

## 沿岸域におけるデッドゾーンの分布 —三河湾の事例—

和久光靖<sup>1‡</sup>, 金子健司<sup>2\*</sup>, 鈴木輝明<sup>3</sup>, 高倍昭洋<sup>4</sup>

### Distribution of dead zones in the coastal waters: A model study in Mikawa Bay, Japan

Mitsuyasu WAKU<sup>1‡</sup>, Kenji KANEKO<sup>2\*</sup>, Teruaki SUZUKI<sup>3</sup> and Teruhiro TAKABE<sup>4</sup>

Dead zones are determined as areas where few organisms can survive. The extent of dead zones was estimated in the coastal waters of Mikawa Bay, Japan, to estimate its adverse effects on the bay-wide ecosystem function. Fisherpersons of the fisheries cooperatives holding common fishery rights in the coastal area of Mikawa Bay, were surveyed using a questionnaire to ask opinions as to the type of waters where few organisms can survive. From the survey results, 174 areas were extracted as potential dead zones from the coastal waters of Mikawa Bay. Field observations of macrobenthos biomass were conducted at 44 of the 174 areas. In areas where the number of macrobenthos species was <5, its biomass was very low ( $4.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , on an average). The macrobenthos community in these areas was mainly composed of pollution indicator species, such as polychaetes *Paraprionospio patiens* and *Sigambra hanaokai*, and bivalves *Macoma tokyoensis*, *Macoma incongrua* and *Theora fragilis*. These areas were thus defined as dead zones. Multiple linear regression analysis indicated a significant relationship between the number of macrobenthos species and environmental factors. These factors included not only local ones (such as degree of closeness to the coastline, the depth, presence of influent water, presence of near-by tidal flat, and speed of tidal flow), but also large-scale hypoxia. The number of macrobenthos species was estimated based on a multiple linear regression analyses of the 174 potential dead zones. The estimated number of macrobenthos species was <5 at 80 out of the 174 areas. These 80 areas, comprising of 27.8 km<sup>2</sup>, were designated as dead zones. Overall, 79.2% of the total dead zones was represented by large-scale ports, and waterways created at closed-off section of the bay. Our results suggest that environmental restoration of the dead zones is essential to the recovery of the bay-wide ecosystem function.

**Key words:** dead zone, coastal waters, macrobenthos, multiple linear regression analysis, Mikawa Bay

2011年12月26日受付, 2012年9月5日受理

<sup>1</sup> 愛知県水産試験場  
Aichi Fisheries Research Institute, 97 Wakamiya, Miya, Gamagori,  
Aichi 443-0021, Japan

<sup>2</sup> (株) 日本海洋生物研究所 中部支店  
Chubu branch, Marine Biological Research Institute of Japan Co., Ltd.,  
3-9-2 Koubai, Showa, Nagoya, Aichi 466-0031, Japan

<sup>3</sup> 名城大学大学院総合学術研究科  
Graduate School of Environmental and Human Science, Meijo University,  
1-501 Shiogamaguchi, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

<sup>4</sup> 名城大学総合研究所  
Research Institute of Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku,  
Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

<sup>‡</sup> 現住所: 愛知県海部農林水産事務所  
Present address: Ama Agriculture, Forestry, and Fisheries Office Aichi  
Prefectural Government, 1-14 Nishiyanaohara, Tsushima, Aichi 496-  
8532, Japan

<sup>\*</sup> 現住所: 東北大学大学院農学研究科  
Present address: Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University,  
1-1 Amamiya-machi, Tsutsumidori, Aoba, Sendai, Miyagi 981-  
8555, Japan  
mitsuyasu\_waku@pref.aichi.lg.jp

#### はじめに

生物生産機能や水質浄化機能, 稚魚の保育機能などの生態系機能が低下した海域は, Dead Zone (デッドゾーン) と称され, 1960年代以降, 全世界においてその分布域の急速な拡大が指摘されている (Diaz and Rosenberg, 2008). 日本においても, 東京湾, 大阪湾, 伊勢・三河湾をはじめとする主要な内湾では, 夏季の大規模な赤潮の発生と, それに起因する貧酸素水塊の発達により, 生物の生息が阻害され, 漁業生産の減少傾向が続いており, 湾全体がデッドゾーンとみなされている. その中でも, とくに貧酸素化が顕著な三河湾では, 1970年代を中心に大規模な埋め立てが実施され, 東部湾奥部では12km<sup>2</sup>の干潟・浅場が消失した. 貧酸素域拡大の原因は, 干潟・浅場の喪失に伴う底生生態系の変化, とくに底生動物群集の減少による水質浄化機能の消失と考えられ (例えば Suzuki, 2004), 干潟・浅場

の大規模造成が実施されている (石田・黒田, 2007). 一方湾の中でも生態系機能の高い沿岸域, とくに水深5m以浅の極沿岸域には, 窪地, 航路, 入り江, 泊地等, 人為的に改変された水域が多く存在している. これらは上述の大規模な埋め立てと同時に並行的に作られ, その多くで, 生態系機能が極度に低下していると漁業者は認識しており, その改善を強く要望している.

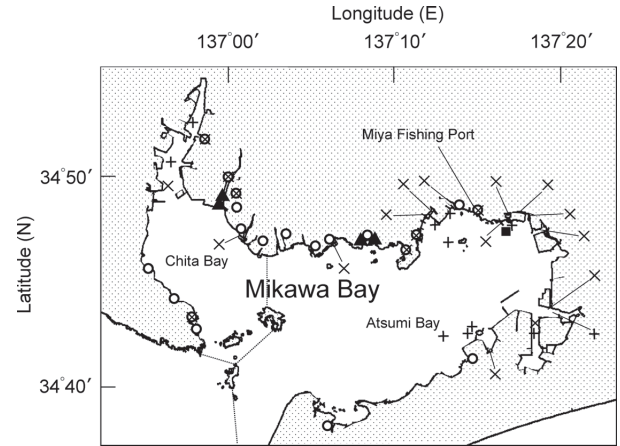
鈴木ほか (2000) は, 三河湾において, 観測結果を基に有機懸濁物除去速度を算出し, 極沿岸域における有機懸濁物除去機能が湾全体の水質に大きく影響すると指摘している. また, 極沿岸域は, 干潟や藻場に代表されるように, 稚魚の育成にとって重要な場所である (鈴木・家田, 2003). このように極沿岸域は, 本来, 生物多様性に富み, 高い生態系機能を提供する場であるが, その機能低下により, 湾全体の水質悪化や漁業生産の低下を惹起しているおそれがある. さらに, 人為的改変水域は周辺水域の生物へい死を引き起こすこともある. 例えば, 土砂採取等によって出現した浚渫窪地 (武田・石田, 2006; 大見ほか, 2008; 和久ほか, 2011; 金子ほか, 2011) や, 人為的に静穏性を高めた水域 (市岡ほか, 2009) では, 夏季に硫化水素を含む無酸素水が発生し, 周辺生態系に大きな劣化をもたらされることが明らかにされ, 全国的な問題になっている. しかし, このような極沿岸域における生態系機能低下水域については, その存在と内湾生態系全体に与える悪影響について概念的には理解されているものの, 既往の科学的知見が少なく, 環境改善への取り組みが進められていないのが現状である.

本研究では, 現在, 漁業者が抱えている極沿岸域における生態系機能の低下に関する経験的かつ主観的な認識を定量的かつ客観的に評価するため, 従来, 湾スケールの海域全体に適用されていたデッドゾーン概念を, 極沿岸域および周辺海域に適用し, 局所的な環境悪化に伴う生態系機能低下水域を「デッドゾーン」と定義した. その上で, 三河湾を対象に, マクロベントス群集の調査を行い, 漁業者が生態系機能低下をもたらすと考えている地形的要因と生態系機能との関係を解析し, それを基にデッドゾーンの分布実態を推定した.

## 材料と方法

### 「デッドゾーン化が疑われる水域」の抽出

三河湾沿岸に共同漁業権を有する漁業協同組合20箇所 (Fig. 1) を対象に, 聞き取り調査を行った. 面談により, 三河湾の極沿岸域全域を対象に, 生息生物の量や種類数が周囲に比べ少ない水域, 生物のへい死が頻繁に起こる水域の有無を, その水域の特徴とともに質問した. その結果, 生態系機能が低下していると考えられた水域として合計46箇所の水域が挙げられた. これら水域の特徴を整理すると, 地形が閉鎖的な水域が45.7%と最も多く, 次いで多



**Figure 1.** Location of the fisheries cooperatives where the questionnaire was conducted (○). Enclosed zone (×) and dredged hollows (+), which were indicated as water bodies where few organisms can survive by the questionnaire responses, are also shown (see text). Symbols (▲ and ■) show locations of enclosed zone with tidal flat and borrow pit studied by Waku et al. (2011), respectively.

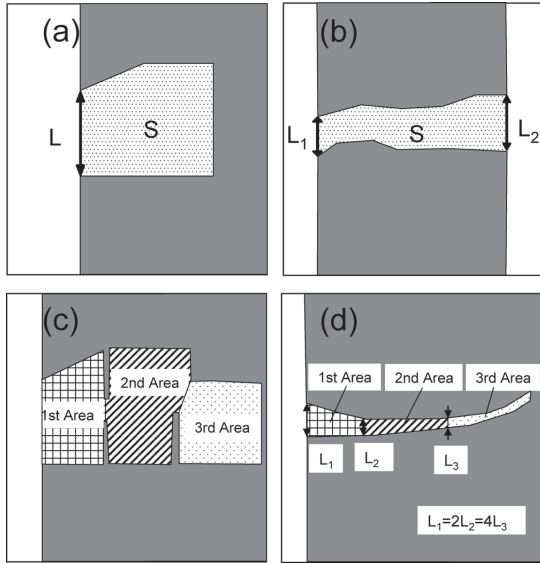
**Table 1.** Percentage of water body types in which few organisms can survive, based on the questionnaire responses from the fisheries cooperatives in Mikawa Bay.

Area	Percentage in total dead zone (%)
Enclosed zone	45.7
Dredged hollow	23.9
Change in quality of influent	19.6
Others	10.9

いのが, 海底が窪地状になっている水域 (23.9%) であり, 両者の合計は69.6%と過半数を占めた (Table 1). 以下, 生活排水, 産業排水の流入や流量の低下により流入水質が変化した水域 (19.6%) が続いた. 以下に示す手順により, 閉鎖的水域と, 窪地状水域をそれぞれ定義して, これら水域を三河湾における「デッドゾーン化が疑われる水域」として抽出した.

(1) 閉鎖的水域 生態系機能が低下していると漁業者が考えている水域のうち地形が閉鎖的な部分の面積は, 0.01–60km<sup>2</sup>の範囲でさまざまであった. ここでは, 海図 (2004–2008海上保安庁発行, 縮尺1:10000–1:50000) を利用して, 海岸線が凹んだ形状になっている水域の開口部を直線で結び, 直線と海岸線で囲まれた面積が0.01km<sup>2</sup>以上60km<sup>2</sup>以下の水域 (Fig. 2a) について, 以下に示す開放度ODを計算した.

$$OD=L^2/S \quad (1)$$



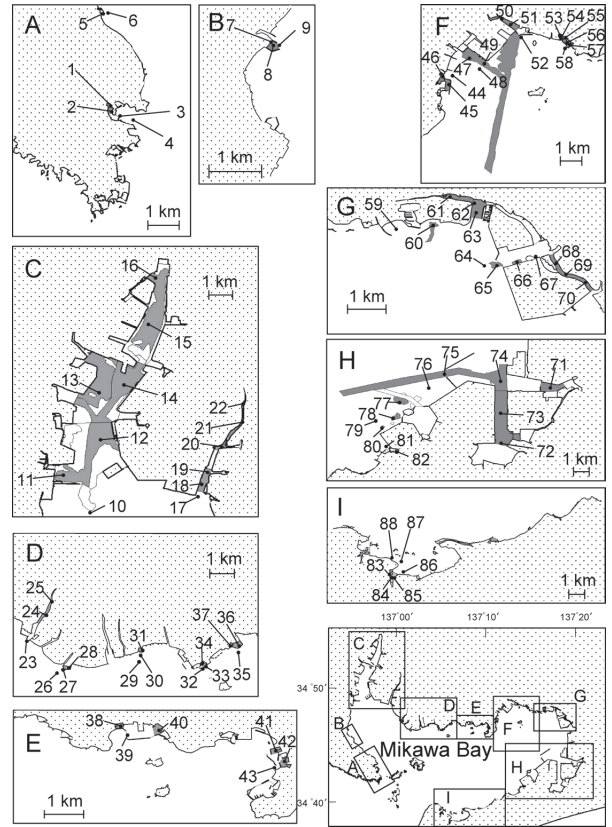
**Figure 2.** Schematic of an enclosed zone (a), a water way (b), an enclosed zone with convoluted coastline (c), and an inlet (d).

ここで、 $L$ は開口部の長さ、 $S$ は水域面積である。開口部が2つある水路状の水域 (Fig. 2b) については (2) 式によりODを算出した。

$$OD = (L_1^2 + L_2^2) / S \quad (2)$$

ここで、 $L_1$ は開口部1の長さ、 $L_2$ は開口部2の長さである。計算されたODが1未満の水域を閉鎖的水域と定義した。水域の形状が堤防や埠頭により入り組んでいる場合 (Fig. 2c) は、堤防や埠頭の位置で分割し、画分が $0.01 \text{ km}^2$ 以上であり、かつ、その水域について (1), (2) 式で計算されたODが1未満であれば、そこを独立した閉鎖的水域として取り扱い、沖合に近いものから、1次水域、2次水域、3次水域...n次水域と称し、それぞれのODを計算した。また、Fig. 2dのような凹凸のない細長い入江状の水域については、水域の幅が開口部の最大幅の1/2になる場所で分割し、画分が $0.01 \text{ km}^2$ 以上であり、かつ、その水域について、(1), (2) 式で計算されたODが1未満であれば、そこを独立した閉鎖的水域として取り扱い、沖合に近いものから、1次水域、2次水域、3次水域...n次水域と称し、それぞれのODを計算した。

(2) 窪地状水域 生態系機能が低下していると考えられた水域のうち、海底が窪地状の水域では、浚渫等によって水深が深くなっており、いずれも海図基準面 (CDL) 下5m以深であった。ここでは「窪地状水域」を、1/50以上の勾配で1.5m以上深くなった面で囲まれており、平均水深がCDL下5m以深の水域と定義した。窪地状水域が、上記で定義した閉鎖的水域内に存在する場合は、閉鎖的の水域



**Figure 3.** Location of 44 potential dead zone areas that were surveyed (hatched area), and sampling stations of macrobenthos.

から分離し、窪地状水域として扱った。

上記作業の結果、合計174水域が「デッドゾーン化が疑われる水域」として抽出された。

#### 現場観測

「デッドゾーン化が疑われる水域」として抽出された174水域から地理的に偏りのないよう、Fig. 3に灰色で示す44水域を任意に選択し、それら水域の外内に88測点を設けた。移動能力の小さいマクロベントスは、局所的な環境の指標として適切であり、また、その場の水質、底質環境の変動履歴を反映することから、その生息状況を基に水域環境の評価がなされている (横山ほか, 2002a; 2002b)。さらに、マクロベントスの種組成や現存量の多寡は、懸濁物除去機能を規定し、水質環境に影響を与える (鈴木ほか, 2000)。これらのことから、マクロベントスの生息状況を、局所的な環境悪化に伴う生態系機能低下を評価するための指標とした。本研究では、2008年7月25日から9月19日にかけて上記の88測点でマクロベントスを採取した。1つの測点につき3回、エクマンバージ (面積 $0.02 \text{ m}^2$ ) で採泥した。3回分の底泥を目開き1mmのふるいにかけて、ふるい上の生物を10%中性ホルマリンで固定した後、種の同定と個体数の計数、湿重量の測定を行った。

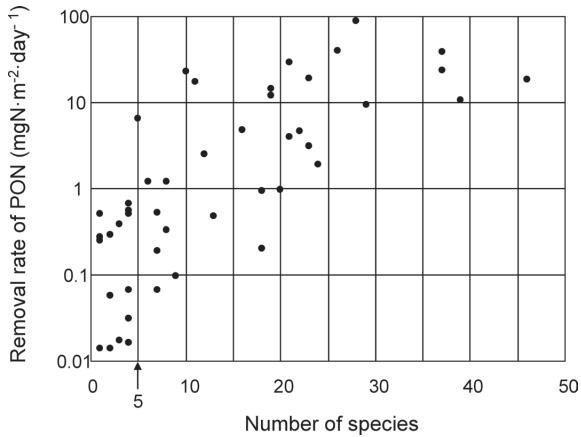


Figure 4. Relationship between the number of macrobenthos species and the removal rate of PON.

マクロベントスが出現した測点について、鈴木ほか(2000)の方法によりマクロベントス現存量を基に有機懸濁物除去速度を算出し、出現種数との関係を求めた (Fig. 4).

#### 重回帰分析によるマクロベントス生息制限要因の検討

マクロベントスの生息に影響する因子を見いだすため、以下に示すように指数化した環境因子を独立変数とし、現場観測で得られたマクロベントスの出現種数 (species $\cdot$ 0.06 m<sup>-2</sup>), 個体数密度 (inds $\cdot$ m<sup>-2</sup>), 現存量 (wetg $\cdot$ m<sup>-2</sup>) を従属変数として、それぞれ重回帰分析を行った。個体数密度と現存量については、実測値に1を加えたものの自然対数を従属変数とした。聞き取り調査結果を踏まえ、地形的な特徴を表現する因子として、「地形の開放性」と「水深」、水域の立地条件を表現する因子として、水域への「河川流入の有無」と「水域内における干潟の有無」を取り上げた。また、湾における位置関係を表現するため、湾口からの相対位置により変化すると考えられる「潮汐流の強さ」を取り上げた。選択した環境因子の詳細を以下に述べる。

(1) **地形の開放性** 聞き取り調査で指摘されたような閉鎖的の水域の地形の開放性を表現する開放性指数  $OI_n$  を前述のODを用いて (3) 式のように定義し、独立変数とした。測点が閉鎖的の水域外に位置する場合、 $OI_n$  は1とした。

$$OI_n = OD_n \times OD_{(n-1)} \times \dots \times OD_2 \times OD_1 \quad (3)$$

測点の水深がCDL以浅で、干潟化する場合は、地形の開放性とは異なる要素が存在すると推測されたことから、与える独立変数は1とした。なお、測点22については、水深がCDL以浅であるが、強い臭気を有する軟泥の堆積により水深がCDL以浅となっていたことから、ここでは、地形の開放性を表す独立変数には1ではなく、式 (1) で求めたODを用い、式 (3) で計算されたOIを与え、解析を

行った。

(2) **水深** 聞き取り調査では、窪地状の地形の他、閉鎖的の水域の中で水深が大きい部分において生態系機能が低下していると考えられる場合が多かった。ここでは、現場観測で実測した各測点におけるCDL下の水深を独立変数とした。

(3) **河川流入の有無** 聞き取り調査においては、生物の生息阻害の要因として、生活排水、産業排水の流入や流量の低下による流入水質の変化が挙げられた (Table 1)。これら淡水流入の変化が生態系機能に与える影響を評価するためには、流入水の水質を独立変数とすることが望ましいが、中小の河川の水質に関する情報は乏しいため、ここでは、測点が含まれる水域に、二級河川、準用河川、排水路から直接流入がある場合に擬似独立変数として1を、ない場合に0を与えた。

(4) **水域内における干潟の有無** 聞き取り調査では、閉鎖的であっても、内部に砂質の干潟を有する水域 (Fig. 1に記す4点) では生態系機能が低下していないという意見があった。これらの水域は、干潟がその面積の15–34%を占めていた。このため、閉鎖的の水域内に砂質の干潟が存在し、海図から判断して干潟が当該水域の面積の15%以上である場合、擬似独立変数として1を、それ以外の場合に0を与えた。

(5) **潮汐流の強さ** 聞き取り調査で指摘された閉鎖的の水域は、知多湾、渥美湾の奥部に多かった (Fig. 1)。三河湾の潮汐流の強さは湾奥に向かって減少している (日本海洋学会, 1985)。潮汐流の強さについては、以下のように指数化し、独立変数とした。(財)日本水路協会海洋情報提供部の潮流メッシュ推算データを利用し、各測点にもっとも近い推算点における1時間ごとの表層流速の絶対値 (knot) を、2008年8月1日 (大潮) と8月9日 (小潮) の干潮–満潮–干潮の1潮汐間について平均し、潮汐流の強さを表す独立変数とした。閉鎖的の水域内では潮汐流の強さが水域外と異なると考えられる。海洋政策研究財団・愛知県水産試験場 (2011) は、多層レベルモデルを用いて、三河湾の沿岸部中央に位置し Fig. 2c のような入り組んだ水域として代表的な三谷漁港 (Fig. 1参照) 内の流動を、33.3m解像度の格子で計算している。この計算で得られた2009年6月1日から2009年9月30日の間の三谷漁港における流速値を用い、三谷漁港内の1次水域、2次水域、3次水域のそれぞれ中央部の格子における表層流速絶対値の平均と、三谷漁港開口部の計算格子における表層流速絶対値の平均との比を求めると、それぞれ0.58, 0.33, 0.23であった。(財)日本水路協会海洋情報提供部の潮流推算点が閉鎖的の水域内部になく水域沖合にのみ存在する場合、三谷漁港が閉鎖的の水域の流動場を代表すると仮定した上で、測点が存在する水域の次数に応じてこの表層流速を上記で求めた近傍推算点における表層平均流速に乗じて、閉鎖的の水域内の潮汐流の強

さを表す独立変数とした。なお、測点が4次以上の水域に位置する場合は、便宜的に3次水域の流速比を用いた。

また、窪地状水域内においては、その海底形状により、流速は窪地外に比べ大きく異なると考えられる。和久ほか(2011)は、三河湾奥部の浚渫窪地内の測点(水深はCDL下6.9m, Fig. 1の■;本研究の現場観測時には埋め戻しがほぼ完了)において各深度の流速を実測している。彼らが観測を行った2007年6月14日-21日および2007年6月28日-7月12日における、窪地縁辺部の深度(CDL下3.2-3.4m)と、海底直上の深度(CDL下6.2-6.4m)における流速の絶対値平均の比は0.64であった。本研究では、窪地状地形による流速の変化を表現するため、便宜的にこの流速比をすべての窪地状水域に適用し、近傍推算点における表層平均流速に乗じて、窪地状水域の潮汐流の強さを表す独立変数とした。

**重回帰式の選択**

重回帰分析は、変数増加法により行った。多重共線性を避けるため、各独立変数については、単相関係数と偏回帰係数の符号の逆転が生じないことを確認した。さらに、独立変数のひとつを従属変数とし、残りの独立変数によって回帰を行い、得られた重相関係数 $r$ から(4)式によりVIF(Variance Inflation Factor, 分散拡大要因)を計算した(田中ほか, 1992)。

$$VIF=1/(1-r^2) \quad (4)$$

独立変数の選択にあたっては、重相関係数が5%水準で有意であり、赤池の情報量規準(AIC)(Akaike, 1973)がもっとも小さくなる変数の組み合わせの重回帰式を採用した。

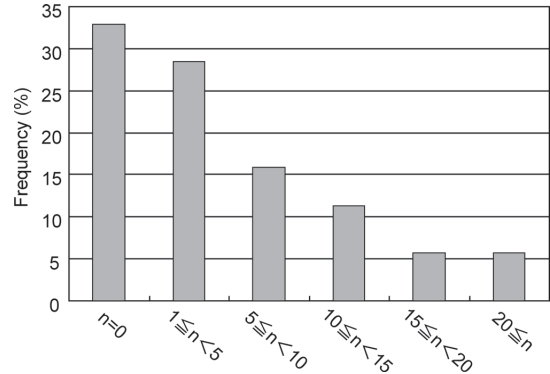
なお、この計算の結果、VIFは最大でも1.74と、多重共線性の存在の判断目安である5以下であった。

**結果**

**マクロベントスの出現状況**

88測点のうち、33%の測点ではマクロベントスは採集されなかった(Fig. 5)。出現種数が1以上5未満であった測点は28%、5以上であった測点は39%であった。出現種数が1以上5未満であった測点における現存量は、平均 $4.13\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ と、出現種数が5以上であった測点の平均値 $121\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ の3.4%にすぎなかった。

出現したマクロベントスは、多毛類49種、二枚貝類27種、腹足類22種、甲殻類16種、その他13種の合計127種であった。平均現存量上位10種のマクロベントスで、出現した全マクロベントス現存量の88%が占められた(Table 2a)。平均現存量上位3種は、サルボウガイ *Scapharca kagoshimensis*、アサリ *Ruditapes philippinarum*、ホトトギスガイ *Musculista senhousia* の懸濁物食性の二枚貝類が占めた。出現種数が1以上5未満であった測点では、平均現存量上



**Figure 5.** Frequency of the number of macrobenthos species ( $n$ : number of species  $\cdot 0.06\text{ m}^{-2}$ ) collected.

**Table 2.** (a) Biomass of macrobenthos collected during a period from July 25 to September 19, 2008 at all stations where more than 1 species occurred. (b) Biomass of macrobenthos at stations where only 1 to 4 species occurred.

(a)

Ranking of averaged biomass	Species	Biomass ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	
		Max.	Avg.
1	<i>Scapharca kagoshimensis</i>	352.7	19.3
2	<i>Ruditapes philippinarum</i>	446.8	10.8
3	<i>Musculista senhousia</i>	281.3	10.4
4	<i>Reticunassa festiva</i>	242.7	5.7
5	<i>Paphia undulata</i>	153.5	5.6
6	<i>Macoma incongrua</i>	32.9	3.9
7	<i>Theora fragilis</i>	31.3	3.1
8	<i>Batillaria multiformis</i>	80.1	1.8
9	<i>Macoma tokyoensis</i>	34.8	1.3
10	<i>Raetellops pulchellus</i>	20.2	1.3

(b)

Ranking of averaged biomass	Species	Biomass ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )	
		Max.	Avg.
1	<i>Macoma incongrua</i>	18.58	1.930
2	<i>Actiniaria</i>	14.92	0.993
3	<i>Paraprionospio patiens</i>	3.67	0.740
4	<i>Alaba picta</i>	3.75	0.150
5	<i>Macoma tokyoensis</i>	3.67	0.147
6	<i>Reticunassa festiva</i>	1.50	0.070
7	<i>Platynereis bicanaliculata</i>	0.42	0.017
8	<i>Theora fragilis</i>	0.42	0.017
9	<i>Owenia</i> sp.	0.33	0.013
10	<i>Sigambra hanaokai</i>	0.08	0.013

位10種で, 出現したマクロベントス現存量の99%が占められた (Table 2b). 現存量上位10種のうち, ヒメシラトリ *Macoma incongrua*, シノブハネエラスピオ *Paraprionospio patiens*, ゴイサギ *Macoma tokyoensis*, シズクガイ *Theora fragilis*, ハナオカカギゴカイ *Sigambra hanaokai* の5種は汚濁指標生物とされている (菊池, 1975; 玉井, 1998; 西・田中, 2007).

マクロベントスの出現種数が5未満の測点では, いずれも有機懸濁物除去速度が  $0.7 \text{ mgNm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  以下であった (Fig. 4). この値は, 鈴木ほか (2000) による三河湾の極沿岸域の54測点における平均値  $49 \text{ mgNm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  の1.4%程度と小さく, 本来極沿岸域が有する水質浄化機能がほとんど機能していないと考えられた.

**重回帰分析**

自由度調整済み決定係数 (CD) は, マクロベントスの出現種数を従属変数とした重回帰式 (Table 3a1) で0.59と

もっとも高かった. マクロベントスの出現種数の低下は, 代表的な生態系機能である水質浄化機能の消失を表すことから (Fig. 4), 以下ではマクロベントスの出現種数を従属変数とした重回帰式について取り上げる.

独立変数は, 設定したすべてが採用され, 符号については, 「潮汐流の強さ」, 「水域内における干潟の有無」, 「地形の開放性」が正で, 「水深」, 「河川流入の有無」が負であった. 従属変数への貢献度を示す標準化した独立変数の偏回帰係数の絶対値は, 「潮汐流の強さ」が0.57ともっとも大きく, 「水域内における干潟の有無」が0.38, 「水深」が0.36と続いた. 個別の漁業者への聞き取り調査で指摘の多かった「地形の開放性」はこれらに次いで0.16であった.

**考察**

**マクロベントスの生息に影響を与える要因**

Table 3aに示したとおり, 重回帰分析の結果, マクロベン

**Table 3.** (a) Partial regression coefficients, coefficients of determination adjusted by degree of freedom (CD), and Akaike's information criterion (AIC), estimated by multiple regression analysis. Standardized partial regression coefficients are also shown in parentheses. (b) Statistical information, including the additional independent variable "Large-scale hypoxia."

(a)

Dependent variable	Independent variable					Constant	CD	AIC
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>			
(1) No. of species	Speed of tidal flow 66.8 (0.57)	Nearby tidal flat 16.2 (0.38)	Depth -1.0 (-0.36)	Open index (OI) 4.3 (0.16)	Influent water -3.4 (-0.14)	3.4	0.59	596 (179)
(2) *Density	Speed of tidal flow 18.3 (0.54)	Nearby tidal flat 3.5 (0.29)	Open index (OI) 1.3 (0.18)	Depth -0.1 (-0.16)		1.8	0.39	413 (213)
(3) *Biomass	Speed of tidal flow 9.9 (0.45)	Nearby tidal flat 3.1 (0.39)	Open index (OI) 1.4 (0.28)	Depth -0.1 (-0.28)		0.5	0.47	324 (193)

\* Values added 1 and transformed into natural logarithms

(b)

Dependent variable	Independent variable						Constant	CD	AIC
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>			
No. of species	Speed of tidal flow 50.5 (0.43)	Nearby tidal flat 14.5 (0.34)	Large-scale hypoxia -7.1 (-0.31)	Open index (OI) 6.7 (0.26)	Depth -0.6 (-0.23)	Influent water -4.8 (-0.20)	4.4	0.64	585 (168)

トスの出現種数には、潮汐流の強さが増加要因としても大きく影響していた。三河湾のマクロベントス群集の現存量や種多様性は貧酸素化により大きく減少することが観測によって捉えられている(鈴木ほか, 1998b; 今尾ほか, 2004)が、潮汐流の強さとの相関解析はなされていない。多田ほか(2004)は、夏季の諫早湾において、潮汐流速の増大に伴う高酸素濃度水の移流により底層の溶存酸素濃度が上昇することを明らかにしている。また、中山ほか(2004)も夏季の諫早湾において、底層流速の絶対値と底層の溶存酸素濃度との間の高い相関を捉えている。したがって、潮汐流速の減少が貧酸素化を通じてマクロベントスの生息を阻害していたと考えられる。

出現種数の増加要因として潮汐流の強さに次いで強く影響していたのは、水域内における干潟の存在であった。既往の研究によって、干潟の底生生物の有機懸濁物除去機能による湾全体の貧酸素化抑制効果が認められている(例えば、青山・鈴木, 1996)が、本研究の結果は、比較的小規模な干潟であっても、そこに生息する底生生物による有機懸濁物の除去や海水の鉛直混合による物理的酸素供給効果により、水域内底層に対する局所的な酸素供給に寄与し、出現種数の増加要因として作用することを示唆する。このことから、デッドゾーンの環境改善策として、近傍に干潟を造成することは有効であると考えられる。

水深の増加は、出現種数の減少要因として影響していた。深い水域では、夏季の成層の発達に伴い、鉛直混合による表層からの酸素供給が妨げられ、底層が貧酸素化しやすく、これにより、マクロベントスの生息が阻害されていた(鈴木ほか, 1998b; 今尾ほか, 2004)と考えられる。

地形の開放性を示すOIの増加は出現種数の増加要因として影響していた。OIが低い閉鎖的な水域では、海水の停滞が生じることが水理実験により明らかにされている(山崎ほか, 1998)。海水の停滞は、有機物の大量沈降、堆積を促進させ、それら分解による酸素消費と、密度成層の強化による酸素供給の阻害を引き起こし、底層を貧酸素化させる。この貧酸素化の進行がマクロベントスの生息を阻害していた(鈴木ほか, 1998b; 今尾ほか, 2004)と考えられる。

流入河川の存在は、出現種数の減少要因であった。本研究の結果は、河川等への生活排水、産業排水の流入や、河川自体の流量低下に伴う流入水質の悪化により水域のマクロベントスの生息が抑制されていることを示唆する。

このように、漁業者が生態系機能低下をもたらすと考えている地形的特徴によりマクロベントス群集の生息状況の説明を試みたが、得られた重回帰式のCDは0.59であり、十分な説明がなされたとは言い難い。そこで、聞き取り調査では得られなかった、マクロベントス群集の生息状況に影響を与える他の因子について以下に検討した。

### 全湾規模の貧酸素水塊がマクロベントスの生息に与える影響

2008年6月23日には、三河湾奥部の底層が大規模に貧酸素化し、湾北東沿岸域の地先が広く貧酸素水に覆われ、6月30日には苦潮の発生が確認された(愛知県水産試験場, 2009)。本研究の現場観測は、苦潮発生が確認された6月30日以降に行われているので、測点によっては、マクロベントスがへい死していた可能性がある。今尾ほか(2001)は、夏季の三河湾において沖合の貧酸素水塊の影響を受けず生残率70%以上を確保できると判断される地盤高を推算している。これによると、三河湾北東沿岸域に位置する5地区の平均値はCDL下2.52mである。したがって、三河湾北東部で、水深がCDL下2.52mより大きい水域は、全湾規模の貧酸素水塊の影響を受けていた可能性が高いと判断される。このことを考慮して、先述の重回帰分析に全湾規模の貧酸素水塊の影響を表す独立変数を追加し、2008年6月23日に地先が貧酸素水に覆われていた(愛知県水産試験場, 2009)水域にあり、水深がCDL下2.52mよりも大きい測点については擬似変数1を、それ以外の測点には擬似変数0をそれぞれ与え、再度解析を行った。その結果、全湾規模の貧酸素水塊の影響を表す独立変数の追加により、CDが0.64に上昇した(Table 3b)。すべての独立変数を採用し標準化データを用いた重回帰式では、今回加えた「全湾規模の貧酸素水塊」の影響の有無を示す独立変数の偏回帰係数は-0.31であり、「潮汐流の強さ」よりは従属変数への貢献度が小さいが、それに次ぐ「水域内における干潟の有無」と同等の貢献度を示した。このことから、マクロベントスの生息には、流れや地形等の、その場の要因に加え、全湾的な貧酸素水塊も大きく影響していると示唆される。したがって、デッドゾーンの環境改善には、その場の環境修復とともに、現在実施されている大規模な全湾的環境修復(石田・黒田, 2007)の強化も必要であり、両者は不可分であるといえる。

### デッドゾーンの分布実態の推定

全湾規模の貧酸素水塊の影響を表す独立変数を追加して得られた重回帰式(Table 3b)を用い、前章で「デッドゾーン化が疑われる水域」として抽出された174水域におけるマクロベントスの出現種数を予測した。水深の項には各水域におけるCDL下の平均水深を与え、その他の各項には独立変数と同様の方法で求めた値を代入した。その結果、予測種数が5種未満の水域は80水域、5以上10種未満の水域は55水域、10種以上の水域は39水域であった(Fig. 6)。

Fig. 7に、現場観測が実施された44水域について、Table 3bに示す重回帰式を用いて予測されたマクロベントスの出現種数と、実測種数を対比する。実測種数が5種以上であった測点には、予測種数が5種未満のものが、わずか3%しかなかったのに対し、実測種数が5種未満であった測点には、予測種数が5種以上のものが22%もあった。し

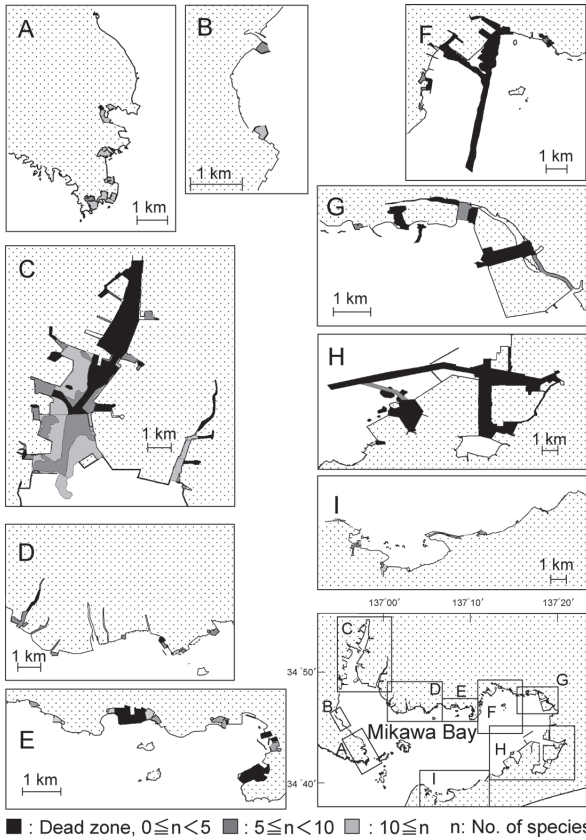


Figure 6. Distribution of dead zones based on predictions of the number of macrobenthos species.

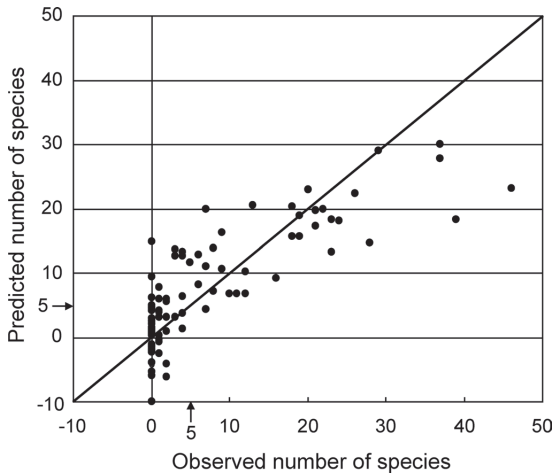


Figure 7. Relationship between predicted numbers and observed numbers of macrobenthos species.

たがって、重回帰式により推定された出現種類が5種未満の水域の数は、過少に評価されている。実測種数が5未満の測点は、窪地状水域の近傍に位置していることが多く、一方、予測種数が実測種数を大きく上回る例が多かった実測種数が20以上の測点の周囲には、窪地状水域はない。

Table 4. Predicted dead zones categorized based on the topography and social utility.

Category	No. of areas	Total area (km <sup>2</sup> )	Overall percentage (%)
Large-scale port, Water way	19	22.0	79.2
Small-scale port	32	3.5	12.5
Borrow pit	14	1.4	4.9
Loch (artificial)	11	0.6	2.1
Loch (natural)	4	0.4	1.3
Total	80	27.8	

したがって、出現種類が5種未満と推定された水域が過少となった要因としては、近傍の窪地由来の硫化水素や無酸素水が周辺の非窪地状水域の種数低下に影響していたことが考えられ、この評価が出現種数推定の今後の課題である。

また、重回帰解析において、貢献度が高かった「潮汐流の強さ」については今後、個々の水域において高解像度の流動計算を行うとともに、窪地状水域に対しては3次元非静水圧流動モデル（大見ほか, 2008）により、窪地内部の流動を精度よく表現する必要がある。

しかし、本研究で用いたマクロベントス出現種数の予測手法は、現場観測による実測値と、海図や流速情報等、既存資料から得られる可能な限りの情報を利用しており、簡便性の面で長所を有すると同時に一定の妥当性を持つものと考えられる。

結果で述べたとおり、マクロベントスの出現種数が5未満であった測点は、例外なく、代表的な生態系機能である水質浄化機能をほとんど有していないことから、予測種数が5未満である80水域をデッドゾーンと定義すると、その合計面積は27.8km<sup>2</sup>で、これらの多くが人為的地形改変に起因していた（Table 4）。とくに湾奥部に作られた大規模な泊地、航路はデッドゾーンの面積の79.2%と大きな割合を占めた。

Suzuki (2004) は、1970年代を中心とした三河湾東部湾奥部の干潟・浅場12km<sup>2</sup>の埋め立てに伴い消失した懸濁物食性マクロベントスによる海水ろ過速度は、夏季の三河湾湾口部における海水交換速度の65–145%に相当すると推算し、これによる莫大な水質浄化機能の喪失が大規模な赤潮の発生とそれに起因する貧酸素化拡大の主たる原因であると主張している。本研究で推算されたデッドゾーンの面積27.8km<sup>2</sup>は、この消失干潟・浅場面積の2.3倍に相当する。このことは、大規模な埋め立てが、浚渫や閉鎖等の地形改変を伴い、干潟・浅場の消失面積を上回る面積をデッドゾーン化させている実態を表している。鈴木ほか



(1998a) は、夏季の三河湾において現場観測を基に、マクロベントス群集による総窒素の除去能力を試算した。それによると、水深がCDL下4mよりも小さい調査対象水域では、 $650 \text{ mg Nm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ と、1995年の三河湾における水域面積あたりの総窒素負荷量推測値の約10倍に相当する総窒素除去能力を有しているが、ひとたび貧酸素化によってマクロベントスが死滅すると、その水域は、水質浄化の場から一転し、総窒素 $250 \text{ mg Nm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ の負荷源に転じると指摘している。

したがって、今回明らかになった極沿岸域のデッドゾーン化は、鈴木ほか(1998a)と同様に、本来極沿岸域が持つ水質浄化機能を不全にするばかりでなく、場合によっては全湾の水質環境悪化に拍車をかけ、湾全体の生態系に埋め立てによる直接的な生物生息域の消滅よりも強い悪影響を及ぼすと考えられる。

上述のとおり三河湾における全湾的な貧酸素化の抑制策については、大規模な干潟・浅場造成が進められているが、局所的な環境悪化については、湾奥部の浚渫窪地の埋め戻し修復(石田・鈴木, 2006)の他には対策がなされていない。これまでは、埋め立てによる干潟・浅場の消失面積に着目して環境修復が議論されてきたが、三河湾の生態系機能の回復には、消失した干潟・浅場に加えて、デッドゾーン化した極沿岸域についても修復の対象として議論されなければならない。

泊地や航路は物流等、経済活動に重要な役割を果たしているが、一方で多くの場合デッドゾーンを含んでおり(Table 4)、全湾の生態系機能低下に大きく影響していると考えられる。本研究では、デッドゾーンの環境改善策として近傍の干潟造成の有効性が示唆されたが、上記のような社会的機能を有する水域への適用が可能な策も検討されるべきである。今後は、この他にも環境改善のための要素技術の開発を行い、それらが湾全体の生態系機能回復に与える効果を定量的に評価する必要がある。

## 謝 辞

聞き取り調査においては、三河湾沿岸に共同漁業権を有する漁業協同組合の組合長をはじめ漁業者の方々に貴重な情報をご教授頂いた。また、愛知県水産試験場 漁場環境研究部の諸兄には、本研究を通じ、多大なる協力と助言を頂いた。さらに、いであ株式会社 畑 恭子博士には、流動場の解析に関して貴重な助言を頂戴した。これらの方々に感謝の意を表す。

## 引用文献

- 愛知県水産試験場 (2009) 平成20年伊勢湾・三河湾の赤潮発生状況。愛知県, 19pp.
- Akaike, H. (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. 2nd International Symposium on Information Theory, Petrov, B. N. and F. Csaki (eds.), Akadimiai Kiado, Buda-

- pest, 267–281.
- 青山裕晃, 鈴木輝明 (1996) 干潟の水質浄化機能の定量的評価。愛知水試研報, 3, 17–28.
- Diaz, R. J. and R. Rosenberg (2008) Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321, 926–929.
- 市岡志保・佐々木 淳・吉本侑矢・下迫健一郎・木村俊介 (2009) 航路と浚渫窪地に着目した硫化物動態と青潮影響に関する考察。土木学会論文集B2 (海岸工学), 28, 1041–1045.
- 今尾和正・鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・伊藤永徳・渡辺 淳 (2001) 貧酸素化海域における水質浄化機能回復のための浅場造成手法に関する研究。水産工学, 38, 25–34.
- 今尾和正・鈴木輝明・高倍昭洋 (2004) 溶存酸素環境の変化に伴うマクロベントス群集の構造と機能の変化予測手法。水産工学, 41, 13–24.
- 石田基雄・黒田伸郎 (2007) 三河湾における環境修復の取り組み。月刊海洋, 39, 35–43.
- 石田基雄・鈴木輝明 (2006) 三河湾における浚渫窪地修復事例と実現に至る経過。海洋理工学会誌, 12, 65–71.
- 海洋政策研究財団・愛知県水産試験場 (2011) 平成22年度「海の健康診断」を活用した三河湾の極小海域における環境評価手法の調査研究報告書 海の健康診断 三河湾モデル。海洋政策研究財団, 東京, 135pp.
- 金子健司・橋口晴徳・宮向智興・今尾和正・和久光靖・石田基雄・鈴木輝明 (2011) 浚渫窪地における底質の極度の悪化と底生生物群集の動態—三河湾の事例—。水環境学会誌, 34, 47–55.
- 菊池泰二 (1975) 環境指標としての底生動物 (1) 群集組成を中心に。日本生態学会環境問題専門委員会 (編), 環境と生物指標2 水界編, 共立出版, 東京, 255–264.
- 中山哲蔵・佐伯信哉・木元克則 (2004) 諫早湾での夏季における流動, 成層安定性と底層の溶存酸素の関係。海岸工学論文集, 51, 906–910.
- 日本海洋学会 (1985) 「日本全国沿岸海洋誌」。日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 東海大学出版会, 東京, 1106pp.
- 西 栄二郎・田中克彦 (2007) 神奈川近海の干潟・汽水域に産する環形動物多毛類。神奈川自然誌資料, 28, 101–107.
- 大見智亮・内藤大輔・酒井 亨・山口将人・寺澤知彦・田口浩一・中田喜三郎・中村由行 (2008) 浚渫窪地における酸素環境シミュレーション。海岸工学論文集, 55, 1126–1130.
- Suzuki, T. (2004) Large-scale restoration of tidal flats and shallows to suppress the development of oxygen deficient water masses in Mikawa Bay. *Bull. Fish. Res. Agen.*, 1, 111–121.
- 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・畑 恭子 (1998a) 貧酸素化の進行による底生生物群集構造の変化が底泥-海水間の窒素収支に与える影響—底生生態系モデルによる解析—。海洋理工学会誌, 4, 65–80.
- 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・今尾和正 (1998b) 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.
- 鈴木輝明・青山裕晃・中尾 徹・今尾和正 (2000) マクロベントスによる水質浄化機能を指標とした底質基準試案—三河湾浅海部における事例研究—。水産海洋研究, 64, 85–93.
- 鈴木輝明・家田喜一 (2003) 三河湾奥に存在するアマモ場内・外の魚類群集の相違。愛知水試研報, 10, 21–24.
- 多田彰秀・中村武弘・矢野真一郎・武田 誠・藤本大志 (2004) 諫早湾湾口部における潮流流速と溶存酸素濃度の現地観測。海岸工学論文集, 51, 901–905.
- 武田和也・石田基雄 (2006) 三河湾における苦潮によるアサリ大量死と浚渫窪地内部の貧酸素化の状況。海洋理工学会誌, 12, 51–58.
- 玉井恭一 (1998) マクロベントスの分布と生産。「沿岸の環境圏」, 平野敏行監修, フジ・テクノシステム, 東京, 244–253.

- 田中 豊・垂水共之・脇本和昌 (1992) 「パソコン統計解析ハンドブック 多変量解析編」, 共立出版, 東京, 416pp.
- 和久光靖・橋口晴穂・栗田貴代・金子健司・宮向智興・青山裕晃・向井良吉・石田基雄・鈴木輝明 (2011) 三河湾の浚渫窪地における粒子状物質の特異的な集積機構. 海の研究, **20**, 1-17.
- 山崎宗広・宝田盛康・上嶋英機・朝位孝二 (1998) 湾口部地形変化による停滞性海域の流況改善に関する実験的研究. 海岸工学論文集, **45**, 1026-1030.
- 横山 寿・西村昭史・井上美佐 (2002a) 熊野灘沿岸の魚類養殖場におけるマクロベントス群集と堆積物に及ぼす養殖活動と地形の影響. 水産海洋研究, **66**, 133-141.
- 横山 寿・西村昭史・井上美佐 (2002b) マクロベントス群集型を用いた魚類養殖場環境の評価. 水産海洋研究, **66**, 142-147.