

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K12043

研究課題名(和文)共振結合型無線電力伝送方式による体内埋め込み医療機器への電力供給の実証研究

研究課題名(英文) Research on power supply to implantable medical devices by resonance-coupled wireless power transmission

研究代表者

島谷 祐一 (SHIMATANI, YUICHI)

東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：20154263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、体内完全埋め込み型医療機器への電源供給に用いられる「磁気共鳴型無線電力伝送」の共振周波数同調方法を新たに考案し、その理論に基づき実証実験を行うものである。体内では受信側の共振周波数が変化するため再同調を行う必要があるが、コイルの位置が体動で常に変化するため従来の同調方法を用いることが困難である。この問題を解決するために「受信側出力電圧推定方式」、「送信側電流ピーク検出方式」という2つの方法を考案した。さらにこの理論に基づき同調装置を試作し、ファントムとラット体内に埋め込んで、理論どおりの動作を確認した。その結果、提案した方法が、実際の電力伝送において利用可能であることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で完成した2つの新しい同調方式の理論とその動作実証の成功は、体内埋め込み医療機器への無線電力伝送方式として有力とされながら実用化が遅れていた磁気共振結合型電力伝送方式の問題点の一つを解決し、従来の方法より効率的に電力伝送を行う方法として利用可能であることを示している。これによって、体内埋め込み機器の利用者のQOLが向上することが期待される。また、本研究で確立した同調方式は、体内埋め込み機器以外にも広く応用が可能である。より多くの場面において磁気共鳴結合型無線電力伝送の導入が容易になると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, we devise a new resonance frequency tuning method for "magnetic resonance wireless power transmission" used to supply power to a completely implantable medical device, and conduct a demonstration experiment based on that theory. Since the resonance frequency of the implanted receiver circuit changes in the body, it is necessary to retuning resonant frequency. However, it is difficult to use the conventional tuning method because the position of the coil constantly changes due to body movement. To solve this problem, we devised two methods, "reception side output voltage estimation method" and "transmission side current peak detection method". Furthermore, based on this theory, a prototype tuning device was made and implanted in the biological phantom and the rat body, and the operation according to the theory was confirmed. As a result, it was proved that the proposed method can be used in actual power transmission.

研究分野：生体医工学、神経生理学、感覚生理学、生物学

キーワード：無線電力伝送 磁界共鳴方式 体内埋め込み 同調回路 伝送効率

## 1. 研究開始当初の背景

体内埋め込み医療機器を設計開発する際に常に問題となるのは、体内の電子回路に電力を供給する方法である[1]。埋め込み機器の電源は以前は皮膚に露出したソケットに外部電源を接続するものもあったが、引き抜き事故や感染症防止などの安全性の問題から近年では装置を完全埋め込み型として電池で駆動する方法が主流となった。しかし定期的な電池交換手術は利用者にとって大きな負担となる。このため充電電池を用い体外から無線電力伝送によって充電を行う方式が研究・開発されている。無線電力伝送の方式は従来電磁誘導方式が一般的であるが、この方式には欠点もある。一つは送受信コイルを密着する必要があるため受信コイルを皮下に埋め込む必要があり、体内深部に埋め込めないという問題、さらに送信コイルを皮膚に貼り付けて受信コイル上に正確に配置し続ける必要があるため、充電中の利用者は長時間自由な行動を奪われQOLが低下するという問題である。このような欠点を解決するために「共振結合型無線電力伝送方式」を体内埋め込み機器に応用する研究が行われている[2, 3]。この方式は送受信コイルを密着させる必要がなく、コイル間の距離と向きが変動しても安定して電力を送ることができる。これは体内深部に埋め込まれ体動で常に位置が変化するような装置にとっては最適な方法である。しかしこの方法を実用化するにはまだ問題がある。それは受信コイルを体内に埋め込むと、コイル線間の浮遊容量によって受信側共振周波数が設計値からずれたり、時間と共に変化したりするといった問題である。このため、埋め込んだ後にその共振周波数変化に応じて送受信間の共振周波数を再同調させる仕組みが必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目的は、体内に埋め込む小電力の医療機器に対し共振結合型無線電力伝送方式を用いて電力を供給する技術を確立することである。そのためには上述のように、電力の送受信回路間において、共振周波数の同調を行う仕組みを考案し、実証しなくてはならない。同調方法としては、送信周波数を変えながら出力電圧がピークになる点を探索するピーク探索法を用いるのが一番簡単ではあるが、この方法は体動等で常に送受信コイル間の角度や距離が変化し、結合係数が変動する埋め込み機器への応用には適していない。このため、この方法に代わる新しい同調理論が必要となってくる。そこで本研究では、まず同調を行うための新しい理論を提案確立したのち、それを実現するための具体的な回路設計と、回路の各パラメータを決定するための実測実験を行う。さらにはその設計に基づき実際に送受信機器を作成し、体内を模した生体ファントムや、ラット体内への受信回路埋め込みによって、その同調動作を確認する段階までの実現を到達目標として研究を進める。なお、申請時点においては、すでに構築を始めていた「受信側出力観察法」による同調理論に基づき研究を進める予定であったが、研究の進展とともに新たに「送信側電流観察法」による同調方法のアイデアを得て、その理論構築と実証も目的に加えることにした。すなわち2つの同調方法を並行して研究を行なった。

## 3. 研究の方法

### (1)理論構築

同調理論の構築は、純粋な算術計算を用いた回路解析による関係式の導出と回路シミュレーションによる動作確認によって行なった。回路シミュレーションにはLTSpiceを用いた。

### (2)送受信コイル

埋め込んだ受信コイルの実効インダクタンスの変化は、受信コイル周辺の体液や組織の影響で発生する受信コイルの線間容量によるものであるが、どの程度の容量が発生し、それが経時的にどう変化するかは、実際に受信コイルを生体ファントムや実験動物体内に埋め込んでみないと判明しない。そこで、本研究では受信コイルのサイズをラット腹腔内に埋め込み可能な、外径24mmの一層スパイラルコイルとし、直径0.2mmのマグネットワイヤを用いて作成した。巻き数は50とした。送信コイルには表皮効果を抑えるためにリッツ線を巻き、巻き数30、直径70mmのスパイラルコイルを作成した。

### (3)生体等価ファントム

生体等価ファントムを用いた実験では生理食塩水(0.9%NaCl水溶液)を用い、体液(間質液)の代わりとした。また、一部の実験では生理食塩水を寒天で固めた生体等価ファントムを用いた。寒天ファントムを用いた実験では、温度を上げて寒天を溶かした状態で受信コイルを溶液中に位置固定し、その後温度を下げて寒天を固めることによって受信コイルの埋め込みを行なった。

### (4)動物実験

受信コイルのラット体内埋め込みは、三種混合麻酔薬による深い麻酔化で外科手術により行なった。動物実験に際しては東京都市大学動物実験委員会が定める動物実験規定に従い、3Rに十分配慮しながら実施した。腹腔内あるいは皮下に埋め込んだ受信コイルからのリード線を頭蓋骨に固定したソケットに接続した。体内における受信コイルの実効インダクタンスの測定は、このソケットを介して体内コイル両端を外部のLCRメータ(HIOKI IM3536)に接続し測定した。

測定は麻酔下で、手術直後、手術後2週間までは毎日、その後は1週間おきに、埋め込み3ヶ月後のエンドポイントまで測定を行なった。エンドポイント後の安楽死処分はペントバルビタールナトリウムの腹腔内過剰投与によって行なった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 同調理論

今回研究の対象とした磁気共振結合型無線電力伝送方式は、図1の回路に示すように、送・受信回路にRLC直列共振回路を用いたものである。両共振回路は結合係数kによって磁気結合する。送・受信回路の同調とは、両回路の共振周波数を一致させることをいう。なお、この回路はT型等価回路によって置き換えることが可能で、以下の同調理論の説明はすべてT型等価回路を用いて展開している。

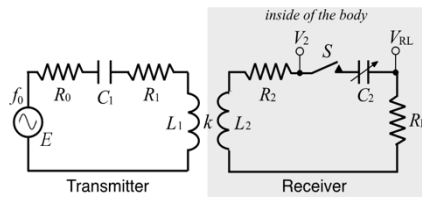


図1 磁気共振結合回路

##### ① 受信側出力電圧推定方式

本研究を始める段階で考えていた同調方法は受信側の共振周波数を変化させるこちらの方法である。研究開始後に理論展開を進め、以下のように同調理論をまとめることができた。すなわち、図2のように受信側共振回路にスイッチを設け、回路の開閉をおこなう。このとき回路開放時の受信コイル両端電圧V<sub>2</sub>と、回路閉鎖時の負荷抵抗両端電圧V<sub>RL</sub>を測定すると、送・受信回路の共振周波数が一致した時に等式(1)が成立する。すなわち、送・受信回路の同調を行うには、受信側の共振用コンデンサC<sub>2</sub>の値を変化させながらV<sub>2</sub>、V<sub>RL</sub>両電圧の絶対値(振幅)を測定し、式(1)が成り立つ点を特定すれば良いことになる。あるいは、送信側の共振状態を保ったまま送信周波数を変化させて同様の電圧測定を行なっても良いが、この場合は電源周波数とC<sub>1</sub>の値を同時に変化させる必要がある。本方式の最大の特徴は、式(1)に示されるように、結合係数、インダクタンス、送信周波数に関係なく、スイッチ開放時の受信コイル両端電圧|V<sub>2</sub>|から同調時の負荷抵抗電圧|V<sub>RL</sub>|を推測できることである。したがって、体内埋め込み型医療機器において、体動による結合係数の変動が起きる条件下でも同調時負荷抵抗電圧|V<sub>RL</sub>|を推測し同調を行うことができる。

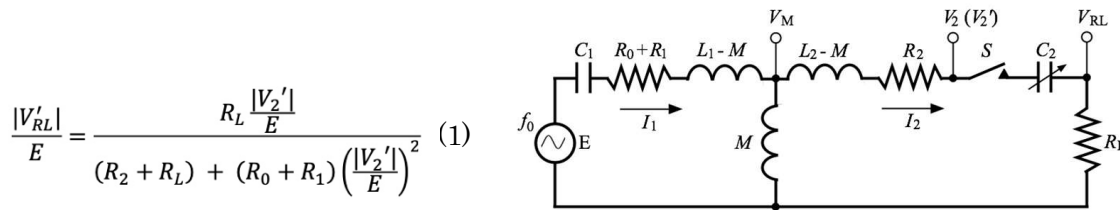


図2 受信側出力電圧推定方式

$$\frac{|V_{RL}'|}{E} = \frac{R_L \frac{|V_2'|}{E}}{(R_2 + R_L) + (R_0 + R_1) \left(\frac{|V_2'|}{E}\right)^2} \quad (1)$$

##### ② 送信側電流ピーク検出方式

この方式は本研究が開始された後に得たアイデアで、申請時の研究計画には含まれていなかったが、受信側出力電圧推定方式にはない利点があるため研究計画に加えることにした。本方式は磁界調相結合における送信側インピーダンスの変化に着目した方法で、図3のように送信側の共振用コンデンサC<sub>1</sub>を抵抗R<sub>t</sub>に置き換え、R<sub>t</sub>の両端電圧を測定することで送信回路の電流を観察する。このためR<sub>t</sub>はなるべく小さな値とすることが必要である。送信周波数を変化させながらV<sub>Rt</sub>を観察すると、図4にみられるように、受信回路の共振周波数付近でV<sub>Rt</sub>が大きく変化する現象がみられる。このうち正のピークは反共振周波数で、負のピークが共振周波数である。送信周波数を連続的に変化させながらこのピークの生じる特異点を検出することで、送・受信回路の同調が可能となる。なお、受信側出力電圧推定方式同様に受信側にスイッチを2つ設置する。このうちS<sub>1</sub>は受信側共振用コンデンサの両端を短絡するもので、開放時の送信回路V<sub>Rt</sub>曲線と閉鎖時のV<sub>Rt</sub>曲線の差をとることで、ピークの検出を容易にする。また、ピーク値をなる

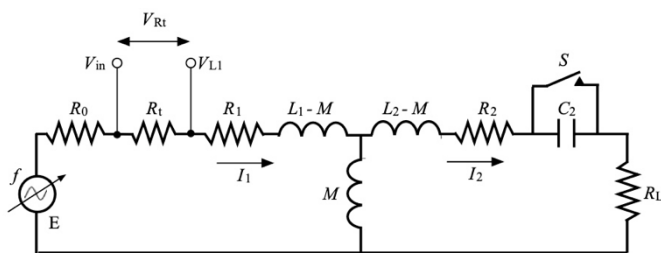


図3 送信側電流ピーク検出方式

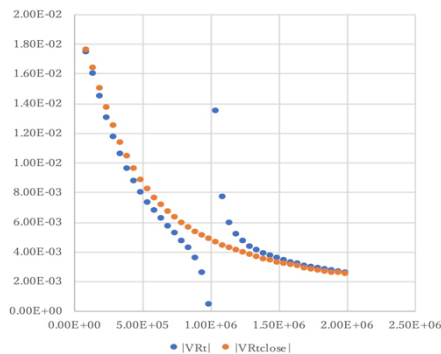


図4 送信側電流

べく大きくして検出を容易にするために、同調動作時には S2 を閉じて受信側負荷抵抗の値を 0 とする。この方法は受信側に可変コンデンサを設置する必要がなく、受信回路側の電圧情報を体外に送信して伝える必要もない。このため受信回路側の同調装置は①の方法よりもずっと単純で、受信装置の小型化も容易であるという利点を持つ。

## (2) パラメータ決定

### ① 体内環境における実効インダクタンス

以上のような同調回路を実働可能な装置として設計し試作するためには、実際に体内環境において受信コイルの実効インダクタンスがどのような範囲で変動するかを知らなくてはならない。そこで受信コイルを生体ファントムやラットの体内に埋め込んで、実効インダクタンスの測定を行なった。その結果、空中のコイルインダクタンスの周波数特性曲線に比べ、体内環境中では低周波数領域で受信コイルが自己共振を起こすことが判明した。これは電解質溶液である体液の影響で、受信コイルの線間に大きな浮遊容量が発生するためであると思われる。このため、電力の送信周波数は自己共振周波数よりも低い 1MHz に決定して受信回路を設計することにした。また、この周波数における実効インダクタンスの上昇分と、ラット腹腔内への受信コイルの長期埋め込みで測定された経時的な実効インダクタンスの変化を踏まえて、受信側共振用コイルの可変範囲の決定を行なった。

### ② 等価回路の最適化

しかし、ここで一つ問題点が判明した。体内に埋め込まれた受信コイルの等価回路を従来提案されている寄生容量を含む等価回路(図 5(a))で置き換えると、理論値と実測値の間に差異が生じてしまいカーブフィッティングがうまくいかない。そこで、より正確な等価回路を得るべく、いくつかの回路を試した結果、図 5(b)に示すような等価回路で、実効インダクタンスおよび cole-cole プロットの実測値と正確に一致したカーブフィッティングが得られることがわかった。なお、この等価回路に含まれる抵抗  $R_c$  は体液の溶液抵抗であると解釈される。したがって、体内受信回路の設計はこの新しい等価回路を用いて行うことが適切であると思われる。

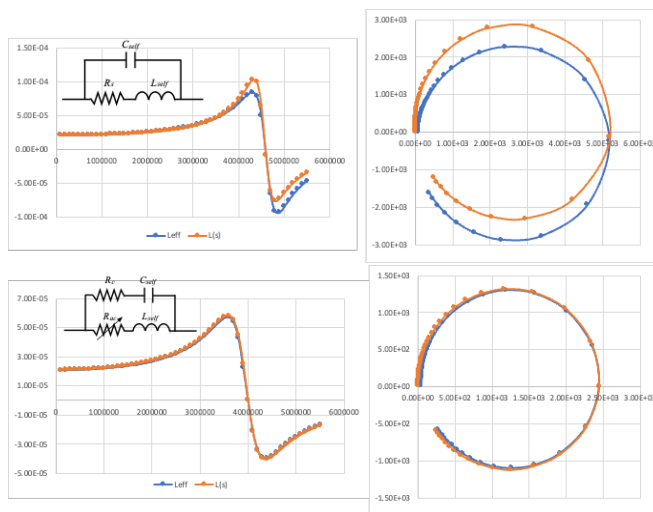


図 5 コイルの体内等価回路 (a) 従来回路, (b) 提案回路

## (3) 装置の設計と試作

決定したパラメータに基づき回路を設計し、試作した。送信および受信回路に設置する各スイッチには、低抵抗値のアナログスイッチを用いた。受信側出力電圧推定方式における受信回路の可変コンデンサは、コンデンサアレイとアナログスイッチを組み合わせたデジタル可変コンデンサを自作し、コンピュータプログラムでアナログスイッチを制御して可変動作を行うようにした(図 6)。送信側電源にはファンクションジェネレータと超低内部抵抗の高速バイポーラ電源(NF 回路ブロック, HSA4101)を用いた。送信側電流ピーク検出方式における送信周波数の変更は、ファンクションジェネレータをコンピュータプログラムで制御して行なった。なお、この報告書の作成時点では当初の最終到達目標である、受信回路の小型化によるラット体内への完全埋め込みまでは達成することができていない。このため、同調装置は体外設置とし、頭蓋骨に固定したソケットを介して体内に埋め込んだ受信回路に接続して動作確認を行なった。

## (4) 試作回路による動作確認

### ① 受信側出力電圧推定方式

受信コイルをラット体内に埋め込んで、実際に同調を行なったときの結果を図 7 に示す。同調周波数付近で周波数を変化させながら、受信コイルの回路開放時両端電圧  $|V_2'|$ 、上述の式(1)によって算出された共振時の出力電圧の推定値  $|V_{RL}'|$ 、出力電圧の実測値  $|V_{RL}|$  の結果を比較したものである。また、送・受信コイル間の距離を変えて異なる結合係数の条件で測定したグラフが示

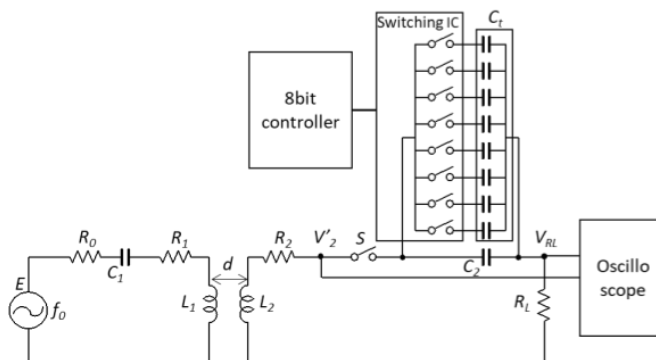


図 6 受信側出力電圧推定方式 可変コンデンサ

されている。結合係数が変化しても  $|V_2'|$  から推測される  $|V_{RL}'|$  に実測値  $|V_{RL}|$  が一致する周波数を特定すれば、同調周波数が得られることがわかる。この結果から、試作装置による同調機能がラット体内でも理論通りに動作したことを実証することができた。

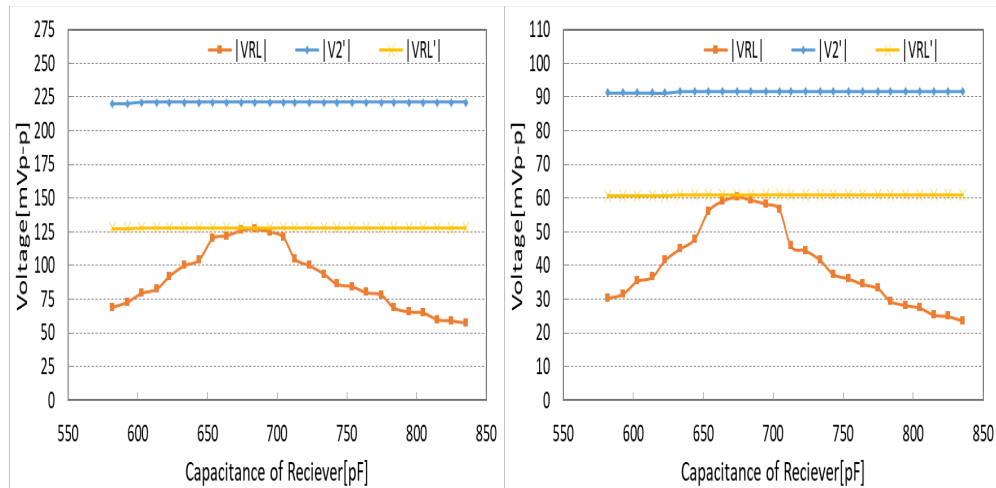


図7 受信側出力電圧推定方式による同調曲線. コイル間距離20mm(左), 40mm(右)

## ② 送信側電流ピーク検出方式

送信側電流ピーク検出方式についても、体内環境における実験を行なった(図8)。図中の各曲線は送・受信コイル間の距離を変えて異なる結合係数の条件で測定したもので、受信側共振コンデンサを回路に直列に挿入した時の送信側回路電流から、コンデンサをなくしたときの送信側回路電流を差し引いたものである。いずれも共振周波数において送信側電流は大きく変動しており、ピークを検出することによって共振周波数を特定することが可能である。この結果、試作回路が理論通りの同調動作をすることが実証された。

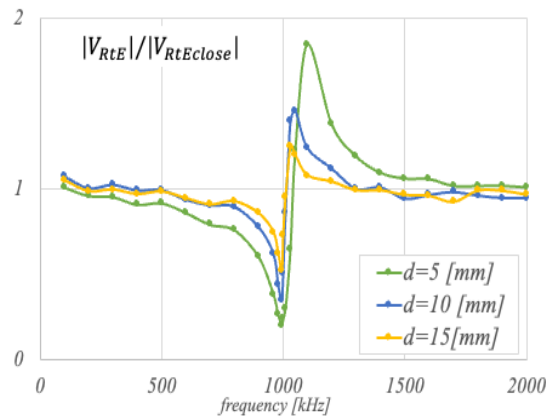


図8 送信側電流ピーク検出方式による同調曲線

## <引用文献>

- [1] American Heart Association :What Is a Pacemaker? American Heart Association brochure, 2012.
- [2] L. Rindorf, L. Lading, and O. Breinbjerg, Resonantly coupled antennas for passive sensors, in Proc. IEEE Sensors, pp.1611-1614, Oct. 2008.
- [3] A. KUMAR, S. MIRABBASI and M. CHIAO, Resonance-based wireless power delivery for implantable devices, Biomedical Circuits and Systems Conference, pp. 25-28, Nov., 2009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Ryohei Suwahara, Ryota Kato, Koki Murata, Tomoki Watanabe, Yuichi Shimatani and Shogo Kiryu	4. 巻 27
2. 論文標題 A Coil for Wireless Power Transmission by Using Sewing Technique with Litz Wire	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 49-54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14243/jsaem.27.49	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 桐生昭吾, 諏訪原良平, 海藤沙也佳, 村田昂基, 島谷祐一	4. 巻 19
2. 論文標題 体内植え込み機器への送電を想定した非接触電力伝送用縫い込みコイルの作成と電気特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 高速信号処理応用技術学会誌	6. 最初と最後の頁 51-58
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 無
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15件（うち招待講演 0件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Arata Yamamoto, Satoshi Kawaguchi, Yuichi Shimatani
2. 発表標題 Study on the Equivalent Circuit of Receiver Coil for Magnetic Resonant Radio Power Transmission in Internal Environment.
3. 学会等名 TOIN International Symposium on Biomedical Engineering 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本新, 豊田尋*, 川口哲, 小池智仁, 梅原秀平, 京相雅樹, 島谷祐一
2. 発表標題 体内埋め込み機器にむけた 無線電力伝送用受信コイルの生体内における等価回路の検討
3. 学会等名 第21回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本新, 川口哲, 島谷祐一
2. 発表標題 体内埋め込み型磁界共鳴型無線電力伝送用受信コイルの体内環境における電氣的等価回路構成の検討
3. 学会等名 ライフサポート学会 第30回フロンティア講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Arata Yamamoto, Kohei Minemura, Yuichi Shimatani, Masaki Kyoso, Shogo Kiryu
2. 発表標題 Reproduction in the Living Body Using Biological Equivalent Phantom for the Resonance Coupling Wireless Power Transmission
3. 学会等名 41th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Minemura, Masahiro Tatsuta, Arata Yamamoto, Masaki Kyoso, Yuichi Shimatani
2. 発表標題 A Novel Tuning Method of the Resonance Coupling Wireless Power Transfer for Implantable Medical Devices
3. 学会等名 41th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Arata Yamamoto, Kosuke Sasaki, Kohei Minemura, Masaki Kyoso, Yuichi Shimatani
2. 発表標題 Examining the cause of changes in electrical characteristics of Implanted Receiver Coils for the Resonance Coupling Wireless Power Transmission
3. 学会等名 17th International Conference on Biomedical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Arata Yamamoto ,Kohei Minemura ,Satoshi Kawaguchi ,Ryo Kato ,Yuichi Shimatani
2. 発表標題 Resonance Coupling Wireless Power Transmission Receiver Coil Investigation of Effects of Internal Environment
3. 学会等名 Toin ISBME 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 峯村康平, 辰田昌洋, 加藤諒, 京相雅樹, 島谷祐一
2. 発表標題 体内埋め込み機器への給電に向けた磁場共振型無線電力伝送システムにおける外部送信回路による共振周波数同調方法の検討
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 峯村康平, 辰田昌洋, 山本新, 小橋基, 京相雅樹, 島谷祐一
2. 発表標題 体内環境が及ぼす体内埋め込み機器用磁界共鳴型無線電力伝送受信コイルへの影響
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本新, 峯村康平, 加藤諒, 大嶋真広, 京相雅樹, 島谷祐一
2. 発表標題 生体内への電力伝送を目的とした磁界共鳴型無線電力伝送システムの受電コイルに体内環境が与える影響調査
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 峯村康平, 辰田昌洋, 山本新, 宮脇奈央, 京相雅樹, 島谷祐一
2. 発表標題 体内埋め込み機器への給電を目的とした磁界共鳴型無線電力伝送方式による電力伝送実験
3. 学会等名 第58回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Ozawa, Kohei Minemura, Yuichi Shimatani, Masaki Kyoso and Shogo Kiryu
2. 発表標題 A Novel Tuning Method for the Implantable Resonant Coupling Wireless Power Transmission
3. 学会等名 40th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Minemura, Yuta Ozawa, Kosuke Sasaki, Yuichi Shimatani, Masaki Kyoso, Shogo Kiryu,
2. 発表標題 Long-Term Changes in Effective Inductance of Thin Coils Implanted in Rats for the Resonance Coupling Wireless Power Transmission
3. 学会等名 40th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小澤裕太, 峯村康平, 辰田昌洋, 小橋基, 京相雅樹, 島谷祐一
2. 発表標題 体内埋め込み型医療機器向け磁場共振結合型無線電力伝送システム用同調回路の設計
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 峯村 康平, 小澤 裕太, 辰田 昌洋, 京相 雅樹, 島谷 祐一
2. 発表標題 体内埋め込み機器への給電を目的とした磁界共鳴型無線電力伝送方式による送受信回路の試作と伝送実験
3. 学会等名 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京都市大学研究者情報データベース  
<https://www.risys.gl.tcu.ac.jp>

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
研究分担者	小橋 基  (KOBASHI MOTOI)  (80161967)	岡山大学・医歯薬学総合研究科・准教授    (15301)	

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