3次元人体解剖学的モデルによる空洞共振器アプリケーションの加温制御 Heating Control of Resonant Cavity Applicator for 3-D Anatomical Human Head Model

○学 井関 祐也 (明治大) 学 中根 和也 (明治大) 正 新藤 康弘 (明治大)
久保 允則 (オリンパス) 正 加藤 和夫 (明治大)

Yuya Iseki, Nakane Kazuya, Shindo Yasuhiro, Mitsunori Kubo and Kazuo Kato
Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571

This paper describes a new heating control method of a resonant cavity applicator with a dielectric bolus for a 3-D anatomical human head model. We have already proposed the resonant cavity applicator for deep seated brain tumors hyperthermia treatments. In this paper, first, the method using dielectric bolus was described. Second, the 3-D anatomical human head model which was reconstructed from 2-D MRI and X-ray CT images was presented. Finally, from the result of temperature distributions with blood flow rate, it was found that the proposed method was useful for effective hyperthermia treatment.

Key Words: resonant cavity applicator, 3-D anatomical human model, brain tumor

1. はじめに

ハイパーサーミアは、癌細胞が熱に弱く 42~43℃で一定時間加温すると死滅するという臨床事実に基づいている。

本研究室では、非接触・非侵襲での脳腫瘍のハイパーサーミアが可能な空洞共振器加温方式を提案し、実験的及び数値的検討の両面から、本加温方式の有用性を示してきた⁽¹⁾。これまで著者らは、被加温体である人体頭頂部に誘電体を満たしたボラスを設置する方法を提案し、有効な加温位置制御の可能性を示してきた⁽²⁾。

本報では、MRI や X 線 CT 等の 2 次元医用画像から作成した 3 次元人体解剖学的モデルを用い、血流による冷却効果を考慮した温度分布解析により、本加温位置制御方法の有用性を数値的に示した。

Fig. 1 Diagram of the cavity.

2. 解析モデル

図 1 は、空洞共振器加温装置の概略を示している。なお、空洞共振器の各寸法を図中に示した。図 1 に示すように、本加温方式では空洞共振器内部にリエントラントと呼ばれる一対の内部電極を設けている。本加温方式は、共振周波数に応じた種々の電磁界共振モードを空洞共振器内部に発生させることで、間隙に設置した頭部を非接触状態で深部・局所加温が可能である。図 1 に示すように、頭頂部には純水などの誘電体を満たしたボラスと呼ばれる水袋を設置している。

図 2 は、2 次元医用画像から再構築した、3 次元人体解剖学的モデルの詳細図である。本解析モデルは白質、灰白質、腫瘍、頭蓋骨、眼球、心臓等の組織から構成されている。この解析モデルの総要素数は 1,631,388 であった。

表 1 に、電磁界周波数 150 MHz における、生体組織の諸パラメータを示した^{(3),(4)}。なお、本検討では、誘電体ボラスの物性値は純水のそれとした。

解析に用いた支配方程式を式(1)から式(5)に示した。なお、本検討では式(5)の基礎代謝による項は、他の項よりも十分値が小さいため無視している。式(2)の生体熱伝導方程式からわかるように、血流による冷却項(W_b)を考慮することは、ハイパーサーミアの温度分布解析において、無視することのできない重要な課題である。本検討では、組織の血流量を定数とし、血流による冷却効果を考慮した計算アルゴリズムにより、温度分布解析を行った。図 3 は、血流を考慮した計算アルゴリズムの流れ図を示している。

Fig. 2 Detail view of the 3-D FEM model.

Table1 Physical parameters at 150 MHz

Tissue	σ [S/m]	ϵ_r	κ [W/m $\cdot$ °C]	c [J/kg $\cdot$ °C]	ρ [kg/m 3]	$B \times 10^{-6}$ [m 3 /kg $\cdot$ s]
Tumor	0.72719	62.179	0.5	3,437	1,040	4.167
Ventricle/CSF	2.16060	81.169	0.62	4,000	1,010	0.000
Skull/Bone	0.024219	6.1064	0.39	1,300	1,810	0.192
Gray Matter	0.60467	70.073	1.13	3,675	1,030	11.183
White Matter	0.35408	50.306	0.5	3,621	1,030	3.950
Eyeball	1.5064	69.052	0.59	3932	1,000	0.000
Muscle	0.72719	62.179	0.53	3,546	1,040	1.000
Heart	0.78866	80.671	0.54	3,720	1,040	15.000
Air	0	1	0.025	1010	1.165	0.000
Dielectric Bolus	0	75.0	0.6	4,200	1,000	0.000

σ : electrical conductivity, ϵ_r : relative permittivity,
 κ : thermal conductivity, c : specific heat, ρ : volume density,
 B : blood flow rate

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

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\kappa \cdot \text{grad} T) + W_h - W_c + M \quad (2)$$

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

$$W_c = (F\rho)_{\text{tissue}} \times (\rho c)_{\text{blood}} \times (T - T_b) \quad (4)$$

$$M = M_0 (1.1)^{\Delta T} \quad (5)$$

$k^2 = \omega^2 \epsilon \mu$, ω : 角周波数, ϵ : 誘電率, μ : 透磁率, ρ : 体積, c : 比熱, κ : 熱伝導率, σ : 電気伝導率, F : 血流量, T_b : 血液温度, M_0 : 基礎代謝熱

3. 結果と考察

図4は、誘電体ボラスを設置していない場合の温度分布解析結果を示している。共振周波数は166.6 MHzであった。図4からわかるように、脳内の腫瘍が、42~43℃程度に加温されていることが確認できる。一方、頭部側面から首にかけての発熱が高く、47℃程度に加温されていることが確認できる。

図5は、誘電体ボラスを設置した場合の温度分布解析結果である。共振周波数は156.7 MHzであった。図5からわかるように、脳腫瘍が42~43℃程度に加温されていることが確認できる。一方で頭蓋骨から灰白質付近にかけて最高温度46℃程度に加温されていることがわかる。

図4と図5とを比較すると、首および頭部表面の温度が、誘電体ボラスを設置することで、41℃~42℃程度に緩和されていることが分かる。この理由は、誘電体ボラスを頭頂部付近に設置したことで、リエントラント部の電気力線が頭頂部に集中したため、加温位置が誘電体ボラスの方向に移動したためであると考えている。

臨床において、安全なハイパーサーミアを行うには、脳腫瘍部が最高温度であることが望ましい。しかしながら、今回の結果ではホットスポットの発生位置が、脳腫瘍部ではないことがわかった。今後は、誘電体ボラスの電気的特性を変更し、加温位置の制御の検討を行うことを考えている。

4. まとめ

本報告では、空腔共振器加温方式において、誘電体ボラスを用いた加温位置制御の方法を提案した。さらに、3次元人体解剖学的モデルを用い、血流による冷却効果を考慮したFEM温度分布解析手法により、本手法の有用性を数値的に示した。

5. 参考文献

- (1) 加藤和夫ほか, 深部癌の非接触温熱治療を目的とした空腔共振器アプリケーションの設計・試作, 設計工学会, Vol.39, No.11, (2004), pp. 627-631.
- (2) 井関祐也, 加藤和夫ほか, 誘電体ボラスによる空腔共振器アプリケーションの加温位置制御, 日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文, (2010), pp. 169-170.
- (3) Dielectric Properties of Body Tissues, Available: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>
- (4) Esra Neufeld, "High Resolution Hyperthermia Treatment Planning", PhD thesis, ETH Zurich, August 2008.

Fig. 3 Algorithm of calculating temperature

Fig. 4 Temperature distributions without bolus (Resonant frequency: 166.6 MHz)
(a) front of view, (b) side of view.

Fig. 5 Temperature distributions with bolus (Resonant frequency: 156.7 MHz)
(a) front of view, (b) side of view.