

電場を使って磁性体を冷やす

[1] 要旨

1930年代には磁性体に加えていた磁場を消去する方法によって 1 ケルビン（摂氏マイナス 272 度）以下の温度を実現することが可能となった。これと同じような冷却操作を電場でも行うことができるのではないかというアイデアに基づいて、強誘電性と強磁性の両方の性質を併せ持つガドリニウムと鉄の酸化物に着目して実際に電場による冷却に成功したことが報告された。

[2] 本文

一般に、周囲よりも温度を高くすることと比べて、温度を低くすることは容易ではない。初期の冷却技術は液体が蒸発するときの気化熱を利用するもので、18 世紀には実験に用いられるようになっていた。19 世紀になると、この冷却方式をサイクル化した蒸気圧縮冷凍技術が開発され、現在に至るまで、冷蔵庫や空調機に用いられている。さらに低温の領域では、気化熱を利用する方式と並んで、ジュールトムソン効果と呼ばれる現象が利用されてきた。蒸気圧縮冷凍もジュールトムソン効果式冷凍も、微視的には分子間力を利用した冷却技術であると言える。

20 世紀になると、分子間力とは全く異なる微視的機構に基づく冷却技術が開発された。デバイは電子の磁気モーメントと外部磁場の相互作用に着目し、磁性体に磁場を印加してから断熱状態で磁場を弱くすることによって温度が下げられることを提唱した。ジオークは、この断熱消磁と呼ばれる冷却方式を用いて、1 ケルビンを切る温度の実現に成功し、さまざまな低温実験を展開した。

さらに低温に冷やすために、通常のヘリウム（陽子 2 つと中性子 2 つからなる原子核）にヘリウム 3（陽子 2 つと中性子 1 つからなる原子核）を混合させた液体の性質を用いて 100 分の 1 度を切る温度まで下げられる希釈冷凍機と呼ばれる装置が開発された。現在、超伝導量子コンピュータの冷却に使われているのはこの希釈冷凍機である。これより低い温度を実現する方法としては、銅の原子核の磁気モーメントを利用する核断熱消磁法が利用されている。

以上のように、これまでにさまざまな冷却方式が開発されてきているが、どれも現在は電力を用いて動作している。しかし、不思議なことに、電気を直接冷却に使う技術は、ペルチェ式冷却以外、これまで実用化に至っていない。この理由の一つは、電場のオン・オフに伴う熱量効果が、磁気モーメントが示す熱量効果と比べて小さいことにある。

最近では、一つの外場（磁場、電場、または応力）によって二つ以上の熱量効果を同時に引き起こすマルチ熱量効果が注目を集めている。例えば、強磁性体の性質と強誘電体の性質を併せ持つマルチフェロイックと呼ばれる物質では、電気的性質と磁气的性質が強く結合しており、電場によって磁性と誘電性の 2 つの性質を操作することができる。すると、図 1 左に示されるように断熱条件下で電場を除去すると原子の振動から電子の磁気モーメントへと熱が移動し、物質の温度が下がると期待される。このようなマルチフェロイック物質の熱量効果に関する理論研究はあったが、実験によって概念実証に成功した例はなかった。

東京大学新領域創成科学研究科物質系専攻の研究グループは、電場誘起の熱量効果による磁性体の温度変化を測定することを目指し、実験系を作製した（図 1 右）。対象物質としては、電場による磁化の操作が過去に報告されているガドリニウムと鉄の酸化物磁性体に注目した。この GdFeO_3 という組成式で表されるマルチフェロイック物質に対して 2 ケルビン（摂氏マイナス 271 度）付近で実験を行った結果、電場のオン・オフによって、試料の温度が確かに変化することが確認された（図 2）。さらに研究グループは、観測された温度変化とガドリニウムの磁気モーメントの関係などについても明らかにした。 GdFeO_3 の電気磁気結合を利用

した冷却が、既存の断熱消磁冷却や核断熱消磁冷却と比べて、エネルギー効率という指標では優れていることも報告している。

この成果はJPSJの2024年9月号に掲載された。

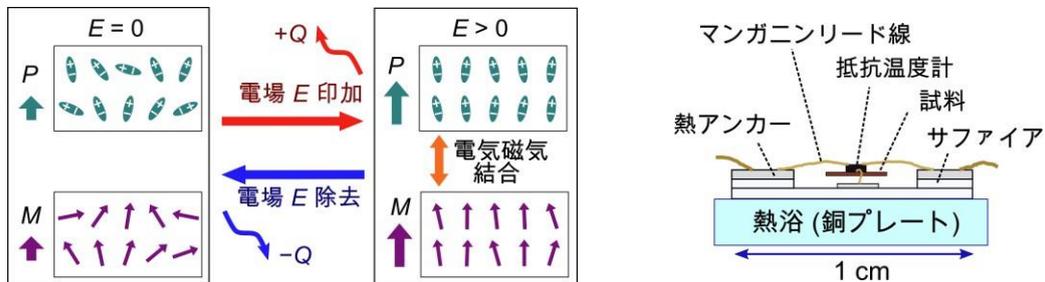


図1. 電気磁気結合に基づくマルチ熱量効果の概念図(左)と熱量効果の測定系(右)

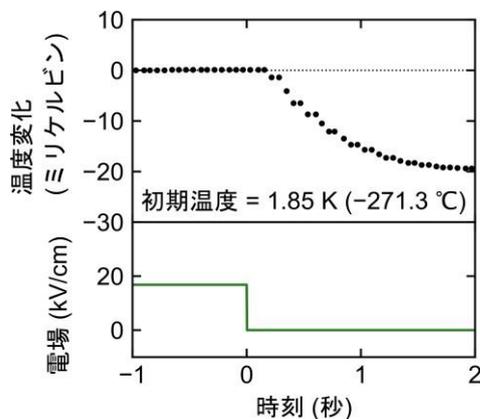


図2. ゼロ磁場における試料の温度変化. 時刻 = 0 秒で電場を除去した.

原論文 (2024年8月30日公開済)

Magnetoelectric Coupling Based Caloric Effect in Multiferroic $GdFeO_3$

Rintaro Ikeda, Takashi Kurumaji, Yusuke Tokunaga, and Taka-hisa Arima, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 094709 (2024).

<情報提供:

有馬孝尚 (東京大学新領域創成科学研究科物質系専攻)

池田凜太郎 (東京大学新領域創成科学研究科物質系専攻、NTT データ (現所属)) >