

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450258

研究課題名(和文) 有明海底泥の巻き上げに伴う懸濁層における栄養塩動態のモデル化

研究課題名(英文) Modeling of nutrient dynamics in the nepheloid layer with resuspension of bottom sediment in the Ariake Bay

研究代表者

郡山 益実 (Koriyama, Masumi)

佐賀大学・全学教育機構・准教授

研究者番号：30380794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、有明海底泥の巻き上げに伴う懸濁層における栄養塩動態、特に底泥土粒子への栄養塩の吸脱着特性について現地調査や室内実験より検討、考察した。その結果、現場海域における巻き上げ時の水質環境と栄養塩濃度の時空間変化が把握された。六角川河口付近の懸濁層におけるNH₄⁺とP₀₄₃⁻濃度には、激しい底泥の巻き上げと河川水からの移流が相互に影響していることが重回帰分析より示された。底泥の巻き上げ実験より、懸濁層におけるNH₄⁺とP₀₄₃⁻濃度の変動には、巻き上げられた土粒子から脱離した吸着態由来のNH₄⁺とP₀₄₃⁻が大きく寄与し、それは巻き上げ強度(SS濃度)に依存することが示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, the nutrient dynamics, such as adsorption and desorption characteristics of nutrients to the bottom mud particles, in the nepheloid layer with resuspension of bottom sediment were investigated based on the field measurements in the inner area of the Ariake Bay and the laboratory experiments. As a result, the spatial and temporal variations in water quality and nutrient concentrations at neap tide were clarified in the field sea area. We found that the NH₄⁺ and P₀₄₃⁻ concentrations in the nepheloid layer near river mouth were thought to be influenced by the supply of NH₄⁺ and P₀₄₃⁻ due to the violent resuspension of bottom sediment (turbidity) and the advection from rivers (salinity) based on the multi regression analysis. From the laboratory experiments, we found that the variations of NH₄⁺ and P₀₄₃⁻ concentrations in the aqueous suspension were caused by desorption of NH₄⁺ and P₀₄₃⁻ adsorbed on resuspended sediment particles, which strongly depend on SS concentration.

研究分野：農学

キーワード：有明海 底泥 巻き上げ 懸濁層 栄養塩

1. 研究開始当初の背景

有明海は、広大な干潟を持つ豊かな浅海域である。近年、二枚貝の漁獲量の減少やノリ養殖の不作など海域環境の変化が問題となっており、その原因を解明し有明海の再生に向けた取り組みが急務となっている。

有明海的环境異変の中で、赤潮や貧酸素水塊の発生が大きな問題となっており、それらの発生には海域の栄養塩動態が密接に関連している。速水ら(2009)と郡山ら(2009)は、有明海奥部西岸域の干潟から潮下帯域における海水と底泥内の栄養塩濃度の季節変動について現地調査を行った。その結果、海水と底泥内の栄養塩濃度の季節変動は比較的対応していること、海水-底泥間の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 溶出速度は夏～秋季に高く、底泥は $\text{NH}_4^+\text{-N}$ と $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の重要な供給源の1つであることが示された。また、年間を通した海水-底泥間の栄養塩フラックス実験により、夏～秋季における底泥からの栄養塩供給量は、水柱の栄養塩現存量の約5割程度を占め、また、ノリ養殖において特に底泥からのリン溶出量は、河川からのリン供給量の3倍程度大きいことが示唆された。

このように、底泥からの栄養塩溶出は、海域への重要な栄養塩供給源の1つであることが現地調査や室内実験より明らかにされてきたが、近年、底泥の巻き上げに伴う海水中への栄養塩の拡散は、巻き上げなしのそれと比較して1オーダー程度大きいことが国内外で報告されている(中園ら,2009; Corbert,2010 など)。有明海奥部の浅海域は、潮流や波浪により容易に微細な底泥土粒子が巻き上げられ、高濁度の浮泥が形成される。このことから、有明海において、底泥からの栄養塩溶出だけでなく、巻き上げにより懸濁した底泥に伴う栄養塩の拡散や吸脱着特性が、海水中の栄養塩動態に大きく影響するものと推察される。しかし、底泥の巻き上げに関する既往の研究は、巻き上げの発生メカニズムや巻き上げ量の解析が主に行われているため、底泥の巻き上げに伴う懸濁層での栄養塩動態に関する知見は乏しく、また、有明海においては底泥巻き上げとそれに伴う栄養塩濃度の変動に関する報告例すらほとんど見当たらない。

2. 研究の目的

本研究では、底泥の巻き上げに伴う懸濁層の栄養塩変動を現地調査や室内実験より明らかにすることを前提に、以下の3点について検討、考察した。

- 1) 有明海奥部に調査区を設定し、1潮汐間の集中観測により底泥の巻き上げに伴う懸濁層内の栄養塩変動を現場レベルで明らかにする。
- 2) 1)の現地調査と並行して、現地で採泥した未攪乱の底質コアサンプルを用いて

底泥の巻き上げ実験を行い、巻き上げ特性と懸濁層内の栄養塩変動を明らかにする。

- 3) 現場海域における水質環境の潮汐・季節的周期変動を考慮した種々の実験条件のもとで栄養塩の吸脱着実験を繰り返し行い、懸濁層における底泥への栄養塩の吸脱着特性を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 底泥の巻き上げと栄養塩変動に関する現地観測

現地調査は、2013年8月～10月の大潮時に3回(8/21,9/18,10/21)、小潮時に1回(9/12)の計4回実施した。現地調査は、図1に示されるような沖から六角川河口に向かうS4からS1の測線を1潮汐間で5～6往復し、採水、水質及び流速の測定を行った。水質測定では、船上より多項目水質計(AAQ1186-H,アレック電子)を用いて、水質の鉛直分布を連続計測した。測定した項目は、濁度、塩分、DO濃度、水温、光量子及びクロロフィルaである。流速及び流向の測定は、電磁流速計(VP2400D,ケネック)を用いて1m間隔で約20秒間の平均流速と流向を測定した。採水は、バンドーン採水器(5226-A,離合社)を用いて、海底から海底上5mまでは1m間隔で、それ以上は2m間隔で採水を行った。採取した海水は、船上で0.45 μm のディスマックフィルターを用いて濾過し、現地調査終了後速やかにサンプル水を冷凍保存した。保存したサンプルは、後日オートアナライザー(SWAAT,BLTEC)を用いて栄養塩濃度の分析を行った。なお、栄養塩濃度の測定項目は、アンモニア態窒素($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝酸態窒素($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亜硝酸態窒素($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、リン酸態リン($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)の4項目である。

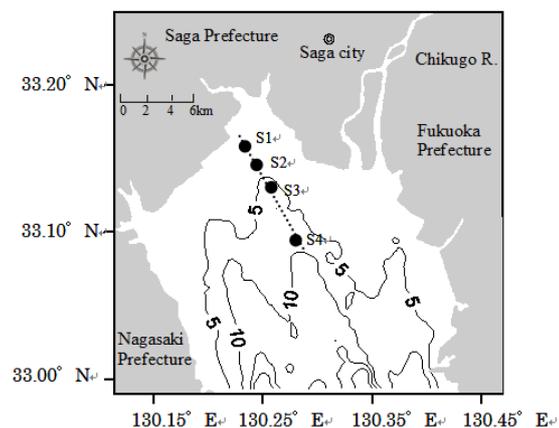


図1 調査地点

(2) 懸濁層内の栄養塩変動に関する室内実験

底泥の巻き上げに伴う懸濁層内の NH_4^+ 及び PO_4^{3-} の変動特性とその変動因子を明らかにするため、巻き上げ実験を行った。

底泥の巻き上げ実験では、100mlの三角フラスコに六角川河口域から採取した底泥約10g(湿重量)とアジ化ナトリウムを0.02%添加した人工海水100mlを入れ、30℃の恒温室内でネオシェーカーを用いて2時間振とうした。ここで、ネオシェーカーの攪拌強度は、対象海域における底泥の巻き上げ状況を考慮して数段階にコントロールし、人工海水の塩分濃度を10、20、30‰とした。本研究では、底泥の巻き上げ有無(巻き上げ系と静置系)の実験を同時に行い、実験終了時の巻き上げ系の人工海水中の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度から静置系のそれらを差し引いたものを巻き上げによる $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 供給量とした。また、巻き上げに伴う $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の供給源は、巻き上げられた底泥間隙水中の溶解態由来のものと、底泥土粒子から脱離した吸着態由来のものに大別される。そこで、本研究では、巻き上げによる $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 供給量から巻き上げ量より概算した間隙水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 拡散量(溶解態由来)を差し引いたものを吸着態由来の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 量とみなした。なお、巻き上げ系と静置系実験におけるサンプル水の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度は、ポータブル吸光度計(HACH, DR2700)を用いて定量分析した。

4. 研究成果

(1) 大潮・小潮時の水質環境の時空間分布
現地観測より、対象海域における(図1)大潮・小潮時の流況及び水質環境の時空間的変動が明らかにされた。

すなわち、流速については、大潮の憩流期において、S1では全層平均0.11~0.17m/s、S4では全層平均0.09m/sであったのに対して、大潮の最盛期において、S1では全層平均0.46~0.59m/s、S4では全層平均0.37~0.42m/sまで増加した。一方、小潮時の憩流期において、S1では全層平均0.23m/s、S4では全層平均0.24m/sであったのに対して、小潮の最盛期において、S1では全層平均0.41m/s、S4では全層平均0.39~0.41m/sまで増加した。流速の鉛直分布を見ると、S1では大潮及び小潮時にS4と比べて比較的一様な分布傾向を示した。一方、S4における大潮及び小潮の最盛期の流速は上層で高く、下層で低い対数分布則に近い分布傾向を示した。

濁度については、S1における憩流期では大潮、小潮ともに平均13と低く、巻き上げがほとんど起こっていないことが確認された。一方、最盛期にはS1の小潮時における海底付近の濁度は最大でも120程度であるのに対して、大潮時には海底付近で400程度まで増加しており、大潮時と小潮時の最盛期において底泥の巻き上げの顕著な差異が見られた。S4においては、大潮時には海底近傍の濁度が70~150と比較的高くなるが、表層~中層部の濁度は2~10と低かった。

S1の光量子については、憩流期における有光層は2.5~3mであった。しかし、最盛期には、小潮時で有光層が約1mであったのに対して、大潮時には有光層が約0.5mと憩流期から大幅に減少した。これは、大潮時における濁度の鉛直分布から明らかなように、最盛期に激しい底泥の巻き上げが起こり、巻き上げられた底泥が水柱全体に拡散・混合されたためと考えられる。S4については、大潮及び小潮時における憩流期の有光層はそれぞれ5~6m及び7~8mであったのに対して、最盛期には、大潮時、小潮時ともに有光層が3m程度であり、S4において大潮時と小潮時で有光層に大きな差は見られなかった。これは、大潮時の最盛期においても、S4では海底付近の濁度が50~150程度まで増加するだけであり、S1と比較して底泥の巻き上げが水柱全体に及ぼす影響が小さかったためと考えられる。

塩分については、S1の大潮時では、ほぼ一様な鉛直分布で強混合状態であり、潮汐の変動に伴って17~29と大きく変動した。S4の大潮時では、塩分は29程度でほぼ一様な鉛直分布であった。しかし、小潮時には顕著な塩分躍層が形成され、最盛期においても塩分の成層化は弱くなるものの維持された。このことから、S4における水柱の成層強度はS1より強く、小潮の最盛期程度では塩分の成層構造は解消されないことが明らかにされた。

S1の大潮時におけるDO濃度の鉛直分布は、塩分の鉛直分布と同様に一様であり、水柱のDO濃度は全層平均6.2~10mg/lと潮汐の変動に伴い変化した。一方、小潮時におけるDO濃度の鉛直分布は、塩分のそれとは対応しなかった。すなわち、塩分の鉛直分布が強混合状態にもかかわらず、DO濃度は成層化していた。S4の大潮時におけるDO濃度は、塩分とほぼ同様の鉛直分布で、水柱のDO濃度は全層平均8.1~11mg/lと潮汐の変動に伴い変化した。一方、小潮時では塩分躍層を境界にDO濃度の成層化が見られ、DO濃度が躍層上部では9.6~16mg/lの過飽和状態で、躍層以深では3.5~6.8mg/lであった。

(2) 現場海域における底泥の巻き上げ

図2及び写真1は、9/18(大潮)における憩流期及び最盛期の調査海域における濁度の空間分布と、その時のS1の海域状況を表したものである。図示されるように、憩流期における濁度は、全域にわたって20以下と低く、底泥の巻き上げが見られないため、S1の海水面に顕著な濁りは見られない(写真1a)。しかし、最盛期には、いずれの地点においても海底付近で濁度が高くなり、特に岸側のS1では、濁度が100以上の高濁度の懸濁層が水柱全体に形成され、海水面も激しく濁っている(写真1b)。これは、最盛期において激しい底泥の巻き上げが岸側の海底で起こっていることを示唆している。

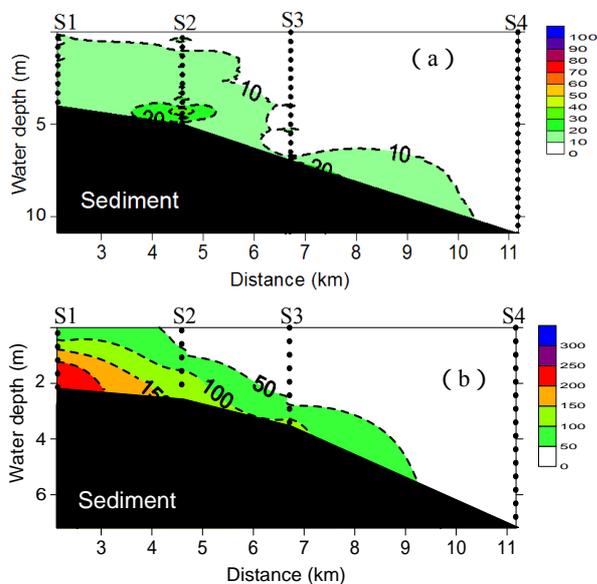


図 2 大潮時(9/18)の憩流期(a)と最盛期(b)における濁度の空間分布

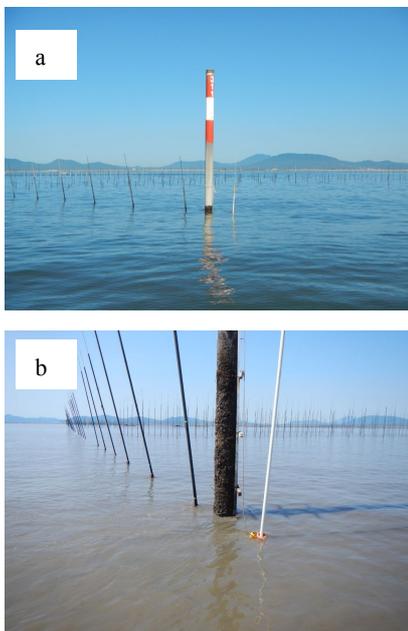


写真 1 大潮時(9/18)の憩流期(a)と最盛期(b)における S1 の海域状況

図 3 は、大潮時(8/21,9/18,10/21)及び小潮時(9/12)の海底上 50cm における流速(U_{50})と濁度の関係を表したものである。なお、ここで U_{50} は、海底直上の流速から海底上 1m 付近の流速を線形補完して求めた値である。また、濁度については実測値を用いた。図示されるように、大潮時には U_{50} の増加に伴って濁度が指数関数的に増加しており、濁度と U_{50} の間には $R^2=0.65$ と有意な相関性が見られた(ANOVA, $P<0.05$)。特に、 U_{50} が 0.3m/s を超えると濁度が大きく増加することから、対象海域における底泥の巻き上げ限界流速は 0.3m/s であると推察される。本研究で得られた巻き上げ限界流速は、山西ら(2003)が鹿島市七浦地

区飯田海岸沖の現地観測より得られた巻き上げ限界流速(0.25m/s)と比較的良好一致した。なお、 $U_{50}>0.3\text{m/s}$ となるデータの約 70%は水深が 5m 以下の浅い海域(S1 及び S2)であった。このことから、有明海奥部西岸域において底泥の巻き上げが発生する海域は、平均水深が 5m 以下の河口浅海域を中心に大潮時の上げ潮・下げ潮最盛期に発生することが明らかにされた。一方、小潮時には U_{50} の 54.2%は 0.3m/s 以下であり、最大でも U_{50} は 0.41m/s 程度であった。また、 U_{50} と濁度の相関性は $R^2=0.16$ と低かった(ANOVA, $P>0.05$)。

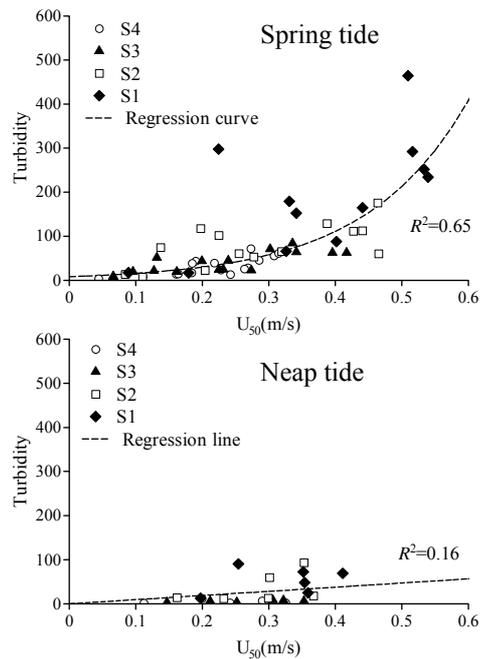


図 3 大潮及び小潮時における海底直上 50cm の流速(U_{50})と濁度の関係

(3) 海底近傍における栄養塩濃度の変動とその影響因子

潮相に応じて対象海域における栄養塩濃度の空間分布は大きく異なった。すなわち、大潮時では、流速の最盛期において六角川河口付近で最も栄養塩濃度が高くなり、S4 を除いた他地点の栄養塩濃度の鉛直分布は比較的一様な分布であった。調査期間を通して岸側の S1 ほど栄養塩濃度の時間変動が大きく、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 濃度の平均値の時間変化は、それぞれ 24.31 ~ 194.26, 43.99 ~ 117.61, 13.42 ~ 468.92, 10.13 ~ 48.41 $\mu\text{g/l}$ であった。また、栄養塩濃度の時間変動は、沖側に向かうにつれて小さくなり、S4 における $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 濃度の平均値の時間変化は、それぞれ 16.55 ~ 61.16, 24.26 ~ 49.23, 20.63 ~ 121.01, 9.93 ~ 17.41 $\mu\text{g/l}$ であった。これは、河口付近で河川から流入した水塊が、潮汐作用によって上下流方向に繰り返し移動していることや、底泥の激しい巻き上げに伴い底泥内の栄養塩

が海水中に拡散したためと考えられた。一方、小潮時の栄養塩濃度は、流速の最盛期に関わらず、全体的に底層で高く、上層で低くなる分布傾向を示した。これは、小潮時の流速最盛期における平均流速は、大潮時のそれと比較して全地点で14~21%低く、海水の鉛直混合が小さくなり、海水密度の成層構造が解消されなかったためと考えられた。また、S2付近の表層における NO_3^- -N及び NO_2^- -N濃度が大きく減少しているが、これは赤潮の発生によって NO_3^- や NO_2^- が消費されたためと考えられた。

海底付近の懸濁層における栄養塩濃度の変動には、河川からの栄養塩の移流と巻き上げに伴う底泥内の栄養塩の拡散などの影響が考えられる。そこで、河川からの移流と底泥の巻き上げの程度をそれぞれ塩分及び濁度で表し、栄養塩濃度とそれらの関連性について検討した。

図4及び5は、大潮時(8/21, 9/18, 10/21)における海底から1m付近の塩分及び濁度と栄養塩濃度との関係をそれぞれ表したものである。図示されるように、塩分と栄養塩濃度の間では、塩分の低下に伴い NH_4^+ -N, NO_3^- -N及び PO_4^{3-} -P濃度が増加する傾向が見られ、特にS1~S3においては塩分と NO_3^- -N及び PO_4^{3-} -P濃度に有意な負の相関が見られた。このことから、河川から移流した水塊が、S3の地点まで潮汐作用によって移動しているものと考えられた。また、海底付近の濁度と栄養塩濃度と関係では、各調査地点において大きなバラつきが見られた。しかし、激しい底泥の巻き上げが見られるS1においては、 NH_4^+ -N及び PO_4^{3-} -P濃度間に有意な正の相関が見られ、底泥の巻き上げに伴い NH_4^+ -N及び PO_4^{3-} -P濃度が増加することが明らかになった。これらの結果より、S1における海底付近の NH_4^+ -N及び PO_4^{3-} -P濃度の変動には、激しい底泥の巻き上げと河川からの移流による NH_4^+ 及び PO_4^{3-} の供給が相互に影響しているものと考えられた。そこで、S1の大潮時における海底1m付近の NH_4^+ -N及び PO_4^{3-} -P濃度(C_{NH_4} 及び C_{PO_4})と濁度(Turb)及び塩分(Sal)の重回帰分析を行った結果、次式が得られた。

$$C_{\text{NH}_4} = 0.1646 \times \text{Turb} - 13.7517 \times \text{Sal} + 447.8928 \quad (R^2 = 0.69) \quad (1)$$

$$C_{\text{PO}_4} = 0.0796 \times \text{Turb} - 8.0647 \times \text{Sal} + 288.1755 \quad (R^2 = 0.90) \quad (2)$$

これらの結果より、S1における C_{NH_4} 及び C_{PO_4} の変動は、濁度と塩分で比較的精度良く説明できることが分かった。また、重回帰式における濁度と塩分の標準偏回帰係数を比較すると、 C_{PO_4} に対する塩分の影響は濁度のそれより高いが、 C_{NH_4} の場合、塩分と濁度は同程度であることが明らかになった。

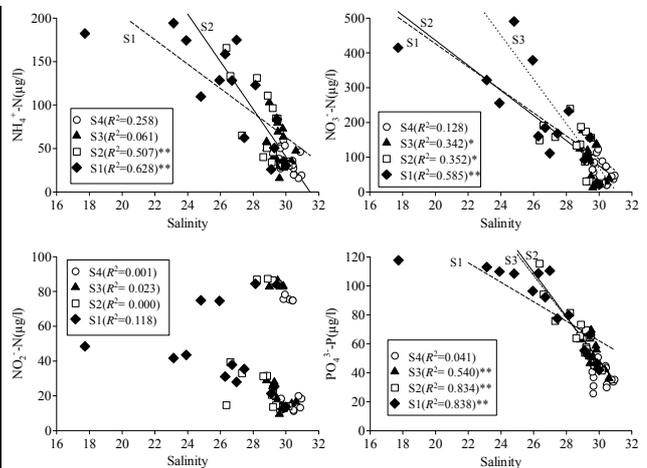


図4 大潮における海底1m付近の塩分と栄養塩濃度の関係 (** $P < 0.01$, * $P < 0.05$)

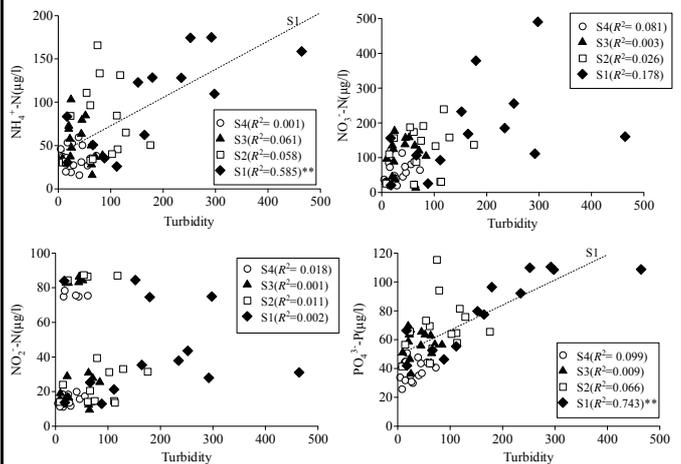


図5 大潮における海底1m付近の濁度と栄養塩濃度の関係 (** $P < 0.01$)

(4) 懸濁層における NH_4^+ と PO_4^{3-} の変動要因

巻き上げに伴う懸濁層内の NH_4^+ 及び PO_4^{3-} の変動要因を明らかにするため、現地底泥を用いた巻き上げ実験を行った。

図6は、人工海水の塩分濃度を10, 20, 30%とし、底泥の巻き上げ強度(SS濃度)を段階的にコントロールした時の懸濁水中の NH_4^+ -N及び PO_4^{3-} -P濃度をそれぞれ表したものである。図示されるように、懸濁水中の NH_4^+ -N及び PO_4^{3-} -P濃度は、いずれもSS濃度の増加に伴い指数関数的に増加するが、塩分濃度の影響はほとんど見られなかった。

次に、懸濁水中の NH_4^+ -N及び PO_4^{3-} -P濃度に占める吸着態由来の両濃度(Ads- NH_4^+ -N及びAds- PO_4^{3-} -P)とSS濃度及び塩分濃度との関係を図7に表す。図示されるように、Ads- NH_4^+ -N及びAds- PO_4^{3-} -P濃度は、SS濃度の増加に伴い指数関数的に増加する傾向を示した。また、これらの結果より、懸濁水中に占めるAds- NH_4^+ -N及びAds- PO_4^{3-} -P濃度の割合は、巻き上げが激しい高濁度層において、そ

れぞれ 36~43% (平均 41%) 及び 47~69% (平均 61%) であった。

これらの巻き上げ実験より、底泥の巻き上げに伴う懸濁層内の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度の変動には、巻き上げられた土粒子から脱離した吸着態由来の $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ の供給が大きく寄与し、その供給は底泥の巻き上げ量 (SS 濃度) に依存することが実験的に明らかにされた。今後、より詳細な巻き上げ実験を行い、懸濁層における NH_4^+ 及び PO_4^{3-} の動態や吸脱着特性を明らかにし、そのモデル化を行う必要がある。

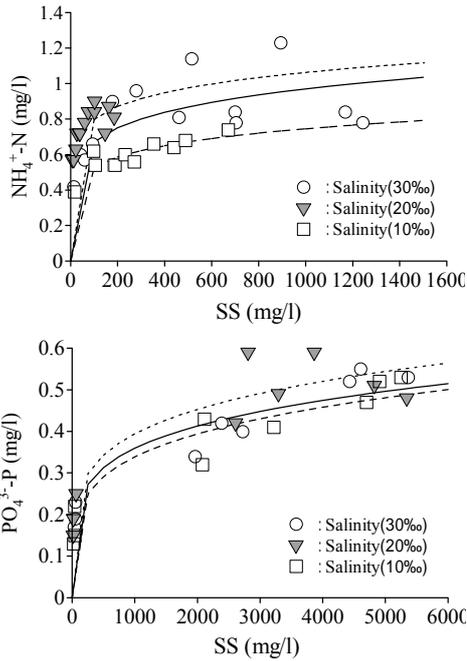


図6 懸濁層における $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度と SS 濃度、塩分との関係

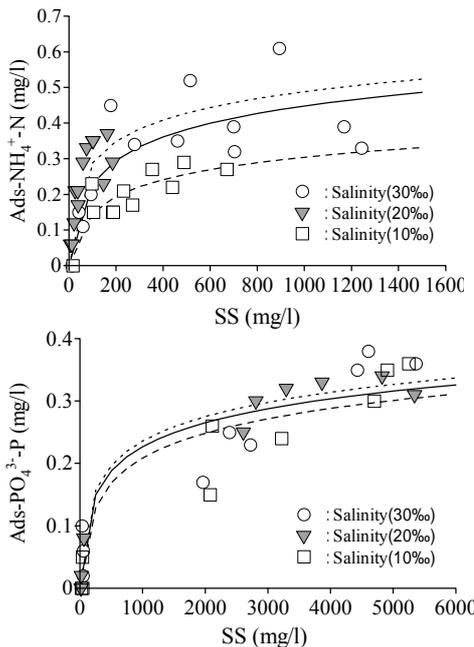


図7 懸濁層における $\text{Ads-NH}_4^+\text{-N}$ 及び $\text{Ads-PO}_4^{3-}\text{-P}$ 濃度と SS 濃度、塩分との関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

- 1) 郡山益実, 西山修司, 石谷哲寛, 有明海奥部底泥の巻き上げに伴う懸濁層における栄養塩濃度の変動特性, 佐賀大学農学部彙報, 101, 25 - 32. 2016. (査読無し)
- 2) 西山修司, 郡山益実, 石谷哲寛, 有明海奥部における底泥の巻き上げ特性に関する現地観測, 佐賀大学農学部彙報, 100, 55 - 62. 2015. (査読無し)
- 3) 郡山益実, 荒木啓輔, 伊藤祐二, 片野俊也, 石谷哲寛, 有明海奥部底質における吸着態 NH_4^+ の季節変化とその影響因子, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 69(2), _1141- _1145, 2013. (査読有り)

〔学会発表〕(計4件)

- 1) 西山修司, 郡山益実, 石谷哲寛, 有明海奥部河口浅海域における底泥の巻き上げ特性と水質環境, 農業農村工学会, 2014.10.29.
- 2) 西山修司, 郡山益実, 石谷哲寛, 有明海奥部西岸域における巻き上げ特性, 農業農村工学会, 2014.8.27.
- 3) 郡山益実, 荒木啓輔, 伊藤祐二, 片野俊也, 石谷哲寛, 有明海奥部底質における吸着態 NH_4^+ の季節変化とその影響因子, 第60回海岸工学講演会, 2013.11.13.
- 4) 郡山益実, 石谷哲寛, 西山修司, 荒木啓輔, 有明海奥部底質における吸着態 NH_4^+ の変動特性, 農業農村工学会, 2013.11.6.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

郡山 益実 (Koriyama, Masumi)

佐賀大学・全学教育機構・准教授

研究者番号: 30380794