

乳がんに対する RFA 治療支援システムの開発

Development of RFA assisted System for Breast Tumor

2001006



研究代表者	早稲田大学 理工学術院	次席研究員	小 林 洋
共同研究者	早稲田大学 理工学術院	研究助手	渡 辺 広 樹

[研究の目的]

近年、世界各国における乳がん罹患率および死亡率は急激な増加傾向にある。こうした中、診断技術の発展に伴い、従来の診断では確認できなかった微小病変を早期に発見することが可能になっている。それに付随して、治療法についても、従来の外科的切除法に代わる新たな治療法として、腫瘍に電極針を穿刺（針を刺す）し、ラジオ波をながすことでジュール熱により腫瘍のみを局所的に焼灼・壊死させるラジオ波焼灼療法（Radio Frequency Ablation: RFA）を選択する症例が増加している。RFA は病変のみを局所的に壊死させることが可能であり、患部以外の組織の損傷が少ない。特に乳がんの治療においては、乳房の形状保全が可能であり、整容面で優れていることから、女性の精神的な負担を軽減できる点に大きな利点がある。

しかし、その一方で、その手技には困難な点も多い。たとえば、RFA 施行時の超音波画像の診断画像からは焼灼領域が正確に把握できない。また、一般に乳がんは不整形であり複雑な形状を有するが、既存の RFA 装置では、楕円形状の焼灼領域しか形成できず、腫瘍を過不足なく焼灼することができない。

本研究では、従来の RFA 装置では治療が困難であった任意形状の乳がんに対し、過不足ない最適な焼灼領域の形成を高精度に実現する RFA 治療支援システムの開発を目的とする。

特に、本申請では、システムの最重要要素である生体の熱力学特性の取得、および、医師が術中に操作し、焼灼の進行状態を確認する RFA 用温度分布シミュレータの開発に取り組んだ（図 1）。

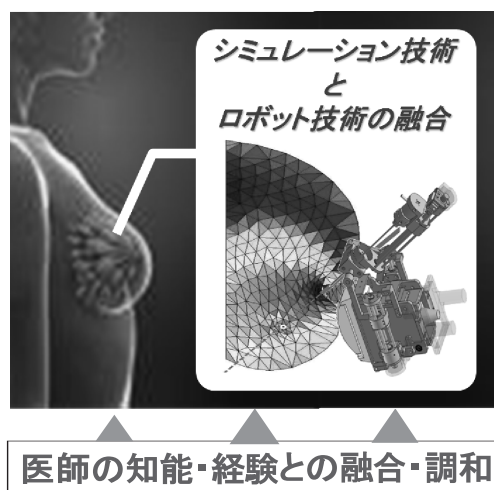


図 1 コンセプト

[研究の内容・成果]

本研究にて開発する焼灼支援システムは、RFA 中の患部の時間的・空間的温度分布をリアルタイムに推定する高精度温度分布シミュレータを規範とし、シミュレータから提示される温度分布情報に基づき、患部への供給熱量をシステム自らが調整するものである。シミュレータにより求解された最適な熱量を患部に供給することで、最終的に腫瘍のサイズ・形状に

即した理想的な焼灼形状を形成することが可能になる。本申請では、豚肉の熱力学特性を実験より詳細に取得し、取得した特性を用い、数値計算手法を用い RFA 用温度分布シミュレータを開発した。

1. 生体組織の熱力学特性

生体組織は温度上昇に伴い組織の組成が変化するため、熱物性値が変化することが知られている。したがって、高精度な温度分布シミュレータを開発するには、生体組織の熱物性値の温度依存性をシミュレーションに反映させる必要がある。そこで食用の豚肉を用い、解析精度に大きく影響する熱伝導率および比熱の温度依存性をそれぞれ非定常熱線法、温度変調法より取得した。実験結果を図2に示す。実験結果より、豚肉の熱伝導率は、75℃以下では線形増加し、75度以上では、たんぱく変性に伴う水分の減少により、値が急激に減少することが分かった。また比熱については、すべての温度領域について線形増加する結果となった。

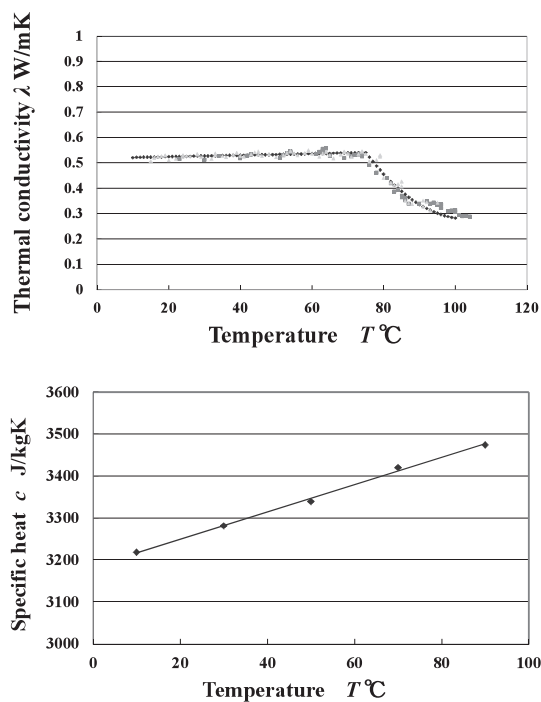


図2 熱物性値

2. 温度分布シミュレータの開発

実験より取得した熱力学特性に基づき、有限要素法にて RFA 用温度分布シミュレータを開発した。この際、術中に医師が直観的にシステムを利用することを可能とするため、医用画像解析用フリーオープンソースソフトウェア 3D Slicer を用い、温度分布シミュレーション用 GUI を構築した。図3に開発した GUI を示す。本システムは、MRI, CT 等から取得した DICOM 形式の医用画像から臓器の外形を抽出し、解析のためのメッシュ作成、発熱量計算、温度分布計算を一貫して行うことが可能である。有限要素解析にあたっては、RFA 中に生じる実際の誘電加熱の原理に即し、電気的作用と熱的作用の連続問題として解析を行った。具体的には、まずラジオ波が肝臓内部に形成する電界分布を算出するため、静電場の原理式であるラプラス方程式を有限要素法により離散化し電界分布の数値解析解を求めた。続いて発熱量分布を算出するため、ジュールの法則に基づき空間的な発熱量分布を求めた。最後に、温度分布を算出するため、Pennes の生体熱輸送方程式を有限要素法により離散化し、繰り返し計算により温度の時間的な変化を求めた。なお温度の算出にあたっては、熱物性値の温度依存性を考慮するため、各要素の温度に応じて逐次熱容量マトリクス、および、熱伝導マトリクスを更新した。

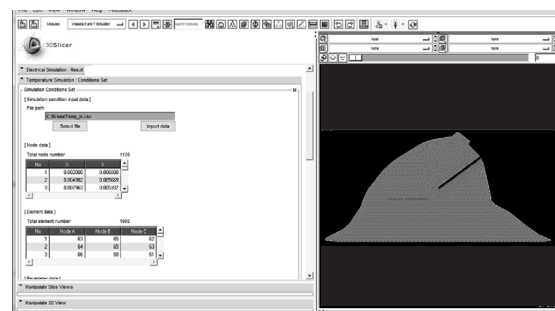


図3 シミュレーション用 GUI

3. 乳房 RFA 中の温度分布評価

医用画像から取得した乳房外形データを元に、GUI を用いて、乳房 RFA 中の温度分布解析を

実施した。解析にあたっては、モデル底面には対極板が存在することを仮定し 0 V を、針先端には 28 V を設定した。また、初期温度は体温を想定し 36℃ とした。

図 4 に、本解析から得られた 40 分後、80 分後の乳房の温度分布を示す。解析の結果、時間経過とともに針先端近傍の温度が上昇している。しかし、針から一定距離以上の領域においては、温度が十分に上昇せず、局所的な発熱がなされている。

図 5 は、針先端からの距離がそれぞれ 0 [mm]、5.7 [mm]、18.5 [mm] の 3 点、点 A、点 B、点 C の温度変化を示す。組織が変性する温度は一般に 60℃ とされているが、針先

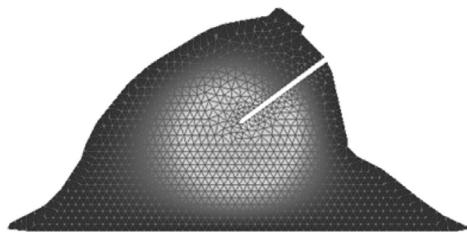
端から最も遠方に位置する点 C においては 60℃ に達していない。これは、生体組織の熱伝導率が極めて低いため、針近傍に生じた発熱が周辺組織に十分に伝わらないためと考えられる。

[今後の研究の方向、課題]

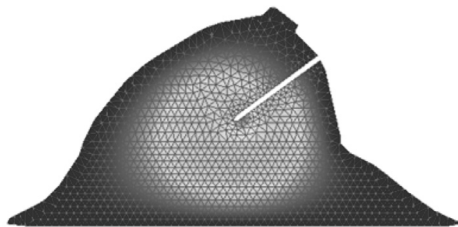
今後は、乳腺、脂肪等の乳房が有する組織の複雑性を反映したシミュレータに改良していくとともに、摘出乳房を用いた in vitro 実験、およびブタ等を用いた in vivo 実験を通じ、シミュレータの精度評価を行っていく。これらのプロセスを経て、「豊富な経験を有する医師」と「定量化が得意な外科支援機器」の能力・知能を調和させ、一体となって手術に取り組むシステムの完成を目指す。

[成果の発表・論文等]

- 1) 渡辺広樹, 山崎望, 小林洋, 大平猛, 橋爪誠, 藤江正克: “血流の存在を考慮した肝臓 RFA 用温度分布シミュレータの開発”, 第 19 回日本コンピュータ外科学会大会 (2010)
- 2) Hiroki Watanabe, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, “Organ Biomechanical Simulators for Model based Control of Robotic RF Ablation System”, 2010 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS2010), 2010
- 3) 渡辺広樹, 山崎望, 小林洋, 大平猛, 橋爪誠, 藤江正克: “臓器物理モデルを規範とした画像誘導下 RFA 支援ロボットシステムの開発”, 第 5 回 Open MRI 研究会 (2010)
- 4) 渡辺広樹, 山崎望, 小林洋, 大平猛, 橋爪誠, 藤江正克: “肝臓 RFA 用温度分布推定シミュレータの開発 ～血流が温度分布に及ぼす影響についての基礎的検討～”, 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2010)
- 5) Hiroki Watanabe, Nozomu Yamazaki, Yo Kobayashi, Tomoyuki Miyashita, Makoto Hashizume, Masakatsu G. Fujie: “Temperature dependence of thermal conductivity of liver based on various experiments and a numerical simulation for RF ablation”, in Proceedings of the 32 nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2010), pp. 3222-3228 (2010)



(a) 40分加熱後



(b) 80分加熱後

図 4 温度分布

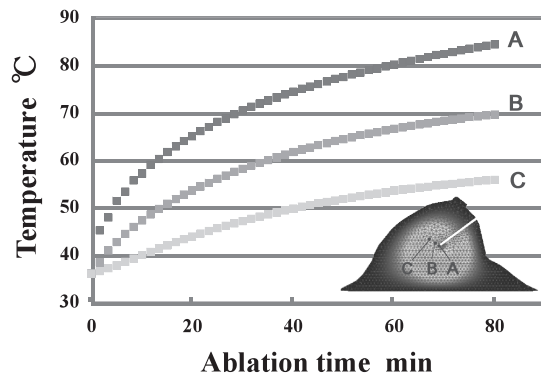


図 5 温度の時系列変化