



Title	バルク物質への二軸歪み印加による物性制御
Author(s)	中島, 正道
Citation	大阪大学低温センターだより. 2023, 173, p. 3-7
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/91011
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

バルク物質への二軸歪み印加による物性制御

理学研究科 中島 正道

E-mail : nakajima@phys.sci.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

物質に歪みを加えると、バンド構造が変化し、物性に影響が現れる。歪みは物性を制御するための重要なパラメータの一つであり、物性研究において強力な手段となる。近年、ピエゾ素子を用いた一軸歪みの精密制御技術が開発された[1]ことを契機に、バルク単結晶に対して一軸歪みを印加する研究が広く行われるようになってきている。その一方で、歪みを二次元に拡張する試みはほとんどない。単結晶試料に対する均一な二次元的歪みの印加が容易ではないためである。多彩な歪みを自在に印加できるようになれば、これまで到達不可能であった構造パラメータを持つ物質領域へアプローチできるようになり、物性研究の進展に大きく貢献できると考えられる。

我々は、従来ほとんど活用されてこなかった二次元的な歪みに注目し、制御パラメータの新機軸を打ち出すべく、研究を進めている。本稿では、鉄系超伝導体FeSeの単結晶試料に対して、様々な大きさの二軸歪みを印加し、物性の変化を調べた研究について紹介する[2,3]。我々の知る限り、バルク物質を対象に、二軸歪みに対する系統的な物性の変化を観測した初めての成果である。

2. 鉄系超伝導体 FeSe

鉄系超伝導体の特徴の一つとして、局所構造の変化に対してバンド構造が敏感に反応することが挙げられる。そのため、鉄系超伝導体の電子状態の解明に向けて、歪みを用いた研究は有用である。鉄系超伝導体は層状物質であり、Feと第15族元素（ニクトゲン）あるいは第16族元素（カルコゲン）から成る二次元的なネットワークを有する。鉄系超伝導体FeSeの結晶構造を図1に示す。FeSeは最も単純な結晶構造を取る鉄系超伝導体であり、FeSe層のみが積層している。SeはFeに対して四

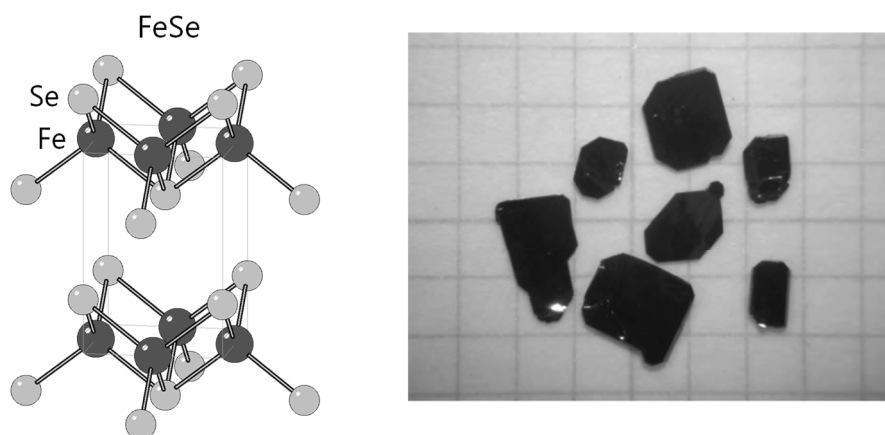


図1. (左) FeSeの結晶構造。(右) 化学気相輸送法で作製したFeSe単結晶の写真。マス目の一辺は1 mm。

面体配位しており、四面体の形状によってバンド構造・フェルミ面が大きく変化する。鉄系超伝導体の局所構造が超伝導転移温度 T_c と密接に関係していることは、研究の初期段階から指摘されており [4,5]、超伝導発現機構解明に向けた重要な知見となっている。歪みは、化学置換や圧力印加とは異なる局所構造の変化を引き起こすため、相補的な制御パラメータと言える。

FeSe は、正方晶から直方晶への構造相転移を 90 K で、超伝導転移を 8 K で示す [6]。劈開性のある柔らかい物質であり、歪みを印加する対象として適している。フェルミ準位がバンドの非常に浅いところに位置しているため [7]、歪みによるバンド構造の変調はフェルミ面を大きく変化させ、物性に大きな影響を与えることが期待される。実際に、異なる大きさの二軸歪みが加わった FeSe 薄膜では、歪みに対する T_c の変化が報告されている [8]。

3. 二軸歪みの印加

一軸歪みの場合とは異なり、試料の端を固定して伸縮させる方法では二軸歪みの印加は難しい。そのため、試料を基板に貼り付けることが歪みの印加に向けた基本的な作戦となる。我々は、化学気相輸送法 [9,10] によって作製した FeSe 単結晶 (図1) に対して、貼り付ける基板材料との熱膨張率の差を利用して二軸歪みを印加した。セッティングは、図2(a) に示すように試料を基板に貼り付けるだけである。温度を変えると試料の大きさが基板に追従して変化することにより、等方的な二軸歪みが導入される。意図的に力を加えるための特別な機構を用意する必要のない、簡便な手法である。歪みによる物性の変化を調べるため、測定には全て同じバッチの試料を使用し、試料品質のばらつきを可能な限り抑えた。歪みが試料内で緩和せず、均一にかかるようにするため、貼り付けた試料は劈開させることにより $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下の厚みにまで薄くした。

基板貼り付けによる歪み印加では、様々な熱膨張率を持つ基板材料を揃えることで、二軸歪みの大きさを制御できる。本研究では、ポリカーボネート、スタイキャスト 2850FTJ、ソーダ石灰ガラス、ホウケイ酸ガラス、石英ガラスの五種類を用意した。歪みゲージを用いて測定した、各基板材料の長さの温度依存性を図2(b) に示す。基板材料に加えて、FeSe 単結晶の結果 [11] もプロットしている (構造相転移点以下は双晶状態のデータである)。FeSe における冷却時の収縮は、ポリカーボネート

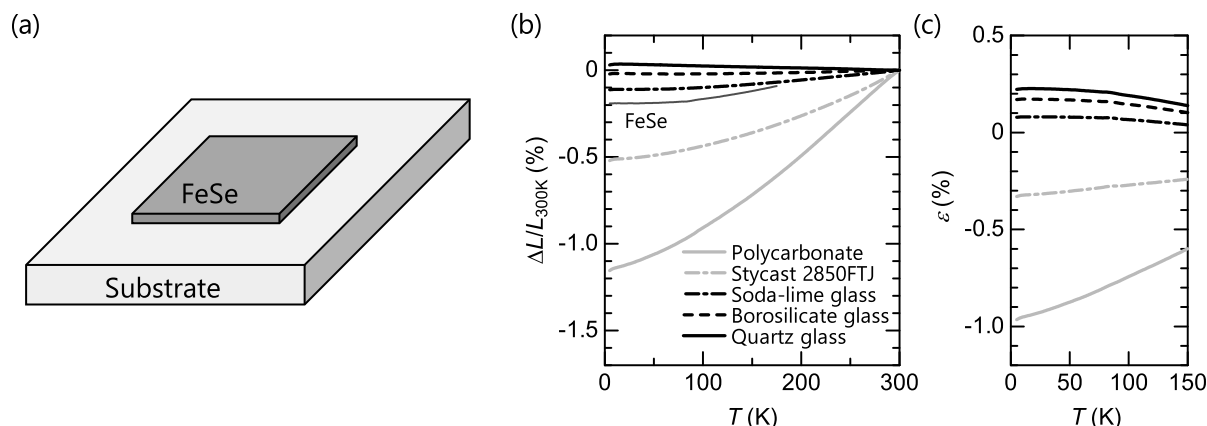


図2. (a) 二軸歪み印加のための基板貼り付けの模式図。 (b) 300 K を基準とした、ポリカーボネート、スタイキャスト 2850FTJ、ソーダ石灰ガラス、ホウケイ酸ガラス、石英ガラスの長さの温度依存性。FeSe のデータは、文献 [11] より引用。 (c) 各基板での FeSe に加わる二軸歪みの温度依存性。

とスタイキャストよりも小さく、ガラスよりも大きい。このことは、ポリカーボネートとスタイキャストは圧縮歪み、ガラスは伸長歪みをFeSeに加えることを意味している。基板の伸縮がそのままFeSeに伝わるとすれば、各温度で試料に印加される二軸歪みの大きさを見積もることができる（図2(c)）。二軸歪みの大きさ ε は、温度に対して変化することに注意が必要であるが、限られた温度範囲であればほぼ一定の歪みが加わっているとみなしてよい。5 Kにおける歪みの大きさは、ポリカーボネートでは-0.96%、石英ガラスでは0.23%に達する。

4. FeSeの物性の変化

様々な基板に貼り付けたFeSe単結晶の電気抵抗率の温度依存性を図3(a)に示す。構造相転移に伴う折れ曲がりが見え、90 Kあたりに観測されている。大きな歪みが加わっているポリカーボネート上の試

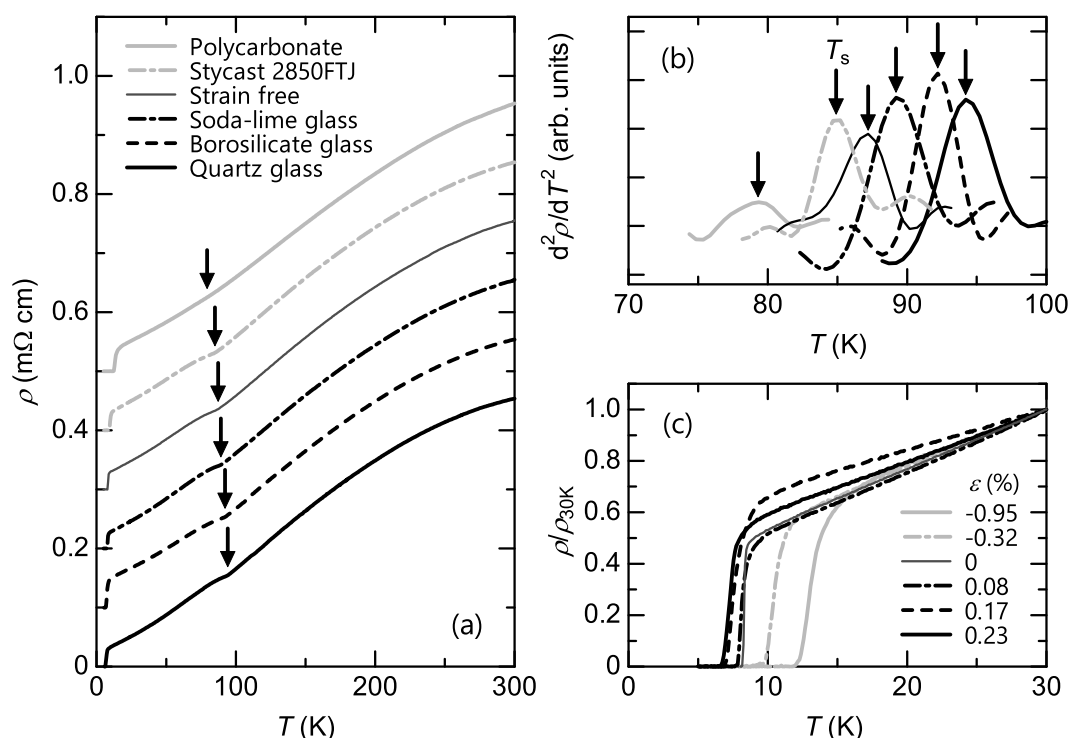


図3. (a) 二軸歪みを印加したFeSeにおける電気抵抗率の温度依存性。矢印は T_s を示している。(b) 電気抵抗率の温度による二階微分。ピーク位置が T_s に対応している。(c) 30 K以下の領域を拡大した電気抵抗率の温度依存性。歪みの大きさは T_c における値を示している。

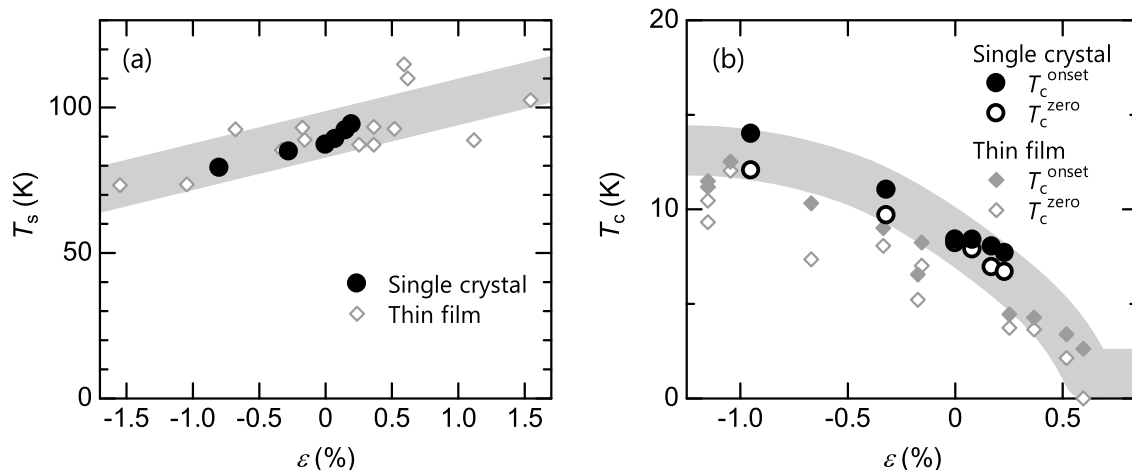


図4. FeSeにおける(a) T_s と(b) T_c の二軸歪み依存性。薄膜のデータは、文献[8]より引用。

料では折れ曲がりが多少不鮮明になってはいるが、折れ曲がりを示す温度が歪みに対して系統的に変わっている様子を見て取れる。構造相転移点 T_s は、図3(b)に示したように二階微分のピークから決定した。 T_c を ε に対してプロットすると、 ε の増加にしたがって（伸長方向の歪みに伴って）単調に増加することが分かる（図4(a)）。薄膜試料でも同様の傾向が見られており[8]、基板貼り付けによって試料にきちんと二軸歪みがかかっていることを示している。

電気抵抗率の低温部分を拡大したものを、図3(c)に示す。歪みのかかっていない試料では8.4 Kから抵抗率が急激に減少し、8.2 Kでゼロ抵抗を示す。歪みに対して、 T_c は系統的に変化する。圧縮歪みは T_c を上昇させ、 $\varepsilon = -0.95\%$ でオンセットの T_c は14.0 Kに達する。一方、伸長歪みは超伝導を抑制し、 $\varepsilon = 0.23\%$ で T_c は7.7 Kまで減少する。歪みが加わっている試料では超伝導転移が多少ブロードになっているが、 T_c の系統的な変化はきれいに観測されており、歪みの不均一性は小さいと考えられる。 T_c の歪み依存性も薄膜試料における報告[8]と一致している（図4(b)）。

T_s と T_c の系統的変化は、バンド構造が二軸歪みの大きさに応じて変わっていることを示唆している。詳細は文献[2]にゆずるが、我々は、磁気輸送現象測定からバンド構造も系統的に変化していることを確認している。本研究の結果により、二軸歪みが物性を制御するための効果的なパラメータであることを実証した。

5. まとめ

本稿では、試料と基板の熱膨張率の違いを利用した、基板貼り付けによる二軸歪みの印加について紹介した。鉄系超伝導体FeSeに対して様々な大きさの二軸歪みを加えることにより、バンド構造を変調させ、物性が系統的に変化することを示した。本研究の手法の適用により、物性の効果的な制御パラメータである二軸歪みを、広い範囲で簡便に印加することができる。歪みは多くの測定手法と組み合わせることができ、アイデア次第で面白い実験の設計が可能である。今後、様々な物質に対して二軸歪みを用いた研究を広げていきたい。

謝辞

本研究は、理学研究科物理学専攻の大畑祐貴氏と田島節子氏とともに行ったものです。本研究の遂行にあたり、科学研究費助成事業（JP18K13500）と村田学術振興財団の援助を受けました。

参考文献

- [1] C. W. Hicks, M. E. Barber, S. D. Edkins, D. O. Brodsky, and A. P. Mackenzie, Rev. Sci. Instrum. **85**, 065003 (2014).
- [2] M. Nakajima, Y. Ohata, and S. Tajima, Phys. Rev. Mater. **5**, 044801 (2021).
- [3] 中島正道, 高圧力の科学と技術 Vol. 31, No. 4, pp. 214–223 (2021).
- [4] C. H. Lee, A. Iyo, H. Eisaki, H. Kito, M. T. Fernandez-Diaz, T. Ito, K. Kihou, H. Matsuhata, M. Braden, and K. Yamada, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 083704 (2008).
- [5] Y. Mizuguchi, Y. Hara, K. Deguchi, S. Tsuda, T. Yamaguchi, K. Takeda, H. Kotegawa, H. Tou, and Y.

- Takano, *Supercond. Sci. Technol.* **23**, 054013 (2010).
- [6] F. C. Hsu, J. Y. Luo, K. W. Yeh, T. K. Chen, T. W. Huang, P. M. Wu, Y. C. Lee, Y. L. Huang, Y. Y. Chu, D. C. Yan, and M. K. Wu, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105**, 14262–14264 (2008).
- [7] S. Kasahara, T. Watashige, T. Hanaguri, Y. Kohsaka, T. Yamashita, Y. Shimoyama, Y. Mizukami, R. Endo, H. Ikeda, K. Aoyama, T. Terashima, S. Uji, T. Wolf, H. von Löhneysen, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **111**, 16309–16313 (2014).
- [8] F. Nabeshima, M. Kawai, T. Ishikawa, N. Shikama, and A. Maeda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 120314 (2018).
- [9] A. E. Böhmer, V. Taufour, W. E. Straszheim, T. Wolf, and P. C. Canfield, *Phys. Rev. B* **94**, 024526 (2016).
- [10] N. Murai, T. Fukuda, M. Nakajima, M. Kawamura, D. Ishikawa, S. Tajima, and A. Q. R. Baron, *Phys. Rev. B* **101**, 035126 (2020).
- [11] A. E. Böhmer, F. Hardy, F. Eilers, D. Ernst, P. Adelman, P. Schweiss, T. Wolf, and C. Meingast, *Phys. Rev. B* **87**, 180505(R) (2013).