

<報 文>

## 季別運転を行う下水処理場放流水が流れ込む 堂面川及び有明海における栄養塩類調査\*

柏原 学\*\*・秦 弘一郎\*\*・松木 昌也\*\*・古賀 敬興\*\*・古閑 豊和\*\*・平川 周作\*\*・  
志水 信弘\*\*・松本 源生\*\*・石橋 融子\*\*・宮脇 崇\*\*\*・山西 博幸\*\*\*\*

キーワード ①下水処理場 ②季別運転 ③栄養塩類 ④堂面川 ⑤有明海

### 要 旨

大牟田市北部浄化センターでは有明海への窒素供給を目的として季別運転が実施されているが、放流水に含まれる栄養塩類のノリ養殖場への到達状況に関する調査は行われていない。そこで、フラップゲートから放流される浄化センター由来の放流水による堂面川の水質の変化及び栄養塩類の分布状況を調査した。月毎の栄養塩類の濃度変化に関する調査の結果、硝化抑制期に堂面川上流で検出されないアンモニア態窒素が河口付近で検出された。また、河川上流から海域までの栄養塩類分布調査の結果、硝化抑制期の全窒素に対するアンモニア態窒素の割合は、フラップゲートより下流側でほぼ同じ割合で推移していることを確認した。これらの結果から、大牟田市北部浄化センター放流水に含まれる窒素系の栄養塩類は、少なくとも堂面川河口付近まで到達していることが分かった。

### 1. はじめに

近年、豊かな海を取り戻すための施策の一つとして、瀬戸内海・有明海をはじめとする閉鎖性海域に面する一部の下水処理場にて、栄養塩類の能動的な管理運転が行われている<sup>1-3)</sup>。この運転は、放流先水域の利用を鑑みて、必要な時期に栄養塩類を供給する運転を指し、季別運転と呼ばれている。季別運転の実施状況は、令和2年3月末時点で全国30箇所の下水処理場にて実施されている<sup>2)</sup>。国土交通省下水道部では、現在までに事例集<sup>1, 2)</sup>、手順書(案)<sup>3)</sup>等を公表し、季別運転を進めている。一方で、「栄養塩類の能動的な管理に関する事例集」では、「海域に対する能動的な運転管理の効果や下水処理水が海域に与える影響についても十分に明らかになっていない実情に留意する必要がある」ことが言及<sup>2)</sup>されており、季別運転に関する知見の集積は非常に重要である。この知見の集積は徐々に進んできており、有明海を放流先とする調査の報告もなされている。山西ら<sup>4, 5)</sup>は、季別運転を行う佐賀市下水

浄化センターを対象として本庄江川及び有明海湾奥における栄養塩類の分布調査の結果、佐賀市下水浄化センター放流水が河口のノリ養殖場に到達していることを報告している。また、佐賀市<sup>6)</sup>では産学官連携共同研究にて、佐賀市下水浄化センターの季別運転管理における「ノリ養殖海域への窒素供給」及び「処理水によるノリ養殖への影響」を報告している。

福岡県では有明海に面した大牟田市北部浄化センター(浄化センター)において、平成16年度よりノリの養殖期である冬季(硝化抑制期)に硝化・脱窒を抑制させる季別運転を実施している。一方で、浄化センターによる有明海への窒素供給をはじめとする栄養塩類等のノリ養殖場への到達状況に関する調査は行われていない。これまでに、筆者らは浄化センターを対象とした調査研究にて、フラップゲート(FG)から堂面川に放流される直前の水路内の水質が浄化センター放流水と同様の水質であることを報告している<sup>7)</sup>。これらを踏まえて、本研究では

\*Survey of Nutrient Salts in the Domen River and Ariake Sea Discharged from Seasonal Operation of Sewage Treatment Plant

\*\*Manabu KASHIWABARA, Koichiro HATA, Masaya MATSUKI, Takaoki KOGA, Toyokazu KOGA, Shusaku HIRAKAWA, Nobuhiro SHIMIZU, Gensei MATSUMOTO, Yuko ISHIBASHI (福岡県保健環境研究所) Fukuoka Institute of Health and Environmental Sciences

\*\*\*Takashi MIYAWAKI (北九州市立大学) Kitakyushu University

\*\*\*\*Hiroyuki YAMANISHI (佐賀大学) Saga University

FGからの放流水による堂面川の水質変化及び栄養塩類の分布状況を調査したので報告する。

## 2. 調査方法

### 2.1 月毎の濃度変化に関する調査地点

河川上流、下流及び浄化センター放流水の濃度変化の傾向を把握するため、図1のとおり堂面川上流の畔切橋 (St-1)、浄化センター放流口 (St-2)、堂面川河口 (St-3) の3地点にて栄養塩類等の調査を行った。St-1及びSt-2での調査は、2017年5月～2019年4月の間、毎月各地点の表層水をバケツで採取した。感潮域であるSt-3での調査は、2017年9月～2019年4月の間、毎月表層水をバケツで採取し、干潮時刻の2時間前に行った。

### 2.2 河川及び海域の濃度分布に関する調査地点

これまでの調査から、浄化センター放流水が堂面川河口付近まで到達していることが示唆された。そこで、河川から海域にかけての栄養塩類の分布状況を明らかにするために、同日中の河川及び海域の栄養塩類の濃度を調査した。図2及び図3は調査地点を示し、堂面川上流の畔切橋 (St-1)、FGから堂面川へ放流される直前 (St-4)、新白川橋 (St-5) - 有明海 (St-15) の13地点とした。St-1 - St-7に示す地点は橋上等から、St-8 - St-15に示す地点は動力船上からバケツにて表層水を採取した。調査は、硝化抑制期にあたる2017年12月15日10時30分～11時50分、及び硝化促進期にあたる2018年7月23日9時20分～11時40分の下げ潮時に行った。なお、St-8からSt-15については船上から採水した。2017年12月15日及び2018年7月23日の三池港 (大牟田市) における潮位図を図4及び図5に示す。

### 2.3 分析項目及び分析方法

分析項目は、化学的酸素要求量 (COD)、全窒素 (T-N)、硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、亜硝酸態窒素 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、アンモニア態窒素 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ )、全リン (T-P)、リン酸態リン ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) とした。T-Nについては、残留塩素による妨害を除くため、既報<sup>8)</sup>に従って測定した。COD、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、T-P及び $\text{PO}_4\text{-P}$ についてはJIS K0102<sup>9)</sup>に準拠して測定した。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 各項目の濃度の経月変化

各地点におけるCOD、T-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の変化を図6～図12に示す。

図6より、St-1及びSt-3におけるCODは明確な季節変動が見られず、平均値6.2mg/L及び4.7mg/L前後を推移していた。St-2におけるCODは硝化促進期の平均値 (8.4mg/L) と比較して硝化抑制期の平均値 (11.2mg/L) の方が2.8mg/L高くなっていた。

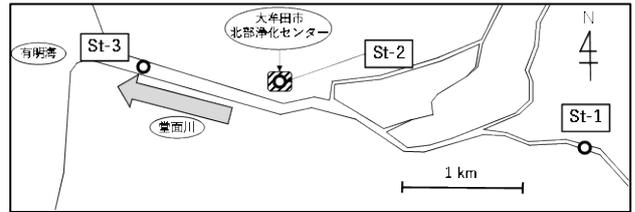


図1 月毎の濃度変化に関する調査地点 (St-1～St-3)

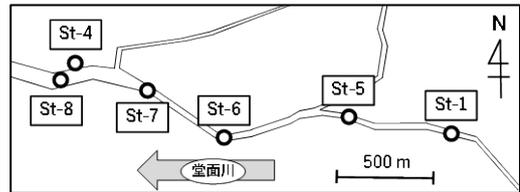


図2 濃度分布に関する調査地点 (上流)

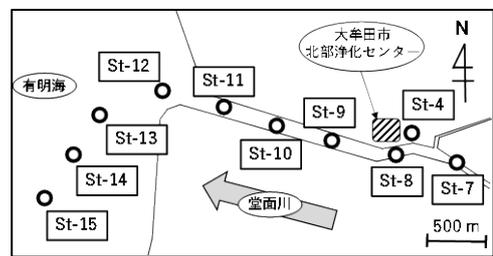


図3 濃度分布に関する調査地点 (下流～海域)

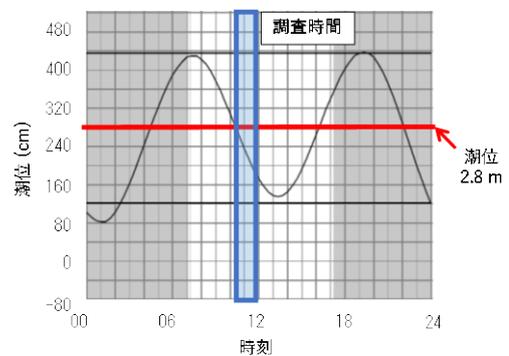


図4 2017年12月15日の潮位図 (三池港)

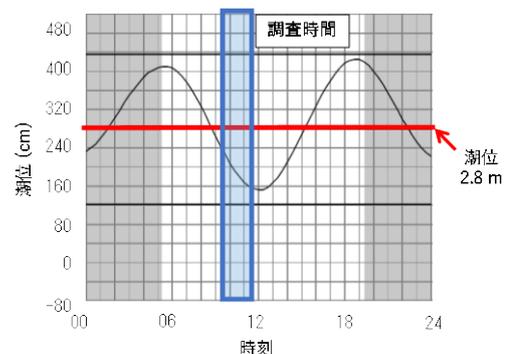


図5 2018年7月23日の潮位図 (三池港)

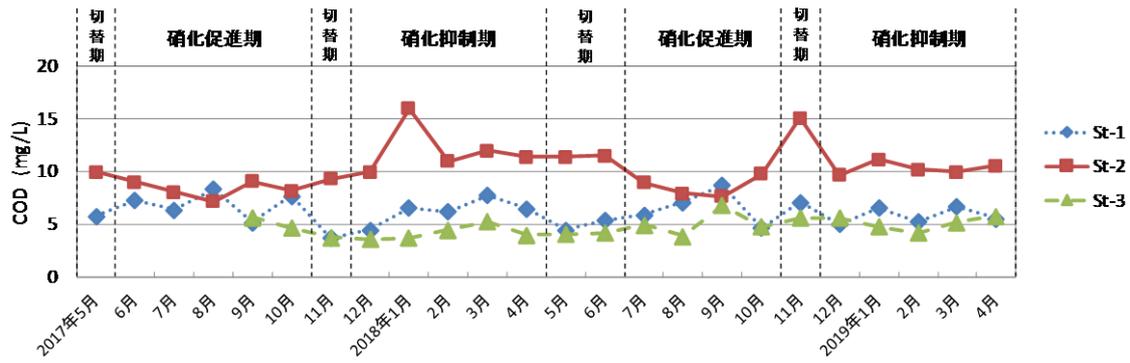


図6 月毎のCOD変化

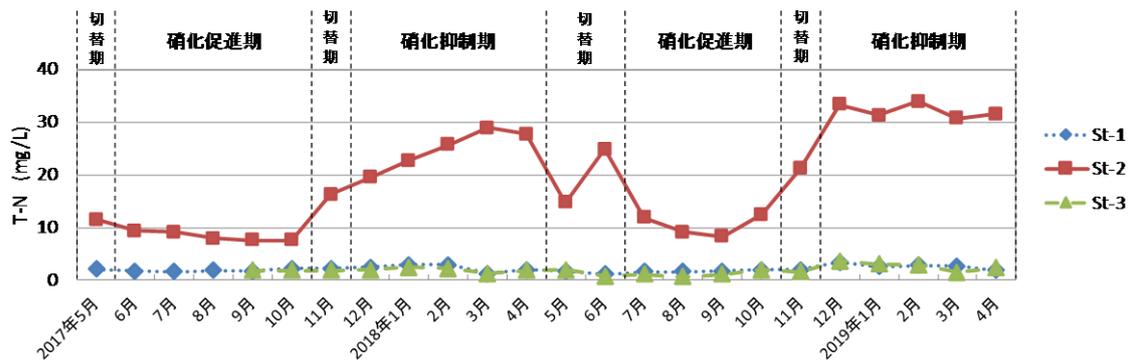


図7 月毎のT-N変化

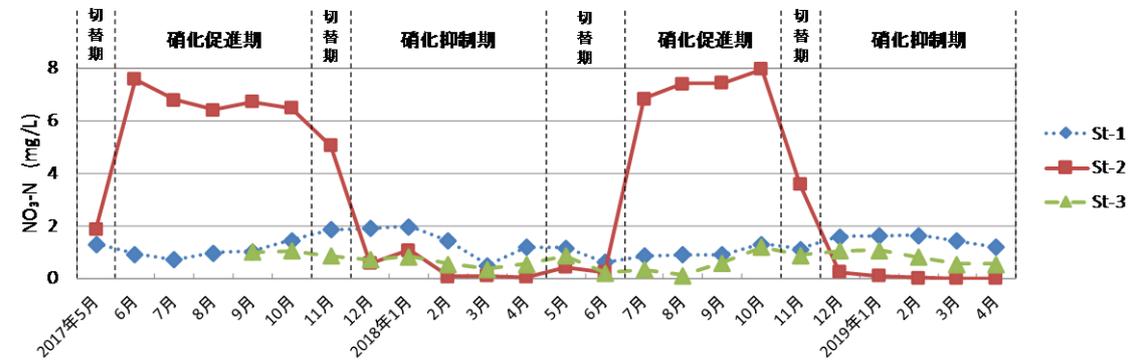


図8 月毎のNO<sub>3</sub>-N変化

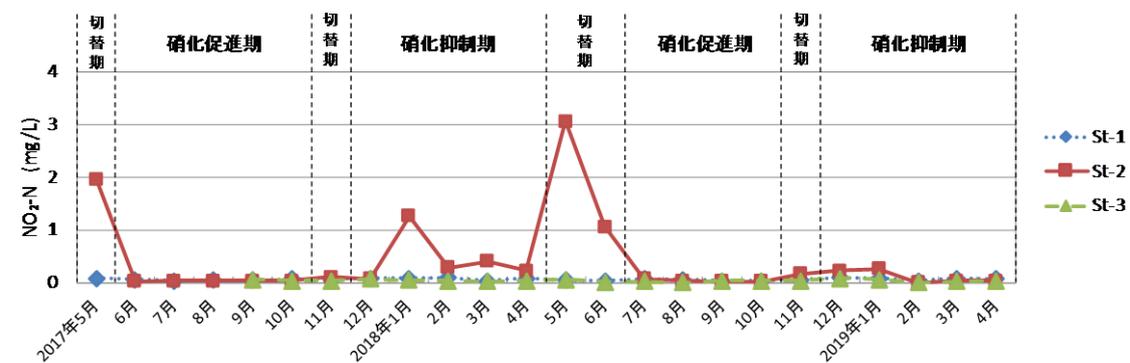


図9 月毎のNO<sub>2</sub>-N変化

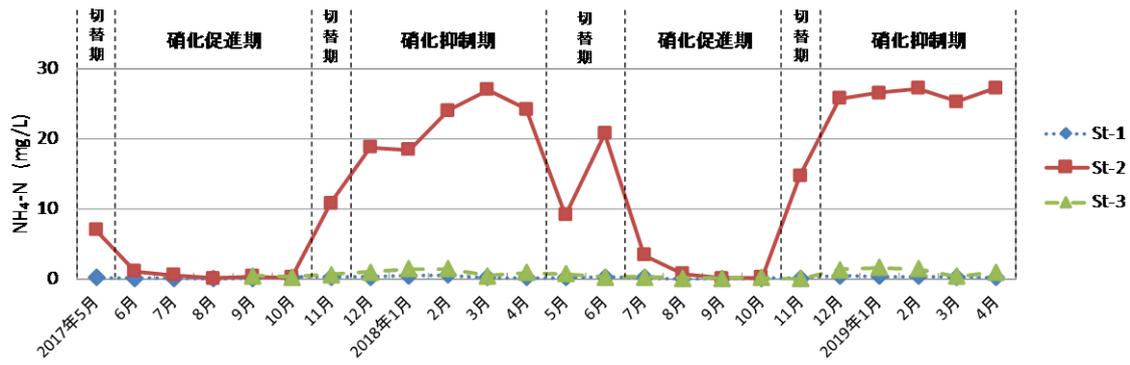


図10 月毎のNH<sub>4</sub>-N変化

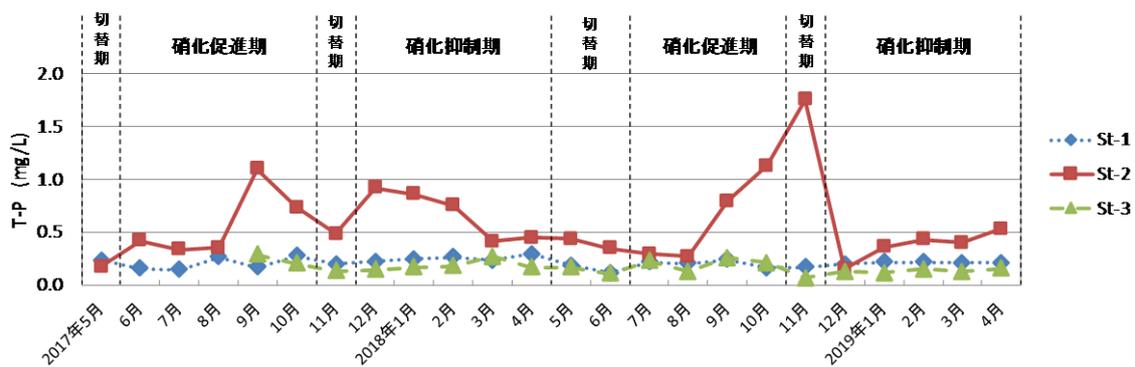


図11 月毎のT-P変化

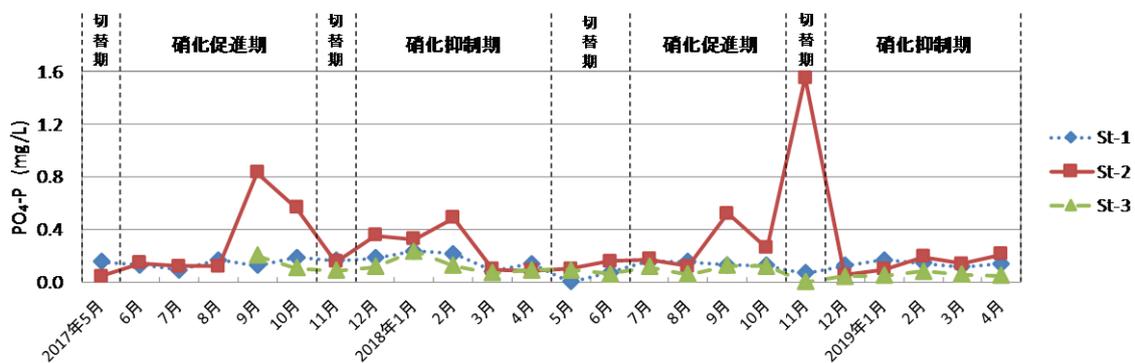


図12 月毎のPO<sub>4</sub>-P変化

図7より、St-1におけるT-Nは、調査期間を通じて2mg/L前後を推移していた。一方、St-2における硝化抑制期のT-N平均値(28.5mg/L)は、硝化促進期の平均値(9.2mg/L)と比較して19.3mg/L高くなっていた。また、St-3における硝化抑制期のT-N平均値(2.3mg/L)は、硝化促進期の平均値(1.3mg/L)と比較して1.0mg/L高くなっていた。なお、St-3の硝化促進期のT-Nは、上流に位置するSt-1のT-Nと比較してほぼ同程度の濃度であった。そのため、St-3における硝化促進期と硝化抑制期とのT-N平均値の差は、浄化センター放流水の影響によることが示唆され

た。

さらに、溶存態窒素について形態別に調査した(図8-図10)。St-1における溶存態窒素は、調査期間を通してNO<sub>3</sub>-Nが主成分(NO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N+NH<sub>4</sub>-N=DINに対するNO<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N/DIN:75-96%)であり、NO<sub>2</sub>-N及びNH<sub>4</sub>-Nは0.1mg/L未満であった。一方、St-2における溶存態窒素は、浄化センターの運転切り替えに依存した変動を示し、硝化促進期でNO<sub>3</sub>-Nが主成分(NO<sub>3</sub>-N/DIN:67-99%)、硝化抑制期でNH<sub>4</sub>-Nが主成分(NH<sub>4</sub>-N/DIN:89-99%)であった。St-3における溶存態窒素は、St-2と同様の挙動を示した。

ただし、硝化抑制期は $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NH}_4\text{-N}$ が混在 ( $\text{NO}_3\text{-N}/\text{DIN}$  : 28–60%,  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{DIN}$  : 50–71%) し、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NH}_4\text{-N}$ の平均値は0.70mg/L及び1.1mg/Lであった。St-1では時期によらず $\text{NO}_3\text{-N}$ が主成分であったことに対し、St-3では硝化抑制期に $\text{NH}_4\text{-N}$ が検出された。これは、浄化センター放流水による影響を示唆している。

T-Pは、どの地点においても明確な季節変動が見られず、St-1、St-2及びSt-3でのそれぞれの平均値は0.21、0.58及び0.17mg/Lであった (図11)。特に、St-2は、St-1やSt-3と比べて調査期間における濃度変化は大きいものの、明確な傾向は確認されなかった。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$ についても、T-Pと同様の結果となった (図12)。T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ ともに、局所的な値の変動は見られたものの、季別運転によるリン濃度の影響はほとんど見られなかった。

このように、季別運転前後のT-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度変化の比較より、浄化センター放流水はSt-3に到達していることが示唆された。

### 3.2 河川及び海域での濃度分布

各地点におけるCODの変化を図13、T-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 及び $\text{NH}_4\text{-N}$ の変化を図14、T-P及び $\text{PO}_4\text{-P}$ の変化を図15に示す。図13–図15の横軸の左側が河川上流側で右側が河川下流側となっている。なお、浄化センター放流水を堂面川に放流するFGは、St-7とSt-8の間であり、FGから放流される直前 (St-4) の水質を図上部に数値にて示す。また、感潮域及び非感潮域の境界を点線で示す。

硝化抑制期、硝化促進期ともに上流から河口にかけてCOD、T-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、T-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の低下が見られた。これは、海水による希釈及び拡散によるものと考えられた。

まず、窒素の分布について考察する。St-7とSt-8の間で窒素濃度の高い浄化センター放流水が合流する。そのため、St-7より下流側において、硝化促進期では $\text{NO}_3\text{-N}$ 、硝化抑制期では $\text{NH}_4\text{-N}$ の上昇が起こると予想される。一方で、希釈・拡散による濃度低下が生じることから、硝化促進期に増加する放流水中の $\text{NO}_3\text{-N}$ 、硝化抑制期に増加する放流水中の $\text{NH}_4\text{-N}$ に着目して、T-Nに対する $\text{NO}_3\text{-N}$  ( $\text{NO}_3\text{-N}/\text{T-N}$ ) 及びT-Nに対する $\text{NH}_4\text{-N}$  ( $\text{NH}_4\text{-N}/\text{T-N}$ ) について検討した (図16)。

硝化抑制期の $\text{NO}_3\text{-N}/\text{T-N}$ は、堂面川上流から海域にかけて低くなっていた。また、 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{T-N}$ は、堂面川上流から海域にかけて高くなった。その際、放流水が流入するFG付近で高くなり、その後やや低下しながら推移した。これらの結果から、硝化抑制期の調査時点では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を含んだ浄化センター放流水は海域調査末端のSt-15まで到達していると考えられた。

硝化促進期の $\text{NO}_3\text{-N}/\text{T-N}$ は、堂面川上流、河口、沖合に向けて徐々に低下し、海域では非常に低くなっていた。

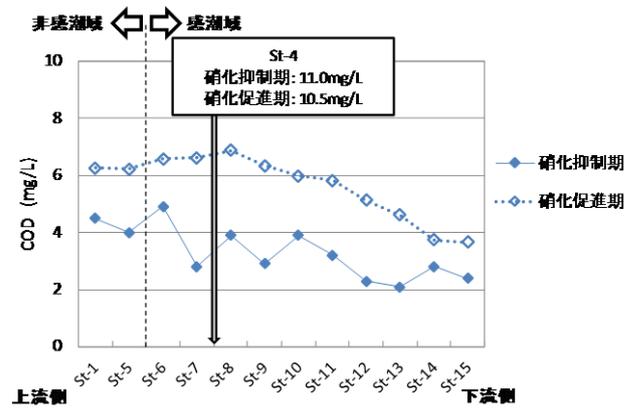


図13 各地点でのCOD

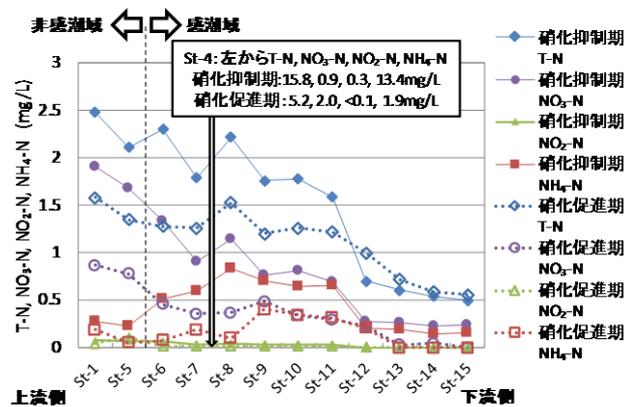


図14 各地点でのT-N、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$

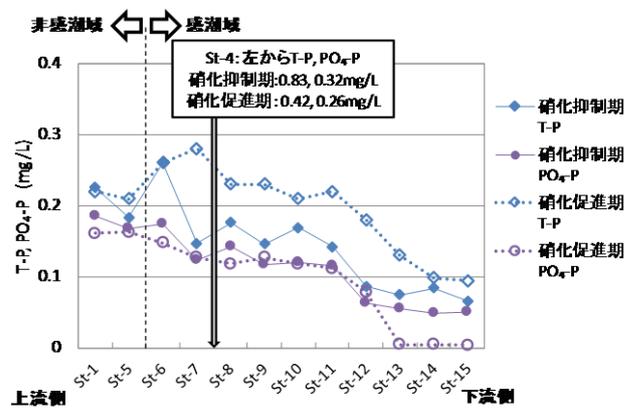


図15 各地点でのT-P、 $\text{PO}_4\text{-P}$

また、 $\text{NH}_4\text{-N}/\text{T-N}$ は、堂面川上流と比較して、感潮域から河口で高くなり、特に、堂面川上流からSt-6、St-7とFG付近で高くなった。その後、河口から沖合に向けて徐々に低下し、St-13以降の海域では非常に低くなっていた。なお、この濃度減少の原因として2018年7月13日にSt-13–St-15を含む大牟田市地先の有明海で異常発生していた珪藻の*Skeletonema*属<sup>10, 11)</sup>による窒素の消費等が考えられた。これらの結果から、硝化促進期の浄化センター放流水に含まれる $\text{NO}_3\text{-N}$ 及び $\text{NH}_4\text{-N}$ は、河口のSt-12まで到達していると考えられた。

達していると考えられた。

次に、リンの分布について考察する。前述の窒素の分布と同様に、希釈・拡散によるリン濃度の低下を考慮する必要から、T-Pに対する $PO_4\text{-P}$  ( $PO_4\text{-P}/T\text{-P}$ ) について検討した(図17)。

硝化抑制期の $PO_4\text{-P}/T\text{-P}$ は、非感潮域である堂面川上流と感潮域から海域を比較すると、一部で低い地点もあったが、堂面川上流からはほぼ一定の値で推移していた。季別運転前後で放流水に含まれるリン濃度が変わらないことや今回の調査結果も踏まえると、硝化抑制期の調査においては、浄化センター放流水に含まれるT-P及び $PO_4\text{-P}$ の水域への影響は具体的に確認できなかった。

硝化促進期の $PO_4\text{-P}/T\text{-P}$ は、非感潮域である堂面川上流と比較すると、感潮域から河口は低くなっていた。また、感潮域から河口ではやや減少しながら推移し、海域では非常に低くなっていた。窒素の場合と同様に、この濃度減少は、2018年7月13日に大牟田市地先(St-13-St-15)で異常発生していた珪藻の*Skeletonema*属<sup>10), 11)</sup>によるリンの消費等が考えられた。これらの結果から硝化抑制期及び硝化促進期の調査において、浄化センター放流水に含まれるT-P及び $PO_4\text{-P}$ の影響は具体的に確認できなかった。

#### 4. まとめ

FGからの放流水による堂面川の水質の変化及び栄養塩類の分布状況を調査した結果、浄化センター放流水に由来する $NO_3\text{-N}$ 及び $NH_4\text{-N}$ は、少なくとも堂面川河口付近まで到達していることが分かった。堂面川の感潮域では、浄化センター由来の栄養塩類が一定量滞留していることが考えられるので、今後は、栄養塩類が河口付近から近傍のノリ養殖場に到達しているか調査する予定である。

#### 5. 謝辞

本研究実施にあたり、採水及び情報提供にご協力いただいた大牟田市企業局、大牟田市環境保全課の方々へ感謝の意を表します。また、本研究は、平成29年度及び平成30年度「瀬戸内海の環境保全・創造に係る研究助成」から支援を受けました。ここに、感謝の意を表します。

#### 6. 文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：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, <https://www.mlit.go.jp/common/001033458.pdf> (2022.2.8アクセス)
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：栄養塩類の能動的運転管理に関する事例集, <https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/seweraage/>

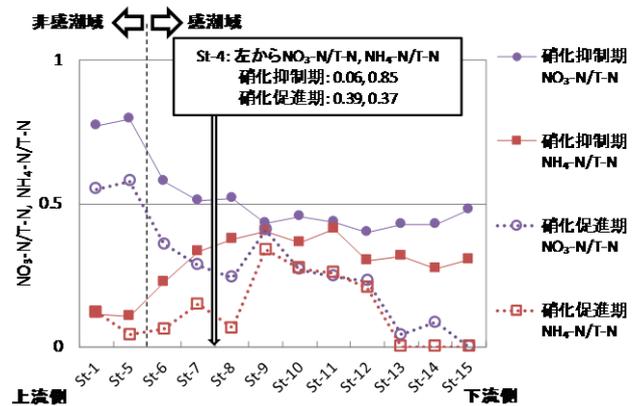


図16 各地点での $NO_3\text{-N}/T\text{-N}$ ,  $NH_4\text{-N}/T\text{-N}$

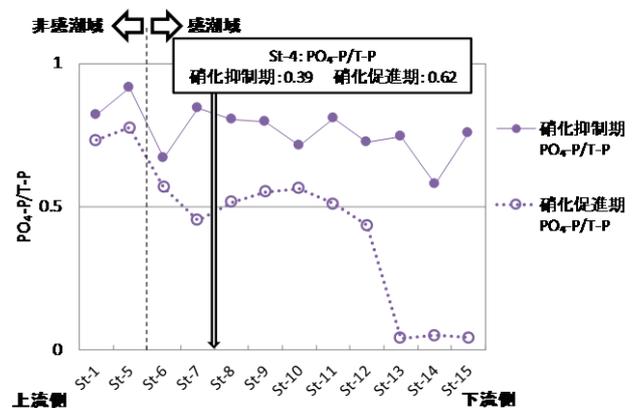


図17 各地点での $PO_4\text{-P}/T\text{-P}$

content/001397912.pdf (2022.2.8アクセス)

- 3) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：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), <https://www.mlit.go.jp/common/001105123.pdf> (2022.2.8アクセス)
- 4) 山西博幸, 前田優斗, 田中溪介, 大石京子：河川感潮水域における硝化抑制処理水の輸送とその環境影響に関する調査研究. 水環境学会誌, **41**, 35-42, 2018
- 5) 山西博幸, 大鷲一輝, 谷村聡政, 青木優佳, アニカサラ, 大石京子：下水処理の季別運転が流下沿岸水域に及ぼす影響に関する研究. 第21回日本水環境学会シンポジウム, 40-41, 2018
- 6) 一般財団法人佐賀県環境科学検査協会, 国立大学法人佐賀大学, 佐賀市上下水道局：産学官連携共同研究下水処理施設の季節別運転管理によるノリ養殖海域への効果 報告書, [https://www.water.saga.saga.jp/site\\_files/file/産学官共同研究//kyoudou\\_kenkyu\\_20201228.pdf](https://www.water.saga.saga.jp/site_files/file/産学官共同研究//kyoudou_kenkyu_20201228.pdf) (2022.2.8アクセス)

- 7) 柏原学, 秦弘一郎, 古賀敬興, 古閑豊和, 平川周作, 黒川陽一, 宮脇崇, 志水信弘, 松本源生, 石橋融子, 山西博幸: フラップゲートを経由して排出される下水処理場放流水の栄養塩類の経時的変動調査. 福岡県保健環境研究所年報, **47**, 67-71, 2020
- 8) 柏原学, 秦弘一郎, 松木昌也, 古賀敬興, 古閑豊和, 平川周作, 黒川陽一, 宮脇崇, 志水信弘, 松本源生, 石橋融子, 山西博幸: アンモニア性窒素及び塩素剤を含む下水処理場放流水の全窒素濃度分析法に関する研究. 水環境学会誌, **43**, 35-41, 2020
- 9) 日本産業標準調査会: 工場排水試験方法 (JIS K0102), 日本規格協会, 東京, 2016
- 10) 福岡県水産海洋技術センター有明海研究所: H30年度有明海赤潮発生速報第3号,  
<http://www.sea-net.pref.fukuoka.jp/gyogyo/gyogyo.htm> (2022.2.8アクセス)
- 11) 福岡県水産海洋技術センター有明海研究所: H30年度有明海赤潮発生速報(続報)第3号,  
<http://www.sea-net.pref.fukuoka.jp/gyogyo/gyogyo.htm> (2022.2.8アクセス)