

2025年度 各務記念材料技術研究所共同研究報告書

研究課題名	カーボンナノチューブの熱伝導特性解析と層間熱伝導材料開発		
重点課題	Ⅲ－A（省エネルギーとプロセス）、Ⅲ－B（省エネルギーと構造）		
新規・継続	継続		
研究代表者	イノウエ ヨク		
氏名	井上 翼		
所属機関・部局・職名	静岡大学・工学領域電子物質科学系列・教授		
研究分担者 （氏名・所属機関・部局・職名）	研究代表者	井上 翼・静岡大学工学部・教授	
	研究分担者	奥村 友貴・静岡大学大学院総合科学技術研究科・修士2年	
		渡辺 倭・静岡大学大学院総合科学技術研究科・修士2年	
研究所側 受入教員名	川田 宏之		

研究目的

カーボンナノチューブ（CNT）を半導体素子冷却用の熱伝導材料に応用すべく、超高密度 CNT 材料開発を目的して研究を実施する。CNT 超高密度化では合成プロセスにおける触媒ナノ粒子熱挙動解明が重要である。CNT 材料開発と熱特性解明は、近年電力需要が高まる半導体デバイスの省エネルギー化に資する重要な研究開発である。CNT の熱伝導特性を明らかにし、半導体冷却などで利用される層間熱伝導材料（TIM）への適用性を調べる。

実験内容と研究成果

熱化学気相堆積法(CVD)により、Si 基板上に高密度に垂直配向 CNT フォレストを形成した。加熱時の昇温速度を $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$ と高速化し、成長温度より低い 500°C 程度で CNT 核形成を行うことで、非常に緻密な CNT フォレストを得た。この CNT フォレストの根元に酸化処理を施して基板から剥離し、熱抵抗測定用の試料とした。本研究では薄膜試料の厚み方向の熱抵抗を評価する手法として、過渡熱応答測定と構造関数解析を用いた。熱源と温度測定を兼ねる TEG チップと、冷却器とであるコールドプレート(CP)の間に CNT を配置し、過渡冷却曲線の測定結果をもとに熱抵抗と熱容量からなる熱回路網モデルを構築して、CNT 部の熱抵抗を算出した。図1に長さ $100\mu\text{m}$ の CNT を TEG/CP 間に挿入した際の構造関数を示す。CNT が無い場合の熱抵抗は $0.63\text{cm}^2\text{K}/\text{W}$ であったのに対し、CNT を挿入することで $0.49\text{cm}^2\text{K}/\text{W}$ に低下した。これにより、**CNT が TIM として熱抵抗を低減する効果を有することが確認された。**

CNT 長を $100\sim 700\mu\text{m}$ の範囲で変化させた試料について、接触圧力を変化させて測定した熱抵抗を図2に示す。CNT 長 $700\mu\text{m}$ では 100kPa という低圧力時に $2.5\text{cm}^2\text{K}/\text{W}$ とやや大きい値を示すのに対し、CNT が $300\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ と短くなるにつれて熱抵抗が減少する、明確な CNT 長依存性が見られた。どの長さの CNT においても、接触圧力が大きくなるほど熱抵抗は単調減少する傾向が見られた。これは、高圧下で CNT が CP と良好に接触し、界面接触熱抵抗が減少したためと考えられる。ただし、 $300\mu\text{m}$ および $100\mu\text{m}$ の CNT では、 400kPa 以上の圧力領域では熱抵抗の減少がほぼ見られなくなった。この時の熱抵抗値(約 $0.5\text{cm}^2\text{K}/\text{W}$)は、CNT バルクの熱抵抗よりも界面熱抵抗が支配的になっているためと推測される。なお、長さ $100\mu\text{m}$ の CNT の熱抵抗は、全圧力領域において市販の熱伝導グリスとほぼ同等の大きさを示した。このことから、このような短い CNT は 100kPa という低い接触圧力でも良好な接触状態が得られること、そして、測定された熱抵抗値の大部分が界面熱抵抗に支配されていることが示唆される。以上の結果から、**高密度 CNT フォレストは、 $100\mu\text{m}$ 程度の長さであれば界面熱抵抗が支配的になるほど良好な熱輸送媒体として作用することが明らかになった。**この界面熱抵抗は、CNT と CP のように格子振動周波数が大きくことなる界面において、フォノン散乱が顕著になることに起因している。CNT を TIM としてさらに高性能化するには、このミスマッチの軽減が重要である。

CNT フォレストのハンドリング性を向上させるため、高耐熱樹脂であるポリフェニレンサルファイド (PPS) フィルムの両面に CNT を熱融着したフィルム状 CNT-TIM を作製し、その熱輸送特性を評価した(図3)。比較のため、金属箔両面に直接 CNT を合成した試料も作製し熱抵抗を評価したところ、中間材料によらず熱抵抗は $0.7\text{cm}^2\text{K}/\text{W}$ 程度となった(図4)。界面での接触熱抵抗が支配的である状況下においては、中間材料(樹脂層)自身の熱抵抗の寄与は相対的に小さい。そのため、樹脂であっても大きな熱障壁とはならず、**CNT/PPS/CNT 構造が良好な TIM として機能することが示された。**

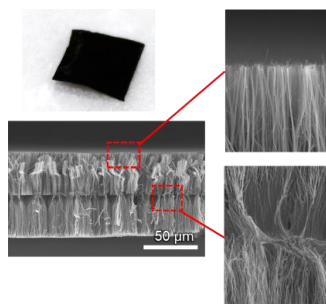


図3 CNT/PPS/CNT 構造 TIM

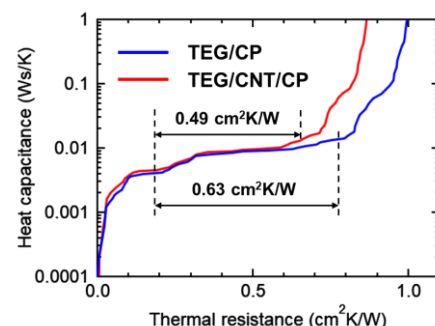


図1 CNT を TE/CP 間に挿入した際の構造関数比較

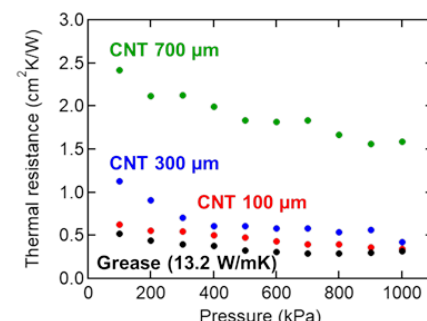


図2 長さの異なる CNT フォレストの熱抵抗の圧力依存性

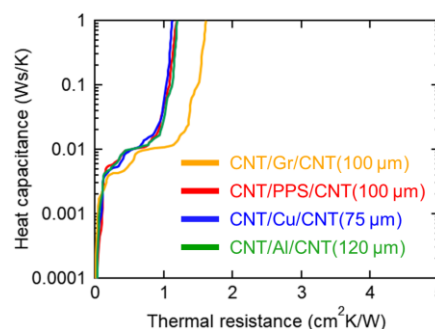


図4 サンドイッチ型 CNT-TIM の構造関数

研究成果の公表状況(論文、国際・国内会議、学会発表、特許等の知財)

論文 1 “Film-type carbon nanotube thermal interface materials for advanced thermal management: A study on interfacial resistance”, Tomoki Okumura, Takayuki Nakano, Yoku Inoue, Carbon **250**, 121288 (2026).

学会 1 “高密度 CNT フォレストによる TIM 開発”, 奥村友貴、中野貴之、井上翼, 第 35 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (MES2025), 2025/9/4, 大阪大学 中之島センター

学会 2 “Investigating heat transport properties of CNT forests by thermal structure function analysis”, Yamato Watanabe, Takayuki Nakano, Yoku Inoue, The 69th Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (第 69 回 FNTG 学会), 2025/9/24, National Taiwan Normal University (台湾・台北)

学会 3 “垂直配向 CNT フォレストの熱輸送特性”, 渡辺倭, 中野貴之, 井上翼, 第 52 回炭素材料学会年会, 2025/11/26, 長野市生涯学習センター

学会 4 “CNT/Cu 複合材料の電気・熱伝導メカニズム”, 第 52 回炭素材料学会年会, 奥村 友貴, 井上 翼, 中野 貴之, 2025/11/26, 長野市生涯学習センター

(注) 様式Bは、A4サイズ2頁になるようにしてください。