

瀬戸内海中西部海域, 2016年の底質 —主成分分析による水域区分と既往調査との比較—

横山 寿^{1†}, 藤原建紀²

Zoning of the central and western parts of the Seto Inland Sea based on the principal component analysis of sediment parameters and comparison between the 2016 and previous surveys

Hisashi YOKOYAMA^{1†} and Tateki FUJIWARA²

瀬戸内海における底質環境の変遷を把握するために、環境省が2016年7月に中西部135地点より採取した0–5 cm層堆積物の全有機態炭素量 (TOC), 全窒素量 (TN) および炭素, 窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) を分析し, C:N比および同省による6項目 (泥分率, 強熱減量, 化学的酸素要求量, 全リン量, 酸化還元電位, 酸揮発性硫化物態イオウ量) の分析結果を加えて主成分分析を行った。当水域は泥質で有機物量が多いA区, 砂質で有機物量が少ないB区, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ が低く, 海岸近くのC1区, 沖合のC2区に4区分された。C1区では陸起源有機物の割合が高かった (37%) が, C2区では低いC:N比 (5.4) より陸起源有機物は少ないと判断した。1980年代以降の環境省による3回の調査結果と比較し, 広島湾のA区のみTOCとTNの有意な減少を認めた。

キーワード: 底質環境, 堆積物, 年変化, 炭素安定同位体比, 窒素安定同位体比

Total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in sediments collected from 135 stations in the central and western parts of the Seto Inland Sea in July 2016 by Ministry of the Environment, Japan (MOF) were analyzed to evaluate the bottom environment. The principal component analysis based on these parameters plus C:N ratio and six parameters provided by MOF shows that the area is divided into four zones: zone A characterized by fine and organically enriched sediments, zone B characterized by coarse sediments showing low contents of organic matter, zone C1 characterized by low $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values and the nearshore location and zone C2 characterized by low $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the offshore location. The terrestrial organic matter ratio in the sediment of zone C1 was high (37%), whereas the ratio in zone C2 must be low, considering low values of the C:N ratio. The comparison in the sediment parameters between the 2016 and previous surveys shows no clear trend in the sediment parameters during the 30 years except for TOC and TN in sediments collected from zone A in Hiroshima Bay.

Key words: bottom environment, sediment, decadal change, stable carbon isotope ratio, stable nitrogen isotope ratio

はじめに

瀬戸内海は700有余の島々と7,230 kmの長い海岸線を有し, 東西およそ450 km, 南北15–55 km, 面積23,203 km²,

平均水深38 m, 容積8,815×10⁸ m³のわが国最大の閉鎖性水域である (瀬戸内海環境保全協会, 2017)。瀬戸内海には大小669河川より年間5×10¹⁰ m³の陸水が流入する。その総流域面積48,931 km²には約3,000万人が生活し (星加, 2003), 産業が盛んで, 河川水は生活排水, 工場排水を含んでいる。

瀬戸内海では, 1960年代に始まった高度経済成長とともない富栄養化が進行し, 1970年代には大阪湾, 播磨灘, 燧灘などにおいて赤潮や貧酸素水塊の発生による大規模な漁業被害が頻発した。そのため, 国は1973年に「瀬戸内海環境保全臨時措置法」を制定し, 1978年には「瀬戸内

2018年3月30日受付, 2018年11月1日受理

¹ 京都大学フィールド科学教育研究センター, 〒606–8502 京都市左京区北白川追分町

Field Science Education and Research Center, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwakecho, Sakyo, Kyoto 606–8502, Japan

² 京都大学名誉教授

Kyoto University, Professor Emeritus

† patients07@gmail.com

海環境保全特別措置法」に恒久法化するとともに、「水質汚濁防止法」を一部改正し、総合的な環境対策を講じた。これらの法律に基づき、1979年以降、汚濁発生源となる生活排水、産業排水などの化学的酸素要求量 (COD) について削減対策が行われてきた。1993年には窒素 (N)、リン (P) の環境基準の設定、各水域における環境基準の類型指定とともに、N、Pの排水規制が実施された。この方向性は2004年度を目標年度とする「第5次総量規制」においても継続されたが、2005年の中央環境審議会から環境省への答申「第6次水質総量規制の在り方について」(https://www.env.go.jp/council/toshin/t097-h1703/01.pdf, 2018年6月9日)では、「大阪湾において引き続きN、Pの削減が必要であるが、大阪湾以外の瀬戸内海では現在の水質を維持することが適切」とされた。

このような施策により瀬戸内海の水環境は大きく変化した。たとえば、溶存態の無機窒素 (DIN) およびリン酸態リン ($\text{PO}_4\text{-P}$) の濃度が1980年代前半に急激に減少し、透明度が1980年代後半以降、上昇傾向にあること、および夏季の底層溶存酸素濃度が1980年代以降、上昇傾向にあることが報告されている(樽谷, 2007)。また、赤潮の年間発生件数は1976年に299と最大となった後、減少に転じ、1980年代後半以降、100件前後で推移するようになった (Imai et al., 2006)。瀬戸内海の栄養状態は人間活動に伴う陸からの影響を受けてきたが、外海等の海況変動も受け、1970年代後半の富栄養期から、1985年ごろにいったん貧栄養になった後、1990年ごろにやや高栄養となり、2000年代後半以降は貧栄養期に入っているとみられている (Yamamoto, 2003; 藤原ほか, 2006; Tsugeki et al., 2017)。

瀬戸内海における海面漁業の生産量は1985年に48.5万トンとピークを示した。しかしその後、減少の一途をたどり、2016年には15.7万トンまで低下した (http://www.jfa.maff.go.jp/setouti/tokei/seisansui.html, 2018年6月9日)。漁家経済の基盤を支えてきたノリ養殖においても、DINの不足によるとみられる色落ちが1990年代後半より続発し、生産量が低下している (松岡ほか, 2005; 多田ほか, 2010; 反田ほか, 2014)。広島湾では植物プランクトンの種組成の変化と一次生産量の低下が養殖カキの生産量低下に影響を及ぼしていると考えられている (Yamamoto et al., 2004)。このような現象の一因が1970年代以降、講じられてきた陸域からの流入負荷の削減により海域が貧栄養化し、生態系の生産性が低下してきたことにあるとの見方が生じ (Yamamoto, 2003; 山本, 2014)、瀬戸内海の環境保全とともに水産物の生産を維持するため栄養塩類の適正な負荷レベルの算定と負荷削減策の見直しが求められるようになった (反田ほか, 2014)。

水質は水塊の流動により、短期的に大きく変化しうる一方、底質は時間を積分した環境を表しやすく、水質より地点指標性が高いといえる。また、栄養塩は陸域からの流入

以外に底泥から溶存無機態として溶出することによっても負荷され (Seiki et al., 1989)、瀬戸内海では陸からの溶存態N、P負荷量の50%以上に相当する量が堆積物から溶出するとされている (山本ほか, 1998)。このように、底質調査は環境評価、物質循環の理解、ひいては生態系全体の保全に重要な役割を担っている。

瀬戸内海では広域の底質調査がこれまでに数回、行われてきた (山田, 1976; 塩沢ほか, 1979; 谷本ほか, 1984; 山本ほか, 1999)。また、環境省は瀬戸内海の底質の状況を把握するため、瀬戸内海全域にわたる詳細な底質調査を1981–1987年度、1991–1996年度、2001–2005年度に実施し (永淵ほか, 1998; 駒井, 2008; 瀬戸内海環境保全協会, 2017)、2015年度より第4回調査を行っている。調査地点の総数は第1回調査では857、第2回および第3回調査では425と合わせて多く、測定項目も粒度組成のほか、堆積物中有機物量の指標となる強熱減量 (IL)、COD、有機態全炭素量 (TOC)、全窒素量 (TN)、全リン量 (TP) および底質悪化の指標となる酸化還元電位 (ORP) および硫化物量 (正しくは酸揮発性硫化物態イオン量であり、本報では略号としてAVSを使用) など底質の物理化学的性状を把握できるほとんどの項目を含んでいる。これらの調査ではほぼ同一の地点、採集方法、分析方法が採用されているので、調査時期の比較が可能である。筆者らは第4回調査のうち、2016年7月に備讃瀬戸、備後灘、燧灘、安芸灘、広島湾、伊予灘および別府湾の合計135地点より得られた試料を分取し、炭素、窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)、TOCおよびTNを分析した。これらの分析値に環境省分析の他項目を加えて主成分分析とクラスター分析を行い、水域を区分した。この区分をもたらし環境要因を検討した上で、各区の底質環境を環境省による過去3回の調査結果と比較することにより、この30年余間の環境変化を評価した。

材料および方法

現場調査および試料の分析

環境省は、「瀬戸内海環境情報基本調査」の一環として、2016年7月12日より24日にかけて、瀬戸内海の備讃瀬戸、備後灘、燧灘、安芸灘、広島湾、伊予灘および別府湾 (別府湾を除く水域の区分は「瀬戸内海環境保全臨時措置法第13条第1項の埋立についての規程の運用に関する基本方針について」(瀬戸内海環境保全協会, 2017) に準じた) の合計135地点 (Fig. 1) において、底質調査を行った。この調査では、調査位置はGPS (位置精度、 $<5\text{m}$) により決定され、各地点においてスミス・マッキンタイア型採泥器 (採泥面積、 0.05m^2) を用いて海底表層の堆積物 (堆積物表面より 5cm) が3回採泥され、船上で混合して試料とされた。

本研究では、環境省により採取された上記堆積物試料を用い、 -20°C で冷凍保存された試料を解凍後、TOC、TN、

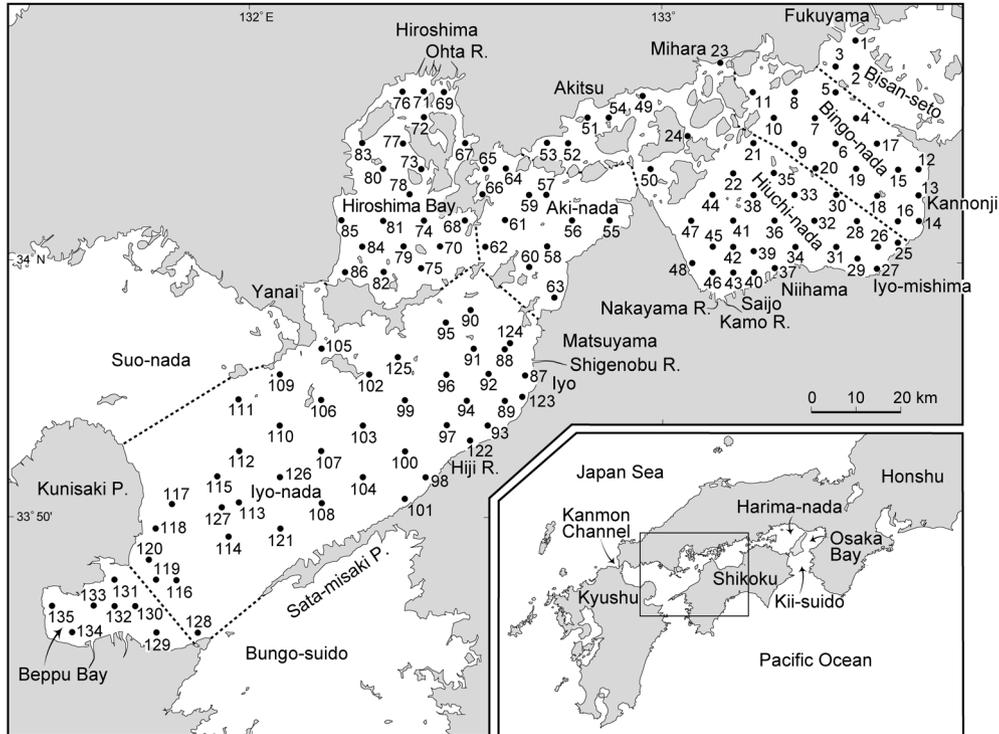


Figure 1. Map of the study area, the central and western parts in the Seto Inland Sea, showing the sampling stations (1–135). Dotted lines indicate the boundary between water areas.

$\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ を分析した。TOCおよび $\delta^{13}\text{C}$ の分析の前に、堆積物を1.2 Nの塩酸に2–3時間浸し、炭酸カルシウムを分解させた。TNと $\delta^{15}\text{N}$ の分析には酸未処理の試料を用いた。元素分析計と質量分析計を連結させたシステム(Thermo Fisher Scientific, EA ConFlo IV/DELTA V Plus)によりTOC, TN, $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ を分析した。TOCおよびTNの分析値は、含水率と底層水の塩分から乾燥試料中の海塩含量を計算し、塩を含まない乾重量に換算した。

著者が分析した4項目およびC:N比(重量比)とともに、環境省が分析した物理化学項目のうち粒度組成、泥分率、IL, COD, TP, AVSおよびORP(酸化還元電位計の読み取り値を25°Cにおける標準水素電極を基準とした電位Ehに換算した値)の原データを解析に用いた。粒度組成については、堆積物を篩によりシルト・クレイ(silt+clay, <0.075 mm:泥分率はこの画分の組成率)、砂(sand, 0.075–2.0 mm)および礫(gravel, >2.0 mm)に分画し、それぞれの乾燥重量の組成率が求められた。IL, COD, TP, AVSおよびORPは「底質調査方法」(環境省水・大気環境局, 2012)に従って分析された。COD, TOC, TN, TPおよびAVSの値は乾泥gあたりmgで示した。

データの解析方法

各地点における堆積物の粒度を、シルト・クレイ、砂および礫の重量百分率組成にもとづき、Buchanan (1984)の粒径区分に従って分類した。堆積物中の有機物(SOM)が陸

起源有機物(TOM)と海洋起源有機物の混合物と仮定して、各地点においてSOMに占めるTOMの割合(TOM率, %)を算出した。TOMの $\delta^{13}\text{C}$ 代表値として温帯における C_3 植物の一般値 -27‰ (Fry and Sherr, 1984)を、海洋起源有機物(植物プランクトン)の値として大阪湾中央部の水深5 m層より採取した海水中の懸濁態有機物の $\delta^{13}\text{C}$ 値 -20.7‰ (横山・佐野, 2015)を用いた。TOM率は、 $\text{TOM}(\%) = 100(-20.7 - \delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}}) / (-20.7 + 27)$ により計算した。計算値が負となった場合($\delta^{13}\text{C}_{\text{SOM}} > -20.7\text{‰}$)、TOM率を0とした。

底質11項目(泥分率, IL, COD, TOC, TN, TP, C:N比, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, AVSおよびORP)を基に主成分分析を行った。成分1および成分2の主成分得点をもとに、標準化ユークリッド平方距離を測度としたワード法によるクラスター分析を行い、水域を区分した。底質11項目およびTOM率に関して、水域間での有意差を一元配置分散分析法(one-way ANOVA)により有意差($p < 0.05$)を確認したうえで、チューキー・クレーマー検定により各区間の相違を多重比較した。主成分分析およびクラスター分析には統計ソフト‘KyPlot’(カイエンス)を用いた。

環境省により過去3回実施された底質調査の原データを環境省より入手した。これらの調査では今回の調査と同一の地点において、同じ底質項目が分析されている。これらの原データより今回の調査により区分された4区における有機物量あるいは酸化還元状態を示す6項目(IL, TOC,

TN, TP, ORP および AVS) の測定結果を抽出した。各区内において灘・湾ごとに時系列的な変化の有無を一元配置分散分析法により確認し、有意 ($p < 0.05$) な変化があれば、テューキー・クレーマー検定により各調査 (第1-4回) 間の相違を多重比較した。なお、第4回調査の底質分析方法は、底質調査方法 (環境省・水大気環境局, 2012) に準拠しており、第1-3回とは分析方法が異なる項目がある。瀬戸内海中東部で行われた新旧方法の比較調査 (未発表) によると、CODは $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 程度以上の範囲では新法のほうがやや高い値を示す傾向がみられたため、本研究では比較の対象より除外した。TPとAVSは新法と旧法で確かな変化がなかったため、比較の対象とした。

結果

各分析項目の水平分布

各地点における堆積物のシルト・クレイ、砂および礫の組成率を三角座標図に示した (Fig. 2a)。Buchanan (1984) の粒径区分に従うと、備後灘、燧灘、広島湾および別府湾の大多数の地点は silt+clay となり、泥分率が95%以上と非常に高かった (Fig. 2b, c)。一方、燧灘の島嶼周辺、安芸灘および伊予灘では泥分率が25%未満であり、gravelly sand, sand, silty gravelly sand, silty sand に区分される地点が多かった。とくに伊予灘では粗粒の gravelly sand から silty sand の地点が多く、本調査水域の中で、細粒の堆積物が多い備後灘、燧灘と比べ、対照的であった。ただし、伊予灘内の伊予市から肱川河口にかけての海岸線近くの水域、山口県柳井市南方の水域では泥分率が25%以上となる sandy silt の地点がみられた。

堆積物中の有機物量に関する分析項目 (Fig. 3a-e: IL, COD, TOC, TN, TP) はいずれも、備讃瀬戸、備後灘、燧灘南東部、広島湾、別府湾において高い値を示し、燧灘北西部、安芸灘および伊予灘では低い値を示した。ただし、伊予灘の伊予市・肱川河口地先水域、山口県柳井市南方水域では値が高くなる傾向があった。

C:N比 (Fig. 3f) は備讃瀬戸、備後灘、燧灘および広島湾の大多数の地点において7-8、燧灘島嶼周辺および安芸灘の多くの地点において5-7、伊予灘の多くの地点において6-7の範囲にあった。国東半島の東に位置する伊予灘西部水域および佐田岬半島北部の水域では6以下となる地点がみられた。

$\delta^{13}\text{C}$ (Fig. 3g) は大多数の地点において-22%から-20%の範囲にあり、-22%以下となる地点は広島県南岸の備後灘、香川県観音寺から愛媛県伊予三島にかけての地先、愛媛県西条地先より来島海峡にかけて、伊予灘の中で愛媛県伊予市から肱川河口にかけて、広島湾最奥部および別府湾の湾央から奥部にかけて分布しており、いずれの地点も海岸線近くに位置していた。一方、佐田岬半島と国東半島の中間に位置する sand あるいは gravelly sand の Stns 113, 114,

121, 127 (Fig. 2b) では海岸線から8 km以上離れているにもかかわらず、 $\delta^{13}\text{C}$ が-23.3%から-22.5%と比較的低い値を示した。海岸線に近く $\delta^{13}\text{C}$ が低い地点では、堆積物中有機物のC:N比がおおむね8以上を示したが、佐田岬半島・国東半島中間水域ではC:N比が4.8-6.3の範囲にあり (Fig. 3f)、比較的低いC:N比にもかかわらず低い $\delta^{13}\text{C}$ 値を示した点で、海岸線近くの水域とは対照的であった。

TOM率 (Fig. 3h) は、大多数の地点 (101地点) において20%未満 ($\delta^{13}\text{C}$, $> -21.9\%$) であった。TOM率が40%以上 ($\delta^{13}\text{C}$, $< -23.2\%$) となった水域には、広島県安芸津地先、観音寺から伊予三島地先、新居浜地先、伊予市から肱川河口地先のそれぞれ海岸線近くの水域、および佐田岬半島・国東半島中間水域が含まれていた。TOM率最大値は観音寺地先のStn 13における63% ($\delta^{13}\text{C} = -24.7\%$) であった。

$\delta^{15}\text{N}$ (Fig. 3i) は燧灘南東部の観音寺から新居浜地先の水域では6.0%未満 (最小値はStn 14における4.7%) と低かったが、北方に向けて値が上昇し、広島県福山・三原地先地点 (Stns 1, 3, 8, 23) では9.0%以上 (最大値はStn 1における9.9%) となった。今回の調査水域全体を海岸線付近の地点を除いて俯瞰すると、東部の備讃瀬戸、備後灘、燧灘ではおおむね7.0-10.0%の範囲にあったが、西に向かうに従い徐々に低下し、伊予灘中央部では6.0%前後、佐田岬半島・国東半島中間水域では4.0%前後 (最小値はStn 127における3.7%) まで低下した後、その西方の別府湾では6.0%以上に増加する傾向があった。燧灘南東部以外でも伊予灘南東部の重信川や肱川など中小河川が流入する海岸線近くの地点では6.0%未満を示した。一方、大田川が流入する広島湾最奥部の地点 (Stn 69, 71, 76) では7.0-7.7%を示したように、値の低下はみられなかった。

AVS (Fig. 3j) は備讃瀬戸、備後灘、燧灘、広島湾および別府湾では $0.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上となる地点があり、広島湾内Stn 67の $0.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ が最大であった。一方、安芸灘および伊予灘の大多数の地点では $0.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 未満と低かった。

ORP (Fig. 3k) は備讃瀬戸、備後灘、燧灘、広島湾及び別府湾では負の値の地点が多く、伊予灘の伊予市地先のStns 87, 89でも負となった。燧灘・安芸灘・伊予灘北東部の島嶼周辺域では300 mVを超える地点が多数あった。また、佐田岬半島・国東半島中間水域では400 mV以上の高い値を示した。

主成分分析による水域区分

$\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ を除く堆積物9項目 (泥分率, IL, COD, TOC, TN, TP, C:N比, AVS, ORP) 間にはお互いに有意の高い相関 ($p < 0.001$) があった (Table 1)。SOMの $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ については、両者間に有意 ($p < 0.001$) の正の相関関係があり、 $\delta^{13}\text{C}$ はC:N比と有意 ($p < 0.001$) の負の相関があった。

堆積物11項目をもとに、主成分分析を行った。第1、第2、第3主成分の寄与率はそれぞれ、66.9%, 14.5%, 6.5%で、

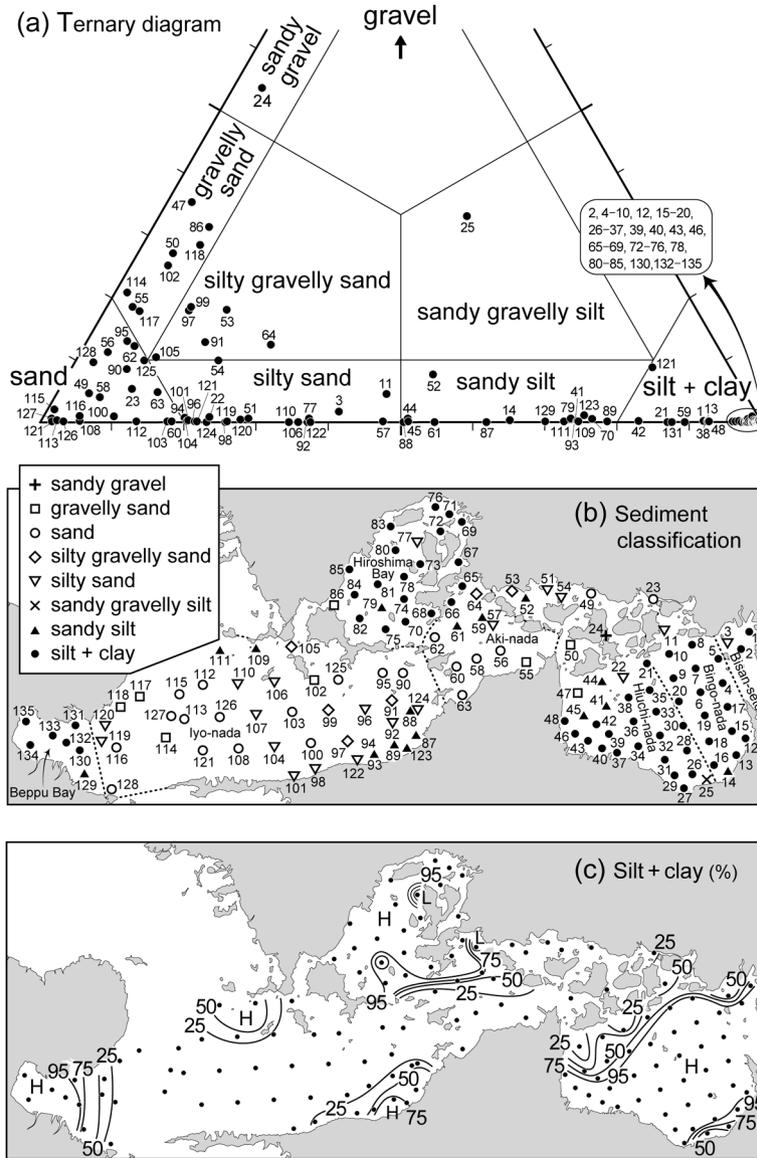


Figure 2. Sediment size distribution in the study area. (a) Ternary diagram (silt and clay, sand, and gravel) of sediment size distributions at the 135 stations, (b) map showing sediment size distributions at the 135 stations, and (c) isopleths of the silt-clay fraction (%).

第1主成分の寄与率が高く、第1、第2主成分により全変動の81.4%が説明される。第1主成分の因子負荷量については泥分率、IL、COD、TOC、TN、TPおよびAVSが正の大きな値、ORPが負の大きな値を示した (Table 2)。したがって、第1主成分は底質の粒度組成および粒度組成と相関がある項目を反映している。第2主成分の因子負荷量については $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$ が正の大きな値を示した。

各地点の第1、第2主成分の主成分得点に基づくクラスター解析を行った。その結果、135地点は標準化ユークリッド平方距離7を基準として、A-Cの3グループに区分された (Fig. 4a)。A区は備讃瀬戸・備後灘・燧灘の大部分、

安芸灘北部、広島湾、伊予灘の一部および別府湾であり、B区は燧灘の島嶼周辺、安芸灘南部および伊予灘の大部分からなっていた (Fig. 4b)。C区は備後灘と燧灘に面した四国側沿岸部の伊予三島地先水域およびその西方の新居浜・西条地先の水域、伊予灘の中で伊予市・肱川河口地先水域および佐田岬半島・国東半島中間水域であった。C区内において、佐田岬半島・国東半島中間水域 (Stns 113, 121, 127) は海岸線より離れていた点で他の地点と異なったのでC2区とし、海岸線近くのC1区と区別した。

135地点の主成分得点を第1、第2主成分のバイプロットの中に配置すると、A区の地点は第1主成分が正、第2主

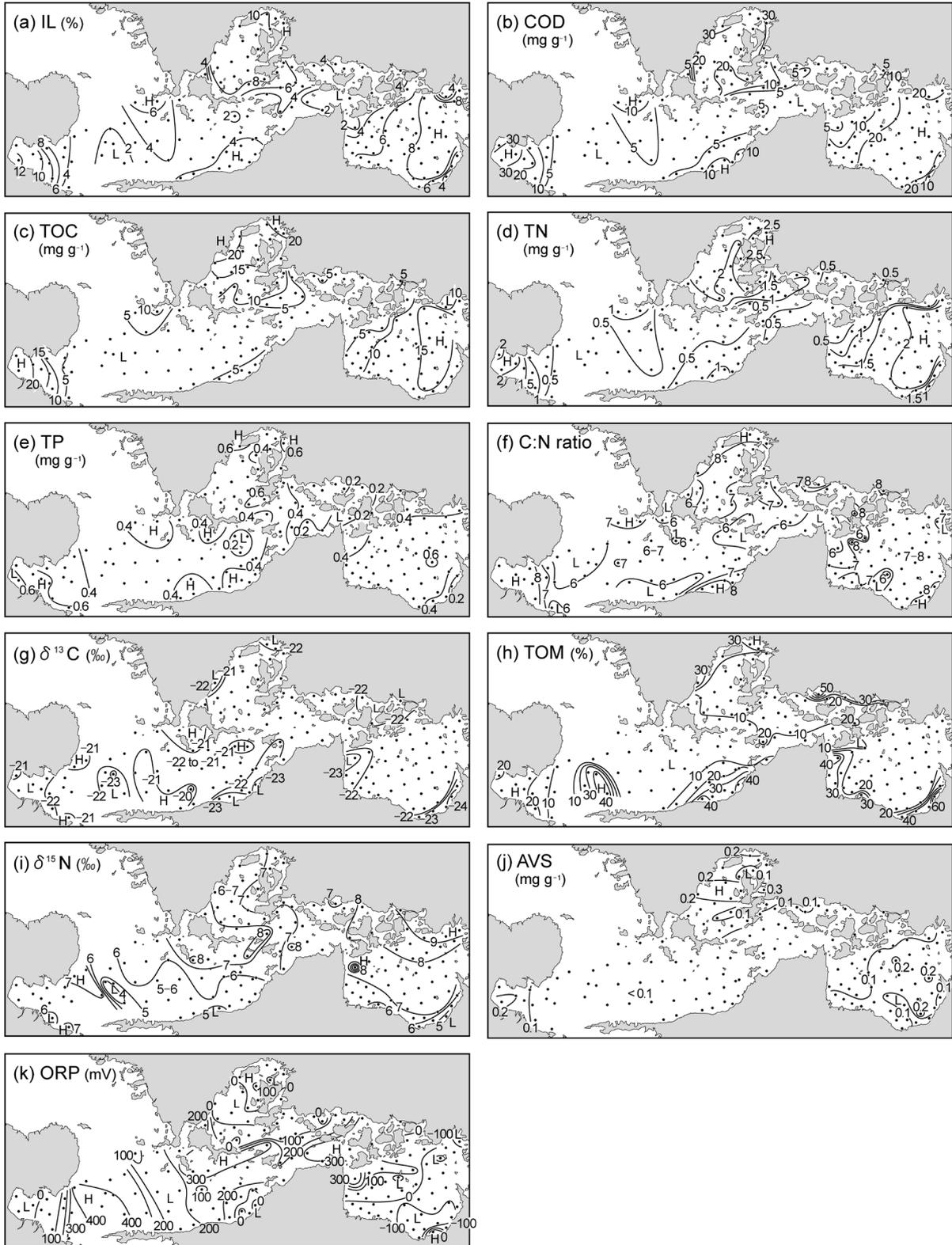


Figure 3. Isopleths of the 11 sediment parameters: ignition loss (a), chemical oxygen demand (b), total organic carbon (c), total nitrogen (d), total phosphorus (e), C:N ratio (f), stable carbon isotopic ratio (g), terrestrial organic matter ratio (h), stable nitrogen isotopic ratio (i), acid volatile sulfides (j), and oxygen-reduction potential (k) in the surface sediment.

Table 1. Correlation matrix of the sediment parameters.

	Silt+clay	IL	COD	TOC	TN	TP	C : N ratio	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$	AVS
IL	0.899**									
COD	0.908**	0.962**								
TOC	0.903**	0.961**	0.976**							
TN	0.930**	0.958**	0.974**	0.974**						
TP	0.763**	0.832**	0.769**	0.749**	0.773**					
C : N ratio	0.611**	0.634**	0.618**	0.697**	0.568**	0.424**				
$\delta^{13}\text{C}$	-0.143	0.004	-0.067	-0.123	-0.039	0.088	-0.422**			
$\delta^{15}\text{N}$	0.095	0.165	0.172	0.151	0.203	0.045	-0.146	0.381**		
AVS	0.811**	0.833**	0.888**	0.862**	0.858**	0.648**	0.532**	-0.079	0.188*	
ORP	-0.854**	-0.766**	-0.768**	-0.772**	-0.811**	-0.586**	-0.551**	0.161	-0.078	-0.687**

Silt+clay=silt and clay fraction, IL=ignition loss, COD=chemical oxygen demand, TOC=total organic carbon, TN=total nitrogen, TP=total phosphorus, AVS=acid volatile sulfides.

* $p < 0.05$, ** $p < 0.001$.

Table 2. Factor loadings on the correlation matrix of the 11 sediment parameters in the principal component analysis.

Parameter	PC1	PC2
Silt+clay	0.952	-0.034
IL	0.972	0.095
COD	0.977	0.062
TOC	0.979	-0.007
TN	0.976	0.103
TP	0.806	0.136
C : N ratio	0.683	-0.483
$\delta^{13}\text{C}$	-0.114	0.856
$\delta^{15}\text{N}$	0.140	0.759
AVS	0.886	0.071
ORP	-0.840	0.078

成分が0前後, B区の大多数の地点は第1主成分が負, 第2主成分が0前後, C区の地点は第2主成分が負となった (Fig. 5). C2区では, 第1主成分得点 (-1.6から-1.5) がC2区の第1主成分得点 (-0.7から0.7) と大きく異なった. つぎに, 各区における底質11項目およびTOM率の平均値と標準偏差 (Fig. 6) を示しつつ, それぞれの区の特徴を述べる.

A区: 本区は泥分率が $91.4 \pm 15.6\%$ (平均 \pm SD) と卓越する泥底であり, IL ($8.0 \pm 1.7\%$), COD ($21.8 \pm 7.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), TOC ($14.1 \pm 4.4 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), TN ($1.86 \pm 0.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) および TP ($0.53 \pm 0.08 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) で示されるように有機物量が他の区より有意に ($p < 0.05$, 以下同様) 多かった. ORPは $-9 \pm 77 \text{ mV}$ と低く, AVSも $0.13 \pm 0.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ と他区の値より有意に高く, やや還元的な環境となっていた. $\delta^{13}\text{C}$ は $-21.6 \pm 0.3\%$, $\delta^{15}\text{N}$ は $7.3 \pm 0.7\%$ といずれも高く, TOM率は $14.4 \pm 5.3\%$ と小さかった. C : N比は 7.5 ± 1.0 であり, B区およびC2区より有意に高かった.

B区: 泥分率は $15.5 \pm 12.3\%$ とA区およびC1区より有意に低く, 粒径区分ではsandy silt, silty sand, silty gravelly sand, sand, gravelly sandの範疇に入る. IL ($3.2 \pm 1.0\%$), COD ($3.8 \pm 1.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), TOC ($2.8 \pm 1.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), TN ($0.44 \pm 0.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) およびTP ($0.32 \pm 0.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) で示される有機物量はA区およびC1区より有意に少なかった. ORP ($241 \pm 105 \text{ mV}$) は全地点で正の値であり, AVS ($0.01 \pm 0.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) はほとんど認められなかった. $\delta^{13}\text{C}$ ($-21.4 \pm 0.7\%$), $\delta^{15}\text{N}$ ($7.0 \pm 1.1\%$) およびTOM率 ($11.9 \pm 10.7\%$) はいずれもA区とは有意の差がなく, C1区およびC2区とは有意に異なっていた. C : N比 (6.0 ± 1.1) はC2区とは有意の差がなかったが, A区およびC1区より有意に低かった.

C1区: 泥分率 $75.0 \pm 22.9\%$ が示すように, 地点により粒度組成が大きく変化し, silt+clayの地点が多いものの, sandy silt, sandy gravelly silt, silty sandといったやや粗い粒子の堆積物を含む地点があった. IL ($5.2 \pm 1.3\%$), COD ($13.4 \pm 4.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), TOC ($9.3 \pm 3.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), TN ($1.15 \pm 0.38 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) およびTP ($0.42 \pm 0.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) はA区について高い数値がみられた. ORP ($23 \pm 92 \text{ mV}$) は地点によるばらつきが大きかった (範囲: -110 から 206 mV) が, 概して低い値の地点が多かった. AVS ($0.08 \pm 0.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) はA区につき高かった. $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ はそれぞれ $-23.1 \pm 0.7\%$, $5.6 \pm 0.5\%$ を示し, A区およびB区より有意に低かった. TOM率 ($37.4 \pm 11.7\%$) はA区およびB区より有意に高かった. C : N比 (8.1 ± 0.9) はB区より有意に高かったが, A区とは有意差がなかった.

C2区: 泥分率の低い ($1.7 \pm 0.5\%$), sandの範疇に入る3地点より構成される. IL ($1.3 \pm 0.3\%$), COD ($0.3 \pm 0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), TOC ($0.3 \pm 0.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) およびTN ($0.05 \pm 0.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) はA区およびC1区より有意に少なかった. TP ($0.29 \pm 0.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) はA区より有意に少なかった. ORP ($417 \pm 10 \text{ mV}$) は4区中, 最大であり, AVS ($0.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) はほとんど認

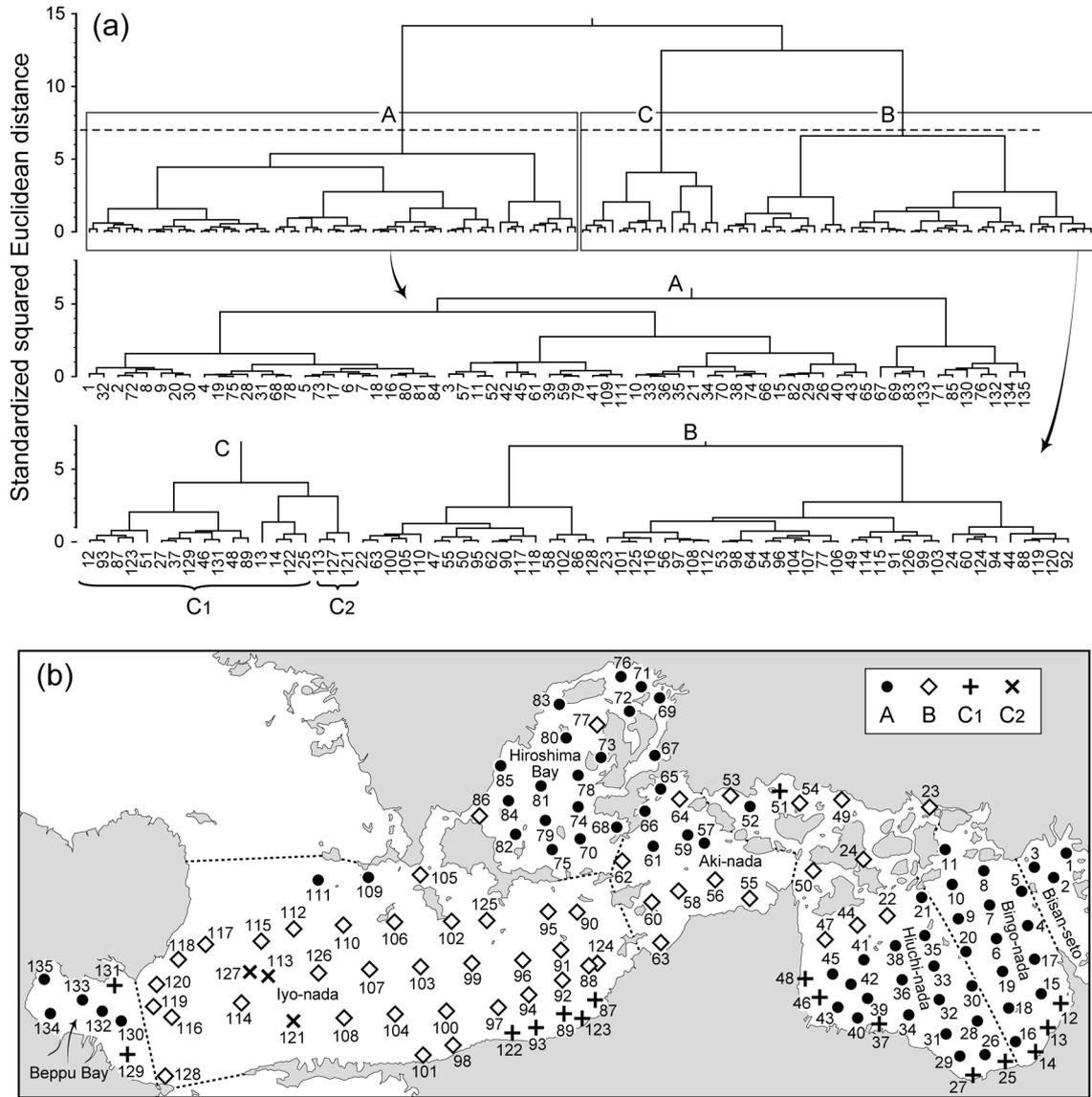


Figure 4. Principal component analysis (PCA) based on the 11 sediment parameters. (a) Dendrogram for cluster analysis based on the PC1 and PC2 scores of the 135 samples, showing zones A, B, C1 and C2. Ward's minimum variance method was used for clustering. (b) Distribution of the 135 stations which are classified into the four zones.

められなかった。 $\delta^{13}\text{C}$ ($-23.2 \pm 0.2\%$) は C1 区と有意差はなかったが、 $\delta^{15}\text{N}$ ($4.1 \pm 0.5\%$) および C:N 比 (5.4 ± 0.8) は C1 区よりさらに低く、両区間で有意差があった。

既往底質調査との比較

環境省により過去3回行われた瀬戸内海底質調査と今回の結果を比較した。A区には備讃瀬戸、備後灘、燧灘、安芸灘、広島湾および別府湾の地点が属していたが、備讃瀬戸、備後灘および燧灘の地点は近接していたため、3水域をまとめて扱い、他の各水域とともに、底質6項目について過去3回と今回の分析結果を時系列で示した (Fig. 7)。調査年代による有意差 (一元配置分散分析, $p < 0.05$) が認めら

れたのは、備讃瀬戸・備後灘・燧灘における IL, TP, ORP, 安芸灘における TP, 広島湾における IL, TOC, TN, AVS, ORP, 別府湾における IL, TN, TP, ORP であった。これらの分析項目の中で経年的な一定方向の減少傾向を示したのは広島湾における TOC および TN のみであった。この他、第1回調査 (1981–1987 年度) と今回の調査 (2016 年) 間で有意な減少傾向を示した有機物量に関する項目として備讃瀬戸・備後灘・燧灘と広島湾の IL, および安芸灘の TP があげられる。

B区には燧灘、安芸灘および伊予灘の地点が属していた。伊予灘における ORP は経年的な増加傾向があったが、

これを除くと、調査年代による有意差のある分析項目はなかった (Fig. 8).

C1区には備後灘・燧灘, 伊予灘の地点が属していた. 分散分析では備後灘・燧灘におけるORP, 伊予灘におけるTNに有意差が認められたが, 第1回調査と今回の調査間で有意差がある項目はなかった (Fig. 9).

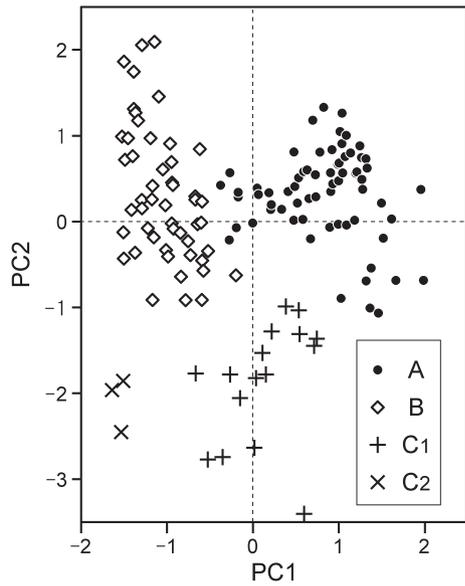


Figure 5. PC1 and PC2 scores of the 135 samples which are classified into the four zones (A, B, C1 and C2).

C2区には伊予灘の3地点が属していた. IL, TOCおよびORPにおいて, 4回の調査間で有意差があったが, 一定した経年的変化はなかった (Fig. 9).

考察

底質の場所的变化

本研究では, 瀬戸内海中西部の135地点から2016年7月に採集された表層堆積物 (0-5 cm) の11項目をもとに主成分分析を行い, 本調査域を4区 (A, B, C1, C2) に区分した. 瀬戸内海における堆積物の粒度組成は潮流に最も強い影響を受けており, おおよそ海峡部や瀬戸部で潮流が強く堆積物は粗粒となり, 灘部で潮流が弱く細粒となる (井内, 1982; 安田ほか, 1990). 星加 (2003) は, このような瀬戸内海における粒度組成の相違が潮流振幅の相違と対応し, $30-70 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ では sand が, $20 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下では silt+clay が卓越することを述べている. また, 一般的に, 堆積物中の有機物量や酸化還元状態は粒度組成に大きく支配される. 実際に, 閉鎖的地形で潮流が弱く, かつ人口密度が高い後背地を有するA区にあたる水域では, 中央粒径値が 6ϕ を超えて泥分率が高く, clayey silt か silty clay に分類され, 堆積物中の有機物量が多く, 還元的環境になりやすいこと, 一方, B区にあたる水域では中央粒径値が 4ϕ 以下, sand に分類される底質であり, 有機物量が少なく, 好気的環境が保たれていることが報告されている (山田, 1976; 塩沢ほか, 1979; 井内, 1982; 谷本ほか, 1984). これらより, 両区の区分は基本的に潮流の強さに基づいていると考

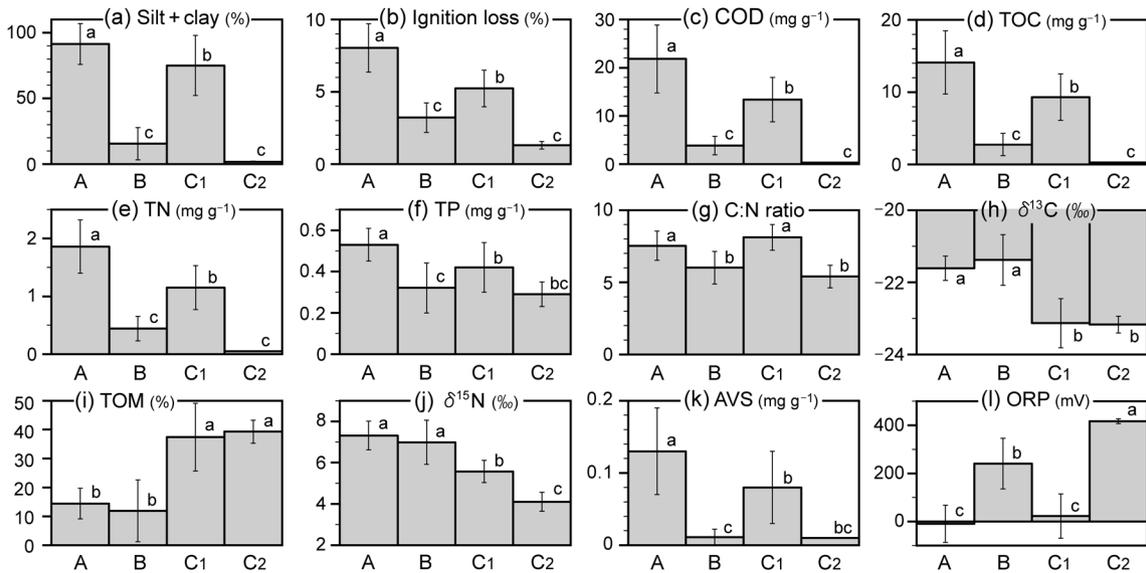


Figure 6. Comparison of sediment parameters including silt and clay fraction (a), ignition loss (b), chemical oxygen demand (c), total organic carbon (d), total nitrogen (e), total phosphorus (f), C : N ratio (g), stable carbon isotopic ratio (h), terrestrial organic matter ratio (i), stable nitrogen isotopic ratio (j), acid volatile sulfides (k) and oxygen-reduction potential (l) in the surface sediments among the four zones. Different letters denoted above bars indicate significant differences ($p < 0.05$) from the Tukey-Kramer test. Mean \pm SD values are shown.

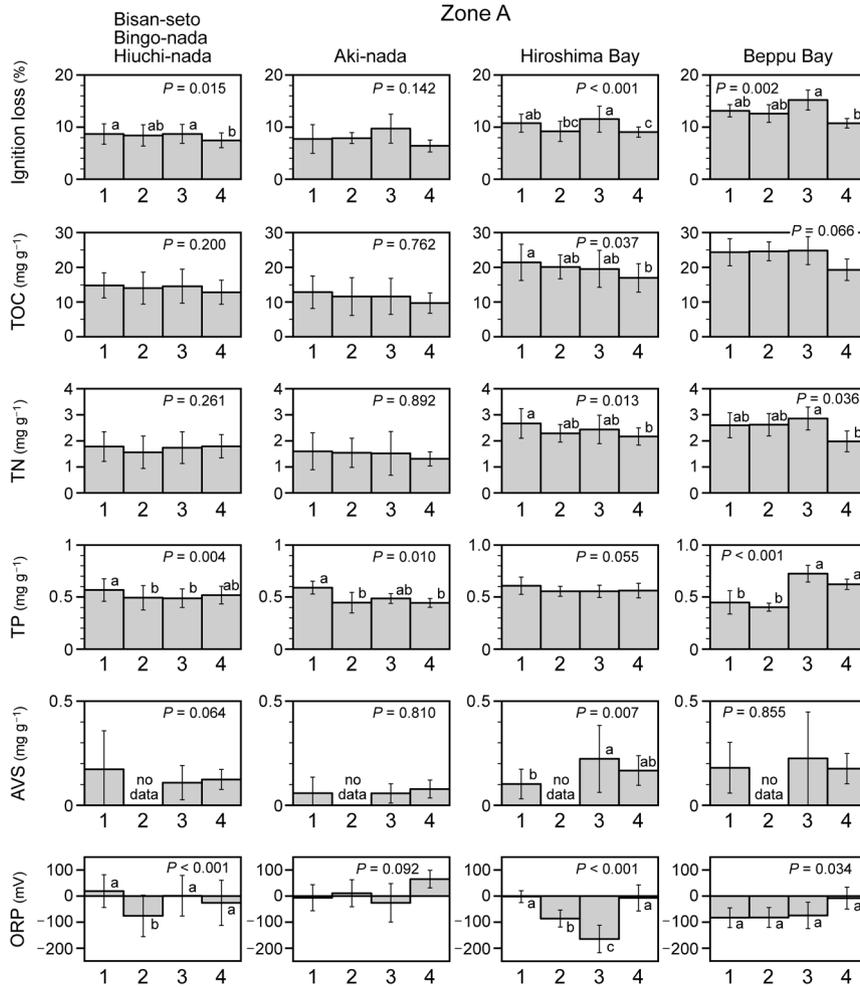


Figure 7. Comparison of the six sediment parameters (ignition loss, total organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, acid volatile sulfides and oxygen-reduction potential) in each area in zone A among four surveys (1=a first survey conducted during a period from 1981 to 1987, 2=a second survey conducted during a period from 1991 to 1996, 3=a third survey conducted during a period from 2001 to 2005, 4=a fourth survey conducted in 2016), conducted by Ministry of the Environment, Japan. Bars and vertical lines indicate mean and SD values. *P* values calculated from the one-way ANOVA are shown. Different letters denoted above bars indicate significant differences ($p < 0.05$) from the Tukey–Kramer test.

えられる。

本研究により、低い $\delta^{13}\text{C}$ 値で特徴づけられるC (C1, C2) 区が存在が明らかになった。C1区の地点は海岸より数km以内に位置しており、IL, COD, TOCおよびTNで示される有機物量が比較的多く、C:N比の平均が8.1と高かった。これらの特徴は堆積物中に陸起源有機物 (TOM) が多く含まれていることを支持している。現に、 $\delta^{13}\text{C}$ をもとにC1区におけるTOM率を計算すると、平均37%に達した。C1区はおもに伊予三島地先水域、新居浜・西条地先水域および伊予市～肱川河口地先水域からなるが、このうち後2者の水域では中小河川 (加茂川, 中山川, 重信川, 肱川) が水域に流入し、TOMの影響を直接、受けると考えられるのに対し、伊予三島周辺には河川の流入がほとんど

とみられない。伊予三島周辺地域 (四国中央市) では製紙業が盛んで多くの製紙工場があり、その製品出荷額は全国1位である (<https://www.city.shikokuchuo.ehime.jp/kankyomachizukuri/sangyousyougyo/kigyomuke/ranking.html>, 2018年6月11日)。製紙工場排水中の溶存態、粒状有機物の $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ は原料となる木材の影響を受けて低い (それぞれ、 -29.2 から -25.9% , -0.1 から 6.29% : Oakes et al., 2010) ことから、この水域におけるSOMの起源として製紙工場排水中の有機物が考えられる。

海岸から離れたC2区の粒径区分はsandであり、堆積物中の有機物量が少ない点でC1区とは異なっていた。C2区ではTOM率が平均39%と計算されたものの、C:N比が5.4と低く、地点が海岸より約10 km以上離れていたことか

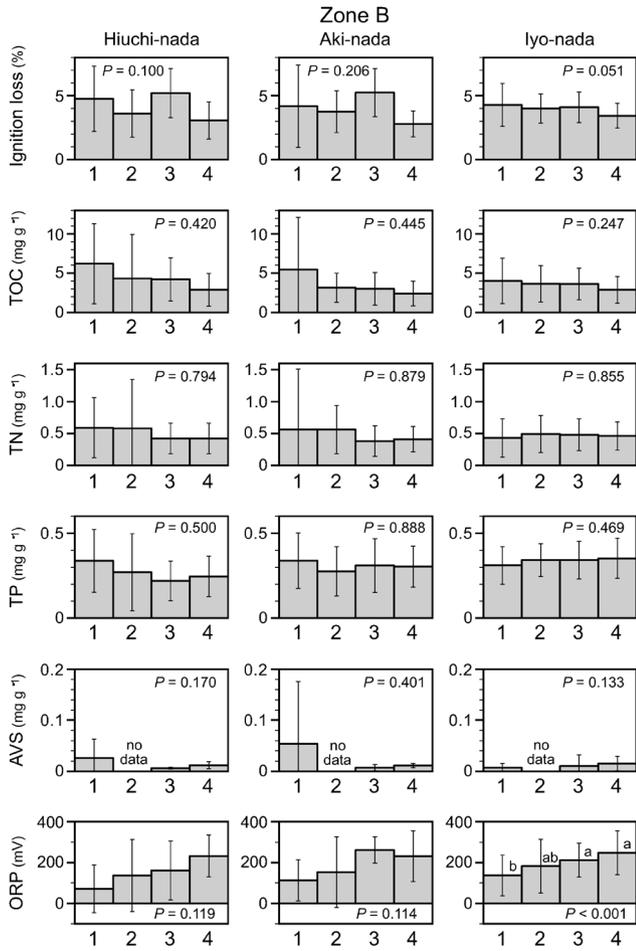


Figure 8. Comparison of the six sediment parameters in each area in zone B among the four surveys. See the caption of Fig. 7 for a detailed explanation.

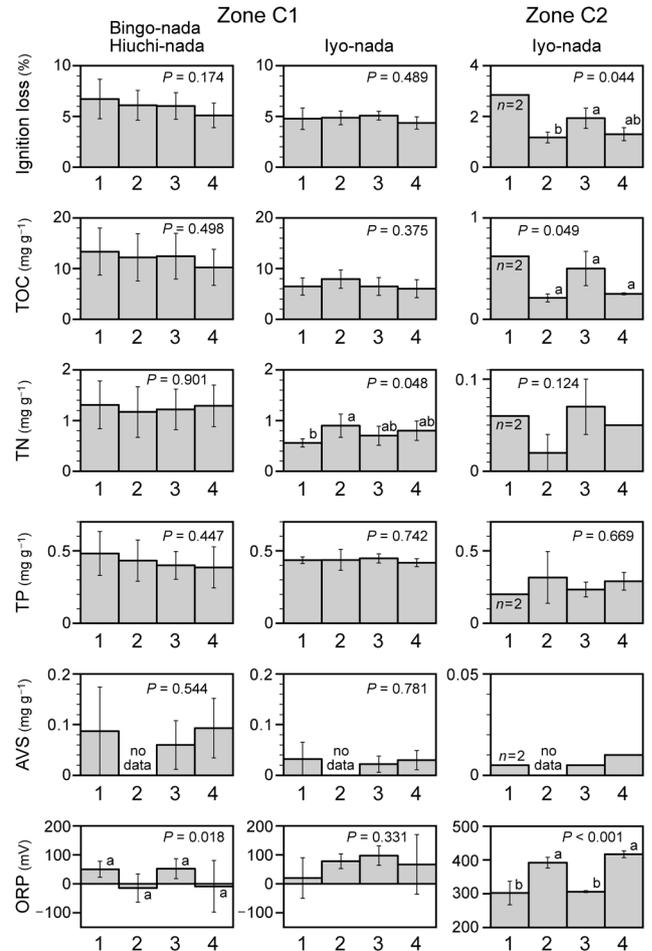


Figure 9. Comparison of the six sediment parameters in each area in zones C1 and C2 among the four surveys. See the caption of Fig. 7 for a detailed explanation.

ら、流域から流れ込んだTOMが大量に蓄積しているとは考えにくい。Ogawa and Ogura (1997) は東京湾をモデルに、富栄養内湾域から外洋に向けて、懸濁物の $\delta^{13}\text{C}$ 値は -19.7% から -20.5% へと若干低下し、堆積物では -21.6% から -22.8% へと大きく低下することを指摘した。豊後水道に接しているC2区において堆積物の $\delta^{13}\text{C}$ が低い値を示したのは、TOMの影響ではなく、外洋性の有機物の影響による可能性が高い。

$\delta^{13}\text{C}$ を基に計算した、C2区の3地点を除く132地点におけるTOM率平均は18%であった。この値はMishima et al. (1999) が大阪湾の値として示した21%よりやや低い。しかし、大阪湾に流入する陸水の流入量が瀬戸内海の全流入量の37%を占め、卓越していること(山本ほか, 1996)を考えると、瀬戸内海全域での平均値18%は妥当な数値であろう。したがって、残り82%が海洋起源となり、瀬戸内海の大部分の水域では、水中の栄養塩類を取り込んだ海洋植物プランクトンの沈降物がSOMの起源になってい

ると推察される。

一方、SOMの $\delta^{15}\text{N}$ は広島県福山沖で約9%と高く、南西に向かって低下し、伊予灘で5–6%となる傾向を示した(Fig. 3i)。この傾向は、本調査水域全域において海洋起源有機物の貢献度が高かったことから、海洋植物プランクトンおよびその基質となる水中の NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ を反映していると考えられる。たとえば、駒井ほか(2015)は備讃瀬戸の東方で隣接する播磨灘において採取された堆積物コア試料を分析し、1954年以降、植物プランクトンの増殖が高まったことが堆積物中有機物の $\delta^{15}\text{N}$ 上昇をもたらしたと推論している。他方、海水中 NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる原因として、流入する陸水の NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ 値が主として人間活動の影響を受けて高いことと、底層の貧酸素化による脱窒の発生が考えられる。山本ほか(1996)は瀬戸内海における淡水と窒素の流入量を算定し、大阪湾への淡水流入量が全体の37%を占めて卓越しているが、備讃瀬戸への単位体積あたりの淡水流入量は大阪湾への $0.33 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ を凌

ぐ $0.46 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ であり、瀬戸内海の水域内で最大であることを示した。また、窒素負荷量に関しては、大阪湾への流入量が全体の62%を占め、備讃瀬戸への単位体積あたり流入量は $0.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ と、 $1.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ を示した大阪湾に次ぐ2位であった。このように、瀬戸内海では東部水域への陸からの窒素の負荷が多いのに対し、安芸灘以西水域への負荷は全域の17%を占めるに過ぎない。このような窒素負荷量についての東西傾度がある中で、中部の備讃瀬戸の狭い水域に陸域から $\delta^{15}\text{N}$ が高い NO_3^- の集中的な流入を受けて、備讃瀬戸および備後灘北部海水中の NO_3^- の $\delta^{15}\text{N}$ が高くなり、この NO_3^- を同化した植物プランクトン、ひいては植物プランクトンが沈降し形成された堆積物の $\delta^{15}\text{N}$ が上昇したと推察される。SOMと同様の傾向は、海藻およびカキにもみられ、小林・藤原 (2015) はアオサ類 *Ulva* spp. と養殖ノリ (スサビノリ *Porphyra yezoensis*) の $\delta^{15}\text{N}$ は瀬戸内海中東部で9–12%と高く、外海に近い紀伊水道・豊後水道では約6%に低下したことを、また、マガキ *Crassostrea gigas* の $\delta^{15}\text{N}$ は、その場所の海藻の $\delta^{15}\text{N}$ に約3%加えた値となっていたことを指摘した。このように、瀬戸内海においてみられる $\delta^{15}\text{N}$ の傾度は、植物プランクトンだけでなく海藻など他の一次生産者および消費者に至る生態系全体に及んでいると考えられる。

橋本ほか (1997) は、瀬戸内海の一次生産力を水域別に比較し、周年にわたって成層が形成され、陸域からの大量の栄養塩供給によって一次生産が高く維持されていた広島湾北部において年間平均一次生産量がもっとも大きく ($1,013 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、周年にわたり鉛直混合が卓越しており、光不足により一次生産が制限されている備讃瀬戸 ($323 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)、安芸灘 ($335 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) では年間一次生産量が少なく、混合卓越域の燧灘 ($570 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) と伊予灘 ($560 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) では中間的な一次生産量であることを指摘した。このような一次生産力の水平分布とSOMの分布はおおむね合致するが、合致しない点もある。たとえば、これらの水域の中で堆積物中の有機物がもっとも多い水域は、広島湾、備讃瀬戸であり、もっとも少ない水域は伊予灘であった。備讃瀬戸で有機物量が多かったのは、瀬戸西端の3調査地点では潮流が緩やかで細粒の堆積物であったこと、伊予灘で有機物量が少なかったのは豊後水道に近く、流れが大きく粗い粒子が堆積していたことによるとみられる。このように水柱の一次生産量と堆積物の有機物量の分布が一致しないことから、堆積物の有機物量は水柱の一次生産量以外に流れの強さにより強く影響されていると推測される。

底質の経年変化

環境省による底質調査の主目的は、1980年代以降、瀬戸内海全域にわたり多くの採集地点を設け、ほぼ10年間隔でほぼ同一の地点、方法で多数の測定項目を測定することにより、底質環境の変化を把握し、過去に実施してきた瀬戸内

海における環境保全施策の効果を検証することにある (瀬戸内海環境保全協会: <https://www.seto.or.jp/research>, 2018年3月27日)。同省のこれまでの瀬戸内海全域底質調査では各灘・瀬戸・湾を単位として経年変化が評価されてきた (瀬戸内海環境保全協会, 2017)。本研究では陸起源有機物・栄養塩類の影響を反映する $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ の分析を加えることにより、地理的な区域と底質環境に基づく区分が可能となった。瀬戸内海における堆積物の平均堆積速度は $0.26\text{--}2.11 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ の範囲にあるが、 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 前後を示す地点が多く (永淵ほか, 1998)、採取された0–5 cm層の堆積物は各調査間の10年間に堆積した粒子より構成されていると考えられる。

永淵ほか (1998) は、環境省による第1回と第2回の調査結果を比較し、この約10年間では瀬戸内海全体をみて大きな変化はないことを述べている。一方、駒井 (2008) は、第1–3回調査の結果をまとめ、(1) 1980年代前半から約20年間の瀬戸内海全体をみると、堆積物中の有機物量は減少傾向にあること、(2) 堆積物粒子の比重、含水率より求めたTOC、TN、TPの堆積量は備後灘、燧灘、広島湾で減少したが、とくに広島湾での減少傾向が顕著であること、を指摘した。また、辻野 (2018) は、2011–2014年に瀬戸内海全域でマクロベントス調査を行い、広島湾湾奥部では1998年の調査結果と比べ、マクロベントス生産量が $2.45 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ から $0.55 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ に減少したことを見出した。環境省の水環境総合情報サイト (<https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/mizu/download/download.asp>, 2018年6月14日) より1978–2015年間の上下層を平均したTN濃度を本調査で対照とした6水域別 (備讃瀬戸、備後灘、燧灘、安芸灘、広島湾および別府湾を含む伊予灘、水域の区分は「広域総合水質調査」に準ずる) にみると、いずれの水域においても、1990年以降、減少傾向を示している (Fig. 10)。TNが最大となった1988–1992年の5年間の測定値の平均と2011–2015年の平均値を比較すると、いずれも水域も正の減少率がみられたが、広島湾では37%ととくに高く、伊予灘の32%がこれに次いだ (Table 3)。広島湾におけるSOMの減少傾向は海水中のTNの傾向を反映している一方、水の流れが速い伊予灘ではTNの減少が堆積物に反映されなかったと考えられる。

本研究では第3回までの調査に第4回調査の結果を加え、A–C2区と灘・瀬戸・湾を合わせて各水域ごとに経時的な底質の変化を検討した。この結果、広島湾のA区におけるTOCとTNの減少傾向以外、統計的な有意性をもって明瞭な一定の傾向を見出せなかった。このように、経年変化が明瞭な項目、水域は限られており、酸化還元状態を示すAVSに関しても、底質改善を示す証拠を見いだすことはできなかった。山本ほか (1999) は1993–1994年に瀬戸内海全域の底質調査を行い、1971–1972年に行われた調査 (山田, 1976) および1979–1985年調査 (谷本ほか, 1984; 瀬

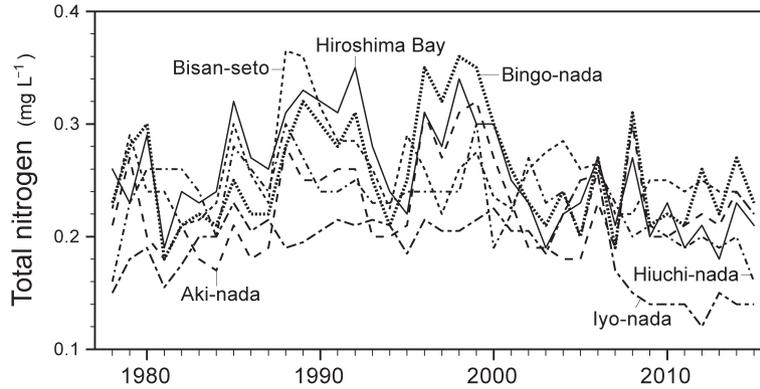


Figure 10. Annual fluctuation in the concentration of total nitrogen in the water column in six areas of the Seto Inland Sea during the period between 1978 and 2015. Data were obtained by Ministry of the Environment, Japan (see URL shown in the text).

Table 3. Comparison of average values of total nitrogen concentrations in the water column in six areas of the Seto Inland Sea between 1988–1992 and 2011–2015 and the percentage decrease found during the two periods. Annual fluctuations in total nitrogen were shown in Fig. 10.

Area	Total nitrogen ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)		Percentage decrease
	1988–1992	2011–2015	
Bisan-seto	0.32	0.24	26
Bingo-nada	0.30	0.24	20
Hiuchi-nada	0.26	0.19	28
Aki-nada	0.26	0.22	15
Hiroshima Bay	0.32	0.20	37
Iyo-nada	0.20	0.14	32

戸内海環境保全協会, 1988)と比較した。彼らは, 1971–1972年調査時に比べてILで1–2%, AVSは広島湾を除いて $0.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 程度の減少を認めたと, 1979–85年調査時との明瞭な変化を見いだせなかった。一方, 瀬戸内海における海水中の栄養塩類濃度については, 1980年代より2000年代前半までほぼ横ばいで推移しているという報告(樽谷, 2007; 駒井, 2008)があるが, 2010年前後までの観測結果を加えた報告(多田ほか, 2010; 反田ほか, 2014)では明確な低下傾向が指摘されている。このように水質と底質間で経年的変化に差があるのは, 瀬戸内海の海水は約0.5年で交換する(藤原・肥後, 1987)のに対し, 堆積物中の有機物は難分解性の有機物が多く, かつ, 堆積物中ではごく表層を除いて酸素供給が制限されるため, 速度の遅い嫌氣的分解が卓越するためであろう。堆積物中の有機物はバクテリアの分解を受けて無機化し, 溶存物質として間隙水中に濃縮され, 底泥直上水との濃度勾配にしたがって水中へ拡散する(山本ほか, 1998)が, 2016年に至っても底質に大きな変化がなかったことは, 拡散速度が遅いこと, お

よび堆積物は有機物や栄養塩類の大きな蓄積場となっていることを示唆している。

今回の調査結果を加えた過去約30年間のモニタリングでは一部の海域, 項目を除き明瞭な底質の変化はみられなかったが, この傾向が今後も続くかは不明である。瀬戸内海の環境を把握, 評価し適切に管理するには水質と底質および生物を対象とした生態系のモニタリング調査が不可欠であることに変わりなく, 同一地点, 同一方法による調査を継続する努力が必要である。他方, 本研究により底質調査の項目として $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ を加えることの重要性が示された。調査方法の継続性ととも, 必要に応じて新しい手法を加えることも必要である。

謝 辞

本研究は環境省による瀬戸内海底質調査の中で採集されたサンプルの譲渡により成立した。サンプルを譲渡し, 第1–3回調査の原データを提供くださった環境省にお礼を申し上げる。安定同位体比測定には京都大学生態学研究センターの共同利用施設(安定同位体質量分析計)を使用した。生態学研究センターおよび分析費を拠出してくださった日本財団にお礼を申し上げる。

引用文献

- Buchanan, J. B. (1984) Sediment analysis. In: Methods for the study of marine benthos, ed. N. A. Holme & A. D. McIntyre, Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 41–65.
- Fry, B. and E. B. Sherr (1984) $\delta^{13}\text{C}$ measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. *Contrib. Mar. Sci.*, **27**, 13–47.
- 藤原建紀・肥後竹彦 (1987) 瀬戸内海の海水交換時間の基本特性. 沿岸海洋研究ノート, **25**, 67–73.
- 藤原建紀・小林志保・國井麻妃・宇野奈津子 (2006) 瀬戸内海に存在するリン・窒素量の経年変動. 沿岸海洋研究, **43**, 129–136.
- 橋本俊也・山本民次・多田邦尚・松田 治・永末寿宏 (1997) 瀬戸内海の一次生産と海洋構造. 沿岸海洋研究, **35**, 109–114.
- 星加 章 (2003) 陸域・流域を意識した瀬戸内海の環境. 陸水学雑

- 誌, **64**, 219–224.
- Imai, I., M. Yamaguchi and Y. Hori (2006) Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan. *Plankton Benthos Res.*, **1**, 71–84.
- 井内美郎 (1982) 瀬戸内海における表層堆積物分布. *地質学雑誌*, **88**, 665–681.
- 環境省水・大気環境局 (2012) 「底質調査方法」環境省, 東京.
- 小林志保・藤原建紀 (2015) 安定同位体比を用いたノリ漁場への窒素供給源の推定. *海洋と生物*, **37**, 269–273.
- 駒井幸雄 (2008) 第5章 瀬戸内海の底質・ベントスの変化. 「瀬戸内海の海底環境」柳 哲雄編, 恒星社厚生閣, 東京, 43–60.
- 駒井幸雄・米林甲陽・勝見尚也・入月俊明・辻本 彰・岡崎正規 (2015) 炭素・窒素安定同位体比とメイオベントス相から見た瀬戸内海の底質環境の変遷. *水環境学会誌*, **38**, 39–47.
- 松岡 聡・吉松定昭・小野 哲・一見和彦・藤原宗弘・本田恵二・多田邦尚 (2005) 備讃瀬戸東部 (香川県沿岸) におけるノリ色落ちと水質環境. *沿岸海洋研究*, **43**, 77–84.
- Mishima, Y., A. Hoshika and T. Tanimoto (1999) Deposition rates of terrestrial and marine organic carbon in the Osaka Bay, Seto Inland Sea, Japan, determined using carbon and nitrogen stable isotope ratios in the sediment. *J. Oceanogr.*, **55**, 1–11.
- 永淵 修・東 義仁・清木 徹・駒井幸雄・村上和仁・小山武信 (1998) 最近10年間における瀬戸内海底質の変動評価. *水環境学会誌*, **21**, 797–804.
- Oakes, J. M., B. D. Eyre, D. J. Ross and S. D. Turner (2010) Stable isotopes trace estuarine transformations of carbon and nitrogen from primary- and secondary-treated paper and pulp mill effluent. *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 7411–7417.
- Ogawa, N. and N. Ogura (1997) Dynamics of Particulate Organic Matter in the Tamagawa Estuary and Inner Tokyo Bay. *Est. Coast. Shelf Sci.*, **44**, 263–273.
- Seiki, T., H. Izawa and E. Date (1989) Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay. *Water Res.*, **23**, 219–228.
- 瀬戸内海環境保全協会 (1988) 瀬戸内海の環境—瀬戸内海環境情報基本図一. 瀬戸内海環境保全協会, 神戸.
- 瀬戸内海環境保全協会 (2017) 瀬戸内海の環境保全—資料集一. 瀬戸内海環境保全協会, 神戸.
- 塩沢孝之・川名吉一郎・星加 彰・谷本照己・滝村 修 (1979) 瀬戸内海の底質. *中工試報*, **4**, 1–24.
- 多田邦尚・藤原宗弘・本城凡夫 (2010) 瀬戸内海の水質環境とノリ養殖. *分析化学*, **59**, 945–955.
- 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 (2014) 瀬戸内海の栄養塩環境と漁業. *水産技術*, **7**, 37–46.
- 谷本照己・川名吉一郎・山岡到保 (1984) 瀬戸内海における底質の粒度組成と有機物. *中国工業技術試験所報告*, **21**, 1–11.
- 樽谷賢治 (2007) 瀬戸内海の環境の30年間の変化—水産の環境モニタリング“浅海定線観測調査”のとりまとめ一. *日本ベントス学会誌*, **62**, 52–56.
- Tsugeki, N. K., M. Kuwae, Y. Tani, X. Guo, K. Omori and H. Takeoka (2017) Temporal variations in phytoplankton biomass over the past 150 years in the western Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.*, **73**, 309–320.
- 辻野 陸 (2018) 瀬戸内海におけるマクロベントスの現存量と生産量. *日本水産学会誌*, **84**, 211–220.
- 山田 久 (1976) 第6節 底質. 「瀬戸内海の海域生態と漁場」村上彰男編, フジ・テクノシステム, 東京, 90–100.
- Yamamoto, T. (2003) The Seto Inland Sea—eutrophic or oligotrophic? *Mar. Pollut. Bull.*, **47**, 37–42.
- 山本民次 (2014) 瀬戸内海の貧栄養化について (再考). *日本マリンエンジニアリング学会誌*, **49**, 71–76.
- 山本民次・北村智顕・松田 治 (1996) 瀬戸内海に対する河川流入による淡水, 全窒素および全リンの負荷. *広島大学生物生産学部紀要*, **35**, 81–104.
- Yamamoto, T., A. Kubo, T. Hashimoto and Y. Nishii (2004) Long-term changes in net ecosystem metabolism and net denitrification in the Ohta River Estuary of northern Hiroshima Bay—an analysis based on the phosphorus and nitrogen budgets. In: *Progress in aquatic ecosystem research*, ed. A. R. Burk, Nova Science Publishers, New York, pp. 123–143.
- 山本民次・松田 治・橋本俊也・妹背秀和 (1999) 瀬戸内海表層底泥に見られる強熱減量, 酸化還元電位および酸揮発性硫化物濃度の関係. *沿岸海洋研究*, **36**, 171–176.
- 山本民次・松田 治・橋本俊也・妹背秀和・北村智顕 (1998) 瀬戸内海海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量の見積もり. *海の研究*, **7**, 151–158.
- 安田秀一・肥後竹彦・谷本照己 (1990) 地球時自転効果による底層流と瀬戸内海の底質分布. *海岸工学論文集*, **37**, 200–204.
- 横山 寿・佐野雅基 (2015) 大阪湾, 2013年の底層環境—主成分分析による水域区分と既往調査との比較一. *日本水産学会誌*, **81**, 674–683.