原 著

電気的特性から見た寒天ファントムについての考察 —マイクロ波領域を中心として— 宮川道夫

電子技術総合研究所電子計算機部

A Study on the Electrical Property of an Agar Phantom,
The Permittivity Mainly at the Microwave Region
Michio Miyakawa
Computer Systems Division, Electrotechnical Laboratory

Summary :

Complex permittivity of agar phantoms and the temperature dependency were examined experimentally and obtained results were discussed from the point of view of developing a standard phantom in the microwave region.

Experimental results showed that an ideal agar phantom which was completely equivalent to the human tissue in the permittivity and was easily handled was not easily made, except at an special frequency range. But agar phantoms which are equivalent to human tissues in the conductivity are easily made in the wide frequency range and easily handled in clinical studies of hyperthermia.

Key Words :

ハイパーサーミア	Hyperthermia
寒天ファントム	Agar Phantom
複素誘電特性	Complex Permittivity
マイクロ波領域	Microwave Region

1. はじめに

ハイパーサーミアの臨床適用が進んでいる現在に於いても、新たな加温装置の開発研究、加温法の改善研究、加温装置のキャリブレーションあるいは新たな測温手法の研究にと、所謂非動物実験用ファントムの重要性は増しこそすれ減少することはない。様々なファントムが開発されているのは良く知られているが^{1,2)}、非動物ファントムの利点としては①作成から保存までの管理の容易さ、②電気的特性の一定性等が主として期待されているものと考えられる。このため本学会でも“ハイ

パーサーミア装置の操作ガイド「I」³⁾の中で加温装置の性能チェック用に標準筋肉等価寒天ファントムについて、その組成から電気的特性、作成手順についてまで指針を示している。この操作ガイドIはRF加温装置を対象として書かれているため、当該寒天ファントムの記述も主として8～13.56MHz用として記述されている。これに対し本研究の目的は主としてマイクロ波領域に於いて必ずしも特性値の定かでなかった寒天ファントムの複素誘電特性を測定報告すると共に、その限界についても明らかにすることである。すなわち

本稿では主としてマイクロ波領域での寒天ファントムの電気的特性を微小同軸プローブ法⁴⁾で実際に測定した結果を報告すると共に、得られたデータの解析結果から高含水率生体組織と寒天ファントムとの等価性とその限界等について検討を加えた。

2. 測定法とテストファントムの構成

既に我々はサンプルホルダを用いた定在波法により寒天ファントムの複素誘電特性をマイクロ波領域で測定、報告しているが⁵⁾、本稿ではより低域まで含め広帯域の測定を目標に微小同軸プローブ法⁴⁾により測定を実施した。測定法の詳細は文献4に譲るが、本法の測定領域は最大誤差の観点から約 20 ~ 2500MHz としている⁴⁾。しかしこの値は確定的なものではなくプローブの校正用標準誘電体と測定対象の誘電特性によって変化するので、後述の結果についても 20MHz 以下の値が全く信頼できないという事にはならない。

寒天ファントムの作成に使用した材料は、寒天が試薬ルートで販売されている関東化学製の 250g 入り粉末寒天、アジ化ナトリウムも同社製 25g 入り粉末、塩化ナトリウムも同じく同社製試薬 1 級の製品であり、また水は半導体洗浄用超純水 16.5M Ω cm のものを使用した。作成法

は、操作ガイド I とは若干異なり、超純水を予め一定時間だけ沸騰させておき作成プロセスで溶けこんだ空气の脱気を行なうと共に約 90°C 程度にまで低下した高温水を、これもまた予め測定・混合しておいた他の粉末状の材料中に注ぎ容器を密閉して攪拌する。この操作により水分濃度の正確さを期している。つまり、加温しつつ寒天の溶解を行なう場合に比して水分の蒸発による各物質の相対的濃度変化を避け易い方法を採用した。また本稿中に記述されたデータの値は特に断らない限り濃度表示は重量%，測定値は 37 $\pm$ 0.5°C に温度制御されたファントムの測定値、およびそれらの特性値から導出された値である。

3. 測定結果

図 1(a) に塩化ナトリウム濃度を 0.2% から 0.8% 迄 0.1% づつ変化させた場合の比誘電率 ϵ' と導電率 σ の周波数特性の変化を示す。テストファントムの構成は寒天 4%，アジ化ナトリウム 0.1% と上記濃度の塩化ナトリウムの他は超純水である。同図から塩化ナトリウム濃度増加は主として導電性イオン濃度を増加させるため損失の増加、つまり σ の増加となって現れるが、 ϵ' には計測法の避け得ない誤差が表面化する低周波域を除き絶対値自体には殆ど影響を与えないことが分か

図 1(a) NaCl 濃度による寒天ファントム複素誘電特性の変化

る。この関係を塩化ナトリウム濃度と複素誘電率、つまり ϵ' と σ との相関係数で示したものが図1(b)である。以下同様であるが8 MHz, 13.5 MHzについては参考値として(文献4に示すごとく可能性としての最大誤差の値が増加するので測定域外としている)示してある。40 MHz ~ 100 MHz に ϵ' との相関係数が正から負に反転する周波数が、つまりゼロクロス周波数とでも称すべき周波数が

あるが、その周波数から離れるに従い相関係数自体はかなり大きくなる。つまり ϵ' と塩化ナトリウム濃度は特定の領域を除きかなりの相関関係を有していると言える。ただし、この事は塩化ナトリウム濃度が ϵ' の絶対値に必ずしも敏感に反映されるものでないことは図1(a)で見た通りである。

図1(b) NaCl 濃度と比誘電率 ϵ' 、導電率 σ の関係

次に寒天濃度とファントムの複素誘電特性の関係を調べた結果を図2(a), (b)に示す。図2(a)からは予想とは裏腹に寒天濃度は殆ど複素誘電特性に影響を与えていないことが読み取れるが、同図(b)からは予想通り ϵ' と寒天濃度の相関係数自体は最低でも -0.975 あること、他、 σ との相関係数も最低でも約 -0.9 であることが分かる。

図3はアジ化ナトリウムの複素誘電特性を調べたものである。すなわち超純水から0.05%刻みに0.3%迄アジ化ナトリウムの濃度を変えた7種類の“アジ化ナトリウム水溶液ファントム”(平均温度 27.3°C)の複素誘電特性を示している。この図から、アジ化ナトリウムも塩化ナト

リウムと同様イオン電導性の損失、つまり σ に大きく寄与していることが分かる。

表1は寒天4%, 塩化ナトリウム0.6%, アジ化ナトリウム0.1%と超純水からなる寒天ファントムについて、20°Cから50°Cまでの温度範囲内で約2°C刻みに複素誘電特性を測定し、その測定データから計算により求めた ϵ' と σ の温度係数(%/°C)の値を示している。紙面の都合から代表的な周波数で37°Cと43°Cの値のみを示しているに過ぎないが、 ϵ' は(この温度範囲では)負のほぼ一定値を、 σ は周波数が高くなるに従い減少する傾向を示す正の温度係数を有するのが分かる。

図 2 (a) 寒天濃度による寒天ファントム複素誘電特性
の変化

図 2 (b) 寒天濃度と比誘電率 ϵ' , 導電率 σ の関係

図 3 アジ化ナトリウム水溶液の複素誘電特性

表1 寒天ファントム温度係数の例

周波数 [MHz]	温 度 係 数 [%/℃]	
	比誘電率 ϵ' (37℃) (43℃)	導電率 σ (37℃) (43℃)
8*	-0.483~-0.433	1.68~1.45
13.5*	-0.523~-0.524	1.63~1.42
40	-0.578~-0.641	1.57~1.41
100	-0.592~-0.670	1.58~1.42
300	-0.569~-0.640	1.52~1.35
430	-0.554~-0.620	1.46~1.27
750	-0.526~-0.582	1.21~1.08
915	-0.514~-0.569	1.10~0.97
1500	-0.484~-0.535	0.63~0.61
2450	-0.454~-0.509	-0.06~0.08

注) テストファントムの組成については本文中に記載、*: 参考値

4. 検 討

生体組織の誘電特性値として Schwan 等の測定データをもとに Johnson と Guy 等がテーブルに纏めた値⁹⁾が有名である。その平均値的値の妥当性はともかくとして、一応ハイパーサーミア機器の校正用ファントムとして同様な値を有する寒天ファントムが簡単に作成出来れば大変都合が

よい事は疑いない。まず今回取り上げた、つまり本学会の操作ガイドに記載している寒天ファントムの構成で、マイクロ波領域に於いて各成分の構成比を変える事によって筋肉等価ファントムが構成可能かどうか簡単に触れてみたい。図4はこの問題を定性的、直観的に説明するためのものである。図1および図2はそれぞれ、一方のパラメー

図4 組織等価寒天ファントムの存在可能性

タすなわち寒天あるいは塩化ナトリウムの濃度を一定値に固定して他方のパラメータ, すなわち塩化ナトリウム, あるいは寒天の濃度のみを変化させて得られた結果であるが, この様なテストファントムで両パラメータを少なくとも5~6通り変えて複素誘電特性の測定を実施すれば, 各周波数毎に (x, y, ϵ') 空間に π_1 , (x, y, σ) 空間に π_2 なる複素誘電特性面を実験的に定めることが可能である. 但, x は塩化ナトリウム濃度, y は寒天濃度とする. 従ってこの問題は周波数 f_0 に於ける (高含水率) 組織の誘電特性値 (ϵ'_{f_0} , σ_{f_0}) が同一塩化ナトリウム濃度 X_0 , 寒天濃度 Y_0 の座標上の点 P_1 , P_2 として π_1 , π_2 上に現実存在するか否かという問題になるが, もし数値的に存在したとしてその様なファントムが作成・使用の面で現実的かという観点からも議論されなければならない. 以上の点について, 実験は前述の通り一部しか実施していないので断言は出来ないが, 図1および図2の基になっている実験結果から予測は可能である.

表2は Johnson と Guy 等のテーブル⁹⁾の値を基準値として, 図1および図2の結果から誘電特性的にそれぞれ高含水率組織等価となる塩化ナトリウム濃度または寒天濃度を1次の線形回帰式から求めたものであり, 図1の結果では寒天濃度, 図2の結果では塩化ナトリウム濃度が固定されているとはいえ, 高含水率組織等価となる ϵ' と σ 両者の塩化ナトリウム濃度, あるいは寒天濃度の間には大きな乖離のある事が分かる. 表2の中にある括弧内の数値は σ を生体等価とした場合の ϵ' の値, あるいは ϵ' を生体等価とした場合の σ の値である. この結果を見る限り 37°C 近辺で高含水率組織と誘電特性的に等価な寒天ファントムは図1(b)のゼロクロス周波数近辺では図1, 2の実験結果に近いパラメータ値として存在し得る確率の高いことが予想される. またそれより高い周波数でも数値的には存在する確立は高いと想定される. しかしながら敢えてその探索実験を行なわなかった理由は主としてその寒天濃度の値にある. 表2からは前述のゼロクロス周波数の近辺を除

表2 組織等価寒天ファントムの例

周波数 [MHz]	高含水率 生体組織	4%寒天ファントムの σ 等価 NaCl 濃度	NaCl 0.6% ファン トムの ϵ' 等価寒天濃度
8*	$\epsilon' = 180$ $\sigma = 0.482$	30.41% 0.153% ($\epsilon' = 76.6$)	-180.8% (-) 33.40%
13.5*	$\epsilon' = 142$ $\sigma = 0.530$	25.76% 0.178% ($\epsilon' = 75.5$)	-102.2% (-) 31.08%
40	$\epsilon' = 97.3$ $\sigma = 0.693$	25.01% 0.268% ($\epsilon' = 73.2$)	-28.40% (-) 25.32%
100	$\epsilon' = 71.7$ $\sigma = 0.889$	-1.74% 0.374% ($\epsilon' = 71.0$)	2.589% ($\sigma = 1.254$) 19.29%
300	$\epsilon' = 54.0$ $\sigma = 1.37$	8.557% 0.549% ($\epsilon' = 68.1$)	18.31% ($\sigma = 1.023$) 0.611%
430	$\epsilon' = 53.0$ $\sigma = 1.43$	7.066% 0.612% ($\epsilon' = 67.1$)	17.87% ($\sigma = 1.083$) -0.133%
750	$\epsilon' = 52.0$ $\sigma = 1.54$	5.456% 0.597% ($\epsilon' = 65.7$)	16.63% ($\sigma = 1.216$) 0.255%
915	$\epsilon' = 51.0$ $\sigma = 1.60$	5.247% 0.591% ($\epsilon' = 65.3$)	15.28% ($\sigma = 1.293$) 0.261%
1500	$\epsilon' = 49.0$ $\sigma = 1.77$	4.728% 0.544% ($\epsilon' = 64.2$)	17.0% ($\sigma = 1.408$) 1.976%
2450	$\epsilon' = 47.0$ $\sigma = 2.21$	4.403% 0.545% ($\epsilon' = 63.1$)	17.19% ($\sigma = 1.605$) -1.481%

注) テストファントムの組成については本文中に記載、*: 参考値

き、寒天濃度が平均約 17 ~ 18%となることから分かるが、この様に高濃度の寒天ファントムを従来の組成のまま作成するのは非常に困難である。図 2 に結果を示す実験実施時のテストファントムの最高寒天濃度は 10%であるが、6%を越えた高濃度寒天ファントムの作成には攪拌に伴う気泡の発生、ファントム組成の不均一性等の問題が発生し、僅かな量のテストサンプルの作成ですら、何度も失敗を重ねているのが実情である。しかし逆に、ゼロクロス周波数の近辺ではほぼ高含水率組織と等価な寒天ファントムの作成は比較的容易であると言うべきかもしれない。また別の言い方をすれば、 σ が生体のそれと一致しておれば、 ϵ' については厳密な一致を必ずしも求めないというようなケース、或いは一応生体と複素誘電特性が近似していて、 ϵ' 、 σ とも値が既知であればよい、というようなケースには表 2 の結果が役立つであろう。

以前我々は本学会の大会で⁷⁾ σ が高含水率組織と等価な寒天ファントムの組成についてポスター展示発表を行なったが、その値は 26°C に於ける測定値であり、表 2 に示す結果(37°C)とは若干異なったものとなっている。これは表 1 に示す如く寒天ファントムに温度依存性があるためであり、加温・測温実験に寒天ファントムを使用する場合、厳密には温度依存性についても考慮すべきことを示している。

5. まとめ

主としてマイクロ波領域に於ける寒天ファントムの組成と複素誘電特性の関係について実験的に検討を加えた。従来の構成材料を使用したまま筋肉等の高含水率組織と完全に複素誘電特性が一致し、かつ取り扱いも容易であるような寒天ファントムの実現可能性が高いのは数十から百数十 MHz の辺りまでと考えられるが、導電率のみを一致させた寒天ファントムを作成・使用することは測定した全周波数領域にわたり容易である。また周波数にもよるが加温パターンの実時間制御等を考慮に入れた先端的加温装置の研究に使用する

のであれば、厳密には寒天ファントムの温度係数についても考慮が払われるべきこともまた明らかである。

[謝 辞]

本研究は工業技術院医療福祉プロジェクト「がん治療用ハイパーサーミア装置」の成果を利用して行なわれたものであり、工業技術院の関係各位および金井委員長をはじめとする開発委員会の先生方に感謝申し上げる。また本研究の必要性を御教示下さった他、数々のアドバイスを戴いた本学会 QA 委員会委員長菊地真先生をはじめとする当該委員会の諸先生方にも深謝申し上げる次第である。

文 献

- 1) Stuchly M. A. and Stuchly S. S. : Dielectric properties of biological substances——tabulated. *J. Microwave Power*, 15, 1, pp. 19—26, 1980.
- 2) 加藤博和, 石田哲哉: ハイパーサーミア用ファントム. 日本放射線技術学会雑誌, 43, 1, pp. 48—59, 1987.
- 3) 日本ハイパーサーミア学会 QA 委員会: ハイパーサーミア装置の操作ガイド「I」. pp. 12—14, 1986.
- 4) 宮川道夫: 微小同軸プローブによる組織誘電特性の測定法. 信学会論文誌, D(印刷中)
- 5) 宮川道夫: マイクロ波実験用ファントムと誘電特性. 信学技報. *MBE84-105*, pp. 177—184, 1985.
- 6) Johnson C. C. and Guy A. W. : Nonionizing electromagnetic wave effects in biological materials and systems. *Proc. IEEE*, 60, 6, pp. 692—718, 1972.
- 7) 宮川道夫, 岩崎裕一: 温度をパラメータとした誘電特性の測定. 日本ハイパーサーミア学会第 4 回大会, 演題-93, 1987.