

## 論文の内容の要旨

論文題目 数値解析によるラビリンスシール不安定流体力の評価と設計指針の構築

氏名 西嶋規世

蒸気タービンやプラント向けのプロセスガス圧縮機などの高圧ターボ機械では、回転体(軸や回転翼)と静止体(ケーシングや静止翼)の隙間にラビリンスシール構造が多く用いられているが、シール部で発生する流体力(以降 シール流体力)は、軸系の自励振動を引き起こす主要因となっている。またこれらの製品では、エネルギー需要に応じていくためのさらなる効率向上や高圧化が求められており、これらにともなう軸振動のポテンシャル増加に対し、シール流体力を定量的に把握・予測すること、あるいは低減することが重要な研究課題となっている。

シール流体力の予測手法としては、簡易式、バルクフローモデル、数値解析(CFD)があり、これらと要素実験を合わせて、広く研究されてきた。しかしながら、シール流体力では、軸受におけるゾンマーフェルト数のような支配的パラメータが無く、流れの旋回速度、シール長さ、径、ギャップ、差圧などに複雑に依存するため、これらの影響を体系的に把握することは依然として大きな課題である。加えて、従来の研究は主にシール単独の要素実験やそれを対象とした理論、CFD による検討が多く、シールが実際にターボ機械の様々な部位に実装された場合の影響は、十分には検討されていない。

上記背景を踏まえ、本論文は、蒸気タービンのラビリンスシールを対象として CFD によりシール流体力を評価し、様々な設計パラメータが流体力に与える影響を体系的に把握し、設計に有用な知見・指針を示すことを目的とする。具体的には下記を目的とした。

- (1) シール流体力を CFD で定量的に評価するためのモデル化手法の構築
- (2) シール長さ、ギャップなどの設計パラメータがシール流体力に与える影響の評価とその要因の明確化
- (3) 設計指針として適用可能なシール流体力のパラメータ依存性の定式化
- (4) 旋回防止板を用いたシール流体力低減法の検討と設置指針の提示

## (1) モデル化手法の構築

シール入口で回転速度を任意に与えることが可能な解析モデルを構築し、圧力境界条件と流量境界条件の 2 段階で解析を行う手法を提示した。そして、Picardo らの要素実験(Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.127 (2005), pp. 843-855)を再現する解析を行い、定量的に一致すること(ばね定数の差異 30%以下、減衰係数の差異 15%以下)を示した。

また、動翼先端のシール(以降 動翼シール)を対象とし、(a)実機実装状態を模擬する翼列モデル、(b)シールのみで構成され圧力を与える圧力境界モデル、(c) シール要素実験における旋回流発生を模擬するためのガイドベーンモデル、(d)流量を与える流量境界モデル、からなる 4 種の解析モデルにより、要素実験と実機実装時の違いを CFD により検討した。その結果、要素実験と実機実装状態ではシール流体力が異なり、その要因がシール入口における周方向流量分布であることを明らかにした。さらに、要素実験では、実機よりも高いばね定数・減衰係数が計測される恐れがあることを示した。

## (2) 設計パラメータが与える影響の評価とその要因の明確化

動翼シールを対象とし、フィン形状(ステータフィンとロータフィン形状)とギャップ(0.2 ~0.8 mm)の違いが及ぼす影響を評価し、流れ場からその要因を検討した。フィン形状によらず流体力(ばね定数)は、ギャップにおおよそ反比例するが、ギャップを極端に縮小すると依存性が低下する。また流れ場から、この要因が、ギャップを極端に縮小すると、シール内部の回転速度がシール下流側で一定値に漸近し、シール下流側で流体力の増加が抑制されるためであることを明らかにした。

また、軸部のシール(以降 軸シール)を対象とし、シール長さ(47.6~357 mm)とギャップ(0.42 ~0.85 mm)の違いが及ぼす影響を評価した。他の条件が一定のもとでシールが長くなると流体力(ばね定数)の増加傾向が逡減することを示し、この要因が、シール入口、出口近傍のシールキャビティ(フィンで囲まれる空間)で十分な周方向圧力分布が形成されず、その影響が短いシールでは相対的に大きいためであることを明らかにした。また長いシールではばね定数のギャップ依存性が低下することを示し、シール内部の流体力分布と回転速度との関係から考察した。

### (3) シール流体力のパラメータ依存性の定式化

設計で想定される幅広い条件で流体力を迅速に算出することを目的として、様々な設計パラメータに対する依存性を定式化した。CFD で得られた知見から、シール流体力は、(a)シールに流入する旋回流れの影響と、(b)内部のロータ回転の効果に分けられ、両者の和で表されるとの考え方を示し、ギャップの効果、シールに流入する流れの影響範囲を考慮した実質的なシール長さ、などのパラメータ依存性を新しく導入したばね定数の評価式を構築した。

そして、蒸気タービンの高圧段・中圧段で想定される条件を大よそ網羅する解析(182 ケース)に基づいて評価式を検証し、±30%の差異でCFD で得られたばね定数を再現できることを示した。さらに、新しく導入したパラメータ依存性の影響をそれぞれ個別に評価することで、新しく組み込んだパラメータ依存性は、いずれも妥当であることを示した。

また、減衰についても、(a)流入する旋回流れの影響と(b)内部のロータ回転の効果に分けられるという考え方に基づき、簡易的な評価法を提示した。流入する流れの影響に関しては、実際に問題になる周波数での減衰効果は大きくないため、減衰を考慮せずばね定数のみで評価する。ロータ回転の効果に関しては、 $k_w / \omega$ に( $\omega$ :回転角速度)比例する減衰係数を適用し、設計上は保守側( $\sim 2k_w / \omega$ )で評価する。これらにより、迅速に安全側の流体力を算出できる。

### (4) 旋回防止板を用いたシール流体力低減法の検討と設置指針の提示

旋回防止板を実機に実装する上での設計指針を得ることを目的として、動翼シールを対象とし、旋回防止板がシール流体力と翼列性能に与える影響、およびその要因を検討した。

旋回防止板の設置枚数を増加させると、シール入口の旋回速度が低下し、それに対応してばね定数が低下する。流体力低減効果は、旋回防止板の配置間隔と大きさでおおよそ整理でき、無次元配置間隔  $d_{SB}^*$ が重要な設計パラメータであることを示した。加えて、旋回防止板の設置が翼列性能を低下させる恐れがあることを示し、その要因が、旋回防止板に衝突し減速した流れが主流へ逆流するためであることを明らかにした。

性能低下と流体力低減のトレードオフを考慮すると旋回防止板の設置が逆効果になる場合があることを示した。また、設置する場合は、枚数を多くするとともに、主流への逆流を抑制する観点から旋回防止板の高さを低くし、主流から径方向に離して配置する設計が望ましい。

以上本論文では、蒸気タービンの重要課題であるシール部の不安定流体力を対象として数値解析(CFD)を行い、従来検討されていなかった実機実装時の影響や、様々なパラメータが与える影響を体系的に評価し、設計に適用可能な定式化や指針を示した。