

境界層近似を適用させた碎波の三次元 Large Eddy Simulation

3D Large-Eddy Simulation using boundary layer approximation

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 櫻野英之(Hideyuki Kashino)
 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 フェロー 佐伯 浩(Hiroshi Saeki)

1. はじめに

碎波後の流体運動は、大規模水平渦を中心とした複雑な3次元的なものへと遷移し同時に生成される乱れと共に、異なる長さスケールを有する流れが混在する複雑な流速場を形成する。特に碎波帯内の底面極近傍というのは、海底面と流体の間で発生する速度勾配と碎波による乱れが複雑に作用し合っている境界層流れが碎波に起因する回転流れに多大な影響をもたらしている。またこれは碎波後の流体運動だけでなく碎波前の流体運動にも寄与していることがわかっている(2003)。例えば、底質輸送などを考える場合、底面の粘性が支配的などから対数則的なものへと遷移していく境界層を正確に再現していかないと漂砂予測など精度は落ちるだろう。

しかしながら近年のコンピュータの高性能化は著しいものである。そのことは数値流体力学にも多大な影響を及ぼしており、境界層の問題に対しても様々な取り組みがなされている。Balaras & Benocci は outer layer を LES で inner layer を境界層近似された式を解く Two-Layer Model(TLM) を提案した。また他には Spalart らによって Detached Eddy Simulations (DES) が考案された。これは outer flow を LES で解像し inner layer を the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS) によって直接的に数値解析されている。

共著者ら(1998)は碎波の3次元流速場の再現可能な3次元 Large Eddy Simulation(LES)を提案している。LES は subgrid の動きをモデル化できることにより計算格子より大きいスケールの運動を直接解くだけで乱流の計算ができるという利点があり、時間的なコストにも優れている。しかし既存の研究において底面付近の流速プロファイルに乱れが多少ありこの問題点を解決する必要がある。

そこで本研究は3次元 LES を用いて碎波帯の流速場を得て、さらに底面の境界層においては境界層近似されたモデルを適用することに精度良く解像することにより碎波帯内の流速場をより正確に再現するための基礎的な研究と位置づける。

2. 数値計算法

数値計算法は共著者らの提案している繰り込み群理論による非線形 SGS モデルを適用した3次元 LES(1998)を実行した。計算は2次元波動水槽型の領域で行われ、y軸に対して側壁の影響のない周期境界条件を適用している。また自由表面は密度関数により決定し、入射境界では2次元ノイド波を造波した。波浪諸元、数値条件は表-1に示され

ている。

今回 inner layer を解析するにあたり Balaras & Benocci (1994)によって提案された2種類のグリッドを用いる(TLM)を導入した。TLMは outer layer では無次元化された Navier-Stokes 式を LES で解き、その outer layer で得られた底面から1番目のグリッドでの流速を使い、そのグリッドから微細なメッシュ(secondary grid)が底面までメイングリッドの中に組み込まれ(図-2参照)、2次元の境界層方程式を基にしたモデル化された式を解像した。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_s} (u_i u_s) + \frac{\partial}{\partial x_n} (u_n u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_n} \left[(v + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_n} \right] \quad (1)$$

ここで n は n 軸方向成分、1 は s 軸方向成分を示している。今回底面(s-m 軸平面)だけに固体境界層を用いているため i は s と m 軸方向成分とする。鉛直流速は連続式を適用することにより得られる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

v_t は simplified mixing length model による壁面せん断力である。

$$v_t = (\kappa z)^2 D(z) |S| \quad (3)$$

ここで κ はカルマン係数であり、z は底面からの距離とし、D は damping function である。そして |S| は歪率で $|S| = (2S_{ij} S_{ij})^{1/2}$ 歪テンソル積は下記の式と定義する。ちなみに $A^+ = 25$ である。

$$D(z) = \left\{ 1 - \exp\left[-\left(z^+ / A^+\right)\right] \right\} \quad (4)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

	Breaker Type	Simulation Type	B.C for a Bottom	Reynolds Number	Wave Height/Water Depth	T(s)	Time Step
case1	plunging	LES	non slip	389830	0.45	2.75	T/2048
case2		TLM					

表-1 波浪諸元及び計算条件

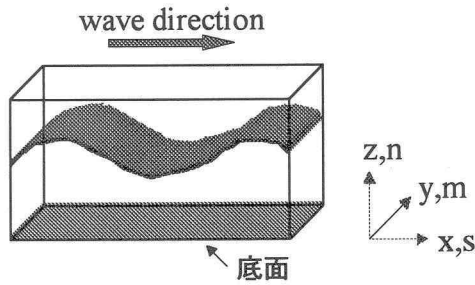


図-1 計算領域

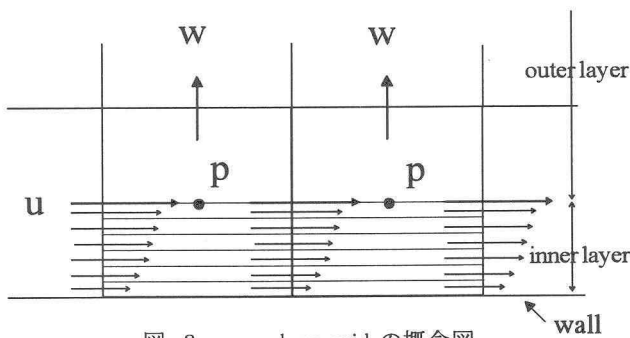


図-2 secondary grid の概念図

本研究ではこのTMLの妥当性を比較検討するために、同じ数値条件でLESのみでの数値計算も実行した。

ちなみに流速などのすべての変数は、波速、水深及び水の密度で無次元化された値とする。

3. 結果

TMLとLESを同条件で行ったときの1周期目の水平及び鉛直流速鉛直分布をとった。本研究の位置付けを基礎的な研究としているため傾斜のない計算領域での流速場の比較を行った。傾斜を与えていないこと同時に碎波前ということもあり、他の要因を排除した底面での乱れに起因する違いのみが見ら

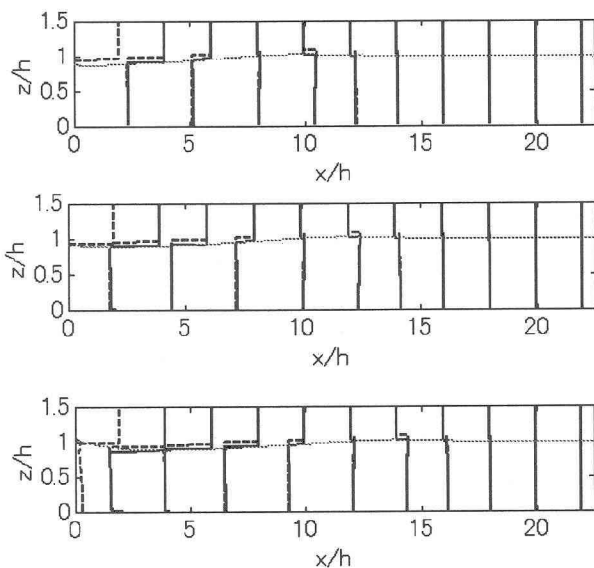


図-3 底面にTMLを適用したものと、LESのみのももの流速分布の比較（水平流速、周期T/8、実線TML、破線LES）

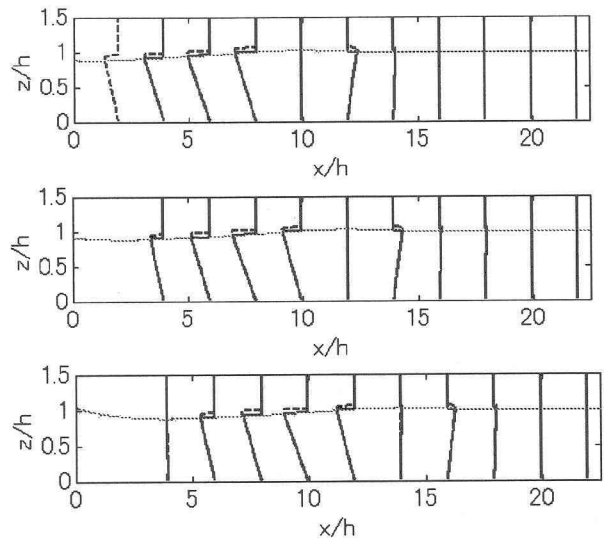


図-4 底面にTMLを適用したものと、LESのみのももの流速分布の比較（鉛直流速、周期T/8、実線TML、破線LES）

れた。水平流速においては図-3よりTMLを適用していない場合には底面の乱れが境界層外縁にも影響がみられた。しかしTMLを適用した場合には底面での乱れが境界層外縁にまで影響せず、secondary grid内だけで乱れが起きているのが確認された。また鉛直流速においては両方に大きな違いは見られなかった。(図-4参照)

4. 結論

既存の3次元Large-Eddy SimulationにTwo-layer Modelを適用させた。TLMを適用することにより底面境界層の乱れの粘性及び、対数則的な鉛直分布を正確に再現することができた。

LESでの底面の乱れはgrid幅の関係によって境界層外縁にも影響していることがわかった。

これによりLESにも何らかの形で境界層正しく再現する必要があり、今後更なる研究の必要がある。

参考文献

- 1) Eugo Piomelli, Elias Balaras: (2002); Wall-Layer Models For Large-Eddy Simulations, Annu. rev. Fluid Mech. pp349-pp374
- 2) Elias Balaras, Carlo Benocii: (1996); Two-layer approximate boundary conditions for large-eddy simulations, AIAA Journal. Vol.34, No.6. pp.1111-1119
- 3) Wang M: (1999); Dynamic-wall modeling for LES of complex turbulent flows, In Annu. Res. Briefs, Center Turbul. Res., Stanford Univ., Calif., pp.241-250
- 4) U. Piomelli: (1999); Large-Eddy simulation: achievements and challenges, Progress in Aerospace Sciences. Vol.35. pp335-362
- 5) 渡部 靖憲, 森 憲広, 佐伯 浩: (1998); 碎波の3次元 Large Eddy Simulation, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.146-150