

76 有限要素法を用いた高周波加温の熱伝導解析

富山浩一 金井 靖 齊藤義明 宮川道夫

(新潟大学工学部)

1.はじめに

ハイパーサーミア用加温装置の加温実験には被加温体として生体と電気的特性が等価なファントム(疑似生体)が用いられる。

本報告では、まず、ファントムの電気的特性及び熱的特性の計測を行い、その温度依存性を示す。次に高周波加温の熱伝導解析を有限要素法を用いて行い、ファントムの初期温度によって加温パターンが異なることについて述べる。最後に、温度依存性を考慮した解析計算と加温実験との比較を行い、両者の温度分布が良好に一致することを示す。

2.ファントムの電気的特性と熱的特性

計測に用いたファントムは水80wt%、TX-151粉末20wt%、界面活性剤少量から構成される。このファントムの電気的特性を図1に示す。電気的特性の計測は微小同軸プローブ法^[1]を用いて4回行い、その平均を測定値とした。

ファントムの電気的特性は図2に示す加温装置の使用周波数帯域(65±5MHz)ではほぼ一定といえる。しかし、その値は温度によって大きく変化する。即ち、導電率は温度とともに上昇し、比誘電率は温度とともに下降する傾向が見られる。

一方、熱的特性は10～30℃の範囲で熱伝導率 $\lambda = 0.555 \sim 0.585$ [W/sec℃]、比熱 $C = 3150 \sim 3250$ [J/Kg℃]、密度 $\rho = 1028 \sim 1038$ [Kg/m³]であった。

3.熱伝導解析

高周波加温に用いるリエントラント型空洞共振器^[2]のモデルを図2に示す。空洞共振器、ファントム共に軸対称性を有するため軸対称三次元体として扱える。

r-z軸対称空間における非定常熱伝導問題の支配方程式、境界上で熱伝達がある場合の境界条件は以下ようになる。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} + \dot{Q} \quad (1)$$

$$q = \alpha_c (T - T_c) \quad (2)$$

ここでTは物体の温度、 \dot{Q} は単位時間単位体積当りの発熱量、qは熱流束、 α_c は熱伝達係数、 T_c は外部温度を表す。

また単位時間単位体積当りの発熱量は次のように表わせる。

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} \sigma |E|^2 \quad (3)$$

ただし σ は導電率、Eは電界である。

(3)式から分るように発熱量は電界分布から算出される。電界計算についてはEDTD法を用いた^[3]。なお、得られるエネルギー量は相対的な値であるため、適当な係数をかけ発熱量とした。

熱伝導解析は(1)(2)式に有限要素法を適用し行った。ここでは、基礎実験との比較を目的としているため、(1)式において血流による冷却効果を考えていない。

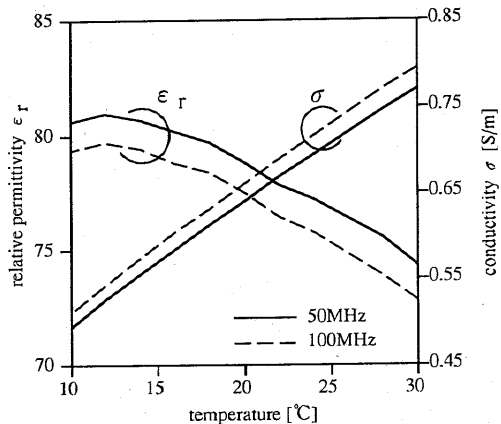


図1 ファントムの電気的特性の温度依存性

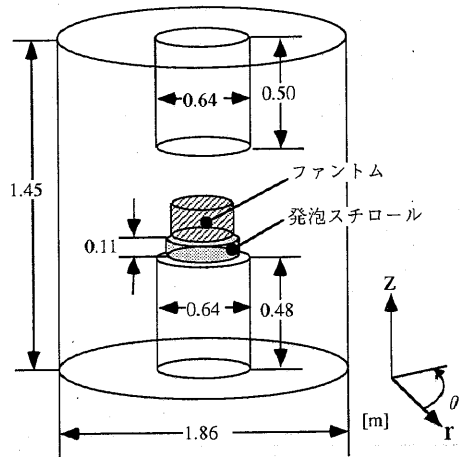


図2 リエントラント型空洞共振器モデル

4.解析計算結果と実験の比較

前述の空洞共振器を用いた加温の解析計算例を図3に示す。ファントムの直径は0.24m、厚さは0.25m、加温時間は30分間とした。ファントムの初期温度はそれぞれ10℃、30℃を想定している。電界分布はファントムの初期温度での導電率及び比誘電率を用いて算出し、加温中の電界分布は一定とした。熱的特性としては10℃、30℃の場合ともに $\lambda = 0.555$ [W/sec℃]、 $C = 3150$ [J/Kg℃]、 $\rho = 1030$ [Kg/m³]、 $\alpha_c = 16$ [J/m²sec℃]とした。また外部温度は $T_c = 20$ [℃]とした。

図3からファントムの初期温度によって加温パターンに違いが生ずることがわかる。これは電界分布が異なっているた

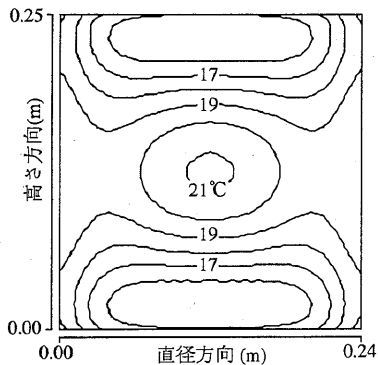
めであり、この電界分布の差は導電率、比誘電率の違いに起因する。つまり温度による電気的特性の違いにより電界分布が異なり、その結果加温パターンに差異が現われる。一方、熱的特性の変化は、加温パターンに与える影響が少ないこと、温度上昇の絶対値に影響を与えるが前述の範囲内ではわずかなであることを確認している。即ち、高周波加温の解析計算ではファントムの電気的特性の温度依存性を十分考慮する必要がある。

以上から、解析計算では加温中の温度上昇による電気的特性の変化を考慮する必要があるといえる。つまり、①電界分布の計算、②温度分布の計算、③温度変化による電気的特性の更新、の3段階を繰り返すことになる。また、より厳密には温度による電気的特性の更新と同時に熱的特性の更新を行う必要がある(図4)。

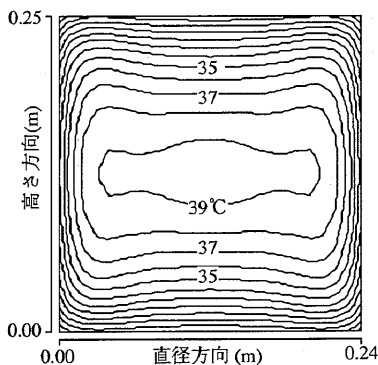
解析計算と加温実験の温度分布の比較を図5に示す。加温時間は30分間、ファントムの初期温度は9.2℃、外部温度は21.7℃である。解析計算における電気的特性値の更新は5分ごとに行い、熱的特性は一定値として $\lambda=0.555[\text{W/sec}^\circ\text{C}]$ 、 $C=3150[\text{J/Kg}^\circ\text{C}]$ 、 $\rho=1030[\text{Kg/m}^3]$ 、 $\alpha=16[\text{J/m}^2\text{sec}^\circ\text{C}]$ を与えた。同図から分るように解析計算と実験とで加温パターンがよく一致している。

5.まとめ

ファントムの電気的特性の温度依存性を計測した。また高周波加温の解析計算を行い、ファントムの初期温度によって加温パターンが異なることを示した。これはファントムの電気的特性の温度依存性が原因であり、解析計算では温度依存性の影響を考慮する必要がある。温度依存性を考慮した解析計算では加温実験とよく一致した温度分布を得た。



(a) ファントム初期温度10℃



(b) ファントム初期温度30℃

図3 解析計算による30分加温後の温度分布

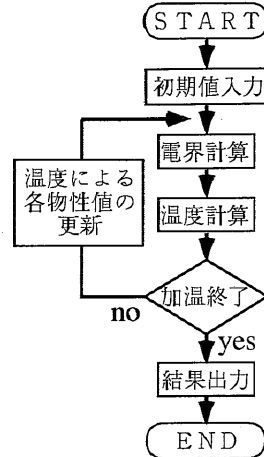
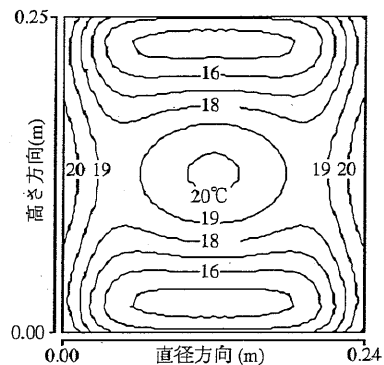
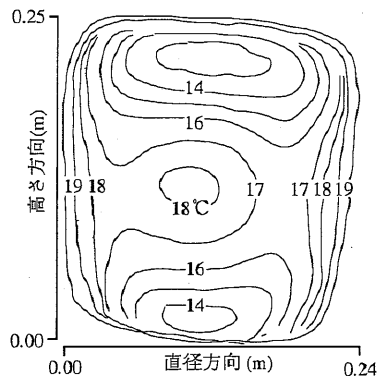


図4 温度依存性を考慮した解析手順



(a) 解析計算による温度分布



(b) 加温実験による温度分布

図5 解析計算と加温実験の温度分布の比較

参考文献

- [1]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」電子情報通信学会論文誌 D 71巻 11号 pp.2450-2456 (1988年11月)
- [2]塚本、金井、柏、齊藤、宮川:「差分時間領域法によるリエントラント型空洞共振器の電磁界解析」電気学会静止器回転機合同研究会 SA-94-3 (1994年8月)