

周防灘北部沿岸域における浮遊泥の輸送特性

中川康之¹・三谷正人²・友田伸明³・松本英雄⁴

周防灘北部に位置する宇部港では入港船舶の大型化に対応するため、港内泊地から約 5 km 沖合におよぶ水深 13 m の航路整備が進められている。しかし、水深 10 m 以下の比較的浅い海域を浚渫して航路を整備するため、周辺海域からの土砂の移動による航路の埋没が懸念されている。本研究では、航路埋没の対策に向けて重要となる、周辺土砂の移動特性の把握を行うため、流況および濁度測定を中心とする現地観測を実施し、航路沖合において潮汐流の作用による底質の移動が顕著に生じていることを明らかにした。また、これら底質移動現象の再現を目的とした数値シミュレーションを行い、現地データとの比較を通じて検証を行った。

1. はじめに

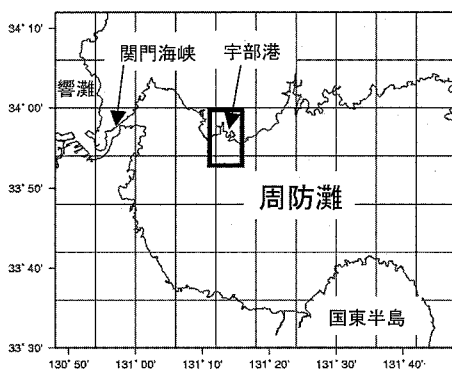
船舶の大型化に伴い航路や泊地の大水深化が各地の港湾で進められている一方で、埋め立て用地の確保や海域への土砂投入が自然環境への配慮から困難となりつつある。このため、航路や泊地の整備に伴って生じる土砂量を極力抑えることが求められており、周辺土砂の移動などによる航路・泊地の埋没が懸念される港湾においては、埋没機構の解明や堆積土砂量の定量的な予測に基づき適切な対策を講じていくことが港湾とその周辺環境の整備において重要である。

本研究では、浅海域における航路整備に対して埋没が懸念される港湾を対象に、将来的な対策の検討において重要となる周辺土砂の移動過程の実態把握と埋没への影響を検討するため、流況と濁度を中心とする現地観測データの解析を行い、特に潮汐流の作用による浮遊泥の輸送特性について検討を行った。また、将来的な埋没量の予測手法の確立に向けて、観測結果で示された浮遊泥輸送を再現すべく数値シミュレーションを試みた。

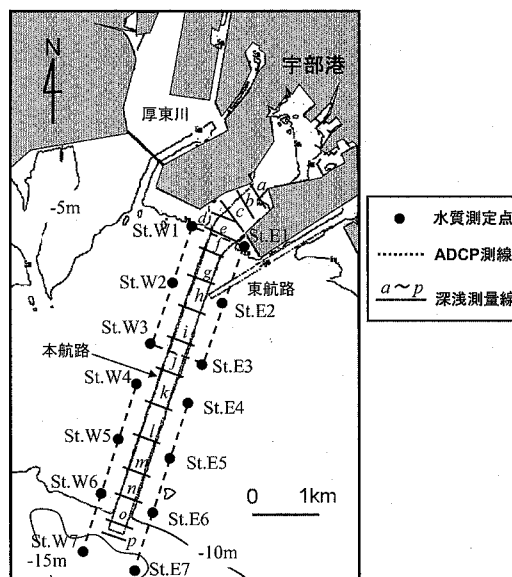
2. 調査の概要

(1) 対象海域

瀬戸内海の内海に位置する周防灘は、西端で関門海峡を通じて響灘に接し、また東側では国東半島の沖合で伊予灘に接している(図-1(a))。周防灘沿岸部では水深 20 m 以下の浅海域が広く分布し、堆積物の分布としては関門海峡付近や沿岸部の一部で砂や礫質となっている以外はシルトや粘土の泥質物が広く分布している(太田ら, 2005)。



(a) 対象海域



(b) 調査地点

図-1 調査海域と観測地点

本研究で対象とする海域は、周防灘北部に位置する宇部港沖合であり、水深 10 m 以下の浅海域が沖合約 5 km まで広がる浅海域となっている。同港では港内泊地から

1 正会員 工修 (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部沿岸環境領域
2 工修 国土交通省四国地方整備局高松港湾・空港整備事務所
(前・広島港湾空港技術調査事務所調査課第一係長)
3 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所
調査課長
4 正会員 工修 国土交通省中国地方整備局企画部技術企画官(前・広島
港湾空港技術調査事務所所長)

沖合に向かう本航路が現在水深約 12 m まで掘り下げられているものの、大型船舶の利便性を高めるためにさらなる増深が必要とされている。

(2) 調査内容

航路周辺の海域における堆積物特性や地形変化の状況を把握するため、既往の底質調査や地形測量のデータの整理を行った。底質調査は、2002 年 10 月に図-1(b)に示される Stn.W4, E4 よりも沖側の地点を、また 2003 年 9 月には Stn.W3, E3 よりも岸側の地点をそれぞれ対象として、Grab 式採泥器による表層底質の採取および粒度試験等の試料分析が行われている。一方、深淺測量は航路断面方向に設定された測線 (Line-a~p, 合計 16 本) を対象として、2005 年 9 月 3 日、同 10 月 3 日および同 12 月 10 日の計 3 回行われている。これらの深淺測量にはいずれもマルチビーム測深器 (SEABAT9001S, 455kHz) が使用された。

さらに、航路内への土砂の堆積特性と、周辺海域での底質の移動特性との関連性を調べるため、ADCP (RD-Instruments, 1,200 kHz) を儀装した調査船による流況観測と濁度等の水質鉛直分布測定を、1 潮汐間 (約 25 時間) を対象とした連続観測を実施した。大潮期を対象とした調査は、Stn.E1, E3, W3, W1 を頂点とする岸側測線を 2003 年 9 月 10 日から 11 日にかけて、また沖側測線 (Stn.E4~E7, Stn.W4~W7) を 2002 年 10 月 22 日から 23 日にかけて、それぞれ実施した。流況調査船はほぼ一定の速さ (3~4 ノット) で測線上を航行し続け、一方、流況調査船が水質調査点を通過する際に、水質調査用の船上より水質センサー (アレック電子, ACL208) を投入し濁度等の鉛直分布測定を実施することにより、流況と水質の同時測定を行った。

3. 観測結果

(1) 航路部周辺の底質分布と堆積状況

航路周辺の堆積物の粒度分布特性を図-2 に示す。港口付近 (E1, W1) では礫質を含む粗粒分が主体であるものの、沖合に向かって泥分 (シルトおよび粘土分) の割合が高くなり、航路先端部付近の E6 および W7 では含泥率が 80 % 以上となっている。航路を挟む東西の各地点間 (例えば W3 と E3 など) の差を見ると、東側で含泥率がわずかに高くなるものの大きな差はみられない。また、図には示していないが、浚渫により掘り下げられた航路内で採取された底質については、周辺地盤の底質粒径とは無関係に、どの地点においても含泥率が 90 % 以上の泥質物となっていた。

つぎに航路内での埋没状況を把握するため、深淺測量データから各測線での平均水深を測量時期ごとに求め、

2005 年 9 月と同年 12 月の 3 ヶ月間における水深変化量を求めたものが図-3 である。同図中には 2005 年 9 月の測量時における航路内の水深と、航路脇の法肩端部 (非浚渫域) の水深も示してある。港内よりも沖側の航路部において比較的堆積量が多くなっており、沖側からみて自然地盤からの浚渫深さが急激に増大する Line-m や n の地点で最も大きな堆積が生じている。

さらに、2005 年 10 月の深淺結果も考慮して、観測期間の前後半での水深変化量の差異について、6 測線を対象に整理した結果を図-4 に示す。前半の期間 (2005 年

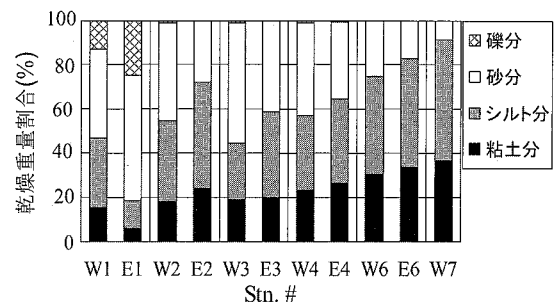


図-2 航路周辺の底質分布

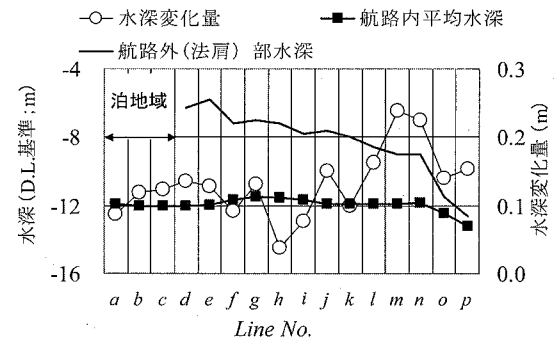


図-3 航路内の水深変化量とその空間分布

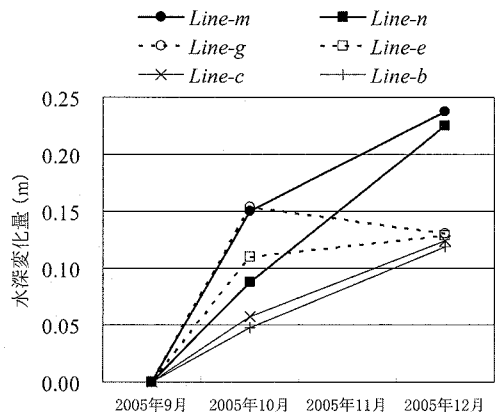


図-4 水深変化量の経時変化

9月～10月)ではいずれの地点でも堆積傾向を示し、特に航路内 (Line-e, g, m, n) での堆積量が泊地内 (Line-b, c) に比べて大きくなっている。一方、後半の期間 (同10月～12月) では港口付近の航路部 (Line-e, g) での水深変化はきわめて小さいのに対し、航路の沖側部分 (Line-m, n) では前半同様に顕著な堆積傾向がみられる。1回目の深浅測量を実施した直後 (2005年9月6日) には台風0514号が九州西岸を通過し、気象庁宇部測候所の記録によると日最大風速が20 m/sを越える強風が発生している。この気象擾乱で発生した高波浪が、前半期間における全地点での堆積量の増大に関与しているものと考えられる。これに対し、後半では日最大風速が10 m/sをわずかに越える程度の季節風が3日ほど発生したのみであるにも関わらず、特に航路沖合部では比較的大きな堆積が生じ続けている。そこで、航路内への土砂の供給における気象擾乱以外の要因として潮汐流の影響について検討した。

(2) 流況およびSS分布の測定結果

大潮期の流況観測により得られた流速データにより、上げ潮時および下げ潮時の流況パターンを図-5に示す。(ただし、岸側測線と沖側測線の調査時期が同一ではなく、潮位差等の条件は異なる。) 同図では、底質輸送への影響をみるため、ADCPにより測定された底面付近 (底面上約1m) の測定結果を示している。上げ潮時には北西方向、下げ潮時には南東方向が流れの卓越方向となり、いずれも航路を横断する方向に潮汐流が生じている。港口部分では地形の影響により流速は小さく、一方、沖合部では流速は速くなり、40 cm/s 程度の流れが空間的にほぼ一様に分布していることがわかる。

このような潮汐流が発生する際に、底面付近で生じるSS濃度の変動特性を見るため、沖側の東側測線に位置するStn.E4およびE6で観測された底面上約1mにお

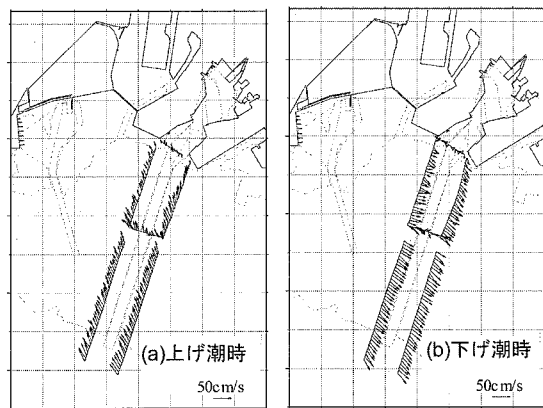


図-5 大潮期の航路周辺での流況分布 (底面上約1mでの流速値による)

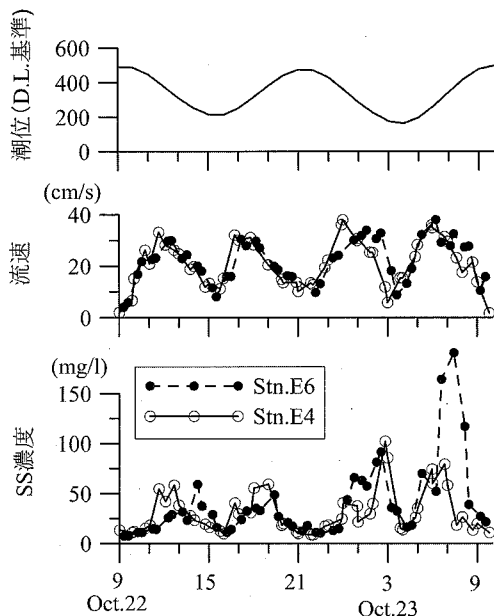


図-6 観測期間中の潮位、底面付近での流速およびSS濃度の時間的变化

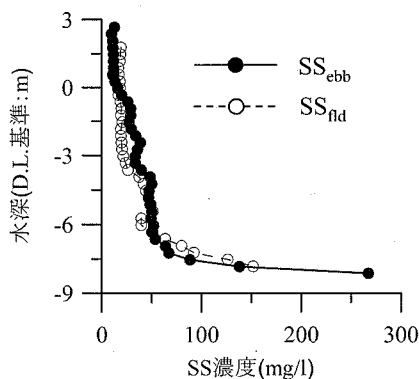


図-7 Stn.E6におけるSS濃度の鉛直分布 (SS_{ebb}:下げ潮時/10月23日午前0時, SS_{fld}:上げ潮時/同日午前5時)

ける流速とSS濃度の時間変化を潮位と比較して図-6に示す。SS濃度については、現場で採取した底質による濁水試料を用いた検定を通じて、濁度値をSS濃度 (mg/l) に換算した結果で示している。いずれの地点においても、下げ潮および上げ潮時には流速が40 cm/s程度にまで達し、また流速変動に対応したSS濃度の変動も見られる。このような傾向は、さらに沖側に位置するStn.E7や航路西側のStn.W4～W7においても同様に見られる。これらSS濃度の上昇時におけるSS濃度の鉛直分布 (図-7) を見ると、上げ潮時 (SS_{fld})、下げ潮時 (SS_{ebb}) のいずれにおいても底面に向かって急激

に濃度が上昇している。潮流速の増大に対応し、かつ海底面付近でのSS濃度が上昇するという時空間変動特性を考慮すると、潮汐流の作用による底泥の巻き上げがこれら浮遊懸濁物の主要な供給要因の1つとして考えられる。これに対し、岸側の測定域(Stn.E1~E3, W1~W3)では陸岸に近づくほど潮汐の流速振幅が小さく、底面付近でのSS濃度の上昇は見られなくなる。流速の減少のみならず、図-2で示したように陸岸に近づくほど底質粒径が粗くなっていることも、潮汐流による巻き上げが生じにくくなる要因として考えられる。一方、泥分が主体となる沖側海域で生じる底質の巻き上げは、潮汐流の卓越方向が航路横断方向であることを考慮すると、航路内への泥の集積、すなわち航路埋没の要因に成り得るものと考えられる。

4. 数値シミュレーションによる底質輸送の再現

将来的な埋没量の予測は、埋没対策の内容や投資効果の検討にとってきわめて重要である。数値モデルによる埋没量予測の試みもいくつかみられ(例えば, Tsuruya et. al. 1988), また底質輸送に関与する様々な要因のモデル化を統合したモデルも開発されている(HydroQual, 2002)。しかしながら、埋没の原因となる底質輸送現象は、地形や海象条件だけでなく対象海域における底質の物性特性とその空間分布に大きく依存しているため、対象海域ごとにこれらの情報を効率的にモデルに反映させることが必要である。特に泥質の場合には、侵食特性が圧密過程などの堆積状態に依存する(例えば, Whitehouse et. al, 2000)ため、対象海域における泥の侵食特性に関するモデル・パラメータを適切に設定することが重要である。そこで本研究では、流況と濁度観測の現地観測データを活用して、泥の侵食パラメータを設定する手法(Hill et. al, 2003, 中川ら, 2005)を活用し、宇部港周辺での底泥の輸送現象のモデル化を試みた。

ここでは多層レベルモデルによる潮流計算と移流拡散計算を組み合わせた底質輸送モデルを用いて、潮汐流による泥の移動現象を対象とした数値計算を行った。対象海域における卓越周潮であるM₂, S₂分潮を考慮して潮汐流の境界条件を設定し、現地観測を実施した2002年10月22日~23日の流れの再現をまず行った。また、計算における浮遊泥の供給は、すべて海域内の底泥の巻き上げによるものとし、また底質の含泥率の空間分布を既存の底質調査結果を参考に作成して境界条件とした。一方、泥の侵食速度は底面せん断応力(τ_b)の関数として表される式(1)を用いた。

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ec}} - 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、M: 侵食速度定数および τ_{ec} : 侵食に関する

限界せん断応力である。これら侵食特性に関するパラメータを得るため、Stn.E4からE7での観測データを基に潮汐流による底面せん断応力と浮遊泥量の増加率の関係を得たものが図-8である。含泥率が高くなる沖側の測点(Stn.E6, E7)では、作用外力の増大に対応する浮遊泥量の増加傾向がより顕著となっている。ただし、SS濃度の上昇要因は水平移流の効果など、必ずしも巻き上げの効果のみによるわけではなく、同図の結果においてもデータのばらつきは見られる。しかし、水平方向の濃度勾配など移流の影響を評価するための情報が不足している一方で、前章に示したような潮流速と濃度変動の対応関係が見られることから、ここでは巻き上げの効果がSS濃度増大の主要因であると仮定し、図-8より侵食速度定数および限界せん断応力の平均値を求めた。その結果、ここでは $M=0.019$ (mg/cm²/min.) および $\tau_{ec}=0.021$ (Pa)が得られ、有明海熊本沖での観測データに基づく同様な検討結果(中川ら, 2005)と比較するとオーダー的には同様な結果が得られた。

これらのパラメータ設定に基づく数値計算の結果につ

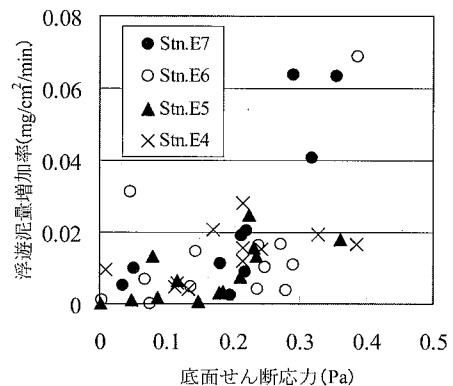


図-8 底面せん断応力と浮遊泥増加率の関係

いて、Stn.E6における潮位、流速ベクトル、SS濃度の時系列データを観測結果と比較して示したものが図-9である。大潮期の流れのパターンならびに流速の強弱に対応した底面付近でのSS濃度の時系列変化も良好に再現できていることがわかる。さらに、沖合東側の測線(Stn.E4~E7)に沿ったSS濃度の空間分布について、ADCP反射強度から推定された観測値と計算結果を比較した結果を図-10に示す。航路沖合の底面付近ほど濃度が増大する傾向が計算により再現できていることがわかる。ただし、航路先端部での局所的な濃度の増大など、計算では再現できていない部分もみられ、このような空間分布の形成要因をさらに検討したうえで、数値モデルの精度向上を図る必要がある。

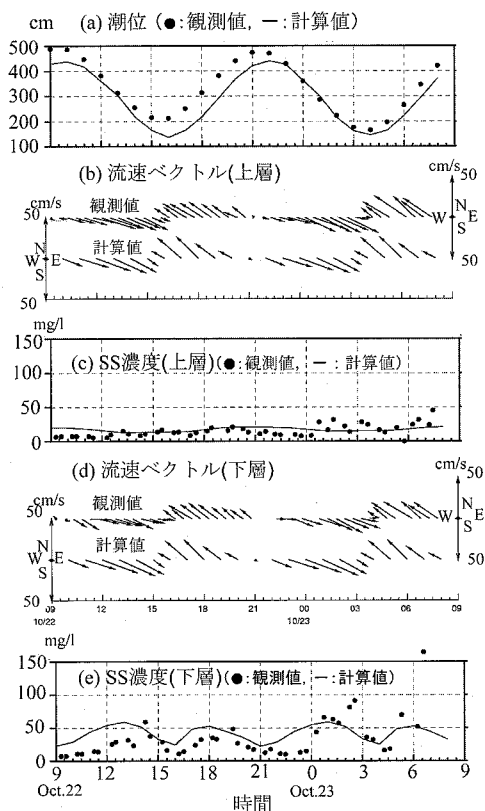


図-9 数値モデルによる SS 濃度分布と観測結果の比較

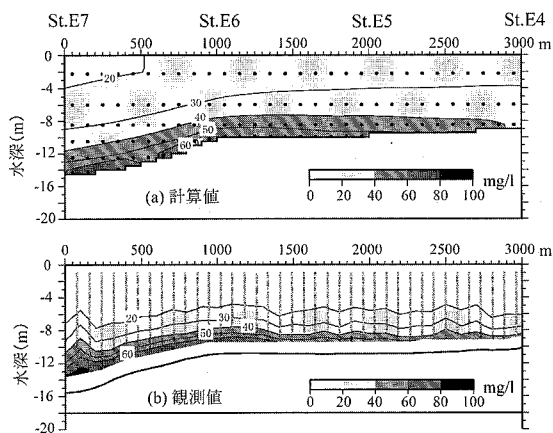


図-10 数値モデルによる SS 濃度分布と観測結果の比較

5. おわりに

周防灘北部沿岸域(宇部港沖)で実施された流況・濁度等の観測データの解析により、航路沖合では潮汐流の増大とともに海底付近の浮遊泥濃度の上昇が顕著であることを示した。これら SS 濃度の時空間分布の変動と潮汐流変動との対応関係から、浮遊泥濃度の上昇は航路周辺海域の底泥の巻き上げが主要因と考えられ、また航路の横断方向に輸送される浮遊泥は航路の埋没にも影響を及ぼすものと考えられる。さらに、現地での浮遊泥の輸送現象の再現を目的とした数値モデルを構築し、泥の巻き上げに関するモデル・パラメータについては現地での観測結果を基に設定し、潮汐流の作用による浮遊泥の濃度変動や空間分布が良好に再現できることを示した。

今後は、これら浮遊泥の航路内の侵入による埋没への影響について検討するため、より詳細な SS 濃度分布さらには SS フラックスの再現性の検証をふまえて、埋没量等の定量的な評価が可能な底泥輸送モデルに発展させていく予定である。

謝辞：現地調査の実施にあたり、国土交通省中国地方整備局宇部港湾事務所の協力を得たことを付記し、関係各位に謝意を表する次第である。また、データ整理の一部において三洋テクノマリン(株)、国土環境(株)(現・いであ(株))の各社に協力を得たことを付記する。

参考文献

- 太田陽子・成瀬敏郎・田中真吾・岡田篤正編(2004)：日本の地形 第6巻(近畿・中国・四国)，pp. 383.
- 中川康之・吉田秀樹・谷川晴一・黒田裕一(2005)：潮汐流による底泥の巻き上げ現象のモデル化と浮遊泥量変動の再現，海岸工学論文集，第52巻，pp. 441-445.
- Hill, D.C., Jones S.E. and Prandle, D., (2003) : Derivation of sediment resuspension rates from acoustic backscatter time-series in tidal waters, Continental Shelf Research, Vol.23, pp.19-40.
- HydroQual (2002) : A primer for ECOMSED Version 1.3, Users Manual, 188p.
- Tsuruya, H., K. Murakami and I. Irie. (1990) : Mathematical modeling of mud transport in ports with a multi-layered model-Application to Kumamoto Port-, Technical report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.1, 3-51.
- Whitehouse, R. Soulsby, R., Roberts, W. and Mitchener, H., (2000) : Dynamics of estuarine muds, Thomas Telford Publishing, 210p.