

多周波マイクロ波ラジオメトリによる生体内温度分布無侵襲計測法に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学大学院電子科学研究科 公開日: 2008-03-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大庭, 弘行 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/1232

氏名・(本籍)	大庭弘行(静岡県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博甲第 128 号
学位授与の日付	平成 8 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻の名称	電子科学研究科 電子応用工学
学位論文題目	多周波マイクロ波ラジオメトリによる生体内温度分布無侵襲計測法に関する研究

論文審査委員	(委員長)		
	教授	渡辺健蔵	教授 池田弘明
	教授	神藤正士	教授 水品静夫
	助教授	杉浦敏文	

論文内容の要旨

本研究は生体内部の温度分布を無侵襲で測定する技術の開発を目的としている。無侵襲温度測定技術の開発はハイパーサーミアの分野で長年切望されている。ハイパーサーミアは癌細胞を41~45℃程度に加温する治療法である。現在、ハイパーサーミア加温における組織内温度の測定には熱電対やサーミスタなどの測温プローブを腫瘍内に刺入するという方法がとられている。このような侵襲的溫度測定は患者に対し苦痛を与えるばかりでなく、刺入できるプローブの本数と位置が限られるために不十分な温度測定しかできない。そのため無侵襲で温度分布測定を行う技術の開発が望まれている。無侵襲温度測定法として、MRI、マイクロ波CTやラジオメトリ等を用いた方法がこれまでに研究されているがまだ広く実用化された技術はない。本研究はマイクロ波ラジオメトリによる無侵襲温度測定法について行った。

本論文は多周波マイクロ波ラジオメーターによる温度測定の方法及び輝度温度測定値から組織内温度プロファイルを推定する方法について述べる。また、ファントムを用いた実験及びFDTD(Finite-Difference Time-Domain)法によって得られているアンテナ-生体間の電磁氣的結合の3次元解析の結果を組織内温度プロファイル推定法に導入した場合の数値シミュレーション結果を示す。

第1章はハイパーサーミアの原理、加温方法を述べ、温度測定の重要性及び無侵襲温度測定の開発が望まれていることを述べる。

第2章は温度計測の手法について侵襲的計測と無侵襲計測に分類してその原理について述べる。無侵襲温度測定法については現在有望と思われるMRI及びマイクロ波ラジオメトリによる手法を取り上げた。最後に、医学応用上無侵襲温度測定に望まれる温度分解能について示す。

第3章はラジオメーターの観測する熱輻射電力とその観測について述べる。物体の放射する熱輻射電波の電力と温度の関係はプランクの式に従う。マイクロ波領域においてはレイリージーンズの式に近似され熱輻射電力と温度は比例する。生体組織も同様にその温度に応じた強度で熱輻射電波を放射する。そのうちの体表にまで達したマイクロ波成分をラジオメーターは見かけの温度である輝度温度として観測する。本研究で用いる1.2–3.6GHz5周波マイクロ波ラジオメーターシステム及びラジエーションバランス法を用いた測定について述べる。Dicke型ラジオメーターを用いており、ラジエーションバランス法により1つのアンテナで反射係数の異なる生体の様々な部位を観測できる利点を示す。

第4章では輝度温度測定値から組織内温度プロファイルを推定する方法について述べる。輝度温度と組織内温度とは重み関数で関係づけられる。この生体とアンテナの電磁界結合の度合いを示す重み関数についてその定義を明確にし、FDTD法による3次元電磁界解析結果(本研究室の阿部による)に基づくものについて示す。また平面波近似に基づく重み関数については付録に示した。その後、組織内温度分布回復問題を定式化する。これまでは、平面波近似に基づいた重み関数を用いていたが、本研究ではアンテナ-生体間の3次元電磁界解析の結果を用いたより現実に近い形の重み関数を温度分布解析手法に取り入れた。輝度温度測定値から組織内温度分布を求める問題は悪条件下の逆問題であり、精度の高い解を一般的に求めることが困難である。一方、医学応用は精度の高い解を要求する。この逆問題に対する解法として、本研究でモデル適合法を用いる。この方法では事前知識に基づいた温度分布モデル関数を用いることで精度の高い安定した解を得ることができる。本研究ではこれまでに用いたモデル関数をまとめた形の未知モデル定数の少ないモデル関数を提案している。このモデル関数はハイパーサーミア加温条件下での生体熱輸送方程式の解に基づいたものと類似しており、その妥当性が示されている。また、従来用いていたモデル関数についても付録に示した。ラジオメーターによる測定値は熱輻射の性質上ランダムにばらつく。本解析法では温度分布推定に及ぼす影響を定量的に表す手法としてモンテカルロ法を用い、推定した温度分布の 2σ 信頼区間を計算し、温度分布測定の分解能の指標として用いる。

第5章では5バンドラジオメータを用いて筋肉等価寒天ファントムに対する無侵襲温度測定実験について述べる。実験の結果、ラジオメトリによる無侵襲温度測定で得た温度プロファイルは寒天に刺入した熱電対による測定値とよく一致した。このポーラス-寒天の2層モデルに対する無侵襲測定の 2σ 信頼区間(温度プロファイルの分解能)は寒天表面からの深さ4cmまで1.9℃以下であった。

第6章では温度プロファイル推定法の数値シミュレーションについて述べる。はじめに本測定法をハイパーサーミア臨床時の温度分布に適用した場合のシミュレーションを平面波近似に基づく解析手法を用いて行う。このシミュレーションはポーラス-皮膚-脂肪-筋肉からなる4層生体モデルなど多層組織構造に対するもので、無侵襲測定の 2σ 信頼区間は体表からの深さ4cmまで約2℃以下で測定できる。しかし、FDTDによるアンテナ-生体間の電磁界結合の3次元電磁界解析データに基づく重み関数を用いた場合の数値シミュレーションを行なったところ、脂肪層を含む4層生体モデルにおける温度分布推定では分解能が実用には不十分な値であることがわかった。分解能の改善手法を数値シミュレーションで検討した結果、モデルパラメータの少ない温度分布モデル関数、開口面の大きいアンテナ及び0.5cm厚のポーラス、0.8GHzの観測周波数の使用等により温度分布推定の分解能を改善することが可能であり、深さ4cm程度まで1.6℃以下の温度分解能が得られることがわかった。

論文審査結果の要旨

本論文は多周波マイクロ波ラジオメトリによる生体内温度分布無侵襲計測法に関する研究の成果を纏めたもので、7章から成る。第1章では、癌温熱療法の分野で無侵襲体内温度計測法の開発が切望されていることが本研究の背景であると述べている。第2章では、侵襲温度計測法の原理と性能、無侵襲計測法の最近の研究について概観し、プロトン核磁気共鳴映像法(MRI)及び多周波マイクロ波ラジオメトリが研究されていること、無侵襲計測法で温度分解能 1°C 、空間分解能 1cm が達成できれば極めて有用と考えられていることを指摘している。第3章ではマイクロ波ラジオメトリの原理について述べ、多周波マイクロ波ラジオメータで測定した一組の輝度温度データは体内温度分布に関する情報を含むことを指摘している。第4章では、輝度温度データから体内温度分布を回復する逆問題の解法について論じている。本研究では、温度分布がアンテナの観測視野の内では体表に平行な平行平板状分布と見做せる場合を取り扱い、モデル適合法を用いて体内温度プロファイルを推定する方法を採用している。モデル関数として、癌温熱療法の加温条件のもとで、事前知識に基づいて予測される温度プロファイルを記述するのに適した関数を採用している。この方法では、解の一般性は失われるが、高い分解能を持つ解が得られ、医学応用を目的とした本研究に適した方法と言える。また、輝度温度測定値のランダムなばらつき標準偏差はラジオメータの輝度温度分解能で与えられることを指摘した上で、データのばらつきが組織温度プロファイルに与える影響をモンテカルロ法を用いて解析し、信頼区間(2σ)を推定し、 2σ 信頼区間を以て組織温度測定の分解能の尺度とすることを提案している。第5章は、筋肉等価寒天ファントムと静岡大学で開発された5周波マイクロ波ラジオメータを用いた実験について記述している。ラジオメトリによる測定結果は熱電対温度計による測定結果と良く一致しており、本測定法の有効性が実証されている。第6章では、本測定法を臨床応用した場合に期待できる温度分解能を数値シミュレーションにより検討している。アンテナと生体の結合を3次元解析(阿部による)した結果から導出した重み関数を組み込んだ新しい温度プロファイル推定アルゴリズムを開発し、それを臨床温度データに適用して 2σ 信頼区間を計算した。高性能(輝度温度分解能 0.03K)5周波ラジオメータを使えば、深さ $2, 3, 4\text{cm}$ における 2σ 信頼区間が $0.4, 0.7, 1.1\text{K}$ となり、実用上望ましいと考えられている目標をほぼ達成できることを示した。第7章は結論で本研究で得られた結果を総括している。

本研究の成果は、医用マイクロ波ラジオメトリの技術開発に貢献するところ大であり、博士(工学)の学位を授与するに十分な価値を持つものと認定する。