

## [資 料]

## 2010 年代の観測データを用いた播磨灘の栄養塩類の空間解析

古賀 佑太郎<sup>1</sup> 鈴木 元治<sup>1</sup> 宮崎 一<sup>1</sup> 松村 千里<sup>1</sup><sup>1</sup> 兵庫県環境研究センター 水環境科 (〒654-0037 神戸市須磨区行平町 3-1-18)Spatial analysis of nutrients in Harima Nada  
using observed data from 2010sYutaro KOGA<sup>1</sup>, Motoharu, SUZUKI<sup>1</sup>, Hajime MIYAZAKI<sup>1</sup> and Chisato MATSUMURA<sup>1</sup><sup>1</sup> Water Environment Division, Hyogo Prefectural Institute of Environmental Sciences,  
3-1-18, Yukihiro-cho, Suma-ku, Kobe, Hyogo 654-0037, Japan

播磨灘は、豊かで美しい里海の再生のために栄養塩類の管理方法が検討されている。そこで、本研究では直近の 2010 年代の播磨灘の公開観測データを解析することにより、播磨灘の栄養塩類の空間分布を確認し、栄養塩類の管理方法のための情報収集を目的とした。その結果、沿岸域の表層水は、沖合よりも高濃度の TN 及び TP と低濃度の栄養塩 (DIN 及び DIP) がみられた。これは、Chl.a 濃度分布から植物プランクトンの栄養塩摂取による結果と考えられた。底層水の栄養塩濃度は水深と高い相関がみられた。播磨灘北東部では、明石海峡での鉛直混合の影響と考えられる濃度分布がみられた。

## I はじめに

瀬戸内海は、高度経済成長期に赤潮などの被害が頻発し、「瀕死の海」と呼ばれていた。これは、栄養塩類 (窒素・りん等) が過剰に増加し、富栄養状態であったことが原因であった。そこで国及び沿岸自治体では、水質汚濁防止法や瀬戸内海環境保全特別措置法 (以下、瀬戸法) 等により規制や対策を実施した。その結果、瀬戸内海の栄養塩類濃度は低下し、赤潮の被害は減少した。一方で、瀬戸内海東部に位置する播磨灘等では、栄養塩類濃度が低下したことにより、ノリの色落ちが発生している他、漁獲量の減少も報告されている<sup>1-4)</sup>。このため、2015年に瀬戸法が改正され、瀬戸内海を「豊かな海」とする旨が明確化され、2021年には関係府県知事が栄養塩類の管理に関する計画を策定できる「栄養塩類管理制度」が導入された。また、瀬戸内海東部に面する兵庫県では、2019年に全国で初めて海域の栄養塩 (全窒素・全りん)

濃度の下限値 (全窒素0.2 mg/L・全りん0.02 mg/L) を条例で設定した。このような背景から、現在の瀬戸内海は栄養塩類濃度を適切に管理することが求められており、多くの数値シミュレーションモデルにより管理方法が検討されている。しかし、瀬戸内海においても、大阪湾の一部では依然として富栄養化が認められる等、海域により水質・生態系の性質が異なる。このため、数値シミュレーションモデルに適用するインプットデータは、計算対象海域の実態に対応した数値を使用する必要がある。しかし、実測値の不足や、栄養塩類の分布状況が十分に把握できていないことにより、数値シミュレーションの結果の精度に課題が生じている<sup>5)</sup>。そこで本研究では、数値シミュレーションモデルの精度向上に有用な情報を集積するため、播磨灘について、公開されている直近の観測データを用いて、栄養塩類等が空間的にどのように分布しているのかを解析した。

## II 方法

## III 結果

解析に使用した測定データは、環境省により瀬戸内海広域総合水質調査で実施された結果を、同省の水環境総合情報サイト<sup>6)</sup>より入手した。解析項目は、全窒素(TN)、溶存性無機態窒素(DIN)、全りん(TP)、溶存性無機態りん(DIP)、クロロフィルa(Chl-a)の各濃度、及び水温とした。なお、DINはアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、及び硝酸態窒素の合計値、DIPはりん酸態りんの値とした。分析方法は、TN、DIN内の各項目、TP及びDIPはJIS(日本産業規格)K0102に定める方法、Chl-aは海洋観測指針に準じた方法、水温は棒状温度計または電気温度計による方法で実施されている。

解析対象年度は、窒素濃度が低下して横ばいに推移し始めた直近の10年間である2010年~2019年とした。各年の調査頻度は、一部欠測を除き1月、5月、7月、及び10月の計4回である。本報では、年間の平均的な海域の水質を計算する数値シミュレーションモデルのためのデータ解析を想定する。そのため、季節変動については解析せずに、全期間の平均値を解析対象とした。

解析対象地点は、Fig.1に示すとおり、播磨灘海域のうち兵庫県が実施している8地点とした。各地点は兵庫県沿岸域に近い方から地点1~6とし、明石海峡の近傍を地点7及び8とした。

水平・鉛直方向の空間分布を把握するために、以下の2種の方法で解析した。

方法1;各地点の表層水(水深0.5 m)及び底層水(海底から1.0 m上層)の地点ごとの各水質の10年間平均値を求め、水平方向と鉛直方向の違いを解析した。

方法2;地点ごとの表層水と底層水の各水質の有意差の有無についてt検定により解析した。



Fig.1 Location of sampling stations(1-8).

## 3.1 水平方向の分布(方法1)

各地点における表層水及び底層水の各水質平均値をFig.2に示す。図中には参考として水深も示す。

TN濃度(Fig.2(a))について示す。表層水のTN濃度をみると、最も陸に近い地点1で0.22 mg/Lと最も高く、次に地点2, 4, 7, 及び8が0.17 mg/Lであり、地点3, 5, 及び6が0.15 mg/Lと最も低くなっていた。陸に近いほど濃度が高い傾向にあったことから、地点1の最寄りの陸域に位置する姫路市(人口約54万人の都市)と姫路市を流れる市川(2級河川)からのTN負荷の影響を受けているものと推測される。地点3は、地点4及び8に比べて陸に近いものの、TN濃度は低かった。これは、地点3の最寄りの陸域には、窒素の高濃度負荷源がほとんど存在しないこと、及び播磨灘の北部が平均して時計回り(地点1→8→7→4)の潮流であり<sup>6)</sup>、陸に近い地点1及び明石海峡を通過した比較的高濃度の海水が地点7, 8, 及び4に到達していることが影響していると考えられる。底層水については、表層水と同様に、地点1が0.20 mg/Lと最も高かった。地点1は水深が浅く、陸から流入したTN負荷が底層まで影響していると考えられる。その他の地点は0.17~0.18とほぼ差はみられなかった。

DIN濃度(Fig.2(b))について示す。表層水のDIN濃度をみると、陸に近い地点1, 2, 及び3で0.028~0.034 mg/Lで比較的低かった。これはChl-a濃度をみると同地点で2.1~7.0 µg/Lと高く、このことから植物プランクトンによりDINが消費されていると考えられる。一方で、地点4, 7, 及び8のDIN濃度が0.042~0.047 mg/Lと比較的高かった。これは、上述したように、播磨灘北部の時計回りの潮流が影響していると考えられる。

TP濃度(Fig.2(c))について示す。表層水のTP濃度をみると、TN濃度同様に、陸からのTP負荷の影響を受けて地点1が0.028 mg/Lと最も高かった。地点ごとのTN濃度とTP濃度の相関を確認すると決定係数( $R^2$ ) = 0.91であり、他の地点も含めて、TN濃度と同様の傾向を示した。底層水についても、TN濃度と同様に地点1が0.030 mg/Lと高かった。一方で、地点ごとのTN濃度とTP濃度の相関を確認すると $R^2$  = 0.28であり、表層水でみられたようなTN濃度との相関はみられなかった。これは、粒状態のりんは窒素に比べて沈降速度が速い<sup>7)</sup>ことが影響していると考えられる。

DIP濃度(Fig.2(d))について示す. 表層水のDIP濃度をみると, 陸に近い地点1及び3で0.0071~0.0075 mg/Lと比較的低かった. この傾向はDINと同様であり, 植物プランクトンによる消費が考えられる.

Chl-a濃度(Fig.2(e))について示す. 表層水及び底層水のChl-a濃度をみると, 陸に近い地点で高く, 沖に向かうにつれ低くなる傾向がみられた. Chl-aは植物プランクトンの量を示す指標であり, そのため栄養塩類が多いほど多くなると考えられる. しかし, 地点ごとのChl-a濃度とDIN濃度, 及びDIP濃度の相関を確認すると, 表層水でそれぞれ $R^2 = 0.16$ 及び $R^2 = 0.51$ , 底層水でそれぞれ $R^2 = 0.56$ 及び $R^2 = 0.40$ であり, 相関の強さに違いがみられた. Chl-aは, 水温, 光環境, 細胞の浮上・沈降作用, 流動環境など多くの要因が複雑に影響しているためと考えられる<sup>8,9)</sup>.

### 3.2 鉛直方向の分布(方法2)

次に, Table 1に各地点における各水質の表層水及び底層水の $t$ 検定による $p$ 値を示す.

比較的有意差がみられたDIN及びDIP濃度について示す. 水深と底層水のDIN濃度及びDIP濃度の相関を確認すると, それぞれ $R^2 = 0.86$ 及び $R^2 = 0.79$ であった. 表層水のその $R^2 = 0.01$ 及び $R^2 = 0.24$ よりも大きく, 底層水は水深が深いほどDIN濃度及びDIP濃度が高くなる傾向があった. これは, 底層からのDIN及びDIPの溶出による影響が考えられる. くわえて, 底層では日射量が減少し, 植物プランクトンの量の増殖が抑えられ, DIN及びDIPの消費量が少ないことも影響していると考えられる. 植物プランクトンの量については, Chl-a濃度の底層水で, 水深が深いところで濃度が低くなっていることから確認できる. 以上より, TN及びTPに比べてDIN及びDIPは表層でのプランクトンによる消費, 底層からの溶出が影響し, 表層水と底層水で有意差が多くみられたと推察される. また, TPはTNに比べ沈降速度が速いことにより, 一部の地点でTN濃度よりも強い有意差がみられたと推測される.

なお, 地点7及び8はTable 1をみると, 概ね有意差はみられなかった. これは, 明石海峡付近の激しい水交換で鉛直混合が活発になっていることが影響していると考えられる. Fig.1(f)の水温をみると, 地点1~6は表層水温と底層水温の差は

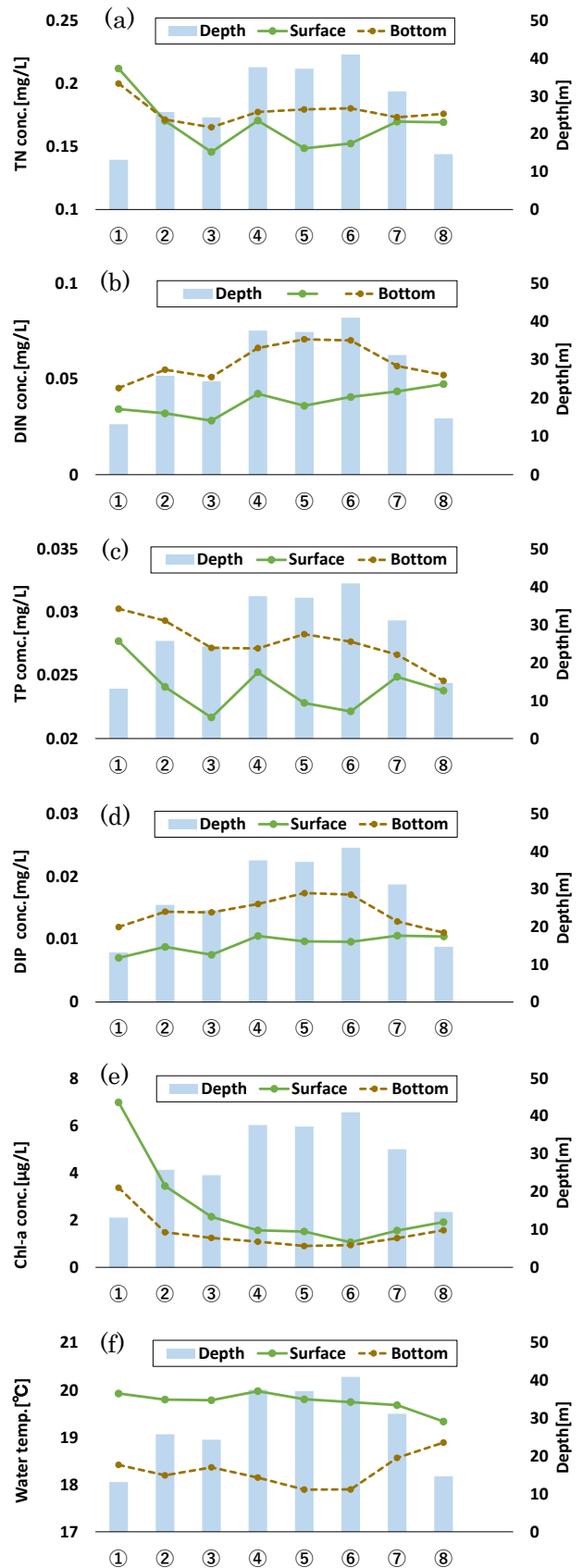


Fig.2 Average water quality values between surface and bottom at each station.

Table 1 Water quality correlations ( $p$ -value) between surface and bottom at each station.

data\station	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
TN conc.	0.44	0.92	0.041*	0.59	0.0035**	0.0090**	0.73	0.54
DIN conc.	0.025*	0.0015**	<0.001***	0.0014**	<0.001***	<0.001***	0.043*	0.47
TP conc.	0.11	0.028*	0.025*	0.34	0.0042**	0.0023**	0.26	0.62
DIP conc.	0.0029**	0.0017**	<0.001***	0.0026**	<0.001***	<0.001***	0.12	0.69
Chl-a conc.	0.0016**	0.0073**	0.023*	0.21	0.095	0.63	0.20	0.13
Water temp.	0.27	0.23	0.29	0.16	0.15	0.15	0.39	0.72

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*\*\*:  $p < 0.001$

1.4~1.9°Cであったが、地点7及び8でそれぞれ0.4°C及び1.1°Cであった。水温は生態系の活動による影響を受けにくく、主に表層が外気の影響を受けて変化するという特徴を持つため、表層水温と底層水温の差が小さいことは鉛直混合が激しいことを示しているといえる。

季節変動は考慮せず水質の年間平均値でみるという解析ではあるが、水平方向、鉛直方向には濃度差があり、播磨灘の潮流や生態系の影響を反映していると考えられる。水平方向では、沿岸と沖合でTN濃度に最大1.5倍、TP濃度に最大1.3倍、Chla濃度に最大6.6倍の差がみられた。鉛直方向では、TN濃度に最大1.2倍、TP濃度に最大1.3倍、Chla濃度に最大2.3倍の差がみられた。

シミュレーションモデルには、対象海域を水平方向、鉛直方向に細かく分けて計算されるものや、ボックスモデルのように海域全体を少数のボックスに分割し、計算を単純化しているものもある。本結果は、海域を単純化させる際の必要な情報を提供する。

#### IV 結論

本報告では、数値シミュレーションモデルに活用できる情報を集積するため、播磨灘について、公開されている直近の観測データを用いて、栄養塩類等が空間的にどのように分布をしているのかを解析した。その結果、以下のことが示された。

○TN及びTPについて、表層水は沿岸域で比較的高濃度である傾向にあり、陸からの負荷の影響を受けていると考えられた。

○表層水のDIN及びDIP濃度が沖合域に比べて沿岸域で低くなった原因は、すみやかに植物プランクトンに消費されるためと考えられた。

○底層水のDIN及びDIP濃度は、底層からの溶出及

び植物プランクトンの量の影響により水深と高い相関がみられたと考えられた。

○Chl-a濃度はDIN及びDIP濃度との相関に違いがみられ、植物プランクトンの量の解析には生態系モデルによる詳細な解析が必要と考えられた。

○明石海峡付近の海域では、明石海峡の鉛直混合の影響を受けている可能性が示唆された。

○TN及びTPは、DIN及びDIPに比べて鉛直方向の相関はみられなかった。

#### 文献

- 1) Yamamoto, T.: The Seto Inland Sea—eutrophic or oligotrophic?. *Marine Pollution Bulletin*, **47**, 37-42 (2003)
- 2) 反田實, 原田和弘: 瀬戸内海東部(播磨灘)の栄養塩環境と漁業. *海洋と生物*, **34(2)**, 132-141 (2012)
- 3) 山本民次, 花里孝幸: 海と湖の貧栄養化問題, p. 55-57, 地人書館, 東京 (2015)
- 4) 藤原建紀, 鈴木健太郎, 木村奈保子, 鈴木元治, 中嶋昌紀, 田所和明, 阿保勝之: 栄養塩類変動が内湾の生態系・生物生産に及ぼす影響: 大阪湾. *水環境学会誌*, **45(3)**, 145-158 (2022)
- 5) 鈴木元治, 中谷祐介, 古賀佑太郎: 下水処理場の窒素排出量増加運転が瀬戸内海播磨灘の有機物及び栄養塩の海水中濃度に与える影響評価. *水環境学会誌*, **43(2)**, 43-53 (2020)
- 6) 環境省: 水環境総合情報サイト, <https://water-pub.env.go.jp/water-pub/mizu-site/index.asp> (参照2022.11.15)
- 6) 中山哲巖: 瀬戸内海の流動と栄養塩に関するレビューと流動・低次生産モデルの開発. *水産総合研究センター研究報告*, **34**, 49-70 (2011)
- 7) 杉原幸樹, 濱原能成, 加藤晃司, 中津川誠: 茨

- 戸川の富栄養化に関する総合的解析その2ー負荷収支の推定と生態系モデルによる水質シミュレーションー. 北海道開発土木研究所月報, **615**, 10-24 (2004)
- 8) Nishikawa, T., Hori, Y., Nagai, S., Miyahara, K., Nakamura, Y., Harada, K., Tanda, M., Manabe, T., Tada, K. : Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35-year period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts*, **33**, 417-427 (2010)
- 9) 赤井紀子, 大山憲一, 益井敏光, 宮川昌志: 燧灘東部海域におけるクロロフィル鉛直分布の季節変動. 沿岸海洋研究, **54(2)**, 203-213 (2017)