

## 審査の結果の要旨

氏名 松浦 一雄

本論文は、「遷移を伴うタービン翼列内流れの圧縮性 LES 解析」と題し、6 章よりなっている。

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に多大な影響を与える。特に低レイノルズ数効果を有する翼列流れでは、形状損失や、2 次流れによる二次損失、さらには漏れ損失が増大し、効率は低下する。近年開発が行われている航空用、産業用タービンは、形状の小型化あるいはタービン入口温度の上昇により内部流れのレイノルズ数が小さい条件下で使用される傾向にあるため、設計にあたっては低レイノルズ数効果の理解と予測が重要である。

従来、このような流れに対しては、RANS 解析が一般的に用いられてきた。しかしながら、低レイノルズ数流れの予測に必然的に伴う遷移予測は、遷移点や遷移距離と境界層パラメータとの関係式、あるいは間欠率など実験式に基づいているため、その実験式の仮定をはずれる作動条件や 3 次元的な複雑形状における流れでは、予測精度が低下するという本質的限界がある。

一方、近年 Navier-Stokes 方程式に基づき、なるべく直接的に解析を行う手法が発達し、遷移を伴う流れ場にも適用されている。これら直接的解析は非定常な空間変動に関する情報が得られ、特に低 Re 数効果を伴う流れ場の損失発生あるいは熱伝達の機構を解明する上で、重要な解析手段になると考えられる。中でも LES は DNS に必要な計算負荷を軽減し、高精度に乱流を解析する手法として工学的実用化が期待されている。しかしながら、LES は遷移を伴う圧縮性翼列流れに対して、高い解像度で計算を行うことが困難であったためこれまでほとんど適用されておらず、このような流れに対するその解析手法は確立されていなかった。

以上の背景から、本研究では 6 次精度コンパクトスキームを基礎とし、陰的な SGS モデルとして作用し、かつ、実用計算において数値的な安定性を確保するために導入した 10 次精度フィルタリングを組み合わせた実用的な LES 計算手法を提案している。遷移流れに対してその有効性を検証した後、低圧タービン翼列および超小型ラジアルタービン翼列に適用し、その内部流れを解明している。

第一章は序論であり、航空用低圧タービンや、超小型ラジアルタービンなどにおける圧縮性遷移翼列流れに関する予測の工学的重要性和このような流れを高精度に予測できる手法の必要性を説いている。そして従来広く使用されてきた RANS 解析の限界、LES や DNS に関する過去の研究や LES 解析の利点に言及した後、LES に基づき圧縮性遷移翼列流れを高い精度で解析できる手法の必要性を論じている。

第二章では、本研究で用いる基礎方程式や解析手法に関して述べている。特に LES 解析手法や、コンパクトスキームを用いた空間離散化手法、陰解法に基づく時間積分法、MPI に基づく分散並列化手法などを説明している。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を明らかにしている。

第三章では、提案した手法の精度を検証することを目的として、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い、得られた局所摩擦係数、平均速度成分、変動速度成分およびレイノルズ応力などをこれまでに報告されている実験値と比較している。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、その影響を議論している。その結果、 $\alpha_f \geq 0.45$ ,  $\Delta x^+ \cong 14$ ,  $\Delta y^+_{min} = 1$ ,  $\Delta z^+ \cong 15$  とするフィルター強度に関するパラメータ、計算格子幅の設定で計算すれば、遷移が完了する点近傍の予測精度には問題が残っているものの、遷移域における乱れの発達を精度良く再現することが可能であることを明らかにしている。

第四章では第三章により検証された手法を、翼弦長および流出速度に基づく Re 数が  $5 \times 10^5$  の T106 低圧タービン翼列流れに適用している。設計点条件に対して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の両者の結果を比較し、主流乱れが遷移翼列流れに与える影響や、POD 解析を用いて乱流遷移に至る過程における支配的な非定常挙動を議論している。その結果、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、圧縮性遷移翼列流れの境界層乱れの発達を議論し得る高精度な解析を可能にしている。さらに主流乱れを考慮しない場合、翼列スロート部下流で非定常的に剥離した渦が、翼後縁を通過する際に強い圧力波が発生し、それが前記の渦を圧縮 / 膨張させる変形が境界層内の支配的挙動であることを明らかにしている。特に 95% 翼弦長位置では、スパン方向に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スパン方向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ことを明らかにしている。また、主流乱れが 5% の場合、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とを明らかにしている。

第五章では、本手法を小型ラジアルタービン動翼内部流れに適用し、損失発生要因や、その予測に対する Baldwin-Lomax モデルを用いた RANS 解析との相違、低 Re 数効果、効率向上に関する設計指針などを議論している。その結果、小型ラジアルタービン動翼内部流れでは、ロータ入口からの流れと、ハブからの流れが負圧面でシュラウド側に巻き上がる流れあるいは、漏れ流れと混合する領域において大きな損失が発生することを示し、小型ラジアルタービンの効率向上のためにはこれらの流れをなるべく混合させないように子午面ならびに動翼形状を設計することが有効であることを明らかにしている。また、LES 解析と RANS 解析との相違に関しては、後者は全体的に平均化された流れしか予測できない

のに対して，前者は局所的な渦構造やそれに起因する低エネルギー領域などの予測が可能であることを明らかにしている．さらに，外径 46mm と外径 8mm のラジアルタービンに関する LES による解析結果の比較より， $Re$  数に対する効率の依存性は-0.1 乗程度の相関であることを示し，これより，上述の損失を低減するような流路設計を行えば，80%程度以上の高い断熱効率を維持できる可能性があることを明らかにしている．

第六章は結論であり，本論文で得られた成果をまとめている．

以上，本論文では，低レイノルズ数効果を有する圧縮性翼列流れの高精度な数値予測の実現および解明を目的とし，6次精度コンパクトスキームを基礎とし，実用計算において数値的な安定性を確保すると同時に，陰的な SGS モデルとして作用する 10次精度フィルタリングを組み合わせた実用的な LES 計算手法を提案した．それにより低圧タービン翼列および超小型ラジアルタービン翼列内部流れを解明した．その結果，圧縮性遷移翼列に関して従来の研究と比較してはるかに高い精度で解析することに成功した．そして，遷移形態が主流乱れの有無により大幅に異なることや，境界層における乱れの発達の違いが翼列における非定常流れの違いとしても現れることを明らかにした．さらに，小型ラジアルタービンへの適用では，損失の発生要因，その予測に対する LES 解析と Baldwin-Lomax モデルを用いた RANS 解析の違い，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明らかにした．

これらの結果は，遷移を伴うタービン翼列内流れの解明のみならず，その数値解析技術の発展にもつながるもので，流体力学，エネルギー変換工学をはじめ工学の上で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．