

神戸大学工学部建設学科

学生員

○ 崎尾幸司

神戸大学大学院自然科学研究科

正会員

中山昭彦

神戸大学大学院自然科学研究科

正会員

S. VENGADESAN

1. はじめに

工学的に乱流現象の数値予測のために、広く用いられている乱流モデルとして、Reynolds 平均と渦粘性仮定を用いる 2 方程式モデルがあげられる。なかでも、乱流エネルギー k とその散逸率 ε を用いる $k-\varepsilon$ モデルは、その標準型¹⁾がすでに確立されており、比較的少量の計算量で管路流などの流れにおいて実用上の目的に合致する制度で予測ができるまで発展してきている。また、標準モデルでの壁面近傍まで計算できないなどの欠点を補った低 Reynolds 数モデルも発展しており、かなりの精度で予測が可能になってきている。ところが、これらのモデルの共通の問題点は、乱流強度の非等方性が正しく予想できないということである。この原因の一つとして考えられるのが、Reynolds 応力の勾配拡散型の線形近似によるものがあげられる。このことにより、特に発達したせん断流では、主流方向の勾配は無視できるので、乱流応力の非等方性を表現できない。これらのことは、Reynolds 応力の非線形表現によって解決されるものと考えられる。そこで、本研究では、既存の非線形モデルを用いて、検証をし、モデル開発のための検討を行う。

2. 検証対象とする非線形モデルと検証ケース

今回検証する非線形モデルとして、Craft, Launder and Suga²⁾による Nonlinear $k-\varepsilon$ モデル (以降 NECLS と表す) と Sofialidis and Prinos³⁾による Nonlinear $k-\varepsilon$ モデル (以降 NESP と表す) と Myong and Kasagi⁴⁾による Nonlinear $k-\varepsilon$ モデル (以降 NEMK と表す) について、 $Re_\tau = 180$ におけるチャンネル流において、それぞれのモデルの比較検証を行った。各モデルの詳細については参考文献を参照されたい。また、比較の対象として、Kim et al.⁵⁾による DNS の結果と Launder and Spalding¹⁾による標準 $k-\varepsilon$ モデル (以降 SKE と表す) と Kawamura and Kawashima⁶⁾による Low-Reynolds number $k-\varepsilon$ モデル (以降 LEKK と表す) と NECLS, NESP, NEMK モデルにおいて、Reynolds 応力の非線形項を付け加えないで線形項のみで計算を行ったもの (以降それぞれを LECLS, LESP, LEMK と表す) とあわせて検証を行った。

3. 検証結果ならびに考察

Figure 1~Figure 3 に、それぞれのモデル別に Reynolds 垂直応力 $\overline{uu}$, $\overline{vv}$ を摩擦速度 u_τ と動粘性係数 ν で無次元化した $\overline{uu}^+$, $\overline{vv}^+$ を示す。SKE, LEKK, LECLS, LESP, LEMK モデルのように Reynolds 応力を線形表現で表したモデルでは、Reynolds 垂直応力の非等方性を表すことができていない。しかし、LECLS, LESP, LEMK モデルの Reynolds 応力に非線形項を付け加えた NECLS, NESP, NEMK モデルでは、Reynolds 垂直応力の非等方性をどのモデルでも表現することができている。ただし、NECLS, NESP モデルでは、特に壁面近傍での非等方性の予測には、まだ不十分な点が見られる。また、NEMK モデルにおいては、他の 2 つのモデルに比べ、壁面近傍での非等方性を再現することができている。これは、NEMK モデルでは、乱流強度の壁面漸近条件を考慮した付加項を付け加えており、その効果が現れたものと思われる。つぎに、Figure 4 に今回検証した 3 つのモデルの Reynolds 垂直応力 $\overline{uu}$, $\overline{vv}$ を摩擦速度 u_τ と動粘性係数 ν で無次元化した $\overline{uu}^+$, $\overline{vv}^+$ を示す。NECLS モデルと NESP モデルの違いは、Reynolds 応力を非線形表現したときのモデル係数に違いがあり、NECLS モデルでは、これを定数で与え、NESP モデルでは、無次元不変量である $\tilde{S}$, $\tilde{\Omega}$ の関数で与えているところにある。

Kouji SAKIO, Akihiko NAKAYAMA and Sankara VENGADESAN

ここで, $\tilde{S}$, $\tilde{\Omega}$ は

$$\tilde{S} \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}}, \quad \tilde{\Omega} \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega_{ij} \Omega_{ij}}, \quad S_{ij} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad \Omega_{ij} = \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

である。したがって、モデル係数を定数で表すよりも無次元不変量 $\tilde{S}$, $\tilde{\Omega}$ の関数で表した方が、より非等方性を表現できることが期待できる。また、今回検証した3つのモデルの中では、NEMK モデルが最もよく非等方性を表現できているので、モデルとしてはよいように思えるが、一概にそうともいえない。それは、NEMK モデルではモデル係数の設定にあたって、チャンネル流に限定して決定しているの、完全に発達したチャンネル流では主流方向の勾配が無視できるため、決定しなくてもよいモデル係数があり、その係数が決められていないこと、それから、Reynolds 応力のモデル化にあたって、乱流強度の壁面漸近条件を考慮した付加項の中に、壁からの距離を含んでいるため、複雑境界に適用するのに困難点がある。したがって、境界条件あるいは境界形状が変わったときに同じ結果が出てくるとは限らない。以上のことから、モデル構築の留意点としては、任意形状の流れ場に適用できるモデルを構築するためには、壁からの距離をパラメータとして含まないことが必要となってくる。さらに、モデル定数の決定においても不変的なパラメータを用いて決定する必要があると思える。

4. おわりに

既存の非線形モデルを用いて、Reynolds 応力の非線形表現が、Reynolds 垂直応力の非等方性を表現することができるか検証を行った結果、Reynolds 応力を非線形表現することによって、非等方性を表現できることが確認できた。

参考文献 1) Launder, B. E. and Spalding, D. B.: *Computer Methods in Applied Mechanics and Eng.*, **103**, 456, 1974 2) Craft, T. J., Laynder, B. E., and Suga, K.: *J. Heat and Fluid Flow*, **17**, 108, 1996 3) Sofialidis, D. and Prinos, P.: *k - ε models*, *J. Hydraulic Eng.*, **124**-3, 253, 1998. 4) 明, 筈木: 機論, **56**-531, B. 94, 1990 5) Kim, J., Moin, P. and Moser, R.: *J. Fluid Mech.*, **177**, 133, 1987 6) Kawamura, H. and Kawashima, N.: *Proc. Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transf.*, P.I.1, 1994

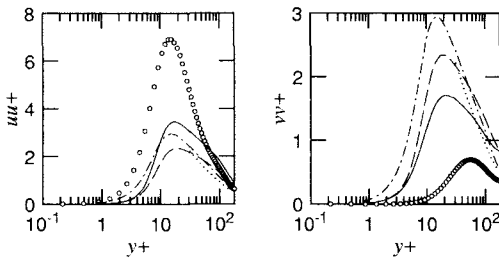


Figure 1: Profiles of Reynolds normal stresses in plane channel flow at $Re_\tau=180$: — NECLS; ... SKE; -- LECLS; - · - LEKK; ○ DNS

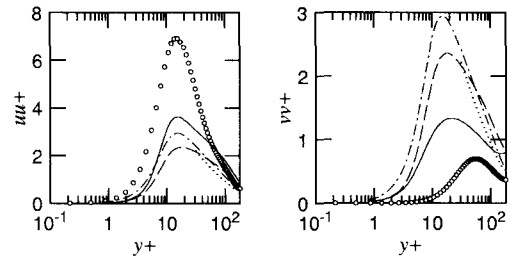


Figure 2: Profiles of Reynolds normal stresses in plane channel flow at $Re_\tau=180$: — NESP; ... SKE; -- LESP; - · - LEKK; ○ DNS

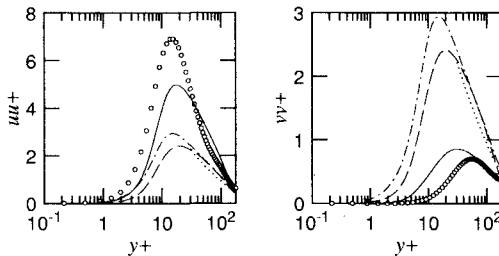


Figure 3: Profiles of Reynolds normal stresses in plane channel flow at $Re_\tau=180$: — NEMK; ... SKE; -- LEMK; - · - LEKK; ○ DNS

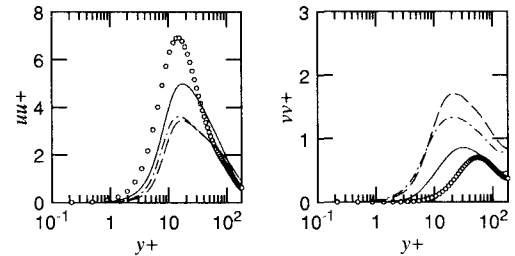


Figure 4: Profiles of Reynolds normal stresses in plane channel flow at $Re_\tau=180$: — NEMK; -- NECLS; - · - NESP; ○ DNS