

氏名	森 圭史 ^{もり よしふみ}
授与学位	博士(工学)
学位記番号	理工博甲第622号
学位授与年月日	平成26年3月17日
学位授与の要件	学位規則第4条1項
研究科, 専攻の名称	理工学研究科(博士後期課程)システム設計工学系専攻
学位論文題目	往復動式圧縮機の振動解析モデルとモニタリング技術への応用に関する研究
論文審査委員	主査 山口大学 教授 齊藤 俊 山口大学 教授 小河原 加久治 山口大学 教授 江 鐘偉 山口大学 教授 藤井 文武 山口大学 准教授 森 浩二

【学位論文内容の要旨】

国内外の化学プラントに於いて、種々のメンテナンス技術を導入し、設備保全は行われているものの、多様な故障事例が報告されており、発生要因や損傷箇所を事前に推定可能とする技術導入が求められている。本研究の対象設備である往復動式圧縮機は、石油精製プラントや石油化学プラントで広く使用され、使用範囲も多岐にわたり産業のあらゆる分野に重要機械として重要な機器として位置づけられている為、安全・安定した連続運転が望まれている。往復動式圧縮機の保全方式は、振動法を用いた状態監視技術による状態基準予防保全と時間基準予防保全を組み合わせた総合予防保全を実施することで突発的な故障を未然に防ぐ方式が一般的である。しかし、長期連続運転下で故障が生じ運転停止に至るなど、多大な損害を生じていることが報告されている。それらの発生要因は必ずしも解明されていないのが現状である。また、往復動式圧縮機は構成要素が多く、駆動機構や回転機構を備えており、往復動により定常の衝撃荷重が発生することから、従来のような設備診断技術では予知できない事例が多数存在する。従来のモニタリングシステムは絶対値で評価を行っており、損傷部位を事前に把握できず、その度合いを判定できるシステムとは言い難い。そして、往復動式圧縮機は回転の基本周波数とは関係しない周波数が多数存在しており、周波数領域で評価することは困難とされている。加えて、運転中はケーシングに覆われている上に高速運転を行っている為、装置内部に発生している現象に対して実機を用いた測定及び把握は困難である。

本研究では、往復動式圧縮機を対象とした故障度合の把握及び新たなモニタリング技術の確立を目的として、劣化・損傷をモデルパラメータ変化で表現する数理モデルを提案し、数値解析により往復動式圧縮機に対する周波数特性と固有振動特性を検討することにより運転時に発生している共振ピークの発生要因を明らかにした。また、提案した振動解析モデルを応用して、往復動式圧縮機に対する新たなモニタリング技術を提案した。

本論文は、本章8章から構成されている。

第1章は序論であり、往復動式圧縮機における予知メンテナンスの重要性、発生要因の解明、監視技術の概要について、現状の問題点を述べた。そして、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、往復動式圧縮機の運転中に発生した損傷事例に基づいて、頻出する損傷箇所の調査とその破面解析及び実事例に基づき、想定される 3 条件の FEM 解析によって損傷原因と発生要因を検討した。その結果として、クロスヘッドーピストンロッド間の接合状態が損傷原因であること、そして往復動式圧縮機の発生する接合部応力はピストンロッド中間グランド部の摩耗に起因する曲げ変形によって設計で想定している許容応力を超える可能性があることを明らかにした。

第 3 章では、周波数領域での評価が困難とされている運転時の動特性に関し、固有振動数と運転中の周波数応答の関係について検討した。正常運転時においてクランク回転数の基本周波数に関係しない多数の共振ピークが存在しており、その中で支配的と考えられる周波数は、固有振動数に対応していることが推察された。また、故障発生前後において周波数特性が変化しており、故障発生部位と周波数特性との関係について考察を行った。第 4 章では、第 2 章、3 章で得られた結果に基づき、損傷箇所や損傷の度合い、及び、系の動特性をモデルパラメータ変化で表現する数理モデルを提案した。提案した数理モデルは、往復動式圧縮機の可動部を 4 つの剛体パーツに分け、各パーツ間の連結部及び摺動部の特性をモデルパラメータである弾性部材の特性に置換した 11 自由度振動解析モデルである。振動解析モデルに基づく周波数応答解析より 100Hz~1.8kHz に顕著な共振ピークが存在し、実機の運転中に発生している支配的な周波数を提案モデルにより表現できることを明らかにした。また、第 3 章で示した故障事例を想定した剛性変化に対する数値シミュレーションを行い、提案モデルにより実事例と同様な周波数特性変化をシミュレートできることが分かった。さらに、連結部、摺動部のばね定数を変化させることにより、故障事例時に想定される周波数特性変化を表現できることを確認した。

第 5 章では、振動実験及びモデルに基づいた固有値解析を行い、往復動式圧縮機の固有振動特性について検討した。その結果として、クランク角度に依存した固有振動特性を有しており、ピストンロッドの曲げ及び伸縮に起因する支配的なモードが存在していることを明らかにした。また、主要部品で構成されるクロスヘッドーピストンロッドーピストン系の単体における曲げ及び伸縮モードについて検討し、実機運転中に発生している支配的な周波数は曲げ及び伸縮モードに対応する固有振動数が関連していることが分かった。

第 6 章では、運転時の周波数特性と系の固有振動数の関係を詳細に検討するために、実機に対応した周波数特性を有する小型実験装置を製作し、その小型実験装置を用いた振動実験及びモデルに基づいた固有値解析を行った。小型実験装置を用いた振動実験に基づく固有振動数と固有モードに関する検討を行い、提案モデルが系の固有振動特性を表現できることを確認した。また、系の固有振動特性を利用したパラメータ同定を行い、固有振動特性と運転時周波数特性との関係を利用したモデルパラメータ推定法について検討した。

第 7 章では、これまでの検討結果を応用して、往復動式圧縮機を対象とした故障発生要因の解明や損傷箇所を事前に特定するためにマルチボディダイナミクス解析を用いた新たなモニタリング技術を提案した。本研究で提案するモニタリング技術は、運転時に測定される加速度や各加速度時系列データの周波数応答解析により定められる特徴的な共振周波数を誤差関数と定義し、運動方程式中に示されるモデルパラメータを同定することで連結部や摺動部の状態を定量的に評価でき、発生要因や損傷箇所を特定することができるというものである。

第 8 章は結論であり、本研究の内容と得られた知見をまとめ、残された研究課題を述べている。

【論文審査結果の要旨】

本研究の対象設備である往復動式圧縮機は、石油精製プラントや石油化学プラントなどで広く使用されており、使用範囲も多岐に亘る産業のあらゆる分野の重要機械として位置づけられ、安全で安定した連続運転が望まれている。しかしながら、現存するプラントは、すでに建設後 30 年以上経過したものが殆どあり、老朽化による設備の劣化損傷、長期連続運転による摩耗、メンテナンス時の不備などに起因する大小様々なトラブルが報告されている。昨今の経済環境下において、コストダウンの実現と効率的な連続運転への要求はこれまで以上に高まっており、損傷による異常を早期に発見し、トラブルを最小限に抑え、なおかつ最適な補修計画の立案を可能とする信頼性の高い設備診断技術の確立が求められている。連続運転時には、シリンダ内の圧力、温度計測やフレームの振動加速度など様々なセンサ・計測機器を用いたモニタリングを実施し、状態監視が行われているものの、必ずしもトラブルの低減には至っていない。また、状態監視による異常が見つかった場合に、異常個所まで特定することは難しく、定修時において検査箇所を絞り込むなど、効率的な修繕作業を実施するためのデータを提供するまでの信頼性はない。これは、これまで開発されてきたプラント監視システムは、汎用的なものであり、個別の装置に対応した評価・診断ができておらず、実際に起こっているトラブルの根本的な原因が究明されていないためであると考えられる。現場で起こっている現象は、非線形性に起因した複雑現象であり、現象に対応した評価・診断技術の確立が必要である。

本研究では、往復動式圧縮機運転時の可動部の動的な特性を利用したモニタリング技術について検討したものである。実機の動的な特性を評価可能とする数学モデルについて検討し、そのモデルパラメータを用いて、装置の劣化・損傷の故障度合いや故障個所を特定する手法を提案している。

本論文は、7 章からなり、第 1 章において、プラントの維持管理に関する基本的な考え方と予知メンテナンスの重要性、現行のプラント監視技術について論じ、研究目的と論文の構成について説明している。

第 2 章では、往復動式圧縮機可動部のクロスヘッドーピストンロッド間の接合部に発生した損傷事例に対して、破面解析を行い、両振り平面曲げ応力状態による疲労破壊が損傷原因であることを明らかにし、クロスヘッドーピストンロッド間のダブルナットの接合状態の緩みや摺動部の摩耗によるクリアランス変化により生ずる曲げにより、疲労限度を超える応力の増大の可能性があることを有限要素法による応力解析により示している。

第 3 章では、株式会社トクヤマの徳山製造所で稼働中の往復動式圧縮機を対象に、正常運転時および故障発生前後における実機運転時の加速度応答に対する周波数解析、回転遮断時の同様の周波数特性の回転速度依存性について調査し、実機運転時の周波数応答には、クランク回転数の基本周波数とは異なる特徴的な周波数ピークが存在し、その中に回転遮断時に観察される共振振動数と関連付けることのできるものが存在することを明らかにしている。また、故障発生前後の実機運転時の周波数特性に関して、ピークが確認できる周波数、および、ピークの高さ共に、大きく変化していることを周波数応答の比較により明らかにしている。

第 4 章では、往復動式圧縮機可動部を対象とした動力学モデルを提案している。提案モデルは、クランク軸の回転を入力とし、剛体として仮定されたコネクティングロッド、クロスヘッド、ピストンロッド、並びに、ピストンが、それぞれ水平方向と垂直方向にばねで連結され、各摺動部には、垂直方向にばね支持された 11 自由度系である。本モデルは、運動学的、及び、幾何学的非線形性を有するものである。実験結果との比較により、提案モデルを用いて、実機運転時の周波数特性を模擬できる数値シミュレーションが可能であること、連結部、及び、摺動部のばね特性を変化させることにより、実機の故障前後において観察される周波数特性の変化を模擬できることを示している。

第 5 章では、振動実験、並びに、提案モデルに対する固有値解析により、往復動式圧縮機の固有振動特性について論じている。固有値解析では、局所線形化手法を用いて、一定のクランク回転角度に対する定式化を行い、クランク角度を変化させた振動実験、並びに、固有値解析結果より、系の固有振動数及び固有モードは、クランク角度に依存して変化すること、固有値解析により推定される固有振動数の中に、実機運転時の周波数応答において観察される周波数が存在することを明らかにしている。

第 6 章では、実機と同様の固有振動特性を有する小型実験装置を製作し、実機で確認された実機運転時の周波数特性と固有振動特性との関係を調べている。実験により定められる共振振動数と固有値解析によ

り定められる固有振動数を用いたパラメータ同定に基づきモデルパラメータを定めることにより，提案モデルを用いて，実機の固有振動数と固有モードを共に表現できること，また，実機運転時の周波数特性を定量的に表現できることを示している。

第7章では，往復動式圧縮機の周波数特性を利用した提案モデルによるモニタリング技術を提案している。運転時の周波数特性を利用して，モデルパラメータの経時変化を調べることにより，損傷箇所の特定制や損傷度合を推定する手法を提案している。

公聴会での主な質問は，内部の運動を計測する他の手法について，異常時のスペクトルに観察される剛性低下に伴う共振振動数の上昇原因，得られた知見から新たな機械を設計する際の考え方などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より，本論文は，独創性，信頼性，有効性，実用性ともに優れ，博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。