

審査の結果の要旨

氏名 石川 桂

本論文は“垂直配向単層カーボンナノチューブ膜の伝熱特性”と題し、ナノテクノロジーの中心的素材として注目を集めている単層 CNT (Carbon Nanotube) の伝熱特性の実験的解明を目指したものである。基板と垂直に配向した単層 CNT 膜の CVD 合成から開始し、走査型電子顕微鏡観察、吸収分光やラマン分光による評価、配向単層 CNT 表面への金属蒸着の現象解明、3 オメガ法による計測および新たに提案したラマン分光を用いた伝熱特性計測により単層 CNT 膜の熱伝導率と単層 CNT 膜と基板との接触熱抵抗の実測を実現したものであり、論文は全 7 章よりなっている。

第 1 章は、“序論”であり、CNT などの炭素の同素体の幾何学構造、単層 CNT の幾何学構造と電子物性、単層 CNT の熱伝導率や伝熱特性、従来の理論と実験、光学物性、CVD 合成技術などについて議論し、論文全体の流れを述べている。

第 2 章は、“垂直配向単層カーボンナノチューブへの金属蒸着について”である。以降の伝熱特性の実験的計測に必須の技術であるとともに単層 CNT の工学的な応用の基礎として、垂直配向単層 CNT 膜への金属蒸着の解析と制御を行っている。ナノスケールの構造となる単層 CNT 膜への金属蒸着の様相は金、チタン、パラジウム、アルミニウムなどの金属種ごとに全く異なり、これは、金属の結合エネルギーとナノチューブ表面と金属原子との界面エネルギーとのバランスで整理できることを示した。また、蒸着後のアニーリングによってより均一な金属膜が実現することも示した。

第 3 章は、“3 ω 法による測定”である。薄膜の表面にパターン蒸着した金属細線に角周波数 ω の交流電流を加えると、角周波数 2ω のジュール発熱がおこり、金属細線の温度はおおよそ 2ω で変動するが、薄膜への熱拡散によって若干の変調を受ける。金属細線の抵抗は温度によって変化することから、金属細線の電圧に表れる角振動数 3ω の成分が熱拡散率と相関することが知られている。この手法を垂直配向単層 CNT 膜に適用し、SWNT 膜の熱伝導率および膜と基板であ

る石英ガラスとの界面熱抵抗の計測を実現した。

第4章は、"ラマン分光による断面温度測定からの測定"である。単層 CNT に特有な G バンドと呼ばれるラマン散乱ピークのエネルギーが単層 CNT の温度に依存することにより、レーザーを集光した位置での温度の計測が可能である。また、シリコンの特徴的なラマン散乱ピークのエネルギーの温度依存性も知られている。これらを応用して、シリコン基板上の単層 CNT 膜の上部を金属細線で加熱した状態での膜圧方向の温度分布を直接計測し、第3章の 3ω による界面熱抵抗の実測値と矛盾のない熱伝導率および界面熱抵抗を得た。

第5章は、"ラマン分光による励起レーザーからの加熱を利用した測定"であり、単層 CNT のラマン散乱による温度計測を更に発展させ、励起レーザー加熱による温度計測データと1次元理論解析及び2次元の数値解析で予測される温度分布とを様々な単層 CNT 膜の膜厚の場合について比較し、単層 CNT 膜の熱伝導率およびシリコン基板との界面熱抵抗を計測する手法を提案し、実測を行った。

第6章は、"考察"であり、第3章、第4章、第5章のいずれの計測においても単層 CNT 膜の熱伝導率は 1W/mK 程度の極めて低い値となること、および界面熱抵抗は $10^5\sim 10^6\text{ m}^2\text{K/W}$ と大きいことを整理し、理論的にはダイヤモンドを越える優れた熱伝導率が予測されているそれぞれの単層 CNT が垂直配向膜中で連続していない可能性を指摘した。

第7章は、"結論"であり、上記の研究結果をまとめたものである。

以上を要するに、本論文では高純度で CVD 合成し、分光評価をおこなった垂直配向単層 CNT 膜の伝熱特性についての実験を行い、単層 CNT 膜としての熱伝導率と単層 CNT 膜と基板との接触熱抵抗の実測と実現するとともに、ラマン分光法によるこれらの測定技術を提案したものである。本論文は単層 CNT の伝熱特性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。