

# 血流を考慮したダイナミックファントムの試作

2019SC058 嶋本将也 2019SC070 山本竜輝  
指導教員 藤井勝之

## 1 はじめに

近年、携帯電話などの通信機器から発生する電磁波が、人体に与える影響を客観的かつ、定量的に評価する需要が高まってきている。電磁波が人体に与える影響は、通信機器に使用される周波数帯によって大きく異なってくるが、その中で、携帯電話などに使用されるマイクロ波帯においては、人体の熱的作用が大きく関係してくる[1][2]。

このマイクロ波において、応用例の一つに医療分野への応用例があげられる。[3]医療機器の開発だけでなく、がんの温熱療法(ハイパーサーミア[4])用の、機器から発生する電磁波の、人体への作用を定量的かつ、客観的に評価する必要性が高まってきている。そこで本研究では人体の特性を模擬したファントムに血管を模擬し、その加温について評価する。

## 2 アプローチ

本研究の内容としては、血管を模擬した生体等価ダイナミックファントムの試作と、それをを用いた加温実験を行った。加工したファントムの血管に生理食塩水を循環させ、市販のドライヤーで加温し、赤外線カメラで測定する。

ファントムとは、生体組織の熱的特性を模擬した数値、並びに物理モデルである。実人体では、個人によって実験結果が異なってしまう、再現性のあるデータが取れない可能性があるため、ファントムを用いた定量的実験が行われている。また、実人体であると、倫理的な問題や、最悪死に至るケースも少なくない。さらには、計算機シミュレーション等の機器を用いたファントムの温度分布解析は可能であるが、この計算機シミュレーション等の妥当性の確認や、血流を考慮した最適な温度上昇領域を発生させる機器の開発を行うためにもファントムは必須に違いない。[5]そのため、人体の熱的特性及び、形状的特性を模擬した数値解析用、そして、実験用の人体モデルを構築する必要がある。

従来、生体等価ダイナミックファントムを評価するために、人体モデルとして種々のファントムを、様々な研究機関で議論されている。しかし、血流を模擬したダイナミックファントムの開発はまだ少ないため、本研究では試作したダイナミックファントムの加温評価を行った。

## 3 先行研究

### 3.1 毛細血管を考慮したダイナミックファントムの加温実験

次に、実際に血管を模擬したダイナミックファントムの実験を行った例を紹介する。この研究は、小さな生体等価ファントムをアクリル容器内に充填し、毛細血管による放熱作用を模擬する実験である。図1のような装置を製作し、そこに生理食塩水を循環させる。この時の加温方法は、組織内加温用同軸スロットアンテナを用いて、電磁波照射することで加温した。

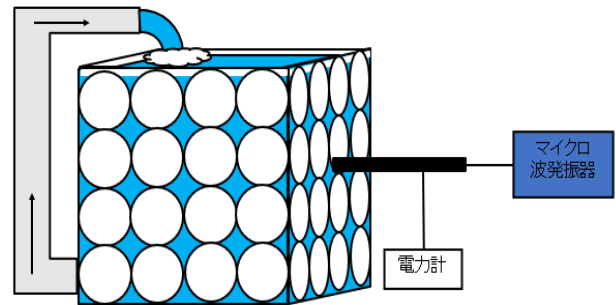


図1 毛細血管を模擬したダイナミックファントム[6]

アクリル容器内に充填した細かなファントムは、図2のmm単位のファントムである。



図2 使用するファントム[6]

図1のように、一辺が150mmのアクリル容器に、球状ファントムと線状ファントムをそれぞれ充填した。この充填したファントムとアクリル容器の隙間を毛細血管と定義している。この隙間に血液の導電率と同等の質量パーセント濃度の食塩水を循環させ、生体内の毛細血管による冷却作用を模擬している。また、容器の体積に占める充填した線状ファントム及び球状ファントムの割合を充填率と呼ぶ。この研究では、線状ファントムの充填率がおよそ73%、球状ファントムの充填率がおよそ54%であった。図1のように、ダイナミックファントムの温度上昇を測定するために、加温用同軸スロットアンテナを、側面に穴をあけたアクリル容器に差し込み、アンテナの先端に近い方のスロット部が、容器内の中央部に配置した。ここでのアンテナからの放射電力を7Wとし、5分間の加温を行った。温度の測定方法については、蛍光式光ファイバを用いて、食塩水ではなくファントムの内部を測定したいため、温度計を線状加工及び球状加工したファントム内に存在するようにした。なおこの装置が実際のハイパーサーミアでの治療で用いられるものと似たものである。加温方法は、電磁波源として組織内加温用同軸スロットアンテナ(2スロット)を用いて、ファントムの加温実験を行っている。スロットアンテナとは、無線通信用のアンテナの一種であり、超短波という30~300MHz以上の周波数において用いられる。

### 3.2 実験結果

図3に実験結果を示す。加熱時間は300sとし、縦軸を、加熱開始からの温度上昇値[°C]、横軸を加熱開始からの時間[s]としている。観測した点は、また、還流させる食塩水とファントムの温度に差が出ないように、温度の誤差を、 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 以内にしてから、加熱を開始した。加熱終了時においても、食塩水自体の温度上昇は見られなかった。

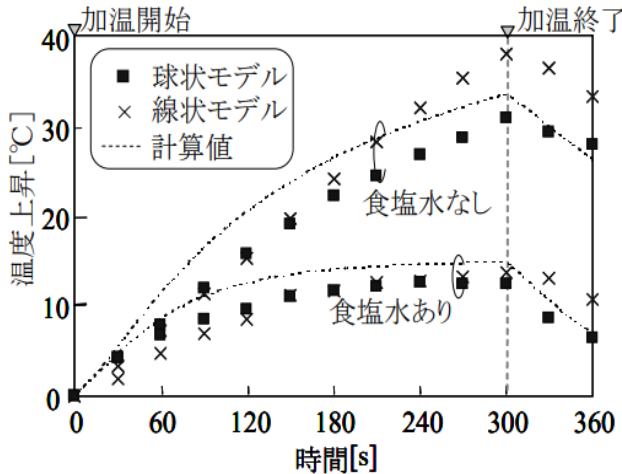


図3 温度上昇の時間変化

この先行研究の結果としては、図3より、線状ファントム、球状ファントムともに、食塩水がない方に着目すると、加熱開始から加熱終了時まで温度が上昇し続けているのに対し、食塩水ありの方が、これ以上温度が上昇しない熱的定常状態が確認できている。つまり実際の人体において、生体内には血管が存在しており、その流れる血流によって、温度上昇に違いが出たことは正しいと言える。また球状ファントムは線状ファントムに比べて、加熱終了時の温度の低下が早いことがわかっている。これは球状モデルの方の充填率が低く、熱が隙間から逃げやすい等があげられ、計算値と近似することから、球状モデルの方がより人体の特性を模擬できている。

### 3.3 本研究で比較する点

この研究では、人体における生体組織内の血流を考慮したダイナミックファントムを作成し、体内の温度上昇を測定した。血流を流した時の計算結果と、実験によって得られた温度上昇値が良好に近似したことから、血流量が生体内の温度上昇に対しての冷却効果を模擬できた。今回比較する点として、細かなファントムを多く作成する工程を、一つの塊のファントムに針金で穴を開ける工程に変更した。これはmm単位に細かく正確に作成することは手間がかかり、また、毎回充填率が変化してしまうと考える。定量的に評価し、誰でも作成できる簡易さをベースにし、この試作したダイナミックファントムに血流を模擬した食塩水を循環させ、加熱実験を比較する。

## 4 本研究

### 4.1 ファントムの構造と試料

本研究で製作したファントムは、先行研究の小さいファントムを充填させ、血管を模擬するのではなく、一つのファントムを製作し、そこに穴を開け血管を模擬するファントムを製作した。穴

は2.6mmの針金で穴を開けた。また、穴を規則的に空けたファントムも製作した。これは後程実験のところでも述べるが、穴の開け方でファントムの温度上昇に変化があるのかを比較するためである。次に試料、組成比を表1に示す。

表1 生体等価固体ファントムの組成比[7]

試料	成分割合[%]	量[g]
イオン交換水	85.60	256.8
寒天	2.65	7.95
塩化ナトリウム	0.99	2.97
デヒドロ酢酸ナトリウム	0.05	0.15
TX-151	2.14	6.42
ポリエチレン粉末	8.56	25.68

表1にあるデヒドロ酢酸ナトリウムは防腐剤のことであり、腐るのを防ぐ役割を持つ。そしてTX-151は増粘剤のことであり、このTX-151を使用することで、このファントムには以下の特徴を持つことができる。

1. 原材料の入手が容易で、制作も簡易に行うことができる。
2. 任意形状への加工の簡易さ。
3. 形状保持が良好で、強度的にも取り扱いやすい。

誰でも簡易的に作成しやすいことが向上するという点で先行研究より優位な点として挙げられる。ダイナミックファントムがより簡易的に、定量的に作成できるとなると、汎用性が高くなり、様々なところで研究に使用することが可能になるのではないかと考えている。

逆にデメリットとして挙げられることとしてTX-151ファントムは、参考文献[1]より含水率が80%以上であり、模擬できる組織が筋肉、脳、皮膚などの高含水組織に限定されてしまう。また、今回実際に作成したファントム2つを図4、図5に示す。

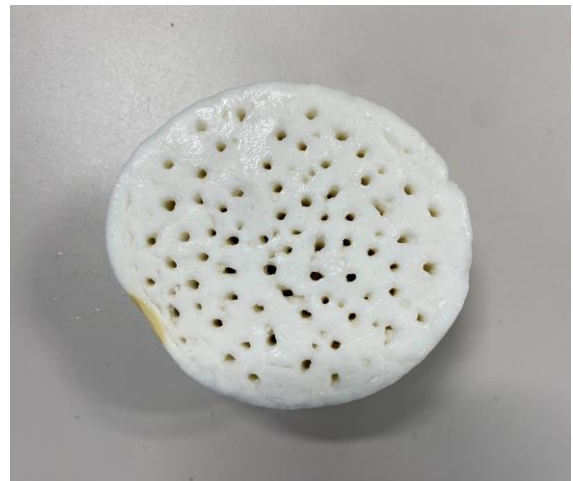


図4 まばらに穴を開けたファントム



図5 規則的に穴を開けたファントム

#### 4.2 必要な器材と作成手順

ファントムを試作する段階の必要な器材で、精密器、IHコンロ、鍋、ビーカー、料理用のへら、ふるい、攪拌器を用意した。そして表1の材料を準備する。

次に実験の手順を以下に示す。

1. 材料をそれぞれ正確に量り取る。
2. イオン交換水を張った鍋に、塩化ナトリウム、保存料、寒天を入れてよく混合する。このとき、寒天を入れる前に塩化ナトリウムと保存料を先に溶かしておく、これら二つが溶けたのがわかりやすくなる。
3. 強火で一気に加熱する。火にかけているときに底が焦げ付かないよう、常に鍋の底をまんべんなくへらで軽くこするようにしながらかき混ぜる。特に10分過ぎあたりからはすぐに焦げ付くので注意しなければならない。
4. 沸騰の兆候(細かい泡が一面に沸き上がり液面が盛り上がるようになる)が現れたら、直ちに火を止める。ただし、加熱が不十分な場合には、寒天が凝固しないので注意すること。(約15分)
5. その後、TX-151をふるいにかけてながら鍋に入れ、ホイッパーで塊にならないように混ぜる。
6. ポリエチレン粉末をふるいにかけてながら少量ずつ混ぜ込む。鍋の縁に沿うように攪拌器を動かすと混ぜ込みやすい。このとき泡が入らないように十分注意する必要がある。泡立てるような動きをしてはいけない(約15分)なお、分量が多い場合はより均一に攪拌するために別途ミキサーを購入し、使用することを推奨する。5,6の手順は手早くやらないと冷めてきて寒天が固まってしまうので注意しなければならない。
7. 材料の全てを均一に混ぜた後、空気が入らないように静かにゆっくりと型に注ぎ入れる。この際、型を少し傾けて型の内側を伝ってファントムを底に流し入れるようにすると空気が入りにくい。
8. 注ぎ入れ終えたら、ファントムが乾かないように型の上面にサララップを張る。これは異物の侵入も防ぐためでもある。
9. 室温で一晩程度放置する。可能であれば、型に注いでから3-5時間後に、一度、ファントムと型の境界面に包丁を入れる。これは、ファントムが上表面から冷め固まり体積が減るが、このときにファントムが型に密着して離れず、引っ張られて割れたりすることを防ぐためである。
10. ファントムが凝固した後、型から取り出す。
11. 型から取り出したら、ファントムの空気接触面は気泡など

により平坦でないため、数cm程度切り捨て、形を整える。

12. 保存時はファントムの乾燥と異物混入を防ぐ為、サララップなどで包む必要がある。また、冷蔵庫などの比較的涼しい場所での保存が望まれる。

以上より本研究においてファントムを試作した。

翌日以降、1から12の手順で試作したファントムに針金で穴をあけて血管を模擬したダイナミックファントムに加工した。ポンプで流れる量が溢れないような穴の数と大きさにした。本研究では血流ありとなしとの加温実験の比較であり、人体の構造を正確に模擬することは本来の目的ではないため、実際に流れる流量であったり、血管の模擬であったりについては議論しない。

## 5 実験

### 5.1 実験目的と手順

本研究では、先行研究の細かなファントムよりも、簡易的、定量的なデータを取ることができるようダイナミックファントムを試作することを目的とした。そこで、先行研究と同じ細かなファントムを作成し、本研究で作成したファントムと同じ条件下で加温実験を行った。その両者の結果を比較することで、先行研究と同じ性能となることを示すために実験を行った。本来であれば、先行研究と同じ同軸スロットアンテナを用いた、加温実験を行いたかったが、本研究室にはそれがなく、代わりにドライヤーを使用した。また、実験で使用する電動ポンプの流量は1分間に約1000ml流れるものを使用した。

次に手順について説明していく。

1. 本研究のファントムで生理食塩水ありの場合の手順
  - ① 生理食塩水を0.9%の濃度で作成し、桶に貯める。
  - ② 菜箸、電動ポンプ、ダイナミックファントムをセットする。
  - ③ 電動ポンプを作動させ、生理食塩水を循環させる。
  - ④ その後、ドライヤーでファントムの上部を温める。
  - ⑤ 5分間加熱した後、1分放置する。60秒ごとにダイナミックファントムの温度を赤外線カメラで測定する。
2. 本研究のファントムで生理食塩水なしの場合の手順
  - ① ダイナミックファントムを菜箸の上に乗せる。
  - ② ドライヤーでファントムの上部を温める。
  - ③ 5分加熱した後、1分放置する。60秒ごとにダイナミックファントムの温度を赤外線カメラで測定する。
3. 先行研究と同じ細かなファントムで生理食塩水ありの場合の手順
  - ① 細かなファントムをガラス容器に詰める。
  - ② 電動ポンプのホースの吸い口をガラス容器に直接セットし、生理食塩水を循環させる。
  - ③ ドライヤーでファントムの上部を温める。
  - ④ 5分加熱した後、1分放置する。60秒ごとにダイナミックファントムの温度を赤外線カメラで測定する。
4. 先行研究と同じ細かなファントムで生理食塩水なしの場合の手順
  - ① 細かなファントムをガラス容器に詰める。

- ② ドライヤーでファントムの上部を温める.
- ③ 5分加熱した後, 1分放置する. 60秒ごとにダイナミックファントムの温度を赤外線カメラで測定する.

さらに, 本研究のダイナミックファントム製作段階において, 規則的に穴を空け, 生理食塩水が均一に流れるようにファントムを試作したが, それを用いての実験の手順は, 最初に作成したファントムの手順 1, 2 と同じようにした. 本研究も先行研究と同じく, 生理食塩水ありと食塩水なしで比較して実験を行った. これは, ファントムに生理食塩水を流すことで, 食塩水ありと食塩水なしでの生体内における温度上昇の相違することを証明するためである. 本研究で製作したファントムを用いた装置を図 6 に, 先行研究のように作成した細かなファントムを用いた実験装置を図 7 に示す.

図 6 本研究で製作したファントムの実験の装置

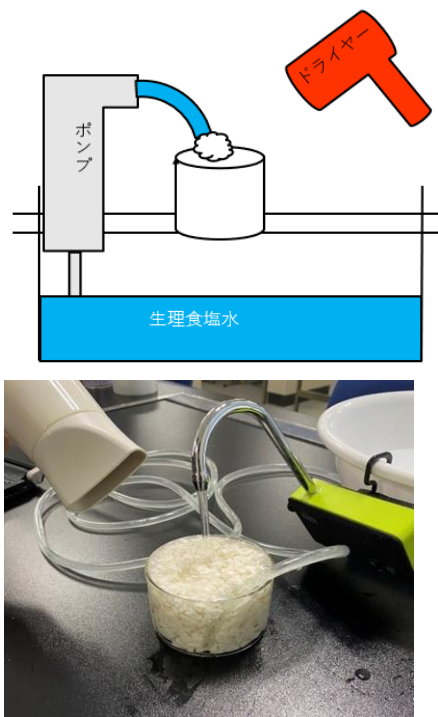


図 7 先行研究のファントムを用いた実験装置

図 6, 図 7 の装置を, 赤外線サーモグラフィカメラ InfReC を用いて, 固定した場所から撮影し, 温度上昇を計測した.

## 5.2 実験結果

実験で計測したそれぞれのファントムの温度上昇のグラフを図 8 に示す.

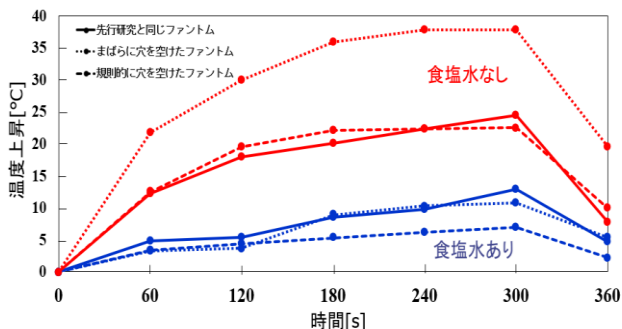


図 8 各ファントムの比較図

また, 食塩水を循環させ, 加温した時の先行研究と同じく細かいファントムを充填させ血管を模擬したファントムと, 本研究で製作した 2 つのファントムとの温度上昇の誤差を表 2 に示す.

表 2 誤差

	1分後	2分後	3分後	4分後	5分後	6分後
まばらに穴を空けたファントム	-1.5	-1.7	0.4	0.6	-2.1	0.7
規則的に穴を空けたファントム	-1.4	-1.0	-3.2	-3.5	-6.0	-2.5

図 8, 表 2 より, まばらに空けたダイナミックファントムの方が, 細かなファントムとの差が小さかった. しかし, 熱的定常が示されたのは規則的に穴を空けたファントムの方であり, まばらだと測定する箇所によってデータが異なる可能性が高く, 本研究では定量的なデータを目的としているため, 規則的に穴を空けたほうが良いと考える. したがって, 規則的に穴を空けたファントムの加温実験の試行回数を増やし, 誤差が小さくなるか検討するとなお良い.

## 6 まとめと今後の展望

生体内における温度分布評価には, 人体に流れる血流の考慮が重要であり, 本研究では血流を模擬したダイナミックファントムの試作とその加温実験を行った. 実験結果として, 食塩水ありと食塩水なしで温度上昇に所望の違いが見られた. しかし, 先行研究で用いた同軸スロットアンテナは電磁波による体内からの加温であり, 本研究ではドライヤーで外側から温風を当てた. つまり先行研究でドライヤーを当てた比較実験をしたものの, 本研究の針金で穴を空けたファントムを同軸スロットアンテナで加温した場合の実験データと, 本研究のドライヤーで加温した実験データと異なる可能性がある. 今後, 針金で穴を空けたファントムをアンテナで加温する実験を行う予定である.

### 参考文献

- [1] 藤原 修, “電磁波のバイオエフェクト,” 信学誌, vol. 75, no. 5, pp. 519-522, May. 1992.
- [2] 斉藤 正男, “電磁界の生体への影響,” テレビ誌, vol. 42, no. 9, pp. 945-950, Sept. 1988.
- [3] K.Ito, “Medical applications of microwave,” Proc. 1996 APMC, vol. 1, pp. 257-260, Dec. 1996.
- [4] 柄川 順, “新編 癌・温熱療法,” 篠原出版, 参照 Aug. 2022.
- [5] 伊藤公一, 河井寛記, 齊藤一幸, “生体等価ファントムの現状と今後の展望,” IEICE, Vol. J85-B, No. 5, pp. 582-596, May. 2002.
- [6] 千葉大学, “毛細血管を考慮した温度上昇測定用ファントムにおける有用性の比較検討”, 平成 19 年度電子情報通信学会東京支部学生研究発表会, 参照 Aug. 2022.
- [7] 林伸伍, 藤井勝之, “超音波振動を利用した脱気によるファントム制作の安定化,” 電子通信情報学会, IEICE Communications Express, vol. 11, no. 5, pp. 229-233, May. 2022.