

2026 年 8 月 3 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学
国立大学法人島根大学
国立大学法人九州大学
国立研究開発法人海洋研究開発機構
国立大学法人大阪大学
株式会社アカデメィア

空孔の規則度制御でフェリ磁性体の補償温度をコントロール — ありふれた元素から次世代スピントロニクス材料を創出！ —

【発表のポイント】

- 鉄 (Fe)、クロム (Cr)、硫黄 (S) からなる非平衡相（ピロータイト型構造^(注1)）において、熱処理（焼き入れ）温度を最適化することで不純物のない「単相」の合成に成功しました。
- 1323 K（約 1050 °C）から急冷した試料において、極めて大きな磁気保磁力^(注2)（38 kOe）が観測されました。
- 鉄とクロムから構成される副格子磁化の大きさが相殺する「補償型フェリ磁性体^(注3)」で、片方のスピンのみが電気を流す「ハーフメタル型電子状態^(注4)」を両立していることが第一原理計算の結果から示唆され、次世代の超高密度・超高速スピントロニクスデバイス^(注5)の基盤材料として期待がもたれます。

【概要】

本研究は、ありふれた元素のみで構成され、次世代スピントロニクスへの応用が期待される「ハーフメタル補償型フェリ磁性体」の創出に向け、鉄・クロム硫化物（ $(\text{Cr,Fe})_7\text{S}_8$ ）の製造プロセスの最適化に挑んだ成果です。

東北大学金属材料研究所の梅津理恵教授らの研究グループは、熱処理条件を検討した結果、1323 K 以上から急冷することで不純物の析出を完全に抑えた準安定相を得ることに成功しました（図 1、図 2）。急冷温度を変えることで結晶内の原子空孔の規則度を制御でき、それに伴い磁化が相殺する「磁化補償温度」をチューニングすることが可能です。特に 1323 K から急冷して得た試料は、5 K において 38 kOe という極めて巨大な保磁力を示しました（図 3）。さらに第一原理計算により、本物質が高いスピン分極率を持つハーフメタル型電子状態を有していることが示唆され、漏れ磁場のない超高密度・高速デバイスの基盤材料として極めて有望であることを明らかにしました。本成果は、2026 年 8 月 4 日（現地時間）に学術誌 Small にオンライン掲載されます。

なお本成果は、島根大学材料エネルギー学部（東北大学金属材料研究所クロスアポイント）の千星聡教授、九州大学大学院工学研究院の吉年規治准教授、国立研究開発法人海洋研究開発機構の真砂啓技術副主幹と川人洋介上席研究員、国立研究開発法人産業技術総合研究所の福島鉄也研究チーム長、大阪大学大学院工学研究科・株式会社アカデメイアの赤井久純 大阪大学名誉教授との共同研究によるものです。

【詳細な説明】

研究の背景

現代の情報社会を支える磁気ストレージや半導体デバイスのさらなる大容量化・省電力化に向け、「スピン（電子の磁石としての性質）」と「電荷（電気の流れ）」を同時に利用するスピントロニクス技術が注目を集めています。近年、デバイスの超高密度化に伴い、素子同士の磁気的な干渉（漏れ磁場による誤作動）を防ぐため、「マクロな磁化がゼロ（または極めて小さい）」でありながら「高いスピン分極率」を持つ材料の探索が世界中で進められていました。

今回の取り組み

東北大学をはじめとする研究グループは、以前に理論的・実験的に発見していた鉄・クロム硫化物 $(\text{Cr,Fe})_7\text{S}_8$ に着目しました。本研究では、その特性を最大限に引き出すための製造プロセス（焼結・急冷条件）の最適化に挑みました。

1323 K および 1423 K という高温域からの急冷（WQ）を行うことで、不純物（スピネル相）の析出を完全に抑え、綺麗な「単相」を得ることに成功しました。さらに、急冷温度を変えることで、結晶内の「原子の隙間（空孔）」の規則性をナノレベルで制御できることを見出しました。それにより、1323 K から急冷した試料では、磁化がゼロになる温度（磁化補償温度）が約 200 K だったのに対し、1423 K からの場合は約 90 K と 100 K 以上も変化しました。つまり、磁化補償温度を急冷プロセスでチューニング可能であることを突き止めました。

また、1323 K から急冷した試料は、5 K において 38 kOe（キロエルステッド）という驚異的な磁気保磁力を示しました。これは、一度書き込んだ磁気情報が外部の強力な磁場によっても簡単に破壊されない、極めて強固な安定性を持つことを意味します。

第一原理計算（Akai-KKR）を用いた電子状態の計算により、本物質が一方のスピン電気伝導性のみを 100% 近く通す「ハーフメタル型電子状態」を有していることを示しました。

本成果の最大のポイントは、「鉄・クロム・硫黄」という極めてありふれた（安価かつ地殻中に豊富な）元素の組み合わせで、これほど特殊な次世代機能（巨大保磁力・補償型フェリ磁性・ハーフメタル型電子状態）を発現させた点

にあります。また近年、磁性物理学のトレンドとなっている「オルターマグネット (Altermagnets) ^(注6)」や「補償型フェリ磁性体」の議論に一石を投じる学術的価値があります。

今後の展開

研究グループは、すでに本物質の「単結晶」の合成にも成功しており、今後は結晶の方位による磁気異方性や、実際のデバイス動作に直結する電気伝導・スピン輸送特性の評価を進める予定です。これにより、漏れ磁場が一切なく、熱に強く、超高速で動作する次世代 MRAM (磁気抵抗メモリ) などの実用化の促進に貢献することが期待されます。

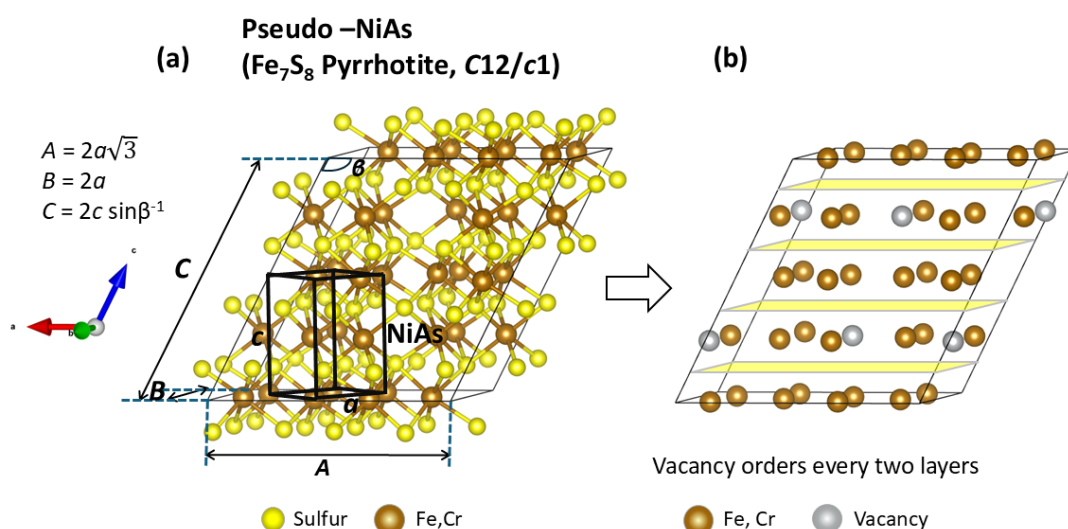


図 1(a). ピロータイト型結晶構造。六方晶 NiAs 型構造を a 軸と c 軸に 2 個ずつ積み上げたような構造である。(b) Fe (Cr)の層に着目すると、1 層おきに空孔が規則的に配列している。高温からの急冷でその空孔の配置が不規則化し、磁化補償温度が制御可能であることが本研究で明らかになった。

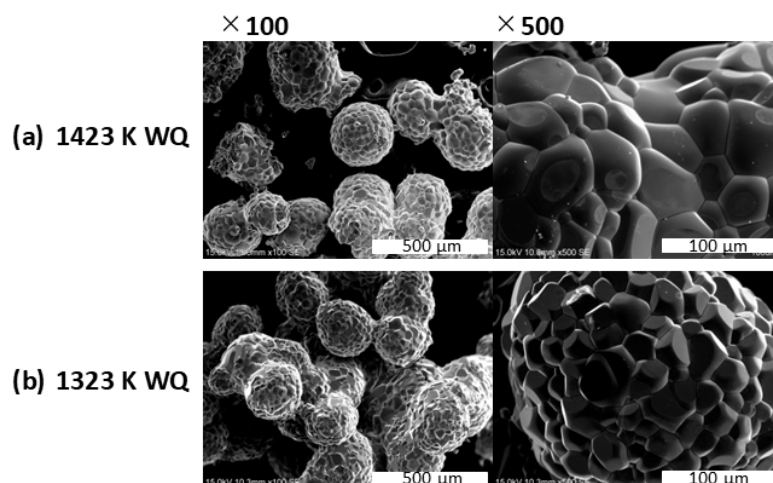


図 2. (a) 1150 °C (1423 K)、および(b) 1050 °C (1323 K)にて焼結し、急冷 (WQ) して得た試料の組織。数十ミクロンの結晶が凝集して数百ミクロンの粒を形成している。析出物相は見られず、X 線回折測定の結果と合わせて単相であることが分かる。

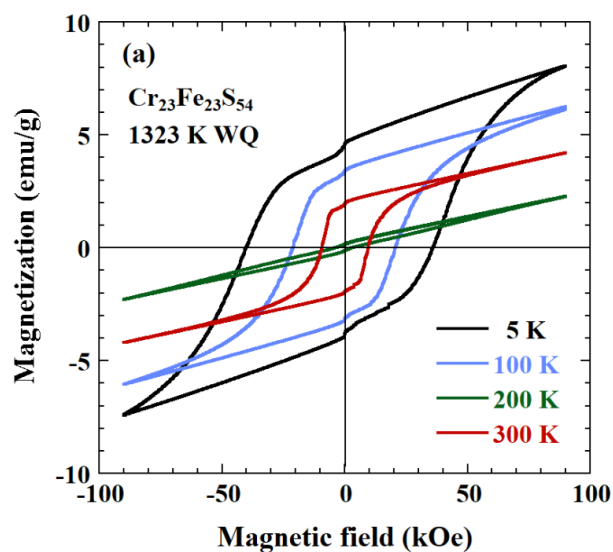


図 3. 1050 °C (1323 K) から急冷 (WQ) して得た試料の磁化曲線。特に 5 K で測定を行った磁化曲線では非常に大きなヒステレシスが観測され、保磁力は 38 kOe であることが分かる。

【謝辞】

本研究は、東北大学、島根大学、九州大学、海洋研究開発機構（JAMSTEC）、大阪大学、産業技術総合研究所（AIST）、株式会社アカデメイアなどの緊密な共同研究体制のもとで行われました。また、文部科学省科学研究費補助金

(JP22H00287、JP26H02191) の支援を受けるとともに、第一原理計算については JAMSTEC の「地球シミュレータ」を用いて実施されました。

【用語説明】

注1. ピロータイト型構造

自然界では「磁硫鉄鉱（じりゅうてっこう）」として知られる、硫化鉄をベースとした結晶構造の一種。結晶を構成する原子の並びの中に、規則正しく「原子の隙間（空孔）」が存在することが大きな特徴である。

注2. 保磁力

磁石の「磁化の反転しにくさ」、つまり記録された磁気情報の「消えにくさ（強固さ）」を表す指標。本研究の 1323 K 急冷試料が示した「38 kOe（キロエルステッド）」という値は巨大で、外部の強力な磁場やノイズにさらされても情報が破壊されない極めて高い安定性を持つことを意味する。

注3. フェリ磁性体、補償型フェリ磁性体

フェリ磁性体とは、物質の内部に「上向き」と「下向き」の異なる大きさのナノ磁石（磁気モーメント）が交互に並んでいる磁性体をいう。フェリ磁性体のうち、特定の温度や組成において、上向きと下向きのナノ磁石の強さが完全に釣り合い、物質全体としての磁気（マクロな磁化）がゼロになった状態（または物質）、もしくはそのような特徴を持つ磁性体を補償型フェリ磁性体という。フェリ磁性体は、磁石としての「漏れ磁場」が一切出ないため、超高密度に素子を敷き詰めても隣同士で磁気的な干渉（誤作動）を起こさないという強みがある。

注4. ハーフメタル型電子状態

電気を流す電子の「上向きスピン」と「下向きスピン」のうち、片方のスピンにとっては電気をよく通す「金属」、もう片方にとっては「絶縁体（または半導体）」として振る舞う、極めて特殊な電子のエネルギー状態。流れる電流のスピンが 100%片方に揃う（完全スピン極性を持つ）ため、スピントロニクスデバイスの性能を極限まで高めることができる。

注5. スピントロニクス

電子が持つ「電气的な性質（電荷）」と「磁石としての性質（スピン）」の両方を同時に工学的に利用する次世代の技術分野。従来の半導体技術に比べて圧倒的に省電力で、電源を切ってもデータが消えない超高速な MRAM（磁気抵抗メモリ）などの実現に不可欠な技術として注目されて

いる。

注6. オルターマグネット

近年の磁性物理学において、強磁性（いわゆる普通の磁石）、反強磁性（磁化ゼロの磁性）に続く「第 3 の磁性」として世界中で爆発的に研究が進んでいる新しい磁気構造のカテゴリー。マクロな磁化はゼロ（相殺されている）であるにもかかわらず、結晶の対称性によってハーフメタルのようにスピンの大きさが大きく偏った電子状態（スピン分裂）を持つという特徴がある。

【論文情報】

タイトル : Fully Compensated Ferrimagnetic Properties of (Cr,Fe)S Compound with a Pyrrhotite-type Structure

著者 : Weida Yin, Masato Miyakawa, Satoshi Semboshi, Noriharu Yodoshi, Akira Masago, Yosuke Kawahito, Tetsuya Fukushima, Hisazumi Akai and Rie Y. Umetsu*

*責任著者 : 東北大学金属材料研究所 教授 梅津理恵

掲載誌 : Small

DOI : 10.1002/sml.74603

URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sml.74603>

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学金属材料研究所

教授 梅津理恵

TEL : 022-215-2199

Email : rie.umetsu@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学金属材料研究所

情報企画室広報班

TEL : 022-215-2144

Email : press.imr@grp.tohoku.ac.jp

島根大学

企画部 企画広報課 広報グループ

TEL : 0852-32-6603

Email : gad-koho@office.shimane-u.ac.jp

九州大学 総務部広報課

TEL : 092-802-2130

Email : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

海洋研究開発機構

企画部門 事業推進部 報道室

Email : press@jamstec.go.jp

大阪大学

大学院工学研究科 総務課 評価広報係

Email : kou-soumu-hyoukakouhou@office.osaka-u.ac.jp

株式会社アカデメイア

Email : y-teramae@academeia15.co.jp