

Title	直接シミュレーションによる円形噴流の崩壊過程の解析
Author(s)	竹内, 伸太郎
Citation	大阪大学, 2001, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/42370
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について <a>〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	たけうち しんたろう 竹内伸太郎
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	第 16211 号
学位授与年月日	平成13年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科機械物理工学専攻
学位論文名	直接シミュレーションによる円形噴流の崩壊過程の解析
論文審査委員	(主査) 教授 三宅 裕 (副査) 教授 辻 裕 教授 中村喜代次 助教授 梶島 岳夫

論文内容の要旨

噴流は各種の機械システム、工業装置に多く見られる現象であり、噴流における混合の最適化あるいは乱流騒音の低減などは重要な工学的課題である。本論文は、もっとも基礎的な形態である円形ノズルから無限空間への円形噴流を扱い、直接数値シミュレーションに基づいて空間発展の機構を明らかにしている。数値シミュレーションによって得られた円形噴流に対して、ウェーブレット変換、直交固有分解法ならびに全体安定性解析を適用し、渦輪が発生する第一次不安定、そのブレード部に縦渦を形成する第二次不安定を経て乱流に遷移する過程を明らかにしている。本論文は全5章から構成されており、内容は以下のように要約できる。

第1章では、本研究の背景、および円形噴流に関する従来の研究成果について示し、研究の目的と意義を述べている。

第2章では、空間発展型円形噴流の非定常数値解法ならびに数値解析結果について述べている。円筒座標系における中心軸での特異性の問題を解消し、適切な境界条件と高精度離散化手法を導入して円形噴流を再現し、従来の測定結果ならびに数値シミュレーションの結果と比較して計算方法の妥当性を示している。また、線形安定性解析を適用した結果、第一次不安定として発生する渦輪の間隔は予測可能であること、ランダム擾乱の強度に対して鈍感であり、さらに選択的な波数受容性を持つことを示している。

第3章では、フィルタリングを通して乱流遷移領域における組織的な渦構造の解析を行った結果を述べている。ウェーブレット変換によるブレード部の縦渦の構造解析により、縦渦は周方向に偏在した様々なモードの波から構成されており、擾乱が周方向で非一様に受容されていることを明らかにしている。一方、直交固有分解法を用いて乱流遷移域における大規模渦構造を可視化し、縦渦によって乱された渦構造が乱流渦中に大きなエネルギー領域を形成していることを見いだしている。

第4章では、全体安定性解析の手法を用いて第二次不安定過程の擾乱受容性の解析を行った結果を述べている。まず、第二次不安定性の固有値はほぼ連続なスペクトル分布で、対応する不安定モードの時間発展は第二次不安定の範囲で線形的であることを示している。不安定モードの強度分布が周方向の擾乱受容性に対応し、固有値実部の差に関わらず低位から高位まで様々なモードが受容されていることがわかり、第二次不安定過程の多様な擾乱受容性と縦渦の局所集中の機構が解明されている。一方、空間発展の統計量には、第二次不安定に由来する変動よりもノズル出口における初期乱れの方が顕著な影響を与えることを見いだしている。

第5章では、本研究によって得られた成果を総括している。

論文審査の結果の要旨

噴流における渦輪の発達から崩壊に至る過程の研究は、自然界あるいは工業装置における流動現象の解明とともに、燃焼や化学反応に伴う熱および物質移動、ジェット騒音の低減などを目的とする乱流制御技術の確立においても有意義である。近年、流れの数値シミュレーションの技術は空間発展型の乱流を代表例とする複雑な乱流現象の解明を重要な目的のひとつとして急速に進歩しており、超並列スーパーコンピューターがこの分野の研究の進展に大きく寄与しつつある。噴流においても、数値シミュレーションによる現象解明の試みは従来から数多く見受けられる。しかし、もっとも基本的な形態である円形断面ノズルから無限空間への噴流に対しても、離散化誤差や境界条件の影響が顕著に現れており、現象の解明は十分ではない。また、実験においてもノズルからの速度分布と乱れ、遠方の境界条件によって噴流の発達過程のデータは大きくばらついており、普遍的な理解が得られていない。したがって、噴流現象を解明する目的のためには、より大規模で精度の高い数値計算法とともに素過程に立脚した新たな現象解析手法が望まれるところである。

本研究は、以上のような背景から、円形噴流に対する大規模な直接数値計算の結果に基づいて流れの構造を明らかにしている。まず、ウェーブレット変換や直交固有分解法によって渦構造の詳細な解析を行い、大規模数値シミュレーションを援用した全体安定性解析法を取り入れて乱流遷移の先駆けとなる第二次不安定の機構を示し、いくつかの重要な結果を得ている。本研究の成果は以下のように要約される。

- (1)円形噴流に対して、空間発展および非定常の条件で高解像度かつ高精度な大規模直接数値シミュレーションを行い、近似境界条件や乱流モデルに影響された従来の数値計算に比べ、最も信頼性の高いデータベースを構築し、渦輪の発生、崩壊から乱流遷移までの過程を精度よく再現し、円形噴流の空間発展を支配する諸因子の影響を明らかにしている。
- (2)せん断層の第一次不安定によって生じた渦輪に対して、第二次不安定、すなわち渦輪のブレイド部における縦渦群の発生が円形噴流の乱流遷移に深く関わっていることを示し、渦輪構造崩壊の引き金となるブレイド部の縦渦の性質、すなわち周方向の非一様性および多様な擾乱受容機構を明らかにしている。
- (3)ウェーブレット変換法によって渦輪の崩壊と噴流の空間発展の関係について明らかにするとともに、直交固有分解法により乱流遷移後にも大きなエネルギーを保有する組織的な渦構造を抽出し、噴流現象に及ぼす第二次不安定の役割を解明している。
- (4)大規模数値計算を活用した全体安定性解析を適用し、第二次不安定の擾乱受容性の解析を行い、支配的な固有値をもたないこと、第二次不安定の範囲では線形的に発展することを明らかにし、円形噴流の空間発展には初期擾乱の影響が顕著に表れることを示している。

以上のように、本論文は、円形噴流に対する空間発展型の高精度数値計算を実現し、噴流の発達において第二次不安定が大きな寄与をもっていることを示し、さらに新しい解析手法によって第二次不安定の機構と擾乱受容性を明らかにしており、噴流の制御に不可欠な物理現象を解明している。これらの成果は流体力学に新しい知見を与えるものであり、機械工学の発展に大きく寄与している。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。