

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04024

研究課題名（和文）粘弾性体による柔軟構造物の高次マルチモード制振の実現

研究課題名（英文）Realization of multi-mode vibration reduction of flexible structures utilizing visco-elastic bodies

研究代表者

富岡 隆弘 (Tomioka, Takahiro)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：00425860

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、粘弾性体の多方向への振動を動吸振器として活用する柔軟構造物の弾性振動のマルチモード制振に取り組んだ。鉄道車両の台枠部を約1/10スケールで模擬した細長い平板構造体を用い、その弾性振動特性の評価システムを構築するとともに、マルチモード制振デバイスの検討を行った。そして、球状高吸水性樹脂を用いたマルチモード制振デバイス、質量（金属製立方体）を多方向から粘弾性体で弾性支持しその圧縮量を変更することで制振対象周波数を調整する機構を持つ制振デバイス、球状粘弾性体に球状質量体を埋め込んだ多軸動吸振器、などを提案し、いずれも上記台枠を用いた実験によりマルチモード制振効果を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軽量化や構造簡素化に伴い機械構造物の弾性振動が問題となるが、弾性振動は様々な形状で生じ、特定のモードを対象とした制振では不十分なことが多い。本研究は構造物の弾性振動のマルチモード制振に取り組んだもので、センサやアクチュエータ、制御システム等が不要で低コストの制振法であり、広く産業応用が見込める。提案したデバイスを実構造物に適用してマルチモード制振効果を確認しており、実現可能性が示されているほか、特許出願も行っている。また、鉄道車両の乗客による車体のマルチモード制振効果をもとにした従来にない発想による制振法である。以上より学術的意義と、社会的意義を有する成果が得られていると考えている。

研究成果の概要（英文）：Multi-mode vibration reduction of elastic vibration in flexible structures has been studied in this research by utilizing the vibration of the visco-elastic body in multiple directions as a dynamic vibration absorber (DVA). Using an elongated flat plate that simulates the underframe of a railway vehicle on a scale of about 1:10, we constructed an evaluation system for its elastic vibration characteristics and examined the effectivity of proposed multi-mode vibration damping devices. Some unique vibration damping devices were newly proposed such as; a DVA using vibration of super absorbent polymer beads; a multi modal DVA with frequency adjustment mechanism by changing the amount of compression of visco-elastic rubbers supporting a vibrating mass; and a DVA consisting of a mass embedded in spherical visco-elastic medium. All of the proposed devices were applied to the model underframe and the multi-mode vibration damping effects have been confirmed.

研究分野：機械力学，振動工学

キーワード：弾性振動 制振 動吸振器 粘弾性体 マルチモード制振 パッシブ制振

### 1. 研究開始当初の背景

航空機や鉄道車両など軽量化された柔軟構造物では弾性振動が問題となり、複数の弾性振動モードの同時制振（マルチモード制振と呼ぶ）が必要となることが多い。例えば鉄道車両では新幹線・在来線とも人が敏感な 10Hz 付近の周波数域に複数の車体弾性振動モードを持つため、乗客の快適性向上にはそれらの同時低減が不可欠となる。また数百 Hz の高次の弾性振動は内装パネルが音を放射する固体伝播音の原因となるため低減が求められるが、透過音に比べ対策が遅れている。これらに関するマルチモード制振の実用化事例はない。

航空機や建築構造物等でも同様な状況にあり、柔軟構造物のマルチモード制振は快適性（付加価値）や信頼性向上の点から重要性が高いが、未解決な課題であった。本研究はこの課題に挑み、「これまで困難であった柔軟構造物のマルチモード制振の簡便な実現」を目指して行われた。

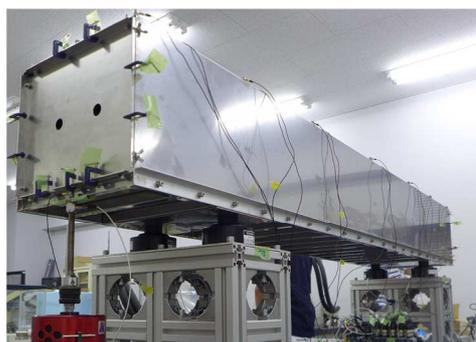
鉄道車両に関しては、人体の挙動を模擬した粘弾性体の活用でマルチモード制振が実現できる可能性が示されている。この効果を適切に模擬することで有用な制振デバイスの実現が期待される。これらは人体が粘弾性体として多方向に振動することで車体の振動エネルギーを散逸する多重動吸振器効果と考えられ、その効果を適切に模擬できれば軽量で有効なマルチモード制振デバイスが実現できると期待される。このように、柔軟構造物のマルチモード制振の実現のために、人体による制振効果を模擬することがブレイクスルーになる可能性があり、具体的には粘弾性体の変形を利用することが考えられる。しかし、粘弾性体の特性や形状を合理的に定めるための系統的な研究は行われておらず、制振対象に応じた制振デバイスの設計法は明らかにされていないかった。

### 2. 研究の目的

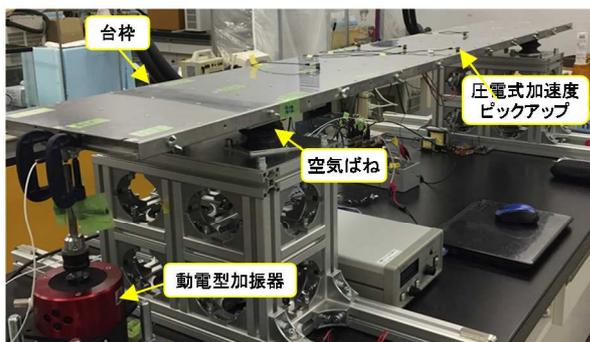
本研究は、柔軟構造物の弾性振動を対象に、人体による制振効果を模擬した簡便なマルチモード制振の実現を目的とし、粘弾性体の変形を利用し、制振対象に応じて設計可能で実用性の高い制振デバイスの提案とそのマルチモード制振効果の実証に取り組んだ。

### 3. 研究の方法

本研究では、制振対象として、複数の弾性振動モードが励起されやすく、鉄道車両や航空機等に見られる薄板筒状構造体（鉄道車両の約 1/10 相当：長さ 2m、幅 0.3m、高さ 0.3m の角筒形薄板筒状構造体）を弾性支持して用いたが、本研究では主にその台枠部分（質量 10.5kg）を対象としてマルチモード制振に取り組んだ（図 1）。粘弾性体の多方向変形を活用し、構成の異なる複数の制振デバイスを考案し、実際にこの構造体に適用してその有効性を検証した。



(a) 角筒構造全体



(b) 台枠部分

図1 制振対象角筒構造物(鉄道車両の1/10車体相当)

### 4. 研究成果

まず構造体の詳細な弾性振動特性を把握するための振動測定システムの構築に取り組み、最大加振力 49N の動電型小型加振器を導入するとともに、多チャンネル同時計測に対応した振動測定システムの整備を行い、加速度や加振力を 32ch の同時計測できるシステムを構築した。また、加振信号出力と振動加速度等の測定データを収録するプログラムを作成した。

複数の方式のマルチモード制振デバイスを考案・試作し、それぞれ上記角筒構造体の台枠部に適用してマルチモード制振効果を確認した。そのうち、(a)球状の高吸水性樹脂 (Super Absorbent

Polymer: SAP) を変形が無視できる容器に充填した制振デバイス, (b)金属製立方体を可動質量として粘弾性体で 3 軸方向に支持し, 粘弾性体を圧縮することで立方体の 3 軸方向の振動を制振対象周波数に同調させる多軸動吸振器 (Three-directionally Supported Dynamic Vibration Absorber: 3DSDVA とよぶ), (c)球状粘弾性体に埋め込まれた球状質量の多軸振動を用いる多軸動吸振器 (Embedded Mass Dynamic Vibration Absorber: eMDVA とよぶ) について以下に示す。

まず(a)の球状 SAP を用いた制振デバイスは, 容器に充填した SAP 自身の弾性変形を動吸振器として活用するもので, 水を吸収した球状 SAP が質量およびばね・減衰要素として機能する。球状 SAP を収める容器の大きさや積載量は, 台枠質量の 3~5%程度となるよう設定した(図 2)。積載する制振デバイスの条件を様々に設定して台枠に積載して加振実験を行い, 台枠の振動加速度により制振性能を評価した。そして容器に充填する球状 SAP の量と積載段数等により制振対象周波数を変更できることを示した。また球状 SAP と水を併用することで, 広い周波数範囲で複数の弾性振動モードへの同時制振効果が得られることを見出した(図 3) ほか, その制振効果を模擬する簡易な解析モデルを提案した<sup>1)</sup>。

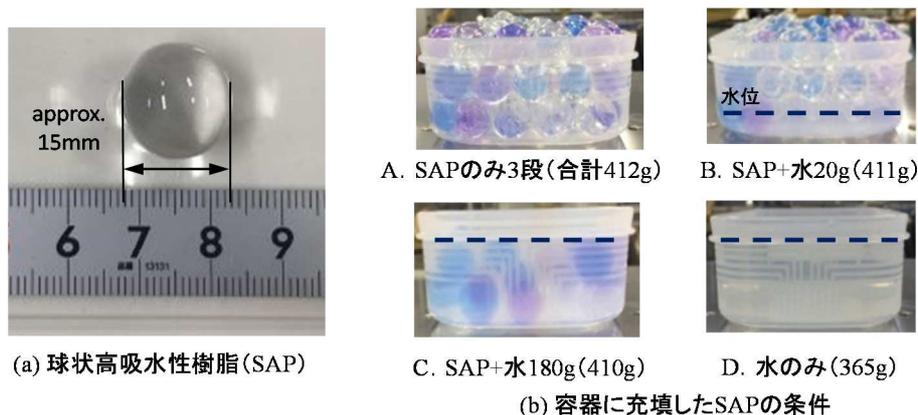


図2 使用した高吸水性樹脂とその適用条件

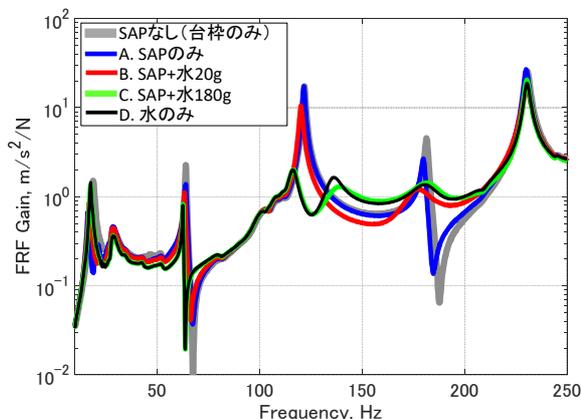


図3 高吸水性樹脂適用による制振効果  
(台枠中央における周波数応答関数FRF)

(b)の 3DSDVA に関しては, 粘弾性体と球状 SAP を併用して立方体形状の鋼製質量 (以下, 立方体質量とよぶ) を支持し, その圧縮量により各軸方向の固有振動数を独立して調整可能なデバイスを製作した(図 4)。立方体質量内には 3 軸方向の加速度を計測できるよう 3 個の圧電式加速度ピックアップを内蔵しており, その出力を見ながら各軸方向の固有振動数を調整することができる。これを上記台枠に適用してマルチモード制振効果を確認した。このデバイスの可動質量 (立方体質量) は 63g, アクリル製のケースや粘弾性体等を含むデバイスの全体質量は 359g で台枠質量の約 3.4%である。3DSDVA の単体加振試験を行って 3 軸の固有振動数を調整し, 台枠の 2 次曲げと 3 次曲げモードに対応する条件を設定して台枠に積載して加振試験を行った。その結果, 想定した通り 2 次曲げ, 3 次曲げモードの制振効果を確認した。また, ねじりモードについても振動低減が確認された<sup>2)</sup> (図 5)。

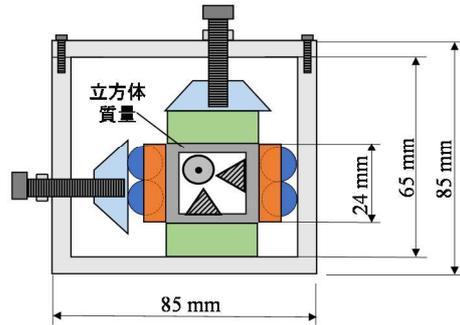
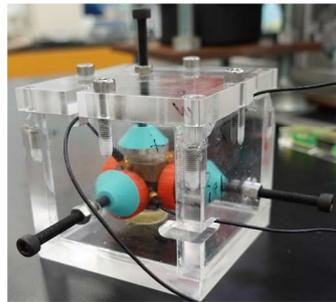


図4 粘弾性体と球状高吸水性樹脂を併用して立方体質量を保持する多軸動吸振器3DSDVA

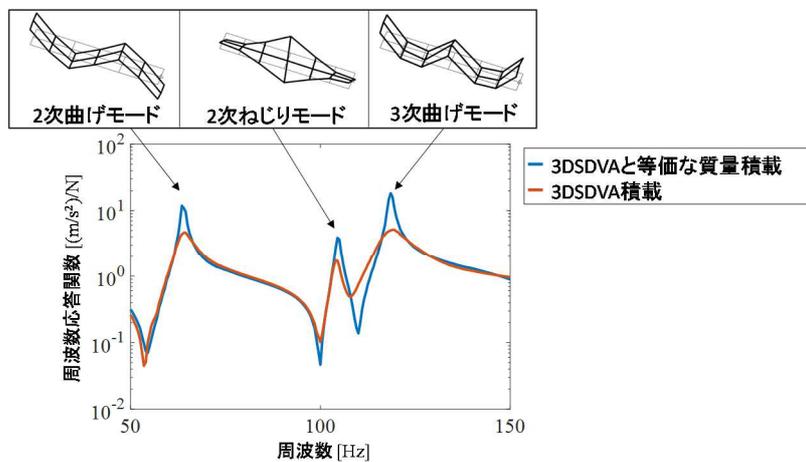


図5 3DSDVAによる制振効果

(c)の eMDVA に関しては、球状粘弾性体 (粘弾性球) に金属製の球状質量 (質量球) を埋め込み、質量球があらゆる方向に振動できる動吸振器を提案し、数値解析と実験により制振デバイスとしての可能性と有効性について検討を行った。有限要素法を用いた数値解析により質量球および粘弾性球の大きさの組み合わせを変更することで固有振動数の調整が可能であり、制振対象に応じて動吸振器としての振動設計が可能なることを示した<sup>3)</sup>。そして変形が無視できるアクリルケースに粘弾性球を納め、そこに質量球を埋め込んだ eMDVA を試作して (図 6)、上記台枠に適用して加振実験を行い、マルチモード制振効果を確認した (図 7)。また本件は特許出願も行った。

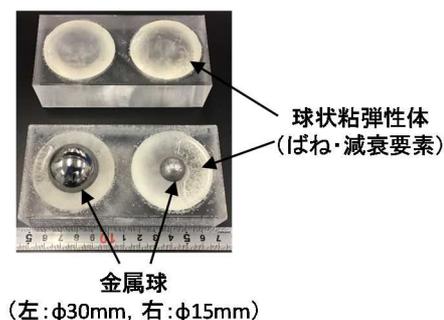


図6 試作したeMDVA

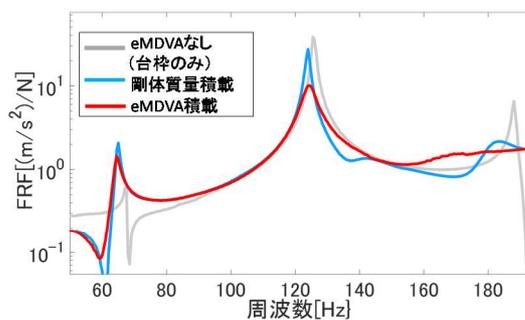


図7 eMDVA適用による制振効果 (φ15mmとφ30mmの2個の質量球を有するeMDVAを積載. 台枠中央におけるFRF)

以上述べたように、本研究では従来にない発想による構造物の弾性振動のマルチモード制振に取り組んだ。鉄道車両の乗客による車体のマルチモード制振効果をヒントに粘弾性体の変形を利用した複数の独創的な構成の制振デバイスを提案し、実構造物に適用してマルチモード制振効果を確認して実現可能性を示した。以上より学術的意義と、社会的意義を有する成果が得られていると考えている。

#### 文献

- 1) Takahiro Tomioka and Karen Minamisawa, Multimodal Reduction of Elastic Vibrations in Plate Structure using Super Absorbent Polymer Beads, EPI International Journal of Engineering, 3-1(2020), pp.21-29. doi.org/10.25042/epi-ije.022020.03
- 2) 宮坂岳宏, 富岡隆弘, 3軸を粘弾性支持された立方体質量による動吸振器の開発, 日本機械学会 2020 年度年次大会 講演論文集, 講演番号 S10113
- 3) Takahiro Tomioka, Keiya Higuchi, Proposal and numerical feasible study of a novel multi-modal and multi-axis dynamic vibration absorber consists of spherical viscoelastic material containing embedded ball-like mass, Bulletin of JSME Mechanical Engineering Journal, (under review).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahiro Tomioka	4. 巻 -
2. 論文標題 Vibration of straight and curved beam coupled systems: Proposal of a simple model for side structures of railway vehicle carbodies to analyse their elastic vibrations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Klomp M., Bruzelius F., Nielsen J., Hillemyr A. (eds) Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. IAVSD 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham	6. 最初と最後の頁 929-937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-38077-9_108	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomioka Takahiro, Minamisawa Karen	4. 巻 3
2. 論文標題 Multimodal Reduction of Elastic Vibrations in Plate Structure using Super Absorbent Polymer Beads	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPI International Journal of Engineering	6. 最初と最後の頁 21 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.25042/epi-ije.022020.03	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takahiro Tomioka
2. 発表標題 Vibration of curved and straight beam coupled systems -Proposal of a simple model for side structures of railway vehicle carbodies to analyse their elastic vibrations-
3. 学会等名 The 26th IAVSD International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (IAVSD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮坂岳宏, 富岡隆弘
2. 発表標題 3軸を粘弾性支持された質量による動吸振器の検討
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 (Dynamics and Design Conference 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂下友哉, 富岡隆弘
2. 発表標題 異方性をもつ任意境界条件の平板構造物の簡易な弾性振動解析手法
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 (Dynamics and Design Conference 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木諒, 富岡隆弘
2. 発表標題 角筒状構造体の弾性振動に対する端部拘束と質量分布の影響に関する実験的検討
3. 学会等名 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 (Dynamics and Design Conference 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂下友哉, 富岡隆弘
2. 発表標題 平板とはりを組み合わせた数値解析モデルを用いた筒状構造物の簡易な弾性振動解析手法
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮坂岳宏, 富岡隆弘
2. 発表標題 3軸を粘弾性支持された立方体質量による動吸振器の開発
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 制振装置	発明者 富岡隆弘, 樋口京哉	権利者 公立大学法人秋 田県立大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-082339	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	瀧上 唯夫  (Takigami Tadao)  (30425863)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・車両構造技術研究部車両 振動研究室・研究室長    (82658)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------