

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 13 日現在

機関番号：12701

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H06210・20K20288

研究課題名（和文）高周波電気機械エネルギー変換工学の開拓

研究課題名（英文）High-frequency electro-mechanical energy conversion

研究代表者

藤本 康孝（Fujimoto, Yasutaka）

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60313475

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,700,000 円

研究成果の概要（和文）：電気-機械エネルギー変換の基礎理論は、電束電流が無視できる低周波数帯域において概ね確立しており、その応用であるモータや発電機は広く普及している。それらは主に鉄心と銅線からなるため軽量化が難しかった。本研究では、電気-機械エネルギー変換の基礎理論を原理から見直し、数MHz～数GHzまで高周波化した場合の電気-機械エネルギー変換モデルの提案と検証を行った。磁界共振結合を利用して13.56MHzで駆動する回転型モータおよびマイクロ波導波管を利用して2.54GHzで駆動する原理モータのモデルの提案とシミュレーションによる検証を行い、小さいながらもいずれも原理的に力を発生させられることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまで検討されてこなかった数MHz～数GHzの高周波数帯域での電気-機械エネルギー変換のモデルを提案することで、原理的にこれらの高周波数帯域でもエネルギー変換が可能であることを示した点に学術的な意義がある。また、これまでとは性質の異なる全く新しいモータや発電機の開発の可能性を示した。MHz帯域のものでは鉄心を用いず、GHz帯域のものでは鉄心も銅線も用いないことから、軽量に構成できる可能性がある。MHz帯域のモータでは、磁気結合の弱さを磁界共振で補うことができ、固定子-回転子間のギャップを大きくしても性能が劣化しないため、ギャップを可変にできるモータなどの新しい展開が考えられる。

研究成果の概要（英文）：The basic theory of electrical-mechanical energy conversion has been largely established in the low frequency range below several tens of kHz, where the displacement current can be neglected, and its application devices, such as motors and generators, are widely used. Since they mainly consist of iron core and copper wire, it has been difficult to reduce their weight. In this study, we extended the basic theory of electrical-mechanical energy conversion and proposed and verified an electrical-mechanical energy conversion model when the drive frequency increases from several MHz to several GHz. A rotating motor model driven at 13.56 MHz using magnetic resonance coupling, and a motor model driven at 2.54 GHz using microwave waveguide were proposed and verified by simulations, and it was shown that both of them can generate force in principle, although they are small.

研究分野：電気機器学

キーワード：電気機械エネルギー変換 高周波 電気機器 モータ ワイヤレス電力伝送

### 1. 研究開始当初の背景

近年、磁界共振結合を利用したワイヤレス電力伝送技術が注目を集めている。この技術は、従来の電磁誘導を利用したワイヤレス電力伝送技術と比較して、伝送距離が **1m** 程度と比較的長いことが特長である。このシステムは、磁気的な結合の小さい1次側および2次側の2つのコイルと、それぞれのコイルに接続されたキャパシタから構成される。ここでは、1次側から見込んだインピーダンスが極小となる共振周波数が存在し、そのQ値が十分高ければ、コイル間の磁気結合が小さくてもその共振周波数において大きな電力の伝送が可能となる。より低周波数帯域では、電力伝送、電気-機械エネルギー変換ともほぼ原理が共通の電磁誘導方式で実現できているが、この磁界共振結合の考え方をコイル間の電力伝送のみならず、電気-機械エネルギー変換に拡張することができるかどうかは、これまで全く検討されていなかった。つまり、磁界共振結合を利用して電力伝送と電気-機械エネルギー変換の両者を統一的に扱った研究はこれまでに存在していなかった。一方で、近年、高性能な SiC や GaN などの次世代パワーデバイスの登場により、従来は困難だった MHz 帯域においても高効率な電力変換が可能となりつつあった。さらに、この磁界共振結合の周波数をマイクロ波の領域まで上げていった場合に、電気-機械エネルギー変換が可能かどうかとも未知の問題となっていた。

### 2. 研究の目的

電気エネルギーと機械エネルギーの相互変換の基礎理論は、電束電流が無視できる数十 kHz 以下の低周波数帯域において概ね確立しており、その応用機器であるモータや発電機は我々の生活にはなくてはならないものとなっている。モータや発電機は主に磁気回路を構成する鉄心と起磁力を発生させる銅線からなるため軽量化が難しい。本研究では、電気-機械エネルギー変換の基礎理論を原理から見直し、数 MHz~数 GHz まで駆動周波数を高周波化した場合の相互エネルギー変換理論の確立とその検証を目的とする。これは電気-機械エネルギー変換の原理を高周波に拡張するものであると同時に、ワイヤレス電力伝送の原理を機械エネルギー変換も扱えるように拡張するものである。低周波数帯域から高周波数帯域まで現象を統一的に扱うことのできる新しい電気-機械エネルギー変換の原理を明らかにし、鉄心や銅線を用いない超軽量なモータや発電機の実現を目指すものである。

### 3. 研究の方法

まず、磁界共振結合による電気-機械エネルギー変換のモデル、すなわち、MHz 帯域で駆動するモータの理論モデルの構築を行う。このシステムは図1のように共振回路を持つ誘導機として集中定数回路による表現が可能である。モデルは、図2のように鉄心がなく固定子と回転子の巻線のみからなるものとする。固定子巻線が発生させる磁界の和を求め、これが固定子巻線に鎖交する量から自己インダクタンスを、回転子巻線に鎖交する量から相互インダクタンスを算出する。さらに、相互インダクタンスの回転角度依存性を正弦波状に仮定することで、定常トルクのモデルを導出する。また、JMAG-Designer による電磁界解析によりトルクの1次電源周波数依存性の解析を行い、モデルの妥当性を検証する。

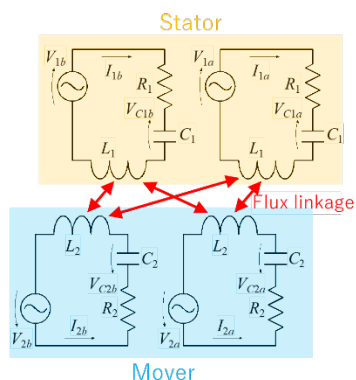


図1：集中定数回路モデル

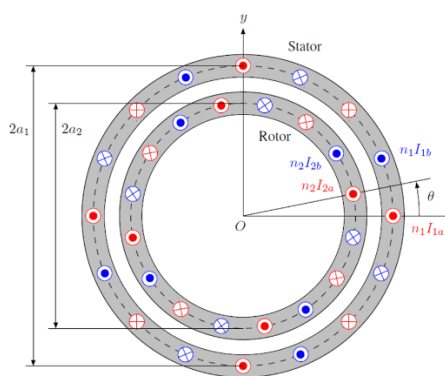


図2：基本モデル

次に、駆動周波数をさらに引き上げ、GHz 帯域、すなわち、マイクロ波により駆動するモータのモデル構築を行う。GHz 帯域に拡張するにあたり、巻線の代わりに導波管を利用し、交流電源の代わりにコヒーレントなマイクロ波源を用いる。方形導波管において、電界の短辺方向成分と進行方向成分および磁界の短辺方向成分を考えない TE10 モードを利用し、固定子におい

て図3のようにスタックし、90度ずつ位相シフトした導波管端面で可動子の運動方向に移動する磁界を形成する。各導波管の位相をシフトさせるために、図4のようにコヒーレントな単一のマイクロ波源から、分岐を介して所望の位相差を実現する。

一方、可動子にも図5や図6のように方形導波管を配置し、導波管短辺の面に生じる表面電流と磁界によるローレンツ力により力を発生させる。図5は1相分、図6は2相分の可動子導波管であり、いずれも導波管の深さは管内波長の1/4とする。以上の基本構成のもと、Ansys HFSSによる高周波3次元電磁界解析を行い、可動子に力が生じるかどうか検証する。

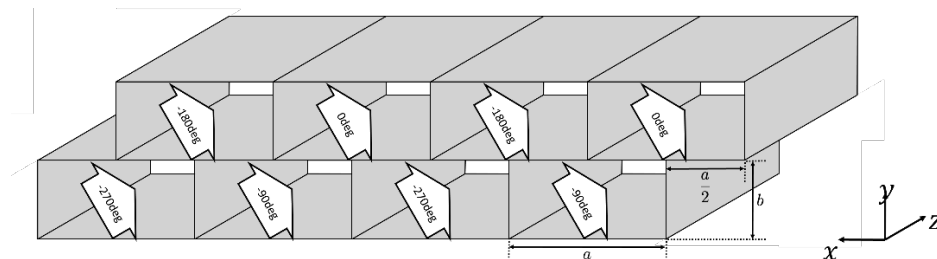


図3：マイクロ波導波管による運動方向(x)に移動する磁界の生成（2極対分）

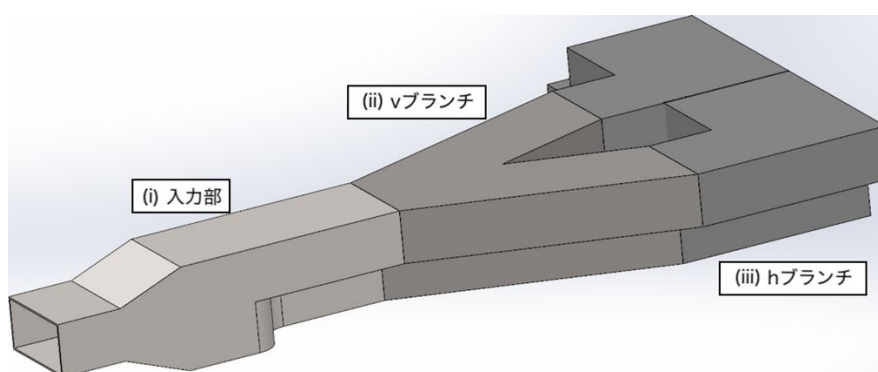


図4：コヒーレントなマイクロ波源から所望の位相差を実現する分岐路

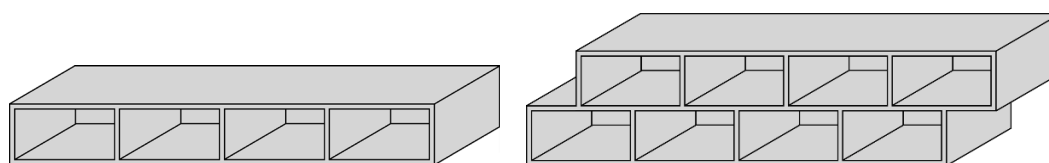


図5：可動子（単相、2極対分）

図6：可動子（2相、2極対分）

#### 4. 研究成果

まず、MHz帯域のモータに関しては、導出した基本モデルでは、ギャップ距離に応じてトルクは2つの共振ピークを持つことが分かった。それぞれの共振周波数は、巻線のインダクタンスと寄生容量によって調整することができる。図7は一つの共振ピークの周波数を13.56MHzとなるように調整し、13.56MHzの電圧源により1次巻線を励起したときの4極対共振モータの磁界分布のシミュレーション結果である。モータ外径は64mm、長さは50mm、ギャップ距離は6mmとしている。ギャップ距離は通常のモータよりもかなり大きい。2次側の回転子巻線に誘導電流が生じていることがわかる。また、図8は電源周波数を変化させたときのトルク特性である。2つのピークがあり、13.56MHzにおいてトルクは約0.18mN.mとなっている。大きさはかなり小さいが、トルクが発生できることが確認できた。

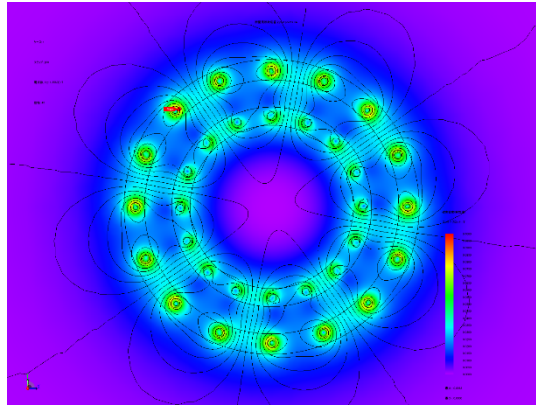


図 7 : 13.56MHz で駆動された共振モータの磁界分布

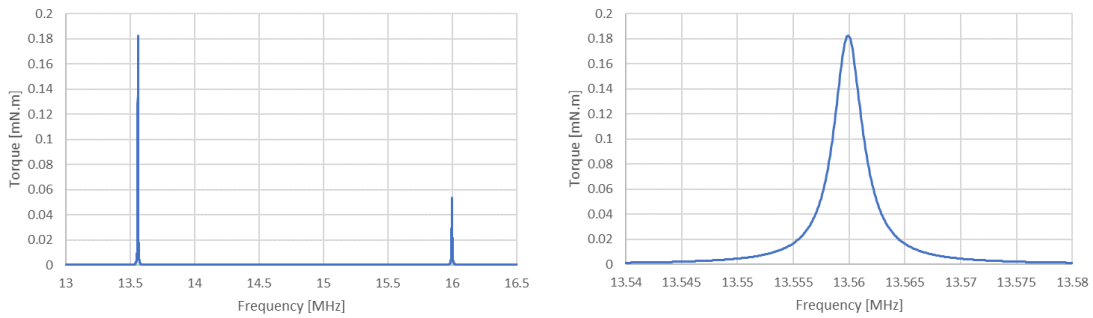


図 8 : トルクの電源周波数依存性 (右図は 13.56MHz 付近の拡大図)

次に、GHz 帯域のマイクロ波で駆動するモータに関しては、まず、図 4 の導波管により端面から放射される電磁界が可動子運動方向(x)に移動する移動磁界となるかどうかの確認を行った。図 9 は、ギャップ部の磁界分布のシミュレーション結果であり、任意のギャップ断面で移動磁界を形成していることが分かった。図 10 は、この磁界を受けて可動子に発生する磁界分布、図 11 は可動子に生じる誘導電流の分布、図 12 は可動子に発生する力の分布である。固定子で生成された磁界により可動子短辺の面に誘導電流が生じ、力を発生させている。図 13 は可動子に生じる力の和である。図 5 の単相モデルの場合は、位相により力の大きさが正弦波状に大きく変化してしまうのに対して、図 6 の 2 相モデルの場合は、発生力がほぼ一定にできている。なお、1kW の入力に対して、発生力は最大約  $2.5\mu\text{N}$  とかなり小さい値であることが分かった。

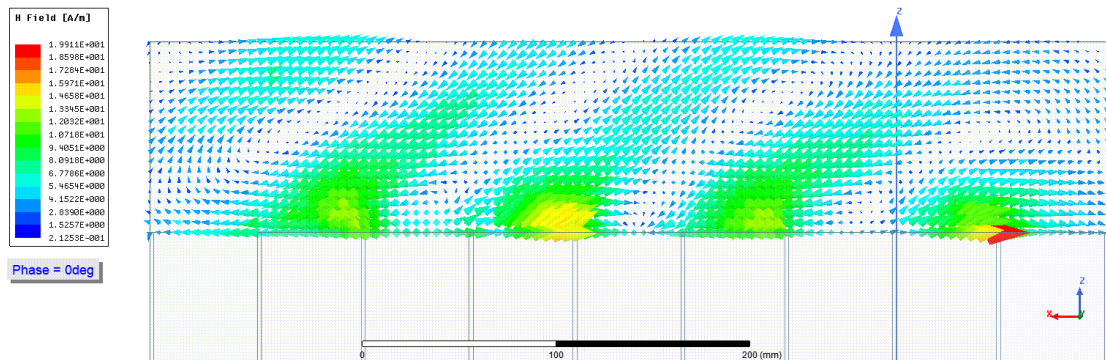


図 9 : 固定子導波管端面から放射される電磁界によるギャップ部の磁界分布

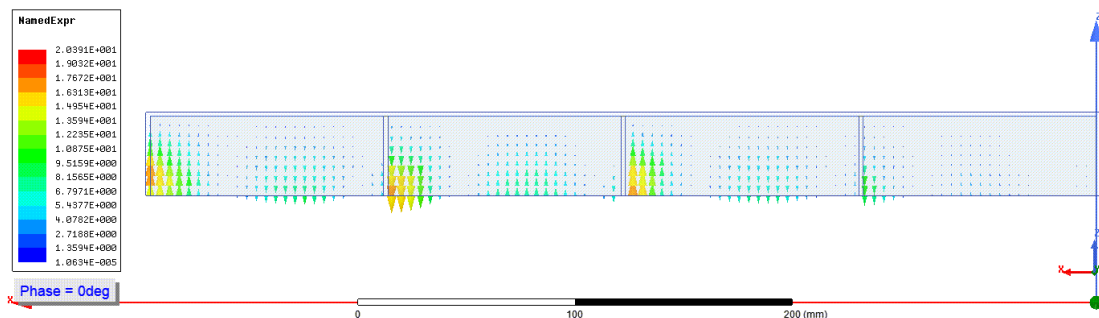


図 1 0 : 可動子に生じる磁界分布

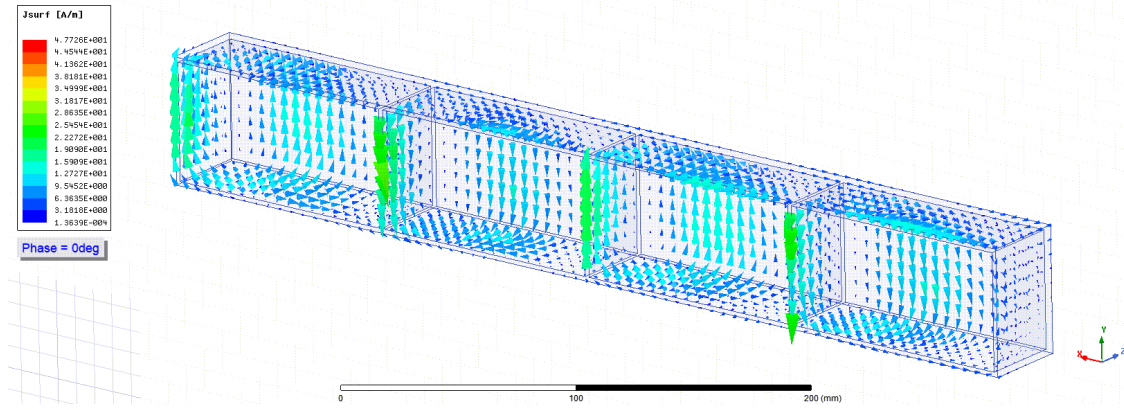


図 1 1 : 可動子に生じる誘導電流の分布

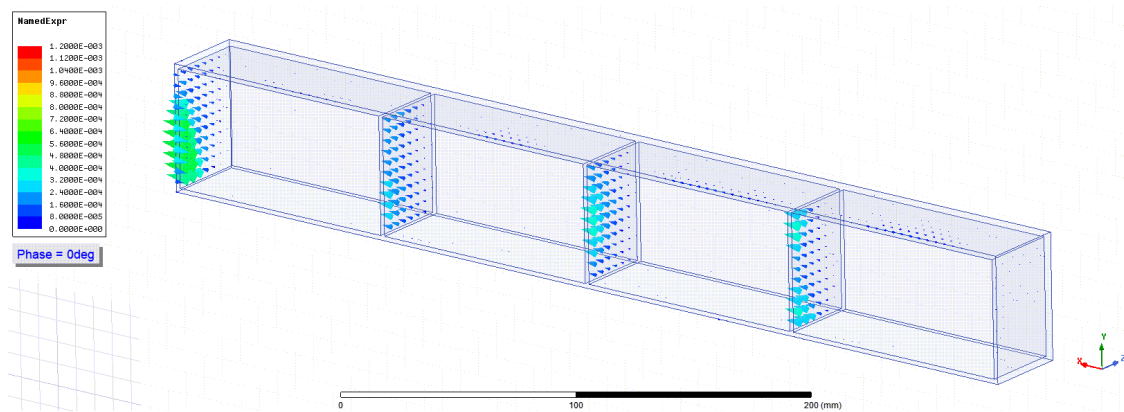


図 1 2 : 可動子に発生する力の分布

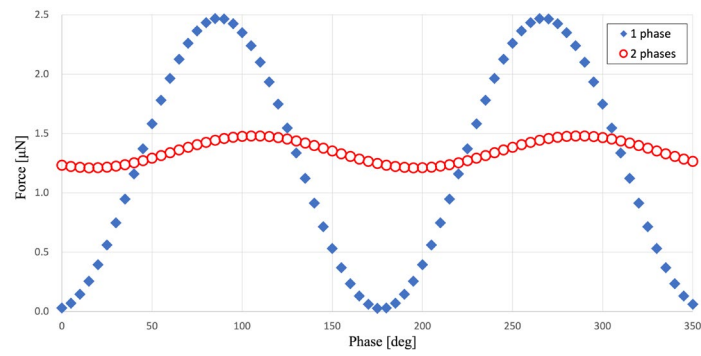


図 1 3 : 可動子に発生する力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Besong John Ebot and Yasutaka Fujimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 A Simulation Method for a Motor Design Based on Magnetic Resonance Coupling Technology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 proc. Int. Conf. on Electrical Machines and Systems	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/ICEMS50442.2020.9291149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ebot Besong John, Fujimoto Yasutaka	4. 巻 -
2. 論文標題 A Motor Design Based on Wireless Magnetic Resonance Coupling Technology	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ECCE44975.2020.9236068	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masazumi Katoh and Yasutaka Fujimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Analysis of Force Generation in Microwave Motors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 John Ebot Besong and Yasutaka Fujimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 A General Framework for the Analysis and Design of a Wireless Resonant Motor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 proc. IEEE Int. Electric Machines & Drives Conference	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/IEEMDC.2019.8785220	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Besong John Ebot and Yasutaka Fujimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Design Analysis for a Novel Wireless Resonant Actuator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 加藤正純, 藤本康孝
2. 発表標題 マイクロ波モータの実現に向けた磁界分布に関する検討
3. 学会等名 電気学会モータドライブ / 回転機 / リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masazumi Katoh and Yasutaka Fujimoto
2. 発表標題 Analysis of Force Generation in Microwave Motors
3. 学会等名 IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Besong John Ebot and Yasutaka Fujimoto
2. 発表標題 A Simulation Method for a Motor Design Based on Magnetic Resonance Coupling Technology
3. 学会等名 Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 John Ebot Besong and Yasutaka Fujimoto
2. 発表標題 A Motor Design based on Wireless Magnetic Resonance Coupling Technology
3. 学会等名 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 John Ebot Besong and Yasutaka Fujimoto
2. 発表標題 A General Framework for the Analysis and Design of a Wireless Resonant Motor
3. 学会等名 IEEE Int. Electric Machines and Drives Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Besong John Ebot and Yasutaka Fujimoto
2. 発表標題 Design Analysis for a Novel Wireless Resonant Actuator
3. 学会等名 IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------