

(33) 自動昇降型水質測定装置を用いた有明海湾奥部の干潟における懸濁物輸送と
水質変動に関する現地調査

Field surveys on suspended matters transport and variations of water quality
on an intertidal mudflat in the gulf of Ariake Sea using an automatic profiler sensor

山西博幸¹・荒木宏之¹・古賀康之²・日村健一²・大石京子³

YAMANISHI Hiroyuki¹, ARAKI Hiroyuki¹, KOGA Yasuyuki², HIMURA Kenichi²
and OHISHI Kyoko³

ABSTRACT; In the Ariake Sea, the tide difference is very great. Therefore, mud erosion under currents and waves affects amount of suspension in water column. In this study, water quality in a tidal flat is measured using an automatic ascending-descending instrument that collects hydraulic data and water quality data at various depths over a long period. Analysis of the data, focusing on suspended solids, reveals the variations and distribution of suspended solids in different tidal periods (spring tides and neap tides). Information regarding the fluctuation in various physical characteristics of tidal flats was successfully extracted from the obtained measurements, as summarized in this paper. Some of the characteristics of sediment transport over mud flats under the variations of water level were also clarified. This research also attempts to consider that the movement of SS and nutrients, and thus their characteristics and the influence of erosion to water quality are investigated. As a result, it can be said that T-N and T-P are much dependent on the behaviors of mud erosion. They contribute a great effect to the water quality, while DIN and DIP may not be affected clearly by the mud erosion in this limited survey.

KEYWORDS; Ariake Sea, Mud transport, Nutrient, Erosion, Suspended matters

1. はじめに

有明海では、その地形的特徴から日本有数の干満差を有している。特に、湾奥部では最大5mもの潮位差から強い潮流が発生し、干出・水没を周期的に繰り返す干潟域では、常に底泥粒子の巻き上げ、流動および沈降が生じている。また、湾奥部では陸域から流入する淡水とともに土砂や栄養塩が流れ込み、これらが河口沿岸部での海水流動と出会うことで凝集物の形成が促進され、流れの緩やかな場所では沈降・堆積することとなる。そのため、干潟堆積物には様々な物質が内包されると共に、これらの物質輸送は干潟生態システムの一部を形成することとなる。従来、大きな潮位差に伴う大量の海水交換という点から、有明海の水質には大きな問題はないものと考えられてきた。しかしながら、近年、アゲマキやタイラギといった水産資源の漁獲量の激減、有害赤潮の発生件数の増加や貧酸素水塊の発生が報告される中（例えば、1)~3)など）、有明海の環境変化について、物理的・化学的および生物学的観点から、多くの研究者によって研究がなされている。一方で、中田⁴⁾が指摘するように、有明海の環境システムには多くの要素が関与しているものの、いずれも十分な調査データが無く、推測の域を脱し得ていないのが実情である。

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

²佐賀大学大学院工学系研究科 *Graduate School of Engineering, Saga University*

³九州大学大学院工学研究院 *Graduate School of Engineering, Kyushu University*

著者らは湾奥部での底泥の堆積環境について、すでにその一部を報告している⁵⁾。これによると、湾奥西部域での底質の平均粒径の細粒化や有機成分の高含有化を示している。また、数値計算からもこの傾向の一部を明らかにしている⁶⁾。その他、湾奥部では、透明度やCODが経年的に上昇していることも報告されている(例えば、7)、8)など)。これら一連の結果には、干潟底泥の浄化能や堆積環境の変化が大いに関与するものと推察される。

したがって、干潟生態系や水質・底質環境を論じる上で、干潟域における物質輸送現象を明らかにすることは重要な事項である。本研究では、有明海湾奥西部干潟域に自動昇降型の水質測定装置を設置し、長期にわたる干潟上の水理・水質データの収集・解析より、干潟底泥の再懸濁や懸濁物質の輸送およびその変動特性、さらには底泥の巻き上げが直上水におよぼす影響について若干の知見を得たのでここに報告する。

2. 調査方法

2. 1 自動昇降型水質測定装置を用いた連続干潟観測

調査地点を佐賀県鹿島市七浦干潟とした(図-1参照)。調査には、同地点に設置した自動昇降型の水質測定装置を用いた(図-2参照)。測定項目は、水位、塩分、濁度、クロロフィル、電気伝導度、DO、pHである。本装置は、多項目水質測定センサー(アレック電子(株)、AAQ1183)、センサー移動用ウインチ及びセンサー洗浄ロボットからなり、1時間毎に観測櫓の最上部に係留したセンサーが昇降する。まず、センサーは水面を検出し、最下部(0.2m)まで降下後、水面までの間を0.2m毎に上昇しながら水質データを収集し、元の位置に戻る。また、センサーロープは観測塔上部に設置した水槽内に格納され、常に水で洗浄された状態を保つよう工夫されている。収集されたデータは、Dopa通信で遠隔にて入手することが可能で、リアルタイムの水質データを把握することができる。その他、0.2m以下の流速や水質データ収集のために、二次元電磁流向・流速計(アレック電子(株)、COMPACT-EM)、水位計(アレック電子(株)、COMPACT-TD)、クロロフィル・濁度計(アレック電子(株)、COMPACT-CLW)を同時に設置した。1回の測定期間は大潮-小潮-大潮のおよそ2週間を基本とした。なお、観測期間中に自動採水器にて試料を採取し、センサーによる検出値と実測値との校正を行っている。

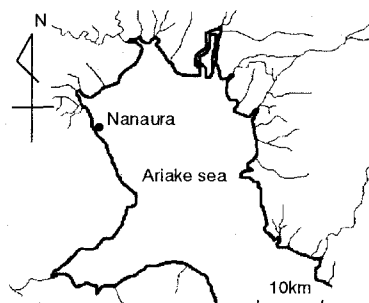


図-1 調査地点

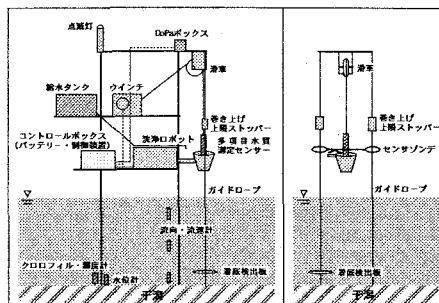


図-2 観測装置の概略図

2. 2 干潟直上水の水質変動調査

底質の巻き上げと水質への影響に関する検討を行うため自動昇降型水質測定装置とともに、採水・採泥を行った。調査地点は観測塔を設置している場所と同じ七浦干潟である。ここで、大潮にあたる2004年11月11日(17:00~23:00)、25日(16:00~23:00)と小潮にあたる2004年12月4日(9:00~19:00)の干潮~満潮~干潮に調査を行った。調査項目は、水位、流向、流速、水質(DO、SS、Chl-a、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、D-N、T-N、PO₄-P、D-P、T-P)である。試料の採取を底泥面上0.1mに設置した採水口から自動採水器にて1時間毎に行った。また干潟干出時、底泥表層1cm程度を採取し、底泥中の形態別栄養塩の測定に用いた。採水試料は0.45μmのメンブランフィルターにて懸濁態成分と溶存態成分に分けた。一方、底質は間隙水と乾燥試料に分け、それぞれについて栄養塩を測定した。特に、底泥中のリンの形態については、駒井・中島⁹⁾や山本・末次¹⁰⁾と同様にCa結合体としてのアパタイト型か非

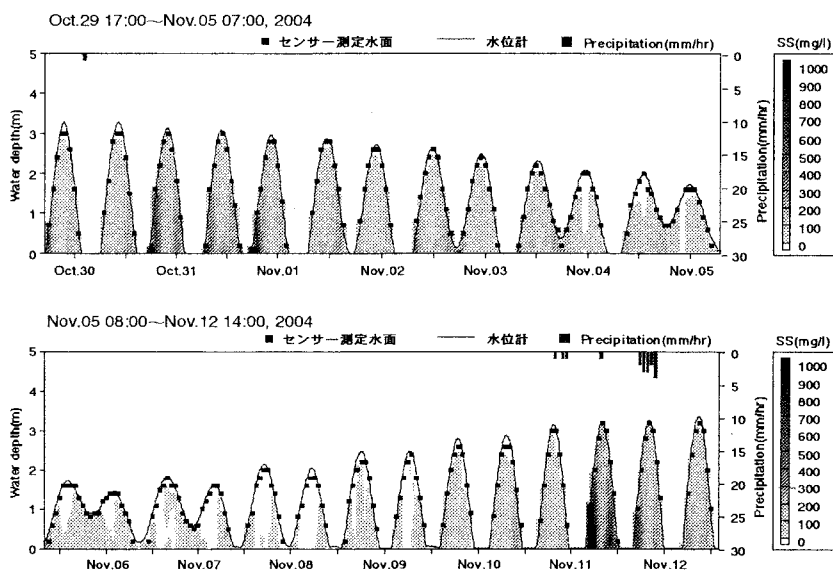


図-3 SS等濃度分布と降雨量(2004年10月29日～11月12日)

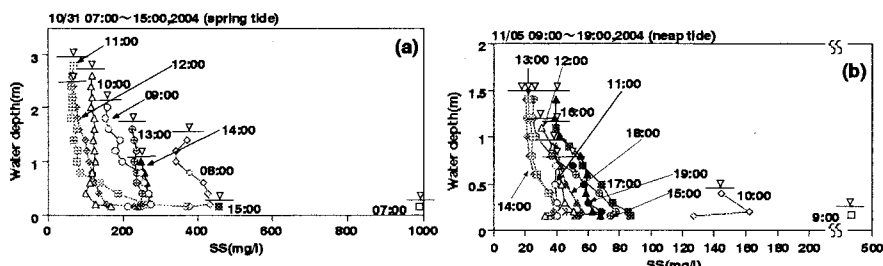


図-4 SS分布の経時変化(左図:(a)大潮, 右図:(b)小潮)

アパタイト型かに留意し測定した。

3. 調査結果及び考察

3. 1 懸濁物輸送に関する特性

図-3は、2004年10月29日-11月12日(大潮～小潮～大潮)に測定した干潟上でのSSに関する等濃度分布を水位とともに示したものである。なお、濁度からSSへの換算は、同時採水で得られた試料のSSと濁度との関係式を用いている。測定期間中、降水はほとんどなく、また風速が10(m/s)を越える日は見られなかった。図より、上げ潮初期及び干潟干出直前に高濃度を示す傾向は、既報¹⁾と同様の結果である。すなわち、上げ潮では潮位上昇とともに、沖から干潟面上に流れ込む水塊フロントの強い乱れのため干潟底泥を多量に巻き上げ、一方、下げ潮では底泥面から新たな巻き上げが生じるのではなく、底泥面直上に沈積せずに存在する浮泥が再懸濁することで、見かけ上SSが高くなるからである。

図-4(a),(b)は図-3中の大潮期と小潮期にあたる1潮汐間のSS分布を取り出したものである。先に述べたように、大潮では干潟が冠水し始める初期に底面付近で高いSS濃度が観測され、水位上昇とともに高さ方向に拡散し、鉛直方向に一樣となる。また、転流時に底面付近で高いSS濃度が現れたのち、平均濃度を上昇させながら干出することとなる。一方、小潮では、大潮ほどの高いSS濃度は現れない濃度分布となるが、転流時には図-4(a)同様、一時的に底面付近でSS濃度の増加が見られた。

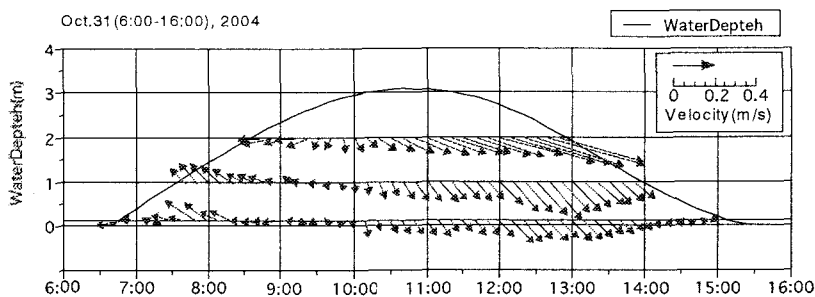


図-5 水位変化と流速ベクトル

図-5は図-4で示したSS分布の経時変化と同じ時刻の水位と底面から0.15m, 1.0mおよび2.0m地点に設置した流向・流速計による流速ベクトルを示したものである。なお、水平方向は東西、鉛直方向は南北を表している。どの高さもこの期間に測定された流向は主にNW-SE方向が卓越していた。また、底層部での最大流速は上げ・下げともに0.2m/sを越えなかった。図より干潟上の流速は満潮の1～2時間前から徐々に弱まり、転流し始める。この水平流速が弱まるとき、水中に存在する懸濁物は鉛直方向輸送が卓越するため、次のような鉛直一次元の物質収支式が適用できる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}[(w - w_s)c] = \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial c}{\partial z}\right) \quad (1)$$

ここで、 c :濃度、 w :鉛直方向流速、 w_s :沈降速度、 k :拡散係数、 z :鉛直座標（鉛直上向きを正とする）、である。

このとき、式(1)を底面付近の高さ $z=z^*$ (一定)から $z=h(t)$ まで積分すると、

$$\int_{z^*}^{h(t)} \frac{\partial c}{\partial t} dz + [(w - w_s)c]_{h(t)} - [(w - w_s)c]_{z^*} = \left[k \frac{\partial c}{\partial z}\right]_{h(t)} - \left[k \frac{\partial c}{\partial z}\right]_{z^*} \quad (2)$$

となる。このとき、式(2)の左辺第1項の積分区間に時間の関数 $z=h(t)$ があるため、これにライプニッツの法則を適用し、また、 $z=z^*$ は時間にかかわらず一定であること、さらに、鉛直方向流速成分が無視できるとすれば、式(2)は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{z^*}^h c dz = c(h, t) \frac{\partial h}{\partial t} + [F_e - w_s c]_{z=z^*} \quad (3)$$

ここで、 $F_e = -k \frac{\partial c}{\partial z}$ である。式(3)より、基準高さ $z=z^*$ より上に存在するSS量の時間変化は水面変動に伴う輸送量と $z=z^*$ 面を出入りする輸送量によって決定される。このとき、式(3)の右辺第二項を次のように見かけ速度 w_a を用いて定義する。

$$F_e - w_s c = w_a c \quad (4)$$

図-5より、上述の仮定が成立する時間帯として9:00～10:00が考えられる。このとき、 $z=z^*$ を水質測定最下限の0.15mとして図-4のSS分布より式(3)の左辺および右辺第1項を求め、式(4)を考慮し、見かけ速度 w_a 求めた。その結果、水位上昇時にもかかわらず、冠水直後の過剰な高濁水の流入の影響を強く受け、下向きの沈降フラックスとして $w_a c = -5.29 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ が算出された。これを基準高さ $z=z^*$ での時間平均SS濃度で除し、見かけの沈降速度 $w_a = -0.28 \text{ mm/s}$ を求めた。この見かけ沈降速度は水平流速減衰時の計算結果であるため、これを単純に水中の沈降速度 w_s とみなし、転流時の流速減衰時

間を1時間とすれば、およそ1m水深地点の懸濁物質は全てその地点に沈降してしまうこととなる。このとき、底面へ $5.29 \times 10^{-5} \text{kg/m}^2/\text{s} \times 3600\text{s} = 0.19 \text{kg/m}^2$ (沈降フラックス×時間) の沈積量が見積られることとなる。もしこれがそのまま底面に沈積すれば、粒子密度を 2650kg/m^3 とすれば、およそ0.07mm厚で堆積することとなる。

次にSS分布の経時変化をもとに、水中に存在するSS量として $W(\text{kg/m}^2)$ を算出し、底面流速 $V_b(\text{m/s})$ (干潟面上0.15m)との関係を経時的に示したものが図-6である。なお、SSの存在量 W は各時間に得られるSS分布を鉛直方向に積分したものである。図より、底面流速 V_b に呼応する形で干潟直上水中に存在するSS量も増減することが分かる。また、図-6から干潟の冠水直後に W が増加する速度を F_{e1} 、満潮から再び W が増加する速度を F_{e2} とする。これら巻き上げ速度 F_e の値を求めると、 $F_{e1} = 3.38 \times 10^{-3} \text{kg/m}^2/\text{s} \sim 2.78 \times 10^{-4} \text{kg/m}^2/\text{s}$ 、 $F_{e2} = 4.81 \times 10^{-6} \text{kg/m}^2/\text{s} \sim 5.47 \times 10^{-8} \text{kg/m}^2/\text{s}$ となった。 F_{e2} は F_{e1} の値よりも1桁オーダーが小さくなっている。これは、巻き上げ過程の違いに由来するもので、 F_{e2} は底面に堆積する底泥の巻き上げというよりも、むしろ一度巻き上げられた懸濁物の再浮上であり、 F_{e1} で評価される高濁水の流入もないためである。したがって、それぞれ現象が異なるため F_{e1} および F_{e2} を一般的な底泥の巻き上げ速度算定公式¹²⁾に当てはめての評価は一概にできない。そこで巻き上げ速度 F_e の概算のため、 F_{e1} と F_{e2} を V_b の関数として表した(図-7参照)。図より、 F_{e1} は V_b^3 、 F_{e2} は V_b^2 で関係づけられる傾向にあった。ただし、これだけでは巻き上げ速度式として十分な評価とは言えず、これらを規定する算定式については今後も検討が必要である。

図-8は、大潮期における連続した3潮汐間の底面流速 V_b とSSの存在量 W の関係を示したものである。図より、 W は上げ潮最大流速付近から流速最小の満潮となる頃まで徐々に減少する。その後、流速増加にも関わらず W は、ほとんど変化しないが、0.1m/sを越えたあたりから再び増加する。下げ潮最大流速後は、流速の減少とともに W も減少に向かう。上げ潮初期の W は、冠水直後のセンサー稼動時刻によって底面近傍のSS濃度の評価に多少の差異は生じるものの、底面流速 V_b と巻き上げ量 W の変化は、左回りの螺旋的のループを描きながら変動する。

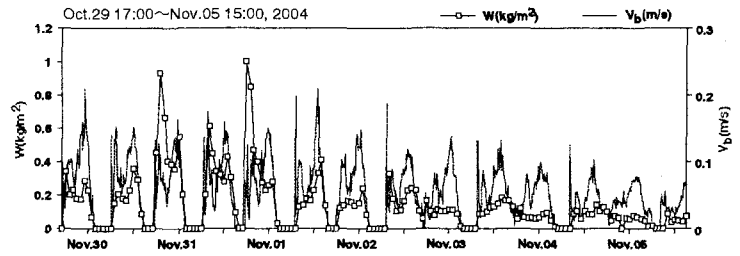


図-6 巻き上げ量 W と底面流速 V_b の経時変化

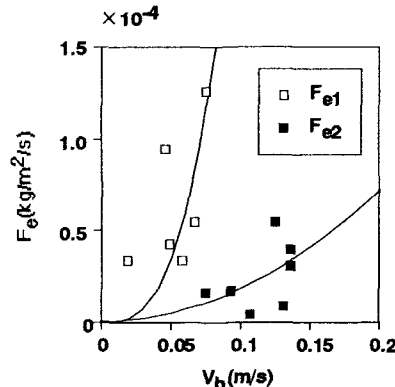


図-7 V_b と F_e との関係

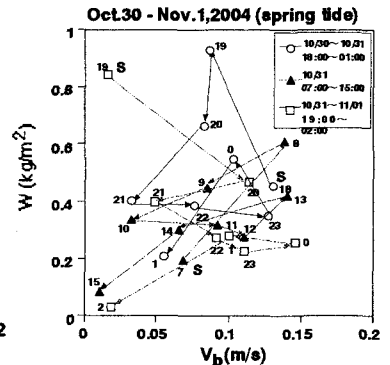


図-8 W と V_b の相関図

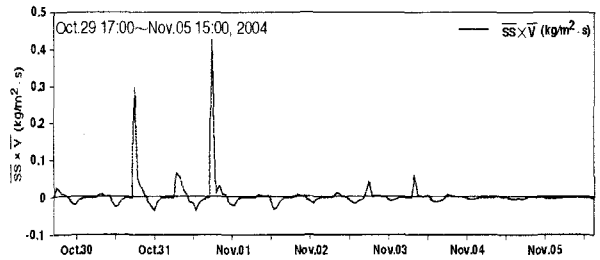


図-9 干潟底泥上における物質輸送量

このような時間的変化の中で、干潟直上水の移動により輸送されるフラックス量を深さ平均SSと深さ平均流速 V との積の形で表すと図-9となる。この図は、上げ潮時を+、下げ潮時を-として表現している。これらの値と時間軸で囲まれた面積についての収支をとると、正味の水平輸送量が概算できる。図-9の場合、観測期間（大潮一小潮）で算出された正味の量は、 $+0.75(\text{kg}/\text{m}^2)$ で、上げ潮向きに輸送される。

3. 2 底泥の巻き上げと水質変動特性について

前項では、干出・水没を繰り返す干潟底泥面上での物質輸送として、主に懸濁物質の輸送について検討した。ここでは、自動昇降型水質測定装置により得られたSS以外の変動や底泥の巻き上げによりSSとともに水中に供給される干潟底質中の栄養塩の輸送について取りまとめる。なお、図-10は干潟上での底質の巻き上げ・沈降・溶出による栄養塩の挙動を模式化したものである。

図-11は、Chl- a に関する等濃度分布を水位・日照量と共に示したものである。特に、SSとChl- a との相関は既報

¹¹⁾でも示したように、強い相関関係が得られる。これは干出時、底泥表層部で付着藻類が増殖し、これが前述した上げ潮初期の強い流れにより巻き上げられるためである。また、Chl- a の高濃度水塊が流入している様子が観測され、同時にこの増殖した植物プランクトンの流入により、pHの上昇も見られた。さらに、図-12より高濃度のChl- a 分布域に植物プランクトンの光合成によるDOの上昇が見られた。一方、今回の調査では、室内実験で見られるような巻き上げに伴う明瞭な酸素消費⁵⁾は観測されず、その現象や反応時間および観測方法を含めた検討が必要であると思われる。

次に、図-10中に示した底質の巻き上げと栄養塩の挙動について検討した。

表-1は干潟冠水直前に採取した底質乾燥試料中の栄養塩濃度である。表より乾燥試料中に含まれる栄養塩の観測平均は、T-Nが $2300\text{mg}/\text{kg-dry}$ 、T-Pが $814\text{mg}/\text{kg-dry}$ であった。T-PはIPとOPに分類でき、IPはさらにアパタイト型リン(HCl-P)と非アパタイト型リン(CDB-P, NaOH-P)に分けることができる。アパタイト型リンは巻き上げによって水中に供給されてもすぐには生物が利用できないが、非アパタイト型リンは、Fe

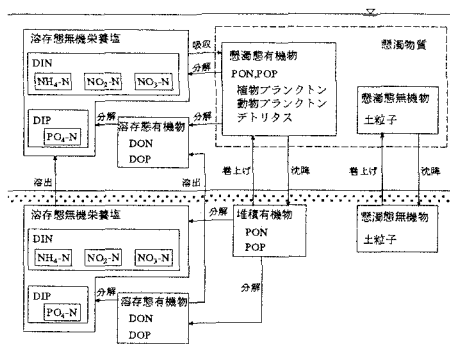


図-10 物質輸送模式図

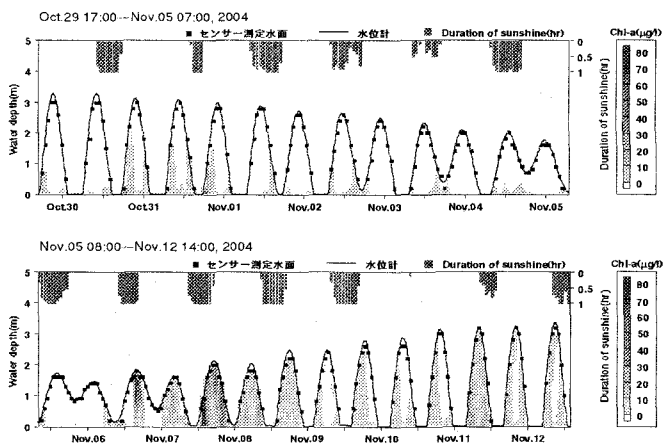


図-11 Chl- a 等濃度分布と日照量

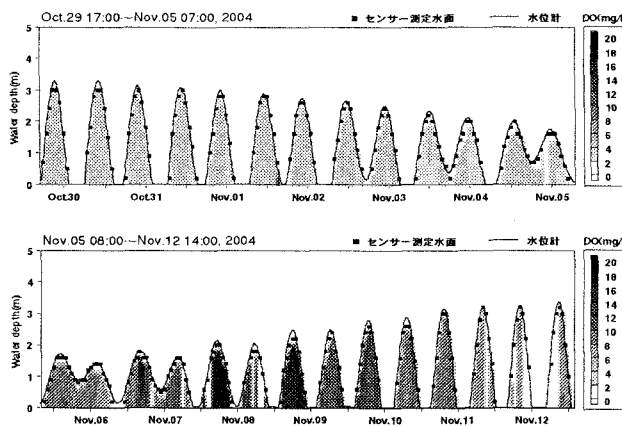


図-12 DO等濃度分布

やAIと結合したリンであり、嫌気的条件下で水中に溶出する。また、Res-PはT-PからIPを差引いたもので有機態リンとして考える。したがって、乾燥試料中のリンのうち、溶出あるいは生物に利用される可能性のあるリンは非アパタイト型リンと有機態リンである。よって、底質中のT-Pのうち直上水の水質に影響しているのは、アパタイト型リンを除いた成分と考えられ、これはT-Pの約80%を占めることになる。

図-13は、採水時の水位とSS、T-NおよびT-Pの経時変化である。SS濃度は、前項でも述べたように、大潮にあたる11月11日、25日ともに上げ潮始めに高くなっている。12月4日の場合、小潮であることから干潟上の流れはそれほど大きくならず、上げ潮初期のSS濃度はさほど高くない。しかし、その日の午後からの降雨(10mm/hr程度)が影響し、下げ潮終了直前時にSS濃度の増加が見られた。図示していないが、同時刻に測定した塩分の希釈状況からも陸域を含めた影響と考えられる。同様に、これは

図-13、14で示したT-N、T-P、DINおよびDIPの経時変化にも影響している。図-15はSSとT-N、T-Pとの関係を示したものである。また、図-16は、SSとPN、PPの関係で、いずれも底質の巻き上げにより懸濁態として栄養塩が水中に供給されていることを示している。一方、DPについてはSSとの相関が見られず、干潟上1周期間での底質の巻き上げによるリンの水中への溶出に関する寄与も明瞭ではなかった。

4. おわりに

本研究では、有明海湾奥西部干潟域を調査地点とし、自動昇降型の水質測定装置を用いて、干潟上の水理・水質に関する基礎情報を収集し、SSを中心とした変動特性についてその一部をとりまとめた。調査結果から、水位変動を有する現地干潟域でのSS輸送特性を明らかにすることができた。また、干潟底泥の巻き上げによる直上水のSS及び栄養塩の挙動特性に着目し検討し

表-1 底質乾燥試料中の栄養塩含有量 (mg/kg-dry sed)

Exp. date	T-N	T-P	有機態リン	非アパタイト型リン		アパタイト型リン
			Res-P	CDB-P	NaOH-P	HCl-P
11月11日	2500	789	226	396	32	135
11月25日	2200	818	208	418	36	156
12月4日	2200	836	246	418	38	134

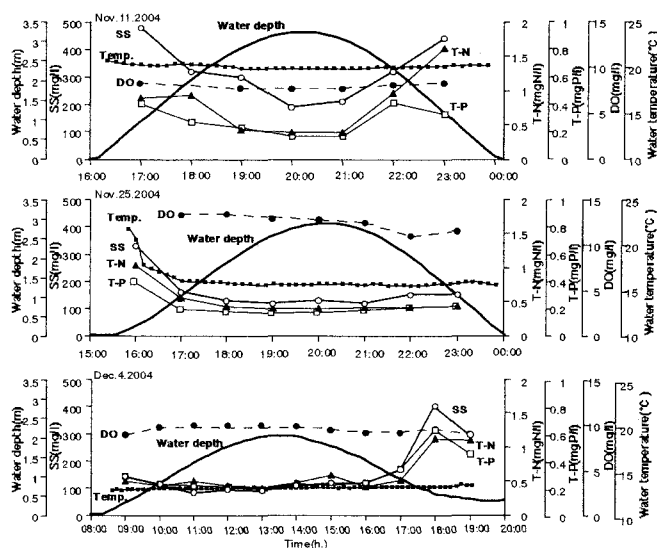


図-13 SS,T-N,T-P,DO,水温および水位の経時変化

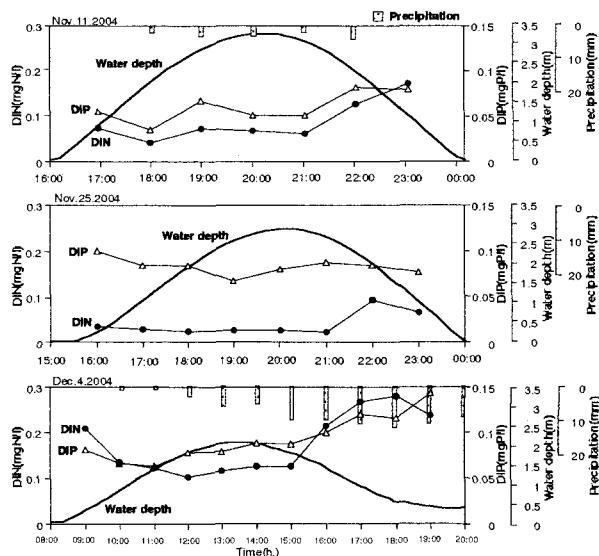


図-14 DIN,DIP,降水量及び水位の経時変化

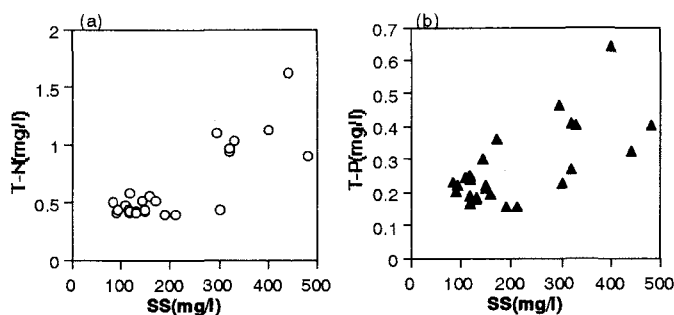


図-15 SSとT-N,T-Pの関係

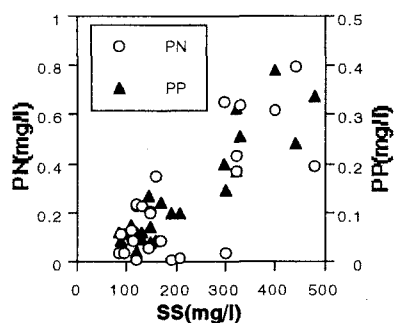


図-16 SSとPN,PPの関係

た.その結果, T-N, T-Pの挙動はSSの挙動に依存しており, 底質の巻き上げが直接, 直上水の水質に影響していることがわかった. また, 無機栄養塩については, 干潟域で巻き上げられた有機物の分解による影響や沿岸域からの流入負荷および底質からの溶出を含めたさらなる検討が必要と考えられる.

本研究を遂行するにあたり, 科学研究費・基盤研究(B)(2)(代表:山西), 河川整備基金助成(代表:山西), 生研センター・地域コンソーシアム(代表:林), 佐賀県受託研究助成および佐賀大学有明海研究プロジェクトから補助を受けた. また, 現地調査では低平地研究センター水圏環境研究室の学生諸氏, 窒素・リンの水質分析では元九州大学大学院修士学生の岡崎光夫氏(現北九州市役所), にご協力いただいた.ここに記して謝意を表す.

参考文献:

- 1) 大隈斉 (2002):「アゲマキ漁業の復活に向けての試み」, 佐賀大学有明海研究に関するシンポジウム, pp.21-25.
- 2) 中嶋雅孝・横山佳裕・内田唯史・中野拓治・中西弘 (2005):「有明海における冬季のノリ及び赤潮プランクトンの増殖特性」, 水環境学会誌, Vol.28, No.5, pp.339-345.
- 3) 程木義邦・佐々木克之・村上哲生 (2002):「干拓地からの負荷と貧酸素水塊の形成」, 第8回ジョイントシンポジウム諫早湾締め切りが有明海環境におよぼす影響の検討要旨集, pp.13-19.
- 4) 中田英昭 (2002):「有明海の環境システム:そのとらえ方と現状診断」, 第51回理論応用力学講演会概要集, pp.15-16.
- 5) 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, Vol.39, pp.219-227.
- 6) 茂木裕介・山西博幸・荒木宏之・古賀憲一 (2005):「生態系モデルを用いた有明海の水質計算」, 平成16年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.943-944.
- 7) 伊藤史郎 (2004):「有明海における水産資源の現状と再生」, 佐賀県有明水産振興センター研究報告, Vol.20, pp.69-80.
- 8) 磯部雅彦 (2001):「有明海における水環境の現状」, 水環境学会誌, Vol.24, No.10, pp.659-664.
- 9) 駒井幸雄・中島和一(1994):「加古川流域に分布する岩石および河川底質中のリンの濃度と形態」, 水環境学会誌, Vol.17, pp.744-753.
- 10) 山本浩一・末次忠司(2005):「筑後川河口部における底質中の形態別栄養塩の分布特性に関する研究」水工学論文集, Vol.49, pp.1417-1422.
- 11) 山西博幸・荒木宏之・高哲煥・清川徹・茂木裕介・古賀憲一 (2003):「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」, 環境工学研究論文集, Vol.40, pp.587-594.
- 12) 二渡了 (1993):「強混合河川感潮部における物質輸送と水質変換に関する研究」, 九州大学学位論文, p.72.