

砕波帯内浮遊砂量の評価法

——現地規模の現象に着目して——

柴山 知也*・M. P. R. Jayaratne**

砕波帯内の浮遊砂濃度を算定するために浮遊機構を, 1) 底面砂連近傍に発生する渦による浮遊, 2) 底面シートフロー上の乱流による浮遊, 3) 砕波の下での乱流による浮遊 に分割して考えることができる。これまでの研究では現地規模の実験, 実測結果と室内実験室規模の実験結果を同列に論じることが多かった。本研究では実験式に寸法効果が含まれていることを前提として, これまでの浮遊砂濃度に関する実験結果を再整理, 分類し, 実規模実験, 現地観測の結果に基づいて新しい算定式を示した。その結果, 乱流機構の相違によって, 濃度分布の関数形が異なることを示した。

1. はじめに

本研究では基準点濃度と拡散係数を用いて砕波帯内の浮遊砂濃度分布を推定する。柴山・Jayaratne (2003) の研究では, 浮遊砂の発生機構は砂連上の乱流に起因するもの, シートフロー上の乱流に起因するもの, 砕波の下での乱流に起因するものの 3 つに分類し論じている。本論文ではそれぞれの条件での基準点濃度と拡散係数の算定方法について新たな検討を行なった。具体的には次元解析および実測データとの比較から関数形を定め, 最小自乗法を用いて係数を決定した。本論の検討では, 現地観測値と現地規模の実験結果である 198 ケースを対象として解析した。具体的には鹿島ら(1983), Nielsen(1984), Dette and Uliczka (1986) および Ribberink and Al-Salem (1994) などのデータを用いている。

2. 実験室規模での濃度分布

柴山・Jayaratne (2003) の研究では, 主に実験室規模の実験結果を用いていた。そのため, 関数形を定めて係数を同定する際に, 小規模実験の結果に比重が置かれることとなっていた。そのために図-1 から 3 に示すように小規模実験の結果を精度よく説明していたものの, 実験結果にはスケールの効果が含まれているために現地スケールでの現象を予測する際には推定の精度がよくなかった。図-1 は小規模実験での砂連上の浮遊, 図-2 は同じくシートフロー上の浮遊, 図-3 は同じく砕波による浮遊であるが, いずれの場合にも柴山・Jayaratne (2003) の式は小規模の水路を用いた実験結果を精度よく予測している。

3. 実規模実験での濃度分布

以下では, 実規模および現地データを用いて, 柴山・Jayaratne (2003) の式を関数形を保存したまま, 係数を比定することにより, スケールの効果について検討する。

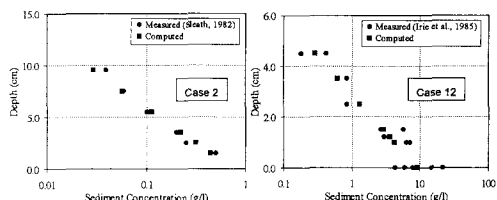


図-1 砂連上の浮遊砂濃度予測 (柴山・Jayaratne, 2003 の式より算定)

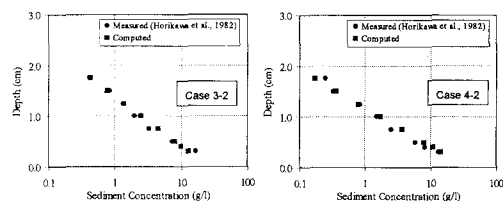


図-2 シートフロー上の浮遊砂濃度予測 (柴山・Jayaratne, 2003 の式より算定)

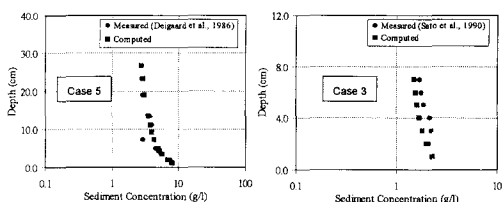


図-3 砕波下の浮遊砂濃度予測 (柴山・Jayaratne, 2003 の式より算定)

(1) 底面砂連近傍の渦による浮遊

まず底面近傍での基準点濃度 c_r の推定方法について述べる。砂連上の浮遊については Nielsen (1984) がオーストラリアの海岸で観測した 28 セットの非砕波下, 渦を伴う砂連上の浮遊の実測データを用いた。

砂連が形成された底面については砂連頂部から砂連高さの 1/2 の高さの点を基準点として選んでいる。柴山・Jayaratne (2003) と同様の次元解析および実測データを用いた回帰分析により砂連が形成された場合については次式で評価する事とした。すなわち, 基準点濃度 (c_r) と砂連上の拡散係数 (ϵ_r) を先の Nielsen (1984) の実測デー

* フェロー 工 博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院システムの創生部門

** 学生会員 M.Eng. 横浜国立大学大学院工学府博士課程後期学生

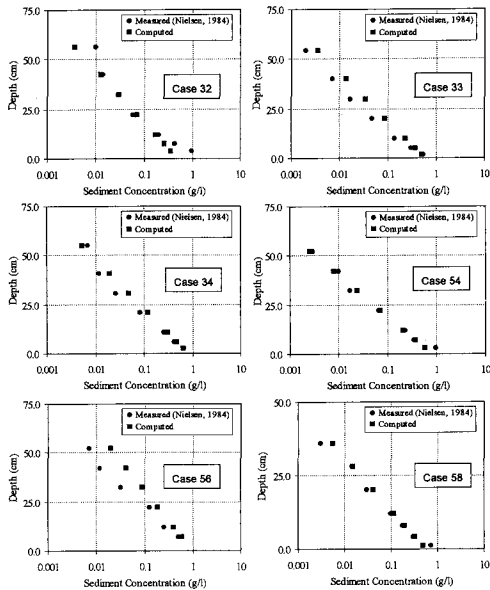


図-4 現地海岸での砂漣上浮遊砂濃度分布の比較 (Nielsen, 1984 との比較)

タを用いて同定すると次式を得る。

$$c_r = \frac{4.5(\phi - 0.05)\nu}{\sqrt{(s-1)gd}(\eta/2)} \quad (1)$$

ここで、 ϕ は底面粒径を用いた Shield 数、 s は砂粒子比重、 d は粒径、 ν は水の動粘性係数、 η は砂漣波高、 g は重力加速度である。

式 (1) は Nielsen (1984) の現地観測データを用いて解析した結果であるが、小規模実験の結果より係数が約 45% 小さくなっている。

次に拡散係数 ε_r について述べる。柴山・Jayaratne (2003) より前の研究では砂漣の波高は変数に含まれていたが、水平方向の大きさ (波長 λ) は含まれていなかった。砂漣近傍の渦の大きさは砂漣の波長によっても規定されており、本研究でも砂漣波長を含めて検討し以下のような評価式を得た。

$$\varepsilon_r = 0.37 u_{*wc} A_b \left(\frac{w_s}{u_{*wc}} \right)^2 \left(\frac{\eta}{d} \right)^{0.1} \left(\frac{\lambda}{d} \right)^{0.25} d_*^{-1.5} \quad (2)$$

ここで w_s は底質の沈降速度、 λ は砂漣波長、 u_{*wc} は波流れの下での底面摩擦係数、 A_b は境界層外縁での水粒子軌道半径 ($= u_b T / 2\pi$) さらに $d_* = d(sg/\nu^2)^{1/3}$ (van Rijn, 1984) である。

結果として濃度の鉛直分布は高さの指数関数として表されて、以下となる。

$$c(z) = c_r \cdot \exp\left\{ \frac{-w_s(z - \eta/2)}{\varepsilon_r} \right\} \quad (3)$$

予測結果と実測結果の比較を図-4 に示す。これらの

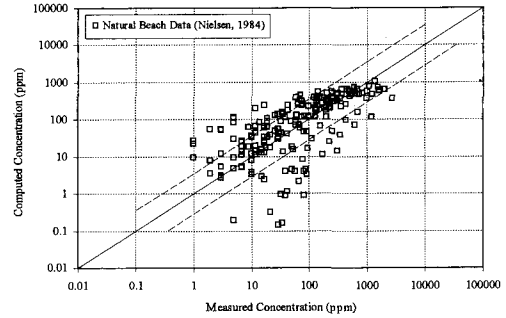


図-5 現地砂漣上浮遊砂濃度分布の比較 (Nielsen, 1984 の 28 ケース, 191 のデータを用いた。)

図の傾向は柴山・Jayaratne (2003) で示した小規模実験における Sleath (1982) あるいは Deigaard ら (1986) のデータの示した傾向とほぼ同じで、式 (3) は実験の鉛直方向分布をよく説明している。横軸に高さの対数をとった片対数グラフで濃度の分布はほぼ直線 ($\log c$ 対 z) となり、高さによって指数関数的に減衰する。鉛直方向の代表長さは砂漣波高 (η)、となり、濃度の減少量は 4 から 5 砂漣波高分の高さの変化で 10^2 分の 1 と急速に変化する。つまり、砂漣近傍の浮遊現象では底面のごく近傍に濃度分布は集中しているといえる。

図-5 は Nielsen (1984) の計測の 28 ケースの 191 のデータを比較したものである。75% のデータが予測値の $1/3.5$ から 3.5 倍の範囲に分布しており、データが現地海岸の観測結果であることを考えると、良く予測していると言える。残りの 25% のデータの場合は主に基準点濃度の評価に誤りが含まれていると考えられる。

(2) シートフロー上の浮遊

次にシートフローの場合の基準点濃度と拡散係数について述べる。碎波帯内で底面の摩擦応力が増加すると砂漣が消滅し、シートフロー状態の砂移動が始まる。底面での基準点濃度は砂漣上の浮遊の場合よりも大きくなる場合が多い。シートフローによる乱流域は底面近傍に底面に沿って形成されるために、一般に鉛直方向の濃度分布は大きく、底面近傍 (現地の場合でも底面から 10 cm 程度) では高濃度であるものの、上層では急激に濃度が小さくなると考えられている。

以下の解析では、Nielsen (1984) の現地データと Ribberink・Al-Salem (1994) の現地規模振動流実験結果の合わせて 12 ケースを用いる。

砂漣上の検討と同様に最小二乗法による係数の同定手法 (柴山・Jayaratne, 2003) を用いて、基準点濃度 (c_s)、は $z \leq 100d$ の場合、以下で与えられる。

$$c_s = \frac{1.5(\phi - 0.05)\nu}{\sqrt{(s-1)gd}(25d)}; z \leq 100d \quad (4)$$

また、 $z > 100d$ の場合には

$$c_s = \frac{0.3(\psi - 0.05)\nu}{\sqrt{(s-1)gd(100d)}}; z > 100d \quad \dots\dots\dots (5)$$

と表すことができる。

次に拡散係数 (ε_s) は $z \leq 100d$ の場合については以下のように表すことができる。

$$\varepsilon_s = 0.024 u_{*wc} A_b \left(\frac{u_{*wc}}{w_s} \right)^2 d^{-1.5}; z \leq 100d \quad \dots\dots\dots (6)$$

$z > 100d$ の場合については陽な形式では表現できず、

$$M_s = \left(\frac{w_s}{u_{*wc}} \right)^{0.25} \quad z > 100d \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表される。ここで M_s は $z > 100d$ の場合の式 (9) で濃度分布を表すような拡散に関する係数である。

よって濃度の鉛直分布 $c(z)$ は以下となる。

$$c(z) = c_s \exp\left(\frac{w_s(z-25d)}{\varepsilon_s}\right); z \leq 100d \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$c(z) = c_s \left(\frac{100d}{z} \right)^{M_s}; z > 100d \quad \dots\dots\dots (9)$$

図-6 は 2 つの文献 (Nielsen, 1984; Ribberink & Al-Salem, 1994) の 12 のケースについて実測値と予測値を比較したものである。90%ほどのデータは良く予測されているが 10%ほどのデータは過大あるいは過小評価されている。全体としては式 (4)-(9) で評価できるものである。

図-7 は現地、振動流装置それぞれについて実測値と推定値の鉛直分布を比較したものである。図から底面ごく近傍のシートフロー層のすぐ上の層では指数関数的に変化するものの、上層に移動するにつれて勾配は急になり、鉛直方向距離に関してべき乗関数的に変化するようになる。これはシートフロー層のすぐ上の層とさらに上層の浮遊層の間での乱流構造の相違に起因していると考えられる。

(3) 砕波による底質浮遊

これまでの漂砂量式では砕波による底質移動を取り入れることは難しかった。この領域では砕波による乱流が底面に達し、底質を巻き上げ、浮遊状態に取り込む過程

が重要である。一般に底面近傍の乱流場は底面での摩擦や砂漣周辺に発生する乱流場で底質の移動が規定されているが、砕波による上層からの乱れはこれらの底面から発生する乱れとは性質が大きく異なることがわかっていく。

2 つの文献 (鹿島ら, 1983; Dette & Uliczka, 1986) から 19 のケースについてデータを解析し、柴山・Jayaratne (2003) と同様の次元解析により式の同定を行った。式 (10) は底面から $100d$ の高さにおける基準点濃度 (c_b) を与える式である。

$$c_b = 4 \times 10^{-10} \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_b} \right)^{1.5} g T \frac{\bar{u}_b^{2.3}}{w_s^{3.3}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで $\bar{u}$ は着目点での波による軌道流速、 $\bar{u}_b$ は底面近傍での流れの強さを示すパラメーターとして用いられる砕

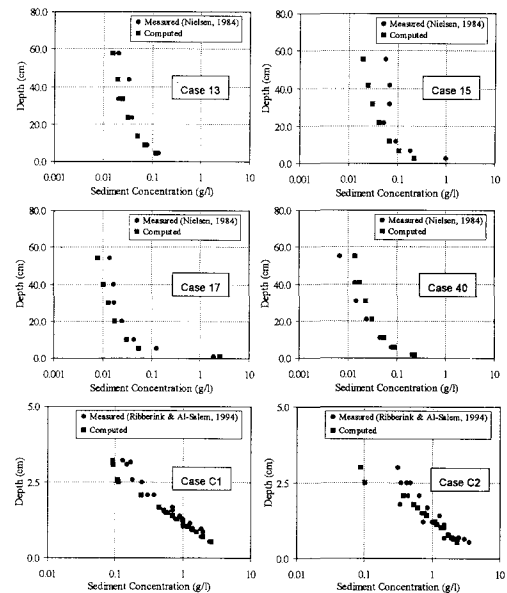


図-7 実測値と推定値の比較 (現地海岸と実規模振動流装置、シートフローの場合)

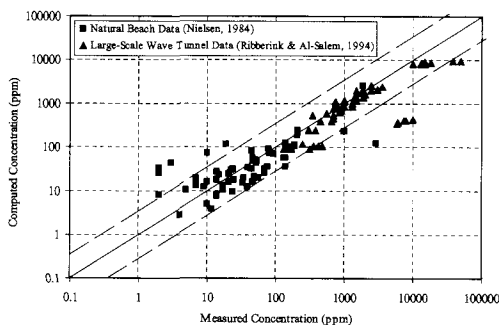


図-6 観測値と推定値の比較 (シートフローの場合)

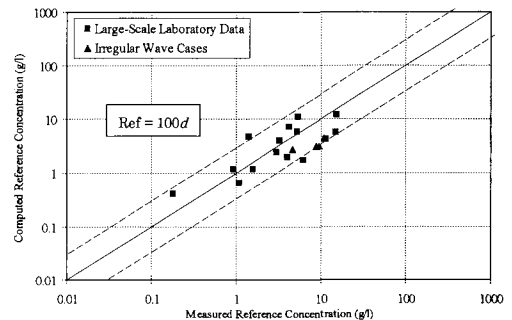


図-8 砕波下での底面基準点濃度の測定値と予測値の比較 (大規模実験結果)

波点での波による底面軌道流速 (Sato ら, 1990) である。

図-8は観測値と式 (10) による推定値を比較したものである。ここでは Dette・Uliczka (1986) による不規則波動下のデータと鹿島ら (1983) の規則波下のデータを比較のために示してある。概ね 90% の推定値が実測値の 1/3-3 倍の範囲 (図中の破線の範囲) に含まれており、推定精度は良好である。

拡散係数についてもこれまでと同様に解析する。ただし、柴山・Jayaratne (2003) の k_2 の値は定数ではなく、Rattanapitikon・Shibayama (1996) に倣って、砕波点での値 0.3 から遷移点で 1.0 になるように変化させる。

$$k_2' = k_3 \left[0.3 + 0.7 \frac{(x_b - x)}{(x_b - x_t)} \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで $k_3 = 0.225$, x は岸沖位置を表し、添え字 b と t はそれぞれ砕波点と遷移点からの距離を表している。拡散係数は以下で与える。

$$\varepsilon_b = \left[k_1 u_{*wc}'' + k_2' \left(\frac{D_B}{\rho} \right)^{1/3} \right] z \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで $k_1 = 0.08$ である。結果として浮遊砂濃度分布は以下で与えられる。

$$M = \frac{w_s}{\left[k_1 u_{*wc}'' + k_2' \left(\frac{D_B}{\rho} \right)^{1/3} \right]} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$c(z) = c_b \left(\frac{100d}{z} \right)^M \quad \dots\dots\dots (14)$$

図-9に現地規模、砕波下の鹿島ら (1983) の浮遊砂濃度の実験値と算定値の比較を掲げる。この場合にも多くのデータが推定値の 1/3.5 から 3.5 倍の間に分布しており、データのまとまりは改善されている。予測の失敗は多くの場合、拡散係数の推定に起因しており、基準点濃度の推定のほうがより予測に成功している。

図-10と図-11は浮遊砂濃度分布の比較を鹿島 (1983) と Dette・Uliczka (1986) それぞれについて示したものである。図-10で実験値が中層で大きくなってい

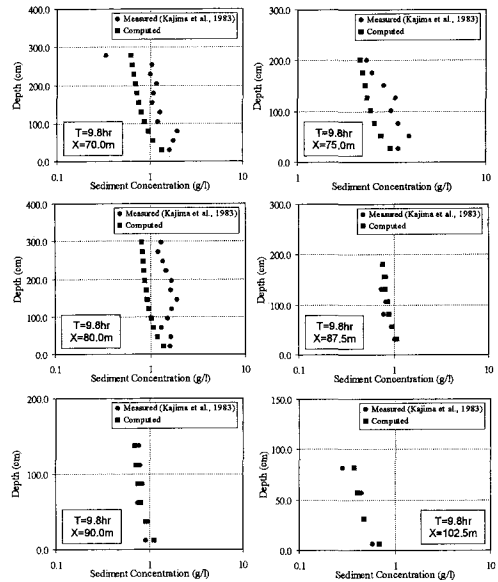


図-10 砕波下の浮遊砂濃度の計測値と推定値の比較 (鹿島ら, 1983, Case 6.1 のデータとの比較)

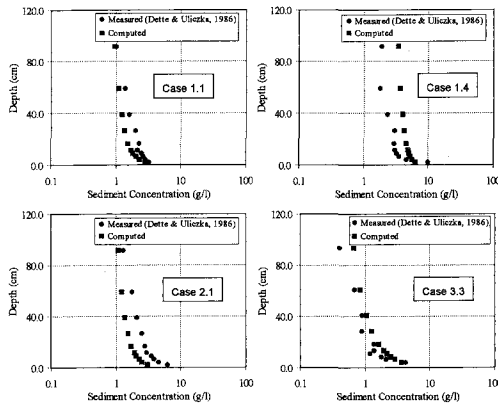


図-11 砕波下の浮遊砂濃度の計測値と推定値の比較 (Dette and Uliczka, 1986 のデータとの比較)

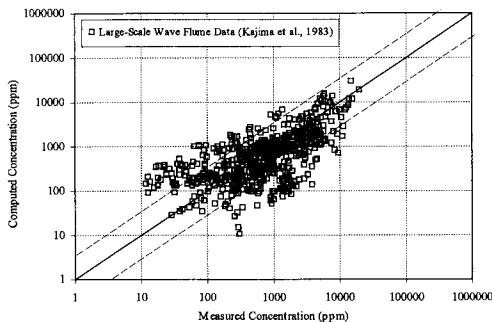


図-9 砕波下の浮遊砂濃度の比較 (鹿島ら, 1983 の 137 ケース, 595 個のデータを用いた.)

る例があるが、このような現象は本モデルでは説明できない。

砕波帯内では、1) 砂漣上の浮遊と砕波下の浮遊、あるいは 2) シートフロー上の浮遊と砕波下の浮遊、が重合して発生している場合が多い。これら 3 つの浮遊砂発生機構を量的に比較する (図-4, 7, 10, 11) と、砂漣上、シートフロー上、砕波下の順に大きくなる。多くの場合、それらの相違を上層での浮遊砂濃度を用いて比較した場合、1) 2) に比して 3) は、10 倍程度の比であることがわかった。

4. 結 論

実規模の砕波帯内の浮遊砂濃度をより精密に見積るために、基準点濃度、拡散係数の二点について3つの浮遊機構別に新たな推定式を提案した。これらの推定式は過去の大規模実験室あるいは現地海岸の実測データを精度良く再現することができた。また、これらの浮遊機構を量的に比較し、それらの大小関係を量的に比較した。

本研究は五洋建設株式会社からの研究費を用いて行ったことを付記する。

参 考 文 献

- 入江 功・寺崎賢次・加藤一正 (1985): 砂漣上の底質の浮遊過程を考慮した漂砂観測法に関する実験的研究, 港研報告, Vol. 24, No. 2, pp. 124-156.
- 鹿島遼一・斎藤昭三・清水隆夫・丸山康樹・長谷川寛・橋山 勉 (1983): 大型造波水路による岸沖漂砂の実験, 資料集 No. 1-8, 電力中央研究所.
- 柴山知也・Jayaratne, M. P. R. (2003): 砕波帯内浮遊漂砂量の評価方法, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 451-455.
- Deigaard, R., Fredsoe, J., and Hedegaard, I.B. (1986): Suspended sediment in the surf zone; J. WW, ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 115-128.
- Detle, H.H., and Uliczka, K. (1986): Velocity and sediment concentration field, Proc. 20 th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1062-1076.
- Horikawa, K., Watanabe, A., and Katori, S. (1982): Sediment transport under sheet flow condition, Proc. 18 th Coastal Eng., Conf., ASCE, pp. 1335-1352.
- MacDonald, T.C. (1977): Sediment suspension and turbulence in an oscillating flume, CERC, Technical paper No. 77-4.
- Nielsen, P. (1984): Field experiments of time-averaged suspended sediment concentration under waves, Coastal Engineering, Elsevier, No. 8, pp. 51-72.
- Winyu Rattanapitikon and T. Shibayama (1996): Cross-Shore Sediment Transport and Beach Deformation Model, Coastal Eng., Conf., ASCE, pp. 3062-3075.
- Ribberink, J.S., and Al-Salem, A.A. (1995): Sheet flow and suspension of sand in oscillatory boundary layers, Coastal Eng., Elsevier, 25, pp. 205-225.
- Rijn, L.C. van (1984): Sediment transport, Part I: Bed load transport, J. W, P., C., and Ocean Eng., ASCE, Vol. 110, No. 10, pp. 1431-1456.
- Sato, S., Homma, K., and Shibayama, T. (1990): Laboratory study on sand suspension due breaking waves, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 33, No. 2, pp. 219-231.
- Sleath, J.F.A. (1982): The suspended of sand by waves, J. Hydraulic Res., No. 20, pp. 439-451.