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

山西博幸^{1),*}

前田優斗²⁾
大石京子¹⁾

田中溪介³⁾

Environmental Impact Study on Transport of Nitrification Restrained Water in Tidal Area

Hiroyuki YAMANISHI^{1),*}, Yuto MAEDA²⁾, Keisuke TANAKA³⁾ and Kyoko OISHI¹⁾

¹⁾ Institute of Lowland and Marine Research, Saga University, Honjo 1, Saga 840-8502, Japan

²⁾ Kurume City, Jonan-cho 15-3, Kurume, Fukuoka 830-8520, Japan

³⁾ Works Applications Co., Ltd., Akasaka 1-12-32, Minato-ku, Tokyo 107-6019, Japan

Abstract

Field observation was conducted to study the influence of nitrification restrained water in an estuary. In particular, the transport of ammonium nitrogen before and after nitrification restraint was investigated. It was found that the mixing and dispersion along the flow in a semitidal period dilute the concentration of ammonium nitrogen; therefore, the increase in nutrient concentration in the downstream area was not clear under the restrained nitrification treatment at the sewage treatment plant. On the other hand, the effluent water body flowed out to near the seaweed cultivation area. Then, the effluent water body moved upstream near the upper tidal area of 4 to 5 km from the river mouth. In addition, on the basis of past research regarding the effects of the removal of ammonium nitrogen on salinity and suspended solids, the transport of ammonium nitrogen in estuaries was considered. The results indicate that high salinity blocks the adsorption of ammonium nitrogen on suspended solids, and the potential for the accumulation of deposits including ammonium nitrogen out of a tidal river was shown. Consequently, ammonium nitrogen derived from the effluent water may be transported offshore without removal by adsorption on suspended solids.

Keywords: Tidal river; Nitrification restrained water; Salinity; Suspended solids; Ammonium nitrogen

1. はじめに

日本有数の干満差を持つ有明海湾奥部では、多くの河川が強混合型の河川に分類される。このような河川感潮部では、潮汐による物理、化学及び生物学的影響が時空間的に変動する。そのため、河道内に流入した物質の輸送や水質変化を把握するには、その流況を加味した影響評価を行う必要がある。六角川河口に隣接した嘉瀬川水系本庄江川は強混合型河川で、本水域下流部には全国総生産量の20%近くを誇る全国第一位のノリ養殖の生産拠点があるほか、広大な泥干潟には多様な生態系が形成されている。一方で、ノリ養殖期の栄養塩濃度の低下はノリの色落ちを含む生長阻害を引き起こすため、その回避策として海域への栄養塩供給が模索されている。一般に、海域への栄養塩の供給源として、河川を通じた陸域からの流入のほか、底泥からの溶出が考えられ、栄養塩の制御可能な供給源として、下水処理場での運転管理、ダム

や水路からの放流、海域への施肥、海底耕耘等の取り組みが挙げられる。実際、佐賀県有明海漁協は、2014年2月以来3季ぶりに、嘉瀬川ダム（佐賀市）、県営ダムおよび佐賀平野のクリークからの緊急放流を要請している¹⁾。現在まで、これら一連の取り組みはノリ生産性の向上に寄与している²⁾とされているものの、その水域への定量的な評価は今のところ十分であるとは言えない。さらに、ノリの色落ちやアゲマキ・タイラギといった特産貝類の漁獲高の激減など、有明海湾奥部での水環境と生態系への問題は未だ十分に解決されるに至っていない。

このような中、佐賀市下水浄化センターでは、下流域のノリ生産者との話し合いの中で、2007年から冬期（ノリ養殖期）の硝化抑制運転を試みている³⁾。ただし、硝化抑制された放流水は、有明海特有の大きな干満差の中で、上げ潮・下げ潮の流れに応じ、下流域のみならず、広く河川上流域にも輸送される。また、強混合型河川特有ともいえる強い潮流下では底質の巻き上げが顕著で水

1) 佐賀大学低平地沿岸海域研究センター 〒840-8502 佐賀市本庄町1

2) 久留米市役所 〒830-8520 福岡県久留米市城南町15-3

3) ワークスアプリケーションズ株式会社 〒107-6019 東京都港区赤坂1-12-32

* 連絡先: yamanisi@cc.saga-u.ac.jp

域内には常に高濃度の懸濁物が存在している。二渡ら⁴⁾は、強混合型河川である六角川河川感潮部での現地調査および室内実験を通じた検討の中で、感潮部における各態窒素濃度の変動は、感潮部水塊の移動特性、硝化・脱窒反応の特性および流入負荷の変動の影響を受けることを明らかにし、とくにSSや底泥が果たす役割の重要性を指摘している。一方、本研究のように下水処理場での季別運転によってもたらされる高濃度の NH_4^+ を含む下水処理放流水が河道内に流入し、一潮汐程度の比較的短時間にどのように輸送されるかについての検討はなされていない。

本研究では、ノリ養殖場の生産性向上を目的とした下水処理場の弾力的運用措置として実施されている硝化抑制処理水の流下とこれに伴う水質変化、および河道内における流動状況について現地調査を通して明らかにする。とくに、硝化抑制運転時の下水処理放流水は通常時よりも NH_4^+ -N濃度の高い状態で放流される点に着目し、遡上上限域を含む感潮区間での水質輸送や底質環境への影響について考察を加えた。

2. 現地調査および実験方法

2.1 放流水の長期モニタリング

図1は、調査対象とした有明海湾奥部と本庄江川感潮域の概略図で、放流口は河口から0.8 km地点左岸に位置している。ここで、季別運転（硝化抑制運転）とは、ノリ漁期に法定排水基準値の範囲内で可能な限り高い栄養塩類濃度で放流することを指している⁵⁾。佐賀市下水浄化センターでは、この指針に則り、既存の標準活性汚泥法の施設で、ばっ気槽内の空気量を通常運転時の4分の3に抑制し、かつ、ばっ気槽内のMLSSを2割程度削減した運転管理を行っている。ここ2年間の季別運転は2015年11月～2016年3月、2016年11月～2017年4月に実施している。なお、季別運転の移行期間は例年11月上旬から中旬で、増加運転期間は11月中旬から3月中旬に設定されている。

放流水のモニタリングは2016年5月から2017年8月まで行い、COD、 NH_4^+ -N、TNおよびTPを測定した。CODは電量滴定式迅速COD測定器（セントラル科学社

製、HC-607）、 NH_4^+ -Nはアンモニア計（セントラル科学社製、AT-2000）、TN、DN、TPおよびDPはあらかじめ試薬量の調整されたテストチューブに採水試料を入れてリアクタで反応させた後、携帯用多目的迅速水質分析計（HACH社製、DR/2400）を用いて測定した。

2.2 下水処理放流水の流下に伴う水質調査

放流水の流下に伴う水環境への影響を把握するため、放流水塊とともに移動しながら水質を調査した。放流水追跡調査を硝化抑制前（調査①、2016年7月20日の中潮期）と硝化抑制開始後（調査②、2016年11月28日の大潮期）の2回行った。採水地点を図2に、調査時の潮位を図3（調査①、調査②）に示す。なお、潮位データは近隣の六角川河口・住ノ江港のデータである。図2のN1地点が下水処理場の放流口、N2地点が本川との合流地点、N5地点が河口地点、N8地点が河口部と同じとする嘉瀬川との合流地点、N9地点からN12地点はノリ漁場を含む海域である。調査方法は、N1地点から備船の動力を停止させ、無動力のまま流れとともに移動し、所定の地点の表層水を採水した。この際、小型GPSロガー（Canmore Electronics社製、GT-740FL）を用いて、放流口前の水域から備船が流下していく様子を記録した。調査①ではN1地点からN8地点まで、調査②ではN1地点からN12地点で採水した。採水試料は500 mlのポリビンに分取後、冷却剤入りのクーラーボックスに保管した。測定項目は塩分、DO、COD、 NH_4^+ -NおよびTNである。また、ろ液は0.45 μm のメンブランフィルターを用いて作成した。塩分は塩分・電気伝導計（HORIBA社製、ES-51）を用い、COD、 NH_4^+ -N、TN、DN、TPおよびDPは上記2.1と同様の方法で測定した。なお、必要に応じて原液のCODをTCOD、ろ液のCODをDCODと表記する。

2.3 河道内における下水処理放流水の挙動に関する現地調査

ここでは、本庄江川感潮域に放流された処理水の時空間的な変動特性を把握するための調査を実施した。調査

図1 有明海湾奥部と調査対象水域の概略図

図2 調査①（N1～N8）および調査②（N1～N12）における採水地点

図3 観測時の潮位変化 (左:調査①, 右:調査②)

地点は本庄江川河口から深町水門のある上流 6.3 km 地点までの区間に計 8 点を設定した。(図 1 参照)。硝化抑制前の調査 (調査③) は、2016 年 8 月 22 日 (中潮, 8:00~18:00), 硝化抑制開始後の調査 (調査④) は、2016 年 12 月 2 日 (中潮, 7:00~17:00) に行った。調査はいずれも干潮~満潮~干潮の一潮汐とした。水質の測定項目は塩分, SS, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TCOD, DCOD, TN, DN, TP および DP とした。

3. 結果および考察

3.1 放流水の水質に関するモニタリング

図 4 は、2016 年 5 月から 2017 年 8 月までの放流水の TCOD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN および TP 濃度の結果を経月的に示したものである。本来、河川における有機物汚濁指標に BOD を採用すべきところであるが、有明海湾奥部の感潮域では海水混入は常であり、河川本川との比較検討も踏まえ、本研究では有機物汚濁指標として TCOD を採用した。

図より、放流口での TCOD は $7.4\sim 15.9\text{ mg L}^{-1}$ の変動を有していたものの、平均値が 11.3 mg L^{-1} であった。なお、河川本川に合流後は希釈され流下し、放流口から 300 m ほど流下した地点の TCOD が 3 mg L^{-1} ほどまで低下することを確認している (後掲, 3.2 節参照)。佐賀県が定める生活環境の保全に関する環境基準報告⁷⁾によれば、調査対象の関連水域である本庄江川 (C 類型, BOD 5 mg L^{-1} 以下), 有明海 C 水域 (六角川地先) (C 類型, COD 8 mg L^{-1} 以下) はいずれも環境基準を満たしている。したがって、現状では硝化抑制運転による放流水が水域の有機汚濁を進行させることにはなっていないといえる。一方、河川本川では、放流水の流入以外に他河川との合流、水温に依存した生物活性や潮汐による底泥の巻き上げなどが生じており、TCOD が 10 mg L^{-1} 以上となることもあった (3.2 節参照)。

次に $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN および TP についての検討を行った。2016 年度に佐賀市下水浄化センターが硝化抑制の本格的な運用を開始したのは 11 月である。通常運転時の硝化促進期における放流水の TN は $9.3\sim 19.3\text{ mg L}^{-1}$ で、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は $6.8\sim 18.5\text{ mg L}^{-1}$ であった。その後、11 月以降に硝化抑制が開始されることで TN および $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の濃度はいずれも上昇し、 30 mg L^{-1} 程度となり、また TN と $\text{NH}_4^+\text{-N}$ との濃度差はほとんどなく、硝化反応の抑制がなされている結果といえる。なお TP に関しては、下水処理場での硝化抑制に伴うリン除去への影響はなく、

図4 放流水の TCOD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN および TP の経月変化

2016 年 8 月の突出値を除けばほぼ 2 mg L^{-1} 以下で推移していた。

以上の結果は、これまでの放流水モニタリング結果⁶⁾とも合致し、2007 年から試行している佐賀市下水浄化センターでの季別運転による放流水質の変動の基本的な特性と言える。

3.2 放流水流下に伴う水質変化特性

本調査は、放流口からの処理水の流動を下げ潮の流れとともに流下しながら採水を繰り返すことで、放流水塊の時々刻々とした水質変化をとらえようとした試みである。もちろん、フロートや本調査のように備船の流れとともに浮遊流動させることだけで必ずしも放流水塊そのものの輸送を正確に追跡しているとは言えないが、水塊自身が沿岸水域のどこまで流下しているかを大凡理解するには有用な調査といえる。

図 5 は調査②での採水地点と備船が無動力で流れとともに移動した軌跡の一部を示したもので、図中に付した番号とともに括弧書きされた距離は放流口からの距離を示している。また、採水地点間毎の時間と距離をもとにこれらの流下速度を算出したところ、最大流下速度は 0.96

図5 GPS ロガーで捉えた備船流下軌跡の一部 (調査②; 2016 年 11 月 28 日, 9:00~11:00)

m s^{-1} ($=3.46 \text{ km h}^{-1}$), 平均流下速度は 0.55 m s^{-1} ($=1.98 \text{ km h}^{-1}$) であった。さらに, 最干潮での最終的な到達地点は, 放流口からおよそ 13 km (本庄江川河口から下流およそ 12.2 km) となり, このことから放流水塊がノリひび域 ($5\sim 13 \text{ km}$) まで到達していることを確認した。先に算出した GPS データによる備船の平均流下速度に実際の流下時間である 6.5 時間に乗じた到達距離も 13 km ほどで, 両結果はいずれも合致する。表面流速は必ずしも移流拡散する物質そのものの輸送を正確に表現しているとは言えないが, 放流水の影響がノリひび域まで到達していることの凡の確認としては十分と言えよう。

図6~8は, 調査①(硝化促進期)における水質結果(SS, TCOD, DCOD, TN, DN, NH_4^+-N , TPおよびDP)を示したものである。SSについては, 放流水と河川水との合流地点で 300 mg L^{-1} となったものの, その後は 50 mg L^{-1} まで低下し, 本庄江川河口部から嘉瀬川と合流する付近(図5中の⑦, ⑧地点)で再び $200\sim 300 \text{ mg L}^{-1}$ に上昇した。SSの変動はCODの変動に影響を及ぼす。図6にはTCODとDCODを示しているが, SSの上昇がTCOD値を上昇させていることから流下に伴うTCOD値の上昇は, 底質の巻き上げ等によるSS由来の有機物負荷といえる。

図7は, NH_4^+-N , TNおよびDNの流下に伴う変化である。 NH_4^+-N 濃度は放流口直下から河川との合流・希釈により10分の1程度まで低下し, その後 1 mg L^{-1} 程度で流下した。一般に水中での硝化反応は微生物の反応速度論に従った増殖モデル式と基質摂取速度式に基づき評価される⁸⁾。二渡⁹⁾はSS依存による硝化速度として $0.043\sim 0.082 \text{ mg L}^{-1} \text{ day}^{-1}$, 底泥依存による硝化速度として $0.014 \text{ mg L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ を示した。また, 高橋ら¹⁰⁾も河川水中での硝化速度として $0.044\sim 0.104 \text{ mg L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ を導いている。ここでは仮に硝化速度を $0.1 \text{ mg L}^{-1} \text{ day}^{-1}$ とすれば, 調査①で 0.01 mg L^{-1} 以下の減少, 後述する調査②でも 0.025 mg L^{-1} の減少でしかない。結果として放流口から流下する水塊輸送には希釈および拡散の効果が大きいといえる。なお, TNとDNの差は先のCOD同様, SSに依存していることがわかる。

図8は放流口からの流下に伴うTP, DPおよびSSの変化である。一連の流下に伴う水質変化と同様に河川本川との合流による急激な濃度低下が見られた。またSSの増加に伴い, 水中内のTP濃度の上昇が顕著に見られた点もTNと同様であった。ただし, TNの場合にはSS増加に伴い, DNがやや上昇したものの, DPに関してはほとんど変化がなく, 底泥の巻き上げ等によるSS上昇が溶存態のリン濃度に移行する寄与は少ないと言える。

図9~12は調査②(硝化抑制期)における水質結果(塩分, SS, TCOD, DCOD, TN, DN, NH_4^+-N , TPおよびDP)を示したものである。

図9は塩分とSSの流下変化である。調査②では調査①とは異なり, 河口からノリ漁場を含む海域にいたるまでの流下を行い, $2\sim 20\%$ 程度にいたる範囲での計測となっていた。なお, 既往の研究¹¹⁾によれば, ノリの幼芽の正常な生育に適切な塩分は $17\sim 18\%$ であることが指摘されている。

図10はCOD(TCOD, DCOD)とSSの流下変化である。調査①同様, N8付近でSSの上昇とTCODの上昇

図6 放流口からの流下に伴うCOD(TCOD, DCOD)およびSSの変化(調査①)

図7 放流口からの流下に伴う NH_4^+-N , TNおよびDNの変化(調査①)

図8 放流口からの流下に伴うTP, DPおよびSSの変化(調査①)

が一致した。このことは, DCODが高くないことから, 底泥の巻き上げ等のSS由来の結果と言える。また, 調査①では測定できなかったN9~N12(海域部分)地点での測定値は, おおよそTCOD値で 4 mg L^{-1} 以下で推移した。

図11は, NH_4^+-N , TNおよびDNの流下に伴う変化である。調査当日は, 硝化抑制運転が本格的に運用されている期間であるが, 満潮位からの測定で放流口は冠水して希釈されるため, 窒素濃度が特段に高い値を示しては

図9 放流口からの流下に伴う塩分およびSSの変化（調査②）

図11 放流口からの流下に伴う $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN および DN の変化（調査②）

図10 放流口からの流下に伴う COD (TCOD, DCOD) および SS の変化（調査②）

図12 放流口からの流下に伴う TP, DP および SS の変化（調査②）

いない。放流水の窒素濃度は、調査①同様に放流水の河川合流地点で希釈され、TNで5分の1程度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ で10分の1程度まで低下していた。ここで、河川流量と希釈について以下の式を用いて概算を行った。

$$C_1Q_1 + C_2Q_2 = C(Q_1 + Q_2) \text{ より,} \\ Q_2/Q_1 = (C - C_1)/(C_2 - C) \quad (1)$$

ここで、 C_1 ：本庄江川 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度、 C_2 ：放流水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度、 C ：合流後の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度、 Q_1 ：本庄江川流量、 Q_2 ：放流口流量、である。式(1)から河川水に対する放流水の寄与率 (Q_2/Q_1) を求めるにあたり、 C_1 、 C_2 および C の値が必要となる。 C_1 と C は後述する調査③（2016年8月22日）と調査④（2016年12月2日）の下げ潮順流時の放流口（0.8 km）をはさむ上下流2地点（0.5 kmと1.4 km、図1参照）で採水した $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度、 C_2 は放流口での $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度として概算した。調査③と④のデータに基づき算出した河川水に対する放流水の平均寄与率 (Q_2/Q_1) は5.5%となった。ただし、干潮時には本庄江川の固有流量は非常に少なくなるため、放流水の占める割合は極端に高くなることが予想され、河道内および下流水域への放流水の寄与率にも深くかわることとなるが、ここでは経時的な流量観測を実施しておらず、処理水の河川本川への寄与度の評価は今後の課題と言える。

さて、調査②ではノリ漁場（放流口から5～13 km）に至る過程で TN は 2 mg L^{-1} 、DN は 0.5 mg L^{-1} 、そして

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ は 0.1 mg L^{-1} 以下の計測限界となった。なお、ノリの生育に必要な基準値として DIN で $0.07 \sim 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ とされている^{12, 13)}。

本調査結果から、硝化抑制により放流水中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の増加がもたらされるものの、放流先での希釈・拡散効果によりその流下先での顕著な濃度上昇などは認められなかった。一方で、下げ潮時には放流水に対する河川水の混合割合は低下するため、河川本川に対する放流水の寄与率が増加することを考えれば、河川を經由して拡がった放流水の最大到達距離以内の水域が硝化抑制水効果のホットスポットとなる。したがって、放流水の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の水域への拡がりに関する継続的なデータ収集とともに、数値計算による検証の必要性がある。また、ノリのバイオアッセイ、すなわち、処理水がノリの生育に及ぼす影響を室内実験等で検討し、季節運転の結果として排出される処理水の効用を見極め、ノリ養殖場に対して下水道システムに望まれる対応（たとえば、硝化抑制時における環境基準の再考など）として反映させるなどの検討も必要である。

図12は放流口からの流下に伴う TP, DP および SS の変化である。一連の流下に伴う変化と同様で合流付近で一気に濃度減少し、流下した。その後、SSの増加はあるものの、水中内の TP 濃度の顕著な変化は見られなかった。これは、観測時の河口部が調査①とは異なり滞筋の形成もなく、むしろ濃度希釈の効果が大きかったため、

見かけ上の濃度上昇としては計測されなかったと言える。また、ノリ漁場で TP は平均 1.5 mg L^{-1} 、DP は平均 0.8 mg L^{-1} となった。なお、ノリの色落ちを誘起する可能性のある DIP 下限値は $0.4 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ ($\approx 0.012 \text{ mg L}^{-1}$) とされている¹⁴⁾。

3.3 潮汐に伴う下水処理放流水の遡上域への影響

図 13 は、調査③および④における塩分の河川縦断方向分布である。いずれの調査時期も中潮で満潮時刻は調査③が 12:00、調査④が 11:00 であり、その遡上上端は 5km 付近で調査区間内の塩分の濃度範囲は 0~20‰であることがわかる。なお、本庄江川上流 6.3 km 地点には深町水門があるため、ここが放流水の最大遡上地点となる。

図 14 は、潮位と河道内表層水の塩分、SS および $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の時空間分布を示したものである。図から、潮位に応じて河道内に海水が入り出すことや上げ潮時に底泥の巻き上げを含む下流域からの高濃度の SS が河川上流方向 4~5 km 付近まで輸送されていることがわかる。また、満潮位前後では流速低下と相まって水中内の SS 濃度が急速に低下する。転流後は、流速上昇に伴う底泥の再懸濁が生じることで SS 濃度の高い水塊が下流方向に輸送される。さらに、調査③と④を比較した際、調査④の方がやや SS 濃度の増加が見られる。調査④の期間はノリ漁期にあたり、調査③と比して船の往来が河口及び河道内で頻繁に生じることから、総じて河道内水中の SS 濃度が高くなる傾向にあったといえる。

次に、河道内における $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の時空間分布について考察する。図 15 は、調査④で放流口より上流側の水域を対象に満潮を除く上げ潮時と下げ潮時の SS と $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の相関を示したものである。特に上げ潮時の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ は、SS と強い相関性が認められる（相関係数 $R=0.96$ ）。なお、下げ潮時は上げ潮時の底質の巻き上げによって $\text{NH}_4^+\text{-N}$ がすでに水中内に移行しているため、上げ潮時と同様の SS との明瞭な線形性は得られないといえる。また、塩分の河道内縦断分布から上げ潮での遡上上限域が 5km 付近であったことを踏まえれば、放流口から河川本川に負荷された栄養塩としての窒素成分もおおよそ同一地点まで輸送されているといえる。加えて、満潮時に放流口付近で $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の高濃度水塊が滞留する様子も見られた。さらに、硝化抑制開始後の結果は、硝化抑制前の結果よりも多くの窒素量を上流域に輸送していることを示している。遡上端部に位置する深町水門堰上湛水域の TN および $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均濃度がそれぞれ 1.1 mg L^{-1} 、 0.02 mg L^{-1} であったことを考えれば、上流域からの流入負荷はさほど大きくなく、海水及び放流水が本庄江川河道内の窒素存在量に大きく関与しているといえる。

3.4 水中内の NH_4^+ に及ぼす SS と塩分の影響についての一考察と今後の課題

余湖・那須¹⁵⁾ は、底泥粒子への $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の吸着と溶出メカニズムを検討する中で、底泥粒子が持つ CEC（陽イオン交換容量）の 70% が Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ によって吸着され、 NH_4^+ の吸着量が占める割合は相対的に小さいと述べている。これを踏まえれば、 NH_4^+ の水中からの除去速度は、塩分の増加とともに小さくなるといえる。このことは、放流水由来の NH_4^+ が下流域で SS の吸着除去の作用を受けず、さらに海域に向かって輸送される可

図13 塩分の縦断分布（上図：調査③，下図：調査④）

能性を示唆するものといえる。ただし、実水域では塩分その他、SS による除去効果も考慮する必要があり、室内実験等によるさらなる検討を要する。

水質調査結果から河道内の塩分は潮位変動に依存する（図 13、14 参照）が、これらの水域では SS の流入に伴い、水中から NH_4^+ が除去されやすく、河道内底泥や植生域内に蓄積あるいは移行する可能性がある。栄養塩を吸着した懸濁物の沈降・堆積は、汽水域の植物にとっては重要な栄養素の供給源として自然循環の一役を担っているといえるが、過剰な $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の負荷は水域の富栄養化の原因をもたらし、水質悪化を引き起こす可能性は否定できない。本結果に基づく検証を行う上でも、感潮域での水環境モニタリングを引き続き行う必要がある。

このように有明海湾奥部のような特異な流動場や高懸濁物を有する水環境場の中で、下水処理場から硝化反応を抑制した処理水の排出を考える上で、排出される物質、とくに栄養塩類を中心とした物質の拡がりの解明は、河川生態系の維持管理の立場からも重要であり、下流域の水産増殖場への影響を把握し、下水処理場の管理等に有用な情報を提供するものと考えられる。

4. まとめ

本研究は、地域特性に応じた下水処理場の弾力的運用として実施されている硝化抑制された放流水の周辺水域への影響調査の一環として実施したもので、硝化抑制前後での $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の流下変化およびその広域分布を調査した。また、放流水を受け入れる河川感潮区間における NH_4^+ 濃度の高い処理水の挙動を現地調査に基づき整理した。その結果、次のようなことを明らかにした。

(1) 流れとともに移動する水塊をトレースした結果、放流水が河口のノリ養殖場に到達していることを確認した。一方、本調査で明確な放流水のノリ養殖に対する影響を

図14 河道内における塩分、SSおよび $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の時空間分布（左：調査③、右：調査④）

十分に検証できておらず、今後も継続的な調査を実施する必要がある。

- (2) 半潮汐間における水塊移動での栄養塩濃度の低下には、希釈・拡散効果の寄与が大きい。
- (3) 現地調査より放流水を含む高濃度の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水塊が河川上流4～5km付近まで遡上していることを確認した。
- (4) 感潮域での $\text{NH}_4^+\text{-N}$ の挙動特性として、河道内ではSSとの吸着促進による蓄積・移行、下流域ではSSの吸着除去を受けず、さらに海域に向かって輸送される可能性を示唆した。

謝 辞

本研究は平成28、29年度河川財団助成事業および科研費基盤研究(C)（いずれも代表：山西博幸）の一部助成のもとで実施された。また、現地調査および分析全般にわたり、木山剣生君（平成28年度佐賀大学理工学部都市工学科卒業生）の多大なる調査及び実験補助を受けた。さらに、本論文取りまとめに当たり、査読者からの有益なコメントをいただいた。ここに記して謝意を表する。

図15 SSと $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度との関係（調査④）

（原稿受付 2017年8月1日）

（原稿受理 2017年12月13日）

参 考 文 献

- 1) 佐賀新聞 Live. 有明海漁協—ノリの色落ちで県に緊急放流を要請—. URL. <http://www.saga-s.co.jp/news/saga/10101/399723> (2017 年 1 月時点).
- 2) 佐賀新聞 Live. 有明海緊急放流—ノリ品質に効果—. URL. <http://www.saga-s.co.jp/news/saga/10101/429990> (2017 年 5 月時点).
- 3) 山口徳雄, 2012. 海苔養殖に適した下水処理, 第 15 回日本水環境学会シンポジウム講演集, p. 254.
- 4) 二渡了, 大石京子, 古米弘明, 楠田哲也, 1993. 強混合河川感潮部における硝化・脱窒過程に関する研究. 土木学会論文集 479/II-25, 101-110.
- 5) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部, 2014. 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. URL. <http://www.mlit.go.jp/common/001033458.pdf> (2017 年 8 月時点).
- 6) 山西博幸, 福島保奈美, 井上紀行, 長濱祐美, 2015. 硝化抑制された下水処理放流水の水・底質環境への影響に関する検討, 平成 26 年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会講演要旨集, p. 9.
- 7) 佐賀県, 2017. 平成 28 年度公共用水域及び地下水の水質測定結果参考資料. URL. https://www.pref.saga.lg.jp/kiji00357689/3_57689_65405_up_z5861eja.pdf (2017 年 9 月時点).
- 8) 土木学会環境工学委員会編, 2004. 環境工学公式・モデル・数値集. 丸善, 東京.
- 9) 二渡了, 1994. 強混合河川感潮部における物質輸送と水質変換に関する研究, 九州大学学位論文.
- 10) 高橋和彦, 渡部雅也, 大谷康彦, 工藤潤, 金澤弘之, 小園一郎, 山口秀幸, 細見正明, 畑恭子, 永尾謙太郎, 2016. 高濃度アンモニアを含む天然ガス・ヨウ素工場排水が流入する夷隅川における硝化に関する調査. 水環境学会誌 39(5), 163-170.
- 11) 山内幸児, 1973. ノリの幼芽の生長におよぼす塩分濃度の影響. 日本水産学会誌 39(5), 489-496.
- 12) 小谷祐一, 2010. 栄養塩不足とノリ色落ち. 西海 7, 6.
- 13) 川村嘉応, 久野勝利, 横尾一成, 2011. 佐賀県有明海で実施されている栄養塩添加の現状. 佐賀県有明水産振興センター研究報告 25, 81-87.
- 14) 小池美紀, 湖上哲, 2013. 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 23, 33-42.
- 15) 余湖典昭, 那須義和, 1982. 底泥中のアンモニア窒素について—底泥粒子への吸着とメカニズム—. 水質汚濁研究 5(2), 73-82.

[論 文 要 旨]

本研究は、地域特性に応じた下水処理の一環として実施されている硝化抑制が周辺水域に及ぼす影響について調査したものである。特に、硝化抑制前後での $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の水域内での輸送状況について調査した。その結果、半潮汐間の放流水流下に伴う $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の低下には、希釈・拡散の寄与が大きかった。また、放流水の最流下端で $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の顕著な濃度上昇は見られないものの、放流水が河口からノリ養殖場を含む沿岸水域（放流口から 13 km 付近）まで拡がることを確認した。さらに、放流水由来と思われる高濃度の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水塊が河川上流 4~5 km 付近まで達していることを確認した。水中からの NH_4^+ 除去の効果を塩分および SS の関係から考察し、本河川における NH_4^+ の河道内底泥への蓄積・移行や放流水由来の NH_4^+ が下流域で SS の吸着除去の作用を受けず、海域に向かって輸送される可能性を示唆した。

キーワード：河川感潮域；硝化抑制水；塩分；懸濁物質；アンモニア態窒素