選択的レーザー溶融法による粒状体ダンパを適用した多重動吸振器の製造
および制振性能評価増谷 隆志^{*1}, 中野 幸人^{*2}, 富田 直^{*2}, 原 昌司^{*1}, 佐藤 晴輝^{*1}

Manufacture of multi-mass dynamic vibration absorber using particle dampers by selective laser melting and evaluation of vibration damping performance

Takashi MASUTANI^{*1}, Sachito NAKANO^{*2}, Sunao TOMITA^{*2}, Masashi HARA^{*1} and Haruki SATO^{*1}^{*1,*2} Toyota Central R&D Labs., Inc.

41-1 Yokomichi, Nagakute-shi, Aichi 480-1192, Japan

Received: 10 November 2020; Revised: 24 January 2021; Accepted: 2 February 2021

Abstract

Selective laser melting (SLM) has been used to fabricate lightweight and complicated structures. Lightweight structures tend to suffer from noise and vibration problems. Hence, to overcome these problems, dynamic vibration absorber (DVA) are embedded in these structures through SLM fabrication. Although SLM can control the stiffness of the DVA by structural design, it is difficult to obtain enough damping effect. To add damping to the DVA in the fabrication process, we embedded powder in the structures so that the powder can work as the damping element of the DVA. This study proposes a fabrication process for tuned particle dampers (TPD), in which the DVA with the embedded powder can be fabricated through a single SLM process. To experimentally demonstrate the vibration reduction performance of the TPD fabricated using the proposed process, we carried out impact testing of plates with multiple undamped DVA (i.e., without powder), and plates with multiple TPD. The maximum acceleration of the plates with multiple TPD and undamped DVA were 19.8 dB and 31.8 dB, lower than that of the plate without dynamic vibration absorber. These results suggest that the proposed fabrication process can effectively add damping to the DVA embedded within the lightweight structures.

Keywords : Additive manufacturing, Selective laser melting, Powder bed fusion, Particle dampers, Tuned particle damper, Dynamic damper, Dynamic vibration absorber

1. 緒 言

従来の製造方法では実現できない複雑な形状を得られる付加製造 (Additive Manufacturing, AM) 技術が注目されている。その技術の1つである選択的レーザー溶融法 (Selective Laser Melting, SLM) は、サブ mm の寸法精度で精細な構造を得られる (Campanelli et al., 2010)。この特徴を活用し、熱伝達性に優れる 3D フラクタルの熱交換器といった伝熱機能を有する構造 (Wang et al., 2019) の他、特にトポロジー最適化やラティス構造を適用した軽量化のコンセプトが多く報告されている (Yan et al., 2012, Seabra et al., 2016, 西津他, 2017, Plocher and Panesar, 2019)。しかし、軽量化と低振動、低騒音は剛性の問題から背反することが多く、SLM で製造した軽量部品は静粛性との両立が困難とされている。この課題に対し、ラティス構造による吸音機能の報告例がある (増田他, 2020) が、制振機能の報告例は少ない。

複雑形状を実現できる SLM の特徴を活かした制振技術の一例として、多重動吸振器 (Multi-mass Dynamic Vibration Absorber, MDVA) が考えられる (神谷他, 1996, 潘, 安田, 2005)。動吸振器 (Dynamic Vibration Absorber)

は、制振対象である主振動系に、同等の固有振動数を有する副振動系を設けることで、特定の周波数で過大な振動が生じる共振を抑制できる。固有振動数が異なる動吸振器を複数設けた MDVA は、主振動系における固有振動数の変動に対してロバストな制振性能を得られる。これらを SLM の加工プロセスで実現する場合、副振動系の構成要素である質量要素とばね要素は形状によって容易に制御できるが、減衰要素を付与することが課題となる。

そこで、SLM の加工プロセスで用いる原料の粉末を利用した減衰の付与に着目した。SLM の加工プロセスは、原料の粉末を造形面上に薄く敷き、製造する部品の形状に応じてレーザーを選択的に照射することで、粉末が溶融し凝固する。これを繰り返すことで部品の最終形状を得られる。そのため、造形する 3D モデルの内部に閉空間を設ければ、その部位にはレーザーが照射されず、原料である粉末がプロセス過程で自然と封入される。この特徴を活かし、片持ち梁の試験片内部に粉末を残存させ、原料である粉末を粒状体ダンパ (Particle Damper) として試験片に付与し、制振効果を確認した報告例がある (Scott-Emuakpor et al., 2019)。粒状体ダンパとは衝撃ダンパの一種で、主振動系に可動物体である粒状体を封入した容器を取り付ける単純な構造である。制振の効果は、容器の壁と粒状体または粒状体同士で生じる衝突と摩擦により振動エネルギーが散逸することで発現する (荒木他, 1983, Lu et al., 2018, Gagnon et al., 2019)。粒状体ダンパは、広い周波数帯で機能し、高融点である金属等の粒状体を用いれば、種々の様々な雰囲気や温度下で使用できるなどの利点から多くの研究報告がある (橋本他, 2000, Liu et al., 2005, 井上他, 2013, 高橋, 2019)。また、低加速度の振動に対しては効果的な減衰性能を得られない粒状体ダンパの欠点 (Lu et al., 2018) に対し、粒状体に加わる加速度を増大させるように動吸振器の減衰要素へ粒状体ダンパを適用した構造 (Tuned Particle Damper, TPD) が提案されている (Zhang et al., 2018)。しかし、SLM を用いて意図的に粉末を封入させる上記の例では、粒状体が減衰効果を発現する条件について詳細に報告しているが、この制振性能を活かした構造の提案や、その構造を SLM で製造するための条件については具体的に提案されていない。

本研究では、粒状体ダンパを適用した多重動吸振器 (Multi-mass Tuned Particle Damper, MTPD) を SLM で実現する方法を提案する。この方法では、主振動系と一体化した MTPD を製造できるため、動吸振器の多重化に伴う部品数の増加、大型化といった問題を解決できる利点がある。更に、粒状体ダンパの課題である充填量の管理など、粒状体を取り扱うことによる製造プロセスの複雑化の問題も解決できる。

具体的には、動吸振器のばね要素を片持ち梁の曲げ剛性とし、自由端側におもりを設けて質量要素とする構成を SLM における製造制約の下で実現した。更に、質量要素であるおもりの内部を閉空間として、原料の粉末を封入させることで減衰要素とした。この構成により、各要素の寸法を制御して固有振動数を制御できる。また動吸振器を小型化すれば、主振動系の部品に多数内蔵することで MTPD を構成でき、かつ部品の大型化を抑えられる。この考えに基づき、主振動系と一体化した MTPD の板状試験片を作製し、打撃試験による制振性能の定量的な実験的検証を行った。

2. SLM により製造する TPD の構造

2・1 概要

本研究で検討した動吸振器の形状と力学モデルを図 1 に示す。小型化かつ固有振動数の制御を容易にするため、ばね要素は片持ち梁の曲げ剛性とした。固定端側は主振動系と接合し、自由端側には質量要素のおもりを設け、その内部に原料である粉末を封入した (図 1 (a))。力学的には、片持ち梁の曲げ共振を利用した動吸振器となり (図 1 (b))、質量要素の内部に封入された粉末間の摩擦や衝突によって動吸振器に減衰が付与される。図 2 のように、質量およびばね係数の調整によって固有振動数を制御した動吸振器を、主振動系に中空形状を設けて複数埋め込むことで、固有振動数が異なる動吸振器を分布させることができる。これにより、主振動系や動吸振器の寸法誤差、および密度やヤング率の誤差等に伴う固有振動数の変動に対してロバストな制振性能を得られる。

Fig. 1 Schematics of tuned particle damper model. The tuned particle damper has a single degree of freedom and consists of a mass ($m+m_p$) with a spring constant (k) and a damping coefficient (c). The mass is consists of a shell and encapsulated powder. The spring constant represents bending stiffness. The damping is caused by the friction and collision between particles.

Fig. 2 Conceptual diagram of dispersing dynamic vibration absorbers with different natural frequencies. The natural frequencies of the multi-mass dynamic vibration absorbers are adjusted by tuning the mass and flexural rigidity; the absorbers are embedded in the structure.

2・2 SLMの加工プロセス

一般的な SLM の工程 (Campanelli et al., 2010) に、閉空間へ粉末を封入する工程を追加した加工プロセスを図 3 に示す。ビルドチャンバの Z ステージ (高さ方向ステージ) を数十 μm 下降した後 (図 3 (a)), コーターにより原料の粉末をビルドチャンバ上に敷き均し (図 3 (b)), 部品の形状に応じてレーザーを照射することで粉末が溶融し凝固する (図 3 (c))。この際、部品の 3D モデル内に閉空間がある場合、その箇所にはレーザーが照射されず、後工程で回収できない粉末が封入される。これを部品の高さ分繰り返すことで最終形状を得た後 (図 3 (d)), Z ステージを上昇させてポケットに未溶融の粉末を回収し (図 3 (e)), 造形を完了する (図 3 (f))。製造制約として、部品のオーバーハングした面には構造的な支持のため、その面と基板の間にサポート構造を設ける必要がある。サポート構造は、後工程において手作業や機械加工により除去する。また、粉末が意図せず残存した場合、部品の質量が重くなるため、通常 3D モデルの閉空間に抜き穴を設ける対策がとられる (図 3 (c) の Hole に相当)。しかし、本研究では部品の一部へ意図的に粉末を封入させ、粒状体ダンパとして動吸振器へ減衰を付与することを提案する。

Fig. 3 Process flowchart of selective laser melting method (SLM). The powder remains in the closed space of the specimen, because the laser is not irradiated to the closed space during the process. Although the holes are created to remove powder from closed space, this study uses the powder as the particle damper.

2・3 粉末の仕様と試験片の物性

本研究で用いた粉末ならびに試験片の材質は、アルミ合金 AlSi10Mg (Al-10Si-0.35Mg, wt. %) とした。原料である粉末の走査電子顕微鏡 (SEM) による観察像を図 4 に、粒度分布を図 5 に示す。累積分布 50 % の粒径を表すメディアン径 $Dv50$ は $39.2\ \mu\text{m}$ である。試験片は SLM Solutions 製 SLM280 を用いて作製した。SLM の主要な加工条件を表 1 に示す。本条件で作製した造形体の密度は、液中ひょう量法 (JIS Z 8807:2012) による測定の結果、約 $2660\ \text{kg/m}^3$ であった。

Fig. 4 Typical SEM micrograph of the AlSi10Mg powder.

Fig. 5 Particle size distribution of the AlSi10Mg powder. The 10 %, 50 %, and 90 % cumulative particle sizes ($Dv10$, $Dv50$, and $Dv90$) are $21.9\ \mu\text{m}$, $39.2\ \mu\text{m}$, and $58.1\ \mu\text{m}$, respectively.

Table 1 Parameters used for the selective laser melting (SLM) process.

Parameter	Value
Laser power [W]	350
Scan speed [mm/s]	1150
Hatch distance [μm]	170
Layer thickness [μm]	50
Laser spot diameter [μm]	80

また、コーターにより供給したビルドチャンバ内における粉末のかさ密度は、ステンレス鋼 (17-4PH, JIS SUS630) の場合 $4680\ \text{kg/m}^3$ であったとの報告がある (Jacob et al., 2016)。17-4PH の真密度を $7780\ \text{kg/m}^3$ とすれば、相対かさ密度は 60.2 % となる。この相対かさ密度を基に、ビルドチャンバ内における AlSi10Mg 粉末のかさ密度、つまり 3D モデルの閉空間に封入させる粉末のかさ密度を計算すると、約 $1600\ \text{kg/m}^3$ と推定された。上記で求めた造形体の密度 $2660\ \text{kg/m}^3$ と粉末のかさ密度 $1600\ \text{kg/m}^3$ は、後述する数値計算で使用する。

2・4 SLMの製造制約を考慮した動吸振器の形状

動吸振器の形状は SLM の製造制約を考慮し、図 6 に示すフローにより決定した。図 6 (a) のように、ばね要素である片持ち梁の軸が積層方向と直交する姿勢では、質量要素であるおもりを支持するサポート構造が無いと製造できない。サポート構造を設けた場合、後工程で除去可能な形状にする必要があるほか、除去時に片持ち梁が折損するリスクが高い。一方、片持ち梁の軸が積層方向と平行で、かつ固定端から積層する姿勢であれば、片持ち梁がサポート構造を兼用できる。そのため、本研究における動吸振器の積層方向は、片持ち梁の軸と平行に設定した。

また、図 6 (b) のようにオーバーハングする面が基板に対し 40° 以上の角度であれば、3D モデルとの形状誤差を小さくできる (Calignano, 2014, Atzeni and Salmi, 2015)。基板からの角度が 40° 以下となる場合、形状誤差が大きくなり、造形できない場合もある。この製造制約を基に、片持ち梁は円柱形状とし、おもりは基板からの角度を 45° とする両端が尖り先の円柱形状とした。

更に、図 6 (c) のように提案する減衰型の動吸振器 (TPD) は、おもりの外壁から内側にオフセットした閉空間に粉末を封入させ、比較する非減衰型の動吸振器 (Undamped Dynamic Vibration Absorber, UDVA) は、おもりを中実な構造とした。

Fig. 6 The flow of dynamic vibration absorber shape determination with considering limitation. This flow enables us to determine geometry manufacturable with high accuracy.

3. 提案する MTPD の構造

本章では、制振対象である主振動系と、その 1 次曲げモードを制振する多重動吸振器および主振動系との一体構造を示し、固有振動数の変動に対してロバストな制振性能が得られることを有限要素法による数値解析で検証する。

3・1 主振動系

制振対象となる主振動系の形状を図 7 に示す。大きさは、長さ 250 mm×幅 20 mm×厚さ 6 mm とした。内部には、直径 4.5×長さ 15 mm の両端が尖り先の円柱状空間を合計 45 個（15×3 個）設けた。長さ方向を積層方向とし、内部空間の尖り先部は基板からの角度を 45°とする傾斜面とした。また、主振動系の内部空間に残存した粉末を造形後に除去するため、直径 1 mm の貫通穴を設けた。この主振動系の形状について、有限要素法 (Finite Element Method, FEM) による固有値解析を行った結果、1 次曲げモードの固有振動数は 544 Hz であった。なお、汎用 FEM ソフト ANSYS を用い、ヤング率とポアソン比はそれぞれ 68 GPa (Kempen et al., 2012) および 0.3 と見積もられ、密度は 2・3 節の測定値より 2660 kg/m³ とした。ヤング率は引張試験から測定されており、積層方向に対して直交方向を引張軸とする試験片で評価した値で、±3 GPa の誤差があると報告されている (Kempen et al., 2012)。

Fig. 7 Schematic of the main vibration system (i.e. plate without dynamic vibration absorber). Forty-five sharp-pointed cylindrical spaces (diameter 4.5 mm, length 15 mm) are distributed in the plate.

3・2 動吸振器の固有振動数制御

動吸振器の詳細な形状を図 8 に示す。動吸振器を埋め込む主振動系の内部空間は、内径が 4.5 mm であるため、動吸振器の D 寸法は内壁との確実な隙間を得られるように 3 mm とした。粉末を封入させる TPD の t 寸法は 0.5 mm とした。動吸振器を設計する際、一般に主振動系と副振動系の質量比は 1~10 % の範囲で調整されることが多い (井上他, 2013) ため、動吸振器のおもり 1 つあたりの質量は UDVA, TPD ともに 87 mg となるように h 寸法を調整し、計 45 個となる動吸振器の質量要素を主振動系の質量 (53.7 g) の約 7.3 % とした。また、主振動系に埋め込める小型な動吸振器にするには曲げ剛性 ($k = 3EI/(H-h)^3$ ここで $I = \pi d^4/64$, E はヤング率である) を下げる必要があるため、 d 寸法は製造可能な最小寸法に近い 0.5 mm とした。以上のパラメータを固定して、 H 寸法により動吸振器の固有振動数を制振対象の周波数である 544 Hz 付近に制御した。なお、減衰係数の定量的な制御については本研究では議論せず、SLM の加工プロセスにおける粉末封入の有無により、定性的に減衰付与の可否を検討する。具体的には、UDVA と TPD を埋め込んだ試験片を用いた周波数応答関数 (Frequency Response Function, FRF) の振幅を比較することで、粒状体ダンパによる動吸振器の減衰付与を検証した。

Fig. 8 Schematic of dynamic vibration absorber. d and D are set as values that allow the dynamic vibration absorbers to be manufactured within the cylindrical cavities. The h value is fixed to ensure that the static ratio between the mass of the plate and dynamic vibration absorbers will be approximately 7.3 %. The natural frequency of the dynamic vibration absorber is adjusted by tuning H .

H 寸法と動吸振器の固有振動数の関係を得るため、動吸振器だけの UDVA と TPD のジオメトリを対象に、 H 寸法を 0.5 mm 刻みに 10.0/10.5/11.0/.../14.0 mm と変更し、固定端を完全固定した条件で FEM による固有値解析を行った。解析結果を図 9 に示す。得られた固有振動数と H 寸法の関係から図 9 の近似式を求め、所望する動吸振器の固有振動数を実現できる H 寸法を決定した。なお、FEM において、中実部分の材料物性は前節と同じの値を用い、粉末部分の密度は 2・3 節のとおり 1600 kg/m^3 とし、ヤング率は十分に小さい値 0.001 GPa 、ポアソン比は 0.3 とした。

Fig. 9 Relationship between natural frequency f and dimension H , obtained from the eigenvalue analysis using the finite element method (FEM) by varying H dimensions in 0.5-mm increments. Plots ○ and □ show the results of the undamped dynamic vibration absorber (UDVA) and tuned particle damper (TPD), respectively. The dotted lines represent the approximated relationships between f and H .

3・3 多重動吸振器の埋込

試験片の断面形状を図 10 に、外観を図 11 に示す。試験片は、動吸振器を含まない主振動系のみ、主振動系と一体化した非減衰型の多重動吸振器 (Multi-mass Undamped Dynamic Vibration Absorber, MUDVA)、減衰型の多重動吸振器 (MTPD) の 3 つである。いずれの試験片も外形寸法および外見は同じである。MUDVA と MTPD は、主振動系の設計値である 1 次曲げモード 544 Hz に対し ± 100 Hz となる 444~644 Hz の範囲において、線形に固有振動数を変化させた動吸振器を長さ方向 (No. A~O) に分布させ、幅方向 (No. 1~3) は同一の動吸振器とした。作製後に測定した試験片の質量は、主振動系のみが 51.1 g, MUDVA が 54.8 g, MTPD が 54.7 g であった。主振動系と副振動系の質量比は 7.1~7.2 % であり、前節で設計した 7.3 % と同等であることを確認した。提案するプロセスでは、主振動系と動吸振器を一体造形できるため、取り付け部品による余分な質量増加させることなく動吸振器を構造物に配置することができる。

Fig. 10 Cross-sectional view of the actual specimen. The dynamic vibration absorbers are designed such that the natural frequencies are linearly distributed from 444 Hz at A to 644 Hz at O.

Fig. 11 Appearance of the actual specimen. Since the dynamic vibration absorber is built-in, the appearance of the specimen is the same.

3・4 多重動吸振器による制振性能のロバスト性

SLM で製造する動吸振器の固有振動数は、寸法精度、および密度とヤング率の誤差等により変動する。特に、SLM は粉末を熔融凝固するプロセスであることから、熔融前に存在した粉末間の空隙が凝固後に無くなるため、積層方向の寸法が設計値より小さく製造される傾向にある。図 8 のように動吸振器の積層方向は、片持ち梁の軸と平行に設定したため、 H 寸法が小さくなることが予測できる。 H 寸法が小さくなることで、設計した動吸振器の固有振動数より、実際に製造した動吸振器の固有振動数が高くなる。そのため、この予想される固有振動数の変動に対して、多重動吸振器による制振性能のロバスト性を評価する。具体的には、図 10 で示した MUDVA のジオメトリを対象に、 H 寸法を変化させ線形に分布する固有振動数の範囲を ± 0 , $+20$, $+40$, $\dots$, $+100$ Hz (つまり $444 \sim 644$ Hz, $464 \sim 664$ Hz, $484 \sim 684$ Hz, $\dots$, $544 \sim 744$ Hz) と高周波側にシフトし、周波数応答解析による制振効果の相対比較を行った。なお、使用したソフトウェアおよび物性値は 3・1 節と同じで、解析手法はモード重ね合わせ法とした。モード減衰比は、後述する主振動系のみの打撃試験結果より半値幅法で求めた 0.0008 を各モードに一定で与えた。また、数値実験の比較基準として、主振動系のみのジオメトリも計算対象とした。

試験片表面の長さ方向および幅方向の中央に 1N の繰り返し荷重を負荷した条件に対し、4 章で後述する加速度センサの中心位置 (長さ方向の端面から 3 mm, 幅方向の中央) における板厚方向の加速度応答を図 12 に示す。また、 $400 \sim 700$ Hz の評価範囲における各ジオメトリの最大振幅と、主振動系のみとの差を表 2 に示す。主振動系のみへの応答に対して、 ± 0 , $+20$, $+40$ Hz では -14 dB 以上の制振効果があるのに対し、 $+60$ Hz では -11.4 dB, $+80$ Hz では -8.3 dB, $+100$ Hz では -5.6 dB と徐々に制振効果が小さくなった。この結果から SLM によるプロセス上の傾向から動吸振器の固有振動数が高周波側へ変動するという想定に対し、本試験片の設計においては、固有振動数を線形分布させた多重動吸振器による制振性能は、 $+40$ Hz までの周波数範囲の変動に対しロバスト性を有することを検証できた。

Fig. 12 Frequency response functions of a plate without dynamic vibration absorber and a multi-mass undamped dynamic vibration absorber (MUDVA, modal damping ratio = 0.0008). This graph's 0 dB is 10^{-5} m/s². The position indicated by "↓" is the maximum value of each condition. The frequency range for the distribution of MUDVA is shifted to evaluate the robustness of the damping effect. The damping effect can be robustly obtained at a frequency shift less than 40 Hz.

Table. 2 Maximum acceleration of frequency response analysis.

		Plate without dynamic vibration absorber	Multi-mass undamped dynamic vibration absorber (MUDVA, modal damping ratio = 0.0008)					
			± 0 Hz	+20 Hz	+40 Hz	+60 Hz	+80 Hz	+100 Hz
Maximum acceleration	[dB]	187.6	173.4	170.6	172.9	176.2	179.3	182.0
Reduction dB for plate without dynamic vibration absorber	[dB]	-	-14.2	-17.0	-14.7	-11.4	-8.3	-5.6

4. 打撃試験の方法

試験片の1次曲げモードを対象にした打撃試験の方法を図13に示す。1次曲げモードの節を糸で吊り、試験片の一端に加速度センサ（PCB Piezotronics, 352C23）を取り付け、インパルスハンマー（小野測器, GK-2110）で中央を打撃し、信号をFFTアナライザ（小野測器, CF-7200）で取得した。ノイズ除去のため加算平均処理を適用し、平均回数7回でFRFを評価した。長さ方向において非対称形状であるMUDVAとMTPDは、ばね要素である片持ち梁の固定端側となる一端に加速度センサを取り付けた。また、一般的な構造に対する打撃試験では任意の打撃力で良いが、粒状体ダンパを含む構造は減衰の大きさに加速度依存性があることから（Liu et al., 2005）、FRFは打撃力に依存する。そこで、非線形の影響を排して加算平均処理時の再現性を高め、ばらつきを抑えた制振性能の評価をするため、打撃直後における加速度センサの最大値が $30 \sim 50 \text{ m/s}^2$ の範囲に収まるように打撃力を調整した。

Fig. 13 Experimental setup of the impact tests. The specimen is suspended at the node of the primary bending mode. The accelerometer is attached at the end of the specimen, and the center of the specimen is excited using an impulse hammer. The frequency response function is obtained using a FFT analyzer.

5. 結果・考察

5・1 試験片の寸法精度

MUDVA と MTPD の試験片は主振動系に動吸振器を内蔵するため、製造後に仕上がりを確認できない。そこで、動吸振器を目視確認するため、3D モデルの内壁を板厚方向に除去した設計にて、制振性能を評価する試験片と同一のロット、加工条件で別途製造した。これを測定顕微鏡（ミットヨ, MF-UD2017B）により、図 10 中の H 列で示す動吸振器 3 つ（セル H-1, H-2, H-3）を対象に d , D , H の各寸法を測定した。外観を図 14 に、測定結果を表 3 に示す。オーバーハングしたおもりの形状は、3D モデルに対し総じて誤差の小さい品質を得た。定量的には、測定した 3 つの平均値は設計寸法に対し、曲げ剛性に対する寄与の大きい d 寸法が $-0.01 \sim 0$ mm, おもりの質量に対する寄与の大きい D 寸法が ± 0.01 mm, 固有振動数の制御変数である H 寸法は $-0.12 \sim -0.08$ mm であり、同一の設計寸法とした幅方向における個体差は小さかった。SLM を用いた単一の加工プロセスにより複数の動吸振器を高い寸法精度で製造することを確認した。

また、MUDVA の H 寸法誤差 -0.12 mm は、他の寸法および密度とヤング率の誤差が無いと仮定すれば、図 9 の近似式から動吸振器の固有振動数が設計値に対し $+12$ Hz になると推定される。しかし、3・4 節で先述したとおり、多重動吸振器によって $+40$ Hz までの変動に対してロバスト性が期待されることから、この影響は無視できると考えられる。

Fig. 14 Appearance of the fabricated multi-mass undamped dynamic vibration absorber (MUDVA) and multi-mass tuned particle damper (MTPD) (Cell no. H-1, H-2, H-3 in Fig. 10).

Table 3 Designed and measured sizes of the fabricated multi-mass undamped dynamic vibration absorber (MUDVA) and multi-mass tuned particle damper (MTPD). The d and D dimensions are highly accurate at ± 0.01 mm, but the H dimension is slightly smaller at -0.08 to -0.12 mm.

Type	Cell number	d [mm]	D [mm]	H [mm]
MUDVA	Design	0.50	3.00	11.53
	H-1	0.50	3.01	11.42
	H-2	0.50	3.00	11.41
	H-3	0.50	3.02	11.42
	Ave.	0.50	3.01	11.41
MTPD	Design	0.50	3.00	12.03
	H-1	0.50	2.99	11.95
	H-2	0.50	3.00	11.97
	H-3	0.49	2.98	11.93
	Ave.	0.49	2.99	11.95

5・2 打撃試験による制振性能の評価

主振動系の1次曲げモードが存在する400～700 Hzの周波数帯域におけるFRFの振幅を図15に示す。各試験片におけるアクセラランスの最大振幅と、その周波数を表4に示す。主振動系に対する最大振幅の低減量は、MUDVAが-19.8 dBであったのに対し、MTPDが-31.8 dBとなり、より大きな制振効果が見られた。

動吸振器を含まない主振動系の固有振動数は538 Hzであり、固有値解析の結果544 Hzに対し6 Hz低かった。MUDVAは410～670 HzにおいてFRFの振幅に複数のピークがある。主振動系に単一の動吸振器を設けた場合、FRFのピークは基本的に2山に分かれる。動吸振器を2個、4個、6個設けた多重動吸振器の場合、FRFのピークは3山、5山、7山に分かれる(神谷他, 1996)。つまり、FRFのピークが複数の分割されることは多重動吸振器として機能していることを示している。MTPDも同じ周波数帯域でFRFのピークが複数の分割しており、同様に多重動吸振器として機能した。一方、分割されたピークの山と谷の鋭さは、MUDVAに比べMTPDの方が小さい。これは粉末の有無により、各ピークで定性的に減衰の効果が発現していることを示している。提案する多重動吸振器は、制振効果を発現させたい周波数帯域で動吸振器の固有振動数を分布させることにより、動吸振器のモデル化誤差や製造精度に対してロバストな制振性能を得られたと考えられる。以上より、本提案のMTPDは、質量要素に封入した粉末が粒状体ダンパによる減衰要素として機能し、かつ H 寸法を制御して固有振動数を線形分布した複数の動吸振器が多重動吸振器として機能する狙い通りの制振性能を確認できた。

Fig. 15 Frequency response function of the actual specimen. This graph's 0 dB is 10^{-5} m/Ns². Since multi-mass undamped dynamic vibration absorber (MUDVA) and multi-mass tuned particle damper (MTPD) have multiple peaks, they function as multiple dynamic vibration absorbers. Furthermore, the sharpness of the peaks and valleys of MTPD is smaller than that of MUDVA, which indicates that the powder serves as a damper in the system.

Table 4 Maximum acceleration of frequency response function.

	Plate without dynamic vibration absorber	Multi-mass undamped dynamic vibration absorber (MUDVA)	Multi-mass tuned particle damper (MTPD)
Maximum acceleration [dB]	188.8	169.0	157.0
Natural frequency [Hz]	538	647	494

6. 結 言

原料粉末を利用した粒状体ダンパを動吸振器の減衰要素に適用し、多重動吸振器（MTPD）を有する主振動系との一体構造を、SLM による単一の加工プロセスで実現する方法を提案した。板状試験片と MTPD を一体造形し、1 次曲げモードを対象とした打撃試験から以下の結論を得た。

1. ばね要素を片持ち梁の曲げ剛性、質量要素を自由端に設けたおもりとする動吸振器を、片持ち梁の軸と積層方向を合わせることで、梁をサポート構造として兼用し、また基板に対しオーバーハングする面の角度を 45°にすることで、SLM の製造制約を満たし、寸法精度の高い動吸振器を単一の加工プロセスで主振動系と一体で製造できた。
2. SLM の原料である粉末を、粒状体ダンパとして動吸振器の質量要素に封入させる造形プロセスによって、余分な取り付け部品による質量増加をさせることなく、減衰型の動吸振器（TPD）を部品に内蔵することができた。
3. ばね要素である片持ち梁の長さを調整することで、試験片に複数埋め込まれた動吸振器の固有振動数を分布させ、加振力を揃えた打撃試験の下で 1 次曲げ共振付近の広い周波数帯域において制振性能を得た。特に、MTPD を一体造形した試験片では、MUDVA を一体造形した試験片に対して最大振幅が 12.0 dB 小さく、粉末を減衰要素として動吸振器に付与する提案の造形プロセスによって効果的な減衰を得られた。一方、粒状体ダンパは非線形性を有するため、粒状体の仕様や入力に応じて制振効果に変化することが推測される。今後、SLM で用いる粉末を使用した粒状体ダンパの非線形特性を評価し、減衰要素としての最適な粒状体の仕様や入力条件を探索する。

文 献

- 荒木嘉昭, 横道 勲, 井上 順吉, 粉粒体衝撃ダンパ: 垂直振動, 片側衝突時の特性, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.49, No.442 (1983), pp.945-951.
- Atzeni, E. and Salmi, A., Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by direct metal laser sintering (DMLS), Journal of Manufacturing Processes, Vol.20, Part.3 (2015), pp.500-506.
- Calignano, F., Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting, Materials and Design, Vol.64 (2014), pp.203-213.
- Campanelli, S.L., Contuzzi, N., Angelastro, A. and Ludovico, A.D., Capabilities and performances of the selective laser melting process, New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems (2010), DOI:10.5772/10432.
- Gagnon, L., Morandini, M. and Ghiringhelli, G.L., A review of particle damping modeling and testing, Journal of Sound and Vibration, Vol.459 (2019), DOI:10.1016/j.jsv.2019.114865.
- 橋本正俊, 若澤靖記, 丸井悦男, 粒子充てん構造物の振動減衰特性 (第 1 報) -ガラス粒充てんによる減衰能改善-, 精密工学会誌, Vol.66, No.9 (2000), pp.1446-1450.
- 井上昌信, 横道勲, 平木講儒, 近似解析法による垂直振動用粒子ダンパの設計, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.801 (2013), pp.1280-1289.
- Jacob, G., Donmez, A., Slotwinski, J. and Moylan, S., Measurement of powder bed density in powder bed fusion additive manufacturing processes, Measurement Science and Technology, Vol.27, No.11 (2016), DOI:10.1088/0957-0233/27/11/115601.
- 神谷圭二, 鎌形健太郎, 松本進, 背戸一登, 多重動吸振器の最適設計法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.62, No.601 (1996), pp.3400-3405.
- Kempen, K., Thijs, L., Humbeeck, J.V. and Kruth, J.P., Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting, Physics Procedia, Vol.39 (2012), pp.439-446.
- Liu, W., Tomlinson, G.R. and Rongong, J.A., The dynamic characterisation of disk geometry particle dampers, Journal of Sound and Vibration, Vol.280, Issues 3-5 (2005), pp.849-861.

- Lu, Z., Wang, Z., Masri, S.F. and Lu, X., Particle impact dampers: past, present, and future, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.25, Issue 1 (2018), DOI:10.1002/stc.2058.
- 増田直樹, 牛島邦晴, 山口誉夫, 山本崇史, 選択的レーザー溶融法で造形したラティス構造の吸音特性評価, *日本機械学会論文集*, Vol.86, No.883 (2020), DOI:10.1299/transjsme.19-00311.
- 西津卓史, 谷次智弥, 竹澤晃弘, 米倉一男, 渡邊修, 北村充, トポロジー最適化と積層造形を活用したラティス構造の創出手法, *日本機械学会論文集*, Vol.83, No.855 (2017), DOI:10.1299/transjsme.16-00581.
- 潘公宇, 安田正志, 多重動吸振器のロバスト最適設計方法, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.71, No.712 (2005), pp.3430-3436.
- Plocher, J. and Panesar, A., Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: towards next-generation lightweight structures, *Materials & Design*, Vol.183 (2019), DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108164.
- Scott-Emuakpor, O., George, T., Runyon, B., Beck, J., Sheridan, L., Holycross, C. and O'Hara, R., Sustainability study of inherent damping in additively manufactured nickel alloy, *AIAA Journal*, Vol.57, No.1 (2019), DOI:10.2514/1.J057608.
- Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos, R. and Mortágua, J.P., Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components, *Procedia Structural Integrity*, Vol.1 (2016), pp.289-296.
- 高橋芳弘, ねじり振動における粒状体ダンパの効果, *日本機械学会論文集*, Vol.85, No.880 (2019), DOI:10.1299/transjsme.19-00248.
- Wang, G., Gu, Y., Zhao, L., Xuan, J., Zeng, G., Tang, Z. and Sun, Y., Experimental and numerical investigation of fractal-tree-like heat exchanger manufactured by 3D printing, *Chemical Engineering Science*, Vol.195 (2019), pp.250-261.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A. and Raymont, D., Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.62 (2012), pp.32-38.
- Zhang, K., Xi, Y., Chen, T. and Ma, Z., Experimental studies of tuned particle damper: Design and characterization, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.99 (2018), pp.219-228.

References

- Araki, Y., Yokomichi, I. and Inoue, J., Impact damper with granular materials : Single side impact in a vertical oscillating system, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.49, No.442 (1983), pp.945-951 (in Japanese).
- Atzeni, E. and Salmi, A., Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by direct metal laser sintering (DMLS), *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.20, Part.3 (2015), pp.500-506.
- Calignano, F., Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting, *Materials and Design*, Vol.64 (2014), pp.203-213.
- Campanelli, S.L., Contuzzi, N., Angelastro, A. and Ludovico, A.D., Capabilities and performances of the selective laser melting process, *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems* (2010), DOI:10.5772/10432.
- Gagnon, L., Morandini, M. and Ghiringhelli, G.L., A review of particle damping modeling and testing, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.459 (2019), DOI:10.1016/j.jsv.2019.114865.
- Hashimoto, M., Wakasawa, Y. and Marui, E., Damping characteristics of structures packed with balls (1st report) -damping capacity improvement by glass ball packing-, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.66, No.9 (2000), pp.1446-1450 (in Japanese).
- Inoue, M., Yokomichi, I. and Hiraki, K., Design of particle damper for vertical vibration with approximate analysis, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.79, No.801 (2013), pp.1280-1289 (in Japanese).
- Jacob, G., Donmez, A., Slotwinski, J. and Moylan, S., Measurement of powder bed density in powder bed fusion additive manufacturing processes, *Measurement Science and Technology*, Vol.27, No.11 (2016), DOI:10.1088/0957-0233/27/11/115601.
- Kamiya, K., Kamagata, K., Matsumoto, S. and Seto, K., Optimal design method for multi dynamic absorber, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.62, No.601 (1996), pp.3400-3405 (in Japanese).
- Kempen, K., Thijs, L., Humbeeck, J.V. and Kruth, J.P., Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting, *Physics Procedia*, Vol.39 (2012), pp.439-446.
- Liu, W., Tomlinson, G.R. and Rongong, J.A., The dynamic characterisation of disk geometry particle dampers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.280, Issues 3-5 (2005), pp.849-861.

- Lu, Z., Wang, Z., Masri, S.F. and Lu, X., Particle impact dampers: past, present, and future, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol.25, Issue 1 (2018), DOI:10.1002/stc.2058.
- Masuda, N., Ushijima, K., Yamaguchi, T. and Yamamoto, T., Evaluation of acoustic properties of lattice structure manufactured by selective laser melting, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol.86, No.883 (2020), DOI:10.1299/transjsme.19-00311.
- Nishizu, T., Tanitsugu, T., Takezawa, A., Yonekura, K., Watanabe, O. and Kitamura, M., Lattice structure design with topology optimization and additive manufacturing, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol.83, No. 855, DOI:10.1299/transjsme.16-00581.
- Pan, S. and Yasuda, M., Robust Design method of multi dynamic vibration absorber, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.712 (2005), pp.3430-3436 (in Japanese).
- Plocher, J. and Panesar, A., Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: towards next-generation lightweight structures, *Materials & Design*, Vol.183 (2019), DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108164.
- Scott-Emuakpor, O., George, T., Runyon, B., Beck, J., Sheridan, L., Holycross, C. and O'Hara, R., Sustainability study of inherent damping in additively manufactured nickel alloy, *AIAA Journal*, Vol.57, No.1 (2019), DOI:10.2514/1.J057608.
- Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., Alves, N., Santos, R. and Mortágua, J.P., Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes, *Procedia Structural Integrity*, Vol.1 (2016), pp.289-296.
- Takahashi, Y., Effect of particle damper under torsional vibration, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol.85, No.880 (2019), DOI:10.1299/transjsme.19-00248.
- Wang, G., Gu, Y., Zhao, L., Xuan, J., Zeng, G., Tang, Z. and Sun, Y., Experimental and numerical investigation of fractal-tree-like heat exchanger manufactured by 3D printing, *Chemical Engineering Science*, Vol.195 (2019), pp.250-261.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A. and Raymont, D., Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.62 (2012), pp.32-38.
- Zhang, K., Xi, Y., Chen, T. and Ma, Z., Experimental studies of tuned particle damper: Design and characterization, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.99 (2018), pp.219-228.