

瀬戸内海東部におけるノリ、ワカメ 養殖のための栄養塩管理に向けて

(水産庁委託「沿岸海域の栄養塩管理技術の開発」事業成果ダイジェスト)

(独) 水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所
岡山県農林水産総合センター水産研究所
兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター
香川県水産試験場
徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課
(地独) 大阪府立環境農林水産総合研究所水産技術センター
大阪工業大学
香川大学
京都大学

水産庁委託「新たなノリ色落ち対策技術開発のうち沿岸海域の栄養塩管理技術の開発委託事業」が平成22年度～26年度に実施されました。この事業成果の概要を紹介することを目的として、「瀬戸内海東部におけるノリ、ワカメ養殖のための栄養塩管理に向けて」を作成しました。

もくじ

瀬戸内海東部の栄養塩環境とノリ生産の現状	1
備讃瀬戸における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発（岡山県）	2
播磨灘北部海域における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発（兵庫県）	6
播磨灘南部海域における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発（香川県）	10
紀伊水道における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発（徳島県）	12
大阪湾における形態別窒素の動態と播磨灘への栄養塩供給（大阪府）	14
瀬戸内海東部海域に流入する主要河川の水質の時系列解析と加古川下流域における窒素・リンの存在形態の解明（大阪工業大学）	16
底層における窒素・リンの動態と珪藻の生態学的機能の解明（香川大学）	18
安定同位体比を用いたノリ漁場への栄養塩供給源の推定（京都大学）	20
瀬戸内海東部における栄養塩動態の把握とノリ養殖等のための栄養塩管理（瀬戸内水研）	22
ノリ、ワカメ養殖のための栄養塩管理に向けて（まとめ）	24
用語の解説	25



正常ノリ

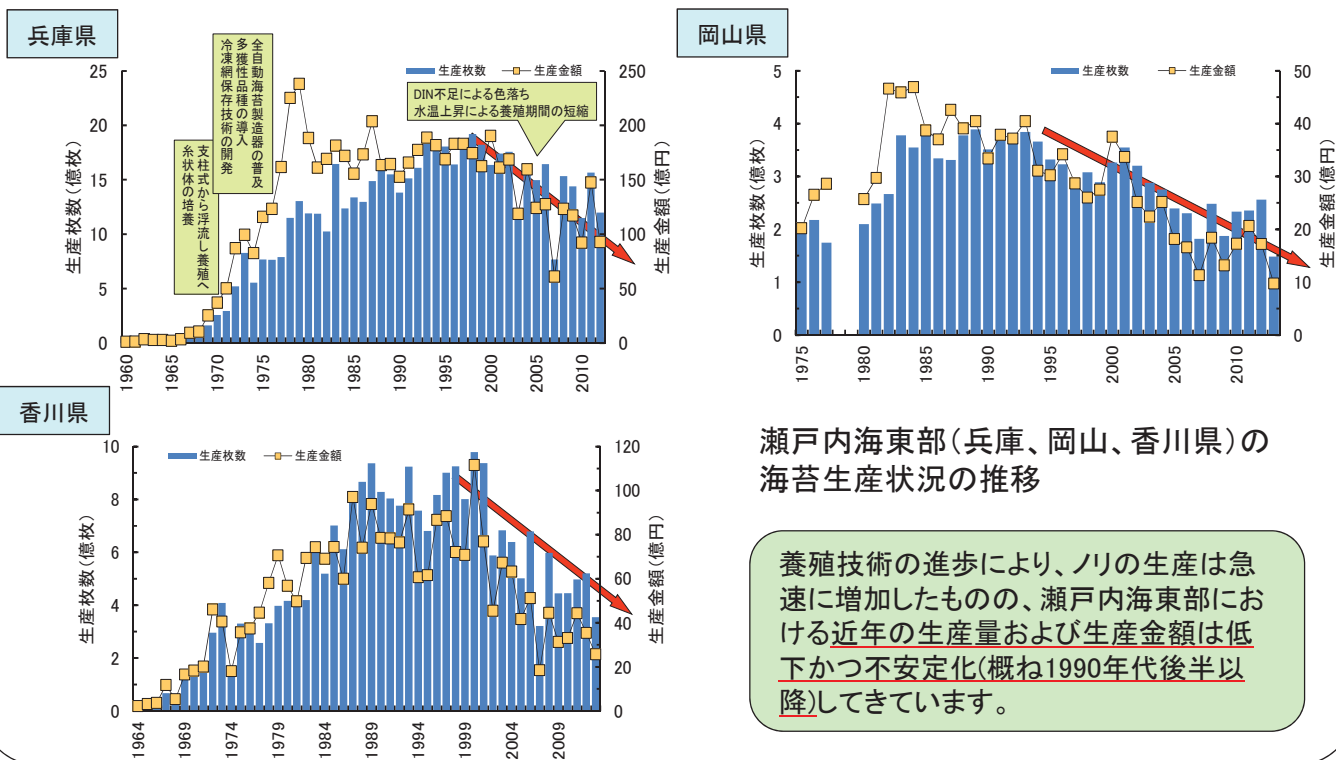


色落ちノリ

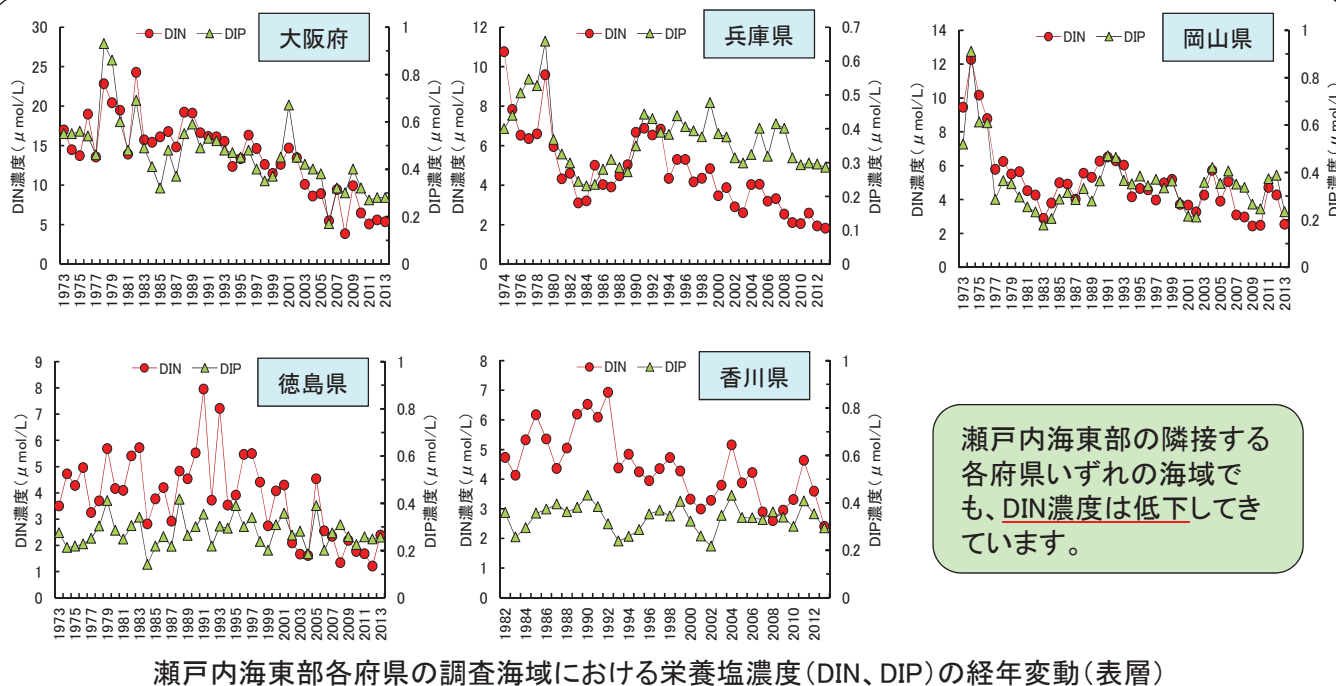


海域の栄養塩（無機態窒素）が不足すると色落ちが発生して商品価値が低下します

瀬戸内海東部の栄養塩環境とノリ生産の現状



ノリ養殖は瀬戸内海東部の重要な漁業種類であり、生産不振は水産業において深刻な課題



瀬戸内海東部では栄養塩のうち、特にDIN量の不足によってノリ(ワカメ)の色落ちが発生し、生産不振の主な要因となっています

- このような背景から、本事業では次の成果を目標に調査、研究に取り組みました
- ①瀬戸内海東部のノリ(ワカメ)漁場およびその周辺海域における栄養塩の動態を明らかにする
 - ②ノリ(ワカメ)養殖に有効かつ適切な栄養塩管理技術を開発、提言する

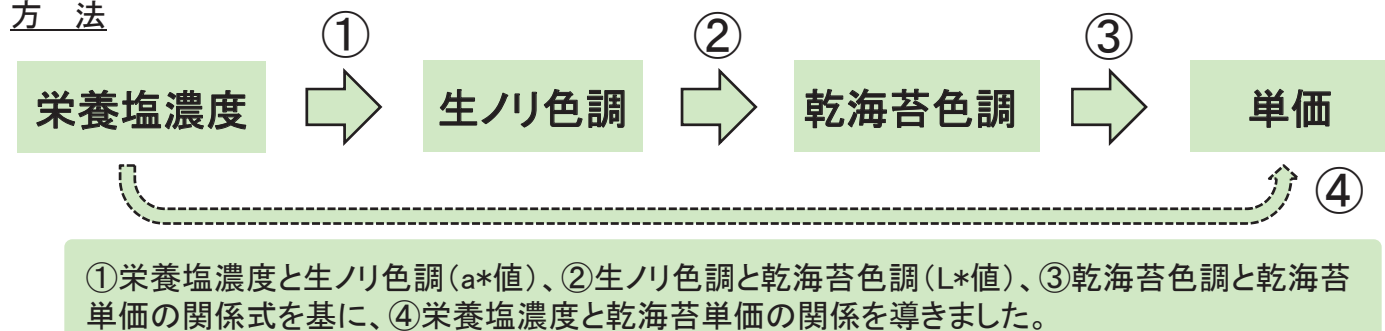
備讃瀬戸における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発 (岡山県農林水産総合センター 水産研究所)

岡山県における栄養塩濃度とノリ色調および乾海苔単価との関係

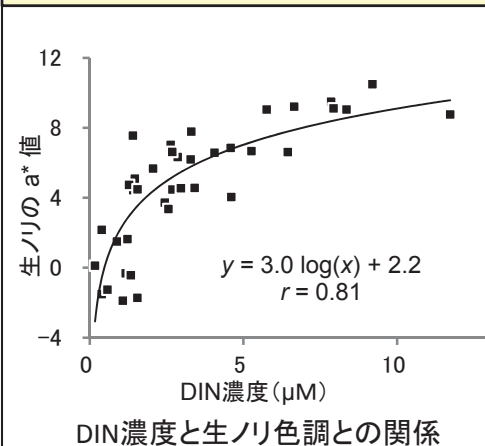
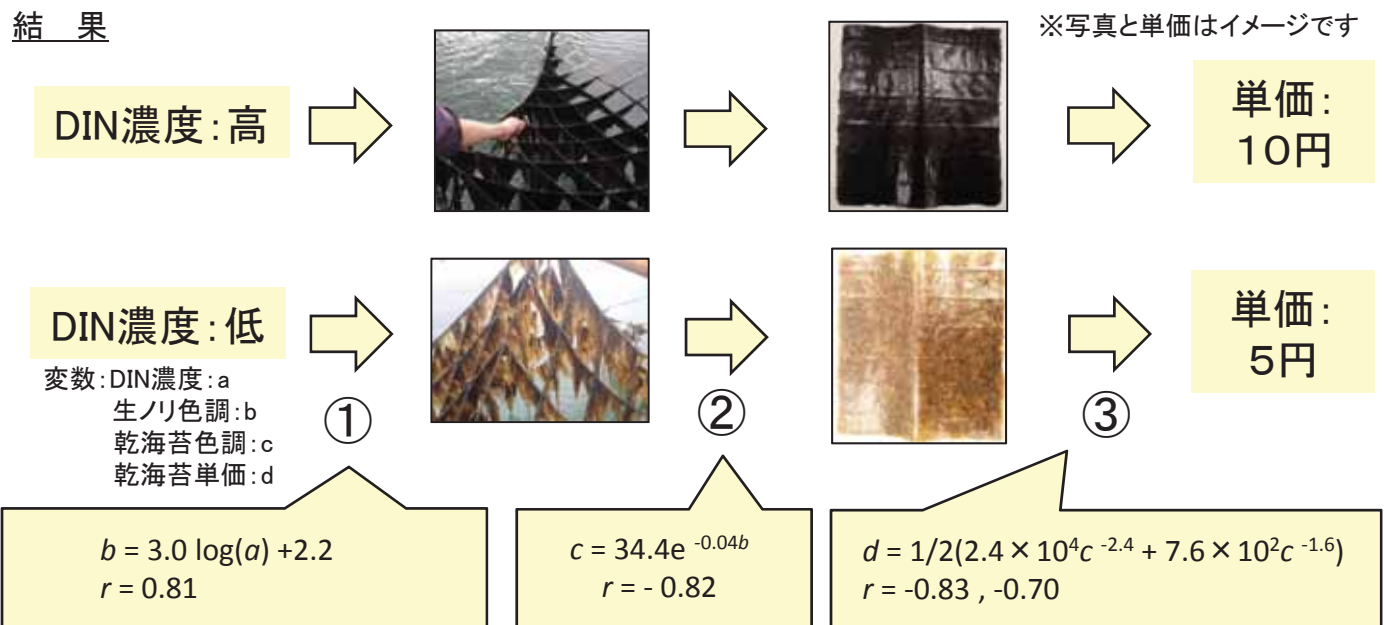
近年、岡山県のノリ養殖は、海域の栄養塩濃度の低下に伴う色落ちにより大きな被害が出ています。色落ちしたノリから製造した乾海苔の品質は低下し、単価が低くなると言われていますが、栄養塩濃度と乾海苔単価の関係は明らかになっていません。

そこで、養殖漁場における栄養塩濃度と生ノリの色調、乾海苔の色調、乾海苔単価の関係をそれぞれ明らかにし、原価割れが生じる栄養塩濃度を検討しました。

方 法



結 果



④ 栄養塩濃度と単価との関係

DIN濃度	生ノリa*値	乾海苔L*値	単価
1.0	2.2	31.7	4.27
2.0	4.3	29.3	5.04
2.1	4.4	29.2	5.10
3.0	5.5	28.1	5.56

DIN濃度と生ノリ、乾海苔の色調、単価の関係を明らかにしました。

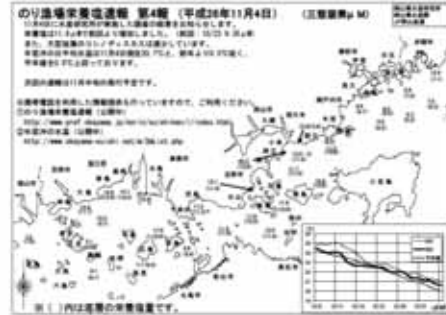
DIN濃度が2.0μM以下になると、原価(5.10円/枚)割れの恐れがあります。

硝酸塩センサーを用いたノリ漁場栄養塩テレメトリー技術の開発

栄養塩(DIN)濃度の低下に伴って、ノリの色落ちが発生します。DIN濃度の低下を早期に知ることができれば、色落ちの発生前に収穫が可能となり、色落ち被害の軽減が可能です。日本各地の水試等の公設研究所では、定期的にノリ漁場の海水を採取し、栄養塩調査を行っています。



栄養塩分析装置



栄養塩モニタリング結果

ところが、現在の方法は調査および分析に多くの労力が必要となるため、その回数が限定されます。その結果、DIN濃度の低下のタイミングを見逃し、色落ち被害の軽減に十分に貢献できないことがあります。



DINの主成分である硝酸塩の連続観測装置と電話回線を組み合わせたDIN濃度のテレメトリー技術の開発を試みました。

1. 漁場に硝酸塩のセンサーを設置し、センサー値と実測のDIN濃度の相関を調べました。
2. 転送装置を開発し、データの転送試験を行いました。

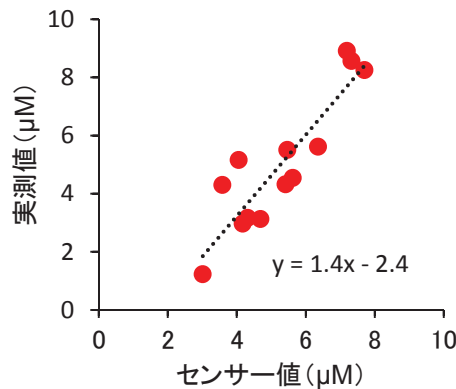


図1 センサー値と実測DIN濃度の関係

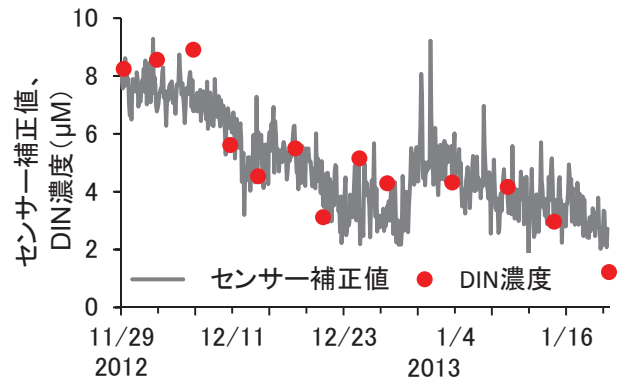


図2 センサー補正值と実測DIN濃度の推移

センサー値と実測DIN濃度の間に有意な相関が見られました(図1)。相関式による補正值は、実測DIN濃度と同様の推移を示しました(図2)。

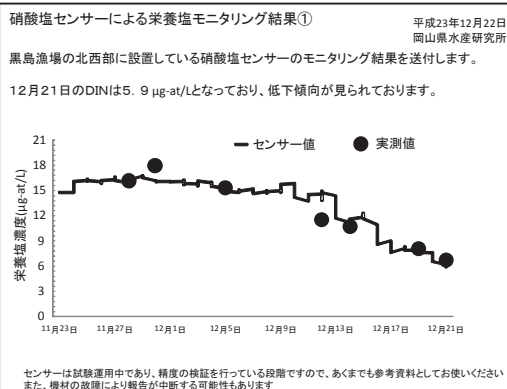


図3 漁業者に向けて送付したFAX

データ転送試験に成功し、DIN濃度のテレメトリー技術を開発しました(図3)。



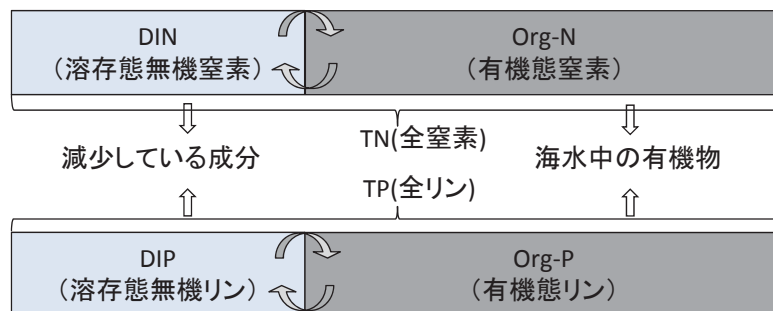
海域のDIN濃度の状況を把握しながら、ノリ養殖を行うことが可能となり、色落ち被害の軽減につながることを期待されます。

備讃瀬戸沿岸海域における形態別の窒素・リン動態の把握

現在、瀬戸内海で減少が問題となっているのは、DIN(溶存態無機窒素)、DIP(溶存態無機リン)ですが、海域の窒素とリンはTN(全窒素)、TP(全リン)を基準に管理しており、矛盾が生じています。今後、海域のDINとDIPの動態を理解し、管理を行っていくためにはTNとDIN、TPとDIPの関係についてより深く知る必要があります。

形態別の窒素、リンとは？

海水中の窒素、リンは有機態、無機態の2種類で存在しています。ところが、それぞれの成分ごとの季節変動や分布量についてはほとんど分かっていません。



方法



図1 調査測点

2010～2012年の3年間、毎月1回、左に示した33測点の表層と底層において、形態別の窒素、リン、塩分の観測を行いました。

結果

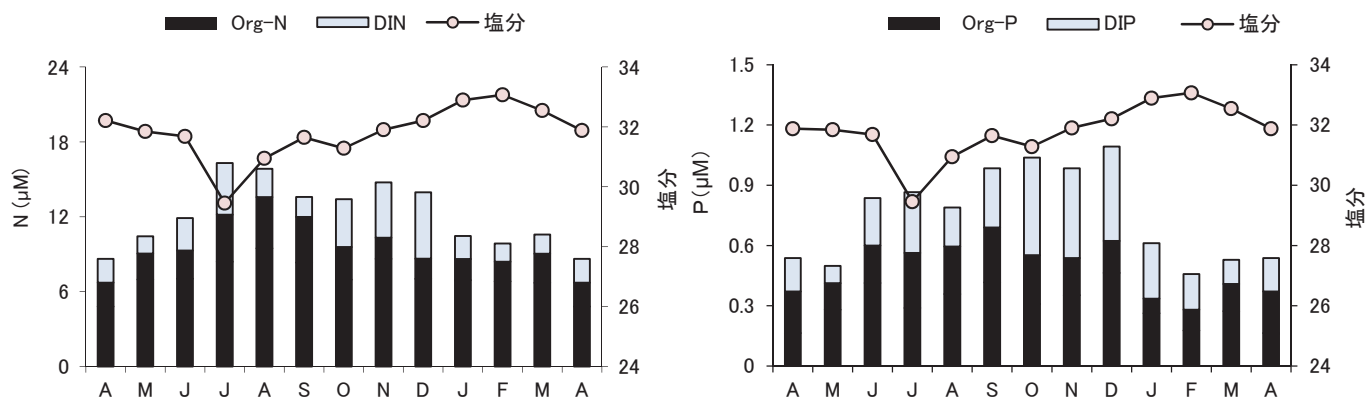


図2 表層における形態別の月別平均値：窒素(左)、リン(右)

TNは夏季に、TPは秋季に最高値を示し、窒素とリンで異なる季節変化を示しました。DINとDIPは秋から冬に、Org-NとOrg-Pは夏季に高くなり、形態ごとに異なる季節変化を示しました。

表1 表層と底層における形態別の窒素、リンの濃度(3ヶ年全平均)

	TN	Org-N	DIN	TP	Org-P	DIP
表層	12.5±3.2	9.7±2.2 (77.6)	2.7±1.6 (21.6)	0.78±0.26	0.51±0.15 (65.3)	0.27±0.16 (34.6)
底層	13.0±3.5	10.3±2.0 (79.1)	2.8±1.6 (21.5)	0.95±0.52	0.64±0.14 (67.4)	0.31±0.04 (32.6)

μM±標準偏差 ()内は、TN、TPに対するそれぞれの成分の割合(%)を示す

海域のTNに対するDINの割合は約2割、TPに対するDIPの割合は約3割でした。TN、TPだけではなくDIN、DIPによる管理が必要であると考えられました。

河川から流入した窒素の河口域における形態の変化

沿岸海域に存在する窒素は、有機態(Org-N)と無機態(DIN)の2種類の形態で存在します。現在、瀬戸内海において不足しているDINの動態を理解するためには、河川から供給される窒素の形態(有機態or無機態)について知ることが重要です。そこで、備讃瀬戸中央部の児島湾の河口域を中心として河川から沿岸海域に供給される窒素の形態について調べました。

方 法

2010年の冬季と2012年の夏季に、図1に示した吉井川の堰堤から河川、河口域、備讃瀬戸に設定した合計17測点において表層の塩分、クロロフィルa濃度、DINとOrg-N濃度の分布について調べました。



図1 調査場所

結 果 (冬季)

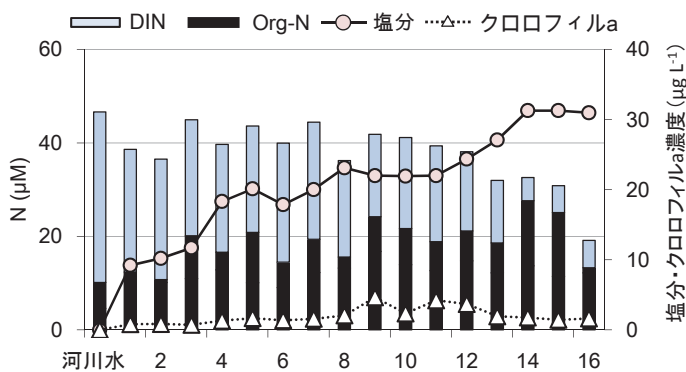


図2 測点ごとのDIN、Org-N、塩分、クロロフィルaの分布

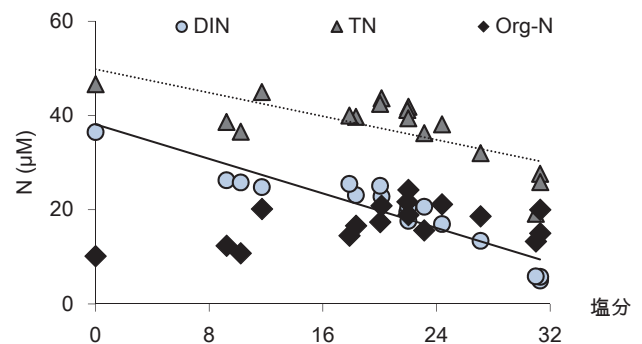


図3 塩分とTN、DIN、Org-Nの関係

クロロフィルa濃度は一様に低く、測点ごとのOrg-N濃度にも違いはありませんでした(図2)。海に近い場所のTN濃度とDIN濃度は低く、塩分とTN濃度、DIN濃度は負の相関を示しました(図3)。⇒冬季には、河川から供給された窒素(主成分はDIN)が海水によって希釈されながら、海域に流入していました。

(夏季)

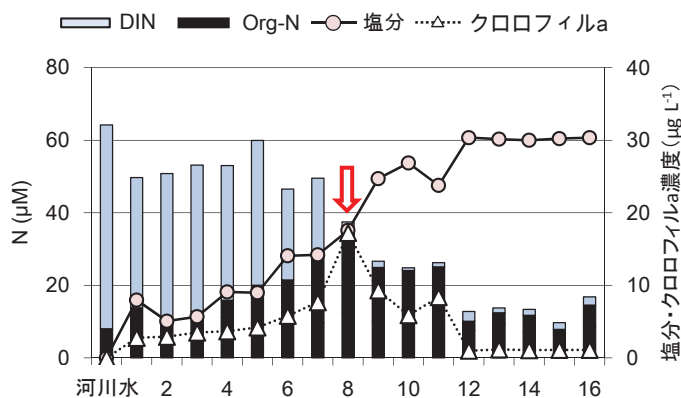


図4 測点ごとのDIN、Org-N、塩分、クロロフィルaの分布

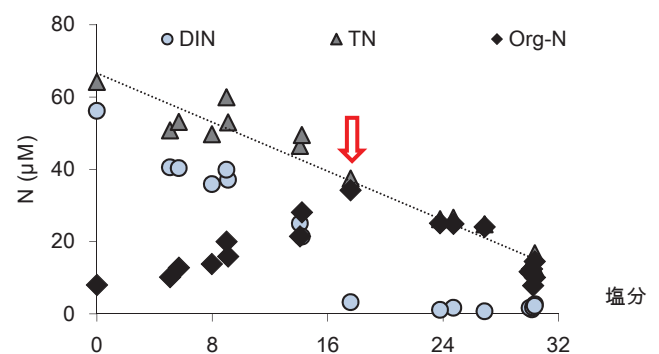


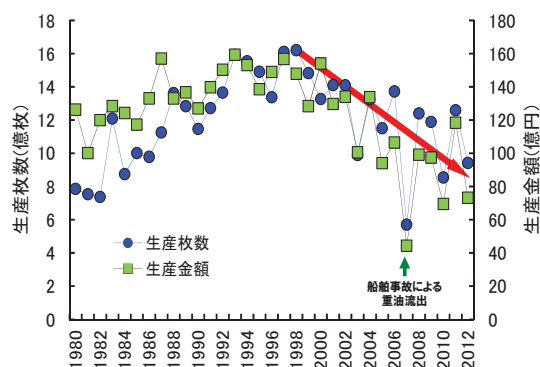
図5 塩分とTN、DIN、Org-Nの関係

河口域においてクロロフィルa濃度とOrg-N濃度が高い値を示し、DINもほぼ0となり、枯渇していました(図4)。塩分とTN濃度は負の相関が見られましたが、塩分とDIN濃度の間には単純な相関は見られませんでした(図5)。⇒夏季には、河川から供給されたDINはOrg-N(無機態⇒有機態)に変化して、海域に流入していました。

冬季と夏季で河川から供給される窒素の形態が異なっており、河川水由来の窒素が海域のDIN動態に与える影響については季節的な違いがあることが分かりました。

播磨灘北部海域における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発（兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター）

播磨灘北部（兵庫県海域）におけるDINとノリ養殖の関係

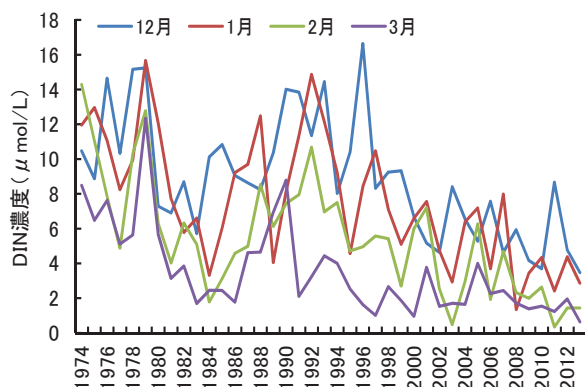


播磨灘北部の海苔生産枚数と生産金額の推移

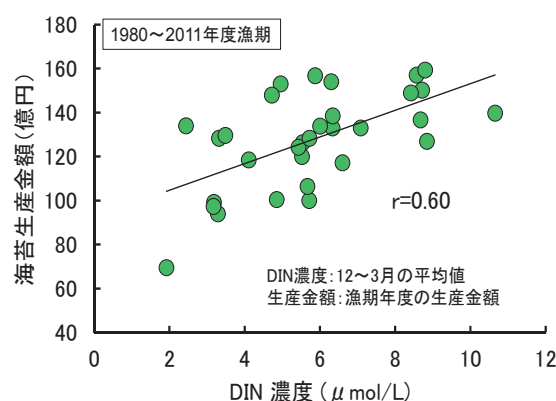


正常な乾海苔と色落ちノリの乾海苔

- ・兵庫県は全国でも有数のノリ生産地（2013年度の生産は全国2位）であり、ノリ養殖は兵庫県の瀬戸内海側では漁業生産金額の約4割を占める基幹漁業種類となっています。
- ・ところが、播磨灘北部のノリ養殖は、1990年代後半から色落ち等の影響により、生産不振が続いています。色落ちしたノリの製品は外観が悪い（色、つや）ほか、アミノ酸量の減少等によって食味も悪くなるため、販売されないか非常に安価に取引されてしまいます。



ノリ主要生産期における播磨灘北部のDIN濃度



播磨灘北部の海苔生産金額とDIN濃度の関係

播磨灘北部のDIN濃度は、特に1990年代後半以降顕著に低下しており、DINの不足によって色落ちが発生しています。色落ちが発生し始めるDIN濃度の目安は3 μmol/Lとされています。DIN濃度と海苔生産金額には関連のあることが伺われます。

色落ちによるノリ生産への影響が非常に大きいため漁業関係者から海域への栄養塩供給に関する強い要望

豊かな海づくりに向けた対応方法の検討（海域への栄養塩供給など）

栄養塩供給手法の検討

- ・下水処理施設での栄養塩管理運転（基準値内での窒素排出量増加運転）
- ・ダムからの一時放流
- ・ため池からの放流（かいぼり）
- ・ノリ漁場への施肥
- ・海底耕耘

「豊かな海づくりに係る検討会」を設置

兵庫県水大気課、下水道課、水産課、水産技術センターおよび関係市等で構成
↓
海域への栄養塩供給など豊かな海づくりに向けた対策の協議



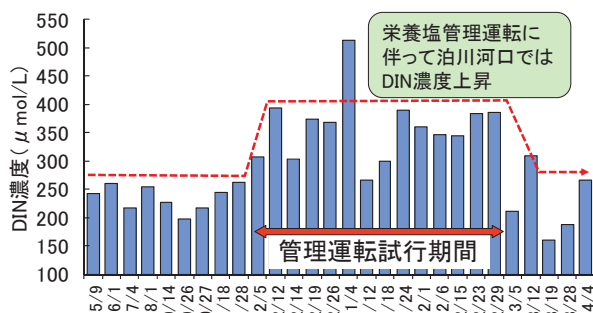
供給量、経済性、継続性や啓発的意義等を総合的に判断して、下水処理施設での栄養塩管理運転やため池放流等の栄養塩供給対策の試みに至る

播磨灘北部における栄養塩の有効利用に関する研究 加古川河口域に位置する加古川下流浄化センターにおける栄養塩管理運転 (基準値内での窒素排出量増加運転) の試行事例と効果の検証

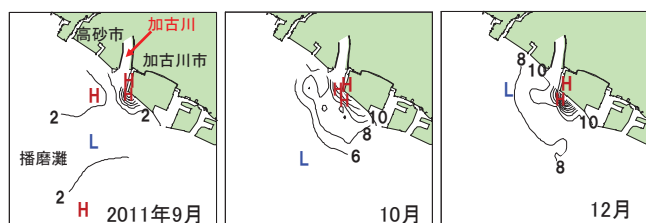


加古川河口域における陸域からの主な栄養塩供給源

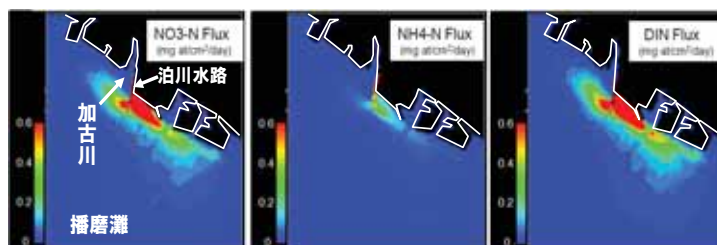
- ・加古川河口域には河川水、下水処理水および産業排水等の栄養塩供給源がある
- ・下水処理水と産業排水は泊川水路を通じて海域に流出



浄化センターの栄養塩管理運転に伴う泊川河口のDIN濃度変化(2011年度)

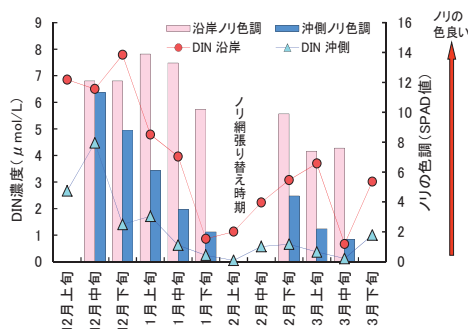


加古川河口域のDIN濃度分布(実測値)



栄養塩管理運転による周辺海域への栄養塩供給シミュレーション(浄化センター通常運転時からの栄養塩フラックス変化量を示す、瀬戸内海区水産研究所解析)

- ・現場観測では、年間を通じて加古川河口左岸沿岸にDIN高濃度域の分布が確認できる場合が多い
- ・モデルシミュレーションでは栄養塩管理運転に伴って、泊川水路からNO₃-Nが供給される計算結果



ノリ漁場13号区の沿岸側と沖側のDIN濃度とノリの色調比較

泊川水路水や加古川河川水の影響を受けやすい沿岸側の漁場でDIN濃度は高く、ノリの色調も良好でした。

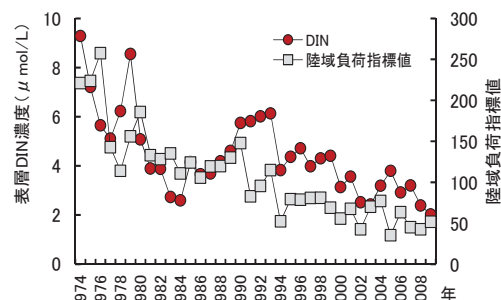
- ・陸水からの栄養塩供給は、貧栄養化した海域のノリ漁場においては重要な窒素供給源となっています。
- ・栄養塩管理運転に伴う、海域への窒素供給はノリ色調の安定化に寄与することが推測されました。(ただし、海域特性(潮流が速い等)によっては、その効果を確認しにくい場合もあります)
- ・下水処理施設内では浮泥の増加など運転管理上の課題が若干生じます。

2013年度現在、兵庫県内15の下水処理施設の協力により、冬季を中心に栄養塩管理運転(基準値内での窒素排出量増加運転)を試行しています

播磨灘北部における窒素・リンの動態（河川域および海域）



* 陸域負荷指標値(試算)＝兵庫県瀬戸内海区の汚濁負荷量(COD)×姫路の降水量平年比



播磨灘北部の窒素・リンの動態に影響する因子

播磨灘北部のDIN濃度と陸域負荷指標値(試算値)の関係

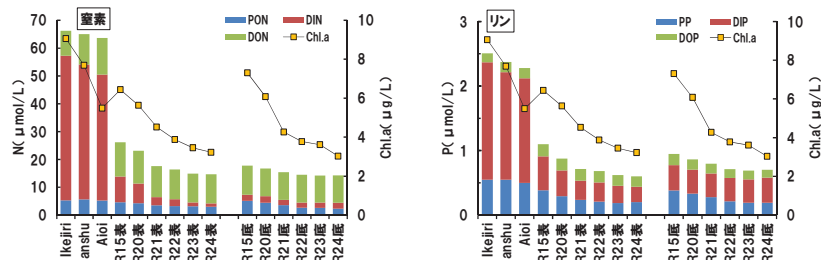
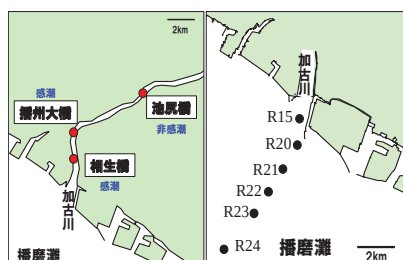


播磨灘北部および大阪湾のDINフラックス(2011年度の値、瀬戸内海区水産研究所解析)

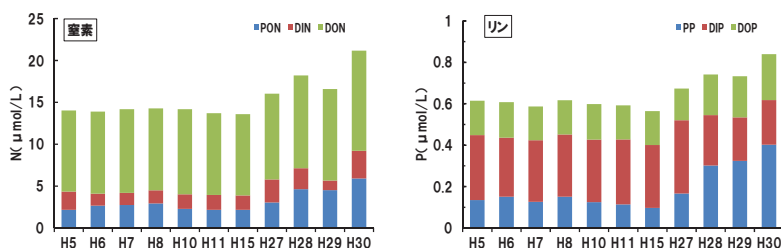
播磨灘北部のDIN変動には、陸域負荷や隣接海域(大阪湾)からの影響が大きく関わっていることが推察されます。また、大阪湾のDINは陸域負荷の影響を大きく受けられていると考えられます。

将来的に播磨灘北部の栄養塩管理を考える場合には、陸域負荷に関する施策の検討が妥当

播磨灘北部の窒素、リンの存在形態



加古川河川域から沖合へのライン上における窒素、リンの存在形態



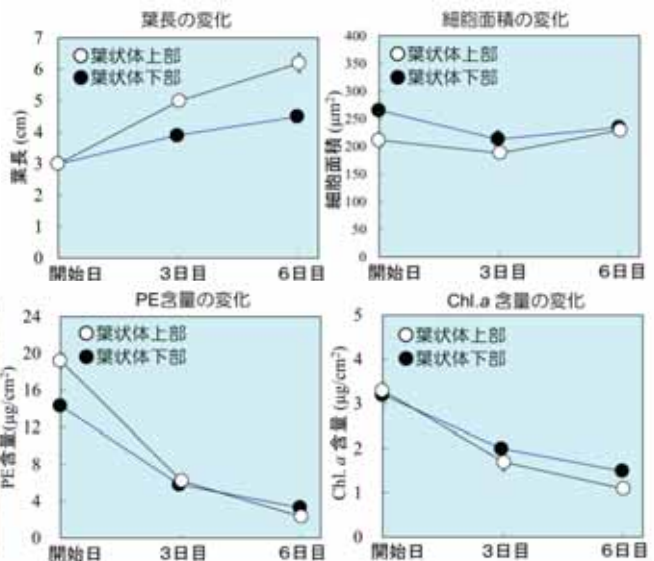
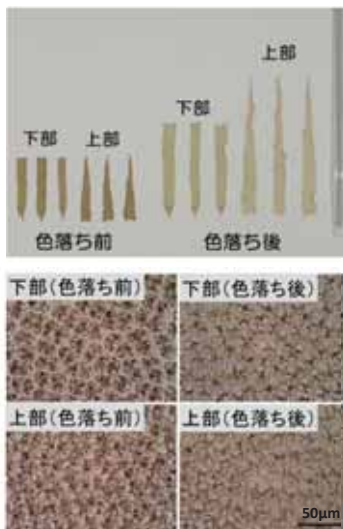
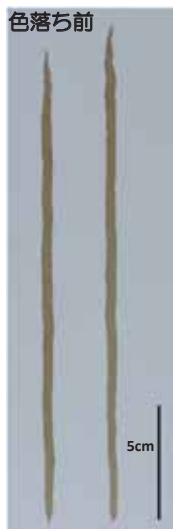
播磨灘北部における窒素、リンの存在形態(表層)

河川域では溶存態無機(DIN、DIP)が多いですが、河口付近で窒素およびリンの量、存在形態の比率は大きく変化し、海域での存在形態は窒素とリンで異なることがわかりました。

リンは河川、海域ともDIPやPPの占める割合が高いですが、海域の窒素は生物が利用しにくいDONが大きな量、割合を占めており、DINは減少してもTNはある濃度から低下しない可能性が推測されます。

生物生産性を考慮した場合、海域における窒素についてはTNとともにDINへの配慮が必要

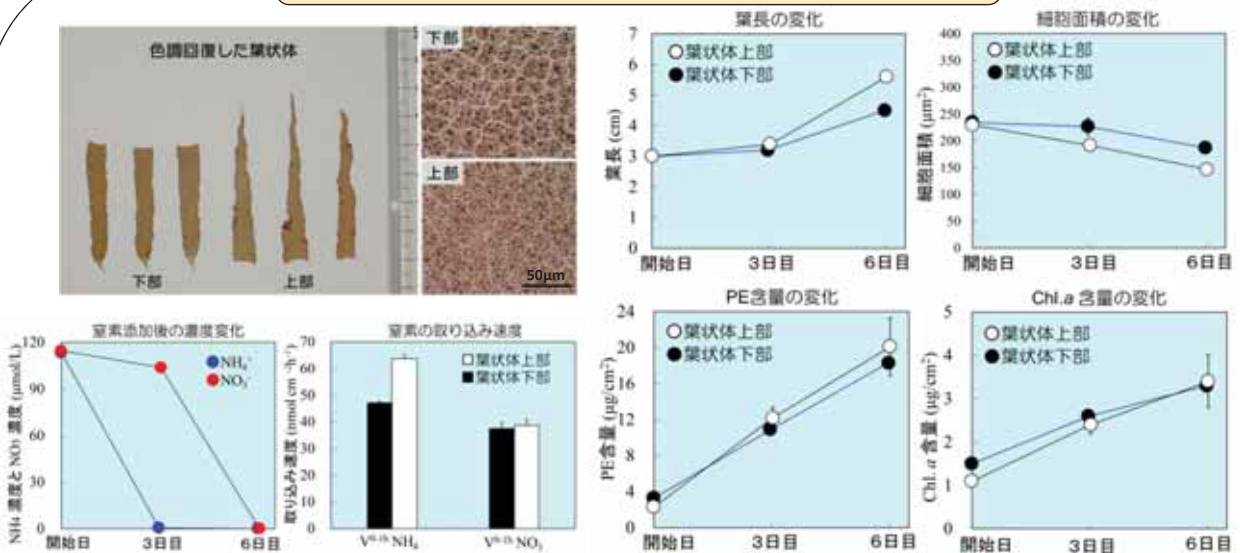
養殖ノリの生理生態学的調査 養殖ノリ色落ち試験（窒素欠乏下で培養）



窒素が欠乏しても、葉状体上部は下部に比べて盛んに細胞分裂を行うが、窒素が供給されないため、葉状体上部の光合成色素含量の低下が速い。

葉状体上部は下部に比べて色落ちしやすい。

養殖ノリ色調回復試験（窒素源を添加）



窒素源を添加すると葉状体上部は下部に比べて盛んに細胞分裂を行うが、アンモニア態窒素の取り込み速度や光合成色素の合成も速く行われる。

葉状体上部は下部に比べて色落ちの回復が速い。

養殖現場での活用方法

- ・摘採時に葉状体の根元まで刈り込まないほうが、色落ちの回復がしやすい。
- ・窒素源を供給する場合、硝酸態窒素よりアンモニア態窒素の方が即効性がある。

播磨灘南部海域における窒素・リンの動態解明と栄養塩の有効利用技術の開発 (香川県水産試験場)

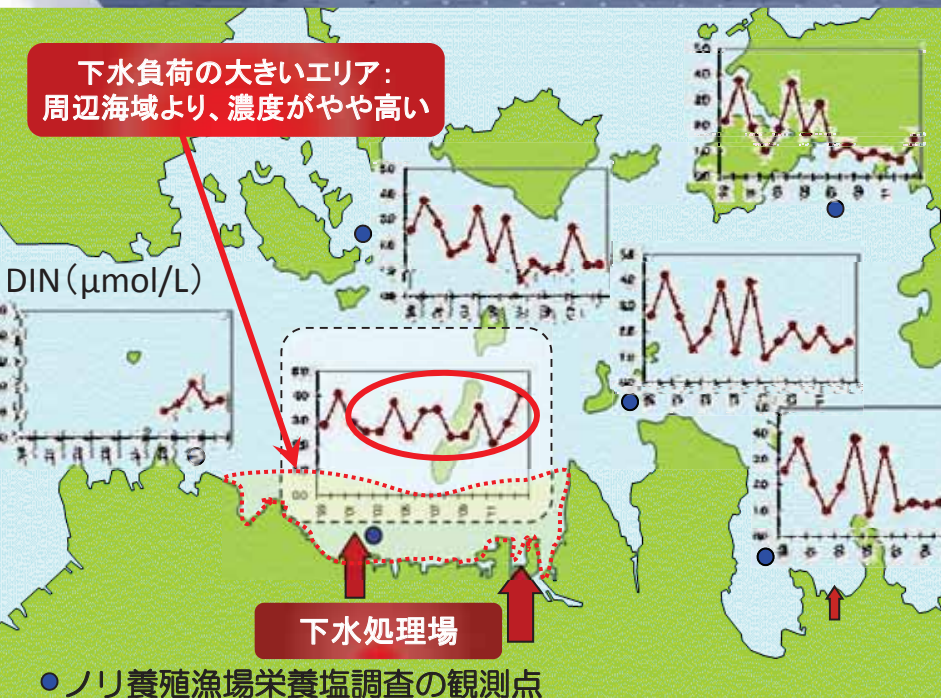
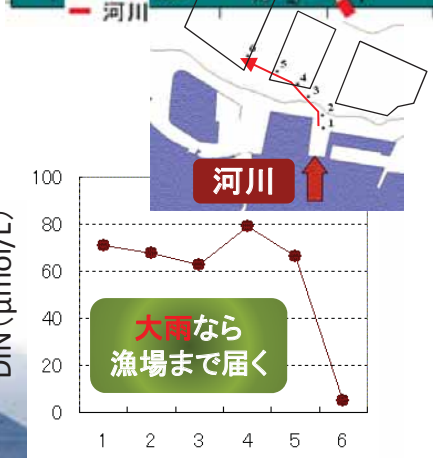
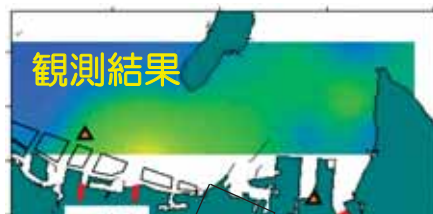
ノリ養殖業は、香川県の主要な水産業の一つですが、近年の瀬戸内海における低栄養塩化に伴い、色落ちによる生産量の減少が顕著となっています。このため養殖業の経営に深刻な影響が出ており、その対策が求められています。そこで、本事業により、栄養塩の動態の解明と栄養塩の有効利用技術の開発について取り組んできたので、その成果を報告します。

①沿岸域の栄養塩の動態

陸域からの栄養塩負荷（河川と下水処理排水）がどのようにノリ養殖漁場に届いているかを、現地観測とシミュレーションによって検討しました。

シミュレーション結果から潮流によって栄養塩が広範囲に移動しながら拡散すると予想されましたが、現地観測でこれを確認することは困難でした。

そこで、河口付近の詳細な観測を行ったところ、**栄養塩は少雨時にはノリ養殖漁場に直接は届かないものの、大雨時には、届いていることが確認されました。**



②栄養塩の有効利用技術の開発

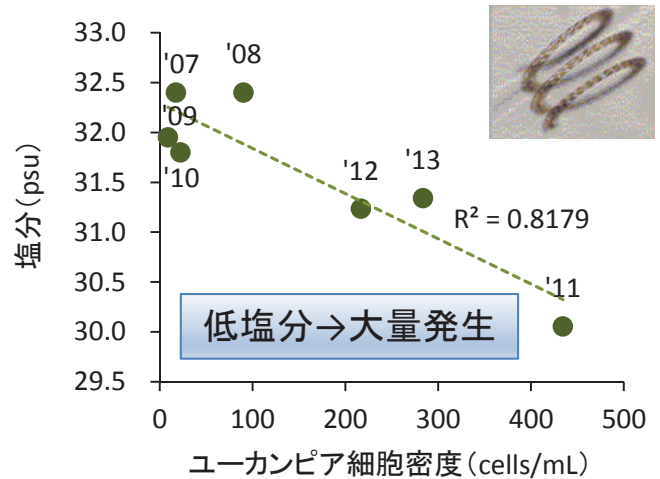
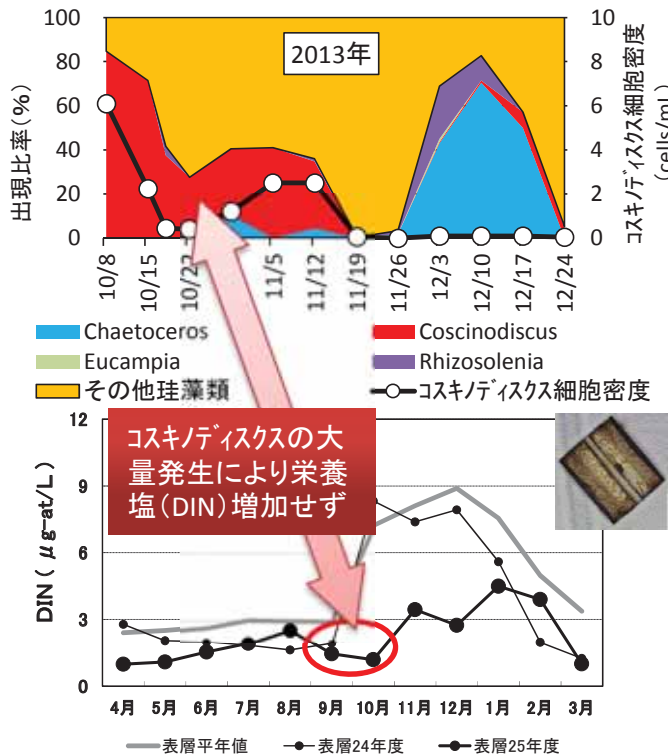
短期的には、大雨があればノリ養殖漁場へ栄養塩が供給されます。では、長期的にノリ養殖漁場の栄養塩濃度を高めることは可能でしょうか。過去15年のノリ養殖漁場での観測結果から、下水処理排水の負荷が大きいと考えられる沿岸域では、周辺海域よりも栄養塩濃度がやや高い傾向が見られました。

これらのことから、下水処理排水による栄養塩供給を検討する場合は、**海域の地形や潮流などの物理的条件を考慮して実施することが重要**であるといえます。

③ノリ漁場における植物プランクトン（珪藻類）の出現状況

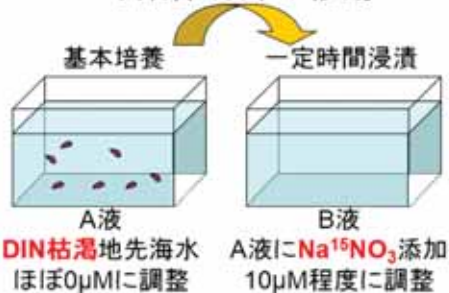
ノリと栄養塩を競合している珪藻類の動向と栄養塩濃度の関係を調査しました。その結果、大型珪藻のコスキノディスクスやユーカンピアなどの大量発生により、栄養塩が大量に消費されることを確認しました。大量発生の要因となる**水温、塩分、栄養塩濃度等のデータを蓄積し、発生の予測に役立てることが重要**であると考えられます。

播磨灘南部では、ノリ養殖の漁期当初（10月上旬）の塩分から、その漁期中に発生するユーカンピアのおよその量を予測できることが分かり、ノリの生産・管理への活用が期待されます。



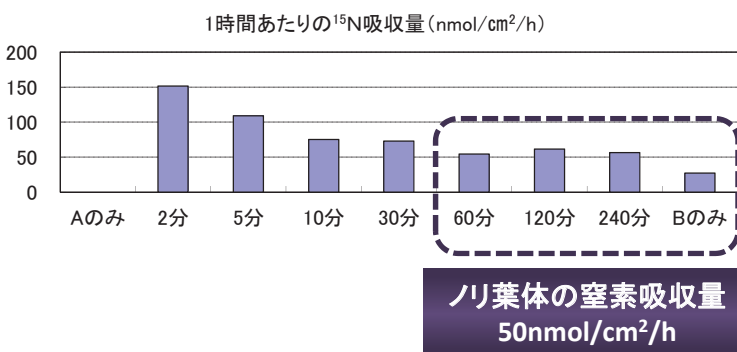
漁期中(10~3月)のユーカンピアの最大細胞密度と漁期当初(10月上旬)の塩分との関係(播磨灘南部)

40L水槽による一括培養 ノリ葉体切片の移動



測定項目 葉体: 色調, 大きさを毎日測定
培養液分析: 毎日採水
葉体内のN含有量: 同位対比質量分析

ノリ葉体の窒素吸収能の把握

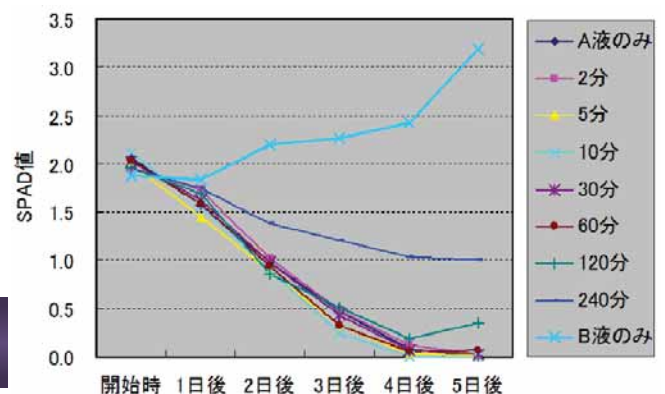


④安定同位体を用いたノリ葉体の栄養塩の取り込み

ノリが必要とする栄養塩濃度の基礎データを得るため、水槽での培養実験を行い、ノリ葉体の窒素吸収能を把握しました。

その結果、ノリ葉体の窒素吸収量は50nmol/cm²/h程度であることが確認されましたが、バックグランド海水の窒素が枯渇した状態では、一時的に窒素濃度が高い環境に置かれても、色調を回復できないことも確認されました。

このことから、施肥による栄養塩供給を検討する場合は、海域の窒素濃度に留意する必要があることが示唆されました。



紀伊水道における窒素・リンの動態解明と栄養塩管理技術の開発 (徳島県立農林水産総合技術支援センター)

徳島県は全国有数のワカメの生産地になっています。しかしながら、近年の栄養塩濃度の低下にともない、ノリよりも栄養塩要求量が高いワカメで色落ちが頻発するようになってきました。色落ちによる品質の低下は価格と生産量の減少を引き起こし、ひいては養殖業の経営のみならず地域経済にも深刻な影響を及ぼしています。

このような状況を踏まえ、「窒素・リンの動態解明と栄養塩管理技術の開発」と「ワカメの色落ち現象機構の解明と対策」について取り組んできた成果を報告します。

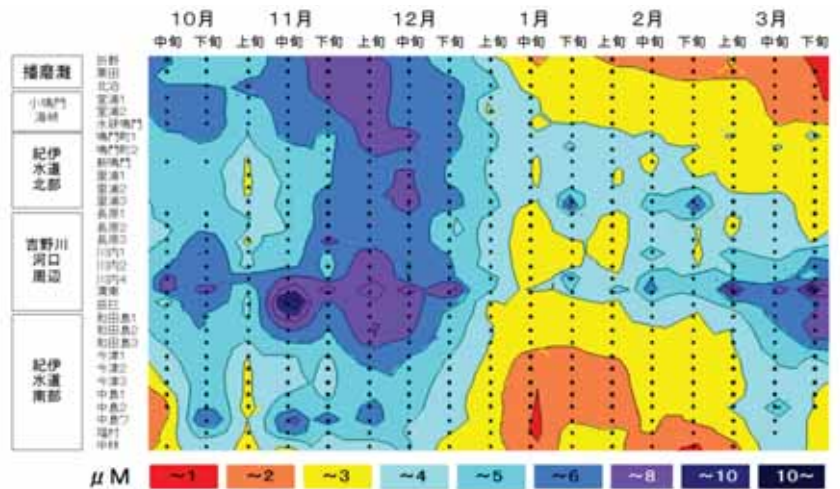


図1. 徳島県沿岸における10～3月のDIN濃度の分布(2007～2011年漁期平均)

①1～3月にDIN濃度が低下する。吉野川河口域は相対的にDIN濃度が低下し難い。

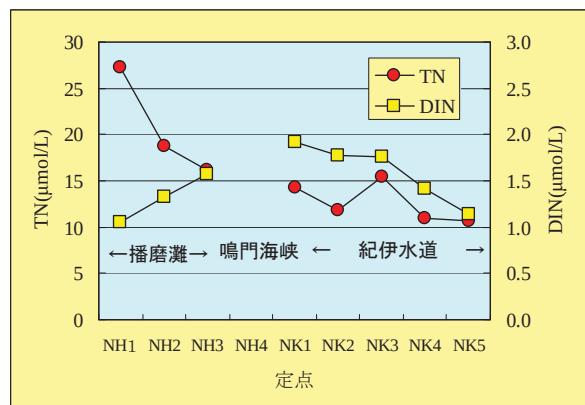


図3. NH1～NK5におけるDIN及びTN濃度の分布(2010年11月16日)

②播磨灘では相対的にDIN濃度が低い、TN濃度が高い。紀伊水道はDIN濃度が高く、TN濃度が低い。播磨灘と紀伊水道でチッソの性状が異なる。

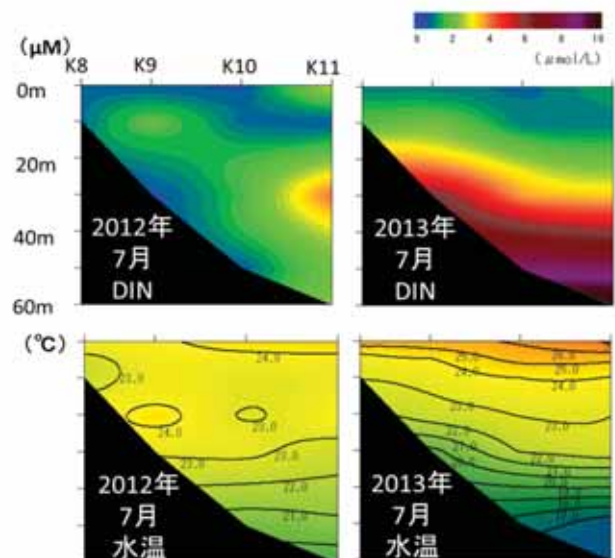


図5. 2012年(左)及び2013年(右)の7月のDIN濃度の鉛直断面図及び水温の鉛直断面図。DIN濃度は、右上のカラーバー参照。

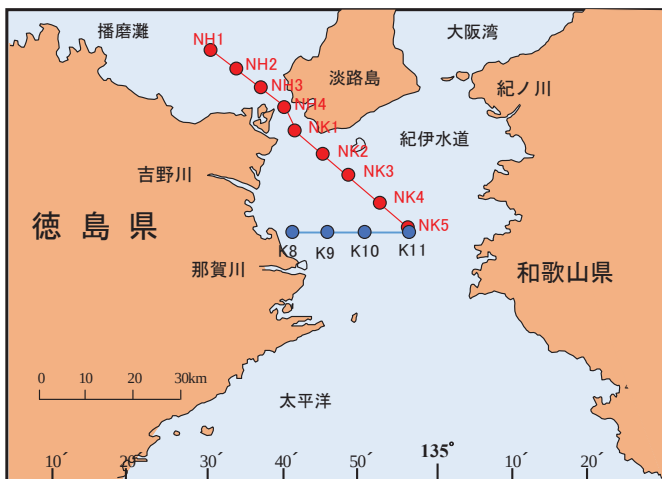


図2. 漁業調査船「とくしま」による調査定点図。NH1～NK5及びK8～11において栄養塩の分布について調査を実施した。



図4. 潮岬からの黒潮の離岸距離。水色の丸がK8～K11の横断観測日、赤の矢印が7月の横断観測日を示す。

③黒潮が離岸したとき和歌山側から徳島県海域に陸棚斜面水とともにDINが流入
④外海では塩分とDIN濃度が正の相関

外海からの栄養塩の流入の影響が大きい。

ワカメの色落ち現象機構の解明と対策



図7. 正常なワカメ(左)と基部が色落ちしたワカメ(右)



図8. 葉緑素計(コニカミノルタ製SPAD-502)を用いてワカメ藻体のSPAD値を計測。

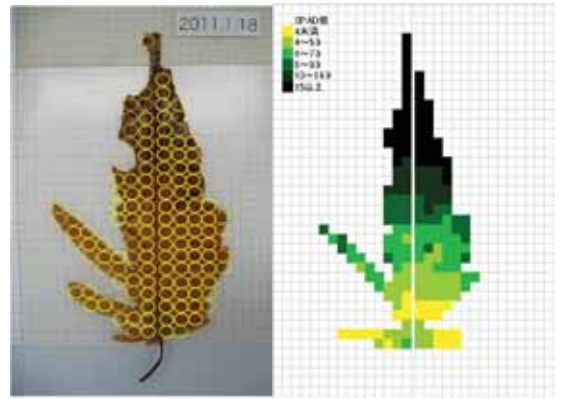


図9. 色落ちワカメの測定部位(黄色○)とSPAD値の分布

⑤ワカメの色落ちを数値化できる。

⑥ワカメは基部生長であり、基部から色落ちする。
⑦基部SPAD値の測定で色落ちを早期に発見。

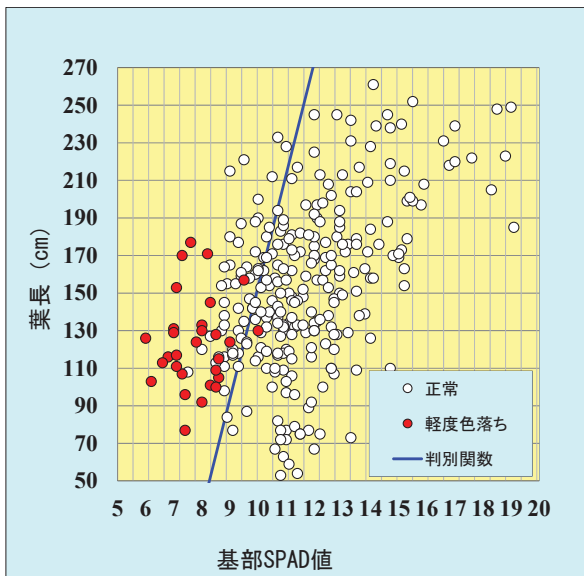


図10. サンプルの葉長と基部SPAD値の関係及び両者の関係に適用された線形判別式

⑧ワカメの色落ちはSPAD値からサイズに応じて判別できる。

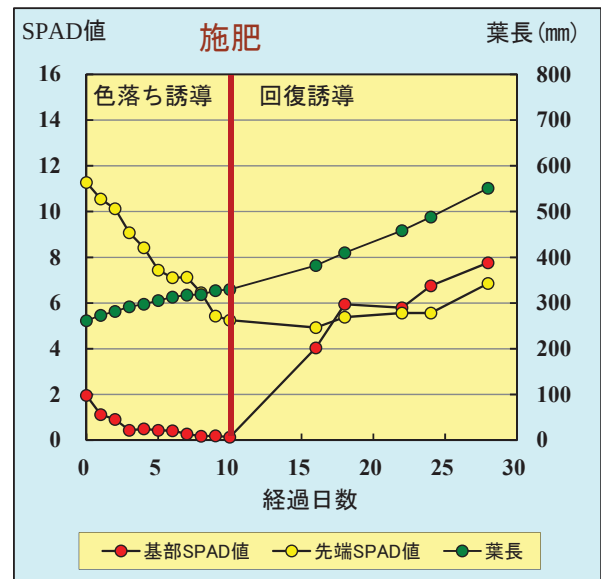


図11. 色落ちしたワカメの施肥による回復試験

⑨ワカメの色落ちは回復する可能性がある。



図12. 異なる光量下でのワカメの色落ちおよび色落ちからの回復試験。写真奥から光量8,000lux、5,000lux、2,000luxに設定された試験区。

⑩光量を下げ、光合成を抑えることで色落ちを抑制することができる。

⑪養殖ロープの沈下もしくは遮光により光量を下げて色落ちを抑制することが可能。

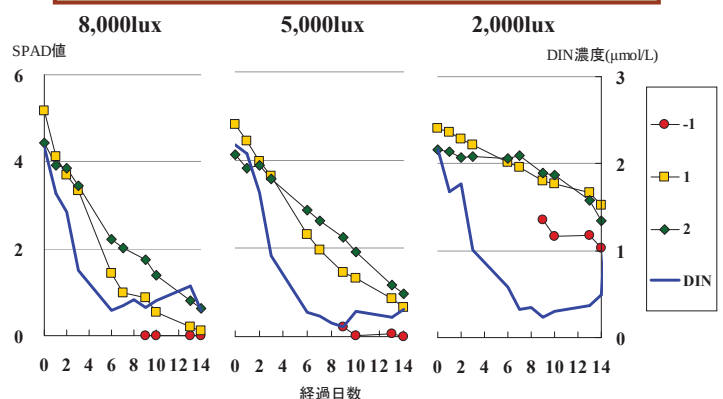
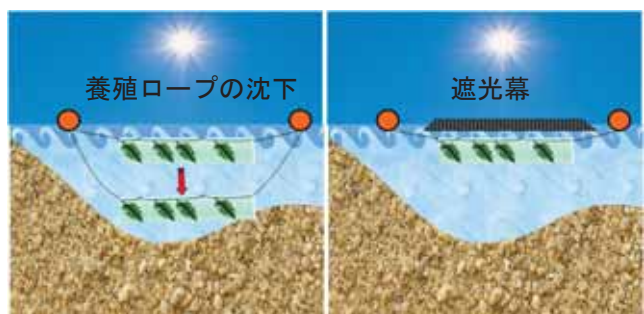


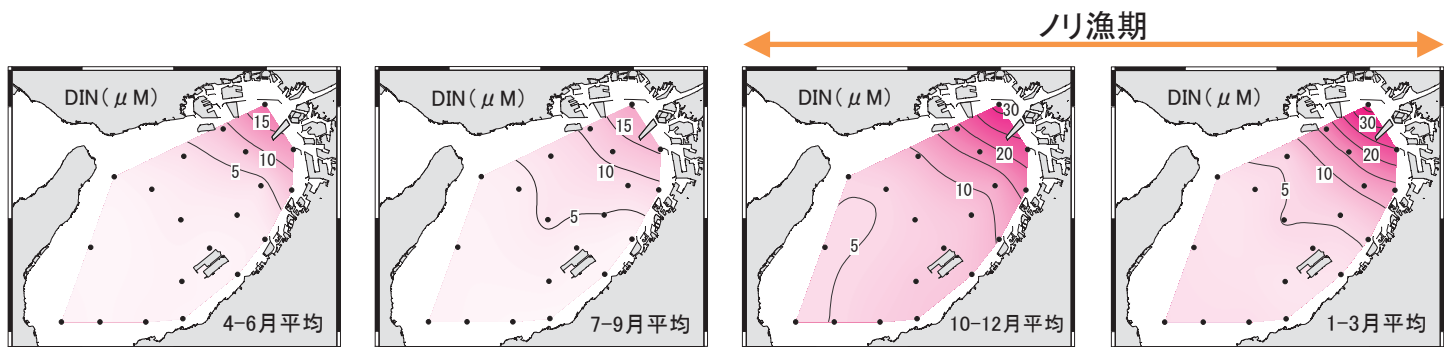
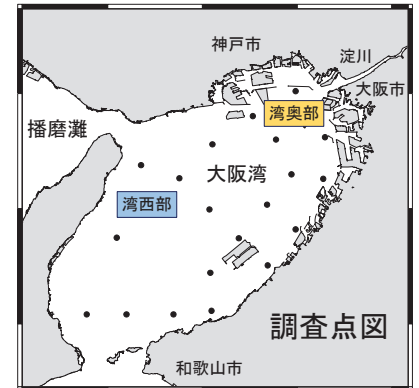
図13. かけ流し下における部位別のSPAD値とDIN濃度の推移。



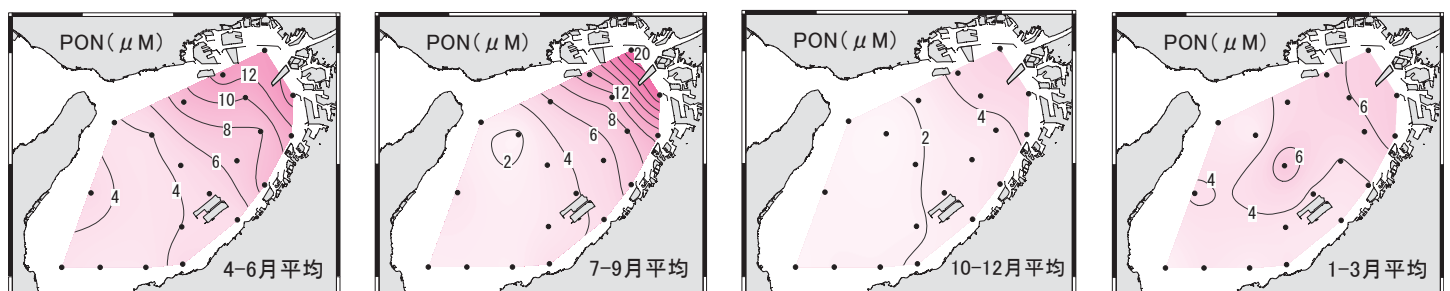
大阪湾における形態別窒素の動態と播磨灘への栄養塩供給 ((地独)大阪府立環境農林水産総合研究所水産技術センター)

- ◆大阪湾の表層水に含まれる窒素を毎月測定し（2010年4月～2014年3月）、形態別窒素の分布を明らかにしました。
- ◆海水に含まれる窒素は次のように分けられます。
[全窒素] = [栄養塩としての無機態窒素] + [プランクトン等の粒状有機態窒素] + [溶けている有機態窒素]

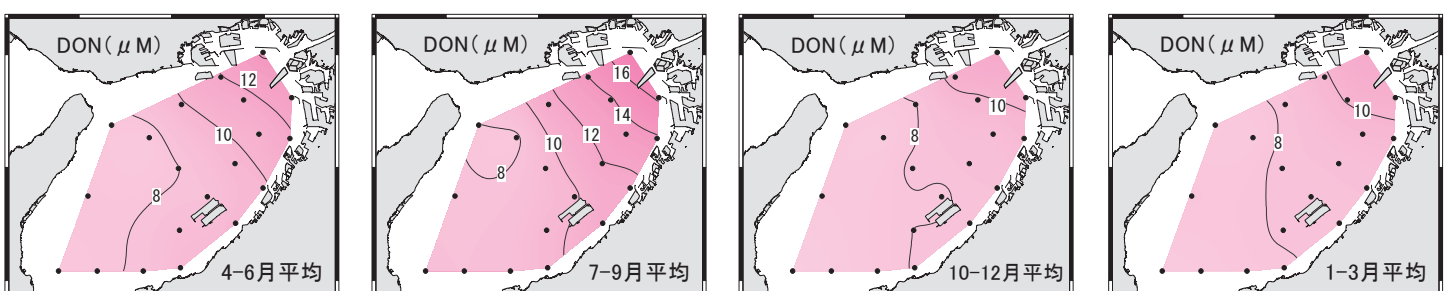
◎分布の特徴：大阪湾は湾奥部に大阪市や神戸市を始めとする大都市が接していて、陸域から窒素（特に栄養塩）が流入します。このため、湾内の窒素濃度は湾奥部で最も高くなります。



栄養塩としての無機態窒素 (DIN) 濃度：春季（4-6月）から夏季（7-9月）にかけて植物プランクトンの取り込みによって低くなり、秋季（10-12月）から冬季（1-3月）にかけて高くなります。

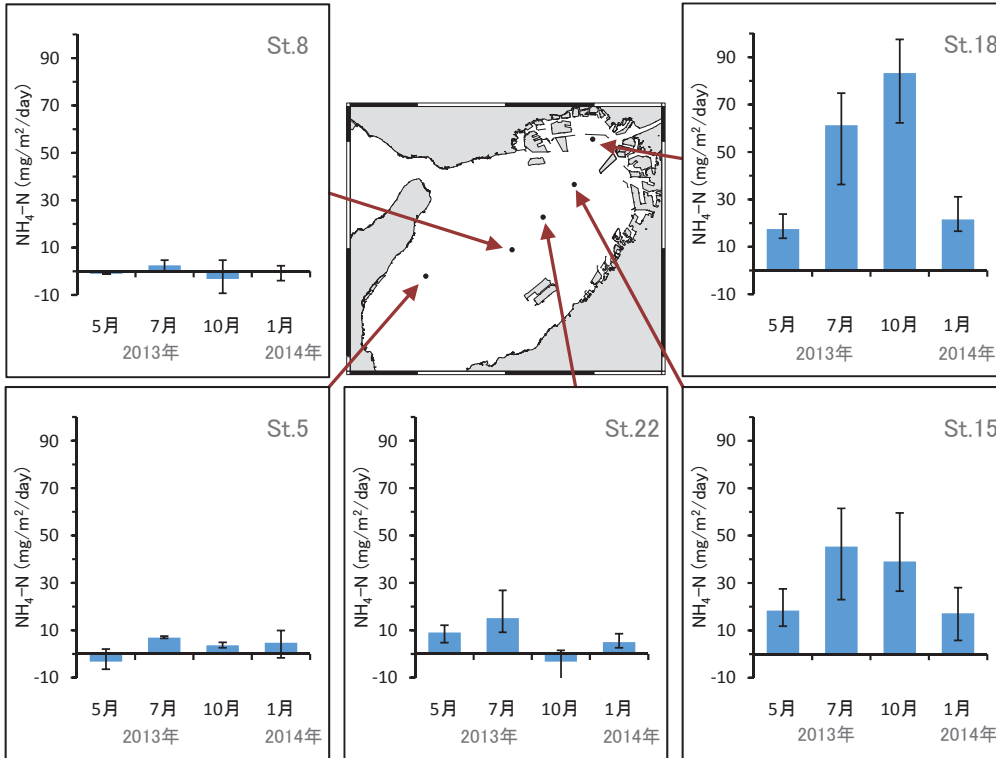
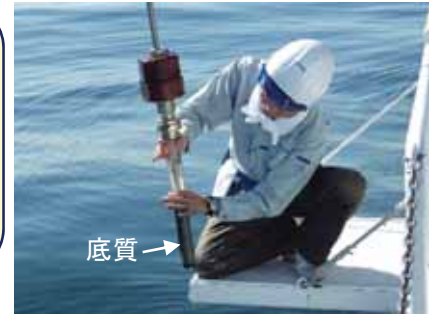


プランクトン等の粒状有機態窒素 (PON) 濃度：春季から夏季にかけて植物プランクトンが湾奥部の豊富な栄養塩を取り込んで増殖し、粒状有機態窒素が高くなります。



溶けている有機態窒素 (DON) 濃度：湾奥部ではプランクトンの増殖とともに増える傾向がありますが、それ以外は一年を通じて比較的安定して存在しています。

- ◆大阪湾の海底から溶出する栄養塩としての窒素（アンモニア態窒素： $\text{NH}_4\text{-N}$ ）を測定しました。
- ◆方法：アクリル管を海底に突き刺して底質を採取し、実験室に持ち帰ったあと現場と同じ温度で培養します。一定時間ごとにアクリル管上部の海水を採取して栄養塩濃度を測定し、溶出速度を求めました。



◎溶出試験の結果

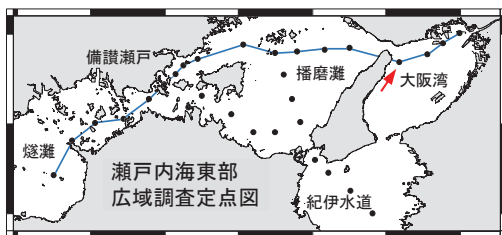
- ・湾奥部で溶出速度は高く（St. 15, 18）、湾中央部（St. 8）や淡路島寄りの海域（St. 5）ではほとんど溶出しない。
- ・高水温期の7月、10月に高く、低水温期の5月、1月に低い。

◎湾内の水環境への影響

- ・陸域からの流入により湾奥部表層水の栄養塩濃度は湾内で最も高いが、海底からの溶出も湾奥部で高く、栄養塩分布の偏りを強める働きをしている。

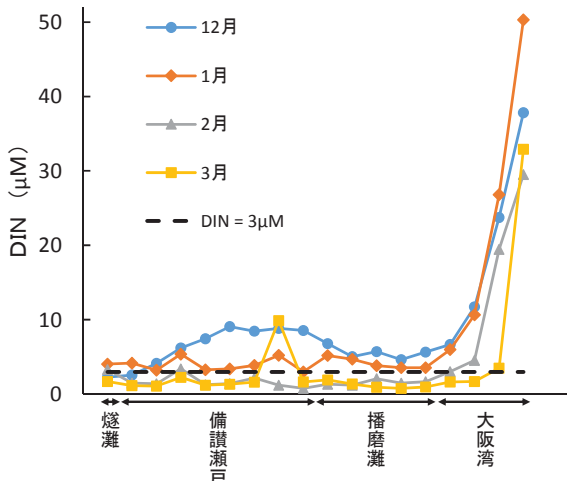
◆瀬戸内海東部で広域調査を行いました。

◆大阪湾の栄養塩は経年的に低下しています。

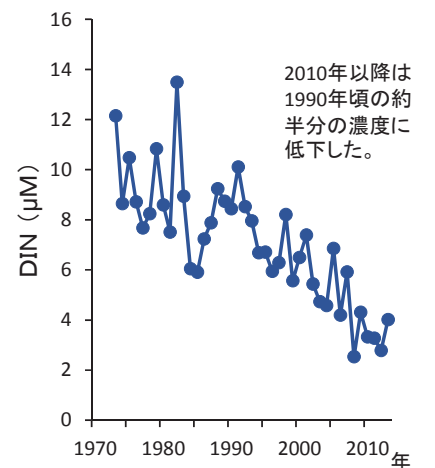


◎瀬戸内海東部における栄養塩分布

- ・大阪湾奥部でノリ漁期を通じて最も高く、次に備讃瀬戸で12月に高い。
- ・漁期前半はほとんどの海域で色落ち警戒濃度である $3\mu\text{M}$ を上回っているが、後半には大阪湾奥部を除いて大きく下回っている。



ノリ漁期中の栄養塩分布（2010年度～2013年度平均）
（兵庫県水産技術センター、岡山県水産研究所、香川県水産試験場、徳島県立農林水産総合技術支援センター、大阪府立環境農林水産総合研究所による広域調査結果）

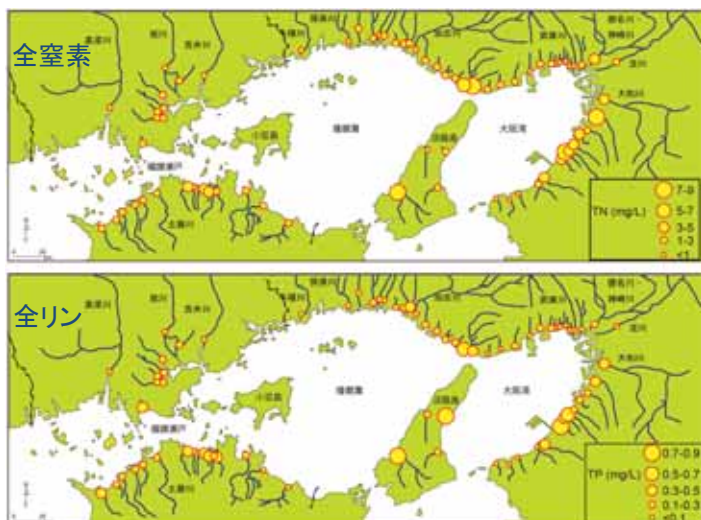


浅海定線調査による大阪湾と播磨灘をつなぐ地点（定点図の↑）における栄養塩濃度の経年変化（表層・底層の年4回測定値を平均）

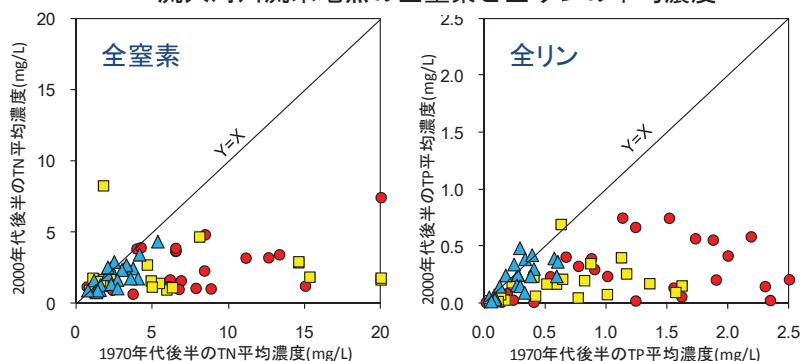
◎大阪湾の栄養塩が周辺海域に及ぼす影響

- ・大阪湾奥部の栄養塩濃度は瀬戸内海東部の中で最も高く、ノリ漁期前半では播磨灘に栄養塩を供給していると考えられる。漁期後半になると大阪湾西部と播磨灘の濃度勾配が小さくなり、大阪湾から播磨灘への栄養塩供給は小さいものと考えられる。

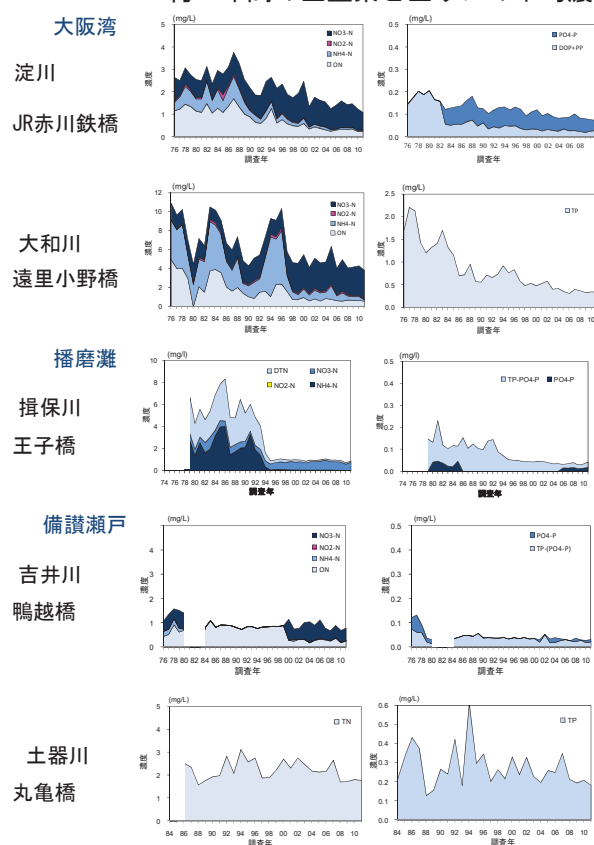
瀬戸内海東部海域に流入する主要河川の水質の時系列解析と 加古川下流域における窒素・リンの存在形態の解明 (大阪工業大学)



流入河川流末地点の全窒素と全リンの平均濃度



約40年間の全窒素と全リンの平均濃度の変化



流入河川流末地点の全窒素・全リン濃度の変化

大阪湾・播磨灘・備讃瀬戸に流入する主要河川の流末地点における最近5年間の全窒素（TN）と全リン（TP）の平均濃度を調べました。

◎流入河川流末における全窒素と全リンの濃度

大阪湾：淀川、大和川、猪名川・神崎川に比べて、志筑川（淡路島）と大阪府側にある二級河川で濃度の高いことが分かりました。

播磨灘：加古川と揖保川を含めた大部分の河川に比べて明石川（兵庫県明石市）と三原川（淡路島）の濃度の高いことが分かりました。

備讃瀬戸：旭川、吉井川、高梁川など岡山県の河川に比べて、土器川など香川県の河川で濃度の高いことが分かりました。

◎約40年間の窒素・リン濃度の変化

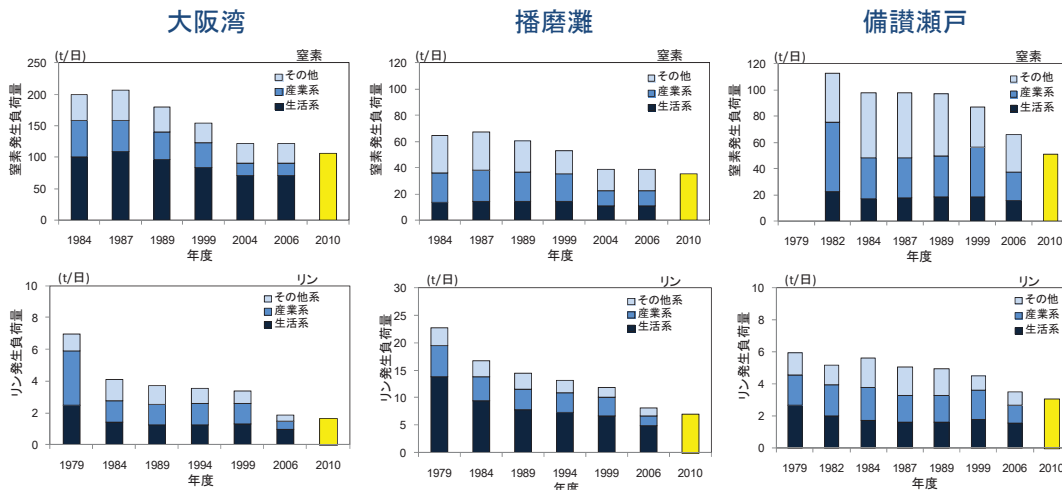
大阪湾：対象とする全ての河川の窒素とリンの濃度は減少しており、窒素の中ではアンモニア態窒素濃度の減少が顕著でした。

播磨灘：下水処理排水が流入する明石川（兵庫県明石市）を除いた全ての河川の窒素とリンの濃度は減少しており、窒素の中ではアンモニア態窒素濃度の減少が顕著でした。

備讃瀬戸：岡山県の窒素とリンの濃度は減少傾向にありましたが、香川県の河川濃度は大きな変化は認められませんでした。

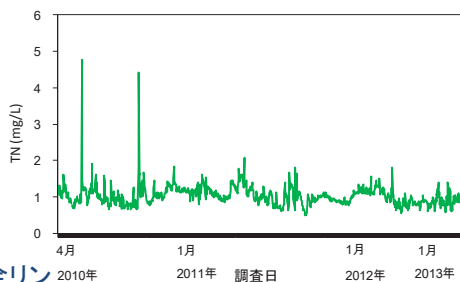
◎陸から海に流入する窒素とリンの負荷量の変化を調べました。

大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸への陸域から流入する窒素とリンの負荷量の変化をみると、環境省が公表している発生負荷量は窒素（1980年代以降）とリン（1970年代以降）は着実に減少しており、河川についても同じ傾向が認められました。

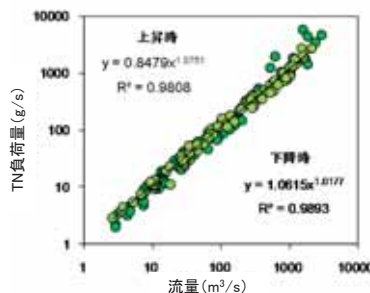
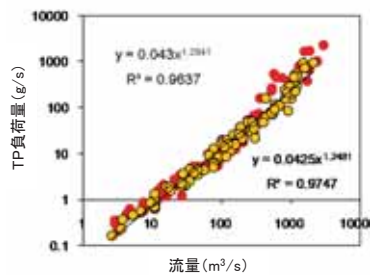
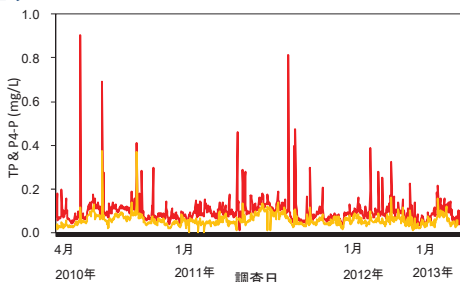


発生負荷量の変化（環境省発生負荷量管理等調査資料）

全窒素

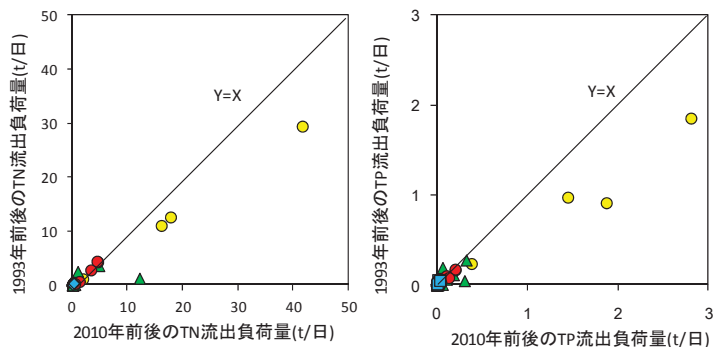


全リン



定期調査による濃度変動

加古川における流量と窒素とリン濃度の関係



● 大阪湾流入河川 ▲ 播磨灘流入河川 ● 備讃瀬戸流入河川(岡山県)
■ 備讃瀬戸流入河川(香川県)

注)縦軸の流出負荷量のうち一級河川は1993年前後、二級河川は2000年前後

約20年間の全窒素と全リンの負荷量の変化

窒素・リンの発生負荷量の減少は、工場排水や生活排水対策等の進展に伴うもので、生活排水の場合は、下水道普及率と大きく関係しています。

年間流出負荷量の見積もり

河川の濃度と流量は降雨時に大きく変化するので、洪水時の流出負荷量を評価することが必要です。

L-Q式の作成

加古川の調査結果に基づいて、流量と負荷量の関係式（L-Q式）を作成しました。この式を使って精度の高い年間流出負荷量を推定しました。

◎大阪湾・播磨灘・備讃瀬戸に流入する河川の流入負荷量の変化

1990年代から約20年間で多くの河川では窒素とリンの流入負荷量として減少していることがわかりました。

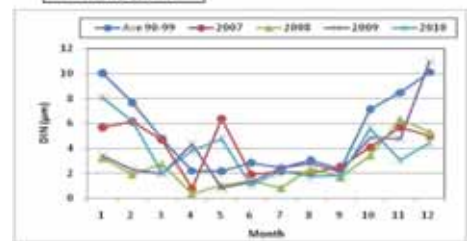
底層における窒素・リンの動態と珪藻の生態学的機能の解明 (香川大学農学部)

瀬戸内海では近年、表層水中の溶存態無機窒素(DIN)濃度が低下し、ノリの色落ちが問題となっています。

播磨灘の香川県沿岸では、ノリ養殖が安定していた1990年代に比べて、2000年以降は表層水中のDIN濃度が低下しています。さらに、夏季の底層におけるDIN濃度が低下していることが特徴的です(右図)。

そこで、この夏季の成層期における底層水中のDIN濃度の減少が、底泥からの栄養塩の溶出量の減少に起因しているのではないかと考え研究を行いました。

DIN(表層)



DIN(底層)

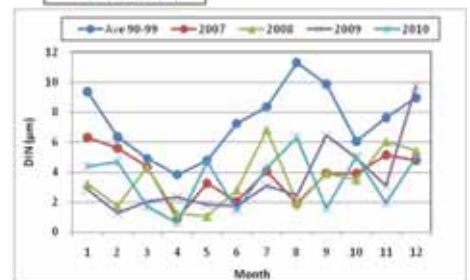


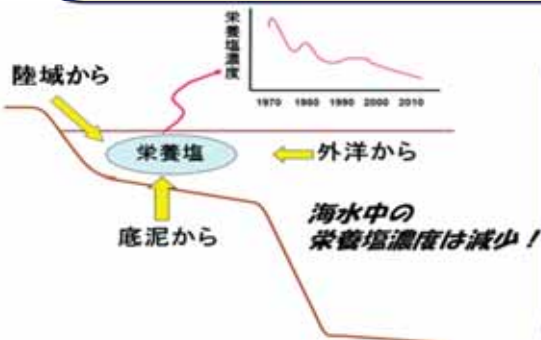
図. 播磨灘における表層・底層のDIN濃度の月別変化
(香川県浅海定線調査結果より)

マニュアルを
つくりました!

海底堆植物からの栄養塩類溶出量測定 マニュアル

2012年1月改訂

手塚雅典(香川大学・農学部)
横谷賢治(水産総合研究センター・瀬戸内海試水産研究所)
山口一樹(香川大学・農学部)
一見和彦(香川大学・瀬戸内海研究センター)



沿岸域への栄養塩供給源としては、①陸域から、②外洋から、③底泥からの三つが考えられます(左図)。

海底からの栄養塩溶出

瀬戸内海における底泥からの栄養塩溶出に関する研究例は少なく、データが極めて少ないのが現状です。

マニュアルの作成: とにかく、底泥からの栄養塩溶出測定データの蓄積が重要です。栄養塩溶出量の測定には、これまで様々な方法が提案されましたが、各方法における問題点が指摘されていて、完璧な方法はありません。そこで、より多くの人が、短時間に、且つ、簡単に測定できるような測定マニュアルを、本事業で作成しました(右図)。

栄養塩溶出量の測定方法: 海底泥は取扱いの簡単なKK式柱状採泥器を用いて採取し(右の写真)、その柱状試料を実験室に持ち帰り、現場の温度、暗条件下で12~24時間インキュベート後、栄養塩の測定を行います。

栄養塩の溶出量測定: 本事業では、播磨灘の小豆島東海域、播磨灘に隣接する志度湾などで、測定しました。



2011年の PO_4^{3-} はほとんど底泥から溶出せず、逆に吸収されている

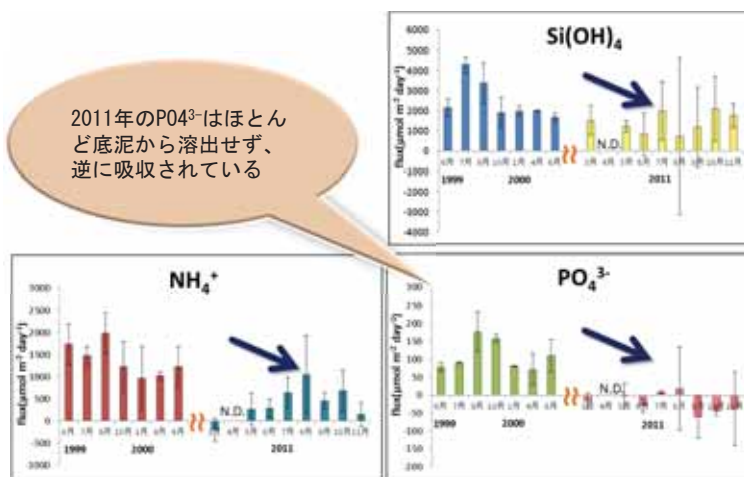


図. 志度湾における栄養塩溶出量. 1999, 2000年と2011年

栄養塩の溶出量-1

播磨灘に隣接する香川県志度湾で測定した結果（左図）。同じ場所、同じ方法で測定し、10年前と現在を比較してみました。

2011年度の栄養塩溶出量は10年前（1999, 2000年）に比べて明らかに減少していました。

栄養塩の溶出量-2

本事業で測定された栄養塩溶出量の結果では、下記のような傾向が認められました。

- ① 栄養塩溶出量は高温期に高く低温期に低い。（温度に依存）
- ② 栄養塩溶出量と底泥の有機態窒素量との間に正の相関関係。（泥の有機物含量に依存）
- ③ 栄養塩溶出量は過去に比べて減少傾向。（泥の栄養塩供給能力低下）

⇒ 栄養塩管理の際には、泥からの栄養塩溶出量を考慮する必要あり。

瀬戸内海では近年、大型ケイ藻の *Eucampia zodiacus* が低水温期に大増殖して、表層水中のDIN濃度が低下し、ノリの色落ちが問題となっています。

本事業では、播磨灘で現存量が比較的高い夜光虫が *Eucampia* 細胞を捕食することに注目し（左下写真）、夜光虫が *Eucampia* 属の生物量に影響を与える可能性を検討しました。



Eucampia 細胞を捕食した夜光虫

夜光虫の *Eucampia* 捕食

夜光虫は *Eucampia* 細胞を捕食して、増殖することが室内実験で確かめられました。

夜光虫の現存量の変化

播磨灘の中央部における夜光虫は、過去、春から初夏にかけて高密度でしたが、2010年以降は低水温期に高密度になっていました（右図）。また、低水温期の夜光虫細胞の食胞内には、珪藻が確認されることが多く、特に、2012年1月の観察では、その食胞内に *Eucampia* 細胞が観察できました。

低水温期にも、夜光虫が高密度になり、その捕食によって *Eucampia* 現存量が減少する可能性が考えられました。

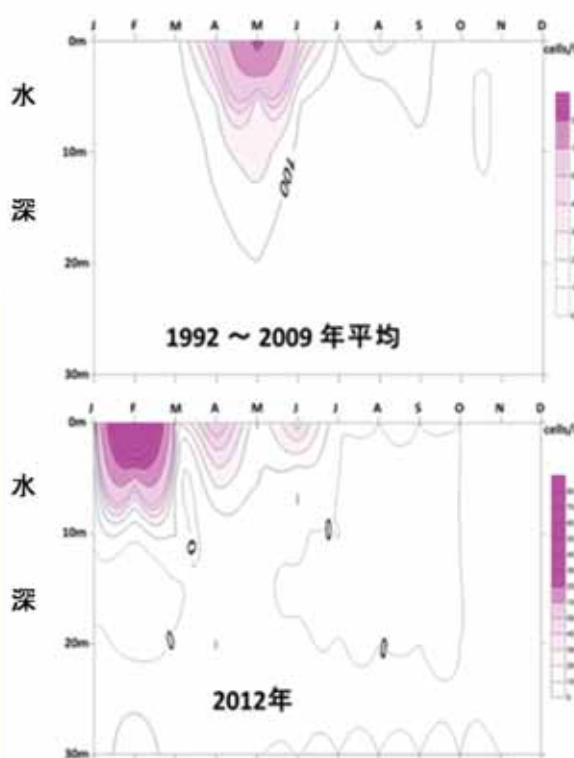
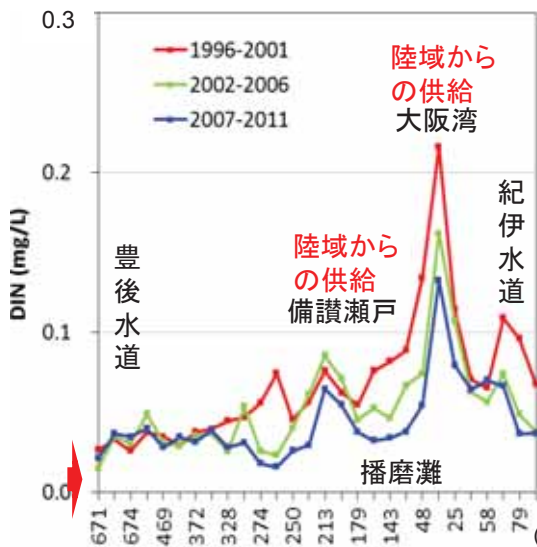


図. 夜光虫の細胞密度. 1992～2009年の平均と2012年

安定同位体比を用いたノリ漁場への栄養塩供給源の推定 (京都大学 フィールド科学教育研究センター)



瀬戸内海東部には陸域だけではなく外海からも栄養塩が流入することが知られています。

栄養塩(NO_3)の同位体比(窒素安定同位体比; $\delta^{15}\text{N}$)が、その起源によって異なることを利用して、瀬戸内海東部のノリ漁場への栄養塩供給源を推定しました。

図1 グラフは広域総合水質調査(環境省)より作成した。海域のDIN濃度は1990年から2010年までの20年間で、約60%低下している。

* 以下では同位体比の高い栄養塩を”重いN”、同位体比の低い栄養塩を”軽いN”と呼んでいます。

栄養塩の同位体比 分析サンプル数: 海域 665、河川等 135

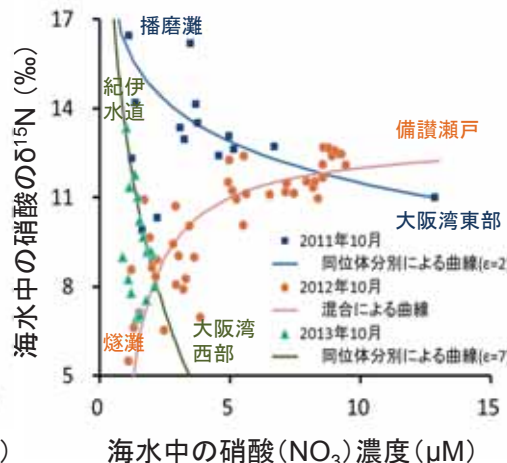
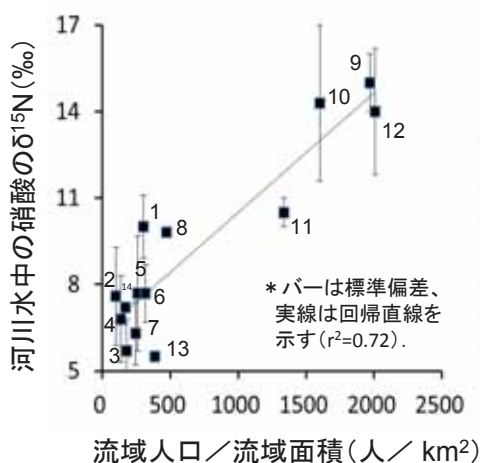


図2 (左)河川水中の栄養塩の同位体比は流域の人口密度によって異なった。大阪湾には重いN、それ以外の海域には比較的軽いNが河川を通じて供給されている。

図3 (右)大阪湾東部と備讃瀬戸から重いN、大阪湾西部から軽いNが、植物プランクトンによる取り込みの影響を受けながら隣接海域に拡散していることが示唆された。

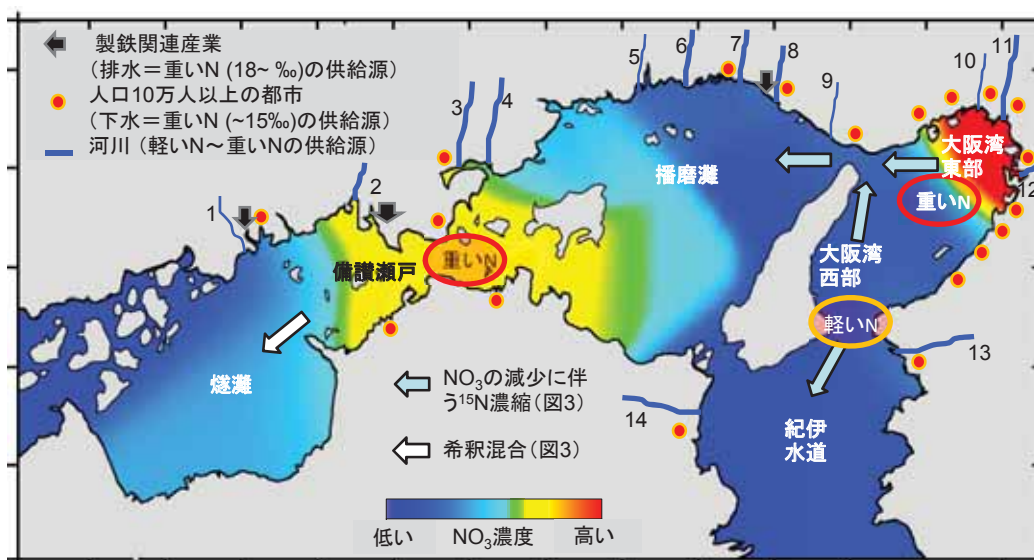
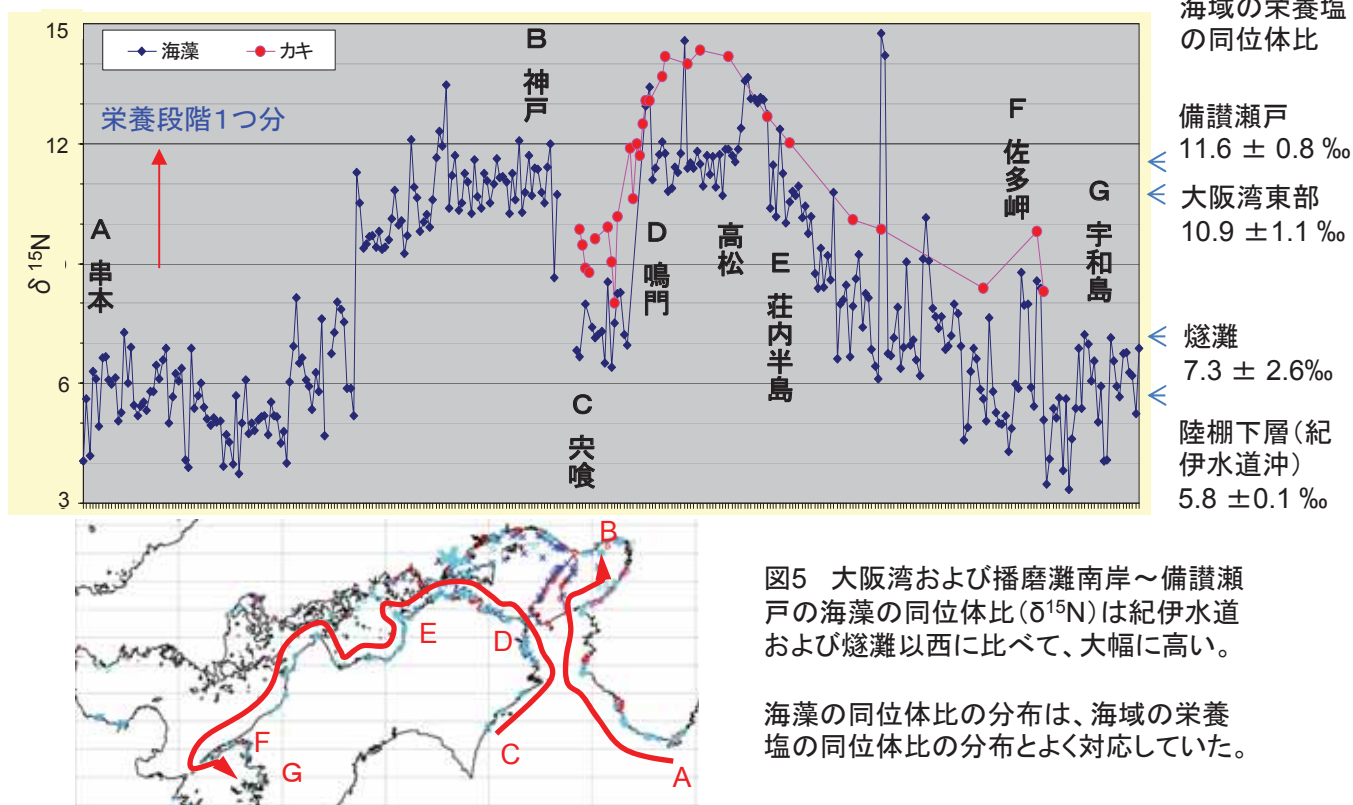


図4 備讃瀬戸には比較的軽いNが河川を通じて北岸に供給されているが、南岸には河川がなく、下水・工場排水などの重いNの供給を受け、さらに外海から遠いため人為影響を受けやすく、このため常に重いNがあると考えられた。大阪湾西部の軽いNは外海起源(～5.8‰)の可能性はあるが、さらに検証が必要である。

瀬戸内海東部では、大阪湾東部と備讃瀬戸に比較的濃度が高くまた同位体比の高い栄養塩があり、隣接海域への栄養塩供給源となっていると考えられました。

海藻の同位体比 分析サンプル数: 約3000



海藻の同位体比は場所的に大きく異なり、海藻への主な栄養塩供給源は海域によって異なることが示されました。

ノリの窒素源推定への応用

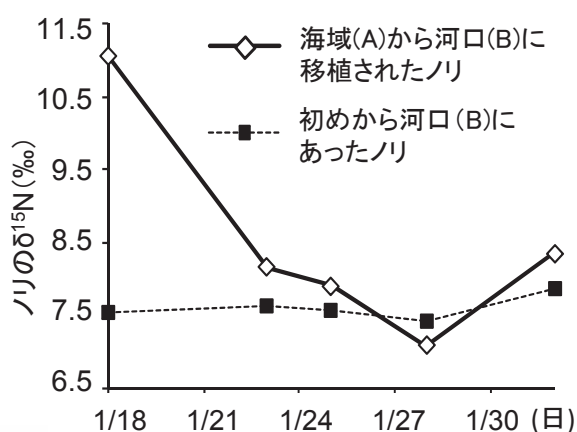
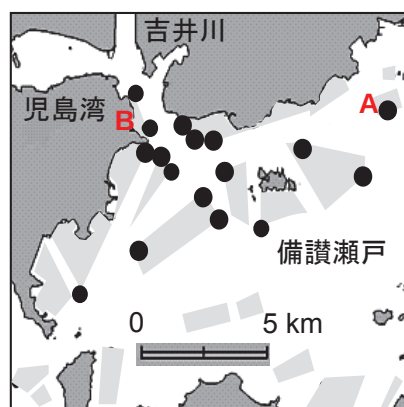


図6 (左) 岡山県児島湾沖のノリ漁場と塩分観測点。

図7 (右) A地点(栄養塩の同位体比が高い備讃瀬戸海域)から、B地点(同位体比の低い河川起源栄養塩の寄与が大きい河口付近)へ移植されたノリの同位体比の変化。

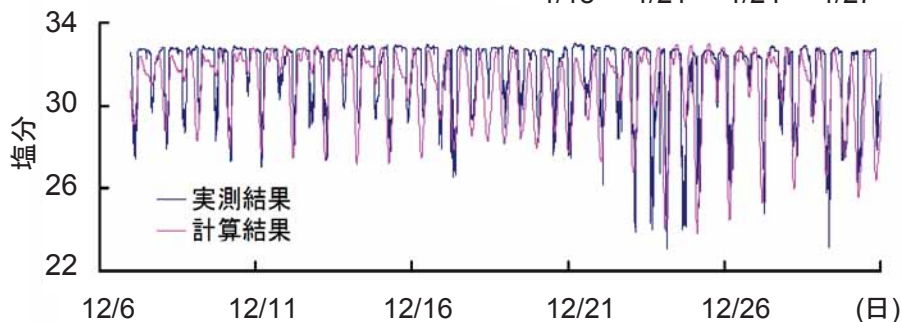
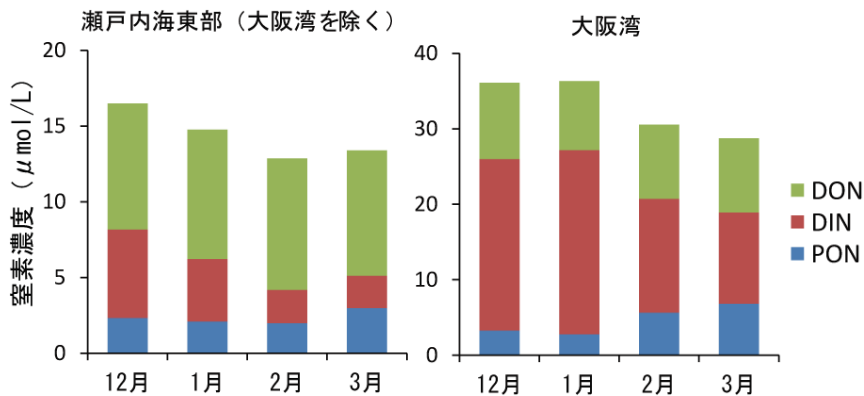


図8 児島湾付近のノリ漁場を対象とする数値モデルによる塩分の再現結果。塩分と同位体比を用いて特定の起源(上の例では河川)の栄養塩のノリ漁場への影響をシミュレートすることができる。

ノリの同位体比は栄養塩の同位体比の変化を速やかに反映することがわかりました。ノリの同位体比を連続的に測定することにより、栄養塩の供給源を知るとともに、施肥・海底耕耘・下水道緩和運転をはじめとする人為的な栄養塩供給の効果を定量的に評価することができると考えられます。

瀬戸内海東部における栄養塩動態の把握とノリ養殖等のための栄養塩管理 (水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所)

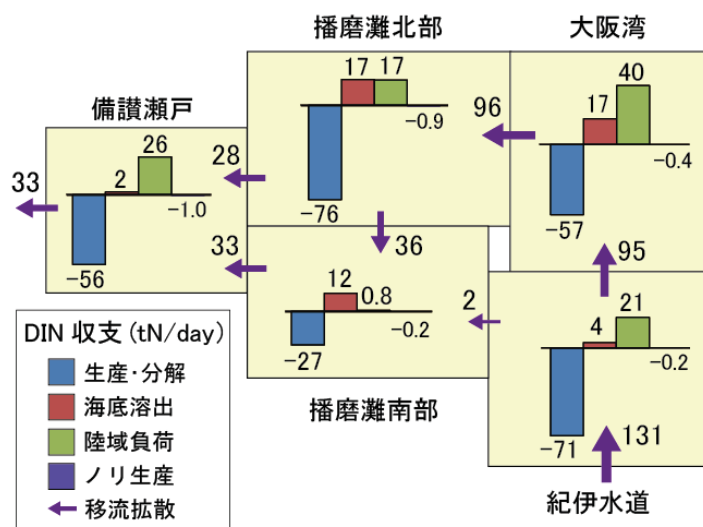
◎ノリ漁期における形態別窒素の割合



ノリ漁期中における形態別窒素の割合(表層、2010年度～2013年度平均)
(兵庫県水産技術センター、岡山県水産研究所、香川県水産試験場、徳島県立農林水産総合技術支援センター、大阪府立水産技術センターによる広域調査結果)

海域における形態別の窒素濃度を調査した結果、溶存態有機窒素(DON)が一定量(10 μmol/L程度)含まれていることが分かりました。特に、大阪湾を除く瀬戸内海東部では溶存態無機窒素(DIN)が少なく、DONが全窒素量の5～7割を占めていました。DONは生物が利用しにくい難分解性の窒素を多く含むことから、生物生産を考えた場合には、DINに注視する必要があります。

◎シミュレーションモデルによるノリ漁期(12月～3月)の栄養塩(DIN)収支の計算結果

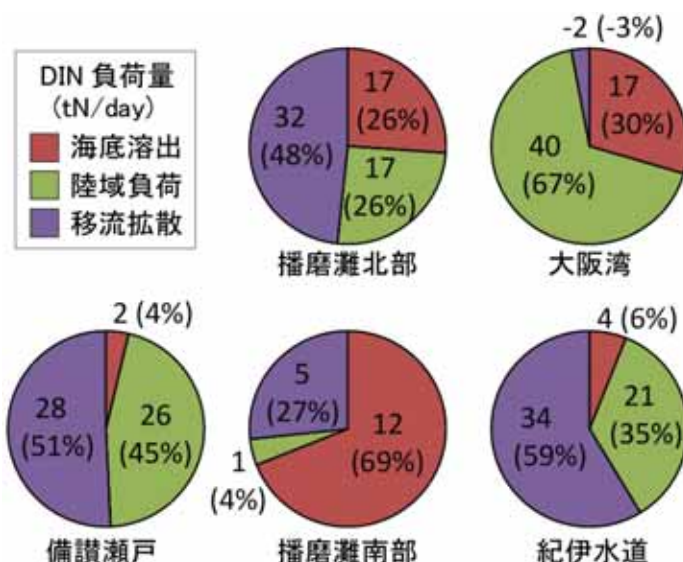


栄養塩(DIN)の収支

生産・分解: 各海域で植物プランクトンの生産による栄養塩消費が大きく、濃度低下の原因になっている。
海底溶出: 播磨灘では栄養塩溶出の寄与が大きい。
陸域負荷: 大阪湾では陸域からの栄養塩流入が大きく、播磨灘南部では陸域負荷が非常に少ない。
移流拡散: 紀伊水道へ流入する外洋の栄養塩および大阪湾へ流入する陸域負荷は、播磨灘北部を経由して、播磨灘南部・備讃瀬戸へ達しています。

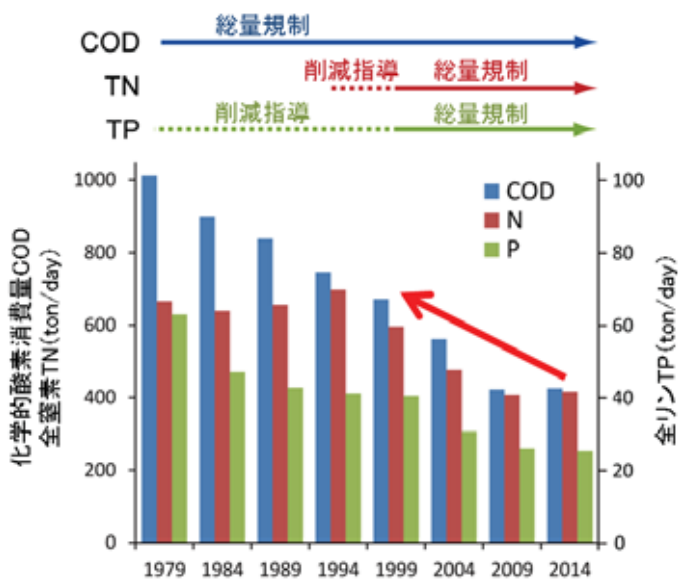
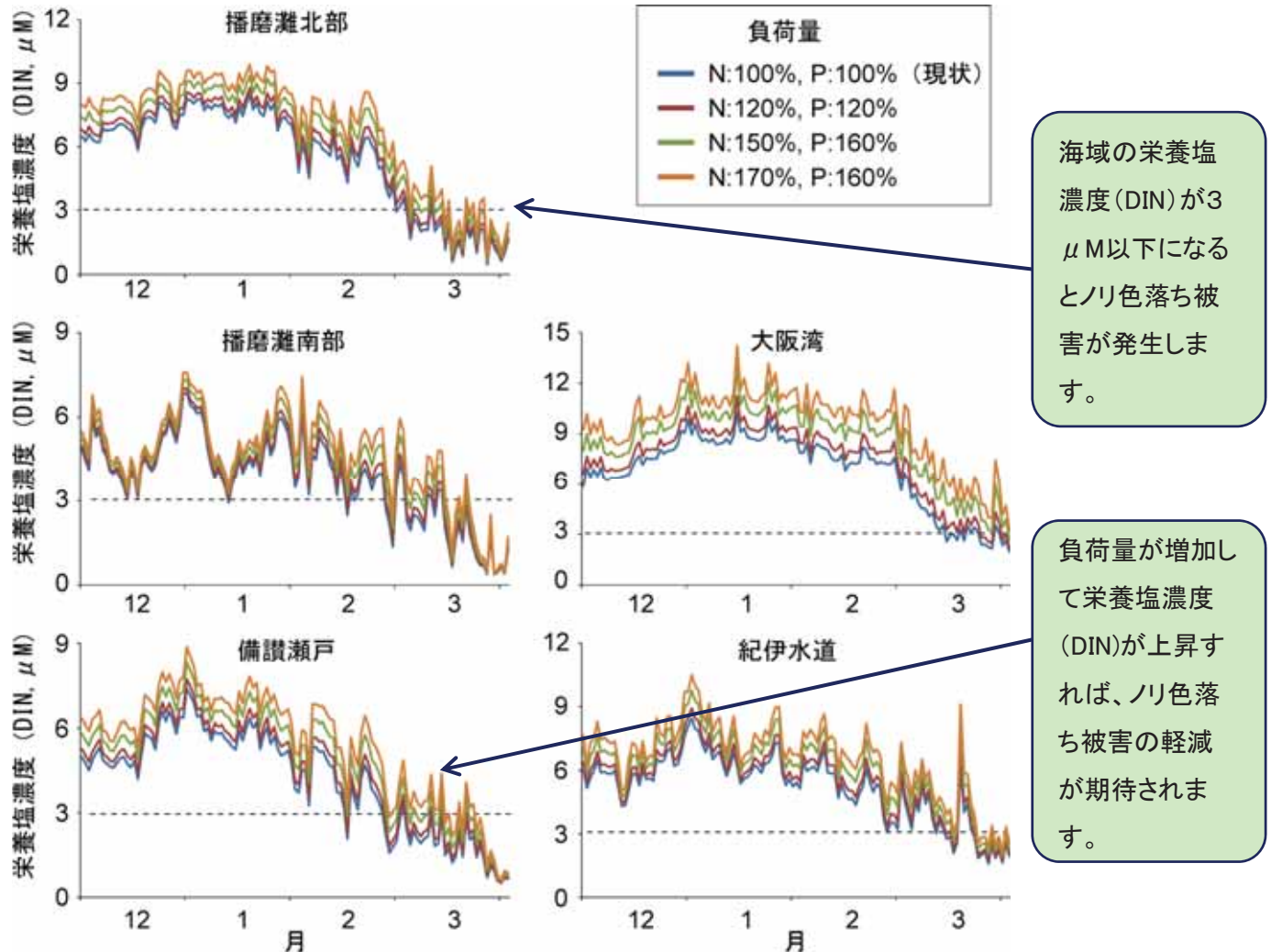
栄養塩(DIN)の負荷起源

各海域に流入する栄養塩の起源を推定しました。
大阪湾: 陸域負荷が大きく、海底溶出の割合も高い。
紀伊水道: 移流(外洋からの流入)が大きく、陸域負荷の割合も高い。
播磨灘北部: 移流(大阪湾からの流入)が大きいが、陸域負荷、海底溶出の割合も高い。
播磨灘南部: 陸域負荷が非常に小さく、海底溶出の寄与が相対的に高い。
備讃瀬戸: 陸域負荷が大きく、移流(播磨灘からの流入)の割合も高い。



◎栄養塩濃度(ノリ漁期、表層)のシミュレーション結果

陸域からの負荷量がノリ漁期の栄養塩濃度に及ぼす影響を試算しました。陸域からの負荷量を変化させてノリ漁期の栄養塩濃度を計算した結果、負荷量が増えると海域の栄養塩濃度(DIN)が高くなり、色落ち被害が軽減されることが推測できました。



瀬戸内海への汚濁負荷量の推移
(環境省発生負荷量管理等調査、関係府県資料より)

◎ノリ養殖等のための栄養塩管理

水質総量規制により瀬戸内海の水質は改善されましたが、その一方でノリ、ワカメ等の藻類養殖を基準にすると海域の栄養塩濃度は低すぎると言えます。シミュレーションにより負荷量を増やせばDIN濃度が高くなると推定されたこと、1990年代には海域のDIN濃度が比較的高くノリ色落ち被害が少なかったことから、陸域からの負荷量を1990年代の水準まで戻せば、ノリ色落ち被害が軽減されることが期待されます。

ノリ、ワカメ養殖のための栄養塩管理に向けて(まとめ)

本事業により、瀬戸内海東部におけるノリ等の色落ち被害軽減を図る管理手法を提案するとともに、藻類養殖を維持するために今後必要な施策を示すことが出来ました。

事業の特筆成果

色落ち対策技術

- ・ノリ、ワカメの生理生態学的調査により、色落ち被害の軽減に向けた養殖管理手法を提示しました。
- ・海域のDIN濃度のテレメトリー技術を開発し、DIN濃度のモニタリングによるノリの色落ち被害の軽減が可能になりました。
- ・ノリ漁場への栄養塩供給技術として、海域特性によっては下水処理施設の栄養塩管理運転が有効であることを示唆する成果を得ました。

新たな知見

- ・DIN濃度が $3\mu\text{M}$ より低下するとノリの色落ちが始まること、 $2\mu\text{M}$ を下回ると原価割れが生じる恐れがあることが分かり、今後海域の水質管理を行う上で目標とするべきDIN濃度が示されました。
- ・現在の水質基準である全窒素(TN)は、難分解性の窒素を比較的多く含むDONが高い割合を占めていることが分かり、TNではなく生物が利用できる形態の窒素(DIN)に注視する必要性が示されました。
- ・大阪湾・播磨灘・備讃瀬戸に流入する河川について調べた結果、1990年代からの約20年間で大部分の河川において窒素とリンの濃度および流入負荷量が減少していることが分かりました。
- ・底泥からの栄養塩溶出の重要性が示されたとともに、10年前に比べて栄養塩溶出量が減少していることが明らかになりました。
- ・栄養塩の安定同位体比を利用して、瀬戸内海東部のノリ漁場への栄養塩供給源を推定しました。
- ・瀬戸内海東部における湾灘毎のDIN収支と負荷起源を明らかにしました。
- ・栄養塩濃度のシミュレーションにより陸域負荷量がノリ漁期の水質に及ぼす影響を試算した結果、負荷量を増やすとDIN濃度が高くなり色落ち被害が軽減できると推定されました。



提言

- ・海域の窒素管理は全窒素(TN)で行われているが、生物生産を考えた場合にはTNのみでは不十分であり、溶存態無機窒素(DIN)を考慮した水質管理施策が必要である。
- ・ノリ養殖を基準にすると現在の海域の栄養塩濃度は低すぎる。ノリ養殖を安定的に維持するには、生態系への影響に配慮しながら、陸域からの負荷量を増やすなど栄養塩を管理する必要がある。
- ・栄養塩の供給方法として、供給量、継続性、経済性、実効性等の面から、現段階では下水処理施設の栄養塩管理運転が有効な一手法と考えられる(実施にあたっては、漁場の特性を検討する必要あり)。

なお、海域の円滑な物質循環を考える上では干潟・浅場が重要であることから、栄養塩管理と並行して干潟・浅場の保全、回復を進める必要があると考えられます。

用語の解説

安定同位体比

質量数の異なる原子(同位体)のうち安定に存在するものを安定同位体とよび、その存在比率を安定同位体比とよぶ。窒素は ^{14}N 約 99.63%と ^{15}N 約 0.37%から構成されているが、 ^{15}N の存在比率は様々な物理化学反応や食物連鎖によりわずかに変化することから、生物が基質としている物質の由来の推定に利用できる。(参考資料:陀安一郎(2007)あなたの同位体はいくつ?—同位体でわかる生物のつながり)

移流、拡散

海水中で物質が輸送されること。物質が散らばり広がる拡散と流れに乗って移動する移流を併せて移流拡散と言う。

色落ち

養殖ノリやワカメなどが栄養不足により色素量が低下して色が薄くなる現象。瀬戸内海では海水中の無機態窒素(DIN)不足により発生する。色落ちしたノリは著しく商品価値が下がる。

栄養塩

植物プランクトンや海藻などの栄養となる無機塩類の総称。海水中に溶けた硝酸塩、亜硝酸塩、アンモニウム塩、ケイ酸塩、リン酸塩など。

栄養塩管理運転

ここでは、下水処理施設における規制範囲内での窒素排出量増加運転を指す。各施設の処理方式によって方法(脱窒抑制、硝化抑制等)は異なるが、通常運転よりも窒素を増量させる(参考資料:「栄養塩類の循環バランスに配慮した運転管理ナレッジに関する事例集」、国土交通省水管理・国土保全局下水道部)。

栄養塩分析装置

連続的に水中の栄養塩濃度を測定する機械。自動化されており、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リン酸態リン、ケイ酸態ケイ素を測定できる。

乾海苔単価

入札によって決定する海苔一枚あたりの単価

クロロフィル a 濃度

植物プランクトンが有している光合成色素の主成分であるクロロフィル a の海水中の濃度であり、水中の植物プランクトンの量を示す指標となる。

シミュレーション

自然現象などをコンピューター上で擬似的に再現して実験を行うこと。模擬実験。

硝酸塩センサー

現場に設置しているだけで、硝酸塩濃度を連続的にモニタリングできる装置

テレメトリー

電話回線等を利用して、離れた場所で取得したデータ等を見ることができる技術

フラックス

ある面を通過する単位時間、単位面積あたりの物質量。

a*、L*値

色調を表す指標、色彩色差計で測定され、a*は赤み、L*は明るさを示す。良好な海苔は a*が高く、L*が低い⇒赤黒いノリとなる

DIN(溶存態無機窒素)

水中に溶けている無機態の窒素を指し、アンモニア態窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素の合計である。栄養塩とも呼ばれ、植物プランクトンや海藻の肥料となるものである。

DIP(溶存態無機リン)

水中に溶けている無機態リン。

DON(溶存態有機窒素)

水中に溶けている有機態の窒素を示す。プランクトンからの排出や、有機物の分解過程で発生する。一般的に微生物分解しにくいものが多く、海洋生物に利用されにくい窒素である。

DOP(溶存態有機リン)

水中に溶けている有機態リン。

LQ 式

河川からの物質負荷量を河川流量から推定するための式。

PE(フィコエリスリン)

養殖ノリに含まれる光合成色素のうち水溶性で赤色の色素。通常の養殖ノリでは最も多く含まれている光合成色素。

PON(粒状態有機窒素)

水中に粒状態として存在するものに含まれる有機態窒素。プランクトンなどが含まれる。

PP(粒状態有機リン)

水中に粒状態として存在するものに含まれる有機態リン。

SPAD 値

葉緑素計の指示値。植物の葉などに含まれる葉緑素(クロロフィル)量を表す数値。

TN(全窒素)

水中に存在する有機態窒素と無機態窒素の総計。TN=DIN+DON+PON。

TP(全リン)

水中に存在する有機態リンと無機態リンの総計。TP=DIP+DOP+PP。



問い合わせ先

独立行政法人 水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所
〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5
TEL 0829-55-0666

岡山県農林水産総合センター 水産研究所
〒701-4303 岡山県瀬戸内市牛窓町鹿忍6641-6
TEL 0869-34-3074

兵庫県立農林水産技術総合センター 水産技術センター
〒674-0093 兵庫県明石市二見町南二見22-2
TEL 078-941-8601

香川県水産試験場
〒761-0111 香川県高松市屋島東町75-5
TEL 087-843-6511

徳島県立農林水産総合技術支援センター 水産研究課
〒771-0361 徳島県鳴門市瀬戸町堂浦字地廻り壱96-10-2
TEL 088-688-0555

地方独立行政法人 大阪府立環境農林水産総合研究所 水産技術センター
〒599-0311 大阪府泉南郡岬町多奈川谷川2926-1
TEL 072-495-5252

大阪工業大学工学部
〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1
TEL 06-6954-4512

香川大学農学部
〒761-0795 香川県木田郡三木町池戸
TEL 087-891-3148

京都大学フィールド科学教育研究センター
〒606-8502 京都市左京区北白川追分町
TEL 075-753-6216

発行 平成27年3月
発行者 独立行政法人水産総合研究センター
瀬戸内海区水産研究所
〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5