

計測から分析，評価へ

21世紀になって起こった最大の社会変化は、いわゆるデジタル化によって、世界に垣根が無くなったことであろう。いつでもどこでも膨大な情報にアクセスすることができ、国境を越え、離れた場所でも人的ネットワークを形成することが可能になった。その結果、ほとんどの製品は、世界のどこで作っても、品質に大きな差が出なくなり、多くの仕事は誰がやっても同じと考えられるようになった。現在では必然的に、安い給料で働いてくれるアジア地域で製品が作られている。安い人が選ばれる時代が到来し、近い将来に、ロボットが人間に置き換わると危惧されている。

もはやその製品がどこの国で作られたのかに意味はない。実際、アメリカの Apple 社の製品である iPhone には「Made in USA」とは書かれておらず、代わりに「Assembled in China」と刻印されている。iPhone は中国で製造（組み立て）されているためである。しかしながら「Assembled in China」の隣にはしっかりと「Designed by Apple in California」とも印されている。つまり、モノづくりの本質は、製品をデザインする設計図をつくることであり、それは Apple が行っているといっているのだ。

さらに、そのつくったモノがどのように使われ、その結果、何を顧客に提供できるのかも重要だ。製品をもち、使うことによって得られる快感の大きさが、その製品の価値を決定する。

我々、産業技術総合研究所ナノチューブ実用化研究センター CNT 評価チームではナノ炭素材料の実用化に際し、その設計情報を得るために必要な種々の評価手法の開発を行っている。カーボンナノチューブ (CNT) やグラフェンに代表されるナノ炭素材料は、銅より大きな熱伝導率や、鋼より強い機械的強度、著しく高い電子移動度など、従来の材料に置き換わるポテンシャルを有するため、世界中で精力的に研究開発が行われている。多くの場合、CNT やグラフェンがそのままのかたちで商品化されることはなく、何らかの加工が行われる。例えば、複合材を作製するために、CNT を溶媒へ分散する場合があるが、溶媒中に分散した CNT がどのような状態になっているかを把握することは非常に難しい。どの CNT 分散液も真っ黒な液体であり、最適な CNT 分散液の作製は各研究者・技術者の長年の経験と勘にゆだねられ、最終製品の物性を測定して初めてその優劣が判断されている。このような状況はナノ炭素材料について共通の課題となっている。これではナノ炭素材料を用いた材料開発プロセスは、まさに「匠の技」となってしまう、その根底に存在する物理法則や物性発現メカニズムが置き去りにされ、どこまで望む特性に近づけられるかの判断や、品質のばらつきを抑えることができない。その結果、全く同じ種類の CNT を全く同量用いても、分散方法の違いによってその導電率が大きく異なるといった類の問題が生じている。

そのため、我々はこれまでブラックボックスであったナノ炭素材料の状態や品質を見える化し、設計情報を得るための評価法開発を行ってきた。例えば、時間及び労力のかかる方法しか存在しなかった CNT 長さ計測について、遠赤外波長領域に観測される光吸収のピーク位置から CNT 長さを見積もることができることを示した¹⁾。そして、見積もられた CNT 長さは、CNT 糸の物性、特に導電率との相関が高いことを見出している²⁾。

また、分散液中の CNT 分散体サイズについて評価したい場合には、遠心沈降法が有効であることを見出している。分散液中の CNT サイズ分布は非常に広いので、動的光散乱法やレーザー散乱法などの手法では、その全体をうまくとらえることができない。ラインスタートによる遠心

沈降法を用いることで、最初にサイズによる分級を行い、その後にサイズ分級された分散体を光散乱などで検出し、そのサイズ分布を再構成する。CNTのようなサイズ分布幅の広い試料を扱う場合には、このような分級と検出を組み合わせる必要がある。

さらに、複合体中のCNT分散状態を可視化する方法の開発にも取り組んでいる。すなわち、CNT複合材へ電流を流し、そこからのジュール熱を顕微サーマルスコープで観察することで、複合材料中のCNTネットワーク構造を、実空間・非破壊で観測する手法である。通常、発生したジュール熱は、CNTネットワーク構造だけでなく、母材や周囲の電流経路外のCNTへ散逸し、背景の熱として蓄積されるため、微細なCNTネットワーク構造を観測することは困難である。そこで、電圧を周期的に印加し、観測した発熱画像を印加周波数でロックイン処理することにより、CNTネットワークが発するジュール熱成分のみを抜き出すことに成功した³⁾。これにより、数分から10分程度の短時間でCNTネットワーク上の電流経路を数 μm の分解能で実空間観測することを可能とした。また、同手法によってグラフェン上の構造欠陥を大面積かつ短時間で評価できることも分かってきた⁴⁾。

民間企業などとの共同研究においては、上記の比較的オリジナルな評価手法に加え、ナノ炭素評価にとって一般的な顕微鏡観測やラマン分光法などの手法も駆使し、材料物性と構造との相関を調べることによって、総合的な評価を行っている。なぜならば、顧客にとって大事なものは、測定データではなく、彼らの知りたいことが分かったかどうかだからだ。計測し、データを取っただけで満足するのではなく、そこから分析、評価へとつなげることで、知識を生み出す。この、これからのモノづくりに欠かせない重要な部分を私たちは担うことができる。

文 献

- 1) T. Morimoto, S.-K. Joung, T. Saito, D. N. Futaba, K. Hata, T. Okazaki: *ACS Nano*, **8**, 9897 (2014) .
- 2) X. Wu, T. Morimoto, K. Mukai, K. Asaka, T. Okazaki: *J. Phys. Chem. C*, **120**, 20419 (2016) .
- 3) T. Morimoto, S. Ata, T. Yamada, T. Okazaki: arXiv:1811.10910 [cond-mat.mtrl-sci] (27 November 2018) .
- 4) H. Nakajima, T. Morimoto, Y. Okigawa, T. Yamada, Y. Ikuta, K. Kawahara, H. Ago, T. Okazaki: *Sci. Adv.*, **5**, eaau3407 (2019) .

略 歴 1994年 京都大学 理学部 卒業
1999年 京都大学 大学院理学研究科 博士後期課程化学専攻 単位取得退学
1999年 博士 (理学) (京都大学)
1998年~1999年 日本学術振興会特別研究員 (DC2)
1999年~2004年 名古屋大学大学院理学研究科 (化学系) 助手
2004年~2008年 産業技術総合研究所ナノカーボン研究センター 主任研究員
2008年~2010年 同ナノチューブ応用研究センター 主任研究員
2010年~2015年 同ナノチューブ応用研究センター 研究チーム長
2015年~現在 同ナノチューブ実用化研究センター 副研究センター長 (兼) 研究チーム長
2007年~2011年 (独) 科学技術振興機構 さきかけ研究員
2008年~現在 筑波大学大学院数理物質科学研究科化学専攻 (連携大学院) 准教授
2017年~現在 千葉大学大学院医学研究院 客員教授

専門分野 ナノ炭素科学

受賞歴 2018年度 産総研理事長賞

