

## 審査の結果の要旨

氏名 ボウミク デブナート オイエンズリラ

本研究は、乳房腫瘍の治療を目的としたマイクロ波温熱療法と放射線近接照射療法の組み合わせに焦点を当てている。

本研究では、特にマイクロ波アンテナを用いた乳房腫瘍の温度上昇による、治療時の放射線量の減少に着目し、シミュレーションによる線量の計算を行った。研究における初期段階では、マイクロ波アンテナ、および人間の細胞組織を模擬したファントムが設計された。アンテナをファントムに用いて温度を上昇させた。アンテナの高周波電力および印加時間は、すべての模擬実験およびシミュレーションにおいて一定とした。マイクロ波アンテナの周波数は ISM 帯域である 2.45GHz に設定した。次に、シミュレーションによる線量計算を行った。様々な放射線量の適用を試みたが、臨床の観点から最適な腫瘍部の放射線量は 30 Gy とした。3 腫瘍周辺組織の線量分布も評価した。その後、SAR（比吸収率）分布、温度分布およびアンテナ間相互結合の影響を得るために、カテーテル間の距離の最適化を試みた。カテーテル間の距離は、0.5cm から 2cm までの範囲において検討した。結果、0.5cm は SAR 分布と温度分布に対して最良の結果を示した。

本論文の第 1 章ではまず研究背景として、癌とその治療法、さまざまな放射線療法について説明し、この研究が 4cm×3cm ほどの広がりをもつ乳房腫瘍における温熱療法と放射線近接照射療法の組み合わせにおいて、どこに焦点を当てているかを説明している。この章では、文献調査も含んでおり、両者の組み合わせを最適化するにあたっての、さまざまな組み合わせやアプローチについて説明した。

第 2 章では、研究の最初の部分、すなわち温熱療法について述べている。これは、人体組織を模擬したファントムがどのように設計されたか（組織の比誘電率と導電率）を説明している。非侵襲アンテナと侵襲アンテナの設計の詳細を説明している。ファントムに異なるアンテナを適用した場合の実験結果を説明した。アンテナを適用することによる、各ファントムの比吸収率および温度上昇および加熱パターンの浸透深さが得られた。それらの結果を用いて、アンテナの性能に関する議論が行われ、深部腫瘍の治療には、侵襲アンテナが適していることが定量的に判断できた。

第 3 章では、放射線近接照射療法の詳細について説明した。まず、従来法と放射線量の選定方法について検討した。後半では、計算とシミュレーションの結果を示した。隣接する細胞組織に影響を与える放射線量についても計算した。

この計算は、匿名の患者の乳癌の CT 画像で行った。腫瘍の広がりには  $4\text{cm} \times 3\text{cm}$  であり、これは温熱療法によって加熱された領域とほぼ一致している。その後、腫瘍部の吸収線量が  $30\text{Gy}$  となる線量分布を計算した。

第 4 章では、カテーテル間隔の最適化について述べた。本研究の初期段階では、SAR (比吸収率) および温度を考慮した場合、カテーテル間の距離が  $0.5\text{cm}$  であることが適切であることが分かった。その後、相互結合係数も含まれ、距離が再計算された。カテーテル間の距離を  $2\text{cm}$  とした場合、相互結合の影響で真ん中に SAR (比吸収率) と温度のピークが見られた。しかしながら、間隔  $0.5\text{cm}$  のケースに比べ、SAR (比吸収率) と温度は低下した。以上より、温度上昇の観点から、間隔  $0.5\text{cm}$  を最適とした。

第 5 章では、総合的考察を行った。本研究で実施した計算手法とパラメータ、結果の評価、および今後の研究に向けた課題において、総合的に考察している。

第 6 章では、本研究の概要、結論と今後の展望について説明している。ここでは組み合わせにおける 2 つの手法や、それらをどのように乳房腫瘍に使用できるかについて、説明した。将来的には、血流などの他のパラメータの変化を考慮する必要がある。

マイクロ波温熱療法用アンテナの設計を行うために、論文の付録 A で説明されている、有限積分法に基づく手法が用いられた。

以上のように、本論文は乳房腫瘍の治療を目的とした、新しいマイクロ波温熱療法と放射線近接照射療法の組み合わせ治療システムの基本設計、数値解析、およびファントムによる実証実験に関するものである。提案・設計システムは上記組み合わせ治療法を、世界で初めて詳細に検討したものである。今後医学物理・臨床サイドとの共同研究が展開されることが期待される。本論文は今後の温熱・放射線がん治療、バイオイメージング、バイオエンジニアリングの高度化につながる非常に意義のある論文といえる。

これらの成果より、本研究はバイオエンジニアリング分野に貢献していると判断できる。

よって本論文は、バイオエンジニアリング専攻での、博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。