

国立大学法人電気通信大学
 国立研究開発法人科学技術振興機構
 国立研究開発法人理化学研究所
 国立大学法人東京大学
 国立大学法人東北大学
 公立大学法人兵庫県立大学
 国立大学法人山形大学
 国立大学法人静岡大学
 公益財団法人高輝度光科学研究センター

ポータブル装置による世界最強 110 テスラ磁場発生と X 線実験に成功

【ポイント】

- * 独自開発のポータブル装置「PINK-02」により、地磁気の約 200 万倍にあたる 110 テスラの超強磁場発生に成功。
- * 磁場中心に X 線自由電子レーザーを照射し、X 線実験の世界最強 110 テスラ磁場を記録。従来は 77 テスラ。
- * 110 テスラ X 線回折実験により、磁石である固体酸素が 1% にも及ぶ巨大かつ異方的な磁歪（じわい）を示すことを明らかにした。
- * 同手法は、今後、100 テスラを超える極限環境で現れる新しい結晶構造や電子状態、機能性の探索に活用される。

【概要】

電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻の池田暁彦准教授と理化学研究所放射光科学研究センターの久保田雄也研究員らを中心とした共同研究グループは、110 テスラという極限強磁場下で X 線自由電子レーザー実験に成功しました。本研究では、固体酸素が異方的に 1% もの巨大な磁歪を示すことを観測し、その成果が国際的な物理学の学術誌 *Physical Review Letters* に掲載され、注目論文（Editors' Suggestion）に選ばれました。

【背景】

近年、日本で 1000 テスラ（※1）に至る超強磁場が利用可能となり、このような強磁場が引き起こす新現象の探索が始まっています。期待される新現象の一例として、磁場によって物質の結晶構造が不安定化した結果、これまでにない新しい結晶構造が出現することが挙げられています。

このような期待を実証するには、強い磁場中で物質に X 線を照射する必要があります。しかしこれは困難でした。というのも、100 テスラを超える磁場を得るには、破壊型パルス磁場発生法（※2）が必須なためです。破壊型パルス磁場発生装置は、施設級の大型装置であること、持続時間が短い（100 万分の 1 秒程度）パルス発生であること、シングルショットで繰り返せないこと、そしてコイルの爆発が避けられないといった多くの問題がありました。このため、100 テスラ以上の超強磁場と X 線を組み合わせた実験を行うことは従来困難と考えられてきました。

2011年に、この問題に解決をもたらす出来事が起こりました。世界で2番目のX線自由電子レーザー（※3）（XFEL）施設としてSACLA（※4）が日本に建設されたのです。SACLAでは非常に短いパルス幅（100兆分の1秒）で、かつ世界最強レベルの強度を持ったパルスX線が利用できます。このX線を用いれば、1発でX線実験データが得られるため、一瞬で1回しか起こらないような現象を研究することができます。しかし、SACLAも700メートル以上の大型装置であることから、施設級の大型装置である破壊型パルス磁場発生装置と組み合わせて利用することは依然として困難でした。

【手法および成果】

電気通信大学の池田暁彦准教授らの研究グループは、理化学研究所放射光科学研究センターの久保田雄也研究員らと共同研究グループを立ち上げ、今回、世界に先駆けてポータブル110テスラ発生装置「PINK-02」（※5）の開発に成功しました。PINK-02は、1100キログラムと自動車程度の重量に収まっており、可搬型です。

研究グループはその可搬性を活かしてPINK-02をSACLAのX線照射位置に設置し、110テスラ強磁場下でのX線実験を実施（※6）しました（図1）。実験対象には固体酸素（※7）を選びました。固体酸素は磁場を有しており、磁場に応答を示します。また固体酸素は結晶格子が柔らかいという特徴を持ちます。このため、強磁場下で新しい構造が現れる有力な候補物質とされてきました。

研究グループは、110テスラの破壊型パルス磁場発生とシングルショットX線実験を両立することに成功し、世界で初めて110テスラ超強磁場におけるX線回折データの取得に成功しました（図2）。実験の結果、固体酸素が110テスラ強磁場の作用を受け、その結晶構造が異方的な大きな歪み（磁歪）を示すことを観測しました。観測された異方的な磁歪は1%に達しました。これはスピン（※8）間の相互作用が結晶の一方方向には強く、別の方向には弱いという、原子スケールで異方的な磁気相互作用が存在することを示唆しています。この成果により初めて原子レベルで、磁性体においてスピンと結晶構造の異方性が強く結びついていることを実証することができました。さらに山形大の笠松准教授らの理論計算と照らし合わせることで、この解釈が支持されることがわかりました。

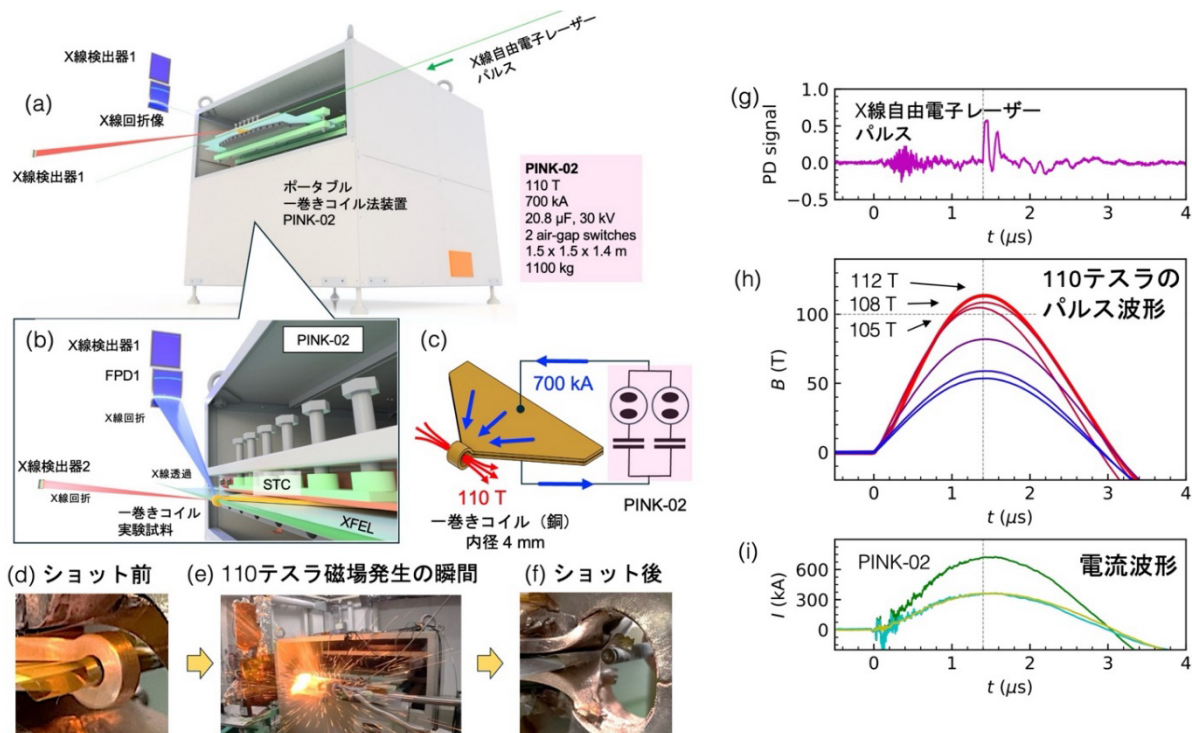


図1 PINK-02とXFELによる強磁場X線実験の様子
(a) PINK-02とXFELによる強磁場X線実験の模式図
(b) その拡大図

- (c) PINK-02 の回路図
- (d) 一巻きコイル（磁場発生前）
- (e) SACLA ビームラインにおける 110 テスラ磁場発生瞬間
- (f) 一巻きコイル（磁場発生後）
- (g) X 線自由電子レーザーの照射タイミング
- (h) PINK-02 による 110 テスラパルス磁場波形
- (i) PINK-02 のパルス電流波形

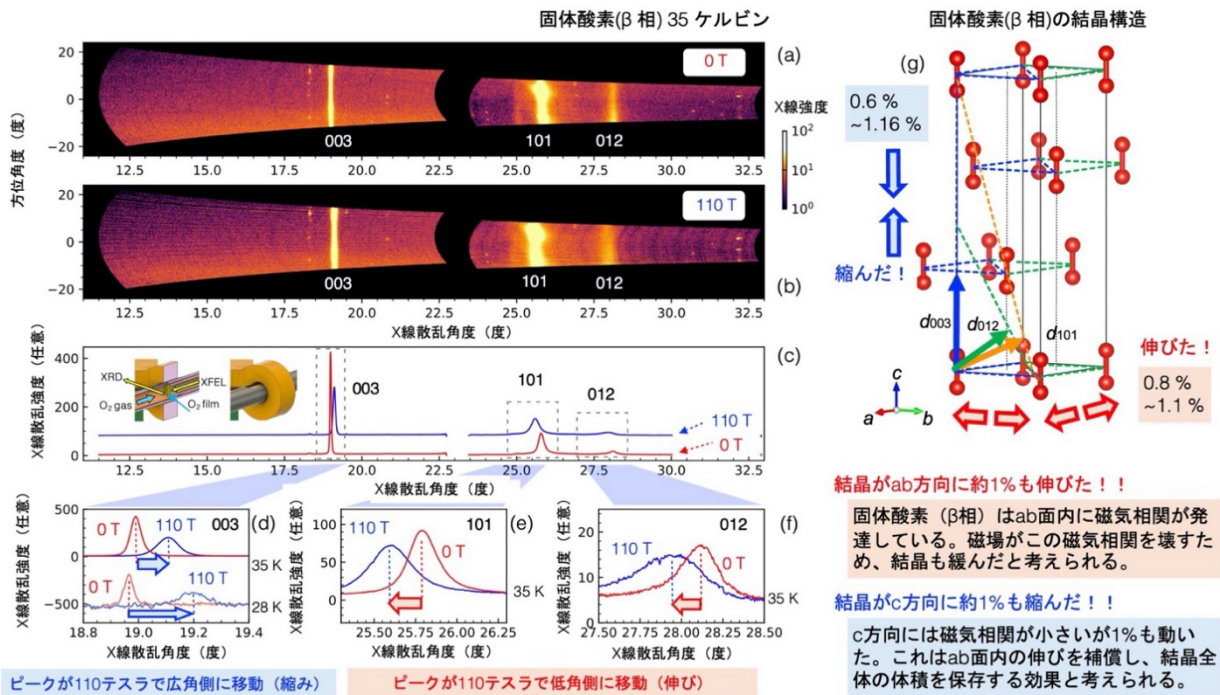


図 2 110 テスラにおける固体酸素の X 線回折実験データ、および、判明した 110 テスラにおける固体酸素結晶の変形の様子

- (a) 固体酸素の粉末 X 線回折像（ゼロ磁場中）
- (b) 固体酸素の粉末 X 線回折像（110 テスラ磁場印加の瞬間）
- (c) 固体酸素の粉末 X 線回折プロファイル（全体）
- (d) 固体酸素の粉末 X 線回折プロファイル（部分 1）
- (e) 固体酸素の粉末 X 線回折プロファイル（部分 2）
- (f) 固体酸素の粉末 X 線回折プロファイル（部分 3）
- (g) 固体酸素（β 相）の結晶構造の模式図と磁場による異方的な変形の様子

【今後の期待】

今回確立した研究プラットフォームを活用し、磁性体、金属非磁性体など、さまざまな結晶に対して、極限磁場下での新しい結晶構造の出現を実証していく計画です。固体酸素については、今回の 110 テスラを超える 120 テスラ付近でさらなる全く新しい結晶構造（θ 相）が現れると予想されており、その構造を明らかにすることが次の目標となります。

また、X 線はその発見以来、物質の構造、電子状態、磁性、ダイナミクスなど多方面の研究に用いられてきました。今後は 100 テスラを超える極限領域で、これら全ての研究を展開できることを目指しており、これらの研究により強い磁場が引き起こす新現象や新物質の発見につながることを期待されます。

・今回の成果を得た際のポイント、ブレイクスルー

2009 年にアメリカ・スタンフォード大学で登場した XFEL ですが、日本では世界 2 番目となる SACLA が 2011 年から稼働しています。アメリカとヨーロッパの XFEL 施設の全長がそれぞれ約 2 キロメートルと約 4 キロメートルであるのに比べて、SACLA は 700 メートルと小型です。それでも、

SACLA は大型施設であり、強磁場と組み合わせるためには「パルス磁場装置かパルス X 線レーザー装置のいずれかをポータブル化する」ことが不可欠でした。

室内世界最強 1200 テスラの発生が日本の東京大学物性研究所で報告されました。池田准教授が同研究所在職中に破壊型パルス磁場の開発を経験する中で、100 テスラ超強磁場では、電子や原子のミクロな現象を直接観測する手段が決定的に不足していると痛感したことが、今回の研究のモチベーションとなりました。

池田准教授は電気通信大学に拠点を移し、ポータブル超強磁場発生装置の開発に注力しました。2020 年に開発を始めた初号機「PINK-01」では、2022 年に 77 テスラの発生に成功。その後継機として理化学研究所と共同開発を続けた 2 号機の「PINK-02」で、今回、世界で初めて 110 テスラのポータブル発生を実現しました。

・国内外の状況との比較

パルス強磁場と量子ビームを組み合わせる研究は日本が発祥です。現在は世界中で取り組まれており、特に近年はアメリカとヨーロッパが先行してきました。2015 年にはアメリカ・スタンフォード大学の XFEL 施設 LCLS において 40 テスラでの実験が報告され、続いて 2017 年に共用開始されたヨーロッパの European XFEL では、現在 60 テスラ級の装置の開発が完了しつつあります。日本でも SACLA で強磁場研究が進められ、2022 年には 77 テスラでの実験が報告されていました。

今回、日本が世界に先駆けて 110 テスラでの X 線実験を実現したことにより、磁場強度においては日本が大きくリードしました。本成果は、世界中の研究者を日本に引き寄せる大きな契機となり、今後の学術交流や共同研究の拡大につながることを期待されます。

(論文情報)

雑誌名 Physical Review Letters, Editors' Suggestion
DOI: 10.1103/r7br-qnrn
タイトル X-ray free-electron laser observation of giant and anisotropic magnetostriction in β -O₂ at 110 Tesla
著者 A. Ikeda(*), Y. Kubota(*), Y. Ishii, X. Zhou, S. Peng, H. Hayashi, Y. H. Matsuda,
K. Noda, T. Tanaka, K. Shimbori, K. Seki, H. Kobayashi, D. Bhoi, M. Gen,
K. Gautam, M. Akaki, S. Kawachi, S. Kasamatsu, T. Nomura,
Y. Inubushi, M. Yabashi (*) Equal contribution

発表者

池田 暁彦	(電気通信大学大学院情報理工学研究科 基盤理工学専攻 准教授) (共同責任著者)
久保田 雄也	(理化学研究所 放射光科学研究センター 研究員)(共同責任著者)
石井 裕人	(東京大学物性研究所 助教)
周 旭光	(東京大学物性研究所 ISSP リサーチフェロー)
彭 詩悦	(東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程 3 年 (研究当時))
林 浩章	(東京大学物性研究所 特任助教)
松田 康弘	(東京大学物性研究所 教授)
野田 孝祐	(電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻 博士後期課程 1 年)
田中 智也	(電気通信大学情報理工学域Ⅲ類 2023 年卒業)
新堀 琴美	(電気通信大学情報理工学域Ⅲ類 2025 年卒業)
関 健汰	(電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻 博士前期課程 2 年)
小林 秀彰	(電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻 博士前期課程 1 年)

Dilip Bhoi	(電気通信大学 大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻 特任准教授 (研究当時)) (現 オークリッジ国立研究所 パーマネント研究員)
巖 正輝	(東京大学物性研究所 助教)
Kamini Gautam	(理化学研究所 創発物性科学研究センター 研究員 (研究当時))
赤木 暢	(東北大学金属材料研究所 助教)
河智 史朗	(兵庫県立大学理学研究科 助教)
笠松 秀輔	(山形大学理学部 准教授)
野村 肇宏	(静岡大学理学部 講師)
犬伏 雄一	(高輝度光科学研究センター 主幹研究員)
矢橋 牧名	(理化学研究所 放射光科学研究センター グループディレクター)

(外部資金情報)

科学技術振興機構 (JST) 創発的研究支援事業 JPMJFR222W

SACLA/SPRING-8 基盤開発プログラム (2021-2024 年度)

日本学術振興会 (JSPS) 科研費 学術変革領域 (A) JP23H04859, JP23H04861, JP23H04862

日本学術振興会 (JSPS) 科研費 基盤研究 (B) JP23K25818

文科省卓越研究員事業 JP-MXS0320210021

(用語説明)

- ※1 テスラ：磁場の単位であり、1 テスラは 10000 ガウスに対応します。地磁気の強さは 46 マイクロテスラ (0.46 ガウス) 程度です。
- ※2 破壊型パルス磁場発生法：パルス磁場とは強磁場を発生するために、コイルに大電流を流す方法です。大電流を一瞬だけコイルに流すことでパルスマグネットが発熱し融解することを回避しています。この方法で 10~100 テスラの強磁場が得られます。さらに 100 テスラを超える強い磁場を発生すると、コイル自身が磁場の反発力に負けて爆発します。そこでコイルを破壊するに任せ、毎回コイルを爆発させながら磁場発生を行う手法を破壊型パルス磁場発生法といいます。一巻きコイルに 100 万アンペアほどの電流を流して超 100 テスラ磁場を発生する破壊型パルス磁場発生法を一巻きコイル法といいます。今回ポータブル化したのは、一巻きコイル法です。1200 テスラの室内世界最強磁場の発生に利用された手法は、電磁濃縮法といって磁束を力で束ねる破壊型パルス磁場発生法です。
- ※3 X 線自由電子レーザー：近年利用可能となった X 線のパルスレーザーです。従来の管球 X 線や放射光は複数の波長の X 線が混ざって発生された光源 (可視光域では白色ランプに相当する) であるのに対して、X 線自由電子レーザーは X 線のレーザーであり、高輝度、高空間コヒーレンス、超短パルス性という際立った特徴をもちます。
- ※4 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で初めての XFEL 施設。2011 年 3 月に完成し、SPRING-8 Angstrom Compact free-electron LASER の頭文字を取って SACLA と命名されました。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、利用実験が始まっています。
- ※5 ポータブル 110 テスラ発生装置「PINK-02」：PINK は Portable INTense Kyokugenjiba の略です。
- ※6 SACLA ビームラインでの 110 テスラ X 線実験の様子は YouTube にて公開されています (リンク：https://youtu.be/J4MT_Raz_k?si=6XfNuYUGTS2_06ZX)

- ※7 固体酸素：酸素ガスが低温で凝縮し固化した状態。凝縮力の要因であるファンデルワールス力と磁気秩序のエネルギースケールが同程度で、拮抗しています。このため低温で三つの秩序相が出現します。最低温度で現れる α 相では磁石の向きが互い違いになった秩序を持ちます。この磁気秩序を安定にするため分子軸は平行になっています。ここに 120 テスラ超強磁場をかけると、磁石の向きが無理矢理同じ方向にそろうことが 10 年前に日本で報告されました。磁石の向きがそろってしまうと、元の分子軸がそろっている状態は不安定になります。このため、120 テスラで現れる酸素の θ 相では、結晶構造が完全に新しいものに置き換わると予想されています。本実験の真の目的はこの検証でした。しかし、今回は 120 テスラには 10 テスラ足りず、検証は未達成のままです。
- ※8 スピン：ミクロな磁石の性質。ここでは特に電子が持つ電子スピンのことを指しています。酸素分子では電子スピンの相殺せずに残るため、分子一つで磁石の性質を有しています。

【連絡先】

<研究内容に関すること>

電気通信大学情報理工学研究科 基盤理工学専攻

【職名】准教授

【氏名】池田 暁彦

E-Mail : a-ikeda@uec.ac.jp

理化学研究所 放射光科学研究センター

【職名】研究員

【氏名】久保田 雄也

E-Mail : kubota@spring8.or.jp

<報道に関すること>

電気通信大学 総務部総務企画課広報係

Tel : 042-443-5019 Fax : 042-443-5887

E-Mail : kouhou-k@office.uec.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-Mail : jstkoho@jst.go.jp

理化学研究所 広報部報道担当

Tel : 050-3495-0247

E-Mail : ex-press@ml.riken.jp

東京大学物性研究所 広報室

Tel : 04-7136-3207

E-Mail : press@issp.u-tokyo.ac.jp

東北大学金属材料研究所 情報企画室広報班

Tel : 022-215-2144 Fax : 022-215-2482

E-Mail : press.imr@grp.tohoku.ac.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

山形大学 総務部総務課秘書広報室

Tel : 023-628-4008

E-Mail : yu-koho@jm.kj.yamagata-u.ac.jp

静岡大学 総務部広報・基金課広報係

Tel : 054-238-5179

E-Mail : koho_all@adb.shizuoka.ac.jp

公益財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI） 利用推進部普及情報課

Tel : 0791-58-2785

E-Mail : kouhou@spring8.or.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 創発的研究推進部

【職名】調査役

【氏名】加藤 豪

Tel : 03-5214-7276 Fax : 03-6268-9413

E-Mail : souhatsu-inquiry@jst.go.jp