

LES における Dynamic Clark モデルおよび Dynamic two-parameter Clark モデルの性能

Performance of dynamic Clark model and dynamic two-parameter Clark model in large eddy simulation

小林宏充, 慶應義塾大学日吉物理教室, 〒223-8521 横浜市港北区日吉 4-1-1, hkobayas@phys-h.keio.ac.jp
下村裕, 慶應義塾大学日吉物理教室, 〒223-8521 横浜市港北区日吉 4-1-1, yutaka@phys-h.keio.ac.jp
Hiromichi Kobayashi, Dept. of Physics, Keio Univ., 4-1-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama, 223-8521 JAPAN
Yutaka Shimomura, Dept. of Physics, Keio Univ., 4-1-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama, 223-8521 JAPAN

The performance of dynamic Clark model (DCM) and dynamic two-parameter model (DTCM) is numerically examined in large eddy simulation of no-rotating and rotating channel turbulences. The DCM and DTCM are consistent with the constraint of asymptotic material frame indifference in a rotating frame, but dynamic Smagorinsky model (DSM) and dynamic mixed model (DMM) are not consistent. For the non-rotating channel turbulence, the streamwise turbulence intensity is overestimated for the DSM, and is underestimated for the DMM and the DCM. The DTCM is most similar to the DNS. For the rotating channel turbulence the DSM, the DCM and the DTCM show similar performances, but it is found that the DCM is very numerically unstable.

1. はじめに

LES におけるダイナミックサブグリッドモデルとしてダイナミック Smagorinsky モデル⁽¹⁾ (DSM) が提案されているが, DNS の結果との比較により, その精度があまり良くないことからダイナミック Mixed モデル⁽²⁾ (DMM), ダイナミック Clark モデル⁽³⁾ (DCM) などのモデルが提唱されている. 著者らは, 回転座標系へそれらモデルを適応した場合に角速度無限大でも発散しない asymptotic material frame indifference (AMFI) なモデルとして, 回転座標変換で不変形の dynamic Clark model ならびにその 2 パラメータモデルである dynamic two-parameter Clark model (DTCM) が有用であると提唱し, 一様減衰乱流ならびに回転一様減衰乱流に対して, それら LES モデルの性能を数値計算により DNS の結果と比較検討を行った⁽⁴⁾. その結果, 堀内⁽⁵⁾が報告しているように, 回転乱流場では回転系に変換を行った DSM は非物理的な振動を引き起こし, モデル係数も大きく振動するので, 回転場でも無矛盾な DCM および DTCM が有効であることを示した. 本報告では, DCM および DTCM を非回転および回転 channel 乱流へ適応し, その性能を比較することを目的とする.

2. ダイナミックサブグリッドモデル

本研究で検討したモデルは以下のモデルである. 回転系では各モデルは以下ようになる⁽⁴⁾.

回転系ダイナミック Smagorinsky モデル (RDSM)

$$\tau_{ij} = -2C_D \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij} - Z_{ij},$$

$$Z_{ij} = \frac{\bar{\Delta}^2}{12} \left(\varepsilon_{iab} \Omega_a \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_b} + \varepsilon_{jab} \Omega_a \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_b} + \delta_{ij} \Omega_a \Omega_a - \Omega_i \Omega_j \right)$$

・ 回転系ダイナミック mixed モデル (RDMM)

$$\tau_{ij} = (\bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j) - Z_{ij} - 2C_D \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij},$$

$$Z_{ij}^c = \frac{\bar{\Delta}^2}{12} \left(\varepsilon_{iab} \Omega_a \frac{\partial (\bar{u}_j - \bar{u}_i)}{\partial x_b} + \varepsilon_{jab} \Omega_a \frac{\partial (\bar{u}_i - \bar{u}_j)}{\partial x_b} \right)$$

・ ダイナミック Clark モデル (DCM) (回転系でも同形)

$$\tau_{ij} = \frac{\bar{\Delta}^2}{12} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_a} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_a} \right) - 2C_D \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij}$$

・ 回転系ダイナミック 2 parameter Clark モデル (RDTCM)

$$\tau_{ij} = C_{LC} \frac{\bar{\Delta}^2}{12} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_a} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_a} \right) + (C_{LC} - 1) Z_{ij} - 2C_D \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \bar{S}_{ij}$$

ただし, 上式において Z_{ij} , Z_{ij}^c は回転角速度に依存した項で

あり, 非回転系ではゼロとして扱えばよい.

3. 計算手法および条件

非圧縮性流体の NS 方程式を, 4 次精度中心差分で離散化を行い (ただし壁方向は 2 次精度), Mac 法で計算を行った. 非回転 channel 乱流に対しては, $Re_\tau=180$, 計算領域として $2 \times 2 \times$ (は channel 半値幅), 回転 channel 乱流に対しては, $Re_\tau=150$, 計算領域として $5 \times 2 \times 2$, 回転角速度 $\Omega=2.5$ として計算を行った. 格子点数は, いずれの場合も $32 \times 64 \times 32$ とした (壁方向 64).

4. 結果と考察

まず, 壁面摩擦速度で規格化した $Re_\tau=180$, 回転角速度 $\Omega=0$ である非回転 channel 乱流について検討を行う. 図 1 に, 各モデルにおける平均主流速度分布を示す. DSM および DCM が中央において若干 DNS よりも大きな値をとっているが, どのモデルも DNS の結果と良く一致しており, 顕著な差はみられなかった. 図 2 に, 各モデルにおける乱れ強度分布を示す. 乱流強度分布も図 1 に示した平均速度分布と同様, 各モデルの差はほとんど見られないが, 主流乱流強度を比較す

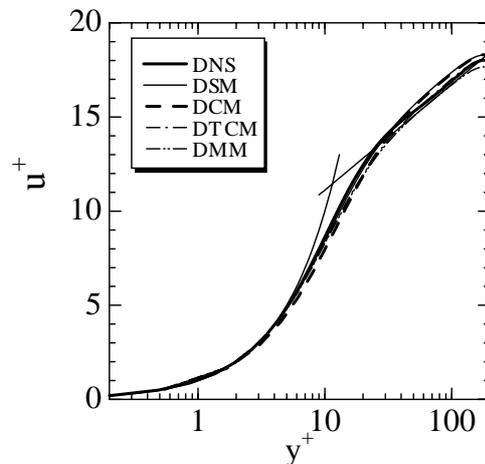


Fig. 1 Mean velocity profiles for $Re_\tau=180$ and $\Omega=0$.

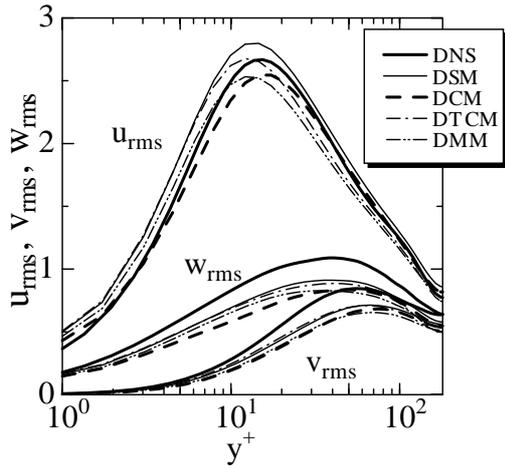


Fig. 2 Turbulence intensities for $Re_\tau=180$ and $\Omega=0$.

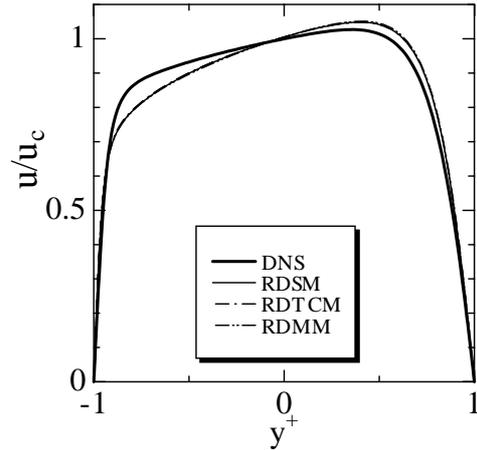


Fig. 4 Mean velocity profiles for $Re_\tau=150$ and $\Omega=2.5$.

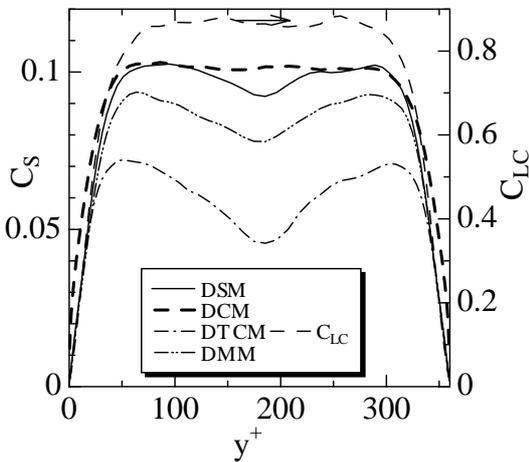


Fig. 3 Model coefficients for $Re_\tau=180$ and $\Omega=0$.

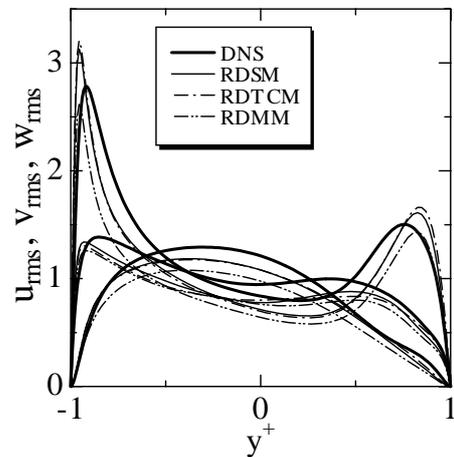


Fig. 5 Turbulence intensities for $Re_\tau=150$ and $\Omega=2.5$.

ると DSM は過大評価であるが、DCM, DMM は過小評価しており、DTTCM が DNS に近い。図 3 に、各モデルにおけるモデル係数の比較を示す。同図中、 C_s は Smagorinsky モデル係数と同じ形である C_D の平方根で示してある。また、DTTCM のもう一方のモデル係数 C_{LC} も示されている。DSM, DCM では、主流部分においてモデル係数が 0.1 となっているのに対し、DMM, DTTCM の順に小さくなった。これは、DMM においては Leonard 項、DTTCM においてはさらに Cross 項ともう一方の係数 C_{LC} の寄与により、渦粘性に寄与するモデル係数が小さくて良いことに起因していると考えられる。

次に、 $Re_\tau=150$, $\Omega=2.5$ である回転 channel 乱流について検討を行う。図 4 に、各モデルにおける中心主流速度で規格化した平均主流速度分布を示す。同図から、平均主流速度分布については、各モデルの差がほとんど無いことがわかった。しかしながら、DNS の結果と比較すると、各 LES の結果は回転の効果を過剰に示していることがわかる。図 5 に、各モデルにおける乱流強度分布を示す。主流乱流強度を比較すると、回転 channel においては、RDMM は過小評価で、RDSM, RDTCM は過大評価である。図 6 に各モデルにおけるモデル係数の比較を示す。回転乱流では、非回転乱流と異なり、モデル係数は各モデルでほとんど変わらない結果であった。

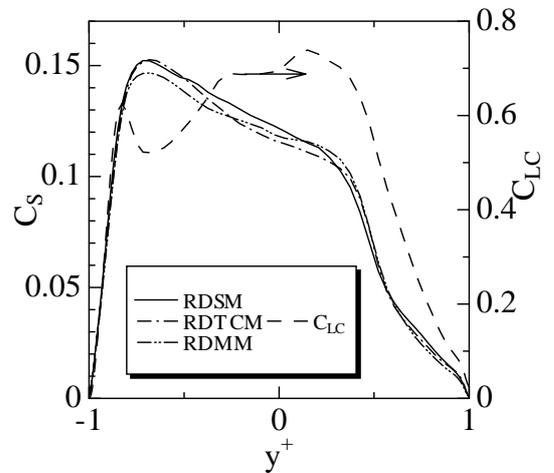


Fig. 6 Model coefficients for $Re_\tau=150$ and $\Omega=2.5$.

また、いずれの場合においても、DCM はモデル係数を決める際に壁付近で非常に負になりやすく、数値的に非常に不安定で、非回転乱流では clipping を行うことにより計算が行うことができたが、回転乱流においては clipping を行っても数値的に非常に不安定で計算が不可能であった。このことが、これまで DCM が channel 乱流の計算に用いられてこなかった原因であると考えられる。

5. まとめ

非回転および回転 channel 乱流において、これまで提案されている DSM, DMM と回転系においても回転角速度無限大の極限において漸近挙動が無矛盾な DCM, DTCM を比較した結果、今回検討した条件下ではモデル間の差異は顕著ではなかったが、回転乱流下では数学的に無矛盾なモデルを用いることが有用であると思われる。また、DCM は channel 乱流計算においては、非常に数値的に不安定であることがわかった。

今後の課題として、更にレイノルズ数の高い条件下での比較検討を行い、各モデル間の差異を調べる必要があると思われる。

参考文献

- (1) Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., and Cabot, W. H., "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model," *Phys. Fluids A*, **3**, (1991), pp.1760.
- (2) Vreman, B., Geurts, B., and Kuerten, H., "On the formulation of the dynamic mixed subgrid-scale model," *Phys. Fluids A*, **6**, (1994), pp.4057.
- (3) Vreman, B., Geurts, B., and Kuerten, H., "Large-eddy simulation of the turbulent mixing layer," *J. Fluid Mech.*, **339**, (1997), pp.357.
- (4) Kobayashi, H. and Shimomura, S., "The performance of dynamic subgrid-scale models in the large eddy simulation of rotating homogeneous turbulence," *Phys. Fluids*, **13** (2001), pp.2350-2360.
- (5) 堀内潔, 「一般化スケール相似則 SGS モデルとその応用 回転系における SGS モデルへの拘束条件」, 第 14 回 生研 N S T シンポジウム, IIS Tokyo, (1999), p.55.