

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 松 沼 孝 幸

本論文は、「低レイノルズ数域における環状タービン翼列特性」と題し、9章からなっている。

タービン翼列は、発電用ガスタービンや航空推進ジェットエンジンの主要な構成要素である。近年開発が盛んに進められている産業用および航空用の小型ガスタービンでは、翼の小型化とタービン入口温度の上昇によって、タービン翼列のレイノルズ数が低下する。しかし、低レイノルズ数域の実験データは、直線翼列の2次元流れのデータが数例報告されているのみで、環状翼列の3次元流れのデータは皆無である。本研究は、3孔ピトー管、5孔ピトー管、熱線流速計、レーザードップラ流速計等の計測方法を駆使することによって、 10^4 オーダーの低レイノルズ数域での環状タービン翼列の静翼の三次元流れ、動翼の非定常流れ等の空気力学特性を実験的に明らかにしている。

第1章「序論」では、本研究の動機、タービン翼列のレイノルズ数の影響、二次流れ、非定常流れなどに関する従来の研究を概説し、本研究の意義と目的を述べ、本論文の構成を説明している。

第2章「実験装置」では、実験風洞、タービン翼列、乱れ発生装置及び乱れ度特性、流動計測システムについて述べている。

第3章「境界層計算による遷移点・層流剥離点・再付着点の位置とレイノルズ数との関係の予測」では、二次元の境界層計算を行い、低レイノルズ数域では層流剥離が生じることを明らかにしている。

第4章「低レイノルズ数域における環状タービン静翼の三次元流れに与えるレイノルズ数と主流乱れ度の影響」では、静翼入口流れと翼弦長を基準としたレイノルズ数が 1.8×10^4 から 10.8×10^4 の範囲で、流速、流れ方向、静圧、乱れ度分布を測定している。その結果、レイノルズ数が低下すると、翼負圧面側の剥離の発生による形状損失の増加と、壁面近くの二次渦の影響による二次損失の増加で、全圧損失が2倍近くに増加すること、しかし主流乱れの影響はレイノルズ数に比して少ないことを明らかにしている。

第5章「環状タービン翼列の三次元流れに与えるチップクリアランスの影響と低レイノルズ数化の関係」では、レイノルズ数が低下すると翼端隙間流れが全圧損失分布と3次元流れの構造に変化を与えるが、測定面全体の翼端隙間損失は、レイノルズ数によらずほぼ一定であることを明らかにしている。

第6章「低レイノルズ数域で作動する環状タービン動翼のミッドスパンにおける非定常流れの解明」では、静翼入口流れ基準のレイノルズ数 2×10^4 で、

タービン動翼ミッドスパンでの流れをレーザードップラ流速計により計測している。その結果、静翼のウェークが動翼上流で動翼周りの速度分布により弓状にねじ曲げられながら動翼内部に流入し、動翼下流で動翼負圧面側の剥離領域や動翼ウェークと干渉して、非等方性の強い乱れを持つ複雑な非定常流れを発生させることを示している。

第7章「環状タービン動翼ミッドスパンの非定常流れに与えるレイノルズ数と主流乱れの影響」では、静翼入口流れ基準のレイノルズ数 2×10^4 から 6×10^4 で測定している。その結果、レイノルズ数が低下するほど、翼後縁のウェークが急増し、動翼負圧面側での剥離が上流側から発生して剥離領域が大きく発達し、流れの非定常性（周期的な変動）が強くなること等を明らかにしている。動翼出口直後のウェークのエネルギー消散厚さ（全圧損失と対応）は、レイノルズ数が 5.4×10^4 以下ではレイノルズ数の^{-0.5}乗に比例することを示している。また、主流乱れ度の影響はレイノルズ数の影響ほど顕著ではなく、翼後縁直後でのウェーク形状は主流乱れ度が変わっても変化が見られないが、ウェークが下流に流れる際に誘起する非定常変動は、主流乱れ度が高いほど少なくなることを明らかにしている。

第8章「静翼ウェークと二次渦によって生じる環状タービン動翼まわりの非定常流れ」では、静翼入口流れ基準のレイノルズ数 2×10^4 で、タービン動翼全体の非定常流れを、レーザードップラ流速計により計測している。その結果、静翼のウェークと二次渦が動翼内部の流れに与える影響を捉え、それらと動翼内部の剥離領域、動翼後縁のウェーク、流路渦や翼端隙間からの漏れ渦との非定常干渉を解明し、動画として解析することによって、タービン動翼周りの非定常流れを分かりやすく表示することに成功している。

第9章「結論」では、以上を総括するとともに、従来の高レイノルズ数域で作動するタービン翼列の設計で利用されている「損失はレイノルズ数の^{-0.2}乗に比例する」関係を用いて小型ガスタービンのタービン翼列を設計すると、実機で得られる性能が設計値を大きく下回ってしまい、所望の性能が得られない可能性が高いことを指摘している。これを防ぐためには、低レイノルズ数域で作動するタービン翼列を設計する際には、少なくとも^{-0.35}乗則（あるいは^{-1/3}乗則）を用いて性能予測をする必要があると示唆している。さらに、低レイノルズ数域のタービン翼列形状の最適化には、近年発達が著しい数値流体力学（CFD）を適用することが不可欠で、本研究で得られた豊富な実験データが、CFDコードの信頼性向上に利用されることを期待している。

上記のように本論文は、低レイノルズ数域でのタービン翼列のCFD解析に必要な信頼性の高い実験データを提供し、また低レイノルズ数域における損失とレイノルズ数の関係を明らかにしており、機械工学、特にガスタービン工学の発展に寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。