

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13492

研究課題名（和文）軌道選択モット転移近傍の鉄系超伝導体におけるネマティック状態の研究

研究課題名（英文）Electron nematic states in iron-based superconductors near the orbital-selective Mott transition

研究代表者

水上 雄太（Mizukami, Yuta）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：80734095

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：過剰ホールドーブ鉄系超伝導体RbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>、CsFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>に対するネマティック感受率測定において、Fe-As方向に対応するネマティック感受率が大きく増大する結果が得られた。Ba置換系(Ba,Rb)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の中間組成域ではFe-As方向とFe-Fe方向に対応するネマティック揺らぎが同時に発達するXYネマティック状態を示唆する結果が得られた。更に、RbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>において長時間緩和法を用いた磁場角度回転比熱測定を行った。その結果、電子状態が格子の4回回転対称を破り2回回転対称になっていることを熱力学的に示す結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は過剰ホールドーブ鉄系超伝導体において従来の電子ネマティック状態とは方向の異なる新規なネマティック状態が存在することを揺らぎや熱力学的な観点から明らかにしました。この性質は他の系との類似性も指摘されており、強相関電子の電子状態の普遍的な性質を理解する上で重要であると考えられます。また、置換系における結果はこれまで報告されていたネマティック状態よりも古典的なネマティックに似た状態が実現していることを示唆します。この新しく発見されたネマティック状態は、従来のものとは異なりその向きを自由に制御できるため、新しい素励起等の発見につながることを期待されます。

研究成果の概要（英文）：We clarify that the nematic susceptibility along Fe-As direction is enhanced in heavily-hole doped iron-pnictide superconductors RbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> and CsFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>. In the intermediate regime of Ba-substituted system (Ba, Rb)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>, the nematic susceptibilities along Fe-As direction and Fe-Fe direction are simultaneously enhanced, suggesting the existence of XY nematicity in this regime. Furthermore, we perform field-angle resolved heat capacity measurement on RbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> using long relaxation method. This study provides thermodynamic evidence that the electronic state has two-fold symmetry which breaks the four-fold symmetry of the underlying crystal lattices.

研究分野：磁性、超伝導および強相関系関連

キーワード：軌道選択モット転移 量子相転移 XYネマティック 電子ネマティック状態 長時間緩和法 精密比熱測定 ネマティック感受率 弾性抵抗

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

鉄系超伝導体の母相の多くにおいては、鉄原子は $3d^6$ の電子配置を持っており、それに電子ドープやホールドープをすることで超伝導が生ずる。一方、過剰にホールドープされた鉄系超伝導体においては、 $3d^{5.5}$ の電子配置が実現されていることが指摘されている。これは、鉄原子の電子軌道すべてがハーフフィリングとなる $3d^5$ の電子配置に近いと考えられ、いわゆる軌道選択モット転移近傍に位置していると提案されている。ごく最近このような系において新規な電子ネマティック相や超伝導相との競合相の存在の可能性が報告され、モット相近傍に位置している銅酸化物高温超伝導体との類似性も指摘されている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は軌道選択モット転移近傍に位置していると提案されている鉄系超伝導体において、新規な電子ネマティック相の存在を明らかにすることである。特に、ネマティック揺らぎの存在を示すこと及び、ネマティック相を熱力学的に検証することを主な目的とする。

### 3. 研究の方法

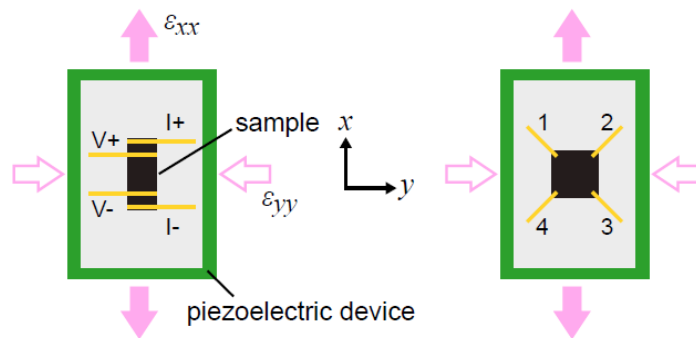


図 1. ピエゾ素子を用いた弾性抵抗測定模式図[1]。

本研究では、過剰にホールドープされた鉄系超伝導体である  $\text{RbFe}_2\text{As}_2$  や  $\text{CsFe}_2\text{As}_2$ 、及び置換系  $(\text{Ba}, \text{Rb})\text{Fe}_2\text{As}_2$  を対象にした。これらに対して、電子ネマティック状態に対して鋭敏なプローブであるネマティック感受率測定を行った。

ネマティック感受率は図 1 に示すようなピエゾ素子を用いた弾性抵抗測定により算出可能である。具体的にはピエゾ素子に対して試料を張り付け、ピエゾ素子に印可される電圧により試料に一軸歪  $\epsilon_{xx}$  ( $\epsilon_{yy}$ ) を導入した際の電気抵抗の変化からネマティック感受率を見積もる。ここで一軸歪の印可方向を変えることで、異なる既約表現におけるネマティック感受率を独立に導出可能である。従来、鉄系超伝導体においては、Fe-Fe ボンド方向へのネマティック不安定性が主に報告されてきており、一方向のみのネマティック感受率が多く議論されてきたが、本研究においては上述のように方向を変えることで Fe-Fe 方向と Fe-As 方向の二方向のネマティック不安定性に対応するネマティック感受率の測定を行った。

更に、本研究ではネマティック状態の熱力学的検証を行う為に、試料の結晶面内で磁場を回転させた磁場角度回転比熱測定を行うことで、熱力学量における電子異方性の観測を試みた。比熱測定手法は図 2 に示す、長時間緩和緩和法を用いた。この手法を用いることで、数重マイクログラム程度の微小試料を測定することができる。一般的にネマティック状態においては回転対称性の破れた

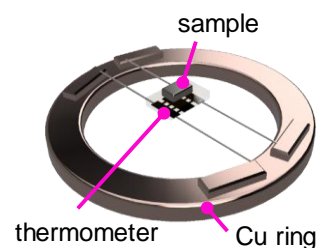


図 2. 長時間緩和法による比熱測定の設定アップ。

等価なドメインが複数存在し、ドメインサイズより十分大きなバルク結晶における熱力学量は複数のドメインからの寄与の合計となるため、ネマティック状態を反映する電子異方性はキャンセルされる。しかしながら、微小試料においては、試料内での複数のドメインの体積の不均衡が生じやすい為、ネマティック状態に起因した異方性をより検出しやすくなると期待される。

#### 4. 研究成果

特に本研究で行った弾性抵抗を用いたネマティック感受率測定においては、Fe-As方向へのネマティック揺らぎが大きく増大することを示す結果が得られた。図3はRbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>における異なる規約表現におけるネマティック感受率の温度依存性である。Fe-As方向に歪を加えた場合は温度に対して大きく変化し、40K程度でキックを示す一方、Fe-Fe方向に歪を加えた場合は比較的小さな温度依存性を示した。これは、この系において従来とは異なるFe-As方向へ電子異方性が生ずるネマティック状態の存在を示す。更に、このネマティック状態のホールドープ量に対する変化を調べるためにBa置換系(Ba, Rb)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>に対するネマティック感受率測定を行った。その結果、BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>におけるFe-Fe方向のネマティック揺らぎがRbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>におけるFe-As方向のネマティック揺らぎに変化していく中間領域では両方のネマティック揺らぎが同時に発達するということが明らかとなった。これは磁性体とのアナロジーから、XYネマティック状態の存在を示唆していると考えられ、鉄系超伝導体において新奇なネマティック状態を提案するに至った(図4)。更に、RbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>におけるFe-As方向へのネマティック状態の熱力学的証拠を得るために、RbFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>の微小単結晶において、長時間緩和法を用いた磁場角度回転比熱測定を行った。その結果、超伝導転移における比熱の跳びの大きさが、磁場角度方向に対して結晶の4回回転対称よりも低い2回振動を示すことが分かった。これは、上部臨界磁場が2回回転対称になっていることを示しており、通常状態の電子状態が2回回転対称になっていることを示唆する。

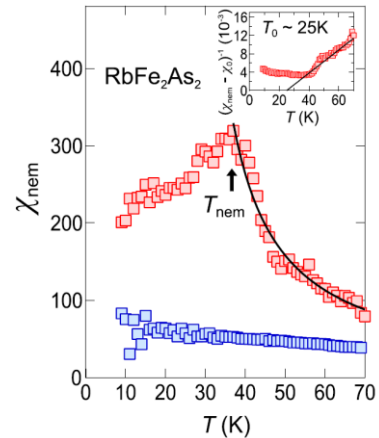


図 3. ネマティック感受率の温度依存性[1]。赤色が Fe-As 方向、青色が Fe-Fe 方向に歪を加えた場合。

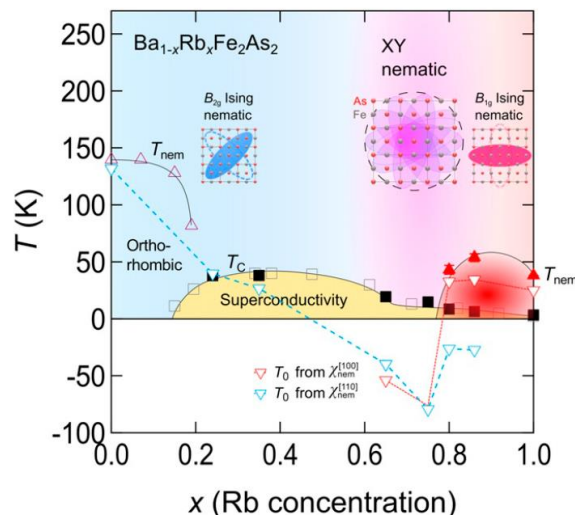


図 4. (Ba,Rb)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>における相図[1]

[1]K.Ishida et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA **117**, 6424 (2020).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kasahara Y., Ohnishi T., Mizukami Y., Tanaka O., Ma Sixiao, Sugii K., Kurita N., Tanaka H., Nasu J., Motome Y., Shibauchi T., Matsuda Y.	4. 巻 559
2. 論文標題 Majorana quantization and half-integer thermal quantum Hall effect in a Kitaev spin liquid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 227 ~ 231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1038/s41586-018-0274-0">https://doi.org/10.1038/s41586-018-0274-0</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishihara K., Takenaka T., Miao Y., Tanaka O., Mizukami Y., Usui H., Kuroki K., Konczykowski M., Goto Y., Mizuguchi Y., Shibauchi T.	4. 巻 98
2. 論文標題 Evidence for s-wave pairing with atomic scale disorder in the van der Waals superconductor NaSn <sub>2</sub> As <sub>2</sub>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 020503(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.020503">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.020503</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kuwayama Takanori, Matsuura Kohei, Mizukami Yuta, Kasahara Shigeru, Matsuda Yuji, Shibauchi Takasada, Uwatoko Yoshiya, Fujiwara Naoki	4. 巻 88
2. 論文標題 77Se-NMR Study under Pressure on 12%-S Doped FeSe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033703 ~ 033703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.033703">https://doi.org/10.7566/JPSJ.88.033703</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sato Y., Xiang Z., Kasahara Y., Taniguchi T., Kasahara S., Chen L., Asaba T., Tinsman C., Murayama H., Tanaka O., Mizukami Y., Shibauchi T., Iga F., Singleton J., Li Lu, Matsuda Y.	4. 巻 15
2. 論文標題 Unconventional thermal metallic state of charge-neutral fermions in an insulator	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Physics	6. 最初と最後の頁 954 ~ 959
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1038/s41567-019-0552-2">https://doi.org/10.1038/s41567-019-0552-2</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murayama H., Sato Y., Kurihara R., Kasahara S., Mizukami Y., Kasahara Y., Uchiyama H., Yamamoto A., Moon E.-G., Cai J., Freyermuth J., Greven M., Shibauchi T., Matsuda Y.	4. 巻 10
2. 論文標題 Diagonal nematicity in the pseudogap phase of HgBa <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub> +	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 3237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-019-11200-1">https://doi.org/10.1038/s41467-019-11200-1</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kitagawa Shunsaku, Kawamura Takeshi, Ishida Kenji, Mizukami Yuta, Kasahara Shigeru, Shibauchi Takasada, Terashima Takahito, Matsuda Yuji	4. 巻 100
2. 論文標題 Universal relationship between low-energy antiferromagnetic fluctuations and superconductivity in BaFe <sub>2</sub> (As <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> ) <sub>2</sub>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 60503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.060503">https://doi.org/10.1103/PhysRevB.100.060503</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yip King Yau, Ho Kin On, Yu King Yiu, Chen Yang, Zhang Wei, Kasahara S., Mizukami Y., Shibauchi T., Matsuda Y., Goh Swee K., Yang Sen	4. 巻 366
2. 論文標題 Measuring magnetic field texture in correlated electron systems under extreme conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1355 ~ 1359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aaw4278	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murayama H., Sato Y., Taniguchi T., Kurihara R., Xing X. Z., Huang W., Kasahara S., Kasahara Y., Kimchi I., Yoshida M., Iwasa Y., Mizukami Y., Shibauchi T., Konczykowski M., Matsuda Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 Effect of quenched disorder on the quantum spin liquid state of the triangular-lattice antiferromagnet 1T-TaS <sub>2</sub>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 13099
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013099">https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.2.013099</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ishida Kousuke, Tsujii Masaya, Hosoi Suguru, Mizukami Yuta, Ishida Shigeyuki, Iyo Akira, Eisaki Hiroshi, Wolf Thomas, Grube Kai, v. L?hneysen Hilbert, Fernandes Rafael M., Shibauchi Takasada	4. 巻 117
2. 論文標題 Novel electronic nematicity in heavily hole-doped iron pnictide superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 6424 ~ 6429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1073/pnas.1909172117">https://doi.org/10.1073/pnas.1909172117</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Y. Mizukami
2. 発表標題 Thermodynamic studies on iron-chalcogenides Fe(Se,S) in the BCS-BEC crossover
3. 学会等名 12th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High-Temperature Superconductivity (M2S-2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Mizukami
2. 発表標題 Nematicity in heavily hole-doped iron-pnictides Ba1-xRbxFe2As2
3. 学会等名 31th International Symposium on Superconductivity (ISS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水上雄太
2. 発表標題 Ce系重い電子超伝導体における未解決問題
3. 学会等名 領域8シンポジウム 「非従来型超伝導体の未解決問題と将来の展望」, 日本物理学会第74回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Mizukami
2. 発表標題 A novel nematic state in heavily hole-doped iron-pnictides
3. 学会等名 Superstripes 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="https://sites.google.com/view/yutamizukamipage/home">https://sites.google.com/view/yutamizukamipage/home</a> <a href="https://scholar.google.co.jp/citations?hl=ja&amp;user=lldynWbIAAAAJ">https://scholar.google.co.jp/citations?hl=ja&amp;user=lldynWbIAAAAJ</a>
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考