

福岡湾におけるマクロベントス及び漁場環境の長期変化

江頭 亮介^a・江崎 恭志・池浦 繁^b
(水産海洋技術センター)

近年、福岡湾を取り巻く環境が大きく変化しており、漁場環境にも多大な影響を与えている。福岡湾に隣接する水処理センターにおいて、リン除去を目的とした高度処理設備が1993～1999年度に整備され、福岡湾では全リン（以下TP）濃度は1993年度ごろをピークに減少傾向にある¹⁾。また、2000年代には冬期の溶存態無機リン不足によるノリ、ワカメ養殖の不作が頻発するようになった²⁾。福岡湾の漁場環境のうち、水質やプランクトンについては一定の知見³⁾が存在するが、マクロベントスについては、2010年以後福岡湾全域の調査結果が報告⁴⁾されておらず、近年の状況が明らかになっていない。

そこで、本研究では2024年5月から2025年2月にかけて福岡湾全域で採泥および水質調査を実施し、マクロベントスの環境と密接に関係する特に個体数と水質、底質を評価した上で過去と比較し、その変化を引き起こした要因を統計的に検証した。

方 法

1. 福岡湾の水質及び底質の長期変動

福岡湾のマクロベントスの生息、分布や組成などに影響を与えていると考えられる水質、底質の長期変動について以下のとおり分析を行った。

(1) 水質

解析には、Windows版のR version 4.5.1でパッケージtimsac version 1.3.8-4を用いた。

福岡湾の水質については、季節調整法を用いた長期変動傾向の報告がある⁵⁾。季節調整法とは、時系列データをトレンド成分、季節成分、ノイズ成分に分ける統計手法であり、トレンド成分を分析することにより長期変動傾向を把握することができる。しかし、この報告⁵⁾では環境基準点ごとに分析しているため、海域全体の傾向が分からない。またマクロベントスに影響があると思われるクロロフィルa（以下Chl-a）の分析がなされていない。

そのため、福岡市水質測定結果報告から、1982年4月

～2025年3月の底層水温、底層溶存酸素量（以下D0）、底層化学的酸素要求量（以下COD）、底層Chl-a、底層全窒素（以下TN）、底層TPについて、全環境基準点の月別平均値を使用し、この報告⁵⁾と同様に季節調整法を用いてトレンド成分を抽出し、海域全体の長期変動について分析を行った。環境基準点を図1に示した。なお、このデータは、毎月1回調査されているものである。

(2) 底質

福岡湾の底質については、福岡市水質測定結果報告から1982年～2024年のCOD、強熱減量（以下IL）について、全環境基準点の年別平均値を使用し、海域全体の分析を行った。なお、このデータは、毎年8月に調査されているものである。

2. 調査年別と季節別マクロベントス生息状況の比較

2024年度の春（5月）、夏（8月）、秋（11月）、冬（2月）の季節別に、福岡湾内の21点でマクロベントス調査を行った。調査定点を図1に示した。なお、この調査定点は、1991～1992年⁶⁾、2008年度⁴⁾に実施されたマクロベントス調査と同様の定点のうち、埋め立てにより採泥ができなくなった定点1を除いたものである。

水質については、各定点で多項目水質計（JFEアドバンテック株式会社製RINKO-Profiler ASTD102）を用いて底層水温、底層D0、底層Chl-aを測定した。

底質およびマクロベントスについては、各定点でスミス・マッキンタイヤ採泥器（採泥面積1/20m²）を用いて

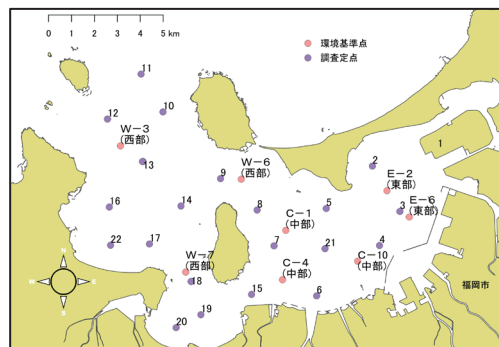


図1 福岡湾内の環境基準点と調査定点

^a 現所属：有明海研究所

^b 現所属：漁業調整委員会事務局

3 回ずつ底泥を採取し、分析用サンプルとした。

底泥のうち、底質環境項目分析用として深さ 3cm の表層泥を採取し、泥分率、中央粒径値（以下 $Md\phi$ ）、酸揮発性硫化物（以下 AVS）、COD、IL を分析した。分析方法は 1980 年刊行の新編水質汚濁調査指針に従った。

また、底泥中のマクロベントスの分析用として、残りの泥全量を目合い 1mm の金属製篩に通し、残存物を 10% 中性ホルマリンで固定の上、種の同定および計数を行った。なお、重量 1g を超える個体は今回の分析から除外した。

（１）調査年別マクロベントス生息状況の比較

1991～1992 年、2008 年度、2024 年度のマクロベントス個体数およびマクロベントスの出現状況より求めたシャノンの多様度指数（以下多様度指数）を年別に比較し評価した。評価については、調査年ごとに対応のある 2 標本 t 検定を行い、有意か判断した。

（２）季節別マクロベントス生息状況の比較

1991～1992 年、2008 年度、2024 年度のマクロベントス個体数を、季節別に整理して比較し評価した。評価については、調査年ごとに対応のある 2 標本 t 検定を行い、有意か判断した。

3. マクロベントス個体数と底質および水質との関係

福岡市水質測定結果報告の各環境基準点に最も近いマクロベントス調査定点を選出し、水質とマクロベントス個体数及び底質の関係を解析した。対応は表 1 のとおりとした。解析には、Windows 版の R version 4.5.1 でパッケージ glmTMB version 1.1.13 と MuMIn version 1.48.11 を用いた。

（１）1991～1992 年、2008 年度、2024 年度のマクロベントス個体数と水質との関係

1991～1992 年、2008 年度、2024 年度のマクロベントス個体数と水質の関係を解析した。マクロベントス個体数については、1991～1992 年、2008 年度、2024 年度の表 1 の調査定点における全季節のデータを用いた。水質は福岡市水質測定結果報告の同年同月のデータを使用した。解析は一般化線形混合モデル（以下 GLMM）を用いた。応答変数をベントス個体数、説明変数を底層水温、底層

D0、底層 COD、底層 TN、底層 TP、底層 Chl-a、ランダム効果をマクロベントス調査定点、応答変数の確率分布は負の二項分布、link 関数は log とした GLMM のフルモデルを構築した後、総当たり法により赤池情報量基準（以下 AIC）が最小となるモデル選択を行った。

また、夏季には福岡湾奥において貧酸素水塊が発生することが知られており⁷⁾、マクロベントス個体数に影響があると考えられる。そのため、夏季におけるマクロベントス個体数と水質の関係を解析した。応答変数をベントス個体数、説明変数を底層水温、底層 D0、底層 COD、底層 TN、底層 TP、底層 Chl-a、ランダム効果をマクロベントス調査定点、応答変数の確率分布は負の二項分布、link 関数は log とした GLMM のフルモデルを構築した後、総当たり法により AIC が最小となるモデル選択を行った。

そして、ベントスの大多数の種は懸濁物食もしくは堆積物食であることから⁸⁾、餌料となる有機物量の指標である COD は重要と考えられる。そのため、底層 COD と他水質との関係を解析した。応答変数を底層 COD、説明変数を底層水温、底層 D0、底層 TN、底層 TP、底層 Chl-a、ランダム効果をマクロベントス調査定点、応答変数の確率分布は正規分布、link 関数は log とした GLMM のフルモデルを構築した後、総当たり法により AIC が最小となるモデル選択を行った。

（２）2024 年度のマクロベントス個体数と底質および水質との関係

2024 年度のベントス個体数と底質および水質の関係を解析した。データは 2024 年度マクロベントス調査の、全季節の全調査定点のものを使用した。解析は GLMM を用いた。応答変数をベントス個体数、説明変数を AVS、泥中 COD、 $Md\phi$ 、底層水温、底層 D0、底層 Chl-a、ランダム効果をマクロベントス調査地点、応答変数の確率分布は負の二項分布、link 関数は log とした GLMM のフルモデルを構築した後、総当たり法により AIC が最小となるモデル選択を行った。なお、説明変数間の多重共線性を考慮し、VIF が 10 以上になる泥分率、IL は除外した。

結 果

1. 福岡湾の水質及び底質の長期変動

（１）水質

福岡湾の水質の長期変動を図 2-1 から図 2-6 に示した。

表 1 ベントス調査地点と環境基準点の対応

マクロベントス調査定点名	2	3	4	7	9	12	15	18
環境基準点名	E-2	E-6	C-10	C-1	W-6	W-3	C-4	W-7

福岡湾におけるマクロベントス及び漁場環境の長期変化

底層水温の上昇傾向、底層DOの2010年以降の減少傾向、
底層COD、底層Chl-a、底層TPの1990年代からの減少傾向

向が見られた。

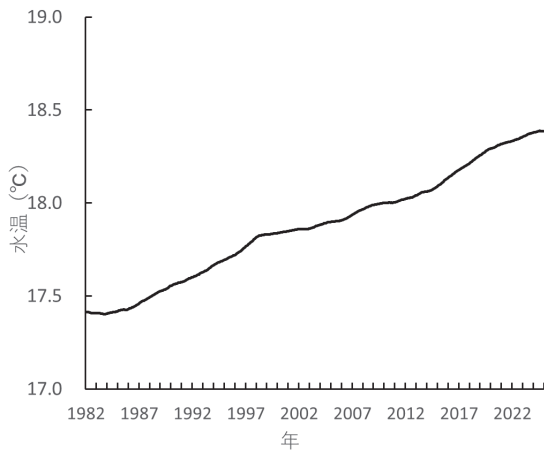


図 2-1 底層水温の長期変動

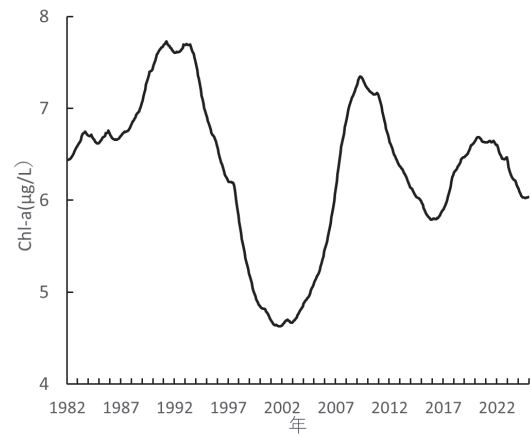


図 2-4 底層 Chl-a の長期変動

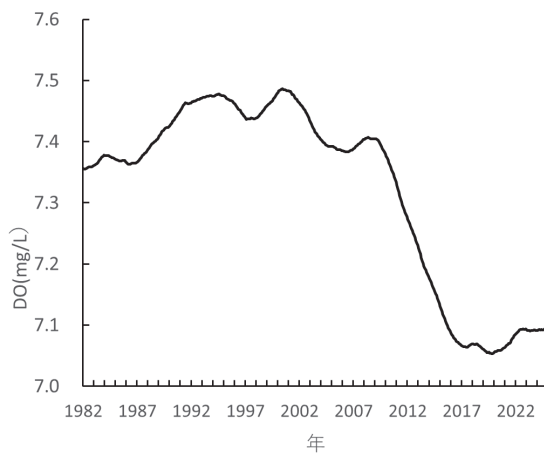


図 2-2 底層 DO の長期変動

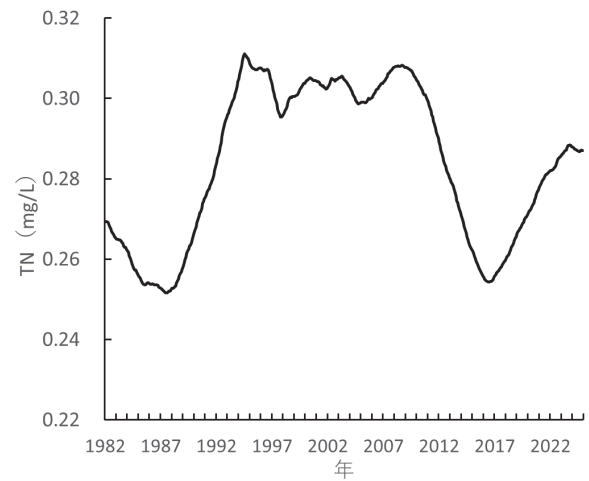


図 2-5 底層 TN の長期変動

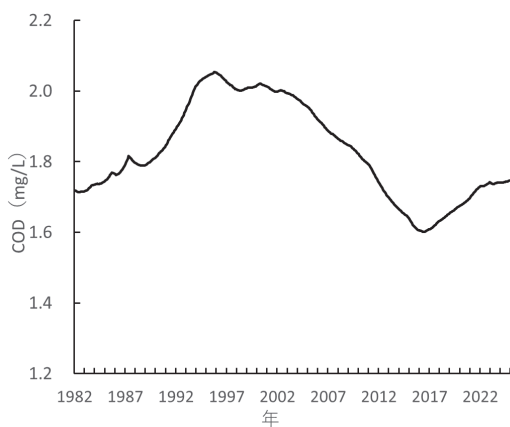


図 2-3 底層 COD の長期変動

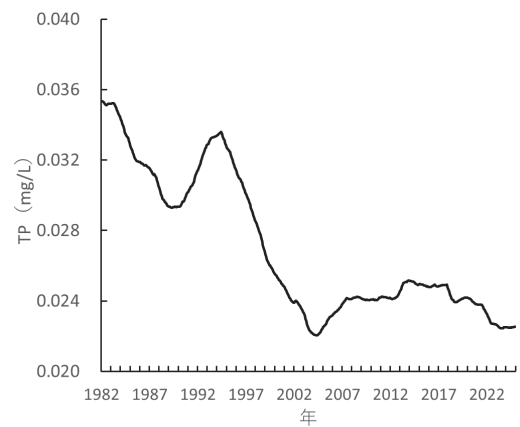


図 2-6 底層 TP の長期変動

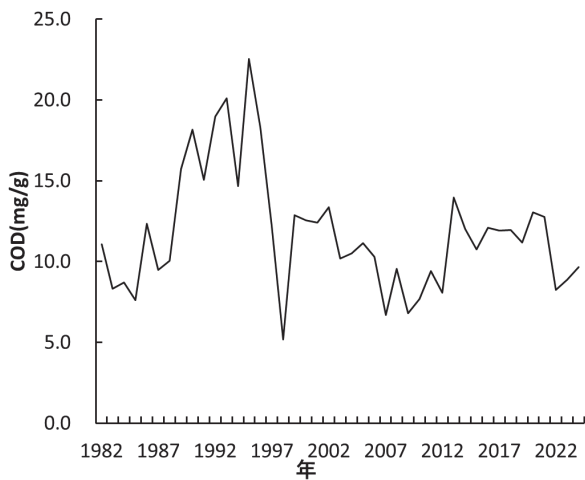


図 3-1 COD の長期変動

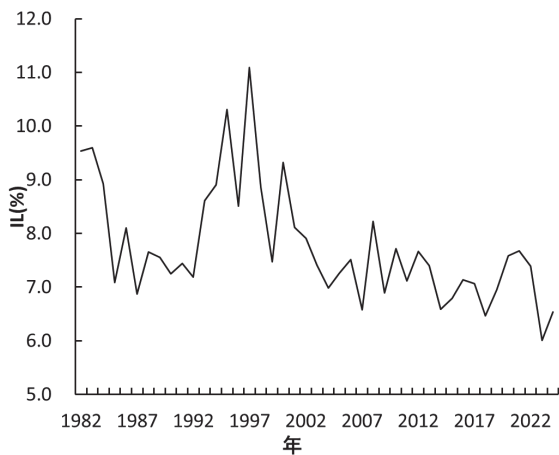


図 3-2 IL の長期変動

(2) 底質

福岡湾の底質の長期変動を図3-1から図3-2に示した。CODは1995年をピークに減少したのち横ばい、ILは1990年代以降の減少傾向が見られた。

2. 調査年別と季節別マクロベントス生息状況の比較

(1) 調査年別マクロベントス生息状況の比較

マクロベントス生息密度と多様度指数について調査年別に比較した結果を表2に示した。

1991～1992年と2008年度の比較では、多毛類、多様度指数の増加が見られ、危険率1%で有意であると判断された。

1991～1992年と2024年度の比較では、マクロベントス平均個体数、多毛類、軟体動物類の減少が見られ、危

表2 年別マクロベントス生息密度と多様度指数の経年変化

項目	1991～1992年	2008年度	2024年度	評価 (1991～1992年 と2008年度)	評価 (1991～1992年 と2024年度)	評価 (2008年度と 2024年度)
マクロベントス 平均個体数 (個体/㎡)	1911.4	2795.0	471.2	有意差なし	減少**	減少**
うち多毛類	582.7	1549.3	232.0	増加**	減少**	減少**
うち甲殻類	251.5	181.2	125.1	有意差なし	有意差なし	有意差なし
うち軟体動物類	1040.1	846.4	70.0	有意差なし	減少**	減少**
多様度指数H'	2.3	3.6	2.4	増加**	有意差なし	減少**

有意水準：*5% **1%

表3 季節別マクロベントス生息密度の経年変化

季節	1991～1992年 マクロベントス 平均個体数 (個体/㎡)	2008年度 マクロベントス 平均個体数 (個体/㎡)	2024年度 マクロベントス 平均個体数 (個体/㎡)	評価 (1991～1992年 と2008年度)	評価 (1991～1992年 と2024年度)	評価 (2008年度と 2024年度)
春	1,484.3	4,686.7	503.7	増加*	減少*	減少**
夏	487.6	2,852.4	286.7	増加**	有意差なし	減少**
秋	1,151.9	1,819.0	436.2	有意差なし	減少**	減少**
冬	4,521.9	1,821.9	658.1	有意差なし	減少*	減少**

有意水準：*5% **1%

危険率1%で有意であると判断された。

2008年度と2024年度の比較では、マクロベントス平均個体数、多毛類、軟体動物類、多様度指数の減少が見られ、危険率1%で有意であると判断された。

また、2024年度のマクロベントス平均個体数は過去最低であった。

(2) 季節別マクロベントス生息状況の比較

季節別のマクロベントス生息密度について調査年別に比較した結果を表3に示した。

1991～1992年と2008年度の比較では、春と夏にマクロベントス平均個体数の増加が見られ、春の増加は危険率5%、夏の増加は危険率1%で有意であると判断された。

1991～1992年と2024年度の比較では、春、秋、冬にマクロベントス平均個体数の減少が見られ、春と冬の減少は危険率5%、秋の減少は危険率1%で有意であると判断された。

2008年度と2024年度の比較では、全季節でマクロベントス平均個体数の減少が見られ、危険率1%で有意であると判断された。

また、2024年度のマクロベントス平均個体数は全季節において過去最低であった。

3. マクロベントス個体数と底質および水質との関係

(1) 1991～1992年、2008年度、2024年度のマクロベントス個体数と水質の関係

表 4 1991～1992 年, 2008 年度, 2024 年度のマクロベントス個体数と水質の GLMM 解析結果

標本数	変数名	標準化偏回帰係数	標準誤差	p値	AIC
96	切片	7.253	0.129	<0.001	1596.9
	底層水温	-0.431	0.118	<0.001	
	底層COD	0.683	0.170	<0.001	
	底層Chl-a	0.311	0.135	0.021	

表 5 1991～1992 年, 2008 年度, 2024 年度の夏季マクロベントス個体数と水質の GLMM 解析結果

標本数	変数名	標準化偏回帰係数	標準誤差	p値	AIC
24	切片	6.363	0.252	<0.001	362.8
	底層DO	1.120	0.373	0.003	
	底層TN	2.705	1.054	0.010	
	底層Chl-a	-1.817	1.024	0.076	

1991～1992 年, 2008 年度, 2024 年度のマクロベントス個体数と水質の関係の解析結果を表 4 に示した。AIC が最小となるモデルの説明変数として, 底層水温, 底層 COD, 底層 Chl-a が選択され, 水温が高く, 底層 COD と底層 Chl-a が低いとマクロベントス個体数が減少するモデルとなった。

また, 夏季における 1991～1992 年, 2008 年度, 2024 年度のマクロベントス個体数と水質の関係の解析結果を表 5 に示した。AIC が最小となるモデルの説明変数として, 底層 DO, 底層 TN, 底層 Chl-a が選択され, 底層 DO と底層 TN が低いとマクロベントス個体数が減少するモデルとなった。

そして, 底層 COD と他水質との関係の解析結果を表 6 に示した。AIC が最小となるモデルの説明変数として, 底層水温, 底層 DO, 底層 TN, 底層 TP が選択され, 底層水温と底層 DO, 底層 TN, 底層 TP が低いと底層 COD が減少するモデルとなった。

(2) 2024 年度のマクロベントス個体数と底質および水質の関係

2024 年度のマクロベントス個体数と底質および水質の関係の解析結果を表 7 に示した。AIC が最小となるモデルの説明変数として, 泥中 COD, Mdφ, 底層水温が選択され, 泥中 COD が低く, 底層水温が高いとマクロベントス個体数が減少するモデルとなった。

表 6 1991～1992 年, 2008 年度, 2024 年度の底層 COD と水質の GLMM 解析結果

標本数	変数名	標準化偏回帰係数	標準誤差	p値	AIC
96	切片	0.614	0.057	<0.001	127.1
	底層水温	0.161	0.031	<0.001	
	底層DO	0.200	0.033	<0.001	
	底層TN	0.129	0.028	<0.001	
	底層TP	0.055	0.018	0.003	

表 7 2024 年度マクロベントス個体数と底質および水質の GLMM 解析結果

標本数	変数名	標準化偏回帰係数	標準誤差	p値	AIC
84	切片	5.976	0.110	<0.001	1178.7
	泥中COD	0.552	0.171	0.001	
	Mdφ	-0.310	0.169	0.068	
	底層水温	-0.368	0.092	<0.001	

考 察

1991～1992 年, 2008 年度, 2024 年度と 3 回実施されたマクロベントス調査のうち, 2024 年度のマクロベントス個体数が最小であり, 減少していることが明らかになった。

マクロベントスのうち, 甲殻類については減少が認められなかったが, ほとんどがメナシピンノであった。この種は, 泥場を嗜好する種にも関わらず砂場の砂を敷いた水槽で長期間飼育可能と環境の変化に強い種と推測されている⁹⁾ため, 福岡湾の湾奥の泥質や湾央の砂泥質⁶⁾といった様々な底質環境に適応して増加した可能性がある。そして, 2024 年度のマクロベントス個体数の変動が大きいため, マクロベントスの種も変動していることが考えられる。そのため, マクロベントス種組成によるクラスター分析等を行い, マクロベントスの経年変化の詳細を更に分析する必要があると推察された。

また, マクロベントス個体数と水質および底質の GLMM 解析結果から, 底層もしくは泥中 COD と底層 Chl-a が低く, 水温が高いとマクロベントス個体数が減少することが分かった。

ベントスの大多数の種は植物プランクトンを主とする有機懸濁物をろ過もしくは吸着によって摂餌する懸濁物

食と、底表面もしくは砂泥中の有機物を摂餌する堆積物食であることから⁸⁾、COD と Chl-a については、マクロベントスの餌料に関連する項目である。そのため、これらが低いとマクロベントス個体数が減少することを示していると考えられる。

また、底層 COD、泥中 COD、底層 Chl-a のいずれも 1990 年代以降に減少しており、マクロベントスの餌料の減少が推察される。

水温が高いほどマクロベントス個体数が減るという解析結果に加え、夏季の底層 D0 が減るほどマクロベントス個体数が減るという解析結果から、近年の海水温上昇により海中の D0 が減少し、マクロベントスに悪影響を及ぼしていることが推察される。

そして、底層 TP は 1990 年代以降、底層 D0 は 2010 年以降に減少が見られること、GLMM 解析により TP、TN、D0 の減少も底層 COD の減少に影響していることが分かった。底層 TP の減少理由については、1993 年から順次導入された下水の高度処理の効果と推察している報告がある⁵⁾。

以上により、TP の減少等によりマクロベントスの餌料が減少していることに加え、海中の D0 の減少によりマクロベントス個体数が減少している可能性がある。

なお、福岡湾と同様に栄養塩類の低下によるノリの色落ちや浮魚・底魚などの漁業生産量の低下が問題となっている瀬戸内海では、2015（平成 27）年 10 月 2 日に改正瀬戸内海環境保全特別措置法が公布・施行され、栄養塩類の適切な管理に関する調査・研究や、様々な栄養塩供給の試みが行われている¹⁰⁾。

福岡湾においても、漁場環境の改善に向けて同様の取り組みが必要ではないかと考えられる。

文 献

- 1) 横山佳裕，大島雄三，後藤祐哉，望月佑一，藤井暁彦，内田唯史．冬期博多湾における海域の栄養塩類に対する下水処理の緩和運転の効果に関する現地観測 2019；75；2：I_983-I_988．土木学会論文集 B3（海洋開発）
- 2) 江藤拓也，片山幸恵，江崎恭志．2008 年から 2010 年における福岡湾でのノリ，ワカメ養殖の不作要因について．福岡県水産海洋技術センター研究報告 2012；22：33-40．
- 3) 里道菜穂子，江崎恭志，多田邦尚．福岡湾の栄養塩濃度と植物プランクトン種組成の 18 年間（1993－2010 年）の変化 2019；56；2：131-141．沿岸海洋研究
- 4) 江崎恭志，江藤拓也．マクロベントス群集から見た福岡湾底質環境の現状と経年変化．福岡県水産海洋技術センター研究報告 2010；20：47-52．
- 5) 有本圭佑，中山恵利，大平良一．季節調整法を用いた博多湾の長期水質変動解析 2023；48：79-88．福岡市保環研報
- 6) 本田清一郎．福岡湾の底生生物群集の季節変化．福岡県水産海洋技術センター研究報告 1993；1：189-198．
- 7) 柳哲雄，石井大輔．博多湾奥部における貧酸素水塊発生・消滅機構．海の研究 2009；18（2）：169-176．
- 8) 菊池 泰二．ベントスの働き—生物攪拌を中心に．沿岸海洋研究ノート 1981；18（2）：67-77．
- 9) 荒巻陽介．福岡県柳川市沖端の干潟に出現するカニ類とメナシピンノの生態に関する一知見，2005；53；1：9-19．水産大学校研究報告
- 10) 阿保勝之．瀬戸内海を豊かな海に—水産資源の持続的利用のための提言．2016；39（A）：97-101．水環境学会誌