

学 位 論 文 題 名

VGCF-CNTフィラーを用いたアルミニウム基高熱伝導 複合材料の熱・強度特性に関する研究

(Study on Thermal and Strength Properties of Aluminum Based High
Thermal Conductive Composites Containing VGCF-CNT Filler)

学位論文内容の要旨

近年、環境問題や化石燃料の枯渇などの問題から、エネルギー問題に関心が集まっている。また、エネルギー効率を上げるための省エネルギーシステムの研究開発も数多く行われている。これからのシステム開発の飛躍的な技術的進展のために、より優れた材料特性を有する新材料の開発が急務となっている。近年発見されたカーボンナノチューブ (CNT) や気相成長炭素繊維 (VGCF) は極めて高い熱伝導率、強度特性、導電特性などの優れた材料特性を有しており、機械材料への応用が期待されている。

本研究は、優れた熱伝導特性を有する CNT と VGCF を用いたアルミニウム基高熱伝導複合材料に着目し、複合材料の強度特性と熱伝導特性を実験および数値解析により明らかにした。本論文は、全 7 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景や動向、本研究の位置づけ、論文の構成について述べた。近年の金属基複合材料や繊維強化プラスチックなどに関する研究動向を述べ、本研究の目的を明らかにした。

第 2 章では、アルミニウム基高熱伝導複合材料の作製方法、複合材料に用いた材料の詳細、熱伝導率の測定法、VGCF-CNT 間のネットワーク構造、熱伝導特性について、これまでの研究成果を説明している。複合材料の作製には、VGCF や CNT の高い熱伝導率を損なわないために、低温で短時間の焼結が可能な放電プラズマ焼結法を用いた。放電プラズマ焼結法により作製した複合材料の VGCF 軸方向の熱伝導率は、VGCF の体積含有率が 60vol% の時にアルミニウムマトリックスに比べて約 3 倍高い熱伝導率を有するが、VGCF 半径方向の熱伝導率は小さく、複合材料は熱異方性を有する。さらに、少量の CNT を添加する事により、熱伝導率は大きく増加した。これは、複合材料内部組織において CNT が VGCF 同士を架橋するネットワーク構造が構築され、このネットワーク構造が熱伝導率の増加に関与していると考えられる。

第 3 章では、強度特性について実験および数値解析により検討した。VGCF の配向方向に対する引張り試験より、VGCF の体積含有率の増加とともに引張り強さや伸びなどの強度特性の低下が起これ、複合材料は微小ひずみ区間において二段階的な特異な非線形変形挙動を示すことを明らかにした。また、破断後の試験片断面の SEM 観察より、複合材料内部に母材-繊維間のはく離や、母材中に空げきが発生することを確認した。これらの実験結果について、Eshelby 理論、Mori-Tanaka 理論、Weibull 関数、Ramberg-Osgood 則を使用した変形解析を行った結果、複合材料の微小ひずみ区間の特異な非線形変形挙動をよく表すことが出来た。さらに、複合材料の VGCF の体積含有率と母材中に発生する空げきの体積含有率の関係から、VGCF の体積含有率の増加にともない、母材中の空げきが増加することを明らかにした。

第 4 章では、VGCF 軸、半径、焼結時圧縮の各方向を引張り方向と一致させた試験片を作製し、強度特性の異方性について検討した。また、高温引張り試験や熱伝導率測定試験による強度特性と熱伝導特性の温度依存性についても検討した。常温の引張り試験より、VGCF

の配向方向の違いによる強度特性の異方性が確認され、引張り強さや Young 率は VGCF 軸方向において最も大きな値を取ることや、全伸びは VGCF の配向方向による差が見られないことを明らかにした。また、VGCF の体積含有率の増加とともに複合材料の Poisson 比が低下することを明らかにし、直交異方性弾性体における対称性の条件も確認した。高温引張り試験からは、引張り強さの温度依存性を明らかにし、アルミニウムマトリックスと比較して、引張り強さの減少に対する温度の影響は小さく、673K における VGCF 軸方向の引張り強さはアルミニウムマトリックスと同等となることがわかった。また、熱伝導率測定試験より、熱伝導率の温度依存性を明らかにした。アルミニウムマトリックスと比較して、熱伝導率の減少に対する温度の影響は大きい、最も熱伝導率が高く熱伝導率の低下率も大きい VGCF 軸方向においても、673K における熱伝導率はアルミニウムマトリックスよりも大きいことがわかった。以上のように、高温域においても複合材料の強度はアルミニウムマトリックスとほぼ等しく、また、熱伝導率はアルミニウムマトリックスよりも大きいことを示し、高温域における複合材料の有用性について明らかにした。

第 5 章では、非弾性変形により生じる母材-繊維間の界面損傷、VGCF 層の破壊が熱伝導特性に与える影響について実験と数値解析より検討した。実験において、複合材料に引張り負荷を与えると、非弾性変形の増加とともに、複合材料の熱伝導率が減少することを明らかにした。また、0.6% の非弾性ひずみを受けた場合の熱伝導率の減少率は 9% であり、非弾性変形が熱伝導率の減少に与える影響は小さいことも明らかにした。数値解析において、有限要素解析と Nan モデルを併用した熱伝導解析、VGCF-CNT ネットワーク構造を考慮した熱伝導解析、複合材料の作製方法を考慮した板状積層モデルを用いた熱伝導解析を行い、非弾性変形による内部構造の変化と熱伝導率との関連性について検討した。有限要素解析と Nan モデルを併用した解析により、複合材料にはく離と空げきが発生した場合の熱伝導率は、定性的に実験結果と一致する結果を得た。また、VGCF-CNT ネットワークモデルや板状積層モデルを用いた有限要素解析により、VGCF 軸方向の引張り負荷によって、複合材料内部でフィラー層が局所的に破断した場合に、実験結果とよく一致する結果を得た。以上の結果から、非弾性変形により、局所的に複合材料の内部組織に変化が生じるために、熱伝導率が低下する可能性を指摘した。

第 6 章では、複合材料の有する高い熱伝導率や熱異方性を活かすためのアプリケーションとして、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) 冷却システムへの適用性について検討した。IGBT はハイブリットカーなどにおけるパワーモジュールのインバータとして電力制御を行うが、高い発熱を伴い、発熱による回路や接合部の破損などが問題となる。発熱部となる IGBT と、IGBT からの熱輸送のための均熱板、空冷によって排熱を行うフィンで構成された冷却システムの有限要素解析を行い、その冷却性能について検討した。均熱板の一部に複合材料を用いることにより、アルミニウムマトリックスのみを使用した均熱板よりも高い冷却性能を有することや、均熱板内部の複合材料の配置や複合材料内部の VGCF の配向方向によって冷却性能に差があることを明らかにした。

第 7 章では、本研究によって得られた結果の総括と、今後の展望についてまとめた。

以上のように、本研究では VGCF-CNT フィラーを用いたアルミニウム基高熱伝導複合材料の強度特性と熱伝導特性を実験と数値解析により明確にするとともに、その実機への適用性についても明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	佐々木 克 彦
副 査	教 授	成 田 吉 弘
副 査	教 授	松 浦 清 隆
副 査	准教授	黒 田 明 慈

学 位 論 文 題 名

VGCF-CNTフィラーを用いたアルミニウム基高熱伝導 複合材料の熱・強度特性に関する研究

(Study on Thermal and Strength Properties of Aluminum Based High
Thermal Conductive Composites Containing VGCF-CNT Filler)

近年、環境問題や化石燃料の枯渇などの問題から、エネルギー問題に関心が集まっている。また、エネルギー効率を上げるための省エネルギーシステムの研究開発も数多く行われている。これからのシステム開発の飛躍的な技術的進展のために、より優れた材料特性を有する新材料の開発が急務となっている。本研究は、優れた熱伝導特性を有するカーボンナノチューブ (CNT) と気相成長炭素繊維 (VGCF) を用いたアルミニウム基高熱伝導複合材料に着目し、実機利用を想定した複合材料の強度特性と熱伝導特性を実験および数値解析により明らかにするとともに、その有用性を明確にすることを目的としている。

このためにまず、対象とするアルミニウム基高熱伝導複合材料の作製方法、複合材料に用いた材料の詳細、熱伝導率の測定法、VGCF-CNT 間のネットワーク構造、熱伝導特性についての概要を示し、複合材料は最大でアルミニウムマトリックスの約 3 倍程度の熱伝導率を有すること、VGCF の配向方向と垂直方向で熱伝導率が異なる、いわゆる、熱異方性を有することを示している。

次いで、複合材料の実機使用に欠かせない強度特性を明確にするために、実験および数値解析を行っている。VGCF の体積含有率の増加とともに引張り強さや伸びなどの強度特性の低下が起こり、複合材料は微小ひずみ区間において二段階的な特異な非線形変形挙動を示すこと、また、複合材料内部に母材-繊維間のはく離や、母材中に空けきが発生することを明らかにし、さらに、Eshelby 理論、Mori-Tanaka 理論、Weibull 関数を用いた数値解析により、特異な非線形変形挙動を記述するとともに、複合材料内部の微視的構造変化の推定を行っている。

複合材料の高温領域での使用を想定した、強度特性および熱伝導特性の温度依存性についての検討を行っている。常温の引張り試験より、引張り強さや Young 率は VGCF 配向方向において最も大きな値を取ること、全伸びは VGCF の配向方向による差が見られないこ

となど、複合材料の強度異方性を明らかにしている。さらに、高温引張り試験を実施し、複合材料の強度はアルミニウムマトリックスと比較して、引張り強さに対する温度の影響は小さく、特に、673KにおけるVGCF配向方向の引張り強さはアルミニウムマトリックスと同等であることを示している。熱伝導特性に関しては、雰囲気温度上昇とともに熱伝導率は低下するが、試験を行った中での最高温度673Kにおける熱伝導率はアルミニウムマトリックスよりも大きく、高温領域においても複合材料が有利であることを示している。

実際の使用時に懸念される非弾性変形により生じる母材-繊維間の界面損傷、VGCF層の破壊が熱伝導特性に与える影響について実験と数値解析より検討している。複合材料に引張り負荷を与えると、非弾性変形の増加とともに複合材料の熱伝導率が減少するが、複合材料としては比較的大きい0.6%の非弾性ひずみが生じた場合の熱伝導率の減少率は9%であり、非弾性変形が熱伝導率の減少に与える影響は小さいことを示している。また、有限要素解析とNanモデルを併用した熱伝導解析、VGCF-CNTネットワーク構造を考慮した熱伝導解析、複合材料の作製方法を考慮した板状積層モデルを用いた熱伝導解析を行い、非弾性変形により複合材料内部にはく離と空げきが発生した場合の熱伝導率が、定性的に実験結果と一致することを明らかにしている。さらに、VGCF-CNTネットワークモデルや板状積層モデルを用いた有限要素解析により、VGCF軸方向の引張り負荷によって、複合材料内部でフィラー層が局所的に破断した場合の解析結果が実験結果とよく一致することを示し、複合材料の非弾性変形による局所的な内部組織変化と熱伝導率の関連性を明確にしている。

高熱伝導複合材料のアプリケーションの一例として、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ(IGBT)冷却システムへの適用性について検討している。発熱部となるIGBTと、IGBTからの熱輸送のための均熱板、空冷によって排熱を行うフィンで構成された冷却システムの有限要素解析を行い、その冷却性能について検討し、均熱板の一部に複合材料を用いることにより、アルミニウムマトリックスのみを使用した均熱板よりも高い冷却性能を有することや、均熱板内部の複合材料の配置やその熱異方性によって冷却性能に差があることを明らかにし、高熱伝導材料が冷却システムに有用であることを示している。

これを要するに、本研究は、CNTおよびVGCFとアルミニウムから成る高熱伝導複合材料の強度特性と熱伝導特性を評価するための実験および理論的解析を行うとともに、実機応用を想定した構造解析により複合材料の有用性を明確にしておき、放熱特性向上が課題であるパワートランジスタなどを用いた次世代機器開発に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。