

砕波帯内浮遊砂量の評価方法

柴 山 知 也*・M. P. R. Jayaratne**

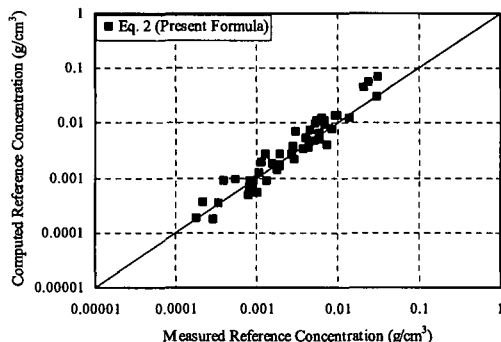
砕波帯内の浮遊砂濃度を算定するためには起動力により, 3つの要素に分割して考える必要がある。それらは1) 底面砂連近傍での渦運動による浮遊量を評価するための基準点濃度と拡散係数, 2) シートフロー状態での浮遊量を評価するための底面近傍基準点濃度と拡散係数, 3) 砕波による渦運動により巻き上げられる浮遊砂量を評価するための底面基準点濃度と拡散係数である。本論ではこれらの3つの要素それぞれについて既往の実験結果を用いて別々に評価方法を提案し, 最終的にそれらを統合することにより砕波帯内浮遊砂濃度推定の総合的評価方法を提案した。

1. はじめに

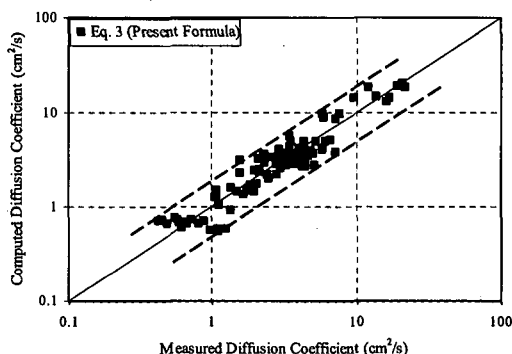
地形変化を引き起こすような漂砂移動の内, 砕波帯内では特に浮遊漂砂の割合が大きくなる。本研究では浮遊漂砂量を推定する場合に必要な全水層での濃度の鉛直分布を求めるために, 基準点濃度と拡散係数を用いて推定する方法を枠組みとして用いる。砕波帯内では浮遊砂の推定方法をその起動力を用いて3つの要素に分割して考える必要がある。それらは1) 底面砂連近傍での渦運動による浮遊量を評価するための基準点濃度と拡散係数, 2) シートフロー状態の移動床からの浮遊砂量を評価するための底面近傍基準点濃度と拡散係数, 3) 砕波による渦運動により巻き上げられる浮遊砂量を評価するための底面基準点濃度と拡散係数である。これらのうち, 1)と3)あるいは2)と3)は同じ場所で同時に起こるが, 1)と2)は同じ場所で同時に重なり合うことはない。

本論ではこれらの3つの要素それぞれについて既往の実験結果を用いて別々に評価方法を提案し, 最終的にそれらを統合することにより砕波帯内浮遊砂濃度推定の総合的評価方法を提案する。

砕波帯内外の浮遊漂砂濃度推定の精度を向上するために, 砂連上の基準点濃度については4つの文献から48ケース, 拡散係数については9つの文献から100ケース, シートフローについては基準点濃度の検討に3つの文献から12ケース, 拡散係数については2つの文献から9ケース, さらに砕波による浮遊については基準点濃度について3つの文献から23のケース, 拡散係数は3つの文献から29のケースを検討の対象としている。これらのデータを用いて, 砕波帯全体の濃度分布推定精度に大きな影響を及ぼす3つの要素について再検討したわけである。文献は文末の参考文献に掲げてあるが, 1977年から現在までのものである。これは温度ドリフトの影響を受けない光学式の濃度計が計測に用いられるようになって



図一 砂連上基準点濃度の算定結果と実測の比較



図二 砂連上拡散係数の算定結果と実測の比較

からのデータを使用したためである。これらのデータは広範な実験室での実験結果を含んでおり, 現時点でのもっとも信頼できるデータの集積結果であるといえる。

2. 砂連上の浮遊

まず底面近傍での基準点濃度 c_r について述べる。本研究では次元解析から関数形を定め, 実測データとの比較に最小自乗法を用いて係数を決定した。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。次元解析と関数形の比較により基準点濃度 (c_r) を以下のように表す。

* 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

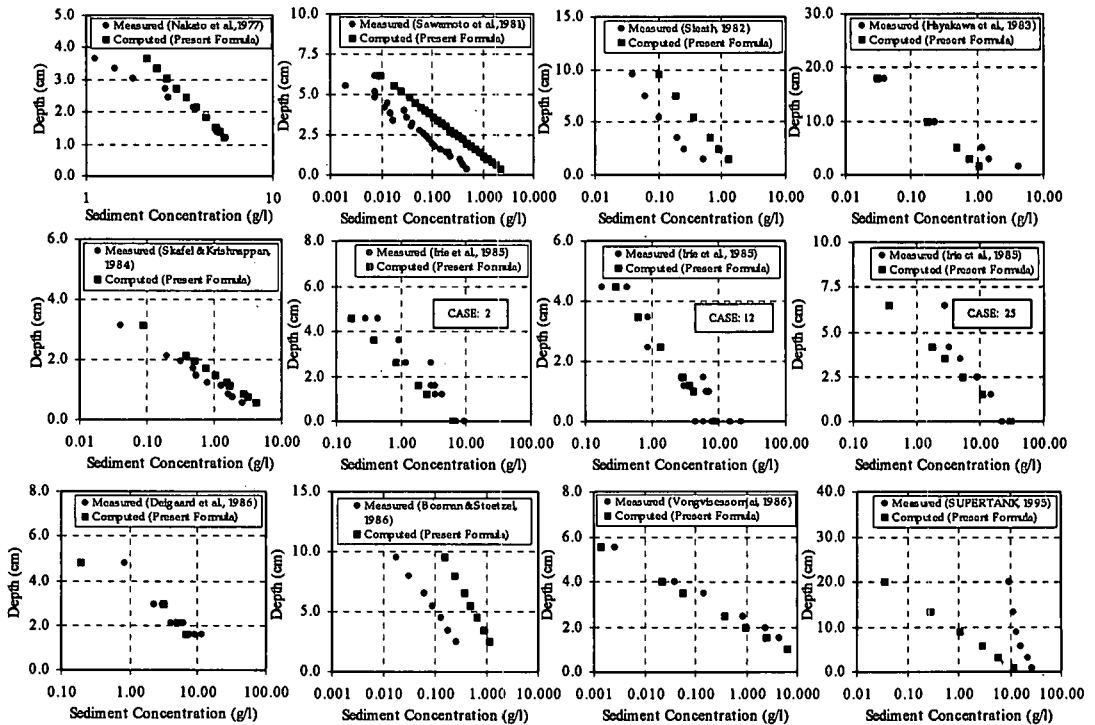


図-3 砂漣床上の浮遊砂動濃度の比較

$$c_r = (\psi - \psi_c) \frac{k_2 w_s d}{f_1 \sqrt{(s-1)gd}} \quad (1)$$

ここで f_1 は砂漣の形状 (高さ η , 波長 λ) と砂の粒径などの関数, c_r は底面基準点濃度, ψ は Shields パラメータ, ψ_c は砂移動限界に対応する Shields パラメータ, ν は動粘性係数, s は底質比重, d は砂の粒径である。さらに実測データとの回帰分析により砂漣が形成された場合については式 (2) で評価する事とした。使用したデータは Nielsen (1979), Sawamoto ら (1981), Sleath (1982), Skafel・Krishnappan (1984) のものである。

$$c_r = \frac{10(\psi - 0.05)\nu}{\sqrt{(s-1)gd}(\eta/2)} \quad (2)$$

図-1 は基準点濃度の算定値と実験値の比較を示したものであり, 従来の Rattanapitikon・Shibayama (1993) や Nielsen (1988) などの方法に比べてかなりデータのまとまりが良くなっていることがわかる。

次に拡散係数 ϵ_r について述べる。これまでの研究では砂漣の波高 (η) は変数に含まれていたが, 水平方向の大きさ (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, 本研究では砂漣波長 (λ) を含めて検討した。次元解析で関数形を定めた後に 101 ケースの砂漣床上部の濃度分布から求めた拡散係数を用いて, 係数を最小二乗法を用いて定め, 以下の式を得た。

$$\epsilon_r = 0.27 \cdot u_{*wc} A_b \left(\frac{w_s}{u_{*wc}} \right)^2 \left(\frac{\eta}{d} \right)^{0.1} \left(\frac{\lambda}{d} \right)^{0.25} d_*^{1.5} \quad (3)$$

ここで ϵ_r は乱流拡散係数, u_{*wc} は波流れ下での摩擦速度, A_b は境界層外縁での水粒子水平方向運動軌道径, $d_* = d/(sg/\nu^2)^{1/3}$ である。使用したのは Nakato ら (1977), Nielsen (1979), Sawamoto ら (1981), Sleath (1982), Hayakawa ら (1983), Skafel・Krishnappan (1984), Irie ら (1985), Vongvisessomjai (1986), Bosman・Steetzel (1986) のデータである。この式からは一見流速の効果が読みとれないが, 分母分子に含まれる底面流速の効果は相殺されて大きな影響を与えていない。これは, 砂漣が形成される条件では流速の範囲が元々限られており, 一旦砂漣が形成されると必ず流れが剥離し渦が発生するために砂漣形状の効果がより大きな影響力を持つためであると考えられる。

図-2 に拡散係数の実験値と算定値の比較を掲げる。この場合にも別途 Sleath (1982), Nielsen (1988), Rattanapitikon・Shibayama (1993) の推定式と比べて検討しているが, 式 (3) による推定は相関係数が 0.86 と高く, 実験値は予測値の 50% から 200% の範囲に入っている。

図-3 は以上の検討により求められる基準点濃度と拡散係数を用いて砕波帯内の浮遊砂濃度を算定し, 濃度鉛直分布の実験値と比較した例である。分布形状について

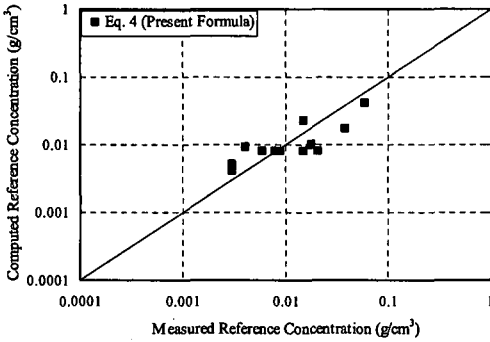


図-4 シートフロー上基準点濃度の比較

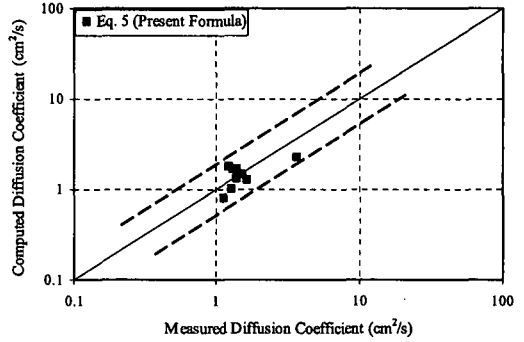


図-5 シートフロー上拡散係数の比較

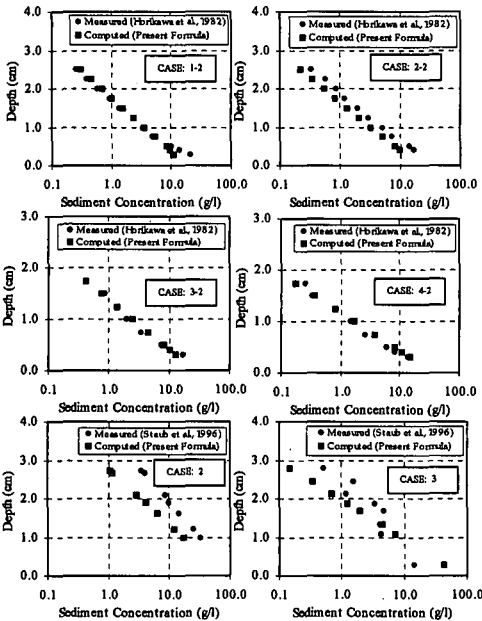


図-6 浮遊砂濃度の比較

図-4 はこの算定値と実験値を比較したものである。この比較結果も良好である。

また、拡散係数も同様の手法により、以下で与えられる。データは Horikawa ら (1982), Staub ら (1996) のものを使用した。

$$\varepsilon_s = 0.012 u'_{*wc} A_b \left(\frac{u'_{*wc}}{w_s} \right)^2 d_*^{-1.5} \quad \dots\dots\dots (5)$$

シートフロー上層の拡散現象については、砂漣のように強制的に流れを剝離させる機構が存在しないため、拡散係数の大きさは底面での摩擦速度(あるいは底面流速)に大きく依存している。式(3)と式(5)の相違は主にこの乱流生成機構の違いに起因していると考えられる。

図-5 はこの算定式と実験値の比較である。ここで実験結果は、実験による濃度の分布から逆算して求めたものであるが、算定値との一致度は良好であるといえる。

図-6 はこれらの式を用いて推定した浮遊砂濃度の鉛直分布について実測結果と比較したものであるが、この場合にも拡散係数に起因する濃度分布形はよく説明しているものの、基準点濃度についてはいくつかの場合で推定精度が低下するようである。

4. 砕波による浮遊

砕波による浮遊については、Sato ら (1990) が、実験室内の浮遊砂濃度分布を空間的に積分し、浮遊状態になる砂の質量を以下の式で評価している。

$$M_{sm} = 4.4 \times 10^{-8} \rho_s H_b^2 \left(\frac{\bar{u}_b}{w_s} \right)^{3.3} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで M_{sm} は砕波により浮遊状態になる砂の質量、 H_b は砕波波高、 $\bar{u}_b$ は底面軌道流速の最大値である。

本論では、この関数形を参考にして関数形を定め、係数を実験データ (Dette・Uliczka, 1986, Sato ら, 1990, Wang ら, 2002) を用いて定める。その際、基準点高さを底質粒径の 100 倍にとっている。結果として以下のような式を提案した。

は概ね良好な推定をしている場合が多いが、基準点濃度がずれている場合が散見できる。全体としてみると拡散係数の推定精度に比べて基準点濃度の推定精度の方により多くの問題が残されるようである。

3. シートフロー上の浮遊

シートフロー状態では厚い移動砂層が存在することを考慮して、基準点高さは、 $z=25d$ と定める。この高さでの基準点濃度を 2. と同じ手法で次元解析により関数形を推定し、その上で実験値との比較により最小自乗法を用いて係数を定めている。使用したのは Horikawa ら (1982), Ribberink・Al-Salem (1995), Staub ら (1996) のデータである。その結果、以下の推定式を提案する。

$$c_s = \frac{2.75(\psi - 0.05)\nu}{\sqrt{(s-1)gd(25d)}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

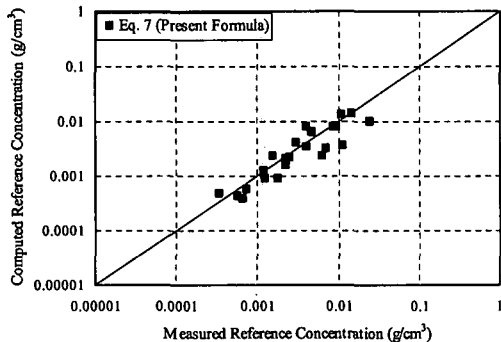


図-7 砕波による基準点濃度の比較

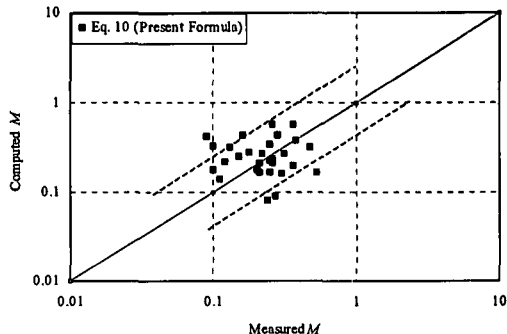


図-8 M値（濃度分布形状を表す）の比較

となり、式中の M は以下で表される。

$$M = \frac{w_s}{\left[k_1 u_{*wc}^2 + k_2 \left(\frac{D_b}{\rho} \right)^{1/3} \right]} \quad (10)$$

図-8はこの M の値を実験値と比較したものである。この場合にも砕波のもとの現象であることを考慮すれば、十分な精度で分布形を推定しているといえる。図-9に濃度分布比較の例を示す。この場合にも全体としては良好なものの、基準点濃度、分布形の双方に誤差が含まれている事がわかる。

5. 主要な結論

砕波帯内の浮遊砂濃度を算定するために起動力により、浮遊現象を3つの要素に分割して考えた。それらは

- 1) 底面砂漣近傍での渦運動による浮遊
- 2) シートフロー状態での浮遊
- 3) 砕波による渦運動により巻き上げられる浮遊

である。

底面基準点濃度と拡散係数を、既往の実験結果を用いて検討し、それぞれに評価方法を式(2)、(3)、(4)、(5)(7)、(8)のように提案した。最終的にそれらを統合することにより砕波帯内浮遊砂濃度推定の総合的な評価をすることができる。

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): 砂れん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, 港湾技術研究所報告, 第24巻, 第2号, pp. 123-156.
- 沢本正樹・山下俊彦・北村 匡 (1981): 砂漣上の乱れ強度分布と浮遊砂濃度分布, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 232-236.
- Bosman, J. J. and H. J. Steetzel (1986): Time and bed averaged concentration under waves, Proc. 20th Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 986-1000.
- Deigaard, R., J. Fredsoe and I. B. Hedegaard (1986): Suspend-

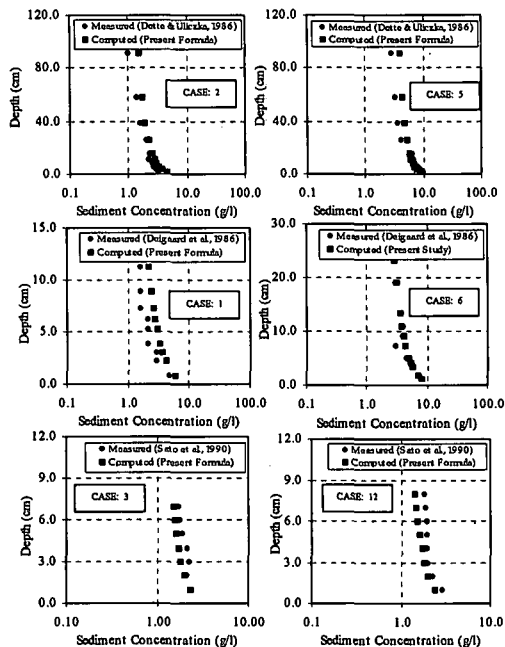


図-9 砕波の下での濃度分布の比較

$$c_b = 1.0 \times 10^{-9} g T \frac{\bar{u}_b^{2.3}}{w_s^{3.3}} \quad (7)$$

図-7に基準点濃度の比較を示す。この場合にも砕波条件下での基準点濃度の推定に成功している。

次に拡散係数は以下となる。データは Dette・Uliczka (1986), Deigaardら (1986), Satoら (1990) のものを使用した。

$$\varepsilon_b = \left[k_1 u_{*wc}^2 + k_2 \left(\frac{D_b}{\rho} \right)^{1/3} \right] z \quad (8)$$

ここで k_1 と k_2 は定数, u_{*wc} は波流れ下での摩擦速度, D_b は砕波によるエネルギー減衰の定数である。濃度分布は結局,

$$c(z) = c_b \left(\frac{z_0}{z} \right)^M \quad (9)$$

- ed sediment in the surf zone, *J. Waterways, P., C., and Ocean Eng., ASCE*, Vol. 112, No. 1, pp. 115-128.
- Detle, H. H. and K. Uliczka (1986): Velocity and sediment concentration field, *Proc. 20 th Conf. on Coastal Eng., ASCE*, pp. 1062-1076.
- Hayakawa, N., G. Tsujimoto and H. Hashimoto (1983): Velocity distribution and suspended sediment concentration over large-scale ripples, *Coastal Eng. in Japan, JSCE*, Vol. 26, pp. 91-100.
- Horikawa, K., A. Watanabe and S. Katori (1982): Sediment transport under sheet flow condition, *Proc. 18 th Conf. on Coastal Eng., ASCE*, pp. 1335-1352.
- Nakato, T., F. A. Locher and J. F. Kennedy (1977): Wave entrainment of sediment from rippled beds, *Proc. ASCE 103, (WW1)*, pp. 83-100.
- Nielsen, P. (1979): Some basic concepts of wave sediment transport, *Inst. Hydrodynamics and Hydraulic Eng. (ISVA), Series paper 20*.
- Nielsen, P. (1988): Three simple model of sediment transport, *Coastal Eng., Elsevier*, No. 12, pp. 43-62.
- Rattanapitikon, W. and T. Shibayama (1998): Energy dissipation model for regular and irregular breaking waves, *Coastal Eng. in Japan, JSCE*, Vol. 40, No. 4, pp. 327-346.
- Rattanapitikon, W., T. Vivattanasirisak and T. Shibayama (2003): A proposal of new breaker height formula, *Coastal Eng. in Japan, JSCE*, Vol. 45, No. 1, pp. 29-48.
- Ribberink, J. S. and A. A. Al-Salem (1995): Sheet flow and suspension of sand in oscillatory boundary layer, *Coastal Eng., Elsevier*, 10, pp. 23-31.
- Sato, S., K. Homma and T. Shibayama (1990): Laboratory study on sand suspension due to breaking waves, *Coastal Eng. in Japan, JSCE*, Vol. 33, No. 2, pp. 219-231.
- Shibayama, T. and W. Rattanapitikon (1993): Vertical distribution of suspended sediment concentration in and outside the surf zone, *Coastal Eng. in Japan, JSCE*, Vol. 36, No. 1, pp. 49-65.
- Skafel, M. G. and B. G. Krishnappan (1986): Suspended sediment distribution in wave field, *J. Waterways, P., C., and Ocean Eng., ASCE*, Vol. 110, No. 2, pp. 215-230.
- Sleath, J. F. A. (1982): The suspended concentration of sand by waves, *J. Hydraulic Res.*, No. 20, pp. 439-451.
- Staub, C., I. G. Jonsson and I.A. Svendsen (1996): Sediment suspension in oscillatory flow: Measurements of instantaneous concentration at high shear, *Coastal Eng., Elsevier*, 21, pp. 67-96.
- SUPERTANK Laboratory Data Collection Project (1994): Intermittent near-bed sediment suspension in the offshore at SUPERTANK, Main text, Vol. 1, Chap. 10, pp. 185-210.
- Vongvisessomjai, S. (1986): Profiles of suspended sediment due to wave action, *J. Waterways, P., C., and Ocean Eng., ASCE*, Vol. 112, No. 1, pp. 35-53.
- Wang, P., B. A. Ebersole, E. R. Smith and B. D. Johnson (2002): Temporal and spatial variations of surf-zone currents and suspended sediment concentration, *Coastal Eng., Elsevier*, 46, pp. 175-211.
-