

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 胡 暉 (HU Hui)

本論文は論文題目「Investigation on Lobed Jet Mixing Flows by Using PIV and LIF Techniques (和訳 粒子画像流速測定法(PIV)とレーザー誘起蛍光法(LIF)によるロブジェットミキシングに関する研究)」と題して、優れた混合促進能力を持ち広い範囲での応用が可能であるロブノズルから放出されたジェット混合流れ場について、レーザー誘起蛍光法(LIF)と粒子画像流速測定法(PIV)を用いて可視化し、濃度場、速度場と渦度場を計測したものである。近年、ロブジェット混合流れ場に関する広い範囲での研究が行われているが、本論文の研究はロブ混合流れ場における種々のスケールの渦、乱流構造の変化とそれらの相互作用の特徴を瞬時に、定量的に、全体的に表した初めての研究である。また本論文では速度場、渦度場、濃度場の測定データから、ロブジェットにおけるジェット混合の混合促進のメカニズムに対して考察を加えるとともに PIV 技術についてもいくつかの改善を行っている。

第1章では研究の動機、目的及び論文の構成が述べられている。ここで申請者は、近年行われたロブノズルに関する多くの研究活動の研究成果をまとめることにより、ロブノズルによる混合促進の流体力学的メカニズムをはっきりさせるためにはロブジェットの乱流構造の把握、特にその時間変化の把握が必要であることを述べている。

第2章では、本研究の光学計測技術であるレーザー誘起蛍光法と粒子画像流速測定法の基本的な概念と計測原理について述べられている。現在までに報告されている具体的な研究を例に挙げながら、これらの光学的計測手法の現状を検討している。

第3章では、レーザー誘起蛍光法と粒子画像流速測定法を用いて行った、液体を用いたロブジェット混合流れ場とその比較基準となる円筒ジェット流れ場の可視化、定量的計測およびその結果が詳しく述べられている。LIF と PIV による計測結果から、ロブジェットと円筒ジェットの混合流れ場とで渦と乱流構造に大きな相違が存在すること、ロブジェット混合流れ場では円筒ジェット流れ場に比べて、層流領域が短く、スパン方向の Kelvin-Helmholtz 渦のスケールが小さいこと、乱流への遷移が速く、小さいスケールの渦をもつ乱流構造が早く現れること、ノズル端口に近い領域でせん断層の成長が速く噴流中心速度の減衰が速いこと等を示し、ロブノズルが従来の円筒ノズルに比べ混合能力が強いことを定量的に明らかにしている。

第4章では、高解像度ステレオ PIV を用いてロブノズルと円筒ノズルからの空気ジェット混合流れ場の計測を行い、瞬時速度場と平均速度場を区別して抽出して求め、ロブジェット混合流れの三次元的特徴を明らかにしている。流れ方向渦の瞬時分布から、ロブノズルの幾何学的特徴により生成された大きいスケールの流れ方向の渦は小さい渦に分解されるが、分解された後の流れ方向渦の渦度は弱いことを示している。さらに、ロブ混合流れの混合プロセスにおけるロブノズルの全体効果の流れ方向平均渦場の分布より評価している。すなわち、流れ方向平均渦はノズル出口から流れ方向にノズル直径に等しい距離以内では半径方向に広がり、その後の領域では、小さくて弱い渦に分解される。この過程を流れ方向渦の形成—増強—分解過程と分類し、乱流の運動エネルギーの分布から、中心噴

流と周囲流体はノズル出口から直径の 2 倍に相当する距離以内で激しく混合すること、流れ方向平均渦の分解もこの領域で起こることを明らかにしている。これより下流の領域での乱流運動エネルギーの等高線分布は、円筒噴流でのノズル出口から遠く離れた領域の等高線分布と近似している。以上のことからロブノズルの特殊な幾何学的構造による混合の促進はノズル出口からノズル直径の 2 倍に相当する距離で基本的に終了し、ノズル出口から遠い領域での中心噴流と周囲流体の混合は円筒噴流と同じメカニズムにより起こると結論づけている。

第 5 章においては、二重平面ステレオ PIV システムと呼ばれる新型式の PIV システムを開発した。このシステムでは空間的に離れた二つの平面で流れの速度場（三方向速度成分）を同時に測定することができる。この同時計測は二組のダブルパルスの Nd:YAG レーザーに他の光学機器を付加し、二つの空間的に離れた平面で、二組の垂直偏光レーザー光線で流れ場を照らすことにより実現されている。偏光分離器により分離された後の二組の散乱光は二組の高解像度の CCD カメラで記録される。従来の PIV システムや単平面ステレオ PIV システムによる計測では渦度ベクトルの単方向成分しか得られないのに比べ、本研究で開発した二重平面ステレオ PIV システムでは渦度の三方向成分、及び流れ場の様々な自己相関関数と相互相関関数を瞬時に、同時に提供することが可能である。その二重平面 PIV システムの計測結果から、ロブジェット混合流におけるスパン方向の Kelvin-Helmholtz 渦とロブノズルにより生成された流れ方向渦間の相互作用を定量的に表すことに成功した。すなわちノズル出口から 1/4 直径に相当する距離までの範囲で、スパン方向の Kelvin-Helmholtz 渦巻チューブの形状はロブノズルの出口の形状と同じであり、この範囲でロブジェットの二次流れは大きなスケールの流れ方向渦を生成させる。この後、流れ方向渦との相互作用により、スパン方向の Kelvin-Helmholtz 渦巻チューブは pinch-off 構造に変形し、多くの小さい構造に分解される。その結果、中心噴流と周囲流体が激しく混合すると推論している。実験研究より得られた LIF 可視化情報と PIV 計測結果に基づき、ロブジェットについての混合促進のメカニズムを定量的に明らかにすることに成功している。

第 6 章においては全体の結論が述べられている。

以上を要約すると、ロブジェット混合流れ場に関して、本研究において新たに明らかになった特徴および提案した混合促進のメカニズムはこの分野の基礎研究と応用研究の両面において有用な資料である。開発した二重平面ステレオ PIV システムを用いて、速度ベクトルのほか、渦度ベクトルの三方向成分あるいは流れ場における種々の自己相関関数と相互相関関数を取得し、それらによって理工学における複雑乱流場における素過程と構造との間の干渉に関して新たな知見を与えており、工学の進展に寄与するところが大きい。よって、本研究は博士(工学)の学位請求論文として合格であると認められる。