

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

熱流体システム工学部門

申請者氏名

平元 理峰

噴流中の渦構造と拡散促進機構および

流力音発生機構に関する研究

乱流は強い非線形性を有し、不規則で三次元的な挙動のために統計的な取り扱いが余儀なくされてきた。1960年代後半から、乱流中に組織的な構造が含まれることが知られるようになり、その挙動が流れ特性を強く特徴づけることから「大規模渦構造」として今日の乱流理解のための重要な概念となっている。乱流の代表例である噴流は工業分野で広く用いられており、例えば内燃機関における燃料の拡散・混合、ジェットエンジンの推力・騒音、化学反応設備における拡散・混合、空調設備における気流の拡散などの性能は、噴流の特性に支配されている。噴流の特性は大規模渦構造の挙動により特徴づけられると考えられるので、噴流中に生成する大規模渦構造を操作することによる拡散・混合特性の制御が注目されている。この操作手法が開発されることにより関連の機械の性能が向上し、エネルギー・環境問題の改善にも大きな貢献が期待される。

噴流中の渦構造を操作する手法として、非円形噴流の利用が注目されている。非円形噴流中で形成される渦は、周方向の非一様曲率の自己誘起速度効果により、三次元的に変形することが知られている。とくに、適度な攪乱を与えたアスペクト比4の長方形噴流では渦の生成が促進され、長方形渦輪が噴出口の短軸方向に著しく拡がるのが可視化法により示され、短軸側の領域で噴流断面積および噴流流量が著しく増大することが平均速度分布から明らかにされている。このように三次元渦構造の挙動が長方形噴流の拡散を促進すると考えられるが、渦挙動と拡散機構の関連性については不明な点が多く残されている。この機構の詳細を明らかにするためには、流れ中の三次元渦構造を検出し、その変形・干渉・合体・分裂挙動の特性を理解することが必要である。従来の流れの可視化法や熱線流速計による速度測定では、三次元渦構造の検出が難しいため、二次元および軸対称を仮定した渦構造にその適用が限定されており、複雑な三次元渦挙動を検出する手法の開発が強く望まれている。

近年、北海道工業大学において、乱流中の変動圧力を精度よく測定することができる圧力プローブが開発され、三次元渦構造検出の新しい手法として期待されている。渦構造の存在領域では圧力が降下する性質があり、スカラ量である圧力の測定は三次元渦構造の検出に有効である。本研究では、アスペクト比4の長方形噴流中の三次元渦構造の検出に圧力プローブを適用し、渦構造の変形・干渉・合体・分裂挙動を検討した。

流体機械および輸送システムの高速度に伴い、流れから発生する騒音が重大な環境問題となっている。流れと関係する系から発生する音を総じて流力音と呼び、流れ中の乱れがその発生原因とされてきたが、その詳しい機構はわかっていない。流力音発生理論として、流れ中の渦挙動が音源であるとするPowell-Howeの渦音理論が広く支持され、乱流中の大規模渦構造の挙動が強い音を発生すると考えられている。渦音理論を実験により直接検討するには、渦度測定に

よる渦構造，とくに三次元渦構造，の検出が必要となるが，上述したように流れ中の三次元渦構造の検出は難しく，音源となる渦挙動も明らかにされていない．一方，Ribnerの提案する流体力音発生理論では，流れ中の圧力変動の時間に関する二階微分が音源項であり，上述の圧力プローブによる変動圧力測定により音源項の検出が可能となる．したがって，変動圧力測定によって渦構造と音源項を同時に検出し，その関連性を検討することが可能であり，これにより渦音理論を実験的に検証することができる．

本論文では，拡散促進が期待されるアスペクト比4の長方形噴流に注目し，Ⅰ部では，その渦構造と拡散機構の関連性を明らかにし，Ⅱ部では，渦構造と音源項の関連性を考察し，噴流騒音の発生機構に関して新たな知見を得た．

Ⅰ部とⅡ部はそれぞれ5つの章から構成されており，以下に各章の内容を述べる．

Ⅰ部の第1章では，乱流現象を理解する上で重要となる大規模渦構造に関する研究および円形噴流の研究を概観し，本研究の目的および意義について述べている．

第2章では，流れ場を作り出す実験装置，変動圧力測定に用いる圧力プローブの構造およびその特性，速度計測装置，実験方法および条件抽出法について述べている．

第3章では，まず流れ中の圧力場と渦度の関係および変動圧力測定による流れ中の渦構造の検出法を説明し，つぎに変動圧力測定により長方形噴流中の三次元渦構造を検出し，その変形・干渉・合体・分裂挙動を明らかにしている．とくに，従来不明であった長方形噴流の短軸方向への著しい拡散や，長軸方向の平均速度分布に現れる鞍形の分布が，渦構造の三次元挙動によって引き起こされている機構を明らかにした．また，渦の分裂・合体挙動に重要な機構である「渦のつなぎ替え」過程を実験によって初めて検出し，その詳細を明らかにした．

第4章では，長方形噴流場の詳細な速度測定によって拡散特性を定量的に検討し，噴流の拡散促進手法としての長方形噴流利用の有効性を明らかにしている．また，速度場と三次元渦構造の関連性を明らかにすることにより，長方形噴流の拡散促進が三次元渦構造の挙動によることを明らかにしている．

第5章はⅠ部の結言であり，長方形噴流中の三次元渦構造の挙動および拡散促進機構についての研究成果を要約している．

Ⅱ部の第6章では，渦構造の挙動を音源と考える渦音理論を中心とした研究を概観し，本研究の目的および意義について述べている．

第7章では，圧力変動の時間に関する二階微分を音源項とするRibnerの理論を説明し，変動圧力測定によって渦構造と音源項を同時に検出・検討する考え方を述べている．

第8章では，長方形噴流中の変動圧力測定からRibnerの式の音源項を求め，三次元渦構造の挙動との関連性を検討している．とくに，渦のつなぎ替えは急激な圧力変化を伴い，強い音源となることを示している．また，測定された変動圧力から放射される流力音を計算し，その放射特性と音源の位置を検討している．

第9章では，円形噴流中の変動圧力測定からRibnerの式の音源項を求め，渦構造の挙動との関連性を検討している．音源項は渦構造の加速度運動時に急激に強さを変えることが示され，また，計算された流力音の周波数の検討から，音源が上流のせん断層の領域にあることが推測された．

第10章はⅡ部の結言であり，Ⅱ部で明らかにされた音源となる渦挙動についての研究成果を要約している．

総括では，本研究で得られた成果を総括している．

本研究により，長方形噴流中の複雑な三次元渦構造が変動圧力測定により明らかにされ，三次元渦構造と速度場の関連性の詳細な検討により拡散促進機構が解明された．これにより，噴流拡散が渦操作により著しく促進されることが示され，工学的に有用な知見が得られた．また，変動圧力測定により噴流中の渦構造と音源を初めて同時に直接検出し，その関連性を明らかにするとともに，音源と考えられる渦挙動を提案し，変動圧力測定による新しい流力音解析法の有効性を示した．