カーボンナノチューブの ナノメカニクス

Nanomechanics of Carbon Nanotubes

秋田成司・中山喜萬

カーボンナノチューブの形状は、直径がナノメートルオーダー、長さが数ミクロンのシームレスな円筒であり、引張強度のパラメーターであるヤング率はTPaオーダーである。この強度は、一般的な材料のオーダー、たとえばステンレスなどの鋼材で約0.2 TPa、軽量材のチタン合金の0.1 TPaと比べて非常に大きい。このような弾性に関する予想が早くからなされたにもかかわらず、当初はそのサイズが非常に微小なため1本1本のナノチューブの機械的な特性を実験的に求めた報告はなかった。1996年になり透過型電子顕微鏡(TEM)の観察下でカーボンナノチューブの熱振動を解析し個々のナノチューブのヤング率を求めたことがはじめて報告された¹⁾。その結果ナノチューブのヤング率は実験的にもTPaレンジであることが確認された。その後、原子間力顕微鏡(AFM)の水平力からもヤング率がTPaオーダーであることが報告された²⁾。

筆者らは、2つの独立したマニピュレーターを備えた走査型電子顕微鏡(SEM)を用い、ナノチューブに力を加えたときの変形を直接観察しながら機械的特性を測定してきた^{3), 4)}。その結果、軸の横方向から力が作用する場合と、軸方向に作用する力から求めたヤング率は良い一致を示した。この実験結果から、ナノチューブのような微小でかつ非等方的な構造に対し、等方的な物質に対する古典的な連続体の考え方で実験結果を解析しても矛盾がないことが明らかになった。また、鋼材などの場合、過剰な力を加えたときには塑性変形が起こり力を除去しても元の状態には戻らない。しかし、ナノチューブの場合、加重を除去すると変形前の形状に戻り、実験誤差内で繰り返し同じ特性を示す。図1に力を加えて大きく湾曲させたナノチューブのSEM像を示す。この場合も力を取り去ると元の直線形状に戻る。このように、ナノチューブは繰り返し加重に対しても非常に大きな抵抗力をもつ。

最近の単層ナノチューブ軸の横方向から作用する力に対する計算結果では、折れ曲がり点近傍の炭素の結合が負荷

図1 SEM観察下で外力を加え湾曲させたナノチューブ

図2 ヤング率の直径依存性: ●はSEMによる測定, ○はTEMによる測定¹⁾, ◆はAFMによる測定結果²⁾

を除去した後、4つの6員環のネットワークが2つの5員環と7員環の組み合わせに置き換わり塑性変形する⁵⁾。このような結合の変換が起こっても巨視的なチューブ構造は保っており、さらにこの結合の変換による曲がりにはきわめて小さいため、実験でこのような変化を確認するには至っていない。また、径の大きな多層ナノチューブではどのような変位が起こるかはさらに複雑であり、ナノチューブの曲げ疲労に対する理論的な解析も必要である。

最後に、これまで実験で求められてきた多層ナノチューブのヤング率と直径の関係をまとめて図2に示す。ヤング率と直径には確たる相関があるようには思えない。これらの大きなヤング率の広がりはいくつかのナノチューブのもつ構造や欠陥に起因すると思われる。

文 献

- 1) M. M. Treacy, T. W. Ebbesen, J. M. Gibson: *Nature*, **381**, 678 (1996)
- 2) E. W. Wong, P. E. Sheehan, C. M. Lieber: *Science*, **277**, 1971 (1997)
- 3) S. Akita, H. Nishijima, Y. Nakayama, F. Tokumasu, K. Takeyasu: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 1044 (1999)
- 4) S. Akita, H. Nishijima, T. Kishida, Y. Nakayama: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39**, 3724 (2000)
- 5) 渋谷陽二, 塩崎幹夫, 釘宮哲也, 富田佳宏: 日本金属学会誌, **63**, 1262 (1999)