

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420101

研究課題名(和文) 電場及び磁場によるコロイダルダンパーの制御化に関する研究

研究課題名(英文) Investigations on a Colloidal Damper Rendered Controllable under Electric and Magnetic Fields

研究代表者

数仲 馬恋典 (SUCIU, Barenten)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：20412611

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：コロイダルダンパー(CD)に水ベース磁性流体を使用し、永久磁石をピストンの頭に取り付けた。多孔質体をシリンダの右側、磁性流体をシリンダの左側の部屋に注入した。流れの可視化実験では、ピストンで加圧された液体がナノ細孔に流入し、ピストンで引張られた液体が細孔より染み出して元の部屋に戻ることが見られた。つまり、磁気ピストンにより多孔質体の細孔に吸着・脱着する液体の流れを支援できた。制御効果を高めるため、シリンダ外部にも永久磁石を使用し、この磁石の運動により可変磁場を起こした。流れの可視化実験では外部磁石により磁性流体の移動量を測定した。試作したCDの振動実験より減衰特性の調整範囲を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To achieve controllability of a colloidal damper (CD) under electromagnetic variable fields, a water based ferrofluid was used. Control of the damping properties is obtained by moving permanent magnets, which are placed either on the piston head, or on the external surface of the cylinder. Nanoporous matrix is placed in the right-side, and ferrofluid is introduced in the left-side chambers of the cylinder. During compression, ferrofluid penetrates the nanopores, producing the dissipation effect. During extension, ferrofluid exudes from nanopores and returns in the left-side chamber. Thus, magnetic piston assists penetration and exudation of the ferrofluid in/from nanopores. Controllability is enhanced by moving the outer magnet. To properly select the magnets, flow visualizations inside a transparent damper were performed, and quantity of ferrofluid displaced by magnets was measured. From vibration tests of the trial CD, the control range of the damping performances was clarified.

研究分野：工学

キーワード：ダンピング 制御化 磁場 電場 永久磁石 接触角 表面張力 懸架装置

1. 研究開始当初の背景

従来の磁気粘性ダンパー及び電気粘性ダンパーの場合は磁場及び電場により油ベース作動液体の粘性を調整することで古典的なオイルダンパーの制御化が得られる。これに対して、近年に提案されたアクティブ制御コロイドダンパー(CD)では、多孔質体のナノサイズ細孔に液体が流入する際に表面張力(毛細圧力)の変化により振動エネルギーの散逸効果が得られ、さらに圧力制御手段でシリンダ内の圧力を調整することで古典的なCDの制御化を可能とする(図1)。

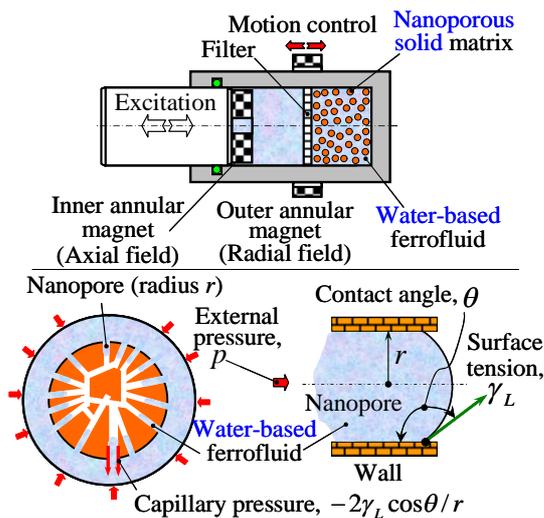


図1: CDの制御化を可能する構造の提案

以前の研究で圧力制御手段には電気・油圧・空気圧装置を用いて自動車の懸架装置用アクティブ制御CDの開発を成功したが、圧力制御手段の単純化・コンパクト化ができなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的はコンパクトで安価なアクティブ制御CDを提案・開発することである。具体的には圧力制御手段の別種として電磁場発生装置を用いて、作用する磁場や電場により作動液体と固体(壁)との界面を有する接触角を調整する(図1,2)。接触角に依存している毛細圧力の調整となることでCDの減衰特性を制御できる。

3. 研究の方法

上記の制御効果を高めるため、純粋水の代わりに水ベース磁性流体を選択して、最初に濡れ実験を行った。その結果、電磁場方向に引張られた磁性流体の見かけ接触角が著しく増加し(図2の下部)、ある磁束密度を超えた場合は液滴が磁石へ飛び上がった。

これらの現象をCDに応用するため、軸方向の磁場を起こす管状円筒形ネオジウム磁石をピストンの頭に取り付けた(図1)。又、シリンダ内に多孔質体封入部屋を備え、この部屋から疲労破壊を受けた多孔質体の浸透を防ぐためにフィルタで蓋をした。磁性流体をシリンダ内の主要部屋(ピストンが往復する部屋)に注入した。更に、制御効果を高めるた

め、シリンダ外部に半径方向の磁場を起こす管状円筒形ネオジウム磁石を使用し、この磁石の運動により位置的な可変磁場を起こした。

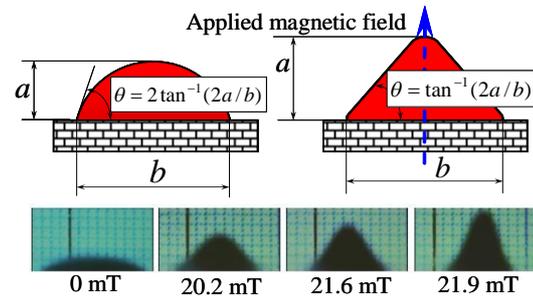


図2: 作用する磁場により接触角の変化

磁性流体として、密度は $1,190 \text{ kg/m}^3$ 、表面張力は 0.057 N/m 、動粘度は $0.005 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、飽和磁束密度は 18.5 mT を有する水と鉄のナノ粒子との混合物からなる黒いコロイド溶液を使用した。

多孔質体として、ガンマアルミナ(粒子の平均直径: $2 \mu\text{m}$ 、細孔の平均直径: 15 nm)及びシリカゲル(粒子の平均直径: $0.02 \mu\text{m}$ 、細孔の平均直径: 15 nm)を使用した。直径 10 mm を有するピストンの頭に円柱形の永久磁石を取り付けた。

得られた磁気ピストンには、材質がN35ネオジウム、直径が 9 mm 、残留磁束密度が 1.19 T 、高さ(厚さ)が $1, 2, 3.5, 6, 12, 30, 60 \text{ mm}$ の7種類の磁石を用意した。ガウスメータを用いて磁石の軸方向に沿って磁石表面と測定位置との間距離に対して磁束密度の変化を調べた(図3)。その結果、距離が短いほど、磁石が高いほど、磁束密度が大きくなるので、磁石で磁性流体の移動量が増えると考えられる。又、破損を受けた磁石では磁束密度が著しく低下するので、もろいネオジウムを用いた磁気ピストンに大きな衝撃を受けさせない、という設計条件が明らかとなった。

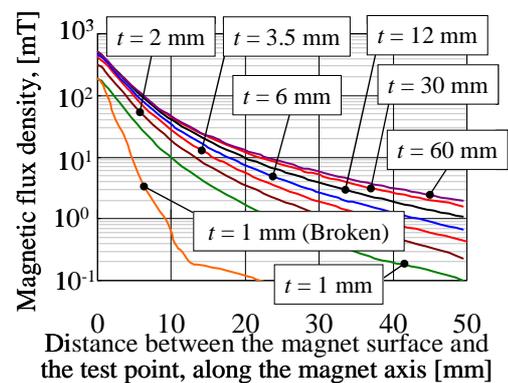


図3: 磁束密度の変化

次に、磁気ピストンにより磁性流体の流れの可視化と移動量の測定を行った(図4)。そのため、二段透明シリンダを用いて、左側の部屋に磁性流体あるいは多孔質ガンマアルミナ粒子と磁性流体との混合物を封入し、フィルタで蓋をした。図4に示すように、高さ 30 mm の磁石を用いた

ピストンにより 16mm のストロークを観察した。

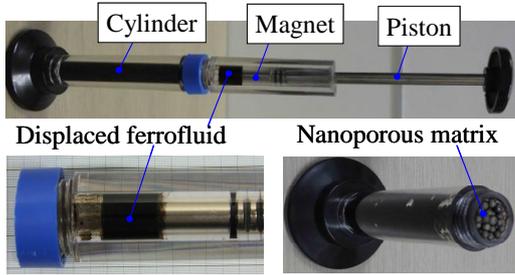


図 4：磁気ピストンにより流れの可視化

次に、シリンダの外部磁石の運動により磁性流体の流れの可視化と移動量の測定を行った。材質は N40 ネオジウム、外径は 22mm、内径は 18mm、高さは 30mm、表面磁束は 0.4T を有する半径方向の磁場を起こす磁石と、同材質・同寸法・同磁束を有する軸方向の磁場を起こす磁石、つまり、二種類の磁石を用意した。磁性流体は外径が 18mm、内径が 16mm を有する透明ガラス試験管の中に挿入した。ガラス管の外側に磁石を軸方向に沿って運動させた結果、半径方向の磁場を起こす磁石で磁性流体の移動量は 8.6g、軸方向の磁場を起こす磁石で液体の移動量は 3.8g となった。すなわち、磁場の作用方向に対して液体の移動効果は 2 倍以上異なるため、図 1 ではシリンダの外側で働く磁石に半径方向の磁場を起こす磁石を採用した。上記の実験結果を理論解析モデルにより説明できた(図 5)。

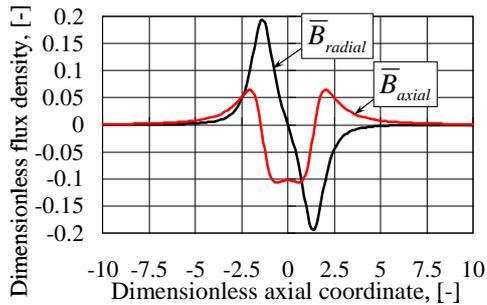


図 5：無時限化磁束密度の変化

Solidworks で作成した CD の三次元設計モデルを図 6 の上部、製作した CD の写真を図 6 の下部、CD の振動実験装置を図 7 に示す。

加振装置はボールねじアクチュエータと制御装置を有する。ロードセルで CD に作用する荷重 F [kN]、レーザ変位計でピストンの変位 S [mm] と振幅 S_{max} [mm] を測定した。ヒステリシスループ(ピストンの変位と荷重との関係グラフ)の面積は CD の散逸エネルギー E となり、等価減衰係数は公式で計算する(図 9)。試作した CD のピストン直径は 8mm、シリンダ穴の直径は 11.5mm であり、ピストンの頭に取り付けた軸方向の磁場を起こす磁石は、材質が N40 ネオジウム、

外径が 11mm、内径が 4mm、高さが 20mm、表面磁束密度が 0.5T を有する。シリンダの外側で働く半径方向の磁場を起こす磁石は、材質が N45 ネオジウム、外径が 50mm、内径が 37mm、高さが 20mm、表面磁束密度が 0.5T を有する。

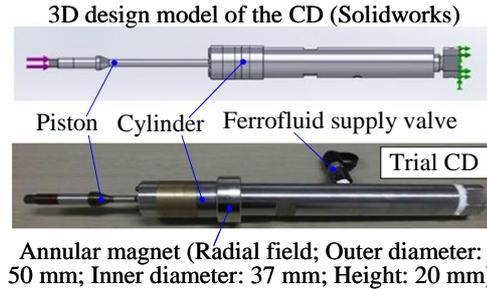


図 6：3D 設計モデル(上部)、試作した CD(下部)

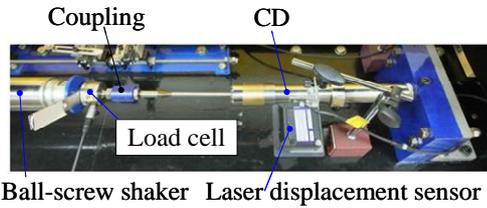


図 7：CD の振動実験装置

加振装置はボールねじアクチュエータと制御装置を有する。ロードセルで CD に作用する荷重 F [kN]、レーザ変位計でピストンの変位 S [mm] と振幅 S_{max} [mm] を測定した。ヒステリシスループ(ピストンの変位と荷重との関係グラフ)の面積は CD の散逸エネルギー E となり、等価減衰係数は公式で計算する(図 9)。試作した CD のピストン直径は 8mm、シリンダ穴の直径は 11.5mm であり、ピストンの頭に取り付けた軸方向の磁場を起こす磁石は、材質が N40 ネオジウム、外径が 11mm、内径が 4mm、高さが 20mm、表面磁束密度が 0.5T を有する。シリンダの外側で働く半径方向の磁場を起こす磁石は、材質が N45 ネオジウム、外径が 50mm、内径が 37mm、高さが 20mm、表面磁束密度が 0.5T を有する。

加振周波数は $f=1\text{Hz}$ で得られたヒステリシス特性を図 8、減衰係数と振幅との関係を図 9 に示す。

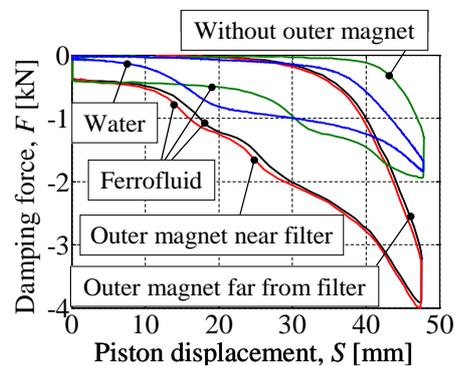


図 8：CD のヒステリシス特性

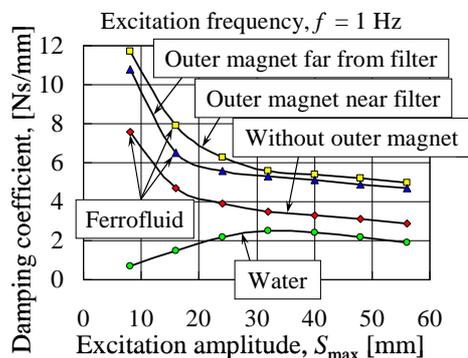


図9：CDの減衰特性

水を用いた従来のCDに比べて磁性流体を用いたCDの場合、ヒステリシスの面積(散逸エネルギー)と共に減衰係数が大きくなり、シリンダの外部磁石の位置によって減衰係数の調整は可能であることが確認できた。

4. 研究成果

水ベース磁性流体と多孔質体を用いたCDを提案し、このようなダンパーの制御化に関する研究を行った。磁気ピストンとシリンダの外部磁石で起こした磁場により磁性流体の流れの可視化ができ、磁石で磁性流体の移動量を測定した。その後、この流れ現象を応用したCDの減衰係数の調整は可能であることを確認した。

3年間の具体的な研究成果は下記のようになる：雑誌論文：9件(うち査読付：7件)、国際学会発表：11件、国内学会発表：10件(うち招待講演：1件)、特許査定：4件(うち国外(米国)：3件)、学会賞の受賞：2件(うち国際会議で：1件)。また、福岡工業大学と(公財)鉄道総合技術研究所との共同研究で、「鉄道車両用コロイダルダンパーの開発」という研究テーマに協力することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

数仲馬恋典, Experimental Investigation on a Colloidal Damper Rendered Controllable under the Variable Magnetic Field Generated by Moving Permanent Magnets, Journal of Physics, Conference Series, 査読有、3rd Quarter, 2016, 1 - 12, DOI: 10.1088

数仲馬恋典, 富岡隆弘, Experimental Investigation on the Dissipative and Elastic Characteristics of a Yaw Colloidal Damper Destined to Carbody Suspension of a Bullet Train, Journal of Physics, Conference Series, 査読有、3rd Quarter, 2016, 1 - 11, DOI: 10.1088

数仲馬恋典, Modeling of a Vehicle Wheel System having a Built-in Suspension Structure Consisted of Radially Deployed Colloidal

Spokes between Hub and Rim, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering, 査読有、Vol. 10, No. 1, 2015, 11 - 20, DOI: scholar.waset.org/1999.3/100003278

数仲馬恋典, Investigation on a Colloidal Damper Rendered Controllable under Electric and Magnetic Fields, 福岡工業大学エレクトロニクス研究所所報、査読無、Vol. 32, 2015, 13 - 18

数仲馬恋典, Experimental Investigation on a Controllable Colloidal Damper for Vehicle Suspension, 日本機械学会, Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, 査読有、Vol. 2, No. 3, 2015, 1 - 12, DOI: 10.1299/mej.14-00512

数仲馬恋典, 小柳恵介, 中村駿太, 周方向に分布された圧電オメガばねあるいは放射状に分布された圧電スポークを用いた非空気タイヤのエネルギーハーベスティングに関する評価, 日本機械学会論文集, 査読有、Vol. 81, No. 824, 2015, 1 - 14, DOI: 10.1299/transjsme.14-00560

数仲馬恋典, A Novel Vehicle Suspension Able to Generate Electrical Power, Journal of the Institute of Industrial Applications Engineers, 査読有、Vol. 3, No. 1, 2015, 30 - 36, DOI: 10.12792/JIIAE.3.30

数仲馬恋典, Investigation on a Colloidal Damper Rendered Controllable under Electric and Magnetic Fields (Development of a 3D Dynamic Structural Model for an Applicative Colloidal Damper), 福岡工業大学エレクトロニクス研究所所報、査読無、Vol. 31, 2014, 11 - 18

数仲馬恋典, 小柳恵介, Evaluation of the Energy Harvestable from an Airless Tire Equipped with Piezoelectric Bimorphs on the Lamellar Spokes, Journal of Telecommunications and Information Technology, 査読有、4/2013, 2013, 79 - 84

[学会発表](計21件)

数仲馬恋典, Experimental Investigation on a Colloidal Damper Rendered Controllable under the Variable Magnetic Field Generated by Moving Permanent Magnets, Proceedings of the 13th International Conference on Motion and Vibration Control, 2016.7.3 - 6, Southampton, UK, 1 - 12

数仲馬恋典, 富岡隆弘, Experimental Investigation on the Dissipative and Elastic Characteristics of a Yaw Colloidal Damper Destined to Carbody Suspension of a Bullet Train, Proceedings of the 13th International Conference on Motion and Vibration Control, 2016.7.3 - 6, Southampton, UK, 1 - 11

数仲馬恋典, Modeling of a Vehicle Wheel

System having a Built-in Suspension Structure Consisted of Radially Deployed Colloidal Spokes between Hub and Rim、Proceedings of the 18th International Conference on Structural, Vibration and Aerospace Engineering、Singapore、2016.1.7 - 8、Vol.18、No.1、279 - 288
数仲馬恋典、辻祥希、宮村晶夫、八田光生、橘野佑一朗、水平面に配置された V レールを自走する双円錐の運動特性に関する研究、日本機械学会・九州支部・第 69 期総会議演会、熊本大学、2016.3.15、講演論文集 No.168-1、79 - 80
数仲馬恋典、阿比留久徳、中村駿太、古典的な設計教育法と三次元 CAD を用いた設計教育法との連結に関する研究、日本機械学会 No.15-23 第 25 回設計工学・システム部門講演会、信州大学、2015.9.23 - 25、USB 講演論文集、1 - 10
数仲馬恋典、辻祥希、水ベース磁性流体と疎水化ナノ多孔質体を用いたコロイダルダンパーの制御化に関する実験的研究、日本機械学会 2015 年度年次大会 No.15-1、北海道大学、2015.9.13 - 16、USB 講演論文集、1 - 5
数仲馬恋典、富岡隆弘、コロイダルヨーダンパの動特性に関する実験的研究、日本機械学会 No.15-7、Dynamics & Design、弘前大学、2015.8.25 - 28、USB 講演論文集、1 - 12
数仲馬恋典、Seismic Evaluation of a Building Structure Equipped with Colloidal Dampers、Proceedings of 5th Asia Conference on Earthquake Engineering、Taipei、Taiwan、2014.10.16 - 18、USB memory、1 - 8
数仲馬恋典、On the Generated Entropy (Heat) at Adsorption/Desorption of Water in/from Liquid-Repellent Nanoporous Silicas、Proc. of the Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures、Nara、Japan、2013.10.10 - 13、487 - 490
数仲馬恋典、On the Energy Dissipation Mechanism at Adsorption/Desorption of Water in/from Liquid-Repellent Nanoporous Silica、Proc. of the Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures、Nara、Japan、2013.10.10 - 13、239 - 242
数仲馬恋典、小柳恵介、Energy Harvestable from a Colloidal Vehicle Suspension、Proc. of the 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing、Kitakyushu、Japan、2014.9.26 - 29、351 - 357 (Student Paper Award 受賞)
数仲馬恋典、小柳恵介、園田啓太、Evaluation of the Dissipative and Thermal Characteristics of a Magneto-Rheological (MR) Damper for Automotive Suspension、Proc. of the 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing、Kitakyushu、Japan、2014.9.26 - 29、358 - 365
数仲馬恋典、Experimental Investigation on a Controllable Colloidal Damper for Vehicle

Suspension、Proc. of the 12th International Conference on Motion and Vibration Control、Sapporo、Japan、2014.8.3 - 7、DVD、1 - 11
数仲馬恋典、Investigation on a Colloidal Damper Rendered Controllable under Electric and Magnetic Fields、Proc. of the 12th International Conference on Motion and Vibration Control、Sapporo、Japan、2014.8.3 - 7、DVD、1 - 12
数仲馬恋典、大津洵也、小柳恵介、Evaluation of the Energy Harvestable from a Non-Pneumatic Tire Equipped with Piezoelectric Bimorphs on the Lamellar Spokes or on the Tread Supporting Lamellar Springs、Proc. of the 12th International Conference on Motion and Vibration Control、Sapporo、Japan、2014.8.3 - 7、DVD、1 - 11
数仲馬恋典、小柳恵介、園田啓太、磁気粘性ダンパー(MRD)の産業応用性に関する評価、産業応用工学会全国大会、西日本工業大学、2014.9.28、2 - 3 (産業応用工学会賞を受賞)
数仲馬恋典、小柳恵介、中村駿太、周方向に分布された圧電オメガばねあるいは放射状に分布された圧電スポークを用いた非空気タイヤのエネルギーハーベスティングに関する評価、日本機械学会 No.14-17、Dynamics & Design、上智大学、2014.8.26 - 29、USB 講演論文集、1 - 11
数仲馬恋典、圧電バイモルフを用いた非空気圧タイヤに関するエネルギーハーベスティングの評価、日本機械学会・九州支部・鹿児島講演会、鹿児島大学、2013.9.28、講演論文集 No.138-3、189 - 190
数仲馬恋典、小柳恵介、コロイダルダンパーの散逸機構に関する基礎研究、日本機械学会 No.13-18、Dynamics & Design、九州産業大学、2013.8.26 - 30、USB 講演論文集、1 - 11
数仲馬恋典、毛利亮太、小柳恵介、車両用懸架装置に関するエネルギーハーベスティングの評価、日本機械学会 No.13-18、Dynamics & Design、九州産業大学、2013.8.26 - 30、USB 講演論文集、1 - 10
②1 数仲馬恋典、コロイダルダンパーに関する 13 年間の研究総括、日本機械学会、第 54 回・ダンピング研究会、招待講演、兵庫工業会・産学連携機構、2013.5.24、1 - 48

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 4 件)

名称：コロイダルダンパー
発明者：数仲馬恋典
権利者：福岡工業大学
種類：特許
番号：特許第 5,920,688 号
取得年月日：2016 年 4 月 22 日
国内外の別：国内

名称：Colloidal Damper
発明者：数仲馬恋典
権利者：福岡工業大学
種類：特許
番号：特許第 9,127,741 号
取得年月日：2015 年 9 月 8 日
国内外の別：国外（米国）

名称：Actively Controlled Colloidal Damper
発明者：数仲馬恋典
権利者：福岡工業大学
種類：特許
番号：特許第 8,997,951 号
取得年月日：2015 年 4 月 7 日
国内外の別：国外（米国）

名称：Colloidal Damper
発明者：数仲馬恋典
権利者：福岡工業大学
種類：特許
番号：特許第 8,770,359 号
取得年月日：2014 年 7 月 8 日
国内外の別：国外（米国）

〔その他〕
ホームページ等

福岡工業大学のホームページ
<http://www.fit.ac.jp/research/search/research/id/43>

SUCIU研究室のホームページ
<http://www.fit.ac.jp/~suciu/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

数仲 馬恋典 (SUCIU, Barenten)
福岡工業大学・工学部・教授
研究者番号：20412611

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

毛利 亮太 (MOURI, Ryouta)
小柳 恵介 (KOYANAGI, Keisuke)

辻 祥希 (TSUJI, Yoshiki)
園田 啓太 (SONODA, Keita)
大津 洵也 (OHTSU, Junya)
中村 駿太 (NAKAMURA, Hayata)
宮村 晶夫 (MIYAMURA, Akio)
八田 光生 (HATTA, Mizuki)
橘野 佑一朗 (KITSUNO, Yuichiro)