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

矢 吹 芳 教^{1),*}
中 嶋 昌 紀¹⁾

小 野 純 子¹⁾
田 中 咲 絵¹⁾

相 子 伸 之¹⁾
駒 井 幸 雄²⁾

Long-Term Change in COD in the Open Waters of the Pacific Ocean near Japan, and its Effect on COD in the Seto Inland Sea

Yoshinori YABUKI^{1),*}, Junko ONO¹⁾, Nobuyuki AIKO¹⁾,
Masaki NAKAJIMA¹⁾, Sae TANAKA¹⁾ and Yukio KOMAI²⁾

¹⁾ Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries, Osaka Prefecture, Shakudo 442, Habikino, Osaka 583-0862, Japan

²⁾ Osaka Institute of Technology, Ohmiya 5-16-2, Asahiku, Osaka, Osaka 535-8585, Japan

Abstract

In the Seto Inland Sea, the largest enclosed sea area in Japan, a gradual increase in the chemical oxygen demand concentrations in the seawater (hereinafter referred to as COD) is apparent, and the achievement ratio of the environmental standards for the COD has not reached 80%. In order to solve this problem, it is necessary to analyze the influence of the open ocean water on enclosed sea areas, in addition to the inflow load and amount of marine-derived organic matter. The present mean values of COD at 0 to 50 and ≥ 100 m depth from the sea surface in open ocean water at the offing of Tokushima (site E9) were 1.2 and under 0.9 mg L^{-1} . The trend that COD at this site is high value near the surface and decreases with increasing water depth was observed. The COD at site E9 was higher than those from 20 to 30 years ago in the open ocean near site E9; thus, the trend that the COD in the open ocean increased over the past 40 years to the present was confirmed in this study. The trend that the annual mean concentration of COD increased in the midwestern Seto Inland Sea area after the 1980s was obtained from the existent data. In these areas, high positive correlations between annual mean values of COD in some areas (bay and sea) of the Seto Inland Sea and those of background (seawater at the offing of Tokushima and Kochi) were confirmed. These results suggested that the COD in the Seto Inland Sea was affected by the background water, namely, the water of the Pacific Ocean.

Keywords: Enclosed sea; Seto Inland Sea; COD; Open ocean

1. はじめに

日本最大の閉鎖性海域である瀬戸内海では、1979年度の第1次から7次までの水質総量規制により陸域からのCOD発生負荷量は着実に減少し、2013年度におけるCOD発生負荷量は1979年度の半分以上となった¹⁾。しかし、大阪湾奥部のようにかつてから汚濁の著しかった海域での改善を除くと、瀬戸内海全体のCODの経年変化は横ばいであり、逆に漸増傾向を示す湾・灘は備讃瀬戸や周防灘など多く存在している²⁾。2013年度におけるCODの環境基準の達成率は大阪湾で66.7%、大阪湾を除く瀬戸内海全域では77.3%であり、特にA類型での達成率は40.7%と低い^{3, 4)}。瀬戸内海と同様に総量規制が行われてきた東京湾および伊勢湾での達成率は、それぞれ、63.2%および56.3%というように、日本の代表的な閉鎖

性海域のCODは改善されていない。

一方、CODの改善のために2002年度の第5次から水質総量規制が進められた窒素とリンについては、いずれも瀬戸内海の全ての湾・灘において濃度が低下しており、環境基準の達成率は2013年度において大阪湾では100%、瀬戸内海全域（大阪湾を除く）でも98.2%である。そのため、窒素とリンの負荷量が削減されているにもかかわらず、CODが改善されない原因の解明は閉鎖性海域共通の課題となっている。

なお、陸域の閉鎖性水域である湖沼の場合は、CODの環境基準達成率は55.1%（2013年度）であり、瀬戸内海、東京湾、および伊勢湾を下回っている³⁾。その原因として、例えば、CODの漸増傾向は微生物に分解されにくい難分解性有機物の増加が関係しているとの指摘^{5, 6)}がされており、下水処理場排水や面源に含まれる難分解性有機

1) 地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所 〒583-0862 羽曳野市尺度442

2) 大阪工業大学 〒535-8585 大阪市旭区大宮5丁目16-1

* 連絡先: yabuki@mbox.kannousuiken-osaka.or.jp

物の寄与のほか、湖沼に生息するある種の植物プランクトンが難分解性有機物を生産する⁷⁾などの湖沼内部での生産に由来するとの報告⁸⁾がある。こうした湖沼における知見は、瀬戸内海におけるCOD上昇の原因を考える上で重要な示唆を与えている。

瀬戸内海でCODが減少しない原因として、湖沼の場合と同様に陸域負荷や水中の有機物に占める難分解性有機物の割合の増加や、内部で生産された難分解性有機物の増加も考えられるが、今のところはよく分っていない。この他、埋め立てによる干潟の減少のような生物生息環境そのものの消失に伴う物質循環の変化、あるいは貝類の減少といった生物相の変化が有機物の難分解化を促進しているとの指摘もある⁹⁾。しかし、こうした陸域起源や内部生産、あるいは物質循環に関わる要因に加えて、海域の場合は湖沼とは違って外洋との水の交換があるため、外洋から内海に流入する有機物あるいは流入した栄養塩による植物プランクトンの増殖を考慮する必要がある。

外洋水が瀬戸内海の水質に影響を及ぼしていることについて、窒素・リンに関しては藤原ら¹⁰⁾、柳¹¹⁾、Yanagiら¹²⁾、石井ら¹³⁾、速水ら¹⁴⁾が指摘している。これらの中で推定されている瀬戸内海に存在する窒素とリンに占める外洋水の寄与率は、研究者によって異なるが、外洋水起源の寄与は陸域起源よりも大きいと報告されている。武岡¹⁵⁾はこれらの研究結果を総括し、外洋水起源の窒素・リンの占める割合は瀬戸内海に存在するうちの約60%が妥当としている。しかし、いずれの研究においてもCODと外洋水との関係について、検討はされていない。

国や大学等によって行われている外洋水に関わる水質調査のうち、測定項目にCODが含まれているものとしては、環境省（当時は環境庁）による日本近海海洋汚染実態調査（1975～1994年度）¹⁶⁾と海洋モニタリング調査（1995年度）がある。その後、1996年から現在までCODの調査は行われておらず、少なくとも最近20年間は外洋水のCODデータは得られていない。これらの調査とは別に、環境省は黒潮の流路に近接する太平洋側に配置された常時監視の環境基準点のうち港湾を除いた62地点のCODの年間平均値を、瀬戸内海に関わる外洋水のCODの経年変化としてとりまとめており、CODの年平均値は増加傾向にあること、およびこの外洋水が瀬戸内海のCODに影響を与えている可能性が指摘されている¹⁷⁾。しかしながら、これらの常時監視地点は港湾を除いているとはいえ、湾内や河口に配置されており陸域からの排水の影響を受けている可能性もあり、また、地先など沿岸のすぐ近くの地点も多いので外洋水そのものの水質とは言い難い。加えて、採水は表層および底層（あるいは中層）のみで行われているため、詳細な鉛直方向の濃度分布は不明である。そのため、瀬戸内海のCODに対して外洋水がどのような影響を与えているかを判断するためには、明らかな外洋域の地点において年間を通した深度別の水質調査結果が必要である。

そこで、本研究では、徳島県沖の外洋域となる地点を設定して年間を通した深度別の調査を行うことにより、外洋水のCODの鉛直分布と季節変化を調査し、1975年以降における外洋水CODの経年変化を推定した。また、瀬戸内海の各湾・瀬と太平洋に面する常時監視地点のうち陸域の影響を受けにくい地点を選定し、当該地点にお

けるCODの濃度変動を解析し、瀬戸内海のCODに対して外洋水が及ぼしている影響について検証した。

2. 調査方法

外洋水は、2015年3月から2016年9月にFig. 1に示した徳島県沖の地点（E9）において、月1回の頻度で徳島県立農林水産総合技術支援センター漁業調査船「とくしま」により採水された。地点E9は沿岸から約20 km離れた位置（水深450 m）にあり、この地点の2015年3月～11月における表層から300 mの塩分は平均で 34.5 ± 0.16 であり、環境省による広域総合水質調査の1981～2013年度の紀伊水道の表層および底層の塩分¹⁸⁾（平均 32.8 ± 0.93 ）と比較して明らかに高い。黒潮の塩分の34～35程度（例えば、旧神戸海洋気象台の報告¹⁹⁾では2000年8月の黒潮流軸やそれより沖側の表層塩分は34～34.5程度）に近いことから黒潮系外洋水として評価できると考えられる。海水試料は、オクトパス採水装置（ニスキン採水器, General Oceanics）により、0, 20, 50, 75, 100, 150, 200 および 300 m の水深の8層で採水した。試料は採取後速やかに冷凍して送付・保管され、分析前に解凍された。なお、2015年9月、2016年1月、8月は荒天のために、また2015年6, 7月は試料保存に不備があったためにいずれも欠測とした。

試料水のCODは、工場排水試験方法（JIS K 0102）²⁰⁾に従い、過マンガン酸カリウム酸化法（硫酸酸性下、100

Fig. 1 Map of study area.

℃, 30 分) により測定した。併せて, 採取した試料の TOC は, TOC 計 (TOC-L, Shimadzu) により測定した。

3. 結果

本研究で対象としている COD は, 酸化剤として使われている過マンガン酸カリウム (KMnO_4) の有機物に対する酸化率が低いために, 全有機物量を示しているとはいえないこと²¹⁾ や KMnO_4 は還元物質によっても消費されるために測定された COD の値が有機汚濁の少ない場合でも増加するケースがあること²²⁾ が指摘されている。そこで, 外洋水 (E9) の COD とともに TOC を測定し, 両者の関係を Fig. 2 に示した。両者間には正の相関関係が認められ, 相関係数は 0.80 ($P < 0.01$ で有意) であった。このことから, 本研究で示された外洋水の COD は, 概ね有機物量を評価しているものと見なして, 以下の検討を行った。

3.1 外洋水の COD 鉛直分布および季節変動

徳島県沖の地点 E9 における COD のイソプレットを Fig. 3 に示した。地点 E9 の調査期間中の COD の平均値

Fig. 2 Correlation between COD and TOC in the open ocean at site E9.

は表層, 20, 50, 75, 100, 150, 200 および 300 m 層で, それぞれ 1.2, 1.2, 1.0, 0.97, 0.85, 0.82, 0.86 および 0.73 mg L^{-1} であり, COD の鉛直分布として, 表層で高い傾向を示した。COD は, 2015 年 11~12 月を除き表層~75 m 層に最大値があり, 2015 年 8 月における表層~50 m 層では 1.6 mg L^{-1} 程度と特に高濃度であった。一方, 100 m 以深では深くなるにつれて濃度が低下する傾向が認められた。11~12 月には明確な鉛直分布の傾向は見られず, COD は表層から 300 m 層まで $0.99 \sim 1.5 \text{ mg L}^{-1}$ で推移した。

3.2 外洋水 COD の長期変動とその特徴

環境省の日本近海海洋汚染実態調査 (1975~1994 年度), および海洋モニタリング調査 (1995 年度) において, 太平洋の外洋水 (以下, 外洋水) に関わる地点として, 地点 E9 に近い紀伊水道南端の地点 C1 (北緯 33 度 51 分, 東経 134 度 56 分) と太平洋の地点 C2 (北緯 33 度 22 分, 東経 134 度 55 分) が調査されている (Fig. 1 参照)。採水層は表層, 10 m および 50 m の水深の 3 層であり, 採水は 7 月から 9 月の夏期に年 1 回実施されていた。なお, これらの調査における COD の分析方法是本報と同じであり¹⁶⁾, 調査結果は国立環境研究所の website である環境 GIS²³⁾ から入手した。これらの中でより E9 に近い地点 C2 について, COD の経年変化を各層ごとにそれぞれ Fig. 4~6 に示した。それぞれの図中には, 本調査で行った外洋水 (地点 E9) の同様の調査時期に該当するデータ (2015 年 5, 8 および 10 月) の表層, 20 m 層および 50 m 層の COD 平均濃度をプロットした。地点 E9 では 10 m 層の採水を行っていないので 20 m 層の値を示した。この図から見てとれるように, 地点 C2 の平均濃度は 3 層のいずれにおいても増加傾向にあり, 20 年後の地点 E9 の平均濃度は概ねその回帰直線の延長線上にプロットされていた。また, 地点 C2 の平均濃度の回帰直線と地点 E9 を含めた場合の回帰直線は, ほぼ重なっていた。表層, 10 m (20 m) 層, および 50 m 層における地点 E9 を含む全体の回帰直線の傾きはそれぞれ 0.0100 ($P < 0.05$ で有意), 0.0162 ($P < 0.01$ で有意) および 0.0156 ($P < 0.01$ で有意) であり, すべての層において COD は統計的に有意に増加していることが示され

Fig. 3 Seasonal and vertical variation of COD in site E9. The down-pointing arrows (↓) show the samples used to draw the isopleth map.

Fig. 4 Annual variation of COD of surface water in site C2 (1975 to 1996 year), and site E9 (2015 year). The dotted line means regression line by monitoring data from 1975 to 1995, and the solid line means regression line by the monitoring data in 2015 (this study) in addition to the previous data.

Fig. 5 Annual variation of COD of 20 m depth in site C2 (from 1975 to 1996 year), and site E9 (2015 year). The dotted line means regression line by monitoring data from 1975 to 1995, and the solid line means regression line by the monitoring data in 2015 (this study) in addition to the previous data.

Fig. 6 Annual variation of COD of 50 m depth in site C2 (1975 to 1996 year), and site E9 (2015 year). The dotted line means regression line by monitoring data from 1975 to 1995, and the solid line means regression line by the monitoring data in 2015 (this study) in addition to the previous data.

た。地点C1と地点C2の層ごとのCODの平均値を求め、E9と比較しても同様の傾向であった。このように、外洋水のCODは1975から1996年度までの20年間では増加傾向を示すと共に、さらに20年後の2015年時点におけ

るCODはより高くなっており、少なくとも過去40年間を通して日本近海の太平洋の外洋水中CODは増加していることが明らかになった。

3.3 瀬戸内海の各湾・灘ごとのCODの経年傾向と太平洋沿岸域のCODとの相互関係

環境省による広域総合水質調査の1981～2013年度のCODデータ¹⁸⁾を用いて、Table 1に示した湾灘の区分ごとに、上層と下層のCODおよび溶存態COD（以下「D-COD」と記す）に分けて年間平均値の経年変化をFig. 7-a～7-lに示した。和歌山県、徳島県、高知県、大分県、および宮崎県の海域環境基準点のうち、特に陸域の影響を受けにくいと考えられる徳島県および高知県の6地点（Table 2およびFig. 1）のCOD年平均濃度を、瀬戸内海地域沿岸のバックグラウンド（以下「BG-COD」と記す）とし、Fig. 7-a～7-lに併せて示した。BG-CODは、1980年代は横ばいであったが、1990年代に上昇する傾向が見られ、2000年代は再び横ばいで推移している。太平洋側において瀬戸内海への海水の流入経路である豊後水道および紀伊水道に面する瀬戸内海の各湾灘および響灘の表層のCODについて1981～1990年を1980年代、1991～2000年を1990年代、2001～2013年を2000年代としそれぞれの年代別平均濃度をFig. 8に示した。BG-CODの平均値は、2000年代>1990年代>1980年代

Table 1 Section of bay and sea in Seto Island.

Bay and Sea	Section
Osaka Bay	North Osaka Bay
	South Osaka Bay
Kii Channel	Eastern Kii Channel
	Western Kii Channel
Harima-nada	North Harima-nada
	South Harima-nada
Bisan-seto	Eastern Bisan-seto
	Western Bisan-seto
Bingo-nada	Bingo-nada
Hiuchi-nada	Hiuchi-nada
Aki-nada	Aki-nada
Hiroshima Bay	Hiroshima Bay
Iyo-nada	Eastern Iyo-nada
	Western Iyo-nada
Suo-nada	Eastern Suo-nada
	Western Suo-nada
Bungo Channel	Bungo Channel
Hibiki-nada	Hibiki-nada

Table 2 Selected 6 sites to calculate the BG-COD from investigation sites for public waters. These sites were selected, because they have been likely to be less affected by load from land area.

Site	Prefecture	Year
Ken-nan-engankaiiki_St-1 (T-1)	Tokushima	1981 - 2014
Ken-nan-engankaiiki_St-2 (T-2)	Tokushima	1981 - 2014
Ken-nan-engankaiiki_St-3 (T-3)	Tokushima	1981 - 2014
Ken-nan-engankaiiki_St-6 (T-6)	Tokushima	1981 - 2007
Ashizuri-kaiiki_St-2 (K-2)	Kochi	1981 - 2014
Ashizuri-kaiiki_St-4 (K-4)	Kochi	1981 - 2014

Fig. 7-a Annual variation of COD in Kii Channel past about 30 years.

Fig. 7-f Annual variation of COD in Hiuchi-nada past about 30 years.

Fig. 7-b Annual variation of COD in Osaka bay past about 30 years.

Fig. 7-g Annual variation of COD in Aki-nada past about 30 years.

Fig. 7-c Annual variation of COD in Harima-nada past about 30 years.

Fig. 7-h Annual variation of COD in Hiroshima Bay past about 30 years.

Fig. 7-d Annual variation of COD in Bisan-seto past about 30 years.

Fig. 7-i Annual variation of COD in Iyo-nada past about 30 years.

Fig. 7-e Annual variation of COD in Bingo-nada past about 30 years.

Fig. 7-j Annual variation of COD in Suo-nada past about 30 years.

Fig. 7-k Annual variation of COD in Bungo Channel past about 30 years.

Fig. 7-l Annual variation of COD in Hibiki-nada past about 30 years.

Fig. 8 Decennial variation of COD in each bay and sea.

の順に高く、外洋水（地点 C1, C2 および E9）の傾向と一致していた。紀伊水道、大阪湾、播磨灘、響灘を除く瀬戸内海中・西部の各湾灘の COD 平均値は、BG-COD と同様に 2000 年代 > 1990 年代 > 1980 年代の順に高かった。一方、大阪湾の COD 平均値は、1980 年代に比べて 1990 年代と 2000 年代のいずれも低かったが、1990 年代と 2000 年代は同程度であり、1990 年代以降は下げ止まりとなっている。

各湾灘の上層と下層の COD および D-COD（下層は大阪湾のみ）と、BG-COD との相関行列を Table 3 に示した。各湾灘と BG-COD における COD の相関分析は、1981～2013 年度の平均で行ったため、 $n=33$ である。したがって、 $r>0.291$ であれば $P<0.1$ の有意な相関、 $r>0.344$ であれば $P<0.05$ の有意な相関、 $r>0.442$ であれば $P<0.01$ の有意な相関があると評価した²⁴⁾。その結果、瀬戸内海の中央から西部に位置する備讃瀬戸、備後灘、燧灘、

Table 3 Correlation matrix between BG-COD and COD of each bay and sea in Seto Island.

	surface		bottom	
	COD	D-COD	COD	D-COD
Osaka bay	-0.413**	-0.221	0.050	0.552***
North Osaka bay	-0.512***	-0.424**	-0.060	0.376**
South Osaka bay	0.006	0.329*	0.243	0.580***
Kii Channel	0.103	0.073	-0.040	-
Eastan Kii Channel	-0.016	-0.249	-0.165	-
Western Kii Channel	0.044	0.468***	0.077	-
Harima-nada	0.192	0.015	-0.224	-
North Harima-nada	-0.050	-0.274	-0.352**	-
South Harima-nada	0.545***	0.532***	0.095	-
Bisan-seto	0.646***	0.543***	0.643***	-
Eastern Bisan-seto	0.645***	0.563***	0.625***	-
Western Bisan-seto	0.619***	0.505***	0.616***	-
Bingo-nada	0.697***	0.680***	0.717***	-
Hiuchi-nada	0.594***	0.614***	0.569***	-
Aki-nada	0.549***	0.688***	0.676***	-
Hiroshima-bay	0.462***	0.674***	0.719***	-
Iyo-nada	0.535***	0.619***	0.707***	-
Eastern Iyo-nada	0.581***	0.573***	0.699***	-
Western Iyo-nada	0.150	0.439**	0.458***	-
Suo-nada	0.698***	0.674***	0.720***	-
Eastern Suo-nada	0.655***	0.660***	0.686***	-
Western Suo-nada	0.628***	0.597***	0.656***	-
Bungo Channel	0.325*	0.493***	0.510***	-
Hibiki-nada	-0.138	-0.189	0.056	-

: Denotes significant differences between BG-COD and COD of each bay and sea in Seto Island (, $p<0.1$; **, $p<0.05$; ***, $p<0.01$).

安芸灘、広島湾、伊予灘、周防灘および豊後水道の COD と BG-COD との相関係数は 0.325～0.720 であり、1～10 % の危険率で統計的に有意な正の相関関係が認められた。一方、陸域からの負荷が大きい大阪湾や播磨灘全域の COD と BG-COD との間には、統計的に有意な関係は認められなかった。但し、陸域からの負荷による直接的な影響が相対的に小さい大阪湾南部および播磨灘南部海域に限ると、BG-COD と表層 D-COD との相関係数は 0.329 および 0.532 となり、1～10 % の危険率で統計的に有意と判定された。

4. 考察

4.1 外洋水の COD 鉛直分布および季節変動

地点 E9 の COD は表層付近で高く、100 m 以深では減少する傾向が見られた。一方で、11～12 月には明確な傾向が見られなかった。この時は TOC も同じような傾向を示したことから、COD の濃度変化は有機物の増減によるものと推察された。しかし、この時期は植物プランクトンのブルームが形成される時期も過ぎていることから、有機物が何に由来したのかはよくわからない。地点 E9 は徳島県沖に位置し紀伊水道の外洋側の海域にあるので、もし外洋水が紀伊水道東部に強く流入した場合には、大阪湾の COD の高い海水が紀伊水道から流出することになる²⁵⁾ ので、その影響を受けたのかもしれないが、それ

を裏付けるデータは今のところない。この傾向が季節的なものであるか、何らかのイベントによるものであるかは、今後の継続的な調査から明らかになると考えられる。いずれにせよ、外洋水の COD に鉛直分布があることは、外洋水が瀬戸内海の COD に与える影響を定量的に見積るために、どの深度の外洋水が瀬戸内海に流入するかなどの詳細な解析の必要性を示唆している。

4.2 外洋水 COD の長期変動とその特徴

本調査結果と過去のデータを比較することで、40 年に亘り外洋水の COD が上昇していることが示唆された。また、図示はしていないが 2016 年 5~9 月の COD の平均濃度は表層、20 および 50 m 層で、それぞれ 1.3、1.1 および 0.93 mg L^{-1} であり、同様に過去のデータよりも上昇していたことから、この傾向は一過性ではないと考えられる。平沢ら¹⁷⁾は、太平洋側に配置された常時監視の環境基準点のうち港湾を除いた 62 地点の COD の年間平均値が上昇している要因について、海流に乗って運ばれる大陸起源の有機物や栄養塩類の影響によると推察している。しかし、Kawahara ら²⁶⁾は、中国の長江河口付近に起源を持つエチゼンクラゲは対馬暖流と黒潮に乗って日本海沿岸に多く漂着していると指摘しており、もし、中国沿岸から海洋に流出する汚濁物質がエチゼンクラゲと同じ漂着経路をたどるとすれば、太平洋の外洋水と同様に日本海の COD についても増加傾向が認められるはずである。しかし、環境省の日本近海海洋汚染実態調査 (1975~1994 年度) と海洋モニタリング調査 (1995 年度) における日本海側の 9 地点での COD に増加傾向は認められず、日本海沿岸の常時監視地点のうち、沖合 1 km 以上にある兵庫県および山口県の 5 地点における COD の経年変化もすべてが増加の傾向は示していない。このことは、COD の増加分が大陸由来であるとは言い切れず、黒潮から対馬暖流が分枝した後に太平洋側の COD が増加していることを示唆しているが、今のところそれ以上のことはわからない。長江を含め東シナ海からの影響を見るためには、日本海の入り口となる対馬海峡周辺の調査が必要であろう。

4.3 瀬戸内海の各湾・灘ごとの COD の経年傾向と太平洋沿岸域の COD との相互関係

各湾灘と BG-COD における COD の相関分析の結果、瀬戸内海の中央から西部に位置する備讃瀬戸、備後灘、燧灘、安芸灘、広島湾、伊予灘、周防灘および豊後水道で統計的に有意な正の相関関係が認められた。外洋水が瀬戸内海に入る経路には 4 つの海峡があり、海水交換の貢献度は豊予海峡が 84%、紀伊水道、すなわち紀淡海峡と鳴門海峡が 12% と 3.3%、残る関門海峡が 0.8% であり²⁷⁾、瀬戸内海に流入する外洋水のメインルートは豊後水道と紀伊水道である。速水ら¹⁴⁾は、瀬戸内海西部では豊後水道及び伊予灘南部まで、東部では紀伊水道内で、現場の栄養塩濃度に対して外界からの栄養塩流入が直接影響するとし、石井ら¹³⁾は豊後水道と紀伊水道と各湾灘の窒素・リン濃度変動の関係から、備後灘を含めた西部では豊後水道を通じての影響が、備後灘以東では紀伊水道からの影響が大きいとしている。このことは、外洋水と瀬戸内海の湾灘の COD の長期変動の関係において、豊後水道から中央部の備讃瀬戸の瀬戸内海西部の湾灘の COD が BG-COD と良い相関を示すという結果とは矛盾

していない。太平洋の外洋水が瀬戸内海に侵入するメカニズムについては、黒潮流軸の離岸距離との関係で説明されている。水温が低く栄養塩濃度の高い陸棚斜面域の底層水は、豊後水道では離岸が小さい時には底入り潮として侵入するが、紀伊水道では豊後水道とは逆に離岸が大きい時に侵入することが報告されている²⁸⁾。また、豊後水道では高温で貧栄養の黒潮系の外洋水が急潮として上層に侵入した後に底入り潮の侵入があることが示されている²⁸⁾。徳島沖の外洋水の COD は、Fig. 3 に示す E9 の鉛直プロファイルから分かるように、表層水は概ね 1.0 mg L^{-1} 以上だが 300 m 層では 0.7 mg L^{-1} 以下であり、豊後水道や紀伊水道の表層水よりも低い。陸棚斜面域の底層水が豊後水道あるいは紀伊水道から侵入し湧昇した時、表層水の COD は底層水により希釈されるが、高濃度の窒素・リンが供給されることで植物プランクトンの生産が高まれば COD は高くなることになる。速水ら²⁹⁾は、豊後水道から底入り潮として瀬戸内海に侵入した低温・高塩分で高栄養塩の外洋水による栄養塩供給が、豊予海峡周辺の植物プランクトン生産に寄与しているとしていると報告している。藤原ら³⁰⁾は、紀伊水道底層の栄養塩は、紀淡海峡で鉛直混合されて一部分は紀伊水道の有光層に運ばれ、残りは大阪湾西部底層を通過して明石海峡で有光層に入り、また、豊後水道底層の栄養塩は、豊予海峡において有光層に運ばれて伊予灘の約 10 m 層を通り、来島海峡からは再び下層を通り燧灘の下層に入るとし、これらの栄養塩はいずれも有光層において植物プランクトンに取り込まれるとしている。このように、豊後水道と紀伊水道から瀬戸内海に侵入した外洋起源の栄養塩によって植物プランクトンが生産され、その結果として COD は増加することが示唆されている。しかし、外洋水の栄養塩が直接 COD の増加に影響している海域は、大阪湾と播磨灘東部の明石海峡周辺、および伊予灘に限られているようである。また、速水ら¹⁴⁾は、瀬戸内海全体に対する外洋起源の窒素・リンの寄与率は瀬戸内海西部で高いが、大阪湾では 25% 程度と東部で低いことを示した。しかし、これらのことと植物プランクトンの生産や結果としての COD との関係については言及していない。

陸域からの負荷が大きい大阪湾や播磨灘全域の COD と BG-COD との間には、統計的に有意な関係は認められなかったが、大阪湾・播磨灘の南部海域の D-COD と BG-COD との間には有意な相関が見られた。これは、大阪湾や播磨灘であっても陸域からの負荷による直接的な影響が相対的に小さい南部の BG-COD との濃度差が小さい海域では、外洋水の影響が顕在化しやすいためであると考えられる。石井ら³¹⁾は、灘・湾全域に対する灘・湾沿岸域の水域別窒素・リン濃度比を求め、水質制御指標 (C-ratio) とし、C-ratio が大きい瀬戸内海東部の紀伊水道、大阪湾、備讃瀬戸は負荷量削減の効果が現れ易いが、播磨灘、安芸灘、広島湾、別府湾では効果が現れ難い水域としている。そこで、BG-COD に対する各湾灘の平均値の比をとり、その経年変動を調べた結果を補足資料 Fig. SI-a) ~ SI-l) に示す。BG-COD との相関係数が低かった大阪湾の表層の COD の C-ratio は、1985 年度の 6.4 をピークに低下傾向が見られ、2011 年度には 2.3 まで低下しており、年々陸域の COD 排出規制による COD 低減効果が得られにくい状況になっている、すなわ

ち、COD について外洋水の影響を受けやすくなってきていることが示唆された。同様に BG-COD との相関係数が低かった紀伊水道の表層の COD の C-ratio は、0.89～1.9 の間で変動しており、低下傾向が見られる。また、播磨灘の表層の COD の C-ratio は、1980 年代は 2～3 で推移していたが、1991 年以降は 1.4～2.1 の間で推移した。したがって、播磨灘では 1990 年以降、1980 年代と比較して COD について外洋水の影響を受けやすくなっていると推察された。その他の BG-COD と有意な相関が見られた各湾灘では、広島湾を除き、1990 年以降の表層の COD の C-ratio は概ね 1～2 の間で推移しており、C-ratio を用いた解析からも、COD について外洋水の影響を受けやすいことが推察された。広島湾では表層の COD の C-ratio は、1990 年に最大で 3.4 に達し、1990 年代以降は概ね 2.0 から 2.5 で変動していることから、他の湾灘と比較して陸域からの負荷が大きく外洋水の影響を受けにくいのではないかと考えられた。

以上のように、外洋水の COD の濃度に近く瀬戸内海における COD のバックグラウンド値とみなされる BG-COD、瀬戸内海全域、および各湾灘ごとの COD はいずれも上昇傾向にあり、同時に瀬戸内海中西部に位置する湾灘の COD と BG-COD には高い相関が認められている。このことから、瀬戸内海の COD が減少せずに漸増傾向にある原因の一つとして、少なくとも 1975 年以降濃度上昇傾向が続いている太平洋の外洋水による影響が示唆された。

5. まとめ

徳島県沖の外洋水の COD の実態を調査した結果、COD の鉛直分布として表層付近で高く底層で低い傾向を示した。表層～50 m 層の COD は、1970 年代から 1990 年代にかけての濃度と比較して、上昇傾向を示していることが示唆された。

瀬戸内海の中西部では 1980 年代以降、COD が上昇傾向にあることが示唆された。バックグラウンドの COD と瀬戸内海の各湾灘の COD の相関関係は、瀬戸内海の中央から西部で統計的に有意な正の相関が見られた。瀬戸内海全域のほとんどの湾灘の COD が上昇傾向にあること、そして特に上昇傾向にある瀬戸内海中西部に位置する湾灘でバックグラウンドと高い相関がみられることから、瀬戸内海の COD が減少せずに漸増傾向にある原因としてバックグラウンド、すなわち太平洋沿岸の外洋水が寄与していることが示唆された。

本研究は、外洋水の COD の鉛直分布の一端を明らかにし、瀬戸内海における COD の漸増傾向の一因に外洋水の COD の増加が関与している可能性を提示するものであり、閉鎖性海域の水質基準を達成するための効果的な対策に役立つものと考えられる。今後も外洋水の COD の変動を監視しつつ、外洋水に含まれる有機物の特性も解明する必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、水質分析にご助力いただいた柳原宇至氏（大阪工業大学環境工学科、現（株）日本ミクニヤ）、杉本夏輝氏（大阪工業大学環境工学科）、相原咲季氏（地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合

研究所）、小畑雅裕氏（同）に厚くお礼申し上げます。また、石川陽子氏（徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課）をはじめとした職員の方々および漁業調査船「とくしま」の皆様には、紀伊水道と外洋域の海水試料の採水等についてご協力頂きました。深く感謝いたします。なお、本研究は平成 26 および 27 年度瀬戸内海の環境保全・創造に係る研究受託事業（瀬戸内海環境保全知事・市長会議）の助成を受けて実施いたしました。ここに記して感謝の意を表します。

付録：補足資料

補足資料は下記より閲覧可能である。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jswe/-char/ja/>
(原稿受付 2017 年 1 月 10 日)
(原稿受理 2017 年 5 月 26 日)

参 考 文 献

- 1) 環境省, 2016. 中央環境審議会水環境部会総量規制基準専門委員会（第 1 回）資料 4. URL: <https://www.env.go.jp/council/09water/y0918-01b.html> (2016 年 12 月時点).
- 2) 環境省, 2015. 中央環境審議会水環境部会（第 40 回）資料 3. URL: <https://www.env.go.jp/council/09water/y090-40.html> (2016 年 12 月時点).
- 3) 環境省, 2015. 平成 27 年版環境・循環型社会・生物多様性白書. pp. 245-246.
- 4) 環境省, 2014. 中央環境審議会水環境部会総量削減専門委員会（第 1 回）資料 6. URL: <https://www.env.go.jp/council/09water/y0917-01b.html> (2016 年 12 月時点).
- 5) 岡本高弘, 早川和秀, 2011. 琵琶湖における溶存有機物の現状と課題. 水環境学会誌 34(A) (5), 151-157.
- 6) 今井章雄, 福島武彦, 松重一夫, 井上隆信, 石橋敏昌, 1998. 琵琶湖湖水および流入河川水中の溶存有機物の分画. 陸水学雑誌 59, 53-68.
- 7) 古田世子, 池谷仁里, 池田将平, 藤原直樹, 岡本高弘, 一瀬論, 馬場大哉, 岸本直之, 今井章雄, 2014. 琵琶湖に棲息する緑藻 *Staurostrum arcticon* (*Desmidiaceae*) の生分解特性に関する研究. 水環境学会誌 37(3), 103-109.
- 8) 佐藤祐一, 岡本高弘, 早川和秀, 大久保卓也, 小松英司, 2016. 琵琶湖における難分解性有機物の起源：発生源における生分解試験とボックスモデルによる推計. 水環境学会誌 39(1), 17-28.
- 9) 佐々木克之, 2015. 内湾および干潟における物質循環と生物生産 瀬戸内海漁獲量の減少要因 2. COD の増加要因. 海洋と生物 37, 633-638.
- 10) 藤原建紀, 宇野奈津子, 多田光男, 中辻啓二, 1997. 外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量. 海岸工学論文集 44, 1061-1065.
- 11) 柳哲雄, 1997. 瀬戸内海の淡水・窒素・リン収支. 海の研究 6, 157-161.
- 12) Yanagi, T., Ishii, D., 2004. Open ocean originated phosphorus and nitrogen in the Seto inland Sea. J. Oceanogr. 60, 1001-1005.
- 13) 石井大輔, 柳哲雄, 2004. 瀬戸内海各灘・湾における全リン・全窒素の起源と濃度変動機構. 海の研究 13, 389-401.
- 14) 速水祐一, 碓井澄子, 武岡英隆, 2004. 瀬戸内海における窒素・リンの存在量とその長期変動. 海と空 80, 75-78.
- 15) 武岡英隆, 2006. 沿岸域における外洋起源栄養物質の見積もり方法とその問題点. 沿岸海洋研究 43, 105-111.
- 16) 環境庁水質保全局, 1994. 日本近海海洋汚染実態調査報告書.
- 17) 平沢泉, 2006. 閉鎖性水域の汚濁の現状と今後の課題. 日本海水学会誌 60(4), 224-228.
- 18) 環境省. 広域総合水質調査 (1981～2013 年度). URL: <https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/mizu/kouiki/dataMap.asp> (2016 年 12 月時点).
- 19) 神戸海洋気象台, 2001. 海洋気象観測報告 15, 1-12.
- 20) 日本規格協会, 2013. K0102 工場排水試験方法. JIS ハンドブ

- ック, pp. 707-711.
- 21) 津田久美子, 早川和秀, 岡本高弘, 2014. 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.
- 22) 相崎守弘, 松重一夫, 今井章雄, 朴済哲, 1998. 霞ヶ浦における有機性汚濁物質に関する研究. 国立環境研究所研究報告, 霞ヶ浦臨湖実験施設研究報告集 12, 20-27.
- 23) 国立環境研究所, 環境 GIS. URL. <http://envgis.nies.go.jp/kaiyo/> (2016 年 12 月時点).
- 24) 薩摩順吉, 1989. 確率統計. 岩波書店, 東京.
- 25) 高志利宣, 藤原建紀, 住友寿明, 竹内淳一, 2002. 外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送. 海岸工学論文集 49, 1076-1081.
- 26) Kawahara, M., Uye, S., Ohtsu, K., Iizumi H., 2006. Unusual population explosion of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* (Scyphozoa: Rhizostomeae) in East Asian waters. Mar. Ecol. Prog. Ser. 307, 161-173.
- 27) 樋口明生, 1976. 瀬戸内海の海域生態と漁場. フジ・テクノシステム, 東京, pp. 41-45.
- 28) 武岡英隆, 2001. 瀬戸内海の栄養塩環境の長期変動. 地球環境 6, 3-12.
- 29) 速水祐一, 兼田淳史, 小濱剛, 中野伸一, 武岡英隆, 2006. 豊後水道における外洋起源栄養塩の供給機構とその生態系への影響. 沿岸海洋研究 43, 143-149.
- 30) 藤原建紀, 小林志保, 高志利宣, 2003. 瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測. 海岸工学論文集 50, 951-955.
- 31) 石井大輔, 柳哲雄, 2005. 瀬戸内海の沿岸域と全域における TP・TN 濃度変動. 海の研究 14, 35-45.

【論文要旨】

徳島県沖の外洋水を調査した結果, 2015 年 3 月～2016 年 9 月までの COD の平均値は, 表層から 50 m 層までは 1.2 mg L^{-1} 程度, 100 m 以深では 0.9 mg L^{-1} 以下であり, 表層付近で高く底層で低くなる傾向が見られた。これらの値は 1970 年代から 1990 年代にかけて調査された近接する外洋地点の COD に比べて増加しており, 外洋水の COD は 1975 年から 2015 年の 40 年間を通して上昇傾向にあることが示唆された。また, 太平洋沿岸域の公共用水域測定地点のうち, 特に陸域の影響を受けにくいと考えられる地点の COD の平均値と広域総合水質調査結果の瀬戸内海の中央部～西部の湾・灘の COD との間には統計的に有意な正の相関が見られ, 瀬戸内海の COD が減少せずに漸増傾向にある原因として, 外洋水の影響が示唆された。

キーワード: 閉鎖性海域; 瀬戸内海; COD; 外洋水