

## LES のネスティングによる高周波数変動の再現性に関する検討

清水建設(株) 正会員 ○野澤 剛二郎

### 1. はじめに

メソ気象モデルと構造物周辺の LES を接続するときなど、格子解像度が異なる非定常乱流解析をネスティングする場合、広域の解析では再現されない高周波数流速変動の再現が課題となっている。粗格子で計算された乱流変動を密格子の流入とした場合、密格子のフィルタ幅に対応した高周波数の乱流変動が再現するにはかなりの吹送距離が必要となる<sup>1)</sup>。風洞実験をターゲットとする場合はそれほど問題とはならないが、平均風速が空間的、時間的に変化する流入の場合や流入からターゲットまでの距離が十分に取れない場合には長い吹送距離を必要とすることが問題となる。そこで、本研究では粗格子 LES と密格子 LES を接続する方法を提案し、粗面上を発達する乱流境界層に適用して高周波数の乱流変動の再現性を調べた。

### 2. スケール相似則による one-way カップリング手法

本研究では粗格子から密格子へのワンウェイの LES ネスティングに対して、以下の仮定を用いる。(1)粗格子で計算された GS (grid scale) 乱流は慣性小領域まで再現されている。(2)粗格子で計算された空間平均風速は密格子でも維持される。仮定(1)は MM5 などのメソ気象モデルで得られる流速場についても当てはまり、MM5 で計算された海上近辺の格子幅 $\Delta=1\text{km}$  としたときの乱流エネルギースペクトルは約  $7\Delta$  よりも長波長で慣性小領域が現れる(図1)。

粗格子の LES フィルタによって粗視化された流速と圧力を  $\tilde{U}, \tilde{P}$  (以下 LGS 成分とする) とすると、粗格子の Navier-Stokes 方程式は以下ようになる(ただし、分子粘性項を省略している)。

$$\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{U}_i \tilde{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{\tau}_{ij}$  は粗格子における SGS 応力である。一方、密格子の LES フィルタで粗視化された流速等を  $\bar{U}$  とし、その Navier-Stokes 方程式と(1)式の差を取ると、粗格子の SGS 成分かつ密格子の GS 成分(以下 MGS 成分とする)の運動方程式を導出することができる。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{U}_i \bar{U}_j - \tilde{U}_i \tilde{U}_j] = -\frac{\partial (\bar{P} - \tilde{P})}{\partial x_i} - \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} - \tilde{\tau}_{ij})}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{u} \equiv \bar{U} - \tilde{U}$  である。また、本研究では粗格子と密格子のフィルタサイズの比が十分に大きいとして  $\bar{U} \approx \tilde{U}$  としている。つまり、MGS 成分  $\bar{u}_i$  は右辺第二項の  $\tilde{\tau}_{ij}$  により粗格子から乱流応力を受けることになる。本研究では  $\tilde{\tau}_{ij}$  にスケール相似則に基づいてモデル化された Bardina モデル<sup>2)</sup>を用い、 $\bar{\tau}_{ij}$  に散逸性を良く再現する Smagorinsky モデルを適用する。

仮定(2)を実現するために本研究では MGS 成分流速を粗格子の LES フィルタで粗視化し、粗視化された流速がゼロとなるように Goldstein らの方法<sup>3)</sup>に準じて外力を加える。外力  $f$  は次式で与えられる。

$$f_i(t, x, y, z) = \alpha \int_0^t \text{err}(\tau, x, y, z) d\tau + \beta \cdot \text{err}(t, x, y, z) \quad (3)$$

ここで、 $\text{err} \equiv \bar{\tilde{u}}$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  はパラメータで、試計算の結果から本研究ではそれぞれ-2000 と-30 としている。

キーワード LES, 乱流境界層, Bardina モデル, 準周期境界条件, 慣性小領域

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-7 清水建設(株)技術研究所総合解析 C TEL03-3820-8327

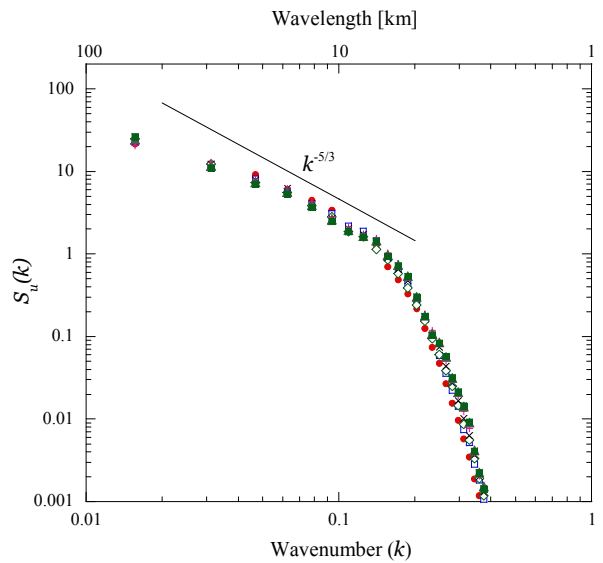


図1 MM5 で計算された風速の乱流エネルギースペクトル (高度 106m~1480m)

3. 解析条件

粗面に拡張された準周期境界条件<sup>4)</sup>を用いた乱流境界層の計算データを用いて粗格子から密格子への接続の検証を行う。解析領域は2.5km×0.5km×1km(順番に主流方向, スパン方向, 鉛直方向), 格子点数504×216×110, 流入での境界層厚が約450mである。この十分に発達した乱流境界層のLES解析で得られた流速データ $\bar{U}_i$ を格子幅の5.4倍のフィルタで粗視化してLGS流速 $\tilde{U}_i$ と見なし, この $\tilde{U}_i$ を入力データとして式(2)(3)より $\bar{u}_i + \tilde{U}_i$ を求め, 真値 $\bar{U}_i$ の平均風速, 乱流エネルギースペクトルと比較する。ただし, 式(2)中の $\bar{U}_i$ や $\bar{v}_{ij}$ は $\bar{u}_i + \tilde{U}_i$ から計算している。移流項はAdams-Bashforth法, 拡散項はCrank-Nicolson法で時間増分する。空間は4次精度の中心差分で離散化している。接続の解析では準周期境界条件は用いず,  $\tilde{U}, \tilde{P}$ を境界値としている。ただし, 床面には1辺20mの立方体ラフネスが主流方向に28個, 直交方向には6個, 千鳥格子状に配置されている。

4. 解析結果

図2と3に高度約100mにおける主流方向流速を上空の自由流速 $U_0$ で無次元化したものをLGS成分とMGS成分に分けて示す。入力データであるLGS成分の変動は粗視化により比較的緩やかであるのに対して, MGS成分の変動周期は短くなっている。また, MGS成分の真値 $\bar{U} - \tilde{U}$ と比較すると, 短周期変動の位相は良くあっており, 振幅もばらつきがあるものの概ね良く対応している。さらに, 時間平均値はほぼゼロで, 仮定(2)を満足することが予想される。図4の乱流エネルギースペクトルより,  $\bar{u}_i + \tilde{U}_i$ のスペクトルは真値 $\bar{U}_i$ のスペクトルと一致し, 慣性小領域を再現している。つまり, 本解析により平均風速だけでなく, 乱流強度についても真値を満足していることを示している。

5. まとめ

本研究ではメソ気象モデルとLESの接続を視野に入れて, 粗格子流速データを用いて密格子の乱流を再現する手法を提案した。また, 準周期境界条件を用いた粗面上を発達する乱流境界層データを用いて, 粗格子流速データから密格子流速を再現する解析を行い, 流速時刻歴や乱流エネルギースペクトルを真値のものと比較し, 高波数成分まで良く再現されることを確認した。今後, 外力項のパラメータや粗格子と密格子のフィルターサイズ比の影響について検討するとともに, メソ気象モデルへの適用を試みる。

参考文献

- 1) 野澤 剛二郎, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部 Vol: 57 巻, pp.1063-1064, 2002.
- 2) J. Bardina, J. H. Ferziger and W. C. Reynolds, AIAA paper No.80-1357, 1980.
- 3) D. Goldstein, R. Handler and L. Sirovich, Journal of Comp. Physics, 105, pp.354-366, 1993.
- 4) K. Nozawa and T. Tamura, Proc. Turbulent Shear Flow Phenomena vol.2, pp.443-448, 2001.

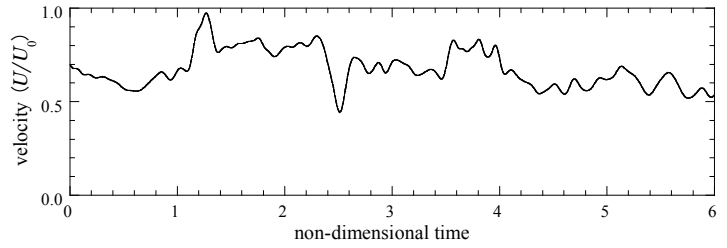


図2 主流方向流速のLGS成分 $\tilde{U}$ の時刻歴

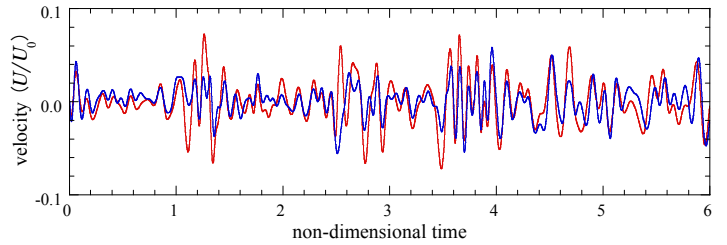


図3 主流方向流速 $\bar{u}$  (赤) と真値 $\bar{U} - \tilde{U}$  (青) の時刻歴

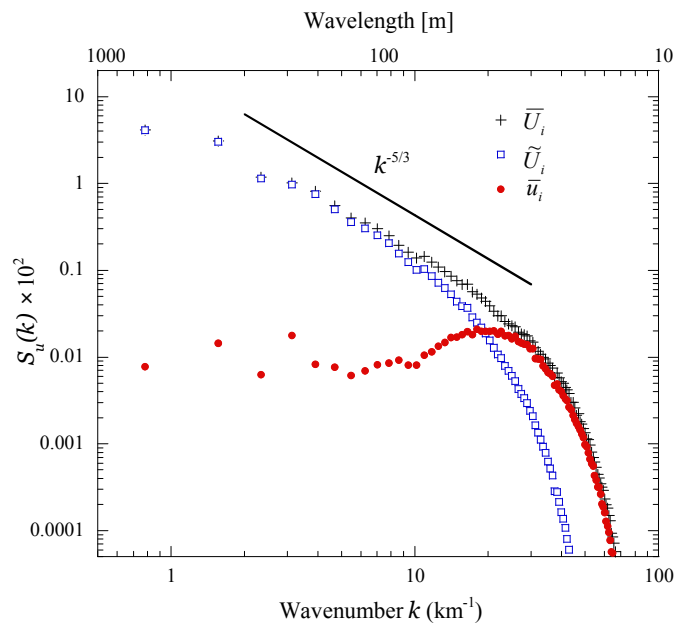


図4 主流方向流速の乱流エネルギースペクトル