

鉄系超伝導体の超高速な結晶構造変化を実現 -光による新しい超伝導操作の可能性を示唆！-

1. 発表者：

鈴木 剛（東京大学物性研究所 助教）

岡崎 浩三（東京大学物性研究所 准教授）

久保田 雄也（研究当時：高輝度光科学研究センター 博士研究員／

現：理化学研究所放射光科学研究センター 基礎科学特別研究員）

富樫 格（高輝度光科学研究センター 主幹研究員）

和達 大樹（研究当時：東京大学物性研究所 准教授／現：兵庫県立大学 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆X線自由電子レーザーSACLAを用いたX線回折法の時間分解測定により、鉄系超伝導体 BaFe_2As_2 の超高速な結晶構造変化を観測することに成功しました。
- ◆圧力や元素置換などの従来の方法に加えて、光による超伝導体の結晶・電子構造に対する新しい操作方法を実証しました。
- ◆将来の超高速スイッチング素子や量子情報素子に対する演算処理方法として期待されます。

3. 発表概要：

東京大学物性研究所の鈴木剛助教と岡崎浩三准教授らは、高輝度光科学研究センター（JASRI）の久保田雄也博士研究員（研究当時、現：理化学研究所放射光科学研究センター基礎科学特別研究員）、東京大学物性研究所の和達大樹准教授（研究当時）らとの共同研究で、鉄系超伝導体（注1） BaFe_2As_2 における結晶構造の超高速変化をX線回折法（注2）の時間分解測定（注3）により直接観測し、ダイナミクスの追跡に成功しました。その結果、光照射して30 ps（ピコ秒＝1兆分の1秒）という超高速な時間の後に、瞬間的に0.1 GPaという巨大な応力が結晶表面に印加され、結晶構造が変化することを世界で初めて明らかにしました。

鉄系超伝導体は、圧力や同族元素置換などによるわずかな結晶構造変化により超伝導転移温度が急激に上昇することから、基礎学理及び応用の観点から大きな注目を集めていました。今回の発見により、光が鉄系超伝導体の結晶構造を瞬間的に変える新しい制御手段になり得ることを実証しました。今後、光を利用した結晶構造制御や他の物質における研究がますます盛んになり、さらにそれを応用した次世代光デバイスの開発が促進されることが期待されます。

本成果は、米国科学誌 *Physical Review Research* に9月8日に公開されました。

4. 発表内容：

① 研究の背景・先行研究における問題点

超伝導は、電気抵抗がゼロになることから損失のない電気エネルギーの輸送を可能にし、リニアモーターカーへの利用など、持続可能な開発目標を目指すこれからの生活において必要不可欠な材料といえます。ここで超伝導状態にするためには、通常絶対零度（-273℃）に近い極めて低い温度にする必要があります。そのために希少な天然資源である液体ヘリウムを大量に消費するなどの問題点がありました。そこで、より高い温度で超伝導状態を実現することが1世紀以上の課題でした。近年、100 GPa以上に及ぶ超高压をかけることで超伝導状態が室温で実現する物質が報告されており、基礎学理及び応用の観点から大きな注目を集めて

います。しかしながら、通常、圧力をかける方法としてダイヤモンド対を用いてそれらの先端部を押し合うという技術が用いられていますが、これでは高圧がかかる面積が極めて小さいため実用には難しいという状況でした。

一方、超伝導が実現する物質に着目すると、銅酸化物高温超伝導体（注4）は液体窒素の液化温度である $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ を上回る転移温度を示す高温超伝導体であることから、4半世紀以上に渡り非常に精力的に研究されてきました。そして2008年には、東京工業大学の細野秀雄教授らにより第2の高温超伝導体である鉄系超伝導体が発見され、その特異な電子・磁気構造など、銅酸化物超伝導体には見られない様々な興味深い特徴が分かってきました。特に、圧力や同族元素置換などにより結晶構造をわずかに変化させるだけで、超伝導転移温度が急激に上昇する特徴は大きな注目を集めてきました。

そこで本研究では、ダイヤモンド対の代わりに「光」を用いて瞬間的に結晶内に歪みを生み出す機構を利用して、鉄系超伝導体に超高速な応力を印加することを試みました。

② 研究内容

東京大学物性研究所の鈴木剛助教、岡崎浩三准教授らの研究グループは、数 GPa の圧力印加により転移温度が顕著に上昇する鉄系超伝導体 BaFe_2As_2 を測定試料として選び、国内唯一の X 線自由電子レーザー施設 SACLA（注5）を用いた X 線回折法の時間分解測定を実施し、光照射後の非平衡状態（注6）における結晶構造の直接観測を行いました。図1に測定の概念図を示します。まず、パルス状の光を BaFe_2As_2 に照射し、その後 SACLA による高輝度で短パルス化された X 線を用いて X 線回折測定を行うことで、光照射後の結晶構造をスナップショットとして観測することができます。この測定では、結晶からの X 線回折の角度変化を観測することで、光照射による結晶構造の伸縮を求めることができます。さらに、照射する光と X 線の時間差を変えながら測定していくことで、時々刻々変化する結晶構造のダイナミクスを捉えることが可能になります。

図2（左）は、光照射により引き起こされた結晶面間距離における時間変化を示しております。光照射後約 30 ps 後に一旦結晶構造が収縮して、その後、約 60 ps 後に伸長する様子が見て取れます。本研究での詳細な数値シミュレーションにより、最初の収縮は、光照射直後の電子温度分布が奥行き方向に非一様であることから引き起こされ、続いて起こる伸長は、電子から結晶へ熱が受け渡されたことに起因することが分かりました。したがって、観測された結晶面間距離の時間依存性は通常の静的な環境では決して起こりえない、光照射によって駆動された非平衡状態ならではの現象であることが分かりました。

ここで最初の収縮に注目し、照射する光の強度を変えて結晶面間距離が収縮する大きさを測定したものを図2（右）に示します。照射する光の強度に応じて収縮が増大していくことが分かりました。さらに、収縮から応力に換算したものを右軸に示しますが、その大きさは最大で約 0.1 GPa に相当しており、これは局所的で過渡的ながら結晶に巨大な応力がかかっていることが分かりました。

③ 社会的意義・今後の予定

本研究成果は鉄系超伝導体に「光」で応力をかけることを世界で初めて実証しました。その大きさは約 0.1 GPa 程度ながら、非接触かつ大面積に印加できることから、ダイヤモンド対の使用では困難であった様々な測定が可能になることが期待されます。さらに、この方法は超高速で行えることにより、圧電素子をはじめとする超高速電気光学デバイスや量子メモリーなどの量子情報処理における制御・操作方法の指針を与えることが期待されます。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 新学術領域（研究領域提案型）「量子液晶の物性科学」（JP19H05824, JP19H05826）、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）」（JPMXS0118068681）、JSPS 科研費（JP18K13498, JP19H00659, JP19H01818, JP19H00651）の助成のもとに行われました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：Physical Review Research

論文タイトル：Ultrafast optical stress on BaFe₂As₂

著者：Takeshi Suzuki*, Yuya Kubota, Asuka Nakamura, Takahiro Shimojima, Kou Takubo, Suguru Ito, Kohei Yamamoto, Shoya Michimae, Hikaru Sato, Hidenori Hiramatsu, Hideo Hosono, Tadashi Togashi, Makina Yabashi, Hiroki Wadati, Iwao Matsuda, Shik Shin*, and Kozo Okazaki*

DOI 番号：10.1103/PhysRevResearch.3.033222

アブストラクト URL：https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevResearch.3.033222

6. 問い合わせ先：

【研究内容に関すること】

東京大学物性研究所 附属極限コヒーレント光科学研究センター
助教 鈴木 剛（すずき たけし）

TEL：04-7136-3367 FAX：04-7136-3383

E-mail：takeshi.suzuki@issp.u-tokyo.ac.jp

東京大学物性研究所 附属極限コヒーレント光科学研究センター
准教授 岡崎 浩三（おかざき こうぞう）

TEL：04-7136-3355 FAX：04-7136-3383

E-mail：okazaki@issp.u-tokyo.ac.jp

【報道に関すること】

東京大学物性研究所 広報室

TEL：04-7136-3207

E-mail：press@issp.u-tokyo.ac.jp

（SPRING-8/SACLA に関すること）

高輝度光科学研究センター 利用推進部 普及情報課

TEL：0791-58-2785

E-mail：kouhou@spring8.or.jp

理化学研究所 広報室 報道担当

E-mail：ex-press@riken.jp

兵庫県立大学播磨理学キャンパス経営部総務課

TEL: 0791-58-0101

E-mail: soumu_harima@ofc.u-hyogo.ac.jp

7. 用語解説：

(注1) 鉄系超伝導体

2008年に東京工業大学の細野秀雄教授らにより発見された超伝導を示すFe化合物の総称。超伝導転移温度が銅酸化物高温超伝導体に次いで高く、そのメカニズムの解明がさらなる高温での超伝導の実現につながると期待され、盛んに研究されている。

(注2) X線回折法

X線が結晶格子で回折を示す現象を利用して、その結果を解析することにより結晶内部で原子がどのように配列しているかを決定する手法。特に、結晶中の原子が作る面（格子面）がX線を反射し、平行な別の2つの面に反射されたX線が干渉によって強めあう時（ブラッグの条件）に強い信号を得ることができ、入射するX線のエネルギーと角度から特定の結晶面間の距離を求めることができる。

(注3) 時間分解X線回折法

物質にレーザーパルス照射して現象を起こさせた後、レーザーパルスと空間的に離すことで遅延時間をつけたX線パルス照射してX線回折を行うこと。特に本測定では、回折されたX線の角度変化から結晶面間距離の変化を求めた。さらに、レーザーとX線の遅延時間を変化させることでレーザー照射前から照射後に渡る時間依存性を追跡することができる。

(注4) 銅酸化物高温超伝導体

1986年にベドノルツとミュラーによって発見された銅と酸素を含む超伝導体の総称。この発見により2人は1987年のノーベル物理学賞を受賞した。この発見により超伝導の転移温度の記録が短期間のうちに著しく上昇し液体窒素の沸点（ $-195.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 77 K ）も超えるきっかけとなった。

(注5) X線自由電子レーザー施設 SACLA

理化学研究所と高輝度光科学研究センターが共同で建設した日本のX線自由電子レーザー施設。2006年度から5年間の計画で建設・整備を進めた国家基幹技術の1つ。2011年3月に完成し、SPring-8 Angstrom Compact free-electron LAsErの頭文字を取ってSACLAと命名された。2011年6月に最初のX線レーザーを発振、2012年3月から共用運転が開始された。SPring-8の10億倍明るいX線を、10フェムト秒（フェムト秒=1,000兆分の1秒）未満のパルス時間内で提供する。

(注6) 熱平衡状態と非平衡状態

物質中の電子などが取り得る状態の中でエネルギーが最低のものを基底状態、それよりもエネルギーが高い状態を励起状態と呼ぶが、外部から物質に熱やエネルギーを与えると励起状態を占める割合が高くなる。逆に、多数の電子が励起状態を占めている場合、光や熱を放出することによって、物質中の電子は外部にエネルギーを放出してよりエネルギーの低い状態を占めるようになる。外部から物質に与えるエネルギーと物質から外部に放出されるエネルギーが等しくつり合っている状態を熱平衡状態という。この時、励起状態を占める割合は一定となり、

その割合から温度は定義される。超短パルスレーザーによって瞬間的に物質にエネルギーを与えると、そのつり合いは保たれなくなり、物質からエネルギーが放出されるようになる。このような状態を非平衡状態と呼ぶ。

8. 添付資料 :

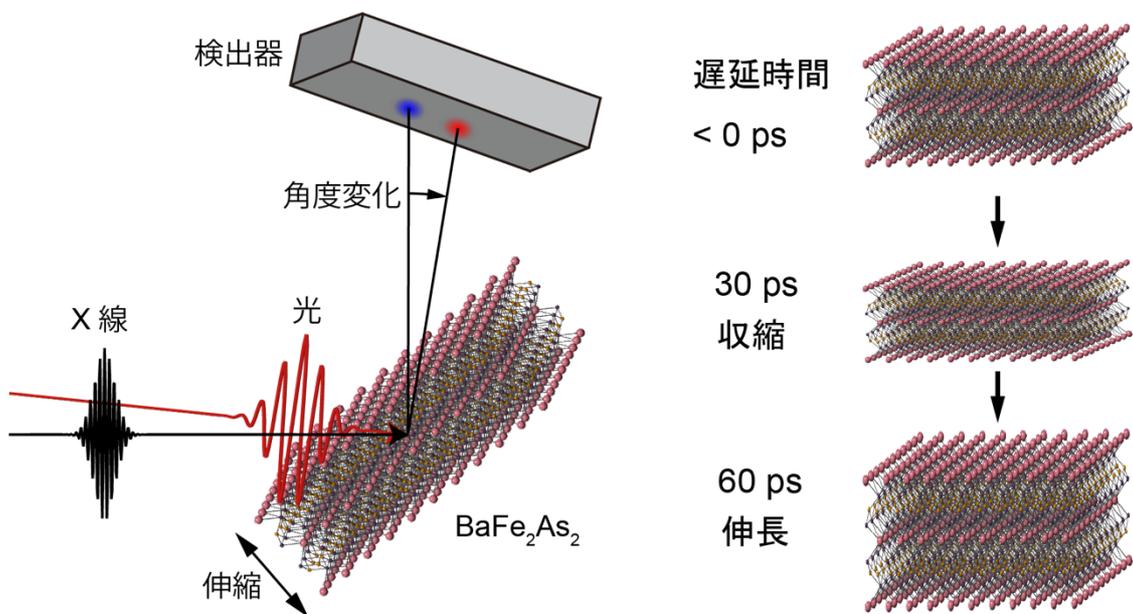


図1 時間分解 X 線回折法の概念図 (左) と観測された結晶構造変化 (右)

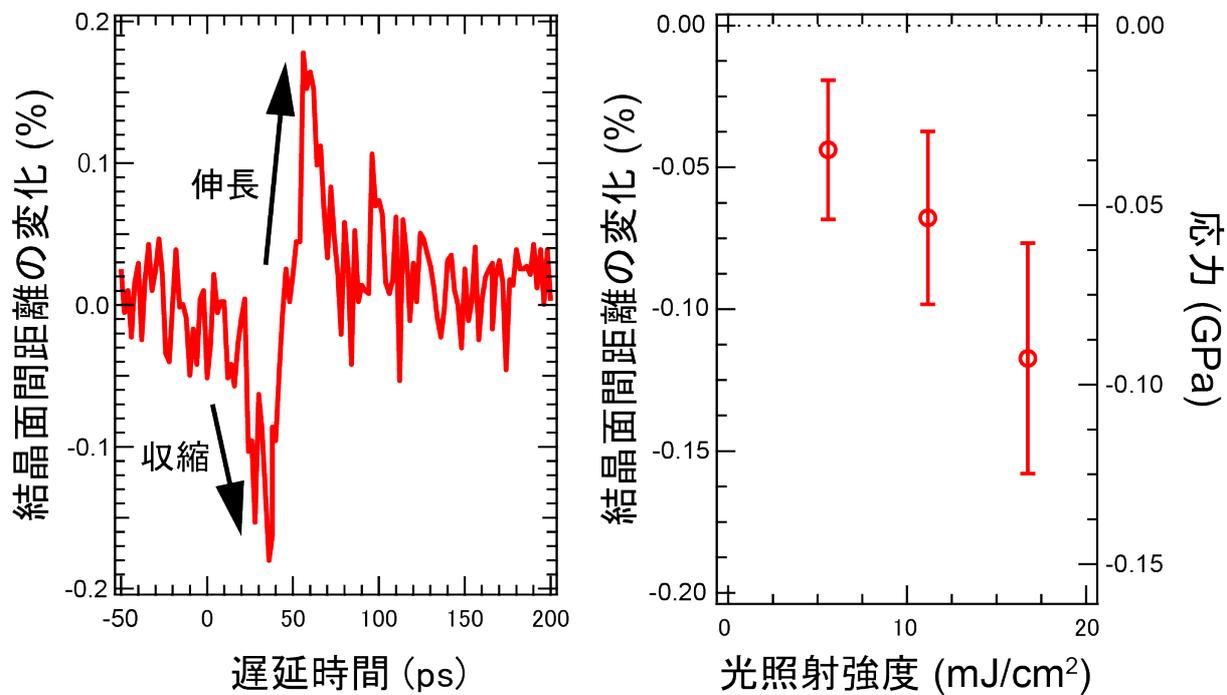


図2 結晶面間距離の時間依存性 (左) と収縮の光照射強度依存性 (右)。(左) 図の遅延時間では光照射した時間をゼロとする。