

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：31303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700491

研究課題名(和文) 磁界共鳴技術とインプラント型磁気ハイパーサーミアの融合

研究課題名(英文) Combination of Implantable Magnetic Hyperthermia and Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling

研究代表者

田倉 哲也 (TAKURA, TETSUYA)

東北工業大学・工学部・講師

研究者番号：00551912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：深部にある腫瘍への治療方法の開発はハイパーサーミアの分野において重要な課題となっている。特に、磁気ハイパーサーミアにおいては、体内深部まで効率良くエネルギーを伝送する技術が求められている。インプラント型ハイパーサーミアとワイヤレス給電技術である磁界共鳴方式を融合させた方法を提案し、磁界共鳴方式に適したインプラント用発熱素子の設計が可能になった。また、磁界共鳴方式に必要な共振器として用いる励磁コイルについて、最適な形状が存在することが確認できた。さらに、磁性板を併用することで出力向上と小型軽量化の可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：The development of the treatment of the deep seated tumor is the important issues in the field of hyperthermia. Especially, in the magnetic hyperthermia, the technology that can transmit the energy to the heating devices implanted in the deep-seated tumor is required. We proposed the method that combined implantable hyperthermia with the wireless power transfer via magnetic resonant coupling. It was made possible to design the suitable heating device for the method via magnetic resonant coupling. The appropriate configuration of the exciting coil used as a resonator was confirmed. The possibility of high magnetic flux density and miniaturization by utilizing a magnetic plate was suggested.

研究分野：医用システム

キーワード：低侵襲治療システム ハイパーサーミア 磁界共鳴方式

### 1. 研究開始当初の背景

近年、温熱療法を併用することで放射線療法や化学療法の治療効果を高められることから、温熱療法(ハイパーサーミア)への注目が高まってきており、高効率で患部を局所的に加温できる方法がインプラント型ハイパーサーミアの研究課題となりつつある。最近の動向として、インプラント型ハイパーサーミアの分野において、磁性流体を用いた研究が数多く発表されている。この方法は DDS (Drag Delivery System) との相性もよく、患者への負担も小さい。しかし、発熱させるために必要な高周波磁界の条件が厳しく、臨床に使用可能な加温装置は大型なものになる。また、毛細血管の直径よりも小さな粒径であるため、当然患部以外の部分に流れていく可能性も指摘されており、目的とする部位における磁性流体の濃度を高めることが課題となっている。それに比べて、磁性体埋込加温方式は、侵襲的ではあるが、目的とする部位に確実に留置可能であるだけでなく、磁性材料が局所に集中しているため磁性流体よりも緩い高周波磁界の条件で発熱させられる。また、比較的低温なキュリー温度を有する感温磁性材料と金属環を組み合わせた構成を取ることによって発熱体の温度を一定に制御することも可能である。さらに、金属環材料として金を用いることで生体への適合性を図ることができるだけでなく、使用する感温磁性材料自体、非常に溶出しにくい材料である。そのため、磁性流体のように他の部位に流れ出す恐れも少なく、埋め込んだ際の安全性を担保できる。また、留置されている限り何度も同じ条件で治療を行う(ハイパーサーミアは、通常、一回の治療期間内に複数回に渡って加温を行う)ことが可能であるため、高い治療効果が期待できる。現状では、発熱素子の形状と発熱量の関係性やマウスによる加温条件と腫瘍抑制効果について明らかにされており、高い治療効果が見込めることを確認している。しかし、臨床応用への展開に関して、解決すべき課題がいくつか残されている。特に、深部癌を想定した高周波磁界発生装置に関する検討は臨床応用を考えた場合に、欠かすことの出来ないテーマであり、如何に効率よく患部に加温に必要なエネルギーを伝送するかが鍵となってくる。これを実現するための新しい方法が望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究では、ワイヤレス給電技術として非常に注目を集めてきている磁界共鳴方式を高周波磁界発生装置に組込むことで効率よく深部癌を加温することが可能なハイパーサーミアシステムの構築を目的とする。

磁界共鳴方式とは、2007年にMITより発表されたワイヤレス給電の新しい方式である。特徴として、共振器と呼ばれるコイルを送電側と受電側に配置することで、2 m 離れた場所の電球を点灯することを可能にしている。

発熱素子の加温に必要な電力は数 W 程度の電力であり、電球を点灯させる電力よりも小さな電力である。そのため、磁界共鳴方式は体内深部まで発熱に必要なエネルギーを伝送できる可能性を十分に有している。そこで、発熱素子とワイヤレス電力伝送技術である磁界共鳴方式を組み合わせることで、あらゆる場所を局所的に加温できるハイパーサーミアシステムの実現につながる。

### 3. 研究の方法

磁界共鳴方式の励磁周波数帯は、数十 MHz までの範囲に及ぶ。この周波数帯は一般的な磁性体埋込加温方式の励磁周波数帯と比べて高く、これまでの発熱素子や励磁装置の設計方針を再検討する必要がある。そこで、本研究では、従来の励磁周波数から数 MHz までの幅広い周波数帯における電磁界を利用した磁界共鳴方式によるインプラント型ハイパーサーミアシステムについて検討を行うこととする。

まずは、本方式に用いる発熱素子の高周波磁界中における発熱量について検討を行う。数百 kHz 帯までは、金属環における電流分布は比較的均一であり、表皮効果による影響を無視しても結果にそれほど影響はないが、MHz 帯までを考慮すると、膜厚によっては表皮効果による影響を無視できなくなる。そこで、有限要素電磁界シミュレータを用いて発熱素子の電気回路定数の周波数解析を行う。この解析により得られた周波数特性から、磁界共鳴方式に適した発熱素子形状についての検討を行う。

次に、MHz 帯までの高周波磁界中における感温磁性材料の選択方針について検討を行う。発熱素子用感温磁性材料として採用している NiCuZn 系フェライトは、一般的に抵抗率が極めて高く、透磁率は数百以下と低いことで代表され、1MHz 以上で低損失という特徴がある。しかし、実際に発熱素子を小型の針状にした場合、形状から実効的な透磁率は数十程度にしかならず、MnZn 系フェライトのような数千規模の透磁率の必要性はないため、透磁率の大きさ自体は問題にならない。しかし、磁性材料がもつ磁気飽和特性は高周波磁界の強度によって金属環に誘起される電圧の波形を歪ませ、その実効値を変化させてしまう恐れがある。そこで、本研究では、数 MHz までの周波数帯における磁性体の磁気飽和を考慮した発熱量について検討を行い、本方式に求められる磁性材料の特性について明らかにする。

次に、高効率な磁界共鳴方式による外部高周波磁界発生装置の設計及び開発を行う。効率良く磁界を発生させるためには磁界を発生させるコイルの損失が低いことが条件である。MHz 帯における磁界共鳴方式用コイルの損失は、主に DC 抵抗、表皮効果による抵抗そして近接効果による抵抗に起因している。特に高周波帯(数十 MHz ~)では近接効

果を考慮して単線が良いとされている。一方、数百 kHz 帯では表皮効果を考慮してリッツ線が良いとされている。しかし、磁界共鳴方式が盛んな周波数帯における低損失な線材のコンセンサスが取れていないのが現状である。そこで、数値解析により、素線径・より本数・素線配置・線材の観点から、優れた導線構成について検討することで、より高い Q 値を実現する構成を明らかにする。また、患部位置（表皮から 10 cm 程度まで）の距離で最も効率よく磁界を発生させることが可能なコイル形状として、コイル外径・内径・巻数の観点からも検討を行う。また、外部磁界発生装置に磁性材料を利用した場合の検討も行う。磁性材料は、磁束を効果的に集めることができるため、空心の場合と比較してインダクタンスを大きくすることができる。そのため、同じ起磁力でも、患部の磁束密度を改善することが可能になる。ただし、インダクタンスの上昇とともにコイル端電圧が上昇するため、絶縁破壊について十分な検証も必要である。そこで、有限要素電磁界シミュレータを利用し、磁性材料を利用したときの患部磁束密度とコイル端電圧の関係を明らかにし、臨床での使用が見通せる高周波外部磁界発生装置の開発を行う。

次に、開発した高周波磁界発生用コイルを共振器として利用するための回路条件について検討を行う。本方式では、高周波電源と共振器は磁気的な結合を介してエネルギーを伝送するため、電源側のコイルと共振器コイルとの間の最適な関係、つまり最適な相互インダクタンスを明らかにする必要がある。そこで、共振器を限定した際の電源側コイルの形状および配置方法について検討を行い、共振器に流れる電流の制御方法について明らかにする。また、マッチング回路を導入した際の共振器コイルに流れる電流の制御方法についても検討を行い、より効果的な共振器コイルを用いた高周波磁界発生装置の開発を行う。

次に、磁界共鳴方式によるインプラント型ハイパーサーミアシステムにおける高周波外部磁界発生装置が周囲に発生させる磁界と ICNIRP ガイドラインの参考レベルとの比較検討を行うと同時に、外部漏洩を防ぐ方法（磁性材料の使用等）についても検討を行う。

#### 4. 研究成果

MHz 帯の電磁界を利用する磁界共鳴方式に合わせたインプラント型ハイパーサーミア用発熱素子に関して、MHz 帯の周波数が金属環部の電流密度に及ぼす影響を調べるために、50 kHz から 2 MHz の範囲で金属環部の電流密度について有限要素電磁界シミュレータによる周波数解析を行った。結果として、最適膜厚の条件であれば電流密度分布は最大値の  $1/e$  を下回ることはなかった。ただし、最適膜厚でも素子長によっては  $1/e$  を下回る条件も存在した。 $1/e$  を下回る部分が広がる

と有効な断面積が低下するため、抵抗値の上昇につながる。一方で、最適膜厚ではなく膜厚を一定とした場合では、周波数の上昇とともに電流密度は  $1/e$  を下回る部分が広がり、抵抗値の上昇とインダクタンス値の低下を引き起こした。ゆえに、MHz 帯の電磁界を利用する磁界共鳴方式用の発熱素子としては、最適膜厚に合わせる条件となる。この結果をもとに、発熱素子の高周波磁界中における発熱量導出に必要な回路定数を求めるために、50 kHz から 10 MHz までの見かけの透磁率および発熱素子のインダクタンス値について先と同様に周波数解析を行った。条件として、周波数毎の金属環厚は発熱量が最大となる膜厚（最適膜厚）を選択している。結果として、各周波数における見かけの透磁率およびインダクタンス値を明らかにすることができた。また、素子長を 2 から 20 mm まで変化させたときの値についても周波数解析を行い、素子形状と周波数における関係を明らかにした。

次に、MHz 帯の磁界中で機能する感温磁性材料の選択方針について検討を行った。磁気飽和時に金属環に誘起される電圧波形を近似的に求めることにより、磁性体の磁気飽和を考慮した発熱量について解析を行った。50 kHz から 5 MHz までの範囲で周波数による磁気飽和を考慮した発熱量による素子中心部の到達温度について解析を行った。結果として、高周波数ではキュリー点到達に必要な励磁磁束密度が低下するため飽和磁束密度が低くても問題ないが、逆に低周波数では高磁束密度が必要になるため高い飽和磁束密度が求められることが明らかになった。ただし、より高いキュリー点をもつ発熱素子を考慮した場合、必要な励磁条件が上がることから、飽和磁束密度に余裕をもたせなければならない。ゆえに、本方式に求められる磁性材料としては、励磁磁束密度を効率良く熱エネルギーへ変換することが可能な高飽和磁束密度を有する磁性材料の選択が優位であることが示唆された。また、解析結果が妥当なものであるか寒天ファントムを用いた実験を行った。その際、励磁周波数は、スケールモデルとして比較的低い条件である 200 kHz で行った。実測値と解析値（どちらも発熱素子からの温度分布）を比較したところ、概ね結果が一致し、磁気飽和を考慮した発熱量解析が妥当であることが確認できた。

次に、MHz 帯の電磁界を利用する磁界共鳴方式に合わせたインプラント型ハイパーサーミア用励磁装置に関して、高効率な高周波外部磁界発生装置を実現するべく、素線径・より本数・素線配置の観点からリッツ線の選択方針について検討を行った。リッツ線の構成要素として、素線径やより本数等が考えられる。その関係を明確にするために、導線の近接効果および表皮効果による影響を加味して、リッツ線構成による Q 値について周波数特性の数値解析を行った。解析条件として、

周波数は 1 kHz から 1 MHz, リッツ線の素線径を 0.05, 0.08, 0.1 mm と変化させている。このとき, 導体全体の断面積は同じになるように素線数は変えてある。結果として, 素線径が小さいコイルの Q 値が高くなることが明らかとなった。これは素線径が小さいことで, 表皮効果や導体同士の近接効果が抑制された結果であると考えられる。また, コイルの Q 値が最大となる周波数は, 素線径が小さくなると高周波側に移動したため, 励磁周波数に適したリッツ線構成が存在することが明らかになった。ゆえに, 素線を細くし, 撚り数を増加させたコイルが MHz 帯におけるコイルとして適していると言える。また, 素線材についても解析を行ったところ, 周波数によって適切な線材が存在することも確認することができた。

次に, 高効率な高周波外部磁界発生装置の設計・開発を行った。共振器コイルの種類としては, スパイラルコイルを選択し, 内外径比と巻線部分における起磁力に注目し, サイズの小型化を目指して有限要素電磁界シミュレータを用いた解析を行った。その際, 磁性材料配置の有無の観点から患部における磁束密度と共振器コイルサイズの関係について検討を行った。結果として, 磁性材料の有無に係らず患部の位置により, 最適なコイルサイズが存在することが明らかとなった。また, 磁性材料を配置することで, 同起磁力・同サイズの条件では, 空心の場合よりも患部における磁束密度を向上できることが確認できた。さらに, 治療に必要な磁束密度を実現するためのコイルサイズは, 磁性材料を用いることで小型化することができるため, 共振器コイルのダウンサイジングも可能になる。このことから, 不必要にコイルサイズや起磁力を拡大しなくてもよくなるため, 結果としてコイル端電圧を抑制することにもつながる。また, 解析によって得られた結果をもとに実機を作成し, 励磁電流値を変化させてコイル中心から 50 mm 離れた位置における磁束密度を測定したところ, 解析結果との一致を確認することができた。実験では, 電源設備の関係上, 周波数のスケールモデルとして低周波条件 (98 kHz) で行ったが, 磁束密度とコイルサイズの関係は周波数に依存しないため, 磁界共鳴方式のような MHz 帯にも本研究の結果は展開することが可能である。

次に, 検討してきたコイルを共振器として利用するために, 共振器コイルと磁気結合させる電源側コイルの開発を行った。電源側コイルに流れる電流値に対する共振器コイルに流れる電流値の倍率 (電流比) は, コイル間の相互インダクタンスに比例することから, 電源側コイルの形状による相互インダクタンスの関係性について, コイル形状による相互インダクタンスは有限要素電磁界シミュレータを用いて, 電流比については数値解析により検討を行った。このとき, 電源側コ

イルの配置箇所は共振器コイルの内径部分とした。これは, 空いたスペースを利用することで, 二つのコイルを用いることによる装置拡大の抑制を図ったためである。結果として, 電源側コイルの内外径比を変化させたとき, 内外径比が大きい, つまり内径が小さいほど, 電流比は大きくなった。しかし, 入力インピーダンスのリアクタンス成分が残ったままのため, 電源側の電圧の上昇を招く恐れがある。そこで, 回路を駆動するためのマッチング回路についても検討を行った。回路に対して力率改善のために直列と並列を組み合わせてコンデンサを接続することで, 力率改善とインピーダンスの調整を同時に実現できた。

次に, 磁界共鳴方式によるインプラント型ハイパーサーミアシステムにおける高周波外部磁界発生装置が周囲に発生させる磁界と ICNIRP ガイドラインの参考レベルとの比較検討を行った。本研究では, 小型化と磁束密度の増強のために共振器コイルの背面に磁性材料を配置しているが, その構成における共振器コイル周囲の磁束密度分布の解析を行ったところ, 患者と接する面では確かに磁束密度が上昇するため, 治療には効果的である。一方, その逆の面方向では磁束密度が低下した。ゆえに, 治療方向以外の磁束の漏れを低減できるため, 治療装置を扱う人の身体に曝露される磁束密度のレベルを抑制に効果が期待される。また, 周囲磁束密度分布における参考レベルの範囲を明らかにすることができた。

#### 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 1 件)

1) 三澤崇弘, 田倉哲也, 佐藤文博, 佐藤忠邦, 松木英敏「非接触給電におけるリッツ線の線材選択に関する一検討」Journal of the Magnetics Society of Japan 第 37 巻 pp.89-94 2013 (査読有)

〔学会発表〕(計 5 件)

1) 江崎龍洋, 青木圭一郎, 田倉哲也, 佐藤文博, 佐藤忠邦, 松木英敏「独立型 LC 共振器を用いた磁気ハイパーサーミア用励磁システムの検討」平成 24 年度電気関係学会東北支部連合大会 秋田県立大学 (由利本荘市) 2012 年 8 月 30 日

2) K. Aoki, T. Esaki, T. Takura, F. Sato, T. Sato, H. Matsuki, "A study of calculation of exciting condition under magnetic saturation for soft-heating hyperthermia," ICAUMS2012, Nara, Japan, October 2nd, 2012

3) 横松広太, 田倉哲也, 佐藤文博, 佐藤忠邦, 松木英敏, 家名田敏明「磁気ハイパーサーミアにおける到達温度と励磁条件に関す

る発熱素子形状の検討」平成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会 会津大学 2013 年 8 月 23 日

4) 横松広太, 田倉哲也, 佐藤文博, 佐藤忠邦, 松木英敏, 家名田敏明「ソフトヒーティングハイパーサーミアにおける発熱素子形状と加温特性に関する検討」平成 25 年度スピニクス特別研究会 岩手大学 2013 年 10 月 18 日

5) T. Takura, F. Sato, and H. Matsuki, "Design of High Frequency Magnetic Field Generator with Ferrite Core for Inductive Hyperthermia," 59th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Honolulu, USA, November 6th, 2014

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田倉 哲也 (TAKURA TETSUYA)  
東北工業大学・工学部・環境エネルギー学科  
研究者番号：00551912

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者