

学 位 論 文 題 名

3次元離散渦法による渦運動の数値解析

学位論文内容の要旨

われわれの周辺に起きている流体现象の大部分は乱流である。身近な乱流現象の例として、地球上の大気の循環にともなう気象の変化、あるいは航空機に代表される工学的諸装置に関連する内部流れ、外部流れがあげられる。

乱流は、“不規則な変動を伴う無秩序な流体運動”と定義される。しかし、例えば、高レイノルズ数における噴流および自由混合層中の渦構造の可視化結果を見ても明らかなように、全く規則性の無いようにみえる乱流中に、実際には様々な大きさを持つ多数の渦が混在している。このことから、乱流を“大小無数の渦の集合”と解釈することが可能である。渦を乱流の基本構成要素とする観点にたつと、一見乱雑で捕らえどころのない無秩序な乱流現象を“大小様々な強さとスケールを持つ渦の運動と、それらの渦の相互干渉”として捕らえることができる。このことによって多種多様な乱流現象に共通した普遍的な渦構造、換言すれば、普遍的な乱流モデルの構築に寄与できると期待される。

渦が作られるためには空間的速度差（速度勾配）が必要である。速度勾配が大きい流れとしてせん断乱流（後流、噴流、自由混合層、境界層）があげられる。一様流中でこれらのせん断乱流ができる要因となるのは、密度の一様な流れ場を仮定すると、物体の壁の存在である。さらに物体に作用する流体力および物体表面の圧力変動に関連して、物体に衝突する渦、物体から放出される渦など、物体とその近傍に存在する渦の関係を調べることは重要である。このように、乱流現象は渦と渦の干渉および渦と物体の干渉の2つに分類することができる。

ニュートン流体の流れ場では、流体の運動は Navier-Stokes 方程式によって記述される。この方程式を解析的に解くことができれば、実験的に求めることが困難な任意の時刻・位置における速度と圧力の情報を得ることができる。しかし、Navier-Stokes 方程式は非線形な慣性項を含むため、解析的な解が得られるのは、この項を無視できるか線形近似できる流れ、例えば流速が遅く定常で境界条件が単純な場合に限定される。そのため、この方程式の解を得ようとする

数値的手法に頼らざるをえない。微分方程式の数値解法の中でその結果を最も信頼できるのは、モデルを一切取り入れずに直接的に差分法で解く方法である。しかしこの方法による場合、レイノルズ数が大きいと、特に物体近傍で多くの格子点を必要とするため、計算時間は実際に実行不可能なほど膨大なものになる。そこで高レイノルズ数の計算をする場合には、乱流モデルによって微細な渦の流れ場に対する影響を定式化し、Navier-Stokes 方程式に組み込み、空間格子および時間間隔をある程度粗く取るようにする。現在でも数多くの乱流モデルが提案されているが、その普遍性に問題があることが指摘されている。普遍性のある乱流モデル構築のためには、第一段階として簡単な乱流について解析し、理解することが必要である。

本研究は、乱流を渦の集合体として捕らえ、乱流の基本構成要素を考えられる渦と渦の相互干渉を3次元離散渦法によって数値解析したものである。

第1章では、関連する従来の研究の概説、本研究の背景、本論文の目的、特徴、流体工学的意義について述べた。

第2章では、本研究で採用した3次元離散渦法について記述した。離散渦法は、1931年にRosenheadによって始められた計算方法である。その後、この方法は主に2次元流れの計算に用いられてきたが、1976年にLeonardによって3次元計算への拡張が行われた。3次元離散渦法は、流れ場の中で渦度が存在する領域を分割して渦要素で近似し、渦要素の移動および変形（伸縮、回転）を、それぞれBoit-Savartの法則および渦度方程式によってラグランジュ的に計算する方法である。渦の相互作用を数値解析する場合には、渦度が存在する領域のみを計算対象とする離散渦法が、渦度の存在しない領域も計算対象とする差分法および有限要素法に代表される領域型解法よりも、一般にデータ数および計算時間の節約ができる点で有利である。さらに、コーディングが簡単であること、並列計算に向いていることなどの利点がある。しかしその反面、3次元計算の場合には渦度の発散が起これ以後の計算ができなくなる問題点をもつ。本研究の離散渦法の特徴の一つは、乱流を特徴づけるエネルギースペクトル、エントロフィスペクトル、ヘリシティ、全渦度、運動量、角運動量の物理量を容易に計算できる点である。

第3章では、渦の相互干渉の代表的な例として、円形渦輪と直線渦糸、複数の円形渦輪の相互干渉に対する計算結果とこれについての考察を行なった。円形渦輪は、乱流を構成する基本要素であると考えられるからである。直線渦糸は円形渦輪の半径を無限大にしたものとみなせる。円形渦輪と直線渦糸の相互干渉には両者の相対位置によって4つのモードの存在が明らかになった。さらに、並進する2つの円形渦輪の相互干渉の解析を行い、渦のつなぎ換えにおけるBridging過程についても考察も行なった。また、初期状態において正多面体上に配置され

た4～8個の渦輪の相互干渉では、そのエネルギスペクトルにKolmogorovの $5/3$ 乗則に近いスペクトルが現れることを示した。

第4章では、非円形噴流の軸の回転および分岐に関連して、非円形渦輪の時間発展に対する計算結果を示した。非円形渦輪として採用した渦輪は、長方形の短辺を半円で置き換えた擬楕円渦輪である。この渦輪の長軸と短軸の比を系統的に変化させて計算を行った結果、その変形には4つの基本的な変形パターンがあることがわかった。さらに、擬楕円渦輪を多数の渦管の集合で表現した場合の計算結果も示した。

第3章と第4章では、渦輪を中心とする比較的簡単な渦運動を伴う乱流について考察したので、第5章では、一様流中に様々な迎え角($90^\circ \sim 45^\circ$)をもって置かれた円板まわりの流れに対する数値解析を行った。離散渦法を物体周りの流れに適用した例は多いが、そのほとんどは2次元流れの計算である。3次元物体周りの流れの離散渦法による計算は、一様流中に垂直に置かれた円板周りの流れのみである。離散渦法に類似した渦糸法による計算を含めても、球のまわりの流れあるいは自由混合層に適用された報告があるのみでその応用例は多くない。ここでは、計算結果に基づいてフローパターン、時間平均速度分布、レイノルズ垂直応力およびレイノルズせん断応力に関する考察を行った。

第6章では、本研究で得られた主な結論を要約している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	木谷	勝
副査	教授	谷口	博
副査	教授	飯田	誠一
副査	教授	板倉	忠興
副査	教授	井上	良紀

乱流現象の解明と予測は流体工学における最も重要な課題の一つである。乱流は多数の渦の複雑な相互作用の結果であると考えることができる。本論文は、この観点にたって渦の相互作用を数値的に解析し、基本的な乱流の渦構造と統計量を求めたものであり、6章からなっている。

第1章は序論であり、乱流現象の工学的重要性、乱流の数値解析に関する従来の研究を概説し、

本論文の目的、意義および構成について述べている。

第2章では、本論文の数値解析に用いた離散渦法について述べている。離散渦法は渦度の分布する領域を多数の渦要素に分割し、各渦要素の位置と渦度をラグランジュ的に計算する方法である。これには渦要素の構成、近接する渦要素の取り扱いなどに関連して、いくつかの異なる方法が提案されている。著者はこれらを比較検討し、適切なものとして渦ブロップ法を採用することを述べ、その基礎式の導出を行っている。乱流の研究ではエネルギー、エントロフィー、ヘリシティおよびこれらのスペクトルが重要である。本章では渦ブロップ法の基礎式に基づいて、これらの基本的諸量を渦要素の位置と渦度の関数として解析的に表現しうることをはじめて明らかにした。これは離散渦法の乱流解析への応用における重要な貢献である。

第3章では、まず渦ブロップ法による計算精度を検討し、十分な精度を得るために必要な渦要素の大きさ・個数、渦要素のまわりの渦度分布の重なり、などを明らかにしている。この結果に基づいて円形渦輪と直線渦糸の相互作用を解析し、両者の初期配置に依存する四つの基本的パターンがあることを示した。これは速度の異なる二つの流れが合流するときに形成される自由混合層に対する主流乱れの効果を理解するための有益な知識を与えている。本章では渦の継ぎ換えの際に発生する特徴的な現象が、渦ブロップ法で表現できることがはじめて明らかにされている。さらに本章では、正 n 面体($n=4, 6, 8$)の表面上に配置された n 個の円形渦輪の相互作用を解析し、相互作用によって空間的スケールの小さい変形が発生した段階で、エネルギースペクトルに広い波数範囲にわたってコルモゴロフ・スペクトルが現われることを示している。コルモゴロフ・スペクトルはレイノルズ数の高い乱流の普遍的法則である。この法則が比較的少数の円形渦輪の相互作用によって実現されることを示したことは、本論文の特に重要な貢献である。

第4章では、非円形渦輪の変形過程に対する計算結果を示している。最近、非円形ノズルからの乱流噴流は同一の面積をもつ円形ノズルからの噴流に比較して、より大きな拡大率と周囲流体との混合速度をもつことが明らかになりつつある。本章の数値解析はこの機構を非円形ノズルのすぐ下流に形成されたノズルと同一形状の非円形渦輪の変形過程を調べることによって解明することを目的としている。非円形渦輪としては、二つの平行な線分の両端をそれぞれ半円で結んだ中心線をもつ渦輪が採用されている。数値解析結果はこの非円形渦輪にはアスペクト比(長軸と短軸の比)によってつぎの4種類の基本的な変形のパターンがあることを示している：(i)渦輪の長軸と短軸が周期的に切り換わる；(ii)1回の軸の切り換わりのあとで2個の渦輪に分裂する；(iii)軸の切り換わりなしに2個の渦輪に分裂し再結合をして1個の渦輪になる；(iv)軸の切り換わりなしに3個の渦輪に分裂する。(i)、(ii)および(iii)の現象は実験によっても確

認されており，とくに（i）および（ii）における軸の切り換わり周期および分裂時間は実験結果とよく一致している。さらに，（i）および（ii）の現象は，楕円ノズルからの噴流においても実験的に確認されているものであり，本章の結果は非円形噴流の乱流構造解明の上で極めて有用である。

第5章では，3次元離散渦法のより複雑な流れへの適用性を確認することを目的として，流れの中におかれた円板の後流に対する数値解析を行っている。円板の迎角を種々に変化させて計算を行い，後流中の渦要素，渦度，レイノルズ応力などの分布を明らかにしている。流れと垂直におかれた円板の後流にはらせん形の渦構造のあることが実験的に知られていたが，これは本計算で明確に再現されている。また迎角が 45° の円板のすぐ下流に，互いに反対方向に回転する一対の縦渦が形成されることも明らかにされている。これらの結果は渦ブロップ法の多様な工学的問題への応用性を示唆したものであり，高く評価される。

第6章は結論であり，本論文の結果を要約している。

以上を要するに，本論文は乱流中の渦構造の変形過程およびこれにともなう乱流特性の解明と予測を行うための3次元離散渦法の有用性を確立したもので，流体力学上寄与するところ大なるものがある。よって著者は，博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。