

— 論文 —

有明海筑後川河口域における冬季の クロロフィル蛍光と濁度変動*

田中 勝久[†]・児玉 真史[†]・熊谷 香[‡]・藤本 尚伸^{**}

要 旨

筑後川河口域において濁度とクロロフィル蛍光の連続観測をノリ施業期の2002年9月から2003年4月初旬まで約半年間にわたって実施し、潮汐変動との関連を調査研究した。クロロフィル蛍光強度は高濁度の大潮干潮時に増大し、濁度と対応した大きな短期的増減を示した。しかし、濁度の低下する満潮時のデータと比較するとクロロフィル蛍光強度から推定される植物プランクトン現存量は、日射量が極端に低下した2002年12月後半および小潮時に塩分が低下した2003年2月を除くと、小潮時から中潮にかけて増大するが大潮時以降には安定または減少する傾向が認められた。小潮時には、表層塩分の低下(弱混合化・成層化)が進み、表層へ高栄養塩濃度の河川水が影響するとともに透明度の上昇による光条件の好転などにより表層での植物プランクトンの増殖が促進されたものと考えられる。一方、強混合となる大潮時は浮泥の巻き上がりにより透明度が低下し、植物プランクトンは光量不足や物理的分散作用(鉛直混合および沖合水との混合)、さらに浮泥による凝集作用により現存量の増大が抑えられると考えられる。

キーワード：有明海、浮泥、ケイ藻赤潮、濁度、干潟

1. はじめに

筑後川河口域では、粘土鉱物粒子を主成分とする浮泥が、最大干満差6 m近くに達する潮汐によって底泥表層から再浮上し潮汐周期に伴って筑後川感潮域から河口干潟域までの約15 kmの範囲を移動し、大潮干潮時には干潟浅海域一帯に粒状懸濁物(SS)濃度の最大値に達する高濁度域を形成している(代田・田中, 1981)。

河川から海域に供給された懸濁物は、海水中の塩分による凝集作用により、河川感潮域から河口周辺で急速に沈降する。沈降した懸濁物は、潮汐作用により再懸濁・沈降を繰り返す浮泥(resuspended sediments)となる。浮泥の再懸濁作用は、植物プランクトンの光合成に関わる光環境に影響するとともに、浮泥の持つ強い吸着・凝集作用により植物プランクトン群集の消長に重大な影響を及ぼし、有明海において過去に大規模な赤潮発生が見られなかった原因のひとつとされている(代田・近藤, 1985)。

しかし、近年有明海では頻繁に赤潮発生が記録され、2000年～2001年冬季のノリ漁期には、これまでに例を見ないほど大規模なケイ藻 *Rhizosolenia imbricata* に

* 2003年7月18日受領；2003年10月16日受理
著作権：日本海洋学会, 2004

[†] 水産総合研究センター 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
主著者 e-mail address: katuhi@fra.affrc.go.jp

[‡] 福岡県水産海洋技術センター 有明海研究所 のり養殖課；
〒832-0055 福岡県柳川市吉富町 728-5

^{**} (株)シャトー海洋調査 九州支店；
〒810-0022 福岡県福岡市中央区菜院 1-16-5-702

よる赤潮が長期にわたって発生し(水産庁九州漁業調整事務所, 2001), ノリの生産量を著しく低下させた(川村, 2001; 福永ら, 2002)。また, 有明海奥部においては, 透明度が上昇傾向にあることが報告されている(川村, 2002)。この現象は有明海全域においても共通した現象であり(嶋津, 2003), 潮汐・流動環境の変化が透明度の上昇に影響しているものと考えられる。近年の約 20 年間では, 有明海の平均水位は 10 cm ほどの上昇傾向にあり, 潮差は 20 cm 程度の減少傾向にある(滝川・田淵, 2002; 宇野木, 2001; 宇野木, 2003)。潮差の減少は浮泥の巻き上がりをもたらす潮汐流を低下させ, 平均水位の上昇も浮泥の巻き上りを抑制する傾向に作用する。一方, 有明海奥部においては, 10 月から 3 月のノリ漁期には湾奥部一帯に高密度にノリ網が設置され, ノリ網の抵抗により漁場内の流速は大幅に低下することが知られており(馬場・山下, 1989), ノリ漁業そのものもノリ漁期の濁度減少要因として検討する必要がある。

このように, 潮汐による浮泥の巻き上がりは透明度の変動や浮泥の植物プランクトンとの凝集作用を通じて, 湾奥部の植物プランクトンの消長と密接なつながりがあることが予想されるが, 濁度と植物プランクトン量の変動についての観測は乏しく, 潮汐との関係については不明な点が多い。

本研究では, 自動観測機器を用い筑後川河口域の濁度・クロロフィル蛍光の変動をノリ施業期の約半年間にわたって連続観測し, 潮汐変動と濁度・植物プランクトン色素量との関連及び濁度に対するノリ網設置の影響を明らかにし, 有明海において浮泥が植物プランクトンの現存量変動や増殖過程にどのような影響を及ぼしているかを検討した。

2. 方法

調査は, 筑後川河口域ノリ漁場の干潟上の定点 1 (最低低潮面±0.0 m; 33°06.72'N, 130°21.26'E) および筑後川河口干潟域ノリ漁場中心部干潟前面の定点 2 (最低低潮面-1.5 m, 33°05.57'N, 130°20.73'E) において実施した (Fig. 1)。定点 1 では 2002 年 10 月 21 日から 2003 年 4 月 10 日まで, 定点 2 では 2002 年 9 月 20 日か

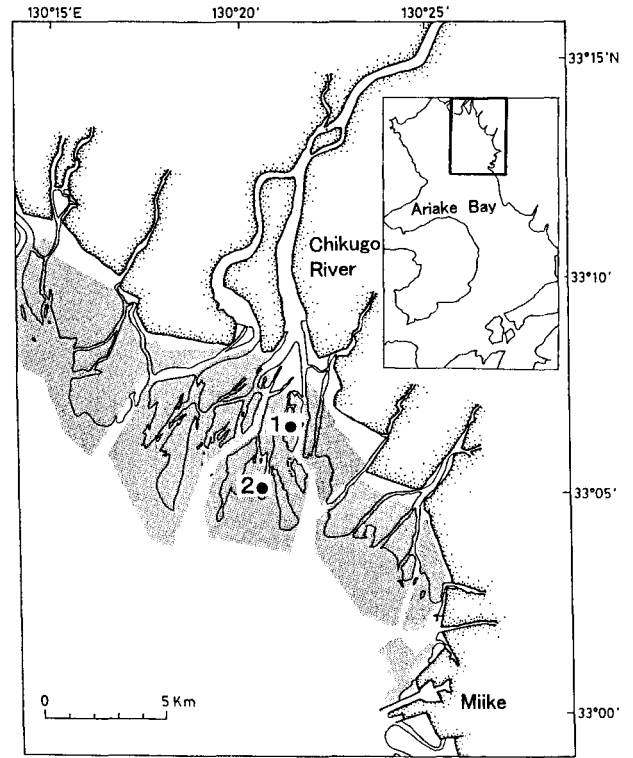


Fig. 1. Monitoring stations in the Chikugo River Estuary for measurements of turbidity and *in situ* fluorescence. Shaded areas denote the Nori farming ground.

ら 2003 年 4 月 10 日までの約半年間に亘って, ワイパー付きメモリークロロフィル蛍光・濁度計 (COMPACT CL/W: アレック電子製) を, 浮体を用いて水面下約 1 m に設置し, 蛍光強度・濁度の連続観測 (10 分ごと) を実施した。各定点には水温・塩分の自動観測テレメトリシステムを水面下 1 m に設置し, 一時間毎のデータを集めたが定点 1 の塩分はセンサーの異常によりデータが得られなかった。定点 1 では大潮干潮時に測器が干出するため, 得られたデータから干出期間のデータは除外した。また, 定点 2 での蛍光強度・濁度は 2002 年 10 月 18 日から 2003 年 12 月 2 日までの約 2 か月は測器の異常 (ワイパー停止) のため欠測となった。

各定点では付着生物除去のために月 1 回~2 回のセンサーのメンテナンスと観測層からキャリブレーション用の試水の採取と透明度の観測, さらに植物プラン

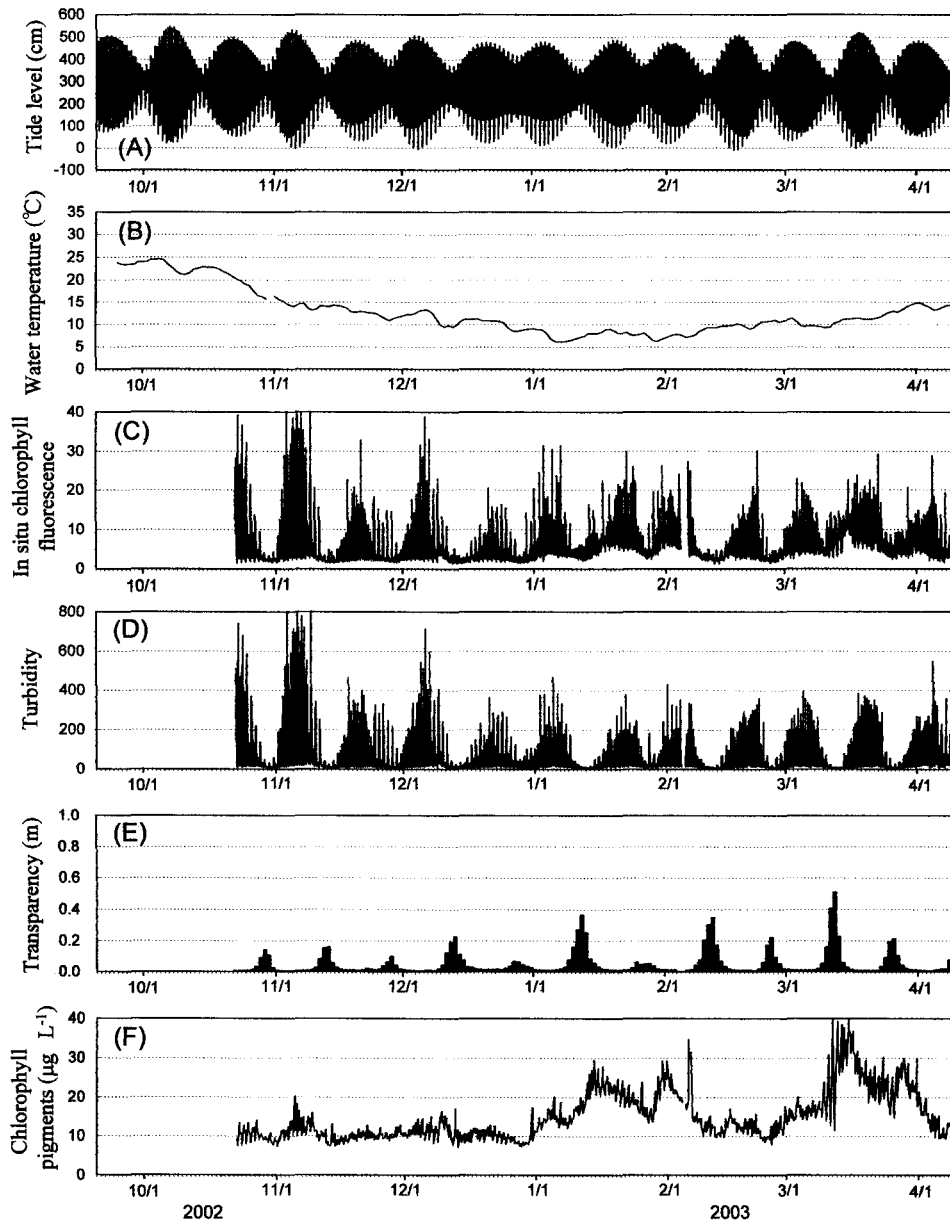


Fig. 2. Variations in tidal level at Miike (A), daily mean water temperature (B), *in situ* chlorophyll fluorescence (C), turbidity (D), estimated daily transparency (E) and chlorophyll pigments at high water (F) at Sta. 1 (1 m).

クトン細胞数計測用の試水の採取を行った。また、定点2では観測期間の前半(2002年12月19日)および後半(2003年2月18日)の大潮時の昼間に約3時間、10分ごとの採水を行い、キャリブレーション用の試水を得た。キャリブレーション用の試水のクロロフィルa (Chl. a)・フェオ色素 (phaeo-pigments) 濃度の分析はDMF (N, N-Dimethylformamide) を用いた蛍光測定法

に従った (Suzuki and Ishimaru, 1990)。SS (懸濁物濃度) の測定は試水を Whatman GF/F フィルターで濾過・乾燥 (60°C, 6時間) 後、秤量して行った。

定点2に設置したメモリークロロフィル蛍光・濁度計によって計測された濁度 (turbidity) と採水試料の分析によって求められた現場のSS (mg L^{-1}) との間、ならびに、クロロフィル蛍光強度と採水試料のクロロ

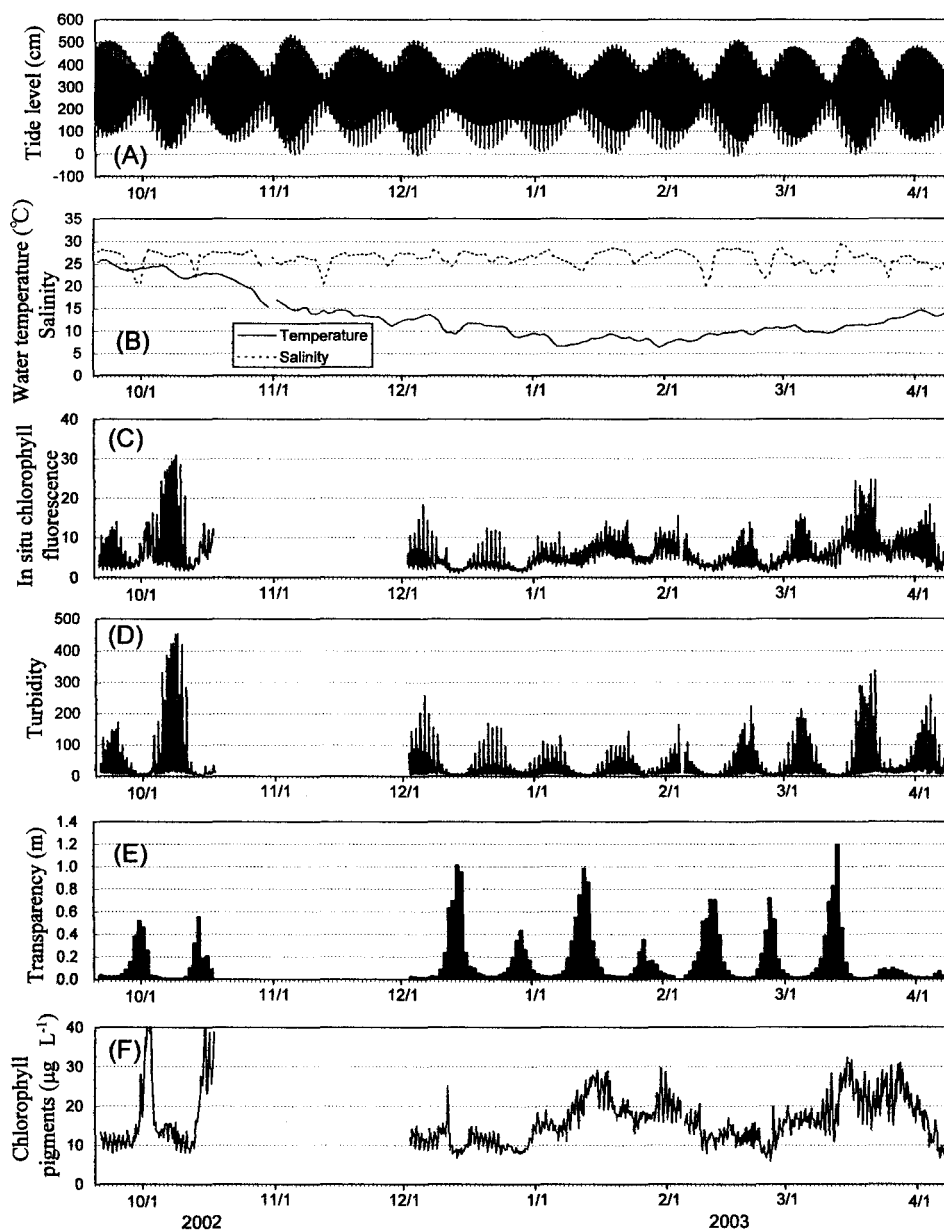


Fig. 3. Variations in tidal level at Miike (A), daily mean water temperature and salinity (B), *in situ* chlorophyll fluorescence (C), turbidity (D), estimated daily mean transparency (E), and chlorophyll pigments at high water (F) at Sta. 2 (1 m).

フィル色素量 (Chl. *a* + phaeo-pigments) には極めて良好な直線関係 ($SS = 2.16 \times \text{濁度} - 1.97$, $r = 0.99$, $n = 62$; クロロフィル色素量 $= 2.99 \times \text{蛍光強度} + 2.74$, $r = 0.92$, $n = 62$) が認められたが、クロロフィル蛍光強度と Chl. *a* の相関は低かった (Chl. *a* $= 1.17 \times \text{蛍光強度} + 6.91$, $r = 0.442$, $n = 62$)。このことからクロロフィル蛍光強度の現場測定値はクロロフィル色素量

(Chl. *a* と phaeo-pigments の総量) の指標にはなるが、Chl. *a* 量の指標にはならないことを示している。なお、DMF を用いた蛍光測定法によって算出されるフェオ色素類 (phaeo-pigments) については、HPLC 分析による検討なしにそのままフェオ色素として扱うことは出来ないが、ここでは便宜上、現場蛍光強度測定に影響する Chl. *a* 以外の蛍光物質の指標として定義する。

3. 結果と考察

3.1. 濁度・クロロフィル蛍光の変動

定点1, 2の水深1 m層における10分ごとのクロロフィル蛍光強度・濁度, 日平均水温・塩分・透明度, ならびにクロロフィル蛍光強度から換算した満潮時のクロロフィル色素量の変動を三池の潮位変動とともにFig. 2およびFig. 3に示した。日平均透明度の変動は, キャリブレーション調査時の水深1 mのSS (mg L⁻¹)と透明度の関係 (Fig. 4) と濁度から換算した現場のSS (mg L⁻¹) 濃度から推定した。

定点1, 2ともに大潮前後には干潮時に高濁度となり, 満潮時には最も低濁度となる約12時間周期の大きな濁度の増減が観測された。これは, 大潮の強流時に筑後川河道内から干潟域で浮泥を巻き上げて形成された高濁度水塊が干潮時には, 干潟前面沖合域まで輸送され高濁度となることを示している (代田・田中, 1981; 中川ら, 2002)。一方, 濁度は小潮時に大きく低下し, 小潮から中潮時には, 大潮時前後のような約12時間周期の濁度の変動は明瞭ではなかった。観測全期間の濁度は岸側干潟上の定点1で沖側のノリ漁場中心部の定点2より1.5倍以上高かった。両定点ともに10月~11月初めまでのノリ漁期前期および3月下旬以降の漁期終期に比較して12月下旬~3月中旬のノリ漁期盛期には濁度の低下傾向が認められ, ノリ網の抵抗による流速の低下に伴う浮泥の巻き上がりの減少が伺える。透明度推定値は両定点とも大潮時前後は数cmのレベルで著しく低く, 植物プランクトンの増殖に適さない低照度となっていることが推察される。小潮時の濁度もノリ漁期盛期に低下する傾向があり, 小潮時の透明度推定値は12月下旬~3月中旬のノリ漁期盛期にしばしば上昇し, 定点2では12月中旬, 1月中旬および3月中旬には1 mを超えた。一方, 定点1では透明度は最大でも0.5 m以下であった。

クロロフィル蛍光強度は浮泥の巻き上がりに伴い高濁度の干潮時に増大し, 大潮時に濁度と対応した大きな短期的増減を示す。筑後川河口域の浮泥中には大量のフェオ色素類が含まれており (田中ら, 1982), 大潮時のクロロフィル蛍光値は浮泥とともに凝集・沈降した植物プランクトンや底生藻類およびそれらの分解産

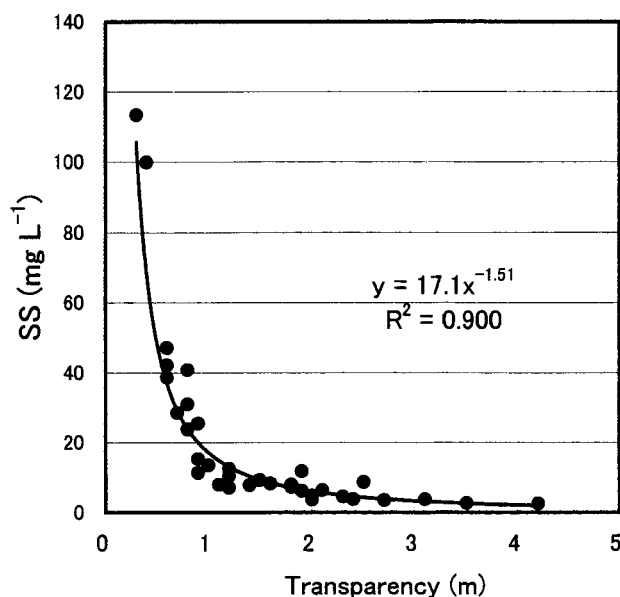


Fig. 4. Relationship between transparency and concentration of suspended solids (SS) in the Chikugo River Estuary.

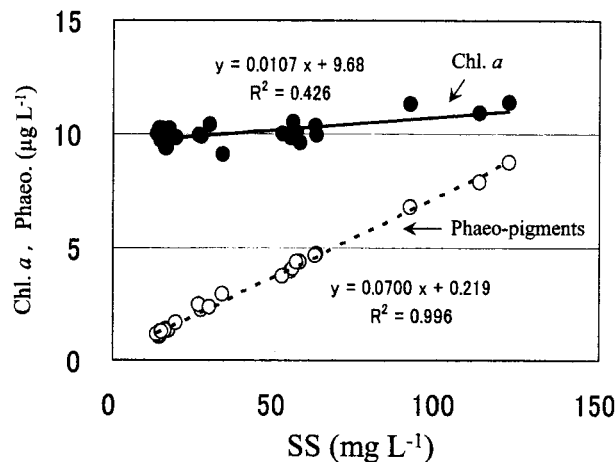


Fig. 5. Relationship between chlorophyll pigments (Chl. a and phaeo-pigments) and concentration of suspended solids (SS) at Sta. 2 (18 February 2003).

物の潮汐周期に応じた巻き上がりによって潮汐に伴って増減を繰り返すものと推察される。Fig. 5に2003年2月18日 (大潮時) に実施したキャリブレーション調査時の採水試料の植物色素濃度とSSの関係を示した。

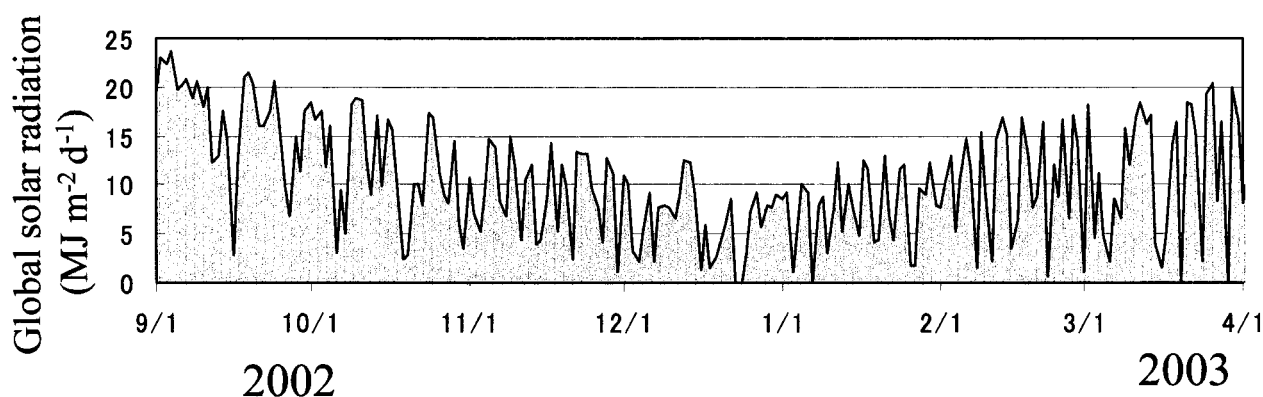


Fig. 6. Variation in global solar radiation at Saga Local Meteorological Observatory (Data from Japan Meteorological Agency).

SS濃度の上昇に伴ってフェオ色素濃度が直線的に上昇しており、濁度の上昇に伴うクロロフィル蛍光値の増加は主に懸濁物中のフェオ色素類によるものであることが伺える。懸濁物中には約 $70 \mu\text{g g}^{-1}$ のフェオ色素類と約 $11 \mu\text{g g}^{-1}$ の Chl. *a* が含まれ、大部分がフェオ色素類であった。高濁度時にはクロロフィル蛍光測定値は巻上がった浮泥中に含まれるフェオ色素類(蛍光物質)の影響を強く受けている。

このように、大潮時の潮汐による短期変動(約12時間周期の大きな濁度の増減に伴うフェオ色素量の増減)のために、定点1, 2のクロロフィル蛍光強度の変動には実際の植物プランクトン現存量の変動と浮泥の巻き上がりに伴うフェオ色素濃度の変動が混在し、植物プランクトンの現存量変動のみを識別することが困難である。また、筑後川河口域のように極端に高濁度となる海域では現場蛍光強度の測定の際に懸濁物そのものによる蛍光測定への影響も否定できない。そこで大潮時においても濁度が大きく低下する満潮時のクロロフィル蛍光値のデータを取り出し、クロロフィル色素量に換算して Fig. 2, 3の(F)に示した。定点1, 2の満潮時のクロロフィル色素量とその変動傾向は良く一致しており、満潮時には定点間のクロロフィル色素量の差は非常に小さい。クロロフィル色素量は小潮から中潮にかけて増大する場合が多く、透明度の低下する大潮時以降は安定または減少する傾向が認められる。小潮時には、表層塩分の低下が認められ(Fig. 3, (B)), 弱

混合化・成層化が進み、表層へ高栄養塩濃度の河川水が影響するとともに透明度の上昇による光条件の好転などにより表層での植物プランクトンの増殖が促進されたものと考えられる。一方、強混合状態となる大潮時には沖合水との混合が進み表層塩分が上昇する。塩分濃度の上昇する大潮時にクロロフィル色素量が低下することは高塩分沖合域の植物プランクトン現存量が干潟域のノリ漁場に比較して低いことを示唆している。さらに、大潮時には浮泥の巻き上がりが顕著であるため、透明度が低下しやすく、強混合による物理的分散作用(沖合水との混合)、さらに浮泥と植物プランクトンの凝集・沈降作用(代田・近藤, 1985)により植物プランクトン現存量の増大が抑えられるものと考えられる。

観測期間中の両定点の満潮時のクロロフィル色素量は、2003年1月中旬と3月中旬に顕著な増加が観測され、約 $30 \mu\text{g L}^{-1}$ の高濃度を記録した(Fig. 2, 3(F))。この期間には筑後川河口域ノリ漁場においてケイ藻赤潮が発生し、ノリの色落ちによる大きな被害が発生した。2003年1月中旬を中心とするケイ藻赤潮は *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* spp., *Thalassiosira* spp. などの複合赤潮であったが、3月中旬のそれは、*Rhizosolenia setigera* を優占種とするものであった。これらのケイ藻赤潮の発生した小潮期間はいずれも定点2における推定透明度が1mに達する時期に当たっており(Fig. 3(E)), 筑後川河口域の透明度の増大による光条件の好転が赤潮形成要因のひとつとなっていることが推察され

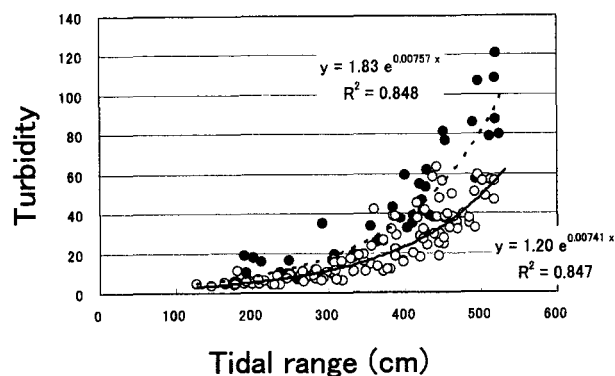


Fig. 7. Relationship between tidal range at Miike and daily average turbidity at Sta. 2 (○: from 17 October 2002 to 17 March 2003, during high season of the Nori farming, ●: from 20 September 2002 to 16 October 2003 and from 8 March 2003 to 10 April 2003).

る。しかし、定点2では2002年12月中旬および2002年2月にも小潮の推定透明度は1 m近くに達しているが、この期間はケイ藻赤潮の発生には至っていない。これはFig. 6に示したように2002年12月後半の日射量が2003年1月や3月の赤潮発生時に比較して著しく低い($10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ を大きく下回る)ことが原因となったものと推定される。また、2003年2月の小潮時には定点2の塩分が20前後に低下しており(Fig. 3, (B)), 出水が植物プランクトン現存量変動に影響を及ぼした可能性がある。

2000年~2001年冬季のノリ漁期にはこれまでに例を見ないほど大規模なケイ藻赤潮がノリ漁期初期より長期にわたって発生しノリの色落ちによる大きな被害を与えた。一般に、有明海の植物プランクトンの光合成に直接関与する光量子量は12月に最低となるが(古賀, 1990), 2000年11月下旬から12月上旬の日照時間は平年の150%以上に達しており、これが大規模赤潮に大きく影響したと考えられている(川村, 2001)。従って11月, 12月の光条件いかによっては2000年冬季のようなノリ漁期初期の赤潮が今後も再発する可能性は十分あるものと考えられる。

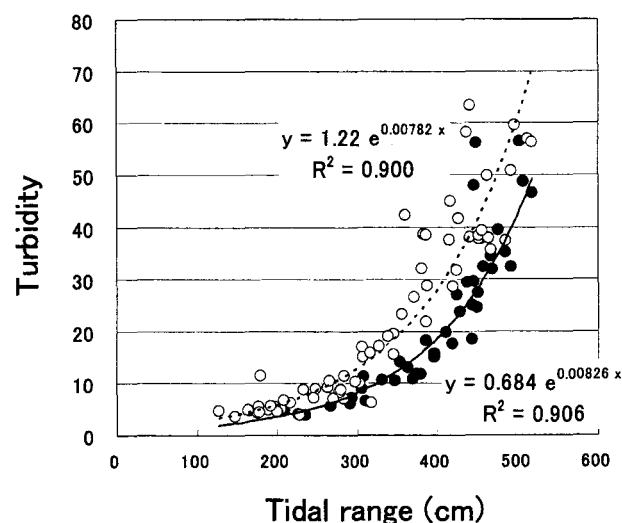


Fig. 8. Relationship between tidal range at Miike and daily average turbidity at Sta. 2 from 17 October 2002 to 17 March 2003, during high season of the Nori farming (●: from neap to spring tides ○: from spring to neap tides).

3.2. 浮泥濃度とその変動要因

筑後川河口域では、大潮時には浮泥の巻き上がりによる高濁度が観測され、小潮時には低濁度となった。大潮・小潮のこのような大きな濁度の違いは、浮泥の巻き上がりをもたらず潮汐流(潮位差)の変動によるものと考えられる。そこで、潮汐流の指標として日間潮位差(三池)と定点2における日平均濁度の関係をノリ漁期盛期(10月17日~3月17日)とそれ以外の時期にわけてFig. 7に示した。日平均濁度は日間潮位差の増加に伴って指数関数的に増大するが、ノリ漁期盛期にはそれ以外の時期に比較して濁度の増大は緩やかであった。佐賀県側の筑後川河口域ノリ漁場においてノリ網により26%の流速の減少が確認されており、ノリ網の抵抗がノリ漁期の濁度の重要な減少要因となっているものと考えられる(馬場・山下, 1989)。Fig. 7の関係式から推定すれば、ノリ漁期の盛期には濁度は大潮時で最大約50%程度減少する。また、ノリ漁期盛期の日平均濁度と潮差の関係を、潮差の増加期(小潮~大潮)と減少期(大潮~小潮)にわけてFig. 8に示した。同じノリ漁期盛期でも、潮位の上昇期は下降期に比較して濁度

が低い傾向が認められた。このような現象は、潮位差の上昇期(小潮～大潮:成層が徐々に壊れていく期間)と下降期(大潮～小潮:成層が再び発達する期間)の物理条件の違いを反映しているものと考えられる。このような濁度の変動から小潮～大潮期間は、大潮～小潮の期間に比較して光条件の面で植物プランクトンの増殖に適しており、クロロフィル色素量が増加するものと考えられる (Fig. 2, 3 (F))。

一方, Fig. 2, 3 (E) から推察されるように、ノリ漁期においても濁度から推定される大潮時の透明度は植物プランクトンの増殖に適さないほど低く、赤潮発生に結び付くようなノリ漁期の透明度の上昇は主に小潮から中潮の期間に見られる。

4. まとめ

近年、有明海では潮位の上昇とともに潮位差が減少していることがわかっている。さらに透明度が経年的に増加していることが報告され、この原因として、浮泥の再懸濁現象との関わりが指摘されてきた(日本海洋学会海洋問題研究会, 2001)。本報告の結果からも、透明度の上昇は潮位差の減少(潮汐流の減少)により浮泥の再懸濁が弱まってきていることが原因の一つとなっているものと推定される。滝川・田淵(2002)の数値シミュレーションによれば、湾奥部の潮位差の減少は潮位上昇によるものが最大潮位差の約1.2%、さらに諫早湾締め切りに起因する潮位差の減少が約2.5%とされている。また、宇野木(2001)によれば、有明海湾奥における大潮潮位差の減少は20 cmに達している(約4%の減少)。これらのデータから筑後川河口域における1980年～2000年の潮位差の減少率を4%と仮定し、Fig. 7の関係式を用いて濁度の変化を推定すると、潮位差の4%の減少は濁度で平均10%、最大15%もの低下をもたらすことが推定される。

潮位の上昇は潮位差の減少のみならず、干潮時の水位の上昇(水深の増加)をもたらす。さらに、筑後川河口域周辺においては、1978年以降海底陥没により徐々に干潟が失われ、1991年時点で1978年度の約70%となった(山本ら, 1993)。水位の上昇と干潟面積の減少による水深の増加は、小潮時の濁度の減少に大きな影

響を及ぼしているものと考えられる。

浮泥の巻き上がりの減少による透明度の上昇、さらに、これにともなう植物プランクトンの増加は単に筑後川河口域のみならず有明海全域で進行している現象であるものと考えられるが、今回報告した筑後川河口域以外では濁度と植物プランクトン現存量の連続観測データは十分ではない。今後、有明海の干潟・沖合域全域のデータを収集し詳しい検討を行うことが重要な研究課題である。また、今回の調査はノリ漁期の秋季から冬季に限られているが、近年では有明海でも夏季の貧酸素底層水の発生やケイ藻類以外のラフィド藻や渦鞭毛藻類による赤潮の発生回数が増加する傾向が見られ、海域の成層状態との関連が強く示唆されている(堤ら, 2003)。本報告の結果からも成層化は濁度の低下(透明度の上昇)をもたらすことから、夏季の成層状態と浮泥、植物プランクトン現存量の関係についても詳細な検討を行う必要がある。

有明海、特に湾奥部においては、干潟の底生藻類(付着藻類)の基礎生産が魚介類生産に重要な役割を果たしている(柳, 2002)。有明海湾奥部干潟の底生藻類は潮汐によって巻き上げられ、水中に懸濁し、水域の動物プランクトンやベントスに餌料として供給される。湾奥部における濁度の低下(透明度の上昇)は底生ケイ藻から浮遊性のケイ藻への卓越種交代、干潟生態系のレジームシフトに結びつくものと考えられる。以上のように、有明海で現在進行している干潟の喪失と潮汐流の減少は、有明海、特に湾奥部の高濁度域の生態系を大きく変化させつつある。

本研究の結果からも推察されるように、筑後川河口域の植物プランクトン現存量変動過程の解明のためには、河川流量や天候等の濁度以外の要因についての関連を検討することも非常に重要である。特に栄養塩濃度の点については本報告では具体的データに基づき検討することができなかった。これらの点を解明するためにも自動観測による連続データの取得は有益な手段である。

謝辞

本研究は農林水産省行政対応特別研究「有明海の海洋環境の変化が生物生産に及ぼす影響の解明」の一環

として行われた。また、調査に当たっては社団法人日本水産資源保護協会の皆様に多大な協力を得た。厚くお礼申し上げる。

References

- 馬場 裕文, 山下 康夫 (1989): ノリ漁場の適正行使に関する研究-I-農区漁場におけるノリ網張り込み方法の変化が流況に及ぼす影響-。佐賀有明水試研報, **11**, 107-112.
- 福永 剛, 小谷 正幸, 尾田 成幸, 淵上 哲, 半田 亮司 (2002): ノリ養殖の高度化に関する調査。福岡県水産海洋技術センター事業報告, 166-170.
- 川村 嘉応 (2001): 平成12年度佐賀県有明海のノリ養殖の不作と珪藻の大増殖。海苔と海藻, (62), 1-12.
- 川村 嘉応 (2002): 佐賀県有明海域におけるノリ生産状況と環境変化。海苔と海藻, (64), 4-9.
- 古賀 秀昭 (1990): 光量子と日照時間・全天日射量及び珪藻類増殖との関係。佐賀水試研報, **12**, 67-74.
- 中川 康之, 今林 章二, 末次 広見 (2002): 有明海の底泥輸送現象に関する現地データの解析。海岸工学論文集, **49**, 571-575.
- 日本海洋学会海洋環境問題委員会 (2001): 有明海環境悪化機構究明と環境回復のための提言。海の研究, **10**, 241-246.
- 嶋津 靖彦 (2003): 行政対応特別研究「有明海の海洋環境の変化が生物生産に及ぼす影響の解明」。日水誌, **69**, 439-443.
- 代田 昭彦, 近藤 正人 (1985): 第21章 有明海III 化学。日本沿岸海洋誌, 846-862, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編。
- 代田 昭彦, 田中 勝久 (1981): 有明海における懸濁物質の研究-I。筑後川懸濁粘土粒子の河口域への輸送。西水研研報, (56), 27-38.
- 水産庁九州漁業調整事務所 (2001): 平成12年12月分九州海域における赤潮発生状況。水産庁九州漁業調整事務所, 6-13.
- Suzuki, R. and T. Ishimaru (1990): An improved method for the determination of phytoplankton chlorophyll using N, N-dimethylformamide. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **46**, 190-194.
- 滝川 清, 田淵 幹修 (2002): 有明海の潮汐変動特性と沿岸構造物の影響。海岸工学論文集, **49**, 1,061-1,065.
- 田中 勝久, 浜田 七郎, 代田 昭彦 (1982): 有明海における懸濁物質の研究-II。筑後川河口域における植物プランクトンとデトライタスの分布と挙動。西水研研報, **57**, 19-30.
- 堤 裕昭, 岡村 絵美子, 小川 満代, 高橋 徹, 山口 一岩, 門谷 茂, 小橋 乃子, 安達 貴浩, 小松 利光 (2003): 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係。海の研究, **12**, 291-305.
- 宇野木 早苗 (2001): 湾域の環境を決める海水の流れ。科学, **71**, 912-920.
- 宇野木 早苗 (2003): 有明海の潮汐と潮流はなぜ減少したか。海の研究, **12**, 85-96.
- 柳 哲雄 (2002): 有明海の低次生産構造-ノリ不作問題に関連して-。応用数理, **12**, 49-53.
- 山本 千裕, 切田 正憲, 本田 一三 (1993): 有明海福岡県地先における底質の季節変動。福岡水技研報, (1), 199-209.