

# カーボンナノチューブ含有複合材料の変形・界面強度測定および そのモデル化

学生証番号 47-086121 氏名 津田 皓正  
(指導教員 武田 展雄 教授)

Key Words : Carbon Nanotubes, Interfacial Strength, *in-situ* SEM, Molecular Dynamics, Finite Element Method

航空宇宙分野において、航空機の飛行の安全性・効率性および宇宙における極限環境下での耐久性を高めるうえで、構造材料の軽量化および高剛性化は大きな課題である。そのため、既存の材料よりも優れた力学特性、軽量性を兼ね備えたマイクロ・ナノ構造材料の開発が現在注目されている。

カーボンナノチューブ(Carbon nanotubes: CNT)は、その低密度およびサイズおよび優れた力学特性から、航空宇宙分野では樹脂に添加する強化材としての利用が期待されている。しかし実際に樹脂に添加された複合材料の力学特性の向上値は、既存の短繊維強化理論による向上値の予測よりも著しく低いことが知られている。

CNTを樹脂の強化材として有効に使うためには、CNTと樹脂の界面における接着特性、すなわちCNTの変形や、CNTと樹脂の界面強度を直接的に測定する必要がある。しかしこれら変形・界面接着特性の測定は、CNTのサイズが非常に小さいため実験が困難であり、現在この界面強度を間接的あるいは直接的に測定するシステムが提案されつつあるが、いまだに定量性に乏しいのが現状である。

そこで本研究では、複合材料中におけるCNTの変形や、CNTと樹脂の界面接着特性および界面剥離が、CNT含有複合材料の力学特性とどのように関係しているのかを調べるため、実験および理論の両方の立場から研究を行った。

まずCNTと樹脂の変形測定手法としてデジタル画像相関法を提案し、TEM/SEM内におけるCNT含有複合材料の引張試験過程からCNTおよび樹脂の変形を取得した。

続いて、樹脂とCNTの界面接着強度を直接的に調べるため、Nano-pull out試験を行った。この時、CNTの埋め込み長をより正確に知るためFIBを用いて複合材料に穴をあけた。さらに界面への損傷を取り除くためにホットプレス処理を施した試験片に対してもFIB切削手法を用いて、より正確な界面強度を算出した。そして樹脂とCNTの界面接着特性への熱残留応力の影響を調べるため、高温状態におけるデータも取得した。

また、分子動力学法を用いてCNTと樹脂の界面強度について、樹脂とCNTの界面相互作用をvan der Waals力と仮定した場合の界面強度計算をおこない、CNTと樹脂の界面接着力を決定する要因について考察した。

最後に、有限要素法を用い、CNTと樹脂の界面に結合要素を挿入することで、界面領域に発生する剥離について再現を試み、この結果と実際のCNT含有複合材料の力学特性との間には、どのような関係があるのかを調べた。また、界面強度の剥離発生の際のせん断力を変化させることで、CNT含有複合材料の強化には、界面接着力の上昇が不可欠であることを定性的に示した。

これらの結果をもとに、CNT含有複合材料の界面接着特性および力学特性強化メカニズムに関する考察を行った。