

学位論文題名

大型蒸気およびガスタービンに生じる

軸振動現象に関する研究

学位論文内容の要旨

エネルギー変換機器としての蒸気タービン、ガスタービン等のターボ機械は主要なエネルギー変換機として長い歴史を有しており、今日においても我々の社会生活を支える基幹動力として主要な役割を果たしている。現在、これらのターボ機械は機器単体及び複合サイクル(コンバインドサイクル)としての発電プラントの大容量化と共に、省資源、省エネルギーの観点から、高効率で稼働率に優れた高い信頼性と柔軟な運用特性を要求されている。これらを実現するうえで工学上の多くの研究開発成果が貢献してきているが、このなかで大型ターボ機械、すなわち大型回転軸系の軸振動現象を精度良く把握し、機器設計に生かすことは機器を安全かつ効率良く運用するうえで最も重要なことのひとつである。

従来、筆者が知る範囲で、当分野での研究を大別すると、(1)回転軸の固有値解析(一般には軸の危険速度として扱われる)、(2)回転軸に残存する不釣り合いによる軸の不釣り合い振動の予測、不釣り合いの位置とその量の評価法、(3)回転軸に生じる不安定振動現象の解明等が挙げられる。これらの諸振動事象は対象とする機器の運転条件、回転軸の形状、軸受を含む支持系の特性により影響をうけるので、個々の機器を対象とした振動事象の解明とその対策に関する研究が必要となる。特に回転軸の軸振動問題を解くうえで、解析上の境界条件としての軸受油膜の静特性、動特性、軸受支持特性の精度の高い把握とその軸振動に及ぼす影響評価が重要となる。また、作動流体の高温高圧化によるエネルギーポテンシャルの上昇により、新たに流体の励振力による振動現象が経験されており、その早急な解明と効果的な対策が高効率な原動機の実用化に重要となってきている。

本研究はこの様な状況に鑑み、従来の研究成果を踏まえつつ大型ターボ機械のなかでも代表的な蒸気タービン、ガスタービンの各発電システムにおける回転軸系の軸振動現象の定量的把握と新たな振動現象の解明、その対策に関するものである。

対象とする軸系は横置きに配置された回転軸とそれを支える支持系から構成されている。この支持系は軸受台、軸受本体、軸受油膜から成り、その静的、動的特性はこの回転軸系の振動に非常に大きな影響を与えることが従来の研究、実機での運用経験より明らかにされてきている。特に軸受油膜の静的、動的特性は当振動現象を解明するうえでの基本となる特性である。この特性は軸受形状、使用条件等で大きく異なる。この様な視点から軸受の特性、特に大型ターボ機器に適用されている大口徑軸受の実サイズ、実使用条件下での特性解明が必要となる。更にこの様な基本的な事項の解明に加え、蒸気等の流体力による新たな軸振動現象の解明は機器性能、機器信頼性を包

括的に考慮した合理的な設計を行う上での必要事項となる。

第1章, 第2章では大型ターボ機械である蒸気タービン, ガスタービンの回転機械としての特徴とそこに発生する種々の軸振動現象, そのシミュレーション技術, 評価法について述べている。ここで, 境界条件としての軸受油膜特性の重要性について述べると共に新たな振動現象としての蒸気力による励振振動, ガスタービンのような柔構造回転体での多自由度振動系の特徴を述べた。

第3章では軸振動解析上の基本境界条件たる軸受油膜の静特性, 動特性の実験的研究成果について述べたものである。本試験の特徴は実サイズ, 実機使用条件下で, 動特性に影響を及ぼす油膜圧力分布, 温度分布を静特性として把握すると共に加振機による油膜のバネ, 減衰定数を求める動特性試験の実施にある。設計製作した試験装置は試験機能として世界有数の機能を有しており, 供試軸受として大型タービン発電機に適用される大口径の楕円型軸受とパッド型軸受を用いている。本章では試験装置の特徴, 試験方法, 計測システム及び試験により得られた各軸受の静特性, 動特性とその実機適用結果について述べた。

第4章では蒸気力によって誘発される軸系の不安定現象を静止部と回転体との偏心による狭間隙分布でのトルクアンバランスと回転体の円周方向に生じる非対称圧力分布によるものとし, シール用ラビリンスを用いた実験的解析について述べたものである。本試験解析結果並びに構築した狭間隙部の非圧縮流れ解析モデル結果より軸系の安定解析結果を行うことで狭間隙部内のスワール流れが不安定化力として作用することについて明らかにしている。

第5章では第4章で得られた狭間隙部流れについてより一般化した数値解析モデルの構築を行い, 流体の圧縮性の影響と不安定化力の発生形態を明らかにした。圧縮性に関しては音速の理論値と解析モデルとの比較によりその妥当性を検証すると共に実用範囲での流体条件では実用上その影響は少ないことを明らかにし, またスワール流れを伴う狭間隙部で流れの形態とそれによる不安定化力発生メカニズム, 及び偏心率が大きいほど不安定化力が強く作用することを明らかにした。また構築した解析モデルの発展性について述べた。

第6章ではガスタービンの軸系を例として, 軸系が柔構造の要素より構成されている回転系, 即ち多自由度の系における新たな簡易物理振動解析モデルを構築し, その有用性について実験検証した結果について述べたものである。多数の自由度を有するケーシング, 剛性評価が困難な組み立て式ロータ, 支持部の締結構造からなる軸系に対し, 予め個々の振動特性(固有値)を把握しておくことで複合構造体としての解析モデルを構築し新たな固有値の把握を可能としている。また本解析モデルはバネ, 質量系でモデル化を行っており, 剛性評価の不確かさのある要素部分の重み付けを行うことで解の収束性を高めている。

第7章では第3章から第6章で得られた研究成果と従来研究成果, 新たな実験的研究および実機での運用経験を基に, 第2章で述べた大型ターボ機械に発生する振動現象に対して構築した軸振動異常診断システムについて述べたものである。本システムは異常振動の周波数, 時間, 負荷, 回転依存性等の振動特性, 振動とその発生要因と相関, 数値シミュレーションによりほぼ発生異常振動の特性とその要因を定量的に把握可能としたもので, その一部は実用に供されているものである。なお, ここでは, 実験的研究でのラビング振動, ロータクラック振動現象の試験成果を併せて述べている。

第8章はまとめであり, 本論文で得られた研究成果をとりまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 田 元
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 藤 川 重 雄

学 位 論 文 題 名

大型蒸気およびガスタービンに生じる 軸振動現象に関する研究

エネルギー変換機器としての蒸気タービン、ガスタービン等のターボ機械は主要なエネルギー変換機として長い歴史を有しており、今日においても我々の社会生活を支える基幹動力として主要な役割を果たしている。現在、これらのターボ機械は機器単体および複合サイクル(コンバインドサイクル)としての発電プラントの大容量化と共に、省資源、省エネルギーの観点から、高効率で稼働率に優れた高い信頼性と柔軟な運用特性を要求されている。これらを実現するうえで工学上の多くの研究開発成果が貢献してきているが、なかでも大型回転軸系の軸振動現象を精度良く把握し、機器設計に生かすことは機器を安全かつ効率良く運用するうえで最も重要なことの一つである。

本研究はこの様な状況に鑑み、従来の研究成果を踏まえつつ大型蒸気タービン、ガスタービンの各発電システムにおける回転軸系の軸振動現象の定量的把握と新たな振動現象の解明、その対策を論じたものである。対象とする軸系は横置きに配置された回転軸とそれを支える支持系から構成されている。この支持系は軸受台、軸受本体、軸受油膜から成り、その静的、動的特性はこの回転軸系の振動に非常に大きな影響を及ぼすことが従来の研究や実機での運用経験より明らかにされてきている。特に軸受油膜の静的、動的特性は本振動現象を解明するうえでの基本となる特性である。この特性は軸受形状、使用条件等で大きく異なる。この様な視点から軸受の特性、特に大型ターボ機器に適用されている大口径軸受の実サイズ、実使用条件下での特性解明が必要となる。さらにこの様な基本的な事項の解明に加え、蒸気等の流体力による新たな軸振動現象の解明は機器性能、機器信頼性を包括的に考慮した合理的な設計を行う上での必要事項となる。

本研究の主要な成果は次の4点に要約される。

(1) 軸振動問題を解析する上での基本境界条件である軸受油膜の静特性、動特性を実験的に研究するため、軸受特性試験装置を開発、製作したが、本試験装置は世界有数の試験機能を有しており、供試軸受として大型タービン発電機に適用される大口径の楕円型軸受とパッド型軸受を用いている。これによって、実サイズ、実機使用条件

下で、動特性に影響を及ぼす油膜圧力分布、温度分布を静特性として把握するとともに、加振機による油膜のばね、減衰定数を求める動特性試験を実施し、各軸受の静特性、動特性、とそれらを実機に適用した場合の結果について述べている。

(2) 蒸気力によって誘発される軸系の不安定現象を、動翼先端からの蒸気リークの不均衡に起因する回転軸のトルクアンバランスと、回転軸の狭間隙シール部に生じる円周方向の不均衡な圧力分布によるものとして実験的に論じた。本試験結果ならびに構築した狭間隙部の非圧縮流れ解析モデルの結果より軸系の安定解析を行い、狭間隙部内のスワール流れが不安定化力として作用することを明らかにしている。

(3) 上述の狭間隙部流れについて、より一般化した数値解析モデルを構築し、流体の圧縮性の影響と不安定化力の発生形態を論じている。すなわち、圧縮性に関しては音速の理論値と解析モデルとの比較を行うことによりその妥当性を検証するとともに実用範囲での流体条件では実用上その影響は少ないことを明らかにし、またスワール流れを伴う狭間隙部での流れの形態とそれによる不安定化力発生メカニズム、および偏心率が大きいほど不安定化力が強く作用することを明らかにしている。また構築した解析モデルの発展性についても論じている。

(4) ガスタービンの軸系を例として、軸系が柔構造の要素より構成されている回転系、すなわち多自由度の系に対する新たな簡易物理振動解析モデルを構築し、その有用性について実験的に検証している。多くの自由度を有するケーシング、剛性評価が困難な組み立て式ロータ、支持部の締結構造からなる軸系に対し、あらかじめ個々の振動特性(固有値)を把握しておくことから複合構造体としての解析モデルを構築し新たな固有値の把握を可能にしている。また本解析モデルは、ばね一質量系でモデル化されており、剛性評価に不確かさのある要素部分に重み付けを行うことで解の収束性を向上させている。

これを要するに、著者は、大型蒸気およびガスタービンに生じる軸振動現象を論じ、大型回転軸系の振動に関して有益な知見を得たものであり、振動工学ならびに機械工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。