

三次元波動境界層の数値シミュレーション

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 松本 卓 (Suguru Matsumoto)

北海道大学大学院工学研究科 正 員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

浅海域の海底上に構成される波動境界層内では強い剪断流が存在し、海底砂を輸送する。この固-液混相境界面にはたらく低Reynolds数における不安定性は主流方向に発生し、波向きに直交する二次元的な砂漣の配列を生成する。さらにReynolds数の大きな場合、あるいは砂漣振幅が十分に発達した場合、曲率の変化する底面境界層に沿う流れのゲルトラー不安定により砂漣のスパン方向に砂漣波長の数倍程度の三次元境界層に遷移することが明らかにされている (P. SCANDURA, et al, 2001)。この三次元境界層の発達はスパン方向に変動するマッシュルーム型渦度分布を誘発させ、砂漣形状を三次元的なブリックパターンへと変化させる。

工学的な観点において、波動境界層の三次元遷移は海底砂の浮遊過程を変化させ、浮遊及び拡散を促進させると考えられ、底質移動に重要な役割を果たしていると考えられる。

一方、P. SCANDURA, et al (2001) の数値シミュレーションは計算領域に周期境界条件を課すために、空間的に一様な流速及び“圧力”を与え、定常流が時々刻々正弦的に変化する振動流場に関する上で示した三次元境界層流れを解いたが、これは現実的な波動下のものとは明らかに異なり、アプリケーションへは直接結びつかない。

本研究は、海底砂の浮遊及び移動過程と水面波パラメータとの関係を明らかにし、浅海域の乱流特性を考慮した底質輸送モデルを構築することを最終的なゴールとし、以下に示す砂漣上の三次元境界層流に関する議論を行おうとするものである。

- ・新たに開発した任意の地形に対する数値モデルの妥当性の検証
- ・三次元境界層流遷移の時空間特性
- ・境界層近傍の剪断力と既存の海底剪断力モデルとの比較、検討
- ・三次元化に伴う乱流拡散の変化

2. 計算法

Navier-Stokes式について渡部ら (1999) と同一の数値計算法を採用し、任意座標系に対する方程式系に拡張し計算を行った。以下に計算法を概説する。

支配方程式は

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu_0\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (1)$$

式 (1) は分離解法により移流差分式、圧力差分式、粘性差分式に分解される。圧力差分式の発散形であるポアソン方程式はGauss-Seidel法ベースの2-level multi-grid法により解かれ、圧力差分式と組み合わせて予測子修正子法が適用される。粘性差分式により粘性力を評価した後、移流差分式はCIP法により計算される。海底面に適合させた座標系は楕円方程式ベースの適合格子法により生成される (図-1 参照)。

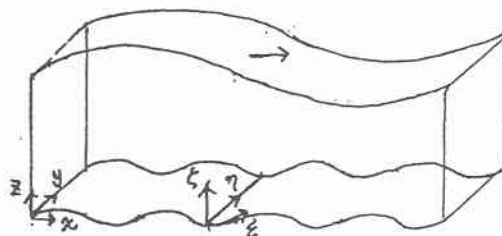


図-1 計算座標系

適合座標系 (ξ, η, ζ) 中の ξ は砂漣に沿う主流方向 ($\zeta = 0$ は海底面を表わす)、 η は砂漣スパン方向、 ζ は鉛直方向の軸となる。 ξ 及び η に対して周期境界条件を与え、底面には nonslip 条件を課す。 x 軸に沿って水面波が進行し、計算領域内に常に水面波一波長分が存在し、厳密に進行波下の流速及び圧力場を再現する。計算領域上端では微小振幅波の解析解が与えられている。ここで、境界層内の流れは計算領域外縁には寄与しないものと仮定している。計算条件は表-1に表わされる。

表-1 波浪・計算パラメータ

	波浪条件				砂漣条件			計算条件			
	波高	波長	水深	Reynolds数	振幅	波長	個数	計算領域	軸方向	グリッド幅	グリッド数
TEST CASE	2.44cm	285cm	20cm	271428	0	0	0	14.25*0.1*0.1	i	0.025	570
									j	0.025	4
									k	0.002	50
CASE1	10cm	285cm	20cm	271428	0.04	1.78125	8	14.25*0.1*0.1	i	0.02544643	560
									j	0.01	10
									k	0.002	50
CASE2	5cm	285cm	20cm	271428	0.02	1.78125	8	14.25*0.1*0.1	i	0.02544643	560
									j	0.01	10
									k	0.002	50

3. 検証

図-2は、水平床上 ($As=0$) の水平振動流の解析解と計算結果を比較したものである。ここで解析解は以下に示す一次の項までを考える。

$$u = U \{ \cos \chi - e^{-\beta y} \cos(\chi + \beta y) \} \quad (2)$$

$$\text{ここで } \beta = \sqrt{\frac{\sigma}{2\nu}}, \quad \chi = kx - \sigma t$$

また、計算結果はある深さにおける微小振幅波の流速を与えているため、鉛直流速についても境界条件として入力されているため厳密に同一条件における比較を行うことは出来ないが底面近傍では鉛直流速は十分に小さく水平流速のみの比較である程度妥当性は検証できる。

底面極近傍及び計算領域上端で両者に若干の差異が見られる。一般に粘性の影響が伝わる速さは遅く、計算開始後ゆっくりと境界層の形成がなされる。図中の各位相において水面波の通過数に応じて計算値が徐々に解析解に漸近していくのがわかる。計算領域上端部近傍の鉛直流速変動は、鉛直流速を有する境界条件に適應するために発生していると考えられ、水平振動流場との違いを示すものである。また、位相が π 異なる逆位相の流速分布の対称性が水面波の通過数の増加に伴って崩れていく結果は波の進行方向に流れるEuler的定常流の発生を示すものであり、定常流の発生しない振動流解析解との差異は時間と共に大きくなると考えられる。設定条件に違いはあるが、計算結果の解析解との比較はおおむね良好であり、本計算法の妥当性がこうして示された。

4. 砂漣上の三次元波動境界層

図-3はCASE1の位相Cにおける鉛直断面流速ベクトル、スパン方向流速、スパン方向渦度の分布を示している。砂漣クレストから発生する剥離渦が顕著に発達し(c参照)、スパン方向流速も絶対値は小さいが発生しているのがわかる(b参照)。このケースは極端に砂漣の規模が大きく設定流速も大きいため、P.SCANDURA, et al (2001) が指

摘した側方の自由度が十分に大きい時に発生するランダムな流速変動であるか数値誤差に起因するものなのか今後確認する予定である。

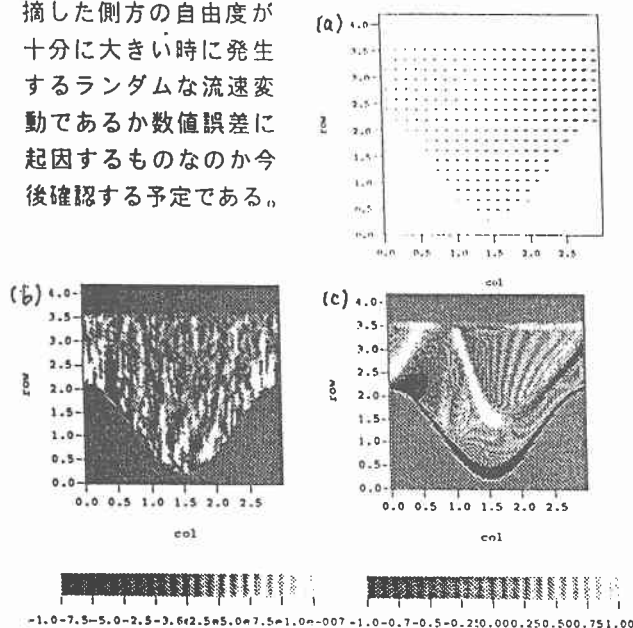


図3 砂漣上の三次元流速場 (a: 流速ベクトル、b: スパン方向流速、c: スパン方向渦度)

5. 結論

- ・波動下の任意の形状をもつ海底面近傍の三次元的流速場を解く数値計算法を開発した。
- ・計算結果は水平振動流下の境界層方程式解と比較され本計算手法の妥当性が示された。
- ・砂漣上の三次元境界層流の特性を明らかにすると共に浮遊砂に重要な影響を与える局所剪断時間特性とそのモデル化を行うことを今後の目標とする。

6. 参考文献

- 1) P.SCANDURA, et al: Three-dimensional oscillatory flow over steep ripples
- 2) 渡部靖憲: Direct Numerical Simulation of Flow Field over Rippled Bed under Waves

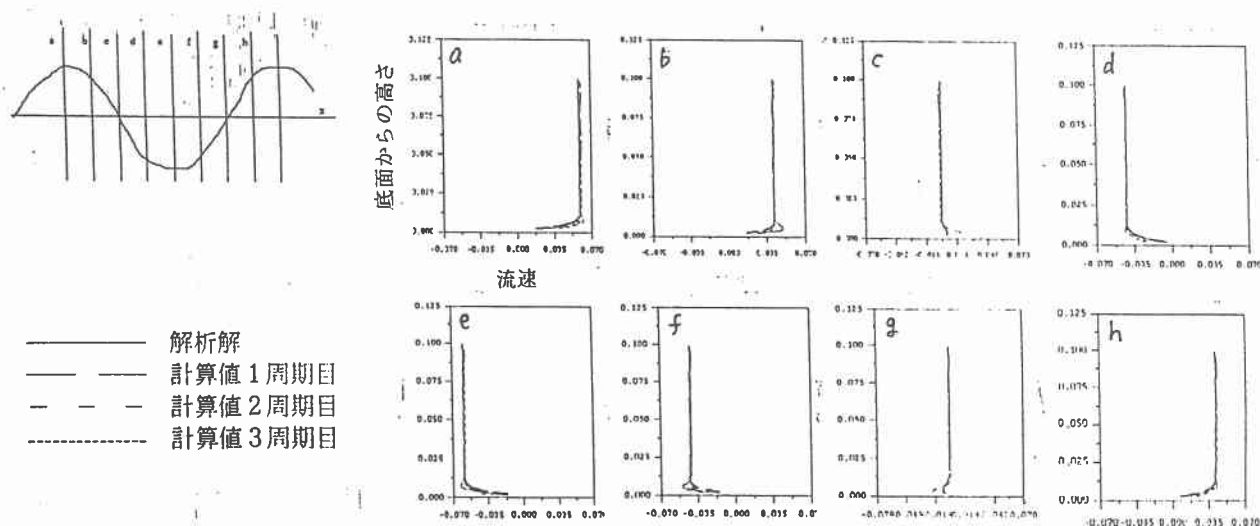


図-2 水平床上の水平振動流下の境界層方程式との比較