

大阪科学・大学記者クラブ 御中
(同時提供先：文部科学記者会、科学記者会)

2024年1月31日

大阪公立大学

東京大学大学院理学系研究科

熱を加える実験で明らかに 水晶が隠し持つ新たな特性！

<ポイント>

- ◇水晶はクォーツ時計や携帯電話、ジャイロセンサに利用されており、「産業の塩」と呼ばれる。
- ◇水晶は右手と左手のように、鏡像では重なるが実際には重ならない特殊な構造を持つ。
- ◇熱の流れに沿って水晶内の原子が回転運動し、その伝搬を電気信号へ変換することに成功。

<概要>

古来より親しみ深い鉱物である水晶は、電氣的に振動する特性を活かし、クォーツ時計や携帯電話などの電子機器、ジャイロセンサに欠かせない電子部品として利用されています。水晶は、鏡写しにすると重なりますが実際には重ならない特殊な構造（キラル）を持っており、電氣的・熱的な性質にキラル構造を持つことの影響が現れます。これまでの研究で、キラルな金属物質に電気を流すと電子の磁氣的なバランスが崩れて正負どちらかに偏ることが明らかになりましたが、キラルな非金属物質である水晶では電気が流れないため、どのようなキラル特有の現象が生じるかは解明されていませんでした。

大阪公立大学大学院 工学研究科の大江 一希氏（当時 博士前期課程学生）、戸川 欣彦教授、東京大学 大学院理学系研究科の加藤 将貴大学院生（博士後期課程）、松浦 弘泰助教らの研究チームは、水晶に加えた熱の流れに沿って原子が回転しながら振動し、その回転運動を電氣的に検出することに世界で初めて成功しました。原理的に「熱の流れを制御すること」や「加熱によって生じる原子の回転運動を電気信号に変換すること」が可能のため、新しい断熱材料や情報処理技術の開発への貢献が期待されます。

本研究成果は、2024年1月30日に米国物理学会が発刊する『Physical Review Letters』に掲載されました。

古くから知られている水晶に新たな魅力を見つけたことが何より嬉しいです。本研究から「キラル物質がなぜ左右の構造となるのか」という謎に迫る手掛かりが得られるかもしれません。キラルな水晶の隠れた特性を実験で証明するには苦労しましたが、研究に用いる左右の天然水晶を探すのは楽しい作業でした。ちなみに、写真で手に持っているのは右水晶です。



戸川 欣彦教授

<研究の背景>

水晶は古くより知られている鉱物で、仏教の七宝の一つとして重宝されてきました。現代では、水晶が電氣的に振動する特性から水晶振動子としても利用されており、発振回路と組み合わせることで、電氣的に高速で安定して動作する発振器になります。水晶発振器は、クォーツ時計や携帯電話・パソコンなどの電子機器の動作タイミングを揃えるために活用されるほか、加速度センサやジャイロセンサとしても利用されています。このような水晶デバイスは「産業の塩」と呼ばれており、水晶は現代社会に必要不可欠です。

水晶は右手と左手のように、鏡写しにすると重なりますが実際には重ならない構造（図1上）を持ちます。この性質をキラルと呼び、最近の研究を通じてキラルな物質が示す新たな特性が明らかになってきています。キラルな特性としてよく知られている光学活性は、らせん階段のような構造を持つキラル物質の中を光が進む際に光の偏光を逆向きに回転させる特性で、この性質から水晶の右と左を見分けることができます（図1下）。この考え方は電子にも当てはまり、本研究グループではごく最近、キラルな無機結晶の金属に電気を流すことで、結晶内の電子がらせん構造を動き、電子の持つ磁気情報（スピン^{*1}）の向きが正負どちらかに偏ることを発見しました。一方で、水晶のように電気を通さないキラルな物質では、キラル構造を持つことに起因する特有の現象が起こるかどうかは明らかになっていませんでした。

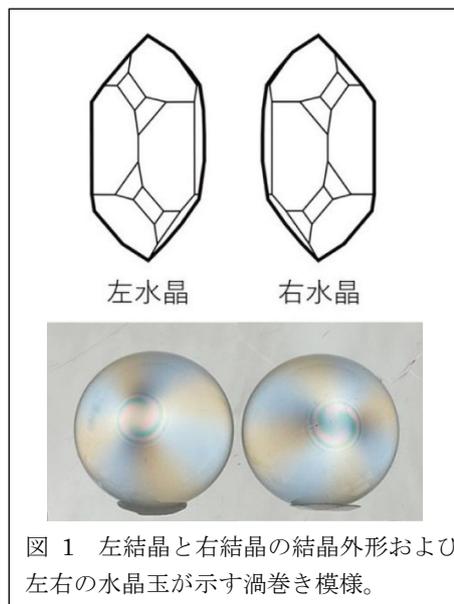


図1 左結晶と右結晶の結晶外形および左右の水晶玉が示す渦巻き模様。

<研究の内容>

本研究では、水晶に電気の代わりに熱を加えることで、キラル特有のどのような現象が起きるかを調べました。板状の水晶の上部に電熱ヒーターを設置し、下部を銅ブロックにつなげることで上部から下部へ熱を流します。また、横向きに設けた電極から電気信号を検出できます（図2）。

この水晶デバイスを用いて実験をしたところ、通常物質中では原子が振動することにより熱が伝わりますが、キラルな水晶では、原子が回転しながら振動し、その波動が水晶内をらせん状に伝わる、キラルな物質特有の現象（キラルフォノン^{*2}）が生じていることがわかりました。また、右水晶では右方向、左水晶では左方向に原子が回転しており、回転方向の情報（角運動量^{*3}）がキラルフォノンによって運ばれること、さらに角運動量を電気信号に変換して検出できることがわかりました。

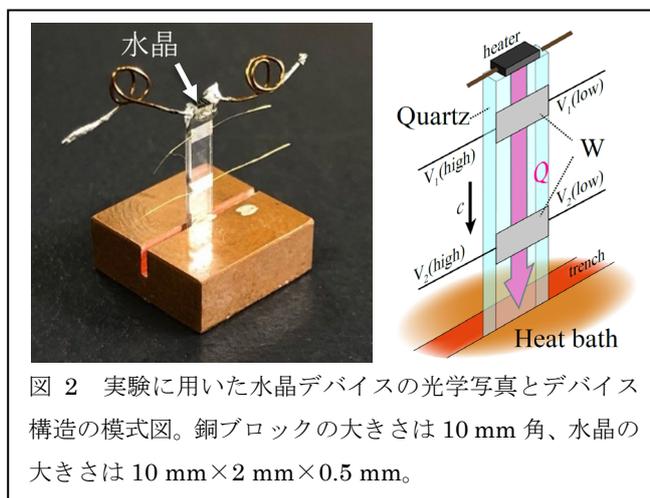


図2 実験に用いた水晶デバイスの光学写真とデバイス構造の模式図。銅ブロックの大きさは10 mm角、水晶の大きさは10 mm×2 mm×0.5 mm。

<期待される効果・今後の展開>

キラルな物質では、電子のスピンが正負どちらかに偏るだけではなく、キラルフォノンによって運ばれる角運動量を電気信号として取り出せることを発見しました。キラルフォノンは水晶のみならず他のキラル物質でも生じるため、スピン偏極現象の発現機構の有力候補と考えられます。また、キラル物質ではキラルフォノンの回転方向に応じてその流れやすさが変わります。この特性を利用することで、新たな断熱材料や絶縁体における情報処理技術の開発も期待されます。

<資金情報>

本研究は、日本学術振興会 科研費 基盤研究 A (JP23H00091)、基盤研究 B (22H01944、21H01032、17H02923、17H02767)、豊田理研 特性課題研究、大学共同利用機関法人自然科学研究機構 OPEN MIX LAB 事業 (OML012301) の助成を受けて行いました。また、本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (JPMXP1222MS0015、JPMXP1222MS3006) の支援を受けて自然科学研究機構 分子科学研究所で実施しました。

<用語解説>

※1 スピン…電気を担う電荷とともに、電子が生まれながらに持つ基本的な属性。スピンは磁気の素であり、究極の情報媒体の一つとして期待されている。一方、スピンは極微な世界を記述する量子力学の産物。スピンの特性を理解して活用する試みはまだまだ発展途上にある。

※2 フォノン…結晶中の原子の振動を量子力学的に記述したもの。原子は結晶中でばらばらに振動するのではなく、全体で一体となって波のように振動しており、量子力学ではこの集団振動を粒子として記述する。波と粒の性質を併せ持つ量子状態に対応しており、この量子化された結晶中の原子の集団運動をフォノンと呼ぶ。

※3 角運動量…物体の回転運動を表す物理量で、回転の強さを表す指標。

<掲載誌情報>

【発表雑誌】 Physical Review Letters

【論文名】 Chirality-Induced Selectivity of Phonon Angular Momenta in Chiral Quartz Crystals

【著者】 Kazuki Ohe, Hiroaki Shishido, Masaki Kato, Shoyo Utsumi, Hiroyasu Matsuura, and Yoshihiko Togawa

【掲載 URL】 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.056302>

【研究内容に関する問い合わせ先】

大阪公立大学大学院 工学研究科
教授 戸川 欣彦 (とがわ よしひこ)
TEL : 072-254-8216
E-mail : ytogawa@omu.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻
助教 松浦 弘泰(まつうら ひろやす)
E-mail: matsuura@hosi.phys.s.u-tokyo.ac.jp

【報道に関する問い合わせ先】

大阪公立大学 広報課
担当：竹内
TEL : 06-6605-3411
E-mail : koho-list@ml.omu.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室
TEL : 03-5841-0654
E-mail : media.s@gs.mail.u-tokyo.ac.jp