

称号及び氏名	博士（工学） 加賀田 翔
学位授与の日付	平成 28 年 9 月 25 日
論文名	「光音響法を利用した人体皮膚と固体材料の熱的性質の計測技術の開発」
論文審査委員	主査 吉田 篤正 副査 須賀 一彦 副査 横山 良平

論文要旨

近年、資源エネルギーの枯渇問題や温室効果ガスによる地球温暖化問題の観点からエネルギーの有効利用がますます重要性を増している。エネルギーの変換効率の改善や機器の効率向上が求められており、そのためには伝熱現象の正確な把握が必要である。またパソコンやスマートフォンなどに代表される電子機器は高性能化と同時に小型化が進み、電子素子からの発熱量は増える一方で部品は高集積化され、過度な発熱や温度上昇が発生しやすくなっている。設計時に発熱量や温度分布を見誤れば、機器の故障や破壊につながる。一方想定が過剰であれば材料の浪費、機器の大型化、効率の悪化を招き製品コストや運用コストの上昇につながる。そのために機器内の正確な温度分布の予測が大きな課題となっており、ここでも伝熱現象を正確に把握する事が必要である。

伝熱現象の把握が必要とされるのは工業製品だけではない。例えば人間も体温を保つ為に常に発熱しており体内では熱移動が起こっている。常に周囲の環境と常に熱の授受が行われ、発汗などによって周囲への放熱量を調節している。最近では人体と外部環境との熱の授受を解明し温熱環境下における人体の快適性を定量的に評価する試みが行われている。また医療の分野においても熱を利用した医療技術が多く開発されている。例えば凍結手術や、癌治療に用いられるハイパーサーミアは、生体組織を低温や高温にする医療技術である。これらの治療の精度を上げるには凍結過程や加熱過程での生体内の熱の移動を正確に把握する事が課題となっている。

あらゆる場面で伝熱現象の正確な把握が求められているが、正確な伝熱計算には正確な熱物性値が必要である。従来から一般的な金属やセラミック、プラスチックなどの材料は豊富に熱物性値のデータベースが存在し、比較的容易に値を知ることができる。し

かし、近年利用が進む高機能材料は、材料の組成自体が用途に応じて設計される事が多く、各組成によって物性値は異なり従来のように代表的な値を求めることが難しい。また生体はそもそも個体差や部位差が大きく、かつ発汗や血流などの状態によっても物性が変化し代表的な値を決める事が難しい。伝熱現象を扱う対象の広がりとともに、熱物性値の計測対象も多様化している。それらに対応するため、実際に使用されるそのままの状態、そのままの条件下で簡便に熱物性値を計測できる技術が求められている。

光音響法は非接触であるがままの状態での熱物性の測定が可能である技術である。測定に要する時間も数分程度と短く簡便に測定を行うことができる。また測定対象の厚みは数 10 μ ～数 mm 程度の薄膜試料の測定に適する。これらの特徴は特に生きたままの状態での測定が求められる人体皮膚の熱物性値の測定への応用が期待できる。そこで本研究では光音響法の特徴を生かし、他の計測方法では測定が難しい人体皮膚の熱浸透率、熱拡散率の生体内 (in vivo) 測定について実験的検討を行った。また皮膚に限らず固体の熱物性値計測手法として有用な、熱拡散率、熱浸透率の同時測定の可能性について理論的検討を行った。また測定の際に課題となる固体同士が接触する際に生じる接触熱抵抗が測定結果に与える影響についての理論的、実験的評価を行い、その現象の工業的な利用の可能性についても検討を行った。本論文ではこれらの検討を通して光音響法の実用的な応用可能性について検討を行った。

第 1 章では、研究の背景、目的をまとめ、本論文の主題である熱物性値の計測技術について概観し、本論文の構成と概要を記した。

第 2 章では、光音響法を用いた人体皮膚の熱物性値の生体内(in vivo)測定について検討を行った。皮膚の表面に金属の薄膜を設置して皮膚を間接的に加熱し、光音響法の不透明二層材料の測定理論を用いることで皮膚の熱浸透率を測定する方法を提案した。この方法は皮膚に直接、光を照射しないので、皮膚の複雑な光学的特性を考慮せず測定を行える。新たに開発した開放型の光音響セルを用いることで試料を加工する必要がなく、人体皮膚の生体内(in vivo)測定が可能となった。得られた皮膚の熱浸透率の値は従来他の測定方法によって得られた測定値と同等の値であった。また複数の被験者、部位についての測定結果より熱浸透率の部位差や個人差を見出すことができた。また接触実験によっても本研究で得られた値の妥当性を確認する事が出来た。

第 3 章では、人体皮膚の熱拡散率の測定方法について検討を行った。皮膚の熱浸透率は 2 章の方法で測定することができたが、一般に熱物性値としては熱伝導率や熱拡散率も必要とされる。本章では、あらかじめ 2 章の手法で熱浸透率を測定しておき、その次に皮膚の上に半透明の膜を設置しそこへレーザーを照射して測定する 2 段階での測定方法を提案した。得られた信号をあらかじめ測定しておいた熱浸透率を既知として解析することで皮膚の熱拡散率を求める。照射光の一部は薄膜で吸収され、一部は透過して皮膚で吸収される。この場合、照射光の一部は皮膚に到達するため皮膚の光学的特性の取扱いが課題となるが、皮膚の吸収性が高い近赤外域の波長のレーザーを光源に用いて測定を試みた。天然ゴムや

皮膚を模擬した試料を対象とした測定を行い、本方法により妥当な測定結果が得られることが確認された。皮膚の熱拡散率についても他の測定法と同程度の値を得ることができ、本測定法の有効性が示された。ただし皮膚の測定については測定値のばらつきが大きかった。これは皮膚の複雑な構造による光学的性質の影響と考えられる。皮膚の光学的な取扱いが課題である。

第4章では、固体試料の熱浸透率と熱拡散率の同時測定の可能性について理論的検討を行った。3章では2段階での測定方法を提案し、この方法で妥当な値が得られることが分かったが、二度測定を行う必要があり、このままでは簡便な測定とは言えず改善の必要がある。人体の皮膚の測定では測定に要する時間が短い事が求められる。測定方法や機器の改良で計測時間を短縮できる余地はあるが、熱浸透率、熱拡散率を一度の測定で同時に得ることができれば簡便さが増す。また工業的な用途においても短時間で必要な物性を得られる事は有用である。本章では、固体試料の熱浸透率と熱拡散率の同時測定の可能性について理論的検討を行った。2章、3章で扱った2層の測定モデルにおいて、各層の物性が光音響信号に与える影響を理論計算に基づいて検討し、熱浸透率と熱拡散率を同時に同定できる条件を検討した。その結果、1層目と2層目共に半透明の場合のみ、2定数同時測定の可能性があることが分かった。また1層目と2層目の吸収係数の違いが一方の $10^3 \sim 10^{-3}$ 倍以内、熱浸透率の違いが $10^2 \sim 10^{-2}$ 倍以内、熱拡散率の違いが $10^4 \sim 10^{-4}$ 倍以内の時、位相遅れの曲線が2層目の熱拡散率・熱浸透率の変化に対して独立に変化することが分かり、同時測定の可能性を見出すことができた。

第5章では光音響法による固体接触面の接触熱抵抗の評価方法を提案し、実験的、理論的な検討を行なった。本研究で扱う皮膚やポリ塩化ビニル樹脂 (PVC) のような弾性のある材料に対する測定の場合には、1層目と2層目は完全に密着していると考えても差し支えない。しかし一般に固体材料は接触面の凸凹により接触面は完全に密着せず、接触熱抵抗が生じる。接触熱抵抗とは接触面の凸凹による実質的な接触面積の減少や、隙間に熱伝導率の低い空気が介在することにより接触面で熱の流れが阻害される現象である。これまでの研究で接触熱抵抗の特性は明らかになっているが、実際の使用状態で接触熱抵抗を測定する方法は十分でないのが現状である。本章では光音響法を用いて、二つの金属を接触させた試料に対して、接触圧力、接触面の表面粗さ、接触面への接触材挿入の有無をパラメータとした測定を行ない、接触熱抵抗の評価を試みた。また従来から用いられる定常法でも同様の条件で測定を行い、光音響法による測定結果との比較、評価を行なった。

その結果、特に光音響信号の位相遅れのピーク値を比較することによって接触熱抵抗の変化を捉えることが可能であることが分かった。接触面の粗さ、接触圧力、接触面への接触材挿入の有無による接触熱抵抗の変化を光音響法で捉える事もでき、それらの傾向は定常法による比較実験の結果と一致した。境界条件に接触熱抵抗を考慮した光音響法測定理論を用いて、測定結果から接触熱抵抗を算出した結果、定常法で測定された値と同じオーダー

一の接触熱抵抗値が得られた。今後、測定値の精度の向上には 3 次元的な熱の流れを考慮した解析が必要である。

第 6 章では、本論文で得られた結果を総括した。

以上、本研究では非破壊であるがままの状態で計測を行う事ができるという光音響法の特徴を生かした熱物性値の測定方法を提案し、人体皮膚の熱物性値の生体内(in vivo)測定、固体接触面の接触熱抵抗の評価が可能となった。

審査結果の要旨

本研究では非破壊であるがままの状態で計測が行える光音響法の特徴を生かし、他の計測技術では難しかった人体皮膚の熱物性値の **in vivo** 測定方法、固体の接触熱抵抗の評価方法を提案し、実験的、理論的検討を行った。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 皮膚の表面に金属の薄膜を設置して皮膚を間接的に加熱し、光音響法の不透明二層材料の測定理論を用いることで皮膚の熱浸透率を測定する方法を提案した。新たに開発した開放型の光音響セルを用いることで試料を加工する必要がなく、人体皮膚の生体内測定が可能となった。直接皮膚に光を照射しないので皮膚の複雑な光学的な性質を考慮せず測定を行うことができた。複数の被験者、部位についての測定結果より熱浸透率の部位差や個人差を見出すことができた。
- (2) 半透明のシートを皮膚表面に設置して測定を行い、予め得られた熱浸透率の値を用いて解析することで皮膚の熱拡散率を求める方法を提案した。皮膚での吸収性が高い光源を用いて測定を行った。皮膚の熱拡散率については他の測定法と同程度の値を得ることができ、本測定法の有効性が示された。
- (3) 固体試料の熱浸透率と熱拡散率の同時測定の可能性について理論的検討を行った。**2** 層の測定モデルにおいて、各層の物性と光音響信号との関係を把握し、熱浸透率と熱拡散率を同時に同定する事ができる条件を検討した。**1** 層目と **2** 層目共に半透明の場合のみ、**2** 定数同時測定の可能性があることが分かった。
- (4) 光音響法により接触熱抵抗の存在する **2** 層材料について位相遅れを測定し接触熱抵抗の評価方法を提案し、実験的、理論的な検討を行なった。その結果特に位相遅れのピーク値を比較することによって接触熱抵抗の変化を捉えることが可能であることが分かった。接触面の粗さ、接触圧力、接触面への接触材挿入の有無による接触熱抵抗の変化を光音響法で捉える事ができ、それらの傾向は定常法による比較実験の結果と一致した。

以上の諸成果は、非破壊であるがままの状態で計測を行う事ができるという光音響法の特徴を生かした、固体材料の熱物性値の新たな可能性を示すものである。人体皮膚の熱物性値の **in vivo** 測定、固体接触面の接触熱抵抗の評価が可能となり、熱物性値の計測技術の今後の発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うにあたり、十分な能力と学識を有することを証するものである。