

学位論文題名

Vortex Method Simulations of Unsteady Vortical Flows

(渦法による非定常渦流れの数値シミュレーション)

学位論文内容の要旨

高レイノルズ数の流れや乱流においては、流体運動は渦力学によって特徴づけられる。翼などの物体周りの流れでは大規模なはく離が起こることがあり、このようなはく離領域では、渦度の生成、放出、拡散が絶え間なく行われている。物体壁面で生成された渦度は、相互作用によって下流域で乱流を生み出す。流れ場に境界がない場合でも、渦度は Kelvin-Helmholtz 不安定によって微小な速度変動から生成され、この渦度場によって乱流が生み出される。

乱流は位相相関のある組織的な流体運動と、位相が無秩序な流体運動の2つの要素から構成されている。前者の要素のうち、特に大規模なスケールのもを、コヒーレント構造とよぶ。渦輪やロール、らせん構造、ストリーク、ヘアピン渦などは、その一例である。これらの渦は、乱流の間欠性や熱輸送、ノイズの生成などに密接に関係している。一方、後者の要素は、特に発達した流れ場において大きな役割を果たしている。いずれにせよ、位相相関の有無に関わらず、これらの渦構造は乱流運動に密接に関わっている。

渦法は、渦度をもつ流体粒子をラグランジュ的に追跡することによって、渦度のある領域の運動を計算する方法である。時間平均型の乱流モデルや差分型LESモデルでは、非定常乱流の計算に Navier-Stokes 方程式の時間平均を取らねばならないのに比べて、渦法では、Biot-Savart 則によって時々刻々の流体運動を直接に計算することができる。それに加え、格子依存性のある解法では、計算格子の生成にかなりの時間とコストがかかるうえ、多大な計算時間が要求される。この点、渦法は渦構造の発達過程を直接に計算できるので乱流の数値解析に有効であり、解析に要求される解像度に応じてスキームの精度を幅広く選択することができるため、計算コストの点からも幅広い工学的応用が期待できる。

渦法の非定常流れへの適用は、様々な分野で進められている。2次元流れでは、主流と同一方向に強制振動する円柱周りの流れ、回転円柱および剛性支持された円柱周りの流れ、渦室内で回転する羽根車を通過する流れ、あるいは、熱輸送や固液二相流、キャビテーションのある流れなどの例が挙げられる。これに対して、3次元流れへの適用はまだ少なく、壁面乱流およびチャンネル流れの計算、球の後流、垂直飛行時の二枚羽を有する回転翼周りの流れの解析などがある。

本研究の目的は、渦法を3次元非定常渦流れに適用し複雑な渦構造の発達過程を解析することであり、渦構造が周辺流体との混合に果たす役割について明らかにすること、および、渦法における乱流モデルを新たに提案し、その有効性を示すことにある。本論文は、第1章から第6章までの全6章で構成されている。各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、渦法全般について述べるとともに、本論文の構成について述べている。

第2章では、はじめに渦法の歴史について簡単に触れ、ついで支配方程式の導出、粘性効果の取り扱いについて述べる。渦法における課題は、粘性効果を取り込む方法と乱流モデルの構築である。粘性効果を取り込む厳密な方法としては、渦要素の運動にランダムウォークを付加する方法や Weighted particle method がある。また、最近では、2次元流れについて粘性拡散速度の方法が新たに提案されている。これらの方法では、渦要素が十分に多いとき、計算結果が Navier-Stokes 方程式の解に収束することが証明されている。しかし、高レイノルズ数の流れでは膨大な数の渦要素が必要となるために、工学的な応用には不便である。そのため、工学的な計算では、渦要素のカットオフ半径を時間的に増加させる方法（渦核成長モデル）が使われることが多い。渦核成長モデルとしては、一般に、粘性渦管の渦核半径の時間的成長を模擬した線形モデルが用いられている。また、渦法における乱流モデルとしては、Mansfieldらによって提案されたものがある。これは渦度方程式にフィルター操作を行い、この方程式に含まれる渦度-速度相関項に、Smagorinsky の渦粘性近似を導入するものである。

本研究で提案するのは、渦核成長モデルに基づいた乱流モデルである。このモデルの原形は Leonard & Chua によって提案されたものであり、渦要素のカットオフ半径よりも小さな空間スケールの渦の影響を、Smagorinsky の渦粘性によって近似する。これを非線形モデルとよぶことにする。このモデルは、分子粘性に対する線形モデルの拡張になっている。

第3章では、人工的な攪乱に対する瞬時出発の円形噴流中の渦構造の変化を、3次元渦法によって解析するとともに、線形モデル、非線形モデル（乱流モデル）および両者の複合モデルについて計算される渦構造の比較検討を行った。このような検討は、3次元渦法の実用化を進めるにあたって不可欠のものである。噴流に対する周期的攪乱は、軸対称攪乱、ヘリカル攪乱、および互いに反対方向に回転する強さの等しい2つのヘリカル攪乱を合成した複合攪乱を取り上げた。渦法による解析の結果、攪乱を受けた非定常円形噴流の出発領域では、高度に組織的な空間分布をもった渦構造が発生することが明らかとなった。また、渦法において粘性を模擬する方法として、渦核成長モデルの有効性を確認した。その上で、渦度分布、速度分布、およびエントレインメントなどに基づいて、各モデル間の相違を示した。

第4章および第5章では、円形噴流中の渦構造の基本構成要素である渦輪について着目する。

第4章では、ノズル出口に軸対称な正弦波状の攪乱を導入したとき、形成される渦輪の循環が攪乱の強さおよび周波数によってどのように変化するかについて明らかにした。ピストンによって一定量の流体を押し出すとき、形成される渦輪の循環には上限があることが報告されているが、渦輪の形成過程とその循環の大きさについてはまだ未解明の点が残されている。本論文では、正弦波攪乱によって、渦輪の循環が攪乱のないときのそれよりも大きくなる条件について述べた。また、力学的不変量として運動量に着目し、攪乱周波数に対する変化について示した。

第5章では、渦輪の3次元相互作用について考察する。渦の相互作用は、乱流の速度変動や圧力変動、音波の発生機構、乱流制御などに密接に関連しており、その相互作用のメカニズムが正しく計算されていれば、渦法の有効性を示すことにもなる。本論文では、渦輪の正面衝突および斜め衝突を取り上げ、実験結果や他の数値解析結果との比較を行った。

第6章は結論であり、本研究で得られた主要な結果についてまとめている。これまでの議論を通して、本論文で提案した乱流モデルを用いた3次元渦法が、非定常渦流れの解析に極めて有用な手法であることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 木 谷 勝
副 査 教 授 井 上 良 紀
副 査 教 授 藤 川 重 雄
副 査 教 授 宮 本 登

学 位 論 文 題 名

Vortex Method Simulations of Unsteady Vortical Flows

(渦法による非定常渦流れの数値シミュレーション)

乱流は流れの速度、圧力、温度などが不規則に変動する現象であるが、その本質は渦度をもつ流体塊の運動にある。渦度をもつ領域を単純に渦とよぶことにすれば、乱流は大小様々なスケールをもつ渦が相互作用をしながら変形し運動する状態と解釈される。乱流の数値シミュレーションは大部分ナビエ・ストークス方程式の差分法によって行われている。レイノルズ数の高い乱流では乱流モデルが使用されるが、これはすべて差分法に基礎をおくものである。この方法による複雑な流れのシミュレーションにおける主要な問題点の1つは格子形成に多大の労力を必要とすることである。

これに対して、ナビエ・ストークス方程式をラグランジュ的に数値解析する渦法は、格子形成を必要としない流れの計算法として多くの関心を集めている。渦法においては流れの中の渦領域を十分小さな要素（渦要素）に分割し、渦要素の位置ベクトルと渦度ベクトルの時間変化をそれぞれビオ・サバールの法則および渦度方程式によってラグランジュ的に追跡し、渦要素の集合として渦領域の運動を計算する方法である。最近、乱流中の渦運動の制御によって乱流摩擦抵抗やはく離に伴う圧力抵抗を低減する研究が多くなされているが、渦法は渦要素を直接計算の要素とする点で、乱流の数値解析と結果の理解および乱流制御の研究に適した方法である。

渦法の問題点は流体の粘性の表現と乱流モデルの開発である。粘性については、ランダム・ウォーク法、Particle Strength Exchange法、渦核成長法などがある。前の二つは数学的に厳密に基礎付けられている方法であるが、膨大な数の渦要素を必要とするために、高速計算法が開発されない限り工学的な応用には適しない。これに対して渦核成長法は数学的な厳密性に問題があるが、比較的少数の渦要素で複雑な渦流れを計算できる点で工学的な応用が期待されている。また、ラグランジュ的な乱流モデルの研究はまだその緒についたばかりである。

このような背景の下に、本論文は、サブグリッド乱流モデルを基本とする渦核成長モデル提案し、基本的な3次元非定常渦流れの数値シミュレーションを行ってその有効性について議論したものであり、6章から構成されている。

第1章は序論であり、流れの数値解析法における渦法の位置づけおよび本論文の構成について述べている。

第2章では、渦法の発展過程を総括し、高レイノルズ数における乱流モデルの必要性を述べてい

る。ついで、3次元渦法の数学的定式化を示し、本論文で使用する渦核関数、粘性効果の表現のための渦核成長方法（線形モデル）について説明している。とくにスマゴリンスキーのサブグリッド乱流モデルを、渦核成長の形で渦法に組み込む方法（非線形モデル）を提案していることは高く評価される。線形モデルと非線形モデルを重畳した複合モデルは粘性効果を取り込んだラグランジュ乱流モデルを構成している。

第3章では、前章で提案した3種類の渦核成長モデルを用いて、円形ノズルからの噴流に関する数値シミュレーションを行い、複合乱流モデルの有用性について論じている。3種類のモデルの中で線形モデルは、渦核成長という近似の下における流れの厳密な数値解を与えると解釈されるので、まずこのモデルによって円形噴流に、軸対称攪乱、ヘリカル攪乱および互いに反対方向に回転する2つのヘリカル攪乱を重畳した複合攪乱を与えたときの、噴流の渦構造の変化を詳細に調べている。このシミュレーションは噴流の拡散を強化する能動制御の研究と位置づけることができる。この意味では、モード2の複合攪乱が拡散の強化に最も効果的であることを明らかにしている。ついで、乱流モデルの有用性を検討するために、モード1の複合攪乱を与えた円形噴流を3種類のモデルによって計算し、渦構造の詳細な比較によってレイノルズ数が高い時の複合乱流モデルの妥当性を論じている。渦要素数が時間とともに指数関数的に増加するために、妥当性の議論は渦構造の定性的比較に留まっているが、今後計算の高速化が進めば、速度や乱れ等の統計量の比較による定量的検討が可能となろう。

第4章では、円形ノズルから一定の体積の流体を押し出すときに形成される渦輪について、線形モデルによる数値シミュレーションを行っている。本計算の信頼性は、運動量の保存を検討することによって確認されている。流体を押し出すときに適当な周波数の軸対称攪乱を与えることによって、渦輪の循環が極大となることを示し、極大値が現われる機構をノズルから放出された渦度の集積過程に調べることによって解明している。この結果は噴流による推進方法の一層の効率向上に有益な知見である。

第5章では、2つの渦輪が衝突するときの変形の過程を複合乱流モデルによって解析している。渦輪の衝突・相互干渉は乱流の渦構造の解明やその制御に有益な情報を与えるためである。まず、同一の大きさをもつ2つの渦輪が正面衝突する時の変形過程を計算し、それぞれの渦輪の初期変形の違いによって、2つの基本的なパターンがあらわれることを明らかにしている。衝突時の変形の位相が同一のときは衝突面に小さな渦輪が形成され、位相が逆位相のときは複雑にからみ合った渦管が形成される。ついで、2つの渦輪が斜めに衝突する時の渦構造の変化も計算している。これらの結果が、他の研究者による実験結果および計算結果に一致することから、本論文で提案する複合乱流モデルが工学的に応用可能であることを述べている。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、3次元渦法についてサブグリッド乱流モデルに基づく渦核成長モデルを提案し、これを基本的な非定常渦運動に適用してその工学的有用性を示すとともに、乱流渦構造の解明とその制御に関する多くの新知見を与えており、流体工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。