

第1章 序論

1-1 渦輪対と剥離渦を伴う流れ

抵抗に比べて大きな揚力を発生する物体として、今までに様々な翼型が開発されてきた。翼型は実用上重要な物体であり、翼周りの流れ場の様子を調べることは翼の性能を向上させる上で重要である。翼周りの流れ場では渦の作用が支配的であり、翼の効率に大きな影響を及ぼすため、渦運動の最小単位である渦の合併と分裂の機構をふまえた上で、翼型の流れを調べる必要がある。

流れの不安定性によって発生した攪乱は、より複雑な流れへの遷移を経た後に最終的に乱流に移行する。乱流は大小様々な大きさの渦から構成されていると考えられており、これらの渦が相互に影響を及ぼしあい、合併、分裂を繰り返すことによって、複雑な流れ場が形成される。乱流を構成する要素と考えられる、このような渦の相互作用について調べることは乱流の構造を理解するうえで重要となり、さらに、剥離が発生するような複雑な乱流場を調べるための基礎となることが期待される。本論文では、渦運動の基礎となる渦の相互作用について調べるために、まず始めに同方向に移動する近接した渦輪対の運動を数値シミュレーションによって再現し、渦の合併、分裂を構成する渦の生成と消滅の機構を本質的に支配しているものが何かを調べる。さらに、渦運動の実用面の問題として、マイクロガスタービンの翼背面に出現する剥離渦の生成の機構を、渦運動の基礎過程を元に明らかにすることを目的としている。

10^6 以上の高レイノルズ数域の翼型特性については、実用面の上で 1930 年代から多くの実験が行われ、高性能の翼型が数多く開発された。McCullough and Gault⁽¹⁾ らは、翼弦長を元にしたレイノルズ数が $5.8 \cdot 10^6$ に固定された場合の翼の失速型について実験を行った。翼型は、NACA63₃-018, NACA 63-009, NACA64A006 の3種類について調べられたが、それぞれ、18%、9%、6%の最大翼厚比を持つ。NACA63₃-018では後縁失速が起こり、NACA 63-009では前縁失速が観察された。また、最大翼厚比の最も小さいNACA 64A006では薄翼失速が発生することがわかった。これらの失速型はそれぞれ、乱流境界層の剥離点の前縁への移動、剥離渦長さの急激な変化による剥離渦のバースト、short bubble から long bubble への移行で説明される。これより、失速型は、翼の最大翼厚比に影響を受けることが推測される。

レイノルズ数が $10^4 - 10^6$ の領域については、1970年代になって注目されるようになった。この理由は、初期の1930年代では輸送機や旅客機などの比

較的大きなスケールの翼の開発を目的としていたのが、後者では、近年開発されたマイクロガスタービンの高効率を実現するために、低レイノルズ数乱流域でのタービン翼の設計に関心が集まってきたことによる。タービン翼背面上で剥離が発生すると抗力が増大して失速が起こり、設計上の揚力が得られなくなる。この対策としては、翼型の形状を変化させることによって、遷移を遅らせたり、あるいは早めたりして、翼背面上での剥離の発生を防ぐことができる。このような剥離によるタービン効率の低下については実験によって調べられてきたが、数値解析によって調べられた例は少ない。とくに低レイノルズ数乱流域における剥離渦を伴う流れに関する数値解析では、遷移現象を表現できる乱流モデルの開発に依存しており、未解決の問題として残されている。

1-2 本論文の構成

本研究は、渦運動に関する二つのテーマから構成されている。まず始めに渦運動の基礎的研究として、渦輪対の運動に関する数値シミュレーションを行った。次に、渦運動の応用問題として、タービン翼列に発生する剥離渦に関する乱流数値解析を行った。

第2章では「2つの渦輪の相互作用に関する数値シミュレーション」について述べてある。ここでは、渦運動の基礎である渦の消滅と生成の機構を本質的に支配しているものは何かを調べるために、3次元非圧縮粘性の渦度方程式を解いて渦輪対の形状の時間的な変化のシミュレーションを行った。その結果、渦の消滅と生成の機構が渦度方程式の各項の物理的な意味を用いて説明できることを明らかにしている。

第3章から第4章までは、「剥離渦を伴う流れに関する数値解析」について述べてある。ここでは、低レイノルズ数乱流域における2次元直線翼列周りの流れに関する乱流数値解析を行う。まず、低レイノルズ数域の翼型の特性についてまとめている。タービン翼列内部の流れは乱流であるため、LES (Large Eddy Simulation) を用いて数値解析を行う。

翼型は、CGT (セラミックガスタービン) プロジェクトで開発された CGT 用タービン翼であり、製作、開発は企業によって行われたもので、特別な翼型名は無い。この翼型を使用して、機械技術研究所が直線タービン翼列の実験的研究として風洞実験を行い、タービン入り口速度を基準としたレイノルズ数が $10^4 \sim 10^5$ オーダの実験データが多数蓄積されている。これらのデータと本研究の乱流数値解析の結果とを、食い違い角をパラメータとして比較検討する。

第4章では、実験では得ることが困難な剥離渦の時間的空間的な形状の変化に

ついて、乱流数値解析によって得られた結果をまとめる。最後に、第5章では本研究の成果と今後の課題についてまとめる。