

電流によって溶ける“電子の氷“

[1] 要旨

電流によって“電子の氷”が溶ける現象が、二酸化バナジウム(VO_2)で見つかった。 VO_2 は約 340 K で金属・絶縁体転移を示すが、この転移を電流や電圧で制御する非線形伝導に関する研究が進んでいる。この現象が、ジュール発熱によらずに、電流によって“電子の氷”が溶ける、いわば本質的な非平衡効果によるものであるかを見極めるのが長年の課題であった。単結晶 VO_2 に対して赤外放射温度計により温度を測定した上で精密実験が行なわれ、非熱的な非線形伝導と電流誘起の非平衡相転移であることが発見された。この成果は、非平衡物性の理解を進める画期的なものである。

[2] 本文

物質にかかる電圧と、その際に流れる電流との比例関係を教えるオームの法則は、誰もが一度は耳にしたことがあるだろう。実はこの法則は、熱力学で平衡状態と呼ばれる、“物質に外部から熱やエネルギーの流れが生じておらず、それ以上温度などの熱力学量に変化しない状態”に極めて近い時にのみ成り立つ。それでは、物質が平衡状態からかけ離れた非平衡状態に置かれると何が起こるだろうか？ その場合には、我々が半ば常識として考えているオームの法則が深刻に破綻し、図 1 (a) に示すように、電流と電圧の関係が比例（線形）関係でなくなる非線形伝導が生じることがある。この非線形伝導は、物質の伝導性を電氣的に切り替えることを可能とする。すなわち、電気が流れにくい状態（絶縁体）と流れやすい状態（金属）とが、電流あるいは電圧を制御因子として切り替わる。この観点で、固体物理において非線形伝導は様々な物質において古くから調べられてきた。

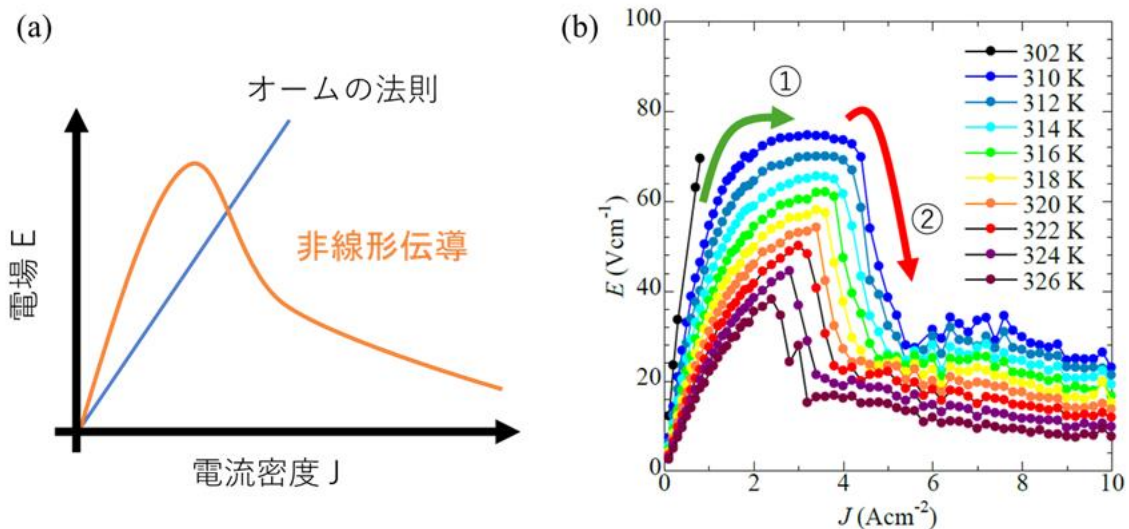


図 1. (a) 非線形伝導の模式図. (b) VO_2 における非線形伝導と非平衡相転移の様子.

VO_2 は古くから非線形伝導が調べられてきた代表的な物質の一つである。この物質はおよそ 340 K (67°C) 以下で金属から絶縁体へと相転移するが、その起源には電子相関、分子軌道形成、パイエルス不安定性が複雑に絡み合っていると考えられている。2000 年代以降、この相転移を電圧や電流によって制御することで、次世代トランジスタやニューラルネットワーク応用する試みが世界中

で続けられている。また、電流が流れる非平衡状態において平衡状態とは異なる電子状態へと変化する物質は、平衡熱力学を非平衡熱力学へ拡張する試金石として基礎学理の面でも重要な意味を持つ。

非線形伝導を議論する際に常に問題となるのがジュール発熱である。すなわち、抵抗体に電流が流れると、抵抗と電流の2乗の積に比例した熱が発生し、抵抗体の温度が上昇する。これにより物質の温度が相転移温度を上回れば、見かけ上の非線形伝導が生じることになる。VO₂においては、このジュール発熱による見かけの非線形伝導である可能性を排除できないことが問題となっていた。

最近、名古屋大学大学院理学研究科の研究グループは、単結晶 VO₂における精密測定を実施した。この測定は、赤外放射温度計を用いた温度測定により、温度上昇による非線形伝導の可能性を排除した点に特徴があり、VO₂が非熱効果による本質的な非線形伝導現象を示すことが見出された。さらに、ある電流値以上においては、電流誘起の非平衡相転移が生じることを発見した。実験から見積もった電子系の応答に関する特徴的長さは 100 μm にも及び、単結晶 VO₂の電流に対する特異な集団的応答が浮き彫りとなった。この成果は JPSJ の 2025 年 6 月号に掲載された。

図 1(b)に示すように、本研究における VO₂の非線形伝導測定では、二つの特徴的ふるまいが観測された。まず①で示した低い電流の領域においては、電圧と電流の関係が線形から著しく外れる非線形伝導が見られた。この強い非線形性がおよそ 80 V/cm という低い電場で生じていることは驚きである。なぜならば、従来の半導体物理において知られているツェナー降伏やアバランシェ効果等の起源による非線形伝導の発生には 10⁵ V/cm 程度の電場で必要と考えられるからである。実際、薄膜 VO₂において非線形伝導が観測されてきたのはこの電場領域であり、本研究の単結晶 VO₂における非線形伝導はそれらと一線を画すものであることが分かる。

さらに、②で示したように、ある電流値以上では物質にかかる電圧が不連続に減少し、電流によって絶縁体から金属へと相転移が生じたことが示唆される。先述したように、試料温度はモニターされているため、この相転移は温度によるものではない。さらに印加電場も小さいことから、電流という“流れ”が“電子の氷”を溶かすという本質的な非平衡現象であると考えられる。このような VO₂における明瞭な非平衡相転移は本研究で初めて捉えられたものであり、多くの研究者の注目を集めることが予想される。相転移後の結晶構造や電子状態の詳細は未だ明らかになっておらず、今後の研究の展開が期待される。

原論文 (2025 年 5 月 20 日公開済)

Current-induced Nonequilibrium Phase Transition Accompanied by Giant Gap Reduction in Vanadium Dioxide

A. Nakano, M. Imaizumi, and I. Terasaki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **94**, 063705 (2025).

< 情報提供：中埜彰俊（名古屋大学大学院理学研究科） >