

令和元年6月20日現在

機関番号：31303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K13038

研究課題名(和文) LC-Boosterを搭載した低侵襲磁気ハイパーサーミアシステムの開発

研究課題名(英文) Development of minimally invasive magnetic hyperthermia system equipped with LC-Booster

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)：本研究では、LC共振型ワイヤレス給電技術であるLC-Booster方式を発熱素子に組み込んだ低侵襲磁気ハイパーサーミアシステムの構築を目的とした。発熱素子構成についての検討として生体による影響を考慮した励磁周波数と発熱素子形状による特性を明らかにすることができた。また、試作した発熱素子の動作検証により、本研究で開発した発熱素子は従来型を凌ぐ性能を有することを示すことができた。さらに、臨床応用を目指した場合に必要な生体媒質の違いによる温度特性から励磁条件に展開する指針を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

がん治療への温熱療法の中でも低侵襲で局所的な治療が可能な方式であるソフトヒーティング法は、外部から高周波磁界を印可することで非接触で発熱体を加熱することができる。しかし、磁界発生装置が大型になることが課題の一つとなっていたが、本研究により、これまでよりも低い磁界強度で発熱素子を加熱できる可能性が出てきた。本研究成果は、ソフトヒーティング法を応用した方式として、患部以外での不要な加熱の抑制や、装置全体の小型化によって在宅での治療の実現につながるものである。

研究成果の概要(英文)：In this research, novel heating element applied LC-Booster method which was one of LC resonance type wireless power supply technology was developed for minimally invasive hyperthermia. As a study on the heating element configuration, we clarified the exciting frequency band considered the influence of human body and confirmed the electrical characteristics due to the heating element shape. In addition, we showed that the heating element of LC-Booster type had performance superior to that of the conventional type by the operation verification of the prototype heating element. Furthermore, we obtained a guideline toward the effective exciting condition by analyzing the temperature characteristics due to the difference of tissue which was required when aiming at clinical application.

研究分野：医用システム

キーワード：低侵襲治療 ハイパーサーミア 感温磁性体 LC-Booster

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

日本人の主な死亡要因のうち、悪性新生物（癌）は数十年近くにわたり死亡要因の第一位として位置し続け、なおその数は増加傾向を示している。そのため、早急な治療システムや特効薬の開発が望まれている。近年では、癌に対する有効な治療方法は数多く提案されており、早期発見ができれば治療後の生存率は飛躍的に向上している。しかし、体内深部の癌においては、悪化するまで病状が表に出にくい（発見時の腫瘍径が大きいあるいは腫瘍数が多い）、生命活動に重要な役割を果たす臓器などの特徴があり、広範な切除は機能の欠損につながるだけでなく死に至る危険性を高めてしまう。また、患部までのアクセスが複雑なため度重なる外科的治療には体力が必要である。そこで治療においては患者への負担が少なく、機能を温存可能な局所的治療が求められている。

局所的治療方法の一つとして感温磁性体を利用したソフトヒーティング法によるハイパーサーミア方式がある。本方式は体内患部に埋め込んだ素子に高周波の磁界を印可することで素子の温度を制御しながら加熱できる低侵襲な治療方法である。しかしながら、加熱に必要な磁界強度を体内深部で実現するために求められる電源仕様はシステム全体の小型化と相反する状況となっていた。

### 2. 研究の目的

高周波磁界を発生させる励磁装置を小型化するためには、装置の一部であるコイルのデザインを見直すこと、一定磁界中における発熱素子の加熱性能を向上させること、あるいはその両方が求められる。本研究では、発熱素子の性能向上に重点をおき、その方策として共振型ワイヤレス給電技術の一つである LC-Booster 方式を導入する。LC-Booster 方式の特徴として、共振器コイルと負荷コイルが独立して配置することで対象とする負荷での効率を改善することが可能になる。現在の発熱素子は 1 turn の負荷コイル（感温磁性材の外側を金属で覆った複合型の構造）が存在しており、これに共振器コイルを付加することで LC-Booster 方式の構造とほぼ同等になる（図 1）ため、一定磁界中における加熱性能の改善につながることが期待できる。

そこで本研究では、(1) 生体による影響を考慮した励磁周波数の選定、(2) 複合型発熱素子の形状による特性解明、(3) LC-Booster 型発熱素子の性能評価、(4) 熱特性の異なる生体媒質中における発熱素子の温度特性について検討を行い、LC-Booster 機構を組み込んだ発熱素子による低侵襲磁気ハイパーサーミアシステムの構築を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 生体による影響を考慮した励磁周波数の選定

塩化ナトリウム、寒天試薬、純水から構成されるファントムを作製し磁界印可試験から励磁周波数選定のための検討を行った。最初に、塩化ナトリウム濃度が励磁コイル（インピーダンス試験用）のインピーダンスに与える影響を明らかにするため、励磁コイル上にファントムを配置したときの励磁コイルのインピーダンスの周波数特性について検討する。次に、励磁コイルの中心からコイル面に対して垂直方向に 50 mm 離れた地点にファントムを介して置いたサーチコイルの誘起電圧から励磁磁束密度に与える影響を検討する。

#### (2) 複合型発熱素子の形状による特性解明

LC-Booster を搭載する前の複合型発熱素子について、電磁界シミュレーションと回路解析を組み合わせサイズ（長さ、直径）と発熱の関係について検討する。流れとして、電磁界シミュレーションにより自己インダクタンスと形状依存の見かけ比透磁率を導出し、その結果を等価回路へ適用したときの単位時間あたりの発熱量（回路では消費電力を解析）を形状ごとに解析を行う。

#### (3) LC-Booster 型発熱素子の性能評価

実機の性能評価として、最初に、LCR メータに接続された小型励磁コイル中に LC-Booster を搭載した複合型発熱素子の実機（図 3）を配置し、定電流条件における小型励磁コイルの等価直列抵抗の変化から発熱素子における消費電力を間接的に測定することで、発熱素子性能について検討する。

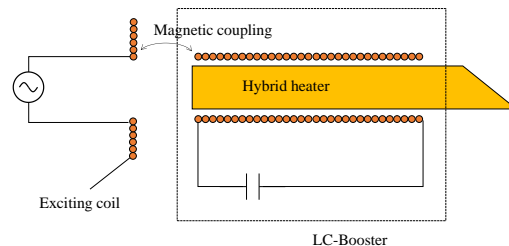


図 1 LC-Booster 搭載型発熱素子の励磁

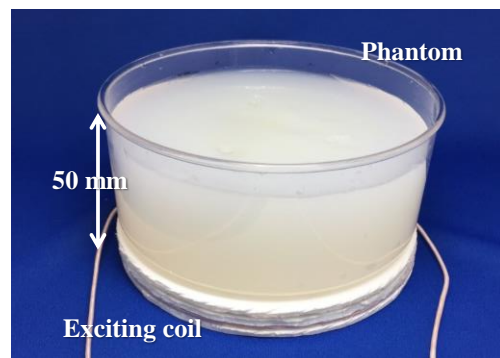


図 2 試験用励磁コイルとファントムの概観



図 3 LC-Booster 搭載型発熱素子の概観

次に、試作したヘルムホルツ型励磁装置を用い、高周波磁界中における素子表面温度の時間経過を測定し、従来型と LC-Booster 型の比較から励磁磁束密度と一定時間経過後の到達温度の関係について検討する。

#### (4) 熱特性の異なる生体媒質中における発熱素子の温度特性

熱特性の異なる生体媒質中において温度制御点に到達するために必要な単位時間あたりの発熱量について 3 次元熱伝導解析を行い、発熱素子周囲媒質が到達温度に与える影響について検討する。なお、周囲組織は均一であるとし、複数の組織を組み合わせではない。また、解析領域は初期温度と境界の温度を 37 °C とし、素子を模擬した物体に与える単位時間あたりの発熱量を 0.2~1.0 W まで変化させ、加熱開始から 20 秒までの発熱素子中心の温度を解析する。

### 4. 研究成果

#### (1) 生体による影響を考慮した励磁周波数の選定

塩化ナトリウム濃度が異なるファントムを励磁コイル上に配置したときのインピーダンスを測定したところ、抵抗分が、塩化ナトリウム濃度の上昇とともに高くなることが確認された (図 4)。また、空気の場合とファントムを配置した場合のサーチコイルの誘起電圧を周波数毎に測定したところ、同一濃度においては周波数の上昇とともに誘起電圧が低下することが確認された (図 5)。さらに、塩化ナトリウム濃度が高くなるにつれて出力電圧が低下する傾向も確認された。塩化ナトリウム濃度により導電率が変化していると考えられ、高周波磁界による渦電流が結果に影響している可能性が高い。ただ、人体の塩分濃度に近づくと、ファントムの有無による変化が小さかったことから、人体を対象とした場合には励磁条件の周波数帯の幅は今回実験を行った範囲 (~300 kHz) までには広げても問題ないことが確認された。よって、本研究では 300 kHz までを検討の対象とすることにした。

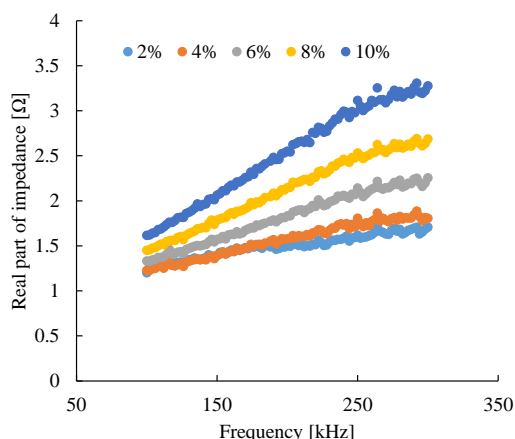


図 4 励磁コイルのインピーダンス (実数成分)

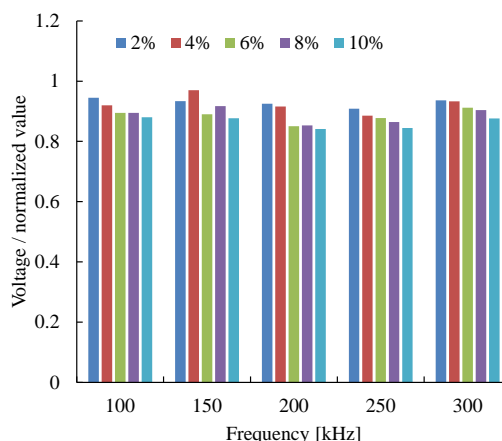


図 5 サーチコイルの誘起電圧 (ファントムがないときの電圧で規格化)

#### (2) 複合型発熱素子の形状による特性解明

計算を容易にするために発熱素子の形状を円柱状とし、その長さを固定した状態で直径を拡大したときの内部発熱と単位体積当りの発熱との関係について検討を行ったところ、形状のアスペクト比 (長さ/直径) が単位体積当りの発熱に影響を与えていることが確認され (図 6)、LC-Booster を搭載する複合型発熱素子の形状として高アスペクト比に設定することが有効であるとの見解を得た。ただし、高過ぎるアスペクト比は、側面からの衝撃によって破損するリスクがあるため、本研究ではアスペクト比が 10 以下となる形状で検討を行うことにした。また、LC-Booster と複合型発熱素子の等価回路による解析を進めるにあたり、金属環のインダクタンス及び巻線抵抗、そして金属環との間の結合係数を直接測定することが困難なため、LC-Booster 用コイルからみたインピーダンスの測定と、シミュレーションによる金属環の自己インダクタンスの解析結果をもとに各値の同定を進め、構築した回路をもとに巻線抵抗、インダクタンス、結合係数が単位時間あたりの発熱量に与える影響について確認した。

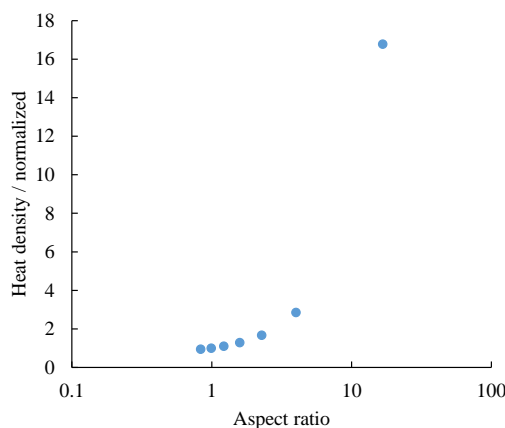


図 6 単位体積当りの発熱とアスペクト比の関係

### (3) LC-Booster 型発熱素子の性能評価

一定磁界を印可中の励磁コイルへの入力電力から励磁コイル自体の損失を差し引くことで発熱素子における消費電力を間接的に測定する手法を試みたところ、従来型よりも発熱素子における消費電力が、特定の周波数において大幅に上昇する結果が確認された (図 7)。ただし、共振特性から外れた周波数帯においては従来型の特性が優れることも確認された。回路での消費電力はほぼ熱として消費されるとすると、消費電力の上昇は発熱性能の向上につながっていると考えられ、LC-Booster 型発熱素子は共振条件を設定した周波数において従来型よりも優れた加温能力を有する可能性が示唆された。次に、試作したヘルムホルツ型励磁装置を用い、高周波磁界中における素子表面温度の時間経過を測定したところ、従来型と比較して LC-Booster 型は、より低い励磁条件で制御温度に到達可能であることが確認された (図 8)。また、同形状において LC 共振器を単独で利用した発熱素子よりも接続するコンデンサの容量値変化に強いことも明らかとなった。

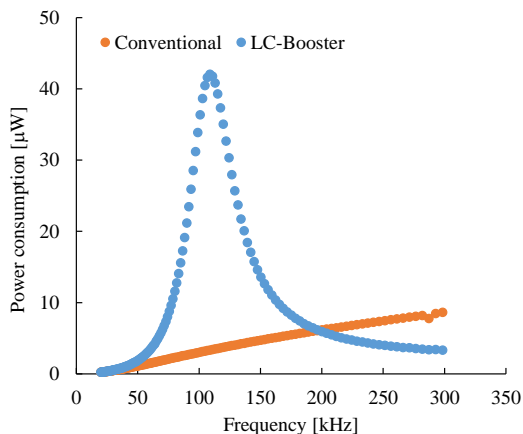


図 7 発熱素子の消費電力の周波数特性

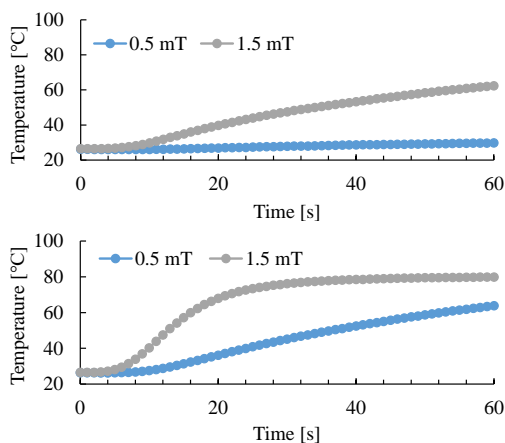


図 8 励磁加温時の素子近傍における温度の経時変化 (上: 従来型、下: LC-Booster 型)

### (4) 熱特性の異なる生体媒質中における発熱素子の温度特性

発熱素子形状を一定とした条件において、媒質中 (熱特性の異なる媒質として水、筋肉、脂肪、そして肝臓を選択) に発熱素子を配置したと想定した際の温度分布の経時変化を熱伝導解析から求めたところ、発熱素子自体が設定した温度制御点に到達するために必要な単位時間当りの発熱量は、周囲媒質の熱伝導率に依存する傾向が確認された (図 9)。なお、20 秒間で到達することができなかった条件については値を記していない。素子の発熱量は励磁条件に関係していることから、結果として、部位毎に励磁条件を検討しなければならない可能性が示唆された。

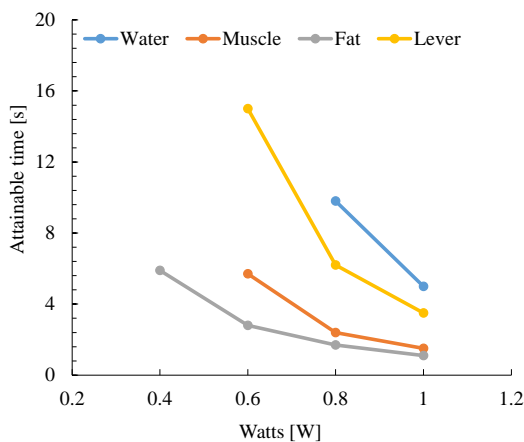


図 9 素子の発熱量と到達温度の関係

以上、LC-Booster 機構を組み込んだ発熱素子による低侵襲磁気ハイパーサーミアシステムの構築に向けた検討を進め、金属環と感温磁性材を組み合わせた従来型の発熱素子よりも高機能な発熱素子を開発することができた。今後は、デバイスとしての最適化や、生体内に留置する際に求められる生体適合材を用いたモールドによる影響評価等について検討していくことが重要となってくる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 佐藤 峯人、十文字 雄大、田倉 哲也、生体等価ファントムの NaCl 濃度によるソフトヒーティングハイパーサーミアシステムの性能評価、平成 30 年東北地区若手研究者研究発表会、2018
- ② 田倉 哲也、梶原 将、菊地 大貴、松木 英敏、LC ブースター回路が機能的ハイパーサーミア素子の温度特性に与える影響、第 52 回日本生体医工学会東北支部大会、2019

- ③ 渡邊 光樹、押切 汰樹、田倉 哲也、周囲組織の熱特性を考慮した機能的ハイパーサーミア素子の温度解析、平成 31 年東北地区若手研究者研究発表会、2019
- ④ 菊地 大貴、梶原 将、田倉 哲也、整磁鋼コアによる機能的ハイパーサーミア素子の性能評価と LC ブースター型への利用の可能性、平成 31 年東北地区若手研究者研究発表会、2019
- ⑤ 田倉 哲也、梶原 将、菊地 大貴、松木 英敏、LC ブースターを用いた機能的ハイパーサーミア素子の共振設定に関する検討、平成 31 年電気学会全国大会、2019

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。