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

鹿島 薫

Salinity changes during the Late Holocene at coastal brackish lakes in Japan

Kaoru Kashima¹

Abstract: To confirm the influence by the global climatic changes and sea level fluctuations to lake environment, we obtained undisturbed vertical core sections of sediments using drilling equipments at several brackish lagoons in Japan. The diatom–inferred salinity reconstruction for these brackish lagoons provides an excellent example of long–term salinity measurements during the Holocene.

At Lake Hamana and Lake Kasumigaura, a series of environmental oscillations with 700–1200 years intervals between fresh water, brackish to marine episodes followed after the eruption of Akahoya Ash (6300 y. BP). They have presumably varied substantially due to sea level fluctuations within the Late Holocene.

On the other hand, at Lake Shinji, a very closed tidal flat, where diatom valves are rarely preserved in sediments, continued for thousands of years after the eruption of Akahoya Ash (6300 y. BP).

Key words: brackish lake, diatom, environmental change, Holocene, salinity

はじめに

宍道湖・中海に代表される沿岸性汽水湖沼は、周囲を陸地で囲まれ、外海とは幅の狭い水道でつながりを持つ.一般に水深が浅く、太陽エネルギーを利用する上で有利であること、陸域からの豊富な有機物や栄養塩類の供給があることから、高い生物生産性を維持している場でもある.さらに、陸域から海域への移行部にあるため、潮汐による外海との物質交換、湖水の塩水成層など複雑な水利的条件を呈し

ている. 生態学的に見ても,多くの汽水固有種が分 布するなど,特色のある場ともなっている(國井ほ か,1993).

地史学的には、日本の汽水湖沼のほとんどが海跡 湖に属し、かつて海域であったものが湖沼となった ものである. 宍道湖・中海も、約1万年前以降の縄 文海進によって形成された古宍道湾・古中海湾が、 その後、砂州の発達や河川による埋積で海域から切 り離されていく過程が復元されている(徳岡ほか、 1990). 汽水湖はその多くが最近2万年以内に形成

¹ 九州大学大学院理学研究院地球惑星学専攻 Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University 6-10-1 Hakozaki, Fukuoka 812-8581, Japan E mail: kashima@asa kuushu u aa in

E-mail: kashima@geo.kyushu-u.ac.jp

されたものであり、その地史的な時間は内陸湖沼に 比べて短い.しかし、汽水湖沼は外部からのわずか な影響によって、その環境を大きく変動させてきた ことが知られている(國井ほか、1993).例えば、海 水準変動や潮汐変動などの海域からの影響、河川か らの堆積物・栄養塩の供給量の変動、気象変動そし て人間による自然改変が湖沼の環境を大きく変動さ せてきたと推定される.

このような汽水湖沼の環境変動史から、その地域 の人間活動の解明、さらには地球規模の地球環境の 変動の解明など、環境変動についての多くの重要な 情報を読みとることが期待され、これまでも堆積学 的、古生物学的そして地球化学的手法を用いて、様々 な研究がなされてきた(例えば、徳岡ほか、1990). 著者は1980年代より、日本各地の汽水湖沼におい て、珪藻を指標としての環境変動の復元について研 究を進めてきた.その結果、汽水域の珪藻類には独 特の生態学的特徴があり、それが環境変動の議論に 極めて効果的であることが明らかとなった.

本稿では,筆者がこれまで関わってきた湖沼およ び内湾における研究成果より,その議論の根拠と なってきた,汽水域における珪藻の生態学的特徴と 珪藻殻の堆積過程についての知見,及び最近 6000 年間の湖水環境,特に塩分変動に関わる知見を報告 する.

古環境指標としての珪藻

珪藻は、単細胞の藻類の一つであり、塩分、pH、 栄養塩,水深,乾湿などの変動を示す環境指標とし て知られている.また,珪藻の殻は堆積物中で保存 されやすいことから、過去の環境変動の指標として も用いられることが多い(鹿島 1986, 1993). 湖沼 堆積物は,一般に珪藻化石に富んでおり, 珪藻を用 いた古環境解析に適している. 例えば, 浜名湖の場 合,湖底堆積物1mgあたりの珪藻個体数は最大で 10万個体を超しており、この場合堆積物のほとん どが珪藻の遺骸からなると言っても過言ではない (鹿島, 1988). 日本においても湖沼堆積物の珪藻化 石群集については,内陸湖沼や沿岸汽水湖沼を中心 にこれまで研究がなされてきたが、その数は十分と は言えない.しかし、近年、珪藻の生態と珪藻殻の 堆積過程については,多くの新しい研究が報告され ており(例えば安藤, 1990; 鹿島, 1986, 1989; 小 杉, 1988), その結果珪藻から復元される古環境の 精度を大きく向上させることが可能となった.



図1 珪藻を指標とした古環境復元のための研究 フローチャート.

Fig.1 The flowchart for the paleo–environmental reconstruction using diatoms.

通常,珪藻を用いた古環境の復元には,図1で示 した過程を経る.この場合,水域生息する現生の珪 藻群集は,死後,湖底に堆積して遺骸群集となり, さらに堆積物中で化石群集へと推移し,その過程で, 生産された珪藻殻は溶解,破壊,運搬,混合を受け てゆく.それまでの研究では,これらの過程をきち んと分離しておかなかったため,古環境指標として の珪藻の特徴を十分に明らかにできなかった.そこ で,次に筆者がこれまで研究を進めてきた宍道湖・ 中海を例にとって,汽水湖沼における現生珪藻群集, 珪藻遺骸群集,珪藻化石群集の特徴をまとめる.

宍道湖・中海における現生・遺骸・化石 珪藻群集の特徴

(1) 水質変化と現生珪藻群集の変動

日本海に面した宍道湖・中海は、大橋川と境水道 によって海域とつながっている汽水湖沼である(図 2,3).周囲を陸地で囲まれている宍道湖・中海で は、降水時には多くの河川水が流入し、その表層部 の塩分は低下する.また、渇水時には河川水の流入



Fig.2 The research lakes of this sutdy.

が減り塩分が上昇することが知られている.淡水化 工事の完了する前の 1970~1980 年代の記録を見て も, 宍道湖湖心部の表層水の塩分は, 塩素濃度で 0.5~6パーミルと 10 倍以上の変動を見せている(秋 山 1975~1985) (図 3). しかし,同時期の湖水中の珪藻群集にはむしろ変 動が小さく,全期間を通じて Cyclotella caspia, Diploneis pseudovalis, Chaetoceros sp. Skeletonema costatum が優占していることが分かる(図3). 塩分 低下期には Skeletonema costatum が増加する傾向は 見られるものの,優占する群集が大きく入れ替わる ことはない.また,湖水の塩分がかなり低下してい るにも関わらず, Aulacoseira granulata などの淡水 生珪藻が多く産出することはなかった(図3).

(2) 湖底表層堆積物中の珪藻遺骸群集の変動

淡水化工事のほぼ完了する 1983-1986 年におけ る湖底表層堆積物中の珪藻遺骸群集の分布では, 宍 道湖では湖の中心部分で堆積物 1 mg あたり 10⁶ 個 を越える珪藻遺骸を確認できた. 湖岸付近では珪藻 数が減少するがこれは堆積物の粒径が大きくなるこ とと関係している (図 4).

これに対して、中海では湖東南部の米子湾で珪藻



Diatom flora from surface water samples at the central part of Lake Shinji 1969-1983

図3 宍道湖湖心における表層水中の珪藻群集の変動と湖水の塩分変動 (秋山 1975–1985 を改変). Fig.3 The diatom floras and lake salinity from surface water samples at the central part of Lake Shinji (after Akiyama, 1975–1985).



図4 宍道湖・中海における湖底表層堆積物中の珪藻遺骸群集(鹿島, 1993, 1994). **Fig.4** Diatom assemblages from surface sediments at Lake Shinji and Lake Nakaumi (Kashima, 1993, 1994).

数の増加が認められた (図 4).

珪藻遺骸群集の構成については、宍道湖と中海で 大きな相違が見られる.宍道湖では、湖のほぼ全域 で Cyclotella caspia が優占し、全珪藻遺骸数の 80% 以上を占めている.そして Diploneis pseudovalis が 随伴して産出している(図4).湖水中からはこれら 2種のほかに、Chaetoceros sp. Skeletonema costatum が産出したが、この2種は殻の構造が弱く、表層堆 積物中に遺骸として保存されていないことを示す (図3).このため、見かけ上、珪藻遺骸の分布では、 Cyclotella caspia が1種、卓越した分布を示すよう になる.

一方,中海では Cyclotella caspia, Diploneis pseudovalis に加えて, Thalassionema nitzschioides, Thalassiosira spp., Fragilaria flavovirens, Paralia sulcata が産出している.このように,両湖沼間で は,珪藻遺骸群集の構成,特に産出する珪藻の種数 に大きな差異が見られた.珪藻遺骸で見る限り,宍 道湖では種の多様性が極端に減少し, Cyclotella caspia が一種多産するようになる (図 4).

宍道湖・中海の湖底から淡水生の珪藻殻も産出する、塩分低下期においても、淡水生種が湖水中に多産する事がないことから(図3)、これらは流域の河

川から流入した異地性の珪藻殻と判断される.淡水 生珪藻殻は, 宍道湖では斐伊川河口, 中海では飯梨 川河口に多く分布しているが, その範囲は河口 2 km 以内に留まり, またその全珪藻殻数に占める割合は 10% 以下である. 両湖沼のその他の地点では, 産 出する淡水生種の割合は 1~2% 以下に留まってい る (図 4).

両湖沼では,降水時に大量の河川水が湖内に流入 しており,それに伴って多くの淡水生珪藻遺骸が湖 内に流入していることが予想された.しかし,珪藻 遺骸の分布で見る限り淡水生種の影響は小さく,し かも分布が河口域などに限定されていることが分か る(図4).これは,湖内での珪藻殻の生産が極めて 大きく,そのため相対的に異地性殻の割合が小さく なっていることを示している.

(3) ボーリングコア試料中の珪藻化石群集の変動

宍道湖・中海ではこれまでに多数のボーリングコ ア試料が古環境復元を目的として掘削されてきた (徳岡ほか,1990).ここでは,これらの中から,宍 道湖の湖心で掘削された SJ 96 及び SJ 89-1 コアを 取りあげ,珪藻化石群集の変動を論じる(図 5).SJ 96 は湖底堆積物基底までの掘削コア試料である.そ



図5 宍道湖湖心における湖底堆積物中の珪藻化石群集の変化(鹿島, 1994;森田ほか, 1998).

Fig.5 Diatom fossil assemblages from lake sediment cores at the central part of Lake Shinji (Kashima, 1994; Morita *et al.*, 1998).

の最上部1mは掘削時の攪乱が見られたため,近接 して採取されていた SJ 89-1 コアを用いて解析した.

宍道湖湖心では、湖底下約 15 m で基底の第三紀 層に達する.堆積物はおおむね均一な粘土層からな るが、基底付近では泥炭質に、また途中いくつかの 層準でラミナの発達が見られる(高安・出雲古代景 観復元チーム、1998).珪藻化石は、S1~S3の3 層準で多く産出した.S1は基底直上に位置し、淡 水生の Aulacoseira granulata と現在の宍道湖で優占 する Cyclotella caspia が混じって産出する.S2は アカホヤ火山灰層を挟む層準であり、Cyclotella caspia 加えて、Thalassiosira nitzschioides、Cocconeis scutellum, Diploneis pseudovalis が産出した.S3は 最上部に位置し、Aulacoseira granulata が優占する 淡水環境から、Cyclotella caspia が優占する汽水環 境への推移が確認された(鹿島、1994; Kashima et al. 1997;森田ほか、1998)(図 5).

以上のように、宍道湖では、断片的ながら海進期 の堆積環境(S1)、縄文海進頂期の内湾的堆積環境 (S2)、そして閉塞された淡水~汽水環境(S3)が 珪藻化石群集から復元され、同湖沼が地史学的に海 跡湖としての特徴を持つことを示しており、徳岡ほ か(1990)による古地理図と調和している.

しかし、以下の2点が宍道湖の環境変動の特徴的 な現象として確認された.第1に、アカホヤ堆積時 以降、約5mの層準にわたって、ヌマコダキガイ の幼貝のみが多産する層準が見られ(高安・出雲古 代景観復元チーム、1998)、その間は珪藻化石の産 出が認められなかった(Kashima *et al*.1997;森田ほ か、1998).貝群集から見て、極めて閉塞された干 潟状の環境が推測されるが、珪藻化石が保存されな い堆積環境が継続していたことになる.

第2には、最近50~100年ほど前から、わずかで あるが湖水の塩分が上昇し、それまでの淡水環境か ら汽水環境へと変化している.これは、近代以降の 人為による地形改変の影響と考えられてきた(例え ば、徳岡ほか、1990).しかし近年、地球の温暖化 に伴う海水準の上昇が指摘されており、それとの関 係についても、他湖沼との比較を含め、検討が必要 となっている(Kashima, in press).

汽水域の珪藻類の生態学的・堆積学的 特徴について

宍道湖・中海における研究より, 汽水域における 珪藻類の分布の特徴として, 以下の2点が明らかと なった.第1は, 宍道湖のように海域から遠く離れ 塩分の低い湖沼では, 湖底に堆積する珪藻遺骸の多 様性が減少し, Cyclotella caspia が1種優占するよ うになる.第2には, 周辺から多くの河川水が流入 しているのにも関わらず, 淡水生珪藻殻の分布は河 口域など限定された範囲に限られており, その割合 も小さい.

以上のような特徴が宍道湖・中海に限定されたも のであるのか,それとも日本各地の汽水湖沼に共通 する特徴であるかを確認するため,他の汽水湖沼に おける表層堆積物中の珪藻遺骸の分布を検討した. 考察に用いた試料は,浜名湖(鹿島,1988),三方 湖(鹿島,未発表),サロマ湖(鹿島,1996),網走 湖(鹿島,1996),上甑島汽水性湖沼群(鹿島1989, 1993)である.これらの湖は,それぞれ太平洋,日 本海,オホーツク海,東シナ海に面している.

宍道湖・中海のように相隣接した湖沼で異なる塩 分環境を呈する湖沼である,サロマ湖・網走湖では, 宍道湖・中海とほぼ似た珪藻遺骸群集の分布が認め られた(図6).極めて閉塞された汽水湖沼である網 走湖では,網走川の河口地域を除くと,Cyclotella caspia が1種で全珪藻殻数の80%以上を占めてお り,その状態は宍道湖と類似している.これに対し て,海水との湖水の交換の大きいサロマ湖では Thalassiosira nitzschioides など約6種が分布を分け 合っている(図6).サロマ湖における多産種の構成 は,Thalassiosira nitzschioides など中海と共通する ものも見られたが,Fragilaria flavovirensのように サロマ湖で産出しない種も認められた.しかし,塩 分上昇に伴い産出する珪藻遺骸の多様性が増加する という特徴は中海と共通している.

ほぼ同様の現象は、東シナ海に位置する上甑島汽 水性湖沼群でも確認された. 塩分の低い貝池, 鍬崎 池では Cyclotella caspia が一種で優占するのに対 し、塩分の高いなまこ池では Cyclotella caspia に加 えて, Thalassiosira nitzschioides, Paralia sulcata など が多く産出するようになる (図 7).

これに対し,浜名湖では Cyclotella caspia の割合 は大きいものの,宍道湖や網走湖のように1種のみ が多産する状態は見られず,Thalassionema nitzschioides,Thalassiosira spp., Fragilaria flavovirens など約5種の珪藻で分布を分け合っている(図8). 浜名湖の北西部は猪鼻湖と呼ばれ狭窄部で区切られ ているが,珪藻遺骸で見る限りむしろ中海に近い分 布となっている.これは狭窄部の水深が大きく,湖 水の交換が頻繁であることによるものと考える.



図 6 網走湖・サロマ湖における湖底表層堆積物中の珪藻遺骸群集 (鹿島, 1996). Fig.6 Diatom assemblages from surface sediments at Lake Abashiri and Lake Saroma, northern Japan (Kashima, 1996).



Cocconeis scutellum Nitzschia lanceolata Cyclotella caspia

図7 上甑島汽水性湖沼群における湖底表層堆積物中の珪藻遺骸群集(鹿島, 1989, 1993).

Fig.7 Diatom assemblages from surface sediments at brackish lakes in Kamikoshiki Island, south–west Japan (Kashima, 1989, 1993).

8



図 8 浜名湖湖底表層堆積物中の珪藻遺骸群集 (鹿島, 1988). Fig.8 Diatom assemblages from surface sediments at Lake Hamana, central Japan (Kashima, 1988).

以上のように、宍道湖のように海域から遠く離れ 塩分の低い湖沼では、湖底に堆積する珪藻遺骸の多 様性が減少し、Cyclotella caspia が1種優占するよ うになる現象が、日本各地の汽水湖沼で、接する海 域の違いには関係なく確認された。

次に、汽水湖内への淡水珪藻遺骸の流入について 考察を加える.汽水湖内への淡水生珪藻殻の流入堆 積は一般に小さい.網走湖では、湖の南端部に網走 川が形成したデルタ地形が発達しているが、最もデ ルタに近い試料採取地点でも淡水生珪藻殻の全珪藻 殻に占める割合は25%に過ぎない(図6).サロマ 湖(図6)や浜名湖(図8)では、湖底表層からの淡 水生珪藻の産出は極めて小さく、全珪藻数の1%以 下となる.浜名湖の場合は、やや塩分を含む河口感 潮域に特徴的に分布する Nitzschia frustulum が、湖 の北端部の都田川河口に見られたが、その分布も河 口 2~4 km 以内に限られている(図8f).湖の規模 の小さい上甑島汽水性湖沼群(図7)(鹿島 1989, 1993)においても,淡水生珪藻遺骸の割合はとても 小さいことが確認されている.このように,宍道湖・ 中海と同様に,多くの河川水の流入があるにもかか わらず,湖内での珪藻殻の生産が大きく,その結果 淡水生珪藻遺骸の割合が相対的に小さくなる現象 は,他の多くの湖に共通した現象であることが確認 された.

これらの湖沼に対して,三方湖では多くの淡水生 珪藻遺骸が湖内から産出している.三方湖は,三方 五湖と呼ばれる複数の湖沼が連なる湖沼群の最も内 陸側に位置している.湖底表層からは,Cyclotella caspia に混じって多くの淡水生種が産出したが,そ の割合は,流入河川の河口部に位置する湖の南東部 で 60~70% に,最も海域に近い北西部で 30~40% に達する (図 9). Cyclotella caspia の遺骸が多くの 淡水生種と混じって産出するのは,三方湖の特異な



図 9 三方湖湖底表層堆積物中の珪藻遺骸群集. **Fig.9** Diatom assemblages from surface sediments at Lake Mikata, central Japan.

堆積環境によるものと思われるが, さらなる観測が 必要とされている.

珪藻化石群集を指標とした 汽水湖沼における古環境変動

宍道湖におけるボーリングコア試料中の珪藻化石 群集の推移から、完新世における湖水の環境変動、 特に湖水の塩分の変動が復元された(図5).その結 果、アカホヤ火山灰堆積時以降、閉塞された堆積環 境が形成されたこと、最近50年ほど前から、わず かであるが湖水の塩分上昇が始まっていることなど の特徴が認められた.

そこで,以上の2点に焦点を絞りながら,日本各 地の汽水湖沼におけるボーリングコア試料中の珪藻 化石群集の変遷について,以下,検討を加える.こ こで用いたのは,湖底堆積物基底部までの試料が得 られた,浜名湖,霞ヶ浦,三方湖,さらに湖底堆積 物浅層部の試料が得られた網走湖,サロマ湖である.

(1) 浜名湖

アカホヤ堆積時以降の塩分変動が最も顕著に現れ たのは浜名湖である.浜名湖では、アカホヤ堆積時 以降 H1 から H6 までの 6 つの珪藻帯を設定するこ とができた(鹿島, 1988;本田・鹿島, 1997; Kashima et al., 1997;森田ほか, 1998).H1 では Cyclotella caspia, Thalassionema nitzschioides, Thalassiosira spp. などが多く産出しており、現在の浜名湖・中海の湖 底遺骸群集の構成と類似した群集となる.ただし, H1 の中でも Cyclotella caspia の割合に変動が見ら れ、深度 13.0 m 付近で、Cyclotella caspia が大きく なっている.これは現在の浜名湖の湖奥部の状態と 類似している.

H2では Cyclotella caspia が優占的に産出してお



図 10 浜名湖湖心における湖底堆積物中の珪藻化石群集の変化(Kashima et al., 1997;森田ほか, 1998). **Fig.10** Diatom fossil assemblages from lake sediment cores at the central part of Lake Hamana (Kashima, 1997; Morita *et al.*, 1998).

り、H2の上半部ではその割合が80%に達してい る.これは、現在の宍道湖の湖底遺骸群集の構成と 類似しており、H1からH2にかけて、湖の閉塞が 強まり、湖水表層の塩分が低下したことを示してい る. H3では, Aulacoseira granulata をはじめとす る淡水生種が多く産出する. 汽水湖沼では、どのよ うに周囲から河川水などに混じって淡水生珪藻遺骸 が流入・堆積しても、それが優占することがないこ とが,前項の考察より判断されるため,H3におい ては浜名湖は海域から完全に切り離されて、淡水湖 沼となったことが判断される. その後, 再び汽水化 (H4) と淡水化 (H5) をくり返した後, Cyclotella caspia, Thalassionema nitzschioides, Thalassiosira spp. などが混じり合って産出する,海水との交換の大き い汽水環境(H6)へと変化した(図10).96H1の解 析により、H6はさらに a-e まで5つに分帯され、 その中では Cyclotella caspia と Thalassionema nitzschioides, Thalassiosira spp. の割合が, 周期的に 変動した (図 10). これは塩分の変動が近年まで続 いていることを示しており,最近の 50~100 年では Cyclotella caspia の割合が減少し Thalassionema nitzschioides, Thalassiosira spp. の割合が増加する塩 分上昇傾向が認められた.

¹⁴C年代測定,火山灰などを基に,その間の堆積 速度を一定として,浜名湖の淡水化時期を推定する と,H2の開始は4500 y.BP,H3は3000−2400 y.BP, H5は1600−500 y.BP となる. (2) 霞ヶ浦

霞ヶ浦の湖心近くで掘削された KB 3 コアについ て解析を加えた(斉藤ほか, 1990). このコアは, 深 度約 40 m で湖底堆積物の基底に達し, その¹⁴C 年代 は 9920±230 y.BP である. アカホヤ火山灰ほかの 火山灰層を, コア中に挟在している (図 11).

珪藻化石群集は、大きく三分され、最下部(深度 35 m 以深)の汽水-淡水層準,中部(深度 1.5~35 m)の内湾-汽水層準,最上部(深度 1.5 m 以浅)の 淡水層準に区分される. 中部(深度 1.5~35 m)の 内湾-汽水層準では, Cyclotella caspia, Thalassiosira spp., Thalassionema nitzschioides などが混じり合って 産出しており、その群集構成は現在の中海や浜名湖 に近い. このことから, 霞ヶ浦では, 海水との湖水 の交換が大きい汽水環境が、完新世において長期間 継続していたことを示している.しかし、アカホヤ 火山灰堆積以降 3 回 (K1~K3) Cyclotella caspia の 割合が増加する層準が見られた(図11).現在の浜 名湖では、湖口付近に比べて、湖奥では Cyclotella caspia の割合が大きくなる傾向が認められており, K1~K3までの変動は、湖の閉塞が一時的に進ん だことを示している.しかし,浜名湖のように,湖 沼の淡水化や, Cyclotella caspia が一種で優占する ような強度の閉塞環境を呈することはなかった.火 山灰層を鍵層として, 各時期の堆積年代を推定する と, K1は4500-5300 y.BP, K2は2100-3000 y.BP, K3は1300 y.BPとなる.これらを浜名湖の珪藻化



図11 度ケ角面心におりる面底堆積初中の珪深に有研集の変化. Fig.11 Diatom fossil assemblages from the lake sediment core at the central part of Lake Kasumigaura.

石群集分帯と対比すると、K1は浜名湖で汽水化が 始まるH2の下限に、K2は淡水化するH3に、K 3はH5にほぼ対比される.このことは、浜名湖で 見つかった塩分変動・湖水の淡水化に代表される環 境変動は、珪藻化石群集の変動の様式は異なるもの の、霞ヶ浦でも現れているものと考察される.

(3) 三方湖

三方湖の湖底堆積物は、その基底が70m以深に も達し、またその堆積年代は8万年前以前にさかの ぼる.これは、三方湖の起源が、他の湖のような海 潟湖ではなく、三方湖の東部を区切る断層活動によ る構造湖であることによる.

珪藻化石群集の変化も、他の湖沼とは大きく異なり、淡水生種のみが産出する堆積環境が継続した. Cyclotella caspia をはじめとする汽水性種は、湖底 堆積物最上部1m以浅のみで産出した.

(4) 網走湖・サロマ湖

両湖沼では、湖底表層部のみの試料が得られた. 網走湖では、下位より Aulacoseira granulata などの 淡水生種が優占する層準が、湖底下 40 cm の層準で Cyclotella caspia の優占する汽水層準へと変化して いる.火山灰層編年より,網走湖の汽水化 50-70 年ほど前より顕著になったと推定された(鹿島, 1996)(図 12).

これに対して、サロマ湖では淡水種はコア試料中 からもほとんど産出せず、珪藻群集の変化は海水~ 汽水性の Paralia sulcata, Diploneis smithii の現象と、 海水生の Thalassiosira spp., Thalassionema nitzschioides の増加という形で示されている. 堆積物の²¹⁰Pb 年 代などより、この変化は 1930 年頃生じたことが推 定された(鹿島・松本, 1986; 鹿島, 1996)(図 12).

日本各地の沿岸性汽水湖沼における淡水化・ 低塩分化層準と最近の塩分上昇

日本各地の沿岸性汽水湖沼の湖底堆積物層の珪藻 化石の分析より、これらの湖が完新世、特にアカホ ヤ火山灰堆積時以降、大きな環境変動を経てきたこ とが明らかとなった.これらの環境変動を塩分変動 に絞って整理すると、図 13 のようにまとめられる.

コア試料から産出する珪藻化石群集の構成から, 各地点における堆積環境の変動を,現生の珪藻遺骸 の分布特性に基づいて,以下のように整理した.

A:内湾環境: Thalassiosira spp., Thalassionema



図 12 網走湖・サロマ湖における湖底堆積物中の珪藻化石群集の変化 (鹿島, 1996). Fig.12 Diatom fossil assemblages from lake sediment cores at Lake Abashiri and Lake Saroma (Kashima, 1996).



図 13 完新世における日本各地の沿岸性汽水湖沼の塩分変動. **Fig.13** Salinity fluctuations during the Holocene at brackish lakes in Japan.

nitzschioides, Cyclotella caspia などが混じり合って産 出する.外海との湖水の交換の大きい汽水湖の湖心 から湖口部.現在の浜名湖,中海など.

B: 内湾~汽水環境: Thalassiosira spp., Thalassionema nitzschioides, Cyclotella caspia などが混じり合って産 出するが, Cyclotella caspia の構成比が大きくなる. 外海との湖水の交換の大きい汽水湖の湖心から湖奥 部. 現在の浜名湖,中海など.

B': 内湾~汽水環境: 基本的な珪藻群集の特徴は は **B** と同じであるが, *Paralia sulcata* の割合が特に 大きくなる.現在のなまこ池(上甑島汽水性湖沼 群).

C:閉塞された汽水環境:Cyclotella caspia が一種 で優占的に産出する.現在の宍道湖,網走湖,貝池, 鍬崎池(上甑島汽水性湖沼群).

F:淡水環境:淡水生種が優占的に産出する.現 在の浜名湖,網走湖などの珪藻遺骸の分布より,周 囲を陸域で囲まれていても,湖水表層が完全に淡水 化しない限り,淡水生珪藻遺骸が優占する事はない.

以上の分類を用いて, 汽水湖沼の塩分変動をまと

めると、以下のような傾向が認められた.

(1)日本の多くの汽水湖沼は、海潟湖であり、その基底部には海進初期の淡水環境 F が確認され、その後の海進に伴って、内湾環境 A が形成された.ただし、三方湖は断層活動に伴う構造湖であり、完新世になっても、最近まで淡水環境 F が継続していた.

(2) 完新世後半,特にアカホヤ火山灰堆積時以降 の塩分変動には,各湖沼で差異が見られる.最も顕 著な汽水化・淡水化が生じたのは浜名湖であり,2 度の淡水化期が確認された.これに対して,霞ヶ浦 では内湾環境Aが継続していたが,アカホヤ火山 灰堆積時以降3回,内湾~汽水環境Bが形成され, 湖水の塩分の変動が生じたことが確認された.両湖 沼における塩分低下期は,北海道東部の湿原地域で 確認された海水準低下期(Sakaguchi *et al.*, 1986)と 強い相関が見られた.

宍道湖では、アカホヤ火山灰降下期以降、極めて 閉塞された干潟のような環境が形成された.このた め、珪藻化石は堆積物中に保存されず、溶解してし まったものと考えられる.しかし、この点について はさらに検討が必要である.

(3) 最近 50~100 年は,各汽水湖沼で塩分の上昇 が顕著である.その珪藻群集へのあらわれ方は各湖 で相違が見られるが,これまでに塩分の上昇が確認 された湖沼は以下の通りである. 宍道湖 (F→C), 浜名湖 (B→A),三方湖 (F→C),網走湖 (F→C), サロマ湖 (B'→A).これに対して,霞ヶ浦では淡水 化が見られた.

これらの現象は、これまで各湖の近代以降の人為 による地形改変の影響と考えられることが多かった (例えば、徳岡ほか、1990).しかし、近年、地球の 温暖化に伴う海水準の上昇が指摘されており、それ との関係についても、検討が必要性となる(Kashima, in press).

謝 辞

本研究をまとまるにあたり, 宍道湖中海における 研究の機会とご助言をいただいた, 徳岡隆夫教授, 高安克美教授をはじめとする, 島根大学汽水域研究 センター,総合理工学部の方々に厚くお礼を申し上 げます.

文 献

- 秋山 優(1975~1985)中海・宍道湖水系における 植物プランクトンおよび着生藻類の推移ならびに その生態学的研究(I)~(X),中海・宍道湖の水 質保全に関する調査報告書(第1報)~(第10 報),島根県環境保健部.
- 安藤一男(1990)淡水生珪藻による環境指標種郡の 設定と古環境への応用,東北地理,42,73-88.
- 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**: 69-76.
- 池谷仙之・和田秀樹・阿久津 浩・高橋 実(1990) 浜名湖の起源と地史的変遷,地質学論集, **36**:129 -150.
- 鹿島 薫(1986):沖積層中の珪藻遺骸群集の推移 と完新世の古環境変遷.地理学評論,**59**(ser.A): 383-403.
- 鹿島 薫(1988): 珪藻分析から復原された浜名湖の完新世における古環境変遷. 細屑性堆積物の研究, 5: 95-107.
- 鹿島 薫(1989):鹿児島県上甑島汽水性湖将軍に おける珪藻の分布特性と珪藻からの体積仮定.日 本ベントス研究会誌,35/36:29-40.
- 鹿島 薫(1993): 汽水湖沼における現生および化石珪藻群集,地質学論集, 39: 7-14.
- 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: 33-39.
- Kashima (in press) An attempt of diatom assemblages from brackish lagoons as an indicator for a long-term monitoring of the global sea level rise, Proceedings of APN/LOICOZ Meeting.
- Kashima K., Honda S. and Morita H. (1997) Paleoenvironmental changes of Lake Hamana, a semienclosed brackish lake at the central Japan, during the last 6000 years presumed by the diatom assemblages from core samples of lake deposits, Diatom, 13: 187-193.
- 鹿島 薫・松本英二 (1986) サロマ湖コア試料中の 珪藻遺骸群集と過去 200 年間の環境変遷.第四紀 学会予稿集, 16: 68-69.
- 鹿島 薫・中海宍道湖自然史研究会(1990):中海・

宍道湖の自然史研究-その14. 宍道湖より得られた柱状試料の珪藻分析-. 島根大学地質学研究報告, 9: 159-161.

- 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.
- 森田英之・鹿島 薫・高安克巳 (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.
- 國井秀伸・高安克巳・橋谷 博・中村幹雄・中尾 繁(1993) 汽水湖生態系の特性と日本における研 究の現状,日本生態学会誌,43:195-209.
- 斉藤文紀・井内美郎・横田節哉 (1990) 霞ヶ浦の地

史:海水準変動に影響された沿岸湖沼環境変遷 史,地質学論集, **36**:103-118.

- Sakaguchi, Y., Kashima, K. and Matsubara, A. (1985) :
 Holocene Marine Deposits in Hokkaido and their
 Sedimentary Environment. Bull. Dep. Geogr. Univ.
 Tokyo, 17: 1-17.
- 高安克巳・出雲古代景観復元チーム (1998) コア SJ 96 の概要と宍道湖の古環境変遷, LAGUNA (汽 水域研究), **5**: 1-13.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・高安克巳・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.

中海中浦水道における水質動向

宇野誠高¹·田中秀典²·大塚泰介³·高安克己²·鮎川和泰⁴

Water quality tendency in Nakaura channel, the outlet of Lake Nakaumi, Japan

Nobutaka Uno¹, Hidenori Tanaka², Taisuke Ohtsuka³, Katsumi Takayasu² and Kazuyasu Ayukawa⁴

Abstract: Salinity, dissolved oxygen and water temperature were continuously measured in the Nakaura channel, the outlet of the Lake Nakaumi, from April 1, 1999 to April 4, 2000. The measurements are carried out near the surface (1 m deep) and near the bottom (11 m deep). As a result, the salinity showed large daily and seasonal variation near the surface, whereas it was comparatively steady near the bottom. Fast Fourier transformation analysis detected its periodic fluctuation with the cycle of 12.52 hours near the surface, and 12.36–and 25.52 hours near the bottom, suggesting influence by tide. The salinity near the bottom also showed 14– and 28 days cycle, corresponding to the lunar tidal changes. Near the bottom, the temperature and the dissolved oxygen also showed periodic pattern corresponding to the tide. In contrast, they showed clear daily cycle near the surface.

Key words: Nakaura channel, continuously observation of water quality, daily and seasonal variation of water quality, tidal changes, Fast Fourier transformation analysis

はじめに

中海・宍道湖は島根県東部から鳥取県西部に位置 する汽水湖である.図1は中海・宍道湖の位置関係 を示したものである.中海は斐伊川水系の下部に位 置し,大橋川を介し宍道湖と,中浦水道・境水道を 介し日本海とそれぞれ連絡している.中海には下げ 潮時に大橋川から低塩分水が流入し,上げ潮時に境 水道・中浦水道から海水が流入する.日本海の潮位 差は20~30 cmと小さいため,遡上してくる海水は 低塩分水とあまり混ざらず、いわゆる塩水楔を形成



図1 中海・宍道湖周辺の概念図. Fig.1 Location map of Lake Nakaumi and Lake Shinji.

¹ 筑波大学大学院環境科学研究科 Graduate School of Environmental Science, Tsukuba University, Tsukuba 305–8572, Japan E-mail: nobutaka-u@mc.neweb.ne.jp

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 滋賀県立琵琶湖博物館 Lake Biwa Museum, Kusatsu 525–0001, Japan

⁴ 環境システム株式会社 Environmental System Co. Ltd., Amagasaki 660–0893, Japan

する.

毎年夏季に中海・宍道湖湖盆に貧酸素水塊が形成 され、これは漁業・環境上の大きな問題となってい る.この貧酸素水塊の形成は、日本海から境水道・ 中浦水道を経て流入してきた海水と強いつながりが ある(橋谷ほか、1991).中海湖底で形成された高 塩分・低 DO 水は潮汐や気圧の影響を受けて、大橋 川の河底を遡上し、宍道湖へと流れ込む(橋谷ほか、 1992).したがって海水の流入口である境水道から 中浦水道にかけての水塊動態は中海・宍道湖全体の 環境に大きな影響を及ぼしていると考えられるが、 高塩分水の動態について十分には解明されていな い.

本研究では中浦水道を通過する水塊の動態を把握 することを目的とした.そこで、中浦水道の一定点 に水質計を設置し、水温・塩分・溶存酸素(Dissolved Oxygen,以下 DO)に関して連続観測を行った.ま た大潮時と小潮時に、潮の干満による流向流速と水 質の変化を把握するため、流向流速計と水質計を用 いた流動集中観測を行った.

観測方法

2-1 調査地点

図2に中浦水道の拡大図を示す.中浦水道は,江 島と弓浜半島の間に位置し,幅約0,5km,全長1,5 km,平均水深は7mである.中浦水道の中ほどに は,かつての中海・宍道湖淡水化計画事業のひとつ として昭和48年に建設された中浦水門がある.中 浦水門は密度流及び潮汐による下流から上流への流 れを消失させ,下流向の一様な流れにすることを目 的としていた(南ほか,1983)ため,水門周辺の地 形は人為的に変えられており,除塩のために塩水ポ ケット(塩水溜)が作られた.現在の水深は13~14 mであり,橋谷・奥村(1990)によれば塩水溜には 褐色汚泥が約30 cmの厚さに堆積しており,その下 は固い砂質層で構成されている.

2-2 調查方法

図2に示す地点において水質の連続観測と流動の 集中観測を行った.以下にその内容を示す.

1) 水質連続観測

多項目水質計(ハイドロラボ社,データゾンデー 3)を使用して,水温・電気伝導度・塩分・DO(溶 存酸素)を測定した.水質計は農水省管理の観測塔 に設置し、水質計の設置深度は表層 1 m と下層 11 mの2点とした.表層の水質計は観測塔から垂下 したロープに係留した.下層の水質計は、観測塔に 結束された塩化ビニール製のパイプ内に投入し、 ロープで係留した.パイプは水質計の保護、固定を 目的としたもので、センサー部分には水を通すため に多数の孔があけられている.測定間隔を 10 分に 設定した.観測を開始したのは 1999 年 4 月 1 日で ある.本研究では 2000 年 4 月 5 日までの約 1 年分 のデータを解析した.

3~4週間に1回,水質計のメンテナンスを行った.センサーおよびその周辺への生物(フジツボ, ヒドロ虫,ゴカイ,藻類など)の付着が表層におい て著しく,これが測定値に影響を及ぼすおそれが あった.そこで設置水質計の検定のために,メンテ ナンスの前後に,連続観測用の水質計2本と直読式 多項目水質計(ハイドロラボ社,H-20型)をとも に現場の表層水で満たしたバケツ中に入れ,水質を 同時に測定した.

またメンテナンス時に,水深1mごとの水温・電 気伝導度・塩分・DOを直読式多項目水質計を用い



図 2 中浦水道における観測地点(国土地理院地形図 2万5千分の1「境港」より).

Fig.2 Location map of study site of the Nakaura channel.



図 3 中浦水道における表層と下層の塩分と境港の潮位のパワースペクトル. **Fig.3** Power Spectra of (a) tidal level at Sakaiminato, (b) 1 m deep and (c) 11 m deep salinity at the Nakaura Channel.

て測定し、それぞれの鉛直分布を調べた.

2) 流動集中観測

流動観測の測定項目は流向流速と水質(水温・電 気伝導度・塩分・DO)である.流向流速の測定に, 水中投下式で直読式の電磁流向流速計(アレック電 子製 ACM 210-D)を使用し,水質測定に直読式多 項目水質計(ハイドロラボ社 H-20 型)を使用した.

水質連続観測を行っている観測塔周辺の1地点に 船を係留し,20分間隔で測定を行った.流向流速 計と水質計を船上から鉛直下向きに下ろし,表層0 mから底まで1m間隔で計測を行った.

小潮流動調査を 1999 年 11 月 30 日の午前 7 時 10 分から午後 4 時半まで,大潮流動調査を 12 月 24 日 の午前 7 時 40 分から午後 2 時 (強風のため途中で 中止)まで行った.

3) パワースペクトル解析

一般に汽水湖では潮汐による強制振動と、湖の形 状や密度成層状態による固有振動とが結びついた複 雑な振動が出現する.振動の卓越成分を抽出するた めには連続した水位・水質データを用いて、スペク トル解析を行う必要がある(奥田、1991).そこで 中浦水道を通過する水の周期性を明らかにするため に,連続観測データに対して FFT (Fast Fourier Transform)によるパワースペクトル解析を行った. 1999年4月1日17時から1999年5月29日23時 までの表層・下層の連続水質データ8191点を解析 に使用した.また、測定された水質データに影響を 及ぼすと考えられた潮位について,中浦水道より日 本海側に位置する境港のデータに FFT 解析を適用 した.図3は表層・下層塩分と境港潮位の FFT 解 析結果である.

なお,境港の潮位データは境測候所が測定した データを使用させていただいた.

結 果

1) 使用データ

水質連続観測においては前ファイル未消去による メモリー不足やバッテリー切れ,台風の影響による 水質計・パイプの破損等による欠測がしばしばあっ た.図4に観測期間に得られたデータ期間を示す.

2) 連続観測季節変動

1999年4月1日から2000年4月4日までの約1 年間の表層と下層の水温,塩分,DOの時系列を図 5に示す.



水温は表層・下層ともに 1999 年 4 月から 7 月に かけて上昇し, 8 月は安定, 9 月から 2000 年 1 月ま で低下し, 2000 年 1 月から 4 月まで安定していた.

塩分は表層が 8~25 psu の範囲で大きく変動した のに対し,下層は 30~34 psu の範囲で安定していた.

表層の DO は 1 年を通じて飽和状態 (年平均 109.8%) であった. 下層の DO は 1999 年 4 月に平均 100

%を超えていたが,夏に向かうにつれて値は徐々に 下がり,6月と7月,9月にはDO値が10%を下回 ることがあった.9月以降,下層のDO値は上昇し, 50~100%の範囲で変動していた.

月周期変動

図6は1999年4月1日から5月29日までの下層 の水温,塩分,DOの時系列図と同時期の境港の潮 位を示したものである.

下層の塩分には、潮相に対応する半月周期の変動 が見られた.すなわち中潮・大潮にかけて低下し、 小潮・長潮・若潮にかけて上昇する周期的な変動が 認められた.FFT 解析では 682 時間と 341 時間の周 期が検出された (図 3).これを日数に換算するとそ れぞれ 28 日、14 日である.

下層の DO についても塩分と同様に,中潮・大潮 にかけて低下し,小潮・長潮・若潮にかけて上昇す る傾向を示した.

短期変動

FFT 解析の結果, 1999 年 4 月 1 日 17 時から 1999 年 5 月 29 日 23 時までの表層の塩分には, 12.52 時



図5 中浦水道における表層(1m)と下層(11m)の水質連続観測結果(1999年4月1日~2000年4月4日). (a)水温(細線,水深1m;太線,水深11m),(b)塩分(細線,水深1m;太線,水深11m),(c)DO(細線, 水深1m;太線,水深11m)

Fig.5 Time series data of (a) water temperature (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep), (b) salinity (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep), (c) DO (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep) of the Nakaura channel (1 Apr 1999 \sim 4 Apr 2000).



図6 中浦水道における下層(水深11m)の水質連続 観測結果と境港の潮位(1999年4月1日~1999年5 月29日).(a)水温,(b)塩分,(c)DO,(d)境港の 潮位.

Fig.6 Time series data of (a) water temperature (11 m deep), (b) salinity (11 m deep), (c) DO (11 m deep) of the Nakaura channel, and (d) tidal level at Sakaiminato (1 Apr $1999 \sim 4$ Apr 2000).

間と 6.09 時間の周期が検出され,下層の塩分には 25.52 時間,12.36 時間,8.22 時間,6.09 時間の周 期が検出された(図 3).下層の塩分の周期は,境港 の潮位の FFT 解析で検出された,25.76 時間,12.45 時間,8.18 時間,6.09 時間の周期とよく対応する.

図7に1999年6月5日から15日までの表層と下 層の水温,塩分,DOの時系列と,同時期の境港に おける潮位を示す.

表層の水温には夜明けとともに水温が上昇し始め、昼過ぎに安定し夜半過ぎから下降し始める日変動がみられた.下層の水温は上げ潮で上がり、下げ潮では下がる傾向が見られた.表層の塩分は大潮・ 中潮の上潮時に塩分濃度がスパイク状に上昇する現象がみられた.小潮・長潮・若潮時にはこの傾向は弱まるものの、大潮・中潮時と小潮から長潮時の塩分の平均値(大潮・中潮時:22.3 psu、小潮~長潮時:22.4 psu)に大きな差はなかった.

表層の DO は夜明けから日没にかけて上昇し,翌 日未明にかけて下降する日変動が見られた.下層の DO は下層の塩分と同様に境港の潮位変動とよく対 応していた.潮相との対応では小潮から若潮・長潮 にかけて DO の値の振幅は小さくなり,中潮から大 潮にかけては値の振幅が大きくなる傾向がみられ た.



図7 中浦水道における表層(1m)と下層(11m)の 水質連続観測結果と境港の潮位(1999年6月5日~ 1999年6月15日).(a)水温(細線,水深1m;太線, 水深11m),(b)塩分(細線,水深1m;太線,水深 11m),(c)DO(細線,水深1m;太線,水深11m), (d)境港の潮位.

Fig.7 Time series data of (a) water temperature (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep), (b) salinity (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep), (c) DO (fine line, 1 m deep; thick line, 11 m deep) of the Nakaura channel, and (d) tidal level at Sakaiminato (5 Jun 1999 \sim 15 Jun 1999).

3) 流動集中調査

3-1 小潮流動調查

小潮調査当日の境港における潮位と観測期間を図 8(a)に,流速(主流向流速)と水温・塩分・DOの 鉛直分布の時系列を図9に示す.表層(0~3m)は 観測期間を通じ中海から境水道方面へと流れてい た.水温,塩分ともに低く,DOは飽和状態であっ た.水深4~8mでは観測を開始した7時から9時 半までは水は境水道から中海に流れていた.9時半 を過ぎると水の流れは中海から境水道方面へと変



図 8 流動集中調査実施時間と境港における潮位変 動.(a)小潮時,(b)大潮時.

Fig.8 The term of observation of (a) the neap tide and (b) the spring tide at Sakaiminato, and tidal change at Sakaiminato (a: $7:10 \sim 16:20$, Nov.30, 1999 b: $7:40 \sim 14:00$, Dec.24, 1999).



図9 小潮流動調査における流速,水温,塩分,DOの鉛直分布時系列図.

Fig.9 The time series of distribution of (a) current velocity, (b) water temperature, (c) salinity, (d) DO, of the Nakaura channel $(7:10 \sim 16:20, Nov.30, 1999)$.



図 10 大潮流動調査における流速,水温,塩分,DO の鉛直分布時系列図.

Fig.10 The time series of distribution of (a) current velocity, (b) water temperature, (c) salinity, (d) DO, of the Nakaura channel $(7:40 \sim 14:00, Dec.24, 1999)$.

わった.水温,塩分,DOはいずれも水深4~5m 付近で変化しており,躍層が存在していることを示 している.14時から16時にかけて,水深6m付近 のDOの低下が認められた.下層(水深8~13m) では7時から9時半までは水は境水道から中海に流 れていた.9時半を過ぎると流速が10cm/secを下 回るようになり流向値の検出が難しくなった.水温, 塩分, DO いずれも値に大きな変動はなく安定していた.

3-2 大潮流動調査

大潮調査当日の境港における潮位と観測期間を示 したものを図8(b)に,流速(主流向流速)と水温・ 塩分・DOの鉛直分布の時系列を図10に示す.表 層0mから水深8mまでは,測定を開始した7時40 分から12時かけて水は中海から境水道方面へ流れ ていた.12時頃になると下層から徐々に流れは境水 道方面から中海へと変わりはじめた.水温,塩分, DOのいずれも水深5m付近で値は変化しており、 躍層が存在していることを示している. 境水道方面 から中海への強い流れ(最大流速 65 cm/sec)を示し た13時から14時にかけて、水深0mから3mの 水温と塩分が上昇し、躍層付近との値の差は縮小し た.水深8mから11mまでは測定を通じ境水道方 面から中海への水の流れを示していた.水温,塩分 ともに13時から14時にかけて値が低下する傾向が 見られた.水深12mから13mにかけての流向は、 流速が10 cm/sec以下を記録したものが多く,流向 ははっきりとした傾向を示さなかった.水温,塩分, DO のいずれも値は安定していた.

考察

1) 塩分の日変動について

境港の潮位データの周期と塩分の周期が対応して いたことから,中浦水道の塩分変動には潮汐が影響 していると考えられる.特に下層の塩分変動は,境 港の潮位変動とよく対応していた.

一方で表層水の塩分の日変動パターンは潮相に よって異なり、大潮では上げ潮時に塩分がスパイク 状に上昇する傾向を示したのに対し、小潮から若潮 の上げ潮時では変動が小さくなる傾向がみられた.

大潮の上げ潮時に表層の塩分がスパイク状に上昇 したのは、大潮の上げ潮時に境水道方面から中海へ と高塩分水が流入してきたためと考えられる.実際, 大潮流動調査では、上潮時、表層において境水道方 面から中海への水の流れがおこり、それとともに塩 分が上昇することが明らかにされた.

それに対し小潮時には、中浦水道の表層では上げ 潮でも中海から境水道方面への流れが卓越していた ため、大潮時のようなスパイク状の塩分変化がみら れなかった可能性がある.ただし、小潮流動調査で は上潮時に観測を行えなかったため、表層の流向と 塩分動態との関係は明らかでない.

2) 塩分の月周期変動について

今回の観測結果から中浦水道の下層水の塩分に は、小潮から長潮・若潮にかけて塩分が上がり、大 潮から中潮にかけて塩分が下がる傾向がみられた. これらの周期は潮汐の月周潮・半月周潮に対応する と考えられる.

小潮流動調査から,下層の水深11mでは上げ潮時には境水道から中海への流れを示したが,下げ潮時は中海から境水道への水の流れは認められなかった.また上げ潮時には,表層と下層の塩分差は大きかった.大潮・中潮時と小潮・若潮・長潮時の潮位変動を比較すると(図7,d),大潮・中潮時には1日2回の上げ潮と下げ潮が確認できるが,小潮・長潮・若潮時には1日2回の下げ潮のうち,1回は潮位変化が小さいため,潮が上がる時間が長い.そのため大潮・中潮時に比べ,小潮から長潮時には境水道方面から海水が流入してくる時間が長くなるため,塩分は高くなると考えられる.

1999年12月の大潮時の調査結果から,上げ潮時 に表層から下層までの塩分差は小さくなっていたこ とから,水の鉛直混合が起こっていたと考えられる. また,大潮の下げ潮時には中海の低塩分水が境水道 方面へ流出するため,中浦水道の下層において低塩 分水が観測されたと思われる.つまり,大潮から中 潮にかけての塩分の低下は,下げ潮時の中海湖心か らの低塩分水の流出と上げ潮時の鉛直混合が原因と 考えられる.

ただし、観測地周辺では、かつての中海・宍道湖 淡水化事業のために水道の底が掘り下げられてい る.中浦水道の平均水深が7mで、塩水ポケット の水深が13~14mであることを考えると、ポケッ トの存在による塩分への影響も無視できないと思わ れる.ポケットの形状などの正確な情報が不足して いることもあって、ポケット内の水の塩分と、その 周辺の水の塩分との関係には不明な点が残る.した がって今後ポケット外の塩分の動向について、ポ ケットの影響を考慮した詳細な調査が必要と思われ る.

今後の課題

今回は中浦水道での水質変動について考察した が、今後国土交通省が中海湖心で計測を行っている 水質データや、島根県内水面試験場が宍道湖大橋に 設置している水質データと比較検討することで、宍 道湖から中海にかけての水質動向がつかめると思わ れる.

また,流向流速調査の問題点として,今回行った 7時から17時までの日中の調査では,日周潮・半 日周潮のサイクルの全てを観測することができな かった.中浦水道の水の動向を正確に把握するため には、流向・流速の連続的なデータが必要である. また表層の水質計はフジツボ、ヒドロ虫、ゴカイ、 藻類などの付着が著しかったため、データの精度を 向上させるために、メンテナンス期間の変更につい て検討の必要がある.

謝 辞

本報告は字野の卒業論文の一部をまとめなおした ものである.島根県衛生公害研究所水質課の石飛裕 氏には,FFT 解析の解釈について有益なご助言を頂 いた.本研究を進めるにあたり,島根大学汽水域研 究センターの皆様にお世話いただいた.特に中海分 室の松本雅夫氏には調査船の運転,水質計の設置な どでお世話になった.中山大介氏には調査にご協力 頂いたとともに,流向流速調査では調査方法などに ついて有益なご助言を頂いた.以上の方々に深く感 謝します.

引用文献

- 橋谷博・奥村稔・藤永薫・近藤邦男・清家泰(1991)
 宍道湖への高塩分水の流入.山陰地域研究(自然
 科学), 7:83-91.
- 橋谷博・奥村稔・藤永薫・近藤邦男・清家泰(1992)
 宍道湖・中海に与える気象・海象の影響-(その2)1982~1991の水質変動と気象5因子.山陰地域研究(自然科学),8:79-81.
- 橋谷博・奥村稔・近藤邦男・清家泰 (1990) 宍道湖・ 中海の湖底環境.山陰地域研究(自然科学), 6:140 -142.
- 南勲(1983) 宍道湖中海淡水湖化に関連する水理水 質及び生態の挙動について-中間報告-. 農業土 木学会, 4-16, 108-115.
- 奥田節夫(1991)中海·宍道湖の水位変動特性(序 報). 汽水湖研究, 1:22-23.

衛星リモートセンシングによる宍道湖の 一次生産量モニタリングの試み

作野裕司¹·松永恒雄²·高安克己³·國井秀伸³ 中村幹雄⁴·六川修一⁵

Monitoring primary production in Lake Shinji using satellite remote sensing

Yuji Sakuno¹, Tsuneo Matsunaga², Katsumi Takayasu³, Hidenobu Kunii³, Mikio Nakamura⁴ and Shuichi Rokugawa⁵

Abstract: To monitor the gross primary production (P_g) in Lake Shinji, a simple algorithm of the Pg estimation using chlorophyll–a (Chl.a) derived from satellite remote sensing data and the maximum primary production per Chl.a (P^Bm) derived from the in–situ water temperature (Tw) was proposed. Some assumptions for developing the algorithm were verified using field survey data obtained in the lake, 1995–1998. And the algorithm was applied to images and Tw data of different dates in the Lake. The following results were obtained. 1) The area average SPOT/HRV band ratio after offset removal showed high correlation (R=0.98) for the area average in–situ Chl.a. 2) The primary production per Chl–a (P^B) almost reached saturation $(= P^Bm)$ under the irradiance below $400\mu \text{ Ein/m}^2/\text{s}$ condition. 3) The P^Bm showed relative high correlation (R=0.71-0.73) for Tw. 4) The estimated P_g using the algorithm changed within the range of about 50–700 mgC/m³/hr in the lake.

Key words: Lake Shinji, monitoring, primary production, remote sensing

1.はじめに

近年, 宍道湖に生息するシジミによる水質浄化能力を評価する目的で, 複数の物質循環モデル (Nakamura *et al.*, 1988;山室, 1997)が提案されている.しかしその物質循環モデルの中で最も重要な パラメータの一つである一次生産量は時空間的な変 動が大きく,その広域分布の推定は難しかった. そこで筆者らは宍道湖全域における一次生産量を推 定するために,1995年から1999年まで高分解能衛 星センサを用いた一次生産量モニタリングの技術開 発に関わる現地調査を継続して行ってきた(例えば

¹ 広島大学工学部 Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashihiroshima, 739–8527, Japan E-mail: ysakuno@naoe.Hiroshima-u.ac.jp

² 東京工業大学大学院総合理工学研究科 Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 226–8502, Japan

³ 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

⁴ 島根県内水面水産試験場 Shimane Prefectural Fisheries Experimental Station, Hirata, 691–0076, Japan

⁵ 東京大学大学院工学系研究科 Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku 113-8656, Japan

作野ほか,1996).一般に衛星データを用いて一次 生産量推定を行う場合,通常衛星データからクロロ フィル a 濃度(以下 Chl.a と略す)を推定する過程 (第1段階)と Chl.a から一次生産量を推定する過程 (第2段階)に分けられる.筆者らはまず第1段階 についてまとめ,ある一時期の衛星データから宍道 湖の表層 Chl.a 分布を推定する比演算回帰モデルを 提案した(作野ほか,1999).この結果を受け,本 報では多時期の衛星データでも同様の Chl.a 推定モ デルが適用可能であるか,そしてまだ研究に着手し ていない Chl.a から一次生産量を推定する方法につ いてそれぞれ検討したのでここに報告する.

2. 衛星データを用いた宍道湖用簡易一次生 産量推定アルゴリズムの提案

筆者らは 1997 年 10 月 9 日の衛星データと現場 データを使って宍道湖の表層 Chl.a 分布推定を行い, SPOT/HRV センサのバンド 1 (XS1:0.50-0.59 µm) とバンド 2 (XS2:0.61-0.68 µm)の比演算モデルが Chl.a 推定に有効であると報告した(作野ほか, 1999).多時期の衛星データについても同様のモデ ルが有効であるとすると,宍道湖の表層 Chl.a と衛 星データとの関係は次式で表せる.

 $C = a (XS1/XS2) + b (\exists 2-1)$

ここで, *C* は Chl.a, *XS*1 及び *XS*2 はオフセット除去 後(暗画素法と呼ばれる簡便大気補正後)の SPOT/ HRV データの DN, *a* 及び *b* は定数である. ただし 宍道湖の Chl.a は上下層間で差が数 µg/1 と小さく (橋谷他, 1991),上下間の濃度差は均一とする.

一方,一次生産量を衛星データから導く場合,一 般に以下のような式が用いられる.

 $P_{g} = P^{B} C \ (\vec{\Xi} 2 - 2)$

ここで、 P_s は総一次生産量、 P^s は「Chl.a あたりの 総一次生産量」である.また P^s は通常、照度や水 温等の関数として表され、一般にその設定は観測値 が使用される.しかし、宍道湖において P^s の観測 例は少なく、その設定方法の議論もなされていない. そこで、ここでは衛星が飛来する午前 10~12 時前 後の時刻には宍道湖の P^s が最大 (P^sm)となり (森 本ほか、1977)、かつ良好な衛星画像が取得できる のは晴天の日に限られ照度は P^s の律速条件になら ないと仮定して式 2-3を以下の式で表す.

 $P_{g} = P^{B}m C \quad (\overrightarrow{\mathfrak{R}} 2 - 3)$

また *P[®]m* は温度の関数であることが知られており (Epply, 1972; Balch and Byrne, 1992), 霞ヶ浦でも *P[®]m* と水温は高い相関があることが報告されてい る (岩熊・安野, 1981). 宍道湖でも霞ヶ浦と同様, 水温の関数で表せると仮定し, *P[®]m* と水温の関係 を以下の式で表す.

 $P^{B}m = cT + d$ (式 2-4) または $P^{B}m = c^{*}EXP(d^{*}T)$ (式 2-5)

ここで, *T* は水温, *c*, *d*, *c*', *d*'はそれぞれ定数である. ただし宍道湖は水平・鉛直の水温差が平均 0.5 ℃程度以下と小さいことから(橋谷ほか, 1991), *P^sm* の値も鉛直的に均一とする.

以上の仮定が妥当であれば, *P*_sは Chl.a と水温の 関数で求めることができ,衛星データと水温データ を使って宍道湖の総一次生産量を比較的簡便に推定 することが可能となる.

3. 宍道湖用簡易一次生産量推定アルゴリズ ムにおける仮定の検証

3.1 多時期衛星データによる比演算モデルの妥当性3.1.1 使用データ

式 2-1 のモデルの検証に使用したデータは, 1995 年 11 月 7 日, 1996 年 10 月 11 日, 1997 年 8 月 8 日, 10 月 9 日, 1998 年 3 月 3 日, 3 月 4 日に筆者 らが収集した衛星 (SPOT/HRV) /現場 (Chl.a) デー タセットである. Chl.a の値は現場で採水した試料 を実験室に持ちかえり, アセトン・抽出吸光度法に より求めた. 天候や調査機器等の関係上, 調査日に よってデータの取得数は異なるが, 基本的な測点は 図 1 に示す通りである. また取得した水質データ (Chl.a) データを取得した同地点で取得した透明度, SS の各データも含む)の概要を表 1 に示す.

衛星データは、地上基準点(GCP)による精密幾何補正処理により現場調査測点と対応づけた画素の DNを使った.また各測点のDNは、センサノイズ 及び測点位置決定誤差の影響を軽減する目的で、現 地調査測点を中心とした3×3 画素(60 m×60 m) の平均値を用いた.さらに大気補正には暗画素法(作 野他、1999)を採用し、清浄な日本海域のDNを各



図 1 宍道湖における基本調査測点. Fig.1 The standard stations of water quality survey in Lake Shinji.

測点の DN から差し引いた.

3.1.2 結果及び考察

図 2 (a), (b) はそれぞれ,オフセット除去前の SPOT/HRV の比演算値と現場表層 Chl.a の関係を示 している. (a) と比べて (b) は全データが直線的に 並び,両者の相関は非常に高い(相関係数 0.81). これは宍道湖の HRV データにおけるオフセット除 去が時期間の大気補正処理手法として,十分な効果 があったことを示している.しかし図 2 (b) で各測 定日ごとの値を見ると,両者の相関は悪く,ここに 示した回帰式では各測定日ごとの Chl.a 分布を推定 する式としては不適当である.このような問題は多 時期の Landsat/TM データを使った東京湾の表層 表1 1995~1998年に宍道湖衛星同期調査で得られ た水質データのレンジ.

 Table 1
 Ranges of simultaneous water quality survey data

 with satellite observation in Lake Shinji, 1995–1998.

		Chl-a(µg/l)	SS(mg/l)	Transparency(m)	Temperature (°C)
No.	Date	Min-Max	Min-Max	Min-Max	Min-Max
1	7 Nov.1995	19.2-29.3	3.7-5.7	1.3-1.7	13.8-14.6
2	11 Oct. 1996	14.1-34.1	3.4-7.2	1.0-1.5	19.9-20.4
з	8 Aug. 1997	26.7-36.9	3.2-8.0	0.9-1.1	26.9-27.7
4	9 Oct.1997	36.7-68.8	6.8-10.5	0.7-1.0	19.8-20.9
5	3 Mar. 1998	1.4-11.7	3.6-7.2	1.0-1.6	8.3-8.9
6	4 Mar. 1998	4.2-8.2	2.4-8.4	1.3-1.5	8.4-9.1

Chl.a 推定例 (水尾, 1998) でも報告されている. こ のことは現状の衛星センサデータから1つの Chl.a 推定式で全測定日の Chl.a 分布を推定することの難 しさを示しているといえる. これは, 湖内や湾内の 表層 Chl.a の濃度差に比べて時期的な表層 Chl.a の 濃度変化の方が大きいことに起因すると考えられ る.

一方,図3は図2(b)を各測定日のSPOT HRV の比演算値と現場表層 Chl.aのそれぞれ面平均値を とった時の関係を示した図である.この図において 両者の相関は高い(相関係数0.89)ことがわかる.こ のことは,衛星データからただ1つの回帰式で多時 期における宍道湖の面平均表層 Chl.aを比較的精度 よく推定することができる可能性を示している.そ こで,式2-1を次式に修正した場合,多時期衛星



図2 宍道湖における SPOT/HRV の比演算値と現場表層クロロフィル a 濃度との相関.(a) オフセット除去前,(b) オフセット除去後.

Fig.2 Correlation between SPOT/HRV band ratio and the in-situ surface chlorophyll-a concentration in Lake Shinji. (a) before offset removal, (b) after offset removal.



図3 宍道湖における SPOT/HRV の面平均比演算値 と現場の面平均表層クロロフィル a 濃度との相関. Fig.3 Correlation between the area average of SPOT/ HRV band ratio and the average in – situ surface chlorophyll–a concentration in Lake Shinji.

データによる比演算モデルは宍道湖の表層 Chl.a 推定に妥当だといえる.

 $C_{\text{ave}} = a \ (XS1/XS2)_{\text{ave}} + b \quad (\vec{\texttt{T}} \ 3-1)$

ここで, *C*_{ave} は表層 Chl.a の面平均値, (*XS1/XS2*)_{ave} は SPOT/HRV の比演算値の面平均値, *a*, *b* はそれ ぞれ定数である.

3.2. 「Chl.a あたりの一次生産量」の光依存性及び温 度依存性について

3.2.1 使用データ

宍道湖における光(照度)と一次生産量のデータ は、國井(未発表)のデータを用いた.このデータ は、1994年8月から1995年11月まで毎月宍道湖 湖心表層で採取した14試料を用いて、実験室にお いて種々の照度(I)下で明暗瓶法により一次生産量 を測定したものである.本報では國井が測定した各 光量下の純一次生産量と呼吸量を足すことによっ て、総一次生産量を求めた.また一次生産量と同じ 湖水試料で測定された水深0mと1mにおける Chl.aの平均値を表層Chl.aとした.そしてこの表 層Chl.aで総一次生産量を割って、「Chl.aあたりの 一次生産量」(P^{s})を求めた.ただし、この測定値 は酸素単位(mgO₂)であるため、先に求めた P^{s} の



図4 宍道湖湖心における光(*I*) - 一次生産量(*P*) 曲線の例(1994年8月1日). *P*と*I*は國井(未発表) のデータを使用.

Fig.4 Example of P-I curve at the center of Lake Shinji. P and I data from Kunii (unpublished).

値を 0.47 倍 (気象庁, 1977) して炭素単位 (mg C) に変換した. このようにして求めたデータの一覧を 表 2 に示す.

一方, *P[®]*の最大値 (*P[®]m*) は先に示した國井の*I* と*P[®]*のデータを使って両者の関係を次式のような 双曲線 (関, 1996) で近似することによって求めた.

$$P^{B} = \alpha I / (\beta + I) \qquad (\vec{\mathfrak{R}} 3-1)$$

このうち、 $\alpha \geq \beta$ は定数で、それぞれ $P^{s}m$ と半飽 和定数 ($P^{s}m$ の 1/2 のときの光強度、 K_{i}) に相当す る.本報ではこの定数 $\alpha \in P^{s}m$ のデータとした.ま たこの時の水温 (T) は $I \geq P^{s}$ を測定した水槽内の 水温とした.

3.2.2 結果及び考察

図4は宍道湖湖心表層における*I*と*P*[#]の関係を 式 3-1 で双曲線近似した結果を表した例である.図 中の近似式のうち,分子側の定数 16.1,分母側の定 数 305.3 がそれぞれ*P*[#]m,*K*₁の値に相当する.また 表 3 には同様にして求めた全データの*P*[#]m,*K*₁,相 関係数(*R*), RMS 誤差(*RMSE*)を,図5には全デー タから求めた近似曲線をそれぞれ示す.

表3より1995年1月,2月の相関が他の日にち と比べ若干悪い(R=0.88,0.73)がその他の相関は 表 2 疑似現場法によって得られた宍道湖湖心のクロロフィル a 濃度あたりの一次生産量,呼吸量とクロロフィル a 濃度及び水温のデータ(國井,未発表). クロロフィル a 濃度データは水深 0 m と 1 m の平均値 **Table 2** Original data primary production per chlorophyll–a (P^{B}), using the simulated in–situ method, chlorophyll–a concentration (Chl.a), and water temperature at the center of Lake Shinji (Kunii, unpublished). Chl.a data are the averages of values at 0 m and 1 m depths.

Gross primary production per Chl.a									
(mg C/mg Chl.a/hr)							Respiration	T,	Chl.a
Light intensity(μ Ein/m ² /s)	0	3.8	11.4	38	133	380	(mg C/mg Chl.a/hr)	(°C)	(µg/l)
1.Aug.94	0.00	-0.26	1.09	1.48	2.23	4.12	3.0	25.0	15.1
9.Sep.94	0.00	0.50	0.64	1.50	3.12	7.29	2.3	25.0	22.0
13.Oct.94	0.00	0.34	0.45	1.56	3.86	4.14	0.6	20.0	63.3
24.Nov.94	0.00	0.35	0.89	0.95	4.30	5.76	1.0	15.0	14.8
20.Dec.94	0.00	0.16	0.74	2.60	3.80	3.48	0.5	10.0	30.2
27.Jan.95	0.00	0.55	0.82	2.11	2.56	2.21	1.2	6.5	49.1
28.Feb.95	0.00	0.15	-0.09	2.00	1.88	0.81	2.5	6.5	12.6
29.Mar.95	0.00	-0.04	0.38	1.04	1.85	1.00	0.7	12.0	24.4
20.Apr.95	0.00	2.28	3.79	3.84	6.65	6.51	4.7	15.0	8.3
1.Jun.95	0.00	0.30	0.71	2.09	3.57	4.24	1.4	20.0	15.5
30.Jun.95	0.00	0.34	1.05	1.84	4.32	6.72	2.4	25.0	8.3
27.Jul.95	0.00	0.30	0.52	1.68	4.46	6.22	0.8	27.5	15.6
29.Aug.95	0.00	0.07	0.22	1.49	5.18	8.86	0.7	30.0	25.9
27.Sep.95	0.00	0.11	0.47	1.45	3.85	4.69	0.4	25.0	49.4
5.Nov.95	0.00	0.06	0.63	1.59	3.55	3.76	0.3	15.0	34.3

R = 0.96以上と極めて高い.このことは, 宍道湖湖 心表層における $I \ge P^{B}$ の関係は式 3-1の双曲線で 近似することが妥当であることを示している.また, $P^{B}m$ の値は 1.5~18.4 mg C/mg Chl.a/hr 範囲にあり, 一般の富栄養湖で観測された $P^{B}m$ の値 2~6 mg C/ mg Chl.a/hr (有賀, 1973)と比べても同等かそれ以 上の高い値を示している.同様な指摘は山室(1991) でもなされている.一方, 図 5 からほとんどのデー タが 400 μ Ein/m²/s 以下の照度下で P^{B} は飽和してお り,衛星データ取得条件である晴天時・午前 10~12 時前後にはほぼ飽和状態つまり $P^{B}m$ の状態に達し ている場合が多いと推測される.以上から衛星デー 夕観測日時における宍道湖湖心表層では $P^{B} = P^{B}m$ の仮定は妥当であると考えられる.

図6は、異なる水温下における典型的な光-一次 生産量曲線を示す.また図7には P^sm と水温の関 係を表す.両者には $R=0.71\sim0.73$ 程度の相関があ り,値はほぼ岩熊・安野(1981)が示した回帰曲線 上に近いところへプロットされた.このことから、 宍道湖の P^sm と水温の間にも深い関係があること が示唆された.しかし、推定誤差(RMSEで表す) は3 mg C/mg Chl.a/hr 程度あり、水温の関数で P^sm を推定する場合にはこの程度の誤差を考慮しなけれ



図5 1994 年 8 月から 1995 年 11 月まで毎月の光(*I*) --次生産量(*P*)データを使って推定した宍道湖の 全 *P*-*I*曲線. *P* と *I* は國井(未発表)のデータを使 用.

Fig.5 P-I curves estimated from P and I data for each month between Aug.1994 and Nov.1995 in Lake Shinji. P and I data from Kunii (unpublished).

表3 式 3–1 によって導き出された宍道湖の Chl.a あたりの最大一次生産量 ($P^{s}m$)及び半飽和定数 (K_{l}), 相関係数 (R), RMS 誤差 (RMSE).単位: $P^{s}m$ (mg C /mg Chl.a/hr), K_{l} (μ Ein/m²/s), RMSE (mg C/mg Chl.a /hr).

Table 3 Maximum primary production per chlorophyll–a $(P^{B}m)$, P-I saturation parameter (K_{I}) in Lake Shinji derived from equation 3–1, and correlation coefficient (R) and *RMS* error (RMSE). Unit: $P^{B}m$ (mg C/mg Chl.a/hr), *KI* (μ Ein/m²/s), *RMSE* (mg C/mg Chl.a/hr).

No.	Date	P^{B}_{m}	K	R	RMSE
1	1 Aug.1994	5.2	121.2	0.99	0.5
2	9 Sep.1994	18.4	585.4	0.99	0.3
3	13 Oct.1994	5.2	73.0	0.96	0.4
4	24 Nov.1994	8.3	155.3	0.99	0.4
5	20 Dec.1994	4.2	30.6	0.98	0.3
6	27 Jan.1995	2.6	15.4	0.97	0.2
7	28 Feb.1995	1.6	16.1	0.88	0.6
8	29 Mar.1995	1.5	22.7	0.73	0.3
9	20 Apr.1995	6.5	9.8	0.96	0.7
10	1 Jun.1995	4.9	53.7	1.00	0.1
11	30 Jun.1995	9.2	144.1	1.00	0.2
12	27 Jul.1995	8.6	136.5	1.00	0.2
13	29 Aug.1995	16.1	305.3	1.00	0.2
14	27 Sep.1995	6.1	101.4	0.99	0.2
15	5 Nov.1995	4.6	62.6	0.99	0.2
	Ave.	6.9	122.2		0.3
	SD	4.8	149.9		0.2



図6 3時期の異なる水温下における宍道湖の典型的 な P-I曲線. $P \geq I$ は國井(未発表)のデータを使用. **Fig.6** Typical P-I curves in Lake Shinji under three different water temperature condition in Lake Shinji. Pand I data from Kunii (unpublished).

ばならない.このような比較的大きなばらつきが生 じる原因としては,主に栄養塩の影響が考えられる が(秋山ほか,1986),本報では栄養塩のデータを 入手することができなかったためその原因について は十分な検討ができなかった.しかし,現状では宍 道湖の P[®]m を設定する他のよい方法がないため,水 温を関数とした図7中の回帰式を使用するのが妥当 だと考えられる.

4. 提案した宍道湖用簡易総一次生産量推定 アルゴリズムの適用と問題点

図 8 は 2 で提案した式 2-3 を使って推定された 平均的な宍道湖全体における総一次生産量の季節変 化である.使用したデータは,HRV から推定され た面平均 Chl.a (図 3 参照)と実測した面平均水温の データである. *P[®]m* の設定には図 7 に示す回帰曲 線式 (宍道湖のデータで計算した回帰式)を用いた. これによると推定された宍道湖の総一次生産量は約 50~700 mgC/m³/hr の範囲内で変化している.一方, 秋山 (1991) が 1974~1985 年に宍道湖で実測した 総一次生産量の最小,最大はそれぞれ 20~80,130~ 420 mgC/m³/hr であった.本アルゴリズムを使って



図7 宍道湖における水温 (*T*) と Chl.a あたりの最 大一次生産量 (*P^sm*)の相関.

Fig.7 Correlation between the water temperature (T) and the maximum primary production per chlorophyll – a $(P^{B}m)$.



図8 本報で提案した方法を用いて推定した宍道湖 の面平均総一次生産量の季節変化.

Fig.8 Seasonal change of the area average of the estimated gross primary production using the proposed method in Lake Shinji, 1995–1998.

得られた総一次生産量はアオコ発生時の10月の データを除くと妥当な推定値であると考えられる. 図8のグラフから推定される宍道湖全体の一次生産 量は3月(冬~春)は低く,8月~10月(夏~秋)は 高い.このような季節的な変動は國井(1995)も指 摘しており,宍道湖の一次生産量の季節変化が大き いことを示唆している.

一方,本報で提案したアルゴリズムの精度を求めるには,衛星データと同期して得られた現場の総一次生産量測定値が必要である.またこのアルゴリズムでは前述したように P^smの推定誤差が大きいため,時期によって推定値が大きく異なる場合が考えられる.さらに,現時点では SPOT データが得られない場合,面平均 Chl.a 推定は不可能であり,SPOT データも高価でありかつ衛星と同期した現場の水温データも得ることが難しいことから現実的な方法とはいえないという問題点がある.従って,今後はTerra/ASTER (岸野,1995)等比較的安価で購入でき広域の Chl.a や水温を推定可能な衛星センサデータや建設省等が観測している水温,塩分,栄養塩データ等を活用するアルゴリズムに改良することが重要だと考えられる.

5.まとめ

多時期の衛星データを用いて一次生産量を推定す るアルゴリズムの提案をし、そのアルゴリズムにお けるいくつかの仮定の検証を行った.また提案した アルゴリズムを現場データに適用し、宍道湖におけ る一次生産量の季節変化について若干の考察を行った.

そして以下のような事項が明らかになった.

1.オフセット除去をした多時期の SPOT/HRV デー タの比演算値と現場 Chl.a の相関は全体としては高 いが,各調査日における両者の相関は低い.一方 HRV の比演算値と現場表層 Chl.a のそれぞれ面平均 値をとった場合の相関は高い.これらの結果は,湖 内の表層 Chl.a の濃度差に比べて時期的な表層 Chl.a の濃度変化の方が大きいことに起因する.

2.季節に関わらず 400 μ Ein/m²/ s 以下の照度下で宍 道湖の *P^b* はほぼ飽和状態に達していることから, 衛星データ取得条件である晴天時・午前 10~12 時 前後には *P^b=P^bm* とする仮定は妥当である.

3. *P[®]m* と水温には *R* = 0.71~0.73 程度の相関があ り,現状では宍道湖の *P[®]m* を水温から推定するの が妥当である.

4. 推定された宍道湖の総一次生産量は約 50~700 mgC/m³/hr の範囲内で変化し,従来の研究値から判断して妥当な推定値といえる.

今後は本報で提案したアリゴリズムの検証のため の一次生産量測定を行いたい.また、本アルゴリズ ムを改良して比較的安価で入手できる可視センサ及 び熱赤外センサを搭載した Terra/ASTER センサに 適用できる新しい一次生産量推定アルゴリズムの開 発を行いたい.

謝 辞

島根大学大学院理学研究科地質学専攻修士課程 (当時)の中山大介氏には,現場調査の準備,実施, データ処理等,終始手伝って頂きました.その他に も船舶による現地調査ではたくさんの方々にお世話 になりました.お世話になった皆様に感謝致します.

引用文献

- 秋山優 (1991) 中海・宍道湖の水質保全に関する調 査報告 (第 12 報). 島根県環境保全課, 1-10.
- 秋山優・有賀祐勝・坂本充・横浜康継(1986) 藻類 の生態.内田老鶴圃,東京, 163-169.
- 有賀祐勝(1973)水界植物群落の物質生産 II-植物 プランクトン.共立出版,東京,91 p.
- Balch, W.M. and Byrne, C.E. (1994) Factors affectig the estimate of primary production from space. Journal of

Geophysical Research, 99 C: 7555-7570.

- Eppley, R.W. (1972) Temperature and phytoplankton growth in the sea. Fishery Bulletin, **70**: 1063-1085.
- 橋谷博・清家泰・近藤邦男・奥村稔・藤永薫・伊達 善夫(1991)月1回の定期調査からみた中海・宍 道湖の水質-地点間変動-.山陰地域研究(自然 環境), 7:93-104.
- 岩熊敏夫・安野正之 (1981) 霞ケ浦の一次生産特性. 国立公害研究所報告, 22,99-122.
- 岸野元彰 (1995) ASTER の海洋・陸水への応用.日 本リモートセンシング学会誌, 15 (2): 72-77.
- 気象庁(1977)海洋観測指針, 9.5 基礎生産量の測定. 244-256.
- 國井秀伸(1995) 宍道湖湖心における水深別クロロ フィル量と光合成速度の季節変化(予報). LAGUNA(汽水域研究), **3**: 97-101.
- 水尾寛己・岡敬一・小倉久子・二宮勝幸・大道章 一・飯村晃・安藤晴夫・三島義人・安岡善文 (1998)人工衛星データによる水質モニタリング ー関連自治体による環東京湾プロジェクト紹介 ー.日本リモートセンシング学会,18(3):62-66. 森本直知・川上誠一・石原純子・葛原美紀雄(1977)

宍道湖の水質汚濁と植物プランクトン.用水と排水, **19**:407-419.

- Nakamura, M., Yamamuro, M., Ishikawa, M. and Nishimura, M. (1988) Role of the bivalve Corbicula japonica in the nitrogen cycle in a mesohaline lagoon. Marine Biology, 99: 369-374.
- 作野裕司・高安克己・松永恒雄・中村幹雄・國井秀 伸(1996) 宍道湖における衛星同期水質調査(そ の1), LAGUNA(汽水域研究), **3**: 57-22.
- 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: 132-148.
- 関文威監訳 (1996) 生物海洋学入門. 講談社, 東京, 220 p.
- 山室真澄(1991) 富栄養化した汽水湖での窒素循環 における懸濁物食性二枚貝の役割.東京大学大学 院理学研究科地理学専門課程博士論文,1990.
- 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: 69-73.

ヤマトシジミの大量斃死機構に関する基礎的研究

相崎守弘'・高橋 愛'・山口啓子'

Study on the mechanism of the large amount death of Corbicula japonica I

Morihiro Aizaki¹, Ai Takahashi¹ and Keiko Yamaguchi¹

Abstract: *Corbicula japonica* is a typical bivalve in blackish water environment in Japan and is an important resource in fishery. It is also importance for nutrient circulation in blackish water ecosystem. *C. japonica* has a high ability to tolerate the anoxic condition and adapt to wide range of salinity concentration. However, a large amount death of *C. japonica* occurred in 1997 in Lake Shinji, a representative lake for fishery of *C. japonica* in Japan. We considered that there are causes for this large amount death in addition to the final deterioration in their health conditions.

For this study, several containers with different set of population densities of *C. japonica* were submerged in Ohashi River, an outflow of Lake Shinji, from the early August to the end of October. Death rate in each container, tolerance ability and filtration rate of *C. japonica* were collected periodically from each container. The following results were obtained: 1) The death rate increased in high population density of *C. japonica*. 2) The filtration rate decreased in high population density of *C. japonica*. 3) The tolerance ability for an anoxic condition decreased in high population density of *C. japonica*. 4) These effects occurred in the population of over 2000 ind./m² of *C. japonica* with ca. 2 cm length of shell size. 5) Tolerance ability for anoxic condition increased when water temperature decreased under 20°C, and little dead shells were observed in October. 6) The rapid decrease in dry flesh weight of *C. japonica*, such as the decrease of flesh weight, seemed to be an important factor for decrease in tolerance, and over population of *C. japonica* in Lake Shinji before the large amount death in 1997 was considered to be one of the cause of this phenomena.

Key words: Corbicula japonica, Lake Shinji, large amount death, population density, anoxic tolerance

1.はじめに

島根県にある宍道湖は日本を代表する汽水湖であり、ヤマトシジミの生産量は全国1位である(中村, 2000). ヤマトシジミは水産資源として重要なこと

は言うまでもないが,近年水質保全の上でも重要な 役割を果たしていることが明らかにされている(中 村(由)ら,1998; Nakamura *et al.*,1988).ヤマトシ ジミはろ過摂食により,湖水から植物プランクトン を直接体内に取り込み消化分解して排泄している.

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

1 個体が毎時 0.2 リットルの湖水をろ過する能力を 持ち, 宍道湖の湖水は単純計算では 3 日に 1 度ヤマ トシジミの体内を通過している(相崎ら, 1998; 相 崎・福地, 1998).

この宍道湖を代表するヤマトシジミが 1997 年の 夏季に大量斃死を起こし,漁業に対して重大な被害 を与えたばかりでなく,環境へも大きな影響を与え た.この大量斃死は宍道湖のヤマトシジミ現存量の 74%にもおよび,また全域にわたって被害を受け ていた.従来,貧酸素水塊の影響を受けて水深の深 い部分でヤマトシジミが斃死する現象は見られてい たが,今回の斃死は水深の浅いところでも生じてお り,従来とは異なった初めての現象である(島根県 水産試験場三刀屋内水面分場, 1998).

島根県内水面水産試験場ではこの大量斃死の原因 として、消去法により台風によってもたらされた多 量の浮泥によるものと結論づけた(島根県水産試験 場三刀屋内水面分場、1998).しかしながら、ヤマ トシジミは本来懸濁物を排泄する高い能力を持って おり、また状況が悪いときには殻を閉じてしばらく の期間は回復するまで耐えることができる能力を 持っている.したがって,直接的な原因は浮泥にあ るにしても、間接的には抵抗力の低下した状態に置 かれていたことが原因と考えられる.我々は、ヤマ トシジミを使った水質浄化実験を行っているが, 1998年夏季に実験水槽の水が停止してしまい、生 息密度の高い水槽など条件の悪かった水槽では全滅 したが、停止前の環境の良かった水槽では大半が生 き残ったという現象を体験している(前田ら、 2000). このことから、ヤマトシジミの斃死には直 接的な原因の他に, 事前の健康状態が重要であり, 健康状態によって耐性が変化してくるものと考え た.

そこで事前の健康状態が無酸素耐性に与える影響 を調べる目的で、ヤマトシジミの生息密度を変化さ せた条件のコンテナを作り、大橋川に浸漬し、無酸 素耐性とろ過活性や軟体部重量変化などについて調 査した.

2. 実験方法

2.1 大橋川における調査

生息密度がヤマトシジミの斃死や無酸素耐性及び 生理活性に与える影響を調べる目的で,大橋川に生 息密度を変えたコンテナを浸漬し,実験を行った. 実験期間は1999年8月初旬から10月下旬までの約

表 1 実験条件. **Table 1** Experimental Conditions.

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
Number of C. japonica/Containe	200	300	400	600	800
Density of C. japonica(Ind./m ²)	1000	1500	2000	3000	4000

3ヶ月間行った.内寸 470×400×225 mm のコンテ ナを6つ用意し,砂とヤマトシジミを入れ,大橋川 の川辺に浸漬した.砂は宍道湖鳥ヶ崎の沿岸部で採 取し,コンテナの底から約10 cm の厚さになるよう に入れた.また,ヤマトシジミは宍道湖西部湖岸で 採取したものを使った. 殻長は約20 mm,湿重量 は2.7±0.4gのものを用いた.生息密度は1 m²当 たりの個体数として,No.1; 1,000, No.2; 1,500, No.3; 2,000, No.4; 3,000, No.5; 4,000(表1)とした.また, コンテナは岸に近い方から No.4, No.1, No.2, No.3, No.5の順で設置した.コンテナを設置した付近は 岸辺にはヨシが茂っており,そのため水の流れは妨 げられた.No.5を設置した付近はちょうどヨシ帯 が切れる付近で水の流れはよかったが,一番岸より の No.4 のコンテナ付近は流れが特に悪かった.

週に1回の頻度で,各実験系からヤマトシジミを 20個体づつ採取し,研究室に持ち帰り実験を行っ た.ただし,No.1については,個体数が少なく影 響が出やすいためコンテナを2つ用意し,10個体 づつ採取した.同時に,多項目水質計(水質チェッ カーU-10,堀場製作所)を用いて水温,溶存酸素 (DO),塩分濃度を測定した.また,実験系毎にヤ マトシジミの斃死個体数の計数を行った.各実験系 で計数された斃死個体数から累積斃死率を算出し た.斃死個体の計数はコンテナを引き上げて確認し, 開設した状態のものを死貝とした.死貝はその都度 コンテナから取り除いた.

2.2 ろ過速度の測定

1 リットルの広口ガラス瓶にヤマトシジミ10 個 体と試水1リットルを入れ、ふたをしない条件で培 養した.底質は入れなかった.試水のみを入れたも のをコントロールとした.実験容器は、20℃に設 定した恒温槽に保持し、暗条件下で90分間静置し た.実験に先立ち、ヤマトシジミを設定水温で最低 1時間馴化させた.実験に用いた試水は堀川から実 験の当日に採水したものを用いた.堀川は宍道湖の 湖水が導水され、汽水環境になっているが、家庭排 水等の流入により宍道湖に比べて汚濁した水質と なっている. 実験開始時と実験終了時(90分後)に試水を300 ml ずつ採取し, 懸濁物質(SS)濃度, 濁度, アンモ ニア態窒素(NH4–N)濃度を測定した. 試水はサイ フォンを用いて, 糞や擬糞が混入しないように注意 しながら取水した. 懸濁物質(SS)濃度は, ガラス フィルター(GF/F)でろ過後, 105℃で乾燥させて 重量を測定し求めた. 濁度は携帯濁度計(Hach 社, 2100 P型)を用いて測定した. NH4–N濃度はオー トアナライザー(ブラン・ルーベ社, AAⅡ型)を用 いて分析した. 実験に用いたヤマトシジミは, 実験 終了後, 殻長及び湿重量を測定し,軟体部について 60℃, 24 時間で乾燥させて軟体部乾燥重量を求め た.

懸濁粒子のろ過速度の測定は,経時変化の測定で 藻類現存量が実験開始から90分までは直線的に変 化している結果(相崎ら,1998)を基に,その時間 内での変化量から求めた.ろ過速度はヤマトシジミ がろ過摂食,または呼吸のため一定時間に体内に通 した水のろ過水量であり,懸濁粒子の除去速度と異 なり,試水の初期の濃度に影響を受けない.したがっ て,ヤマトシジミのち週速度は以下の式にしたがっ て計算した(Nakamura *et al.*, 1988).

 $F = (V / t) [\ln (C_{(0)}/C_{(t)}) - \ln (Cb_{(0)}/Cb_{(t)})]$

V:試水の量(L), t:培養時間(h), C₍₀:ヤマ トシジミを入れた容器内での実験開始時における懸 濁粒子濃度(mg/l), C₍₀:ヤマトシジミを入れた容 器内でのt時間後における懸濁粒子濃度(mg/l), Cb₍₀:コントロール系の実験容器内での実験開始時 における懸濁粒子濃度(mg/l), Cb₍₀:コントロール 系の容器内でのt時間後における懸濁粒子濃度(mg /l)を表す.

図1に示すように、本実験において SS 濃度と濁 度との間には高い相関が得られ、濁度からほぼ正確 な SS 濃度を推定することが可能となった.そこで、 本実験ではろ過速度を算出する際、濁度から SS 濃 度を換算して用いた.

2.3 無酸素耐性実験

ろ過速度の測定実験と同様な条件で,容器の上部ま で試水を満たし,試水を無酸素状態にした後,ふた をして暗条件下の恒温槽で保持した.ただし,各実 験系について,ろ過速度の測定に用いたヤマトシジ ミとは別の10個体を用いた.無酸素の試水は,溶 存酸素 (DO)が DOメーターで検出されなくなる (0.05 mg/l 以下)まで窒素ガスを充分吹き込んで





Fig.1 Relationship between turbidity and SS concentration in experimental waters.

作った. 生死の判定は,開設した状態のものを死貝 とした.毎日一定時刻に観察し,半数致死日数を調 べ,生息密度の違いによる無酸素耐性の違いを調べ た.

3.結 果

3.1 大橋川に浸漬したコンテナにおけるヤマトシ ジミの斃死状況

実験期間中の水温, DO 濃度及び塩分濃度の変化 を図2に示す.水温は8月26日の29.3℃をピーク に次第に低下した.9月20日までは25℃以上で あったが,10月18日以降には20℃以下となった. DO 濃度は3.07~7.06 mg/1と,極端な貧酸素化は見 られなかった.塩分濃度は3.6~10.1 psuと,極端 な低塩分化,高塩分化は見られなかった.





Fig.2 Changes in the water temperature, salinity and dissolved oxygen concentrations at experimental site in Ohashi River during the experimental period.



図 3 大橋川に浸漬したコンテナーでのヤマトシジ ミの斃死個体数と累積斃死率. (◆) No.1, (■) No.2, (▲) No.3, (●) No.4, (*) No.5.



図3に大橋川に浸漬した各コンテナでのヤマトシ ジミの斃死個体数と累積斃死率を示す.8月中は生 息密度の高い No.4, No.5 のコンテナで 20 個程度の 斃死個体が計測されたが、密度の低い No.1 及び No.2 ではほとんどみられなかった.9月3日は他の 日に比べて多量の斃死個体がみられ、特に No.4 で は83個体という高い値が計測された.また,9月 中は No.5 のコンテナでは 30 個体程度が毎週死んで いたが、ほかのコンテナではさほど多くの死亡個体 は見られなかった. No.4 のコンテナでは9月3日 に多くの死亡固体がみられたが9月下旬にはあまり みられなくなった.また10月にはいると死亡個体 数は減少し10月25日には各系とも0となった.累 積斃死率をみると、生息密度が 2.000 個体/m²ま での密度では死亡率に大きな違いは見られず, 3,000 個体以上で死亡率が高まることが明らかになった. No.4 と No.5 を比較すると密度の低い No.4 の方が 斃死率が高くなったが、これは9月3日に多量の斃 死個体が見られたためであり、そのケースを除けば No.5の方が死亡個体数が多かった.9月3日に No.4 で多くの斃死個体が見られたのは, No.4 のコンテ ナがもっとも岸寄りだったため,水質悪化が激し かったことによるものと考えられた.

3.2 軟体部乾燥重量

大橋川に浸漬したコンテナにおけるヤマトシジミ の軟体部乾燥重量の変化を図4に示す.実験に用い たヤマトシジミは殻長約2cmのものを用いたが,す べての個体が同じサイズではなかったとことから, サイズによる補正を行うため, 殻長1cm 当たりの 軟体部乾燥重量に換算して示した.生息密度の高い



図4 単位殻長当たりの軟体部乾燥重量の変化. (◆) No.1, (■) No.2, (▲) No.3, (×) No.4, (*) No.5. **Fig.4** Changes in the flesh dry weight per unit shell length in each experimental container submerged in Ohashi River.

No.5 では実験開始からすぐに重量は低下し,8月26 日には27 mg まで低下した.9月3日に大量の斃死 個体が出た No.4 でもその前週の8月26日には軟体 部乾燥重量は27 mg まで低下しており,その他 No.1, No.3 でも9月3日には29 mg と30 mg 以下 となった.大量斃死を起こした No.4 では9月3日 の軟体部重量は25 mg まで低下した.生息密度の 高い No.5 ではその後も26~27 mg の値を維持し,10 月9日になって30 mg まで回復した. No.4 では9 月10日には28 mg まで回復しており,9月27日以 降は30 mg を超える値となった. No.1,2,3では9 月3日以外は30 mg を越えており,高いときには 約40 mg の値を示した.

3.3 ろ過活性

図5にろ過活性の変化を示す.0.15 l/Ind.・h を中 心に変動しており,生息密度の高いコンテナで変動 が激しかった.8月26日から9月10日までは密度 の違いによるろ過速度の差が小さかった.9月3日 には全ての系で実験期間中最も低い値を示し,斃死 個体数が多かった No.4では0.09 l/Ind.・h と最も低 い値を示した.また,9月3日以降,ろ過速度は回 復傾向を示し,密度の低い系ほど回復率が高かった.

図6に8月13日から9月27日までの実験で得ら れた各生息密度での平均ろ過速度を示す. No.1 お よび No.2 の系では平均ろ過速度は 0.15 l/Ind.・h と 同じであったが,生息密度 2,000 個体の No.3 では 0.145 l/Ind.・h と少し低下し,3,000 個体および 4,000 個体の No.4 および No.5 では,0.137,および 0.135 l/Ind.・h とろ過速度が低下していることがわかっ た.



ジミのろ過速度の変化. (◆) No.1, (■) No.2, (▲) No.3, (●) No.4, (*) No.5.

Fig.5 Changes in the filtration rate of *C.japonica* in each experimental container submerged in Ohashi River.

3.4 アンモニア排出速度

ろ過速度の測定と同時にアンモニアの排出速度に ついても測定した.その結果を図7に示す.アンモ ニア排出速度は 1~15 μ gN/Ind. \cdot h の間を変動した. 実験開始直後と9月27日には低い排出速度であっ たがその他では 5~10 μ gN/Ind. \cdot h 程度の値を示す ことが多かった.実験期間の全平均値は7 μ gN/Ind. \cdot h で生息密度とはほとんど関連性が見られなかっ た.また,排出速度と初期アンモニア濃度および試 水のSS 濃度との間には何の関係も見られなかっ た.同様にろ過速度や斃死個体数などとの関連も見 られなかった.

3.5 無酸素耐性

表2に無酸素条件下におけるヤマトシジミの半数 致死日数を示す.設定水温20℃とした8月13日で は半数致死日数は約2週間であったが,8月20日 には7~12日になった.特に,No.4で最も短くなっ た.8月26日のサンプルではすべて9日以上となっ



(\blacksquare) No.2, (\blacktriangle) No.3, (\times) No.4, (*) No.5.





ジミの平均ろ過速度 (8~9月). **Fig.6** Comparison among the mean filtration rates of *C*.

japonica during Aug. to Sep. in the each container submerged in Ohashi River.

たところから、9月3日のサンプルでは設定温度を 30℃に変更して実験を行ったところ2~3日という 短い日数で半数が死亡した.前述したごとくこの日 には大橋川に浸漬したコンテナでの死亡率も高かっ たところから、ヤマトシジミの健康状況はかなり悪 かったものと推測される.9月10日以降は設定温 度を25℃とし実験した.生息密度の低い No.1及び No.2では9月27日に8日程度まで延びその後大き な変化は見られなかったが、No.3、4、5では徐々 に耐性が回復し、10月になると生息密度による違 いは見られなくなった(図8).

4.考 察

宍道湖におけるヤマトシジミの大量斃死原因としては、夏場の高水温、台風による塩分の低下、貧酸素化、浮泥によるエラづまりなどが考えられ検討された。その結果、直接的原因は浮泥によるエラ詰まりであるとの結論が得られている(島根県水産試験場内水面分場、1998).しかしながら、その他の要

表 2 無酸素耐性実験における半数致死日数. Table 2. Median lethal time (days) in the experiment of anoxic condition.

Date	Exp. Temp.(°C	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
13 Aug.	20	15	14	15	13	15
20 Aug.	20	9	12	9	7	9
26 Aug.	20	>9	>9	>9	>9	>9
3 Sep.	30	3	3	3	2	3
10 Sep.	25	4	4	4	4	3
20 Sep.	25	4	5	5	5	4
27 Sep.	25	8	9	6	6	6
2 Oct.	25	7	8	7	7	7
9 Oct.	25	8	8	7	8	7
18 Oct.	25	10	9	11	9	10
25 Oct.	25	9	9	10	9	8



図 8 無酸素耐性実験におけるヤマトシジミの半数 致死日数の変化. (◆) No.1, (■) No.2, (▲) No.3, (×) No.4, (*) No.5.

Fig.8 Changes in the median lethal days of *C.japonica* in the anoxic tolerance experiment.

因についても可能性が否定されたわけではなく、特 に,大量斃死が発生する前にヤマトシジミが異常発 生しており、それが原因であると考える漁師もいた ことが報告されている. 図9に内水面水産試験場が 推定した宍道湖におけるヤマトシジミの資源量を示 す.1982年の夏季には約2万8千トンであった資源 量が斃死直前には7万8千トンまで増加しており, それが大量斃死により1万1千トンまで低下してい る (島根県水産試験場内水面分場, 1998). 1982年の 資源量は宍道湖にとって適当な資源量であったと考 えられており、このときの個体密度はヤマトシジミ のよく生息している 0~3 m までの水深で約 1,500 個体/m²と推定されている(島根県水産試験場内) 水面分場、1984). この値に比べて斃死直前の生息 密度は約2.8倍になっているところから、個体数で は4,200 個体/m² 程度の値になっていたものと推 測される.この生息密度は実験を行った No.5 の生 息密度とほぼ同じであるが、個体サイズは異なって いると考えられるところから単純には比較できな い.しかし、大量斃死が起きる直前に生息密度が異 常に高くなっていたことは、今回の実験結果と合わ せて考えるとき、ヤマトシジミの大量斃死の伏線と して大きなウエイトを占めるものと考えられる.

生息密度が高くなることにより,ヤマトシジミの 無酸素耐性が低下することは図3及び図8から明ら かであるが,その原因は明らかではない.ヤマトシ ジミは無酸素耐性が大きなことで知られており,健 康な個体では20℃においては2週間以上生存可能 であり,30℃においても半数致死日数は5日程度 であることが知られている(中村(幹)ら,1997). 今回の結果はこのような数字に比べると,20℃で



図 9 宍道湖における 1982 年及び 1997 年の大量斃 死前後でのヤマトシジミ現存量の比較 (島根県水産 試験場三刀屋内水面分場, 1998).

Fig.9 Comparison among the standing stock of *C.japonica* in 1982 and before and after the large amount death of *C. japonica* in 1997.

測定した8月においても7日程度の半数致死日数が No.4 で測定されており,耐性が低下していたこと が分かる.また,大量斃死が起きた9月3日では30 ℃での測定であったが2~3日という短い半数致死 日数であり,ヤマトシジミの無酸素に対する耐性が 著しく低下していたことが推測される.

このような無酸素耐性の低下と関連が見られるの は軟体部乾燥重量変化である.図4に示したごとく、 大橋川で多くの個体が死亡した No.4 および No.5 の 系では軟体部乾燥重量が殻長1cm 当たり25mg 程 度まで低下し、短期間の内に15%程度の重量減少 が見られた.これは高水温における異常代謝が原因 か、貧酸素化が生じ嫌気呼吸が起こったためによる ものか原因は不明であるが、とにかく急激な重量減 少が生じていたことは事実である. 生息密度が高い No.5 では、軟体部重量の回復は進まず、その間毎 週30個体程度づつ死亡していた.軟体部乾燥重量 が 30 mg 以上になった系での死亡個体数は少なく, 無酸素耐性実験結果との直接的な関係は見られな かったが軟体部重量減少が無酸素耐性の低下に関係 があることが強く示唆された. No.5 でも 10 月にな ると斃死個体はほとんど見られなくなった.10月に 斃死個体が見られなくなった原因としては水温が 25℃以下まで低下したことが大きな要因と考えら れるが、軟体部重量の回復もその原因の1つと考え
られる.

ヤマトシジミの殻長と軟体部乾燥重量との間には 強い相関関係が見られ、大きなシジミほど重量も重 くなる. 1997年に宍道湖より採取した殻長 2 cm の ヤマトシジミの軟体部乾燥重量の平均値は77.1 mg であった⁴⁾.1 cm 当たりでは 39 mg 程度に相当する. 夏季における健康なヤマトシジミの軟体部乾燥重量 は明らかでないが、今回の実験結果から考え合わせ ると殻長2cm 程度の個体では70~80mg 程度では ないかと推測される. 今回の実験からはこの値が 60 mgを低下すると危険な状態になり,50 mg まで低 下するとかなり深刻であることが示唆された.しか し、単に重量だけが問題なのではなく、重量変化が 重要である可能性も考えられる. 重量変化の重要性 に関しては次報で報告する. ヤマトシジミは殻長の 他、殻高、殻幅などの測定が可能であり、体積とし て算出が可能である.軟体部重量を殻のサイズで補 正する場合、体積当たりで補正した方がより精度が 向上するものと考えられる.

軟体部重量がヤマトシジミの健康状況の指標とし て重要なことが示唆されたことから、今後の検討課 題として健康な状況にあるヤマトシジミの軟体部重 量が環境変動によりどのように変化するかを調査す る必要がある.

その他,貧酸素耐性の変化に対応する活性として, ろ過活性及びアンモニア排出活性について調べた. その結果,貧酸素耐性が低下した9月3日にはろ過 活性も著しく低下したが,その他の日については明 確な関係は見られなかった.但し,平均的に見ると 生息密度の高い系での個体当たりのろ過活性は低下 しており,これは軟体部重量の低下や貧酸素耐性の 低下の原因と結びつく可能性は高い.アンモニア排 出速度に関しては,その変化の要因について明確に することは出来なかった.

5.摘 要

汽水域におけるヤマトシジミは漁業のみならず物 質循環の上でも重要な役割を果たしている.ヤマト シジミは貧酸素耐性が高く,また広範囲の塩分濃度 に適応できる能力を持っている.しかしながら,1997 年に宍道湖において大量斃死が生じ,約74%が死 滅したと報告されている.本研究では,ヤマトシジ ミの大量斃死には直接的原因の他に間接的な要因と してヤマトシジミの健康状況が重要な影響を及ぼし ていると考え,実験を行った.実験はヤマトシジミ の生息密度を変えたコンテナを大橋川に浸漬し,そ こでの斃死率の調査,無酸素耐性実験及びろ過活性 の測定を行った.その結果,以下のことが判明した. 1)生息密度が高まると斃死率が増加した.2)生息 密度が高まるとろ過活性が低下した.3)生息密度 が高まると無酸素耐性が低下した.4)殻長2cm程 度のヤマトシジミの場合,2,000個体/m²以上の生 息密度になると影響が現れた.5)水温が20℃以下 に低下すると影響は見られなくなった.6)軟体部 重量の急激な減少の後に,無酸素耐性の低下や多数 の死亡個体が見られた.

これらの結果から,ヤマトシジミの無酸素耐性の 低下には軟体部重量の減少が重要な要因として関与 していることが示唆され,高密度の生息環境は耐性 の低下に関係していることが判明した.大量斃死前 の宍道湖でのヤマトシジミの高い生息密度が,大量 斃死を引き起こした要因として重要であることが示 唆された.

6.引用文献

- 相崎守弘,森岡美津子,木幡邦夫(1998)ヤマトシ ジミを利用した汽水域の水質浄化に関する基礎的 研究,用水と排水,40:142-147.
- 相崎守弘・福地美和(1998)ヤマトシジミを用いた 汽水性汚濁水域の浄化,用水と排水,40:894-898.
- 島根県水産試験場三刀屋内水面分場(1984)赤潮対 策技術開発試験報告書,島根県,87 p.
- 島根県水産試験場三刀屋内水面分場(1998) 宍道湖 におけるシジミ大量へい死対策緊急調査報告書, 75 p.
- 中村幹雄編著(2000)日本のシジミ漁業-その現状 と問題点,たたら書房,265 p.
- M. Nakamura, M. Yamamuro, M. Ishikawa, H. Nishimura (1988) Role of the bivalve, *Corbicula japonica*, in the nitrogen cycle in mesohaline lagoon, Marine Biol., **99**: 369-374.
- 中村幹雄・品川明・戸田顕史・中尾繁 (1997) ヤマ トシジミの貧酸素耐性,水産増殖, 45:9-15.
- 中村由行, F. Kerciku, 井上徹教, 二家本晃造(1998) 汽水湖におけるヤマトシジミの水質浄化機能に関 するボックスモデル解析, 用水と排水, 40: 18-26.
- 前田伊佐武,相崎守弘,山口啓子,藤田直樹(2000) 汽水湖水を連続供給した屋外実験水槽でのヤマト シジミの水質浄化能に関する研究,水環境学会誌, 23:716-720.

ヤマトシジミの大量斃死機構に関する基礎的研究 II

末光健治'·山口啓子'·相崎守弘'

Study on the mechanism of the large amount death of Corbicula japonica II

Kenji Suemitsu¹, Keiko Yamaguchi¹ and Morihiro Aizaki¹

Abstract: Corbicula japonica is a typical brackish bivalve and plays an important role in the brackish lake ecosystems. Large amount death of C. japonica is a very serious problem for both the fishery productivity and the water quality of brackish lakes. To make ways to avoid the large amount death, it is required to establish some values to check the condition of the bivalve. To clarify the value of the elements effective to check the condition of C. japonica, some experiments were carried out in this study. Seasonal changes of Condition Index defined as an index representing the content richness of the shell (=A.F.D.W./ (shell length \times shell height \times shell width $) \times 1000$), filtration rate and tolerance of anoxic condition, were examined for C. japonica living in an artificial lagoon built beside the Lake Jinzai, Shimane Prefecture, from March 2000 to January 2001. Although the Condition Index reduced largely from May to September, the filtration rate and the tolerance of anoxic condition did not reduce so apparently. It indicates that the artificial lagoon was kept in a comfortable condition for C. japonica through the experiment period. The Condition Index of C. japonica kept in an anoxic condition artificially reduced rapidly. It appears that the large amount death occurs when the reducing rate of the Condition Index becomes larger than 3%/day. In these cases of large amount death, the filtration rate is reduced to under 0.1 L/ind. • hr. The combination of these two values may provide a guide to check the condition of C. japonica and effective to predict the large amount death.

Key words: *Corbicula japonica*, Condition Index, filtration rate, tolerance of anoxic condition, seasonal change

はじめに

ヤマトシジミ(Corbicula japonica)は汽水域においてしばしば優占する二枚貝である.島根県東部に 位置する宍道湖と神西湖はヤマトシジミの優占する 汽水湖で,重要な漁場となっている.特に宍道湖は ヤマトシジミの生産が日本で最も高く,漁業資源と しての価値が広く認識されている(中村,2000 a). また,ヤマトシジミは濾過摂食により水中懸濁物を 直接的に水柱から除去し,更に漁獲や捕食されるこ とを通じて栄養塩を系外除去する役割も持ち,宍道 湖の水質浄化において重要な役割を果たしているこ とが,近年注目されてきている(Nakamura *et al*., 1988;山室,1994;相崎ほか,1998;相崎・福地, 1998 など).

一方, 宍道湖ではヤマトシジミの斃死個体の増加 が問題となっている.1997年の夏季に起こった大量 斃死では,8月に78,610トンであったヤマトシジミ

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

の現存量が,11月には11,165トンとなり,現存量 の8割以上が減少し,漁業関係者の生活を脅かして いる.また大量斃死により,ヤマトシジミの懸濁物 質を除去する能力が低下し,さらに斃死個体が腐敗, 分解することにより発生するアンモニアや硫化水素 のため,宍道湖の水質が著しく悪化することも問題 となっている(島根県水産試験場三刀屋内水面分場, 1998).

宍道湖での大量斃死の原因は浮泥等により鰓詰まり、呼吸困難を起こしたためであると報告されている(島根県水産試験場三刀屋内水面分場、1998).しかし、ヤマトシジミの成貝は本来、高い懸濁物質の排出能力、環境悪化への耐性を持っている.浮泥が直接的な原因であったとしても、それ以前にヤマトシジミが別の要因(間接的原因)で抵抗力を低下させていた可能性がある.

前報(相崎ら, 2001)において、ヤマトシジミの 事前の健康状態が無酸素耐性に与える影響を調べる 目的で、ヤマトシジミの生息密度を変化させた場合 の軟体部乾燥重量・ろ過活性・無酸素耐性の変化に ついて調査研究が行われた.その結果,生息密度を 高く設定した系 (3000, 4000 個体/m²) においてヤ マトシジミの斃死率が上昇し、斃死率の高い時期に は軟体部乾燥重量・ろ過活性・無酸素耐性が低下し ていることがわかった. これらの項目はヤマトシジ ミの健康状態を示す指標値となりうる項目(健康指 標項目)と考えることができる. そこで本研究では, ヤマトシジミの大量斃死機構に関する基礎的研究と して、環境などの要因や生育状況の把握が容易な人 工湿地に生息するヤマトシジミを対象に、重量やろ 過活性・無酸素耐性などの健康指標項目について年 間を通した値の変化を調べ、健康状態の把握を行っ た. ただし、軟体部乾燥重量は各個体の大きさに支 配され,異なる個体の比較が困難である.そのため 本研究では、大きさの異なる個体においても適用可 能な指標として肥満度を採用し,肥満度・ろ過速度・ 無酸素耐性を健康指標項目として指標値を検討し た.

人工湿地のヤマトシジミについて約1年間,健康 指標項目の測定を行った結果,肥満度とろ過速度の 減少が単純に大量斃死を招くものでは無いことがわ かった.そこで大量斃死と肥満度,ろ過速度の値と の関係をより明確にすることを目的として,人工的 に悪化させた環境において飼育したヤマトシジミの 健康指標項目の値と斃死率の関係を調べ,斃死率の 上昇を予測する指標としてのこれらの指標項目の有





効性について検討を行った.

実験方法

1.人工湿地に生息するヤマトシジミにおける健康 指標項目の季節変化

ヤマトシジミの調査は島根県出雲市から湖陵町に またがる神西湖湖畔に建設した人工湿地(図1)に おいて,2000年3月から2001年1月までの間に月 に一回の頻度で行った.人工湿地への流入水は,神 西湖からポンプにより汲み上げた湖水を貯水槽に一 時貯留した後,その上澄み水を6t/m²・h,滞留時 間が約2時間になるように連続的に供給した.この 人工湿地に2000年2月29日,2kg/m²の密度で 神西湖産ヤマトシジミを投入した.この生息密度は, 前田ら(2000)・相崎ら(2001)の結果を参考として, 密度効果が生存やろ過活性に悪影響を及ぼさない程 度の値として設定した.投入時のヤマトシジミは平 均殻長が20.3±1.6 mm,平均重量が3.27±0.75 gで あった.

ヤマトシジミの調査日は,2000年3月7日,4月 13日,5月13日,6月6日,7月4日,8月8日,9 月8日,10月4日,11月7日,12月8日,2001 年1月10日であった.3月7日の調査で,投入時に おける湿地内のヤマトシジミの分布が極端に偏って いたため,4月3日に鋤簾を用いて回収し,分布が 均一になるように再投入した.生残率は4月13日 以降の調査日に現地にてコドラート内の生存個体数 を計測し(30 cm×30 cm×15 地点の平均),4月13 日の個体数との比として求めた.

夏季の極端な水温上昇を防ぐため7月末~9月末 の間,人工湿地の上に寒冷紗(遮光率50%)をかけ た.また,月に一度の調査時には湿地内の水を抜き, 底質表面の泥をホースで洗い流した.

1-1. サイズ・肥満度の測定

人工湿地内からコドラート(30 cm×30 cm×2 地 点)で採取したヤマトシジミを研究室に持ち帰り, 計測・実験を行った.毎月40個体について,湿重 量,殻長,殻高,殻幅,軟体部乾燥重量(60℃,2 日間乾燥),軟体部灰重量(600℃,2時間燃焼)の 計測を行った.さらに,この計測結果から肥満度を 算出した.肥満度は貝の内部充足度を表し,論文に よって軟体部の湿重量や殻重量が利用されている (例えば西沢ほか(1992),網尾ほか(1989)).本論 文では以下のように定義して計算を行った.

肥満度=軟体部有機物量/(殻長×殻高×殻幅) ×1000

ただし, 軟体部有機物量 (AFDW) = 軟体部乾燥 重量-軟体部灰重量

1-2.ろ過速度

ヤマトシジミのろ過速度は、一般に水温の影響を 強く受けるため、毎月25℃の恒温槽内において約 6時間の馴致後に測定した.1Lの広口ガラス瓶に 持ち帰ったヤマトシジミを10個体と、人工湿地流 入水を試水として1L入れ、試水のみを入れたもの をコントロールとした.実験容器は25℃の恒温槽 で保持し、実験開始時と実験開始90分後に試水を 採水し、濁度の測定を行った. 試水は擬糞などが混 入しないように注意しながらシリンジを用いて採水 し、濁度は携帯濁度計(Hach 社、2100 P型)を用い て測定を行った. 濁度と懸濁粒子濃度との間には高 い相関があり, 濁度からほぼ正確に懸濁粒子濃度を 推定することができる(相崎ら、2001).これを利 用して,ろ過速度の算出には濁度を懸濁粒子濃度に 換算し, Nakamura et al. (1988) の方法に準じて, ろ 過速度 (F) を算出した.

 $F = (V / t) [ln (C_{(0)}/C_{(t)}) - ln (Cb_{(0)}/Cb_{(t)})]$

- V : 試水の量 (L), t: 培養時間 (h),
- C₍₀₎: ヤマトシジミを入れた容器内での実験開始
 時における懸濁粒子濃度 (mg/L)
- C(t) : ヤマトシジミを入れた容器内でのt時間後における懸濁粒子濃度(mg/L)
- Cb₍₀₎:コントロール系の実験容器内での実験開始 時における懸濁粒子濃度 (mg/L),
- *Cb*_(t):コントロール系の容器内での*t*時間後にお ける懸濁粒子濃度 (mg/L) を表している.

1-3. 無酸素耐性実験

無酸素耐性は環境悪化時にヤマトシジミが持つ個 体維持能力を表す.本実験では人工湿地内に生息す るヤマトシジミの無酸素耐性を比較するために、無 酸素水中における半数致死日数の測定を行った.死 貝の混入を防ぐため、実験には研究室において潜砂 したヤマトシジミを用いた. 試水には人工海水 (テ トラ社製)を用い、人工湿地に近い8.5‰の塩分に 調整した. 底質を入れない1Lの実験容器に試水を 満たし、ヤマトシジミ 10 個体を入れた. 試水を無 酸素状態にするため,窒素ガスを溶存酸素が DO メーターで 0.05 mg/L 以下になるまで吹き込んだ. その後ふたをして暗条件下の25℃の恒温槽で保持 し,毎日一定時刻に観察して斃死個体を確認した. 腐敗による水質悪化を防ぐために死貝は取り出し試 水の交換を行った.半数致死日数の測定は2000年 5月から2001年1月まで行った.

1-4.湿地の環境

人工湿地内の環境要素として水温・電気伝導度・ クロロフィル a 濃度 (Chl-a) ・溶存酸素濃度 (DO) を測定した.水温および電気伝導度は自記水温・電 気伝導度計 (CI サイエンス社製, C 55-F)を用いて 連続測定 (5 分毎)した.塩分はこのデータから計 算によって求めた. Chl-aと DO は週1回の頻度で 測定した. Chl-aは SCOR/UNESCO法で測定し,DO は多項目水質計 (HORIBA 社製, U-10 型)を用い て測定した.

2.環境悪化時の肥満度・ろ過速度・斃死率の変化

2-1. 無酸素条件実験

無酸素耐性実験と同条件の密閉容器にヤマトシジ ミを入れ(各10個体×2容器),無酸素での保持を それぞれ3日間,5日間,7日間行う系,および無 酸素の飼育を行わない飼育前系(0日間),計4系を 設定し,各日数経過後のヤマトシジミの肥満度・ろ 過速度・斃死率について調べた.無酸素飼育の影響 により斃死した個体を含めて斃死率を求めるため に,設定日数経過後に生存した個体をさらに25℃ の人工湿地水でエアレーションを行いながら2日間 飼育した.実験開始から日数経過後2日間までの期 間中にへい死した個体を,各系無酸素飼育の影響に より斃死した個体を判断した.

2-2. 無給餌条件実験



図 2 人工湿地内に生息するヤマトシジミにおける 1 個体当たりの湿重量 (g) と肥満度 (g/cm³)の経時変化. **Fig.2** Seasonal change of wet weight (g) and condition index (g/cm³) for *Corbicula japonica* in the artificial lagoon.

飼育前の状態として、まず、採取直後のヤマトシ ジミについて肥満度、ろ過速度、無酸素耐性の測定 を行った.その後、ヤマトシジミを人工海水中に置 き、無給餌でエアレーションを行いながら室温にて 2ヶ月間(2000年9月~11月)飼育した.飼育後の ヤマシジミ10個体に対して、肥満度の計測、ろ過 速度、無酸素耐性の測定を行った.

結果

1.人工湿地のヤマトシジミの成長

人工湿地より採取したヤマトシジミの湿重量および肥満度の平均値について,経月変化を図2に示す. 湿重量は盛夏の7月から9月および冬季の12月から1月に成長の停滞があったが,全実験期間では1 個体平均3.32gから7.62gへと4.30g増加した.

肥満度は3月から5月までは増加,5月から9月 までは減少,9月から1月にかけて再び増加していた.肥満度は2000年5月に最大値0.054g/cm³,9 月には最低値0.017g/cm³を示した.2001年1月には 2000年3月とほぼ同じ値0.040g/cm³となった.

2. ろ過速度と無酸素耐性

ろ過速度と半数致死日数の経月変化を図3に示 す.ろ過速度は7月から8月にかけては低下したが, 8月から10月に向けて大きく上昇した.10月に実験 期間の中でも最も高い値0.173L/個体・hとなっ た後,ろ過速度は低下し,11月から12月にかけて 大きく低下した.1月においても低い値のままであ り,最も低い値0.084L/個体・hを示した.また, 7月28日に人工湿地内の水が非常に濁っているこ



図3 人工湿地内に生息するヤマトシジミ1個体当た りのろ過速度 (25°C) と半数致死日数の変化. **Fig.3** Filtration rate (l/ind. \cdot hr) at 25°C and Medial lethal time (day) of *C. japonica* in the artificial lagoon.

とが観察されたため、ろ過速度の測定を行ったところ、0.09 L/個体・h という低い値になっていた.

無酸素耐性については,5月から9月までは半数 致死日数は七日,または八日であり,大きな変化は 見られなかった(図3).10月,11月,12月と気温 が低下するにつれて半数致死日数は長くなる傾向が みられた.1月では,半数致死日数は12月より短く なった.

3.人工湿地の環境と生残率

水温の変化を図4Aに示す.水温は3月と12月 はじめには10℃を下回っていた.夏季(7月~9月) の日中は30℃を超えていたが,一日の変動幅は7~ 8℃あり,夏季も夜間は25℃程度に下がっていた.

塩分は変動が激しく (図 4 B), 一時的に 0 psu 程 度に下がったこともあったが, 最高でも 16 psu 程 度で, 平均して 8 psu 前後であった. ヤマトシジミ の生息する水域の塩分としては, 好条件な範囲の変 動であった.

図5にクロロフィル a 濃度と溶存酸素濃度の季節 変化をしめす.3月~6月までは Chl-a は高い値で推 移していたが,7月以降急激に低下し,9月まで低 い値が継続した.10月以降,Chl-a はやや回復した ものの高い値ではなかった.DOは,全般には6 mg /L以上の高い値であったが,7月28日と8月5日 の測定では3 mg/L以下に低下していた.

図6に人工湿地内のヤマトシジミの生残率を示 す.月平均5%程度で緩やかに減少した.4月から5 月に10%を超える生残率の減少があったが,大量 斃死といえるような生残率の急激な低下はなかっ た.



図 4 人工湿地内の A) 水温 B) 塩分.水温・塩分ともに 2 時間の平均値 (5 分ごとの測定値を 24 個ごとに平 均) が 1 ポイントで表されている.

Fig.4 Changes in A) temperature ($^{\circ}$ C) and B) salinity (psu) of the artificial lagoon water during the experimental period.



図5 人工湿地内のクロロフィルa濃度と溶存酸素濃度の変化.

Fig.5 Changes in concentration of Chl-a ($\mu g/l$) and dissolved oxygen (mg/l) of the artificial lagoon water during the experimental period.

4.環境悪化時の肥満度、ろ過速度の検討

無酸素条件

表1に各実験の結果を示す.3日間の飼育を行ったものでは肥満度の減少は2.23%と小さく,ヤマトシジミの斃死も起こらなかった.5日間では19.83%の肥満度の減少があり,無酸素の飼育後2日以内に20個体中2個体が斃死したため,斃死率は10%となった.7日間では25.64%肥満度が減少し,無酸素の飼育中に3個体,無酸素の飼育後に4個体,合計7個体が斃死した.斃死率は35%となった. ろ過速度については,0日間は0.097 L/個体・h,3日間飼育をおこなったものでは0.083 L/個体・h,5日間で0.089 L/個体・h,7日間では0.072 L/個

表1 環境悪化時におけるヤマトシジミの肥満度の変化と斃死率およびろ過速度. **Table 1** Changes in reducing rate of Condition Index, mortal rate and filtration rate of *Corbicula japonica* under experimental conditions.

		Condition	Reducing	Reducing	Death	Filtration Rate
		Index (g/cm ³)	Ratio(%)	Rate(%/day)	Ratio(%)	(l∕Ind.•hr)
Anoxic Exp.	Before	0.0343	_	_	-	0.097
	3days	0.0335	2.23	0.78	0	0.083
	5days	0.0275	19.83	3.97	10	0.089
	7days	0.0255	25.64	3.65	35	0.072
Unfeeding Exp.	Before	0.0170	-	-	-	0.147
	After	0.0167	1.78	0.03	5 (2months)	0.063
Artificial Lagoon	Мау	0.0540	_	_	_	0.137
May to Sept	Sept	0.0170	68.52	0.58	18 (4months)) 0.145
Death Event in	Before	0.0164	_	_	-	0.156
Aizaki <i>et al.</i> (2001)After	0.0135	17.09	3.42	17 (2weeks)	0.088

体・h となり,7日間の飼育によりろ過速度はわず かに低下した.

無給餌条件

無給餌での飼育を行ったものにおいて,表1に示 すように肥満度の減少は1.78%と非常に小さかっ た.濾過速度は飼育前では0.140 L/個体・hであっ たが,無給餌での飼育後には0.063 L/個体・hと 大きく低下した.無給餌飼育後の個体で無酸素耐性 実験を行った結果,半数致死日数は7日となり,耐 性の低下は見られなかった.飼育期間中にへい死し た個体は20個体中1個体のみで,斃死率は2ヶ月 間で5%であった.

考 察

1.人工湿地におけるヤマトシジミの健康状態

本研究で約1年間にわたり人工湿地内に生息する ヤマトシジミ成貝個体群の観察・測定を行った結 果,6月から9月にかけて肥満度が68%以上と著 しく減少したが,大量斃死は起こらなかった.相崎 ら(2001)では軟体部乾燥重量の減少が斃死と密接 な関連があることが指摘されたが,本研究から軟体 部の減少が必ずしも斃死につながるわけではないこ とがわかる.

6月から9月に肥満度が減少した理由の一つとし て、この時期がヤマトシジミの繁殖期であることが あげられる.最も肥満度の高かった5月には生殖腺 の顕著な発達が見られていた.神西湖と地理的に近 い宍道湖におけるヤマトシジミの繁殖期は5月下旬 から10月上旬で、産卵盛期は6月中旬と9月下旬 にあると報告されている(島・後藤, 1988).一般 に、ヤマトシジミ幼生の出現は水温が 22.5℃ から 27 ℃の時に多いとされる(根本ら, 1996).本研究の 人工湿地でも、6月と10月上旬に放卵放精が現場 において確認されており, 上記の報告とほぼ一致す る.一方、人工湿地では7月~9月の日中に水温が 30℃を超えており(図4A),このころの軟体部の 減少は、生殖活動が主な原因とは考えがたい、そこ で環境要因をみると、7月から9月はクロロフィル a濃度すなわちヤマトシジミの餌料量が低い値を維 持していた (図 5). また,7月末から8月初めに流 入水の溶存酸素濃度が3mg/L以下まで低下した時 期があった (図 5). このように, 7-9月には高水 温・餌料の減少・一時的貧酸素化といった環境要因 も肥満度の減少に関わったと考えられる.

本研究のヤマトシジミのろ過速度は7月から8月 にやや低下し、その後回復して10月に最大値を示 し,秋から冬に向けて低下した.ろ過速度は個体サ イズによって変化することが知られ、相崎・福地 (1998)の報告では、 殻長 25 mm で 20℃ において 0.4 1/個体・hの値が得られている。本研究の結果は その値に比べてやや低い傾向にある.この原因とし ては個体サイズに対して用いた水量が少なかったた め、過小評価となったと考えられる、本実験で得た ろ過速度を単位湿重量当たりに換算すると図7のよ うになり、日中の水温が25℃付近であった6月・10 月が最もろ過活性が高かった.ろ過活性は水温に大 きく依存することが知られ、一般に水温 20~25℃ 付近をピークとして、それより低温・高温で活性は 低下する(中村, 2000 b). 本研究の結果もそれと調 和的であった.ろ過速度は7月28日のように一時 的に低下しても,8月8日の月例調査時には水温に 見合ったろ過速度までほぼ回復していたと考えるこ とができる.

無酸素耐性も飼育水温に大きく依存し,高水温時 には極端に耐性が低下することが知られる(中村ら, 1997).実際の生息条件においては水温の高い夏季 に最も耐性が低下すると考えられるが,8月の無酸 素耐性は欠測となってしまったため,詳細な検討は できない.逆に11月~12月は人工湿地の水温が低 下したため半数致死日数がやや長くなったと考えら れる.本研究では,全期間を通じて25℃に馴致し て実験を行ったため,無酸素耐性の季節変化は小さ かった.25℃ 馴致条件では期間を通じてヤマトシジ ミは高い無酸素耐性を示し,高い個体維持能力を維 持していたといえる.

このように、人工湿地のヤマトシジミは、肥満度 に大きな減少があっにもかかわらず、大量斃死する ことは無かった.4月から5月にかけて生残率の減 少がやや大きいが、これは4月3日に人工湿地内を 鋤簾で攪乱したことの影響、あるいは5月の生息個 体数がやや過少に見積もられている、と考えられる. 健康状態としては、夏季にやや殻成長の停滞とろ過 活性の低下が見られ、高水温・貧酸素化が健康状態 に影響した可能性はあるが、これらも斃死とは結び つかなかった.1997年の宍道湖の大量斃死および相 崎ら (2001)の大橋川における実験においては、ヤ マトシジミの生息密度が非常に高い場合に斃死が起 こりやすくなっていた.一方、本研究では人工湿地 内の密度は期間中 2.0~2.7 kg/m² (平均 2 g の個体 であれば 1000~1400 個体/m²に相当)程度であっ



図 6 人工湿地内に生息するヤマトシジミの生残率. **Fig.6** Survival rate of *C. japonica* in the artificial lagoon.

た(投稿準備中).この値は安定した漁獲量を維持 していた時期の宍道湖におけるヤマトシジミの生息 密度に近い(島根県,1984).人工湿地のヤマトシ ジミは生息密度の上では好ましい状態で維持されて いた.また,人工湿地では寒冷紗や底泥の除去など ヤマトシジミの保護を行っていたことも斃死の予防 につながったと考えられる.人工湿地の環境はヤマ トシジミにとってほぼ好条件であったと考えられ る.本研究で得られた年間を通じての肥満度および ろ過活性の変化は,むしろ対象水域におけるヤマト シジミの生理周期や環境要因の季節変化と密接に関 係した周期的変化としてとらえることが出来る.

2.環境悪化実験における健康指標項目の値変化と 野外調査結果の比較

表1には無酸素条件実験系・無給餌条件実験系に 加えて、5-9月の人工湿地系および相崎ら(2001) の実験で大量斃死が起こった系(No.4,8月26日~ 9月3日)における健康指標項目の値とその変化を 示した.ただし相崎らのデータは重量と殻長のみで あったため、本研究で用いたシジミのデータから肥 満度を推算した.また、相崎ら(2001)は、軟体部 乾燥重量の急激な減少の後に斃死率が増加したこと も指摘した.そこで、表1には肥満度の減少を一日 当たりに換算した値、減少速度%/dayを示した.

無酸素条件実験では飼育3日目までの減少速度は 0.78%/dayと低いが、5日間飼育では3.97%/day、 7日間では3.65%/dayとなった.3日目と5日目の 間で軟体部重量の減少速度が大きく変わっており、 斃死率は5日目以降に上昇している.相崎ら(2001) の斃死系においては、飼育中にへい死が起こったと きにおける肥満度の減少速度は3.42%/dayであっ



Fig.7 Filtration rate $(1/g \cdot hr)$ at 25 °C of *C. japonica* in the artificial lagoon.

た.一方,人工湿地における調査では5-9月の間 に68%以上の肥満度の減少があったが,これは一 日当たりに換算すると0.58%/dayとなる.最も減 少の大きかった6月-7月でも,一日当たりでは 1.34%の減少であった.これらの時期において人工 湿地のヤマトシジミの斃死率は4ヶ月で18%であ り,全期間を通じた穏やかな減耗と調和的な減少で あった(図6).無給餌条件実験においては2ヶ月間 で肥満度の減少はほとんどなく,斃死率も2ヶ月間 で5%という低い値であった.これらの結果から, 肥満度の減少速度が約3%/day以上となったとき, 斃死が起こるということができる.

無酸素条件実験においてヤマトシジミは嫌気呼吸 を行っていたと考えられる.嫌気呼吸を行う際には, 体内のグリコーゲンを消費する(Hochachka, 1984).

肥満度の急激な減少は、嫌気呼吸による体内蓄積 栄養の急速な消費を反映した現象であろう.3%/ day 以上という数字の意味は本研究では明らかにで きなかったが、嫌気呼吸を行って3日程度では斃死 はおこらず肥満度の減少も小さいことを考慮する と、嫌気呼吸速度がある限度を超えると斃死に至る のかもしれない.

相崎ら (2001) の実験において斃死が起こった系 の場合,その死亡要因は特定できなかったが,肥満 度の減少速度が無酸素条件実験の場合と類似するこ とから,嫌気呼吸に入っていた可能性が高い. 斃死 直前 (8/26) において大橋川の溶存酸素濃度は 3 mg /L 程度とやや低かった. 浮泥の襲来や硫化水素の 発生が嫌気呼吸を起こさせたのかもしれない.

相崎ら (2001) において斃死の起こった系ではろ 過速度が大きく低下して,0.1 L/個体・h 以下に なっていた.無酸素条件実験においてもろ過速度は 0.1 L/個体・h 以下に低下しており,斃死が起こる ときにはろ過活性が低下しているということができ

る.しかし、その逆は必ずしも成り立っていない. 無給餌条件実験の結果ではろ過活性が大きく低下し ていたが、斃死率は非常に低かった. 無給餌である にもかかわらず、肥満度に減少がほとんど見られな かったことから、この実験ではヤマトシジミは休眠 状態に入っていたと考えられる. また、冬季など水 温が低下した場合もろ過活性は大きく低下する.こ のように、ろ過活性が低下しただけでは斃死が起こ るということはできない、肥満度についても、たと えば水域の個体群が一斉に放卵放精を行った場合な ど、短期間に急激に減少することがあり得る.しか し3%/day 以上の肥満度の急激な減少(休眠状態) ではないことを意味する)とろ過速度の 0.1 L/個 体・h 以下への低下が同時に起こった場合には, 斃 死が起こりやすい状態にあると判断できるものと考 えられる.

3. 応用の可能性と今後の課題

本研究において, ヤマトシジミの斃死率が上昇す る場合の健康指標値(ろ過速度・肥満度減少速度) の目安が示された.ろ過速度の測定は濁度計を用い て現場において即座に行うことができる.一方,肥 満度の減少速度の測定から斃死を予測するには、週 1回程度の定期的な試料採集と数日の処理日数が必 要であり, 宍道湖のような湖沼で実際に行うことは 難しい.しかし,前述のように,肥満度やろ過速度 の変化には年周期があると考えられ、対象水域にお けるヤマトシジミが健全な状態にある場合のこれら の値の変動パターンと各時期の標準値を把握するこ とができれば、それを基準に実測値の比較検討を行 うことでヤマトシジミの健康状態を判断することが 可能となるだろう.また、漁協などの協力によって 定期的な肥満度測定を行うことができれば、肥満度 の変化速度の把握も不可能ではないだろう.

本実験の無酸素条件実験は12月に行ったため,実 験に使用したヤマトシジミは活性が低下しつつあっ た.そのため,無酸素条件とろ過速度の低下との関 係については,実験によって顕著な変化を把握する 事ができなかったと考えられる.夏季を中心とした 時期に再度,実験を行い検討する必要がある.

引用文献

- 相崎守弘・森岡美津子・木幡邦夫 (1998) ヤマトシ ジミを利用した汽水域の水質浄化に関する基礎的 研究.用水と排水,40(2):142-147.
- 相崎守弘・福地美和(1998)ヤマトシジミを用いた 汽水性汚濁水域の浄化.用水と排水,40(10):894 -898.
- 相崎守弘・高橋愛・山口啓子 (2001) ヤマトシジミ の大量斃死機構に関する基礎的研究 I. LAGUNA (汽水域研究), 8: 31-37.
- 網尾勝・浜野龍夫・浜崎日出男・花田貴志・石飛博 敏・村上雅信(1989)二枚貝の活力を何で評価す るか.水産増殖,37(4):281-288.
- Hochachka.P.W. (1984) 嫌気代謝:何が変更可能か. 低酸素適応の生化学酸素なき世界で生きぬく生物 の戦略(橋本周久訳), pp.15-28, 恒星社厚生閣, 東京.

前田伊佐武・相崎守弘・山口啓子・藤田直樹

- (2000) 汽水湖水を連続供給した屋外水槽でのヤマトシジミの水質浄化能に関する研究.水環境学会誌,23 (11):716-720
- Nakamura , M , Yamamuro , M . , Ishikawa , M . and Nishimura, H. (1988) Role of the bivalve *Corbicula japonica* in the nitrogen cycle in mesohaline lagoon. Marine Biol, **99**: 369-374.
- 中村幹雄(2000 a) 宍道湖. 日本のシジミ漁業, pp.187 -202, たたら書房, 米子.
- 中村幹雄(2000 b) ヤマトシジミが宍道湖の窒素循 環に果たす役割.月刊「水」, 10: 16-25.
- 中村幹夫・品川明・戸田顕史・中尾繁 (1997) ヤマ トシジミの貧酸素耐性.水産増殖,45 (1):9-15.
- 根本隆夫・河崎正・根本孝(1996)涸沼におけるヤ マトシジミの研究.Ⅱ.茨城内水試研報, **32**: 8-20.
- 西沢正・柿野純・中田喜三郎・田口浩一 (1992) 東 京湾盤州干潟におけるアサリの成長と減耗.水産 工学,29 (1): 61-68.
- 島隆寿・後藤悦郎(1988) 宍道湖におけるヤマトシ ジミD型幼生の出現時期について.島根水試研 報,5:103-112.
- 島根県水産試験場三刀屋内水面分場(1998) 宍道湖 におけるシジミ大量へい死対策緊急調査報告書. 75 p.
- 山室真澄 (1994) 食物連鎖を利用した水質浄化技術. 化学工学, **58**: 214-220.

貝類遺骸の殻サイズ分布形の鉛直方向への変化 ー津屋崎干潟を例に一

田中秀典

The vertical change of size-frequency distribution pattern of dead shells

Hidenori Tanaka¹

Abstract: In Tsuyazaki tidal flat in North Kyushu, the sediment from the surface to the depth of 50cm were collected at 10cm intervals. Shell size of *Umbonium moniliferum*, *Batilailia zonalis* and *Macoma ingongrua*, which were included in the sediment, were measured. The dead shells were not greatly different from primary shell size–frequency distribution at the surface, at a center of their habitation. This tendency was found in the dead shell at other depth also. On the other hand, outside the habitat, the shell size distribution histogram of *B. zonalis* showed right backing away. At other depth, there was a little number of shells outside their habitat. Therefore, histogram of dead shell size distribution does not show a tendency.

Key words: shell size, taphonomy, TAZ, Tsuyazaki tidal flat, vertical distribution

1.はじめに

生きている貝類が化石となるためには,死後貝類 の遺骸が破壊をまぬがれる深さまで埋没する必要が ある.その間には,TAZ (Taphonomical active zone) と呼ばれるタフォノミーの影響をうけやすいゾーン が存在している (Davies *et al.*, 1989 a, b).貝類の遺 骸がこのTAZ に滞留している間にどのような影響 を受けるかを評価することは,貝化石を使って古環 境の復元をする場合において重要になってくる.現 在の干潟は,このようなタフォノミーの観察が行い やすいため,数多くの研究がなされている(下山, 1979; Shimoyama, 1984, 1985; Füsrich and Flessa, 1987; Tanabe *et al.*, 1986; Tanabe and Arimura, 1987; 田中・近藤, 1995; Medahl, 1997;田中・前田, 1999 など).しかし,これらの研究のほとんどは,干潟 の表面や表層での水平方向への情報の変化を扱った ものがほとんどである.鉛直方向への情報の変化を 扱った研究例は少ない(Van Straaten, 1952 a, b; Medahl, 1987).そこで,九州北部にある津屋崎干 潟で深さ 50 cm までの堆積物を採集し,TAZ にお ける貝類遺骸群の観察をおこなった.田中(2000) において,堆積物中に含まれている貝類遺骸群の種 組成の鉛直方向への変化についてはすでに報告して いる.そのためこの論文では,イボキサゴ(Umbonium moniliferum :巻貝)・イボウミニナ(Batilalia zonalis:巻貝)・ヒメシラトリガイ(Macoma incongrua:二枚貝)の3種類の貝類遺骸に焦点をあ て,これらの貝類遺骸の殻サイズ分布が鉛直方向へ どのように変化するかについて述べることにする.

¹ 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 E-mail: BYA 06151@nifty.com



図1 津屋崎干潟の底質図と試料採集地点. **Fig.1** Sample points and bottom sediment map.

2.調査地と方法

2.1 調査地

調査は九州北部で、玄界灘に面した福岡県宗像郡 津屋崎町にある干潟でおこなった(図1).この干潟 は、南北約2km、東西は最も広いところで100m程 度と、南北に細長い(図1).この干潟の環境や生物 などについては、下山による一連の研究(下山, 1979, 1980; Shimoyama, 1984, 1985) や筆者のこれまでの 研究(田中・近藤, 1995;田中, 2000)によって明 らかにされているので、ここでは簡単に述べること にする. 底質の区分は下山(1979)に従った. 底質 は次の5つに区分できる(図1): 1) 泥質平底(奥 部). ヤマトオサガニの巣穴とイボウミニナの生貝 が見られる.また、コアマモがパッチ状に分布する. 2) 泥砂質平底 (奥部と湾口部). ヤマトオサガニの 巣穴とイボウミニナの生貝が見られる. 湾口部では イボキサゴの生貝が見られる. 3)砂質平底(湾口 部). ニホンスナモグリ・テッポウエビの巣穴が見 られる. イボキサゴの生息地であり、生貝が多数見 られる. 4) レキ質平底 (くびれ部の両岸). アラレ タマキビ等の岩礁生の貝が見られる. 堆積物の表面 にはスナガニの巣穴が見られる. 5) 感潮水路. ア

マモが分布している.

2.2 調査方法

田中秀典

1994年5月9・11日,24・27日の大潮時に,感 潮水路とレキ質平底を除く全ての底質から試料採集 (5地点)をおこなった.各試料採集地点では,0.5 m×0.5m×0.1m(深さ)の堆積物を,深さ50cmま で採集した.採集した堆積物は,現場におて2mm のメッシュにかけて,残った物を研究室に持ち帰っ た.研究室に持ち帰った試料は,貝殻とその他のも のに区分し,貝殻の殻頂(巻貝)と蝶番(二枚貝)が 残っているものピンセットで拾い出した.拾い出し た貝殻遺骸群の中で,イボキサゴ(巻貝)・イボウ ミニナ(巻貝)・ヒメシラトリガイ(二枚貝)の3種 類の貝類遺骸に関しては,完全な個体を取り出して 殻サイズを計測した.巻貝では殻の直径を,二枚貝 では殻高をデジタルノギスで計測した.

3.結 果

各試料採集地点の様子は、田中(2000)において 述べているので、詳しいことはそちらを参照してほ しい.この論文ではイボキサゴ・イボウミニナ・ヒ メシラトリガイの殻サイズについてのみ述べること にする.また遺骸数は、0.5 m×0.5 m×0.1 m(深さ) の堆積物に含まれているものを示している.

3.1 Loc.1b:入り江の最奥部の泥質平底.

0-10 cm: イボキサゴの遺骸は 496 個体含まれて おり,28 個体が完全個体であった. 殻の破損率は94 %であった. これらの遺骸の平均直径は9.2 mm で, 最小は5.5 mm で最大は12.8 mm であった. 殻サイ ズ分布は,8 mm サイズをピークとした単山型のヒ ストグラムをしている(図2). イボウミニナの遺骸 は283 個体含まれており,6 個体が完全な個体で あった. 殻の破損率は97.9% であった. これらの 遺骸の平均直径は8.8 mm で,最小は6.6 mm で最 大は10.1 mm であった. 個体数が少ないためヒス トグラムは傾向を示さない(図3). ヒメシラトリガ イの遺骸は,まったく含まれていなかった(図4).

20-30 cm: イボキサゴの遺骸は 964 個体含まれ ており,217 個体が完全個体であった. 殻の破損率 は77.5% であった. これらの遺骸の平均直径は 9.5 mm で,最小は 3.1 mm で最大は 14.1 mm であった. 殻サイズ分布は,11 mm サイズをピークとした単 山型のヒストグラムをしている (図 2). イボウミニ



Fig.2 Size-frequency distribution pattern of Umbonium moniliferum.

ナの遺骸は 683 個体含まれており,43 個体が完全 個体であった. 殻の破損率は 93.7% であった.こ れらの遺骸の平均直径は 9.7 mm で,最小は 6.8 mm で最大は 12.5 mm であった. 殻サイズ分布は 10 mm サイズをピークとした単山型のヒストグラムをして いる(図 3). ヒメシラトリガイの遺骸は 7 個体含ま れており,いずれも完全個体でであった.これらの 遺骸の平均殻高は 16.1 mm で,最小は 11.3 mm で 最大は 23.4 mm であった. 個体数が少ないため,ヒ ストグラムは傾向を示さない(図 4).

40-50 cm: イボキサゴの遺骸は 883 個体含まれ ており,88 個体が完全な個体であった. 殻の破損 率は90% であった.これらの遺骸の平均直径は8.8 mmで,最小は3.3 mmで最大は14.2 mmであった. 殻サイズ分布は,殻サイズ分布は10 mmサイズを ピークとした単山型のヒストグラムをしている(図 2).イボウミニナの遺骸は471 個体含まれており, 353 個体が完全な個体であった.殻の破損率は25% であった.これらの遺骸の平均直径は7.2 mmで, 最小は2.0 mmで最大は12.0 mmであった. 殻サイ ズ分布は10 mmサイズをピークとした単山型のヒ ストグラムをしている(図3).ヒメシラトリガイの 遺骸は 24 個体含まれており,10 個体が完全な個体 であった. 殻の破損率は 58.3% であった.これら の遺骸の平均殻高は 13.6 mm で,最小は 6.9 mm で 最大は 23.7 mm であった. 殻サイズ分布は 12 mm サイズをピークとした単山型のヒストグラムをして いる (図 4).

3.2 Loc.2 a':入り江の奥の泥質平底. イボウミニ ナおよびヒメシラトリガイの生息地.

0-10 cm: イボキサゴの遺骸は 496 個体含まれて おり,37 個体が完全な個体であった. 殻の破損率 は 92.5% であった. これらの遺骸の平均直径は 8.6 mm で,最小は 3.3 mm で最大は 13.9 mm であった. 殻サイズ分布は 3 mm と 11 mm サイズをピークと した 2 山型のヒストグラムをしている(図 2).イボ ウミニナの遺骸は 747 個体含まれており,205 個体 が完全な個体であった. 殻の破損率は 72.6% であっ た.これらの遺骸の平均直径は 6.8 mm で,最小は 2.2 mm で最大は 12.9 mm であった. 殻サイズ分布 は 2 mm と 9 mm サイズをピークとした 2 山型のヒ ストグラムをしている(図 3).ヒメシラトリガイの 遺骸は 139 個体含まれており,93 個体が完全な個 田中秀典



図 3 イボウミニナの殻サイズ分布. **Fig.3** Size-frequency distribution pattern of *Batilalia zonalis*.



Fig.4 Size-frequency distribution pattern of Macoma ingongura.

50

体であった. 殻の破損率は 33.1% であった. これ らの遺骸の平均殻高は 18.5 mm で, 最小は 8.9 mm で最大は 23.1 mm であった. 殻サイズ分布は 18 mm サイズをピークとした単山型のヒストグラムをして いる (図 4).

20-30 cm: イボキサゴの遺骸は 290 個体含まれ ており、39個体が完全な個体であった. 殻の破損 率は 86.6% であった. これらの遺骸の平均直径は 8.6 mm で, 最小は 2.4 mm で最大は 14.8 mm であっ た. 殻サイズ分布は3mmと12mmサイズをピー クとした2山型のヒストグラムをしている (図2). イボウミニナの遺骸は386個体含まれており,248 個体が完全な個体であった. 殻の破損率は 35.8% であった.これらの遺骸の平均直径は 6.8 mm で, 最小は 2.0 mm で最大は 12.0 mm であった. 殻サイ ズ分布は2mmと8mm サイズをピークとした2山 型のヒストグラムをしている (図 3). ヒメシラトリ ガイの遺骸は58個体が含まれていたが、破損した 個体は含まれていなかった. これらの遺骸の平均殻 高は18.3 mmで、最小は5.8 mmで最大は25.0 mm であった. 殻サイズ分布は 18-20 mm サイズをピー クとした単山型のヒストグラムをしている (図 4).

40-50 cm: イボキサゴの遺骸は 949 個体含まれ ており、87個体が完全な個体であった。 殻の破損 率は 90.8% であった. これらの遺骸の平均直径は 7.6 mm で, 最小は 2.4 mm で最大は 14.9 mm であっ た. 殻サイズ分布は3mmと11mmサイズをピー クとした2山型のヒストグラムをしている (図2). イボウミニナの遺骸は435個体含まれており、289 個体が完全な個体であった. 殻の破損率は 33.6% であった.これらの遺骸の平均直径は 5.2 mm で, 最小は 2.0 mm で最大は 12.6 mm であった. 殻サイ ズ分布は2mmと9mm サイズをピークとした2山 型のヒストグラムをしている (図3). ヒメシラトリ ガイの遺骸は、92個体が含まれており、破損した 個体は含まれていなかった.これらの遺骸の平均殻 高は 15.3 mm で、最小は 5.0 mm で最大は 24.0 mm であった. 殻サイズ分布は 20 mm サイズをピーク とした単山型のヒストグラムをしている (図 4).

3.3 Loc.2 b':入り江の奥の泥質平底.

0-10 cm: イボキサゴの遺骸は 58 個体含まれて おり,7 個体が完全な個体あった. 殻の破損率は 87.9 %であった. これらの遺骸の平均直径は 7.8 mm で, 最小は 3.1 mm で最大は 14.7 mm であった. 個体数 が少ないためヒストグラムの傾向は認められない (図 2). イボウミニナの遺骸は 77 個体含まれてい たが,完全な個体は 9.9 mm のものが 1 個体だけで あった. 殻の破損率は 98.7% であった (図 3). ヒ メシラトリガイの遺骸は 14.3 mm のものが 1 個体 含まれているだけであった. 殻の破損率は 0% で あった (図 4).

20-30 cm: イボキサゴの遺骸は 172 個体含まれ ており、24個体が完全な個体であった. 殻の破損 率は 86% であった. これらの遺骸の平均直径は 5.9 mmで, 最小は 2.7 mm で最大は 12.2 mm であった. 3 mm と 10 mm サイズをピークとした 2 山型のヒス トグラムをしている (図 2). イボウミニナの遺骸は 298 個体含まれており、49 個体が完全な個体であっ た. 殻の破損率は83.6%であった. これらの遺骸 の平均直径は 9.4 mm で, 最小は 7.4 mm で最大は 11.2 mm であった. 殻サイズ分布は 9 mm サイズを ピークとした単山型のヒストグラムをしている (図 3). ヒメシラトリガイの遺骸は23個体が含まれて おり、完全な個体は20個体であった. 殻の破損率 は13%であった.これらの遺骸の平均殻高は17.8 mmで、最小は15.0mmで最大は20.9mmであった. 殻サイズ分布は 16 mm サイズをピークとした単山 型のヒストグラムをしている (図 4).

40-50 cm: イボキサゴの遺骸は 432 個体含まれ ており、完全な個体は60個体であった.これらの 遺骸の平均直径は 6.5 mm で, 最小は 2.9 mm で最 大は 14.4 mm であった. 殻サイズ分布は 3 mm と 11 mm サイズをピークとした 2 山型のヒストグラムを している (図 2). イボウミニナの遺骸は 446 個体含 まれており、完全な個体は109個体であった. 殻の 破損率は 75.6% であった. これらの遺骸の平均直 径は 9.4 mm で、最小は 4.0 mm で最大は 11.7 mm であった. 殻サイズ分布は9mm サイズをピークと した単山型のヒストグラムをしている (図 3). ヒメ シラトリガイの遺骸は24個体含まれており、完全 な個体は11個体であった. 殻の破損率は54.2% で あった.これらの遺骸の平均殻高は16.5 mm で、最 小は 10.4 mm で最大は 20.3 mm であった. 殻サイ ズ分布は 16–18 mm サイズをピークとした単山型の ヒストグラムをしている (図4).

3.4 Loc.3a:入り江の中央部の砂質平底. イボキ サゴの生息地.

0-10 cm: イボキサゴの遺骸は 1037 個体含まれ ており,完全な個体は 181 個体であった. 殻の破損 率は 82.5% であった. これらの遺骸の平均直径は 6.3 mmで,最小は 2.0 mmで最大は 13.5 mmであった. 殻サイズ分布は 3 mm と 10 mm サイズをピークとした 2 山型のヒストグラムをしている (図 2). イボウミニナの遺骸は 213 個体含まれており,完全な個体は 73 個体であった. 殻の破損率は 65.7% であった. これらの遺骸の平均直径は 3.4 mmで,最小は 2.0 mm で最大は 12.6 mm であった. 殻サイズ分布は 2 mm サイズをピークとした右下がりの単山型のヒストグラムをしている (図 3). ヒメシラトリガイの遺骸は 6 個体含まれていたが,完全な個体は全くなかった (図 4).

20-30 cm: イボキサゴの遺骸は 2341 個体含まれ ており、完全な個体は376個体であった.これらの 遺骸の平均直径は 5.7 mm で, 最小は 2.2 mm で最 大は 13.2 mm であった. 殻サイズ分は 3 mm をピー クとした右下がりの単山型のヒストグラムをしてい る(図2). イボウミニナの遺骸は563 個体含まれて おり、完全な個体は221個体であった。 殻の破損率 は 59.9% であった. これらの遺骸の平均直径は 3.9 mmで, 最小は 2.0 mm で最大は 12.5 mm であった. 設サイズ分布は2mmサイズをピークとした右下が りの単山型のヒストグラムをしている (図 3). ヒメ シラトリガイの遺骸は11個体含まれており全て完 全な個体であった. これらの遺骸の平均殻高は 17.5 mm で, 最小は 13.2 mm で最大は 22.1 mm であった. 殻サイズ分布のヒストグラムは目立った傾向を示さ ない (図4).

40-50 cm: イボキサゴの遺骸は 4859 個体含まれ ており、完全な個体は2081個体であった、殻の破 損率は 57.2% であった. これらの遺骸の平均直径 は 7.4 mm で, 最小は 2.0 mm で最大は 17.5 mm で あった. 殻サイズ分布は3mmと11mm サイズを ピークとした2山型のヒストグラムをしている(図 2). イボウミニナの遺骸は1654 個体含まれており, 完全な個体は 339 個体あった. 殻の破損率は 79.5% であった.これらの遺骸の平均直径は 3.2 mm で, 最小は 2.0 mm で最大は 9.3 mm であった. 殻サイ ズ分布は2mm サイズをピークとした右下がりの単 山型のヒストグラムをしている (図 3). ヒメシラト リガイの遺骸は106個体含まれており、完全な個体 は43個体であった. 殻の破損率は59.4% であった. これらの遺骸の平均殻高は 16.0 mm で, 最小は 8.7 mm で最大は 23.1 mm であった. 殻サイズ分布は 16 mm サイズをピークとした単山型のヒストグラムを 示す (図4).

3.5 Loc.4b:入り江の開口部.イボキサゴの生息地.

0-10 cm: イボキサゴの遺骸は 1552 個体含まれ ており,完全な個体は 105 個体であった. 殻の破損 率は 93.2% であった. これらの遺骸の平均直径は 6.5 mm で,最小は 2.2 mm で最大は 13.9 mm であっ た. 殻サイズ分布は 3 mm と 11 mm サイズをピー クとした 2 山型のヒストグラムをしている(図 2). イボウミニナの遺骸は 17 個体含まれており,完全 な個体は 7 個体であった. 殻の破損率は 58.8% で あった. これらの遺骸の平均直径は 4.9 mm で,最 小は 3.1 mm で最大は 8.2 mm であった. 個体数が 少ないため,ヒストグラムは傾向を示さない(図 3). ヒメシラトリガイの遺骸は全く含まれていな かった(図 4).

20-30 cm: イボキサゴの遺骸は 889 個体含まれ ており,完全な個体は 372 個体であった. 殻の破損 率は 58.2% であった. これらの遺骸の平均直径は 5.7 mm で,最小は 2.3 mm で最大は 16.1 mm であっ た. 殻サイズ分布は 3 mm をピークとした右下がり の単山型のヒストグラムをしている(図 2). イボウ ミニナの遺骸は 153 個体含まれており,完全な個体 は 47 個体であった. 殻の破損率は 69.3% であった. これらの遺骸の平均直径は 3.2 mm で,最小は 2.0 mm で最大は 9.1 mm であった. 殻サイズ分布は 2 mm サイズをピークとした右下がりの単山型のヒス トグラムをしている(図 3). ヒメシラトリガイの遺 骸は破損した 1 個体が含まれていただけであった (図 4).

40-50 cm: イボキサゴの遺骸は 3304 個体含まれ ており、完全な個体は1339個体であった. 殻の破 損率は 59.5% であった. これらの遺骸の平均直径 は 6.2 mm で, 最小は 2.2 mm で最大は 14.5 mm で あった. 殻サイズ分布は3mmをピークとした右下 がりの単山型のヒストグラムをしている (図 2). イ ボウミニナの遺骸は513個体含まれており、完全な 個体は 206 個体であった. 殻の破損率は 59.8% で あった.これらの遺骸の平均直径は 3.4 mm で、最 小は 2.0 mm で最大は 12.7 mm であった. 殻サイズ 分布は2mm サイズをピークとした右下がりの単山 型のヒストグラムをしている (図3). ヒメシラトリ ガイの遺骸は8個体含まれており、完全な個体は4 個体であった. 殻の破損率は 50% であった. これ らの遺骸の平均殻高は18.1 mm で, 最小は15.7 mm で最大は 19.8 mm であった. 個体数が少ないため に、ヒストグラムは傾向を示さない (図 4).

4. 貝類の生息地と生息地外での貝類遺骸の 殻サイズ分布の変化

貝類遺骸群の殻サイズ分布は,生息地内ではあま りタフォノミーの影響を受けないため,初期殻サイ ズ分布型とほぼ同じか大きく異なっていない.それ に対して,生息地以外では運搬の過程で様々な影響 を受けるために大きく異なった形を示していると考 えられる(下山,1989).この津屋崎干潟では,下 山(1979),Shimoyama(1984,1985)によって,今 回対象とした3種類の貝類の初期殻サイズ分布につ いて調べられている.そこで,これらの貝類の遺骸 の殻サイズ分布が,生息地と生息地外で深度ごとに どのように異なっているかを検討してみた.

イボウミニナとヒメシラトリガイの生息地の中心 は Loc 2 a'(下山, 1979; Shimoyama, 1984) である. ここではイボウミニナの遺骸の殻サイズ分布は,表 層(0-10 cm)では成貝サイズと幼貝サイズの2つ にピークを持つ2山型をしている(図3).これは, 下山 (1979) で報告されている初期殻サイズ分布と ほぼ同じである. また、ヒメシラトリガイも Shimoyama (1984) で報告されている初期殻サイズ 分布とほぼ同じ, 単山型の殻サイズ分布をしている (図4). これらの貝類の殻サイズ分布は、生息地の 表層では初期殻サイズ分布とは大きく異なっていな い. そして、このような初期殻サイズ分布とあまり 違わないヒストグラムは,深さ 20-30 cm, 40-50 cm の堆積物に含まれるイボウミニナ・ヒメシラトリガ イの遺骸群の殻サイズ分布においても見られる (図.3, 4). これらが示しているように, 生息地で は殻サイズ分布パターンの変化はほとんど見られな かった.

それに対して,生息地外の干潟表層に含まれるイ ボウミニナの遺骸は,外海に近いLocs.3 a,4bでは 幼貝に偏った右下がりの殻サイズ分布を示している (図3).そして,この殻サイズ分布のパターンは, 試料採集地点の表層以外に含まれる遺骸においても 認められる(図3).一方,湾奥側のLocs.1 b,2b の表層の遺骸群では,殻サイズ分布は単山型を示し ており,この傾向はLoc.1 bの40-50 cm除く,全 ての深さで認められる(図3).イボウミニナに対し て,ヒメシラトリガイの遺骸は,Loc.3 aの深さ40 -50 cmを除いて個体数が少なく,殻サイズのヒス トグラムからは傾向が読みとれない(図4).Loc.3 a の深さ40-50 cmでは,初期殻サイズ分布に近い単 山型の殻サイズ分布を示している.Bucoot(1953)

は、これらイボウミニナの遺骸に見られるような幼 貝サイズに偏った殻サイズは運搬の時の選択的な淘 汰の結果であるとした.しかし、今回調査したこの 津屋崎干潟は外界との連絡路が狭く,潮の干満を除 くと水流の影響はあまりないと思われる.下山 (1989)は、このような遺骸の殻サイズ分布を貝類 の生息地の周辺部で見られるものとした. 今回のイ ボウミニナの遺骸群の殻サイズ分布は、これにあた ると思われる.一方,田中・近藤 (1995) は,ヒメ シラトリガイの遺骸が破片化した個体でも生息地か らほとんど移動されないと述べており、ヒメシラト リガイの遺骸が生息地以外でほとんど見られないの は、このためと思われる.しかし、Loc.3 aの 40-50 cm でまとまった数のヒメシラトリガイの遺骸群が 認められる.田中・近藤 (1995) から,これらの遺 骸群は生息地である Loc.2 a'の場所から運搬されて きたのではなく、もともとこの場所に生息していた ものと考えることができる. また、Loc.3 a のこの 深さから得られた貝類遺骸の C¹⁴ 年代は, 2050±70 Y.B.P. を示している. おそらく, この地点が過去に おいて泥質平底であった時期の残留集団 (Cadée, 1982) だと思われる. そのため, このように死後も 生息地から移動されにくい貝類の化石の殻サイズ分 布は、初期殻サイズ分布を反映している可能性が高 いと考えられる.

次に、イボキサゴの遺骸群について述べることに する.この巻貝の遺骸群の殻サイズ分布は,生息地 のLocs.3 a, 4 b の表層では, Shimoyama (1985) で 示されている初期殻サイズ分布とほぼ同じである. しかし、表層以外の堆積物に含まれる遺骸の殻サイ ズ分布のパターンは、生息地内でもLocs.3aと4b で異なっている.Loc.4bでは、表層以外の深さで は幼貝にピークを持つ右下がりのヒストグラムを示 す(図 2). これに対して, Loc.3 a では深さ 20-30 cm では、幼貝をピークとした右下がりのヒストグラム を示すが,深さ40-50 cm では幼貝と成貝にピーク を持つ2山型のヒストグラムを示す(図2). 深さ40 -50 cm に含まれるイボキサゴの遺骸の殻サイズ分 布は,幼貝と成貝の割合があまり違わない点で, Shimoyama (1985) で示されている初期殻サイズ分 布と異なっているが、原因についてはわからない. 一方, 生息地外の Locs.1 b, 2 a', 2 b の表層では, イボキサゴの遺骸数が生息地に比べてかなり少な く、殻サイズ分布は2山型をしたり単山型を示して いたりするが、生息地に比べて遺骸数がすくないた め,傾向を示しているとは言い難い.そして、この

ような傾向は表層以外の堆積物においても見られる (Loc.1 b の深さ 20-30 cm は除く). イボキサゴにお いても,他の2種の貝類遺骸と同様の結果が得られ た.しかし,イボキサゴの場合は,試料間で遺骸数 が大きく異なっている(最大 300 倍程度). そのた め,標本数がサンプル間で大きく異なる場合には, 殻サイズ分布が情報の変化の指標として使えるかど うかの検討も必要であろう.

5.まとめ

九州北部にある津屋崎干潟で、表層から 50 cm の 深さまでの堆積物を 10 cm 間隔で採集し、そこに含 まれるイボキサゴ・イボウミニナ・ヒメシラトリガ イの遺骸の殻サイズを計測した。その結果、生息深 度や殻の強度など色々な違いがあるにもかかわら ず,いずれの貝類遺骸も生息の中心地の表層では, 初期殻サイズ分布と大きく違っていなかった. そし て,この傾向は生息地の中心で表層以外の堆積物(深 さ 20-30 cm, 40-50 cm) に含まれる遺骸群におい ても見られた、一方、生息地外では、イボウミニナ では幼貝サイズをピークとした右下がりのヒストグ ラムを示すものが多く見られた.その他の2種にお いては、生息地以外では個体数がすくなく遺骸の殻 サイズ分布のヒストグラム傾向はあまり認められな かった. また, イボキサゴのように, サンプル間で 標本数が大きく異なる場合には、殻サイズ分布をサ ンプル間の比較に用いるにはあまり適してないよう に思われる.

6.謝辞

この研究を進めるにあたり,高知大学理学部の近 藤康生助教授には,野外調査・室内処理などのご指 導をいただいた.京都大学大学院理学研究科の増田 富士雄教授,前田晴良助教授には論文をまとめる際 にいろいろご指導をいただいた.九州大学農学部津 屋崎臨海実験所には,試料採集のさいに宿泊をさせ ていただいた.また,試料採集に同行していただい た高知大学理学部地学科の同級生の方々に,この場 をかりてお礼申し上げます.

7.引用文献

Cadée, G. C. (1982) Low juvenile mortality in brachipods, some comments. Publ. Versl. Neth. Inst. Sea Res., **3**: 1

-29.

- Davies, D.J., Powell, E.N. and Stanton, R. J. Jr. (1989 a)
 Taphonomic signature as a function of environmental process : shells beds in a hurricane–influenced inlet on the Texas coast . Palaeogeogr . Palaeoclimatol .
 Palaeoecol., 72: 317-356.
- Davies, D.J., Powell, E.N. and Stanton, R. J. Jr. (1989 b) Relative rate of shell dissolution and net sediment accumulation – a commentary : can shell beds form by the gradual accumulation of biogenic debris on the sea floor?. Lethia, **22**: 204-212.
- Füsich, F. T. and Flessa, K. W. (1987) Taphonomy of tidal flat molluscs in the northern Gulf of California: paleoenvironmental analysis despite the perils of preservation. Palaios, 2: 543-559.
- Meldahl, K. H. (1987) Sedimentologic and taphonomic implications of biogenic stratification. Palaios, 2: 350-358.
- Meldahl, K. H. (1997) Time–averaging and postmortem skeletal survial in benthic fossil assemblages : quantitative comparison among Holocen environments. Paleobiology, 23: 207-229.
- Meldahl, K. H. and Flessa, K. W. (1990) Taphonomic pathways and comparative biofacies in a recent intertidal/shallow shelf environment. Lethia, **23**: 43-60.
- 下山正一(1979) 内湾性ヤドカリによる巻貝死殻集 団の殻サイズ分布型の再構成.海洋科学,11:527 -535.
- Shimoyama, S. (1984) Size-frequency distribution of living population shell assemblages of *Macoma* (*Macoma*) incongrua (MARTENS) on intertidal mud flat in north Kyushu. The Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser., D. Geology., 25: 271-287.
- Shimoyama, S. (1985) Size-frequency distribution of living population and dead shell assemblages in a marine intertidal sand snail, Umbonium (Suchium) moniliferum (Lamarck), their palaeoecological significance. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 49: 327-353.
- 下山正一 (1989) 化石集団. 日本ベントス研究会誌, 37: 11-34.
- Tanabe, K. and Arimura, E. (1987) Ecology of four infaunal bivalve species in the recent intertidal zone, Shikoku, Japan. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 60: 219-230.

- Tanabe, K., Fujiki, T. and Katsuta T. (1986) Comparative analysis of living and death bivalve assemblage on the Kawarazu Shore, Ehime Prefecture, west Japan. 日本 ベントス研究会誌, **30**: 17-30.
- 田中秀典 (2000) 津屋崎干潟で見られる貝類遺骸群 について、LAGUNA (汽水域研究), 7: 29-35.
- 田中秀典・近藤康生(1995) 干潟における貝類遺骸 の分散:表層堆積物に含まれる貝殻の保存状態区 分とその頻度分布に基づく推定.高知大学学術研 究報告[自然科学], 44:1-11.
- 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.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1952 a) Biogene textures and the formation of shell beds in the Dutch Wadden Sea I. Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap., 55: 500-508.
- Van Straaten, L. M. J. U. (1952 b) Biogene textures and the formation of shell beds in the Dutch Wadden Sea II. Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap., 55: 509-516.

中海における塩分躍層の動態についての新知見 - 1996 年度の湖底設置型音波探査装置による観測データから-

徳岡隆夫¹·三瓶良和¹·板坂尚孝¹·亀井健史¹

A new discovery on the halocline behaviour At Lake Nakaumi –from 1996 observation by the echo–sounding instrument settled on lake bottom

Takao Tokuoka¹, Yoshikazu Sampei¹, Naotaka Itasaka¹ and Takeshi Kamei¹

Abstract: To investigate the halocline behaviour and water quality in brackish lakes and estuaries, we have already developed a long-term observation system. The system consists of an acoustic observation system and it measures acoustic reflection caused by the rapid change of acoustic impedance at the boundary of the halocline in water. Long-term observations using the system were successfully carried out in Lake Nakaumi. Salinity, pH, dissolved oxygen, water temperature, and water flow rate and direction were also investigated by the other equipments. The results suggest that the halocline is easily moved and its behaviour is influenced by wind significantly. In addition, a simplified model of the halocline behaviour with the wind velocity and the distribution of salinity has been developed. Through the data presented in this paper, the importance of integrated studies of halocline bahaviour, and the usefulness of the long-term observation system.

Key words: acoustic observation, brackish lake, halocline, Lake Nakaumi, Lake Shinji

1.はじめに

河口域では河川水と海水が接触混合することに よって複雑な流れや水質の変化が見られる.そにに は豊かな生態系が存在し,かつ維持されており,人 間の生活環境とも深く関わっている.このような水 環境を支配している重要な要素として,水の流れと 水質が考えられるが,両者は潮汐,地形,水文条件 等の変化により常に変動している.潮位差の小さい 日本海側の河口では,海水と淡水の混合が弱く,海 水と淡水はその密度差のために容易に混合すること はなく,密度の大きな海水が淡水の下に潜り込む形 でその境界には弱混合型の塩分躍層が形成される.

この塩分躍層は,夏季になると密度躍層に温度躍 層が加わり,上層部と下層部の水塊が安定するとい う物理的影響と,下層において呼吸量および分解量 が増加するという生物的影響が合わさることによ り,容存酸素が少ないいわゆる貧酸素水塊が形成さ れる.このような貧酸素水塊の形成は漁業或いは水 質管理上重大な問題となる.

中海における塩分躍層は,大橋川からの淡水~低 塩分水と境水道からの海水の流入に風・気圧・気温

¹ 島根大学総合理工学部地球資源環境学教室 Faculty of Science & Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan E-mail:tokuoka@riko.shimane-u.ac.jp

が影響しあって形成や消滅が起こり、その挙動は極 めて複雑である.また、塩分躍層の挙動は、一日の うちでも潮汐、波浪、湖水の流れおよび内部振動等 によって変化することが指摘されている(奥田ほか、 1994).このような変化は上部低塩分層と下部高塩 分層の動態の違いに起因しており、中海・宍道湖で は停滞した貧酸素高塩分層が湖縁に遡上した場合、 湖棚に生息する魚介類を死滅させ漁業に甚大な被害 を与える怖れがある.

徳岡ほか(1993, 1994)は、貧酸素水塊の形成要 因である塩分躍層を音波探査法で観測できることを 示し、さらに小型船に探査機を搭載することにより 中海における塩分躍層の広域的な分布を明らかにし た.しかし、塩分躍層の形成過程とその後の挙動、 さらには季節的変動特性と風・気圧・気温等といっ た自然条件との関係に関しては、実際の観測例が極 めて少なく、不明な点が多かった.これは、湖水に 大きく影響を与える台風などの荒天時には出航する ことができず、観測が不可能となるためであるが、 塩分躍層はこの時に最も複雑な挙動をとることが考 えられるからである.

上記の点に基づいて徳岡ほか (1995, 1996) は, 荒 天時においても観測可能な固定設置型音響探査装置 (塩分躍層動態観測システム)の開発を行い, それ を用いて中海において長期観測を行っている. その 結果,風と塩分躍層の挙動には密接な関係があり, 風速が速くなるにつれて下部高塩分層が移動するこ とを報告している.

以上のような観点から,本研究では湖底の環境等 を評価する際には,その湖水の水質および動態の連 続的な観測が必要であると考え,水質計(塩分・水 温・溶存酸素・pH),流向流速計(塩分・水温・水 深・濁度・流向・流速)および湖底設置型音響探査 装置を用いて,中海における塩分躍層の挙動と水質 および気象条件との相互関係を定量的な観点から解 明することを試みた.

2. 観測場所および観測期間

中海は鳥取県西部から島根県東部にまたがる汽水 湖であり、境水道によって日本海と、大橋川によっ て宍道湖とつながっており、その湖水面積は日本第 5位(汽水湖としては北海道のサロマ湖についで第 2位)である.しかし湖水面積に対して平均水深は 5.4 mと比較的浅く、最も深い所でも水深 8 m 前後 (人工改変地を除く)である.



図 1 (a) 観測水域, (b) A 地点:建設省中海湖心観 測所.

Fig.1 (a) Map showing the observation area, (b) Observation area A (The Lake Nakaumi Observatory of the Ministry of Construction).

今回の調査にける観測場所は、場所的な変化を考 え、中海湖心から中浦水門にかけて順にA地点、B 地点、C地点の3地点を設定した(図1a).また、 音響探査装置はA地点(中海湖心観測所)に設置し (図1b),観測期間は1996年7月26日から10月29 日までの約3ヶ月間である.

3. 観測方法の概要

3.1 湖底設置型音響探査装置(徳岡ほか, 1995, 1996)

本観測装置の概要は音響送受波器・送受信機・シ ステム制御・データ収録器から構成され(図2),送 受波器の下部には沈下防止と固定のため直径 50 cm 中海における塩分躍層の動態についての新知見 - 1996 年度の湖底設置型音波探査装置による観測データから -



図 2 塩分躍層動態観測システムの概要. **Fig.2** Concept of the observation system for halocline behavior.



図 3 湖底設置型音響送受波器の概観. Fig.3 Appearance of the transducer fixed on the lake bottom.

の鉄板を取り付けてある(図3).また,送受波器は 200mのケーブルによって音響送受信機に接続さ れ,送受波器により受信されたアナログ信号をシス テム制御でデジタルに変換,コンピュータで画像処 理してモニターディスプレイ上に表示され,同時に MOディスクに記録される.本装置の基本仕様は表 1に示したとおりである.

本装置の原理は一般に使用されている魚群探知機 や測深器と同様で,音波(トーン・バースト信号) を送信すると,送出された音波は音響インピーダン ス(密度と音速の積)の異なる境界で一部反射し,透 過波と反射波に分かれて反射波は戻ってくる.音響 インピーダンスの異なる境界は水と海底,水と魚, 水とプランクトン,暖流と寒流などが知られている. 既に徳岡ほか(1993)および西村ほか(1994)で示さ 表 1 塩分躍層動態観測装置の仕様. **Table 1** Specification of the halocline behavior observation system with acousic profiler.

送受波器:	周波数 200kHz	電歪式 指	向角	半減角	約6度
送受信機:	送信パルス幅	15~110μs	感度	調整	0~30dB
システム制	御・データ収録器	.			
	A/D変換器12b	it, サンプリ	レング層	目波数1	MHz
	光磁気ディスク	・ドライブ 2	230МЬ	yte	

れているように,入射波と反射波の振幅比は反射係 数 r として

$$r = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) \neq (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)$$

で示される.ここで ρ₁, ρ₂ はそれぞれの媒体の密 度, V₁, V₂ はそれぞれの媒体の音速を表す.水中に おける密度および音速は,塩分と温度の関数で表す ことができ,音速の変化は塩分と水温の両方の変化 に依存し,密度の変化は主に塩分変化に依存する(西 村ほか,1994).このことから反射係数は汽水域で は主に塩分変化によって変化していると考えられ る.本装置ではこの反射面をとらえることによって 塩分躍層の動態観測を可能にした.

観測例として図4に10月11日のT-3地点の音響画像を示した.図中の縦軸は湖底からの距離を1m間隔で表示している.横軸は時間軸であり,特定の観測地点における時間的な変化をみることができる.この音響画像では反射強度は色によって分けられており,反射強度が増すにつれて淡青,青,黄



図4 1996年10月11日の湖心 T-3地点における音 響画像.

Fig.4 Graphics of a time series data of acoustic profile by the halocline behavior long-term observation system (Point T-3 at the center of the lake, Oct. 11, 1996).

緑, 橙, 赤, 黒となる.

徳岡ほか(1996)によれば図中の矢印Aの赤い帯 状の下面は水面を示し、矢印Bで示した赤色の反 射画像は波による乱反射像である.矢印Cで示さ れる最下部は湖底であり、湖底上90 cm までの赤い 帯状の反射画像は機械的信号ノイズマスクである. 矢印Dで示される幅 30~100 cm の帯状の反射面は 塩分躍層を表している.その他、矢印Eで示され る斑点状もしくは線状の反射画像は魚群および浮遊 物によるものと思われる.

3.2 塩分,水温,溶存酸素,pH,水深,濁度,流 向,流速

音響探査装置による記録と併せて湖水の動態を把 握するため, B 地点の湖底にアレック電子(㈱製の電 磁流向・流速計(検出部は湖底上 60 cm)を設置し 観測を行った.この流向流速計には塩分計・温度計・ 圧力式深度計および濁度計が装備してあり,それら の検出部は湖底上 50 cm に位置する.また3地点す べてにおいて塩分濃度,水温,溶存酸素, pH の水 深 50 cm 毎の変化を(㈱堀場製作所製の水質チェッ カー U-10 を用いて約1週間毎に測定した.

4. 観測結果および考察

徳岡ほか(1996)は中海の湖心と湖縁において同 システムによる観測を行い(図5),塩分躍層の挙動 は風の強弱によって「無風時」(3 m/s 以下),「通常 時」(中風)(3~12 m/s),「強風時」(12 m/s 以上)



図 5 観測水域 (徳岡ほか, 1996). **Fig.5** Observation site by Tokuoka *et al*. (1996).

の三種類のパターンに分けられると報告している (図 6, 7).

今回の観測期間中には 12 m/s 以上の風は観測さ れなかったが、本研究では風速との関係を細分化し て詳細に議論することができた.すなわち、風速を 「無風時」(0~4 m/s)、「微風時」(4~6 m/s)、「弱風 時」(6~8 m/s)、「中風時」(8~12 m/s)と定義し、 それぞれに対応する塩分躍層の挙動を議論した.図 8 にそれぞれの風速時の湖心 T-3 地点の音響画像を 示した.「無風時」には明瞭な塩分躍層の反射面は 見られず、「微風時」には反射面が水深約 3.5 m に 見られ、それが「弱風時」・「中風時」となるとそれ ぞれ水深約 4.5 m から 5.5 m へと移動している.た だし、ここでいう塩分躍層とは、徳岡ほか(1996) で示された音響探査装置の検出感度である 3‰/50 cm 以上の変化である.以下にそれぞれの風速時の 特徴と湖水の動態について考察する.

ただし、本研究において用いた風向・風速等の気 象データは、全て建設省出雲工事事務所中海湖心観 測所の1時間ごとの観測データである.

4.1 「無風時」

今回の調査期間中,中海において一日中ほとんど4 m/s 以上の風が吹かなかった日は8月26,28,29 日,9月4,5,6,25,26日,10月12,14,18日 であった.中海においてこのような状態はまれであ る.「無風時」の代表的な例として,9月6日0時~ 24時のT-3地点の音響画像を図8に示した.9月5 日~9月6日18時にかけては風速4m/s以上の風が





吹くことはほとんどなく,降雨は観測されなかった. このときの水質特性を図9に示した.塩分は表層の 約17%から湖底の約31%までほぼ等勾配で増加し ている.音響画像においても塩分躍層の明瞭な反射 面は見られていない.この理由としては,「無風時」 には波がほとんどないため,拡散等の作用によって 塩分勾配が均等に近くなり,塩分躍層は消滅し,音 響画像で捉えられなかったと考えられる.このこと は徳岡ほか(1996)でも指摘されている.

溶存酸素は水深3mまでは10mg/l前後で,それ 以深では水深が深くなるにつれて徐々に減少し,水 深6mで無酸素となっている.水温は表層から湖 底まで約26℃であった.

4.2 「微風時」

今回の調査期間中の中海において少なくとも半日 以上 4~6 m/s の風が吹き続けた日は 9 月 1, 2 日, 10



強風時(12 m/s 以上)



月2,4,5日であった.中海において4~6 m/sの 風はほぼ毎日吹いているが半日以上吹き続けること はほとんどなかった.「微風時」の代表的な例とし て,10月4日15時~5日15時までのT-3地点の 音響画像を図8に示した.この期間中は風速4~6 m/sの西南西の風が吹き続け,降雨は観測されな かった.音響画像では水深3.5m付近に塩分躍層の 反射面が見られる.この理由としては,「微風時」 になると波の伝播によって湖水が上方から混合され 均一化される.このため混合した直下では塩分勾配 が増加し,水深約3.5mに塩分躍層が形成され,音 響画像で捉えることができたものと考える.

塩分は湖面の 21.2‰から湖底 6.7 m では 32.4‰ま で増加し,水深 3.5~4 m で塩分勾配は最大の 4.8‰ /50 cm となっている (図 10).また,溶存酸素は 塩分躍層の存在する水深 3.5 m から急減し,水深 4.5 m 以深ではほぼ無酸素となっている.水温は湖面



図8 「無風時」,「微風時」,「中風時」の中海湖心T-3地点における音響画像.

Fig.8 "Windless day", "a breeze day", "medium–windy day" Graphics of the time series data of acoustic profile at the center of the lake T–3.



図9 「無風時」の湖心における塩分,水温,溶存酸 素および pH の鉛直分布.

Fig.9 "Windless day" Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH.

の 20.6℃ から湖底 6.7 m では 23.9℃ まで増加し,水 深 3.5~4.5 m で水温勾配は最大となっており,温 度躍層の逆転が見られる.

4.3 「弱風時」

今回の調査期間中の中海において少なくとも半日 以上 6~8 m/s の風が吹き続けた日は 9 月 7 日,10 月 1,20 日であった.中海において 6~8 m/s の風 は頻繁に吹いているが半日以上吹き続けることはほ とんどなかった.この中でも「弱風時」の代表的な 例として 10 月 20 日 0 時~24 時の T-3 地点の音響 画像を図 8 に示した.この期間中は風速 6~8 m/s の北の風が卓越し,降雨は観測されなかった.音響 画像において塩分躍層の反射面は 9 時には水深約 4 m に存在しているが,19 時には水深約 4.5 m に移 動している.これは 13 時から 20 時まで吹き続けた 中海における塩分躍層の動態についての新知見 - 1996 年度の湖底設置型音波探査装置による観測データから --



図 10 「微風時」の湖心における塩分,水温,溶存酸 素および pH の鉛直分布.

Fig.10 "a breeze day" Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH.

風速 6~8 m/s の風によって,湖水が水深約 4.5 m ま で混合し,その直下に塩分躍層が形成され,音響画 像に捉えられたと考えられる.

また、塩分・水温・溶存酸素は共に水深 3.5 m ま で一定であり、水深 6 m ではそれぞれ 30.6‰, 22.8 ℃, 0.2 mg/l となっており、鉛直的な測定点数が少 ないため塩分躍層を確認することはできなかった が、反射面より浅い深度では湖水が均一化し、深い 深度ではほぼ無酸素となっていた(図 11). このこ とから音響画像において反射面の見られる水深約 4.5 m に塩分躍層が存在していることが考えられる.

4.4 「中風時」

今回の調査期間中の中海において少なくとも半日 以上 8~12 m/s の風が吹き続けた日は 8 月 30, 31 日,9月 21,22 日,10 月 26 日であった.中海にお



図 11 「弱風時」の湖心における塩分,水温,溶存酸 素および pH の鉛直分布.

Fig.11 "Faint-wind day" Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH.

いて 8~12 m/s の風が吹くことはあまりなく,半日 以上吹き続けることはほとんどなかった.この中で も「中風時」の代表的な例として9月21日0時~24 時の T-3 地点の音響画像を図8に示した.9月21 日は13時から風速8~2 m/s の北東の風が吹き,18 時には11.9 m/s (同日最大風速)となった.また,降 雨は観測されなかった.音響画像において塩分躍層 の反射面は9時に水深2mに現れ,13時からは徐々 に下方に移動し,20時には水深5.3mにまで達し た.これは13時から吹き続けた風速8~12 m/s の 風によって,湖水が水深5.3mまで混合し,その直 下に塩分躍層が形成されたと考えられる.

また,塩分・溶存酸素は共に水深 3.5 m まで一定 であり,水深 6.5 m ではそれぞれ 29.4‰,0.2 mg/l となっており塩分躍層は確認できず,反射面より浅 い深度では湖水が均一化し,深い深度ではほぼ無酸



図 12 「中風時」の湖心における塩分,水温,溶存酸素および pH の鉛直分布.

Fig.12 "Medium–wind day" Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH.

素となっていた(図 12).水温は表層から水深 6.5 m まで約 25℃と一定であり,温度躍層は見られな かった.これらのことから「弱風時」と同様に音響 画像において反射面の見られる水深 5.3 m に塩分躍 層が存在することが考えられる

4.5 湖水のサイクル

図 13 に 10 月 15 日 0 時~10 月 21 日 0 時の音響 画像と風速・塩分および DO (それぞれ水深 1.1 m· 3.5 m・5.6 m における測定値)の経時変化を示した. 10 月 15 日 12 時頃から吹き始めた 6~10 m/s の風に よって音響画像では水深約 3.5 m に反射面が現れて いる.またそれと同時に塩分濃度は上層で 18‰か ら 21‰まで増加し,中層で 25‰から 21‰まで減少 している.溶存酸素は上層ではほとんど変化はなく, 中層では 5.0 mg/l から上層と同じ値である 9.0 mg/l まで増加している.このことから風が吹くことに よって音響画像の反射面が見られる深度まで湖水が 均一化したことがわかる.

しかし、その後風が弱まるとすぐに元の状態に 戻っており、さらに「無風時」の状態が続いた10月 18日0時から10月19日9時においては、塩分・ DOとも上層と中層の差は広がり勾配が緩やかに なっていることが明らかとなった。またその後10 月19日15時から6~10 m/sの風が吹き始めると音 響画像では反射波が水深4m前後に現れ、それと 同時に塩分・DOは中層が上層に歩み寄る形で、湖 水が少なくとも水深3.5mまで均一化されている。 またこの時下層では無酸素となっていた。



図 13 1996 年 10 月 15-21 日の湖心 T-3 地点における音響画像と風速,塩分および溶存酸素の経時変化. Fig.13 Graphics of a time series data of acoustic profile, wind velocity, salinity and dissolved oxygen.

中海における塩分躍層の動態についての新知見 - 1996 年度の湖底設置型音波探査装置による観測データから -



Fig.14 "Windless day" time series data of salinity, temperature, water depth, muddiness, water flow direction and waer flow rate at B point.

これらのことから中海においては、風が吹くと湖 水が音響画像で反射面の見られる深度まで均一化 し、風が弱まると元の状態に戻り、さらにまた風が 吹くと均一化するといったサイクルで湖水が挙動し ていることが明らかとなった.

4.6 水域による特徴

図 14 に「無風時」の B 地点の湖底における水質 の経時変化を示した.塩分濃度・水温はそれぞれ 30.5‰,25.5℃とほぼ一定の値を示し,濁度変化は ほとんど見られない.流向は上げ潮時には SE~SW の南成分で,そこから下げ潮になるにつれて SW-W-NW と変化した.流速は満潮時・干潮時に遅く なる変化を示した.このことから B 地点の湖底に おいては,潮汐に伴って海水が流出入していると考 える.また,A,B,C 地点における9月21日8時



図 15 1996 年 9 月 21 日 8 時 45 分の A, B, C 地点にお ける塩分, 水温, 溶存酸素および pH の鉛直分布. **Fig.15** Vertical profiles of salinity, temperature, dissolved oxygen and pH at 08.45, Sept. 21, 1999 at points A, B and C.

15~45分に測定した水質の鉛直変化を図 15 に示した. 塩分濃度は 3 地点とも水深 2 m まで 16~17‰ とほぼ一定であり,そこから徐々に増加し, 湖底では 33~34‰となっている.

また、水温も3地点とも同様の変化を示し、表層・約24℃、中層・約26℃、下層・約25℃となっている.しかし、溶存酸素はA地点では湖底で無酸素となっているのに対し、B・C地点は湖底でそれぞれ4.86 mg/l、5.71 mg/lと高い値を示している.これらのことから B・C 地点の湖底においては比較的高い溶存酸素を有する海水が潮汐に伴って流入していると考えられる.

以上のことから、中海における塩分躍層および下 部高塩分層の挙動は、図 16 のように考えられる.す なわち、「無風時」には湖水はあまり大きな挙動を しないため、拡散等の作用により塩分勾配が均等に 近くなり、塩分躍層は存在しない.ところが、「微 風時」になると波の伝播によって湖水が上方から混 合され均一化される.このため混合した直下では塩 分勾配が増加し,水深約3.5mに塩分躍層が形成される.

さらに風が強くなり「中風時」になると湖水の攪 拌される深度は深くなり、湖心では水深約5.5mに 塩分躍層が形成される.またこのとき下部高塩分層 は湖心から湖縁に移動する.台風のような「強風時」 では下部高塩分層の移動はさらに顕著である(徳岡 ほか,1996).このことから中海においては、風に よる湖水の攪拌と湖水の振動は複合的に起こってい ると考えられる.

また, B・C 地点の湖底においては潮汐に伴って 海水が流入し, その海水は比較的高い溶存酸素を含 んでいることが明らかとなった.

今後は, さらに湖水全体の動きを把握するため, 広域的な長期同時観測を行うことが必要であると考 える.

引用文献

- 西村清和・安間恵・土屋洋一・松田滋夫・徳岡隆 夫・井内美郎 (1994) 塩水楔のための水中音波探 査機の開発, LAGUNA (汽水域研究) 1: 1-9.
- 奥田節夫・藤井智康・川上誠一(1992)中海・宍道 湖における水位変動(2). 汽水湖研究, 2, 1-6.
- 奥田節夫・藤井智康・植田敏史(1994)中海の物理 特性. 汽水湖研究, **7:** 21-33.
- 徳岡隆夫・高安克己・三瓶良和・土屋洋一・安間 恵・松岡弘和・井内美郎・西村清和(1993)音波 探査による中海の浮泥層と塩水楔の検討(予報). 山陰地域研究(自然環境), **9**: 9-17.
- 徳岡隆夫・大西郁夫・三瓶良和・瀬戸浩二・田村嘉 之・高安克己・安間 恵・土屋洋一・松田滋夫・ 井内美郎・西村清和 (1994) 音波探査による中海・ 宍道湖の塩分躍層の検討とその意義. LAGUNA (汽水域研究), 1: 11-26.
- 徳岡隆夫・高安克己・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.



図 16 中海における風に伴う湖水の挙動. Fig.16 Schematic illustration of the movement of lake water caused by wind in Lake Nakaumi.

追記:この研究は1996年度に島根大学理学部地質 学科の板坂尚孝の卒業研究「汽水湖中海における塩 分躍層の挙動と水質特性に関する研究」として観測 を行い、まとめたものである、この後、このような 研究に関連した観測機器開発のための観測の場を江 の川に移したために、この研究成果を公表する機会 を失してきた.しかしながら、無風時が続いた場合 には塩分躍層は消失し, 微風時になるとともに塩分 躍層が形成されていくことを観測データから指摘し たことは1つの知見であるので、ここに報告するこ とにした次第である.その後の研究の進展を取り入 れずに報告をまとめたことについてはお詫び申し上 げます.当時、観測機器の開発をともに行ってきた 地質調査所西村清和氏,千本電気㈱須崎 聡氏らを はじめとする塩水楔研究グループ各位、汽水域研究 センターの高安克巳教授、および中海湖心における 観測データを利用させていただいた建設省出雲工事 事務所にお礼申し上げます.(徳岡隆夫)

LAGUNA (汽水域研究) 8, 67~78 頁 (2001 年 3 月) LAGUNA 8, p.67-78 (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)

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

Saline wedge at River Gonokawa, Shimane Pref., Japan –Saline water intrusion at estuary river and its relation to the underground water– (Observation at a period of water shortage during Dec. 1999–Feb.2000)

Takao Tokuoka¹, Yoshikazu Sampei¹, Hiroyoshi Ueno², Kiyokazu Nishimura³, Akira Suzaki⁴, Shigeo Matsuda⁵, Shunsuke Kubota⁶, Shigenori Suzuki⁷, and Tatsuhiko Ikeda⁸

Abstract: A new monitoring system for the observations of spatial and temporal movement of halocline occurring at boundary between fresh water (the low–salinity water) and salt water (the high–salinity water) has been developed and applied since 1992. The saline wedge (salt–water intrusion along the bottom of river) has been observed at the lower stream of River Gonokawa of Shimane Prefecture since 1997, and when discharge rate decreased below 50 m³/s in 1999, we observed for two months that the head of saline wedge invaded up to 7.2 km. A groundwater well was installed at the riverbank for the observation of groundwater system. The well is 50 m in length and penetrates the alluvial sand and gravels. The preliminary results from this observation well indicate that the boundary between saline and fresh water in adjacent subsurface aquifer system moves downward when the discharge rate at the river increases. Consequently the movement of saline wedge is positively related with the boundary between saline and fresh water in subsurface aquifer system.

Key words: saline wedge, halocline, groundwater, Gonokawa

1.はじめに

江の川の塩水楔の観測については 1998 年 12 月から 1999 年 2 月にかけての渇水期に各種観測機器を

使用しての結果を報告した(徳岡ほか,1999b).こ れに引き続いて1999年12月から2000年2月に塩 水溯上の観測を行い,同時に渇水期に塩水が溯上す る範囲より上流に深度50mの井戸を設置して地下

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

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 地質調査所海洋地質部 Marine Geology Department, Geological Survey of Japan

⁴ 千本電機(株) Senbon Denki Co., Ltd.

⁵ クローバテック(株) Clovertech Inc.

⁶ (株)ワイ・オー・システム Y.O.Systems Inc.

⁷ (株)鶴見精機 The Tsurumi-Seiki Co., Ltd.

^{*} 国土交通省中国地方整備局浜田工事事務所 Hamada Branch, Ministry of Land, Infrastructure and Transport

に貯留されている塩水塊についての連続観測を行 い、塩水溯上と地下の塩水との動きの関係を捉える ことにした. 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的な例としてよく知られて いて(たとえば西條・奥田、1996)、筆者らのグルー プは1997年度から観測機器の開発とともに観測を 行ってきている (徳岡ほか, 1998 および 1999 a). 江の川では、塩水は通常は河口から4~7kmの範 囲で、渇水時には河口から 8.2 km にある赤栗の瀬 にまで至り、大渇水時にはこれを越えて溯上する. 1998 年度には河口からの距離 7.4 km 地点をベース とし、6.4~7.6 km の範囲で観測を行い、河川水位 (流量)と塩水溯上限界との関係を検討した.1999年 度は渇水(この場合は 50 m³/s)が始まった 1999 年 12 月始めから次にのべる3つの観測を行った. 観測地 域を図1に示す.

2.調査の概要

2-1. 舟上からの音波探査による塩水楔の観測

河口から赤栗の瀬に至る範囲について,塩水楔音 響探査システム SC-3 型を改良した SC-3 R型(千 本電機株式会社製,記録部はクローバテック株式会 社製)によって塩水楔の発達状況の観測を計3回 (1999.9.10, 10.27, 12.4)行った.また,川床までの 垂直方向の水質(温度・電気伝導度・塩分・pH・ DO)測定を各回とも4地点で行った.

2-2. 川床設置機器による河口から 7.4~8.2 km 地点 での連続観測

前年度(徳岡ほか, 1999)と同じく 7.4 km 地点を 基点として渇水の始まった 1999 年 12 月始めから 2000 年 2 月にかけて連続観測を行った.使用した 機器は以下のとおりで,設置にあたってはスキュー バダイビングによる確認を行った.

- ・塩水楔音響探査システム SC-2 型 (川床設置,オ ンライン式) (千本電機株式会社製)
- ・塩水楔音響探査システム CL-2 型および新たに改良された CL-3 型(川床設置,オフライン式)(クローバテック株式会社製)
- ・水温・電気伝導度・塩分を測定するマルチ CT センサ(株式会社鶴見精機製)
- ・光ファイバ式温度分布計測システム DTS-80 (株 式会社ワイ・オー・システム製)
- ・ICメモリ付き小型水温計 WaDaR(株式会社鶴見 精機製)



図1 江の川における塩水溯上調査観測区域と地下 水調査観測井の位置.

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

 ・流向流速計(メモリー電磁流速計 ACM-16 M型, アレック電子製)

2-3.市村観測井での地下水観測

通常の渇水時には塩水が溯上しない松川町市村 (江の川右岸,河口からの距離 8.65 km)の堤防上に 深さ 50 mの観測井を 1999 年 10 月に設置し (GL 14.63 m)し, 5 回(1999.10.27, 11.18, 12.3, 2000.1.8, 2.3)の水位・水質(温度・電気伝導度・塩分・pH・ DO)の測定を行った.また試作された井戸用マル チ CT センサ(圧力センサによる水位測定装置付き で共著者の鈴木・西村による;GL からの位置:CT 1, -37.5 m;CT 2, -40.5 m;CT 3, -41.5 m;CT 4, -42.5 m;CT 5, -45.5 m;水位センサ, -19.5 m; 測定時間間隔, 5 分)を設置して 35 日間(1999.12.3 日~2000.1.7)の連続観測を行った.

3. 調査結果

3-1. 舟上からの音波探査による塩水楔の観測

塩水楔音波探査機 SC-1 型を改良した SC-3 R 型 を用いて行った. SC-3 型は放電破壊記録式の SC-1 型の後継機として超音波を用いた感熱式記録器 で,小型軽量化とバッテリー内蔵型を目的として千 本電機株式会社により開発されたものである. 淡塩 境界の記録は,感熱記録紙に 10 階調で出力される とともに,外部へ送信トリガ信号とともに,アナロ グ信号として出力される. この外部出力信号を利用 することにより,デジタル収録器へのデータ収録を 容易に行うことが可能である. 1999.9.10, 10.27, 12.4

江の川の塩水楔 一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)



図 2 塩水溯上観測機器設置位置図. **Fig.2** Map showing observed area for saline wedge by various euipments.

の3回の調査で観測された塩水溯上限界はそれぞれ 5.2 km, 8.2 km, 7.0 km であった.塩水溯上限界は 後述する江の川の流量の変化(図5)とよく対応し ている.12月4日の記録を図版1-1に示す.

これらの観測ではそれぞれ直後に舟を引き返して 各4地点を選んで水質測定を行っている.結果を音 探記録(図版 1-1)のなかに示す.音響的に識別さ れる淡塩境界は各地点で垂直方向に見いだされる塩 分の急変する位置によく相当している.いずれの場 合も溯上限界域において入りこんだ塩水は25 PSU 以上を保っていて,上位を流れる淡水と混合は弱い ことがわかる.また,全域にわたって流下する淡水 によって下位の塩水が削りとられる現象(連行)が 観察され、とくに川床地形が下流に向かって深みか ら高まりへと変化する辺りでそれが著しい.

3-2. 川床設置機器による河口から 7.4~8.2 km 地点 での連続観測

渇水期に調査することをねらって12月4日に機器を図2のように設置し、連続観測を開始した.結果としては機器設置を行った12月4日から6日にかけての期間が冬期にもっとも流量が減じた時期にあたっていて、50m³/sを下回ったが、その後は流量がむしろ増えていった.流量が30m³/s程度まで

図版1(1~7)



1-1 江の川の塩水楔 (1999 年 12 月 4 日の記録). 音響プロファイリングシステム SC-3 R 型による淡塩境界分布.



1-2 川床設置オンライン探査装置 ON 1, ON 2, ON 3 に記録された塩水溯上 (1999 年 12 月 4 日~6 日).







1-4 マルチ CT センサによる塩水溯上時の川床塩分 変化 (1999 年 12 月 4 日~6 日).

Temperature(°C)

■9-10 ■10-11 ■11-12 ■12-13 ■13-14 ■14-15 ■15-16 ■16-17 ■17-18



1999/12/4 12:00 1999/12/5 0:00 1999/12/5 12:00 1999/12/6 0:00 1999/12/6 12:00 Date

1-5 光ファイバによる塩水溯上時の川床温度の時空 変化 (1999 年 12 月 4 日~6 日.)



Date
1-6 メモリー電磁流速計 ACM による塩水溯上時の

流速の連続測定結果 (1999年12月4日~6日).



1-7 市村観測井の5点での井戸用マルチCTセンサ による塩分の連続観測(1999年12月4日~2000年2 月3日) 下がることを期待したが、それは実現しなかった. しかしながら、12月4~6日にかけての流量の減少 の際に、赤栗の瀬の近くまでの塩水溯上が観測され た.この結果について以下に述べる.

(1) 塩水楔音響探査システム (SC-2 a 型, 川床設置 オンライン式, 千本電機製) による淡塩境界の時系 列変化の観測

送受波器3基(ON1,2,3)がそれぞれケーブル で記録部に連結している.なお,今回使用した機器 は川床近くの記録をとれるようにSC-2型からSC-2a型に改良した送受波器を使用した.それぞれの 送受波器の位置と深度は以下のとおりである.

	河口からの距離	水深
ON 1	7.70 km	10.0 m
ON 2	7.55 km	8.0 m
ON 3	7.45 km	8.7 m

各地点とも測定間隔は2分である.今回の実観測 期間はそれぞれ計24日である.観測期間中に川平 での流量が50 m³/sを切って赤栗の瀬に至る塩水溯 上が起こった1999年12月4~6日のON1の記録 を図版1-2に示す.記録は示していないが,ON3, ON2,ON1の順に川床をはい上がる塩水塊の通過 があったこと,また塩水溯上が時間的に上流に進む にしたがって淡塩境界面の反射が強くなることか ら,塩水の濃度が増していくこと,などがわかる.

(2) 川床設置型塩水楔音響探査システム (CL-2 お よび CL-3 型, 川床設置オフライン式, クローバテッ ク製) による淡塩境界の時系列変化の観測

昨年度に開発された CL-2 型 (全体の電源供給を バッテリー駆動としたまま,記録部のみを陸上に設 置するシステム)およびこれをもとに反射面をより 鮮明に捉えるための改良とあらたに水温センサを組 み込んだ CL-3 型をもちいて観測を行った.観測地 点と期間は以下のとおりである.

	河口からの距離	水深
OFF 1	8.10 km	8.5 m
OFF 2	5.50 km	8.0 m
OFF 3	2.00 km	8.4 m

観測期間は OFF 1 と OFF 2 が CL-3 型で 33 日, OFF 3 が CL-2 型および CL-3 型で 61 日である.図 3 に CL-3 型による河口から 5.5 km 地点で得られた 潮汐によって振動する淡塩境界面の連続記録(1999 年 12 月 6~11 日)を示す.



図3 塩水楔音響探査システム CL-3型(川床設置,オ フライン式) OFF 2 連続記録(河口から 5.5 km, 1999 年12月6日~2000年1月8日).

Fig.3 A record of saline wedge by the underwater acoustic reflection measurement system of Off–line Model CL–2.

(3) 水温,電気伝導度を測定するセンサ(マルチ CT センサ,鶴見精機製)による川床 5 地点での温度・ 塩分変化の連続測定

マルチ CT センサは江の川の塩水溯上観測のため に鶴見精機によって平成9年度に試作され,その都 度改良が加えられてきたものである.延長 700 m の多芯ケーブルに温度・電気伝動度センサを5 個接 続し,川底近く(川底から 15 cm 上)の水温・電気 伝動度を連続測定し,両者から塩分(PSU)を換算 する仕様となっている.光ファイバの測線にほぼ平 行するようにケーブルの敷設を河口からの距離 7.55 km~7.81 kmの川底に行い,センサ5 個(CT 1, CT 2, CT 3, CT 4, CT 5)を設置した.各地点での測 定は 5 分間隔である.

	河口からの距離	水深
CT 1	7.55 km	8.0 m
CT 2	7.63 km	8.0 m
CT 3	7.68 km	8.6 m
CT 4	7.76 km	8.8 m
CT 5	7.81 km	9.9 m

1999年12月4日~6日の塩水溯上時の温度および塩分の記録をそれぞれ図版1-3および1-4に示す.

温度と塩分の時系列変化は良く一致することか ら、塩水楔の移動を知ることができる.

(4) 光ファイバ式温度分布計測システム DTS-80,(株) ワイ・オー・システム製による川底での水温分布の 連続測定

平成9,10年度と同様に使用した光ファイバ式温 度分布計測システムは1本の光ファイバケーブルで 多くの点の温度測定が同時に、しかも連続的に行え

る.ケーブルの1mごと に温度が測定され,精度は 4 km の範囲で±0.2℃ 程度 である. 今回は河口からの 距離 7.45 ~ 8.25 km にわ たって全長 1000 m で設置 した. 測定は5分間隔で, 観測期間は 1999 年 12 月 4 日~2000年1月7日の計 34 日である.水温 2℃ご とに区切ってカラー表示し た1999年12月4~6日の 結果を図版 1-5 に示す.な お、光ファイバケーブルに よる水温データのクロス チェックのために IC メモ リ式小型水温計(T.S WaDaR, 鶴見精機製, 温 度センササーミスタ、測定 範囲-2~35℃,精度は 0.022℃)を2地点(T1, T 2) に, 光ファイバに連結 して設置して測定してい て, 光ファイバによる温度 測定が精確であることを確 認している.

(5)流向流速計による水温・流向・流速の連続測定

メモリー電磁流速計 ACM-16 M型(アレック電 子製)を音波探査機ON1 の近く(7.55 km地点,水 深 8.1 m)に設置し,1999 年12月4日~2000年1月 7日の計34日,測定間隔20 分毎で観測を行った.12月 4~6日のデータを図版1-6に示す.



図 4 川平における水位 (1999 年 12 月 1 日~2000 年 1 月 28 日,国土交通省浜 田工事事務所による).

Fig.4 Water level at Kawahira Observation Site (Dec. 1,1999~Jan. 28, 2000.



川平流量: 1999.12.04-2000.02.03

図 5 川平における流量(1999年12月4日~6日,国土交通省浜田工事事務所による).

(6) 江の川の水位・流量変化

調査期間中の江の川の川平観測所(河口から9.1 km)の1時間ごとの水位・流量データ(国土交通省 中国地方建設局浜田工事事務所による)にもとづい て塩水溯上時の12月4日~6日のデータを図4お よび5に示す.

3-3.市村観測井での地下水観測

(1) 観測井の位置の選定とボーリング

江の川での塩水潮上とその上流に貯留された地下 の塩水塊との関係を明らかにするために適当な場所 を選定して観測井を設置し,新たに開発された井戸 用マルチ CT センサ(圧力センサ付き)を使用して 観測を行うことにした.これまでの国土交通省浜田 工事事務所による調査(昭和 61 年および平成 6 年

Fig.5 Discharge late (m^3/s) at Kawahira Observation Site (Dec. 1,1999 ~ Jan. 28, 2000).

江の川の塩水楔 一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)



図 6 設置された市村観測井の概要. Fig.6 Configuration of monitoring sensors in the Ichimura observation well installed at 8.65 km from the river mouth.

度の報告書による)で、河口からの距離9kの松川 橋の近くまで大渇水の際には地下に塩水が存在する ことがわかっていたことから、地下に塩水がほぼ恒 常的に存在し、かつ沖積砂礫層がすくなくとも50 mの厚さで分布し、かつ川の流路に近く、ボーリ ングの可能な場所を選定することとして、河口から の距離8.65 kの松川町市村の河川堤防上でボーリン グを行った。オールコア採取を行い、すべて砂礫層 からなることから、一連の沖積層と判断した(図 6).井戸は径110 mmのケーシングで適当な間隔に 孔をあけて地下水の移動に問題を生じないような仕 上げとした(写真1,2参照).

 (2) 観測井における水位および温度・塩分観測
 水質計 600 XL (YSI ナノテック社)によって温度・ 電気伝導度・塩分・溶存酸素・pH を連続観測期間
 中1回を含めて計5回行った.結果を図7~11に示す.

(3) 井戸用マルチ CT センサの設置と地下水位・温 度・塩分の連続観測

新たに試作した井戸用マルチ CT センサはマルチ CT センサ(西村ほか, 1998)を改造して観測井に おいて垂直方向に適当な深さにおいて温度と電気伝 導度(塩分)を時系列で測定しようとするものであ



写真1 江の川の右岸堤防(市村)におけるボーリング



写真2 採取されたボーリングコアの沖積砂礫層



写真3 観測井へのCTセンサの設置

る. センサと測定方法は同じで,地下水位測定のための圧力センサを装着している. 淡塩境界の深度は 変動することから,設置前に水質計によって深度を 確認し,変動幅を考慮してケーブル長を調節するこ とによってセンサの位置を固定して観測を行った. 設置状況を写真3に示す.連続観測を計61日間 (1999年12月3日~2000年2月3日)行った. セ



74

図 7 市村観測井における水質観測 (その1) 1999 年 10月 21日.

Fig.7 Temperature and salinity disribution at the observation well (Oct. 21, 1999).

市村観測井(1999.12.03) 5 0 10 20 30 T(°C), S(PSU) -5 -- Temp -∎– Sal -10 Elevation (m) -15 -20 -25 -30 -35-40 L

図 9 市村観測井における水質観測 (その 3) 1999 年 12月3日.

Fig.9 Temperature and salinity disribution at the observation well (Dec. 3, 1999).



図8 市村観測井における水質観測(その2)1999年 11月18日.

Fig.8 Temperature and salinity disribution at the observation well (Nov. 18, 1999).



図 10 市村観測井における水質観測(その4)2000 年1月8日.

Fig.10 Temperature and salinity disribution at the observation well (Jan. 8, 2000).


図 11 市村観測井における水質観測(その 5) 2000 年 2 月 3 日

Fig.11 Temperature and salinity disribution at the observation well (Feb. 3, 2000).

ンサ CT 1~CT 5 および圧力センサの測定間隔は5 分である.地下水位の変動を図12に, CT 1~CT 5 における温度と塩分の時系列変化をそれぞれ図13 および図版1-7 に示す.

4. 観測結果についての考察

4-1.江の川の塩水溯上

(1)塩水溯上が起こった際にその上流の地下に貯留 されている塩水塊がどのような反応をするかを知る ためにこの観測を行った.江の川の塩水溯上は河川 の水位・流量の変化と直接関係して起こっているこ とが各種の機器を併用した総合的な観測によってこ れまでに明らかにされている(徳岡ほか,1998,1999 b)ことから,1999年12月4日に川平流量が50 m³/ s以下となり,赤栗の付近まで塩水溯上が起こった 機会を捉えてこの一連の観測を行った.結果として その後の流量の減少はほとんどなく,逆に流量が増 加したことから,流量の減少(塩水楔の後退)に伴 う地下の淡塩境界の動きが捉えられた.

(2) SC-3 R 塩水楔音響プロファイリングシステム

による塩水溯上観測では 1999 年 12 月 4 日に塩水楔 の先端が河口からの距離 7.0 km の位置にたっして いることがわかる.先端での塩分は 30 PSU である (図版 1–1).

(3)河口からの距離 7.4 km~8.2 km に各種観測機器 を設置(図2)して,塩水溯上の観測を 34 日間行っ た.結果としては機器を設置した 12 月 4 日から 6 日までが,この季節としてはもっとも流量が小さく なり,赤栗の瀬の近くまで塩水溯上が起こった.各 種機器による観測結果はまとめて図版 1 に示されて いる

 (4) オフライン式塩水楔探査装置は上記の観測を補 足するために、あらたに温度センサをつけた機器に よって 2.0 km, 5.5 km, 8.1 km 地点での観測を行っ た、河川流量の変化と潮汐に対応してこれらの地点 で淡塩境界が振動していることが記録された(図 3).

4-2.塩水溯上域より上流に設置した観測井での地下 水の塩水塊の動き

(1)塩水溯上とその上流の地下に貯留された塩水と の関係を明らかにするために松川町市村で深度 50 mの観測井を設置し,新たに試作した機器を用い て地下水位とともに温度・塩分の連続観測を行っ た.観測井での水位・水質測定(図7~11)では,地 下水面は川床面よりわずかに高く(数10 cm),淡塩 境界は DL-25~26 m に位置している.淡塩境界以 下の塩水は 21~22 PSU で上位の淡水とは比較的 シャープな境界面(漸移帯は数 10 cm 以下の厚さ) で接している.いずれの測定でも最深部では塩分が 急激に低下している.より下位に被圧した淡水層が 存在していることによる影響と考えられる.また, 塩水層中では中位のあたりでやや塩分が高い.温度 の変化は全体として小さいが,塩分の変化と対応し ている.

(2)地下水位は振幅 20 cm までの規則的な変動が認められ、潮汐によるものと判断される(図 12).水位の変動は河川の水位・流量の変動(図 4,5)と連動していて、両者の時間差(河川水位データは1時間ごと)は認められない.

(3) 淡塩境界の変動を知るために淡塩境界を中心としてセンサー5つを上からCT1-(3m)-CT2-(1m)-CT3(1m)-CT4-(3m)-CT5の順に設置し、温度と塩分についての連続観測を行った(図13および図版1-7).淡塩境界は潮汐の影響とともに、河川の水位(結果として流量)の変化と応答してい

76



Well-MCT: 江の川市村観測井, 1999.12.04-2000.02.03



Well-MCT: 江の川市村観測井, 1999.12.04-2000.02.03







ることが明らかになった. 観測期間中に CT1 は常 に淡水中にあった. CT2 は 12 月 3 日以降 26 日ま では淡塩境界付近にあって潮汐による淡塩境界の振 動によって塩分はほぼ0 あるいは 22 PSU で変化 し、その変化の時間は次第におそくなり、27 日以 降は淡水中に入ったままとなる. このことは淡塩境 界が次第に CT 2 に近づき, ついにはそれ以下に下 がったことを意味する. つぎに CT 3 についてみる と1月24日以降には淡塩境界はこれより下に下 がったことがわかる. さらに CT 4 では2月1日以

江の川の塩水楔



流量と塩水楔の遡上限界

図 14 江の川における塩水溯上距離と河川流量 (川平観測所)の関係. **Fig.14** Relationship between saline invation limit and the discharge amount.

降に淡塩境界はそれ以下に下がっている.これらの 変化を川平の水位変化と比較すると時間差をおいて よく相関していることが明らかである.その時間差 はおおよそ2日程度と判断される.

(4) 観測井での淡塩境界の変化と塩水溯上との関係について考察する.塩水溯上は河川流量の変化に対応しているので、今回の調査では12月初めに赤栗のあたりまで溯上した塩水楔はその後の河川流量の増大で後退したことが明らかである.今回の調査では塩水溯上が起こった最中に観測を開始したので、赤栗付近まで溯上した時期に地下の淡塩境界がどのように変動したかは明らかにできなかったが、流量が増し(水位が上昇し)て、塩水楔が後退した際に赤栗より先の地下に貯留された塩水塊の水位は下がったことは明らかである.このことから、塩水溯上とその先の地下に貯留された塩水塊が連動していることが確かめられた.

5.まとめと今後の課題

塩水楔の観測システムについては 1992 年以降,本 研究グループによって開発が進められ,特に江の川 においてこの4年間観測が行われた.その結果,塩 水溯上限界と河川流量とは図 14 に示すように正の 相関をしていることが明らかになった.ただし,流 量が 30 m³/s 以下となるような渇水時に塩水楔の先 端の位置を実測によって捉えた例はないので,今後 渇水が起こった際の調査が必要である.この調査で は流量が 50 m³/s を上回った冬期の渇水期に通常の 渇水時の塩水溯上限界である赤栗の瀬(河口から 8.2 km)までの範囲で観測を行い,予測どおりの結果 を得たが,それ以上の流量の減少は起こらなかった.

塩水溯上限界より上流の地下に貯留された塩水と 塩水溯上の関係については河口からの距離 9.65 km に深さ 50 m (GL-35.37 m) の観測井を設置して新た に井戸用のマルチ CT センサを試作して連続観測を 行った.その結果、河川流量と地下水位は時間差な しに連動していること、また流量が増加した際には 時間差をおいて淡塩境界は下がることが確認され た.流量の増加で塩水楔の先端は後退するので、塩 水溯上と地下の淡塩境界とは連動していると云え る.しかしながら今回の観測では上に述べたように その後の塩水溯上はなかったので、溯上時に地下の 淡塩境界が上昇するところを捉えることは出来な かった.また、淡塩境界を検出するためのセンサ5 つは3,1,1,3mの間隔で設置されていたために、 その変動はこれらセンサの深度を通過する時点でし か捉えられていない. 観測時期のチャンスと更なる 機器の工夫はこれからの課題である.

引用文献

西村清和・松林 修(1996) 光ファイバ分布型温度 センサの海洋および湖沼調査への適用.海洋調査 技術,8:17-31.

- 西村清和・鈴木重教・徳岡隆夫 (1998) 多点型 CT センサケーブルー測定システムの開発と汽水域で の塩分・温度観測実験ー.海洋理工学会誌, 4:41 -54.
- 西條八束・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),5:197

-208.

- 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 a) 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), 6: 179-187.
- 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 b) 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-(渇水期溯上例, 1998 年 12 月~1999 年 2 月). LAGUNA(汽水域研究), 6: 233-245.

大橋川における高塩分水塊の動態観測(1999 年秋)

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

Long-term observation of high-saline watermass at River Oohashigawa,, Shimane Pref., Japan (Observation in Autumn, 1999)

Takao Tokuoka¹, Yoshikazu Sampei¹, Hiroyoshi Ueno², Kiyokazu Nishimura³, Akira Suzaki⁴, Shigeo Matsuda⁵, Shunsuke Kubota⁶ and Shigenori Suzuki⁷

Abstract : A long-term observation system has been developed by the present writers since 1992. The system consists of several sub-systems such as an acousic reflection profiling system for spatial disribution 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-2), a thermometry system using optical fiber distrituted temprature sensor (Model DTS-80) and a temperature salinity measurement system using multiple CT sensors (Model MCTH-2). The observations was successfully carried out from Sept. 30 to Nov. 2 at the middle part of River Ohashigawa in addition to the ship-survey using Model SC-3.

Key words: halocline, saline wedge, oxygen–poor water mass, Lakes Nakaumi and Shinji,R. Ohashigawa

1.はじめに

著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て いて,それらについては徳岡ほか(1999)で報告し た.この観測法は当初は中海での塩分躍層の観測の ために考案され,1997 年度から主に江の川の塩水 楔の観測で機器の開発が進められていったものであ る.これらの機器のうちマルチ CT センサを使用し て 1998 年 4 月に大橋川から宍道湖への高塩分水塊 の流入を捉えるための予備的な観測についても上記 で報告した.中海から大橋川を経て宍道湖にはとき に高塩分水塊が流入することが知られていて,それ が貧酸素化した水塊である場合には環境に悪影響を 及ぼすことが指摘されており,本観測法によって高 塩分水塊の動きを時間的・空間的に捉えることがで きることが明らかになったことから,この問題で貢 献できるとの見通しを得ることがきた.そのために,

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

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 地質調査所海洋地質部 Marine Geology Department, Geological Survey of Japan

⁴ 千本電機(株) Senbon Denki Co., Ltd.

⁵ クローバテック(株) Clovertech Inc.

⁶(株ワイ・オー・システム Y.O.System Inc.

⁷ (株)鶴見精機 The Tsurumi–Seiki Co., Ltd.



図1 大橋川における高塩分水塊の動態観測地域 **Fig.1** Observation area for the behavior of high-saline water at R. Oohashigawa

1999年9月末から約1ヶ月間の予定で大橋川に各 種の機器を設置して観測を行うことにした。その後 も大橋川においては 1999年 12月および 2000年9 月にも建設省(現国土交通省)出雲工事事務所の協 力を得て観測を行っているが、ここでは上記の観測 結果についてのみ報告する.この調査では株式会社 シマダ技術コンサルタントには大橋川畔の事務所を 観測の基地として提供していただき、かつデータ収 録機器の管理に協力をいただいた.島根県内水面水 産試験場には大橋川の水質情報の提供を受けるとと もに本論文中にデータを利用させていただいた.建 設省(現国土交通省)出雲工事事務所からは調査に ついての便宜をはかっていただくとともに中海~宍 道湖の水質および気象データの提供を受けた. 宍道 湖漁業組合には調査に御協力をいただいた. 島根大 学汽水域研究センターの各位には御支援をいただい た.これらの機関および各位に御礼申し上げます.

なお、本号には著者らによってこれらの一連の機 器開発についてテクノオーシャン 2000 でなされた ポスター展示が資料として掲載されている(徳岡ほ か,2001).本報告の一部の図がカラーで示されて いるので、観測機器などについての説明とともに参 照していただきたい.

2. 観測場所と観測内容

1998 年 4 月の観測(徳岡ほか, 1999)と同じく, 大橋川のほぼ中央部の矢田の渡しの西側右岸に観測 基地を置き,ここから各観測機器のセンサ部をケー ブルによって川床に下流側に向かって図1のように 設置した.使用した機器と設置状況,観測期間は以 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,千 本電機㈱SC-2型)

3 地点 (ON 1, ON 2, ON 3) で行い, 測定時間間 隔は 2 分である.

	(設置位置)	(水深)	(データ収録期間, (月.日.時
· ON 1	2.18 km	— m	データ不調
· ON 2	2.44 km	5.3 m	10.01.17~10.10.16,
			10.15.14~10.24.02,
			$10.25.17\!\sim\!11.02.08$
			計 25 日
· ON 3	2.60 km	5.5 m	Ť

(設置位置は大橋川における距離表示で,松江馬 潟港からの距離.以下同じ)

(2)塩水楔音響動態観測システム(オフライン式,クローバテック(株)CL-3型)

3 地点 (OFF 1, OFF 2, OFF 3) で行い, 測定時間 間隔は 3 分である.水温についても同時に測定して いる.なお OFF 1 では親器を松江大橋の橋桁に, OFF 2 と 3 では大橋川左岸の陸上に設置してデータの収 録を行った.

- タ収録期間, (設置位置)(水深) 月.日.時 8.1 km 7.0 m 10.01.17~11.02.10, • OFF 1 (松江大橋直下) 計 32 日 • OFF 2–0 1.53 km 6.2 m Î (塩楯島付近) • OFF 2–2 1.58 km 7.1 m 1 (3) マルチ CT センサー((株)鶴見精機製) 5 地点 (CT 1~CT 5) で行い, 測定時間間隔は5 分である. (データ収録期間, 月.日.時 (設置位置) (水深) 2.55 km 5.7 m センサ不調で測定不能 \cdot CT 1 \cdot CT 2 2.46 km 5.2 m $09.30.15 \sim$.21.06, 10.21.18~10.24.00, 10.25.17~10.26.11,

10.25.17~10.26.11 10.28.11~11.02.08 計 29 日

• CT 3	2.37 km	6.4 m	1
• CT 4	2.28 km	5.4 m	1
• CT 5	2.22 km	5.9 m	1

(4) 光ファイバ温度分布計測システム (DTS-80 型, (㈱ワイ・オー・システム)

全長 1000 m の光ファイバを川床に敷設して行い, 測定時間間隔は5分である.

(設置位置)	(データ収録期間,) (月.日.時)
$1.55 \text{ km} \sim 2.6 \text{ km}$	09.30.16~11.02.10
	計 33 日

(5)メモリ電磁流向流速計(アレック電子製 ACM 16 M型)

1 地点に設置して行い,測定時間間隔は 20 分で ある.

	(設置位置)	(水深)	(データ収録期間,) (月.日.時)
R 1	2.6 km	5.9 m	09.30.16~11.02.10
			計 33 日

(6) 川床形態調査

1.35 km~2.6 km 間について 50 m 間隔で横断測量 を1999 年9 月27 日に行い,川床地形断面を調査した. 機器の設置は 9 月 30 日~10 月 1 日に行い, 11 月 2日に撤去した. なお機器の設置はダイバーにより 行い,撤去時にもダイバーによって状況の確認を 行っている. これらの観測の他に,1999年9月11 日と10月22日に塩水楔音響プロファイリングシス テム(航走式:SC-3型)により,中浦水門から湖 心の建設省中海観測所を経由し,大橋川から宍道湖 嫁が島付近までの音響探査を行い,数地点を選定し て水質調査(YSI 600 XL により水温,塩分,溶存酸 素,電気伝導度,PH)を行った.

3. 観測結果

3-1. 塩水楔音響プロファイリングシステム (航走 式:SC-3型)による動態観測

中海から宍道湖にかけての水塊構造を把握するた めに、1999年9月11日と10月22日の2回、によ り観測を行った(船は島根大学汽水域研究センター のしじみちゃん号を使用). SC-3 は航走しながら 200 kHz の超音波を水面から湖底に向かって発信 し, 塩分躍層で生じる反射波を受信し, 塩分躍層の 分布,形状を記録断面として捉えることができる. 反射信号はデジタル化され、データ収録器に記録さ れる.10月22日の記録をまとめて図2に示す.中 浦水門から航路標識塔を経て湖心の建設省中海観測 所, さらに大橋川の航路標識を目標に直線的に走行 し、そこからは航路に沿い、大橋川ではほぼ中央部 を走るようにした.船速は約5ノットを保つように し、位置は GPS 測位によって 5 分ごとに記録して いる.水質の測定は中海の3点についてはいったん 停船して行い、それら以外の点については音探終了 後に引き返して測定を行った.各地点の水質データ をまとめて表1に、温度と塩分を図3に示す。また 図2のなかには各地点の温度・塩分の垂直分布を示 している.

湖底地形をみると、中浦水門の南側には干拓工事 に伴う深さ10m以深の凹みがあるが、それ以外で は水深8mから徐々に浅くなっていくスムースな 地形をなしている.松江馬潟港沖の中海から大橋川 では航路にそって浚渫が行われていて水深5~6m の凹凸のある地形をしている.大橋川中にある塩楯 島のところには水深4mの高まりと7mを越える 深みがあり、松江大橋には9mの深みがある.ま た、宍道湖大橋の西の航路の深みの先には水深2m の高まりがあり、それを越えるとスムースな宍道湖 の湖底へと移り変わる.塩楯島と宍道湖大橋より西 の高まりは自然地形で、後述するように中・高塩分



図 2 音響プロファイリング装置(航走式) SC-3 による中浦水門-中海湖心-大橋川-宍道湖大橋の観測記録 (1999 年 10 月 22 日)

Fig.2 A record of spatial distribution of halocline between Lake Nakaumi and Lake Shinji via R. Oohashi by acoustic reflection profiling system (Model SC–3, Oct. 22, 1999)

表 1 中海~大橋川の水質の垂直分布 (1999年10月22日)

st.1	中浦水門			
Depth(m)	Temp(°C)	Sal(PSU)	DO(%)	DO(mg/l)
0	18.77	18.97	111	
0.5	18.78	18.97	109.4	0
2	18.85	19.09	109	9 8 8 8
3	21.55	24.56	74.5	5.76
4	23.32	28.99	26.1	1.88
5	23.08	29.69	37.8	2.77
6	22.94	30.21	43.2	3.56
7	22.64	31.21	60.7	4.41
9	22.04	31.8	67.9	4.03
10	22.64	31.88	67.6	4.86
L. 1 5	市海ガロ住宅		h	
Dopth(m)			DO(%)	DO(ma/l)
	18.69	18 27	116.9	0 86
2	19.52	20.13	119.2	9.22
3	21.78	21.79	104.3	8.24
4	22.62	27.28	41.4	2.93
5	23.69	29.75	21.7	1.55
6	23.26	31.43	38.3	2.73
7	23.03	31.43	50.2	3.15
st.2	中海湖心観》	則所		
Depth(m)	Temp(°C)	Sal(PSU)	DO(%)	DO(mg/l)
0	19.09	18.15	116.6	9.75
1	19.26	18.67	119.6	9.88
2	19.31	18.91	119	9.67
3	21.76	23.19	73.2	5.56
4	23.72	28.27	33.2	52.39
5	23.79	29.04	17.1	1.00
6.8	23.35	31.38	14.1	1
st.3	松江馬潟港分	もの中海		
	T (00)	O KOOLIN	DOW	
Depth(m)	Temp(°C)	Sal(PSU)	DO(%)	DO(mg/l)
Depth(m) 0	Temp(°C) 20.68	Sal(PSU) 16.26	DO(%) 97.3	DO(mg/l) 7.92
Depth(m) 0 1 2	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89	DO(%) 97.3 89.5 82.6	DO(mg/l) 7.92
Depth(m) 0 1 2 3	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76
Depth(m) 0 1 2 3 4	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98
Depth(m) 0 1 2 3 4 4	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29
Depth(m) 0 1 2 3 4 4.4	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 5t.4	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩糖島	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PS1)	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29
Depth(m) 0 1 2 3 4 4.4 st.4 Depth(m) 0	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 DO(%) 102.6	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98
Depth(m) 0 1 2 3 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57
Depth(m) 0 1 2 3 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8 95	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 St.4 Depth(m) 0 1 2 3 3	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 100(%) 102.6 98.8 95 81.4	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 100(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 St.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 (st.5)	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 くにびき大橋	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 5 Depth(m)	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 くにびき大橋 Temp(°C)	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU)	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 DO(mg/l)
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 st.5 Depth(m) 0 0	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 くにびき大橋 Temp(°C) 19.45	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 DO(mg/l) 9.59
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 st.5 Depth(m) 0 1 2 3 4 1 2 1 1 2 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 くにびき大橋 Temp(°C) 19.45 19.38	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 8.08 6.45 5.77 DO(mg/l) 9.59 9.27
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 st.5 Depth(m) 0 1 2 3 4 1 2 3 4 1 2 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 くにびき大橋 Temp(°C) 19.45 19.38 19.29	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 8.08 6.45 5.77 9.05 9.27 9.05
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 5 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 1 2 1 2 3 4 5 1 1 2 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 <u>くにびき大橋</u> Temp(°C) 19.45 19.38 19.29 19.29 19.22 20.24	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 7	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5 00(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 6 20.5	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 8.08 6.45 5.77 9.05 9.27 9.05 8.93
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 5 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 1 2 3 4 5 1 1 2 3 4 4 4 4 4 5 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 <u>〈Iこびき大橋</u> Temp(°C) 19.45 19.38 19.29 19.32 20.63 20.76	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.7	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 9.05 9.27 9.05 8.93 4.98 4.93
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 5 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 1 2 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4	<u>Temp(°C)</u> 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> <u>Temp(°C)</u> 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 <u>くにびき大橋</u> <u>Temp(°C)</u> 19.45 19.38 19.29 19.32 20.63 20.76	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 9.05 8.93 9.27 9.05 8.93 4.98 4.83
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 5 0 1 2 3 4 5 5 0 1 2 3 4 5 5 0 1 2 3 4 5 5 0 1 1 2 3 4 5 1 1 2 1 1 2 3 4 4 5 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 <u>塩楯島</u> Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 <u>くにびき大橋</u> Temp(°C) 19.45 19.38 19.29 19.32 20.63 20.76 松江大橋	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 00(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 8.08 6.45 5.77 9.05 8.93 4.98 4.83
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 st.5 Depth(m) 0 1 2 3 4 st.4 St.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 St.4 St.6 Depth(m)	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 <1こびき大橋	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) Sal(PSU)	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1 DO(%)	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 8.08 6.45 5.77 9.05 8.93 4.83 4.83 4.83
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 st.5 Depth(m) 0 1 2 3 4 st.5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 5 0 0 1 1 2 3 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 <1:びき大橋	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) Sal(PSU) 4.37	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1 DO(%) 109.1	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 9.05 8.93 4.93 4.83 4.83 DO(mg/l) 9.85
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 5 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.73 20.24 20.24 20.65 19.38 19.29 19.38 19.29 19.38 19.29 19.32 20.63 20.76 松江大橋 Temp(°C) 19.36 19.36 19.36	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) 4.37 4.44 Sal(PSU)	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 102.6 98.8 95 81.4 72.5 81.4 72.5 00(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1 DO(%) 109.1 105.4	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 9.05 8.93 4.95 9.27 9.05 8.93 4.98 4.83 00(mg/l) 9.85 9.46 6.45
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 5 0 0 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 3 1 1 1 2 1 1 1 2 3 1 1 2 1 1 1 2 3 1 1 2 1 1 1 2 3 1 1 2 1 1 1 2 1 1 2 3 1 1 2 1 1 2 3 1 1 2 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 2 3 1 1 2 3 1 2 2 3 1 2 1 1 2 3 1 2 2 3 1 1 2 2 3 1 1 2 2 3 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.73 20.24 20.65 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 19.38 19.29 19.38 19.29 19.32 20.63 20.76 松江大橋 Temp(°C) 19.36 19.35 19.36 19.35	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) 4.37 4.44 4.45 5.44 4.44 4.45 5.44	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1 DO(%) 109.1 105.4 103.1 105.4	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 9.05 8.93 4.98 4.83 4.98 4.83 DO(mg/l) 9.85 9.46 9.19
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 4 5 1 2 3 4 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 Depth(m) 0 0 1 2 3 4 4 5 5 5 2 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.73 20.24 20.65 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 19.38 19.29 19.32 20.63 20.76 松江大橋 Temp(°C) 19.36 19.35 19.36 19.36 19.36 19.36 19.36 19.36 19.36 19.36 19.36 19.36	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) 4.37 4.44 4.45 4.45 4.45 4.45	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1 DO(%) 109.1 105.4 109.1 105.4 103.1 5 98.7	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 9.05 8.93 4.98 4.83 4.98 4.83 DO(mg/l) 9.85 9.46 9.19 9.08 8.82
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 5 5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.74 19.74 19.73 20.24 20.64 くにびき大橋 Temp(°C) 19.45 19.38 19.29 19.32 20.63 20.76 松江大橋 Temp(°C) 19.36 19.36 19.35 19.36 19.35 19.35 19.35 19.35	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) 4.37 4.44 4.45 4.45 4.45 4.47 4.47 4.58	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1 DO(%) 109.1 105.4 109.1 105.4 109.5 109.7 99.7 98.7 99.7 98.7	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.08 6.45 5.77 9.05 8.93 4.98 4.83 4.98 4.83 0D(mg/l) 9.85 9.46 9.19 9.08 8.92 8.76
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 5 5 6 0 0 1 2 3 4 5 6 0 0 1 2 3 4 5 6 0 0 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 2 3 1 1 2 3 1 2 3 1 1 2 3 3 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 塩楯島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.74 19.74 20.24 20.64 くにびき大橋 Temp(°C) 19.45 19.38 19.29 19.32 20.63 20.76 松江大橋 Temp(°C) 19.35 19.36 19.35 19.35 19.35 19.35 19.35	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) 4.37 4.44 4.45 4.53 4.53	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 103.4 100.9 99.6 61.7 60.1 DO(%) 109.1 105.4 109.1 105.4 109.5 109.7 99.7 98.8 96.3	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.57 8.57 8.57 9.55 9.59 9.27 9.05 8.93 4.98 4.83 4.98 4.83 DO(mg/l) 9.85 9.46 9.19 9.08 5.946 9.19 9.08 5.92 8.92 8.92 8.92 8.92 8.92 8.92 8.92 8
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4.4 st.4 Depth(m) 0 1 2 3 4 st.5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 st.5 Depth(m) 0 1 2 3 4 4 5 5 0 0 1 2 3 4 4 5 5 0 0 1 2 3 4 5 5 0 0 0 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 1 1 2 3 1 1 2 1 1 2 3 1 1 2 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 2 1 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 1 2 3 1 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 1 2 3 3 4 4 5 5 0 0 1 1 2 3 3 4 4 5 5 0 0 1 1 2 3 3 4 4 5 5 0 0 1 1 2 3 3 4 5 5 5 0 0 1 1 2 3 3 4 5 5 5 6 0 0 1 1 2 3 3 4 4 5 5 6 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 生析唱島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 〈Iこびき大橋 Temp(°C) 19.45 19.32 20.63 20.76 松江大橋 Temp(°C) 19.36 19.36 19.35	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) 4.37 4.44 4.45 4.53 4.53 4.55	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 17.7 00(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5 00(%) 107.1 107.1 107.1 107.4 100.9 99.6 61.7 60.1 00(%) 109.1 105.4 109.1 105.4 103.1 101.5 99.7 98.8 96.3 64.9	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 8.57 8.57 9.55 9.59 9.59 9.27 9.05 8.93 4.98 4.83 00(mg/l) 9.85 9.46 9.19 9.08 9.08 5.92 8.92 8.92 8.92 8.92 8.92 8.92 8.92 8
Depth(m) 0 1 2 3 4 4 4 4 4 5 5 0 1 2 3 4 5 5 0 1 2 3 4 5 5 0 1 2 3 4 5 5 0 1 2 3 4 5 5 0 1 1 2 3 1 2 3 1 1 2 3 1 2 3 1 1 1 1 2 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Temp(°C) 20.68 20.96 21.49 22.11 22.66 23.31 生価格島 Temp(°C) 19.64 19.74 19.93 20.24 20.64 〈Iこびき大橋 Temp(°C) 19.45 19.38 19.32 20.63 20.76 松江大橋 Temp(°C) 19.36 19.36 19.35 19.35 19.35 19.35 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33 19.33	Sal(PSU) 16.26 20.15 21.89 23.27 27.31 27.96 Sal(PSU) 7.74 8.32 9.22 17.12 18.49 Sal(PSU) 4.58 4.61 4.66 4.7 17.7 17.84 Sal(PSU) 4.37 4.44 4.45 4.45 4.53 4.55 4.57 4.57	DO(%) 97.3 89.5 82.6 61.2 25.7 17.7 DO(%) 102.6 98.8 95 81.4 72.5 DO(%) 107.1 107.1 107.1 107.4 100.9 99.6 61.7 60.1 DO(%) 109.1 105.4 103.1 101.5 99.7 99.8 896.3 64.9 93.6	DO(mg/l) 7.92 6.41 4.76 1.98 1.29 DO(mg/l) 8.98 8.57 5.77 DO(mg/l) 9.59 9.59 9.27 9.05 8.93 4.98 4.83 4.83 4.83 4.83 4.83 4.83 4.83 4.8



図 3 中海~宍道湖の各地点における温度・塩分の 垂直分布 (1999 年 10 月 22 日)

Fig.3 Vertical profiles of temperature and salinity at various points in Lakes Nakaumi and Shinji

水塊の動きはこれらによって規制されている. 中海 では水深3のあたりに塩分躍層が存在することは良 く知られていることで,図2でも音響的によく表現 されている.水質データを合わせて全体としてみる と、中海では 30 PSU を越える高塩分水塊の上に 20 PSU 前後の中塩分水塊が重なっていると云える.た だし、シャープな1つの境界をしているわけではな く,いくつかの副次的な成層も認められる.大橋川 の入口に向かって中・高塩分層の境界面が浅くなっ て行く理由については明らかでない. 大橋川では宍 道湖側からの流れと地形の凹凸の影響によって音響 的な乱れが認められ、中・高塩分層の境界が明瞭で はないが、中海下層の高塩分水塊は馬潟港の西の辺 りまで達していて、この先では上層の中塩分水塊と 混合しているものと判断される. 中塩分水塊はこれ より西では宍道湖側からの低塩分水塊の流れによっ て連行による削り取りの乱れが見られるが、矢田の 渡しを越えて、朝酌川の流れの影響がなくなる辺り から上流では音響境界が次第に明瞭になり、新大橋 の下にまで中塩分水塊が達しているのがわかる. 言 い換えると、中海側から侵入した中塩分水塊の塩水 楔の先端がこの位置にまで達している. 上位の低塩 分水塊は5 PSU 程度で、東に行くに従って下位の 中塩分水塊と混合して塩楯島のあたりでは8~9 PSUとなっている.

3-2. 川床設置式の各機器による動態連続観測

各機器を図1に示すように設置して連続観測を 行った.

(1)塩水楔音響動態観測システム(オンライン式, SC -2 型)

矢田の渡し付近に子機3台をそれぞれ400,200, 200 mのケーブルで設置して観測を行った.うち1 台は不調で,2台(ON 2, ON 3)で10月1日から11 月2日まで,それぞれ25日間の連続データが得ら れた.一部に欠測があるのはデータ送信時のトラブ ルにより,一時的に取り込みが中断されたためであ る.ON 2の結果をまとめて図4に示す.縦軸は水 深,横軸は時間である.中海側からの塩水楔(今回 の観測では3-1で述べた中塩分水塊)の侵入は音響 境界面の川床からの立ち上がりで示され,またその 後退は音響境界面の降下から消失で示される.境界 面が水面にまで達している場合は中塩分水塊の上面 がほぽ水面にまで達していることを,それが途中に ある場合にはその上位に低塩分水塊あることを示し ている.一般的にいうと,塩水楔の侵入のほうが後 退よりもよりシャープな境界面が観察される場合が 多い.これらの観測記録から,ほぼ1日1回の塩水 楔の侵入・後退があったことがわかる.ON2から 水平距離にして約160m離れて設置したON3で も,ほぼ同様の記録が得られている.両者の音響境 界面の動きの時間差から塩水楔の移動速度を算出す ることが可能である.

(2)塩水楔音響動態観測システム(オフライン式, CL -3 型)

松江大橋直下の1および地点塩楯島付近の2地点 (図1)に設置をして観測を行い,それぞれ32日間 の連続データが得られた.音響境界面の記録が上記 のオンラインのそれと比較するとやや不鮮明である が,バッテリー内蔵方式であることから,どこにで も設置できる利点がある.また,水温についても同 時に観測できるようにしている.ここでは記録を示 していないが,今後,水塊の広域的な動態観測には 有効である.

(3) マルチ CT センサ

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.設置後に CT 1 は不調であるこ とがわかり, CT 2~5 でそれぞれ計 29 日間の温度 と塩分についての連続データが得られた.なお,途 中でデータ収録の際のトラブルで一部が欠測となっ ている.全期間の CT 2~CT 4 の温度と塩分のデー タを図 5 と図 6 に示す.

CT 2~CT 4 は直線距離にして 240 m であり,川 床に設置していて水深の違いも小さいので,温度・ 塩分ともほとんど同じ変化をしているこ1とがわか る.温度と塩分を比較すると同じパターンで時間的 な変化をしていることから,水塊ごとに温度・塩分 が異なっていることがわかる.塩分の時系列変化は 温度のそれと比較すると顕著であり,5 PSU 程度と 17~24 PSU の間でスイッチしている.前者は宍道 湖側から大橋川を降る低塩分水塊の,後者は中海側 から溯上する中塩分水塊の温度であることが明らか である.上記の(1)の音響による低・中高塩分水塊 の侵入・後退(図 4)と比較するとその変化のパター ンは時間的によく一致していることから,両者は同 じ現象を捉えていることが明らかである.

(4) 光ファイバ温度分布計測システム

全長 1.0 km のファイバを図1のように設置し, 計





Fig.4 A record of the behavior of high–saline water atYatanowatasi point by SC–3 (Sept.30~Nov.2, 1999)



図 5 マルチ CT センサによる大橋川川床における温度の時系列変化 (1999 年 9 月 30 日~11 月 2 日) **Fig.5** Time series data of temperature at the bottom of R. Oohasi by Multi–CT sensor (Sept.30~Nov.2, 1999)



図 6 マルチ CT センサによる大橋川川床における塩分の時系列変化 (1999 年 9 月 30 日~11 月 2 日) Fig.6 Time series data of salinity at the bottom of R. Oohasi by Multi–CT sensor (Sept.30~Nov.2, 1999)

33 日間の連続した温度データが得られた. 川床で のファイバの延長距離は 1050 m で,ファイバ1 m 間隔で5分ごとに温度データが収録された. これら を 0.5℃ごとに区切って画像処理した結果を図7に 示す(カラー図版は徳岡ほか,2001を参照).上記 (3)で温度変化と塩分変化は対応していることから, この図にみられる温度変化のパターンは(1)及び(3) で示されたと同じ現象を捉えていることがわかる.

(5) メモリ電磁流向流速計

図1に示す地点で計33日間の流速,流向,温度, 水深の連続記録が得られた.結果をまとめて図8に 示す.



図7 光ファイバによる大橋川川床における温度の時空変化(1999年9月30日~11月2日) **Fig.7** Time series data of temperature at the bottom of R. Oohasi by Optical fiber sensor (Sept.30~Nov.2, 1999)

島根県内水面水産試験場による 松江大橋での観測との比較

松江大橋下に各種の観測機器を設置しての連続観 測(水面から1,3,6mごとの温度・塩分・濁度・ 溶存酸素および流向・流速など)が行われ,その概 要は水質情報として定時ごとに速報されている.こ の速報は著者らの観測の実施においても貴重な参考 資料となっている.水産試験場による原データから 塩分について,上記と同様に規格化して図9に示す. 図6の大橋川中央部のデータと比較すると,ここで は中塩分層に相当する水塊は塩分でみると15~22 PSUであり,宍道湖から流入する低塩分水塊は約4 PSUである.両図を比較することによって,大橋 川中央部まで到達する中塩分水塊のうちのいくつか が松江大橋にまで到達することがわかる.

5.1999 年 10 月 22 日の大橋川における 水塊の動き

10月22日には塩水楔音響プロファイリングシス テムによって中海から大橋川を経て宍道湖に至る水 塊構造が明らかにされた(図2).中海から大橋川へ 流入した中塩分水塊は矢田の渡しを越えたあたりか ら次第に塩水楔の形が明瞭となり、22日の11時10 分には新大橋を越えたあたりにその先端が位置して いる (図 10). この日1日間の大橋川の中央部の観 測機器設置場所付近での水塊のうごきについて各観 測機器のデータを図 11~15 に示す.音響探査装置 SC-2型では ON 2 および ON 3 でそれぞれ 2 回の中 塩分水塊の侵入・後退があったことがわかる(図 11). 図2の塩水楔の侵入は図11では最初の侵入が 01 時過ぎにここを通過して 11 時に新大橋まで進ん だことを示している.流向流速計(図12)では上流 に向かう流れが支配的で、16時以降には下流に向 かう強い流れに変化しているが、図11の音響パター ンで見られる中塩分水塊の動きとよく対応してい



図8 大橋川川床における観測期間中の流速・流向・ 水温・水深・鉛直流速分布(1999.9.30~11.02, アレッ ク電子製 ACM 16 M による)



県内水面水試データ:松江大橋,1999.09.30-11.02

図 9 大橋川(松江大橋)における塩分の鉛直変化(1999年9月30日~11月2日,島根県 内水面水産試験場のデータによる)

Fig.9 Vertical profile of salinity at Matsue Oohasi (Sept.30~Nov.2, 1999, Data by Research Center of Brachish Lake, himane Prefecuture)



図 10 SC-3 による塩楯島~松江大橋間の水塊分布 (1999 年 10 月 22 日, 10.30~11.05)

Fig.10 A record of spatial distribution of halocline between Shiotateshima and Matue–Ohasi by Model SC–3

る. CT センサでは温度(図 13)と塩分(図 14)が よく対応していて、2回の水塊の動きがあったこと とよく対応している. CT 2 から CT 5 までは 240 m あるので、2度の塩水塊の侵入速度は 0.2 m/s (0.72 km/h)であったことがわかる. 光ファイバでもこの 日に2度の水温の大きな変化があったことがわかる (図 15).0時過ぎに大橋川をはい上がった水塊が いったんは退き、再度 12時ころからはい上がって いったことがしめされている.光ファイバ 1000 m 間での温度の時間変化から,最初のはいあがりの速 度は 0.35 m/s(1.26 km/h),2度目は 0.27 m/s(1.05 km /h) であったと計算される.以上に示したように, このような観測システムによって塩水塊の移動を可 視化した上で,さらに具体的に捉えることができた.

つぎに島根県内水面水産試験場による松江大橋下 での連続観測データから温度・塩分・流速について 図 16 に示す.ここでも2回の水塊の動きが観測さ れている.上記の観測地域との間の距離は約5 km



図 11 1999 年 10 月 22 日の音響探査装置 SC-2 型 (オ ンライン式) による高塩分水塊の流出入記録 Fig.11 A one day (Oct. 22) record of the behavior of high saline water by SC-2



図12 1999年10月22日の流向流速計による流速記録 Fig.12 A one day (Oct. 22) record of velocity of the behavior of high saline water

であることから、両者を比較することによって水塊 の移動速度などをさらに把握することができる.

6.まとめ

1) 中海から大橋川を経て宍道湖への塩水塊の動き を著者らがこれまでに開発してきた各種の探査シス テムをもちいて捉えることについては 1999 年 4 月 の予備的な観測をもとに可能であるとの見通しが得 られたことから, 1999 年 9 月末から約 1 ヶ月間の 観測を行った.その結果,水塊の動きを音響を使っ て可視化して捉えるとともに,温度・塩分および流 向流速を連続的に測ることによって水塊の移動をリ アルタイムで具体的に捉えることができた.大橋川 中央部では水塊の移動速度は時速 1~2 km 程度の ゆっくりとしたものである.

2) 音響プロファイリングシステム (航走式, SC-3) をもちいて中海から大橋川を経て宍道湖に至る水塊 構造を明らかにすることができた.図17に示すよ うに中海から宍道湖にかけては塩分のことなる3つ の水塊 (高・中・低塩分水塊) があり,それぞれ音



図 13 1999 年 10 月 22 日のマルチ CT センサによる 温度記録

Fig.13 A one day (Oct. 22) record of the behavior of high saline water by Multi CT sensor



図 14 1999 年 10 月 22 日のマルチ CT センサによる 塩分記録

Fig.14 A one day (Oct. 22) record of salinity of the behavior of high saline water by Multi CT sensor SC-2



図 15 1999 年 10 月 22 日の光ファイバによる温度記録 **Fig.15** A one day (Oct. 22) record of temperature of the behavior of high saline water by Optical fibfre

響的に明らかな境界をもって接している.これらの 水塊が主に潮汐・斐伊川からの流量・風によって移 動する.さらに境水道からときに中海湖心近くまで 流入してくる海水と斐伊川から宍道湖に流入する淡



図 16 1999 年 10 月 22 日の松江大橋における温度・塩 分・流速記録(島根県内水面水産試験場のデータによ る)

Fig.16 A one day (Oct. 22) record of temperature, salinity, velocity of the behavior of high saline water at Matsueoohasi (Data by Research Center of Brachish Lake, Shimane Prefecuture)

水を考慮すると、5つの塩分(および温度)の異な る水塊が存在することになる.

3) 川床に設置した各種の観測機器によって大橋川 を溯上する水塊のうごきは時速1kmを越える程度 までのゆっくりとしたものであることが明らかに なった.したがって貧酸素化した高塩分水塊が大橋 川を溯上して宍道湖に達するような場合になんらか の対策を効果的に講じることは可能であると云え る.

引用文献

- 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)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.
- 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.



Fig.17 A schematic modele of the movements of watermasses among Lake Nakaumi, Oohasigawa and Lake Shinji

LAGUNA (汽水域研究) 8, 91~94 頁 (2001 年 3 月) LAGUNA 8, p.91-94 (2001)

短報

ヤドカリによるキバウミニナの 空殻利用についての野外実験

田中秀典」

The field experiment of empty shell (*Terebralia palustris*) utilization by the hermit crab

Hidenori Tanaka¹

Abstract: In a mangrove tidal flat of Iriomote Island, Okinawa, an experiment on utilization of empty gastropod shells by hermit crabs was carried out. One hundred twenty–seven gastropod shells of *Terebralia palustris* were left at the mangrove tidal flat in the Funaura Bay of the Iriomote Island. After 48 hours, these shells were re–collected and shell size and distance from an experimental point were measured. Thirty–five shells were utilized by hermit crabs. Sixty shells were not used and left as before. Most of the shells used by the hermit crabs were collected at the distance of less than 10 m from the experimental point. The most moved shells by the hermit crabs were collected near the experimental point. The small–sized shells used by hermit crabs were collected near the experimental point. But, the shells collected at a distant from the experimental point were only large ones. In the mangrove swamp, dead gastropod shells were used by the hermit crabs immediately after death and they moved the shells to a long distance on a short time.

Key words: Taphonomy, hermit crab, mangrove swamp, Terebralia palustris, Iriomote

はじめに

生物が化石となるためには,生物の死後,TAZ (taphonomically active zone: Davies *et al.*, 1989 a, b)を 越えて,深く埋没する必要がある.巻貝の場合,堆 積物の表面に生息している種類が多く,巻貝が死後, TAZを越えて埋没するまでに様々な影響を受ける. その中の一つに,ヤドカリによる空殻の利用がある. ヤドカリによる巻貝への影響を扱った研究は,Frey (1987), Walker (1989), Shimoyama (1985) などが ある.しかし,マングローブ干潟での観察例はほと んどない.また,日本列島にはマングローブ堆積物 の地層が広く分布しており,巻貝化石が多産する. そのため化石への応用も比較的簡単に行えると思わ れる.そこで,日本にあるマングローブ干潟におい て,ヤドカリがどれだけマングローブ干潟に生息す る巻貝遺骸群に影響与えているのかを検討する実験 をおこなった.

実験場所と方法

野外実験は,1998年5月に沖縄県の八重山諸島 にある西表島でおこなった(図1).この島には,日 本のマングローブ林の約80%が分布している(佐

¹ 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 E-mail:BYA 06151@nifty.com



図1 調査地. Fig.1 Location Map.

藤, 1992). 島の海岸や大きな河川の河口にはマン グローブ林が見られ, 典型的な亜熱帯の海岸線を示 している.アプローチのしやすさ、ツメナガヨコバ サミ (Clibanarius longitarsus) の生息個体数, キバ ウミニナ (Terebralia palustris) の生息個体数などを 考慮に入れて, 西表島の北側にある船浦湾を実験場 所に選んだ. 湾の詳細な環境については、田中・前 田 (1999) と Tanaka (1999) において報告されてい るので、ここでは簡単に述べることにする.この湾 は,幅2km,奥行き1.5kmで,湾口が北に向かっ て大きく開いている.湾内の潮位差は2mほどで、 春の大潮時には湾の内部のほとんどが干出する. 湾 の環境は、後背地・マングローブ林・外干潟の3つ に大きく区分することができ, 今回実験の対象とし たツメナガヨコバサミは、外干潟とマングローブ林 のチャネルに分布している(田中・前田, 1999; Tanaka, 1999). このヤドカリは体長が5 cm ほどあ り、日本に生息しているヤドカリの中では大きな部 類にはいる.この湾では、このヤドカリはほとんど がキバウミニナの空殻を利用しており、まれにホカ ケソデガイ (Labiostrombus epidromis) の空殻を利用 している.ただし、後者の巻貝を利用しているもの は、船浦橋の外側でのみ観察され、橋より陸側では まったく見ることはない.そこで、キバウミニナの 空殻をマングローブ林の際の干潟に放置し、48時 間後に回収にいき、空殻がどれだけ残っているかを 観察した.同時に、ヤドカリによって利用され、放 置した地点から移動したものについては、干潟を広 範囲に探索して回収するとともに、放置した地点か らの距離も測定した.放置したキバウミニナの空殻 は、放置した地点のすぐそばのマングローブ林の 1 m²に生息していたキバウミニナ(127 個体)をす べてを採集し、殻サイズを計測した後、軟体部を取 り除いたものを使用した.また、回収する際にわか りやすいように赤色に着色した.

結果と考察

図2は、放置したキバウミニナの空殻の殻サイズ をしめしたものである。船浦湾のキバウミニナの生 態情報については、西平(1983)によって報告され ており、湾内の場所によって殻サイズに違いがある ことを示している。この原因として、幼貝と成貝と の間にわずかな生態学的要求の差異があり好む環境





が微妙に異なっている可能性を挙げている.今回実 験のために使用したキバウミニナの殻は,成貝と幼 貝の2つのサイズにピークを持つ2山型の殻サイズ 分布を示し,成貝と幼貝の両方が含まれいる.おそ らく,この巻貝の成貝と幼貝の分布域の中間にあた る環境から採集したためと思われる.そのため,空 殻として生産されるキバウミニナの殻の大部分のサ イズを網羅していると思われる.

放置してから48時間後に、これらの殻の回収を 試みた. その結果, 35 個体(28%)がヤドカリによっ て利用されていた.60個体(47%)は利用されずに 放置した場所に残っていた. また, 32 個体 (25%) の殻が回収できず、回収率は全体で約75%であっ た. ヤドカリによって利用されていた 35 個体のキ バウミニナの殻サイズ分布を図3に示している.こ のヒストグラムは、幼貝と成貝にピークをもつ2山 型を示している.これらのピークは、実験のために 放置したキバウミニナの空殻のピークとまったく同 じである(図 2). Walker (1989)は、ヤドカリによっ て引き起こされる影響を7つ挙げているが、その中 の1つに殻の選択的な利用によるサイズ異常 (Size -frequency anomalies)がある.また,下山(1979, 1980) や Shimoyama (1985) もヤドカリによる選択的な殻 利用による影響について指摘している。しかし、今 回の実験結果からは、ヤドカリによる殻サイズ選択 による顕著な影響は認められなかった.この湾には, 本土の潮間帯でよく見られるトゲツノヤドカリも生 息している. このヤドカリは, 本土ではウミニナや イボウミニナのような小型の巻貝の殻を利用してい る。キバウミニナの幼貝の殻サイズは、これらの巻 貝のサイズと似っている. トゲツノヤドカリがこれ らの小さいサイズの殻を利用したため、ヤドカリが 利用している殻サイズに見かけ上偏りがないと思わ



図3 ヤドカリが利用したキバウミニナの殻サイズ分布. **Fig.3** Size-frequency distribution of gastropod shells used by the hermit crab.



図4 移動距離と放り入ささり関係. **Fig.4** Relation between moving distance and shell size.

れる.

次に移動距離について述べる.この湾におけるヤ ドカリの移動距離については、田中・前田(1999) が報告している.しかし、この研究では貝殻の回収 率(全て 40% 以下)が悪く、 殻サイズが 4 cm 以下 の個体について検討していない. そこで, 今回の実 験をもとに再検討してみる.図4は、ヤドカリが利 用していたキバウミニナの殻を回収した場所から, 貝殻を放置した場所までの直線距離を示したもので ある. また、 殻サイズが 5 cm 以下のものと 5 cm 以 上のものとの区分をも示している.5 cm で区分し たのは、放置した空殻の殻サイズの幼貝と成貝との 境界であるためである (図2). ほとんどのヤドカリ が空殻を放置した場所から10m以内で回収された (69%). そして、これらヤドカリが利用している殻 の大部分は、 殻サイズが 5 cm 以下の幼貝であった. これに対して、10m以上離れた個体は少なかった が,最大120m移動したものが見られた.これら の殻は、全て殻サイズが5cm以上の成貝を利用し

ていた.田中・前田(1999)では,48時間で最大 210m移動したものもあると報告している.これら のことから,大きい殻を利用しているヤドカリは, 短時間でかなりの距離を移動できることがわかっ た.また,放置した場所からの直線距離を計測して いるため,実際の移動距離はもっと長いと思われる.

まとめ

今回の実験から,西表島船浦湾のキバウミニナの 殻は,死後すぐにヤドカリによって利用される可能 性が高いことがわかった.また,大きい殻を利用し ているヤドカリは,短時間で長距離を移動している ことも判明した.これは,キバウミニナの殻が,波 浪などの物理的な要因でなくとも,長距離運ばれる 可能性を示している.このことは古生物学的な観点 からも重要で,マングローブ林に生息した貝類の化 石がリーフ堆積物の中から発見される場合があり, これらの化石はヤドカリによる運搬の結果の可能性 もある.生息地から遠く離れた場所から産出する巻 貝化石を観察する場合は,ヤドカリによる影響も考 える必要があると思われる.

謝 辞

この実験をするにあたり,京都大学大学院理学研 究科の前田晴良助教授には,フィールドにおいてい ろいろとアドバイスをいただいた.京都大学の大学 院生の辻野匠,坂倉範彦,関口智宏(現:大阪大学) の方には,貝殻の計測や回収など実験や観察等にお いて色々サポートをしていただいた.民宿マリウド は宿泊に関してお世話になった.

引用文献

- Frey, R. W. (1987) Hermit crabs : Neglected factors in taphonomy and paleoecology. Palaios, **2**: 313-322.
- 西平守孝(1983) 西表島船浦のマングローブ湿地に
 おけるキバウミニナ *Terebralia palustris*(Linne)
 の分布と個体群構造および摂食について.西表島
 水域漁場開発計画調査結果報告書, 28-35.
- 佐藤一紘 (1992) マングローブ林.日本の海岸林-多面的な環境機能とその活用(村井宏・石川政幸・ 遠藤治郎・只木良也編).226-237.ソフトサイエン ス社.東京.
- 下山正一(1979) 内湾性ヤドカリによる巻貝死殻集 団の殻サイズ分布型の再構成.海洋科学,11:527 -535.
- 下山正一(1980)イボウミニナ死殻集団の殻サイズ 分形とその形成様式.地球科学,34:27-39.
- Shimoyama, S. (1985) Size-frequency distribution of living populations and dead shell assemblages in a marine intertidal sand snail, *Umbonium* (*Suchium*) *moniliferum* (LAMRCK), and their palaeoecological significance. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 49: 327-353.
- Tanaka, H. (1999) (MS) Taphonomy of Recent potamid gastropod : *Terebralia palustris* in the recent mangrove swamp in the Iriomote Island, southwest Japan. D.Sci. Thesis, Kyoto University.
- 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.
- Walker, S.E (1989) Hermit crabs as taphonomic agents. Palaios, **4**: 439-452.

短報

宍道湖・中海における水生絶滅危惧植物の分布

國井秀伸

Distribution of endangered aquatic macrophytes in Lakes Shinji and Nakaumi

Hidenobu Kunii¹

Abstract: This paper describes the results of observation on the distribution of endangered aquatic macrophytes in Lakes Shinji and Nakaumi, southwestern Honshu, Japan. Distribution of six submerged (*Potamogeton pectinatus* L., *P. panormitanus* Biv., *Ruppia maritima* L., *Zannichellia palustris* L., *Chara corallina* Willdenow var. *kyushuensis* Imahori and *Zostera japonica* Ashers et Graebn.) and one emergent macrophyte (*Carex rugulosa* Kükenth) are shown and their characteristic features are also shown.

Key words: aquatic macrophytes, distribution, endangered species, Lake Nakaumi, Lake Shinji

はじめに

「しまねレッドデータブック」植物編(島根県, 1997)には、水生植物としてアサザ、アンペライ、 オオクグ、オグラノフサモ、オニバス、ガガブタ、 カワツルモ、シナミズニラ、スジヌマハリイ、タコ ノアシ、デンジソウ、ナガエミクリ、ヒメミクリ、 ミクリ、ミズニラ、ミツガシワ、ヤマトミクリなど が保護上重要な植物として挙げられている. 杦村 (1991)は島根半島における水生植物相について報 告しているが、県内における水生植物の分布は十分 に把握されているとは言えず、その実態は明らかで ない.

日本ではリュウノヒゲモ,ヒロハノエビモ,カワ ツルモ,ネジリカワツルモ,ヤハズカワツルモ,コ アマモ及びイトクズモの7種が汽水性の沈水植物と みなされるが(國井,1995),環境庁のレッドデー タブック(環境庁編,2000)には,特に汽水域を主 な生育場所とする種に関して、イトクズモ、カワツ ルモ、ヤハズカワツルモ、ネジリカワツルモ、リュ ウノヒゲモ、オオクグ、アッケシソウなどの名前が 載せられ、宍道湖と中海を結ぶ大橋川によく見られ るコアマモも情報不足の種とされている.前述の「し まねレッドデータブック」植物編に載せられている 水生植物にも、汽水域を主な生育場所とする植物が 2種載せられている(オオクグとカワツルモ).これ ら水生植物、特に汽水域の水生植物の実態に関して は、しかしながら、全国的にも地域的にもその詳し い分布状況が把握されていないと考えられる.

そこで今回, 宍道湖・中海周辺の絶滅危惧植物の 実態調査として, 汽水域の水生植物について, 各植 物の分布の現況を記録することとし, いくつかの植 物に関しては生活史関連の調査も進め, 今後の保全 策の基礎資料を得ることとした. 生活史関連の報告 は別の機会に譲り, ここでは分布に関する報告を行 う.

¹ 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 E-mail:kunii@soc.shimane-u.ac.jp

方 法

既存資料により,まず各植物の大まかな分布について知り,その後,水草の生育に適した夏季を中心に(1999年及び2000年),これまでに宍道湖・中海 周辺での生育が確認されているイトクズモ,コアマ モ,カワツルモ,リュウノヒゲモおよび湿生植物で あるオオクグの生育を,聞き取りおよび湖岸と船上 から観察し,その分布を地図上にプロットした.今 回紹介する植物のさく葉標本は,汽水域研究セン ターに保管してある.

結 果

これまでに確かめられたそれぞれの植物の分布に ついて以下に記す(図1).

イトクズモ(ミカヅキイトモ)(Zannichellia palustris L.)(写真1a, b):絶滅危惧II類. 宍道湖と日本海 を結ぶ佐陀川におけるその自生を,1994年7月に 國井(1994)が記録するまでは,島根県内では長い 間記録の無かった一年生の水生植物である.その後, 1995年5月には鳥取県米子市の米子水鳥公園内の つばさ池で,リュウノヒゲモとカワツルモに混じり, イトクズモが少数生えているのが報告され(國井, 1995),揖屋干拓地の中央排水路に大きな群落があ ることもわかった.天神川の宍道湖口でイトクズモ が生育しているという未確認情報もある.

以上のうち,揖屋干拓地の排水路以外の個体群は ごく小さなものである.揖屋干拓地での生育は1998 年6月以降確認されておらず,つばさ池でもこの数 年その生育は確認されていない.なお,この植物の 成長と光合成に関しては,辻・國井(1998)による 詳しい報告がある.

カワツルモ (*Ruppia maritima* L.) (写真 2 a, b):絶 滅危惧 II 類. 建設省 (現国土交通省)中国地方建設 局出雲工事事務所 (1993)による斐伊川水系の植物 調査により,中海本庄工区を囲む西部承水路と北部 承水路でのカワツルモの生育が確認されていた. そ の後,源(1997)によってこの植物が本庄工区内,特 に野原町宮ケ鼻付近に大きな群落を形成しているこ とが確認され,さらに農水省の調査により (中国四 国農政局,2000),カワツルモは中海本庄工区のほ ぼ全域にわたって点々と分布することが明らかと



図1 5種の水生絶滅危惧植物の宍道湖・中海での 分布図.

Fig.1 Distribution map of five endangered aquatic macrophytes in Lakes Shinji and Nakaumi.

なった.筆者は 1999 年夏に中海の宮ケ鼻・弁慶島 付近でカワツルモの水中ビデオ撮影を行い,その際 にヨシの生えている砂質の沿岸部に高い確率で見ら れることを知った.この現象は興味深いものである ので,今後生態学的な調査を進める必要があろう. 1999 年の観察では宮ケ鼻におけるカワツルモの発 芽は遅く,7月に入ってから起こり,わずか3ヶ月



写真 1 (a) イトクズモ. Photo 1 (a) Zannichellia palustris.



写真 1 (b) 揖屋干拓地のイトクズモ. **Photo 1 (b)** *Z. palustris* in Iya Land Reclamation area.



写真 2 (a) カワツルモ. Photo 2 (a) *Ruppia maritima*.



写真 2 (b) 宮ケ鼻のカワツルモ. **Photo 2 (b)** *R. maritima* in Miyagahana.



写真 3 (a) リュウノヒゲモ. **Photo 3 (a)** *Potamogeton pectinatus.*







写真4(a) オオクグ. Photo4(a) Carex rugulosa.



写真 4 (b) 大橋川河口付近のオオクグ. **Photo 4 (b)** *C. rugulosa* community at the mouth of Ohashi River.



写真 5 (b) 野原町船溜りのコアマモ. **Photo 5 (b)** *Z. japonica* in a port of Nohara-cho.



写真 5 (a) コアマモ. Photo 5 (a) Zostera japonica.

ほどでその生活環を終えていた.

カワツルモは、米子水鳥公園のつばさ池でも神谷 要氏によりイトクズモの発見時に同時に採集されて おり、さらに、それに隣接する干拓地内(彦名処理 地)の池において、2000年夏に大きな群落が確認さ れ(國井,2000)、安来干拓地の排水路においても 確認された.彦名処理地での2000年夏の観察によ れば、カワツルモはリュウノヒゲモが優占していた 6月5日には見られず、6月22日に初めてその生育 が確認され、さらに8月になって池の一部区域では リュウノヒゲモと入れ替わって優占種となってい た.

なお,カワツルモは島根半島の加賀の海岸そばに ある池での生育も杦村喜則氏によって確認されてい る.神西湖での観察の報告もあるが,これはリュウ ノヒゲモの誤同定である可能性が高い(國井, 1997).

リュウノヒゲモ (*Potamogeton pectinatus* L.) (写真 3 a, b):絶滅危惧 II類. 米子水鳥公園のつばさ池で 大群落を形成し(國井, 1998), それに隣接する彦 名処理地においても 2000 年に大きな群落が確認さ ている(國井, 2000). その他の島根県内の自生地 としては,神西湖での自生について國井 (1988) が 報告しているが,最近の状況は不明である.

オオクグ (Carex rugulosa Kükenth) (写真4a, b):絶 滅危惧Ⅱ類.湿生の多年生草本である.島根県内で は、同じように塩生湿地に生えるシオクグ (Carex scabrifolia Steud.) (地域 (例えばレッドデータブッ ク近畿研究会編著(1995)など)によってはこの植 物も絶滅危惧種とされる)も生育している(杦村、 1991). オオクグは、大橋川が中海と接する北岸(松 江市福富町) に大きな群落を形成し、中海ではその 他安来市中海町用水路,米子市彦名町水鳥公園近く, 安来市十神町(油壷鼻),八束町江島汽水域研究セ ンター分室前,八束町大根島波入,美保関町下宇部 尾、松江市新庄町、揖屋干拓地の東側承水路などで も小個体の生育が確認されている.また、大橋川の 中州と宍道湖南岸の宍道町来待における生育も確認 されている.平田市のグリーンパークの湖岸に以前 オオクグが移植されている.

この植物については、その保全を目的とした生活 史関連の調査が島根大学理学研究科の今田直人氏に よって行われ、今春(2001年)2月、大学院の修士 論文としてまとめられた(今田、2001).

コアマモ (Zostera japonica Aschers et Graebn.) (写真 5a, b):情報不足.日本各地の河口域などに生育 する多年生の植物である(國井, 1999). 宍道湖・中 海においては Nishigami et al.(1987) によってその 分布が塩素量との関連で述べられている.今回, 宍 道湖・中海における分布を詳しく調査したところ, Nishigami et al.(1987)の結果同様、コアマモは大橋 川と中海のほぼ全域で見られたものの、剣先川では 見られなかった。また、意宇川河口の群落は確認で きなかった. 宍道湖においても佐陀川の流入部近く の舟溜りに生育しているという聞き取りの結果を得 ているが (田村, 2000), 筆者は未確認である. 宍 道湖では以前には,北岸では松江市役所のあたり, 南岸では鳥ガ崎のあたりまで群落があったと言われ ている(杦村喜則私信). 汽水域における藻場の主 要構成種と考えられることから、中海におけるその 増殖が望まれる.

以上の植物のほか,今回の調査中,絶滅危惧 I 類 のツツイトモ (*Potamogeton panormitanus* Biv.) (写 真 6) と車軸藻類のフシナシシャジクモ (*Chara corallina* Willdenow var. *kyushuensis* Imahori) (写真 7) を彦名処理地で,そしてイバラモと車軸藻の一 種 (*Chara* sp.) をつばさ池で,それぞれ確認してい る. 彦名処理地及びつばさ池の水質等に関しては, 國井 (2000) と神谷 (2000) を,それぞれ参照してほ しい.

おわりに

汽水域を主な生育場所とする水生植物の, 宍道湖・ 中海における分布について紹介した.今回の調査に より,コアマモを除くその他の植物は,主に干拓地 内の排水路や池に生育していることがわかった.干 拓地は塩分を含む周囲の湖から仕切られた人工の場 所である.中海における干拓地は,揖屋,安来及び 弓浜工区が1989年3月の完成,そして米子水鳥公 園のある彦名工区が1992年3月の完成と,どの干 拓地もまだ完成後間もない.今後,時間の経過とと もに水中や間隙水中の塩分が徐々に低下し,これら の水域では汽水性の水生植物から淡水性の水生植物 へと植物相が変化することが予想される.

レッドデータブックで明らかにされたように,汽 水性の水生植物は全国的に絶滅の危機に瀕している のが現状である. 宍道湖・中海に生育する水生植物 をいかに保全すべきかの議論が望まれる.



写真6 ツツイトモ. Photo 6 Potamogeton panormitanus.

謝 辞

本調査は、1999年全労済助成事業(環境問題研究 助成:案件名「宍道湖・中海周辺における汽水性絶 減危惧植物の分布図作成」)、1999年度ホシザキグ リーン財団委託事業(事業名:「宍道湖~中海周辺 の水域における絶滅危惧植物の実態調査」)及び平 成12年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2): 「汽水域における水生絶滅危惧植物の保全と修復」 No.12480163)等の助成によって行われた.米子水 鳥公園ならびに彦名処理地での調査では、それぞれ 関係者のお世話になった.記して感謝する.

文 献

- 今田直人(2001)オオクグ(*Carex rugulosa* Kükenth) の保全生態学的研究.島根大学大学院理学研究科 平成 12 年度修士論文.
- 神谷要(2000) 汽水性沈水植物リュウノヒゲモ (Potamogeton pectinatus L.) に与える水鳥の影響.

写真7 フシナシシャジクモ. **Photo7** *Chara corallina* var. *kyushuensis*.

島根大学大学院理学研究科平成11年度修士論文.

- 環境庁編(2000)改訂・日本の絶滅のおそれのある 野生生物.植物I(維管束植物).(財)自然環境 研究センター,東京,660 p.
- 國井秀伸(1988)島根県神西湖の流入河川および周 辺の用水路に生育する水生植物.山陰地域研究(自 然環境),4:103-106.
- 國井秀伸 (1994) イトクズモ (ミカヅキイトモ) 発見 記.水草研会報, **54**: 38.
- 國井秀伸(1995)イトクズモ. 汽水湖, 8:27.
- 國井秀伸(1997)カワツルモ、汽水湖, 10:62.
- 國井秀伸(1998) リュウノヒゲモ. 汽水湖, 11:52.
- 國井秀伸 (1999) コアマモ. 汽水湖, 12:57.
- 國井秀伸(2000)中海米子湾彦名処理地の水生植物. ホシザキグリーン財団研究報告,4:1-5.
- 建設省出雲工事事務所(1993)斐伊川水系の植物.建 設省中国地方建設局出雲工事事務所.192 p.
- 島根県 (1997) しまねレッドデータブック. 植物編. 266 p. 島根県.
- 杦村喜則(1991)島根半島の植生と植物相V.水生

植物と単子葉植物相.山陰地域研究(自然環境), 7:67-81.

- 田村徹 (2000) 宍道湖・中海水系における異なった塩
 分環境下でのコアマモ (*Zostera japonica* Aschers.
 et Graebn.)の光合成特性. 島根大学大学院理学研
 究科平成 11 年度修士論文.
- 中国四国農政局(2000)本庄工区の利用についての 調査結果(本庄工区検討委員会資料抜粋版).128 p.
- 辻和弘・國井秀伸(1998)危急種イトクズモの成長 と光合成特性.LAGUNA(汽水域研究),5:225-231.
- Nishigami, K., Onoda, T., Oshima, A., Kashiwamura, S. and Itoh, Kazutaka (1987) Distribution and brackish environments of *Zostera japonica* in the lower reaches of the River Hii. Studies of teh San'in Region (Natural Environment), **3**: 19-24.
- 源耕一(1997)中海における水生大型植物相の地域 的違い.島根大学理学部卒業論文.
- レッドデータブック近畿研究会編著 (1995) 近畿地 方の保護上重要な植物-レッドデータブック近畿 -. 関西自然保護機構, 121 p.

LAGUNA (汽水域研究) 8, 101~110 頁 (2001 年 3 月) LAGUNA 8, p.101-110 (2001)

資 料

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)

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

Development of saline wedge observation system (Introduction of Poster Exhibition at TECHNO–OCEAN 2000)

Takao Tokuoka¹, Yoshikazu Sampei¹, Kiyokazu Nishimura², Akira Suzaki³, Shigeo Matsuda⁴, Shunsuke Kubota⁵, Shigenori Suzuki⁶ and Hiroyoshi Ueno⁷

テクノオーシャンは隔年で開催される国際シンポ ジウム(TECHNO-OCEAN 2000 INTERNATIONAL SYMPOSIUM)で,2000年度は11月9-11日に神 戸国際展示場で行われた.今回は「人は海について 何を知ったのか,そして21世紀地球社会と海との 関わりは」のメインテーマのもとに海洋科学技術セ ンターなどの共催のもとで行われた.例年,海洋調 査開発機器メーカーの大型の展示がなされるが,今 回ははじめて学術研究団体展が併せて開催されるこ とになり,20グループほどの参加があった.当グ ループは前回テクノオーシャン'98シンポジウムか ら参加したが,今回の呼びかけに応えて,一般の興 味も沿岸や汽水域にも伸びてきていることを感じ 取って出展することにした.以下の4つが展示した ポスターである.

汽水域の水の動きをしらべる(その1)
 ーこれまでに開発した観測機器 汽水域の水の動きをしらべる(その2)

ー中海での塩分躍層の観測 汽水域の水の動きをしらべる (その3)
 一大橋川での高塩分水塊の観測 汽水域の水の動きを調べる (その4)

- 感潮河川「江の川」の塩水くさびの観測-

当研究グループは 1992 年以来汽水域の塩分躍層 を音響的に捉えられるのではないかとのアイデアの もとに研究を始め,文部省科学研究費試験研究 B を平成 4~5 年度及び平成 6~7 年度に採択されたこ とから大学と官・産の共同により機器開発を軌道に のせることができた.それらの成果については本誌 にその都度報告してきた.本研究グループは当初は 中海を主な調査対象として塩分躍層の観測を行うな かで機器の開発を行ってきたが,平成9年度からは 島根県の江の川を対象に塩水楔の観測を建設省中国 地方建設局浜田工事事務所の協力で行うようになっ てから,機器の開発を飛躍的に進めることができた. その後,平成 11 年度からは中海・宍道湖にも観測

¹ 島根大学総合理工学部 Faculty Science & Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan E-mail:tokuoka@riko.shimane-u.ac.jp

² 地質調査所 Marine Geology Dept., Geological Survey of Japan

³ 千本電機(株) Senbon Denki Co., Ltd.

⁴ クローバテック(株) Clovertech Inc.

⁵ (株)ワイ・オー・システム Y.O. Systems Inc.

⁶ (株)鶴見精機 The Tsurumi-Seiki Co., Ltd.

⁷ 北陸先端科学技術大学院大学 Janan Advanced Institute of Science and Technology in Hokuriku

の場を再び拡げて,とくに両湖をつなぐ大橋川で高 塩分水塊がどのようにして宍道湖にまで流入するか の観測を同,出雲工事事務所の協力によって行うよ うになった.これは社会的にも貧酸素水塊が環境へ の悪影響を与えることに対する社会的な関心にも応 えることを目指してのことである.ポスター3と4 はこれら両機関の協力があって初めてできたもので ある.展示ではポスターの他に新たに開発した観測 機器とともに調査の様子をビデオで示すなどして, なかなか好評であった(写真).多くの研究者およ び機器開発メーカーも,汽水域を含む沿岸域が人の 生活や環境保全の問題とかかわって重要であること をよく認識してきていることが感じられた.



以下は研究団体展展示パンフレットに示した本グ ループの宣伝である.

「本グループは河口域の塩水クサビや汽水湖の塩分 躍層を対象に学・官(工技院地質調査所)・産(千 本電機〔株〕、クローバテック〔株〕、〔株〕 ワイ・オ ―・システム、〔株〕鶴見精機)の協力により機器開 発と観測を行ってきました.水質測定を基本にした 従来の観測法ではクサビや躍層の実態を捉えること は困難でしたが、水中の塩分急変部で生じる超音波 の反射を可視化した測器(航走式・水底設置式), 海洋での投下式測器 XCTD をもとに開発した温度 塩分測定システム, 光ファイバケーブル自体を温度 センサとした分布型温度計を併用することによっ て、それらの動きをリアルに捉えることに成功しま した。本システムは塩水の流動により生じる良好な 環境や停滞による貧酸素化から生じる環境悪化、温 暖化による塩水侵入・地下水の塩水化などの観測に 有効です.| (徳岡記)

参考文献

- 西村清和・松林 修(1996) 光ファイバ分布型温度 センサの海洋および湖沼調査への適用.海洋調査 技術,8:17-31.
- 西村清和・鈴木重教・徳岡隆夫(1998)多点型 CT センサケーブルー測定システムの開発と汽水域で の塩分・温度観測実験ー.海洋理工学会誌, 4:41 -54.
- 西村清和・徳岡隆夫・三瓶良和・須崎 聡・松田滋 夫・久保田俊輔・鈴木重教・上野博芳(2000)汽 水域の環境計測システム. TECHNO-OCEAN 2000 PROCEEDINGS, 855-858.
- 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 a) 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), 6: 179-187.
- 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 b)
 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-(渇水期溯上例, 1998 年 12 月~1999
 年 2 月). LAGUNA (汽水域研究), 6: 233-245.
- 徳岡隆夫 (2000) 汽水域をとらえる 江の川の塩水 楔観測.月刊「水」,11月号,16-23.
- 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・池田龍彦 (2000) 感潮河川における塩水溯上と地下水との 関係:江の川の観測例. TECHNO-OCEAN 2000 PROCEEDINGS, 715-720.

汽水域の水の動きをしらべる(その1) ーこれまでに開発した観測機器ー

Study the movement of the water in estuaries and coastal lagoons

Two-layer structure of fresh water and salt wate

Fresh water

Verboilty V1

De

SC-3型装置のブロック図

Block diagram of SC-3

acoustic profiling system

塩分躍層

湖底

Brackish lake

Medium

汽水湖

1. 汽水域での観測の意義と機器開発

陸と海の接点に存在する汽水域はどこでも数千年の歴史を経て成立したもので、そこ には環境変化の試練を受けた豊かな生態系がみられる.淡水と塩水の二層構造は汽水域の 特徴で、その分布や移動方向などを知ることは、汽水域の環境保全および将来予測に重要 である. 塩水の流動により良好な水底環境が生じ、一方、酸素が消費された貧酸素水塊が 漁場に侵入すると魚介類が死滅するなどの被害が生じる。さらにグローバルな視点で環境 問題を考える場合、地球温暖化による海面上昇の影響は真っ先に汽水域に現れるので、汽 水域は地球環境研究のモニタリングポストとしてふさわしい場所と言える.近年、こうし た汽水域における水の挙動を定量的かつ時系列的に把握することが急務となってきている が、従来の観測方法は地点毎の水質(主に塩分)の測定のみであり、その実際の挙動をと らえることは困難だった、そこで我々のグループは、8年前から、音波、光ファイバ温度 センサ、高精度の塩分・温度センサ等を用い、広範囲・長期連続測定可能な観測機器を新 たに開発し、観測を行い、水環境の保全や創造のために必要な基礎的データの取得を行っ ている

1. Introduction A brackish water area (estuaries and coastal lagoons) which is located at the contact between land and sea, has been formed through a history of housands of years, and there is a rich accosystem which has been affected by the environmental changes. Brackish-water lakes and/or tidal river occur this area. Two-layer structure of fresh and salt waters is a characteristic of the brackish water. To know the distributions and transfer directions of fresh and salt waters is important for environmental preservation and future prediction of the brackish water. Good bottom environment is maintained by the flow of salt water, while the damage of the fishes dying out is generated by the invasion of an anoxic water mass to fishing ground. Moreover, when environmental preservation the water in such brackish water area is a suitable place as monitoring post of the global environment research, because the effect of sea surface elevation by global warming appears at the very beginning in brackish water. Recently, though it is an urgent need to determine the behavior of the water in such brackish. water quentilatly, the conventional observation method was only a measurement of water quality (salinity mainly) of the every site, and it was difficult to understand the actual behavior. Accordingly, since 1992 our group has been developing new observation instruments for wide area and long-term measurements using ultrasonic waves, optical fiber temperature sensors, high-precise salinity and temperature sensors, etc., and has been carrying out the observation. And now, we are acquiring basic data for preservation and creation of the hydrosphere environment.

2. 汽水域で起こる現象

汽水域では塩水(高塩分水)と淡水(低塩分水)の密度差から、両者が容易にまじわらず、その 境目に、塩分が急激に変化する塩分躍層が生じる.これに超音波を当てると魚群探知器が魚をとら えるのと同じように強い反射が生じる.塩分の急変するところでは、水の音響インピーダンス(密 度X速度)が急変するからである。この測定原理を利用して塩分躍層の分布や塩水層の層厚を把握 することができる. また海水が流入する河川(感潮河川)では上流に遡上した海水の先端部(塩水 楔(くさび))を超音波で同様にとらえることができる. このようにして, 塩水楔音響プロファイ リングシステムと塩水楔音響動態観測システムが生まれた.

塩水と淡水では塩分が大きく違っているが、水温を測ってみると、やはり相違している、しかも 塩分が急変するところで水温も急変する、このことは、水温を測れば、ある程度塩分を推定できる ことを意味し、水底で水温を連続的に測れば、塩水、淡水の流動を捉えることができる、光ファイ バ式温度分布計測システムはこれを応用し、塩水塊の分布や動きを観測する。

我々は新たに開発した観測機器を用い、島根県東部の中海、宍道湖、大橋川、島根県西部の江の 川などの汽水湖・感潮河川で観測を行っている

Frequency 200kHz Beam angle 6 degree Transmission pulse width 15–110ms Gain adjustment 0– 30dB

ta logger A/D converter 12bit, sampling frequency 1MHz CPUCeleron 166MHz, RAM64Mbytes, HD 6GB MO disk drive 230Mbytes nd ClovertechInc.)

3.新たに開発した観測機器

(1)塩水楔音響プロファイリング

システム (航走式: SC-3型)

航走しながら200kHzの超音波を水面から水底に向かって発信 し、塩分躍層で生じる反射波を受信し、塩分躍層の分布、形 状を記録断面として捉えることができる.反射信号はデジタ ル化されデータ収録器に記録される

3. Measurement systems for brackish water observation (1)An acoustic reflection profiling system for spatial distribution survey of halocline(Model SC-3)

of halocline(Model SC-3) This acoustic profiling system was made by improvement of 200kHz precision echo sounder. A receiver of the system was used as amplifiers to maintain the linearity and fidelity of signal. The system measures reflection amplitude and detect the weak raflector caused by the survey of ha Transducer Receiver amp Recorder Power supply (SenborDenkiCo Itd.) weak reflector caused by the rapid change of acoustic impedance at the halocline in brackish water. Distribution of the halocline and thickness of (2)Underwater acoustic reflection measurement systems for long-term observation of halocline behavior(On-line model, Model SC-2) Transducer Frequency 200kHz the nalocline and thickness of the salt water layer can be recorded as profile records. Analog reflection signal is converted to digital signal and recorded in a digital data longer Transmitter and re data logger

SC-3型装置の外観 (左:本体,右:デジタル記録器) SC-3 acoustic profiling system (left: main body, right: digital recorder) Basic specifications of measurement system (3)Thermon. temperature netry system using optical fiber distributed sensor(Model DTS-80) e range -200 - 300 e accuracy ±0.2 (measuring time 10min; Jution 1m tem for spatial d SC-3) Frequency 200kHz Beam angle 6 degree Straight type Thermal type Internal Ni-Cd battery o External battery(12V) DC12V, 0.6A











SC-2 acoustic reflection measurement system (left: main body, right: digital recorder)



受信部

Receive

送信部

Transmitte

本体

送受波器

Z= Densityr xVelocity V Z1=r1 V1 Z2=r2 V2

ection of halocline and thermocline

tient R = $\frac{Z2-Z1}{Z1+Z2}$



Tidal river

感潮河川

River-mouth

汽水域の概念 Concept of estuary and coastal lagoon

Vater leve 水面

f波発振網 塩分躍層 Halocline

湖底

Yenngo Day

記録部

Graphic recorde

制御部

デジタル記録器

Digital record

Saline wedge 塩水楔

音響探査で生じる塩分躍層と

Upper stream

Temperat 水温

4 4 1 10 12

- Fresh water

塩分

Position of sensors in R. Gonokawa





潮上する塩水とその上を流下する河川水の境界が明瞭に識別される。境界では連行が見られる。 SC-3型装置による記録例(島根県江の川) Example record of SC-3 acoustic profiling system



(2)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)

200kHzの超音波を発信する送受波器を水底に固定し、水面に 向かって音波を発信する. 塩分躍層で生じる反射波を連続的 に記録し、時間、空間的な動態を捉る. オンライン方式の装 置では、送受波器は3台あり、最長400mのケーブルで陸上の 記録部に接続され、リアルタイムの測定が可能である。また オフライン方式の装置はバッテリ駆動ですので、設置場所が フリーとなる利点がある.

erwater acoustic reflection measurement systems for long-term of halocline behavior(On-line model, Model SC-2; Off-line model, Model CL-3)

Model CL-3) The transducer which sends out an ultrasonic wave of 200kHz in the system is set up on the bottom of water, and the ultrasonic wave is sent toward the surface of the water. The reflection generated by the halociline is continuously recorded in the systems, consequently, the system detects temporal and spatial behavior of the brackish water. An on-line system, model SC-2 has three transducers with cables of 200m. The end of the cables is connected to the system on land. On the other hand an off-line system, wadel SC-2 and the placed anywhere we like because the system is driven by a battery power.

(3) 光ファイバ温度分布計測システム (DTS-80型)

光ファイバケーブル自体を温度センサとして利用する温度計 で、光ファイバケーブルを湖底や川底に敷設して温度を測定 する. 光ファイバケーブルの全長は最大4kmで, 1m毎4,000点 のケーブルに沿った分布温度が得られる. 温度精度は±0.2 の変化を捉えることにより塩水塊の分布や動きを知ることが できる.

Main instrument DTS-80 rameters Optical fiber cable L To measure distributed temperature at one-meter intervals along a 4,000m long optical fiber

(3)A thermometry system using optical fiber distributed temperature sensor(Model DTS-80) The optical fiber thermometry system is a thermometer using an optical fiber as temperature sensor. This system may not have as high accuracy as thermistor thermometers, but it has the great capability of simultaneous multi-point temperature measurements using only one optical fiber cable. For example, temperatures can be measured at 4,000 points at an interval of one meter along a 4,000m long optical fiber. The system can measure spatial and temporal distribution of water-bottom temperature in brackish water.



光ファイバ温度分布計測 システムの外観 DTS-80 optical fiber thermometry system

ontroller		
ersonal	MO disk	
omputer	drive	

光ファイバ温度分布計測システムのブロック図 Block diagram of DTS-80 optical fiber thermometry system





Temperature distribution records of DTS-80

(4) マルチCTセンサ温度塩分システム (MCTH-2型)

海洋での水温・塩分測定用の投下式測器であるXCTDをベース にして、湖底や川底の温度、電気伝導度(塩分)を広範囲に測 定できるようにした測定システムである. XCTDプローブを改 造したCTセンサを100m間隔で5個つなぎ、水底の近くの塩分と 水温を高精度に連続的(5分毎)に測定できる.

(4)A temperature salinity measurement system using multiple CT sensors (Model MCTH-2) CT(Conductivity/Temperature) multi-sensor temperature salinity measurement system is based on XCTD (Expendable Conductivity, Temperature & Depth Profiling System) for oceanographic observation. The system utilizes five modified XCTD probes as its CT sensors. Each CT sensor is connected with a 700m long multi-wire cable at an interval of 100m, and the cable is connected at its end to a measurement -control and data logging system. The CT sensors are installed on the bottom of a brackish water lake or a tidal river, and the continuous measurement (5 min. interval) of temperature and salinity can be carried out.





マルチCTセンサ計測システムの外観



Temperature salinity measurement system using multiple CT sensors Block diagram of temperature salinity measurement system using multiple CT sensors





汽水湖では高塩分層が下に、低塩分層が上に重なり、その間に塩分が急変する塩分躍層ができています。これは2つの層の密度差から起こるこ とで、なかなか混じり合いません、特に夏になって上層の水温が高くなってくると、密度差はさらに大きくなるので、下の高塩分層は底のほうに停滞し、有機物の分解や生物によって含まれている酸素がしだいに減っていき、貧(無)酸素の高塩分水塊を生じさせ、湖底からのリンの溶 出をもたらすなどして水質を悪化させます.また、この水塊が潮位・気圧・風の吹き方によって湖の底を這うように移動することがコノシロやヤマトシジミの大量 死と関係があるのではないかと考えられています.

これまで塩分躍層は船上から水質計を降ろして水質(塩分)を測定することによって行われてきました。しかし、この方法だと、天気が悪い時には観測ができません。 くわしくデータをとろうとすると、観測点や観測の回数を増やさなければならず、経費もたくさんかかることになりま す. 私たちの研究グループは、(その1)で示したように、湖底に観測機器を設置して塩分躍層の動きを昼夜を問わず、また天候にとらわれずに その動きを連続的にとらえる方法を開発しました. これによって、中海では 強い風が長時間に渡って吹くと高塩分水塊が移動を始め、陸に近い湖 棚にはい上がっ てくる現象や、台風のような強風で湖が荒れた時には塩分躍層は消失するのではなく、大きく振動して、風が弱まるとまたもと に戻るといった驚くべき現象が明らかに なっています.

☆強い風が吹くと高塩分水塊が湖棚へはい上がってくる. (大根島入江での観測例 1995年5月10-11日)





光ファイバ分布型温度センサに よる海底水温分布と時系列変化



入江港

大根島

(中海大根島入江湖岸)



強風による湖水の流動



貧酸素高塩分水塊の漁場への侵入



中海の大根島入江港の沖合約200m先に塩水楔音響動態観 測システムの送受波器3台を設置しました.送受波器を設置 した場所の水深は3.5m程度で、通常、水面から湖底まで低 塩分水で満たされており、ふだん塩分躍層は存在していませ ん. 水温, 塩分, 塩分層の動きを把握するため, 温度塩分 センサを備えた流向流速計や光ファイバ分布温度センサも同 時に湖底に設置しました. 観測データの中で, 典型的な塩 分躍層の現れた音響断面を図(左上図)に示しました. の記録では、5月11日8時頃から送受波器T-3付近に沖合 いから塩水が到来し12時~14時には水面下約50cmまで 塩分躍層が上昇したことを示しています. 塩水層が到来した 時,湖底の塩分,水温,流向流速はどのように変化するかを グラフ(左下図)に示しました. 音響記録の塩分躍層の上昇 と、 塩分の上昇、水温の低下が相関していることがわかりま また, 流向は北向き(0, 360度) から南向き(180度) す に変化しますが、これは塩水塊の動きを反映しています。ま た光ファイバケーブル(右上図)には、高塩分水塊の湖岸へ の到来に伴って湖底水温が低下する様子が光ファイバケーブ ルの各地点で検知されています(中図)、光ファイバケーブ ルの南端から順次水温が低下して低温の高塩分水でみたされ ることがわかります

この長期観測により、湖岸付近では、主に強風(観測域付 近では西風)が吹いた後、湖水下層の塩水塊が湖岸(湖棚) に到来することがわかりました.



観測機器の設置作業





汽水域の水の動きをしらべる(その3) - 大橋川での高塩分水塊の観測 -

汽水湖中海では下位の高塩分層と上位の中塩分層の間に塩分躍層があります.これは 境水 道から中浦水門を経て入ってくる海水と斐伊川 宍道湖 大橋川を経て中海に入 ってくる水 塊が密度差からたやすくは混じり合わないことから起こります((その 2)参照).湖底付 近の高塩分水はとくに夏場には停滞して貧(無)酸素化し,気象条件によっては大橋川を溯 上して, 宍道湖にまで入りこみます. 大橋川を生活の場としている漁師は, 「川底を這うよ うに澄んだ、冷たい水が上がってくるがそれだ!」といっています、この水には魚はおら ず,この水が上がってくるとまったく漁にならないとのことです.(その1)で説明した機 器を矢田の渡し付近に設置して行 った観測から,以下に説明します.

大橋川での一日の水の動きをとらえる(1999年10月22日)





光ファイバ分布型温度センサによる川床温度の時空間分布 中海入口(大橋川河口)からの距離 1.6kmから宍道湖側へ 2.6kmまでの 1000m間(縦軸)の川床の温度 変化が0.5 ごとで示されています.温度の 急激な変化は水塊が違うことを意味するので(右図), 0時すぎに大橋川を はい上がった水塊がいったんは退き,再度昼からはい上がっていったこと がわかります.図のA-A', B-B'の傾きは水塊がはい上がる速度を示してい て,前者では0.35m/s (1.26km/h),後者では0.27m/s (1.05km/h)となりま

観測機器の水底設置作業 設作業 光ファイバ温度センサで一ヶ月の温度変化をみる (1999/9/30~1999/11/2).





マルチCTセンサによる温度塩分測定 4つのセンサが川床に約 100mおきに設置されています.温度 と塩分の変化が完全に対応 していることから,水塊の動きを 知ることができます. CT2から CT5までは 240m であるの で, 最初のはい上がり速度は 0.2m/s (0.72km/h), 二度目は 0.2m/s (0.72km/h)となります



マルチ CTセンサの敷



光ファイバーケーブル の敷設





観測室での機器調整

11/3

流向流速計で観測された流速





大橋川を溯上する塩水塊

Date (yum/d)



塩水楔音響プロファイリングシステム (航走式: SC-3型)による大橋川(塩楯島~大橋間)の水塊 分布(1999年10月22日,10.30~11.05の記録) 中海側からの中塩分水塊の先端部が新大橋付近に まで達し,その上を宍道湖からの低塩分水塊がそ れを削りながら流れています.水深 2~ 3m あたり に重なるように見える音響反射面はそこで塩分が 急変していることを示しています.水面直下の濃 い帯状部は音源からの直接反射,縦の線は波によ る乱れを示しています (上記の大橋川の一日の水 の動きを示した観測データと同じ時間帯で測定し ています)



中海~大橋川~宍道湖にかけての水塊の分布(概念図) 中海では下位の高塩分層が上位の中塩分層と塩分躍層で接し, 宍道湖では 湖底付近に 中塩分層がうすく拡がりますが,大部分は低塩分~淡水層から



大橋川付近の空中写真



音響動熊観測システム

たことを示しています.午前 1時すぎにはい上がった水塊は昼前 に後退しましたが,この位置から後退しきれずに再び はいあがっ



ていったことがよくわかります





なっています.大橋川では中海側からの中塩分水塊と宍道湖側からの低塩 分~淡水塊が斐伊川の流量,潮の干満・風・気 圧などによって複雑な出入 りをします.中海の高塩分水塊は通常は塩楯島を越えること はありません が,気象条件によっては大橋に至り,さらに宍道湖にまで流入します.

まとめ

Position Position

この観測システムによって高塩分水塊の動きを目で見えるようにリアルにつかまえることに成功しましたが,溶存酸素(DO)の測定が組み 込まれていないこともあって,かんじんの無酸素水塊の宍道湖への来襲はまだとらえられていません.さらに改良を加えて,大橋川で長期の |観測を続ければ , 高塩分水塊が中海から宍道湖にどのようなタイミングで入り込むのかを明らかにすることが可能です . また , 光ファイバを はじめとしてこれらの観測機器を中海から宍道湖まで連続して系統的に設置すれば,全体の水の動きをつかまえることもできるでしょう.大 橋川をさかのぼる高塩分水塊の速度は今回観測した矢田の渡しから松江大橋(県内水面水試の観測による)の間まででみると時速 1~2km程 度でゆっくりしたものですから、それが無酸素で、まわりの水環境に悪影響を与えるおそれがあるときに工学的な手段を使って破壊すること も夢ではありません.

制作 2000年1日 徳同隆夫(島根大学総合理工)・西村清和(地製調査所)・上野侍芳(北陸先臨科学技術大学院大学) 塩水模研究開発グループ 徳同隆夫・三氟発和(島根大学総合理工)・西村清和(地製調査所)・須崎駿(千本電機 株))・ 松田讃夫(クローバテック 株))・久保田穀輔(株 プイ・オー・システム)・許木重教(株 鹿見精機)・上野傍芳(北陸 先満祥学技術大学院大学)

汽水域の水の動きをしらべる(その4) - 感潮河川「江の川」の塩水くさびの観測 -

河口域では一般に流下する河川水の下位に海側から海水がもぐりこみながら溯上する 塩水楔(くさび)が形成されます.流量が大きく,干満の差が小さい河川では淡水と海 水はあまり混合せずに、海(塩)水は川床を這うようにして溯上して行きます、塩水溯 上の起こる範囲は日本の大きな河川では数 kmから数 10km,世界の大河では数 100kmに及 ぶ例があります.日本海に注ぐ江の川は感潮河川の代表的な例として知られていて,下 流域では自然の状態が良く保存されているので、塩水楔の観測には好適な条件を備えて います.建設省浜田工事事務所の支援のもとに行われた観測機器開発による観測例を以 下に紹介します.塩水の溯上は川床の浚渫や上流での取水によって促進され,さまざま の被害が起こります.また,地球温暖化による海面上昇では塩水侵入が進み,地下水の 塩水化により水資源に影響を与えることになるので,それをモニターしておくことは重 要です.塩水くさびは河川管理上で重要な意味を持っていますが,これまでの調査は水 質測定のみに頼っていたために,その実際の挙動を捉えることは困難でした.また,測 定点や観測時間を増やしても、経費がかさむばかりで、実態の解明には限界がありまし た.ここに紹介する観測システムによって,塩水溯上がどこまで及んでいるかを船上か らの音波探査ですみやかにとらえることができ、また、各種の機器を川床に設置するこ とによってその動きを連続的にリアルにとらえることが初めて可能になりました



江の川



川床の送受浪器上を塩水楔が通過すると淡塩境界が記録される。 境界面はこまかな振動をしている。 塩水楔音響動態観測システム(オンライン式: SC-2型)による河

口から 5.5km地点での塩水溯上と降下(1997年12月25日~31日)

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 河口から 5.5km地点での淡塩境界(1999年12月6日~11日)

江の川はその源を広島県山県郡大朝町阿佐 山に発し,本流の長さ約 200km,流域の広 さ 3870km2で全国 16位,流域人口は約 23万 人です.中国山地を越えて日本海に注ぐ先 行性河川で,上流部では河川争奪が各所で みられ,地形学的にはもっとも特徴があ り,注目されている河川の一つです.また 下流部では豊富な水量と日本海側は潮位差 が小さいことから,弱混合型感潮河川の日 本における代表例として知られています. 江の川ではスズキは河口から 15kmにわたっ て溯上しており,アユとともに魚釣りの名 所として知られています.



温度 塩分

音響探査で生じる塩水楔 (塩分躍層)と







水面

塩水楔音響プロファイリングシステム(SC-3型) による航走調査





光ファイバ温度センサによる川床水温の時間空間変化からみた 塩水溯上と降下(1999年2月3日~11日)

川床



マルチCTセンサ温度塩分計測システム(MCTH-2型)に よる川床での温度・塩分の変化(1999年2月7日~10日)



水中撮影でとらえた淡塩

境界(潮目)



光ファイバケーブルの設置準備 光ファイバケーブルの敷設作業

マルチCTセンサの設置準備



川床に設置したオフライン音響 動態観測システム用送受波器



川床に設置した光ファイバケー ブル 佐 とオンライン音響動態 観測システム用送受波器(右)

制作 2000年1月 後回隆夫(鳥観大学総合理工)。西村清和(地質調査所)・上野博芳(北陸先選科学技術大学院大学) 塩水関市S開発グループ 毎回隆夫・三重良和(鳥観大学総合理工)・西村清和(地質調査所)・須崎範(千本電機(鉄)) 松田出夫(シローバテック(鉄))・久保田総輔((株)ワイ・オー・システム)・鈴木重数((株)観見精機)・上野博芳 (北岸先端科学技術大学院大学