

児島湾における底質環境の現状と 貧酸素水塊の動態に関する現地観測

高木 秀蔵¹・石黒 貴裕¹・弘奥正憲¹

Sediment Conditions and field observations of hypoxia in Kojima Bay, Japan

Shuzo Takagi¹, Takahiro Ishiguro¹ and Masanori Hirooku¹

Abstract: Field observations were carried out to identify the effects of hypoxia on 2 macro-benthos in Kojima Bay during 1996 to 2012. Sediment conditions (COD, IL, AVS, content of mud) in a semi-enclosed section of the bay showed higher values than in the bay mouth. Hypoxia in the bottom layer developed in August and September. Macro-benthos species in September were lower than in June. Bottom DO decreased during neap tides, and increased during spring tides. High DO water mass intruded intermittently into the bottom zone from the bay mouth during flood tides. Bottom DO fluctuated 2 ~ 3 mg/L with the tide over 12 hour periods.

Key words: benthos, Kojima Bay, hypoxia, sediment condition.

はじめに

閉鎖性内湾の特に流れの弱い場所では、夏季に水温、塩分の成層が発達するとともに、鉛直混合が制限され、底層への酸素供給が減少する。その状況に加え、底質が富栄養化していた場合、生物及び化学的作用により底層の酸素が消費され、底層に貧酸素水塊が発生する（柳，2004）。貧酸素水塊は、その場所に生息するベントスの生残に悪影響を与えるだけでなく、それらを餌とする生物すべてに影響を

与えることから、沿岸域の生物生態系を健全に保つためには、解決すべき環境問題である（鈴木ほか，1998）。

備讃瀬戸中央部に位置する児島湾は、人口密集地である岡山市の南に位置し、吉井川、旭川、人工湖である児島湖からの淡水の流入と栄養塩の負荷がある。この陸域から供給される栄養塩の恩恵を受けて、同湾には魚類やエビ類の稚魚が多く生息するといわれており、岡山県のアキアミ (*Acetes japonicus*)、シラウオ (*Salangichthys microdon*) の8割以上が児

¹ 岡山県農林水産総合センター 水産研究所 Research Institute for Fisheries Science, Okayama Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries, Setouchi, 701-4303, Japan

島湾とその周辺で漁獲されている（岡山県，1974～2005）。つまり，同湾周辺の水産業を持続的に発展させるためには児島湾の現状を理解し，良好な環境を維持することが必須である。

児島湾は，湾口部から湾奥部までの距離が10 km以上であるのに対し，湾口幅は1 km程度と閉鎖性が高いため，湾奥部では，以前から底質の悪化と貧酸素水塊の発生が危惧されていた。ところが，同湾における底質や貧酸素水塊に関する調査は少なく，高木ほか（2009）が，湾奥の底層では夏季に貧酸素水塊が存在すること，湾口と比べると湾奥では生物の種類数が少ないことを示しているのみであり，同湾における貧酸素水塊の形成過程と時期，底生物に与える影響については不明である。また，我が国では東京湾，大阪湾といった一定以上の大きさと深さを有し，底層における環境変動が少ない内湾の貧酸素水塊の研究は多いものの（石井・大畑，2010；藤原ほか，2004），児島湾のように河川水と潮汐による水位変動の影響を強く受ける上に，平均水深が5 m以下とごく浅い閉鎖性内湾における貧酸素水塊の研究例はほとんどない。

本研究では，まず同湾における底質と貧酸素水塊の概要について示し，次に貧酸素水塊が同湾の底生物に悪影響を与えていることを示した。最後に，海底直上の溶存酸素量（DO）の連続観測結果をもとに，同湾における貧酸素水塊の形成過程と動態について考察を行った。

材料および方法

定期調査（水質）

1996年4月から2012年3月までの間，毎月一回，図1（a）に示す児島湾の測点1から5において，多項目水質計 AST1000S，ASTD687またはRinko-Profiler（JFEアドバンテック社製）を用いて，海面から海底まで10 cm毎の水温と塩分のデータを取得した。また，上記の調査に合わせて表層，2.5 m層，底層（底上1 m）の海水を採取し，ウィンクラー法によってDOの分析を行った。一部の試水については研究所に持ち帰った後に，GF/Cフィルター（Whatman社製）でろ過を行い，90%のアセトンで抽出した後に，Lorenzen（1967）の方法でクロロフィルa濃度の分析を行った。また，2008年4月から2012年3月については，全窒素（TN）・全リン（TP）分析装置 Quattro 2HR（BL-tech社製）を用いて，表層水のTNおよびTPの分析を行った。

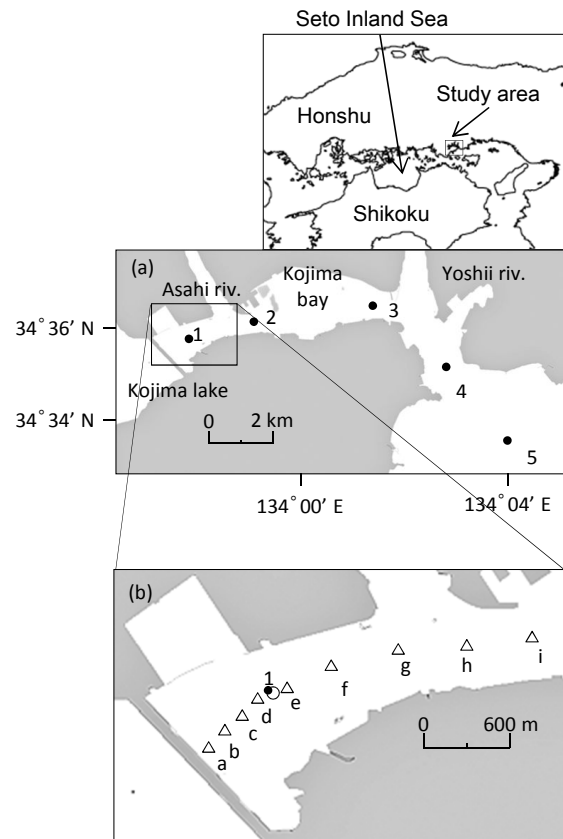


図1 児島湾周辺海域における調査地点。

- 定期調査測点。
- 水温，塩分，DOの連続観測測点。
- △ CTDによる鉛直調査測点。

Fig. 1 Location of the sampling stations in Kojima Bay.

- in sub-panel (a) indicates the monthly research stations.
- in sub-panel (b) indicates the salinity, temperature, and DO continuous monitoring station.
- △ in sub-panel (b) indicates the CTD observation stations.

定期調査（底質・ベントス）

上記の調査と合わせて毎年6月と9月に，すべての測点において，0.44 m²のSM型採泥器（離合社製）を用いて採泥を行い，一部を底質分析用に供し，残りをマクロベントス調査用のサンプルとした。底質分析は，化学的酸素要求量（COD），強熱減量（IL），全硫化物量（AVS），泥分率（粒径0.063 mm以下）について行った。マクロベントスは，1 mmの篩に残った生物について最終濃度10%のホルマリンで固定し，種または属レベルまで同定を行った。また，

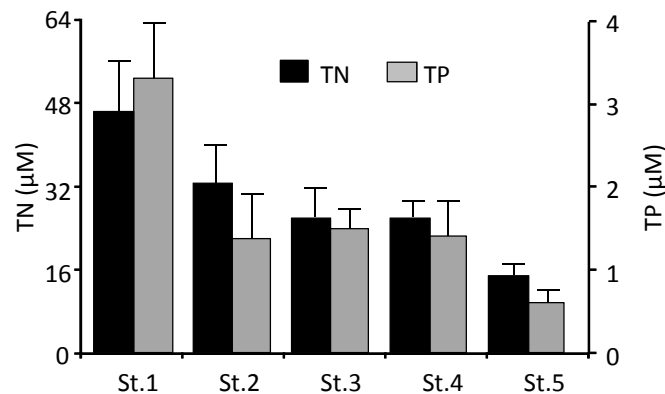


図2 2008年4月から2012年3月までのTNとTPの年平均値。図中の線は標準偏差を示す。
Fig. 2 Annual mean of TN and TP concentrations in surface from April 2008 to March 2012.
 Vertical bars indicate the standard deviation.

解析に用いた多様度指数 (H') は Shannon-Wiener の式を用い、水産用水基準による合成指標値は、 $0.582 \times (\text{COD} - 20.9) / 15.4 + 0.568 \times (\text{AVS} - 0.51) / 0.6 + 0.580 \times (\text{泥分率} - 64.9)$ として計算した (日本水産資源保護協会, 2005)。

DOの連続モニタリングと測線断面調査

2012年8月1日から11月1日までの間、図1(b)に示す測点1の海底直上(底上20cm)にワイパー式メモリーDO計RINKO-Wとワイパー式メモリー水温・塩分計INFINITY-CTW(JFEアドバンテック社製)を設置し、30分ごとのDO、水温、塩分を測定した。なお、9月14日の12:00から9月19日の16:00までの間は、測器のメンテナンスのために欠測とした。

また、測器の設置期間中の8月20日の上げ潮時(10:30~11:00)と9月19日の満潮時(15:00~15:30)において、図1(b)に示す9測点(a)~(i)において、Rinko-Profilerを用いて10cm毎のDO、水温、塩分を調べた。

海況データ

解析に用いた潮位は、気象庁のHP (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) から、同海域の直近に位置する宇野港の潮位を用い、大潮と小潮は気象庁の潮見表にしたがった。

また、本報では日本水産資源保護協会(2005)に従って4.3mg/L以下のDOを低酸素とし、柳(1989)に従って3.0mg/L以下を貧酸素とし、0.5mg/L以下を無酸素として便宜上説明を行う。

結果

定期調査(水質)

2008年4月から2012年3月までの表層のTNとTPの全平均値を図2に示した。

測点1では、TN濃度が $46.5 \pm 12.5 \mu\text{M}$ 、TP濃度が $3.3 \pm 0.7 \mu\text{M}$ であったが、両値ともに沖合の測点に向うにとともに低下し、測点5ではTN濃度が $14.6 \pm 4.4 \mu\text{M}$ 、TP濃度は $0.6 \pm 0.1 \mu\text{M}$ となった。また、TN、TPそれぞれについて測点ごとの全データを用いて、Scheffeの多重比較検定を行ったところ、TN、TPともに測点1ではそれ以外の測点よりも高い値を示し、測点5ではそれ以外の測点よりも低い値を示した($p < 0.05$)。

1996年4月から2012年3月までの塩分、クロロフィルa濃度、DOの月ごとの平均値の鉛直分布を図3に示した。

塩分は、すべての月において、湾奥の表層において低く、沖合の底層において高い値を示した。特に、春季から夏季にかけて河川水の影響は大きくなり、表層における塩分20以下の河川プルームの先端は5月、7月、9月には測点3まで到達していた(図3(a),(b))。一方、秋季から冬季には、河川水の影響は小さくなり、12月から2月には塩分20以下の場所は見られなかった(図3(c),(d))。塩分躍層は、一年を通じて水深2~3m付近で見られ、底層には河川水の影響はほとんど見られなかった。

クロロフィルa濃度は、表層では一年を通じて湾奥部において高かった。春季から夏季にかけて上昇し、8月には測点4でも $20 \mu\text{g/L}$ 以上となっていた(図

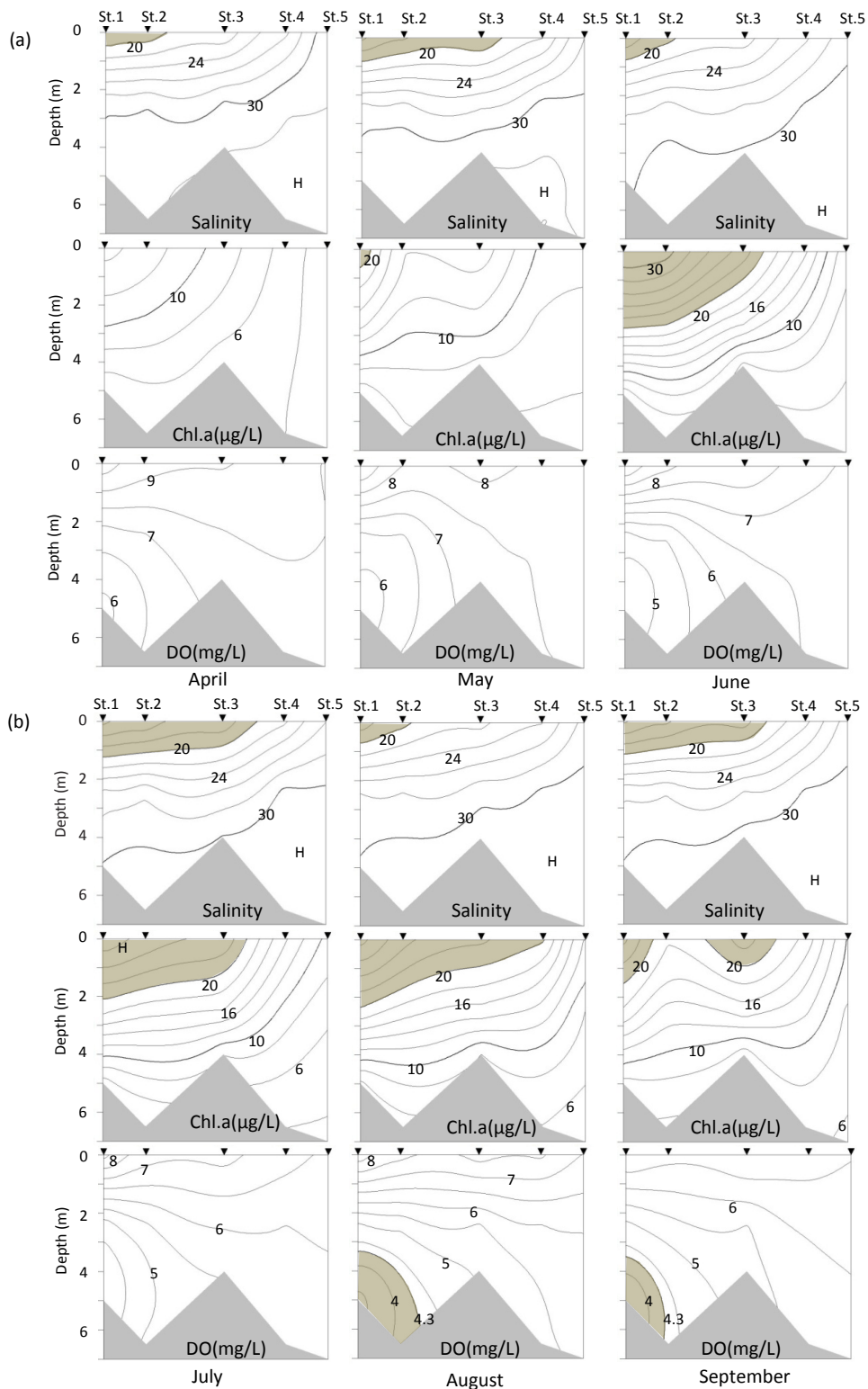


図3 (a) 塩分, クロロフィル a, DO の期間中平均値の鉛直断面図 (4 月, 5 月, 6 月).
 (b) 塩分, クロロフィル a, DO の期間中平均値の鉛直断面図 (7 月, 8 月, 9 月).

Fig. 3 (a) Cross sectional distributions of monthly mean salinity, chlorophyll a, and DO from April 1996 to March 2012. (April, May, and June)
 (b) Cross sectional distributions of monthly mean salinity, chlorophyll a, and DO from April 1996 to March 2012. (July, August, and September)

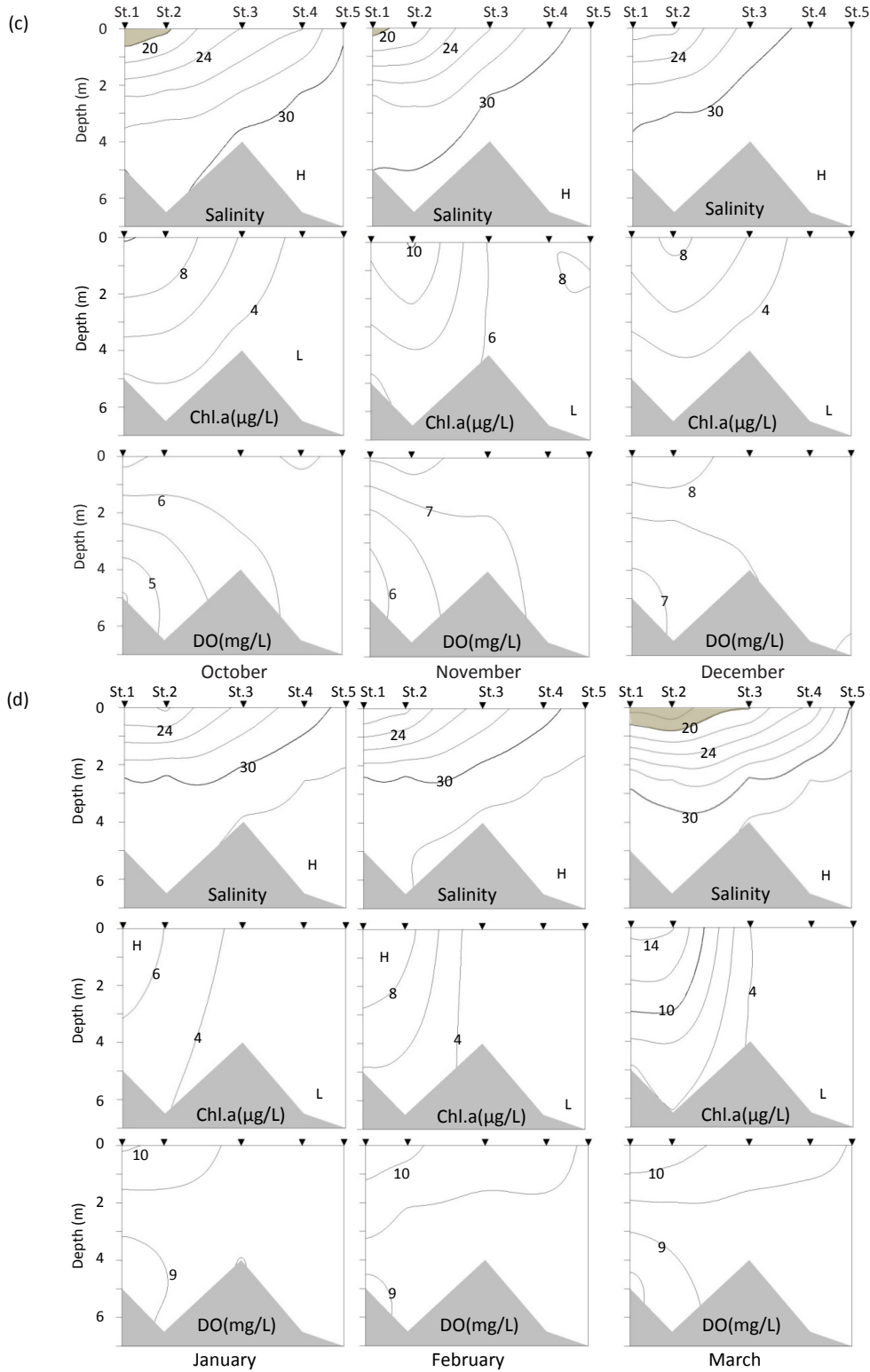


図3 (c) 塩分, クロロフィル a, DO の期間中平均値の鉛直断面図 (10月, 11月, 12月).

(d) 塩分, クロロフィル a, DO の期間中平均値の鉛直断面図 (1月, 2月, 3月).

Fig. 3 (c) Cross sectional distributions of monthly mean salinity, chlorophyll a, and DO from April 1996 to March 2012. (October, November, and December)

(d) Cross sectional distributions of monthly mean salinity, chlorophyll a, and DO from April 1996 to March 2012. (January, February, and March)

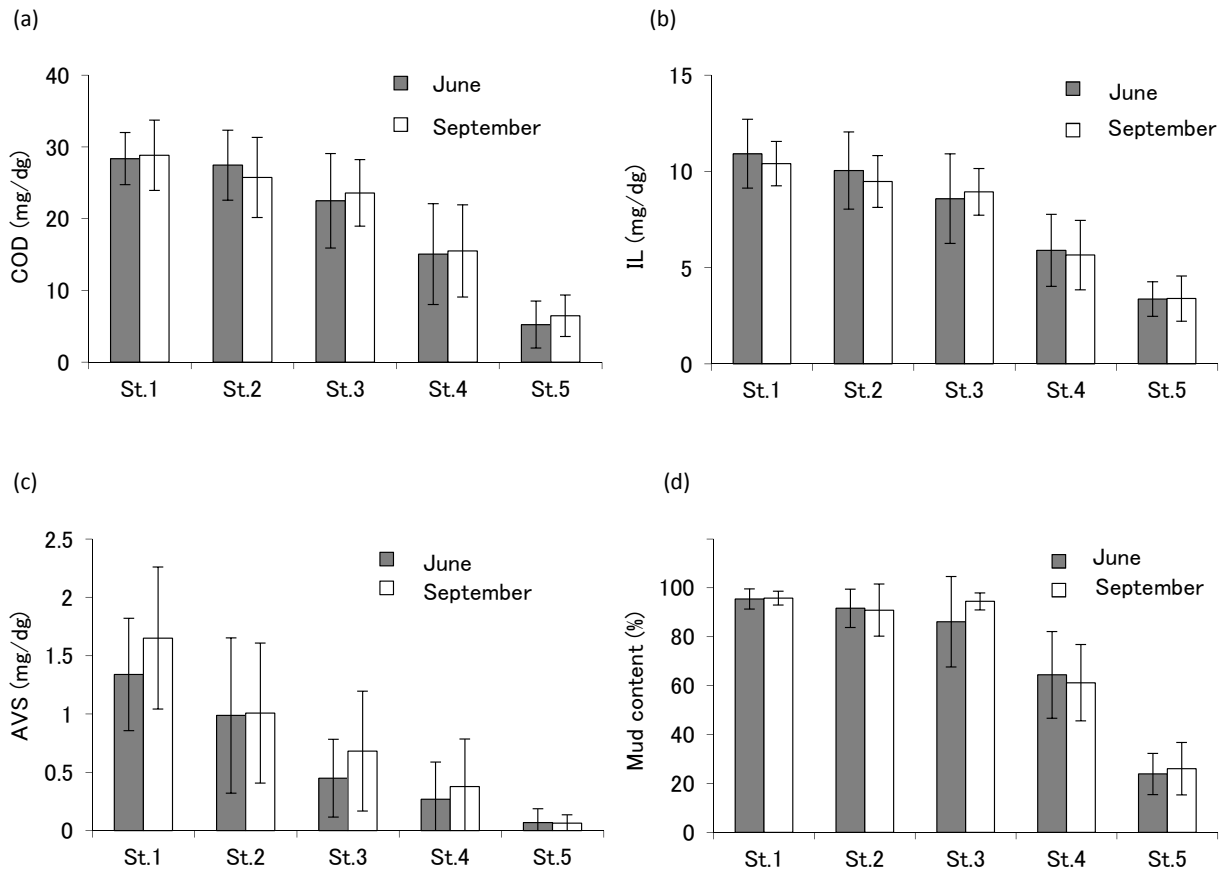


図4 児島湾の底質の期間中平均値 (a) COD, (b) IL, (c) AVS, および (d) 泥分率. 図中の線は, 標準偏差を示す.
Fig. 4 Annual mean sediment condition in Kojima Bay. (a) COD, (b) IL, (c) AVS, and (d) mud content. Vertical bars indicate the standard deviation.

3 (a), (b)). 秋季から冬季にかけては徐々に低下し, 12月から2月の間ではすべての場所において $10 \mu\text{g/L}$ 以下となった (図3 (c), (d)). 底層では, すべての場所で $10 \mu\text{g/L}$ 以下となっていた. 層別では, 水深が深くなるとともに, クロロフィル a 濃度は低下していた.

DOは, 一年を通じて湾奥の表層で高く, 湾奥の底層で低い値を示した. 春季から夏季にかけて, 湾奥の底層 DOは徐々に減少しはじめ, 8月と9月には 4.3 mg/L を下回る低酸素水塊が発生していた (図3 (b)). その後は徐々に回復し, 1月から3月には, 全層ではほぼ一様の値となっていた (図3 (d)). なお, この定期調査の DOは底上1mの結果であるため, 後に示す海底直上 (底上20cm) よりも高い傾向を示している.

定期調査 (底質・ベントス)

1996年から2011年までの, 6月と9月における

測点ごとの COD, IL, AVS, 泥分率の平均値を図4に示した.

COD, IL, AVS, 泥分率はいずれについても湾奥ほど高く, 沖合では低かった.

CODは測点1から3の順に, 6月に $28.4 \pm 4.6 \text{ mg/dg}$, $27.4 \pm 4.9 \text{ mg/dg}$, $22.5 \pm 6.6 \text{ mg/dg}$ となり, 9月に $28.8 \pm 4.9 \text{ mg/dg}$, $25.7 \pm 6.0 \text{ mg/dg}$, $23.6 \pm 4.6 \text{ mg/dg}$ となり, これらの測点では水産用水基準で好ましいとされる値 20 mg/dg を上回った (図4 (a)). ILは, 測点1では, 6月に $10.9 \pm 1.8 \%$, 9月に $10.4 \pm 1.2 \%$ であったが, 沖合の測点では低下し, 測点5では6月に $3.4 \pm 0.9 \%$, 9月には $3.4 \pm 1.2 \%$ となった (図4 (b)). AVSは測点1から4の順に6月に $1.34 \pm 0.48 \text{ mg/dg}$, $0.99 \pm 0.67 \text{ mg/dg}$, $0.45 \pm 0.33 \text{ mg/dg}$, $0.27 \pm 0.32 \text{ mg/dg}$ となり, 9月に $1.65 \pm 0.61 \text{ mg/dg}$, $1.00 \pm 0.60 \text{ mg/dg}$, $0.68 \pm 0.51 \text{ mg/dg}$, $0.38 \pm 0.41 \text{ mg/dg}$ となり, これらの測点では, 水産用水基準で好ましいとされる値 0.2 mg/dg を上

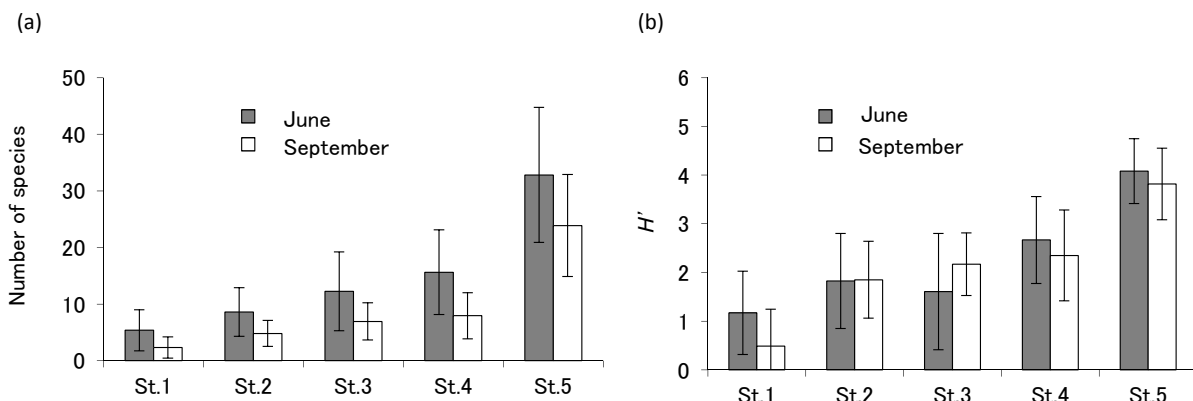


図5 6月と9月における児島湾の底生生物の分析結果 (a) 種類数, (b) H' . 図中の線は, 標準偏差を示す.
Fig. 5 Annual mean benthic condition on June and September in Kojima Bay. (a) Number of species, and (b) Shannon-Wiener diversity index (H'). Vertical bars indicate the standard deviation.

回った (図4 (c)). 泥分率は, 測点1~3では6月, 9月ともに90%以上となっていたが, 測点5では6月に $22.5 \pm 8.4\%$, 9月に $24.2 \pm 9.5\%$ となった (図4 (d)).

合成指標値の全平均値は, 測点1から5の順に6月では2.2, 1.3, 0.4, 0.2, -1.8となり, 9月では2.0, 1.1, 0.8, -0.4, -1.7となった. 合成指標値が負となった場所の底質環境は, 生物にとって良好であるとされることから, 湾奥の測点1, 2, 3は両月ともに生物にとって好ましくない底質であった.

1996年から2011年までの, 6月と9月における測点ごとの生物の種類数と H' の平均値を図5に示した.

生物の種類数は, 6月には測点1から5の順に 5.4 ± 3.6 , 8.6 ± 4.3 , 12.2 ± 6.9 , 15.6 ± 7.5 , 32.8 ± 11.9 となり, 9月には 2.3 ± 1.9 , 4.8 ± 2.3 , 6.9 ± 3.3 , 7.9 ± 4.1 , 23.9 ± 9.0 となった (図5 (a)). 測点間の比較では, 6月, 9月ともに湾奥の測点の方が生物の種類数は少なく, の測点ほど多かった. 測点ごとに6月と9月の種類数の比較を行ったところ (t-test), すべての測点において6月の方が有意に高い値を示した ($p < 0.05$). H' は, 6月には測点1から5の順に 1.2 ± 0.9 , 1.8 ± 1.0 , 1.6 ± 1.2 , 2.7 ± 0.9 , 4.1 ± 0.7 となり, 9月にはそれぞれ 0.5 ± 0.8 , 1.9 ± 0.8 , 2.2 ± 0.6 , 2.4 ± 0.9 , 3.8 ± 0.7 となった (図5 (b)). 種類数と同様に, 6月, 9月ともに湾奥の測点の方が低かった.

DO と底生生物の経年変化

1996年から2011年までの測点1および2の8月

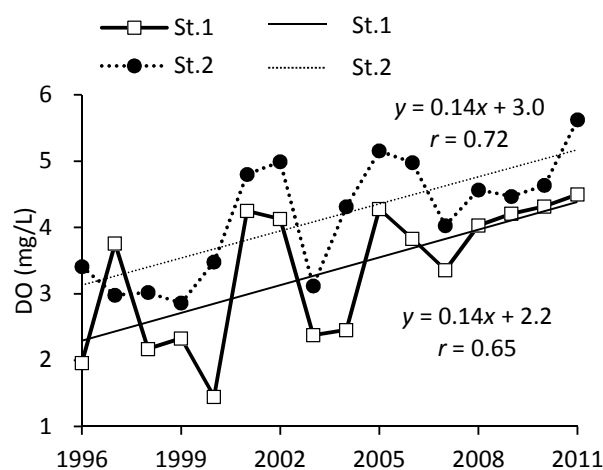


図6 1996年から2011年までの測点1, 2における8月の底層DO濃度の経年変化.

Fig. 6 Time series of bottom DO at St. 1 and St. 2 in August from 1996 to 2011.

の底層DOの推移を図6に示した. 1996年には, 測点1では2.0 mg/L, 測点2では3.4 mg/Lであったが, 2011年には測点1では4.5 mg/L, 測点2では5.6 mg/Lとなり, 両側点ともに有意な増加傾向が見られた ($p < 0.05$). また, 8月と9月に測点1, 2の底層と2.5 m層において低酸素 (4.3 mg/L以下) となっていた回数を表1に示した. 1996年から2000年の間には, 8月, 9月ともに底層と2.5 m層の両方において低酸素となっていることが多かったが, 2001年以降は, 2.5 m層で低酸素となる回数は徐々に減少し, 2011年には, いずれの調査時においても, 低酸素水塊は見られなかった.

表 1 1996 年から 2011 年までの 8, 9 月において測点ごとに 4.3 mg/L を下回っていた回数.

Table 1 Frequency of low DO conditions (< 4.3 mg/L) in August and September from 1996 to 2011.

layer	St.	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
B-1m	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	0
	2	2	2	1	2	2	0	0	2	0	0	0	1	0	0	1	0
2.5m	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
	2	0	2	1	0	2	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
Mean		1.25	2	1.25	1.5	2	0.75	0.75	1.5	1	0.5	0.5	1.25	0.25	0.75	0.75	0

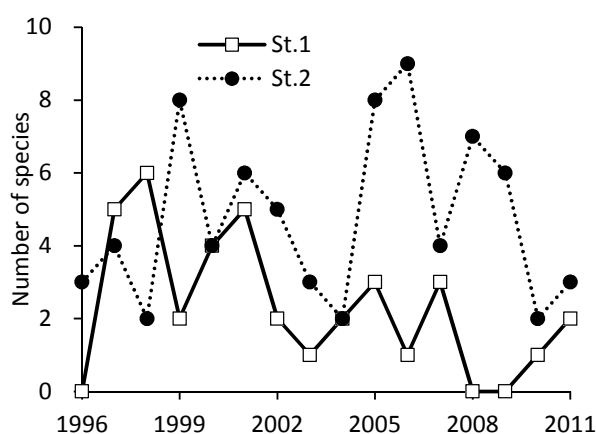


図 7 1996 年から 2011 年までの測点 1, 2 における底生生物の種類数の経年変化.

Fig. 7 Time series of number of macro-benthos species at St. 1 and St. 2 in September from 1996 to 2011.

1996 年から 2011 年までの 9 月における測点 1 および 2 の底生生物の種類数の推移を図 7 に示した. 測点 1, 2 ともに調査年ごとのばらつきが大きく, DO で見られたような単純な傾向は見られなかった.

DO の連続モニタリングと測線断面調査

2012 年 8 月 1 日から 11 月 1 日までの測点 1 の海底直上における 30 分ごとの水温, 塩分, DO, DO の 24 時間移動平均値について図 8 に示した. また, 図中には大潮の日を白の矢印で, 小潮の日を黒の矢印で示した.

水温は, 8 月 1 日には, 25.4°C であったが, 徐々に上昇し, 9 月 13 日には 28.4°C となり, 期間中の最高値を示した. その後低下し, 11 月 1 日には, 22.4°C となった.

塩分は, スパイク的な低下が見られたが, 期間を通じて 30 前後の値を示し, ほぼ一定であった.

DO の移動平均値は, 8 月 1 日には 1.7 mg/L であったが, 増減を繰り返しながら徐々に低下し, 8 月 19

日から 22 日の間はほぼ 0.5 mg/L 以下の無酸素状態であった. その後, 増減を繰り返しながら増加し, 11 月 1 日の観測終了時には 3.8 mg/L となった.

次に, DO と大潮と小潮の関係を見ると, 大潮から小潮の間に DO は低下し (灰色の矢印), 小潮から大潮の間に増加するという規則的な変動を示していた. 大潮から小潮の間の DO の最高値 (○) とその次の小潮から大潮の間の最低値 (▲) の差をもとに, 図中の期間 A (8 月 2 ~ 7 日), 期間 B (8 月 15 ~ 19 日), 期間 C (8 月 30 ~ 9 月 8 日), 期間 D (10 月 2 ~ 11 日), 期間 E (10 月 18 ~ 27 日) についてみかけの酸素消費速度を計算すると, 期間 A から E の順にそれぞれ 0.50 mgO₂/L/day, 0.40 mgO₂/L/day, 0.28 mgO₂/L/day, 0.18 mgO₂/L/day, 0.24 mgO₂/L/day となり, 低水温時と比べると高水温時の方が酸素の消費速度は速かった.

海底直上の DO と水温の全データを用いて (n = 4128), DO と水温の相関関係について図 9 に示した. 水温と DO の間には有意な負の相関が見られ(p

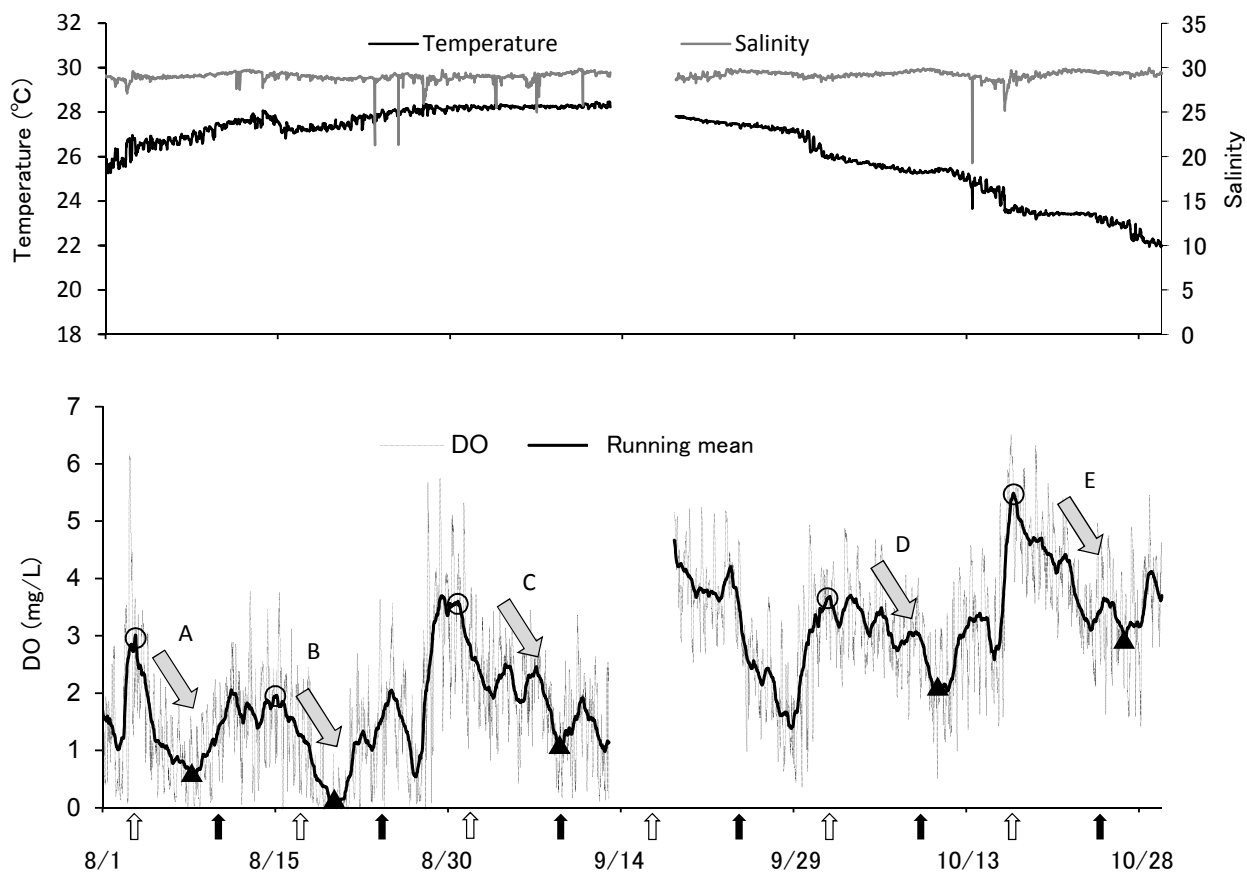


図8 2012年の8月1日～11月1日までの海底直上の水温、塩分、DOの推移。黒矢印は小潮の日を白矢印は大潮の日を示し、灰色の矢印はDOの減少傾向を示す。

○：大潮時周辺のDOの最高値，▲：小潮時周辺のDOの最低値を示す。

Fig. 8 Time series of bottom water temperature, salinity, and DO at St. 1 from August 1 to November 1, 2012. Black arrows indicate neap tides, white arrows indicate spring tides, grey arrows adjacent to the upper case alphabet letters indicate the downward trends in DO.

○ indicate the highest DO around the spring tide. ▲ indicate the lowest DO around the neap tide.

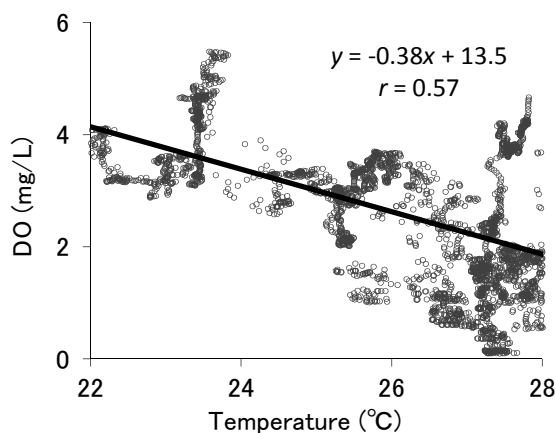


図9 2012年の8月1日～11月1日までの海底直上水の水温とDOの関係。

Fig. 9 Relationship between bottom temperature and DO from August 1 to December 1, 2012.

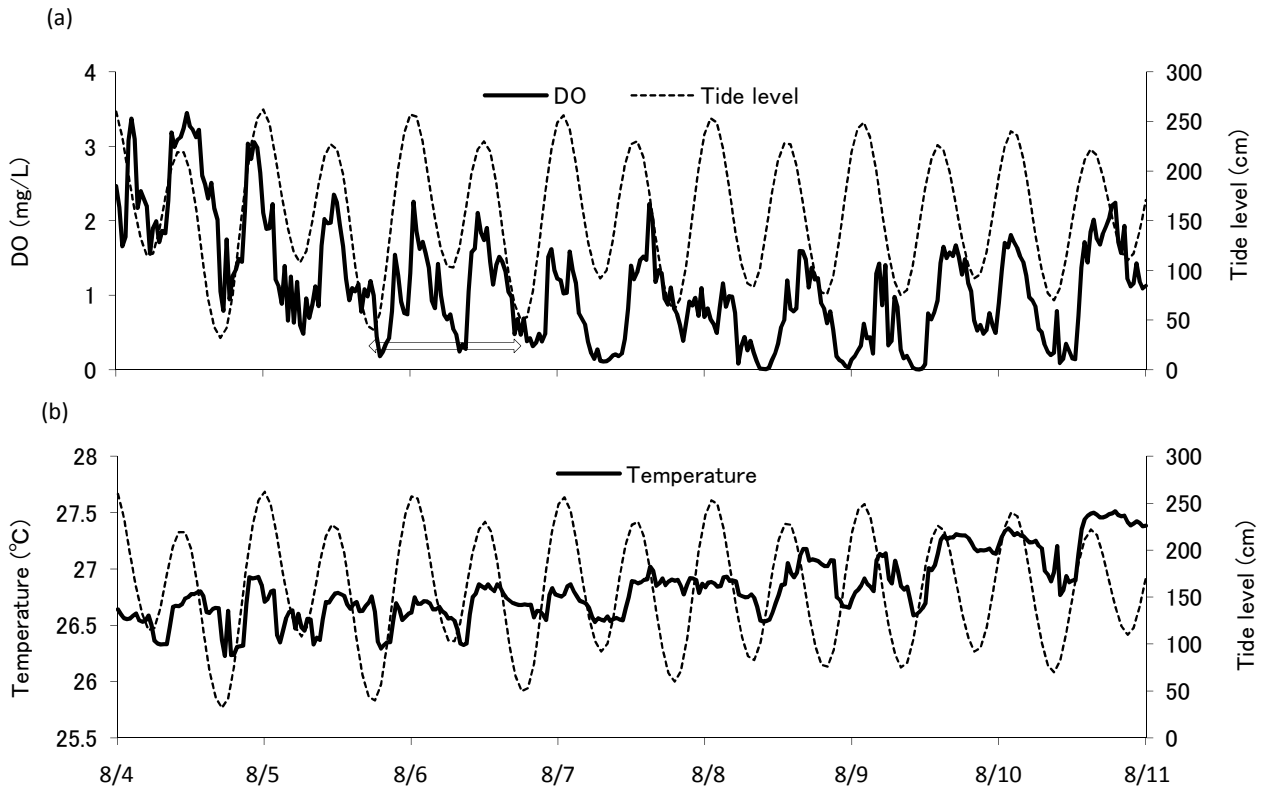


図10 2012年8月4日～11日までの海底直上水の水質の変化。(a)DOと潮位の変化,(b)水温と潮位の変化。
⇔:8月5日の低低潮時から8月6日の低低潮時までの期間を示す。

Fig. 10 Time series of bottom water qualities from August 4 to 11, 2012. (a) DO and tide level, (b) temperature and tide level. ⇔ indicate the period from the lower low tide in August 5 to the lower low tide in August 6, 2012.

<0.05), 高水温時のDOは低かった。

次に, 8月4日から8月11日までのDOと潮位, 水温と潮位の推移を図10に示した。

DOは, 潮位の上昇に伴って増加し, 潮位の低下に伴って減少する規則的な変動を示した(図10(a))。⇔で示した低低潮時から次の低低潮時までの潮位とDOの推移について説明する。最初の低低潮時には, DOは1.2 mg/Lであり, その30分後には0.2 mg/Lまで低下し, 期間中の最低値を示した。潮位の上昇に伴ってDOも増減を繰り返しながら増加し, 高高潮時には期間中最高となる2.3 mg/Lとなった。潮位の低下とともにDOも減少し, 高低潮時から1時間後には, 0.3 mg/Lとなった。その後も同様の変動を示し, 低高潮時の30分前に極大値となる2.1 mg/Lまで上昇し, 低低潮時には0.5 mg/Lまで減少した。

水温と潮位の関係は, 潮位の上昇に伴って水温も上昇し, 潮位の低下に伴って水温も低下する傾向が見られた(図10(b))。両者の位相がずれることがあったが, 概ね満潮時頃に水温変化の極大値を示した。

上に示した潮位変動に伴うDOの変化を調べるため, 8月20日の上げ潮時と9月19日の満潮時におけるDO, 塩分, 水温の測線上の鉛直断面を図11と図12に示した。

まず, 8月20日の上げ潮時について見ると, 測点a～gの底層には3 mg/L以下の貧酸素水塊が存在しており, 測器の設置場所付近の測点d, eの海底直上では無酸素になっていた(図11(a))。一方, 沖合に近い場所(h, i)の底層DOはそれらと比べると高かった。表層DOは湾奥において高い値を示し, 測点a～fではいずれも10 mg/L以上となっていた。

塩分は, 湾奥の表層ほど低く, 沖合の底層において高い値を示した。塩分29以上の水塊が, 測点f～iの底層で見られた(図11(b))。

水温は, 表層では高く, 底層では低かった(図11(c))。底層では, 測点eの海底直上を中心として27.5℃以下の水塊が見られた。沖合に近い測点h, iの底層では, その水塊よりも0.2～0.3℃高い水塊が存在した。

次に, 9月19日の満潮時についてみると, DOは,

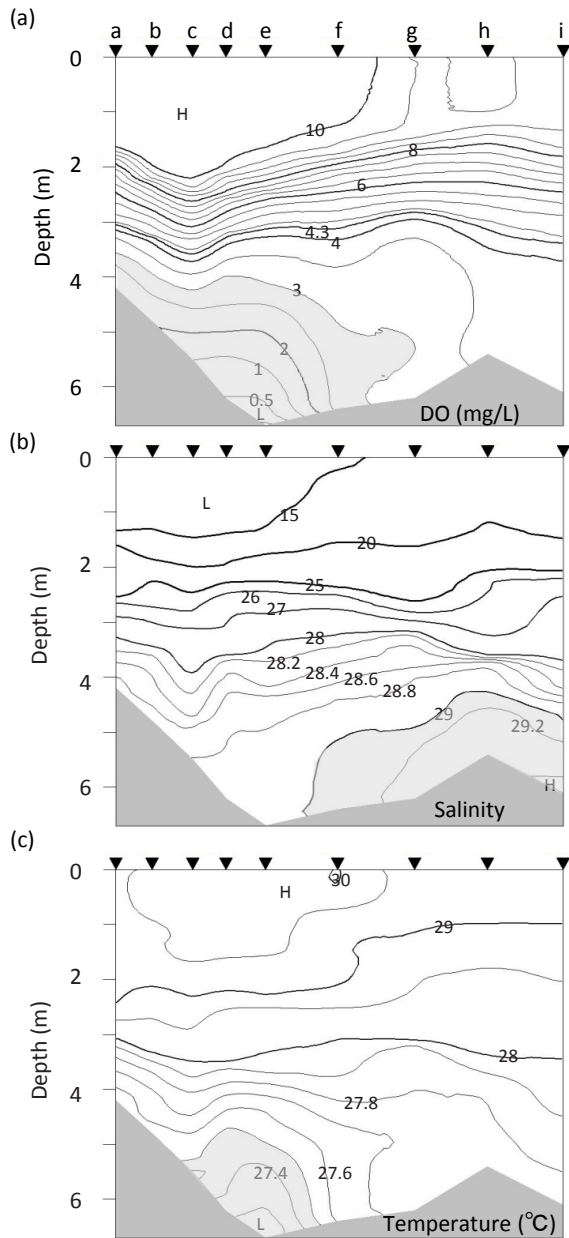


図11 2012年8月20日の上げ潮時の鉛直断面図。図中の▲は、CTDの観測点を示す。(a) DO, (b) 塩分, (c) 水温。
Fig. 11 Cross sectional distributions at rising tide on August 20, 2012. Alphabet letters adjacent to each triangle indicated the CTD observation stations. (a) DO, (b) salinity, and (c) temperature.

測点 d ~ h の水深 3 ~ 5 m に低酸素水塊が見られ、海底直上よりも中層域において低い値を示した。表層では、8月の結果と同様に、底層と比べて高い値を示した(図12(a))。

また、底層では、塩分 28.3 以上の水塊が測点 c

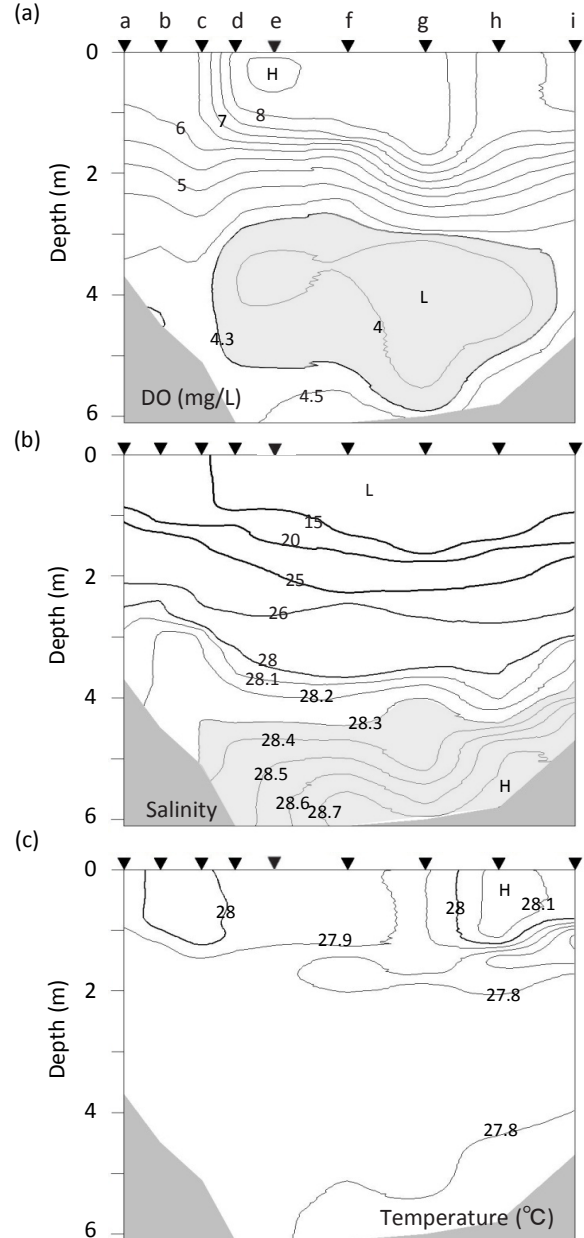


図12 2012年9月19日の満潮時の鉛直断面図。図中の▲は、CTDの観測点を示す。(a) DO, (b) 塩分, (c) 水温。
Fig. 12 Cross sectional distributions at high tide on September 19, 2012. Alphabet letters adjacent to each triangle indicated the CTD observation stations. (a) DO, (b) salinity, and (c) temperature.

~ i まで広がり、水平的な違いはほとんど見られなかった(図12(b))。また、水温についても同様にほぼ一様となっていた(図12(c))。

DOの鉛直断面を調べた期間前後にあたる8月16日の0時から8月23日の0時まで、9月19日の12

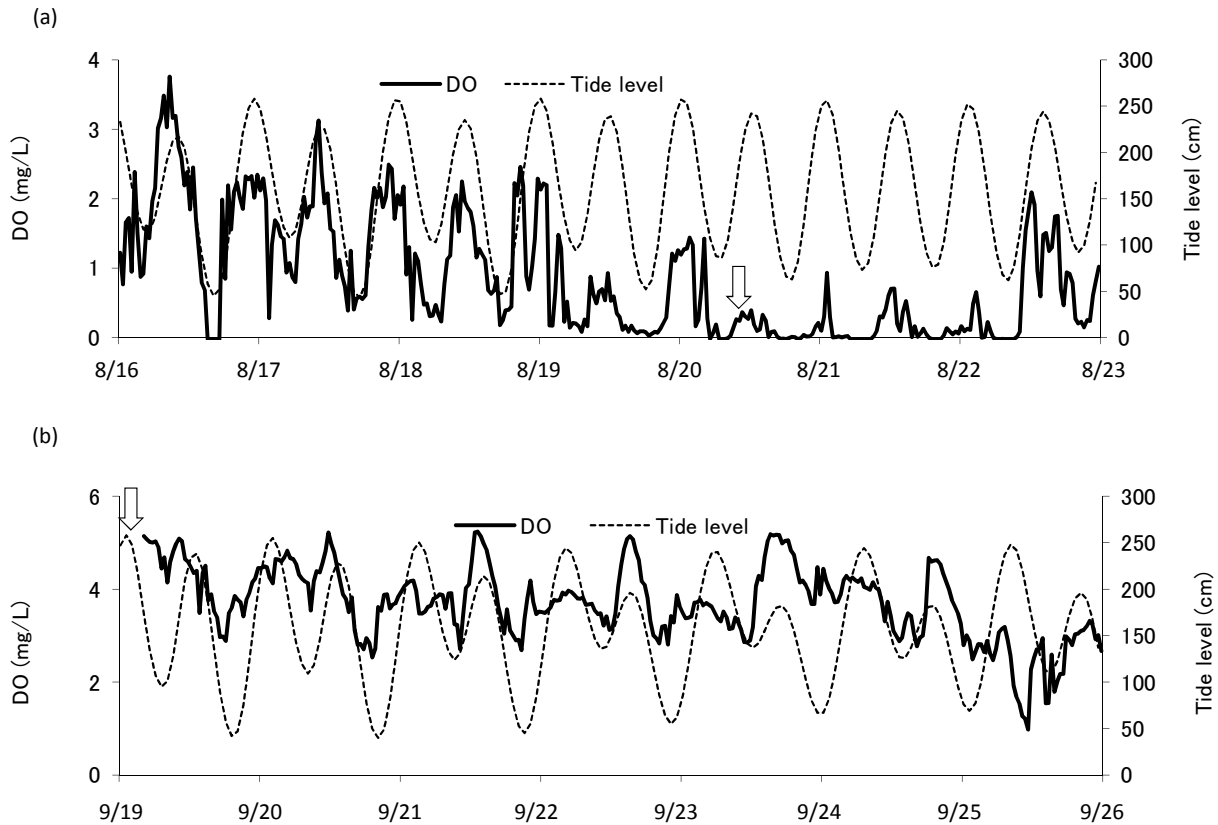


図 13 海底直上の DO と潮位の変化。(a) 2012 年 8 月 16 日から 23 日, (b) 2012 年 9 月 19 日から 26 日。矢印は, CTD による観測調査の時間を示す。

Fig. 13 Time series of bottom DO and tide leve in 2012. (a) August 16 to 23, (b) September 19 to 26. White arrows indicate the CTD observation time in each period.

時から 9 月 26 日の 12 時までの海底直上の DO と潮位の推移を図 13 に示した。また, 両図ともに, 鉛直分布を調べた時刻を矢印 (⇒) で示した。

両期間ともに, 先に図 10 で示した結果と同様に, 満潮時に高く, 干潮時に低下するという規則的な変動を示した。特に, 8 月 19 日から 22 日までの間は, 干潮時には常に 0 mg/L まで低下しており, 満潮時頃にごく間欠的に DO が供給される状況であった (図 13 (a))。一方, 9 月 19 日から 26 日については, 干潮時においても無酸素になることはなく, 常に一定以上の値を示しながら推移し (図 13 (b)), 増減幅は, 期間ごとに異なっていた。また, 両期間ともに, 図 11 (a), 図 12 (a) で示した測点 d, e 付近の海底直上の DO と矢印で示した時刻の DO はほぼ同じ値を示していた。

考 察

本研究では, 閉鎖性内湾である児島湾において底質と底生生物について調べるとともに, 湾奥部における貧酸素水塊の動態について調べた。

児島湖の直近に位置する測点 1 では, それ以外の測点と比べて TN, TP 濃度は高く, 測点 2, 3, 4 の間に明確な濃度差は見られなかった。また, 測点 1 の表層塩分は他の測点と比較して低かった。さらに, 平成 23 年度の児島湖の中心部における TN, TP 濃度の年平均値はそれぞれ $92.8 \mu\text{M}$, $5.81 \mu\text{M}$ と湾内よりも高かった (岡山県, 2011)。これらのことから, 児島湖から流入した窒素とリンの影響を受けて, 湾奥部の TN, TP 濃度が上昇したと考えられた。河川から沿岸域に流入してきた河川由来の窒素やリンは, 直接的に海底に堆積するとともに化学的な凝集反応やプランクトンの取り込みによって急速に沈降, 堆積することが知られている (奥田, 1996)。

本研究では、同位体等を用いた堆積物の起源解析を行っていないが、児島湾由来の窒素、リンが湾奥に蓄積された結果、湾奥の底質が悪化した可能性が高い。

同湾では、一年を通じて塩分躍層が形成されており、表層からの底層への DO 供給が制限される状況であった。また、底層中には湾奥を中心として有機物が大量に存在するとともに、高水温時ほど海底直上の酸素消費速度は速く、DO も少なかった。これらは、夏季の底層において貧酸素水塊が発達する典型的な状況を示しており（柳，2004）、児島湾においても、有機物分解に伴う酸素消費の増加と表層からの酸素供給の減少によって、夏季底層の DO が減少することが示唆された。酸素消費速度については、徳永ほか（2011）は有明海において $0.72 \sim 2.88 \text{ mgO}_2/\text{L/day}$ とし、鈴木ほか（1998）は三河湾において $0.59 \sim 0.66 \text{ mgO}_2/\text{L/day}$ とし、高水温時の大阪湾では $1.34 \sim 2.18 \text{ mgO}_2/\text{L/day}$ としている（矢持・佐野，1992）。本調査の見かけの酸素消費速度は最高でも $0.50 \text{ mgO}_2/\text{L/day}$ であり、既往研究の結果と比べて速いものではないが、後に述べるように同湾では間欠的に DO が供給される特異的な環境を有しており、単純に比較することは難しい。今後は、湾奥底層に間欠的に流入してくる水塊中の DO の変化を詳細に調べ、評価する必要がある。

また、6月と9月のベントスの種類数を比較すると、調査したすべての測点において9月の方が少なかった。一般に、沿岸域において貧酸素や出水等の環境変化があった場合、夏季に個体数や種類数が減少することが知られている（日本海洋学会，1986）。同湾では常に塩分躍層が存在し、海底直上の塩分低下もほとんど見られていないことから、生物の生存に影響を与えた要素は河川水の流入に伴う物理的な攪乱ではなく、貧酸素であった可能性が高い。海域の DO が減少すると水中に生息する生物は呼吸が出来なくなり、生存が脅かされる。また、貧酸素化が進行し、無酸素に近くなると嫌氣的細菌である硫酸還元菌の活性が高まり硫化水素が発生する。硫化水素は還元型チトクローム a3 の酸化を遮断し、低酸素症と同様の症状を引き起こし、生物を死滅させる（Lehninger, 1977）。この DO の減少に伴う直接的、間接的な影響によって、湾奥部の生物の種類数は少なく、夏季に種類数の減少が生じた可能性が考えられた。

これまでの結果から、夏季の DO の減少が生物に悪影響を与えていると考えられたので、以降は、海底直上の連続観測をもとに、貧酸素水塊の形成機構

とその動態について考察を行う。

海底直上における DO は、15日周期の変動を示した（図8）。大潮時から小潮時にかけて DO が減少し、小潮時から大潮時にかけて増加するという15日周期の変動は、有明海や浦の内湾でも知られており（徳永ほか，2009；宗景ほか，1991）、潮流速度の上昇によって、大潮時には密度躍層が解消するとともに、沖合からの DO の供給量が増加するためと考えられている。児島湾でも同様の作用が生じることによって、周期的に DO が変化していた可能性が高い。

次に、半日周期の変動について解析する。潮位と水温、DO の関係をみると、満潮時頃には干潮時頃と比べて DO は 2 mg/L 程度、水温は $0.3 \sim 0.5^\circ\text{C}$ 程度上昇するという変動を繰り返した（図10）。また、夏季の上げ潮時の鉛直断面を見てみると、連続モニタリング地点よりも沖合の底層に高 DO、高水温の水塊が存在していた。一方、満潮時には、中層に低・貧酸素水塊が存在し、海底直上には沖合から高塩分、高 DO 水塊が流入していた。つまり、満潮時には沖合から高 DO の海水が流入することによって、低・貧酸素水塊は中層に移動し、その結果として海底直上の DO は上昇したと考えられた。本調査だけでは、その後の水塊の動きについてははっきりしたことは言えないが、干潮時には中層に形成された低・貧酸素水塊が沖合に運ばれるとともに、海底直上では急速に酸素が消費され、再び DO が低下した可能性が高い。沖合からの高 DO 水塊の流入に起因する一連のサイクルを繰り返すことによって、間欠的な DO の変化が生じていると考えられた。この間欠的な変化は、DO が少ない時期（図13(a)）、多い時期（図13(b)）、の両方においても同様に見られたことから、その供給量に差は見られるものの、夏季には常に生じている現象であると考えられた。

沖合の高 DO 水塊の流入によって底層の DO が上昇し、中層に貧酸素水塊が形成される現象は、伊勢湾や大阪湾でもみられているが（藤原，2010；Fujiwara et al., 2002）、これらはエスチュアリー循環に起因する流入であり、潮汐周期に伴うものではない。有明海では、干潟縁辺部に干潮時に河川水が流入することによって、酸素が供給され、スパイク的な DO の変化を示すことが知られているが（速水ほか，2006）、本報では、満潮時にのみ沖合から底層に間欠的に DO が供給されていた。今後は、同一日時において水位と潮流、密度、DO の関係を調べるとともに、児島湾で見られた底層水の移流による海

底直上の DO の変化が他の海域でも見られるかどうかを確認する必要がある。また、同湾では一日の内に 2 mg/L 以上の増減が見られた。つまり、現行の潮位変動をほとんど考慮していない散発的な調査ではそのバラツキの影響を排除できないため、同湾の貧酸素動態を正確に把握することができないことが分かった。

夏季の底層 DO の経年的な変化を見たところ、1996 年から 2011 年までの間に測点 1 では 2.5 mg/L、測点 2 では 2.2 mg/L 増加しており（図 6）、鉛直的に見た場合でも、低酸素水の規模は縮小傾向にあった（表 1）。近年、児島湖の TN 濃度と COD は低下傾向にあり（陳・河原，2009）、児島湾内の TN 濃度も低下していることから（藤原，2011）、負荷量の減少に伴う水質改善の影響を反映したものと考えられた。一方、湾奥のベントスの種類数は経年的な変化はなく、DO との間には明確な関係が見られなかった（図 7）。これまでは、スパイク的な DO の変化を考慮していなかったため、正確な DO の値を反映していなかった可能性もあるが、この矛盾は一つの可能性を示唆する。すなわち、底上 1 m 以浅については、貧酸素状態は解消傾向にあるものの、生物に直接作用する海底直上の DO は改善されていないという事である。事実、本調査においても 8 月の海底直上では、日平均値では 4 日程度無酸素状態が継続し（図 8）、同期間の DO 供給はごく間欠的であった（図 13 (a)）。この無酸素状態が海底直上に発生することによって底生生物に致命的なダメージを与えている可能性がある。採水に依存するウィンクラー法では海底直上の DO データを得ることは難しいが、近年 DO 測定が可能な CTD が開発され、得られるデータが飛躍的に向上している。今後は、設置型の装置と合わせて連続的な DO のモニタリングを行うとともに、表面から海底直上までの DO を調べ、より正確に貧酸素と生物の影響を把握する必要がある。

謝 辞

データの取得に協力していただいた、水産研究所の職員に感謝します。また、貴重なご意見をいただいた藤原建紀京都大学名誉教授、データを報告する機会を与えていただいた島根大学大学院野村律夫教授に謝意を示します。

引用文献

- 陳 文・河原長美 (2009) 児島湖および児島湖流入河川における水質の経年変化と季節変動に関する研究. 環境技術, 38: 573-581.
- Fujiwara, T., Takahashi, T., Kasai, A., Sugiyama, T. and Kuno, M. (2002) The role of circulation in the development of hypoxia in Ise bay, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 19-31.
- 藤原建紀・岸本綾夫・中嶋昌紀 (2004) 大阪湾の貧酸素水塊の短期的および長期的変動. 海岸工学論文集, 51: 931-935.
- 藤原建紀 (2010) 内湾の貧酸素化と青潮. 沿岸海洋研究, 48: 3-15.
- 藤原建紀 (2011) 瀬戸内海の貧栄養化. 水環境学会誌, 34: 34-39.
- 速水祐一・山本浩一・大串浩一郎・濱田孝治・平川隆一・宮坂 仁・大森浩二 (2006) 夏季の有明海奥部における懸濁物輸送とその水質への影響. 海岸工学論文集, 53: 956-960.
- 石井光廣・大畑 聡 (2010) 東京湾の貧酸素水塊と貧酸素水塊の変動 (シンポジウム沿岸海域の貧酸素化). 沿岸海洋研究, 48: 37-33.
- Lehninger A. L. (1977) 生化学 (上) 第 2 版—細胞の分子的理解—(中尾 眞訳), 共立出版 592pp. 東京.
- Lorenzen C. J. (1967) Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, 12: 343-346.
- 宗景志浩・木村晴保・村田 宏・森山貴光・田島健司 (1991) 浦の内湾における湾外水の差し込み現象と貧酸素水塊の消長について. 日本水産学会誌, 57: 1635-1643.
- 日本海洋学会編 (1986) 沿岸環境調査マニュアル, 恒星社厚生閣 pp. 217-257. 東京.
- 日本水産資源保護協会 (2005) 水産用水基準 (2005 年版).
- 岡山県 (1974 ~ 2005) 岡山県漁業の動き (昭和 49 年 ~ 平成 17 年).
- 岡山県 (2011) 平成 23 年度公共用水域の水質測定結果.
- 奥田節夫 (1996) 干潮河川における堆積環境. 河川干潮域—その自然と変貌. 西條八東・奥田節夫編, 名古屋大学出版会 pp. 85-105. 名古屋.
- 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.

高木秀蔵・岩本俊樹・飯野浩太郎 (2009) 児島湾における底質環境の現状と近年の変化. 岡山水試報, 24: 1-5.

徳永貴久・児玉真史・木元克則・柴原芳一 (2009) 有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成特性. 土木学会論文集 B2, 65: 1011-1015.

徳永貴久・児玉真史・木元克則・柴原芳一 (2011) 有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成特性. 土木学会論文集 B2, 67: 926-930.

矢持 進・佐野雅基 (1992) 大阪湾谷川港における溶存酸素濃度の変動とサルエビのへい死について. 水産海洋研究, 56: 1-12.

柳 哲雄 (1989) 貧酸素水塊のまとめ. 沿岸海洋研究ノート, 26: 141-145.

柳 哲雄 (2004) 貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と科学・生物学的影響. 海の研究, 13: 451-460.