

VA314

ウェルビーイングと水

(日女大・理) ○(正)宮崎あかね*

1. ウェルビーイング

ウェルビーイング (well-being) は GDP (国内総生産) では測ることのできない、より広い意味での豊かさや活動を表す言葉として用いられている。日本語では「より良い暮らし」、「健康」、「幸福」などと表されることが多い。化学工学会の札幌宣言¹⁾では「健康、安心、幸福」と訳されており、「心身ともに健やかで安心と幸せが満たされている状態」と定義されている。

しかし、ウェルビーイングについて広く合意された定義は存在せず、これをどのようにして定量的に測定するのは難しい問題である。そもそも、何のウェルビーイングなのか。個人なのか、地域、国もしくは地球全体なのか。また、主観的に評価すべきか、それとも客観的に評価すべきなのか。ウェルビーイングの定義や評価については、公開討論や文献調査など、さまざまなアプローチによって模索されてきた²⁾。

現在、WHO や OECD など様々な機関がウェルビーイングの測定を実施しているが、その方法は各機関の目的に沿った独自のものとなっている。例えば、OECD は2011年から「OECD より良い暮らしイニシアチブ (OECD Better Life Initiative)」を開始し、「より良い暮らし指標 (BLI, Better Life Index)」を用いてウェルビーイング指標の分析・公表を行っている。BLI は「物質的生活状況」と「生活の質」の2分野からなる全11の指標で測定される。物質的生活状況には、「住宅」、「所得と富」などが、生活の質には「環境の質」、「社会とのつながり」や「仕事と生活のバランス」などが指標として含まれている。ちなみに、「環境の質」は「大気汚染」と「水の質」で評価され、前者は平均微小粒子状物質(PM_{2.5})濃度、後者は「あなたの住んでいる街や地区での水の質に満足していますか」との設問に対する回答によって測定される³⁾。

2. ウェルビーイングと水

ウェルビーイングと水が深く関係しているのは論を俟たない。健康に生きるために成人は体内の塩分濃度を0.9%に保つ必要があり、そのためには1日あたり1.5~3.5 L 程度の淡水を飲む必要がある。安全な飲料水を継続的に利用できる人口の割合は1990年から2015年にかけて、世界全体では76%から91%へ改善しているが、未だ約6億6千万人が安全な飲料水を継続的に利用できない状況にある。また、ウェルビーイングと水の関係は飲料水のみに限らない。世界的に見て最大の淡水消費分野は農業であり、淡水取水の約70%が灌漑農業に使用されている。残りは工業用水が約20%と生活用水が約10%である。

札幌宣言に謳われるように、化学工学者は化学工学と関連する技術の進歩を通して、人々のウェルビーイングの推進への貢献を第一の目的とする。安全な水への化学工学の貢献を考えるにあたり、我々はウェル

ビーイングをどのように捉えれば良いのだろうか？

ウェルビーイングの主要な3要素として、経済、社会、環境及び持続可能性がある³⁾とされ、水はこのいずれとも密接に関わっている。図1は国のウェルビーイングの構造を図式化した一つの例である。

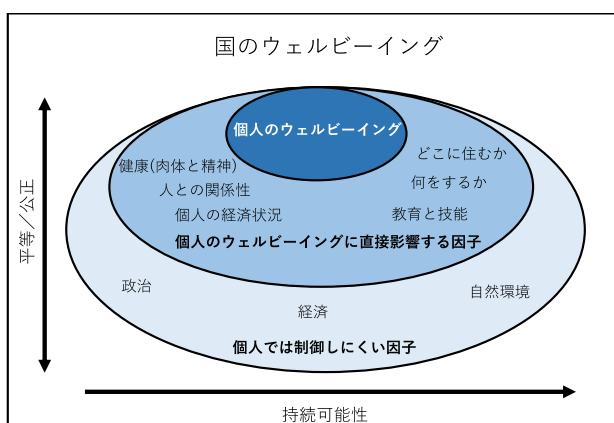


図1 ウェルビーイングの構造(文献2をもとに作成)

個人の主観を中心に、その周りを個人のウェルビーイングに直接影響する因子、例えば健康状態や居住場所などが囲んでいる。さらにその外側には、自然環境や経済など、個人では制御しにくい因子が配置されている。また、これらウェルビーイングの主体間での差異は平等や公正に、また時間軸が持続可能性に関係することが示されている。

こうしたウェルビーイングの構造に基づいて水との関わりを考えたとき、化学工学はどのような領域にもっとも貢献できるのだろうか。

3. 水の量と質

地球上の水の量は、今から44億年前に海洋が形成されて以来一定である。現在、地球の表面にはおよそ14億立方キロメートルの水が存在するが、このうち97.5%は海水であり、淡水はわずか2.5%である。しかも淡水の大部分は南極や北極地域などの氷や氷河として存在するため、河川や湖沼など人が利用しやすい状態で存在する淡水は、地球上の水の約0.01%でしかない⁴⁾。

水圏において水は循環し、定常状態を保っている。海水が蒸発し、雨となってさまざまな場所に降り注ぐ過程は、太陽エネルギーによる地球規模での水の蒸留・輸送である。しかし、2030年までに淡水資源の不足は必要量の40%に達すると見積もられており⁵⁾、世界は水危機への道を一直線に進んでいる。これは太陽エネルギーによる水循環と人間の水需要との間で、量的・質的な不一致が拡大していることに他ならない。

生活、農業、工業、エネルギー及び環境に要する水資源量は一人当たり1,700 m³/年とされている⁶⁾。一

方、水資源として人間が最大限利用可能な量を水資源賦存量といい、降水量から蒸発散量を引いたものに当該地の面積を乗じて求めることができる。世界の水資源賦存量は一人当たり約7,300 m³/年であり⁴⁾、全ての人に行き渡らせるのに十分なだけの量がある。しかしながら、この値は地域によって大きく異なっており、今後の人口および水循環の変化によって大きく左右される。こうした、水の量的な問題に対するアプローチとして、淡水の輸送が考えられる。これには淡水の直接的な輸送と、食料の輸出入を介した間接的な輸送があるが、こうした領域での化学工学の貢献は間接的なものになると考えられる。

一方で、質の問題はどうか。水質の問題には、原水中の不要なものを分離するというアプローチが必要である。原水中に含まれる不純物の種類や濃度、求められる水の純度によって多岐にわたる需要があり、この領域では化学工学が直接的に貢献している。

4. どのような水をどのくらいきれいにするのか

水の質に関する問題を解決する際の鍵は、どのような水をどのくらい浄化するのかという問いに尽きる。例えば、日本でもっとも身近な飲料水は水道水であるが、その水質は水道法で基準が定められており、水道事業者などに検査の義務が課せられている。水道水の原水は多岐にわたり、河川上流都市の下水が下流都市の水道水源として利用されるなど、限られた水資源を有効に利用するための反復利用が行われている。反復利用において原水の水質は、上流都市の下水処理に大きく依存する。

さらに、水についての量的な問題を解決するために新たな水源として利用されているのが、下水と海水である。こうした場合には、通常の浄水とは異なる次元での浄化が求められ、質的な問題を同時に解決することも欠かせない。下水や海水からの淡水製造では、膜を用いた分離が行われており、日本は水処理膜の開発において主導的な地位にある。膜を用いた淡水製造においては、膜の維持、排水、コストなどが課題となっている。

一方で、半導体や液晶などの電子デバイス製造、原子力発電、医療精製、バイオテクノロジー、化学分析などの分野では純度を高めた超純水が必要とされる。超純水は膜やイオン交換装置などを用いて製造され、現在我々が入手できるもっとも純度の高い水は、限りなく理論純水に近い。しかし、超純水への要求水質は年々上昇しており、さらに大流量化への対応、コスト削減や環境保全など、超純水製造に対する要求も多岐にわたっている。

5. Efficiency と Sufficiency

我々は今、下水や海水を含めて、どんな水からも淡水を作り出し、そこに含まれる不純物を限りなく取り除くことができる。つまり、水質を自在にコントロールすることができる技術を手に入れている。これらの技術をより効率の良いものへと高めていくことが必要な

一方、ウェルビーイングの推進のためには別の視点が求められる。例えば、水道水は同じ水質の水が多く、家庭に供給されるが、どの程度のコストやエネルギーをかけて、どのような水質を保証するのかについては、市民の合意に基づく判断が必要になる。

日本の浄水処理方法は、急速ろ過、緩速ろ過、膜ろ過、消毒のみの4つの方式に分類され、このうち急速ろ過が80%近くを占めている。いずれの方式を採用する場合でも消毒施設を設け、塩素剤による消毒を行うことが義務付けられている。最近ではこれらの処理に加えて、高度浄水処理の導入が一般化している。高度浄水は、粉末活性炭処理、粒状活性炭処理、オゾン処理、生物処理のひとつまたは複数を組み合わせたもので、有機物やカビ臭などの溶解性成分の除去を目的としている。高度浄水処理される水の量は年々増えており、1995年度は浄水量の12%だったものが、2017年度は35%になった⁷⁾。この事実は、人々が水道水に対して単に安全性のみならず、おいしさも求めており、そのためにはコストの増加もやむを得ないと判断していることを示している。

「あなたの住んでいる街や地区での水の質に満足していますか」という OECD の BLI に関する質問にもあり、水の質は私たちのウェルビーイングに直結する。人口増加、温暖化などによって水需要が変化しつつある現在、我々はどのような水源から水を得て、どの程度浄化し、どこで使うべきか。我々が手にしている技術を理解し、ウェルビーイングとの関係の中で判断していくためにも、関係者が広く対話を繰り返すことが欠かせない。

参考文献

- 1) 公益社団法人化学工学会 SDGs 検討委員会、化学工学会 国連持続可能な開発目標に関する宣言 (2019・札幌) - 人々の「健康、安心、幸福」のための化学工学- (2019).
- 2) WHO, Measurement of and target-setting for well-being: an initiative by the WHO Regional Office for Europe, First meeting of the expert group, 2012
- 3) OECD Better Life Initiative Compendium of OECD well-being indicators, 2011
- 4) 国土交通省、令和元年版 日本の水資源の現状について、2019
- 5) 水と衛星に関するファクトシート (国際連合広報センタープレスリリース) (https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgr_ounders/27702/)
- 6) 国連開発計画. 人間開発報告書 2006 (https://www.jp.undp.org/content/tokyo/ja/home/library/human_development/human_development1/hdr_2006.html)
- 7) 公益社団法人日本水道協会 HP 水道資料室：日本の水道の現状 (<http://iwa-jnc.jp/shiryu/water/water.html>)

VA315

分散型水処理・給水システム -SDGs への取り組み-

1. 世界における水問題と持続可能な開発目標 (SDGs)

現在、安全な飲料水を確保できない人は世界に約20億人おり、このうち1.2億人は不衛生な表流水を未処理のまま飲用せざるを得ない¹⁾。また、水不足に陥ることのある地域に住んでいる人は世界人口の半数以上の約40億人おり、その人数は2050年までに約50億人に達すると予想されている²⁾。水問題がより顕著な開発途上国では、人口増加や気候変動等による影響を受け、農村部に限らず都市部においても安全な飲料水へのアクセスが危ぶまれている。安全な飲料水を確保できないことは、衛生問題はもちろん、貧困や飢餓、女性と子どもの就学率、就業率問題等にも繋がっている。

こうした状況を踏まえ、2015年9月の国連総会で採択された SDGs の目標6では「安全な水とトイレを世界中に」を掲げ、2030年までにすべての人々が安全な飲料水、衛生施設にアクセスできる環境を整えることを目指している。

2. 三菱ケミカルアクア・ソリューションズ (MCAS)

MCAS は、三菱ケミカルホールディングスグループ傘下の水処理関連のプラント・エンジニアリング会社である。同社では水問題に関わる多様なソリューションを開発・提供、持続可能な社会の実現に向けて取り組んでおり、特に後述する分散型水処理・給水システムは SDGs の目標6だけでなく、9「産業と技術革新の基盤をつくろう」、13「気候変動に具体的な対策を」等への貢献も期待される。

これまでの事業では SDGs や気候変動適応対策への貢献が認められ、独立行政法人国際協力機構（以下「JICA」）から「JICA-SDGs パートナー」の認定や、環境省から「令和2年度気候変動アクション環境大臣表彰」を受賞している。

3. 分散型水処理・給水システム

分散型水処理・給水システム(写真1)は水源(井水、市水、河川水等)を問わず処理ができ、ニーズに応じて適切な技術(砂ろ過、活性炭、膜ろ過等)を組み合わせ



写真1. 分散型水処理・給水システム

○(MCAS) (法)佐原絵美*・(MCAS) (法)等々力博明

ることで水道法が定める水道水質基準を満たす水を供給できる。大型浄水場と比べ給水配管網が短いことから工期が短く、設備導入に係る費用も抑えられる。そのため、上水道が未整備の地域において代替水源として普及させることで、安全な飲料水へのアクセス向上を低予算且つ早期に実現することが可能である。また、原則無人運転ができるため、現地での運用、技術移管が容易である。加えて自社開発の遠隔監視システム (WeLLDAS[®]) を搭載することで、日本から設備稼働状況や各種データ、異常値をリアルタイムで把握でき、現地パートナーへのテクニカルサポートも容易に行えるなどのメリットがある。

4. SDGs への取り組み事例

これまでに本システムを用いた SDGs への取り組みとして、ケニアの地方都市における高濁度表流水の飲料化供給 (JICA 事業「太陽光発電を用いた水浄化普及・実証事業(中小企業支援型)」(2013年10月～2016年9月))、無電化地域における表流水の飲料化(写真2、UNDP 事業「アフリカにおけるインクルーシブビジネス・パイロットプロジェクト」(2012年11月～2013年5月))、塩水化・高濁度表流水の浄化(2016年5月～2017年5月、ミャンマー)等の事業を行ってきた。

また、持続可能な水資源を確保する上で、適切な環境関連技術は必要不可欠であり、MCAS では水資源管理・解析手法の技術開発等にも取り組んでいる。

当日はこれら過去の取り組みや水資源管理の事例などについて紹介する。



写真2. 無電化地域における表流水の飲料化

参考文献

- 1) WHO/UNICEF JMP, Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020. Five years into the SDGs, (2021).
- 2) WaterAid,世界の水の現状2021年.

*sahara.emi.ma@m-chemical.co.jp

VA316

海の豊かさをもたらす水管理

○(広大環) (正)西嶋 渉*

1. はじめに

里山、里海という言葉で代表されるように、日本には人が自然とうまく関わることで、より豊かな自然となり得るという思想がある。生物多様性という概念が一般化すると人の手が入ることで生まれ、維持される特有な環境が生物多様性を高めるとも認識されている。最近では森川海のつながりも重視され、漁獲量が減少し、ノリの色落ちなどに悩む瀬戸内海では、特に河川等を経由して海に流れ込む窒素やリンといった栄養塩類を上手く管理することで、「きれい」かつ人間活動のない自然環境より「豊かな」海を目指す機運が高まりつつある。

瀬戸内海は流域人口約3000万人であり、沿岸に工業地帯が立地し、高度経済成長期には死の海と呼ばれたほど富栄養化、水質汚濁が進んだ海である。後述する水質規制、下水道整備などを進め、汚濁負荷の削減に努めた結果、依然として一部で環境保全上の問題を抱えるものの規制が進みすぎ、むしろ貧栄養化しているのではないかと危惧する声ができるまで環境の改善が進んだ。

排水規制は有機汚濁物質だけでなく、富栄養化をもたらす栄養塩類についても行われた。栄養塩類は過剰であれば赤潮や過剰増殖した植物プランクトンによる底質悪化、貧酸素水塊の発生等様々な環境保全上の問題を引き起こすが、本来海洋生態系の底辺を支える植物プランクトンの生産には必須の物質である。図1¹⁾に、栄養塩類と生物生産の関係をイメージとして示す。瀬戸内海は、紀伊水道と豊後水道の2ヶ所太平洋と接続しており、そこから瀬戸内海の栄養塩類の約6割が供給されており、残り約4割が陸域から供給されている²⁾。この太平洋からの栄養塩負荷に陸域負荷が加わることで植物プランクトンによる基礎生産が高まり、その生産が動物プランクトンの生産につながり、食物連鎖を通じて魚類等さらに高次の生物生産につながる。一方、付加される陸域からの栄養塩類が多すぎると1980年代に起こったような赤潮等過剰な植物プランクトンの増殖が起こり、利用されない基礎生産が底質悪化を通じて海域の環境を劣化させる。

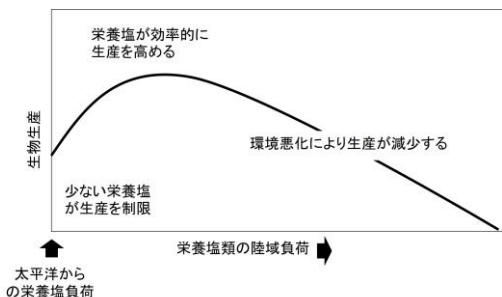


図1. 栄養塩負荷と生物生産の関係に関するイメージ¹⁾

世界の多くの閉鎖性海域では、依然として富栄養化が大きな課題であり、SDGs のゴール14では、富栄養化を含む海洋汚染を防止し、海洋及び沿岸生態系の持続可能な管理と保護を通じて健全で生産的な海洋を実現することが謳われている。瀬戸内海では、世界の閉鎖性海域に先駆けて富栄養化の克服に成功し、次のターゲットである環境保全上の問題を起こさず、生物生産を最大化する図1における生物生産のピークでの栄養塩類の管理を目指す試みが始まったところである。

2. 法規制の状況

瀬戸内海では、赤潮が頻発する富栄養化や有機汚濁を改善するために1973年に瀬戸内海環境保全特別措置法が定められた。また、人口が増加し、工業化が進む中では排水の濃度規制だけでは陸域から負荷される汚濁物質が総量では増加することから、水域に流入する汚濁負荷量全体を削減する水質総量規制が1979年に導入された（1984年为目标年次）。導入当時は COD（化学的酸素要求量）が規制対象であった。5年ごとに総量削減計画を定め、第4次（目標年次1999年）まで実施され、確実に負荷量の削減は進んだが、海域のCOD値には顕著な改善が見られず、CODの環境基準の達成率の改善も進まなかった。海域での植物プランクトンの生産に起因する内部生産が大きいことが、海域のCODが改善されない原因とされ、第5次総量規制（目標年次2004年）から規制対象に窒素・リンが加えられた。第5次総量規制以降も海域に負荷される窒素・リンが削減され、1979年当時と比較すると現在では窒素で約4割、リンで約6割

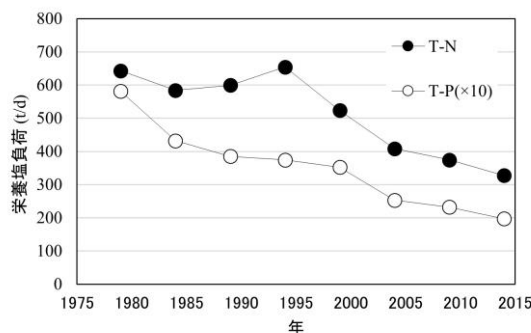


図2. 栄養塩類負荷の推移

の削減となっている（図2）。

一方で、瀬戸内海における漁獲量は1980年代から現在まで一貫して低下しており、ピーク時と比較すると6割以上の削減となっている。漁獲量の低下は、沿岸域の開発による干潟・浅場の消失や水産資源の管理が十分なされてこなかったことなどを含めた複合的な影響の結果と考えられるが、特に瀬戸内海では養殖ノリの色落ちなども重なり、瀬戸内海はきれいになりすぎた、貧栄養化し、生物生産が低下しているといった声が高まっている。

大阪湾を除く瀬戸内海では、第6次水質総量規制以降

さらなる栄養塩類の負荷削減は求められていない。さらには2015年に瀬戸内海環境保全特別措置法が一部改正され、水質が良好な状態で保全されるだけでなく、生物の多様性及び生産性が確保されるなど、瀬戸内海の有する価値や機能が最大限に発揮された「豊かな海」を目指すことが明確に示された。さらに2021年に瀬戸内海環境保全特別措置法が一部改正され、栄養塩管理制度が創設され、これまでの「規制」中心から「管理」への転換が図られ、海域や季節ごとに栄養塩類をきめ細かく管理し、生物多様性や水産資源との調和を図ることとなった。

3. 瀬戸内海の海域特性

海域や季節ごとの栄養塩類の管理といっても人為的に管理できることは、陸域からの栄養塩類負荷の調整や海域での養殖の管理などに限られる。前述した通り、瀬戸内海に供給されている栄養塩類の6割程度が太平洋起源であり、接続海域に近い海域や沖合域では太平洋起源の栄養塩類への依存度が高く、大都市圏を流域に抱える内湾や沿岸域では陸域起源の栄養塩類への依存度が高いことが容易に想像できる。

栄養塩管理を行うためには、まず対象とする海域が陸域からの栄養塩類負荷の変動に対してどう反応するかを知ることから始める必要がある。そのためには、窒素で約4割、リンで約6割の削減された過去の栄養塩類の負荷削減に対する海域の反応をみるのがわかりやすい。海域に流入した栄養塩類は、最初に植物プランクトンに摂取され、そこから食物連鎖を通じて魚類等に生産につながっているため、特に栄養塩削減と植物プランクトンの基礎生産の関係を見ることが出発点となる。この解析をしてみると瀬戸内海の実に4割程度の海域は1980年代から現在まで陸域からの栄養塩類負荷の大きな変化にも関わらず、クロロフィル-*a*量(植物プランクトン量の代替指標)、基礎生産量は変化していない。さらに別の約4割の海域は、陸域負荷の影響は多少あるものの限定的な海域であり、残りの約2割が陸域影響を強く受ける海域である³⁾。動物プランクトンの生産をその餌である植物プランクトンの生産で除した転送効率で評価すると陸域負荷の影響を受けていない海域の転送効率は0.15程度と高い値を示す。一方で、最も強い陸域負荷の影響を受ける海域では、1980年代の転送効率は0.05程度であり、基礎生産が有効に利用されず、環境悪化を引き起こしていたことがわかる。現在はこの海域においても過剰な基礎生産が改善され、転送効率は0.1を超えてきた。

もともと陸域負荷の影響を受けていない海域の生産は人為的な栄養塩類の管理の対象外である。陸域からの栄養塩類負荷の影響が強い海域が栄養塩管理の対象となり得る海域である。

4. 海域の栄養塩管理のための水処理

人為的な栄養塩類の管理が可能な海域は限定的であり、内湾や沿岸域が対象となる。これらの海域は、もともと富栄養化が著しかった海域であり、管理を誤る

と再び富栄養化する危険が高い海域でもあり、生物生産と環境保全を両立させる注意深い管理が必要である。栄養塩管理が目指すところは、環境を保全しつつその海域の生物生産全体を最大化することであるが、現状では海域の生物生産全体を対象とした栄養塩管理を行うには、十分な知見の蓄積がないことから、沿岸で営まれているノリ養殖に対する栄養塩管理が対象になっている。

具体的な管理としては、ノリ養殖が営まれる秋から冬にかけて陸域からの栄養塩類の放出量を高めることが試行されている。海域での富栄養化による弊害は高水温期に起きやすいことから、低水温期に栄養塩類の放出量を高めることは環境保全との両立の面でも望ましい。沿岸で藻場を形成する大型海藻類には低水温期に繁茂期を迎える種も多く、低水温期の栄養塩類の放出は、沿岸生態系の保全・再生のためにも一つの方向性となろう。

具体的な栄養塩類の放出手段としては、現在は下水処理場が対象となっている。対象がノリ養殖となっていることもあり、窒素を対象とした季節別運転管理が試行されている。窒素の放出量を高める主要な運転方法としては、硝酸性窒素を増加させる脱窒抑制運転とアンモニア性窒素を増加させる硝化抑制運転がある。高度処理を導入している処理場では、脱窒槽(無酸素槽)を好気槽に変更して硝化された窒素を放出する脱窒抑制運転を行うことが可能であるが、高度処理を導入している下水処理場は少ない。一方、標準活性汚泥法ではあるが、曝気槽の前段を嫌気槽として運転している施設では、後段好気槽の曝気量を抑制し、硝化細菌の活性を低下させることで脱窒量を減少させ、アンモニア性窒素として窒素の放出量を増加させる硝化抑制運転が行われている。曝気槽が多段に槽割されている施設では、好気槽数を減じる方策もとられている。

5. おわりに

海の豊かさを高める栄養塩管理には、海域生態系の理解と栄養塩管理を可能にする水処理技術が求められる。硝化抑制運転では曝気量を抑制することによる省エネ効果が期待できることもあり、今後民間の水処理施設でも季節別運転管理が進められる可能性があるが、様々な水処理施設で効果的かつ安定的に季節別運転を行う技術開発を同時に進める必要がある。

参考文献

- 1) 西嶋渉, 瀬戸内海の水環境・生態系について, 瀬戸内海, 82 (2021), 印刷中
- 2) 武岡英隆, 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 (2006).
- 3) 西嶋渉, 瀬戸内海における栄養塩濃度管理法, 沿岸海洋研究, 56, 13 (2018).