

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289014

研究課題名(和文)交流アンペール式磁気浮上技術による管材・環材支持システムへの応用展開

研究課題名(英文) Applied development to magnetic suspension system for tube and ring products by using ac Ampere magnetic levitation technique

研究代表者

大路 貴久 (Takahisa, Ohji)

富山大学・大学院理工学研究部(工学)・教授

研究者番号：30334709

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：アルミ管材用に特化した交流アンペール式磁気浮上装置を製作し、交流アンペール式の特長である浮上力増大効果、省電力効果、発熱低減効果について調査した。その結果、薄板と同様に、全ての項目で従来型である交流誘導式を上回る良好な特性が得られた。アルミ環材に対しては、アルミ環材に生じる誘導反発力とアルミ環材の自重分を上回る準定常な交流アンペール力による引上げが可能であることを試作機で実証した。このように、薄板用として提唱された交流アンペール式磁気浮上技術が、管材や環材に対してもその有効性を保持したまま適用可能であることが示された。

研究成果の概要(英文)：We developed a new ac Ampere type maglev system for an aluminum tube, and investigated the effects of levitation force enhancement, power saving, and reduction of heat generation. As a result, the new maglev for an aluminum tube exhibited all the above effects that ac Ampere type maglev for an aluminum plate acquires. In addition, to realize electromagnetic suspension of an aluminum ring, we developed a prototype of ac Ampere type maglev for an aluminum ring. The prototype includes an electromagnet arranged from the upper side of the ring and six electromagnets around the ring. It was proven that the prototype generates quasi-static ampere force larger than the sum of induction force and own weight of the ring and therefore can continue pulling up the ring. From these verification tests, we conclude that ac Ampere type maglev technique we have proposed can be applied to various shapes of aluminum products such as plate, tube, ring, and frame without impairing its effectiveness.

研究分野：電気機器工学

キーワード：磁気浮上 非磁性金属 管材 環材 交流アンペール力 渦電流

### 1. 研究開始当初の背景

従来の交流誘導式磁気浮上技術では、非磁性金属薄板内の渦電流による急激な熱上昇が原因で浮上高が著しく低下する問題があった。一方、申請者らが発案した交流アンペール式磁気浮上技術では、薄板内の渦電流の一部を浮上力として利用するため、同質量の薄板であれば熱上昇を緩和しつつ浮上高を維持でき、省電力運転も可能であることが実証されている。このように薄板形状に対しては、浮上力増大効果、省電力効果、発熱低減効果を有する交流アンペール式であるが、非磁性金属製品の生産ラインへの導入を考慮した場合、薄板に限らず、管材(パイプ)や環材(リング)、フレーム材といった基本形状製品にも対応可能なシステムの開発が必要である。他の側面として、対向面の取れる薄板形状であれば、空気圧や静電引力による方法もあるが、リング、フレームといった穴あき製品に対しては、交流アンペール式以外は原理的に困難であると考えられ、試作機の開発と実証試験は産業上極めて重要である。

### 2. 研究の目的

本研究は、交流アンペール式磁気浮上技術の非磁性金属管材・環材への適用可能性調査と応用展開を目的とする。具体的には、①交流アンペール式を用いたパイプ状非磁性金属の磁気浮上技術の確立、②交流アンペール式を最大限に利用したリング状非磁性金属の浮上安定化、③リング状非磁性金属の懸垂浮上と制御技術、④非磁性金属フレームに対する磁気浮上技術の確立を当初目的とし研究を遂行した。

### 3. 研究の方法

非磁性金属製品の形状はパイプ、リング、フレームの3種であり、交流アンペール力を効果的に付与する装置の開発が主体となる。

1つ目は、パイプ状非磁性金属に適用する磁気浮上装置の設計・製作・評価である。パイプ材は、薄板を丸めた構造と捉えることができる。薄板用装置との唯一の違いは、アンペール力生成のための外部磁束がパイプ側面に渦電流を発生させてしまう点であり、この点に注視し薄板用装置構造を元に設計する必要がある。並行してFEM解析によるパイプ内渦電流の可視化や発生力評価等を行い、浮上力増大、省電力、発熱低減の観点から最も効果的な磁極配置や励磁方法を明らかにする。以降、装置製作と各種特性試験により、パイプ用装置に対する交流アンペール式の適用可能性を評価する。

2つ目として、リング状非磁性金属に適用する磁気浮上装置の設計・製作・評価である。リング材の場合、リング内に如何に渦電流を集中させるかがポイントとなる。また、交流電磁石によって励起された渦電流は誘導反発力の誘因であるため、誘導反発力を如何に抑えるかも重要な要素となる。この相反する

事象を実現するための装置構成をFEM解析により探る。さらにアンペール力用電磁石の配置構成と励磁条件の差違による浮上力発生状況を確認したのち、装置設計・製作・評価を行う。リング材の懸垂吸着試験から非接触懸垂浮上実験へと繋げる。

3つ目として、フレーム状非磁性金属に適用する磁気浮上装置の設計・製作・評価である。リング材の場合と同様にフレーム材も穴あき構造となる。従って、フレーム内に渦電流を如何に効果的に発生させるかが重要となる。フレーム材の一辺が大きければ、フレーム自身を二次導体と捉え、U字鉄心から成る交流電磁石を使用して二次電流を生成すればよい。事前のFEM解析に基づき、アンペール力用電磁石を具備する実験装置を製作したのちアンペール力の発生状況を確認する。

### 4. 研究成果

#### 1) パイプ状非磁性金属に対する交流アンペール式磁気浮上の効果

薄板用装置では、薄板断面(側面)からアンペール力用の交流電磁石磁極を配置することで、発熱を抑制しながら浮上力を増補できるが、パイプ材の場合、ラジアル方向の全てがパイプ面となるため、アンペール力用電磁石からの磁束がパイプ面内に渦電流を発生させる。このことによって交流アンペール力の重畳状況に何らかの変化をもたらす可能性がある。図1は、パイプ材に対する交流アンペール式磁気浮上装置である。Al製パイプ( $\phi 100\text{ mm} \times 210\text{ mm}$ , 肉厚2mm)の奥行方向に電磁石EM1, 2, 3の固定子磁極を配置する。全ての固定子磁極がパイプ面の法線方向となるように、放射方向へ45度間隔でEM1, 2, 3を配置している。EM1, 2は誘導反発力用電磁石、EM3は交流アンペール力用電磁石である。各磁極は浮上力の観点から最適な磁極パターンを選択しており、励磁周波数を120 Hzに固定する。各励磁電流を $i_1, i_2, i_3$ とし、EM1, EM2には同一の正弦波電流、EM3にはそれよりも90度遅相の電流を入力する。Alパイプに生じるz方向の浮上力は、励磁周波数の2倍(240 Hz)で発生する。図2はFEM解析によって求められたパイプ内での時々刻々の力密度ベクトルの様子である。励磁条件は $i_1 = i_2 = 3\text{ A}$ ,  $i_3 = 3\text{ A}$ (90度遅相)で、EM1,

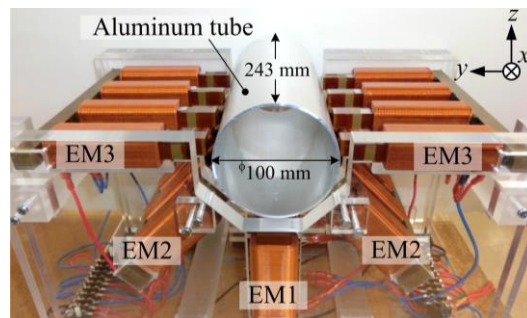


図1 非磁性パイプ材用磁気浮上装置

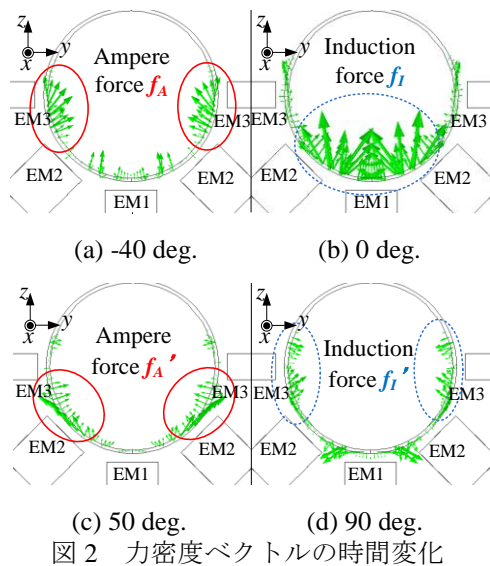


図2 力密度ベクトルの時間変化

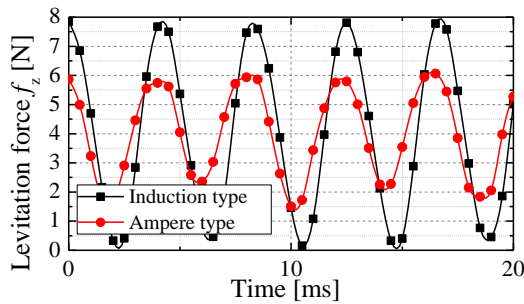


図3 浮上力瞬時波形

2 による誘導反発力  $f_i$  が最も強く発生する瞬間を 0 deg. (基準) として、Al パイプに発生する各所の力と発生位相 (力の一周周期分) を示した。誘導反発力とアンペール力を意味する 4 種類の力が順次発生するのがわかる。EM2-EM3 間のアンペール力  $f_A'$  (同図(c)), EM3 からの磁束による誘導反発力  $f_i'$  (同図(d)) がパイプ材特有の力となる。

図3は、同一浮上高 (5 mm) で同一の平均浮上力 (4.04 N) が発生する電流条件での浮上力の時間変化である。交流誘導式 ( $i_1 = i_2 = 4.36$  A,  $i_3 = 0$  A) と交流アンペール式 ( $i_1 = i_2 = 2.5$  A,  $i_3 = 3.51$  A) を比較すると、交流アンペール式では、図2のようにアンペール力と誘導反発力は異なる位相タイミングで生じるため、全体の浮上力は時間的に分散し浮上方向振幅が減少したと考えられる。図4は、図3と同一の条件で一定時間励磁した際の浮上力低下度を示す。交流アンペール式では浮上力低下度が小さく、Al パイプに対しても交流アンペール式の特長である発熱低減効果が確認された。60秒後の浮上力低下度が、交流誘導式で約13%、交流アンペール式で約6%に留まっている。さらに、図5は、他の電流条件を追加して実験した際の、システム運転時の全体の消費電力を示す。このように、励磁電流条件を正しく設定することで、従来型である交流誘導式の約60%の電力で浮上可能であることが確認された。

以上より、薄板用装置と同様に、パイプ状

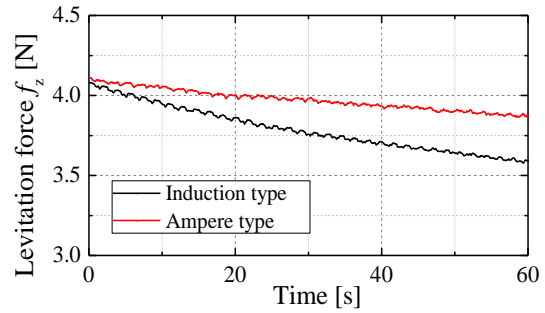


図4 平均浮上力の時間変化

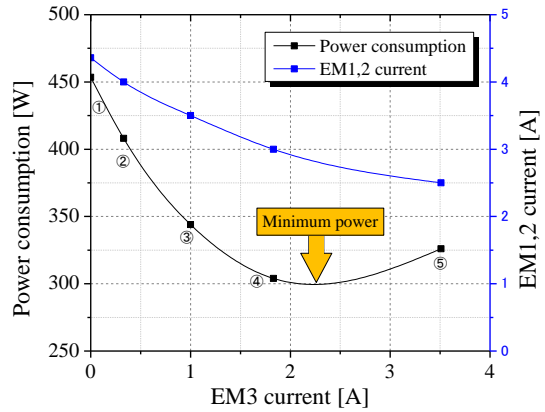


図5 同一浮上高、浮上力条件での消費電力

非磁性金属に対する交流アンペール式磁気浮上技術の有効性を示した。本システムは無有限長パイプの引抜成形における非接触搬送、振動抑制等への利用が期待できる。

## 2) リング状非磁性金属に対する交流アンペール式浮上方式に基づいた懸垂吸着

従来型である交流誘導式は、非磁性金属からなる浮上対象物と交流電磁石との間に準定常な誘導反発力が生じる。このとき、交流電磁石からの主磁束と、誘導電流からの副磁束が対向するよう、交流電磁石を非磁性金属の下に配置しなければならない。一方、交流アンペール式では、交流誘導式で生じる誘導反発力に加え、金属内の誘導電流に対し外部磁束を印加することでアンペール力が生成される。つまり、誘導電流に同相同期させた外部磁束を新たに用意し、主磁束に対し垂直方向から誘導電流に作用させることでアンペール力を得る。仮に、交流電磁石を上方に配置し、浮上対象物をその下方に配置した場合でも、外部磁束の位相を調整することで、下向きの誘導反発力と浮上対象物の自重の和よりも大きな上向きの交流アンペール力を生成できれば、浮上対象物の懸垂動作 (非磁性金属の引上げ) が可能となる。

図6は、リング材に対する交流アンペール式磁気浮上の原理検証用試作機である。DVDと同直径のAl製リング ( $\phi 120$  mm  $\times$   $\phi 110$  mm  $\times$  5 mm, 23 g) を浮上対象物とした。中央上部には誘導電流発生用の交流電磁石 EM1 が設置されており、パンケーキコイルと継鉄で構成されている。Alリング周囲には6極の側方

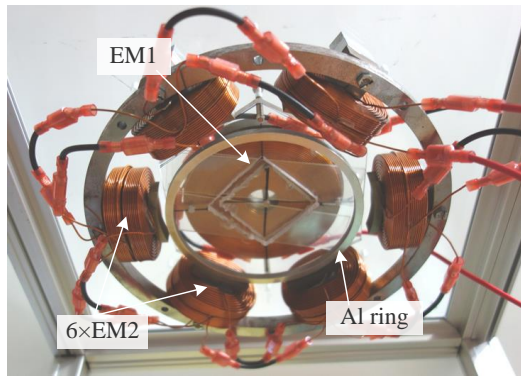


図6 非磁性リング材用懸垂磁気浮上試験機。

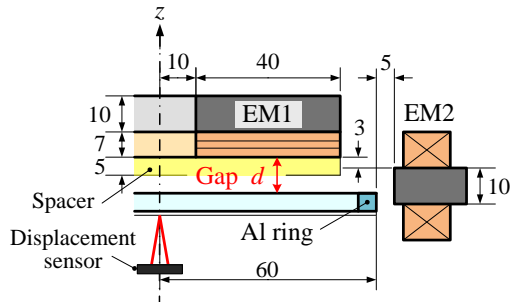


図7 電磁石, Alリング寸法と相対位置

電磁石 EM2 を設置しアンペール力を発生させる。EM1 に対する EM2 の励磁電流位相差を任意に設定できるように2台の交流電源で別回線を構築する。なお, Al リングには一方向の交番誘導電流が流れるため EM2 から磁束は全て同極かつ放射方向に生成する。

図7は各部の寸法および相対位置を示す。Al リング上面とパンケーキコイル表面とのギャップを  $d$  [mm] とする。ギャップを固定した実験ではフォースゲージで Al リングにかかる浮上方向の引上げ力を測定した。図8は, 励磁電流  $i_1 = i_2 = 3.0$  A, 周波数 120 Hz における電流位相差と浮上力の測定結果である。 $d = 6 \sim 12$  mm の全ての場合で Al リングの自重を上回る位相が存在し, 60 度進相付近で極大となるのがわかる。また, ギャップ  $d$  にも浮上力が最大となる最適値が存在するのが確認できる。図7からわかるように, 実際には  $d = 8$  mm で Al リングの下面と EM2 の磁極下面が一致する位置関係となっており, それよりも下方に Al リングが存在しても Al リングを引上げるだけの浮上方向力が出ていることになる。図9は  $d = 10$  mm を初期位置としたときの Al リングの引上げ動作結果を示す。Al リングの挙動は, Al リング中央に貼付した反射シールに対しレーザ変位センサで測定する。各電磁石の励磁電流, 周波数はそれぞれ,  $3 A_{max}$ , 120 Hz とし, EM1 の励磁完了後に EM2 をステップ状, ランプ状 (3 種) に励磁した。図より全ての場合でスペーサに接触 ( $d = 5.5$  mm) しており, この浮上・吸着状態は過渡的な跳ね上がりによるものではなく連続的な引上げ力によるものであることが確認できる。なお,  $d = 8.0$  mm 付近の段差

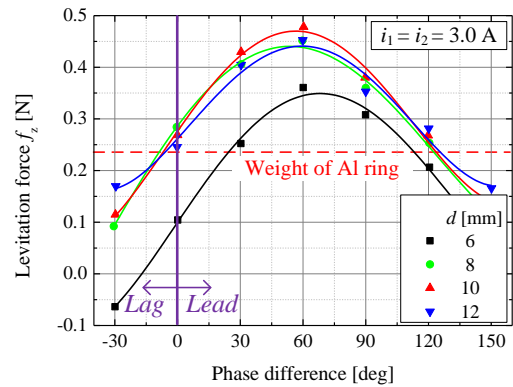


図8  $i_2$  の励磁電流位相と浮上力

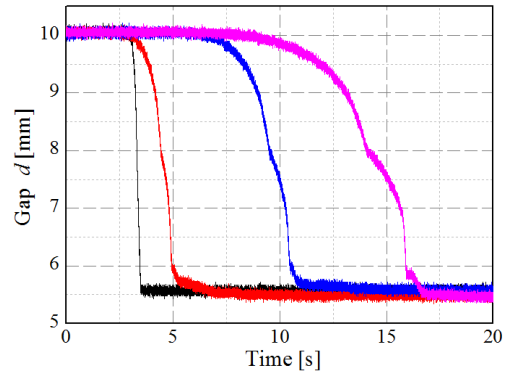


図9 Al リング引上げ試験 (ステップ励磁とランプ励磁 (3 種))

は, リングのある一カ所から順次引上げられたためである。

以上より, リング状非磁性金属に対する交流アンペール力の生成原理に基づき試験機を製作し, 浮上対象物の重力方向への誘導反発力とリング自重の和を上回る交流アンペール力を準定常的に生成させることに成功した。また, 実際の引上げ試験によりその有効性を証明した。本来, 交流電磁石ではアルミ部材に対し反発力しか生成できないという通説に対し, 交流電磁石とアルミ部材との位置関係と励磁方法を工夫すれば, あたかも吸引動作のように電磁力を生み出せることを立証した。現状では非接触懸垂浮上状態までは確立されていないが, 現状の結果より, スタックされた非磁性金属の吸着把持, 搬送などへの産業利用の可能性が広がった。

### 3) フレーム状非磁性金属に対する交流アンペール力の生成

リング状非磁性金属と同様に, フレーム材に対しても交流アンペール式を適用し産業利用を目指す。フレーム材はサッシやスクリーン等比較的大きな寸法, 重量となる。そこで対象物となる Al フレームを B4 サイズ (364 mm×257 mm, 板厚 3 mm), 枠幅 30 mm に設定しプロトタイプ装置を設計した。フレーム材はリング材の考え方と類似しているが, フレーム枠幅があるため, この枠内に局所的に渦電流を発生させることで交流誘導式も適用される。一方, フレーム一周に誘導電流

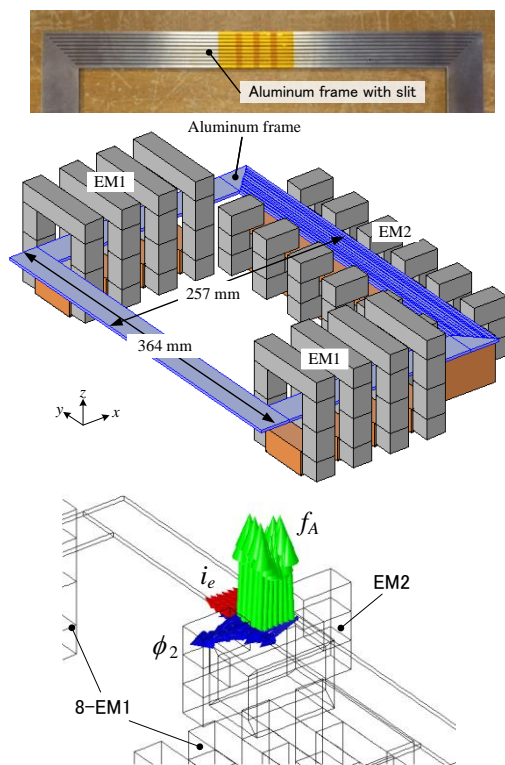


図 10 フレーム材用磁気浮上装置作用部の FEM モデルと解析例 (EM2 一個分)

を発生させて外部磁束との外積によるアンペール力を発生させることも可能である。そこで、両方式の効果を検証することができるように、長辺の一方に複数の貫通スリットを施した Al フレームを準備した (図 10)。これにより、交流アンペール式の効果を明確に調査できる。電磁石固定子を 8 個用意し、フレーム周囲に配置しフレーム自体に誘導電流 (二次電流) を流す。この二次電流に対し交流アンペール力用電磁石を 6 個配置しアンペール力を発生させる。この構造に対し、図 10 のように三次元磁場解析モデルを作成し、交流アンペール力の有効性を確認した。この知見をもとにした試作装置の製作が終了し近く成果を公開する予定である。

以上の研究成果より、非磁性金属薄板に対する浮上力発生方法として申請者らが提案する交流アンペール式磁気浮上技術が、薄板のみならずパイプ、リング、フレームといった形状に適用できることを証明し、アルミ生産技術としての応用展開が可能であることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

① T. Ohji, F. Kato, K. Amei, M. Sakui, A comparative numerical study of repulsive forces for stabilizing a rectangular aluminum plate between ac induction type and ac ampere type magnetic levitation methods, Int. J. Appl. Electromagn. and Mech., 査読有, Vol. 45, No. 1-4, pp. 895-

〔学会発表〕 (計 12 件)

① 加藤冬樹, 松島功児, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール式磁気浮上搬送装置によるアルミ薄板の浮上安定性の解析的検討, 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 302-303, 2013

② T. Ohji, F. Kato, K. Matsushima, K. Amei, M. Sakui, A Comparative Numerical Study of Repulsive Forces for Stabilizing an Aluminum Plate between Ac Induction Type and Ac Ampere Type Magnetic Levitation Methods, Abstract Book of the 16th Int. Symp. Appl. Electromagn. Mech., pp. 444-445, 2013

③ 佐藤太一, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール式磁気浮上搬送装置における励磁電流調整によるアンペール力の増大, 平成 26 年電気学会全国大会講演論文集, 5-072, p. 126, 2014

④ 佐藤太一, 加藤冬樹, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール式磁気浮上方式の非磁性金属管材への適用, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会, Y-106 (CD), 2014

⑤ 佐藤太一, 加藤冬樹, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール式リニア磁気浮上搬送装置によるアルミ薄板の励磁区間切替搬送, 平成 26 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, A-57 (CD), 2014

⑥ 大路貴久, 加藤冬樹, 佐藤太一, 飴井賢治, 作井正昭, 非磁性金属薄板・円管に対する交流アンペール式磁気浮上方式の効果, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 55-58, 2015

⑦ T. Sato, F. Kato, T. Ohji, K. Amei, M. Sakui, Application of an AC ampere type magnetic levitation method to an aluminum round tube, Int. Conf. Electrical Engineering, ICEE15A-431, 2015

⑧ 濱野祐貴, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール力を用いた懸垂型磁気浮上の提案, 平成 27 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, A3-9 (CD), 2015

⑨ 須田一輝, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール式磁気浮上装置によるアルミ板の板厚-浮上高特性, 平成 27 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, A3-7 (CD), 2015

⑩ 濱野祐貴, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール力を利用したアルミニウムリングの浮上実験, 平成 28 年電気学会全国大会講演論文集, 5-135, p. 207, 2016

⑪ 佐藤太一, 須田一輝, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 非磁性金属円管に対する交流アンペール式磁気浮上装置の評価, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 214-215, 2016

⑫ 濱野祐貴, 須田一輝, 大路貴久, 飴井賢治,

作井正昭, 交流アンペール力を用いたアルミニウムリングへの浮上力生成, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 242-243, 2016

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大路 貴久 (OHJI Takahisa)

富山大学・大学院理工学研究部 (工学)・  
教授

研究者番号 : 3 0 3 3 4 7 0 9