

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

(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

海洋・水工部

中川康之

平成19～20年度 合計予算額 13,354千円

(うち、平成20年度予算額 6,489千円)

※上記の合計予算額には、間接経費1,781千円を含む

〔要旨〕本研究では、有明海湾奥部にて現地観測を実施し、泥質堆積物直上における流速と懸濁物濃度の詳細測定を行い、潮流や波浪等の外力に対する海底泥の移動に関する応答特性について検討した。現地観測では、底面付近における詳細な流速場の把握が可能な超音波式流速計等を導入し、底面付近濁度との同時観測により、堆積物の移動（巻き上げ）に関与する底面せん断応力および巻き上げられた懸濁物の輸送量（フラックス）の評価を行い、潮汐流による乱れの増大とそれに伴う巻き上げフラックスが増大する関係を定量化した。一方、海洋に面した河口沿岸部における底泥の輸送においては、外洋から入射してくる波浪の作用が重要であるものの、その影響に関する定量的な評価は必ずしも充分ではない。そこで本調査においては、現地底泥を敷設した大型の実験水槽を用いて、気象擾乱時の高波浪を想定した外力作用下での底泥の巻き上げ現象の再現を試み、波浪作用に伴う再懸濁時の物質動態測定手法の検討も行った。本実験では、現地底泥特有の鉛直方向に侵食強度が異なる堆積環境を反映した底泥の巻き上げ現象を再現し、外力に対する侵食速度に加え溶存酸素等の水質の変化も捉えることが可能であることを確認した。これにより、実海域での環境変動に大きな影響を与えるものの、現地観測での実態解明が困難な高波浪時における海底での物質移動特性について、その動態を定量的に評価可能な実験手法を確立した。

〔キーワード〕 海底境界層、潮汐流、波浪、底面せん断応力、底泥の巻き上げ

1. はじめに

河口内湾域においては、河川からの流下土砂などによる堆積物の供給がある一方で、波浪や潮汐など多様な外力の影響による底質の再移動が生じている。特にシルトや粘土の微細粒子（底泥）の移動は、地形変化の予測に有用なだけでなく栄養塩類をはじめとする化学物質の移動にも密接に関係するため、水域環境の動態を把握する上でも重要な課題であり、国内外でも内湾浅海域を対象として底泥の巻き上げに関する観測例がいくつか見られ、底泥の巻き上げが波浪外力により生じるもの¹⁾²⁾³⁾⁴⁾や、潮汐流の作用だけでも顕著な底泥の巻き上げが生じる場合など⁵⁾、海域の外力特性に応じた堆積物の移動が確認されている。さらには、内湾域のみならず陸棚域においてもハリケーン通過時の高波浪等の影響により、堆積物の再移動が生じることも観測されている⁶⁾。こ

のように、陸棚域も含めた沿岸域での海底堆積物の挙動は極めてダイナミックな様相を呈しており、陸域から供給される環境負荷物質の海域での挙動を把握するためにも、海底堆積物の巻き上げ現象の解明が重要である。一方、これら堆積物の移動過程を解明するためには、海底境界に作用する流体力の特性を適切に把握する必要がある。このような外力の評価に際しては、時間的に高解像度な流れの測定が可能な超音波式ドップラー流速計(ADV)が導入されるようになり⁷⁾、流れの乱れ成分の測定結果に基づく底面せん断応力の評価⁸⁾⁹⁾や、さらにはADVの超音波反射強度から懸濁物濃度の推定を試みた例¹⁰⁾¹¹⁾など、底面境界における外力評価と堆積物の巻き上げの関係に関する詳細な検討が可能となりつつある。

2. 研究目的

潮流や波浪等の外力の作用による底泥の巻き上げに際しては、(1)堆積泥の侵食、およびそれに伴う(2)懸濁層の形成、が生じる。泥の湿潤密度や間隙水中の化学物質の濃度は鉛直方向に変化するため、堆積物の侵食に伴う深部の底泥の露出は、たとえば、より還元性が強く高濃度の有害化学物質を含んだ堆積物が直上水と接触することを意味し、酸素消費速度および化学物質の溶出速度が増大すると考えられる。また、再懸濁した個々の粒子表面においても同様に、海水と直接接触することによる酸素消費および化学物質の劇的な溶出促進が起きると考えられ、静穏時における物質移動機構とは状況がかなり異なったものと予想される。そこで本研究では、このような水質環境の変動に大きな影響を及ぼす堆積物の移動現象に注目し、堆積物に作用する潮流等の外力特性とそれによる底泥の移動の実態を明らかにするための、評価方法の確立を目的とする。このため、海底境界における懸濁物の輸送機構を定量的に評価するための観測システムを導入し、有明海をケーススタディとした現地観測ならびに水槽実験による検討を行った。

3. 研究方法

(1) 現地観測

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1-1)において、各種計測器を船上からダイバー作業(図1-2)により、図1-3に示すように海底設置させて連続観測を行った。なお、テーマ(2)における酸素消費フラックスの測定実験も同一地点にて観測を行っている。本観測における、使用機器の内容と測定方法を表1-1に示す。

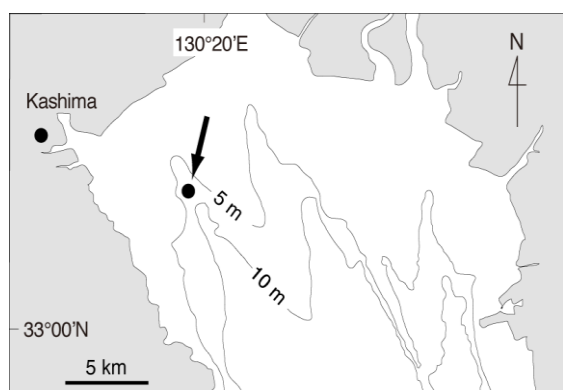


図1-1 観測地点(鹿島タワー横)



図1-2 観測地点での計測器設置の様子

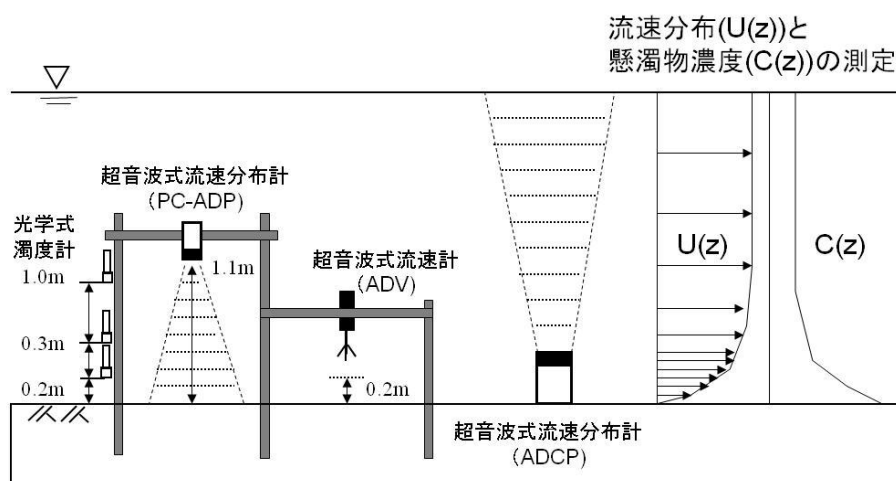


図1-3 海底付近の流速と懸濁物濃度の詳細測定のための計測器の設置概要図

表1-1 使用計測機器と測定内容

測定項目	使用機器	測定高さ	測定記録間隔
流速	ADV (Nortek社製Vector)	0.2m	1時間ごとに、約4分間16Hzで記録
	PC-ADP (底面境界用プロファイラ、Sontek社製PC-ADP)	0.05～1.1m (約10cm間隔)	1時間ごとに、約10分間1Hzで記録
	ADCP (全水深用プロファイラ：RD-Instrument社製ADCP1200kHz)	1.35m～水面下0.3m (50cm間隔)	10分ごとに、2分間(1Hz)の平均値を記録
濁度	メモリー式濁度計(アレック社製COMPACT-CLW)	0.2m／0.5m／1.0m／水面下1.0m	1時間ごとに、5分間1Hzで記録
水温 塩分 DO	メモリー式小型水質計(アレック社製COMPACT-CT,DOW)	0.2m／1.0m 水面下1.0m	10分ごとに、1データを記録
粒度	現地式粒度分布計(Sequoia社製LISST100)	0.2m	1時間ごとに、10分間1Hzで記録

(2) 水槽実験

外洋に面した河口部での堆積物の移動現象において波浪外力が重要である¹²⁾ものの、高波浪の作用する条件下での再懸濁現象の実態は明らかではない。そこで、気象擾乱等による高波浪条件下での底泥の巻き上げ(再懸濁)現象を解明するため、現地底泥の堆積状態や海水の流動条件など、できるだけ現地に近い条件で現象を再現させる実験手法の確立に向けた検討を行った。ここで用いた実験水槽(港湾空港技術研究所・海底流動実験水槽)の概要を図1-4および1-5に示す。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。

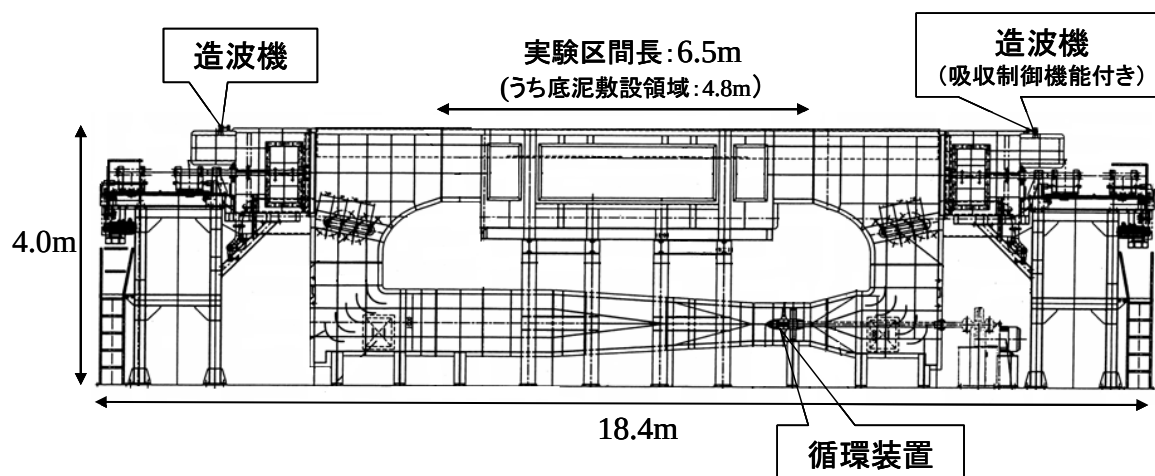


図 1 - 4 海底流動実験水槽（港湾空港技術研究所）

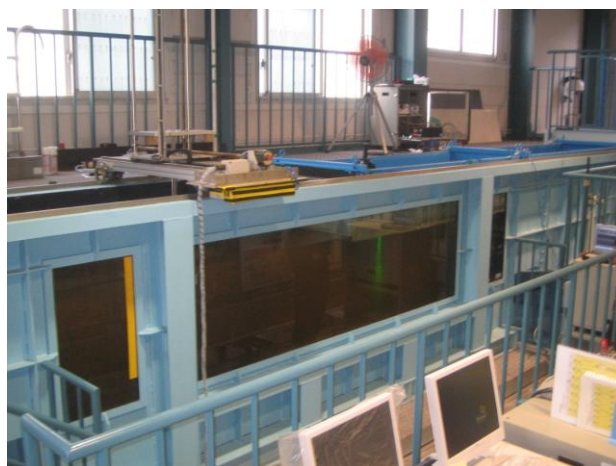


図 1 - 5 海底流動実験水槽観測部

今回の実験に用いた底泥は2009年1月19～20日にかけて、定点連続観測を行った有明海の現地調査地点（図 1 - 1）にて採取した。採泥には幅40cm・深さ30cm・長さ160cmを1ユニットとする専用の採泥容器を用い、ダイバー作業により水深約6mの海底から2ユニットの採泥試料を採取し（図 1 - 6）、フェリー（北九州港～東京有明）を利用したトラック輸送により、神奈川県横須賀市の研究所まで搬送し水槽内に敷設した（図 1 - 7）。同一地点より採取したコアサンプルによる底質分析の結果によると、深さ約40cmにわたって99%以上がシルト・粘土分で占められており、表層では含水比が300%を越える極めて流動性の高い軟泥であった。



図 1 - 6 採泥状況(中央が採泥容器)



図 1 - 7 実験水槽への現地泥敷設状況

現地観測と同様に再懸濁現象が生じる際の作用外力を評価するための底面近傍流速および流速の鉛直分布の測定と、それに伴う海水中の懸濁物濃度等の変化を把握するための各種計測器を水槽内に設置（図 1 - 8）した。実験に用いた主な計測器の内容を表 1 - 2 に示す。

表 1 - 2 実験に用いた主な計測器と計測内容

測定項目	使用機器	測定位置 (底面からの高さ)	測定記録間隔
流速	ADV (Nortek社製Vectorino)	2cm	16Hz
	PC-ADP (底面境界用プロファイラ, Sontek社製PC-ADP)	3 ～70cm(約3cm間隔)	1Hz
濁度	メモリー式濁度計 (アレック社製COMPACT-CLW)	2cm／10cm／40cm	1Hz
水温 塩分 DO	メモリー式小型水質計(アレック 社製COMPACT-CT,DOW)	2cm／40cm	1Hz

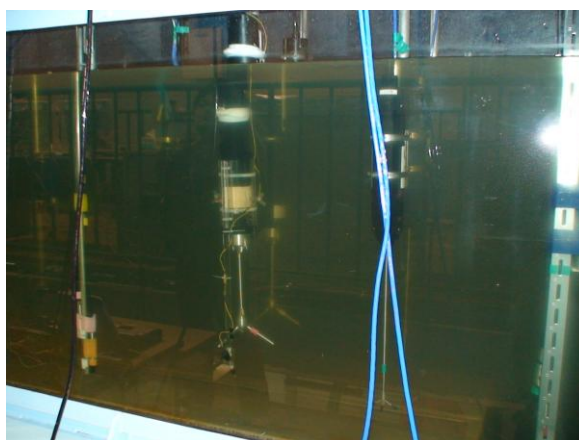


図 1 - 8 各種センサーの水槽内への設置状況

実験における外力条件として、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）の巻き上げ現象の把握と水質の変化について検討した。図1－9は、本実験装置で振動流を発生させた際の底面上2cmにおける流速波形を示したものである。ここでは、台風等の暴風時に湾内で発生しうる高波浪を想定した周期8秒のケース（同図(a)）と、外洋からのうねり性の波浪を想定した周期30秒のケース（同図(b)）について検討を行った。流速振幅については、周期8秒のケースで約50cm/s、周期30秒のケースで約10cm/sとした。

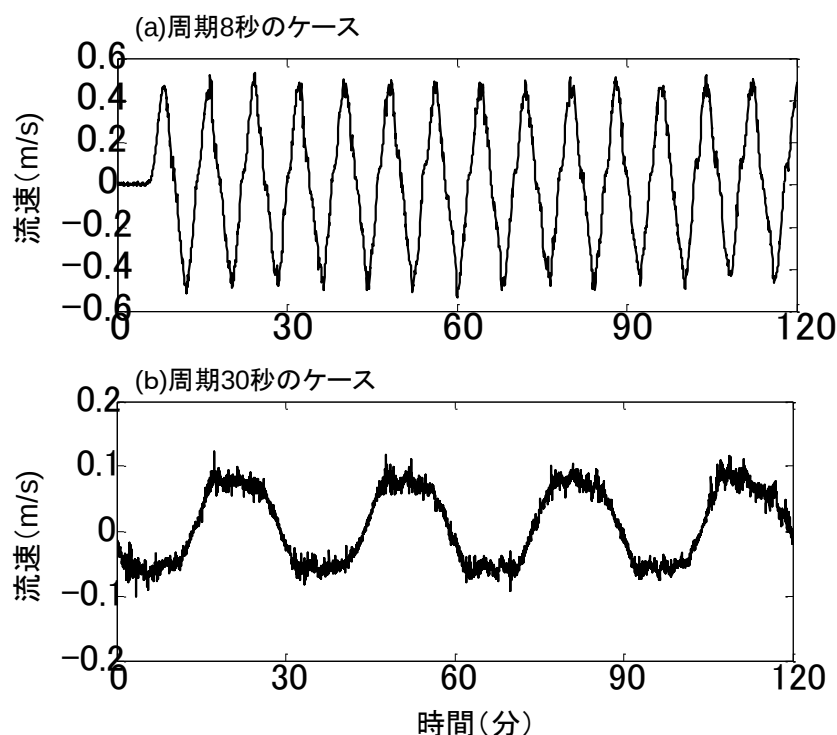


図1－9 実験に用いた振動流の流速変動

4. 結果・考察

(1) 潮汐変動に伴う底層濁度の変化

本調査により観測された潮位と海底付近における流速と浮遊懸濁物（SS）濃度の観測結果を図1－10に示す。観測期間の前半は小潮期のため、流速も最大で15cm/sであるのに対し、観測期間後半の大潮期には、潮位差の増大に伴って流速も最大で40cm/sにまで達している。さらに、底層付近の懸濁物濃度についても、小潮期にはほとんど変動がみられないのに対し、大潮期には200mg/l前後にまで濃度が増大することがわかる。

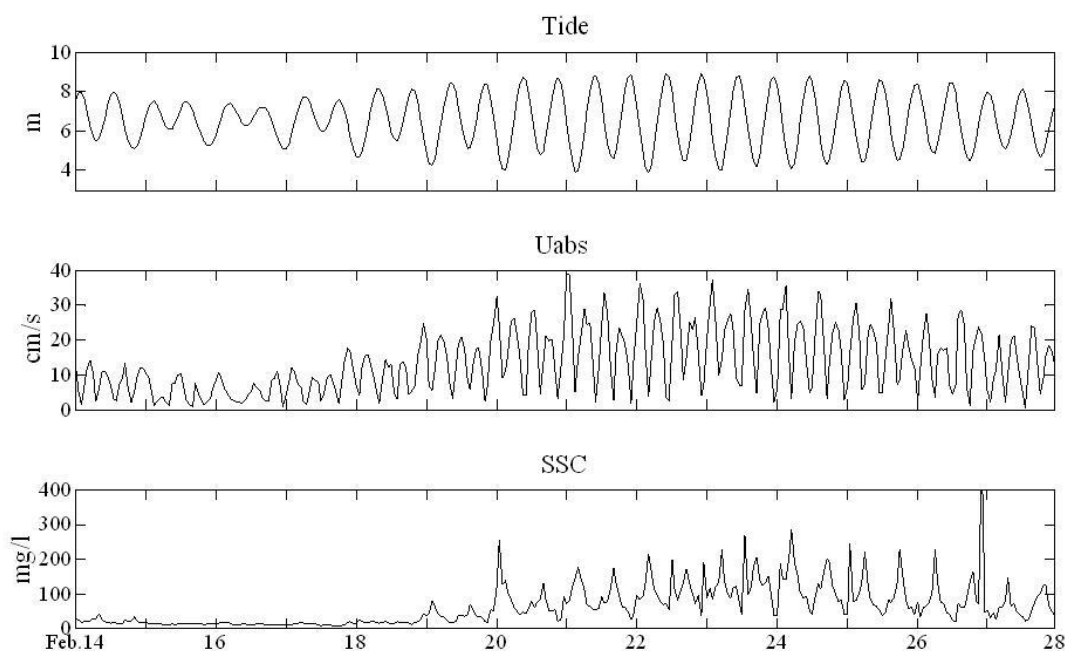


図 1 - 1 0 観測期間中における潮位、および底面上約20cmの流速とSS濃度

これら大潮期にみられるSS濃度の増大の要因について検討するため、大潮期間中のこれらの関係を拡大したものが図 1 - 1 1 である。潮汐変動とSS濃度の変動パターンの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⁵⁾。

一方、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 1 - 1 1 中にそのSS濃度上昇期を矢印で示している。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。

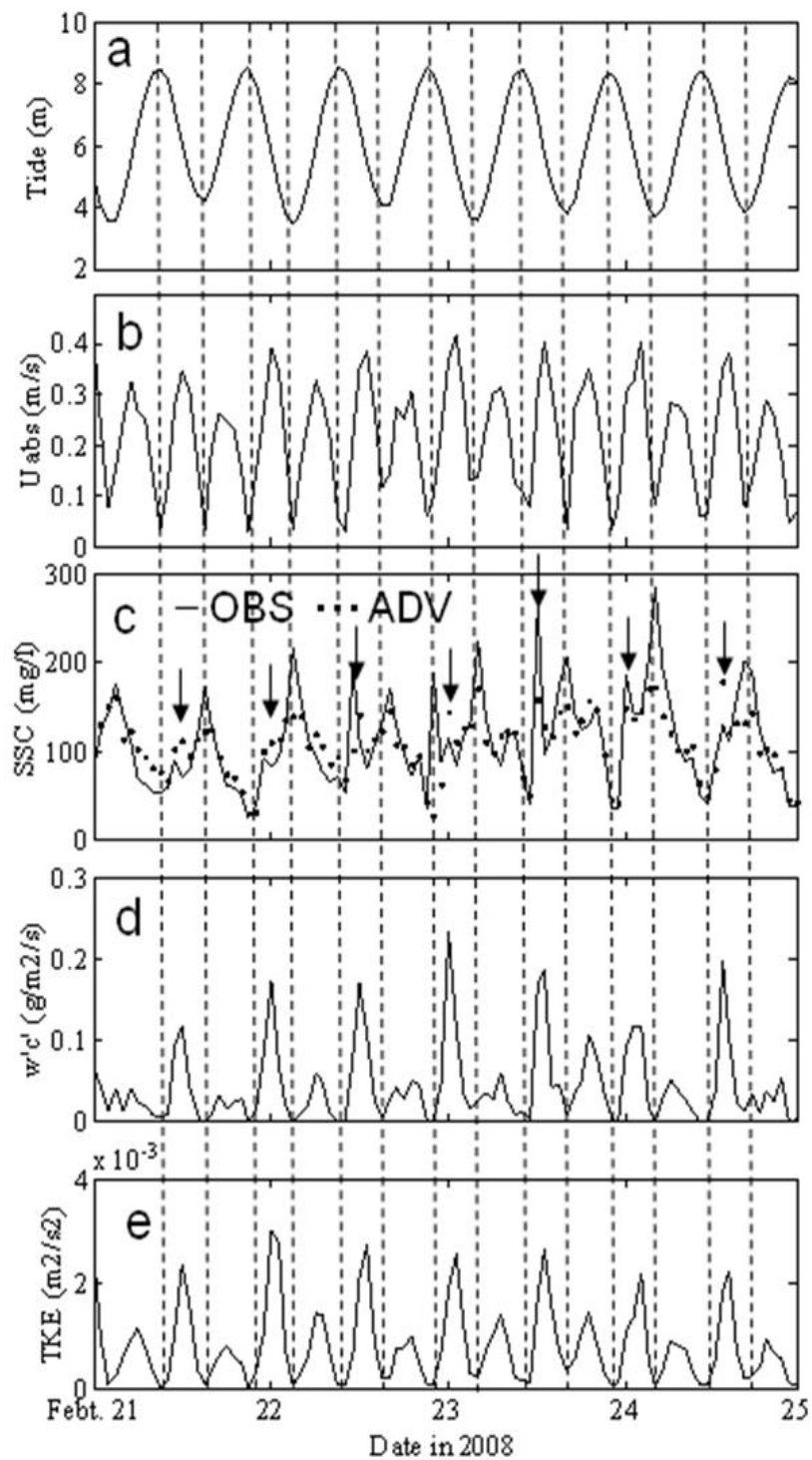


図 1 - 1 1 観測点で測定された**a**潮位、**b**流速、**c**SS濃度（底面上20cm）、**d**懸濁物鉛直フラックスおよび**e**乱流運動エネルギー

（２）現地データに基づく底泥の巻き上げ外力条件の評価

本研究では、下げ潮に転流した直後にみられた、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考察を加えた。図 1 - 1 1 に破線で示したSS濃度の上昇期に関して、次式で示さ

れる底面せん断応力（ τ_c ）とSS濃度の関係を示したものが図1-12である。

$$\tau_c = C_f U^2 \quad \dots (1)$$

ここに、 C_f ：抵抗係数および U ：平均流速である¹³⁾。ここでは抵抗係数を0.0026とし、流速については図1-11に示した海底付近の流速を準用している。これによると、おおよそ0.01Paを超えるあたりから、SS濃度が増大する場合がみられることがわかる。SS濃度にばらつきが見られる要因としては、ここでは平均流速による底面せん断応力を評価しているが、実際には波浪による振動流成分の影響なども底泥の巻き上げには関与しているものと考えられる。たとえば、図1-13は本調査におけるADV測定の結果を用いて、平均流で評価した底面せん断応力と乱れ強度(TEK)を次式により求め、これらを直接比較した結果である。

$$TKE = \frac{1}{2} \overline{(u'^2 + v'^2 + w'^2)} \quad \dots (2)$$

ここに u', v', w' は流速の乱れ成分を表す。両者の間にはおおむね線形関係（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、波浪の影響や他の乱流特性も詳細に検討を進める必要が示された。

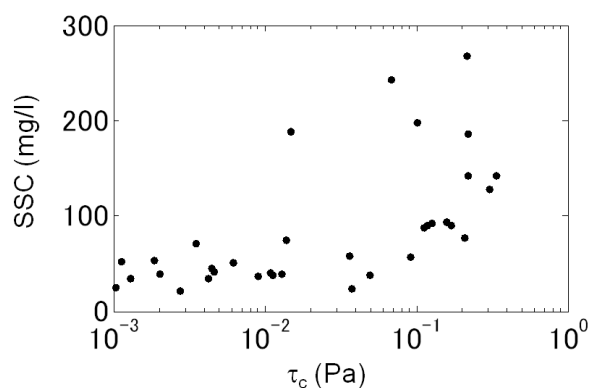


図1-12 平均流を基にした底面せん断応力とSS濃度の関係

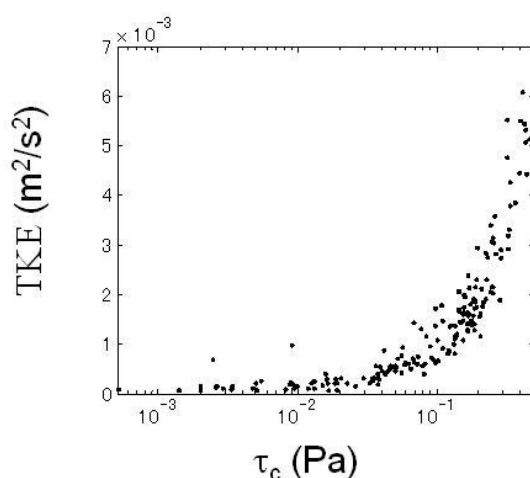


図1-13 平均流速を基にした底面せん断応力と乱れ強度との関係

（３）現地観測に基づく巻き上げフラックスの定量化と乱れの関係

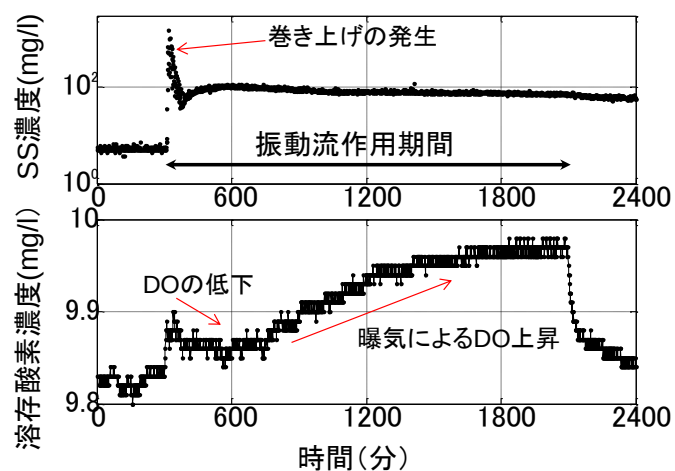
ADV計測における超音波の反射強度の測定結果から浮遊懸濁物濃度を推定し、海底から巻き上げられた浮遊懸濁物の鉛直輸送における巻き上げフラックス（乱流フラックス）を算定した結果が図 1-11d である。一方、上述の式（２）により算定される乱れ強度の時間変動も図 1-11e に示してある。これらをみると、懸濁物濃度の２次的なピークがみられる下げ潮時に、巻き上げフラックスの明瞭なピークがみられ、これらは乱れエネルギーのピークにも対応しており、海底近傍での乱れによる底泥の巻き上げの発生を示唆する結果が示された。なお、このような乱れの増大は下げ潮時に顕著であり、本調査を実施した海域では下げ潮時の方が上げ潮時に比べて潮流速が速く、潮汐の非対称性がみられた。

（４）振動流実験による底泥の巻き上げ現象の再現

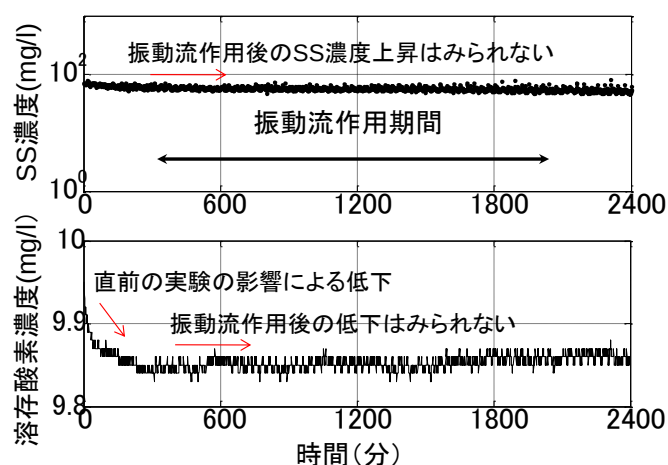
波浪の作用を想定した底泥の巻き上げに関する水槽実験の結果について、台風のような比較的大きな擾乱時に発生する風波条件に相当する周期8秒のケースと外洋からのうねりを想定した周期30秒のケースにおける、底泥直上での懸濁物濃度および溶存酸素の時系列変化の測定結果を図 1-14 に示す。周期8秒のケースでは、流速振幅が大きいことから振動流作用直後に巻き上げが生じSS濃度が急激に上昇していることがわかる。一方、周期は長いものの流速振幅が比較的小さい周期30秒のケースにおいては、底泥の巻き上げはほとんど生じておらず、SS濃度は上昇していない。顕著な巻き上げが生じた周期8秒のケースにおいて、初期の急激なSS濃度の上昇が巻き上げにより生じた後、SS濃度は一端下降した後はほぼ一定の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結果となっている。これは、底泥の侵食強度が深さ方向に増していくのに対し、作用する外力は一定の条件であったため、比較的小さい表層の底泥が巻き上げられた後は侵食が進行しなかったためであり、現地の底泥の堆積特性を反映した再現実験が可能となったことを意味する。

これまで一様な流れ場を対象とした底泥の巻き上げ試験は数多くの検討がなされてきたものの波浪外力を想定した例は少なく、ま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¹¹⁾ことをふまえると、本研究で確立した実験方法を活用し実験データを蓄積していくことは、河口沿岸域での物質輸送過程の解明において益々重要性が増して行くものと考えられる。

一方、巻き上げが生じた際の水中の溶存酸素濃度の変化も図 1-14 に示しており、SS濃度上昇と同時に溶存酸素の減少がみられ、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。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。



(a) 周期8秒のケース



(a) 周期30秒のケース

図 1-14 振動流実験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

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。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。

(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。また、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検討を行った。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に活用できる。

6. 引用文献

- 1) 瀬口昌洋・渡辺潔・加藤治 (1989) : 有明海奥部浅海域における底層の流れと濁りについて, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 819-823.
- 2) Sanford L.P. (1994): Wave-forced resuspension of upper Chesapeake Bay mud, *Estuaries*, Vol.17, No.1B, pp.148-165.
- 3) 中川康之 (2002) : 東京湾奥部での底泥の巻き上げとその粒度分布特性について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1046-1050.
- 4) 中川康之・有路隆一・松坂省一・諸星一信・八木宏・灘岡和夫・田中晋 (2008) : 東京湾多摩川河口沖における底泥の巻き上げに関する現地観測, 海岸工学論文集, 第56巻, 印刷中
- 5) 中川康之・今林章二・末次広児 (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, 第49巻, pp. 566-570.
- 6) Chang G.C. and Dickey T. D. (2001): Sediment resuspension over a continental shelf during Hurricanes Eduard and Hortense, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, C5, pp.9517-9531.
- 7) Precht E., Janssen F. and Huettel M. (2006): Near-bottom performance of the Acoustic Doppler Velocimeter(ADV) –a comparative study, *Aquatic Ecology*, Vol. 40, pp.481-492.
- 8) Kim, S. C., C. T. Friedrichs, J. P.-Y. Maa and L. D. Light (2000) : Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126, No.5, pp. 399-406.
- 9) Sherwood, C. R., Lacy, J. R. and Voulgaris, G.(2006): Shear velocity estimates on the inner shelf off Grays Harbor, Washington, USA. *Continental Shelf Research*, Vol.26, pp.1995-2018.
- 10) Fugate, D.C. and Friedrichs, C. T. (2002): Determination concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST, *Continental Shelf Research*, Vol.22, pp.1867-1886.
- 11) Maa, J.P.-Y. and Kwon, J. -I. (2007): Using ADV for cohesive sediment settling velocity measurements, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol.73, pp.351-354.
- 12) Traykovski, P., Wiberg, P.L. and Geyer, W.R. (2007): Observations and modeling of wave-supported sediment gravity flows on the Po prodelta and comparison to prior observations from the Eel shelf, *Continental Shelf Research*, Vol.27, pp.375-399.
- 13) Dyer, K. R. (1986): *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*, John Willy & Sons, 342p.

7. 国際共同研究等の状況

(1) 内湾域堆積泥の侵食特性の試験方法に関する研究情報の交換

カウンターパート氏名：Prof. L.P.Sanford

カウンターパート所属：米国メリーランド大学環境化学センター・ホーンポイント研究所

連携状況：国際会議会場等での交流の場を活用して、現地観測および実験に関する手法および結果の評価方法について、研究情報の交換を行った。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

＜論文（査読あり）＞

- 1) 桑江朝比呂・中川康之・三好英一：海岸工学論文集第55巻（2008）：pp.1001-1005
“海底境界面における酸素消費速度－渦相関法を用いた現地連続観測”
- 2) Y.Nakagawa and T. Kuwae：International conference on Physics of Estuarine and Coastal Seas (PECS08)(2008)：pp.107-111 “Field observation of fine sediment transport processes and oxygen fluxes in estuarine bottom boundary layer”

(2) 口頭発表（学会）

- 1) Y.Nakagawa and T. Kuwae：Ocean Science Meeting, Florida,USA, March2-7, 2008,“Field studies on fine sediment transport dynamics and oxygen fluxes near the bed”
- 2) 桑江朝比呂・中川康之・三好英一：2008年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集(2008)：p.163： “渦相関法を用いた有明海湾奥部海底境界面における酸素消費フラックスの観測”
- 3) 中川康之，桑江朝比呂：2008年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集(2008)：p.121：“底泥の巻き上げフラックスと乱れ強度との関係～有明海湾奥部での観測例～”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はなし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はなし

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 日本テレビ系ニュース番組における、有明海泥干潟での海難事故に関する報道にて、干潟底泥の特性に関するコメント提供のためTV出演（2008.3）
- 2) 海底流動実験水槽に関する新聞報道
神奈川新聞（2007.7.28）、港湾空港タイムス（2007.7.30）、港湾新聞（2007.7.31）

(6) その他

特に記載すべき事項はなし