

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760269

研究課題名(和文)伝送周波数無変換を特徴とする高効率で安全な深部癌温熱治療用電力伝送システムの研究

研究課題名(英文)Energy transmission system for deep local hyperthermia

研究代表者

柴 建次(Shiba, Kenji)

東京理科大学・基礎工学部・准教授

研究者番号：10343112

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

研究成果の概要(和文)：体内深部の癌を治療する手段はまだ確立されていない。我々は体内埋込電極を用いたハイパーサーミアによる癌治療システムを提案している。本研究においては、1)埋込電極のエッジ効果の抑制、2)体外から体内深部への電力伝送、3)体内深部の温度データの体内から体外の情報伝送の3つの課題について検討を行った。

エッジ効果の抑制については、試作した電極を、人体モデルの膵臓部に埋めたモデルを電磁界解析および熱伝導解析ソフト上に作り、SARや温度特性を評価した。その結果、温度は2W送電時に、1.5℃上げることができた。1)～3)を組み合わせた我々のシステムは、体内深部加温に有用なシステムであることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：Treatment for deep local cancer has not yet been established. We propose a hyperthermia treatment method for deep local cancer by using implantable electrodes. In this study, three themes are investigated; 1) A method for suppressing the edge effect of implantable electrode, 2) Energy transmission method from outside body to deep inside body, and 3) Thermal data transmission method from deep inside body to outside body.

As for method for suppressing the edge effect in the implantable electrode, the best electrode model was applied to a numerical human model that included 51 types of tissue and the pancreas (target organ), and the temperature was evaluated. As a result, temperature rise value of 1.5 degrees Celsius in the deep of the target organ and that of 4.5 degrees Celsius near the heating electrodes were obtained when the input power to the electrodes was 2 W at a frequency of 8 MHz. It was found that our system including 1), 2) and 3) has a high capacity for deep local heating.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電力伝送 ハイパーサーミア 癌 SAR エッジ効果 誘電加熱 電磁誘導

### 1. 研究開始当初の背景

癌治療法の一つに、生体に高周波電流を流し、43℃前後に加熱して癌を死滅させる方法（ハイパーサーミア）がある。さらに、近年では、癌組織周辺を38～41℃の温度で加温し、免疫機能を高め癌の進行を抑える治療方法（マイルドハイパーサーミア）も知られており積極的に用いられている。しかし、現在の温熱療法では人体表面の加温は可能であっても、深部を十分に加温することはできていない。特に、深部臓器である膵臓・胆のうの末期癌は治療手段も少なく、深部臓器のマイルドハイパーサーミアが可能になれば末期患者の延命治療にもなる可能性が高い。そこで深部の確実な加熱を実現させるために、ワイアレス電力伝送（電磁誘導）と埋込型の加熱電極（誘電加熱）を組み合わせ、体内深部臓器を加温する方法を提案する。

### 2. 研究の目的

#### (1) 電力伝送方法の検討

体内深部を暖めるために、体内に電極を入れる方法が考えられるが、ワイヤが皮膚を貫くと、感染症を起こす可能性あり望ましくない。そのため、体内コイルで受けとった交流を、磁界を用いて体内まで伝送し、体内で受け取った磁界の電極を用いて、周波数変換せずにそのまま加熱電極に印加することで、体外から体内深部のみを局所的に暖める方法を検討する。このための、電力伝送システムを開発するため、伝送周波数や伝送電力などを検討する。

#### (2) 局所加熱電極と周波数の検討

表面電極を用いた生体組織加温法の一つとして、生体組織を一对の電極で挟み込み電極間に高周波電流を流すことで発生する誘電損失によって癌組織を加温し治療する方法（誘電加温法）が挙げられる。しかしながら、電極の外側にも電流が流れるため、癌の部分以外も加熱してしまう。また、電極付近が局所的に暖まり、電極間があまり暖まらないことが知られているため、何らかの対策が必要である。

本研究では、埋込型電極を用いて体内深部を局所加温する方法を提案している。治療対象臓器を加温する際に、治療非対象臓器の温度上昇を抑え、かつ、深部を局所的に加温できる方法を検討し、その方法を数値人体モデルに応用することで体内深部局所ハイパーサーミアの加温効果を確認する。

#### (3) 体内深部温度の情報伝送

体内深部を加熱する際には、温度上昇を体外にリアルタイムに伝達する必要がある。この方法として、容量結合を用いることが可能である。この仕組みを解明し、情報伝送可能か調べる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 電力伝送方法

磁界を用いて体内深部まで電力を伝送し、さらには電界を用いて加熱する方法が本研究であるが、同じ周波数、同じ電力を用いる点が特徴である。磁界を用いると生体組織の加温は起こらないが、電界を用いると生体組織の加温が起こる周波数帯を見つけるため、電磁界解析を用いて、最適周波数の検討を行った。

伝送用コイルとして、ここではフレキシブル体内コイルを提案した。中空なやわらかいリング状のコイルであり、臓器間の隙間に挿入することができるものである。これを腹腔鏡などを用いて、折りたたんだ状態で体内に挿入し、体内で広げて用いる。図1に試作品の写真を示す。今回は2回巻きのコイルとして、直径16cmのものを用いた。

これを人体の大腸・肝臓・膵臓付近に埋めたモデルを作成し、体外コイルから電力伝送できるかどうか解析による検討を行った。なお、送電用に用いる体外コイルは、腹巻き状のもので20回程度巻いたものとしている。体内コイルの終端には、φ20mmの電極を2個とりつけ、この間に膵臓（癌組織が電極の中央にあるものとしている）を置いた。また、この方法について、特許出願を行った。

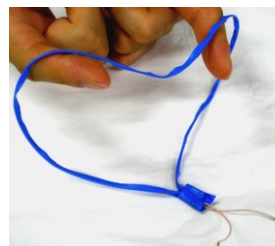


図1 フレキシブル体内コイル

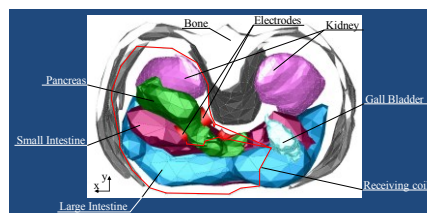


図2 解析モデル

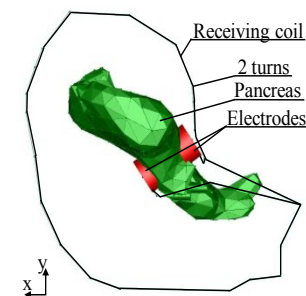


図3 体内コイルと膵臓に挟んだ埋込電極

(2) 局所加熱電極と周波数の検討方法  
電極の外側にも電流が流れるため、癌の部分以外も加熱してしまう。また、電極の付近は電流密度が高くなるため、エッジ効果が発生し、電極の角の部分で、局所加熱が生じる。これを防ぐため、電極の裏側は絶縁シートで覆い、エッジ部分は、さらに厚い絶縁シートで覆った電極を開発し(図4)、その評価を行った。最終的には、数値人体モデルの膵臓部分に電極をつけて、電磁界解析および熱伝導解析により評価した。

さらに、加熱周波数を高くすると加熱効果が上がることが知られているが、ホットスポットが発生し、加熱対照以外の部分が加温される可能性がある。また、周波数が低すぎると、生体刺激作用が生じ、神経を興奮させてしまい危険である。このため、できるだけ高い周波数で、かつ、局所的に加熱が可能な周波数を検討した。

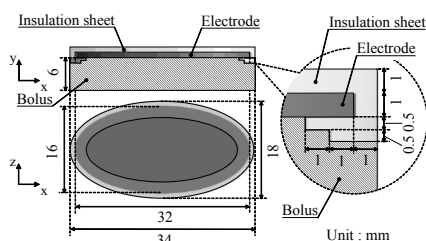


図4 開発した埋込電極

(3) 体内深部温度の情報伝送  
容量結合を用いて、デジタル通信可能か調べる。仕組みを理解するために、電磁界解析を用いて、周波数と電圧伝達率の関係を調べる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 電力伝送の結果

試作した方法により、2MHzで伝送したSARの解析結果、ポイントA(電極間中央部)は、加熱され、電極間以外は、加熱がないことが分かった。つまり、同じ電力を送る場合においても、磁界(電力伝送による電力の移動)は加熱がなく、電界による加熱(電極を用いた加熱)により、加熱されていることがわかる。

局所吸収の指標となるSARにおいて、ポイントAにおいては45W/kgであり、ポイントC(脳脊髄液、導電率が高い箇所)においては、0.5W/kgであった。10W/kgが安全の指標であるため、Cは全く問題ないことがわかる。Aは、10W/kgが1°Cの温度上昇とすると、約4°Cの加熱であることが推定されるが、膵臓付近は血液循環が多い臓器であることから、1°C前後であると思われる。

##### (2) 局所加熱電極と周波数の検討結果

加熱用電極については、3種類検討し(平山, 柴, AEM学会誌, 22(1), 2014参照), 図4

に示したもの(エッジ部を絶縁シートで囲い、かつ、ボラスを挟んだもの)が優れていた。そのため、これを膵臓につけて、臓器がすべてはいた精密な数値人体モデル(NICT, TARO)を用いて8MHzで加熱したときの加熱効果を調べた。図5にモデルと温度上昇結果を示す。入力電力2Wにおいては、血流を考慮しないと51.3°Cとなるが、血流を考慮すると38.5°Cの温度上昇が得られる結果となった。血流が多い場所のため、1.5°C程度の温度上昇になってしまったが、本方式により深部局所加熱が可能であることが明らかとなった。

また、加熱周波数に関しては、30MHz程度までであればホットスポットができることはなく、また、3MHz以上であれば刺激作用はないことがわかった。よって、3-30MHzが適していることがわかった。

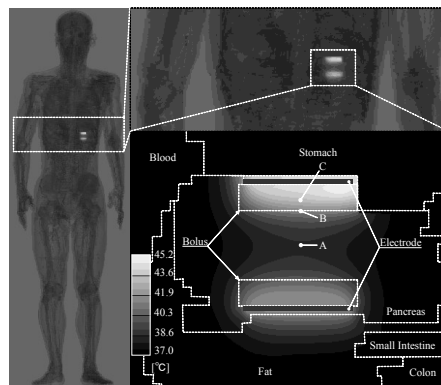


図5 人体モデルと熱解析結果

##### (3) 体内深部温度の情報伝送

電磁界解析ソフトを用いて1~1000MHzまでの電圧伝達率を調べた。その結果、高周波の500~800MHz付近と、2MHz以下において、電圧伝達効率が高くなるポイントがあることがわかった。1kHzの低周波を用いて、温度情報をデジタル伝送するデモ機を作成した。

#### 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5件)

柴 建次, 榎 直通: 体内深部に埋めた医療電子デバイスからの無線情報伝送方法の検討, 日本AEM学会誌, Vol.20, No.1, pp.97-105, 2012. 査読有

Kenji Shiba, Naomichi Enoki, Capacitive-coupling-based information transmission system for implantable devices: Investigation of transmission mechanism, IEEE Transactions on Biomedical Circuits and System, Vol.7,

No. 5, pp. 674-681, 2013 査読有

平山洋志, 柴 建次, 埋込型電極を用いた体内深部局所ハイパーサーミア: エッジ効果の抑制および加温効果の評価, pp. 48-56, 日本AEM学会誌, Vol. 22, No. 1, 2014. 査読有

吉川秀一, 京岡政浩, 柴 建次: 体内-体外間の容量結合型無線情報伝送-模擬生体を用いた減衰特性の実測-, LIFE2013(生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2013), pp. 1-4, GS2-3-6, 2013年9月2-4日, 山梨(山梨大学) 査読無

柴 建次, 吉川 秀一: 微弱電流を用いた体内深部-体外アンテナ間の情報伝送-アナログ通信システムの試作-, pp. 9-12, リニアドライブ研究会, 北海道大学, 2013年10月7日 査読無

[学会発表] (計15件)

Hiroshi Hirayama, Kenji Shiba: Deep local hyperthermia using implantable electrodes and insulation sheets: evaluation of power absorption uniformity in the heating target organ, The 11th International Congress of Hyperthermic Oncology, p. 168, Hyatt Regency Kyoto, Japan, August 28-31, 2012

Takehiro Shibuya, Kenji Shiba: Deep local hyperthermia combined with flexible ribbon-type wireless energy transmission-Analysis of SAR in abdominal region-, The 11th International Congress of Hyperthermic Oncology, p. 168, Hyatt Regency Kyoto, Japan, August 28-31, 2012

柴 建次, 経皮電力伝送と電磁生体影響の解析, 第50回日本生体医工学学会大会, 東京電機大学, 2011年5月1日.

柴 建次, 榎直通: 体内深部に埋めた医療電子デバイスからの無線情報伝送方法の検討, pp. 147-154, 第23回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, 日本AEM学会, 2011年5月18日.

榎 直通, 柴 建次: 電極を用いた体内深部からの無線情報伝送方法の基礎的検討, 日本機械学会茨城講演会, pp. 131-132, 日立市, 2011年8月26日

種田 敦 川原 翔太 柴 建次: 体内埋込型医療機器につけた電極と体外電極間の電力伝達効率の測定, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-11-071, pp. 21-26, 2011年11月24日

柴 建次: 体内医療機器への無線電力伝送とハイパーサーミアへの応用, The 3rd International Biomedical Interface Workshop, 宮古島, 2012年2月26日

柴 建次: 体内医療機器への無線電力伝送, 電子情報通信学会総合大会, pp. 53-54, 岡山大学, 2012年3月22日(招待講演)

加藤結大, 柴 建次: 無線電力伝送を用いた体内深部局所ハイパーサーミア -NaCl水溶液を用いた加温分布の測定-, LIFE2012(生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2012), pp. 1-4, GS2-5-8, 2012年11月2-4日, 愛知(名古屋大学)

澁谷 健大, 柴 建次, 無線電力伝送と組み合わせた深部臓器への局所ハイパーサーミア -2 MHz帯での解析-, pp. 237-238, 日本機械学会茨城講演会, 茨城大学, 2012年8月24日.

阿部 芹生, 平山 洋志, 柴 建次: 深部癌治療用体内埋め込み電極型ハイパーサーミア -熱伝導解析による温度分布の評価-, p. 83, 第22回ライフサポート学会フロンティア講演会, 慶応義塾大学, 2013年3月2日

京岡 政浩, 吉川 秀一, 川原 翔太, 柴 建次: 液体模擬生体中の電流密度測定方法の検討-1 mm 針の試作プローブの場合-, p. 82, 第22回ライフサポート学会フロンティア講演会, 慶応義塾大学, 2013年3月2日

平山 洋志, 加藤 結大, 柴 建次: 深部癌治療用体内埋め込み型ハイパーサーミア-模擬人体を用いた加温実験による温度評価-, pp. 148-149, 第25回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 箱根ホテル小涌園, 2013年5月16日

京岡 政浩, 柴 建次: 液体模擬生体中の電流密度測定プローブの試作-100kHz~1MHzの測定-, pp. 150-151, 第25回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 箱根ホテル小涌園, 2013年5月16日

石渡 将己, 吉川 秀一, 京岡 政浩, 柴 建次: 体内深部-体外間の容量結合型無線情報伝送-送信機挿入位置における電圧利得特性-, p. 77, 第23回ライフサポート学会フロンティア講演会, 東京理科大学, 2014年2月28日

[図書] (計1件)

坊っちゃんシリーズ第3巻『命を守る材料~人工血管から再生医療の最先端へ~』, 東京書籍, 2013年4月5日

[産業財産権]

○出願状況 (計 2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：特許出願  
番号：特願 2011-190992  
出願年月日：23年9月1日  
国内外の別：国内

名称：体内局所加温装置  
発明者：柴建次  
権利者：東京理科大学  
種類：特許出願  
番号：特願 2012-087831  
出願年月日：2012年4月6日  
国内外の別：国内

○取得状況 (計 0件)

[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・准教授  
研究者番号：10343112

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし