

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

阿 部 淳* ・松 永 信 博** ・児 玉 真 史***
徳 永 貴 久**** ・安 田 秀 一*****

貧酸素水塊の形成が深刻化している有明海西部海域において、高濁度層の形成と貧酸素水塊の形成に関する知見を得るため、25 時間連続定点観測を行った。上げ潮最強時および下げ潮最強時の時間帯において海底上約 5 m まで高濁度層が形成され、形成された高濁度層は干潮時では全水深にわたって一様化する傾向があることがわかった。また、底泥および再懸濁した浮遊粒子（以下 SS）の酸素消費速度を実験的に調べた結果、SS の酸素消費速度は底泥のものと比較して 5～13 倍の値を取り、SS が海域の貧酸素化に大きく寄与することが明らかとなった。

1. はじめに

有明海西部海域では夏季において貧酸素水塊の形成が報告されている（佐藤ら, 2001）。貧酸素水塊の発生はアサリやタイラギ等の底生生物の死滅、底泥から水塊中へ栄養塩の溶出など様々な環境問題を引き起こす。また近年、有明海における赤潮の大発生により底泥表面に堆積した大量の有機物が、有明海特有の強い潮流のため巻き上げられ、底泥付近で高濁度層を形成している可能性がある。貧酸素水塊の形成要因として底泥表面の酸素消費だけでなく、再懸濁した浮遊粒子（以下 SS）による酸素消費も重要であると考えられるため、高濁度層が形成される海域における酸素消費速度を定量的に評価することは極めて重要である。

Wainright・Hopkinsou (1997) は再懸濁の効果を考慮した数値シミュレーションの結果より、底泥表面から水塊中への有機物の輸送は、系全体の有機物分解速度を上昇させることを示している。

本研究では貧酸素水塊の発生が報告される有明海西部海域において現地観測を行い、主に潮流と濁度の鉛直分布の関係について検討し、高濁度層の形成過程について考察を行った。また、現地底泥および SS の酸素消費速度を室内実験により求め、それに基づき現地における底泥と SS の酸素消費速度を評価し、SS が貧酸素化を引き起こす可能性について検討した。

2. 調査および観測概要

(1) 底泥環境調査

有明海西部海域における底泥の環境評価を行うため、2002 年 9 月 4 日（中潮）に図-1 に示す 6 地点においてエクマンバージ採泥器を用いて底泥を採取した。底泥表層約 5 mm の試料を用いて、強熱減量（以下 I.L.）、酸化還元電位（以下 ORP）、酸揮発性硫化物濃度（以下 AVS）、

クロロフィル a 濃度（以下 Chl. a）およびフェオフィチン a 濃度（以下 Pheo. a）を計測した。また、コアサンプラーを用いて未攪乱コアを採取し、室内実験より底泥酸素消費速度を求めた。

(2) 25 時間定点観測

2002 年 9 月 22 日午前 9:00 から 9 月 23 日午前 10:00（大潮）まで図-1 の A 地点において 25 時間連続観測を行った。図-2 に定点観測の概要を示す。

まず海底面付近の再懸濁現象を調べるために、Yasuda ら (1997) によって考案されたシアー流速計（アレック電子製：ACM16M-4CHI, 以下 C/T タワー）を係留し海底面上から 2 m までの水平流速・流向および濁度の鉛直分布を 0.5 m 間隔で測定した。表層-底層間の水平流速の鉛直分布に対しては船に固定された超音波式ドップラー流速計（RDI 社製、以下 ADCP）を使用して 1 m 間

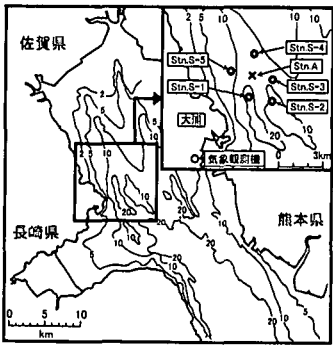


図-1 調査および観測地点

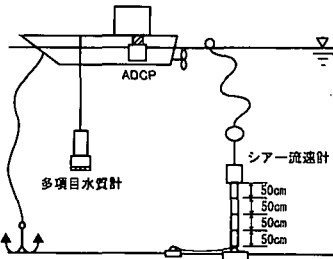


図-2 定点観測概

* 学生会員 九州大学大学院総合理工学府
** 正 会 員 工博 九州大学教授 大学院総合理工学研究院
*** 正 会 員 工博 中央水産研究所 日本学術振興会特別研究員
**** 学生会員 工修 九州大学大学院総合理工学研究科博士後期課程
***** 正 会 員 理博 (独法)水産大学校教授 水産情報経営学科

表-1 底泥環境と酸素消費速度

	I.L. (%)	AVS(mg/dry-g)	ORP(mV)	Chl. <i>a</i> ($\mu\text{g/dry-g}$)	Pheo. <i>a</i> ($\mu\text{g/dry-g}$)	SOD($\text{g/m}^2/\text{day}$)
A	10.1	0.126	-220	1.01	17.11	0.989
S-1	12.1	0.189	-176	0.12	12.82	1.394
S-2	6.6	0.061	-150	1.28	29.37	2.887
S-3	8.3	0.063	-322	1.01	30.64	0.618
S-4	11.5	0.100	-226	0.18	16.92	1.095
S-5	11.3	0.076	-363	0.61	13.67	0.898

隔で計測した。C/T タワーおよび ADCP の計測データはそれぞれ 2 秒, 10 分間隔で記録された。船を 25 時間 C/T タワー付近に係留し, 1 時間毎に多項目水質計 (アレック電子製: ACL1183-PDK, 以下 STD) を使用して, 水温, 塩分, Chl. *a*, DO 濃度および濁度の鉛直分布を測定した。さらに, 気象観測地点を長崎県小長井町に設置し, 風向・風速の変化を 10 分間隔で測定した。

3. 調査ならびに観測の結果と考察

(1) 底泥環境

表-1 に底泥環境調査の結果と各地点の酸素消費速度を示す。I.L. の値が 10% 前後と若干高く, Chl. *a* の値がほぼゼロであり Pheo. *a* の値が高いことから, 底泥表面には植物プランクトンの死骸が堆積していることがわかる。また, ORP の値が大きな負値を取ることで, 底泥表面 5 mm でも還元層が形成されていることがわかる。底泥表面による酸素消費速度 SOD については 4 節で述べる。

(2) 水質の鉛直分布時系列

図-3 に毎正時の STD 観測で得られた水温, 塩分, Chl. *a*, 濁度および DO 濃度の鉛直分布時系列を示す。観測当日は水温および塩分による成層はなく, 貧酸素水塊の形成は認められなかった。また, 上げ潮最強および下げ潮最強の時間帯において, 海底面上約 5 m まで高濁度層が形成されている様子がわかる。上げ潮最強時, 下げ潮最強時に海底面付近で形成された高濁度層は干潮時に水面付近まで達し, 濁度は水深方向に一樣となる。一方, 満潮時では高濁度層は海底面近傍に限られていることがわかる。また, 高濁度層の形成に対応して, 海底面付近の DO 濃度が減少していることがわかる。

図-4 に STD より得られた海底面上 5 m までの濁度と DO 濃度の関係を示す。海底面付近においては濁度の上昇とともに DO 濃度が低下する傾向が見て取れる。これは海底面上の有機物が巻き上げによって DO 濃度が減少したことを示唆する。

(3) 流 況

図-5 は佐賀県竹崎島における潮位変動, 風向・風速の時系列, そして C/T タワーと ADCP により得られた水平流速・流向, STD により得られた濁度の鉛直分布を示している。ただし, 水平流速・流向に基づいて, おおよ

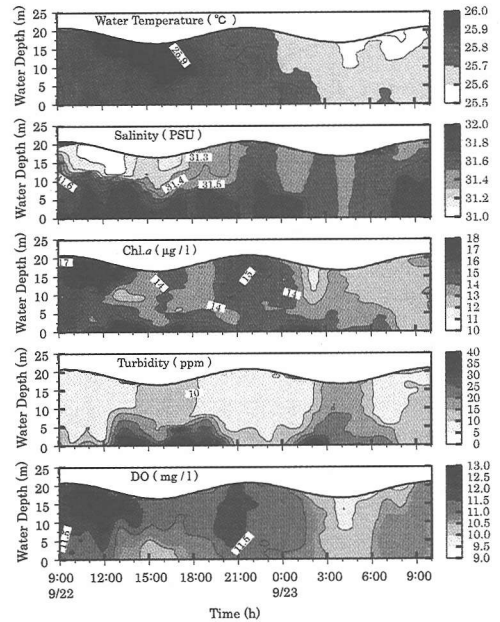


図-3 水温, 塩分, Chl. *a*, 濁度および DO 濃度の鉛直分布時系列

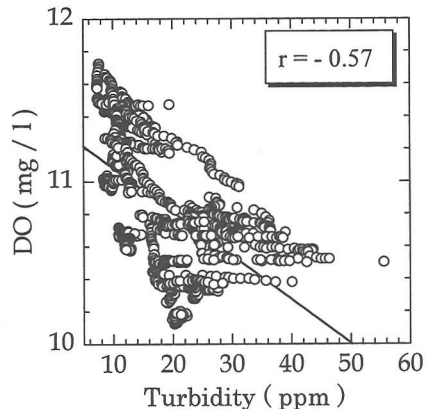


図-4 海底面付近における濁度と DO 濃度の関係

そ満潮, 下げ潮最強, 干潮そして上げ潮最強の時間帯に対応する結果を載せている。これらの時間帯は潮位の図において●印で示されている。C/T タワーと ADCP の海底面付近における流速・流向とも時間帯により多少の差があるものの, 良く一致していることがわかる。風向・

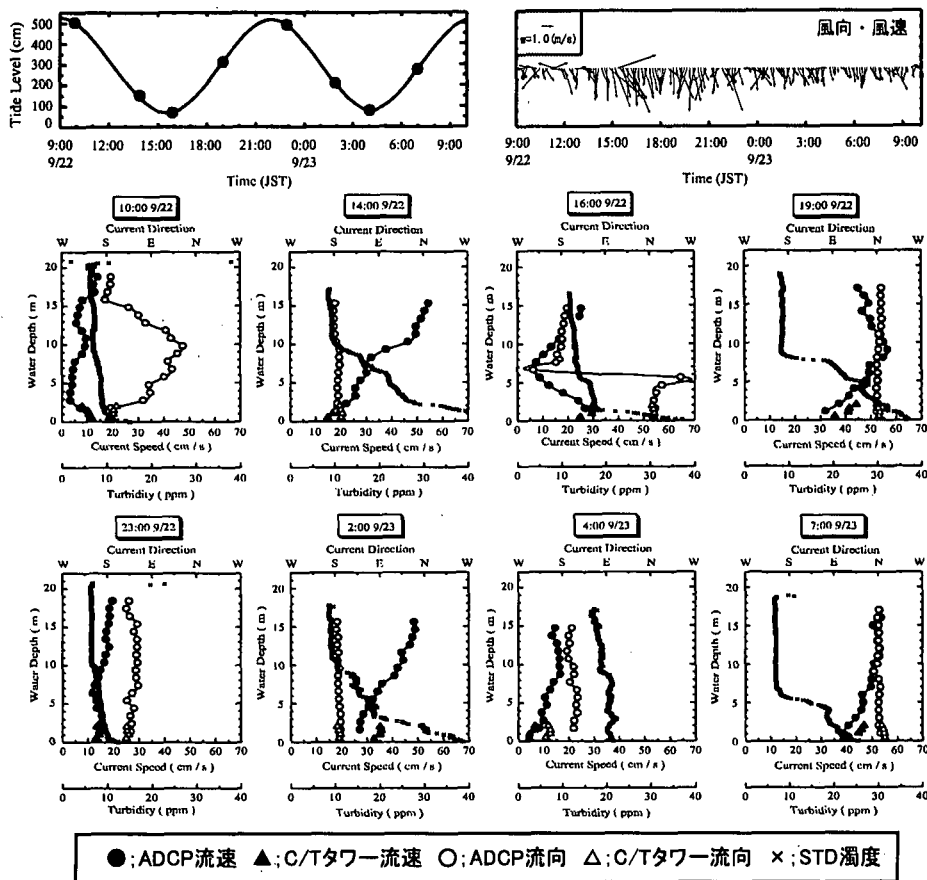


図-5 佐賀県竹崎島における潮位変動、風向・風速の時系列および水平流速と濁度の鉛直分布

風速の結果より、9月22日14:00から23:00まで風速5 m/s程度の強い北風が吹いていた。9月22日14:00、16:00、19:00の水平流速の鉛直分布をみると、水表面から約5 mまで発達した南向きの吹送流が、潮流に重なっていることがわかる。特に、16:00の結果では水深約7 mを境に、表層では吹送流の影響によって南向きの流れ、底層では潮流によって北向きの流れが明瞭に形成されている。しかしながら、北風が2 m程度に弱まった9月22日23:00以降においては、吹送流の影響はほとんどみられない。

(4) 高濁度層の形成過程

満潮付近の時間帯である10:00と23:00の流速および濁度の鉛直分布をみると、速度勾配はほとんどないために濁度の値も低くなっており、鉛直方向に一様である。下げ潮最強付近の時間帯（9月22日14:00および9月23日2:00）になると、海底面上10 m程度まで鉛直シアが形成される。海底面付近における濁度の値は非常に大きく、鉛直シアの層内で大きな濃度勾配をもって減少する。干潮付近の時間帯に移ると、9月22日16:00の流速分布は吹送流の影響を受けているため複雑な構造

になっているものの、濁度の鉛直分布は一様となる。しかしながら、満潮時の濁度分布よりもかなり大きな値を取ることがわかる。上げ潮最強付近の時間帯（9月22日19:00および9月23日7:00）になると、流速分布が速度勾配を持ち、鉛直シアが発達し、その結果、海底面付近の濁度の値が上昇している。また、干潮時に吹送流が影響している9月22日16:00を除くと、濁度の勾配と水平流速の速度勾配が明確な対応があることがわかる。つまり、水平流速の速度勾配が存在する高さまで、SSが上方へ輸送されていることがわかる。

一般に底泥表面の堆積物は潮流による摩擦応力によって再浮上すると考えられる。そのため、高濁度層の形成過程についての評価を行うためには、摩擦速度 u_* を算出し、 u_* と海底面上の濁度との関係を調べる必要がある。しかしながら、今回の観測では、図-5に見られるように、全ての位相の流速分布に対数分布則を当てはめることは困難であり、 u_* による再懸濁の評価を行うことは妥当ではないと思われる。そこで、海底面上0.5 mの濁度と水平流速の関係を調べることにより、高濁度層の形成過程について検討した。図-6にC/Tタワーにより得

られた海底面上0.5mの水平流速と濁度のデータを下げ潮時と上潮時にわけた関係を示す。下げ潮時にはほとんど相関がないものの、上げ潮時は比較的高いことがわかる。このことから高濁度層の形成過程は、下げ潮時と上げ潮時において若干異なるように思われる。一つの形成過程として、上げ潮時では堆積物が巻き上がるにより高濁度層が形成されるが、下げ潮時では堆積物の巻き上げだけでなく、湾奥部で再懸濁したSSが移流によって輸送されることによって高濁度層が形成されることが考えられる。このことについては、今後さらに詳細な検討が必要である。

4. 酸素消費実験

(1) 底泥とSSの酸素消費実験手法

2002年9月4日に採取された底泥と未攪乱底泥コアサンプルを用いて、底泥とSSによる酸素消費実験を行った。底泥とSSによる酸素消費実験を図-7示す。実験条件は、水温を現場泥温に合わせ28°Cに保ち、暗条件とした。攪拌器を用いて底泥を巻き上げないようにろ過海水を攪拌し、DO濃度を計測した。またSSの酸素消費実験に関しては現地底泥を用い、SS濃度を0, 21, 38, 69, 132 mg/lと変化させDO濃度を計測した。酸素消費速度は、DO濃度の時間変化に対して直線近似を仮定し、その勾配から求められた(長尾ら, 2000)。なお、底泥の酸素消費実験は全地点の底泥に対して、SSの酸素消費実験はA地点の試料に対して行った。

(2) 実験結果および酸素消費速度の比較

図-8に底泥の酸素消費実験結果を示す。各地点におけるDO濃度は、ほぼ線形的に減少しており直線近似の妥当性が認められる。このようにして求めた底泥の酸素消費速度を表-1に示す。図-9に各観測地点におけるI.L.と底泥酸素消費速度の関係を示す。ここで、S-2地点の底泥酸素消費速度は他の地点と比較して約3倍程大きな値を取っており、図-9ではS-2地点のデータは除かれている。その理由として実験終了後の試料を調べたところ、大型ベントスの存在が確認されたため、ベントスによる酸素消費を無視することができないと判断したためである。両者の間には良い相関関係が認められ、底泥中の有機物の量が増加すると、底泥酸素消費速度も増加することがわかる。

次に、図-10にA地点におけるSSの酸素消費実験の結果を示す。底泥の酸素消費実験の結果と同様に、各濃度とも線形的にDO濃度が減少しているとみなせる。SS濃度と酸素消費速度の関係を図-11に示す。この図より、SS濃度が上昇すれば、酸素消費速度も線形的に増加することがわかる。これらのことより、現地において高濁度層が形成された場合、急激に有機物の分解により水

塊中のDOが消費されることが示唆される。

最後に、底泥とSSの酸素消費速度の比較を行うため、図-11の実験結果から得られた関係式とSTDの濁度の結果を使用して、A地点の底泥5m内におけるSSによる酸素消費速度を見積った結果、 $1.01 \sim 2.53 \text{ g/m}^3/\text{day}$ となった。一方、A地点の底泥のみの酸素消費速度 $0.98 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であったので、この値を用いて水柱5m内の酸素消費速度を見積もると $0.19 \text{ g/m}^3/\text{day}$ となる。したがって、SSによる酸素消費速度は底泥による酸素消費速度と比較して5~13倍の値を取り、再懸濁した浮遊粒子が海域の貧酸素化に大きく寄与していることが明らかとなった。

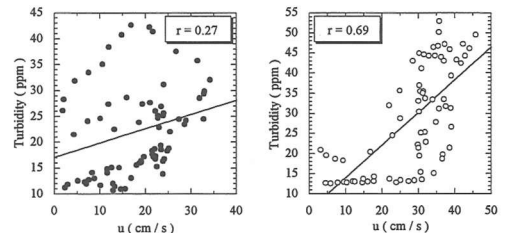


図-6 下げ潮時(左)および上げ潮時(右)における濁度と流速の関係

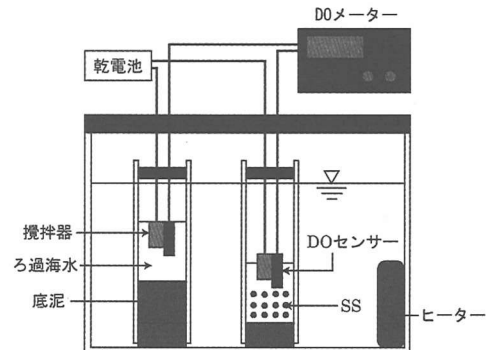


図-7 底泥(左)およびSS(右)による酸素消費実験

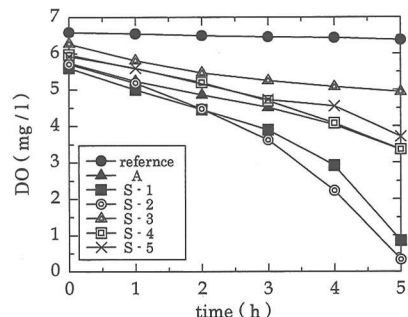


図-8 底泥の酸素消費実験結果

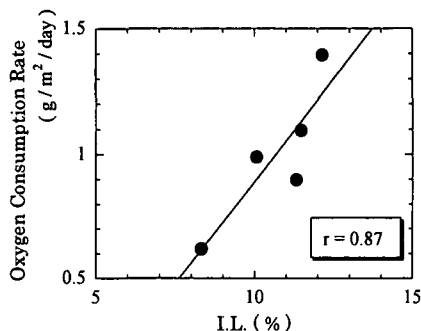


図-9 強熱減量と底泥酸素消費速度の関係

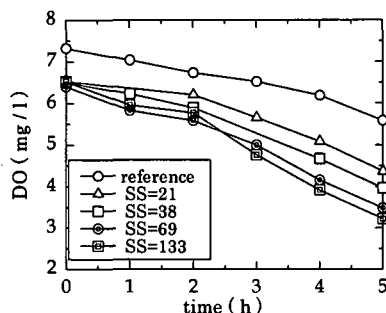


図-10 SSの酸素消費実験結果

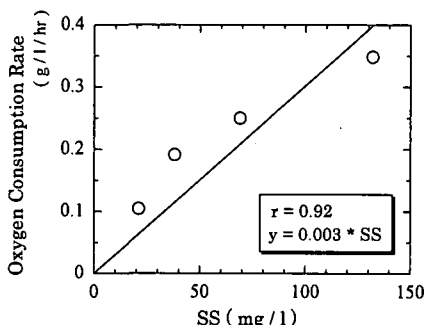


図-11 SS濃度と酸素消費速度の関係

5. 結 論

本研究の結論をまとめると、以下のようになる。

- 1) 現地観測の結果より、有明海西部海域では、上げ潮最強および下げ潮最強の時間帯において、海底面上約

5 m まで高濁度層が形成される。

- 2) 形成された高濁度層は、満潮時では海底のごく近傍に近傍に限られるが、干潮時では水表面付近まで達する。また、海底面付近の濁度と DO 濃度との間に負の相関関係が存在することから、海底面上の有機物が巻き上げによって海水中の DO を消費する可能性が確かめられた。
- 3) 有明海西部海域では、風速 5 m 程度の北風が生じると、水表面下 5 m まで吹送流が影響する。また、水平流速の速度勾配と濁度の濃度勾配の高さが一致し、鉛直シアーにより、SS が上方へ輸送される。
- 4) 高濁度層の形成過程は上げ潮時と下げ潮時において異なり、上げ潮時では底泥が巻き上げられることによって高濁度層が形成されるが、下げ潮時では堆積物の再懸濁だけではなく、湾奥部で再懸濁した SS が移流により輸送されることによって高濁度層が形成されると推察される。
- 5) 底泥と SS の酸素消費実験の結果、底層 5 m 内における SS 酸素消費速度は、底泥の酸素消費速度と比較して 5~13 倍の値を取った。したがって、再懸濁した浮遊粒子が海域の貧酸素化に大きく寄与している可能性がある。

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)の助成を受けて行われた。また、九州大学大学院工学府環境流体力学研究室からは ADCP を貸与していただいた。ここに記し感謝の意をあらわす。

参 考 文 献

- 佐藤正典・東 幹夫・佐藤慎一・加藤夏絵・市川敏弘 (2001): 諫早湾・有明海で何が起きているのか?, 科学 7 月号, 岩波書店, pp. 882-894.
- 長尾正之・橋本英資・朱 小華・吉田みゆき・高杉由夫 (2000): 広島湾における海底酸素消費量の連続測定, 土木学会論文集, No. 663/II-53, pp. 109-117.
- Yasuda, H., Y. Takasugi and T. Higo (1997): Generation of High Turbidity Layers in the Seto Inland Sea, Journal of Coastal Research, SI, 25, pp. 31-40.
- Wainright, S. C. and C. S. Hopkins Jr. (1997): Effect of resuspension on organic matter processing in coastal environments: a simulation model, Journal of Marine System, Vol. 11, pp. 353-368.