

砕波帯内底面乱流境界層の数値モデルとその検証

柴山 知也*・Nguyen The Duy**・岡安 章夫***・Ioan Nistor****

1. 緒 論

本研究では砕波帯内の浮遊砂運動の予測や流速場の算定のために構築した乱流方程式を基礎とした新しい砕波帯内乱流場の数値モデル(柴山・Duy, 1994)を、底面境界層内の流速分布の算定に拡張する事を目的とした。さらに計算結果を砕波帯内底面境界層流速場の室内実験データ(岡安, 1996 あるいは Cox et al., 1995)と比較し、開発した数値モデルの検証を目指した。

これまでの底面境界層解析のための理論的取り扱い(例えば Kajiura, 1968, Grant and Madsen, 1979 あるいは Larson, 1995 など)は、①境界層外縁流速をどのようにして与えるか、②境界層内の渦動粘性係数をどのように与えるかの2つの観点から分類する事ができる。本研究では柴山・Duy (1994)の砕波帯内流速モデルで境界層外縁流速を与え、渦動粘性係数については後述するように Kajiura (1968) あるいは Grant・Madsen (1979)と同様に底面からの距離に比例して増大するとして与えている。従来は、砕波帯内において境界層外縁流速を算定することが困難であったため、砕波帯を直接に対象としての境界層内の流速算定も行われてこなかった。砕波帯内底面境界層内の流速情報は掃流砂量の推定、あるいは浮遊砂量の推定をする際に必要な底面基準点濃度の推定に資するものである。

2. 数値モデルの構成

境界層の計算に当たってはまず砕波帯内全体の流速場を算定する必要がある。砕波帯内全体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(岸冲方向および鉛直方向)と連続式を用いた。したがって Reynolds 応力項は位相平均流速からのずれで定義される。ここで渦動粘性係数は水面位置の変動とともに時間的に変化する係数として与える。以上の方程式系を水表面、水底、沖側境界、岸側境界での境界条件の下で解く。沖側境界では Ursell 数に応じて

ストークス波あるいはクノイド波を用いて水面位置、流速、圧力を与えている。水表面では時間的に変動する表面の位置自体を計算していく必要がある。このような方程式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。そこで本研究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ている(柴山・Duy, 1994を参照)。

次に以上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、境界層内の流速算定を行った。境界層の方程式は運動量保存式に Reynolds 応力項を含み以下のように与えられる(Trowbridge・Madsen, 1984)。

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

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

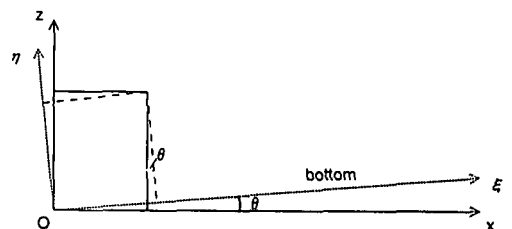
ここで τ_{zx} は Reynolds 応力であり、添字 e は境界層外縁での値を示している。また u, w はそれぞれ水平方向、鉛直方向の位相平均流速を表す。

計算に当たって境界条件は以下のように定める。まず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る。

$$u \rightarrow u_e, \quad w \rightarrow w_e \quad (z \rightarrow \infty) \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、底面で

$$u = 0, \quad w = 0 \quad (z = 0) \quad \dots\dots\dots (4)$$



図一 (x, z) 平面と (ξ, η) 平面の関係

* 正会員 工 博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科
 ** 博(工) ベトナム国立ホーチミン市工科大学講師
 *** 正会員 工 博 横浜国立大学助教授 工学研究科
 **** 横浜国立大学大学院博士課程後期学生

さらに沖側境界（砕波点近傍に設置する）と岸側境界では対数則で境界層内の水平流速の鉛直分布を仮定している。

レイノルズ応力は

$$\tau_{zx} = \rho \nu_T \frac{\partial u}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与え、さらに境界層内における渦動粘性係数はGrant・Madsen (1979) にならって以下のように与える。

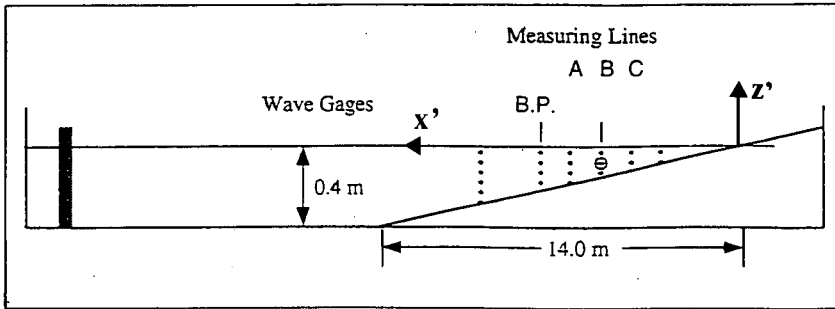
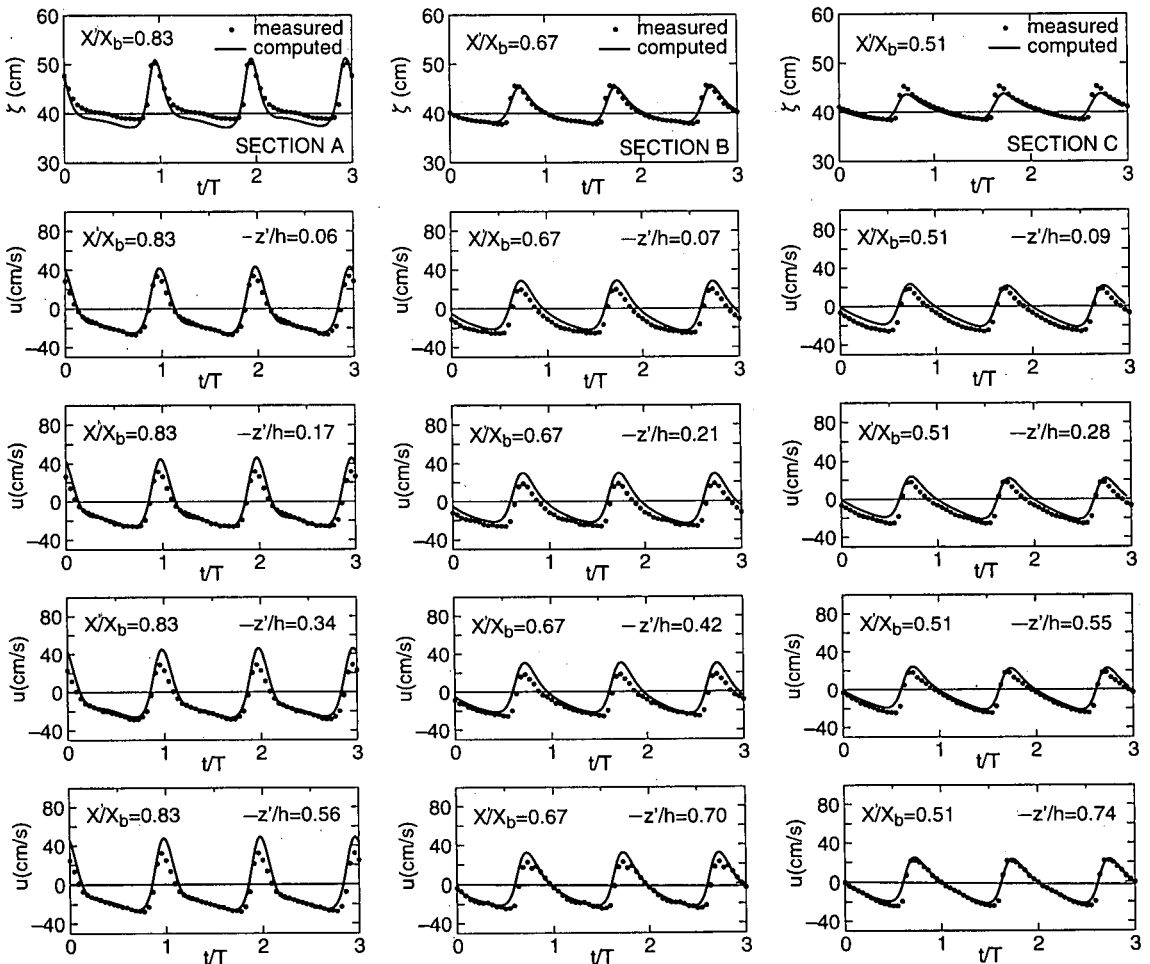


図-2 流速測定点の配置 (岡安, 1996)



(a) 測線 A

(b) 測線 B

(c) 測線 C

図-3 砕波帯表面波形 (ζ), 水平流速場 (u) の計測値と算定値の比較 (X_b : 砕波点)

$\nu_T = \kappa u_* z \dots\dots\dots (6)$

ここで κ はカルマン係数 ($\kappa=0.4$)、 u_* は摩擦速度、 z は底面からの高さである。ここで摩擦速度は

$u_* = \sqrt{0.5 f_w u_{em}^2} \dots\dots\dots (7)$

で与え、 f_w は波による摩擦係数、 u_{em} は境界層外縁流速の最大値をとっている。層流および滑面乱流に対する摩擦係数は Jonsson (1966) と同様に与え、粗面乱流に対する摩擦係数は最近の研究成果を参照して、以下のように与える (k_N は粗度長、 a は境界層外縁軌道振幅)。

$\frac{a}{k_N} > 50$ の場合
 $f_w = 0.04 \left(\frac{a}{k_N} \right)^{-\frac{1}{4}} \dots\dots\dots (8)$
(Fredsoe and Deigaard, 1992)

あるいは

$\frac{a}{k_N} < 50$ の場合
 $f_w = 0.4 \left(\frac{a}{k_N} \right)^{-0.75} \dots\dots\dots (9)$
(Kamphuis, 1975)

さてこのような方法で境界層内の位相平均流速を計算する場合に底面地形の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する必要がある。ここでは後述する実験条件に合わせて一様勾配斜面の場合の計算を行った。従って図-1 に示すように平面 (x, z) と平面 (ξ, η) の間で変換を行った。結果として (ξ, η) 平面上で式 (1)、式 (2) は以下のように表される。

$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial w}{\partial \eta} + \tan \theta \left(\frac{\partial w}{\partial \xi} - \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) = 0 \dots\dots\dots (10)$
 $\frac{\partial u}{\partial t} + u \left(\cos \theta \frac{\partial u}{\partial \xi} - \sin \theta \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) + w \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial \xi} + \cos \theta \frac{\partial u}{\partial \eta} \right)$

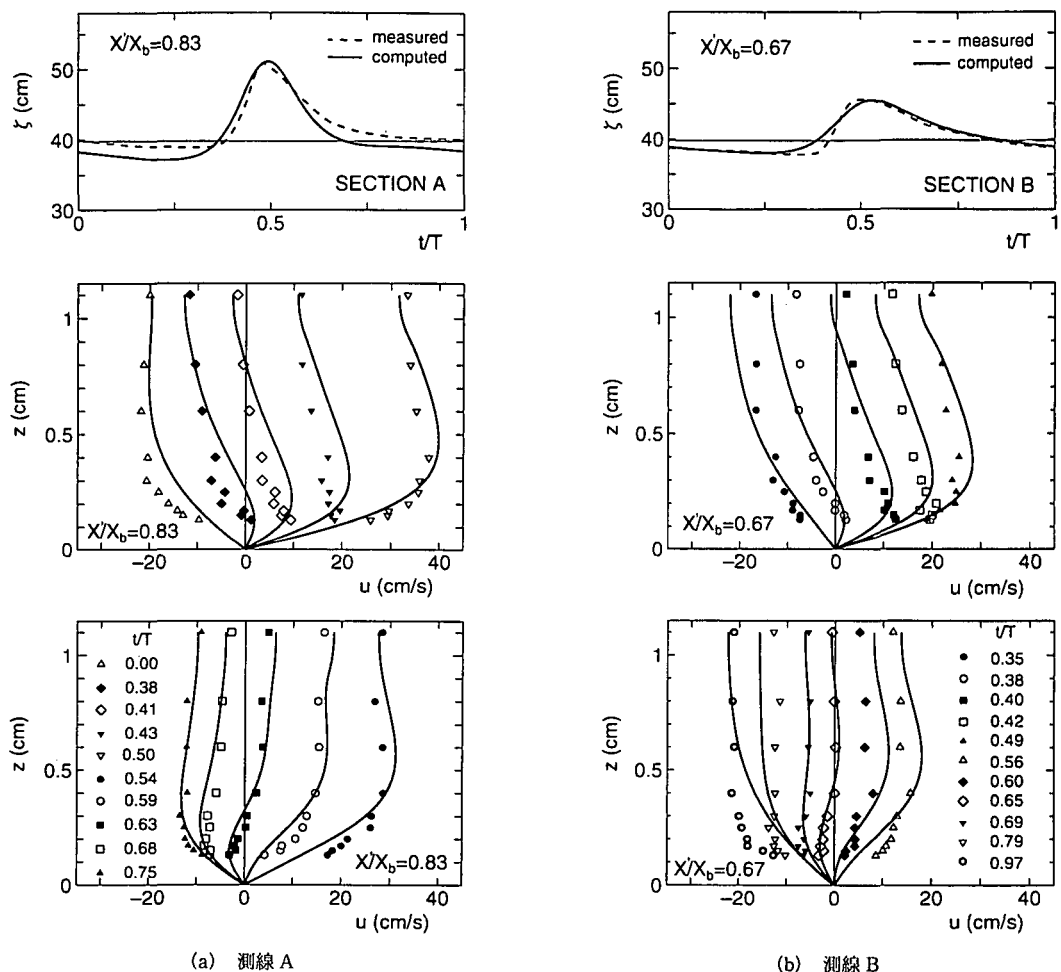


図-4 境界層内流速の位相変化の比較 (ζ: 表面波形、u: 水平流速)

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\kappa u_*}{\rho} \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial \xi} + \cos \theta \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \\
 & -\frac{\nu_r}{\rho} \left(\sin^2 \theta \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \cos^2 \theta \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \\
 & = \frac{\partial u_e}{\partial t} + \cos \theta u_e \frac{\partial u_e}{\partial \xi} \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

式 (11) を差分化し、計算点に対する連立方程式系を数値的に解いて水平流速分布を算定し、さらに式 (10) を解くことにより鉛直流速分布を算定できる。

3. 数値モデルの算定結果とその検証

本計算法の妥当性を検討するために砕波帯内底面境界層の室内実験による計測結果との比較検討を行った。実験は岡安 (1996) が行ったもので、砕波帯内固定床上に中央粒径 1 mm の砂粒子を張り付け、レーザー流速計を用いて乱流を含めて流速を計測したものである。計算に当たって η 軸は砂粒子を張り付ける前の固定床にとる。

なお、実験で境界層の厚さは 1 cm 程と報告されている。図-2 に算定値と実測値を比較した断面の位置を示す。ボア形成領域には 3 つの計測断面がある。このうち断面 A は“transition zone”，B および C は“inner surf zone”に位置している。それぞれの計測断面には鉛直方向に 30 の計測点が配置されており、このうち 10 点は底面近傍にあり底面境界層内算定モデルの検証に用いることできる。数値モデルによる算定に当たっては水平方向に 25、鉛直方向に 11 の計算点を配置している。また、入射波の周期は 2.2 s、砕波波高は 17.1 cm、底面の勾配は 1/35 である。

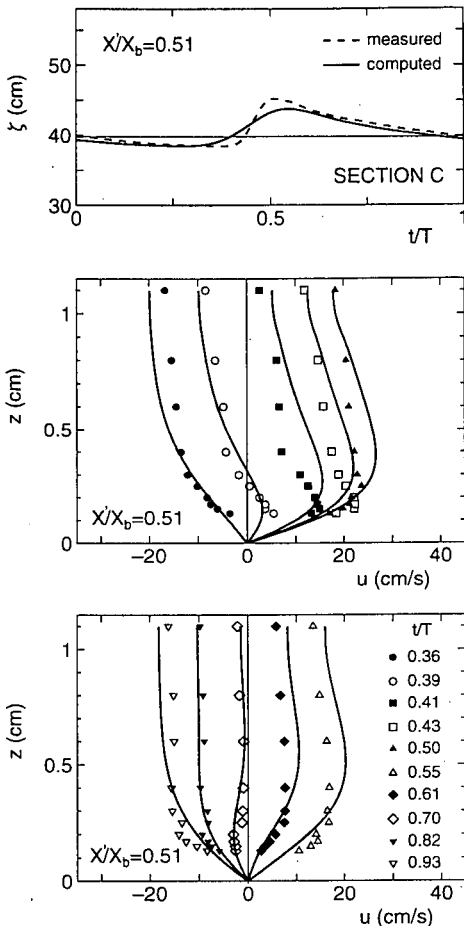
図-3(a)～(c) はまずそれぞれの測線での表面波形および境界層外部の水平流速の位相変化を実測と計算と比較したものである。いずれの場合にも算定結果は実測を良く再現しており、境界層流速算定のための境界層外縁流速の入力条件としての妥当性を有していると判定できる。但し、A 断面においては波谷部の水位変動を過大評価する傾向が見られる。この点については別途検討が必要である。

図-4(a)～(c) はそれぞれの断面における底面境界層での流速の位相変化の比較を表面波形の比較とともに示したものである。流速の図は、図が複雑になるため、前半の位相 (中段の図) と後半の位相 (下段の図) に分けて示してある。実測値の測定点数は限られているが砕波点近傍 (測線 A) を含めて、いずれの場合にも境界層外縁よりも下層で流速の最大値が起こるなどの現象を再現しており、実測値と算定値の一致度は良好である。しかし、詳細に比較すると岸向き、あるいは沖向き最大流速の位相付近で底面極近傍での流速の勾配が急に大きくなり、せん断力が底面付近に集中するという実測値の傾向 (例えば A 断面の $t/T=0.0, 0.54$, B 断面の $t/T=0.56, 0.97$, C 断面の $t/T=0.55, 0.93$ など) は必ずしも算定値において再現されておらずこの点についてはさらに検討を要する。

4. 結 論

砕波帯内の底面乱流境界層内の流速場を予測するために提案した新しい数値計算方法を、実験結果と比較し、良好な結果を得た。この計算法はレイノルズ方程式を直接に数値解析する、砕波帯内水量量の算定に広い汎用性を有する方法を、新たに底面境界層の計算に拡張したものであり、漂砂現象、物質混合などを検討する際に強力な道具となる。

本研究は文部省科研費一般研究 (c) No. 07650590 (代表者・柴山知也) により行われたことを付記する。



(c) 測線 C

図-4

参考文献

- 岡安章夫 (1996): 碎波帯における粗度面上の流速場の特性, 海岸工学論文集, 第43巻 (1), pp. 41-45.
- 柴山知也, Nguyen The Duy (1994): 乱流方程式を用いた碎波帯内波浪場の数値モデル, 海岸工学論文集, 第41巻 (1), pp. 151-155.
- Larson, M. (1995): 乱流波動境界層に対する閉形式の解, 海岸工学論文集, 第42巻 (1), 26-30.
- Cox, D. T., N. Kobayashi, and A. Okayasu (1995): Experimental and numerical modeling of surf zone hydrodynamics, Res. Report No. CACR-95-07, Center for Applied Coastal Res., Univ. of Delaware.
- Fredsoe, J. and R. Deigaard (1992): Mechanics of Coastal Sediment Transport, World Scientific, pp. 25-26.
- Grant, W. D. and O. S. Madsen (1979): Combined wave and current interaction with a rough bottom, J. Geophys. Res., Vol. 84, pp. 1797-1808.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layers and friction factors, Proc. 6th Coastal Eng. Conf., pp. 127-148.
- Kajura, K. (1984): A model of the bottom boundary layer in water waves, Bull. Earthquake Res. Inst., Vol. 46, pp. 75-123.
- Kamphuis, J. W. (1975): Friction factors under oscillatory waves, J. Waterways, Harbors Coastal Eng. Div., ASCE, 101 (WW2), pp. 135-144.
- Shibayama, T. and N. T. Duy (1994): A 2-D vertical model for wave and current in the surf zone based on the turbulent flow equations, Coastal Eng. in Japan, JSCE, Vol. 37, No. 1, pp. 41-65.
- Trowbridge, J. and O. S. Madsen (1984): Turbulent wave boundary layers, 1, Model formulation and first-order solution, J. of Geophys. Res., pp. 7989-7997.
-