F211

非線形渦粘性モデルを用いた LES/RANS ハイブリッド乱流伝熱モデル A hybrid LES/RANS approach using anisotropy-resolving algebraic turbulence models for predicting turbulent scalar transfer

○学 犬東 稔 (九大院)

正 安倍 賢一 (九大工)

Minoru INUZUKA and Ken-ichi ABE, Dept. of Aero. & Astro., Kyushu University, Fukuoka, 812-8581

In order to derive a possible path for developing a large eddy simulation (LES) applicable to high Reynolds-number turbulent flow, a hybrid approach connecting LES with the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) modeling in the near wall region is studied. In contrast to most of the previous studies, an advanced non-linear eddy-viscosity model and a higher order extension of the generalized gradient diffusion hypothesis model are introduced to resolve near-wall turbulence and turbulent scalar transfer more correctly. The proposed model is applied to fully-developed channel flow with various grid resolution. The present model provides encouraging results for developing this kind of hybrid LES/RANS model.

Key Words: Turbulence, Turbulent Scalar Transfer, Hybrid LES/RANS Model, Non-linear Eddy-Viscosity Model

1. 緒言

ラージ・エディ・シミュレーション(LES)は、計算機の発達に伴い、複雑乱流場の予測への適用が可能になり、乱流計算の主力になりつつある。しかしながら、高レイノルズ数(Re)乱流にLESを適用する場合、現在なお解決すべき問題が残されており、高 Re 乱流における壁面近傍の取り扱いの問題は深刻である。なぜならば、壁面近傍の流れを解像するには非常に多くの計算格子が必要だからである。例えば、滑りなし条件を適用してチャンネル乱流を計算する場合、適切なLESを行う為に必要とされる壁面近傍の格子解像度は、壁座標表示で概ね $\Delta x^+ \sim 100$ (x :流れ方向), $\Delta z^+ \sim 20$ (z :スパン方向)程度とされている。これを $Re_\tau (=u_\tau H/\nu) = 10^4$ (バルク Re で約 5×10^5 , H :チャンネル半幅, u_τ :摩擦速度)のチャンネル乱流に適用すると、スパン方向にチャンネル半幅当たり 500 点の格子点数が必要となり、工学的な観点から考えるとこれは受け入れ難い要求である。

この問題を解決すべく多くの研究グループが、高 Re 乱流における壁面近傍の計算コスト削減に向けた努力を行ってきた。中でも、壁面近傍でレイノルズ平均ナビエ・ストークス(RANS)モデルを適用し、中心領域でLESを用いる“LES/RANSハイブリッド手法”が注目されている。これまでの研究^{(1)~(3)}により、LES/RANSハイブリッド手法の有用性は確認されているが、従来の研究では殆どの場合RANSとして線形モデルが採用されており、壁面近傍での乱れの非等方性まで立ち入った議論がなされていない。しかし、ハイブリッド手法では常に壁面近傍でRANSが採用されることを考えると、この問題は重要である。例えば乱流伝熱予測において、最近の代数型熱流束モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾では乱れの非等方性の適切な再現を前提としており、壁面近傍で線形のRANSモデルは採用できない。そこで、壁面での乱れの非等方性を正しく表現できる非線形のRANSモデルを用いたLES/RANSハイブリッド手法がAbe⁽⁶⁾により提案され、様々な格子解像度のチャンネル流れで適切な予測が得られた。

本研究では、より高精度な乱流伝熱予測を行う為に、速度場におけるAbe⁽⁶⁾によるLES/RANSハイブリッド手法に、GGDHの高次展開型モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾を組み合わせた手法を検討する。このハイブリッドモデルを種々の格子解像度のチャンネル乱流に適用し、乱流伝熱を含めた予測精度に関する議論を行う。

2. 計算手法及び計算条件

フィルター平均(またはレイノルズ平均)された強制対流スカラー輸送に対する支配方程式は以下になる。

$$\frac{D\bar{T}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu}{Pr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - q_i \right) \quad (1)$$

ここで、 $(\quad)$ はLES領域ではフィルター化された、またRANS領域ではレイノルズ平均された値を示す。式(1)において、 $\bar{T}$, ν , Pr はそれぞれGS(平均)スカラー、動粘性係数、プラントル数を表す。LESとRANSの接続に関しては、Abe⁽⁶⁾のハイブリッド手法に従い、レイノルズ応力 τ_{ij} と同様に乱流熱流束 q_i を以下の式で定義する。

$$\tau_{ij} = (1 - f_{hb}) \overline{u_i u_j}_{(RANS)} + f_{hb} \tau_{ij(LES)} \quad (2)$$

$$q_i = (1 - f_{hb}) \overline{u_i T}_{(RANS)} + f_{hb} q_{i(LES)} \quad (3)$$

f_{hb} はLESとRANSを滑らかに接続するための関数である。 f_{hb} は、LESが採用される壁から離れた領域では1となり、壁から離れた領域では0となる。 f_{hb} は次の式で表される⁽⁶⁾。

$$f_{hb} = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{n}{C_{hb} \Delta} \right)^6 \right\}, \Delta = \sqrt{\frac{\Delta_x \Delta_y \Delta_z}{\min(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)}}, C_{hb} = 4.0 \quad (4)$$

RANS領域において、レイノルズ応力のモデル化に関しては、Abe⁽⁶⁾のハイブリッド手法に従いAbe et al.⁽⁷⁾のモデルを採用した。また乱流熱流束は、GGDHの高次展開型モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾を用いてモデル化を行った。LES領域のレイノルズ応力及び乱流熱流束は、RANSと同様の表式を用いてモデル化を行っている。なおLES領域の乱れエネルギー k_s は、以下のフィルタリングに基づくモデルを採用した⁽⁶⁾。

$$k_s = C_k \frac{1}{2} (\bar{U}_i - \hat{U}_i)^2, C_k = 4.5 \quad (5)$$

本研究では本ハイブリッドモデルの基本性能を確認するために、 $Re_\tau = 640$ のチャンネル流れで計算を行った。格子点数は $31(x) \times 61(y) \times 31(z)$ とし、計算領域を $6H \times 2H \times 1.5H$, $12H \times 2H \times 3H$, $24H \times 2H \times 6H$ と変化させることで、3通りの格子解像度($\Delta = 0.1, 0.2, 0.4$)について計算を行った。また、何れの場合でも壁面垂直方向の格子解像度は $y_w^+ \leq 1$ を確保している。スカラー場については $Pr = 0.71$ とし、DNS⁽⁸⁾⁽⁹⁾と同じ境界条件を用いた。本計算は、Lien and Leschziner⁽¹⁰⁾によって開発されたSTREAMコードを用いた。

3. 計算結果及び考察

$Re_\tau=640$ の計算結果をDNSデータ⁽⁸⁾⁽⁹⁾と比較して示す。Fig.1より、平均速度分布は何れの格子解像度においても、DNSとほぼ一致しLESとRANSが滑らかに接続されていることがわかる。Fig.2より、レイノルズせん断応力においても Resolved Stress(RS)と Modeled Stress(MS)を足した Total Stress(TS)がDNSと何れの格子解像度でも概ね一致している。また $\Delta=0.4$ の場合は、RSがほぼ0となりRANSのみの計算結果に近く、本ハイブリッドモデルはより格子が粗い場合でもRANSの予測精度を保障することがわかる。Fig.3はレイノルズ垂直応力分布を比較したものであるが、DNSとほぼ一致し乱れの非等方性がよく再現されている。しかし、 $\Delta=0.1$ では接続領域付近で再分配の抑制が生じており、TSがDNSよりも非等方性が強くなっている。また、 $\Delta=0.2$ ではLES領域全体で再分配の抑制傾向が見られる。

Fig.4~6よりスカラー分布に関しても、何れの格子解像度においてもLESとRANSが滑らかに接続されている。平均スカラー分布では、 $\Delta=0.2$ でやや上方にずれが見られるが、概ねDNSと一致しており、ヌッセルト数も適切に予測していることがわかる。Fig.6の主流方向の乱流スカラー流束については、 $\Delta=0.1$ で壁面垂直方向の乱流スカラー流束のRSが最大付近で、 $\Delta=0.2$ ではLES領域全体で過大予測された。これはFig.3で見られた傾向と一致し、 u が u と相関が強い⁽¹¹⁾為であると考えられる。

4. まとめ

壁面乱流及び乱流スカラー輸送をより高精度に予測する為に、NLEVM及びGGDHの高次展開型モデルを用い、その有効性を確認した。平均スカラー分布と壁垂直方向熱流束については良い結果が得られたが、乱れの再分配の抑制に伴い、壁面垂直方向の乱流スカラー流束はLES領域で過大予測された。今後、更なるLES/RANSハイブリッドモデルの発展の為に、様々な流れ場に適用すると同時に、妥当性の検証・改良を進めることが重要である。

4. 謝辞

本研究の一部は、平成16年度科学研究費補助金(No.15360450, No.15106013)の支援を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Nikitin, N.V., Nicoud, F., Wasistho, B., Squires, K.D. and Spalart, P.R.: *Phys. Fluids*, **12** (2000) 1629-1632.
- (2) Hamba, F.: *Theoret. Comput. Fluid Dynamics*, **16** (2003) 387-403
- (3) Davidson, L., and Peng, S.H.: *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, **43** (2003) 1003-1018.
- (4) Suga, K., and Abe, K.: *Int. J. Heat Fluid Flow*, **21** (2000) 37-48.
- (5) Abe, K., and Suga, K.: *Int. J. Heat Fluid Flow*, **22** (2001) 19-29.
- (6) Abe, K.: *Int. J. Heat Fluid Flow*, **26** (2005) 204-222.
- (7) Abe, K., Jang, Y., and Leschziner, M.A.: *Int. J. Heat Fluid Flow*, **24** (2003) 181-198.
- (8) Abe, H., Kawamura, H. and Matsuo, Y.: *ASME J. Fluids Eng.*, **123** (2001) 382-393.
- (9) Abe, H., Kawamura, H.: *Proc. of 9th European Turbulence Conference*, 399-402, 2002.
- (10) Lien, F.S., and Leschziner, M.A.: *Comput. Methods Appl. Mesh. Engrg*, **114** (1994) 123-148.
- (11) Moser, R.D., Kim, J., and Mansour, N.N.: *Phys. Fluids*, **11** (1999) 943-945.

Fig.1 : Mean velocity profiles

Fig.2 : Reynolds shear stress

Fig.3 : Reynolds normal stresses

Fig.4 : Mean scalar profiles

Fig.5 : Wall-normal scalar flux

Fig.6 : Streamwise scalar flux