

超音波振動を用いたファントム作製法の実験的評価

2020SC033 加藤瑞穂

指導教員：梅比良正弘

1 はじめに

近年、人体近傍あるいは身に付けて利用する情報通信機器が普及している。そのためこれらの機器より発生する電磁波と人体の相互作用を評価する必要がある。しかし実際の人体を用いて実験を行うことは困難であるため、生体組織の電気定数を模擬した模型(ファントム)が使用されている[1]。

ファントム作製時の課題点として、ファントムの電気定数は、作製者の経験や技術により異なることが挙げられている。先行研究[2]では、作製者の技術に依存する原因の一つであり、ファントムの電気定数を下げる要因である気泡を、図1のよう超音波振動を与えることで減らし、実際の人体の電気定数に近いファントムを作製できることが報告されている。しかしながら、気泡の減少量は目視可能な範囲の個数での計測であり、大きさや形は考慮されていない。そこで、本実験では超音波振動を加えたファントムの断面より、気泡の断面積を測定し、ファントム内の気泡の面積割合と電気定数の関係を定量評価する。



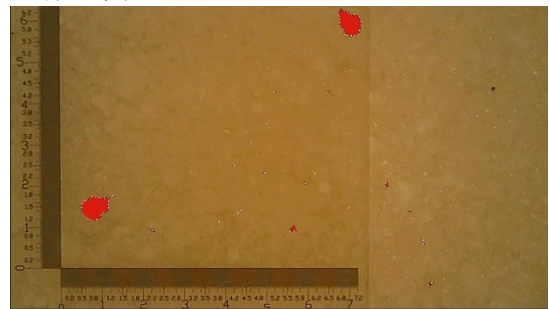
図1 超音波洗浄機使用前のファントム[2]

2 実験内容

本研究では、先行研究[2]と同様の筋肉等価ファントム(超音波振動を加えたファントム(w/ USV: Ultrasonic vibration)、加えていないファントム(w/o USV without Ultrasonic vibration))2種類5セット(合計10個)を、洗浄器の槽に入るサイズのシャーレ(直径90mm、高さ60mm)を用いて作製した。超音波洗浄器はアズワン(株)MCD-23-6747-01を使用し40kHz、15分間の超音波振動を与えている。

二種類のファントムの電気定数を測定した後、ファントムを薄く切断した。その後、薄くなったファントムの断面の上にマイクロルーラーを置き、気泡がある部分を中心に写真を撮影した。使用したマイクロルーラーは、目盛全長7mm、最小目盛0.02mmである。本研究では超音波振

動を与えたファントム、与えていないファントムそれぞれ5枚ずつ撮影している。気泡の断面積の測定では、画像・写真編集ソフト Adobe Photoshop の計測機能を使用した。図3に気泡の計測画面を示す。図2(a)では気泡の部分を赤色で示している。撮影した写真全体の画素数は921600(1280×720) pixel であり、気泡の面積は画素数の計測により算出する。気泡がある部分をアプリの選択ツールを使い選択し、図2(b)のように計測機能を使い選択された部分の画素数を計測した。また、撮影した写真の1mm²あたりの画素数の計測も同時に行った。これは断面積の観察時に顕微鏡を用いており、観察毎に違う倍率で画像を撮影しているためである。



(a)撮影した断面画像

ソース source	スケール scale	スケール単位 unit	スケール比率	カウント	面積 area	外周 perimeter	平均厚 thickness	高さ height	幅 width
選択範囲 selection	1 pixels = 1.0000 p...	pixel	1.000000	2783.0000...	949.212770	0.680571	657.000000	1831.2000...	
選択範囲	1 pixels = 1.0000 p...	pixel	1.000000	2416.0000...	209.145707	0.694654	64.000000	15.000000	
選択範囲	1 pixels = 1.0000 p...	pixel	1.000000	8.000000	12.342961	0.362888	4.000000	4.000000	
選択範囲	1 pixels = 1.0000 p...	pixel	1.000000	12.000000	16.500000	0.593949	2.000000	4.000000	
選択範囲	1 pixels = 1.0000 p...	pixel	1.000000	1.000000	4.000000	0.785398	1.000000	1.000000	
選択範囲	1 pixels = 1.0000 p...	pixel	1.000000	2.000000	6.000000	0.698132	2.000000	1.000000	
選択範囲	1 pixels = 1.0000 p...	pixel	1.000000	18.000000	16.242641	0.857372	5.000000	4.000000	
選択範囲	1 pixels = 1.0000 p...	pixel	1.000000	6.000000	18.000000	0.753482	1.000000	2.000000	

(b)気泡の計測

図2 気泡の計測画面

3 実験結果と混合物の誘電率の評価

本実験の電気定数測定には、キーサイト・テクノロジー社のネットワークアナライザーN1500A-004を使用し、測定する周波数帯はUHF帯(300~3000MHz)で、測定方法は同軸プローブ法を用いる[2]。作製した二種類合計10個のファントムの比誘電率と導電率を5回ずつ測定した。その最大値と最小値、平均値を図3に示す。また、IFAC[3]が公開している実際の筋肉組織の電気定数を点線で示す。表1では、測定した電気定数の最大値最小値の差の平均を示す。超音波振動を加えたファントムの比誘電率は加えなかったファントムに比べ平均3.97上昇した。導電率は0.2[S/m]上昇した。比誘電率の最大値最小値の差の平均は0.55倍、導電率の最大値最小値の差の平均は0.8倍になった。超音波振動を与えることで、比誘電率は、目標値とほぼ同じ値になり、計測値のばらつきが抑えられる。導電率は、目標値より遠ざかってしまうが、計測値のばらつきはあまり変化がなかった。そのため超音波振動を加え電気定数が増えることを考慮した、ファントムの原材料の組成比の調整は今後の課題である。

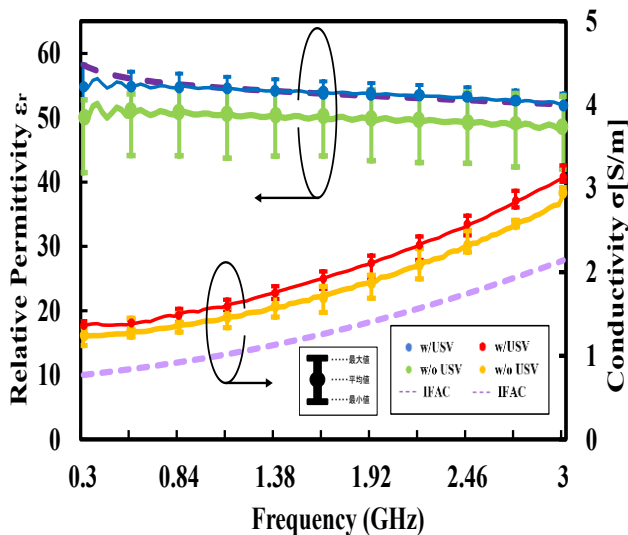


図3 測定したファントムの電気定数

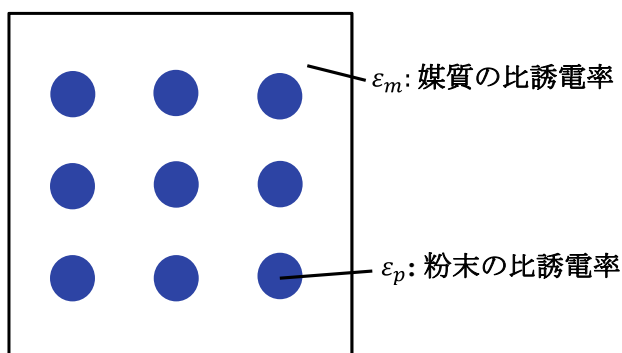
表1 最大値最小値の差の平均

	w/o USV	w/USV
ϵ_r	10.2	5.7
σ [S/m]	0.23	0.19

作製したファントムの気泡の面積割合は、超音波振動を加えたものが0.10%、加えていないものが0.94%であり、ファントム内を占める気泡量が0.11倍になることわかった。

本研究では、ファントム内の気泡の減少量と電気定数の関係を実験的手法で評価することに重きを置いているが、気泡と電気定数の関係を大まかに予測するために利用できる Maxwell-Garnett モデル[4](図4)を使用した混合物の誘電率計算(1)について記載しておく。

$$f = \frac{\epsilon_{mix} - \epsilon_m}{\epsilon_{mix} + 2\epsilon_m} \cdot \frac{\epsilon_p + 2\epsilon_m}{\epsilon_p - \epsilon_m} \quad (1)$$



ϵ_{mix} : 混合物の比誘電率 ϵ_m : 媒質の比誘電率
 ϵ_p : 粉末の比誘電率 f : 粉末の体積分率($0 < f < 1$)

図4 Maxwell-Garnett モデル

このモデルは、粉末などの微小な物質が均一に分散し

た場合に適応することができる。本研究で目標としているファントムの比誘電率の値は54.02である。一方、今回作成した超音波振動を加えていないファントムの比誘電率の平均値は49.92である。Maxwell-Garnett モデルを用いて、目標値の比誘電率と実験で作製された気泡の混入したファントムの比誘電率から気泡の体積割合を算出した。その結果、媒質(目標としているファントム)の比誘電率54.02のとき、混合物(気泡の混入したファントム)の比誘電率が49.92であると、気泡が5.34%混入していると想定できることが分かった。本実験では、気泡の占める割合を面積比で計測したため体積比に変換する。体積比は面積比を $\frac{3}{2}$ 乗することで得ることができ、作製したファントムの気泡の割合の体積比は0.09%となった。このモデルは均一に微小な物質が混合した場合に利用できるが、実際は不均一に気泡が混合しており条件が異なるため本実験の値とこの計算モデルで得られた値は一致しなかった。しかし、少量の気泡の混入が電気定数へ影響を与えることは明らかである。

4 まとめ

本論文では、それぞれのファントムの電気定数を計測し、あわせて超音波振動を与えることでファントム内の気泡の割合がどれほど減少したかを撮影した画像の画素数より、明らかにした。ファントムの電気定数は、原材料の割合により調整することができるが、作製する際に混入する気泡も電気定数に大きく影響を与えてしまう。超音波振動を用いることで気泡がどれほど減少するか実験で検証することは、理想の電気定数を持つファントム作りの指針になる。今後の課題としては、超音波振動の周波数や加える時間を変化させたときの気泡の減少量の評価や気泡の体積割合の計測が挙げられる。

参考文献

- [1] R. Suga, M. Inoue, K. Saito, M. Takahashi, K. Ito, "Development of Biological Tissue-Equivalent Phantom in HF Band," IEICE Communications Express, vol.2, no.12, pp.507-511, 2013.
- [2] Shingo Hayashi, Katsuyuki Fujii, Yasuyuki Okumura, and Masahiro Umehira, "Stabilization of phantom fabrication by degassing using ultrasonic vibrations," IEICE Communications Express, Vol.11, No.5, pp.229-233, Feb.2022.
- [3] IFAC, "Calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 300 MHz-3.0 GHz," IFAC-CNR, Florence (Italy), 1997-2018, <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>, accessed Jan.20.2023.
- [4] Nonlinear susceptibility of composite optical materials in the Maxwell Garnett model J. E. Sipe and Robert W. Boyd Phys. Rev. A 46, 1614 - Published 1 August 1992