

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03213

研究課題名(和文)構成要素の態・性状に着目した磁気浮上研究の開拓

研究課題名(英文)Pioneering research of magnetic levitation focused on the states and properties of components

研究代表者

大路 貴久(Ohji, Takahisa)

富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：30334709

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文):本申請は、磁性流体に対する磁気浮上研究と車上一次式システムの固定子形状・性状対応研究に大別される。前者では、簡便な能動型磁気浮上装置と計測環境を構築し、磁性液滴に対する浮上始動から安定浮上までの一連の操作法を確立した。また、液滴の体積、粘度、変形状態と磁気吸引力式との関係を導出した。磁気支持中の磁性流体液錐を垂直・水平操作し、制御不能になることなく高速な往復運動ができることを示した。後者では、吸引面形状に対応可能な装置を製作し、平板、円筒、直線・曲線レール下での安定浮上を確認した。また、吸引面の導電性/磁性不均一成分による影響の除去方法を提案し、実機試験にて性状不均一箇所の実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁性流体1滴を大気中かつ室温下で簡便に繰り返し浮上始動、安定浮上できる本研究は、解析予想に基づく磁性流体液滴の変形現象を実験的に捉える一手段として提示でき学術的意義が高い。一方、固体を浮上対象として発展を遂げてきた磁気浮上技術に対し、磁性液体や半固体まで浮上対象に拡張したことで、磁気機能性流体による磁気支持方式の三次元光造形技術への産業利用の可能性を拓いた。車上一次式システム研究では、対向吸引面形状や性状にかかる制約(形状既定、性状一定)を一部取り払えることが実証された。本成果により、多様な吸引面を自由に滑走する拡張性の高い磁気浮上システム研究の進展が期待される。

研究成果の概要(英文):This research subject includes two topics: A maglev system using magnetic fluid (MF) as a levitated object and a maglev vehicle that can respond to changes in the shapes and properties of the opposing surface. In the former, we established a levitation procedure for a placed MF droplet. Also, we derived the relationship between the levitated droplet's volume, viscosity, deformation state, and the magnetic force equation. Moreover, we have shown that a positioning-controlled MF cone can be manipulated vertically or horizontally and reciprocated at high speed. In the latter, we fabricated a device that can handle various opposing surfaces. It was demonstrated that the device could float stably under flat plates, cylinders, and straight and curved rails. In addition, we proposed a method to remove the influence of non-uniform conductivity and magnetism on the opposing surface. As a result, our device successfully passed through the non-uniform area while keeping contactless levitation.

研究分野：電気機器工学

キーワード：磁気浮上 磁気支持 磁性流体 態 性状 車上一次式

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

磁気浮上とは、空隙を介して磁気力により非接触で物体を支持する技術である。支持される物体は強磁性体、良導体、反磁性体（超伝導体）が選定されるが、一般にはいずれの物質であっても固体に限定されている。磁気浮上装置における構成要素が、「形状が既定された均質な固体」でセットアップされることは、産業システムとして進化する上で当然の経緯である。これは、各種機械式軸受が磁気支持（磁気軸受）に置換される際、直動あるいは回転システムに適用することで可動子（出力部）の運動性能（制御による安定性や位置決め精度）を評価・向上させてきたという背景に起因する。一方、特殊な例として、超伝導磁石による強磁場下での水（反常磁性体）の浮上や、高周波磁場を利用した金属浮揚融解（坩堝）がある。これらは、超伝導磁石冷却のための極低温状態や、高周波電源と金属融解に伴う高温状態が存在し、システムや電源の大型化、電磁環境の問題が付随する。もっとシンプルに、電磁石で吸引（能動）制御することで液体を大気中かつ室温下で非接触支持することができるのではないか。その実現によって、固体であることが条件ではない、別の新たなアプリケーションが創出されるのではないだろうか。

別の観点として、磁気浮上列車 HSST に代表される車上一次式システムは、固定子レールに懸垂支持された形で非接触浮上し、リニア誘導モータ（LIM）による走行が可能である。また、半導体製造クリーンルーム内での磁気浮上搬送システムでは LIM とゼロパワー制御を合わせ、同様に非接触浮上搬送が可能である。これらは、固定子レールの形状や性状が既定されるからこそ能動制御による安定性が担保される。このレール側の決まり事（形状既定、性状一定）を取り払うとどのような磁気浮上システムが創造されるだろうか。このような発想はなく、固定子レール（吸引面）が任意形状、性状であっても安定な浮上移動を実現しうる車上一次式システムの提案はなされていなかった。

上記 2 つの研究背景は、吸引対象物に存在する「形状が既定された均質な固体」という限定要素を取り払う点が共通項であり、「構成要素の態・性状に着目した磁気浮上研究の開拓」というテーマを設定した。

2. 研究の目的

本申請は、構成要素の態（液体、半固体）、性状（表面、内部性状）に着目した磁気浮上研究の創生とその基盤技術の確立を目的としている。

磁性流体を使用する磁気浮上研究については、① 磁性液体・半固体用磁気浮上装置の開発と特性評価、② 磁性液体・半固体の非接触支持操作、を実施項目とする。また、車上一次式磁気浮上システムを対象とする磁気浮上研究については、③ 固定子レールの形状、性状に対応可能な磁気浮上移動体の開発、④ 性状情報を利用した磁気浮上移動体の安定浮上走行の確立を実施項目とした。以降、(1) 磁性流体に対する磁気浮上研究、(2) 車上一次式システムの固定子形状・性状対応研究、に分けて記載する。

3. 研究の方法

(1) 磁性流体に対する磁気浮上研究

① 磁性液体・半固体用磁気浮上装置の開発と特性評価

磁性液体・半固体用の磁気浮上装置を開発し、液滴浮上実験を実施する。液滴が目標浮上位置に達するまでの浮上始動方法の確立と、浮上始動から非接触安定浮上までの挙動を確認する。さらに、浮上物体となる材料の体積（質量）、粘度、表面張力等の物質定数と制御電流、液滴変形状の関係性を明らかにする。

② 磁性液体・半固体の非接触支持操作

浮上位置決めされた液体に対し、産業利用を見据え、搬送操作性を評価する。具体的には、液体頂点を位置決め制御した状態で、制御電磁石を水平方向に動かし、さらに目標値も垂直方向に動作させることで磁性流体の形状変化や即応性を調査する。

(2) 車上一次式システムの固定子形状・性状対応研究

③ 固定子レールの形状、性状に対応可能な磁気浮上移動体の開発

制御電磁石と制御用センサを有する電磁石ユニットを複数個搭載した浮上移動体を製作し、磁性平板（固定子）下での磁気浮上状態を確立する。また、様々な形状、性状の固定子を設定し、浮上状態への影響を評価する。

④ 性状情報を利用した磁気浮上移動体の安定浮上走行の確立

固定子側の表面・内部性状状態を検出するための性状用センサを搭載した磁気浮上移動装置を製作し、上記不均一を有する固定子下において、性状不均一が存在してもそれを検出しながら安定走行を継続可能なシステムを確立させる。

4. 研究成果

(1) 磁性流体に対する磁気浮上研究

① 磁性液体・半固体用磁気浮上装置の開発と特性評価

大気中かつ室温下で簡便に使用できる磁気浮上方式として常電動電磁石による吸引式を採用する。浮上物体には強磁性かつ流動性の性質を持つ磁性流体を態変更要素として使用する。図 1 は

制御電磁石および制御計測環境である。棒状の制御電磁石下端と磁性流体頂点との距離を透過型レーザー変位センサ (omron, ZX-LT030) で計測し、さらに能動制御環境 (DSP (MIS, sBOX II), Power Amp) を整備した。磁性流体の挙動は、変位センサおよび高速度カメラ (楯フोटロン, FASTCAM mini AX-50) からの取得情報を処理しデータ化する。z ステージは磁性流体液滴の浮上始動の際に微調整する。なお、完全非接触となる「液滴」の場合は、ステージ上に撥液シートを設置し1滴を滴下した状態 (図1) から浮上始動を開始する。また、液溜りから直接引き上げる「液錐」の場合は、z ステージ上にシャーレと磁性流体を設置し、制御電磁石上方にリニアステージを設けることで浮上制御しながら水平運動を与えた。

磁性流体液滴に対する磁気浮上実験について、まず、5種の磁性流体 (炭化水素系合成油ベース、粘度 500~10000 mPa.s) に対し、1滴 15 mg (基準) を撥液シート (超撥液アルミ (北海道大学応用化学部門界面電子化学研究室より提供)) 上に滴下し、浮上始動から安定浮上までの実験を行った。安定化には PID 補償器を用いた。

低粘度の場合、磁性液滴の伸長度が高く撥液シートから離脱するには至らなかった。3000 mPa.s 以上の3種で安定浮上状態まで達することができた。理由として、液滴の伸長による液滴上部の吸引面曲率の増大と、それに伴う制御電流の著しい増大、さらに離脱直後の液滴の上下方向収縮といった一連動作中の液滴の大変形が原因であり、浮上始動と安定浮上で PID ゲインを大幅に変更することで対応できると考えられる。図2は3000 mPa.sでの浮上始動から安定浮上状態までの連続写真である。離脱直後から0.3s後には卵形を形成しその後の上下動で変形は見られなかった。図3は粘性および体積 (質量) 変更による安定浮上中の扁平率を示しており、低粘度ほど扁平率が高く、体積が増えるほど扁平率が高くなる傾向が得られた。磁気浮上における一般式では、制御電磁石の吸引力と浮上物体の自重が平衡となるよう能動制御するが、液滴の場合、体積増加が扁平率の増加に繋がることから、体積、粘性等に起因する係数 $a (>1)$ を重力分に乗算する補正が必要であることがわかった。磁性流体液滴の物理特性および体積が定めれば、設定した PID ゲインによる浮上始動、安定浮上、下降停止までの一連動作の再現性が担保されることも示された。

② 磁性液体・半固体の非接触支持操作

磁性流体溜りから所望の液滴 (1滴) を取り出すために試行錯誤を重ねたが不調に終わった。これは、液溜りにも制御電磁石からの磁束が作用し、液滴下端で液溜りから切り離せないためである。一方、図4は円錐状の磁性流体突起 (以下「液錐」) を出現させ、その頂点の位置決め制御を実施した例である。さらに制御電磁石自体をリニアアクチュエータで水平移動させること

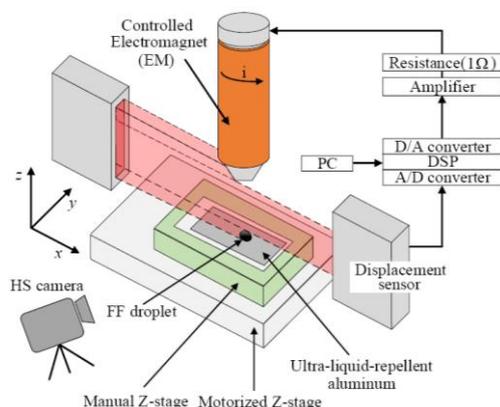


図1 制御計測環境

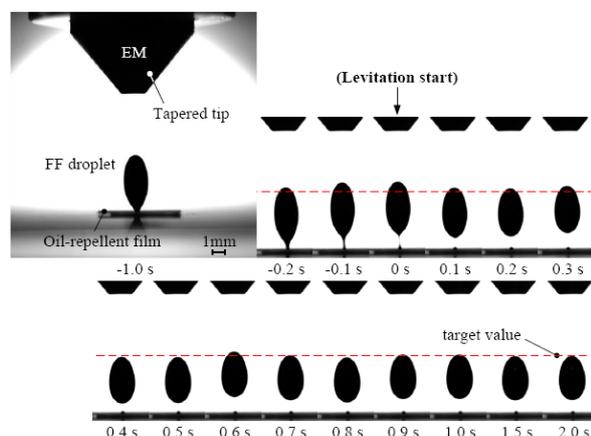


図2 浮上始動連続写真

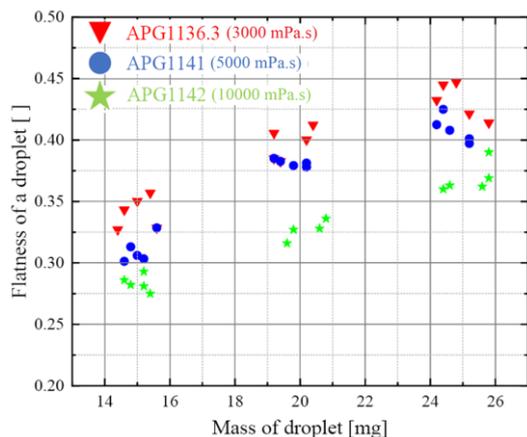


図3 液滴形状評価 (粘性, 体積, 扁平率)

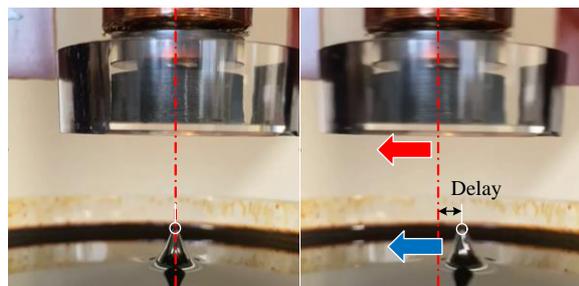


図4 液錐の水平応答 (MSGP50(41~80 mPa.s), 振幅 (ストローク): 10 mm, 周期: 0.5 s)

で目標ギャップの位置決め制御時の流体挙動を評価した。水平方向運動に対し周期 0.5 s での比較的高速な往復運動（ストローク 10 mm）でも制御状態は維持された。電磁石の移動中は磁性流体の粘性に伴う変形と位相遅れが生じた。一方、液錐頂点の目標ギャップ指令値を正弦波状に変化させることで、液錐初期高さ 4 mm、ストローク 2 mm、周期 1 s の上下運動も可能であることが示された。磁性流体液滴の非接触支持状態での水平方向運動付与は未実施であるが、液錐での応答結果から、液溜りとの共有部分が無い分液滴の変形は生じないものと考えられる（ただし、慣性力および空気抵抗は存在するため位相遅れは生じる）。

本研究項目(1)では、半固体（ゲル）に対する評価が予定されていたが、磁性流体の物理特性のうちの粘度に着目し研究を進めた結果、磁気浮上状態は高粘度ほど固体に近い挙動となる知見が得られた。よって、同装置で同質量のゲル状磁性流体を非接触浮上させても同様の結果となることが十分予想される。また、磁性流体に光硬化性を与えた磁気機能性流体（例えばレジンペース）の場合、高粘度流体であるため、同様に非接触磁気支持やアクチュエーションが可能であると示唆される。このことから、磁気支持方式の光造形技術（水平、垂直運動による光硬化造形）という新規アプリケーションが期待される。

(2) 車上一次式システムの固定子形状・性状対応研究

③ 固定子レールの形状、性状に対応可能な磁気浮上移動体の開発

種々の固定子レール（吸引面）形状や性状に対応可能な車上一次式磁気浮上システムとして、バイアス磁束用の永久磁石（一辺 15 mm 立方体）を磁路に含む制御電磁石（磁極面：15 mm × 15 mm）を 4 台搭載した 4-EM 装置と 2 台を直線的に並べた 2-EM 装置を製作した。制御電磁石の磁極間中央には渦電流式変位センサ（omron, ZX-EV04）が設置され吸引面との距離を検出する。図 5 の 4-EM 装置では、各制御電磁石の中央に回転ヒンジ、ボディ付根には屈曲殻調整用ヒンジを設置しており、磁性平板や磁性円筒（内部、外部）での懸垂浮上が可能となるよう配慮されている（ただし、現状は角度調整後に固定している）。4-EM 装置で最大全長 250 mm である。4-EM 装置において平板の場合は、 z, θ_x, θ_y を、円筒の場合は、 z, θ_y, θ_z を能動制御することになる。また 2-EM 装置では進行方向を x 軸、案内方向を y 軸とすると、 z, θ_y を能動制御する必要がある。各ヒンジ角を含めた各装置の数理モデルを導出しており、4-EM 装置の場合は 3 制御入力 of 4 分配則も適用する。予備実験として、性状が均一な各種レール形状（直線レール下での浮上実験、平板下での浮上実験、カーブ走行を想定した曲線レール下での浮上実験、鉄円筒下での浮上実験、ツイストケーブル下における浮上走行時の吸引力変化への対応（解析のみ））を実施した。将来的には回転、屈曲部のヒンジをフリー化し、浮上移動中の吸引面形状変化に柔軟に対応できるシステムを構築する。

④ 性状情報を利用した磁気浮上移動体の安定浮上走行の確立

2-EM 装置は 4-EM 装置を二分した電磁石配置となっており、進行方向に対し 2 台の制御電磁石の 4 か所の磁極が直線かつ等間隔（磁極間距離 66 mm）に並ぶ構成とする。一般に車上一次式磁気浮上システムは、1 台の制御電磁石の磁路を進行方向に対し直角に配するとともに、制御電磁石を進行方向に多数並べる。こうすることで、吸引面の異常性状（キズやクラック等）の影響に対し、他の制御電磁石で力を補うことで影響を回避するといった方策を取る。しかし、本研究では、進行方向が限定されない場合でも対応可能なシステムの構築を目的としており、制御電磁石の磁路方向が進行方向と同一という厳しい条件を設定した。

図 6 は性状検出用センサを含む 2-EM 装置の実験環境である。対向面（直線レール）は長さ 1000 mm、幅 15 mm、厚さ 10 mm の鉄製であり、磁極幅と鉄レール幅を同一として案内方向の受動安定（無制御でも安定）を得ている。この表面に銅板（1000 mm、幅 20 mm、厚さ 1 mm）を設置し、さらに進行方向に対し直角にスリット（幅 1~20 mm）を設定することで導電性不均一状態を模した。この場合、電磁石の磁極と鉄レールとのギャップが浮上力に大きく関与するが、表面に導電性不均一性状が存在することで、2 か所の制御用センサ（omron, ZX-EV04）の検出信号が銅スリットを検出してしまい安定走行が失われる。そこで浮上体の先端に性状用センサ（制御用センサと同一）を設置し、先端で得た不均一情報を制御用センサに反転加算する

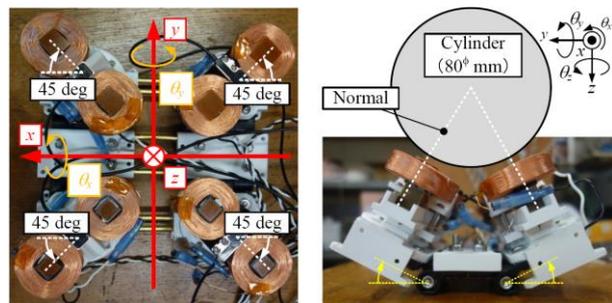


図 5 固定子形状対応 4-EM 装置
（左：平板、右：円筒）

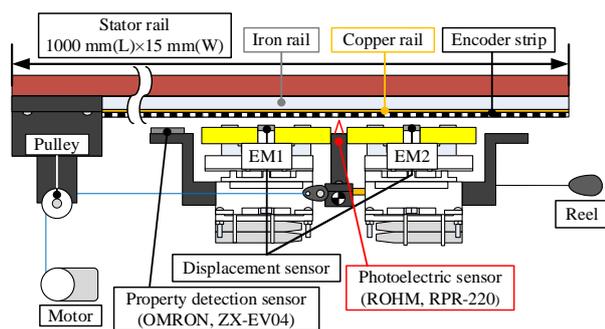


図 6 性状用センサを含む実験系（2-EM 装置）

ことで不均一箇所を通過することを試みた。なお、移動距離に従い不均一情報を反転加算する必要があることから、レール側にエンコーダシート(ピッチ 1 mm) 浮上体側に光电センサを設置しカウンタで距離換算した。また、浮上体には駆動源を搭載せずモータとプーリーによる牽引と細線の緩み防止用リールを使用した。

図 7 は、20 mm 幅の銅スリットを設置した場合の走行試験結果である。性状用センサが t_p の時間幅で sp^* の信号を検出し、 t_{c1} , t_{c2} で各電磁石の制御用センサに $sc1$, $sc2$ を加えることで、浮上体が落下することなく非接触走行に成功した。なお、浮上体のピッチング運動を性状センサが検出することでの影響は制御ブロック内のアルゴリズムで

排除している。磁性不均一の場合には、導電性不均一の場合とは異なり、性状用センサが不均一を検出したのち、制御電磁石の磁極通過時に吸引力変化(減少)として影響を与える。この吸引力変化に対する除去アルゴリズムとして、予めスリット幅で生じる吸引力変化を有限要素法解析(FEA)でデータベース化し、性状用センサの信号波形、および、移動距離情報をもとに吸引力の減少分を補う方法を取った。実際の浮上移動実験では、銅板は設置せず、鉄レールの進行方向と直角に幅 5 mm のスリットを設置した磁性不均一を模擬した。性状用センサ信号は導電性不均一と磁性不均一で傾向が異なることから、磁性不均一であることを容易に分離抽出できる。各制御電磁石がスリットを通過する際に吸引力の不足分を追加することで非接触浮上走行が達成された。

本結果は、対向面として一般的な磁性レールであればクラック等が発生しても本方式が適用できることを示している。本研究の目的は、吸引面の形状や性状にかかる決まり事(形状既定、性状一定)を取り払っても安定な浮上移動を実現しうる車上一次式システムの開発であった。各種形状吸引面での安定浮上、性状不均一直線レール下での浮上走行試験を実施し一定の成果を得た。今後、形状、性状ともに既定されていない任意吸引面での懸垂浮上移動実験を進めていく。

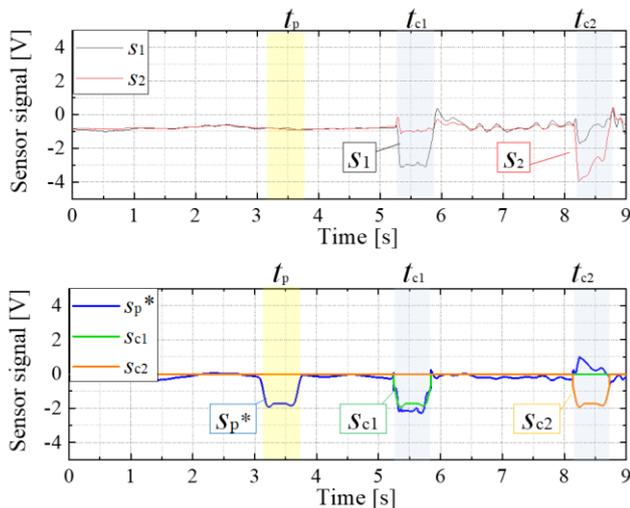


図 7 導電性不均一レール下での牽引試験

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 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ohji Takahisa, Yamaguchi Soichiro, Amei Kenji, Kiyota Kyohei	4. 巻 10
2. 論文標題 Magnetic levitation of a ferrofluid droplet in mid-air	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 015037-1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5129611	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 該当する

1. 著者名 YAMAGUCHI Soichiro, OHJI Takahisa, AMEI Kenji, KIYOTA Kyohei	4. 巻 28
2. 論文標題 Actively controlled magnetic levitation of a ferrofluid droplet in mid-air using a bar-shaped electromagnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 239~244
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14243/jsaem.28.239	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13件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 岡崎哲也, 大路貴久, 飴井賢治, 清田恭平
2. 発表標題 吸引面形状に対応可能な車上一次式磁気浮上装置の提案と浮上実験
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口宗一朗, 大路貴久, 飴井賢治, 清田恭平
2. 発表標題 磁性流体に対する位置決め制御と液滴磁気浮上の試み
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口宗一朗, 大路貴久, 飴井賢治, 清田恭平
2. 発表標題 棒状電磁石を用いた大気中での磁性流体液滴の能動磁気浮上
3. 学会等名 第28回MAGDA コンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahisa Ohji , Soichiro Yamaguchi , Kenji Amei , Kyohei Kiyota
2. 発表標題 Magnetic Levitation of a Ferrofluid Droplet in Mid-Air
3. 学会等名 The 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口宗一朗, 大路貴久, 飴井賢治, 清田恭平
2. 発表標題 磁気機能性流体磁気浮上のための基礎的検討
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡崎哲也, 大路貴久, 飴井賢治, 清田恭平
2. 発表標題 吸引面形状に対応可能な車上一次式磁気浮上装置の提案
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口宗一朗, 大路貴久, 飴井賢治, 清田恭平
2. 発表標題 磁性流体の円錐状態での位置決め制御と液滴磁気浮上実験
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松野恭尚, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 車上一次式磁気浮上装置による導電性不均一レール下での移動実験
3. 学会等名 2020年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石原直樹, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 車上一次式磁気浮上装置での対向面不均一性状部の通過実験
3. 学会等名 2021年電気学会産業応用部門大会 (JIASC21)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田将聡, 北守祐貴, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 磁性流体液滴に対する磁気浮上実験 -粘性と形状評価-
3. 学会等名 2021年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松野恭尚, 石原直樹, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 導電性不均一信号の除去ブロックを用いた車上一次式磁気浮上装置の浮上移動実験
3. 学会等名 2021年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原直樹, 松野恭尚, 大路貴久, 飴井賢治
2. 発表標題 車上一次式磁気浮上装置における不均一性状レールへの対応方法の検討
3. 学会等名 第34回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大路貴久, 二村宗男, 丸山裕
2. 発表標題 磁気浮上・磁気支持と磁性流体
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究協力者	清田 恭平 (Kiyota Kyohei)		

6. 研究組織（つづき）

	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	鮫井 賢治 (Amei Kenji) (50262499)	富山大学・学術研究部工学系・准教授 (13201)	

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