

令和 4 年 5 月 25 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12371

研究課題名(和文) 地域特性に応じた処理水放流制御が受水空間に及ぼす影響と評価

研究課題名(英文) Environmental impact assessment in the receiving water area by the treated water discharge control according to the regional characteristic

研究代表者

山西 博幸 (Yamanishi, Hiroyuki)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号：20240062

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：地域の要望に応じた下水処理の弾力的運用効果と水環境への影響について調査及び解析を行った。夏季の灌漑用水としての処理水供給効果は、全水路水量に対する寄与率は低いものの、窒素およびリンともに灌漑水中の量を増加させ、これによる施肥量の削減や水田土壌等の現場環境に即した利用の可能性を示した。また冬季は、ノリ養殖場へ栄養塩濃度を高めた処理水の放流を行い、ノリの生育に必要な濃度レベルでノリ漁場到達を確認した。さらに水および底質を含む受水空間内の栄養塩輸送量を評価した結果、放流量の多い水域では、ノリ生産による栄養塩の系外取り出し量と同程度であったが、放流量の少ない水域では1/10程度でその効果は小さかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有明海湾奥部水域には、日本を代表するノリ養殖の一大拠点が形成されている。昨期のノリ生産高も日本一となり、地域産業としての役割も大きい。一方で、ノリ養殖は自然状況に大きく左右されるため、その管理が非常に難しい。特に、ノリの生長を左右する水域の栄養塩管理は毎年の課題となっている。とかく、短期的な漁獲収量に目を奪われやすい状況のままにある実態から、本研究が実施する現地調査・解析およびこれらに基づく現状の問題点の有無など明らかにすることで、懸念の払しょくもしくは現状の早期改善等を科学的な根拠に基づき、とりまとめることに大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：Flexible operational effects of sewage treatment according to the needs of the region and the impact on the water environment were investigated. The effect of treated water as irrigation water in summer has a low contribution to the amount of the whole canal water, but the increased concentration of nitrogen and phosphorous showed the possibility of reducing the amount of fertilizer applied and using it in the on-site environment such as paddy soil. In winter, the treated water with high nutrient concentration was released to the seaweed farm, and it was confirmed that the treated water had reached the fishing ground at the concentration level required for growth. In addition, as a result of evaluating the amount of nutrients transported in the water area, it was estimated that the amount of nutrient inflow was about the same as the amount of nutrients taken out by seaweed production. However, in the water area where the discharge is small, the effect was small at about 1/10.

研究分野：水環境工学

キーワード：季別運転 硝化抑制 アンモニア態窒素 ノリ養殖 下水処理場 有明海 泥干潟 水温

1. 研究開始当初の背景

有明海湾奥部水域には、日本を代表するノリ養殖の一大拠点が形成され、地域産業としての役割も大きい。一方で、ノリ養殖は自然状況に大きく左右されるため、その管理が非常に難しい。特に、ノリの生長を左右する水域の栄養塩管理は毎年の課題となっている。このような中、近年、ノリ養殖場への栄養塩供給策として、冬期（ノリ養殖期）に下水処理場での硝化反応を抑制した季節別運転が行われている。硝化抑制された処理水には通常期よりも約 2 倍の濃度のアンモニア態窒素 (NH_4^+-N) が含まれ、 NH_4^+-N は硝酸態窒素 (NO_3^--N) よりもノリの吸収がよいため、現在までノリ生産性の向上に寄与していると言われていた。一方、有明海特有の干満差により放流先での処理水は、必ずしも海域のみならず、河川域にも輸送されるが、その処理水の受け入れ先となる河川や河口域での水質管理は科学的にも明確な目標値がないままとなっている。

2. 研究の目的

本研究は、地域のニーズに対し、既存施設として日々稼働する下水処理場の有効活用として全国的にも注目されている事例である。一方、十分な科学的根拠のないまま実水域で実施されていることへの懸念も有している。とかく、短期的な漁獲収量に目を奪われやすい状況のままにある実態から、本研究が実施する現地調査・解析およびこれらに基づく現状の問題点の有無など明らかにして、懸念の払しょくもしくは現状の早期改善等を科学的な根拠に基づき明らかにすることを目的とした。学術的には、現地調査を通じて、有明海湾奥部の特異な流れ場で、かつノリ養殖業を中心とした水産業が発達した河口沿岸水域に対して地域の特性に応じた水質管理の有効性と将来的な流域管理に向けた下水道の果たすべき役割への提案につなげることを目標に掲げた。

3. 研究の方法

本研究は、地元水産漁業者らの要請に応じて実施されている下水処理の季節別運転によって、栄養塩濃度を調整した処理水の放流後の行方とともに、放流水受水域内の水産増養殖への効果を明らかにするとともに、水域環境および底質環境の影響を評価するものである。

この目的達成のため、主として現地調査および室内実験を通じたデータ収集を行い、その後、対象水域内の物質輸送、とくにアンモニア態窒素に関する物質収支の計算をもとに、処理放流水による水一底質環境への影響について検証した。具体的には、下水処理の季節別運転前後の栄養塩濃度の拡がりとその水質輸送特性の把握、潮汐に応じた水域岸沖方向の物質輸送量と物質収支の把握、放流水受水空間内の底泥の長期的な質変化特性と堆積底泥を用いた溶出実験、等を通して、陸域負荷を人工的に調整した処理水受水域への環境影響についてまとめた。

4. 研究成果

(1) 下水処理放流水受水空間における栄養塩輸送

ここでは、佐賀市下水浄化センターの放流量に比して 1/20 程度の放流量である鹿島市浄化センターの放流水に着目した。対象水域はその放流先の河口からノリ漁場を含む沖合とし、季節別運転切り替え直後（調査 A）と定常運転後（調査 B）の 2 回調査を行った。調査 A は 2019 年 10 月 29 日 10:00-16:00（大潮）、調査 B は 2019 年 12 月 23 日 7:00-13:00（中潮）に実施した。調査開始は満潮時とし、その後下げ潮の流れとともに備船およびフロートの軌跡を干潮時まで GPS で記録した。また、所定の地点では採水および採泥を行った。水質測定項目は、塩分、SS、TN、DN、 NH_4^+-N 、TP および DP とした。

図 1 は調査 A、B での移動軌跡で、軌跡上の番号は採水地点を示している。なお、調査 B は GPS データが欠測したため、図中に点線で示している。図より、移動到達の直線距離は、調査 A で約 6.7 km、調査 B で約 6.4 km とほぼ同じであった。大潮の調査 A に比べて中潮の調査 B では、対象水域内を流れる水塊輸送の到達距離が短くなると予想されたものの、調査 B は前日の降雨の影響で、陸域からの流量が増加しており、大潮の調査 A とほぼ同じ程度の輸送距離になった。図 2 は調査 A での表層水水質を放流口からの距離に対して示している。TN、DN、 NH_4^+-N とともに、河口および放流口付近で高く、沖合に向かうにつれて海水との混合・希釈および拡散によって減少している。最終地点での NH_4^+-N 濃度は、調査 A で 0.72mg/L、調査 B で 0.23mg/L であり、ノリの色落ち限界濃度（DIN で 0.07~0.1mg/L）以上であることを確認した。また、水深方向の水質分布特性を把握するため、調査 C（季節別運転切り替え直後）を 2020 年 10 月 17 日（大潮）（a）9:00-10:30、（b）11:30-13:00 と調査 D（季節別運転定常後）を 2020 年 12 月 21 日（小潮）（c）13:00-14:00、（d）15:00-16:00 の満潮時と下げ潮時に行った。この調査

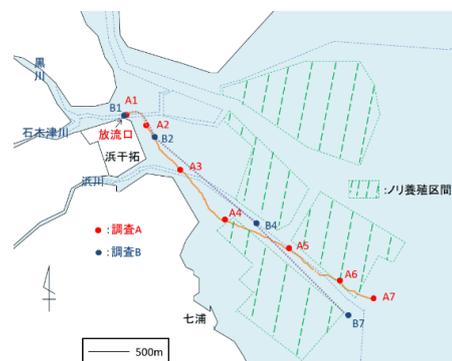


図 1 調査 A、B での移動軌跡

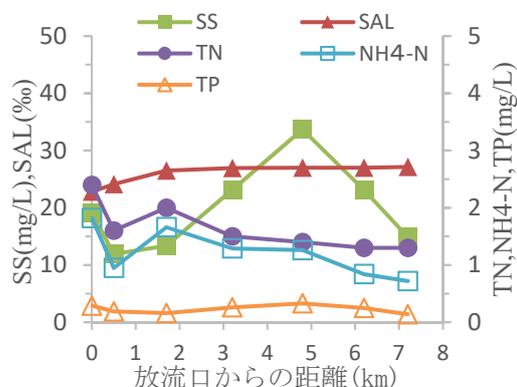


図 2 調査 A の水質データ (2019. 10. 29)

は、図1の軌跡を参考に図3の各地点まで船で1時間から1時間30分かけて移動し、表層(約10cm)、中層(水深の約半分)、下層(海底から約30cm)の水を採水した。同時に多項目水質センサーで各地点の塩分、水温、濁度、pHおよびDOの鉛直分布を測定した。採水試料の水質分析項目は、SSおよび $\text{NH}_4^+\text{-N}$ とした。

図4、5は、調査C、Dにおける $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の空間分布である。調査C(大潮)では、放流水による高濃度の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 水塊が明瞭には確認されなかった。一方、満潮から下げ潮にかけて干潟底泥の巻き上げに起因すると思われる $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の上昇と下流域への輸送が確認された。調査D(小潮)では、季別運転の影響もあり、満潮時に放流口付近で高濃度の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の水塊が観測された。その後、下げ潮による水塊の拡がりが見られたが、大潮に比べ流れの弱まる小潮ではその拡がりはやや限定的であった。一方で、表層部の塩分の拡がり比較的沖合まで到達しており、結果として、小潮でも表層水の沖合輸送が期待できる。

(2) 下水処理放流口を起点とした栄養塩輸送量の評価

放流口を起点とする栄養塩輸送量を概算するためには、対象水域内の物質収支を把握する必要がある。調査対象域である鹿島市浄化センターの放流水受水域にはいくつかの河川が流入しており、これらの河川からの流入負荷を調査とともに、鹿島川河口部を介した流出入負荷量を算出するため、流量と各種水質測定を行った。調査地点は図6の通りで、いずれの地点も堰が設置され、海水遡上の影響を受けていない。流入負荷調査を2021年10月8日(地点①、②)、10月20日(地点③、④)に行い、各地点の堰から下流側に流入する水量と各種水質(SS, COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ およびTP)を測定した。また、河口域の流出入負荷調査を2021年11月2日(地点⑤)の下げ潮最強時間帯(10:20~11:10)と上げ潮最強時間帯(16:00~17:00)に行った。その際、測線上を船で移動し、断面内3カ所の流速測定と採水を行った。採水は潮位に応じて深さ方向に1~3点とし、採水試料の分析項目をSS, COD, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ およびTPとした。

図7は各河川からの流入負荷をもとに受水域内の寄与割合示したものである。図より、河川上流端から対象水域に流入するCOD負荷は32.68(kg/day)、TN負荷は10.18(kg/day)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 負荷は3.06(kg/day)およびTP負荷は2.93(kg/day)となった。これらの調査を通して、河川上流端からの流入量、河口断面を介した物質質量をもとめ、これまでの海域調査や既往の研究から得られた流速、水質データをもとに、下水処理放流口を起点とした栄養塩物質の収支概算を試みた。また、物質収支の算定期間をノリ漁期の11月1日から3月31日の151日とした。

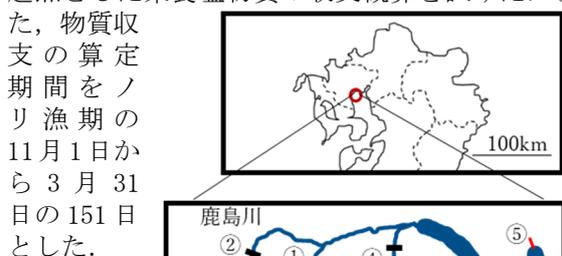


図6 調査地点

図8は、佐賀市下水浄化センターの放流水受水域におけるアン

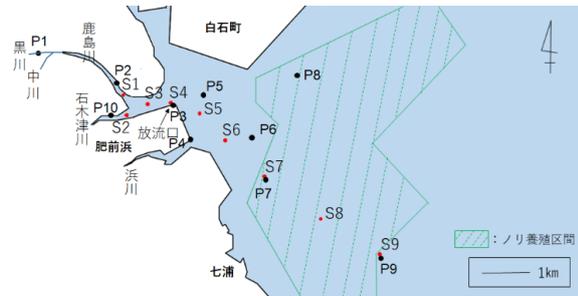


図3 調査水域と採水(S)・採泥(P)地点

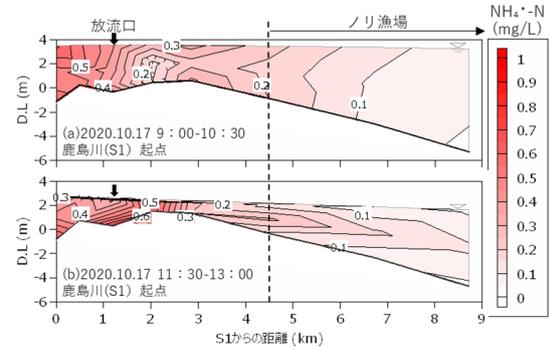


図4 放流水流下方向の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の空間分布(調査C)

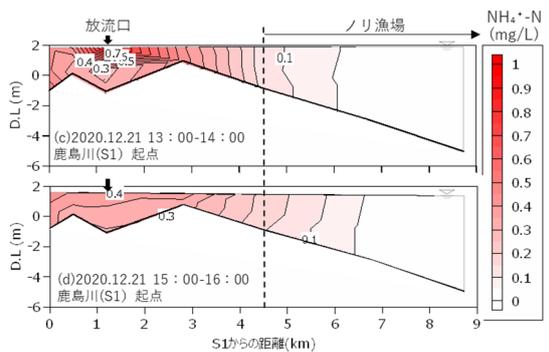


図5 放流水流下方向の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 濃度の空間分布(調査D)

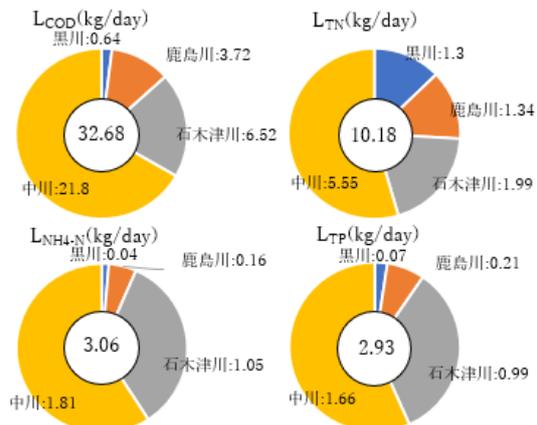


図7 河川上端からの流入負荷と河川毎の寄与

モニタリングを主体とした窒素量の収支を概算したものである。同図は河川、干潟および海域を3つのボックスとして、これまで実施してきた現地調査データをもとに算出している。図より、季別運転実施中の硝化抑制時に放流水に含まれる NH_4^+-N 量は季別運転前の量の約2倍となるものの、ノリ養殖場から系外に取り出される量がその増加分とほぼ同程度になると見積もられた。

同様に、鹿島市浄化センターからの放流水を含む鹿島川河口からノリ漁場に及ぼす影響を評価した。図9は鹿島市浄化センターと佐賀市下水浄化センターの放流水受水域におけるアンモニア態窒素を主体とした窒素量の収支を概算したものである。同図は河川、干潟および海域を3つのボックスとして、これまで実施してきた現地調査データをもとに算出している。図より、鹿島市浄化センターからの放流水を受け入れている鹿島川河口域から有明海への流出負荷量 (776.3kg/day) は、佐賀市下水浄化センターからの放流水を受け入れている本庄江川からの流出負荷量 (2375kg/day) の約3分の1程度であった。また、図より鹿島市の季別運転による NH_4^+-N 濃度の正味の増分量はおよそ15kg/day (=54.7(季別運転後)-39.4(季別運転前)) であるのに対し、ノリ養殖による系外取り出し量が126kg/day であることから、鹿島市浄化センターの季別運転によるノリ生産への寄与度は佐賀市下水処理場より小さく、かつ水域負荷として、過大にはなっていない。一方で、安易な放流水量の増加は、現状の干潟を含めた生態系バランスを崩す恐れもある。少なくとも、系外取り出し相当量以上の負荷は避ける必要がある。

(3) 下水処理放流受水域内の底泥が水域に及ぼす影響

ここでは、季別運転による水質・底質環境に与える影響評価の一環として、下水処理放流口を起点とした底質調査とともに、室内実験を通して水-底質間の栄養塩輸送を検討した。

図10は、受水空間内の底泥採取地点で、図11は底泥中の NH_4^+-N 量のモニタリング結果である。図11より、季別運転が開始される10月から放流口を起点に底泥中の NH_4^+-N 量が高くなっている。また、その影響は河道内にまで及んでおり、季別運転による放流水受水域内底質への影響が伺える。別途調査した強熱減量 (I.L.) と底泥中の NH_4^+-N 量との関係から NH_4^+ 供給源としての有機物量と底泥中における可溶態の NH_4^+-N 量との関係性が得られた。また、季別運転では通常よりも高濃度のアンモニアを含む処理水が放流されるため、これを受水する底泥から直上水への影響を把握するためのアンモニアの溶出実験を行った。実験条件として、水温を3通り (10℃, 20℃, 30℃)、攪拌の有無で6条件とした。

図12は水温と溶出速度との関係を示したものである。図より、攪拌なし

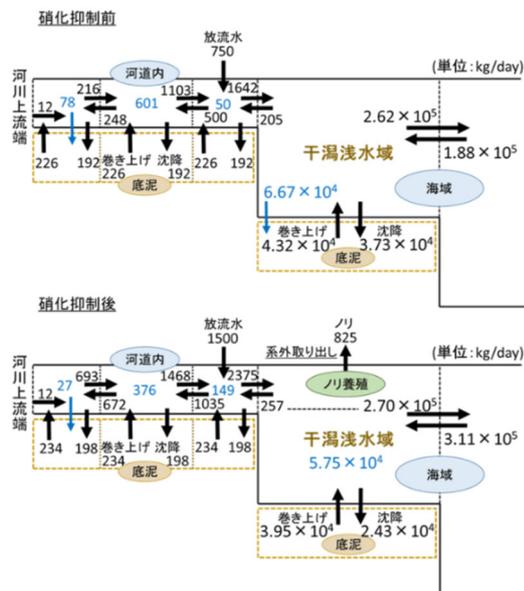


図8 放流水受水域でのアンモニア態窒素を主体とした窒素量収支 (本庄江川河口沿岸域)

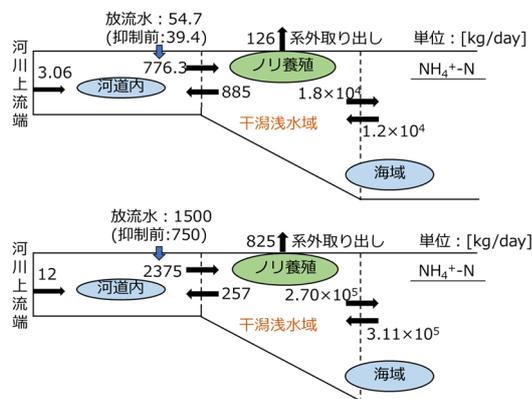


図9 放流口を起点とした受水域内のアンモニア態窒素量収支(上:鹿島市, 下:佐賀市)



図10 採泥地点

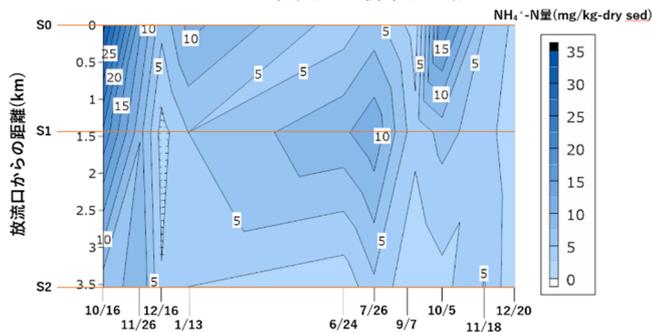


図11 NH_4^+-N 量の時空間分布 (2020.10-2021.12)

の場合、その溶出速度は水温の増加とともに大きくなり、一般的な溶出速度の関係とも一致した。一方、攪拌ありの場合、水温上昇とともに溶出速度が低下した。これは、水温の上昇とともに水中内の硝化活性が上がるため、底泥からの溶出よりも硝化反応が進む結果といえる。

(4) 下水処理水を受け入れている干拓地水路内の水環境と灌漑用水としての効果

当初の計画に沿って、有明海湾奥西部に位置する鹿島市浄化センターを基点とする季別運転の効果を検討する過程で、ノリ養殖期でない夏季に下水処理水を処理場が立地する干拓地内の用水路に流入させ、灌漑用水として利用していることが判明し、急遽、下水処理水を灌漑用水に利用することの効果について検討した。図13は、調査対象地とした肥前浜干拓地内の水路網と灌漑システムの概略である。また、水路内の水質を2019年5月から2019年12月まで定期的に調査した。採水地点は、図中の①～⑫で、水路内表層水の塩分、SS、COD、TN、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ およびTPの6項目を測定した。

調査結果をもとに、干拓水路内水質をベースに、干拓地へのN、P供給量の概算を試みた。その結果、希釈率 Q/V (Q :浄化センターから水路に放流される流量、 V :水路内の湛水量)は0.07(1/day)となり、灌漑水量に対する放流水量の寄与は7%程度と見積もられた。この水量割合に実測濃度の結果を乗じて、用水路内の栄養塩供給量を概算した。その結果、放流水流入による窒素供給が12.6%増加し、リン供給が30.8%増加した。なお、放流水の寄与は適切なN濃度とともに、水田土壌等の現場環境に即した利用が望まれることも指摘されており、今後も放流水の多目的利用の可能性と問題点の検討を進める必要がある。

(5) 有明海湾奥部における水温の長期変化と水産生物に関する検討

本成果も当初の計画に無かったもので、研究対象水域であった有明海湾奥西部水域の栄養塩濃度を俯瞰的に把握するために浅海定線調査データを解析する中で得られた成果である。具体的には、佐賀県有明水産振興センターが毎月行っている浅海定線調査データのうち、1973年1月から2020年12月までに収集された有明海湾奥部11地点における表層および底層(海底から1m)の不定期な離散観測データを周期関数に当てはめることで、定期的な観測日ずれによる平年値算出の問題を改善させ、時間補間平年値および水温振幅を求めた。その結果、湾奥部の広域的な水温特性と西部水域での貧酸素水塊の頻発の始まりや水質悪化との関係を示した。また、水温の平年値や振幅といった周期性にもとづく基本量とは別に、平均操作では把握しづらい急激な変化事象を見出すため、均質性検定を行ったところ、図14ようになった。図より、48年間で平年値の水温ジャンプが3回検出され、いずれも北太平洋レジームシフトの生じた時期(1976/1977年、1988/1989年、1998/1999年)とおおむね一致した。図15は、水温の平年値とノリ生産枚数との関係を示したもので、水温ジャンプの期間に基づき整理を行うことで、ノリ生産の遷移過程を示すことができた。なお、2000年以降のノリ生産枚数は横ばいで、水温はさらに上昇傾向であり、栄養塩不足解消とともに、高温体制品種の技術開発も望まれる。

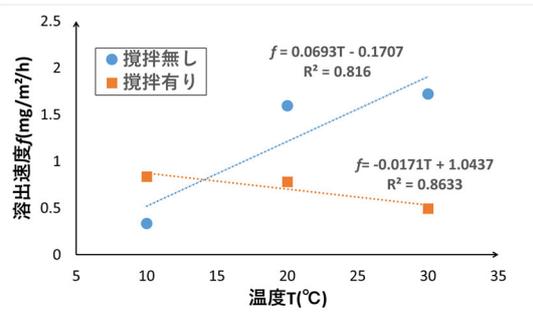


図12 水温と $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 溶出速度の関係

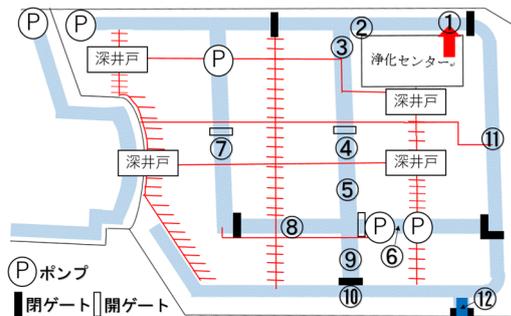


図13 干拓地内灌漑用水路網と採水地点

調査結果をもとに、干拓水路内水質をベースに、干拓地へのN、P供給量の概算を試みた。その結果、希釈率 Q/V (Q :浄化センターから水路に放流される流量、 V :水路内の湛水量)は0.07(1/day)となり、灌漑水量に対する放流水量の寄与は7%程度と見積もられた。この水量割合に実測濃度の結果を乗じて、用水路内の栄養塩供給量を概算した。その結果、放流水流入による窒素供給が12.6%増加し、リン供給が30.8%増加した。なお、放流水の寄与は適切なN濃度とともに、水田土壌等の現場環境に即した利用が望まれることも指摘されており、今後も放流水の多目的利用の可能性と問題点の検討を進める必要がある。

(5) 有明海湾奥部における水温の長期変化と水産生物に関する検討

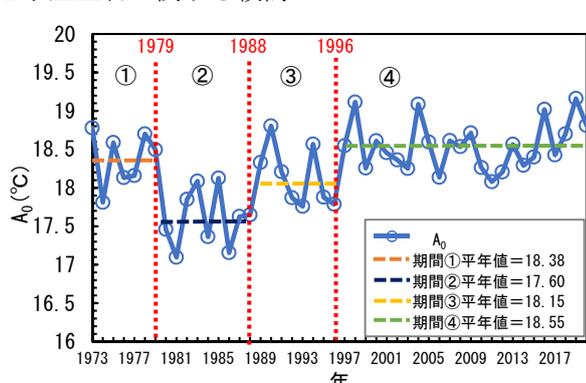


図14 有明海湾奥部における水温平年値 A_0 の均質区間と遷移年

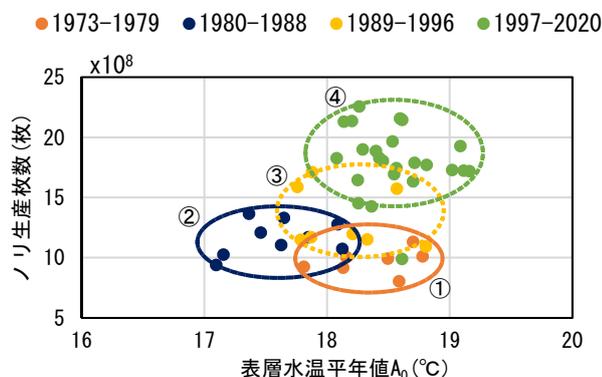


図15 ノリ生産枚数と表層水温との関係

●1973-1979 ●1980-1988 ●1989-1996 ●1997-2020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 右田朱里, 山西博幸 |
| 2. 発表標題 下水処理場の季別運転が処理水受水域の底質環境に及ぼす影響に関する研究 |
| 3. 学会等名 令和2年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山本啓太, 山西博幸 |
| 2. 発表標題 下水処理放流水受水空間におけるアンモニア態窒素輸送に関する研究 |
| 3. 学会等名 令和2年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山西博幸, 松尾広希, 古賀匠, 秋山夕輝 |
| 2. 発表標題 季別運転による処理水受水域内の底質環境に関する現地調査 |
| 3. 学会等名 第22回日本水環境学会シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 福本大地, 山西博幸 |
| 2. 発表標題 下水処理放流口を起点とした河口沿岸域における栄養塩輸送に関する現地調査 |
| 3. 学会等名 2019年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 牧野晃歩, 山西博幸 |
| 2. 発表標題 下水処理水を受水する水路内水質分布と灌漑効果に関する現地調査 |
| 3. 学会等名 2019年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山西博幸, 牧野晃歩, 福本大地 |
| 2. 発表標題 地域特性に応じた下水処理水の多目的利用に関する現地調査 - 灌漑用水と季別運転 - |
| 3. 学会等名 第54回日本水環境学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 山西博幸, 山本啓太, 右田朱里 |
| 2. 発表標題 季別運転による栄養塩輸送と底質環境に関する検討 |
| 3. 学会等名 第24回日本水環境学会シンポジウム |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 高井佑豪, 山西博幸 |
| 2. 発表標題 有明海湾奥部における水温の長期変動特性 |
| 3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 高椋大平, 山西博幸, 右田朱里, 伊瀬知昂希 |
| 2. 発表標題 下水放流水受水域内の栄養塩輸送に関する研究 |
| 3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊瀬知昂希, 山西博幸 |
| 2. 発表標題 下水処理放流受水域内の底泥が水域に及ぼす影響に関する研究 |
| 3. 学会等名 令和3年度日本水環境学会九州沖縄支部研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高井佑豪, 山西博幸 |
| 2. 発表標題 有明海湾奥部における水温の長期変化と水産生物に関する研究 |
| 3. 学会等名 第56回日本水環境学会年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

毎年、佐賀県鹿島市役所会議室にて、有明海湾奥西部水域の地域住民、水産漁業者および行政職員を対象に科研の研究成果報告を行い、研究成果の地域還元に供した。
 (実施日: 2020年8月20日, 2021年8月2日, 2022年5月12日: 広報記事<https://www.se.saga-u.ac.jp/pdf/202205180854370000.pdf>)

6. 研究組織

| | | | |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|