

剥離・再付着乱流における乱流拡散項の考察

The Influence of Turbulent Diffusion Term on Separated and Reattachment Flow

小林 敏 雄*・富 樫 盛 典*

Toshio KOBAYASHI and Shigenori TOGASHI

1. は じ め に

われわれは既報¹⁾で、バックステップ流れに対して LES データベース²⁾を用いた A PRIORI TEST を行い、レイノルズ応力の渦粘性表現 (非等方項も含む) および ASM の特徴を明らかにした。さらに ASM を用いた数値解析を行った結果、再付着距離や圧力係数が改善されることを確かめた。しかし、ASM を用いても $Y/H=0.5$ 近傍での乱流エネルギー k の分布は実験データ³⁾と比較して大きめに予測されていた。

そこで本研究では、乱流エネルギー k の分布のさらなる改善を試みるために LES データベースを用いた k 方程式の評価を行い、その問題点を見いだして修正を加えた。さらに実際の数値計算によりその修正法の妥当性を検証した。

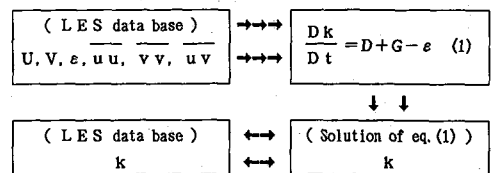
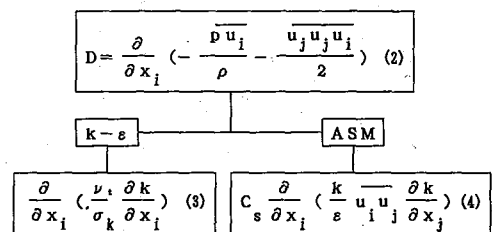
2. k 方程式の評価

図 1 は LES データベースを用いた k 方程式の評価方法を示しており、(1)の k 方程式の中で D , G はそれぞれ拡散項、生成項となっている。まず最初に k 以外の U , V , ε および各応力成分 \overline{uu} , \overline{vv} , \overline{uv} に対して LES データベースを利用して、(1)の k 方程式を解いて k の値を求める。次にその k の値と LES の k の値を比較することにより k 方程式の評価を行った。この方法を用いた場合、生成項 G と散逸項 ε は既知となるので k 方程式の拡散項 D のモデル化の評価ができることになる。拡散項 D は図 2 の(2)式のように圧力速度相関項と速度 3 重相関項からなっており、通常のモデル化では圧力速度相関項を無視して、速度 3 重相関項に対して勾配拡散を仮定しており、(3)式あるいは(4)式のような式が用いられている。図 3 の(a)~(d)は(4)式のモデル、(e), (f)は(3)式のモデルの評価結果である。(a)は ASM の k 方程式の拡散係数として最も広く用いられている $C_s=0.22$ の場合であり、この図を見ると $Y/H=0.5$ 近傍の再循環流領域で k を過大評価していることがわかる。そこで拡散係

数 C_s を変化させたときの影響を考えて見ることにする。(b)は $C_s=0.10$ の場合であり、この値は 1988 年の Amano ら⁴⁾の論文で推奨されているものであるが、この場合は k の拡散が少なすぎており、再循環流領域での k がかなり過大に評価されてしまっている。(c)は $C_s=0.31$ の場合であり、この値は Pope と Whitelaw の論文の中で推奨されているものであるが、 $C_s=0.22$ の場合より LES のデータベースに近い値を示しているが、やはりまだ再循環流領域での k が過大評価されている。これに対して (d)は $C_s=1.00$ とした場合であるが、 k の分布がかなり拡散的になってしまっていることがわかる。

次に k - ε モデルで用いられている(3)式の評価を試みた。(e)は $\sigma_k=1.0$ の場合であり、(f)は低レイノルズ数型のモデルで用いられる $\sigma_k=1.4$ の場合の結果である。この場合、両方とも $Y/H=0.5$ 近傍の再循環流領域において k の過大評価がみられるが、 $\sigma_k=1.4$ の場合のほうが悪い結果を示している。

以上のような評価結果より、係数が 1 つの勾配拡散型モデルでは $Y/H=0.5$ 近傍での再循環流領域の k の分布を正確に予測することはできないことがわかった。さら

図 1 k 方程式の評価法図 2 k 方程式の拡散項

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研究速報

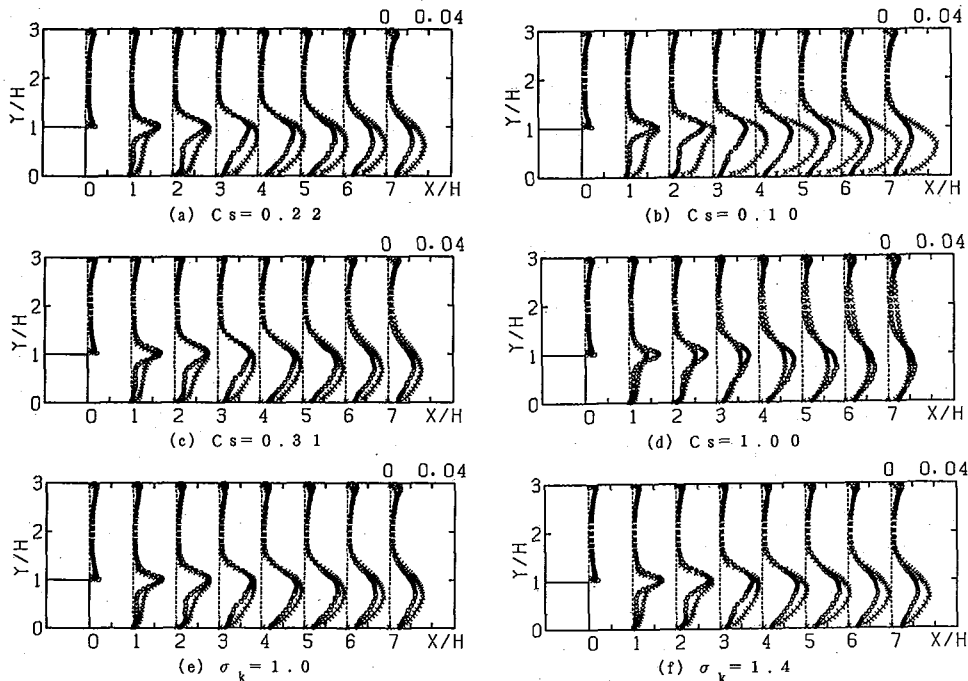


図3 k方程式の評価結果 (勾配拡散型)
(OLES, XA PRIORI TEST)

にASMで用いられている(4)式は拡散項に非等方性を考慮した形になっているが、(3)式と比較してよいモデルであるとは言えないこともわかる。

3. k方程式の修正

前節では拡散係数が1つの勾配拡散型モデルでは再循環流領域でのk分布の特徴をとらえることができないことを示した。従来よりこれを改善するために、フラックスリチャードソン数^{5),6)}を導入して流線曲率の影響を考慮する方法がとられてきているが、ここでは改善法として、係数を2つ有する吉沢モデルの拡散項を導入する。吉沢^{7),8)}はTSDIAを用いてk方程式の拡散項に対して(5)式のようなモデルを提案している。

$$C_{kk} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - C_{k\varepsilon} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k^3}{\varepsilon^2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

この拡散項の特徴はkの拡散にεの拡散を考慮したことであり、2つの係数 C_{kk} と $C_{k\varepsilon}$ が存在する。このことによりモデルの硬直性がなくなり⁹⁾、前節で述べた係数が1つの勾配拡散モデルでの難点に有望な対策を与えるように思われる。このようなkとεの相互拡散に関してはすでに竹光⁹⁾の改定k-εモデルおよび河村¹⁰⁾のk-ε- $\overline{v'v'}$ モデルでも考慮されている。バックステップ流れでの C_{kk} と $C_{k\varepsilon}$ の最適値はおおよそ $C_{kk}=0.12 \sim 0.15$ 、 $C_{k\varepsilon}=0.06 \sim 0.12$ の範囲にあり、図4の(a)は $C_{kk}=0.15$ 、 $C_{k\varepsilon}=0.12$ のときの結果である。図3では $Y/H=0.5$ 近傍でkが過大評価されていたが、図4(a)ではこの過大

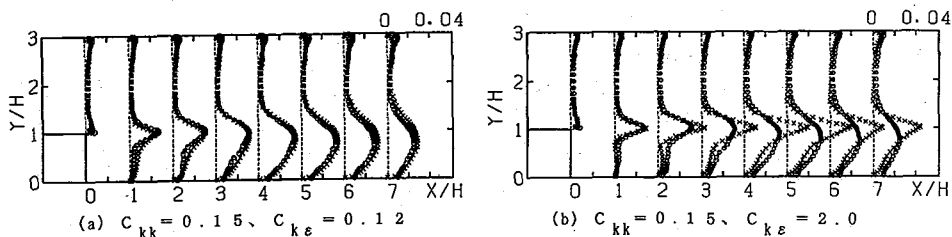


図4 k方程式の評価結果 (吉沢モデル)
(OLES, XA PRIORI TEST)

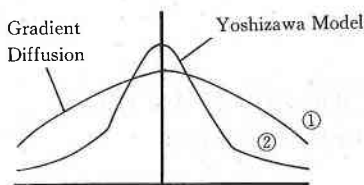


図5 吉沢モデルの効果

評価が改善されていることがわかる。さらに吉沢モデル中の ε の拡散を考慮した項の効果を調べるために、 $C_{k\varepsilon} = 2.0$ と極端に大きくした場合の結果が図4(b)である。この結果より ε の拡散を考慮した項は、図5の②の曲線のように k 分布のピーク値を保つ役割があることがわかる。この効果により、再循環流領域の k のふくらみを抑えることができたものと考えられる。

4. モデル修正後の数値解析

図6に k の分布図、図7に流線図を示す。図7の(a)、(b)はすでに計算した k - ε および ASM の結果であり、(c)と(d)は吉沢モデルの拡散項を使用した場合の結果である。これらの数値解析結果から判断して、次のようなことが明らかになった。

ASM では k の生成項が厳密な形として扱えることにより再循環流領域での k の分布が改善されるが、拡散項のモデルの不適切さに起因する k の過大評価は改善できていない。それゆえに再付着距離の改善は不十分で

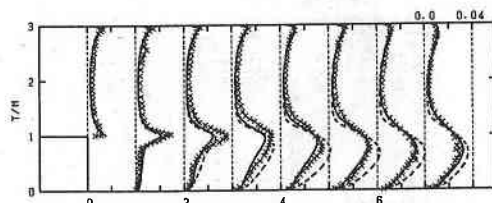


図6 乱流エネルギー分布
(×実験, k - ε , — ASM+Yoshizawa)

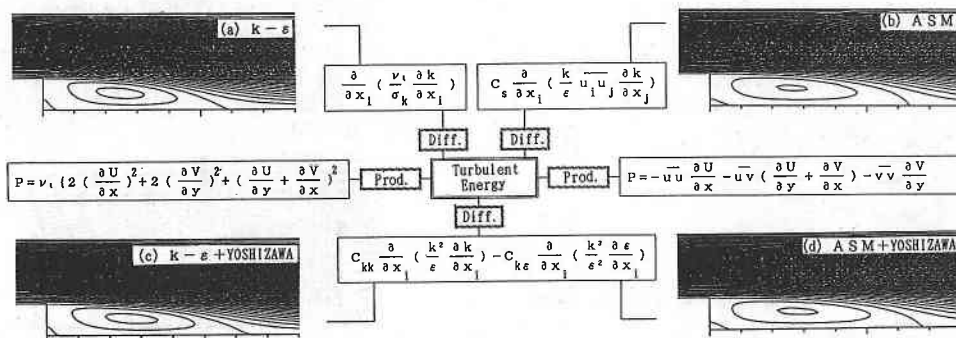


図7 乱流エネルギーと再付着距離の関係

ある。また、吉沢モデルの拡散項を用いた k - ε モデルでも再付着距離に改善を与えるが、生成項が厳密でないことに起因する k の過大評価は改善できていない。これに対して ASM+吉沢モデルの拡散項では、 k の生成項と拡散項を適切な形で表現できているので、一番良い結果をもたらしていることがわかった。

5. 結 論

バックステップ流れにおける乱流モデルを検証するために、LES データベースを用いた評価および数値解析を行うことによって次のような結論が得られた。

k 方程式の拡散項に勾配拡散を仮定したモデルでは再循環流領域での乱流エネルギー k の分布を正しく予測することができないことがわかった。これに対して、係数を2つ有する吉沢モデルの拡散項を用いると、乱流エネルギー k の分布のピーク値が保たれ、 k 分布をかなり良く予測することができるとわかった。最後にモデル修正の妥当性を検証するために数値解析を行った結果、再循環流領域での乱流エネルギーの過大評価が改善されると、再付着距離も改善されることが明らかになった。

(1992年10月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 小林・富樫, 生産研究, 44-2, 32(1992).
- 2) Morinishi and Kobayashi, Int. Symp. on Eng. Turbulence Modelling and Measurements, 279(1990).
- 3) 笠木ほか2名, 第9回流体計測・第6回流体制御合同シンポジウム講演論文集, 77(1989).
- 4) Amano and Goel, AIAA J., 26-3, 273(1988).
- 5) Rodi and Scheuerer, Phys. Fluids, 26-6, 1422(1983).
- 6) Cheng and Farokhi, Trans. ASME, Fluid Eng. 114, 52(1992).
- 7) Yoshizawa, A., J. Phys. Soc. Jpn., 51-7 2326(1982).
- 8) 第28回生研講習会テキスト(1988).
- 9) 竹光, 機論B, 53-496, 3629(1987).
- 10) Kawamura, 8th turbulent shear flows 12, 26-4(1991).