

Ice Slush 法による腎冷却時の深部温度予測を目的とした 熱伝導シミュレーションによる腎実質の熱拡散率推定

安江 亮祐[†] 小枝 正直[‡] 曲渕 敏博^{*} 澤田 篤郎^{*} 濱田 彬弘^{*} 小林 恭^{*}

[†] 岡山県立大学大学院 情報系工学研究科 [‡] 岡山県立大学 情報工学部 ^{*} 京都大学 医学研究科

1 はじめに

現在、腎がんの手術手法としては腎部分切除術が一般的である。腎部分切除術は、がん部分のみを切除するため、腎機能を維持することができる。一方で、切除時に腎臓の血流を遮断し、出血をコントロールする必要があるため、阻血時間の長さにより腎機能を低下させる可能性がある。腎血流遮断時の腎機能低下を防ぐ方法として、Ice Slush（細かく砕いた氷）を腎周囲に充填し、腎臓を冷却する方法（以降、冷阻血）がある。

冷阻血において、腎機能温存に有利とされる腎臓の温度は 15[°C] とされており、Ice Slush 充填後、10 分程度で深部温度が 20[°C] まで低下することが確認されている [2]。しかし、深部温度の測定には、針型熱電対の穿刺という侵襲的手段しか存在しない。

そこで本研究では、針型熱電対の温度データと 3 次元非定常熱伝導シミュレーションから熱拡散率を推定し深部温度を予測する、非侵襲的な深部温度の測定手法を提案する。

2 熱伝導方程式の陰解法

本研究では、3 次元非定常熱伝導方程式

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

Estimation of thermal diffusivity of renal parenchyma by heat conduction simulation for prediction of deep temperature of renal during ice slush cooling

Ryosuke YASUE[†], Masanao KOEDA[‡], Toshihiro MARGARIBUCHI^{*}, Atsuro SAWADA^{*}, Akihiro HAMADA^{*} and Takashi KOBAYASHI^{*}

[†]Graduate School of Computer Science and Systems Engineering, Okayama Prefectural University, Okayama, JAPAN. [‡]Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Okayama Prefectural University, Okayama, JAPAN. ^{*} Graduate School of Medicine, Kyoto University, Kyoto, JAPAN.

に対し、陰解法のガウス = ゼイデル法により離散化した

$$T_{x,y,z}^{n+1} = \frac{T_{x,y,z}^n + C_x + C_y + C_z}{1 + 2\alpha\Delta t(1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 + 1/\Delta z^2)} \quad (2)$$

を用いてシミュレーションを作成する。ここで、

$$\begin{aligned} C_x &= \frac{\Delta t \times \alpha}{\Delta x^2} (T_{x-1,y,z}^{n+1} + T_{x+1,y,z}^{n+1}) \\ C_y &= \frac{\Delta t \times \alpha}{\Delta y^2} (T_{x,y-1,z}^{n+1} + T_{x,y+1,z}^{n+1}) \\ C_z &= \frac{\Delta t \times \alpha}{\Delta z^2} (T_{x,y,z-1}^{n+1} + T_{x,y,z+1}^{n+1}) \end{aligned}$$

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。

3 腎実質の冷却実験

熱伝導シミュレーションを用いて深部温度を推定するためには、元データとして冷阻血状態における正確な温度データが必要となる。本研究では冷阻血状態における温度データを測定するため、生体ブタ腎の腎実質切片を冷却する簡易的な実験装置を作成した（図1）。本装置は 3D プリンタ (Snapmaker2.0 F250) で作成しており、腎切片の指定位置に針型熱電対を垂直に穿刺して固定することができる。穿刺位置は、ブタ腎切片の冷却面中心を原点として、1ch を $(x, y, z) = (0, 0, 3)$ 、2ch を $(0, 0, 6)$ 、3ch を $(0, 0, 9)$ 、4ch を $(0, -3, 6)$ とし、計 4 本の針型熱電対で計測を行った（図3）。また、外部からの温度変化を抑えるため、腎切片の周囲を発泡スチロールで覆い、実験装置との間を埋めた。腎上面に氷を設置して冷阻血状態を模擬し、下部は空気と接触した状態となっている。

冷却するブタ腎切片は、腎実質に腎被膜が付いているものを選択し、検体から 2 ケ所抽出することで 2 回分の温度データを計測した。ブタ腎切片は 1 辺が約 10[mm] の立方体形状に摘出・切断し、温度が安定した状態で計測を開始した。温度計測開始から 4[sec] 後に、図2のように実験装置上部に氷を設置して冷却を開始し、計測終了後までその状態を維持した。本実験では、針型熱電対は 88598 AZ EB を用いた。温度データは 1[sec] 毎に各チャンネルの値が出力される。

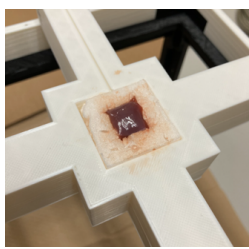


図1: 実験装置



図2: 実験風景

計測結果について、10 分間の温度計測データの 1 例を図4に示す。10 分後には 4 つのチャンネル全ての温度が 10°C 付近まで低下している。

4 シミュレーションと測定データの比較

測定した温度データとシミュレーションによる温度予測データを比較することで、図4のブタ腎冷却における温度データに対して熱拡散率の推定値を算出した。本シミュレーションの対象物体は、生体ブタ腎切片と同様に、1 辺が $10[\text{mm}]$ の立方体形状とし、 Δx , Δy , Δz それぞれ 0.1 とした。

各点の初期温度は、元データにおける針型熱電対で計測開始時の初期温度とした。氷を用いて臓器を冷却している状態を想定し、物体上部表面を、シミュレーション開始時から終了までの間、 0°C に冷却し続けた際の温度分布を $\Delta t = 0.1[\text{sec}]$ で計算した。シミュレーション時間は $600[\text{sec}]$ とした。熱拡散率は著者らの先行研究により得られた推定値を元に、 $0.0005 \sim 0.003[\text{cm}^2/\text{s}]$ の範囲で $0.0001[\text{cm}^2/\text{s}]$ 刻みで変更させ、温度データを作成した [3]。本研究の推定値は元データとの温度の差分が最も小さい熱拡散率のことを指すものとする。また、シミュレーションには Python3 を用いた。それぞれの熱拡散率に対して、理論値となる針型熱電対での温度データとシミュレーションによる温度データとの $0.1[\text{sec}]$ 毎の差分を比較した結果を図5に示す。差分値は、1ch ~ 3ch における温度データ差分値を平均したものを熱拡散率ごとの差分値として算出した。また、計測した温度データは $1[\text{sec}]$ 毎のデータであり、小数点以下 1 桁まで測定する仕様であったため、計測したデータを 7 次関数の多項式で近似し、 $0.1[\text{sec}]$ 毎のデータとしている。 $0.0006 \sim 0.007[\text{cm}^2/\text{s}]$ の範囲において差分値が小さく示され、元データとの温度と近い値になった。また、実測値の元データとシミュレーションの温度データを比較して、シミュレーションの温度データの方が急激に温度が低下していた。

5 おわりに

Ice Slush により生体ブタ腎切片を冷却した際の温度変化と、3 次元非定常熱伝導シミュレーションにより計

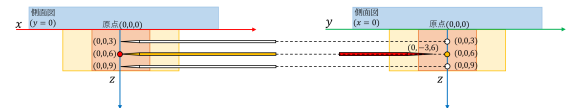


図3: ブタ腎切片と針型熱電対の位置関係

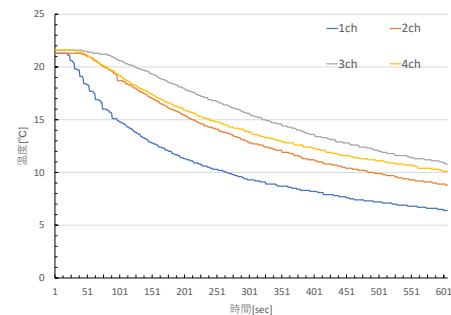


図4: 冷却実験の温度計測結果

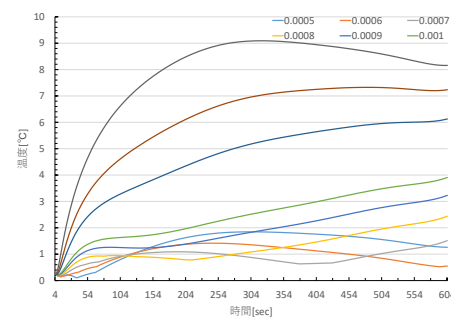


図5: 各熱拡散率における元データとの差分比較

算した温度変化の比較から熱拡散率を推定した。実測値とシミュレーション値の差が生じる原因としては、氷と腎切片との接触面が 0°C まで下がりきっていなかったこと、発泡スチロールによる断熱が不完全であったこと等が考えられる。今後、以上の問題を改善し、実験回数を増やして検証する予定である。

謝辞

本研究は MEXT 科研費 21K03967 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Yoo S, et al., "Comparison of renal functional outcomes in exactly matched pairs between robot-assisted partial nephrectomy using warm ischemia and open partial nephrectomy using cold ischemia using diethylene triamine penta-acetic acid renal scintigraphy", Int Urol Nephrol, 48(5), pp.687–693, 2016.
- [2] Ward J, et al., "Determination of the Optimum temperature for regional renal hypothermia during temporary renal ischaemia.", Br J Urol, 47(5), pp.17–24, 1975.
- [3] 安江ら, "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", IPSJ84, 1ZM-2, pp.4-971–972, 2022.