集束電界を利用した非侵襲がん治療装置の開発

- A noninvasive cancer treatment system using the focused electric field -

1061001

研究者代表 国立大学法人 長岡技術科学大学 准教授 石 原 康 利

[研究の目的]

がんの温熱療法(ハイパーサーミア)におい て、生体内の局所領域を所望温度に加温でき ないことが大きな課題となっている。我々は、 温熱治療効果の改善と患者の QOL (Quality of Life)向上のために、がん組織を非侵襲、 かつ、局所選択的に加温可能なシステムの開 発に取り組んでいる。本研究では、(1)生体深 部の非侵襲加温を実現するために、『リエント ラント型空胴共振器』の特性を利用した加温 アプリケータを開発するとともに、(2)加温領 域の局在化を実現するために、リエントラン ト電極間に挿入した誘電体の電界集束効果に より、対象領域のピンポイント加温を図るこ とを目的とした。

[研究の内容、成果]

1.リエントラント型空胴共振器による局 所加温

リエントラント型空胴共振器内部の電磁界 分布(E、H)は、(1)式に示す波動方程式に 基づく。

 $\nabla^{2} \mathbf{E} + \mathbf{k}^{2} \mathbf{E} = 0$ $\nabla^{2} \mathbf{H} + \mathbf{k}^{2} \mathbf{H} = 0$ $\mathbf{k}^{2} = \omega^{2} \varepsilon u$

$$\omega^2 \varepsilon \mu$$
 (1)

ここで、 は角周波数[rad/s]、 は誘電率 [F/m]、µは透磁率[H/m]を表す。

共振周波数が最も低い共振モードの場合に は、空胴共振器内部に図1のような電磁界分 布が形成され、リエントラント電極間に電界 分布が集中する。したがって、治療部位をリ エントラント電極間に配置することで、生体 深部に局在したがんを非侵襲に加温できる。



図1 リエントラント型空胴共振器を 利用した加温アプリケータ

我々はこれまでに,ヒト腹部領域を加温対象 としたプロトタイプ機を試作しており、ファ ントム実験によって電極径程度の局所領域を 加温できることを確認している。しかし、頭 頸部等に局在した早期がんを治療するには、 さらなる加温領域の局所化が必要であった。

リエントラント電極間の電界分布を局在化 する一つの方法として、加温アプリケータの 小型化が考えられるが、空胴共振器の小型化 に伴う共振周波数の上昇によって、深部加温 特性が劣化する可能性が懸念されている。こ のため、リエントラント電極周囲に誘電体を 配置し、共振周波数を低減することで、局所 加温特性の改善が試みられてきた。本研究で はさらに、アプリケータ内部に挿入する誘電 体をリエントラント電極間に配置することで、 加温アプリケータの小型化による電界局在に 加え、電極間の電界をより効果的に集束させ ることを提案する。ここでは、挿入する誘電 体形状・寸法・性状による電界分布の集束効 果を数値解析することで、局所加温特性の最 適化を図る。さらに、数値解析結果に基づき 試作機を構築し、実験的に本手法の有用性を 明らかにする。

2.誘電体の挿入による電界分布の集束

2.1 数値解析による評価

リエントラント電極間に誘電体を挿入する ことで得られる電界分布の集束効果を確認す るために、図2に示すリエントラント型加温 アプリケータモデルにおける電磁界分布を、 3次元有限要素法を用いて解析した。ここで は、リエントラント電極間に挿入する誘電体 を円筒型、接頭円錐型とし、誘電体の直径、 高さ、リエントラント電極間に形成される 電界分布を算出した。電界分布の集束効果は、 ファントム内部の正規化 SAR (specific absorption rate)を用いて評価した。

図3に、円筒型誘電体の高さHを60[mm] 一定とし、直径Dを60~150[mm]とした場 合のファントム中心断面における半径方向(r 方向)の正規化 SAR 分布を示す。誘電体未 挿入の場合における SAR 分布の半値幅が 104 [mm]であるのに対して、直径60[mm] の誘電体を挿入した場合に最も電界分布の集 束効果が高く、正規化 SAR 分布の半値幅は 84 [mm]となった。これは、誘電体未挿入時 に対して約20[%]の電界集束効果の改善に対 応する。

図4に、誘電体の直径Dを60[mm]一定と









図5 Z方向の電界集束効果

し、高さHを10~90 [mm]とした場合のr方 向の正規化 SAR 分布を示す。誘電体の高さ が 60 [mm]の場合に、正規化 SAR 分布の半 値幅が最小となることから、円筒誘電体を挿 入した場合には、直径、高さとも 60 [mm]の 場合に最適な局所加温特性が得られることが 示された。しかし、ファントム中心軸方向(Z 方向)の正規化 SAR 分布を示した図5より、 r 方向に比べ Z 方向には集束効果が得られに くいことが示唆された。これは、誘電体の挿 入により、Z 軸方向に沿った円筒状の電界分 布(加温領域)が形成されるためであり、こ のような電界分布形状を加温源として利用し た場合には、対象物体表面の異常加温が懸念 される。そこで、この現象を緩和するために、 誘電体とファントムとの間に空隙を設けた場 合の電界集束効果を解析した。その結果、Z 方向の正規化 SAR 分布の広がりは改善でき るが、r 方向の電界集束効果が 20 [%]から約

10 [%]に減少した。このように、誘電体挿入 による加温領域の集束効果はr方向に得られ 易いものの、Z方向の大幅な改善は困難であ ることが明らかになった。この傾向は、誘電 体形状が切頭円錐型の場合にも認められた(r 方向に関する正規化 SAR 分布の半値幅は誘 電体未挿入の場合に比べ約24 [%]減少した)。 逆に、このようにして形成される円筒状の電 界分布を回転することで、円筒状の電界分布 が交叉する回転軸周辺の領域のみに電界分布 を集中できるため、本研究を新たな加温方式 として発展できる可能性がある。

2.2 試作機による評価

数値解析の結果、誘電体を挿入することで リエントラントギャップ間の電界分布を集束 できる可能性が示された。この効果を実験的 に確認するために、図6に示す加温システム を構築・調整し、ファントム実験を行った。

加温装置は、小型リエントラントアプリケ ータ、マッチング回路、アンプ、信号発生装 置より構成されている。リエントラント空胴 共振器への効率的な電力伝達のために、リエ ントラント空胴共振器の共振周波数をネット ワークアナライザ(E5061A: Agilent Technologies)を用いて測定し、マッチング 回路を介して RF 波を供給した。また、加温 対象のファントム(寒天:4[%]、NaCl:0.24 [%]、NaN3:0.1[%])をテフロン製の台に固 定し、図7に示すようにポリ容器に封入した



図6 実験システムの概観



図7 ファントム・誘電体の配置

蒸留水を誘電体として配置した。なお、誘電 体とファントムとの間に緩衝材を挿入し、誘 電体をファントムと電極の中間に配置した。

加温アプリケータに供給する電力は、ファ ントム側面近傍の電界強度を電界強度計 (EMR-20:Narda)により測定し、ファン トム中央のSAR値が20[W/kg]相当となるよ うに調整した。また、加温特性を評価するた めに、加温終了直後のファントム断面の温度 分布をサーモグラフィー装置(InfraEye 1200:(株)富士通)を用いて測定した。

図8に、誘電体未挿入、ならびに、挿入した場合のファントム内部の温度分布を数値解析結果とともにそれぞれ示す。また、図9、10にr、Z方向の温度プロファイルを示す。

誘電体挿入時の温度分布の半値幅は 74 [mm]であり、未挿入時の半値幅 88 [mm]に 対して半値幅(局所加温領域)を約16[%]減 少できることが示された。なお、理論値との 差異はファントム、挿入誘電体、および、リ エントラント電極との相対位置の誤差が主な 要因であることを数値解析により確認している。



図 10 温度分布プロファイル (誘電体挿入)

-20

0 Z[mm]

-60 -40

40

60

2.3 まとめ

誘電体を挿入することで、リエントラント 電極間の電界分布を未挿入時に比べ約20[%] (r方向)集束できることが確認された。しかし、 Z方向の電界集束は困難であり、挿入する誘 電体とリエントラント電極との間隔を設ける ことで集束効果を改善できるものの、その場 合にはr方向の電界分布の集束効果が低減す ることを明らかにした。この対策として、誘 電体を挿入してr方向の電界分布を集束した 後、アプリケータを回転することでZ方向の 電界を回転軸周辺に集中させる新たな加温方 式が有望であることを示した。

[今後の研究の方向、課題]

ハイパーサーミアの課題の一つである局所加 温に関して、リエントラント型空胴共振器に誘 電体を挿入することを提案し、電界の集束効果 が得られることを示した。しかし、頭頸部等の 早期局所がんを加温するには、30 [mm]以下の 加温領域が必要となる。本研究成果にアプリケ ータの回転操作を加えること、ならびに、リア ルタイム温度計測法に基づくアクティブな温度 制御を実現することで、より局所な加温が可能 になると考えている。今後、本研究成果を生か した研究展開を予定している。

[成果の発表、論文等]

- 21) 峯岸康充,和田森直,石原康利,小型リエントラント型アプリケータの局所加温特性改善の検討,電子情報通信学会信越支部大会講演論文集,p.88 (2006).
- 2) 井野祐一郎,石原康利,リエントラント型加 温方式における局所加温の検討,電子情報 通信学会信越支部大会講演論文集,p.98 (2006).
- 3) Y. Ishihara, N. Wadamori, Hyperthermia applicator based on a reentrant cavity for localized head and neck tumors, J. Med. Eng., (in print).