

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 27日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360113

研究課題名（和文） 磁性めっき線を用いた磁界共振形非接触エネルギー伝送の研究

研究課題名（英文） Research on Wireless Power Transfer of Magnetic Resonant Coupling Using Magnetoplated Wire

研究代表者

水野 勉（MIZUNO TSUTOMU）

信州大学・工学部・教授

研究者番号：90283233

研究成果の概要（和文）：磁界共振形非接触エネルギー伝送の伝送効率向上のためには、コイルの Q 値の向上、受信コイルの位置情報が必要である。コイルの Q 値を向上させるために、磁性めっき線を用いたコイルを検討した。従来の銅線と磁性めっき線を用いたコイルの伝送効率はそれぞれ 69.2%と 77.7%であり、磁性めっき線を用いることで 8.5%向上した。また、受信コイルの位置情報取得のために、整合回路の切り替え機能を有する磁界共振形距離センサを検討して、従来の距離センサの 1.5 倍の検出距離を達成した。

研究成果の概要（英文）：Improvement in Q value and position information of receiving coil are required for improvement in transmission efficiency of wireless power transfer of magnetic resonant coupling. To improve the Q value of coil, project leader proposes the use of magnetoplated wire. The transmission efficiencies of coils using the conventional and magnetoplated wire are 69.2% and 77.7%, respectively; thus, the efficiency of the coil using magnetoplated wire is 8.5% greater than that of the coil using conventional wire. Also, for acquisition of the position information, the leader proposes the distance sensor using magnetic resonant coupling with switching function of matching circuit and achieves 1.5 times the detection distance of conventional distance sensor.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2011年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	12,100,000	3,630,000	15,730,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気エネルギー工学(発生・変換・貯蔵、省エネルギー)・磁界共振形非接触エネルギー伝送

1. 研究開始当初の背景

数 cm の短距離を給電する電磁誘導形非接触エネルギー伝送は、1980年代から人工心臓やリニアモーター搬送の給電装置として研究開発がなされてきた。モバイル・ユビキタス

機器や電気自動車などの長距離非接触エネルギー伝送の要求が高まるなかで、2006年に長距離の非接触エネルギー伝送ができる磁界共振結合形エネルギー伝送がトリガとなって数十 cm から数 m の長距離伝送の開発が

活発になされるようになった。

磁界共振結合形の特徴として、電磁誘導形よりも電源周波数が高いことがあげられる。磁界共振結合形は数百 kHz から数十 MHz で給電を行うために、交流抵抗が増加して、銅損が増加するという問題があった。そこで、さらなる高効率化のためには交流抵抗の低減が必要である。

また、非接触エネルギー伝送の高性能化のためには、コイルの位置検出も重要な課題となっていた。

2. 研究の目的

一般的に、表皮効果に起因する交流抵抗を低減するために細い導線を多数本燃ったリッツ線が用いられる。しかし、従来のリッツ線では近接効果に起因する抵抗を低減できない。そこで、銅線(以下、COW)の周りに銅よりも透磁率および抵抗率の高い磁性薄膜をめっきした磁性めっき線(以下、MPW)を用いることを提案してきた。MPW は銅よりも透磁率および抵抗率が高い磁性薄膜に交流磁界が通過するために、COW と比較して導線内で生ずる渦電流損を低減できる。研究代表者はこれまでに、渦電流形変位センサや DC-DC コンバータの高周波トランスに MPW 用いることで、MPW の有用性を実証してきた。

本研究の目的は、磁界共振結合形非接触エネルギー伝送のコイルに MPW を用いたリッツ線を適用して、現状よりも高効率化・小形化、さらにコイルの位置を検出できることを、理論的および実験的に実証することにある。

3. 研究の方法

(1) MPW を用いた磁界共振結合形非接触エネルギー伝送

図 1 に磁界共振結合形非接触エネルギー伝送の等価回路を示した。磁界共振結合形非接触エネルギー伝送の効率特性を把握するために、エネルギー伝送装置を試作して、インピーダンスおよび効率特性を測定した。また、有限要素法(FEM)解析を用いてコイルのインピーダンスおよび相互インダクタンスの計算を行った。さらに、図 1 に基づいて、伝送効率 η_{21} と反射効率 η_{11} の理論式を導出して、実測値と計算値との比較を行った。

次に、MPW の有用性を確認するために、磁界共振結合形非接触エネルギー伝送に COW と MPW のコイルを用いて、伝送効率の比較を行った。

図 2 に COW と MPW の構造を示した。MPW は銅の周りに Fe 薄膜をめっきしたものを用いた。Fe 薄膜の外側の Ni 薄膜は半田付けを容易にするためのものである。なお、表皮効果に起因する抵抗を抑制するために、細い COW を多数本燃ったリッツ線(LCW)と細い MPW を多数本燃ったリッツ線(LMW)を用いて、実測

と計算の両面から検討を行った。

さらに、LMW を用いた磁界共振結合形非接触エネルギー伝送のさらなる高効率化のために、整合回路の検討を行った。また、実測値と FEM 解析の計算値との比較を行った。

図 3 に整合回路を挿入した場合の等価回路を示した。図 3 の等価回路から、整合回路を挿入した場合の伝送効率 η_{21} と反射効率 η_{11} およびインピーダンス整合の理論式を導出して、実測値と計算値との比較を行った。

(2) 体内ロボット用非接触エネルギー伝送

身体に与える負担の少ない医療機器としてカプセル内視鏡等の体内ロボットの研究が盛んにおこなわれている。現行のカプセル内視鏡はボタン電池を用いて電力供給を行っている。しかし、ボタン電池がカプセル内視鏡の体積の半分を占めており、小形化の障害となっている。また、電池駆動方式では駆動に必要なとされる 30 mW 以上の電力を長時間供給することが難しい。そのために、非接触で体

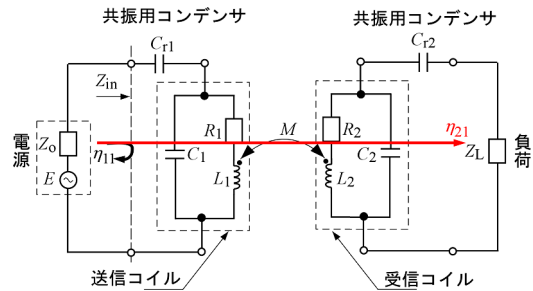


図 1 磁界共振結合形非接触エネルギー伝送の等価回路

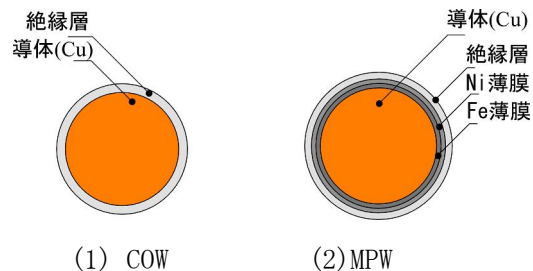


図 2 導線の構造

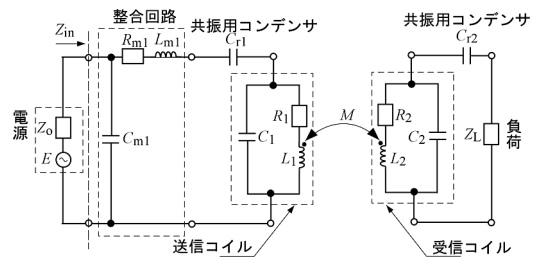


図 3 整合回路挿入時の磁界共振結合形非接触エネルギー伝送の等価回路

内ロボットに給電する方法が検討されている。しかし、体内ロボット内の受信コイルが小さいために必要な電力を供給することが困難である。

そこで、同形状のコイルであっても、伝送効率が向上する LMW を用いた磁界共振結合効率の評価を行った。図 4 に体内ロボット用非接触エネルギー伝送のモデルと実際に製作した装置の等価回路を示した。

(3) 磁界共振結合形距離センサ

磁界共振結合形非接触エネルギー伝送において、各位置に応じて最適な伝送制御を行うことは、省エネや伝送の安全性の観点からして非常に重要である。そのためには、受信コイルの位置を検出するセンサ等が必要である。しかし、光学式センサや超音波センサなどを用いた場合には、高コスト・装置の大形化などにつながる。そこで、エネルギー伝送に用いる 1 対のコイルを用いて位置検出も行う方法が必要となるために、磁界共振結合形距離センサの検討を行った。

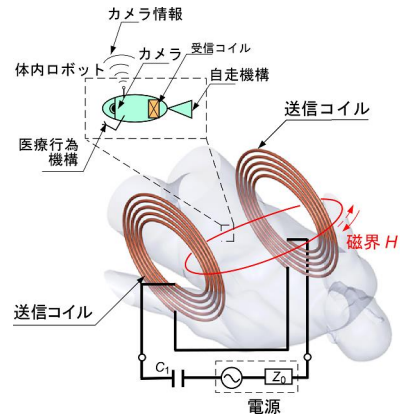
図 5 に磁界共振結合形距離センサの構成を示した。図 5 に示した距離センサは検出距離によって変化する入力インピーダンス Z_{in} を、ブリッジ回路を用いて出力電圧 V_o に変換して検出を行う。長距離検出・高精度のために、整合回路の切り替え機能を有する距離センサを提案して、整合の有無における出力電圧特性を測定した。FEM 解析を用いてコイルのインピーダンスおよび相互インダクタンスを算出して、図 5 に基づいて Z_{in} や V_o の理論式を導出して、 V_o の実測値と計算値との比較を行った。

4. 研究成果

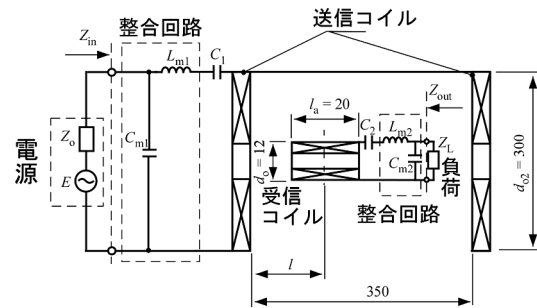
(1) MPW を用いた磁界共振結合形非接触エネルギー伝送

磁界共振結合形非接触エネルギー伝送の効率特性の検討を行った。導体径 1.2 mm の COW を用いて、コイル内径 300 mm、巻数 8 回、密巻のソレノイドコイルを作成した。送受信コイルに同一形状のコイルを用いて伝送効率を測定した。図 6 に示したように、理論式の計算誤差が 5% 以下であることを実験によって確認した(雑誌論文④)。

次に、MPW を用いた磁界共振結合形非接触給電の効率特性の検討を行った。導体径 100 μm の COW を 8 本撚った LCW と導体径 100 μm 、Fe 薄膜の厚さ 0.9 μm 、Ni 薄膜の厚さ 0.05 μm の MPW を 8 本撚った LMW をそれぞれ用いて、コイル内径 37 mm、巻数 10 回、密巻のスパイラルコイルを作成して、インピーダンス特性および効率特性の比較を行った。周波数 6 MHz において、LMW と LCW コイルの Q 値の実測値はそれぞれ 187 と 98 であり、LMW は 1.9 倍に Q 値が向上した。さらに、図 7 に示したよう



(1) コンセプト



(2) 伝送装置のモデル

図 4 体内ロボット用磁界共振結合形非接触エネルギー伝送

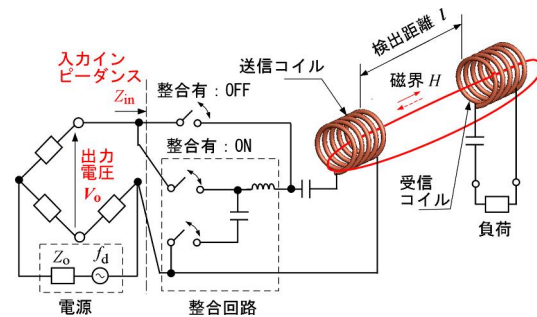


図 5 整合回路の切り替え機能を有する磁界共振結合形距離センサの構成

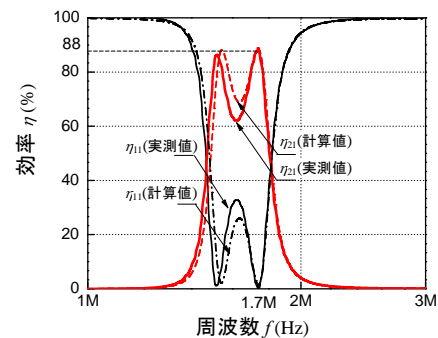


図 6 磁界共振結合形非接触エネルギー伝送の効率-周波数特性 ($l = 100 \text{ mm}$)

に、伝送距離 10 mm における伝送効率はそれぞれ 94.3%と 89.8%であり、4.5%向上した(雑誌論文③)。

さらに、導体径 80 μm 、Fe 薄膜の厚さ 0.9 μm 、Ni 薄膜の厚さ 0.05 μm の MPW を 15 本撚った LMW を用いて、コイル内径 36 mm、巻数 10 回、密巻の 2 並列巻きスパイラルコイルを作成した。送受信コイルに同形状のコイルを用いて、整合回路なしとありの伝送効率を測定した。図 8 に、伝送距離 20 mm における整合の有無に依存する伝送効率を示した。整合無と有の伝送効率の最大値はそれぞれ、28.2%と 82.5%であり、整合回路を挿入することで 54.3%向上した。また、実測値と計算値との差は 5%以下であることを確認した。さらに、同距離における整合回路ありの LCW を用いたコイルの最大効率は 73.1%であり、LMW を用いることで 9.4%向上した(学会発表⑥)。

(2) 体内ロボット用非接触エネルギー伝送

図 4 に示した伝送装置を作成して、効率-距離特性を測定した。送信コイルに、導体径 70 μm の COW と導体径 70 μm 、Fe 薄膜の厚さ 0.6 μm 、Ni 薄膜の厚さ 0.05 μm の MPW をそれぞれ 2000 本撚った LCW と LMW を用いて、外長径 400 mm、外短径 300 mm、巻数 10 回、巻線ピッチ 12 mm の楕円形スパイラルコイルを作成した。また、受信コイルに、上記と同じ COW と MPW をそれぞれ 40 本撚った LCW と LMW を用いて、外径 12 mm、内径 10 mm、一層 23 回巻、巻線ピッチ 0.9 mm の二層巻スパイラルコイルを作成した。なお、結合係数向上を目的として 5 mm \times 10 mm のフェライトコアを挿入した。最も送信コイルから遠くなる伝送距離 $l = 175$ mm において両側整合となるように整合回路の回路定数を定めて、送信コイルと受信コイルの中心軸が同一直線状になるように伝送効率測定を行った。図 9 に伝送効率-距離特性を示した。 $l = 175$ mm における LMW と LCW コイルの最大伝送効率はそれぞれ 5%と 3.6%であり、LMW コイルで 1.4%向上した。 $l = 20$ mm 付近において LMW と LCW コイルの伝送効率の差が見られなかった。これは整合回路の問題であり、 $l = 20$ mm 付近で整合する回路定数にすることで LMW コイルの伝送効率が LCW コイルの効率よりも高くなる(学会発表④、⑤)。

以上、(1)および(2)の結果より、磁界共振結合形非接触エネルギー伝送に MPW を用いることで伝送効率が向上することを明らかにした。MPW を用いることで、省エネや伝送距離の長距離化に大きく影響を与え、今後期待されている家電製品や電気自動車への非接触エネルギー伝送の実用化に大きく貢献できよう。また、体内ロボットへのエネルギー伝送は、電磁界が人体に与える影響を考慮する必要がある、伝送効率の数%の向上が非常

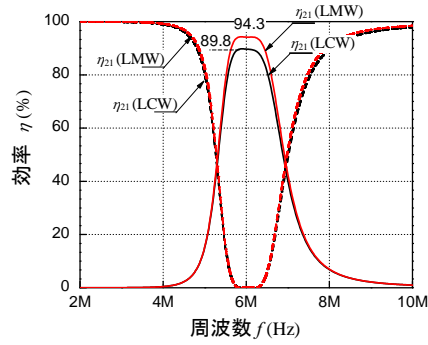
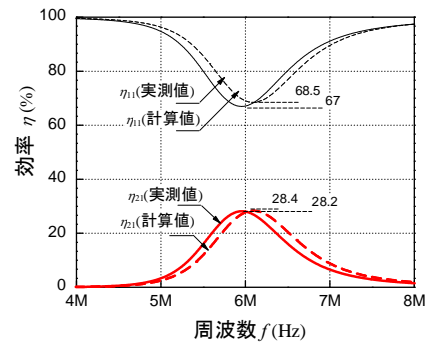
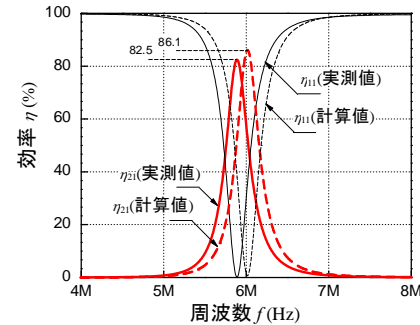


図 7 LCW と LMW コイルの効率-周波数特性



(1) 整合無し



(2) 整合有

図 8 整合の有無に依存する LMW コイルの効率-周波数特性

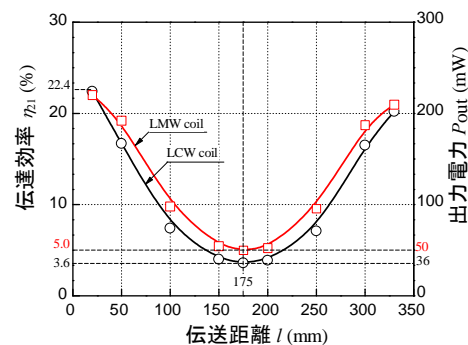
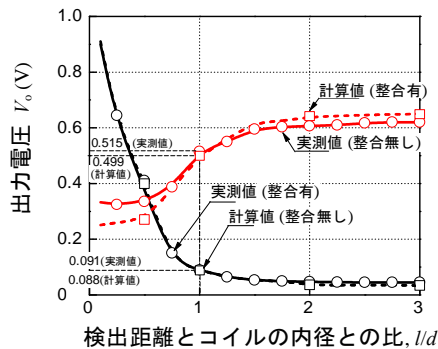


図 9 体内ロボット用非接触エネルギー伝送の伝送効率-距離特性

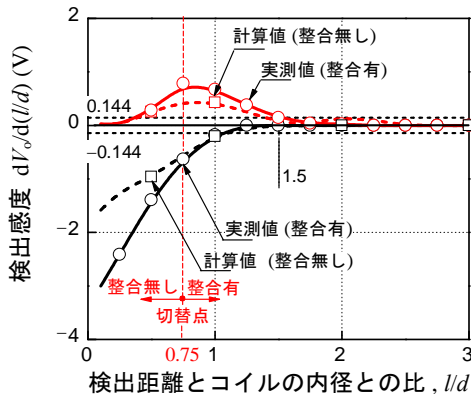
に重要になるために、MPW の必要性がますます高くなるであろう。

(3) 磁界共振結合形距離センサ

図5に示した距離センサを製作して評価した。導体径 $450\ \mu\text{m}$ のCOWを用いて、内径 $d = 36\ \text{mm}$ 、巻数8回、密巻のソレノイドコイルを作成した。送受信コイルには同形状のコイルを用いて、 $13.56\ \text{MHz}$ でコイルが共振するように共振用コンデンサを定め、整合回路は検出距離 $l = 36\ \text{mm}$ ($l/d = 1$) で整合されるように回路定数を定めた。図10に出力電圧-距離特性を示した。同図(b)は同図(a)の実測値と計算値を6次の多項式で近似して、その多項式を微分して算出したものである。1 mmあたりの電圧 $4\ \text{mV/mm}$ を分解能として考えて、 $0.144\ \text{V}(l/d)$ を閾値とした。整合無と有の距離センサはそれぞれ $l/d = 0$ から1と $l/d = 0.5$ から1.5の範囲を測定できるために、整合を切り替えることで $l/d = 0$ から1.5まで検出が可能となる。また、計算誤差は4%以下であることが確認できた。以上より、本距離センサは整合回路の有無を切り替えることで、検出範囲を従来の1.5倍検出距離を拡大することができた(雑誌論文②)。



(1) 出力電圧



(2) 検出感度

図10 整合回路の切り替え機能を有する距離センサの出力電圧-距離特性

以上より、本距離センサの有用性を明らかにした。今後期待されるモバイル機器や電気自動車へのエネルギー伝送を考えた場合には受信コイルの位置情報は必須である。エネルギー伝送に用いる1対のコイルだけで、エネルギー伝送と位置検出を行うことで、エネルギー伝送システムを低コスト、小形化、高性能化することができる。今後は、実際にエネルギー伝送と位置検出を1対のコイルだけで行う位置検出機能を有する非接触エネルギー伝送の開発を行う。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

① 水野 勉, 谷内 慎太郎, 上田 拓人, 大友 隆平, 後藤 徳仁: 磁性めっき線を用いた磁界共振形非接触給電システム, 日本AEM学会誌, 採録決定, 査読有

② 水野 勉, 前田 庸宏, 雨宮 永宜, 橋本 静香: 整合回路の切り替え機能を有する磁界共振結合を用いた距離センサの検出範囲, 日本AEM学会誌, 採録決定, 査読有

③ Tsutomu Mizuno, Shintaro Yachi, Akira Kamiya and Daisuke Yamamoto: Improvement in efficiency of wireless power transfer of magnetic resonant coupling using magnetoplaed wire, IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, Vol. 47, No. 10, pp. 4445-4448, 2011. 査読有

④ 水野 勉, 神谷 旭, 山本 大輔, 谷内 慎太郎: 磁界共振結合を用いた非接触給電の効率の理論式, 日本AEM学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 153-158, 2011. 査読有

⑤ 水野 勉, 神谷 旭, 志村 祐介, 飯田 和剛, 山本 大輔, 宮尾 直樹, 笹平 秀昭: リッツ線の素線数が交流抵抗に与える影響に関する検討, 日本AEM学会誌, Vol. 18, No. 3, pp. 300-305, 2010. 査読有

⑥ 水野 勉, 飯田 和剛, 神谷 旭, 山本 大輔, 藤松 拓也: 磁性めっき線を用いた空心トランスの交流抵抗と効率, 日本AEM学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 130-135, 2010. 査読有

⑦ 水野 勉, 神谷 旭, 飯田 和剛, 志村 祐介, 山本 大輔, 藤松 拓也, 池田 千里, 笹平 秀昭: 磁性めっき線を用いた空心コイルの交流抵抗, 日本磁気学会誌, Vol. 34, No. 3, pp. 401-406, 2010. 査読有

[学会発表] (計8件)

- ① 水野 勉, 後藤 徳仁, 谷内 慎太郎, 上田 拓人, 大友 隆平, 西山 昌宏, 武藤 龍: 三軸受信コイルを用いた体内ロボット用給電, 電気学会リニアドライブ研究会, 2012. 11. 15. (東京)
- ② T. Mizuno, T. Ueda, S. Yachi, R. Ohtomo and Y. Goto: Efficiency dependence on wire type for wireless power transfer of magnetic resonant coupling, The 15th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2012, 2012. 10. 22. (Sapporo)
- ③ 水野 勉, 雨宮 永宜, 前田 庸宏, 橋元 静香: 整合回路の切り替え機能を有する磁界共振結合を用いた距離センサの提案, 電気学会マグネティクス研究会, 2012. 9. 25. (仙台)
- ④ 水野 勉, 後藤 徳仁, 谷内 慎太郎, 上田 拓人, 大友 隆平: 磁性めっき線を用いた磁界共振結合形体内ロボット用非接触給電システムの効率向上の検討, 第24回「男児力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2012. 5. 17. (富山)
- ⑤ Tutomu Mizuno, Yoshihito Goto, Shintaro Yachi, Takuto Ueda, Ryuhei Ohtomo: Wireless Power Transfer, System of Magnetic Resonant Coupling for Robots inside the Body, International Magnetism Conference 2012, 2012. 5. 11. (Vancouver)
- ⑥ 水野 勉, 谷内 慎太郎, 上田 拓人, 大友隆平, 後藤 徳仁: 磁性めっき線を用いた磁界共振結合形非接触給電の効率の向上, 電気学会マグネティクス リニアドライブ合同研究会, 2012. 2. 21. (金沢)
- ⑦ 水野 勉, 神谷 旭, 山本 大輔, 谷内 慎太郎: 磁性めっき線を用いた磁界共振結合形非接触給電の効率向上, 電気学会 半導体電力変換研究会, 2011. 1. 22. (兵庫)
- ⑧ 水野 勉, 神谷 旭, 山本 大輔, 谷内 慎太郎: 磁界共振結合をもちいた非接触給電の効率の理論式, 第19回 電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス, 2010. 11. 23. (北海道)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: コイルの交流抵抗計算方法
発明者: 水野勉

権利者: 信州大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-053697

出願年月日: 平成 23 年 3 月 11 日

国内外の別: 国内

名称: 整合回路の切り替え機能を有する磁界共振を用いた距離センサ

発明者: 水野勉、雨宮永宜

権利者: 信州大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-203990

出願年月日: 平成 24 年 9 月 18 日

国内外の別: 国内

[その他]

水野・ト研究室ホームページ

<http://mizunolab.shinshu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 勉 (MIZUNO TSUTOMU)

信州大学・工学部・教授

研究者番号: 90283233

(2) 研究分担者

脇若 弘之 (WAKIWAKA HIROYUKI)

信州大学・工学部・教授

研究者番号: 50240461