

トポロジーに基づく新たな物質は現在世界で激しい研究開発競争が行われており、トポロジカル絶縁体(TI)・超伝導体などの創製、またそれらを基盤としたマヨラナフェルミオンの探索とトポロジカル量子ビットへの応用も模索されている。その中で三次元 TI 物質はある程度多く創製されそれらの物性も研究されて来たが、低次元 TI の創製例は少ない。例えば二次元 TI は HgTe 系、InAs 系などの半導体二重量子井戸のみであった。これに対して原子 1 個 (あるいは数個) の薄さからなる原子層物質が低次元 TI になる可能性が以前から理論で指摘されていた。例えば Kane らは本来スピン軌道相互作用(SOI)を持たないグラフェンにおいて約 2K のトポロジカルギャップが開くことを古くから予言しており、重元素を修飾したグラフェンでは数多くの理論報告がなされ、僅か 1-2% のランダムな微粒子被覆率で 0.2eV を超える巨大 TI ギャップが安定して開くとさねカリフォルニア工科大学(CalTech)グループなどは報告している(図 1(a, b))[3]。しかしその信頼できる実験例はほぼ皆無であった。一方で昨年、原子層物質の一種である遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)系物質の WTe_2 において TI 相が発見されたという実験報告が STS・ARPES 観測などでスタンフォード大学などからなされ(図 1(c,d))、さらに今年になって 100K までその量子スピンホール効果が存在すると MIT グループが報告し、現在熱い注目を集めている(図 1(e))。

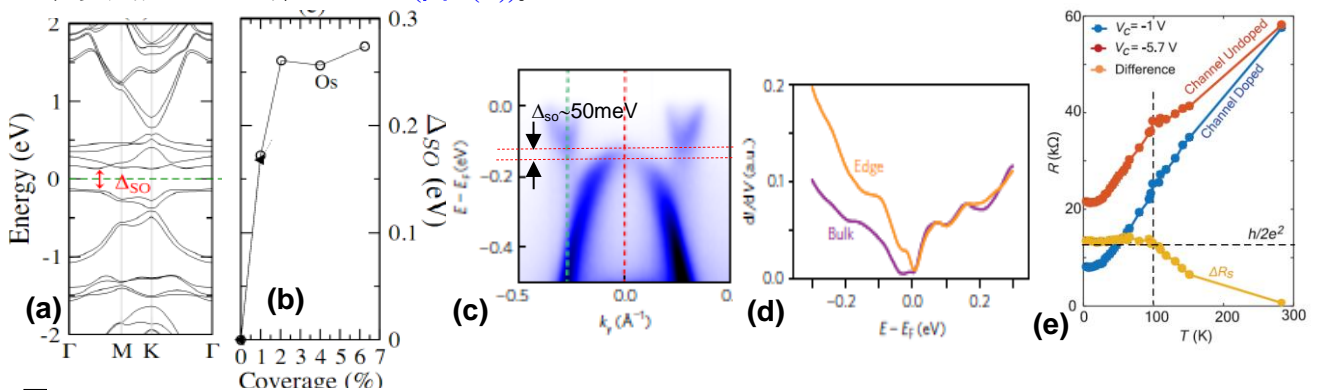


図 1 : 原子層 TI の各種報告例。(a,b) Os 原子を修飾した単層グラフェンの第一原理計算例。(a) 被覆率 1% のバンド図。約 0.2eV もの SO ギャップが存在。(b) SO ギャップの微粒子被覆率依存性。2% で 0.25eV を超えるギャップが出現。(c-e) 原子層 WTe_2 で実験報告された TI 相。(c) ARPES による $1T'$ 相 WTe_2 の TI ギャップの観察結果。バンド反転により約 50meV のギャップが存在(P.8 図 4c 参照)。(d) その STS 観察結果。バルクで開いた TI ギャップがエッジでは閉じている。(e) 原子層 hBN で上下から挟んでゲート電圧印加した $2H$ 相 WTe_2 の抵抗の温度依存性。ヘリカルエッジスピンモードにより出現する半整数量子抵抗値が 100K 付近まで存在(黄色プロット)。

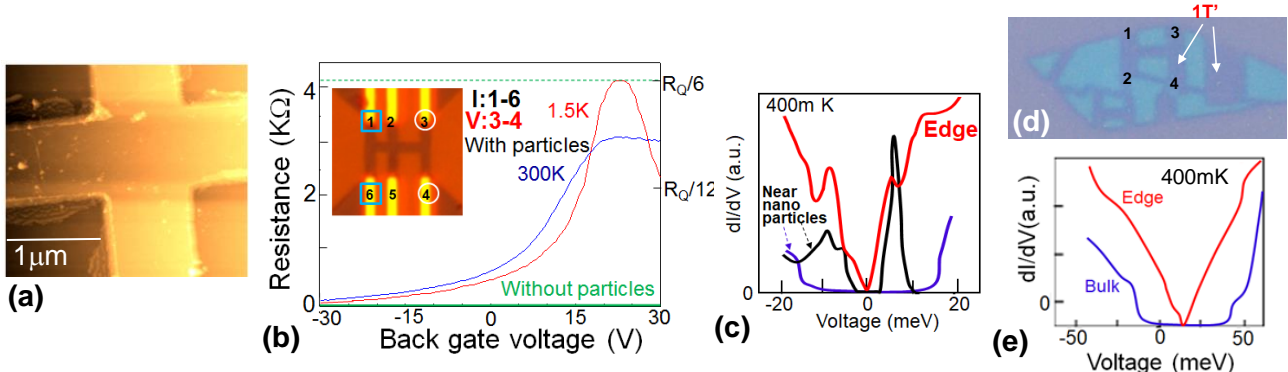


図 2 : 春山らの 2 種類の原子層 TI の報告例。(a-c) 約 3% の低被覆率でナノ針先端から Bi_2Te_3 微粒子を修飾した単層グラフェンの結果。(a) その試料の AFM 観察例。僅かな微粒子存在が確認できる。(b) 6 端子パターン(挿入図)に整形されたそのグラフェンでの R_{NL} 観察例。電極 1-6 間に固定電流を流し離れた電極 3-4 間の R_{NL} を測定。1.5K では室温に比べ R_{NL} ピークが大きく上昇し、量子抵抗 R_Q の 1/6 になる。この値は、ヘリカルエッジスピンモードの Landauer-Büttiker 公式と 6 つの電極中でのその位相破壊の理論と一致。(c) その低温 STS 観察結果。バルク 2 箇所を開いた最大約 20meV の TI ギャップがエッジでは閉じている。(d) 原子層 MoS_2 へのレーザー光照射によりパターンニングした H 字型と長方形型の $1T'$ 相。(e) その低温 STS 観察結果。バルクで開いた約 35meV の TI ギャップがエッジでは閉じる。

当研究室では従来から各種原子層物質のエッジが織りなす多様なスピン物性・磁性の研究を行っており(PRL 初め各種論文誌、IOP News、Highlight など選出)、またカーボンナノチューブの酸化開口による世界最大バンドギャップを持つ二次元グラフェン創製(Nature Nanotech.掲載、Latest highlight・表紙 Index に選出)、TMDC 系物質の一つである原子層半導体 MoS₂ への電子線照射で金属相転移を実現し、それらの界面に世界で最も薄い原子層ショットキー接合を発見(Nano Letters 掲載)、など、独自の切り口で原子層物質の研究で大きな業績を上げて来た。

特に最近上記 CalTech(J. Alecia)・スタンフォード大(Z. Shen) 、UC Irvine(R. Wu) 、University of Texas(A. MacDonald)などとの共同研究で原子層物質への SOI 導入に挑戦し、独自の方法で開発した医療用ナノ針の先端から重微粒子(Pt 、Bi₂Te₃)をグラフェン上に低汚染・低欠陥で低濃度修飾し(被覆率<5%)、50meV を超える SOI ギャップの導入に成功、さらに、6 端子・4 端子に整形した Bi₂Te₃ 微粒子修飾グラフェンにおける非局在抵抗や走査型トンネルスペクトロスコピー(STS)の観察から二次元 TI 特有のヘリカルエッジスピンモードの発見に成功した(図 2(a-c))。また、上記原子層半導体 MoS₂ へのレーザー照射で室温 1T'相の創製に成功し、これが低温で TI 相になる可能性を発見した(図 2(d,e))。これらは現在 [Science](#) で審査中である。

現在これら独自の手法に基づいて低次元原子層 TI を創製しその特異な物性を解明、特に原子層半導体相上に低次元 TI 相をレーザー照射で制御パターンニングしその物性を究明、それに超伝導体をハイブリッドすることで界面に自在に位置制御できるマヨラナフェルミオン(MF)を創出し、非 Abelian 統計に基づいた原子層トポロジカル量子ビットの原型を創製することに挑戦している。