

ナノカーボン研究の進展



若 者

井ノ上 泰 輝*

Development of nanocarbon research

Key Words : Nanocarbon, Nanomaterial

はじめに

筆者は、工学研究科・物理学系専攻・応用物理学コース・ナノマテリアル領域（小林研究室）にて助教を務めており、2020年に着任してから2年ほどが経とうとしています。研究テーマとしては、カーボン系を中心とするナノ材料の化学気相成長、物性計測、デバイス応用に取り組んでいます。

今回は、この「生産と技術」誌における「若者」の執筆についてお声掛けいただきました。内容は自由ということで、文章の種類としてはエッセイに相当すると思われます。思い返せば、このようなエッセイ・作文には子どものころから幾らかの苦手意識があります。小学生のとき、夏休みの読書感想文や冬休みの新年の誓いという作文の宿題には、毎年悪戦苦闘してきました。逆に、エッセイを書くという機会はそれ以降ほとんどなかったように思います。現在では職業柄、文章の執筆を日々多く行っています。論文、解説論文、授業の資料、研究費の中請書、報告書などの書き方については、書籍や研究活動等を通じて徐々に身に付けてきました。論文などの執筆については研究室の学生に指導する立場であります。一方で、エッセイの執筆については初心者ということになります。過去の「若者」の記事や、他の学会誌のコラムなどを読み返しましたが、工夫の凝らされた面白い内容が多くありました。さて何を書

いたものかと考えましたが、個人的な経験に基づく手頃なトピックは思いつきませんでした。そこで今回は、筆者が取り組んでいるナノカーボン材料という研究分野の概要について、私見を交えながらご紹介することにいたします。雑文となりますことご容赦いただきたく思います。

ナノカーボン研究の進展

ナノカーボンとは、炭素原子から構成されるナノメートルスケールの材料の総称です。炭素原子同士の強固な sp^2 結合を基本とした、フラーレン、カーボンナノチューブ (CNT)、グラフェンが主要なナノカーボンとして知られています。フラーレンは、サッカーボールの形の C_{60} に代表される、ボール状の物質です。CNTは直径1 nmから数 nmの中空の筒状の物質です。グラフェンはグラファイトの1層に対応するシート状の物質です。フラーレン、CNT、グラフェンは、それぞれ0次元、1次元、2次元的な構造とみなすことができるので、低次元ナノ材料にも分類されます。

フラーレンの発見はスモーリー先生(ライス大学)らによって1985年に報告されました。彼らは1996年にノーベル化学賞を受賞しています。アーク放電法などによりある程度の量産が早期に確立し、フラーレンおよびその誘導体は有機太陽電池などに応用されています。

CNTは、飯島澄男先生 (NEC) により日本で発見されました。1991年の多層CNT、1993年の単層CNT発見の論文について、筆者は研究を開始したB4からM1ごろに読んだはずですが、何年後に読み返して、改めて感銘を受けました。透過型電子顕微鏡によるCNTのらせん状の原子構造の特定に加えて、成長機構に関する鋭い考察が当初の論文に含まれています。フラーレンやCNTの発見にはセ



* Taiki INOUE

1986年7月生まれ
東京大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 (2014年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 物理学系専攻・応用物理学コース ナノマテリアル領域 (小林研究室) 助教 博士(工学)
専門/ナノ材料
TEL : 06-6879-4684
E-mail : inoue.taiki@ap.eng.osaka-u.ac.jp

レンディピティ（予期せぬ発見）という言葉が用いられることがあります。思いもよらぬものを見つけ、それに気づくためには、高い観察技術と優れた洞察が必要なのだということを思い知らされます。

CNTは、筒を構成する炭素原子の並び方がわずかに異なるだけで、その電子状態が変わります。この点が面白さであり難しさでもあります。電子・光学デバイスへの応用に向けては、CNTの構造制御の実現が大きな課題となります。CNTの合成では化学気相成長法が主要な方法となっています。この方法では、800℃から1000℃程度の高温環境において、成長核となる金属ナノ粒子などに炭素源分子を供給します。金属ナノ粒子中に溶解した炭素原子が析出することで、種から伸びるようにCNTが成長していきます。合成時におけるCNTの構造制御と合成量の確保の両立は未だ実現していません。チューブ端部の原子構造に依存した熱力学的な安定性と動力学的な成長速度の2点について、実験・理論の両面から構造制御合成の研究が進んでいます。一方で、合成後のCNTから半導体型CNTなど特定の構造を溶液プロセスにより分離する技術は、かなり確立されてきています。

CNTは、電気・熱伝導率や機械強度が高く、構造に依存してバンドギャップを持つなど、様々な特長を有することから、薄膜などのバルク体として、あるいは孤立したチューブとして、多様な応用が期待されています。バッテリー電極や透明導電膜などとしてのCNTの産業化は既に実現しています。CNTを半導体材料として電界効果トランジスタなどに実用化するためには、更なる構造制御やチューブ配列構造の制御が求められています。

グラフェンについては、ガイム先生とノボセロフ先生（マンチェスター大学）が、2004年に最初の論文を報告し、わずか6年後の2010年にノーベル物理学賞が彼らに授与されています。このグラフェンの作製方法は、セロハンテープを用いて黒鉛を剥離するという方法です。非常にローテクではありますが、物性関係の研究などにおいて、最も高い結晶性のグラフェンは現在でもこの方法により作られています。一方で、2009年に化学気相成長法によるグラフェンの作製が報告され、グラフェンの工業応用に向けて研究が進められています。単層グラフェンはシンプルで一意的な構造ですが、グラフェンを2

枚重ねると、積層角度をわずかに変えることで異なる周期構造を持つ結晶を作ることができ、これに由来する物性の変化が注目されています。

また、グラフェンから派生して、炭素以外の元素から成る層状物質（あるいは原子層物質、2次元物質）と呼ばれるナノ材料の一群も注目を集めています。窒素原子とホウ素原子から成る六方晶窒化ホウ素は、原子レベルで平坦な絶縁体として利用されています。モリブデン原子と硫黄原子から成る二硫化モリブデンに代表されるような、遷移金属ダイカルコゲナイドと呼ばれる層状物質は、適切な大きさのバンドギャップを持つことから電子・光デバイスへの応用が期待されています。さらに、これらの複数の層状物質を組み合わせたヘテロ構造の研究が2013年ごろから盛んになっています。

国内におけるナノカーボン関連の学会

ナノカーボン研究に関係する国内の学会の中で筆者が良く知るものとしては、応用物理学会¹⁾とフラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会²⁾（以下、FNTG学会）があります。これらについて簡単に紹介します。

応用物理学会は、ご存知の方も多いことでしょうが、応用物理に関する幅広い学問分野を取り扱う、国内で有数の大規模な学会です。学術講演会が毎年2回開催されています。応用物理学会の中にはいくつかの大分類が存在しますが、大分類17の名称がナノカーボンです。17番は現在の大分類の中で最も大きい番号であり、ナノカーボンが最も新しく作られた大分類であることを意味します。もちろん、各々の大分類の中で新たな研究分野が生まれていると思いますが、独立した大分類として一定の規模まで発展した分野としては、ナノカーボンが最新ということになります。現在の大分類17における中分類は、17.1 CNTとその他、17.2 グラフェン、17.3 層状物質の3つに分かれています。グラフェンも層状物質の一つではありますが、17.3はグラフェン以外の層状物質ということになります。中分類の番号が大きいほど新しく作られたものであり、最近ではこの番号順に発表件数が多い傾向にあります。

もう一つのFNTG学会は、応用物理学会と比べれば規模は小さく、より専門的な学会になります。物理、化学、生物など、応用物理学会以上に様々な

バックグラウンドの研究者が集まるところが特徴です。学会名は、フラーレン研究会から始まり、フラーレン・ナノチューブ学会の時代を経て、現在のFNTG学会へと変更されてきており、対象とする物質が広がってきました。年に2回のシンポジウムが開催されています。各回3日間のシンポジウムの中で、ポスターと口頭を含めて150件から200件程度の発表が行われます。

おわりに

本稿では、ナノカーボンの研究の進展について紹介しました。筆者が学部生のときにCNTの研究を始めてから14年ほどが経ちましたが、研究分野の潮流には予想もしていなかった変化があることを再確認しました。ナノカーボンと題しておきながら、

カーボン以外のナノ材料の研究が増えていることも面白い点だと考えています。また、CNTやグラフェンと一言で言いましても、10年前と比べてより一様な構造や、より複雑な構造を制御して作れるようになってきています。ナノカーボンについて新たにご興味をお持ちになりましたら、上述の学会に参加する、私や他のナノカーボン研究者に連絡するなど、行っていただければと思います。

最後に、本原稿の執筆の機会を下さいました、大阪大学大学院情報科学研究科の森田浩先生、および「生産と技術」の関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) <https://www.jsap.or.jp/>
- 2) <https://fntg.jp/>

