

夏季の瀬戸内海周防灘における 大型底生動物の酸素消費量

神菌真人*・山元憲一**・江藤拓也*・佐藤博之*

Oxygen Uptake of Macrobenthos in Oxygen-Deficient Water of Suo-Nada, Seto Inland Sea

Masato KAMIZONO*, Ken-ichi YAMAMOTO**,
Takuya ETOH* and Hiroyuki SATOH*

Abstract

Oxygen consumption rate of three species of macrobenthos dominant in this study site was measured at different conditions by laboratory experiments and a biomass of macrobenthos *in situ* was intermittently sampled by Smith- McIntyer grab sampler in the southwestern area of the Suo-Nada Sea from June to August, 1995. Oceanographic observation was also done several times during this period. Relation of oxygen consumption rate ($\dot{V}O_2$; $\mu\text{gO}_2/\text{individual}/\text{h}$) to wet weight of sample (W ; mg wet weight) was $\dot{V}O_2=0.323W^{0.769}$ in *Theora lubrica*, $\dot{V}O_2=0.132W^{0.842}$ in *Raeta rostralis* and $\dot{V}O_2=0.163W^{0.846}$ in *Nephtys oligobranchia*. Relation of consumption rate ($\dot{V}O_2$; $\mu\text{gO}_2/\text{g}$ wet weight/h) to water temperature (T ; $^{\circ}\text{C}$) was $\dot{V}O_2=0.027T^{2.829}$ in *T. lubrica*, $\dot{V}O_2=0.062T^{2.398}$ in *R. rostralis* and $\dot{V}O_2=0.100T^{2.335}$ in *N. oligobranchia*. The *in situ* consumption rate per day of the dominant three species in the area was estimated from their sampled biomass to be 3.81 ($\text{mgO}_2/\text{m}^2/\text{day}$) in June and 14.21 ($\text{mgO}_2/\text{m}^2/\text{day}$) in July. These consumption rates were about 0.1~0.5% of the total oxygen consumption rate in the area. The results show that oxygen consumption rate of the three species' biomass affect only a little formation and maintenance of oxygen-deficient water mass in the area in summer.

1. はじめに

富栄養化が進行した内湾域では、しばしば成層期に貧酸素水塊が形成される。SMITH *et al.* (1972), SMITH (1973) および今林 (1989) は、貧酸素水塊の形成に果たす大型底生動物群集の役割を、その酸素消費量の割合から検討している。

周防灘南西部の浅海域では、夏季にしばしば貧酸素水塊が形成される。磯辺ほか (1993) は、同浅海域での貧酸素水塊の形成は成層の発達といった物理的な条件による酸素供給量の低下だけでは説明がつかず、生物学的・化学的な酸素消費速度の増加が主要な要因であると述べている。また、同浅海域の底層水および底泥による酸素消費速度の測定については、神菌ほか (1995) が行ったが、大型底生動物群集の酸素消費については調べられていない。

本研究では、周防灘南西部の浅海域に調査点を設定し、野外調査を行うと同時に、大型底生動物群集の中で出現量の多かったシズクガイ *Theora lubrica*、チヨノハナガイ *Raeta rostralis* およびシログネゴカイ科の一種である *Nephtys oligobranchia* (IMAJIMA and TAKEDA, 1987) の酸素消費速度を室内で測定した。

1996年3月14日受理

* 福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所
〒828 福岡県豊前市大字宇島76-30
Fukuoka Fisheries and Marine Technology Research
Center, Buzenkai Laboratory 76-30, Unoshima, Buzen,
Fukuoka 828, Japan

** 水産大学校
〒759-65 山口県下関市永田本町2-7-1
National Fisheries University 2-7-1, Nagata-Honmachi,
Shimonoseki 759-65, Japan

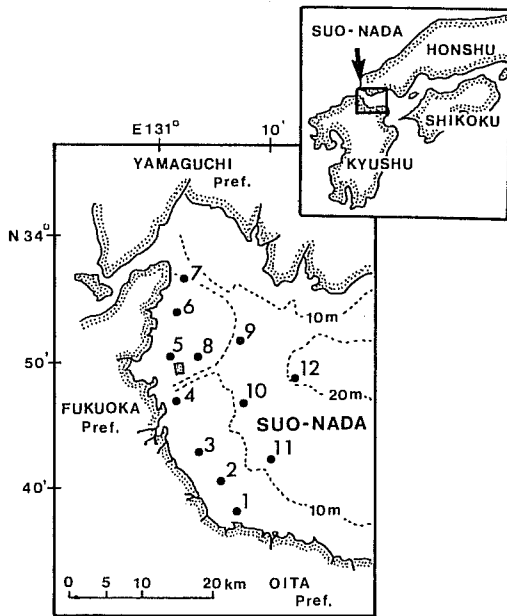


Fig. 1. Map of the southwestern area of the Suo-Nada Sea. Closed circles denote the station of observations. Numerals on the dotted line show water depth in meter.

また、野外での大型底生動物群集による酸素消費速度を試算した。

2. 材料と方法

2.1 野外調査

周防灘の St. 4 (Fig. 1; 水深 8m) において、1995 年 6 月～8 月に約 1 週間間隔で、底層水 (底上 1m) の水温 (アレック電子 STD, AST 1000M) と溶存酸素濃度 (YSI 溶存酸素計, M58) を測定すると同時に、灘南西部における底層水の溶存酸素飽和度の水平分布も測定した。また、同年 6 月 21 日、7 月 26 日および 8 月 23 日には、スミス・マッキンタイヤー型採泥器 (採泥面積 0.05m²) を用いて大型底生動物を採取した。採泥は調査日毎に 3 回行い、1mm 目の篩で選別して採取し、10%ホルマリン溶液で固定し、種の同定および湿重量と個体数の測定を行った。

2.2 室内実験

酸素消費速度の測定材料として、シズクガイ、チヨノハナガイおよび *N. oligobranchia* を、1995 年 6～9 月に、周防灘の St. 4 付近で、スミス・マッキンタイヤー型採泥器を用いて採集した。採集した 3 種は、

1mm 目の篩でふるい分けしてポリ容器 (2 l 容) に入れ、海水を加えて実験室に持ち帰った。1～2 日間後に、外見上損傷がなく、活発に活動している個体をガラス水槽 (20 l) に移し、実験に供した。実験には 100ml 容の孵卵瓶を用い、これにワットマン GF/C フィルター (目合 1.2 μm) でろ過した塩分約 32‰ の海水 (以降、ろ過海水と表記) を満たし、3 種類の大型底生動物を 1 個体入れ、密栓をして一定時間安置した。酸素消費速度は、密栓時と安置後の酸素濃度の差から計算した。溶存酸素の測定には、スターラー付き孵卵瓶用酸素センサーを取り付けた溶存酸素計 (YSI, M58) を用いた。供試した底生動物の個体数と湿重量および試験時の水温は、Table 1 に示した。

溶存酸素濃度と酸素消費速度の関係

海水中の酸素濃度が、供試動物の酸素消費速度に及ぼす影響を調べるため、海水の酸素濃度を変えて底生動物の酸素消費速度を測定した。

エアポンプと窒素ガスで種々の酸素濃度に調整したろ過海水を孵卵瓶に満たして 3 種の底生動物を 1 個体入れ、みかけ上、呼吸が安定したところ (5～6 時間後) で実験を開始した。孵卵瓶に密栓をして、温度を 20℃ に設定した恒温室内で、2～17 時間安置し、酸素消費速度を測定した。密栓時の酸素濃度は、シズクガイでは 1.19～7.12mgO₂/l (飽和度で 16～95%)、チヨノハナガイでは 0.35～7.20mgO₂/l (5～96%)、*N. oligobranchia* では 1.30～7.19mgO₂/l (17～96%) の範囲であった。

体重と酸素消費速度の関係

個体サイズと酸素消費速度の関係を明らかにするため、種々の大きさの供試動物を用い、酸素消費速度を測定した。酸素飽和させた過海水を満たした孵卵瓶に供試個体を 1 個体入れ、5～6 時間経過したのち実験を開始した。密栓をして 20℃ に設定した恒温室内で、2～15 時間安置し、酸素消費速度を測定した。

温度と酸素消費速度の関係

水温と酸素消費速度の関係を調べるため、海水の温度を変えて、酸素消費速度を測定した。温度条件は、11.3～28.8℃ の温度範囲 (Table 1) で、3～5℃ 間隔の 5 段階とした。それぞれの温度のろ過海水で満たした孵卵瓶に 1 個体入れ、実験水温に順応させる意味で約 20 時間経過したのち実験を開始した。密栓をして 4～23 時間安置し、酸素消費速度を測定した。

Table 1. Conditions of experiments on the relationship of oxygen consumption rate to dissolved oxygen concentration (Experiment 1), to wet weight (Experiment 2) and to water temperature (Experiment 3).

IN: individual number used in the experiment, WW: wet weight unit per individual, WT: water temperature.

Experiment	Species	IN	WW (mg)		WT(°C)	
			range	mean	range	mean
1	<i>Theora lubrica</i>	14	13-21	18	20.7-21.2	21.0
	<i>Raeta rostralis</i>	12	76-130	130	20.0-21.0	20.4
	<i>Nephtys oligobranchia</i>	10	8-15	11	20.0-21.0	20.3
2	<i>Theora lubrica</i>	15	3-87	24	19.0-19.5	19.3
	<i>Raeta rostralis</i>	15	81-170	125	19.0-20.0	19.3
	<i>Nephtys oligobranchia</i>	15	5-25	11	19.3-19.5	19.4
3	<i>Theora lubrica</i>	25	9-23	16	11.3-28.8	—
	<i>Raeta rostralis</i>	25	75-171	126	12.5-27.4	—
	<i>Nephtys oligobranchia</i>	24	5-17	11	12.0-28.3	—

3. 結果

3・1 野外調査

St. 4 での底層の水温と溶存酸素濃度 (DO) の推移を Fig. 2 に示す。

底層の水温は、6月上旬には20°C前後であったが、その後徐々に上昇し、7月上旬には22°C台を示した。7月下旬には急激に上昇し26°C前後となり、8月下旬には28°C台となった。底層DOは、6月から7月上旬までは4.96~7.28mgO₂/l (68~96%) の範囲で推移していたが、7月11~18日には2.67~2.71mgO₂/l (37~38%) と低い値を示した。7月25日には5.18mgO₂/l (80%) 近くまで回復したが、8月22日には再び2.35mgO₂/l (36%) に低下した。なお、大型底生動物を採取した6月21日には6.12mgO₂/l (83%)、7月26日には5.06mgO₂/l (74%)、8月23日には3.54mgO₂/l (54%)であった。

Fig. 3 には、周防灘南西水域での底層DOが低かった7月11日、18日および8月22日の底層DOの水平分布を示す。いずれも St. 4 を中心として、貧酸素水塊が形成されているのが分かる。他の観測日には貧酸素水塊は形成されていなかった。このような浅海域での貧酸素水塊の形成は、1991年にも観察されている(磯辺ほか, 1993)。

大型底生動物は、6月21日には6種、161個体/m²、肉湿重量1.56g/m²、7月26日には9種、306個体/m²、肉湿重量2.22g/m²であったが、8月23日には出現は全く認められなかった (Table 2)。主要な構成種を見

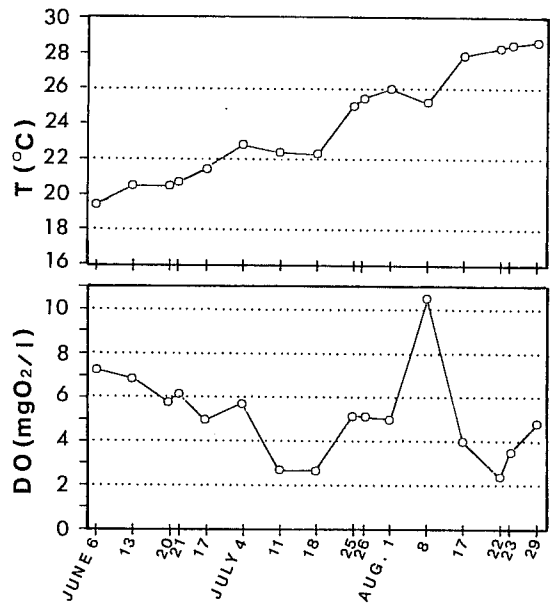


Fig. 2. Temporal fluctuations of water temperature (upper panel) and DO (lower panel) at 1m above the bottom at Stn. 4.

ると、シズクガイ、チョノハナガイおよび *N. oligobranchia* の3種の合計は、6月21日には94個体/m² (58%)、肉湿重量1.26g/m² (81%)、7月26日には220個体/m² (72%)、肉湿重量1.71g/m² (77%) を占めていた。

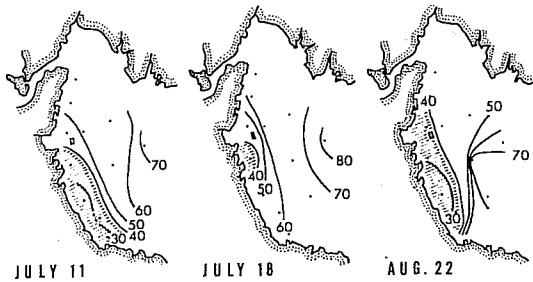


Fig. 3. Horizontal distributions of dissolved oxygen content (DO) at 1m above the bottom on 11 July, 18 July and 22 August, 1995. The shaded area indicates area with DO less than 40%.

3・2 溶存酸素濃度と酸素消費速度の関係

溶存酸素濃度を変えて測定した底生動物3種の酸素消費速度の変化を Fig. 4 に示す。図から酸素消費速度は、いずれの種も酸素濃度が 3mgO₂/l (飽和度40%) まで低下する間ほぼ一定であるが、さらに酸素濃度が低下すると著しく減少していた。

シズクガイの酸素消費速度は、酸素濃度が 3mgO₂/l (40%) 以上では 150 μgO₂/g wet/h 前後を示すが、1.0~1.5mgO₂/l (15~20%) では 1/2 に低下し、60 μgO₂/g wet/h 前後を示した。チヨノハナガイの酸素消費速度は、酸素濃度が 3mgO₂/l 以上では 60 μgO₂/g wet/h 前後の値を示すが、0.5mgO₂/l (10%) では 10 μgO₂/g wet/h 前後と、1/5 に低下した。*N. oligobranchia* の酸素消費速度は、酸素濃度 3mgO₂/l 以上では、130 μgO₂/g wet/h 前後の値を示すが、1.5mgO₂/l (20%) では、約 40 μgO₂/g wet/h を示し、

1/3 に低下した。

3・3 底生動物の体重と酸素消費速度の関係

一般に、大きな個体の酸素消費速度は同種の小さな個体よりも大きいですが、単位体重当たりでは小さい。体重 (*W*, mg wet weight) と酸素消費速度 ($\dot{V}O_2$, μg O₂/individual/h) との関係は $\dot{V}O_2 = a \cdot W^b$ で表されることから、底生動物3種についての測定結果を Fig. 5 に示す。いずれの種も、酸素消費速度は肉湿重量の増加にともなって指数関数的に増加しており、それらの関係は、シズクガイでは $\dot{V}O_2 = 0.323 \cdot W^{0.769}$ ($r^2 = 0.95$), チヨノハナガイでは $\dot{V}O_2 = 0.132 \cdot W^{0.842}$ ($r^2 = 0.89$), *N. oligobranchia* では $\dot{V}O_2 = 0.163 \cdot W^{0.846}$ ($r^2 = 0.91$) で表された。回帰式の定数 *b* は、一般に、0.67 から 1 の範囲の値を示すが、本研究で対象とした3種の底生動物では 0.769~0.846 の範囲であった。

3・4 温度と酸素消費速度の関係

種々の温度条件下で測定された底生動物3種の酸素消費速度の変化を Fig. 6 に示す。酸素消費速度 ($\dot{V}O_2$, μgO₂/g wet/h) は水温 (*T*, °C) の増加にともなっていずれの種も増加した。それらの関係は、シズクガイでは $\dot{V}O_2 = 0.027 \cdot T^{2.829}$ ($r^2 = 0.94$), チヨノハナガイでは $\dot{V}O_2 = 0.062 \cdot T^{2.308}$ ($r^2 = 0.94$), *N. oligobranchia* では $\dot{V}O_2 = 0.100 \cdot T^{2.333}$ ($r^2 = 0.95$) で表された。

4. 考察

底層 DO は 7月11~18日に 2.67~2.71mgO₂/l (水温

Table 2. Individual number (IN) and wet weight (WW, g) of macrobenthos per unit square meter collected at the station 4 in the southwestern area of the Suo-Nada Sea. Wet weight of mollusca was that of soft part except shell and operculum.

	June 21		July 26		August 23	
	IN	WW	IN	WW	IN	WW
Mollusca						
<i>Theora lubrica</i>	27	0.15	160	1.01	0	0
<i>Raeta rostralis</i>	27	0.89	47	0.58	0	0
Other species	20	0.07	46	0.20	0	0
Arthropoda						
<i>Nephtys oligobranchia</i>	40	0.22	13	0.12	0	0
Other species	47	0.23	27	0.22	0	0
Echinodermata	0	0	13	0.09	0	0
Total	161	1.56	306	2.22	0	0

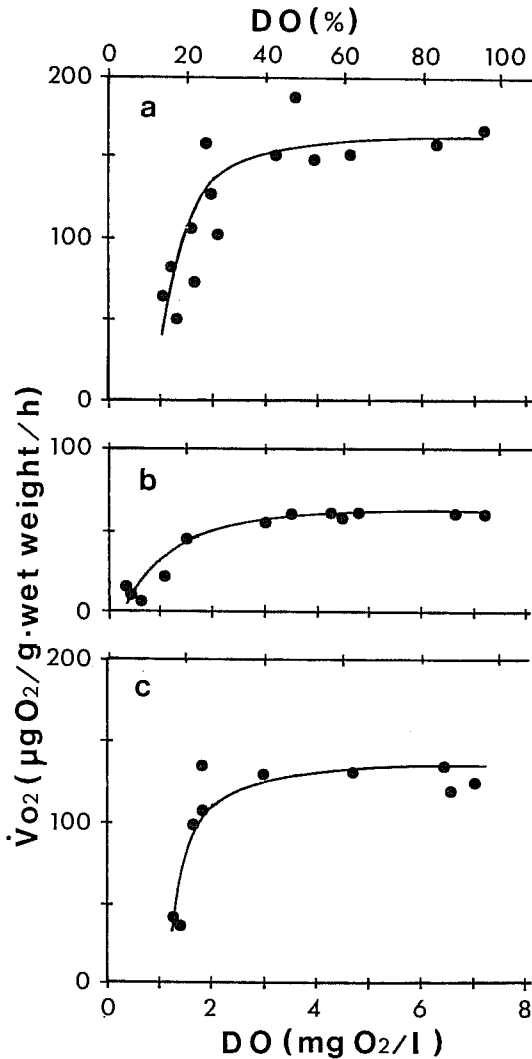


Fig. 4. Relation of oxygen consumption rate ($\dot{V}O_2$) to dissolved oxygen content (DO) in *Theora lubrica* (a), *Raeta rostralis* (b) and *Nephtys oligobranchia* (c). The lower and the upper X-axis of each figure indicate mgO_2/l and % in unit, respectively.

22.5°C, 飽和度37~38%)の低い値を示したにも拘わらず、8日後(7月26日)の底生動物の調査において多数の個体の生息が確認されている。一方、室内実験下でのシズクガイ、チョノハナガイおよび *N. oligobranchia* の酸素消費速度は、いずれも酸素濃度が $3mgO_2/l$ (40%) に低下するまではほぼ同じ値を示していた。玉井(1993)によると、シズクガイは水温25.1°Cで、酸素濃度2.2~2.4 mgO_2/l 以上では活発な摂

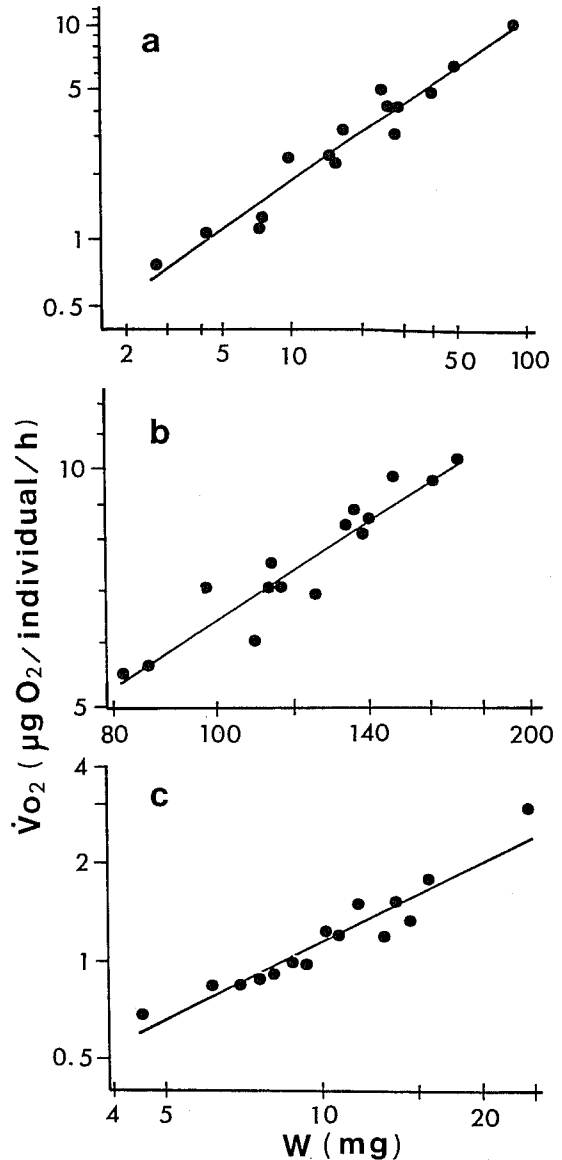


Fig. 5. Relation of oxygen consumption rate ($\dot{V}O_2$) to wet weight (W) in *Theora lubrica* (a), *Raeta rostralis* (b) and *Nephtys oligobranchia* (c).

餌活動を行い永続的な生存が可能である。以上のことから、7月11~18日(水温22.5°C)に生息していた個体は、酸素濃度2.67~2.71 mgO_2/l のDO減少程度では大きな影響を受けなかったものと推察される。

8月23日においては、底生動物の生息は確認できなかった。8月になると、水温は一段と上昇し(25~28°C)、また底層DO濃度は8月8日(10.52 mgO_2/l , 飽和度で150%)に一時的に急増するが概して低かつ

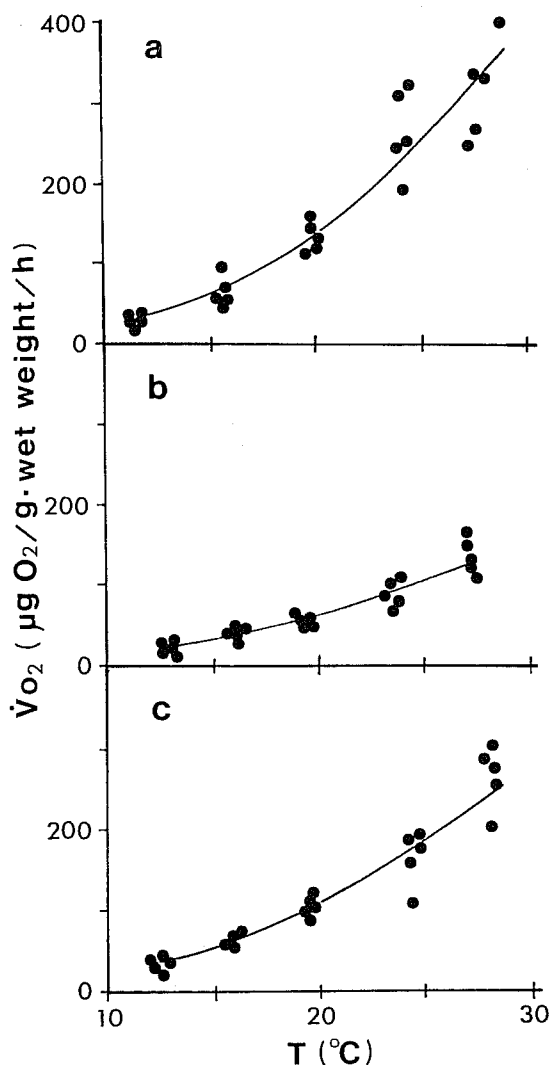


Fig. 6. Relation of oxygen consumption rate ($\dot{V}O_2$) to water temperature (T) in *Theora lubrica* (a), *Raeta rostralis* (b) and *Nephtys oligobranchia* (c).

た。特に、8月22日(水温28.3°C)には2.35mgO₂/lと低く、この値は20~21°Cでの酸素濃度と酸素消費速度の実験で、酸素消費速度が減少する3mgO₂/l以下の区間に相当する(Fig. 4)。さらに、水温と酸素消費速度の関係を調べた結果では(Fig. 6)、底生動物3種の水温28°Cのときの酸素消費速度は、水温20°Cのときの酸素消費速度の約2倍となっている。以上のことから、8月23日に底生動物が消失したことは、底層DO濃度が低下したこと、さらに水温の上昇に伴い酸素消費速度(呼吸量)が増加し、貧酸素に対する耐性が低下し

た(Theede *et al.*, 1969)のために生じたものと推察される。

夏季の卓越種である3種の単位面積当たりの酸素消費速度を試算すると、次のようになる。6月21日(21.1°C)のシズクガイ(平均5.6mg)では、個体当たりの酸素消費速度は体重と酸素消費量の関係式 $\dot{V}O_2 = 0.323 \cdot W^{0.769}$ より1.21 μgO₂/hとなる。しかし、この関係式を求めた際の水温が19.3°Cであったことから、調査当日の水温21.1°Cに補正するための係数は、水温と酸素消費速度との関係式より、 $0.027 \cdot 21.1^{2.829} / 0.027 \cdot 19.3^{2.829} = 1.29$ となる。この係数を用いて酸素消費速度を補正すると、個体当たりの酸素消費速度は1.21 × 1.29 = 1.56 μgO₂/hとなり、単位面積当たりの酸素消費速度は0.00156 × 27 × 24h = 1.01mgO₂/m²/dayとなる。チヨノハナガイおよび*N. oligobranchia*でも同様に計算すると、それぞれ1.99mgO₂/m²/day, 0.82mgO₂/m²/dayとなる。7月26日の場合にも、同様に計算すると、単位面積当たりの酸素消費速度は、シズクガイでは11.38mgO₂/m²/day, チヨノハナガイでは2.34mgO₂/m²/day, *N. oligobranchia*では0.63mgO₂/m²/dayとなる。3種を合計した酸素消費速度は、6月21日の場合には3.81mgO₂/m²/day(水温21.1°C, 94個体/m²), 7月26日の場合には14.21mgO₂/m²/day(水温25.5°C, 220個体/m²)となる。底生動物の採集と同時に測定した懸濁物、沈降物および底泥を合わせた全酸素消費速度は平均で2,850mgO₂/m²/dayであった(神菌ほか, 1996)。したがって、大型底生動物だけによる酸素消費速度の比率は、6月21日の場合には0.1%, 7月26日の場合には0.5%に相当する。今回の調査での3種の肉湿重量の合計は、6月21日の場合には大型底生動物群集の合計の81%, 7月26日の場合には77%と、同群集の合計の大半を占めていた(Table 2)。これらのことから、大型底生動物群集全体の酸素消費速度は、前記の3種だけの値(6月21日の3.81mgO₂/m²/day, 7月26日の14.21mgO₂/m²/day)よりもわずかに大きくなる程度であると考えられる。

周防灘南西部の底質は、泥分率96%, 強熱減量11%の有機物の多い軟泥底である。今林(1983)によると、本調査水域は、同じ瀬戸内海の燧灘の底泥の性状(泥分率84%, 強熱減量10%)と類似しており、また夏季の燧灘では、軟体動物ではシズクガイやチヨノハナガイが、多毛類ではスピオ科の一種*Paraprionospio* sp.が卓越していた。燧灘東部海域での大型底生動物群集の酸素消費速度は、10.8mgO₂/m²/day(水温24.7°C,

116個体/m²)であり(今林, 1989), この値は底層水と底泥を含めた全酸素消費速度 1,790mgO₂/m²/day (OCHI and TAKEOKA, 1986) の0.6%であった。

燧灘での大型底生動物による酸素消費速度や, 全酸素消費速度に占める大型底生動物による酸素消費速度の割合は, 周防灘南西部で算出された値とほぼ同じ値である。これは, 底質や底生動物の組成が類似していることを, 主に反映しているものといえよう。本研究で算出された周防灘での底生動物による酸素消費速度はほぼ妥当な値と考えられる。

以上に述べたように, 全酸素消費速度に占める大型底生動物群集による酸素消費速度の割合が著しく小さいこと, 8月には大型底生動物が採集されなかったにもかかわらず, 貧酸素水塊が7月と同様に発生していることから, 周防灘南西部の浅海域で夏季にみられる貧酸素水塊の形成・維持に対して, 大型底生動物群集の酸素摂取が及ぼす影響は小さいものと考えられる。

5. 謝 辞

底生動物の同定について懇切なる御指導と御協力を頂いた南西海区水産研究所赤潮環境部漁場保全室長玉井恭一博士, 本研究の実施と取りまとめに際してご指導して頂いた福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所古田久典所長, さらに内容および表現について貴重な御指摘を頂いた査読者と担当編集委員の方に深く感謝いたします。

文 献

- 今林博道 (1983) 底生動物群集に及ぼす貧酸素水塊の影響. 日水誌, **49**, 7-15.
- 今林博道 (1989) 富栄養化海域における底生動物群集と貧酸素水塊の相互作用. 沿岸海洋研究ノート, **26**, 119-128.
- IMAJIMA, M. and Y. TAKEDA (1987) Nephtyidae (Polychaeta) from Japan. Bull. Natn. Sci. Mus., Tokyo, Ser. A, **13**(2), 47-50.
- 磯辺篤彦・神菌真人・俵 悟 (1993) 周防灘南西部海域における貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, **31**, 109-119.
- 神菌真人・磯辺篤彦・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—. 沿岸海洋研究ノート, **32**, 167-175.
- 神菌真人・江藤拓也・佐藤博之 (1996) 周防灘南西部の浅海域下層における酸素収支. 海の研究 (投稿中)
- OCHI, T. and H. TAKEOKA (1986) The Anoxic Water Mass in Hiuchi-Nada Part. I Distribution of the Anoxic Water Mass. J. Oceanogr. Soc. Japan, **42**, 1-11.
- SMITH, Jr. K.L., K.A. BURNS and J.M. TEAL (1972) *In situ* respiration of benthic communities in Castle Harbor, Bermuda. Mar. Biol., **12**, 196-199.
- SMITH, Jr. K.L. (1973) Respiration of a Sublittoral Community. Ecol., **54**, 1065-1075.
- 玉井恭一 (1993) シズクガイの貧酸素耐性. 日水誌, **59**, 615-620.
- THEEDE, H., A. PONAT, K. HIROKI and C. SCHLIEPER (1969) Studies on the resistance of marine bottom invertebrates to oxygen-deficiency and hydrogen sulphide. Marine Biol., **2**, 325-337.