

生体情報工学実験

題目：空洞共振器によるマイクロ波加温

1. まえがき

電子レンジの原理を考えてみる。電子レンジの内部に食品を入れ、扉を閉めてスイッチを押すと、マグネトロンから電磁波が発射され、食品に照射される。すると、食品中の水分子が振動し、その摩擦熱で加熱される。

この原理を応用した癌（腫瘍）の温熱療法が、電磁波ハイパーサーミア（以下、ハイパーサーミア）である。癌細胞は、熱に弱く、 $42 \sim 43^{\circ}\text{C}$ で加温されると死滅することが医学的に証明されている。ただし、正常細胞は、 $42.5 \sim 43^{\circ}\text{C}$ で $30 \sim 60$ 分程度加温されると、致命的なダメージを受けることも明らかになっている。従って、この治療法の成否は、目標とする位置を如何にして局所的かつ安定に加温するかにかかっており、工学分野の役割が期待されている。

2. 目的

この実験を通して、コンピュータ・シミュレーションおよび実験の両面から、電磁波加温の基礎技術を理解する。具体的には、有限要素法による温度分布計算および加温システムによる寒天の加温実験をとおして、加温のメカニズムを理解する。

3. 実験方法

（1）コンピュータ・シミュレーションによる温度分布推定

加温実験を実施する前に、ここでは工学の広い分野で応用されている有限要素法（FEM：Finite Element Method）を用いて、空洞共振器内の寒天内部の温度分布を予測する。

図1は、実験で使用する空洞共振器内部の電磁界の概略を示している。この図では、電気力線（Electric line of force）および磁気力線（Magnetic line of force）がベクトルで描かれている。このように、空洞共振器内には、その共振周波数に応じて種々の電磁波モードが発生する。図1では、 TM_{010} モード（電磁波の専門用語）によく似た TM_{010} - like モードと呼ばれる電磁界パターンが示されている。このタイプの空洞共振器は、円筒型空洞共振器の内部にリエントラントと呼ばれる相対

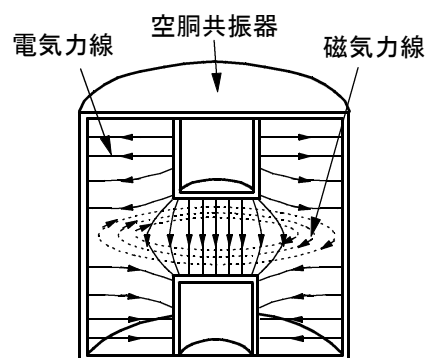


図1 空洞共振器内の電磁界分布

向する 2 つの内円筒を設けたものであり、マイクロ波の分野では、リエントラント型空洞共振器としてよく知られている。この 2 つの内円筒の底面間の間隙部には、一種のコンデンサーが形成されており、強い電界が発生しているため、この位置に加温対象物を置けば、容易に加温できる。

(a) 電磁界計算

図 1 に示した空洞共振器内部の電磁界分布は、物理学の授業でもお馴染みの次式の波動方程式を解いて求めることができる。

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (2)$$

ただし、

$$k^2 = \omega^2 \mu \left(\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \quad (3)$$

ここで、 E ：電界、 H ：磁界、 ω ：角周波数、 μ ：透磁率、 ε ：誘電率、 σ ：導電率。さらに、上式 (1)、(2) を種々の境界条件のもとに解き、電磁界分布計算結果から次式を用いて加温熱エネルギー (W_h) 分布を求める。

$$W_h = \frac{1}{2} \sigma |E|^2 \quad (4)$$

(b) 温度分布計算

電磁エネルギーによって加温された寒天内の温度 (T) 分布は、次式の熱伝導方程式を解いて求めることができる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\kappa \text{grad} T) + W_h \quad (5)$$

ここで、 T ：温度、 t ：時間、 W_h ：電磁波による加温熱エネルギー、 ρ ：体積密度、 c ：比熱、 κ ：熱伝導率。

表 1 寒天の物性値

ε_r	σ (S/m)	κ (W/m·°C)	ρ (kg/m³)	c (J/kg·°C)
75	0.61	0.6	1000	4200

(2) 加温実験システム

図 2 は、実験で使用する加温システムの概略を示している。図中のアン

テナ（Antenna）を介して、周波数の異なる電磁波を空洞共振器内に発生させる。空洞共振器（Cavity）内には、種々の周波数で電磁波共振モード（電磁波のパターン）が発生する。この実験では、例として、最も低い共振周波数の電磁波モードを用いて、寒天（Agar）の加温実験を行う。

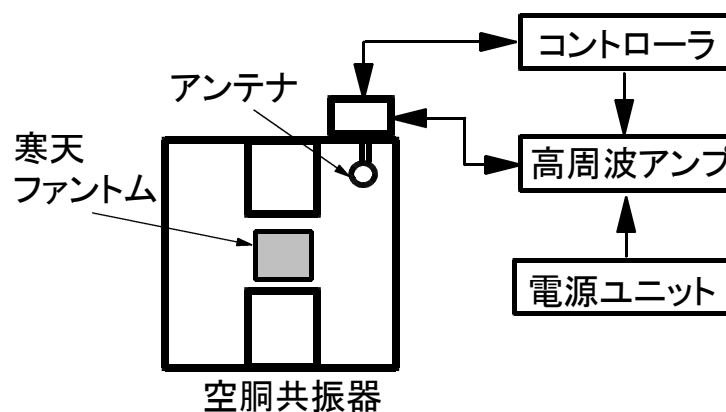


図2 加温システムの概略

4. 実験

(1) コンピュータ・シミュレーション

(a) 図3に示す計算モデルを作成する。

- ①空洞共振器：直径 40cm、高さ 110cm
- ②内円筒：直径 10cm、高さ 40cm
- ③寒天ファントム：直径 18cm、高さ 13cm

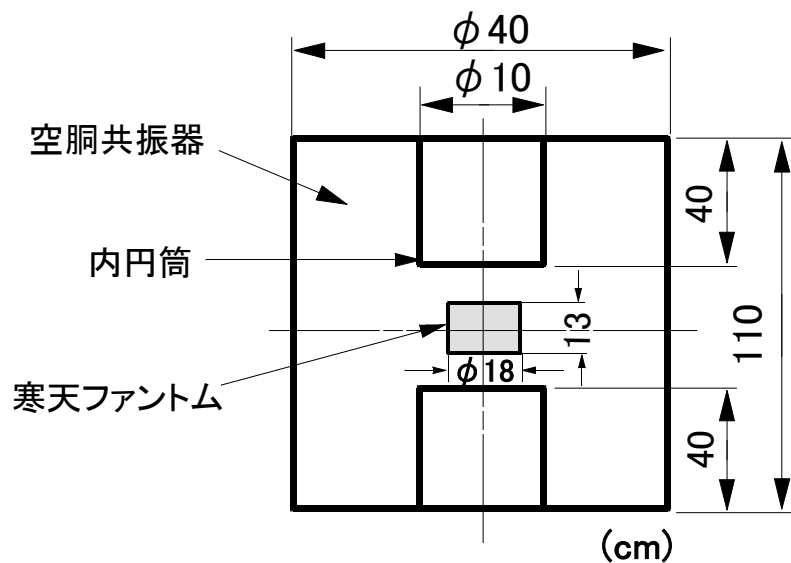


図3 計算モデルの寸法

(b) 電磁界分布を計算する。

- ①共振周波数は、何 MHz か。
- ②電界強度の分布は、どのような分布形状か。

(c) 温度分布を計算する。

- ①寒天内の温度分布は、どのような分布形状か。
- ②寒天内の温度プロファイルを描く。

なお、コンピュータを使用した3次元モデルの作成および有限要素法計算については、マニュアルを参照のこと。(持ち出し厳禁!、コピー不可!)

(2) 加温実験

(a) 使用する機器

- ①加温装置
- ②寒天（中央部で切断してある）
- ③赤外線サーモカメラ（加温終了直後、寒天中央断面の熱画像を撮像する）

(b) 実験条件

- ①加温電力：20W
- ②加温時間：15分

(c) 測定項目

- ①共振時の共振周波数をメモすること。
- ②加温終了直後の寒天中央断面の熱画像を撮像し、これをプリンタ出力すること。
- ③熱画像のプリンタ出力結果から断面内の温度プロファイルを描くこと。

なお、加温装置の操作方法については、マニュアルを参照のこと。(持ち出し厳禁!、コピー不可!)

5. まとめと考察

- (1) コンピュータ・シミュレーション結果、実験結果を整理すること。
- (2) (1) のまとめから、共振周波数の異なる原因を考察すること。
- (3) 温度プロファイルの異なる原因を考察すること。