

癌治療デバイスによる加温分布評価用の乳房ファントムの開発

道山哲幸, 鎌野秀三
日大工・電気電子

【緒 論】

ラジオ波またはマイクロ波帯域のエネルギーを利用した癌の治療法には、ハイパーサーミアや凝固療法がある。外科手術や投薬治療よりも弱侵襲性の特長を有するが、治療範囲の推定及び制御の課題が残されたままである。特にハイパーサーミアでは治療時における患部の温度を連続的に測定する技術が確立されていない。

そこで、加温範囲とその温度を定量的に計測することを目的とした模擬人体（ファントム）[1]の開発を研究している。従来は、主に生理食塩水を媒質とした物が使用されており、電磁波の生体影響や人体が通信に及ぼす影響の検証において、数値解析と良好に一致する結果が得られている。しかし、加温実験への応用では、複素比誘電率の温度依存性および蒸発が問題となる。本報告ではマイクロ波による乳癌治療を想定し、乳房の極低含水ファントムを開発した[2]。その複素比誘電率と、比熱及び熱伝導率を検証する。

【本 論】

乳房は主に脂肪と複雑な乳腺で構成されているが、電磁波の波長に対し十分に小さいため、本報告では一様な組織とする。

そのファントムの組成を、表 1 に示す。媒質に Silicone oil (KE-106; 信越シリコーン) を用いる。さらに複素比誘電率の調整のために Graphite と BaTiO₃ を混合後、Resin Hardener (硬化剤) を入れて攪拌及び脱泡し、全体を硬化させる。Graphite と BaTiO₃ の球状粒は 5 ~ 20 μm (直径) と小さく、本ファントムの複素比誘電率の周波数特性に影響しない。またファントムはゴム状のため、凝固

表 1 乳房ファントムの組成

Material	Specific heat c (J/g·°C)	Thermal conductivity κ (W/m·°C)	Mixture ratio (%)
Silicone oil	1.5	0.15	55
Resin Hardener	1.5	1.5	5
Graphite	0.50	78-180	25
BaTiO ₃	0.50	6.0	15

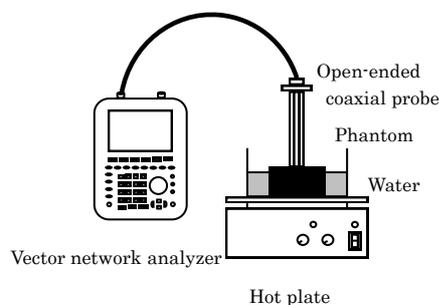


図 1 測定システム

療法用のアンテナや生体深部の複素比誘電率を測定するプローブの刺入は可能である。そこで乳房ファントムの複素比誘電率（比誘電率 ϵ_r 、導電率 σ ）の測定には、ネットワークアナライザ (ZVH, R&S®) による反射法[3]を用いた。測定点はファントムの表面と内部（表面から 2cm）の 10 回平均である。

図 1 は、複素比誘電率の温度依存性の測定システムの概略を示す。

ファントムの複素比誘電率は、凝固療法で用いる周波数 ($f=2.45\text{GHz}$) における複素比誘電率 ($\epsilon_r=15.8$, $\sigma=0.451(\text{S/m})$ [4]) である。

図 2 には参考のため周波数特性を、それぞれ示す。ただし、ファントムの温度 $t=21^\circ\text{C}$ (室温) である。2GHz 以上の ϵ_r と σ のばらつきは小さく、2.45GHz におけるそれらの公称値との差異はそ

れぞれ 1.2%と 2.2%と十分に小さい。複素比誘電率の探索において、 ϵ_r と σ の制御にはそれぞれ BaTiO₃と Graphite が主を担っていることを確認した。

ファントムの温度依存性の測定では、上面以外を水に浸したファントムを、その底面からヒーターで加熱した (図 1 を参照)。測定点はファントム表面のみである。測定時の温度は加熱器の出力を調整し、上昇温度を一定にしている。

その結果を、図 3 に示す。ただし、 $f=2.45\text{GHz}$ 、加温温度 $t=21\sim 95^\circ\text{C}$ である。 ϵ_r は温度の上昇に伴ってほぼ直線的に減少し [4]、 σ は 60°C 以上でばらつきながら僅かに上昇した。これは BaTiO₃ のキュリー温度 (120°C) と Graphite の導電率温度依存性のためである。実験式は、最小二乗法により、

$$\epsilon_r = -0.0515t + 17.3 \quad (1)$$

$$\sigma = 7.36 \times 10^{-5} t^2 - 0.0104t + 0.651 \quad (2)$$

で表される。

マイクロ波凝固療法では、ファントムが 60°C 以上の高温になるため、この特性を考慮した加温特性の解析が可能になる。ただし、乳房組織の温度依存性を含めた公称値は不明である。

提案したファントムの熱定数は、比熱 $c=1.3 \pm 0.1 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}$ (公称値: 3.5 ± 0.5 , 測定: 示差走査熱量法), 熱伝導率 $\kappa=0.61 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ (公称値: 0.5 , 測定: 非定常熱線法) であった。前者の公称値との差異は大きい。複素比誘電率と熱定数の両者を満たしたものは現在も開発されていない。

【むすび】

マイクロ波による乳癌治療を想定した実験のための極低含ファントムの開発を行った。その結果として、複素比誘電率の目標値と等価で、かつ刺入性と耐温性に優れたファントムを開発した。また、保存性にも優れており、実験の再現性検証

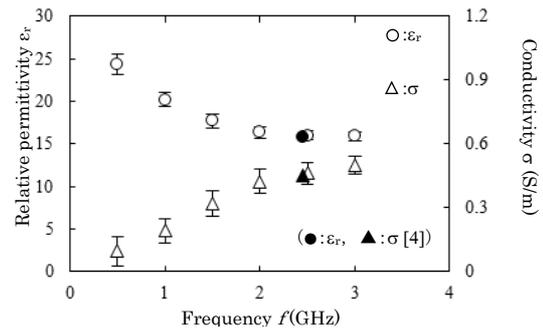


図 2 複素比誘電率の周波数特性

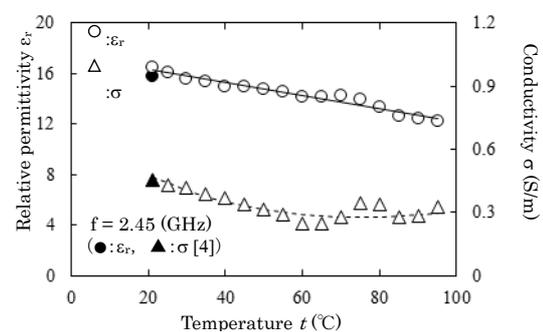


図 3 複素比誘電率の温度依存性

にも有効である。

高誘電体組織の極低含水ファントムの開発と、加熱実験用の電気特性と熱特性を模擬したファントムの実現が今後の課題である。

【文献】

- [1] 伊藤公一, 河井寛記, 斎藤一幸, “生体等価ファントムの現状と今後の展望,” 信学論(B), vol.J85-B, no.5, pp.582-596, May 2002.
- [2] 道山哲幸, 二川佳央, 鍛野秀三, “癌治療デバイス用乳房ファントムの開発”. 信学論(C), vol.J99-C No.9, pp.458-459, Aug 2016.
- [3] M. Converse, E. J. Bond, B. D. Van Veen, and S. C. Hagness, “A Computational study of ultra-wideband versus narrowband microwave hyperthermia for breast cancer treatment,” IEEE Trans., vol.MTT- 54, no.5, pp.2169-2180, May 2006.
- [4] 道山哲幸, 二川佳央, 鍛野秀三, “刺入性の優れた終端開放同軸プローブによる半固体状媒質の複素誘電率測定,” 信学論(C), vol.J93-C, no.5, pp.167-174, May 2010.