

令和元年6月7日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04288

研究課題名(和文)ドライMR流体の創製とその動力伝達・制動系への革新的応用展開

研究課題名(英文)Development of Dry MR Fluids and the Inovative Applications to Power Transmission and Braking Systems

研究代表者

中野 政身 (NAKANO, MASAMI)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・教授

研究者番号：40147947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁場に反応して粘性の変化する既存の油ベースのMR流体の特性上の種々の限界や使用上の制約を克服するために、分散媒として液体を用いないで気体を用いるドライMR流体を提案し、その磁性微粒子からなる粉体としての流動性を向上しつつ、かつ大きなMR効果を発揮するドライMR流体を新規に創製している。創製したドライMR流体を単一円盤型ロータを有するモデルMRブレーキ装置に充填して基本的なブレーキ特性を把握している。その結果に基づいて比較的使用環境が苛酷な小型EV用のドライMR流体ブレーキを設計・開発し実装して、十分なブレーキ性能と高速応答性及び高い制御性があることを実証している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁場に反応して粘性の変化するMR流体は、その特筆すべき機能性から種々の工学的応用が試され、また実用化もなされてきている。本研究では、その分散媒として油を用いることによる特性上の種々の限界や使用上の制約を克服するために、分散媒として液体を用いないで気体を用いた流動性を向上した磁性微粒子の粉体からなるドライMR流体を新規に創製しており、機能性新素材の研究開発という面において学術的意義がある。また、創製したドライMR流体を小型EV用の四輪ブレーキに適用して優位性と有用性を実証しており、既存の技術を凌駕するかなり高度な革新的な制動技術の実現やEVの全電動化等に貢献することに繋がり、社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：MR(Magneto-rheological) fluids are the suspensions with micron-sized ferromagnetic particles dispersed into carrier oil, and also are one of smart fluids which can be changed their rheological properties in reversible manner by applying magnetic field. Since the carrier medium is a liquid, the limits of the viscosity reduction and the operating temperature raising exist. In this study, to overcome the above limits and restrictions for the conventional MR fluids, novel "dry MR fluids without liquid medium" ; MR fluidic powder, mainly consisting of micron-sized carbonyl iron particles coated with nano-sized silica particles have been fabricated, featuring extremely low zero-field viscosity and higher operating temperature. The optimized dry MR fluid has been applied to the MR fluid brake of multi-disks type for a super-compact EV, and it has been realized that the developed dry MR fluid brakes have performed enough braking torque, high speed response and high controllability.

研究分野：工学、機械工学、流体工学、機械力学・制御

キーワード：機能性流体・材料 マイクロ磁性粒子 ナノ粒子 流動性パウダー マグネトロロジー 車両用ブレーキ 制動トルク 電気自動車

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 駆動側のトルクを被駆動側に伝達するための手段としてクラッチ、そして駆動側に制動トルクを与えるための手段としてブレーキが一般に用いられている。現在実用化されているクラッチやブレーキは動力伝達媒体として摩擦パッドを用いた機械的摩擦式が主流で、制動力は摩擦係数によって決定される構造であるため、①ブレーキの鳴き音が発生する、②制動トルクの経時変化が大きい、③摩耗により寿命が短い、④制動トルクが柔軟に調整できない、⑤摩耗粉が発生するなどの問題があり、改善が求められていると同時に、新たな動力伝達媒体や機構に基づいたクラッチやブレーキの開発が期待されている。新たな動力伝達媒体として、電磁場に反応して粘性の変化するER (Electro-Rheological) 流体やMR (Magneto-Rheological) 流体が有力な候補として挙げられ、これまでブレーキやクラッチへの応用のための研究開発が活発に行われてきており、使用条件が比較的過酷ではないリハビリ機器、ロボット分野、一般産業分野等で試作レベルでの応用展開がなされてきてきている。特に、MR流体に関しては使用温度範囲も広く(-40℃~150℃)大きなせん断応力(最大70 kPa程度)を発揮するという点において、ある限られた用途での適用の可能性が高いといえる。

(2) MR (Magnetorheological) 流体はシリコンオイル等の分散媒中にマイクロサイズの強磁性体微粒子を分散させた懸濁液で、磁場印加によりそのレオロジー特性(厳密には、降伏せん断応力)を数ミリ秒のオーダーで可逆的に変化できる機能性流体である。一般には、その応用に際して無磁場時のエネルギー損失を僅少にすることと、磁場印加による降伏せん断応力の変化幅を大きくすることなどの観点から無磁場時の基底粘度は低い方が好ましいとされており、MR流体には低粘度の分散媒オイルが用いられ粒子体積分率の上限も存在する。また、分散媒としてシリコンオイル等の液体を用いていることから、使用温度範囲もその分散媒の沸点や凝固点に依存する。さらに、用途によっては長期間静置時の分散鉄粒子の沈降が問題となる場合もある。このように、分散媒としてオイル等の液体を用いることによって、MR流体の諸特性への種々の制約や限界が生じ、上述したように応用する用途も限られているため、動力伝達・制動媒体として広範な普及には至っていないのが現状である。

(3) 本研究では、以上のような背景から、現状のMR流体のように粘度が高くかつ広い温度範囲での使用を制限する要因となるオイル等の液体の分散媒を含まず、流動性が高く、粒子沈降が生じにくいトルク伝達用媒体として気体を分散媒とするドライMR流体を提案・創製し、これを用いた比較的使用環境が苛酷な車両用ブレーキなどのトルク伝達・制動機構の実現を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、オイル等の液体の分散媒を含まず、気体を分散媒とする強磁性体粒子の粉体からなり高い流動性を有しかつ強いMR効果を発揮するドライMR流体を創製し、それを比較的使用環境が過酷な車両用ブレーキなどの動力伝達・制動系に活用して、従来にはない革新的な応用展開を図るために、下記の3点を研究目的とする。

(1) μm サイズの強磁性体微粒子にナノ微粒子をコーティングしたCore-Shell構造の磁性粒子パウダーからなるドライMR流体を創製し、その流動性とMR効果の両面から性能評価を実施し、高い流動性と強いMR効果を発揮するドライMR流体を創製する。

(2) (1)で最適化を図って創製したドライMR流体に関して、単一円盤型ロータを有するモデルドライMR流体ブレーキ試験装置によって、その基本的なブレーキとしての特性を評価する。

(3) (2)の研究結果に基づいて、開発したドライMR流体を活用した小型電気自動車用の多層円盤型の車両用ドライMR流体ブレーキ(制動トルク 160 Nm程度)を設計・開発し、小型電気自動車に搭載して試験走行を実施することにより、優位性や実用上の問題点を把握して改善を行い、車両への革新的な応用展開を図る。

3. 研究の方法

(1) ドライMR流体の創製： 高い流動性と強いMR効果を発揮するドライMR流体を創製することを目的に、 μm サイズのカルボニル鉄粒子の表面に摩擦式粉碎機でナノ微粒子をコーティングしたCore-Shell構造の磁性粒子パウダーを創製し、磁場印加型平行円盤レオメータを用いてその流動性(無磁場時のせん断応力)とMR効果(磁場印加時のせん断応力)の両面から性能評価を実施し、そのコーティングするナノ粒子素材と添加量を種々変えることによってドライMR流体創製の最適化を図る。

(2) 単一円盤型ロータを有するモデルドライMR流体ブレーキ試験装置による評価： (1)で最適化を図って創製したドライMR流体のトルク伝達・制動機構としての実用的なクラッチやブレーキへの応用展開を図る基礎研究として、単一円盤型ロータを有するモデルドライMR流体ブレーキ試験装置を製作し、その制動トルク特性、内部流動特性、発熱特性、耐久性などの基本的なブレーキとしての特性を把握する。

(3) 車両用ドライMR流体ブレーキの開発と小型EVへの実装： (1)及び(2)の研究結果に基づいて、開発したドライMR流体を活用した小型電気自動車用の多層円盤型の車両用ドライMR流体ブレーキ(制動トルク 160 Nm程度)を設計・開発し、その基本的なトルク特性、応答特性、発熱特性などを把握するとともに、小型電気自動車に搭載して試験走行を実施することにより、その優位性や実用上の問題点を把握して改善を図り、実用レベルへと展開する。

4. 研究成果

(1) 高い流動性と強いMR効果を発揮するドライMR流体の創製： μm サイズのカルボニル鉄粒子(CI粒子)の表面に摩擦式粉碎機でナノシリカ粒子や耐吸湿性の高いカーボンブラック粒子をコーティングしたCore-Shell構造をもつ磁性粒子パウダーからなる2種のCore-Shell系ドライMR流体、さらに、CI粒子粉体に非磁性ナノシリカ粒子やアークプラズマ法によって創製した磁性ナノ鉄粒子を混合した2種の混合系ドライMR流体の粉体としての流動特性や定常的及び動的なMR効果について詳細な計測評価を行い、それぞれのドライMR流体の特徴を明らかにすることができた。その結果、CI粒子にナノシリカ粒子をコーティングしたCore-Shell系ドライMR流体が、ナノシリカ粒子の添加量が増すにつれてせん断応力が低下して最も流動性が向上するが(図1)、一方でMR効果が低下するため、高い流動性と強いMR効果を両立するための最適なナノシリカ粒子の添加量が存在し、0.5 wt%程度の添加量のドライMR流体を最適とした。この最適化したドライMR流体は、図2に示すように、印加磁場によって降伏せん断応力が変化でき、かなり高いせん断速度まで一定のせん断応力を呈する。

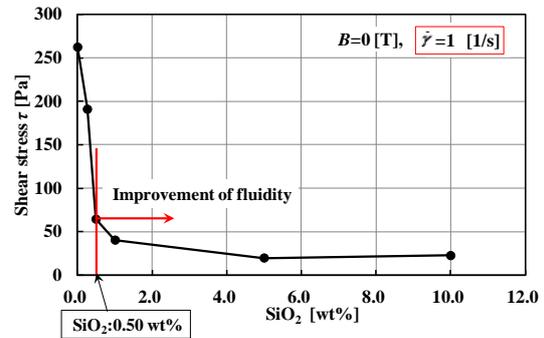


図1 ナノシリカ粒子添加量と流動性との関係

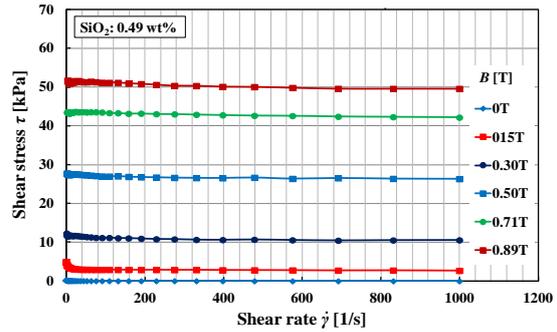


図2 ドライMR流体の流動曲線(SiO₂=0.49 wt%)

(2) 単一円盤型ロータを有するモデルドライMR流体ブレーキ試験装置による評価：ブレーキ用途としての基本的な性能評価を行なう目的で製作した単一円盤(直径 ϕ 70mm)を有する基本的なドライMR流体ブレーキ試験装置(外径 ϕ 120mm)(図3)に、(1)で開発した最適なドライMR流体をすでに確立してある吸引法によって充填し、ブレーキとしての発生トルク試験や耐久性試験等の基本的な性能試験を実施してドライMR流体のブレーキへの適用性の評価を行なった。その結果、カルボニル鉄粒子だけからなるドライMR流体に比して、流動性が向上しているため無磁場時の制動トルク(引摺りトルク)が約半分と低下し、かつ磁場印加時のトルクも若干低下するが、油ベースのMR流体の推定トルクに比して1.0T程度の磁場印加に対しても磁気飽和現象が観察されず約1.5倍程度のトルクを発生し高い性能を示すこと(図4)、そしてその磁場に対する発生トルクの過渡応答も時定数が約13ms程度とかなり速いことを明らかにした。また、ブレーキングによるドライMR流体の発熱特性についても試験し、最大ブレーキトルクで4分間制動し続けた場合にドライMR流体の温度が約80°C程度まで上昇しているが、特に問題は生じていないことを確認している。さらに、長時間のブレーキのON(5s)/OFF(10s)による耐久性試験では、280時間で67,200サイクルのON/OFFで制動トルクが初期トルクの約10%程度しか低下せず、かつドライMR流体の温度が約50~60°C程度に維持され、引摺りトルクは約半減するという良好な結果を得ており、ドライMR流体のブレーキへの適用が十分可能なことを実証している。

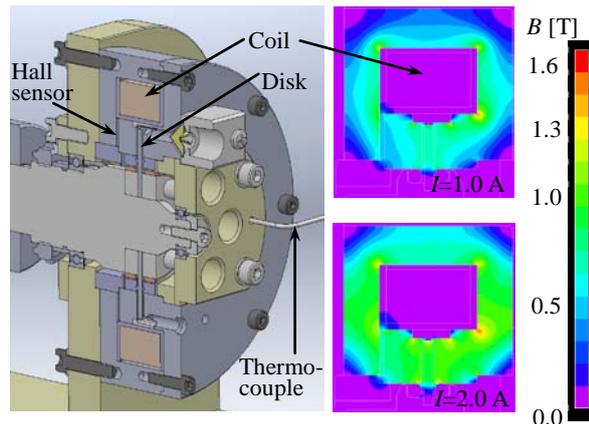


図3 単盤型ドライMR流体ブレーキ試験装置

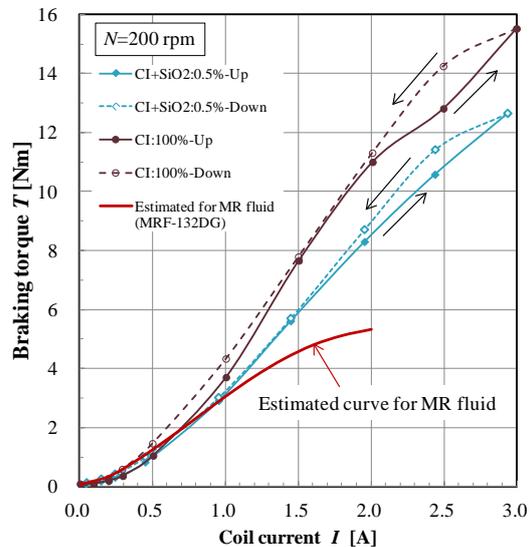


図4 印加電流に対する制動トルクの変化

(3) 車両用ドライMR流体ブレーキの開発と小型EVへの実装：(2)の単一円盤型ドライMR

流体ブレーキ試験装置を用いた基本的なブレーキ性能の測定結果に基づいて、磁場解析を援用したドライMR流体ブレーキの発生トルクの予測法に関して、磁場印加型レオメータで得られたドライMR流体の印加磁場に対する誘起降伏せん断応力の変化特性及びドライMR流体のB-H曲線を考慮した磁場解析を援用することにより、発生トルクをかなりの精度で予測できる解析・設計法を確立した。

ドライMR流体を活用した動力伝達・制動機構は、電氣的に高い制御性を有していることから、全電動化等の将来を見据えて電気自動車への適用が最適である。本研究では、ドライMR流体の動力伝達・制動装置への実際的な応用として、超小型電気自動車(コムス)の四輪のホイール内に搭載することを前提に、確立した解析・設計法に基づいてドライMR流体を活用した多層円盤型の車両用ブレーキ(外径:φ244mm、幅:51mm、回転ディスク外径及び内径:φ198mm、φ170mm、回転ディスク枚数:3枚)を設計・製作し、制動トルクの定常及び過渡応答特性及び発熱特性などを測定・評価している。その結果、無磁場時の引摺りトルクが約2Nm程度で、コイル印加電流 $I=2.2$ A (消費電力30W) 時に目標制動トルク160Nmを達成でき(図5)、印加磁場に対するトルクの過渡応答が時定数22ms程度のかかなり高い応答性を有する車両用ドライMR流体ブレーキを開発できた。超小型電気自動車(コムス)の四輪用に開発したドライMR流体ブレーキを4台製作し、実装している(図6)。ブレーキペダルからの電気信号で直接ブレーキ力を制御できるブレーキワイヤ方式を採用したブレーキシステムを構築している。走行試験を実施して、十分なブレーキ性能と高速応答性及び高い制御性があることを実証している。

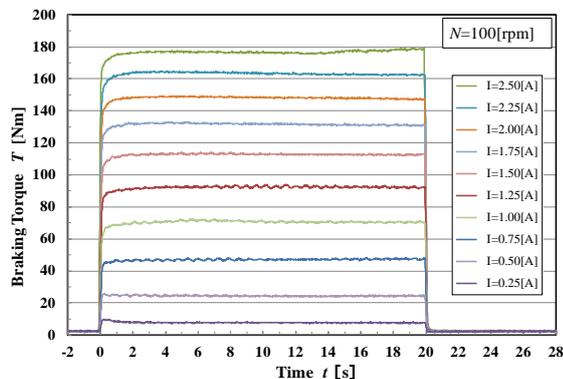
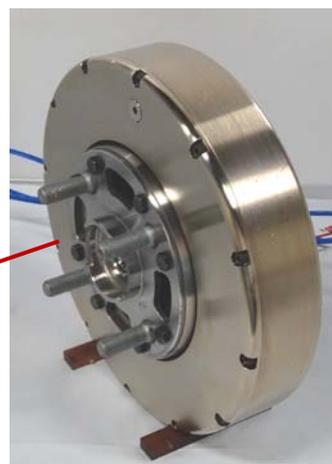


図5 車両用ドライMR流体ブレーキの印加電流のON/OFFに対する制動トルクの時間変化



(a)超小型EV (コムス)



(b)開発した多層円盤型ドライMR流体ブレーキ

図6 開発した車両用ドライMR流体ブレーキの超小型EVへの搭載

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

- ①G. Diguët, G. Sebald, M. Nakano, M. Lallart, J-Y Cavaille, Magnetic particle chains embedded in elastic polymer matrix under pure transverse shear and energy conversion, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, Vol. 481, 2019, pp. 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.02.078>
- ②T.F. Tian, M. Nakano, Fabrication and Dynamic Viscoelastic Properties of Silicone Rubber-based MR Elastomers with Silicone Oil, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 59, No. 1, 2019, pp. 349-355. DOI: 10.3233/JAE-171162
- ③T.F. Tian, M. Nakano, W.H. Li, Applications of shear thickening fluids: a review, International Journal of Hydromechatronics, 査読有, Vol. 1, No. 2, 2018, pp. 238-257. DOI: 10.1504/IJHM.2018.092733
- ④S.S. Sun, J. Yang, H.P. Du, S.W. Zhang, T.H. Yan, M. Nakano, W.H. Li, Development of magnetorheological elastomers-based tuned mass damper for building protection from

seismic events, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 査読有, Vol. 29, No. 8, 2018, pp.1777-1789.

DOI: 10.1177/1045389X17754265

- ⑤ M. Nakano, H. Abe, T.F. Tian, A. Totsuka, O. Taguchi, F. Shibata, Novel MR Brake of Disk Type utilizing Dry MR Fluids, Proceedings of Fourteenth International Conference on Flow Dynamics (14th ICFD2017), 査読有, Paper No. OS12-6, 2017, pp. 458-459.
- ⑥ M. Nakano, H. Abe, T.F. Tian, A. Totsuka, C. Sato, Magneto-Rheological Effects and Fluidity Improvement of Novel Dry MR Fluids, Proceedings of The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power (FUKUOKA 2017), 査読有, Paper No. 1B11, 2017, pp. 1-5.
- ⑦ S. S. Sun, D. H. Ning, J. Yang, H. P. Du, S. W. Zhang, W. H. Li, M. Nakano, Development of an MR seat suspension with self-powered generation capability, Smart Materials and Structures, 査読有, Vol. 26, No. 8, Article No. 085025, 2017, pp. 1-15.
DOI: 10.1088/1361-665X/aa76b6
- ⑧ T.F. Tian, M. Nakano, Design and Testing of A Rotational Brake with Shear Thickening Fluids, Smart Materials and Structures, 査読有, Vol. 26, No. 3, Article No. 035038, 2017, pp. 1-7.
DOI: 10.1088/1361-665X/aa5a2cv
- ⑨ S. S. Sun, J. Yang, W. H. Li, H. P. Du, G. Alici, T. H. Yan, M. Nakano, Development of an isolator working with magnetorheological elastomers and fluids, Mechanical Systems and Signal Processing, 査読有, Vol. 83, 2017, pp. 371-384.
DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.06.020
- ⑩ 中野政身, 機能性流体の研究開発と実用化の動向, フルードパワーシステム, 査読無, 第 47 巻 6 号, 2016, pp. 265-271.
- ⑪ 中野政身, 古川仁, 辻道善治, 超小型 EV 向け MR 流体ブレーキの開発, フルードパワーシステム, 査読無, 第 47 巻 6 号, 2016, pp. 275-278.

[学会発表] (計 12 件)

- ① 中野政身, 車両用ドライ MR 流体ブレーキの磁場解析を援用した設計・開発, 第 6 回数理解物理セミナー, 2019.
- ② M. Nakano, H. Abe, A. Totsuka, O. Taguchi, and F. Shibata, Novel MR Brake of Disk Type Using Dry MR Fluids, The 16th Int. Conf. on ER fluids and MR suspensions (ERMR2018), Maryland, USA, 2018.
- ③ T. Aoyagi, S. Odaka, T. Nguyen, Y. Michitsuji, M. Nakano, A. Totsuka, O. Taguchi, Durability Test Using MR Fluid Brake for a Super-Compact Electric Vehicle, The 16th Int. Conf. on ER fluids and MR suspensions (ERMR2018), Maryland, USA, 2018.
- ④ 中野政身, MR 流体とその先進フルードパワーテクノロジー (特別講演), 日本フルードパワーシステム学会平成 30 年春季フルードパワーシステム講演会, 2018, pp. 1-6.
- ⑤ 中野政身, 新規ドライ MR 流体の創製とそれを活用した単盤型 MR ブレーキの特性, 第 5 回数理解物理セミナー, 2018.
- ⑥ 中野政身, ER/MR 流体とその先進テクノロジー (招待講演), 日本レオロジー学会エレクトロレオロジー研究会第 37 回例会, 2017.
- ⑦ S. S. Sun, X. Tang, J. Yang, W. H. Li, M. Nakano, Experimental Verification of an Advanced Vehicle Suspension with Variable Stiffness and Damping MR Damper, The Fourteenth International Conference on Flow Dynamics (14th ICFD2017), Sendai, Japan, 2017.
- ⑧ 中野政身, 戸塚厚, 田口修, 尾高成也, 古川仁, 道辻善治, 超小型 EV 向け MR 流体ブレーキの開発と実装, 日本フルードパワーシステム学会平成 29 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2017, pp. 81-83.
- ⑨ 中野政身, 超小型 EV 向け MR 流体ブレーキの電磁場解析を援用した設計・開発, 第 4 回数理解物理セミナー, 2017.
- ⑩ 中野政身, 戸塚厚, 佐藤忠一郎, 田瞳菲, 阿部浩也, ドライ MR 流体のせん断流れモードでの粒子クラスター挙動の可視化観察, 第 94 期日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, Paper No. 1103, 2016, pp. 1-2.
- ⑪ M. Nakano, A. Totsuka, O. Taguchi, S. Odaka, H. Furukawa, Y. Michitsuji, Development of MR Fluid Brake for a Super-compact Electric Vehicle (Plenary Lecture), The 15th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR2016), Inchion, Korea, 2016.
- ⑫ 中野政身, 阿部浩也, 田瞳菲, 戸塚厚, 佐藤忠一郎, ドライ MR 流体の流動性向上と MR 効果, 日本フルードパワーシステム学会平成 28 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2016, pp. 27-29.

[図書] (計 2 件)

- ① 中野政身, 道辻善治, MR 流体ブレーキの開発と EV への適用, pp. 116-129, 電気自動車のモーションコントロールと走行中ワイヤレス給電技術, 堀洋一, 横井行雄監修, (株)エヌ・ティ

ー・エス, 2019, p. 492.

②田中克史, 中野政身, ナノ粒子分散系におけるレオロジー —微細間隙における電場・無電場での流動と流体の微細構造—, pp. 157-166, 高分子微粒子ハンドブック, 藤本啓二監修, シーエムシー出版, 2017, p. 316.

〔産業財産権〕

○取得状況 (計 2 件)

名称: トルク伝達媒体及びこれを用いたクラッチ
発明者: 中野政身, 野間淳一
権利者: 株式会社栗本鐵工所
種類: 特許
番号: 特許第 6232026 号
取得年: 平成 29 年
国内外の別: 国内

名称: 磁気粘性流体及びこれを用いたクラッチ
発明者: 野間淳一, 中野政身
権利者: 株式会社栗本鐵工所
種類: 特許
番号: 特許第 6057938 号
取得年: 平成 28 年
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 阿部 浩也
ローマ字氏名: (ABE, hiroya)
所属研究機関名: 大阪大学
部局名: 接合科学研究所
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 50346136

研究分担者氏名: TIAN TONGFEI
ローマ字氏名: (TIAN, tongfei)
所属研究機関名: 東北大学
部局名: 流体科学研究所
職名: 助教
研究者番号 (8 桁): 80772714

研究分担者氏名: 戸塚 厚
ローマ字氏名: (TOTSUKA, atsushi)
所属研究機関名: 東北大学
部局名: 流体科学研究所
職名: 技術専門職員
研究者番号 (8 桁): 40626313

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。