

ターボ圧縮機で発生する流体関連振動の高精度予測 手法に関する研究

三浦, 聡允

<https://hdl.handle.net/2324/4784611>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 三浦 聡允

論 文 名 : ターボ圧縮機で発生する流体関連振動の高精度予測手法に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

ターボ圧縮機は、比較的小型の機械で大容量の流体エネルギーを取り扱うことができるため、発電、Oil&Gas、航空宇宙産業などにおいて幅広く利用されている。近年では、環境問題への意識が急速に高まっていることなどに伴って、機器の高効率化や軽量化、小型化、広作動範囲化がますます要求されるようになってきている。これら複数の要求を同時に満たすために機器の空力負荷増化や部材の薄肉化が進んでおり、限界設計追求の中で前世紀までは問題になることが少なかった流体関連振動に起因する機器破損事例が増加の一途を辿っている。ターボ機械の内部で発生する流体関連振動は、機器の内部を流れる流体と構造体の連成問題であることから未だに高精度で予測することが難しく、設計段階で利用可能な評価法や振動抑制技術が求められている。そこで、本論文では流体関連振動の中で特に予測が難しいとされている3問題である「動-静翼間の共振問題」、「旋回失速に起因する軸振動問題」、「ラビリンスシールのフラッター問題」に焦点を当て、シミュレーション技術を活用することで高精度評価法や制御手法の確立を目指し研究を行った。

本論文は全5章から構成されており、第1章の序論に続き第2章において、軸流圧縮機の動翼列と静翼列の干渉に起因する共振問題の評価手法確立に取り組んでいる。まずは、業界で検証例が無い、遷音速動翼列で発生する衝撃波によって隣接静翼が共振する問題を、流体解析と構造解析を連成させた1-wayのFSI (Fluid-Structure Interaction) 解析技術によって評価する手法の確立を行った。解析精度の検証を行うために、実機の産業用ガスタービン試験設備において翼面に歪ゲージを設置して翼振動計測を実施した。検証の結果、確立した手法によって高精度で翼振動レベルを評価できることが実証できた。また、流体解析による非定常外力評価において Time Transformation(TT)法を利用することで、精度を確保しつつ計算負荷を大幅に低減可能であることが検証された。衝撃波起因の共振問題に続いて、事例が増加しているものの検証例が乏しい遠方静翼後流に起因する動翼共振問題を対象に検討を行った。全周解析モデルを利用した多段圧縮機の非定常流体解析と構造解析を組み合わせることで、当問題についても振動オーダを正確に見積もることができることが確認された。今回確立した評価手法は、解析負荷の観点から設計段階で利用可能と考えられるため今後の最新鋭のターボ圧縮機開発において利用され得る技術となっている。次に、確立された評価法を用いて共振による翼振動を抑制する技術についても検証を行った。制御法として、遠方に存在する静翼列と更に前方の静翼列との周方向位置関係(クロッキング)を最適化することによって、圧縮機内部で発生する変動を弱める手法を検討した。検証の結果、圧縮機性能を全く損なわずに振動オーダを数十%低減させられることが確認された。

第3章では、遠心圧縮機の内部で発生する旋回失速に起因する軸振動問題を対象に、評価手法の確立と検証を行った。当問題は、特に高圧ガスを取り扱う圧縮機において問題となることが多いため、高圧条件で試験が可能な特殊な圧縮機試験設備を製造して精度検証を進めた。実試験では、吸

込圧力 36 bar a の高圧条件における旋回失速と軸振動の詳細計測を行い、圧縮機ディフューザ、インペラにおいて発生するそれぞれ特徴の異なる 2 種類の旋回失速を確認した。そのため、まずは圧縮機壁面粗度を考慮した非定常流体解析手法を用いて、試験で発生した 2 種類の旋回失速を高精度で評価できるか検証した。検討の結果、失速セルの数や失速伝播速度、発生する圧力変動レベルを共に正確に評価できることが確認された。次に非定常流体解析とローターダイナミクス解析を連成させた FSI 解析によって、旋回失速に起因して発生する軸振動の評価検証を行った。解析によって評価された軸振動を試験と比較することで、特徴の異なる 2 種類の失速がそれぞれ軸振動へ及ぼす影響も定量的に高精度で評価できることが示された。今後は当手法を駆使して、軸振動に有害な旋回失速の発生を抑制する技術確立に取り組んでいく必要がある。

第 4 章では、ラビリンスシール部品で発生するフラッターの評価法と制御法に関する検討を行った。流体解析と構造解析を連成させた解析技術を用いて、不安定となる振動モードやフラッター発生条件を特定する手法を確立した。解析精度の検証は、シールフラッターの発生有無を様々な条件下にて正確に計測できるフラッター試験設備を製造して行った。検証の結果、確立した評価手法によって不安定となる振動モードや運転条件を定量的に高い精度で評価できることが確認された。また、評価法を利用したフラッター抑制技術の確立にも取り組んだ。まずは、過去の文献に示唆されているようなシールクリアランスの分布を意図的に制御する方法による効果を検証した。クリアランスの分布制御は高いフラッター抑制効果が得られ、その詳細な物理的メカニズムも明らかにされた。一方で、本手法は一部のシールクリアランスを大きく設定する必要があるため、シール漏洩量が増加傾向にあることも確認された。そのため、漏洩量とフラッターの両方を効果的に抑制できる新手法を検討した。シールに作用する空力仕事分布を詳細分析することで、「キャビティ形状の最適化」、及び「静止フィンを用いた抑制法」の 2 種類の方法を提案した。解析による検証の結果、両手法共にフラッターと漏洩量双方の制御に高い効果があることが判明した。一連の検討を通じて、シールフラッターの効果的な制御手法を確立することができた。

最後に第 5 章では、以上の検討結果をまとめている。