

機関番号：11301

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540343

研究課題名(和文) 二ホウ化物超伝導体の渦糸状態の研究—多ギャップ効果により発現する新渦糸相図探索—

研究課題名(英文) Study of vortex state in magnesium diboride superconductors -A vortex matter phase diagram originating from two superconducting gap

研究代表者

野島 勉 (NOJIMA TSUTOMU)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：80222199

研究成果の概要(和文)：2種類の超伝導ギャップ(電子対)を持つ MgB_2 の渦糸相図(磁場中超伝導状態図) およびその不純物効果を研究した。銅酸化物超伝導体で統一的に観測されてきたものと同様な渦糸相転移に加え、この系特有の渦糸状態転移と渦糸相図の不純物による変調効果を見出した。またポイントコンタクト法によるトンネル効果測定により、 MgB_2 の関連物質 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ の2つの超伝導ギャップエネルギーの観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：We studied the vortex matter phase diagram in MgB_2 , which has been known as a typical two-gap superconductor, and the impurity effect on it. In addition to clarifying the universal characteristics of vortex phase transitions, which have been remarkably observed in high- T_c cuprate superconductors, we found a new type of transition in the vortex state and a modulation of the phase diagram due to Al substitution, which were considered to be peculiar to this system. We also succeeded in measuring the two kinds of gap energies in $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$, which is related materials of MgB_2 .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：低温物理学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：ホウ化物超伝導体、渦糸相転移、渦糸相図、多ギャップ超伝導、磁気トルク測定、元素置換効果、ポイントコンタクト

1. 研究開始当初の背景

(1)研究背景

2001年に青山大学の秋光グループによって発見された MgB_2 は、当時、銅酸化物高温超伝導体に次ぐ高い超伝導転移温度 T_c (= 39 K) を持っていたため、その超伝導機構に関する研究が盛んに行われてきた。その結果、

この物質は一般的な超伝導体とは異なり、2つのホールおよび電子軌道(2次元の σ バンドと3次元の π バンド)からそれぞれ独立に発生する2種類の超伝導ギャップ Δ_σ 、 Δ_π ($\Delta_\sigma > \Delta_\pi$)をもつ特殊な超伝導体であることがわかり、この事実は「多ギャップ超伝導」という観念を広く認識させるに至った。

一方、 MgB_2 は比較的大きな異方性や GL パラメータを持つ典型的な第二種超伝導体であることから、渦糸系は熱揺らぎの効果を受けやすく、銅酸化物超伝導体で顕著に観測されるような、渦糸系相転移も興味ある研究対象となっていた。しかし当時 MgB_2 の渦糸相図についてはあまり多くの事はわかっておらず、かつ渦糸相図の研究に 2 ギャップという観念はほとんど考慮されていなかった。

(2) 動機

本研究代表者らは、 MgB_2 の発見直後からこの良質単結晶の磁化特性や異方性の温度磁場特性を調べ、単一ギャップのみを考慮した一般的な現象論では説明できない実験結果を報告してきた。超伝導体の磁化の起源となる渦糸は常伝導コアとその周りを回転する超伝導電流渦からなり、どちらのサイズも超伝導ギャップの大きさに依存する。よって観測されている磁化は 2 つのギャップの相対的变化を反映していることになる。そこでまだ明らかになっていない MgB_2 の渦糸相図には、これまでに報告例のない 2 ギャップの性質が隠れているのではないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、 MgB_2 および $Mg_{1-x}Al_xB_2$ の良質単結晶を用いて、

- (1) 多ギャップであるがゆえ現われる新しい渦糸状態やその相転移を探索しその機構を解明すること、
- (2) ギャップの磁場依存性を不純物 (Al) により変化させ、この渦糸状態を制御すること、である。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、(1) MgB_2 および $Mg_{1-x}Al_xB_2$ の詳細な渦糸相図の作成と (2) 各相における超伝導ギャップの直接測定 の両方が必要となる。

(1) 渦糸相図は、磁化 M の温度 T ・磁場 H 依存性を詳細に測定することにより決定した。特に本研究では、測定試料が小さいため ($100 \times 100 \times 50 \mu m^3$ 程度)、原子間力顕微鏡 (AFM) 用のカンチレバーの先端に試料を張り付け、磁場を磁化容易軸 (MgB_2 の場合は c 軸) から傾けて印加することにより、発生した磁気トルク $\tau (= \mathbf{M} \times \mathbf{H})$ を同じくカンチレバーに蒸着した piezo 抵抗により検出し、磁化を観測するといった特殊な方法を採用した (図 1(a) 参照)。この方法では $H > 1 \text{ T}$ で 10^{-8} emu 以下といった高精度が得られる。さらに渦糸ピンングによる $M(H, T)$ ヒステリシスが相転移の観測を阻害する場合、渦糸 Shaking 法を用いて、ピンングの効果を消去した。これは印加した直流磁場に小さな AC 磁場 H_0 を (10

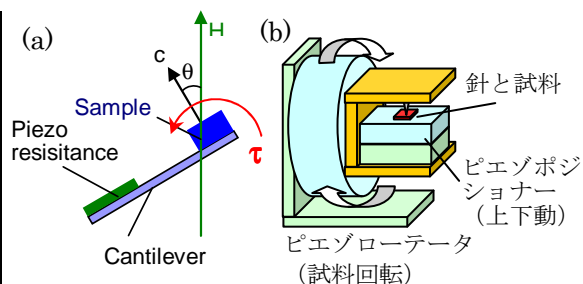


図 1 (a) トルク τ 測定のご概念図と (b) 作製したトンネル測定ユニット。

- 20 Hz) 重ねることにより渦糸を局部的に振動させ、ピンング位置から熱力学的平衡位置へ緩和させる方法であり、本研究期間中に新たに開発した。

(2) 超伝導ギャップの観測には、ポイントコンタクト法によるトンネル効果測定を試みた。本研究では新たなトンネル測定ユニットを、piezo positioner、piezo rotator を用いて作製した (図 1(b))。この装置は、低温で磁場方向と試料-ポイントコンタクト針 (PtIr や Au) 間の距離を室温に取り出すことなく自由に変化できる特徴を持つ。

4. 研究成果

(1) MgB_2 単結晶の渦糸相図の決定

MgB_2 良質単結晶の $\tau(H)$ の温度変化を様々な磁場方向 θ (ここで θ は H 方向と c 軸のなす角度) について詳細に測定することにより、この系の渦糸相転移現象を明らかにした。

図 2 に典型例として $\theta = 60^\circ$ での磁化曲線 $M(H) (= \tau(H)/H)$ の各温度での測定例を示す。各磁化曲線はヒステリシスが小さく、本研究で用いた試料が良質であることを示している。 $T > 26 \text{ K}$ の高温領域で超伝導が壊れる上部臨界磁場 H_{c2} 付近を詳細に測定することにより、図 3 に示すよう、ステップ的な $M(H)$ の変化 (微分磁化 dM/dH のピーク) が磁場 H_m において観測され、これが渦糸融解一次相転移の発見の証明となった。同様な変

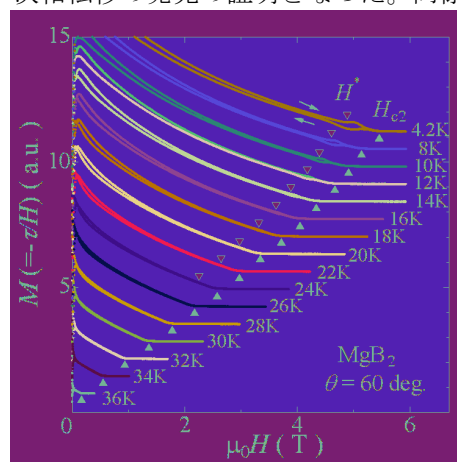


図 2 MgB_2 単結晶の磁化曲線の測定例 ($\theta = 60^\circ$, Shaking 磁場なし)。

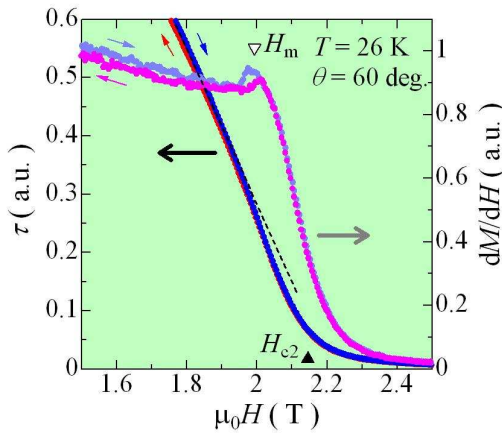


図3 MgB₂単結晶の渦糸格子融解の測定例.

化は $33\text{ K} > T > 26\text{ K}$ のすべての温度範囲で観測された。

温度の下降とともにこの磁化のステップは $T < 25\text{ K}$ でヒステリシスピークに変化する(図2)。図4に $\theta = 70^\circ$ 、 $T = 16\text{ K}$ におけるピーク近傍での通常の $M(H)$ 曲線、渦糸 shaking 法を用いて熱平衡状態にした $M(H)$ 曲線およびその dM/dH 曲線の例をそれぞれ示す。このヒステリシスピークは近年、渦糸格子相から渦糸ガラス相への秩序-無秩序一次相転移を反映したものであるという予測がなされるようになっていた。実際、図5に示すよう熱平衡条件に近い可逆的な $M(H)$ では、ピーク磁場 H^* でステップ状の変化 (dM/dH のピーク) が観測され一次相転移がおこっていることを見出した。図4でさらに注目したいのは、 H^* より少し高磁場側の不可逆磁場(磁化のヒステリシスがなくなる磁場) H_{irr} で dM/dH ステップが観測されることである。これは H_{irr} で二次の相転移、つまり渦糸ガラス融解転移が起こっていることを意味する。このような2つの相転移は $T < 25\text{ K}$ のすべての温度範囲、すべての θ 、において観測された。

図5に本研究で得られた渦糸 ($H-T$) 相図

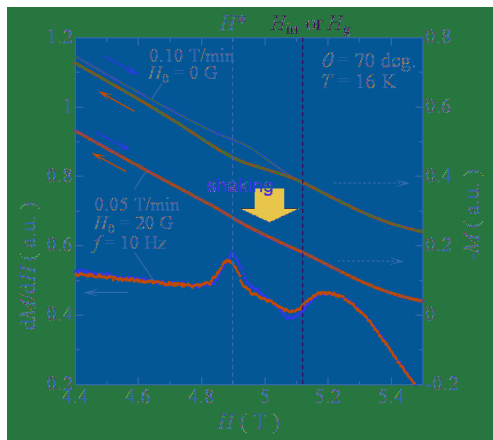


図4 秩序-無秩序転移 H^* と渦糸ガラス融解転移 H_g の測定例 ($\theta = 70^\circ$)。

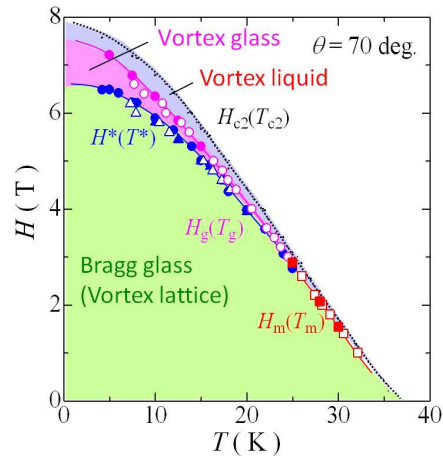


図5 MgB₂単結晶の渦糸相図 ($\theta = 70^\circ$)。

($\theta = 70^\circ$ の場合)を示す。他の θ でもほぼ同様な結果が得られた。渦糸格子融解線 $H_m(T)$ 、渦糸ガラス融解線 $H_g(T)$ 、秩序-無秩序転移線 $H^*(T)$ といった渦糸系特有の3つの相転移線の存在を明瞭に示すことができた。これまでこの3つの相転移線が明瞭に観測された例は銅化合物超伝導体を除いてはなく、MgB₂ では国内外を含め始めての観測例となる。

33 K 以上の高温域では、相転移線は消失している。後の述べるよう、相転移が観測される温度・磁場領域は、2種類のギャップのうち、大きな σ バンドからの超伝導ギャップ Δ_σ のみが主成分となる領域であると考えられる。よってこの相転移線の消失は、 T_c 近傍および低磁場でその寄与が大きくなる π バンドからのギャップ Δ_π の影響かも知れない。理論的考察も含め今後の課題である。

(2) MgB₂ 単結晶の渦糸相転移における過冷却現象と多ギャップ効果の発見

(1)での $M(H)$ による研究では渦糸相図上に、多ギャップの効果を見出すことができない。もしこの効果がクロスオーバー的に現れるものであれば、測定時に常に渦糸が移動する $M(H)$ では観測が難しい。そこで、渦糸系への刺激の少ない一定磁場中での磁化の温度依存性 $M(T)$ 測定を行い、下記のような、この系特有の2ギャップ効果を発見した。

図6に $\theta = 70^\circ$ の各磁場での $M(T)$ の測定例を示す。測定は5 Kまでゼロ磁場中冷却の後、(i)磁場を印加して温度を T_c 以上まで上昇、(ii)磁場中で温度を下降、(iii)再び T_c 以上まで温度を上昇、という過程で測定した。図5中の $H_g(T)$ や $H^*(T)$ が観測される高磁場領域 ($\theta = 70^\circ$ では $H > 2.9\text{ T}$) で新たな $M(T)$ のふるまいが発見された。 $M(T)$ は(ii)の過程で温度の下降とともに $H_g(T)$ 上の温度 T_g 以下になると(i)や(iii)のものより離れほぼ一定値をとり、その後 $H^*(T)$ 上の温度 T^* (図中点線) では相転移を起こさず、代わりにある特徴的温度 $T_2^* (< T^*)$ で(i)や(iii)の $M(T)$ へ向けての急

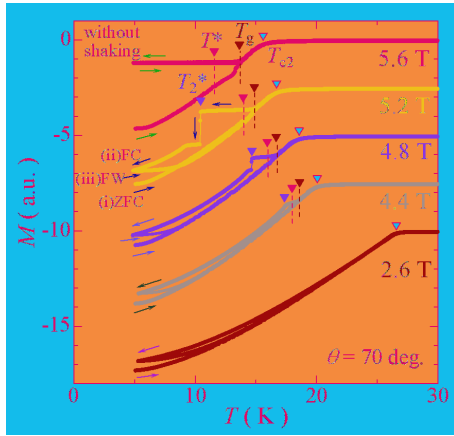


図6 MgB₂単結晶の $M(T)$ 曲線の測定例 ($\theta = 70^\circ$).

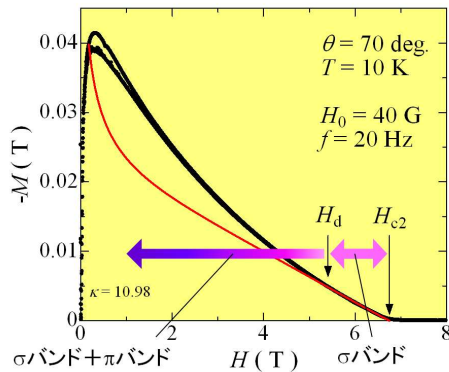


図7 MgB₂単結晶の磁化曲線の1バンドGLモデルによるフィッティング例.

激な飛び（フラックスジャンプ）を示す。この現象は T^* 以下で渦糸グラス相（無秩序相）の過冷却現象がおり、それが T_2^* で急激に熱平衡状態（渦糸格子相（秩序相））に飛び移る現象と解釈できる（実際渦糸 shaking 法を用いて測定すると、ヒステリシスはなくなる）。しかしこのような大きなフラックスジャンプを伴う渦糸系の過冷却はこれまで報告例がほとんどなく、かつ T_2^* は温度の下降速度にもよらないばかりか、試料にもよらないことも見出した。よって図6で観測された現象はMgB₂に固有の効果である。

T_2^* での $M(T)$ の飛びが2ギャップの出現とどう関連するか調べるため、図2で調べた $M(H)$ をさらに解析した。図7に示すよう、渦糸 shaking 法により熱平衡に近付けた $M(H)$ 曲線は H_{c2} 近傍の高磁領域では、1ギャップを仮定したGLモデル（図中赤の実線）でうまくフィッティングできるが、ある磁場 H_d を境に徐々にこのモデルから離れていく。これは高磁場で主な寄与をしていた σ バンドの超伝導に π バンドギャップ Δ_π の寄与が現れ始めたことを意味する。

上記のように求めた $T_2^*(H)$ と $H_d(T)$ を $H-T$ 相図上にプロットすると（図8）、両者はほぼ同様な位置にあることがわかる。これより温

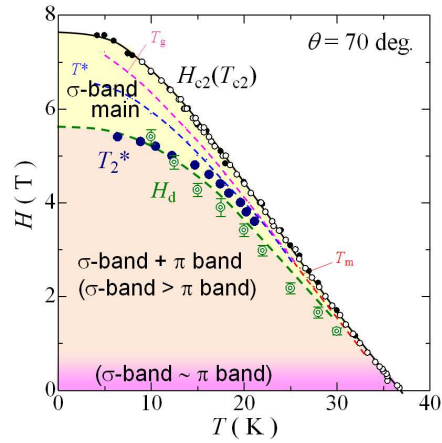


図8 MgB₂単結晶の渦糸相図上への過冷却転移温度 T_2^* と π バンド超伝導の臨界磁場 H_d のプロット ($\theta = 70^\circ$).

度磁場の下降に伴う Δ_π の出現が、渦糸グラスの過冷却状態から渦糸格子相へ転移のトリガーになっていることがわかった。このような多ギャップの効果が渦糸系の変化に現れた例はこれまでになく、この発見も本研究の大きな成果の一つと言える。

図8中の低磁場領域（1 T近傍）では、 $M(T, H)$ の両方に T_2^* で観測されたものとは違う小さな異常が観測されている。これは、 Δ_π の寄与のさらなる増大に起因する渦糸格子の回転に関連するものであると考えられるが、今後詳しく検証する必要がある。

(3) Al 置換効果

① 渦糸相図への不純物効果

通常の1ギャップ第二種超伝導体では、不純物（disorder）の増加とともに、 H_{c2} が上昇し、かつ H^* と H_{c2} で囲まれる渦糸グラス相（無秩序相）の領域は広がる。これらは不純物散乱によって超伝度電子対のコヒーレンス長 ξ が短くなること（ H_{c2} は ξ^2 に反比例）と不純物による渦糸ピンニングにより渦糸グラス状態が安定になることで理解できる。しかしMgB₂の場合、MgサイトをAlで置換したMg_{1-x}Al_xB₂では、 x の増加とともに T_c で規格化した温度で比べた H_{c2} は変化しない（ H/c ）か、むしろ減少する（ H/c ）ことが知られ、本研究でもMg_{1-x}Al_xB₂（ $x = 0.12, 0.21$ ）単結晶を用いた $M(H)$ 測定より同様な結果が確認された。これはMg面とB面から構成されるMgB₂中において H_{c2} はB面内に2次元的とどまる σ バンドからの超伝導ギャップによって決まり、Al不純物の影響を受けないと考えれば、2ギャップ効果としてうまく説明できる。

一方、Mg面を横切る3次元 π バンドはAlによる不純物散乱の効果を受け、これが $H_{c2}(T)$ 線以下の渦糸相図に通常とは逆の変調を起こすことを新たに見出した。図9に $x = 0.12$ の場合の $\theta = 60^\circ$ における渦糸相図の測

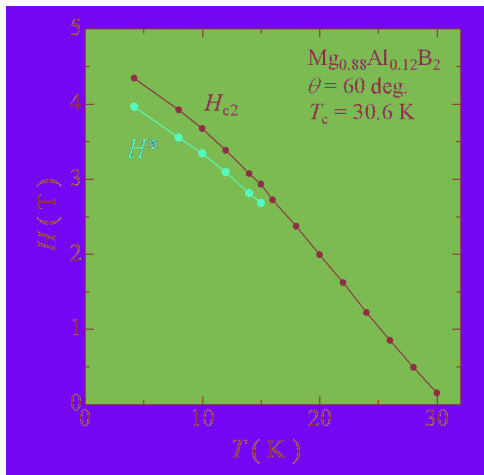


図 9 $\text{Mg}_{0.88}\text{Al}_{0.12}\text{B}_2$ 単結晶における渦糸相図 ($\theta = 60^\circ$).

定例を示す。Al ドープ試料では、測定精度の範囲内で秩序-無秩序転移 $H^*(T)$ のみしか観測されなかった。さらに注目したいのは図 5 ($x = 0$) と比べ H^* と H_{c2} で囲まれる渦糸グラス相 (無秩序相) の温度領域が相対的に狭くなっていることである ($x = 0.21$ の試料では測定の範囲内で H^* (ピーク効果) は観測されなかった)。図 5 と図 8 を比べてわかるようにこれまで $x = 0$ の試料で観測された 3 種類の渦糸相転移は σ バンドからの超伝導ギャップが主な寄与をする温度・磁場領域のみで観測されてきた。Al をドープすることにより π バンド超伝導の実質的な H_{c2} (ここでは図 8 の $T_2^*(H)$ や $H_d(T)$ 上の磁場) が上昇し、 σ バンド超伝導が主となる領域を狭めた ($x = 0.21$ ではほとんどの温度磁場領域が Δ_σ と Δ_π の混合する領域になった) と考えれば、実験結果をうまく説明できる。ただしなぜ π バンド超伝導が現れると渦糸系の相転移が観測されなくなるのかは未だ不明である。4(1)の 33K 以上の高温・低磁場領域で渦糸相転移が観測されないことと関連すると予想される。今後さらなる理論的考察が必要である。

② 渦糸ピンニングへの効果

$\text{Mg}_{1-x}\text{Al}_x\text{B}_2$ ($x = 0, 0.12, 0.21$) の $M(\theta, H)$ を詳細に調べることにより、Al 置換によって $\theta = 90^\circ$ 付近のピンニング力のみが急激に大きくなることを発見した。これは、この物質の層状構造に起因するピンニング効果に見えるが、Al 置換により異方性は逆に小さくなるので、それでは説明不能である。上記 4(3)①と同様 Al 置換により π バンド超伝導が強くなることによる効果と考えられるが詳細はわかっていない。

(4) 関連物質 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ の異方性パラメータの導出

本研究を始めた 2008 年から 2009 年にかけて鉄砒素系超伝導が数多く発見され、この一

連の超伝導体も MgB_2 と同様多ギャップ超伝導体であることが指摘されていた。本研究者は東京大学の為ヶ井グループとの共同研究により、 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ 単結晶 ($T_c = 23$ K) の提供を受け、その多バンド的效果を磁気トルク τ 測定から導出される異方性パラメータ γ の磁場依存性によって検出することを試みた。 MgB_2 とは対照的に γ は 20 K 以上の測定範囲ではほとんど 3 ~ 3.5 の値で磁場依存しない。この系では 2 つのバンドの異方性があまり変わらないか、測定範囲が T_c 近傍であるため 2 つのバンドが混成していると考えられる。より低温での測定は大きなピニングの効果により実現できなかった。今後よりクリーンな結晶を用いた研究が待たれる。

(5) 超伝導ギャップ測定

① 装置開発

本研究では図 8 に示されるような渦糸状態における 2 ギャップの効果を超伝導ギャップの直接測定からも確認するため、ピエゾ素子を用いたポイントコンタクト型トンネル測定装置を開発した。従来型超伝導体 Nb と Au を使った試験では、報告例とよく一致する超伝導ギャップを反映した電流電圧 ($I-V$) 特性、およびトンネルコンダクタンス ($dI/dV-V$) 特性の温度変化を測定することに成功した。

② 関連物質 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ の超伝導ギャップ測定

本研究の目的である MgB_2 のトンネルコンダクタンスによる超伝導ギャップ測定は期間内に到達されなかった。試料が小さい ($100 \times 100 \times 50 \mu\text{m}^3$) ことに起因する正常表面 (へきかい表面) 出しの失敗が原因と考えられ、今後の課題となる。一方、 MgB_2 の関連物質である $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ 単結晶を用いて 2 つの超伝導ギャップ構造を観測

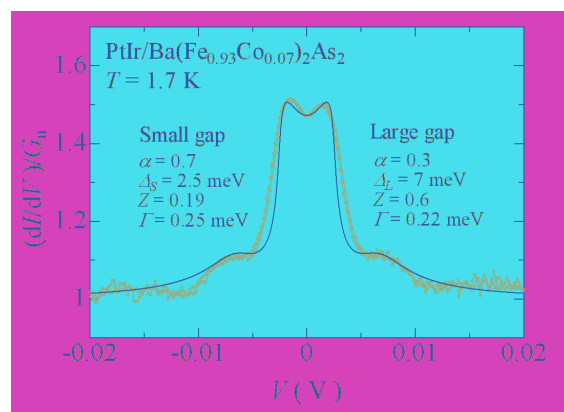


図 10 $\text{Ba}(\text{Fe}_{0.93}\text{Co}_{0.07})_2\text{As}_2$ 単結晶のトンネルコンダクタンスと BTK 理論によるフィッティング (実線). α , $\Delta_{S,L}$, Z , Γ はフィッティングパラメータで、それぞれ 2 つのギャップの重み、超伝導ギャップエネルギー、トンネルバリアエネルギー、ブロードニングパラメータである。

することに成功した。図 10 に探針として PtIr 合金を用いて測定した $T = 1.7$ K での dI/dV 特性の測定例を示す。これを Blonder-Tinkham-Klapwijk (BKT) 理論を用いてフィットすることにより 2.2 - 2.5 meV と 7 - 8 meV の 2 種類のギャップエネルギーを導出できた。今後、実験方法をさらに工夫することにより MgB_2 の 2 つの超伝導ギャップも観測できるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① T. Nojima, Y. Honda, Y. Nakajima, T. Tamegai, Superconducting anisotropy in single-crystalline $Ba(Fe_{0.93}Co_{0.07})_2As_2$ near T_c , Physica C, 査読有, Vol. 470, 2010, pp.S813-S814
- ② M. Chotoku, T. Nojima, A. Ochiai, H. Aoki, H.-G. Lee, S.-I. Lee, Anomalous flux jump and supercooling phenomenon around the order-disorder transition in MgB_2 single crystals, Physica C, 査読有, Vol.469, Issues 15-20, 2009, pp.1132-1135
- ③ T. Nojima, K. Takahashi, M. Chotoku, A. Ochiai, H. Aoki, H.-G. Lee, S.-I. Lee, Observation of magnetization step at order-disorder transition in MgB_2 single crystals, Physica C, 査読有, Vol.469, Issues 15-20, 2009, pp.1055-1058
- ④ T. Nojima, M. Chotoku, K. Takahashi, H.-G. Lee and S.-I. Lee, Intrinsic pinning effect and its enhancement by Al substitution in MgB_2 single crystals, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.150, 2009, pp.052190(1-4)
- ⑤ T. Nojima, K. Takahashi, M. Chotoku, A. Ochiai, H. Aoki, H.-G. Lee and S.-I. Lee, Observation of first-order transitions of the vortex lattice in MgB_2 single crystals, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.150, 2009, pp. 052189(1-4)

[学会発表] (計 12 件)

- ① 野島 勉, MgB_2 単結晶の H-T 相図 - 渦糸相転移と多バンド効果 -, 第 18 回渦糸物理国内会議, 2010 年 12 月 2 日, 日本原子力研究開発機構システム計算科学センター (東京都)
- ② 野島 勉, 鉄砒素系超伝導体 $Ba(Fe_{0.9}Co_{0.1})_2As_2$ 単結晶の電子異方性, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月 25 日, 熊本大学
- ③ T. Nojima, Phase transitions and a supercooling phenomenon of the vortex matter in MgB_2 single crystals, 12th

International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, 東京大学山中寮内藤セミナーハウス (山梨県南都留郡)

- ④ T. Nojima, Thermodynamic phase diagram of the vortex matter in MgB_2 single crystals, 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, 2009 年 9 月 11 日, 京王プラザホテル (東京都)
 - ⑤ Y. Honda, Superconducting anisotropy in single-crystalline $Ba(Fe_{0.9}Co_{0.1})_2As_2$ near T_c , 9th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity, 2009 年 9 月 9 日, 京王プラザホテル
 - ⑥ 野島 勉, 磁束 shaking 法を用いた MgB_2 単結晶の磁束相転移の観測 II, 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 29 日, 立教大学 (東京都)
 - ⑦ 野島 勉, 磁束 Shaking 法を用いた MgB_2 単結晶の渦糸相図の研究, 第 16 回渦糸物理国内会議, 2008 年 12 月 8 日, 東京工業大学 (東京都)
 - ⑧ M. Chotoku, Anomalous flux jump and supercooling phenomenon around the order-disorder transition in MgB_2 single crystals, The 21st International Symposium on Superconductivity, 2008 年 10 月 28 日, つくば国際会議場 (つくば市)
 - ⑨ T. Nojima, Observation of magnetization step at order-disorder transition in MgB_2 single crystals, The 21st International Symposium on Superconductivity, 2008 年 10 月 28 日, つくば国際会議場 (つくば市)
 - ⑩ 長徳峰美, MgB_2 単結晶における渦糸相転移 - 熱平衡磁化の温度依存性からの観測 -, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 21 日, 岩手大学上田キャンパス (盛岡市)
 - ⑪ T. Nojima, Observation of first-order transitions of the vortex lattice in MgB_2 single crystals, 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008 年 8 月 12 日, RAI Conference Center (オランダ・アムステルダム市)
 - ⑫ T. Nojima, Intrinsic pinning effect and its enhancement by Al substitution in MgB_2 single crystals, 25th International Conference on Low Temperature Physics, 2008 年 8 月 11 日, RAI Conference Center (オランダ・アムステルダム市)
6. 研究組織
(1) 研究代表者
野島 勉 (NOJIMA TSUTOMU)
東北大学・金属材料研究所・准教授
研究者番号: 80222199