粒径別の底質浮遊特性に関する現地観測

Field Measurement of Suspended Sediment Size Distribution

栗山善昭¹・鈴木崇之²・柳嶋慎一³・鵜崎賢一⁴・石野芳夫⁵・坂本 光⁶

Yoshiaki KUIRIYAMA, Takayuki SUZUKI, Shin-ichi YANAGISHIMA
Ken-ichi UZAKI, Yoshio ISHINO and Hikari SAKAMOTO

To investigate size distributions of suspended sediments, the field measurement using LISST (Laser In-Situ Scatter and Transmissometer) was conducted on a sandy beach. The time-series of suspended sediment concentration (SSC) of a grain size in the sand range (63 to 500 μ m) had strong correlations with those of other sand grain sizes, and the same trend was observed for silt (3 to 28 μ m). However, the time-series of SSC of sands had little correlations with those of silts. The comparison between the estimated and measured grain size distributions of suspended sediments suggested that the assumption that SSC is inversely proportional to the sediment fall velocity can be applied to estimation of SSC of various grain sizes. With the increase in median sediment diameter, the sorting coefficient decreased and the skewness increased.

1. はじめに

底質粒径は海浜の特性を決定する重要な要因の一つである。海浜変形に関する従来のモデルでは底質は単一粒径として扱われることが多かったものの、現地における底質の粒径はある幅を持っていることから、混合粒径条件下における模型実験や粒径に注目した現地観測（例えば、片山ら，1999；加藤ら，2007）が実施されるとともに、複数の粒径を考慮した数値シミュレーションが試みられている。しかしながら、混合粒径条件下における底質浮遊に関しては未だに不明な点が多いことから、本研究では、粒径・粒度分布計を用いた現地観測を実施し、粒径別の底質浮遊特性を検討した。

2. 現地観測の概要

粒径・粒度分布計（LISST-100, Laser In-Situ Scatter and Transmissometer）は粒径2.5～500 μ mの範囲を32分割し、それぞれの範囲の底質の濃度をレーザー光の回折を利用して測定するものである。現地観測は2008年1月30日18:00～2月17日14:00に茨城県波崎海岸に位置する波崎海洋研究施設で行った。図-1に示す地点において、初期地形の底面より約30cmの高さにLISSTと光学式後方散

乱型濃度計（OBS）を設置するとともに、同地点に光学式砂面計も設置した。なお、OBSに関しては、現地の前浜で取得した底質（ふるい分けで得られた中央粒径220 μ m）を用いてキャリブレーションを行った。LISSTによる観測は2時間毎に約20分間、サンプリング周波数は約0.5Hzであり、OBSによる観測は1時間毎に20分間、サンプリング周波数は2Hzである。光学式砂面計は、鉛直方向に2.5cm間隔で設置された光の送受波器間の光の

図-1 観測期間中の断面変化と観測位置。高さの基準は波崎港工事基準面（T.P.-0.687m）である。

図-2 観測地点の地盤高さの変動。実線は砂面計の記録、黒丸印は断面測量結果、破線は計測器の位置を示す。

1 正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所 特別研究官
2 正会員	博(工)	横浜国立大学 大学院都市イノベーション
研究院 准教授
3 正会員		(独法)港湾空港技術研究所 沿岸環境
研究領域 主任研究官
4 正会員	博(工)	群馬大学 大学院工学研究科 准教授
5		国土交通省 伏木富山港湾事務所
沿岸防災調査官
6 正会員	修(工)	(株)プライア・コンサルタント

図-3 (a) 沖波波高(常陸那珂港沖), (b) s_o , s_k , (c) d_{50} , (d) $C(24\mu\text{m})$, $C(201\mu\text{m})$, (e) C_{LISST} , C_{OBS} の時間変動

透過度によって砂面位置を測定するもので、本観測では30分間隔で観測を行った。図-2は観測地点の地盤高さの変動をLISST, OBSの位置とともに示したものである。

上記観測以外には、2月8日の15:52～16:00にかけて、LISSTのすぐ横に設置したホースからポンプによって3回採水を行い、採取した浮遊底質より浮遊砂濃度および中央粒径を調べた。採水時間は、21.8s, 14.5s, 38.3sであり、採水量はそれぞれ、 $14.6 \times 10^{-3} \text{m}^3$, $9.6 \times 10^{-3} \text{m}^3$, $20.0 \times 10^{-3} \text{m}^3$ であった。

さらに、波崎海洋研究施設の長さ約400mの観測機橋に沿って、図-1に示す範囲の断面を、週末、休日を除く1日1回、岸沖方向5m間隔で測量した。沖波に関しては、波崎海岸より約50km北の常陸那珂港沖の沿岸波浪計(地盤高さ、D.L. -30.0m)の2時間間隔20分間のデータ(サンプリング周波数2Hz)を利用した。

解析では、LISSTデータに関して、20分間の測定毎に、

図-4 採水によって得られた浮遊底質からふるいを用いて求めた中央粒径(縦軸、黒丸印)と同底質からLISSTを用いて求めた中央粒径(横軸)、採水時間において観測地点のLISSTで測定した中央粒径(縦軸、赤三角印)との比較

各粒径 d の平均浮遊砂濃度 $C(d)$ およびそれらの総和 C_{LISST} を求めるとともに、OBSデータに関しても20分間の平均浮遊砂濃度 C_{OBS} を求めた。続いて、 $C(d)$ を基に中央粒径 d_{50} 、ふるい分け係数 s_o ($=\sqrt{d_{75}/d_{25}}$, d_{25} , d_{75} は、それぞれ、通過質量百分率が25%, 75%の粒径)、偏わい度 s_k ($= (d_{75}d_{25})/d_{50}^2$) を求めた。図-3は、各特性値の時間変動を示したものである。 C_{LISST} , C_{OBS} は沖波が大きくなると増大する傾向にあり(図-3(a, e)), $C(201\mu\text{m})$ の変動も同様な傾向を示している(図-3(d))。しかしながら、 $C(24\mu\text{m})$ の変動特性は $C(201\mu\text{m})$ のそれとは異なっている(図-3(d))。 d_{50} , s_o , s_k は、お互い相関の高い変動特性を示している(図-3(b, c))。ただし、それらの変動特性と沖波変動特性とは異なっているようである。

3. 解析結果および考察

(1) 測定方法による中央粒径の違い

測定方法による中央粒径の違いを検討するために、採水によって得られた浮遊底質からふるいとLISSTを用いて求めた中央粒径を比較する(図-4)。ふるい分けによって求めた中央粒径はLISSTによって求めた中央粒径に比べて、やや小さめであったけれども、二乗平均誤差は $15\mu\text{m}$ であり、その差は小さいと言える。

続いて、採水によって取得した底質の特性と現地で浮遊している底質の特性との違いを検討するために、採取底質からLISSTを用いて求めた中央粒径と現地で浮遊している底質をLISSTで直接測定して求めた中央粒径とを比較する(図-4)。1つのデータでは両方の差が $18\mu\text{m}$ であるものの、残りの2つのデータでは誤差が $4\mu\text{m}$ であり、全体の二乗平均誤差は $11\mu\text{m}$ であった。よって、採水による方法と直接測定する方法との差も小さいと言える。

図-5 採水結果から得られた浮遊砂濃度（横軸）と LISST による観測値（縦軸，黒丸印），OBS による観測値（縦軸，赤三角印）との比較

図-6 C_{LISST} と C_{OBS} との比較

(2) 採水結果から求めた浮遊砂濃度と LISST と OBS による観測値との比較

採水結果から求めた浮遊砂濃度と LISST, OBS を用いて観測した浮遊砂濃度とを比較する (図-5)。採水結果を基にした浮遊砂濃度と LISST による観測値との二乗平均誤差は 0.12 g/l であり，両者の差は小さい。一方，OBS による観測値は，採水結果から求めた浮遊砂濃度および LISST による観測値よりも数倍大きい。この原因については，次節で検討する。

(3) LISST と OBS による観測値の比較

観測期間中の C_{LISST} と C_{OBS} とを比較したところ (図-6)， $C_{\text{OBS}} < 4 \text{ g/l}$ では， C_{LISST} は C_{OBS} に比べて小さいものの両者の間には高い相関があるのに対して， $C_{\text{OBS}} > 4 \text{ g/l}$ では C_{OBS} が増加しても C_{LISST} の増加量は小さかった。

そこで， C_{LISST} と C_{OBS} との関係を 1 次曲線と 2 次曲線で近似し，両者のモデルの優劣を赤池情報量基準 (AIC) によって判断することにより C_{LISST} と C_{OBS} の線形性の範囲を検討した。その結果， $C_{\text{LISST}} < 1 \text{ g/l}$ では両者の間に線形性がある ($C_{\text{LISST}} = 0.36 C_{\text{OBS}}$) との結果が得られた。

OBS の観測値が LISST の観測値に比べて大きくなった原因としては，OBS の検定に用いた底質の中央粒径が $220 \mu\text{m}$ であったのに対して，浮遊していた底質の中央粒径のほとんどが $200 \mu\text{m}$ 以下であり (図-3 (c))，検定に用いた底質の中央粒径よりも小さかったことが考えられる。OBS による観測では，浮遊砂濃度を底質による光の後方散乱量から計測する。光の後方散乱量は，底質の断面積に比例するため，同じ濃度であっても粒径が小さいほど光の後方散乱量，すなわち，出力値が大きくなる。よって，本観測では，OBS の観測値が LISST の観測値に比べて大きくなったと考える。

図-7 粒径毎の平均浮遊砂濃度 $C(d)$ の時間変動の相関

(4) 粒径毎の浮遊砂濃度の相関

粒径毎の $C(d)$ の相互相関を調べたところ (図-7)，粒径 $63 \sim 500 \mu\text{m}$ (細砂～中砂) の範囲では各 $C(d)$ 間の相関が高くなっており，同様のことが粒径 $3 \sim 28 \mu\text{m}$ (シルト) の範囲でも生じていた。ただし，粒径 $63 \sim 500 \mu\text{m}$ (細砂～中砂) の $C(d)$ と粒径 $3 \sim 28 \mu\text{m}$ (シルト) の $C(d)$ との相関は低く，砂の底質浮遊特性とシルトの特性とは異なっていた。このことは，図-3 (d) に示されている粒径 $24 \mu\text{m}$ の浮遊底質と粒径 $201 \mu\text{m}$ の浮遊底質の濃度の時系列の違いからも見て取れる。

以上の結論は，大粒径の浮遊砂濃度の時間変化と小粒径のそれとは負の相関があるという加藤ら (2007) の結論に近い。ただし，加藤ら (2007) の観測では，相関が逆転する粒径は $200 \mu\text{m}$ であり，本観測結果 ($30 \sim 60 \mu\text{m}$) よりも大きい粒径となっている。また，Creed (2001) らは，粒径 $50 \sim 150 \mu\text{m}$ の範囲における各粒径の浮遊砂濃度の時間変化の相関は高いものの，それらと粒径 $300 \sim 500 \mu\text{m}$ の範囲における浮遊砂濃度の時間変化の相関は低いことを示しており，本観測結果とやや異なる結果とな

図-8 C_{LISST} と d_{50} との関係

っている。

(5) 浮遊砂の中央粒径と平均濃度との関係

C_{LISST} と d_{50} との相関 (図-8) からは, $C_{\text{LISST}} < 0.2 \text{ g/l}$ の場合には, C_{LISST} が増加するにしたがって d_{50} も増加する傾向が見られるものの, $C_{\text{LISST}} > 0.2 \text{ g/l}$ ではそのような傾向は見られず, d_{50} は $185 \mu\text{m}$ を中心にばらついて分布していた。

ここで, 中央粒径の違いによる粒度分布の違いを検討する。図-9より, 中央粒径が変化しても, 砂成分におけるピーク位置は $201 \sim 237 \mu\text{m}$ の範囲に位置しており, 砂成分における粒度分布の形状はほぼ相似である。一方, シルト成分は, 中央粒径が小さくなるにつれて増大する。このことは, 中央粒径の変化は, 粒度分布のピーク位置が変化することによって生じているのではなく, 砂成分とシルト成分の重量比の変化によって生じていることを示している。

この結果は, 前節において明らかとなった, 砂成分では各粒径の浮遊砂濃度の時間変動の相関が高い, すなわち, 各粒径の浮遊砂濃度分布の重量比は変化が小さいことと矛盾しない。

(6) 粒径毎の浮遊砂濃度の推定

浮遊砂濃度を推定する際の仮定の一つに, 浮遊砂濃度が底質の沈降速度に反比例するとの仮定がある。この仮定を粒径別の浮遊砂濃度の推定に適用し, 本仮定の妥当性を検討する。具体的には, 底面における底質の粒度分布から得られる各代表粒径の重量比に, それぞれの粒径の沈降速度の逆数を乗じて, 粒径別の浮遊砂濃度の推定値を求めた。ただし, 観測期間中は底面の底質を採取していなかったため, 2005年6月～10月にかけて観測地点で月1回取得された底質の粒度分布を底面における底質の粒度分布とした。具体的には, 上記期間において, 大別して, 小粒径 ($170 < d_{50} < 180 \mu\text{m}$) と大粒径 ($310 < d_{50} < 410 \mu\text{m}$) の粒度分布が得られているので, それぞれの代表として, 6月10日 ($d_{50} = 179 \mu\text{m}$) と9月29日

図-9 中央粒径の違いによる粒度分布の違い

図-10 粒径毎の平均浮遊砂濃度分布 (黒実線) と底面における底質の粒度分布 (6月: 赤破線; 9月: 青破線), 粒径別の浮遊砂濃度分布の推定値 (6月: 赤実線; 9月: 青実線) との比較。縦軸の値はそれぞれの最大値で無次元化してある。

($d_{50} = 403 \mu\text{m}$) の粒度分布を検討に用いた。

図-10は, 観測期間中の粒径別の浮遊砂濃度の平均値と上記の方法で求めた粒径別浮遊砂濃度分布とを比較したものである。底面での底質が小粒径の場合には, 底面において中央粒径が本観測における浮遊砂の平均の中央粒径よりも小さいことから, 浮遊砂濃度の推定値は実測の粒度分布よりも大きく小粒径側に寄っている。

一方, 底面での底質が大粒径の場合には, 底面における底質の粒度分布では粒径の大きい領域での値が大きいものの, 粒径別浮遊砂濃度分布の推定値では, 粒径の大きい領域, 小さい領域で, 底面での値に比べて, それぞれ, 値が小さく, 大きくなり, 実測値に近い分布形状となった。

この結果は, 浮遊砂濃度が底質の沈降速度に反比例するとの仮定が粒径別の浮遊砂濃度分布を推定する際にも適用可能であることを示唆していると言える。もちろん, この結論に関しては, 本観測期間中は底面における底質を採取していないため確定的なことは言えないものの, 2005年の4ヶ月間の観測では比較的大きな粒径が底面において2ヶ月間継続しており, 上記結論の可能性が低いとは言えない。

(7) ふるい分け係数, 偏わい度と中央粒径との関係

ふるい分け係数 s_0 , 偏わい度 s_k は, 中央粒径 d_{50} との相

関が高く、 d_{50} が増加するにしたがって、それぞれ、増加、減少した (図-11, 12)。

ふるい分け係数、偏わい度の定義式からうかがえるように、ふるい分け係数は粒度分布の形状がよくなるほど、粒径が不均一になるほど大きくなり、一方、偏わい度は中央粒径よりも粒径の小さい底質の含有量が大きくなるほど小さくなる。前述したように、本観測では、中央粒径が小さくなるほどシルト成分が砂成分に比べて相対的に増大する関係が見られた。シルト成分の増大は、中央粒径よりも小さい成分の増大を意味しており、よって、中央粒径が小さくなるほどふるい分け係数が増加し、偏わい度が減少したと考える。

なお、加藤ら (1990) は、波崎海洋研究施設で取得された底面における底質の特性を検討し、中央粒径が $200\mu\text{m}$ よりも小さい範囲では、中央粒径が小さくなるほどふるい分け係数、偏わい度ともに減少しながら1に近づく結果、すなわち、より中央粒径に集中する粒度分布となる結果を得ている。この結果と本観測結果との違いとして、測定方法の違いが考えられる。加藤らの方法では、最小のふるい目は $53\mu\text{m}$ であるのに対して、本観測で使用した LISST では $53\mu\text{m}$ 以下の18粒径において浮遊砂濃度が測定でき、 d_{25} が $53\mu\text{m}$ よりも小さい値となることがあった。ただし、加藤らの方法に合わせるために $53\mu\text{m}$ 以下の d_{25} を $d_{25}=53\mu\text{m}$ とし s_o 、 s_k を計算しても、 $150\mu\text{m} < d_{50}$ の範囲における d_{50} と s_o 、 s_k との関係は図-11, 12に示す通りであり、測定方法の違いが本観測結果と加藤らの結論との差であるとは言えない。この差の原因は今後の検討課題である。

4. おわりに

LISSTを用いて粒径別の浮遊砂濃度の観測したところ、粒径 $63 \sim 500\mu\text{m}$ (細砂～中砂) の範囲では各粒径の浮遊砂濃度の時系列間の相関が高くなっており、同様のことが粒径 $3 \sim 28\mu\text{m}$ (シルト) の範囲でも生じていた。ただし、粒径 $63 \sim 500\mu\text{m}$ の浮遊砂濃度の時系列と粒径 $3 \sim 28\mu\text{m}$ のそれらとの相関は低く、砂の底質浮遊特性とシルトの特性とは異なっていた。

浮遊砂濃度が底質の沈降速度に反比例するとの仮定を用いて底面における粒度分布から推定した浮遊砂の粒度分布と実測値とを比較したところ、上記の仮定が粒径別の浮遊砂濃度分布を推定する際にも適用できそうであることが示唆された。

ふるい分け係数、偏わい度は、中央粒径が増加するにしたがって、それぞれ、増加、減少した。

図-11 中央粒径 d_{50} とふるい分け係数 s_o との関係

図-12 中央粒径 d_{50} と偏わい度 s_k との関係

謝辞：常陸那珂港の沖波データは国土交通省港湾局から提供頂いた。また、データ解析では富田光広氏（豊橋技術科学大学からの元実習生）及び当所の中川康之氏、有路隆一氏に手伝って頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 片山裕之, 岡安章夫, 永田達也 (1999): 連続採水による現地碎波帯浮遊砂濃度および粒度分布の時系列変化, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.571-575.
- 加藤一正, 柳嶋慎一, 栗山善昭, 磯上知良, 村上裕幸, 藤田誠 (1990): 碎波帯内の底質粒度の変動特性－波崎海洋研究施設における現地調査－, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第2号, pp.37-61.
- 加藤 茂, 鳥居裕康, 青木伸一 (2007): 粒径別浮遊砂濃度の時間変動特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.416-420.
- Creed E. L., Pence A. M., Rankin K. L. (2001): Inter-comparison of turbidity and sediment concentration measurements from an ADP, an OBS-3, and a LISST, OCEANS 2001: MTS/IEEE Conference and Exhibition 3, pp.1750-1754.