

夏季の有明海奥部における懸濁物輸送とその水質への影響

速水祐一¹・山本浩一²・大串浩一郎³・濱田孝治⁴
平川隆一⁵・宮坂 仁⁶・大森浩二⁷

夏季の有明海奥部において、現地観測によって1潮汐間の正味の懸濁物フラックスの分布を求め、輸送される懸濁物の質について分析した。懸濁物は湾奥向きに輸送され、躍層が海底に接する地点の沖側に集積していた。このような輸送は、主に底層で湾奥に向く残差流によって生じていた。湾奥に輸送される懸濁物は平均9%の有機炭素を含んでおり、その半分は陸起源と考えられた。潮汐周期内では、懸濁物は活発に沈降・再浮上を繰り返していた。また、懸濁物の集積域は貧酸素水塊に一致していた。有機懸濁物質が湾奥に輸送、集積され、沈降・再懸濁を繰り返していることは夏季の有明海奥部に貧酸素水塊が形成されるための重要な機構ではないかと考えられた。

1. はじめに

濁度の高い有明海奥部では、懸濁物の輸送が物質循環の中で重要な位置を占めている。そのため、近年問題になっている有明海の環境変化の原因解明のためには、懸濁物の分布や輸送過程を明らかにすることが重要である。そこで本研究では、夏季の有明海奥部で現地観測をおこない、懸濁物輸送量(SSフラックス)の空間分布を明らかにし、さらにその水質、特に溶存酸素濃度(DO)に対する影響について検討した。

2. 現地観測と残差流・フラックスの見積もり

有明海の流れは潮流が卓越する。しかし、潮流は基本的に往復流であるため、海域の物質輸送を評価する上では潮汐周期変動を除去した正味の輸送量を見積もることが重要である。そこで、2005年7月15日に有明海奥部の塩田川沖海底水道に沿った測線を12時間の間に6往復し、流速と水質の反復観測をおこなった(図-1)。測定は、測線上の6測点で停船しておこない、船の舷側に取り付けた ADCP (RD Instruments 製, Workhorse 1200 kHz) によって鉛直 0.5 m 毎の流速を測るとともに、CTD (アレック電子製, Compact CTD) によって水温・塩分・濁度・クロロフィル a 蛍光の鉛直分布を測定した。濁度については、あらかじめ同じ海域で得た濁度と SS 濃度の関係式を用いて SS 濃度に変換した。同時に、湾奥部全域の海洋構造と水質分布を把握するため、もう1隻の船によって測点 A~F を含む湾内 27 点で多項目水質計 (アレック電子製, AAQ1183) を用いて水

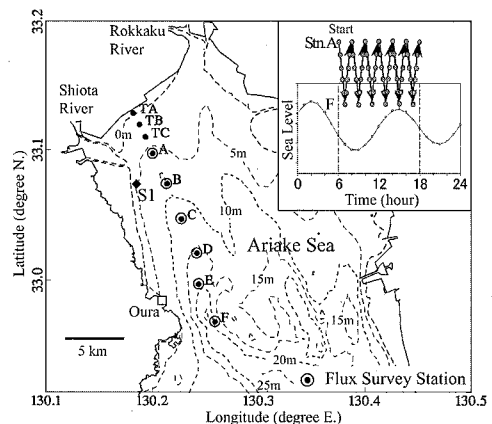


図-1 測点位置、7月15日の予報潮位(大浦)と観測順位

温・塩分・濁度・クロロフィル a 蛍光・DO の測定をおこなった。また、7月20日には5日前のフラックス観測と同じ測線上で、多項目水質計による水質計測とバンドン採水器による層別採水をおこなった。この時には、冠水した干潟上を含む岸よりの3測点(TA~TC)を追加している。試水は栄養塩、懸濁態の炭素・窒素およびそれらの安定同位体比の測定に用いた。懸濁物については、GF/F フィルターでろ過後、60℃で乾燥、デシケーター内で24時間塩酸蒸気で燻蒸した後、ミリQ水で洗浄、再び60℃で充分に乾燥させた後、電子天秤で重量を秤量し、安定同位体質量分析計(PDZ Europa Ltd 製, ANCA-SL)によって炭素・窒素濃度およびそれらの安定同位体比を測定した。なお、両観測日も晴天で、風は弱く静穏であった。両観測日間の5日間も比較的好天が続き、降水はなかった。

7月15日の観測で得られた流速については、測線方向(340°)とそれに直交する成分に分け、最小二乗法を用いた調和分解によって半日周潮成分と残差流成分を求めた。懸濁物フラックスを求めるにあたっては、まず各測点各深度で得られた流速と SS 濃度を掛け合わせ、鉛

1 農 博 佐賀大学助教授有明海総合研究プロジェクト
2 正会員 工博 佐賀大学講師有明海総合研究プロジェクト
3 正会員 工博 佐賀大学助教授理工学部都市工学科
4 正会員 工博 佐賀大学講師有明海総合研究プロジェクト
5 正会員 工博 佐賀大学助理工学部都市工学科
6 理博 愛媛大学 COE 研究員沿岸環境科学研究センター
7 理博 愛媛大学助教授沿岸環境科学研究センター

直積分することにより、各時刻における懸濁物の水平輸送量を求めた。それを流速と同様に調和分解することにより、半日周潮成分を除いた正味の輸送量を求めた。なお、12時間の調査では日周潮成分を除去できないが、本研究では小潮の日潮不等が小さい時期を選んで調査をおこない、その影響が小さくなるようにした。

3. 断面構造と SS フラックスの分布

7月15日の測線に沿った水温、塩分、SS濃度の断面分布を図-2に示す。いずれも観測期間の平均である。観測海域は強く成層しており、特に塩分差が大きく、3m付近に顕著な塩分躍層が存在した。これは、7月9日から10日にかけて大雨が降ったことが影響している。水平的には湾奥の方が低塩分になっており、弱混合型エスチュアリー構造となっていた。SS濃度は潮汐周期で変動したが、平均すると底層に高濁度層を形成していた。図-2fは測線方向の残差流分布である。全体として上層流出・下層流入のエスチュアリー循環型の流れである。下層の流れは湾奥ほど弱くなる傾向にあり、測点Aで

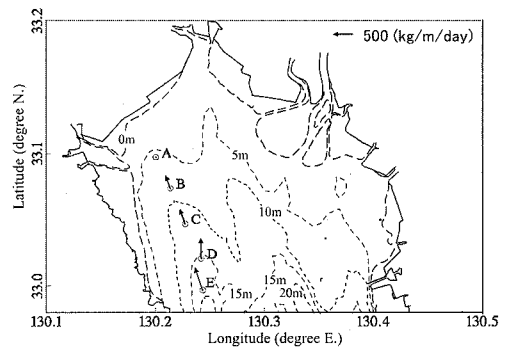


図-3 7月15日の鉛直積分 SS フラックスの水平分布

はほとんど下層の流れはない。その結果、底層に水平収束域が形成されている。図-2eは干潮から上げ潮にかけて測定されたDOの分布である。躍層を境に下層で低い値になっているが、特に湾奥の測点Bで3.5 mg/L以下と低酸素濃度になっていた。1潮汐間の正味の鉛直積分 SS フラックスの分布を図-3に、その測線方向成分を図-2aに示す。SSフラックスは測点Aではほぼ0であったが、それ以外の点ではいずれも海底地形に沿って(測線に平行方向)湾奥に向いており、沖側の点ほど大きくなっていた。この結果は、懸濁物が沖合から湾奥に輸送され、浅海域、特に測点AB間に集積する傾向にあったことを示している。図-4は7月20日の測線に沿った塩分と水質の分布である。塩分分布が示すように、基本的な海洋構造は5日前と変わっていない。ただし、下層のDOが低下し、2.5 mg/L以下の貧酸素水塊が出現している。表層は赤潮状態で、高いクロロフィルa濃度を示している。懸濁態炭素(PC)・窒素(PN)濃度は赤潮の影響をうけて表層で高く、海底直上でも高い値が見られた。懸濁物の $\delta^{13}\text{C}$ は表層では-16~-20‰であったが、下層では-21‰以下の低い値であった。懸濁物の $\delta^{15}\text{N}$ は、測点Bの底層から測点D、Eの中層にかけて9‰以上の高い値が分布していた。

4. 潮汐周期内での SS 濃度変動

次に、SS濃度の潮汐周期以下の短周期変動について見てみる。7月15日の観測期間中、いずれの測点においても底層の濁度・SS濃度には顕著な潮汐周期内変動がみられた。測点BにおけるSS濃度と測線方向の流速分布の時間変動を図-5に示す。期間を通して底層には高濁度層が見られるが、干潮と満潮の2回の憩流時には底層SS濃度は低下している。一方、10時から12時にかけては著しいSS濃度の上昇が生じている。流速は潮汐周期の変動が卓越するが、決して鉛直的に一様ではなく、かなりの鉛直シアが存在する。高濁度層が発達した12時前には湾奥向きの強い流れがあり、海底直上でも

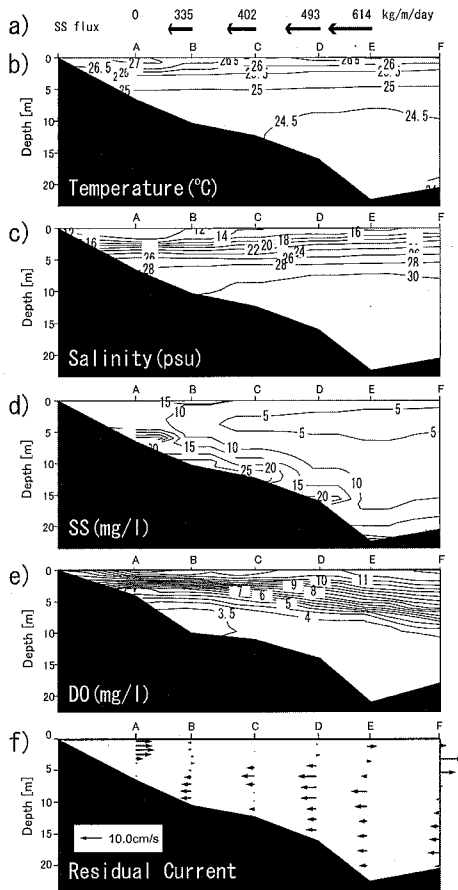


図-2 7月15日の a) 鉛直積分 SS フラックス, b) 水温, c) 塩分, d) SS 濃度, e) DO, f) 測線方向の残差流の分布

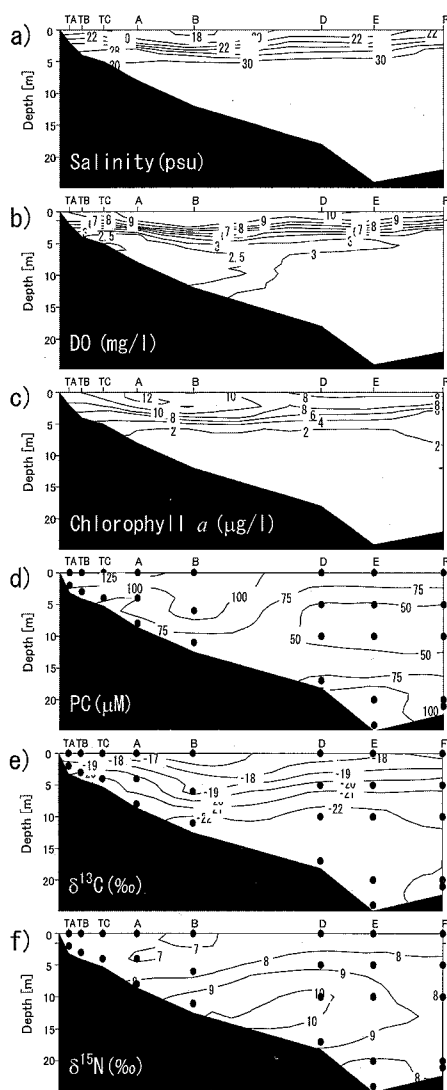


図-4 7月20日の a) 塩分, b) DO, c) クロロフィルa, d) 懸濁態炭素, e) 懸濁物の $\delta^{13}\text{C}$, f) $\delta^{15}\text{N}$ の分布

20 cm/s 以上に達した。このような高濁度層の変動は、SS の海底への沈降と再懸濁、それに移流によって引き起こされる。ここで測線に沿って x 軸を取り、 x 軸方向の流速を u 、それに直交する y 方向の流速を v 、SS 濃度を C とする。潮流による移流が卓越するので水平拡散は無視できるとすると、点 (x, y) における SS 濃度変動は以下のように表される。 F_B は海底との間の沈降・再懸濁フラックスである。

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial t} = -\frac{\partial uC}{\partial x} - \frac{\partial vC}{\partial y} + F_B \quad (1)$$

今回の測線はほぼ潮流楕円の長軸に沿っており、 x 軸方向の流れが卓越する。そこで、 y 軸方向の移流が相対的に

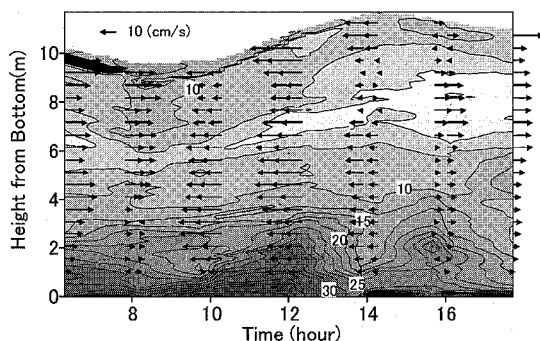


図-5 7月15日の測点 B における SS 濃度(mg/l)と測線方向の流速変動

小さく、無視できるとすると、式(1)は次のようになる。

$$\frac{\partial C(x, y)}{\partial t} = -\frac{\partial uC}{\partial x} + F_B \quad (2)$$

このような仮定が可能かどうか、塩分の移流と時間変動を比較することで検討した。保存量である塩分 (S) の場合は、沈降・再懸濁がないため、式(2)は次のようになる。

$$\frac{\partial S(x, y)}{\partial t} = -\frac{\partial uS}{\partial x} \quad (3)$$

そこで、測点 B における塩分変動から左辺の時間変動項を、測点 A と C の流速・塩分から右辺の x 軸方向の移流項を求めて比較した。その結果、両者の変動はよく一致しており、測点 B における潮汐周期内の塩分変動の 85% が測線方向の移流によって説明された (図-6a, b)。このことは、上記の仮定がかなりの精度で成り立つことを示す。そこで、同様の解析を SS についても試みた。塩分の場合と異なって、時間変動項と x 軸方向の移流項の変動の関係は一致せず、よい相関はみられない

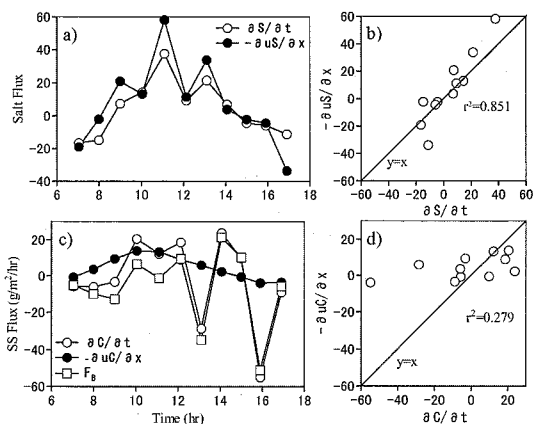


図-6 測点 B における a) 塩分の時間変動項と移流項の比較及び b) 相関関係, c) SS 濃度の時間変動項, 移流項と両者の残差 (F_B) の比較及び d) 相関関係

かった(図-6c, d). 時間変動項から x 軸方向の移流項を引いた残差を沈降・再懸濁フラックス (F_B) とすると, 時間変動項の変動への寄与は移流項よりも F_B の方が大きかった. このことから, 測点 B における懸濁物濃度の短期変動(潮汐周期内変動)については, 移流よりも現場付近における巻き上げ・沈降の影響の方が大きいと考えられた.

5. 考 察

生態系内の有機物の $\delta^{13}\text{C}$ は陸上植物起源と海域の内部生産起源のもので異なる. ここで $\delta^{13}\text{C}_{\text{marine}}$ を海域の内部生産有機物の, $\delta^{13}\text{C}_{\text{ter}}$ を陸起源有機物の, $\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}$ を試料の $\delta^{13}\text{C}$ とすると, 試料に含まれる陸起源有機物の寄与割合 (f) を次式で推定することできる(Wada ら, 1990).

$$f = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{marine}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{marine}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{ter}}} \quad (4)$$

今回の観測で得られた躍層以深の下層で湾奥に輸送される懸濁物の $\delta^{13}\text{C}$ は $-21.5 \pm 1.8\text{‰}$ であった. それに対して, 植物プランクトン主体の湾内表層の懸濁物の $\delta^{13}\text{C}$ は $-18.7 \pm 2.1\text{‰}$ であり, 7月10日に筑後川で採取したものを含めた流入河川水中の懸濁物の $\delta^{13}\text{C}$ は $-24.8 \pm 1.6\text{‰}$ であった. そこで, $\delta^{13}\text{C}_{\text{marine}}$ を -18.7‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{ter}}$ を -24.8‰ として湾奥に輸送される下層の懸濁物について f を求めると 46% となった. これは, 湾奥に輸送される有機懸濁物の半分以上が陸起源であったことを示している. 一方で $\delta^{15}\text{N}$ は測点 B の底層から測点 E にかけて高くなっていた. 水域で脱窒が起きると同位体分別によって $\delta^{15}\text{N}$ が高くなる(Wada ら, 1987). 脱窒に必要な貧酸素な環境もあることから, この結果は浅海域底層で活発な脱窒が起きていることを示唆している.

今回得られた SS フラックスの分布は, 夏季の有明海奥部では, 正味の懸濁物輸送は湾奥向きであり, 特に湾奥のごく浅海域に懸濁物が集積する傾向にあることを示している. 正味の SS フラックスが湾奥向きになる最大の要因は残差流による輸送である. SS 濃度が高い底層で湾奥向きの残差流があることが大きな原因になっている. このような下層の湾奥向きの流れはエスチュアリー循環によるものと考えられ, 湾奥に流入河川をもつ多くの内湾に共通して見られる特徴である. また, 下げ潮に比べて上げ潮時の方が SS 濃度が高くなる(図-5) この効果も湾奥向きの SS 輸送に寄与している.

懸濁物が最も集積するのは測点 AB 間で, 躍層が底面に接する位置のすぐ沖側であった. これは底層の残差流の収束域に一致する. また, この位置は貧酸素水塊にも一致する. 今回得られた湾奥向きに輸送される躍層以深の下層の懸濁物の平均炭素含有率は 9% であった. この

値を用いて単位時間に測点 AB 間に集積する懸濁物量を炭素換算すると, $10.6 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ となった. これは, 清本ら(2004)が報告した有明海表層の基礎生産量の年間最大値よりも大きい. 4章の結果は, この付近では潮流の変動にともなって底層で活発な懸濁物の沈降・再懸濁が起きていることを示す. すなわち, 湾奥の躍層が海底に接する位置のすぐ沖側では, 流れによって有機懸濁物が水平的に集積されながら, 活発に沈降・再浮上を繰り返している. 阿部ら(2003), 徳永ら(2005)は, 有明海奥部の貧酸素水塊の形成に対して再懸濁物質による酸素消費が重要であることを指摘し, SS による酸素消費速度は底泥の約 7 倍にもなると述べている. このような高い酸素消費が生じる大きな理由は, 懸濁物による酸素消費が水柱内部で生じ, 体積で効くのに対し, 底泥による酸素消費は水柱の底面に限られるためである. この知見と本研究の結果を合わせて考えると, 有機懸濁物質が湾奥に輸送, 集積され, 沈降・再懸濁を繰り返していることは, 夏季の有明海奥部に貧酸素水塊が形成されるための重要な機構の 1 つではないかと考えられる.

本研究で問題なのは, その時空間的な代表性である. そこで, 2004 年の 7 月から 9 月に農林水産省によって測点 D でおこなわれた係留観測データを図-7 に示す. 台風の影響を受けた 8 月 19 日と 9 月 7 日を除くと, 25 時間移動平均した海底上 1 m における測線方向の流速および濁度フラックス(濁度計の測定値に流速を掛けた値)は, 常に湾奥向きである. 正味の SS 輸送を引き起こす主な原因が残差流による底層の高濁度水の輸送であることと考え合わせると, 我々の観測結果は夏季の一般的な懸濁物輸送構造を捉えていると考えてよいだろう. また, 八木ら(2006)は 2005 年 8 月に本研究の測線の東の峰部で観測をおこない, SS の輸送方向がやはり岸向きであることを示した. これは, 本研究の結果が塩田川沖海谷部のローカルな現象ではないことを示している.

最後に長期変化との関係について考察する. 夏季の有明海奥部では, 成層が強いほど底層の DO が低い(瀬口ら, 投稿準備中). 成層強度は河川流量によって変動するため, 毎年同じ期の大潮時に調査していても, 底層 DO は年によって大きく異なり, 明瞭な経年トレンドは

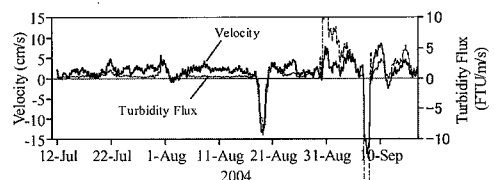


図-7 測点 D 底層における測線方向(湾奥向きが正)の流速と濁度フラックス(25 時間移動平均)

みられない。そこで、1972年から2002年までの佐賀県の浅海定線データから、測点Bに近い定点1(図-1, S1)における7月の成層強度と底層DOについて連続した11年ずつ回帰直線を求め、得られた回帰直線上で同じ成層強度(全期間の平均値, 0.92 kg/m^4)の時のDO(DO_s)を求めた(図-8a)。こうすることで、年々の成層強度変動の影響を除いた長期的な底層DOの変化を調べることができる。成層強度は表底層間の密度勾配で表した。こうして求めた DO_s は1970年代から80年代にかけて低下しており、過去30年間に同じ成層強度であっても底層のDOが低くなったこと、すなわち貧酸素化し易くなったことを示している(図-8b)。なお、対象とした全期間について、各11年間で成層強度と底層DOの間には有意な負の相関が見られた。長期的な貧酸素化の進行に対して成層強度が無関係となると、酸素消費速度が大きくなったことが要因である可能性が高い。酸素消費速度は水温が高いほど大きい。しかし、底層水温の変化には DO_s の変化に対応したトレンドは見られなかった。したがって、酸素消費速度が増加したとすると、それは分解される有機物の増加を示すと考えられる。徳永ら(2005)は有明海奥部では底泥の有機物量が多いほど酸素消費速度が大きいことを示している。夏季の有明海は湾奥部に懸濁物が輸送・集積される構造になっている。そのために、海域への有機懸濁物の供給が増加すると、湾奥部底層に蓄積されることになる。さらに、集積域では懸濁物が水柱内に巻き上げられ、活発な分解、酸素消費が引き起こされる。このような一連のプロセスの結果、湾奥部底層で貧酸素化が進行したのではないかと考えられる。また、山本ら(2006, 本論文集)は、有明海奥部の底質分布を調べ、細かい粒子ほど有機物含有量が高いことを示している。このことから、近年問題になっている有明海奥部の底質細粒化(東, 2005)についても、底質に有機物が蓄積されたと考ええることで説明できる。

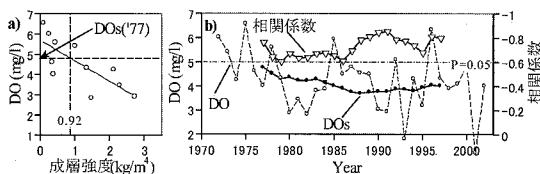


図-8 佐賀県による浅海定線定点1におけるa) 1972-82年7月の底層DOと成層強度の関係および DO_s の定義、b) 7月の底層DO、 DO_s および11年ずつの底層DOと成層強度の相関係数の変動

6. ま と め

夏季の有明海奥部では、主に残差流によって懸濁物が

湾奥向きに輸送され、躍層が海底に接する地点よりも沖側に集積する。このような構造により、陸から流入した有機懸濁物は沖合に流出しにくく、湾奥部にトラップされている。また、海域で生産された有機物も沈降すると湾奥に輸送される。湾奥に集積した有機懸濁物は潮流によって活発に巻き上げ、沈降を繰り返している。再懸濁物質による酸素消費は体積で効くため、海底による酸素消費よりもはるかに大きくなる。そのために、成層が強まるなどの原因で、底層への酸素供給量が減少すると、速やかな貧酸素化が生じる。河川の増水にともなった有機物供給量の増加が貧酸素化の引き金になっている可能性もある。7月の浅海定線データによると、同じ成層強度で比較すると、有明海奥部の底層DOは長期的に低下している。これは酸素消費速度が長期的に増大していることを示唆する。また、この海域では底質の細粒化が進んでおり、これはおそらく底質の有機物含量が増加したことを意味している。これらのことから、有明海では過去30年の間に有機物の供給が増加し、湾奥への有機物集積量が増加、その結果酸素消費量が上昇して貧酸素水塊が形成されやすくなったのではないかと考えられる。

謝辞：貴重なモニタリングデータをご提供いただいた農林水産省農村振興局、現地観測の実施にご協力いただいた佐賀大学理工学部都市工学科の野口剛志氏および学生諸氏に感謝する。浅海定線データは有明海等環境情報・研究ネットワークから提供を受けた。

参 考 文 献

- 東幹夫(2005)：底質の変化，日本海洋学会編，有明海の生態系再生をめざして，pp. 94-104.
- 阿部淳・松永信博・児玉真史・徳永貴久・安田秀一(2003)：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，海工論文集，第50巻，pp. 966-970.
- 清本容子・横内克巳・木元克則・田中勝久・熊谷香・梅田智樹・黒木善之・山本憲一(2004)：有明海表層における基礎生産量の季節変動，2004年度海洋学会秋季大会要旨集，p. 209.
- 徳永貴久・松永信博・阿部淳・児玉真史・安田秀一(2005)：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，No. 782/II-70，pp. 117-129.
- 八木宏・井瀬肇・松村航裕・木元克則(2006)：有明海奥部干潟前縁域の流動構造と懸濁物質輸送特性に関する現地観測，水工学論文集，第50巻，pp. 1465-1470.
- 山本浩一・速水祐一・笠置尚史・宮坂 仁・吉野健児・大串浩一郎・平川隆一・西本潤(2006)：有明海奥部における表層底質の分布特性と底質環境の形成要因，海工論文集，第53巻.
- Wada, E., M. Minagawa, H. Mizutani, T. Tsuji, R. Imaizumi and K. Karasawa(1987)：Biogeochemical studies on the transport of organic matter along the Otsuchi River watershed, Japan, Estuarine Coastal and Shelf Science, 25, pp. 321-336.
- Wada, E., Y. Kabaya, K. Tsuru and R. Ishiwatari(1990)：13C and 15N abundance of sedimentary organic matter in estuarine area of Tokyo Bay, Japan, Mass Spectroscopy, 38, pp. 307-318.