

掃流砂と浮遊砂を統一的に取り扱う碎波帯内 漂砂量モデルとその検証

柴山知也* · 片山裕之** · Ioan Nistor***
石田純一**** · 藤良太郎*****

1. 緒 論

本研究では Duy・Shibayama (1997) の碎波帯内の浮遊砂移動量算定の数値モデルを用いて, これを底面境界層に拡張することにより, 碎波帯の総漂砂量を算定する。まず碎波帯内流速場の数値モデルを構築し, 次に砂の移動に関して, 移流拡散モデルを適用する。底面境界層についても境界条件を工夫し, 同様の取り扱いを行い, 従来から浮遊漂砂, 掃流漂砂と別個の取り扱いが行われていたものを移流拡散モデルを用いて, 統一して評価する事が可能となる。

底面境界層内の砂移動については, 振動流装置を用いた過去の移動床実験データ (Ribberink et al., 1992 および Katopodi et al., 1994) により検証する。また, 碎波帯内の境界層を含む流速場については Cox et al. (1996) の流速計測結果と比較する。また, 碎波帯内全体の漂砂量の比較については, 海岸変形研究会 (清水ら, 1996) の大型水路の実験結果を用いて検証を試みる。大型水路の結果と比較することにより, 本モデルの現地規模の海岸変形予測に向けての有効性を検証することができる。

2. 数値モデルの構成

図-1 に示すように, 全体のモデルは, 上層の流体モデル, 底面境界層の流体モデル, 底面境界層内の浮遊砂モデル, 上層の浮遊砂モデルから構成されている。全体の流速場の断面の場は, 図-2 に示すように構成されている。座標系を図-2 には併せて示してある。

(1) 上層の流体モデル

碎波帯内全体の流速場の算定には, 流速値に波動運動の位相を基準とした位相平均値を用いた, Reynolds の方程式 (岸沖方向および鉛直方向) と連続式を用いる。渦動粘性係数の値は波の位相に応じて時間的に変化する量として与えている。この方程式系を水表面, 水底, 沖側,

岸側の境界での境界条件の下で解く。このような系を表面の境界が時間的に変動するような場で, 時間的に変動する曲線座標系の下で解くことは, 一般には不可能であるが, ここではデカルト座標で書かれた方程式を一般曲線座標に変換して差分計算を行った (具体的な計算方法

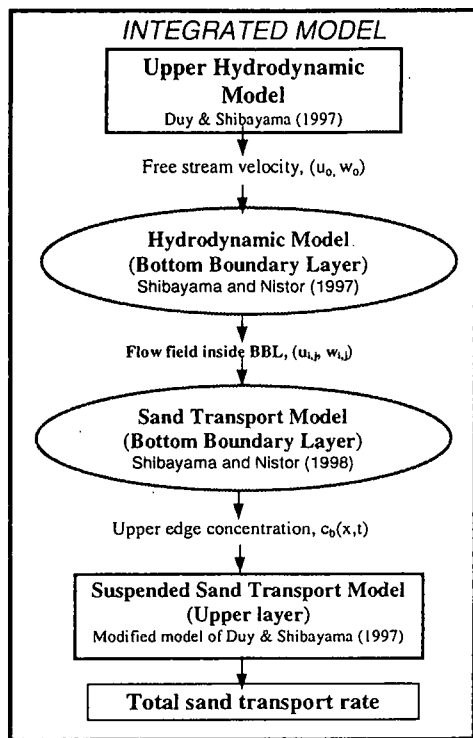


図-1 数値モデルの全体像

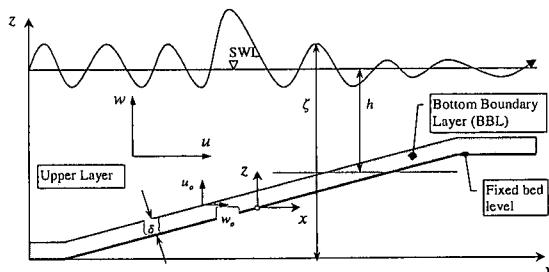


図-2 全体モデルの座標

* フェロー 工 博 横浜国立大学教授 工学研究科/留学生センター
** 正会員 工 修 横浜国立大学助手 大学院工学研究科
*** 博(工) イアシ工科大学講師 土木工学科
**** 正会員 山口県庁
***** 学生会員 横浜国立大学大学院工学研究科

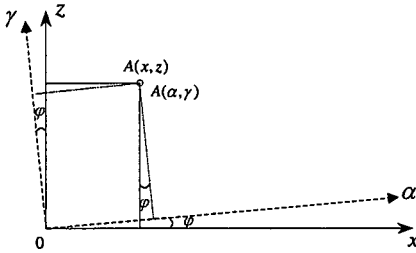


図-3 底面境界層の座標変換の説明

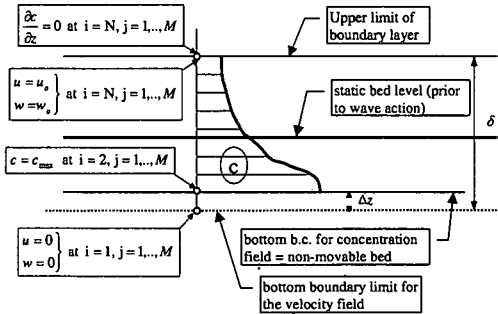


図-4 境界層内の境界条件

は Shibayama・Duy, 1994 を参照されたい。

(2) 底面境界層の流体モデル

次に (1) の算定法により計算した底面近傍流速を境界層外縁流速として与え、境界層内の流速場の算定を行った。境界層の方程式は Reynolds 応力項を含み、境界層外縁における流速の時間変化を境界条件として与えられる。質量および運動量の保存式はそれぞれ以下のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \frac{\partial u_0}{\partial t} + w_0 \frac{\partial u_0}{\partial x} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u, w は水平および鉛直方向の位相平均流速、 τ_{zx} はレイノルズ応力、 u_0 は境界層外縁流速である。ここでも境界層内の位相平均流速を計算するため、底面形状に合わせて、座標変換の方法により実空間での流速を算定している。レイノルズ応力の算定には渦動粘性係数モデルを用い、係数の値は Shibayama・Nistor (1998) と同様に、時間に拠らないものとして算定している。

(3) 底面境界層の浮遊砂モデル

以下に示す浮遊砂の移流拡散方程式を差分化し、流速場と同様の一般曲線座標系に変換して濃度分布を計算した。

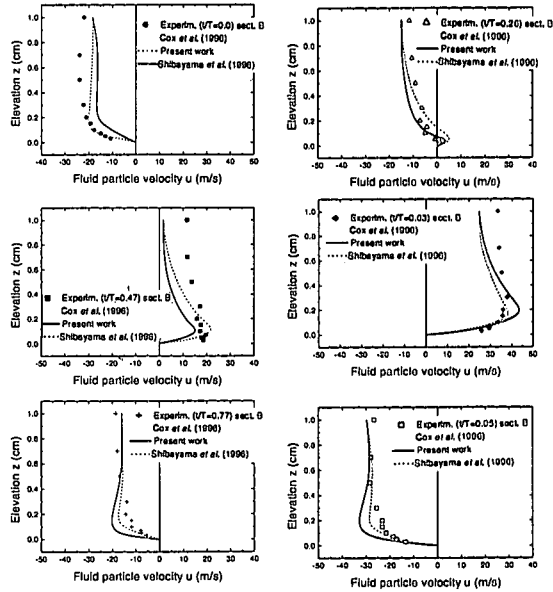


図-5 底面近傍流速場の比較

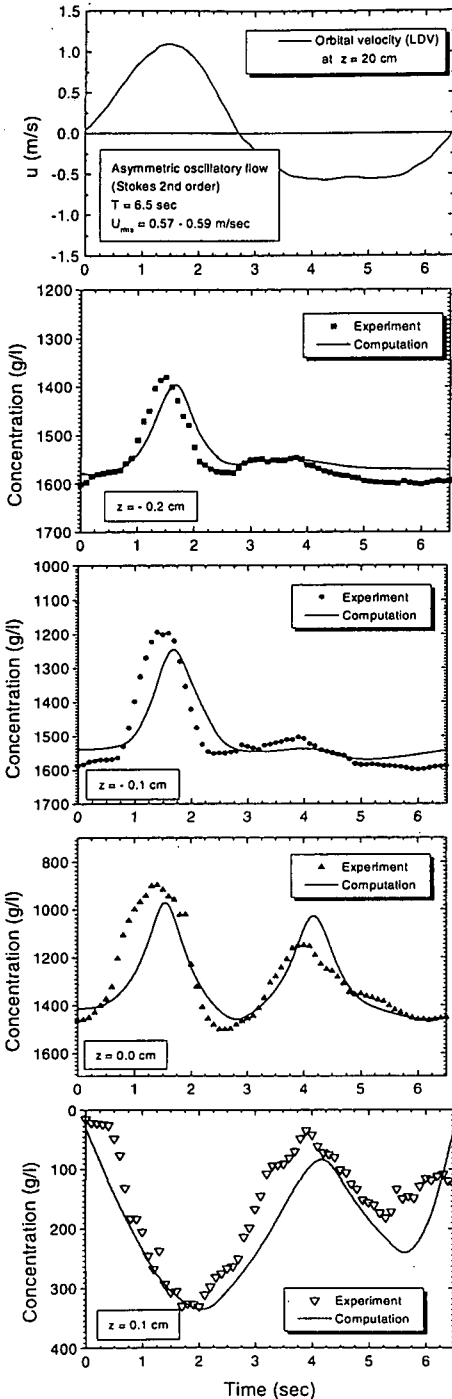
$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (uc)}{\partial x} + \frac{\partial (wc)}{\partial z} = \frac{\partial (cw_s)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial z}) \dots\dots\dots (3)$$

ここで c : 浮遊砂濃度, u, w : 水平及び鉛直流速, w_s : 砂粒沈降速度, ϵ_s : 拡散係数である。座標変換は、図-3 に示す様に、一様勾配の場合について行い、式 (1) から式 (3) は次のように変換される。

$$\frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{\partial w}{\partial \gamma} + \tan \phi \left(\frac{\partial w}{\partial \alpha} - \frac{\partial u}{\partial \gamma} \right) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \left(\cos \phi \frac{\partial u}{\partial \alpha} - \sin \phi \frac{\partial u}{\partial \gamma} \right) \\ & + w \left(\sin \phi \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \cos \phi \frac{\partial u}{\partial \gamma} \right) \\ & - \kappa u_* \left(\sin \phi \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \cos \phi \frac{\partial u}{\partial \gamma} \right) \\ & - \nu_T \left(\sin^2 \phi \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha^2} + 2 \sin \phi \right. \\ & \left. \cdot \cos \phi \frac{\partial^2 u}{\partial \alpha \partial \gamma} + \cos^2 \phi \frac{\partial^2 u}{\partial \gamma^2} \right) \\ & = \frac{\partial w_0}{\partial t} + w_0 \left(\cos \phi \frac{\partial u_0}{\partial \alpha} - \sin \phi \frac{\partial u_0}{\partial \gamma} \right) \dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + \cos \phi \frac{\partial (uc)}{\partial \alpha} - \sin \phi \frac{\partial (uc)}{\partial \gamma} \\ & + \sin \phi \frac{\partial (w-w_s)c}{\partial \alpha} + \cos \phi \frac{\partial (w-w_s)c}{\partial \gamma} \\ & - \epsilon_s \left(\frac{\partial^2 c}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial \gamma^2} \right) - \frac{\partial \epsilon_s}{\partial \alpha} \frac{\partial c}{\partial \alpha} - \frac{\partial \epsilon_s}{\partial \gamma} \frac{\partial c}{\partial \gamma} = 0 \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$



図一六 境界層内移動砂濃度分布の比較

碎波帯内の拡散係数は先に算定した流速場の計算に用いた渦動粘性係数の関数と考え、 $\epsilon_s = \beta u_t$ とおいた。ここで、係数 β の値は0.1とした。

底面の静止した砂層の濃度は、実測結果を用いて、1600 g/lが最大値となるように与える。底面の境界条件を与

える際には、図一四に示すように、最下層部で、砂の静止最大濃度を与える場所に、流速値を与える必要があるため、流速算定の格子点の最下部より一つ上の格子点から濃度の算定を開始している。

(4) 上層の浮遊砂モデル

底面境界層よりも上方の浮遊砂濃度については、上層について(3)式と同様の移流拡散方程式を、下方の境界条件として、境界層外縁での濃度を与えることにより、解くことができる。

(5) 総漂砂量の算定

以上の4つのサブモデルにより、各点における浮遊砂フラックスを算定し、鉛直方向に積分することにより、各断面での総砂移動量を算定できる。

3. モデルの検証

(1) 過去の実験データとの比較

図一五は固定床上の碎波帯における底面境界層内における流速場の実測値(Cox et al., 1996)との比較である。Cox et al.の実験では、碎波帯内に3つの側線が配置されているが、ここでは中央に位置するB側線に就いての比較を示す。図には柴山ら(1996)が予め境界層厚さを仮定して行った算定結果も比較のために示してある。速度が反転する位相を含めて数値モデルの予測精度は満足できるものとなっている。

図一六は振動流装置を用いた、境界層内の浮遊砂濃度の位相変化の算定値と実測値(Ribberink, 1992)の例である。最下層の $z = -0.2$ cmの地点では、静止最大濃度(1600 g/l)から流速が上昇すると1400 g/lまで下降する事がわかる。いずれの場合にも濃度変化は時間変化も絶対値も良好に推定されている。

また図一七は、同じく振動流装置を用いた浮遊砂量Fluxの算定値と実測値(Katopodi et al., 1994)を比較したものである。算定値は絶対値と位相変化のいずれについても実験値を再現している。ただし、流速が反転する位相($t/T = 3T/8, 7T/8$)では算定値の位相が進んでしまうために、方向を含めて算定値は実験値の予測に失敗している。位相反転時の予測を正確に行なうことは本モデルに残された課題である。

(2) 室内実験

これまでの小規模の室内実験では、底質に中央粒径0.2 mmの砂を用いる事が多かったが、それでは現地と比べて、外力による輸送速度に対して沈降速度が大きくなりすぎて、ここで問題とするような移流の効果を過小評価すると思われる。そこで粒径0.1 mmの砂を用いる実験を実施した。実験結果を図一八に示す。

鉛直1次元の拡散方程式を用いると、浮遊砂の源が底面にあるために濃度は常に下方で濃くなるが、鉛直・岸

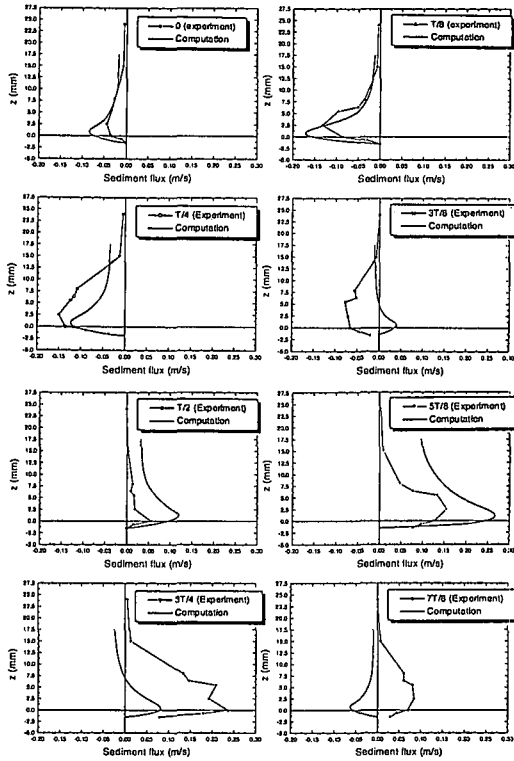


図-7 境界層内輸送量の比較

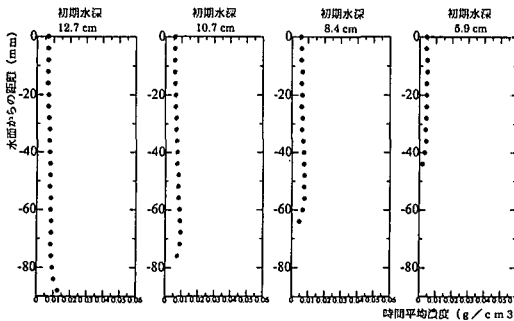


図-8 移流効果を強調した実験 ($H_0: 11.5 \text{ cm}$, $T: 1.2 \text{ s}$)

沖の2次元では移流の効果を取り込むため、碎波帯のある部分では下方よりも上方が濃くなる。この現象を実験室で確認した。しかしながら本研究の数値モデルでは底質砂の条件によっては、沈降速度が小さくなって計算が不安定となり、このような傾向は再現することができず、この点も現モデルの限界の一つである。

4. モデルの適用例

このモデルを電力中央研究所の大型造波水路を用いた不規則波による移動床実験(清水ら, 1996)に適用し、その適用性を検討する。不規則波に適用するためには

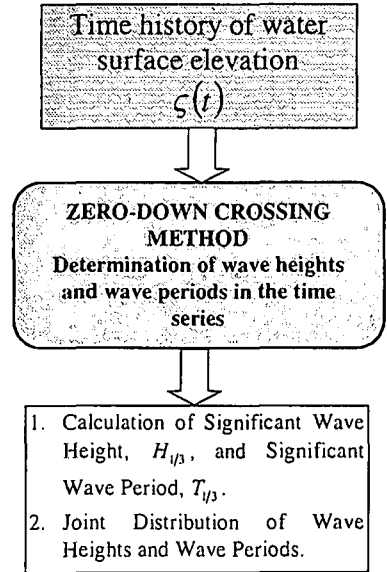


図-9 不規則波浪への適用

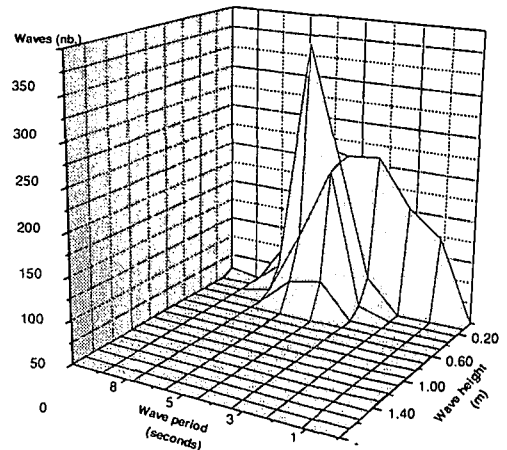


図-10 波高周期結合確率の例 (Case 1a)

図-9に示すように、不規則波をzero-down crossing法により波別に解析し、その波高と周期の結合確率を求める。この他に代表波(有義波高)を用いた場合についても検討を行なっている。

図-10はCase 1aについての結合確率の例である。区分したそれぞれの波高、周期の条件について、漂砂量(ここでは浮遊砂Fluxの鉛直方向積分値)を求め、この値と結合確率と掛け合わせて足し合わせる事により、全体の期待漂砂量を求めている。

図-11は漂砂量を比較したものである。全体としては、上層での沖向きの輸送と境界層内の岸向きの輸送の釣り合いで全体の輸送方向が決定されており、この場合

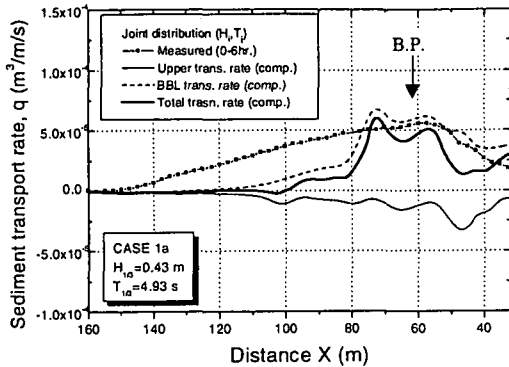


図-11 漂砂量の実験値と予測値の比較 (Case 1a)

には岸向きの輸送量が卓越している。このケースについては全輸送量の予測に成功しているといえる。この Case 1a は、一連の実験開始後の一様勾配斜面に最も近い海浜断面における実験結果である。この他のケースでは、初期地形を整地しないために、微地形を含めて、地形変化が進行するのに伴い、予測結果と実験結果との一致がしだいに悪くなる。これは、このモデルが、座標変換の方法を用いるために、水平床と一様勾配の組み合わせで地形を近似しており、複雑な地形にたいしては対応が難しく、精度が落ちることに起因していると考えられる。このように、複雑な地形への対応が難しい事も、本モデルの問題点である。

5. 結 論

従来、掃流漂砂あるいはシートフロー漂砂として、浮遊漂砂とは別途に扱われてきた底面近傍の漂砂移動量を、上層と同様の方法で計算することが可能となった。流速場については、上層の計算から底面境界層の上方境界条件を与えて底面境界層内流速を計算し、浮遊砂濃度変化については底面での静止した砂層の最大濃度を境界条件として与え、下方から上方に向けて移流拡散方程式を乱流場の下で計算している。以上により、砕波に伴う乱流によって生じる濃い浮遊砂雲の移流の効果など、砕

波帯内漂砂に特有の現象をあらわにモデルに取り込む事に成功した。

本モデルは、複雑な地形への対応が難しい、あるいは底質条件によっては計算の不安定が発生するなどいくつかの問題点も有しており、今後の改良を行なう必要がある。

本研究は、文部省科学研究費補助金基盤研究 B (No. 11450187, 代表者柴山知也) および五洋建設株式会社よりの研究費を用いて行った事を付記する。

参 考 文 献

- 柴山知也・Nguyen The Duy・岡安章夫・Nistor Ioan (1996): 砕波帯内底面乱流境界層の数値モデルとその検証, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 446-451.
- 清水隆夫・池野正明・岡安章夫・栗山善昭・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.
- Cox, D. T., Kobayashi, N. and Okayasu, A. (1996): Bottom shear stress in the surf zone, *J. Geophysical Res.* 101, C6, pp. 14337-14348.
- Davies, A. G., Ribberink, J. S., Temperville, J. A. and Zyserman, J. A. (1997): Comparison between sediment transport models and observations made in wave and current flows above plane beds, *Coastal Eng.*, Elsevier, pp. 163-198.
- Duy, N. T. and Shibayama, T. (1997): A convection-diffusion model for suspended sediment in the surf zone, *J. Geophysical Res.* 102, C10, pp. 23169-23186.
- Katopodi, I., Ribberink, J. S., Ruol, P. and Lodahl, C. (1994): Sediment transport measurements in combined wave current flows, *Proc. of Coastal Dynamics '94, ASCE*, pp. 837-851.
- Ribberink, J. S. and Al-Salem A. A. (1992): Time-dependent sediment transport phenomena in oscillatory boundary layer flow under sheet flow conditions, Part IV, *Data Report H 840.20, DELFT Hydraulics, Netherlands.*
- Shibayama, T. and Nistor, I. (1998): Modeling of time-dependent sand transport at the bottom boundary layer in the surf zone, *CEJ, JSCE*, 40(3), pp. 241-246.
- Shibayama, T. and Duy, N. T. (1994): A 2-D vertical model for wave and current in the surf zone based on the turbulent flow equation, *CEJ, JSCE*, 37(1), pp. 41-65.