

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13790 号
------	---------------

氏 名 石崎 拓也

### 論 文 題 目

ロックイン赤外式周期加熱法に基づく3次元熱拡散率分布・局所  
界面熱抵抗計測法に関する研究  
(Study on measurement method of three-dimensional thermal  
diffusivity distribution and local thermal contact resistance based  
on lock-in infrared periodic heating method)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	工学研究科	教授	長野 方星
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	福澤 健二
委員	名古屋大学	工学研究科	准教授	義家 亮
委員	産業技術総合研究所 計量標準総合センター	研究グループ長	八木 貴志	

## 論文審査の結果の要旨

本研究では、熱伝導異方性や局所的な熱物性の評価が原理的に可能なレーザースポット式周期加熱法に着目し、ロックインサーモグラフィと顕微赤外レンズを用いてこれを応用することで、次世代の高機能デバイスにおける熱マネジメントのため、高熱伝導材料の実用化を目的とした詳細な3次元熱伝導異方性評価法及び、実在的な界面熱抵抗現象における学理の確立を目的としたマイクロスケールにおける局所的界面熱抵抗計測法の開発を行った。第一章では研究背景として、次世代の高機能デバイスが動作する極限環境の代表である宇宙機と高発熱パワーモジュールに焦点を当て、要求される熱制御技術への対策とその実現における課題について熱物性計測の視点から概論することで研究課題を挙げ、本研究の目的について示した。

第二章では、開発したロックインサーモグラフィ式周期加熱法による三次元熱拡散率分布計測法について示した。従来の熱電対式レーザースポット周期加熱法を応用し、温度応答検出にロックインサーモグラフィを用いることで計測対象である薄板状試料のスポット加熱点を中心とした半径方向の熱拡散率の0.2度刻みの詳細な分布を計測・解析する手法を構築した。次にこれを用いて、殆どの材料を含む1.08–174 mm<sup>2</sup>/sまでの幅広い熱拡散率の標準材料や純金属を対象とした計測法の妥当性検証を行い、6.5%以内の高い精度で熱拡散率を計測できることを示した。また、面内・厚さ方向にも異方性を有する場合の二次元異方性熱伝導理論を構築し、異方性材料における面内方向測定時の温度波の一次元性を保証するための加熱周波数条件、及び厚さ方向熱拡散率の非線型フィッティング解析手法を確立した。そして本手法を二種類の繊維配向を有する高熱伝導CFRPに適用した。その結果、炭素繊維が一方方向のみに配向したUD材では繊維方向に極めて高い熱拡散率である267–285 mm<sup>2</sup>/sの値を有するのに対し、繊維直交方向はその100分の1程度の熱拡散率となる大きな異方比を有することを、詳細な分布解析により明らかにした。また、炭素繊維が直交するように二方向に配向したCP材では面内全方向において熱拡散率が純アルミニウムに匹敵する高い値を示すことを明らかにしたが、理論的には生じないと考えられる熱拡散率分布の加熱周波数依存性が生じることが明らかになった。この原因について、熱解析ソフトのThermal Desktop®を用いてモデル化したCP材の積層層間接触界面熱抵抗をパラメータとして解析を行った結果、接触界面熱抵抗が $1 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>K/W程度の場合、計測結果と同様の熱拡散率分布の加熱周波数依存性が生じることが明らかになり、その原因について考察した。

第三章では、第二章の三次元熱拡散率計測法を応用し、顕微赤外レンズを用いて試料側面方向から界面を直接検出することにより、マイクロスケールにおける界面熱抵抗分布を計測・解析する手法を新たに構築した。計測理論の新規構築では、熱界面条件を導入した一次元界面熱抵抗モデルに始まり、温度波の多重反射を考慮した級数的温度応答モデル、熱入力ガウシアン強度分布や加熱点から試料端までの距離を考慮した三次元熱伝導モデルまで発展させ、解析モデルへの反映においては独自にリニアフィルター法などを導入して実装することに成功した。次に等方性黒鉛IG-110を用いて接着した積層試料を作成し、計測手法の妥当性検証を行った。そして得られた計測結果の妥当性が確認され、また、熱拡散率の同時計測についても参考値との良好な一致が得られ妥当性を実装することに成功した。さらに、解析アルゴリズムの高速化によりサーモグラフィの視野内の界面に沿った熱抵抗の「線分布」を解析する手法に発展させ、同等方性黒鉛試料に適用した。その結果、分布解析手法の妥当性が確認されたとともに、等方性黒鉛の接着界面の2.6 mmの領域に約30%の熱抵抗の分布が存在することを明らかにした。

第四章では、第三章のマイクロスケールにおける表面加熱-側面検出型界面熱抵抗分布計測法を裏面加熱-表面検出の厚さ方向かつ周波数領域に応用し、界面熱抵抗の二次元分布を計測する理論及び装置の開発について示した。次に接触界面のない単体の等方性黒鉛IG-110試料を用いて、厚さ方向熱拡散率の分布を実際に計測することで計測手法の妥当性検証を行った。その結果、得られる熱拡散率が参考値より低く見積もられることが明らかとなった。これについて原因検証を行い、これまで知られていたロックインサーモグラフィでのロックイン計測の際に生じる計測装置系固有の位相遅れに加えて、様々な要因により試料表面で位相遅れの周波数に依存する変化が生じることを明らかにした。そしてこれらを総合して補正可能で、界面熱抵抗計測に有効な補正手法を提案した。そして熱抵抗分布計測の検証として熱抵抗の差異を定量的に可視化できるよう、接触界面に熱抵抗が大きくなる十字型の溝を設けた等方性黒鉛積層試料を作成し計測を行った。その結果、溝以外の領域において、第三章の計測結果と同等の値が得られており、計測手法の妥当性が確認され、また、接触界面における内部構造を界面熱抵抗の変化として定量的に検出することに成功した。また、作成した等方性黒鉛試料の界面熱抵抗分布では1.5–1.9倍のスプレッド効果が発現することが分かった。そしてスプレッド効果について熱拡散率や試料熱さ、加熱周波数の視点で考察を行い、スプレッド効果を低減可能な加熱周波数の上限が存在することを推察した。

第五章では本論文について結論し、今後の課題と将来の展望について述べた。

以上のように本論文ではロックインサーモグラフィ式周期加熱法による熱拡散率計測法の確立から、界面熱抵抗計測法への発展まで至っており、基礎理論の導出からシステムの構築、実験検証ならびに実材料の測定までを行いその有効性を実証している。本研究によって得られた結果は、様々な先端機能材料に未知なる熱物性解明や界面熱抵抗の低減につながる重要な成果であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である石崎拓也君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。