

中海に出現する貧酸素水塊の海況学的特性と海洋構造

森脇 晋平^{1,2}・大北 晋也¹

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

Shimpei Moriwaki^{1,2} and Shinya Ohkita¹

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

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

はじめに

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

心事のひとつであったと思われる。

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

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

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

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

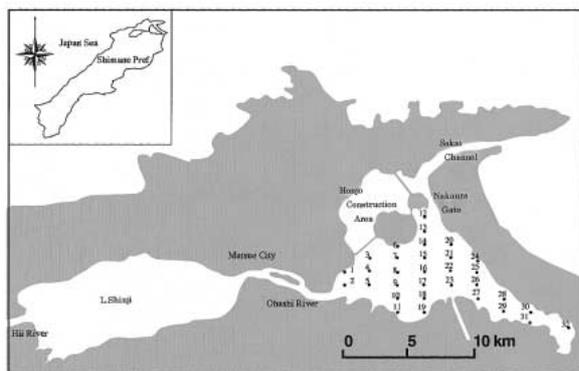


図1. 調査場所の地理的概要.

Fig. 1. Location map showing hydrographic stations.

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

資料と方法

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

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

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

結果と考察

1. 海洋構造の季節変動と水塊特性値

(1) 季節変動

中海に出現する水塊の海水特性の差を各月ごとに測点グラフで対比した(図2)。

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

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

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

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

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

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

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

10月には5m以浅で再び貧酸素水塊が増加した。酸素—水深分布(O₂-D)パターンは8月のそれに似るが、水温—塩分分布(T-S)パターンから理解できるように、上層から冷却が始まり上層の水塊より下層のそれが高水温である。上層水は低温・低塩、下層水は高温・高塩という現象が3月まで継続する。

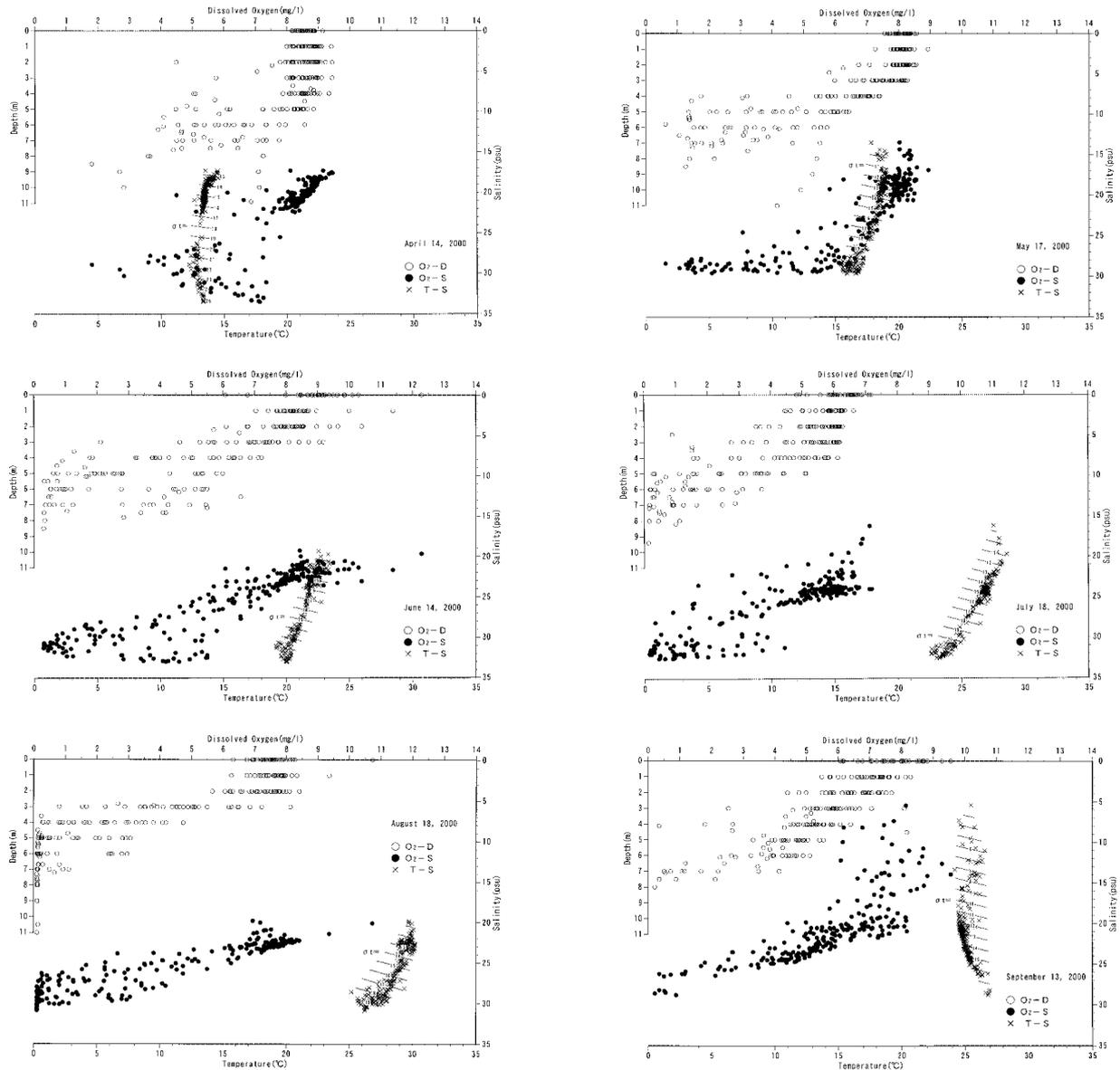


図 2. 測点グラフによる地中海の水質特性.

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

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

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

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

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

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

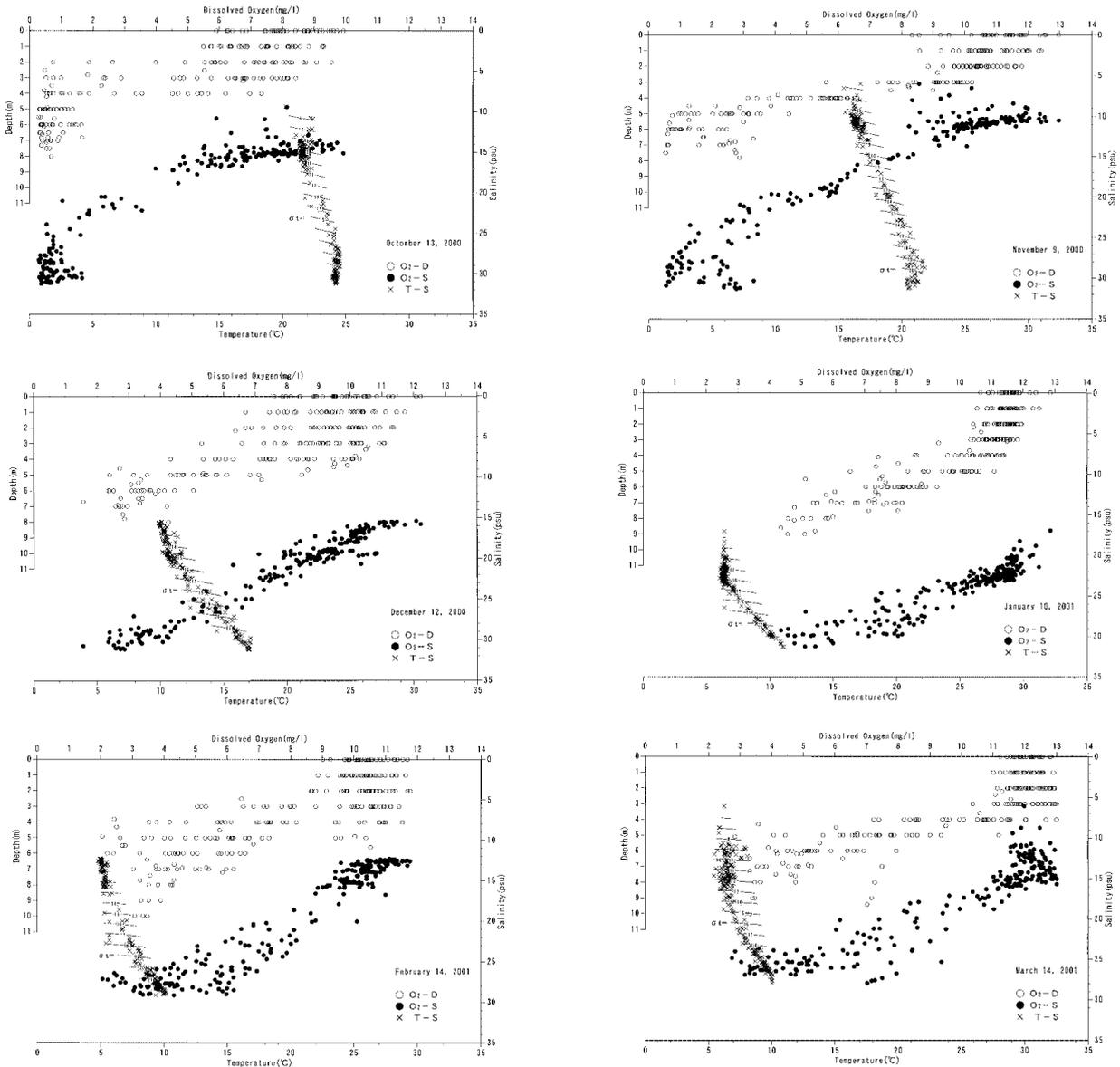


図 2. (続き)
Fig. 2. (continued)

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

(2) 海洋構造と水塊特性値

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

る。それらの水塊特性値の出現範囲を表1に季節毎に示した。

2. 河川流量の季節変動

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

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

表 1. 季節別水塊特性値.

Table 1. Seasonal water mass characteristics.

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

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

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

3. 水塊の体積比の季節変動と貧酸素水塊の体積の季節変動

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

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

で算出した。ただし、この体積のなかには本庄水域は含まれていない。

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

各水塊の現存量の季節変動(図4)をみると、4月

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

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

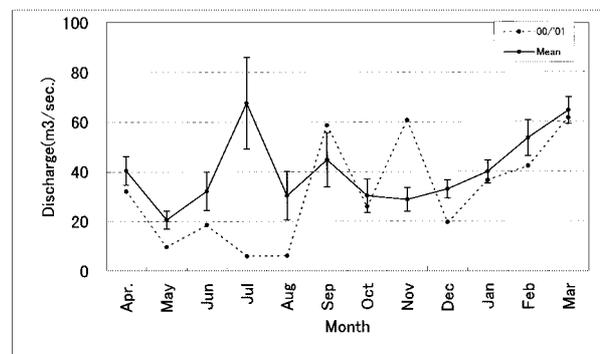


図 3. 斐伊川の流量の季節変動.

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

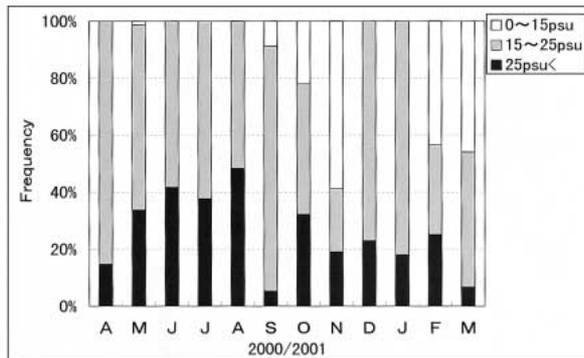


図4. 3つの水塊の季節的な量的変化。

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

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

4. 若干の議論

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

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

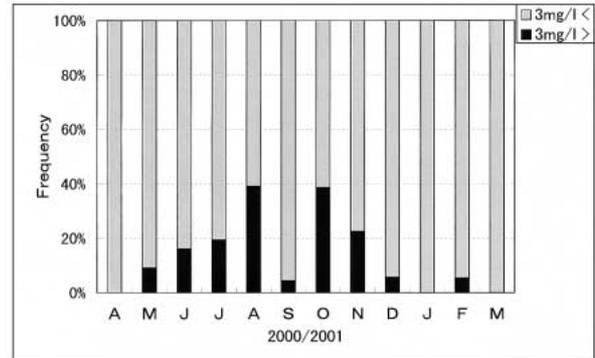


図5. 貧酸素水塊の季節的な量的変化。

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

富な海水が短期間のうちに貧酸素化することを示唆している。

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

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

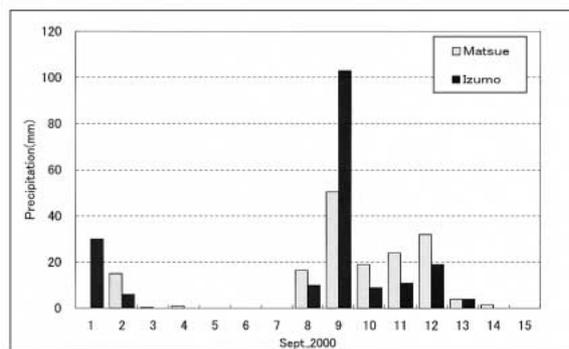


図6. 2000年9月前半の松江と出雲における降水量.

Fig. 6. Precipitation at Matsue and Izumo during the first half of September, 2000.

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

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

謝 辞

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

参 考 文 献

藤原建紀(1997)淡水影響域におけるエスチュアリー

循環流と生物・物質輸送. 海と空, 73: 23-30.
 藤原建紀・高橋鉄哉・山田佳昭・兼子昭夫(2000)東京湾の貧酸素水塊に外洋の海況変動が及ぼす影響. 海の研究, 9: 303-313.
 福岡捷二・黒川岳司・日比野忠史・鈴木 篤・中村剛・上原 浩(1999)中海における気象変化に伴う貧酸素水塊の挙動. 土木学会論文集, 636: 61-79.
 東 輝明・山田真知子・門谷 茂・広谷 純・柳 哲雄(1998)過栄養な内湾洞海湾における貧酸素水塊の形成過程とその特性について. 日水誌, 64: 204-210.
 平塚純一(2001)パイプ方式による潮通しが閉鎖された中海本庄水域の魚類及び甲殻類相に与えた影響. 陸水学雑誌, 62: 61-73.
 石飛 祐・平塚純一・桑原弘道・山室真澄(2000)中海・宍道湖における魚類および甲殻類相の変動. 陸水学雑誌, 61: 129-146.
 城 久・矢持 進・安部恒久(1978)大阪湾における貧酸素水塊の発生状況. 大阪水試研報, 5: 71-84.
 神蘭真人・磯部篤彦・江藤拓也・俵 悟・小泉喜嗣(1995)周防灘南西部における貧酸素水塊形成機構—酸素消費速度の変動要因. 沿岸海洋究, 32: 167-175.
 神蘭真人・江藤拓也・佐藤博之(1996)周防灘南西部における貧酸素水塊形成と気象変動の関係. 沿岸海洋研究, 33: 179-190.
 越川敏樹(1986)中海の魚類. 島根野生生物研究会報 4: 7-17.
 大竹久夫・伊達善夫(1981)統計的にみた中海汽水環境の特徴について. 中海の干拓・淡水化が水圏環境に及ぼす影響に関する基礎的研究, 4: 7-23.
 Ohtake, H., Y.Seike, A.Takeda, K.Kondo and Y.Date (1982) A quantitative analysis of phosphorus cycle in the shallow brackish lake Nakanoumi, Japan. Arch. Hydrobiol., 94: 286-301.
 奥田節夫(1997)汽水湖における水塊の移動と混合過程. 沿岸海洋研究, 35: 5-13.
 鬼塚正光(1989)東京湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, 26: 99-100.
 佐野 茂(1992)学術論文にみる中海水質の変遷. 山陰地域研究, 8: 95-100.
 佐々木克之・佐藤善徳・杉浦健三・松川康夫(1977)渥美湾の貧酸素水塊の形成機構—躍層下部の酸素収支—. 東海水研報, 89: 43-55.
 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・今尾和正(1998)底層の貧酸素化が内湾浅海底生生物群集の変化に及

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