

岡東浄化センターにおける栄養塩管理運転の
影響調査報告書

令和5年5月

岡山県農林水産総合センター水産研究所

目次

1. はじめに
 - (1) 目的
 - (2) 岡山県における栄養塩濃度の変化
 - (3) 栄養塩濃度とノリ養殖，漁船漁業の生産量との関係

2. 能動的（栄養塩）管理運転について
 - (1) 栄養塩管理運転とは
 - (2) 岡東浄化センターでの実施に至るまでの経緯
 - (3) 管理運転の実施方法
 - (4) 管理運転の実施結果

3. 海域での栄養塩の増加量とノリ漁場への栄養塩供給量
 - (1) 海域での栄養塩の拡散状況調査
 - (2) 連続観測による影響調査
 - (3) シミュレーションモデルによる解析結果

4. 周辺の生物等への影響
 - (1) 底質調査結果
 - (2) 底生生物調査
 - (3) その他

5. まとめ

6. その他

1. はじめに

(1) 目的

瀬戸内海では、水質汚濁防止法及び瀬戸内海環境保全特別措置法に基づく水質総量削減等により、陸域からの窒素、リン等の負荷量が減少した。その結果、海域の栄養塩（特に溶存態無機窒素；DIN）が減少し、ノリの色落ちが頻発するとともに、漁船漁業の生産量減少にもつながっていることが指摘されるようになった。そういった中、各地の沿岸域で、下水処理水中の栄養塩類（窒素やリン）の濃度を基準の範囲内において、高い水準に維持して排水する管理運転の取組が各地で進んでいる。

本県においても、2018年11月から岡山市の岡東浄化センターにおいて管理運転が開始され、その効果等を評価するために、岡山市と県が調査を行った。本報告書は、その結果を取りまとめたものであり、今後同様の取組を検討する下水道部局、環境部局、水産部局等の担当者の参考となることを目的とする。

(2) 岡山県における栄養塩濃度の変化

岡山県が毎月一回県下33測点で実施している調査を基に、海域のDIN及び溶存態無機リン（DIP）濃度の年平均値の推移を図1に示した。1985-89年、95-99年、2005-09年、2015-19年における5ヶ年平均のDIN濃度は、 $5.1\mu\text{M}$ 、 $4.7\mu\text{M}$ 、 $3.6\mu\text{M}$ 、 $3.3\mu\text{M}$ となり、この40年間で約4割減少している。DIP濃度は、 $0.32\mu\text{M}$ 、 $0.38\mu\text{M}$ 、 $0.37\mu\text{M}$ 、 $0.37\mu\text{M}$ となり、明確な変化はなかった。NP比（DIN/DIPで計算され、16より小さい場合には海域の一次生産の制限要因が窒素となる）は16.0、12.2、9.8、8.8となり、近年16を下回る状況が続いている。このことから、本県海域では窒素が不足しており、DINが制限要因となってノリの色落ちが発生し、植物プランクトンの増殖も抑制されていると考えられた。

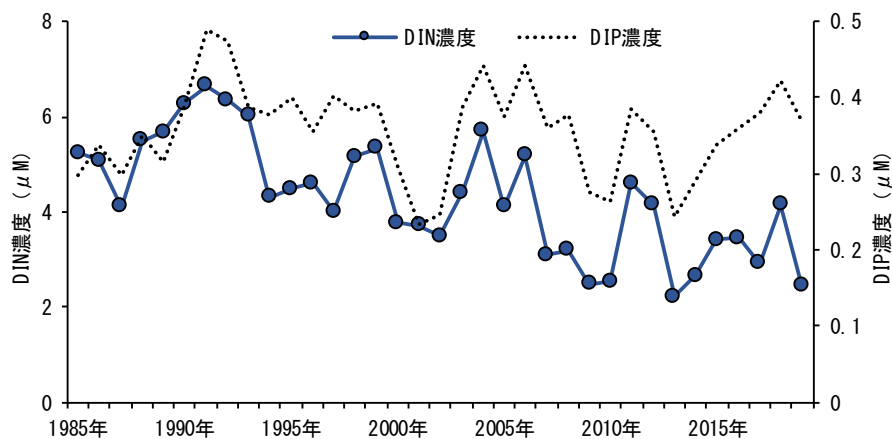


図1 岡山県海域のDIN及びDIP濃度の年平均値の推移

1985～2020年度の1月（ノリ養殖漁期中）のDIN濃度の推移を図2に示した。2000年頃までは、ノリの色落ちが発生するとされる $3\mu\text{M}$ を下回ることはほとんどなかったが、近年は $3\mu\text{M}$ を下回る事が多くなっている。このように、海域のDIN濃度の減少は顕著である。

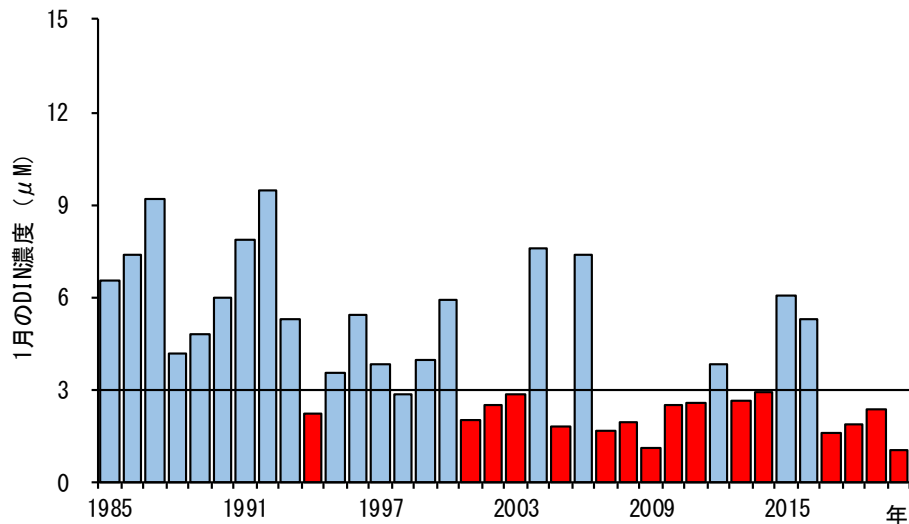


図2 1985～2020年度の1月のDIN濃度の推移

(3) 栄養塩濃度とノリ養殖，漁船漁業の生産量との関係

海域の生態系は、海水中のDINを植物プランクトンが吸収し、続いて植物プランクトンを動物プランクトンが摂餌し、魚やエビといった高次の生物がそれらを捕食するというピラミッドで形成されている。そのため、食物連鎖を通じた栄養段階間の物質循環の流れが同じであれば、生態系全体の生物の現存量は、土台となるDIN量の影響を受けて変化する（図3）。

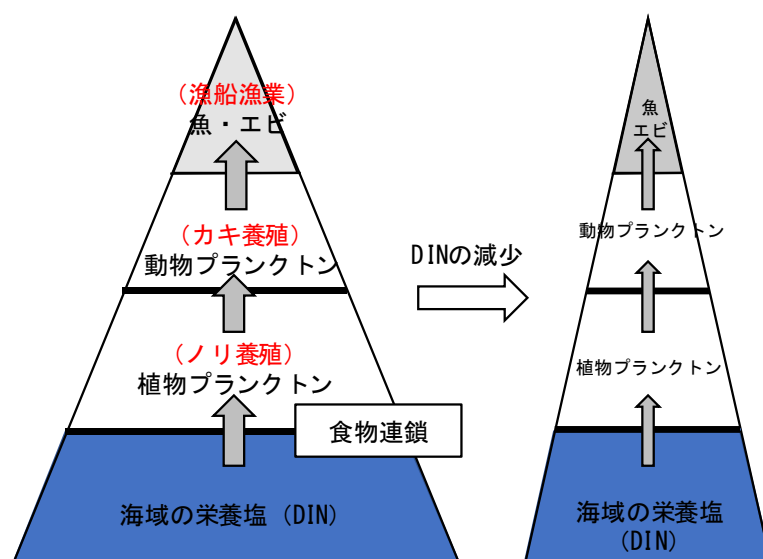


図3 生態系ピラミッドとDIN濃度の減少の影響

DIN濃度と生ノリの色調の関係を図4に示した。a*値は赤み度の指標であり、値が高いほど赤黒く良好なノリ（生ノリ）とされる。DIN濃度(x)とa*値(y)の関係は $y = 3.0 \log x + 2.2$ ($p < 0.05$) となり、DIN濃度の低下に伴って、a*値は減少し、特に2~3 μM を下回ると急速な低下がみられる。また、色落ちした生ノリから作ったのり（乾のり）の品質は低く、単価も低い。

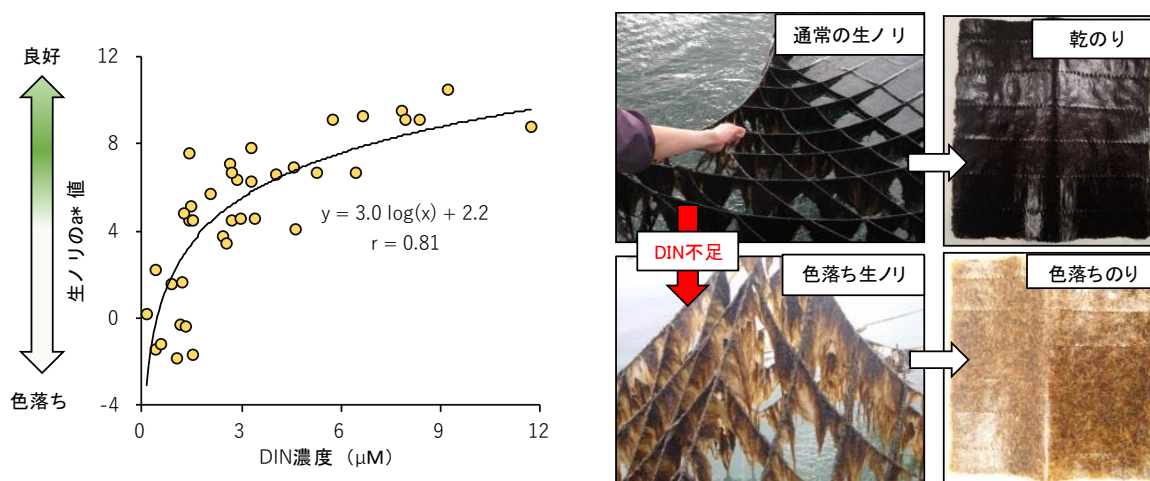


図4 DIN濃度と生ノリの色調の関係（左），通常のノリと色落ちノリ（右）

岡山県に隣接する兵庫県において、海域環境とイカナゴの資源量や漁獲量等について調べた結果を図5に示した。ここでは、Case-1；1990年代半ばの栄養塩環境，Case-2；2000年代前半の栄養塩環境，Case-3；現況より水温が1°C低い，の3条件を想定し，現況（2016年頃）と比較してイカナゴの漁獲量等がどの程度変化するかを示している。現況と比較して，Case-1とCase-2では初期の資源尾数がそれぞれ1.9倍と1.6倍となり，漁獲量はそれぞれ2.1倍と1.6倍となり，栄養塩濃度が高ければイカナゴの量が増えるとしている。



図5 海域環境とイカナゴの資源量や漁獲量等の関係
（「豊かな瀬戸内海の再生を目指して」兵庫県資料より抜粋）
Case-1:1990年代半ばの栄養塩環境，Case-2:2000年代前半の栄養塩環境，Case-3:現況より水温が1°C低い

一方，現況よりも水温が低かったとしても，資源量はそれほど変化せず，栄養塩と比較すると水温の影響は小さかった。また，本県が別に実施している調査において栄養塩濃度が高く，植物プランクトン量が多い漁場ではカキの成育も良好であることが分かっており，DINの減少は漁業生産量の減少につながっている。

2. 能動的（栄養塩）管理運転について

(1) 栄養塩管理運転とは

栄養塩管理運転とは、「下水処理水放流先の養殖業等に配慮し、下水処理水中の窒素濃度を上げることで不足する窒素を供給するなど、地域のニーズに応じて水質を管理すること（出典；下水放流水に含まれる栄養塩類の能動的管理のための運転方法に係る手順書（案）」とされており、その中でも季節を限って実施するものを「季節別管理」と呼んでいる（図6）。増加させる栄養塩の種類としては、窒素とリンがある。窒素では、下水処理の過程における硝化や脱窒を抑制する方法が採用されることが多く、それぞれアンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）や硝酸態窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）が増加する。リンでは、凝集剤添加量や曝気量調整を行うことにより、DIP濃度が上昇する事例が報告されている。

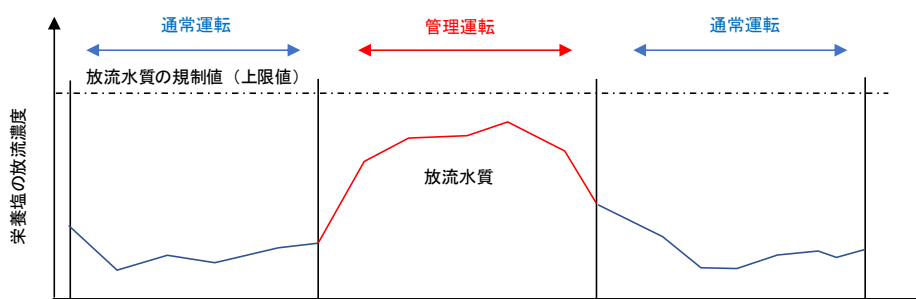


図6 栄養塩の季節別管理運転のイメージ

(2) 岡東浄化センターでの実施に至るまでの経緯

岡東浄化センターにおける管理運転の実施に至るまでの経緯を表1に示した。2015年10月に瀬戸内海環境保全特別措置法が改正され、水質管理の在り方において水産資源の持続的な利用の確保という考え方が示された。2017年9月に本県の下水道業に係る窒素、リンの総量規制基準が変更され、岡東浄化センターの総量規制基準は窒素が10mg/Lから15mg/Lに、リンが1.0mg/Lから1.5mg/Lに緩和されたことを受け、2017年11月から同センターの一部の処理池において管理運転の試行が始まった。その後、2018年3月に児島湾漁業協同組合連合会から岡山市に対して管理運転に関する要望が提出され、同年11月から管理運転の正式運用が始まり、その後は現在に至るまで毎年11月～翌3月に実施されている。

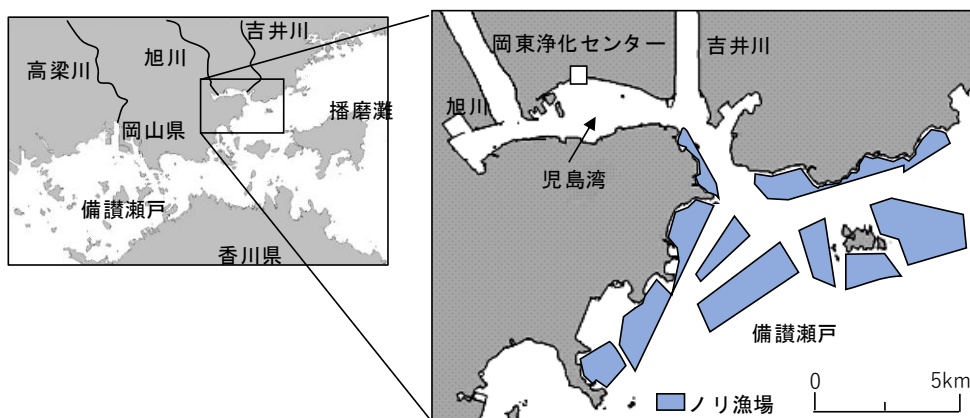
表1 岡東浄化センターで管理運転が実施されるまでの主な経緯

	主体	概要
2015年10月	国	瀬戸内海環境保全特別措置法の一部改正
2017年6月	県	第8次岡山県水質総量削減計画の策定
2017年9月	県	水質汚濁防止法に基づく下水道業に係る総量規制基準の一部改正
2017年9月	県	下水処理場の管理運転の導入について（依頼）
2017年11月	県	下水処理場の季節別管理運転の導入について（通知）
2017年11月～	市	岡東浄化センターにおいて、管理運転の試行を開始
2018年3月	児島湾漁業協同組合連合会	下水処理場の管理運転に関する要望
2018年11月～	市	管理運転の本格運転を開始

岡東浄化センターの概要と周辺の状況

岡東浄化センター

所在地 : 岡山市東区升田614-11
 処理方法 : ステップ流入式多段硝化脱窒法
 +凝集剤添加
 処理能力 : 63,280m³/日
 処理開始 : 1992年4月
 排除方式 : 分流式
 計画処理人口 : 171,560人
 計画処理面積 : 3,487ha



岡東浄化センターと沖合のノリ漁場の位置



岡東浄化センターと排水部

排水部周辺の状況（海底付近から排水）



ノリ漁場

ノリの収穫（摘採）の状況

周辺の状況

(3) 管理運転の実施方法

1) 窒素

岡東浄化センターの処理方法は、凝集剤添加ステップ流入式多段硝化脱窒法（高度処理）であり、流入水が、嫌気槽、好気槽、無酸素槽、好気槽の順に通過し、その中で処理が行われた後に海に排出される。通常運転では、まず好気槽において、槽内の硝化細菌の作用によって、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) が亜硝酸態窒素 ($\text{NO}_2\text{-N}$) を経て硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) になる。次に、無酸素槽において、脱窒細菌が作用して $\text{NO}_3\text{-N}$ が窒素ガス (N_2) となって空气中に放出され、水中から窒素分が除去される（図7）。管理運転を実施する際には、無酸素槽へのステップ流入を停止して脱窒過程を抑制することにより、排水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ が増加し、その結果として排水中の窒素濃度が上昇する。

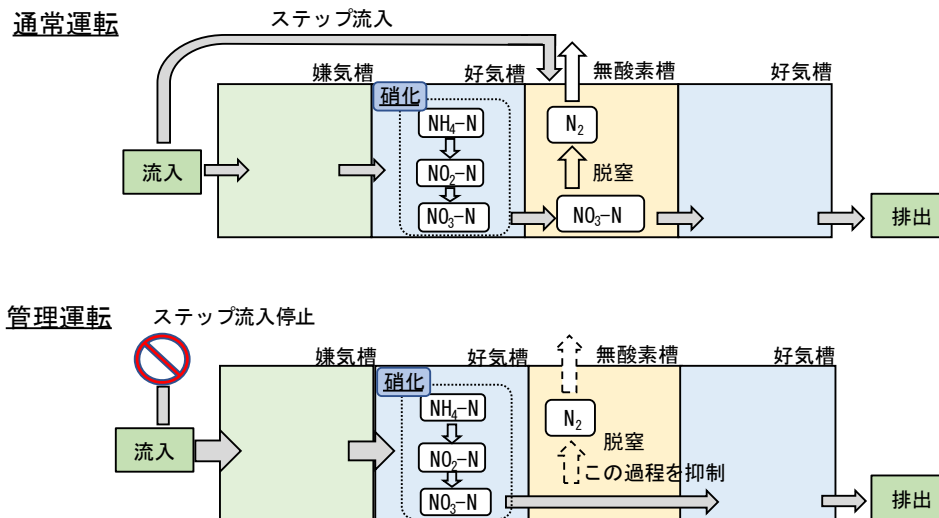


図7 岡東浄化センターにおける通常運転と管理運転時の処理方法（窒素）

2) リン

リンについても窒素と同様に生物学的な処理も行われているが、今回は管理運転に係る化学的な凝集沈殿法のみ述べる。通常運転では、処理槽に硫酸二鉄を主成分とする凝集剤を添加し、DIPと鉄を反応させてリン化合物（鉄塩）として凝集、沈殿させることにより、処理水中のリン濃度を低下させる。管理運転では、添加する凝集剤の量を添加しない（減らす）ことにより濃度管理を行う（図8）。管理運転の実施により、凝集剤の使用量が削減でき、コスト削減にもつながる。

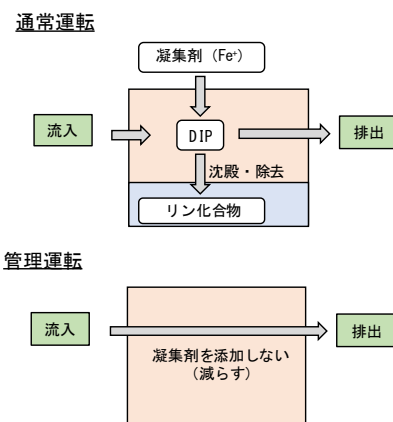


図8 岡東浄化センターにおける通常運転と管理運転時の処理方法（リン）

(4) 管理運転の実施結果

1) 窒素

2018～21年度（管理運転実施年）及び2015～17年度（管理運転未実施年）の10月から翌3月における日平均TN（全窒素）濃度等の推移を図9に示した。実施年のTN濃度は、10月中は $400\mu\text{M}$ 前後で推移していたが、11月からは上昇し始め、1月上旬には $800\mu\text{M}$ 前後の濃度となった。その後、増減を繰り返しながらも徐々に低下し、3月下旬には $600\mu\text{M}$ 程度となった。未実施年では10月中は、実施年と同様に $400\mu\text{M}$ 程度であった。その後も一定の増減は見られたものの $400\mu\text{M}$ 程度で推移した。11～3月までの期間中平均濃度は実施年で $683\pm 95\mu\text{M}$ （平均値±標準偏差）、未実施年では $428\pm 69\mu\text{M}$ となり、管理運転の実施により、TN濃度は約1.6倍となっていた。

TNの排出量は、実施年の10月中は $0.2\text{t}/\text{日}$ 程度で推移していたが、管理運転期間中は高い値を示し、11～3月の平均値は、 $0.33\pm 0.04\text{t}/\text{日}$ であった。未実施年では期間を通じて大きな変化はなく、11～3月の平均値は $0.20\pm 0.03\text{t}/\text{日}$ であった。実施年、未実施年の11～3月の期間中放流量は、それぞれ $34,500\pm 1,200\text{m}^3/\text{日}$ 、 $33,400\pm 1,700\text{m}^3/\text{日}$ とほぼ同程度であったことから、TN排出量の違いは管理運転に伴う濃度の上昇によるものと考えられた。

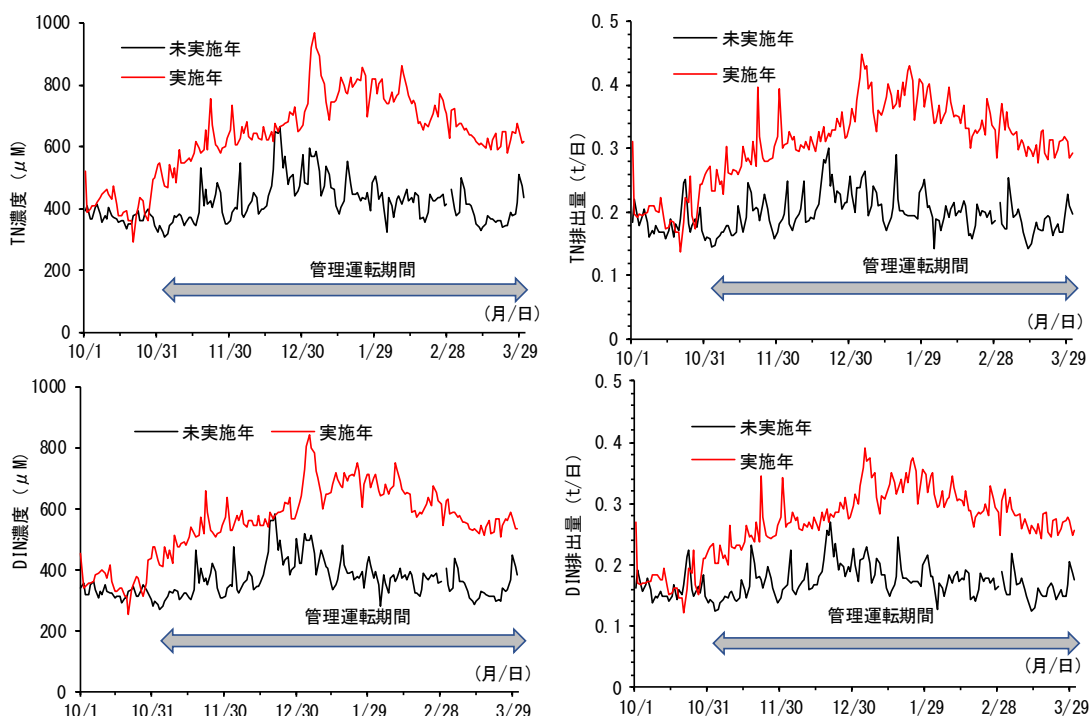


図9 2015～17年度（管理運転未実施年）と2018～21年度（管理運転実施年）の10月～翌3月における日平均TN濃度とTN排出量の推移（上），日平均DIN濃度とDIN排出量の推移（下）

後述する TN に対する DIN の割合を基に、管理運転実施年と未実施年の DIN 濃度と排出量を計算した。管理運転期間中では、TN の結果と同様に管理運転実施年の DIN 濃度は高く、DIN 排出量も多くなっていた。実施年における期間中平均の DIN 濃度と排出量は $594 \mu\text{M}$ と $0.28\text{t}/\text{日}$ となり、未実施年の平均 DIN 濃度と排出量は $372 \mu\text{M}$ と $0.17\text{t}/\text{日}$ となった。

2) リン

11~3月までの日平均 TP (全リン) 濃度は、管理運転未実施年 (2015~17年度平均) では $18.4 \pm 5.5 \mu\text{M}$ 、管理運転実施年 (2018~21年度) では $25.8 \pm 7.5 \mu\text{M}$ となり、管理運転の実施により TP 濃度は約 1.4 倍となった (図 10)。また TP 排出量は、実施年では $0.028 \pm 0.008\text{t}/\text{日}$ 、未実施年では $0.020 \pm 0.006\text{t}/\text{日}$ となり、管理運転により TP 排出量も増加した。

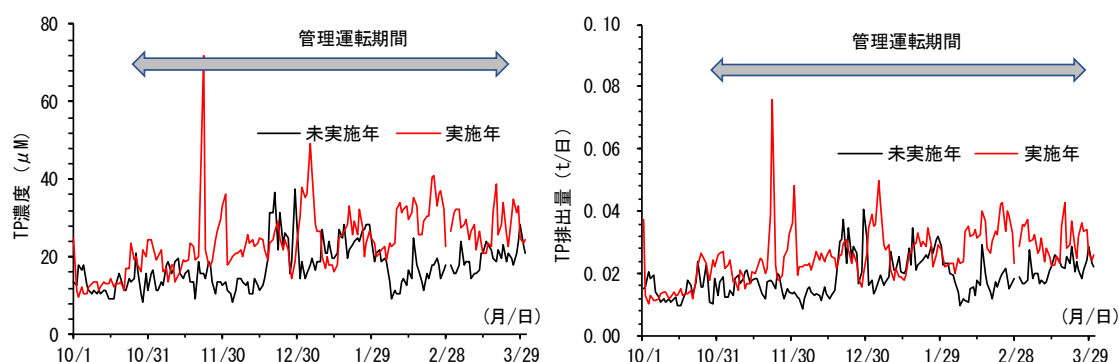


図 10 2015~17年度 (管理運転未実施年) と 2018~21年度 (管理運転実施年) の日平均 TP 濃度と TP 排出量の推移

3) 形態別の窒素濃度の変化

2018~21年度の管理運転前 (10月) に 4 回、管理運転期間中に 12 回、排水中の形態別の窒素濃度を分析した結果を図 11 に示した。運転前の TN 濃度、有機態窒素 (Org-N) 濃度、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はそれぞれ $368 \mu\text{M}$ 、 $49 \mu\text{M}$ 、 $105 \mu\text{M}$ 、 $4 \mu\text{M}$ 、 $212 \mu\text{M}$ となり、TN に対する DIN の割合は 87% であった。管理運転期間中では、それぞれ $775 \mu\text{M}$ 、 $108 \mu\text{M}$ 、 $223 \mu\text{M}$ 、 $11 \mu\text{M}$ 、 $434 \mu\text{M}$ となり、TN に対する DIN の割合は 86% であった。管理運転によって、主として $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度が上昇しており、ノリや植物プランクトンといった一次生産に関する生物が利用しやすい DIN の総量が増加し、TN 濃度が上昇していた。

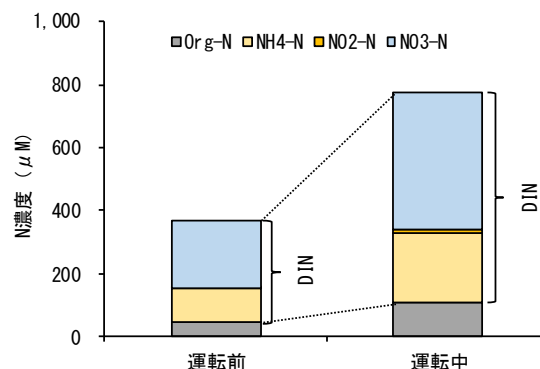


図 11 管理運転前と運転中における排水中の形態別の窒素濃度

3. 海域での栄養塩の増加量とノリ漁場への栄養塩供給量

(1) 海域での栄養塩拡散状況調査

2019～22年度に管理運転の実施前、運転中、実施後に合計22回(表2), 図12に示した21測点において調査を行った。すべての測点で表層及び底層(底上50cm)の採水を行うとともに, 多項目水質計(CTD)を用いて表層から底層までの10cmごとの水温, 塩分, 濁度, 溶存酸素濃度(DO)を測定した。また, 採水した試水は持ち帰り, 栄養塩分析装置を用いて, TN, TP, DIN, DIP, ケイ酸態ケイ素(DSi)の分析に使用した。

表2 海域での栄養塩拡散状況調査の実施状況

実施時期	実施日	潮汐
実施前	2019年10月9日	干潮
実施前	2019年10月10日	満潮
運転中	2019年12月18日	満潮
運転中	2019年12月19日	干潮
運転中	2020年2月12日	満潮
運転中	2020年2月14日	干潮
実施後	2020年4月27日	満潮
実施前	2020年10月14日	干潮
実施前	2020年10月14日	満潮
運転中	2020年12月18日	干潮
運転中	2020年12月18日	満潮
運転中	2021年2月24日	干潮
運転中	2021年2月24日	満潮
運転中	2021年3月15日	満潮
実施後	2021年4月20日	満潮
実施前	2021年10月25日	干潮
実施前	2021年10月25日	満潮
運転中	2021年12月22日	満潮
運転中	2021年12月28日	干潮
運転中	2022年3月10日	満潮
運転中	2022年3月10日	干潮
実施後	2022年4月19日	満潮

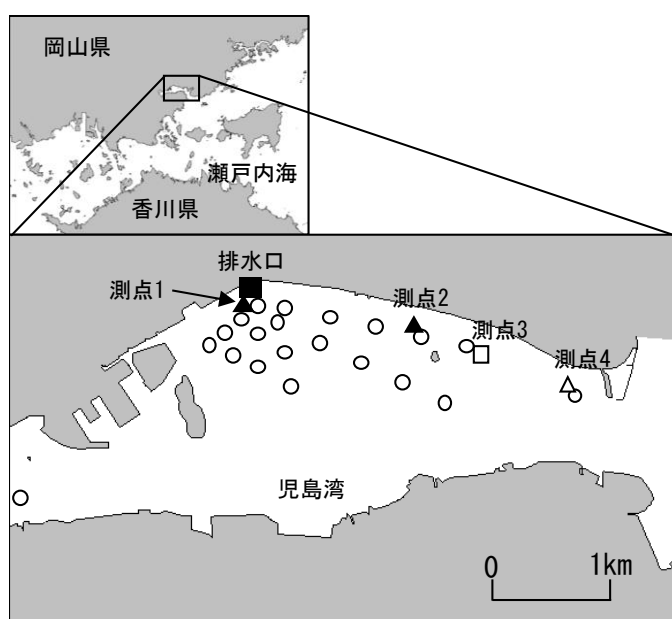


図12 海域での栄養塩の増加量の調査等に係る定点図
 ○: 拡散状況調査測点, ▲: 底質調査測点
 □: 連続観測調査測点, △: 底生生物及び溶存酸素の調査測点

2019～21年の10月(管理運転実施前)と2020, 21年2月及び2021年12月(管理運転中)のTN濃度の分布を図13に示した。なお, これらの調査は潮汐に伴う結果の差異を排除するために, 満潮時頃に実施した結果を示している。

実施前についてみると, いずれの調査時においても排水口周辺では $60\mu\text{M}$ 以上の高い値を示していたが, 排水口から離れるとともに濃度は低下し, 1km以上離れた場所では排水由来の窒素の影響はほとんど見られなくなった。

運転中では, 管理運転実施前と比較して高い濃度を示す範囲が拡大した。特に2020年2月をみると, $40\mu\text{M}$ 以上となっている場所が1.5km以上離れた

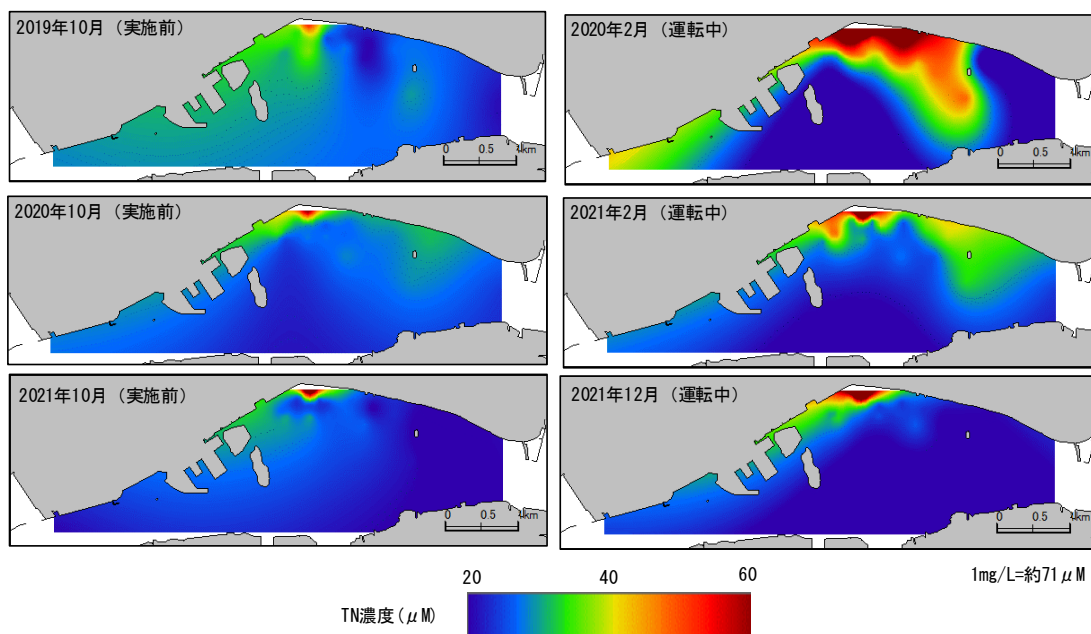


図 1 3 管理運転実施前と運転中におけるTN濃度の分布状況の違い

場所でも確認できた。一方で管理運転中の各調査で見ると、いずれの調査時においても実施前と比較して TN 濃度は上昇しているもののその分布は調査年毎に大きく異なっていた。すなわち、管理運転によって周辺海域の窒素濃度が上昇することは分かるものの、潮流、風等の様々な影響を受けてその影響範囲は変化すると考えられた。そのため、散発的に実施する現場調査によって影響を把握する事は難しいと考えられたので、以降に示す連続観測調査とシミュレーションモデルによる影響把握を行った。

(2) 連続観測による影響調査

2021年2月20日から4月20日の間、図12に示した測点3の表層に硝酸塩センサー(図14)、水温塩分計、流向流速計を設置し、1時間に一回、硝酸塩センサー値、水温、塩分、流向・流速を取得した。センサーは、多波長の紫外線を照射し、その吸光度を基に冬季のDINの主成分となるNO₃-Nの濃度を算出する。ここでは、センサー値はDIN濃度を示すものとした。2021年2月20日から4月20日までの1日ごとの岡東浄化センターからの排水中のDIN濃度と供給量、硝酸塩のセンサー値の推移を図15に示した。なお、この時期は管理運転実施中から終了する期間に該当する。



図 1 4 現場に設置した硝酸塩センサー (ISUS V3)

2月中の岡東浄化センター排水中におけるDIN濃度は、 $600\mu\text{M}$ 程度で推移していたが、徐々に低下し4月には $300\mu\text{M}$ 程度となった。DINの供給量は、 $0.3\sim 0.4\text{tN/日}$ で推移していたが徐々に減少し、4月には 0.2tN/日 程度となった。センサー値は、増減を繰り返しながらも2月中は $10\sim 20\mu\text{M}$ で推移していたが徐々に低下し、4月中は $10\mu\text{M}$ を上回る事はほとんどなかった。

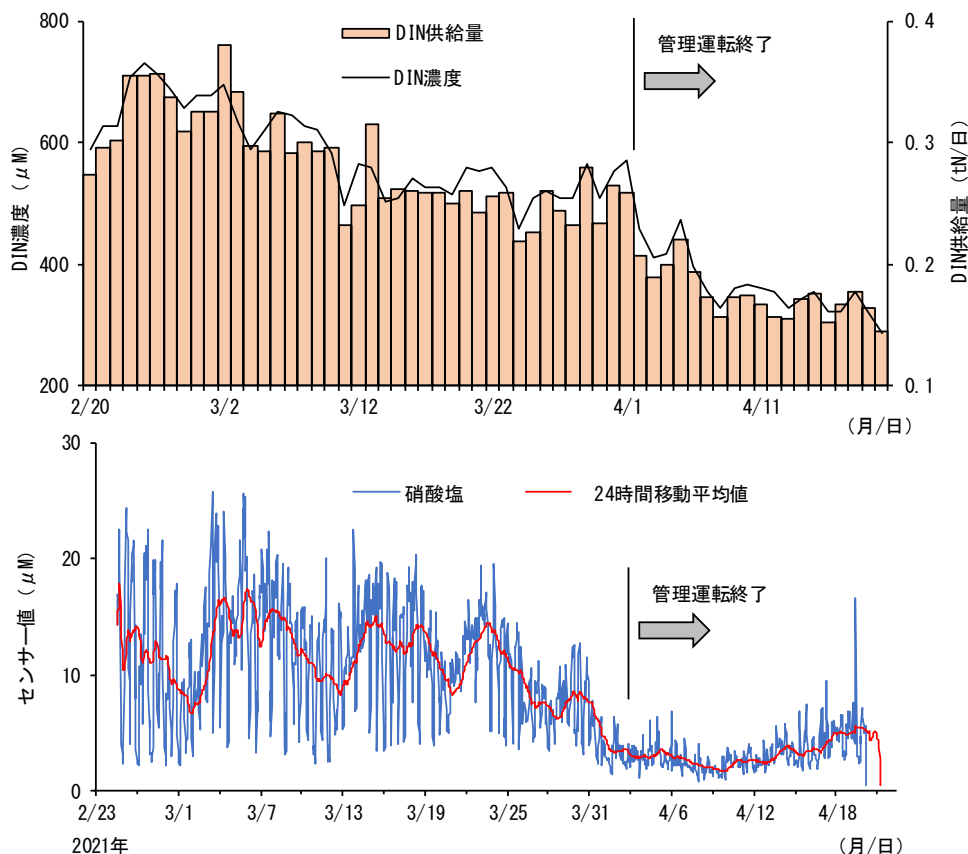


図15 2021年2月20日～4月20日までの排水中のDIN濃度と供給量（上），同期間中のセンサー値の推移（下）

岡東浄化センターからの日平均DIN供給量とセンサー値の関係を見たところ、両者は正の相関を示した（図16）。管理運転中に供給量が多く、センサー値も高い値を示していた。

さらに、センサーの設置場所に供給されていたDINの由来を確認するため、2021年2月25日～3月2日のセンサー値と塩分、東方流速と潮位について図17に示した。

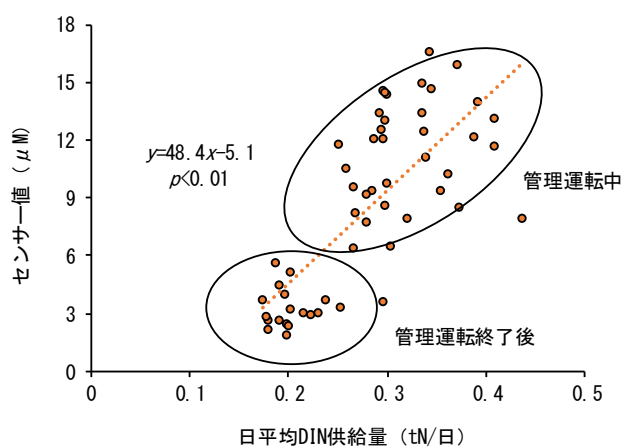


図16 浄化センターからのDIN供給量とセンサー値の関係

なお、東方流速は、正の値を示すときに東向きに、負の値を示した際には西向きに流れていることを示す。

センサーと塩分の推移について、2月25日を例に説明する。センサー値は、0時には $15.2\mu\text{M}$ であったが、8時には $2.3\mu\text{M}$ に低下した。その後は増加し、15時には $24.4\mu\text{M}$ となった。以降、再び減少に転じ、21時には $4.1\mu\text{M}$ となった。2月25日の8時の塩分は31であったが、15時には16に低下した。その後、21時には塩分は27となった後に減少した。両値ともに、1日2回の増減を繰り返しており、センサー値の上昇時に塩分は低下していた。また、塩分低下とセンサー値の上昇は、満潮時から干潮時にかけての下げ潮時に生じており、下げ潮時の東方流速は正の値であった。

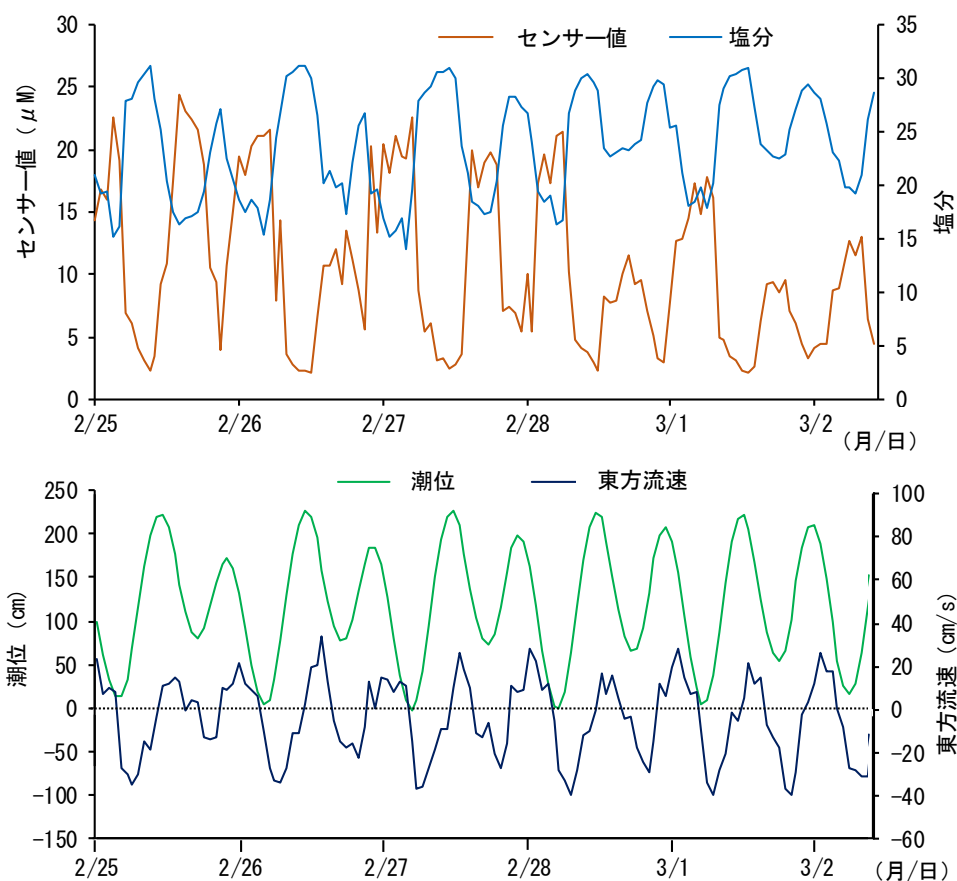


図17 2021年2月25日～3月2日のセンサー値と塩分（上）、東方流速と潮位（下）の推移

これらのことから、観測地点よりも西側に位置する岡東浄化センターからの低塩分・高DIN水塊が干潮時に流入することによって、間欠的にセンサー値が上昇していると考えられ、岡東浄化センターからのDIN供給量の変化が海域の栄養塩環境に影響を与えていることが示唆された。

(3) シミュレーションモデルによる解析結果

下水処理施設の管理運転の影響について、3次元物理－低次生態系モデルを用いて検討した。なお、本節の結果は、令和2,3年度漁場環境改善推進事業「栄養塩からみた漁場生産力回復手法の開発」の成果報告書から抜粋したものである。計算領域を備讃瀬戸とし、計算格子を200m×200m（格子数113×115）、鉛直10層とした（図18）。流入河川としては、計算領域内の1級・2級河川を考慮した。さらに、下水処理施設（岡東浄化センター）について通常運転及び管理運転による栄養塩供給量をそれぞれ設定し、計算を実施した（表3）。なお、その他の計算条件は、県が所有している児島湾周辺の水質データ、河川等陸域からの流入量等については国交省の公表データ等から引用した。1か月の助走計算を行った後に、2019年1月1日～2月28日までの2か月間について行うとともに、1月17日～31日までの15日間の窒素収支を計算した。

表3 通常運転と管理運転時の計算条件

手法	放流量 (m ³ /日)	栄養塩濃度 (μM)	
		TN	DIN
通常運転	32,800	420	328
管理運転	32,800	706	614

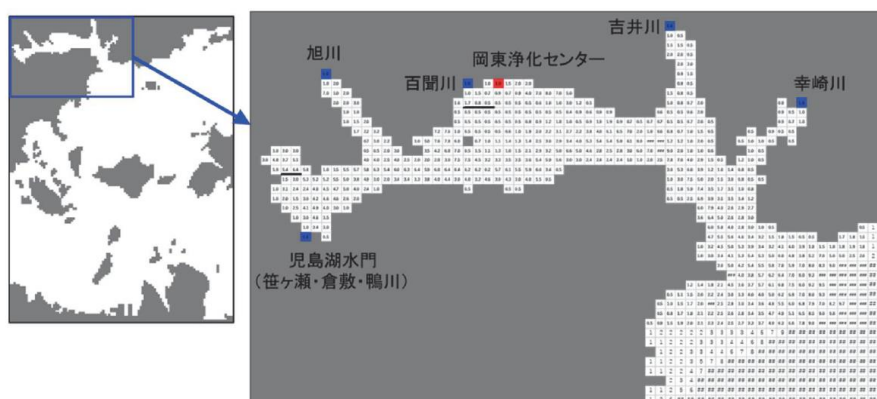


図18 シミュレーションモデルの計算範囲

管理運転の実施に伴う干潮時（2019年1月17日の午前2時）、満潮時（同日午前9時）の海域表層のDINの上昇量を示すとともに、クロロフィルa、TN、DINの期間中の平均上昇量（2019年1月17～31日）を図19に示した。まず干潮時と満潮時についてみると、先に示した実測値の結果と同様に、岡東浄化センターからの排水が流入する周辺ではDIN濃度の上昇が大きく、いずれの潮時においても児島湾中央部では0.5～1.0μM上昇していた。また、連続観測の結果と同様に、干潮時には高濃度水の湾外への流出量が増加しており、干潮時の湾口部ではDIN濃度は0.5μM程度上昇している。一方、満潮

時には管理運転の影響は小さくなり、湾口部の DIN 濃度の上昇は $0.1 \mu\text{M}$ 程度となった。干潮と満潮、大潮と小潮等の影響を考慮した 15 日間の平均値で見ると、湾口部のノリ漁場における DIN 濃度の上昇は $0.2 \sim 0.3 \mu\text{M}$ であった。沖合のノリ漁場ではより低い値となり、 $0.1 \mu\text{M}$ 以下となる場所もみられた。クロロフィル a についても、栄養塩の供給量の増加に伴って一定程度増加し

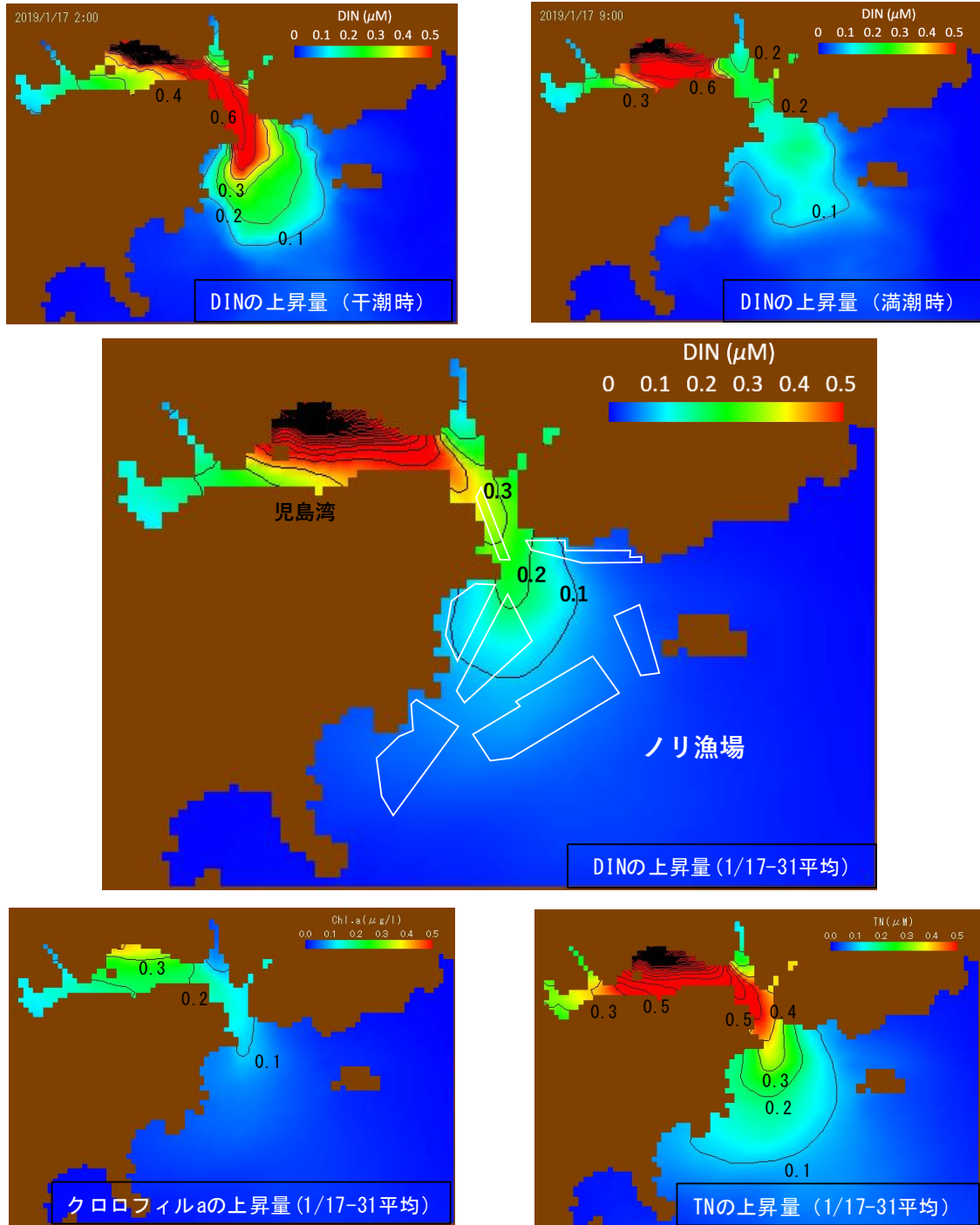


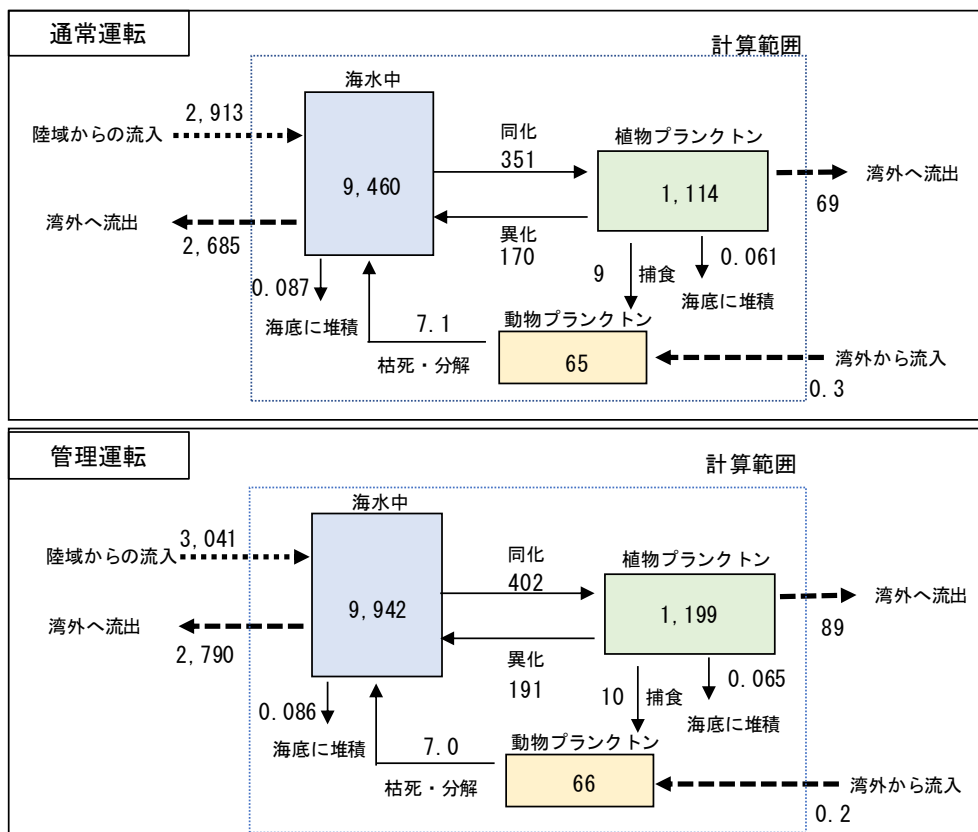
図19 シミュレーションモデルによる計算結果
 左上：DINの上昇量（干潮時），右上：DINの上昇量（満潮時），中央：DINの上昇量（平均）
 左下：クロロフィルaの上昇量（平均），右下：TNの上昇量（平均），

たが、その上昇は $0.1\mu\text{g/L}$ 以下であり（本県では、クロロフィルaによる赤潮の基準はないが、カキ養殖では、 $10\mu\text{g/L}$ 以上を赤潮状態と定義している）、管理運転によって植物プランクトンが異常増殖し、赤潮化する可能性は低いと考えられた。また、DINとクロロフィルaの増加の影響を受けてTN濃度も湾外での上昇が確認できた。

次に、先に図示化した1月17日～31日の15日間について、通常運転と管理運転それぞれの児島湾内の窒素収支を図20に示した。なお、この収支計算は、図の青色の範囲について実施し、この範囲内に流出入する窒素量と範囲内での窒素の吸収、分解量を計算している。



計算範囲（青色の着色部分）



陸域からの流入
 湾外への流出
 湾内で移動 ——>

図20 窒素を中心とした収支計算の結果
 (単位: kgN/日)

まず、通常運転時についてみると、岡東浄化センターや河川等を含めた陸域からの一日当たりの窒素の流入量は2,913kgNであり、計算範囲内の海水中の窒素量は9,460kgNとなった。植物と動物プランクトンの現存量はそれぞれ1,114kgNと65kgN、植物プランクトンの同化量と異化量は351kgNと170kgNであり、9kgNが動物プランクトンに捕食されていた。海水中の窒素は湾外へ2,685kgN流出しており、植物プランクトンは69kgN流出していた。湾内海底への堆積量は、海水から0.087kgN、植物プランクトンから0.061kgNであり、陸域からの流入量と比較してその値は小さかった。

管理運転時には、陸域からの流入量が3,041kgNとなり、海水中の窒素量は9,942kgNとなった。植物と動物プランクトンの現存量は1,199kgNと66kgNとなり、現存量の増加に伴って計算範囲内での同化量や捕食量等も増加した。湾外へは、海水と植物プランクトンのそれぞれから2,790kgNと89kgN流出していた。

管理運転によって陸域からの流入量は128 kg N(2,913→3,041kgN)増加したが、海水から計算範囲外への窒素の流出量は105kg (2,685→2,790kgN)、植物プランクトンの流出量は20kgN (69→89kgN)増加していた。このことから、管理運転によって増加した窒素の82%は湾外に直接流出し、海域に供給されたと考えられた。また、通常運転時、管理運転時で海底への堆積量の増減はなく、管理運転に伴う有機物堆積量の増加、底質悪化の可能性は低いと考えられた。

これら一連のシミュレーションによる結果をまとめると岡東浄化センターの管理運転によって海域への一定の栄養塩供給効果はみられるものの、湾外の漁場におけるDIN濃度の上昇は0.1~0.2 μ Mであった。また、管理運転によって追加で供給された窒素のほとんどは湾内に滞留することなく、その大部分は海域に供給されていた。

4. 周辺の生物等への影響

(1) 底質調査結果

2018年10月から2022年4月の間、年に4回程度、**図12**に示した測点1、2の底泥を採取し、泥中のCOD（化学的酸素要求量）とAVS（硫化物量）を測定した。なお、CODとAVSは底泥の有機汚染の指標とされ、水産用水基準ではCODは20mg/dg、AVSは0.2mgS/dgを上回ると好ましくない環境とされる。

測点1のCODとAVSは、2018年10月には24.3mg/dgと1.8mgS/dgであった（**図21**）。その後は両値ともにほぼ一定で推移し、2022年4月には24.9mg/dgと1.6mgS/dgとなった。期間中平均値は 25.7 ± 3.6 mg/dgと 1.1 ± 0.2 mgS/dgであった。測点2のCODとAVSは2018年10月には39.3mg/dgと0.9mgS/dgであった。CODは徐々に減少したが、AVSはほぼ一定で推移し、2022年4月には13.9mg/dgと0.7mgS/dgとなった。期間中の平均値は 24.7 ± 6.7 mg/dgと 0.8 ± 0.3 mgS/dgであった。

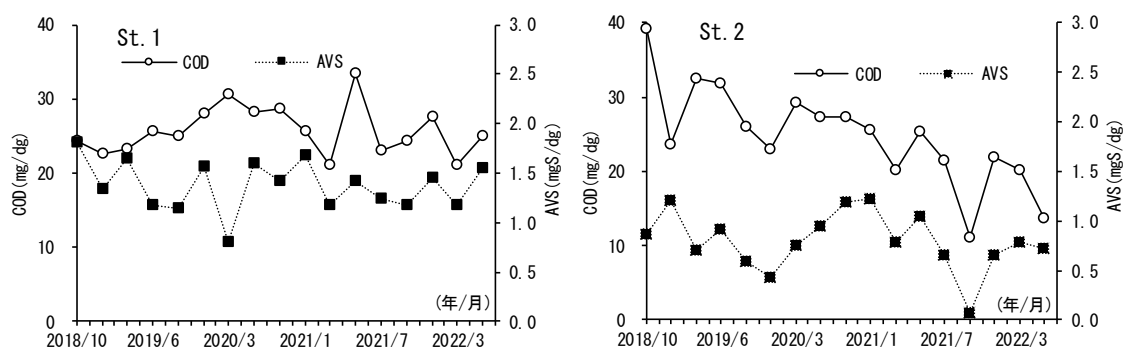


図21 測点1及び2におけるCODとAVSの推移

測点1、2ともに期間中の平均値ではCOD、AVSはともに好ましいとされる底質ではなかったものの、管理運転開始後（2018年11月以降）に底質が悪化する傾向は見られなかった。

(2) 底生生物調査結果

2018～21年の6月と9月に、排水口周辺の測点4において底泥を採取し、生物の種類数と全個体数の変化を調べた。管理運転実施前（2018年）の6月と9月における生物の種類数平均は 5.5 ± 2.5 種類となり（**図22**）、管理運転開始後（2019～21年）の平均は 9.5 ± 4.3 種類となった。個体数は管理運転前の平均は 95.8 ± 54.6 個体/m²、管理運転後には 250.0 ± 124.6 個体/m²となった。生物の種類数や個体数はばらつきが大きいいため、現時点でははっきりとした結論をだすことは難しいが、底生生物の種類数と個体数の減少傾向は見られず、管理運転による周辺生物への悪影響は見られなかった。

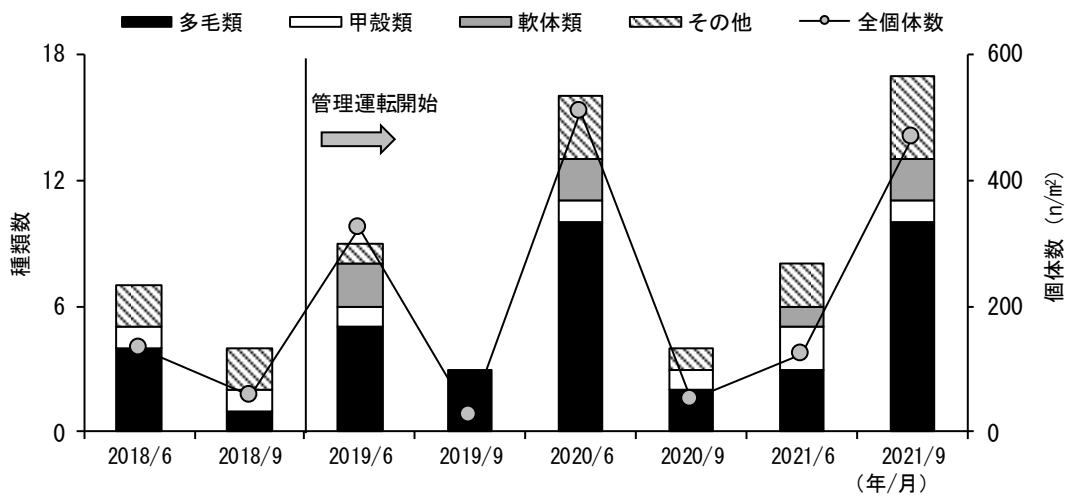


図 2 2 測点 4 における底生生物の種類数と個体数の推移

(3) その他

県は毎月一回、児島湾の湾奥から湾口にかけて水質調査をするとともに、有害プランクトンの検鏡調査を実施している。2018～21 年度に実施した測点 4 の海底直上の酸素濃度 (DO) と酸素飽和度を図 2 3 に示した。一般に DO は 4.3mg/L 以上、酸素飽和度は 40% を超えている状況が望ましいとされているが、管理運転の実施前から実施期間を通じて、DO、酸素飽和度は共にそれらの値を下回ることなく推移していた。また、当該調査において魚類のへい死や貝毒の原因となるプランクトンが県の基準値を超えて発生する状況は確認されなかった。

加えて、同期間中には児島湾沖やその周辺海域において、有害プランクトンの発生は見られておらず、先に示したシミュレーションモデルの結果と同様に、管理運転によって周辺海域の環境悪化や有害プランクトンの赤潮化につながった可能性は低いと考えられた。

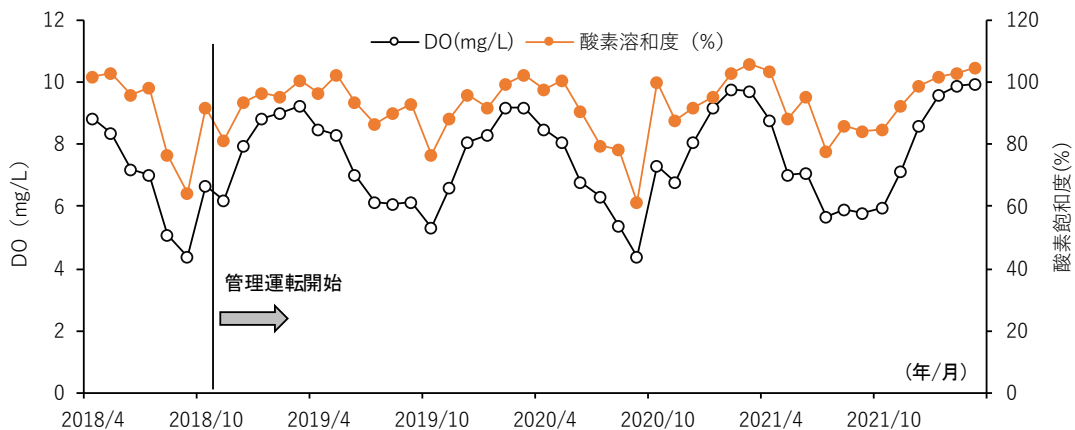


図 2 3 測点 4 における海底直上の酸素濃度 (DO) と酸素飽和度

5. まとめ

本報告では、近年の栄養塩不足の状況について説明するとともに、2018年度の冬季から実施された岡東浄化センターにおける栄養塩の管理運転影響調査結果を示した。概要は以下のとおりである。

まず、近年海域の栄養塩（特に無機態窒素；DIN）が減少しており、ノリの色落ちが深刻化するとともに、食物連鎖を通じて水産資源全体の減少につながっている状況を説明した。

次に、管理運転の実施方法と結果を示した。管理運転期間中の排水中 TN 濃度が $428 \mu\text{M}$ から $683 \mu\text{M}$ に上昇し、未実施年と比較して実施年では、約 1.6 倍の窒素が海域に供給されていた。

海域における影響について、採水による実測調査、機器を用いた連続観測調査、シミュレーションにより評価した。実測調査では、岡東浄化センターからの排水部を中心として管理運転前と比較して窒素濃度が上昇することを確認した。連続観測調査では、排水部からの供給量の減少に伴って、硝酸塩センサーの値も低下することを示し、供給された窒素が海域環境に与える影響を正確に把握した。シミュレーションでは、干潮時には湾口部のノリ漁場の DIN 濃度を $0.5 \mu\text{M}$ 程度上昇させる効果があることが示された。一方、潮汐を考慮した平均的な状況では、沖合のノリ漁場の DIN 濃度を $0.1\sim 0.2 \mu\text{M}$ 上昇させるという計算結果が得られた。また、児島湾を対象とした窒素収支の計算では、管理運転によって新たに供給された窒素は河川水と混じりながらそのほとんどが湾外に流出していた。

最後に、排水部周辺の底質と底生生物を調べたところ、管理運転の実施後の明確な底質悪化は見られず、底生生物の種類数や個体数の減少は確認されなかった。加えて、周辺海域での有害プランクトンの発生や赤潮についても報告されておらず、現時点では悪影響は確認されていない。

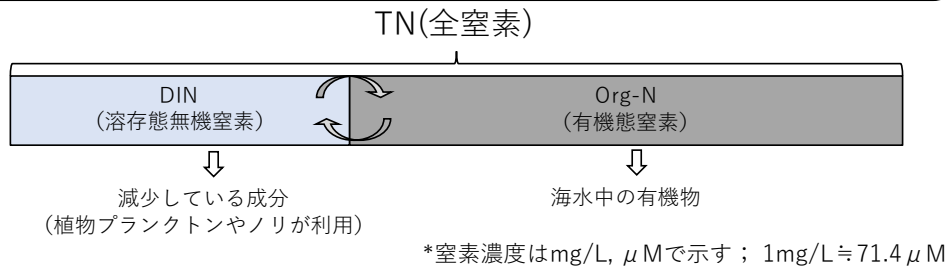
上記の結果から、管理運転の影響を評価すると、管理運転によって海域の栄養塩濃度を上昇させることは可能であり、一定の効果はあると考えられた。一方、現在の実施規模では、ノリの色落ち対策としては十分ではなく、安定したノリ養殖に必要な濃度を維持するためには、より多くの栄養塩を供給する必要がある。今後は新たな窒素源を探求する必要がある。

6. その他

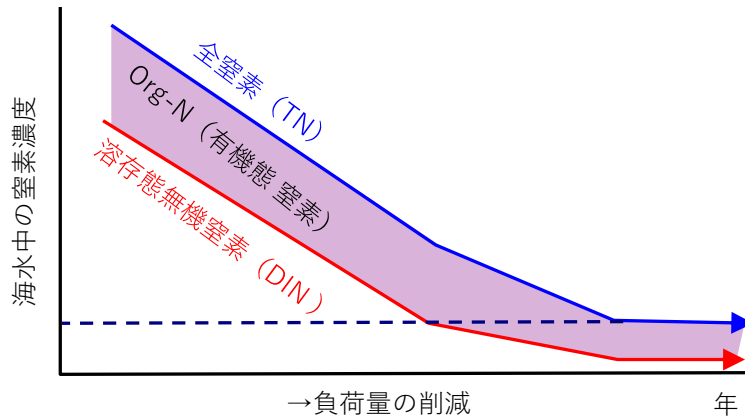
本報告の成果の一部は「水産庁補助事業漁場環境改善推進事業」から抜粋した。また、管理運転の実施方法に関する部分について、岡山市下水道施設管理課の方々に多大な協力をいただきました。加えて、シミュレーション部分については、国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所の阿保勝之氏の協力の基に実施しており、この場を借りて謝意を表します。

海水中の窒素について

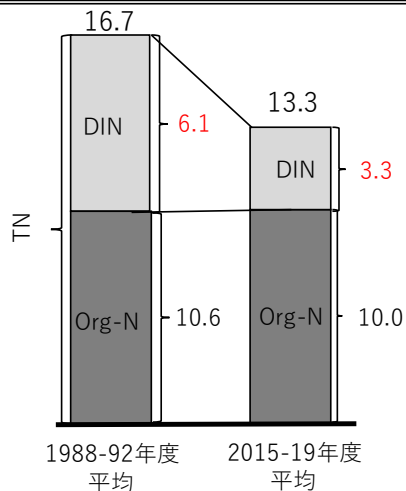
海水中の窒素は、大きく有機態 (Org-N) と溶存態無機 (DIN) の2種類に分別され、これらの合計値が全窒素 (TN) とされます。植物プランクトンやノリが直接利用できるのはDINです。



陸域からの負荷量削減と海水中の形態別の窒素濃度の変化 (イメージ)



陸域からの窒素負荷量と海域の窒素の関係は上図の関係が考えられており、負荷量を削減すると主にDINが減少するとされています。



岡山県 (沿岸を除く) 海域における形態別の窒素濃度の比較 (単位は μM)

過去 (1988-92年度平均) と近年 (2015-19年度平均) について、TN, Org-N, DIN濃度を比較しました。



DINが大きく減少し、その結果としてTN濃度が若干低下する状況が見られました。負荷量削減の影響は、主にDINの減少につながっていました。