

単原子層におけるディラックノーダルラインフェルミオンの発見

—表面科学のルネサンス—

松田 巖、杉野 修

Less is different. 例えば、よく知られたシリコン結晶も固体表面でバルクとは異なり $\text{Si}(111)7\times 7$ や $\text{Si}(001)2\times 1$ など表面特有の原子構造と2次元電子状態を有する。また、3次元のシリコン結晶を原料にシリコン原子を金属基板上に蒸着すると単体では自然では存在しえない2次元シリコン結晶「シリセン(Silicene)」が形成され、特有のディラック電子系を成す。このように物質を小さく、構成原子数を少なく、そして次元を下げていくと新しい物質ができる。これは表面科学の研究における醍醐味であるが、最近では次世代の原子層デバイス技術の礎としても注目を集めている。

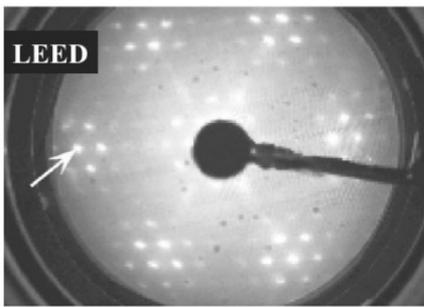


図1 “5.55x5.55”-Cu/Si(111)表面の低速電子回折(LEED)パターン (36 eV)。矢印はSi(111)1x1スポットの位置。

表面科学の歴史の中で半導体表面上の金属吸着系が主な研究対象の1つであり、特に貴金属原子をシリコン表面上に吸着させたものは金属/半導体界面のモデル系として扱われてきた。代表例として $\text{Si}(111)$ 表面上に Cu を蒸着して作成する“5x5”または“5.55x5.55”表面超構造が挙げられる。多くの研究者がその回折パターンを観察した結果(図

1)、表面では Cu_2Si の単原子層(図2(a))が $\text{Si}(111)$ 上に形成され、2つの2次元格子によるモアレ模様に対応する“5.55x5.55”周期が現れることがわかった。私自身も院生だった2000年にこの表面の電子構造研究に携わり、光電子フェルミ面マッピングの結果、 Cu_2Si 層は金属的であることを明らかにした[1]。この単原子層は基板から独立するような原子構造・電子構造を有していたため、「他の表面超構造とは異なり基板がなくても単独で存在しうるのでは」と、当時感じたことを記憶している。それから10年経つと表面科学の分野では逆に貴金属表面上にシリコン原子を蒸着する研究が行われるようになった。2012年に「シリセン」が Ag 結晶表面上で発見されると、多くの研究者がシリコンやゲルマニウム原子などを貴金属結晶表面に蒸着して新たな2次元物質の探索をするようになった。そんな中、「シリセン」を期待してシリコン原子を $\text{Cu}(111)$ 結晶表面に蒸着する研究が行われたが「残念ながら Cu_2Si 単原子層ができてしまった」という話を耳にした。程なくして Cu_2Si 単原子層の理論研究が発表され、本物質が単独でも存在できること、そしてその電子構造は金属的であることが報告された[2]。驚いたことに論文のバンド分散図には $\text{Si}(111)$ “5.55x5.55”-Cu 表面では私がかつて観測したホールのバンドだけでなく、電子的なバンドも重なるように存在していた。さらに論文には対称軸でのバンド分散図しか載っていなかったが、2次元運動量空間を想像するとホール及び電子的なバンドがループ状に重なって2次元ディラックノーダルライン(ディラック線、ディラックループ)を形成していることに気付いた。そこで $\text{Cu}(111)$ 基板上に

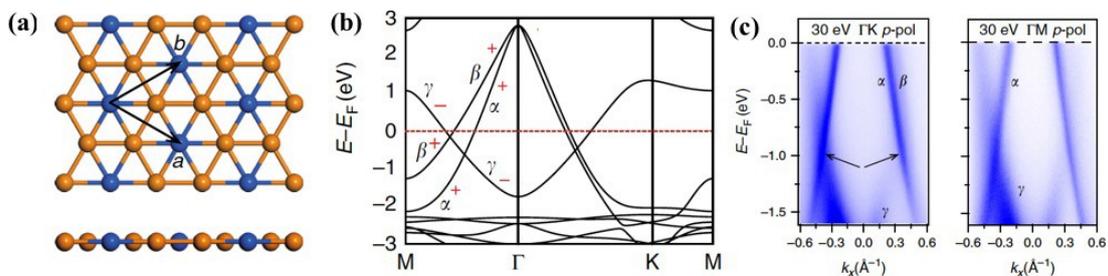


図2(a) Cu_2Si 単原子層の構造モデルで、銅色が銅原子に対応する。(b) Cu_2Si 単原子層のバンド分散図。(c) 放射光($h\nu=30\text{eV}$)で測定した光電子分光バンドマッピングの結果。

Cu₂Si 単原子層は単独で存在できることも予言されている [2]。現在デバイス素子内の導電シートとしてはグラフェンが利用されているが、本 Cu₂Si 単原子層の単離に成功すれば、グラフェンに対して 1000 倍大きいキャリア密度を持つ新たな導電単原子シートとしての利用も今後期待される。

謝辞

本研究は B. Feng 氏、笠松秀輔氏、伊藤俊氏、Tai C. Chiang(外国人客員所員)氏(物性研)、Y. Feng、S. Wu 氏、有田将司氏、島田賢也氏、宮本幸治氏、奥田太一氏(広島大学 HiSOR)、B. Fu 氏、C.-C. Liu 氏、Y. Yao 氏(Beijing Institute of Technology)、P. Chen 氏、K. Wu 氏、L. Chen 氏(Chinese Academy of Sciences)、S. K. Mahatha 氏、P. Sheverdyaeva 氏、P. Moras 氏(ELETTRA)との共同で実施されました。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

1. B. Feng, B. Fu, S. Kasamatsu, S. Ito, P. Cheng, C.-C. Liu, S. K. Mahatha, P. Sheverdyaeva, P. Moras, M. Arita, O. Sugino, T.-C. Chiang, K. Wu, L. Chen, Y. Yao, and I. Matsuda, Experimental realization of two-dimensional Dirac nodal line fermions, *Nature Comm.*, **8**, 1007 (2017).
2. L.-M. Yang *et al.*, Two-dimensional Cu₂Si monolayer with planar hexacoordinate copper and silicon bonding. *J. Am. Chem. Soc.* **137**, 2757 (2015).
3. H.-J. Neff, I. Matsuda, T. Greber, and J. Osterwalder, High-resolution photoemission study of the incommensurate (5.55 x 5.55)-Cu/Si(111) surface layer, *Phys. Rev. B* **64**, 235415 (2001).

