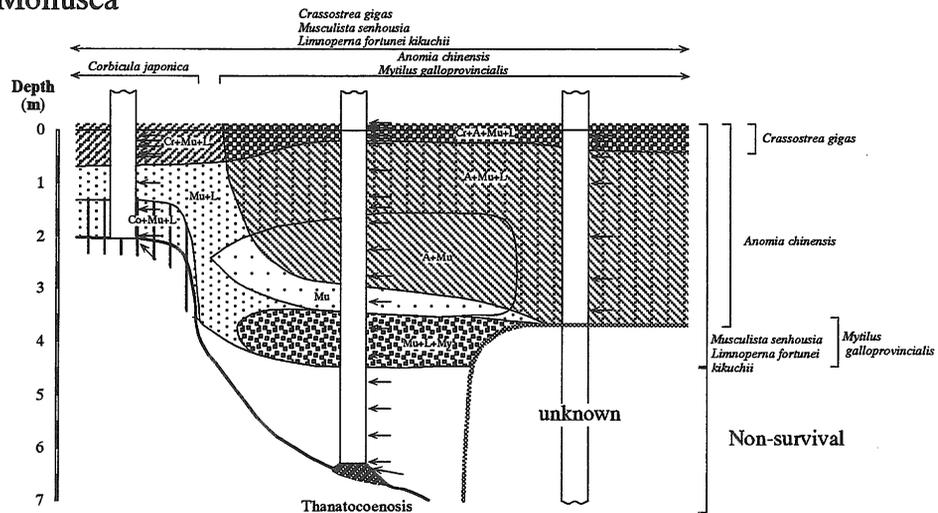


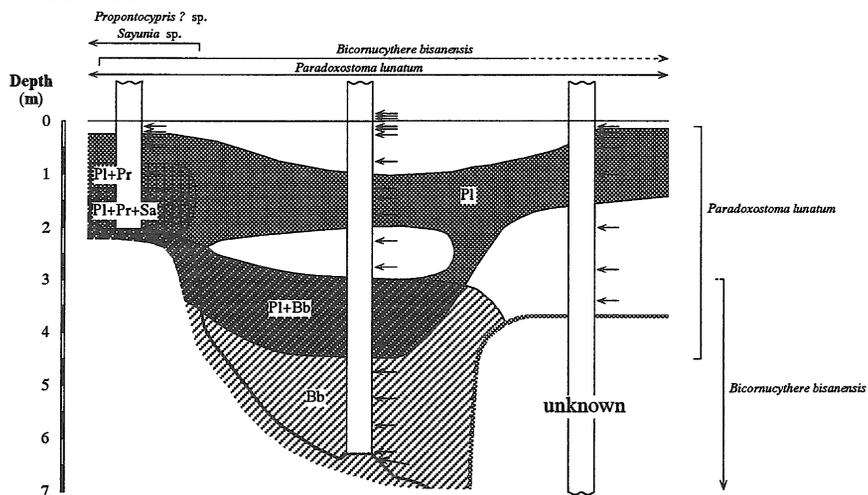
図8. 中海における炭酸塩殻生物の分布概略。

Fig. 8. Schematics of carbonate shell animals for distribution in the Lake Nakaumi.

Mollusca



Ostracoda



Foraminifera

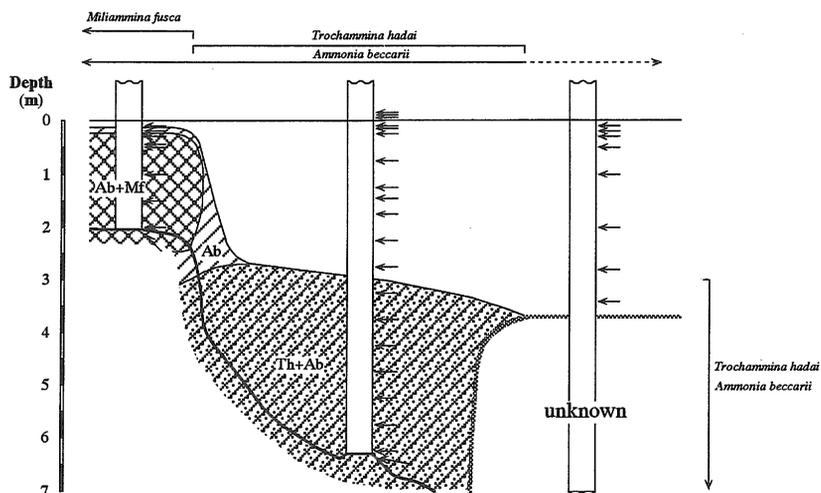


図9. 貝, 介形虫, 有孔虫の潜在的な分布.

Fig. 9. Capacity of Mollusca, Ostracoda, Foraminifera for distribution in Lake Nakaumi.

(山室, 1997) が, 塩分躍層の変動帯の下限以浅であれば, どこでも着底・生存する。しかも, ヒドロ虫様の着底基盤にすれば, 多量の生産が可能である。一方, 養殖に広く用いられているマガキは, 中海では水深30cm程度でしか, 自然着底することは期待できない。採苗された"カキ連"を筏式垂下法で入れたとしても水深70cm以深では, ヒドロ虫に覆われ, 足糸性付着生物が繁栄するため, 貝類の養殖は困難であろう。貝類を養殖するためには, ホトトギスガイやヒドロ虫の対策を行う必要がある。

## 謝 辞

本研究の調査では, 島根大学汽水域研究センターの所有する調査船「ルピア」を使用した。調査船を快く貸していただいた國井秀伸博士に厚く御礼を申し上げます。また, 島根大学総合理工学部地球資源環境学科の田中陽子氏には調査に御協力いただいた。また, 本研究には財団法人日本科学協会による笹川科学研究助成金の一部を使用した。ここに感謝の意を表し, 厚くお礼を申し上げます。

## 引用文献

- Connell, J. H. (1972) Community interactions on marine rocky intertidal shores. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 3: 169-192.
- Fujii, T. (1998) Relationship between Internal Oscillation and Movement of anoxic water in a connected brackish water region - Lake Nakaumi and the Ohashi River. *Jpn. J. Limnol.*, 59: 1-12.
- 細見杉文 (1989) ムラサキイガイの生態学。山海堂, 東京, 137 p
- Ishizaki, K. (1969) Ostracodes from Shinjiko and Nakanoumi, Shimane Prefecture, western Honshu, Japan. *Sci. Rep., Tohoku Univ., 2nd Ser. (Geol.)*, 41 (2): 197-224.
- Iwasaki, K. (1995) Factors delimiting the boundary between vertically contiguous mussel beds of *Septifer virgatus* (Wiegmann) and *Hormomya mutabilis* (Gould). *Ecological Research*, 10: 307-320.
- 清川智之・向井哲也・山根恭道・内田浩・中村幹雄 (1998) 中海沿岸ベントス (貝類) 調査。島根県水産試験場事業報告, 平成8年度: 223-229.
- 中海・宍道湖自然史研究会 (1985) 中海・宍道湖自然史研究 - その4, アトラスデソ20による宍道湖湖底の音波探査 -。島根大地質研報, 4: 127-132.
- Nomura, R. and Seto, K. (1992) Benthic foraminifera from brackish lake Nakanoumi, San-in district, Southwestern Honshu, Japan. *Centenary of Japanese Micropaleontology*: 227-240.
- 野村律夫・遠藤公史 (1998) 汽水域における人為的改造と有孔虫群集の変化 - その5 *Ammonia* イベントの提唱と2005年の宍道湖 -。LAGUNA (汽水域研究), 5: 15-26.
- Okubo, I. (1980) Taxonomic studies on Recent marine Podocopid Ostracoda from the Inland Sea of Seto. *Publ. Seto. Mar. Biol. Lab.*, 25 (5/6): 389-443.
- 奥田節夫 (1997) 汽水湖における水塊の移動と混合過程。沿岸海洋研究, 35 (1): 5-13
- 新川英明 (1988) 牡蛎の生物学。共文社, 東京, 167p.
- 園田武・中尾繁・中村幹雄・高安克巳 (1998) 宍道湖・中海・神西湖の多毛類相。LAGUNA (汽水域研究), 5: 101-108.
- 高安克巳・植田和昭・太田久子 (1990) 中海・宍道湖の自然史研究 (その12), 中海底質中の介形虫遺骸群集とその変遷。島根大地質研報, 9: 129-144.
- 田中源吾・瀬戸浩二・高安克巳 (1998) 美保湾・中海・宍道湖に至る環境と介形虫群集との関係。LAGUNA (汽水域研究), 5: 81-91.
- 徳岡隆夫・高安克巳・三瓶良和・瀬戸浩二・井内美郎・西村清和・安間恵・須崎聡・松田滋夫・山中正 (1995) 汽水域・塩分躍層の動態長期観測システムの開発 (予報)。LAGUNA (汽水域研究), 2: 21-27.
- 徳岡隆夫・三瓶良和・亀井健史・玉理圭太郎・西村清和・松田滋夫・須崎聡 (1996) 汽水湖中海における塩分躍層動態の長期観測。LAGUNA (汽水域研究), 3: 73-90.
- 山室真澄 (1997) 汽水域での高次生産者を通じた窒素・リンの収支。沿岸海洋研究, 35 (1): 69-72.
- 山根恭道・向井哲也・清川智之・内田浩・中村幹雄 (1998) 中海・宍道湖漁場環境保全対策推進調査定期観測基礎調査。島根県水産試験場事業報告, 平成8年度: 230-249.

付表1. 軟体動物・蔓脚類産出リスト.

Appendix 1. List of Mollusca and Cirripedia from Lake Nakaumi in this study.

Sample No.	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Species name	-10	-20	-30	-45	-50	-100	-150	-200	-230	15	10	5	-5	-10	-15	-25	-75	-125
	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Mollusca																		
<i>Scapharca subcrenata</i>																		
<i>Mytilus galloprovincialis</i>															C(L)	F(L)	F(L)	C(L>D)
<i>Limnoperna fortunei kikuchii</i>	F(L)	F(L)	A(L)	A(L)	A(L>D)	A(L>D)	A(L>D)	A(L>D)	C(L>D)	C(L)	C(L>D)	C(L>D)	C(L>D)	C(L>D)	C(L>D)	C(L)	VA(L)	A(L>D)
<i>Musculista senhousia</i>	F(L)	A(L)	A(L)	A(L)	A(L>D)	VA(L>D)	A(L>D)	A(L>D)	VA(L>D)	VR(L)	C(L>D)	C(L>D)	C(L>D)	F(L>D)	A(L>D)	A(L>D)	VA(L>D)	VA(L>D)
<i>Anomia chinensis</i>											A(L>D)	A(L)	A(L)	C(L)	A(L)	VA(L)	A(L>D)	C(L>D)
<i>Crassostrea gigas</i>	VA(L>D)	VA(L)	VA(L)	VA(L)	C(L)		C(L>D)			VA(L)	A(L=D)	A(L)		A(L)				
<i>Corbicula japonica</i>						VR(L)	C(L>D)	C(L>D)	A(L>D)									
<i>Trapezium liratum</i>				R(L)			F(L>D)		VR(L)						R(L)	F(L)	F(L)	C(L)
<i>Ruditapes philippinarum</i>																		
<i>Thais clavigera</i>																		
others										R								
Cirripedia																		
				C(L>D)						R(D)	C(L=D)	A(L>D)	A(D)	C(L=D)	A(D)	F(D)	F(L=D)	C(L=D)

Sample No.	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C
Species name	-145	-175	-225	-275	-325	-375	-425	-475	-625	-625	-10	-20	-30	-50	-100	-200	-280	-340
	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C
Mollusca																		
<i>Scapharca subcrenata</i>																		
<i>Mytilus galloprovincialis</i>																		
<i>Limnoperna fortunei kikuchii</i>				F(D)														
<i>Musculista senhousia</i>	A(L>D)	A(L>D)	A(L>D)	VA(L>D)	VA(L>D)	A(L<D)	A(L<D)											
<i>Anomia chinensis</i>	VA(L>D)	A(L>D)	A(L)	A(L>D)	VR(L=D)	VR(L=D)												
<i>Crassostrea gigas</i>																		
<i>Corbicula japonica</i>																		
<i>Trapezium liratum</i>				VR(L)														
<i>Ruditapes philippinarum</i>																		
<i>Thais clavigera</i>	C(L)	C(L)																
others																		
Cirripedia																		
	R(D)	F(L=D)	C(L<D)	A(L=D)	R(L=D)	A(L<D)	C(L<D)	VR(D-frag)	VR(D-frag)	C(D)	C(L<D)	C(L=D)	C(L<D)	R(L>D)	VA(L)	A(D)	VA(L)	VA(L=D)

付表2. 介形虫産出リスト.

Appendix 2. List of Ostracoda from Lake Nakaumi in this study.

Sample No.	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
Species name	-30	-45	-50	-100	-150	-200	-230	5	-125	-145	-175	-325	-375	-425	-625	-10	-20	-30	-50	-100	-340
	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C
<i>Sayunia</i> sp.	L	9	1	1	31	175	77	63													
	S	2	1	1	15	107	2	98													
	D				21	1	1														
<i>Paradoxostoma lunatum</i>	L		4	64	33	4	6	1	2			4			1		6	654	7		
Okubo, 1977	S	9		7	254	62	6	1	5	11	1	20			1	2	6	2360	6		
	D			3	3		2								2		2	27			
<i>Propontocypris</i> ? sp.	L				10		24														
	S				2		1														
	D																				
<i>Dolerocypris mukaishimense</i>	L																				
Okubo, 1980	S																				
	D						1														
<i>Bicornucythere bisanensis</i>	L						1					1	1	2							
(Okubo,1980)	S																				
	D																				
<i>Spinileberis quadriaculeata</i>	L																				
(Brady, 1880)	S																				
	D																				
<i>Loxoconcha hattorii</i>	L																				
Ishizaki, 1971	S																				
	D																				
<i>Xestoleberis hanaii</i>	L																				
Ishizaki, 1968	S																			1	1
	D																				
<i>Xestoleberis setouchiensis</i>	L																				
Okubo, 1979	S																				2
	D																				
Living specimen	9	1	5	95	218	81	94	1	2	0	0	5	1	3	0	0	1	7	655	7	2
Stained specimen	11	1	8	269	171	8	100	0	5	11	1	20	0	0	113	1	2	6	2360	6	0
Dead specimen	0	0	0	3	24	1	4	0	2	0	0	0	1	7	652	0	0	2	27	0	0
Total	20	2	13	367	413	90	198	1	9	11	1	25	2	10	765	1	3	15	3042	13	2

付表3. 介形虫産出リスト.

Appendix 3. List of Foraminifera from Lake Nakaumi in this study.

Species name	Sample No.	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
		-10	-20	-30	-45	-50	-100	-150	-200	-230	5	-15	-75	-125	-175	-225	-275	-325	-375	-425	-475	-525	-575	-625	-625
		C	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	B
<i>Ammobaculites</i> sp.	L							2		1															
	D																								
<i>Cribrostomoides canariensis</i>	L								1																
	D							2		3															
<i>Cribrostomoides?</i> sp.	L																								
	D					1																			
<i>Milianmina fusca</i>	L		2	13	7	16	22	23	14	7															
	D			7	2	9	8	17	13	12															
<i>Pelosina</i> sp.	L																					1		15	
	D																					1	3	7	
<i>Trochammina hadai</i>	L												1			2	1	23	8	1	2			9	
	D										1	6	3	3	1	3	16	213	177	23	24	22		79	
<i>Scutularis</i> sp.	L																						1	1	
	D																							1	
<i>Ammonia beccarii</i>	L	1	35	193	111	186	113	122	133	140						1	7	6	21		1			4	
	D	1	9	39	6	58	12	49	37	69	1			3	2	3	11	31	31	19	13	13	1	30	
<i>Brizalina striatula</i>	L																								
	D																					1			
<i>Elphidium clavatum</i>	L																								
	D																	1							
living		1	37	206	118	202	135	147	147	148	0	0	0	1	0	0	3	8	30	30	1	3	0	0	
dead		1	9	46	8	67	20	68	50	81	1	1	6	6	5	1	6	28	245	211	42	38	35	2	
Total		2	46	252	126	270	155	215	198	232	1	1	6	7	5	1	9	36	275	241	43	41	35	2	