

進行波下の砂漣上に生成される三次元渦構造に関する研究

Three-dimensional vortex structure over ripples under progressive wave

北海道大学大学院工学研究科 ○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)
 北海道大学大学院工学研究科 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及び輸送に極めて大きな影響を与える。乱流境界層は、底面砂漣形状の遷移に伴って生成される渦構造の影響を受けて発達する。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、Hara and Mei(1990) や Scandura et al(2000) が指摘しているスパン方向の不安定性が原因と考えられる。

著者ら(2002, 2003)は、線形及び非線形波動下の三次元境界層流れについて三次元 Large Eddy Simulation(以下 LES)を行い、実験室スケールの波動下では主流流速とほぼ同オーダーのスパン方向流速が発生し、同時に発達する三次元組織渦が浮遊砂の対流過程に影響を与える可能性を指摘した。砂漣上に発達する乱流境界層内では、クレスト部で生成される剥離渦だけではなく旋回性の軸を有するゲルトラー渦から構成される三次元的組織渦構造が形成される(Scandura et al, 2000)。この三次元組織渦は、底質の浮遊を促進するだけでなく砂粒子の浮遊時間を長期化させると考えられることから、底質輸送に極めて重大な役割を果たしていると考えられる。

本研究は、線形並びに非線形波下の砂漣上に発達する三次元境界層流れを LES によって計算し、底面近傍に生成される三次元渦構造の特性を調べると共に、passive scalar 関数の輸送拡散を通して渦構造と浮遊現象の相関について議論するものである。

2. 数値計算法

著者ら(2002)が提案した繰り込み群理論をベースとした非線形格子粘性モデルを適用した三次元 LES が、微小振幅波及びストークス波下一波長に渡る砂漣底面近傍の

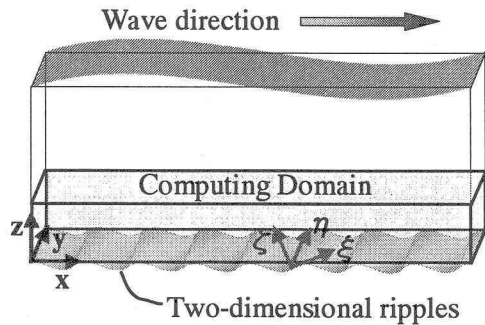


図-1 計算領域

境界層を含む領域において実行される。砂漣はクレスト線が波の進行と直交する様に配置され、砂漣表面に適合する楕円型方程式により計算された準直交格子が流体域に対して生成される。計算座標系(図-1参照)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、 η は砂漣スパン方向、 ζ は ξ と直交する軸となる($\zeta = 0$ は海底面を表す)。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(水面は直接解かれぬ)。計算領域内には常に進行波一波长分が存在し、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。なお、計算条件は表-1に示してある。CASE1及び4は、線形及び非線形波動下の砂漣上に生成される渦構造に関して調べるために行われ、CASE2及び3は、流れの不安定性に関してHara and Mei(1990)の数値結果と比較するために行われた。

3. 数値結果

図-2は、CASE1の全計算領域内におけるvortex coreの等値分布を表したものである。個々の砂漣に対応して渦が発達している様子が確認できる。スパン方向には規則性の無い複雑な分布となっているが、波向き方向には

表-1 計算条件

	波浪条件				砂漣条件				計算領域 (x,y,z)cm	最小グリッド幅 (x,y,z)mm	グリッド数 (x,y,z)	Timestep of interval
	水面波	波高	波長	周期	流入境界水深	Re(hc/ν)	振幅	波長				
CASE1	微小振幅波	5cm	160cm	1.25sec	20cm	255856	4mm	5cm	32	(160,2,4)	(1120,10,50)	1024/T
CASE2		5.5cm				80554						
CASE3		1.4cm				35321000						
CASE4		ストークス波				5cm	255856					

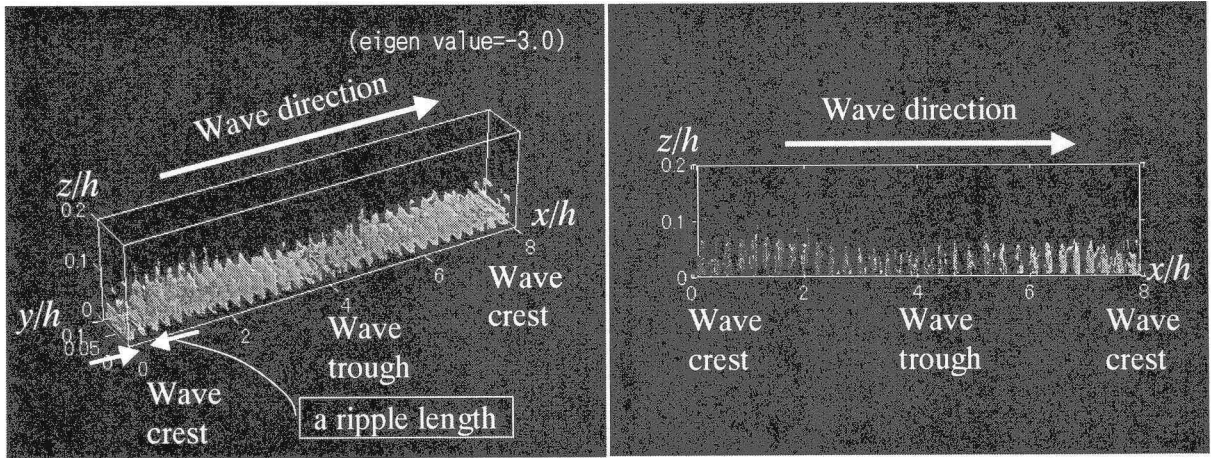


図-2 vortex core の等値分布

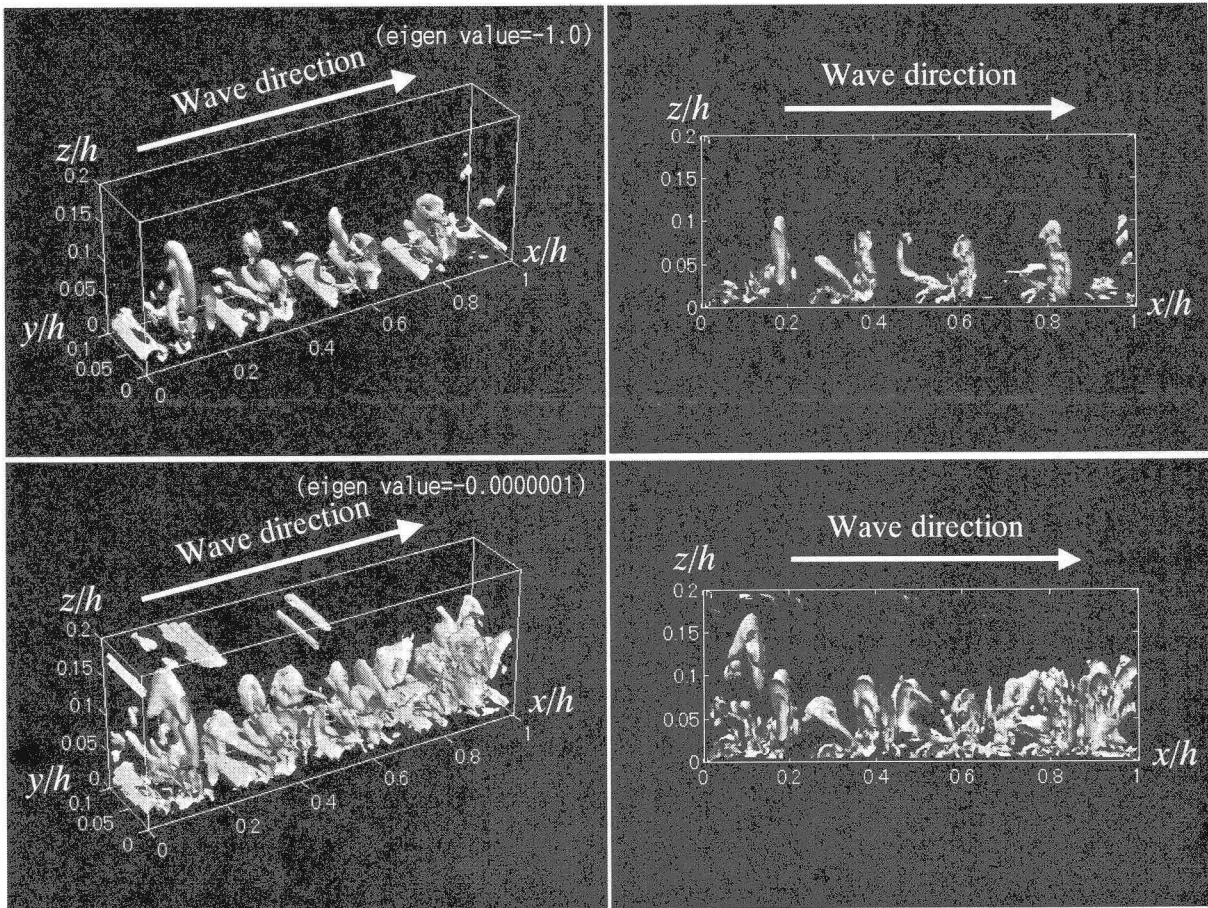


図-3 vortex core の等値分布

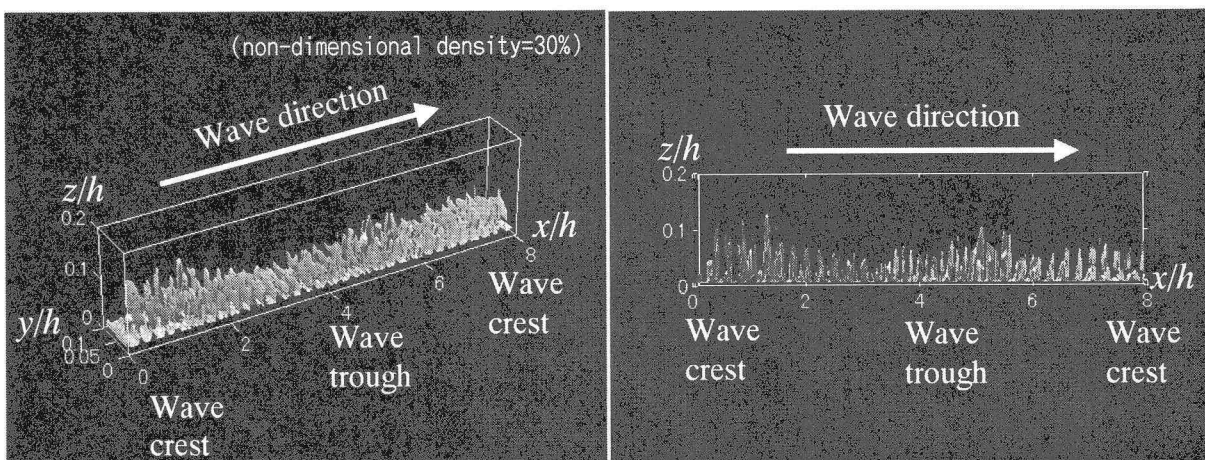


図-4 passive scalar 関数の等濃度分布

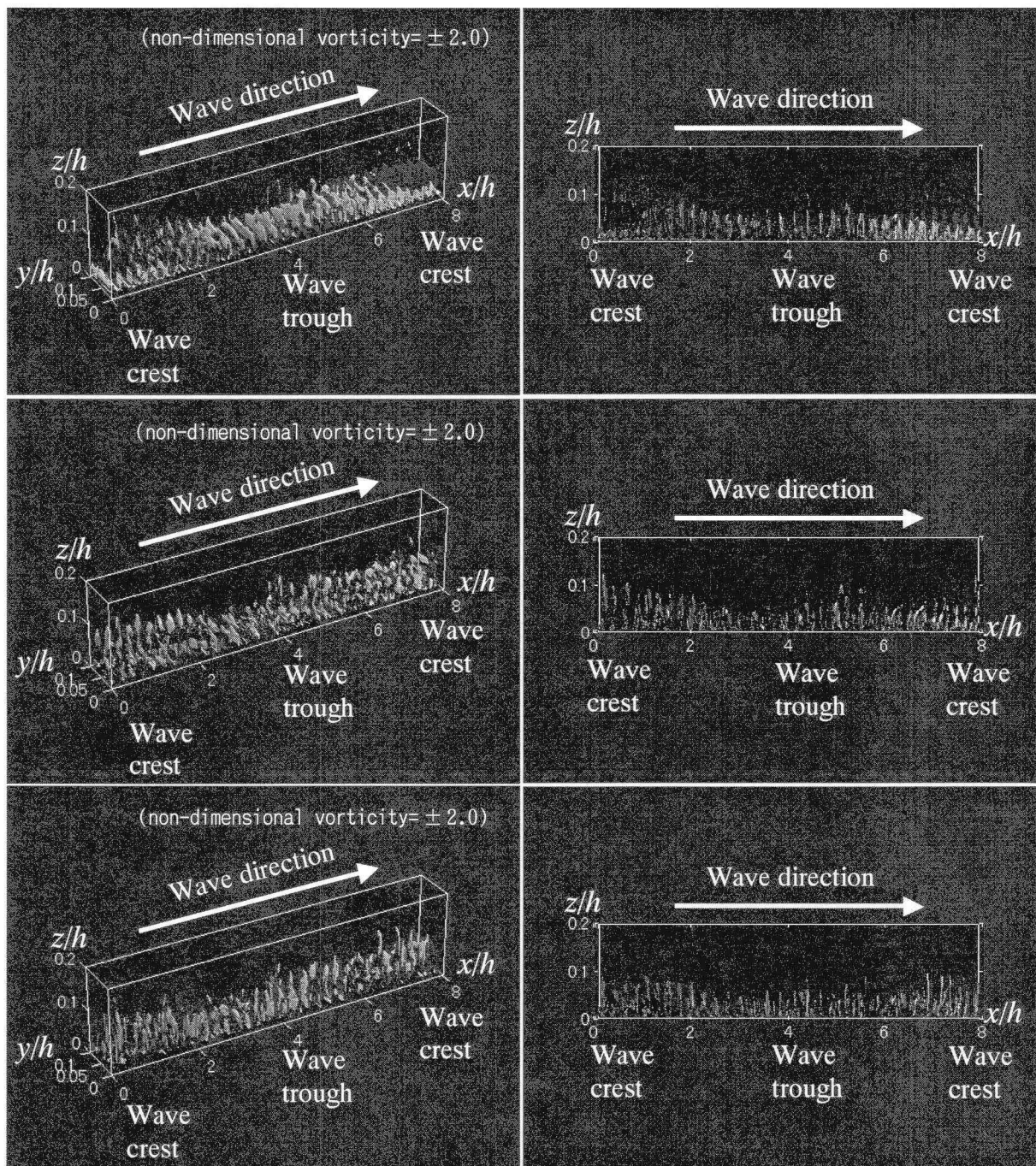


図-5 渦度3成分の等渦度面 (上: $\partial u/\partial z - \partial w/\partial x$, 中: $\partial w/\partial y - \partial v/\partial z$, 下: $\partial v/\partial x - \partial u/\partial y$)

水面波のスケールで変動しており、法絡線ピークが2つのWave node (crestとtroughの中間)の位相近傍に存在する。

図-3は、CASE4の($0 \leq x/h \leq 1$)の領域内におけるvortex coreの等値分布を表したものである。ここでは、渦構造の局所的な特性に関して考察する。この領域内には4つの砂漣が設置されているが、図-2と同様に、各砂漣に対応して渦が発達している様子が確認できる(上図参照)。砂漣クレスト部で生成される剥離渦だけではなく、Sleath and Ellisがbrick-pattern rippleの生成要因と指摘した馬蹄渦が形成されているのがわかる。Scandura et alが指摘した旋回性の軸を有するゲルトラー渦は、本計算では確認されなかった。また、渦は砂

漣振幅(4mm)の約8倍程度の高さにまで発達している(下図参照)ことから、砂粒子の巻き上げ及び浮遊砂としての輸送形態に大きな影響を与えていることが改めて示された。

次に、三次元波動境界層近傍の拡散過程に関する基礎的特性を得るため、passive scalar関数を底面に分布させ、その濃度の時空間変動を調べた。passive scalar関数とは、GS(グリッドスケール)流速に完全に追従する関数であり、無限小の粒子群密度と考えてよい。

図-4は、CASE1の全計算領域内におけるpassive scalar関数の等濃度分布を表したものである。vortex coreの分布と類似しており、渦とは若干の位相差を持って2つの法絡線ピークが存在する。流速の最大加速度が課せ

られる位相近傍においてpassive scalar関数が大きく上方へ拡散されているこの分布は、図-2の特徴とも類似していることから、渦の発達した領域で底質の浮遊及び拡散が盛んになるものと考えられる。

図-5は、CASE1の全計算領域内における渦度3成分の等渦度面を表したものである。ここで、

スパン方向渦度： $\partial u/\partial z - \partial w/\partial x$ ，

波向き方向渦度： $\partial w/\partial y - \partial v/\partial z$ ，

鉛直方向渦度： $\partial v/\partial x - \partial u/\partial y$ となっている。

スパン方向渦度は、水面波のスケールで変動しており、positive valueの法絡線ピークがWave troughの位相近傍、negative valueの法絡線ピークがWave crestの位相近傍に存在する。波向き及び鉛直方向渦度においては、スパン方向に対して顕著な高波数成分を伴った複雑な分布となっており、明確な法絡線ピークは確認できない。著者ら(2002)が行ったReynolds数の小さいケースでは、渦度3成分はそれぞれ水面波のスケールで変動し、ある程度の規則性を持った分布となっていた。この規則性が崩れた今回のケースにおいては、スパン方向に対する顕著な高波数変動が特徴的な分布となっていることから、渦構造が複雑化する高Reynolds数流体を扱う場合は、スパン方向流速の発生及び時空間変動についてさらなる調査が必要であると考えられる。

4. 結論

・底面に分布させたpassive scalar関数は、初期段階において砂漣クレストから放出される剥離渦に巻き込まれると同時に浮遊し、近傍に波向き及び鉛直方向渦がある場合、顕著に上方へ輸送拡散される。vortex coreとpassive scalar関数の分布域が類似していたことから、渦の発達した領域で底質の浮遊及び拡散が盛んになるものと考えられる。底質の輸送過程には、このような三次元渦構造との密接な関係が存在する。

・乱流境界層内では、砂漣クレスト部で生成される剥離渦だけではなく、brick-pattern rippleの生成要因と考えられる馬蹄渦が形成されているのが確認できた。

・渦度3成分の等渦度面がスパン方向に対して顕著な高波数変動を有した分布となっていることから、三次元渦構造特性を解明するためにスパン方向流速の発生及び時空間変動についてさらなる調査が必要である。

参考文献

- 1) Sleath, J.F.A. and Ellis, A.C. (1978): Ripple geometry in oscillatory flow. CUED/A-Hydraulics/TR2. University of Cambridge. Engineering Department.
- 2) Hara, T. and C.C. Mei (1990): Oscillating flows over periodic ripples, J. Fluid Mech., Vol. 211, pp. 183-209.
- 3) Watanabe, Y. and H. Saeki (1999): Three-dimensional large eddy simulation of breaking waves, Coastal

Engineering Journal, Vol. 41(3&4), pp. 281-301.

- 4) Scandura, P., G. Vittori and P. Blondeaux (2000): Three-dimensional oscillatory flow over steep ripples, J. Fluid Mech., Vol. 412, pp. 355-378.
- 5) 渡部靖憲, 松本卓, 佐伯浩 (2002): 波動乱流境界層の三次元化と乱流拡散に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻(2), pp. 76-80.
- 6) 渡部靖憲, 松本卓, 佐伯浩 (2003): 砂漣上の三次元波動乱流境界層流れの力学特性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 71-75.