

グラフェンを用いた超伝導ジョセフソン素子の特性解析

炭素原子からなる層状物質であるグラファイト（黒鉛）は、鉛筆の芯や電池の電極など多岐にわたって用いられるありふれた材料である。このグラファイトから原子一層分だけを剥ぎ取ったものがグラフェンであり、炭素原子が蜂の巣格子を組んだ理想的かつ安定な2次元結晶に他ならない。グラフェン中を運動する電子は質量ゼロの相対論的な運動方程式（ディラック方程式）に従い、金属や半導体中の電子とは質的に異なる振る舞いを示す。その特異な振る舞いは主として基礎理論の立場から研究されてきた。一方、2004年にマンチェスター大学のGeimらは単層グラフェンに電極を取り付けた微小な電界効果トランジスタを作成し、電気伝導特性の測定に成功した。これが口火となり、グラフェンを主役としたナノエレクトロニクスの研究が爆発的に進展している。

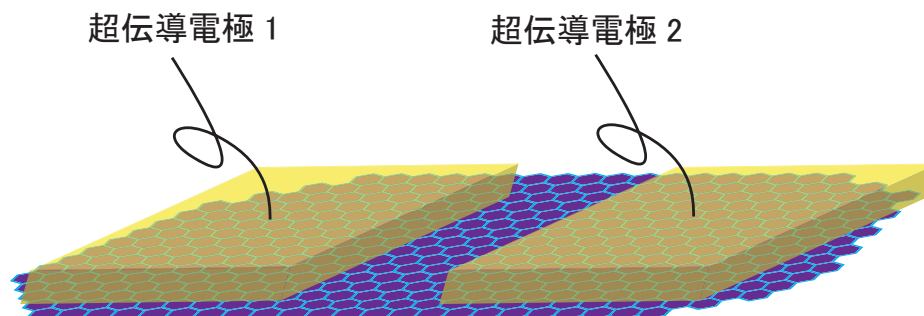


図1. 単層グラフェンに二つの超伝導電極をのせたジョセフソン接合

グラフェンは超伝導エレクトロニクスにおいても注目されている。この分野における基幹素子は二つの超伝導体を弱く結合させたジョセフソン接合である。接合を構成する各超伝導体では巨視的な位相が定まっており、接合には位相差に応じて抵抗ゼロで電流が流れる。これがジョセフソン電流であり、その最大値を臨界電流と呼ぶ。近年、グラフェンを介して二つの超伝導体を結合させたジョセフソン接合が注目を集めている。グラフェンは原子一層分の超薄膜であるから、接合は膜上に二つの超伝導電極をのせることによって構成される（図1参照）。このような平面的な素子構造はグラフェンが理想的な2次元電子系であることを反映している。しかし、これまでのグラフェン・ジョセフソン接合に対する研究は相対論的なバンド分散の影響に焦点が絞られており、構造の特異性はおざなりにされていた。

最近、広島大学の高根美武氏と井村健一郎氏はグラフェン接合に特有な平面的素子構造を取り込んだ理論モデルを提案し、ジョセフソン電流を計算するための一般的な公式を導出した。また、臨界電流の温度依存性を計算し、それがグラフェンと超伝導体の結合の強弱に敏感であり、従来知られていなかった予想外の振る舞いを引き起こし得ることを示した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の2010年4月号に掲載された。

超伝導状態を担う超伝導電子対は平面的な接合面を通してグラフェン中に染み込み、ジョセフソン電流を誘起する。しかし、従来のグラフェン接合に関する理論研究は超伝導電子対

の染み込み効果を現象論的に扱っていたために、その適用範囲には大きな制約が課せられていた。例えば、実験的に重要である臨界電流の温度依存性ですら予言することは叶わなかった。この研究では、超伝導体が平面的に結合したグラフェンに対して及ぼす影響を適切に記述する理論モデルを提案し、準古典グリーン関数法と呼ばれる理論手法を応用してジョセフソン電流の一般的な公式を導くことに成功した。この公式は単層グラフェン接合だけでなく二層以上の多層グラフェン接合にも用いることができ、温度や超伝導電極間の距離、グラフェンと超伝導体の結合の強さ等に対する制約はなく、汎用性に優れている。今後、実験結果の解析や素子の設計に関する指針を与えるうえで重要な役割を果たすと期待される。また、準古典グリーン関数法は様々なジョセフソン接合の振る舞いを解析する際に用いられる強力な手法であるが、グラフェン接合に対する定式化は遅れていた。この分野における理論研究の進展が促されるものと期待される。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) No.4, p.043702

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/80/043702> (3月25日公開済)

<情報提供：高根 美武（広島大学大学院先端物質科学研究科）

井村 健一郎（広島大学大学院先端物質科学研究科） >