

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244070

研究課題名(和文)局所マイクロ波複素伝導度測定を用いた量子凝縮相の新しいダイナミクスの研究

研究課題名(英文) Novel dynamics of quantum condensate investigated by local microwave complex conductivity measurement

研究代表者

前田 京剛 (MAEDA, Atsutaka)

東京大学・総合文化研究科・教授

研究者番号：70183605

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,900,000円

研究成果の概要(和文)：液体ヘリウム中で動作する，STMも同時に兼ね備えたマイクロ波顕微鏡(同軸共振器タイプ，動作周波数 10.7 GHz)を開発した。これを用いて，鉄系超伝導体 $KxFe_2Se_2$ 単結晶において，電気伝導度の空間分布を取得することに初めて成功し，網目状の部分が超伝導領域であることを直接示すことができた。また，この過程で，表面の粗さがマイクロ波共振特性に与える影響を取り除く走査方法を見出した。これら伝導度の空間分布測定の空間分解能は，現状で，200 nm以下であった。これらの技術は，さらなる改良により，今後の物性物理学研究に新しい切り口を導入することになると確信する。

研究成果の概要(英文)：It is important for modern scanning microwave microscope to overcome an influence of the surface roughness. Here we report microwave imaging of phase-separated iron chalcogenide $KxFe_2Se_2$ ($x = 0.8$, $y = 1.6 - 2$) using scanning tunneling/microwave microscope developed by ourselves, distinguishing electric contrast from topography-induced contrast using STM/SMM. We successfully observed the characteristic modulation of local electric property originating from mesoscopic phase separation of the metallic and the semiconducting phase in two different scanning modes; constant current mode and constant Q mode. In particular, the constant Q scanning is turned to be extremely useful because we can get an qualitative image in which topographic contrast is largely eliminated without degradation of the spatial resolution. This technique, with a further improvement, should introduce novel aspect for condensed matter physics reseraches.

研究分野：物性物理学

キーワード：マイクロ波 マイクロ波顕微鏡 STM 鉄系超伝導体 電気伝導度分布 局所電気伝導度 銅酸化物超伝導体 トポロジカル絶縁体

1. 研究開始当初の背景

最近の凝縮系物理学研究では、興味ある状態・現象の背後に不均質性が深く関与している現象が多く発見されている。**第一の例**は、銅酸化物超伝導体、分子性導体、重い電子系などに代表される競合多秩序系の「電子液晶」状態である [例えば Kivelson *et al.*: Nature 393(1998) 550, Y. Kohsaka *et al.*: Nature 454(2008)1072, 及びその引用文献] すなわち、これらの物質では、圧力、化学組成などを変化させると異なる秩序状態が次々と現れるが、更に興味深いのは、それらの異なる秩序が共存したり、励起エネルギーに依存して異なる姿を見せたりすることである。特に、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ状態では、電子が遍歴的な姿、局在的な姿の二面性を見せ、それに対応して、実空間 (STM 等)、波数空間 (角度分解光電子分光, STM 等) のいずれにおいても不均質な構造を持つことが明らかになってきた。これらの不均質かつ特徴的構造を持ち、結晶の対称性を破っているが長距離秩序を持たない状態を電子液晶状態と呼び、その理解が高温超伝導を始めとする興味深い現象の解明の鍵になる。**第二の例**は、トポロジカル絶縁体である。すなわち、バルクはバンド絶縁体であるが、表面に遍歴的な状態を持ち、その電子状態が特異であることから非常に興味を持たれている物質である (例えば, T. Hanaguri *et al.*, Phys. Rev. B82 (2010) 08135(R), 及びその引用文献)。加えて、トポロジカル絶縁体に異種元素を挿入することで超伝導現象も発現しており [Hor *et al.*: PRL104(2010)057001.], この超伝導の機構がいかなるものであるか、非常に興味もたれる。**第三の例**は超伝導体の磁束量子である。磁束量子自体は新しい現象ではないが、超伝導体中のトポロジカルな欠陥という意味で典型的な不均質系であり、これを高速で動かせれば超低消費電力のデバイスができるため、その動力学に興味を持たれている。我々のマイクロ波を用いた研究により、磁束量子の中心 (コア) に閉じ込められている準粒子の平均自由行程は、磁束量子の外側の準粒子のそれと著しく異なり、コアの半径程度に頭打ちされてしまっていることが明らかになったが、そのメカニズムは理解されていない。加えて、異方的超伝導体では、クラッピングモードと呼ばれる新しい素励起を検出することによって、局所的に異なる対称性の成分が混在しているか否かを判定できる [Balatsky *et al.*: PRL84(2000)4445.] という興味尽きない新しい問題もある。

これらの例は各々異なる舞台上で起こっている現象であるが、基底状態や励起状態が空間的に不均質であるために、通常平均化された電気伝導度等の測定だけでは現象の本質に深く切り込むことができず、現象の本質

の理解には局所的プローブによる測定が絶対に必要であると考えられる。

一方で、既述のように、例えば STM 等の手法によって局所的な電子状態 (一粒子グリーン関数に相当) についての情報はかなり詳しく得られるようになってきているが、他方、局所ダイナミクス (二粒子グリーン関数に相当) については、全くといってよいほど調べられていない。物質の機能を支配するのは、電子や格子 (特に電子) のダイナミクスであり、その情報は、複素電気伝導度に全て含まれている。従って、局所的に複素伝導度を測定し、その空間マップを作製することができれば、上述の興味ある新しい現象においても、さらに新しい物理、新しい物質の機能の発見につながる可能性が高い。

以上が、本研究開始当初の背景である。

2. 研究の目的

以上の背景に基づき、ナノメートルの空間分解能をもつ低温マイクロ波顕微鏡を作製し、局所マイクロ波複素伝導度測定を行い、更に、通常の「平均」電気伝導度測定を併用しながら、量子凝縮相の新しい側面、特にダイナミクスを探り、凝縮系研究の新しい研究スタイルを構築することを目的に据えた。具体的には、(1) 強相関電子系で共通して観測されるようになった「電子液晶」状態の素励起・キャリアダイナミクスを探る。(2) トポロジカル絶縁体の表面状態の素励起のダイナミクスを調べ、さらに、これにキャリアをドープして発現する超伝導の機構を探る。(3) 磁束量子コアの内外の複素伝導度を分離して測定し、何故コア内準粒子の平均自由行程がコア半径程度で抑えられてしまうのか、その機構を解明する。また、異方的超伝導体磁束量子でクラッピングモードを探索し、混合秩序検出を試みる。この3点を研究開始当初の目的とした。

3. 研究の方法

[開始当初の計画] 研究開始当初描いていた研究計画 (方法) は以下の通りである。

平成 23 年度 (1) 室温動作マイクロ波顕微鏡 (10GHz 付近) の作製, (2) 銅酸化物超伝導体 LSCO 不足ドープ領域単結晶育成 (TSFZ 法), (3) 室温動作マイクロ波顕微鏡を用いた LSCO 単結晶の局所伝導度測定 (室温), (4) トポロジカル絶縁体表面のディラック粒子のダイナミクスの理論的研究

平成 24 年度 (1) 低温動作マイクロ波顕微鏡 (10GHz 付近) 作製, (2) 銅酸化物超伝導体 LSCO 不足ドープ単結晶の擬ギャップ領域のマイクロ波局所伝導度測定, (3) トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 における表面状態のマイクロ波表面インピーダンス及び局所伝導度測定 (4) 鉄系超伝導体単結晶作製

平成 25 年度以降(1)前年度(2) (3)の継続,
 (2)銅酸化物超伝導体, 鉄系超伝導体単結晶
 における磁束量子コアの内外それぞれの局
 所マイクロ波伝導度測定を行い, コア内準粒
 子の平均自由行程が短く抑えられている理
 由を解明する。また, 理論と共同でクラッ
 プモードの検出を試みる。

[研究開始後の軌道修正] 研究を開始させ
 た後, 以下の遅延があり, 軌道修正を行っ
 た。
 (1)当初, SII セイコーナノテクノロジー社で
 研究開発していたマイクロ波顕微鏡ユニ
 ット(室温動作のみ)や除振台, 制御エレクト
 ロニクスを安価で譲り受け, それらを改造し
 て, 自分たちの目的に合うような装置にし
 ようと, 約1年の時間をかけたが, 結局のと
 ころ, コントローラーの性能が不十分であ
 ることが目標達成のためには致命的であ
 ることがわかり, コントローラーを新規購
 入し, STM・マイクロ波顕微鏡ユニット, ク
 ライオスタット, 除振台等すべての設計を
 見直し, 改めて最初から作製することに
 なった。
 (2)研究の科学的内容とは関係ないが, 研
 究協力者の学生の実家が東日本大震災に
 被災し, 甚大な被害を受けたことも, さ
 らなる研究の遅延をもたらしたことは
 否定できない。

4. 研究成果

(1) マイクロ波顕微鏡システムの開発・作
 製: 同軸共振器とエバネセント波を利用し
 た方式のマイクロ波顕微鏡ユニット(10.7 GHz
 動作)を設計し, 製作を行った。具体的には,
 (a)ヘッド部の設計し, 電磁界解析シミュ
 レーターを利用して, チップの形状の最適
 化を行った後, マイクロ波顕微鏡ユニッ
 トを作製した(図1)。(b)SPMコントロー
 ー(ナノニス社製)と接続し, グラファイト
 標準試料, トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 (結
 晶作製については後述)等を用いて, ナノ
 メートルの空間分解能でSTM像を取得で
 きることを確認した。(c)ユニットを除
 振台付クライオスタット(オーダーメード)
 に組み込み, 寒剤中での動作も確認した。
 (d)当初は, ベクトルネットワークアナ
 ライザーを用いて, 作製した顕微鏡の共
 振曲線を取り込む方法で, 複素共振特性の空

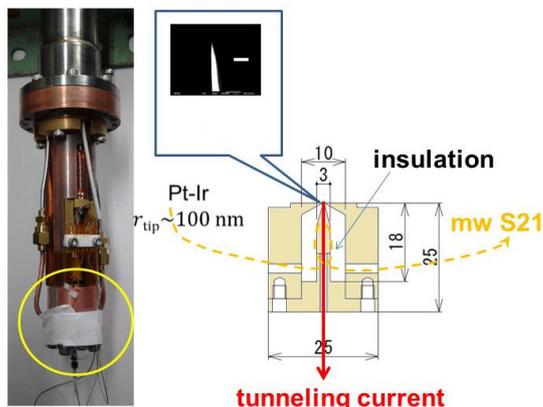


図1 マイクロ波顕微鏡ユニット核心部

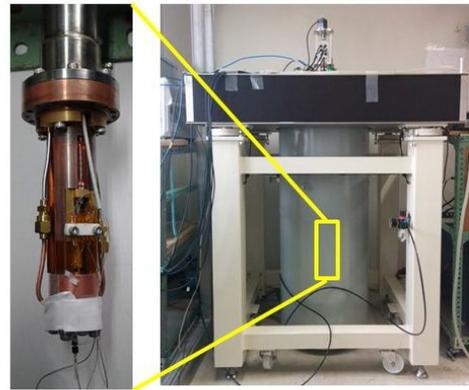


図2 除振台付クライオスタットに装着時
 間分布像を取得した。(d)前項の方法だと, 膨
 大な数の測定点の処理に時間を要するため,
 探針を走査しながら複素電気伝導度分布を迅
 速に測定することは不可能である。そこで,
 ある段階からは, マイクロ波を af 波(周波数 f)
 で変調し, 変調信号の f 成分, $2f$ 成分(それ
 ぞれ, 共振周波数, Q 値に対応)のみを測定す
 るという方式を導入し, 良好な結果を得てい
 る。(e)測定・解析専用のソフトウェアを開
 発・作製した。これらにより, 従来報告され
 ているものよりも小型で高 Q 値(2000-3000)
 の共振器をもつマイクロ波顕微鏡システムが
 完成した。(2) 結晶作製

(A) 鉄系超伝導体 $\text{K}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ 単結晶育成と評価:
 現有の電気炉を用いて, 同物質のバルク単
 結晶を作製し, 帯磁率, 直流電気抵抗率の温
 度依存性などを測定し, 典型的な同物質の
 特性が得られていることを確認した。
 (B) PLD法で11系($\text{FeSe}_{1-x}\text{Te}_x$)エピタキ
 シル薄膜を作製した。作製方法については,
 本研究開始時点で当研究グループに蓄積さ
 れていた技術を最大限活用した。
 (C) トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 単結晶の良
 質かつ再現性のよいものを得ることに成功
 した。
 (3) 鉄カルコゲナド超伝導体 $\text{K}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ の
 メスコピックな相分離の電気伝導度分布
 による直接観察: 完成した STM 型マイクロ
 波顕微鏡を用いて, 室温で, 鉄カルコゲ
 ナド超伝導体 $\text{K}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ のメスコピック
 な相分離を, 電気伝導度のマップとして初
 めて直接観測することに成功した。それ
 によると, 数ミクロン程度のドメインの境
 界に存在する網目状の構造が電気伝導性の
 高い部分(低温で超伝導性を示す部分)であ
 り, それに囲まれたドメインは, 絶縁体的な
 構造であることを直接示すことができた(図
 3)。

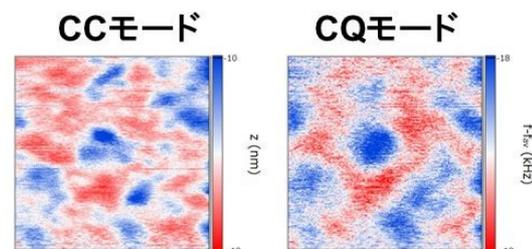


図3 $\text{K}_x\text{Fe}_2\text{Se}_2$ のメスコピック相分離

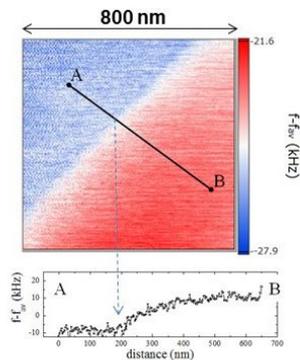


図4 Fe(Se,Te)の伝導度不均一(4.2K)

(4) 液体ヘリウム温度で、鉄・カルコゲナイドFe(Se,Te)薄膜の電気伝導度分布を測定し、電気伝導度の異なるドメインが形成されていることを直接確認した(図4)。おそらく、局所的なTe量の違いが反映されているものと考えられる。

(5) 複素電導度の空間分布の、トポグラフィックな凸凹からの分離：一般に、マイクロ波複素共振特性の空間分布は、(A)表面の凸凹の影響(B)複素電導度特性の空間分布の両方の寄与を含み、特に前者の寄与は測定結果の質を低下させる。これに関して、トンネル電流一定で操作するモード(constant currentモード(CCモード))ではなく、共振のQ値を一定にして走査を行い、共振周波数の空間分布を記録するモード(constant Qモード(CQモード))で走査を行うことで、トポグラフィックな凸凹から、電気伝導度の空間分布をほぼ完全に分離することに成功した。

(6) 空間分解能の評価：トポグラフィックな凸凹と電気伝導度の空間分布を完全に分離することに成功したので、電気伝導度分布に対する空間分解能の正確な評価が可能になり、それは200nm以下であることがわかった。以上、総括すると、これまで報告されていたSTMタイプのマイクロ波顕微鏡の性能を凌駕するスペックの低温動作マイクロ波顕微鏡の開発に成功し、また、複素電導度の空間分布をトポグラフィックな凸凹から分離することにも成功した。今後、探針部の改良による更なる空間分解能の向上などに取り組み、マイクロ波顕微鏡が物性物理学における必要不可欠な重要な測定手段となるであろう。本研究は、その礎を築いたものと位置づけられる。これらの成果は下記発表・論文リストに記された形で発表を行ったほか、現在、Appl. Phys. Lett. 誌に一報を投稿中(査読結果良好)、Rev. Sci. Rep. 誌に投稿を準備中である。

上記の実験的研究と並行して、関連する以下の理論研究を行った。

(1) 本研究の成果は、強磁性、半導体、従来型S波超伝導体からなるヘテロ構造において実現するトポロジカルS波超伝導体について量子渦の微視的理論を構築し、ゴリコフ方程式に対する数値計算の結果を、励起スペクトル

に関してもエネルギー散乱率に関しても再現できる解析的理論を構築したことが主な成果である。

(2) 超伝導量子渦にかかる力について長年の論争に決着をつけた。すなわち、単一量子渦の理論計算においてはローレンツ力は無視できるほど小さく、これまでローレンツ力と言われていた力は物質場の運動量流テンソルに由来することを時間に依存するギンツブルグ・ランダウ理論に基づき見出した。

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90件)

H. Takahashi, Y. Imai, A. Maeda, “Observation of mesoscopic phase separation in $KxFe_ySe_2$ by scanning microwave microscopy”: *Physica C*, *in press*, 査読有, doi:10.1016/j.physc.2015.02.040

Y. Imai, Y. Sawada, F. Nabeshima, A. Maeda, “Suppression of phase separation and giant enhancement of superconducting transition temperature in $FeSe_{1-x}Te_x$ thin films”: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 112 (2015) 1937-1940, 査読有, doi: 10.1073/pnas.1418994112

T. Okada, F. Nabeshima, H. Takahashi, Y. Imai, A. Maeda, “Exceptional suppression of flux-flow resistivity in $FeSe_{0.4}Te_{0.6}$ by back-flow from excess Fe atoms and Se/Te substitutions”: *Phys. Rev. B* 91 (2015) 054510/1-6, 0, 査読有, http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.91.054510

I. Tsukada, F. Nabeshima, A. Ichinose, S. Komiya, M. Hanawa, Y. Imai, A. Maeda, “Crossover from hole- to electron-dominant regions in iron-chalcogenide superconductors induced by Te/Se substitution”: *Jpn. J. Appl. Phys.* 54 (2015) 043102/1-5, 査読有, doi:10.7567/JJAP.54.043102

加藤 雄介, “超伝導量子渦のダイナミクス”: *固体物理*, その1: vol. 48 (2013) 21-26, その2: vol. 49 (2014) 13-23, その3: vol. 49 (2014) 395-403, その4: vol. 50 (2015) 101-109, 査読有.

A. Maeda, F. Nabeshima, H. Takahashi, T. Okada, Y. Imai, I. Tsukada, M. Hanawa, S. Komiya, A. Ichinose, “Synthesis, characterization, Hall effect and THz conductivity of epitaxial thin films of Fe chalcogenide superconductors”: *Appl. Sur. Sci.* 312 (2014) 43-49, 査読有, doi:10.1016/j.apsusc.2014.02.124

A. Ichinose, I. Tsukada, F. Nabeshima, Y. Imai, A. Maeda, F. Kurth, B. Holzapfel, K. Iida, S. Ueda, M. Naito, “Induced lattice strain in epitaxial Fe-based superconducting films on CaF_2 substrates: A comparative study of the microstructures of $SmFeAs(O,F)$, $Ba(Fe,Co)_2As_2$, and $FeTe_{0.5}Se_{0.5}$ ”: *Appl. Phys. Lett.* 104 (2014)

122603/1-5, 査読有,
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4869961>
D. Daghero, P. Pecchio, G. Umbarino, F. Nabeshima, Y. Imai, A. Maeda, I. Tsukada, S. Komiyama, R. Gonnelli, “Point-contact Andreev-reflection spectroscopy in Fe(Te,Se) films: multiband superconductivity and electron-boson coupling”: *Supercond. Sci. Technol.* 27 (2014) 124014/1-8, 査読有, doi:10.1088/0953-2048/27/12/124014
E. Arahata, Y. Kato, “DC conductivity in an s-wave superconducting single vortex system”: *J. Low Temp. Phys.*, 175 (2014) 346-352, 査読有, doi:10.1007/s10909-013-0992-5
N. Kurosawa, N. Hayashi, E. Arahata, Y. Kato, “Impurity effects in a vortex core in a chiral p-wave superconductor within the t-matrix approximation”: *J. Low Temp. Phys.*, 175 (2014) 365-371, 査読有, doi:10.1007/s10909-013-0951-1
C. K. Chung, Y. Kato, “Zero-field vortex-induced Hall effect and polar Kerr effect in chiral p-wave superconductors near Kosterlitz-Thouless transition”: *J. Low Temp. Phys.*, 175 (2014) 359-364, 査読有, doi:10.1007/s10909-013-0906-6
F. Nabeshima, Y. Imai, M. Hanawa, I. Tsukada, A. Maeda, “Enhancement of the superconducting transition temperature in FeSe epitaxial thin films by anisotropic compression”: *Appl. Phys. Lett.* 103 (2013) 172602/1-4, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4826945>
S. Watabe, Y. Kato, “Stability Criterion for Superfluidity in the light of Density Spectral Function”: *Phys. Rev. A*, 88 (2013) 063612/1-18, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4826945>
H. Takahashi, T. Okada, Y. Imai, K. Kitagawa, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, A. Maeda, “Investigation of the superconducting gap structure in $\text{SrFe}_2(\text{As}_{0.7}\text{P}_{0.3})_2$ by magnetic penetration depth and flux flow resistivity analysis”: *Phys. Rev. B*, 86 (2012) 144525/1-5, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.144525>
R. Kondo, T. Yoshinaka, Y. Imai, A. Maeda, “Reproducible Synthetic Method for the Topological Superconductor $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ”: *J. Phys. Soc. Jpn.* 82 (2013) 063702/1-4, 査読有, <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.063702>
D. Nakamura, Y. Imai, A. Maeda, I. Tsukada, “Superconducting Fluctuation Investigated by THz Conductivity of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ Thin Films”: *J. Phys. Soc. Jpn.*, 81 (2012) 044709/1-12, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.044709>
T. Okada, H. Takahashi, Y. Imai, K. Kitagawa, K. Matsubayashi, Y. Uwatoko, A. Maeda, “Microwave surface-impedance measurements of the electronic state and dissipation of magnetic vortices in superconducting LiFeAs single crystals”: *Phys. Rev. B*, 86 (2012) 064516/1-5,

査読有,
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.064516>
Y. Imai, F. Nabeshima, T. Yoshinaka, K. Miyatani, R. Kondo, S. Komiyama, I. Tsukada, A. Maeda, “Superconductivity at 5.4 K in $\beta\text{-Bi}_2\text{Pd}$ ”: *J. Phys. Soc. Jpn.*, 81 (2012) 113708/1-4, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.113708>
Y. Imai, H. Takahashi, K. Kitagawa, K. Matsubayashi, N. Nakai, Y. Nagai, Y. Uwatoko, M. Machida, A. Maeda, “Microwave Surface Impedance Measurements of LiFeAs Single Crystals”: *J. Phys. Soc. Jpn.*, 80 (2011) 013704/1-4, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.80.013704>
H. Takahashi, Y. Imai, S. Komiyama, I. Tsukada, A. Maeda, “Anomalous temperature dependence of the superfluid density caused by a dirty-to-clean crossover in superconducting $\text{FeSe}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ single crystals”: *Physical Review B*, 84 (2011) 132503/1-5, 査読有, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.84.132503>

〔学会発表〕(計 130 件)

高橋英幸, 今井良宗, 前田京剛, “走査型マイクロ波顕微鏡による $\text{K}_x\text{Fe}_y\text{Se}_2$ におけるメソスコピック相分離のマイクロ波イメージング”: 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学早稲田キャンパス, 東京都新宿区.

高橋英幸, 今井良宗, 前田京剛, “走査型トンネル/マイクロ波顕微鏡の開発と低温応用”: 2015 年春季 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 12 日, 東海大学 湘南キャンパス, 神奈川県平塚市.

A. Maeda, et al, “Direct observation of mesoscopic phase separation in $\text{K}_x\text{Fe}_y\text{Se}_2$ by scanning microwave microscopy”: American Physical Society March Meeting 2015, March 2, 2015, Henry B. González Convention Center, San Antonio, Texas, USA.

H. Takahashi, Y. Imai, A. Maeda, “Sensitivity Improvement and Cryogenic Application of Scanning Microwave Microscope”: American Physical Society March Meeting 2015, March 3, 2015, Henry B. González Convention Center, San Antonio, Texas, USA.

H. Takahashi, Y. Imai, A. Maeda, “Observation of Mesoscopic Phase Separation in $\text{K}_x\text{Fe}_y\text{Se}_2$ by Scanning Microwave Microscopy”: 27th International Symposium on Superconductivity (ISS 2014), November 25-27, 2014, Funabori Tower Hall, Edogawa, Tokyo.

Y. Kato, C. Chun-kit, “Revision on Force on single vortex in superconductors” (招待講演): YKIS2014, November 21, 2014, 京都大学基礎物理学研究所, 京都府京都市.

高橋英幸, 今井良宗, 前田京剛, “低温走査型マイクロ波顕微鏡の開発”: 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 8 日, 中部大学

(春日井キャンパス), 愛知県春日井市.

Y. Masaki, Y. Kato, "Impurity effects on vortex core states of topological s-wave superconductor": LT27, August 6-13, 2014, the Palais Rouge, Buenos Aires, Argentina.

前田京剛, 他4名, "鉄カルコゲナイド超伝導体のフラックスフロー" (招待講演): 第22回渦糸物理国内会議, 2014年7月11日, ハ일랜드ふらの, 北海道富良野市.

高橋英幸, 今井良宗, 前田京剛, "マイクロ波顕微鏡による超伝導体研究(現状報告)": 高温超伝導フォーラム第2回会合, 2014年3月26日, 上智大学四ツ谷キャンパス, 東京都千代田区.

正木祐輔, 加藤雄介, "トポロジカル超伝導渦内の束縛準位に対する不純物効果": 第21回渦糸物理国内会議, 2013年12月13日, 東北大学金属材料研究所, 宮城県仙台市.

荒畑恵美子, 加藤雄介, "超伝導量子渦糸系における直流伝導度の解析 II": 日本物理学会 2013年秋季大会 2013年9月27日, 徳島大学, 徳島県徳山市.

今井良宗, 前田京剛, 他6名 "Pd-Bi-Se 単結晶の超伝導特性": 2012年秋季 第73回 応用物理学会学術講演会, 2012年9月12日, 松山大学文京キャンパス, 愛媛県松山市.

加藤雄介, "超伝導体・フェルミ系超流動体における量子渦": 日本物理学会年会シンポジウム 2012年3月27日, 関西学院大学, 兵庫県西宮市.

吉中泰輝, 前田京剛, 他2名 "補償したトポロジカル絶縁体の輸送特性": 日本物理学会 2011年秋季大会, 2011年9月24日, 富山大学五福キャンパス, 富山県富山市.

〔図書〕(計2件)

前田京剛, "電気工学ハンドブック": 第2編(全39ページ)編主任(2013年, 電気学会, オーム社)

前田京剛, "電気工学ハンドブック": 第2編6章「電磁誘導」 pp.66-69. (2013年, 電気学会, オーム社)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://maeda3.c.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 京剛 (MAEDA, Atsutaka)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号: 70183605

(2) 研究分担者

加藤 雄介 (KATO, Yusuke)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号: 20261547

(3) 連携研究者

今井 良宗 (IMAI, Yoshinori)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号: 30435599

花栗 哲郎 (HANAGURI, Tetsuo)

独立行政法人理化学研究所・創発物性科

研究センター・チームリーダー

研究者番号: 40251326

近藤 隆祐 (KONDO, Ryusuke)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 60302824

深津 晋 (FUKATSU, Susumu)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号: 60199164

安武 裕輔 (YASUTAKE, Yusuke)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号: 10526726

(4) 研究協力者

高橋 英幸 (TAKAHASHI, Hideyuki)

東京大学・大学院総合文化研究科・博士課程3年(H27年3月まで・現在神戸大学分子フォトサイエンス研究センター・助教)