

強相関電子系における普遍的な非線形伝導現象

[1] 要旨：

早稲田大学理工学術院の研究チームは、様々な遷移金属酸化物において、 10^{-5} 秒程度のパルス電場でも普遍的に非線形伝導が観測されることを明らかにした。さらに、非線形伝導が見出されるしきい電流密度と電気抵抗率の絶対値の間に、反比例の関係が成り立つことも明らかにした。これは、これまでに観測されてきた強相関電子系における非線形伝導の前駆現象に対応すると考えられる。

[2] 本文

物質に電場を印加した場合、それが小さいときは電場と電流密度が比例するオームの法則が成り立つ。一方、強い電場を印加するとオームの法則からはずれ非線形伝導が観測される場合があり、よく知られた例として、電荷密度波のスライディングに伴う非線形伝導などが挙げられる。近年、遷移金属化合物を中心とした強相関電子系における非線形伝導が興味を集めている。この系においては、遷移金属の d 電子特有の強いクーロン相互作用によって伝導電子が局在化し(モット絶縁体)電気抵抗率が高くなるが、それが強電場で動くことによって非線形伝導が生じるというモデルが提案されている。一方、強い電場を印加して電流密度が高くなると、試料そのものが発熱することによって電気抵抗率の温度依存性による見かけの非線形伝導が現れる可能性が指摘されており、実験に対する信頼性の問題を抱えていた。

これまでの研究に関する問題点の一つに、非線形伝導度測定には、線形領域での電気伝導度測定に比べて測定方法のバリエーションや制御できるパラメータの数が多く、各研究によってそれが異なり、さらには各研究において特定の物質についてのみ測定が行われているため、異なる物質における非線形伝導現象の比較が困難であることがあった。

最近、早稲田大学理工学術院の研究チームは、5つの全く異なる遷移金属酸化物の単結晶試料において、パルス電場印加による四端子法を用いた非線形伝導測定を行った。その結果、 10^{-5} 秒程度の短いパルス電場で、さらにパルスの duty cycle (パルスの長さ/パルス間隔) を 10^{-4} に抑えた測定において、すべての物質で比較的低い電場(電流密度)から非線形伝導が見出されることを明らかにした。さらに、非線形伝導が現れるしきい電流密度 j_c と電気抵抗率の絶対値 ρ_0 が、温度を変化させた場合 $j_c \propto \rho_0^{-1}$ の関係を満たすことを、すべての物質で明らかにした。この結果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2020 年 4 月号に掲載された。

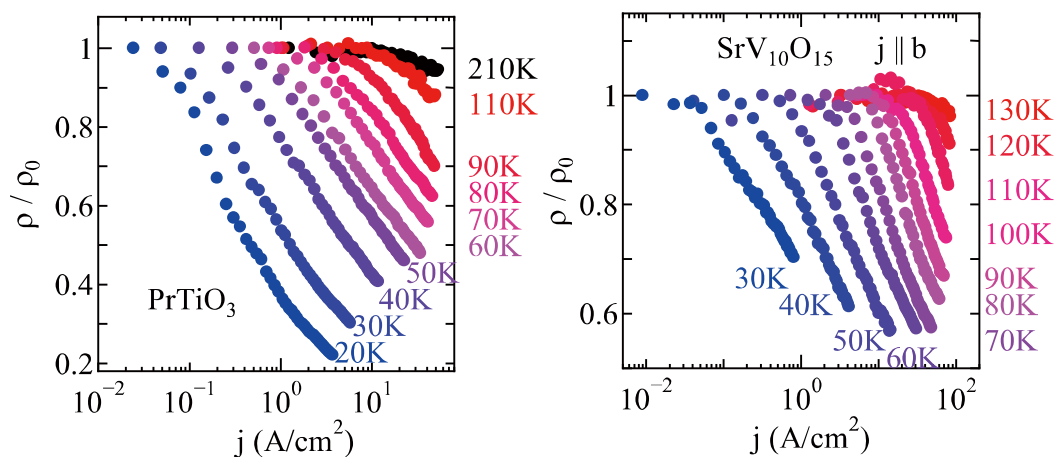
観測される非線形伝導は電気抵抗率の減少として数 10% 程度であり、これまでに報告されている強相関電子系の非線形伝導よりは小さいものの、モット絶縁体や軌道整列絶縁体など様々な物質において普遍的に非線形伝導が観測された点が重要である。さらに、 $\text{BaV}_{10}\text{O}_{15}$ という軌道整列相転移によって電気抵抗が 3 桁近く上昇する物質においては、転移温度より高温でも低温でも同じ $j_c \propto \rho_0^{-1}$ の関係を満たしており、この非線形伝導が系の絶縁化のメカニズムに依存しないことを強く示唆している。

研究グループはこの非線形伝導のメカニズムとして、乱れた系におけるパーコレーションの可能性を挙げている。これは、試料の中に電気抵抗率の高いところと低いところが混在している場合、強電場が電気抵抗の高いところに印加されることによって、トンネル効果、あるいは局所的な温度上昇により電気抵抗率が低下するというものである。乱れの原因は明らかにされていないが、酸化物特有の酸素欠損あるいは過剰酸素の空間的な不均一により、電気抵抗率が場所によって異なる可

能性が挙げられている。

さらに研究グループは、より長いパルスによる非線形伝導の測定も行っており、多くの物質で、強電場下で 10^{-3} 秒より長い時間領域において、電気抵抗率が 1 桁以上減少する非線形伝導の振舞を観測した。これは、試料に均一に電流が流れていると考えると温度上昇によって説明するには電力量が足りないが、試料の一部に filamentary に電流が流れていると考えると、温度上昇に伴う電気抵抗率の減少で定量的に説明できることも明らかにした。これは、上記の 10^{-5} 秒ですでに起こっている局所的なパーコレーションが、 10^{-3} 秒で試料全体をつなぐものになっていることを示唆している。言い換えれば、早い時間スケールで見られる非線形伝導は、より長い時間スケールで見られるより大きな非線形伝導の前駆現象と見なすことができる。

本研究は、強相関電子系における特徴的な非線形現象を明らかにしたのみならず、強相関電子系における乱れの重要性を強く示唆するものであり、乱れの状態に関する今後のより詳細な研究が待たれるところである。さらには、このような比較的短い時間領域で起こる非線形伝導現象を用いたデバイスの開発も期待される。



原論文(3月6日公開済)

[Nonlinear Behavior in the Electrical Resistance of Strongly Correlated Insulators](#)

T. Katsufuji, H. Ikeda, M. Ashizawa, M. Oike, and T. Kajita, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 044702 (2020).

<情報提供:勝藤 拓郎 (早稲田大学理工学術院) >