

瀬戸内海の海水中の栄養塩濃度低下と 環境改善へ向けて 〜豊かな海へ〜

香川大学瀬戸内圏研究センター センター長 香川大学農学部 教授 多 田 邦

はじめに

瀬戸内海の海水中の栄養塩(無機態の窒素 やリン) 濃度が低下し、特に瀬戸内海の東部 海域ではノリの色落ち(ノリの不作)が社会 問題となっている。ノリの色落ちとは、本来 黒色であるノリの色が薄くなり、激しい場合 には薄茶色から黄色になる現象を指す1)。同 時に瀬戸内海ではイカナゴやイワシ類に代表 される漁獲量の低下が問題となっている。こ の漁獲量の低下も栄養塩濃度の低下と時間的 に一致しており、栄養塩濃度の低下が漁獲量 低下の原因ではないかと懸念されている2)3)。

現在、海域の「貧栄養化」の話題が顕著に なり、栄養塩濃度低下を食い止める、あるい は管理することに注目が集まっている。近年 の瀬戸内海の環境問題の中で、栄養塩濃度の 管理の問題は最重要課題である。しかし、栄 養塩管理は大変難しい問題で、慎重に考えな ければならない問題である40。『近年の栄養 塩濃度低下は陸域からの栄養物質の負荷量が 減少したことによるので、今後は陸域からの 負荷を増やせば解決する』というような単純 なことではない。本稿では、そのことについ て述べてみたい。

瀬戸内海の過去と現在

瀬戸内海では高度経済成長期に、急激な重 工業化と特定地域への人口集中化、生活環境 整備の立ち遅れなどのために、著しく富栄養

化が進行した。当時は赤潮の多発、貧酸素水 塊の発生などの状況から「瀕死の海」といわ れるまでにその環境は悪化していた。そんな 中で、1973年に瀬戸内海環境保全臨時措置法 (1978年に瀬戸内海環境保全特別措置法に改 称、いわゆる瀬戸内法)が施行され、それ以 降は化学的酸素要求量(COD)、全窒素(TN) 量、全リン(TP)量の陸上からの総量負荷 削減が5年毎に見直されながら実施されてき た。その結果、赤潮発生件数の低下に代表さ れるように水質は改善された。2005年(平成 17年)の第6次水質総量規制のあり方につい て、中央環境審議会は「窒素・リンについて は、大阪湾において引き続き削減が必要であ るが、それ以外の瀬戸内海では現在の水質を 維持することが適切」と答申した。このこと は、それまでのように単に水質を良くすると いう時代は終わったことを意味し、環境行政 の大きな転換期であったと考えられる。

2015年には瀬戸内法が改正され、水産資源 の持続的な利用の確保のための栄養塩類の適 切な調査・研究が求められ、瀬戸内海の周辺 府県はそれぞれの府県計画を立て湾灘ごとに その特性に応じた取り組みをすすめることと された。いわゆる「きれいな海」から「豊か な海」を目指して舵を切ることになった。更 に、本年(2021年)の6月に2度目の瀬戸内 法の改正がなされ、あらゆる業種で排水をす る際には緩和運転(排水中の窒素やリン濃度

を上げる)をしても良いとし、各府県で状況 に応じたきめ細かな施策を立てるべきとされ た。即ち、周辺環境の保全と調和した形で特 定の海域への窒素やリンの供給を可能にし、 海域及び季節ごとに栄養塩類のきめ細かな管 理を行えるようにするということである。

栄養塩濃度の低下

瀬戸内法施行以前から現在までを網羅する 栄養塩濃度のデータセットは、残念ながら瀬 戸内海全域では現存していない。瀬戸内法施 行後の最も長く、また測定項目も多い栄養塩 濃度のデータセットは兵庫県が毎月1回実施 している浅海定線調査の結果である(本誌、 2014年8月号、No. 330参照)。播磨灘の兵庫 県側の栄養塩濃度の長期変動について見てみ ると⁵⁾、無機三態窒素(DIN: NH₄ + NO₃ + NO₂) 濃度は1970年代後半から1980年代中盤にかけ て約4μM低下し、その後徐々に増加して 1990年代初期には5 μM を上回り、その後再 び低下している。一方、リン酸塩 (DIP: PO₄) 濃度は1970年代後半から1980年代中盤にかけ て低下し、その後1990年代初期まで徐々に増 加し、その後約0.4 µM 程度で一定している (図1)。尚、上記の1990年代以降の DIN 濃 度の低下が、養殖ノリの色落ちの原因である。 その後、水産総合研究センター瀬戸内海区水 産研究所(現水産研究・教育機構)の阿保 ら6) が瀬戸内海周辺の府県の浅海定線調査の 結果をとりまとめ、瀬戸内海のほぼ全域で 1980年代以降に栄養塩濃度が低下しているこ とが明らかとなった。図2は、瀬戸内海全域 の表層水中の DIN 濃度の変化で、その濃度 が10年ごとでみれば、瀬戸内海全域で明らか に低下していることがわかる。

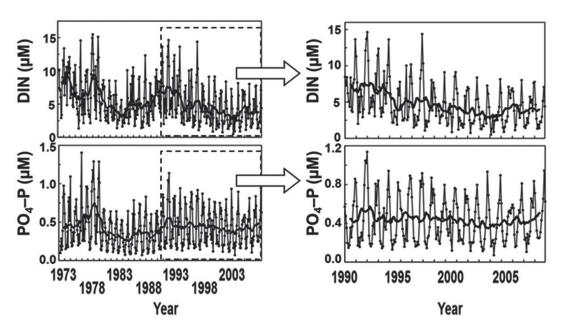


図 1 播磨灘東部海域における無機三態窒素(DIN)および無機リン(DIP)の長期変動(19観測 点の平均値). 細線は月ごとの表層から底層までのデータの平均. 太線は13カ月の移動平均 (Nishikawa et al. 2010) 5) を一部改変

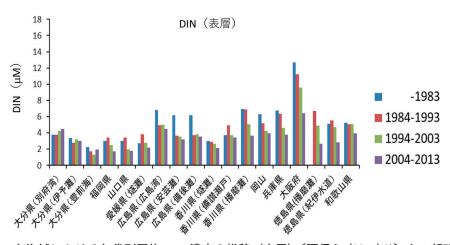


図 2 各海域における年代別平均 DIN 濃度の推移(表層) [阿保ら(2015)⁶⁾] を一部改変]

栄養塩濃度の低下の要因

上記のように、栄養塩濃度はほぼ瀬戸内海 全域で明らかに低下しているが、実はそのメ カニズムはよくわかっていない。瀬戸内海の 海水中の栄養塩濃度は、高度経済成長期に陸 域から窒素やリンが大量に負荷されたために 上昇し、一方、瀬戸内法施行後には陸域から の窒素やリンの負荷量が削減されたために栄 養塩濃度は低下したと考えられているが、実 際にはそう単純な話ではない。

瀬戸内海全域の陸域からの全窒素(TN)と全リン(TP)の負荷量は過去35年間でTNは4割、TPは6割削減されているが。しかし一方で、瀬戸内海全域の海水中のTN、TP濃度は横ばいあるいは若干減少している

だけである⁸⁾。栄養塩濃度低下は排水総量規制の効果がその要因のひとつであることは間違いないが、それだけでは説明できない。陸からのある物質の負荷量を半分にしても、その物質の海水中の濃度は2分の1にはならないのである。

瀬戸内海への栄養塩の供給源は、①陸域からの栄養塩負荷、②外洋域(隣接海域)からの海水交換による流入、および③底泥からの栄養塩溶出と大きく三つあると考えられる(図3a)。この三つの供給源のバランスで海水中の栄養塩濃度は決定されると考えられる。大方の予想に反して、瀬戸内海に存在するNやPは、その半分以上が外洋起源であると報告されている9~120。近年、②の外洋からの

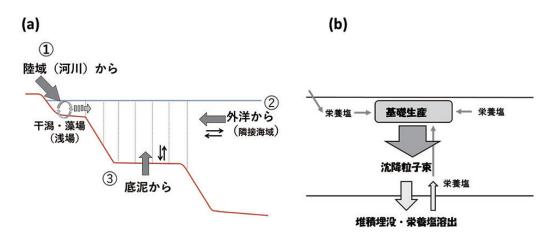


図3 沿岸海域における栄養塩の供給(a)、基礎生産(内部生産)を介しての物質循環(b)

栄養塩流入量の見積もりの問題点も指摘され ているが、N、Pの60%弱は外洋起源と考え られる13)。前述のように、陸域からの負荷削 減(Nは4割、Pは6割削減)の影響が顕著 に海水中の濃度に現れないことは、瀬戸内海 への陸域からの栄養塩負荷が占める割合が外 洋起源の栄養塩に対して小さいことによると 理解できる。

一方、堆積物からの栄養塩の溶出量につい ては、これまで陸域からの負荷、および外洋 域(隣接海域)からの流入との間で定量的な 比較検討がなされて来なかった。著者らの見 積もりでは、夏季の播磨灘において③底泥か らの栄養塩溶出は、①陸域からの栄養塩負荷 よりも大きかった14)。但し、海底からの栄養 塩溶出量については過去のデータが乏しく、 経時的な変化については不明である。そのう え底泥からの栄養塩溶出量の測定法による問 題も大きい15/~16/。今後、底泥からの栄養塩溶 出については、方法論の検討と、データの蓄 積が必要である。以上のように、栄養塩の三 つの供給源の割合が正確にはわかっていない ことに加え、特に海底からの溶出量の経時的 変化が正確にわかっていないため、栄養塩濃 度低下の原因の詳細は明らかではない17)。

さらに、沿岸海域における栄養塩は前述の ように三方向(図3a)からの単純なもので はなく、実際には内部での基礎生産(内部生 産)を介して動いている(図3b)。即ち、三 方向から海水中に流入した栄養塩は植物プラ ンクトンに吸収され、植物プランクトンの細 胞となり、細胞自体が死滅したり、他の生物 に捕食されるなどして海水中を循環する。ま たその一部はマリンスノーと呼ばれる様な粒 子として海水中を下方に向かって沈降する。 「沿岸海域の栄養塩濃度はどのようなメカニ ズムで決定されるのか?」「将来、人為的に

陸域から負荷を減少あるいは増加させた場合 に海水中の栄養塩濃度はどう変化するの か?」。この疑問に答えるため、現在、著者 らの香川大学瀬戸内圏研究センターの研究チ ームでは、環境省・環境研究総合推進費「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」 (研究代表者:愛媛大学 CMES 森本昭彦) を獲得し、研究を進めている。このプロジェ クトでは著者らの研究グループがこれまで播 磨灘で蓄積してきたデータを整理し、栄養塩 管理のための物理―底質―低次生態系モデル 構築に使用できるデータを提供するとともに、 播磨灘のほぼ中央部の観測点において、¹³C 法による植物プランクトンの基礎生産、海水 中の沈降粒子捕集装置(セジメント・トラッ プ)を用いての沈降粒子のフラックス(単位 時間、単位面積当りの沈降粒子量)、および 海底泥からの栄養塩溶出フラックス(単位時 間、単位面積当りの溶出量)を同時に測定し、 内部生産を介した窒素やリンの動きについて 調査している。

栄養塩濃度低下と植物プランクトン量の推移

我々人間を含め地球上のすべての動物の食 べ物は、植物が光合成して生産した有機物が 源になっている。陸上で草木が光合成をして 成長し、その植物を食べる草食動物が肉食動 物に食べられるといった関係を食物連鎖とよ んでいる。その肉食動物の遺骸はバクテリア によって分解されて無機物となり、無機物の 一部は再び植物の成長の栄養分となる物質循 環が駆動している。海洋でも同様の食物連鎖 (図4)と物質循環が駆動している。海洋で は植物とは単細胞生物で顕微鏡を用いないと 観察できない小さなサイズの植物プランクト ン、および海藻類である。海洋の植物として

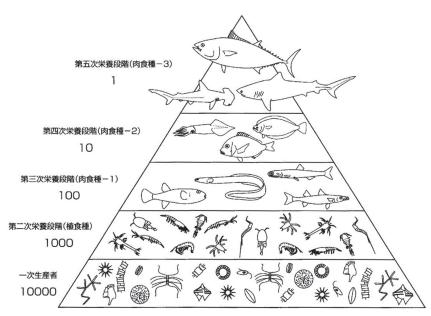


図 4 海洋の生態ピラミッド (多田ら2014)18)

は水深の浅い一部の沿岸部を除いて、生物量 として圧倒的に多いのは植物プランクトンで ある。植物プランクトン量はその細胞密度や 海水中の Chla (光合成色素) 濃度でモニタ ーされている。

海洋の植物プランクトンの増殖を制限する 因子は光、水温、栄養塩濃度の三つであるが、 この中で栄養塩濃度が最もその増殖に大きな 影響を及ぼしている。さらに瀬戸内海では、 無機態リン濃度よりも DIN 濃度が植物プラ ンクトンの増殖やノリの成長を制限している。 近年、西嶋ら19 は瀬戸内海の基礎生産量を

推定して、その経年変化について報告してお り、ここではその結果について紹介する。な お、この推定では塩分の変動が少なく、かつ 栄養塩が枯渇しない秋のデータが用いられて いる。まず植物プランクトン量については、 1981~1985年に、Chla 濃度が10 μg L⁻¹以下 の海域は瀬戸内海の全面積の94%を占め、 Chla 濃度が10 μg L⁻¹以上の海域は瀬戸内海 ではわずか6%に過ぎなかった(図5)。Chla 濃度平均が20 μg L⁻¹以上および10~20 μg L⁻¹ の海域(面積では6%)は、その25年後の 2006~2010年には基礎生産量(植物プランク

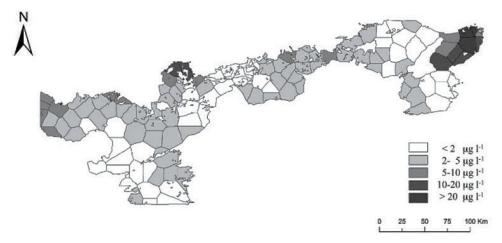


図 5 瀬戸内海における1981-1985年の秋季の平均 Chla 濃度分布 [西嶋 (2018)¹⁹]

トンの光合成量)がそれぞれ38%、41%と大きく減少していると推定された。一方、面積では94%を占める Chla 濃度が $10 \mu g$ L^1 以下の海域では基礎生産量の減少は小さく、特に $2 \mu g$ L^1 以下の観測点での減少率はわずか3%と推定された(図6)。尚、海域の Chla 濃度が $10 \mu g$ L^1 以上である場合には赤潮状態であり、1981-1985年当時に赤潮状態であった海が水質改善され、25年後には基礎生産量も大幅に低下したことを示しており、この推定は非常に的を得たものであると考えられる。これまで瀬戸内海では、現場観測の結果として大阪湾あるいはごく沿岸部での Chla 濃度

の経年的な減少は報告されているが、瀬戸内海の沖合域においては Chla 濃度の経年的な減少は報告されていない。著者らの香川大学の研究チームでも播磨灘の沖合で長年にわたって定点観測を行っており、1991年から現在まで栄養塩の DIN 濃度は減少傾向にあるが、周年平均 Chla 濃度の減少傾向は認められていない(未発表)。これらの観測結果は、瀬戸内海の栄養塩濃度や植物プランクトンが平均的に分布しておらず、栄養塩濃度低下に対して植物プランクトン生物量や基礎生産量が単純に応答していないことを示している。

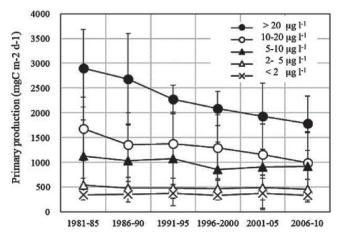


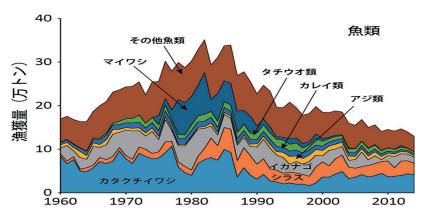
図 6 1981-1985年の秋季の平均 Chla 濃度別の基礎生産速度の経年変化〔西嶋(2018)¹⁹⁾〕

栄養塩濃度低下と漁獲量の減少

近年の瀬戸内海の漁業・養殖業は低迷している。養殖を除いた海面漁獲量は、1980年代前半をピークに減少しており、現在はピーク時の約2分の1程度に減少している(図7)²⁰⁾。皮肉なことに、漁獲量の高かった1980年前後は瀬戸内海の赤潮発生件数も多かった時期である。但し、この漁獲量の高かった時期にはマイワシ漁獲量の割合が顕著に高く、この頃高級魚と言われるタイなどの割合は低く、漁獲される魚類の生物多様性は低かったと考えられる。

漁獲量の低下は栄養塩濃度の低下と時間的

に一致しており、栄養塩濃度の低下が漁獲量低下の原因ではないかと懸念されている²⁾³⁾。 教科書的には、「栄養塩濃度低下 → 植物プランクトン生物量の減少・基礎生産量低下 → 動物プランクトン生物量の減少 → 魚介類の生物量の減少」のシナリオは理解しやすい。しかしながら、実際の沿岸海域で起こっている現象がそう単純ではないことも少しずつわかってきた。即ち前述のように、栄養塩濃度低下に対して植物プランクトン生物量や基礎生産量が単純に応答していないこと、さらに動物プランクトンのデータが非常に乏しいことから、図4の海洋食物連鎖の1段目(第一



瀬戸内海における海面漁獲量〔阿保(2016)20)を改変〕 図 7

栄養段階)およびそれ以降の減少といった上 記の教科書的なシナリオは単純には受け入れ られない。さらに地球温暖化に伴う海水の水 温上昇の影響、藻場・干潟といった浅場の喪 失も同時に検討しなくてはならない。尚、養 殖ノリの不作に関しては、冬季の水温上昇も 寄与しているが、栄養塩濃度の低下が原因で あることには疑いの余地はない。

以上のように栄養塩と漁獲量の関係につい ては、栄養塩を直接利用するノリ養殖では栄 養塩濃度低下と生産量低下の関係は明瞭であ るが、より高次の栄養段階の生物(図4の2 段目以降)を対象とする漁獲量と栄養塩との 関係解明は単純ではなく難しい200。

おわりに(今後の環境改善に向けて)

前述のように瀬戸内海の海水中の栄養塩濃 度は低下しているが、その低下メカニズムの 全容はわかっておらず、それがわからないと 栄養塩管理にむけた政策決定ができない。上 記のように近年の瀬戸内海の栄養塩濃度低下 は、単純に陸域からの負荷量の削減だけでは 説明できない。従って、まず栄養塩濃度低下 の原因を明らかにすることが重要である。次 に、漁獲量の減少については栄養塩濃度の低 下がその原因の一つであることは間違いない が、同時に、干潟・藻場といった浅場の減少、 海水温上昇、漁獲圧の影響についても検討し なくてはならない。瀬戸内海の播磨灘ではマ ダイなど近年増加した魚類もある。低次から 高次生態系までの関係をモデルで推定する試 みもなされているが、モデルの基になるデー タは十分か、またモデルの精度がどの程度な のかを確認しておかなくてはならない。今後、 低次から高次生態系へのさらなる調査研究が 必要である。

瀬戸内法が改正されたが、瀬戸内海の栄養 塩濃度の低下についての現状の把握はできた ものの、将来予測ができているわけではなく、 現時点では具体的に何をすれば良いのかはわ かっていない。また、漁獲量減少があたかも 海水中の栄養塩濃度の低下のみが原因で、そ れだけで説明されるような報道も一部みられ るが、決してそれだけでは説明できない。こ の問題は行政に任せておけば良いのではなく、 瀬戸内海に暮らす我々が瀬戸内海の栄養塩濃 度低下と漁獲量低下についての理解を深め、 今後どうすればよいのかを考えなくてはなら ない。そのためにも、市民の方にもっと、瀬 戸内海についての理解と興味を深めて欲しい。 前回の寄稿(本誌、2014年8月号、No. 330) にも述べたが、我々、香川大学瀬戸内圏研究 センターでは、瀬戸内海の環境に関する基礎 研究はもちろんのこと、一般市民の方への瀬

戸内海の環境についての啓蒙活動にも積極的 に取り組んでいる。毎年、調査船を用いた海 洋観測実習や海の環境に関する公開講座を開 催している。また、干潟観察用のテキスト 『干潟の生物ハンドブック』(香川大学瀬戸内 圏研究センター・庵治マリンステーション編、 恒星社厚生閣)21)、高校生から大学生向けの 海の科学の入門書『海洋科学入門~海の低次 生物生産過程~』(多田邦尚・一見和彦・山 口一岩著、恒星社厚生閣)18)も出版した。瀬 戸内周辺に暮らす方々に、瀬戸内海への関心 をもっと持って頂き、瀬戸内海が豊かな海を 取り戻すことを願っている。

尚、本稿は主に今年度学会誌に掲載された 著者の総説(多田2021)22)の内容を中心に、 他の情報も加えて整理し直したものである。 本稿をまとめるにあたり、有益なご議論とご 協力をしてくださった香川大学瀬戸内圏研究 センター教授の一見和彦氏、同大学農学部准 教授の山口一岩氏、博士研究員の中國正寿氏、 技術補佐員の滝川祐子氏に感謝する。本稿の 一部は、環境研究総合推進費

JPMEERF20205005の補助によるものである。

参考文献

- 1) 天野秀臣(2001) 有明海のノリに起きたこと~日 本のノリ産業に大きな打撃を与えた"色落ち"と は?~. 化学と生物, 39, 784-785.
- 2) 反田實(2015)第4章 瀬戸内海東部の貧栄養化 と漁業生産.「海と湖の貧栄養化問題 水清けれ ば魚棲まず」(山本民次・花里孝幸編), 他人書 館, 東京, pp. 91-128.
- 3) 反田實(2020) 瀬戸内海・播磨灘における水産業 と窒素. 海洋と生物, 250, 446-456.
- 4) 山本民次(2021) 瀬戸内法の再改定と広島湾の環 境改善策の提案,豊かな海,54,23-31.
- 5) Nishikawa, T., Y. Hori, S. Nagai, K. Miyahara, Y. Nakamura, K. Harada, M. Tanda, T. Manabe and K. Tada (2010) Nutrient and Phytoplankton Dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan During a 35 Year Period from 1973 to 2007. Estuaries and Coast, 33, 417 - 427.

- 6) 阿保 勝之, 秋山 諭, 原田 和弘, 中地 良樹, 林 浩志, 村田 憲一, 和西 昭仁, 石川 陽子, 益井 敏光, 西川智, 山田京平, 野田誠, 徳光俊二 (2018) 瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変 化とその要因.沿岸海洋研究,55,101-111.
- 7) 環境省(せとうちネット) 令和元年度版環境統計 集 URL. https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/ setouchiNet/seto/g2/g2cat03/tokusohou/ hasseifuka.html (2021年10月時点)
- 8) 環境省(せとうちネット) 灘別水質の推移 URL. https://www.env.go.jp/water/heisa/heisa_net/ setouchiNet/seto/g2/g2cat01/suishitsu/ suishitsusuii.html(2021年10月時点)
- 9)藤原健紀, 字野奈津子, 多田光男, 中辻啓二, 笠 井亮秀, 坂本亘 (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.
- 10) 武岡英隆, 菊池隆展, 速水祐一, 榊原哲郎 (2002) 瀬戸内海における外洋起源の栄養物質、月刊海洋、 34. 406-411.
- 11) Yanagi, T., Ishii, D. (2004) Open ocean originated phosphorus and nitrogen in the Seto Inland Sea, Japan. Journal of Oceanography, 60, 1001-1005.
- 12) 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.
- 13) 武岡英隆 (2006) 沿岸域における外洋起源栄養物 質量の見積もり法とその問題点. 沿岸海洋研究. 43. 105-111.
- 14) 多田邦尚, 西川哲也, 樽谷賢治, 山本圭吾, 一見 和彦, 山口一岩, 本城凡夫(2014) 瀬戸内海東部 海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影 響. 沿岸海洋研究, 52, 39-47.
- 15) 多田邦尚(2015)海底からの栄養塩溶出量,海洋 と生物, 37, 217-221.
- 16) 駒井幸雄(2015) 底質の状況と内部負荷, 環境技 術, 44, 128-133.
- 17) 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.
- 18) 多田邦尚, 一見和彦, 山口一岩(2014) 海洋科学 入門~海洋の低次生物生産過程~, 恒星社厚生 閣, 122p.
- 19) 西嶋渉 (2018) 瀬戸内海における栄養塩濃度管理 法,沿岸海洋研究,56,13-19.
- 20) 阿保勝之(2016) 瀬戸内海を豊かな海に~水産資 源の持続的利用のための提言, 水環境学会誌, 39, 97-101.
- 21) 一見和彦, 多田邦尚, 太田直友, 河井 崇, 吉田 一代. 滝川祐子 (2011) 瀬戸内圏の干潟生物ハン ドブック、香川大学瀬戸内圏研究センター庵治マ リンステーション編,恒星社厚生閣,95p.
- 22) 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.