

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1334 June 2017

新潟西港内での土砂堆積特性の解明に関する現地調査と水理実験

中川 康之
高嶋 紀子
篠澤 巧

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 現地調査の概要	4
2.1 調査項目	4
2.2 調査時期と河川流量	5
3. 地形・底質変化と出水時の懸濁物輸送	5
3.1 地形の変化	5
3.2 底質の変化	6
3.3 出水時の高濃度懸濁物輸送	7
4. 循環水槽を用いた土砂水理実験	9
4.1 実験方法	9
4.2 実験ケース	10
4.3 結果と考察	11
5. まとめ	13
6. おわりに	13
参考文献	14

Field measurement and flume experiment studies on sedimentation in river mouth port, a case study in the Port of Niigata

Yasuyuki NAKAGAWA*

Noriko TAKASHIMA**

Takumi SHINOZAWA***

Synopsis

The aim of the research is to elucidate suspended sediment transport and their deposition processes especially at river mouth or estuarine area. Field measurements were carried out in the port of Niigata to clarify characteristics on spatial and temporal variations of bottom sediment properties around navigation channel and turning basin in the river mouth port. The measurements includes acoustic sounding, in-situ mud density measurement with a tuning fork type densimeter and taking sediment core samples by Scuba-divers. The data shows that diversity of sediment properties such as mud content and water content according to river flood condition. The survey successfully captured also the formation of three layer structure during a river flood condition with the higher turbid fresh water in the upper layer and the lower turbid sea water in the middle layer. Further high concentrated mud or fluid mud layer was found in the lowest layer at the deeper dredged channel area. The hydraulic model experiments were also carried out with a circulating flume to elucidate the fluid mud transport on the steep slope modeling the edge of navigation channel. The experiments clarified the influence of the hydrodynamics conditions on fluid mud behavior and suspended sediment transport process at river mouth area.

Key Words: River mouth port, sediment discharge, fluid mud, dredging, pycnocline

* Director of coastal and estuarine environment department.

** Kyusyu Regional Development District Bureau (former researcher of coastal and estuarine sediment research group)

*** National Institute for Land and Infrastructure Management (former researcher of coastal and estuarine sediment research group)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5051 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:nakagawa@pari.go.jp

新潟西港内での土砂堆積特性の解明に関する

現地調査と水理実験

中川 康之*・高嶋 紀子**・篠澤 巧***

要 旨

河口港の埋没に関与する主要因とそのメカニズムの把握を目的として、新潟港西港地区（信濃川河口）における定期測量データの活用と、底質・水質調査等の現地観測の実施により、航路・泊地内での地形・底質の時空間変動の特徴や、河川出水時における高濁度水の港内への流入・堆積過程の実態について調べた。また、出水時に行った観測時にみられた港内での密度躍層や懸濁物濃度の空間分布の特徴を考慮して、浚渫域最上流部の水深急変部で生じたと想定される土砂輸送（fluid mud 移流）現象について、水槽実験による再現を試みた。

観測結果によると、港内上流側では出水履歴に対応して地形変化量および底質粒径の変動が大きくなり、底質組成に関しては含泥率（底質中のシルト分および粘土分の含有率）が10～90%の間で変化するのに対し、下流側の浚渫域では、水深の増大とともに含泥率と含水比が増大していくものの、記録的な大規模洪水の発生後には砂分の増大が確認された。一方、流入土砂の挙動の特徴として、出水時には航路水域内の上層では、低塩分・高浮遊懸濁物（SS）濃度、下層では高塩分・低SS濃度となる明瞭な塩分とSS濃度の界面が形成されることを確認した。さらに、浚渫域上流部においては、高塩分・低SS濃度層のさらに下層の海底面近傍に、湿潤密度が1,100～1,200kg/m³前後のいわゆるFluid mud層が30cm以上の厚さで形成されていることを明らかとした。

水槽実験では、浚渫域を模した水深急変部に流下した高濃度濁水の挙動実験を行い、水底斜面上のFluid mud移流（重力流としての斜面床直上の高濃度濁水の流下）の再現に成功した。また、流下する流れの流速（乱れ）の条件に応じて、上流側での濁水濃度の希釈効果によりFluid mud移流の発生に影響を及ぼすことを示した。

キーワード：河口港，流下土砂，Fluid mud，浚渫，密度界面

* 沿岸環境研究領域長 沿岸土砂管理研究グループ長併任

** 九州地方整備局博多港湾・空港整備事務所（前・沿岸土砂管理研究グループ研究官）

*** 国土交通省国土技術政策総合研究所（元・沿岸土砂管理研究グループ研究官）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5051 Fax：046-844-1274 e-mail:nakagawa@pari.go.jp

1. まえがき

河口港湾では、河川により陸域から供給される土砂の堆積が生じるため、航路・泊地の水深維持を目的とした定期的な浚渫が必要となる場合が多い。近年では、浚渫土砂の処分場の確保が困難であり、これまで以上に浚渫量の軽減を含めた効率的な航路・泊地の維持管理が要求される。効果的な埋没対策を講じるうえでは、出水時における河川からの土砂供給や港内での堆積過程など、港の埋没に関与する主要なプロセスを的確に把握しておくことが重要である。

河口域での土砂輸送に関連する様々な現象に関して、たとえば水理構造を支配する塩水くさびの挙動などは古くより研究対象とされ、金子（1965）による密度界面の挙動に関する水理実験や浜田（1967）による内部海面波の解析的研究がある。また、近年では塩分躍層の再現を精緻化した数値計算手法の改良も見られる（中村・石川，2010）。一方、河川流下土砂の定量化に関しては、河川ごとの土砂排出量について、限られた現場情報を駆使して流域ごとの土砂量の推算がなされつつある（武川・二瓶，2013，山崎・村上，2013）。また、河口域の密度成層場を考慮した河川供給土砂の挙動については、数値シミュレーションにより検討した例もいくつかみられる（たとえば、中田ら・1983，柳ら・1987）。しかしながら、河口港湾においては、浚渫により水深が急変するなど、人為的な地形変化に対応した密度成層の形成や流下懸濁物の挙動に関しては実態の把握が十分ではなく、河口港湾域における土砂堆積量の推定精度については依然として改善の余地が残る。

懸濁物中の泥粒子の濃度増大により、密度流的な振る舞いを示すFluid mud輸送が、河口域周辺での泥の輸送形態の一つとして重要となることが知られている（Fan et al.,2004, 中川ら2013）。Fluid mudによる航路埋没対策に関する検討例（Rahmanら・2001）もみられるものの、塩分躍層が形成される中でのFluid mud輸送の実態や、河口港湾での埋没要因として検討した例はみられない。本論文では、新潟港西港地区（信濃川河口）における定期測量結果や、底質・水質調査等の現地観測データの解析を通じて、出水前後における地形変化や、堆積土砂の底質粒径の変化の特徴を明らかにする。特に出水期間中に行われた濁度等の空間分布の測定結果により、河口浚渫域での塩水・海水による密度界面の形成と連動した浮遊土砂の輸送や、Fluid mud輸送による航路への土砂侵入を示唆する底面での高含水比底泥の集積など、土砂流動体についても検討を行う。

さらに、出水期間に生じた土砂輸送過程について、浚渫域最上流側の水深急変部での流下土砂の挙動の把握を目的として、淡水・海水による密度躍層を考慮した水槽実験を行い、異なる水理条件等におけるFluid mud移流特性についても検討した。

2. 現地調査の概要

観測対象とした新潟港西港地区は、信濃川河口に位置し（図-2.1）、定期フェリー航路の主要な交流拠点となっている。同港内では水域ごとに定められた航路・泊地の水深（5.5m～12m）を維持するため、年間約80万m³の浚渫が定期的に行われている。図-2.1には濁度等の水質観測点の位置と水深を示している。

2.1 調査項目

図-2.1(b)に示す測線および測点を対象に、(1)コアサンプルの採取・分析による堆積物性状の時空間分布の把握、(2)塩分、SS濃度等の水質鉛直分布計測による土砂（懸

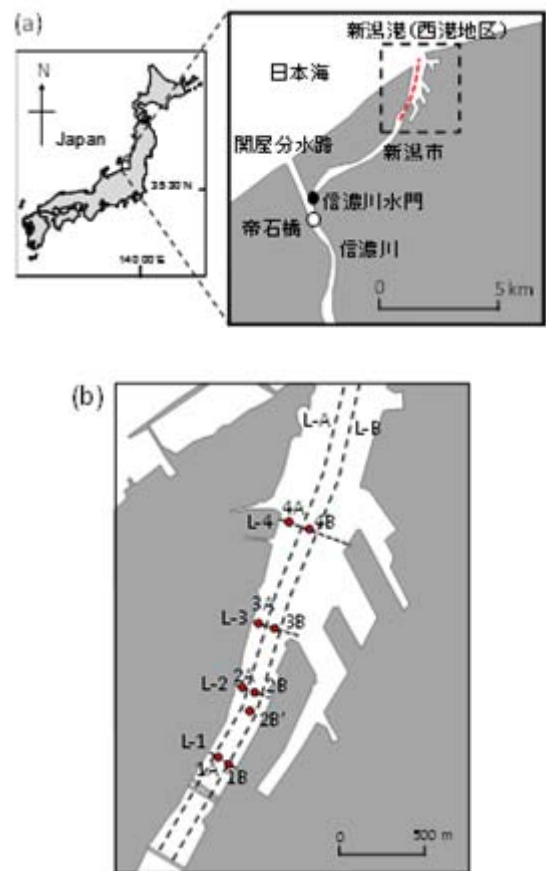


図-2.1 調査対象水域 ((a)新潟港(西港地区)の位置と(b)港内での調査点)

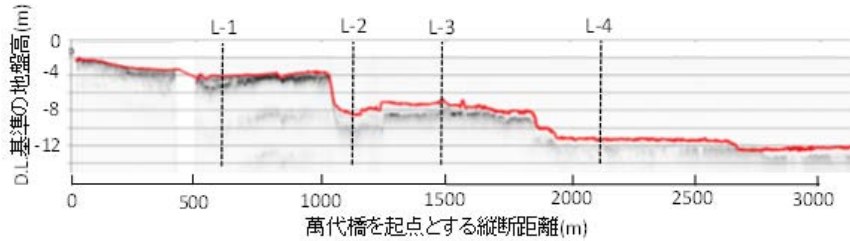


図-2.2 港内縦断方向の水深分布と測線位置の関係

濁物)の流下特性の把握をそれぞれ試みた。調査水域の地形的な特徴として、図-2.1(b)中の破線で示す測線のうちL-B(右岸側縦断測線)での水深分布を図-2.2に示し、また調査測点が位置する航路横断ライン(L-1~L-4)も同図には示してある。ラインL-2よりもすぐ上流側(同図左側)から、浚渫により地盤高(D.L基準)が-4mから-8m程度にまで急に深くなっており、これよりも下流側では航路・泊地の水深確保のため、浚渫を継続的に行っている。さらに下流側では地盤高が-12m程度で維持され日本海に接続している。

2.2 調査時期と河川流量

調査は2012年1月、11月および2013年8月の合計3回実施している。調査時期を含めた3.5か年における信濃川(帝石橋)の河川流量および同地点の新潟西港での水位のデータ(いずれも国土交通省水文水質データベースによる)を図-2.3に示す。同図中の▼印は本調査の実施時期を表し、1回目(2012年1月)の調査を行う前年(2011年)の7月30日に記録的な豪雨による洪水(最大日平均流量:約2,800m³/s)が発生している。さらに、3回目の調査(2013年7月下旬から8月上旬)の際にも、上流部では3日間の総雨量が180mmを超える梅雨前線の影響による出水が生じており、帝石橋観測点でも日平均流量が1,000 m³/sを超えるものとなっている。ただし、洪水時の新潟西港内への淡水流入量は、それよりも上流部にある信濃川水門により制御されており、港内の水位(図-2.3(b)にて西港と表示)は常に上流側(帝石橋)の水位よりも低くなることがわかる(図-2.3(c))。

3. 地形・底質変化と出水時の懸濁物輸送

3.1 地形の変化

観測対象期間における港内での地形変化の状況を図-3.1~3.2に示す。ここで示す地形データは、当調査での測量に加えて、港内の水深管理のため新潟港湾・空港整備事務所により、ほぼ毎月実施されている水路測量結果である。まず2011年7月に生じた記録的な出水による地形

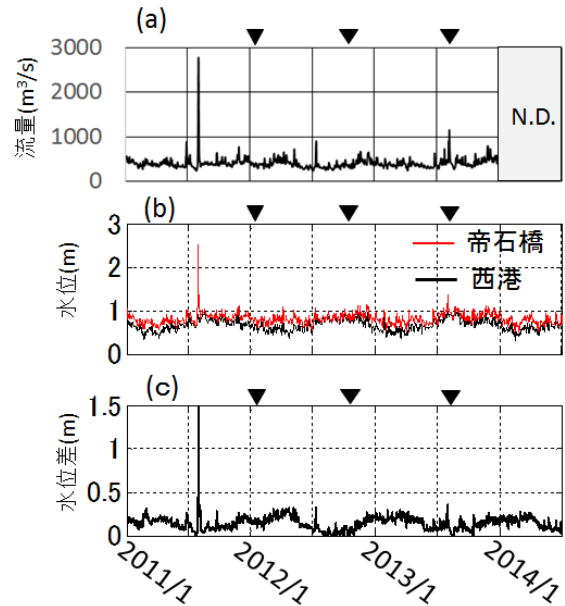


図-2.3 港内縦断方向の水深分布と測線位置の関係

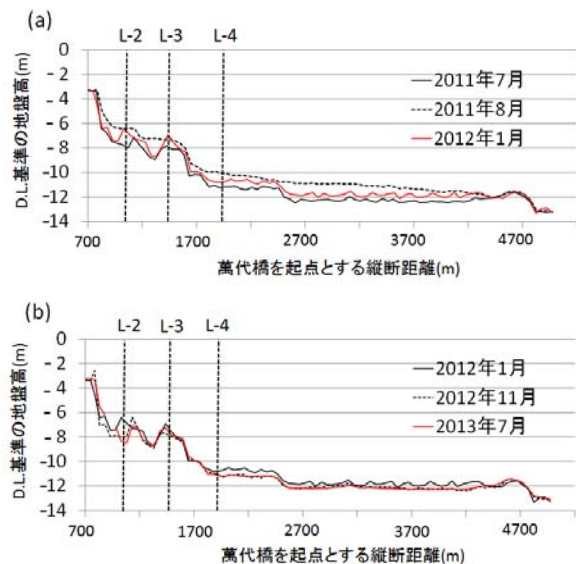


図-3.1 縦断地形の変化 ((a) 大規模出水前後の変化, (b) 各調査時期における縦断地形)

変化について、その前後における縦断方向の地形変化を比較したものが図-3.1(a)である。出水前の2011年7月（黒線）と出水後の同年8月（黒破線）の地形を比較すると、多いところでは1.5m程度の流下土砂の堆積が生じていることがわかる。また、一回目の調査を実施した2012年1月の地形においては、出水時に堆積した土砂はほぼ浚渫により除去されているものの、次節の底質データで示すように部分的には出水時の堆積土砂が残っている部分もある。

一方、3回の底質調査時期における縦断地形が、図-3.1(b)にそれぞれ示されており、これらの時期においては維持浚渫の実施により水深が管理されているため、基本的には大きな差異がみられない。ただし、L1~L4の各断面測線を対象とした測量結果の時期ごとの比較（図-3.2）をみると、たとえば測線L3（同図(c)）の左岸側では2m以上の地盤高変化がみられる。

3.2 底質の変化

次に各調査時期において採取した底質コアサンプルの分析による、底質組成の鉛直分布特性を示す。採泥は内径100mm、長さ約70cmのコアサンプラーを用いて、ダイバー作業により実施した。採取したサンプルは、押し出し機により3cmずつスライスして、粒度分析、含水比等の分析に供した。粒度分析の結果から、シルト・粘土分の重量含有率として求めた含泥率と、含水比の分析結果について、採取時の底質表層を基準面とする深さ方向の分布を示したものが図-3.3である。同図では泊地上流側のStn. 1Bと、航路中央付近の調査点Stn. 2B, 3B, 4Bの4地点それぞれにおける3回分の結果を重ねて示してある。大局的には、上流から下流に向かい水深が深くなるほど底質中の含泥率は上昇し、また泥分が多いほど一般的には含水比も上昇する。さらに各地点の特徴を詳細に見ていくと、泊地上流側のStn. 1B (D.L. -4m) では、表層の含泥率が観測時期ごとに20~70%の間で変化し、また同一時期の結果においても、深さ方向に10~90%の大きな変化がみられる場合もある（2012年11月）。このような含泥率変化と地盤高変化（図-3.2）との対応をみると、2012年1月から同年11月の間でStn. 1B地点では約30cm程度の堆積が生じ、一方、その後2013年7月までの間には浚渫による地盤高約50cmの低下が生じている。したがって2012年11月の表層堆積物の含泥率および含水比の増大は、流下土砂の細粒分の堆積によるもの、一方、2013年7月における底質表層の含泥率および含水比の低下は浚渫により深部の砂質地盤が露出したことによるものと推定される。この

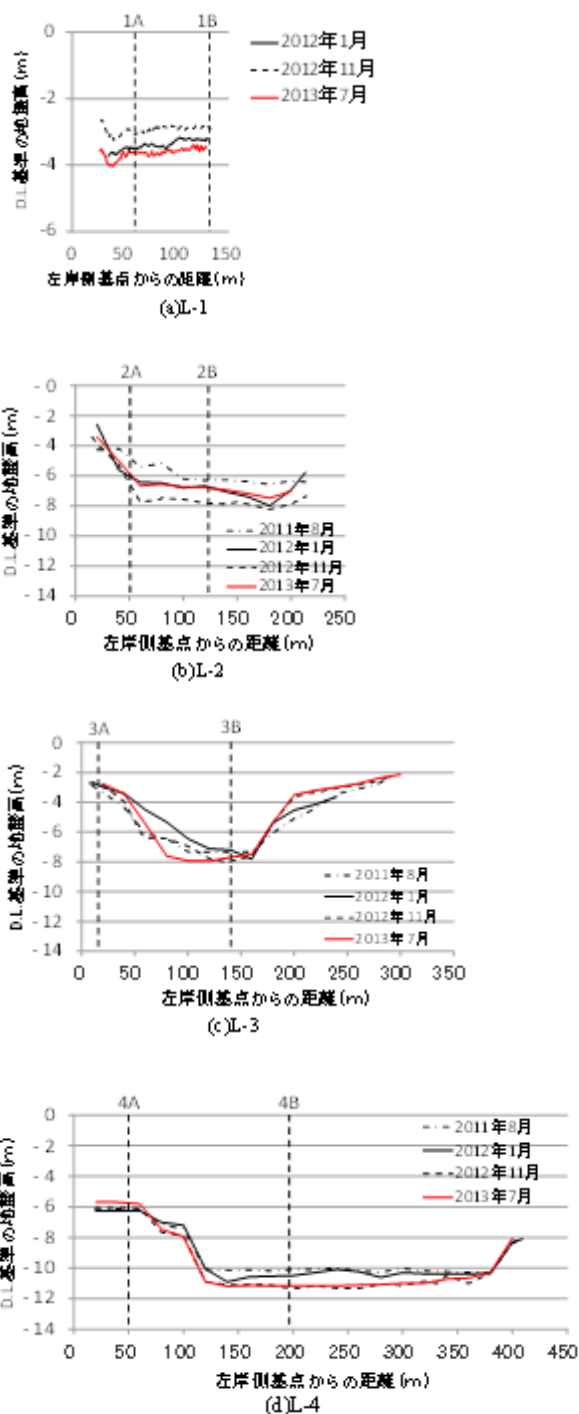
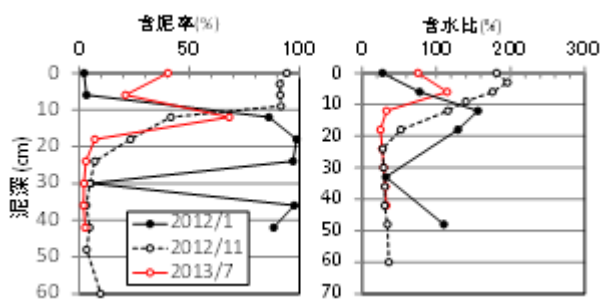


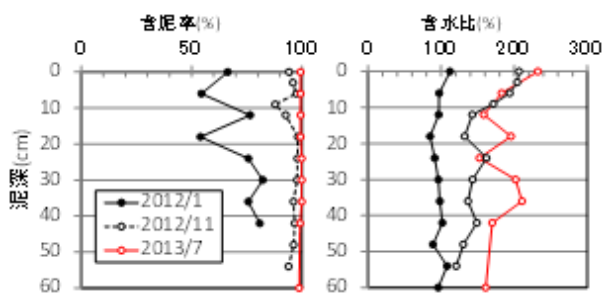
図-3.2 断面地形の変化

点については、これらの2つの時期における含泥率の鉛直分布パターンと比較により堆積履歴の特徴を示すことができる (Ariji et al. 2013). すなわち、2012年11月の含泥率鉛直分布における泥深50cm以深での含泥率の上昇と、2013年7月の25cm以深での同様な上昇のパターンがみられ、地盤高変化量の30cmとほぼ一致することがわかる。

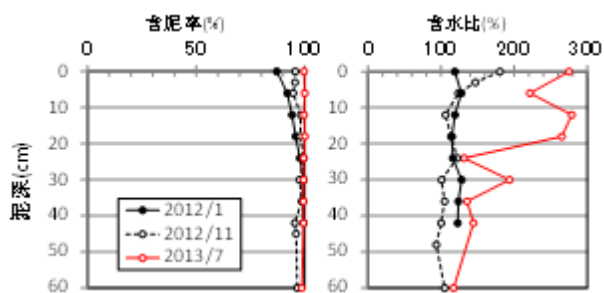
つぎに、Stn. 2B (D. L. -7~-8m) においては、2012年



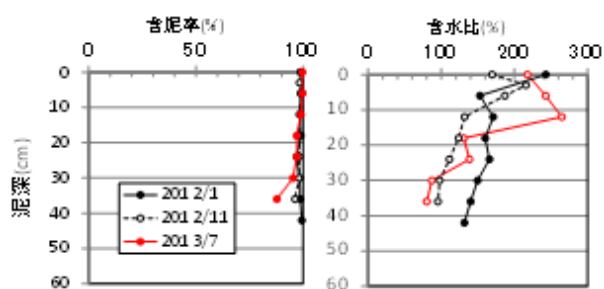
(a) Stn.1B



(b) Stn.2B



(c) Stn.3B



(d) Stn.4B

図-3.3 底質中の含泥率と含水比の鉛直分布

1月期には表層ほど砂質分が多く含泥率が70%以下まで低下し、含水比も100%以下であったものが、その後は含泥率が90%以上、含水比も表層では200%と高く、泥分が主体となる環境へと変化している。初期の比較的砂分が多い状況は、その前年の大規模出水の履歴が残っていたもの

と考えられる。図-3.2(b)に示す地形変化との対応をみると、2012年1月以降の浚渫(約1mの地盤高低下)により、これらの砂泥層は除去されている。その後の再堆積(約1m程度の地盤高上昇)が生じた際には、底質は含泥率100%、含水比200%超の高含水比泥へと変化している。このような大規模出水時の影響と思われる表層底質の砂分の増大は、わずかではあるもののStn. 3B (D.L. -7m~8m)でもみられる(図-3.3(c))。同地点ではその後、Stn. 2B同様に砂分が含まれる表層は浚渫により除去され、ほぼ泥分100%の底質へと変化している。

3.3 出水時の高濃度懸濁物輸送

河川から供給される懸濁物の港内での輸送過程の把握のため、各調査点で行われた塩分およびSS濃度の時空間分布について以下に示す。現地計測は観測船から多項目水質計(JFEアドバンテック社製・AAQ1183)およびバンドン採水器等の各種機器を船上から投げ込み実施した。多項目水質計の濁度データについては、現地で採取した底泥試料により濃度を調整した濁水試料を用いたキャリブレーションにより、濁度値からSS濃度(mg/l)に換算した結果を用いている。

上流側からStn. 1A, 2B, 4Bの各地点で測定された塩分およびSS濃度の鉛直分布を図-3.4および図-3.5に示す。これらの地点の測定は、梅雨前線の影響による降雨に伴う出水が生じていた2013年7月31日に実施している。このため、いずれの地点においても、平水時に行われた他の観測時期の結果に比べてSS濃度が高く、最も上流側のStn. 1Aの下層では1,000mg/lを超える高濃度な状況にあることがわかる。

比較的、懸濁物供給の少ない平常時の観測となっている2012年1月および11月の観測結果と比較すると、2013年7月の観測時のSS濃度がいかに高濃度かがわかる。なお、Stn. 1Aにおいては、全層にわたり淡水の状況にあるため、塩分がほぼ0psuとなっている。それよりも下流側のStn. 2B'の最下層で塩分の上昇がわずかにみられ、さらに下流側のStn. 2Bにおいては、上層に上流からの淡水層が、浚渫により掘り込まれた水深層では河口沖側から侵入した海水による高塩分層がみられ、水深約3m付近で明瞭な塩分躍層が形成されていることがわかる。これに対応して、SS濃度の分布にも明瞭な濃度躍層がみられる。すなわち、上層の低塩分・高SS濃度層と、下層の高塩分・低SS濃度層の水塊により構成される2層構造になっていることがわかる。なおこのときは、流速測定を行っていないため定量的な流れのデータを示すことはできないが、

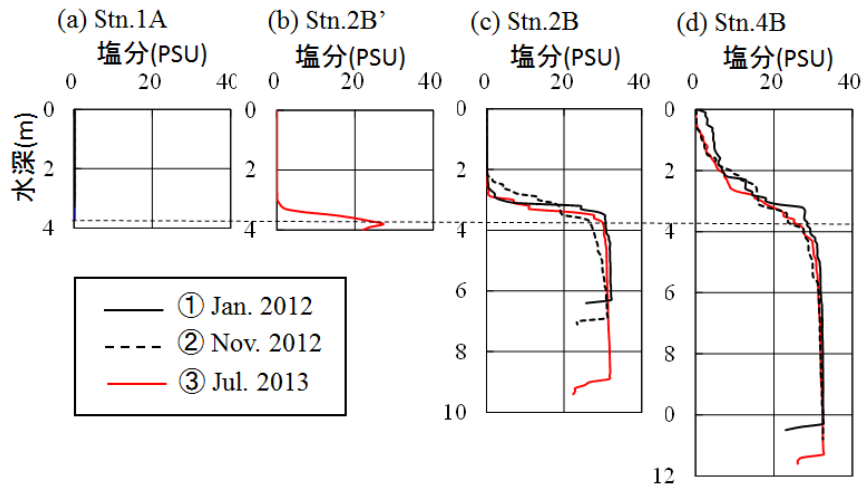


図-3.4 港内縦断方向にみた塩分の鉛直分布の変化 ((a)Stn.Aの塩分はいずれの観測時も0psu)

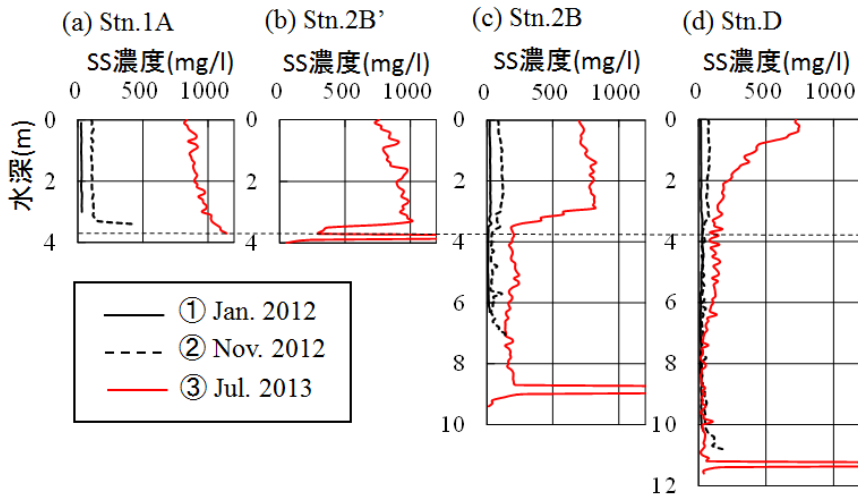


図-3.5 港内縦断方向にみたSS濃度の鉛直分布の変化

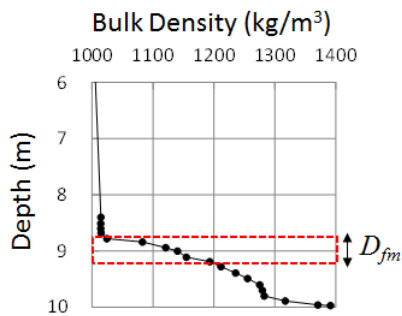


図-3.6 港内 (Stn.2B) で観測された底面近傍の湿潤密度鉛直分布

躍層上部の低塩分・高SS濃度層では海側に向かう流れが生じ、一方の下層では微弱な流れしかないことが、ダイバー作業を行った潜水士により確認されている。このような密度躍層の形成は、河川から供給される浮遊懸濁物

の鉛直混合を抑制し、下層へのSSの沈降量を減じる方向に機能しているものと考えられる。さらに沖側のStn.4Bでは、鉛直混合により塩分およびSS濃度ともに連続成層の状態へと変化している。

一方、Stn.2Bの底面近傍の水深約8.5m以深では、SS濃度の計測値が急激に上昇し、濁度計の測定限界（約2,500mg/l）以上となる高濃度濁水が底層付近でみられている。このため、濁度計以外に振動子式の現地式底泥密度計（中川ら・2004）を導入し、底層付近にみられるこのような高濁度層の湿潤密度の鉛直分布の計測を行った。観測された湿潤密度の鉛直分布を図-3.6に示す。船舶に航行上支障が無いとされるFluid mudの湿潤密度の目安である約1,200kg/m³の値（PIANC, 2008）と照らし合わせると、海水層から密度が上昇し始めてから上記の値に至るまでの高濁度流動泥層の厚さ（図-3.6中の D_{fm} ）が40cm程度となっている。このような底層近傍での高濃度層の形成は、

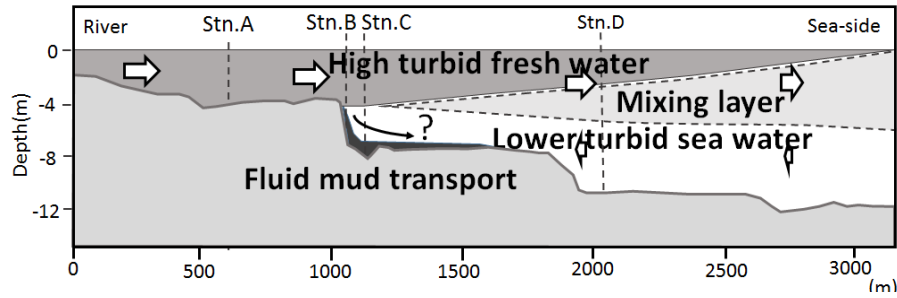


図-3.7 出水時における河口港内での懸濁物輸送の模式図

水中からの懸濁物の沈降によるものと、上流から底層付近を密度流的に流れてくる水平移流による集積とが考えられる。上層からの沈降を考えた場合には、上層で見られる懸濁層のSS濃度（約200mg/l）を考慮して、仮に泥粒子の沈降速度を1mm/sとした場合、湿潤密度が $1,200\text{kg/m}^3$ （乾燥密度約 300kg/m^3 ）のFluid mud層の発達には、24時間経ても5.8cm程度の厚さにしかならない。

これら観測結果より得られた知見を基に、出水時の港内における懸濁物の輸送過程を模式的に示したものが図-3.7である。流下土砂の港域内での堆積プロセスとしては、上述のとおり上流部の底層から密度流的に輸送される泥の輸送形態（たとえばFan et al., 2004）についても考慮する必要がある。この点については、上流部での高濁度水塊の発生状況などの現地情報のさらなる蓄積することにより、高濁水の密度流的な輸送による浚渫域への底泥流入過程の可能性について検討をすすめる必要がある。

4. 循環水槽を用いた土砂水理実験

4.1 実験方法

観測結果により示唆された、浚渫による水深急変部における、上流からの流下土砂の堆積プロセスのうち、Fluid mud輸送について検討するため、港湾空港技術研究所の海底流動実験水槽（図-4.1）を用いた土砂流動実験を行った。水槽上段の水路部（幅80cm）において、上下流両端の床面よりも深さ40cmの掘り下げられた試験区間の一部に、図-4.2に示すような河口港湾での水深急変部を想定した模型地形を作成した。掘り下げ部分に、まず久里浜湾より汲み上げた海水を充填したのちに、水槽内全体に淡水（水道水）を満たすことにより、水槽上段の試験区間に淡水・海水の密度躍層を再現した。水槽内の淡水部分は、プロペラ式の還流装置により水流を発生させるこ

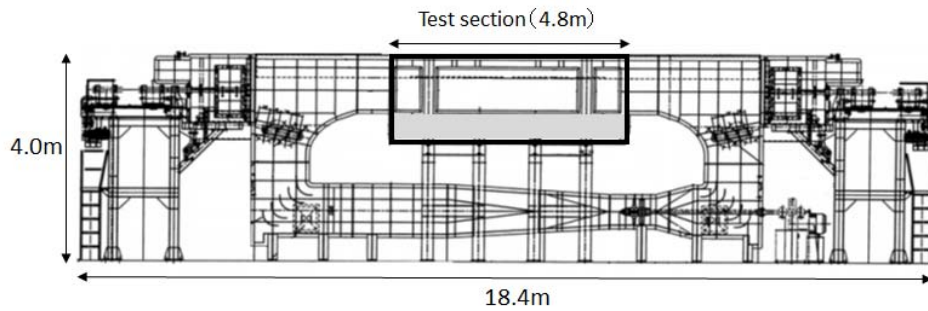


図-4.1 実験に用いた海底流動実験水槽（港湾空港技術研究所）

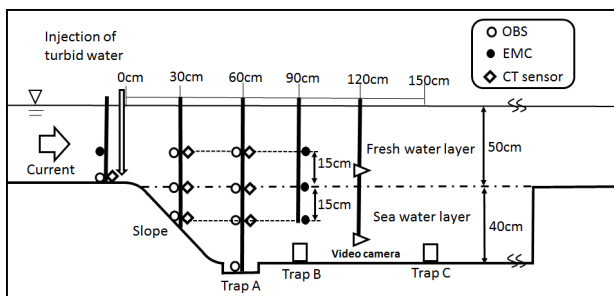


図-4.2 浚渫域上流端での水深急変部を模擬した実験縦断面と各種計測機器の設置点

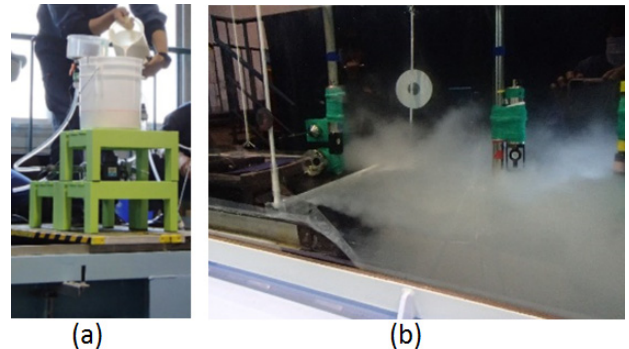


図-4.3 高濁度水の水槽内への投入の様子

とができ、試験区間の深掘り部に充填された海水層の直上に淡水を流下させることで、現地河口港湾でみられた水理環境における高濁度水塊の流下現象（図-3.7）の再現を試みた。

一方、濁水の流下に関しては、カオリナイト粘土粉末を水道水で濃度調整した濁水を、水深急変部の頂部に設置したアクリルパイプ製のノズルから投入した。流量調節バルブにより、毎分約0.9リットルの濁水を流れを発生させている水槽中に約10分間投入した（図-4.3）。

濁水の流入条件に関しては、出水時の上流側での流下土砂の濃度分布の観測結果（図-3.5）をみると、底層から水面まで高濃度な濁水が流下しており、現地の状況とは異なる。本実験では水深急変部でのFluid mudの重力流的な底面床上の移流の可能性を検討するため、底面直上の濁水だけに注目したことになる。

濁水投入実験における計測項目としては、投げ込み式の多項目水質計（JFEアドバンテック・AAQ1183）による塩分や濁度の鉛直分布測定のほか、図-4.2に示すように各地点に電磁流速計や光学式濁度計を固定することにより、流速場と濁質の濃度場の時系列変動の把握を試みた。なお、すべての濁度計の計測結果は、実験に用いたカオリナイト粘土粉末による濁水を用いたキャリブレーションにより、SS濃度（mg/l）に換算された数値をここでは示す。また、水中ビデオ撮影により、濁水の拡散状況やFluid mudの動態を捉える動画データの取得も行った。

4.2 実験ケース

流動の条件として、上流境界部の測定点（図-4.2）における底面床上15cmでの水平流速が約13cm/sおよび約26cm/sとなる2ケースを設定した。各流速条件でのフルード数はそれぞれ $Fr_1=0.059$ 、 $Fr_2=0.118$ となり、実スケールでの上流側水深を4mと仮定すると、相当するフルード数では約37~74cm/sの流れを対象としていることになる。一方、投入濁水の濃度については、100,000mg/lの結果においてはFluid mudとしての流動機構は観察されなかったことから、ここでは200,000mg/lのケースのみ示すこととする。また、密度成層の有無による浮遊懸濁物の輸送への影響を評価するため、水槽内をすべて淡水で満たして、流速条件および濁水投入条件を同一とした実験も比較のために実施している。これらの条件設定の一覧を表-4.1に示す。

一方、流速および密度場の条件により、投入濁度の輸送過程に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、試験区間における流れ場の情報として、濁度投入点から90cm下流側の深掘り部内（図-7）の密度界面を挟む鉛直3点で、

電磁流速計により計測（測定間隔1Hz、約10分間測定）された主流方向の平均流速と変動流速（ここでは標準偏差として算定）を表-4.2に示す。

表-4.1 実験ケース一覧

ケース名	密度条件	上流境界の流速	濁水濃度
CaseA-1	成層あり	13.5 cm/s	200,000 mg/l
CaseA-2		26.7 cm/s	
CaseB-1	淡水のみ	12.9 cm/s	
CaseB-2		26.4 cm/s	

表-4.2 試験区間での主流方向の平均流速（上段）と変動流速（下段カッコ内）
単位：cm/s

計測位置	CaseA-1	CaseA-2	CaseB-1	CaseB-2
基準界面 +15cm	12.9 (0.24)	21.8 (2.01)	12.0 (2.13)	28.0 (3.31)
基準界面 ±0cm	6.77 (1.89)	14.9 (1.80)	4.98 (2.82)	5.89 (5.39)
基準界面 -15cm	-0.55 (0.24)	1.18 (2.01)	1.58 (2.19)	-2.63 (2.53)

変動流速の大きさは、浮遊懸濁物の鉛直混合を支配する乱れ強度に関係する。表-4.2を見ると、密度躍層が無い各ケース（CaseB-1およびB-2）の方が、密度成層ありの各ケース（CaseA-1およびA-2）に比べて、相対的に変動流速が大きく、特に基準界面（密度成層がある場合の初期界面高さ）で、せん断流による乱れが顕著である。

密度成層の再現状況としては、図-4.4に試験区間内（濁水投入点より90cm地点）にて多項目水質計の昇降により測定した塩分の鉛直分布を示す。同図には、Case A-1およびCase A-2のそれぞれについて、実験前（実線）および実験後（破線）の結果を示す。実験前はいずれも水深30~50cmの間に明確な塩分躍層が形成されていることがわかる。また約10分間、流れをかけた実験後においても塩分躍層は消滅することはないものの、流れの条件

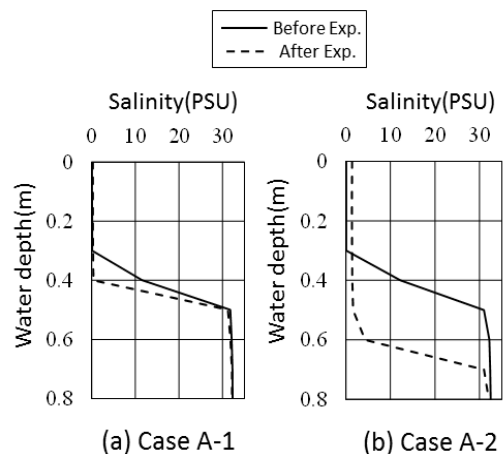


図-4.4 実験前後における塩分躍層の変化

に依存してその界面高さには変化が生じている。

4.3 実験結果と考察

試験区間下流域（掘り下げ部）での、懸濁物濃度の空間分布の特徴を把握するため、濁水投入点より下流側60cm地点の基準界面（図-4.2中の一点鎖線）を挟む鉛直3層ならびに床面（掃流状態で流下する濁水の把握を目的に設けられた、斜面最下部のトラップ内）に固定設置された光学式濁度計の測定結果を示す。

斜面部でのFluid mud輸送（密度流的な濁質の斜面床上の流下）が水中ビデオ画像により確認されたCase A-1の結果を図-4.5に示す。基準界面付近のSS濃度の変化をみると、濁水投入から2分間程度は基準界面の高さのみにSS濃度の上昇がみられ、その後、基準界面の下層15cmにおいて濃度の上昇が確認できる。基準界面よりも上層では、濁水投入（約10分間）の全期間においてほとんどSS濃度の上昇が生じていない。一方、当該地点の底面に相当す

る斜面最下部に設けたトラップ部のSS濃度の変化（図-4.5(b))を見ると、濁水投入から1分以内に急激な濃度上昇が確認でき、その濃度は上述の水中部分よりも高濃度であり計測器の測定範囲上限にまで達している。すなわち、斜面床部に沿って密度流的に流下した高濁度水塊が最下部のトラップ部に侵入したことを意味し、その様子はビデオ画像でも確認されている。

これに対し、Case A-1に比べて上流からの流れが速く乱れの程度も強くなるCase A-2の場合には、斜面最下部のトラップ内のSS濃度の上昇はほとんど見られず（図-4.6(b))、むしろ基準界面やそれよりも上層でのSS濃度の上昇が生じている（図-4.6(a))。ビデオ画像からも、Case A-1で生じていたようなFluid mud輸送は見られず、下層の海水層内では透明度が高い状態が維持されていることが確認されている。すなわち、本ケースにおいては、投入後の濁水は一樣流の乱れによる拡散により希釈され、重力流的な斜面流下が生じる前に、上層の淡水層を浮遊状態で流下したことになる。

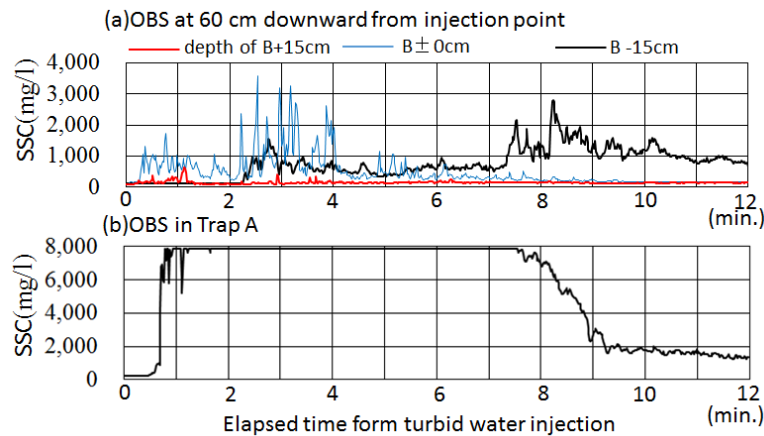


図-4.5 試験区間の SS 濃度の時系列変化 (Case A-1)

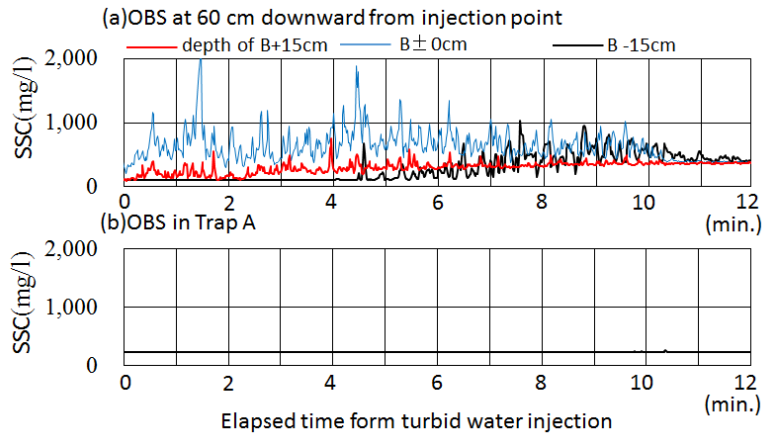


図-4.6 試験区間の SS 濃度の時系列変化 (Case A-2)

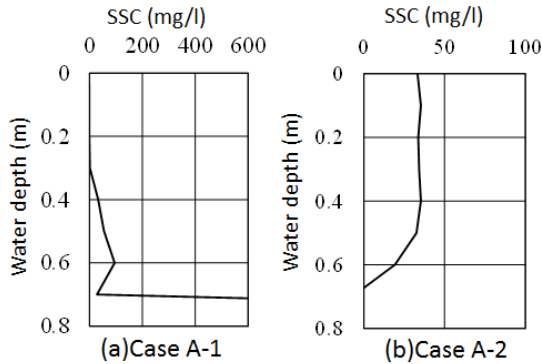


図-4.7 濁水投入点から下流 90cm 地点で測定された SS 濃度鉛直分布 (密度成層ありの各ケース)

Case A-1およびA-2の各ケースにおける、濁水投入停止後に濁水投入点より下流90cm地点で測定されたSS濃度の鉛直分布を図-4.7にそれぞれ示す。Case A-1においては上述のとおり、斜面部を流下した高濃度濁水の影響により、特に底面付近に高濃度な濁水の集積が生じているのに対し、Case A-2においては鉛直混合によりほぼ一様化したSS濃度が上層部にみられ、60cmより下層ではSS濃度

は急激に低下している。Case A-2にみられる下層の低濃度層の水深帯は、同時に計測された塩分濃度の鉛直分布の結果(図-4.4(b))と照らし合わせると、塩分躍層の下層(海水層)の水深帯とほぼ一致している。これは、現地観測でも確認されているように、上流からの浮遊懸濁物が上層の淡水層を流下し、下層の海水層は低濃度な状態が保持される現地での状況(図-3.7)を再現したものとなる。

一方、密度躍層の有無による懸濁物輸送過程への影響を確認するため、Case B-1およびCase B-2の測定データの結果を図-4.8および図-4.9にてそれぞれ示す。Fluid mud輸送が確認されたCase A-1と流動条件が同じであるCase B-1の結果についてみると、斜面最下部のトラップ内のSS濃度の上昇(図-4.8(b))がCase A-1のときと同様にみられる。しかしながら、その濃度の上昇速度はCase A-1に比べると緩やかであることや、同地点の水中部のSS濃度(図-4.8(a))をみると基準界面だけでなく基準界面の下層において、濁水投入直後からSS濃度の上昇が生じている。これは、Case A-1では基準界面下層での濃度上

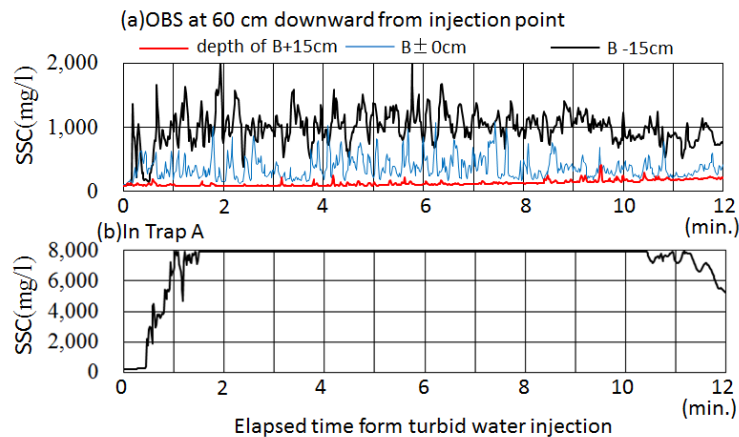


図-4.8 試験区間の SS 濃度の時系列変化 (Case B-1)

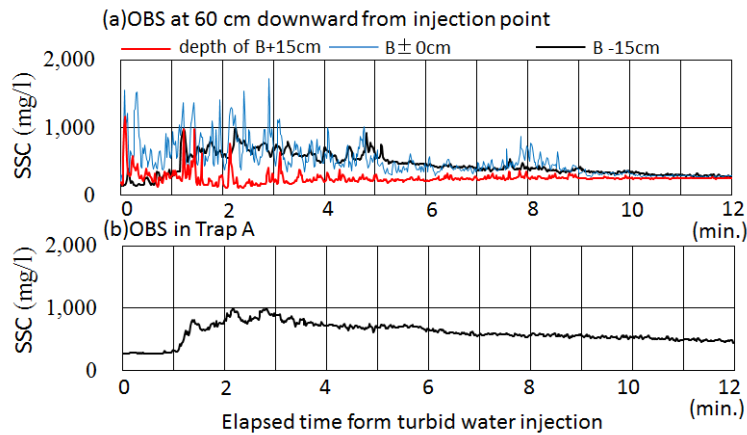


図-4.9 試験区間の SS 濃度の時系列変化 (Case B-1)

昇がほとんど生じることなく、その直下の斜面最下部で Fluid mudの侵入による急激な濃度上昇が生じたことと、Case B-1では懸濁物の輸送経路が異なることを意味する。この点について水中ビデオ動画で確認すると、濁水投入点の下流側では、流れによる濁質の移流と拡散・沈降により下層のSS濃度が上昇していく様子がみてとれる。さらに、海水層への懸濁物沈降の抑制がみられたCase A-2に対して、同じ上流での流れと濁水の条件であるCase B-2では、下流域で乱れが最も大きく(表-4.2)密度躍層も存在しないことから、鉛直方向のいずれの層においてもSS濃度が上昇し(図-4.9)、SS濃度の鉛直方向の一様化(図-4.10(b))が確認できる。

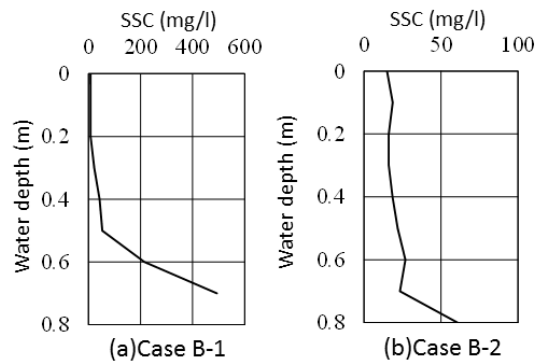


図-4.10 濁水投入点から下流90cm地点で測定されたSS濃度鉛直分布(密度成層なしの各ケース)

5. まとめ

出水時の河口港域では、塩分躍層の存在と底層付近で生じるFluid mud移流が、河川により流下する懸濁物の浚渫域内での輸送に大きく影響を及ぼす可能性があることを現地観測および水槽実験により明らかとした。まず、塩分躍層と同時にSS濃度にも同様な躍層が顕著となり、河川から流下する高SS濃度・低塩分層の流れが懸濁物を河口沖まで輸送する際に、密度界面が懸濁物の沈降を抑制している。さらに、浚渫域最上流部の底面付近では、Fluid mud層が低SS濃度・高塩分層の下層に存在していることが明らかとなり、このことは上流からの土砂の一部が重力(密度)流的に斜面部を伝って、直接、浚渫域内に流入した可能性を示唆するものである。

このうち、Fluid mudの流入過程においては、本実験を通じて上層流の乱れの影響により上層部のFluid mudの拡散が生じると、密度流的な土砂の流入は生じることがなくなり、上層の低塩分層の流れにより沖合に輸送されることが定性的に示された(図-4.11)。このように上層部で土砂の濃度を制御できれば、下流側での土砂輸送形態を変化させることができ、港内での土砂の堆積範囲をある程度制御可能になることを意味する。この点については、現時点では未解明である上層部でのFluid mudの発生過程について、現場での観測等を通じて実態を把握しつ

つ、埋没対策としての活用についてさらに検討を進めていく必要がある。

6. おわりに

現地観測を通じて、河口港湾における出水時の土砂堆積メカニズムの解明における新たな知見の獲得に成功した。Fluid mud的な輸送の有無については、港内での土砂堆積量の空間分布を支配する要因となり得ることから、浚渫量や浚渫域の設定など航路泊地の維持管理上極めて重要な課題となるものである。たとえば、実験で示されたように上流側でのFluid mudの希釈と上層での浮遊輸送を活用することにより、港内での堆積域が大きく変化する可能性がある。ただし、現時点ではFluid mudの上層部での発生場所や発生範囲、さらに浚渫域への流下する過程について現時点では不明である。河口港湾の浚渫域上流端での土砂輸送機構の解明が、上述のように下流側の埋没対策の効率化にも結び付く可能性を有することから、今後も現地データの取得も試みつつ、河口土砂動態の定量的な評価手法の精度向上を推進する予定である。

謝辞：本調査は国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所からの受託調査として実施したものである。調査実施に際しては、同事務所主催による埋没土砂技術

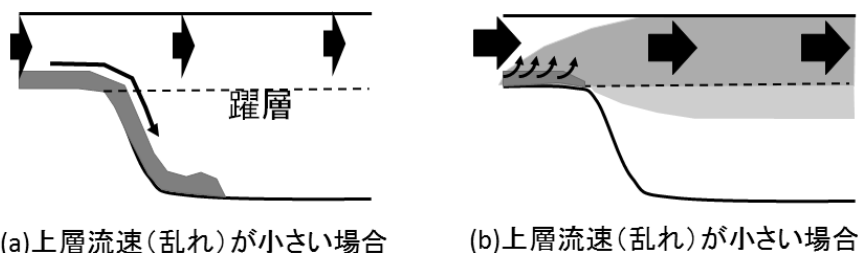


図-4.11 水槽実験で確認された上層流れの条件の違いによる土砂輸送形態の変化

検討会（座長：村上和男東京都市大学名誉教授）にて、中村由行横浜国立大学教授、菊池喜昭東京理科大学教授、細山田得三長岡技術科学大学教授の各委員より貴重な意見を頂いた。また現地観測および水槽実験の実施において日本ミクニヤ(株)、三洋テクノマリン(株)および(株)コンクリート診断センターの各社の作業協力を得た。最後に部内討議等を通じて貴重な意見やコメントを頂いた海洋・水工部門の各位ならびに査読意見を頂いた片山昭特別研究主幹ほか公表審査委員会委員の各位に感謝いたします、

(2017年1月27日受付)

参考文献

- 金子安雄 (1965), 流路の水深が変化する場合の塩水くさびの気候, 港湾空港技術研究所報告, Vol.4, No.5, 20p.
- 武川一樹・二瓶泰雄 (2013): 日本の河川における浮遊土砂輸送量と流量の相関関係, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, I_1221-I_1225.
- 中川康之, 灘岡和夫, 八木宏, 二瓶泰雄, 木村彰宏, 久保田踊児, 吉田行秀 (2013), 東京湾羽田沖における泥質物の堆積分布特性を考慮した底泥輸送モデルの構築, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, I_571-I_575.
- 中川康之, 渡邊和重, 谷川晴一, 黒田祐一 (2004), 海底面近傍における底泥密度の鉛直分布特性の把握, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.986-990.
- 中田邦夫, 及川研, 難波喬司, 長谷川賢一, 西田寿夫 (1983): 河口港埋没分布予測手法の開発について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.244-248.
- 中村恭志, 石川忠晴 (2010), CIP-Soroban法に基づく汽水域3次元数値流動モデルの開発, 水工学論文集, 第54巻, pp.1441-1446.
- 濱田徳一 (1967), 密度流の問題, 港湾技術研究所報告, No.14, 34pp.
- 柳哲夫, 磯部篤彦 (1997), 河口域での懸濁粒子の挙動に関する数値実験, 沿岸海洋研究ノート, 第25巻, 第1号, pp.61-66.
- 山崎宗彦, 村上和男: 新潟西港における流入土砂量の算定と数値モデルを用いた沈降特性の再現, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp. I_910-I_915, 2013.
- Ariji, R., H. Yagi, K. Nadaoka, Y. Nakagawa, T. Furota and H. Yoneyama (2013): Clarification of the properties of fluctuation of bottom sediment based on long-term monitoring around the mouth of the Tama River in Tokyo Bay, Coastal Engineering Journal, Vol. 55, No. 2, DOI: 10.1142/S0578563413500046
- Fan, S., D.J.P. Swift, P. Traykovski, S. Bentley, J. C. Bor-geld, C. W. Reed and A. W. Niedoroda (2004): River flooding, storm resuspension, and event stratigraphy on the northern California shelf: observations compared with simulations, Marine Geology, Vol.210, pp.17-41.
- PIANC (2008): Minimising harbour siltation, PIANC Report No.102, 75p.
- Rahman Hidayat, 入江功, 森本剣太郎, 小野信幸: アジア地域の港湾におけるシルテーション対策とフルードマッド, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1406-1410. 2001.

港湾空港技術研究所資料 No.1334

2017.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2017) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています