

# 論文の要旨

題 目：粉体ダンパの振動特性とトポロジー最適化によるピストンへの応用に関する研究

(Research on vibration characteristics of powder dampers and application to pistons by topology optimization)

氏名 市川 和男

2050 年に向けた社会全体での脱炭素化を推し進める上で、内燃機関をはじめとする動力源の振動騒音対策もまた更なる改善を必要としている。上記実現に必要な不可欠となるのは、内燃機関の熱効率向上に直結する、圧縮比の向上をはじめとした燃焼技術の進化である。これを実現可能とするには、燃焼性能と相反する振動課題について、ライフサイクルでの環境負荷物質低減を考慮した簡素な構成で実現できる革新的な構造での制振対策が最も重要となる。本研究では振動低減手段のひとつとして、熱効率に寄与する燃焼起振力を損なうことなく振動伝搬のみを抑制する手法について実現手段を検討した。検討に際しては、高温かつ高荷重が作用する燃焼室近傍での振動低減を想定した、物体間の摩擦散逸現象を利用する振動減衰構造を導出し、妥当性と有効性を示した。さらには離散化要素法によるシミュレーションを活用して振動減衰原理を解明するとともに、ガソリンエンジンピストンへの適用効果の検証を行うことでその有用性について述べている。

本論文は、以下の 6 章で構成している。

第 1 章の「緒論」では、自動車動力源の進化の歴史と最新のエネルギーセキュリティに関わる観点から内燃機関の熱効率改善と振動低減技術の必要性について述べた。

第 2 章の「摩擦を利用した、振動減衰のモデル化」では、構造体の制振原理のひとつであるクーロン摩擦を基礎理論とした減衰現象についての考察を行い、振動試験によってその効果を検証した。検証に際し金属 3D プリンタにて減衰理論の裏付けとなる試験体を試作造形することでモデル精度の検証を行うとともにその試験方法についても精度確保に向けた考え方を示した。各種ある減衰構造について剛性と損失係数の対比を行い、最も優れた減衰構造として、粉体ダンパによる摩擦効果について可能性を示した。

第 3 章の「微細粒を用いた粉体ダンパの性能」では、限られた部品空間内で摩擦による振動減衰を最大化にするため、基本粒径 100  $\mu\text{m}$  以下の微細粒を用いた粒状体ダンパの性能評価手法について、実験検証方法ならびに設計指針についての検討を行った。実験検証には内部に中空形状を有する短冊試験片をもちいて内部に封入する微細粒子の粒子径、充填率、振動振幅をパラメータすることで振動減衰性能の評価指標である、損失係数の変化について検証を行った。検証に際しては粉体ダンパ固有の制振原理であるひずみ量への依存性について、試験体の実働時変位計測と固有値解析を行うことでその期待効果とメカニズムについて考察を行った。

第 4 章の「粉体ダンパのシミュレーションモデル」では、3 章で述べたパラメータに対する封入粒子の挙動ならびに減衰に寄与するエネルギー収支を計算解析によって求めることで実験との対比を行った。振動シミュレーションに用いるパラメータの同定には、粉体の形状起因で性能変化する静摩擦係数の精度検証方法として、安息角測定を用いた検証方法について考察を行ない、パラメータとして実装を行った。計算解析の実施には、Hertz の接触理論をベースに材料の機械的特性を考慮した、離散要素法 (discrete element method, 以下 DEM) シミュレーションを用いて計算原理を述べ、減衰特性の予実差について考察を行った。

第 5 章の「ガソリンエンジンピストンへの減衰設計」では、導出した摩擦減衰構造をピストンへと適用するための設計手法について検討を行った。検討においては、実稼働中のピストンへと作用する荷重と各部の機能について述べ、その算出方法について計算解析を行った。算出した最大応力を基にした具体化設計では、作用力を境界条件として最小体積で応力緩和が可能な構造として、トポロジー最適化を用いた構造導出を行った。構造導出に用いた最適化シミュレーションでは、2 種類の計算手法を構築して、理想となる構造について検討を行った。計算手法の 1 つは、任意質量で剛性を最大化する単位構造（ラティス構造）を周期的に配置するもので、2 つ目は一般的な CAE ソフトウェアによるトポロジー最適化結果に形状最適化を加えてより外形輪郭を捉えやすくするものとなる。それぞれを比較分析した結果、最も効率的に軽量化を行うためには、ピストンへと作用する様々な荷重のうちエンジンの燃焼によって発生する圧力荷重に対する応力を緩和することが重要となること、ならびに汎用計算手法による最適構造では市販のピストン構造と類似した外形構造になりうることを示した。以上の知見をまとめ、ピストン構造内部に減衰構造を適用したピストンを試作し、ハンマリングによる加振試験を行うことで部品単体での減衰効果について定量化したうえで比較を行なった。

第 6 章の「結論」では、本論文で獲得した知見を総括した。