

## 博士学位論文審査要旨

氏名	池田 和正
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第273号
学位授与の日付	2021年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文の題目	エネルギー伝播に基づく低振動騒音の二段階構造設計に関する研究
論文審査委員	主査 神奈川大学 教授 山崎 徹 副査 神奈川大学 教授 原村 嘉彦 副査 神奈川大学 教授 江上 正 副査 神奈川大学 教授 中尾 陽一 副査 神奈川大学 教授 中西 裕二 副査 岐阜大学 教授 松村 雄一

### 【論文内容の要旨】

自動車業界では、近年の地球温暖化に伴い、CO<sub>2</sub>排出規制が厳しくなってきたことから、エンジン車の代替として、電気自動車やハイブリッド車が大幅に普及してきている。そうしたタイプの自動車は、大きな騒音源であるエンジンを持たない(もしくは走行シーンによっては動かさない)ため、エンジン車に比べ静粛性に優れており、その静粛性が一つの付加価値となっている。しかし、従来エンジン騒音によって隠れていたコンポーネント製品による騒音が目立つようになり、騒音低減のための技術開発がさかんに行われている。

しかしながら、振動騒音低減の取り組みは一筋縄ではいかないことが多々ある。なぜならば、コンポーネント製品設計において満足しなければならない性能は、振動騒音だけではなく、製品の出力・効率や、車両搭載性を鑑みた体格・重量、品質保証に関わる強度・耐久性などとの両立が求められるからである。しかし、従来の振動騒音解析による結果を踏まえて設計変更をしようとする段階では、3D構造は出力・効率や体格・重量、強度の観点から既に固まっているため、振動騒音のための設計代が残っていない状況に陥るのである。

このような背景の下、本研究では、振動騒音の設計をフロントローディングし、出力・効率や体格・重量、強度といった他の性能と振動騒音を同時期に設計する「初期設計」と、初期設計で考慮しない固有モードに手を打つための「詳細設計」からなる「二段階設計」の手法確立を目的とし、検討を行った。

第2章「基礎理論」では、波動論の観点から振動騒音の発生機構について説明し、振動騒音の低減のためには、二段階設計によって、波動の伝播を抑制するか、もしくは共振を抑制することが重要であることを示した。また、波動の伝播を抑制するための初期設計には解析SEA (Statistical Energy Analysis, 統計的エネルギー解析法) が適しているが、*MOF* (Modal Overlap Factor, モーダルオーバーラップ係数) < 1 の低周波数帯域における有効性の確認が課題であることを示した。一方、共振を抑制するための詳細設計に活用する手法としては、固有周波数を設計できるモード解析が適しているが、加振力が広帯域にわたって発生する場合、固有モードによる振動速度を抑制す

る必要がある。そこで、放射部品以外の振動エネルギーを大きくして間接的に放射部品の振動エネルギーを小さくするか、もしくは放射部品の振動エネルギーを直接小さくすることが有効と考えるエネルギー伝播視点の着想について述べた。同時に、共振を含む振動挙動を示す対象物への、エネルギー伝播視点の着想の適用性確認が課題であることを示した。

第3章「伝播特性の初期設計による波動伝播の抑制」では、解析SEAを用いた初期設計の課題である、 $MOF < 1$ の低周波数帯域における初期設計の有効性について検討を行った。その結果、 $MOF < 1$ の低周波数帯域においても、伝播特性であるCLFを初期設計することにより、第一波の波動により伝播する振動エネルギーを低減できることを示した。

第4章「初期設計の実践」では、第3章で有効性を示した解析SEAを用いた初期設計について、設計フローを提案し、実際の製品であるGDI高圧ポンプを対象に実践した。ポンプは放射部品が多数存在するため、各部品の振動エネルギーを任意の評価点における音響エネルギーに換算する評価式を導出し、解析SEAの基礎式と本評価式を用いて、音響エネルギーが最小もしくは最大となる初期設計を行った。また、ポンプ模擬試験機を用いた評価検証により、初期設計により得られた設計解の妥当性を示した。

第5章「詳細設計へのSEAモデルの適用」では、共振を抑制するための詳細設計において、エネルギー伝播視点の着想の適用可否を検討した。エネルギー伝播視点の着想の適用可否は、対象物のSEAモデルの精度で判断できる。従来、SEAモデルは低モード密度帯域において精度が悪化するとされてきた。しかし今回、直交する三方向全ての加速度を考慮することで、周波数帯域を問わず、高精度のSEAモデルが得られることを確認した。したがって、詳細設計において、エネルギー伝播視点の着想を適用できると結論付けた。

第6章「詳細設計の実践」では、第5章で詳細設計に適用できることを確認したエネルギー伝播視点の着想から、固有モードによる振動速度を抑制するために、バネ・マス・ダンパーからなる力学モデルを用いた理論展開を行った。その結果、放射部品の振動エネルギーを小さくするためには、伝達部品のモードの腹の質量は小さく、放射部品のモードの腹の質量は大きくすることが有効であることを導いた。この設計指針に基づいた設計フローを提案し、その振動速度の抑制効果を、複数の平板から構成されるモデル、およびGDI高圧ポンプを対象に、検証・確認した。

以上により、初期設計と詳細設計からなる二段階設計の手法を確立した。

## 【論文審査の結果の要旨】

本研究は、多性能が求められる自動車用コンポーネント製品を低振動騒音に設計するため課題を明らかにし、その課題を解決するための提案と、実機試験による検証を行っている点で、工学的な有用性が高い。

第2章では、多性能が求められる自動車用コンポーネント製品では、波動の伝播を抑制するための初期設計と、共振を抑制するための詳細設計からなる二段階設計が有効であり、それぞれの設計に活用する手法として、解析SEAとモード解析が適していることを明確にした。

第3章では、従来、 $MOF < 1$ の低周波数帯域において適用困難とされる解析SEAについて、伝播特性の設計に限定すれば $MOF < 1$ の帯域においても適用可能であることを示し、解析SEAを活用した初期設計が全周波数帯域で有効であることを示した。

第4章では、実製品であるGDI高圧ポンプを対象に、初期設計による振動騒音低減効果を実証した。

第5章では、固有モードを考慮するSEAモデルが低モード密度帯域では低精度となる従来の問

題に対し、直交する三方向全ての加速度を考慮することで、周波数帯域を問わず、高精度の SEA モデルが得られることを示した。

第 6 章では、バネ・マス・ダンパーからなる力学モデルを用いた理論展開により、詳細設計において振動騒音の低減を狙うためには、伝達部品のモードの腹の質量は小さく、放射部品のモードの腹の質量は大きくすることが有効であることを明らかにした。また、複数の平板から構成されるモデル、および GDI 高圧ポンプを対象に、詳細設計による振動騒音低減効果を実証した。

以上の一連の研究成果は、学術的な新規性があり、多性能が求められる自動車用コンポーネント製品を設計する上での課題とその解決方法を示した点で工学的な価値も高い。自動車用コンポーネント製品に限らず、多性能が求められる構造物を対象としたバランス設計の考え方や手法を広く普及させていく上で、本研究の資するところは大きく、博士論文として認定するに値するものと評価できる。