

播磨灘における海底泥からの栄養塩溶出の四季変動： 栄養塩供給源として何割を占めるのか？

香川大学 農学部 博士研究員

中國 正寿

香川大学 農学部 准教授

山口 一岩

香川大学 農学部 教授、香川大学 瀬戸内圏研究センター 副センター長

一見 和彦

香川大学 農学部 教授、香川大学 瀬戸内圏研究センター センター長

多田 邦尚

1. はじめに

世界の多くの沿岸海域では、人為的な負荷の増加に伴い富栄養化が進行している。その影響により、赤潮や青潮などの発生が頻発化してきた。瀬戸内海でも、1960年代の高度経済成長期を中心に、急激に富栄養化が進行し、多くの漁業被害に悩まされた過去がある。これを受け、1970年代に、瀬戸内海環境保全特別措置法（いわゆる、瀬戸内法）によって、瀬戸内海に負荷される化学的酸素要求量(COD)および全窒素(TN)・全リン(TP)に規制が設けられた。この規制により、現在は、1970年代よりもTNで40%、TPで60%の削減に成功している。このことから、瀬戸内海は、世界の半閉鎖性海域が富栄養化する中で、その危機を脱することに成功した先駆者であるといえる。しかしながら近年、「栄養塩が低下しすぎたことにより、一次生産者が減り、漁獲量が減ったのではないか」との指摘が挙がってきている。これは、食物連鎖の基礎たる微細藻類の増殖の制限要因の1つが栄養塩濃度であるため、その濃度変化が生態系全体を変え得るという考え方に基づいている。確かに、個々の現象に目を向ければ、ノリの色落ちなど、栄養塩濃度が関係する事実も見出されており(松岡ほか, 2005; 多田ほか, 2010)、栄養塩の管理は、現在の瀬戸内海において、強い関心事項となった。ただし、栄養塩濃度の低下による漁獲量低下には、未解明の部分も多く、その因果関係の解明が試みられている(例えば、吉江, 2022)。

栄養塩管理に関する政策に関しては、2021年に瀬戸内法が改正され、関係府県知事が、一部の海域へ栄養塩類の供給を可能とする制度が組み込まれた。この栄養塩管理の具体的な対応は、瀬戸内海に面する各府県に任されており、湾や灘ごとの状況に応じた保全計画が求められている。そのため、湾や灘ごとの状況把握とその海域に合わせた栄養塩管理の方向性の決定が急務となる。実際に、環境省の環境総合推進費の動向は、沿岸という全体のくくりから湾灘という個別のスケールに焦点を絞られる傾向にある。すなわち、2014-2018年で実施された「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発」(代表:九州大学 柳哲雄教授)では、国内の広い地域の沿岸海域を対象とし、研究が展開された。一方で、次代では、愛媛大学の森本昭彦教授らの研究チームによる「播磨灘を例とした瀬戸内海の栄養塩管理のための物理-底質-低次生態系モデルの開発」(2022-2024年)や、広島大学の西嶋歩教授らの研究チームが実施している「特定海域の栄養塩類管理に向けた評価手法開発」(2020-2023年)など、より具体的な海域に焦点が絞られている。いずれにしても、各湾や灘ごとにおける栄養塩濃度の経時的変化とそれが与える生態系への影響の把握は、栄養塩の観測と生物資源の把握の同時並行で、実施・議論される必要があるだろう。

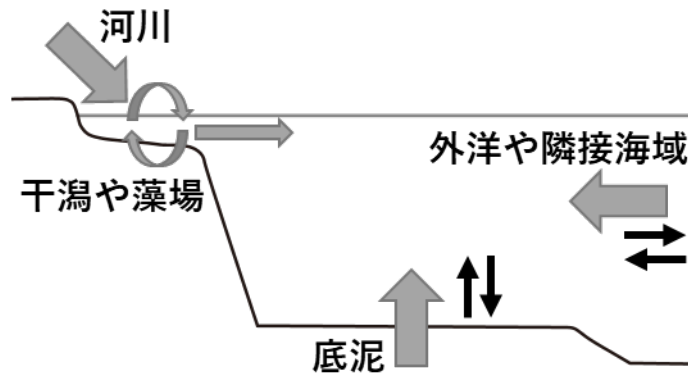


図 1 沿岸海域における栄養塩供給源 (図は、多田 (2021) を改変)

沿岸海域の栄養塩管理を実施するうえで、栄養塩の主要な供給源の把握とその供給量を把握することは、最も重要となる。そもそも栄養塩とは、植物プランクトンの成長に制限要因となる窒素(N)、リン(P)、ケイ素(Si)の無機塩類の総称である。海水中では、硝酸(NO₃⁻)、亜硝酸(NO₂⁻)、アンモニウム塩(NH₄⁺)、リン酸塩(PO₄³⁻)、溶存ケイ酸(Si(OH)₄)として存在する。瀬戸内海における主要な栄養塩供給源は、主に、陸からの負荷、外洋・隣接海域からの移流、および海底からの溶出の3つがあり(多田, 2021)、これまでの研究で、これら3者の供給源のバランスとその変動を把握する研究がいくつか実施されてきた(Yanagi and Tanaka, 2004; 阿保ほか, 2015)。この推定には、それぞれ供給源の観測値が重要となるが、特に、底泥からの溶出量の季節変化の把握は、極めて少なく正確な推定に十分な情報が得られていなかった(多田, 2015)。

そこで本研究では、瀬戸内海の播磨灘の観測定点において、2年間に渡って毎月、底質中の栄養塩の分析を実施し、底質中の栄養塩濃度と底質からの栄養塩の供給速度の把握を行った。なお、本稿は、2022年8月に開催された特定非営利活動法人・瀬戸内海研究会主催の瀬戸内海研究フォーラム in 和歌山において発表した「播磨灘における海底泥からの栄養塩溶出の四季変動: 栄養塩供給源として何割を占めるのか?」のExtended Abstractとして、その研究の要点を述べたものである。

2. 試料と方法

柱状堆積物試料の採取は、香川県小豆島東部に定点観測地点(水深約40 m)を設け、香川大学 瀬戸内圏研究センターの調査船カラヌスⅢ(19 t)によって2020年4月から2022年3月まで、毎月実施された。採泥は、G.S型表層採泥器(直径88 mm)を用いて行った。堆積物試料直上の海水を採取後、堆積物試料を、0-1、1-2、2-4、4-8、8-12 cmの間隔で切り分けた。切り分けられた各深度の堆積物試料を3000 r.p.m.で15分間遠心分離し、間隙水を得た。間隙水と直上水は、孔径0.45 μmのシリンジフィルターでろ過し、栄養塩分析用の試料とした。栄養塩(NO₂+3、

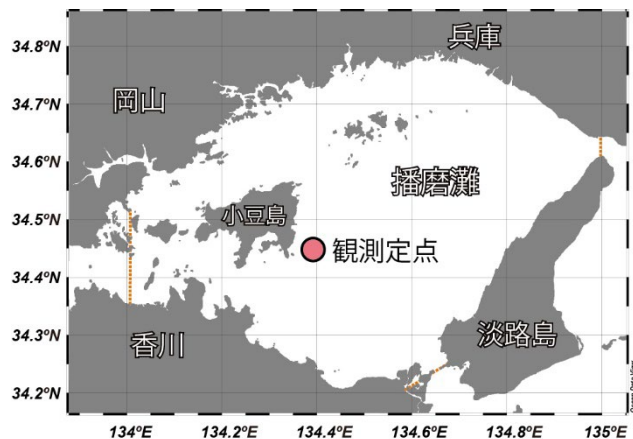


図 2 試料の採取地点

図中の点線は播磨灘と隣接海域の境界を意味する。

NH₄、PO₄、Si(OH)₄は、オートアナライザー(ビーエルテック社製 AA3)を用いて分析した。NO₂₊₃ と NH₄ の和を溶存無機窒素(DIN)、PO₄ を溶存無機リン(DIP)、Si(OH)₄ を溶存無機ケイ酸(DSi)とした。間隙水から直上水間の栄養塩フラックスは、間隙水-直上水の濃度勾配と拡散係数より見積もった(山本ほか, 1998)。

3. 結果の総括と今後の展望

3.1 観測から明らかとなった間隙水からの栄養塩の供給量

0-1 cmにおける間隙水中の栄養塩濃度は、直上水の栄養塩濃度よりも1桁から2桁ほど高かった。例えば、溶存無機態窒素(DIN)では、0-1 cmの栄養塩濃度が $34 \pm 15 \mu\text{M}$ (平均値 \pm 標準偏差)であったのに対して、直上水のDIN濃度は $4.6 \pm 2.8 \mu\text{M}$ となった。さらに、間隙水中の栄養塩濃度は、深度とともに増加する傾向が見られ、8-12 cmにおける間隙水中のDIN濃度では、 $160 \pm 78 \mu\text{M}$ を示した。0-1 cmの間隙水と直上水のDIN濃度の差から求められたDINの供給速度は、19.5から3.1 $\text{mgN m}^{-2} \text{日}^{-1}$ の範囲で変動し、平均値で9.1 $\text{mg-N m}^{-2} \text{日}^{-1}$ となった。さらに、DINの供給速度の季節的な変動は、夏季に高く、冬季に低くなる傾向を示した。

水温に応じた栄養塩供給速度の変動傾向は、過去に播磨灘で提案されている栄養塩供給速度の変動を多項式で説明された経験式でも見られていた(多田ほか, 2018)。

ここで、堆積物間隙水と陸域からの窒素供給の比較を試みた。播磨灘への陸からの窒素供給は、「水質総量削減に係る発生負荷量等算定調査(環境省)」によると、2014年度実績で約34 t 日^{-1} と報告されており、この値を播磨灘の海域面積(3426 km^2)で割ると9.9 $\text{mg-N m}^{-2} \text{日}^{-1}$ となる。したがって、海底からの窒素供給量は、陸域からの窒素供給量に匹敵することが明らかとなった。この陸域から窒素供給量は、河川に近い海域も含まれているため、河川から距離のある本調査地点では、間隙水からの窒素供給がより高い割合を占めている可能性も高い。総じて、堆積物中からの溶出は、重要な栄養塩供給源であることが、実測値をもって定量化することができ、本研究により、それらの季節変化を明らかとすることができた。

3.2 間隙水からの栄養塩溶出に対する見解

本研究結果は、播磨灘における栄養塩の供給源として、間隙水は重要な供給源であることを意味している。Yanagi and Tanaka (2004)が単位応答関数法を用いて試算した瀬戸内海におけるTN・TPの供給源の推定によれば、60%程度が外洋起源(他の研究でも60%程度と見積もられているが、モデルを用いた外洋起源栄養塩物質量の推定方法には、いくつかの問題点がある[詳しくは、武岡, 2006を参照])、10%程度が河川起源、30%程度が底質起源であると報告されている。播磨灘では、冬季に限られるが、阿保ほか(2015)が、播磨灘北部と南部に分けて試算している。その推定によれば、播磨灘北部では外海との移流起源が48%、陸域起源と底質起源がそれぞれ26%で、播磨灘南部では、移流起源が27%、陸域負荷が4%、底質起源が69%と報告している。これまでの数値モデルの精度には議論の余地があるが、いずれの

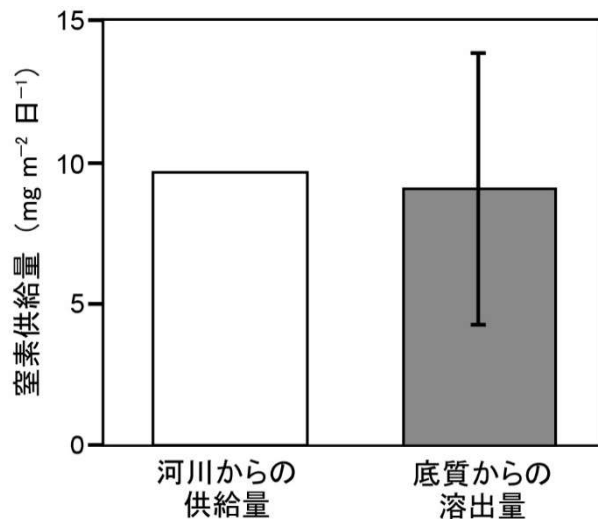


図3 海域1日1km²当りの陸域からの窒素負荷量と観測期間における海底からのDIN溶出量の比較(図中の縦棒は標準偏差を意味する)

研究においても、本結果と同様に、底質からの栄養塩供給が、水柱の栄養塩供給に大きな役割を果たしていることが伺える。このことは、陸域からの供給量の増加分が海域の DIN 濃度の増加割合に順当に応答するわけではないことを意味している。

一方で、栄養塩管理の視点から考えると、底質からの溶出を管理することは極めて難しいかもしれない。まず初めに、その分布特性が関係している。河川からの栄養塩の供給源は、特定の地域に偏っている。播磨灘に隣接する第一級河川は、西から岡山の旭川、吉井川、兵庫の揖保川と加古川である。したがって、もしこれらの河川が陸域からの主要な栄養塩供給源であるとすれば、4 か所と数が少ないため管理しやすい。一方で、間隙水からの溶出は、非常に広い海域に満遍なくその供給源が存在しているため、海域全体を管理する必要がある。

次いで、底質の粒子態窒素の供給源が関係している。底質からの DIN 溶出は、底質に積もった粒子態の有機窒素の分解によって供給される。そして、底質中の有機物の主要な供給源は、水柱の微細藻類を始めとしたデトリタスの沈降物で構成されている。実際に、Nakakuni et al. (2022)は、燧灘と播磨灘の堆積物柱状コアから得られた炭素と窒素の比を用いて、底泥中の有機物の起源は、80%以上が微細藻類に由来すると試算している。同様に、播磨灘全域の表層泥の炭素と窒素の比からも、微細藻類が主要な構成要素であることを示している(Yamaguchi et al., 2014)。したがって、底泥中の窒素量は、水柱の一次生産の結果であり、その変動を反映する。そのため、底質への窒素供給を高めるためには、強い貧酸素水塊の形成による有機物の高い蓄積率を伴うような海域を除いて、海域全体の基礎生産力(無機態から粒子態窒素に変換する力)を高める必要がある。これでは、主客転倒となる。

いずれにしても、本研究の現場観測によって、底泥からの供給が水柱の栄養塩供給に重要な貢献を成しており、その把握が重要であるといえることが再確認された。手法間で差異があるものの(多田, 2015)、決まった手法を用いて、間隙水からの栄養塩供給のデータを継続的に得ていくことが海域の栄養塩管理において重要な視点となるだろう。

謝辞

本研究の一部は、トヨタ財団(D19-R-0050)と(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20205005)によって実施されました。

引用文献

- 1) 阿保 勝之, 中川 倫寿, 阿部 和雄 (2015) 東部瀬戸内海における栄養塩の動態とノリ養殖などのための栄養塩管理. 海洋と生物 37, 274-279.
- 2) 多田 邦尚 (2015) 海底からの栄養塩溶出量. 海洋と生物 37, 217-221.
- 3) 多田 邦尚 (2021) 沿岸海域における基礎生産と栄養塩濃度, 堆積物からの栄養塩溶出. 水環境学会誌 44, 137-141.
- 4) 多田 邦尚, 中嶋 昌紀, 山口 一岩, 朝日 俊雅, 一見 和彦 (2018) 沿岸海域における栄養塩濃度決定要因と堆積物. 沿岸海洋研究 55, 113-124.
- 5) 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.
- 6) 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法とその問題点. 沿岸海洋研究 43, 105-111.
- 7) 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.
- 8) Nakakuni M., Loassachan N., Ichimi K., Nagao S., Tada K. (2022) Biophilic elements in core sediments as records of coastal eutrophication in the Seto Inland Sea, Japan. *Regional Studies in Marine Science* 50, 102093.
- 9) Yamaguchi H., Hirade N., Kayama M., Ichimi K., Tada K. (2014) Total organic carbon and nitrogen contents in surface sediments of Harima Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan: a comparison under two different trophic states. *Journal of Oceanography* 70, 355-366.
- 10) 山本 民次, 松田 治, 橋本 俊也, 妹背 秀和, 北村 智顕 (1998) 瀬戸内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.
- 11) Yanagi T., Tanaka T. (2013) Origins of phosphorus and nitrogen in the Seto Inland Sea, Japan. *Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University* 144, 13-18.
- 12) 吉江 直樹 (2022) 栄養塩循環から高次栄養段階生態系までを取り扱う統合モデルの現状と課題. 沿岸海洋研究 60.