

## 2017年から2018年の三河湾における2ヶ所の広域流域下水道の 冬季リン管理運転が湾奥部の水質に与えた影響

蒲原 聡・高須雄二・湯口真実・美馬紀子・天野禎也・石田俊朗・宮脇 大・鈴木智博

(2018年12月3日受付, 2019年1月31日受理)

### Influence of phosphorus management at two wide area sewage treatment plants on water quality in the inner section of Mikawa Bay during the winter season from 2017 to 2018

KAMOHARA Satoru\*, TAKASU Yuuji\*, YUGUCHI Manami\*, MIMA Noriko\*,  
AMANO Yoshinari\*, ISHIDA Toshiro\*, MIYAWAKI Dai\*, and SUZUKI Tomohiro\*

**Abstract :** We investigated the influence of phosphorus, whose concentration is thought to have increased in local water bodies between November 2017 and March 2018 due to test operations. It is discharged from Yahagigawa and Toyogawa wide area sewage treatment plants located the coast of Mikawa Bay into the sea area. The accumulation phosphorus discharged from Yahagigawa sewage treatment plant was 4.1 times as greater than the corresponding period for previous year, and the phosphorus load form Yahagigawa sewage treatment plant was estimated to be 0.8 times to 1.7 times higher than the load from the Yahagigawa River. The dissolved inorganic phosphorus proportion of the total phosphorus load increased to 82.0% compared with 44.0% in October 2017 before the test operation. The accumulation phosphorus discharged from Toyogawa sewage treatment plant was 2.0 times as greater than the corresponding period for previous year, and the phosphorus load form Toyogawa sewage treatment plant was estimated to be 0.1 times to 1.3 times higher than the load from the Toyogawa River. The dissolved inorganic phosphorus proportion of the total phosphorus load increased to 63.0% compared with 44.3% in October 2017 before the test operation. The supply of dissolved inorganic phosphorus, which in beneficial to laver seaweed and phytoplankton, was drastically increased by the test operations at the two wide area sewage treatment plants.

**キーワード:** 広域流域下水道, 栄養塩, リン, 窒素, クロロフィル *a*, ケイ酸

“豊かな海, 豊穡の海の復活”というフレーズが聞かれて久しいが, 伊勢湾, 三河湾ではノリの色落ちや, アサリ, イカナゴなど内湾で生活史の全てや稚魚期を過ごす魚介類資源の減少が認められている。2017年のアサリ漁獲量は2013年の10分の1以下に低下し, イカナゴに至っては資源が激減して2016年から3年間禁漁となっている。また, 伊勢湾, 三河湾においては, 長期的に栄養塩濃度が減少していることが確認されている。<sup>1, 2)</sup> 愛知

県漁業協同組合連合会は, 栄養塩の減少が漁業生産量を低迷させている一つの要因として, 2017年に愛知県に対し下水道の管理運転等, 栄養塩類の適切な管理に関する調査研究とその在り方の検討に努めるとともに, その結果に基づき, 所要の措置を講ずることを要望した。瀬戸内海や有明海などでは, ノリやアサリ等を対象として, 一部地域で2004年から下水道の季節別管理運転を実施しており,<sup>3)</sup> 播磨灘のノリ漁場では下水処理水等により,

\* 愛知県水産試験場 (Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan)

ノリの色調が良好に保たれていることが確認されている。  
 4) こうした状況を受け、愛知県は矢作川と豊川の浄化センター (Fig.1) から放流される処理水について、2017年11月から2018年3月まで全リン (以下 TP) の現状の平均放流濃度 (矢作川: 0.3mg/L, 豊川: 0.5mg/L) を試験的に排水基準濃度 1.0mg/L を超えない範囲で放流することとした。この効果を把握するため、著者らは浄化センター周辺海域の水質を調査したので、その結果を報告する。なお、全窒素 (以下 TN) については現状で排水基準濃度の上限値での放流となっていることから、増加運転は実施されなかった。

### 材料及び方法

放流水の TP, TN の濃度および放流負荷量は、矢作川および豊川各浄化センターそれぞれの測定結果を用いた。水質調査は Fig.1 に示した両浄化センター地先海域における測点で、2017年10月から2018年3月まで毎月3回、2018年4月については1回それぞれ実施した。各地先海域の各測点と調査項目については以下に示した。矢作川浄化センターの放流口直近に St.Y-1, 放流口周辺に St.Y-2~6, アサリおよびノリの漁場 (以下漁場) に St.Y-7~10 を設定した。なお、1月30日からは、放流口周辺と漁場の間に測点 St.Y-11 を追加した。また、St.Y-6, 7および9においては、植物プランクトンの細胞数を計数した。豊川浄化センターの放流口直近に St.T-1, 放流口周辺に St.T-2~6, 豊川に St.T-7, 六条潟に St.T-8 および9 を設定した。また、St.T-2, 7および8において、植物プランクトンの細胞数を計数した。なお、10月10日のみ St.T-2, 6 および8 の計数を実施した。各測点での水温、塩分は

CTD (JFE アドバンテック社製, AAQ-RINKO および AAQ-1182S-H) で測定した。また、表層水を採水して TP, PO<sub>4</sub>-P (リン酸態リン), TN, NO<sub>2</sub>-N (亜硝酸態窒素), NO<sub>3</sub>-N (硝酸態窒素), NH<sub>4</sub>-N (アンモニア態窒素), PON (懸濁態有機窒素), SiO<sub>2</sub> (ケイ酸), クロロフィル *a* を分析した。採水試料 500mL をガラス濾紙 (Whatman 社製, GF/C) で濾過し、ガラス濾紙を PON の分析に、濾液を PO<sub>4</sub>-P, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N および SiO<sub>2</sub> の分析にそれぞれ供した。なお、DIN (溶存態無機窒素) は、NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N および NH<sub>4</sub>-N の値を合計して求めた。PON は CHN コーダー (株式会社住化分析センター製, 高感度 N.C-ANALYZER SUMIGRAPH NC-22F) を用い、TP, PO<sub>4</sub>-P, TN, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N, SiO<sub>2</sub> は全窒素・全りんオートアナライザー (ビーエルテック株式会社製, QuAAtro2-HR) を用いてそれぞれ測定した。クロロフィル *a* の分析には、別に採水試料 200mL を濾過したガラス濾紙を供した。ガラス濾紙から常法により抽出して、蛍光法により蛍光光度計 (TURNER DESIGNS 製, 10-AU Fluorometer) を用いてクロロフィル *a* を測定した。

### 結 果

矢作川浄化センターの調査測点における調査結果を以下に示した。

**放流水の TP および TN**; 放流水の TP および TN の濃度および負荷量の時系列変化を、前年同時期の 2016年10月~2017年4月の結果とともにそれぞれ Fig.2 および Fig.3 に示した。浄化センターでは、2017年11月は上限値を超えないように徐々に TP 濃度を増加させた。2017年11月~2018年3月の放流水の TP 濃度は日平均 778 μg/L で累積負荷量は 24.0 t であった。前年同時期の TP の日平均濃度は 204 μg/L, 累積負荷量は 5.9 t であったことから、試験運転期間中は前年同時期と比較べ、平均濃度は 3.8 倍, 累積負荷量は 4.1 倍となっていた。2017年11月~2018年3月の放流水の TN 濃度は日平均 6,779 μg/L で累積負荷量は 210.3 t であった。前年同時期における TN の日平均濃度は 7,354 μg/L, 累積負荷量は 212.8 t であったことから、試験運転期間中は前年同時期と比較べ、平均濃度は 0.9 倍, 累積負荷量は 1.0 倍となっていた。

**放流口直近の水質**; 矢作川浄化センターの放流口直近 (St.Y-1, 以下略) における TP, PO<sub>4</sub>-P の濃度および PO<sub>4</sub>-P/TP の割合の時系列変化を Fig.4 に示した。試験運転中の PO<sub>4</sub>-P/TP の平均割合 82.0% は、試験運転前の 10月平均 44.0% の 1.9 倍であった。また、試験運転中に 11月21日および1月30日の 47.8% および 57.4% と低い割合の時もあり、試験運転後の 4月24日の割合は 42.4% に

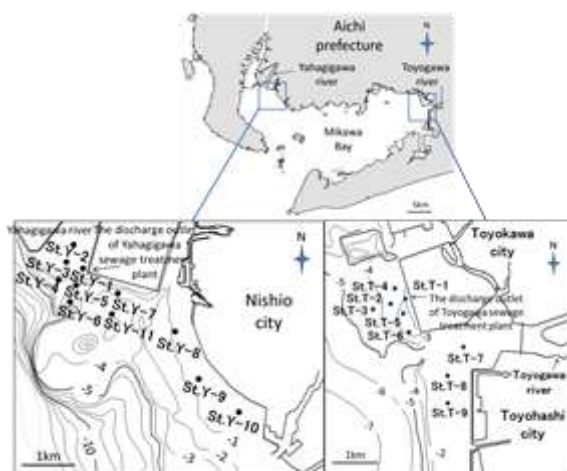


Fig. 1 Location of the study area in Chita Bay and the inner section of Atsumi Bay, which is part of Mikawa Bay. Solid circles show the sampling stations

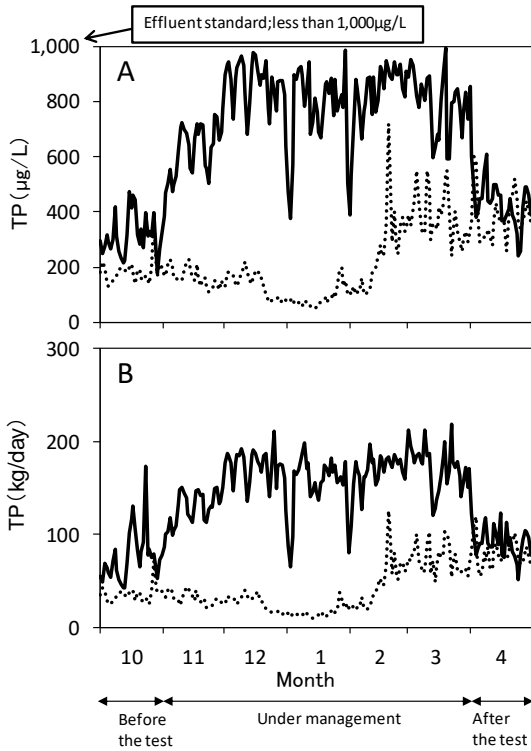


Fig. 2 Time series variations for the (A) concentrations and (B) the amount of TP effluent from the Yahagigawa wide area sewage treatment plant. Dotted line represents October 2016 to April 2017. Solid line represents October 2017 to April 2018

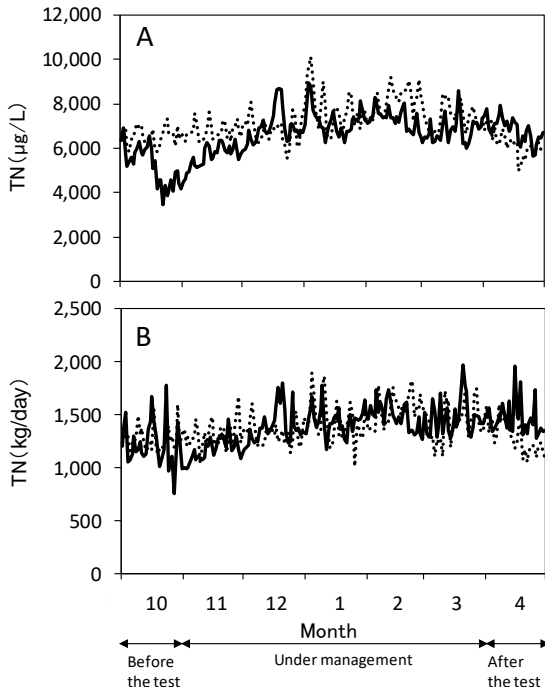


Fig. 3 Time series variations for (A) the concentrations and (B) the amount of TN effluent from the Yahagigawa wide area sewage treatment plant. Dotted line represents October 2016 to April 2017. Solid line represents October 2017 to April 2018

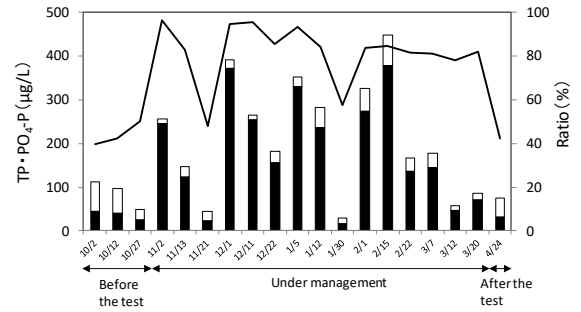


Fig. 4 Time series variations for the TP,  $PO_4\text{-P}$  concentrations, and the  $PO_4\text{-P}/TP$  ratio at the closest place of discharge port (St.Y-1) of the Yahagigawa wide area sewage treatment plant. Black and total bars represent the  $PO_4\text{-P}$  and TP concentrations, respectively. Solid line represents the  $PO_4\text{-P}/TP$  ratio

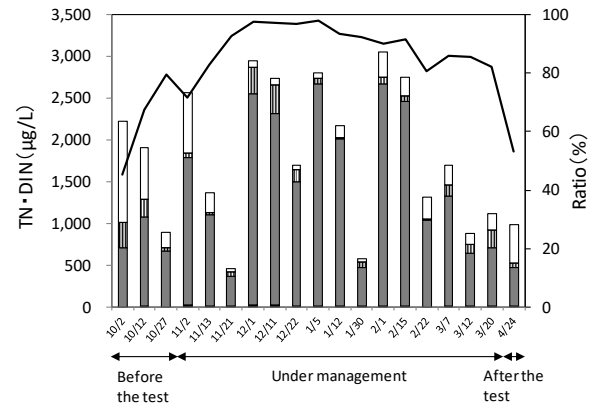


Fig. 5 Time series variations for the TN, DIN concentrations, and the DIN/TN ratio at the closest place of discharge port (St.Y-1) of the Yahagigawa wide area sewage treatment plant. Black, gray, stripe and total bars represent the  $NO_2\text{-N}$ ,  $NO_3\text{-N}$ ,  $NH_4\text{-N}$  and the TN concentrations, respectively. Solid line represents the DIN/TN ratio

戻っていた。放流口直近における DIN ( $NO_2\text{-N}$ ,  $NO_3\text{-N}$ ,  $NH_4\text{-N}$ ) および TN の濃度, DIN / TN の割合の時系列変化を Fig.5 に示した。TN は通常運転であるため前年と同程度の放流量 (Fig.3) であり, 試験運転中の TN に占める DIN の平均割合は 89.2%であった。DIN に占める各  $NO_2\text{-N}$ ,  $NO_3\text{-N}$ ,  $NH_4\text{-N}$  の平均割合は, 試験運転前の  $NO_2\text{-N}$  が 0.6%,  $NO_3\text{-N}$  が 82.2%,  $NH_4\text{-N}$  が 17.2%であり, 試験運転中の  $NO_2\text{-N}$  が 1.0%,  $NO_3\text{-N}$  が 91.1%,  $NH_4\text{-N}$  が 7.9%であった。また, 試験運転後は  $NO_2\text{-N}$  が 1.1%,  $NO_3\text{-N}$  が 89.5%,  $NH_4\text{-N}$  が 9.4%となっていた。 $NO_3\text{-N}$  の割合は試験運転前から平均して 8 割以上あったが, 試験運転中は増加して 9 割以上になった。

**周辺海域の水質**; TP,  $PO_4\text{-P}$ , TN および DIN の濃度の時系列変化を Fig.6 に示した。試験運転中の TP の平均濃

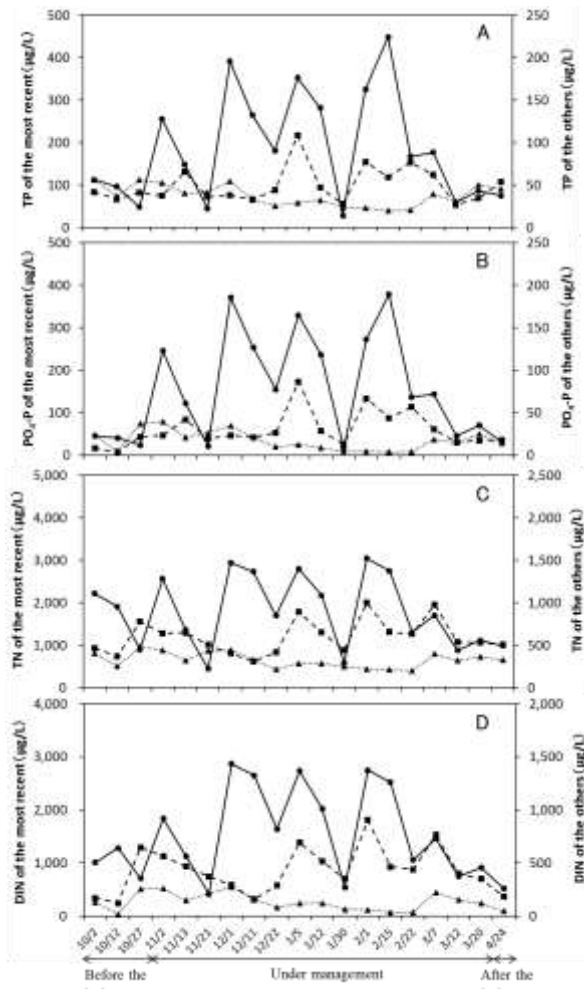


Fig. 6 Time series variations for (A) the TP, (B) the  $PO_4\text{-P}$ , (C) the TN and (D) the DIN concentrations at the closest place of discharge port(St.Y-1), the around of discharge port(St.Y-2~6) of the Yahagigawa wide area sewage treatment plant and the fishing grounds(St.Y-7~10). Solid circles, solid squares and solid triangles represent the closest place, the around and the fishing grounds, respectively

度は、放流口直近で  $192.7 \mu\text{g/L}$ 、放流口周辺 (St.Y-2~6, 以下略) で  $49.5 \mu\text{g/L}$ 、漁場 (St.Y-7~10, 以下略) で  $36.9 \mu\text{g/L}$ 、 $PO_4\text{-P}$  の平均濃度は、放流口直近で  $186.8 \mu\text{g/L}$ 、放流口周辺で  $34.3 \mu\text{g/L}$ 、漁場で  $16.6 \mu\text{g/L}$ 、TN の平均濃度は、放流口直近で  $1,875 \mu\text{g/L}$ 、放流口周辺で  $617 \mu\text{g/L}$ 、漁場で  $315 \mu\text{g/L}$  であった。また、DIN の平均濃度は、放流口直近で  $1,688 \mu\text{g/L}$ 、放流口周辺で  $469 \mu\text{g/L}$ 、漁場で  $138 \mu\text{g/L}$  であった。 $SiO_2$ 、PON およびクロロフィル  $a$  の濃度の時系列変化を Fig.7 に示した。試験運転中の  $SiO_2$  の平均濃度は、放流口直近で  $2,472 \mu\text{g/L}$ 、周辺で  $1,699 \mu\text{g/L}$ 、漁場海域で  $470 \mu\text{g/L}$  であり、期間を通して、放流口直近や放流口周辺が漁場より高かった。また、11月21日から1月5日までは放流口直近が河口に位置している

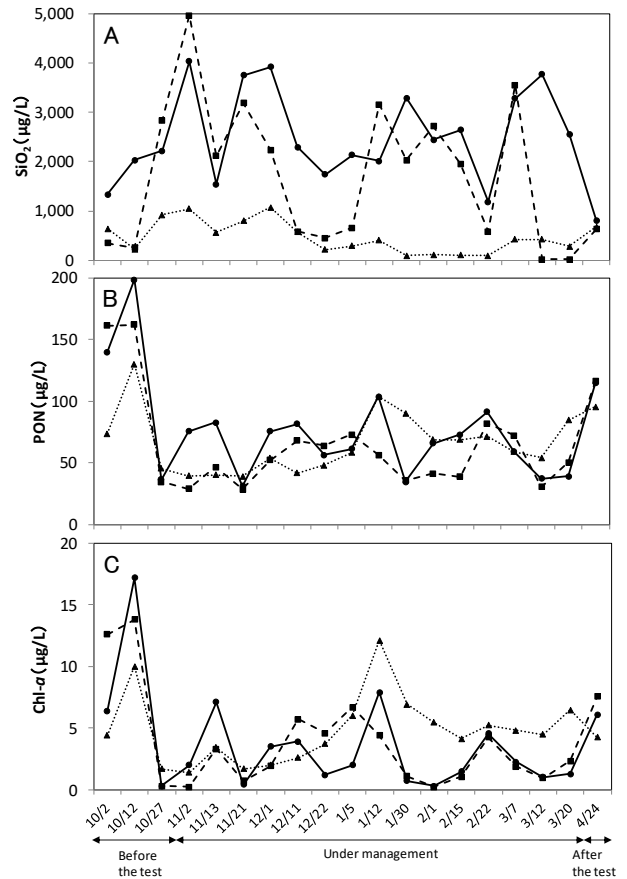


Fig. 7 Time series variations for (A) the  $SiO_2$ , (B) the PON and (C) the Chl- $a$  concentrations at the closest place of discharge port(St.Y-1), the around of discharge port(St.Y-2~6) of the Yahagigawa wide area sewage treatment plant and the fishing grounds(St.Y-7~10). Solid circles, solid squares and solid triangles represent the closest place, the around and the fishing grounds, respectively

放流口周辺よりも著しく高かった。PON 濃度は試験運転前の10月2日および10月12日は放流口直近や周辺で  $140 \mu\text{g/L}$ 、 $161 \mu\text{g/L}$  および  $199 \mu\text{g/L}$ 、 $162 \mu\text{g/L}$  とそれぞれ高い値を示したが、試験運転中はそれよりも低くなり変化が少なかった。試験運転中のPONの平均濃度は、放流口直近で  $64.5 \mu\text{g/L}$ 、放流口周辺で  $51.2 \mu\text{g/L}$ 、漁場で  $61.4 \mu\text{g/L}$  であった。クロロフィル  $a$  濃度は試験運転前の10月2日および10月12日は放流口直近や周辺で  $6.4 \mu\text{g/L}$ 、 $12.6 \mu\text{g/L}$  および  $17.2 \mu\text{g/L}$ 、 $13.8 \mu\text{g/L}$  と高い値を示したが、試験運転中はそれよりも低くなり変化が少なかった。10月に矢作川地区全体でPONおよびクロロフィル  $a$  が高かった要因は出水の影響と推測された。試験運転中のクロロフィル  $a$  の平均濃度は、放流口直近で  $2.6 \mu\text{g/L}$ 、放流口周辺で  $2.6 \mu\text{g/L}$ 、漁場で  $4.7 \mu\text{g/L}$  と漁場が高く、特に、1月12日から3月20日は、漁場が放流口周辺より連続して高い状態が継続した。

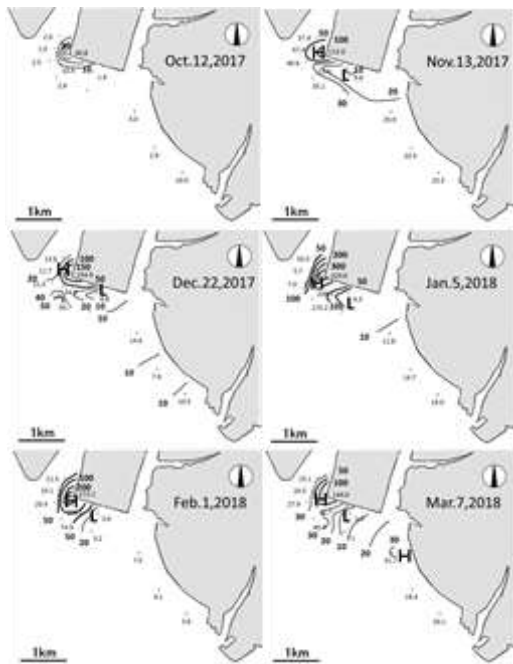


Fig. 8 Horizontal distributions of the  $\text{PO}_4\text{-P}$  concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) in the surface water taken in the Yahagigawa area between October 2017 and March 2018

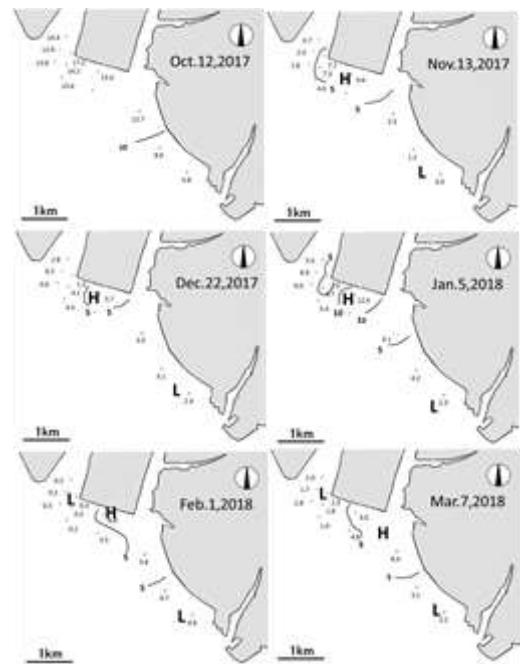


Fig. 10 Horizontal distributions of the  $\text{Chl-}a$  concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) in the surface water taken in the Yahagigawa area between October 2017 and March 2018

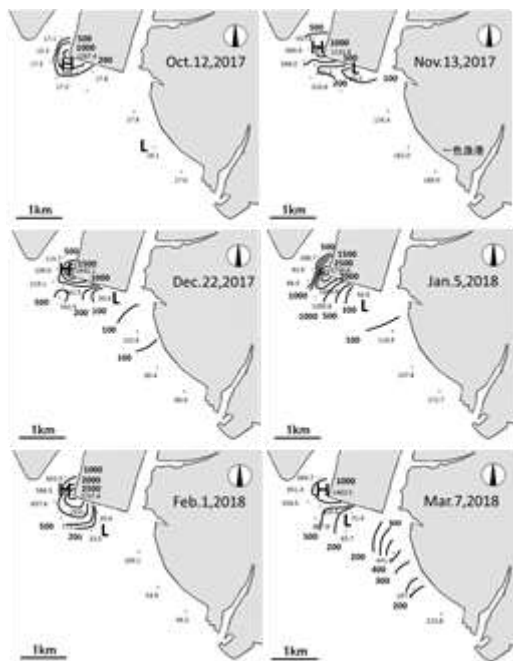


Fig. 9 Horizontal distributions of the  $\text{DIN}$  concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) in the surface water taken in the Yahagigawa area between October 2017 and March 2018

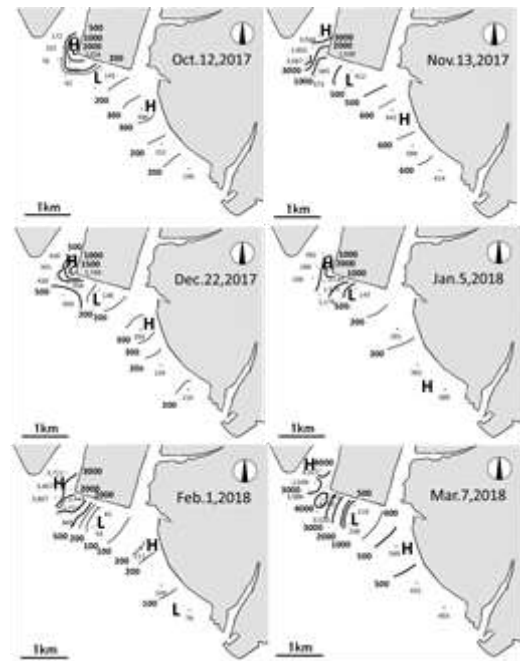


Fig. 11 Horizontal distributions of the  $\text{SiO}_2$  concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) in the surface water taken in the Yahagigawa area between October 2017 and March 2018

**水質の水平分布** ;  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{DIN}$ , クロロフィル  $a$  および  $\text{SiO}_2$  の各月の代表的な水平分布を Fig.8, 9, 10 および 11 に示した。 $\text{PO}_4\text{-P}$  は、試験運転前と比較して  $50 \mu\text{g/L}$  以上の範囲が放流口周辺の測点に拡大したものの試験運転前および試験運転中を通して、漁場の St.Y-7 で他の測点よりも低いことが特徴的であった。そのため、放流口から

漁場に向け連続的に濃度が拡散している様子は確認できなかった。また、12月22日、1月5日、2月1日のように、 $50 \mu\text{g/L}$  以上の範囲が放流口から南側に広がって、観測した測点では濃度の境界を確認できない場合もあった。 $\text{DIN}$  は、試験運転前、試験運転中ともに、 $500 \mu\text{g/L}$  以上の範囲が放流口周辺に存在した。試験運転中を通して、

St.Y-7 で DIN が他の測点よりも低いことが特徴的であり、DIN についても  $\text{PO}_4\text{-P}$  と同様に放流口から漁場に向けた濃度の拡散は明瞭ではなかった。また、 $\text{PO}_4\text{-P}$  と同様に  $500 \mu\text{g/L}$  以上の範囲が放流口から南側へ広がって、観測した測点では濃度の境界を確認できない場合があった。クロロフィル *a* は、試験運転前は放流口周辺から漁場へ向けた濃度勾配がみられたが、試験運転中は放流口周辺よりも St.Y-7 で濃度が高くなり、St.Y-8, 9 および 10 と放流口から遠ざかるほど濃度が低くなる傾向が見られた。 $\text{SiO}_2$  は、試験運転前、試験運転中ともに、 $1,000 \mu\text{g/L}$  以上の範囲が放流口周辺に存在したが、11 月 13 日および 3 月 7 日は放流口周辺の方が放流口直近よりも高かった。試験運転中を通して、St.Y-7 で  $\text{SiO}_2$  が他の測点よりも低いことが特徴的であり、 $\text{SiO}_2$  についても  $\text{PO}_4\text{-P}$  および DIN と同様に放流口から漁場に向けた濃度の拡散は明瞭ではなかった。また、試験期間中を通して  $500 \mu\text{g/L}$  以上の範囲が放流口から南側へ広がって、観測した測点では濃度の境界を確認できない場合があった。Table.1 に細胞密度が  $2,000 \text{ cells/mL}$  以上となった植物プランクトン種を示した。10 月 2 日は *Pseudo-Nitzschia* spp. が、10 月 12 日は *Skeletonema* spp. がそれぞれ優占していた。11 月から 12 月には  $2,000 \text{ cells/mL}$  以上の植物プランクトンは出現しなかった。1 月 12 日は *Skeletonema* spp., 1 月 30 日および 2 月 1 日は *Chaetoceros* spp. がそれぞれ優占していた。また、4 月 24 日は小型鞭毛藻類が優占していた。

Table 1 Dominant of phytoplankton around the Yahagigawa wide area sewage treatment plant

Month/day	St.	Small flagellate	<i>Asterionella glacialis</i>	<i>Chaetoceros</i> spp.	<i>Leptocylindrus danicus</i>	<i>Pseudo-Nitzschia</i> spp.	<i>Skeletonema</i> spp.	cells/mL
10/2	6				3,533	8,350		
	7				2,050	10,550		
10/12	6		3,125	4,967		3,875	12,650	
	7						8,750	
	9						3,938	
1/12	7						2,200	
	9						2,230	
1/30	7			2,710				
2/1	9			2,310				
4/24	7	2,675						
	9	3,325						

豊川浄化センターの調査測点における調査結果を以下に示した。

**放流水中の TP および TN;** 放流水中の TP および TN の濃度および負荷量の時系列変化を前年同時期の 2016 年 10 月～2017 年 4 月とともに Fig.12 および 13 に示した。2017 年 11 月～2018 年 3 月の放流水中の TP 濃度は日平均  $798 \mu\text{g/L}$  で累積負荷量は  $8.2 \text{ t}$  であった。前年同時期における日平均濃度は  $446 \mu\text{g/L}$  で、累積負荷量は  $4.1 \text{ t}$  であったことから、試験運転期間は前年と比べて、平均濃度は 1.8 倍、累積負荷量は 2.0 倍となっていた。2017 年 11 月～2018

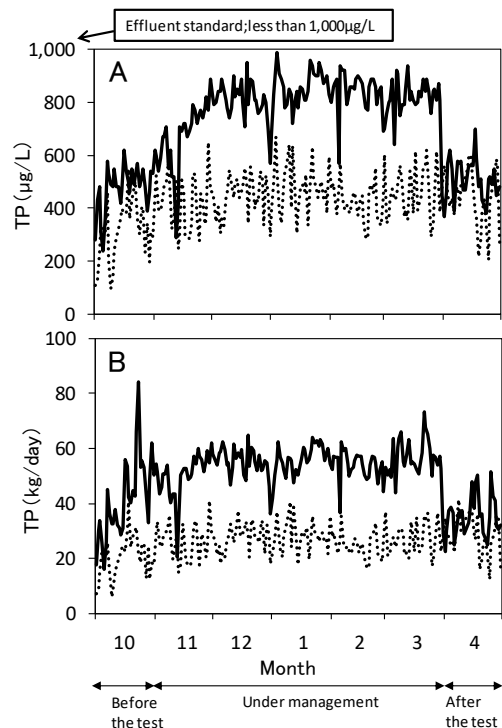


Fig. 12 Time series variations for the (A) concentrations and (B) the amount of TP effluent from the Toyogawa wide area sewage treatment plant. Dotted line represents October 2016 to April 2017. Solid line represents October 2017 to April 2018

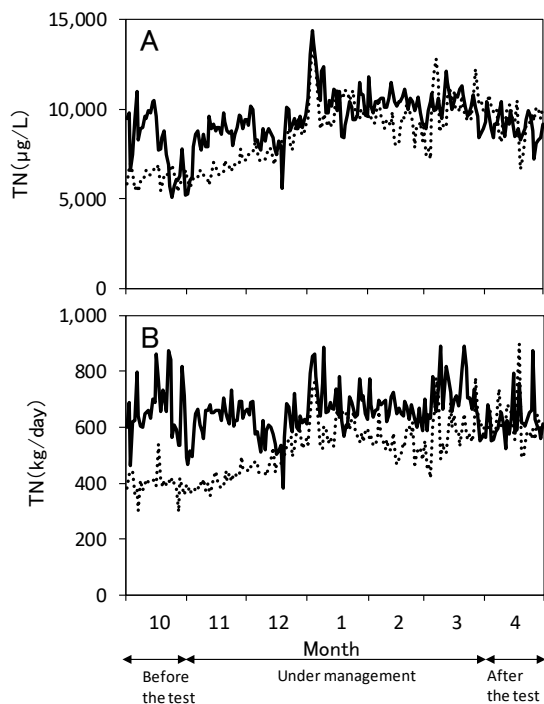


Fig. 13 Time series variations for (A) the concentrations and (B) the amount of TN effluent from the Toyogawa wide area sewage treatment plant. Dotted line represents October 2016 to April 2017. Solid line represents October 2017 to April 2018

年3月の放流水中のTN濃度は日平均9,701 µg/Lで累積負荷量は658.1tであった。前年同時期におけるTN濃度の日平均は8,849 µg/Lで、累積負荷量は529.4tであったことから、試験運転期間中は前年と比べ、平均濃度は1.1倍、累積負荷量は1.2倍となっていた。

**放流口直近の水質**；豊川浄化センターの放流口直近（St.T-1、以下略）におけるTP、PO<sub>4</sub>-Pの濃度およびPO<sub>4</sub>-P/TPの割合の時系列変化をFig.14に示した。試験運転中の平均割合は63.9%であり、試験運転前の10月平均44.3%の1.4倍であった。試験運転後の4月24日はTP、PO<sub>4</sub>-Pとも試験運転中と同程度の濃度であり、PO<sub>4</sub>-P/TPの割合も87.7%と高かった。放流口直近におけるTNおよびDIN（NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N）の濃度、DIN/TNの割合の時系列変化をFig.15に示した。TNは通常運転であるため前年と同程度の負荷量（Fig.13）であり、試験運転中のTNに占めるDINの平均割合は73.0%で、矢作

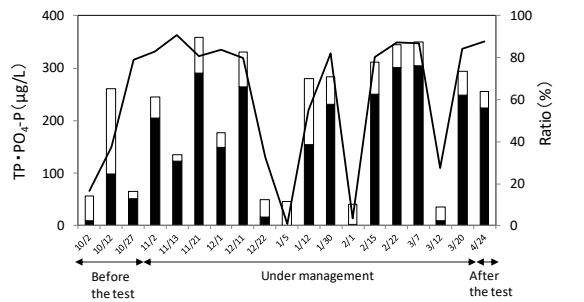


Fig. 14 Time series variations for the TP, PO<sub>4</sub>-P concentrations, and the PO<sub>4</sub>-P/TP ratio at the closest place of discharge port(St.T-1) of the Toyogawa wide area sewage treatment plant. Black and total bars represent the PO<sub>4</sub>-P and TP concentrations, respectively. Solid line represents the PO<sub>4</sub>-P/TP ratio

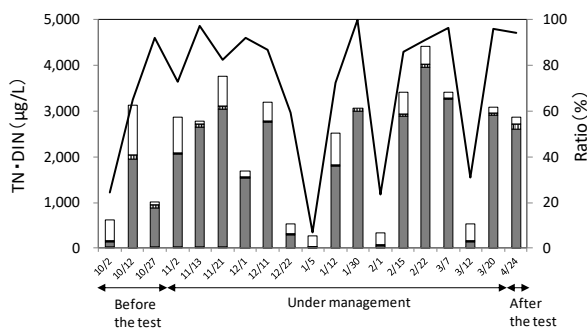


Fig. 15 Time series variations for the TN, DIN concentrations, and the DIN/TN ratio at the closest place of discharge port(St.Y-1) of the Toyogawa wide area sewage treatment plant. Black, gray, stripe and total bars represent the NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NH<sub>4</sub>-N and the TN concentrations, respectively. Solid line represents the DIN/TN ratio

川浄化センターの89.2%より低かった。DINに占める各NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-Nの平均割合は、試験運転前のNO<sub>2</sub>-Nが0.6%、NO<sub>3</sub>-Nが82.2%、NH<sub>4</sub>-Nが17.2%であり、試験運転中のNO<sub>2</sub>-Nが2.5%、NO<sub>3</sub>-Nが90.6%、NH<sub>4</sub>-Nが7.0%であった。また、試験運転後はNO<sub>2</sub>-Nが1.1%、NO<sub>3</sub>-Nが89.5%、NH<sub>4</sub>-Nが9.4%となっていた。NO<sub>3</sub>-Nの割合は試験運転前から平均して8割以上あったが、試験運転中は増加して9割以上になった。

**周辺海域の水質**；TP、PO<sub>4</sub>-P、TNおよびDINの濃度の時系列変化をFig.16に示した。試験運転中のTPの平均

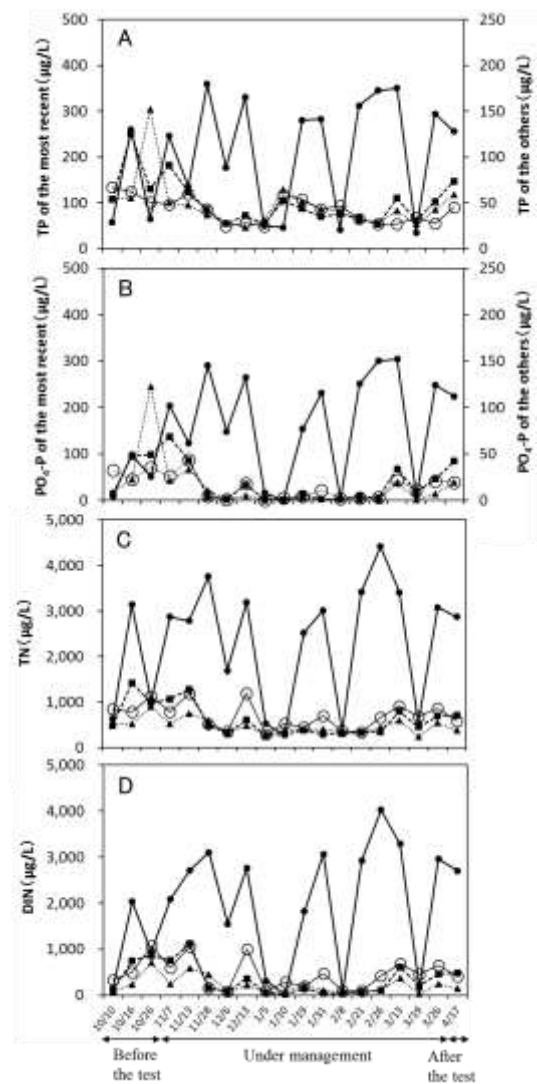


Fig. 16 Time series variations for (A) the TP, (B) the PO<sub>4</sub>-P, (C) the TN and (D) the DIN concentrations at the closest place of discharge port(St.T-1), the around of discharge port(St.T-2~6) of the Toyogawa wide area sewage treatment plant, the Rokujo tidal flats(St.T-8,9) and the Toyogawa river(St.T-7). Solid circles, solid squares, solid triangles and open circles represent the closest place, the around, the Rokujo tidal flats and the Toyogawa river, respectively

濃度は、放流口直近 (St.T-1, 以下略) で 206.5  $\mu\text{g/L}$ , 放流口周辺 (St.T-2~6, 以下略) で 50.9  $\mu\text{g/L}$ , 六条潟 (St.T-8, 9, 以下略) で 47.6  $\mu\text{g/L}$ , 豊川 (St.T-7, 以下略) で 42.1  $\mu\text{g/L}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  の平均濃度は、放流口直近で 169.8  $\mu\text{g/L}$ , 放流口周辺で 14.4  $\mu\text{g/L}$ , 六条潟で 7.0  $\mu\text{g/L}$ , 豊川で 11.5  $\mu\text{g/L}$ , TN の平均濃度は、放流口直近で 2,389  $\mu\text{g/L}$ , 放流口周辺で 526  $\mu\text{g/L}$ , 六条潟で 440  $\mu\text{g/L}$ , 豊川で 654  $\mu\text{g/L}$  であった。また、試験運転中の DIN の平均濃度は、放流口直近で 2,059  $\mu\text{g/L}$ , 放流口周辺で 284  $\mu\text{g/L}$ , 六条潟で 195  $\mu\text{g/L}$ , 豊川で 422  $\mu\text{g/L}$  であった。

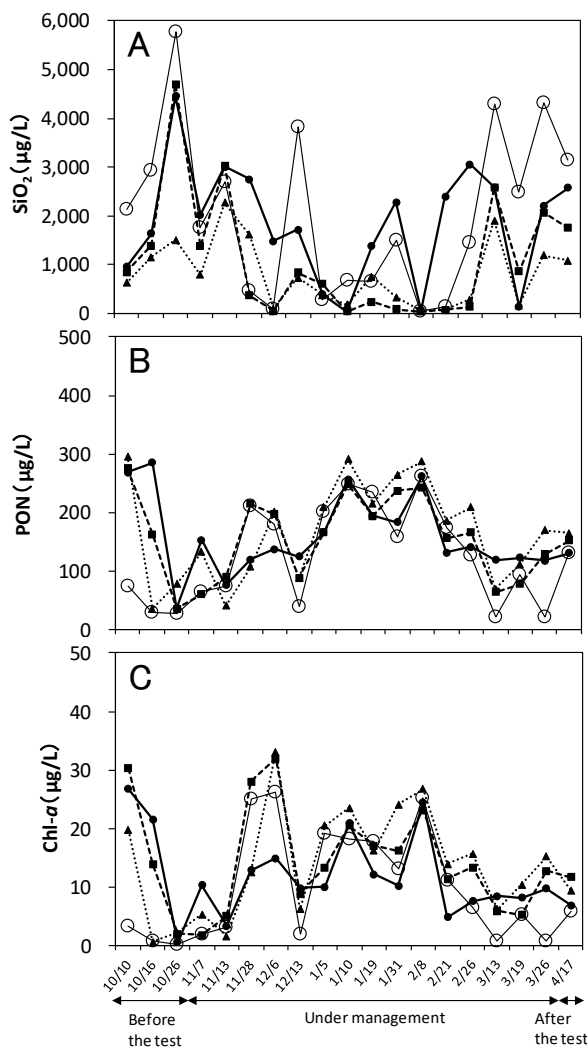


Fig. 17 Time series variations for (A) the  $\text{SiO}_2$ , (B) PON and (C) Chl-*a* concentrations at the closest place of discharge port (St.T-1), the around of discharge port (St.T-2~6) of the Toyogawa wide area sewage treatment plant, the Rokujo tidal flats (St.T-8,9) and the Toyogawa river (St.T-7). Solid circles, solid squares, solid triangles and open circles represent the closest place, the around, the Rokujo tidal flats and the Toyogawa river, respectively

$\text{SiO}_2$ , PON およびクロロフィル *a* の濃度の時系列変化を Fig.17 に示した。試験運転中の  $\text{SiO}_2$  の平均濃度は、放流口直近で 1,704  $\mu\text{g/L}$ , 放流口周辺で 826  $\mu\text{g/L}$ , 六条潟で 722  $\mu\text{g/L}$ , 豊川で 1,649  $\mu\text{g/L}$ , PON の平均濃度は、放流口直近で 154  $\mu\text{g/L}$ , 放流口周辺で 155  $\mu\text{g/L}$ , 六条潟で 172  $\mu\text{g/L}$ , 豊川で 141  $\mu\text{g/L}$ , クロロフィル *a* の平均濃度は、放流口直近で 11.2  $\mu\text{g/L}$ , 放流口周辺で 14.3  $\mu\text{g/L}$ , 六条潟で 15.4  $\mu\text{g/L}$ , 豊川で 11.7  $\mu\text{g/L}$  であった。

**水質の水平分布** ;  $\text{PO}_4\text{-P}$ , DIN, クロロフィル *a* および  $\text{SiO}_2$  の各月の水平分布を Fig.18, 19, 20 および 21 に示した。試験運転中の  $\text{PO}_4\text{-P}$  は放流口を中心とした同心円状に濃度勾配が見られた。50  $\mu\text{g/L}$  までの明瞭な濃度勾配は、放流口周辺の測点内に収まっていた。DIN は  $\text{PO}_4\text{-P}$  と同様な濃度勾配を示したが、12月13日や3月13日のように六条潟では豊川から河川水の影響を受ける日も認められた。クロロフィル *a* は11月28日や3月13日など St.T-6 の濃度が高かった場合には、St.T-6 から六条潟に向けて濃度が拡散している傾向が見られた。 $\text{SiO}_2$  は12月13日や3月13日のように豊川の濃度が高い日が認められた。また、11月28日, 12月13日, 1月19日, 2月21日など St.T-6 の濃度が低い日があった。Table.2 に細胞密度が 2,000 cells/mL 以上となった植物プランクトン種を示した。10月10日は *Skeletonema* spp. が, 11月13日は小型鞭毛藻類がそれぞれ優占種となっていた。11月28日および12月6日は *Chaetoceros* spp. と *Skeletonema* spp. が優占していた。1月5日, 19日, 31日, 2月8日および26日は *Chaetoceros* spp. が優占種となっていた。4月17日は小型鞭毛藻類が優占していた。

Table 2 Dominant of phytoplankton around the Toyogawa wide area sewage treatment plant

Month/day	St.	cells/mL		
		Small flagellate	<i>Chaetoceros</i> spp.	<i>Skeletonema</i> spp.
10/10	2	2,500		4,575
	6			2,438
11/13	2	2,750		
	2		3,080	4,270
11/28	7		2,060	
	8		2,450	
	8		2,200	2,490
1/5	2		3,550	
	7		8,100	
	8		12,450	
1/19	2		6,500	
	7		13,400	
	8		5,650	
1/31	2		3,575	
	7		6,800	
	8		4,875	
2/8	2		6,550	
	7		2,600	
	8		2,267	
2/26	2		3,530	
4/17	2	8,900		



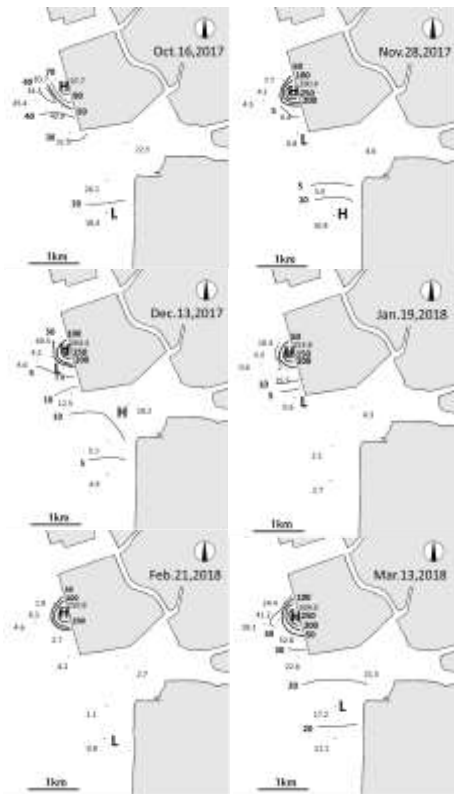


Fig. 18 Horizontal distributions of the  $\text{PO}_4\text{-P}$  concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) in the surface water taken in the Toyogawa area between October 2017 and March 2018

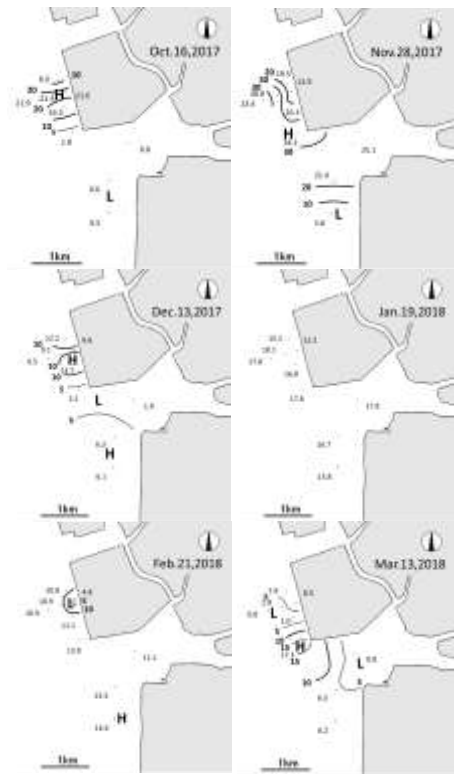


Fig. 20 Horizontal distributions of the  $\text{Chl-}a$  concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) in the surface water taken in the Toyogawa area between October 2017 and March 2018

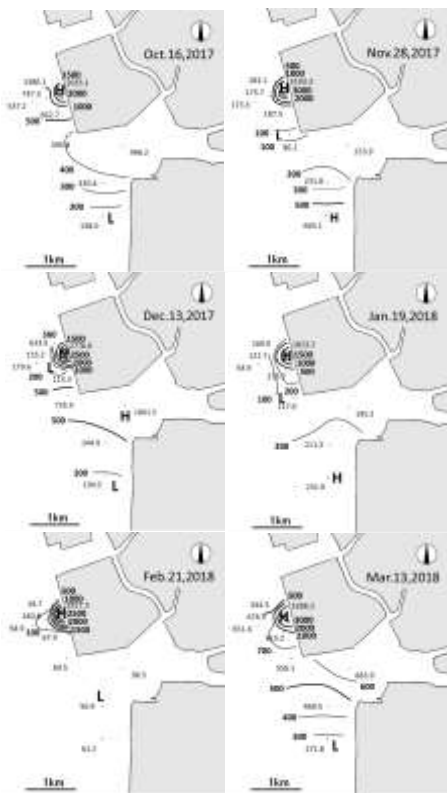


Fig. 19 Horizontal distributions of the  $\text{DIN}$  concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) in the surface water taken in the Toyogawa area between October 2017 and March 2018

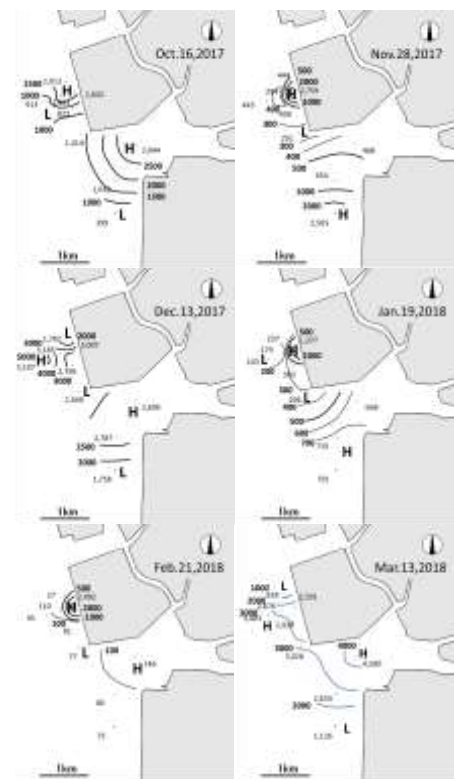


Fig. 21 Horizontal distributions of the  $\text{SiO}_2$  concentrations ( $\mu\text{g/L}$ ) in the surface water taken in the Toyogawa area between October 2017 and March 2018

## 考 察

Fig.8, 9 および 11 に示した矢作川浄化センターから放流された  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{DIN}$  および  $\text{SiO}_2$  の濃度勾配は、放流口周辺および南側に向けて高濃度の範囲が広がり、漁場の St.Y-7 が他の測点より濃度が低い傾向にあった。また、クロロフィル  $a$  は、St.Y-7 が高い傾向にあり、St.Y-8, 9 および 10 と放流口から遠ざかるに従って低くなっていた (Fig.10)。植物プランクトンは St.Y-7 で、1 月 12 日に *Skeletonema* spp. が 2,200cells/mL, 1 月 30 日に *Chaetoceros* spp. が 2,710cells/mL の細胞密度で発生していた (Table.1)。したがって、St.Y-7 では放流口から供給された栄養塩を基に植物プランクトンが増殖しており、管理運転の 1 つの効用になると考えられた。

試験運転中 TP の増加放流時に、TP に占める  $\text{PO}_4\text{-P}$  の割合が高いことが認められた。これは、リンを除去するために添加される凝集剤<sup>5)</sup>を減らしたため、リン酸態リンが増加して割合が変化したものと考えられた。 $\text{PO}_4\text{-P}$  は、ノリや植物プランクトンが吸収して生命活動に利用できることから、試験運転が海域の一次生産向上に貢献していたと推測された。矢作川地区の N/P 比を Fig.22 に示した。試験運転中の N/P 比の平均は、 $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{TN}/\text{TP}$  それぞれ、放流口直近が 32.5 および 26.2、放流口周辺が

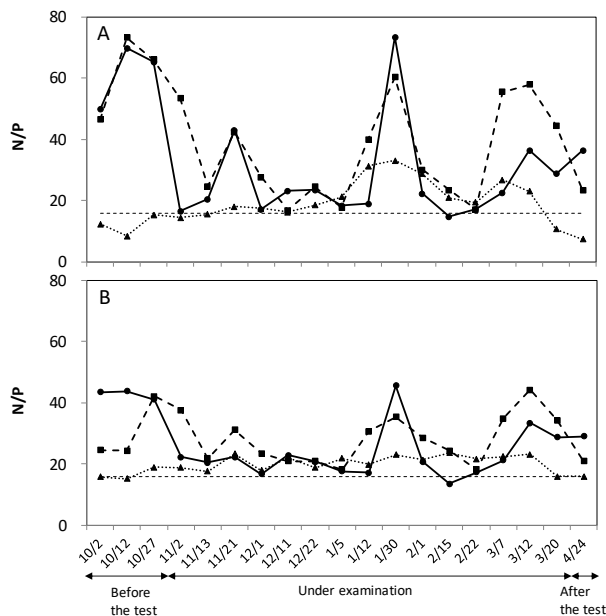


Fig. 22 Time series variations for (A) the  $\text{DIN}/\text{PO}_4\text{-P}$  and (B)  $\text{TN}/\text{TP}$  at the closest place to discharge port (St.Y-1) and the around of discharge port (St.Y-2~6) of Yahagigawa wide area sewage treatment plant, and fishing grounds (St.Y-7,8,9,10). Solid circles, solid squares, solid triangles represent the closest place, the around, and the fishing grounds, respectively. Dotted straight line represents that the N:P ratio is 16

39.2 および 28.2、漁場が 18.9 および 19.2 であった。このように、漁場では植物プランクトンの生長に必要なとされるレッドフィールド比 16<sup>6)</sup>に近い値であり、窒素、リンのバランスは取れていたが、放流口直近や放流口周辺ではレッドフィールド比を上回りリンが不足していた。浄化センターからは、バランスのよくレッドフィールド比で放流されることが望ましい。そのためには、排水基準濃度の制限はあるが、放流水のリンの濃度を上昇させる必要がある。さらに、1 月 12 日から 2 月 22 日には漁場の  $\text{PO}_4\text{-P}$  が品質のよいノリを生産できるとされる  $10 \mu\text{g/L}$ <sup>7)</sup>を下回り (Fig.6),  $\text{DIN}$ についても 1 月 30 日から 2 月 22 日は品質のよいノリを生産できるとされる  $100 \mu\text{g/L}$ <sup>7)</sup>を下回った (Fig.6) ことから、これらの期間においてはノリの生産に必要なとされるリンや窒素が不足していた。また、Fig.7 に示したように、10 月 27 日から 12 月 11 日にかけては、漁場のクロロフィル  $a$  はそれ以外の時期と比べて低かった。2014 年から 2017 年の 9 月から 11 月には餌料不足によりアサリの減耗が起きた可能性がある。<sup>8)</sup>したがって、秋季の早い時期から浄化センターによる栄養塩管理を実施して、アサリの主要な餌料とされる植物プランクトンの量を示すクロロフィル  $a$  についても動向を注視する必要がある。矢作川地区の  $\text{DSi}/\text{DIN}$  比を Fig.23 に示した。試験運転中の  $\text{DSi}/\text{DIN}$  比の平均は、放流口直近が 0.57、放流口周辺が 0.94、漁場が 0.67 であった。このように、矢作川地区全体で珪藻類の生長に必要なとされる  $\text{DSi}/\text{DIN}$  比 1<sup>9)</sup>を下回っており、ケイ酸不足となっていた。また、矢作川の河口から 12km 上流の地点では冬季の低水温期には最低値 0.74 と

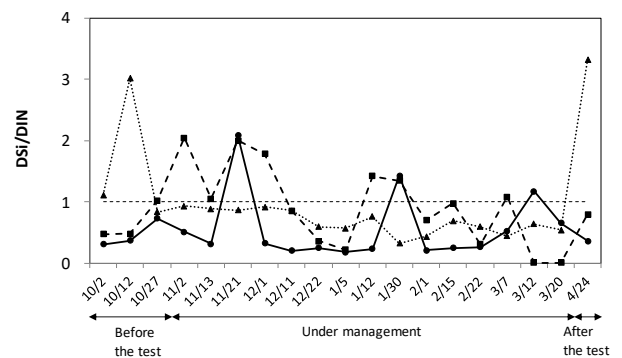


Fig. 23 Time series variations for the  $\text{DSi}/\text{DIN}$  at the closest place of discharge port (St.Y-1) and the around of discharge port (St.Y-2~6) of Yahagigawa wide area sewage treatment plant, and fishing grounds (St.Y-7,8,9,10). Solid circles, solid squares, solid triangles represent the closest place, the around, and the fishing grounds, respectively. Dotted straight line represents that the  $\text{DSi}:\text{DIN}$  ratio is 1

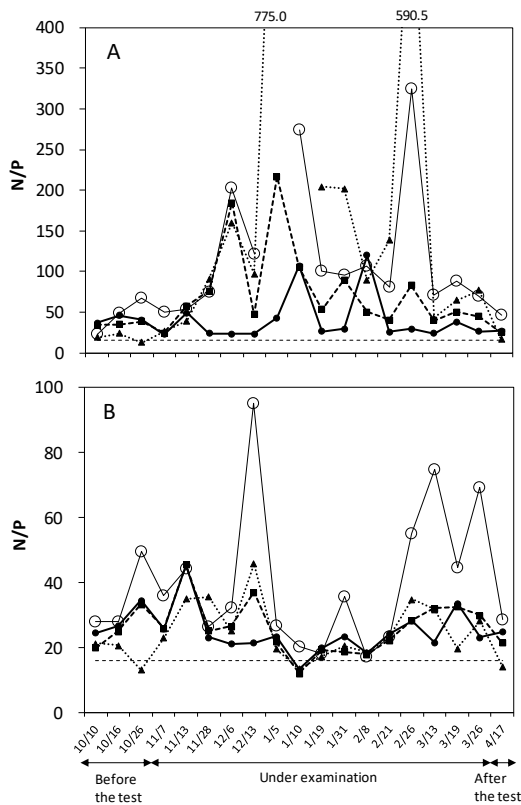


Fig. 24 Time series variations for (A) the DIN/PO<sub>4</sub>-P and (B) TN/TP at the closest place of discharge port(St.T-1) and the around of discharge port(St.T-2~6) of Toyogawa wide area sewage treatment plant, the Rokujo tidal flats(St.T-8,9) and the Toyogawa river(St.T-7). Solid circles, solid squares, solid triangles and open circles represent the closest place, the around, the Rokujo tidal flats and the Toyogawa river, respectively. Dotted straight line represents that the N:P ratio is 16

DSi/DIN 比が低くなる傾向にあり、梅雨前にかけて流量の増加にともなって DSi/DIN 比が緩やかに増加することが認められている。<sup>10)</sup> 11月21日~1月5日は河川よりも浄化センター放流口直近のケイ酸の濃度が継続して高かった (Fig.7) ことから、冬季渇水期には浄化センターからのケイ酸の放流が有効であることが示された。

Fig.18 および 19 に示した豊川浄化センターの PO<sub>4</sub>-P および DIN の濃度勾配では、放流口から周辺に同心円状に拡散していたが、St.T-6 付近では周辺よりも低い濃度が認められた。SiO<sub>2</sub> は放流口周辺と豊川の河川水に高濃度の範囲が認められたが、St.T-6 で濃度が低い傾向にあった (Fig.21)。また、クロロフィル *a* は、11月28日や3月13日のように St.T-6 で高いことがあり、六条潟への波及も見られた (Fig.20)。したがって、St.T-6 では放流口から供給された栄養塩を基に植物プランクトンが増殖し

ており、管理運転の1つの効用になると考えられた。また、六条潟 (St.T-8, 9) では、クロロフィル *a* の平均濃度が、放流口直近、放流口周辺および豊川より高かった (Fig.20)。St.T-8 では、11月28日、12月6日や1月5日から2月8日にかけては *Chaetoceros* spp. が、12月6日は *Skeletonema* spp. が共に 2,000 cells/mL 以上の細胞密度で発生していた (Table.2)。よって、六条潟はアサリにとって周辺よりも良い餌料環境にあると考えられた。

豊川浄化センターにおいても、試験運転中の PO<sub>4</sub>-P/TP は試験運転前の平均 44.3% から平均 63.9% に増加していた。これは、矢作川浄化センターと同様にリンを除去するために添加される凝集剤<sup>5)</sup> を減らしたことでリン酸態リンが増加したことにより割合が変化したものと考えられた。しかし、試験運転前が平均 44.0%、試験運転中が平均 82.0% であった矢作川浄化センターに比べると PO<sub>4</sub>-P/TP の増加割合は低かった。これは、豊川浄化センターでは、矢作川浄化センターで実施されている凝集剤添加後に処理水を砂ろ過すること<sup>5)</sup> が行われていないため、試験運転前から矢作川浄化センターよりも懸濁態リンに起因する TP の濃度が高いことが影響していると考えられた。放流水の N/P 比を Fig.24 に示した。N/P 比の平均は、DIN/PO<sub>4</sub>-P、TN/TP それぞれ、放流口直近が 39.9 および 25.1、放流口周辺が 68.2 および 26.0、六条潟が 148.2 および 24.3、豊川が 105.4 および 39.7 であった。豊川地区では全体に植物プランクトンに必要とされるレッドフィールド比の 16 を上回り、リンが窒素よりも不足している状態にあった。特に、六条潟の植物プランクトンの増殖に関してはリンが制限要因となっていることが推察された。浄化センターからは、本来バランスのよくレッドフィールド比で放流されることが望ましい。そのため、排水基準濃度の制限はあるが、放流水のリンの濃度を上昇させる必要がある。こうした状況下、Fig.17 に示したように、六条潟では、10月16日から11月13日にかけて、それ以外の観測日よりクロロフィル *a* の値が著しく低かった。また、St.T-8 のアサリ稚貝は、9月から11月にかけて生息密度が減少し、かつ減耗が起きるとされている肥満度 12 以下になっていた<sup>11)</sup> ことから、植物プランクトンが減少してアサリの餌料不足が起きていた可能性が示唆された。したがって、秋季の早い時期から下水道による栄養塩管理を実施して、アサリの主要な餌料とされる植物プランクトンの量を示すクロロフィル *a* についても動向を注視する必要がある。豊川地区の DSi/DIN 比を Fig.25 に示した。試験運転中の DSi/DIN 比の平均は、放流口直近が 0.23、放流口周辺が 0.65、豊川が 0.77、六条潟が 0.78 であった。このように、豊川地区

では珪藻類の生長に必要とされる DSi/DIN 比 1<sup>9)</sup> を下回っており、ケイ酸不足となっていた。特に、11~2 月は 1 月 5 日を除き DSi/DIN 比 1 を下回っていた。11 月 28 日~2 月 26 日は断続的ではあるが豊川よりも浄化センター放流口直近のケイ酸の濃度が高かった (Fig.17)。このことから、冬季渇水期には浄化センターからのケイ酸の放流が有効であることが示された。

矢作川浄化センターおよび豊川浄化センターはともに 1 級河川の河口に位置し、浄化センターから放流された処理水の TP および TN は河川水の TP および TN と混合して周辺海域に供給されている。周辺海域に供給される TP および TN について浄化センターと河川水の負荷割合を評価するため、河川水の TP および TN の負荷量を次の通り求めた。河川水の TP および TN の濃度は、矢作川については月別に St.Y-2 に河川水の影響が一番大きい観測日に、安定して塩分が高い St.Y-7 に対する St.Y-2 の塩分比率から海水混合率を算定し、St.Y-2 の TP および TN の濃度とこの海水混合率から求めた。豊川についても同様の方法で、St.T-3 に対する St.T-7 の塩分比率から河川水の TP および TN の濃度を求めた。河川流量は矢作川については西尾市米津橋観測点のデータ<sup>12)</sup>、豊川については豊橋市当古観測点のデータ<sup>12)</sup>のうち 2006~2016 年度の各年度 10~4 月の値を用いてそれぞれ 10 年間平均値を

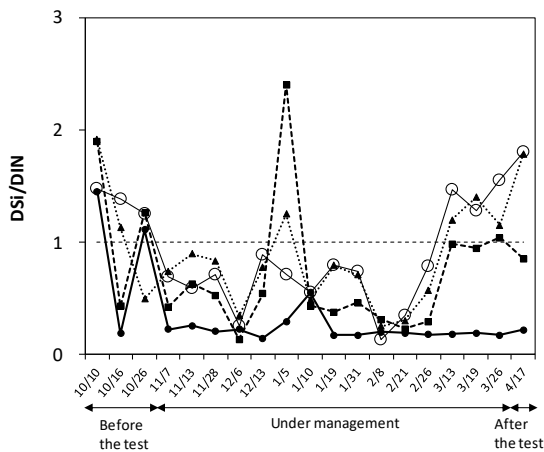


Fig. 25 Time series variations for the DSi/DIN at the closest place of discharge port(St.T-1) and the around of discharge port(St.T-2~6) at Toyogawa wide area sewage treatment plant, the Rokujo tidal flats(St.T-8,9) and the Toyogawa river(St.T-7). Solid circles, solid squares, solid triangles and open circles represent the closest place, the around, the Rokujo tidal flats and the Toyogawa river, respectively. Dotted straight line represents that the DSi:DIN ratio is 1

求め、河川の TP および TN の濃度に乗じて負荷量を算出した。河川および浄化センターからの TP および TN 負荷量について、矢作川地区を Table.3 に豊川地区を Table.4 にそれぞれ示した。試験運転前においては、矢作川地区では河川水 TP 負荷量に対して浄化センターからの TP 負荷量は 0.47 倍、豊川地区では 0.24 倍であったのに対し、試験運転中は矢作川地区では 0.75~1.68 倍、豊川地区では 0.09~1.28 倍であった。特に河川水の流量が減少する 12~2 月の矢作川地区では 1.01~1.68 倍、12 月の豊川地区では 1.28 倍となっており、浄化センターからの TP 負荷量は河川水の TP 負荷量を大きく上回っていた。また、試験運転前においては、矢作川地区では河川水 TN 負荷量に対して浄化センターからの TN 負荷量は 0.33 倍、豊川地区では 0.17 倍であったのに対し、試験運転中は矢作

Table 3 Monthly average river flow between October and April from 2006 to 2016, the estimated concentrations and the amount of TP and TN in the Yahagigawa river and the amount of effluent TP and TN produced by the Yahagigawa wide area sewage treatment plant from October 2017 to April 2018

Season	Month	Monthly river flow (m <sup>3</sup> )	Water quality list	River concentration (μg/L)	River load A (kg)	Sewer load B (kg)	B/A
Before the test	10	142,120,656	TP	35.3	5,017	2,350	0.47
			TN	810.5	115,189	37,737	0.33
Under management	11	95,004,443	TP	44.2	4,199	3,840	0.91
			TN	837.8	79,595	35,056	0.44
	12	65,078,748	TP	57.8	3,762	5,351	1.42
			TN	860.9	56,026	43,003	0.77
	1	53,672,083	TP	87.7	4,707	4,736	1.01
			TN	1,452.4	77,953	44,952	0.58
2	67,981,014	TP	41.6	2,828	4,741	1.68	
		TN	876.0	59,551	41,582	0.70	
3	124,675,643	TP	57.4	7,156	5,348	0.75	
		TN	1,264.3	157,627	45,705	0.29	
After the test	4	119,261,984	TP	1,159.3	138,260	2,763	0.02
			TN	11,822.4	1,409,963	43,869	0.03

Table 4 Monthly average river flow between October and April from 2006 to 2016, the estimated concentrations and the amount of TP and TN in the Toyogawa river and the amount of effluent TP and TN produced by the Toyogawa wide area sewage treatment plant from October 2017 to April 2018

Season	Month	Monthly river flow (m <sup>3</sup> )	Water quality list	River concentration (μg/L)	River load A (kg)	Sewer load B (kg)	B/A
Before the test	10	89,420,047	TP	59.6	5,329	1,283	0.24
			TN	1,338.3	119,671	20,588	0.17
Under management	11	54,392,148	TP	290.6	15,806	1,495	0.09
			TN	4,745.2	258,102	18,932	0.07
	12	32,032,638	TP	41.5	1,329	1,706	1.28
			TN	1,785.0	57,178	18,419	0.32
	1	21,295,724	TP	162.8	3,467	1,743	0.50
			TN	2,628.0	55,965	21,613	0.39
2	39,354,318	TP	241.5	9,504	1,502	0.16	
		TN	5,999.9	236,122	18,616	0.08	
3	65,033,906	TP	83.4	5,424	1,733	0.32	
		TN	1,685.3	109,602	21,786	0.20	
After the test	4	71,159,944	TP	75.2	5,351	1,061	0.20
			TN	972.1	69,175	18,767	0.27

川地区では0.29~0.77倍、豊川地区では0.07~0.39倍であった。特に河川水の流量が減少する11~2月の矢作川地区では0.44~0.77倍、12、1月の豊川地区では0.32、0.39倍となっており、試験運転前の倍率を上回っていた。

浄化センターから供給されるリンは植物プランクトンが利用しやすいリン酸態リンの割合が高く、また渇水時には河川水よりも負荷量が多いことから、浄化センターから供給されるリンは冬季の海域の生物生産に大きな影響を与えていると考えられた。しかし、放流水の窒素およびリンのバランスはリン不足の状態にある。浄化センターの周辺海域では、管理運転でリンが供給されることにより、リン不足が少し緩和されたが、まだリン制限の状態にある。よって、今後はますますリン管理運転が重要になってくると考えられた。また、現状では植物プランクトンの発生量が少なく餌不足によるアサリなどの資源量が減少している可能性もあることから、より高い生物生産力が得られるスケールでリンや窒素が供給されることが求められ、今後は高い次元での生物収支となるべく浄化センターでの処理水管理について検討が必要とされる。

## 要 約

三河湾沿岸に立地する広域流域下水道の矢作川および豊川浄化センターが、2017年11月から2018年3月に試験的に実施したリン増加運転が、地先海域の水質へ与えた影響を調査した。主な影響を以下に示した。

- ・増加運転期間中の放流水の日平均リン濃度は、前年同時期と比べて矢作川浄化センターでは3.8倍、豊川浄化センターでは1.8倍であった。
- ・増加運転期間中の放流水のリン累積負荷量は、前年同時期と比べて矢作川浄化センターでは4.1倍、豊川浄化センターでは2.0倍であった。
- ・全リンに占めるリン酸態リンの割合は、矢作川浄化センターでは試験前の44.0%より高い82.0%、豊川浄化センターでは試験前の44.3%より高い63.0%であり、ノリや植物プランクトンが吸収できるリン酸態リンの供給量が大幅に増加した。
- ・浄化センターの月別リン負荷量の最大は、矢作川地区では矢作川の1.7倍、豊川地区では豊川の1.3倍と試算された。
- ・冬季渇水期には、矢作川および豊川各浄化センター放流口直近のケイ酸の濃度が矢作川および豊川の濃度を上回っており、浄化センターは珪藻類の生長に必要なケイ酸の供給に寄与していた。
- ・矢作川および豊川各地区ともに放流水の流路の脇にお

いて、リン、窒素およびケイ酸の濃度が低く、クロロフィル $a$ の濃度が高い海域が観測され、そこで栄養塩類を吸収して増殖した珪藻類が漁場や六条潟へ波及している状況が認められた。

## 謝 辞

愛知県建設部下水道課には、浄化センターのデータを提供していただいた。また、愛知県水産試験場、東三河および西三河の農林水産事務所水産課の職員、西三河漁業協同組合栄生支所には調査に協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) 曾根亮太・蒲原 聡・鈴木輝明(2016) 内湾環境の現状とより豊かな海とするための課題. 月刊下水道, 39(3), 22-28.
- 2) 蒲原 聡・高須雄二・湯口真実・美馬紀子・天野 慎也 (2018) 三河湾における栄養塩の低下. 愛知水試研報, 23, 30-32.
- 3) 国土交通省下水道部(平成27年9月) 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). <http://www.mlit.go.jp/common/001105127.pdf> (2018.11.13).
- 4) 原田和弘・阿保勝之・川崎周作・竹迫史裕・宮原一隆(2018) 港湾水および下水処理放流水に含まれる溶存態無機窒素が播磨灘北東部沿岸のノリ漁場に与える影響. 水産海洋研究, 82(1), 26-35.
- 5) 愛知県,(公財)愛知水と緑の公社(2015.5) 矢作川流域下水道.
- 6) 田口 哲(2016) -総説-レッドフィールド比:研究の歴史と現状. 今後の展望. 海の研究, 25(4), 123-132.
- 7) 愛知県水産試験場(2003) ノリ養殖テキスト.
- 8) 蒲原 聡・芝 修一・市川哲也・鈴木輝明(2018) 伊勢・三河湾のアサリ増殖環境, 月刊海洋, 574, 406-414.
- 9) Brzezinski, M.A. (1985) The Si:C:N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environmental variables. J. Phycol. 21.347-357.
- 10) 児玉真史・田中勝久・沢田知希・都築 基・山本有司・柳澤豊重(2006) 矢作川下流におけるDSi:DIN比の変動要因, 水環境学会誌, 29, 2, 93-99.
- 11) 鈴木智博・宮脇 大・石田俊朗(2019) 人工生態系機能高度化技術開発試験, 愛知水試業務報告, 68-69.
- 12) 国交省, 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp>(2018.11.3).