

# 複数の同軸スロットアンテナによる加温分布の評価

2012SE249 高橋健人 2012SE261 豊吉司

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がんの温熱治療法がある。これは、がん細胞と正常細胞の温熱感受性の差を利用することでがん細胞のみを殺傷するという治療法である。細胞の温度感受性は多様であり、がん細胞は正常細胞より熱に対する抵抗力が弱い。過去の研究結果から 42.5 以上であればがん細胞の生存確率は急速に低下することがわかっている。つまり、ハイパーサーミアでの治療の成否は治療部分を確実に加温することができるかにかかっている。

本研究では、筋肉等価ファントムと複数の同軸スロットアンテナを使用し実験を行い、先行研究 [2] で求められたアンテナの配置により筋肉等価ファントムを目標の温度にする事ができるかを検証する。

同軸スロットアンテナを複数本利用した加温法は外部加温装置が不得意とする人体深部に位置する腫瘍などの加温に適している。しかし、患者の視点から考えると、治療時間や挿入アンテナの本数はともに少ないほうが身体的、精神的な負担は少ない。そこで、最適な位置に配置したアンテナ 3 本の治療有効範囲や治療時間を調べることでがん細胞のみを効率的に加温することを目指す。

本研究では、アンテナの発熱量の判断基準として、ハイパーサーミアでの加温機器の性能評価に用いられる SAR(Specific Absorption Rate) により治療の成否を判断する。また、既存のハイパーサーミアは加温したい部分を正確に加温出来ない事が課題にあげられるため、同軸スロットアンテナの加温分布を調べる事が出来るかを確かめる [1][2]。

## 2 本研究の流れ

先行研究で求められたアンテナの最小刺入本数、最適配置、最適座標の結果が正しいかを検証するため実際に同軸スロットアンテナ、筋肉等価ファントムを作成して実験を行う。研究の流れとしては、まずアンテナの性能を反射係数の定義により評価する。次に、アンテナ 1 本の加温性能、範囲などを入力電圧を変更し SAR を求める。そして先行研究の p-センター問題により求められたアンテナ 3 本の最適配置をもとに同様の実験を行い SAR を求める。実験結果を先行研究のシミュレーション結果を比較し検証する。

先行研究より、癌を温熱治療する際に用いられる同軸スロットアンテナを複数本使用する場合の最適な配置座標、また人体の組成のうちの筋肉を想定したファントムを同軸スロットアンテナ 1 本で加温した場合の実験結果が得られている。本研究では先行研究で得られた同軸スロットアンテナの最適な配置座標と 1 本で加温した実験結果を参照

し、先行研究と同様な筋肉を想定したファントムを用いて同軸スロットアンテナを最適な配置座標で加温した場合どのような範囲に加温分布するかを確かめる [2][3]。

## 3 実験準備

加温実験に必要なものを製作し、実験に使用可能かを評価する。

### 3.1 SAR について

SAR とは、比吸収率 (Specific Absorption Rate) の略称で、人体が電波にさらされることによって単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量のことである。この値から人体が、ある電波を発する機械から一定の時間でどのくらいのエネルギーを受けるかが分かる。また、局所 SAR とは人体が電波にさらされることによって、任意の 10g 当たりの組織に 6 分間に吸収されるエネルギー量の平均値のことで、W/kg の単位で表される。SAR の定義は以下の式 (1) で表される [2]。

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ :生体組織伝導率 [S/m]、 $\rho$ :生体組織密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $|E|$ :電界 [V/m] である。

### 3.2 アンテナの設計

実験で使用した同軸スロットアンテナの設計について説明する。同軸スロットアンテナは直径 1mm 前後の同軸ケーブルの先端およそ 20mm 付近にリング状に外導体を取り除き露出させた部分を配置させたものである。この露出させた部分をスロットと呼称している。このアンテナの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、衛生上の問題から医療用のカテーテルと呼ばれるチューブが使われている。本研究でも同様にアンテナにカテーテルを装着し実験した。また、本研究で使用したアンテナは、刺入長が表面から  $Dt=70\text{mm}$  のものを設計、製作した。

以下の図 1 に自作したアンテナの設計図を示した。また表 1 にアンテナの各部分の寸法を載せている [4][6]。

表 1 同軸スロットアンテナの寸法 [4][6]

$db$ (アンテナの直径)	1.19 [mm]
$dc$ (カテーテルの直径)	2.00 [mm]
$tc$ (カテーテル厚さ)	0.35 [mm]
$Lts$ (先端とスロット中心までの距離)	20.0 [mm]
$Dt$ (アンテナの刺入長)	70.0 [mm]

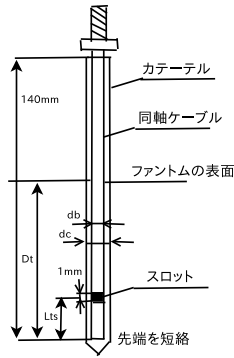


図1 同軸スロットアンテナの基本的な構造 [4][6]

### 3.3 アンテナの性能評価

使用するアンテナの性能評価の結果を示す。本研究では、430MHzの周波数帯域での使用を考えている。評価実験は、Agilent Technology社のネットワークアナライザと筋肉等価ファントムを使用して評価を行った。本研究では、ファントムは20cm × 20cm × 20cmの大きさのファントムを使用した [3]。

アンテナが実際に使用できるかの基準は反射係数を用いた以下の式 (2) を用いて判断した。

$$10 \log_{10} \frac{P_r}{P_f} \leq -10[\text{dB}] \quad (2)$$

$P_f$  は入力電力であり、 $P_r$  反射電力を表し、 $\frac{P_r}{P_f}$  が1割程度以下であればアンテナとして信頼性を損なうことなく使用できることが判断できる [3]。

### 3.4 アンテナの性能評価の結果

以下の図2に本研究製作した4本のアンテナの評価結果のグラフを示す。このグラフは、横軸を周波数 [MHz]、縦軸を反射係数 [dB] の値である。430MHzでの反射係数はそれぞれ以下の表2にまとめた。表2より4本のアンテナはすべて430MHz帯で反射係数は-10dBの値になり、式(2)を満たしている。また、先行研究 [3] での同軸スロットアンテナの評価とほぼ等しいため本研究で製作した同軸スロットアンテナは実験に使用する事が出来るアンテナである事が分かった。

### 3.5 ファントム

今回実験で使用したファントムは筋肉等価ファントムである。先行研究では筋肉等価ファントムを使用しており先行研究と比較することを考え本研究でも筋肉等価ファントムを使用した。今回使用する筋肉等価ファントムの分量と組成比は表3にまとめた [1][5]。

表2 反射係数

アンテナ1	アンテナ2	アンテナ3	アンテナ4
-21.2 [dB]	-17.7 [dB]	-14.8 [dB]	-24.7 [dB]

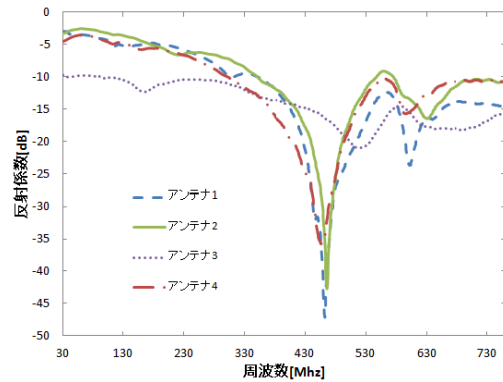


図2 同軸スロットアンテナ評価グラフ

### 3.6 電波暗箱について

電波暗箱を使用する理由として、使用する周波数によっては他の場所で電波を利用している人の電波に干渉し、妨害してしまうことを防ぐためである。この問題を防ぐため電波暗箱を使用し、実験を行う [3]。

430MHzの電磁波を遮蔽するための表皮深さ  $d$  の条件は

$$d = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

式 (3) より求めた。それぞれ  $f$ :周波数 [Hz]、 $\mu$ :透磁率 [H/m]、 $\sigma$ :導電率 [S/m] である。

この式にアルミホイルでの各定数を代入し求められた解は、 $d = 3.92693 \times 10^{-6} \text{m}$  である。この値は、市販のアルミニウム箔の厚さ  $11 \times 10^{-6} \text{m}$  より薄いためアルミニウム箔で十分に遮蔽出来る事が分かる。

### 3.7 電波暗箱の評価

電波暗箱の性能評価は以前に製作した約430MHzで共振するダイポールアンテナ、特定小電力無線機、スペクトラム・アナライザを図3のように接続し電波暗箱の評価を行った。

まず、ダイポールアンテナをスペクトラム・アナライザに接続する。その後、特定小電力無線機の電源を入れると430MHz辺りで共振する。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。暗箱の蓋はアルミ板で製作し、さらに蓋にはパッチン錠を取

表3 筋肉等価ファントムの組成比及び分量 [5]

材料	組成比 (%)	使用量 (g)
脱イオン水	85.64	7193.4
寒天	2.65	223.0
塩化ナトリウム	0.95	80.2
アジ化ナトリウム	0.05	4.2
TX-151(増粘剤)	2.14	179.8
ポリエチレンパウダー	8.56	719.4
合計	100.00	8400.0

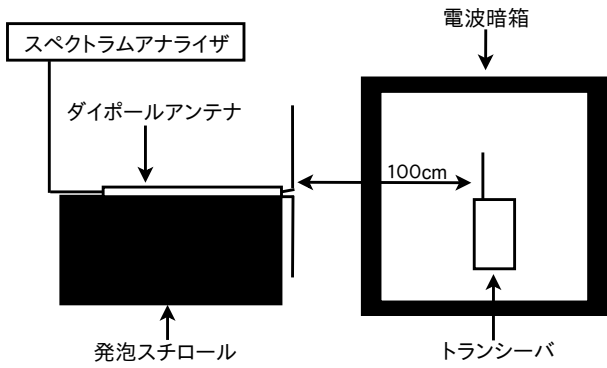


図3 電波暗箱の性能評価実験構成

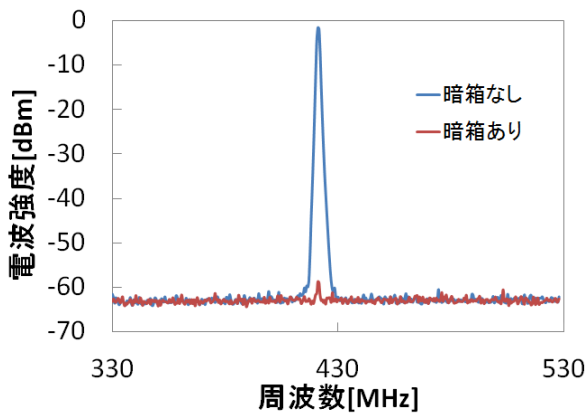


図4 電波暗箱の性能評価結果

り付け箱の上部に確実に固定出来るよう改良を加えた。実験結果を図4に示す。

図4より430MHz付近の最大レベルは約-57.2dBとなり、改良以前の結果より約-8dB良い結果が得られた。市販の暗箱のシールド性能は-70dBでありこの値には届かなかった。しかし、これ以上に改善は得られない判断し、今後の実験ではこの電波暗箱を実験で使用する。

#### 4 筋肉等価ファントム加温実験

加温実験に使用可能なアンテナ、電波暗箱が完成したため加温実験を行う。

##### 4.1 実験構成

実験は、20cm × 20cm × 20cmの筋肉等価ファントムを使用し癌細胞を5cm × 5cmの大きさと仮定する。まず、アンテナ1本で行う。使用するアンテナそれぞれが十分な加温性能を示すかを確認め次に3本での実験を行う。

アンテナ3本の接続は、二股のSMAコネクタを3個使用し図6の通過型電力計と同軸スロットアンテナの間につながる実験を行う。3本での実験の使用機器、実験構成図を図6に示す。また、3本のアンテナの最適配置と座標は、図5と表4に示す。

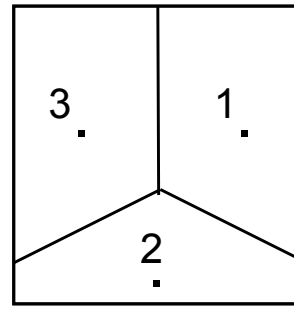


図5 アンテナ配置位置 [2]

表4 アンテナ配置座標 [2]

	$x$	$y$
1	0.79	0.58
2	0.5	0.063
3	0.21	0.56

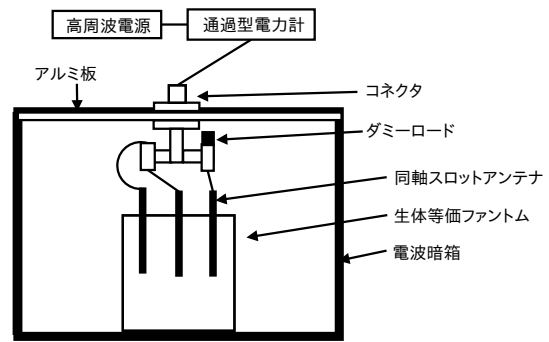


図6 加温実験の実験構成図

##### 4.2 実験結果

同軸スロットアンテナ1本を筋肉等価ファントムへ刺入し、加温した。その時の結果を先行研究と比較した。

1本でのアンテナの実験を、複数回行ったが正味入力電力が大きく、加温時間が長ければ長いほど、加温後のファントムの温度は高くなった。また、アンテナにより加温性能の違いがあることが分かった。

図8と図9はそれぞれ、図7のようにファントムを切断して測定した熱画像である。正味入力電力12W、90sの結果である。正味入力電力とは、入力電力から反射電力を差し引いた電力である。

各平面においてほぼ左右対称に分布した。同軸スロットアンテナで加温可能と言える。この結果より今回製作した、同軸スロットアンテナ及び生物等価ファントムを用いた実験は概ね信用できる。

次に4分配するのでアンテナ1本で正味入力電力4Wに調節して実験を行った。これは、高周波電源の最大出力電力が20Wのためである。その後二股コネクタを3つ使用して4分配し、アンテナ3本をつなぎ最適配置に刺入した。また、最適配置にアンテナを刺入するために木材に穴を開けアンテナを固定した。この時余った端子には、ダミーロードを接続する。

正味入力電力4W、加温時間60sの場合でのそれぞれのアンテナの加温分布を図10から図11に先行研[2]で求められた最適配置に刺入した場合の熱画像と先行研究[8]の直角二等辺三角形に刺入した場合の熱画像を図12と図13に示す。それぞれの熱画像の同座標の温度を比較すると

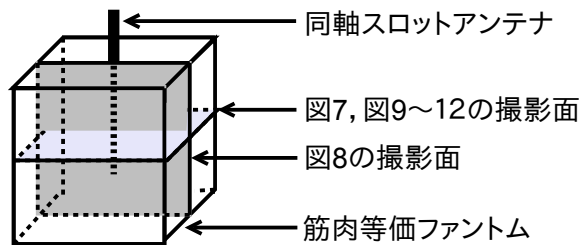


図 7 加温実験の測定面

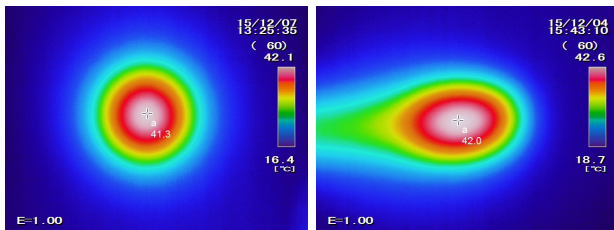


図 8 加温分布:水平平面

図 9 加温分布:垂直平面

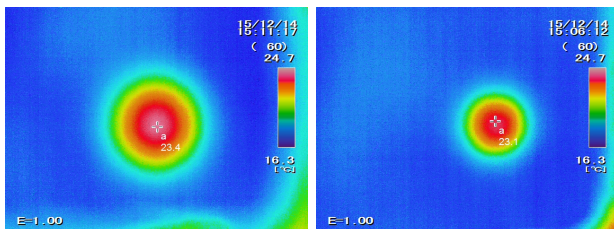


図 10 アンテナ 1

図 11 アンテナ 2

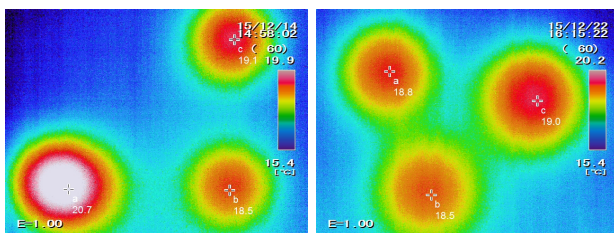


図 12 二等辺三角形

図 13 最適配置

約 2 違いがあり同じ入力電力でも違う結果が得られた。5cm × 5cm の癌細胞だと仮定すると、最適配置で加温する方がより癌細胞全体を加温できる。

## 5 まとめと今後の課題

加温実験に必要な同軸スロットアンテナ、電波暗箱、筋肉等価ファントムを製作し、実験を行った。加温実験を行う前に同軸スロットアンテナ、電波暗箱は評価実験を行った。電波暗箱については、使用する電磁波を約-57.2dB 遮断できた。同軸スロットアンテナは、基準である式 (2) を満たすアンテナを製作することができた。また、筋肉等価ファントムの製作も行った。

本研究では、製作した同軸スロットアンテナ 3 本を使用した。まずアンテナ 1 本で加温実験を行い加温分布を先行研究 [3] と比較すると結果がほぼ一致した。次に先行研究 [2] より求められた最適配置と先行研究 [8] の配置で刺入し、アンテナ 3 本で加温実験を行った。結果から最適配

置の方が領域全体を加温出来ている事が分かった。アンテナ 3 本での実験については、実験器具の性能により 4W 以上の電力を入力出来なかったため目標温度である 40 以上に加温できるように電力の条件を変えての実験を行えなかった。高い電力を入力でき、癌細胞が死滅する温度に加温することが出来た場合、最適配置ではない座標に刺入した場合の加温分布と最適配置での加温分布を比較し、最適配置の優位性を確認する必要があると思われる。

また、アンテナを刺入するときスロット部分で折れてしまったり、複数本で実験を行うため使用するアンテナにより加温性能に違いがあり、加温分布にムラが出来てしまうため、まっすぐ刺入する方法、スロット部分やアンテナ長などアンテナ製作に関してその過程を見直し使用するアンテナに出来る限り差が出来ないようにする必要があると考えられる。

## 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 -効果的な癌温熱治療法を実施するために-, 株式会社医療科学者社, 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, 榊原健二, “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 年卒業論文, Jan. 2015.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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ア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.
- [7] 齋藤一幸, 吉村博幸, 伊藤公一, “生体等価個体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,” 電子情報通信学科論文誌 B, Vol.J85-B, No.5, pp719-722, Jun. 2002.
- [8] LIRA HAMADA, “STUDY ON THE ARRAY APPLICATOR FOR MICROWAVE INTERSTITIAL HYPERTHERMIA,” Graduate School of Science and Technology CHIBA UNIVERSTY, pp.88, Feb. 2000.