

非線形波動下の三次元乱流せん断力に関する研究

Three-dimensional turbulent shear force under non-linear waves

北海道大学工学研究科 ○学生員 松本 卓 (Suguru Matsumoto)
 北海道大学工学研究科 正 員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)
 北海道大学工学研究科 正 員 佐伯 浩 (Hiroshi Saeki)

1. はじめに

浅海域に発達する乱流境界層は海底砂の浮遊、輸送に極めて大きな影響を与える。浮遊状態の砂粒子輸送が全砂移動量で大きな役割を占めると報告されている一方、漂砂量推定で用いられる底面水平せん断力モデルでは海底砂の浮遊量の見積もりは困難であり、高精度の漂砂予測並びに構造物近傍の局所洗掘予測を行うためには海底面近傍の三次元局所せん断力の定量的評価が不可欠である。

底質移動初期段階においては主流方向に対して断面二次元的な砂漣が発達し、この砂漣は適当な条件下で三次元的な brick-pattern の砂漣へと遷移する。砂漣クレストからの剥離渦が顕著となる vortex ripple の形状については、古くから多くの実験が為されてきた (例えば, Sleath and Ellis, 1978)。brick-pattern ripple は二次元形状を持つ vortex ripple から遷移するが、このような底質の三次元的遷移は、二次元渦構造の崩壊によって生じる波動境界層の三次元化に起因するとされている。この二次元渦構造の崩壊は、砂漣波形勾配が小さいあるいは振動流速振幅が小さいケースについて Mei (1990) が解析的に、比較的大きなレイノルズ数に対しては Scandura ら (2000) が数値的に明らかにしたスパン方向の不安定性 (ゲルトラー不安定) の発生が原因と考えられる。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、浮遊砂としての底質輸送に重要な役割を果たしていると考えられる。

著者らは今までに数値シミュレーションを行い、線形波を与えた浅海域において、ゲルトラー不安定に起因すると思われる波動境界層の三次元化を確認した (2002)。しかし、浅海域においては非線形波による非ポテンシャル流れとなっているため、線形波及び振動流を考えたこれらの数値シミュレーションでは、アプリケーションへは直接結びつかない。一方、水深積分型モデルで扱われるポテンシャル流れにおいては、底質輸送を評価するために底面流速を用いたが、浅海域では、底面近傍の波動境界層が顕著に三次元化し、複雑な渦構造を有していると考えられるため、底面流速のみの評価では浅海域における底質輸送過程を再現できない。また、底面での鉛直流速を考慮しないポテンシャル流れでは、底質の浮遊に重大な影響を及ぼすと考えられる鉛直せん断力を評価できない。波動境界層の三次元化に伴う底面せん断力の影響は、浅海域における底質の浮遊、輸送を考える上で不可欠なものである。

本研究は、海底砂の浮遊及び拡散過程と水面波パラ

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の構築を最終目的としている。ここでは波動乱流場での基礎的研究として、波浪進行方向に一次元的な砂漣上に発達する三次元乱流境界層並びに底面せん断力の時空間特性を数値的に明らかにすると共に、水面波の非線形性を考慮した場合の流速場及び圧力場の変化について議論するものである。

2. 数値シミュレーション

2. 1 数値計算法と数値パラメータ

Navier-Stokes 式について Watanabe ら (1999) と同一の数値計算法を採用した。一様水面を通過する進行波を想定し、スパン方向に一様で波向き方向に周期的に変化する 32 個の砂漣を設置した計算領域が採用される。(東江ら, 1993 と類似した計算領域) (図-1 参照)

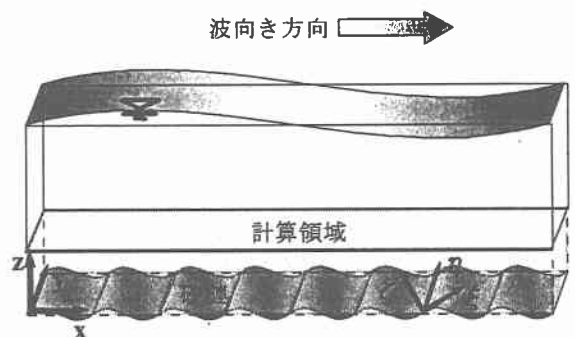


図-1 計算領域と座標系

計算座標系は x を波の進行方向、 y を横断方向、 z を鉛直方向の軸とした。海底面に適合させた座標系 (ξ, η, ζ) 中の ξ は砂漣に沿う主流方向 ($\xi = 0$ は海底面を表す)、 η は砂漣スパン方向、 ζ は ξ と直交する軸となる。 x 軸に沿って水面波が進行し、計算領域上縁では微小振幅波及びストークス波の解析解が与えられる (水面は直接解かれない)。計算領域内には常に進行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。波向き方向並びにスパン方向の側方境界にはそれぞれ周期境界条件が与えられ、底面では non-slip 条件が課せられる。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。全ての変数は水深、微小振幅波及びストークス波の波速、水の密度で無次元化される。

波浪パラメータの異なる 4 ケースについて計算が行われ (表-1 参照)、三次元渦度及び境界層遷移の波浪パラメータ依存性、並びに底面せん断力の時空間特性が調べられた。水深積分型モデルでの底面流速に対応する底面せん断力を評価するため、各位相のせん断力の一砂漣に

	波浪条件						砂漣条件			計算条件			
	水面波	波高	波長	水深	$Re(h \cdot c / \nu)$	$Re(L_s \cdot u / \nu)$	振幅	波長	個数	計算領域	軸方向	グリッド幅	グリッド数
CASE1	微小振幅波	5cm	160cm	20cm	25585	1151	0.02	0.25	32	8.0*0.1*0.2	i	0.00714	1120
CASE2					255856	14708					j	0.01	10
CASE3	ストークス波	5cm	160cm	20cm	25585	1157	0.02	0.25	32	8.0*0.1*0.2	k	0.004	50
CASE4					255856	13850							

表-1 波浪及び地形パラメータ

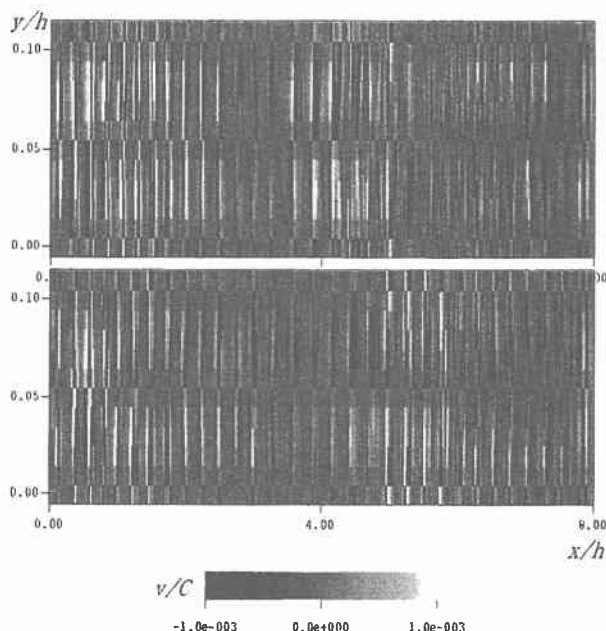


図-2 底面に隣接するグリッド内のスパン方向流速 (CASE2(上), CASE4(下))

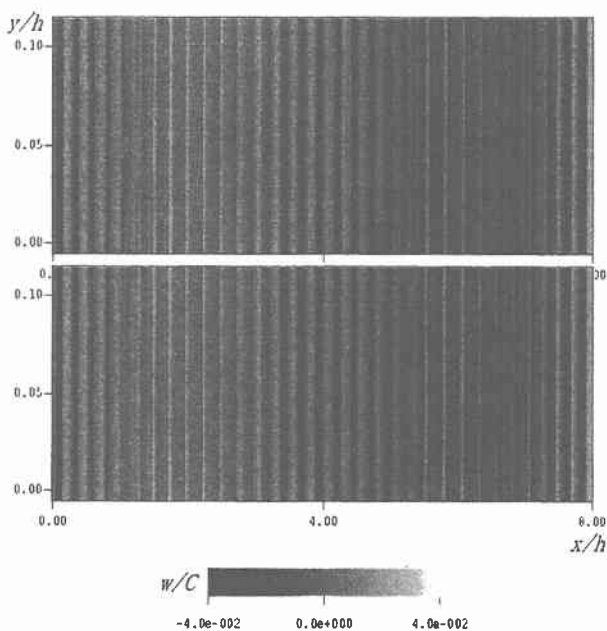


図-4 底面に隣接するグリッド内の鉛直方向流速 (CASE2(上), CASE4(下))

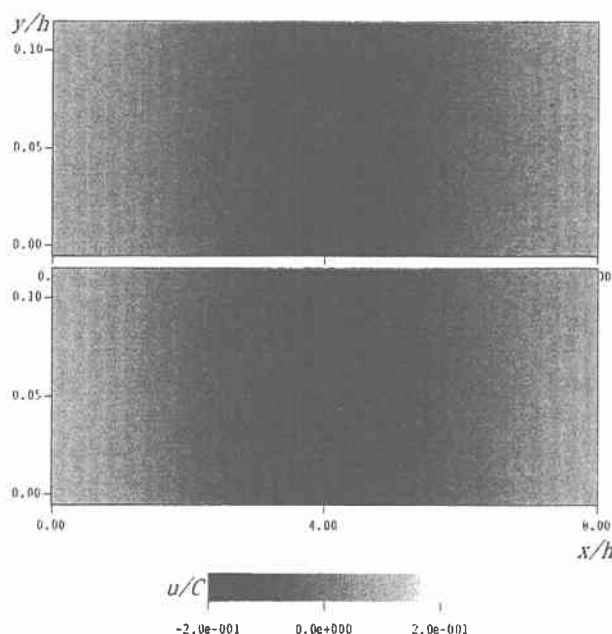


図-3 底面に隣接するグリッド内の水平方向流速 (CASE2(上), CASE4(下))

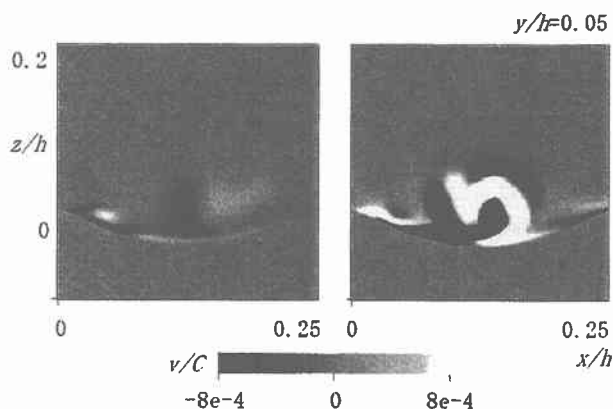


図-5 CASE4におけるスパン方向流速 (位相平均流速(左), 瞬時流速(右))

2.2 数値結果

図-2は、水面波一波長に渡る底面隣接グリッド内のスパン方向流速分布を表す。計算領域中央($y/h=0.05$)軸に完全に対称なスパン方向流速が分布し水面波のスケールで変動する。水平、鉛直流速に関しては水面波の波高が小さく非線形の効果もまた小さいため、CASE2及びCASE4でほぼ同様の分布を示すが(図-3, 4参照)、スパン方向流速は明らかに異なった分布を示している。水面波の波高が小さい場合、非線形性効果は水平、鉛直流速に比べ、スパン方向流速に対して大きな影響を与えるものと考えられる。

渡る空間平均並びに一波長平均を考える。また、瞬時流速場の評価は工学的にあまり意味を為さないため、位相平均処理を施すことによって各位相における流速場の傾向を調べた。

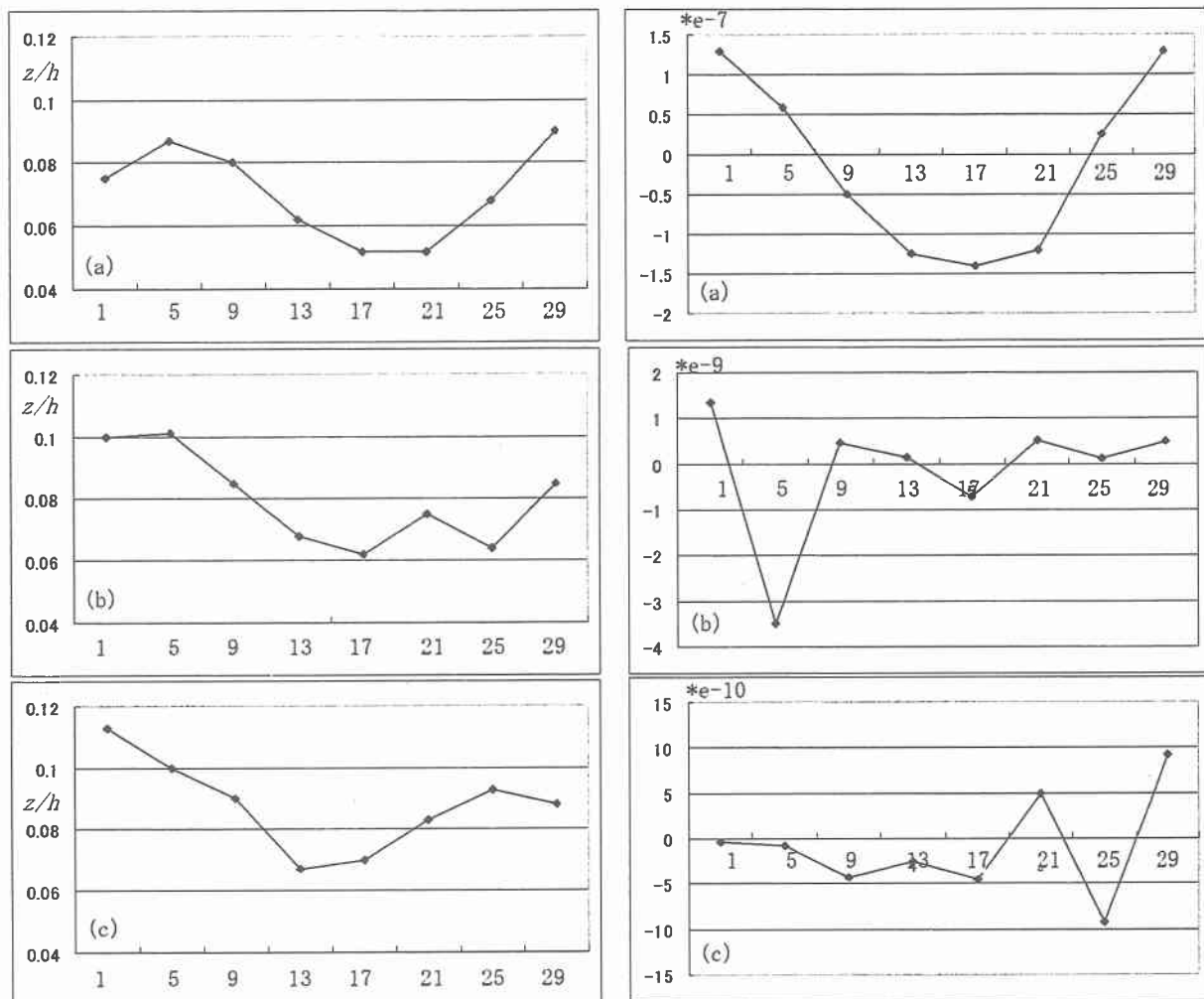


図-6 CASE4における乱流境界層厚(左)と平均せん断力(右)

$$\text{(上: } \tau_{13} = \nu_s \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right), \text{ 中: } \tau_{12} = \nu_s \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \text{ 下: } \tau_{23} = \nu_s \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right))$$

図-5は、CASE4における、 $x=0$ の位相でのスパン方向の位相平均流速と瞬時流速を比較したものである。瞬時流速に比べ、位相平均流速が小さいことが確認できる。剥離点等ほぼ固定される断面二次元的流れに比べ、スパン方向の瞬時流速はランダム性が大きく、流速値の分布が広域に渡っていると考えられる。水平、鉛直流速に関しては、位相平均流速と瞬時流速のオーダーに差が無いことから、改めてスパン方向流速の挙動が境界層の三次元化を通して底質の浮遊拡散に大きな影響を与える可能性を示唆している。

図-6は、CASE4における乱流境界層厚と層内の平均せん断力を示したものである。横軸は砂漣番号となっている。(a)では、境界層厚は最大流速を与える位相から少しずれた位相で大きくなっている。これは剥離渦の影響によるものと考えられる。また平均せん断力は水面波の位相に適合した分布となっており、最大流速を与える位相で底質輸送が活発となることを示している。(b)及び(c)では、境界層厚は水面波の位相にほぼ対応しているのが確認できる。しかし、境界層厚の変動は平均せん断力と対応せず、高周波成分が含まれた分布となっており、剥離渦発生時に大きなせん断力ピークを持つものと考えられ

る。

図-7は、CASE4における、スパン方向ほぼ中央の断面での一波長平均流速を示したものである。水平流速では、境界層内において正の流速を示すBoundary layer drift以外にも、逆向きの平均流が発生していることから、底面あるいは底面近傍の非線形性が影響していると考えられる。鉛直流速は、底面近傍では上昇流速が大きい、底面を離れるにつれて下降流速が一定値に収束しており、底質の浮遊及び沈降を特徴付ける分布となっている。スパン方向流速では分布変動が大きく、水平、鉛直流速のピークとも対応しない。また、各方向の平均流速オーダーが等しいことから、底質輸送の三次元的な挙動を示している可能性があるが、スパン方向流速は断面によって大きく異なるため、今後さらなる考察が必要とされる。

3. 結論

- ・水面波の波高が小さい場合、非線形波の影響は、水平、鉛直流速に比べ、スパン方向流速に対して顕著に現れる。
- ・位相平均流速と瞬時流速の比較から、スパン方向では瞬時流速のランダム性が大きく、位相平均流速と比べ1～2オーダーの違いがあった。

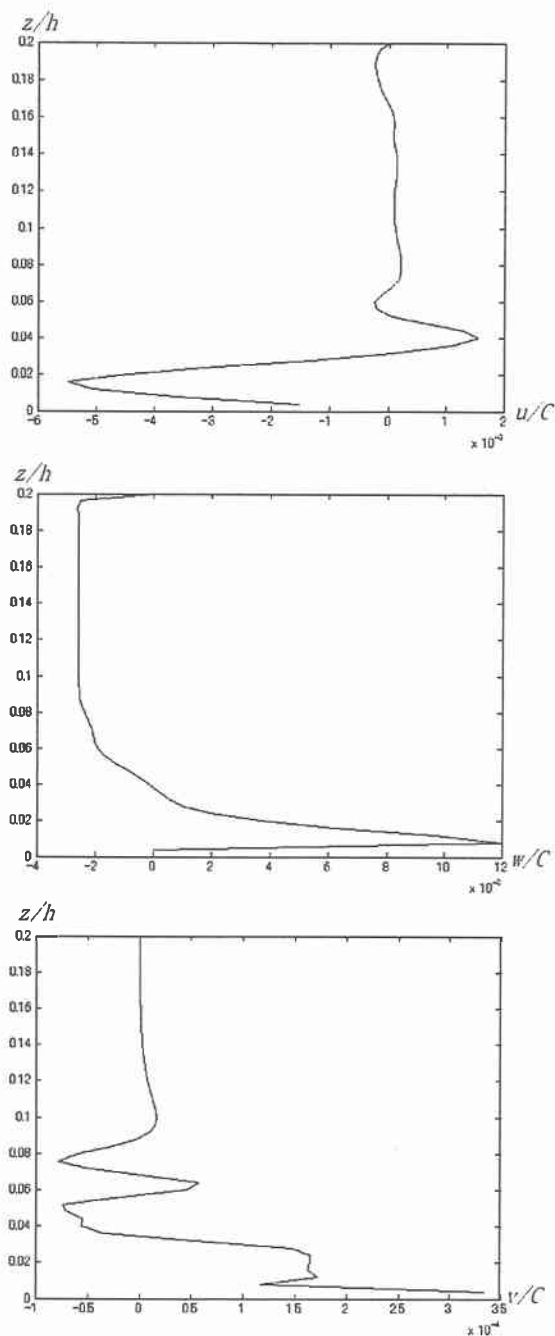


図-7 CASE4における一波長平均流速
(上：水平流速，中：鉛直流速，下：スパン方向流速)

・境界層厚と層内の平均せん断力分布には剥離渦の影響と思われる特徴が大きく現れていた。最大流速を与える位相で強い底面せん断力が発生している他，剥離渦によってせん断力作用位置がずれると思われる分布となっていた。

・一波長平均流速では，水平方向に非線形性の影響と考えられる逆向き流れが発生しており，鉛直流速は底質の挙動を特徴付ける分布となっていた。スパン方向流速に関しては，乱雑な分布となっているが，水平，鉛直流速とオーダーが等しいことから，底質輸送の三次元的挙動を示している可能性がある。各断面におけるスパン方向平均流速の評価が必要である。

参考文献

- Sleath, J. F. A. and Ellis, A. C. (1978): Ripple geometry in oscillatory flow. CUED/A-Hydraulics/TR2. University of Cambridge. Engineering Department.
- Hara, T. and C. C. Mei (1990): Oscillating flows over periodic ripples, J. Fluid Mech., Vol. 211, pp. 183-209.
- 東江隆夫，灘岡和夫，勝井秀博，伊藤一教 (1993)：二次元進行波における砂漣上の流れ，海岸工学論文集，第40巻 (1)，pp. 1-5.
- Watanabe, Y. and H. Saeki (1999): Three-dimensional large eddy simulation of breaking waves, Coastal Engineering Journal, Vol. 41 (3&4), pp. 281-301.
- Scandura, P., G. Vittori and P. Blondeaux (2000): Three-dimensional oscillatory flow over steep ripples, J. Fluid Mech., Vol. 412, pp. 355-378.