

碎波帯を含む浮遊砂濃度の鉛直分布の評価

柴 山 知 也*・Winyu Rattanapitikon**

1. はじめに

地形変化を引き起こすような漂砂移動の内、碎波帯内では特に浮遊漂砂の割合が大きくなることが知られている。特に碎波点近傍では碎波の効果により高濃度の領域が形成される (Shibayama et al., 1986)。このような浮遊漂砂の移流の効果を現行の地形変化モデルにより正確に取り込むために、本研究ではまず浮遊漂砂濃度の鉛直分布をより正確に見積もることを目指した。浮遊砂の鉛直濃度分布を見積もるには底面の基準点濃度、浮遊砂拡散係数の鉛直分布をそれぞれ見積もる必要がある。底面基準点濃度に関しては Nielsen (1986)、拡散係数の分布に関しては Sleath (1982)、Nielsen (1988) の研究があり、それぞれに推定式の提案が行われているが特に碎波帯内での推定精度が問題となる所である。本研究では碎波帯内外、あるいは砂漣床上・平坦床上 (Sheet Flow) を分類することにより、より正確な評価の方法を目指すこととする。

2. 実験データの検討

碎波帯内外の浮遊漂砂濃度を検討するために著者ら (Sato et al, 1990) の碎波領域での浮遊砂濃度の実験室での計測を含めて、13 の文献から 139 ケースのデータを検討の対象とした。表-1 にデータの出典を示す。表に示すようにそれぞれの作用波の条件を規則波、不規則波、および碎波帯の内外、碎波形式また底面が平坦床 (Sheet Flow) によって分類している。

これらの文献は 1977 年から現在までのものであるが、これは精度の良い光学式の濃度計が計測に用いられるようになってからのデータを使用したためである。これらのデータは実験室内の大型および小型の造波水路、振動流水路のものを含んでおり、底質粒径は 0.07-0.55 mm、波の周期は 0.8-6.0 s、底面軌道流速の振幅は 0.1-2.23 m の範囲にある。

3. 底面基準点の検討

まず底面付近での基準濃度について述べる。Nielsen (1986) の研究では基準濃度 c_0 を底面 ($z=0$) に於ける値として、実測データから濃度分布曲線を仮定した上で外挿して求めている。この方法では分布を仮定して外挿を用いているため実測結果をそのまま用いることはできない。そのため図-1 に示すように無次元掃流力 (Shields Number) と底面基準点濃度の相関も必ずしもよくない結果となっている。

そこで本研究では次元解析および実測データとの比較から砂漣が形成された底面については砂漣頂部から砂漣高さの 1/2 の高さの点、また Sheet Flow 状態などの平坦な底面については底質粒径の 10 倍の高さの点を基準点として選んでいる。こうすることにより分布曲線を仮定することもなく、また実測結果からの内挿を用いて基準点濃度を評価することができる。

本研究での主要な課題は碎波帯内でのかなり濃度の高い部分での浮遊砂の移流拡散を検討することであり、したがって水槽部上層での浮遊砂濃度分布への興味が強い。Nielsen (1986) の研究は底面のごく近傍での濃度を評価できる長所を持っているが、むしろこの領域は浮遊漂砂としての取り扱いよりも掃流漂砂、砂漣近傍の渦作用、Sheet Flow としての取り扱いが適当な部分であろうと考えている。

さて、次元解析および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 (1) で評価する事とした。

$$c_a = \frac{10}{3} \frac{(\phi - 0.05)\nu}{\sqrt{s - 1}gd(\eta/2)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで c_a は $\eta/2$ の点における基準点濃度、 ϕ は Shields 数、 ν は水の動粘性係数、 η は砂漣波高、 s は砂粒比重、 d は粒径である。ここで Shields 数が 0.053 以下の場合のデータに付いては濃度が極めて薄いと考えて解析の対象から外している。図-2 は式 (1) を用いて推定した基準点濃度と実測値を比較したものであり、沖浜帯においてかなり良い精度で基準点濃度を推定していることが分かる。

* 正 会 員 工 博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 学生会員 M. Eng. 横浜国立大学大学院工学研究科

表-1 実験データの出典と説明

Reference	Sym- bole	Sand Dia. (mm.)	Apparatus	Wave, Condition*	Total Test
Nakato et al. (1977)	☆	0.14	tunnel, optical	regular, non.	3
Nielsen (1979)	●	0.08-0.55	flume, suction	regular, non.	44
Sawamoto et al. (1981)	○	0.20	flume, optical	regular, non.	4
Sleath (1982)	★	0.41	tunnel, optical	regular, non.	4
Hayakawa et al. (1983)	△	0.27	tunnel, optical	regular, non.	4
Skafel and Krishnappan (1984)	◆	0.15	flume, optical	regular, non.	8
Irie et al. (1985)	◇	0.07, 0.20	flume, suction	regular, non.	27
Vongvisessomjai (1986)	▽	0.21	tunnel, suction	regular, non.	4
Bosman and Steetzel (1986)	▼	0.21	tunnel, suction	regular, non.	3
Horikawa et al. (1982)	▲	0.20	tunnel, photographic	regular, non., sf.	7
Deigaard et al. (1986)	■	0.12	flume, optical	regular, sp.	6
Detle and Uliczka (1986)	◎	0.33	big flume, suction	regular, sp., pl.	8
Detle and Uliczka (1986)	⊙	0.33	big flume, suction	irregular, sp., pl.	3
Sato et al. (1990)	□	0.15, 0.18	flume, optical	regular, sp., pl.	14

* non.: non-breaking wave, sp.: spilling breaking wave, pl.: plunging breaking wave, sf.: sheet flow.

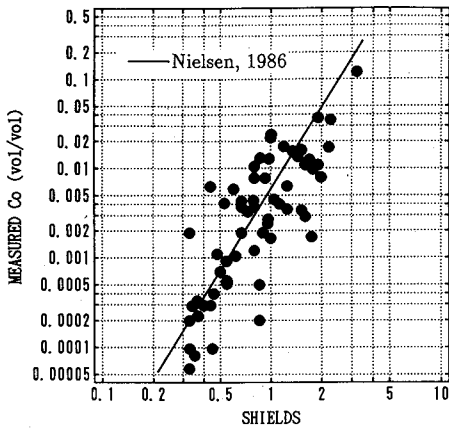


図-1 基準点濃度に関する Nielsen の式と実験データの分布

次に Sheet Flow や砕波点直下などの平坦床の場合には式 (2) で評価できる。

$$c_b = \frac{10}{3} \frac{(\phi_b - 0.05)\nu}{\sqrt{s-1}gd(10d)} \dots\dots\dots (2)$$

ここで ϕ_b は砕波の効果をあらわに取り込むために巻波砕波の場合とそれ以外の場合に以下のように評価することとする。

$$\phi_b = [u_* + 0.01(D_b/\rho)^{1/3}]^2 / [(s-1)gd] \quad (\text{巻波砕波}) \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi_b = \phi \quad (\text{その他}) \dots\dots\dots (4)$$

ここで, $u_* = \sqrt{f_w u_b^2/2}$ である。また, $D_b \propto H^3 g / (4Th)$ であり, 巻波砕波によるエネルギー逸散 $D_b = -\frac{d}{dx}(EC_\theta)$ を表す。

ここで不規則波の場合の扱いに付いて述べる。Detle・Uliczka (1986) は, 大型造波水路において不規則波の下での浮遊砂濃度の測定を行っている。ここでは彼らの論文中で与えられている有義波高, ピーク周期をそれぞれ波高周期の代表値として用い, 規則波と同様の取り扱いをすることとした。

図-3 は非砕波, 砕波, Sheet Flow を含んだ基準点濃度の算定値と実験値の比較を示したものである。推定値の 0.5 から 2 倍の間 (図中の破線) に測定ケースの 80 % 程度の測定結果が含まれており, 従来の Nielsen 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。

4. 浮遊砂濃度鉛直分布の検討

次に拡散係数の鉛直分布について述べる。まず砕波帯外の場合に付いて述べる。次元解析と実験データ中の非

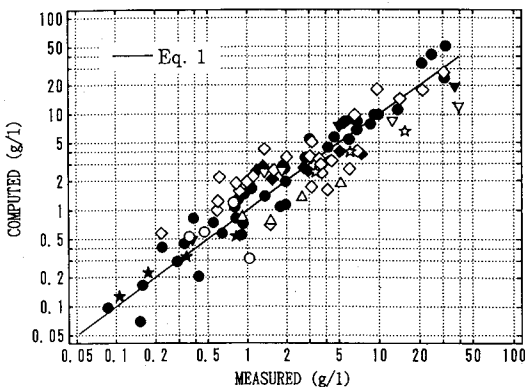


図-2 非砕波の条件の下での基準点濃度を推定する式 (式 1) と実験データの比較

碎波の場合に付いて回帰分析の結果以下の式を用いることとした。拡散係数 ε_s は以下で与えられる。

$$\varepsilon_s = 0.21 u_* A_b \left(\frac{u_*}{w} \right)^{-2} \left(\frac{\eta}{d} \right)^{0.5} d_*^{-1.5} \dots\dots\dots (5)$$

ここで d_* は粒子係数 (Rijn, 1984) であり、

$$d_* = d (sg/\nu^2)^{1/3}$$

で与えられる。また、平坦床の場合には式中 η の代わりに $2.5d$ を使用するのが最も一致度がよくなる。図-4 は式 (5) による算定結果と測定結果の比較であるが、80% の算定値が測定値の 0.7 から 1.5 倍以内図中の破線に含まれており、Sleath (1982), Nielsen (1988) の方法に比べて大幅に改善されている。

次に碎波帯内の条件に付いて述べる。この場合には底面の影響と碎波による上方からの乱れの影響の両者を考えて以下のように定めた。

$$\varepsilon_s = (k_a u_* + k_b (H^3 g / (4 Th))^{1/3}) z \dots\dots\dots (6)$$

k_a , k_b はそれぞれ係数である。この式を積分して浮遊砂の鉛直分布の式に直すと以下ようになる。

$$c(z) = c_b \left(\frac{b}{z} \right)^M \dots\dots\dots (7)$$

$$M = \frac{w}{(k_a u_* + k_b (H^3 g / (4 Th))^{1/3})} \dots\dots\dots (8)$$

あるいは

$$\log(c) = \log(c_b) + M \log\left(\frac{b}{z}\right) \dots\dots\dots (9)$$

ここで碎波の影響を代表する k_b は碎波の形態 (Spilling, Plunging) によって別々の値をとることとなる。回帰分析から求めた係数の値を以下に示す。

$$k_a = 0.04,$$

$$k_b = 0.144$$

$$= 0.216$$

$$= 0.45$$

崩れ波碎波

巻-崩れ波碎波

巻き波碎波

図-5 は上記のパラメータ M の実験値と算定値の比較である。この図では今までの図に比べてデータのばらつきが大きい。そこで図中に印を付けたそれぞれ別の文献の測定から選んだ 1 から 4 の点に付いて詳細な検討を行うために図-6 を示す。図は基準点濃度の測定値と M の推定値から求めた推定濃度分布と実測値を比較している。一般に碎波帯内では碎波の不規則性の影響を受けて濃度分布の測定値も波毎にある程度の変動を示しており、ここにみられる程度の相違は現在の手法からして致し方無い範囲のものと判断できる。

図-7 (実験データは Deigaard et al, 1986 による), 図-8 (Dette・Uliczka, 1986), 図-9 (Sato et al., 1990) はそれぞれ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碎波帯内の浮遊砂濃度を算定し、実験値

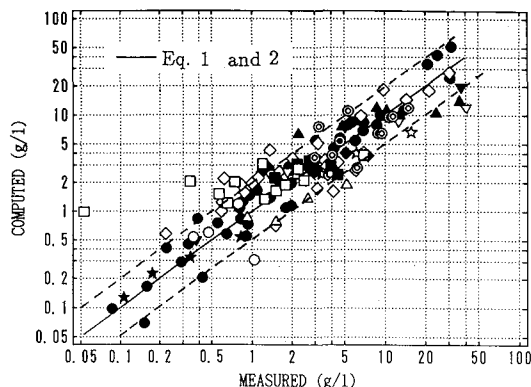


図-3 基準点濃度の推定式と実験値の比較
(碎波, 非碎波, シートフローを含む)

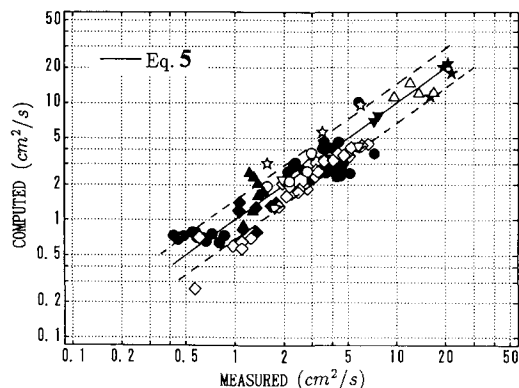


図-4 拡散係数の推定式と実験値の比較

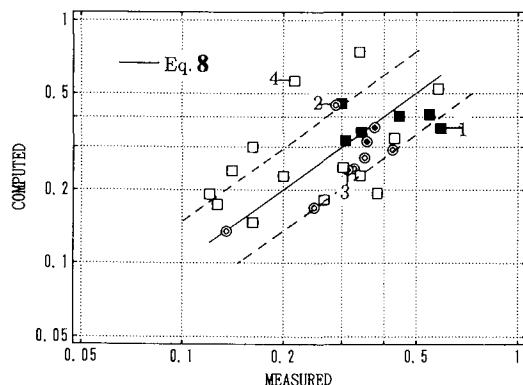


図-5 M の値の計算値と実測値の比較

と比較した例である。ここに上げた例が碎波点の近傍における計測例であることを考えれば、一致度は全体としては満足すべきものであると考えている。

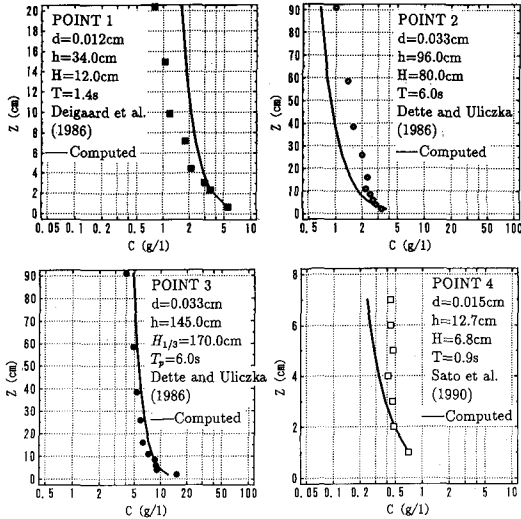


図-6 推定した M 値を用いて算定した濃度分布と実測値の比較

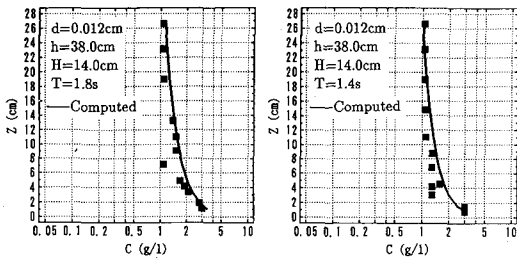


図-7 濃度分布の推定値と実測値の比較(碎波条件, 実測値は Deigaard et al., 1986)

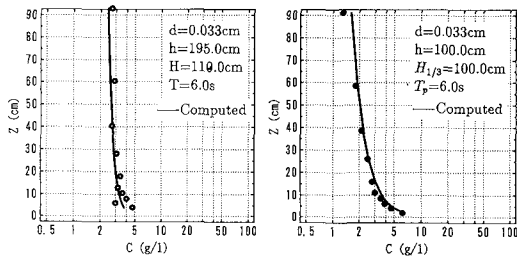


図-8 濃度分布の推定値と実測値の比較(碎波条件, 実測値は Dette・Uliczka, 1986)

4. 結 論

碎波帯内外の浮遊砂濃度をより精密に見積もるために、基準点濃度、浮遊砂鉛直分布の二点について新たな推定式を提案した。これらの推定式は過去の実測データを精度良く再現することができ、またこれらの値を用い

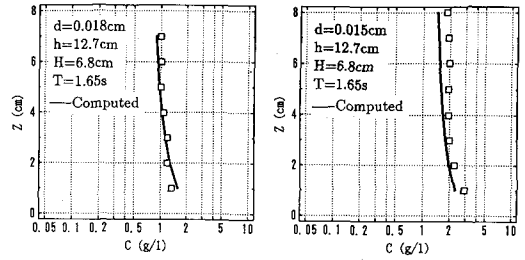


図-9 濃度分布の推定値と実測値の比較(碎波条件, 実測値は Sato et al., 1990)

て碎波帯内の碎波点の近傍を含めた浮遊砂濃度の鉛直分布を精度良く推定することができた。

本研究は文部省科学研究費一般研究 C (No.03650417 代表 柴山知也) による研究であることを付記する。

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, 港湾技研報告, Vol. 24, No. 2, pp. 124-156.
- 沢本正樹, 山下俊彦, 北村 匡 (1981): 砂連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 Steetzel, H. J. (1986): Time and bed averaged concentration under waves, Proc. 20th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 986-1000.
- Deigaard, R., Fredsøe, J., and Hedegaard, I. B. (1986): Suspended sediment in the surf zone, J. Waterways, P., C., and Ocean Eng., ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 115-128.
- Dette, H. H. and Uliczka, K. (1986): Velocity and sediment concentration field, Proc. 20th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 1062-1076.
- Hayakawa, N., Tsujimoto, G. and Hashimoto, H. (1983): Velocity distribution and suspended sediment concentration over large scale ripples, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 26, pp. 91-100.
- Horikawa, K., Watanabe, A., and Katori, S. (1982): Sediment transport under sheet flow condition, Proc. 18th Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 1335-1352.
- Nakato, T., Locher, F. A., Glover, J. R., and Kennedy, J. F. (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 Engineering (ISVA), Series Paper 20.
- Nielsen, P. (1986): Suspended sediment concentrations under waves, Coastal Engineering, No. 10, pp. 23-31.
- Rijn, L. C. van (1984): Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport, J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 110, No. 10, pp. 1431-1456.
- Sato, S., Homma, K., and Shibayama, T. (1990): Laboratory study on sand suspension due to breaking waves, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 33, No. 2, pp. 219-231.
- Shibayama, T., Higuchi, A., and Horikawa, K. (1986): Sediment transport due to breaking waves, Proc. 20th

- Coastal Engineering Conf., ASCE, pp. 1509-1522.
- Skafel, M. G., and Krishnappan, B. G. (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 of sand by waves, J. Hydraulic Res., No. 20, pp. 439-451.
- Vongvisessomjai, S. (1986): Profile of suspended sediment due to wave action, J. Waterways, P., C., and Ocean Eng., ASCE, Vol. 112, No. 1, pp. 35-53.
-