

審査の結果の要旨

氏名 シブシャンカラン ハリーシュ

本論文は”Thermal conductivity enhancement of liquid and solid with single-walled carbon nanotubes (単層 CNT を用いた液体／固体の熱伝導率増大効果)”と題し、単層カーボンナノチューブ(Single-walled carbon nanotube, SWNT)を中心として、ナノホーン、ナノダイヤモンドやグラファイト薄膜などのナノ炭素材料によるナノ流体やナノ複合固体の熱伝導率増大効果を検討したものである。ナノ流体においては、いずれのナノカーボン材料についても従来の現象論的なモデル予測から大きく逸脱しない範囲での熱伝導率増大効果が得られることを明らかにし、高いアスペクト比を有する一次元材料である SWNT の優れた可能性について言及している。さらに、潜熱蓄熱材(Phase Change Material, PCM) としてよく用いられるノルマルオクタデカンに SWNT を加えたナノ複合固体においては、熱伝導率が 2 倍以上に増大する異常現象を実験的に明らかにし、潜熱蓄熱材の固化の過程で SWNT が特殊なネットワーク構造を形成することが原因であるとの考察をしている。論文は全 6 章よりなっている。

第 1 章は、"Introduction(序論)"であり、電子デバイス冷却における材料の熱伝導率向上の必要性、水や油にナノ材料を添加するナノ流体の概念と熱伝導率増大効果、ナノ流体研究の歴史的背景、理論的考察について議論し、論文全体の流れを述べている。

第 2 章は、" Materials, experimental methods and models (ナノ物質・実験手法・モデル化手法)"である。水や油などの液体に熱伝導率の高いナノ物質を加えることで熱伝導率の増大が図れることが知られており、ナノ流体(nanofluid)と呼ばれて多くの研究が行われているが、一般に流体中のナノ材料の表面構造や分散状態を計測／制御することは容易ではなく、ナノ流体の熱伝導率や粘性に関する多くの研究の再現性が問われていた。本論文では、直径や長さの測定が可能であり、かつ近赤外蛍光分光によって孤立分散状態であることが確認できる SWNT を用いることでナノ流体の熱伝導率増大効果を詳細に検討している。SWNT 試料に関しては、走査型電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)、吸収分光、近赤外蛍光分光、ラマン分光、AFM 観察、熱重量分析(TGA)を用いて評価し、デオキシコール酸ナトリウム(DOC)を界面活性剤として用いて水およびエチレングリコールに分散してナノ流体を実現している。ホットワイヤ法と呼ばれる計測装置を構築して熱伝導率を測定している。さらに、熱伝導率増大の現象論的モデルについて整理している。

第 3 章は、" Enhanced thermal transport in ethylene glycol and water with single walled

carbon nanotube inclusions (単層カーボンナノチューブによるエチレングリコールおよび水の熱伝導率増大効果) ”である。エチレングリコールおよび水に SWNT を 0.3 wt% 加えることで 10 % 程度の熱伝導率増大が得られることを明らかにしている。また、SWNT と流体との界面熱抵抗を考慮した経験的モデルと比較し、界面熱抵抗を見積もっている。ここで、水を用いたナノ流体については、熱伝導率の増大効果に温度依存性が現れることを明らかにして、高温になると SWNT の回転運動による熱伝導率増大効果が加わると考察している。

第 4 章は、"Effect of carbon nano additive dimensionality in the thermal conductivity enhancement of nanofluids (ナノ流体の熱伝導率増大効果に及ぼすナノカーボン材料の次元性の効果) "である。一次元材料である SWNT の比較として、球形に近いナノホーンやナノダイヤモンドと二次元的であるグラファイト薄膜を用いた場合のナノ流体効果を検討している。いずれのナノカーボン材料についても従来の現象論的なモデル予測から大きく逸脱しない範囲での熱伝導率増大効果が得られることを明らかにし、高いアスペクト比を有する一次元材料である SWNT の優れた可能性について言及している。

第 5 章は、"Enhanced thermal conduction characteristics of phase change composites with single walled carbon nanotube inclusions (単層カーボンナノチューブによる潜熱蓄熱材の熱伝導率増大効果) "であり、潜熱蓄熱材としてよく用いられるノルマルオクタデカンに SWNT を加えたナノ複合固体においては、熱伝導率が 2 倍以上に増大する異常現象を実験的に明らかにし、潜熱蓄熱材の固化の過程で SWNT が特殊なネットワーク構造を形成することが原因であるとの考察をしている。

第 6 章は、"Conclusions and scope for future research (結論と今後の展望) "であり、上記の研究結果をまとめ本分野の研究の展望を述べている。

以上を要するに、本論文では、SWNT を中心とするナノカーボン材料によるナノ流体およびナノ材料複合固体の熱伝導率増大効果を検討したものである。ナノ流体においては、いずれのナノカーボン材料についても従来の現象論的なモデル予測から大きく逸脱しない範囲での熱伝導率増大効果が得られることを明らかにし、高いアスペクト比を有する一次元材料である SWNT の可能性を議論している。さらに、潜熱蓄熱材に SWNT を加えたナノ複合固体においては、熱伝導率が 2 倍以上に増大する異常現象を実験的に明らかにしており、潜熱蓄熱材の固化の過程で SWNT が特殊なネットワーク構造を形成することを提案している。本論文はナノ材料を用いたナノ流体とナノ複合固体の熱伝導率増大に関する新たな知見を与えており、分子熱工学の発展に寄与するものであると考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。