

有明海北部海域の底泥環境調査

INVESTIGATION OF SEABED ENVIRONMENTS IN THE NORTHERN AREA OF ARIAKE SEA

徳永貴久¹・宗孝士²・松永信博³・児玉真史⁴

Takahisa TOKUNAGA, Takashi SOH, Nobuhiro MATSUNAGA and Masashi KODAMA

¹学生員 修(工) 九州大学大学院総合理工学府(〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

²学生員 九州大学大学院総合理工学府(〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

³正会員 工博 九州大学大学院総合理工学研究院(〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

⁴正会員 博(工)(独) 中央水産研究所海洋生産部(〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4)

The seabed environments were investigated at 20 stations located in the northern area of Ariake Sea in July 2004. The spatial distributions of sediment characteristics and nutrients in porewater were obtained. It is found that the area where the acid volatile sulfides (AVS) content exceeds 0.2mg/gdry spreads along the west coast, and the seabed conditions in the area are bad. The concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) in porewater increase from the southwest to the northeast, and the concentration of phosphate ($\text{PO}_4\text{-P}$) takes the reverse distribution. The spatial distributions of nutrients seem to depend strongly on the process of adsorption and desorption of $\text{PO}_4\text{-P}$ and the process of nitrification and denitrification of DIN.

Key Words : seabed environments, spatial distribution, Ariake Sea

1. はじめに

有明海は九州最大の閉鎖性内湾である。その特徴として、我が国最大の干満差を有していること、それに伴う強い潮流によって底泥の再懸濁が起きていること、また、湾奥部には筑後川など多数の河川から粘土鉱物が供給されるため、広大な泥質干潟が発達していることなどが挙げられる。このような環境の下で有明海特有の生態系は維持されてきたが、近年、赤潮発生件数の増加や貧酸素水塊の発生に伴い、漁獲量の減少など様々な環境問題が顕在化している。多くの有機物が堆積し、分解される場として底泥は重要な役割を果たすため、比較的浅い閉鎖性内湾の水質を調べる上で、底泥環境の理解は不可欠である。陶山ら¹⁾は、ベントスの分布量や組成は底泥環境と緊密な関係があるという観点から、2001年6月に有明海北部で調査を行い、底質とマクロベントスの分布状況について報告している。しかしながら、有明海の底泥は強い潮流によって巻き上げられることが報告されている。半田ら²⁾は、新生沈殿物が堆積した層も有機物を分解して栄養塩を再生する場所として大変重要であると示唆している。また、著者ら^{3), 4)}は、有明海西部海域におけ

る現地観測と室内実験によって、底泥表面のみならず再懸濁した浮遊粒子も海域の貧酸素化に大きく寄与している可能性があることを示唆している。

著者らは、有明海特有の強い潮流によって起こる底泥の再懸濁が水質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした研究に取り組んでおり、その一環として、有明海北部海域において底泥環境調査を行った。本論文では、この調査結果に基づいて、底質と間隙水中の栄養塩濃度の空間分布特性について検討する。

2. 調査方法

調査は、有明海北部海域の20地点で行われた。調査地点を図-1に示す。領域1~4はそれぞれ2004年7月10日、11日、23日、25日に行った観測地点のグループを表しており、調査はいずれも小潮の満潮時に行われた。各調査地点では、不攪乱柱状採泥器⁵⁾を用いて採泥を行うと同時に、多項目水質計(アレック電子製: ACL1182-PDK, 以下STD)を船上から吊り下げ、約1m間隔で水温、塩分、クロロフィルa濃度(Chl. a濃度)、溶存酸素濃度(DO濃度)の測定を行った。採取した底泥のコアサンプルを、

底泥表面から深さ0~0.5cm, 0.5~1cm, 1~2cm, 2~3cmの4層に分け、それぞれ中央粒径 (Md ϕ)、強熱減量 (I.L.)、酸揮発性硫化物濃度 (AVS濃度)、Chl.a濃度、フェオフィチン濃度 (Pheo.濃度)、間隙水中の栄養塩濃度について分析を行った。Md ϕ は、累積粒径頻度曲線の50%にあたる粒径の ϕ であり、レーザー式粒度分析器 (HORIBA製: LA920) によって求められた。I.L.については、試料を110度で2時間乾燥した後、貝殻の分解を防ぐため550度で6時間強熱し⁶⁾、重量の減少の割合から算定された。AVS濃度はAVS測定キット (株式会社ガステック製: ヘドロテック-S) を用いて測定された。Chl.a濃度およびPheo.濃度は、アセトン抽出法およびLorenzenの方法によって求められた。間隙水中の栄養塩濃度については、試料を遠心分離によって固液分離し、栄養塩自動分析装置 (Buran+Luebbe社製: TRAACS 800) を用いて分析された。栄養塩としてはアンモニア態窒素 (NH₄-N)、亜硝酸態窒素 (NO₂-N)、硝酸態窒素 (NO₃-N)、リン酸態リン (PO₄-P) が分析された。また、溶存態無機窒素 (DIN) はNH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nの和として算定された。なお、筑後川河口付近にあるSt. 11は砂質であったため、底泥試料を採取することはできなかった。

3. 調査結果及び考察

(1) 各領域における水質の鉛直分布特性

図-2に水温、塩分、水温と塩分から算出した密度 σ_t 、DO濃度およびChl.a濃度の鉛直分布を示す。各領域の代表データとして、それぞれSt. 5, St. 15, St. 8, St. 17のデータを示している。縦軸は水表面からの距離を全水深で無次元化したものである。前日まで雨が降り、調査当日の天気も曇りだったSt. 5及びSt. 15の観測では、表層の水温がそれぞれ27.0℃、27.5℃だったのに対し、調査当日の天気が良く、日射が強かったSt. 8及びSt. 17の観測では、表層の水温は28.1℃、29.3℃と比較的高かった。底層の水温に関しては、どの地点も約25.5℃であった。塩分は、St. 5及びSt. 15と比較してSt. 8及びSt. 17は全体的に高い値を示していた。St. 5及びSt. 15では調査前日までの雨とそれに伴う河川からの淡水流入の影響を受けていたものと考えられる。水表面と海底面における密度 σ_t の差はSt. 5, St. 8及びSt. 17では2.9~3.6kg/m³であり、弱い密度成層が認められる。DO濃度は、すべての地点において表層で飽和状態であった。一方、底層では4.7~5.2mg/lと比較的低い値を示していたが、貧酸素状態といえる程ではなかった。Chl.a濃度は、St. 5及びSt. 15においては水表面で最大値をとっているのに対して、St. 8及びSt. 17では躍層付近で最大値をとっている。この理由として、St. 8及びSt. 17の観測では日射が強く植物プランクトンが強光阻害にあったためと考えられる。

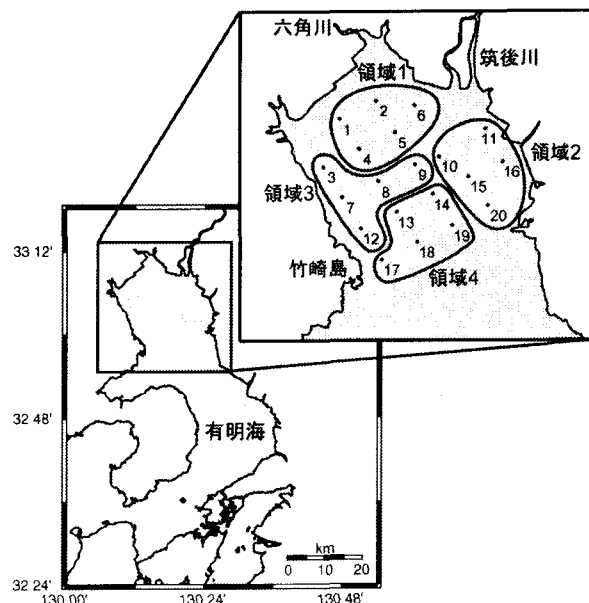


図-1 調査地点

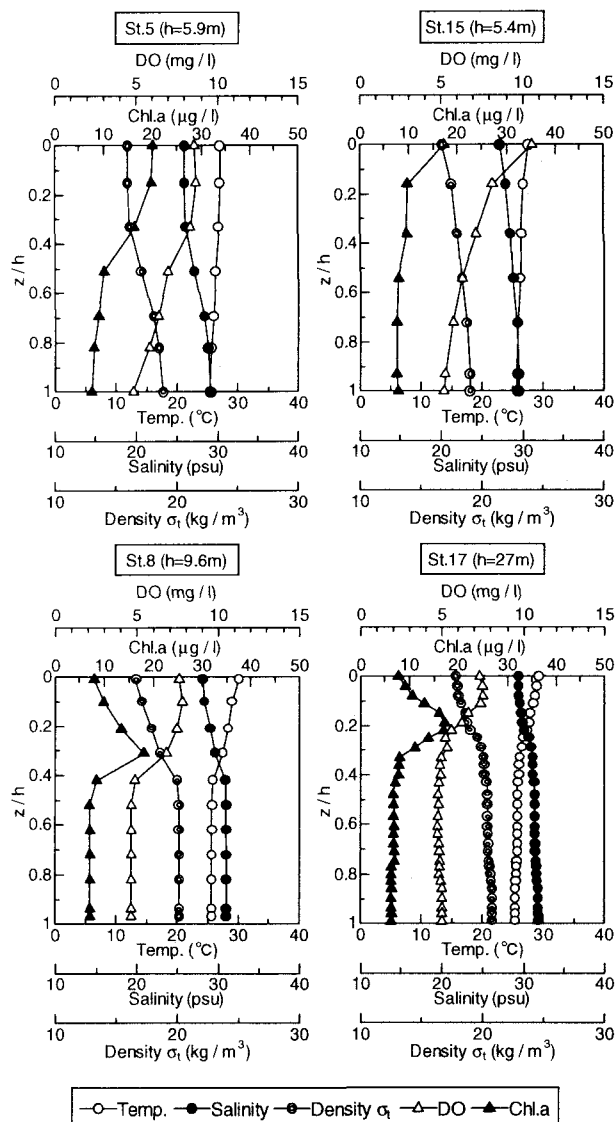


図-2 水質の鉛直分布

(2)底質の空間分布特性

底泥表面から深さ3cmまでの平均的な底質の空間分布を図-3～7に示す。これらの値は、底泥表面から深さ0～0.5cm, 0.5～1cm, 1～2cm, 2～3cmの各層で得られた底質の分析結果に層厚を掛け、加算した値を層厚3cmで割ることにより求められている。なお、図-2に示した通り、海底面付近での水質はいずれの地点においても類似しており、気象条件が底泥環境に与える影響は小さいと考えられる。本論文では夏季の底泥環境としてこの4日分のデータで、底質及び間隙水中の栄養塩の空間分布を作成した。また、空間分布はGMT (Generic Mapping Tools, Wessel and Smith 1991) を利用して作成しており、補間には曲率最小化アルゴリズムを用いた関数surfaceを使用した。

Mdφは4.9～7.6の範囲にあり、有明海北部海域では広範囲にわたって泥質堆積物が分布していることがわかる。西側（佐賀県側）および中央（St.9およびSt.14付近）の粒径は小さく、東側（福岡県側）の粒径は大きいことがわかる。この分布は東⁷⁾が示した北西海域や湾奥部中央付近でMdφが7以上の粘土質が堆積していることと類似している。有明海北部では反時計回りの恒流があるとされており、これが河川から供給される土砂の分級効果を引き起こすことにより、西側（佐賀県側）に粒径の小さい泥が堆積したと考えられる。今回のMdφの値は、2001年に陶山ら¹⁾によって得られた調査結果よりも0～2の範囲で大きくなっている。I.L.の値は3.8～14%の範囲にある。I.L.の分布も北西海域で高い値を示しており、懸濁態の有機物などが恒流によって輸送されたためと考えられる。また、この結果は陶山ら¹⁾の調査結果と類似している。一般的にMdφとI.L.の間には相関がある^{1), 8)}と言われているが、今回の調査では強い相関は認められなかった。Chl.a濃度は0.19～4.6μg/gwet, Pheo.濃度は5.0～34μg/gwetの範囲にある。Chl.aの酸化分解物であるPheo.の方が高い濃度を示している。Chl.a濃度が六角川河口域で非常に高い値をとっていることを除いて、Chl.a濃度の分布とPheo.濃度の分布は定性的に類似している。一方、Pheo.濃度の分布はI.L.の分布と異なっている。これは、有機物の起源が植物プランクトンだけではないことを示唆している。AVS濃度は0.0020～0.27mg/gdryの範囲にある。この値は、陶山ら¹⁾の調査結果（検出限界以下～0.76mg/gdry）に比べると低いものの、水産用水基準である0.2mg/gdry⁹⁾の値を超えている範囲が西側を中心に広がっている。このことから、西部海域の底泥環境が非常に悪い状態にあることがわかる。

(3)間隙水中の栄養塩特性

間隙水中の栄養塩濃度についても、底質の各分析項目と同様に深さ0～3cmまでの平均値を求め、その値に基づいて空間分布を描いた。それらの結果を図-8～12に示す。

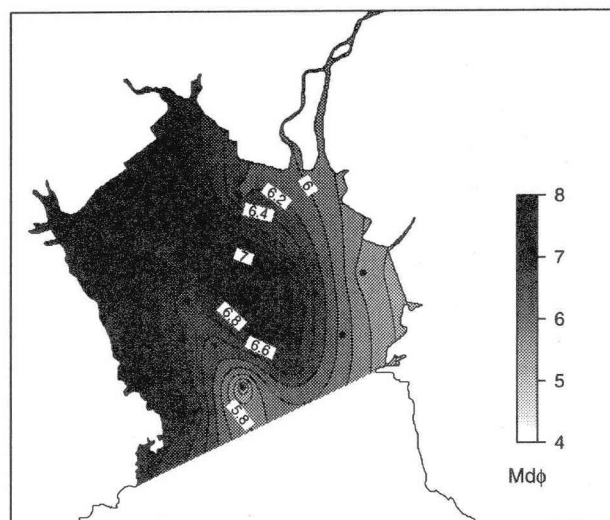


図-3 中央粒径の空間分布

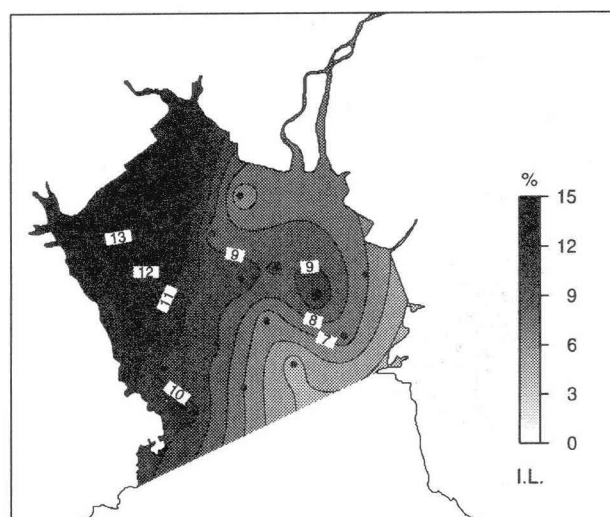


図-4 強熱減量の空間分布

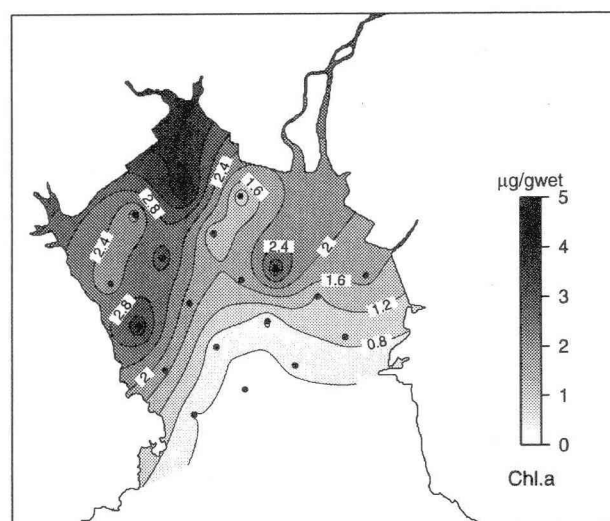


図-5 クロロフィルaの空間分布

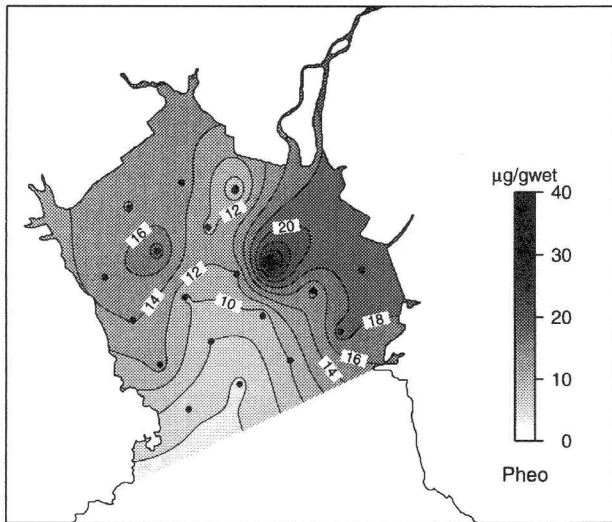


図-6 フェオフィチンの空間分布

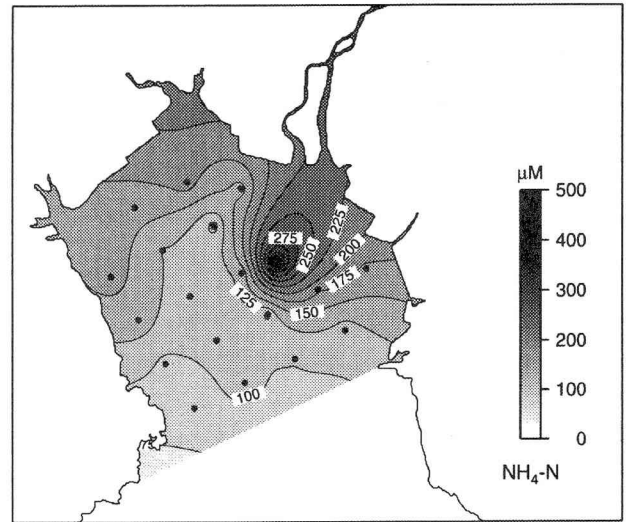


図-8 アンモニア態窒素の空間分布

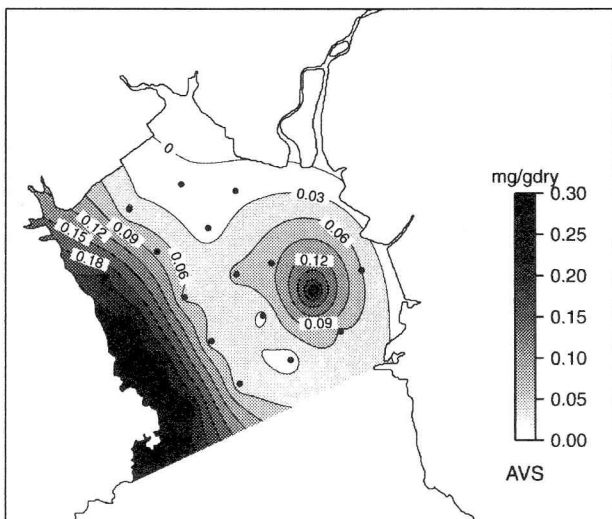


図-7 酸揮発性硫化物の空間分布

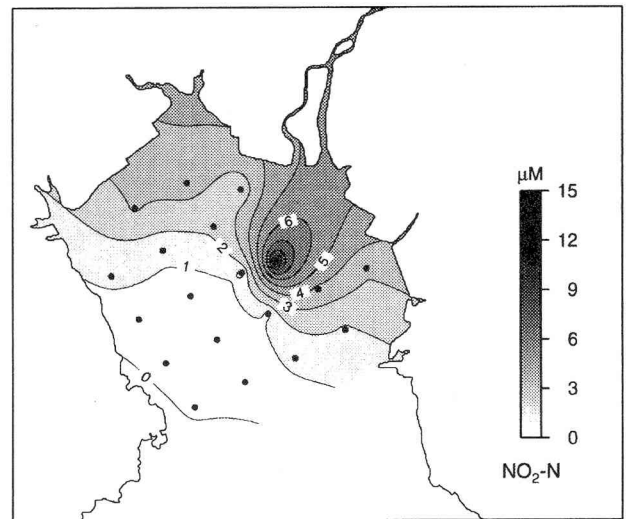


図-9 亜硝酸態窒素の空間分布

NH₄-NはSt. 10での438µMを除くと、74.6～201µMの範囲にある。今村ら¹⁰⁾によって1996年6月に行われた東京湾での340～820µMという調査結果と比較すると、今回の調査結果は低い値を示す。また、山本ら¹¹⁾によって1994年6月に行われた瀬戸内海での26.3～282µMという調査結果と比較するとあまり変わらない結果となった。NO₂-NはSt. 10での12.0µMを除くと、0.260～3.79µMの範囲にあり、NH₄-Nの分布と非常に良く似た分布を示す。NO₃-Nは5.23～26.4µMの範囲にある。瀬戸内海¹¹⁾での1.29～6.80µMという調査結果と比較すると、今回の調査結果は高い値を示している。NO₃-NはNH₄-NやNO₂-NのようにSt. 10において非常に高い値を示すということとはなかったものの、南西から北東へ向かって値が大きくなる傾向は同じであった。DINはNH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nの和として算定されているが、NH₄-NがNO₂-NやNO₃-Nに比べ桁違いに大きいので、その分布はNH₄-Nの分布と非常に良く似た

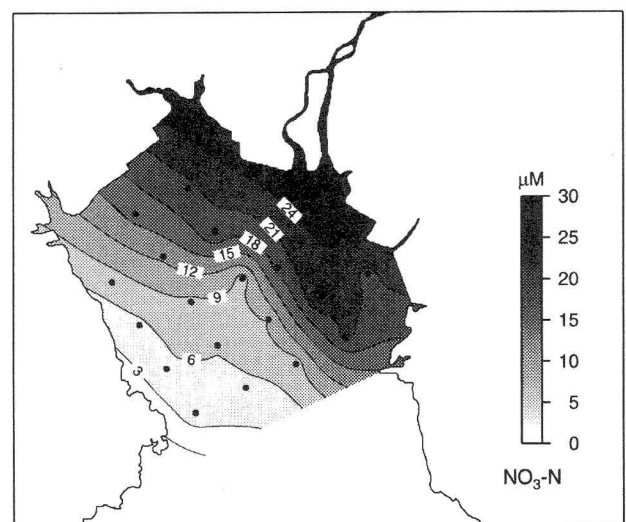


図-10 硝酸態窒素の空間分布

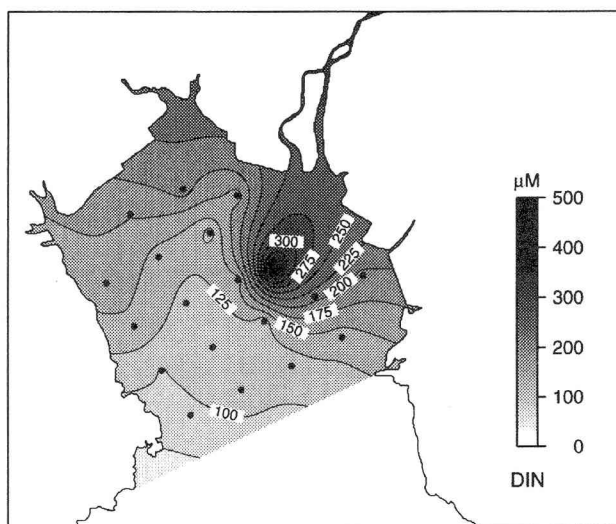


図-11 溶存無機態窒素の空間分布

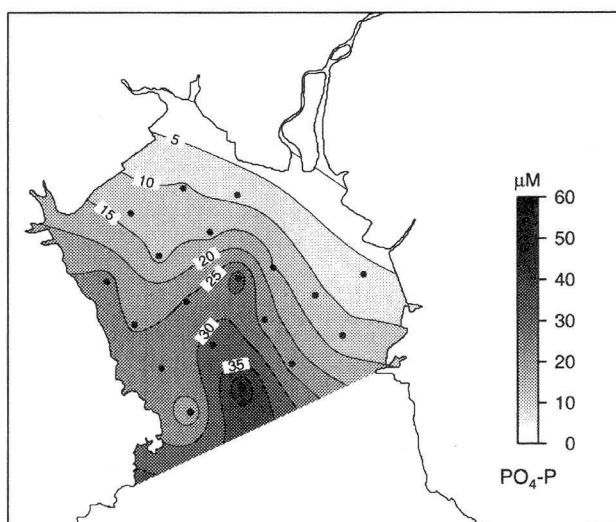


図-12 リン酸態リンの空間分布

ものとなっている。PO₄-Pは6.50~50.2μMの範囲にあり、東京湾¹⁰⁾の64.5~271μMと比較すると、NH₄-N同様に非常に低く、瀬戸内海¹¹⁾の16.5~73.7μMと同程度の結果であった。PO₄-Pの分布は南西から北東へ向かって値が小さくなる傾向を示しており、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nとは全く逆の分布を示している。以上の結果より、間隙水中のNH₄-NおよびPO₄-Pについては、東京湾よりも濃度が低いものの、瀬戸内海と同程度であり、有機物の分解が活発に行われていることが推察される。また、DINは、筑後川河口付近から竹崎島に向かって低くなり、PO₄-Pについては、DINとは逆の傾向があり、竹崎沖では50.2μMに達することが明らかとなった。

(4)底泥の有機物分解特性

有明海のような内湾では水深が浅いため、河川からの負荷、あるいは内部生産によって生産された有機物は、

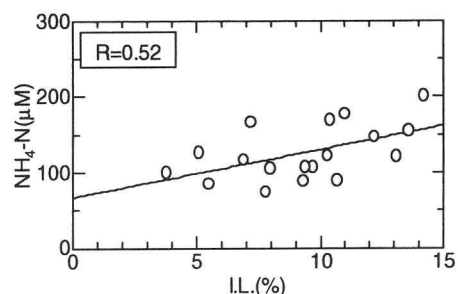


図-13 強熱減量とアンモニア態窒素の関係

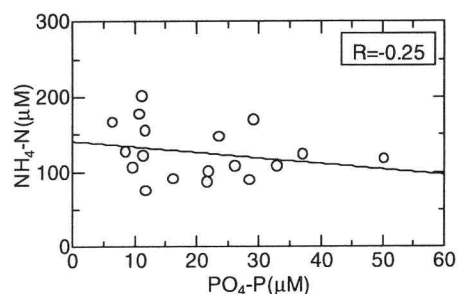


図-14 リン酸態リンとアンモニア態窒素の関係

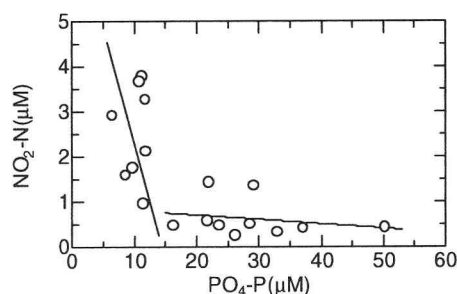


図-15 リン酸態リンと亜硝酸態窒素の関係

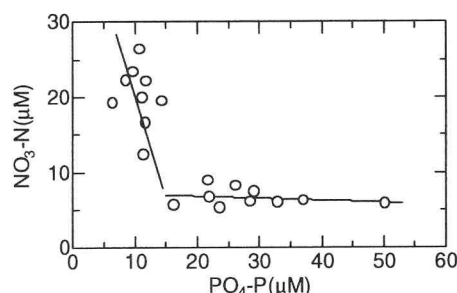


図-16 リン酸態リンと硝酸態窒素の関係

水中で十分な分解がなされないまま沈降し、底泥に堆積する。沈降・堆積した有機物の一部は有明海特有の強い潮流により再懸濁と沈降・堆積を繰り返す。その過程で有機物はバクテリアによって分解され、無機化される。

図-13は各地点のI.L.とNH₄-Nについてプロットしたものである。(但し、図-13~15においては、St.10のデー

タは非常に高い値を示していたため除かれている。) I.L. と $\text{NH}_4\text{-N}$ の間には正の相関が見られ、有機物が多い地点ほどバクテリアによる分解が活発に行われていることがわかる。図-14では各地点の $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ についてプロットされている。通常は $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の間には正の相関があると考えられるが、今回の調査結果では両者の間にやや負の相関があることがわかる。これは $\text{PO}_4\text{-P}$ の吸着・溶脱現象が影響しているものと考えられる。

図-15は各地点の $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$ の関係について、図-16は $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の関係について示したものである。どちらの図においても、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の値が $15\mu\text{M}$ 付近を境に2つの領域に分けられる。 $15\mu\text{M}$ 以上の領域は主に南西海域であった。それぞれの領域において線形近似をあてはめると、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の値が $15\mu\text{M}$ 以下の領域に比べ、 $15\mu\text{M}$ 以上の領域の方が傾きが非常に小さいことがわかる。つまり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の値が $15\mu\text{M}$ 以下の領域では、図-7に示したAVSの値から判断して、各調査地点が酸化的な状態であり、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は三価の鉄などによって吸着されていると考えられる。一方、 $\text{NO}_2\text{-N}$ や $\text{NO}_3\text{-N}$ は硝化菌による $\text{NH}_4\text{-N}$ の酸化(硝化)が行われることにより高い値を示すと推測される。 $\text{PO}_4\text{-P}$ の値が $15\mu\text{M}$ 以上の領域では、同様に図-7に示したAVSの値から判断して、各調査地点が還元的な状態にあると推察される。よってこの領域の $\text{PO}_4\text{-P}$ は、三価の鉄の還元により間隙水中に溶出したものであると考えられる。一方、 $\text{NO}_2\text{-N}$ や $\text{NO}_3\text{-N}$ が低い値を取る理由として、硝化作用が小さいことに加え、脱窒菌による窒素ガスへの還元(脱窒)が行われたためであると考えられる。したがって、この傾きの違いは調査地点が酸化的な状態であるか、還元的な状態であるかに密接に関係しており、その結果が今回の空間分布に現れているものと考えられる。

4. おわりに

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- 1) $\text{Md}\phi$ は $4.9\sim 7.6$ の範囲にあった。この値は、2001年に陶山ら¹⁾によって得られた調査結果よりも0~2の範囲で大きくなっていた。
- 2) AVS濃度が 0.2mg/gdry を超えている範囲が西側で広く見られ、西部海域の底泥環境が悪い状態にあることが示された。
- 3) DINに占める $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合は $\text{NO}_2\text{-N}$ や $\text{NO}_3\text{-N}$ と比較すると桁違いに大きかった。また、DIN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ についてはどの空間分布も筑後川河口から竹崎島へ向かって値が小さくなる傾向を示したのに対し、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は全く逆の分布を取ることを示された。
- 4) I.L. と $\text{NH}_4\text{-N}$ の間には正の相関が見られたが、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の間にはやや負の相関が見られた。
- 5) 各調査地点が酸化的な状態であるか、もしくは還元

的な状態であるかに依存して、 $\text{PO}_4\text{-P}$ の吸着・溶脱現象や無機態窒素の硝化・脱窒が生ずる。その結果が間隙水中の栄養塩の空間分布に現れているものと推察された。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(A)(1) 14205075, 研究代表者：小松利光)および(基盤研究(B)(2) 15360268, 研究代表者：松永信博)の助成を受けて行われた。独立行政法人中央水産研究所海洋生産部物質循環研究室塩本明弘室長には栄養塩自動分析装置の使用を認めていただいた。水産大学校水産情報経営学科安田秀一教授からは多項目水質計を貸与していただいた。熊本大学工学部環境システム工学科滝川清教授にはレーザー式粒度分析器の使用を認めていただいた。ここに記し感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 陶山典子・奥石裕一・須田有輔・村井武四：底質から見た有明海北部の海域区分とマクロベントスの分布，水産大学校研究報告，第51巻，第4号，pp.105-114，2003。
- 2) 半田暢彦・武居薫：底泥海水境界層の有機物代謝，沿岸海洋研究ノート，第18巻，第2号，pp.100-104，1981。
- 3) 阿部 淳・松永信博・児玉真史・徳永貴久・安田秀一：有明海西部海域における高濁度層の形成と酸素消費過程，海岸工学論文集，第50巻，pp.966-970，2003。
- 4) 徳永貴久・松永信博・阿部淳・児玉真史・安田秀一：有明海西部海域における高濁度層の観測と懸濁物質による酸素消費の実験，土木学会論文集(投稿中)。
- 5) 井澤博文・清木 徹・伊達悦二：大口径パイプを用いた簡易不攪乱柱状採泥器の試作，水質汚濁研究，第13巻，第5号，pp.320-323，1990。
- 6) 佐藤善徳・捧 一夫・木全裕昭：浅海の底質の強熱減量測定法の改善，東海区水産研究所研究報告，第123号，pp.1-13，1987。
- 7) 東幹夫：諫早湾干拓事業と「有明海異変」——再生への提言一，陸水学会誌，64，pp.209-217，2003。
- 8) 谷本照己・川名吉一郎・山岡到保：瀬戸内海における底質の粒度組成と有機物，中国工業技術試験所報告，No.21，pp.1-11，1984。
- 9) 社団法人 日本水産資源保護協会：水産用水基準，pp.6，1995。
- 10) 今村正裕・松梨史郎：湾奥部における水-底泥間の窒素・リンのフラックス，海岸工学論文集，第44巻，pp.1081-1085，1997。
- 11) 山本民次・松田 治・橋本俊也・妹背秀和・北村智顕：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見積もり，海の研究，Vol.7，No.3，pp.151-158，1998。

(2004.9.30 受付)