

学位論文内容の要旨

北海道工業大学大学院工学研究科
機械システム工学専攻
博士後期課程
熱流体システム部門
申請者氏名 森 隼 人

噴流中の大規模渦と縦渦の干渉

噴流は工業分野で広く利用され、その利用例として燃料噴射装置、化学反応装置、排気装置、空調機器、エアカーテンなどがある。燃料噴射においては、自動車などの低燃費・低公害化を推し進めるために、高度な空気・燃料混合制御が要求されている。さらに大量の燃料を消費する航空機などでは、低燃費化は重要な課題である。化学反応装置においては、噴流の混合作用を利用するので、その性能は噴流特性に支配される。工場からの排気においては、周囲環境への配慮から排気の拡散特性が重要な課題となっている。空調機器においては、室内温度分布などが問題となるが、これらの性能は冷暖気噴出口からの噴流特性に影響される。エアカーテンは、熱および塵埃を遮断するために、建物、クリーンルーム、冷蔵室などの出入口に設けられているが、その性能は噴流特性に強く依存している。以上の例では、噴流の混合・拡散特性が問題となるので、その特性を十分に理解して噴流を利用することにより、各種機器の性能を向上させることが期待できる。

また、噴流では騒音が問題となる場合がある。具体例としては、航空機用ジェットエンジン、各種ノズル、各種弁などがある。これらの装置から発生する噴流騒音は、騒音公害や作業環境悪化につながることから、その低減化が強く望まれているが、噴流の混合促進が騒音低減に有効であることが従来の研究により指摘されている。

噴流に関する近年の研究により、噴流中には組織的な大規模渦が存在し、この大規模渦が噴流の特性を支配していることが明らかになってきた。また、噴流には、大規模渦の発達に伴って流れ方向に軸をもつ縦渦が発生し、この縦渦も噴流特性に重要な影響を及ぼすことが指摘されている。したがって、これらの渦の挙動を解明し制御することができれば、噴流の利用効率は著しく向上することが期待できる。

実際に利用されている噴流の噴出口形状は円形とスリット（細長い長方形）の場合が多いので、本研究では円形噴流（軸対称噴流）と二次元噴流を取り扱っている。円形噴流に関する従来の研究により、噴流中には周期的な大規模渦輪列が発生することが知られている。この渦輪の形状は発生時には噴出口形状に対応しているが、下流では縦渦と干渉し三次元的に変形する。この干渉・変形過程は混合促進や騒音低減に効果的であることが近年の研究により示唆され注目されているが、その詳細については不明な点が多い。二次元噴流についても、円形噴流の場合と類似した渦構造が存在することが実験および数値解析により示されているが、縦渦と大規模渦の干渉・変形機構については全く不明である。

上述の渦構造を解明するために、様々な手法による研究が行われている。実験的研究では、速度場または圧力場を測定して渦度分布または圧力分布により渦構造を抽出する手法が用いられているが、従来の研究では流れ場の点測定が多く、渦構造の詳細をとらえることは困難である。とくに、空間的に様々な方向に渦度の軸を持った渦構造の把握は容易ではない。また、近年急速に発展している PIV（粒子画像流速計）により面測定が可能になってきたが、三次元渦構造を捕えることはまだ不可能である。近年活発に用いられている数値計算は、実験的解析では困難な物理量の情報が得やすいなどの利点もあるが、現実的な三次元流れ条件での詳細な解析を行う場合、計算機の計算速度・容量の観点

から負担が大きく、多くの研究者は空間発展する現象を時間発展型に置き換えた解析や、流体支配方程式をモデル化して計算を行っており、現状では現実的な解を得ることは困難である。これらの手法に対し、視覚的に容易に構造を把握できる可視化法は渦挙動を解析する上で有用であり、とくに渦構造の三次元変形などの複雑な構造を把握するのに適した手法である。

本論文では、縦渦を含む三次元渦構造の詳細を明らかにするために、水噴流の可視化と空気噴流の速度測定により、実験的に渦構造の干渉・変形過程を検討した。また、可視化画像および速度場により噴流の混合状態も定量的に評価した。

第1章では、本研究の背景である乱流現象と渦構造について概観し、本研究の工学的意義および研究目的について述べている。

第2章では、軸対称噴流の実験方法、可視化画像の処理方法、実験結果と考察を述べている。

実験は水槽で行われ、ノズル噴出口には、自然状態で発生する縦渦を強調し安定化するために、6つの渦発生突起を取り付けた。軸対称渦輪の発生も促進するために、上流の励起装置により噴流を励起した。したがって、噴流中に周期的な渦挙動を発生させて実験を行った。噴流の可視化には、蛍光染料とレーザーライトシートを用い、噴流の断面可視化画像をビデオカメラに記録しコンピュータにより画像を処理した。また、噴流の混合を定量的に評価するために、熱膜流速計により速度測定も行った。

本章で得られた研究成果は以下のように要約される。

(1) 可視化画像をコンピュータにより処理することにより、噴流境界面積を求め、噴流の混合特性を検討し、軸対称渦と縦渦の生成が混合を著しく増大することを示した。また、噴流境界形状の複雑さを評価するために、フラクタル次元による検討も行った。

(2) 可視化画像にTaylorの凍結仮説を適用することにより噴流境界面の三次元画像を構築し、三次元渦構造の詳細を明らかにした。また、従来不明であった軸対称渦輪と縦渦の干渉・変形機構を渦力学モデルにより解析した。

(3) 速度測定により、速度変動のスペクトル分布から噴流中の渦挙動の特性を明らかにし、噴流混合度合いを示すエントレンメント率を検討した。その結果、縦渦の生成は周囲流体の巻き込み量を著しく増大することを定量的に示した。

第3章では、二次元噴流の実験方法、実験結果と考察を述べている。

実験は、風洞出口に取り付けた二次元ノズル噴出口に複数の渦発生突起を取り付けて行った。また、二次元ノズル出口近傍に取り付けられたスピーカからの音波により噴流を励起し、噴流中に周期的渦構造を生成した。速度測定では、X型熱線プローブの向きを変えることにより3方向の速度成分をコンピュータに記録した。測定データを位相平均処理することにより、3方向の渦度成分の時空間分布を求め、エンストロフィの時空間画像から渦の干渉・変形挙動を詳細に検討し、第2章で提案した渦力学モデルが二次元噴流でも適用できることを立証した。

第4章は結論であり、本研究で明らかにされた噴流中の軸対称渦輪および大規模渦と縦渦の干渉・変形機構、および渦挙動と混合機構との関連性を要約している。

本研究により、噴流中の三次元渦挙動の詳細、特に従来不明であった軸対称渦輪と縦渦の干渉・変形機構、が渦力学モデルにより明らかになり、さらに噴流の混合・拡散を増大させる渦操作法についても、工学的および工業的に有用な基礎資料を得た。