

論文審査の結果の要旨

氏名 鄧 飛

修士(工学)鄧飛提出の論文は、「カーボンナノチューブ含有ナノ複合材料における界面接着特性および変形メカニズムに関する研究」と題し、7章と付録A、Bよりなる。

カーボンナノチューブ(Carbon Nanotube, CNT)は、軽量かつ優れた力学特性を持つため、樹脂の補強材として用いられようとしている。しかし、実際に作製したCNT含有複合材料の力学特性は、期待値よりはるかに小さい。その原因には、樹脂中におけるCNTの均一分散、配向制御および良好な界面接着、などが不十分であることが挙げられる。これら課題の中で最も重要かつ困難な課題が界面接着である。界面はナノメートルオーダーであり、かつ複合材料内部に存在するため、実験的な研究は非常に困難である。本研究では、CNTと樹脂の界面強度を走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)内で実験的に直接測定する手法を開発し、界面強度を求め、また、複合材料の引張り試験を透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)内で行い、複合材料中におけるCNTの補強メカニズムを解明することを目的とする。

第1章は「序論」であり、本研究の背景についてまとめ、従来研究の問題点を総括するとともに、本研究の目的と構成について述べている。

第2章は「FIB法による樹脂中におけるCNTの分布および配向評価」であり、樹脂中におけるCNTの分散や配向状態を、直接かつ容易に評価する手法としてフォーカスイオンビーム(FIB)法を開発した。その原理は、イオンビームを試料表面に連続照射することにより、切削率の高い樹脂が優先的に削られてCNTだけが露出することである。二種類の樹脂と異なるCNT重量分率が充填された場合について、適切に評価できることを立証した。

第3章は「ナノ複合材料のマクロ特性評価」であり、多層CNT(MWNT)と熱可塑性樹脂であるPEEKを用いたPEEK/MWNTナノ複合材料の引張り特性と動力学特性の評価を行った。引張り特性については、CNT添加量増加とともに複合材料の弾性率や強度は室温のみならず、100-200°Cの高温においても増加した。また、実験により求めた弾性率は、既存の繊維強化複合材料の理論式により予測した値よりもかなり小さいことから、複合材料中のCNTの荷重負担が不十分であることを示した。

第4章は「TEM内における複合材料の引張り試験」であり、TEM内で複合材料に一樣引張り荷重を負荷する手法を開発し、複合材料中のCNTの変形を原子オーダーで観察することに成功した。ひずみを与えてもCNTは無ひずみ時と比べてほとんど変化がないことから、荷重がCNTへ伝達していないことが示唆された。また、引張り破断後に観察できるPullout(引抜き)されたMWNTには、樹脂からPulloutしたものと、MWNTの内層からPulloutしたものが存在した。

第5章は「分子動力学法によるCNT Pullout シミュレーション」であり、CNTと樹脂の界面接着力を理論的に予測するために、CNTとPEEK樹脂の界面相互作用を、ファンデルワールス力と仮定した場合と、化学結合と仮定した場合について、分子動力学法シミュレーションを行った。前者の平均的な界面強度は2MPa程度、後者で界面に化学結合が5つ存在する場合には、300MPa程度であることを示した。

第6章は「CNTと樹脂の界面強度測定」であり、走査型電子顕微鏡内において、ナノサイズの単一のCNTをPEEK樹脂からPulloutする試験システムを3種類開発し、各々の手法で界面強度を直接測定し、界面強度は1.5~14 MPaの範囲にあることを示した。とくに、界面剥離が生じた材料でも、加熱再溶融することにより、界面強度が回復することを示した。実験とシミュレーションの結果を比較すると、複合材料中におけるCNTとPEEK樹脂の界面相互作用は、ファンデルワールス力である可能性が高いことを明らかにした。

以上要するに、本論文は、CNT含有ナノ複合材料中のCNTの配向、分散状況およびナノ領域の負荷下直接観察や界面力学特性評価を行うことが可能な装置を開発し、ナノオーダーの界面強度を測定することに成功した。その結果、CNTとPEEK樹脂の界面相互作用が弱いことを示した。また、CNTのようなナノメートルサイズの物質を含む複合材の界面特性の評価法を開発した点で、先端エネルギー工学、とくに、極限環境材料工学に貢献するところが大きい。

なお、本論文の第2-4章は小笠原俊夫氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析および検討を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。