



平成 22 年 1 月 21 日

報道機関 各位

国立大学法人 東北大学金属材料研究所  
独立行政法人 日本原子力研究開発機構  
国立大学法人 東京大学物性研究所

## 超強磁場中性子回折法により フラストレート磁性体の普遍的なスピン-格子相互作用を発見

### <概要>

国立大学法人東北大学（総長 井上明久）金属材料研究所の野尻浩之教授、独立行政法人日本原子力研究開発機構（理事長 岡崎俊雄、以下「原子力機構」という）の松田雅昌研究主幹、国立大学法人東京大学（総長 濱田純一）物性研究所の植田浩明助教らの共同研究グループは、30 テスラ（\*1）の超強磁場下における中性子回折（\*2）法を用いた実験を行い、クロム（Cr）のフラストレート磁性体が磁場中で共通の磁気構造を持つことを初めて明らかにしました。この結果は、普遍的なスピン-格子相互作用（\*3）がこの現象に大きな役割を果たしていることを意味しており、今後、この現象の機構に対する理解が大きく進むことが期待されます。

また、今回の厳しい条件下での超強磁場中性子回折の成功により、これまで実験が出来なかった非常に広範囲の磁性体において磁場中のマイクロ磁気状態が明らかになると期待されます。これは、磁性と誘電性をもつ新材料の開発や、磁気を帯びたナノサイズの粒子の解析などへの応用をはじめとして、様々な新しい磁気デバイス材料の開発に大きな威力を発揮すると考えられます。

### <フラストレート磁性体の研究について>

物質の性質の多くは電子により特徴付けられています。電子はスピンと呼ばれる小さな磁石を持っており、磁場を用いればスピンを介して物質の性質を精密にコントロールすることが可能です。

フラストレート磁性体では数多くの磁気状態がほぼ同様のエネルギーで拮抗して

おり、この性質が不満（フラストレーション）を抱えた集団と似ているためにフラストレート磁性体と呼ばれます。また、どの磁気状態が物質の性質として最終的に表われるかを予想出来ず、その発現の仕方も物質によって異なるため、これを統一的に理解することは困難でした。その一方で、磁場をかけてフラストレーションの度合いを調節することにより、新たな性質を引き出すことも可能です。そして、これらの特徴は今回の研究の対象であるクロムのフラストレート磁性体でも同様です。今回の研究では、磁場をかけたフラストレート磁性体が共通な構造を持つことが明らかになりました。この機構には普遍的なスピン-格子相互作用が大きな役割を果たしていると考えられます。

#### <超強磁場中性子回折法について>

中性子回折法は物質中のスピンの配列を決定するための最も強力な手段です。磁場中で引き起こされるスピン配列の様々な変化を中性子回折実験で調べることは、物質の性質を理解する上で重要なことです。超強磁場中性子回折法は、20年以上にわたり、世界的に開発競争が進められてきましたが、最近 30 テスラを越える超強磁場での実験に成功し、注目されています。今回の成果は、独自に開発した超小型パルス強磁場発生装置を世界最高強度の研究用原子炉を有するフランス、ラウエランジュバン研究所(Institute for Laue Langevin)の中性子回折装置と組み合わせることで実現しました。

今回の実験に使用した超小型パルス強磁場発生装置（図1、図2参照）は野尻教授らのグループが開発したもので、通常用いられる大型パルス磁場発生装置と比べ、既存の装置の改造や新たなインフラを必要とせず、場所を選ばず迅速に実験ができることから、国外でもこの方式が導入されています。また、超強磁場中性子回折装置は、東北大学と原子力機構が4年前から原子力機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所内の研究炉 JRR-3 において開発を進めてきたものであり、海外への技術移転も行っています。この装置は、ラウエランジュバン研究所において高強度の中性子源を使い従来の強磁場記録の2倍以上という常識を打ち破る超強磁場下で計測を実現して世界的にも注目され、他国への導入も進んでいます。

今後この手法を様々な磁性物質の研究にも広げることで、磁性と誘電性をもつ新材料の開発や、磁気ナノ粒子の解析などへの応用につながり、より効率的な磁気材料開発が可能になると期待されています。

今回の研究は超強磁場中性子回折法により初めて可能になりました。クロムのフラストレート磁性体における普遍的なスピン-格子相互作用のメカニズムの検証と、この手法が様々な物質の特異な磁気特性を解明する強力な手法であることを示したことが評価され、著名な学術誌である **Physical Review Letters** に掲載される予定です。今

後この手法は、基礎物理のみならず新しい磁気材料の設計・開発にも大きく貢献すると期待されています。

---

今回の研究成果は、米国物理学会発行の英文学術雑誌「Physical Review Letters」のオンライン版で1月22日に公開されます。

(問い合わせ先)

国立大学法人 東北大学金属材料研究所

教授 野尻 浩之 (ノジリ ヒロユキ)

住所：宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

Tel：022-215-2015、Fax：022-215-2016

E-mail:nojiri@imr.tohoku.ac.jp

国立大学法人東北大学金属材料研究所

准教授 大山 研司 (オオヤマ ケンジ)

住所：宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

Tel：022-215-2038、Fax：022-215-2036

E-mail:ohoyama@imr.tohoku.ac.jp

## 補足説明

### 《掲載論文》

題名：Universal magnetic structure of the half-magnetization phase in Cr-based spinels (Crスピネルにおける半磁化状態の統一的な磁気構造)

著者：M. Matsuda, K. Ohoyama, S. Yoshii, H. Nojiri, P. Frings, F. Duc, B. Vignolle, G.L.J.A. Rikken, L.-P. Regnault, S.-H. Lee, H. Ueda, and Y. Ueda

ジャーナル名：Physical Review Letters (米国物理学会発行学術雑誌)、Vol.104

発行日:1月22日

### 《研究背景》

クロム (Cr) の酸化物であるスピネルというフラストレート磁性体のことをクロムスピネルといいます。クロムスピネル  $\text{ACr}_2\text{O}_4$  (A:非磁性元素)では正四面体の頂点にスピンの存在し、さらにこの正四面体が三次元的ネットワーク (パイロクロア格子) を構成しています。この構造に起因してクロムスピン間の相互作用に強いフラストレーションが存在します。ゼロ磁場の低温で磁気秩序が観測されますが、複雑な相互作用のために物質依存性が見られます。

また、 $\text{ACr}_2\text{O}_4$  では磁場中で磁化が一定になるプラトー現象が広い磁場領域で観測されており、強いスピン-格子相互作用に起因すると注目を集めています。約 10 テスラでプラトー相を示す  $\text{HgCr}_2\text{O}_4$  においては、プラトー相での磁気構造が明らかになっていますが、これがゼロ磁場同様に物質依存性を持つのか注目されていました。次の候補物質である  $\text{CdCr}_2\text{O}_4$  では、プラトー相での研究のために約 28 テスラ以上の超強磁場が必要ですが、これまでの超伝導マグネットの定常磁場を用いた手法 (磁場の上限値が約 17 テスラ) では不可能でした。

### 《研究内容と成果》

今回、30 テスラまでの超強磁場中でスピネル磁性体  $\text{CdCr}_2\text{O}_4$  の実験を行い、幾つかのブラッグ反射 (\*4) 強度の磁場依存性を測定しました (図 3)。その結果、磁化プラトー相における磁気構造が明らかになりました (図 4)。今回の実験により、この磁気構造が  $\text{ACr}_2\text{O}_4$  の磁化プラトー相において普遍的な構造であることが明らかになりました。このことは、数多くの可能な磁気整列状態の中から、物質によらないただ一つの状態が選択されていることを意味します。これはスピンと格子の自由度が協調することにより、一つの安定な状態を作り出しているものと考えられます。このような普遍的な現象を見出したことにより、フラストレート磁性体におけるスピン-格子相

関の機構に対する理解が大きく進むことが期待されます。

#### 《今後の展開》

今回の実験は、スピンの大きさが3/2（最小単位の3倍）、結晶質量が約40ミリグラムという弱い回折強度しか期待出来ない厳しい条件で行われています。30テスラまでの強磁場中性子回折法がこの厳しい条件下で成功したことにより、これまで実験が出来なかった非常に広範囲の磁性体において磁場中のマイクロ磁気状態が明らかになると期待されます。これは、磁性と誘電性をもつ新材料の開発や、磁気ナノ粒子の解析などへの応用をはじめとして、様々な新しい磁気デバイス材料の開発に大きな威力を発揮すると考えられます。

#### 用語説明

\* 1 : テスラ

磁場の強さを表す単位。30テスラは、地球上に生じる磁場（地磁気）の約75万倍に相当する。地磁気の強さは場所によって多少異なり、東京付近の磁場は約45,000ナノテスラといわれている。1ナノテスラは10億分の1テスラ。

\* 2 : 中性子回折

中性子という磁気(スピン)をもつ粒子を物質に照射して、磁気構造や結晶構造を決定する手法。磁気を持たないX線を用いて結晶構造を決定するX線と異なり、磁性体の磁気構造（磁気モーメントのマイクロな並び方）を直接的に決定する手法として使われている。

\* 3 : スピン-格子相互作用

磁気構造と結晶構造が互いに影響を及ぼしあって起こる現象。磁気秩序を安定化させるために格子歪みが協調して起こる。

\* 4 : ブラッグ反射

原子やスピンの規則正しく配列した結晶にX線や中性子線などを当てると、特定の波長や散乱角の条件を満たした時に強い反射が起こる。これをブラッグ反射と呼ぶ。

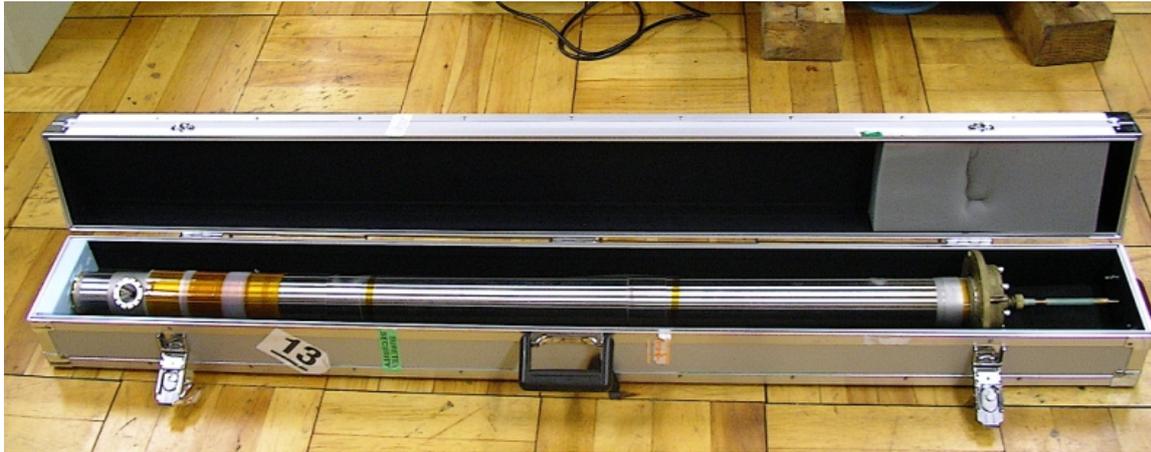


図 1 : 超小型パルス強磁場発生装置

磁場発生用のマグネットはステンレス管の内側に取り付けられている。持ち運びが容易であり、世界中の施設において実験ができる。

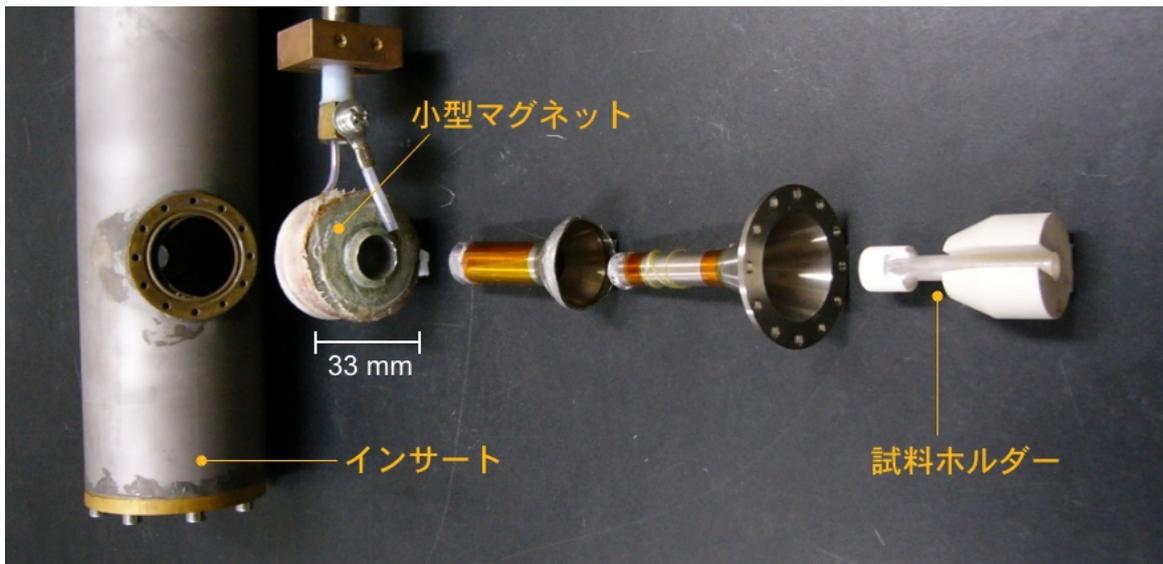


図 2 : 超小型パルス強磁場発生装置のパルスマグネットおよび試料周辺部

マグネットは内径 12mm、外径 33mm と小型ながら、地磁気の約 75 万倍（30 テスラ）の強磁場を発生できる。

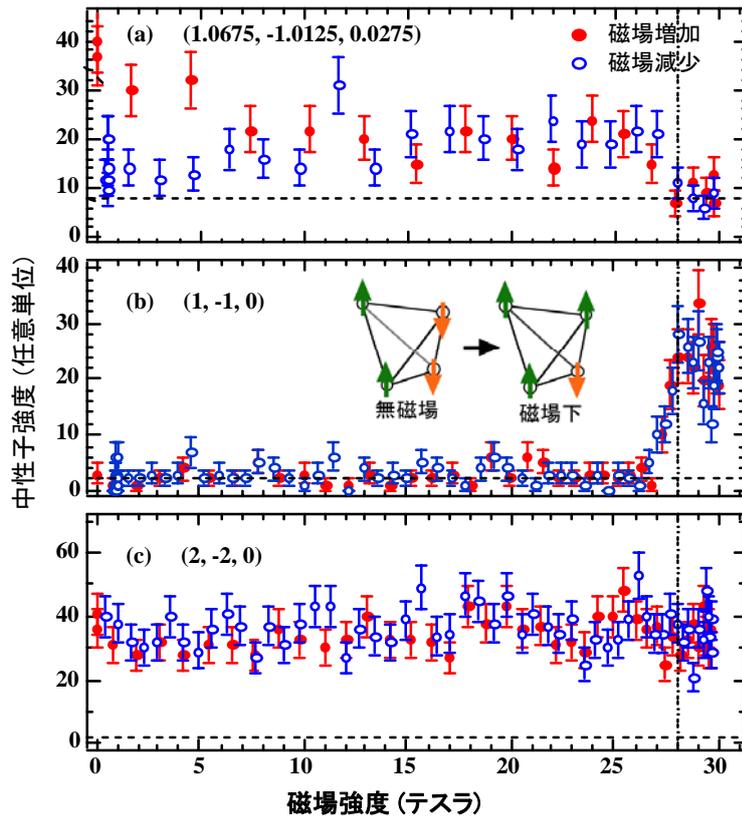


図 3 : Cr スピネル  $\text{CdCr}_2\text{O}_4$  のブラッグ反射強度の磁場依存性

磁場強度 0 で観測される磁気ブラッグ反射(a)が磁化プラトー相 (点線より右側が磁化プラトー相) で消失し、(1, -1, 0)磁気ブラッグ反射(b)が新たに出現する。(1,-1,0)反射が増加し、(2,-2,0)反射(c)が変化しないことから図 4 で示す磁気構造が決定された。1つの四面体に注目すると、無磁場では4つの Cr スピンのうち2つが上、2つが下という構造であるが、磁化プラトー相では3つが上、1つが下という構造に変化する。

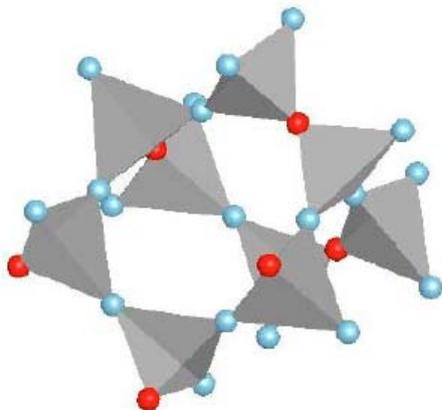


図 4 : 中性子回折実験により決定された  $\text{CdCr}_2\text{O}_4$  の磁化プラトー相における磁気構造  
青丸、赤丸ともに Cr スピンを表す (青丸が上向きスピンの、赤丸が下向きスピンの)。青丸間の距離が伸び、青丸-赤丸間の距離が縮むことによりこの磁気構造が安定になっていると考えられ、この系における強いスピン-格子相互作用を示している。