

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420249

研究課題名(和文)超小型体内留置デバイス用容量結合型デジタル情報・電力伝送システムの研究開発

研究課題名(英文) Research and development of the information and energy transmission system using capacitive coupling for small implantable medical devices

研究代表者

柴 建次 (Shiba, Kenji)

東京理科大学・基礎工学部電子応用工学科・准教授

研究者番号：10343112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々は体内埋込型医療機器に、容量結合を用いて電力と情報を無線伝送する方法を検討している。

体外から体内への容量結合型電力伝送において、模擬人体中の中心までワイヤレス電力伝送したときの最大受電電圧を実験により求めた。その結果、100Ωの負荷をつけたときの最大受電電圧は2460mVであった。また、体内深部から体外への容量結合型情報伝送において、受信回路の波形整形フィルタのカットオフ周波数 $f_c$ と増幅度 $AV$ を変え、受信精度の向上を図った。その結果、 $f_c=36$  kHz、 $AV=10\sim 20$ 倍のときに精度99%を得た。

研究成果の概要(英文)： We proposed a capacitive coupling energy and information transmission method for implantable medical devices deep inside the body. To investigate the capacity of capacitive coupling energy transmission system, experimental measurements of the received voltage were conducted in which transmitting electric energy and load resistance was changed from the surface of the human phantom to an implantable device inside it. As a result, a received voltage of 2460 mV could be obtained with a load resistance of 100Ω. Also, information transmission system can transmit information from deep inside body to outside the body using a couple of titanium electrodes. To increase communication accuracy of the capacitive coupling information communication, the value of communication accuracy is measured using a human phantom when the filter constant and voltage gain in the receiving circuit were changed. As a result, the communication accuracy was 99% when  $f_c$  was 36 kHz and  $AV$  was 10-20 times.

研究分野：医用生体工学

キーワード：容量結合 磁界共振 電力伝送 ワイヤレス 体内埋込 放射電磁ノイズ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、体内に完全に埋め込むタイプの様々な医療機器が開発されている。それらの中には、脳波測定デバイス、心臓発作検出器、など、検診用として小型で体内深部に長期間埋め込むものもある。これらのデバイスは取得した情報を体外に情報伝送する必要があるが、小型で、かつ、体内深部から体外まで無線デジタル通信可能な体内深部埋込型情報伝送デバイスはまだ実現できていない。

また、体内埋込型医療器機は、長期間バッテリーの交換なしで、動作できるようにするため、体外—体内へのワイヤレス電力伝送方法(容量結合、磁界共振型)についても求められている。

## 2. 研究の目的

体内—体外間のワイヤレス通信方法として、容量結合型通信が研究されている。容量結合を用いて、情報を体内から体外にワイヤレス伝送する方法であるが、生体組織中はキャパシタンス成分であるためデジタル波形(矩形波)がその中を通過すると、波形が大きく歪むという問題があった(微分された波形になる)。そのため、容量結合を用いた体内深部—体外間のデジタル情報伝送回路は実現できていなかった。これらを実現できるデジタル無線送信回路と、受信回路を試作する。

さらに、小型化のためには、ワイヤレス電力伝送を実現させる必要があるが、まだ生体電磁安全性が不明確であった。電磁界解析を用いてこれらを確認する。

また、伝送効率は、伝送特性を評価する上で重要なパラメータであるが、周波数が高い程コモンモード電流が測定機に流れてしまうため、容量結合型や磁界共振型の電力伝送については、伝送効率を正しく測定することができていなかった。この測定方法を見つけ出し、磁気共振型の電力伝送と比較することも、本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

### 3 - 1 人体組織中のデジタル通信用回路

受信電極で得られた出力電圧波形は、大きく歪んでいる。これを、元の送信電圧波形に復元する回路を試作する。高速処理できることが求められるため、アナログ電子回路によるフィルタ回路を設計する。

送信回路の変調回路及び、受信回路の復調回路には、PICを用い、復調後のデジタル信号(7文字の英文字)はUSBで接続したパソコンのモニタの画面から表示できるようにする。

また、容量結合を用いて生体組織中をデジタル通信した場合に、送信電極の位置が動いた場合でも、常に安定した通信が実現できるように、波形整形用ローパスフィルタと増幅回路の再設計も行う。ローパスフィルタのカットオフ周波数を8k~800kHzまで、また、

増幅回路の増幅度も1~40倍まで変化させ、100文字のテキストを伝送した場合における誤り率を測定する。模擬人体はヒトの筋を模擬した直径24cmのものを用い、0.5S/mのNaCl水溶液とした送電電極を、水槽中央、水槽の縁に近いところ(受信電極が近くないところ)、水槽の縁に近いところ(受信電極近傍)に動かしたときの誤り率測定を行う。

### 3 - 2 容量結合型ワイヤレス電力伝送における正確な効率測定

人体に対して影響が少ないと考えられる50k~20MHzの周波数帯において、AC-AC間及び、AC-DC間伝送効率、最大受電電力を実測する。オシロスコープは送電側、受電側でそれぞれ1台ずつ用い、受電側はバッテリー駆動とし、グラウンドを介したコモンモードを抑制する。電流測定にはDC/AC電流プローブ、電圧測定には差動プローブを用いることで、送電側と受電側の結合を少なくした正確な伝送効率の測定を行う。

磁気共振型電力伝送方法についても、同様な測定方法で、正確な伝送効率を測定する。

## 4. 研究成果

### 4 - 1 人体組織中のデジタル通信用回路

生体組織を通過し歪んでしまった矩形波を整形するフィルタ回路には、高速オペアンプを用いた。体内のどの部分に送信回路があっても、体外まで送信できることを確かめるために、送信回路と送信電極を、水槽中央、水槽の縁に近いところ(受信電極が近くないところ)、水槽の縁に近いところに動かして通信試験をした。カットオフ周波数17kHz、増幅度10~20倍のときに最も誤り率が小さくなり、正しく伝送できた確率は100%、100%、99.5%であった。誤りが増える原因として、実験室の蛍光灯から発生している50kHz付近の放射性妨害波が大きく影響していることがわかり、蛍光灯インバータに対するフィルタの強化が今後の課題となった。

### 4 - 2 容量結合型ワイヤレス電力伝送における正確な効率測定

正しい伝送効率を測定する方法として、様々な方法を検討した結果、オシロスコープを一次側と二次側とそれぞれ1台ずつ用い、二次側はUPS内のバッテリーで浮かせ、さらにすべてのチャンネルで差動プローブを用いることで正しい効率測定ができることが明らかとなった。

容量結合型電力伝送について、1~10MHzの周波数帯における、AC-AC間の伝送効率、最大受電電圧を電磁界解析・実測した。最大効率は5MHz付近において、0.058%が得られた。受電電圧は、伝送周波数4MHz、送電電流900mA(送電電極付近の電流密度、11.25mA/cm<sup>2</sup>)において、100Ω負荷では受電電圧

2.46 V, 30 kΩ 負荷では受電電圧 3.75V が得られた。周波数が増加するとともに、受電電圧は増加する傾向にあった。また、電磁生体影響については、SAR と体内電界の観点から、上述の 100Ω 負荷時に受電電圧 2.46 V, 30 kΩ 負荷時に受電電圧 3.75V が限界であり、磁界共振の方が大きな電力を送ることができる と推察された。

磁界共振型ワイヤレス電力伝送についても、正確な測定方法の見直しを行い、多くの学会発表を行った(学術論文等)。容量結合型と比べどちらの伝送効率が高いか調べるため、体外から胃内部へのワイヤレス電力伝送を想定して試作したトランスを対象に、NaCl 水溶液を介して、伝送効率を測定した。その結果、磁界共振型は 600k ~ 1MHz において、0.06%程度の効率が得られた。容量結合型の 0.058%とほぼ同等であった。この成果については、第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(2017年5月)と IEEE EMBC 2017 で発表予定(2017年7月開催、現在査読中)である。

#### 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 10 件)

Kenji Shiba, Nur Elina Binti Zulkifli, Yuji Ishioka: Analysis of Specific Absorption Rate and Internal Electric Field in Human Biological Tissues Surrounding an Air-core Coil-type Transcutaneous Energy Transmission Transformer, Journal of Artificial Organs, 20(2), pp.103-109, 2017.

柴 建次: 体内埋込医療機器への容量結合型ワイヤレス電力伝送-受電電極の極性を考慮した受電電圧の測定-, 日本 AME 学会会誌, Vol.24, No.3, pp.130-135, 2016

柴 建次, 吉川 秀一, 小谷野 純一: 体内埋込型人工心臓用経皮エネルギー伝送システム - 液体浸漬時における伝送効率と温度上昇の実測 -, 日本 AME 学会会誌, vol.23, no.1, pp.179-186, 2015.

Kenji Shiba: Electrically Induced Energy Transmission using for Implantable Medical Devices Deep Inside the Body: Measurement of Receiving Voltage in Consideration of Biological Effect, Proceedings of the IEEE EMBS 2015, pp.2681-2684, 2015.

Ryutaro Iwashita, Kenji Shiba 他 (全 6 名 6 番目): A Thin, Flexible Receiving Coil for Wireless Power Transmission Based on Magnetic Induction to an Implantable

Device Measuring the power efficiency of receiving coils with varying numbers of mounted magnetic sheets, Proceedings of the ISMICT, pp.40-44, March pp.24-26, 2015.

加我 正, 柴 建次: 人工心臓用空心偏平型経皮エネルギー伝送トランスの正確な伝送効率測定 - 各種測定機器による測定値と理論推定値との比較 -, 電子情報通信学会信学技報, 無線電力伝送, pp.57-62, 2017.

明賀 新, 柴 建次 他(全 4 名 4 番目), 電磁誘導を用いた体内深部埋込型医療機器への無線電力伝送 - 蓄電用電気二重層コンデンサの充電回路の試作 -, 第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文, pp.320-323, 2016.

石渡将己, 柴 建次 他(全 5 名 5 番目), 体内埋込型モニタリング装置への無線電力伝送 - NaCl 水溶液に浸漬させた受電コイルの受電電力測定 -, 電子情報通信学会技術研究報告(無線電力伝送) pp.1-4, 無線電力伝送研究会, 2014.

小谷野 純一, 柴 建次 他(全 4 名 4 番目): NaCl 水溶液浸漬時における補助人工心臓用経皮エネルギー伝送トランスの渦電流損の検討, 電子情報通信学会技術研究報告(無線電力伝送), pp.5-8, 2014.

石渡 将己, 柴 建次 (全 5 名 5 番目), 体内深部-体外間の容量結合無線情報伝送 ~ 空気中及び液体模擬生体中における電圧利得特性の評価 ~, 電子情報通信学会技術研究報告, 高信頼制御通信, vol. 114, No.60, pp.9-12, 2014.

[学会発表](計 25 件)

新郷航希, 柴 建次, 原一裕, 坪木光男, 伊藤雅一: 体内深部-体外間の容量結合型無線情報伝送システム - 電磁ノイズ環境下における通信特性の測定 -, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(2017年5月18日, 発表予定)

勝山晃吉, 柴 建次: 体内留置逆流性食道炎用モニタリング装置への無線電力伝送 - 解析による最適巻数と周波数の検討 -, 第 29 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(2017年5月18日, 発表予定)

新郷航希, 柴 建次, 原一裕, 坪木光男,

伊藤雅一：体内深部-体外間容量結合型無線情報伝送システム - 受信回路のフィルタ定数変化時における通信特性の測定 - p. 82, ライフサポート学会フロンティア講演会, 芝浦工業大学, 2017年3月10-11日

木戸香, 柴 建次：逆流性食道炎モニタリング装置への無線電力伝送 - 同時情報伝送動作に伴う相互干渉 - p. 124, ライフサポート学会フロンティア講演会, 芝浦工業大学, 2017年3月10-11日

勝山晃吉, 柴 建次：逆流性食道炎モニタリング装置への空心偏平型コイルを用いた無線電力伝送 - コイル定数変化時のAC-AC間の伝送効率特性の解析 - p. 85, ライフサポート学会フロンティア講演会, 芝浦工業大学, 2017年3月10-11日

土屋 純平, 岩下 龍太郎, 柴 建次：ウェストリング型送電コイルを用いた体内埋込型小型医療機器への無線電力伝送 - 送電コイルの径と電磁生体影響の関係 -, LIFE2016 講演論文集, pp.752-753, 東北大学 青葉山キャンパス 2016/9/4-6

米谷早織, 柴 建次：心臓ペースメーカー用容量結合型経皮電力伝送システムの伝送条件最適化? 最適伝送周波数の解析?, LIFE2016 講演論文集, pp.7520-751, 東北大学 青葉山キャンパス 2016/9/4-6

Tadashi Kaga, and Kenji Shiba, Efficiency Measurement of Air-Core Transcutaneous Energy Transmission Systems Considering Common-Mode Current at 900 kHz for a Transformer Immersed in NaCl Solution, ISRBP 2016 Program and Abstract Book, P.24, Mito, Sept. 20-22, 2016 (Nominated Helmut Reul Young Investigators Award)

柴 建次, 体内埋込型医療機器へのワイヤレスエネルギー伝送・情報伝送, 招待講演, JPCA show 2016 & 2016 エレクトロニクスショーのJIEP最先端実装技術シンポジウム アブストラクト集, pp.11-14, 東京ビックサイト, 2016年6月1日.

柴 建次, 体内埋込医療機器への容量結合型ワイヤレス電力伝送 - 受電電極の極性を考慮した受電電圧の測定 -, 日本AEM学会 第24回MAGDAコンファレンス, 2015.11.12 (招待講演)

Kenji Shiba, Kazuhiro Hara, Mitsuo Tsuboki,

Masakazu Itoh, Wireless information transmission system between deep inside and outside the body using capacitive coupling: Development of digital communication circuits, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, P.1, Aug.16-20, Orland, FL, 2016.

Tadashi Kaga, and Kenji Shiba, Efficiency Measurement of Air-Core Transcutaneous Energy Transmission Systems for Ventricular Assist Devices Considering Common-Mode Current, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, P.1, Aug.16-20, Orland, FL, 2016.

Arata Myoga, and Kenji Shiba, Estimation of Maximum Received Power Considering Biomedical Effect on Capacitive Power Transfer for Implantable Medical Devices, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, P.1, Aug.16-20, Orland, FL, 2016.

石渡将己, 柴 建次：微弱電流を用いた体内深部-体外間における無線情報伝送 - ネットワークアナライザを用いた減衰率の測定 -, p.101, ライフサポート学会フロンティア講演会, 東京工科大学, 2015.3.8-9

柴 建次, 小谷野 純一, 小口 寛人, 橋本一生：体外結合型経皮電力伝送システムのコンデンサ挿入による効率改善と出力電圧安定化, 第52回日本人工臓器学会大会, P.S-118, 北海道, 京王プラザホテル, 2014年10月17日~19日

田中俊太郎, 柴 建次：体内深部埋込小型医療機器への無線電力伝送 - 電磁界解析によるエッジ効果の影響の検討 -, p.181, ライフサポート学会フロンティア講演会, 東京工科大学, 2015.3.8-9

米谷早織, 柴 建次：心臓ペースメーカー充電のための容量結合型経皮電力伝送システム - 最適伝送周波数の解析 -, p.109, ライフサポート学会フロンティア講演会, 東京工科大学, 2015.3.8-9

明賀新, 柴 建次：体内深部埋込型センシング機器への容量結合型無線電力伝送 - コモンモードの影響を抑制したAC-AC間の伝送特性測定 -, p.99, ライフサポート学会フロンティア講演会, 東

京工科大学, 2015.3.8-9

加我正, 柴 建次: コモンモード電流を考慮した空心偏平型経皮電力伝送システムの効率測定 - 200kHz の理論値と実測値の比較検討 -, p.183, ライフサポート学会フロンティア講演会, 東京工科大学, 2015.3.8-9

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○取得状況 (計 1 件)

名称: 体内情報伝送装置

発明者: 柴 建次

権利者: 東京理科大学

種類: 特許

番号: 特許第 5 8 6 7 8 4 8 号

取得年月日: 平成 2 8 年 1 月 1 5 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rs.noda.tus.ac.jp/shibalab/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

柴 建次 (SHIBA, Kenji)

東京理科大学基礎工学部電子応用工学

科・准教授

研究者番号: 10343112