

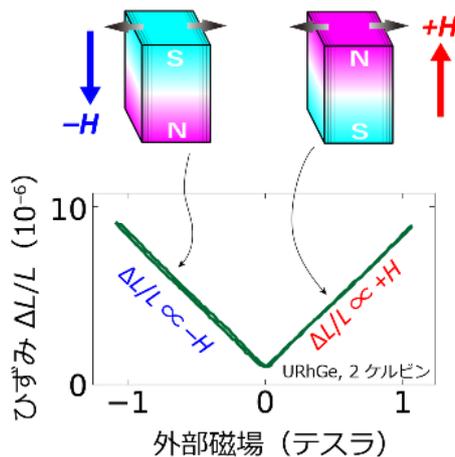
強磁性体における圧磁効果を発見

— 必然でありながら半世紀以上知られていなかった強磁性圧磁効果の初観測 —

概要

磁場中で物質が伸縮する効果を磁歪(じわい)と呼びます。通常の磁歪は磁場の二乗に比例する効果ですが、磁場の一乗に比例してひずむ効果を「圧磁効果 (Piezomagnetism)」と呼びます。このひずみが磁場に比例するという性質から、圧磁効果は低い磁場で動作するセンサーやアクチュエーターなどへの応用も期待できます。この圧磁効果の基礎理論は 1950 年代に確立され、その後十数例程度の圧磁効果物質が発見されてきました。この基礎理論は、「磁石にくっつく物質」である強磁性体は必然的に圧磁効果を示すことを予言します。しかしながら、これまで強磁性体における圧磁効果の報告例はありませんでした。この、必然でありながら半世紀以上も報告されていなかった原因として、通常の強磁性体が形成する磁区によって圧磁効果が打ち消されてしまう点が考えられます。京都大学大学院工学研究科 米澤進吾 教授、富川幹也 大学院理学研究科修士課程学生 (研究当時)、荒木遼 同修士課程学生 (研究当時)、大学院理学研究科 石田憲二 教授らの研究グループは、東北大学金属材料研究所の青木 大 教授、仲村 愛 助教らと共同で、強磁性化合物 URhGe が圧磁効果を示すことを発見しました。このグループは、URhGe の単結晶試料のひずみ-磁場曲線を、光ファイバーを用いたひずみゲージで複数の結晶方位に対して同時に測定し、圧磁効果に起因する V 字型のひずみ-磁場曲線が特定の磁場方向のみで観測できることを見出しました。磁区が形成されにくい特殊な性質の強磁性体を用いたことがこの発見のカギになったと考えられます。この成果は圧磁効果を示す物質の探索幅を爆発的に広げ、圧磁効果の基礎的理解の大きな進歩や、応用に足る巨大圧磁効果物質の探索の指針を与えるものです。

本研究成果は、アメリカ合衆国の国際学術誌「Physical Review B」において、掲載論文のうち 10%以下しか選ばれない Editors' Suggestion に選出され、2024 年 9 月 20 日に同誌にオンライン掲載されました。



概念図: 強磁性体 URhGe が圧磁効果に起因する V 字型のひずみ-磁場曲線を示すことを観測しました。これは強磁性体において圧磁効果が観測できた初めての例になります。

1. 背景

物質は外部条件を変えることでわずかに伸縮することがあります。温度変化によって伸縮する熱膨張や、電場によって伸縮するピエゾ効果はその代表例ですが、外部磁場の印加によって伸縮する磁歪（じわい）¹ 効果も知られています。通常の磁歪は外部磁場の二乗に比例する効果ですが、特別な磁歪として磁場の一次に比例する伸縮が生じるという圧磁効果（Piezomagnetism）² が知られています（図 1）。通常の磁歪は低磁場では非常に小さくなってしまふのに対し、圧磁効果は磁場が小さくてもひずみを引き起こすことが可能であり、磁場センサーや磁場によって駆動するアクチュエーターなどへの応用も期待されています。

圧磁効果の基礎理論は 1950 年代に確立されました。それによると、圧磁効果が起こるのは、磁石にくっつく物質である強磁性体³か、特殊な磁気構造を持つ反強磁性体⁴に限られることがわかっています。後者については実際に圧磁効果が発見されており、これまでに数十例の圧磁効果物質が知られています。一方、強磁性体は、理論的には必然的に圧磁効果を示すはずであると予言されていながら、基礎理論の確立から半世紀以上もの間、圧磁効果を示す強磁性体は知られていませんでした。この大きな理由としては通常の強磁性体が形成する磁区（磁気ドメイン）⁵の存在が考えられます。通常、強磁性体では図 2 に模式的に示すように、磁気モーメントが様々な方向を向いた磁区が形成されています。この磁区が形成されてしまうと、圧磁効果が打ち消されてしまったり、磁区の変化に起因する磁歪効果が生じてしまったりして、圧磁効果の観測が極めて難しくなると考えられるのです。このように、強磁性体における圧磁効果は、必然でありながら 50 年以上も見過ごされてきた効果であるといえます。

2. 研究手法・成果

ウラン-ロジウム-ゲルマニウム化合物 URhGe は絶対温度 9.5 ケルビン（-263.7°C）以下で強磁性を示す物質であり、さらに低温の 0.3 ケルビン以下では超伝導も示す物質として世界的に注目を集めている物質です。この物質の強磁性磁気モーメントは結晶構造の *c* 軸方向に非常に大きな値を持つことから、イジング的強磁性体と呼ばれています。

京都大学大学院工学研究科米澤進吾教授らの研究グループは、東北大学金属材料研究所の青木大教授らのグループと共同で、URhGe の単結晶試料の磁場中でのひずみを精密に測定しました。測定には、光ファイバーベースのひずみゲージである fiber Bragg grating (FBG) を用い、複数方向の伸縮を同時測定するという新しい研究手法を用いました。その結果、磁場を結晶の *c* 軸方向に印加した場合、*b* 軸方向と *c* 軸方向の相対的なひずみ $\Delta L/L$ と外部磁場の関係が強磁性状態においては V 字型になることを見出しました（概念図）。一方、別の磁場方向ではこのような V 字型の振る舞いは観測されず、通常の磁歪から期待されるような磁場の二乗に比例する放物線型のひずみが観測されました。他の実験結果から、磁場を反転させると URhGe 試料の磁化が、磁区を作る間もなく完全に反転することがわかりました。この特徴はイジング的強磁性体であることと関連していると考えられます。すると、観測された V 字型のひずみ-磁場曲線は、磁場に比例するひずみ（圧磁効果）と、磁区を作らない磁化反転を組み合わせることで説明が可能です。このような考察・解析によって、URhGe が圧磁効果を示す初めての強磁性体であることを示しました。さらに、本研究から得られた URhGe の圧磁効果の大きさを表す応答係数は、*c* 軸方向の磁場下で生じる *b* 軸方向のひずみに対して $+8.0 \times 10^{-6} / T$ であり、これまでに知られている反強磁性体の圧磁効果の最大値（ $10 \sim 20 \times 10^{-6} / T$ ）と比較しても遜色がない大きさでした。

3. 波及効果、今後の予定

先にも述べたように、圧磁効果は磁場に比例するひずみ効果であり、その特性を利用した応用も期待されています。このように顕著な性質を持ちながら、圧磁効果を示す物質は十数例が知られているのみであり、まだ開拓途上の効果であるといえます。本研究で、強磁性体が圧磁効果を示すことが発見されました。この発見により、より大きい圧磁効果を示す物質や、より応用しやすい条件下での圧磁効果を示す物質を探索するうえでの条件が大きく緩和されます。また、圧磁効果の基礎理論は圧磁効果が起こるか否かを予言するだけにとどまっており、その応答の大きさを定量的に理論計算することはまだできません。URhGe が比較的大きな圧磁効果を示すということが発見されたことから、その応答の大きさを理論的に理解する研究などへの波及効果も見込まれます。このように、本研究によって、圧磁効果の研究が大きく進展すると期待されます

4. 研究プロジェクトについて

本研究を行うにあたり、日本学術振興会の科学研究費補助金(課題番号 JP20H05158、JP22H04473、JP23H04861、JP24H01663、JP17H06136、JP20H00130、JP22H01168、JP22H04933、JP20KK0061、JP20K20889)、日本学術振興会の Core-to-Core Program (課題番号 JPISCCA20170002)、日本学術振興会の二国間交流事業 (JPISBP120223205)、公益財団法人京都大学教育研究振興財団の研究活動推進助成、京都大学の研究費獲得支援事業いしずえ (2020 及び 2023 年度)、および公益財団法人村田学術振興・教育財団の研究助成の支援を受けました。本研究で用いた実験装置の一部は京都大学理学研究科研究機器開発支援室に作製いただいたものです。また、実験に用いる液体ヘリウムなどの寒剤供給について、京都大学低温物質管理部門のサポートを受けました。

<用語解説>

1. 磁歪

外部磁場を印加した際に物質がわずかに伸縮すること。通常の物資では、磁場の符号に依らないひずみ方をします。つまり、磁歪 $\Delta L / L$ は磁場 H の偶数乗の項からなる多項式で表され ($\Delta L / L = AH^2 + BH^4 + CH^6 + \dots$)、 H の奇数乗に比例する項が入ることは許されません。

2. 圧磁効果

通常の磁歪とは異なり、磁場 H の一次に比例する磁歪 ($\Delta L / L \propto H$) のこと (参考図表 1)。磁場の一次の効果であるため、磁場が小さくても大きい応答を示すことが期待され、センサーやアクチュエーターの基礎原理として応用可能です。理論的には、このような効果が生じるためには、強磁性体であるか、特殊な磁気構造を持つ反強磁性体 (専門用語でいうと時間反転対称性を破った物質) である必要があります。これまでに圧磁効果を示す反強磁性体が十数例のみ知られていました。

3. 強磁性体

物質の中で磁気モーメント (微小な磁石) が一方向に整列しており、磁石に引き寄せられたり、磁石になったりするような物質。身近な例では、鉄やニッケルが強磁性体ですし、ネオジム磁石も強磁性体の一例です。

4. 反強磁性体

物質の中で磁気モーメントが逆方向に交互に整列した物質。

5. 磁区

強磁性体では、物質中で磁気モーメントがそろいますが、ほとんどの強磁性体では、その揃う方向が異なる微小な領域に分かれています（参考図表 2）。この微小な領域を磁区といいます。この磁区が形成されると、様々な磁氣的性質が打ち消し合ってしまう。例えば、鉄は強磁性体であるにもかかわらず他の鉄を引き寄せたりしませんが、これは磁区の形成によって磁気モーメントがキャンセルされてしまっているからです。同様に、磁区が存在すると圧磁効果もキャンセルされてしまうと考えられます。

<研究者のコメント>

この研究では、実験もちろん苦労しましたが、V字型の歪みが本当に圧磁効果なのか考察し、さらになぜこの物質で初めての強磁性圧磁効果が見えたのかということを理解するのも非常に苦労しました。結果として、必然でありながら見過ごされてきた世界初の効果を報告することができたので非常にうれしく思います。

<論文タイトルと著者>

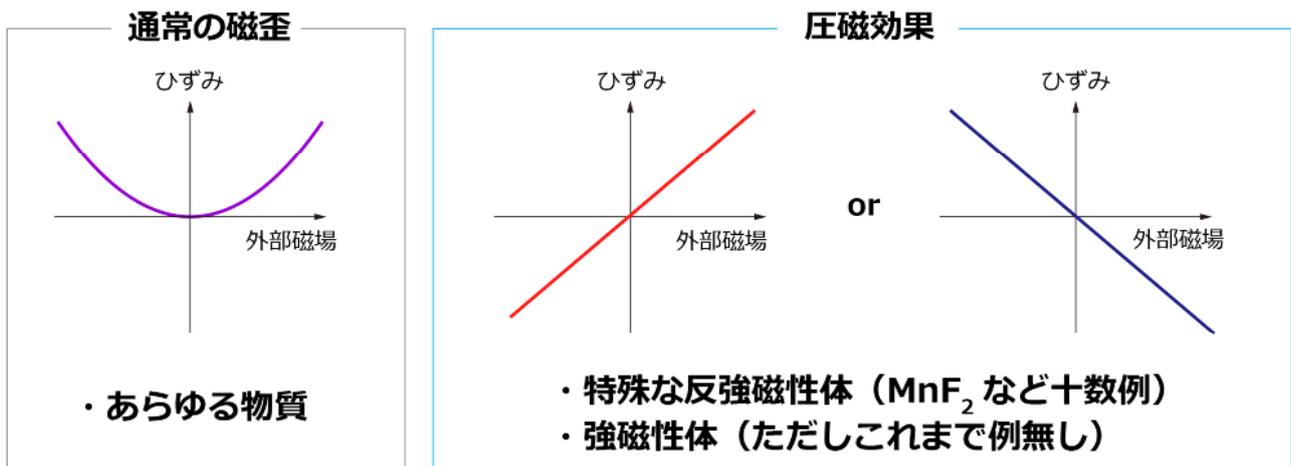
タイトル： Piezomagnetism in the Ising ferromagnet URhGe

(イジング強磁性体 URhGe における圧磁効果)

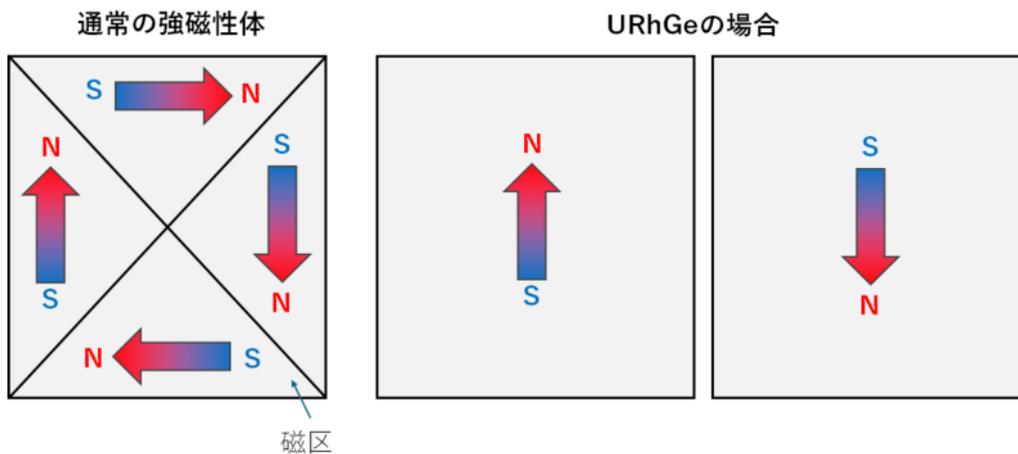
著者： Mikiya Tomikawa, Ryo Araki, Atsutoshi Ikeda, Ai Nakamura, Dai Aoki, Kenji Ishida, and Shingo Yonezawa

掲載誌： *Physical Review B* DOI：未定

<参考図表>



参考図表 1: 通常の磁歪と圧磁効果の比較。通常の磁歪では、左図のように外部磁場の 2 乗に比例するような磁場の正負に対して対称なひずみ-外部磁場曲線を示します。一方、圧磁効果は外部磁場の 1 乗に比例する効果で、右図のように直線的なひずみ-磁場曲線を示します。傾きの正負は磁気構造によって決まります。



参考図表 2: 強磁性体の作る磁区。通常の強磁性体では、左図のように磁気モーメントの揃う向きが異なる領域（磁区）が物質内部で形成されます。磁区が形成されると、圧磁効果の観測が非常に困難になります。一方 URhGe は右図のように磁区を形成する傾向が非常に弱く、さらに磁気モーメントが $\pm c$ 軸方向に向く傾向が強いというイジング性を持っているため圧磁効果が観測できたと推測しています。