

燃料噴射ポンプ筐体の低振動低騒音構造初期設計

山崎 徹* 武田 章善** 池田 和正*** 中村 弘毅**** 菊地 通*****

Initial Structural Design for low vibration on Fuel Injection Pump by using Analytical SEA

Toru YAMAZAKI* Akiyoshi TAKEDA** Kazumasa IKEDA*** Hiroki NAKAMURA**** Toru KIKUCHI*****

1. はじめに

燃料噴射ポンプは、電磁弁の開閉により、燃料を高圧化させ気筒内に噴入するポンプである。この動作は単純な弁の開閉であり、電磁力により弁を開き、開放により弁が閉じ、その際にポンプ構造体に衝撃力を発生させ、ポンプ筐体を励振し、特に剛性の低い箇所から発音する。エンジン回転数に応じて弁が開閉するため、その衝撃励振による筐体振動および騒音は、高周波かつ広帯域となる。この振動騒音問題を解決するためには、弁と構造体の衝撃力の緩和（起振源対策）、伝達力の低減（伝搬対策）、放射音の低減（放射対策）に大別され、起振源対策ほど効率的であり、低コストである。

一方、噴射ポンプをはじめ様々な機械製品の振動騒音問題の多くは、製品の試作後の性能評価時に発覚することが多く、振動騒音特性を設計のより早い段階で考慮すること、すなわち振動騒音設計のフロントローディングが望まれている。

このような背景の下、著者らは、広帯域な振動騒音問題における二段階設計を提案している⁽¹⁾。第一段設計では、振動騒音の周波数平均特性の低減を数式ベースで行うロバスト設計である。第二段設計では、周波数狭帯域を対象に詳細な設計を意図している。

そこで本研究では、第一段階目の設計手法であり、数式ベースで考えられる解析 SEA (Analytical Statistical Energy Analysis) の有効性を、既存の噴射ポンプ筐体（の簡易試験体）の低振動化で確認したことを紹介する。はじめに、既存物を解析 SEA モデル（すなわち数式）に抽象化し、要素の適正な配置検討⁽²⁾を行う。次いで、適正化で得られた知見を既存物の構造変更に応用し、FEM で数値的に適正化前後での振動を算出し、比較することで、振動の低減を確認する。

2. 解析 SEA に基づく低振動構造適正化

2. 1 対象構造物

*教授 機械工学科
 Professor, Dept. of Mechanical Engineering
 **大学院（博士前期課程） 機械工学専攻
 Graduate (M.C.), Dept. of Mechanical Engineering
 ***大学院（博士後期課程） 機械工学専攻
 Graduate (D.C.), Dept. of Mechanical Engineering
 ****助教 機械工学科
 Assistant Professor, Dept. of Mechanical Engineering
 *****特別研究員 工学研究所
 Researcher, Research Institute for Engineering

図 1 に低振動化の対象構造物を示す。これは、噴射ポンプ筐体の構造を簡易に模擬したものである。材質はすべて SUS304（ヤング率 200GPa, ポアソン比 0.3, 密度 7930kg/m3）である。

2. 2 解析 SEA モデリング

図 1 の対象を、図 2 に示すように 15 個の要素に分割し、解析 SEA モデルを作成する。すべての要素は塊材^(3,4)と考え、モデルのパラメータであり、要素間のエネルギーの伝わりやすさを表す要素 i から j への結合損失率 η_{ij} を式(1)より算出する。もう一種のパラメータである要素内のエネルギー損失を表す内部損失率はすべての要素で 0.01 とする。

$$\eta_{ij} = \frac{S_{ij}\tau_{ij}}{\omega\pi^2V_i}\sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}}, \quad \tau_{ij} = \frac{2}{s^{-5/4} + s^{5/4}} \quad (1), (2)$$

ここで、 S_{ij} は要素 i と j 間の結合面積、 V_i 、 E_i と ρ_i は要素 i の体積、ヤング率、密度、 ω は角振動数、 τ_{ij} は要素 i から j へのエネルギー透

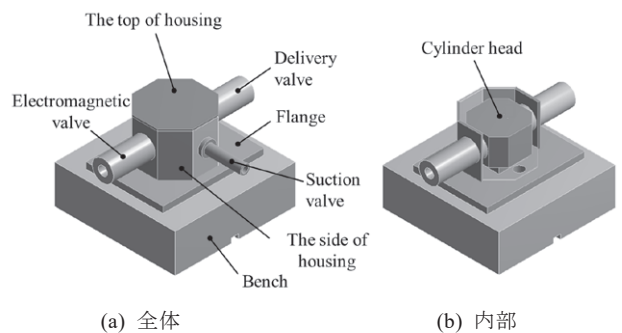


図 1 噴射ポンプ筐体の簡易構造体

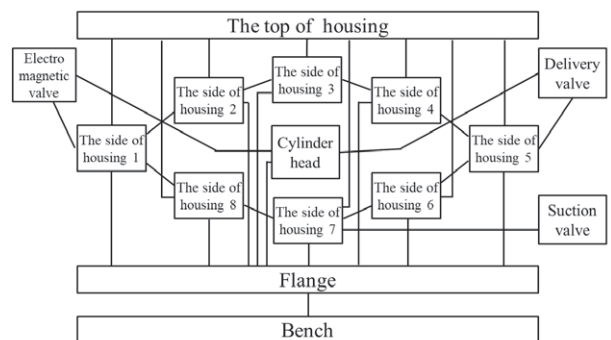


図 2 要素分割図（適正化前）

過率で式(2)より求める。また、 s は板厚比 $=h_j/h_i$ である。

したがって、図 1 の対象物の解析 SEA 基礎式は以下となる。

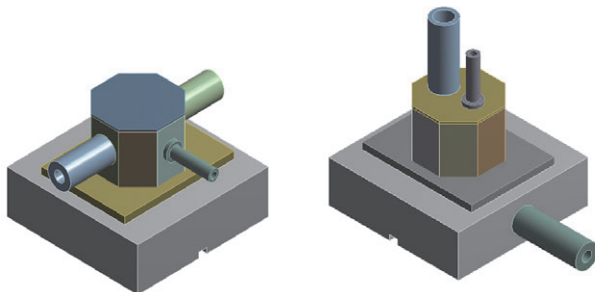
$$P = \omega LE \tag{3}$$

ここで、 P は各要素への入力パワー、 E は各要素の振動エネルギー、 L は内部損失率と結合損失率からなる損失マトリクスであり、15 次正方行列である。

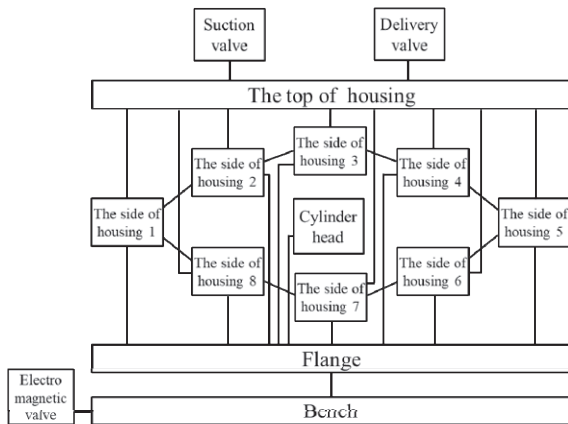
2. 3 構造適正化

作成した SEA 基礎式(3)において、入力パワーは電磁弁のみとし 1W の入力の際、ハウジング上面 (図 2 の上部の The top of housing) の要素の振動エネルギーを最小とするように、電磁弁、吐出弁と吸入弁の三つの要素を接続する要素を決定する問題を考える。なお、要素の接続先数は 1 とし、三つの弁の要素は互いに接続しない制約を与えた。解析 SEA モデルの適正化は Excel を用いて行った。

適正化の結果を図 3 に示す。電磁弁 (入力要素) はハウジング上面 (出力要素) から最も離れたベンチへの配置となり、吐出弁と吸入弁はハウジング上面 (出力要素) への配置となっている。これらの適正化配置は次のように解釈できる。すなわち、入力要素である電磁弁は、要素内での振動エネルギー損失が多くなるように、振動低減要素であるハウジング上面までできるだけ多数の要素を伝搬するよう、最も離れた要素であるベンチに配置することとなっている。一方、吐出弁と吸入弁は振動低減要素であるハウジング上面に伝わったエネルギーを逃がすために、ハウジング上面に配置することとなっている。



適正化前 適正化後
(a) 三つの弁要素の配置



(b) 適正化後の要素配置

図 3 適正化後の三つの弁の適正化結果

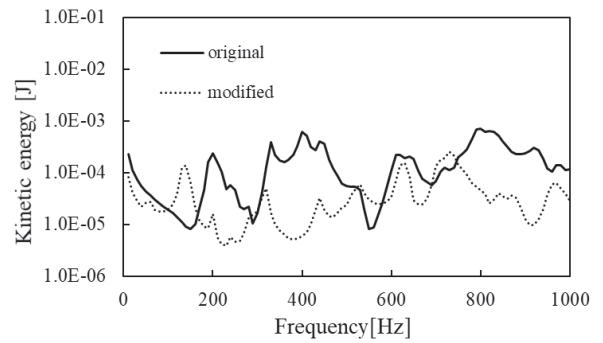


図 4 FEM による適正前後のハウジング上面の振動エネルギー応答の比較

3. FEM による低振動化の確認

適正化による振動の低減を確認するために、適正化前後の対象構造体の FEM を作成し、FEM による周波数応答解析を行い、比較を行った。加振点は、電磁弁上の 1 点とし、弁の軸方向に 1N の調和加振力を与えた。応答はハウジング上面の複数点の運動エネルギー (振動エネルギー) とした。

適正化前後のハウジング上面の運動エネルギーの比較結果を図 4 に示す。実線が適正化前の結果 (original) を表し、点線が適正化後の結果 (modified) を示す。ここに示す様に周波数平均的に運動エネルギーが低減されており、前節で示した三つの弁の適正配置結果は、ハウジング上面の振動の低減に有効であることが確認される。

4. おわりに

本研究で得られた成果は以下の通り。

- (1) 第一段階設計として、対象とする噴射ポンプの簡易構造体を数式で記述できる解析 SEA モデルで抽象化し、適正化を行った。またその結果は、振動エネルギー伝搬の観点で解釈できるものであることを示した。
- (2) また適正化前後の対象構造体の振動を FEM により数値的に確認したところ、適正化により広い周波数域で平均的に振動が低減できていることを確認した。

参考文献

- (1) 三山壯, 宮崎敦子, 中村弘毅, 山崎徹, 振動エネルギー流れの促進と抑制に基づく低振動構造設計, 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会講演予稿集, 20175061, pp.336-341, 2017
- (2) 村山誠英, 逸見純也, 中村弘毅, 山崎徹, 解析 SEA を用いたレイアウト設計法に関する基礎的研究, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2018 講演論文集, 18-7, 337.pdf, 2018
- (3) 大嶋道輝, 山崎徹, 中村弘毅, 板材及び塊材の解析 SEA モデリング, 環境工学総合シンポジウム講演論文集, 26 巻, p.103-107, 2016
- (4) 片岡大雄, 宮澤昌也, 江戸宏一, 坂口元康, 中村弘毅, 山崎徹, 解析 SEA を用いたエンジンの要素追加による低振動化, 自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会講演予稿集, 20186038, 2018-10