

瀬戸内海水島港周辺域の 懸濁粒子(SS)の輸送特性

MOVEMENT CHARACTERISTICS OF SUSPENDED SOLIDS AROUND MIZUSHIMA PORT IN THE SETO INLAND SEA

高尾敏幸¹・杉松宏一²・柴木秀之³・常森通浩⁴・田中丈裕⁵

Toshiyuki TAKAO, Kouichi SUGIMATSU, Hidenori SHIBAKI

Michihiro TSUNEMORI and Takehiro TANAKA

¹正会員 工修 株式会社 エコー 沿岸デザイン本部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²総理工修 株式会社 エコー 沿岸デザイン本部

³正会員 工博 株式会社 エコー 沿岸デザイン本部

⁴岡山県 備中県民局水島港湾事務所 (〒712-8056 倉敷市水島福崎町1-12)

⁵農修 岡山県 農林水産部水産課 (〒700-8570 岡山市内山下2-4-6)

Field experiments to investigate the movement characteristics of suspended solids around Mizushima Port in the Seto Inland Sea were performed throughout winter (1-18 March), the rainy season (30 June - 18 July), and summer (21 August - 7 September) of 2006. To characterize the distribution of suspended solids, physical observations, including current, temperature and salinity were conducted, in addition to observations of turbidity and suspended solid concentrations. As a result of field analysis, the Mizushima area was divided into three areas: the western part of Mizushima Port, the mouth of Takahashi River and the eastern part of Mizushima Port. In the western Mizushima Port sediment suspension appeared predominately in the bottom layer in conjunction with tidal currents. As a result, tidal currents were identified as the main contributor to sediment suspension in this area. At the mouth of the Takahashi River the relative maximum concentration appeared at both the surface and bottom. The depth of the high suspended solid layer was greatest when the river discharge was large, and hence surface water impurity is dependent on river discharge. In the final area, the eastern part of Mizushima Port, suspended solid concentrations were distributed lower and uniformly throughout the water column due to rough sediments and strong tidal currents.

Key Words : *Suspended Solid, Sediment suspension, Field Experiment, Tidal current, Seto Inland Sea*

1. はじめに

海域における懸濁粒子(SS)は、一般的にその濃度が高いほど透明度が低下し、光合成に必要な光量の到達深度である有光層厚を減少させるため、藻場の衰退との関係も推測されている¹⁾。このため、SSの海域における挙動特性を把握することは、各種の環境施策を行う上で非常に重要である。

SSの挙動の外力となる流動場について、柳²⁾は瀬戸内海における潮汐・潮流、残差流を体系的にまとめている。

また、内湾における再懸濁については、鷺見・田中³⁾によって流速の鉛直分布に対数則が適用できることが確認され、濃度の鉛直分布を海底からの距離の関数で表される再懸濁理論により説明している。

多田ら⁴⁾は海砂利採取船近傍で採水を行い、懸濁粒子の沈降速度を実験により調べており、粒径の小さい粒子が長時間浮遊することを示しており、粒径から計算される沈降速度と現場の沈降速度の違いを示している。

本研究で対象とした瀬戸内海の備後灘東部の水島港周辺域は、潮流の速い備讃瀬戸の西側に位置しており、潮汐フロントと呼ばれる潮目が形成される海域である⁵⁾。また、陸域からは、一級河川である高梁川が注ぎ、河口部では河口フロントが形成される。

本研究の目的は、高精度なSS拡散モデル開発のために水島港周辺域のSSの輸送特性を現地観測より把握することである。

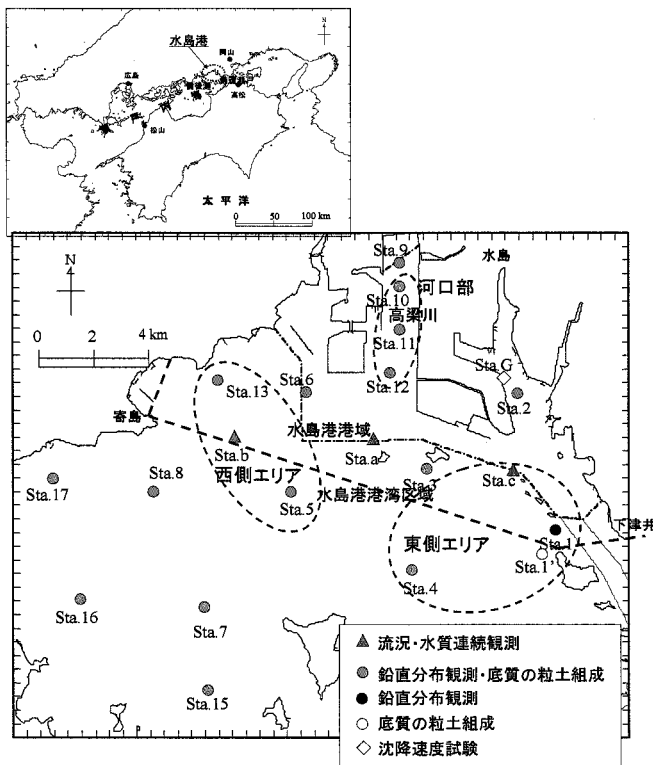


図-1 観測地点図

2. 現地観測

水島港周辺域の流れ、密度場、濁りの現況を把握するため、2006年の冬季(3月1日～3月20日)、増水季(6月29日～7月18日)、夏季(8月21日～9月7日)の3季と8月10日に図-1に示す水島港周辺海域において現地観測を行った。観測では、音響ドップラー流速分布計(ADCP)を用いた連続観測、水温・塩分計と濁度計を海面下2mと海底上2mに係留した連続観測をSta. a, Sta. b, Sta. cの3地点で行った。この3地点と周辺の16地点の合計19地点で、各観測期間内の1日で水温・塩分・濁度の鉛直分布を観測した。また、夏季の観測期間中に20地点(鉛直分布観測の全地点とSta.1')で底質を採取し、うち19地点(Sta.1を除く地点)で粒度組成を調べた。濁度からSSへの換算を行うため、定期的に採水を行い、SSの測定を実施した。8月10日に浚渫工事近傍点(Sta. G)の底層水を採取し、冷暗所で保管した後の8月22日から実験室で沈降速度試験を開始した。実験は、直径7.5cm、長さ30cmの亚克力管に攪拌した濁水を注ぎ、管内のほぼ中央の水を固定したホースを通して注射器により定期的に採取し、濁度の時間変化から沈降速度を求めるものである⁴⁾。これらの観測値・実験値と近隣の気象・海象データを収集し、SSの輸送特性の把握を試みた。

各地点の水深は、表-1のとおりである。

ADCPは、RD社製のWH1200kHzを使用した。測定は、層厚25cm、10分間隔に実施した。水温・塩分計は、冬

季の海面下2mと海底上2m、増水季と夏季の海底上2mではアレック電子社製のCOMPACT-CTを用い、増水季と夏季の海面下2mではアレック電子社製のCOMPACT-CTWを使用し、測定は、10分間隔に行った。濁度計は、アレック電子社製のCOMPACT-CLWを使用し、測定は、10分間隔に行った。

水温・塩分・濁度の鉛直分布測定は、アレック電子社製のCOMPACT-CTDを使用し、測定は、水深0.1m間隔に測定を行った。

底質の採取は、グラブ採泥器(砂質の地点では港研式採泥器を用い、泥質の地点ではエクマン・バージ型採泥器)を用いた。

採水は、バンドーン採水器を使用し、海面下2mと水深の1/2と海底上2mの3層の採水を行った。

表-1 観測地点の水深(単位:m, CDL基準)

Sta	水深(m)	Sta	水深(m)	Sta	水深(m)
a	12	4	13	11	4
b	8	5	10	12	6
c	9	6	6	13	5
1	26	7	11	15	20
1'	10	8	9	16	10
2	16	9	1	17	6
3	13	10	2	G	16

3. 観測結果

(1) 連続観測

増水季の観測期間における水島港の潮位、Sta. a, Sta. b, Sta. cの3地点の海底上2mにおける流速のスティックダイアグラム、および海面下2mと海底上2mの濁度の時系列を図-2に示す。

流れは、潮汐に応じて変動しており、1日間の変動では、上げ潮と下げ潮で強く、15日間の変動では、大潮で強く、小潮で弱い傾向を示し、潮流が卓越していた。

濁度は、この流況の変動と対応して、主に1日4回のピークが出現しており、上げ・潮止まり・下げ・潮止まりに応じて上昇と下降をしていた。さらに、濁度のピークの値は大潮で高く、小潮で低い傾向にあった。濁度の下限値も大潮で高く、小潮で低い傾向にあった。

海面下2mと海底上2mの濁度で比較した場合、海底上2mの濁度の方が概ね高い値を示した。とりわけ、Sta. aとSta. bでこの傾向が強かった。このような特徴から、主に潮流に起因して底質の再懸濁を生じていることが示唆される。

(2) 鉛直分布観測

図-3に濁度の鉛直分布を示す。濁度の鉛直分布から主に高梁川を中心として西側の海域、河口部、東側の海域という3つの海域に分類された。西側の海域では、底層で濁度が高く、表層で低くなる傾向にあった。河口部では、冬季と増水季の表層と底層で高く、夏季は底層で高くなる傾向にあった。東側の海域では、鉛直方向にほぼ一様となる傾向にあった。

備讃瀬戸周辺は、強い潮流によって海水が鉛直混合をする海域である⁵⁾。潮流による海底摩擦のエネルギーと水中のポテンシャルエネルギーの関係から導かれる鉛直混合の指標となる $\log_{10}(H/U^3)$ ⁵⁾を水深(H)と M_2 分潮の潮流楕円振幅の長軸の値(U)を代入して算出したところ、Sta. cは約1.9となり鉛直混合の状態に該当し、Sta. bは、約2.5となり、鉛直混合と成層の境界状態に該当していた。

河口部における濁度の鉛直縦断面内分布図を図-4(1)に示す。3月3日と7月3日は、表層と底層で高く中層で低

い。9月4日は、底層で高い。流下時間を配慮し、前日の高梁川上流の日羽観測所(河口部より約20km)における毎時流量を、国土交通省ホームページ掲載の毎時水位⁶⁾からHQ曲線による推測したところ、3月2日が約130m³/s、7月2日が約360m³/s、9月3日が約30m³/sであった。塩分の縦断面図を図-4(2)に示す。3月と7月は表層に低塩分域が広がっており、淡水流出が確認された。このように、河口部では、高梁川の流量に応じて濁りのパターンも変動していることが確認された。

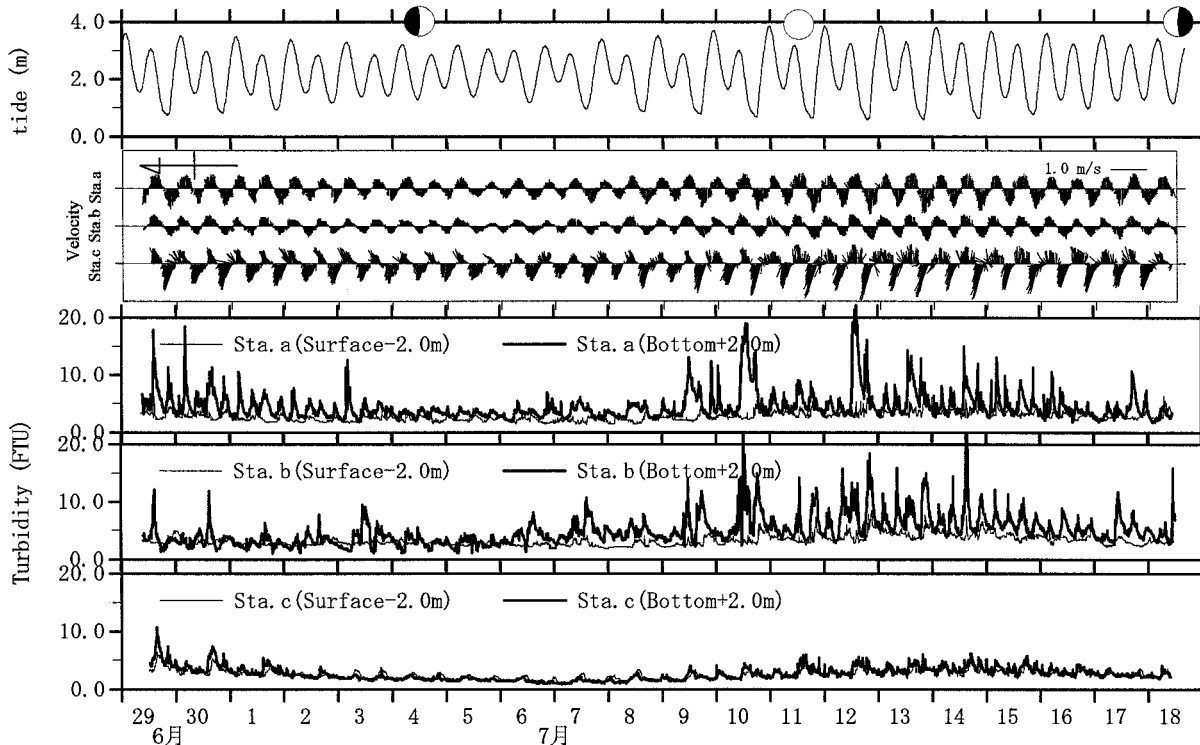


図-2 水島港潮位, Sta. a, b, cにおける流速(海底上2.0m), 濁度(海面下2.0mと海底上2.0m)の時系列

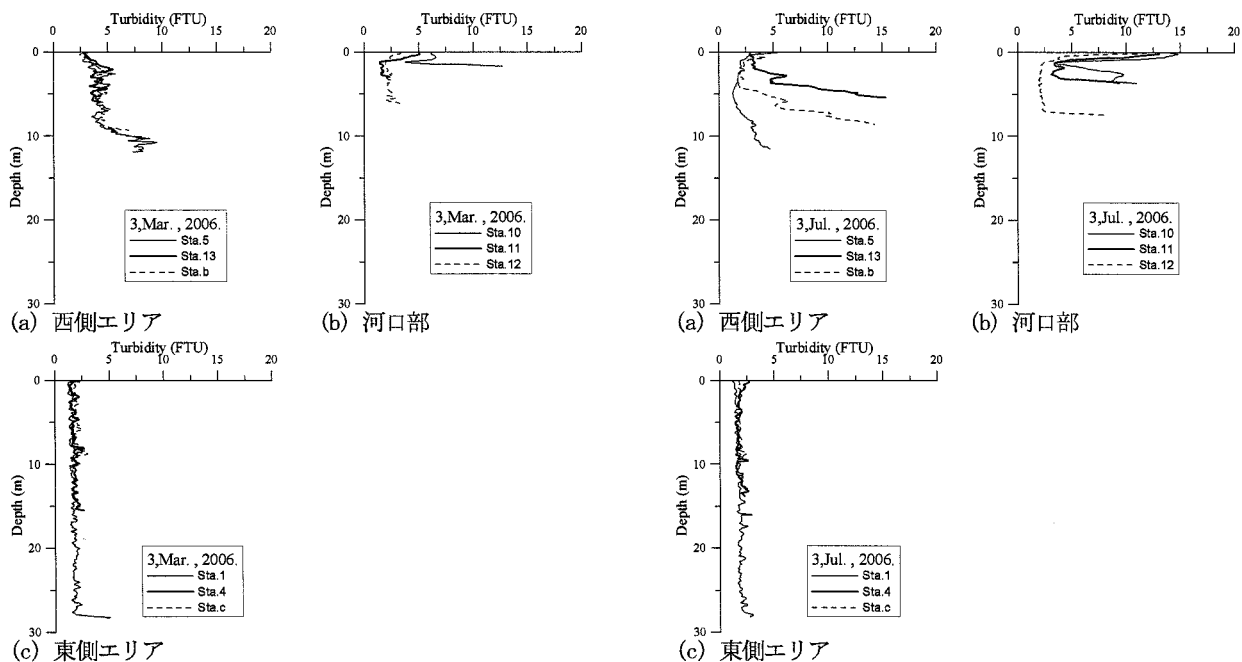


図-3(1) 濁度の鉛直分布 (2006年3月3日)

図-3(2) 濁度の鉛直分布 (2006年7月3日)

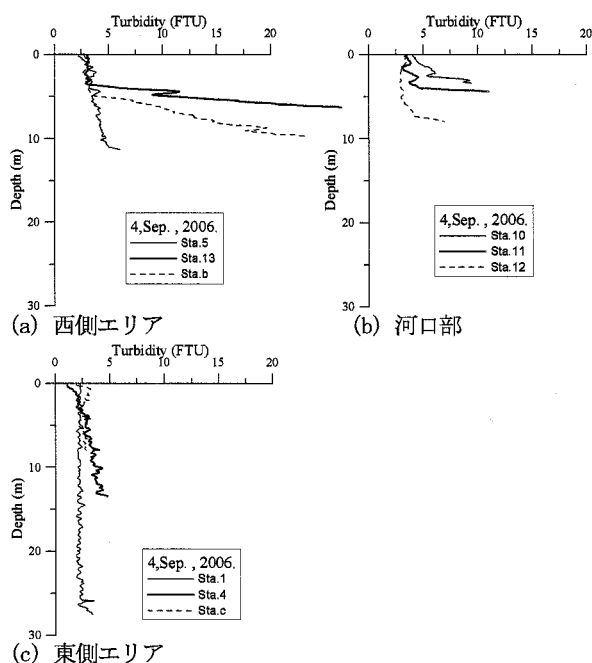


図-3(3) 濁度の鉛直分布 (2006年9月4日)

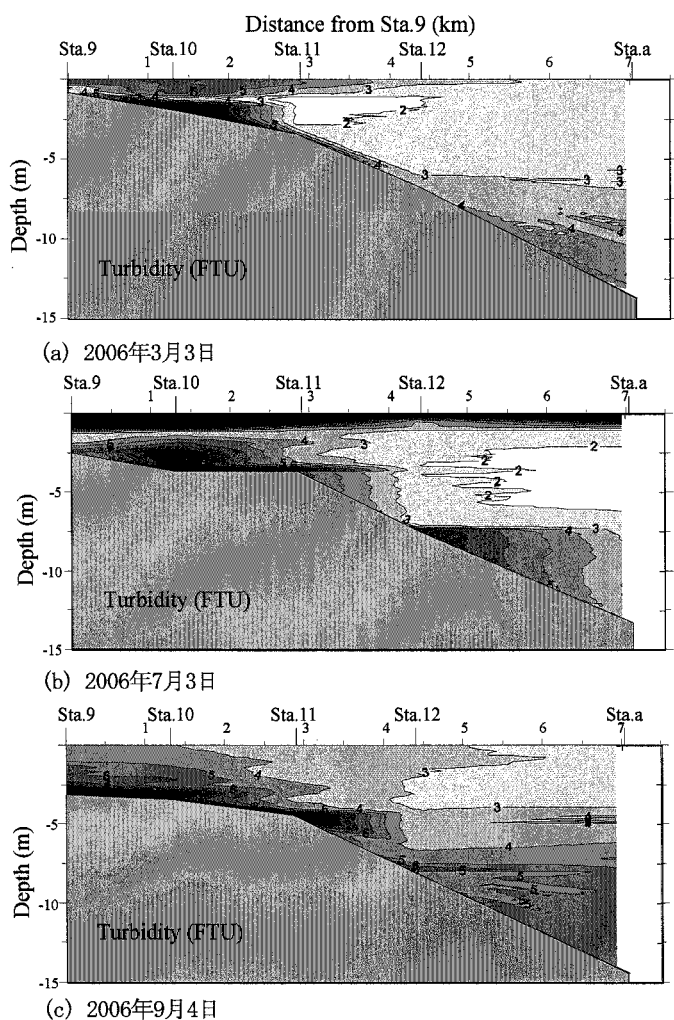


図-4(1) 河口部の濁度の縦断面内の分布図

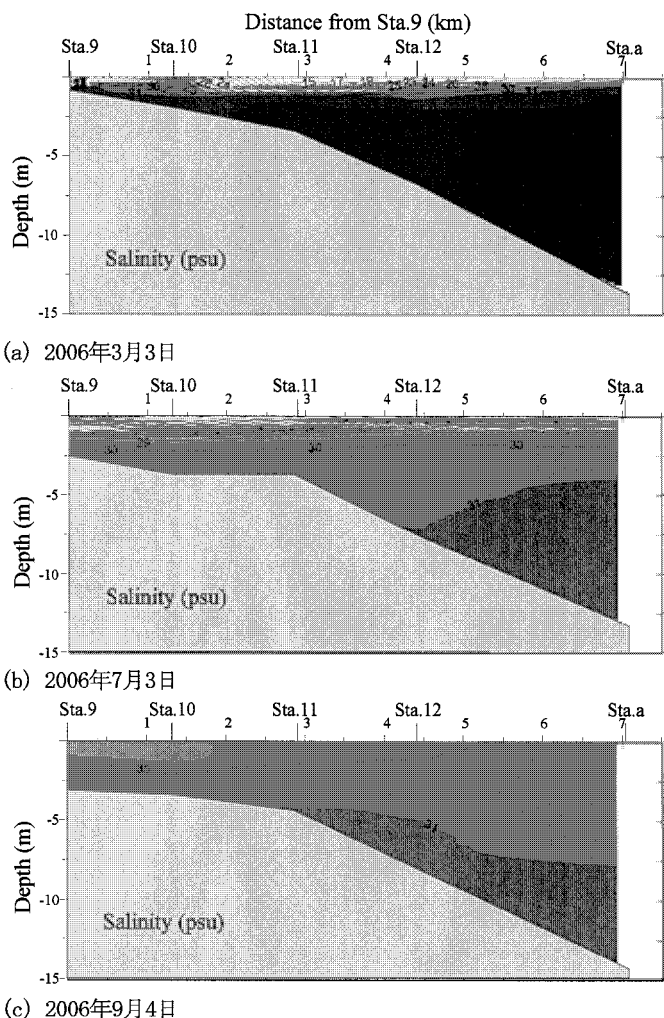


図-4(2) 河口部の塩分の縦断面内の分布図

(3) 底質の粒度組成

Sta.1では、底質採取を複数回試みても礫がわずかに採取されるのみであった(写真-1)。そこで、Sta.1を除く19地点で粒度組成を調べた。

図-5に底質の粒度組成を示す。底層で濁度の高かった西側の海域は、シルト・粘土の割合が高く、Sta. bとSta. 13では、95%以上を占めていた。一方で、濁度の低かったSta. cとSta. 1では、シルト・粘土の割合は10%未満であった。



写真-1 Sta. 1で採取された底質

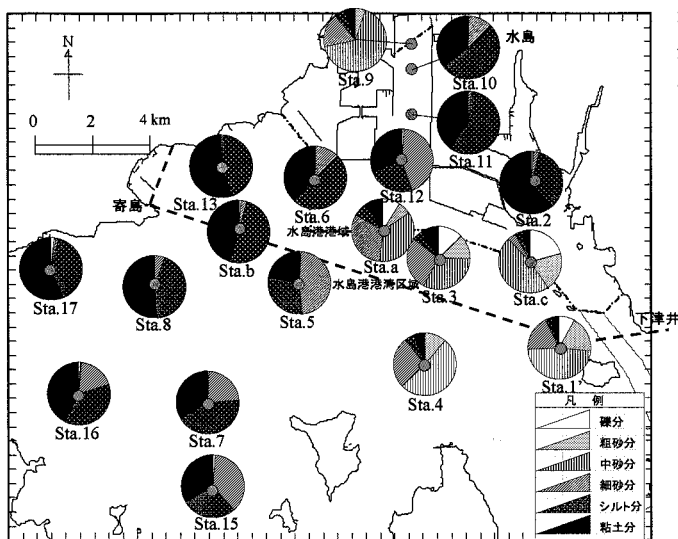


図-5 底質の粒度組成

(4) 沈降速度

前述した沈降速度試験の結果、水島港内の浚渫工事近傍の底層で採取された濁水中の粒子の平均的な沈降速度は、1.8m/dであった。

4. 考察

現地観測により、Sta. bで、シルト・粘土が多く、潮流に応じて濁度変動しており、底層ほど濁度が高い傾向が確認された。このことから、Sta. bでは、潮流による再懸濁を生じていることが推察された。

流れの卓越する場所では、流速の鉛直分布に対数則が適用される⁷⁾。鷲見・田中³⁾は、広島県の福山沖で流速に対数則が適用できることと、SSの鉛直分布にRouseの式⁸⁾が適用されることを示している。また、Itakura and Kishi⁹⁾は、境界層の厚さが成層状態に応じて変化するため、境界層に対してMonin-Obukhovの相似則を適用した関係式(式(1))を提案している。

そこで、Sta. bで観測された流速の鉛直分布からItakura and Kishi⁹⁾の提案している対数則への適用を試みた。

$$\frac{u(z)}{u_*} = \kappa^{-1} \left\{ \ln \frac{z}{k_s} + \alpha \frac{(z - k_s)}{L} \right\} + 8.5 \quad (1)$$

ここで、 $u(z)$ ：海底上 $z(m)$ における流速、 u_* ：摩擦速度(m/s)、 κ ：カルマン定数(=0.4)、 k_s ：相当粗度(m)、 α ：Monin-Obukhov係数、 L ：Monin-Obukhov長さ(m)、をそれぞれ示す。観測により得られている最下層の流速である海底上1.25mの流速を用い、式(1)により摩擦速度を算出した。この摩擦速度を再び式(1)に代入し、流速の鉛直分布を推算した。使用した相当粗度の k_s は1mm、Monin-Obukhov係数の α は7.0、Monin-Obukhov長さの L は3月の観測が350m、7月の観測が175m、9月の観測が17.5mを用いた。流速は、1時間の移動平均した値を使用した。比較は、大潮後の潮流の強い期間における下げ

潮最強時のもので行った。また、海上風の強い期間は、海面に境界層が形成されるため、水島の風速が2.0m/s未満の条件で比較を行った。観測値と計算値の比較結果を図-6に示す。Lの取り方に課題はあるものの、観測された流速の鉛直分布と式(1)により計算された流速の鉛直分布はよく一致し、対数則が成立することが示された。

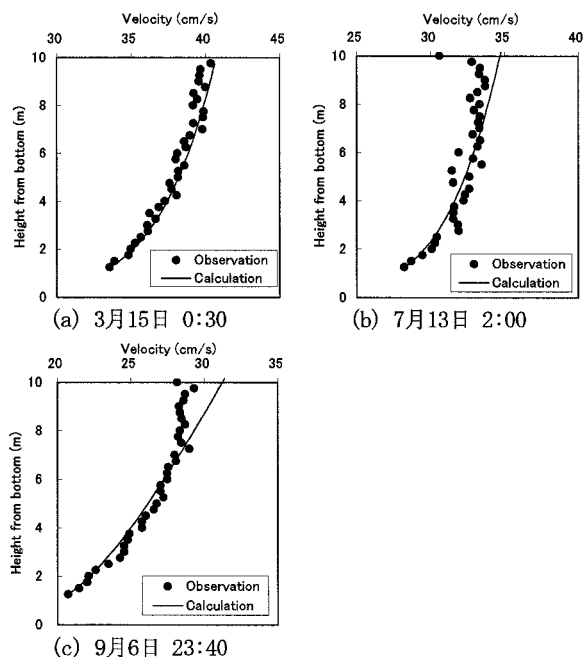


図-6 流速の観測値と対数則による計算値の比較結果

再懸濁による濁度の鉛直分布については、Rouseの分布式⁸⁾とItakura and Kishi⁹⁾の式が提案されている。鉛直混合しているような場における定常解は、Rouseの分布式が適用される。成層による境界層の厚さの変化へも適用される式としてはItakura and Kishi⁹⁾の提案式(式(2a)～式(2d))が使われる。ここで、式(2b)の $\alpha=0$ のときが、Rouseの分布式に該当する。

$$\frac{C(z)}{C_a} = \left\{ \left(\frac{h-z}{h-a} \right)^{1+\phi} \frac{a}{z} \right\}^b \quad (2a)$$

$$\phi = \alpha \frac{h}{L} \quad (2b)$$

$$b = \frac{w_s}{\beta \cdot \kappa \cdot u_*} \quad (2c)$$

$$\beta = 1 + 1.56 \cdot \left(\frac{w_s}{u_*} \right)^2 \quad (2d)$$

ここで、 $C(z)$ ：海底上 z における懸濁態粒子濃度、 C_a ：海底上 a における懸濁態粒子濃度、 h ：水深、 w_s ：懸濁態粒子の沈降速度、をそれぞれ示す。観測された濁度の鉛直分布と式(2a)～式(2d)より計算される濁度の鉛直分布の比較を行った。観測値は、3月が上げ潮から憩流時の時間帯、7月が下げ潮から憩流時の時間帯、9月が憩流時から上げ潮の時間帯にそれぞれCTDを用いて測

定した瞬間値であり、流況の比較を実施した時刻とは異なる。 w_s を水島港内で採取された濁水の実験結果である1.8m/dとした場合と、鷺見・田中³⁾が瀬戸内海福山沖で測定した懸濁態粒子の沈降速度である17.3m/dとした場合を図-7に示した。沈降速度1.8m/dおよび17.3m/dは、3月の分布は比較的一致するものの、7月と9月の分布は観測値を表現するには至らなかった。図-2に示したように底面付近の濁度の時間変化は大きく、観測時の濁度の鉛直分布が定常状態と仮定できない可能性や L と w_s の数値の妥当性に課題があげられる。

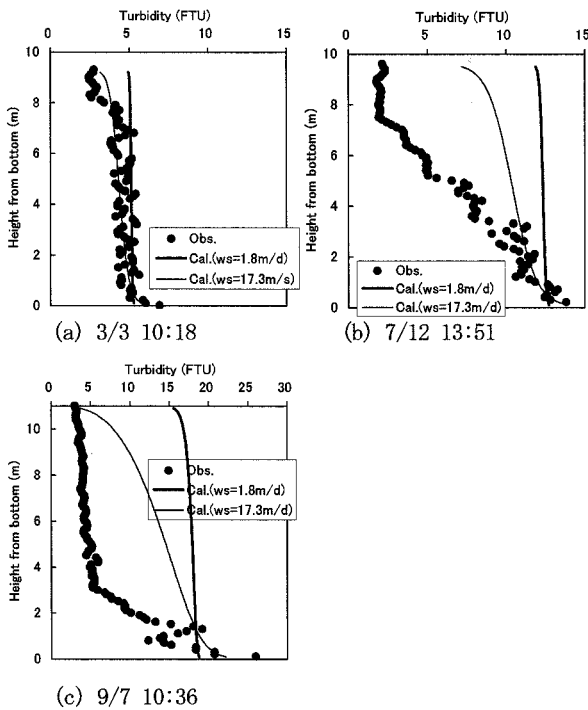


図-7 濁度の観測値と計算値の比較結果

5. おわりに

本研究による主要な結論をまとめる。

- ・濁度は、潮流と対応して変動しており、1日間におよそ4回のピークを示した。15日間では、大潮で高く、小潮で低い。この傾向は、高梁川河口部よりも西側の海域で顕著であった。このような地点の濁度は、海底付近ほど高い傾向にあり、再懸濁を生じていることが示唆された。
- ・高梁川河口部は、高梁川の流量に応じて濁りも変化しており、流量が多くなると、SSを多く含んだ河川水が表層を流出する傾向が確認された。河口部の底面付近も濁りは高く、出水時には、中層に濁りの極小となる層が存在していた。
- ・高梁川の東側における海域は、強い潮流により鉛直混合の状態にあり、濁度の鉛直分布は、ほぼ一様であった。
- ・底質の粒度組成は、底層で濁度の高かった高梁川の西側の海域でシルト・粘土の割合が高く、鉛直方向にほ

ぼ一様な濁度を示した高梁川の東側の海域で砂・礫の割合が高かった。

- ・高梁川の西側海域にあるSta. bに着目し、流速の鉛直分布の対数則への適用を試みたところ、ほぼ一致する結果が得られた。また、濁度の鉛直分布についても対数則への適用を試みたが、観測値と一致するには至らなかった。濁度は、時間変化が大きく定常解として仮定することが困難であることが一因に考えられる。

本研究により、流速の鉛直分布をある程度解析的に示すことが確認できた。これにより、底面近傍の流速の時系列から摩擦速度および底面せん断力の時系列を推算することが可能となる。これと、海底上2mで観測された濁度あるいはADCPの反射強度から推算されるSSの時系列と比較を行い、巻上げ限界せん断力などの再懸濁のモデル化に必要なパラメータを抽出していく予定である。また、各層の流速の時系列と濁度等から推算されるSSを整理し、SSのフラックスについて解析を行うことで、高精度なSS拡散モデル構築の再現の基礎となるSSの輸送特性の把握を行う予定である。

謝辞：本研究は、水島港の濁り拡散予測モデル開発の一環として行ったものであり、研究の機会を与えて頂き、かつ貴重なご助言を賜りました京都大学名誉教授 奥田節夫博士、九州大学応用力学研究所教授 柳哲雄博士並びに岡山大学環境理工学部教授 大久保賢治博士に深くお礼申し上げます。また、水島港の現地観測データの取得にご協力頂きました岡山県土木部港湾課、岡山県水産試験場の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 高橋暁・湯浅一郎・村上和男・星加章：瀬戸内海の海砂利採取周辺海域における透明度の変化と藻場分布の関係、沿岸海洋研究, Vol.42, No.2, pp.151-159, 2005.
- 2) 柳哲雄：沿岸海洋学—海の中でのものはどう動くか—, 恒星社厚生閣, 155p., 1994.
- 3) 鷺見榮一・田中祐志：沿岸域の底層における懸濁態粒子の物理的挙動, 海岸工学論文集, Vol.46, pp.991-995, 1999.
- 4) 多田邦尚・和田探香・一見和彦・橋本俊也：海砂利採取船からの高濁度排水中の微粒子の挙動—微粒子の特性と沈降速度—, 沿岸海洋研究, Vol.43, No.2, pp.157-162, 2006.
- 5) 柳哲雄：潮目の科学—沿岸フロント域の物理・化学・生物過程—, 恒星社厚生閣, 171p., 1990.
- 6) 国土交通省：水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
- 7) Soulsby, R. L. : Dynamics of Marine Sands, a manual for practical applications, Thomas Telford, London, 249p, 1997.
- 8) Rouse, H. : Modern conceptions of the mechanics of turbulence, Trans. Am. Soc. Civ. Eng., Vol. 102, pp.436-505, 1937.
- 9) Itakura, T. and Kishi, T. : Open channel flow with suspended sediments, J. Hyd. Div., ASCE, Vol.106, HY8, pp.1325-1343, 1980.