

癌の温熱療法における最適配置されたアンテナによる加温領域に関する研究

M2015SC008 加藤朝海

指導教員：奥村康行

1 はじめに

ハイパーサーミアと呼ばれる癌の温熱療法がある。この治療法は、正常細胞と癌細胞の温熱感受性の違いを利用して治療部位を加温することにより、癌細胞のみを選択的に殺傷することができる治療法である。正常細胞は癌細胞に比べて熱に対して抵抗性があり、温度が上がったときに癌細胞のほうが正常細胞に比べて温度が若干高くなる。さらに、癌細胞のほうが正常細胞より低い温度で死滅する割合が高くなる [1][11]。

本研究では同軸スロットアンテナに給電し、電磁波を用いて熱を発生させることでハイパーサーミアと同様の治療方法を行う。実際に人体に熱を加えるのではなく、人体と電氣的に等しくなるように設計、制作した生体等価ファントムを用いて実験を行い、赤外線サーモグラフィによる熱画像により加温領域の評価を行う。また、先行研究でシミュレーションが行われているアンテナの最適配置を用いて実験を行い、最適配置の時とそうでない時の加温領域の比較を行い、最適配置の有用性を示す [2]。正確に加温することが必要なため、生体等価ファントムの放射率補正を行う。

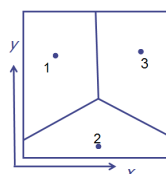
2 ハイパーサーミアの概要と課題

ハイパーサーミアという治療法は、薬物治療や放射線治療などと併用して行うことで治療の成功率を高めている。ハイパーサーミアによる治療の成否は癌の腫瘍部分を確実に加温できるかどうかにかかっているが、患者の体内に位置する癌腫瘍の部分のみを確実に加温することは容易ではない。また生体の部位によって生体組成が異なるので、電氣的特性にも違いが生じてくる。更に患者の癌腫瘍の大きさやその箇所などのでき方は様々であるため、その都度加温する箇所は異なる。

先行研究を元にアンテナの最適な使用本数、刺入座標を決定し、アンテナによる加温が確実になされているかを調べることに着目する。研究の判断基準として、指定した加温領域が望み通り加温できているかなどから、治療の成否を考察する。また、加温領域の範囲と、最適配置と最適配置でない時を比較して最適配置の時のほうが加温領域が多いことを示す [2] [3] [4]。

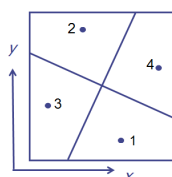
3 p-センター問題による最適配置

先行研究によって、アンテナ3本以上の場合の最適配置がp-センター問題より計算されている [2]。アンテナ3本のときの最適配置を参考にし、実験を行っていく。アンテナ3本のときと4本のときの最適配置は以下の図のようになっている。右の表の数字は四角形の1辺を1としたとき



	x	y
1	0.21	0.56
2	0.5	0.063
3	0.79	0.58

図1 3本の最適配置



	x	y
1	0.63	0.13
2	0.37	0.89
3	0.13	0.37
4	0.89	0.63

図2 4本の最適配置

の割合を示している。

4 実験項目と構成

実験には同軸スロットアンテナ、実験用電波暗箱、及び生体等価ファントムを主として用いる。そしてその実験結果の解析と評価には赤外線カメラと温度解析ソフトを使用する。それぞれについては後述する。

4.1 実験方法

実験方法は、まず生体等価ファントムを電波暗箱の中に入れ、生体等価ファントムに同軸スロットアンテナを刺入し、アンテナに給電する。加温前と加温後のファントムの断面図の温度分布の状態を赤外線カメラで撮影し、その結果を比較することにより結果を検証する。アンテナの給電には高周波電源を用い、アンテナと電源の間には通過型電力計を介す。加温実験の実験構成は以下の図3のように行う。また、赤外線カメラで撮影された写真を温度解析ソフトを使って加温領域を確認する。

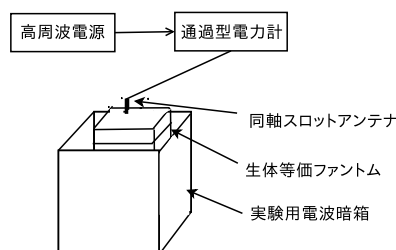


図3 実験構成図

4.2 生体等価ファントム

生体等価ファントムとは、人体と電氣的に等しいとされるもので、本研究で用いる生体等価ファントムは人体の組成のうちの筋肉を想定したものを作成した。本研究の実験では 150mm×150mm×150mm の立方体のもの、放射率の補正には 7cm の高さのコップを用いて 300ml 程度のものを作製した。表 1 に作成した生体等価ファントムの材料と組成をまとめた [9]。表 1 を参考に各分量を求めた。

表 1 生体等価ファントムの組成比 [9]

材料	材料組成比 (%)
脱イオン水	85.64
寒天	2.65
塩化ナトリウム	0.95
アジ化ナトリウム	0.05
TX-151	2.14
ポリエチレンパウダー	8.56
合計	100.00

本研究で使用使用する生体等価ファントムは 300MHz ~ 2.5GHz 周波数帯域において使用可能のものである。このファントムにおいて、比誘電率 ϵ_r は 53.0、導電率 σ は 1.41S/m、比熱 c は 3725J/kg・K、熱伝導率 κ は 0.55J/s・m・K、密度 ρ は 955kg/m³ である [10]。

4.3 同軸スロットアンテナ

実験で使用した同軸スロットアンテナの設計について述べていく。このアンテナは直径約 1mm の同軸ケーブルの先端 10~20mm 付近に、スロットと呼ばれるリング状に外導体を取り除き露出させた部分を作製したものである。先端部分は内導体と外導体とを短絡させてある。実際の治療時には、衛生上の理由から医療用のカテーテルと呼ばれる誘電体のチューブが使われている [5]。本研究でも同様にアンテナにカテーテルを装着して実験を行った。以下の図 4 に今回自作したアンテナの設計図を示した。表 2 に設計図に示したアンテナの各部分の寸法をまとめた [6]。

表 2 同軸スロットアンテナの寸法 [6]

アンテナの直径 db [mm]	1.19
カテーテル直径 dc [mm]	2.00
カテーテル厚 tc [mm]	0.35
アンテナ先端とスロット中心の距離 Lts [mm]	20.0
アンテナ刺入長 Dt [mm]	70.0

4.4 実験用電波暗箱

実験で 2 つのことを防ぐために電波暗箱を使用する。1 つ目の理由として、使用する周波数によっては実験者の身体に害になってしまうことである。2 つ目の理由が、他の

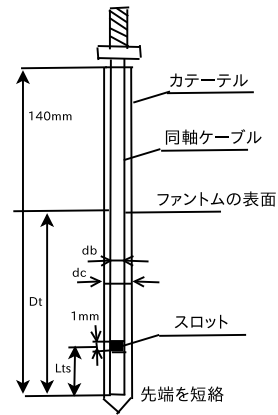


図 4 同軸スロットアンテナの基本的な構造 [6]

場面で電波を利用している人の電波に干渉してしまい、妨害してしまうおそれがある。電波暗箱は箱の境界面に入射してくる波を極力暗箱の外に放出しないようにし、暗箱の外の活動の妨げにならないようにする。暗箱は今回使用する周波数帯 430MHz の電波を外に逃がさないように設計されたものである。本研究では箱の内側にアルミホイルを貼ることで電波が外に漏れるのを防ぐ。ダイポールアンテナをスペクトラムアナライザに接続し、特定小電力無線機の電源をいれると 430MHz 付近で共振する。この時特定小電力無線機を電波暗箱の中と外で起動させたときの電波強度を比べる。本研究では 430MHz 付近で 50dBm ほど減少し、先行研究 [3] では 40dBm、先行研究 [4] では 57dBm 減少していた。これ以上改良しても値の改善が見込めなかったため、この暗箱を使用し実験した。

4.5 赤外線カメラ

本研究では、実験結果の検証と放射率の補正のために日本アビオニクス株式会社の赤外線カメラを使用する。温度分布を写真として撮影することができ、非接触で撮影することができ、表示温度の下限・上限も自由に決められるので、目的の温度に絞り込んで撮影もできる。

4.6 温度解析ソフト

赤外線カメラを購入することでダウンロードが可能になる InfreC Analyzer NS9500 Standard という温度解析ソフトを使用する [8]。カメラで撮影したサーモグラフィーを編集することができる。様々な機能があるが、本研究で使うのはその中で主に 3 つである。1 つめは温度などの条件の変更。下限上限や放射率の値の変更ができる。2 つめはサーモグラフィの中で特定の領域を四角形などに範囲を区切り、その領域内の温度分布や指定した温度の割合を示すことができる。3 つめは面積計算である。特に 2 つめの機能をよく使用する。これにより加温領域の有用性を示す。

4.7 放射率補正

実験でより正確な温度を測定するために、放射率の補正を行う必要がある。放射率とは、物体が放出するエネルギー

ギーを黒体が放射するエネルギーを 1 とした時の対象物と黒体のエネルギーの比である。実際に放射率が 1.0 となるものは存在しないが、赤外線カメラでは放射率を 1.0 として換算し、撮影を行っている。従って、赤外線カメラでそのまま撮影した温度はみかけの温度であり、本当の温度ではないので、正しい測定にはファントムの放射率を補正する必要がある。放射率の補正を行うには、放射率の値が定まっているものを用いる。本研究では放射率が高いとされる黒いビニールテープ (放射率 0.95) を用いて放射率を補正していく。放射率の補正は赤外線カメラを用いて行うことができる [7]。

放射率補正の方法は、まず測定対象に黒いビニールテープを貼り、その対象の温度を変える必要がある。また、環境温度として、壁の温度を赤外線カメラに設定する。ファントムの温度を変えるためにお湯の中に入れ、定量的に弱火で温めておく。十分に温まったら、ファントムのビニールテープの部分にカメラの機能で部分放射率 0.95 を設定する。同じ機能を用いてファントムのビニールテープのない部分にも部分放射率を設定し、テープの部分と同じ温度になるまで放射率を下げていき、同じ温度になった値がファントムの放射率となる。ファントム以外の物体でも同じように測定できる。解析ソフトでも補正ができる。

本研究で作製したファントムは 0.71 となったため、この値を使用する。それ以前の実験のものは補正をしてないので、放射率補正を 3 回異なるファントムで行った結果、0.5, 0.7, 0.7 となったため、0.7 という値を今回のファントム以外の放射率として使用することにした。

5 実験結果

実験結果を温度解析ソフトを用いてどれくらいの領域を加熱できているかを検証した。実験結果はそれぞれアンテナ 1 本の場合と 3 本の場合を先行研究で行った結果を使用し、放射率の補正を行った [3][4]。

5.1 アンテナ 1 本ときの解析結果

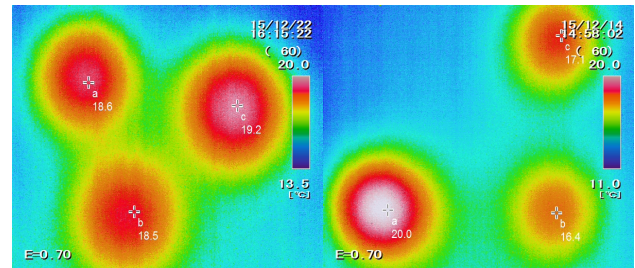
アンテナ 1 本の場合は正味入力電力 12W, 加熱時間 120s で行われた実験結果を使用する [3]。正味入力電力とは、入力電力から反射電力をひいた値である。癌の大きさを 3cm の正方形とした場合と、4cm の場合でどれくらいの範囲を加熱することができたかを調べる。各四角形の中心がスロット部分と重なるように正方形を設定した。このときの温度範囲は 42 から 43 の間、42 以上、30 以上の 3 つの温度の範囲で加熱領域を確認した。その割合を以下の表 3 にまとめた。

表 3 それぞれの温度の加熱領域の割合

温度 ()	3cm × 3cm	4cm × 4cm
42 から 43	4.2%	2.4%
42 以上	33.3%	18.9%
30 以上	95.0%	65.8%

5.2 アンテナ 3 本ときの解析結果

アンテナ 3 本の場合は以下の実験条件で行われた実験結果を使用する [4]。この時は最適配置のとき最適配置でないときの 2 つの実験を比較する。両実験とも正味入力電力は 4W, 加熱時間は 60s であり、補正後の到達最高温度は (a) が 19.1 で、(b) が 20.7 である。3 本の実験ではアンテナに電力を分配するために 2 股の SMA コネクタを使用した [4]。



(a) 最適配置 (b) 最適でない配置

図 5 アンテナ 3 本の温度分布

アンテナ 3 本による実験は癌の大きさを 5cm × 5cm とした上でアンテナを配置している。最適配置ではないときはアンテナ 3 本を直角二等辺三角形の頂点として配置している [4]。

正味入力電力はアンテナ 1 本あたりの入力電力であり、電源装置の性能によりこれ以上に高い入力電力を設定することができなかったため、加熱後の到達温度がアンテナ 1 本の時よりはかなり低くなってしまっている。最適配置とそうでないときの比較を行うにあたって、最高温度とファントム初期温度がほぼ同じなためどれだけ範囲を加熱することができたがで比較していく。16 以上、17 以上の範囲での加熱範囲の割合を比較し、以下の表 4 にまとめた。

表 4 アンテナ 3 本の時の温度の加熱領域の割合

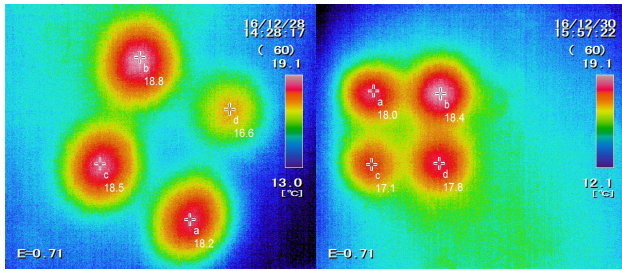
温度 ()	最適配置	最適でない配置
17 以上	30.2%	6.3%
16 以上	65.3%	15.2%

これより、最適配置の時のほうが 17 以上の範囲は 23.9% 多く、16 以上の範囲では 50.1% も多くの範囲を加熱できていることがわかる。

5.3 アンテナ 4 本ときの解析結果

3 本の時同様、最適配置のとき最適配置でないときの 2 つの実験を比較する。両実験とも正味入力電力は 2W が 3W, 加熱時間は 80s であり、補正後の到達最高温度は (a) が 18.8 で、(b) が 18.4 である。アンテナに電力を分配するには 8 分配器を使用した。

最適配置ではないときはアンテナ 4 本を正方形の頂点として配置している [5]。3 本の時同様に、加熱範囲を比較し



(a) 最適配置 (b) 最適でない配置

図6 アンテナ4本の温度分布

た。差が僅かであったため、15 以上の範囲も加えて比較し、以下の表5にまとめた。

表5 アンテナ4本の時の温度の加温領域の割合

温度 ()	最適配置	最適でない配置
17 以上	9.1%	7.4%
16 以上	24.1%	25.5%
15 以上	59.9%	52.6%

これより、最適配置の時のほうが17 以上の範囲は1.7%多く、15 以上の範囲では7.3%多くの範囲を加温できていることがわかる。しかし16 以上の場合のみ1.4%少なくなった。ファントムの初期温度が14 であったため、少しでも温度があがった範囲としては最適配置の方が多い。

6 まとめと今後の課題

実験に必要なものを作製し、先行研究を元にしながらそれぞれの研究が行われてきた。さらに温度解析ソフトや放射率の補正を取り入れたことにより、以前よりも正確な結果を得ることができ、信頼できる結果に近づけたと思われる。放射率の補正によって正確な温度がわかった。実験結果より、アンテナ1本あたりの加温範囲と、複数本の場合は最適配置の方が多く加温できる範囲があることがわかった。

今後、より実験の有用性を高めていくには、3つの点がある。1つは電源装置をより電力の高いものにする必要がある。アンテナの本数が増えていくごとに電力は分配され、アンテナ1本あたりの電力は減っていくため、起電力を大きくする必要がある。2つめは放射率の補正についてだが、ファントムごとに放射率の補正をした方がより正確な温度分布を撮影することができる。そしてこの治療法の利点として脳の腫瘍への治療ができるという点があるので、脳のファントムで実験するという方法がある。よって、実験環境を調整することによって、信頼度の高い結果が得られると思われ、改善していくことによって実際の治療にも近づいていく。

本研究では癌の大きさ、腫瘍の深さを設定し、筋肉組織を想定したが、身体の様々な箇所に癌はでき、大きさも形

も、そして深さもそれぞれにより異なる。それだけではなく、個人によっても人体組織は異なり、人間の各器官でも加温特性は異なる。なので今後は様々な場合における生体等価ファントムなど実験器具の作製が必要になってくると思われる。

参考文献

- [1] 平岡真寛, 田中良明, 全訂 “ハイパーサーミアマニュアルー効果的な癌温熱治療法を実施するためにー”, 株式会社医療科学社, 東京, 1999.
- [2] 南佳那, 信田真佑, “癌の温熱療法のための同軸スロットアンテナの最適配置,” 南山大学情報理工学部システム創成工学科 2012 年度卒業論文, Jan. 2013.
- [3] 加藤朝海, 近藤優, 榊原健仁, “同軸スロットアンテナによる生体等価ファントムへの加温特性の測定,” 南山大学情報理工学部システム創成工学科 2014 年度卒業論文, Jan. 2015.
- [4] 高橋健人, 豊吉司, “複数の同軸スロットアンテナによる加温分布の評価,” 南山大学情報理工学部システム創成工学科 2015 年度卒業論文, Jan. 2016.
- [5] 齊藤一幸, 吉村博幸, 伊藤公一, “生体等価ファントムを用いた医療用マイクロ波アンテナの加温特性改善,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J85-B, no.5, pp.719-722, May 2002.
- [6] 齊藤一幸, 伊藤公一, “FDTD 法を用いたマイクロ波ハイパーサーミア用同軸スロットアンテナの SAR 分布特性に関する検討,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J82-B, no.2, pp.276-282, Feb. 1999.
- [7] 日本アビオニクス株式会社, “赤外線サーモグラフィー応用セミナー,” Oct 28. 2015.
- [8] 日本アビオニクス株式会社, “InfReC Analyzer NS9500 Standard(インフレック アナライザ スタンド) 取扱説明書,” Dec. 2015.
- [9] 伊藤公一, 古屋克己, 岡野好伸, 浜田リラ, “マイクロ波帯における生体等価ファントムの開発とその特性,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J81-B-2, no.12, pp.1126-1135, Dec. 1998.
- [10] 齊藤一幸, 中山修, 浜田リラ, 伊藤公一, “同軸スロットアンテナで構成したハイパーサーミア用正方形アレーアプリケータの温度分布解析,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J82-B, no.9, pp.1730-1738, Sep. 1999.
- [11] Katsuyuki FUJII, Kana MINAMI, Mayu NOBUTA, Yasuyuki OKUMURA, Atsuo SUZUKI, “Optimal allocation of coaxial-slot antennas for cancer treatment,” 35th Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association, Oct. 6-11, 2013