

平成 30 年 5 月 7 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05862

研究課題名(和文) エラストマー粒子を用いた粒状体ダンパーの減衰力特性の解明

研究課題名(英文) Investigation on the damping force properties of the damper using elastomer particles

研究代表者

井門 康司 (IDO, YASUSHI)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40221775

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：振動を抑制する機器であるオイルダンパーのオイルに替えてエラストマー粒子群を利用したダンパーを試作し、その基本的な減衰力特性を実験および数値解析により明らかにした。ロッド両出し型、片出し型および回転型のダンパーを試作し、減衰力の振動周波数や粒子充填率等への依存性を明らかにした。片出し型ダンパーでは、数ヘルツの振動周波数、数ミリの振幅で最大減衰力が1 kNを越え、十分に実用化可能な減衰力が得られた。

研究成果の概要(英文)：A damper utilizing an elastomer particle assemblage instead of the oil of an oil damper which is a device for suppressing vibration was trial-produced, and the basic damping force characteristics were investigated by experiments and numerical simulations. A prototype of double-rod type and single-rod type and rotating type dampers were prototyped, and the dependency of damping force on vibration frequency, particle packing ratio, etc. was clarified. In the single-rod type damper, the maximum damping force exceeds 1 kN at vibration frequency of several hertz, amplitude of several millimeters, and sufficient damping force which can be practically used was obtained.

研究分野：流体工学，機械力学

キーワード：ダンパー エラストマー粒子 減衰力 摩擦力 個別要素法解析 漸硬型

### 1. 研究開始当初の背景

建築構造物や機械類の制振装置として、流体の粘性を利用したオイルダンパーや摩擦ダンパーなどが一般に広く用いられている。一方、粒子を利用したダンパーとして、1個の粒子あるいは粒子群(粒状体と呼ぶ)を容器や構造物に入れ、振動時に生じる壁面への衝突や粒子間および粒子-壁面間の摩擦を利用した粒状体衝撃ダンパーがあり、Masri らの初期の研究[1]から現在まで国内外の研究者による多くの研究報告がある[2]。しかしながら、粒状体の持つ流動性を利用したダンパー機構に関する研究については、一部の実験データを伴わない特許[3]以外、申請者の知る限りほとんどない。そこで申請者らは、オイルダンパーのオイルの代わりに粒状体を用いるダンパーを考案し、前述の特許で提案されている開放型の機構とはまったく異なる密閉型のロッド両出し小型粒状体ダンパーを試作して、粒状体としてガラスビーズあるいは鋼球を用いた場合の減衰力特性を調べた。その結果、粒状体ダンパーの減衰力は漸硬型特性を示すことや、減衰力特性がダンパー設置角に依存して変化することを明らかにするとともに、ばねを用いた設置角依存性を持たない粒状体ダンパー機構を提案した。また、粒状体として鋼球などの強磁性粒子を用いた粒状体ダンパーに磁場を印加することで減衰力可変ダンパーとなること、および適切な磁場を印加する、あるいは永久磁石を配置することで減衰力の設置角依存性を緩和できることを見出した。さらに、粒状体としてある程度の硬度を有するエラストマー粒子を用いた場合、磁場印加や特別な機構の付加がなくても、減衰力のダンパー設置角依存性がほとんど現れないことを予備実験により確かめている。このような粒状体ダンパーは、オイルを使用しないことからオイル漏れの心配がなく環境負荷の低減や機構の簡略化が可能であり、メンテナンス性の向上やオイルダンパーに対して利用環境の拡大が期待できる。

#### 文献

- [1] S. F. Masri and T. K. Caughey, Journal of Applied Mechanics, 33 (1966), 586.  
 [2] Z. Lu, S. F. Masri and X. Lu, Journal of Vibration and Control, 17 (2010), 1454.  
 [3] 太田徹造, 防振装置, 特願 7-46341, 特開 8-219377.

### 2. 研究の目的

これまでの研究成果を踏まえ、本研究ではエラストマー粒子を用いた粒状体ダンパーの減衰力特性について、プロトタイプダンパーを試作して実験的に明らかにするとともに、ダンパー内部の物理現象と減衰力発生

メカニズムを明らかにする。これらの結果から、粒状体ダンパーの現象論的モデルを構築する。研究期間内に明らかにする具体的な研究項目は以下ようになる。

(1) エラストマー粒子を用いたロッド両出し粒状体ダンパーの減衰力特性を実験的に明らかにする。特に、エラストマーの材質、粒子径や加振周波数、振幅、粒子の充填率、異径粒子の混合割合などが減衰力に与える影響を明らかにする。また、衝撃荷重が加わった場合の応答についても調べる。

(2) エラストマー粒子を用いたロッド片出し粒状体ダンパーを新たに試作し、その減衰力特性を明らかにする。片出し粒状体ダンパーでは、ロッドが押し込まれるとエラストマー粒子が変形して粒子間の隙間に入り込み、その際に発生する摩擦力が減衰力の一部となると考えられることから、両出し粒状体ダンパーとは異なる減衰力特性を示すものと期待される。

(3)  $\mu\text{m}$  サイズの鉄粉などの金属微粒子や樹脂微粒子をエラストマーに含有させて粒子を作製する。このような粒子が変形すると、エラストマーと内部の微粒子間に摩擦が発生することから、粒状体として用いた場合、減衰力が増加することが期待できる。このような粒子を用いた粒状体ダンパーの減衰力特性を調べる。混合する球形微粒子の直径や表面性状、および混合割合などが減衰力に与える影響を明らかにする。針状粒子やナノワイヤを混合した場合についても実験を行い、混合微粒子の形状による効果についても明らかにする。

(4) 実験により明らかになった減衰力特性より粒状体ダンパー減衰力の現象論的モデルを構築するとともに、Hybrid 個別要素法を用いた解析により、ダンパー内部の粒子挙動と減衰力との関係を明らかにする。これにより、粒状体ダンパーの減衰力の予測が可能となる。

### 3. 研究の方法

(1) エラストマー粒子の物性や粒子径等が減衰力特性に及ぼす影響の解明

ロッド両出し粒状体ダンパーについてはプロトタイプがすでに製作済みである。これを用いて、エラストマー粒子の硬さやヤング率などの機械的性質、粒子径、加振周波数や振幅などの条件がダンパーの減衰力特性に与える影響を実験的に明らかにする。これまでの実験で明らかとなっている鋼球やガラスビーズなどを用いた場合の実験結果と比較する。

(2) ロッド片出し粒状体ダンパーの試作と基本的減衰力特性の解明

一般に良く使用されるダンパーはロッドが片出しの場合が多いことから、ロッド片出し粒状体ダンパーを試作する。ピストンとダンパー容器の間にオリフィス部があり、この部分を通じて粒子がピストンの前後を移動

する。この際に発生する摩擦力が減衰力に寄与するものと考えられる。エラストマー粒子を用いた場合についてロッド片出し粒状体ダンパーの減衰力特性を実験的に明らかにする。加振周波数、振幅、粒子の充填率や粒子径などが減衰力特性に与える影響を調べる。さらにダンパー容器とピストン、ロッド等のサイズや形状が減衰力特性に与える影響についても実験的に調べる。

(3) 二室型ロッド片出し粒状体ダンパーの試作と基本的減衰力特性の解明

(2)で試作したロッド片出し粒状体ダンパーのピストン部の直径を大きくし、オリフィス部がない二室型のロッド片出し粒状体ダンパーを試作し、その減衰力特性を実験的に明らかにする。(1)や(2)の各種条件に加えて、両側に入る粒子の体積比や充填率が減衰力に与える影響について調べる。片出し粒状体ダンパーの場合、ピストンの進行方向によって減衰力の出方が異なるものと考えられるが、このような二室型して充填粒子の条件を調整することで、ピストンの進行方向に依存しない減衰力特性が得られる可能性がある。

(4) 粒状体ダンパー内粒子挙動の Hybrid 個別要素法 GPGPU 計算コードの開発

粒状体ダンパー内の粒子挙動を解析する個別要素法の基本コードはすでに開発済みであり、開発したコードを用いて得られた計算結果は実験結果と定性的・定量的によく一致することを確認している。現在の計算コードは金属粒子などには有効であるが、粒子の変形が大きい場合には対応できない。そこで、粒子挙動を考慮した Hybrid 個別要素法を開発し、粒子の変更を考慮した計算コードを作成する。

(5) 樹脂微粒子を含む粒状体を用いた粒状体ダンパーの減衰力特性の解明

金属微粒子をエラストマー粒子に混合した場合、重量の増加という問題が生じる。そこで、エラストマーと密度がほぼ変わらない樹脂微粒子を混合したエラストマー粒子を作製し、これらの粒子を用いた粒状体ダンパーの減衰力特性を調べる。金属微粒子を用いた場合の結果と比較し、樹脂微粒子利用の有効性について検討する。樹脂微粒子として、球形、金平糖形状、およびランダム形状のものを用い、形状が減衰力特性に与える効果を明らかにする。

(6) 回転式粒状体ダンパーの試作と減衰力特性の解明

ここまでの研究で用いる粒状体ダンパーは直進式であるが、回転式の粒状体ダンパーも試作し、その減衰力特性を実験的に解明する。回転式の場合、粒子に接触する壁面の移動速度に分布があるため、直進式の粒状体ダンパーとは異なる減衰力特性を有するものと期待される。

#### 4. 研究成果

(1) エラストマー粒子の物性や粒子径等が減衰力特性に及ぼす影響の解明

試作したロッド両出し型粒状体ダンパーを用いて、エラストマー粒子を用いた粒状体ダンパーの基本的な減衰力特性を実験的に明らかにした。エラストマー粒子の材料として硬さの異なる2種類の材料を用いるとともに、粒子の充填率、振動の周波数および振幅などが減衰力に与える影響を明らかにした。その結果、図1のようにエラストマー粒子を用いた粒状体ダンパーは、変位と共に減衰力が増加する漸硬型の減衰力特性を示し、振動周波数や振幅が大きくなると最大減衰力も増加する。粒子の充填率については60%、65%および70%の3つの条件に付いて実験を行い、充填率の増加に伴い減衰力が大きくなること、特に振動の死点近傍で取る最大減衰力が大きくなることがわかった。

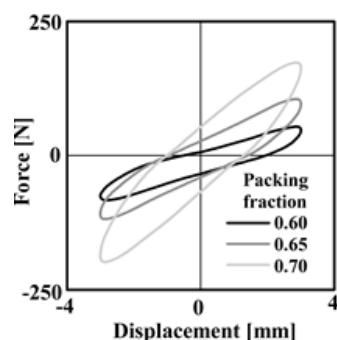


図1 減衰力 変位線図。振幅3mm、振動周波数5Hzの場合の粒子充填率の影響。

(2) ロッド片出し粒状体ダンパーの試作と基本的減衰力特性の解明

内径35mm、長さ78~98mmの円筒容器に直径14mmのロッドの先端について直径20mm、長さ16mmのピストンが入り込むロッド片出し型の粒状体ダンパーを試作し、その基本的な減衰力特性を実験的に明らかにした。ロッド片出し型の場合でも、変位と共に減衰力が増加する漸硬型の減衰力特性を示すことがわかった。ロッド片出し型は、両出し型よりも非常に大きな減衰力を発生させることができ、本試作ダンパーでは500N程度の減衰力が発生した。また、初期充填粒子数が多いほど、減衰力は大きくなる。ピストン径を変化させた実験も行い、ピストン径が大きくなりオリフィス部のサイズが小さくなると、減衰力が増加することがわかった。

(3) 二室型ロッド片出し粒状体ダンパーの試作と基本的減衰力特性の解明

(2)で試作したロッド片出し型粒状体ダンパーのピストン部分を容器内径とほぼ等しいものに替えることにより、二室型ロッド片出し粒状体ダンパーが得られる。ピストンで分けられた二室の両方に同じ充填率で粒子を入れた場合について、ピストンにオリフィスを設けた場合と設けない場合について実験を行い基本的な減衰力特性を明らかにし

た．その結果，オリフィスがない場合の方が振動死点近傍での減衰力が大きくなるということが明らかとなった．

#### (4) 粒状体ダンパー内粒子挙動の Hybrid 個別要素法 GPGPU 計算コードの開発

エラストマー粒子を用いた粒状体ダンパー内では，粒子は変形した状態で他の粒子や壁面等と接触しており，金属粒子と同様の取り扱いはできない．そこで，別途エラストマー粒子の静的な圧縮実験を行い，圧縮量と反発力の関係を明らかにした．この結果を個別要素法解析に取り入れ，エラストマー粒子の変形を考慮した解析コードを開発した．開発した計算コードの妥当性を確認するため，実験で得られた減衰力との比較を行うとともに，アクリル製容器を用いた可視化実験を行い，外周粒子の挙動を比較し，計算結果の妥当性を確認できた．ロッド両出しおよびロッド片出し型についての解析結果より，エラストマー粒子を用いた直動型粒状体ダンパーの減衰力は，主として粒子の弾性反発力と摩擦力によることが明らかとなった．

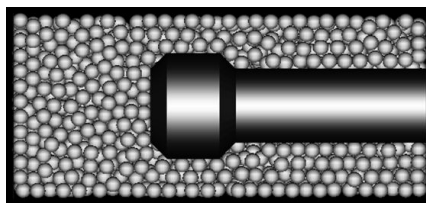


図2 ダンパー内粒子挙動数値解析結果例

#### (5) 樹脂微粒子を含む粒状体を用いた粒状体ダンパーの減衰力特性の解明

粒子作製時に直径  $3\ \mu\text{m}$  および  $6\ \mu\text{m}$  の球形シリコン微粒子を混合して固化させ，体積分率で 30 vol.% の微粒子を含有するエラストマー粒子を作製した．これらのエラストマー粒子を使用した場合のロッド両出し型粒状体ダンパーの減衰力を実験的に調べた．その結果，図3に示すように，同じ体積分率で微粒子を混合した場合，粒子径が小さい方が粒子の母材であるエラストマーと混合されている微粒子との接触面積が大きくなることから，大きな減衰力を示すことがわかった．

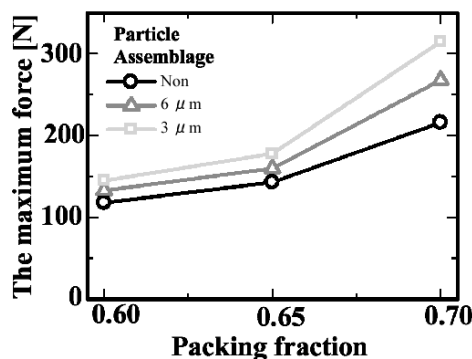


図3 粒子充填率と最大減衰力の関係．エラストマー粒子内に微粒子が含まれない場合， $6\ \mu\text{m}$  径および  $3\ \mu\text{m}$  径の微粒子が 30 % 含まれる場合の比較．

使用したシリコン微粒子の密度は母材のエラストマーの密度とほぼ同じであることから，減衰力を増加させる方法として，エラストマー粒子に微粒子を混合する方法は有効であることが示された．

#### (6) 回転式粒状体ダンパーの試作と減衰力特性の解明

内径 70 mm，高さ 26 mm の円筒形容器と一辺が 28 mm の正方形断面を有する回転子からなる回転型の粒状体ダンパーを試作した．回転速度に対する発生トルクを調べたところ，図4のような結果を得た．粒子充填率が大きい方が減衰トルクは大きく，低回転数領域では回転速度の上昇と共に減衰トルクが急増するが，10~20 rpm を超えると緩やかに増加し，高回転数領域ではほとんど減衰トルクが変わらないことがわかった．

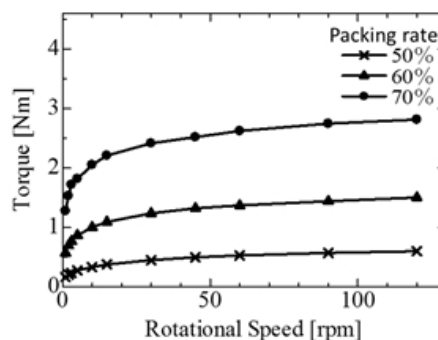


図4 減衰トルク 回転速度曲線．エラストマー粒子の充填率による影響．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

- (1) Yasushi Ido, Makoto Hanai, Takuma Kawai, Koichi Hayashi and Atsushi Toyouchi, “Effects of Stroke and Frequency on Damping Properties of a Damper Using a Steel Particle Assemblage”, *Advanced Experimental Mechanics, Vol.1* (2016), pp.105-110.
- (2) Yusuke Morishita, Yasushi Ido, Kouta Maekawa and Atsushi Toyouchi, “Basic damping property of a double-rod type damper utilizing an elastomer particle assemblage”, *Advanced Experimental Mechanics, Vol.1* (2016), pp.93-98.
- (3) Ryusuke Kawamoto, Yasushi Ido and Atsushi Toyouchi, “Damping Properties of a Damper Using an Elastomer Particle Assemblage Mixing Fine Particles”, *Advanced Experimental Mechanics, Vol.1* (2016), pp.99-104.
- (4) Ryusuke Kawamoto, Yasushi Ido and Koichi Hayashi, “Influence of Installation Angle of a Damper Using a Magnetic Particle Assemblage on Damping Force under Applied Magnetic Field”, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.23, No.3* (2015), pp.624-629.

〔学会発表〕(計7件)

- (1) Makoto Hanai, Yasushi Ido, Yuhiro Iwamoto, Toshiki Nishizawa and Koichi Hayashi, “Discrete Element Method Simulation of Dynamic Behavior of Particles in a Damper Using a Steel Particle Assemblage”, Asian Conference on Experimental Mechanics 2016, Jeju, Korea, Nov. 13-16 (2016)
- (2) Yasushi Ido, Makoto Hanai, Takuma Kawai, Koichi Hayashi and Atsushi Toyouchi, “Effects of Stroke and Frequency on Damping Properties of a Damper Using a Steel Particle Assemblage”, The 10th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Shimane, Japan, Nov. 1-4 (2015)
- (3) Yusuke Morishita, Yasushi Ido, Kouta Maekawa and Atsushi Toyouchi, “Basic damping property of a double-rod type damper utilizing an elastomer particle assemblage”, The 10th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Shimane, Japan, Nov. 1-4 (2015)
- (4) Ryusuke Kawamoto, Yasushi Ido and Atsushi Toyouchi, “Damping Properties of a Damper Using an Elastomer Particle Assemblage Mixing Fine Particles”, The 10th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, Shimane, Japan, Nov. 1-4 (2015)
- (5) 堀田俊介, 花井誠, 井門康司, 岩本悠宏, 豊内敦士, 「粒状体磁性エラストマーを用いたエネルギー回生型ダンパーの基本的特性」, 平成 29 年度磁性流体連合講演会, 首都大学東京秋葉原サテライト教室, 11 月 16 ~ 17 日 (2017)
- (6) 萩原秀郁, 井門康司, 岩本悠宏, 豊内敦士, 「エラストマー粒子を用いた試作回転型粒状体ダンパーのトルク特性」, 日本実験力学会 2017 年次講演会, 岡山理科大学, 8 月 28 ~ 30 日 (2017)
- (7) 花井誠, 井門康司, 岩本悠宏, 藤井泰久, 出口朋枝, 「永久磁石エラストマー粒子を用いた粒状体ダンパーの印加磁場に対する減衰力特性」, 平成 28 年度磁性流体連合講演会, 北海道大学百年記念館, 12 月 8 日 (2016)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 20 件)

名称: ロータリーダンパ  
発明者: 太田晶久, 関根伸一, 豊内敦士, 福沢祐二, 井門康司, 岩本悠宏  
権利者: KYB, 名古屋工業大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2017-082522  
出願年月日: 2017 年 4 月 19 日

国内外の別: 国内

名称: ロータリーダンパ  
発明者: 太田晶久, 関根伸一, 豊内敦士, 福沢祐二, 井門康司, 岩本悠宏  
権利者: KYB, 名古屋工業大学  
種類: 特許  
番号: PCT/JP2017/025675  
出願年月日: 2017 年 7 月 14 日  
国内外の別: 国外

名称: ロータリーダンパ  
発明者: 太田晶久, 関根伸一, 豊内敦士, 福沢祐二, 井門康司, 岩本悠宏  
権利者: KYB, 名古屋工業大学  
種類: 特許  
番号: 201710574978.2  
出願年月日: 2017 年 7 月 14 日  
国内外の別: 国外

名称: ロータリーダンパ  
発明者: 太田晶久, 関根伸一, 豊内敦士, 福沢祐二, 井門康司, 岩本悠宏  
権利者: KYB, 名古屋工業大学  
種類: 特許  
番号: TW106127316  
出願年月日: 2017 年 8 月 11 日  
国内外の別: 国外

名称: ロータリーダンパ  
発明者: 太田晶久, 関根伸一, 豊内敦士, 福沢祐二, 井門康司, 岩本悠宏  
権利者: KYB, 名古屋工業大学  
種類: 特許  
番号: EP17001188.6  
出願年月日: 2017 年 7 月 12 日  
国内外の別: 国外

名称: 発電機能付きダンパ  
発明者: 太田晶久, 関根伸一, 豊内敦士, 福沢祐二, 井門康司, 岩本悠宏  
権利者: KYB, 名古屋工業大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2017-082521  
出願年月日: 2017 年 4 月 19 日  
国内外の別: 国内

名称: 発電機能付きダンパ  
発明者: 太田晶久, 関根伸一, 豊内敦士, 福沢祐二, 井門康司, 岩本悠宏  
権利者: KYB, 名古屋工業大学  
種類: 特許  
番号: PCT/JP2017/025674  
出願年月日: 2017 年 7 月 14 日  
国内外の別: 国外

名称: 発電機能付きダンパ  
発明者: 太田晶久, 関根伸一, 豊内敦士, 福沢祐二, 井門康司, 岩本悠宏  
権利者: KYB, 名古屋工業大学

種類：特許  
番号：201710574654.9  
出願年月日：2017年7月14日  
国内外の別：国外

名称：発電機能付きダンパ  
発明者：太田晶久，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司，岩本悠宏  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：TW106127318  
出願年月日：2017年7月14日  
国内外の別：国外

名称：発電機能付きダンパ  
発明者：太田晶久，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司，岩本悠宏  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：EP17001189.4  
出願年月日：2017年7月12日  
国内外の別：国外

名称：ダンパ  
発明者：太田晶久，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司，岩本悠宏  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2017-082519  
出願年月日：2017年4月19日  
国内外の別：国内

名称：ダンパ  
発明者：太田晶久，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司，岩本悠宏  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：PCT/JP2017/025673  
出願年月日：2017年月日  
国内外の別：国外

名称：ダンパ  
発明者：太田晶久，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司，岩本悠宏  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：201710574653.4  
出願年月日：2017年7月14日  
国内外の別：国外

名称：ダンパ  
発明者：太田晶久，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司，岩本悠宏  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：TW106127318  
出願年月日：2017年8月11日  
国内外の別：国外

名称：ダンパ

発明者：太田晶久，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司，岩本悠宏  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：EP17001190.2  
出願年月日：2017年7月12日  
国内外の別：国外

名称：ダンパ  
発明者：中里雅一，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2016-143561  
出願年月日：2016年7月21日  
国内外の別：国内

名称：ダンパ  
発明者：中里雅一，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：PCT/JP2017/011190  
出願年月日：2017年3月21日  
国内外の別：国外

名称：ダンパ  
発明者：中里雅一，関根伸一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：TW106113117  
出願年月日：2017年4月19日  
国内外の別：国外

名称：ダンパ  
発明者：関根伸一，中里雅一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：特願 2016-122377  
出願年月日：2016年6月21日  
国内外の別：国内

名称：ダンパ  
発明者：関根伸一，中里雅一，豊内敦士，福  
沢祐二，井門康司  
権利者：KYB，名古屋工業大学  
種類：特許  
番号：PCT/JP2017/007686  
出願年月日：2017年2月28日  
国内外の別：国外

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井門 康司 ( IDO, Yasushi )  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40221775