

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：51303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700602

研究課題名(和文)非接触充電時のインピーダンス変化に基づくワイヤレス充電状況推定システムの開発

研究課題名(英文) Study of the system to estimate charge situation based on the impedance value in contactless power transmission

研究代表者

佐藤 拓 (SATO, Taku)

仙台高等専門学校・電気システム工学科・助教

研究者番号：30451545

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：我々はこれまで充電式心臓ペースメーカーの研究を進めてきた。体内に埋め込んだ心臓ペースメーカーの充電状況を体外から推定することは出来なかった。そこで我々は充電状況に応じて2次側インピーダンスが変化することに着目し、体外からの電気パラメータから充電状況を推定する方法を提案した。チタンケースが無い場合において提案する推定式を用いて良好な推定が可能であることを確認した。また、チタンケースが有る場合(2次コイルをチタンケースに封入した場合)のチタンケースに生じる渦電流損を解析し、等価チタンロス抵抗を導入した新たな推定式を提案した。チタンケースが有る場合でも良好に充電状況を推定できる研究成果を得るに至った。

研究成果の概要(英文)：We have been researching the rechargeable cardiac pacemaker. It is difficult to estimate the charge situation from outside the body. We focused on the secondary impedance value which changes according to the charge status and we proposed the method to check the battery situation of rechargeable cardiac pacemaker by estimating the value from outside the body. When the titanium case is not located between the primary coil and the secondary coil, we have confirmed that it is possible to estimate the secondary impedance value by using our proposed formula. We analyzed the effect of the titanium case and we proposed the estimated new our formula which inserted the titanium loss resistance. When the titanium case is located between the primary coil and the secondary coil, we have also confirmed that it is possible to estimate the secondary impedance value by using the new proposed formula.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学、リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：心臓ペースメーカー 非接触電力伝送 ワイヤレス給電 充電状況推定

1. 研究開始当初の背景

日本における心臓ペースメーカ市場は 465 億円 (2004) にのぼり医療機器で最大規模であるが、ペースメーカは全て外国製の輸入品に頼っているのが現状である。世界では年間 100 万件以上、日本でも年間 5 万件の植え込み手術の実績があり、そのうちの 3 割が電池消耗による交換手術と言われている。膨大な量の使用済みペースメーカは再利用されることなく感染性廃棄物として処分される。これは限りある資源の浪費に他ならない。

以上の観点から繰り返し充電することで長期駆動可能なワイヤレス充電式心臓ペースメーカを構想するに至った。

2. 研究の目的

心臓ペースメーカに代表される体内植え込み型医療機器の重要課題は「長期駆動の実現」である。その解決方法として、体外から体内にワイヤレスで電力供給し 2 次電池を充電する「ワイヤレス電力伝送システム」が考えられる。そこで、ワイヤレス電力伝送に必要な不可欠な「ワイヤレス充電状況推定システム」の開発を目的とする。ここでは特に充電時のインピーダンス変化に着目した研究代表者オリジナルのシステムを提案する。提案するシステムは外部から充電の状況が視認できない (充電ランプが見えない) ワイヤレス医療機器を主なターゲットとしているが、他のワイヤレス機器 (電気自動車、携帯電話、深海探査機、軍事機器など) へも信頼性向上の観点から広く応用可能なシステムである。

3. 研究の方法

図 1 に非接触充電式ペースメーカの構想図を示す。コイル間の電磁誘導を利用して体外側からペースメーカ本体内へ非接触に電力伝送し 2 次電池を充電する。表 1 に製作した伝送コイルの仕様を示す。1 次側コイルは平面スパイラル形状で裏面にフェライトを配置した。2 次側コイルはチタンケースの内壁に収まるサイズの短ソレノイド形状とした。非接触電力伝送時の伝送効率<sub>50%</sub>は、2 次側コイルをチタンケースに封入した状態で、コイル間 Gap<sub>10</sub> [mm]、伝送周波数 10 [kHz]、受電電力 400 [mW]において伝送効率 50%を達成し、また、発熱も体内利用レベルに収めることに成功している。

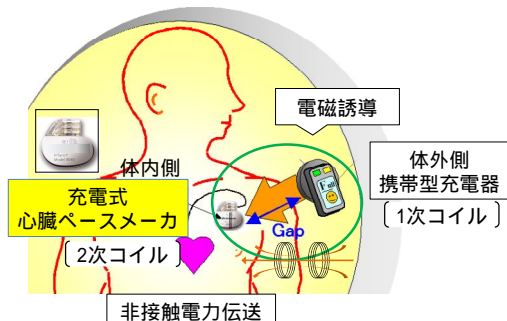


図 1 非接触充電式心臓ペースメーカ構想図。

表 1 非接触電力伝送コイルの仕様。

	1 次コイル	2 次コイル
コイル形状	スパイラル(28-80mm)	短ソレノイド形状
抵抗	R <sub>1</sub> =3.4	R <sub>2</sub> =17.3
自己インダクタンス	L <sub>1</sub> =3.1 mH (フェライトコア付き)	L <sub>2</sub> =1.24 mH
伝送効率	50% (gap10[mm])	

本研究では携帯型充電器によって患者が手軽に充電できる環境を提供することを最終目標としているが、心臓ペースメーカは体内に植え込まれるため、バッテリーの充電状況を容易に確認することができない。そこで非接触充電時に何らかの方法で体外側からペースメーカの充電状況 (電池残量) を推定する必要がある。

(1) インピーダンス変化に基づく充電状況推定式の提案

体内側の充電回路に手を加えることなく、体外側から充電状況を計測する方法を提案する。

(2) 非接触充電時の 2 次側インピーダンス推定の検証

提案する推定式により 2 次側インピーダンスの推定が可能であることを確認するために、実際に非接触電力伝送を行い、2 次電池を充電した場合のインピーダンス推定の検証実験を行う。

はじめに、図 2 の非接触電力伝送回路を構築する。Li-Po2 次電池を充電した時に充電状況に応じて一対一に対応する 2 次側インピーダンスを体外側から計測するための推定式を用いて充電状況を推定する。使用した伝送コイルの仕様は表 1 の通りである。

図 3 に示す二つの実験条件 (条件 A: チタン無, 条件 B: チタン有) でそれぞれインピーダンス推定の検証実験を行う。このとき、伝送周波数 10 [kHz]、受電電力 0.4 [W]となるように高周波電源 (NF-HSA4014) を調整する。電力データ (電圧・電流・力率) はパワーメータ (HIOKI-3193) で測定し、得られた測定データ (1 次側パラメータ) を提案した推定式に代入することで推定値を計算する。なお 2 次側インピーダンスの実測値は受電電力と 2 次側電流の関係より下式より算出する。

$$R_L (actual) = \frac{P_2}{I_2^2} \quad \dots (1)$$

推定式からの推定値と (1) 式からの実測値を比較することで推定式の妥当性を確認する。

(3) チタン有での 2 次側インピーダンス推定

2 次コイルをチタンケースに封入した場合にも推定可能な推定式を新たに提案し、検証実験を行う。実験条件は (2) の条件 B: チタン有の時と同様とする。

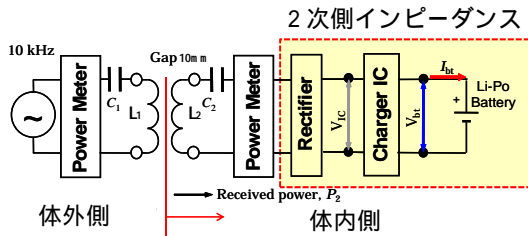


図 2 ペースメーカー用非接触電力伝送の回路構成。

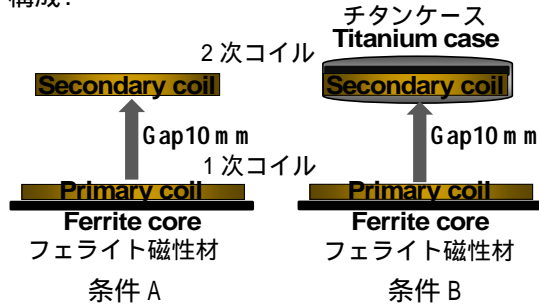


図 3 実験条件の模式図。  
条件 A: チタン無, 条件 B: チタン有り (2 次コイルを封入した状態)。

#### 4. 研究成果

##### (1) インピーダンス変化に基づく充電状況推定式の提案

充電制御とインピーダンス変化の関係  
図 4 にリチウムイオン電池の充電を行った時のバッテリー端子電圧, 充電電流およびインピーダンスの時間変化を示す。実験条件はコイル間伝送 Gap10 [mm], 伝送周波数 10 [kHz] である。ダイオードブリッジ全波整流回路で直流電圧に整流し充電 IC で Li-Po2 次電池 (公称電圧 3.6 [V], 容量 70 [mAh]) を充電した。充電 IC の充電制御は充電初期時 (残量低) には定電流充電を行い, 徐々に満充電に近づくにつれて定電圧充電へと切り替わる特性を持つ。そのため, 図 4 のように充電後半に充電電流が減少し, バッテリー端子電圧が上昇する特性となる。2 次側インピーダンスは充電が進むにつれて増加する特性が得

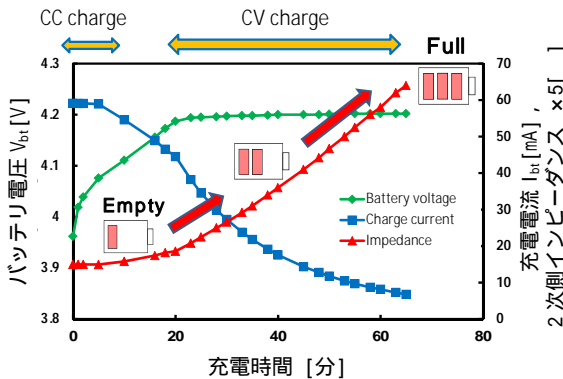


図 4 充電時におけるバッテリー電圧, バッテリー電流, 2 次側インピーダンスの時間変化。

られ, 充電開始 20 分を過ぎてからその増加割合が大きくなった。つまり 2 次側インピーダンスの値はバッテリーの充電残量と一対一に対応していると言え, このインピーダンス変化を捉えることで電池残量もしくは充電量といった充電状況を判断できる。

##### 推定式 1 の導出

図 2 の非接触充電回路の等価回路を図 5 に示す。図中の 2 次側インピーダンス  $Z_L$  は整流回路, 充電回路, バッテリーを含めたインピーダンスであり, ここでは計算簡略化のために  $Z_L$  を純抵抗  $R_L$  とみなした。

図 5 の等価回路において, 1 次側 (入力側) から見たインピーダンス  $Z_1$  は,

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j \left\{ \omega(L_1 - M) - \frac{1}{\omega C_1} \right\} + j\omega M // \left\{ (R_2 + R_L) + j\omega(L_2 - M) - \frac{1}{\omega C_2} \right\} \quad \dots (2)$$

となる。式中の // はインピーダンスの並列接続を意味する。は伝送角周波数である。  $R_1, R_2, R_L, M, L_1, L_2, C_1$  および  $C_2$  は図 5 の各素子に対応する。ここで, 2 次側インピーダンス  $R_L$  について整理すれば, 1 次側パラメータから 2 次側インピーダンス  $R_L$  が導出でき, 次式を得る。

$$R_L = \frac{\omega^2 M^2 + \sqrt{\omega^4 M^4 - 4(Z_1 \cos \theta - R_1)^2 A^2}}{2(Z_1 \cos \theta - R_1)} - R_2 \quad \dots (3)$$

$$\text{ただし, } A = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \quad \dots (4)$$

(3) 式で  $A = 0$  となるような受電コイルのインダクタンス  $L_2$  に対して共振となるコンデンサ  $C_2$  を 2 次側に接続することで (3) 式は (5) 式のように簡略化できる。(5) 式を推定式 1 とする。

$$R_L = \frac{\omega^2 M^2}{Z_1 \cos \theta - R_1} - R_2 \quad \dots (5)$$

$$Z_1 \cos \theta = \frac{P_1}{I_1^2} \quad \dots (6)$$

(5) 式中の  $Z_1 \cos \theta$  は 1 次側インピーダンスの実部であり, 送電電力  $P_1$  と 1 次電流  $I_1$  の測定値から (6) 式より算出できる。

以上より, 体外側から取得可能な 1 次側インピーダンス  $Z_1$  を計測し (5) 式に代入すれば, 充電状況 (電池残量) に応じて一対一に変化する 2 次側インピーダンス  $R_L$  を推定できる。

ただし, 推定式 1 の相互インダクタンス  $M$  値は送受電コイルの結合度合い (位置ずれ) で変化するがインピーダンス推定を行う際は, 代表値として  $M=0.56$  [mH] を用いた。

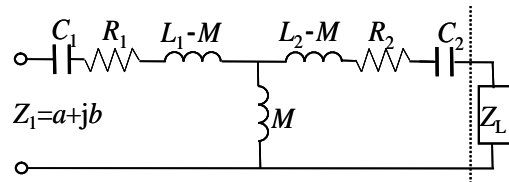


図 5 非接触電力伝送の等価回路。

(2) 非接触充電時の2次側インピーダンス推定の実験結果

チタン無(条件A)での推定結果

図6に2次側の構成が受電コイルのみの場合のインピーダンス推定結果を示す。この図より充電前半から後半にかけて正確に1次側パラメータのみで2次側インピーダンスを推定することが可能である結果を得た。

推定値と実測値間には最大12%程度の違いが見られるが良く似た傾向を示した。よってチタン無(条件A)では推定式1(5式)によりインピーダンス推定が可能であることを確認した。

チタン有(条件B)での推定結果

図7に受電コイルをチタンケースに封入した場合のインピーダンス推定結果を示す。この図より充電前半は推定できているが、充電後半になるにつれて推定値と実測値の間に誤差が広がり正確な推定ができないことが分かった。充電20分以降に最大で約49%の誤差が生じ、チタン有(条件B)では推定式1(5式)によるインピーダンス推定は不可能であるという結果を得た。

以上の結果よりチタンケースが2次側インピーダンス推定に影響を与えることが確認され、新たな推定式を検討する必要性が生じた。

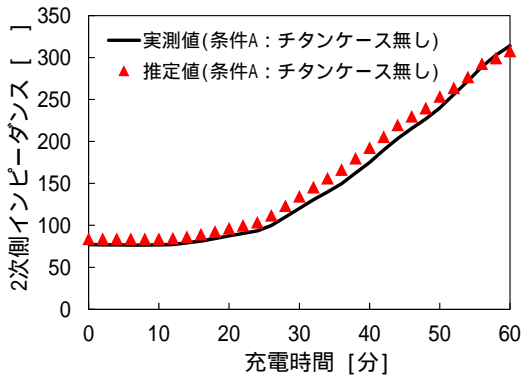


図6 2次側インピーダンスの実測値と推定値の比較(条件A: チタンケース無し時)。

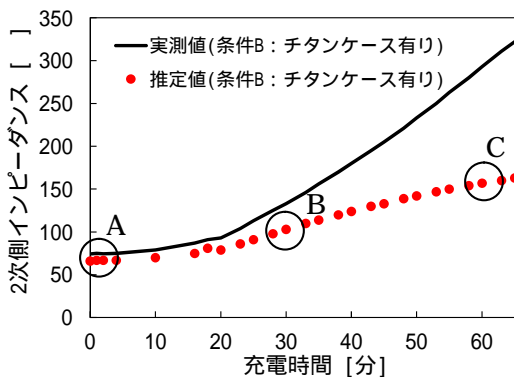


図7 2次側インピーダンスの実測値と推定値の比較(条件B: チタンケース有り時)。

(3) チタン有での2次側インピーダンス推定の検討結果

チタン有無における各パラメータの比較

チタンケース有無における二つの条件で、2次側パラメータ(受電電力 $P_2$ , 2次電流 $I_2$ )の充電時の時間推移を図8に示す。この図よりチタンケース有無において受電電力と2次電流の充電時の推移はどちらも同様の特性となっていることが確認された。これはどちらも受電電力を0.4[W]一定となるように送電電力を調整したためであると言える。

次にチタンケース有無における1次側パラメータ(送電電力 $P_1$ , 1次電流 $I_1$ )の推移を図9に示す。この図より1次電流の特性については充電初期時に最大で5%の差があったもののその後はほぼ同じ特性となった。この電流の増加はチタンケースでの渦電流による磁束鎖交数の減少に起因するものと考えられる。送電電力についてはあきらかにチタンケースの有無において大きく特性がずれている。これは同じ受電電力0.4[W]を得るためにチタンケースに生じる渦電流損の電力分だけ送電電力が多く必要となったためと考えられる。この送電電力の増加分が推定式1(5式)によるインピーダンス推定に誤差を生じさせたものと考えられる。

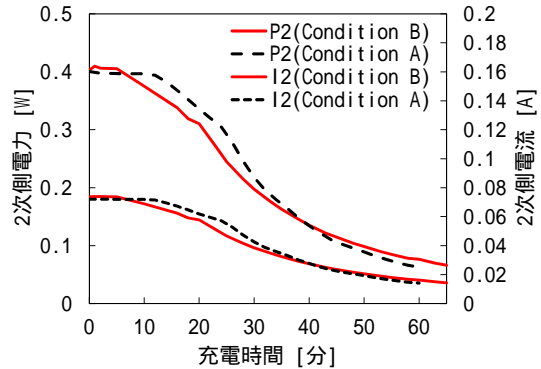


図8 条件A,Bにおける2次側パラメータの時間推移(条件A: チタン無し, 条件B: チタン有り)。

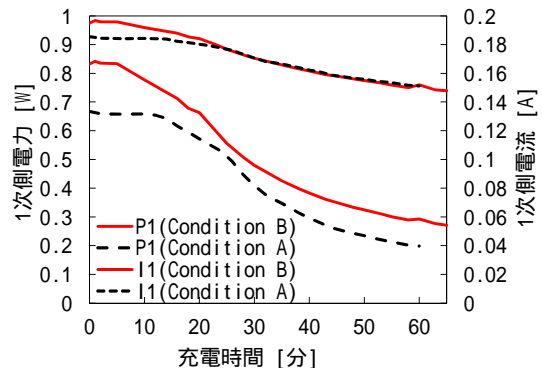


図9 条件A,Bにおける1次側パラメータの時間推移(条件A: チタン無し, 条件B: チタン有り)。

渦電流損の算出と充電時の損失内訳

図7のインピーダンス推定結果において図中の点A,B,Cでの送電電力の内訳を図10に示す。なお、渦電流損は送電電力、受電電力、1次銅損、2次銅損から下式より求めた。

$$P_T = P_1 - P_2 - P_{r1} - P_{r2} \quad \dots (7)$$

図10中でパーセント表示した値は送電電力に対する渦電流損が占める割合である。同図より、渦電流損の値は充電が進行するにつれて小さくなるが、送電電力に対して渦電流損の占める割合は増加する傾向が確認できる。これは推定式1(5式)を導出する際に等価回路でチタンケースを考慮しなかったためであり、チタンケース有の場合には送電電力の内訳に図10に示すチタンケースに発生する渦電流損の損失分が余分に消費されることになり、推定誤差が生じたと考えられる。

実際に図10を図7の推定結果と照らし合わせると、送電電力に対する渦電流損の占める割合が増えるほど推定誤差が大きくなることが確認できる。

以上より、チタンケース有の場合でインピーダンス推定を行う際には推定式上に何らかの形で渦電流損を考慮する必要があることが分かった。

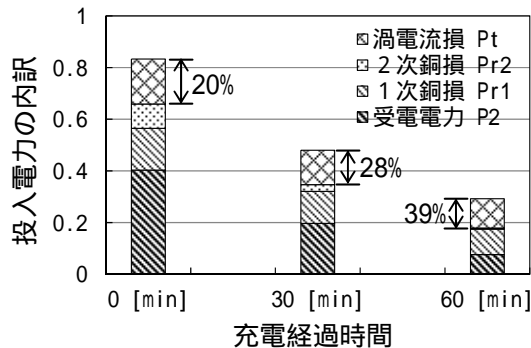


図10 充電経過時間による電力内訳の推移(図7の点A,B,Cでの比較)。

チタンロス抵抗を導入した新たな推定式の提案

実験データから1次電流と渦電流損との関係を調べたのが図11である。この図より渦電流損と1次電流の2乗が比例傾向にあることが確認できる。線形近似より比例定数を算

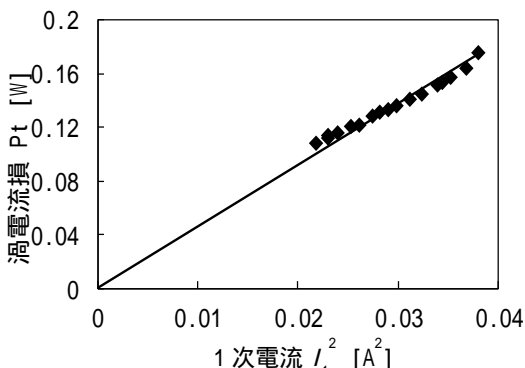


図11 渦電流損と1次側電流の関係。

出した。この定数は抵抗の次元を持つものであり、チタンケースに生じる渦電流損により見かけ上増加する抵抗分として定義し、等価的なチタンロス抵抗と呼ぶことにする。算出したチタンロス抵抗値は4.6 [ ]であった。このチタンロス抵抗を用いて渦電流損の影響を補正する新たなインピーダンス推定式2を導出することに成功した。

新たな推定式2によるインピーダンス推定の検証

チタンケースの影響を補正した新たな推定式2により2次側インピーダンスを推定した結果を図12に示す。同図中にはチタンケース有の場合では、推定が困難であった推定式1(5式)による推定結果も示した。この結果より、チタンケースの影響を補正した推定式2では従来の推定式1では推定が不可能であった充電後半の2次側インピーダンスの変化も正確に推定できていることが確認された。よって送受電コイル間にチタンケースが介在している場合でも推定式2を用いることで2次側インピーダンスを推定することが可能であり、体外側から充電状況を把握することができる良好な研究成果を得ることができた。

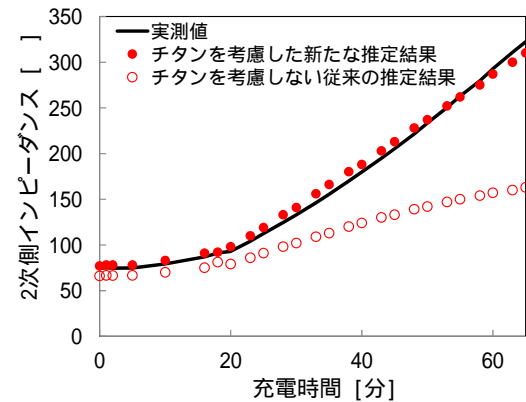


図12 チタンケースを考慮した場合の2次側インピーダンスの推定結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計8件)

橋本昂樹, 佐藤 拓, 「非接触充電式ペースメーカー用携帯型充電器の試作」, 平成26年東北地区若手研究者研究発表会, 2014年2月28日, 東北工業大学八木山キャンパス

渡辺直紀, 渡邊尚照, 佐藤 拓, 「非接触充電式ペースメーカーの充電制御に関する一検討」, 平成26年東北地区若手研究者研究発表会, 2014年2月28日, 東北工業大学八木山キャンパス

小澤祐介, 酒井紀元, 佐藤 拓, 「非接触

電力伝送時の二次側パラメータ推定システムの一検討」,平成 26 年東北地区若手研究者研究発表会,2014 年 2 月 28 日,東北工業大学八木山キャンパス

橋本昂樹,佐藤 拓,古瀬則夫,「非接触充電式心臓ペースメーカーの携帯充電器の製作」,平成 25 年度東北地区高等専門学校専攻科 産学連携シンポジウム,2013 年 11 月 30 日~12 月 1 日,仙台高等専門学校広瀬キャンパス

渡辺直紀,佐藤 拓,「非接触充電式ペースメーカーの充電制御に関する研究」,仙台高等専門学校,平成 25 年度東北地区高等専門学校専攻科 産学連携シンポジウム,2013 年 11 月 30 日~12 月 1 日,仙台高等専門学校広瀬キャンパス

Noritomo Sakai, Taku Sato, Tetsuya Takura, Fumihiro Sato and Hidetoshi Matsuki, “Estimation of Secondary Impedance for The Charge Situation of Rechargeable Cardiac Pacemaker”, 3rd International Symposium on Technology for Sustainability 2013, 2013 年 11 月 20 日~22 日, HongKong

酒井紀元,佐藤 拓,山田 洋,「チタンケースを介する非接触給電における充電状況推定の検討」,平成 25 年電気学会全国大会,2013 年 3 月 21 日,名古屋大学

酒井紀元,佐藤 拓,山田 洋,「非接触充電式心臓ペースメーカーの二次側インピーダンス推定による充電状態推定法の検討」,平成 24 年度東北地区高等専門学校専攻科 産学連携シンポジウム,2013 年 3 月 2 日,仙台高等専門学校広瀬キャンパス

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

佐藤 拓 (SATO, Taku)

仙台高等専門学校・電気システム工学科・助教

研究者番号: 3 0 4 5 1 5 4 5