

ノリの生育等に対する下水処理の季節別管理運転によるリン放流の効果

環境部 環境計画課 主任 望月 佑一
自然環境課 研究員 山津 浩紀

要 旨

本報告では、冬季の博多湾でノリの色落ち対策として実施される西部水処理センターでの季節別管理運転について、下水処理水由来の栄養塩類(リン)が姪浜ノリ養殖場へ与える効果を明らかにするため、水質(栄養塩類)、ノリ葉体(窒素・リン含有量)、窒素安定同位体比の三つの観点から考察した。水質とノリ葉体中の窒素・リン含有量の関係を見ると、ノリの品質・生育状況は、ノリ養殖場周辺の水質に左右されることが示唆された。また、窒素安定同位体比により、ノリ養殖場の一部で、下水処理水由来の栄養塩類の寄与が大きいことが明らかとなり、季節別管理運転のノリ養殖場への効果が示された。

1. はじめに

我が国の沿岸環境は、戦後、高度成長の時代に大きく変化した。自然海岸は埋め立てられ、次々と工場が建設された。冷蔵庫、洗濯機、白黒テレビなど家電製品が普及し、人々の生活がどんどん豊かになる一方で、沿岸海域は悲鳴を上げていた。窒素やリンが大量に含まれた工場排水や生活雑排水がそのまま海域に流れ込み、海が“富栄養化”したことで、赤潮など様々な問題が顕在化したのである。

その後、これら海洋汚染問題が深刻に受け止められ、環境保全の観点から、企業への排出規制や上下水道の整備、高度処理設備の導入等が進められた。海域へ流入する窒素やリンの負荷は大きく低減され、沿岸環境は改善、“きれいな海”を取り戻すことができた。しかし、ここで新たな問題が浮上する。流入負荷削減の取組により、海がきれいになりすぎたのである。近年は、栄養塩類等の不足により、瀬戸内海では、ノリやワカメの色落ちが生じ^{1) 2) 3)}、大阪湾では、魚が減少していると言われている⁴⁾。

このような背景から、瀬戸内海環境保全特別措置法の一部を改正する法律案が令和3年2月に閣議決定された⁵⁾。本改正には、「地域ごとのニーズに応じて一部の海域への栄養塩類供給を可能とする「栄養塩類管理制度」の創設により、多様な水産資源の確保に貢献す

ることが含まれている。いわゆる、栄養塩類の“排出規制”から“管理”への転換であり、地域での栄養塩類管理の機運が高まっている。

本研究のフィールドである博多湾も同じような状況にある。福岡市をはじめとする流域人口の増加に伴い、流入負荷削減を目的とした下水道整備が急速に進められてきた。福岡市の水処理センターでは「博多湾特定水域高度処理基本計画」⁶⁾に基づき、下水処理水中のリンの除去を目的とする高度処理設備が1993年から1999年に順次導入され、化学的酸素要求量(COD)、全窒素(T-N)、全リン(T-P)はいずれも、1993年頃をピークに減少傾向にある⁷⁾。

この流入負荷の削減対策により、リン濃度が大幅に減少したことで、湾内の富栄養化や有機汚濁の低減に大きく貢献した。しかし、夏季に栄養塩類の過剰な供給による富栄養化や有機汚濁、底層の貧酸素化が依然として発生し、冬季にはこの流入負荷削減対策によりノリ養殖において、近年リンの不足が原因と考えられるノリの色落ちやねじれ等の生育異常が発生している⁷⁾。このように、博多湾では、夏季の富栄養化対策を実施しつつ、栄養塩類が不足しがちな冬季には、栄養塩類を供給する等、きめ細かな管理が必要とされている。これに対して、ノリ養殖場近傍にある福岡市の西部水処理センターでは、ノリ養殖に必要なリンを確保するため、養殖期間である冬季(10月～翌年3月)に季節別管理運

転を試験的に実施している。これは、冬季に通常よりも高いリン濃度で処理水を博多湾に放流するものである。

本研究では、西部水処理センターでの季節別管理運転に関して、ノリ養殖場近傍にある環境基準点の全リン(T-P)の環境基準達成を前提としつつ、ノリの品質の維持・向上に必要なリンを確保するために、適切な放流濃度を明らかにすることを目的とする。ここでは、ノリ養殖場の水質がノリの品質に与える影響を検証するとともに、養殖場へ供給される栄養塩類の由来を探っていく。

2. 現地調査方法

2.1 調査地点

調査地点は、図1に示す姪浜ノリ養殖場内のNo.1～4、西部水処理センターの放流口前のNo.5、室見川河口付近のNo.6とした。No.1～4は室見養殖場および妙見養殖場のそれぞれ東端・西端であり、これらの地点では水質分析試料とノリ葉体を採取した。No.5は下水処理放流水の水質状況を指標するための地点、No.6は室見川からの流入状況を指標するための地点として、採水のみを行った。

また、No.1付近に水温ロガー(HOBO Pendant Temperature / Light Data Logger, Onset)を設置し、水温の連続観測を行った。

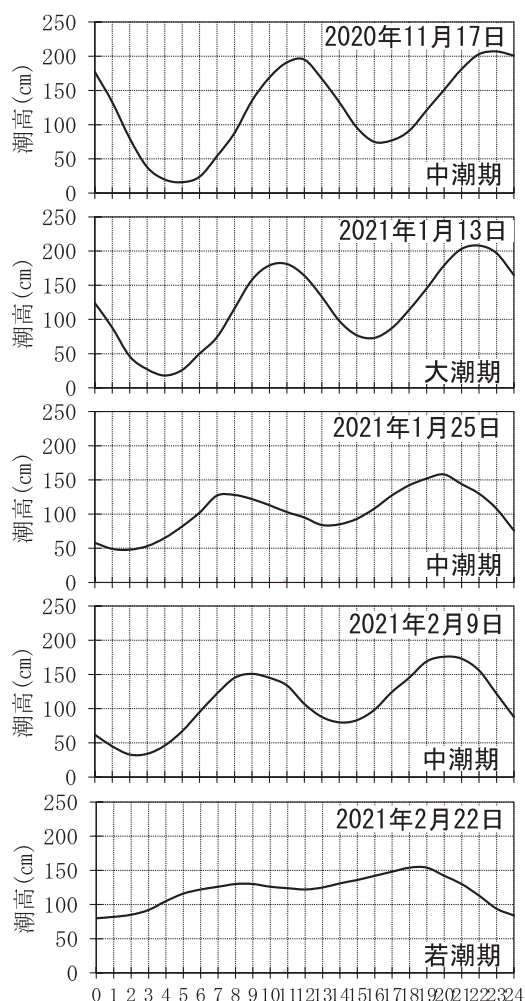


図1 調査地点

2.2 調査時期

例年、ノリの色落ち等の生育異常が1月下旬頃に発

生しやすいことから⁸⁾、1月～2月に各月2回の調査を実施した。また、ノリの品質が最も高いとされる初摘み時期である11月にも調査を1回実施した。



注) 図中の赤塗りは調査時間帯である

図2 調査日の潮汐⁹⁾

調査日は図2⁹⁾中に示すとおりで、調査時間帯は、下水処理放流水がノリ養殖場に到達しやすい下げ潮時とした。

2.3 調査内容

表層の海水を直接容器に採取した後、保冷して持ち帰り、分析に供した。分析項目は、淡水の混入状況を指標する塩分、栄養物質の全窒素(T-N)と全リン(T-P)、栄養塩類のうち、溶解性無機態窒素(DIN)のアンモニウム態窒素(NH₄-N)と亜硝酸態窒素(NO₂-N)、及び硝酸態窒素(NO₃-N)、溶解性無機態リン(DIP)のほとんどを占めるリン酸態リン(PO₄-P)¹⁰⁾とした。

また、ノリの生育状況として、色落ち等の生育異常の

有無、葉体中の窒素・リン含有量を調べた。ノリの生育異常は、現地目で目視確認し、窒素・リン含有量は、ノリ網から 50g 程度の葉体を採取した後(写真)、保冷して持ち帰り、分析に供した。ただし、調査年度のノリ網の設置時期は、No.3、No.4(室見養殖場)が No.1、No.2(妙見養殖場)よりも早く、初摘み時期の 11 月には、室見養殖場でのみノリ葉体の採取が可能な葉長に生育していた。そのため、11 月のノリ葉体と水質の試料は No.3 と No.4 で採取した。

水質とノリ葉体の分析項目などは、表 1 に示すとおりである。



写真 ノリ葉体の採取(11月17日撮影)

表 1 水質・ノリ葉体の分析項目及び方法及び定量下限値

項目	方法	単位	定量下限値	
水質	塩分	海洋観測指針5.3	-	2.00
	T-N	JIS K 0102 45.6	mg/L	0.01
	NH ₄ -N	JIS K 0102 42.1及び42.2	mg/L	0.01
	NO ₂ -N	JIS K 0102 43.1.3	mg/L	0.005
	NO ₃ -N	JIS K 0102 43.2.6	mg/L	0.005
	T-P	JIS K 0102 46.3.4	mg/L	0.005
	PO ₄ -P	JIS K 0102 46.1.1	mg/L	0.001
ノリ	窒素	元素分析計(CHNコーダ)による	wt%・dry	0.01
	リン	H24底質調査方法 II 4.9.1	wt%・dry	0.01

2.4 安定同位体比

ノリ養殖場の近傍には、栄養塩の供給源として下水放流水と室見川河口から流入する河川水がある。下水処理緩和運転によるノリ養殖場への効果を把握するためには、ノリが吸収する栄養塩類の由来は下水処理水と河川水のどちらの寄与が大きいのかを確認する必要がある。その手段として窒素の安定同位体比($\delta^{15}\text{N}/\delta^{14}\text{N}$)に着目した。一般的に $\delta^{15}\text{N}$ は自然界に0.366%と

微量に存在するが¹¹⁾、生態系システムの中の窒素の安定同位体比は食物連鎖にそって上昇していくことが分かっている^{12)、13)}。そのため、栄養段階が上位である人由来の窒素を多く含む下水処理水では、河川水に比べて安定同位体比が高くなることが想定される。この仮定の下、西部水処理センターより提供いただいた放流前の下水処理水、海水の影響を受けない室見川の福重橋近傍の堰上流部の河川水、及びノリ養殖場のNo.1～4各地点のノリ葉体の窒素安定同位体比分析を行った(表2)。なお、海水中の安定同位体比の分析は、T-N濃縮の過程で塩化ナトリウムが析出するため技術的に難しく、本研究では海水試料は対象としなかった。

表 2 窒素安定同位体比の分析項目及び方法

項目	方法	単位	
水質	前処理	加熱による濃縮	%
	測定法	地球科学講座8地球科学実験法4.8質量分析	%
ノリ	前処理	純水洗浄による脱塩処理	%
	測定法	地球科学講座8地球科学実験法4.8質量分析	%

3. 調査結果

3.1 水質

調査期間中の気象¹⁴⁾及び水温を図3に示す。11月中旬～12月中旬以外は、比較的継続した降雨がみられた。これらの降雨により、塩分の低下が顕著にみられたのは1月25日のNo.3、4であり、1月22日から24日の降雨に伴う室見川からの出水の影響がうかがえる。各地点のT-N及びT-Pとその内訳(DINとPO₄-P)の経時変化を図4、図5に示す。なお、有機態窒素(O-N)と有機態リン(O-P)は、粒子性無機態窒素・リンが無視できるほど低いと仮定して¹⁵⁾、T-NとT-PからそれぞれDINとPO₄-Pを差し引いた値である。分析値が表1に示した定量下限値未満の場合は、定量下限値の1/2の値で示している。

DINとPO₄-Pの経時変化の傾向は、妙見養殖場のNo1、2と室見養殖場のNo.3、4で異なっていた。いずれの地点でも降雨の影響により、一時的な増減はあるものの、No.1とNo.2では、放流口近傍のNo.5に似た動

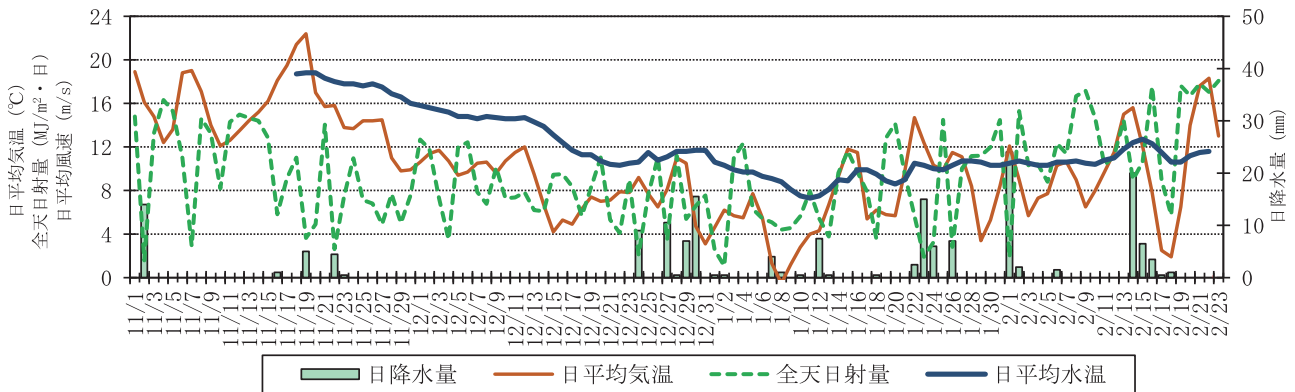
きで、11月にピークを示しその後減少していた。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は1月下旬以降、枯渇状態(定量下限値: 0.001mg/L 以下)となった。一方、No.3とNo.4では、室見川河口のNo.6と同じような動きであり、概ね横ばいで推移していた。 $\text{PO}_4\text{-P}$ をみると、No.1、2と同様に1月下旬以降で枯渇状態となった。

放流口近傍のNo.5では、T-Nに占める $\text{NH}_4\text{-N}$

($\text{NH}_4\text{-N}/\text{T-N}$)とT-Pに占める $\text{PO}_4\text{-P}$ ($\text{PO}_4\text{-P}/\text{T-P}$)の割合が他の地点と比べて高く、ノリ養殖場周辺海域における主要な栄養塩類の供給源となっていることがうかがえる。

3.2 ノリ葉体中の窒素・リン含有量

ノリ葉体中の窒素・リン含有量の経時変化を図6に示



注) 図中の赤塗りは調査日である

図3 気象状況と水温の経時変化

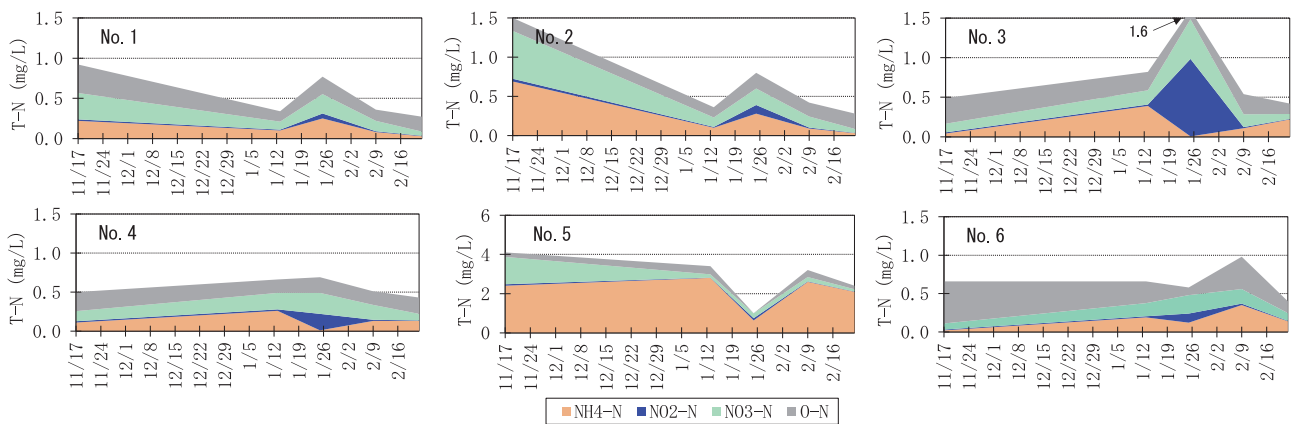


図4 海水中の窒素の形態別経時変化

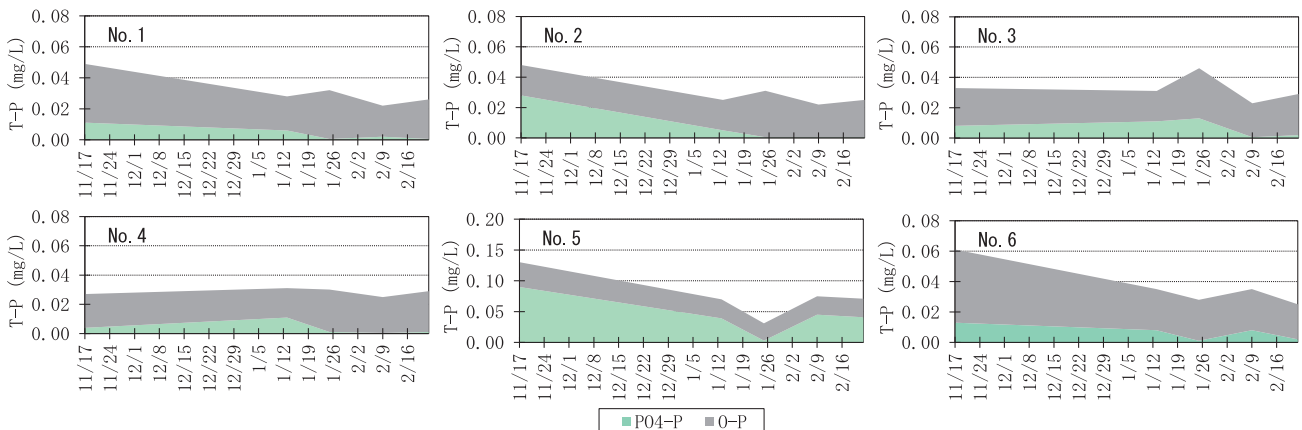


図5 海水中のリンの形態別経時変化

す。なお、11月にはNo.3、4のみでノリ葉体を採取したため、No.1、2のデータは欠測となる。窒素・リン含有量ともに、11月（No.1、2では1月）～2月にかけて減少傾向を示した。また、2月下旬には全地点で色落ちがみられた。

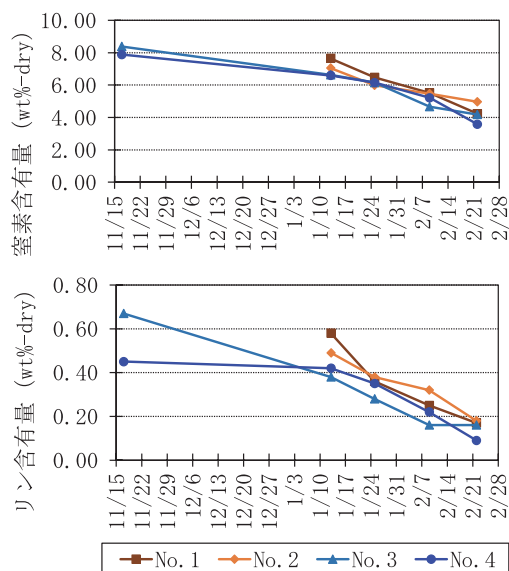


図6 ノリ葉体中の窒素・リン含有量

3.3 水質とノリの関係

水質(DIN・PO₄-P)とノリ葉体中の窒素・リン含有量の関係を図7に示す。また、解析に必要なデータ数を増やすべく、2019年度に実施した調査データを含めた結果を図8に示す¹⁶⁾。残念ながらその関係に有意性はみられなかったが、ノリ葉体中の窒素・リン含有量は、DINやPO₄-Pが高めの場合に多くなる傾向がうかがえた。

3.4 窒素安定同位体比(δ¹⁵N/δ¹⁴N)

西部水処理センター提供の下水処理水と室見川の河川水、ノリ養殖場のノリ葉体、これらの窒素安定同位体比を表3に示す。窒素安定同位体比は、下水処理水で14.6、室見川の河川水で8.8であり、人由来の窒素を多く含む下水処理水が、河川水より高い結果となった。ノリ葉体の窒素安定同位体比をみると、No.1、2がNo.3、4より高い結

果となっており、No.1、2がより下水処理水由来の栄養塩類を吸収していることが明らかとなった。

4. 考察

4.1 季節別緩和運転のノリ養殖場への効果

横山ら(2019)¹⁷⁾の研究では、西部水処理センターの下水処理放流口及び姪浜ノリ養殖場周辺における栄養塩類(リン)の拡散状況を現地調査(下げ潮時)により調べ、下水放流口から放流されたリンがノリの生育に必要な濃度を上回って、主に妙見養殖場(No.1、2)へ到達していることが確認されている。

本研究においても、No.1とNo.2の水質(DINとPO₄-P)は、放流口近傍のNo.5と似た動態を示し、No.1、2のノリ葉体中の窒素安定同位体比は、室見川の河川水よりも下水処理水により近い値であった。このことから、妙見養殖場のNo.1とNo.2のノリは、下水処理水由来の栄養塩類を吸収し、生育していると考えられる。一方で、室見養殖場のNo.3、4は室見川河口に近く、これらの地

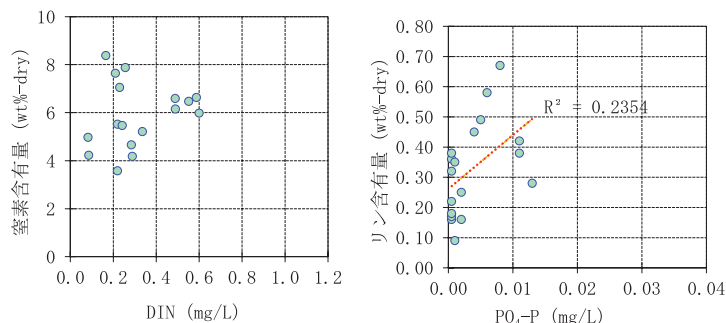


図7 栄養塩類(DIN、PO₄-P)とノリ葉体中の窒素・リン含有量の関係(2020年度)

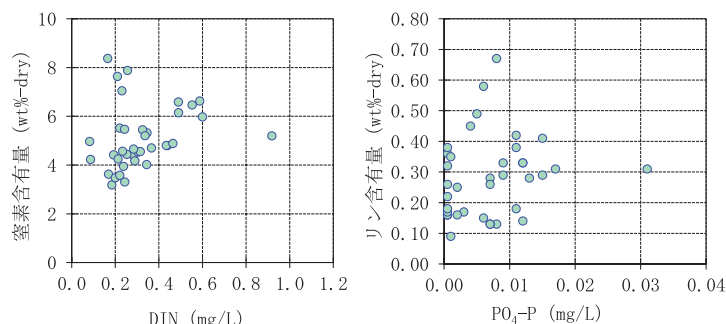


図8 栄養塩類(DIN、PO₄-P)とノリ葉体中の窒素・リン含有量の関係(2019～2020年度)

表 3 水質・ノリ葉体の分析項目及び方法と定量下限値

項目	方法	単位	$\delta^{15}\text{N}$
水質	下水放流水	(‰)	14.6 ± 0.5
	河川水	(‰)	8.8 ± 0.4
ノリ葉体	No.1	(‰)	10.3 ± 0.3
	No.2	(‰)	11.4 ± 0.5
	No.3	(‰)	9.8 ± 0.2
	No.4	(‰)	8.7 ± 0.4

点の水質は、室見川河口の No.6 と概ね同様の動態を示した。No.3、4 のノリ葉体中の窒素安定同位体比も室見川河川水に近く、室見川から供給される栄養塩類を主に吸収し、生育していると考えられる。ただし、放流口近傍の No.5 では高濃度の $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ が含まれており、潮や風向きにより下水処理水由来の栄養塩類は No.3、4 にも到達している可能性はある。

栄養塩 ($\text{DIN} \cdot \text{PO}_4\text{-P}$) とノリ葉体中の窒素・リン含有量の関係を見ると、両者にはある程度関係性が認められるものの、有意性はみられなかった。これには水質以外の要因が影響していると考えられる。例えば、水温や日射量もノリの生育状況には関係してくるだろう。博多湾での姪浜ノリ養殖場では、10 月下旬～11 月上旬にノリ網を張った後、有明海のように養殖期間中にノリ網を張り替えることはしない。姪浜ノリ養殖場の漁業者ヒアリングによると、ノリの収穫は数回行われ、生育した葉先を随時摘み取っていく。そのため、養殖期後半(1 月下旬～2 月下旬)には、ノリが“歳をとる”ことで、生育も遅く色落ちや生育異常、病気等も生じやすいそうだ。

一般的に、ノリ網を張って最初に収穫される初摘みノリは、柔らかくて味も良く、収穫を重ねるごとに固くなり味も落ちるとされる。以上のように、ノリの品質・生育状況には、海水中に含まれる栄養塩類が極めて重要であるが、時期によるノリ自体の生理生態的な変化も影響している可能性がある。

4.2 ノリ養殖と季節別管理運転の課題

図 6 に示すとおり、ノリ葉体中に含まれる窒素・リン含有量は、11 月 (No.1、2 は 1 月) をピークに 2 月まで減少傾向を示した。ノリの生育に必要とされる DIN 濃度は 0.094 mg/L ($7 \mu \text{ mol/L}$ より換算)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は

0.0124 mg/L ($0.4 \mu \text{ mol/L}$ より換算) とされている¹⁸⁾。これを基準にすると、 DIN では、調査期間を通して全地点で十分量が供給されていたものの、 $\text{PO}_4\text{-P}$ では、1 月以降は放流口近傍の No.5 を除いたすべての地点で必要濃度を下回っていた(図 4、図 5)。海水中に窒素が十分にあるにもかかわらず、ノリ葉体中に含まれる窒素含有量は減少しているが、これは生育に必要な $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が下回り、生長に対して制限要因となったことで、ノリ葉体中の窒素・リン含有量のいずれも減少させた可能性がある。

ノリ葉体中の窒素・リン含有量の 1 月～2 月にかけての減少は、主な栄養塩類供給源である下水処理水及び河川水の $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の低下と、ノリ自体が老化することのダブルパンチによるものと考えられる。ノリの窒素・リン含有量を低下させず、色落ちや生育異常等を防ぐには、1 月～2 月に下水処理水のリン濃度をさらに上げて放流することが直接的な解決策として挙げられるが、この実現のためには、以下に示すいくつかの課題を解決しなければならない。

課題①: 水質 (T-P) の環境基準を達成すること。

課題②: ノリ養殖場内に必要濃度の $\text{PO}_4\text{-P}$ を到達させるために必要な下水放流水の濃度を明らかにすること。

課題③: 下水処理のシステムは生物処理によるため、必要濃度を一定に保って放流するためには、技術の確立が必要であること。

課題①、②については、瀬戸内海環境保全特別措置法の一部改正がまさに述べていることであり、法令により定められた環境基準を達成しつつ、ノリ養殖場へ適切な濃度を到達させることを目指す必要がある。

5. まとめ

今回の結果では、ノリ養殖場の水質によりノリ葉体中に含まれる窒素・リン含有量が影響を受けることが示唆された。また、季節別管理運転によるノリ養殖場への栄養塩類供給の寄与は、No.1、2 (妙見養殖場) でより大きいことが明らかとなった。

6. おわりに（今後の展望）

本研究会では今後、シミュレーションにより、上記課題①、②を達成するための適切な放流水濃度を探っていく予定である。

また、ノリの品質や等級の指標の一つとして、色調がよく用いられる^{18), 19)}。本研究では、ノリの生育状況の指標として、窒素・リン含有量を測定し、栄養塩(DIN・PO₄-P)との関係性をみたものの、色調は測定できていない。ノリの品質・等級(色調)を保つために必要な放流水濃度(PO₄-P)を明らかにするため、ノリの窒素・リン含有量を計測するとともに分光測色計を用いた色調測定も検討したいと考えている。

謝辞:本研究は、社内の自主研究会において実施したものである。また、調査にあたっては、福岡市漁業協同組合姪浜支所には試料の採取、西部水処理センターには処理水の提供で多大なるご協力をいただいた。試料の分析では当協会技術部に多くのご協力をいただいた。ここに記して深甚の感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 堀 豊, 望月松寿, 島本信夫: 播磨灘北部海域におけるノリ色落ちと漁場環境の変遷, 水産海洋研究, 72(2), 107-112(2008).
- 2) 多田邦尚, 藤原宗弘, 本城凡夫: 瀬戸内海の水質環境とノリ養殖, BUNSEKI KAGAKU, Vol. 59, No. 11, 945-955(2010).
- 3) 反田實, 赤繁悟, 有山啓之, 山野井英夫, 木村博, 團昭紀, 坂本久, 佐伯康明, 石田祐幸, 壽久文, 山田卓郎: 瀬戸内海の栄養塩環境と漁業, Journal of Fisheries Technology, 7(1), 37-46(2014).
- 4) 大阪の海は「きれいすぎ」て魚が獲れない? 極端ではない「ええかげん」の大切さ, Gyoppy ホームページ(<https://gyoppy.yahoo.co.jp/originals/74.html>).
- 5) 瀬戸内海環境保全特別措置法の一部を改正する法律案の概要, 環境省ホームページ(<https://www.env.go.jp/press/109207.html>).
- 6) 福岡県, 福岡市: 博多湾特定水域高度処理基本計画(2002).
- 7) 博多湾環境保全計画(第二次), 福岡市環境局ホームページ(<https://www.city.fukuoka.lg.jp/kankyo/k-chosei/hp/keikaku4.html>).
- 8) 平成 26~令和元年度博多湾の環境保全に向けて講じた措置およびモニタリング調査結果, 福岡市環境局ホームページ(<https://www.city.fukuoka.lg.jp/kankyo/k-chosei/hp/hakatawann/hakatawan.html>).
- 9) 第七管区験潮データ(毎時潮高, 高低潮時・潮位), 第七管区海上保安部ホームページ(https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN7/kencyo7/kencyo_7kan.html).
- 10) 池田裕一, 中井正則, 中村由行, 道奥康治, 村上一男: 水圏の環境(有田正光編著), 7-8, 東京電機大学出版局(1998).
- 11) T. B. Coplen, J. K. Bohlke, P. De Bievre, T. Ding, N. E. Holden, J. A. Hopple, H. R. Krouse, A. Lamberty, H. S. Peiser, K. Revesz, S. E. Rieder, K. J. R. Rosman, E. Roth, P. D. P Taylor, Jr. R. D. Vocke and Y. K. Xiao: Isotope-abundance variations of selected elements, *Pure & Applied chemistry*, 74, 1987-2017(2002).
- 12) Y. Miyake, and E. Wada: The abundance ratio of ¹⁵N/¹⁴N in marine environments, *Records Oceanogr. Works Jpn*, 9, 37-53 (1967).
- 13) 小川奈々子, 木庭啓介, 高津文人, 和田英太郎: 自然生態系における炭素・窒素安定同位体存在比, *RADIOISOTOPES*, 46, 632-644(1997).
- 14) 過去の気象データ検索, 気象庁ホームページ(<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>).
- 15) 藤原建紀: 内湾の貧栄養化—窒素・リン負荷量削減が海域の COD, 栄養塩レベルに及ぼす影響—, 沿岸海洋研究, 52, 11-27(2014).
- 16) 山津浩紀, 望月佑一, 横山佳裕: 冬季博多湾ノリ養殖漁場における栄養塩類の変動及びその変動に

- 伴うノリの生育状況の把握, 環境管理, Vol.49, 41-48 (2020).
- 17) 横山佳裕, 大畠雄三, 後藤祐哉, 望月佑一, 藤井暁彦, 内田唯史: 冬季博多湾における海域の栄養塩類に対する下水処理の緩和運転の効果に関する現地観測, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 75, I_985-I_988 (2019).
- 18) 小池美紀, 淵上哲: 溶存態無機リン欠乏がスサビノリ (*Pyropia Yezoensis*) に及ぼす影響, 福岡県水産海洋技術センター研究報告, No.23, 33-42 (2013).
- 19) 伊藤博, 須藤篤史: 仙台湾におけるノリ色調と栄養塩濃度の関係, 宮城水産研報 第 17 号 (2017).