

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03984

研究課題名(和文) 生体内熱輸送特性を可視化する新たな画像診断技術の開発

研究課題名(英文) Development of a new imaging technique to visualize in vivo heat transport characteristics

研究代表者

福永 鷹信 (FUKUNAGA, Takanobu)

九州大学・工学研究院・技術職員

研究者番号：60591196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、生体組織内部の熱的情報を非接触で可視化するレーザースキャニングサーモグラフィと名付けた新たな画像診断技術の実現のため、シミュレーションにより原理を確立し適用条件を明らかにすること、さらに、生体模擬試料を用いて実験を行い、考案した測定方法の実証を行うことを目的とした。解析の結果から、シートレーザー通過後の試料表面温度は包埋させた試料の熱輸送性質に依存して異なり、生体試料と同程度の熱拡散率を持つアクリル試料において最も明瞭な可視画像を得ることができた。実証実験では、解析で求められた温度上昇と概ね一致する値を示す可視化画像を得ることができ、非接触可視化法の確立ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

造影剤を用いることなく、レーザー光により非侵襲的に物質内部の可視化を行えることは、汎用性が高く非常に有意義な技術である。本研究は、従来のエネルギー照射源とレシーバーで対象物を挟み込んで撮像を行う謂わば透視系による測定とは異なり、シートレーザー光とサーモグラフィを試料からみて同一方向に設置できる特徴を有している。実証実験の結果、非接触で生体模擬試料内に包埋させた熱輸送性質の異なる物質をマッピング出来ることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish the principle and clarify the application conditions of a new diagnostic imaging technology called laser-scanning thermography, which visualizes thermal information inside biological tissue in a non-contact manner, by simulation. The objective of this study was to establish the principle and clarify the conditions of application through simulation. The results of the analysis showed that the surface temperature of the sample after passing through the sheet laser varied depending on the heat transport properties of the sample in which it was embedded, and that the acrylic sample with the same thermal diffusivity as the biological sample produced the clearest visible image. In the demonstration experiment, we were able to obtain a visualized image with a value that roughly corresponded to the temperature rise determined by the analysis, and thus established a non-contact visualization method.

研究分野：熱工学

キーワード：非接触可視化法 熱輸送性質 レーザースキャニングサーモグラフィ

1. 研究開始当初の背景

通常、血流、特に皮膚血流の測定にはレーザードップラー血流量計やレーザースペックル血流量計が用いられる。これらの測定は皮膚に近赤外レーザー光（波長 780nm）を照射し、主として赤血球による反射や散乱光のドップラー信号やスペックルパターンの変化から血流量を求める。しかし、いずれの方法も測定表面から発する反射波や散乱波の情報から血流を推定しており、測定深度はせいぜい皮膚表面から 0.5 mm 程度にすぎない。そこで、水の吸収係数が大きい赤外線レーザー（波長 1119 ~ 1342nm 程度）を用いて表面の温度を上昇させ、生体内熱輸送の速さに依存して変化する温度の減衰の程度を捉えれば、より生体深部の情報を得ることが可能となる。これまで、レーザー光のエネルギーを組織表面に与え、それに対する皮下組織の応答を利用し、体内の熱輸送に関する情報を直接可視化した画像診断技術は存在せず、また、対象としても捉えられてはいなかった。

そこで本研究はレーザースキャニングサーモグラフィと名付けた熱輸送性質に起因した組織内部の情報を可視化する新たな手法の開発を行った。(図1)。レーザースキャニングサーモグラフィでは、レーザーシート光を生体表面に照射するとともに、生体表面温度の変化を赤外線カメラで同時に計測する。照射されたレーザー光は、生体表面または内部で吸収され温度上昇し、レーザー照射部位近傍の温度が最も高くなる。レーザー光の照射位置が移動するに従い、照射部位の高温度部もレーザーに追従する形で移動する。

その温度上昇と低下の程度は生体内熱輸送の速さに依存するため、内部に熱輸送性質の小さい部位(例えば脂肪など)があると温度上昇は大きくなり、逆に血流が多いなど熱輸送特性に優れた部位の近傍では温度上昇そのものが小さくなり、温度の低下も速くなる。測定対象の表面温度を赤外線温度カメラで計測・記録し、レーザー照射通過前後、あるいは照射時と一定時間経過後の温度差をマッピングすると、一様な物質では可視化画像が一様になるのに対し、内部に熱輸送性質の異なる部位があると、その部分のみが温度差の違いとして現れてくると考えられる(図2)。

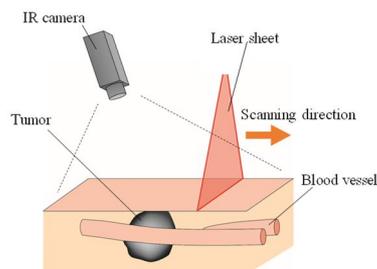


図1 レーザースキャニングサーモグラフィ (概念図)

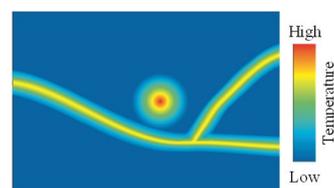


図2 温度差分のマッピングにより得られる可視化画像 (概念図)

2. 研究の目的

本研究は、レーザースキャニングサーモグラフィ技術を開発することとし、その方法が原理的に可能であることをシミュレーションで確かめること、生体模擬試料を対象に実験を行い、その実現可能性を明らかにすることを研究期間内の目標とした。

3. 研究の方法

(1) シミュレーションによるマッピング法の確立と可視化像に及ぼす各種パラメータの検討
本測定法の解析モデルを図3に示す。生体試料の表面を、垂直上方から幅 0.3 mm、波長のシート状のレーザーを照射し、局所的に加熱する。半無限固体の表面に照射されたレーザー光は試料内部で吸収され(吸収係数), 内部発熱により試料表面近傍の温度は上昇する。発熱量の大部分は熱伝導により試料内部へ伝わり、一部は表面から周囲へ放散される。十分に広い有限領域の表面から深さ $d = 1\text{mm}$ 、もしくは $d = 2\text{mm}$ の位置に黒体塗料を塗布した $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ のアルミニウム合金角棒もしくはアクリル角棒を包埋させたモデルを対象として、解析を行った。表1に本解析に用いたアルミニウム合金、アクリルおよび水の物性値を、表2に解析を行った条件のパターンを示す。本解析ではレーザーの加熱開始時の位置を原点 ($x = 0$) とし、そこから長手方向(座標 x) 15mm の位置に角棒を包埋させた。またレーザーは原点から速度 1mm/s で試料表面に沿って走査した。

解析結果を元にマッピング法の開発を行った。レーザーの通過時刻を基準として二つのサンプリング時刻を定め、この時の温度差をマッピングして、熱物性の異なる部位の存在が可視化できるかどうかを検討した。そして、可視化に最も適したタイムポイントやデータ処理の方法を決定した。

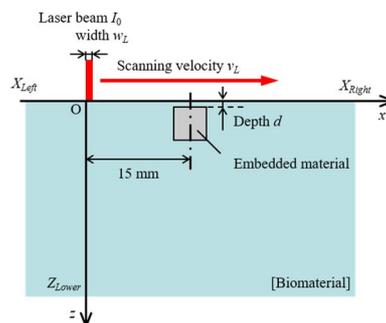


図3 解析モデル

表 1 The properties of materials

物質	熱伝導率 k [W/m·K]	比熱 c [kJ/kg·K]	密度 ρ [kg/m ³]	熱拡散率 α [mm ² /s]	吸収係数 β [1/mm]	浸透深さ $1/\beta$ [mm]
水	0.6	4.2	1000	0.14	-	-
アルミ合金	167.3	0.96	2700	64.5	100	0.01
アクリル	0.21	1.47	1190	0.12	100	0.01

表 2 Series of simulation conditions.

種類	角棒	包埋深さ [mm]	波長 [μ m]	水の吸収係数 [1/mm]	浸透深さ [mm]	角棒表面に到達する レーザー光の割合 [%]
(A)	アルミ合金	1	1.319	0.167	5.99	84.6
(B)	アルミ合金	2	1.319	0.167	5.99	71.6
(C)	アクリル	1	1.319	0.167	5.99	84.6
(D)	アクリル	2	1.319	0.167	5.99	71.6
(E)	アルミ合金	1	2.08	3.1	0.32	0.45
(F)	アルミ合金	1	10.6	86.6	0.01	≈ 0

(2) 生体模擬試料を用いた実証実験

生体模擬試料には水を主成分とする 1.5 wt%アガロースゲルを用い、その中に 5 mm × 5 mm の角棒を深さ 1 mm または 2 mm の位置に包埋させた長さ 100 mm、幅 20 mm、高さ 30 mm の試料 (図 4) を準備した。表 3 に包埋した角棒の素材と試料表面からの包埋深さを表す。

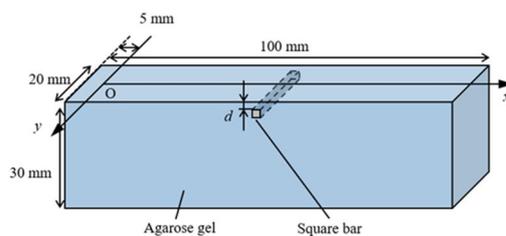


図 4 生体模擬試料

表 3 実験条件

種類	材料	深さ d [mm]	黒体塗料の 有無
(a)	Aluminum alloy	1	○
(b)	Aluminum alloy	2	○
(c)	Acryl	1	○
(d)	Aluminum alloy	1	×

実験装置の概略を図 5 に示す。試料と、その表面を鉛直方向に対し 26 度で観察するように固定された赤外線カメラ (FLIR 社, CPA-T650SC) を同じステージ上に設置し、試料とカメラの相対位置が変わらないようにした。一方、光源から鉛直に射出されたレーザービームをパウエルレンズによりシート状に変換して試料表面に照射した。そして、試料を設置したステージを X 軸アクチュエータ (SUS 株式会社, XA-50L-200E) により一定速度で移動し、試料表面がシート状レーザーでスキャン加熱される構造とした。加熱には波長 1.319 μ m の半導体レーザーを用い、総レーザー出力 1.6 W で実験を行った。測定の結果、照射面積は 0.3 mm × 20mm 程度であった。

また総レーザー出力 1.6 W のうち，照射面積に含まれるレーザー出力は 423.32 mW であったため，強度分布が一様であるとした場合の表面の照射エネルギー密度は 70.5 mW/mm^2 であった．本研究では，試料左端から長手方向（座標 x ）5 mm の位置を原点（ $x = 0$ ）として，そこから速度 1 mm/s でレーザーをスキャンした．赤外線カメラの測定波長は $7.5 \sim 14 \text{ }\mu\text{m}$ であり，毎秒 30 フレームの間隔で温度を記録した．温度測定の分解能は 0.02 K であり，温度測定の空間分解能は試料との距離を 250 mm とした本測定の場合，約 0.17 mm である．

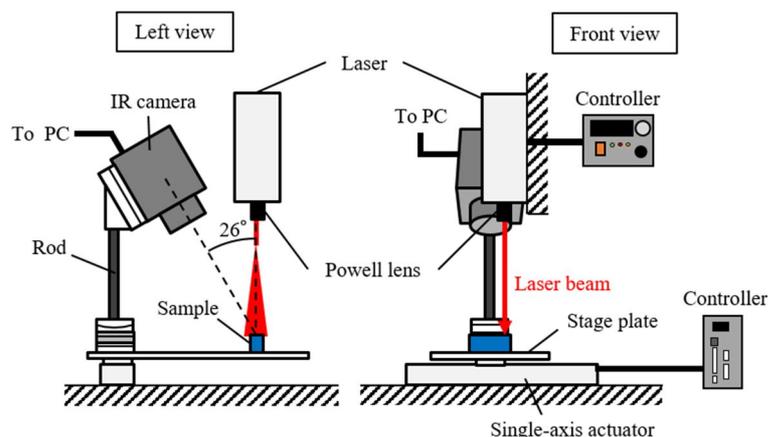


図 5 実験装置の概略

4. 研究成果

解析結果から，波長 $1.319 \text{ }\mu\text{m}$ のシート状レーザーを用いた場合，レーザー光のほとんどが試料内部に存在する包埋試料の表面部分で吸収されるため，レーザー通過後の試料表面温度は包埋試料の熱輸送性質に依存して異なり，生体ファントムと同程度の熱拡散率を持つ場合に最も明瞭な可視画像が得られることが明らかとなった（図 6）．

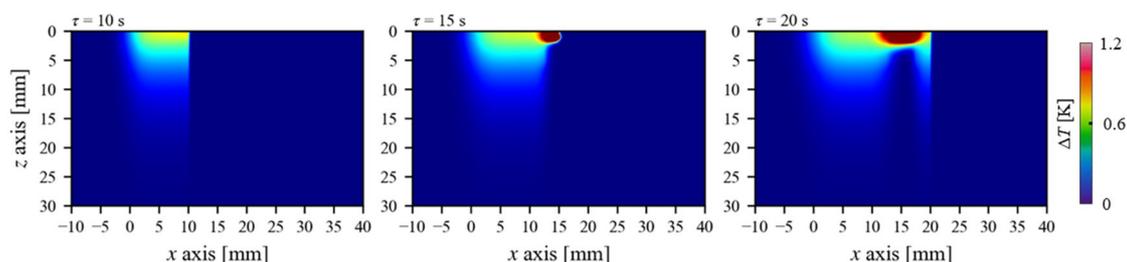


図 6 アクリル試料の解析結果

実証実験において，生体試料の中に包埋させたアクリル角棒は，レーザー光の大部分を表面で吸収し温度上昇したことで，レーザー通過後の試料表面温度の時間変化に伴い，明瞭な可視画像を得ることができた（図 7）．さらに，同条件で行った解析結果とも得られた表面温度分布が一致していた（図 8）．一方， 1 mm 角に成型した豚脂を表面深さ 1 mm として準備した試料においては，生体模擬試料の近赤外波長域における吸収係数の低さが影響し，深さ方向に加熱が十分に行われず，レーザーの散乱の影響が無視出来ない程に小さな応答しか得られず，可視画像の取得には至らなかった．生体由来のみの試料の可視画像を得るには生体の吸収係数を考慮し，遠赤外波長域に最適化したレーザーを使用しなければならないことが明らかとなった．

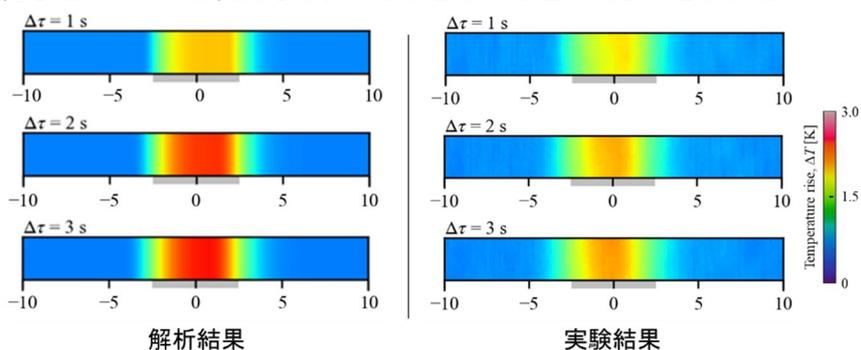


図 7 可視化画像による比較

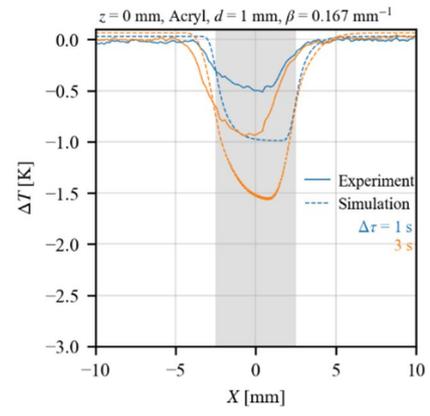
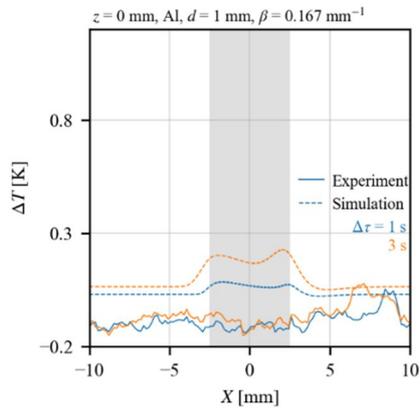


図 8 解析結果と実験結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 柳瀬充玖, 佐藤太一, 福永鷹信, 王海東, 藏田耕作, 高松洋
2. 発表標題 熱輸送性質の違いを用いた生体内部構造の非接触可視化法
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------