

軸流圧縮機における遷音速内部流動現象に関する研究

齋藤, 誠志朗

<https://hdl.handle.net/2324/4475125>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士

バージョン :

権利関係 : Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)

論文の要約

論文提出者： 齋藤 誠志郎

論文題名： 軸流圧縮機における遷音速内部流動現象に関する研究

軸流圧縮機の空力設計では、圧縮機内部で発生する流動現象を適切に予測し、それに伴う流動損失を正確に見積もることが重要であるが、遷音速軸流圧縮機では、衝撃波の発生により、衝撃波損失のみならず、衝撃波と種々の流動現象の干渉に付随した流動損失も発生する。さらに多段の圧縮機では、後流干渉やポテンシャル干渉といった動静翼列干渉も発生するため、圧縮機内部には、流動現象が相互に干渉し合う複雑な流れ場が形成される。そのため、圧縮機内部における渦流れ構造や動静翼列干渉の影響、さらには流動損失の発生メカニズムや流動損失生成量について、未だ十分に解明されていない。また、軸流圧縮機の数値流体解析では、一般に RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)解析が用いられるが、翼面境界層の乱流遷移や衝撃波との干渉および強い逆圧力勾配による境界層はく離を RANS 解析により正確に捉えることは容易ではなく、さらに、壁面モデルを用いる WMLES(Wall-modeled Large Eddy Simulation)解析についても、ターボ機械内で発生する複雑流動現象に対する壁面モデルの妥当性は不明確なままである。

そこで、本研究では、遷音速軸流圧縮機における内部流動現象の三次元渦流れ構造および動静翼列干渉の影響を数値流体解析により解明するとともに、流動損失の定量評価に向けた領域分割手法を新たに構築することで、圧縮機内部における流動損失発生メカニズムの内訳を評価する。また、遷音速軸流圧縮機に対して、壁面モデルを用いずに壁面近傍の微細な乱流構造まで直接解像する WRLES(Wall-resolved LES)解析を適用することで、遷音速軸流圧縮機の内部流動に対する WRLES 解析の有効性について検討を行う。

本論文は全6章からなり、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、本研究の目的について述べるとともに、軸流圧縮機の内部流動現象および流動損失評価に関連した近年の研究動向について概説を述べた。

第2章では、数値計算手法として、離散化、非粘性流束・粘性流束の評価、時間積分、境界条件、乱流モデル等について述べた。また、WRLES 解析において導入した、主流乱れおよびトリップワイヤの効果について、その導入手法の概説を述べた。

第3章では、二段遷音速軸流圧縮機の全段および全周を対象とした大規模 DES (Detached Eddy Simulation) 解析により、圧縮機内部における三次元渦流れ構造を明らかにするとともに、位相固定平均化処理を適用することで、動静翼列干渉が流れ場に与える影響について評価した。初段静翼では、大規模なハブ・コーナーはく離が発生し、中実部(ピボット部) 負圧面側のハブ面上に足を持つハブ・コーナーはく離渦が形成される。ハブ・コーナーはく離領域の内部では、初段動翼との後流干渉により複数のはく離渦が発生し、下流側へ移流することで、流れ構造を時間的に大きく変化させる。一方で、2段動翼とのポテンシャル干渉による流れ構造への影響は極めて小さいものの、2段動翼の離脱衝撃波が初段静翼の翼間に入射することによる翼列干渉が発生する。この衝撃波は、初段静翼の翼面境界層と干渉することで、境界層はく離を引き起こし、翼面で反射を繰り返しながら上流側に伝播することで、翼面上の広い範囲で翼負荷分布を大きく変動させる。2段動翼では、隣接翼で発生した離脱衝撃波と翼負圧面の干渉により境界層はく離が発生するほか、翼後縁近くで小規模なハブ・コーナーはく離が発生する。2段動翼のハブ側では、初段静翼のハブ・コーナーはく離に起因する後流が流入することで、強い後流干渉が発生し、翼前縁付近における翼負荷が大きく変動する。一方、2段静翼のポテンシャル干渉による流れ場への影響は極めて小さく、翼面静圧分布についても翼後縁付近において僅かに変動が認められるのみである。

第4章では、圧縮機内部における流動損失の定量評価に向けた領域分割手法を新たに構築し、遷音速軸流圧縮機動翼列である NASA Rotor37 の DES 解析結果および二段遷音速軸流圧縮機の DES 解析結果の中の初段静翼に適用した。本領域分割手法では、速度勾配テンソルの三成分分解などに基づき、各流動現象の流体力学的な特徴に応じて設定された条件式を、if then ルールにより判定することで、圧縮機内部の領域を、主流、漏れ渦、二次流れ（コーナーはく離を含む）、衝撃波、衝撃波に伴うはく離、境界層、付着境界層の後流、はく離境界層の後流、上流翼列の後流の計9つの領域に分割する。本手法による領域分割結果と流れ構造との比較を行うことで、領域分割結果の妥当性を確認するとともに、本手法が遷音速軸流圧縮機内部の動静翼列干渉を伴う非定常流れ場に対して適用可能であることを確認した。また、本手法により抽出された各領域内でエントロピー生成率を体積分することで、流動現象毎の損失生成量および流動損失発生メカニズムの内訳を評価した。NASA Rotor37 では、翼面境界層による流動損失が最も大きく、損失生成量全体の約55%を占める。また、衝撃波そのものによる流動損失は全体の約1%程度と非常に小さいものの、衝撃波は、翼面境界層と干渉し境界層はく離を引き起こすことで、全体の約18%に及ぶ付加的な流動損失を発生させる。二段遷音速軸流圧縮機の初段静翼では、主に境界層、二次流れ、および初段動翼の後流により流動損失が発生する。このうち、二次流れ損失は全体の約26%を占めるが、これは主にハブ・コーナーはく離によるものである。以上のことから、遷音速軸流圧縮機では、境界層による流動損失が最も大きく、次いで、動翼列では衝撃波に関連した流動損失、静翼列ではハブ・コーナーはく離に伴う流動損失が大きいことが明らかとなった。

第5章では、NASA Rotor37 の単流路を対象として、約13.5億セルの緻密な計算格子を用いた WRLES 解析を実施した結果について述べた。WRLES 解析では、翼圧力面境界層における乱流遷移、および翼負圧面境界層における衝撃波との干渉によるはく離・乱流遷移・再付着を鮮明に捉えることができた。WRLES 解析結果は、実験計測結果とも満足のいく一致が得られたものの、壁面から離れた翼端漏れ渦については、計算格子の空間分解能不足により、乱流拡散が過小に評価される傾向が見られた。そのため、壁面から離れた翼端漏れ渦を含めて圧縮機内部の乱流現象を適切に解像するためには、主流部における格子解像度をさらに高める必要がある。

第6章は結言であり、本論文を総括している。