

分野：自然科学系

キーワード：量子化電流、音波、ひずみ、表面弹性波、SDGs

音波が誘起する量子化電流 —ひずみを活用した新たな量子デバイスへ道—

【研究成果のポイント】

- ◆ 一次元鎖化合物と呼ばれる特殊な結晶 NbSe_3 を圧電基板上に転写し、固体中を伝わる音波の一種である表面弹性波^{※1}を照射すると、電流が一定値にしばらくとどまり階段状に変化する(電流電圧特性に量子化を示すプラトー構造^{※2}が出現する)ことを発見。
- ◆ 周波数特性やパルス状の表面弹性波照射の実験から、この量子化電流は、一次元鎖化合物にひずみが加わることによって出現することを解明。
- ◆ ひずみを活用した新しい原理の量子デバイス開発への応用に期待。

❖ 概要

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻の藤原浩司氏(研究当時、博士後期課程3年)、高田真太郎准教授、新見康洋教授らの研究グループは、音波の一種である表面弹性波によって、電荷密度波^{※3}状態を示す一次元鎖化合物 NbSe_3 にひずみを与えることで、電流電圧特性に量子化を示すプラトー構造が出現することを発見しました。

ひずみは物理学における基本概念の一つです。物質を対象とする物性物理学の分野では、圧電基板に電場を印加することで電気的にひずみを制御することができます。この原理は周波数フィルタなどにも応用されている表面弹性波の基礎となっています。

研究グループは、粘着テープを用いた機械的剥離法により、一次元鎖化合物 NbSe_3 を劈開(特定方向に割ること)して細線状に加工し、それを圧電基板 LiNbO_3 に転写しました。そして LiNbO_3 基板上に準備しておいた櫛型電極に交流電圧を印加することで、 NbSe_3 細線に表面弹性波を照射しました(図1左)。

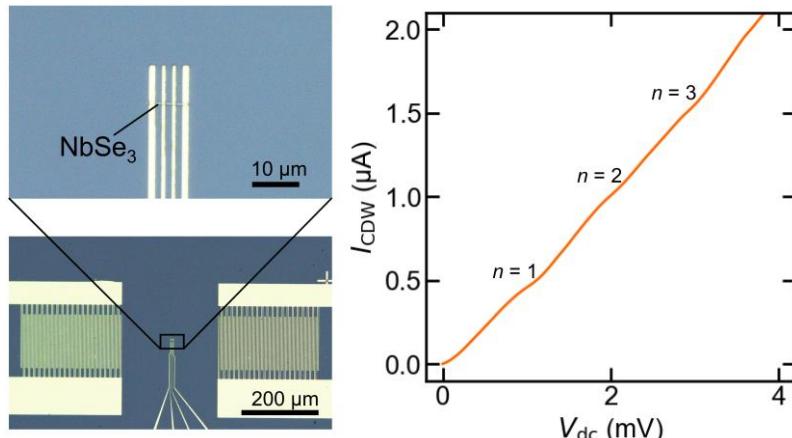


図1:(左)圧電基板 LiNbO_3 上に転写された NbSe_3 細線と、 NbSe_3 細線に表面弹性波を照射するための櫛型電極の光学顕微鏡像。(右) CDW 電流 I_{CDW} と印加した直流電圧 V_{dc} の関係。測定は電荷密度波転移温度以下の 45 K で行われた。 I_{CDW} に量子化に伴うプラトー構造($n = 1, 2, 3$)が観測された。

NbSe_3 はある温度以下で結晶がひずみ、電子が秩序化した電子状態である「電荷密度波状態」を示します。この状態に表面弹性波を照射することで、電流電圧特性に量子化を示すプロト一構造が現れることを発見しました(図1右)。

さらに研究グループは、この量子化電流が一次元鎖化合物のひずみによって誘起されることを明らかにしました。この結果は、ひずみによって誘起される量子化電流の研究を進展させ、ひずみ誘起を用いたデバイス応用への道を開くものです。

本研究成果は、米国科学誌「Physical Review Letters」に、2025年12月17日(水)(日本時間)に公開されました。

【新見教授のコメント】

この研究は、5年前に我々のグループが報告した電荷密度波を示す超伝導薄膜に表面弹性波を照射すると負の抵抗が現れる、という結果が基になっています。単なる超伝導薄膜では負の抵抗は観測されなかったことから、電荷密度波と表面弹性波には何か関係があると思い、電荷密度波のみを示す一次元鎖化合物に焦点を当て、地道な研究を行った成果だと思っています。

❖ 研究の背景

量子力学における最も興味深い現象の一つは、プランク定数と素電荷といった基本定数の組み合わせで電圧が正確に量子化される現象であり、これはシャピロステップと呼ばれます。シャピロステップは、その頑健性と精度の高さから、電圧の標準として利用されています。

また、抵抗に関しても、量子ホール効果^{※4}と呼ばれる現象から、同じく量子化抵抗がプランク定数と素電荷で記述できることが知られており、電圧と抵抗については、量子化する現象が知られています。

一方で、電流の標準に関しては、様々な研究が進展していますが、現在に至るまで確立していません。

❖ 研究の内容

研究グループは、一次元鎖化合物で電荷密度波転移を示す NbSe_3 を機械的に剥離して細線を作製しました。その細線を圧電基板 LiNbO_3 上に転写し、さらに基板上に準備した楕型電極に約 300 MHz の

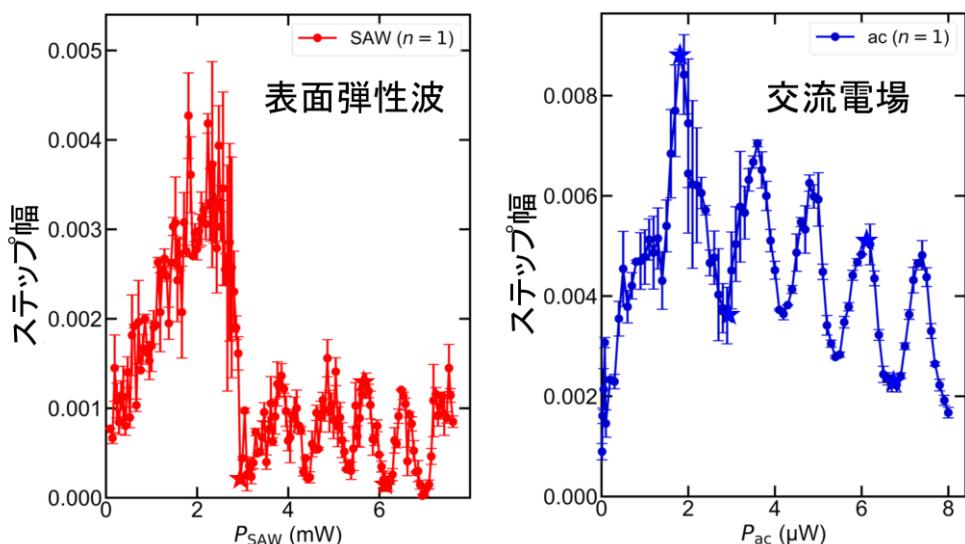


図 2: シャピロステップ幅の(a)表面弹性波パワー P_{SAW} 、及び(b)交流電場パワー P_{ac} 依存性。測定は電荷密度波転移温度以下の 45 K で行われた。

交流電圧を印加することで、表面弾性波を NbSe_3 細線に照射しながら直流の電流電圧特性を測定しました(図1左)。

電荷密度波は、あるしきい値電流まで結晶中の欠陥にピン留めされていますが、あるしきい値電流以上では、ピン留めが外れて一斉に動き出します。今回の研究では、表面弾性波を照射すると、一斉に動き出した電荷密度波による電流がある値の整数倍でプラトー構造をもつことを発見しました(図1右)。さらにこのプラトー構造は、印加する表面弾性波のパワーを大きくすると、急速に減衰することも分かりました(図2左)。この結果は、これまで NbSe_3 試料に直接交流電場を印加したときの結果とは大きく異なります(図2右)。

その後の周波数を変化させた実験や、パルス状の表面弾性波を印加する実験から、量子化した電流値は、表面弾性波によって NbSe_3 細線に誘起されたひずみが要因であることを特定しました。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

電荷密度波状態を示す一次元鎖化合物に音波を照射することで、ひずみ効果を利用した量子化電流の研究がさらに進展することが期待できます。また、ひずみ誘起の量子デバイスへの応用の道も開かれ、新しいタイプのデバイス作製に期待できます。

❖ 特記事項

本研究成果は、2025年12月17日(水)(日本時間)に米国科学誌「Physical Review Letters」(オンライン)に掲載されました。

タイトル: "Observation of Shapiro Steps in the Charge Density Wave State Induced by Strain on a Piezoelectric Substrate"

著者名: Koji Fujiwara, Takuya Kawada, Natsumi Nikaido, Jihoon Park, Nan Jiang, Shintaro Takada, and Yasuhiro Niimi

DOI: 10.1103/p1nh-f6gn

なお、本研究は、科学研究費(JP23H00257, JP22KJ2180, JP22J20076)、JST 創発的研究支援事業(JPMJFR2134)の支援の下、行われました。

❖ 用語説明

※1 表面弾性波

物質の表面を伝播する振動モードで、レイリーモードとも呼ばれる。本研究では、圧電基板である LiNbO_3 上に、互いに入れ違いになった櫛型の電極を準備し、約 300 MHz の交流電圧をかけることで、基板のひずみによる音波を誘起できる。

※2 プラトー構造

測定した物理量が量子化する場合、ある一定値にしばらく留まること。またその一定値は、整数、もしくは整数の逆数に比例する。例えば、超伝導体中の量子化電圧(シャピロステップ)は、プランク定数、素電荷、さらに超伝導体に照射するマイクロ波の周波数のみで決定される。

※3 電荷密度波

固体中の電子が周期的に集まったりまばらになったりする現象で、電子密度が空間的に波のように変化する状態を指す。主に低次元(一次元や二次元)金属や半導体で見られる量子現象である。

※4 量子ホール効果

二次元電子系に強い磁場を印加した際に現れる量子現象で、ホール効果が、プランク定数と素電荷のみで記述される値に量子化する。

❖ SDGs目標



❖ 本件に関する問い合わせ先

<研究に関するお問い合わせ>

大阪大学 大学院理学研究科 物理学専攻 教授 新見 康洋(にいみ やすひろ)

TEL:06-6850-5586

E-mail: niimi@phys.sci.osaka-u.ac.jp

<広報に関するお問い合わせ>

大阪大学 理学研究科 庶務係

TEL:06-6850-5280 FAX:06-6850-5288

E-mail: ri-syomu@office.osaka-u.ac.jp

❖ 発信先 報道機関

大阪大学から 大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会