高周波電流ノイズで探るカーボンナノチューブの電子散乱プロセス

[1] 要旨

カーボンナノチューブにおけるフォノン誘起電流雑音の周波数依存性が理論的に解析され、高周波領域では複数の共鳴ピークが現れることが明らかになった。これらのピークは特定のフォノン散乱に対応するだけでなく、一部は非調和フォノンの関与が示唆される。すなわち、高周波電流雑音の解析は、物質中で生じる複雑な電子・フォノン散乱プロセスに関する新たな「情報」を与えている。本成果は、ナノスケール物質における電子散乱の複雑さを捉える新しい計測手法を提示する重要な成果である。

[2] 本文

電気伝導における「雑音」は、しばしば単なる邪魔者として扱われるが、実際には物質内部で生じる微視的な散乱プロセスを探るための重要な手がかりとなる。特に、フォノン（原子の振動）に起因する電流雑音は、電子と格子の相互作用やエネルギー散逸、非平衡過程の詳細を反映するため、物性物理学の重要な研究対象として注目されてきた。

東京理科大学理学部の研究グループは、バルク物質では無視できる様な電流雑音が、カーボンナノチューブのような一次元ナノ材料では顕在化することに着目した。そうして、高周波領域の電流雑音には、物質中で生じる複雑な電子・フォノン散乱プロセスに関する新たな「情報」が含まれていることを明らかにした。この成果は JPSJ の 2025 年 10 月号に掲載された。

本研究は、アームチェア型単層カーボンナノチューブ（アームチェア型 SWCNT）におけるフォノン誘起電流雑音の周波数依存性を、開放系シュレーディンガー方程式と分子動力学法を組み合わせた量子輸送シミュレーションによって詳細に解析したものである。その結果、電流-電流相関がフォノン散乱によって失われる時間 τ_c によって特徴づけられる特性周波数 ω_c(~3rad/ps)よりも十分に低い周波数領域（$\omega \ll \omega_c$）における電流雑音は、フォノンにランダムに散乱されながら伝導する電子輸送（マルコフ過程）に起因し、ローレンツ型のパワースペクトル密度（PSD）を示すことが確認された。

一方で、高周波領域（$\omega \gg \omega_c$）では、ローレンツ型 PSD から逸脱した複数の共鳴ピークが現れることが新たに明らかになった（図 1 を参照）。解析の結果、これらのうちいくつかのピークは、カーボンナノチューブに特有のフォノンモード、すなわち半径呼吸モード（RBM）、ラジアル呼吸様モード（RBLM）、面外振動光学モード（oTO）による電子散乱に対応することが判明した。しかし、89 rad/ps 付近に現れるピークは、既知の単純な調和フォノン散乱だけでは説明できなかった。詳細な解析から、このピークは非調和フォノン効果、すなわち複数のフォノンが同時に関与する 4 フォノン過程に由来する可能性が示唆された。このような非自明な雑音の起源を特定したことは、電子と格

子振動の相互作用の複雑さを示すものであり、これまでの理論的枠組みを超える新しい理解を与える成果である。

本成果は応用面でも大きな意義を持つ。近年、テラヘルツ帯域の電流雑音を測定できる分光技術が急速に発展しており、カーボンナノチューブを用いた実験によって本研究の予測が検証される可能性が高い。もし実験的に検証されれば、超高速応答を持つ新しいナノエレクトロニクスデバイスや、低消費電力の量子デバイス設計に直結する知見となり得る。以上のように、本研究は一次元ナノ材料における電子-格子相互作用と雑音現象の本質を解明するだけでなく、将来のエレクトロニクス技術への応用を視野に入れた基盤的成果である。

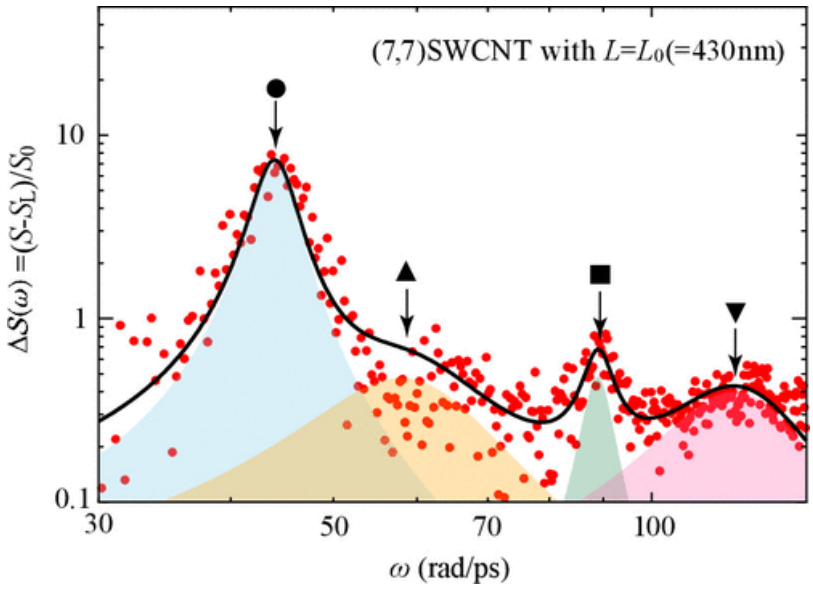

図 1: 残留 PSD の周波数依存性（●: RBM, ▲: RBLM, ■: RBLM+oTO, ▼: oTO に由来する電流雑音）。■が 4 フォノン過程に由来する。

原論文（2025 年 9 月 26 日公開済）

Frequency Dependence of Phonon-Induced Current Noise in Armchair Carbon Nanotube

R. Akimoto, A. Sumiyoshi, and T. Yamamoto, J. Phys. Soc. Jpn. **94**, 104802 (2025).

＜情報提供：山本 貴博（東京理科大学 理学部第一部 物理学科）＞