

— 論文 —

諫早湾および隣接する調整池における底質の栄養塩分布*

手塚 公裕^{†**}・片野 俊也[†]・濱田 孝治[†]・加 瑞[†]・日野 剛徳[†]・
速水 祐一[†]・伊藤 祐二[†]・大串 浩一郎[‡]

要 旨

1997年、諫早湾に潮受け堤防が建設されて以来、調整池底質の栄養塩調査はあまり行われてこなかった。今後予想される排水門の開放に伴う底質の巻き上げの影響を評価するため、2011年2月に諫早湾8地点と調整池5地点の底質調査を行い、栄養塩分布を調べた。底質間隙水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、諫早湾と調整池で有意差($P>0.05$)はなかった。開門に伴い調整池全域の底質が深さ10cmまで巻き上がった場合における間隙水からの栄養塩放出量を試算した結果、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は7.1t ($5.1\times 10^5\text{mol}$)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 量は1.0t ($3.2\times 10^4\text{mol}$)と見積もられた。底質の平均吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は、諫早湾で $1.8\mu\text{mol gDW}^{-1}$ 、調整池で $8.0\mu\text{mol gDW}^{-1}$ であり、有意差($P<0.05$)があった。これは淡水化で塩分の低下した調整池底質の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸着能が高まった結果と考えられた。開門に伴う調整池の塩分増加により調整池底質から $\text{NH}_4\text{-N}$ が脱着し、海水に拡散する可能性がある。そのため、開門に伴う諫早湾と調整池の栄養塩濃度変化を正確に予測するには、底質の巻き上げの程度や脱着する $\text{NH}_4\text{-N}$ 量について詳細な検討が必要である。

キーワード：諫早湾、底質、間隙水、栄養塩、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$

1. はじめに

諫早湾は、有明海西部に位置し、北西を多良山系、南を島原半島に囲まれ、湾奥には潮受け堤防によって淡水

化した調整池がある。1986年に防災と農地造成を目的とした国営諫早湾干拓事業が始まり、1997年に全長7kmの潮受け堤防が建設された。調整池には、長崎県の多良山系南斜面から諫早市中心市街地を流れる一級河川本明川が流入しており、貯留水は潮受け堤防の北部と南部の排水門と中央部のポンプ場を介して排水されている。排水の管理は、調整池に海水が侵入しないように流入水量や潮受け堤防内外の水位を考慮して実施されている。

2010年12月、福岡高等裁判所の判決により、諫早湾干拓事業が諫早湾およびその近傍を含む有明海の環境に及ぼす影響を解明するために、潮受け堤防排水門の中長期開門調査を実施することが確定した。諫早湾潮受け堤

* 2011年6月11日受領；2012年2月11日受理

著作権：日本海洋学会，2012

[†] 佐賀大学 低平地沿岸海域研究センター

〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地

[‡] 佐賀大学 大学院工学研究科

〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地

** 連絡著者：手塚 公裕

TEL: 0952-28-8816

e-mail: sj7772@cc.saga-u.ac.jp

防排水門を開放することにより、水質・底質環境の再生、漁獲量の回復等の効果が期待されるが、一方で開門が環境悪化を引き起こす可能性も懸念される。開門に伴う環境悪化を起こす現象の1つとして、排水門付近の流速が増大することによる諫早湾と調整池における底質の巻き上げと、それに伴う濁水の発生が指摘されている（中・長期開門調査検討会議, 2003）。また、一般に底質間隙水には水中よりも高濃度の栄養塩が含まれているため（細見・須藤, 1992; 佐々木ら, 1995; 日比野・松本, 2006）、底質の巻き上げが生じると間隙水の栄養塩が水中へ拡散し、栄養塩濃度や一次生産を増加させる可能性がある。

諫早湾の底質に関する既往の研究では、堆積環境の変遷（横瀬ら, 2005）、有機物分布の成因（岡村ら, 2005）、浮泥層厚と粒度組成の分布（松岡, 2006）、経年変化と分布特性（李・松永, 2010）が明らかにされた。これらの研究は、主に諫早湾の潮受け堤防外を対象としており、調整池の研究は皆無である。また、潮受け堤防排水門の開放を考慮した研究は実施されていない。

本研究は、諫早湾の潮受け堤防排水門の開放に伴う底質の巻き上げの影響を評価するため、諫早湾と調整池における底質の栄養塩分布を明らかにすることを目的とする。

2. 調査方法

底質調査地点を Fig. 1 に示す。2011 年 2 月に諫早湾 8 地点と調整池 5 地点の底質調査を実施した。底質の不攪乱試料については、潜水士がステンレス製・内径 ϕ 7.5×100 cm の固定ピストン型シンウォールサンプラー（地盤工学会, 2009）を用いて直接採取した。水揚げした試料を現地で 0~5, 5~10, 30~40, 60~70, 90~100 cm の 5 層に切り分け、直ちに真空パックを施し、約 5°C の温度環境で密閉保存し、実験室に持ち帰った。

持ち帰った試料の前処理は次の方法で行った。湿潤試料を遠心分離（4,000rpm, 5 分間）して上澄み液を抽出し、それを 0.45 μ m のメンブランフィルターで濾過して間隙水を得た。また、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ を抽出するために、分離した底質 3 g に 2M-KCl を 30 mL 加え、20 分間振とうした後に遠心分離により上澄み液を得る操作を行った（Morin and Morse, 1999; 徳永ら, 2006）。この

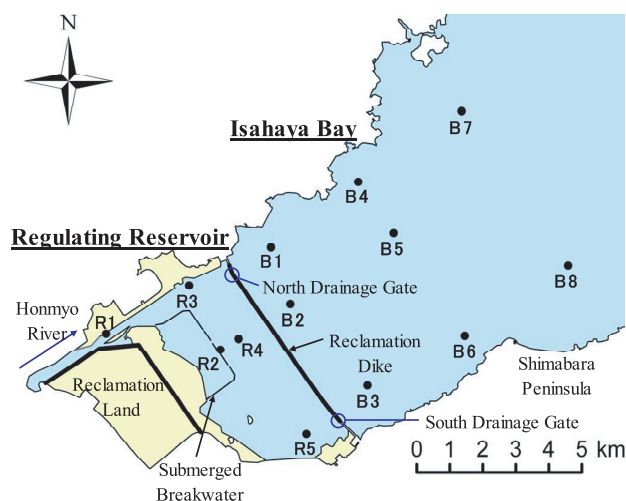


Fig. 1. Study site and sampling stations (●).

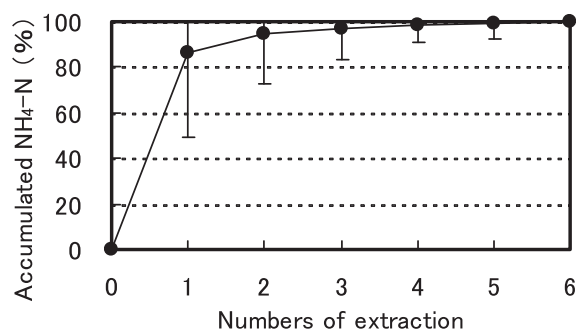


Fig. 2. Cumulative extracted $\text{NH}_4\text{-N}$ from sediments as a function of numbers of extraction. Data are means for 13 core samples and error bars indicate minimum and maximum values.

操作を 6 回反復することにより、ほぼ全ての吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ を抽出できたことを確認した（Fig. 2）。

底質間隙水と吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 抽出液の $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ はオートアナライザー（SWAAT, BLTEC）を用いて定量し、 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の含量を I-N とした。底質の含水率は、採取試料を 110°C で 2 時間乾燥し、減少した重量から算出した（環境省, 2001）。また、乾燥させた試料を 63 μ m ふるいで分け、通過した試料の重量から含泥率を求めた（Eleftheriou and McIntyre, 2005）。TOC は、採取試料を乾燥後メノウ乳鉢で粉碎し、1N-HCl を添加して炭

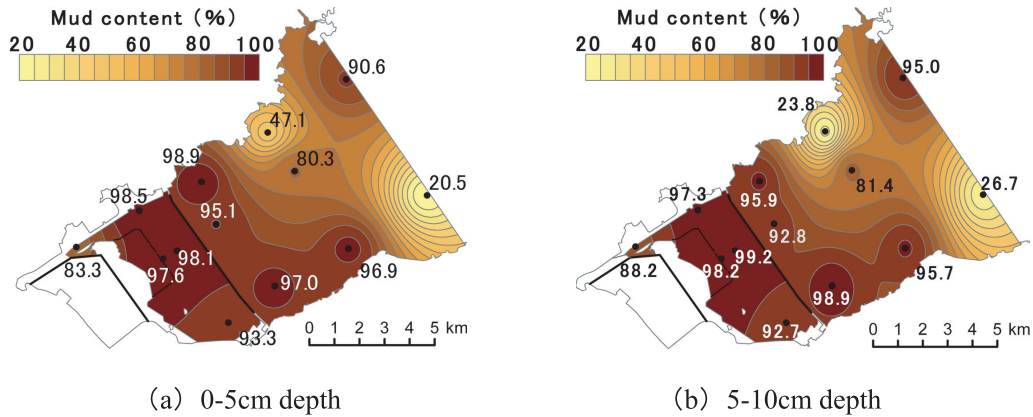


Fig. 3. Horizontal distribution of mud content.

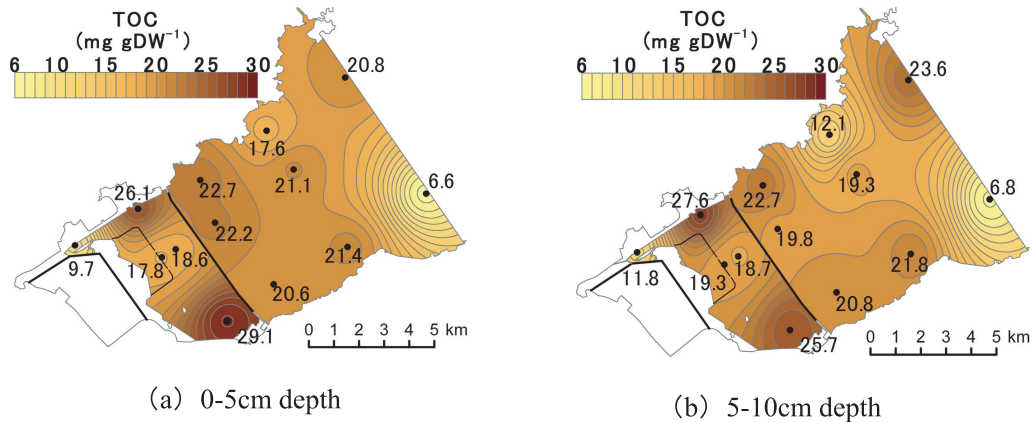


Fig. 4. Horizontal distribution of TOC.

酸カルシウムを除去する前処理を行い、CHN コーダ (JM-10, J-Science LAB) で分析した。なお、30 cm 以深では、分析に必要な間隙水量が採取できなかったため、底質間隙水の分析は 0~5 cm, 5~10 cm のみを対象とした。

3. 結果

3.1 底質の平面分布

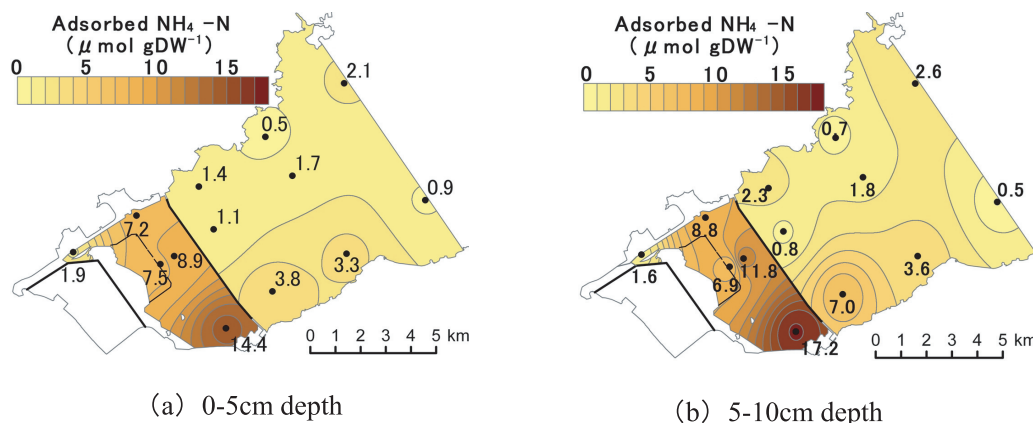
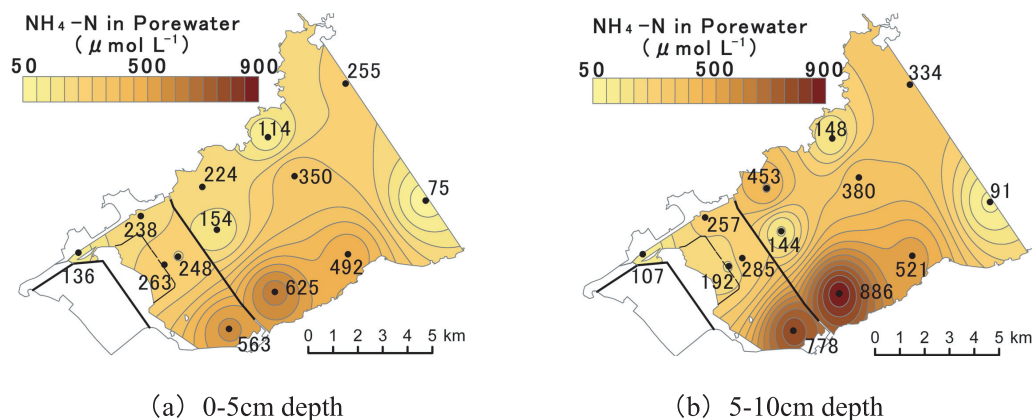
3.1.1 含泥率の平面分布

含泥率の平面分布を Fig. 3 に示す。深さ 0~5 cm の含泥率は、諫早湾では 20.5~98.9% (平均 78.3%)、調整池では 83.3~98.5% (平均 94.2%) で分布し、深さ 5~10 cm は、諫早湾では 23.8~98.9% (平均 78.3%)、

調整池では 88.2~99.2% (平均 94.2%) で分布していた。諫早湾では、湾中央北部 (B4) と湾口部南側 (B8) の深さ 0~10 cm で 21~47% と低い値を示していた。調整池では本明川河口 (R1) で 83~88% とやや低い値であった。B4, B8, R1 では細かな貝殻片が比較的多く混在していたため、その影響で含泥率が低い値を示したものと考えられる。また、諫早湾口部南側 (B8) では、湾口部の流速が中央より南側で強いことから (中村ら, 2002)、細かな底質が巻き上げられ、移送されたため低い値を示したと推察される。

3.1.2 TOC 含有量の平面分布

TOC 含有量の平面分布を Fig. 4 に示す。深さ 0~5 cm の TOC 含有量は、諫早湾では 6.6~22.7 mg

Fig. 5. Horizontal distribution of adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$.Fig. 6. Horizontal distribution of $\text{NH}_4\text{-N}$ in porewater.

gDW^{-1} (平均 19.1 mg gDW^{-1}), 調整池では $9.7 \sim 29.1 \text{ mg gDW}^{-1}$ (平均 20.3 mg gDW^{-1}) で分布し, 深さ $5 \sim 10 \text{ cm}$ は, 諫早湾では $6.8 \sim 23.6 \text{ mg gDW}^{-1}$ (平均 18.4 mg gDW^{-1}), 調整池では $11.8 \sim 27.6 \text{ mg gDW}^{-1}$ (平均 20.7 mg gDW^{-1}) で分布していた。深さ $0 \sim 5 \text{ cm}$ と $5 \sim 10 \text{ cm}$ における TOC 含有量について F-検定および t-検定を行った結果, 諫早湾と調整池の間に有意差 ($P > 0.05$) はみられなかった。また, 諫早湾と調整池では深さ $0 \sim 5 \text{ cm}$ と $5 \sim 10 \text{ cm}$ の平面分布は概ね一致していた。調査地点の特徴は, 諫早湾では湾央北部 (B4) と湾口部南側 (B8) で低く, 調整池では本明川河口 (R1) で低いことである。これらの地点では含泥率も低いことから, 水底付近に流れがあり細かな粒子が堆積しにくい環境であったと推測される。

3.1.3 吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の平面分布

吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の平面分布を Fig. 5 に示す。深さ $0 \sim 5 \text{ cm}$ の吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は, 諫早湾では $0.5 \sim 3.8 \mu\text{mol gDW}^{-1}$ (平均 $1.8 \mu\text{mol gDW}^{-1}$), 調整池では $1.9 \sim 14.4 \mu\text{mol gDW}^{-1}$ (平均 $8.0 \mu\text{mol gDW}^{-1}$) で分布し, 深さ $5 \sim 10 \text{ cm}$ は, 諫早湾では $0.5 \sim 7.0 \mu\text{mol gDW}^{-1}$ (平均 $2.4 \mu\text{mol gDW}^{-1}$), 調整池では $1.6 \sim 17.2 \mu\text{mol gDW}^{-1}$ (平均 $9.3 \mu\text{mol gDW}^{-1}$) で分布していた。吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の平面分布で最も顕著な特徴は, 全体的に諫早湾で低く, 調整池で高いことである。F-検定および t-検定を行った結果, 深さ $0 \sim 5 \text{ cm}$ における諫早湾と調整池の間に有意差 ($P < 0.05$) がみられた。また, 両対象水域では深さ $0 \sim 5 \text{ cm}$ と $5 \sim 10 \text{ cm}$ の吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量はほぼ同様の平面分布を示し, 深さ $5 \sim$

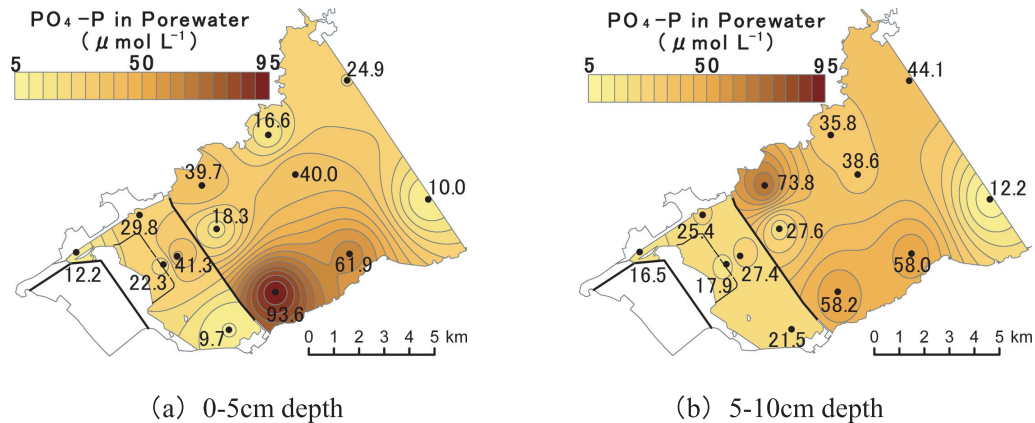


Fig. 7. Horizontal distribution of $\text{PO}_4\text{-P}$ in porewater.

10 cm で高い傾向がみられた。諫早湾口部南側 (B8) と調整池の本明川河口 (R1) における吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は低く、この特徴は TOC 含有量と同様であることから両者の関連性が示唆される。

3.1.4 間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の平面分布

間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の平面分布を Fig. 6 に示す。深さ 0~5 cm の間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は、諫早湾では 75~625 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (平均 286 $\mu\text{mol L}^{-1}$)、調整池では 136~563 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (平均 290 $\mu\text{mol L}^{-1}$) で分布し、深さ 5~10 cm は、諫早湾では 91~886 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (平均 370 $\mu\text{mol L}^{-1}$)、調整池では 107~778 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (平均 324 $\mu\text{mol L}^{-1}$) で分布していた。深さ 0~5 cm と 5~10 cm における間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度について F-検定および t-検定を行った結果、諫早湾と調整池の間に有意差 ($P>0.05$) はみられなかった。これは吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量とは異なる特徴である。一方、諫早湾口部南側 (B8) や調整池の本明川河口 (R1) で低く、諫早湾と調整池の南部排水門付近 (B3, R5) で高い傾向は吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量と同様であり、間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の関連性がみられた。なお、間隙水の $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、全地点で定量下限 (0.36 $\mu\text{mol L}^{-1}$) 未満であり、深さ 0~10 cm の底質は全域で還元状態にあったものと推測される。

3.1.5 間隙水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の平面分布

間隙水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の平面分布を Fig. 7 に示す。深さ 0~5 cm の間隙水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、諫早湾では 10.0~93.6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (平均 38.1 $\mu\text{mol L}^{-1}$)、調整池では 9.7~41.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (平均 23.1 $\mu\text{mol L}^{-1}$) で分布し、深さ 5~10 cm の間隙水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は、諫早湾では 12.2~73.8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (平均 43.5 $\mu\text{mol L}^{-1}$)、調整池では 16.5~27.4 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (平均 21.7 $\mu\text{mol L}^{-1}$) で分布していた。深さ 0~5 cm と 5~10 cm における間隙水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度について F-検定および t-検定を行った結果、諫早湾と調整池の間に有意差 ($P>0.05$) はみられなかった。深さ 0~5 cm と 5~10 cm の平面分布はほぼ同様であり、諫早湾口部南側 (B8) や調整池の本明川河口 (R1) で低く、諫早湾の南部排水門付近 (B3) で高かった。これらの特徴は、間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と概ね同様であった。しかし、調整池の南部排水門付近 (R5) の深さ 0~5 cm では、間隙水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は 563 $\mu\text{mol L}^{-1}$ と調整池で最も高い値を示したが、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は 9.7 $\mu\text{mol L}^{-1}$ と調整池で最も低い値を示しており、間隙水の $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{PO}_4\text{-P}$ の生成機構に違いがあるものと推察される。

3.2 底質の鉛直分布

3.2.1 含泥率の鉛直分布

含泥率の鉛直分布を Fig. 8 に示す。大部分の地点では全層で 80% 以上の高い値を示していたが、諫早湾の

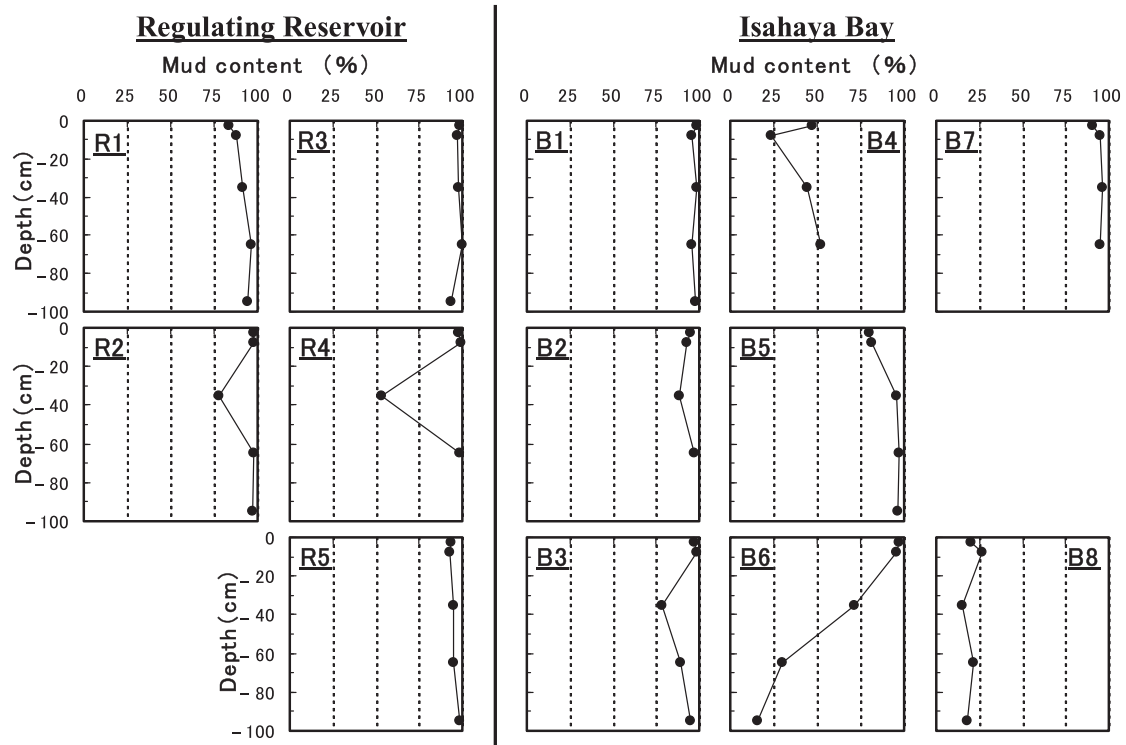


Fig. 8. Vertical profiles of mud content.

湾中央部 (B4) と湾口部南側 (B8) では全層で 20~50%程度と低い値であった。また、諫早湾中央南部 (B6) では深い層ほど低く、調整池中央部 (R2, R4) では深さ 30~40 cm 層で低い値を示した。B4 と B8 では全層で低い含泥率を示していることから、海底面付近に恒常的な流れが生じており、細かな粒子が堆積しなかったものと考えられる。一方、B6, R2, R4 では深さによって含泥率が異なるため、過去に流れの変化や覆砂等の人為的作用があった可能性が考えられる。

3.2.2 TOC 含有量の鉛直分布

TOC 含有量の鉛直分布を Fig. 9 に示す。TOC 含有量について F-検定および t-検定を行った結果、諫早湾と調整池の間に有意差 ($P > 0.05$) はみられなかった。本明川河口 (R1) 以外の地点では、深い層ほど TOC 含有量が低い傾向がみられた。これは堆積時間が長い深い層ほど有機物の嫌気分解が進んでいたためと考えられる。一方、R1 では他の地点とは異なり 10 cm 以浅で低い値

を示していた。調整池では潮受け堤防の締め切りにより潮汐がなくなり、それに伴い R1 では感潮域特有の懸濁物質の沈積現象が生じなくなったと考えられる。また、R1 は本明川河口に位置しているため、他の地点よりも水底付近の流れが強く、細かな粒子が堆積しにくい地点であると推測される。

3.2.3 吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の鉛直分布

吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の鉛直分布を Fig. 10 に示す。深さ 0~100 cm の全層において、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は諫早湾で低く、調整池で高い傾向がみられた。F-検定および t-検定を行った結果、諫早湾と調整池の間で有意差 ($P < 0.05$) が確認された。諫早湾の吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は鉛直方向に明確な変化傾向はなかった。一方、調整池では、北部排水門付近 (R3) の深さ 60~70 cm、南部排水門付近 (R5) の 30~40 cm にピークがあり、他の地点よりも高い値を示した。R3, R5 では全層で含泥率が高いことから底質は乱されることなく堆積し、有機物の

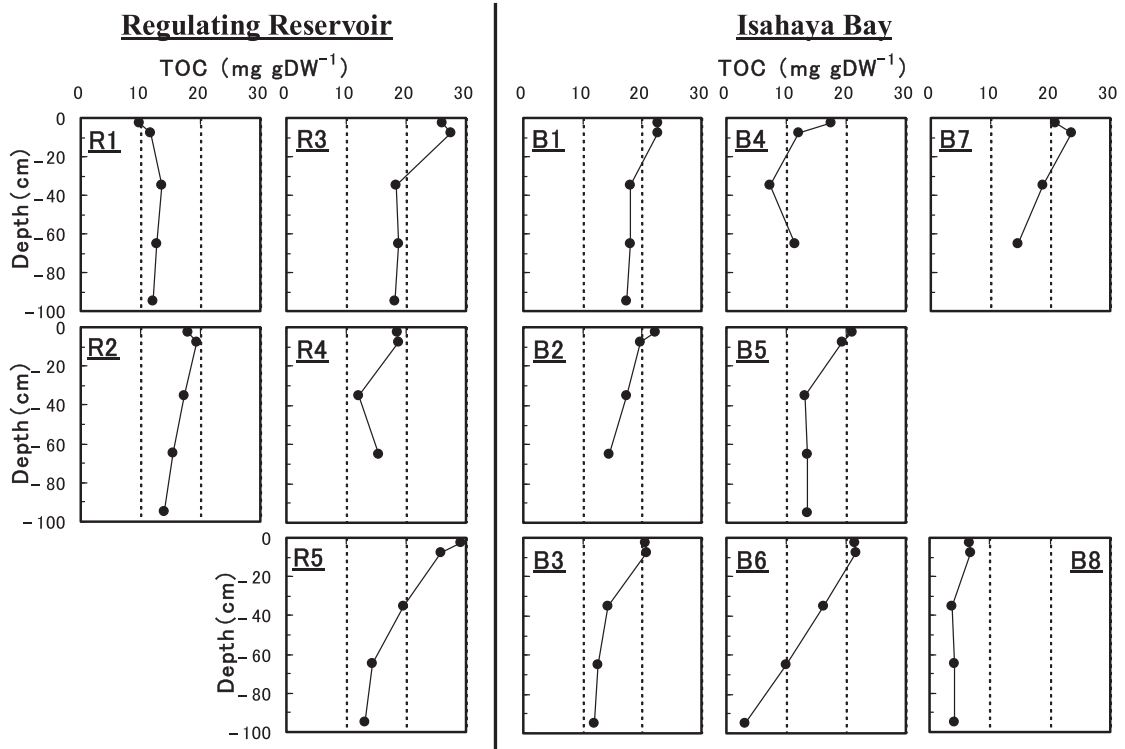


Fig. 9. Vertical profiles of TOC.

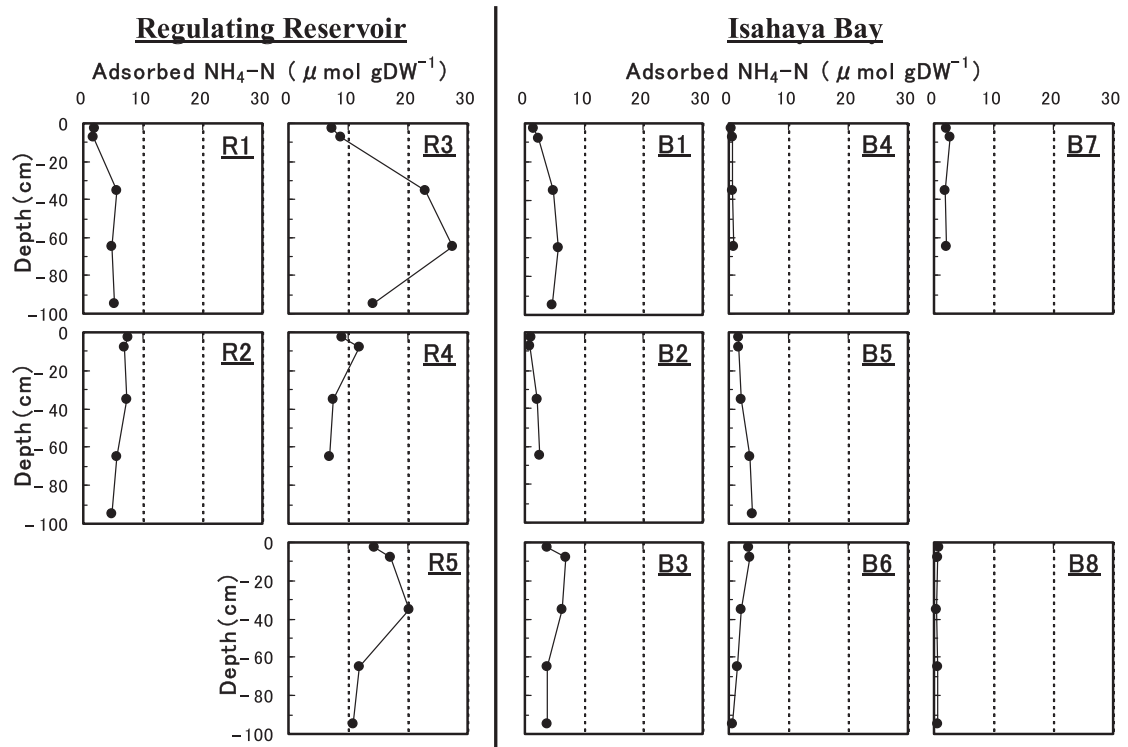


Fig. 10. Vertical profiles of adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$.

嫌気分解が進みやすい環境であったと推察される。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着量は、底質粒径が小さいほど多くなる傾向があり（徳永ら, 2006; Raaphorst and Malschaert, 1996), 含泥率が高く比表面積が大きな R3, R5 では、より多くの $\text{NH}_4\text{-N}$ が底質に吸着したものと考えられる。また、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は、ピークの深さまでは、深いほど高い値を示したことから、堆積時間の長い深い層では有機物の分解が進み吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ が蓄積していたものと考えられる。なお、調整池の他の地点 (R1, R2, R4) では吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ の蓄積がみられなかった。R1 の深さ 0~10 cm 層では含泥率が低く河川からの土砂供給の影響を受けていたものと考えられる。また、R2, R4 では 30~40 cm 層の間に含泥率の低い層があることから過去に底質の攪乱等があった可能性がある。これらの影響により R1, R2, R4 では吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ が蓄積しなかったものと推測される。

4. 考察

4.1 底質の栄養塩分布を特徴づける要因

4.1.1 有機物分解による $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成

TOC 含有量と吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の関係を Fig. 11 に示す。同じ TOC 含有量の試料の吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量を見ると、諫早湾よりも調整池で高い傾向が確認された。吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ は有機物の分解により生じ（西條・三田村, 1995; 山本ら, 1998), 底質への $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着能は塩分が低いほど強い（徳永ら, 2007; Hou *et al.*, 2003; Weston *et al.*, 2010)。これらのことから、間隙水中の塩分が低く $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着能の強い調整池底質において、有機物分解で生成された $\text{NH}_4\text{-N}$ が、より多く蓄積してきたものと考えられる。ただし、調整池において同じ TOC 含有量の試料でも異なる吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量を示した。 $\text{NH}_4\text{-N}$ の生成は、底質の粒径、有機物の組成、温度等の物理・化学的条件に影響を受けることから (Abdulgawad *et al.*, 2008; Yang, *et al.*, 2010), 各調査地点のこれらの底質条件の違いが影響したのと考えられる。なお、本図では全調査地点の深さ 0~10 cm 層のデータを用いている。

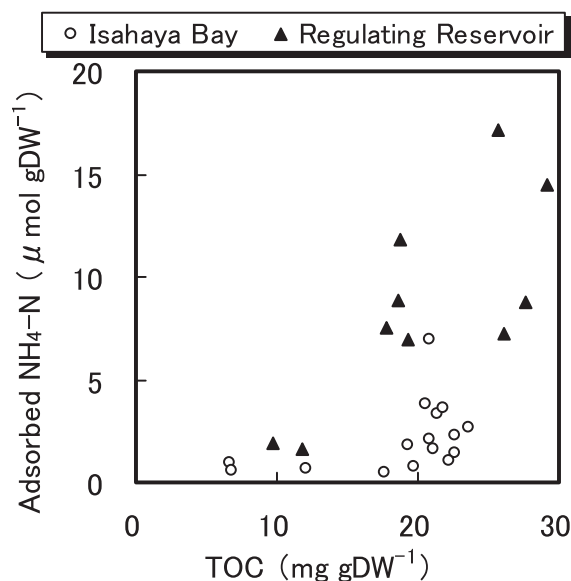


Fig. 11. Relationships between adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$ and TOC in sediments.

4.1.2 底質における $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸脱着

吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量と間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の関係を Fig. 12 に示す。諫早湾と調整池では共に、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量と間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度に強い正の相関がみられ、直線回帰した場合、諫早湾では $R^2=0.92$, 調整池では $R^2=0.83$ であった。回帰直線の傾きは諫早湾の方が大きいことから、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量が同じであれば、諫早湾の間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が高い値を示す。換言すると、塩分の高い諫早湾の方が、底質から $\text{NH}_4\text{-N}$ が脱着しやすいと言える。同様の傾向は既往の研究でも示されており (Weston *et al.*, 2010), 本研究の結果を支持している。また、塩分が高いほど底質への $\text{NH}_4\text{-N}$ の吸着量は少なくなり、特に塩分 0~10 の範囲では顕著となる (徳永ら, 2007)。塩分と底質の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸着量の関係は塩分 10 以上でほぼ一定となるため、潮受け堤防排水門の開放後の調整池の塩分が流入河川水等の影響で 10 程度まで低下したとしても、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ の脱着量は海水の場合と同程度と考えられる。なお、間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度では、諫早湾と調整池の分布に明確な差はみられなかった (Fig. 6)。間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ の拡散には、間隙水と底層水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度勾配および底質空隙率が影響する (山

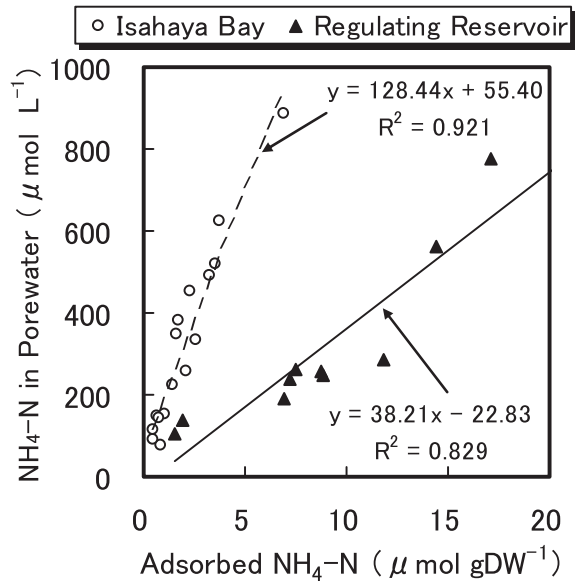


Fig. 12. Relationships between $\text{NH}_4\text{-N}$ in porewater and adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$ in sediments.

本ら, 1998; 郡山ら, 2009) が, これらについて両水域で大きな差がなかった (九州農政局, 2011a) ためと考えられる。

4.2 底質間隙水の巻き上げによる栄養塩の放出

諫早湾と調整池における底質間隙水と底層水の栄養塩濃度と I-N/ $\text{PO}_4\text{-P}$ を Table 1 に示す。底質間隙水の栄養塩濃度は底層水よりも高く, 例えば平均 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度では, 諫早湾で約 500 倍, 調整池で約 100 倍であった。諫早湾底層水の I-N/ $\text{PO}_4\text{-P}$ は Redfield 比 (Redfield *et al.*, 1963) (原子比で 16) よりも常に低く, 植物プランクトン増殖の制限栄養塩は窒素であると推測される。一方, 調整池底層水は Redfield 比の上下に変動しており制限栄養塩は定まっていない。表中の底質間隙水は本調査全地点の値, 底層水は九州農政局環境モニタリング調査結果 (2010 年 4 月~2011 年 3 月; 諫早湾 6 地点の底層, 調整池 2 地点の表層) の値を用いた (九州農政局, 2011a)。また, 表中の値は定量下限値未満の値を 0 として算出した。なお, 調整池の平均水深は約 1.5 m と浅いため表層以外の調査データはない。

諫早湾の潮受け堤防排水門を開放すると諫早湾と調整

Table 1. Inorganic nitrogen (I-N) and phosphorus ($\text{PO}_4\text{-P}$) concentrations and the atomic ratio of I-N and $\text{PO}_4\text{-P}$ in the porewater and bottom water in Isahaya bay and the regulating reservoir.

		Regulating Reservoir		Isahaya Bay	
		Sediment porewater	Bottom water	Sediment porewater	Bottom water
$\text{NH}_4\text{-N}$ ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Min.	107	<0.71	74.6	<0.71
	Max.	778	15.0	886	3.57
	mean	307	2.14	328	0.62
I-N ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Min.	107	<0.71	74.6	<0.71
	Max.	778	63.5	886	15.0
	mean	307	25.6	328	3.21
$\text{PO}_4\text{-P}$ ($\mu\text{mol L}^{-1}$)	Min.	9.71	0.29	9.96	0.10
	Max.	41.3	9.72	93.6	3.43
	mean	22.4	3.35	40.8	0.98
$\frac{\text{I-N}}{\text{PO}_4\text{-P}}$ (-)	Min.	6.0	0.0	4.1	0.0
	Max.	58.0	83.2	15.2	9.8
	mean	16.9	17.9	7.9	2.6

池では新たな流動が生じる (経塚ら, 2001; 濱田ら, 2011)。著者らは, 底質の物理特性を考慮した数値シミュレーションにより, 開門に伴う流動の変化が底質の巻き上げや水質に及ぼす影響について検討を進めている。ここでは, その前段階として, 開門により調整池全域の底質が巻き上がった場合の栄養塩の放出量を以下の方法で試算した。

九州農政局は, 排水門付近の洗掘の予測を行うに当たり, 現状で 50 cm 程度の厚さの底質が擾乱・再堆積を繰り返しているとしている (九州農政局, 2011b)。開門を行うことにより調整池内の広い範囲で流速が増大し, より広い範囲で擾乱・再堆積が起こることが考えられる (九州農政局, 2011c)。そこで本研究では全領域で 10 cm 洗掘した場合の, 底質間隙水からの栄養塩の放出量を試算した。なお, 試算値は底質の巻き上げの時間的な変化や底質-海水間の栄養塩の吸脱着等は考慮しておらず, 底質調査時に対象領域に蓄積していた, いわば潜在的な栄養塩放出量を示すものである。

実測した間隙水の栄養塩濃度と底質の体積含水率を用いて, 両者の積 C (g m^{-3}) を求め, C とその分布域の面積 A (m^2), 巻き上げ深さ H (m) を次式に代入して

調整池底質間隙水の栄養塩量 L (g) を求めた。

$$L = \sum (C_i A_i) \times H \quad (1)$$

ここで、 i は地点を表し、 H を 0.1 m とした。

試算の結果、底質の巻き上げによって間隙水から放出される $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は 7.1t ($5.1 \times 10^5 \text{mol}$)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 量は 1.0t ($3.2 \times 10^4 \text{mol}$) と見積もられた。平成 15 年の調整池流域からの流入負荷量を試算した結果は、T-N で 1.4t/day、T-P で 0.27t/day である (諫早湾干拓調整池等水質委員会, 2007)。流域から流入する栄養塩負荷の形態は不明であるが、流域から流入する T-N、T-P 負荷が $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ のみであると仮定すると、底質の巻き上げにより間隙水から放出される栄養塩量は $\text{NH}_4\text{-N}$ では流域負荷量の約 5 日分、 $\text{PO}_4\text{-P}$ では約 4 日分に相当する。

一方、堤防で諫早湾が締め切られて、干潟環境が変化したことにより失われた浄化力は、T-N で 428~532 t/year (1.2~1.5 t/day)、T-P で 22~73 t/year (0.06~0.20 t/day) と考えられている (佐々木ら, 2003)。長期的な海水導入により浄化能力が回復すると、流域からの流入負荷の大部分を浄化することが可能となる。従って、開門による栄養塩負荷の変化を評価するには、短期的な底質の巻き上げ現象の影響と共に長期的な干潟の浄化能力についても考慮する必要がある。

既往の研究によると、諫早湾の植物プランクトンの増殖は I-N により制御されているものと考えられている (川口ら, 2004; 堤, 2003)。底質間隙水の I-N/ $\text{PO}_4\text{-P}$ が Redfield 比よりも低いことから、間隙水中栄養塩の拡散が生じたとしても、植物プランクトン増殖の制限栄養塩は I-N で維持されるため、水質管理では I-N に注視することが重要である。

底質間隙水の栄養塩濃度は温度に依存して夏季に高くなる (西條・三田村, 1995; 郡山ら, 2009) が、今回の現地調査は 2 月に実施しているため、底質間隙水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は低い時期であったと考えられる。また、現在行われている調整池からの排水が、諫早湾のシャットネラ赤潮を増強する可能性が指摘されている (多田ら, 2010)。開門時には、現在の排水量よりも多くの調整池貯留水が、潮受け堤防外の諫早湾に流出する。さらに、底質の巻き上げによる間隙水栄養塩の水柱への放出が起

きた場合、諫早湾の栄養塩濃度が増加し、赤潮の発生を誘発する可能性も高まる。これらの点を考慮すると、赤潮の発生リスクを低減するためには、間隙水の栄養塩が低濃度で水柱の植物プランクトンの少ない時期に開門 (段階的開門の場合は開門幅の拡大) を行い、初期に生じる底質の巻き上げによる栄養塩負荷の放出量を抑えることが肝要である。

4.3 海水浸入による調整池底質 $\text{NH}_4\text{-N}$ の脱着

諫早湾と調整池の平均吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の比較を Fig. 13 に示す。諫早湾と調整池の深さ 0~5 cm における平均吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は、諫早湾で $1.8 \mu\text{mol gDW}^{-1}$ 、調整池で $8.0 \mu\text{mol gDW}^{-1}$ であり、F-検定および t-検定の結果、有意差 ($P < 0.05$) がみられた。諫早湾と調整池における底質間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の相関が異なったことから (Fig. 12)、両水域底質の吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の差を生んだ要因は、底質間隙水の塩分の相違と考えられた。また、深さ 0~10 cm における底質単位体積当たりの $\text{NH}_4\text{-N}$ 量 (吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量と間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の和) は、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ が 67~94% (平均 83%) を占めている。したがって、潮受け堤防排水門の開放に伴い、調整池底層の塩分が上昇すると、間隙水の拡散に加えて底質からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の脱着が生じるため、前記の試算結果よりも多くの $\text{NH}_4\text{-N}$ が底質から

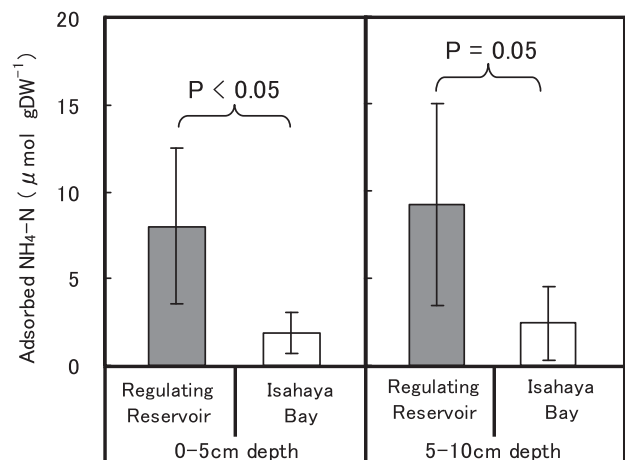


Fig. 13. Mean adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$ in Isahaya bay and the regulating reservoir. Error bars indicate standard deviation.

水中に放出される可能性がある。ただし、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 脱着量を把握するためには、塩分増加に伴う底質 $\text{NH}_4\text{-N}$ の脱着量を明らかにする必要がある、研究を進めている。今後、開門に伴う諫早湾と調整池の栄養塩濃度変化を予測するために、底質の巻き上げの程度や底質から脱着する $\text{NH}_4\text{-N}$ 量について詳細な検討が必要である。

5. まとめ

本研究は、諫早湾の潮受け堤防排水門の開放に伴う底質の巻き上げの影響を評価するため、諫早湾と調整池における底質の栄養塩分布を明らかにすることを目的に実施した。得られた成果は以下の通りである。

- 1) 吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の分布は、諫早湾よりも調整池で有意 ($P < 0.05$) に高かった。これは調整池を淡水化し、塩分が低下したため、底質の $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸着能が高まった結果と考えられた。一方、間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ と間隙水 $\text{PO}_4\text{-P}$ では、両対象地域間に有意差 ($P > 0.05$) はなかった。
- 2) 開門に伴い調整池全域の底質が深さ 10 cm まで巻き上がった場合、間隙水から放出される $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は 7.1t ($5.1 \times 10^5 \text{ mol}$)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 量は 1.0t ($3.2 \times 10^4 \text{ mol}$) と見積もられた。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量は流域負荷の約 5 日分、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は約 4 日分に相当する。したがって、赤潮の発生リスクを低減するためには、間隙水の栄養塩が低濃度で水柱の植物プランクトンの少ない時期に開門（段階的開門の場合は開門幅の拡大）を行い、初期に生じる底質の巻き上げによる栄養塩負荷の放出量を抑えることが肝要である。
- 3) 吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の平均値は、諫早湾で $1.8 \mu\text{mol gDW}^{-1}$ 、調整池で $8.0 \mu\text{mol gDW}^{-1}$ であり、有意差 ($P < 0.05$) がみられた。この差の成因は底質間隙水の塩分の相違と考えられた。また、底質単位体積当たりの $\text{NH}_4\text{-N}$ 量（吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量と間隙水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 量の和）は、吸着態 $\text{NH}_4\text{-N}$ が 67~94%（平均 83%）を占めている。したがって、開門による調整池底質の塩分増加が起きると、底質間隙水の拡散に加えて底質からの $\text{NH}_4\text{-N}$ の脱着が生じるため、水柱に放出される $\text{NH}_4\text{-N}$ 量が増大する可能性がある。

謝辞

本研究では、九州農政局の環境モニタリング水質調査データを使用させて頂きました。また、調査・分析では、ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社、いであ株式会社、佐賀大学低平地沿岸海域研究センター吉野健児博士のご協力を頂きました。関係者各位に深く感謝の意を表します。

References

- Abdulgawad, F., Bockelmann E. B., Sapsford, D., Williams, K. P. and Falconer, R. (2008): Ammonium ion adsorption on clays and sand under freshwater and seawater conditions. Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS, 656–661.
- 諫早湾干拓調整池等水質委員会 (2007): 諫早湾干拓調整池等水質委員会検討結果の取りまとめ (<http://www.maff.go.jp/kyusyu/nn/isahaya/kankyomonitoring01.html>)
- Weston, N. B., Giblin, A. E., Banta, G. T., Hopkinson, C. S. and Tucker, J. (2010): The effects of varying salinity on ammonium exchange in estuarine sediments of the Parker River, Massachusetts. *Estuaries and Coasts*, **33**, 985–1003.
- 岡村和磨, 田中勝久, 木元克則, 清本容子 (2005): 有明海奥部と諫早湾における表層堆積物中の有機物の分布と有機炭素安定同位体比. *海の研究*, **15**, 191–200.
- 川口修, 山本民次, 松田治, 橋本俊也 (2004): 水質の長期変動に基づく有明海におけるノリおよび珪藻プランクトンの増殖制限元素の解明. *海の研究*, **13**, 173–183.
- 環境省水環境部水環境管理課 (2001): 4. 一般項目, II 分析方法, 底質調査方法, p. 20–21.
- 九州農政局 (2011a): 環境モニタリング調査結果 (<http://www.maff.go.jp/kyusyu/nn/isahayaindex.html>)
- 九州農政局 (2011b): 諫早湾干拓事業の潮受堤防の排水門の開門調査に係る環境影響評価準備書第1編 第2章 開門調査の方法, p. 4–12.
- 九州農政局 (2011c): 諫早湾干拓事業の潮受堤防の排水門の開門調査に係る環境影響評価準備書第6編 第6章 地形・地質, p. 1–103.
- 経塚雄策, 古庄健作, 木村洋一郎 (2001): 諫早湾の潮受け堤防排水門の開放に伴う流動について. 第16回海洋工学シンポジウム, 73–80.
- 郡山益実, 瀬口昌洋, 古賀あかね, アリム イスナンセツョ, 速水祐一, 山本浩一, 濱田孝治, 吉野健児 (2009): 有明海奥部の干潟・浅海域底泥における窒素・リンの季節変化. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, **B2-65**, 1031–1035.
- 佐々木久雄, 西村修, 須藤隆一 (1995): 浅い内湾底泥の巻き上げが栄養塩溶出に及ぼす影響. *水環境学会誌*, **18**, 51–59.
- 佐々木克之, 程木義邦, 村上哲生 (2003): 諫早湾調整池からの COD・全窒素・全リンの排出量および失われた浄化量の推定. *海の研究*, **12**, 573–591.
- 地盤工学会 (2009): 第5章 力学試験のための乱さない粘性土試料の取扱い方法, 第1編 総説, 地盤材料試験の方法と解説, 2分冊の1,

- p. 36-43.
- 多田彰秀, 中村康裕, 阿部和也, 田井明, 鈴木誠二, 中村武弘 (2010): 淡水流入が諫早湾の水質動態に及ぼす影響について. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), **66**, 366-370.
- 中・長期開門調査検討会議 (2003): 諫早湾干拓事業 中・長期開門調査検討会議報告書. 38pp.
- 堤裕昭, 岡村絵美子, 小川満代, 高橋徹, 山口一岩, 門谷茂, 小橋乃子, 安達貴浩, 小松利光 (2003): 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係. 海の研究, **12**, 291-305.
- 徳永貴久, 高橋篤, 増田壮祐, 松永信博 (2006): 有明海熊本沿岸の干潟底泥による NH_4^+ 吸着特性. 海岸工学論文集, **53**, 1036-1040.
- 徳永貴久, 高橋篤, 松永信博 (2007): 有明海奥部干潟底泥の NH_4^+ 吸着特性. 水工学論文集, **51**, 1309-1314.
- 中村武弘, 矢野真一郎, 多田彰秀, 野中寛之, 亀井雄一 (2002): 諫早湾口部における流況の現地観測. 海岸工学論文集, **49**, 396-400.
- 西條八束, 三田村緒佐武 (1995): 新編湖沼調査法. 講談社, 230pp.
- 濱田孝治, 日野剛徳, 山口創一, 横山勝英, 山本浩一 (2011): 諫早湾潮受け堤水門開門による環境変化について. 佐賀大学有明海における環境変化の解明と予測プロジェクト報告書, **1**, 9-11.
- 日比野忠史, 松本英雄 (2006): 広島湾に分布する浮泥の特性と季節的な性状変化. 土木学会論文集 B, **62**, 348-359.
- Hou, L. J., Liu, M., Jiang, H. Y., Xu, S. Y., Qu, D. N., Liu, Q. M. and Zhang, B. L. (2003): Ammonium adsorption by tidal flat surface sediments from the Yangtze Estuary. *Environmental Geology*, **45**, 72-78.
- 細見正明, 須藤隆一 (1992): 手賀沼における窒素およびリンの収支. 水環境学会誌, **15**, 105-112.
- 松岡数充 (2006): 諫早湾及び諫早干拓調整池の音波探査. 有明海異変と諫早干拓の関連解明に向けて-財団法人自然保護助成基金 創立10周年記念助成研究論文集-, 91-102.
- Morin, J. and Morse, J. W. (1999): Ammonium release from resuspended sediments in the Laguna Madre estuary. *Marine Chemistry*, **65**, 97-110.
- Eleftheriou, A. and McIntyre, A. (2005): *Methods for the study of marine benthos*, Blackwell Science, Oxford, 418 pp.
- 山本民次, 松田治, 橋本俊也, 妹背秀和, 北村智顕 (1998): 瀬戸内海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量のみ積もり. 海の研究, **7**, 151-158.
- Yang, C., Wang, S., Jin, X. and Wu, F. (2010): Nitrogen and phosphorus mineralization in sediments of Taihu Lake after the removal of light fraction organic matter. *Environmental Earth Sciences*, **59**, 1437-1446.
- 横瀬久芳, 百島則幸, 松岡数充, 長谷義隆, 本座栄一 (2005): 海底堆積物を用いた有明海100年変遷史の環境評価. 地学雑誌, **114**, 1-20.
- Raaphorst, W. V. and Malschaert, J. F. P. (1996): Ammonium adsorption in superficial North Sea sediments. *Continental Shelf Research*, **16**, 1415-1435.
- 李洪源, 松永信博 (2010): 諫早湾の底泥環境特性. 土木学会論文集 B, **66**, 321-334.
- Redfield, A. C., Ketchum, B. H and Richards F. A. (1963): The influence of organisms on the composition of sea-water. *The Sea*, **2**, 26-77.

Distribution of nutrient concentration in the sediment of Isahaya Bay and the adjoining regulating reservoir

Masahiro Tezuka[†], Toshiya Katano[†], Takaharu Hamada[†], Jia Rui[†], Takanori Hino[†], Yuichi Hayami[†], Yuji Ito[†] and Koichiro Ohgushi[‡]

Abstract

In 1997 the reclamation dike, which is now scheduled to be opened, was constructed in Isahaya bay of the Ariake Sea located in the western Japan. In the regulating reservoir separated by the dike, information on the nutrient concentrations especially for the sediment is strictly limited. In the present study, nutrient concentrations in pore waters and adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$ in the bottom sediment of the reservoir were investigated and the values were compared with those in the Isahaya bay. Sediment core samples were taken at 8 stations in Isahaya bay and at 5 stations in the regulating reservoir in February 2011. Significant difference in nutrient concentrations in porewater was not detected between Isahaya bay ($\text{NH}_4\text{-N}$, 75-625 $\mu\text{mol L}^{-1}$; $\text{PO}_4\text{-P}$, 10.0-93.6 $\mu\text{mol L}^{-1}$) and the regulating reservoir ($\text{NH}_4\text{-N}$, 136-563 $\mu\text{mol L}^{-1}$; $\text{PO}_4\text{-P}$, 9.7-41.3 $\mu\text{mol L}^{-1}$). In the case that sediments in the reservoir are scoured 10 cm due to the opening gate, nutrients possibly released from the sediments are estimated as 7.1 t ($5.1 \times 10^5 \text{mol}$) and 1.0 t ($3.2 \times 10^4 \text{mol}$) for $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{PO}_4\text{-P}$, respectively. In contrast to nutrient concentrations in porewater, adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration was significantly different; mean values were 1.8 $\mu\text{mol gDW}^{-1}$ and 8.0 $\mu\text{mol gDW}^{-1}$ in Isahaya bay and the regulating reservoir, respectively. It is likely that $\text{NH}_4\text{-N}$ has been adsorbed to the sediments as the salinity decreased in the regulating reservoir after the dike construction. However, these adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$ in the regulating reservoir are possibly released to the water column when sediments are suspended with seawater by the opening the gate. For the accurate prediction of nutrient dynamics in the regulating reservoir after the opening of drainage gate, further study is essential concerning the sediment scour and $\text{NH}_4\text{-N}$ release from the sediment in the reservoir.

Key words: Isahaya Bay, Sediment, Porewater, Nutrient, Adsorbed $\text{NH}_4\text{-N}$

(Corresponding author's e-mail address: sj7772@cc.saga-u.ac.jp)

(Received 11 June 2011; accepted 11 February 2012)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2012)

[†] Institute of Lowland and Marine Research, Saga University 1, Honjo-machi, Saga-city, Saga, 840-8502, Japan

[‡] Graduate School of Science and Engineering, Saga University 1, Honjo-machi, Saga-city, Saga, 840-8502, Japan