

氏名	しゃらむじゃん すまい Shalamujiang Simayi
本籍(国籍)	中華人民共和国(新疆ウイグル自治区)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第237号
学位授与年月日	平成25年9月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科フロンティア物質機能工学専攻
学位論文 題目	<b>Elastic properties of iron-based superconductor <math>Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2</math> and related materials</b> (鉄系超伝導体 $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ と関連物質の弾性的性質に関する研究)
学位審査委員	主査 教授 吉澤 正人 副査 教授 藤代 博之 副査 教授 松川 倫明

## 論文内容の要旨

The discovery of superconductivity in  $LaFeAsO_{1-x}F_x$  in 2008 opened up a new field in superconductivity research. Now, many types of new iron-based superconductors have been fabricated. Iron based superconductors have high critical temperature  $T_{sc}$ , it is as high as cuprate superconductors, so it has attracted many researchers for its promising applications. Now studies focus on the mechanism of superconductivity of this family, but the key parameter mediating the superconducting state is not clear yet. In this system superconductivity is induced either by chemical substitution or the application of pressure. On the mechanism of superconductivity, it has been argued about the role of structural and magnetic fluctuations as mediating parameters of superconductivity. Among all iron-based superconductors with different crystal structures,  $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$  is suitable for basic research, because it can provide large single crystals. The parent compound  $BaFe_2As_2$  of this system shows stripe magnetic order with a structural change from tetragonal to orthorhombic. If a system encounters with the structural phase transition, elastic constant is a suitable probe for investigating of the neighboring structural ordering.

At first, I have reported elastic properties of iron-based superconductors  $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$ , and found the structural fluctuation in  $C_{66}$  associated with the structural ( $T_S$ ) and magnetic phase transitions ( $T_N$ ). Our results suggested the importance of orbital fluctuation in the emergence of superconductivity. Starting from our reports, many researchers have discussed the superconductivity based non the orbital fluctuations. On the

other hand, the structural fluctuation leads to an in-plane order, and it possesses two-dimensional nature. However, an order is hard to occur in two-dimensional systems, so three-dimensionality is necessary for the occurrence of ordering. Next, in my thesis, I have focused my attention on the three-dimensional character of this system. In our experimental tool, ultrasonic measurement, the corresponding elastic strain modulates physical quantities along *c*-axis through the elongation and contraction of the inter-layer spacing. So by examining the corresponding elastic constant  $C_{33}$ , I can obtain the three-dimensional character of this system.

Our results show that the elastic anomaly  $C_{33}$  due to the inter-layer fluctuation is enhanced near the QCP (Quantum Critical Point). We have studied it by means of electrical resistivity, heat capacity, and ultrasonic attenuation in addition to elastic constant  $C_{33}$ . It is obvious from my results that the three-dimensional properties of Ba122 possibly originated from the magnetic character of this system. My findings about the correlation of  $C_{33}$  with  $T_{sc}$  as well as the in-plane fluctuation appearing in  $C_{66}$  would highlight the roles and relations of the orbital and magnetic fluctuations in the emergence of superconductivity.

Finally, I will report the elastic properties of  $Rh_{17}S_{15}$ , which shows vary similar elastic behavior to those of iron-based superconductor. Then I will discuss the universality and particularity in elastic properties of superconductors.

## 論文審査結果の要旨

2008年に発見された鉄系超伝導体は、構成元素に磁性元素である鉄を含みながら、高い超伝導臨界温度を有することから、現在、世界中で超伝導発現機構の解明に関する研究が行われている。この系の高い超伝導を発現する機構が解明されれば、更なる高い臨界温度を有する超伝導体の発見に繋がり、超伝導の幅広い応用に資すると期待される。本学位申請者は、この系の超伝導発現機構を解明するために、Coをドーブした  $Ba(Fe_{1-x}Co_x)_2As_2$  の物性研究を行った。本学位申請者はCoの濃度を変えた8種類の大型で良質な単結晶試料の全ての弾性定数と比熱などの測定を行った。鉄系超伝導体は、Asの作る四面体に内包されるFeの二次元面が3次的に積み重なった構造を有する。博士論文では、面内の構造揺らぎの指標である  $C_{66}$  弾性定数と面間の構造揺らぎの指標である  $C_{33}$  弾性定数に焦点を絞り、構造揺らぎと超伝導との関係を究明した。

$C_{66}$ に関しては、 $x < 0.07$  のアンダードーブ領域の試料において、室温から低温までに90%の弾性軟化現象を発見した。また、 $x > 0.07$  以上のオーバードープ領域では、超伝導臨界温度における弾性異常と超伝導転移温度との相関を見いだした。この結果は、弱い強磁性体の量子臨界点近傍に現れる磁化率と超伝導との関係に類似しており、この系が構造揺らぎによって超伝導クーパー対が媒介されていることを示唆した。本研究により、それまで、この鉄系超伝導体の発現機構はスピ

ン揺らぎであるとの大方の見方を覆すきっかけとなった。本研究は多くの研究者を触発し、現在では軌道揺らぎ機構による超伝導機構の研究が盛んに行われている。この鉄系で見いだされた大きな弾性異常は、現在、実用材料として広く用いられている A15 化合物  $Nb_3Sn$  でも昔から知られていた。当時はその大きな弾性異常と超伝導との関係が不明のままであったが、本研究がきっかけとなり、A15 化合物の物性に光が当てられ、多バンド系の超伝導の普遍的な問題として、大きな研究領域に発展しようとしている。

本学位申請者は、鉄系超伝導体の超伝導発現機構が軌道揺らぎに起因する二次元面内の構造揺らぎであることを明らかにする一方で、Wigner-Mermin の定理から要請される超伝導を発現させるための三次元効果の役割を研究した。そのために、 $C_{33}$  弾性定数に着目し、その振る舞いの Co 濃度依存性を丹念に調べた。特に、 $x=0.06$  の量子臨界点近傍の試料について、試料依存性や、超音波吸収係数、弾性定数と電気抵抗の同時測定、比熱など複数の測定手段を駆使し、その振る舞いを究明した。その結果、 $C_{33}$  に量子臨界点近傍のみに現れる特徴的な弾性異常を発見し、その起源が軌道揺らぎではなく、磁氣的揺らぎであることを明らかにした。また、超伝導転移温度直下に、 $^4He$  超流動や強相関伝導系超伝導体で報告されている類似の超音波吸収係数のピークを発見した。申請者の研究は、鉄系超伝導体の超伝導が、面内の軌道揺らぎに加えて、面間の磁氣的揺らぎの協力によって発現することを明らかにした。鉄系物質の超伝導機構は、磁氣的スピン揺らぎか構造揺らぎかという観点でこれまで、論じられてきた。報告されてきた実験結果は、そのどちらかで全ての物性を説明できるということではなく、鉄系超伝導体の超伝導発現機構に関する議論が決着できない状態であった。本博士論文は、スピン揺らぎと軌道揺らぎがそれぞれ役割を持って超伝導を発現させるという新しい描像を提案した。また、弾性定数と比熱から面間方向の Grüneisen 定数を見積り、静水圧力の効果が面間方向の一軸圧力の効果に起因することを明らかにし、面間方向の長さの制御が超伝導転移温度の制御に重要であることを示した。

本博士論文では、この鉄系超伝導体の関連物質として、希土類元素を含まない重い電子系として注目を集めている  $Rh_{17}S_{15}$  の弾性的性質の研究も行った。申請者は、この物質の  $(C_{11}-C_{12})/2$  弾性定数が鉄系超伝導体の  $C_{66}$  の振る舞いと酷似していることを発見し、その弾性異常の起源をバンド・ヤーン・テラー効果で説明した。この研究により、大きな弾性異常を伴う超伝導体が鉄系物質や A15 化合物だけでなく、普遍に存在することを示し、超伝導研究における弾性的性質の研究の重要性を示した。この研究に対して、韓国で行われた「重い電子系と新しい量子相に関する国際会議」でベストポスター賞が授与されている。

本博士論文は、鉄系超伝導体に発現する新しい超伝導機構を詳細に研究し、この分野の発展に大いに寄与した。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。

**原著論文名（1編を記載）**

Elastic Anomalies Associated with superconducting phase transitions in Iron-based Superconductor  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$ , A. Ismayil, R. Kamiya, R. Onodera, D. Kimura, T. Chiba, Y. Nakanishi, K. Kihou, M. Nakajima, C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, S. Uchida, and M. Yoshizawa: Journal of Physics: Conference Series, (400 巻, 022037 頁), 2012 年 12 月