

「生物化学的環境評価に基づいた諫早湾底泥の健康診断」

松永 信博

(九州大学大学院総合理工学研究院)

1. はじめに

有明海は、我が国最大の干満差と強い潮汐流を伴う閉鎖性内湾である。また、湾奥部には筑後川をはじめ数多くの一級河川が流入し、大量の土砂と栄養塩が供給される。このため、湾奥部には約231km²にも及ぶ広大な泥質干潟が発達し、アゲマキ、タイラギ、サルボウをはじめ有明海独自の底生生物が生息し、多様で豊かな生態系が構築されてきた。しかしながら、1990年農林水産省（以下、農水省と略す）は洪水対策と農地拡大を目的として諫早湾干拓事業に着工した。1997年には潮受け堤防により諫早湾奥部が閉め切られ、2,900haの干潟を含む3,550haの浅海域が消滅した。その結果、二枚貝をはじめ、多くの底生生物が死滅した。2000年12月有明海で発生した大規模な海苔不作問題を契機に、この諫早湾干拓事業と水産資源激減との因果関係が社会問題となった。その後における、諫早湾干拓事業に対する国と漁師達の争議の歴史は次の様に要約される。2001年12月、農水省の第三者委員会は短・中・長期開門調査の必要性を提言したが、農水省は2002年4月に短期開門調査のみを実施し、中・長期開門調査は見送られた。2002年11月、漁師らが干拓工事差し止めを求めて佐賀地裁に提訴した。2004年8月、佐賀地裁は工事差し止めの仮処分を決定したが、2005年5月、福岡高裁は工事差し止めの仮処分を取り消し、さらに2005年9月には最高裁は漁師らの抗告を棄却した。2006年11月漁師らは工事差し止め訴訟における訴えの内容を「干拓地潮受け堤防の撤去」から「排水門の常時開門」に変更し、佐賀地裁に提訴した。2007年11月、干拓工事の主要工事が終了。2008年6月27日、佐賀地裁は3年間の猶予の後、5年間の常時開門を行うよう国に命じた。これを受け、農水省は2008年7月10日福岡高裁に控訴した。

大規模プロジェクトの計画段階では、環境アセスメントを可能な限り入念に行い、周辺住民の理解を得るための説明と協議を幾度も重ねることが必要であるが、一方で、着工以前の環境を十分綿密に調査し、重要なデータを取得しておくことも極めて重要な仕事である。2000年12月有明海で発生した大規模な海苔不作問題を契機に、諫早湾干拓事業と有明海の水産資源激減との因果関係が社会問題となった時、大学や研究機関は様々な角度から有明海の現地調査に乗り出した。しかしながら、着工前の精確なデータがほとんど無いため、干拓事業と環境悪化との因果関係を正しく評価できないのが実情である。2008年6月27日の諫早湾干拓佐賀地裁判決を受けて、農水省は、排水門の常時開門を行い、干拓事

業と環境悪化との因果関係を解明するための中・長期観測を実施するよう迫られている。もし、現時点における諫早湾内の物理環境と生物化学的環境に関する信頼性の高い調査結果を蓄積することを怠れば、開門調査を行っても比較・検討することができず、干拓事業に対する正しい評価を下すことはできないであろう。諫早湾における常時開門が正式に決定される前に、現在の諫早湾の物理環境特性と生物化学的環境特性について、詳細かつ総合的な調査研究を行い、これらの特性量に関する信頼性の高いデータベースを作成・公表することは、干拓事業と環境悪化との因果関係を解明する上で、必要不可欠である。

本研究は、この様な視点から計画されたもので、諫早湾全域から未攪乱底泥コアをサンプリングし、生物化学的環境評価に基づいて諫早湾の底泥の健康診断を行うことを目的としている。

2. 観測概要

2.1 未攪乱底泥コア・サンプリング

諫早湾は、面積約 100km²の内湾であり、図-1 に示すようにあらかじめ設定した 22 地点から未攪乱底泥コアを採取した。コア・サンプリングは 2008 年 5 月 7 日～8 月 28 日の大潮満潮時に潜水夫を雇っておこなわれた。採取した未攪乱底泥コアの高さが約 15cm になるように、長さ 50cm、直径 11cm の透明アクリル円筒形パイプを海底に突き刺すことにより採泥された。各地点において、4 本ずつ未攪乱底泥コアを採取し、氷詰めにして研究室に持ち帰った。

2.2 室内実験

採取された底泥コアは、表面から 3cm までを厚さ 0.5cm の間隔、深さ 3cm から 10cm までは厚さ 1cm の間隔でスライスされた。スライスした底泥の中央粒径は粒径分析装置(HORIBA, L-920)を用いて求められた。強熱減量(IL)は、サンプルを 110°C で 2 時間乾燥炉(ASONE, DO-450A)で乾燥させ、得られた重量と、550°C で 6 時間燃焼炉(ISUZU, STR-14K)で加熱し有機物を焼却した後

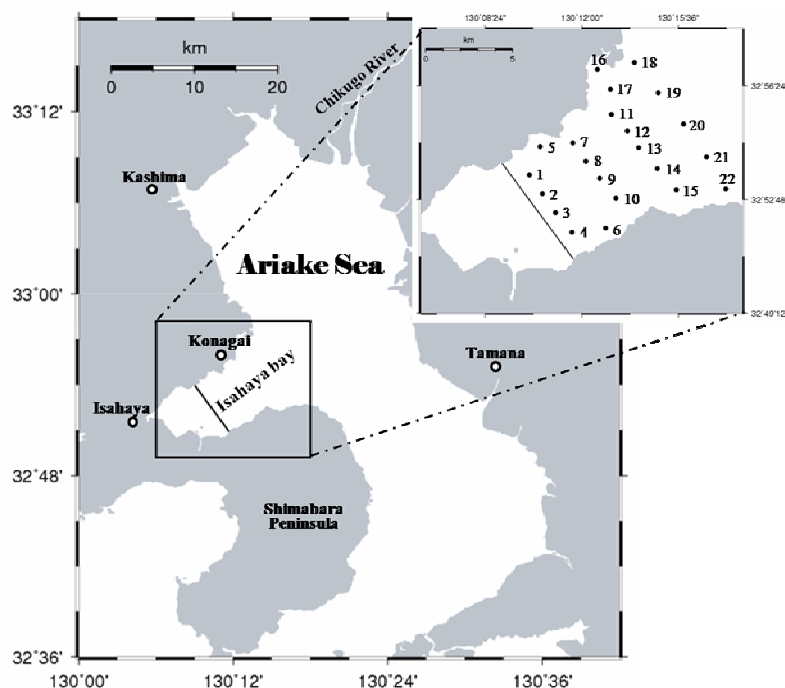


図-1 諫早湾における底泥採取地点

られた重量との差から求められた。クロロフィル a (Chl.a)とフェオフィチン(Pheo.)の濃度は、90%アセトン溶液で溶出させた後、標準分光光度分析方法を用いて求められた。酸化還元電位 (ORP) は ORP プローブ (Toko, TPX-90Si)をスライスした底泥サンプルに直接挿入することにより測定された。乾燥底泥中の酸揮発性硫化物(AVS) は、ガス検知管 (GASTEC, GV-100S)を用いて測定された湿潤底泥中の AVS 値を乾燥重量に対する値に変換することにより求められた。スライスされた底泥は 2000 rpm で 20 分間遠心分離器にかけられ、抽出した底泥中の間隙水は 0.45 μ m の濾紙で濾過された。間隙水中に含まれる栄養塩は、オートアナライザー(BLTEC, SWAAT)を用いて分析された。分析された栄養塩は、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)の濃度である。

未攪乱底泥コアの表面から消費される酸素の速度を求める実験を行った。これは底泥の有機物分解による酸素消費(SOC : Sediment Oxygen Consumption)速度を求めるためで、底泥の含有有機物量や貧酸素水塊の発生指標となる底泥の重要な特性を表す。図-2 は酸素消費実験の概要を示す。恒温装置内に未攪乱底泥コアのサンプルを 2 本とレファレンスとして濾過海水のみを入れたサンプルを 1 本準備した。未攪乱底泥コアサンプルの上には、底泥が巻き上がらないように十分曝気した濾過海水を静かに注いだ。レファレンスの濾過海水も十分曝気した。水表面から酸素が混入ないように 3 本のサンプルの水表面に薄い流動パラフィンの膜を張った。試料水が成層しないように、常時ゆっくりとスターラーで掻き回しながら、DO 計で溶存酸素濃度を測定した。恒温装置内の温度を 20°C に保つことにより、

試料水の温度を 20°C に固定した。SOC の経時変化は、未攪乱底泥コアのサンプル 2 本の酸素消費の平均から濾過海水のみの酸素消費を差し引くことにより算出された。

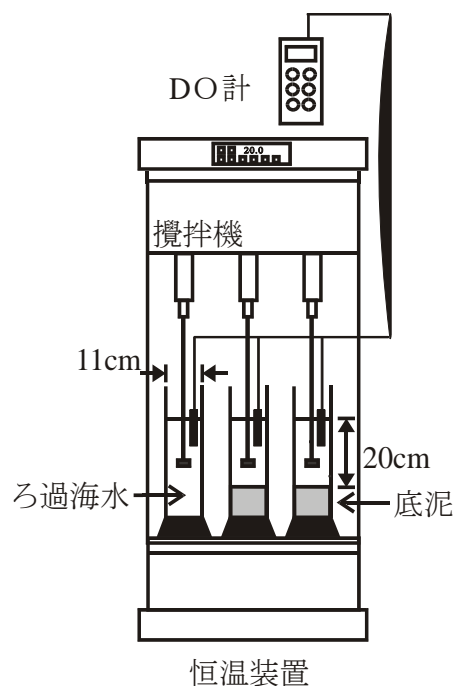


図-2 底泥表面からの酸素消費実験の概要

3. 観測結果

本報告書で示す観測結果は、すべて底泥の表層厚さ 3cm における平均値である。底泥特

性量の鉛直分布等の詳細に関しては、さらに分析を進め、将来、研究発表を行いたいと考えている。

3.1 粒径分布

図-3は、Md ϕ の等値線分布を示している。ただし、

$$Md \Phi = -\log_2 d_{50}$$

であり、 d_{50} は粒径分析装置から得られた中央粒径である。Md ϕ の値は5.6から6.6の範囲にあり、湾全体にわたって粒径0.021mmの中粒シルトから0.010mmの細粒シルトが堆積していることがわかる。有明海奥部においてMd ϕ の値が約7を取ることを考慮すると、Md ϕ =5.6~6.6の値は大きいとは言えないが、非常に小さな粒径の底質が堆積していることがわかる。特に、北部排水門の前方には細粒シルトが広く堆積しており、その堆積パターンから、水門から排水された濁水に含まれた細粒シルトは北部沿岸に沿って輸送されながら沈降・堆積する傾向が推測される。島原半島に沿っても、細粒シルトが堆積している。島原半島に沿っては強い潮流が形成されることが知られており、何故島原半島に沿って細かいシルトが堆積できるのかは、興味深い問題であり、今後詳細に調べていきたいと考えている。

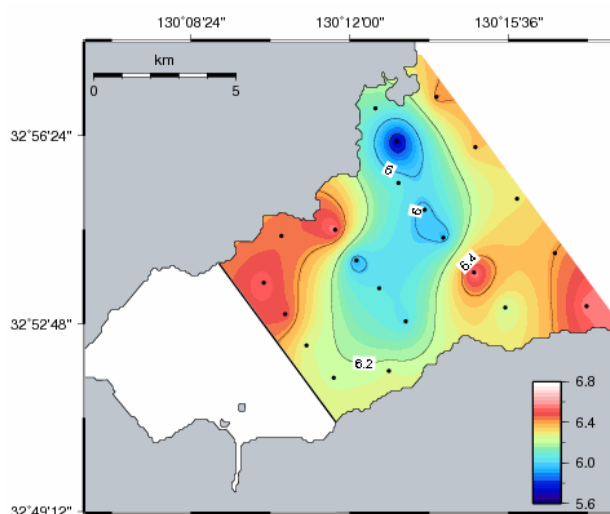


図-3 中央粒径の分布

3.2 有機物分布

ILの空間分布を図-4に示す。ILは6.7%から19.8%の値を取り、ほとんどの海底で10%を越えている。ILの分布は湾軸を境に、北側と南側で大きく異なる。北側の底泥には有機物の堆積は少なく、南側にはかなりの有機物が堆積していることがわかる。

図-5は、Chl.a+Pheo.濃度の空間分布を示している。Chl.a+Pheo.濃度は7.7 $\mu\text{g/g-wet}$ から37 $\mu\text{g/g-wet}$ までの値を取っており、ILの分布とは全く対照的で北部沿岸が高く南側は低くなっている。この結果は、北部沿岸に沿って赤潮がしばしば発生するという観測結果と矛盾しない。しかしながら、ILの分布とChl.a+Pheo.濃度の分布が対照的である理由として、北部沿岸には底生生物は少なく、植物プランクトンの堆積が有機物量を支配している。一方、南側では底生生物が多く生息しているが、植物プランクトンや底生藻類の生息は少ないと考えられる。

3.3 ORP と AVS の分布

ORP と AVS の空間分布をそれぞれ図-6 と 7 に示す。ORP の値は -154 mV から 174 mV の範囲にあり、北部排水門近くと湾の中央付近の ORP は、高い正の値を取る。一方、南部排水門付近と湾口に沿ったラインにおいて、ORP は負の値を取る。特に、湾口の北部では、ORP の値は -100 mV よりも低くなっている。この分布から、北部排水門近くと湾中央部で底泥は好気状態にあり、湾口では嫌気状態にあることがわかる。諫早湾の AVS の値は、 0.04 mg/g-dry から 1.28 mg/g-dry の間で変化している。また、ほとんどの所で、AVS 値は水産用水基準値である 0.2 mg/g-dry よりも高くなっており、底泥環境は深刻な状況にあるといえる。特に、潮受け堤防の南端の底泥では、AVS は 1.0 mg/g-dry より大きな値を取り、IL は 15%以上、ORP は -60 mV 以下の値を取ることから、底泥環境がかなり悪化していることがわかる。図-8 は AVS と ORP の間の相関を示している。両者の間には

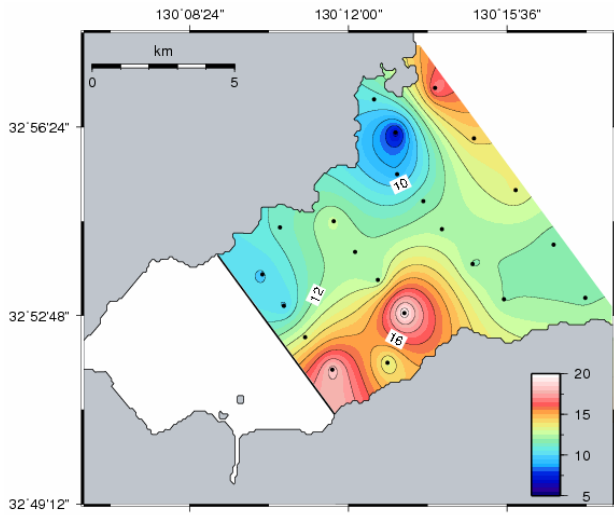


図-4 IL の分布

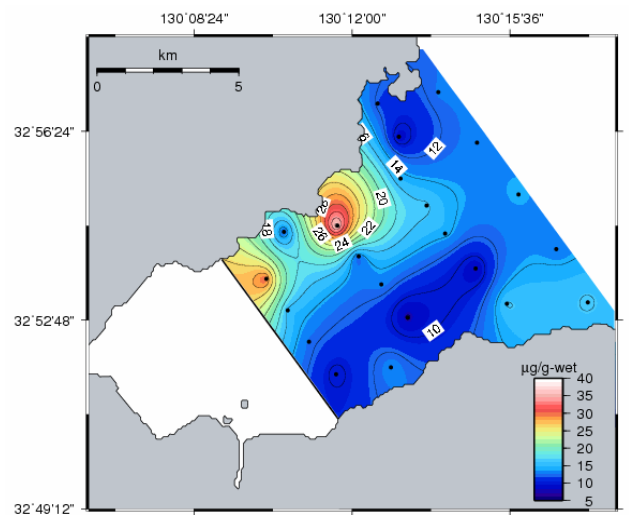


図-5 Chl. a + Pheo. 濃度の分布

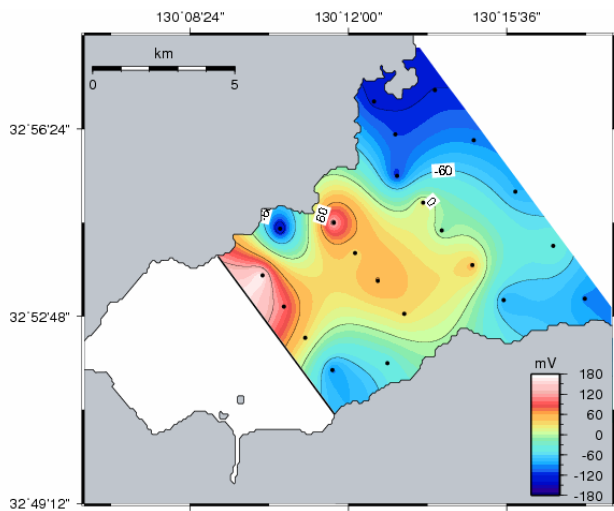


図-6 ORP の分布

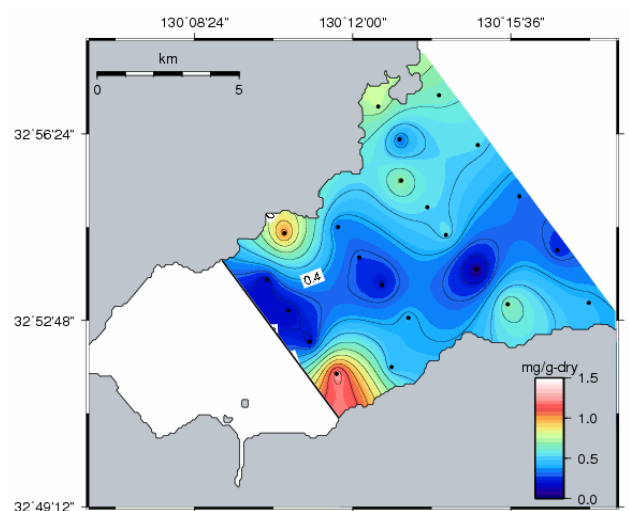


図-7 AVS の分布

かなり高い負の相関が見られ、AVS と ORP のどちらも底泥の健康度を表す指標として用いることの妥当性が明らかとなった。

3.4 SOC 速度

図-9 に底泥による酸素消費(SOC)速度の分布を示している。酸素消費速度は 0.003m/h から 0.017m/h の範囲にあり、北部沿岸と島原半島に沿って高い値を示している。北部沿岸の最大値は St. 8 で 0.014 m/h の値を取っている。島原半島に沿った領域では St. 15 で 0.017 m/h を示している。St. 8 付近の領域は好気状態にあり、Chl.a+Pheo.は高い値を示している。従って、有機物分解が活発に行われ、非常に多くの酸素が消費される状況にあると推測される。一方、St. 15 付近では還元状態にあり、硫化物が生成されている。従って、島原半島の沖側の底泥の酸素消費速度が高くなっている理由としては、硫化物の酸化に伴う酸素消費に起因していると考えられる。SOC 速度は湾口の中央付近で低い値を取る。これは、底泥が含む Chl.a+Pheo.の値が小さいため、酸素消費速度が低くなっているものと思われる。

3.5 間隙水中の栄養塩の特性

図-10 に アンモニア態窒素(NH₄-N)濃度の空間分布を示す。NH₄-N 濃度は 126μM ~540 μM の範囲にある。NH₄-N 濃度の高い値は、南部排水門の前面と St. 5 の地点であった。図-6 と図-7 からわかるように、これら高濃度の NH₄-N は硫化還元状態で発生したものである。つまり、嫌気状態にある底泥の表面に大量の有機物が堆積することにより、有機物が嫌気状態の下で分解され、アンモニア態窒素の段階で止まったためである。湾の東側の領域では、NH₄-N 濃度は低くなっている。これは、図-4 と図-5 からわかるように、有機物の堆積が少ないためと考えられる。

図-11 は、亜硝酸態窒素(NO₂-N)濃度と硝酸態窒素(NO₃-N)濃度の合計の分布を示したものである。NO₂-N+NO₃-N 濃度は 0.11μM から 27μM の範囲で分布している。

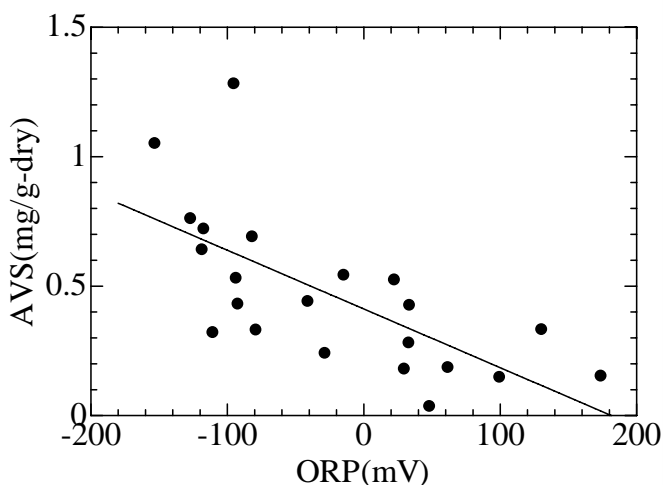


図-8 AVS と ORP の関係

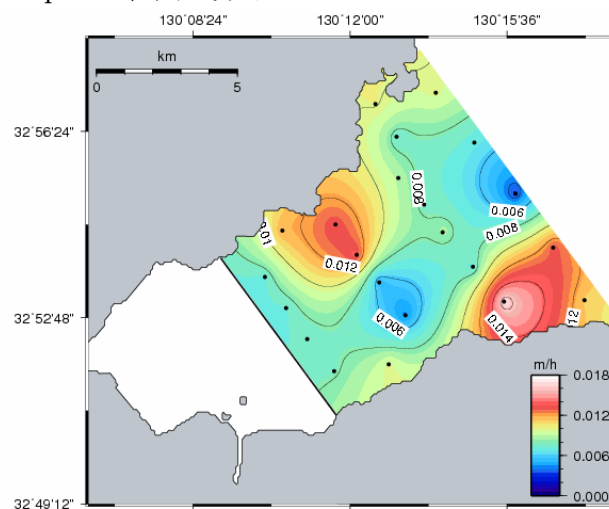


図-9 底泥による酸素消費速度の分布

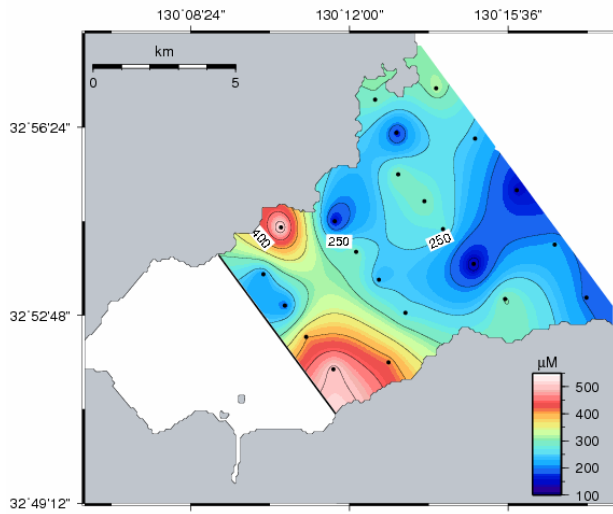


図-10 $\text{NH}_4\text{-N}$ の分布

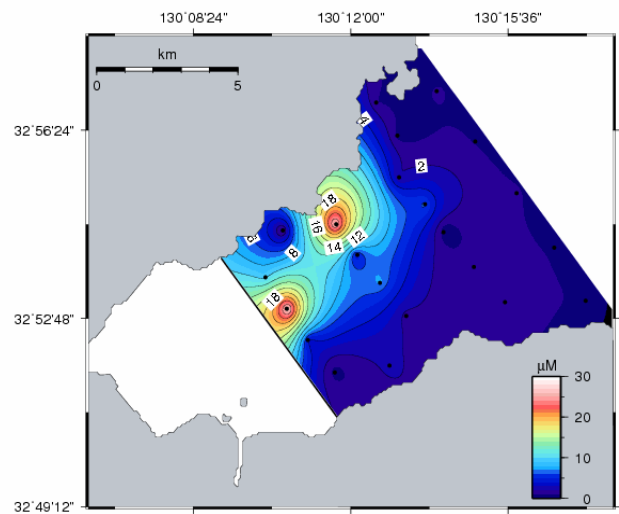


図-11 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ の分布

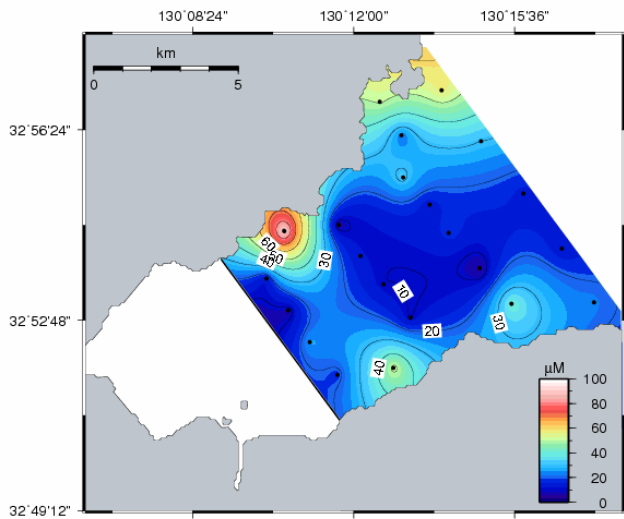


図-12 $\text{PO}_4\text{-P}$ の分布

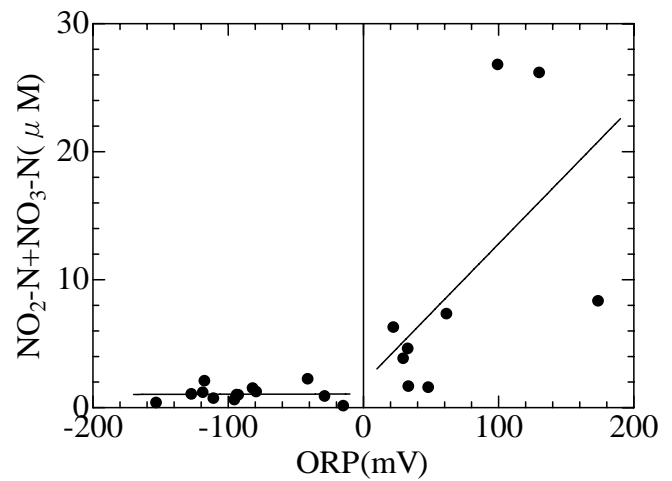


図-13 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ と ORP の関係

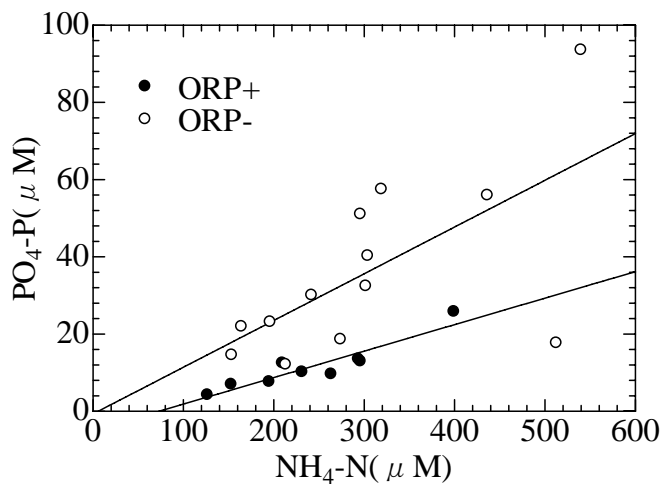


図-14 $\text{PO}_4\text{-P}$ と $\text{NH}_4\text{-N}$ の関係

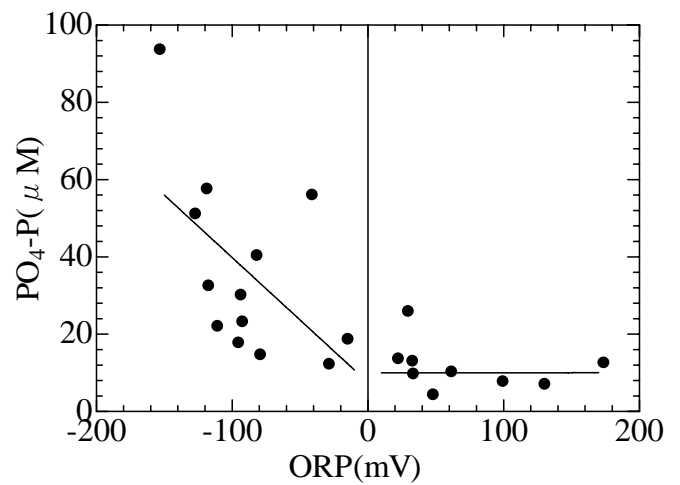


図-15 $\text{PO}_4\text{-P}$ と ORP の関係

NO₂-N+NO₃-N 濃度は諫早湾南岸から湾口に到るほとんどの領域で小さな値を取る。この理由として、南部排水門前方と St. 5 の地点では底泥が嫌気状態にあり、嫌気性微生物群による分解が行われている。従って、有機物分解はアンモニア態窒素の段階で止まってしまい、硝酸態窒素の生成が行われなためである。諫早湾中央部や湾口において、NO₂-N+NO₃-N 濃度が低くなっている理由は、一般に海域では硝化菌による硝酸態窒素生成速度が小さいことに加え、図-10 で記述したように有機物の堆積が少なくアンモニア態窒素の生成が少ないためである。St. 2 と St. 7 の地点で NO₂-N+NO₃-N 濃度が高くなっている。この分布は、図-5 で示した Chl.a+Pheo.濃度の分布と定性的に一致しており、図-6 で示されるように底泥は好気状態にあることより、有機物分解から硝化へのプロセスが効果的に進んでいることを示している。しかしながら、前述したように海域では一般に硝化速度は低いと言われており、何故 St. 2 と St. 7 の 2 地点でこの様な高い硝酸態窒素濃度が観測されたかは極めて興味深い現象である。

図-12 にリン酸態リン(PO₄-P)濃度の空間分布を示す。PO₄-P 濃度は 4μM から 94μM の範囲で分布している。PO₄-P 濃度は St. 5, St. 6, St. 15, St. 16, St. 18 において高い値を取っている。この分布は、図-6 の ORP と図-7 の AVS の分布からわかるように、底泥表面が嫌気状態になっている地点と一致している。従って、底泥中の PO₄-P 濃度が高くなった原因として、還元状態における PO₄-P の溶出が考えられる。

図-13 は、NO₂-N+NO₃-N 濃度と ORP の関係を示している。ORP が負の値を取る場合、NO₂-N+NO₃-N 濃度は非常に小さく、ORP の値に依存しない。これは、還元状態では有機物分解により硝酸態窒素が発生せず、逆に、底泥中に蓄えられた硝酸態窒素は脱窒作用により大気中に放出され、その濃度は小さくなるからである。一方、ORP が正の場合、NO₂-N+NO₃-N 濃度は ORP の増加と共に増加する傾向が見られる。これは、好気状態においては、底泥中の有機物分解によりアンモニア態窒素→硝酸態窒素への反応が進んでいることを示している。

図-14 は PO₄-P と NH₄-N の相関を示している。ORP が正の場合、NH₄-N 濃度/ PO₄-P 濃度の値が 16 となり、レッドフィールド比と一致する。これは、植物プランクトンや底生藻類の分解によって発生した栄養塩であることを示唆している。一方、ORP が負の場合、PO₄-P 濃度は ORP が正の場合に比べて高くなっている。これは、底泥が嫌気状態にあり、PO₄-P が底泥から溶出したためである。

図-15 は PO₄-P 濃度と ORP の関係を示している。ORP が負の領域では PO₄-P 濃度は ORP が正に近づくにつれ減少する。これは、底泥が還元状態であればあるほど PO₄-P の溶出が大きいことを示している。一方、ORP が正の領域では、PO₄-P 濃度は ORP の値に依存せず、約 12μM 程度の一定値を取る。

4. 結論

2008 年 6 月 27 日の諫早湾干拓佐賀地裁判決を受けて、農水省は、排水門の常時開門を

行い、干拓事業と環境悪化との因果関係を解明するための中・長期観測を実施するよう迫られている。もし、現時点における諫早湾内の物理環境と生物化学的環境に関する信頼性の高い調査結果を蓄積することを怠れば、その後開門調査をいくら行っても比較・検討することができず、干拓事業に対する正しい評価を下すことはできないであろう。諫早湾における常時開門が正式に決定される前に、現在の諫早湾の物理環境特性と生物学的環境特性について、詳細かつ総合的な調査研究を行い、これらの特性量に関する信頼性の高いデータベースを作成・公表することは、干拓事業と環境悪化との因果関係を解明する上で必要不可欠である。この様な視点から、「生物化学的環境評価に基づいた諫早湾底泥の健康診断」のプロジェクト研究が計画された。2008年5月7日から8月28日にかけて諫早湾内に設定された22地点から未攪乱底泥コアを採取し、諫早湾の底泥の健康診断を行った。得られた結果は以下の通りである。

- 1) Md ϕ の値は5.6から6.6の範囲にあり、湾全体にわたって粒径0.021mmの中粒シルトから0.010mmの細粒シルトが堆積している。特に、北部排水門の前方には細粒シルトが広く堆積しており、その堆積パターンから、北部排水門から排水された濁水に含まれた細粒シルトは北部沿岸に沿って輸送されながら堆積する傾向がある。
- 2) ILは、6.7%から19.8%の値を取り、ほとんどの海底で10%を越えている。北側の底泥には有機物の堆積は少なく、南側にはかなりの有機物が堆積している。
- 3) Chl.a+Pheo.濃度は7.7 $\mu\text{g/g-wet}$ から37 $\mu\text{g/g-wet}$ までの値を取っており、ILの分布とは全く対照的で北部沿岸が高く南側は低くなっている。この結果は、北部沿岸に沿って赤潮がしばしば発生するという観測結果と一致する。
- 4) ORPの値は-154mVから174mVの範囲にあり、北部排水門近くと湾中央部で底泥は好気状態にあり、湾口では嫌気状態にある。AVSの値は、0.04mg/g-dryから1.28mg/g-dryの間で変化している。また、ほとんどの所で、AVS値は水産用水基準値である0.2mg/g-dryよりも高くなっており、底泥環境は深刻な状況にあるといえる。特に、潮受け堤防の南端の底泥では、AVSは1.0mg/g-dryより大きな値を取り、ILは15%以上、ORPは-60mV以下の値を取っており、底泥環境がかなり悪化している。
- 5) 底泥による酸素消費(SOC)速度は0.003m/hから0.017m/hの範囲にあり、北部沿岸と島原半島に沿って高い値を示している。北部沿岸では最大値0.014m/hを取り、有機物分解が活発に行われ、非常に多くの酸素が消費される状況にある。島原半島に沿って最大値0.017m/hを取る。そこでは、底泥は還元状態にあり、硫化物が生成されている。
- 6) NH₄-N濃度は126 μM ～540 μM の範囲にあり、NH₄-N濃度の高い値は、南部排水門の前方とSt. 5の地点である。これら高濃度のNH₄-Nは、硫化還元状態で発生したものであり、嫌気状態にある底泥の表面に大量の有機物が堆積し、嫌気状態で有機物が分解されたためである。
- 7) NO₂-N+NO₃-N濃度は0.11 μM から27 μM の範囲で分布している。NO₂-N+NO₃-N濃度の分布は、Chl.a+Pheo.濃度の分布と定性的に一致しており、好気状態においては植

物プランクトンの分解により、アンモニア態窒素から硝酸態窒素へと分解が進む。

- 8) $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は $4\mu\text{M}$ から $94\mu\text{M}$ の範囲で分布している。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が高い値を取っている地点では、底泥表面が嫌気状態になっており、底泥からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出に起因している。
- 9) ORP が負の領域では、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は非常に小さく、ORP の値に依存しない。一方、ORP が正の場合、 $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は ORP の増加と共に増加する傾向が見られる。ORP が正の場合、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度/ $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度の値が 16 となり、レッドフィールド比と一致する。一方、ORP が負の領域では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は底泥からの溶出のため、ORP が正の場合に比べて高くなる。ORP が負の領域では $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は ORP が正に近づくにつれ減少する。底泥が還元状態であればあるほど $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出が大きくなる。一方、ORP が正の領域では、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は ORP の値に依存せず、約 $12\mu\text{M}$ 程度の一定値を取る。

謝辞

本研究は、平成 19 年度公益信託エスぺック地球環境研究・技術基金の助成の下で行われたことを記し、謝意を表します。