

ダムからの栄養塩供給による能動的水質管理
に関する基礎的研究
(調研 29-03)

研究成果報告書

平成 29 年度 一般社団法人九州地方計画協会公益事業支援

佐賀大学大学院工学系研究科都市工学専攻

三島 悠一郎

1. はじめに

これまでの水環境行政では汚濁負荷の排出を制限し、水域の水質保全を達成するために種々の施策が行われてきた。また、閉鎖性の強い水域では栄養塩の排出量削減も行われており、水質の環境基準達成率は上昇傾向にある。一方で、養殖からの栄養塩の需要が多く、なおかつ閉鎖性の強い有明海のような海域では、栄養塩の不足が生じるようになった。そのため、下水処理場では能動的水質管理の一つとして季別運転が行われている。

ダムも栄養塩の供給源としては重要な役割を持っており、平成 29 年 1 月には有明海沿岸におけるノリ養殖場への栄養塩供給を目的として、嘉瀬川ダム等から緊急放流が行われた。利水の観点からこの方策を考慮すると、ダム貯水は主として灌漑期のために蓄えられているものであり、冬期における放流は望ましくないと考えられる。そこで、より効果的に栄養塩を供給するために、ダム放流とともに湖底の泥や有明海に接続する河岸に蓄積したガタ土、佐賀平野のクリークに堆積している底泥を活用して栄養塩濃度を上昇させ、放流量を低減しつつ、栄養塩に富む放流水をダムの接続海域へ供給するという、ダムによる能動的水質管理に着想した。

本研究ではダム湖底や河岸に蓄積した底泥を用い、直上水の栄養塩濃度を上昇させる実験を通して、底泥を活用したダムによる能動的水質管理の実現可能性を検討した。

2. 研究方法

2.1 ダムにおける能動的水質管理の概念

ダムには貯水による利益が得られる一方で、土砂の輸送を阻害する不利益も生じている。更に水の流れが遅滞されることから、藻類が増殖しやすい条件になりやすく、同現象はダムの水質管理において典型的な課題の一つといえる。しかしこの現象は、溶存性の栄養塩が藻類の細胞に変換され、死滅した藻類が沈降することで栄養塩が湖底へ移動する蓄積現象であるとも換言することができる。ダム以外でもこのような栄養塩の蓄積現象は起きており、有明海北部沿岸および河口域でも観られる。河岸に堆積したガタ土には窒素、リンが豊富に含まれており、水温の上昇と共にガタ土から栄養塩が溶出し、内部生産へ大きな影響を及ぼしている。

そこで、能動的な水質管理をダムにも適用する、即ち蓄積された栄養塩を冬期に放出させて有明海沿岸のノリ養殖へ供給するという手法に着想した。利点としては、ダム湖や河岸に蓄積された栄養塩の量を冬期に減らすことができれば、夏期に発生しやすい藻類増殖に起因する水質問題の改善にも効果が期待される。さらに、ノリ養殖では沿岸域の塩分濃度低下は好まれないため、冬期にダムや河岸から栄養塩を放出させて直上水の栄養塩濃度を高めることで、ダムの放流量の低減にも繋げられる。

上記の手法は主に底泥直上水の栄養塩濃度を上昇させることを目的としたもので、以下の 2 つに分けられる。1 つ目はダム湖水の湖底に堆積した底泥を巻き上げて蓄積栄養塩を直上水

中へ移行させ、ダム系外に放流するものである。2つ目は冬期の緊急放流に際して河口部河岸に堆積したガタ土を巻き上げ、同様の現象により直上水の栄養塩濃度を上昇させるものである。

2.2 研究方法

前節で述べた手法の実現可能性を検討するために、採取したダム湖の底泥や河岸に堆積した底泥（ガタ土）を、ダム湖水と海水へそれぞれ接触させ、栄養塩濃度の上昇効果を2つの実験から調べた。

実験1では、底泥の接触時間と栄養塩の濃度の関係を調べた。嘉瀬川ダムの取水口から50m離れた地点で採取した底泥1.0gを、同地点で採水した湖水100mLに添加し攪拌した。水温は10°Cで固定した。接触時間が10分、20分、30分、40分、50分、60分、120分、180分において、リン酸、硝酸態窒素、アンモニア態窒素の濃度を測定した。

次に嘉瀬川ダム湖底および河岸に堆積した底泥を用いて、底泥と栄養塩溶出の間にある量的関係を明らかにする実験2を行った。嘉瀬川ダムおよび嘉瀬川、六角川、塩田川、鹿島川で採取した底泥を実験に供した。なお、河岸底泥は干潮時に干出する場所で、表層から5cmまでの深さのものを採取した。嘉瀬川ダム底泥にはダム湖水を、河岸底泥には嘉瀬川河口部で採取した海水を底泥直上水としてそれぞれ接触させた。ダム湖水の栄養塩の初期濃度は、リン酸、硝酸態窒素、アンモニア態窒素の濃度がそれぞれ0.024mg/L、0.6mg/L、0.11mg/Lであった。海水は0.14mg/L、4.0mg/L、0.03mg/Lである。100mLの直上水へ任意の湿潤重量で底泥を添加し、その重量をSSとして評価することで栄養塩の溶出とSS濃度、即ち底泥重量との量的な関係を明らかにした。

3. 結果と考察

3.1 栄養塩溶出と時間の関係

図-1に接触時間と栄養塩濃度の関係を示す。硝酸態窒素は攪拌直後から濃度が徐々に上昇し、30分経過後に0.85mg/Lの最大値を示した。その後は濃度が低下する現象が観られ、50分および60分経過後には初期濃度と同じ濃度まで低下した。120分後には再度濃度が上昇したものの、初期濃度と比較すると僅かである。アンモニア態窒素も同様の傾向を示し、50分経過後に0.425mg/Lの濃度を示した。一方で、リン酸の濃度上昇は観られたものの、僅かなものであった。

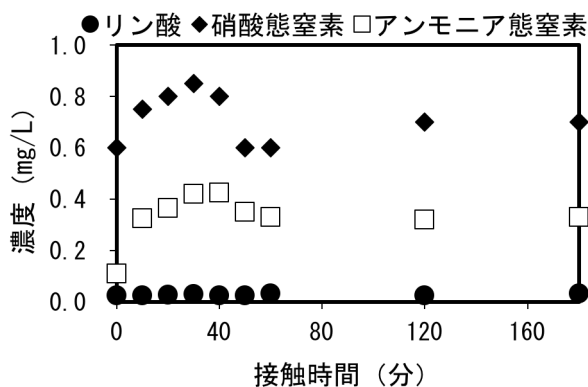


図-1 底泥と湖水の接触時間と栄養塩濃度の関係

実験時間は180分程度であること、水温が10℃であることを考慮すると、硝酸態およびアンモニア態窒素の濃度の低下は藻類による消費や、硝化、脱窒といった生物学的ではなく、吸着といった物理的な現象によるものであると推察される。一方で、リン酸は好気的な状態では底泥中の成分と結合しやすく、嫌気的条件下では放出される。ダム湖底から採取された底泥は速やかに密閉容器に保存したことから、実験開始直前までは嫌気的な状態にあったといえ、実験開始とともにORPが300mV以上の値である湖水に曝されているため、リン酸は放出されにくい条件であったことが推察される。

以上のことから、硝酸態窒素とアンモニア態窒素の濃度上昇効果は期待できるものの、リン酸の放出は難しいことが明らかになった。

3.2 SS濃度と栄養塩濃度の関係

図-2 および図-3 に嘉瀬川ダム底泥と嘉瀬川河口部の河岸で採取された底泥を用いた場合のSS濃度と栄養塩濃度の関係を示す。凡例は図-1と同様である。

図-2 から、溶出した栄養塩のうち、硝酸態とアンモニア態窒素の濃度はSS濃度の増加に伴い上昇した。リン酸に関しては、SS濃度の増加に依らず濃度変化が小さかった。これは3.1節でも述べたように、好気的条件下では底泥から湖水中へ移行されにくいことによるものであると考えられる。

嘉瀬川河岸の底泥を用いた場合の結果を示した図-3 を観ると、アンモニア態窒素を除いて、直上水である海水中の栄養塩の濃度はダム底泥を用いた場合よりも高くなった。SS濃度が上昇するに従い、硝酸態窒素の濃度は最大で5mg/Lまで上昇し、リン酸でも

0.20mg/L オーダーまで上昇した。一方でアンモニア態窒素の濃度上昇は計測できなかった。

リン酸の濃度上昇がダム底泥を用いた場合よりも大きかった要因として、酸化還元条件が大きく影響しているといえる。河岸の底泥は前述したとおり、表層から5cmのものであり、なおかつ干潟として干出する場所から採取している。そのため、ダム底泥を用いた場合とは異なり、河岸底泥は好気的な条件で環境中に存在し、実験中も好気的な水に曝されたことでリン酸の状態変化が少なかった。さらに、遊離可能なリン酸がそのまま直上水である海水

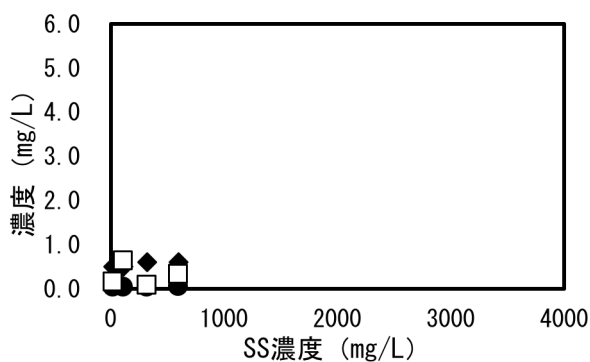


図-2 SS と栄養塩濃度の関係 (嘉瀬川ダム)

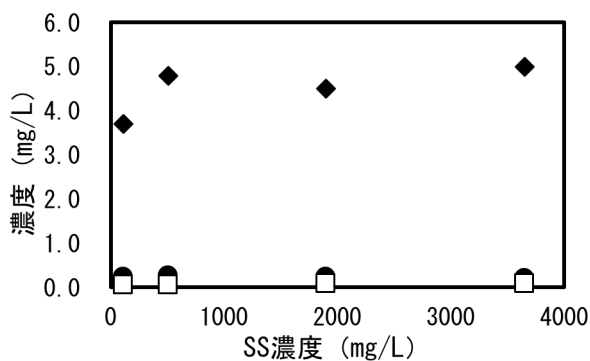


図-3 SS と栄養塩濃度の関係 (嘉瀬川河口部)

へ移動でき、濃度がダム底泥を用いた場合よりも高くなったと推察される。しかし、SS濃度が15,000mg/L以上のオーダーになると、リン酸が底泥に吸着される現象も観られた。

アンモニア態窒素の動態には河岸底泥が強く影響することが知られている。底泥はガタ土由来のものであり、シルト、粘土質が多く含まれる。これらの土質はアンモニアを吸着しやすいため、底泥中の窒素は吸着態アンモニアとしても保存されるため、河岸底泥を海水へ接触させることで海水のアンモニア濃度は上昇することが予想された。しかし実験結果は逆の現象が起きており、さらに硝酸態窒素の濃度がアンモニア態窒素よりも顕著に高かったことから、アンモニア態窒素が硝酸態窒素に硝化され、直上水には硝酸態窒素が多く供給されたと考えられる。

4. おわりに

本研究から、過剰な量の底泥を直上水と接触させると栄養塩の吸着現象が生じるものの、ダム湖底泥から直上水へ硝酸態窒素を中心とした窒素成分の供給は十分に可能であることが示された。また、河岸に堆積した底泥も直上水へ栄養塩を供給することが可能なことが示唆された。これは、冬期においてダムの放流に併せて底泥から栄養塩を放出させることで下流域での栄養塩の需要に応え、春期からは栄養塩の含有量が低下した底泥が直上水の栄養塩を再吸着して水質保全に繋がる、ダムを活用した能動的な水質管理に関する基礎的な知見を得た。

目次

報告書概要	1
第1章 序論	6
第2章 研究背景	
2.1 緒言	8
2.2 佐賀市下水浄化センターにおける能動的水質管理の事例	8
2.3 栄養塩の物質収支	9
2.4 ダムによる能動的水質管理	11
第3章 底泥からの栄養塩供給に関する基礎的検討	
3.1 緒言	13
3.2 実験方法	13
3.3 実験結果と考察	14
3.4 結語	19
第4章 結論	20
謝辞	20

第1章 序論

これまでの水環境行政では有機物や栄養塩といった水質汚濁の原因である物質の排出を制限し、水域の水質保全の達成するために種々の施策が行われてきた。下水道の整備は其中でも大きな役割を示しており、公共用水域における水質保全への寄与は大きい。さらに、ダム整備によって安定的な水の供給が行えるようになったことから、河川においては放流された下水処理水だけでなく、面的な汚濁負荷を希釈でき、水質保全がより達成されやすい環境にある。

また、閉鎖性の強い水域では栄養塩の排出量削減も行われており、水質の環境基準達成率は上昇傾向にある。しかし、マクロ的視点から物質収支を考慮すると、主に食品として系外からの栄養塩の持ち込みが多いことはこれまでと変わらないため、下水処理場等の廃水処理施設で処理された栄養塩は、放流水域へ移動するのではなく、大気中への拡散や、農地への還元、また余剰汚泥の焼却灰として最終処分場に固定されたりしていることになる。また、ダムにおいても上流から運搬された栄養塩がダム湖で捕捉されるためダム湖の富栄養化が問題となっている。一方で、下流では栄養塩の供給量低下に繋がっていることが指摘されている。将来的に、持続可能な循環型社会を確立するためにも、栄養塩の物質循環をよく理解した上での循環利用や効率的な分配が課題といえよう。

すでに現在、排出制限が推進されているなか、一部の海域では栄養塩の不足が指摘されている。特に、閉鎖性の強く、生産性の高い海域ではその傾向が顕著である。代表的な事例としては有明海が挙げられる。秋期から春期にかけて有明海北部沿岸ではノリ養殖が行われており、例年12月を過ぎると海水中の窒素およびリンを中心とした栄養塩の濃度が著しく低下する現象が観られている。ノリ養殖では、窒素濃度が低くなると色落ちが生じ始め品質低下に繋がり、その目安として $7\mu\text{mol/L}$ ($\approx 0.01\text{mg/L}$) が示されている。そのため、養殖業者は海水中の窒素濃度が低下すると窒素系の肥料を海域へ施肥し、色落ちを防止している。

この様に人為的な活動によって環境中では各種の場において栄養塩の存在量に貧富が生じている。この現象を場所的または時間的に平滑化させることで、生産活動において省エネルギー化、省資源化が得られることが期待される。その事例として下水処理場における能動的水質管理が挙げられる。佐賀市下水浄化センターでは冬期には処理水中のアンモニア態窒素の濃度を上昇させるために硝化抑制運転を実施し、夏期には高度処理を行う季別運転を実施している。これはノリ養殖への栄養塩の供給として下水処理場が寄与できているだけでなく、硝化運転においては曝気用ブロワーの省力運転にも繋がることから、省エネルギー化も達成できている。

しかし、ノリ養殖の需要に対して、下水浄化センターから放流された栄養塩量は不十分なため、嘉瀬川ダムから海域への栄養塩の供給を目的とした緊急放流が平成 29 年 1 月に行われた。ダム貯水は主として農業用水として灌漑期のために貯水されているものであり、冬期における放流は望ましくないと考えられる。そこで、より効果的に栄養塩を供給するために、ダム放流とともに湖底の泥や、有明海に接続する河岸に蓄積したガタ土、佐賀平野のクリークに堆積している底泥を活用して栄養塩濃度を上昇させ、放流量を低減ながら栄養塩に富む放流水をダムの接続海域へ供給するというダムによる能動的水質管理に着想した。この手法によれば、既存のステークホルダーに不利益を及ぼすことなく、漁業用水供給という新しい役割をダムへ与えられることが期待される。

本研究では上記の概念の実現可能性を検討するために、ダム湖底や河岸に蓄積した底泥を用いて、その直上水への栄養塩供給に関する基礎的な実験を実施した。

本報告書は以下の 4 章で構成されている。

第 1 章ではダムからの栄養塩供給による能動的水質管理に関する概論について述べた。

第 2 章では既往の能動的水質管理に紹介と新しく提案するダムからの栄養塩供給による能動的水質管理について説明する。

第 3 章では同手法の実現可能性を検討するために行った実験について記述し、その結果から利点と課題を説明する。

第 4 章では本研究から得られた成果を総括する。

第2章 研究背景

2.1 緒言

これまでの水質保全では、汚濁の原因となり得る窒素やリンなどの栄養塩を除去し、公共用水域の内部生産を抑制することが重要とされてきた。しかし水産活動の視点からは、廃水処理整備に起因する海域へ流入する栄養塩の減少はプランクトン減少、即ち漁業資源の減少に繋がることが危惧されている。このような社会的事情により、平成27年1月に改訂された流域別下水道整備総合計画調査指針と解説では、水質環境基準などの満たされるべき事項が満足できるのであれば、季別運転による能動的水質管理を行える規定が定められた。本章ではその事例として、佐賀市下水浄化センターにおける取り組みを概説する。また、持続的に能動的水質管理を行うにあたり必要な情報である物質収支について、嘉瀬川ダムおよびその下流に位置する佐賀市を事例として説明する。最後に、本研究で提案するダムからの栄養塩供給による能動的水質管理について述べる。

2.2 佐賀市下水浄化センターにおける能動的水質管理の事例

能動的水質管理を実施している下水浄化センターは全国に12箇所あり、その中に佐賀市下水浄化センターが含まれる。同センターは有明海最北部に位置し、処理水は本庄江川を経て有明海へ放流されている。例年11月～3月に、図-1に示す範囲でノリ養殖が行われており栄養塩の需要が一時的に高くなる。ノリ養殖では、ノリの細胞増殖のためにアンモニア態窒素が必要とされており、海域の栄養塩が枯渇した場合にはアンモニアまたは硝酸態窒素の施肥が行われている。

図-2には放流水質の変化を示す。図から分かる通り、12月からのノリ養殖最盛期に併せ、処理水中のアンモニア態窒素の濃度が上昇するように硝化抑制運転、即ち曝気量を減らす運転を実施している。その後、徐々に定常運転条件に戻し、6月の出水期には20mg/L以下になる処理操作が行われ、赤潮などによる水質汚濁防止に向けた取り組みが行われている。このような季別運転の成果として、下水浄化センターに近い養殖場ではノリの色落ちが抑制され、また施肥量も例年よりも減少したことが報告されている。

現在では、ノリ養殖へ与える放流水そのものの影響や、放流水由来のアンモニア態窒素の動態を明らかにするためのモニタリングが行われている。

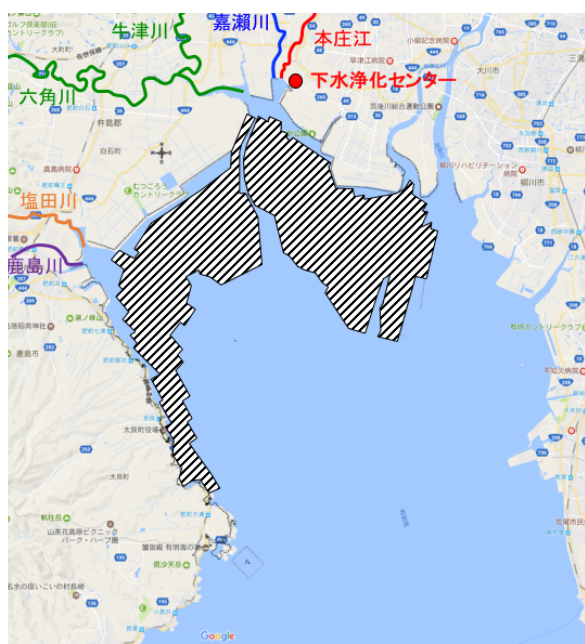


図-1 佐賀市下水浄化センターとノリ養殖場の位置図

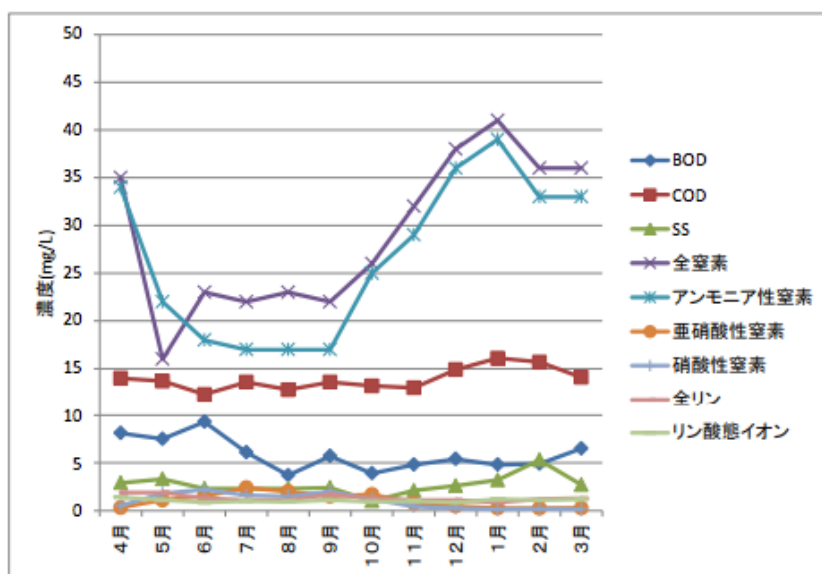


図-2 放流水質の変化

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（国土交通省）から引用

2.3 栄養塩の物質収支

全国の下水道普及率が70%を越えていることから、食品などに由来する栄養塩は下水道によって下水処理場へ集約されているといえる。このような点源は比較的制御が容易なものの、物質循環のフローから観ると量は限られている。そのため、量的にも満足され制御が比較的容易な面源の利活用も必要である。

その一つとしてダムによる能動的水質管理が期待される。そこで、嘉瀬川ダムにおける栄養塩の捕捉量を推計するために、栄養塩の年間における流出入負荷を算出した。その結果を図-3 および 4 に示す。なお、栄養塩は水文水質データベースで公開されている全窒素と全リンを対象とした。計算期間は 2016 年の 1 年間である。

図-3 から、2 月、3 月の流入負荷は極めて低いものの、その他の月では 10t/月以上の流入負荷があることが分かる。また、流出負荷は流入に対して極めて小さいことが分かった。窒素成分は藻類に同化されることで消費されるだけでなく、脱窒現象により水中から大気中へ放出される。そのため、全窒素の流入と流出負荷の差違が全て蓄積量とはいえないものの、上流から下流域へ運搬される全窒素がダム内で消費されていることが分かった。

全リンの場合も全窒素と同様の傾向を示している。しかし、全窒素と異なり全リンは不揮発性物質であるため、流入と流出の差違には蓄積現象が十分に含まれていると考えられる。

ここで、年間の流入負荷から流出負荷を差し引いて収支を取ると、68.9t の全窒素と、1.67t の全リンが消費、または蓄積されていることを意味している。

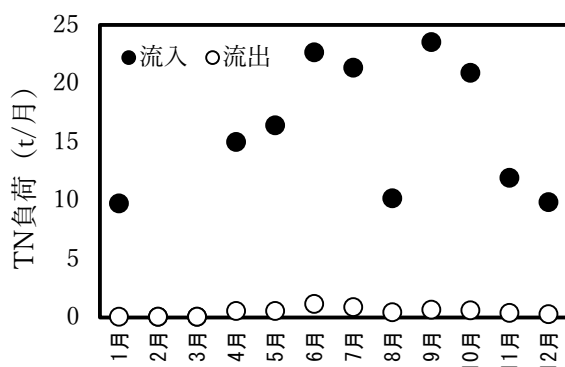


図-3 嘉瀬川ダムの流出入 TN 負荷

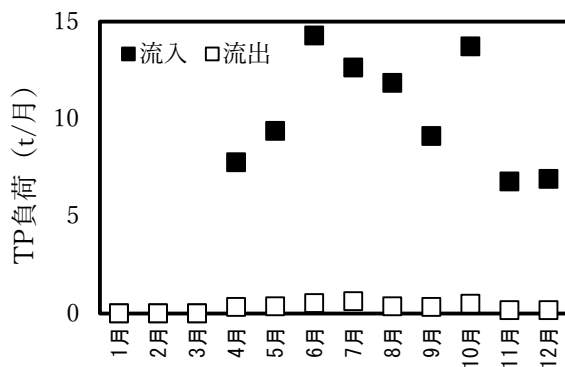
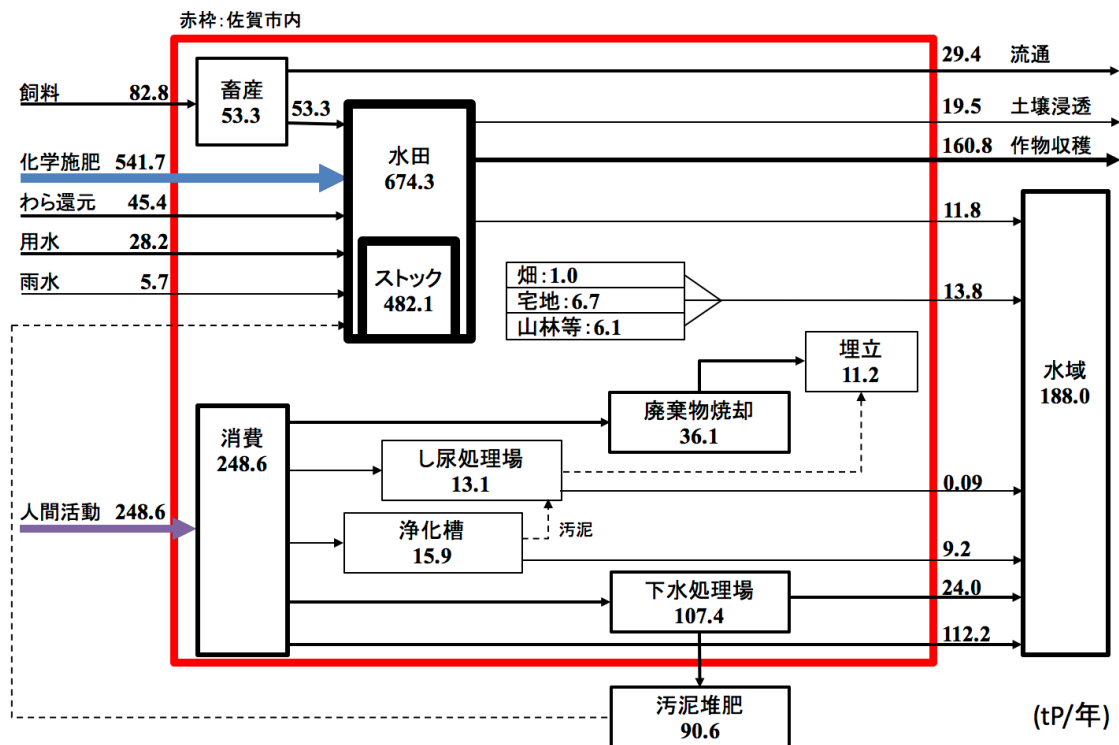


図-3 嘉瀬川ダムの流出入 TP 負荷



2.4 ダムによる能動的水質管理

前節までに述べたように、ダムは栄養塩を消費または蓄積していることが示された。一般的に、これはダムの富栄養化現象と定義できるものの、本研究で提案するダムによる能動的水質管理では栄養塩の貯蓄とも捉えることができる。また、下水道の能動的水質管理を例に考慮すると、夏期における高度処理を行っている状態である。そこで、冬期において下水処理場の季別運転のようにダムを活用した栄養塩の放出を行えることは、水質保全、水産振興の面で利益が大きいといえる。

上記の水質管理手法は、栄養塩が蓄積している底泥を活用して直上水の栄養塩濃度を上昇させることを目的としたものである。例えば、ダム湖底泥を巻き上げて直上水と接触させることで、底泥中の栄養塩を水中へ移行させ、栄養塩が豊富なダム湖水を放流するという手法が考えられる。さらに、この放流により流量が増えた河川においても栄養塩濃度を上昇させる機会がある。有明海湾奥部には干潟が広がっており、河川河口部の感潮域には河川底泥としてガタ土が堆積している。このガタ土には栄養塩が豊富に含まれており、年間を通して河川両岸に堆積する傾向にある。そのため、冬期のダム湖水放流中にこの堆積したガタ土を攪拌し、汽水域へ栄養塩を供給する手法も考えられる。

第 3 章 底泥からの栄養塩供給に関する基礎的検討

3.1 緒言

本研究で提案するダムにおける能動的水質管理では、底泥中に蓄積された栄養塩が直上水へ溶出するかどうか重要である。そこで、本章では基礎実験として、採取した底泥と直上水を接触、強攪拌させて栄養塩の溶出現象を調べた。その結果について述べ、ダムにおける能動的水質管の実現可能性について検討した。

3.2 実験方法

2.4 節で述べた手法の実現可能性を検討するために、採取したダム湖の底泥や河岸に堆積した底泥（ガタ土）を、ダム湖水と海水へそれぞれ接触させ、栄養塩濃度の上昇効果を 2 つの実験から調べた。

実験 1 では、底泥の接触時間と栄養塩の濃度の関係を調べた。嘉瀬川ダムの取水口から 50m 離れた地点で採取した底泥 1.0g を、同地点で採水した湖水 100mL に添加し攪拌した。接触時間が 10 分、20 分、30 分、40 分、50 分、60 分、120 分、180 分において、リン酸、硝酸態窒素、アンモニア態窒素の濃度を測定した。水温は 10℃ で固定した。

次に嘉瀬川ダム湖底および河岸に堆積した底泥を用いて、底泥と栄養塩溶出の間にある量的関係を明らかにする実験 2 を行った。嘉瀬川ダムおよび嘉瀬川（地点 A～C）、六角川（地点 A）、塩田川（地点 A～C）、鹿島川（地点 A、B）で採取した底泥を実験に供した。それぞれの採取地点は図-5 から 9 に示す。なお、河岸底泥は干潮時に干出する場所で、表層から 5cm までの深さのものを採取した。嘉瀬川ダム底泥にはダム湖水を、河岸底泥には嘉瀬川河口部で採取した海水を底泥直上水としてそれぞれ接触させた。ダム湖水の栄養塩の初期濃度は、リン酸、硝酸態窒素、アンモニア態窒素の濃度がそれぞれ 0.024mg/L、0.6mg/L、0.11mg/L であった。海水は 0.14mg/L、4.0mg/L、0.03mg/L である。100mL の直上水へ任意の湿潤重量で底泥を添加し、その重量を SS として評価することで栄養塩の溶出と SS 濃度、即ち底泥重量との量的な関係を明らかにした。



図-5 嘉瀬川ダムの採泥地点



図-6 嘉瀬川の採泥地点



図-7 六角川の採泥地点



図-8 塩田川の採泥地点



図-9 鹿島川の採泥地点

3.3 実験結果と考察

図-10 に接触時間と栄養塩濃度の関係を示す。硝酸態窒素は攪拌直後から濃度が徐々に上昇し、30分経過後に0.85mg/Lの最大値を示した。その後は濃度が低下する現象が観られ、50分および60分経過後には初期濃度と同じ濃度まで低下した。120分後には再度濃度が上昇したものの、初期濃度と比較すると僅かである。アンモニア態窒素も同様の傾向を示し、50分経過後に0.425mg/Lの濃度を示した。一方で、リン酸の濃度上昇は観られたものの、僅かなものであった。

実験時間は180分程度であること、水温が10℃であることを考慮すると、硝酸態およびアンモニア態窒素の濃度の低下は藻類による消費や、硝化、脱窒といった生物学的ではなく、吸着といった物理的な現象によるものであると推察される。一方で、リン酸は好氣的な状態では底泥中の成分と結合しやすく、嫌氣的条件下では放出される。ダム湖底から採取された底泥は速やかに密閉容器に保存したことから、実験開始直前までは嫌氣的な状態にあったといえ、実験開始とともにORPが300mV以上の値である湖水に曝されているため、リン酸は放出されにくい条件であったことが推察される。

以上のことから、硝酸態窒素とアンモニア態窒素の濃度上昇効果は期待できるものの、リン酸の放出は難しいことが明らかになった。

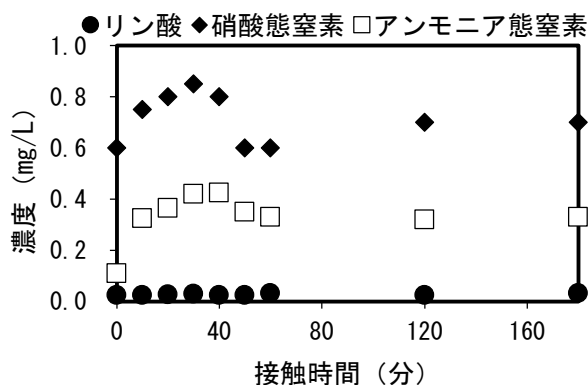


図-10 底泥と湖水の接触時間と栄養塩濃度の関係

図-11 に嘉瀬川ダム底泥を用いた場合のSS濃度と栄養塩濃度の関係を示す。

図から、溶出した栄養塩のうち硝酸態とアンモニア態窒素の濃度はSS濃度の増加に伴い上昇した。リン酸に関しては、SS濃度の増加に依らず濃度変化が小さかった。これは上記でも述べたように、好氣的条件下では底泥から湖水中へ移行されにくいことによるものであると考えられる。

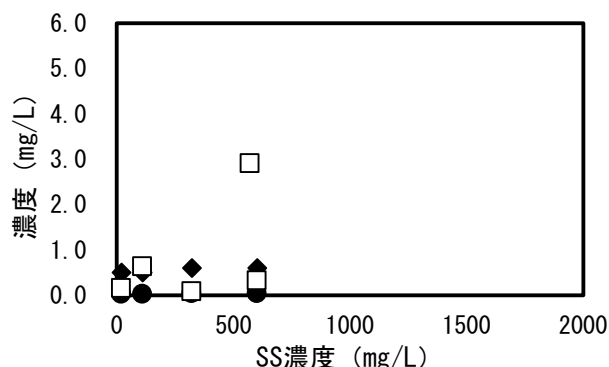


図-11 SS と栄養塩濃度の関係（嘉瀬川ダム）

図-12 から 14 に嘉瀬川の地点 A から C で採取した底泥を用いた場合の実験結果をそれぞれ示す。嘉瀬川の最下流で採取した A 地点の底泥を実験に用いた場合、図-12 からアンモニア態窒素を除いて、直上水である海水中の栄養塩の濃度はダム底泥を用いた場合よりも高くなった。SS 濃度が上昇するに従い、硝酸態窒素の濃度は最大で 5mg/L まで上昇し、リン酸でも 0.20mg/L オーダーまで上昇した。一方でアンモニア態窒素の濃度上昇は計測できなかった。

リン酸の濃度上昇がダム底泥を用いた場合よりも大きかった要因として、酸化還元条件が大きく影響しているといえる。河岸の底泥は前述したとおり、表層から 5cm のものであり、なおかつ干潟として干出する場所から採取している。そのため、ダム底泥を用いた場合とは異なり、河岸底泥は好気的な条件で環境中に存在し、実験中も好気的な水に曝されたことでリン酸の状態変化が少なかった。さらに、遊離可能なリン酸がそのまま直上水である海水中へ移動でき、濃度がダム底泥を用いた場合よりも高くなったと推察される。

次に A 点から C 点の差違について考察する。地点 A および B では、SS 濃度の上昇に伴い栄養塩濃度も上昇する現象が観察された。一方で、地点 C では SS 濃度が上昇するに従い、硝酸態窒素に関しては濃度が低下した。地点 C には河岸に底泥としてガタ土が堆積していたものの、その他の地点に比べて上流に位置するため、塩分濃度が地点 A や B とは異なることが考えられる。直上水の定常的な栄養塩濃度も異なることがその原因として考えられる。アンモニア態窒素の濃度は、地点 C の底泥を海水へ接触させた方が高くなることが分かった。ガタ土には微細な土粒子であるシルトや粘土が含まれており、これらがアンモニア態窒素を吸着する。そして、吸着量は塩分濃度が高いほど少なく、低いほど多くなる。よって、上流側の底泥（ガタ土）は下流へ輸送されることで高い塩分濃度の汽水に接触し、アンモニア態窒素を放出することができるため、上流側の底泥はアンモニア態窒素の供給源として有効に活用することができる可能性が高いといえる。

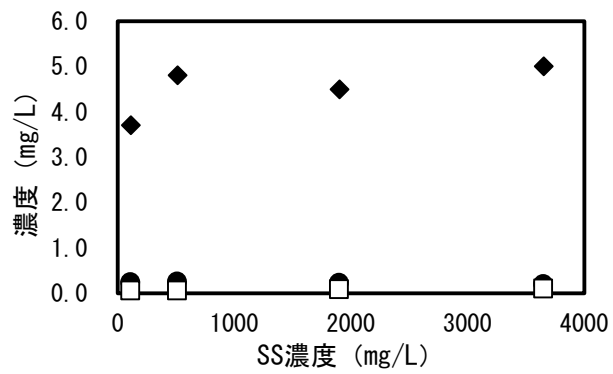


図-12 SS と栄養塩濃度の関係（嘉瀬川 A）

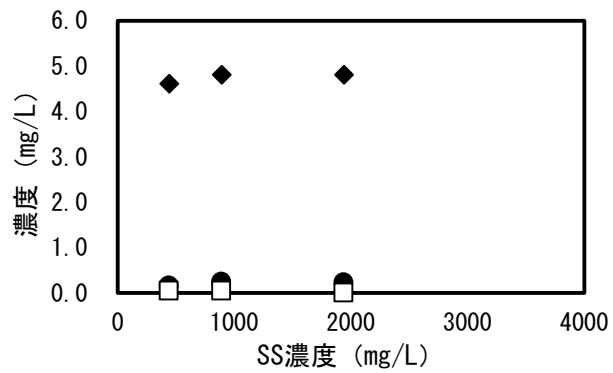


図-13 SS と栄養塩濃度の関係（嘉瀬川 B）

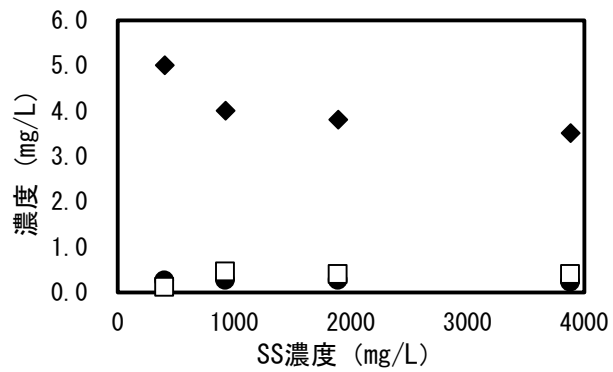


図-14 SS と栄養塩濃度の関係（嘉瀬川 C）

図-15には六角川河口の地点Aで採取した底泥を用いた場合の実験結果を示す。六角川では上流側で河岸に接近できなかったため、河口部の地点Aで採取した底泥を用いた結果を示す。図から、各水質共に嘉瀬川地点Aと同様の傾向を示していることが分かる。

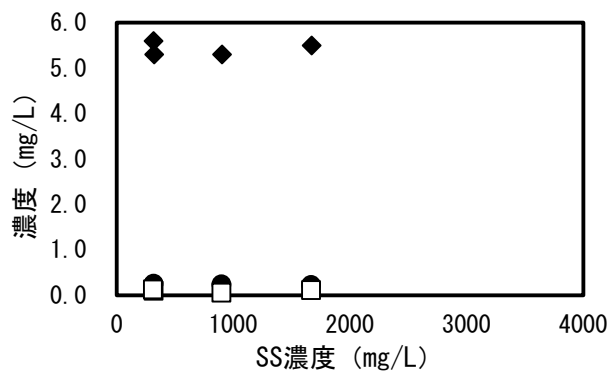


図-15 SSと栄養塩濃度の関係（六角川A）

図-16から20に塩田川の地点AからC、鹿島川の地点A、Bで採取した底泥を用いた場合の実験結果をそれぞれ示す。塩田川の底泥も、溶出濃度および地点間の差違において同様の現象が確認された。上流側の底泥を用いると硝酸態窒素濃度は低く、アンモニア態窒素は高くなる傾向を示した。

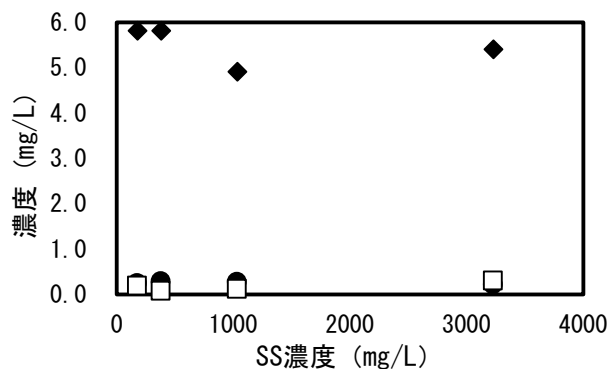


図-16 SSと栄養塩濃度の関係（塩田川A）

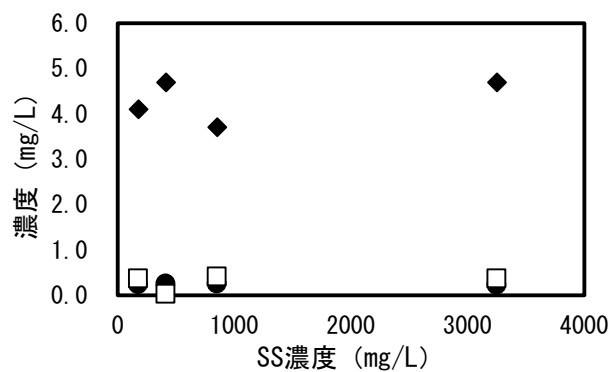


図-17 SS と栄養塩濃度の関係（塩田川 B）

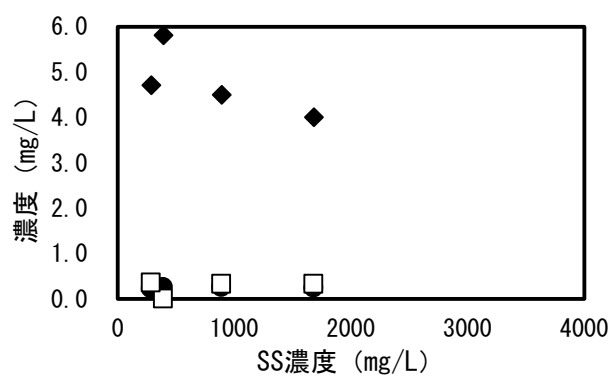


図-18 SS と栄養塩濃度の関係（塩田川 C）

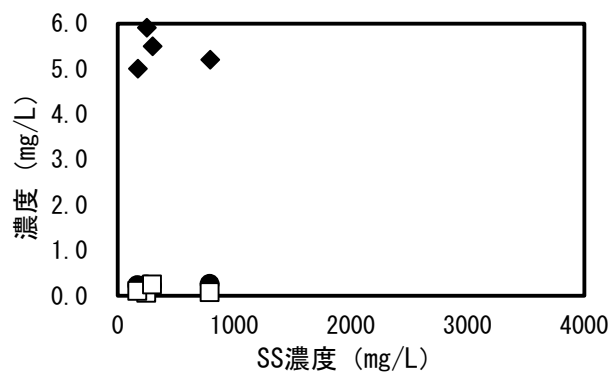


図-19 SS と栄養塩濃度の関係（鹿島川 A）

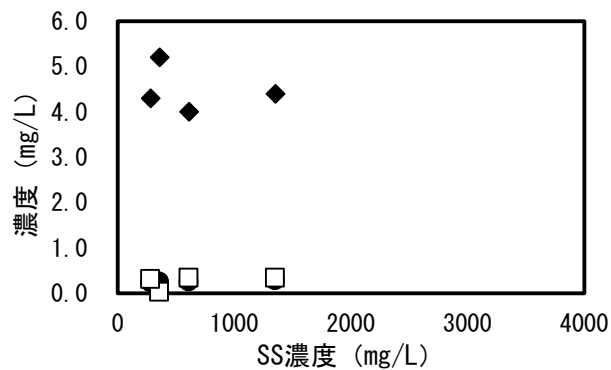


図-20 SS と栄養塩濃度の関係（鹿島川 B）

3.4 結語

以上の実験結果から得られた結論を以下にまとめる。

実験 1 から、底泥と直上水の接触時間は 30～40 分程度が最適であり、長時間の接触は栄養塩の再吸着などが発生するため、直上水中の栄養塩濃度が低下することが分かった。

実験 2 からは、SS 濃度と栄養塩濃度を明らかにした。SS 濃度が上昇するほど、溶出する栄養塩も増加して濃度が上昇することが分かった。しかし、15,000mg/L 以上の SS 濃度では再吸着現象が卓越し、栄養塩濃度が低下することが示された。また、同実験データの地点間の差違に着目すると、上流側のガタ土で構成される底泥を河口部へ輸送することで、水中へアンモニア態窒素を供給できる可能性が極めて高いことが示された。

以上のことから、ダム湖においては底泥巻き上げによる直上水への栄養塩供給を行うことで濃度を上昇させ、その後の放流によって下流域へ栄養塩を供給できることが分かった。さらにはダム湖からの放流に際して、河川部でも河岸底泥を併せて利用することでアンモニア態窒素、硝酸態窒素を海水へ供給できることが分かった。

第4章 結論

本章では各章で得られた主要な知見を取りまとめ、ダムにおける能動的水質管理の実現可能性について言及する。

第1章の序論では、新しい水環境保全の一つとして能動的水質管理が重要であり、その技術の確立のためには栄養塩の物質収支も併せて明らかにする必要性を示した。その上で、本研究で提案するダムにおける能動的水質管理について概説した。

第2章では能動的水質管理の先行事例を示し、さらに嘉瀬川ダムや佐賀市のリン資源フローに基づいて、ダムにおける能動的水質管理の有用性について説明した。

第3章では第1章および2章で示したダムにおける能動的水質管理に実現可能性があるかを実験的に検討した。実験結果から、ダム湖において直上水へ栄養塩を供給し、それを放流するダムのみの能動的水質管理の実現可能性が示された。また、河岸に堆積した底泥も併せて活用することでより効果的に下流への栄養塩供給を行えることが示された。

以上のことから、本研究で提案するダムにおける能動的水質管理には実現可能性があることが実験から明らかになった。今後、より定量的な調査として、各所の底泥の栄養塩蓄積量を明らかにし、海域への栄養塩供給量の物質収支を算定する。これにより、より安全かつ持続可能性のあるダムにおける能動的水質管理が可能になる。

謝辞

本研究は一般社団法人九州地方計画協会公益事業の支援を受けたものである。本稿において関係各位に謝意を示す。

謝辞