

磁場により体積が大きく膨張する新材料の発見  
 ——新たなアクチュエータ材料としての応用に期待——

1. 発表者：

竹中 康司 (名古屋大学大学院工学研究科 教授)

岡本 佳比古 (東京大学物性研究所 教授)

2. 発表のポイント：

- ◆クロムテルル化合物において、磁場を加えたときに最大級の体積膨張を実現した。この体積膨張は室温を含む幅広い温度領域で現れ、広い磁場範囲で磁場に比例する特徴をもつ。
- ◆この磁場中体積膨張が、結晶格子の異方的な変形を利用した新しい機構によるものであることを解明した。
- ◆有害な鉛を含まない新材料であり、アクチュエータ材料開発の候補の幅を大きく広げた。

3. 発表概要：

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院工学研究科の窪田 雄希 大学院生、兼松 智也 大学院生 (研究当時)、平井 大悟郎 准教授、竹中 康司 教授と東京大学物性研究所の岡本 佳比古 教授の研究グループは、東京大学物性研究所の矢島 健 助教と協力して、室温を含む幅広い温度領域において、磁場を加えることで体積が大きく膨張する新材料を発見しました。従来の磁歪材料と異なる新材料系に現れた、新しい発現機構に基づく巨大体積膨張であり、高性能なアクチュエータ (注1) 材料として応用が期待されます。

磁場中で物体の形状や大きさが変化する現象は磁歪 (磁場誘起歪) (注2) と呼ばれ、大きな磁歪を示す材料は、磁場により変位や駆動力を得る磁歪アクチュエータに実用されています。磁歪アクチュエータは、精密位置決め素子やマイクロマシンの駆動部、力や位置の変化のセンサ、超音波を用いたソナーや洗浄機といった、さまざまな機器に使用されてきました。これまで、磁歪材料として、鉄と希土類金属の合金である Terfenol-D などの材料が開発されてきまし

たが、磁歪はいずれの場合にも強磁性体（注3）の「磁石」としての性質である自発磁化（注4）の発現に伴って生じ、それ以外で大きな磁歪を示す例はほとんど知られていませんでした。

岡本教授らは、クロム（Cr）のテルル（Te）化物の焼結体が、9 Tの磁場を加えたときに最大で1200 ppmに達する大きな体積の膨張を示すことを発見しました。この磁場中の大きな体積膨張は、 $-260^{\circ}\text{C}$ から $80^{\circ}\text{C}$ に至る広い温度領域で現れること、磁場中で形状を保ったまま体積が変化すること、幅広い磁場範囲でほとんど磁場に比例することといった特徴をもち、磁場中の異方的な格子変形を利用した新しい機構に基づく磁場誘起歪現象であることが明らかになりました。本物質系が新しい磁歪材料として有望であることはもちろん、磁歪材料の候補物質の幅を大きく広げると期待されます。現在、アクチュエータ材料の分野では、電場で駆動するチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）が大々的に活用されていますが、有害な鉛を含むことが問題となっており、代替材料の開発が喫緊の課題となっています。この成果はその解決にもつながるものです。

この研究成果は、米国科学誌「Applied Physics Letters」電子版に2023年1月25日午前0時（日本時間）に掲載されました。

#### 4. 発表内容：

##### 【研究の背景】

ある物体に磁場を加えたときに形状や体積が変化する現象は磁歪（磁場誘起歪）と呼ばれ、強磁性体では一般に起こる現象です。通常の強磁性体では、磁歪の大きさは1から10 ppm（百万分の一から十万分の一）程度ですが、中にはTerfenol-Dと呼ばれる鉄と希土類金属の合金のように、1000 ppm（千分の一）を超える巨大な磁歪を示す物質もあります。このような物質は超磁歪材料と呼ばれ、大きく高速な磁場応答を生かして、磁場により変位や駆動力を得る磁歪アクチュエータとして実用されています。磁歪アクチュエータは、精密位置決め素子やマイクロマシンの駆動部、力や変位のセンサ、ソナーや超音波洗浄機といった超音波の応用など、様々な用途に使用できます。特に現在、圧電効果を用いたアクチュエータが精密位置決め素子などに幅広く利用されていますが、有害な鉛を含むチタン酸ジルコン酸鉛（PZT）が材料として使われているため、これに変わるアクチュエータ材料の開発が強く求められています。しかし、これまで見出されてきた大きな磁歪を示す物質の大部分は、強磁性体の「磁石」としての性質である自発磁化の発現に伴って大きな磁歪を実現しています。磁歪が主に、強磁性磁区（注5）の磁場による整列により生じるためであり、これ以外の機構で大きな磁歪を示す例はほとんど知られていませんでした。

##### 【研究の内容】

岡本教授らは、 $\text{Cr}_3\text{Te}_4$ と $\text{Cr}_2\text{Te}_3$ の化学組成をもつクロムテルル化物の焼結体が、大きな体積膨張を伴う磁場誘起歪を示すことを発見しました。特に $\text{Cr}_3\text{Te}_4$ では $-260^{\circ}\text{C}$ から $80^{\circ}\text{C}$ に至る広い温度領域で大きな体積膨張が現れ、9 Tの磁場を加えたときの体積膨張は最大で1200 ppmに達しました（図1）。このような巨大な磁場中体積変化を示す物質は、熱膨張制御材料として有名なインバー合金に限られており、これらのクロムテルル化物が新しいアクチュエータ材料として有望であることを示します。また、この磁場中の体積膨張は、従来の磁歪材料と異なるさまざまな特徴をもちます。まず、主に物体の形状が変化し体積は大きく変わらない従来の磁歪と異なり、磁場中で形状を保ったまま体積が大きく変化します（図2）。また、ゼロ磁場から少なくとも9 Tに至る広い磁場範囲でほとんど磁場に比例する体積膨張を示します（図1）。

これらの結果は、岡本教授らが発見したクロムテルル化物における磁場誘起歪が、従来の磁歪材料のような磁場による強磁性磁区の整列によるものでないことを示します。

$\text{Cr}_3\text{Te}_4$  と  $\text{Cr}_2\text{Te}_3$  の磁場誘起歪、熱膨張、低温 X 線回折、磁化の実験結果に基づく考察により、大きな体積膨張を伴う磁場誘起歪が、結晶格子が磁場により異方的に変形する効果と、焼結体試料に存在する空隙の大きさが変化する材料組織の効果が協働することにより生じた可能性が高いことが明らかになりました。これは大きな体積変化を伴う磁場誘起歪を実現する新しい機構です。これは、強磁性体の磁区が重要な役割を担わなくてもよいことを意味し、次世代の磁歪材料開発の幅を大きく広げます。本研究が引き金となって、従来材料と全く異なる物質群におけるアクチュエータ材料の有力候補の開発や、自発磁化をもたない反強磁性体（注6）において大きな磁場誘起体積変化を示す物質が発見されることが期待されます。

本研究は、文部科学省・科学研究費助成事業 新学術領域研究「量子液晶の物性科学」（課題番号：19H05823）、基盤研究(A)（課題番号：20H00346）、基盤研究(B)（課題番号 20H02603）、および公益財団法人池谷科学技術振興財団・単年度研究助成の支援を受けて実施されました。

#### 【成果の意義】

・ ほぼ等方的で、幅広い磁場範囲でほとんど磁場に比例する大きな磁場誘起歪を、極低温から室温以上に至る広い温度領域で実現した

Terfenol-D に代表される従来の磁歪材料において磁歪は主に形状の変化として現れ、磁場を加えることである方向に伸びると、それと垂直な方向には縮みます（異方的）（図2上）。また、強磁性体における自発磁化の発現に伴って現れるため、強い磁場を加えたときには歪の大きさは頭打ちになります。それに対して、クロムテルル化物に現れた磁場誘起の体積膨張は、物体の形をほとんど保ったまま体積が変化し等方的である点、ゼロ磁場から少なくとも 9 T に至る広い磁場範囲で概ね磁場に比例する体積膨張を示す点で従来の磁歪材料と異なり、さらに、このような特徴的な磁場誘起歪を極低温から室温以上に至る幅広い温度領域で示します。既存の磁歪材料では対応できなかった、磁場応答に高い等方性や線形性が要求されるような用途への利用が期待されます。

・ 従来の磁歪材料と異なる物質群：クロム化合物磁性体において室温で最大級の磁場誘起体積膨張を示した

超磁歪材料として知られる Terfenol-D や Galfenol、大きな体積磁歪を示すインバー合金はいずれも鉄を含む金属強磁性体であり、反強磁性体になりやすいクロム化合物の磁性体は磁歪材料としてほとんど注目されていませんでした。本研究においてクロムテルル化物における室温巨大磁場誘起歪を発見したことは、クロム化合物磁性体が次世代の磁歪材料開発の舞台として有望であることを示し、さらなる高性能材料の発見が期待されます。

#### 5. 発表雑誌：

雑誌名：Applied Physics Letters

論文タイトル：Large magnetic-field-induced strains in sintered chromium tellurides

著者：Yuki Kubota, Yoshihiko Okamoto\*, Tomoya Kanematsu, Takeshi Yajima, Daigorou Hirai, and Koshi Takenaka

DOI 番号：10.1063/5.0134911

URL：https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0134911

## 6. 用語解説：

### (注1) アクチュエータ

入力したエネルギーを物理的な運動（変位：物体の位置の変化、駆動力、振動など）に変換するデバイス。磁気エネルギーを利用した磁歪アクチュエータはその一種。現在、圧電効果（ピエゾ効果）を用いた圧電アクチュエータが精密位置制御などに広く使用されるが、チタン酸ジルコン酸鉛（PZT）と呼ばれる有害な鉛を含む物質が材料として使われていることが問題となっている。

### (注2) 磁歪（磁場誘起歪）

磁性体に磁場を加えたときに、外形がわずかに伸縮する現象。歴史的に磁歪とは、強磁性体における磁区が磁場により整列することによる歪のことを指したが、近年ではより一般的に、磁場により誘起される歪や体積変化現象の全てを指すこともある。

### (注3) 強磁性体

磁場のない状況においても、磁気モーメント（電子スピン）が一方向に揃う磁性体。自発磁化をもち、永久磁石となりうる。鉄やニッケルが代表例。

### (注4) 自発磁化

強磁性体において、磁気モーメント（電子スピン）が一方向に揃うことで自発的に形成される磁化。

### (注5) 磁区

強磁性体の内部で、自発磁化の方向が揃った小さい区域のこと。

### (注6) 反強磁性体

強磁性体と同様に、磁気モーメント（電子スピン）が磁場のない状況においても固定されているが、隣同士の原子の磁気モーメント（電子スピン）が互いに逆向きになるなどの方法により、全体として磁気モーメントをもたない磁性体。自発磁化をもたず、磁石にならない。

7. 添付資料：

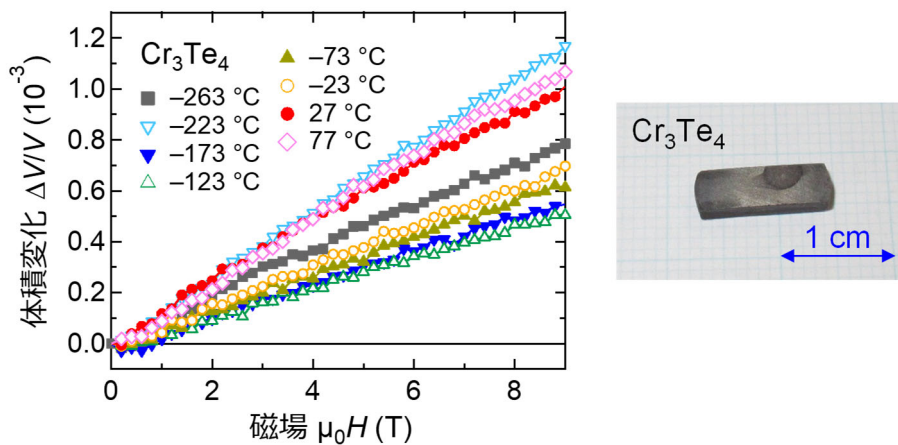


図1.  $\text{Cr}_3\text{Te}_4$  焼結体 (右) の磁場中における体積変化  
どの温度領域においても磁場の大きさにほとんど比例して体積が膨張していることがわかる。

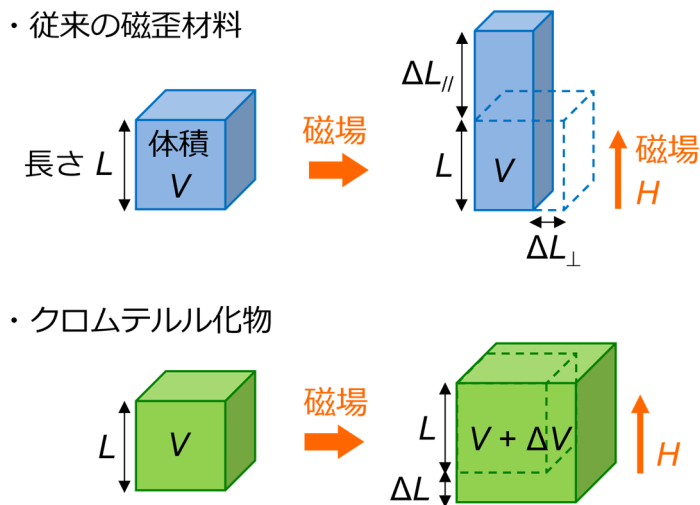


図2. 従来の磁歪材料と本成果の磁場誘起歪  
従来材料では、磁場と平行方向に伸びた場合は垂直方向に収縮し、体積変化は小さい。それに対して、本材料は、磁場の方向に関係なく等方的に膨張する。