

# 主論文の要約

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)

氏名     石崎 拓也

## 論文内容の要約

地上で製造し、宇宙空間の軌道上まで輸送して運用される宇宙機は軽量であることが最も重要な要求の一つであり、低軌道への投入は数百万円/kgとも言われる。近年、宇宙機の大形化に加え搭載機器の高性能化による発熱密度の増加により、熱制御系特に構造部材としての役割も有する熱制御材料にもその要求が迫っている。ラジエータやサーマルダブラなどにおける伝熱促進材料にはこれまで主にアルミニウム合金が用いられてきた。高熱伝導性の材料としては純銅の方が優れているが、単位質量あたりの熱伝導率（比熱伝導率）はアルミニウムの方が優れている。そしてさらに高い比熱伝導率を有する材料として注目されているのが炭素系材料である。その中でも黒鉛系材料はその六角板状結晶の格子振動が高熱伝導キャリアとして振る舞い、熱分解グラファイト、グラファイトシート、炭素繊維などの高い熱伝導率を有する材料形態が知られているが、結晶の面外方向には熱伝導率が小さく、すなわち熱伝導異方性を有する材料である。特に炭素繊維と樹脂を組み合わせることで強度と剛性を有し構造部材としての利用が期待される炭素繊維強化プラスチック（CFRP）はその繊維配向に依存した三次元的な熱伝導異方性を有する。CFRPを伝導拡散促進材料に適用する場合、熱設計にあたってその熱的異方性の情報は必須であるが、これまでCFRPの熱定期異方性の評価に関する研究例は少なく、報告されているものは、ポリ

アクリロニトリル (PAN) を原料とする比較的熱伝導率の小さい炭素繊維を用いた PAN 系 CFRP を対象としたものであった。そのため、熱的異方性も比較的小さく、また異方性の評価も 2 方向のみであった。なぜなら従来の定常法、細線法、レーザーフラッシュ法といった熱伝導率または熱拡散率を計測する手法は一次元的な熱流を原則とした測定原理に基づいており、異方性の評価は試料の切り出し方向を変更するなどして一方向または二方向しか評価できなかったためである。したがって、コールタールピッチを原料とした高強度、高弾性、高熱伝導率などの特徴を有するピッチ系炭素繊維を用いた CFRP の、その大きな熱的異方性を詳細に評価する方法はこれまで存在していないのが現状であった。

一方、一度宇宙機の熱制御を離れ、地上で用いられる電子機器における熱制御の要求に目を向けると、超高発熱密度のインバータ等のパワーモジュール、高機能化や小型化が進むモバイル機器など、次世代の高機能半導体デバイスにおいて内部発熱による性能の低下や制限が問題となっている。機器の温度上昇を防ぐためには内部発熱を効果的に外部に排熱することが要求され、機器の小型化により部材を伝わる伝導熱抵抗は低減されている一方で、相対的に支配的となるのが接触界面熱抵抗である。接触界面熱抵抗とは物質の接触界面で熱流が阻害される現象であり、多層の積層構造や集積構造を有する半導体機器ではその接触面ごとに界面熱抵抗が生じる。電気自動車の電力制御ユニットに用いられる絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) や高電圧直流送電に用いられるプレスバック型 IGBT では総排熱抵抗に占める界面熱抵抗の割合は 30-50%にも達すると言われている。接触界面熱抵抗の低減には接触界面の空隙を充填し接触伝導を促進する熱界面材料 (TIM) として、一般にシリコン系のグリースがよく用いられ、近年ではガリウム系合金などの液体金属 TIM も実用化されているが、その材料探索は経験的手法に大きく依存している。これは、接触界面における伝熱現象に関する学理が未だ確立されていないことによる。接触界面熱抵抗に関する理論的研究は古くから行われており、Acoustic Mismatch Model や Diffuse Mismatch Model といった、熱輸送のキャリアである物質の結晶構造の格子振動を量子化したフォノンを用いた界面熱輸送予測モデルが研究され、近年では計算技術と計算機の発達により第一原理計算に基づいた分子一つ一つの振る舞いを予測する分子動力学計算による予測が研究されている。しかしながらこれらの理論予測モデルはナノスケールにおける理想的な接触界面を対象としており、ナノからマイクロスケールにかけて幾何学的または機械的な熱抵抗因子が複雑な影響を及ぼす実在的な界面を対象としていない。表面粗さや界面接触圧力などの熱抵抗因子を考慮した熱抵抗モデルも研究されているが、接触界面の変形形態 (弾性・塑性) などにおける仮定を含んでおり、また非常に小さい表面粗さなどの特定の条件に適用範囲が限られ、最終的な熱抵抗の評価も界面全体での平均値となるため、熱抵抗因子の寄与に係るモデルの厳密な正確性は検証されていない。従って実在的な界面を表現する熱抵抗モデルは確立されていないが、その要因の一つに熱抵抗因子と界面熱抵抗との関係の評価が困難なことが挙げられる。従来の定常法などによる界面熱抵抗の計測では界面全体の平均的な値しか得られず、熱抵抗因子が分布するマイクロスケ

ールにおける局所的な値を計測するのは困難であった。

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ージメントのため、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う。

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性を有することを、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、熱入力の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。