

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01422

研究課題名（和文）ワイヤレス電力伝送用 超薄型・高効率フレキシブル伝送コイルの開発

研究課題名（英文）Development of ultra-thin and high efficient flexible transmission coil for wireless power transfer

研究代表者

水野 勉（MIZUNO, TSUTOMU）

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：90283233

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000 円

研究成果の概要（和文）： モバイル機器などにおけるワイヤレス電力伝送では薄型で高効率な伝送コイルが必要である。コイルの薄型化のために、銅箔コイルパターンが用いられているが、表皮効果と近接効果に起因する交流抵抗が増加し、伝送効率の低下、コイルの発熱が増加する。

そこで、研究代表者は、磁性粉とシリコン樹脂とを混合した磁性コンポジット材をコイルの適切な位置に装荷（磁束経路制御技術）することで、コイルの交流抵抗の増加（表皮効果と近接効果）を抑制し、効率の増加と低発熱化を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界に先駆けて、平角導線における表皮効果と近接効果に起因する交流抵抗の増加を抑制する方法を提唱し、磁性コンポジット材を導線の適切な場所に装荷（磁束経路制御技術）することで、交流銅損を低減できることを実証した。

この技術は、ワイヤレス給電のコイルばかりでなく、産業界で多用されているコンバータのトランスの巻線にも適用可能である。

さらに、平角アルミニウム線にも有効であり、軽量化が強く望まれている、宇宙機器や航空機用モータなどへの適用が期待される。

研究成果の概要（英文）： Wireless power transmission in mobile devices requires a thin and highly efficient transmission coil. A copper foil coil pattern is used to reduce the thickness of the coil, but the AC resistance due to the skin and the proximity effects increases, the transmission efficiency decreases, and the heat generation of the coil increases.

Therefore, the principal investigator loaded a magnetic composite material, which is a mixture of magnetic powder and silicone resin, at an appropriate position on the coil. Then, the increase in the AC resistance of the coil was suppressed, and the efficiency was increased and the heat generation was reduced.

研究分野：磁気工学

キーワード：磁束経路制御技術 交流銅損 効率 発熱 表皮効果 近接効果

## 1. 研究開始当初の背景

電気機器における巻線抵抗は、直流抵抗、表皮効果に起因する抵抗、近接効果に起因する抵抗の3種類に分類される。丸線では、表皮効果に起因する交流抵抗を低減するために、導体径の小さな素線を多数本撚ったリッツ線が用いられている。丸線の近接効果に起因する交流抵抗を低減するために、研究代表者は文部科学省スーパークラスタープログラム（京都地域、「磁性めっきコイルデバイスの開発」、H25年度～H29年度）において銅線の外周に磁性粉を塗布した磁性塗布線の開発を進めてきた。磁性塗布線は、磁性粉が銅線内に侵入する磁束を減少させ（磁気シールド効果）、銅線内で生ずる電流密度の偏りを低減し、近接効果に起因する抵抗を減少できる。上述のように丸線の交流抵抗の低減技術は開発されつつあるが、フレキシブル基板コイルのように平角導線の表皮効果および近接効果に起因する交流抵抗の低減技術はない。

## 2. 研究の目的

フレキシブル基板コイルの表皮効果および近接効果に起因する交流抵抗の低減技術の確立を目的としており、ワイヤレス電力伝送コイルを対象としている。Fe系アモルファス磁性粉をシリコンに混合した磁性コンポジット材を開発し、超高周波電力用材料工学という新しい分野を確立するとともに、ISMバンド（13.56 MHz）、Qi規格（伝送周波数：110 kHz～205 kHz）におけるフレキシブル基板コイルの伝送効率の向上を実現し、幅広い伝送周波数における交流抵抗の低減技術と高効率パワーエレクトロニクスの実装を支える基盤技術の確立も目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 磁性コンポジット材の最適化

高周波対応の磁性コンポジット材では渦電流損を小さくする必要があり、磁性粉には抵抗率が大きいこと、粒子径が小さく、保磁力も小さいことが必要である。そこで、センダスト粉やカルボニル鉄粉よりも高抵抗率、低保磁力である、Fe系アモルファス磁性粉を選定した。

### (2) 磁性塗布フレキシブル基板コイルの最適化

電磁界解析ソフトウェアを用いて、磁性コンポジット材の複素比透磁率 $\mu'$ と $\mu''$ および塗布の幅と厚さが、コイルの交流低減効果に与える影響を検討し、ISMバンドおよびQi規格における最適な磁性コンポジット材の厚さと幅を求めた。次に、スクリーン印刷技術を用いてフレキシブル基板コイルに磁性コンポジット材を塗布し、コイルの交流抵抗の低減効果を評価した。

### (3) 電力伝送評価

ISMバンドおよびQi規格に準拠した送受電回路を製作して電力伝送効率、コイルの温度上昇を評価した。

## 4. 研究成果

送受電コイル間の伝送効率 $\eta_c$ は下式で与えられる。

$$\eta_c = \frac{U^2}{(1 + \sqrt{1 + U^2})} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$U = k\sqrt{Q_t Q_r}, \quad Q = \omega L / R_{ac} \quad (2)$$

ここに、 $U$ ：性能指標、 $k$ ：結合係数、 $Q_t$ ：送電コイルの $Q$ 値、 $Q_r$ ：受電コイルの $Q$ 値、 $\omega$ ：角周波数(rad/s)、 $L$ ：インダクタンス(H)、 $R_{ac}$ ：交流抵抗( $\Omega$ )

上式に示したように、コイル間効率 $\eta_c$ を大きくするためには、コイルの交流抵抗 $R_{ac}$ を小さくする必要がある。本研究では、導線の外周に磁性体を装荷することで表皮・近接効果を抑制して、交流抵抗（銅損）を低減（磁束経路制御技術）した。

### (1) ISMバンド（13.56MHz）電力伝送

図1に磁束経路制御技術（MPC）を適用した磁性塗布FPCコイル（以下FPC with MPCコイル）の構造を示した。同図(a)はコイルのパターン面であり、巻数 $N = 3$ 回巻のスパイラルコイルで、外径73 mm、内径47 mm、パターン幅3 mm、パターンの厚さ35  $\mu\text{m}$ 、巻線ピッチ2 mmである。同図(b)はコイルパターンの断面図であり、ポリイミド基材の両面に磁性コンポジット材料をキャップ幅100  $\mu\text{m}$ 、厚さ100  $\mu\text{m}$ になるように塗布している。同図(c)は引き出し線のパターン面であり、パターン幅3 mm、パターンの厚さ35  $\mu\text{m}$ である。同図(d)は引き出し線の断面図であり、同図(b)と同様にポリイミド基材の両面にキャップ幅100  $\mu\text{m}$ 、厚さ100  $\mu\text{m}$ になるように磁性コンポジット材料を塗布した。

表1に非接触給電用コイルの仕様を示した。コイルや引き出し線のパターンはいずれも同一の形状である。FPC with MPCコイルは、従来のPCBコイルと比較して、厚さが1.590 mmから

0.697 mm へと薄くなり 56 %薄型化した。また、質量についても 25.99 g から 4.55 g と軽くなり 82 %軽量化した。

表 2 に FPC コイルに塗布した磁性コンポジット材料の磁気特性を示した。磁性材料は Fe 系アモルファス合金粉であり、平均粒径 2.6 $\mu$ m の球状粉を使用した。また、バインダには 2 液性のシリコンを使用している。複素比透磁率はインピーダンスアナライザ(Agilent 4294A)とターミナルアダプタ(Agilent 4294A)および磁性材料テストフィクスチャ(Agilent 16454A)を使用して測定した。周波数 13.56 MHz における複素比透磁率実数部 $\mu'$  = 9.4、複素比透磁率虚数部 $\mu''$  = 0.06 であった。

図 2 に有限要素法 (FEM) 解析によって得られた磁性材料を塗布した FPC with MPC コイルの電流密度分布を示した。解析は ANSYS Maxwell を使用して二次元交流磁界解析によって、周波数 13.56 MHz、 $I = 1\text{ A}_{\text{max}}$  の交流電流を流したときのコイルパターン端部における電流密度分布を算出した。図 2 (a) の FPC コイルと比較して、同図 (b) の FPC with MPC コイルは電流密度の偏りが軽減した。磁性材料を銅パターン端部にキャップ状に装荷したことによって、表皮効果により生じたパターン内部へ鎖交する磁束を誘導し、電流密度の均一化に寄与している。

表 3 に伝送効率の測定結果を示した。式 (1) で示したコイルの性能指標を示す  $kQ$  積は、FPC with MPC コイルが最も高く 95.5 であった。一方、結合係数は FPC with MPC コイルが 0.36 で最も小さくなった。これは送電コイルが発生する磁束をコイルに塗布した磁性料が自己誘導して、受電コイルに鎖交する磁束が減少するためである。

図 3 に 50 W 伝送時におけるコイルの発熱を示した。発熱の測定にはサーモグラフィカメラ (FLUKE) を使用した。50 W 伝送における各コイルに流れる電流はそれぞれ、PCB コイルが 1.09A、FPC コイルが 1.00A、FPC with MPC コイルが 1.01A であり、おおむね同一の電流条件下で測定した。また、発熱は熱飽和したことを確認してから測定した。抵抗が最も小さい FPC with MPC コイルの発熱は他のコイルと比較して小さく、35.1 $^{\circ}$ C であった。コイルの銅損は抵抗に比例することから、磁束経路制御技術を適用してコイルの交流抵抗を低減することで、温度上昇を抑制できる。

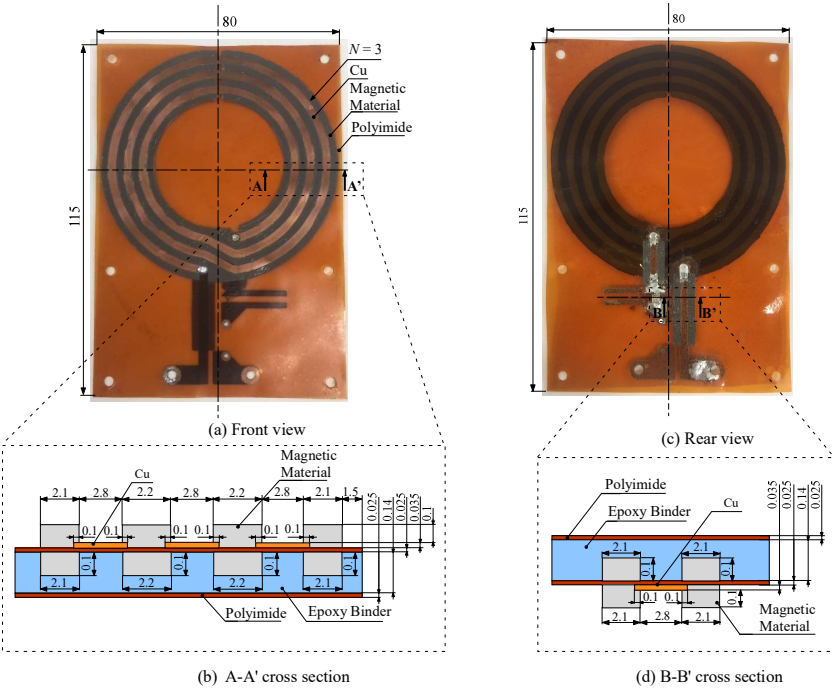


図 1 磁束経路制御技術を適用したフレキシブルコイルの構造(単位: mm)

表 1 非接触給電用コイルの仕様

| Coil         | Circuit board | Pattern thickness (mm) | Coil thickness (mm) | Mass (g) |
|--------------|---------------|------------------------|---------------------|----------|
| PCB          | Glass epoxy   | 0.035                  | 1.590               | 25.99    |
| FPC          | Polyimide     | 0.035                  | 0.149               | 1.57     |
| FPC with MPC | Polyimide     | 0.035                  | 0.697               | 4.55     |

表 2 磁性コンポジット材料の磁気特性

|                                |                                  | Amorphous metal |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Particle shape                 |                                  | Sphere          |
| Volume filling rate            |                                  | 57 Vol%         |
| Mean diameter $D_{50}$         |                                  | 2.6 $\mu$ m     |
| Saturation magnetization $B_s$ |                                  | 0.80 T          |
| Complex Permeability           | $\mu'$ ( $f=13.56\text{ MHz}$ )  | 9.4             |
|                                | $\mu''$ ( $f=13.56\text{ MHz}$ ) | 0.06            |

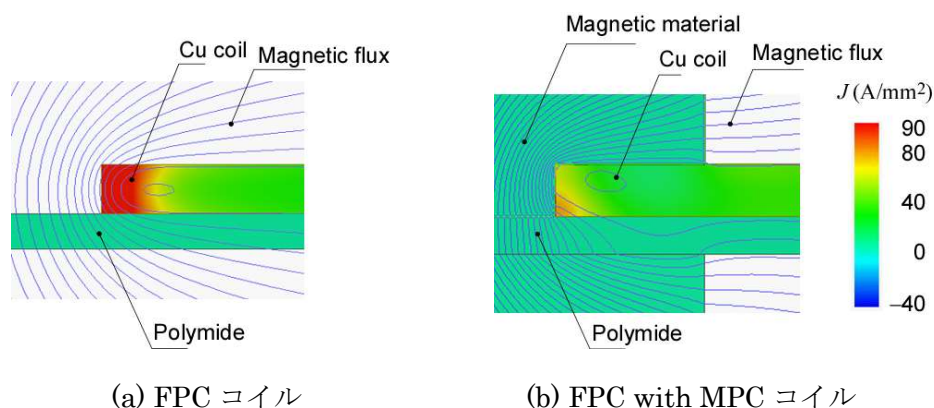
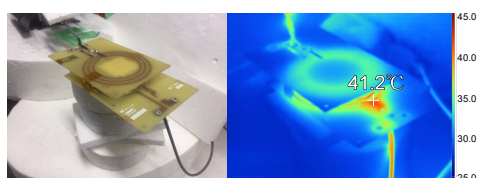


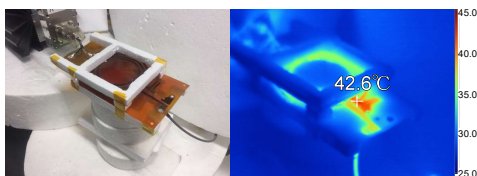
図 2 FPC コイルと FPC with コイルの電流密度分布

表 3 コイルの伝送特性

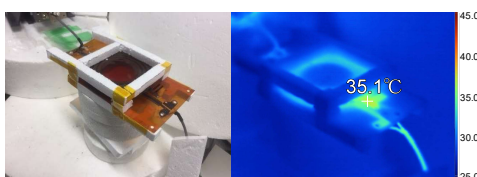
| Coil         | $k$  | $Q$ | $kQ$ | $\eta_c$ (%) |
|--------------|------|-----|------|--------------|
| PCB          | 0.45 | 211 | 94.2 | 93.7         |
| FPC          | 0.49 | 191 | 93.5 | 93.0         |
| FPC with MPC | 0.36 | 268 | 95.5 | 95.0         |



(a) PCB coil



(b) FPC coil



(c) FPC with MPC coil

図 3 50 W 伝送時におけるコイルの発熱特性  
(周波数 13.56 MHz、入力電力 50 W、伝送距離 10 mm)

## (2) Qi 規格 200 kHz 電力伝送

図 4 は、受電コイルにおける磁性コンポジット材の塗付構成である。有限要素法を用いて、磁性コンポジット材の塗付位置の検討を行って、200kHz において最も交流抵抗が小さくなる塗付位置を検討した。

図 5 は、磁性コンポジット材の有無に依存する受電コイルの抵抗一周波数特性であり、伝送周波数 200kHz における磁性コンポジット材の有無のコイル抵抗は、それぞれ、232.5 mΩ と 333.5 mΩ であり、磁性コンポジット材をコイルに塗付することで抵抗が 30% 低減した。

図 6 は、コイルの位置ずれに依存するコイル間の伝送効率であり、送電コイルと受電コイルとの中心軸が変位（位置ずれ）したときのコイル間の伝送効率を求めた。中心軸が 20mm 位置ずれした場合の磁性コンポジット材の有無による伝送効率の低下は、それぞれ、-10% と -17% であり、コンポジット材と塗付したコイルは位置ずれに強いことを示している。これは、送電コイルの磁

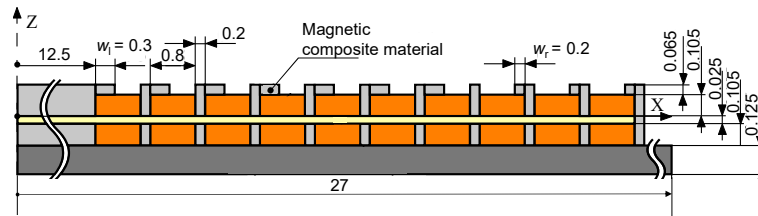


図4 受電コイルにおける磁性コンポジット材の塗付構成（単位：mm）

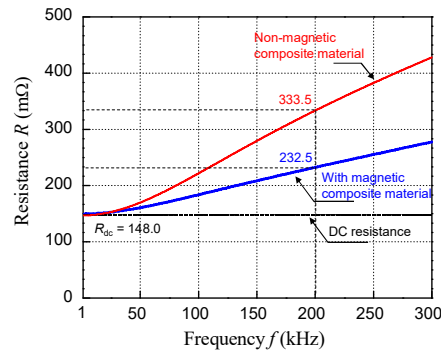


図5 磁性コンポジット材の有無に依存する受電コイルの抵抗一周波数特性

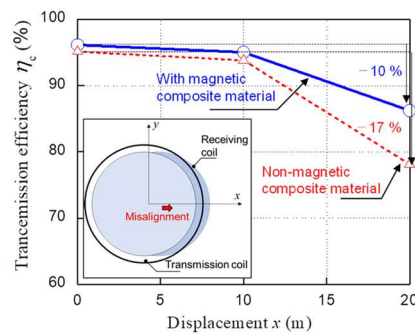
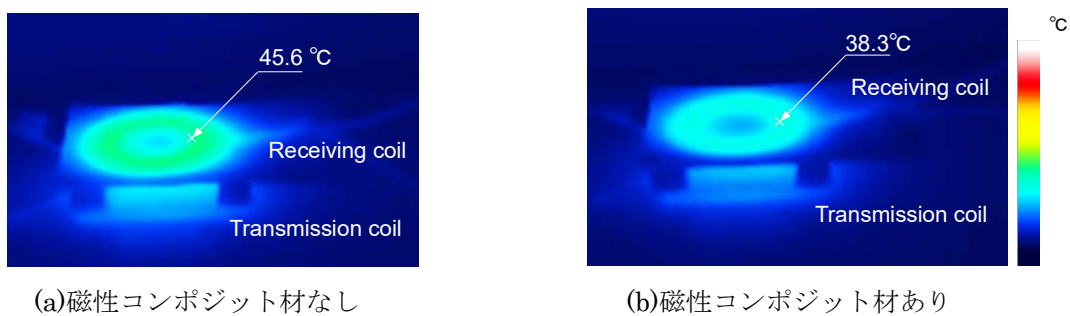


図6 コイルの位置ずれに依存するコイル間の伝送効率



(a)磁性コンポジット材なし

(b)磁性コンポジット材あり

図7 磁性コンポジット材の有無に依存するコイルの発熱特性（ $f = 200 \text{ kHz}$ ,  $P_0 = 15 \text{ W}$ ）

束を受電コイルに塗付した磁性コンポジット材が引き寄せるためである。

図7は、磁性コンポジット材の有無に依存するコイルの発熱特性で、伝送周波数 200 kHz、出力 15 W における熱画像である。磁性コンポジット材の有無による温度は、それぞれ 38.3℃と 45.6℃であり、7.3℃低減した。

上記のことから、ISM バンド（13.56 MHz）、Qi 規格（伝送周波数：110 kHz～205 kHz）における幅広い周波数範囲において、フレキシブル基板コイルの表皮効果および近接効果に起因する交流抵抗の低減技術を確立した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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<br>鳥島 健太, 志村 和太, 佐藤 光秀, 水野 勉                 | 4. 巻<br>140           |
| 2. 論文標題<br>磁束経路制御技術を用いた平角銅線の交流銅損の低減                 | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>電気学会論文誌A                                  | 6. 最初と最後の頁<br>364-371 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1541/ieejfms.140.364 | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>遠藤 俊, 前澤 拓実, 杉本 海斗, 佐藤 光秀, ト 穎剛, 水野 勉   | 4. 巻<br>28            |
| 2. 論文標題<br>磁性テープを用いたワイヤレス電力伝送向けリッツ線コイルの交流抵抗低減     | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>日本AEM学会誌                                | 6. 最初と最後の頁<br>134-139 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.14243/jsaem.28.134 | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Mitsuhide Sato, Kaito Sugimoto, Kazuma Kubota, Shun Endo, Tsutomu Mizuno                                     | 4. 巻<br>15              |
| 2. 論文標題<br>Reducing the alternating current resistance and heat generation in a single-wire coil using a magnetic tape | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Transactions on Electrical and Electronic Engineering  | 6. 最初と最後の頁<br>1541-1548 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/tee.23224  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>水野 勉                                    | 4. 巻<br>28            |
| 2. 論文標題<br>磁束経路制御技術を用いたワイヤレス電力伝送コイルの低銅損と高効率化      | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>日本AEM学会誌                                | 6. 最初と最後の頁<br>257-262 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.14243/jsaem.28.257 | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Mitsuhide Sato, Shun Endo, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno   | 4. 巻<br>16            |
| 2. 論文標題<br>Effectiveness of Magnetic Composite Material on Copper Loss Reductions and Misalignment in Copper-plate-coils for Wireless Power Transmission | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering   | 6. 最初と最後の頁<br>470-477 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/tee.23318  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Yuta Tokudaiji, Daichi Miura, Yusuke Hattori, Kohei Murasato, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno                                   | 4. 巻<br>55            |
| 2. 論文標題<br>AC Resistance Reduction of a Flexible Wireless Power Transmission Coil Using Magnetic Path Control Technology at 13.56 MHz | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Transactions, on Magnetics   | 6. 最初と最後の頁<br>8401407 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/TMAG.2019.2895239   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Daichi Miura, Yuta Tokudaiji, Kohei Murasato, Yusuke Hattori, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno   | 4. 巻<br>55            |
| 2. 論文標題<br>Investigation of Structure and Material for Back Yoke at 13.56 MHz Wireless Power Transfer Focused on High Transmission Efficiency | 5. 発行年<br>2019年       |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Transactions, on Magnetics   | 6. 最初と最後の頁<br>2801105 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/TMAG.2019.2895199   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>服部 雄介, 徳大路 悠太, 三浦 大知, 村里 康平, ト 穎剛, 水野 勉 |
| 2. 発表標題<br>磁束経路制御技術を用いた非接触給電用フレキシブルコイルの伝送効率向上の検討   |
| 3. 学会等名<br>第 31 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集         |
| 4. 発表年<br>2019年                                    |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>徳大路 悠太, 三浦 大知, 服部 雄介, 村里 康平, ト 穎剛, 水野 勉 |
| 2. 発表標題<br>磁束経路制御技術を用いた非接触給電用フレキシブルコイルの交流抵抗低減      |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会、信学技報、WPT2018-38、51-56          |
| 4. 発表年<br>2018年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>三浦 大知, 徳大路 悠太, 村里 康平, 服部 雄介, ト 穎剛, 水野 勉     |
| 2. 発表標題<br>13.56 MHz非接触電力伝送用バックヨークの高効率化に向けた構造と材質に関する検討 |
| 3. 学会等名<br>電気学会マグネティックス研究会、MAG-18-224、99-104           |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuta Tokudaiji, Daichi Miura, Yusuke Hattori, Kohei Murasato, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno                                  |
| 2. 発表標題<br>AC Resistance Reduction of a Flexible Wireless Power Transmission Coil Using Magnetic Path Control Technology at 13.56 MHz |
| 3. 学会等名<br>2019 Joint MMM-Intermag Conference、BM-08 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Daichi Miura, Yuta Tokudaiji, Yusuke Hattori, Kohei Murasato, Yinggang Bu, Tsutomu Mizuno  |
| 2. 発表標題<br>Investigation of Structure and Material for Back Yoke at 13.56 MHz Wireless Power Transfer Focused on High Transmission Efficiency |
| 3. 学会等名<br>2019 Joint MMM-Intermag Conference、BM-09 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年   |



〔図書〕 計1件

|                        |                |
|------------------------|----------------|
| 1．著者名<br>佐藤 勝昭 監修      | 4．発行年<br>2020年 |
| 2．出版社<br>株式会社R&D支援センター | 5．総ページ数<br>293 |
| 3．書名<br>基礎から学ぶ磁性材料     |                |

〔出願〕 計5件

|                                 |                   |               |
|---------------------------------|-------------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>モータ                 | 発明者<br>水野 勉、佐藤 光秀 | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2019-138421 | 出願年<br>2019年      | 国内・外国の別<br>国内 |

|   |                        |               |
|---|------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>コイルおよびコイルユニットおよび無線電力伝送装置およびコイルの製造方法 | 発明者<br>水野 勉、佐藤 光秀、ト 穎剛 | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2019-193299                 | 出願年<br>2019年           | 国内・外国の別<br>国内 |

|                                    |                        |               |
|------------------------------------|------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>磁性体被覆導線および磁性体被覆導線の製造方法 | 発明者<br>水野 勉、佐藤 光秀、ト 穎剛 | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2020-005767    | 出願年<br>2020年           | 国内・外国の別<br>国内 |

|                                 |                |               |
|---------------------------------|----------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>モータ                 | 発明者<br>水野勉、ト穎剛 | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2018-160780 | 出願年<br>2018年   | 国内・外国の別<br>国内 |

|                                 |                |               |
|---------------------------------|----------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>ワイヤレス電力伝送コイルユニット    | 発明者<br>水野勉、ト穎剛 | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2018-172049 | 出願年<br>2018年   | 国内・外国の別<br>国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

水野・佐藤研究室  
<http://mizunolab.shinshu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|