

## 論文

## 動吸振器の3Dプリンタを用いた設計

岩田 雄介<sup>\*1)</sup> 西川 康博<sup>\*1)</sup> 阿保 友二郎<sup>\*1)</sup>

## Design of dynamic vibration absorbers using a 3D printer

Yusuke Iwata<sup>\*1)</sup>, Yasuhiro Nishikawa<sup>\*1)</sup>, Yujiro Abo<sup>\*1)</sup>

The modeling was conducted on the shape of dynamic vibration absorber (DVA) readily designable with simulation. Utilizing this model, the DVAs were designed based on numerical calculation and manufactured with a 3D printer. The calculated natural frequencies were basically consistent with the resonance frequencies obtained by the vibration test on manufactured DVAs. And several DVAs for cantilevers and vibratory tools were designed and manufactured using this model. These attached DVAs were capable of reducing the targeted vibration.

キーワード：動吸振器, アディティブマニュファクチャリング, 3Dプリンタ, 振動低減

Keywords : Dynamic vibration absorber, Additive manufacturing, 3D printer, Vibration reduction

## 1. はじめに

近年, 様々な分野で省エネルギー化, 低コスト化が求められる, 製品を構成する材料を薄くしたり, 安価な材料に変更したりすることが多い。しかし, それに伴い製品の剛性が低下し, 振動が発生しやすくなっている。その対策として, 製品の材料として高減衰性材料や制振材を使用したり, ばねを用いて弾性支持することにより, 共振現象を緩和したり, 振動を伝わりにくくしたりする。しかし, 材料の置き換えや構造の変更はコストや剛性など設計上の理由から困難な場合も多い。その点, 付加系が振動することで対象の振動を抑える動吸振器であれば後付けが可能で, 製品の設計自体を変更する必要はない。しかしながら, 動吸振器は製品の振動特性に合わせた設計, 製作が必須となり, それらは手間を要する。

本研究では上述した課題を解決するため, 物体の形状が変化すると振動特性(固有振動数等)が変化することに注目し, 3Dプリンタを用いて振動特性が予測しやすい(モデル化しやすい)形状による簡便な動吸振器の設計手法を開発した。このことにより, 中小企業の振動を課題とする製品開発の支援に役立てることを目的とした。

## 2. 動吸振器の形状検討およびモデル化

2.1 形状検討 数値計算による設計を容易にするために, 動吸振器の形状は次に挙げる条件を満たすことが必要だと考える。

- ①少ないパラメータ数で形状が一意に決まること
- ②簡単にモデル化が可能であること

## ③主要な振動モードが1つであること

さらに, 3Dプリンタで製作することを活かし, 後述する振動工具への適用も考慮した形状として, 図1の形状を提案する。

図1はひし形に配置された「腕」と「おもり」で構成され, ひし形の各辺を弾性要素の腕とし, 各頂点に質量要素のおもりを有する。ただし, 弾性要素と質量要素がひし形に配置されていることが重要であり, 必ずしも図1のように腕が円柱, おもりが球(または半球)である必要はない。上下のおもりのうち, 一方のおもりを対象への固定点とする。動吸振器の振動特性に影響を与える形状パラメータとして, おもりの体積, 腕の長さ, 角度, 断面寸法が挙げられる。

2.2 モデル化 動吸振器を用いて振動を低減するためには, 振動低減対象の振動特性に合わせて, 動吸振器側の振動特性を設計する必要がある。本研究では, 特に動吸振器の固有振動数の設計を容易にすることを目標とし, 固有振動数への影響が少ないと考えられる減衰は考慮しないものとする。また, 加振入力は上下方向とし, そのとき最も支配的と考えられる図1の変形を伴った低次の振動モードに注目してモデル化を行う。

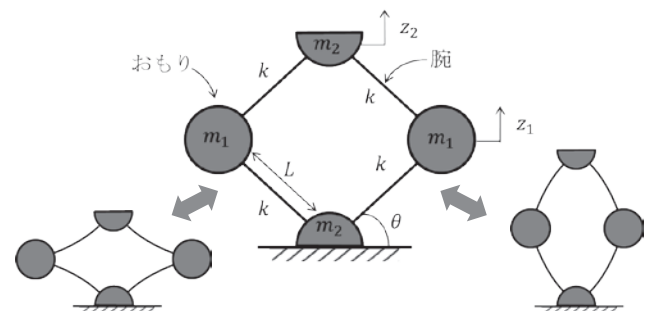


図1. 動吸振器の概形と低次の振動モード形状

パラメータとして、おもりの質量を  $m_1, m_2$ , 中間のおもりの数を  $N$ , 腕のばね定数, 長さ, 角度をそれぞれ  $k, L, \theta$ , おもりの上下方向の変位を  $z_1, z_2$  とおく。腕の質量はおもりの質量に比べて小さいため無視できるものとする。図1の変形を考慮し,  $z_1 = 2z_2$  と仮定すると, ラグランジュの方程式<sup>(1)</sup>より以下の運動方程式を得る。

$$\left\{ \frac{N}{4}(1 + \tan^2 \theta) m_1 + m_2 \right\} \ddot{z}_2 + \frac{N}{2} k z_2 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

式(1)は一自由度系の運動方程式になっていることから,  $z_2$ の係数を等価質量  $m_{eq}$ ,  $z_2$ の係数を等価ばね定数  $k_{eq}$  とおくと, 固有振動数  $f_n$  は次式で求めることができる。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Nk}{N(1 + \tan^2 \theta) m_1 + 4m_2}} \dots\dots (2)$$

**2.3 数値解析結果および考察** 前述したように, 腕とおもり自体の形状は自由なため, 本研究ではモデル図をそのまま形にした図2を使用する。腕は円柱, おもりは球と半球である。腕はオイラー・ベルヌーイ梁として解析を行う。腕のばね定数  $k$  は次式で表すことができる<sup>(2)</sup>。

$$k = \frac{12EI}{L^3 \cos^2 \theta} \dots\dots\dots (3)$$

ここで,  $E$  は材料の弾性率,  $I$  は腕の断面二次モーメントである。式(2), (3)より, 中間のおもりの数  $N$  を4とすると, 固有振動数  $f_n$  は次式より求めることができる。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{24EI}{\{(1 + \tan^2 \theta) m_1 + m_2\} L^3 \cos^2 \theta}} \dots\dots\dots (4)$$

本研究では腕の直径を3 mm, 球の直径を20 mmで固定とする。材料はStratasys社製の硬質樹脂Vero Blue Full Cure 840を使用するとき, 式(4)を用いて計算した固有振動数  $f_n$  と腕の長さ  $L$ , 角度  $\theta$  の関係は図3に示すようになる。図より, 固有振動数は腕の長さに大きく依存し, 腕の角度に少し依存していることがわかる。ここから, 腕の長さ, 角度を変化させることで, 所望の固有振動数を持つ動吸振器を式(4)から簡単に設計できる可能性があることが示された。

**3. 動吸振器設計手法(モデル)の評価**

**3.1 CAE解析**

次に, 有限要素法を用いた数値解析を行った。数値解析にはSolidWorksを使用し, 図2のようなCADデータに対して, 有限要素法による固有値解析を行うことで, 固有振動数を求めた。固有振動数は複数存在すると予想されるが, 図1で示した変形と同様の振動モード形状のときの振動数を比較に用いた。材料や各パラメータは2.3項と同様とし, 腕の長さ10, 15, 20, 30, 40 mmと腕の角度35, 45, 55°の計15種類に対して解析を行った。振動モード形状を図4に示す。

**3.2 加振実験**

次に, モデルをもとに設計した動吸振器を3Dプリンタで製作し, 実際に加振実験を行うことで共振振動数を測定した。モデルによる固有振動数の計算値と加振実験による共振振動数の実測値の比較によってモデル

の有効性を検証した。

3DプリンタはStratasys社製のConnex500を使用し, 材料は硬質樹脂Vero Blue Full Cure 840を使用した。積層ピッチは30  $\mu$ mで, 材料や各パラメータは2.3項と同様とし, 腕の長さ10, 15, 20, 30, 40 mmと腕の角度35, 45, 55°の計15種類を製作した。例として, 腕の長さ30 mm, 角度45°で製作した動吸振器と実験の様子を図5に示す。

加振にはIMV社製の動電型振動試験装置EM2301を使用し, 動吸振器の底面を加振台に接着剤で強固に固定することで鉛直方向に加振した。動吸振器の上部には圧電型加速度ピックアップを取り付けて加速度の測定を行った。加振信号として正弦波掃引振動を用い, 加速度5 m/s<sup>2</sup>, 掃引速度1 octave/minで加振した。共振振動数は複数現れる可能性があるため, 最も低次のピーク振動数に注目した。

**3.3 比較**

モデルによる計算値とCAE解析結果の固有振動数, 加振実験による共振振動数の実測値を比較したグラフを図6に示す。グラフより, 各値とも腕の長い領域では近い値となっていることがわかる。一方, 腕の短い領域では, 差が大きくなっていることがわかる。これは, オイラー・ベルヌーイ梁を用いているためだと考えられる。オイラー・ベルヌーイ梁は, 長さに比べて断面寸法が小さいとき, 曲げによる変形だけを考慮して, せん断による変形や回転慣性の影響を無視する<sup>(3)(4)</sup>。よって, 腕が短くなるにつれて, 腕の長さに対する直径の割合が大きくなり, せん断による変形などが無視できなくなったために, 差が出たものと考えられる。

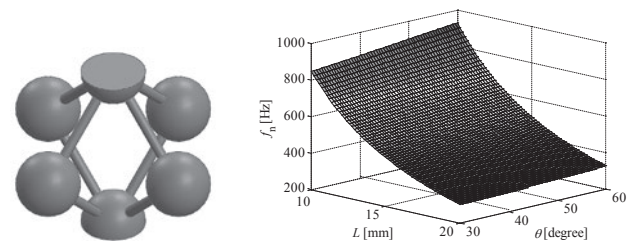


図2. 動吸振器の具体的形状 図3. モデルを用いた数値解析結果

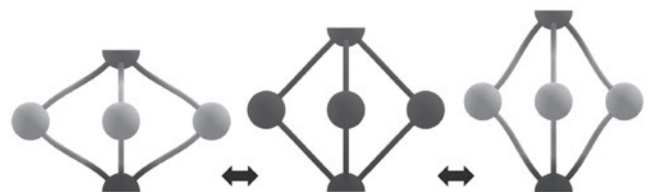


図4. CAE解析による振動モード形状

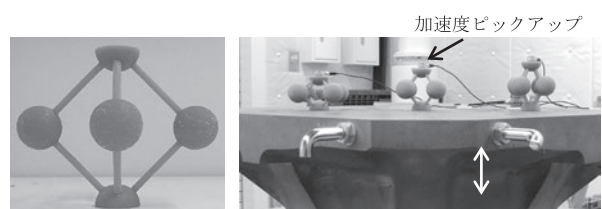


図5. 製作した動吸振器と加振実験の様子

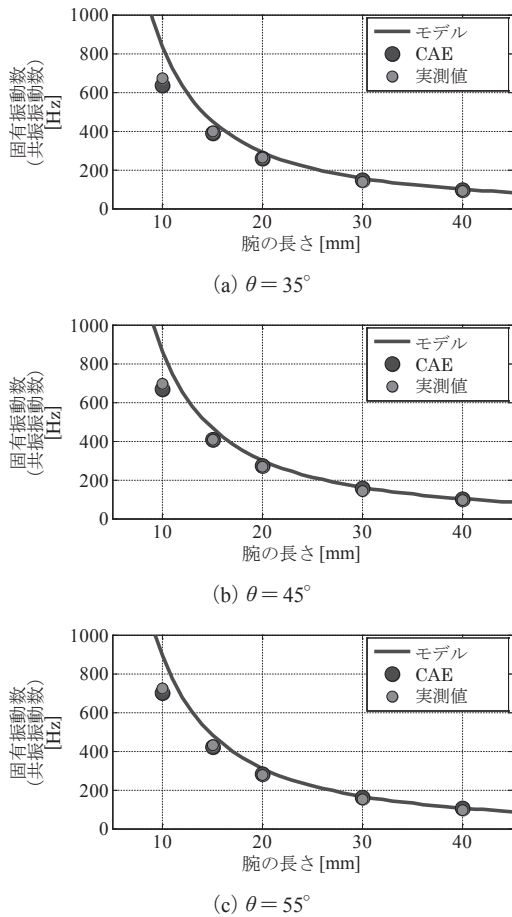


図6. 加振実験による共振振動数とモデルおよびCAEによる固有振動数

以上のことから、腕の短い領域以外では、モデルを用いることで所望の固有振動数を持つ動吸振器を数式から設計でき、制振対象に合わせた動吸振器の製作が容易に行えることが示された。

#### 4. 動吸振器の性能評価

4.1 梁の加振実験 次に、制振対象に合わせた動吸振器をモデルを用いて設計し、3Dプリンタで製作した。それを制振対象に搭載して加振実験を行うことで動吸振器の性能を検証した。

制振対象は図7(a)に示すような梁を用いた。材料はアルミで、質量は1.10 kg/mである。これを後述する方法で単体加振すると、160 Hz付近に明瞭なピークを持つことがわかる。そこで、今回はこの振動数を低減対象とした。

モデルを用いて、160 Hzより少し低い固有振動数を持つ動吸振器を設計した。具体的には定点理論<sup>(5)</sup>を参考に、梁と動吸振器の質量比を考慮し、10 Hzほど低くなるように設計した。これは、動吸振器自体の質量により、制振対象の共振振動数が小さくなるためである。式(4)より設計した各パラメータを表1に示す。

実験の様子を図7(b)に示す。加振にはIMV社製の動電型振動試験装置EM2301を使用し、梁の片端をステップクランプによって加振台に固定することで鉛直方向に加振し

た。加振台から飛び出た部分の長さは約375 mmである。梁の先端に動吸振器の底面を接着剤で強固に固定し、側面に圧電型加速度ピックアップを取り付けて鉛直方向の加速度の測定を行った。加振信号は正弦波掃引振動を用い、加速度 $5 \text{ m/s}^2$ 、掃引速度1 octave/minで加振した。

梁の加振加速度に対する応答加速度の周波数応答関数(FRF)を図8に、これを積分することで求められるグラフ下側の面積(50~250 Hz)を比較したものを図9に示す。グラフより、DVAを搭載することで160 Hz付近の最大ピーク高さが約63.2%減少し、積分値が約18.4%減少したことがわかる。

以上、モデルを用いて対象に合わせた動吸振器を設計、製作でき、それを搭載することで対象の振動を低減できることが実証できた。このように、モデルによる計算と3Dプリンタによる製作を組み合わせることで、動吸振器による振動対策をより容易に短時間で行うことができると考えられる。

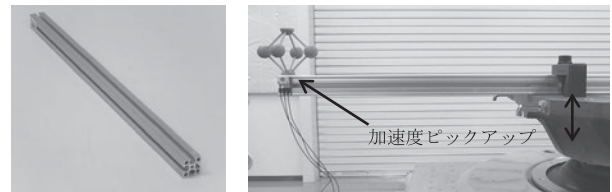


図7. 梁の加振実験 (a) 制振対象 (b) 加振実験の様子

表1. 対象に合わせて設計、製作した動吸振器

腕の長さ [mm]	腕の角度 [°]	質量 [g]	対象振動数 [Hz]	固有振動数 実測値 [Hz]
29	45	27	160	150

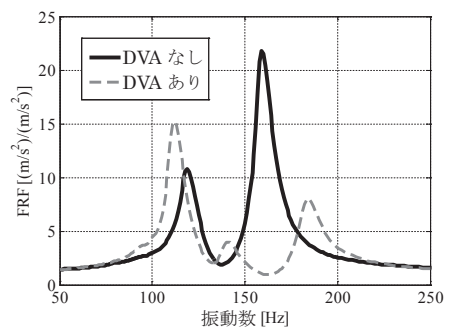


図8. 加振実験による梁の周波数応答関数

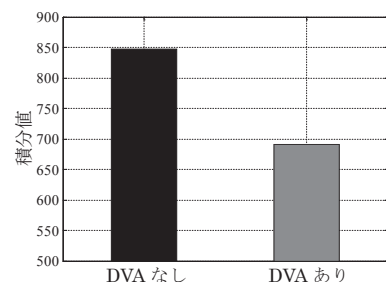


図9. 図8の積分値(50~250 Hz)



4.2 グラインダの振動測定 次に、実際の製品を制振対象とし、これに合わせた動吸振器をモデルを用いて設計した。これを3Dプリンタで製作し、制振対象に搭載することで動吸振器の性能を検証した。

制振対象はグラインダを用いた。全長約145 mm、質量約200 gである。これを駆動させると先端の砥石が回転し、それに伴い振動が発生する。本研究で用いたグラインダの振動は175 Hz付近に明瞭なピークを持つ。そこで、今回はこの振動数を低減対象とした。

モデルを用いて、175 Hzに近い固有振動数を持つ動吸振器を設計した。今回は対象が手持ちの振動工具であることから、動吸振器を付けていても作業が行えるように設置方法を工夫する必要がある。

そこで、本研究で提案した動吸振器の形状は、中の空間も利用可能であることから、対象を中を通して動吸振器の内側に設置できるようにアタッチメントを付けた図10に示すような動吸振器を提案する。式(4)より設計した各パラメータを表2に、動吸振器を設置した様子を図11に示す。

実験の様子を図12に示す。自らが振動を発生するものの振動を正確に測定するには、宙に浮いた状態にする必要があるが物理的に不可能である。そこで、ばね定数の極めて小さい輪ゴムで吊り下げることにより、宙に浮いた状態を再現した<sup>(6)</sup>。

振動測定には小野測器社製のFFTアナライザDS3000を使用した。グラインダの片端に動吸振器のアタッチメント部を接着剤で強固に固定し、その付近に圧電型加速度ピックアップを取り付けて直交3軸方向の加速度の測定を1分間行った。

測定点における165~185 Hzの三軸合成値を図13に示す。なお、三軸合成値 $a_{xyz}$ は式(5)のように求める。

$$a_{xyz} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$ はそれぞれx、y、z軸の加速度実効値である。グラフより、DVAを搭載することで三軸合成値が約46.1%減少したことがわかる。

以上、既存の動吸振器を取り付けるのが難しい実際の製品に対しても取り付けられる形状を実現し、それを搭載することで対象の振動を低減できることが実証できた。このように、取り付け場所の形状に合わせたアタッチメントや通常では製作しにくい形状も、モデルと3Dプリンタを組み合わせることで簡単に製作することができ、より柔軟な動吸振器設計を行うことができると考えられる。

5. まとめ

モデルを用いることで制振対象に合わせた所望の固有振動数を持つ動吸振器が設計でき、これと3Dプリンタによる製作を組み合わせることで、既存の動吸振器を取り付けるのが難しい実際の製品に対しても取り付けられる形状を実現し、対象とする振動を低減できることが示された。

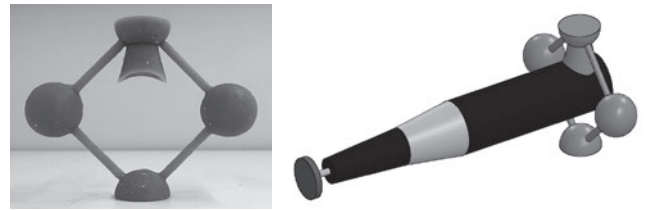


図10. 製作した動吸振器 図11. 動吸振器を設置したグラインダ

表2. 図10の動吸振器の設計パラメータ

腕の長さ [mm]	腕の角度 [°]	中間おもり数 [個]	質量 [g]	対象振動数 [Hz]	固有振動数実測値 [Hz]
25	45	2	18	175	164

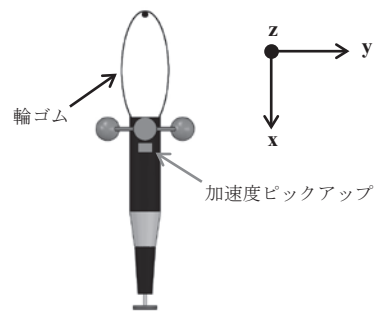


図12. グラインダの振動測定

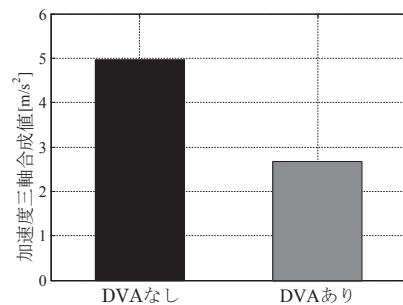


図13. グラインダ駆動時の加速度三軸合成値 (165~185 Hz)

6. 今後の課題

本研究によれば、対象の振動数に合わせた動吸振器の設計は可能だが、その結果が対象の形状にそぐわない可能性もある(大きすぎて適用できないなど)。また、本研究で使用した樹脂は熱に弱く、変形してしまう可能性がある。そこで、他の材料や積層方法、別の動吸振器の形状についても本研究成果が適用できるかを検討し、より柔軟な動吸振器設計ができるよう目指していく。

(平成27年7月14日受付, 平成27年7月30日再受付)

文 献

(1)藤田勝久:「振動工学」, 森北出版, pp.117-121 (2005)  
 (2)湯浅龜一:「材料力学公式集」, コロナ社, pp.74-99 (1968)  
 (3)藤田勝久:「振動工学」, 森北出版, pp.154-155 (2005)  
 (4)鯉淵興二, 小久保邦雄:「製品開発のための材料力学と強度設計ノウハウ」, 日刊工業新聞社, pp.16-17 (2012)  
 (5)藤田勝久:「振動工学」, 森北出版, p.109 (2005)  
 (6)長松昭男:「モード解析入門」, コロナ社, pp.231-237 (2009)