

豊かで美しい里海の再生へ～兵庫県の取組～

兵庫県環境部水大気課 課長
山 本 竜 一

1. はじめに

かつて、「瀕死の海」と呼ばれた瀬戸内海は、厳しい排水規制や生活排水対策などにより大きく水質が改善されました。一方で、のりの色落ちや漁獲量の減少などの深刻な課題が生じており、その要因のひとつとして、生態系の基盤である植物プランクトンの栄養となる栄養塩類(全窒素及び全りん)の濃度低下が指摘されています。

そこで、当県では、瀬戸内海を「豊かで美しい里海」として再生するため、2019 年 10 月に「環境の保全と創造に関する条例」(以下、「県条例」という。)を改正し、海域における栄養塩類の「望ましい濃度」を設定しました。

県条例の改正等を受け、国は 2021 年6月に「瀬戸内海環境保全特別措置法」を改正し、生物の多様性及び生産性確保のための栄養塩類管理制度を創設し、府県知事が海域への栄養塩類供給方法を定めた栄養塩類管理計画を策定できることとなりました。

この改正法に基づき、2022 年 10 月、当県では関係府県で初めて計画を策定し、計画的な栄養塩類供給を進めています。

2. 海域における栄養塩類の「望ましい濃度」の設定

瀬戸内海を「豊かで美しい里海」として再生させるため、2019 年 10 月に県条例を改正し、瀬戸内海の海域における良好な水質を保全し、かつ、豊かな生態系を確保する上で望ましい栄養塩類濃度を定めました。(表1、図1、2)

表1 望ましい栄養塩類濃度

水域類型	全窒素(mg/L)		水域類型	全りん(mg/L)	
	県条例下限値	環境基準値		県条例下限値	環境基準値
Ⅱ	0.2	0.3	Ⅱ	0.02	0.03
Ⅲ	0.2	0.6	Ⅲ	0.02	0.05
Ⅳ	0.2	1	Ⅳ	0.02	0.09

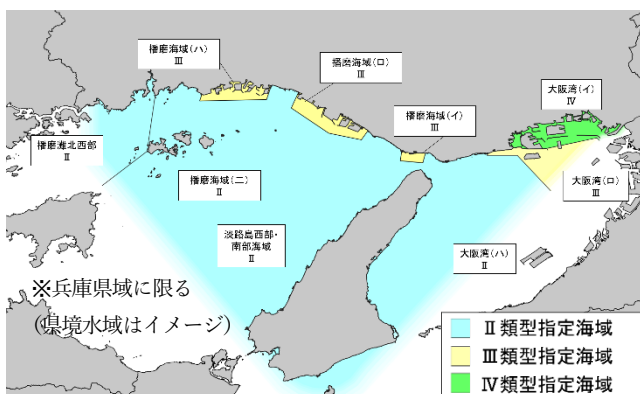


図1 全窒素及び全りんの種類指定

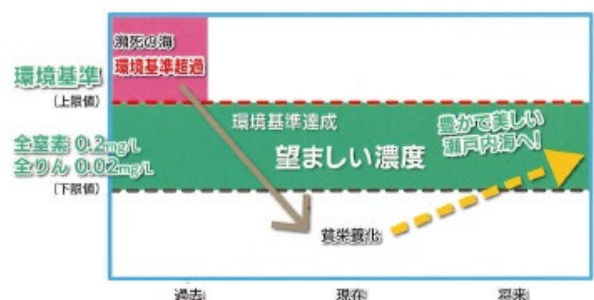


図2 「望ましい濃度」のイメージ

下限値を設定するにあたって、参考としたのが、2018 年8月に改訂された「水産用水基準(2018 年版)」です。この水産用水基準は、水産庁監修の元、公益社団法人日本水産資源保護協会が、水質指標ごとに文献収集し解析して、漁業にとって適した水質を示したものです。

水産用水基準では、「陸域からの栄養塩類供給に依存する閉鎖性内湾であって、全窒素 0.2 mg/L 以下、全りん 0.02 mg/L 以下の海域は生物生産性が低い海域であり、一般的には漁船漁業には適さない」とされています。

図3は、全窒素及び全りん濃度の高い大阪湾北東部から、濃度の低い大阪湾西部までの測定点における年平均全窒素(TN)濃度と、溶存無機態窒素(DIN)濃度、クロロフィル a 濃度及び一次生産量等の関係です。

全窒素濃度と DIN 濃度及びクロロフィル a 濃度の間には高い正の相関があり、全窒素 0.2 mg/L では、DIN 濃度もクロロフィル濃度もゼロに近くなっています。このため、一次生産量も、全窒素 0.2 mg/L では 0 g-C/m³/day に近くなっています。(図3(a)~(c))

全窒素 0.2 mg/L のときの全りんは、概ね 0.02 mg/L となっています。(図3(d))

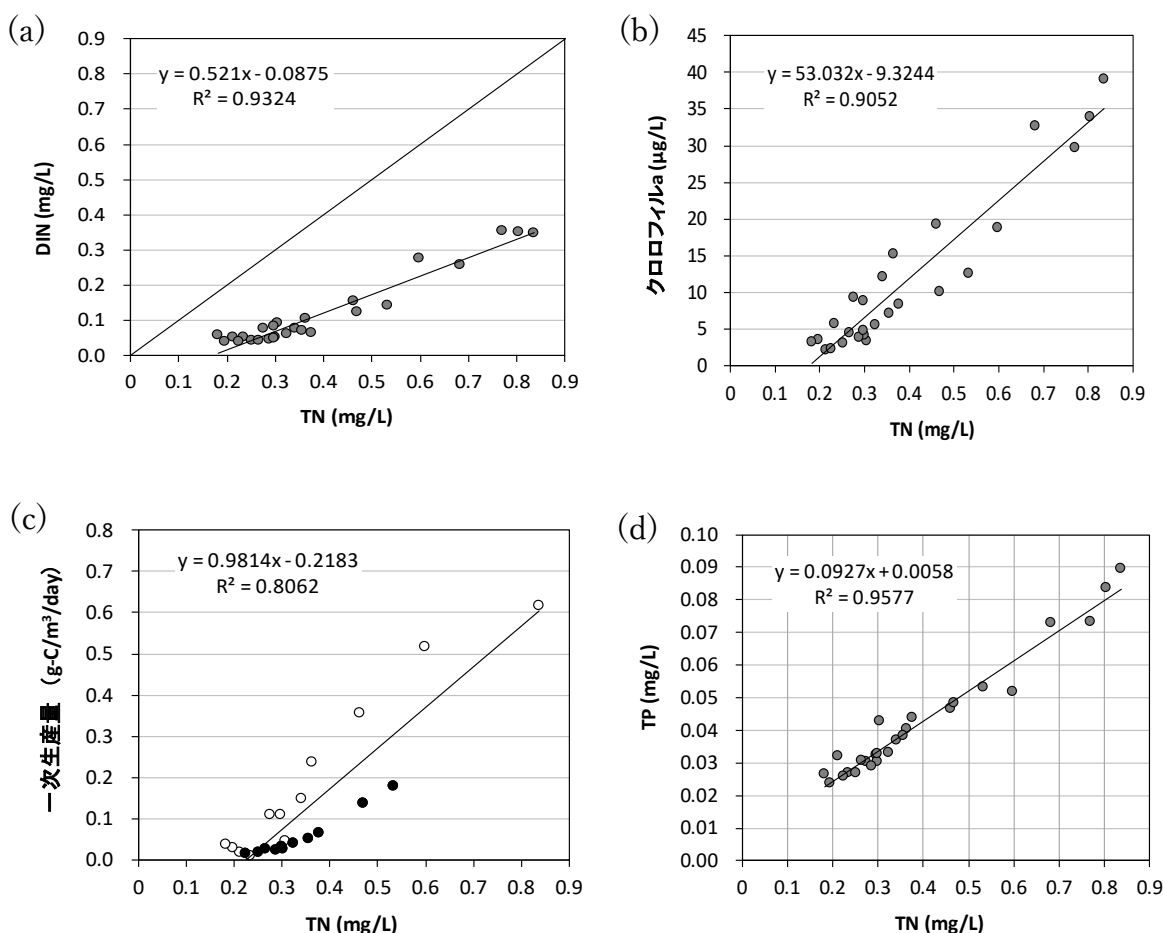


図3 大阪湾における年平均の(a)TNとDIN、(b)TNとクロロフィル a、(c)TNと一次生産量、(d)TNとTPの関係
((公社)日本水産資源保護協会(2018):水産用水基準第8版(2018 年版)より作成)

このように、全窒素 0.2 mg/L、全りん 0.02 mg/L を下回る海域では、生態系の基盤である植物プランクトンが著しく減少することから、豊かな生態系の確保に望ましい栄養塩類濃度(下限値)は、全窒素 0.2 mg/L、全りん 0.02 mg/L としました。

また、中央公害審査会の答申(1993 年 6 月)において、海域の栄養塩類濃度の上昇と透明度及び底層 DO(夏季)の低下に一定の相関が認められると示されていることから検証を行いました。Ⅱ類型指定水域において、全窒素濃度と透明度及び底層 DO 濃度(夏季)の経年変化を比較すると、全窒素が著しく低下し 0.2mg/L を下回っても、透明度、底層 DO 濃度(夏季)は横ばいであることから、栄養塩類濃度が透明度と底層 DO(夏季)へ与える影響は軽微であると考えられます。(図4)

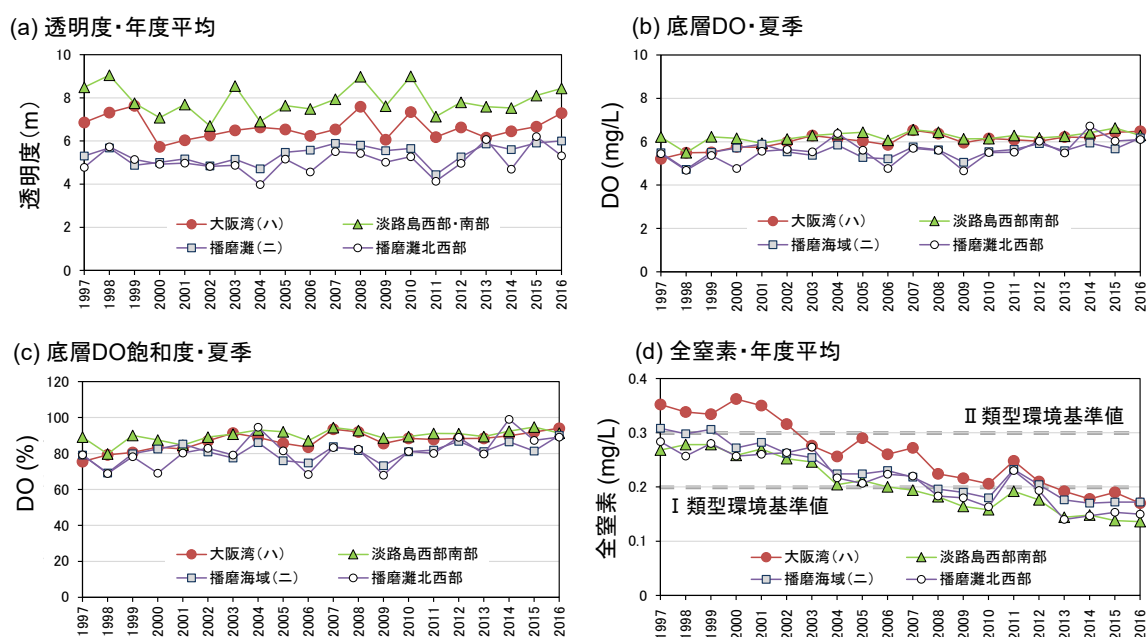


図4 兵庫県(Ⅱ類型海域)の (a) 透明度、(b) 底層 DO(mg/L)・夏季、
(c) 底層 DO 飽和度(%)・夏季 及び (d) 全窒素の経年変化

3. 兵庫県栄養塩類管理計画の策定

3.1 水質の目標値と対象海域

栄養塩管理計画の水質の目標値は、2019 年に県条例で定めた「良好な水質を保全し、かつ、豊かな生態系を確保するうえで望ましい栄養塩類濃度」としました。(表2)

対象海域については、全窒素濃度が著しく低下し、県条例に基づく下限値を下回っている、あるいは下回るおそれがある大阪湾西部及び播磨灘としました。(図5)

表2 水質の目標値

水域類型	全窒素(mg/L)		全りん(mg/L)	
	県条例下限値	環境基準値	県条例下限値	環境基準値
Ⅱ	0.2	0.3	0.02	0.03
Ⅲ	0.2	0.6	0.02	0.05

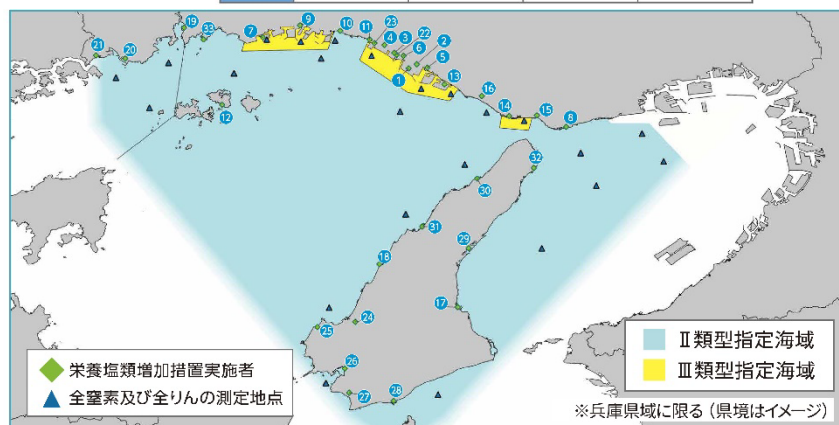


図5 対象海域

3. 2 栄養塩類増加措置実施者

①日平均排水量 50m³以上、②有害物質が増加しない、③生活環境悪化のおそれがない、④栄養塩類供給量の調整が可能な4条件を満たす5箇所の民間工場、28 箇所の下水処理場を選定し、生産工程の一部変更や汚水等の処理方法の変更などにより、対象海域への全窒素の供給量を増加させます。(表3)

表3 栄養塩類増加措置実施者

1	加古川市	(株)神戸製鋼所加古川製鉄所	12	姫路市	家島浄化センター	23	高砂市	伊保浄化センター
2	加古川市	関西熱化学(株)加古川工場	13	明石市	二見浄化センター	24	南あわじ市	松帆・湊浄化センター
3	高砂市	(株)カネカ高砂工業所	14	明石市	船上浄化センター	25	南あわじ市	津井浄化センター
4	高砂市	サントリープロダクツ(株)高砂工場	15	明石市	朝霧浄化センター	26	南あわじ市	福良浄化センター
5	播磨町	多木化学(株)本社工場	16	明石市	大久保浄化センター	27	南あわじ市	阿万浄化センター
6	加古川市	兵庫県加古川下流浄化センター	17	洲本市	洲本環境センター	28	南あわじ市	灘浄化センター
7	姫路市	兵庫県揖保川浄化センター	18	洲本市	五色浄化センター	29	淡路市	津名浄化センター
8	神戸市	垂水処理場	19	相生市	相生下水管理センター	30	淡路市	北淡浄化センター
9	姫路市	中部析水苑	20	赤穂市	赤穂下水管理センター	31	淡路市	一宮浄化センター
10	姫路市	東部析水苑	21	赤穂市	福浦下水処理場	32	淡路市	淡路・東浦浄化センター
11	姫路市	大的析水苑	22	高砂市	高砂浄化センター	33	たつの市	室津浄化センター

※栄養塩類増加措置実施方法: 1は生産工程の一部変更、2～33は汚水等の処理方法の変更(当面、栄養塩類増加措置は全窒素のみとする。)

3. 3 評価・検証

対象海域内の全窒素及び全りん的环境基準点(24 地点)で毎月全窒素濃度等を調査し、水質の目標値の達成状況を評価します。また、COD、透明度等も監視し、栄養塩類増加措置が水質へ及ぼす影響も把握します。

3. 4 計画の順応的な管理

県は、栄養塩類増加措置実施者と連携し、県環境審議会や湾灘協議会に定期的に水質の状況を報告するとともに、意見を聴き、必要に応じて計画を見直していきます。(図6)

計画の策定は、豊かで美しい里海の再生を早期に実現するための第一歩であり、今後、計画に基づいた取り組みを着実に進めていきます。

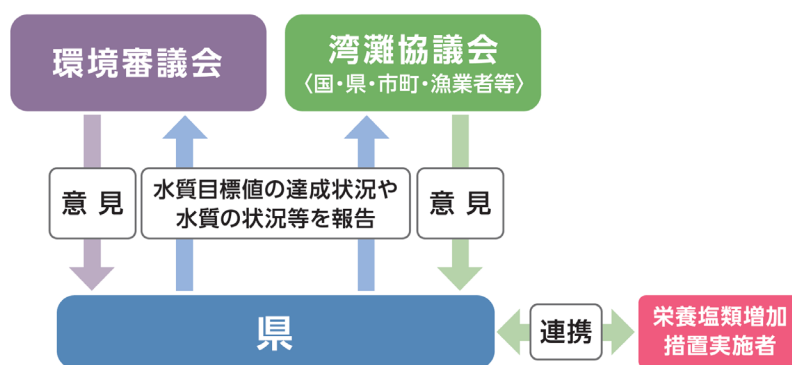


図6 計画の順応的な管理(イメージ)

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。

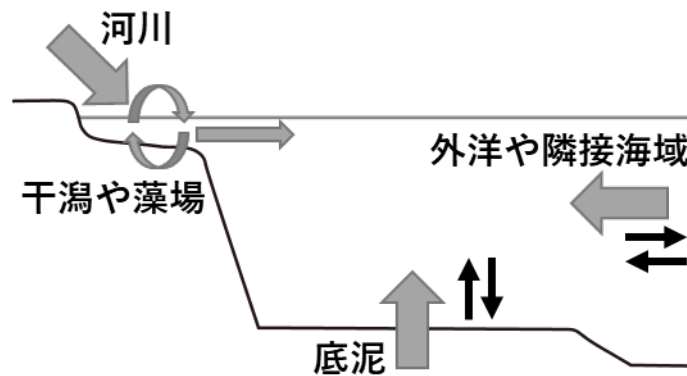


図 1 沿岸海域における栄養塩供給源（図は、多田 (2021) を改変）

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(NO_3^-)、亜硝酸(NO_2^-)、アンモニウム塩(NH_4^+)、リン酸塩(PO_4^{3-})、溶存ケイ酸($\text{Si}(\text{OH})_4$)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(NO_2+NO_3 、

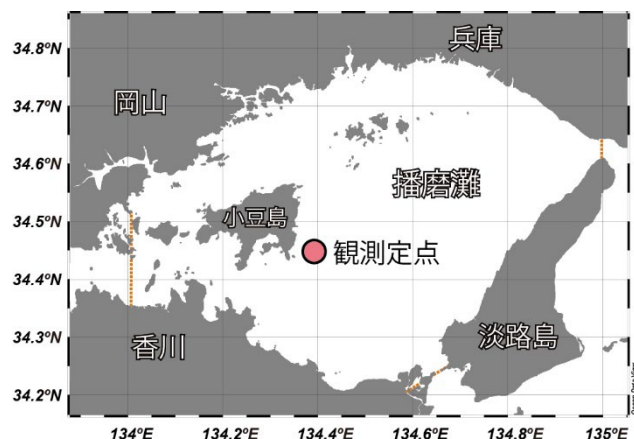


図 2 試料の採取地点

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 $3.1 \text{ mg-N m}^{-2} \text{ 日}^{-1}$ 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

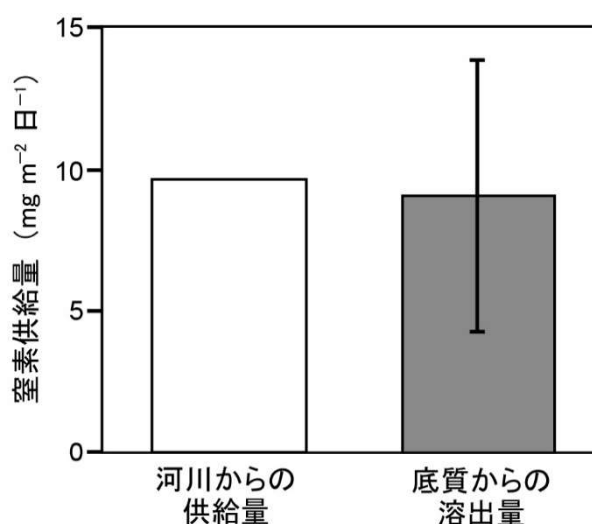


図 3 海域 1 日 1 km^2 当りの陸域からの窒素負荷量と観測期間における海底からの DIN 溶出量の比較（図中の縦棒は標準偏差を意味する）

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.