

乱流モデル応用研究会の活動について

On the Activity of the Research Group for Application of Turbulence Models

藤原仁志(航技研), 小尾晋之介(慶應大), 山本誠(東京理科大),
半場藤弘(東大生研), 岡本正芳(静岡大), 秋山 実(富士総研),
荒木和博(富士総研), 小林克年(東京大)

1. 緒言

計算機の急速な進歩にともなって, CFDは製品の設計や各種流れの予測の現場で広く普及し, 設計や予測の重要な手段の一つとして位置づけられるようになった。このようにCFDが普及した背景には, CFDの実行を支援する, 格子生成法, 計算アルゴリズム, および, 可視化などのポスト処理技術等の絶え間ない進歩もあげられる。これらのCFD支援環境の整備は, 現在もなお日進月歩の勢いで進んでいる。

一方, 現状の工学CFDが抱える最も重要な課題は, 実用的な乱流モデルの開発であることはCFD技術者共通の認識であるが, この点ではいまだにあまり進展が見られないのが実情である。というのも, 現在も次々と提案されている乱流モデルは, あまりにも複雑すぎるためにそれを実際に用いることが難しい。また, 乱流の計算法に関する基礎研究についても, DNSやLESが中心であり, それらは必ずしも近い将来に実用問題に適用できる見通しがあるわけではない。

これらを総合すると, 将来の工学CFDの現場においても, 乱流モデルを用いた計算がその主流を占めている可能性は大きいと言える。確かに, 乱流モデルを用いた計算には, その手法の根幹に係わる欠点がないわけではない。しかし, CFDの現状を見るに, 近い将来では多くの場面で乱流モデルを用いた計算の方がDNSやLESより有利になると予想される。「乱流モデル応用研究会」は, 実際に工学CFDにたずさわる若手研究者からなり, 研究会の目的には

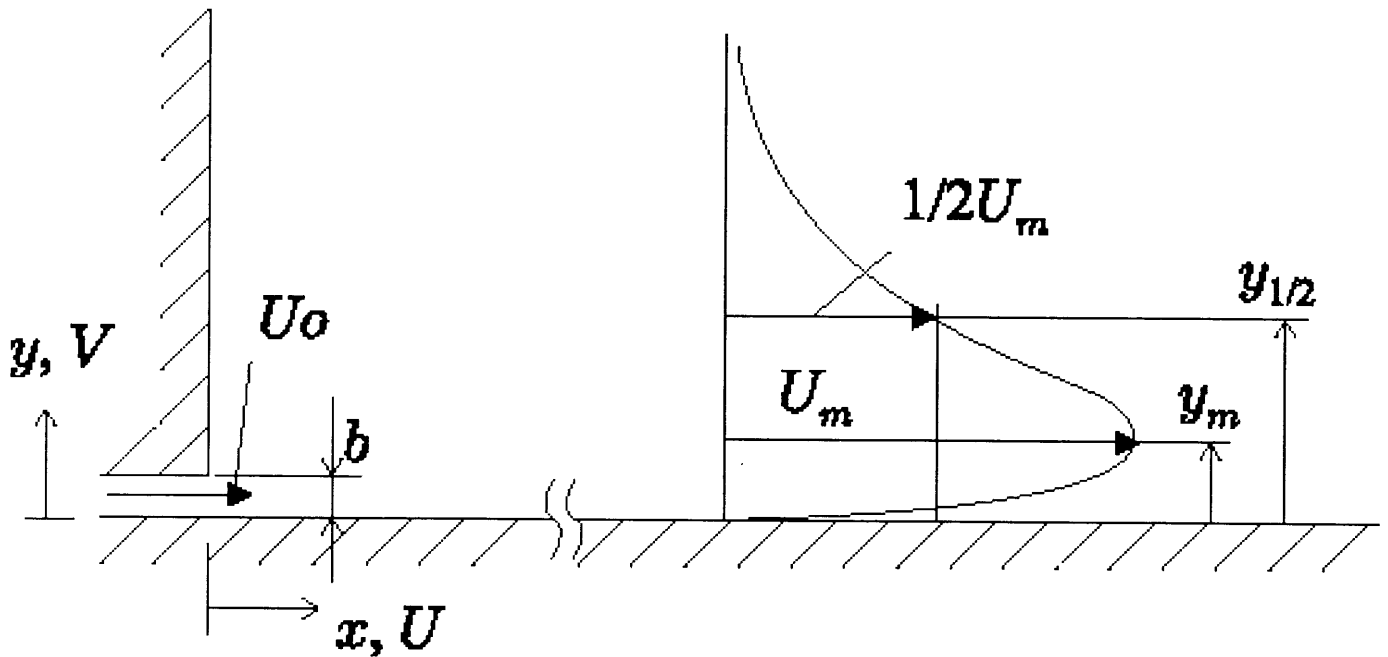
- 各種実用問題に対する乱流の数値計算精度向上のための系統立った手法の確立と実行。
 - 既存乱流モデルの新しい利用法を開拓すること。
- を掲げている。通常の乱流関係の研究会とは違って, 乱流モデル自体の構築は研究会の主眼ではなく, モデルの純粋な利用者が無理無く参加できるシステムになっている。

電子メールによって参加を呼びかけたところ, 24人から参加の表明があり, うち12人が大学関係者, 3人が国研の研究者, 9人が一般企業のエンジニアであった。メンバーの数は徐々に増え続けている。会合は2ヶ月に1度行われる。研究会のメンバーは, 幹事が中心となって設定した流れを, 各自のコードと乱流モデルを用いて計算することが必要で, メンバーの提出した結果は, 計算法, 格子点, 乱流モデルと併せて検討する。結果については, 電子メールやftpなどで回収し, まとめたものは研究会のホームページ(<http://navier.t.u-tokyo.ac.jp/~fuji/>)にも公開している。

2. 研究会の課題(2次元壁面ジェット)

2.1 概要

Karlssonら(1993)による壁面噴流の実験を課題として取り上げる。この結果からは平均速度と変動速度の二次モーメントのデータがERCOFTACの標準データベースとして登録されており, 標準データとして世界的に用いられている。主要なパラメータは



- 流入部レイノルズ数： $Re=U_0b/\nu=1.0\times 10^4$ ($\nu=1.0\times 10^{-6}$, Water at 18°C)
- スリットの幅： $b=10\text{mm}$
- 断面平均速度： $U_0=1\text{m/s}$
- 水槽サイズ： $L=7450\text{mm}$, $H=1350\text{mm}$
- 流入アスペクト比： 1:145

スリット出口の水槽底面を原点として、主流方向に x 軸、壁面に垂直方向に y 軸を取ります。水槽の下流端に当たる $x=L$ で、水は水槽上部 $y=H$ からオーバーフローとして流出するような流れ場になっている。速度場の計測は LDV により、壁面座標で $y^+=2$ までの粘性低層までのデータが得られている。摩擦速度、壁面摩擦係数、ジェットの半値幅の x 方向の発達の様子についてもデータが用意されているので、流れ方向の発達の様子についてもチェックする事が出来る。

2. 2 計算上の注意点

流れは十分下流で自己保存領域に達する事が実験から示されているが、当面は流れの発達領域と自己保存領域の両方を計算対象とする。流入ジェットのアスペクト比が 145 と高いため、二次元性はかなりの程度で成り立つと考えられるが、水槽内部には弱いながらも再循環流が発生しているため、方物近似は適当ではなく、楕円型の計算をする必要がある。計算領域としてはこれまでの結果から判断すると、水槽全体を対象とする必要はなく、 $250b\times 50b$ 程度の計算領域をとれば十分

である。ただし、その場合でも $y=50b$ の境界面での流入を許容する必要がある。流入面で与えられているデータは平均ならびに変動速度成分のうち主流方向成分のみであるため、乱流エネルギーの消散率などの諸量については各自が乱流境界層のパラメータなどを参考に決定する必要がある。ただし、実験データから判るように、流入部では主流には低乱流強度のコア領域があり、流入条件としてチャンネル流れのデータを用いる事は出来ない。データベース上の平均速度の成分の近似式として、以下の式が用意されている。

- ◆ $U = 0$, for $y = 0$
- ◆ $U = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + a_3 y^3 + a_4 y^4$, for $0 < y < 1.67$
- ◆ $U = 1.038$, for $y > 1.67$

$$a_0 = -0.0048423757$$

$$a_1 = 0.516016712$$

$$a_2 = 1.56161407$$

$$a_3 = -1.55715752$$

$$a_4 = 0.39524607$$

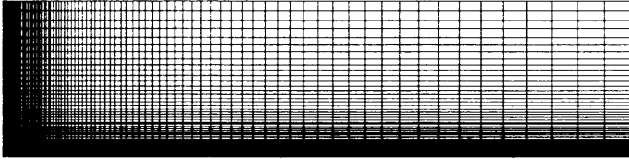
3. 計算結果の一例

3. 1 概要

低レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ モデル (Myong-Kasagi モデル) を用いて計算した。流入条件は課題の通りで、下壁面は断熱・速度 0、左壁面はすべり壁、その他の境界は微分が 0 とした。

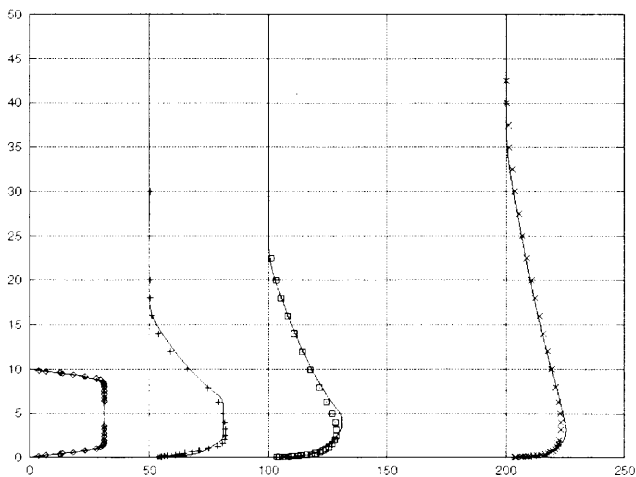
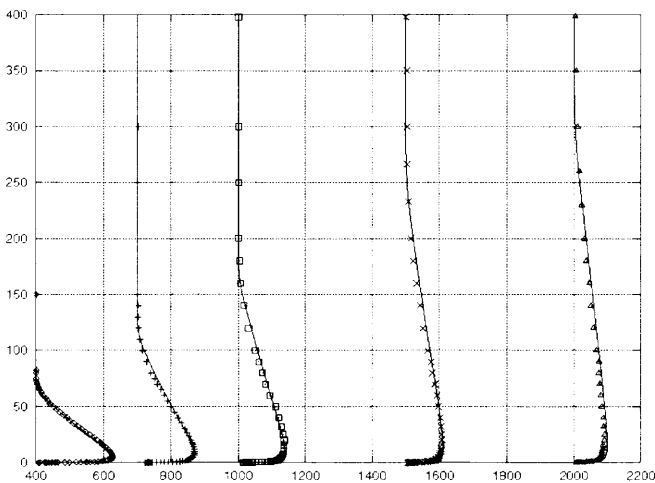
3. 2 計算格子

計算領域は流れ方向に 200b, 壁面に垂直な方向に 50b (b は噴出口の高さ) とした. 格子点数は流れ方向に 100 点, 壁面に垂直な方向に 100 点である.



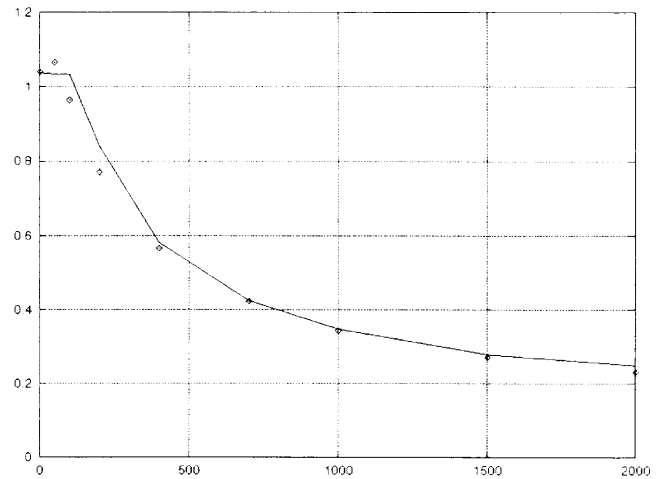
3. 3 流れ方向 平均速度 分布

流れ方向平均速度 U を実験と計算で比較してある (シンボルが実験値で実線が計算結果). 上側の図がジェット噴出口に近い方で, 下側の図がジェットの噴出口から離れた方である. 横軸が噴出口からの距離 (mm), 縦軸が下壁面からの距離 (mm) である ($y = 0$ が壁面).



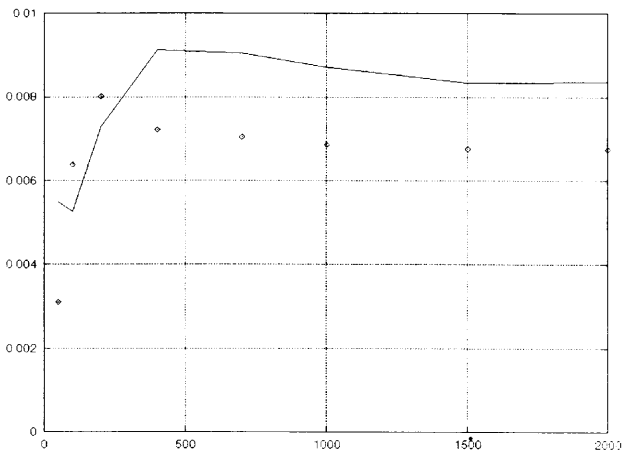
3. 4 流れ方向速度最大値の変化

横軸は噴出口からの距離 (mm), 縦軸が速度最大値 (m/s), シンボルが実験値で実線が計算結果.



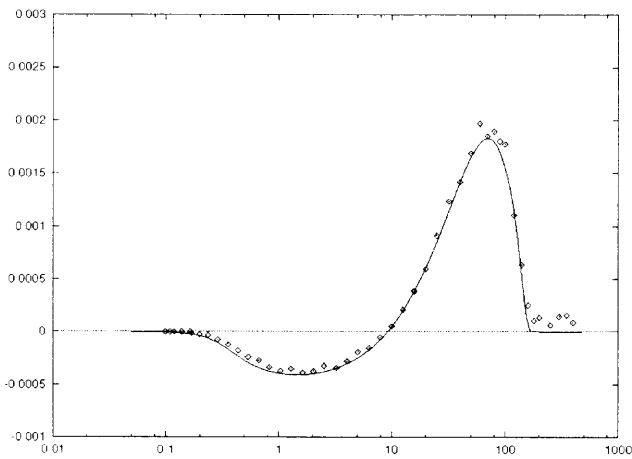
3. 5 壁面の局所摩擦係数 C_f の変化

$C_f = \tau_w / (\rho U_m^2 / 2)$; τ_w は壁面摩擦応力, U_m はその x の位置での平均速度最大値, 横軸は噴出口からの距離 (cm), 縦軸が C_f , シンボルが実験値で実線が計算結果.



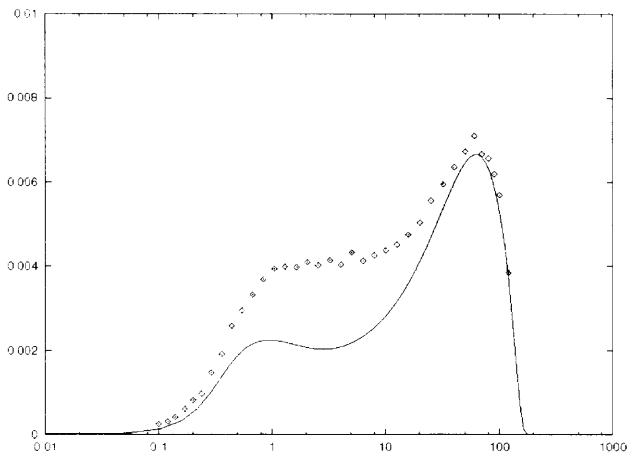
3. 6 レイノルズ応力 $\langle uv \rangle$ の分布

$x = 100b$ での y 方向分布; その x の位置での平均速度最大値の 2 乗で無次元化してある; $-\langle uv \rangle$ でないことに注意横軸は噴出口からの距離 (mm), 縦軸が $\langle uv \rangle / U_m^2$, シンボルが実験値で実線が計算結果.



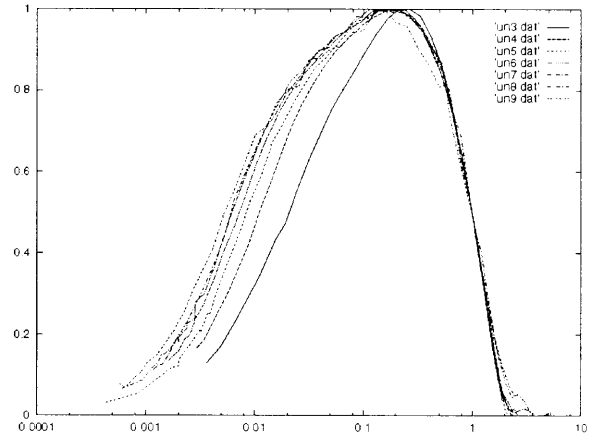
3. 7 乱流エネルギーの分布

$x = 100b$ での y 方向分布 ; その x の位置での平均速度最大値の 2 乗で無次元化してある ; 横軸は噴出口からの距離 (mm), 縦軸が k / U_m^2 , シンボルが実験値で実線が計算結果.



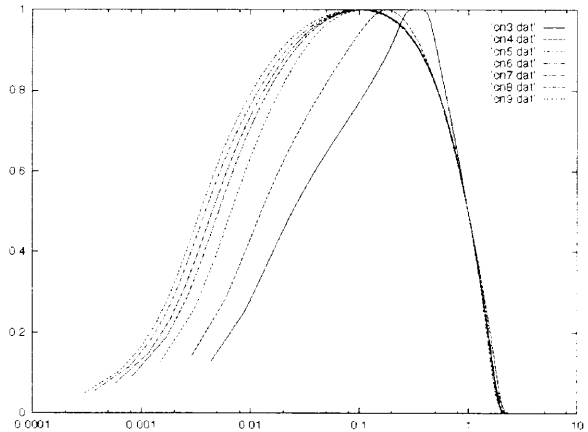
3. 8 自己保存性 (実験結果の流れ方向速度)

9 / 4 提出分課題説明の Table.1 の Station 3 から 8 において、流れ方向平均速度 分布の自己保存性を確認する。自己保存性(self similarity)とは、ある x の位置において、ジェットの最大速度とジェットの幅を用いて、流れの諸量を適切に無次元化して y 方向分布を示すと、それらが x の位置によらず相似になるということである。ここでは、流れ方向平均速度を最大速度で無次元化し (縦軸)、それを、半値幅 $y^{1/2}$ で無次元化した壁からの距離を横軸として示す。半値幅 $y^{1/2}$ の定義は課題説明のページの最初の図を参照.



3. 9 自己保存性の確認 (計算結果の流れ方向速度)

上記の実験結果と同様のものを計算結果について示す.



3. 10 自己保存性 (計算結果の乱流エネルギー)

計算結果について乱流エネルギーが自己保存性を満たしているかを調べた。乱流エネルギーは平均速度最大値の 2 乗で無次元化した。横軸が無次元化した乱流エネルギー、縦軸が $y^{1/2}$ で無次元化した壁からの距離。一般に 0 次の統計量 (平均値) より 2 次の統計量 (レイノルズ応力、乱流エネルギー) の方が自己保存性を満たすまでの距離が長くなるということが知られている。

