

研究論文

鋳鉄粉が封入されたハイグレードオーディオラックの
制振効果に関する基礎的研究

中江貴志*, 劉孝宏*, 廣瀬新吾**

Fundamental Study on Suppression Effect of
High Grade Audio Rack with Cast Iron Powder

Takashi NAKAE, Takahiro RYU and Shingo HIROSE

Particle dampers are extremely simple structure, and unlike general viscous damping. They have the advantages that they do not age, do not require maintenance. There have been many examples of studies on particle dampers, but many studies have focused on particles with a few millimeters particle size. The cast iron powder treated in this study has a particle size much smaller than the particle dampers used so far, and it is currently used in high-grade audio racks, but its damping mechanism is unsolved. In this study, we conducted experiments on a high grade audio rack and pole in which cast iron powder is enclosed, and suppression effects of cast iron powder are clarified by comparing vibration characteristics with a rack and pole in which cast iron powder is not enclosed. Fundamental experiment was also conducted. An experimental comparison was carried out using small-diameter stainless steel balls.

Key words: audio rack, vibration, particle damper, impact damper, cast iron powder

1. 緒言

オーディオ機器の振動は CD 音源の信号に重なることで音質を下げる要因となっている。オーディオ機器の振動は、オーディオラックに機器を設置することで振動を抑制することができる。本研究で扱う高級オーディオラック¹⁾には粒状ダンパが封入されており、その制振効果が確認されている。

粒状ダンパは構造が極めてシンプルであり、一般的な粘性減衰と異なり、老朽化せず、メンテナンスの必要がない等の利点がある。これまで粒状体ダン

パに関する研究例^{2),3),4)}は多くあるが、粒子径が数 mm のものを対象にした研究^{5),6),7)}が多い。その中でも、本研究で扱う鋳鉄粉はこれまでの粒状ダンパと異なり、形状が不揃いかつ粒径が 1mm 以下で非常に小さく、その制振メカニズムは未解決である。本研究では、鋳鉄粉が封入されている特殊な高級オーディオラック製品の制振効果を実験的に調査する。実験では、鋳鉄粉が封入されていないオーディオラック製品との振動特性の比較を行う。また、鋳鉄粉および小径のステンレス球を用いた基礎実験を行い、制振特性の比較検討を行う。

2. 打撃試験による実験的検証

図 1(a)に高級オーディオラック C を図 1(b)に一般

令和 4 年 12 月 22 日受理

* 大分大学理工学部創生工学科機械コース

**アイシン高丘株式会社

的なオーディオラック M を示す. 各オーディオラックは3段構造になっており, ラック C は各段2枚の棚板(620×27×500mm)で構成され, 棚板の間にはインシュレータと呼ばれる鋳鉄製の制振材が挟まれている. また, ラック C のそれぞれの棚板や支柱には図 2 に示す鋳鉄粉が封入されており, ラックの総重量は 50 kg である. 1 枚の棚板は, 鋳鉄粉入りハニカ

ムコアを高密度木質ボードおよび天然木突き板で上下に挟む5層構造になっている. 一方, ラック M は, 各段1枚の高密度 MDF の棚板(600×21×520mm)で構成され, 支柱ともに鋳鉄粉は封入されておらず, 総重量は 16kg である. 本章では, ラックの板や支柱を打撃試験し, 鋳鉄粉の有無の違いを比較調査する.

2.1 オーディオラックの板の打撃試験

ラック C およびラック M の板をそれぞれ打撃試験し, その振動特性を調査する. 図 3 に示すように板の四隅にスポンジを敷いた状態で, 鉛直方向に加



(a) Rack C



(b) Rack M

Fig. 1 Audio rack



Fig. 2 Cast iron powder

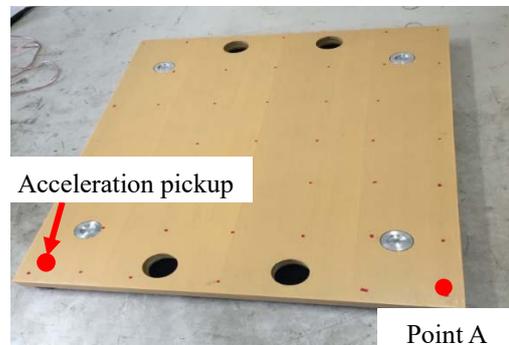
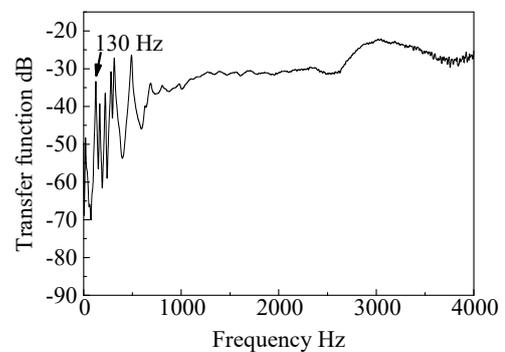
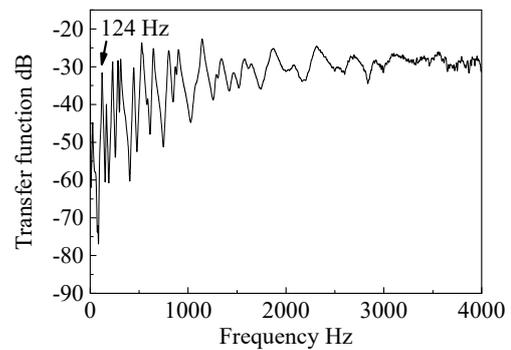


Fig. 3 Hammering test of audio rack board⁸⁾



(a) Rack C

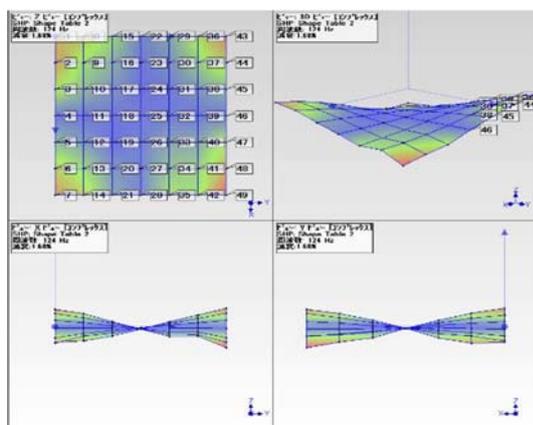


(b) Rack M

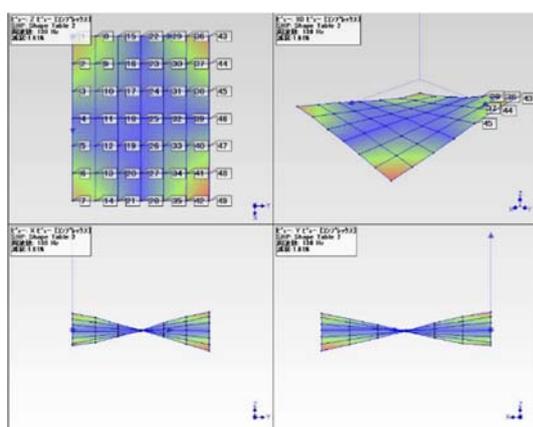
Fig. 4 Frequency response function of the audio rack board

速度計(B&K 4393)を取り付け、インパクトハンマー(B&K 8206)で打撃試験を行った。打撃点は図3中の小さい点とし、板を縦7点×横7点の49点を等間隔で垂直方向に打撃し測定した。また、実験モード解析ソフト(MEScope)を用いて各固有振動数に対するモードパラメーターと固有モードを測定した。図4(a)および図4(b)にそれぞれ図3中のA点を打撃した場合のラックCおよびラックMの周波数応答関数を示す。縦軸はアクセラランスのdB値である。図4(a)は図4(b)に比べ1000 Hz以上の高周波域で振動ピークが見られず、ラックCに封入された鑄鉄粉の高周波域での振動低減効果が確認できた。また、その他の打撃点での結果も同様の傾向が見られた。

また、図4(a)中の130 Hzおよび図4(b)中の124 Hzの固有モードをそれぞれ図5(a)および図5(b)に示し、各固有振動数に対するモード減衰比を表1に示す。図5中の数字は節点番号を示し、振幅が大きい位置



(a) Rack C (130 Hz)



(b) Rack M (124 Hz)

Fig. 5 Natural mode of the audio rack board

Table 1 Modal parameter of the audio rack board

	Natural frequency	Modal damping ratio
Rack C	130Hz	1.61%
Rack M	124Hz	1.21%

を赤で、小さい位置を青で示す。図5(a)および図5(b)から両者は棚板の構造やわずかなサイズの違いがあるものの固有振動数は近く、同じ固有モードであることがわかる。また、表1からラックCのモード減衰比はラックMに比べ全体的に約1.3倍ほど大きいことがわかり、1000 Hz以下の振動モードでもラックCに封入された鑄鉄粉が減衰効果を有していることが確認できた。

2.2 オーディオラックの支柱の打撃試験

次に、それぞれのオーディオラックの支柱を図6に示すように、宙吊りにした状態で軸の垂直方向に打撃試験を行い比較を行った。図7(a)および図7(b)にそれぞれラックCおよびラックMの支柱の周波数応答関数を示す。縦軸はアクセラランスのdB値である。図7から両支柱とも約2000 Hz付近に1次の固有振動数を持っており、ラックCの支柱の振動ピークの方が、ラックMよりもレベルが小さく、丸みを持っていることから、支柱の減衰の大きさの違いが確認できる。板と同様に、実験モード解析ソフトを用いて、表2に示すように、それぞれの固有振動数と減衰比を求めた。表2からラックCの支柱の方が減衰比が約2倍大きく、支柱に封入された鑄鉄粉の減衰効果を確認できた。

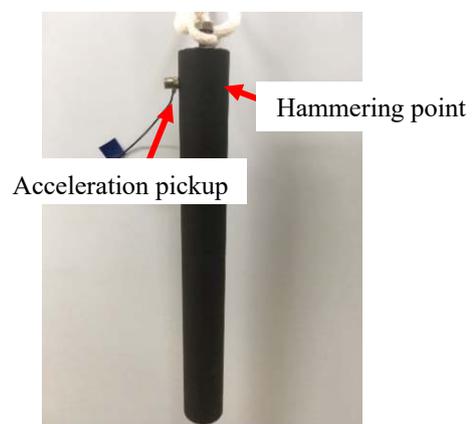
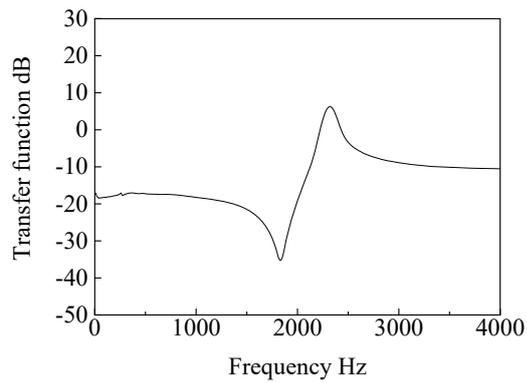
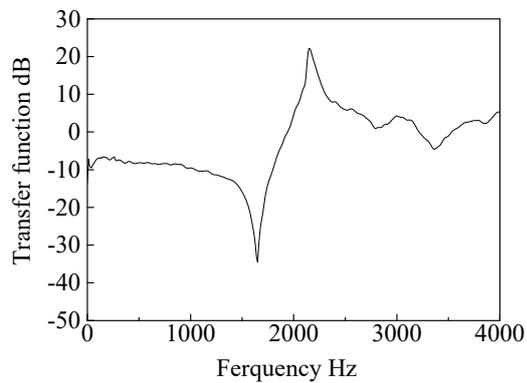


Fig. 6 Hammering test of audio rack pole⁸⁾



(a) Rack C



(b) Rack M

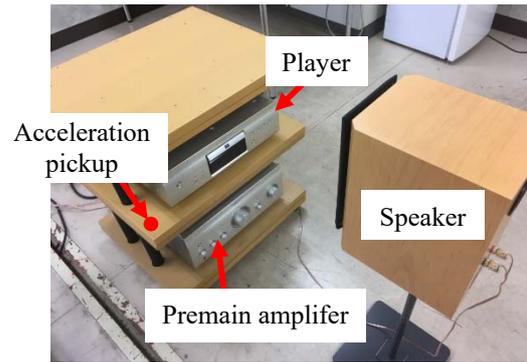
Fig. 7 Frequency response function of the audio rack pole

Table 2 Modal parameter of the audio rack pole

	Natural frequency	Modal damping ratio
Rack C	2150Hz	2.07%
Rack M	2310Hz	0.95%

2.3 Sine sweep 音源によるラックの加振実験

図 8 に示す通り、プレーヤーとプリメインアンプをラックに載せた状態で、30 cm 離れた正面にスピーカーを設置し、可聴域である 20 Hz~20 kHz の音源で Sine sweep 加振実験を行った。ラックの中段の隅に加速度計を取り付け、鉛直方向の加速度を測定した。図 9(a)および図 9(b)にそれぞれラック C およびラック M の応答曲線を示す。ラック M では 1259 Hz の共振ピークが確認できるが、ラック C では確認できない。また、ラック C では 4000 Hz 以上で、ラック M よりも振動レベルが小さいことから、実機においても高周波域での振動低減効果が確認できた。

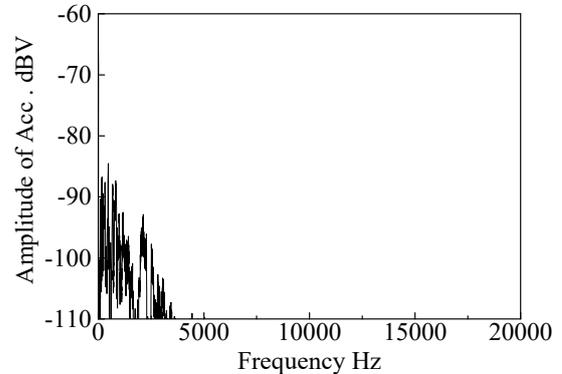


(a) Rack C

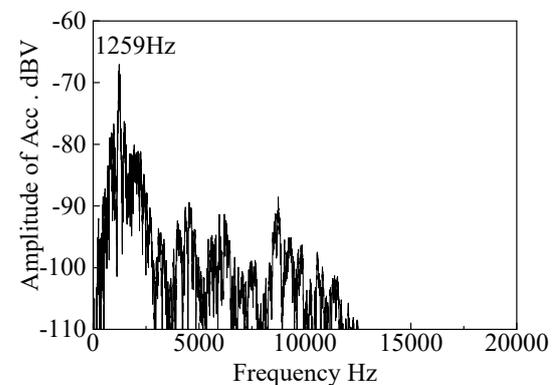


(b) Rack M

Fig.8 Sine sweep excitation experiment



(a) Rack C



(b) Rack M

Fig. 9 Frequency response curve by sine sweep excitation experiment

3. 基礎実験による鋳鉄粉の性能検証

これまで実機を用いた打撃試験および加振実験から、鋳鉄粉が封入されたラック C の振動低減効果が確認されたが、鋳鉄粉以外の粒状ダンパでも同様の制振効果を有する可能性がある。本章では、鋳鉄粉の優位性を確認するため、1 自由度系の基礎実験装置を加振し、鋳鉄粉または直径 1mm のステンレス球を付与し、制振特性を比較検討する。

3.1 基礎実験装置

図 10 に基礎実験装置を示す。質量が 871g の振動体を板ばねで基礎支持し、さらに、別の板ばねで、振動体と加振器を接続し、鉛直方向に加振する 1 自由度振動系の装置を作成した。また、振動体にアクリル製のケースを設置し、鋳鉄粉およびステンレス球が付与できるようになっている。なお、基礎支持側の板ばねの板厚を 0.8mm と 0.5mm の 2 種類でそれぞれ実験を行った。図 10 に示すように、加速度計を振動体の下面に取り付ける。

3.2 打撃試験

粒状体を付与していない時の基礎実験装置の打撃試験を行い、固有振動数を測定する。図 11(a)および図 11(b)にそれぞれ板ばねの板厚を 0.8mm および 0.5mm としたときの周波数応答関数を示す。縦軸はアクセラランスの dB 値である。図 11(a)および図 11(b)からそれぞれ固有振動数は、75 Hz および 40 Hz であることがわかった。

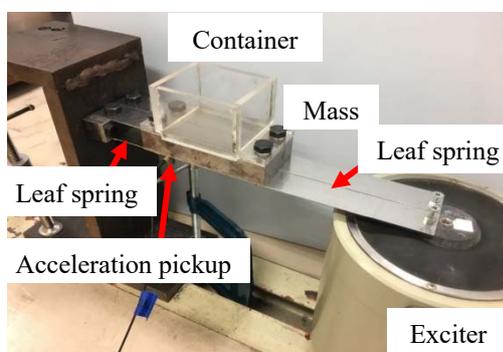
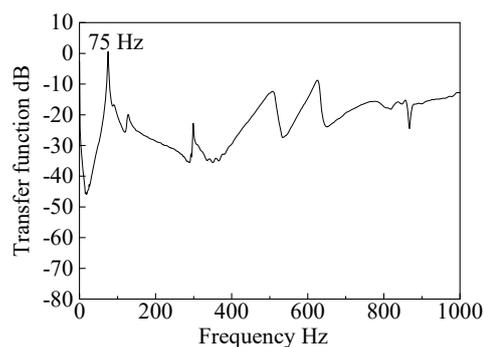
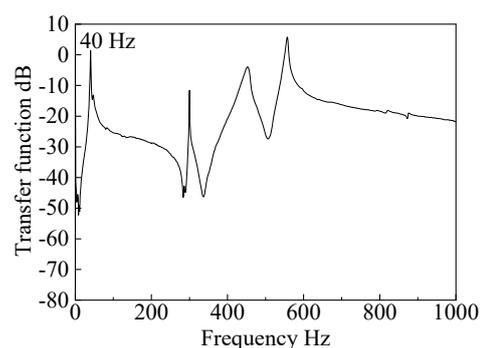


Fig. 10 Experimental set up one degree of freedom system



(a) When the leaf spring thickness is 0.8 mm



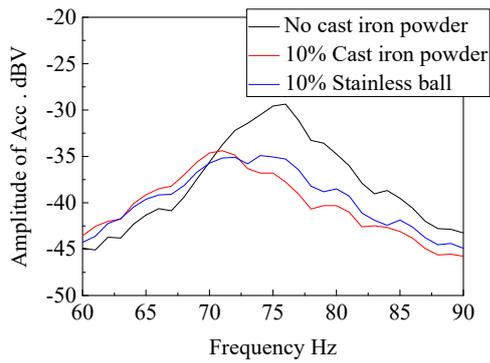
(b) When the leaf spring thickness is 0.5 mm

Fig. 11 Frequency response function of fundamental experimental setup

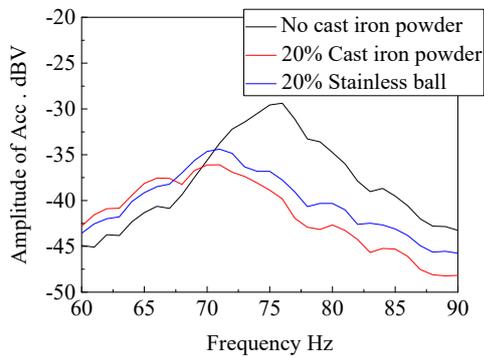
3.3 加振実験

次に、板ばねの板厚が 0.8mm の場合の加振振動数を 60~90 Hz、0.5mm の場合を 30~50 Hz とし、粒状体を付与しない状態、振動体の質量の 10% および 20% の鋳鉄粉またはステンレス球を付与した状態でそれぞれ応答曲線を求め比較を行う。

図 12 に板厚が 0.8mm の場合、図 13 に 0.5mm の場合において、それぞれ実験で得られた応答曲線を示しており、粒状体を付与しない状態を黒、鋳鉄粉を付与した場合を赤、ステンレス球を付与した場合を青で示す。粒状体を付与していない場合、図 12 では 75 Hz に共振ピークがあり固有振動数と一致する。図 13 では 38 Hz に共振ピークがあり、打撃試験よりも加振振幅の大きいことから、非線形性の影響で固有振動数よりもやや低下しているが概ね一致している。この共振ピークは図 12(a)中の 10% の鋳鉄粉および図 12(b)中の 20% の粒状体を付与することによって、質量効果で 71 Hz に低下している。一連の実験から、粒状体が激しく跳ねている様子のときは質量効果とならず共振点の低下は見られないことがわ

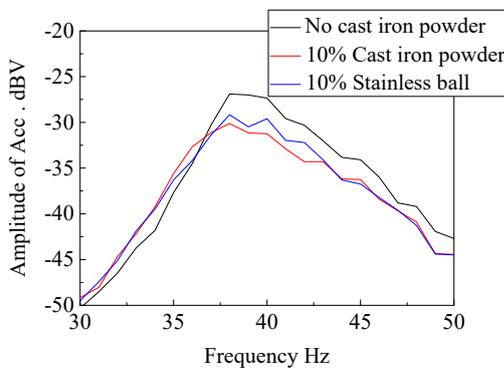


(a) 10 %

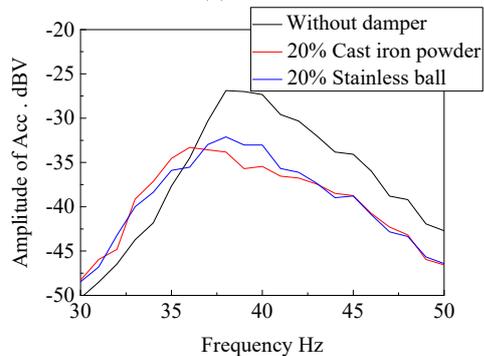


(b) 20 %

Fig. 12 Frequency response curve of one degree of freedom system when the leaf spring thickness is 0.8 mm



(a) 10 %

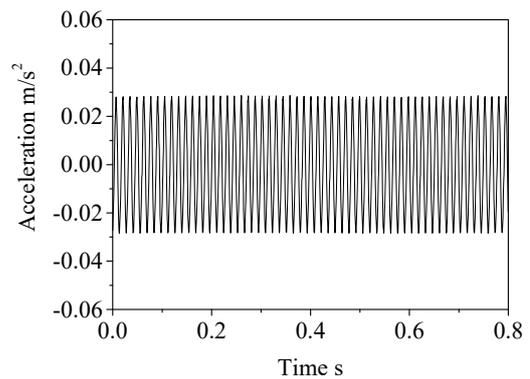


(b) 20 %

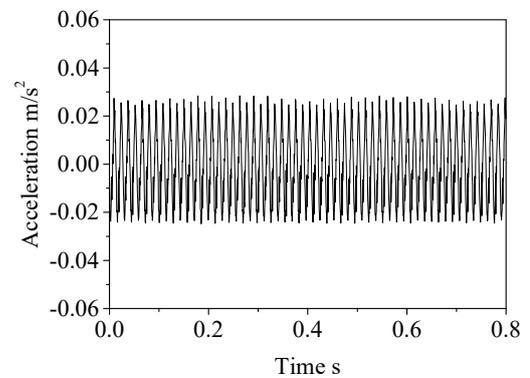
Fig. 13 Frequency response curve of one degree of freedom system when the leaf spring thickness is 0.5 mm

かった. また, 図 12 および図 13 から粒状体の量が増えるほど, 共振ピークの振動レベルが低下しており, 鑄鉄粉においては共振点付近および共振点より高い周波域で, ステンレス球より制振効果が大きかったことがわかった.

さらに, 図 12(a)中の共振点である 71 Hz で, それぞれ鑄鉄粉およびステンレス球を付与した場合の振動体の加速度振動波形を, それぞれ図 14(a)および図 14(b)に示す. 図 14 からステンレス球を付与した場合, 振動波形がキザキザしており, ステンレス球が振動体に衝突する影響であることがわかった. 図 15(a)および図 15(b)にそれぞれ図 14(a)および図 14(b)の振動波形に対する周波数分析結果を示す. 図 15(b)では高周波域に振動ピークがみられノイズを含むことがわかった. 以上から, 鑄鉄粉はステンレス球に比べ静かに制振することが確認できた.

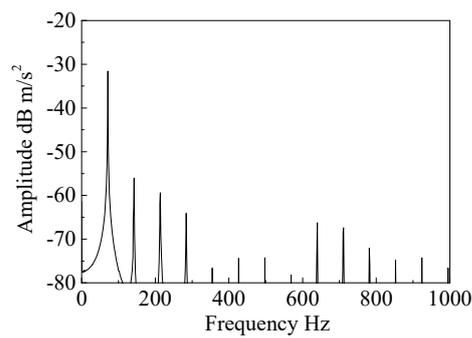


(a) Cast iron powder

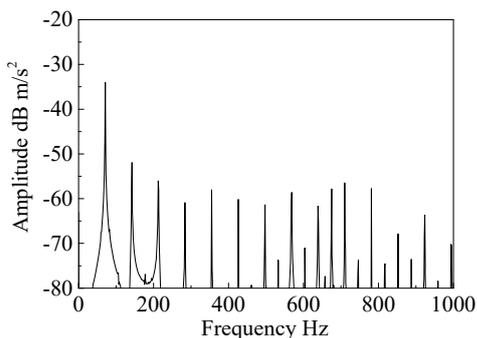


(b) Stainless ball

Fig. 14 Vibration waveform of mass when excitation frequency is 71 Hz, and the leaf spring thickness is 0.8 mm



(a) Cast iron powder



(b) Stainless ball

Fig. 15 Frequency analysis for vibration waveform of

Fig. 14

4. 結言

本研究では、鋳鉄粉が封入された高級オーディオラックの制振効果を実験的に調査した。また、基礎実験装置を用いた加振実験から鋳鉄粉の振動特性を調査した。結果を以下にまとめる。

- (1) オーディオラックの板または支柱単体の打撃試験から、鋳鉄粉を封入することによって、高周波域で減衰効果を有することが確認された。
- (2) 実機のオーディオラックを用いた Sine sweep 加振実験から、打撃試験同様、鋳鉄粉を封入したラックの方が高周波域で振動低減効果があることが確認された。
- (3) 1 自由度系の基礎実験の加振実験から、粒状体を封入することで共振ピークが低下することがわかった。また、粒状体の量を増やすと制振効果が大きくなることが確認された。また、鋳鉄粉はステンレス球に比べ静かに制振することが確認できた。

参考文献

- 1) TAOC 製品紹介ページ, <https://www.taoc.gr.jp/products/#audiorack>
- 2) Friend, R. D. and Kinra, V. K., “Particle Impact Damping”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 233, No.1(2000), pp. 93-118.
- 3) 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.
- 4) 井上昌信, 横道勲, 平木講儒, “垂直振動をうける粒子ダンパの近似解法”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 793, (2012), pp. 3118-3132.
- 5) 佐伯 暢人, 皆川 利宣, 高野 英資, “個別要素法による振動輸送の 3 次元数値シミュレーション”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 64, No. 625, (1998), pp. 3264-3270.
- 6) Michael Heckel, Achim Sack, Jonathan E. Kollmer, Thorsten Pöschel, “Granular dampers for the reduction of vibrations of an oscillatory saw”, *Physica A*, 391, (2012), pp. 4442-4447.
- 7) 田中敏嗣, 牧野俊昭, 瀬畑美智夫, 辻 裕, 川口寿裕, 川崎 健, “粒状体を用いた静音リンク装置の離散要素法による数値シミュレーション”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 688, (2003), pp. 3198-3206.
- 8) 都築彬史, 劉孝宏, 中江貴志, 廣瀬新吾, “粒状体を封入したオーディオラックの振動特性に関する基礎的研究”, *Dynamics and Design Conference 2018 講演論文集*, No.18-7.