

## グラフェン研究の進展と今後の展望 -ノーベル物理学賞受賞から 10 年-

世話人：守谷 頼（東京大学生産技術研究所）

グラフェンは、六角形格子構造を持つ厚さ 1 原子層の炭素原子のシート状物質である。テープを使ってグラフェイト結晶から劈開されたグラフェンの物性が 2005 年に報告され、突然物性科学の分野で有名になった。その後グラフェン研究者の数は爆発的に増え、2010 年にはノーベル物理学賞の対象に選ばれた。ノーベル賞から 10 年という節目の年に、本シンポジウムでは、過去から現在までのグラフェンの基礎および応用に関する研究を俯瞰し、今後のグラフェン研究の展望について議論を交わすことを目的として開催された。大学、企業それぞれの立場の研究者から合計 8 件の招待講演と 2 件の一般講演が行われた。招待講演の概要は以下である。

最初に、安藤 恒也先生（東京工業大学、豊田理研）より「グラフェンの物理的興味」という題目でご講演をいただいた。グラフェン発見以前から現在に至るまでのグラフェンの物性理論の流れと、さらに現在取り組んでいるグラフェンの磁気抵抗効果の理論的解明に関する成果をご紹介いただいた。グラフェンが有名になる以前からグラフェンの理論研究をされていた安藤先生の講演は迫力に満ち、他の講演者や聴衆にとって良い刺激を与えた。

越野 幹人先生(大阪大学)からは単層や二層のグラフェンを 2 つ重ね層間の角度をずらすことにより形成されるツイスト二層グラフェンに関する理論的な展開についてご紹介いただいた。ツイスト角度と材料の組み合わせを変えることで、材料の特性が大きく異なるという「ツイストロニクス」の展望について説明いただき、多くの質問があった。

斎藤 優博士（UCSB）は海外でポスドクとして大活躍している日本人の若手研究者である。博士からはツイスト二層グラフェンの実験についての多くの成果についてご紹介いただき、ツイスト二層グラフェンがグラフェンとは全く異なる大きな電子相関をもつ材料である実験結果や、その超伝導の起源につながる成果について紹介があった。質疑応答の際には博士が示した先端の実験結果は、多くの試料作製とその評価という努力の上に成り立っているということが語られ、日本の若手研究者にとって示唆深いものとなった。

吾郷 浩樹先生（九州大学）からは CVD 法を用いた基板へのグラフェン、ツイスト二層グラフェン、窒化ホウ素(h-BN)の直接合成方法の展開についてのご講演をいただいた。大面積の多層 h-BN の合成やインターカーレート法を用いたツイスト二層グラフェンの物性制御など多岐に渡るテーマについてご報告をいただいた。CVD 法のもつ可能性を常に広げ続け新しい合成技術を開拓する先生らしい素晴らしいご講演であった。

乗松 航先生（名古屋大学）からは SiC 基板上に熱分解法により合成される大面積グラフェンの進展についてご講演いただいた。歴史的な流れを踏まえつつ、いかにして大面積かつ高品質なグラフェンが作られるようになったか。さらにそれを用いた電気標準素子という応用事例への展開についてわかりやすくご説明いただいた。

長汐 晃輔先生（東京大学）からはグラフェンや遷移金属ダイカルコゲナイドを最先端のトランジスタチャンネル材料に応用するための課題などについてご報告いただいた。特にチャンネルとゲート絶縁膜の界面に存在する界面準位の低減という実用に向けての大きな課題を、実験データおよび有機半導体との比較により明示され多くの質問があった。

館野 泰範様（住友電工）からは SiC 上のグラフェンを高周波トランジスタとして使用することを目指した研究の進展についてご紹介いただいた。企業の研究者より、グラフェンが既存の半導体材料を超える特性をもつ可能性があり、テラヘルツの波長で動作する高周波トランジスタとして応用可能性があるという話は、分野の研究者を勇気づける発表であったと感じた。

佐藤 信太郎様（富士通）は初期の頃よりグラフェン、カーボンナノチューブの実用研究を行ってきた研究者である。その佐藤様よりこれまでのグラフェンの実用に向けた研究を俯瞰する講演をいただき、さらに最新のカーボンナノチューブをもちいた放熱素子の成果をご紹介いただいた。一次元のナノチューブと二次元のグラフェンの両方を視野に入れた研究のスタイルは、両分野の協力・融合といった広い視点が必要であるというよい例となっていたと感じた。

一般講演においては、守谷（本シンポジウム世話人、東京大学）と Shengnan Wang 博士 (NTT Basic Research Labs) から行われた。特に Shengnan Wang 博士は、CVD 気相合成とエピタキシャルインターカーレーション法を用いて、今まで困難であった h-BN/グラフェンヘテロ構造を基板上に直接作製するという研究に成功しており、今後の展開が非常に期待される成果であった。

2010 年にノーベル賞が出た頃、グラフェンは夢の材料とも呼ばれ、何でもできる材料だと紹介されることもあった。その後、それぞれの領域でどのような進展があつて何がわかったのか、何に使える何に使えないのか、その全体像が、シンポジウムを通して明瞭になった。2010 年代の前半は、それぞれの領域での基礎的な理解が次々に深まっていくような時期であった一方で、分野によっては応用に向けた壁が非常に高いこともわかってきた。2010 年代後半には、研究のステージや研究者の世代も少しずつ変わり、他の 2 次元系への展開もあった。その結果、特にこの 3、4 年の間に、これまでなかったような新しいアイデアや現象がまた急激に出始めてきたように感じる。特に、ツイスト二層グラフェンの超伝導はその典型であるように思われる。ツイスト二層グラフェンの超伝導に匹敵する新しい発見や新しい物質が今後、日本から、できればこの応用物理学会から出てくる際のきっかけの一つになれば、このシンポジウムも非常に価値があったのではないだろうか。

シンポジウムの講演および議論を通して明らかになったグラフェン研究の今後の課題は、明確な応用事例とその実現に向けた展望が現在分野にて不足しているという点であった。グラフェンは、発見初期の頃より基礎物性と応用両方に目新しさと多くの可能性があったことが、分野の展望に寄与していたことは間違いないと思われる。その後現在に至るまでに、物性では更なる発見が多かったが、一方で応用の可能性は限定的になりつつある。今後の課題としては新しい物性の発見、例えば現在注目を集めているツイストロニクスからデバイス応用の明確な可能性を見出せるかどうかという部分にあるのではないかと感じた。

最後に、本シンポジウムでは最初から最後まで常に 200 人前後の聴講者がおり、質疑応答の時間も余すところなく活用される程多くの質問があった。このような実りの多いシンポジウムにさせていただいた講演者の皆様にこの場を借りて感謝したい。