

氏名（本籍地）	ふりや けんたろう 降矢 健太郎
学位の種類	博士（医工学）
学位記番号	医工博 第 20 号
学位授与年月日	平成24年 3月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院医工学研究科（博士課程）医工学専攻
学位論文題目	針状感温強磁性体埋込型ハイパーサーミアにおける 機能的励磁方式に関する研究
論文審査委員	（主査）東北大学 教授 松木 英敏 東北大学 教授 吉信 達夫 東北大学 教授 出江 紳一 東北大学 准教授 佐藤 文博 （工学研究科）

論文内容の要旨

ハイパーサーミアとはがんの温熱療法のことであり，主な治療法である外科療法・化学療法・放射線療法などに比べて，副作用が患部付近の火傷程度と，比較的小さい点で注目されている。ハイパーサーミアの一種で，針状の感温強磁性体を発熱体として患部に埋め込む加温方式はソフトヒーティング法と呼ばれる。この方式は，発熱体自身に温度制御機能を持ち，正確に加温範囲を限定できるため，正常組織の温存療法に適した加温方式である。また，ソフトヒーティング法は先行研究の成果により，発熱体の小型化・高発熱化，発熱体の加温範囲，動物実験による治療効果が確認されており，根治療法として有効な磁気ハイパーサーミアであることが明らかとなっている。しかしながら，発熱体にエネルギーを伝送する励磁装置に有効なものが存在しないため，本加温方式は普及に至っていない。この原因が，励磁構成にあるとして，本論文は，針状磁性体を的確に加温できる機能的励磁装置やその小型化・簡易化について研究成果をまとめたものである。

以下に各章の要旨を述べる。

第1章は，緒言であり，本研究の背景及び目的について述べている。

第2章は，ハイパーサーミアに関する概説である。また，本研究で取り上げている加温方式であるソフトヒーティング法について，その原理・諸特性など，先行研究の成果を踏まえて述べている。加えて，ソフトヒーティング法の実現に必要な不可欠な，発熱体にエネルギーを伝送する励磁装置について，二点の課題について言及している。一つは任意の方向に埋め込まれた針状磁性体を的確に加温できる励磁装置が存在しないため，「多方向磁界」が必要な点である。二つ目は，磁気ハイパーサーミア共通の課題であるが，励磁装置の小型化が必要な点である。

第3章では，多方向磁界を発生させる手法について述べている。発熱素子の設置角度・位置（あるいはコイルの設置角度・位置）の自由度を確保しつつ，最も効率よく発熱させるには多方向磁

界が必要である。しかしながら、多方向磁界として一般的な回転磁界を用いると、励磁コイル間の電磁結合によって生じる誘導電流が問題となり、安全な使用ができず、コイルモデルが制限され、上記の自由度が実現できない。そこで、二種類の周波数で二つの励磁コイルを駆動する「二重周波数励磁法」を提案し、以下の特徴を持つことを明らかにしている。

1. 二次元平面内で多方向磁界の生成が可能であること
2. 励磁コイル間の電磁結合の度合いによらず、安全な駆動が可能であること

提案している「二重周波数励磁法」について、電磁結合がない、すなわち結合係数が0であるコイルモデルと、電磁結合が比較的大きなコイルモデルにて、多方向磁界が発生することを理論、実験の両面から明らかにしている。また、様々な向きに設置された針状磁性体の加温が可能な機能的な励磁構成であることも示している。加えて、「二重周波数励磁法」を使用した場合の素子発熱量について、簡易に見積もれることについても言及している。なお、結果の抜粋として、図1に様々な角度に設置した発熱素子表面温度の測定結果について示す。左図が従来の単一方向磁界を用いたもので、右図が二重周波数励磁法による多方向磁界で励磁したものである。二重周波数励磁法を用いると、発熱素子の設置角度に関わらず、素子の加温が可能であることが確認できる。

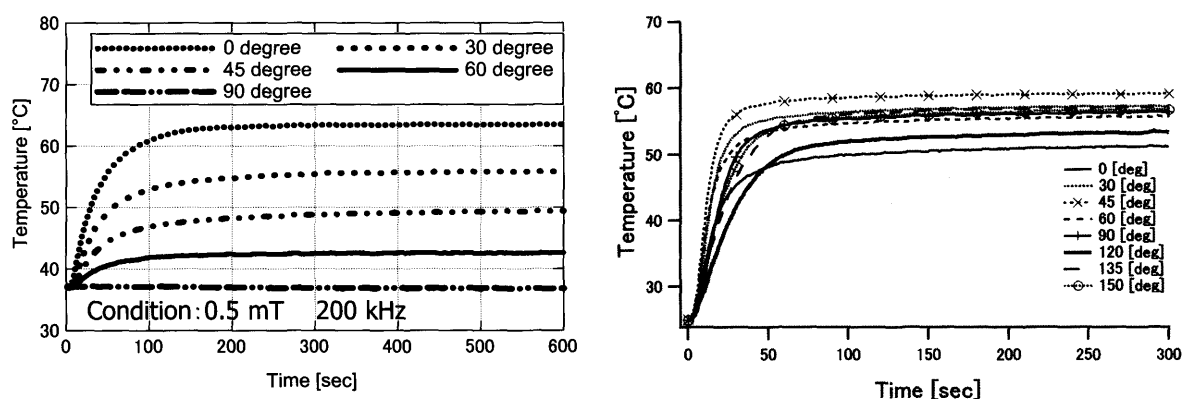


図1 単一方向磁界と多方向磁界の素子温度特性比較

以上、第3章では、多方向励磁を具現化する「二重周波数励磁法」を提案し、実証した結果について述べたものである。また、コイル間の電磁結合に影響しない、誘導電流を低減できる励磁方式であることも明らかにし、コイル設計の自由度を格段に向上させる励磁法であることをも示すものである。

第4章では、二次元平面内における多方向磁界生成法である「二重周波数励磁法」を、三次元の多方向磁界を生成できる「多重周波数励磁法」に拡張を行っている。「多重周波数励磁法」は複数の励磁コイルを複数の周波数で駆動する励磁方式である。三個の励磁コイルを三種類の周波数で駆動し、三次元の多方向磁界が生成されることを実験によって示している。

第5章では、励磁構成の小型化と簡略化の検討結果について述べる。励磁コイルに対して、効果的に電流を流す方法として、一種の共振器である「Magnetic Current Booster」を提案する。

また、「Magnetic Current Booster」を用いた、複数励磁コイルの単電源駆動方式、すなわち励磁構成の簡略化についても述べている。

「Magnetic Current Booster」は一次コイルとの電磁結合によって、励磁コイルに大きな誘導電流を流し、磁気ハイパーサーミアの磁界源とする方法である。電源装置に直接励磁コイルを接続した場合と比べて、非常に大きな電流を流せる励磁構成である。従来の電源に励磁コイルを直接接続する方法と比べて、同じ電流値を得るには、より小さな電源容量で済み、同じ電源容量ならばより大電流が得られる励磁方式であることを示す。また、「Magnetic Current Booster」の配置を工夫した「リフレクターコイル」を提案し、さらに大電流が得やすくなることも示す。

第4章で複数の励磁コイルを使用する「多重周波数励磁法」を提案しているが、コイルと同数の電源装置（発振器・電力増幅器など）が必要であり、励磁構成そのものが巨大化してしまう欠点が存在した。これを解決するために、「Magnetic Current Booster」を用いて、複数励磁コイルの単電源駆動方式を提案する。いわば、「Magnetic Current Booster」を「多重周波数励磁法」に適用したものである。これは、用いる複数の周波数から成る歪波形を一次コイルに入力し、電磁結合をしている全ての「Magnetic Current Booster」に特定周波数のみの電流を誘導する方法である。一組の電源構成でありながら、複数励磁コイルの駆動が可能となる手法である。

以上、第5章は「Magnetic Current Booster」を用いて、励磁構成の小型化と「多重周波数励磁法」における励磁構成の簡略化（単電源化）について示すものである。

第6章は、これまでで述べた方法をもとに臨床を想定した励磁コイル設計について検討を行っている。

第3章で提案した「二重周波数励磁法」を使用する治療用コイルモデルについて、第5章で提案した「Magnetic Current Booster」による単電源駆動方式を適用し、発熱素子の加温実験を行い、簡易な励磁構成で多方向励磁が、実際に実現可能であることを示す。また、同時に発熱素子の加温が十分可能であることも示す。加えて、治療プロトコル作成に必要な不可欠であるため、使用したコイルモデルにおける素子設置可能位置と設置可能角度について、判定表を作成し、使用したコイルの加温能力の評価を行う。先行研究による発熱量の見積もり方法を基に、設置された発熱素子が最大発熱量を実現できる設置地点と設置角度について示すものである。

また、第4章で提案した「多重周波数励磁法」を使用する治療用コイルモデルについても単電源駆動方式を適用し、多方向に設置された発熱素子の加温が可能であることについても示す。前述の二重周波数励磁法の臨床を想定したコイルモデルと同様に、発熱素子の設置可能領域についても言及している。

第7章は、結言であり、本研究のまとめと臨床応用実現に向けた展望、検討すべき課題についてまとめている。本研究により、ソフトヒーティング法は「発熱体」、「励磁装置」の検討が完了した。また、第6章より「治療プロトコル」についても指針を得ている。

以上、本論文は、ソフトヒーティングハイパーサーミアに適した、なおかつ他の磁気ハイパーサーミアにも応用できる機能的励磁方式についてまとめたものである。

論文審査結果の要旨

がんに対するハイパーサーミア（温熱療法）は副作用が小さく，その中で，針状の感温強磁性体を発熱体として患部に埋め込む加温方式は，温度計測が不要であり，低侵襲治療法として優れた特徴を有する．しかしながら，発熱体にエネルギーを伝送するための励磁装置に適切なものが存在せず，本方式は普及するに至っていない．本論文は，針状磁性体を的確に加温できる機能的励磁装置の構成法およびその小型化について検討を行った研究成果をまとめたものであり，全編7章からなる．

第1章は緒言であり，本研究の目的及び概要を述べている．

第2章はハイパーサーミアにおける加温方式について各方式の得失を明らかにするとともに，機能的励磁方式の必要性について述べている．

第3章では，針状磁性体を効果的に加温するための多方向励磁方式について，二重周波数による励磁法を提案し，二次元平面内での多方向磁界生成に成功している．これは重要な成果である．

第4章では，前章の成果を多重周波数に拡張し，三次元の多方向磁界による励磁方式を提案すると共に励磁コイル間の干渉問題の解決法も示している．これは，励磁装置の位置を考慮することなく，がん組織に対して発熱体の効果的な刺入を可能とするもので，優れた成果である．

第5章では，非干渉性を維持した電流増幅法を考案し，容易に大電流が得られる回路構成を示すと共に，ポータブルな単電源のみで多重周波数励磁装置を実現する画期的な方法について実証している．これは将来，ベッドサイドでのハイパーサーミアを可能とする極めて重要な成果である．

第6章では，前章までに述べた成果を踏まえて試作した励磁装置を用いて，任意の方向に埋め込んだ針状磁性体の加温が可能であることを実証すると共に，コイルモデルごとにシミュレーションを行い，発熱体埋込可能領域についての指針を示した．これは治療計画の際に必要な有用な成果である．

第7章は結言である．

以上要するに本論文は，斬新なアイデアで，針状磁性体を発熱体としたハイパーサーミア用励磁装置の高性能化，小型化を実現し，臨床応用への道を開くものであり，医工学及び電気工学の発展に寄与するところが少なくない．

よって，本論文は博士（医工学）の学位論文として合格と認める．