

課題名	RF-074 海洋環境変動に及ぼす堆積物再懸濁現象の影響予測に向けた物質動態詳細測定法の開発		
課題代表者名	中川康之（独立行政法人港湾空港技術研究所 海洋・水工部 沿岸環境研究領域）		
研究期間	平成19-20年度	合計予算額	17,555千円（うち20年度 8,455千円） ※上記の合計予算額には、間接経費2,750千円を含む。

## 研究体制

- (1) 沿岸波浪および潮汐流作用下における侵食と再懸濁機構の把握（独立行政法人港湾空港技術研究所）
- (2) 巻き上げ時における化学物質フラックスの定量化（独立行政法人港湾空港技術研究所）

## 研究概要

## 1. 序（研究背景等）

アジア地域をはじめ、世界各国の大河川河口域では、河川を通じて栄養塩物質や有害化学物質など様々な環境負荷物質が流下土砂と共に陸域から運ばれており、懸濁粒子として海底に沈降・堆積する。一方、波浪や潮汐の流れなどの多様な外力作用による堆積物の巻き上げ現象により、これら環境に負荷を与える物質が再び海水中に浮遊し、移流・拡散し、沿岸海域の水質や生態系に悪影響を及ぼす(図-1)。このような沿岸域の水質環境変動の評価や予測モデルの信頼性を向上させる上では、沿岸域特有の波浪や潮汐流が混在した複雑な外力作用下における「堆積泥の侵食」や「懸濁物質の発生」といった物理現象の把握と同時に、巻き上げ現象の中での溶出など化学物質の輸送過程を解明することが重要である。

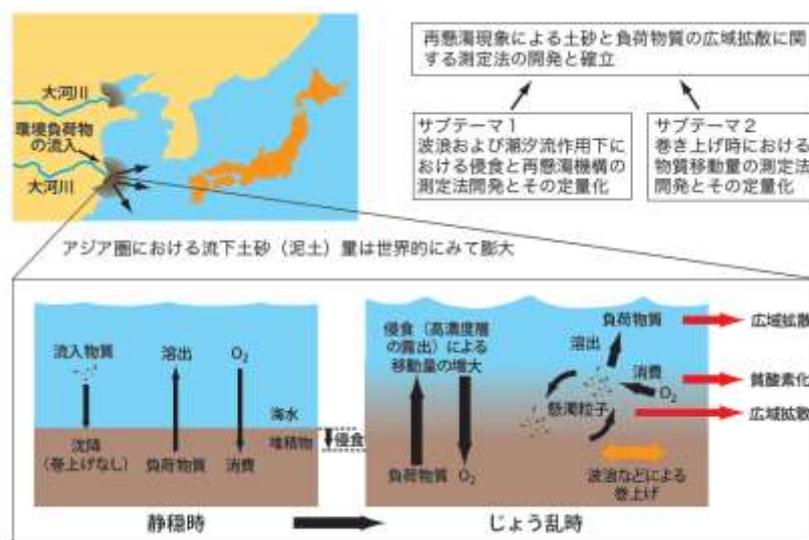


図-1 河口沿岸域海底での物質移動と広域拡散

## 2. 研究目的

沿岸域の水質環境変動の評価や予測モデルの信頼性を向上させる上では、沿岸域特有の波浪や潮汐流が混在した複雑な外力作用下における「堆積泥の侵食」や「懸濁物質の発生」といった物理現象を適切に考慮した化学物質の溶出過程の解明が必要である。そこで本研究では、物理ならびに化学的プロセスの両面から、沿岸域での再懸濁現象に伴う化学物質輸送の定量手法の開発を試みる。ここでは、下記の2つのテーマ、

- (1) 沿岸波浪および潮汐流作用下における侵食と再懸濁機構の把握
- (2) 巻き上げ時における化学物質フラックスの定量化

を設定し、近年になり高度化された計測技術を導入した現地観測の実施と、海底の海水流動環境と現地底泥の移動を再現する水路実験を通じて、底面境界層内での乱れ強度と巻き上げ量との関係や再懸濁層の濃度分布特性を把握し、また再懸濁に伴う水質変化を評価するための化学物質等の輸送量の測定手法の開発を試みることを目的とする。

### 3. 研究の方法及び結果

#### (1) 沿岸波浪および潮汐流作用下における侵食と再懸濁機構の把握

アジア地域をはじめとする大規模河川河口域では、シルトや粘土を多く含む泥分が堆積物の主体となっており、砂に比べて粒径の小さなこれらの泥粒子は、栄養塩や化学物質との吸着特性を有するため、水質環境を考える上では泥粒子の挙動に注目する必要がある。そこで、本研究では海外の河口域との類似性を考慮して、日本国内の中でも有数の潮位差と泥干潟面積を有する有明海を対象として現地観測を実施した。2008年2月13日から2月29日までの約2週間にわたり、有明海湾奥西部に位置する佐賀県鹿島沖の平均水深約6mの地点（図-2）において、各種計測器を船上からダイバー作業（図-3）により、図-4に示すように海底設置させて連続観測を行った。現場堆積物（泥深0-0.5 cm、0.5-2.5 cm、4-6 cm、9-11 cm、19-21 cmの5層）はシルト（66-67%）と粘土（33-34%）によって構成されており（中央粒径10-11  $\mu\text{m}$ ）、泥深方向に一様な粒度組成を呈している。含水率は70-79%、強熱減量は8-10%である。

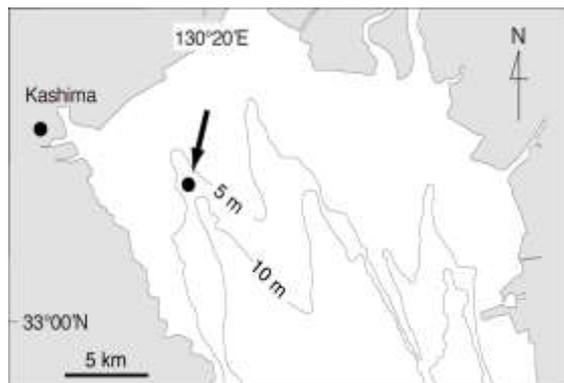


図-2 観測地点（鹿島タワー横）



図-3 観測地点での計測器設置の様子

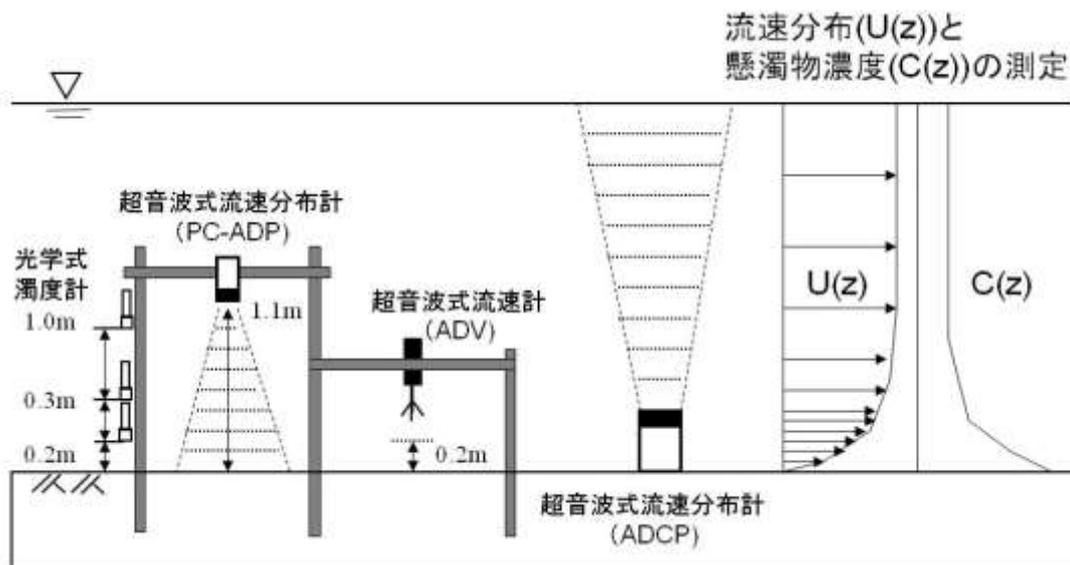
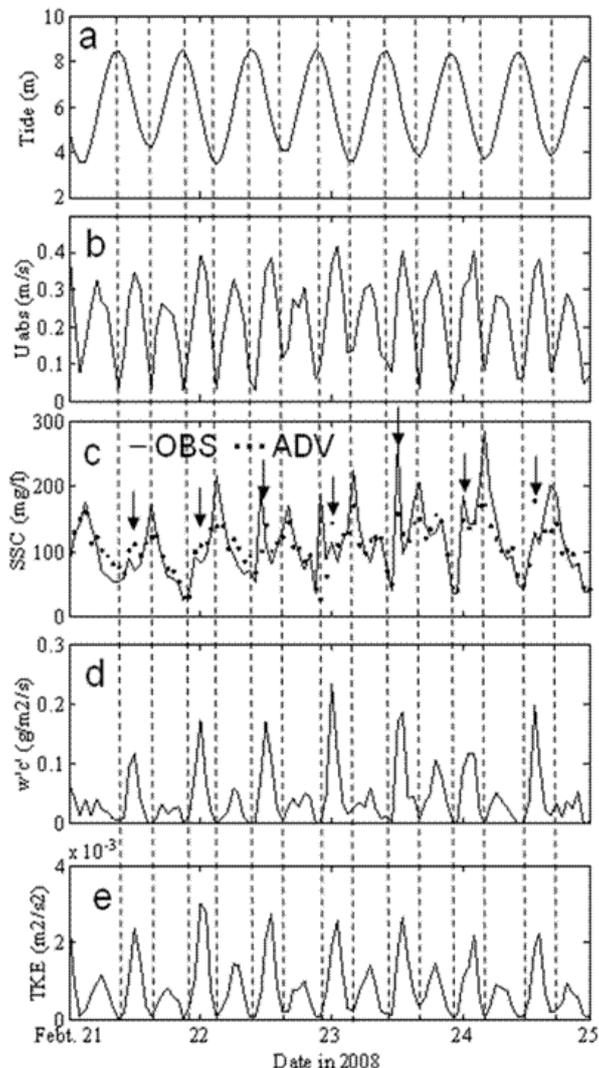


図-4 海底付近の流速と懸濁物濃度の詳細測定のための計測器の設置図

大潮期にみられる浮遊懸濁物（SS）濃度の増大の要因について検討するため、大潮期間中の潮位やSS濃度の変動の様子を拡大したものが図-5である。潮汐変動とSS濃度の変動パターンに対応関係についてみると、下げ潮後の干潮時にSS濃度増大のピークがみられることが特徴の一つである。これは、広大な泥干潟を含む佐賀県沿岸部の沖合に位置し、これらの浅海域では常に高濃度な濁水がみられ、これらが下げ潮になると観測点がある沖合まで移流するため、観測点でのSS濃度が増大するためである。干潮時のSS濃度の増大以外にも、もうひとつの上昇パターンがみられ、これらについては図-5中にその濃度上昇期間を破線で示している。これらは干潮時の濃度増大時に比べ、その上昇が極めて短時間のうちに生じており、潮汐変動との対応をみると満潮を過ぎて下げ潮に転じた直後、下げ潮の流れ（南東方向の流れ）が加速していく時間帯に、濃度の増大が生じていることがわかる。すなわち、干潮時の移流によるSS濃度の増大とことなり、この場合には急激な流速の上昇に伴う観測点

付近での巻き上げの影響によるSS濃度の上昇を示唆するものである。下げ潮時にのみこのような巻き上げ現象がみられる理由としては、干潮から上げ潮に転じる際には、干潮時にみられる移流の影響によるSS濃度の上昇が顕著であるため、仮に上げ潮流の増大に伴う巻き上げが生じたとしても、巻き上げによるSS濃度の増大がデータとして捉えにくい状況にあるものと考えられる。一方、超音波式ドップラー流速計（ADV）観測データから算定したSSフラックスと乱れ強度の時間変化も同図に示してあり、これによると下げ潮時の強い流れが発生する際の乱れの増大に伴う懸濁物の鉛直輸送量（巻き上げ量）の増大が明瞭にみられる結果となった。



図－５ 観測点で測定された **a**: 潮位、**b**: 流速（底面上15cm）、**c**: 懸濁物濃度（底面上20cm）および **d**: ADV計測から算定されたSSフラックスと **e**: 乱れ強度

## （２）巻き上げ時における化学物質フラックスの定量化

上記の連続観測期間中、2008年2月20日から21日の大潮期に図－2の観測点において現地観測を実施した。酸素消費フラックス測定に際しては、流況連続観測と同様に超音波式ドップラー流速計（ADV）（Vector、 Nortek）を用いて流速を測定した。一方、酸素微小電極（OX-10、 Unisense）を電流計（PA-2000、 Unisense）に接続し、電極から発する微弱電流を増幅することにより酸素濃度を測定した。電極先端径は10  $\mu\text{m}$ である。この酸素濃度測定システムの応答速度を事前に室内実験で調べたところ、0.2–0.3 sであった。ADVと酸素微小電極は頑強な架台に取り付け（図－6）、センサー上流部に位置する測定底面と架台の足が重複しないよう、潮汐による主流軸を考慮して設置した。また、計測器設置による自動計測以外には、2月21日の7時30分ごろ（上げ最強時）、10時00分ごろ（満潮時）、13時00分ごろ（下げ最強時）、そして16時00分ごろ（干潮時）の計4回、底面+20 cm付近の海水を採取し、懸濁物質中の有機物含有量（mg TOC/ mg SSC）を測定した。物質フラックス（輸送量）の算出手順について、図－7にまとめた。堆積物表面のごく近傍に存在する濃度境界層の上部においては、分子拡散による物質輸送が無視できるため、溶存物質の鉛直フラックスは物質濃度Cおよび鉛直流速wそれぞれの変動成分の積を時間平均することにより求められる。

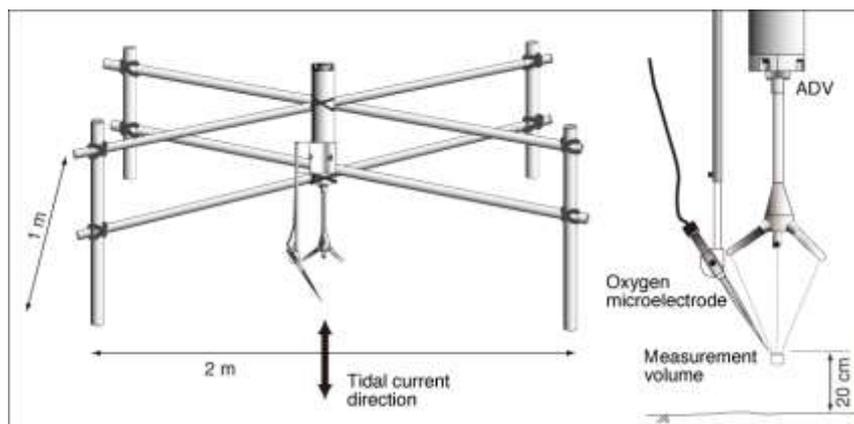


図-6 海底境界面における酸素消費フラックスの現場実測システム（渦相関法）

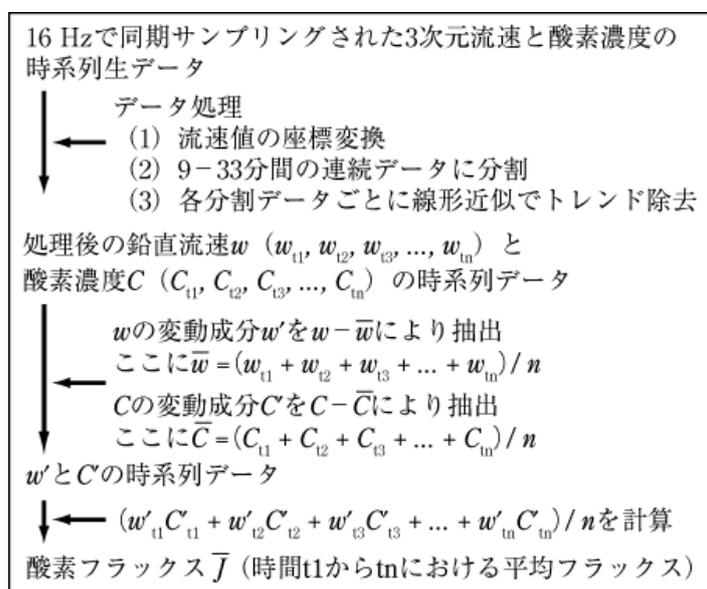


図-7 渦相関法によるフラックス算出手順

底面+20 cmの水平流速・酸素濃度・懸濁物質濃度の時系列（図-8）をみると、懸濁物質濃度と水平流速との間には明瞭な関係性がみられていない。一方、懸濁物質濃度は干潮時に酸素濃度とともに上昇し満潮時に低下している。これは、有明海湾奥の干潟・浅場域に存在する高濁度かつ高酸素濃度の水塊が潮流により岸沖方向に移動していることによると考えられる。したがって、観測時における懸濁物質濃度の変動は、観測地点近傍における堆積物の再懸濁過程よりも高濁度水塊の移流過程に強く支配されていたと予想される。なお、酸素消費フラックスの結果が断続的になっているのは、浮遊物（ノリなど）の電極への接触によると思われる異常値検出が生じる場合があったためである。

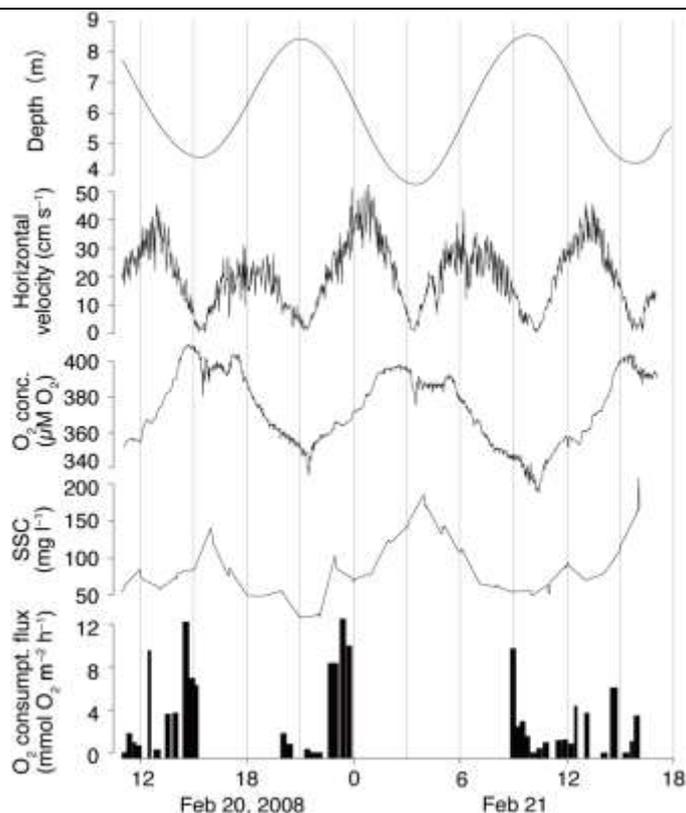


図-8 水深、底面+20 cmの水平流速・酸素濃度・懸濁物質濃度（SSC）、および酸素消費フラックス。

### (3) 現地底泥および海底流動水槽を用いた巻き上げ実験

河口沿岸部では潮汐流のみならず、波浪の影響による堆積物の移動現象が重要である。しかし、気象擾乱時等の現地データの取得は必ずしも容易ではないことから、高波浪条件下での底泥の巻き上げ（再懸濁）現象解明に向けて、現象を再現可能な実験手法について検討した。ここで用いた水槽は、港湾空港技術研究所の海底流動実験水槽（図-9）であり、本水槽では環流装置および造波装置のコンピュータ制御により、実海域で生じる潮流や波浪による海底付近での海水の動きを再現することができる。また、現地で採取された大規模未攪乱底泥試料を水槽内に敷設することにより、現地泥の波や流れによる巻き上げ現象を再現することが可能である。また、侵食後の懸濁粒子の挙動に影響を及ぼすフロック形成（微細粒子の結合による、より大きな粒子の形成）には海水の塩分が関係することから、本水槽では研究所に隣接する久里浜湾から汲み上げた海水による実験ができるようになっている。外力条件として、ここでは高波浪発達時における海底での海水の動き（振動流）を想定し、それに伴う堆積物（底泥）の巻き上げ現象について検討した。また、巻き上げに伴う水質の変化を把握するため、現地観測と同様に溶存酸素濃度の測定も同時に行った。

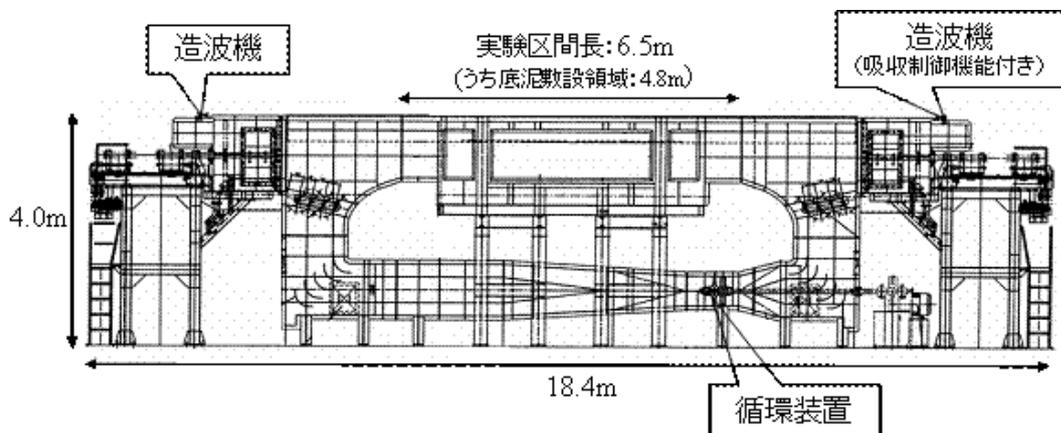


図-9 海底流動実験水槽（港湾空港技術研究所）

内湾域沿岸部で生じる高波浪時の海底面での海水の動きを想定した、振動流の作用下における底泥の巻き上げ実験の結果を図-10に示す。同図は底面直上（底面上5cm）におけるSS濃度の変化と、溶存酸素濃度の変化をそれぞれ示している。振動流による外力を作用させた直後より、底泥の巻き上げが生じ、SS濃度の顕著な増大が発生していることがわかる。ただし、作用外力の程度に応じて、泥の侵食量は決まるため、同じ強さの振動流の作用条件においては、初期にSS濃度が急激に上昇後は、ほぼ一定値にて推移している。一方、溶存酸素濃度の変化についてみると、底泥の巻き上げが発生した直後に減少がみられ、巻き上げに伴う酸素消費が増大していたことが示唆された。ただしその後は溶存酸素濃度が上昇しており、これは水面からの気泡等の混入に伴う曝気効果の影響と考えられる。

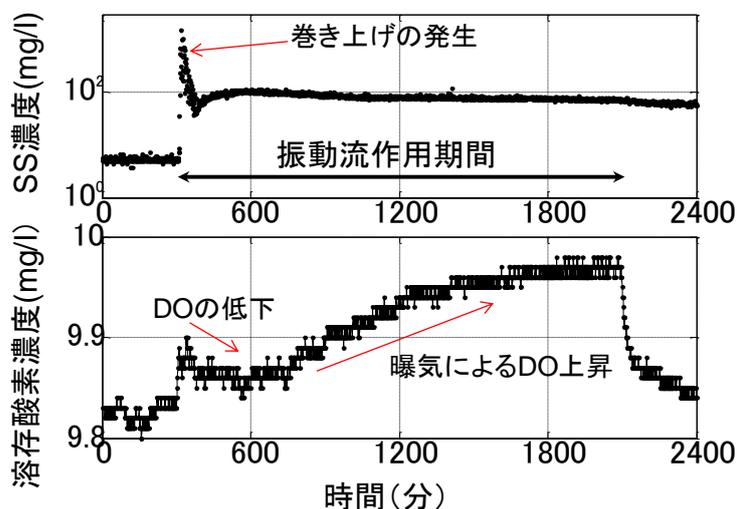


図-10 振動流実験（周期8秒の場合）における底泥直上でのSS濃度および溶存酸素濃度の変化

#### 4. 考察

##### (1) 沿岸波浪および潮汐流作用下における侵食と再懸濁機構の把握

有明海で取得した現地データから、流れの増大と共に生じる堆積物の巻き上げとの関係について、SS濃度の上昇と流れによる底面せん断応力の関係を求めたところ、図-11に示すように、おおよそ0.01Paを超えるあたりから、SS濃度が増大することがわかった。このように巻き上げ限界の外力条件の定量的な評価は、数値シミュレーションなどの底泥移動予測における海底での境界条件に関するモデルパラメータの設定に必要である。また、外力の評価手法として、平均流に基づくせん断応力の算定に加えて、乱れ強度を考慮した場合の比較も行った。その結果、両者の間にはおおむね線形関係（図-12）横軸は対数表示）がみられるものの、同じ平均流速であっても乱れ強度には最大2倍程度の差が生じる場合がある。すなわち、巻き上げに作用する外力としては、必ずしも平均流に基づく外力の評価だけでは十分ではないことを示唆しており、波浪の影響や乱流特性も詳細に検討を進める必要が示された。

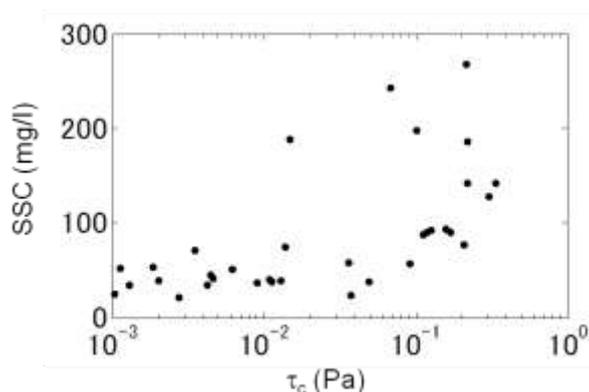


図-11 平均流を基にした底面せん断応力(τc)とSS濃度の関係

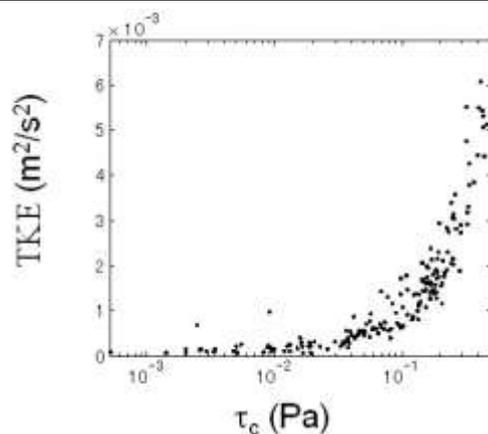


図-1 2 平均流速を基にした底面せん断応力 ( $\tau_c$ ) と乱れ強度 (TKE) との関係

## (2) 卷上げ時における化学物質フラックスの定量化

一般化線形モデルによる統計解析から得られた酸素消費フラックスの説明変数の選択率は、水平流速 (46.8%)、潮汐 (38.9%)、懸濁物質濃度 (26.2%)、水平流速と潮汐との交互作用項 (25.2%)、懸濁物質濃度と潮汐との交互作用項 (0%) の順であり、どの変数もそれほど高くなかった。酸素消費フラックスは上げ潮時において水平流速と統計的に有意な相関 ( $P < 0.05$ ) を示し、水平流速が上昇すると酸素消費フラックスも上昇している (図-1 3)。しかし、下げ潮時には、水平流速と酸素消費フラックスとの間に有意な相関はみられていない。また、酸素消費フラックスと懸濁物質濃度との間には、潮汐にかかわらず有意な相関がみられていない。

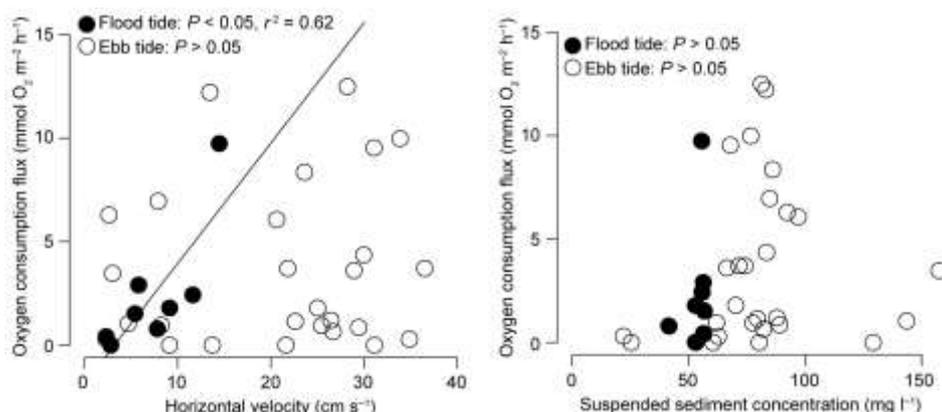


図-1 3 酸素消費フラックスと水平流速との関係 (左図) ならびに酸素消費フラックスと懸濁物質濃度との関係 (右図)。○は下げ潮時、●は上げ潮時

一方、乱れエネルギーと巻き上げフラックスとの間には有意な関係性がみられ、乱れエネルギーが増大にするにつれて巻き上げフラックスも増大している (図-1 4 左)。さらに、巻き上げフラックスと酸素フラックスとの間にも有意な関係性がみられ、巻き上げフラックスが増大にするにつれて酸素フラックスも増大している (図-1 4 右)。

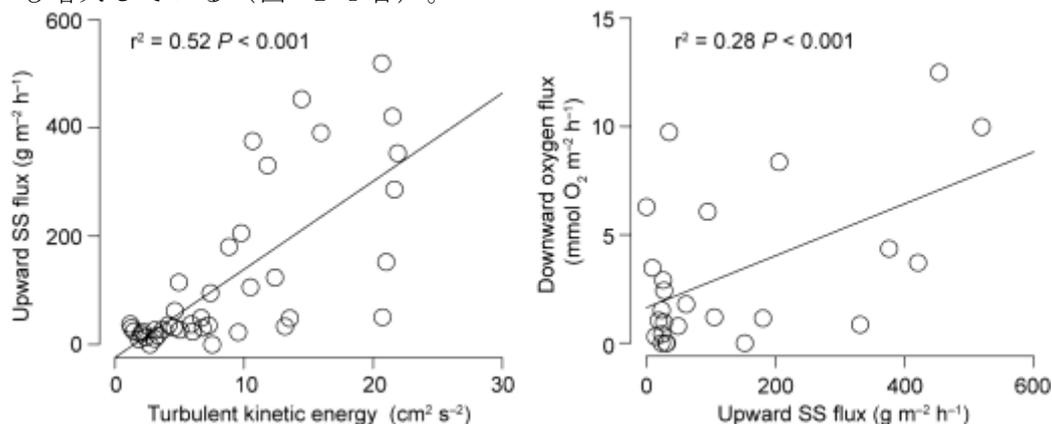


図-1 4 乱れエネルギーと巻き上げフラックスとの関係 (左図) ならびに巻き上げフラックスと酸素フラックスとの関係 (右図)。

これらの結果から推定されるメカニズムは以下のとおりである。(1) 酸素フラックスの増大には巻き上げフラックスの増大が大きく寄与している。(2) 巻き上げを伴わない場合には、単に底面における乱れが強くなることに起因する酸素フラックスを増大させるような諸過程の効果は覆い隠されてしまう。(3) しかしながら、巻き上げフラックスの増大に伴う酸素フラックスの増大は、再懸濁物質自身による酸素消費よっては説明できないことから、巻き上げに伴う底面の侵食により、間隙水が直上水中へ放出するによって、間隙水中に含まれていた還元物質が酸素を消費するというプロセスが重要である。以上のメカニズムを図示すると、図-15のようになる。

今後の検討課題としては、再懸濁物質フラックスを説明する乱れエネルギー以外の要因(例えば、再懸濁現象の履歴効果)や、酸素フラックスを説明する生物過程(例えば、数時間の時間スケールで起きる底生生物活性の変動の影響)があげられる。

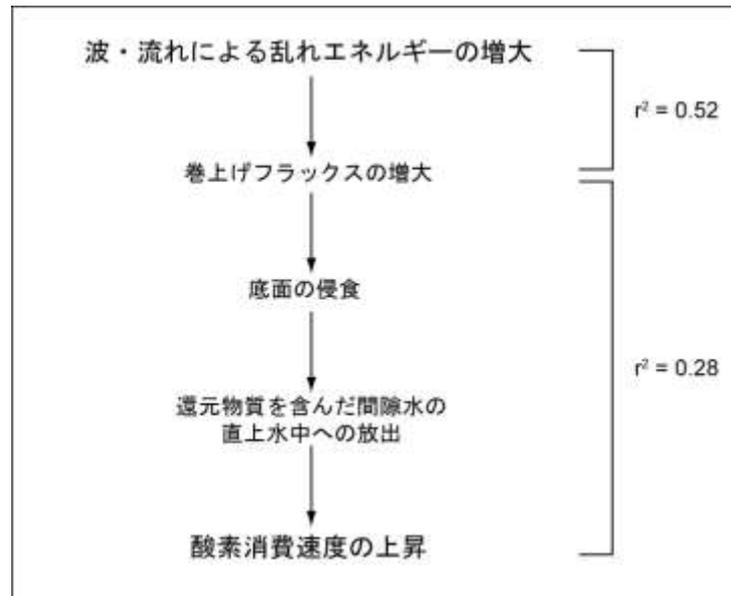


図-15 本研究で推定された酸素フラックスの変動メカニズム。 $r^2$ は決定係数(統計的にその現象を説明する確率)

### (3) 現地底泥を用いた巻き上げ試験方法の確立

波浪の作用を想定した底泥の巻き上げに関する水槽実験の結果によると、振動流作用直後に底泥の巻き上げが生じSS濃度の急激な上昇が生じている。その後は、SS濃度は一端下降してから、振動流外力が作用する間もほぼ一定のSS濃度で推移し、振動流停止後に沈降の影響により緩やかに濃度は減少していく。これは、作用する外力が一定の条件であったのに対し、それよりも小さな外力条件で侵食が生じる深さまでの底泥が巻き上げられたためであり、底泥の深さ方向に侵食強度が増していく現地底泥の堆積特性を反映した、底泥の巻き上げ現象が再現されていることを意味する。一方、巻き上げ時の水質変化の再現については、巻き上げ直後の懸濁物による酸素消費は再現されているものの、水槽上部水面からの曝気の影響と思われる酸素濃度の上昇がみられており、このような水槽実験特有の現象を把握した上で、海底での水質変動現象の再現性を評価していくことが今後の検討課題の一つと考えられる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

水質環境の変動にも大きな影響を及ぼすと考えられる泥質堆積物の巻き上げ特性を解明するため、時空間的に高解像度な流速場の測定を中心とする現地観測を有明海において実施した。底面近傍における流況とSS濃度の対応関係について観測データの詳細な検討の結果、流れが卓越する潮汐条件において底泥の巻き上げが生じていることが確認された。このときの外力条件として、平均流に基づく底面せん断力との対比により、巻き上げが生じ始める外力条件が定量的に評価された。さらに、平均流以外の波浪等の乱れ成分を考慮した外力評価が重要となることも、観測データの解析を通じて示された。また、渦相関法を適用した海底境界面における酸素消費フラックスの連続観測からは、酸素消費フラックスが海底境界面における流動に応じて数十分～数時間という時間スケールで大きく変動する動態が現場で実測された。また、渦相関法によって測定されたフラックスは、既報値を大きく上回るものであった。一方、現地底泥を用いた水槽実験により、波浪外力を想定した巻き上げ現象の再現を試みたところ、現地泥の堆積特性を反映させた巻き上げ現象の再現に成功し、河口沿岸域での底泥の輸送を支配する海底付近での現象解明に向けた実験手法の確立が可能となった。波浪外力により形

成される底面付近の高濃度な懸濁層が底泥の輸送に大きな影響を与えていることが、河口沿岸域での観測事例からも明らかとなりつつある。本研究で確立した実験方法を活用し、波浪外力と底泥侵食量の関係を定量化していくことは、このような河口沿岸域での底泥輸送とそれに基づく水質変化に関する予測シミュレーションの構築に際して、底面での境界条件を定めるモデル・パラメータの設定において重要な基礎情報の蓄積に貢献するものとなる。

## (2) 地球環境政策への貢献

陸域と外洋との接点となる河口内湾域での物質移動は、陸域から供給される環境負荷物質の地球規模的な拡散など、広域的な海洋環境動態を把握する上での境界条件として、極めて重要な位置づけにある。本研究ではそのような河口内湾域での堆積物の再移動現象のうち、特に水質環境の変動にも影響を及ぼし、また大陸性の大河川の河口部で多くみられる泥質堆積物の移動を対象として、その移動限界について定量的な評価手法の検討を行いその有効性を示した。したがって本研究の調査手法は、特に海外の河口内湾域において有用なものであり、各海域での将来的な環境変動予測における数値シミュレーション等の構築において、堆積物の移動に関する底面での境界条件の設定等に活用できる。また、堆積物の巻き上げ現象が水質環境に及ぼす影響を定量化するために用いた渦相関法によると、世界の内湾で頻発する貧酸素水塊の消長メカニズムや、貧酸素化にともなう硫化水素などの有害化学物質の溶出のメカニズムを解明するうえで基礎となる現地観測データを、精確かつ高時間解像度で取得することが可能である。このように、本研究の測定手法は、海底境界面における酸素フラックスが浅海域の水質変動や生態系に与える影響の解明や予測に大きく寄与し得るものである。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：中川康之

1968年生まれ、東京工業大学大学院理工学研究科修了、工学修士、現在港湾空港技術研究所 海洋・水工部 沿岸環境研究領域 主任研究官

主要参画研究者

(1) : 中川康之 (同上)

(2) : 桑江朝比呂

1970年生まれ、京都大学大学院農学研究科修了、博士(農学)、現在港湾空港技術研究所 海洋・水工部 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究チーム・リーダー

## 7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

(1) 査読付き論文

1) 桑江朝比呂、中川康之、三好英一：海岸工学論文集、第55巻、pp.1001-1005(2008)、土木学会  
“海底境界面における酸素消費速度－渦相関法による現地連続観測－”

2) Y.Nakagawa and T. Kuwae : Proc. of International conference on Physics of Estuarine and Coastal Seas (PECS08), pp.107-111(2008), “Field observation of fine sediment transport processes and oxygen fluxes in estuarine bottom boundary layer”