The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Studies of Shapiro Steps in Charge Density Wave State of $NbSe_3$ Thin Films Induced by Surface Acoustic Waves
Author(s)	藤原, 浩司
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101915
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　藤原　浩司　）	
論文題名	Studies of Shapiro Steps in Charge Density Wave State of $NbSe_3$ Thin Films Induced by Surface Acoustic Waves (電荷密度波物質$NbSe_3$薄膜における表面弾性波誘起シャピロステップの研究)

論文内容の要旨

電子-格子相互作用が強い低次元導体では、電荷密度波（charge density wave: CDW）と呼ばれる電子密度の周期的な構造が現れる。CDW状態の電子は電場によって駆動され、そのダイナミクスは興味深い現象として注目されてきた。その中でも、交流電場下で電流-電圧特性に現れるシャピロステップは、CDWと外場の同期現象として知られている。

CDWのダイナミクスにおいて興味深い点は、電子系と格子系の相互作用が存在することである。例えば電場によって駆動されたCDWの運動によって、試料の弾性定数の変調や、機械的な歪みが生じることが知られている。逆に試料に歪みを外場として加えることで、CDWの運動が変調を受けることも明らかになってきた。従来は交流電場によって誘起されるシャピロステップが、時間振動する歪みを試料に加えた場合でも同様に観測されることが近年報告され、機械誘起シャピロステップに関する理論研究も行われている。しかし、歪み外場とCDWの相互作用や、歪みによってシャピロステップが生じるメカニズムは未解明な部分が多い。

そこで本研究では、表面弾性波（surface acoustic wave: SAW）によって駆動されるCDWダイナミクスに着目した。SAWとは、歪みの波が固体表面を伝わる現象であり、圧電基板上の櫛型電極（IDT）にメガヘルツ（MHz）からギガヘルツ（GHz）帯域の交流電場を印加することで励起できる。格子変形を伴うSAWによって、CDW状態の電子を駆動し、シャピロステップを誘起できると期待される。SAWによるシャピロステップを詳細に調べることにより、歪み外場がCDWのダイナミクスに与える影響を明らかにすることを目指した。

圧電基板$LiNbO_3$上にIDTと、CDW物質$NbSe_3$薄膜デバイスを作製し、$NbSe_3$薄膜に約300 MHzのSAWを照射した。CDW転移温度以下で$NbSe_3$薄膜の微分抵抗を測定したところ、SAWによって誘起されたシャピロステップを観測した。IDTの共鳴周波数の交流電場を印加したときのみシャピロステップが観測されたことから、IDTから直接放射される電磁波の影響ではないといえる。また、圧電効果による電場の大きさを計算によって求めると、その電場の大きさは十分に小さく、SAWに伴う電場ではなく歪みがシャピロステップを引き起こしていることがわかった。さらに、歪みの効果を調べるための対照実験として、従来の交流電場によるシャピロステップの測定を行った。交流電場の場合と比較して、SAWによるシャピロステップでは、外場振幅の増大に対してステップの大きさがより強く減衰されるという、顕著に異なる振る舞いが観測された。

本研究は、圧電基板上のSAWによってCDWを駆動できることを実証した最初の例である。また、SAWがCDWの運動に与える影響が、交流電場とは異なることを実験的に示した。これは機械的振動とCDWの運動との相互作用を理解する上で重要な成果である。さらには、CDWの電気的自由度と機械的自由度を結びつけた新奇なSAWデバイスへの応用にも繋がりうるものである。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　藤原　浩司　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教授	新見　康洋
	副 査　教授	花咲　徳亮
	副 査　教授	越野　幹人
	副 査　教授	波多野　恭弘
	副 査　准教授	高田　真太郎

論文審査の結果の要旨

電子格子相互作用が強い低次元導体では、電荷密度波（charge density wave: CDW）と呼ばれる電子密度の周期的な構造が現れる。CDW 状態の電子は電場によって駆動され、そのダイナミクスは 1970 年代から興味深い現象として注目されてきた。特に交流電場下で電流-電圧特性に現れるシャピロステップは、CDW と外場の同期現象として知られている。CDW においてさらに興味深い点は、電子系と格子系の相互作用が存在することである。例えば電場によって駆動された CDW の運動によって、試料の弾性定数の変調や、機械的な歪みが生じる。逆に CDW 物質に外場として歪みを印加することで、CDW の運動が変調を受けることも明らかになってきた。従来は交流電場によって誘起されるシャピロステップが、時間振動する歪みを試料に加えた場合でも同様に観測されることが近年報告され、機械誘起シャピロステップに関する理論研究も行われている。しかし、歪みによってシャピロステップが生じるメカニズムは未解明な部分が多い。

そこで藤原氏は、表面弾性波（surface acoustic wave: SAW）によって駆動される CDW ダイナミクスに着目した。SAW とは、歪みの波が固体表面を伝わる現象であり、圧電基板上の櫛型電極にメガヘルツ（MHz）からギガヘルツ（GHz）帯域の交流電場を印加することで励起できる。格子変形を伴う SAW によって、CDW 状態の電子を駆動し、シャピロステップが誘起されると期待される。実際には、圧電基板 $LiNbO_3$ 上に櫛型電極と、CDW 物質を機械的に剥離した $NbSe_3$ 薄膜デバイスを作製し、$NbSe_3$ 薄膜に約 300 MHz の SAW を照射した。CDW 転移温度以下で $NbSe_3$ 薄膜の微分抵抗を測定したところ、SAW によって誘起されたシャピロステップを観測した。観測されたシャピロステップの起源を探るために、いくつかの実験を行った。

まず櫛型電極の共鳴周波数からずれた周波数の電圧を印加したが、シャピロステップは観測されなかった。このことから櫛型電極に印加した高周波電場が漏れ出して、$NbSe_3$ 薄膜に実効的に交流電場が印加されているという可能性が否定できる。また櫛型電極の共鳴周波数では圧電効果によって電場が生じ得るが、圧電効果による電場の大きさを計算によって求めると、SAW に伴う電場ではないことも分かった。このことから SAW を印加して生じたシャピロステップは、圧電効果による歪みが引き起こしていることがわかった。また対照実験として、従来の交流電場によるシャピロステップの測定を行い、ステップ幅の入力電力依存性を調べた。SAW によるシャピロステップの幅は、交流電場によるそれと同様に、入力電力の増加とともに振動減衰を示すが、その減衰の仕方は両者で異なっており、SAW によるシャピロステップの方が入力電力に対して減衰率が非常に高いことが分かった。

本研究は、圧電基板上の SAW によって CDW を駆動できることを実証した最初の例である。また、SAW が CDW の運動に与える影響が、交流電場とは本質的に異なることが示された。これは機械的振動と CDW の運動との相互作用を理解する上で重要な成果である。さらには、CDW の電気的自由度と機械的自由度を結びつけた新奇な SAW デバイスへの応用にも繋がりうるものである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値があり学位の授与に値するものである。