

MERIT 長期海外派遣報告書

工学系研究科 物理工学専攻
樽茶・山本研究室
博士課程 3年
島崎佑也

MERIT 長期海外派遣プログラムにより、2015年2月より3ヶ月間アメリカ、マサチューセッツ州ケンブリッジに滞在し、ハーバード大学において研究を行った。ハーバード大はアメリカ最古の大学であり、数々の著名な学者、政治家、実業家を輩出し続けている世界有数の大学である。今回滞在を受け入れていただいた物理学科の Philip Kim 教授のグループは近年注目を集める新材料グラフェンの世界的権威であり、グラフェンにおける量子ホール効果の研究、h-BN 基板上の高移動度グラフェンデバイスの実現を始めとした革新的な研究を世界に先駆けて行っている。

研究室には世界中の、特にアジアからの留学生、研究員の方々が多く集まっており、お互いの文化の相違点を発見するのみではなく、共通の話題、共有する文化も



図 1. ハーバード大学

多くあり親交を深めることができた。別の研究室から来た研究員、留学生の方々は量子ドット、スピントロニクス、トランジスタデバイス、結晶成長、TEM 観察など多彩なバックグラウンドを持ち、交流を通じて視野を広げることができた。

研究室では自由な雰囲気の中で活発に議論が行われており、世界に先駆けて研究成果を上げようと平日休日問わず早朝から深夜まで働いている人がいる様子に非常に刺激を受けた。一緒に研究をさせていただいた博士研究員の Ke Wang さんは幾つものプロジェクトを抱え、多忙ながらも夜遅くまで研究、議論に付き合ってくれた。

ハーバードには MIT を始めとする近隣の他大学も利用している巨大な共用のナノデバイス作成設備 (Center for Nanoscale Systems: CNS) があり、装置毎に専属のスタッフがいて相談のできる充実した環境であった。センターの装置の使用には講習を受ける必要があり、時間はかかったが多くのことを勉強させていただいた。

Philip Kim 教授のグループは結晶の機械的剥離により得られた原子層薄膜の転写技術を発明し、グラフェンと良質な絶縁層である h-BN の積層構造を作成している。h-BN でグラフェンをピックアップすることで h-BN/グラフェン/h-BN の積層構造を作成した後に、エッジから 1 次元的にコンタ



図 2. 研究室及び CNS のある LISE 棟

クトを取る技術を確立している。これはプロセスの過程でグラフェンが有機分子により汚染されることがない画期的な手法であり、10 μm を超える平均自由行程を持つ高移動度グラフェンデバイスが実現されている。

私自身は博士課程を通じて二層グラフェンを研究してきており、面直電場で空間反転対称性を破った際にバレーホール効果と呼ばれる新しい現象が出現することをこれまでに観測してきた。バレーホール効果により誘起されるバレー流の緩和長の評価などのさらなる調査のために解決すべき課題として、h-BN 上のデバイスの歩留まりの問題があった。私自身も転写技術を利用して h-BN 上にデバイスを作成してきたが、リソグラフィの際にレジストにより汚染された試料をクリーニングするために原子間力顕微鏡を用いており、歩留まりを下げる要因となっていた。Philip Kim 教授のグループで実現されたこのエッジコンタクト技術を用いることで、試料を汚染せずプロセスができるためクリーニングの必要がなく、高い歩留まりで試料作成が可能となる。

今回の滞在においてはエッジコンタクト技術を勉強させていただくことを第一の目標とし、同時に発展的な課題として二層グラフェンにおける局所的なバンドギャップの変調を目指してデバイス作成技術の開発に取り組んだ。二層グラフェンは面直電場によりバンドギャップを開くことが広く知られている。従って試料内で局所的に面直電場の大きさを制御できれば、バンドギャップの大きさを変調できる。バンドギャップの局所変調により、半導体二次元電子系で実現されてきたゲート電極による閉じこめ構造の作成、バレー流の緩和の抑制、トポロジカルな境界チャネルなど興味深い研究の派生が期待される。

キャリア密度を保ったまま面直電場を印加するにはデバイスの上下にゲートが必要となる。ドーパされた Si 基板を大域的バックゲートとして利用し、SiO₂ 絶縁層を介して基板上に nm オーダーの厚さの均一な局所的バックゲートを実現することに成功した。その上にピックアップにより作成した h-BN/二層グラフェン/h-BN の積層構造を転写し、エッジでコンタクトをとることに成功した。局所的バックゲートに局所的トップゲートを正しくアライメントする必要があり、テストの結果では電子線リソグ

ラフィーにより十分な合わせ精度を実現できた。一方で h-BN 上では絶縁性により、電子線リソグラフィー中に帯電効果に強く影響されることがわかった。帯電防止剤として導電性ポリマーを利用することで影響を抑制できたものの、さらなる改善が望まれる。局所的トップゲートを配置する前に ALD（原子層堆積法）を用いて h-BN 上に絶縁層を成長させるプロセスの最適化が間に合わずに、あと一歩というところで滞在期間中には最終的なデバイスの完成までには至らなかったが、今後とも共同研究を継続したい。

科学に国境はなく、同じように日夜努力し、同じように問題に直面し、同じように悩みを抱え、予想に反して多くの共通点を見出すことができた。それでも楽しそうにこんな面白いアイデアを思いついたんだ、世界に先駆けてこれを実現してやる、と夢を語り合うメンバーを見て、彼らの強さに励まされた。世界に同世代の友人ができ、彼らが夢を持って努力している姿を想像する度に奮起させられるだろう。彼らと一緒に研究ができたことは私の一生の財産になると思う。

謝辞

海外派遣をサポートしていただいた MERIT プログラム、MERIT 事務局の方々、受け入れ先を紹介して下さった樽茶先生、山本先生、貴重な機会を提供して下さいました Philip Kim 先生、一緒に研究をさせていただいた博士研究員の Ke Wang さん、大学院生の Xiaomeng Liu さん、Philip Kim 研究室のメンバーの方々には心よりお礼申し上げます。