

燃焼器内乱流場のラージ・エディ・シミュレーション

(燃焼室内の保炎器形状の違いによる検討)

Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in Combustion Device

高 相 喆*・小林 敏雄**・谷口 伸行*・大塚 雅哉***・池川 昌弘***

Sangcheol KO, Toshio KOBAYASHI, Nobuyuki TANIGUCHI, Masaya OHTSUKA, Masahiro IKEGAWA

1. はじめに

工学上で流れ場が問題となった場合、その多くは複雑な形状を持つ場合が多い。複雑形状に関する問題は大きく分けて、乱流モデルに関する問題と計算格子をいかに設定して解析を行うかということである。複雑形状を有する流れ場は、色々な基本乱流現象が共存する場であるため、乱流モデルに対するさらなる検討が必要である。また、計算格子に対しても、現在流体の数値解析においては構造格子の差分法が主流であるが、計算形状の複雑さによって直交格子を適用することができない場合が生じてくる。

最近、計算機の発達に伴い多くの研究者によって様々な乱流現象に対する乱流モデルが提案され、その精度と有効性が検証されている。また、計算格子に関しても直交格子以外にも形状を忠実に反映できるような手法が開発され、試みられている。

このような背景により、著者らは既に前報^{1,2)}において、LESによる燃焼流れの有効性を検討する目的で一般座標系格子と円筒座標系格子を併用した複合座標系格子を用いて燃焼器内乱流に対する数値解析を行い、その乱流挙動と各種乱流統計量を得た。しかし、その結果、保炎器の形状の違いによる保炎器背面の再循環領域の違いが現れてきた。従って、本報では前報で指摘された燃焼器内の保炎器形状の違いによる検討を行ったので、その結果に対して述べる。

2. 円管内乱流における計算コードの評価

前報の計算で対象している保炎器の形状が円盤型であることに対して、実験で対象している形状は円盤の前面に45°の切断面がある形であるため、保炎器の形状の違いに

よる再循環領域の差が現れた。本研究では実際の保炎器の形状を忠実に反映するため、円筒座標系格子を用いて燃焼器内乱流場の数値シミュレーションを行った。

まず保炎器形状の違いによる検討を行う前に、工業上頻繁に現れる比較的簡単な流れ場である円管内乱流を対象として構築した計算コードの評価を行った。しかし、円筒座標系を用いて円管内乱流を計算する際には、中心に特異点が存在するためそれを避ける別の工夫が必要であり、様々な方法³⁻⁵⁾が提案され試みられている。本研究では円筒座標系格子の中心の特異点に対しては180°反対側の物理量との内捜を行うことによって処理し、計算結果をEggelsら⁵⁾の直接数値シミュレーションの結果と比較を行った。

2.1 数値解析手法

物理反変速度成分を用いた一般座標系の支配方程式の詳細については文献⁴⁾を参照されたい。圧力解法はHSMAC法、時間進行法には2次精度アダムスバッシュフォース法を用いており、空間の離散化は2次の中心差分を用いた。数値計算領域は流れ方向には半径の6.4倍に相当する6.4Rとしている。また、乱流モデルはSmagorinskyモデルを用い、その定数Csは0.1として計算した。入口と出口では周期境界条件を課した。

数値計算は円管の直径と中心速度に基づいた $Re = 7000$ で行われ、摩擦速度 $U\tau$ と円管直径 D で定義されるレイノルズ数を $Re\tau = 360$ とし、壁面境界条件はNon-slip条件を採用している。また、時間刻みは $\Delta t = 0.0001$ として無次

表1 計算条件

case	格子数 (R × θ × Z)
case 1	30 × 60 × 80
case 2	30 × 90 × 80
DNS (E)	96 × 128 × 256
case 3	20 × 60 × 80
case 4	20 × 60 × 80 (40 × 40 × 80)

*東京大学生産技術研究所 第2部

**東京大学国際・産学共同研究センター

***日立製作所

研 究 速 報
元時間 $T = 20.0$ までの助走区間の後、乱流統計量として $T = 20.0-50.0$ までの平均値を取った。

表 1 に各 case の計算条件を示す。計算は 4 つの case に対して行われ、case1-3 は円筒座標系格子を用いて、case4 は円筒座標系格子と一般座標系格子を併用した複合座標系格子を用いて計算を行い、それぞれの結果に対して DNS の結果との比較を行った。これらの計算はシリコングラフィックス社の Origin 2000 を用いて行われ、計算時間は case 2 (格子点数: 216,000 点) の場合は約 8 sec/step であった。

2.2 計算結果

図 1 は無次元速度 u^+ と無次元長さ y^+ で示した主流方向の平均速度分布を示す。実線は粘性低層と対数速度領域を示している。太い実線で表示した DNS の結果は壁から離れるほど ($y^+ > 30$)、その速度分布が対数速度分布よりやや大きくなっている。Eggels らは、それを円管の壁面での流れパターンとチャンネル壁面での流れパターンとの違いによるものであると説明している。即ち、円管の場合には壁面に曲率が存在するため、流れ場が周方向に広がることを抑制する効果があることを示した。

LES の計算結果を DNS 結果と比較を行った結果、LES による平均速度分布の結果が DNS 値よりやや大きく評価されている。しかし、周方向に計算格子を増やした case2 の場合はよく一致している。その結果から円管流れを精度よく解析するためには、円管壁面の乱流構造を十分捕られるような周方向の格子を設計する必要があると思われる。

図 2 に各々方向の乱れ分布を示す。LES 計算の結果は DNS 結果に対して、主流方向の乱れ強度分布は過大評価されているし、半径方向および周方向の場合は過小評価されている。case1 は case3 に対して半径方向に格子を増やした場合であり、結果にはあまり差が現れなかった。今回の計算では全 case に対して壁面境界条件として Non-slip 条件を使っており、どちらの case に対しても粘性低層に 4

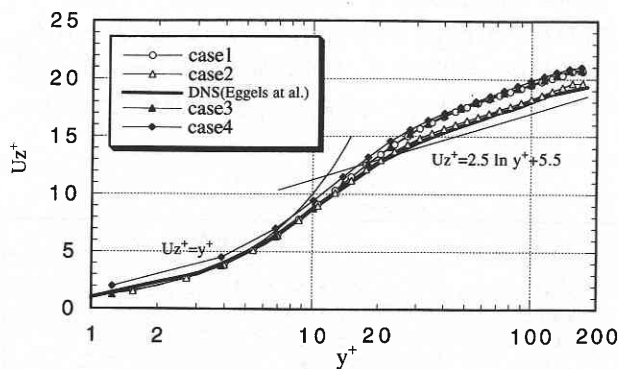


図 1 主流方向の平均速度分布

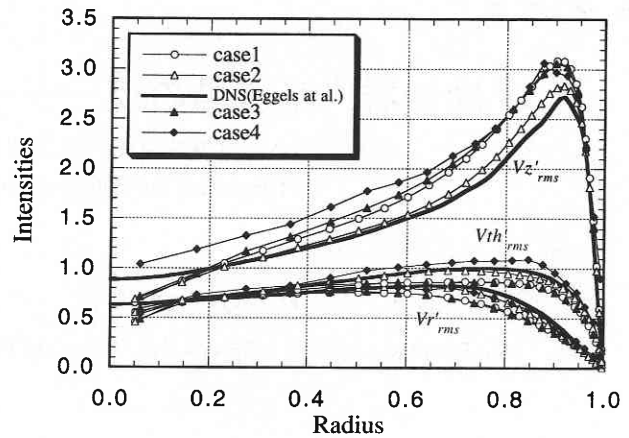


図 2 各方向の乱れ分布

個以上の格子が入っているため半径方向に格子を増やしても結果にはそれほど差は現れなかった。

case4 は複合座標系格子による計算結果で、 v_{sgs} 成分の計算だけを円筒座標系格子上で行い、殆どの計算は一般座標系格子上で行っている。従って、格子数は case3 より細かい格子であるにも関わらず計算結果にはあまり改善がないことと計算結果が滑らかでないことから、格子の直交性が悪いところでの数値誤差と補間を行う際に誤差が入っていることであると考えられる。

それに対して、case2 の場合は case3 の場合より半径方向と周方向にそれぞれ格子を増やした場合の結果であり、その結果は DNS の結果とよく一致することがわかり、周方向の格子数の設計が円管乱流の計算精度に影響を与えることがわかった。

3. 燃焼器内乱流の数値解析

3.1 計算条件

本計算で対象している計算領域と格子図を図 3 に示す。前報で対象にした保炎器が円盤型であることに對し、本計算で対象している保炎器の形状は前面に 45° の切断面が入っている。また、保炎器の位置は燃焼室の前面から $0.85R$ 離れて設けられていて、その厚さは $0.15R$ である。

本研究の計算条件と計算手法は前報と同様であり、その詳細については前報を参照されたい^{1,2)}。本計算は円筒座標系格子を用いて計算を行っており、格子数は r, θ, z 方向に各々 $55 \times 90 \times 102$ (504,900 点) を用いた。また、本計算の時間刻みは $\Delta t = 0.002$ とした。計算は、一般座標系格子と円筒座標系格子を併用した複合座標系による統計的に安定された計算結果を初期値として用い、無次元時間 $T = 78.0$ まで計算を行った後、乱流統計量として $T = 40.0 - 78.0$ までの平均値を取った。

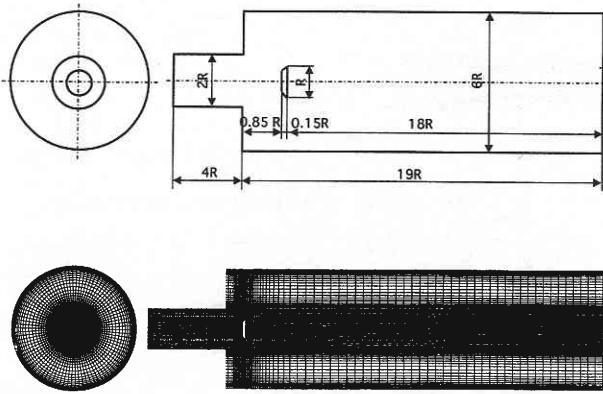


図3 計算格子図

これらの計算はシリコングラフィックス社の Origin 2000 と Fujitsu の VX を用いて行われ計算時間は Origin 2000 の場合約 4.92 min/step, VX の場合約 0.81 min/step であった。

3.2 計算結果

図4と図5には主流方向の速度分布の計算結果と実験結果を比較して示す。図4は複合座標系格子を用いて計算した円盤型の保炎器の場合であり、図5は円筒座標系格子を用いて計算した切断面を持つ保炎器の場合である。実験は各シンボルで表示した保炎器背面から流れ方向に各々 20 mm, 40 mm, 100 mm 下流の3つの場所で行われた。図4の円盤型の保炎器の場合、保炎器の形状の違いによる計算結果と実験結果の間には差が現れた。計算の場合、保炎器の後ろには逆流領域が存在し、主流速度分布のピーク値も実験結果に比べて半径方向にずれている。しかし、定性的にはよく合う傾向を示し、特に保炎器から随分離れた下流である $Z = 100$ mm の計算結果は実験結果とよく一致している。

それに対して、図5の切断面を持つ保炎器の場合の計算

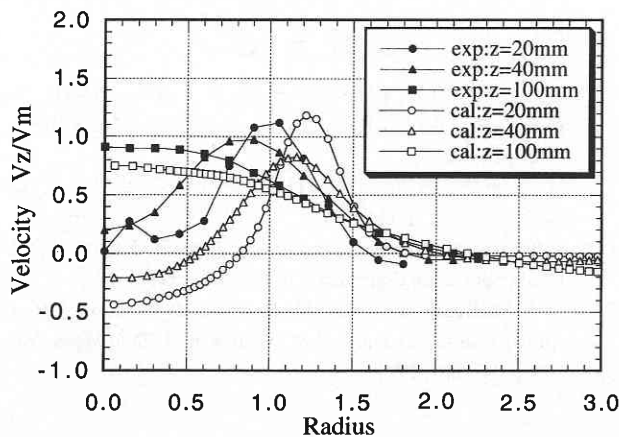


図4 主流方向の平均速度分布 (円盤型の保炎器)

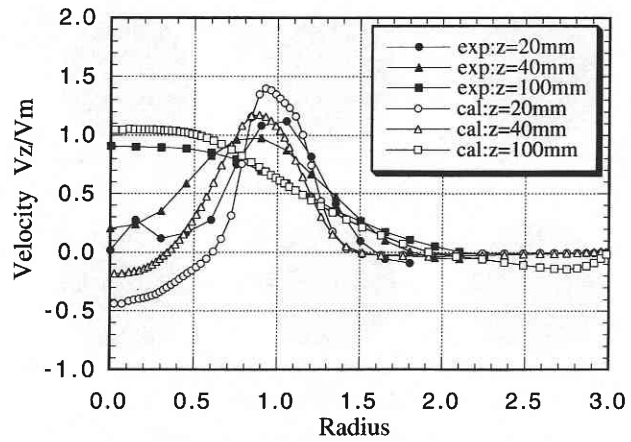


図5 主流方向の平均速度分布 (切断面を持つ保炎器)

結果は全体的に実験結果とよく合うことと、また逆流領域の大きさも円盤型の保炎器の計算結果に比べて小さくなるのが分かり、保炎器の形状の違いは保炎器後ろの再循環

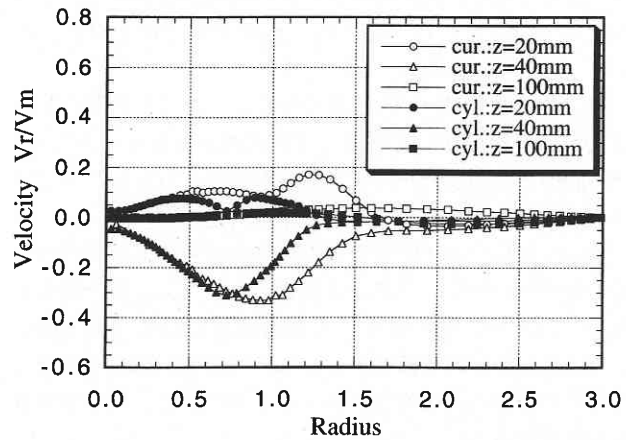


図6 半径方向の平均速度分布

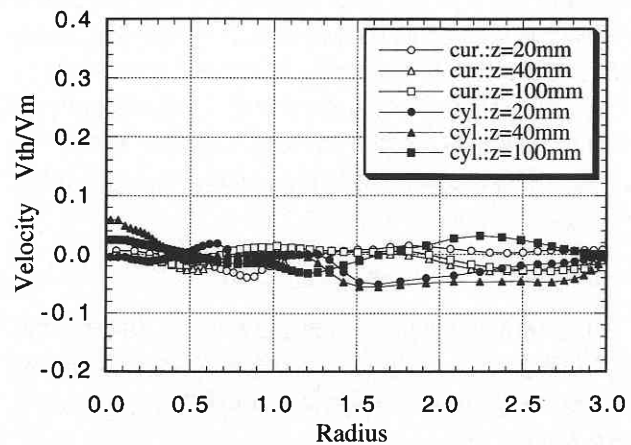


図7 周方向の平均速度分布

研 究 速 報

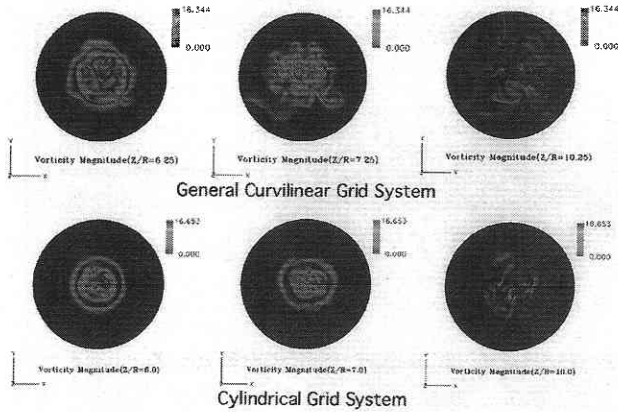


図 8 瞬時の渦強度分布のコンター図

領域の大きさの違いをもたらした。

図 6 には保炎器形状の違いによる半径方向の平均速度分布を示す。切断面を持つ保炎器の場合の計算結果が円盤型の保炎器の計算結果に比べて保炎器後ろの再循環領域が小さくなる。また、流れ場は保炎器の直後で広がって、その後閉じて、下流に行くのに伴い回復される様子が見られる。

図 7 には周方向の平均速度分布を示した。本計算の場合は入口境界条件として旋回のない速度分布を与えたため、周方向の平均速度分布は保炎器の形状によらずほぼゼロに近づいている。

図 8 には瞬時の渦強度分布の比較を示す。上の図は円盤型の保炎器の場合、下の図は切断面を持つ保炎器の場合であり、各々保炎器の後ろから 20 mm, 40 mm, 100 mm 下流の 3 つの断面の比較を示した。その結果、切断面を持つ保炎器の場合の渦強度分布がもっと円やかで、再循環領域も小さくなる。

図 9 には切断面を持つ保炎器の場合の各々方向の渦分布の等値面を示した。x, y 方向には前報の円盤型の保炎器の場合と同様に逆方向の回転を持つ 2 つのリング状の渦が現れ、下流に行くのに連れ崩れて弱くなる。それに対して、主流方向には保炎器の後ろで 2 つのリング状の渦の中、内側の方のせん断層から流れ方向の縦渦が発生し始め、下流に行くのに連れ発達し、下流側の流れ場はその縦渦が支配的になっている様子が見られる。

4. ま と め

円筒座標系格子を用い、複雑な流れ場である燃焼器内乱流の保炎器の形状の違いによる検討を行った。その結果、保炎器の形状の違いは保炎器後ろの再循環領域の大きさに差をもたらした。

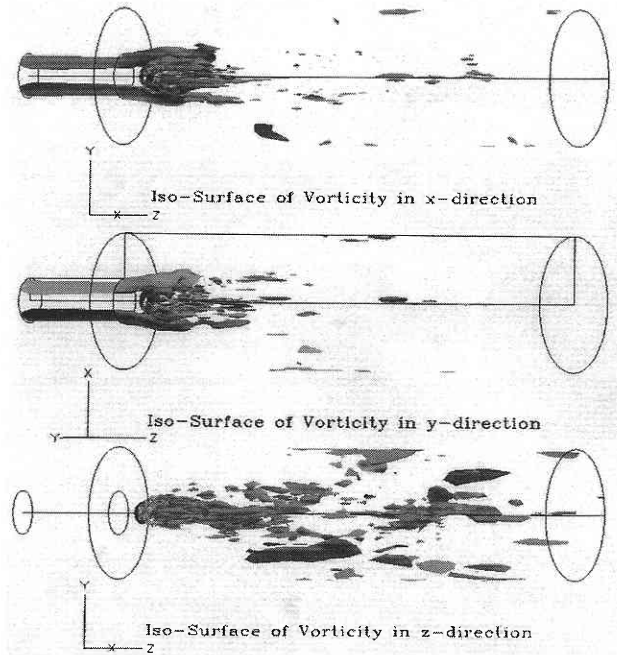


図 9 各方向の渦分布の等値面図

予混合燃焼器内の乱流挙動は、保炎器の影響により保炎器の後ろに逆方向の回転を持つ 2 つのリング状の渦が生成され下流に行くのに連れ崩れて弱くなる反面、流れ方向の縦渦が内側のリング状の渦のせん断層から発生し始め、下流側の流れ場はその主流方向の縦渦が支配的になっている。

謝 辞

本研究は、NEDO 独創的産業技術研究開発促進事業の助成 (ID No.8H 代-170) を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

(1998 年 10 月 28 日受理)

参 考 文 献

- 1) 高, 小林, 谷口, 生産研究, 50 卷 1 号, 1998, p. 57-60.
- 2) 高, 小林, 谷口, 大塚, 池川, 生産研究, 50 卷 10 号, 1998, p. 389-392.
- 3) 竹末, 三宅, 板東, 第 5 回数値流体力学シンポジウム. 講演論文集, p. 111-114, 1991.
- 4) S. Togashi, T. Kobayashi, Proceeding of the 3rd JSME-KSME Fluid Engineering Conference, p. 102-107, 1994.
- 5) J. G. M. Eggels, F. Unger, M. H. Weiss, J. Westerweel, R. J. Adrian, R. Friedrich and F. T. M. Nieuwstadt, J. Fluid Mech., Vol. 268, p. 175-209, 1994.