

大波高データに基づく碎波帯内の浮遊砂巻き上げ率の定量的評価

Quantitative Assessment of Sediment Pickup Rate within Surf Zone Based on Large-Scale Data

合田良実¹

Yoshimi GODA

The rate of sediment pickup for suspension by breaking waves is proportional to the dissipation rate of wave energy flux within the surf zone. A database of mean concentration of suspended sediment is compiled by collecting various data of field measurements and large-scale laboratory experiments and by calculating the depth-averaged mean concentration. By comparing the mean sediment concentration and the energy flux dissipation rate, a sediment pickup coefficient is assessed at a value of 0.0045 on the average. Use of this coefficient enables to estimate the cross-shore variation of mean sediment concentration. Peak values of mean sediment concentration among the series of cross-shore measurements agree well with the prediction based on the wave energy flux dissipation rate.

1. はじめに

漂砂による海浜変形の諸問題は1940年代から数多くの研究者が変形機構の解明ならびに将来予測に取り組んできたにもかかわらず、未だに明快な解答が得られていない。海浜変形現象の解明が遅れている根本的原因是、碎波によって海底の砂が巻き上げられ、高濃度の浮遊砂となって海中を移動する機構がブラックボックスとして放置されていることにある。現行の海浜変形予測モデルの多くはシールド数をベースにして構築されており、経験的パラメータの調整によって碎波による海底砂の巻き上げを処理しようとしているが、碎波帯内の現象を適切に再現しているわけではない。

こうした現状を打開する一つの方法は、個々の砂粒の移動を追うのではなく、マクロな観点で碎波による砂の巻き上げ量を分析することである。既に片山(2001)および片山・合田(2002)は、波の伝播過程で碎波によって波のエネルギーフラックスが減衰する過程に着目し、エネルギーフラックスの減衰量の一部が浮遊砂濃度を一定に保持するための仕事量に費やされると考え、浮遊砂巻き上げ率の定式化を試みた。

この片山・合田の研究の時点では、既往の現地観測ならびに大規模海浜変形実験の諸データを参照したものの、任意形状断面における不規則碎波変形モデルが利用できなかった。しかしながら、著者は先に段階的碎波変形モデル(PEGBIS)と名付けた数値計算モデルを発表しており(合田, 2003)、このモデルを用いることによって任意形状断面の海浜における波の碎波減衰量を見積もることが可能となっている。そこで、現在までに利用可能な浮遊砂濃度のデータを収集して解析し、波エネルギー

ーフラックスの局地的減衰率と比較することによって、浮遊砂巻き上げ率の再評価を行うことにした。

2. 浮遊砂濃度保持のための仕事率と浮遊砂巻き上げ係数

浮遊砂の濃度は一般に質量比、たとえば g/l の単位で表されることが多いが、この論文では基本的に体積比で表示する。たとえば、百万分の一単位のppmを用いると、質量比表示の濃度とは次のような関係がある。

$$c \text{ [ppm]} = 1000 \times c \text{ [g/l]} / \rho_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに ρ_s は砂の密度であり、本論文では $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3 = 2650 \text{ kg/m}^3$ として扱う。

浮遊砂の鉛直分布は、多くの場合に次のような指数関数で表示され、本論文でもこれを前提とする。

$$c(z) = c_0 \exp[az] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 z は海底からの高さ、 c_0 は底面の濃度、 a は濃度の減少率であって長さの逆数の単位(たとえば m^{-1})を持つ。水深 h の海中の浮遊砂の断面平均濃度 $\bar{c}$ は、式(2)の鉛直積分によって次のように求められる。

$$\bar{c} = \frac{c_0}{ah} [\exp(ah) - 1] \quad \dots\dots\dots (3)$$

水中の浮遊砂は擾乱がない場に放置されれば、重力による沈降によって次第に濃度が低下する。砂粒の沈降速度を w_f とすると、浮遊砂は微小時間 dt の間に $w_f dt$ だけ沈降するので、濃度分布を一定に保持するためには浮遊砂全体を $w_f dt$ だけ持ち上げなければならない。すなわち、次の仕事が浮遊砂になされることが必要である。

$$\begin{aligned} dJ_s &= \int_0^h (\rho_s - \rho_w) g c(z) w_f dt dz \\ &= (\rho_s - \rho_w) g w_f \bar{c} h dt \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

表-1 浮遊砂濃度の解析に使用したデータセットの概要

記号	著者またはプロジェクト名	測定 ケース数	データ数	沖波の波高 範囲 $H_{1/3}$ (m)	周期範囲 T (s)	中央粒径 d (mm)	濃度計 台数	備考
A	Nielsen (1984)	65	65	0.33 – 0.8	5.3 – 12.9	0.1 – 0.6	7	現地観測
B	SandyDuck (1997-98)	6	54	1.4 – 3.2	5 – 13	0.2	8 – 9	現地観測
C	Dette・Uliczka (1986)	1	4	1.5	6	0.33	8 – 10	Hannover 大学水路
D	Roelvink・Reniers (1995): LIP-11D	7	24	0.6 – 1.4	5 – 8	0.22	5 – 10	Delft 水理研水路
E	SUPERTANK (1991)	16	67	0.4 – 0.8	3 – 9	0.2	5	Oregon 大学水路
F	清水ほか (1996)	1	5	1.2	5	1.0	3 – 5	電中研水路
G	Peters (2000)	14	105	0.6 – 1.2	5.5	0.3	—	Hannover 大学水路
H	van Thiel de Vries (2009)	12	21	1.5	4.9 – 7.4	0.2	8 – 9	Delft 水理研水路

ここに、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。

一方、砕波等による不規則波のエネルギーフラックスの減衰率を W_D で表すと、これはたとえば次のように表される。

$$W_D = \frac{1}{8} \rho_w g \frac{\partial}{\partial x} [H_{rms}^2 (c_g)_{eff} \cos \theta_p] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 H_{rms} は2乗平均波高、 $(c_g)_{eff}$ は波群全体としての群速度の代表値、 θ_p は波群の代表入射角である。

浮遊砂濃度を一定に保持するための仕事率は、波エネルギーフラックスの減衰率の一部から供給されると考える。すなわち、

$$\frac{dJ_s}{dt} = \beta_s W_D \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 β_s は波による浮遊砂の巻き上げ係数と名付けるパラメータである。式 (6) に式 (4) を代入することによって、各地点の浮遊砂の鉛直平均濃度が次のように波エネルギーフラックスの減衰率に関係づけられる。

$$\bar{c}(x) = \frac{\beta_s}{(\rho_s - \rho_w) g w_f h} W_D \quad \dots\dots\dots (7)$$

浮遊砂の巻き上げ係数 β_s の値は5. に述べるように、浮遊砂の鉛直平均濃度とエネルギーフラックスの減衰率の諸データに基づいて定量的に評価する。

3. 現地観測ならびに大規模海浜変形実験データセットの概要

漂砂に関しては現地と模型との相似則が問題となるため、浮遊砂巻き上げ係数の評価には大波高の下での浮遊砂濃度のデータを収集し、解析した。その概要を表-1に示す。現地観測が2セット、大型実験が6セットである。測定ケース数は波浪条件等を変えたケース数であり、Aのデータセット以外は岸沖方向に複数の測定点を設けているので、データ数は波エネルギーフラックスの減衰率を計算して浮遊砂濃度と比較した数である。濃度計台数は1測定点当たりの台数である。

AのNielsen (1984) のデータは、可搬式の大気圧吸入式採砂管7本の濃度計を観測毎に設置したもので、沖波波高は試行錯誤により推定し、海底勾配はDeanの平衡勾配を仮定して底質の中央粒径と水深から算定した。濃度データは論文に表として記載されている。BのSandy DuckのデータファイルはDr. A. Bayramから提供していただいた。CのデータはDette・Uliczka (1986) の論文の表による。DのLIP-11Dのデータは片山 (2000) がDr. J. A. Roelvinkから貰ったデジタルファイルを転送していただいた。EのSUPERTANKについてはデジタルファイルをProf. M. Larsonから頂戴し、Kraus・Smith (1994, 1995) の実験報告書をDr. J. Smithから送っていただいた。HのデータはDr. van Thiel de Vriesから直接に提供していただいた。

データとして提示された浮遊砂濃度はいずれも時間平均値であり、測定高さ毎の濃度が示されていたので、それらに式 (2) を当てはめて底面濃度 c_0 と濃度減少率 a を推定し、式 (3) を用いて平均濃度を算定した。ただし、Peters (2000) の報告書では高さ毎の濃度ではなく、ケース・地点毎の c_0 と a の値が表に記載されていたのでそれを利用した。また、清水ほか (1996) の平均浮遊砂濃度は、片山 (2000) が計算して論文に記載したものをそのまま使用した。なお、以上の浮遊砂濃度に関する個別の数値はデータベースとして(株)エコーのホームページに掲載している。

4. 平均浮遊砂濃度と波エネルギーフラックス減衰率の関係

浮遊砂濃度の測定点位置における波エネルギーフラックスの減衰率は、合田 (2003) による段階的砕波変形モデル (PEGBIS) を用いて計算した。現地観測データに対するスペクトルのピーク増幅率や方向集中度パラメータは波形勾配を勘案して選定した。実験データについては記述されているピーク増幅率を用いた。

表-1のデータのうちからSandyDuckのTransect 22につ

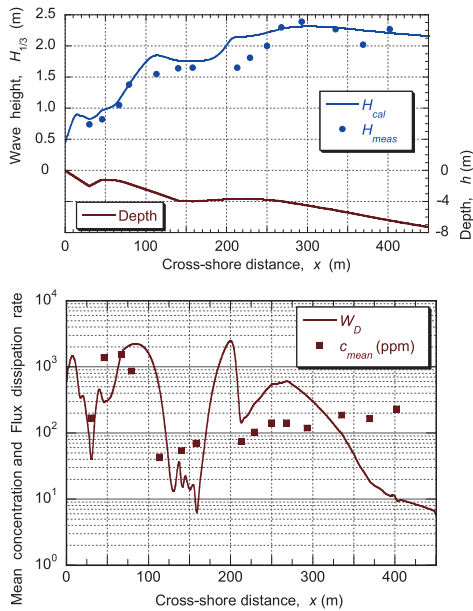


図-1 SandyDuck の Transect 22 に対する観測値と計算値

いて、波高と平均浮遊砂濃度の岸沖変化を図-1に示す。沖波波高は $H_s = 2.3\text{m}$ 、スペクトルピーク周期が $T_p = 12.8\text{s}$ 、栈橋先端の波の入射角 17° である。このケースでは沿岸砂州が2箇所があり、波高の変化が複雑であるが、波高の計算結果はほぼ観測値に合致している。エネルギーフラックスの減衰率は、数値のオーダーを合わせるために1000倍した値で表示している。

図で明らかのように、2箇所の沿岸砂州のところで W_D が増大しており、岸側の砂州の地点($x \approx 50\text{m}$)では観測された平均濃度の増加に対応している。沖側の砂州($x \approx 200\text{m}$)で浮遊砂濃度がピークとなると予測される地点では観測値が得られていない。その沖側では、計算された $1000 \times W_D$ の値が平均浮遊砂濃度よりも大きくなっている。なお $x \approx 150\text{m}$ のトラフで平均浮遊砂濃度が W_D ほど減少していないのは、浮遊砂の移流・拡散によると推測される。

紙数の都合で紹介できないけれども、他の多くのデータも浮遊砂の平均濃度が波エネルギーフラックスの減衰率 W_D に比例するという式(7)の関係を支持している。そこで、解析した345個のデータについて計算したフラックス減衰率 W_D を平均浮遊砂濃度と比べたところ、図-2の結果が得られた。これによると、全体としての両者の比例関係は認められるものの、データセットごとの傾向的な差が見られる。たとえば、フラックス減衰率の絶対値が同じでも、GのPetersの浮遊砂濃度はかなり高めであり、一方、DのLIP-11Dのデータは低い位置を占めている。また、Fの清水ほかのデータは浮遊砂濃度が低い

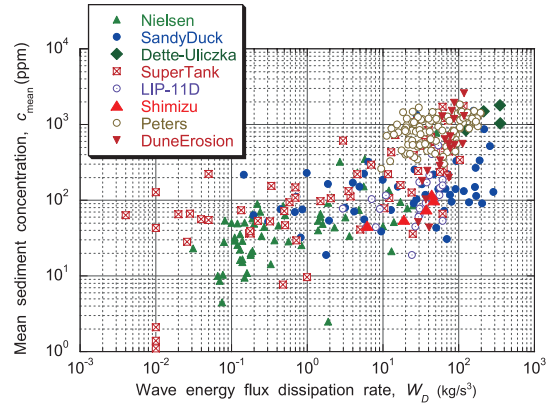


図-2 全データについての観測地点における波エネルギーフラックス減衰率と平均浮遊砂濃度との関係

が、実験に用いた砂が中央粒径 1mm という粗砂であったためと考えられる。

一方、フラックス減衰率が 2kg/s^3 程度よりも小さい範囲では平均浮遊砂濃度が $1 \sim 200\text{ppm}$ の範囲に散らばっており、フラックス減衰率との間に有意な相関が認められない。これは、波からの仕事をほとんど受けない場所であっても、浮遊砂の移流や拡散によってあるレベルの浮遊砂濃度が存在することによると推測される。

5. 浮遊砂巻き上げ係数の定量的評価

砕波帯内で波が海底の砂を巻き上げる割合は、式(6)で導入した巻き上げ係数 β_s で評価される。この係数は式(7)を書き換えた次式で算定される。

$$\beta_s = \frac{\bar{c}(\rho_s - \rho_s) g w_f h}{W_D} \quad \dots\dots\dots (8)$$

この式を用いて全データについて浮遊砂巻き上げ係数を算定した結果を図-3に示す。フラックス減衰率が小さい領域では W_D の減少につれて浮遊砂巻き上げ係数が増大する傾向が見られるが、これは砕波帯外であっても浮遊砂の移流・拡散によって、その平均濃度があまり減少しないためである。

本研究では砕波による海底からの砂の巻き上げに着目しているので、波エネルギーフラックス減衰率の大きな領域を対象とする。ここでやや恣意的ではあるが臨界値を 30kg/m^3 に設定すると、これを超えるデータが161個得られる。このデータについて式(7)で計算した砕波巻き上げ係数は $0.0004 \sim 0.028$ の広い範囲に分布する。図-4はこれを度数分布の形で表示したものである。出現頻度をもっとも多いのは、 $\beta_s = 0.002 \sim 0.005$ の級である。

データの値が広い範囲に分散しているときの代表値としては、算術平均よりも幾何平均が適切である。そこで

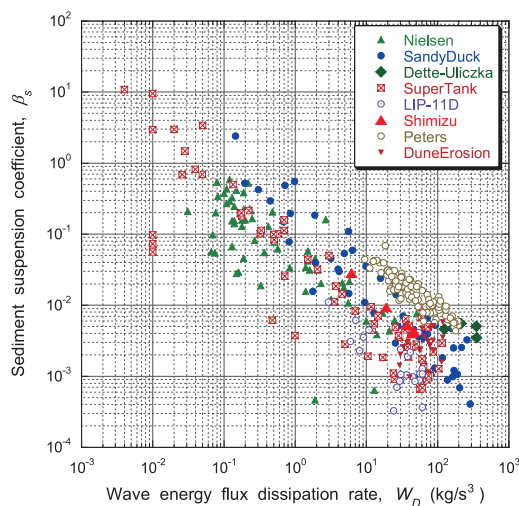


図-3 全データについての碎波巻き上げ係数の算定結果

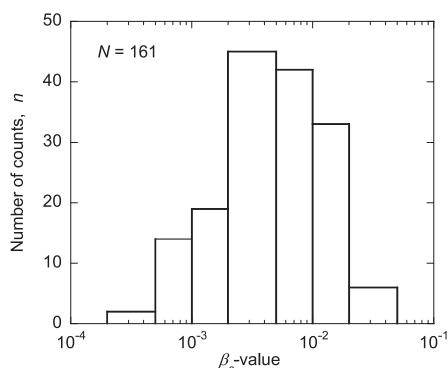


図-4 波エネルギーフラックス減衰率が\$30\text{kg/s}^3\$以上のデータに対する碎波巻き上げ係数の頻度分布

幾何平均ならびに対数正規分布を想定した90%信頼区間を求めたところ、次のような結果が得られた。

$$\beta_s = 0.00448 \times 10^{\pm 0.643} \dots\dots\dots (9)$$

概数としては $\beta_s = 0.005$ である。乗数の $10^{\pm 0.643}$ というのは、数値でいえば1/4.4～4.4倍を表している。

6. 平均浮遊砂濃度の岸沖変化の予測結果

浮遊砂巻き上げ係数 β_s の値を0.005に設定すると、場所毎の平均浮遊砂濃度は波エネルギーフラックス減衰率の場所的变化を計算することにより、式(7)を用いて簡単に推定できる。そこで、表-1のデータセットから代表的なケースを選んで比較検討した事例を図-5, 6に示す。

このように、波エネルギーフラックスの局所的減衰率に基づいて予測した平均浮遊砂濃度は表-1のデータセットの観測値とかなり良く一致する。そこで、各データ系列の岸沖変化のなかで平均浮遊砂濃度が最大値を示す地

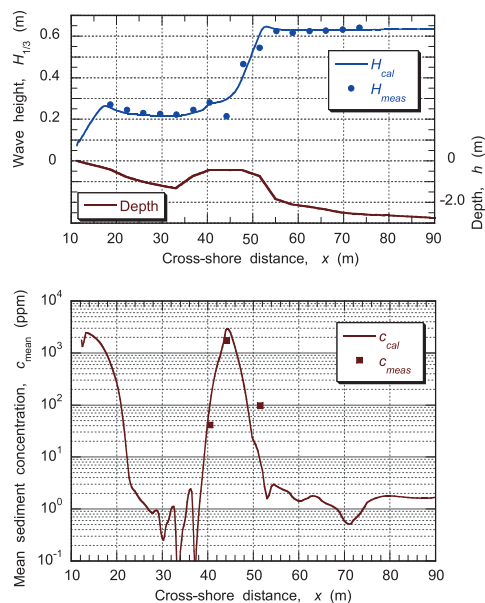


図-5 SUPERTANKのS1209B-S1210A (2ケース平均) に対する波高変化および浮遊砂濃度の推定結果と実験値の比較

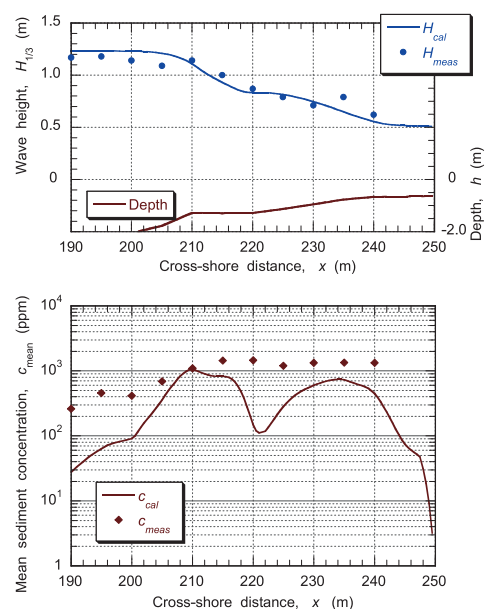


図-6 PetersのC2-1320のデータに対する波高変化および浮遊砂濃度の推定結果と実験値の比較

点を選び、その地点における予測値と比較したものが図-7である。Nielsen のデータは単点観測であるので、フラックス減衰率が 10kg/m^3 以上のデータ9個を対象とした。図の横軸が予測値、縦軸が観測値であり、図中の実線は両者が等しい場合を示し、破線は観測値が予測値の5倍、一点鎖線は観測値が予測値の0.2倍のケースである。

観測値に対する予測値の適合度を吟味するために両者の比率を計算し、幾何平均を求めると次の結果が得られた。

$$\bar{c}_{meas} / \bar{c}_{cal} = 0.77 \times 10^{\pm 0.69} \quad \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、予測結果は平均してやや高めの値を与えており、観測値の90%は予測値の0.16～2.73倍の範囲にある(対数正規分布を仮定した場合)。漂砂に関しては現象自体の変動性が大きいいため、精度の高い予測が困難であり、図-7および式(10)に示すような予測精度は、十分に実用に供されるものと思われる。

8. むすび

砕波による浮遊砂の舞い上がりに関して、波エネルギーフラックスの減衰率に関連づけた浮遊砂巻き上げ係数を新しく定式化することができた。今後はこの巻き上げ

係数を用いた浮遊砂モデルを3次元海浜変形モデルに組み込むことによって、現地海浜への適用性が高まることが期待されよう。

なお、本論文の内容の詳細については合田 (2010) を参照していただきたい。

参 考 文 献

- 片山裕之 (2001): 浮遊砂による沿岸漂砂量の数値予測モデルに関する研究, 横浜国立大学工学研究科学学位論文, 152p.
- 片山裕之・合田良実 (2002): 砕波巻き上げによる浮遊砂の輸送・沈降過程に着目した地形変化の計算, 海岸工学論文集, 第49巻, 2002年, pp. 485-490.
- 合田良実 (2003): 段階的砕波係数を用いた不規則波浪変形計算モデルの改良, 海洋開発論文集, Vol. 19, 土木学会海洋開発委員会, pp. 486-490.
- 合田良実 (2010): 現地観測・大規模実験データに基づく砕波帯内の浮遊砂巻き上げ係数の再評価, ECOH/YG技術論文 No. 11 (<http://ecoh.co.jp/comp/paper/paper.htm>), 2010年4月20日, 13p.
- 清水隆夫・池野正明・岡安章夫・栗山義昭・佐藤慎司・島田広昭・清水琢三・武若 聡・西 隆一郎 (1996): 不規則波による大型海浜断面変形実験と外力場の多点同期計測, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 491-495.
- Detle, H. and K. Uliczka. (1986): Velocity and sediment concentration fields across surf zone, *Proc. 20th Int. Conf. Coastal Engrg.*, Taipei, ASCE, pp. 1062-1076.
- Kraus, N.C., J. M., Smith, and C.K., Sollitt (1992): SUPERTANK laboratory data collection project, *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Engrg.*, Venice, ASCE, pp. 2191-2204.
- Kraus, N.C. and J.M. Smith (1994 and 1995): SUPERTANK Laboratory Data Collection Project, Vol. I (Main Text) and Vol. II (Appendices A - I), Tech. Rept. CERC-94-3.
- Nielsen, P. (1984): Field measurements of time-averaged suspended sediment concentrations under waves, *Coastal Engineering*, Vol. 8, pp. 51-72.
- Peters, K. U. F. (2000): Morphodynamik in der Brandungszone Sandiger Kusten - Konzentrationsverteilung suspendierter Sedimente -, Dissertation at Technical University of Braunschweig.
- Roelvink, J.A. and A.J.H.M. Reniers (1995): LIP 11D Delta Flume Experiments, A dataset for profile model validation, *Delft Hydraulics, Rept. H 2130*.
- van Thiel de Vries, J.S.M. (2009): Dune Erosion during Storm Surges, *Deltares Select Series*, Vol. 3, 201p.

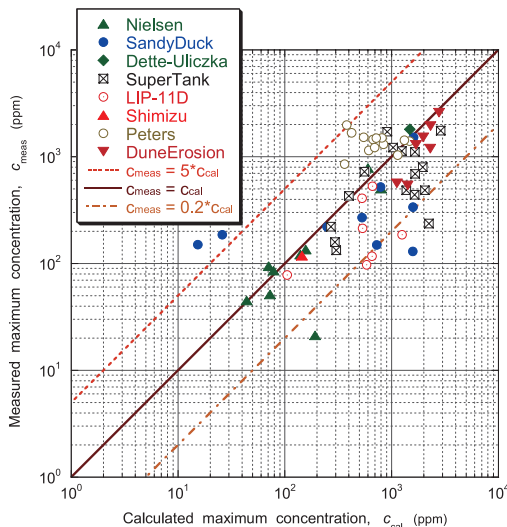


図-7 各データ系列中の最大平均浮遊砂濃度の推定結果と観測値の比較