

超音波で計測する鉄砒素系超伝導体の電気四極子

高い転移温度 $T_{sc} = 26 \text{ K}$ を持つ鉄砒素系超伝導体 $\text{LaFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$ が、2008 年に細野グループにより発見され、それを契機に世界中で多数の研究が行われ、鉄と砒素を含むいくつかの化合物に高温超伝導が見つかった。

この鉄砒素系超伝導体は、鉄と砒素で構成された 2 次元面を積み重ねた結晶構造を持ち、構造相転移と反強磁性秩序とが共存・競合する中で、高い温度で超伝導が出現している特徴がある。母物質に元素置換や静水圧を加えることで、キャリアの注入を行い、構造相転移の温度とその直下で起きる反強磁性転移の温度がともに低下し、遂には有限温度で消失する領域に至ると、超伝導が現れる。これまでに知られている銅酸化物高温超伝導体や、希土類セリウム化合物の重い電子超伝導体では、反強磁性相と超伝導相が接していることから超伝導が出現し、電子のスピンに由来する磁性揺らぎが超伝導を担うクーパー対を形成する役割を果たしていると考えられてきた。この度、新しく現れた鉄砒素系超伝導体では、反強磁性相を生み出す磁性に加えて、構造相転移を生み出す電気四極子（しばしば軌道と呼ばれている）が大きな役割を果たしていると考えられる。果たして、電気四極子は鉄砒素系の超伝導にどのような影響を与えているのであろうか。本研究は、この疑問に答えることを目指して開始された。

電気四極子を観測するには、超音波計測が最適である。一般的に、冷やすとモノは硬くなる。しかし、ある系が電気四極子を持つとき、試料に歪み ϵ を加えると、局所的な電荷の偏りである電気四極子 O が誘起され、その応答として弾性定数 C が柔らかくなるという振る舞いが観測される。これは磁場を印加することにより磁化率を測定することで磁気双極子を観測することと対応づけられる（図 1）。

本研究では、Co イオンを 10% の Fe イオンと置換した $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$ をとりあげた。それは、超伝導転移温度が $T_{sc} = 23 \text{ K}$ と最適化されている試料だからである。弾性定数 C_{66} は、室温から超伝導転移温度に向かって 21% にも減少する（図 2）。すなわち x 面に y 軸方向の応力を加えると結晶は容易に歪む（ ϵ_{xy} -型）ことを意味している。これを C_{66} がソフト化すると呼ぶ。他の弾性定数 $(C_{11}-C_{12})/2$ 、 C_{44} は低温になるにつれて単調に固くなることも解った。これは、鉄砒素系超伝導体には、横波超音波 C_{66} モードの歪み ϵ_{xy} と結合する電気四極子 O_v が大きな役割を果たしていることを示している。

弾性定数 C_{66} のソフト化は、 $C_{66} = C_{66}^0 \left(1 - \frac{\Delta}{T - \Theta} \right)$ で整理でき、負のワイス温度 $\Theta = -47.5 \text{ K}$ は四極子間に反強的な相互作用が働いていることを示している。Jahn-Teller エネルギーと呼ばれる、歪み ϵ_{xy} を通しての四極子間の強的な相互作用は、 $\Delta = 20 \text{ K}$ であ

った。実験に用いた結晶では、構造相転移を特徴づける温度は $T_c = \Theta + \Delta = -27.5\text{K}$ と負になり、構造相転移が消失していることを示唆している。最近、新潟大学大学院自然科学研究科の研究者を中心とする研究グループは、弾性定数を網羅的に測定し、 C_{66} だけがソフト化を示すことを最初に明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2011 年 7 月号に掲載された。

弾性定数 C_{66} のソフト化に関しては、 Fe^{2+} イオンの縮退した d_{yz} 、 d_{zx} 軌道が電気四極子 $O_v = l_x^2 - l_y^2$ を持っていることが重要である。この d_{yz} 、 d_{zx} 軌道は Γ 点のホールバンドと X 点の電子バンドを形成し、歪み ϵ_{xy} によって分裂するために、歪み感受率 (strain susceptibility) に温度の逆数に比例するキュリー項が現れるためと理解できる。反強的に相互作用をする電気四極子 O_v の揺らぎが超伝導の出現に寄与していると推察される。これを実証するためには、超音波計測による弾性定数のソフト化の研究と、理論的研究が必要である。

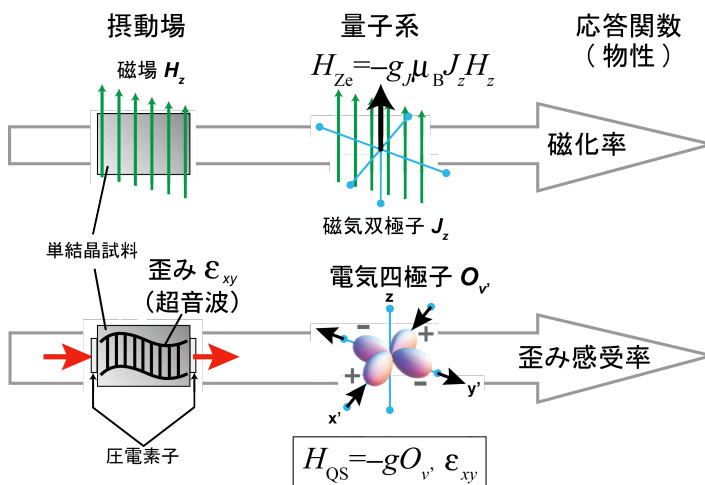


図 1 電気四極子を超音波で観測する概念図

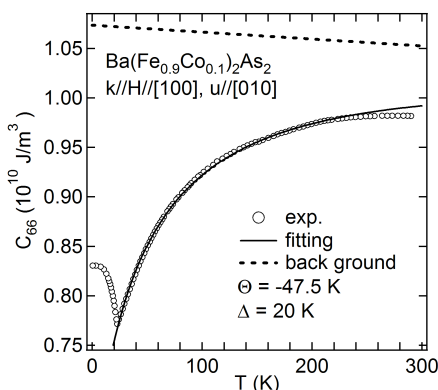


図 2 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.9}\text{Co}_{0.1})_2\text{As}_2$ の弾性定数 C_{66} の温度依存性

電子版 <http://ipsj.ipap.jp/link?JPSJ/80/073702> (6月27日公開済)

<情報提供：後籐輝孝(新潟大学自然科学研究科)

根本祐一(新潟大学自然科学研究科)

佐藤正俊(総合科学研究機構) >