# 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.<u>はじめに</u>

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必要 不可欠な材料といえる。ここで超伝導状態にするには、通 常絶対零度に近い極めて低い温度にする必要があり、その ために希少な天然資源である液体へリウムを大量に消費す るなどの問題点がある。そこで、より高い温度で超伝導状 態を実現することが1世紀以上の課題であった。最近、 100 GPa 以上に及ぶ超高圧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る[1][2]。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アンビルセル が用いられているが、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あった。

一方、超伝導を発現させる物質に注目すると、銅酸化 物超伝導体に次ぐ高い転移温度を示す鉄系超伝導は、 2008年に東京工業大学の細野秀雄教授らにより発見され てから精力的に研究され、その特異な電子・磁気構造が報 告されてきた。特に、図1(a),(b)に示すように、同族元素 置換や圧力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、より高い転移温度の 実現や結晶作成の指針に向けて興味深く研究されてきた[3]。



附属極限コヒーレント光科学センター 鈴木 剛、岡﨑 浩三

### 2. <u>実験結果と議論</u>

このような背景の中、我々は、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 BaFe2As2 を対 象として、「光」により結晶構造変化を実現させることを 試みた[4]。光照射後の超高速な結晶構造変化を捉えるた めに、国内唯一の自由電子レーザー施設 SACLA を用いて X線回折法の時間分解測定を実施した。図 2(a)に測定の概 念図を示す。まず、パルス状の光を BaFe2As2 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る。特にこ 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 とができる。さらに、図 2(b)に示すように、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、時事刻々変 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る。



図 3(a)は、(008)ブラックピーク測定から決定した、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 を示している。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る。 単純な熱励起を考えると結晶の温度上昇が起こるはずなの で、面間距離の伸長のみが予想されるため、最初の収縮は 説明がつかない。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 るといえる。ここで光照射後約30ps後に起こる収縮と約 60ps後に起こる伸長に注目し、様々な指数について照射 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3(b)に示す。照射する光の強度に応じて収 縮と伸長が共に増大していく様子が見て取れる。さらに、 収縮・伸長から応力に換算したものを右軸に示すが、収縮 に注目するとその大きさは最大で約0.1 GPa 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 いることに相当する。

得られた結果について、より詳しい知見を得るためにシ ミュレーションを行った。まず、電子系・格子系から成る 2 温度モデルを用いて時間・空間(深さ方向)についての連 立拡散方程式を計算し、光照射後の電子・格子温度の時空 間分布を求めた。図 4(a)に表面から 4, 50, 150 nm の深さ における電子温度(Ta)と格子温度(T)の時間変化を示すが、 光励起直後に電子系の温度が上昇し、その後電子系から格 子系に温度が受け渡され、約 8 ps 後には電子温度と格子 温度が等しくなる様子が見て取れる。また、図 4(b)に光励 起後5,20,100psにおける電子・格子温度の深さ方向の空 間分布を示すが、電子・格子系共に顕著な温度勾配が形成 されている様子が見て取れる。次に、得られた電子・格子 温度の時空間分布から、時間依存熱弾性モデルを計算し、 格子の伸縮ダイナミクスを求めた。図 4(c)と(d)に平衡状 態からの格子の変位量とその深さ方向の空間微分である伸 縮歪みをそれぞれ示す。この伸縮歪みを深さ方向に平均し たものが本実験結果の図3(a)に相当する。伸縮歪みの空間 分布についてダイナミクスを見てみると、光励起後 5-20 ps では表面近傍で収縮する様子が見て取れるが、これは



図 4 (a),(b) 電子・格子温度の時間変化と深さ方向への分 布。実線が電子温度、破線が格子温度を表す。(c),(d) 各時刻 における平衡状態からの格子の変位量と伸縮歪みの深さ方向 への空間分布。

励起直後に形成される深さ方向への急峻な電子温度勾配に より生み出されることが明らかになった。これがまさに、 実験結果の 30 ps で見られた収縮に相当する。その後 50-150 ps にかけて表面から歪みが伸長していく様子が見て 取れるが、これは格子温度の上昇に伴う熱膨張に起因し、 これが 60 ps で見られる伸長に対応することが分かった。

### 3. <u>まとめと将来展望</u>

本研究成果では、鉄系超伝導体に「光」で収縮応力をか けることを世界で初めて実証した。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、ダイヤモンドアンビルセル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る。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 れる。

#### 謝辞

本研究は、東京大学物性研究所(田久保耕、伊藤俊、山 本航平、道前翔矢、松田巌、辛埴 各氏(所属は全て研究 当時))、高輝度光科学研究センター(久保田雄也、富樫格、 矢橋牧名 各氏(所属は全て研究当時))、兵庫県立大学(和 達大樹氏)、理化学研究所(中村飛鳥、下志万貴博 各氏)、 及び東京工業大学大学(佐藤光、平松秀典、細野秀雄 各 氏(所属は全て研究当時))の共同研究により行われました。 また、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)、JSP科研費(JP18K13498, JP19H00659, JP19H01818, JP19H00651)の助成のもとに 行われました。ここに感謝します。

### 参考文献

- M. Somayazulu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **122**, 027001 (2019).
- [2] E. Snider et al., Nature (London) 586, 373 (2020).
- [3] K. Matsuura et al., Nat. Commun. 8, 1143 (2017).
- [4] T. Suzuki et al., Phys. Rev. Research 3, 033222 (2021).