

IX-5. 低温物性グループ

教授	大塚洋一
准教授	神田晶申
助教	森下将史
研究員	友利ひかり (科学技術振興機構さがけ専任研究者)、
大学院生	青木 仁、伊藤 優、田中宏和、平出璃音可 (数理物質科学研究科物理学専攻 修士課程2年)
	青沼 快、柴田倭宏、鎌水勝秀 (同修士課程1年)
卒業研究	園田大樹、樋口翔馬、堀江彩叶 (物理学類4年)

【1】 グラフェンのひずみ効果

炭素の2次元原子層膜であるグラフェンには、格子ひずみによって実効的なゲージ場（ベクトルポテンシャル・スカラーポテンシャル）が生じるという特殊な性質がある。その結果生じる擬似磁場は時間反転対称性を有する点で通常の磁場とは異なるので、格子ひずみによって様々な新規物理現象が起こることが期待される。また、格子ひずみをうまく利用するとグラフェンに伝導ギャップを誘起して電子デバイスに応用することも可能となる。我々は、ひずみに起因する物理現象の解明と電子デバイス応用のための基盤構築を目指して、以下の研究を行った。

(1) ラマン分光におけるグラフェンの格子ひずみと電荷ドーピングの影響の分離

グラフェンの格子ひずみ量を評価するための最も有効な方法はラマン分光である。ラマンスペクトルに現れるGバンド、2Dバンドのピーク波数はひずみによって変化する。ただし、G、2Dバンドのピークシフトは電荷ドーピングによっても引き起こされるので、ひずみ量を正確に評価するためには、両者の影響を分離することが必要となる。2013年に発表された先行論文では、G、2Dバンドのピークシフト量の比が、格子ひずみと電荷ドーピングで異なることが報告されている。ただし、用いられている励起レーザー波長は我々の波長とは異なるため、先行研究の結果をそのまま我々の実験に適用できるとは限らない。そこで、我々のラマン分光装置を用いて同様の実験を行い、1) ひずみ、電荷ドーピングが無い場合のG、2Dバンドのピーク波数、2) 格子ひずみによるG、2Dバンドのピークシフト量の比、を導出した。これにより、我々の装置を用いて、格子ひずみ量を正確に評価することが可能となった。

(2) グラフェンにおける局所1軸ひずみによる伝導ギャップの観測

グラフェンに局所的に1軸ひずみを導入すると、グラフェンに垂直方向に擬似磁場が発生し、伝導電子はサイクロトロン運動をするので、低キャリア密度領域で伝導ギャップが生じる。ひずみによる伝導ギャップ生成は、グラフェンの電子デバイス応用のためには重要であるが、ひずみの制御が困難であるので、これまで観測されたことがなかった。我々は、4枚の六方晶窒化ボロン(hBN)薄膜(うち2枚は微細加工済み)とグラフェンの積層構造(図1)を作ることによってグラフェンに1軸ひずみを導入し、その電気伝導を測定した。ひずみの導入はラマン分光によって確認

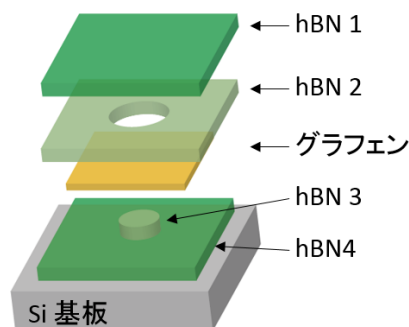


図1：グラフェンへの局所ひずみの導入のための試料構造。

した。ひずみを含む電流経路と含まない電流経路の電気伝導を比較すると、後者では、金属的な電気伝導が見られたのに対し、前者では、熱活性化型の温度依存性をもつ半導体的な電気伝導が観測された。ギャップの値 (3.2 meV) はひずみ量から求めた値とコンシステントであることから、局所1軸ひずみに起因する伝導ギャップをはじめて観測できたと考えられる。本研究で用いたhBN膜は、谷口尚博士、渡邊賢司博士 (NIMS) から提供されたものである。

(3) 1軸ひずみ周期構造によるグラフェンの伝導ギャップの観測

グラフェンに周期的なひずみ (ひずみ超格子) を導入するとバンドギャップが生じることが理論予測されている。これまでに、周期凹凸構造のある基板に載せたグラフェンに対する局所トンネル分光でバンドギャップを観測したとの報告はあるが、電界効果トランジスタ構造において、ゲート挿引によってバンドギャップを確認するのは困難であるとされてきた。これは、電極形成プロセスでひずみが緩和されるためである。我々は、試料作製プロセスを工夫し、周期1軸ひずみのあるグラフェンの電界効果トランジスタ構造を作製することに成功した。ひずみの導入はラマン分光によって確認した。ゲート挿引における最小コンダクタンスの温度依存性では熱活性化型の振る舞いが観測され、低温の電流電圧特性 (図2) では原点周辺で高抵抗領域が現れた。それぞれから見積もった伝導ギャップの値はほぼ一致し、約2 meVであった。このように、周期1軸ひずみによる伝導ギャップの観測にはじめて成功した。今後はひずみの周期や大きさを変化させることによって、伝導ギャップの増大を図りたい。

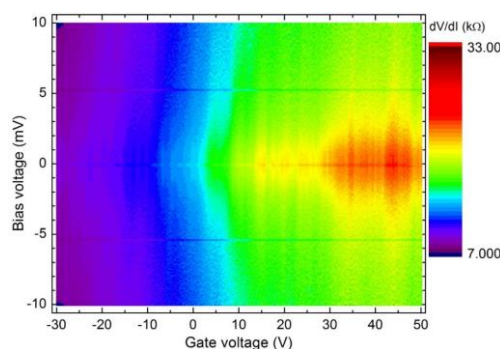


図2: 微分抵抗のゲート電圧、バイアス電圧依存性。

(4) チャネル幅を変化させた架橋グラフェンFETの形状最適化

グラフェンにおけるひずみ誘起局所磁場の大きさは、ひずみの空間変化量に依存する。ひずみの空間変化を集中化させるためには、幅が非一様なグラフェンに張力を加えることが有効であると考え、様々な形状を持つグラフェンに張力を印加した場合のベクトルポテンシャルの空間分布を数値計算によって求め、最適形状を検討した。本研究は、林正彦教授 (秋田大学) との共同研究である。

(5) ナノプローバを利用したグラフェンへの局所ひずみの印加

グラフェンに局所ひずみを導入するために、幅の変化したグラフェンの架橋構造を作製し、産業技術総合研究所の多探針ナノプローバを用いてグラフェンに張力を印加することを試みた。絶縁体を全面に蒸着した探針を用いた場合には、宙に浮いたグラフェン領域を押すことができたがすぐにグラフェン膜が破れた。そこで、図3のように、探針の先端に棒状の金属を取り付けた。この場合には、広範囲で架橋部分を押すことができた。今後、電気伝導の同時計測を行いたいと考えている。

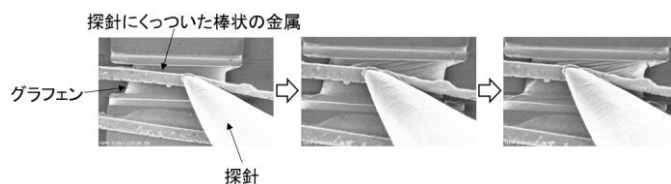


図3: 棒状の金属がついた探針によるひずみの導入。

(6) ひずみ量を変化させることのできる架橋グラフェン構造の作製

単一のグラフェン膜において様々な特性の格子ひずみ量依存性を調べるために、Si 基板のナノギャップ上にグラフェンを転写し、 piezoelectric アクチュエータを用いてギャップの大きさを変化させることを計画している。今年度は、牧英之准教授（慶応義塾大）の協力のもと、Si 基板のナノギャップ構造を作製し、ギャップの大きさを piezoelectric アクチュエータによって制御することに成功した（図4）。今後はギャップ上にグラフェンを転写し、ラマン分光、電気伝導測定を行う予定である。

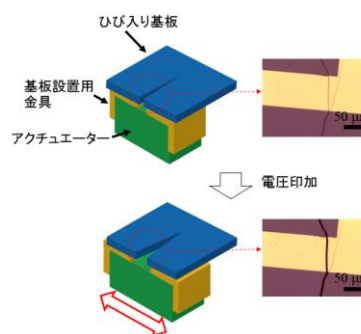


図4：Si 基板のギャップの制御。

(7) レジストナノ柱構造を用いたグラフェンへのひずみ導入

グラフェンと基板の間にレジストでできたナノ柱構造を挿入すると、柱からの距離が大きくなるほどラマン 2D バンドのシフト量が大きくなり、グラフェンのひずみが増大しているように見えることが昨年度までの研究でわかっている。これは、柱の直上でひずみが最大になるという直感的な予想や数値計算結果とは反するものである。また、2D バンドのシフトは基板からの電荷ドーピングに起因している可能性もある。そこで、グラフェンと基板の間に2本のナノ柱構造を挿入した場合の、ひずみの空間分布をラマン分光(Gバンドと2Dバンドのシフト量の比)によって調べた。その結果、1)ナノ柱構造から遠ざかるほどひずみ量が増大すること、2)ナノ柱構造の間隔が大きくなるほど、2本の柱の中間部のひずみ量が大きくなること、3)柱直上、柱周辺のひずみ量は柱の間隔には依存しないこと、が明らかになった。

【 2 】 グラフェンの超伝導近接効果

グラフェンと超伝導体の界面では、グラフェンのバンド構造を反映して、特殊なアンドレーエフ反射（鏡面アンドレーエフ反射）が起こることが理論予測されているが、現在まで実験における確認には至っていない。我々は、その原因が超伝導体からグラフェンへの局所電荷ドーピングであると考え、金属からグラフェンへの電荷ドーピングの詳細を検討するとともに、金属接続の影響を除去する方法を開発した。

(1) グラフェンへの金属電極接続の影響の解明とその除去手法の開発

グラフェンに金属を接続すると、両者の仕事関数の違いに起因して、金属からグラフェンへキャリア（電子あるいはホール）がドーピングされる。その結果、接合近傍のグラフェン領域のキャリア密度は接合から離れたグラフェン領域のキャリア密度とは異なる値をとり、ディラック点に対応するエネルギー E_D は空間的に変化することとなる。このことに起因して、短チャネル長のグラフェン試料の抵抗のゲート電圧依存性にはピークが2つあらわれることを昨年度までの研究で明らかにした。今年度はさまざまな電極金属について測定を行い、2つのディラック点のゲート電圧差と電極（接着層）の金属の仕事関数との関係を調べた。その結果（図5）、(1) グラフェンの実効的な仕事関数が4.93 eVであること、(2) 2つのディラック点のゲート電圧差は接続金属とグ

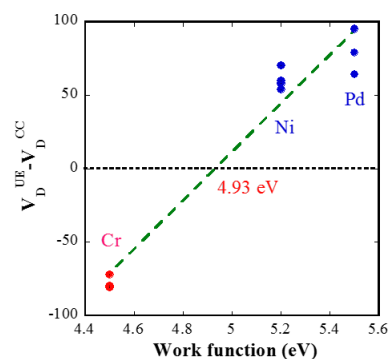


図5：接続金属の仕事関数と2つのディラック点のゲート電圧差の関係。

ラフェンの仕事関数差に比例し、ゲート絶縁膜として厚さ 300 nm の SiO_2 を用いた場合、接続金属とラフェンの仕事関数が 0.1 eV 異なると、2つのディラック点のゲート電圧の差は約 19V となることが明らかになった。

電極金属からの電荷ドーピングを軽減するためには、界面への多層ラフェンの挿入が有効であることを提案し、厚さ 6 nm の多層ラフェンの有効性を昨年度示した。今年は、3 nm の多層ラフェンについても検証し、電荷ドーピングが除去されていることを確認した。

(2) グラフェン/超伝導層状カルコゲナイド接合の作製

超伝導体/グラフェン接合で起こる特殊なアンドレーエフ反射を観測するためには、1) グラフェン上の荷電不純物密度の低減、2) 高い臨界温度を持つ超伝導体の使用、3) 超伝導体からの電荷ドーピングの軽減が必要である。このような接合を実現するためには、層状超伝導体が都合がよいと考え、界面に多層ラフェンを挿入した、グラフェン/セレン化ニオブウム (NbSe_2) 接合を乾式転写法とエッジコンタクト法を用いて作製した。ここで、 NbSe_2 は層状カルコゲナイド超伝導体のうちで最も臨界温度が高い。電気伝導測定の結果、接合界面の抵抗が高く、超伝導近接効果は観測されなかった。この原因は、大気暴露による NbSe_2 表面の劣化である可能性が高い。そこで現在、不活性気体中での試料を作製する準備を行っている。本研究は、上野啓司教授 (埼玉大)、谷口尚博士、渡邊賢司博士 (NIMS) との共同研究である。

【 3 】 SiC 上に形成した新型グラフェンナノリボン (GNR) の電気伝導

グラフェンにバンドギャップを導入するための有力な方法のひとつに、グラフェンの細線化 (ナノリボン化) がある。従来、GNR はグラフェンを切断することによって得られてきたが、エッジの原子配列の乱れによってキャリアが局在化して量子ドットが形成され、移動度が大幅に低減するという問題があった。これに対し、九州大の田中らによって微傾斜 SiC 上に形成された GNR では、エッジが連続的に絶縁体であるバッファ層につながるために、キャリアの局在が抑制される可能性がある。このことを検証するために、田中らの新型 GNR の電気伝導の測定を行った。微細加工には、筑波大学微細加工プラットフォームのマスクレス露光機を使用した。電気伝導測定の結果、一部の試料では、コンダクタンスの温度依存は 2 次元弱局在の振舞いを示し、量子ドットの形成を否定するものであった。これより、この新型 GNR では、従来の GNR の持つエッジ構造の乱れに関する欠点を克服できることが示唆された。本研究は、田中悟教授 (九州大)、小森文夫教授 (東京大)、岡田晋教授 (筑波大) との共同研究である。

【 4 】 表面修飾した CVD グラフェンの磁気抵抗効果

スパッタリングや化学反応、化学吸着、物理吸着などによるグラフェン結晶の改変や修飾はグラフェンの物性制御や新しい機能の付与のための有力な方法である。たとえば、グラフェンに蒸着された金属は電荷移動によってグラフェンのキャリア密度を変えると共に電子の散乱原因ともなる。第 1 原理計算によれば、グラフェンとの相互作用の弱い金や銀上ではグラフェンに特有な線形分散関係が保存されるのに対して、多くの遷移金属で化学吸着の結果分散関係にはギャップが生じるとされている。この場合キャリア散乱は通常のクーロンポテンシャルではなく、より近距離の不純物ポテンシャルが支配的となるであろう。このような散乱ポテンシャルの違いを調べるために、低温での磁気抵抗測定を行った。グラフェンは低温低磁場で弱局在効果による顕著な磁気抵抗を示し、その解析によって位相緩和時間や谷間散乱時間など電子の散乱に関する新たな情報が得られる。大きな波数変化を伴う谷間散乱は近距離ポテンシャルでは起きるもののクーロンポテンシャルでは起きにくい。

試料は CVD によって製作され Si 基板に転写されたグラフェンであり、これに極微量の Ni を真空

蒸着した。CVD グラフェンは移動度がやや小さいものの、大面積であり試料作製が容易であるとともに、コンダクタンス揺らぎ(UCF)の影響を受けないという利点がある。低温の磁気抵抗は弱磁場で負であり、約 1T で抵抗は極小となり、さらに高磁場では正の磁気抵抗となった。約 1T までの磁場領域の磁気抵抗は弱局在理論でフィッティング可能であり、それによって位相緩和時間と谷間散乱時間を決定できた。今後は希釈冷凍温度域での測定を行うと共に、様々な金属による表面修飾グラフェンにおける各緩和時間の相違について調べる。

【 5 】超伝導微粒子-グラフェン系における超伝導転移

むき出しの単原子層導体であり電界効果によって容易に伝導を制御することのできるグラフェンは 2 次元系研究に新しい手段を提供してくれる。CVD グラフェンにインジウムを約 10nm 蒸着し、その電気伝導を液体ヘリウム温度で測定した。低融点金属であるインジウムはグラフェン上で直径 50nm 程度の微粒子を形成するため、3.4K 以下では超伝導インジウム微粒子がグラフェンを介してつながった二次元ランダム超伝導ネットワークを形成する。図 6 はこの系の電気抵抗の温度変化であり、3.4K 付近での各粒子の揺らぎを伴う超伝導転移とさらに低温での Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 転移として理解することができる。ゲート電圧によるグラフェン抵抗の変化によって BKT 転移温度は変化する。さらにグラフェンに短時間酸素プラズマ処理を施し高抵抗化することによって超伝導・絶縁体転移も観測できた。

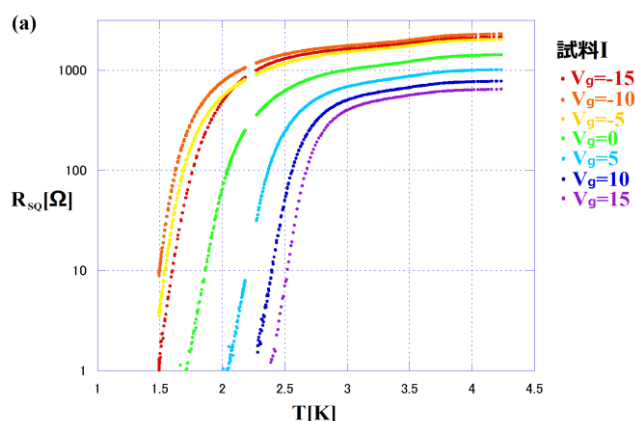


図 6 : インジウムを蒸着した CVD グラフェンの電気抵抗

【 6 】金属ナノコンタクトにおける熱現象

単原子ポイントコンタクトや単分子架橋系では加えた電圧が nm オーダーの接合両端に集中する中で伝導が生じており、エネルギー散逸は著しく不均一であり、容易に強い非平衡状態が生じると考えられる。このような系でのエネルギー散逸や熱伝導について調べるために機械破断法(MBJ) 試料に小型の抵抗温度計を取り付け、極低温で実験を行っている。

図 7 は作製した MBJ 試料の電子顕微鏡写真である。破断接合を形成するアルミニウム架橋細線の基部に小型の AuGe 抵抗温度計を取り付けることに成功した。希釈冷凍機で 50mK 以下まで冷却し、MBJ の破断・再結合を行い、様々な接合状態における MBJ の電流・電圧特性と二つの AuGe センサー抵抗の同時測定を行った。接合に流すバイアス電流を増やすと両端の温度計が示す温度は敏感に変化し、ジュール損に対する温度計温度の上昇の割合は約 50K/ μ W であった。これはこれまでに報告されているナノ接合における局所温度測定の結果に比べ 2 桁から 3 桁大きな値である。

Au のナノコンタクトにおいては、温度上昇が電流の向きに依存すること、つまりジュール損による発熱が電流の上流と下流で異なるとの実験報告があるが、Al-MBJ では温度上昇は電流の極性には

よらず対称であった。ただし少数ではあるが、低バイアスでは対称であるものも、バイアスを増すと非対称になるケース見られた。これがどのような場合に生じるかは今後確認を行いたい。

IV 特性に見られる Al 接合部の超伝導・常伝導転移による構造を本試料でも確認した、電子温度が T_c に達する時の格子温度の情報を得た。さらに二つの AuGe 抵抗の一方をヒーターとし、他方を温度計として使用することによって、ナノコンタクトの熱伝達の実験も行った。

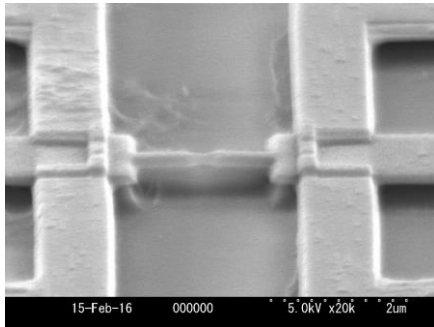


図 7 : AuGe 抵抗温度計付き Al-MBJ 試料の走査型電子顕微鏡写真

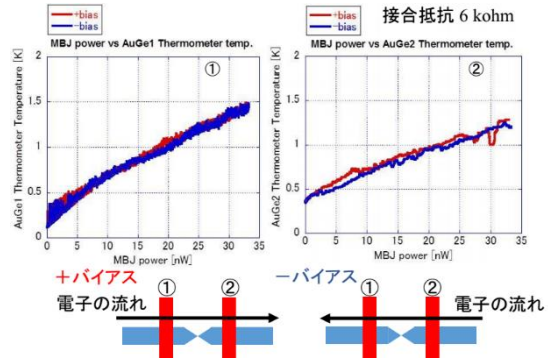


図 8 : 温度上昇のバイアス依存性

【 7 】 極低温磁化測定装置の開発

希釈冷凍温度域の汎用 SQUID 磁化測定装置の開発を始めた。市販の SQUID 磁化測定装置では到達できない 1K 以下の極低温領域での測定を行うことが目標である。技術的な課題は磁化の絶対値を知るために、試料を極低温のまま動かす事にある。使用の簡便性を保持しながらこれを実現するために、以前に開発したトップローディング式簡易希釈冷凍機をベースにした冷凍機を設計し、研究基盤総合センター工作部門に部品の製作を依頼した。

【 8 】 グラファイト上ヘリウム単原子層薄膜における 1 次元 Fermi 流体 と 2 次元 Dirac 粒子系 (森下)

原子レベルで平坦なグラファイト表面に吸着した単原子層ヘリウム薄膜は、理想的な 2 次元系を与える。この系ではヘリウムの高い量子性のために、他の吸着系には見られない特異な吸着構造や、それを反映した物性が期待できる。測定手段に乏しく、ヘリウム 3 (^3He) 薄膜に比べ情報が著しく不足していたヘリウム 4 (^4He) 薄膜について、少量の ^3He を加えて熱容量測定を行うことにより、この系の情報が得られるようになり、その中で特異な現象が観測されている。

単原子層ヘリウム薄膜は、大きな零点振動を反映し、低面密度領域では流体として振る舞う。ここから面密度を増していくと、ヘリウム原子間のハードコア斥力と、吸着ポテンシャルの凹凸との協力により、ヘリウム原子は局在し、ヘリウム薄膜はグラファイト基盤に整合な $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相に固化する。 ^3He 薄膜では、ここから面密度を増しても固体として振る舞うことが確認されており、 ^4He 薄膜も同様と考えられてきた。しかし、上記の ^4He に少量の ^3He を加えて行った熱容量測定は異なる結果を与えた。測定される熱容量は、 ^3He の運動を反映したものである。流体相では 2 次元 Fermi 流体の熱容量を与え、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相では ^3He が局在し、熱容量は消失する。ところが、さらに面密度を増すと再び熱容量が有限となり、 ^3He が運動していること、即ち、面密度の増大により ^4He 薄膜が融解していることを示唆する。しかし、この面密度領域のうち、比較的高面密度の領域で、熱容量は温度の自乗に比例しており、 ^4He 薄膜が一様に融解し、 ^3He 原子が 2 次元 Fermi 流体として振る舞っているとしたのでは、観測結果を説明できない。この面密度領域で ^4He 薄膜は、domain wall 構造と呼ばれる、 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 相のドメインの境界が規則的に配列する吸着構造を

とる。ドメイン境界では、ヘリウム原子は吸着ポテンシャルの極小からはずれた場所に吸着しており、ヘリウム原子を局在化させる働きは弱くなっており、この境界部分のみが融解している可能性が指摘できる。domain wall 構造には、境界が1次元的に配列する striped 構造と、蜂の巣状に配列する honeycomb 構造がある。 ^3He 原子はこの中を運動するため、striped 構造では1次元 Fermi 流体として、honeycomb 構造では2次元 Dirac 粒子系として振る舞うことが期待される。2次元 Dirac 粒子系の熱容量は温度の自乗に比例するため、観測された異常な温度依存性も説明される。

この現象について、さらなる測定データの収集とともに、上記モデルの正当性の検証を行っている。

domain wall 構造は、比較的low面密度領域で striped、高面密度領域で honeycomb となるので、熱容量の温度依存性が面密度の増大とともに線形から自乗に移行することは、上記モデルと符合する。また、温度に線形な熱容量の係数 γ_1 の面密度依存性も、1次元 Fermi 流体の熱容量と定量的に矛盾しないことも確認された。高温極限に目を転ずると、low面密度領域では、熱容量は $\frac{1}{2}N_3k_B$ (N_3 : ^3He の原子数) に漸近し、1次元系であることを強く示唆する。一方、高面密度領域では N_3k_B に漸近し、2次元系であることを示すが、2次元 Dirac 粒子系で期待される $2N_3k_B$ には漸近しない。これについては熱的 de Broglie 波長が、測定の高温極限では honeycomb 構造の周期長を下回り、Dirac 粒子系の性質を失っているものとして説明される。幾つかの面密度では、温度の上昇とともに一旦 N_3k_B を越える熱容量が現れたのち、 N_3k_B に漸近している。単純な2次元系ではこのようなオーバーシュートは説明できず、Dirac 粒子系形成の傍証となっている。

2次元 Dirac 粒子系では Fermi 面近傍で線形分散となっており、ここでは全ての粒子の速さは一定となる特徴がある。この系の熱容量の T^2 の係数は、この速さの自乗に反比例するが、粒子速度は系の状況に依存するため、測定された熱容量を2次元 Dirac 粒子系の熱容量と定量的に比較することはできない。逆に、測定された熱容量から見積もられる ^3He 原子の速さ v_3 を面密度の関数として図9に示す。8.4 nm^{-2} 近傍で最大値をとるが、この面密度は 4×4 という周期性をもつ honeycomb 構造の面密度に一致する。 4×4 構造は周期長が最も短く、結晶子の大きさが限られた基盤上で honeycomb 構造が非常によく定義される。また、面密度の増大とともに honeycomb 構造は2つの異なる周期長が混在しながら構造を変化させていくが、8.4 nm^{-2} では 4×4 の周期性のみとなる。即ち、ここでは規則正しい honeycomb 構造が良く定義されていることとなり、 v_3 が最大値をとる要因となっていると考えることができる。一方、この面密度近傍で v_3 は 160 m/s 程度の値をもつ。 ^3He 薄膜の非常に低面密度の領域で現れる流体相での Fermi 速度は、最大で 50 m/s 程度である。Fermi 分布している速度の最大値がこの値であるのに対して、Dirac 粒子系が実現しているとする、全ての ^3He 原子が非常に大きな速さで運動していることになり、特異な系となっている。また、データ数が少なく確定的ではないが、 ^3He の速度はこの値で頭打ちになっているようにも見える。 ^4He の超流動臨界速度がこの値を規定している可能性が考えられる。超流動臨界速度は従来、渦糸の生成・成長で規定され、数 10 cm/s 程度と3桁近く小さな値となっていたが、ここでは Landau 条件、即ち準粒子生成による臨界速度が初めて観測された可能性もある。

特異な現象が観測されているが、流動性についての動的応答測定等の直接的検証と、domain wall が流動性をもつ原因についての理論的検証が必要となっている。

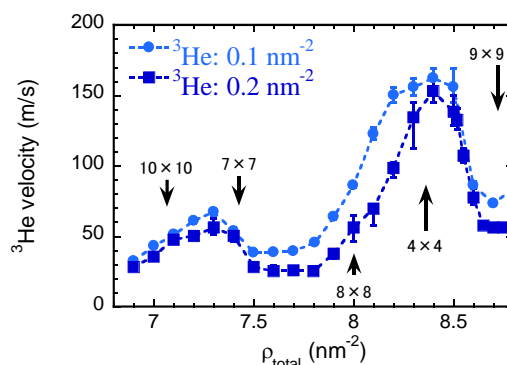


図9. ^4He 薄膜中で Dirac 粒子として振る舞う ^3He の速さの面密度変化。

<学位論文>

(修士論文)

- 伊藤 優：グラフェンの電気伝導に対する電極接続の影響の評価（数理物質科学研究科、2015年9月）
青木 仁：金属で表面修飾したグラフェンの電気伝導（数理物質科学研究科、2016年3月）
田中宏和：SiC ナノ構造上グラフェンナノリボンの電気伝導（数理物質科学研究科、2016年3月）
平出璃音可：グラフェンへの周期一軸ひずみの導入と電気伝導測定（数理物質科学研究科、2016年3月）

(卒業論文)

- 園田大樹：電極界面に多層グラフェンを挿入したグラフェン電界効果トランジスタ構造の作製と電気伝導評価（物理学類、2016年3月）
樋口翔馬：グラフェンの電気伝導における電極接続の影響（物理学類、2016年3月）
堀江彩叶：グラフェン上インジウム微粒子膜の超伝導転移（物理学類、2016年3月）

<論文>

1. S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, T. Ohira, L. Yoshikawa, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, "Circularly polarized near-field scanning optical microscope for investigations of edge states of a two-dimensional electron system", *Appl. Phys. A – Mater. Sci. & Proc.* **121**, 1341-1345 (2015).
2. S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, Y. Ootuka and S. Nomura, "Circularly Polarized Near-Field Optical Mapping of Spin-Resolved Quantum Hall Chiral Edge States", *Nano Lett.* **15**, 2417-2421 (2015).
3. M. Morishita: "Heat Capacity of Dilute ^3He - ^4He Monolayer Films", *J. Low Temp. Phys.* **183**, 245-250 (2016).

<著書>

1. 神田晶申：「超伝導層状カルコゲナイド／グラフェン接合」、『カルコゲナイド系層状物質の最新研究』（上野啓司、安藤淳、島田敏宏編）第6章、シーエムシー出版（印刷中）
2. A. Kanda, H. Tomori: "Experimental approaches to graphene electron transport for device applications", in "Physics and Chemistry of Graphene: Nanographene to Graphene, 2nd edition" (edited by T. Enoki, T. Ando), Pan Stanford Publishing, in press.

<講演>

国際会議

1. Kanda, K. Katakura, Y. Ito, Y. Ootuka, and H. Tomori, Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Characteristics and Its Reduction with Nano-carbon Interfacial Layer, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 仙台国際センター（宮城県仙台市）, July 27, 2015
2. R. Hiraide, H. Tomori, Y. Ootuka, and A. Kanda, Formation of Graphene with Controlled Uniaxial Local Strain and Its Electron Transport, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 仙台国際センター（宮城県仙台市）, July 30, 2015
3. H. Tanaka, K. Fukuma, K. Morita, S. Hayashi, T. Kajiwara, A. Visikovskiy, T. Iimori, K. Ienaga,

- K. Yaji, K. Nakatsuji, F. Komori, N. T. Cuong, S. Okada, S. Tanaka, and A. Kanda, Electron Transport in Graphene Nanoribbons Placed on a Corrugated SiC Surface, 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 仙台国際センター (宮城県仙台市) , July 30, 2015
4. S. Tanaka, K. Fukuma, K. Morita, S. Hayashi, T. Kajiwara, A. Visikovskiy, T. Iimori, K. Ienaga, K. Yaji, K. Nakatsuji, F. Komori, H. Tanaka, A. Kanda, N. T. Cuong, and S. Okada, Quasi-one-dimensional graphene nanostructure on corrugated SiC surfaces, 17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, 仙台国際センター (宮城県仙台市) , July 30, 2015
 5. A. Kanda, Y. Ito, K. Katakura, Y. Ootuka, Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Characteristics and Its Removal with Nano-carbon Interfacial Layer, 7th International Conference on Recent Progress in Graphene (and Two-dimensional Materials) Research, Lorne, Australia, Oct. 28, 2015
 6. H. Tomori, R. Hiraide, Y. Ootuka, K. Watanabe, H. Taniguchi and A. Kanda, Inducing Strain to Encapsulated Graphene, 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 富山国際会議場(富山県富山市) , Nov. 12, 2015
 7. Y. Ito, K. Katakura, H. Sonoda, S. Higuchi, Y. Ootuka, H. Tomori and A. Kanda, Effect of Metal Contact on Transport Properties of Graphene Field Effect Devices, 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 富山国際会議場(富山県富山市) , Nov. 13, 2015
 8. H. Tanaka, K. Fukuma, K. Morita, S. Hayashi, T. Kajiwara, A. Visikovskiy, S. Tanaka, A. Kanda Electron Transport in Densely-Packed Graphene Nanoribbons Formed on a Corrugated SiC Surface, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2015), Waikoloa, USA, Dec. 1, 2015
 9. K. Yarimizu, K. Katakura, Y. Ootuka, K. Watanabe, T. Taniguchi, K. Ueno, H. Tomori, A. Kanda, Encapsulated Graphene/Superconductor Junctions: Formation and Electron Transport, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2015), Waikoloa, USA, Dec. 1, 2015
 10. H. Tomori, R. Hiraide, Y. Ootuka, K. Watanabe, H. Taniguchi, A. Kanda, Inducing Strain to Encapsulated Graphene, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2015), Waikoloa, USA, Dec. 4, 2015
 11. A. Kanda, K. Katakura, Y. Ito, Y. Ootuka, H. Tomori, Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Properties and Its Reduction with Nano-carbon Interfacial Layer, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN 2015), Waikoloa, USA, Dec. 4, 2015
 12. A. Kanda, Toward observation of specular Andreev reflection in graphene, M. S. Dresselhaus 教授名誉博士号授与記念シンポジウム, 東北大学(宮城県仙台市) , Feb. 18, 2016
 13. H. Tomori, R. Hiraide, Y. Ootuka, K. Watanabe, T. Taniguchi, A. Kanda, Introducing lattice strain to graphene encapsulated in hBN, APS March Meeting 2016, Baltimore, USA, Mar. 17, 2016
 14. A. Kanda, Y. Ito, K. Katakura, T. Sonoda, S. Higuchi, H. Tomori, Y. Ootuka, Influence of Metal Contacts on Graphene Transport Characteristics and Its Removal with Nano-carbon Interfacial

Layer, APS March Meeting 2016, Baltimore, USA, Mar. 14, 2016

15. M. Morishita, "Fluidity of Domain Walls in Dilute ^3He - ^4He Mixture Films", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015) (Niagara Falls, August 13, 2015).
16. M. Morishita, "Heat Capacity of Dilute ^3He - ^4He Monolayer Films", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2015) (Niagara Falls, August 13, 2015).

国内会議

1. 神田晶申, 電子デバイス応用に向けたグラフェン研究の最近の進展, 平成 27 年度 TIMS 研究交流会, 筑波大学(茨城県つくば市), 2015 年 7 月 24 日
2. 田中悟、福間洗平、林真吾、梶原隆司、Visikovskiy Anton1、飯盛拓嗣、家永紘一郎、矢治光一郎、中辻寛、小森文夫、田中宏和、神田晶申、Cuong Nguyen Thanh、岡田晋, SiC ファセット上のグラフェン横方向超格子の形成と物性 (1), 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), 2015 年 9 月 14 日
3. 福間洗平、林真吾、梶原隆司、Visikovskiy Anton、田中悟、飯盛拓嗣、家永紘一郎、矢治光一郎、中辻寛、小森文夫、田中宏和、神田晶申、Cuong Nguyen Thanh、岡田晋, SiC ファセット上のグラフェン横方向超格子の形成と物性 (2), 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市), 2015 年 9 月 14 日
4. 田中宏和、福間洗平、森田康平、林真吾、梶原隆司、A. Visikovskiy, 田中悟、神田晶申, SiC 傾斜面に形成されたグラフェンナノリボンの電気伝導, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16 日
5. 平出璃音可, 友利ひかり, 大塚洋一, 神田晶申, レジストナノ構造への転写によってひずみを導入したグラフェンの電気伝導, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16 日
6. 伊藤優, 片倉健太, 大塚洋一, 友利ひかり, 神田晶申, グラフェンの電気伝導に対する電極接続の影響, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16 日
7. 友利ひかり, 平出璃音可, 大塚洋一, 林正彦, 吉岡英生, 渡辺賢司, 谷口尚, 神田晶申, BN 上グラフェンへの局所 1 軸ひずみ導入法の開発, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 16 日
8. 大塚洋一, 青木仁, CVD グラフェンにおける磁気抵抗効果: 表面修飾の影響, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 18 日
9. 柴田倭宏, 大塚洋一, 超伝導ナノコンタクトにおける局所温度計測 II, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 18 日
10. 吉川ルノ, 大平智也, 大塚洋一, 野村晋太郎, 液晶可変リターダを用いた近接場光プローブによる円偏光照射, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 18 日
11. 右近修治, 一宮彪彦, 井通暁, 江尻有郷, 大嶋孝吉, 大塚洋一, 川村康文, 岸澤眞一, 毛塚博史, 小牧研一郎, 近藤泰洋, 真梶克彦, 鈴木功, 瀬川勇三郎, 武士敬一, 遠山潤志, 長谷川修司, 林壮一, 深津晋, 松本益明, 松本悠, 味野道信, 物理チャレンジ 2015 報告: IV 第 2 チャレンジ実験問題, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市), 2015 年 9 月 19 日

12. 福間洗平、林真吾、梶原隆司、Visikovskiy Anton、飯盛拓嗣、家永紘一郎、矢治光一郎、中辻寛、小森文夫、田中宏和、神田晶申、田中悟、SiC フェアセット上サブ 2 次元グラフェンの構造制御、第 63 回応用物理学学会春季学術講演会、東京工業大学(東京都目黒区)、2016 年 3 月 22 日
13. 大塚洋一、青木仁、堀江彩叶、表面修飾した CVD グラフェンの電気伝導、日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日).
14. 青沼快、大塚洋一、希釈冷凍温度域磁化測定システムの開発、日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 19 日).
15. 武政健一、金信弘、武内勇司、木内健司、先崎蓮、森内航也、八木俊輔、大塚洋一、美馬覚、新井康夫、倉知郁生、羽澄昌史、石野宏和、吉田拓生、広瀬龍太、加藤幸弘、池田博一、和田武彦、長勢晃一、松浦周二、ニュートリノ崩壊光探索のための Hf-STJ の研究開発、本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 21 日).
16. 柴田倭宏、大塚洋一、超伝導ナノコンタクトにおける局所温度計測 III、本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日).
17. 森下将史、「グラファイト上ヘリウム薄膜における Dirac 粒子系」、素励起シンポジウム (東京大学, 2015 年 4 月 25 日).
18. 森下将史、「グラファイト上ヘリウム薄膜における 2 次元超流動の臨界速度」、物性研短期研究会「量子乱流と古典乱流の邂逅」(東京大学物性研究所, 2016 年 1 月 7 日).
19. 森下将史、「ヘリウム薄膜における 1 次元 Fermi 流体・Dirac 粒子系」、日本物理学会第 71 回年次大会 (東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日).

〈集中講義、他〉

1. 大塚洋一、固体物理学「電気伝導：ナノを中心として」 東邦大学理学研究科物理学専攻 2015 年 7 月.
2. 大塚洋一、磐城高校 SSH 体験実験 極低温の世界：気体の状態方程式、液体窒素の蒸気圧曲線と三重点 2015. 8. 7.
3. 大塚洋一、高校生のための体験学習 低温実験、筑波大学 2015. 8. 7.

〈外部資金〉

1. 神田晶申：科学研究費補助金 基盤研究 B 「歪み誘起ゲージ場を用いたグラフェンのエネルギーギャップの生成と制御」(H25～H27)、直接経費 300 万円
2. 神田晶申：科学研究費補助金 新学術領域研究 「単層／多層グラフェンにおける超伝導近接効果」(H26～H27)、直接経費 270 万円
3. 神田晶申：科学研究費補助金 新学術領域研究 「電荷／スピンハイブリッド量子科学の研究」(H27～H30)、直接経費 1,180 万円
4. 神田晶申：(共同研究受入) 戦略的創造研究推進事業さきがけ (科学技術振興機構) 「ひずみ誘起ゲージ場を用いた単原子層膜の伝導制御とエレクトロニクス応用」(友利ひかり) (H26～H30)、直接経費 1,765 万円