

◎渡辺 佳明 田中 利幸 多氣 昌生 (都立大)

1. はじめに

パルス変調マイクロ波が人体頭部に照射されるとボンボン、ブーブー、ピチピチといった音が知覚される現象が知られており、マイクロ波聴覚効果と呼ばれる。

この音はマイクロ波の吸収で生じた熱による生体組織の熱膨張で発生すると考えられている^[1]。つまり熱膨張により生じた熱応力波が蝸牛に到達して音が知覚されるということで、いくつかの実験結果もこの説を支持している^{[2][3]}。

これまでに人体頭部を球で近似し、マイクロ波が球対称に加熱すると仮定したときの熱応力波形の計算がなされているが^[1,4]、この計算は頭部の球による単純化だけでなく加熱分布についても単純化しており、実際に生体の頭部に発生する熱応力波と大きく異なる可能性がある。

そこで筆者らはFDTD法(Finite Difference Time Domain Method, 時間領域有限差分法)を用いて解剖学的構造を考慮した計算モデルの電磁波の吸収特性と、それによって発生する熱応力波の数値解析を行った。その結果から推定される聴覚効果のしきい値とパルス幅依存性が実験結果とよく一致したので報告する。

2. 計算手法

本報告ではFDTD法を用いて計算モデルの吸収電力と熱応力波の数値計算を行っている。FDTD法とは支配方程式を差分化し場の変数を差分式で更新する計算手法である。電磁波の支配方程式はMaxwellの方程式であり、FDTD法では電界Eと磁界Hを交互に更新することで解析を行う^[5]。それに対し弾性波の解析では支配方程式は運動方程式とHookeの法則、歪み-変位関係である。これらの弾性波の式をまとめると次のようになる。

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} - \alpha(3\lambda + 2\mu) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} - \alpha(3\lambda + 2\mu) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} - \alpha(3\lambda + 2\mu) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (9)$$

ここで σ_{ij} は応力テンソルの各成分、 v_i は変位速度、 λ, μ, α はラメの定数と熱膨張係数、 T は組織の温度である。本報告では(1)-(9)を4次の精度で差分化し応力 σ_{ij} と変位速度 v_i を交互に更新することで熱応力波の計算を行った。

3. 計算モデル

人体頭部の計算モデルは文献^[6]から引用した。このモデルは2.5 mmの格子で区切られ骨、脳、眼球、脂肪など7つの組織で構成されている(図1)。また、これまでに行われた解析との比較のために球モデルでの計算も行った。球モデルは半径7 cmの脳を仮定し、格子幅1.75 mmで階段近似した。

4. 計算条件

人体頭部モデルと球モデルに915 MHzの平面波の電磁波が1 mW/cm²の電力密度で入射する条件

* Numerical analysis of thermo-elastic wave in human tissue exposed to pulse modulated microwave.

By Yoshiaki Watanabe, Toshiyuki Tanaka, and Masao Taki (Tokyo Metropolitan University)