

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 若手研究(B)
 研究期間： 2008 ～ 2009
 課題番号： 20740205
 研究課題名(和文) マイクロ機能イメージングによる強相関電子系のフェルミオロジー
 研究課題名(英文) Micrometer function imaging technique for Fermiology of strongly correlated electron systems

研究代表者

伊藤 孝寛 (Takahiro Ito)
 名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：50370127

研究成果の概要(和文)：強相関電子系化合物における特異な機能性(磁性、超伝導など)の起源となる相互作用を実空間ドメイン構造単位で明らかにするために、「マイクロ機能イメージング」という新たな分光研究手法の開発を行った。その結果、世界最高水準の「フェルミオロジー」研究が可能なシンクロトロン光ビームライン用角度分解光電子分光装置の立ち上げに成功した。また、開発した手法を用いて擬一次元有機導体(TMTSF)₂PF₆における測定を行い、これまで観測が困難であった準粒子バンドのエネルギー分散を観測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new spectroscopic research technique “micrometer function imaging” for “Fermiology” of strongly correlated electron systems, at the micro-focus vacuum-ultraviolet synchrotron angle-resolved photoemission spectroscopy beamline BL7U(@UVSOR-II). When we applied the technique to the quasi-one-dimensional organic conductor (TMTSF)₂PF₆, where the radiation damage and the surface domains disturb the intrinsic “Fermiology” research, we have successfully observed the Luttinger surface formed by the quasi-particle dispersion, which is suggestive of the strong electron-phonon interactions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：強相関電子系、フェルミオロジー、光物性、シンクロトロン光、イメージング

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導体、磁性半導体、分子性導体に代表される強相関電子系において発現

する特徴的な機能(伝導性・磁性およびその共存・競合)は、電子、スピン、格子間の強い相互作用により形成され、フェルミ

準位近傍に現れる特異な電子状態（準粒子バンド構造）にその起源をもつ。そのため、フェルミ準位近傍における準粒子バンド構造から、特異な機能の起源となる相互作用を研究する「フェルミオロジー」は、基礎物性の理解のみならず、新規機能性物質設計の立場からも注目されていた。

フェルミオロジーによる機能研究における最も直接的なアプローチとして、角度分解光電子分光法 (ARPES) がよく知られている。角度分解光電子分光は、物質における電子状態（フェルミ面・準粒子バンド構造）を実験決定できることから、高温超伝導体の超伝導ギャップ対称性の起源となる準粒子の観測などで多大な貢献を果たしてきた。

しかしながら、特異な機能が発現する強相関電子系試料の多くは、(1) サイズが微小、(2) 試料上における外因的な不均一性の影響が強い、また特に分子性導体において、(3) 表面における光照射損傷の影響が強い、等の困難により、ARPES 測定を用いたフェルミオロジーは限られた系においてのみ行われている状況であった。そのため、機能性と相互作用の関係を明らかにするためには、新たな測定手法の開拓が必要不可欠な状態にあった。

研究代表者は申請当時、自然科学研究機構分子科学研究所における放射光施設（極端紫外光放射光 (UVSOR) 施設）において、極端紫外領域のシンクロトロン光を用いた三次元角度分解光電子分光ビームラインの建設を行っており、当該ビームラインにおいて、マイクロスポットのシンクロトロン光を生かした測定系の立ち上げに取り組んでいた。

2. 研究の目的

以上の背景から本研究は、(サブ)マイクロメートルスケールで準粒子構造を空間イメージングする「マイクロ機能イメージング」新たなフェルミオロジー手法を、シンクロトロン光の微小スポットおよびバルク感性性を利用した実空間ドメイン構造単位での角度分解光電子分光測定により実現し、強相関電子系における機能(伝導・磁性)と相互作用の関わりを(サブ)マイクロメートルスケールの空間的ドメイン構造内で明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

角度分解光電子分光測定をマイクロメートルの精度で行うという本研究の目的を実現するために行った研究方法を以下に示す。

平成20年度は、既存の高分解能角度分解光電子分光装置の改良および UVSOR 施設のビームライン BL7U におけるシンクロトロン光の最適化調整を行った。

平成21年度は、前年度にパルスモータ制御系の導入を行い、数 μm 精度の試料位置操作を実現した高分解能角度分解光電子分光装置において強相関電子系物質のマイクロ機能イメージング測定をスタートした。

4. 研究成果

[主な成果]

①. マイクロ機能イメージング測定系の開発[業績論文①]

試料上の空間的ドメイン構造を数 μm 精度で観測するために、試料マニピレータの x, y, θ 軸にパルスモータ制御系を導入した。また、シンクロトロン光の面積辺りのフラックスの高効率化を目指してビームラインの最適化調整をおこなない、 10^{12} 光子/秒で試料上フォーカスおよそ $100\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ を達成した。以上の測定系開発により、マルチチャンネルの光電子検出器を用いた場合、数 μm 精度でのイメージング測定が可能となった。

②. 不均一系強相関電子系における光電子分光測定[業績論文⑦]

開発した装置のテストを行うために、強相関電子系試料 C_{60} ポリマーの光電子分光測定を行った。その結果、 C_{60} に電子線を照射して得られる C_{60} ポリマーは、空間的に不均一であるものの、その伝導電子は1次元系特有の朝永-ラッティンジャー液体的な準粒子状態を形成していることが明らかになった。

③. 分子性導体系($\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ における、ラッティンジャー面の直接観測に成功

擬一次元分子性導体における磁気的な相互作用と超伝導の関わりを明らかにするために、スピン密度波転移を示す($\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$ において、低励起エネルギー3次元角度分解光電子分光測定を行った。その結果、これまで光照射によるラディエーションダメージから観測が不可能だった、 TMTSF 分子に起因するバンド分散の直接観測および擬一次元的なラッティンジャー面の直接決定に成功した。この結果は、バルク敏感な低励起エネルギーシンクロトロン光と μm スケールで試料位置の走査を同一環境で利用するこ

とで初めて実現したものである。

④. 希土類系強磁性半導体としては最も高い強磁性転移温度 ($T_c \sim 200$ K) をもつ薄膜の作成に成功 [業績論文②—④]

均一系における内的ドメイン構造と磁氣的相互作用による準粒子構造の関係を明らかにする上で重要となる、Laドーパ型EuO強磁性薄膜の作成を行い、希土類系強磁性半導体としては最も高温の強磁性転移温度 ($T_c \sim 200$ K) をもつ薄膜を作成することに成功した。今後、この系におけるマイクロ機能イメージング測定を早期に実施する予定である。

[得られた成果の国内外における位置づけとインパクト]

建設した「マイクロ機能イメージング」ビームラインは、すでに国内外の研究者により、世界最高水準の性能で強相関電子系の「フェルミオロジー」研究を行うビームラインとして利用されている。国内外のシンクロトロン光施設と比較しても、高分解能バルク敏感測定が低励起エネルギー領域で、マイクロフォーカスシンクロトロン光が利用可能なビームラインは類がなく、非常にインパクトがある。

[今後の展望]

今後、「マイクロ機能イメージング」手法をさらに一般的な分析ツールとしていくためには、ハイスループット化が必要不可欠である。具体的には、①実空間顕微鏡による試料表面イメージと準粒子バンド構造の実空間ドメイン内の変化の直接対応可能なシステムの構築、②分光系から光電子分析までを同期した、自動イメージングプロット可能なシステムの開発などによるハイスループット化を目指す。

また、更に微小なナノメートルスケールドメイン構造に分離した準粒子バンド構造のイメージング測定を行うための集光光学系の実現を目指す。

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 10 件)

- ①. S. Kimura, T. Ito 他(12名中2番目)、SAMRAI: A novel variably polarized angle-resolved photoemission beamline in the VUV region at UVSOR-II、Review of Scientific Instruments (2010)

in press、査読有。

- ②. H. Miyazaki, T. Ito 他(8名中2番目)、La-doped EuO: A Rare Earth Ferromagnetic Semiconductor with the Highest Curie Temperature、Applied Physics Letters (2010) *in press*、査読有。
- ③. H. Miyazaki, T. Ito 他(9名中2番目)、Change of lattice constant due to hybridization effect of a ferromagnetic semiconductor EuO、Journal of Physics: Conference Series **200** (2010) 012124、査読有。
- ④. H. Miyazaki, T. Ito 他(7名中2番目)、Direct Observation of Momentum-Dependent Exchange Interaction in a Heisenberg Ferromagnet、Physical Review Letters **102** (2009) 227203、査読有。
- ⑤. H.J. Im, T. Ito 他(6名中2番目)、Crystalline electric field effects in Ce 3d core-level spectra of heavy-fermion systems: Hard X-ray photoemission spectroscopy on $CeNi_{1-x}Co_xGe_2$ 、Physical Review B **79** (2009) 193105、査読有。
- ⑥. H. Miyazaki, T. Ito 他(8名中2番目)、Single Crystalline Growth and Magnetic, Optical and Photoelectrical Properties of EuO Thin Films、Japanese Journal of Applied Physics **48** (2009) 05504、査読有。
- ⑦. J. Onoe, T. Ito, S. Kimura、Time dependence of the electronic structure of an electron-beam-irradiated C_{60} film、Journal of Applied Physics **104** (2008) 103706、査読有。
- ⑧. S. Kimura, T. Ito 他(6名中2番目)、Electronic inhomogeneity in EuO: Possibility of magnetic polaron states、Physical Review B **78** (2008) 052409、査読有。
- ⑨. H. Miyazaki, T. Ito 他(8名中2番目)、Angle-resolved photoemission study on EuO thin films、Physica B **403** (2008) 917、査読有。
- ⑩. H.J. Im, T. Ito 他(9名中2番目)、Direct observation of dispersive Kondo resonance peaks in a heavy-fermion system、Physical Review Letters **100** (2008) 176402、査読有。

[学会発表] (計 11 件)

- ①. 伊藤孝寛、中部シンクロトロン光利用施設(仮称)における真空紫外分光ビームラインの概要、第23回日本放射光学会年会放射光科学合同シンポジウム (イーグレひめじ、2010年1月8日)。

- ②. **[招待講演]** 伊藤孝寛、光電子分光による重い電子系の量子臨界点近傍における電子状態の系統的研究、新学術領域研究「重い電子の形成と秩序化」ワークショップ—先端光電子分光による重い電子系研究—(岡山大学、2009年12月25日)。
- ③. T. Ito、Three-dimensional angle-resolved photoemission study on SmS、11-th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICES-11) (Nara, October 8, 2009).
- ④. T. Ito、Improvement of the SGM-TRAIN monochromator at UVSOR-II BL5U for low excitation-energy photoemission、UVSOR Workshop on Low-Energy Photoemission of Solids using Synchrotron Radiation (LEPES 09) (Okazaki, October 4, 2009).
- ⑤. T. Ito、Present status of VUV angle-resolved photoemission beamline BL7U at UVSOR-II、The 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2009)(Melbourne, September 29, 2009).
- ⑥. T. Ito、Three-Dimensional Imperfect Nesting by Two-Dimensional Charge Density Wave Formation in CeTe₂、International conference on magnetism (ICM2009) (Kurlruhe, July 27, 2009).
- ⑦. **[シンポジウム講演]** 伊藤孝寛、光電子分光でみた低次元物性、第22回日本放射光学会年会(東京大学、2009年1月12日)。
- ⑧. **[Invited]** T. Ito、Evidence of Three-Dimensional Charge-Density-Wave Formation on CeTe₂: VUV Three-Dimensional Angle-Resolved Photoemission Study、Joint Workshop on Heavy Fermion System 2008 (Suwon, October 3, 2008).
- ⑨. 伊藤孝寛、光電子分光による電子線照射 C₆₀ ポリマーにおける一次元電子状態の観測、日本物理学会秋季大会(岩手、2008年9月22日)。
- ⑩. T. Ito、VUV Three-Dimensional Angle-Resolved Photoemission Study on CeTe₂、Low Energy Electrodynamics in Solids (LEES08) (Vancouver, June 30-July 4, 2008).
- ⑪. 伊藤孝寛、放射光を用いた光物性実験による強相関電子系の電子状態、エクストリームフォトリニクスセミナー(理化学研究所、和光、2008年7月11日)。
- [その他(新聞掲載)]
- ① 日経産業新聞「次世代MRAMの材料/磁力強まる構造解明」(2009年6月2日)
- ② 日刊工業新聞「磁石の特性もつ半導体/分子科研が仕組み解明」(2009年6月1日)
- ③ 日経産業新聞「高温超伝導電子を観測」(2008年4月18日)
- [その他(学会活動)]
- ① 第23回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム組織委員、プログラム委員(2010年1月6日～9日 於イーグレひめじ)
- ② 第22回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウムプログラム委員(2009年1月9日～12日 於東京大学本郷キャンパス)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
伊藤 孝寛 (Takahiro Ito)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50370127