

## 大分類 17 ナノカーボン・二次元材料 報告書

取りまとめ：乗松 航（早稲田大学）

大分類 17 ナノカーボン・二次元材料では、初日午前中に大分類全体でのポスターセッション、午後からは中分類ごとに口頭セッションがあった。17.3 層状物質の口頭講演が特に多かつたため、初日午後、2 日目終日、最終日の終日に渡り、参加者も多く終始活発な議論がなされた。17.1 カーボンナノチューブその他のナノカーボン材料は、初日午後、3 日目午前に口頭セッションがあった。17.2 グラフェンは初日午後、最終日午前中に口頭セッションがあった。ポスターセッションでは、過去 3 年で最も多い 80 件の発表があり、4 件がポスターアワードの候補としてノミネートされた。どのポスターも常に複数人で議論がなされ、レベルの高さを感じた。3 日目午後には関連シンポジウム「二次元物質量子エレクトロニクス」が開催された。大分類全体での口頭発表は合計 103 件であった。以下に、各中分類での口頭セッションについて報告する。

### 17.1 カーボンナノチューブ、他のナノカーボン材料

セッションの最初に、この春にキング・ファイサル賞を受賞された飯島澄男 終身教授（名城大）による「Carbon nanotube: Past, Present, Future」と題する招待講演が行われた。講演の前半には“by chance (偶然)”をキーワードに、CNT やフラーレンなど種々のナノ材料発見の経緯と講演者が当時行っていた TEM 観察結果との関係が紹介された。注意深く考えながら観察し、実験を行うことが大発見につながることが強調された。後半では現在ご自身が進めている、CNT に LED 光を照射することで音が生じる現象の発見とそのメカニズムの研究の紹介があった。これまで応用物理学会では話されていない内容も多く、たいへん興味深く含蓄に富んだ内容の講演であった。

引き続き行われた一般講演のセッションでは、CNT ポロメータの高感度化、レーザ照射による配向制御、合金触媒によるカイラリティ制御、横型熱電変換素子のメカニズム、CNT・フラーレン複合薄膜の電極触媒の評価など CNT の合成・応用に関する様々な研究発表がなされた。また、最後の講演では長鎖一次元状炭素鎖（カーボンチェーン）についても発表があった。成熟した分野と思われる CNT の分野であるが、新しいアイデアと幅広い応用分野から、まだまだ発展の余地があると感じた。

CNT 等の応用および成長技術に関するセッションでは、炭素含有分子を酸素還元触媒へ応用する研究や、CNT をトランジスタや熱界面材料へ応用する研究などが報告された。また、廃プラスチックを原料として CNT を合成し、さらに CNT ネットワークをリザバー計算素子に適用するという、廃材の高付加価値化を目指す意欲的な取り組みも紹介された。加えて、CNT の構造制御を念頭に、金属触媒を介した CNT のエッチング反応について、実験とシミュレーションを組み合わせた詳細なメカニズム解析が示された。総じて、講演者と聴講者の間で活発な質疑応答が行われ、意義深い議論の場となった。

デバイス応用セッションでは、春季学術講演会と比べて、カーボンナノチューブガスセンサ応用についての報告が目立ち、対象分子に対するセンサ感度向上のためのドーピング技術や成膜・製紙技術などが議論された。また、ナノチューブの表面洗浄や欠陥修復アニーリングに関する発表も

並び、目的とするデバイス特性を最大化するための様々な処理技術が発展していることが伺えた。

### 17.2 グラフェン

グラフェン成長技術のセッションでは、グラフェン/SiC 界面においてバルクでは不安定な構造を持つ2次元酸化鉄の形成、グラフェン形成に伴う基板表面ステップバンチングの抑制、ベイズ最適化を用いたグラフェン CVD 成長解析に関する発表があった。グラフェン成長に関する講演は、数は必ずしも多くはないが、インパクトの高い論文として出版された内容もあり、質が高い成果が多かった。

グラフェンの構造制御・基礎物性・デバイス応用のセッションでは、流動相界面やイオン透過などグラフェンの界面・非平衡状態に関する基礎評価から、プラズマや界面制御による構造・電子特性のチューニング、さらに光・赤外検出器応用まで幅広い研究成果が報告された。特に光検出器に関しては企業による3件の講演があり、メカニズムの理解とそれに基づく高感度化によって、実用化に向け進展していることが感じられた。基礎物性の解明とデバイス応用が並行して着実に進展していることが示された。

### 17.3 層状物質

遷移金属ダイカルコゲナイト(TMDC)などの成長技術のセッションでは、熱 CVD、MOCVD、スパッタ、MBE などの手法を用いた結晶性向上、層数制御、ドメインサイズの増加に関する取り組みが報告された。さらに、成長後の後処理による膜質の高品質化や機能性向上にも注目が集まつた。特に、硫黄欠損の修復方法に関する発表が多く、使用するガス種、処理温度、雰囲気などについて活発な議論が交わされた。また、MOCVD による MoS<sub>2</sub> 成膜のエピタキシャル成膜するメカニズムに関して活発な議論が行われた。構造評価や新機能発現に向けた発表では、特に異なる基板上に成長した TMDC の歪み効果をフォトルミネッセンスで検証した発表や、原子間力顕微鏡(AFM)のカンチレバーを原子層で覆った原子層探針によって結晶方位に伴う摩擦力の変化を測定する結晶方位分解摩擦力顕微鏡などの発表で積極的な質疑が行なわれて注目を集めていた。

基礎物性に関するセッションでは、TMDC を中心に層状物質薄膜の電子物性および光物性、原子層転写技術の発展やデバイス応用を見据えたドーピング技術など、実験および理論研究の20件の講演が発表された。講演では、機械的剥離法による原子層転写について使用する粘着テープを改良することにより、mm スケールの原子層材料の基板転写に関する報告が注目を集めた。TMDC に限定されず、ファンデルワールス強磁性体 Cr<sub>3</sub>Te<sub>4</sub> 薄膜といった層状物質薄膜を用いた電子および光デバイスへ向けた基礎物性の解明と要素技術の着実な進展が見られ、セッション全体を通して常に活発な議論が行われた。

デバイス応用に関するセッションでは、TMDC 材料のトランジスタ応用に向けた不純物ドーピング制御やコンタクト抵抗の低減に関する議論が中心となった。特にコンタクト抵抗の低減に関しては、プラズマ処理、有機分子処理、アニール条件の最適化、電極材料の選定など、さまざまな手法が試みられていた。また、高濃度ドーピングを施した TMDC を用いた負性微分抵抗素子に関する発表も2件あり、本分野への関心の高さが伺えた。その他、TMDC 材料のトランジスタ応用に向け

たコンタクト電極の作製、ゲート特性の向上、さらにガスセンシングや発光デバイスへの応用について主に議論された。特にゲート特性の向上に関しては、ゲート作製方法に関する講演が複数あり、活発な議論が交わされていたことから、トランジスタ応用への期待の大きさが伺えた。