

(64) 有明海湾奥部干潟域における懸濁物輸送と底泥付着藻類の変動特性に関する研究

Characteristics of suspended matters transport and variations in diatom-derived benthic Chl-*a* on the mud flat of the Ariake Sea

山西博幸¹・荒木宏之¹・高哲煥²・清川徹³・茂木裕介³・古賀憲一⁴
YAMANISHI Hiroyuki¹, ARAKI Hiroyuki¹, KOH Chul-Hwan²,
KIYOKAWA Tohru³, MOGI Hiroyuki³ and KOGA Kenichi⁴

ABSTRACT; This study focused on the relation between transport of suspended matters and diatom-derived benthic Chl-*a* on Nanaura tidal flats of the Ariake sea. Measurements on hydraulics and water quality were obtained for one tide bimonthly on the variations in flow velocity, water depth, turbidity, dissolved oxygen, temperature, salinity, Chl-*a*, etc. by using some sensors and sampled water on a ship. As a result, suspended solids concentration (SSC) is rather high near the bottom bed during the initial accelerating tidal flow and during the final ebb retreat. In addition, the surface mudflat eroded at the initial flood tide is diatom rich sediment because of the increasing concentration of diatom-derived benthic Chl-*a* on the tidal flat under exposure. Consequently, the Chl-*a* along the transected line from the mud shore to 3 km offshore was higher concentration in the tidal flats area than offshore area. The relationship between SSC and Chl-*a* concentration is in proportion and then Chl-*a* mass per unit g dry SS can be calculated by the gradient of the relational line. This is one of the characteristics of mud transport and the governing factor for determining the physical and biological characteristics of the mudflat.

KEYWORDS; Field Observation; Tidal Current; Mud Transport; Erosion; Chlorophyll-*a*.

1. はじめに

有明海湾奥部・浅海域における水産資源としての生物量の急激な変化がここ数年取り上げられている。例えば、アゲマキ *Sinonovacula constricta* (ナタメガイ科) は、泥・砂泥干潟の比較的地盤の高い場所に多く生息しているが、1988年におよそ770万トンが漁獲されたときを境に1992年以降その漁獲高はゼロの状態が続いている。また、アゲマキ同様、有明海特産種としてのタイラギ *Atrina pectinata* (ハボウキガイ科) も漁獲高は激減している。現在、アゲマキやタイラギの復活及び生産性向上のための試みもなされ、その一手法として、海砂と底泥との混合・耕耘による底質改良や覆砂事業が行われている。しかしながら、これらの手法は経験的かつ定性的な域を超えておらず、今後の漁場再生あるいは養殖管理事業を推進するためには、さらなる定量的評価が望まれる。そのためにもまず水・底質環境に関わる基礎情報としての知見を得る必要がある。また、干潟上では水域生態系の中の一次生産者として重要な付着藻類が生産され、干潟に生息する生物の貴重な飼料場としての役割を有している。さらにこれらが潮汐による流れにより巻き上げられ、干潟表層水中へ供給され、その一部はアゲマキやタイラギなどの二枚貝を含めた魚類の濾過者に食される。

干潟底質環境や有明海湾奥部での水質特性についてはすでに著者らがこれらの点を背景にした各種

¹佐賀大学低平地研究センター Institute of Lowland Technology, Saga University, Japan

²ソウル大学地球環境科学部 School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Korea

³佐賀大学大学院工学系研究科 Graduate School of Engineering, Saga University, Japan

⁴佐賀大学理工学部 Faculty of Science and Engineering, Saga University, Japan

調査及び水理・水質計算を通して、湾奥東部水域と西部水域の底質環境の違いや湾内に堆積する底泥・浮泥の挙動そして水・底質間の物質輸送の重要性を示している^{1), 2)}。

本研究では、有明海湾奥西部域に広がる泥干潟周辺域での現地調査を中心に、干潟域でのChl-aを含めた懸濁物の輸送とその変動特性について考察を加えた。

2. 現地調査および分析方法

2. 1 干潟及び深水域での水理・水質調査

図-1は有明海湾奥沿岸部の今回実施した水質・底質調査地点である。干潟域調査は鹿島市七浦地区の飯田海岸に形成される泥干潟にて実施した。この地区ではかつてアゲマキが多数生息していたものの、現在では全く生息していない状況にある³⁾。したがって、アゲマキを対象にその生息環境としての底質特性を把握する上で、ここでの調査が適切であると判断した。

泥干潟上での水理・水質調査として、2002年10月19日～11月6日までの大潮～小潮～大潮の期間に干潟上0.15mの高さの流向・流速と水質(pH, 塩分, ORP, 濁度, DO, Chl-a)の連続モニタリング調査を行った。調査機器には、多項目水質計(堀場製作所, W-20series), 2次元電磁流向流速計(アレック電子(株), COMPACT-EM), クロロフィル濁度計(アレック電子(株), COMPACT-CLW)を使用した。測定間隔は、流速測定(サンプリング間隔1秒で60秒間の平均値を採用)および水質測定ともに10分毎にデータを収録した。また、2002年11月5日(大潮)の所定時間毎に船上から流向・流速および水質(pH, 塩分, ORP, 濁度, DO)の鉛直分布を一潮汐間測定した。さらに、深水域でのモニタリング調査を2003年3月2日～17日までの大潮～小潮～大潮の期間に有明海沖(N33° 02.688', E130° 12.592')の水表面および海底面から約0.3m直上にセンサーを設置して行った(図-2参照)。なお、後述する浮遊物質濃度(SS)は、あらかじめ現地試料で調整した既知濃度の懸濁液を用いて得られたセンサーによる濁度との相関関係式から算出している。

2. 2 干潟底泥上における付着藻類に関する調査

アゲマキを含む多くの底棲生物への飼料として、あるいは水中への植物プランクトンの生産場としての干潟の役割に着目した調査を実施した。本調査は2002年9月5日(大潮)の干潟干出時に図-3中のSt.1で行われ、付着藻類の生物量調査として、干潟底泥表層から0.5cmまでの底質試料を30分間隔で採取した⁴⁾。また、干潟干出前後の下げ潮から上げ潮まで同地点(St.1)の干潟直上水を10～30分間隔で採取した。さらに、2002年10月17日(中潮)の上げ潮始めに七浦干潟から沖まで約3.0kmにわたり100～500m間隔で沿岸表層水の採取を行った(図-3)。底質試料のChl-a測定方法は、底質約1gを90%アセトンにより抽出した後、海水試料のChl-aは、試料水100～500mlをガラス繊維濾紙(ワットマンGF/C)で吸引濾過し、90%アセトンにより抽出した後、ローレンツェンの方法によって求めた⁵⁾。

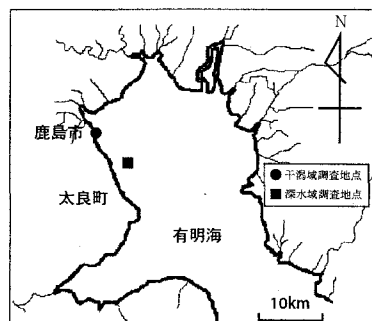


図-1 干潟水位・水質調査地点

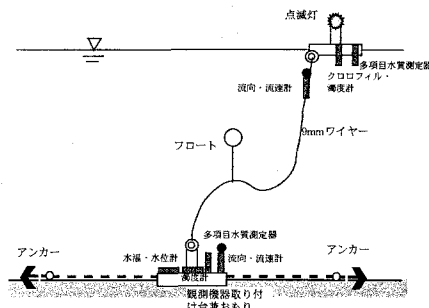


図-2 深水域での調査機器設置状況

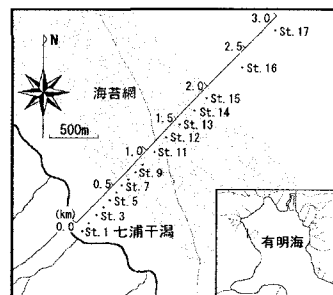


図-3 岸沖方向の水質調査地点

海水中のSSも、Chl-aと同様にガラス繊維濾紙（ワットマンGF/C）にて吸引濾過した後、乾燥させ測定した。なお、これらChl-aとSSの値は、同試料の三回平均で表した。

3. 調査結果及び考察

3. 1 干潟及び沿岸域での連続調査

図-4 (a) は、2002年10月19日～11月6日までの連続調査時の水位、風速および降水量データである。なお風速と降水量データは、観測地点でのデータではなく、佐賀県地方气象台にて測定されたデータである。そのため、風向に関しては厳密な考察を行うことが難しく、ここでは単に風速のみに着目している。観測期間中、降水量はさほど多くなく、風速は10m/sを越える日は見られなかった。

図-4 (b) はこの観測期間におけるSSと流速データの経時変化である。また、図-4 (b)中の大潮期間を拡大表記した図-4 (c)中の水位とSSの比較から、干潟底面上付近のSSは、上げ潮開始時と下げ潮の干潟干出前に高濃度を示した。これは、野村・中村⁶⁾も指摘するように、上げ潮開始時は干潟面を通過する水流による強い攪乱のために底泥が巻き上がるからである。その後、水位上昇と鉛直拡散により高さ方向にはほぼ一様となる。一方、下げ潮干潟干出前に現れるSS濃度のピークは上げ潮時ほど顕著には現れないものの、巻き上げられた粒子が底面に沈積せず、底面付近で高濃度の懸濁液（浮泥）として存在し、併せて水位低下により見かけ上SS濃度の上昇が現れると思われる。なお干潟が干出しない小潮期では、この高濃度の懸濁液が底面付近を浮遊流動することとなる（図-4 (d) 参照）。これら干潟面上に設置したセンサーによる連続モニタリングから判断される傾向は、同一干潟地点で実施した一潮汐間の水位とSS濃度分布の経時変化を示した図-5からも読みとれる。

次に、沖側海域の平均水深が7mほどの海底データ（図-6 (a)～(d)）より、流速は干潟上のものに比べ大きな値であり、有明

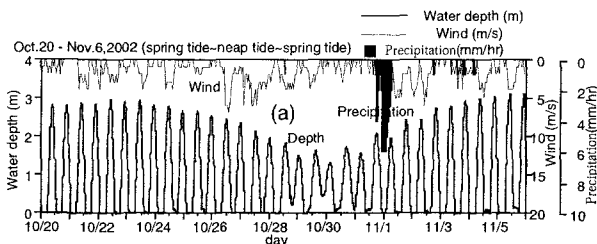


図-4 (a) 干潟底面の水深、風速、降水量の経時変化

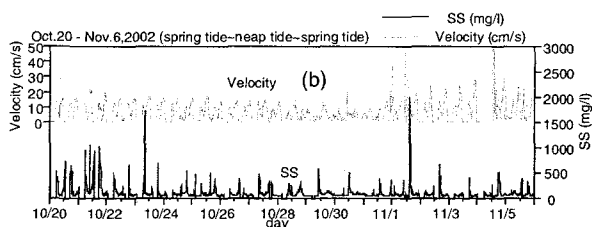


図-4 (b) 干潟底面のSSと流速の経時変化(1)

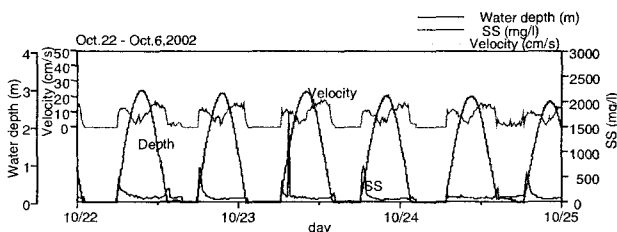


図-4 (c) 干潟底面のSSと流速の経時変化(2)

(図-4 (b) 中、大潮期間を拡大表記したもの)

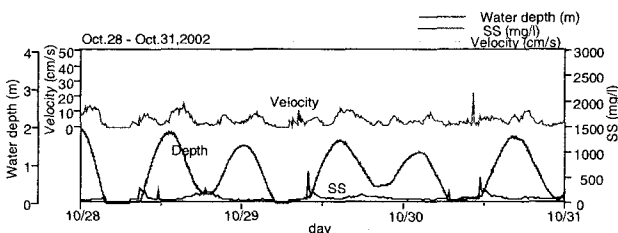


図-4 (d) 干潟底面のSSと流速の経時変化(3)

(図-4 (b) 中、小潮期間を拡大表記したもの)

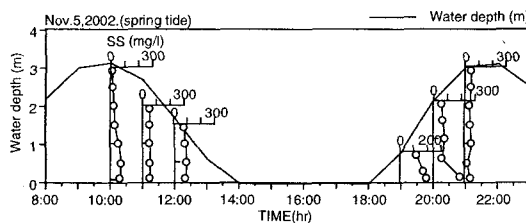


図-5 干潟直上海水のSS分布の経時変化

海内では強い移流分散および鉛直拡散のため断面内の混合がすみやかに行われる。また、大潮期のSSは、流速最大付近から減速し始める際にピークが現れるが、小潮期にはその流速が小さいため濃度ピークは現れずSSも小さい(図-6(c), (d))。一般に干潟沿岸域での底泥の巻き上げには波の効果が重要であることが指摘されている^{7), 8), 9), 10)}。一方、急激な地形変形をもたらすほどの巻き上げは平常時にはあまり見られず、このような場合、1日2回の潮流現象による底面からの巻き上げあるいは沈降現象によって支配される。実際、有明海湾奥部水域での波は一般に0.5m以下の比較的静穏な場でもある。ここでは時化時のような大規模な変動特性ではなく、平常時を対象とし、従来の室内実験的な巻き上げ現象把握から一歩進んだ現地での実証試験という点から比較的観測しやすく、かつ一次的なデータ整理も有効である流れに着目した。

図-7(a)～(d)は、干潟と海域の底面付近に固定したセンサーによる流速とSSとの関係を示したものである。なお、巻き上げ・沈降によるSSの増減のみに着目するため、一潮汐の変化から常時浮遊しているSS値をバックグラウンドデータとし、これを基底SS値と定義し、センサーで得られたデータからこれら基底SS値を差し引いている。図-7(a)より、干潟底面付近の上げ潮では、ある流速(巻き上げ限界流速 $V_c \approx 10\text{cm/s}$)を閾値としてSSの急激な増加現象が見られた。一方、下げ潮(図-7(b))では、流速増加に伴う底面からの巻き上げではなく、流速減速時に高いSSが現れている。これは、下げ潮時に巻き上げ限界流速を超える流速が存在しないのではなく、巻き上げられた底泥粒子の沈降速度が小さく、かつ凝集性や粒度組成などのため、SSと流速(本来は剪断応力などの外力)とにヒステリシス的な関係が生じるからである¹¹⁾。これら干潟域でのSSの挙動は、潮間帯での浮泥や懸濁物質の流動特性を示すとともに、干潟の形成過程を議論する上での重要なメカニズムである。

海域底面付近でのSSと流速の関係(図-7(c))でも上げ潮時に限界流速($V_c \approx 25\text{cm/s}$)の存在が確認されたが、その増加率は干潟域のものに比べると小さい。これは両者の巻き上げ限界流速値から堆積底泥の物性の違い、あるいは巻き上げ機構の違いなどに起因する。また、下げ潮時では流速増加によるSS濃度の変化は見られなかった(図-7(d))。なお、巻き上げ限界流速値は図-4, 6中のSS変動

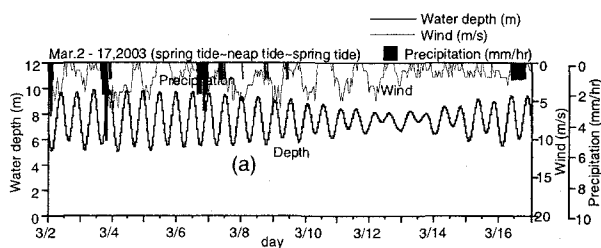


図-6(a) 海底底面の水深、風速、降水量の経時変化

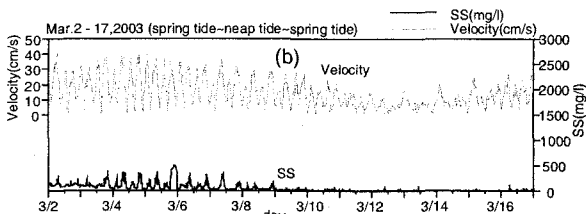


図-6(b) 海底底面のSSと流速の経時変化(1)

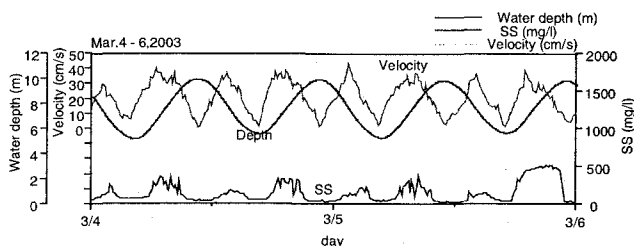


図-6(c) 干潟底面のSSと流速の経時変化(2)

(図-6(b)中、大潮区間を拡大表記したもの)

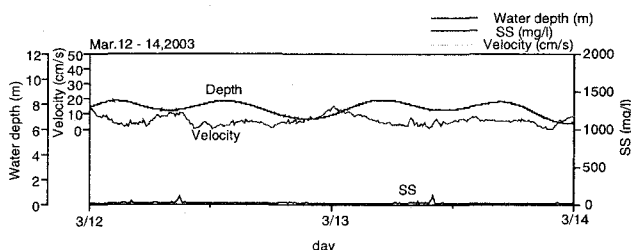


図-6(d) 干潟底面のSSと流速の経時変化(3)

(図-6(b)中、小潮区間を拡大表記したもの)

が急激に増加する際の流速値を平均化したもので、図中の直線はこの値を起点に描かれている。

図-8は干潟直上水のChl-aの経時変化である。Chl-a濃度は干潟のない海域での値の数十倍程度大きく、干潟干出時における付着藻類の干潟面での増殖および泥干潟に生息する底棲生物の餌場としての泥質干潟の特徴を示している。また、Chl-aは図-4中の干潟底面付近のSSと同様の経時変化を示しており、その強い相関が示唆される。

図-9は干潟上に設置したセンサーによるデータのうちSSとChl-aの関係を示したものである。図より干潟底面の直上水中のSSとChl-aには、強い相関関係が見られた。これは干潟が干出している日中に、干潟表層の付着藻類が干潟面で増殖し、干潟が冠水し始める上げ潮初期に、底泥の巻き上げとともに水中に供給されるからである。ただし、干潟底面付近のSSが0mg/l～1000mg/lの時には強い相関が見られるが、SSが1000mg/l以上の時ではその相関にばらつきが見られる。なお、単位SS当たりのChl-a量は、干潟底面から巻き上げられる無機態SSの寄与が大きいため、沖合のChl-a/SS値に比べ1桁オーダーが小さく、干潟域特有の値となっている。底面近傍のSSとChl-aとの関係から、単位SS当たりのChl-a量を求めたところ、約164 μ g/gSSであった。

3. 2 干潟表層部での付着藻類の変動特性について

図-10は、干潟底泥表層に付着した藻類由来のChl-aの経時変化、干潟直上水のChl-aとSSの経時変化である。干潟底泥表層から0.5cmまでの底質試料に付着した藻類由来のChl-aは、底泥単位体積当たり平均2500 (μ g/l sed)であり、海水中と比べ約2桁オーダーが大きく、干潟表層部にChl-aが付着藻類として存在していることがわかる(写真-1)。干潟直上水のChl-aとSSの時間変化から、先に述べた固定センサーによる連続モニタリングの結果と同様に、上げ潮初期では水塊フロント部の強い攪乱により干潟底泥表層の付着藻類の巻き上げが生じ、Chl-aが高濃度

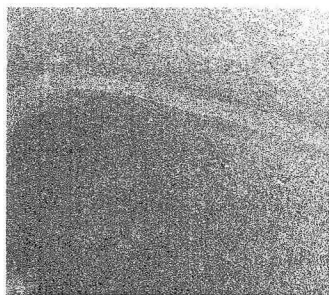


写真-1 干潟底泥表層の付着藻類

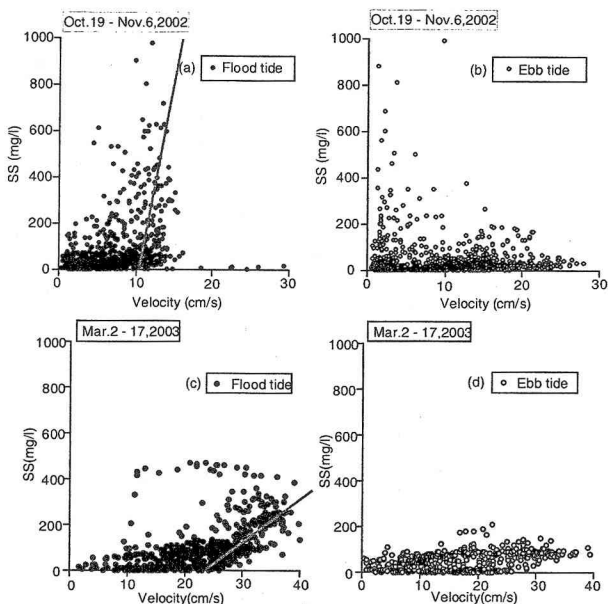


図-7 底面近傍流速とSSとの関係

(a) : 干潟底面 (上げ潮), (b) : 干潟底面 (下げ潮)
(c) : 海域底面 (上げ潮), (d) : 海域底面 (下げ潮)

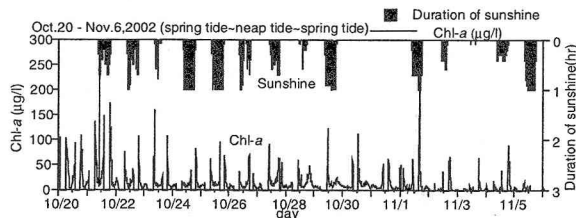


図-8 干潟上のChl-aと日照時間の経時変化

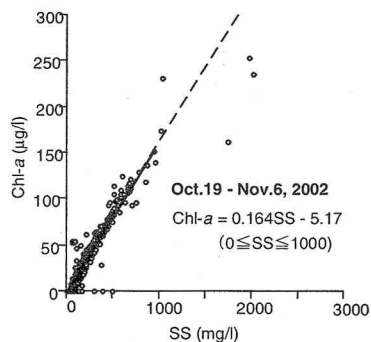


図-9 干潟上のSSとChl-aとの関係

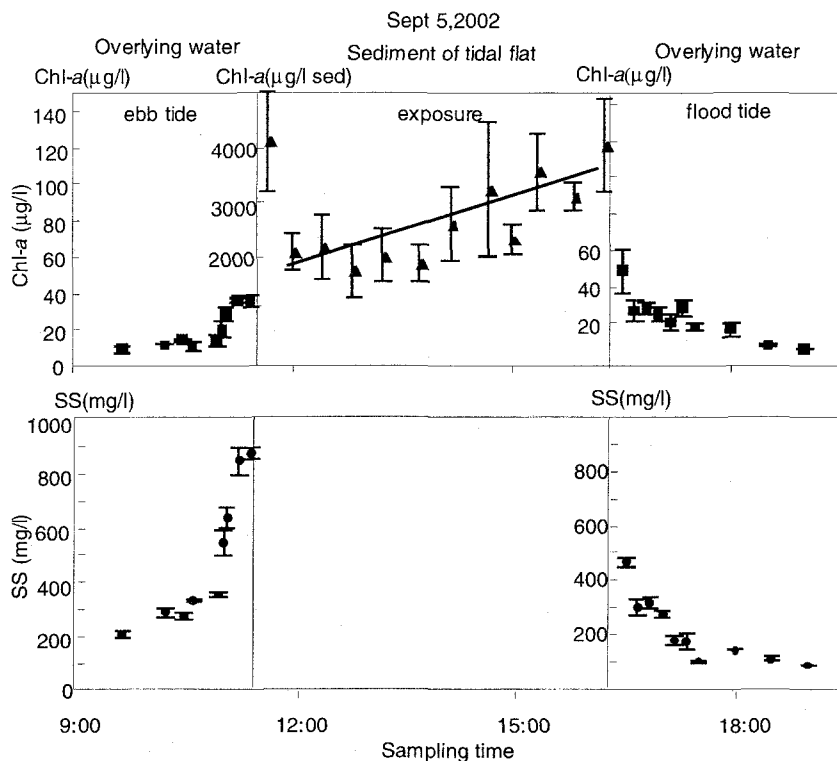


図-10 干潟底泥表層に付着した藻類由来のChl-aの経時変化
および干潟直上水のChl-aとSSの経時変化

となる。また、下げ潮の干潟干出前には、巻き上げられたSSが流速減速とともに底面付近に沈降・流動するため高濃度となる。それ以外では、巻き上げられたSSの海水中への拡散・希釈のためChl-aはほぼ一様かつ低濃度になる。さらに、底泥表層部の干潟干出時における単位体積当たりのChl-a量の経時変化からその増殖速度はおよそ $450\mu\text{g/l}\cdot\text{hr}$ であった。なお、図中、初期濃度が一時的に突出しているのは、下げ潮直後の干潟表層部に残留する水を含めて表層底泥を採取したためと考えられる。したがって、増殖速度はこの値を除いて算出した。

図-11は沿岸水のChl-aとSSの岸沖方向分布である。図から、岸付近(St.1)においてChl-aとSSが高濃度を示し、沖方向に低下する傾向が見られる。これは、岸付近フロント部での干潟底泥の巻き上げや沈降に起因していると考えられる。なお、この調査は上げ潮期に実施されたもので、Chl-a濃度の空間分布が岸側で高く、沖側で低くなる傾向は既往の調査⁶⁾と同様の結果となった。また、後述す

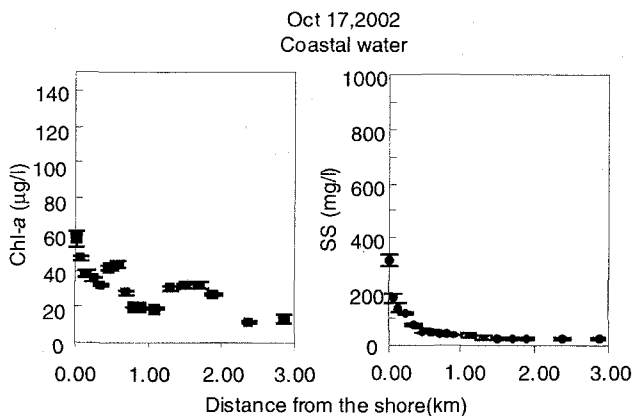


図-11 沿岸水のChl-aとSS岸沖方向分布

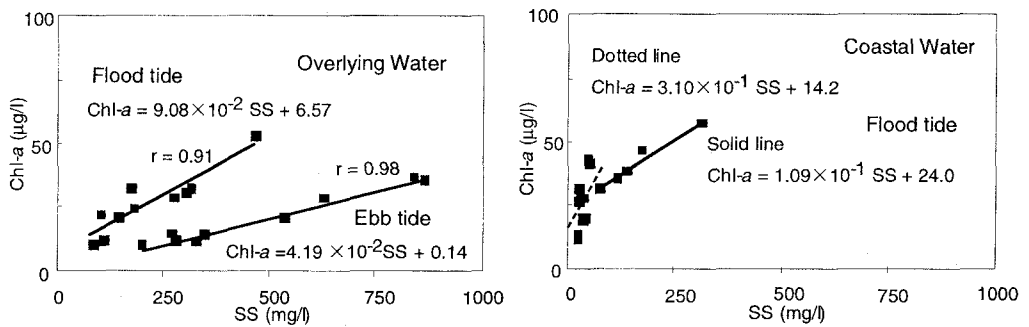


図-12 干潟直上水と干潟沿岸水のChl-aとSSの関係

る図-12左図の関係から下げ潮期には上げ潮期よりも岸側でChl-a濃度が低くなり、沖側で高くなる空間分布特性を示している。

図-12は、干潟直上水と沿岸表層水のChl-aとSSの関係である。図より一次近似した相関係数 r は、干潟直上水の場合、 $r=0.98$ （下げ潮）、 $r=0.91$ （上げ潮）と高い相関を示している。一方、干潟沿岸水の場合、 $r=0.76$ であり相関がやや低くなる。これは、SSが高い岸側に比べ、SSが低い沖側でのデータとでその傾向が異なることに起因しているからである。得られたデータをもとに図中に示す実線（岸付近）と点線（沖側）を示し得て、SS低濃度域とSS高濃度域に分けることができる。このことから、岸付近の干潟直上水は海水中に巻き上げられた干潟底泥表層の付着藻類がChl-aの変動特性に大きな影響をおよぼし、沖側は植物プランクトンによる内部生産など巻き上げられた付着藻類以外の要因がChl-aの変動特性に影響をおよぼしているといえる。また、図-12左図の関係から、干潟上での上げ潮と下げ潮でSSとChl-aとの勾配が異なっている。これは、次のような理由によるものと考えられる。すなわち、上げ潮では底泥面上に繁茂した付着藻類が底泥の巻き上げとともに多量に水中へ取り込まれ、無機態SSの増加とともにChl-a濃度の増加をもたらすが、下げ潮では干潟生態系を形成する底生生物のうち二枚貝などの懸濁濾過捕食者による効果のため、上げ潮期に巻き上がった多量のChl-aが下げ潮期には減少し、SSとの関係図における勾配の減少をもたらすと考えられる。その他、干潟水没時の底泥付着藻類の増殖が顕著でないことや下げ潮に底泥面から新たな巻き上げはそのヒステリシス関係や底泥表層の硬化現象など^{8), 11)}により生じにくく、たとえ巻き上げが生じても干潟上の付着藻類は浮泥による埋没や巻き上げによる流出から逃れるために干満に応じた移動特性を有しており、水中への供給が緩和される可能性もある。ただし、ここでの議論は推論も含まれ、今後これらの検証を進めていく必要があると考える。

4. おわりに

本研究では、有明海湾奥部・七浦地区の泥干潟を中心とした水理・水質に関する現地調査を行い、それら観測データに基づく成果の一部をとりまとめた。調査結果から、SSは干潟が冠水し始める上げ潮始めと干潟干出前の下げ潮の終わりに高濃度を示した。また、干潟直上海水でのSSとChl-aの間には強い相関関係が見られ、干潟底泥表層で増殖したChl-aが付着藻類として高濃度に存在し、これが上げ潮期には流れにより巻き上げられるため、岸沖方向のChl-aは、岸付近で高濃度となった。一方、下げ潮期には干潟底生生物である二枚貝などの懸濁物濾過捕食者のために上げ潮期よりもChl-a濃度の減少が生じていると思われる。このように、干潟底泥表層において高濃度のChl-aが付着藻類として存在し、潮汐により巻き上げられた付着藻類が、干潟直上水のChl-aの変動特性や干潟から沖方向の分布特性に大きな影響をおよぼしていることが本調査により明らかとなった。

本研究を遂行するに当たり、生研機構・地域コンソーシアム「有明海」プロジェクト（代表：林重徳）、佐賀大学有明海等総合調査研究会議（低平地クラスター）および文部科学省科学研究費補助金萌芽研究（代表：山西博幸）より補助を受けた。ここに、記して謝意を表す。

参考文献：

- 1) 荒木宏之・Narumol Vongthanasunthorn・古賀憲一・山西博幸・大串浩一郎（2002）：有明海の水質とボックスモデルを用いたシミュレーション，環境工学研究論文集，Vol.39，pp.229-234.
- 2) 山西博幸・荒木宏之・古賀憲一・佐藤公俊（2002）：有明海湾奥部での水質・底質特性に関する研究，環境工学研究論文集，第39巻，pp.219-227.
- 3) 佐賀統計情報事務所(1981～2002)：第29～49次佐賀農林水産統計年報（水産編），九州農政局.
- 4) C-H. Koh, H.Mogi, H.Yamanishi and H.Araki（2003）：A comparison of the chlorophyll-a concentration in sediment at Nanaura tidal flat with seawater from offshore, Ariake Sea, Japan, 平成14年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，第2分冊，pp.B478-479.
- 5) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater（1989）：17th ed.,American Public Health Association (NERL/ORD/EPA), pp.10-31-10-39.
- 6) 野村宗弘・中村由行（2002）：盤洲干潟における潮汐に伴う水質変動に関する現地調査，水環境学会誌，Vol.25，4号，pp.217-225.
- 7) 柴山知也・中西雅明・石原 肇・佐藤慎司（1987）：波による底質粘土の浮遊機構に関する研究，第34回海岸工学講演会論文集，pp.271-275.
- 8) 楠田哲也・山西博幸・川添正寿・二渡 了（1988）：波による底泥の浮遊及び挙動に関する研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp.352-356.
- 9) 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤（1988）：流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp.357-361.
- 10) 入江 功・村上和男・鶴谷広一（1991）：シルテーションによる航路・泊地埋没の水理機構に関する研究，土木学会論文集，No.438/II-17，pp.1-12.
- 11) 海田輝之(1989)：底泥の巻き上げと懸濁物質の沈降に関する研究，九州大学学位論文，pp.126-139.