

混合砂海浜における漂砂量則

田中 仁*・片山裕貴**・加賀正之***・須賀堯三****

1. はじめに

近年、海浜変形予測に関する研究が数多くなされているが、これらの研究において海浜は均一砂からなるものと仮定されている。現実の海浜は混合砂からなり、その移動特性は均一砂のそれと大いに異なるものと考えられる。すなわち、混合粒径の場合、波により沿岸方向、岸沖方向に底質の分級が生じ、その結果、底質粒径の相違により底質移動特性の場所的な不均衡が生じることとなる。特に、河川におけるアーミングと同様な現象が発生して、表層が粗砂で覆われた場合、当該箇所の侵食速度が低減し、均一砂の場合とは全く異なる移動特性を有することとなる。したがって、波による混合砂の移動現象について検討することは極めて重要な課題であるといえる。

従来、海浜における底質分布に関しては、岸沖方向と沿岸方向とに分けて、それぞれについておもに定性的な傾向の把握が多くなされて来た。岸沖方向の粒度分布については、Fox, Ladd and Martin¹⁾、野田・芝野²⁾によるものをはじめ幾つかの実測例があり、いずれも最終碎波点において中央粒径、標準偏差が最大値を持つという結果が得られている。一方、Bascom³⁾の調査によれば、最終碎波点の岸側の前径浜中央にも粒径のピークが見られる。実験的検討としては、山本⁴⁾によるものがある。また、沿岸方向の分布についても、Komar⁵⁾の報告がある。近年、宇多・酒井・竹淵⁶⁾は、湖沼に形成された舌状砂州がアーマー・コートの形成により安定形状を保つ例を報告し、さらに、移動床模型実験により混合粒径比によって移動限界水深や漂砂量係数が定まることを見いだしている。

本研究では、沖浜帯における岸沖方向の分級現象について検討を行った。特に、波による混合砂移動特性のうち、粒径別移動限界および粒径別漂砂量について実験的検討を行い、それぞれについて実用的な算定式を得た。

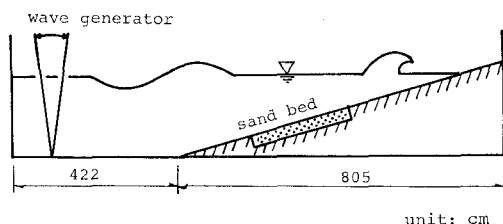
2. 実験方法

本研究では、水平床二次元水路における砂移動（以下 Case A と称する。）と 1/20 勾配を有する二次元海浜での砂移動現象（同 Case B）の 2 つのケースについて検討を行った。今回の実験では、常に掃流状態での砂移動が生じるように実験条件を設定した。

Case A の実験では、長さ 16 m、幅 50 cm、深さ 40 cm の水路を用いた。また、Case B の実験では、長さ 12 m、幅 30 cm、深さ 50 cm の二次元水路を用いており、その概要を図一 1 に示す。両ケースにおいて水路底面はベニヤ製の固定床とし、その一部を 1.5 m にわたって 3 cm の深さに掘込み、この部分を移動床とした。また、移動床に接続する固定床端部には砂粒を貼りつけて粗度を与えている。

今回の実験では前述のように掃流状態の砂移動が生じる様に条件を設定しており、net の砂移動方向は岸向きである。実験では、砂面を平坦にならしてから波を当て、岸側の固定床に移動して来る砂を捕砂して、移動床岸側端部での net の漂砂量とした。同時に、この地点で容量式波高計により波形を測定した。捕砂した砂はふるい分けして、11 の粒径範囲に分け、粒径別漂砂量を求めた。なお、Case B においては、碎波点が常に岸側の固定床上に来るように水深・波高を調整しており、碎波による底質移動は今回の研究の対象外とした。

実験には 3 種類の底質を用いた。その粒度曲線を図一 2 に示す。Sand A と Sand B は類似した粒度組成を有し、比較的広い範囲の底質を含んでいる。前者は後者に比べて、粗粒分が幾分多い。Sand C は前二者に比して、粒度が揃っている。Sand A と Sand C は、1/20



図一 実験水路 (Case B)

* 正会員 工博 東北大学講師 工学部土木工学科

** 正会員 東亜建設工業(株)

*** 神奈川県

**** 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部土木工学科

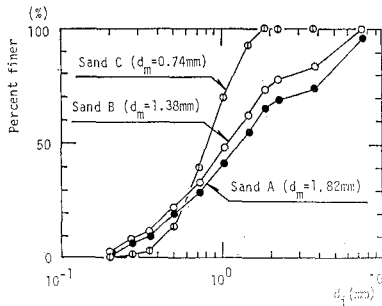


図-2 底質の粒度分布曲線

勾配水路での実験 (Case B) に用い、無次元掃流力が比較的大きいデータを得た。一方、移動限界付近のデータを得ることを目的として Case A の実験 (水平床実験) が行われ、底質として Sand B が用いられた。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

ここでは、平野⁷⁾、芦田・道上⁸⁾と同様に粒径毎の漂砂量の相似性を仮定する。その概要についてはパーカーの論文⁹⁾に解説が施されている。

粒径別の無次元漂砂量 $\bar{q}_{Bi}^* = \bar{q}_{Bi} / (i_b / sg d_i^3)$ と無次元掃流力 $\tau_i^* = u^* / (sg d_i)$ との関係を図-3、図-4、図-5である。ここに、 $\bar{q}_B$: 波による単位時間当りの net の岸向き全漂砂量、 i_b および i_b : それぞれある粒径範囲の砂粒が漂砂中および海浜底質中に占める割合、 s : 砂の水中比重、 d_i : ある粒径範囲の砂の平均粒径、 u^* : Jonsson の摩擦係数¹⁰⁾を用いて得られる波による摩擦速度の最大値である。ただし、摩擦速度の算定に際しては、平均粒径 d_m を以て相当粗度 k_s とし、底面水粒子速度の算定には微小振幅波理論を用いた。図中の曲線については後述する。

実験結果は平野⁷⁾、芦田・道上⁸⁾によって得られた流砂量データと同様な傾向を示している。すなわち、各図において描点は粒径毎に明らかなまとまりを示しており、図の左側から粒径の大きい順にデータが並んでいる。

3.2 粒径別移動限界

図-3、図-4、図-5 において、各粒径とも右上がりの傾向を示し、無次元掃流力が小さくなるにつれて、急速に漂砂量が減少していることがわかる。これらの図から漂砂量がほぼゼロに漸近する無次元掃流力 τ_{ci}^* を各粒径毎に読み取り、無次元粒径 d_i/d_m との関係をプロットした結果が図-6 である。また、各粒径の移動限界摩擦速度 u_{ci}^* と平均粒径のそれ u_{cm}^* との比を求め、粒径に対する依存性を調べた結果が図-7 である。図中には、河川の流砂現象に対し、理論的に導出された

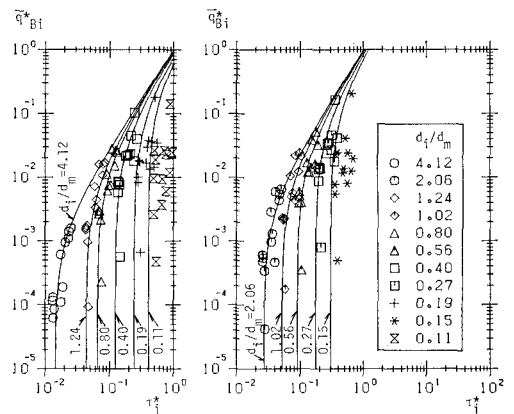


図-3 粒径別岸沖漂砂量 (Sand A)

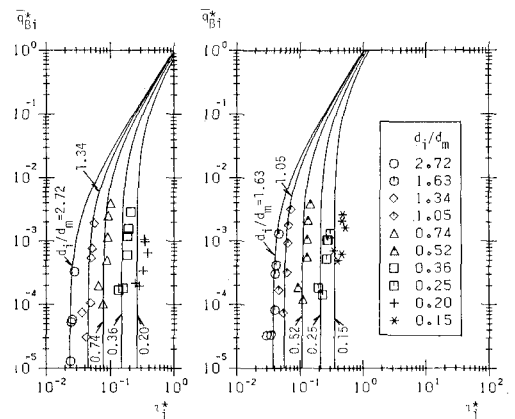


図-4 粒径別岸沖漂砂量 (Sand B)

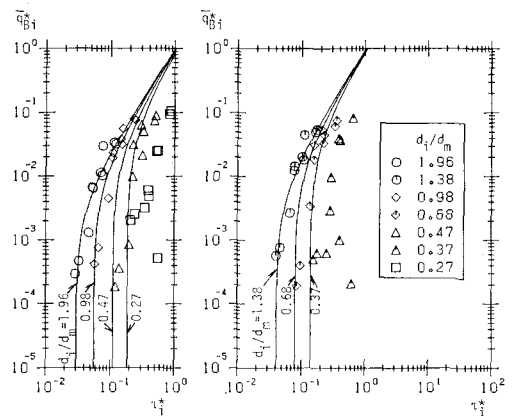


図-5 粒径別岸沖漂砂量 (Sand C)

Egiazaroff の粒径別移動限界式¹¹⁾を鎖線で示し、芦田・道上⁸⁾による修正式も図示した。Egiazaroff の式は対数則をもとに導かれたものであり、一方、乱流振動流境界層内の流速分布は、ほぼ対数則に従うことが知られている¹²⁾ので、同式の波動場への適用が可能であると考えられる。実験値との整合性は小粒径で良好であるが、大き

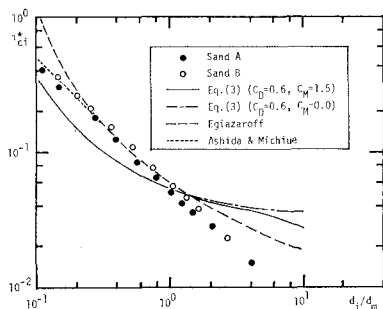


図-6 粒径別移動限界シールズ数

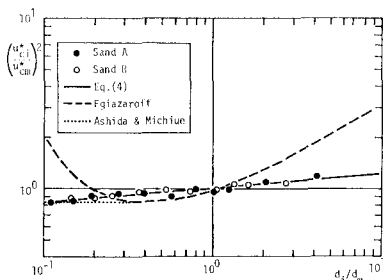


図-7 粒径別移動限界摩擦速度

い粒径については差が大きい。この原因としては、①大粒径の砂レキ頂部は波動境界層外に突出し、対数則とは異なる流速場にさらされる。②小粒径では準定常の仮定

$$\tau_{ci}^* = \frac{\frac{2}{3} f_w \tan \phi}{\text{Max} \left[C_D f_i^2 \cos(\sigma t + \theta) |\cos(\sigma t + \theta)| - \frac{4}{3} C_M \frac{d_i/d_m}{U/(\sigma d_m)} f_1 \sin(\sigma t + \theta) \right]} \quad (3)$$

ここに、 f_i および θ ：式(1)の $\{ \}$ 内の関数の絶対値および偏角、 f_w ：波による摩擦係数であり、 $U/(\sigma d_m)$ の関数である。また、波動下において C_D 、 C_M は K.C. 数の関数である¹⁴⁾から、これらも f_w と同様に $U/(\sigma d_m)$ の関数である。したがって、Egiazaroff の理論によれば τ_{ci}^* は d_i/d_m のみの関数であったが、波動下では τ_{ci}^* と d_i/d_m の関係図の中に $U/(\sigma d_m)$ がパラメータとして含まれることとなる。

計算結果を図-6、図-7 に示した。 $U/(\sigma d_m)$ の値は今回の実験条件をもとに、30とした。なお、 $\tan \phi = 1$ とし、 C_D および C_M の値については Sarpkaya¹⁴⁾ の実験結果等をもとにそれぞれ、0.6 および 1.5 とした。また、慣性抗力の効果を明示するために、 $C_M = 0$ とした計算結果も図示している。

図より、 $d_i/d_m \leq 1.0$ では、実線と一点鎖線は完全に一致しており、この領域においては、加速度の効果を無視できる。一方、粒径が大きくなるにつれて、慣性抗力の効果が現れ、 $C_M = 0$ の曲線に比べて負の勾配がきつくなる。この傾向は定性的には実験値のそれに符合するものであるが、実験値に比べて τ_{ci}^* がかなり大きめである。この原因としては、Sarpkaya の実験は振動流中

が成立するが、大粒径底質では慣性抗力の効果が無視できない、の二点が考えられる。

そこで、以下では著者の一人により導かれた乱流波動境界層理論¹³⁾を用いて流速場を評価し、粒径毎の移動限界剪断力について考察を行う。

正弦波動下の境界層内の流速は次式で与えられる¹³⁾。

$$u = U \text{Real} \left[\left\{ 1 - \frac{H_0^{(1)}(\xi)}{H_0^{(1)}(\xi_0)} \right\} e^{i\sigma t} \right] \quad (1)$$

ここに、 u ：境界層内の水平流速、 U ：境界層外縁での水平流速の振幅、 Real ：実部、 $H_0^{(1)}$ ：ゼロ次の第一種ハンケル関数、 $\xi = 2e^{3\pi/4} \sqrt{cz}$ 、 $\xi_0 = 2e^{3\pi/4} \sqrt{cz_0}$ 、 $c = \sigma/(\kappa u^*)$ 、 z_0 ：粗度長さ ($z_0 = k_s/30$)、 i ：虚数単位、 σ ：角振動数、 κ ：カルマン定数であり、 z 軸は底面から上向きを正とする。ここで、式(1)で $z = d_i$ として得られる流速値を u_i として、底質移動限界における力のつりあい式を立てると次式を得る。

$$\text{Max} \left[\frac{\pi}{8} \rho C_D d_i^2 u_i |u_i| + \frac{\pi}{6} \rho C_M d_i^2 \frac{\partial u_i}{\partial t} \right] = (\rho_s - \rho) g d_i^2 \tan \phi \quad (2)$$

ここに、 Max ：最大値、 ρ ：水の密度、 ρ_s ：砂の密度、 C_D ：抵抗係数、 C_M ：付加質量係数、 ϕ ：砂の水中摩擦角である。上式に式(1)を代入して整理すれば、次式を得る。

に置かれた単一球に関するものであり、遮蔽の効果と壁面近傍での流れの剪断の効果が含まれていない点、実験に使用した波は正弦波からずれており、式(1)では加速度が過小評価されていることなどが考えられる。現時点では、これらの点について詳細に検討することは困難なので、図-7 より実験式として次式を定める。

$$\left(\frac{u_{ci}^*}{u_{cm}^*} \right)^2 = \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{0.08} \quad (4)$$

あるいは、変形して、

$$\tau_{ci}^* = \tau_{cm}^* \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-0.92} \quad (5)$$

となる。ここに、 $\tau_{cm}^* = u_{cm}^{*2}/(sgd_m)$ である。

なお、従来多くの研究が行われている均一砂は混合砂の一つの極限と考えられるので、本研究の実験式に一樣砂の条件を課したとき、すなわち、 $d_i = d_m$ としたときに、その結果は従来の均一砂の実験結果と整合性がとれていなければならない。そこで、図-6 において $d_i = d_m$ の限界シールズ数を読み取ると、Sand A で $\tau_{cm}^* = 0.053$ 、Sand B で $\tau_{cm}^* = 0.059$ となるので、Madsen and Grant¹⁵⁾ による均一砂のデータとほぼ一致している。

3.3 粒径別漂砂量式

式 (4), あるいは式 (5) により粒径別移動限界式が定まったので, 次にこれをもとに粒径別漂砂量式について検討を行う。ここでは, 次式の関数形を想定する。

$$\bar{q}_{Bi}^* = \alpha \tau_i^{*0.5} (\tau_i^* - \tau_{ci}^*) \dots\dots\dots (6)$$

$\bar{q}_{Bi}^*$ と $\tau_i^{*0.5}(\tau_i^* - \tau_{ci}^*)$ との関係をプロットし, 図-8 (Sand A), 図-9 (Sand C) を得る。ただし, 上式中の τ_{ci}^* の算定には式 (5) を用いている。また, 図中の記号はそれぞれ図-3 および図-5 のそれと同一である。移動限界に近いデータと小粒径のデータを除いて, 良い直線性を示している。小粒径のデータは存在比率 i_b がきわめて少ないため, 実験誤差が顕著に現れてしまう。図より, 式 (6) 右辺の係数は $\alpha=1.0$ と定まる。図-3, 図-4, 図-5 の中の曲線は以上のように定められた指数, 係数を式 (6) に代入して得られる各粒径別の漂砂量式を表している。実験値との対応は比較的良好であることがわかる。

次に, 先の移動限界式を扱った節と同様に, 式 (6) において均一砂の条件を与えてみる。著者らの均一砂を用いた実験データ¹⁶⁾と, 式 (6) で $d_i=d_m$ とした式と

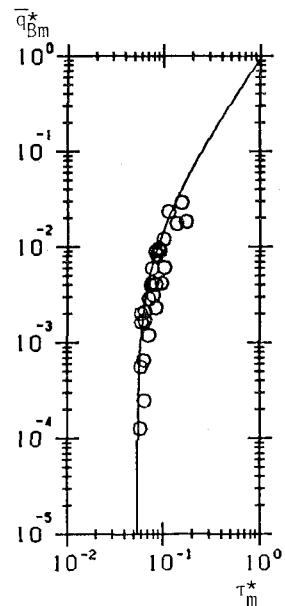


図-10 均一砂の漂砂量データ¹⁶⁾と式 (6) との比較

の比較を図-10 に示す。ただし, 丸印が実験値であり, 実線が式 (6) を表わしている。両者の間には良好な対応がみられる。ここに, $\bar{q}_{Bm}^* = \bar{q}_B / \sqrt{sgd_m^3}$, $\tau_m^* = u^*^2 / (sgd_m)$ であり, 移動限界シールズ数は, 0.055 とした。

4. おわりに

本論文では, 今までほとんど検討がなされていなかった混合砂の岸沖漂砂についての実験結果を報告した。主要な結論は以下の通りである。

- (1) 粒径別移動限界を表わす実験式として式 (4) あるいは式 (5) が得られた。同式と流砂に対する Egiazaroff を比較すると, 大粒径の底質でその差異が顕著である。
- (2) 波動境界層理論を用いて粒径別移動限界について理論的考察を行ったところ, 定性的には実験結果の説明が可能であった。使用した諸係数についてさらに検討を行うことが必要である。
- (3) 粒径別漂砂量式として式 (6) の関数形を仮定し, 実験から係数が定まった。
- (4) 式 (4), 式 (5), 式 (6) において均一砂の条件を与えたとき, それらは従来の研究成果と矛盾することが無い。

謝辞: 本研究に対し, 文部省科学研究費の補助を受けたことを付記し, 謝意を表する。

参考文献

1) Fox, W. T., Ladd, J. W. and M. K. Martin: A pro-

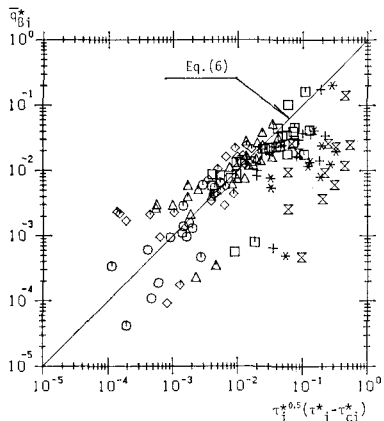


図-8 粒径別無次元漂砂量 (Sand A)

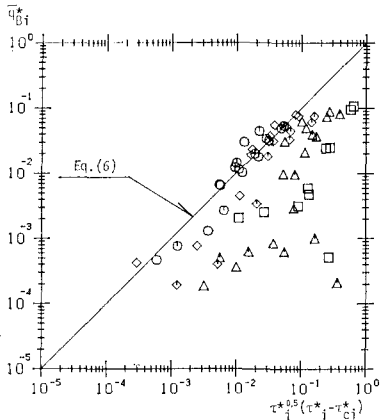


図-9 粒径別無次元漂砂量 (Sand C)

- file of the four moment measures perpendicular to a shore line, South Haven, Michigan, J. Sedimentary Petrology, Vol. 36, pp. 1126~1130, 1966.
- 2) 野田英明・芝野照夫: 大潟海岸における漂砂の観測, 京大防災研年報, 第11号B, pp. 429~445, 1967.
 - 3) Bascom, N. W.: The relationship between sand size and beach face slope, Trans. AGU, Vol. 32, No. 6, 1952.
 - 4) 山本晃一: 波による底質のふるい分け作用, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 142~145, 1977.
 - 5) Komar, P. D.: Beach process and sedimentation, Prentice-Hall, Inc., pp. 351~355, 1976.
 - 6) 宇多高明・酒井佳治・竹渕 勉: アーマーコートによる安定海浜の形成, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 421~425, 1987.
 - 7) 平野宗夫: Armoringをともしう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第195号, pp. 55~65, 1971.
 - 8) 芦田和男・道上正規: 混合砂れきの河床低下と armoring について, 第15回水理講演会論文集, pp. 31~36, 1971.
 - 9) パーカー・ゲーリー: 粗粒化について, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp. 17~27, 1986.
 - 10) Jonsson, I. G.: Wave boundary layer and friction factors, Proc. of 10th Conf. on Coastal Engng., pp. 127~148, 1966.
 - 11) Egiazaroff, I. V.: Calculation of non-uniform sediment concentrations, J. Hydraulic Div., ASCE, Vol. 91, No. HY4, pp. 225~247, 1965.
 - 12) 例えば, Jonsson, I. G.: Measurements in the turbulent wave boundary layer, Proc. 10th Congress IAHR, pp. 85~92, 1963.
 - 13) 田中 仁: 任意波形を有する波動下での水粒子速度と底面せん断応力の算定手法に関する研究, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp. 181~187, 1987.
 - 14) Sarpkaya, T.: Forces on cylinders and spheres in a sinusoidal oscillatory fluid, Trans. of ASME, pp. 32~37, 1975.
 - 15) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. of 15th Conf. on Coastal Engng., pp. 1093~1112, 1976.
 - 16) 田中 仁・吉田 稔・塚原啓司・須賀堯三: 波の形を考慮した岸沖漂砂量式の検討, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 232~236, 1987.
-