

一般座標系による燃焼器内流れの数値解析 (第2報)

Large Eddy Simulation of Turbulent Flow in Combustor using Generalized Coordinates

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 and Masahiro IKEGAWA

1. はじめに

前報¹⁾において、LESによる燃焼器流れの有効性をより詳細に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流れに対する数値解析を行い、特に層流計算の結果を中心としてその幾つかの事例を述べた。本報では前報に続いて乱流の計算をさらに進行させ無次元時間 $T = 140.0$ まで計算を行い、燃焼器内乱流の流動様式と乱流挙動について詳細な検証を行ったので、その結果を示す。

2. 計算手法

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⁾。ただ、本計算の場合は急拡大部を持つ燃焼器の中に保炎器が設けられている割と複雑形状であり、取り上げる乱流現象としては衝突噴流と剥離流、循環流等が交わっている複雑な流れ場になっている。本計算では対流項に QUICK を導入することで計算の安定化を図った²⁾。数値計算は無次元時間 $T = 20.0$ までは時間刻みを $\Delta t = 0.001$ として計算を安定させた後、徐々に時間刻みをあげ本計算の時間刻みは $\Delta t = 0.005$ とした。計算は無次元時間 $T = 140.0$ まで進めて、乱流統計量として $T = 80.0 - 140.0$ の平均値を取った。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 5.1 min/step、VX の場合約 1.7 min/step であった。

3. 計算結果

図1には本計算の結果と実験結果を比較して示す。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。

*東京大学生産技術研究所 第2部

**日立製作所

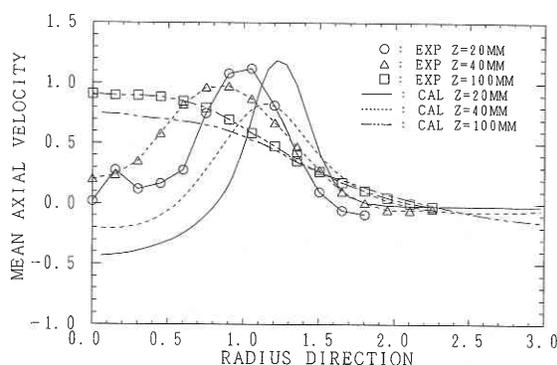


図1 主流方向の平均速度分布

実験結果と計算結果は定性的にはあうものものの実験の結果は保炎器背面から 20 mm 下流のところまで既に逆流領域が閉じて流れ場が回復していることに対して計算の結果は半幅約 $0.8R$ に至るまで逆流領域が存在する。また、 $Z = 40$ mm の計算結果にも半幅約 $0.5R$ までの逆流領域が存在する。

流れ場全体は実験結果に対して計算結果の場合が主流速度のピーク値が半径方向にずれていることと逆流領域が大きく存在することから計算の方が保炎器の後ろで流れ場がもっと広がって、逆流領域も大きくなる。その原因は実験の場合と計算の場合の保炎器の形状の違いによるものと思われる。実験の場合は保炎器の衝突面の角にエッジが設けられていることに対して計算の場合はエッジがないため、保炎器の後ろで流れ場がもっと広がって逆流領域も大きくなる。しかし、保炎器から随分離れたところである $Z = 100$ mm では計算結果と実験結果がよく一致していることがわかり、保炎器の形状を合わせれば定量的にもよい結果が得られると考えられる。

図2と図3には主流方向の平均速度分布、半径方向の平均速度分布、図4には周方向の平均速度分布を示した。シ

研 究 速 報

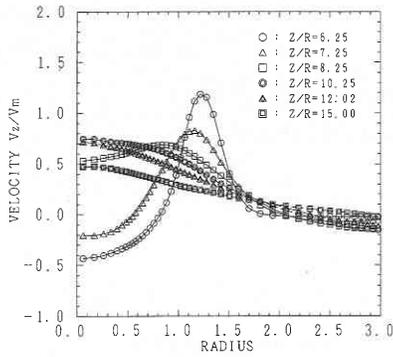


図2 主流方向の平均速度分布

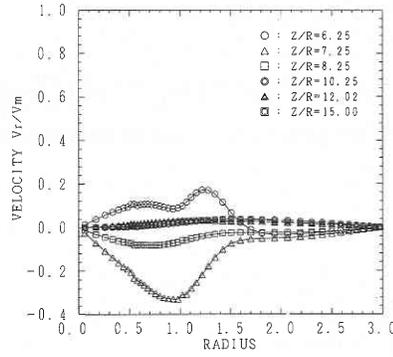


図3 半径方向の平均速度分布

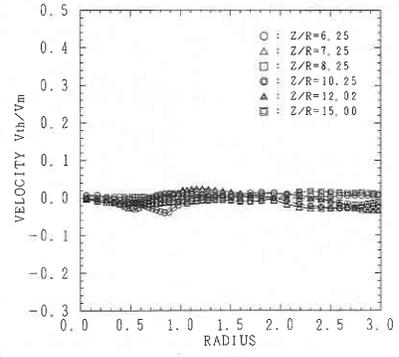


図4 周方向の平均速度分布

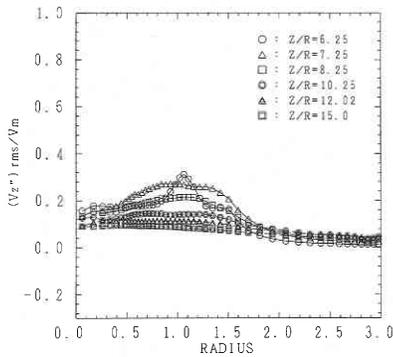


図5 主流方向の乱れ分布

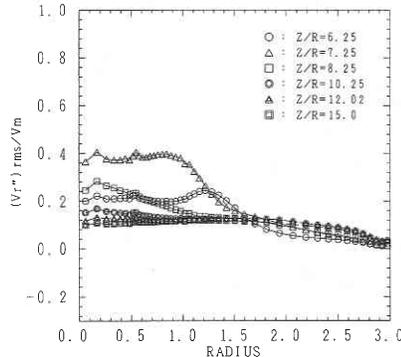


図6 半径方向の乱れ分布

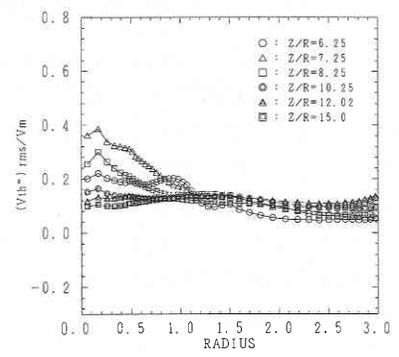


図7 周方向の乱れ分布

ンボル○で表示した $Z/R = 6.25$ の場合、主流方向の平均速度分布は半径 $1.2R$ のところでピーク値を持つことと軸中心部に半幅約 $0.8R$ に至るまで逆流領域が存在することがわかり、半径方向の平均速度分布が陽の値を持つことと対応付けて流れ場が保炎器の後ろで広がっている部分であることがわかる。それに対してシンボル△で表示した $Z/R = 7.25$ の場合は主流方向の速度分布に逆流領域は存在するもののそのピーク値が $Z/R = 6.25$ の場合より軸中心向きになっていることと半径方向の平均速度分布が陰の値を持っていることから流れ場が閉じている部分である。また、 $Z/R = 8.25$ 以下の下流の領域では逆流領域が完全に閉じて流れ場が徐々に回復している。今回の計算では入口条件として旋回のない速度分布を入口に与えたため、図4の周方向の平均速度分布がほぼゼロに近づいていることから本計算の結果は妥当であると判断される。

図5～図8には各方向の乱流強度分布とせん断応力分布を示す。主流方向の乱流強度分布は最もせん断が強い部分である保炎器後ろの高速領域とその内側の逆流領域との境界層である半径約 $1.0R$ のところでピーク値を持っている。半径方向、周方向の乱流強度分布とせん断応力分布に

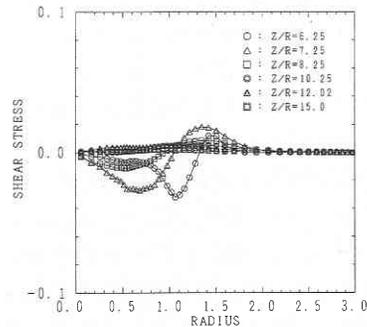


図8 せん断応力分布

も保炎器後ろの逆流領域でその値が大きくなっていることから、保炎器後ろの逆流領域で乱流混合が活発に行っていることがわかる。

図9は主流方向の瞬時速度分布のコンター図を示す。図中の実線のコンターは正值、波線のコンターは負値を示している。流れ場は保炎器によって広がって保炎器の背面には逆流領域が存在し、その大きさは図10の平均速度分布のコンター図によると距離約 $2R$ 、幅約 $1.8R$ である。壁付近にも逆流領域が見られ渦が壁に沿って流れている様子が見られる。図9の下の方の図は主流方向の3ヶ所（実験と合

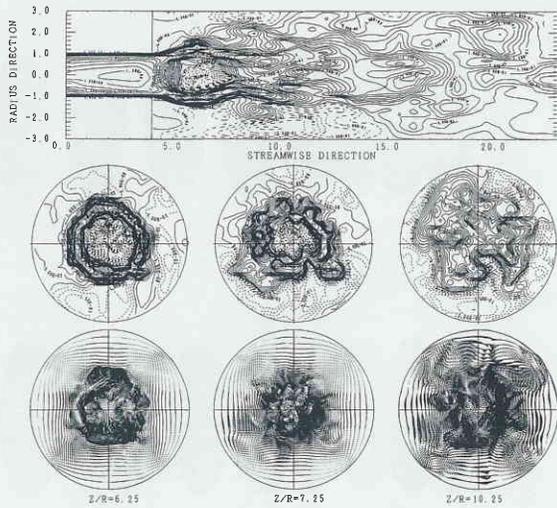


図9 瞬時速度分布図

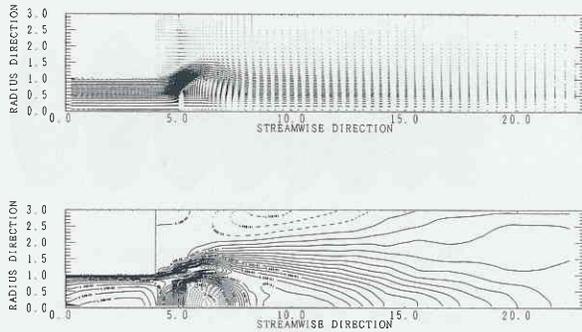


図10 平均速度分布図

わせた場所：保炎器背面から 20 mm, 40 mm, 100 mm 下流) での主流速度の断面コンター図と $r-\theta$ 方向の速度ベクトル図を示している。主流方向の速度分布は保炎器の直後で円形の高速度領域とその内側の逆流領域、また高速度領域の外側に低速領域が存在し、各々の境界面にせん断層が形成される。流れ場はその2つのせん断層の影響によって、特に逆流領域が存在する内側の強いせん断の影響を受け下流に行くのに連れ円形の形状が崩れて複雑な流れ場になっている。速度ベクトル図にも同様の現象が見られる。

写真1は瞬時の圧力分布と速度ベクトルを示す。圧力分布は保炎器の前面で高くなって、背面で低くなっている。速度ベクトルは主流方向に振動している様子が見られる。

写真2は主流方向の瞬時速度コンター分布を示す。保炎器の後ろで高速度領域とその内側の逆流領域、外側の低速領域が見られ、その速度勾配によって形成されるせん断の影響によって下流に行くのに連れ複雑な流れになっている様子が見られる。

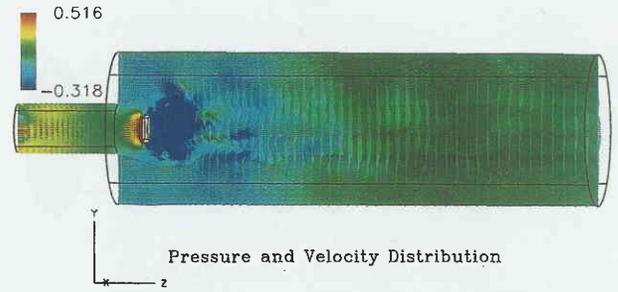


写真1 瞬時の圧力分布と速度ベクトル図

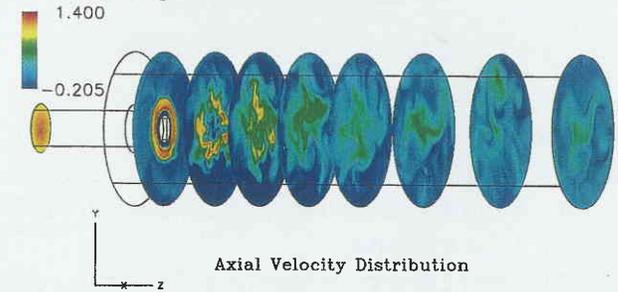
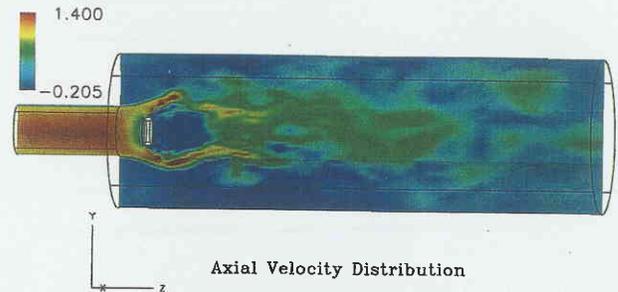


写真2 主流方向の瞬時速度コンター図

写真3は瞬時の渦強度分布を示す。保炎器の直後には逆流方向の回転を持つ2つのリング状の渦が形成され、特に逆流領域が存在する内側の方が強い強度を持っている。その2つのリング状の渦は下流に行くのに連れ崩れて複雑になることが観察できる。下の写真は渦強度分布の等値面を示している。保炎器背面に2つのリング状の渦が見られ、逆流領域が存在する内側からリング状の渦が崩れて縦渦に発達している様子が見られる。

写真4には各々の方向の渦分布を示している。X,Y方向の渦分布図から保炎器の後ろに逆方向を持つ2つのリング状の渦が発生し、そのリング状の渦は逆流領域でせん断の影響を受け崩れて弱くなる。それに対して流れ方向には逆流領域での強いせん断の影響を受け縦渦が発生し始め、下流側の流れ場はその縦渦が支配的になっている。

4. ま と め

一般座標系と円筒座標系を併用した複合座標系を用い、

研 究 速 報

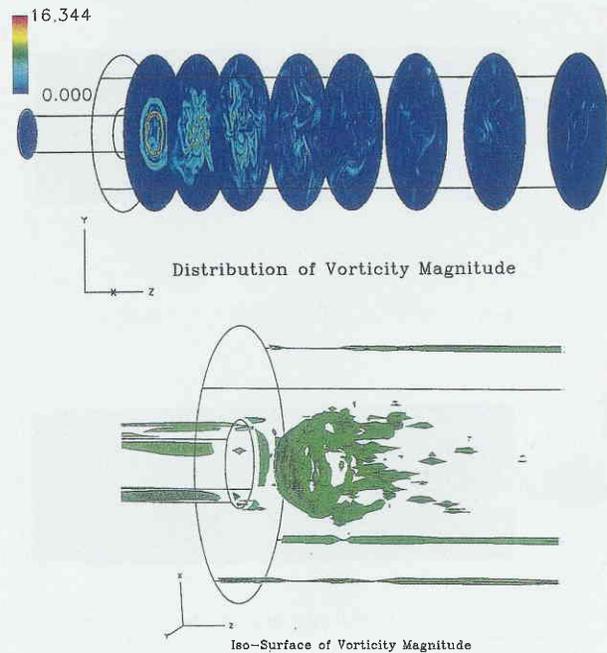


写真3 瞬時の渦強度分布のコンター図と等値面図

複雑な流れ場である燃焼器内乱流の数値計算を行った。主流方向の平均速度分布は実験結果と比較した結果、定性的には合うものの保炎器形状の違いによる保炎器後ろの逆流領域の大きさに差が現れた。

瞬時速度分布と渦強度の分布から、本計算で対象している予混合燃焼器内の乱流挙動は保炎器の後方において逆流領域と高速領域、その外側の低速領域の存在により逆方向の回転を持つ2つのリング状の渦が生成される。

その2つのリング状の渦は保炎器後ろのせん断が最も強い逆流領域から崩れて流れ方向の縦渦が発生し始め、下流側の流れ場には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

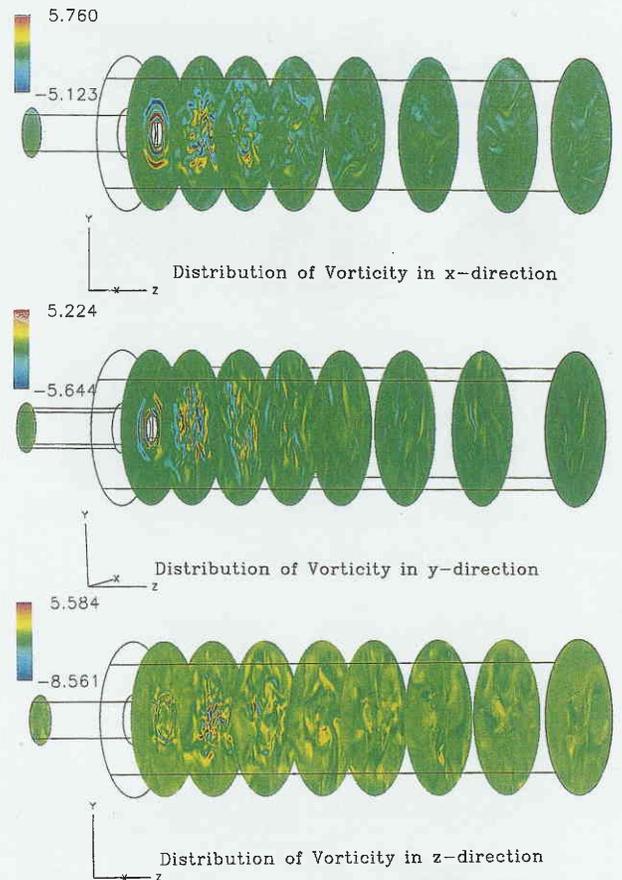


写真4 各方向の渦分布図

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。

(1998年7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) 石川正昭, '反変成分を用いた一般座標系による流れの数値解析', 東京大学修士論文, 1989.