

砕波帯流体運動のLarge Eddy Simulationの底面境界条件依存性とTwo Layer Modelの適用

DEPENDENCIES OF BOTTOM BOUNDARY CONDITIONS ON MAJOR SURF ZONE FLOWS, AND APPLICATIONS OF A TWO LAYER MODEL TO BOUNDARY LAYER FLOWS

渡部靖憲¹⁾・榎野英之²⁾・大島香織³⁾

Yasunori WATANABE, Hideyuki KASHINO and Kaori Oshima

¹⁾正会員 博(工) 北海道大学助手 工学研究科環境フィールド工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²⁾正会員 修(工) セントラルコンサルタント(株) (〒104-0042 東京都中央区入船1丁目4番10号)

³⁾正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所土木技術グループ (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

This paper presents that major computed flow field above a boundary layer in a surf zone could be strongly affected by kinds of the boundary conditions (slip, non-slip and shift B.C. based on a log law) imposed at a bottom. The estimated bottom shear stress is also considerably dependent on the boundary conditions, which might cause over- or under- predictions for bed-load transports in the surf-zone. In order to fill a gap between length-scales of predominant turbulent flows over and within the thin boundary layer, a two layer model (TLM) is applied to the boundary layer flows. TLM is found to give the reasonable boundary layer flows and also major flows over the boundary layer. This model may greatly contribute to practical large-scale computations typically involving a significant gap of turbulence properties across the boundary layers.

Key Words: Two Layer Model, bottom boundary condition, wave breaking, Large Eddy Simulation

1. はじめに

近年, 砕波帯や構造物周りの複雑な瞬時流速場をLarge Eddy Simulation(以後LESと略記)により計算し, その乱れ, 散逸及び局所流体力を数値的に評価する研究が数多く為されている^{1), 2)}. LESでは, Grid-Scale (以下GS)以下の瞬時乱れがSGS応力としてモデル化されGS変数に影響を与えるが, 海底面近傍では乱流境界層の存在により乱れの特性が大きく変化するため境界層を解像し得るグリッド幅及び適切なSGSモデルを採用する必要がある. しかしながら, 波動下に発達する境界層は非常に薄く, これを解像し得るグリッド体系上で計算するためには極めて高い計算コストが必要となり, 特に実海域スケールでLESを適用する場合, これは極めて深刻な問題となる. 砕

波帯流れの底面境界層流れの底面境界条件依存性はChristensen and Deigaard²⁾によって指摘されている. これによるとnon-slip底面境界条件を課した場合と壁法則をベースとしてグリッドシフトさせ乱流境界層外層の流速を与えた場合とではGS流速場及び水位変動が大きく異なる. また, non-slip条件を与えた場合, 流速勾配がグリッド幅に依存し, 結果として底面せん断力が適当に与えられないため, 底面近傍で過剰乱流拡散が発生し不正確な境界層流れが計算され, 海底砂の浮遊輸送過程に対して致命的な誤評価がなされる可能性がある. また, 十分発達した定常乱流を仮定して得られる壁法則からグリッドシフトされる方法は, 波動下では流れの非定常性により境界層流れの鉛直分布並びに境界層厚が位相に依存して大きく変化するため, 非定常問題に直接

適用することには問題があり、さらに統計平均量であるこの乱流境界層理論を瞬時量のみ計算し得るLESの境界条件として直接与えること自体にも矛盾がある。これらの問題を回避するためにLESの底面に隣接するグリッドのみを乱流境界層内層を解像する二次グリッドで分割し、この二次グリッド体系内を境界層近似した乱流境界層方程式によって計算し、適切な底面SGS応力をLESの境界条件として与える方法が提案されている³⁾。このTwo layer Model(以後TLM)は、計算コストを増加させることなく上述したLESの境界条件の問題を著しく改善する方法の一つである。

本研究では、LESの結果の底面境界条件依存性を確認し、それに伴う底面流速及び底面せん断力の誤評価の危険性を指摘すると共に、TLMを適用しその有効性を検討した。また、TLMが現実的なコストで波動下の砂輸送を評価するための底面近傍流速を適切に再現するために有効な方法であることを示した。

2. 数値モデル

本研究で導入し検討するTwo Layer Modelは、乱流長さスケールが大きく異なる底面境界層内外でそれぞれ計算を実行し同一時刻で連続する流速分布を取得するものである。即ち、境界層外縁では、砕波による大スケール乱流が支配的であり、一般に極薄い境界層内ではその長さスケールは極めて小さい。境界層内では境界層近似により、最も計算コストを増加させる圧力の逐次計算が数値的に簡略されるため、計算コストは大幅に低減可能である。また、LESにおいて重要な点は、任意に座標変換された格子系において結果が普遍とは限らない点である。つまり、LESではグリッド間においてフィルター操作を行うため、格子座標変換によりフィルターの長さスケールが変化し、それ故処理される乱れスケールもまた変化してしまう可能性がある。このためLESにおいて、極端に変形するグリッドに対して格子座標変換後の結果の普遍性を証明することは困難な場合があり、本対象問題においても適当な座標変換により境界層内でグリッドの細かい連続格子上で結果の普遍性を示すことは容易ではない。TLMは異なる直交格子座標上で異なる支配方程式(境界層方程式)で計算を行うため、この問題を回避しつつ高解像度で境界層流れを計算できるため、この観点においても合理的な手法である。

(1) Large Eddy Simulation

砕波帯内の瞬時流速は、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

によって計算される¹⁾。計算は、多段階分離解法、CIP法、予測子修正子法により運動方程式を、Gauss-Seidel法ベースの二段階Multi-grid法、irregular-star法により圧力に関するポアソン方程式を数値的に解いた。波浪の進行方向に一樣傾度をもつ直方体の二次元水槽型の数値計算領域の一端から2次のクノイド波が造波される。両側壁に対して周期境界条件が課せられる。slip条件、non-slip条件及び次に表すTLMで計算された境界層外縁流速のせん断力を境界条件とする三種類の底面境界条件のもとに比較を行った。波浪条件として、水平床上の進行波(非砕波)及び巻き波砕波に対応する2種類の波浪(表-1参照)に対して検討を行った。ここで、本研究の目的の一つである、グリッド依存性の小さい数値モデルの開発のためのテストケースとして、主グリッド幅は実スケールで約1cmと表-1で与える計算条件に対し相対的に大きなものを採用している。なお、全ての変数は水の密度、造波境界での水深及び波速で無次元化されている。

(2) Two Layer Model

Balaras et al.³⁾は、乱流境界層流れに対して、底面に隣接する1グリッドのみに対し、グリッド間隔の小さな二次グリッドを配置し(図-1参照)、乱流境界層内層を解像して別途境界層流れを計算する方法を提案した。境界層流れは、境界層近似された運動方程式(1)によって解かれ、同じ近似により、圧力はソース項として扱われるため、グリッド数増加のために必要なポアソン方程式を解くための莫大な計算負荷を大幅に軽減可能である。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(u_1 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_3}(u_3 u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \right]$$

$$i=1, 2, \quad (1)$$

ここで、 $i=1, 2$ は底面に平行かつ波向及び波峰方向を表し、 $i=3$ は底面の法線方向に対応する。また、 u_i は境界層内の流速、 p は圧力、 ν は動粘性係数そして ν_t

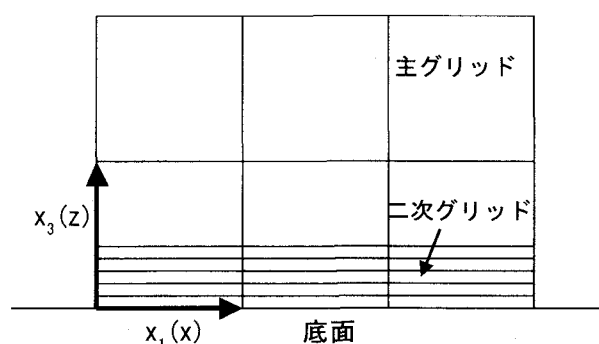


図-1 TLM適用ケースのグリッド体系

表-1 波浪条件

case	1	2	3	4	5
碎波形態	plunging	plunging	plunging	non-breaking	
周期(sec)	2.75				
初期水深h(cm)	25				
波高H(cm)	11.25				
楕円関数の母数	0.9894				
底面勾配BS	1:20			0	
領域(m)	(5.6,0.125,0.37)		(5.6,0.25,0.4)		
Time step interval	T/2048				
底面境界条件	nonslip	slip	TLM	nonslip	TLM
側方境界条件	periodic				

は渦動粘性係数である。二次グリッド内の法線流速 u_3 は連続式の法線方向積分で与えられる。

$$u_3 = - \int_0^{x_3} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} dx'_3 \quad (2)$$

境界層内のレイノルズ応力は、広く用いられている以下の古典的な混合距離モデルによる渦動粘性係数を採用した。

$$\nu_T = (\kappa z)^2 D(z) |s_{ij}| \quad (3)$$

ここで、 κ はカルマン定数、 $|s_{ij}|$ は歪み率である。尚、簡単のためデカルト座標 $(x_p, x_y, x_z) = (x, y, z)$ としている。壁近傍の低レイノルズ数補正のため、以下の減衰関数を導入している。

$$D(z) = (1 - \exp(-(z^+/A^+)^3)) \quad (4)$$

ここで、 z^+ は壁座標 ($z^+ = zu_\tau/\nu$)、 u_τ は摩擦速度 ($=(\tau/\rho)^{1/2}$)、底面せん断力 $\tau = \mu(\partial u/\partial z)$ 、定数 $A^+ = 25$ である。底面せん断力は、底面に隣接する2次グリッド上の鉛直流速勾配から算定される。

主グリッドと二次グリッドの結合点（底面に隣接する主グリッドと二次グリッドの上縁グリッド）ではレイノルズ応力を一致させ、乱れの連続性を維持する必要がある。本研究では、Dynamic Wall model⁴⁾を適用した。これは、この結合点において ν_T と主グリッドにおける sub-grid 粘性 ν_{sgs} の値を一致させるためにカルマン係数を動的に変動させるものであり、波動場の乱流境界層のような非定常性を示す流れについては合理的手法と考えている。また、結合点において流速の鉛直勾配が二次グリッドから主グリッドへ受け渡されるので、レイノルズ応力が保証される。

本研究では、TLMの有効性を確認するための第一段階として、主グリッドの1/10サイズの二次グリッドにおいて線形化された境界層方程式により境界層流れを計算した(乱流レイノルズ数の小さい遅い境界層

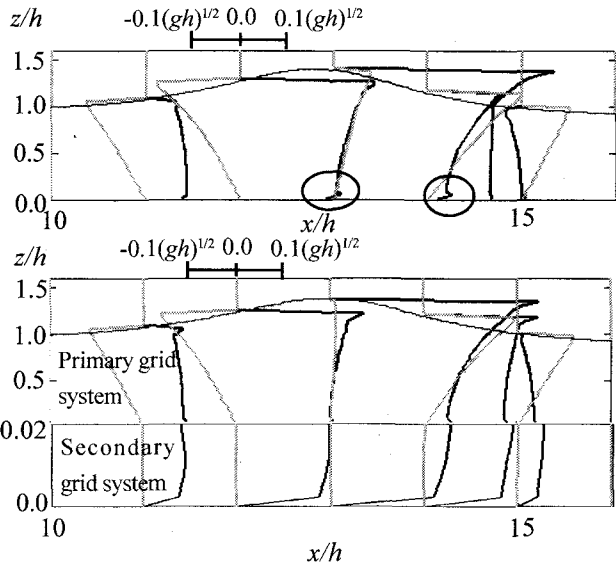


図-2 case4(上, non-slip条件), case5(下, TLM)に対する水平(黒), 鉛直(灰)流速の分布 (case5については主グリッドと二次グリッドを連結して表示している。波動による流れと境界層流れの両者が同時に評価されている。)

流れの仮定に対応する)。

3. 結果

図-2は、進行波下(case 4と5, 表-1参照)の計算領域中央での水平(黒線), 鉛直(灰色線)流速の鉛直分布を表している。non-slip条件を適用した場合、底面近傍に明確な水平流速のピークが現れ、極めて高い流速の鉛直勾配が底面近傍に発生する。この波浪条件における層流波動境界層厚は、底面からこのピークが現れる高さの1/10程度であり、non-slip条件を課したために誘発された境界層の過剰発達が見られているものと考えられる。一方、TLMを導入したケース(case5)では、境界層外縁流速が最大となる波峰直下において case4 の様な底面近傍の流速の急峻

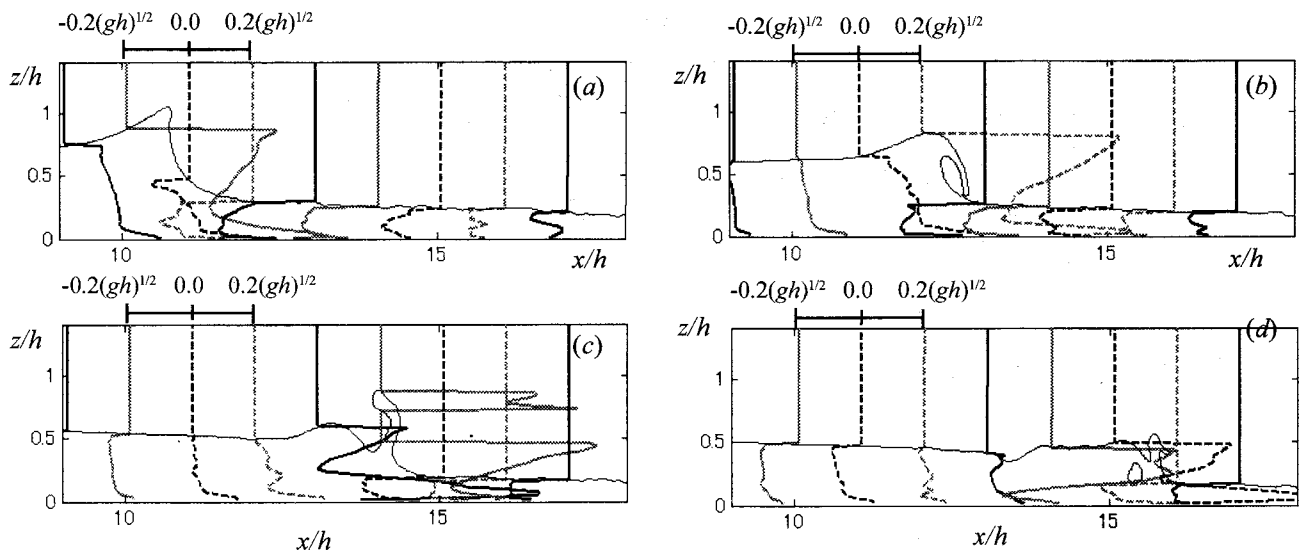


図-3 case1(non-slip 条件)の水平流速の鉛直分布 ((a)～(d)の位相間隔: $T/8$)

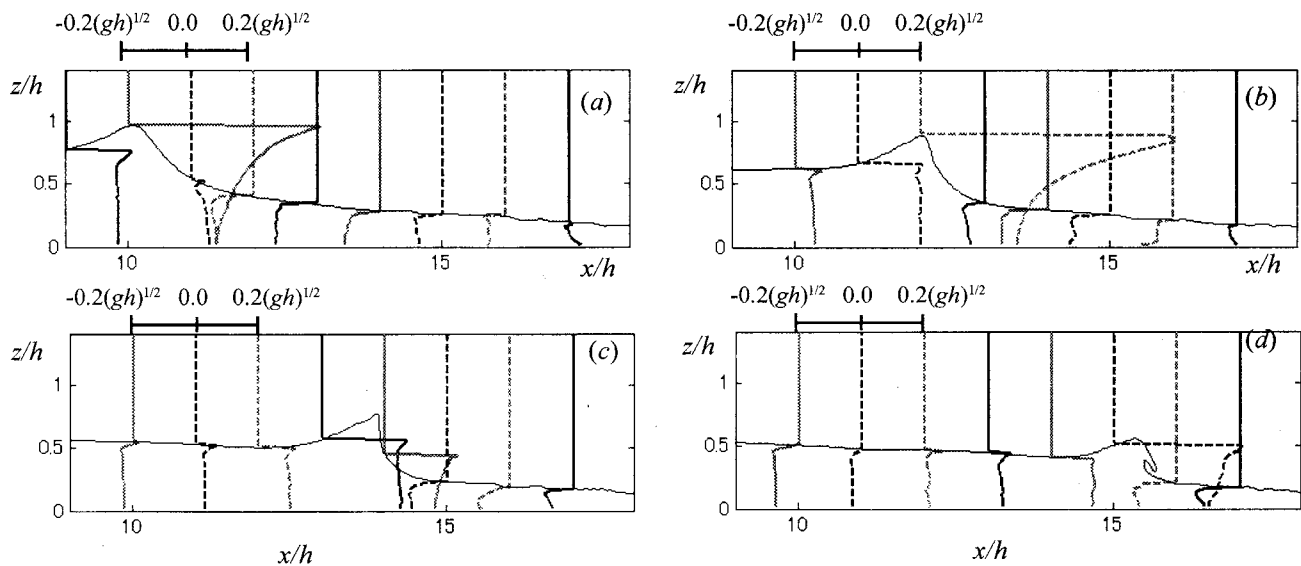


図-4 case2(slip 条件)の水平流速の鉛直分布 ((a)～(d)の位相間隔: $T/8$)

な鉛直勾配は主グリッド上に現れず流速ピークの発達も抑制される。二次グリッド上の底面の極近傍でのみ典型的な境界層流れが発生しており、境界層厚さの発達が抑制され、境界層理論解とほぼ一致する。境界層外縁に乱れのないこの波浪条件では、底面境界条件の影響は前述の底面近傍流れにのみ影響を与え、さらに上部の流速分布には有意な影響を及ぼさない。なお、十分に細かな主グリッド上のみで計算した場合には、TLMを適用しなくても妥当な境界層厚が再現されている。

以降、水平流速の分布にのみ着目して砕波帯流れの境界条件依存性について議論する。図-3, 4は、それぞれnon-slip条件, slip条件を適用したケースの水平流速の鉛直分布を表している。両者共、造波開始後7波目のほぼ準定常状態に達した状態における

同一時刻(位相間隔: $T/8$)における砕波帯流れである(case 1, 2, 表-1 参照)。適用する境界条件により流れが変化するため、砕波点も異なり、同一時刻における波浪の位相もまた異なるため(砕波自体が変化する)、厳密な同一位相における比較ではないが、明らかに底面近傍のみならず上部流速場が境界条件に強く依存していることが両図の比較によりわかる。これらの2ケースの直接的な差異は、底面近傍に発達する境界層流れの有無のみであるが、non-slip条件下で発達する境界層内の強い乱れは、砕波によって生成された大規模乱れと作用し、極めて複雑な流速分布をもつ強いせん断乱流へと発達させているものと考えられる。また、砕波波峰直下では、水面波の水平圧力勾配に起因する大きい水平流速と同等の流速が底面境界層の水平流速ピークとして発生する

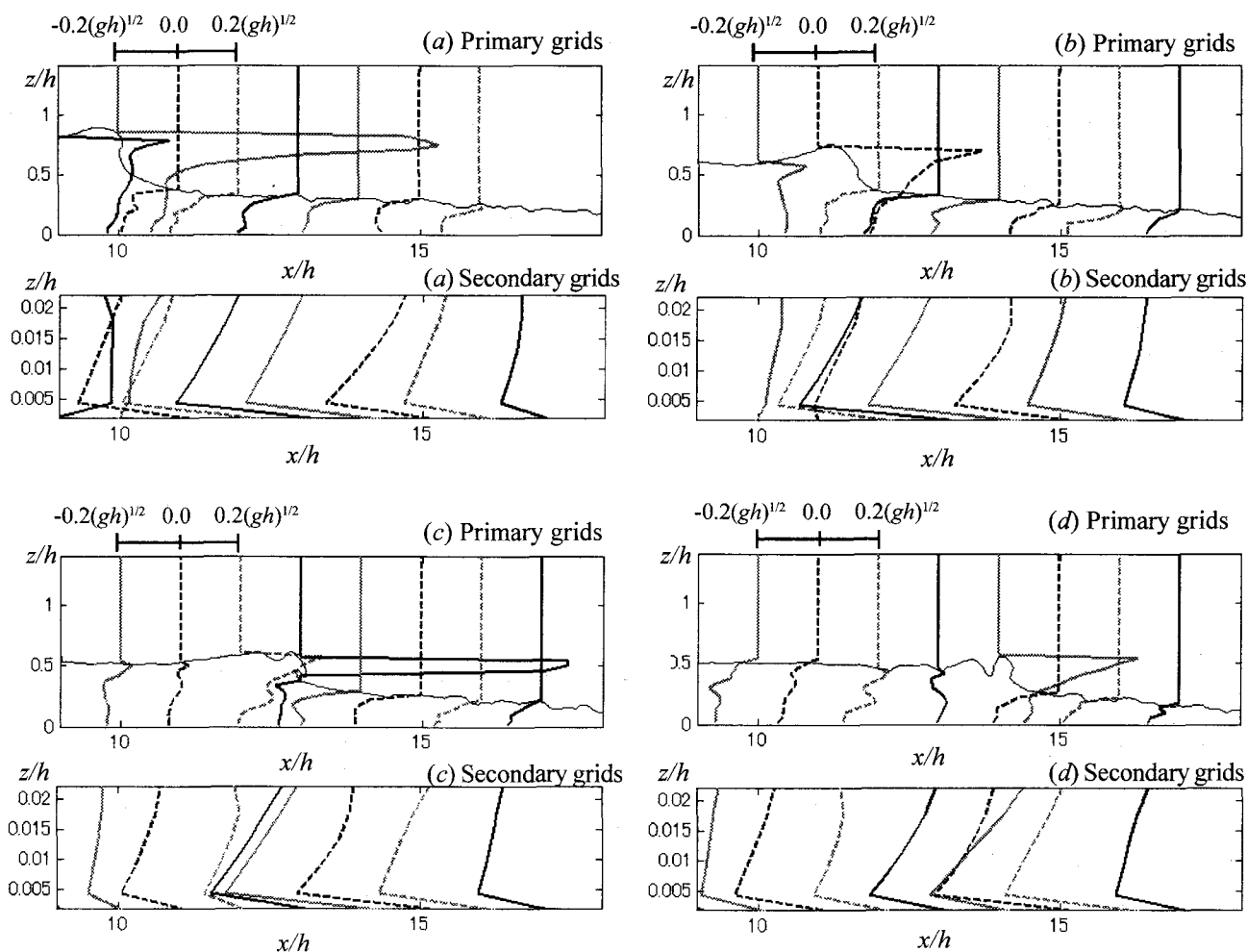


図-5 case3(TLM)の水平流速の鉛直分布(それぞれの位相について、主グリッド上の結果と二次グリッドの結果を上下に配置してある。(a)～(d)の位相間隔: $T/8$)

位相もあり(図-3a,b),適切な境界層流れが再現されていない可能性が高い。これは、境界層流れのグリッド幅依存性を示すものである。一方、砕波点近傍では、沖側で岸向き、岸側で沖向き流れが集中し極めて強い鉛直流が発生するため、境界層自体が鉛直方向に発達することが知られている。この観点から、境界層の存在しないslip条件は、砕波帯の特徴を再現しているとは言い難い。計算結果だけによる比較では、両者の定量的な正当性を議論できないが、両境界条件共に砕波乱流、壁面乱流の混在流を再現するための十分な近似ができていないと考えている。なお、著者ら^{1),5)}のnon-slip条件を課した計算(計算条件はこのテストケースとは異なる)による砕波水面形と実験波浪との類似性から、水面形はnon-slip条件下の計算の方が相対的に適当であると考えている。

図-5は、TLMを適用したケースに対する図-3及び図-4と同一時刻の主グリッド及び二次グリッド上の流速分布を表している。境界層外の波浪及び大規模乱れに関する流速変動はnon-slip条件の適用したケースに近い複雑なものとなるが、底面近傍でその

流速は十分に低減され過剰な底面乱流拡散が抑制されることがわかる。二次グリッド上の境界層流れに注目すると、波浪の通過に伴う境界層外縁流速及び圧力に対応して、波浪の位相毎に水平流速の鉛直勾配が変動し境界層厚さも同時に変動する。これは、波動乱流境界層に現れる典型的な特徴であり、この境界層変動が境界層外の大スケール流速変動にも寄与しているため、slip条件のものと異なる流速分布が主グリッド上で現れる。これらの結果よりTLMの適用がより物理的に矛盾なく現象を再現するものと考えてる。

一般に境界層流れは非常に薄い限定的な領域でのみ支配的になるが、これが適切に再現されない場合、工学的に最も深刻な問題となるのが掃流砂を駆動する底面せん断力の見積もりである。図-6は、前図の時刻(b), (c), (d)に対する底面せん断力の岸沖分布をnon-slip条件及びTLMを適用したケースとで比較したものである。粗い主グリッドで算出した底面せん断力は流速の鉛直勾配が小さいため、TLMのケースと比べその絶対値が極めて小さく、粗いグリッド上の結果から直接せん断力を見積もった場合、明らか

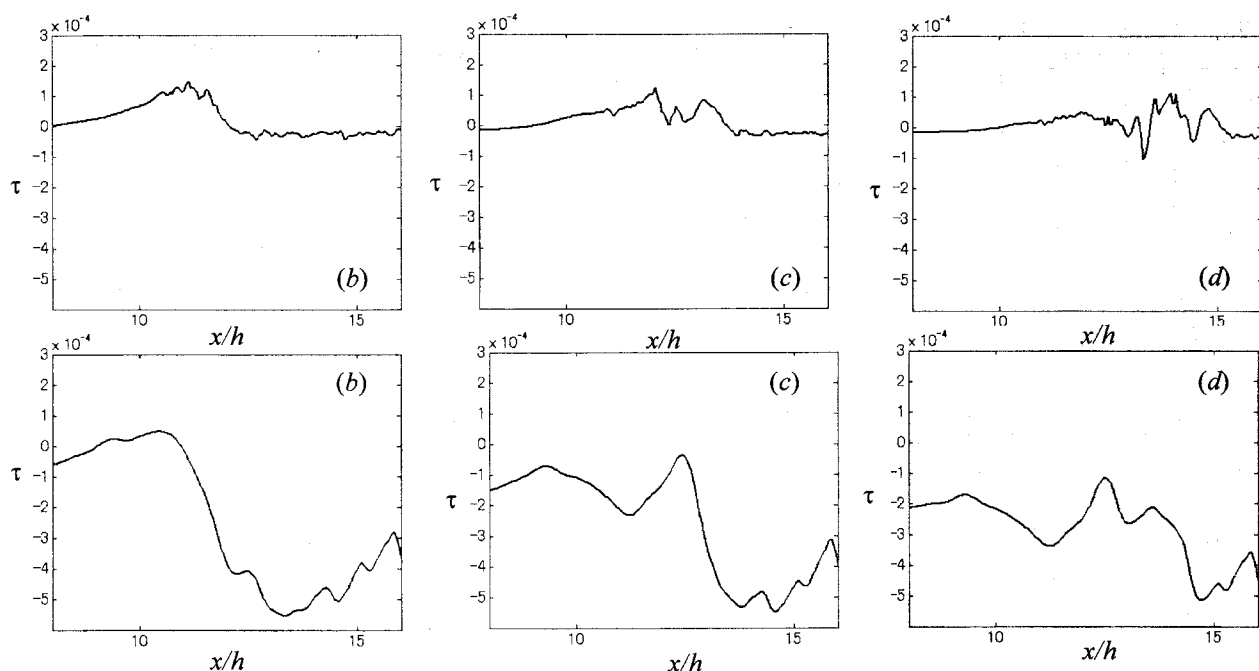


図-6 case1(上)と case3(下)に対する底面せん断力(τ)の岸沖分布 (位相間隔: $T/8$)

に過小評価となる。また、砂移動の観点から重要である岸沖方向の水平せん断力勾配は、non-slip 条件下では局所的に高くなるがその変動スケールは小さく、TLMの適用ケースで特徴的な大スケール変動と比較すると、定性的に大きな差異が存在する。non-slip 条件における底面せん断力の絶対値及び岸沖勾配の過小評価は、岸沖漂砂過程の予測において極めて深刻な問題を引き起こす可能性がある。

4. 結論

TLMを波動乱流LESに適用する方法及び数値計算法を提案した。粗いグリッド間隔でnon-slip条件を課したケースでは、設定した主グリッド幅では境界層を解像できずに流速の局所的鉛直勾配が過大評価され、過剰な乱流力が非常に強い境界層流れを誘発する。この境界層流れは波浪条件及びグリッド条件に依存してかなり上方の波動誘発流れに影響を与える可能性があることを確認した。この誤評価は海底砂輸送の外力を考えた場合極めて不適当な結果を与える危険性があり、計算結果のグリッド依存性について十分注意する必要がある。一方、slip条件を課したケースは、境界層流れが存在しないため波動誘発流れには影響を与えないが、底面近傍の流速及びせん断力を評価することはできない。TLMを適用したケースでは、主グリッド上の流速分布はslip条件とnon-slip条件を課したケースのそれらの中間的な特徴をもつ。小さいグリッド幅をもつ2次グリッド内で境界層流れは十分に解像され適切に解かれている

ので、任意の位置での境界層流れ及びせん断力を取得することができる。

non-slip条件を適用したケースでは、グリッドスケールに依存して、底面せん断力の絶対値及び岸沖勾配を過小評価する可能性がある。砕波による大スケール流速変動に適合した比較的大きなグリッド幅を維持し、かつ底面せん断力を合理的に算出するためにもTLMは有効な方法である。

TLMのLESへの適用は、運動学的、力学的合理性を有し、低コストで波動乱流境界層内外の流速と両者の相互作用の適切な再現を可能とする。このモデルは、境界層を解像するための複雑な座標変換を必要としないので、任意の形状の構造物近傍流れにも矛盾無く適用可能である。

参考文献

- 1) Watanabe, Y. & Saeki, H. 1999, Three-dimensional large eddy simulation of breaking waves, *Coastal Eng. J.* **41**(3&4), 281-301.
- 2) Christensen, E.D. & Deigaard, R., 2001, Large eddy simulation of breaking waves, *Coastal Eng.* **42**, 53-86.
- 3) Balaras, E. & Benocci, C. & Piomelli, U., 1996, Two-layer approximate boundary conditions for large-eddy simulation, *AIAA J.*, **34**, 1111-1119.
- 4) Wang, M. & Moin, P., 2002, Dynamic wall modeling for large eddy simulation of complex turbulent flow, *Phys. Fluids*, **14**, 2043 -2051.
- 5) Watanabe, Y. & Saeki, H., 2002, Velocity field after wave breaking, *Int. J. Num. Meth. Fluids*, **39**, 607 - 637.