

資料

広島湾における栄養塩類及びCOD関連項目の季節変動について

小田 新一郎, 濱脇 亮次, 後田 俊直

Seasonal changes of Nutrients and COD related items in Hiroshima Bay

ODA SHINICHIROU, HAMAWAKI RYOUJI and USHIRODA TOSHINAO

(received : November 27, 2020)

2017年度春期～2019年度冬期の間12回、広島湾内の公共用水域調査環境基準点3地点で海況・水質(栄養塩類及びCOD関連項目)を測定した。その結果、水温及び塩分は流入河川の影響により、湾奥ほど表層と底層の差が大きい傾向にあったが、秋期以降の循環期には表底層の差は少なくなっていた。DOは湾奥・湾中央の底層で夏期に低下、冬期にかけて上昇していた。栄養塩類のうち、溶存態無機窒素(DIN)は湾奥で高い傾向にあったが、春期及び夏期におけるDIN及び溶存態無機りん(DIP)について、3地点ともに表層では枯渇状態となったが、秋期には回復が見られた。海域版BOD(BOD3)については、夏期が冬期よりも高く、湾奥の方が沖合よりも高い傾向にあった。COD関連項目(COD, BOD3, 有機体炭素)では全量に対して溶存態が占める割合の平均値がBOD3:27.3%に対し、COD:74.7%, TOC:79.8%となり、BOD3の方が少なかった。各項目とクロロフィルa(Chl.a)との相関係数を比較したところ、夏期及び秋期で特にBOD3及びP-BOD3で高い相関を示した。また、溶存態の各項目のうち、特に夏期の表層においてD-CODとDOCに比較的高い相関が得られたが、これらの項目とChl.aとの相関はあまり高くなかった。

Key words : 広島湾, 栄養塩類, COD関連項目, 海域版BOD

緒 言

広島湾は厳島と西能美島の間的那沙美瀬戸を境に北と南で大きく海況が異なり[1]、特に北部海域は島嶼部に囲まれた閉鎖性が高い湾であるとともに、一級河川である太田川の流入により、エスチュアリー循環[2]の影響を強く受けている。広島湾における1990～2001年度の調査[3]では、夏期において湾奥部の海田湾や五日市沖、また太田川河口部から湾中央にかけて、広範囲に渡る貧酸素水塊の分布が確認され、年度によってはDOが1 mg/Lを下回っている。一方、近年の栄養塩類については瀬戸内海の他の海域[4]と同様、減少傾向にあると考えられる。広島県が公表している公共用水域等の水質調査結果では、透明度が上昇するとともに全窒素(TN)は減少しているが、総量規制等による行政施策が実施されているにもかかわらず、CODとともに近年、全りん(TP)も増加傾向にある。特にCODの上昇については近年、有機性汚濁の指標性の適否[5]、難分解性物質[6]や瀬戸内海における外洋水の影響[7]などが議論されており、経年的変動に対する評価を困難なものとしている。一方で酸素消費の

みに注目した海域版BODが試行されており、有機性汚濁指標としての有用性が示されている[8]。現在、当センターでは広島湾表層・底層の経年的な水質変動を追跡するため、公共用水域調査とは別途、環境基準点3地点(広島湾北部海域:広島湾12, 南部海域:広島湾14, 西部海域:広島湾西部21)の調査を実施していることから、これらを踏まえ、広島湾の栄養塩類及びCOD関連項目(COD, BOD3, 有機体炭素)の季節変動を検討した。

方 法

1 調査地点

広島湾の公共用水域調査環境基準点のうち、広島湾北部海域1地点(広島湾12, 環境基準類型指定A/Ⅲ(COD/全窒素及び全磷):湾奥)、南部海域1地点(広島湾14, A/Ⅱ:湾中央)及び西部海域1地点(広島湾西部21, A/Ⅱ:沖合)の計3地点(図1)について、基本項目、栄養塩及びCOD関連項目を調査した。各地点の平均水深はそれぞれ15, 21, 32mであった。採水は2017年5月16日, 8月2日, 11月8日, 2018年2月14日, 2018年5月24日, 8月7日, 11月13日, 2019年2

月6日, 2019年5月14日, 8月8日, 11月13日, 2020年2月6日の計12回(春~冬期)行った。

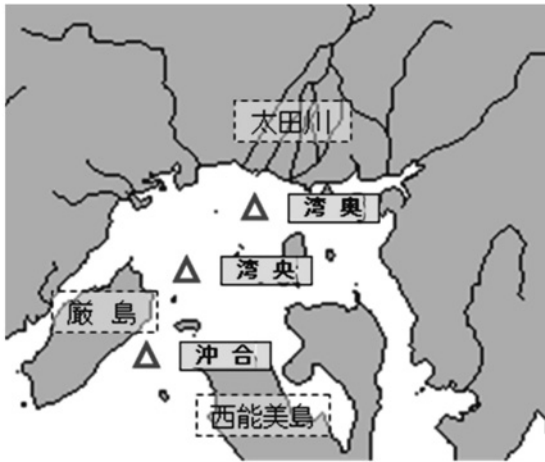


図1 広島湾内の調査地点
出典:「国土数値情報 (JPJIS1. 0行政区域データ H22年・河川データ H20年) 国土交通省」[9]

結果及び考察

1 水温, 塩分, pH, DO, 透明度

水温(図2)及び塩分(図3)は湾奥に向かうにつれ, 表層と底層の差が大きくなる傾向にあり, 流入河川の影響が強くなっていた。秋期から冬期にかけて鉛直混合により表底層の差は少なくなる傾向にあるが, 2018・2019年度冬期では水温が10℃を下回らず, 表層で低水温・低塩分となり, 表底層の間で水温の逆転が生じていた。pH(図4)は表層で春・夏期に上昇, 底層で夏期に低下する傾向にあった。DO(図5)は夏期に表底層で低下, 冬期に上昇する傾向にあり, 2018年度夏期の湾央底層で最も低下(4.0mg/L)した。また, 透明度(図6)は湾奥2.0~11.0m, 湾央3.2~8.0m, 沖合5.0~11.0mの範囲にあり, 夏期の湾奥で低い傾向にあった。各項目の地点層別の季節平均値を表2に示す。

2 採水・分析方法

採水は表層(0.5m)及び底層(B-1m)の2層について, バンドーン採水器等を用いた。持ち帰った海水は, 事前に450℃ 1h焼成処理したワットマンGF/C 47mmによりろ過した検体及び未ろ過の検体をそれぞれの分析に供した。イオン状シリカ(SiO₂)はメンブレンフィルター 0.45µmによるろ過検体を用いた。測定項目及び測定方法は表1のとおりである。海域版BOD(BOD3)についてはJIS K0102, 21 BODに準じて行った。培養期間は3日間, 植種は使用しなかった。なお, 冬期は現場水温と培養温度の差が大きいため, 適量を20℃恒温槽で15分, 振とう後さらに15分, 同槽内で安定させてからBOD瓶に分取し, 試験に供した(n=2)。また, この試験前後の溶存酸素量を光学式センサー(HACH製HQ30d)で測定し, 塩分補正を行った(JIS K0102: 2016 32.4)。

表1 測定方法一覧

測定項目	測定方法
水温	棒状温度計による
塩分	電気伝導度法(「海洋観測指針」5.3)
pH	JIS K0102, 12.1
DO	JIS K0102, 32.1
透明度	透明度板による
栄養塩類	流れ分析法(BLTEC AACS)
クロロフィルa	吸光光度法(アセトン抽出法)
COD	JIS K0102, 17
有機体炭素(TOC)	JIS K0102, 22.1

2 栄養塩類及びChl.a

栄養塩類のうち, DIN(図7)は湾奥で高い傾向にあったが, 春期及び夏期におけるDIN及びDIP(図8)について, 表層では3地点ともにほぼ枯渇に近い状態であった。秋期には全地点で回復が見られるものの, 冬期の底層ではDINの低下が見られた。SiO₂(図9)は夏期を中心に増加し, 冬期に低下する傾向が見られた。表層Chl.a(図10)は湾奥で高い傾向にあったが, 冬期には3地点の底層で表層よりも高い値を示していた(表3)。広島湾の透明度に対する有光層深度の比は2.8[10]であり, 各地点の平均水深が湾奥15m, 湾央21m, 沖合32mであることを考慮すると, 冬期における湾奥及び湾央では底層, 沖合ではかなりの深度まで植物プランクトンに必要な光量が到達していると考えられた。各項目の地点層別の季節平均値を表3に示す。

3 COD関連項目

季節別COD関連項目の平均値について表4に示した。なお, D-BOD3の値が0mg/Lを下回った場合は, D-BOD3=0mg/Lとしてデータ処理を行った。調査期間中のBOD3についてはこれまでの報告[8]と同様, 夏期が冬期よりも高く, 湾奥の方が沖合よりも高い傾向にあった。また, 他のCOD関連項目では全量に対して溶存態が占める割合の平均値がBOD3: 27.3%(0.0~75.3%)に対し, COD: 74.7%(50.1~100%), TOC: 79.8%(55.9~99.0%)となり, BOD3の方が少なかった。なお, 懸濁態平均値はP-BOD3: 0.58mg/L(0.07~2.08 mg/L), P-COD: 0.64 mg/L(0.00~2.20 mg/L), POC: 0.37 mg/L(0.01~1.42mg/L), 溶

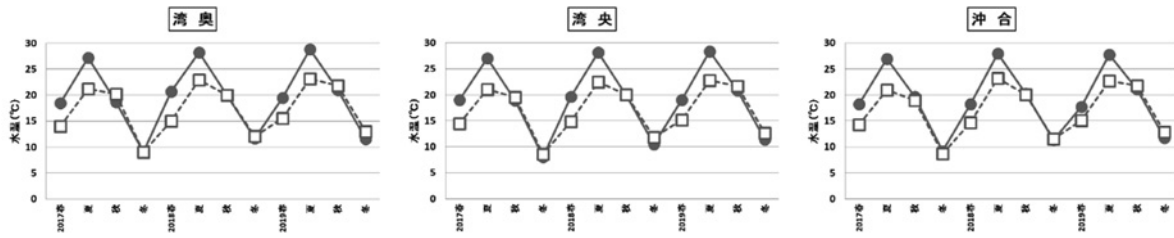


図2 表層・底層の水温変動(左:湾奥, 中:湾央, 右:沖合); ●表層, □底層

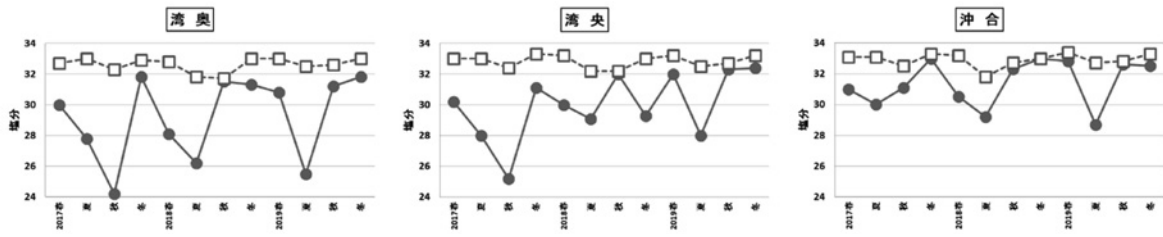


図3 表層・底層の塩分変動(左:湾奥, 中:湾央, 右:沖合); ●表層, □底層

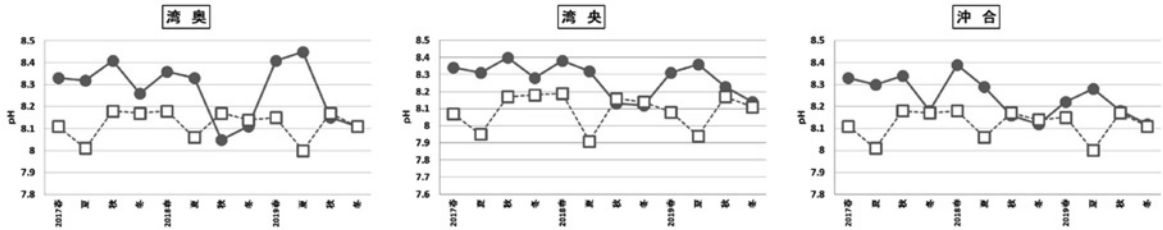


図4 表層・底層のpH変動(左:湾奥, 中:湾央, 右:沖合); ●表層, □底層

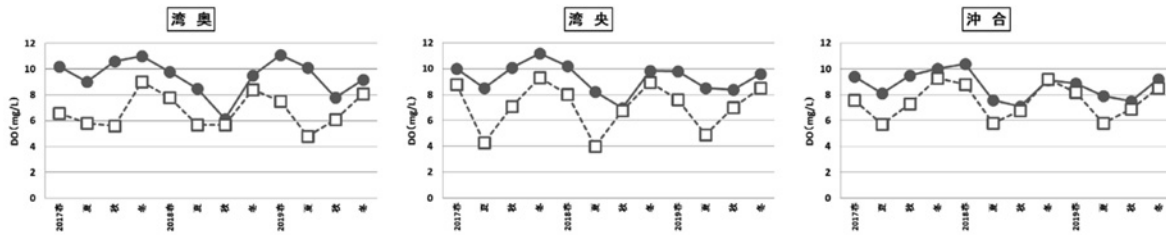


図5 表層・底層のDO変動(左:湾奥, 中:湾央, 右:沖合); ●表層, □底層

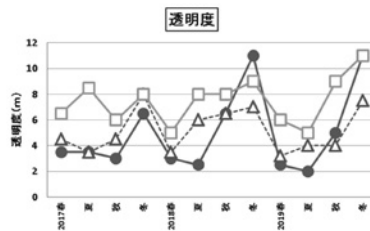


図6 3地点の透明度変動(●湾奥, △湾央, □沖合)

表2 2017年5月～2020年2月の季節別一般項目の平均値

地点	季節	採水層	水温	塩分	p H	DO	透明度
湾奥	春期	表層	19.6	29.6	8.37	10.4	3.0
		底層	14.8	32.8	8.08	7.3	-
	夏期	表層	28.1	26.5	8.37	9.2	2.7
		底層	22.5	32.4	7.99	5.4	-
	秋期	表層	19.9	29.0	8.20	8.2	4.8
		底層	20.7	32.2	8.08	5.8	-
	冬期	表層	10.8	31.6	8.16	9.9	9.5
		底層	11.4	33.0	8.11	8.5	-
湾央	春期	表層	19.2	30.7	8.34	10.0	3.7
		底層	14.9	33.1	8.11	8.1	-
	夏期	表層	27.9	28.4	8.33	8.4	4.5
		底層	22.1	32.6	7.93	4.4	-
	秋期	表層	19.9	29.8	8.25	8.5	5.0
		底層	20.4	32.4	8.17	7.0	-
	冬期	表層	10.0	30.9	8.18	10.2	7.5
		底層	11.0	33.2	8.14	8.9	-
沖合	春期	表層	18.0	31.4	8.31	9.6	5.8
		底層	14.7	33.2	8.15	8.2	-
	夏期	表層	27.6	29.3	8.29	7.9	7.2
		底層	22.3	32.5	8.02	5.8	-
	秋期	表層	20.4	32.0	8.23	8.0	7.7
		底層	20.3	32.7	8.17	7.0	-
	冬期	表層	10.7	32.8	8.14	9.4	9.3
		底層	11.0	33.2	8.14	9.0	-

※ 単位：水温(℃), DO(mg/L), 透明度(m)

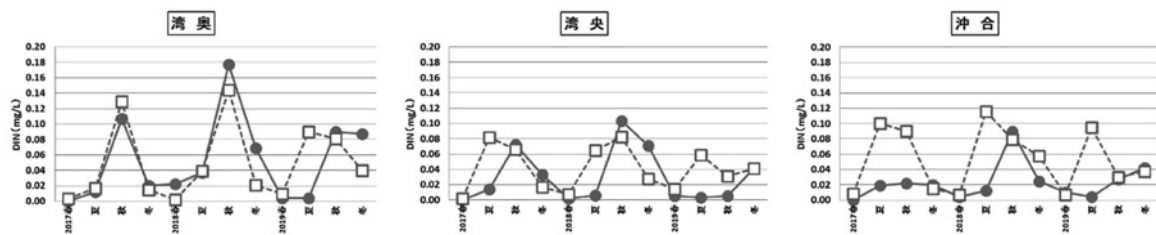


図7 表層・底層のDIN変動(左：湾奥, 中：湾央, 右：沖合); ●表層, □底層

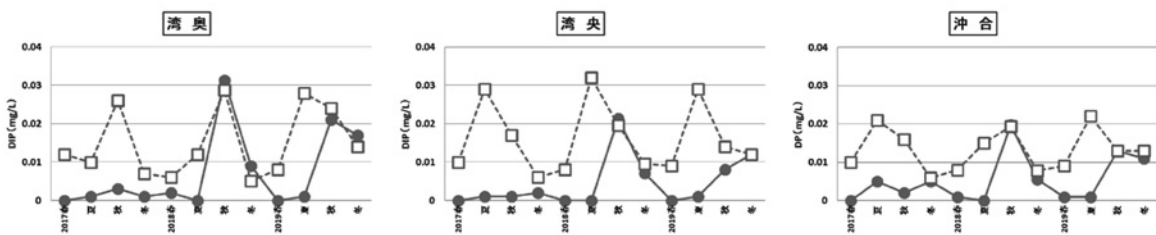


図8 表層・底層のDIP変動(左：湾奥, 中：湾央, 右：沖合); ●表層, □底層

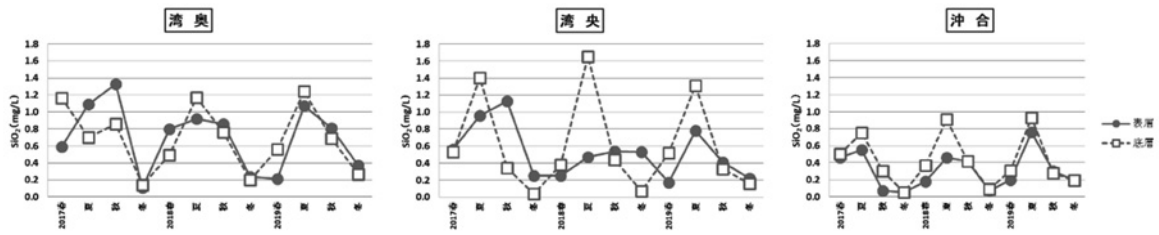


図9 表層・底層のSiO₂変動(左:湾奥, 中:湾央, 右:沖合); ●表層, □底層

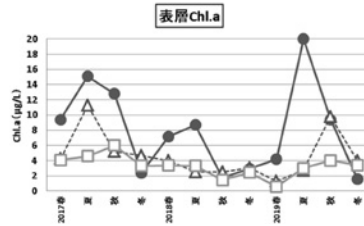


図10 3地点の表層Chl. a変動(●湾奥, △湾央, □沖合)

表3 2017年5月～2020年2月の季節別栄養塩類・Chl. aの平均値

地点	季節	採水層	DIN	DIP	SiO ₂	Chl. a
湾奥	春期	表層	0.009	0.001	0.53	6.93
		底層	0.005	0.009	0.74	3.58
	夏期	表層	0.018	0.001	1.03	14.59
		底層	0.049	0.017	1.04	2.86
	秋期	表層	0.125	0.018	1.00	8.01
		底層	0.118	0.026	0.77	3.26
	冬期	表層	0.059	0.009	0.24	2.31
		底層	0.025	0.009	0.20	4.60
湾央	春期	表層	0.002	0.000	0.33	3.20
		底層	0.007	0.009	0.39	2.46
	夏期	表層	0.008	0.001	0.74	5.47
		底層	0.104	0.030	1.45	1.71
	秋期	表層	0.060	0.010	0.69	5.85
		底層	0.067	0.017	0.37	3.02
	冬期	表層	0.048	0.007	0.33	3.93
		底層	0.036	0.009	0.09	4.57
沖合	春期	表層	0.005	0.001	0.28	2.69
		底層	0.008	0.009	0.39	1.08
	夏期	表層	0.012	0.002	0.59	3.62
		底層	0.069	0.019	0.86	1.40
	秋期	表層	0.046	0.012	0.26	3.83
		底層	0.060	0.016	0.33	2.82
	冬期	表層	0.029	0.007	0.10	2.51
		底層	0.029	0.009	0.11	5.75

※ 単位:栄養塩類(mg/L), Chl.a(μg/L)

表4 2017年5月～2020年2月の季節別COD関連項目の平均値(単位: mg/L)

地点	季節	採水層	BOD3	COD	D-BOD3	¹⁾ D-COD	P-BOD3	¹⁾ P-COD	¹⁾ TOC	¹⁾ DOC	¹⁾ POC	²⁾ Chla	
湾奥	春期	表層	1.96	3.55	0.24	2.50	1.72	1.05	2.46	1.53	0.92	6.93	
		底層	0.58	2.12	0.05	1.62	0.56	0.36	1.55	1.29	0.44	3.58	
	夏期	表層	1.76	4.12	0.22	2.53	1.54	1.59	2.42	1.64	0.78	14.59	
		底層	0.50	2.02	0.16	1.39	0.32	0.57	1.55	1.30	0.40	2.86	
	秋期	表層	0.72	2.34	0.13	1.69	0.58	0.65	1.54	1.24	0.30	8.01	
		底層	0.31	1.85	0.09	1.34	0.22	0.48	1.30	1.18	0.21	3.26	
	冬期	表層	0.62	2.00	0.22	1.68	0.40	0.31	1.41	1.19	0.23	2.31	
		底層	0.72	2.06	0.22	1.62	0.49	0.44	1.37	1.31	0.09	4.60	
	湾央	春期	表層	1.15	3.30	0.06	2.33	1.09	0.97	2.01	1.49	0.52	3.20
			底層	0.31	1.77	0.02	1.26	0.22	0.40	1.36	1.27	0.28	2.46
		夏期	表層	0.93	3.58	0.15	2.93	0.78	0.65	2.16	1.58	0.57	5.47
			底層	0.37	2.28	0.14	1.64	0.25	0.71	1.45	1.19	0.35	1.71
秋期		表層	0.62	2.16	0.11	1.55	0.51	0.60	1.43	1.13	0.29	5.85	
		底層	0.25	1.73	0.08	1.07	0.17	0.67	1.17	1.10	0.09	3.02	
冬期		表層	0.74	2.30	0.27	1.84	0.47	0.46	1.50	1.22	0.28	3.93	
		底層	0.70	2.20	0.22	1.48	0.48	0.72	1.36	1.13	0.34	4.57	
沖合		春期	表層	0.80	3.11	0.06	2.09	0.74	1.03	1.77	1.41	0.36	2.69
			底層	0.33	1.33	0.02	1.10	0.39	0.20	1.25	1.06	0.26	1.08
		夏期	表層	0.88	3.11	0.26	2.35	0.62	0.77	2.08	1.68	0.40	3.62
			底層	0.49	1.99	0.24	1.52	0.31	0.65	1.40	1.31	0.26	1.40
	秋期	表層	0.44	2.00	0.14	1.54	0.30	0.46	1.39	1.14	0.25	3.83	
		底層	0.38	1.72	0.09	1.29	0.27	0.41	1.27	1.15	0.16	2.82	
	冬期	表層	0.65	1.86	0.35	1.47	0.29	0.39	1.48	1.12	0.35	2.51	
		底層	0.68	1.98	0.33	1.55	0.35	0.42	1.51	1.33	0.32	5.75	

注1) 底層D-COD (P-COD) 及び底層 TOC・DOC (POC) は2018年2月から分析開始したため、それ以前のデータを含んでいない。

注2) 再掲(単位: $\mu\text{g/L}$)

存態平均値はD-BOD3: 0.16mg/L (0.00 ~ 0.60 mg/L), D-COD: 1.78 mg/L (0.80 ~ 3.20 mg/L), DOC: 1.31mg/L (0.95 ~ 1.77 mg/L)であった。

ここで項目間の相関関係のうち、溶存態を除く各項目とChlaとの季節別の相関係数を比較した(図11~12)。なお、底層COD・D-COD及びTOC・DOCは2018年2月から分析開始したことから、解析には2018年5月以降の2年分の表層・底層データを使用した。その結果、夏期及び秋期では全項目で相関が高く、BOD3及びP-BOD3で高い相関($R > 0.90$, $p < 0.01$)を示した。しかし、その他の季節では低い傾向にあり、冬期では有意な相関関係が認められなかった($p > 0.05$)。これについては、2017及び2018年度冬期の調査時に、採水容器内に大量の珪藻類*Eucampia zodiacus* [11]が目視により確認された。さらに2019年度冬期には、試料水ろ過時のろ紙上に*Coscinodiscus*属と見ら

れる植物プランクトンが確認されており、これらの比較的大型の植物プランクトンが分析データに影響を与えたと考えられた。

一方、溶存態であるD-BOD3、D-COD及びDOCの相関係数を比較したところ、全量及び懸濁態と比較すると低い数値であったが、D-CODとDOCに比較的高い相関($R = 0.69$)が得られ、これまでの報告[8]と同様の結果となった。さらに詳細に解析すると表層($R = 0.71$)及び夏期($R = 0.75$)の数値が突出しており、夏期の内部生産に密接に関連していると考えられたが、一方でこれらの項目とChlaとの相関はあまり高くなかった。

海域版BODは公定法がなく[12]、植物プランクトンの呼吸や硝化による酸素消費などの有機物分解以外の影響[13]、深層部や冬期にDO消費が少ない[14]など、試験方法や精度にまだ改善の余地があると思わ

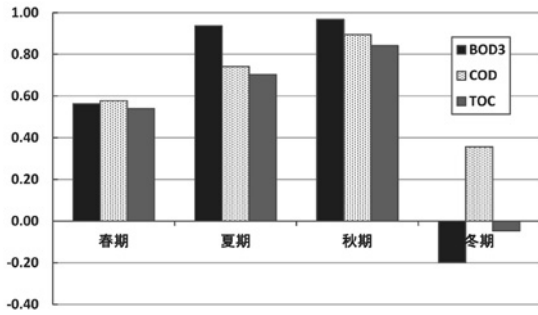


図11 季節別COD関連項目とChl. aとの相関；縦軸R

れるが、データの蓄積が進みつつあり、CODと比較して酸素消費に関連した有機物指標としての有効性が確認されている [15～19]。今後の更なるデータ蓄積と効果的な活用が望まれる。

ま と め

2017年度春期～2019年度冬期の間12回、広島湾内の公共用水域調査環境基準点3地点で海況・水質（栄養塩類及びCOD関連項目）を測定したところ、以下のことが示された。

- ・水温及び塩分は流入河川の影響により、湾奥ほど表層と底層の差が大きくなる傾向にあったが、秋期以降の循環期には表底層の差は少なくなっていた。2018・2019年度冬期では水温が10℃を下回らず、表底層の間で水温の逆転が生じていた。pHは表層で春・夏期に上昇、底層で夏期に低下する傾向にあった。DOは湾奥・湾中央の底層で夏期に低下、冬期にかけて上昇していた。透明度は湾奥・夏期で低い傾向にあった。
- ・DINは湾奥で高い傾向にあったが、春期及び夏期におけるDIN及びDIPについて、3地点ともに春・夏期に表層ではほぼ枯渇状態となり、秋期には回復が見られた。SiO₂は夏期を中心に増加し、冬期に低下する傾向が見られた。冬期の底層ではDINの低下、表層より高いChl.a及び高い透明度が確認されたことから、底層での植物プランクトンの活動が推察された。
- ・調査期間中のBOD3については、夏期が冬期よりも高く、湾奥の方が沖合よりも高い傾向にあった。また、COD関連項目では全量に対して溶存態が占める割合の平均値がBOD3：27.3%に対し、COD：74.7%、TOC：79.8%となり、BOD3の方が少なかった。溶存態を除く各項目とChl.aとの相関係数を比較したところ、夏期及び秋期で特にBOD3及びP-BOD3で高い相関を示した。また、溶存態である

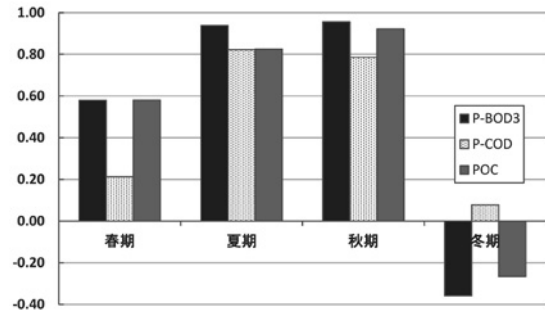


図12 季節別COD関連項目（懸濁態）とChl. aとの相関；縦軸R

D-BOD3、D-COD及びDOCの相関係数を比較すると、特に夏期の表層においてD-CODとDOCに比較的高い相関が得られたが、これらの項目とChl.aとの相関はあまり高くなかった。

謝 辞

本稿は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）「海域における水質管理に係わる栄養塩・底層溶存酸素状況把握に関する研究」報告書：平成29（2017）～令和元（2019）年度の担当分に加筆修正したものです。環境調査については当所環境研究部の研究員の皆様にご協力いただきました。心より深謝いたします。

引用文献

- [1] 橋本俊也, 松田 治, 山本民次, 米井好美: 広島湾の海況特性 - 1989～1993年の変動と平均像 -, 広島大学生物生産学部紀要, 33, 9-19, 1994
- [2] 山本民次, 芳川 忍, 橋本俊也, 高杉由夫, 松田 治: 広島湾北部海域におけるエスチュアリー循環過程, 沿岸海洋研究, 37 (2), 111-118, 2000
- [3] 伊達悦二, 清木 徹: 広島湾の貧酸素水塊の分布とその形成機構, 広島県保健環境センター研究報告, 14, 1-11, 2006
- [4] 反田 實, 赤繁 悟, 有山啓之, 山野井英夫, 木村 博, 團 昭紀, 坂本 久, 佐伯康明, 石田祐幸, 壽 久文, 山田卓郎: 瀬戸内海の栄養塩環境と漁業, 水産技術, 7 (1), 37-46, 2014
- [5] 津田久美子, 早川和秀, 岡本高弘: 有機汚濁と環境基準 - 琵琶湖を例にして -, 用水と廃水, 56, 213-226, 2014
- [6] 仲川直子, 吉田光方子, 金澤良昭, 前川真徳: 加古川流域起源有機物との比較における播磨灘海域の難分解性有機物に関する特性評価, 兵庫県

- 環境研究センター紀要, 3, 9-15, 2011
- [7] 矢吹芳教, 小野純子, 相子伸之, 中嶋昌紀, 田中咲絵, 駒井幸雄: 日本近海の太平洋側外洋水のCODの長期変動と瀬戸内海のCODに及ぼす影響, 水環境学会誌, 40, 189-197, 2017
- [8] 牧 秀明: 環境部局による海域の調査研究の在り方について, 全国環境研会誌, 41 (1), 9-11, 2016
- [9] 国土交通省国土政策局国土情報課, “国土数値情報ダウンロードサービス”,
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>, (参照2015-9-25)
- [10] 橋本俊也, 多田邦尚: 広島湾における海水の光学的特性, 海の研究, 6, 151-155, 1997
- [11] 西川 哲也: ノリの色落ち原因藻 *Eucampia zodiacus* の増殖に及ぼす水温, 塩分および光強度の影響, 日本水産学会誌, 68, 356-361, 2002
- [12] 橋本旬也・石井裕一・安藤晴夫・橋島智恵子・田部一憲・木瀬晴美: 東京都内湾における底層水の酸素消費について, 東京都環境科学研究所年報2018, 52-53, 2018
- [13] 新田千穂・谷口勝彦・上尾一之: 博多湾における貧酸素水塊及び栄養塩類等に関する実態調査, 平成28年度福岡市保健環境研究所報, 42, 70-82, 2016
- [14] 右田裕二, 鞆 憲弘, 宮元 誠, 牛垣里奈, 大庭大輔: 鹿児島湾奥部における水質調査結果について, 鹿児島県環境保健センター所報, 18, 91-95, 2017
- [15] 中居千和, 多田哲子, 牧 秀明, 一二三純子, 北野隆一, 武田真由美, 田中豊稔, 木南敬之: 阿蘇海における酸素消費と貧酸素水塊の形成について, 京都府保健環境研究所年報, 62, 42-47, 2017
- [16] 菅生伸矢, 山本昇司, 岩佐博司: 徳島県沿岸海域におけるCOD関連項目の現状と傾向, 徳島県立保健製薬環境センター年報, 7, 32-36, 2017
- [17] 刈谷玲菜, 田嶋 誠: 浦ノ内湾における底層DOの測定結果とCODに関連する有機物指標について, 高知県環境研究センター所報, 33, 89-99, 2016
- [18] 中村公生, 赤崎いずみ, 島田玲子, 三角敏明: 宮崎県沿岸海域におけるCODに関連する有機物指標と栄養塩類等について, 宮崎県衛生環境研究所年報, 28号, 77-83, 2017
- [19] 右田裕二, 米澤里奈, 山道哲洋, 前畑健太, 桑原庸輔: 鹿児島湾湾奥部における海域版BODについて, 鹿児島県環境保健センター所報, 20, 71-74, 2019