

【短報】

下水処理施設における栄養塩管理運転が 今切川河口周辺海域の水質に及ぼす影響

徳島県立保健製薬環境センター

浅川 愛・酒池 遼^{*1}・管生 伸矢^{*2}・中石 明希^{*2}

Effects of Nutrient Management Operation at Sewage Treatment Plant
on Surface Water in the Sea Around the Imagire River Estuary

Ai ASAKAWA, Ryo SAKAIKE, Shinya SUGAOI, and Aki NAKAISHI

Tokushima Prefectural Public Health, Pharmaceutical and Environmental Sciences Center

要 旨

近年、瀬戸内海では、栄養塩濃度の低下に伴う養殖ノリの色落ち等が問題となっている。その対策として、本県では、2016年度から旧吉野川浄化センターにおいて窒素放流量を増加させる管理運転を試行している。本研究では、管理運転による窒素供給効果及び水質汚濁に係る影響について調査した。その結果、管理運転により、溶存態無機窒素（以下「DIN」という。）濃度は放流口近傍において上昇がみられたものの、その範囲は限定的であった。また、旧吉野川浄化センター周辺海域における化学的酸素要求量（以下「COD」という。）は通常運転時と管理運転時とで差異はみられなかった。さらに、近傍の常時監視地点における全窒素（以下「TN」という。）濃度及び COD は、管理運転開始前（2011-2015年度）と開始後（2016-2019年度）とで有意な差はみられず、水質汚濁に係る影響は確認できなかった。

Key words : 栄養塩管理運転 nutrient management operation, 下水処理施設 sewage treatment plant, 今切川 Imagire river, 河口域 estuary

I はじめに

かつて「瀬死の海」と呼ばれるほど富栄養化が進行していた瀬戸内海は、1970年代以降の水質規制の強化に伴い陸域からの負荷が減少したことにより、水質は改善し、赤潮の発生は減少した^{1,2)}。しかし一方で、イワシやイカナゴ等の漁獲量の減少³⁾や、養殖ノリの色落ちが発生する⁴⁾など、以前とは異なる漁業被害が生じている。本県においても同様の状

況であり⁵⁾、特に、アマノリや、全国第3位の生産量を誇るワカメの色落ちが頻発している⁶⁾。漁獲量の減少については複数の要因が関係していると考えられるものの、これらの漁業被害の原因として、栄養塩、特にDIN濃度の低下が指摘されている⁷⁾。

こうした状況を受け、2015年に改正された瀬戸内海環境保全特別措置法では、「瀬戸内海の環境保全」について、水質が良好な状態で保全されるとともに、生物の多様性及び生産性が確保されるなど、「豊かな海」とすることが明確にされ

^{*1} 現 キオクシア株式会社

^{*2} 現 環境管理課

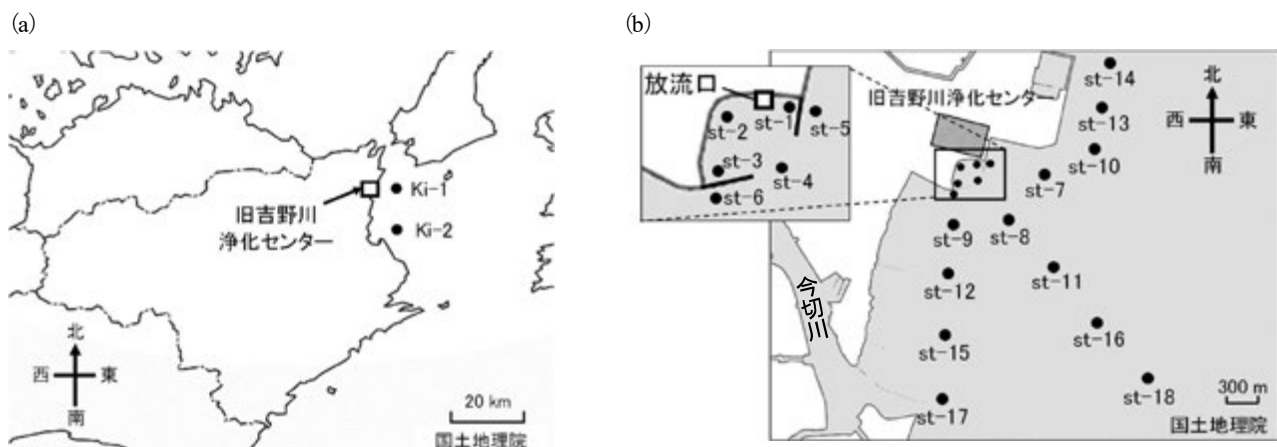


図1 旧吉野川浄化センターの位置及び常時監視地点 (a) と周辺海域における調査地点 (b)

た。また、2021 年の改正では、関係府県知事が栄養塩類の管理に関する計画を策定できる制度が創設され、周辺環境の保全と調和した形での特定の海域への栄養塩供給が可能となるなど、「豊かな海」を実現するために、海域ごとの実情に応じた栄養塩管理が課題となっている。

海域の貧栄養化対策の一つとして、下水処理場における「栄養塩管理運転（以下「管理運転」という。）」がある。これは、下水処理場において維持管理レベルで処理方法を変更することにより、窒素やりん、すなわち栄養塩の放流量を排水基準内で意図的に増加、もしくは減少させる運転のことである⁸⁾。これまで、瀬戸内海や有明海を中心に実施されており、ノリ養殖において一定の効果が確認されている⁹⁾。本県においても、2016 年度から旧吉野川浄化センター（アクアきらら月見ヶ丘）において、窒素の放流量を増加させる管理運転の実証実験が行われている。管理運転により、周辺海域の DIN 濃度がどのように変化し、ノリの色落ちに対して有効かどうかを把握する必要があることは言うまでもないが、それと同時に、有機物濃度等の水質汚濁に係る影響についても十分に把握しておく必要がある。

本研究では、通常運転時及び管理運転時における旧吉野川浄化センター周辺海域の DIN 濃度を比較することにより、管

理運転の窒素供給効果について調査するとともに、周辺海域及び常時監視地点における COD を比較することにより、水質汚濁に係る影響についても調査した。

II 方法

1 調査地点

(1) 旧吉野川浄化センター周辺海域

旧吉野川浄化センターは図 1- (a) に示す徳島県松茂町に位置しており、処理水を紀伊水道に放流している。付近には一級河川である今切川河口や旧吉野川河口があり、周辺海域ではアマノリの養殖が行われている。当該施設では、2016 年度から、毎年度 10 月から 4 月までの間、処理水中の全窒素濃度の目標値を通常（約 9-10 mg/L）より高い 15 mg/L とする管理運転を試行している。通常運転時及び管理運転時における処理水の分析結果、処理水量及び海水混合量を表 1 に示す。なお、処理水は海水を混合した後放流口から放流される。

旧吉野川浄化センター周辺では、図 1- (b) に示す 18 地点において調査を行った。地点番号は放流口から近い順に付番し、st-1 は放流口近傍、st-18 は放流口から約 2.8 km の距離であった。

(2) 常時監視地点

表 1 旧吉野川浄化センターにおける処理水分析結果、処理水量及び海水混合量（県水・環境課提供）

pH	処理水分析結果								処理水量 (m ³ /日)	海水混合量 (m ³ /日)
	COD (mg/L)	全窒素 (mg/L)	亜硝酸態窒素 (mg/L)	硝酸態窒素 (mg/L)	アンモニア態 窒素 (mg/L)	全りん (mg/L)	リン酸態リン (mg/L)			
2017.7	6.8	7.7	9.98	0.066	9.21	0.322	0.51	0.284	4,364	4,360
2018.2	6.4	7.3	14.32	0.071	8.25	0.398	0.24	0.194	4,160	2,243
2018.9*	6.9	6.5	9.35	0.040	8.23	0.187	0.52	0.123	4,950	0
2019.2	6.6	8.5	13.06	0.275	10.79	0.772	0.19	0.160	4,378	4,464
2019.9	6.8	7.9	11.04	0.164	10.00	0.695	0.36	0.190	4,502	5,311
2020.2	6.6	8.0	12.90	0.181	7.30	0.545	0.19	0.142	4,405	4,549

* 台風の影響により海水取水管が埋設したことから海水混合していない。

本県が公共用水域の水質の測定に関する計画に基づき常時監視を行っている環境基準点のうち、旧吉野川浄化センター近傍の2地点（Ki-1及びKi-2、図1-（a））における常時監視データの解析を行った。なお、放流口からこれらの地点までの距離はそれぞれ約6.4km及び約12kmであり、水質環境基準の類型はいずれもAⅡ（COD 2mg/L以下、TN 0.3mg/L以下、全りん 0.03mg/L以下）である。

2 調査期間及び方法

旧吉野川浄化センター周辺海域における調査は、2017年度から2019年度にかけて実施した。各年度において、通常運転時（2017年7月、2018年9月及び2019年9月）及び管理運転時（2018年2月、2019年2月及び2020年2月）にそれぞれ1回ずつ、各調査地点における表層水を採取し、TN、溶存態全窒素（以下「DTN」という。）、亜硝酸態窒素（以下「NO₂-N」という。）、硝酸態窒素（以下「NO₃-N」という。）、アンモニア態窒素（以下「NH₄-N」という。）、DIN、溶存態有機窒素（以下「DON」という。）、粒子状有機窒素（以下「PON」という。）、COD、塩分及びクロロフィルa（以下「Chl-a」という。）について分析した。分析方法は後述のとおりである。

常時監視地点の解析には、管理運転の実証実験が開始される5年前（2011年度）から直近（2019年度）にかけての毎月の表層水のTN濃度及びCODのデータを用いた。なお、TN及びCODの分析方法は後述のとおりである。

3 分析方法

試料は、採水当日に分注及びろ過を行った。なお、TN、COD及び塩分の分析には、ろ過を行わない試料を用いた。

DTN、NO₂-N、NO₃-N及びNH₄-Nは、450℃で4時間焼成した47mm径のガラス繊維ろ紙（Whatman GF/C、孔径1.2μm）を用いて試料を吸引ろ過することで得られたろ液をオートアナライザー（QuAAtro 39、ピーエルテック（株）製）により分析した。DINはNO₂-N、NO₃-N及びNH₄-Nを合計することで算出した。DONはDTNとDINとの差から、PONはTNとDTNとの差からそれぞれ算出した。なお、値がマイナスになる場合はゼロとして取り扱った。

CODは、JIS K 0102 規格17に示された方法により測定した。

塩分の分析には、卓上型塩分計（DIGI-AUTO MODEL-5、（株）鶴見精機製）を使用した。

Chl-aは、450℃で4時間焼成した47mm径のガラス繊維ろ紙（Whatman GF/F、孔径0.7μm）を用いて試料を吸引ろ過した後のろ紙について、海洋観測指針^{10）}に基づき分析した。なお、吸光度の測定には紫外可視分光光度計（UV-2700、（株）島津製作所製）を使用した。

Ⅲ 結果及び考察

1 管理運転による窒素供給効果

（1）通常運転時における窒素動態

通常運転時における旧吉野川浄化センター周辺海域の各態窒素、塩分及びChl-a濃度を図2に示す。なお、これらの値は3回の測定値の平均値であり、エラーバーは標準誤差を表す。DIN（NO₂-N、NO₃-N及びNH₄-Nの合計）濃度は、放流口から最も近いst-1からst-5にかけて緩やかに低下し、st-5からst-9においてはほぼ一定となった。つまり、旧吉野川浄化センターからの放流水は海水中で緩やかに希釈され拡散するが、放流水の影響により濃度の上昇がみられるのは堤防の開口部であるst-4までであり、堤防外には影響が及んでいないと考えられる。その一方で、今切川河口に近いst-11、15、16、17といった地点は、st-1と同等もしくはそれ以上に高濃度であった。これは、それらの地点における塩分濃度が低かったことから、河川水の影響を受けたものと考えられる。DINが0.042mg/L（3μmol/L）を下回るとアマノリの色落ち、0.028mg/L（2μmol/L）を下回るとワカメの色落ちが発生すると言われている^{11）}が、いずれの地点においても、アマノリの色落ち基準である0.042mg/Lを上回った。

（2）管理運転時における窒素動態

管理運転時における旧吉野川浄化センター周辺海域の各態窒素、塩分及びChl-a濃度を図3に示す。なお、これらの値は3回の測定値の平均値であり、エラーバーは標準誤差を表す。DIN濃度はst-1からst-3にかけて急激に低下し、st-3からst-16においてはほぼ一定となった。通常運転時（図2）と比較すると、管理運転時はst-1において約3倍高濃度であったものの、st-2においてはほぼ同値となり、st-3以遠において下回り、st-5以遠のほとんどの地点で0.042mg/L未満となった。つまり、放流水中及びst-1におけるDIN濃度は通常運転時に比べ管理運転時の方が高いにもかかわらず、希釈・拡散による濃度の低下が顕著であり、濃度勾配がみられたのは通常運転時とほぼ同範囲であった。このDIN濃度の急激な濃度低下には、管理運転時、すなわち冬季における海水中DIN濃度の低さが関係していると考えられる。st-5からst-9にかけては通常運転時及び管理運転時ともに各態窒素濃度がほぼ一定であり、放流水や河川水の影響が低いと考えられるが、これらの地点における各態窒素濃度を比較すると、通常運転時に比べて管理運転時の方がPON以外の形態で低値であった一方で、PONのみわずかに高値であるという傾向がみられた。小林ら^{13）}は、播磨灘において、冬季から春季にかけてDINが減少するとともに、PONが上昇すると報告したが、今回の調査結果もこれと同様であった。小林らはまた、この事象の原因として、底泥からのDINの溶出が低温期に入り減少するこ

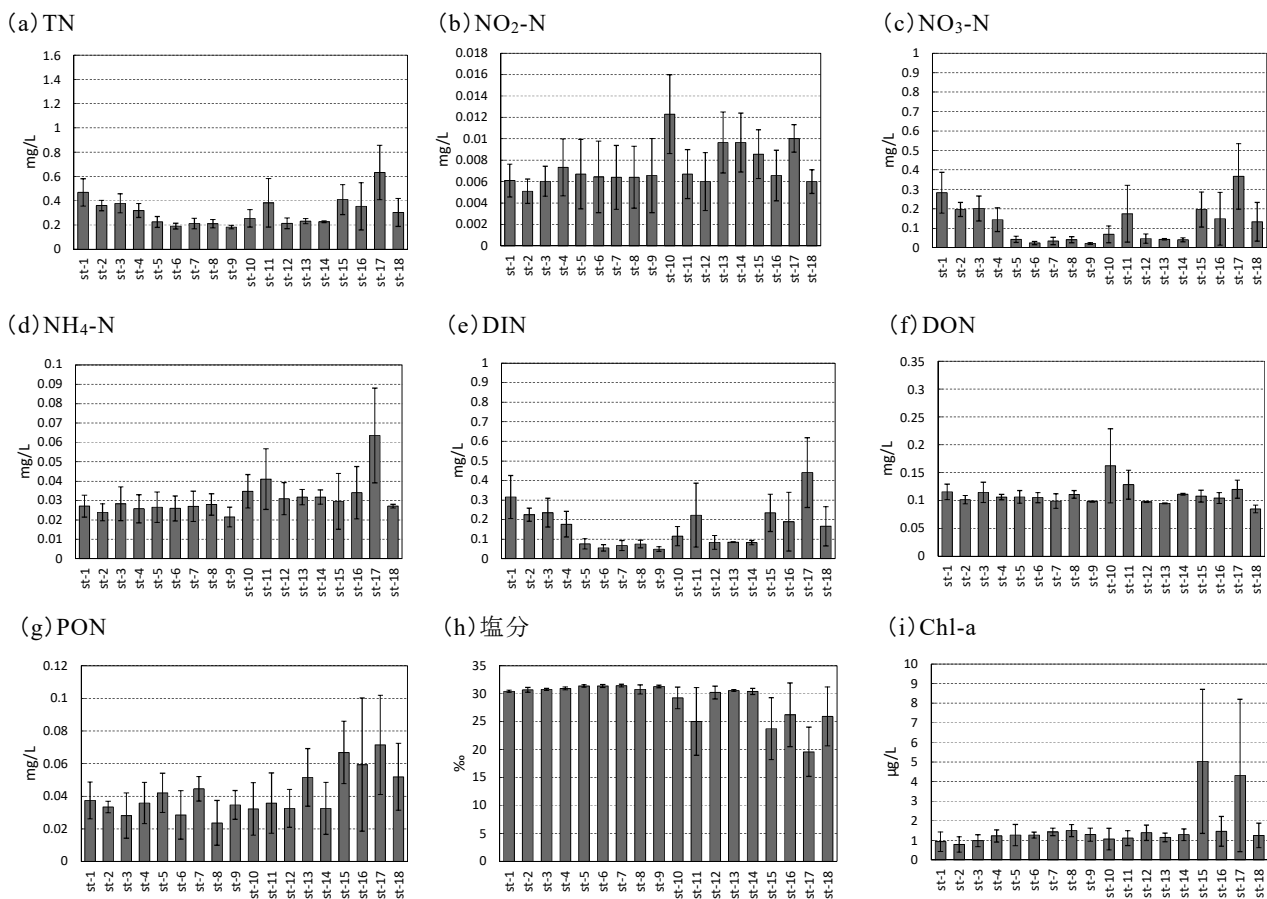


図2 通常運転時における旧吉野川浄化センター周辺海域の各態窒素 (a-g) , 塩分 (h) 及び Chl-a (i) 濃度

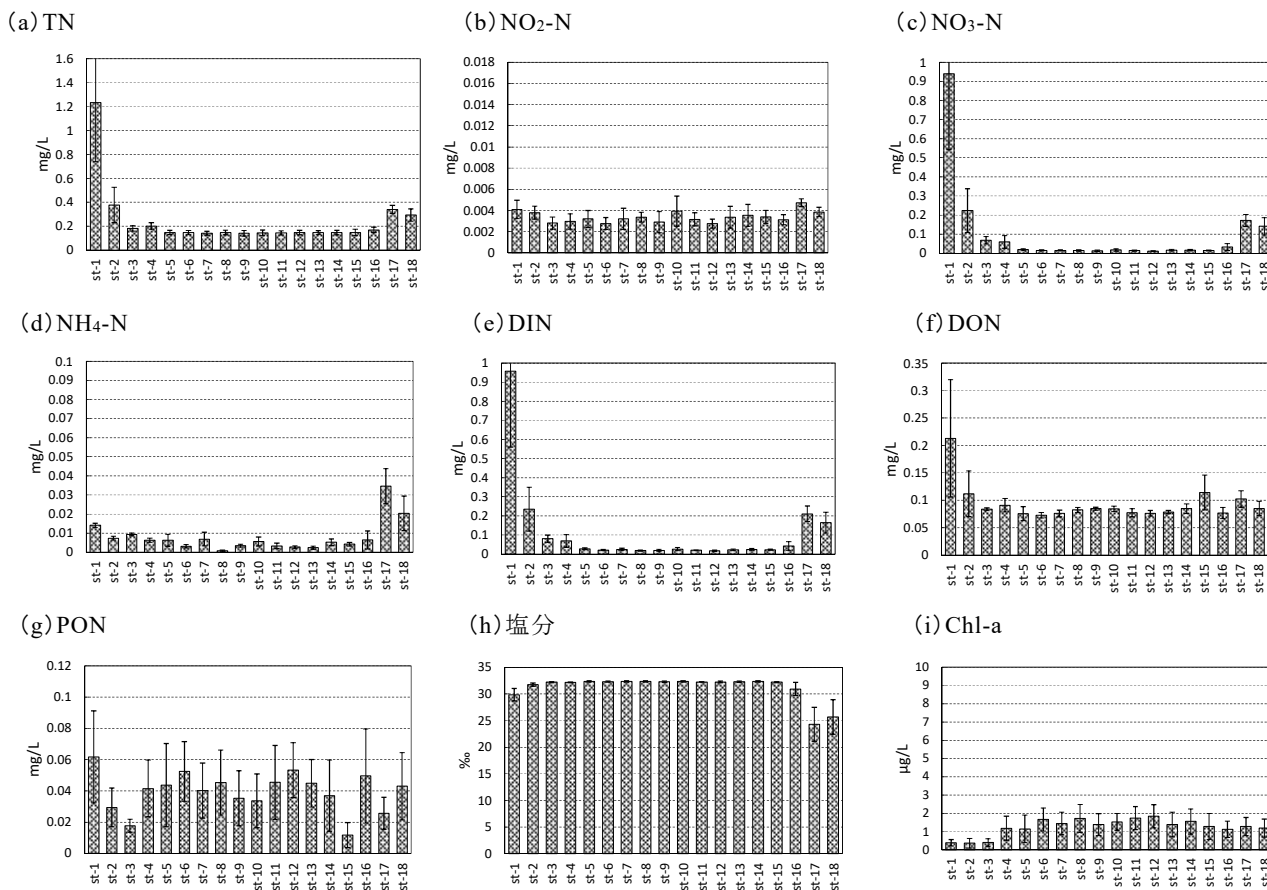


図3 管理運転時における旧吉野川浄化センター周辺海域の各態窒素 (a-g) , 塩分 (h) 及び Chl-a (i) 濃度

とに加え、1 月以降の日射量の増加により植物プランクトンによる栄養塩吸収量が増加するためであると考察している。今回の調査において、管理運転時は通常運転時に比べ放流水中 DIN 濃度が高いにもかかわらず、むしろ周辺海域の DIN 濃度が低かったのは、本来的に冬季は DIN 濃度が低下していることに加え、放流水により供給された DIN は速やかに植物プランクトンに取り込まれるためであると考えられる。しかしながら、今回は通常運転時及び管理運転時ともにそれぞれ 3 回のみの調査であり、一時的な海域の状態を把握したに過ぎない。季節変動や潮向の影響も含めたさらなる調査が求められる。

2 管理運転による水質汚濁に係る影響

(1) 旧吉野川浄化センター周辺海域

管理運転により、放流水に含まれる有機物濃度が上昇する可能性がある上、海水中の窒素濃度上昇に伴う植物プランクトンの増殖等により、波及的に有機物濃度が上昇することも懸念される¹⁴⁾。そこで、管理運転による COD の変化について調査した。旧吉野川浄化センター周辺海域における通常運転時及び管理運転時の COD の比較を図 4 に示す。COD は通常運転時の st-11, 15, 17 といった地点で比較的高値であり、DIN 同様、今切川の河川水の影響を受けていると考えられるが、それ以外では、通常運転時及び管理運転時ともにいずれの地点においてもあまり差はみられなかった。通常運転時及び管理運転時において、DIN は放流口近傍において最も高濃度であり、放流口から遠ざかるに連れ濃度が低下したことは前述したが、COD は放流口近傍においてもほとんど値に変化はみられなかった。つまり、放流水が周辺海域の COD に及ぼす影響は小さく、管理運転による影響も確認されなかった。

(2) 紀伊水道常時監視地点

より広範囲かつ長期的な影響を把握するため、常時監視地点 Ki-1 及び Ki-2 における TN 濃度及び COD について、管理運転の実証実験開始前 5 年間（2011-2015 年度）と開始後 4 年間（2016-2019 年度）における毎月の測定値の平均値を比

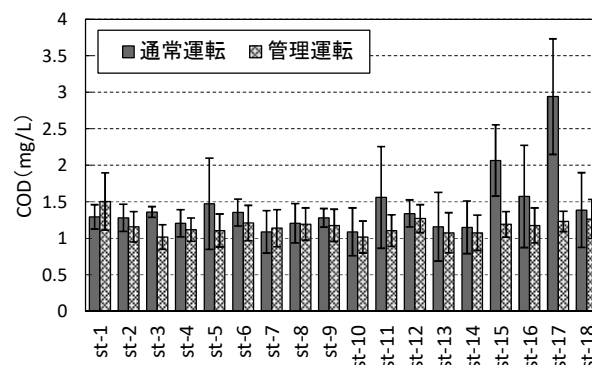


図 4 旧吉野川浄化センター周辺海域における通常運転時及び管理運転時の COD の比較

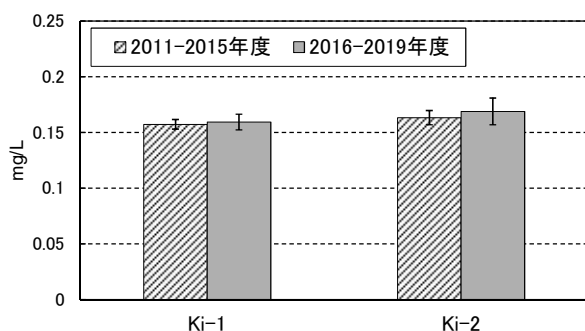
較した。その結果を図 5 に示す。まず TN は、Ki-1 及び Ki-2 のいずれの地点においても、管理運転実施前後でほとんど差異はみられず、t 検定（有意水準 5%）でも有意な差はなかった。次に、COD は、Ki-1 において管理運転開始前（1.22 mg/L）に比べ開始後（1.28 mg/L）にわずかに上昇したが、t 検定（有意水準 5%）では有意な差はなかった。また、Ki-2 において、管理運転開始前後でほとんど差異はみられず、t 検定（有意水準 5%）でも有意な差はなかった。以上から、管理運転開始前（2015 年度以前）に比べ、管理運転開始後（2016 年度以降）の TN 濃度及び COD に有意な差はなく、管理運転による水質汚濁に係る影響はみられないことが分かった。

IV まとめ

旧吉野川浄化センターの管理運転による窒素供給効果及び水質汚濁に係る影響について調査したところ、次の知見が得られた。

窒素供給効果について、旧吉野川浄化センター周辺海域における DIN 濃度を通常運転時と管理運転時とで比較したところ、管理運転時は通常運転時に比べ放流口近傍で DIN 濃度は上昇したものの、堤防外における上昇は認められなかったことから、管理運転の効果が及ぶ範囲は限定的であった。

(a) TN



(b) COD

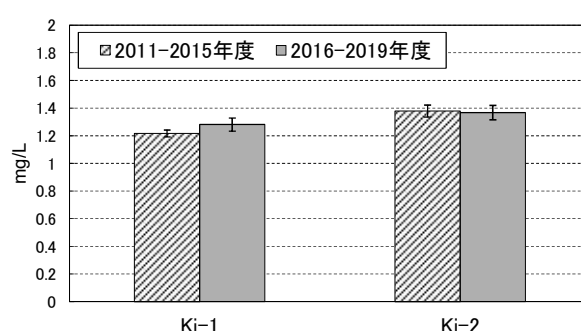


図 5 常時監視地点における管理運転開始前及び開始後の TN 濃度 (a) 及び COD (b) の比較

水質汚濁に係る影響について、旧吉野川浄化センター周辺海域における COD を通常運転時と管理運転時とで比較したところ、両者間で差異はみられなかった。また、旧吉野川浄化センター近傍の常時監視地点 2 地点における TN 濃度及び COD について、管理運転開始前（2011-2015 年度）と開始後（2016-2019 年度）とで比較したところ、いずれの地点においても有意な差はみられなかったことから、水質汚濁に係る影響は確認できなかった。

ただし、今回の調査で得られた結果は調査回数や調査項目が限定された上、放流水の水質や海域をとりまく環境は流動的であると考えられることから、管理運転の効果及び影響については今後もさらなる調査が必要である。

参考文献

- 1) 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, 分析化学, **59** (11), 945-955 (2011)
- 2) 山本民次: 瀬戸内海西部海域における貧栄養化, 沿岸海洋研究, **52** (1), 49-58 (2014)
- 3) 多田邦尚, 西川哲也, 樽谷賢治, 他: 瀬戸内海東部海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影響, 沿岸海洋研究, **52** (1), 39-47 (2014)
- 4) 原田和弘, 阿保勝之, 川崎周作, 他: 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 (2018)
- 5) 池脇義弘: 徳島県沿岸の栄養塩濃度の低下について, 徳島水研だより, **100** (2017)
- 6) 牧野賢治, 上田幸男: 正常なワカメと色落ちしたワカメの一般成分および遊離アミノ酸含量の比較, 徳島水研報, **12**, 1-5 (2018)
- 7) 反田實, 赤繁悟, 有山啓之, 他: 瀬戸内海の栄養塩環境と漁業, 水産技術, **7** (1), 37-46 (2014)
- 8) 中尾賢志: 下水処理場における栄養塩管理運転の実情報告, 下水道協会誌, **56** (677), 78-86 (2019)
- 9) 永尾謙太郎, 中村由行, 鶴島大樹, 他: 伊勢湾における下水処理場での栄養塩の管理運転の有効性に関する試算, 土木学会論文集 B2 (海洋工学), **75** (2), I_1021-I_1026 (2019)
- 10) 気象庁: 海洋観測指針 (第一部), 財団法人気象業務支援センター, 東京 (1999)
- 11) 酒井基介, 上田幸男: 徳島県沿海の藻類養殖漁場における珪藻増殖が DIN 濃度減少に及ぼす影響, 徳島水研報, **12**, 1-6 (2012)
- 12) 阿保勝之, 秋山諭, 原田和弘, 他: 瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変化とその要因, 沿岸海洋研究, **55** (2), 101-111 (2018)
- 13) 小林志保, 藤原建紀, 阿保勝之, 他: 播磨灘における全窒素濃度の季節変動と窒素の形態変化, 沿岸海洋研究, **47** (1), 61-69 (2009)
- 14) 鈴木元治, 中谷祐介, 古賀祐太郎: 下水処理場の窒素排出量増加運転が瀬戸内海播磨灘の有機物及び栄養塩の海水中濃度に与える影響評価, 水環境学会誌, **43** (2), 43-53 (2020)