

外21-3

早稲田大学審査学位論文(博士)の要旨  
早稲田大学大学院理工学系九付

3248

# 博士論文概要

## 論文題目

実験計画法に基づいた回転軸系及び車載用燃料  
直噴装置の最適設計に関する研究

(A Study on Optimum Designs of Rotary Shaft Systems and Fuel Injection  
Equipment Based on the Experimental Design Methodology)

申請者

土屋 雅弘

Masahiro Tsuchiya

2001年5月

近年、国内および国際的な競争力強化の目的のために各種製品において、より一層の開発期間の短縮とコスト削減のために試作回数を減らすことが求められている。試作回数の削減を目的として数理計画法、GA、シミュレーテッド・アニーリングなどを応用した最適化ツールが開発されて急速に実用化をはじめている。一般的に、離散最適化問題にはGAが適しており、連続最適化問題で応答曲面に多峰性がある場合には、局所最適解に落ち込みにくいシミュレーテッド・アニーリング、応答曲面が単調でかつ極値を1つ有する場合には探索効率を重視して数理計画法を適用することが多い。一方、ロバスト設計や応答曲面の作成を目的としたタグチメソッドや実験計画法が企業の製品開発の現場で最近特に最適化手法と併用する形式で注目されはじめしており、実験計画法と最適化手法を組み合わせた設計ツールも市販され始めている。しかしながら、個々の設計には多くのノウハウが存在し、これらの設計ツールの簡単な使用だけでは設計が行えないことも指摘されている。

我々の身近にある回転軸系の設計対象の1つとして遠心圧縮機が上げられる。遠心圧縮機は、石油精製や肥料合成などに使われる回転機械であり、コスト競争力の強化が企業の重要な課題となっている。コストを低減するためには、高速、小型化して材料加工費を削減する必要がある。しかし、遠心圧縮機の一層の高効率化を目的とした羽根車の多段化や軸の細径化により、軸系が相対的に長軸化する傾向にある。軸系の長軸化により、従来では問題にされなかつた2次、3次、4次のモード危険速度が低下して、定格回転数範囲に近づくことが深刻な問題となっている。そこで、従来用いられてきたティルティングパッド軸受にダンパ機構を備えた高減衰軸受を開発して、運転に悪影響を与える可能性を有する全てのモード危険速度を同時に抑制することが課題となった。しかしながら、現行では、ダンパ機構の最適設計解の総数を把握して、各解が軸系の動挙動といかなる関係にあるかを正確に整理して設計指針を導くことに多大な労力を要するためより実用的な最適設計手法が求められていた。

一方、他の設計対象の1つとして燃料直噴型エンジン用の燃料噴射装置が上げられる。この燃料噴射装置は、直接エンジン・シリンダ・ヘッドに装着するため、エンジン・シリンダにおける圧縮／給気過程のタイミングに応じて、高い圧力をかけた燃料を、従来型よりも短時間で噴射する必要がある。このため、従来にも増して噴射弁の駆動力を大きくしなければならなかった。一方、防音材コスト低減の観点から、開閉弁に伴う騒音は従来程度に抑える必要があった。しかし、燃料噴射弁の駆動力を大きくすると、騒音は一般に大きくなるばかりでなく、2次噴射（閉弁時に弁体が燃料噴射口に衝突して跳ね返る現象）が発生して問題になった。これらの互いに背反する課題を同時に解決することが最適設計の課題となった。しかしながら、従来では、作動音と2次噴射について、各因子と燃料噴射弁構造との基礎的な検討が不十分であった。このため、開弁と閉弁の騒

音に対する影響度の比較や、燃料噴射弁の構造振動におけるモード周波数と測定スペクトラムとの対応関係の検討、さらには、騒音と2次噴射を同時に抑制する設計を検討するまでには至らなかった。

そこで、本論文では市販の実験計画法と最適化手法を組み合わせた設計ツールの使用では解決できないこれらの製品の実際の設計における上記の問題を考慮しつつ「最適解導出過程の見通しの良さ」に主眼を置いて、実験計画法に基づいた回転軸系及び車載用燃料噴射装置の最適設計に関する研究を行った。

本論文は序論を含めて6章で構成されている。序論では、回転軸系の制振設計および衝撃騒音低減設計における従来の設計と課題を述べた後、本論文の構成を説明した。第2章から第4章では、ダンパ軸受で支持された遠心圧縮機軸系の制振設計法について述べる。特に羽根車の多段化等により軸系が相対的に長軸化して従来では問題にならなかった曲げ2次モード危険速度が定格回転数範囲に接近する現象へ対処するために、まず、第2章では、回転軸系の曲げ1次モードと、曲げ2次モードの応答倍率を目的関数に設定して、最適解の存在空間を概略的に把握することを目的として、ダンパ軸受で支持された軸系を、2円盤ロータ・モデルで近似することにより、回転軸系の運動方程式を立てた。この運動方程式を逆解析することにより、応答倍率からダンパ軸受定数を求める逆問題解析式を導く。このようにして導出した解析式を用いて、曲げ1次モードと曲げ2次モードの応答倍率マップを作成し、設計軸系の力学的な性質を定性的なレベルで検討した。その結果、従来では、曲げ1次と2次を同時に抑制可能なダンパ軸受定数を設計に採用していたのに対し、曲げ1次を犠牲にしても定格回転数範囲により接近した曲げ2次だけを抑制する設計法があることが新たに判明した。この設計法では、ダンパ部の弾性定数が従来比約10倍になるため、曲げ2次の危険速度を高域へシフトさせる効果もあることが分った。2章における検討の結果、ダンパ軸受の採用が、遠心圧縮機の軸系の低振動化に有効であることが分り、3章と4章では、ダンパ軸受の籠型ばねとスクイズフィルムダンパを主要な設計因子に定めて、検討を進めることにした。特に3章では、実際の設計現場では、実験計画法により提供される手法群をその数理統計的な性質をよく考慮し、回転軸系の振動抑制等の設計の諸問題に慎重に適用し、最大限の効果を引き出すことが困難であることを考慮し、既存のFEMによる回転軸系の振動解析用ソフトと実験計画法を組み合わせて、最適解を高精度に分析することを目的とした、実験計画法に基づく軸振動最適設計支援システムを開発した。開発したシステムでは、軸系の設計で実際に用いられる目的関数と設計変数、及び、付加質量の扱いやメッシュの自動調節ルール等の軸系モデルに関する諸条件の設定や、各設計変数の水準数や上下限値と交互作用の有無等最適な直交表選択と割り付けを自動的に行うために必要な条件を、メニュー形式で選択できる専用画面を作成し、解析結果

は、応答曲面法による解空間の視覚的な把握と、分散分析法による設計変数の影響度解析、また、非線形偏差解析法に基づいたロバスト設計などにより、軸系の動挙動と最適設計解を多面的に評価することを可能にした。第4章では、設計者にとっては、極めて難解な軸系の動挙動を実験計画法により、見通し良くする工夫をしながら、ダンパ軸受の最適設計を進める方法の提案をするとともに、試作ロータ実験により設計結果の妥当性を検証する。そこで、3章で述べたシステムを試作ロータに適用して、試作ロータの1次～4次振動モードに着目し、各モード形状を非減衰危険速度マップと対応付けて分類・整理した。本システムでは実機の複雑なモード形状をテンプレートマッチングにより自動的に判別する機能を実装した。次に、各モードにおける応答倍率を個別の目的関数に設定して実験計画法により分析して、設計変数と設計変数間の交互作用が応答倍率に与える影響度を評価する。また、応答曲面分析により、危険速度と応答倍率の性質を評価する。これらの評価の結果、2次モードと3次モードがパレート解的な様相を示すことが分ったので、1pノルム法により、両モードの妥協解を決定した。そして、得られた最適解の候補に対してAPI規格による評価を行い、設計基準を満足することを確認すると同時に、試作ロータ実験により結果の妥当性を検証する。第5章では、燃料直噴型エンジンに装着する燃料噴射装置の駆動騒音（衝撃騒音）の低減設計について述べた。まず、FFTと比較して衝撃波形の解析に有利なウェーブレット変換による衝撃騒音の分析と、FEMによる構造振動モード解析を同時に実行して、騒音スペクトルと振動モードの対応関係を発見し、可聴帯域内の振動モードを抑制した燃料噴射装置の低騒音構造を求めた。この低騒音構造で設計すれば、燃料噴射装置の振動振幅が約1/3に減少することをFEM解析により確認する。次に、ダイナミック・ダンパ機構を備えた燃料噴射弁を提案し、実験計画法によるダイナミック・ダンパ機構の最適化を行った。まず、燃料噴射弁の構造をばねと質量からなる2自由度系の構造にして、ダイナミック・ダンパ機構を構成するとともに、この動作シミュレータを作成して設計変数のパラメータ検討に用いる。設計変数をダイナミック・ダンパ部のばね定数とマス質量、及び弁体質量とし、閉弁時の衝突騒音と2次噴射量をそれぞれ独立した目的関数に定めて、ダイナミック・ダンパ部の衝突騒音と2次噴射量を同時に抑制する設計を行う。第6章では、各章で得られた本研究の主要な成果をまとめて結論とする。すなわち、本論文では、製品の信頼性向上を目的として、実験計画法と最適化手法を実際の製品設計に適用してきている。設計現場との密接な連携作業を実施し、現場専用にチューニングした設計支援システムの提供と、これを活用した設計プロセスの提案を行った点を述べる。また、実験計画法の観点から従来型の設計手法を見直すことにより、従来では試行錯誤や熟練設計者の感に頼って解決されていた非定型な部分を定型化した新たな設計プロセスを生み出すことができた成果を述べて結論としている。