

3次元非定常熱伝導シミュレーションとサーモグラフィ動画の比較による生体組織の熱拡散率推定

安江亮祐[†] 小枝正直[†] 瀧田彬弘[‡] 澤田篤郎[‡] 曲淵敏博[‡] 小川修[‡]

[†]岡山県立大学 情報工学部 人間情報工学科 [‡]京都大学 医学研究科

1 はじめに

手術において、高周波電気メス（以降、電気メス）は一般的に用いられている。電気メスは高周波電流により発生するジュール熱により切開や凝固を行うため、出血を抑えつつ手術を進めることができるという利点がある [1]。その一方、周辺の組織にも熱損傷を与えてしまうため、損傷範囲を定量化する手法が求められている。この実現には、対象とする臓器の熱拡散率を測定する必要がある。熱拡散率の測定手法として、レーザフラッシュ法があるが、生体組織の熱拡散率測定には不向きである [3]。そこで本研究では、熱伝導シミュレーションとサーモグラフィ動画の比較による熱拡散率の推定手法を提案し、その精度を検証する。また、熱拡散率の温度依存性を考慮したシミュレーションにより推定精度の向上を検証する。

2 シミュレーションによる熱拡散率推定

本研究では、3次元非定常熱伝導方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

をルンゲ・クッタ法を用いて離散化した、

$$T_{t+1} = T_t (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6 \quad (2)$$

を用いてシミュレーションを行う。ただし、 $k_1 = \Delta t \times \partial T / \partial t$, $k_2 = \Delta t \times (\partial T + k_1 / 2) / (\partial t + \Delta t / 2)$, $k_3 = \Delta t \times (\partial T + k_2 / 2) / (\partial t + \Delta t / 2)$, $k_4 = \Delta t \times (\partial T + k_3) / (\partial t + \Delta t)$ とする。ここで T は温度、 t は時刻、 x, y, z は座標、 α は熱拡散率を表す。

Estimation of Thermal Diffusivity of Biological Tissues by Comparison of Three-Dimensional Unsteady Heat Transfer Simulation and Thermographic Video

Ryosuke YASUE[†], Masanao KOEDA[†], Akihiro HAMADA[†], Atsuro SAWADA[†], Toshihiro MAGARIBUCHI[‡] and Osamu OGAWA[‡]

[†]Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Okayama Prefectural University

[‡]Graduate School of Medicine, Kyoto University

本シミュレーションの対象物体は、1辺が10[mm]の立方体で、 x, y, z 軸方向にそれぞれ100分割したものを、各点の初期温度を20[°C]とした。電気メスが凝固モードで点接触した状態を想定し、物体上部中央の半径1[mm]の領域をシミュレーション開始から1[sec]の間、200[°C]に加熱した際の温度分布を $\Delta t = 0.1$ で計算した。本研究のシミュレーションにはPython3を用いた。

3 実験1：熱拡散率推定精度の検証

$\alpha = 0.0001 \sim 0.002$ [cm²/s]を0.0001[cm²/s]間隔でシミュレーションを行い、各値において動画を作成する。この動画と、一辺約10[mm]の立方体形状に切断した牛レバーの上面中央を電気メスにより加熱した際のサーモグラフィ動画 (optris Xi 400) との差分比較を行う。シミュレーション動画とサーモグラフィ動画のある時刻における画像を図1,2に示す。それぞれの動画を0.1[s]ごとに画像（以降、フレーム）として切り出し、同時刻のフレーム画像に対して、代表3点の輝度差の平均を算出し比較した。代表3点は、電気メスにより加熱した物体上部表面のxy平面に対して、中心座標、中心座標からy軸方向に0.5[mm]離れた座標、中心座標からy軸方向に1[mm]離れた座標、とした。

フレームごとの差分平均の時間変化を図3に示す。0.0003 ~ 0.0007[cm²/s]において、サーモグラフィ動画に近い値を示した。また、全体の総和平均では0.0005[cm²/s]で差分が最小となった。

先行研究 [4] では、牛ヒレ肉の熱拡散率は0.0013[cm²/s]と示されているが、本実験では0.0003 ~ 0.0007[cm²/s]においてサーモグラフィ動画に近い値を示した。この原因としては、比較対象となるサーモグラフィ動画の粗く正確ではないこと、差分比較の方法が総和平均であるため正負の誤差が相殺されることが考えられる。

4 実験2：熱拡散率の温度依存性の導入

熱拡散率は温度の上昇に伴い低下することが先行研究 [5] により示されている。これを本シミュレーションに導入し、推定精度の向上を目指す。本研究では、先行研究のグラフ [5] を参考に、熱拡散率を指数関数的に変

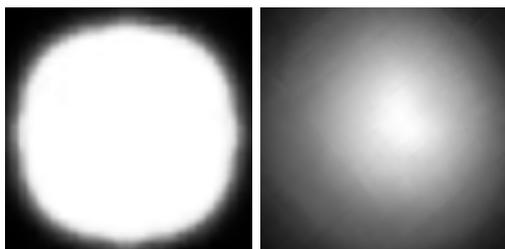


図1: シミュレーションの画像 図2: サーモグラフィの画像

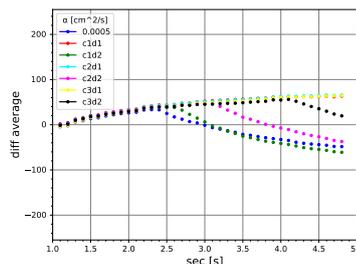


図5: 温度依存性を考慮した熱拡散率での差分比較

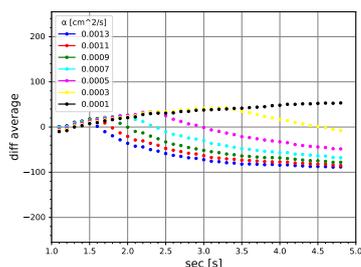


図3: 熱拡散率を固定値とした場合の差分比較

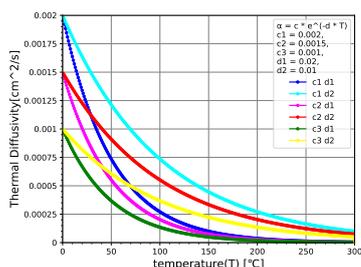


図4: 温度依存性を考慮した熱拡散率の変動

化させた。熱拡散率は、図4の通り、切片 c と傾き d の値を変化させた6パターンを用意し、熱拡散率を一定とした場合と比較した。

フレームごとの差分平均の時間変化を図5に示す。c1d2, c2d2 において、サーモグラフィ動画に近い値を示した。また、全体の総和平均で比較すると、一定値 (0.0005[cm²/s]) より、c1d2の方が差分は減少した。

実験1において、全体の総和平均での差分が最も低く示された、一定値 (0.0005[cm²/s]) と比較して、c1d2の組み合わせ時の方が差分が低くなり、熱拡散率の推定精度が向上した。このことから、サーモグラフィ動画に使用した牛レバーにおいても、熱拡散率は温度により値が変動しており、熱拡散率の温度依存性を考慮することにより推定精度は向上することが示された。また、熱拡散率と温度との関係については、先行研究 [5] の通り指数関数的に変化すると考えられる。

5 おわりに

電気メスによる熱損傷範囲を定量化する手法として、本研究では熱伝導シミュレーションとサーモグラフィ動画の比較による熱拡散率の推定手法を提案し、その精度を検証した。

実験1について、先行研究 [4] では、牛ヒレ肉の熱拡散率は0.0013[cm²/s]と示されているが、本実験では0.0003 ~ 0.0007[cm²/s]においてサーモグラフィ動画に近い値を示した。この原因として、今回使用したサーモグラフィ動画との比較方法とサーモグラフィ動画の粗さの2つが挙げられる。サーモグラフィ動画との比較方法について、本研究の差分比較は、代表3点を抽出し、その輝度差の平均値を差分値とした。しかし代表3点の輝度差の正負が大きくなる場合において、平均をとると差分が相殺されるため、全体の総和平均としては差分値が低く示される。また今回使用したサーモグラフィ動画は解像度が低く、フレームレートが10fpsと低いため、比較が正確ではなかったと考えられる。

実験2について、熱拡散率の温度依存性を指数関数的に表現すると推定精度は若干向上することが示された。したがって本研究で対象とした牛レバーも、先行研究 [5] と同様に熱拡散率が温度により変動し、牛と構造の近い人体の内臓においても熱拡散率が温度により変動すると考えられる。

今後は、サーモグラフィ動画の撮影方法を検討し、比較方法の差分が相殺される問題について改良することで、より正確な検証を行う予定である。

参考文献

- [1] 日本医療機器産業連合会, “私たちの暮らしと医療機器”, https://www.jfmda.gr.jp/devicekikaku/topix/06/page_02.html (閲覧日: 2021/12/31)
- [2] 木村, “腹腔鏡下胆嚢摘出術の合併症とその対策”, 日本消化器外科学会雑誌, 27(8), pp.2054-2058, 1994.
- [3] 産業技術総合研究所, “レーザーフラッシュ法”, https://staff.aist.go.jp/m-akoshima/LaserFlash_J.html (閲覧日: 2021/12/31)
- [4] 貝田ら, “牛肉の熱板焼き調理における最適加熱条件”, 日本家政学会誌, 50(2), pp.147-154, 1999.
- [5] 安江ら, “各種鑄鉄の熱拡散率”, 日本金属学会誌, 42(3), pp.225-231, 1978.