

論文の内容の要旨

論文題目 遷移を伴うタービン翼列内流れの圧縮性 LES 解析

氏名 松浦 一雄

航空用，産業用ガスタービンでは，翼列の空力特性がエネルギー変換効率を大きく左右する．本研究は，この空力特性を支配する内部流動の数値解析に関わる，特に低レイノルズ数効果を有する圧縮性翼列流れに対する高精度数値予測手法の提案および内部流動の解明を主題としている．具体的には，圧縮性遷移翼列流れに対して，乱流変動成分の予測も含めて高精度な解析が可能な LES(Large Eddy Simulation)による計算手法を提案し，基礎的な流れに対する検証の後，低圧タービン翼列ならびに超小型ラジアルタービン翼列内の流れを解析した．その結果，翼列内の詳細な遷移メカニズムや，ラジアルタービンの小型化に伴う損失発生要因などに関して新たな知見を得た．

まず，第 1 章では，航空用低圧タービンや，超小型ガスタービンなどに見られる圧縮性遷移翼列流れに対して従来広く使用されてきた RANS(Reynolds-averaged Numerical Simulation)解析の限界，LES 解析の必要性，LES や DNS(Direct Numerical Simulation)に関する過去の研究に言及した後，本研究の目的を述べる．

第 2 章では，本研究で用いる基礎方程式や解析手法に関して詳述する．特に LES 解析手法や，空間離散化手法，時間積分法，並列化手法などを説明する．また LES に関し，高次精度のフィルタリングを導入し，陽的な SGS 散逸を導入しない工学的背景や理論的根拠について言及する．

第 3 章では，空間的に発達する平板境界層を対象に，ガスタービン翼列に見られる代表的な遷移形態であるバイパス遷移の解析を行うことにより，本手法の有効性，健全性を検証する．特に解析精度への影響が大きいと考えられる計算格子幅やフィルタリングの強度に関して，その影響を議論する．

第 4 章では，第 3 章により検証された手法を， Re 数が 5.0×10^5 の T106 低圧タービン翼列流れに適用する．ここでは，主流乱れ度を 0% とする場合と約 5% とする場合の両条件における解析結果を比較する．また，POD(Proper Orthogonal Decomposition)解析により支配的な境界層挙動を明らかにする．その結果，圧縮性遷移翼列において，遷移形態が主流乱れの有無により本質的に異なることや，境界層における乱れの発達の相違が翼列における非定常圧力変動の相違としても現れることなどを示す．

本章で議論した境界層乱れの発達を解像しうる精度の解析を行うことは，次章の超小型ラジアルタービン動翼内部流れにおける壁面近傍の損失発生因子やその輸送を特定する上で工学的に重要である．

第 5 章では，外径 40mm($Re=7.16 \times 10^4$)および 8mm($Re=1.17 \times 10^4$)のラジアルタービンへ

LES解析を適用する．同時に数値解析との比較のために行った空気試験についても述べる．

これらの結果に基づき，損失の発生要因，その予測に対する LES 解析と RANS 解析の相違，効率および内部流れのレイノルズ数依存性，効率向上に関する設計指針などを議論する．

第 6 章では，第 4 章の議論に基づき，

- 主流乱れを考慮しない場合，固有値が全体の 30%程度を占める 2 つの POD モードより，圧力波の通過に伴う渦の圧縮と膨張による変形が支配的な境界層挙動である．特に 95%翼弦長位置では，主流方向へ渦を歪ませる挙動も現れることから，後縁近傍では渦の圧縮と膨張による変形および主流方向への変形が遷移境界層における支配的な非定常挙動である．

- 主流乱れが 5%の場合，POD 第 1 モードより，85%翼弦長位置付近では主流方向変動速度の増大が，95%翼弦長位置では乱流エネルギーの生成が遷移境界層における支配的な非定常挙動である．

これらより，主流乱れを考慮しない場合と，約 5%の主流乱れを導入する場合とでは遷移メカニズムが本質的に異なることを明らかにした．

また，第 5 章の議論に基づき，

- 内部流動に関して，ハブ側の流れは負圧面側に移動し，負圧面近傍でハブからシュラウドに巻き上がる．そして負圧面近傍入口からの流れと混合しながら，半径方向から軸方向に向きを変え，シュラウド側に転向して流出することが分かった．これに対しエネルギー散逸関数の分布よりロスの発生を明らかにした結果，小型ラジアルタービンを改良するためには，ロータ入口からの流れを漏れ流れやハブからの流れとなるべく混合させないように子午面を変更する必要があることが分かった．

- 本研究で対象とした，小型ラジアルタービンの損失 Re 数依存性は-0.1 乗程度と従来推定されていた-0.20~-0.85 乗よりも小さい結果を得た．従って， Re 数の低下を考慮してロスを極力低減するような設計をすることにより，ロータ外径 8mm 程度のラジアルタービンでも 80%程度以上の断熱効率を得られる見通しを得た．

- 本研究で対象とした超小型ラジアルタービンの更なる効率向上には，低 Re 数効果に関して，本質的に定量的な議論が必要である．

などを主要な結論として得た．

最後に，本研究で提案する計算手法が今後ますますタービンやコンプレッサ翼列流れに適用され，その現象解明およびより良い設計に活かされることを期待したい．