

資料

鹿児島湾奥部における水質調査結果について(第Ⅱ報)

Results of Water Quality Survey in the innermost area of Kagoshima Bay(Ⅱ)

前 畑 健 太 右 田 裕 二¹ 山 道 哲 洋
米 澤 里 奈 有 西 聡 美 桑 原 庸 輔

1 はじめに

鹿児島湾は、南北約80km、東西約20kmの細長く入り組んだ内湾であり、桜島と鹿児島市街地を結ぶ最大水深40m、幅1.9kmの西桜島水道を隔てて、北方の湾奥部(最大水深206m)と南方の湾央及び湾口部に大別される。県は1979年5月に鹿児島湾ブルー計画(鹿児島湾水質環境管理計画)を策定し、以来、生活排水、工場・事業場及び農畜産業・水産養殖業等の汚濁発生源対策など各種環境保全対策を講じてきている。一方で、特に湾奥部は閉鎖性が高いため夏季には環境基準値を上回る化学的酸素要求量(以下「COD」という。)が測定されることが多く、また、赤潮や貧酸素水塊の発生も毎年報告されている¹⁾。

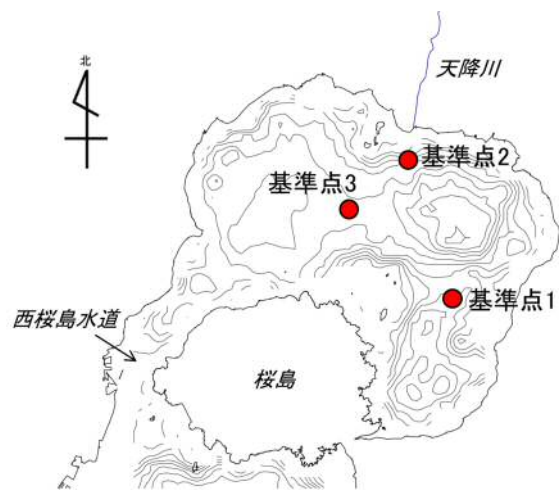
貧酸素水塊の形成は、河川水の流入や植物プランクトンによる内部生産によって供給された有機物が分解される際の溶存酸素の消費が一因と考えられていることから²⁾、有機物に関する解析が重要である。

本県は、湾奥部の水質状況を有機物に関して詳細に把握することを目的として、国立環境研究所と地方公共団体環境研究機関との共同研究(以下「Ⅱ型共同研究」という。)に取り組んでおり、今回、湾奥部におけるCOD、溶存態COD、有機炭素等のCOD関連項目及び植物プランクトンの増殖因子である栄養塩類について調査し、既報^{3),4)}のデータと併せて解析を行ったので報告する。なお、COD関連項目は2005年度から2009年度に本県で調査した水質と比較した結果についても報告する。

2 調査方法

2.1 調査地点

調査地点を図1に示す。調査地点は湾奥沿岸部の基準点1(水深約107m)、基準点2(水深約109m)、基準点3(水深約142m)とした。基準点1は湾の最も奥であり垂水市牛根沖に位置し、基準点2は湾奥部で最も流量の多い天降川の河口沖に位置し、基準点3は湾奥部の中央に位置する地点である。3地点ともA類型であり、CODの環境基準は2.0mg/L以下に設定されている。



(注) 国土地理院「国土数値情報」、日本海洋データセンター「500mメッシュ水深データ」をもとに作成

図1 調査地点

1 鹿児島県立大島病院

〒894-0015 奄美市名瀬真名津町18-1

2. 2 調査項目

2. 2. 1 COD関連項目

COD, 溶存態COD (D-COD), 全有機炭素 (TOC), 溶存態有機炭素 (DOC), 懸濁態有機炭素 (POC), クロロフィルa (Chl-a) を測定した。CODからD-CODを差し引いたものを懸濁態COD (P-COD) とし, TOCからDOCを差し引いたものをPOCとした (国立環境研究所では, DOCとPOCの合計をTOCとした)。

2. 2. 2 栄養塩類

硝酸態窒素 (NO₃-N), 亜硝酸態窒素 (NO₂-N), アンモニア態窒素 (NH₄-N), 溶存態全窒素 (DTN), リン酸態りん (PO₄-P), 溶存態全りん (DTP), シリカ (SiO₂) を測定した。

なお, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-Nの合計を溶存態無機窒素 (DIN) とし, リン酸態りん (PO₄-P) を溶存態無機りん (DIP) とした。

2. 3 調査月及び対象データ

2. 3. 1 基準点1, 2

基準点1, 2については, II型共同研究の調査地点としてCOD関連項目及び栄養塩類の測定を2011年度から2019年度に行っている。調査月及び採水層を表1に示す。

表1 基準点1, 2の調査月及び採水層

調査年度	調査月	採水層	
		表層	下層
2011~2012	8月, 12月	0.5m	100m
2013	9月, 12月	0.5m	100m
2014	1月	0.5m	90m
2015~2019	9月, 1月	0.5m	90m

8月, 9月を夏季データ, 12月, 1月を冬季データとして解析を行った。

また, 2005年度から2009年度に当センターで行った鹿児島湾水質調査結果のうち, 基準点1, 2の表層 (0.5m) における9月と1月のCOD, D-COD, P-COD, TOCの結果を用い, 併せて解析を行った。

2. 3. 2 基準点3

基準点3については, 県の常時監視の調査地点として, COD関連項目及び栄養塩類の測定を行っており, 2011年度から2019年度のデータを用いて解析を行った。採水層は表層 (0.5m) 及び下層 (130m) であり, 9月を夏季データ, 1月を冬季データとした。COD関連項目のう

ち, D-COD, P-COD, TOC, DOC, POCは概ね5年に1回測定しており, 調査月等を表2に示す。

また, 2005年度から2009年度に行った鹿児島湾水質調査結果のうち, 表層における9月と1月のCOD, D-COD, P-COD, TOCの結果を用い, 併せて解析を行った。

表2 基準点3におけるD-COD等^{*1}の調査実施内容

調査年度	調査月	調査実施の有無 ^{*2}	
		表層	下層
2011~2012	9月, 1月	-, -	-, -
2013	9月, 1月	O, O	-, -
2014	9月, 1月	O, -	O, -
2015~2018	9月, 1月	-, -	-, -
2019	9月, 1月	O, O	O, O

*1 D-COD, P-COD, TOC, DOC, POC

*2 有: O, 無: -

COD関連項目及び栄養塩類については, 各調査地点で対象年度の各時季の項目毎に平均値を算出して考察を行った。

2. 4 調査方法

2. 4. 1 基準点1, 2

調査地点における採水方法は, 表層水はバケツを用いて採水し, 下層水はバンドーン採水器を用いて採水した。

試料は冷蔵保存し, あらかじめ450℃で4時間焼成処理したガラス繊維フィルターGF/Fを用いて採水の翌日にろ過操作を行い, 得られたろ液をD-COD, DOC, NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-P, SiO₂測定用, フィルターをPOC, Chl-a測定用とした。ろ過試料, フィルター試料及び未ろ過試料は全て冷凍保管・送付し, 国立環境研究所が分析を行った⁵⁾。2011年度から2019年度の基準点1, 2は, 国立環境研究所の測定データを使用した。

2. 4. 2 基準点3

基準点1, 2と同様の方法で採水した試料を冷蔵保管し, 翌日から分析を行った。COD, D-CODはJIS法に従って測定を行った。TOC, DOCの測定は, 全有機炭素測定装置 (島津製作所 TOC-VCPH) を使用した。D-COD, DOCはあらかじめ450℃で4時間焼成処理したガラス繊維フィルターGF/C又はGF/Fでろ過した試料を測定に用いた。Chl-aは, ガラス繊維フィルターGF/Cを用いて試料を1000mL程度ろ過した後にフィルターをアセトン抽出し, 分光光度計 (HITACHI, U-3900) で測定した。

窒素の測定は, オートアナライザー (ビーエルテック,

QuAAtro 2-HR) を使用し、りんごの測定は、分光光度計 (HITACHI, U-3900) を使用した。NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, PO₄-Pの測定は、ガラス繊維フィルターGC-50でろ過した試料を用いた。DTN, DTPの測定は、ろ過した試料にペルオキシ二硫酸カリウム液を添加後、オートクレーブ処理したものを用いた。

3 結果及び考察

3. 1 COD関連項目

3. 1. 1 2011年度から2019年度の結果

表3 COD関連項目 (2011~2019) の測定結果 (表層)

		(単位: mg/L (Chl-aはμg/L))						
地点名	時季	COD	D-COD	P-COD	TOC	DOC	POC	Chl-a
基準点1	夏季	2.44 8, (0.60)	2.09 7, (0.42)	0.47 7, (0.26)	1.82 8, (0.44)	1.49 8, (0.33)	0.34 8, (0.17)	1.96 8, (1.40)
	冬季	1.25 8, (0.33)	1.13 7, (0.19)	0.17 7, (0.15)	1.16 7, (0.26)	0.97 9, (0.19)	0.18 7, (0.09)	1.66 9, (1.44)
基準点2	夏季	2.42 8, (0.75)	1.95 7, (0.52)	0.56 7, (0.47)	1.63 8, (0.47)	1.21 8, (0.38)	0.42 8, (0.24)	1.67 8, (1.23)
	冬季	1.31 9, (0.18)	1.18 8, (0.17)	0.15 8, (0.14)	1.02 7, (0.23)	0.82 9, (0.18)	0.19 7, (0.06)	1.21 9, (0.98)
基準点3	夏季	2.39 9, (0.43)	1.97 3, (0.25)	0.40 3, (0.17)	1.60 3, (0.20)	1.27 3, (0.15)	0.33 3, (0.06)	1.32 9, (1.13)
	冬季	1.20 9, (0.22)	1.00 2, (0.14)	0.30 2, (0.14)	0.95 2, (0.21)	0.80 2, (0.14)	0.15 2, (0.07)	0.87 9, (0.84)

(注) 下段はn数, 括弧は標準偏差

図2に3地点における各項目間の関係を示す。図2より基準点1, 2のCODとTOC, D-CODとDOCはそれぞれ有意な正の相関 ($p < 0.05$) があつた。P-CODとPOCにも正の相関が見られ, 特に基準点2は強い相関があり, 天降川からの外部負荷が懸濁態有機物として影響していることが示唆された。基準点3についても他2地点と同様の傾向が見られるものの, サンプル数が少ないため今後更なるデータの蓄積が必要であると考えられる。

COD関連項目について, 表層の測定結果を表3に示す。季節間の比較では, Chl-aはばらつきが大きいものの, 各項目のいずれも夏季の方が高い傾向にあつた。要因の一つとして夏季の植物プランクトンの増殖による内部生産が反映された結果と考えられた。

また, 各地点において夏季, 冬季ともにCOD及びTOCの大部分を溶存態のもの (D-COD及びDOC) が占め, その割合は74~90%であつた。

また, 3地点ともD-CODがCODに占める割合とDOCがTOCに占める割合がともに80%程度であることと, 3地点ともにDOCとD-CODとの間に正の相関関係が認められることから, 湾奥部におけるCODの主成分はDOCであるとと考えられた。

なお, Chl-aとその他項目については, 明確な相関は認められなかつた。

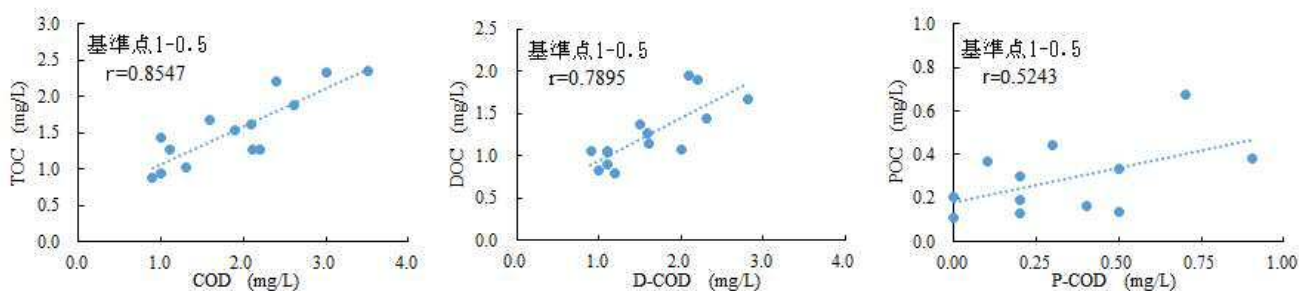


図2 COD関連項目間の関係 (その1)

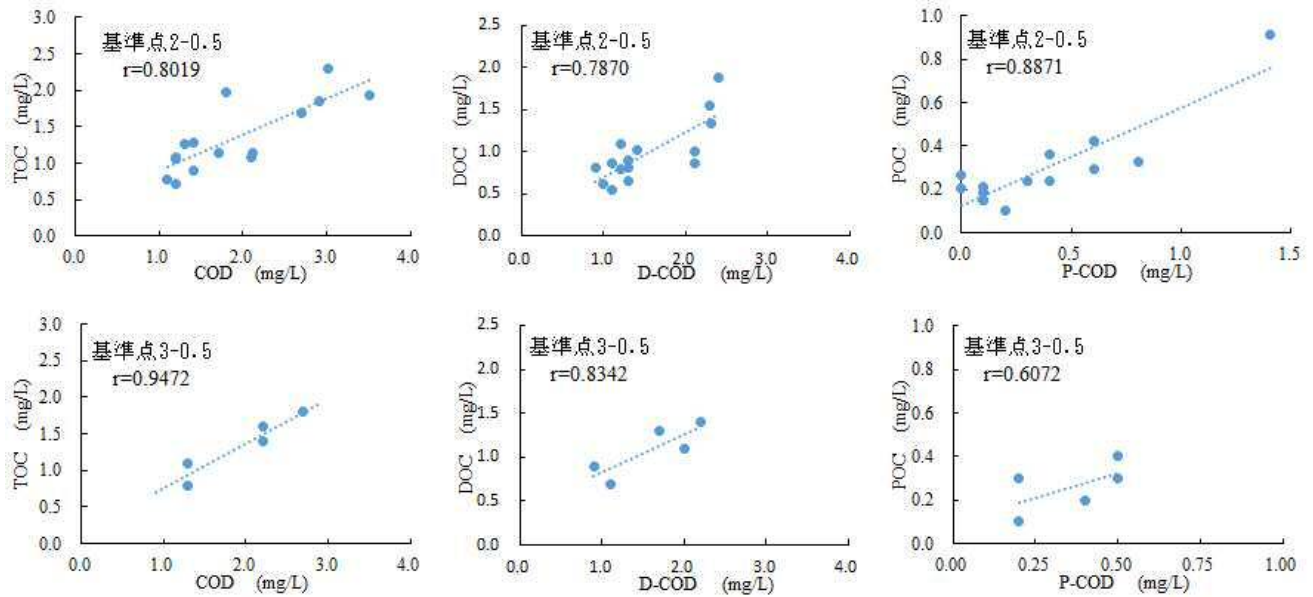


図2 COD関連項目間の関係 (その2)

下層の測定結果を表4に示す。下層では季節間の差は表層に比べて小さくなり、COD、TOCは同一地点でそれぞれ同程度の値を示した。各地点とも夏季、冬季ともにCODとTOCの大部分を表層と同程度の割合で溶存態のものが占めていた。

各地点におけるCOD/TOC比は、基準点1は夏季が1.23、冬季が1.07、基準点2は夏季が1.30、冬季が1.05、基準点3は夏季が0.89、冬季が0.78であった。季節間では、冬季のCOD/TOC比が夏季に比べて小さく、冬季に存在する有機物は、夏季に存在する有機物に比べ化学的酸化

を受けにくく、分析によりCODとして評価されない有機物を高い割合で含んでいると考えられた。また、地点間では基準点3のCOD/TOC比の値が他2地点と比べて小さいことから、基準点3に存在する有機物は、他2地点に比べCODとして評価されない有機物を高い割合で含んでいると考えられた。基準点1と2はCOD/TOC比が同程度の値を示しており、基準点3と基準点1、2の違いの一つは採水深度であることから、有機物の成分は地点によらず深度の違いにより異なることをうかがわせた。

表4 COD関連項目 (2011~2019) の測定結果 (下層)

(単位: mg/L (Chl-aはμg/L))

地点名	時季	COD	D-COD	P-COD	TOC	DOC	POC	Chl-a
基準点1	夏季	1.39 7, (0.32)	1.15 6, (0.30)	0.28 6, (0.25)	1.13 8, (0.28)	0.99 8, (0.27)	0.14 8, (0.07)	0.14 8, (0.08)
	冬季	1.43 7, (0.40)	1.12 7, (0.26)	0.31 7, (0.34)	1.34 7, (0.63)	0.95 9, (0.16)	0.39 7, (0.57)	0.35 9, (0.15)
基準点2	夏季	1.49 7, (0.27)	1.35 7, (0.30)	0.14 7, (0.14)	1.15 8, (0.28)	1.00 8, (0.24)	0.14 8, (0.07)	0.14 8, (0.08)
	冬季	1.20 8, (0.21)	1.03 8, (0.32)	0.18 8, (0.17)	1.14 7, (0.45)	0.98 9, (0.36)	0.13 7, (0.05)	0.24 9, (0.15)
基準点3	夏季	1.02 9, (0.14)	0.85 2, (0.07)	0.10 2, (0.14)	1.15 2, (0.35)	1.05 2, (0.35)	0.10 2, (0.00)	0.03 9, (0.10)
	冬季	0.94 9, (0.15)	0.90 1, (-)	0.00 1, (-)	1.20 1, (-)	1.10 1, (-)	0.10 1, (-)	0.18 9, (0.35)

(注) 下段はn数、括弧は標準偏差

3. 1. 2 2005年度から2009年度の結果との比較

2005年度から2009年度の鹿児島湾水質調査結果について、表層のCOD関連項目の測定結果を表5に示す。

夏季と冬季を比較すると、各項目のいずれも夏季の方が高い傾向があり、また夏季、冬季ともにCODの大部分を溶存態のものが占めており、2011年度から2019年度の結果と同様の傾向であった。

基準点1, 2の夏季における表層のCODはこの調査結果に比べ2011年度から2019年度の結果の方が高くなっており、P-CODには大きな違いがないことから、D-CODの

上昇がCOD上昇の要因であると考えられた。

海洋中の溶存態有機物の特徴としては、難分解性有機物の割合が多いことが知られている⁹⁾が、鹿児島湾の難分解性有機物の実態については把握できていないため、今後も調査が必要であると考えられる。

基準点3については、この調査結果と2011年度から2019年度の結果に大きな違いはなかった。基準点3は、湾奥中央部に位置し、水深も深いことから、陸域から流入した有機物の影響が小さく、また移流・拡散作用により有機物等の蓄積が起りにくいことが考えられた。

表5 COD関連項目（2005～2009）の測定結果（表層）

(単位：mg/L (Chl-aは $\mu\text{g/L}$))

地点名	時季	COD	D-COD	P-COD	TOC
基準点1	夏季	2.26	1.78	0.48	1.62
		5, (0.18)	5, (0.08)	5, (0.16)	5, (0.28)
	冬季	1.30	1.18	0.13	1.30
		5, (0.20)	4, (0.10)	4, (0.15)	4, (0.35)
基準点2	夏季	2.24	1.74	0.50	1.15
		5, (0.26)	5, (0.17)	5, (0.19)	5, (0.32)
	冬季	1.50	1.25	0.30	1.02
		5, (0.24)	4, (0.10)	4, (0.16)	4, (0.16)
基準点3	夏季	2.38	2.02	0.36	1.61
		5, (0.33)	5, (0.25)	5, (0.28)	5, (0.33)
	冬季	1.34	1.13	0.23	1.08
		5, (0.09)	4, (0.05)	4, (0.15)	5, (0.13)

(注) 下段はn数、括弧は標準偏差

3. 2 栄養塩類

栄養塩類について、表層の測定結果を表6に示す。季節間の比較では、基準点2の SiO_2 を除き、冬季の方が夏季より高い傾向にあった。前述のCOD関連項目は夏季に高くなる傾向を示したが、夏季は植物プランクトンの増殖が活発となり、栄養塩類を取り込む内部生産が多くなったためと考えられた。地点間を比較すると、基準点2は他2地点に比べ全ての値が大きく、また、ばらつきも大きくなっている。これは天降川からの外部負荷によるものであると考えられた。

DINのDTNに対する割合は、夏季は基準点1が1.2%、基準点2が63.9%、基準点3が26.1%であり、冬季はそれぞれ39.0%、56.4%、56.3%と基準点1, 3については夏季より冬季が高く、基準点2については同程度であった。

DIPのDTPに対する割合は、夏季は基準点1が7.7%、基準点2が55.6%、基準点3が33.3%であり、冬季はそれぞれ69.7%、69.8%、86.2%と各地点とも夏季より冬季

が高かった。これは夏季に植物プランクトンの増殖が活発となり、栄養塩類(DIN・DIP)が利用されていることを反映していると考えられた。基準点2については、天降川からの栄養塩類の供給が過多となり、プランクトンによる消費の影響は顕著に評価されなかったものと考えられた。

図3に基準点1, 2の表層におけるDINとDIP, SiO_2 の関係、基準点3の表層におけるDINとDIPの関係及び基準点1～3の表層におけるChl-aとDIN, DIPの関係を示す。DINとDIP, SiO_2 は各地点ともそれぞれ有意な正の相関($p < 0.05$)が見られ、3成分は同時に増減していることが分かった。また、Chl-aとDIN, DIPの関係については、基準点2については有意な負の相関($p < 0.05$)が見られ、また、基準点1, 3は明確な相関が認められなかったもののChl-aの増加に伴い栄養塩類が減少する傾向があった。内部生産が活発な夏季に栄養塩類が減少していたと考えられたが、今後もデータの蓄積が必要である。

表6 栄養塩類の測定結果 (表層)

(単位: mg/L)

地点名	時季	DIN	DTN	DIP	DTP	SiO ₂
基準点1	夏季	0.191 8, (0.010)	0.391 8, (0.153)	0.042 8, (0.003)	0.054 8, (0.019)	2.88 8, (0.27)
	冬季	0.179 9, (0.033)	0.398 9, (0.197)	0.043 9, (0.012)	0.054 9, (0.016)	2.72 9, (0.54)
基準点2	夏季	0.193 8, (0.018)	0.405 8, (0.142)	0.040 8, (0.004)	0.052 8, (0.020)	2.74 8, (0.34)
	冬季	0.185 9, (0.023)	0.408 9, (0.230)	0.043 9, (0.008)	0.054 9, (0.019)	2.75 9, (0.35)
基準点3	夏季	0.181 9, (0.040)	0.239 9, (0.063)	0.045 9, (0.004)	0.047 9, (0.004)	- 0, (-)
	冬季	0.155 9, (0.079)	0.240 9, (0.061)	0.042 9, (0.017)	0.045 9, (0.017)	- 0, (-)

(注) 下段はn数, 括弧は標準偏差

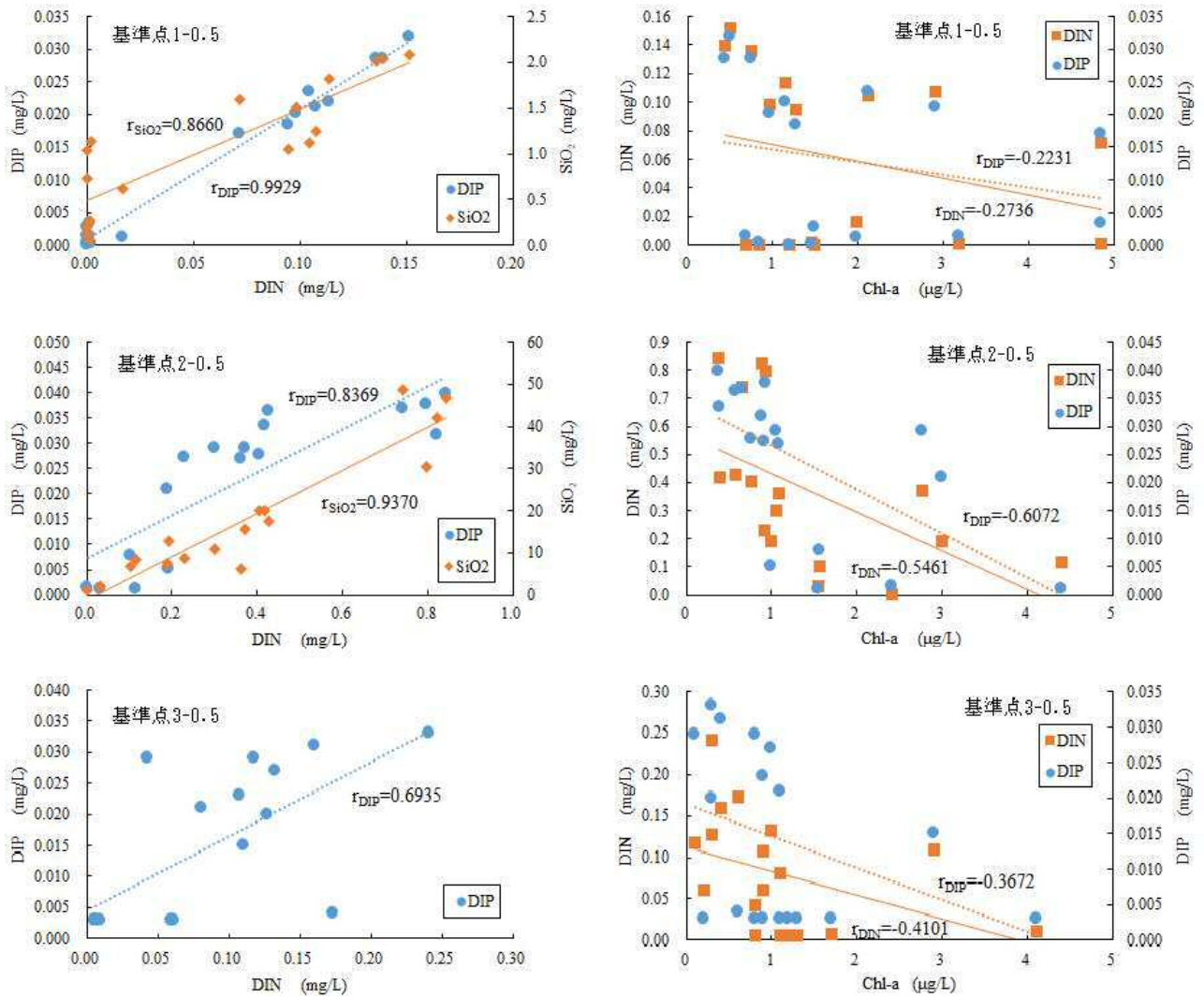


図3 栄養塩類等の関係 (表層)

栄養塩類について、下層の測定結果を表7に示す。下層では各地点とも栄養塩類は高い値となっており、年間を通して下層には豊富な栄養塩類が存在していることが分かった。

DINのDTNに対する割合は、夏季は基準点1が48.9%、基準点2が47.7%、基準点3が75.7%であり、冬季はそれぞれ45.0%、45.3%、64.6%であった。DIPのDTPに対する割合は、夏季は基準点1が77.8%、基準点2が76.9%、

基準点3が95.7%であり、冬季はそれぞれ79.6%、79.6%、93.3%であった。基準点1と2は同程度の値を示しており、基準点3は他2地点に比べて無機態の窒素・リンの割合が高かった。基準点1、2と基準点3の違いの一つは採水深度であることから、下層においては、溶存態窒素及び溶存態リンの組成（無機態と有機態）は地点ではなく、深度の違いにより異なることをうかがわせた。

表7 栄養塩類の測定結果（下層）

地点名	時季	DIN	DTN	DIP	DTP	SiO ₂
基準点1	夏季	0.191 8, (0.010)	0.391 8, (0.153)	0.042 8, (0.003)	0.054 8, (0.019)	2.88 8, (0.27)
	冬季	0.179 9, (0.033)	0.398 9, (0.197)	0.043 9, (0.012)	0.054 9, (0.016)	2.72 9, (0.54)
基準点2	夏季	0.193 8, (0.018)	0.405 8, (0.142)	0.040 8, (0.004)	0.052 8, (0.020)	2.74 8, (0.34)
	冬季	0.185 9, (0.023)	0.408 9, (0.230)	0.043 9, (0.008)	0.054 9, (0.019)	2.75 9, (0.35)
基準点3	夏季	0.18 9, (0.040)	0.239 9, (0.063)	0.045 9, (0.004)	0.047 9, (0.004)	- 0, (-)
	冬季	0.15 9, (0.079)	0.240 9, (0.061)	0.042 9, (0.017)	0.045 9, (0.017)	- 0, (-)

(注) 下段はn数, 括弧は標準偏差

4 まとめ

- 1) COD関連項目は夏季における表層が高く、植物プランクトンによる内部生産の影響と考えられた。下層では季節間の差は表層に比べて小さくなり、各地点でCOD、TOCはそれぞれ同程度の値を示していた。各地点とも有機物指標の約8割が溶存態のものに占められており、湾奥部のCODの主成分はDOCであった。
- 2) 基準点1、2の夏季における表層のCOD値は2005年度から2009年度の調査結果に比べて高くなっており、D-COD値の上昇がCOD値上昇の要因であった。
- 3) 栄養塩類は、基準点1、3の表層において、DIN/DTN比、DIP/DTP比が共に夏季に低下し、冬季に増加する傾向にあり、また、Chl-aの増加に伴いDIN及びDIPが減少する傾向が見られた。これは夏季に植物プランクトンの増殖による栄養塩類の吸収が活発なることを反映したためと考えられた。基準点2においては、天降川の影響により、夏季でも栄養塩類が高い数値を示した。また、3地点とも年間を通して下層には豊富な栄養塩類が存在していることが分かった。

参考文献

- 1) 鹿児島県水産技術開発センター；赤潮情報，<http://suigi.jp/akashio/newHP/info.html>（2020/6/30アクセス）
- 2) 国立研究開発法人国立環境研究所；貧酸素水塊の形成機構と生物への影響評価に関する研究（特別研究）（2010）
- 3) 貴島宏，須納瀬正，福盛順子；鹿児島湾湾奥部における水質調査結果について，Ⅱ型共同研究報告書（2015）
- 4) 右田裕二，大庭大輔，他；鹿児島湾湾奥部における水質調査結果について，本誌，18，91～95（2017）
- 5) 牧秀明；茨城県沿岸海域公共用水域環境基準点における栄養塩類とCODに関する有機物項目について，地方公共団体環境研究機関等と国立環境研究所との共同研究（Ⅱ型）「沿岸海域環境の物質循環現状把握と変遷解析に関する研究」報告書，21～25（2017）
- 6) 仲川直子，藤森一男，他；長期分解過程における大阪湾・播磨灘の有機物及び栄養塩の動態，兵庫県立健康環境科学研究所センター紀要，5，84～88（2008）