

徳島県沿岸の栄養塩濃度の低下について

環境増養殖担当 池脇義弘

Key word: 栄養塩, DIN, 瀬戸内法, 藻類養殖, アサリ

今回のお話しを始めるに先立ち、まず図1を見ていただきたいと思います。図1は、徳島県沿岸のDIN（溶存態無機窒素）の濃度を過去28年間にわたり分析した結果です。各年度の調査期間は10月から翌年3月で、1～2週間に1回調査を行いました。徳島県沿岸を北から、播磨灘海域、吉野川河口周辺海域、紀伊水道南部海域に分けて、各海域の調査定点(図2)の平均値の変化として示しました。DINとは何か、DINの変動の原因やその影響などこのグラフが意味するものは何か、まず説明しなければならないところですが、その前に、瀬戸内海の水質管理に関する近年の動きについてその概要をお話ししたいと思います。

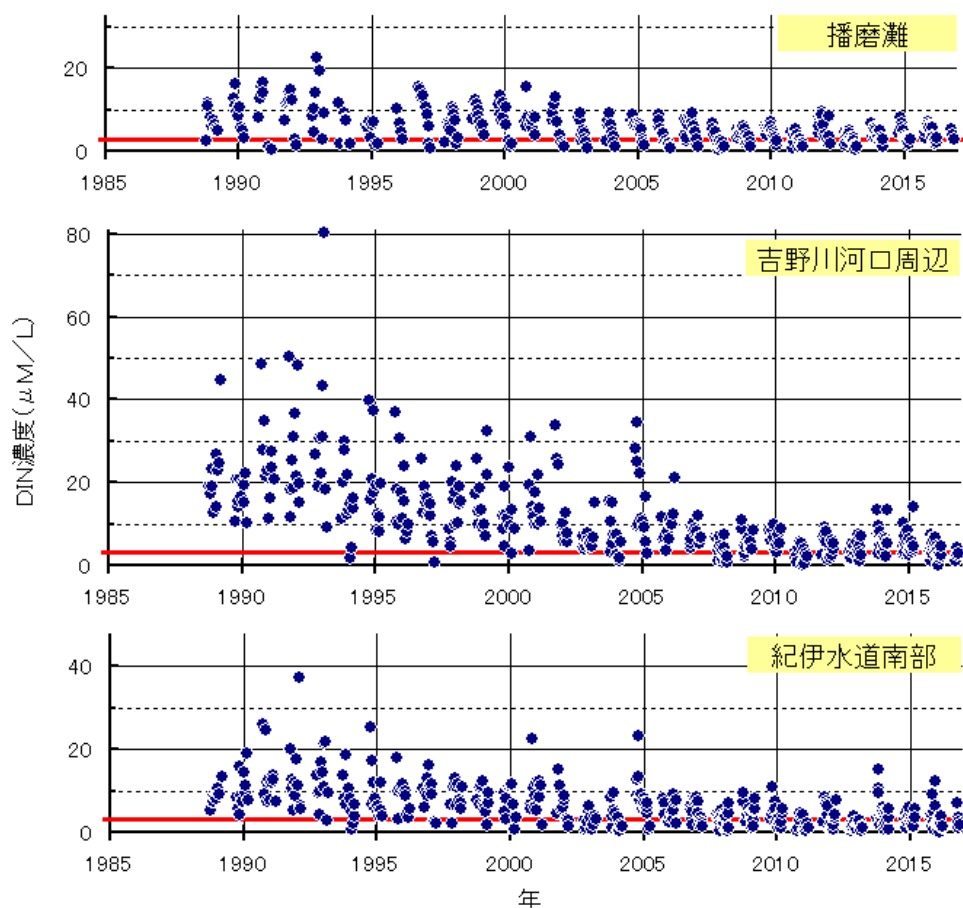


図1. 徳島県沿岸のDIN濃度の変化(赤の横線はDIN濃度 $3 \mu\text{M} / \text{L}$ を示す)

1. 瀬戸内法とその改正

2015年（平成27年）10月2日に「瀬戸内海環境保全特別措置法の一部を改正する法律」（以下、改正瀬戸内法といいます。）が施行されたことをご存じでしょうか。この法律は、1979年（昭和54年）に恒久法として制定された「瀬戸内海環境保全特別措置法」（以下、瀬戸内法といいます。）の内容の一部を変更，拡充することが目的ですが，なぜ，今，改正瀬戸内法が必要になったのでしょうか。

時代をさかのぼれば，高度成長期時代，瀬戸内海沿岸の工業の発展や人口増加にともない，十分処理されていない工場排水や家庭排水が大量に沿岸域に流出し，瀬戸内海の汚染が進んだことが事の発端です。工場排水や家庭排水は栄養塩（栄養塩とは何かについては後述します。）増加の原因となり，富栄養化した海で赤潮が発生し養殖魚や天然の魚介類が大量死したりしたため，「瀬戸内法」が制定され，工場や家庭からの排水の基準を厳しく規制したのです。

その時代は，元のきれいな海を取り戻すことが切実な問題で，規制のおかげで瀬戸内海の水質も改善していったのですが，海域によってはすこしやり過ぎたと思われるような結果になりました。つまり，海が「きれいに」なりすぎたことが改正瀬戸内法制定のきっかけとなったのです。ここで「きれいに」と「」書きにしたのは，人が「きれい」と感じるかどうかは見た目（＝主観）の問題であり，人によって判断基準が違うからです。科学的に正確な表現をするならば，高度成長期時代の「汚れた」海は栄養塩が多すぎる（富栄養な）状態で，一方，「きれいな」現在の海は栄養塩が少ない状態なのです。つまり，「きれいになりすぎた」とは栄養塩が少なくなりすぎた（貧栄養な）状態を意味します。

敢えて主観が入る「きれいな」という言葉を使ったのは，「元のきれいな海」を取り戻そうとした結果実現した「きれいな」海が，元どおりではなかったかもしれないことを言いたかったからです。「きれい」という語は通常よい意味でしか使われないので，「海がきれいになってどこに悪いところがあるのか」とお感じになる方も多いと思いますが，「きれいな海」＝「豊かな海」とは必ずしも言えないことが問題なのです。「きれいになりすぎる」環境（栄養塩が少ない環境）があらゆる生き物にとって棲みやすいとはいえない（栄養塩が豊富な環境を好む生き物も存在する）のです。もし，栄養塩が少ない環境を好まない生物が，私たち人間にとって食糧源などとして重要な生物だとすれば大きな問題になるでしょう。たとえば，栄養塩により増殖した植物プランクトンを直接濾しとって食べるアサリがそのような生物に当たるのではないかと考えられています。

図3に1989年以降の瀬戸内海におけるアサリの漁獲量変動を示しました。アサリは瀬戸内海で1989年には12,000トン漁獲されましたが，その後漁獲量は減少の一途をたどり，2013年には200トン余りしか漁獲されていません。この傾向は徳島県でも同様です（図3）。

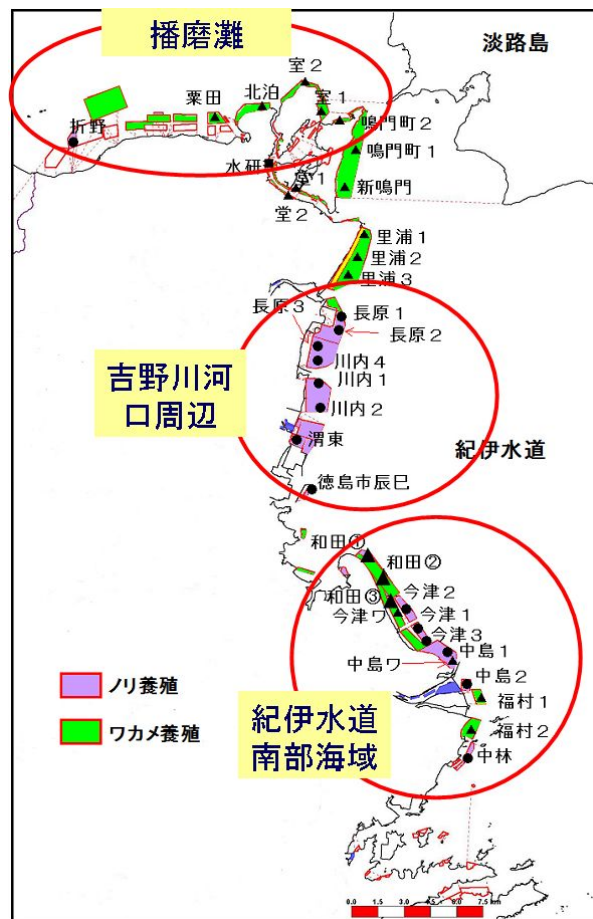


図2. 栄養塩の観測地点

ただし、アサリの漁獲量を左右する要因は、栄養塩が多いか少ないかだけではありません、埋め立てなどによる生息場所の干潟の消失、アサリを捕食する生物の増加など、アサリの漁獲量の減少を招く要因は他にもいくつか考えられます。すなわち、アサリの漁獲量の減少要因として、栄養塩濃度の低下（すなわち、水が「きれいになりすぎた」こと）の影響がどの程度あったのか、簡単には見積もれないのです。このことについては、さらに調査、分析する必要があります。

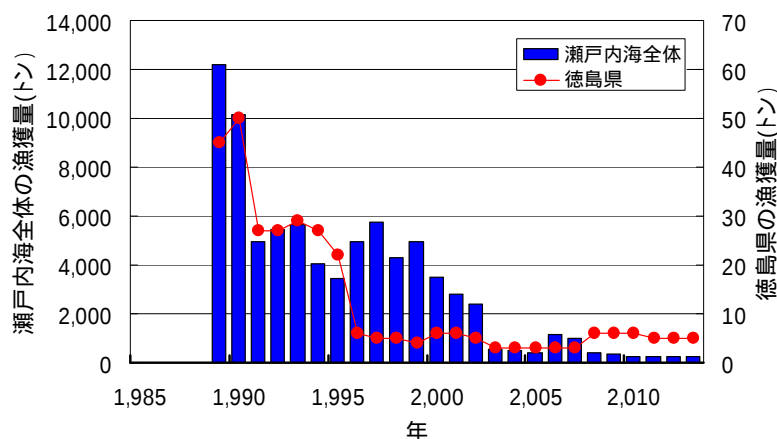


図3. 瀬戸内海におけるアサリの漁獲量の変動(農林水産統計より)

その一方で、瀬戸内海には、栄養塩濃度の影響が極めてわかりやすく現れる漁業があります。それは、ノリやワカメの養殖業（藻類養殖業）です。徳島県は、クロノリやワカメの養殖が盛んで、10月頃から養殖が始まり、翌年の2月頃から春先にかけて収穫され、私たちの食卓に上がります。しかし、近年、クロノリやワカメの養殖は「水がきれいになりすぎた」ことによる悪影響に見舞われています。

2. 藻類養殖と栄養塩

藻類養殖では、水が「きれいになりすぎた」影響は「色落ち」と呼ばれる現象となって現れます。色落ちは、藻類の肥料とも言える「栄養塩」が不足したことにより発生し、肥料切れした農作物の葉の色が悪くなる（通常黄色くなる）のと同じように、クロノリやワカメの色も悪くなるのです（写真1）。色落ちしたクロノリやワカメは見た目が悪いだけでなく、味が落ちるなど品質が低下し、単価が下がるという漁業被害につながります。



写真1. 色落ちしたクロノリ(左)やワカメ(右)(クロノリの漁場写真は岡山県提供)。

それでは、「栄養塩」とはどのようなものなのでしょうか。わかりやすく説明するために、陸上で行われる「農業」と比較してみましょう(図4)。

農業では、通常肥料をまいて作物を育てます。これがないとうまく育ちません。農業用肥料のパッケージにはよくN・P・Kと書かれていますが、それぞれが、窒素(N)、リン酸(P)、カリウム(K)のことで、肥料の三要素と呼ばれる重要な成分です。海で行われるクロノリやワカメなどの海藻養殖は、陸上では農業にあたりますが、海藻の生長にもN・P・Kが必要なのは同じです。これらを栄養塩と呼んでおり、海水中に溶けています。通常は、藻類養殖では農業のように肥料を撒きませんので、栄養塩がもともと豊富な海が藻類養殖にとって好漁場になっています。

N・P・Kのうち、K(カリウム)は海水中にたっぷり含まれており海藻がカリウム不足になる心配はありません。P(リン酸)については、東京湾ではこれが不足することによりクロノリの色落ちが発生すると言われています(石井ら 2008)が、徳島県など瀬戸内海そして有明海では、リン酸不足ではなく、N

(窒素)不足でクロノリやワカメの色落ちが発生しているとされています(村山ら 2015, 川口・高辻 2010, 萩平 2005, 川口ら 2004)。

すなわち、栄養塩の中でも、海水中の窒素の量が、徳島県沿岸の藻類養殖にとって重要なのです。ただし、一言で窒素といっても、ある状態の窒素しかクロノリやワカメは利用できません。窒素は気体として空気中に大量に存在しますが、海水中では大きく分けて、有機態と無機態に分かれます。私たちに馴染みがあるのは有機態の方かもしれません。タンパク質などの私たちの体を作っている化合物が代表的ですが、これらを、植物は栄養として直接利用することができません。これら有機態の窒素化合物がバクテリアなどによって分解され、無機態の窒素になれば、海藻は栄養として利用することができます。溶けた無機態窒素を、ちょっと難しい言葉ですが溶存無機態窒素といいます。溶存無機態窒素は、その英語(Dissolved Inorganic Nitrogen)の頭文字をとってDINと呼ばれます(図5)。海水中のDINは、硝酸、亜硝酸、アンモニアが主要な成分で、通常一番多いのは硝酸です。以下では、DINという表現を用います。

現在、何種類かある栄養塩の中でこのDIN不足が問題になっているのです。

最初にお見せした図1は、徳島県沿岸におけるこのDIN濃度の変化を示したものです。単位は、栄養塩の濃度を示すのによく使われる $\mu\text{M}/\text{L}$ ($\mu\text{g-at}/\text{L}$ とも表現される)です。それでは、図1を詳しくみてみましょう。

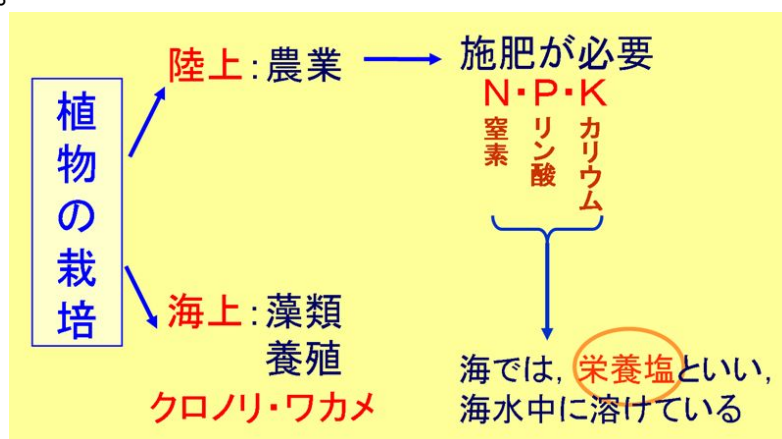


図4. 農業における肥料と藻類養殖における栄養塩との関係。



図5. 溶存無機態窒素(DIN)とは

DIN濃度が高かった1990年代をみると吉野川河口周辺では，頻繁に $20\mu\text{M/L}$ を超えるDIN濃度が観測されておりもっとも栄養塩が豊富な海（＝藻類養殖の好漁場）であったことがわかります。しかしながら，2005年以降をみると，3海域とも，滅多に $10\mu\text{M/L}$ を超えなくなっています。

図には赤い横線が引かれていますが，これはDIN濃度が $3\mu\text{M/L}$ のラインで，これよりもDIN濃度が低下するとクロノリが色落ちする危険があるといわれています（村山ら 2015，松岡ら 2005）。また，ワカメはDIN濃度が $2\mu\text{M/L}$ 未満になると色落ちの危険があるといわれています（萩平 2005）。

とくに2000年以降各海域でこの色落ち危険ラインを下回るDIN濃度が頻繁に観測されています（図1の2000年以降の部分を図6に拡大しました。）。それは，過去には最も栄養塩濃度が高かった吉野川可能周辺海域も同様です。ワカメの色落ちに関しては，1997年に水産研究課がはじめて確認して以来頻繁に発生し，2013年には，ノリ・ワカメの色落ちが大規模に発生しました（斉浦 2013）。

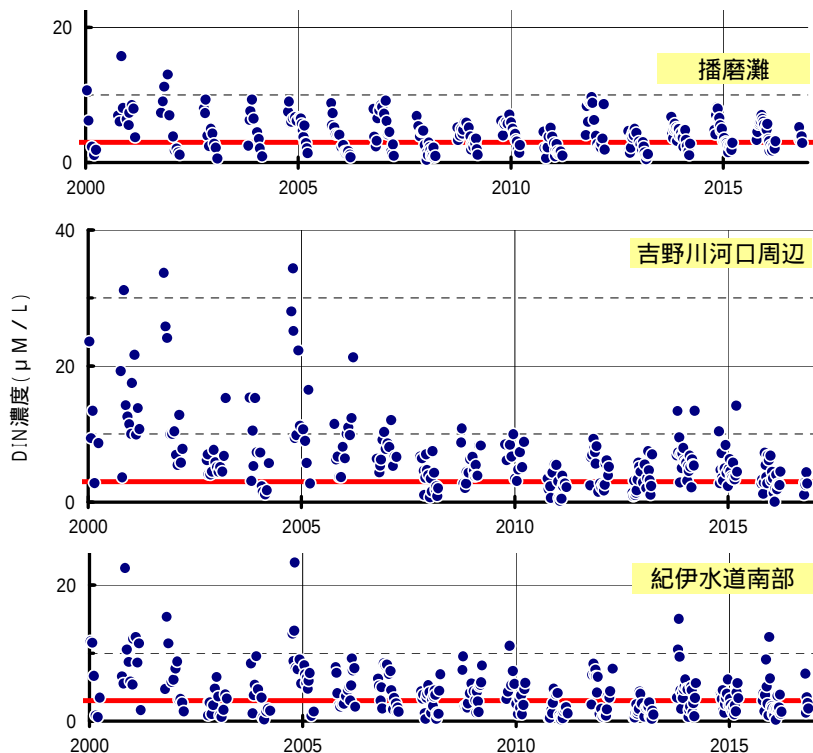
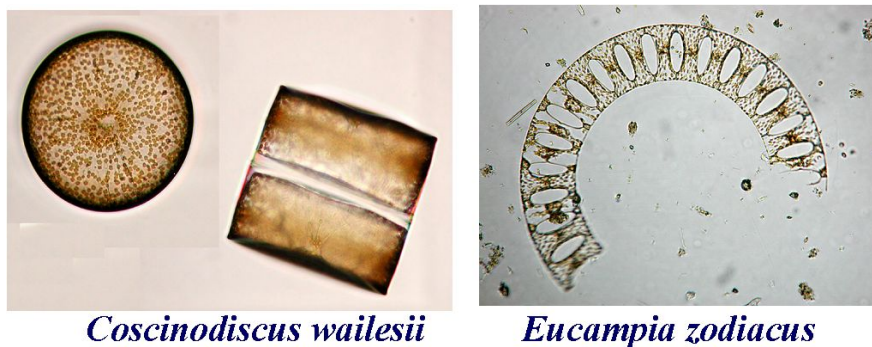


図6. 徳島県沿岸のDIN濃度の変化(2000年以降)
(赤の横線はDIN濃度 $3\mu\text{M/L}$ を示す)



Coscinodiscus wailesii *Eucampia zodiacus*
写真2. 色落ちの原因となる植物プランクトン(大型ケイ藻)の例

たとえば栄養塩を大量に消費する大型の植物プランクトン（写真2に示した大型ケイ藻など）が大発生するとDINは低下します。これが原因の色落ち被害も発生していますが，最近では，大量の植物プランクトンが発生しなくても，DINが低下します。このことから，昔に比べて養殖漁場に供給されるDINの量が減ってきていると考えられます。DINはいついどこから養殖漁場に供給されるのでしょうか？徳島県沿岸を例に考えてみましょう。

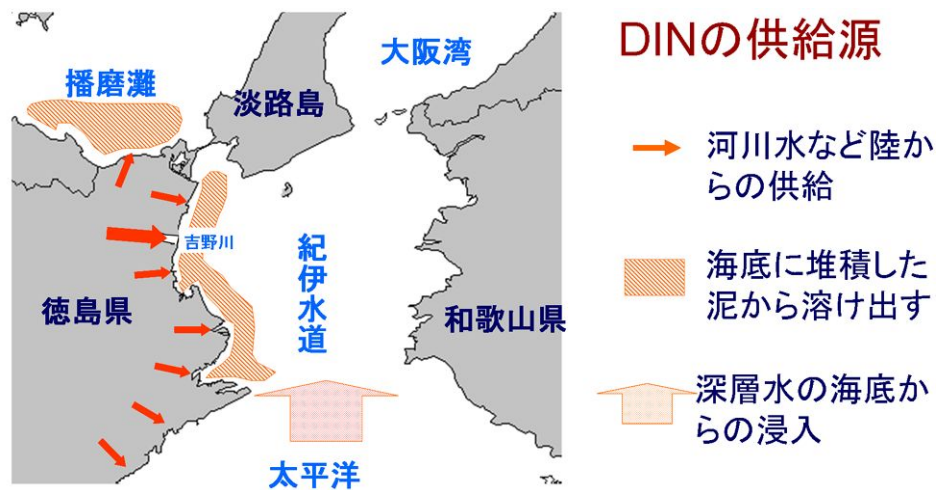


図7. 徳島県沿岸へのDINの供給経路

DINの供給源は3つに大別されます（図7）。

沿岸部の養殖漁場への供給源として最も重要なものは、吉野川など県内大河水をはじめとする陸地からの供給です。このことは、図1に示されているように、かつて、吉野川河口周辺海域のDIN濃度が徳島県沿岸では最も高かったことから明らかです。河川水のDINは、土壌や、家庭排水などを供給源として、その濃度は非常に高いのです。あとは、海底にたまった泥からの溶出、栄養塩が豊富な深層水の浸入という供給ルートもあります。徳島県沿岸のうち播磨灘側は大きな河川もなく、海底にたまった泥からの溶出が主なDINの供給源となっています。また、紀伊水道は太平洋に隣接しており、太平洋の深層水が紀伊水道南部の海底から浸入（這い上がり現象）することが時には重要な栄養塩の供給源となります（金田 1999）。深層水の浸入は黒潮が紀伊水道の南側で離岸している状態で発生する（守岡 2014、鎌田 2012、竹内 2005、金田 1999）のですが、近年は、黒潮は潮岬や室戸岬で接岸傾向が続くことが多く、むしろ黒潮表層水由来の暖かく栄養塩の少ない海水が流入することが多いようです（天真 2015）。また、海底の溶出も元はといえば陸から流れ出したもので、水温上昇に伴い上下層の混合の頻度が減少していることから、供給の頻度は低下しています。結果として、徳島県沿岸へのDINの供給源として、河川水など陸地からの供給の重要性が高まっていると考えられます。

3．瀬戸内法が漁業に与えた影響は？

ここで、第1章で述べた瀬戸内法とその改正について思い出してみましょう。瀬戸内法は海の富栄養化を解消するために陸上から海への栄養塩の流出を規制しました。今起こっている瀬戸内海の栄養塩不足はこの瀬戸内法の規制基準が本来、大阪湾奥部など富栄養海域に較べて相対的に栄養塩が少ない海域にとっては厳しすぎたためではないかと考えられているのです。

そのため、改正瀬戸内法では従前の主要な目的である「水質の保全」、「自然環境の保全」に加えて「水産資源の持続的な利用の確保」つまり「豊かな海」を目指すことが明確にされました。

そして、これまで一律で規制されていた瀬戸内海への排水中の栄養塩の量を、各水域の特性を勘案して湾・灘等を単位として個別に設定することが可能となりました。ただ、「栄養塩」という言葉は、改正瀬戸内法の条文ではなく、附則の「検討事項」に記されています。そこには、「この法律の施行後5年を目途として、瀬戸内海における栄養塩類の管理の在り方について検討を加え、必要があると認めるときは、その結果に基づいて所要の措置を講ずるものとする。」と記されています。なぜ5年後を目途とした検討事項とされたのでしょうか。

それは、これまで説明してきた栄養塩の低下とノリ・ワカメの色落ちとの関係は、水産の研究者や漁業関係者の間では、“常識”となって来ていますが、この関係を含め、栄養塩の減少が漁獲量減少を招いたという考えにはまだ十分な社会的・科学的なコンセンサスが得られていない（藤原 2016）という判断からです（先のアサリの例で述べたように、漁獲量の増減にはまだまだ十分解明されていない様々な要因が絡んでいます）。

漁獲量を回復させるための栄養塩の管理にむけて、5年間を目途に栄養塩と漁獲量の関係を明らかにする必要があるわけですが、ここでいう栄養塩類の管理の方法は「順応的管理」と呼ばれる手法です。順応的管理では、まず目標を設定しこれまでの知見を総合して最善と思われる管理手法を採用し実施するところまでは従来の方法と変わりませんが、未来（すなわち、管理結果）の予測に不確実性（自然本来の変動や情報不足が原因）があることを明確に認めているところが違います。必ずしも、期待していた結果とならない可能性があるため、管理手法を継続的なモニタリングによって逐次見直して修正を加えながらよりよい管理手法を行おうとするものです。

海域の栄養塩の動態には多数の要因が複雑に絡んでいるため、最初から精度の高い管理を目指すには、膨大な知見の集積が必要となることが想定されます。しかし、それでは管理計画策定までに歳月がかかりすぎる恐れがあります。5年間でも足りないかもしれません。せっかく法律が改正されても、新しい管理計画がなかなか実行に移せなかったら意味がありません。未来は予測不可能だからと、全く根拠もなく管理計画を策定し実施することはできませんが、順応的管理は、モニタリング結果をもとにした修正を認めているため、管理手法の決定に柔軟性があります。自然変動などの不確実性があることについては、モニタリング結果に基づく修正で対応すればいいので、計画策定のためのデータを絞り込めます。さらに、データを収集する方法の工夫などにより、早期に管理計画を実行することが可能となるでしょう。水産研究課は、まず、国や瀬戸内海に面した各府県の研究機関と協力して、豊かな海の実現に向けて、栄養塩管理方策を策定するためデータの収集と解析を行ってゆかなければなりません。そして、瀬戸内法を所管する環境省や環境関係の部署等と協議し、できるだけ早い栄養塩管理の実現を目指したいと思います。

4. さいごに

海は全国民共有の財産。どのような海を理想と考えるかは、人それぞれ、住んでいる所、職業、趣味・嗜好などによって違っているでしょう。

しかし、かつて公害によって汚れすぎた瀬戸内海は、誰の目から見ても理想とはほど遠い海だったと思います。海が汚れすぎたのだからきれいにしようと、法により様々な規制が実行されたのは当然の成り行きでした。そして、その結果である今のような「きれいな」海が一番よいと考える人もいます。

一方、漁業などによって海の恵みを得ている人、そして、海の恵み（＝魚介類）を重要な食糧と考えている人は、瀬戸内法によって生み出された海をみて、必ずしも「きれいな海」＝「豊かな海」ではないと感じたのではないかと思います。

「過ぎたるは及ばざるがごとし」

「水清くして魚棲まず」

この言葉が、まさにぴったり当てはまる状態なのかもしれません。ただ、現在でも、瀬戸内海の一部の海域は富栄養な状態のままです。季節的には、赤潮が発生し漁業に被害を与えることもあります。改正瀬戸内法は、単に再び海を汚そうとすることではなく、各海域の特性を正しく理解し、誰にとっても豊かだと思える海の実現を目指しています。そのことを、「きれいな」海が一番よいと考える人も含めてできるだけ多くの人に理解してもらうよう努力する必要があります。そして、そのような理想的な豊かな海が実現できるよう、私たちの知恵が試されていると思います。

文 献

- 石井光廣・長谷川健一・松山幸彦(2008)東京湾のノリ生産に影響を及ぼす環境要因.栄養塩の長期変動および最近の珪藻赤潮発生の影響.水産海洋研究, 72, 22-29.
- 村山史康・清水泰子・高木秀蔵(2015)岡山県ノリ漁場における栄養塩濃度とノリの色調および乾海苔単価との関係.日本水産学会誌, 81, 107-114.
- 川口 修・高辻英之(2010)広島県東部海域における溶存態無機窒素動態とノリの色落ちへの影響.日本水産学会誌, 76, 849-854.
- 萩平将(2005)ノリ・ワカメの養殖漁場の栄養塩.徳島水研だより, 53, 3-4.
- 川口修・山本民次・松田治・橋本俊也(2004)水質の長期変動に基づく有明海におけるノリおよび珪藻プランクトンの増殖制限元素の解明.海の研究, 13, 173-183.
- 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.
- 斉浦耕二(2013)ノリ・ワカメ養殖で重要な1~3月の栄養塩を予測.徳島水研だより, 87.
- 金田佳久(1999)紀伊水道の夏の海洋構造 - 陸棚斜面水の這い上がり現象 -.徳島水研だより, 37.
- 守岡佐保(2014)猛暑なのに低水温? 2013 年夏期の紀伊水道の特異的な海況.徳島水研だより, 89.
- 鎌田信一郎(2012)阿南市沿岸におけるワカメ大量繁茂の謎.徳島水研だより, 80.
- 竹内淳一(2005)紀伊半島周辺の海洋構造と変動および漁業への影響.和歌山県農林水産総合技術センター特別研究報告, 8, 1-123.
- 天真正勝(2015)黒潮流路の変化による徳島県沿岸への影響.徳島水研だより, 93.
- 藤原建紀(2016)瀬戸内法の改正と栄養塩管理の方向性.瀬戸内海, 71, 13-15.