

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月27日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540357

研究課題名（和文） 走査トンネル顕微鏡による銅酸化物高温超伝導体の磁場誘起電荷秩序に関する研究

研究課題名（英文） STM studies on magnetic field induced electronic charge order

研究代表者

小田 研 (ODA MIGAKU)

北海道大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：70204211

研究成果の概要（和文）：本研究では、銅酸化物高温超伝導体に特徴的な擬ギャップを伴った電子系電荷秩序の起源と高温超伝導との関係を明らかにするために、その代表物質の一つであるBi2212で磁場中STM/STS実験とポンプ・プローブ分光実験を行った。STM/STS実験では、Bi2212の電荷秩序が、電荷とスピンのストライプに由来すること、また、バルクの性質としては揺らいだ状態にあることを示唆する結果が得られた。ポンプ・プローブ分光実験では、擬ギャップ・電荷秩序は、超伝導と単なる競合関係にあるのではなく、超伝導の発現に必要な電子系の性質であることが明らかとなった。これらの結果を考え合わせると、ストライプ秩序の揺らぎが高温超伝導の機構に深く関わっている可能性がある」と結論できる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we performed STM/STS experiments under magnetic fields and pump-probe optical experiments in one of the typical high-Tc cuprates Bi2212 to clarify the origin of the electronic charge order accompanied by a pseudogap and its relation to the high-Tc superconductivity. STM/STS experiments suggested that the electronic charge order will be understood in terms of the charge-spin stripes model, and dynamically fluctuating in nature. In pump-probe optical experiments, furthermore, it was found that the electronic charge order and pseudogap do not only compete with but also is needed for the high-Tc superconductivity. Employing these results, we pointed out that the fluctuating stripes would be responsible for the formation of high-Tc superconductivity.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：高温超伝導、銅酸化物、STM、STS、電荷秩序、擬ギャップ

1. 研究開始当初の背景

銅酸化物高温超伝導体の大きな特徴の一つは、擬ギャップと呼ばれるギャップ様構造が超伝導転移温度 T_c より高温の T^* 付近から低温で電子系のエネルギー・スペクトルに形成されることである。擬ギャップは、その発

見当初（1990年代初め）から、「超伝導ギャップの前駆的な現象か、あるいは、超伝導とは競合する新たな秩序（隠れた秩序）によるか」を巡って活発に議論されてきた。これまでの角度分解光電子分光（ARPES）実験から、擬ギャップは k -空間のゾーン境界に位

置する $(\pi, 0)$ 近くのフェルミ面に T^* 付近から形成され、擬ギャップ状態 ($T_c < T < T^*$) でのフェルミ面は $(\pi/2, \pi/2)$ 付近を中心とするアーク状 (フェルミ・アーク) になることが知られている。私達のグループは、2000年に公表した Bi2212 の STM/STS 実験に関する論文で、擬ギャップが $(\pi, 0)$ 付近のフェルミ面に開くものに対して、超伝導転移に実効的な d 波の超伝導ギャップ (有効超伝導ギャップ) は主にフェルミ・アーク上に T_c より低温で形成されることを指摘した。また、銅酸化物高温超伝導体の特徴であるチェッカーボード様の電荷秩序は、ナノメータスケールで空間的に不均一な擬ギャップを伴うことを示してきた。このような2種類の電子系秩序 (超伝導と電荷秩序) に対応するギャップが一つのフェルミ面を分けて形成されること (フェルミ面の二分性) は最近の ARPES の結果とコンシステントであり、これらの結果に基づく、銅酸化物の電荷秩序・擬ギャップは超伝導と競合関係にあると言える。一方、電荷秩序・擬ギャップは高温超伝導と実空間で共存しており、このような事実からは、電荷秩序・擬ギャップは、超伝導と単に競合するだけでなく、その発現に必要な電子系の性質であると考えられている。

2. 研究の目的

以上の銅酸化物高温超伝導体に関する研究背景を踏まえ、本研究では、電荷秩序・擬ギャップの起源と高温超伝導との関係を明らかにし、高温超伝導の発現機構に関する知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

銅酸化物におけるチェッカーボード様電荷秩序は、磁束芯の周囲にも誘起されることが知られている。本研究では、電荷秩序の起源に関する知見を得るために、代表的な銅酸化物高温超伝導体の一つである Bi2212 で STM/STS 実験を行い、磁場誘起電荷秩序を含めて電荷秩序の性質を詳しく調べた。また、高強度の超短パルス光により超伝導と擬ギャップを共に抑制することができるが、両者の関係を解明するために、超伝導と擬ギャップ状態が回復する過程における準粒子のダイナミクスをポンプ・プローブ分光法により詳しく調べた。

4. 研究成果

Bi2212 の STM/STS 実験では、不均一な擬ギャップを示す試料表面 (タイプA) おいて電荷秩序が観測され、一方、均一な擬ギャップを示す試料表面 (タイプB) においては (静的な) 電荷秩序は観測されない。しかし、タイプBの場合でも、その超伝導状態で磁場印加により磁束を浸入させると、磁束芯とその

周囲に電荷秩序が誘起された。したがって、Bi2212 の電荷秩序は本来揺らいだ状態にあり、その揺らいだ電荷秩序が磁束芯でピン止めされて静的なものになると考えられる。また、本研究では、電荷秩序の周期のホール濃度依存性も詳しく調べたが、この周期は低ホール濃度領域で格子の周期の約4倍、高ホール濃度領域で約5倍となり、格子の周期と整合性を保つことが明らかになった。この結果は、Bi2212 の電荷秩序の起源として提案されているモデルの中で、電荷とスピンのストライプモデルが妥当であることを示唆するものである。

Bi2212 の光誘起超伝導-非超伝導転移における準粒子ダイナミクスに関するポンプ・プローブ分光実験では、以下のような興味深い結果が得られた。

(1) 強度の強い超短ポンプ光パルスを超伝導状態にある試料の局所領域 (直径数マイクロン) に照射することで、超伝導が局所的に完全破壊され、さらに、擬ギャップ・電荷秩序も大きく抑制された励起状態を作ることができた。

(2) 上記の励起状態から緩和過程をプローブ光パルスに対する反射率応答により調べた結果、超伝導の形成はポンプ光により抑制されていた擬ギャップがほぼ完全に回復することと連動して始まることが明らかになった。したがって、擬ギャップ・電荷秩序は、超伝導と単なる競合関係にあるのではなく、超伝導の発現に深く関わっていると考えられる。

以上の Bi2212 における STM/STS 実験とポンプ・プローブ分光実験の結果を総合すると、ストライプ秩序の揺らぎが高温超伝導の機構に深く関わっている可能性がある結論できる。

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18件)

①A. T. Rømer, J. Chang, N. B. Christensen, K. Lefmann, L. Mahler, J. Gavilano, R. Gilardi, Ch. Niedermayer, H. M. Rønnow, A. Schneidewind, P. Link, M. Oda, M. Ido, N. Momono, and J. Mesot, Glassy low-energy spin fluctuations and anisotropy gap in $\text{La}_{1.88}\text{Sr}_{0.12}\text{CuO}_4$, Phys. Rev. B 査読有, **87**, in press (2013).

②M. Oda, K. Takeyama, T. Kurosawa, Y. Toda, Y. H. Liu and M. Ido, Role of the Fermi surface dichotomy in high-Tc cuprates, Topologica, 査読有, Vol. 3, in press, 2013.

③Y. Toda, T. Mertelj, P. Kusar, T. Kurosawa, M.

Oda, M. Ido, D. Mihailovic, Impact of pseudogap on photoinduced superconducting phase transition in underdoped Bi2212, *Physica C: Superconductivity and its applications*, 査読有, in press (2013).

④J. Chang, J. S. White, M. Laver, C. J. Bowell, S. P. Brown, A. T. Holmes, L. Maechler, S. Streassle, R. Gilardi, S. Gerber, T. Kurosawa, N. Momono, M. Oda, M. Ido, O. J. Lipscombe, S. M. Hayden, C. D. Dewhurst, R. Vavrin, J. Gavilano, J. Kohlbrecher, E. M. Forgan, and J. Mesot, Spin density wave induced disordering of the vortex lattice in superconducting $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, *Phys. Rev. B*, 査読有, **85** (2012) 1345201-8.

⑤J. Ishioka, T. Fujii, K. Katono, K. Ichimura, T. Kurosawa, M. Oda, and S. Tanda, Reply to “Comment on ‘Charge-parity symmetry observed through Friedel oscillations in chiral charge-density waves’”, *Phys. Rev. B*, 査読有, **86** (2012) 247102-3.

⑥Y. Kawashima, K. Ichimura, J. Ishioka, T. Kurosawa, M. Oda, K. Yamaya, and S. Tanda, Charge stripe structure in FeTe, *Physica B*, 査読有, **407** (2012) 1796-7.

⑦T. Kurosawa, N. Momono, M. Oda, and M. Ido, Ni-impurity effects on the superconducting gap of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ studied from the magnetic field and temperature dependence of the electronic specific heat, *Phys. Rev. B* **85** (2012) 1345221-6.

⑧J. Ishioka, T. Fujii, K. Katono, K. Ichimura, T. Kurosawa, M. Oda, and S. Tanda, Charge-parity symmetry observed through Friedel oscillations in chiral charge-density waves, *PHYSICAL REVIEW B*, 査読有, **84** (2011) 245125-33.

⑨Y. Toda, T. Mertelj, P. Kusar, T. Kurosawa, M. Oda, M. Ido, and D. Mihailovic, Quasiparticle relaxation dynamics in underdoped B2212 by two-color pump-probe spectroscopy, *PHYSICAL REVIEW B*, 査読有, **84** (2011) 174516-21.

⑩T. Kurosawa, N. Momono, H. Amitsuka, M. Oda, and M. Ido, Ni-impurity effects on the superconducting gap of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$: Measurements of the electronic specific heat under magnetic fields, *Physica C*, 査読有, **470** (2010) 42-43.

⑪Y. Kawashima, K. Ichimura, T. Kurosawa, M. Oda, S. Tanda, H. Takahashi, H. Okada, Y. Kamihara, and H. Hosono, Electron tunneling using STM/STS on iron-based oxypnictides,

PHYSICA C, 査読有, **470** (2010) 315-316.

⑫K. Kawatani, K. M. Takesada, M. Fukunaga, M. Oda, M. Ido, and A. Onodera, Dielectric Properties in $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ Single Crystal at High Temperatures, *FERROELECTRICS*, 査読有, **402** (2010) 200-202.

⑬E. Razzoli, Y. Sassa, G. Drachuck, M. Månsson, A. Keren, M. Shay, M. H. Berntsen, O. Tjernberg, M. Radovic, J. Chang, S. Pailhes, N. Momono, M. Oda, M. Ido, O. J. Lipscombe, S. M. Hayden, L. Patthey, J. Mesot, and M. Shi, The Fermi surface and band folding in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ probed by angle-resolved photoemission, *NEW JOURNAL OF PHYSICS*, 査読有, **12** (2010) 125003-8.

⑭J. Ishioka, Y. H. Liu, K. Shimatake, T. Kurosawa, K. Ichimura, Y. Toda, M. Oda, S. Tanda, Measurement of chirality of charge-density-waves in TiSe_2 by using STM, *PHYSICA B*, 査読有, **405** (2010) 214-5.

⑮J. Ishioka, Y. H. Liu, K. Shimatake, T. Kurosawa, K. Ichimura, Y. Toda, M. Oda, S. Tanda, Chiral Charge-Density Waves, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, **102** (2010) 177006-9.

⑯N. Momono, T. Kurosawa, Y. Amakai, Y. Sato, T. Suzuki, H. Takano, S. Murayama, A. Sakai, M. Oda, M. Ido, Impurity Effects on Energy Gap in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ Investigated by Electronic Raman Scattering, *JURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM*, 査読有, **23** (2010) 785-7.

⑰Y. Toda, J. Sekiya, Y. H. Liu, N. Momono, M. Oda, and M. Ido, Nonequilibrium Carrier Dynamics Studied in Underdoped Bi2212 by Polarized Optical Pump-Probe Spectroscopy, *JOURNAL OF SUPERCONDUCTIVITY AND NOVEL MAGNETISM*, 査読有, **23** (2010) 871-3.

⑱T. Kurosawa, T. Yoneyama, Y. Takano, M. Hagiwara, R. Inoue, N. Hagiwara, K. Kurusu, K. Takeyama, N. Momono, M. Oda, and M. Ido, Large pseudogap and nodal superconducting gap in $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{La}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ and $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$: Scanning tunneling microscopy and spectroscopy, *PHYSICAL REVIEW B*, 査読有, **81** (2010) 094519-25.

[学会発表] (計 2 1 件)

①北村友、阿部哲、田島健士、桃野直樹、雨海有佑、高野英明、村山茂幸、黒澤徹、小田

研、伊土政幸、STM/STS から見た銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_{1.6}\text{La}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ のエネルギーギャップと超伝導、第 48 回応用物理学会北海道支部学術講演会 生涯学習センター 釧路市 2013 年 1 月 18 日～19 日

② Y. Toda, F. Kawanokami, T. Kurosawa, M. Oda, M. Ido, T. Mertelj, P. Kusar, D. Mihailovic, Role of pseudogap in the photoinduced superconducting phase transition of underdoped Bi2212 , International conference on study of matter at extreme conditions (SMEC2013), on ship, Miami, USA, March 23~30, 2013.

③ M. Oda, T. Kurosawa, Y. Toda, N. Momono and M. Ido, STM/STS studies on the Fermi surface dichotomy in Bi2212 : role of pseudogap & electronic charge order in high- T_c cuprate superconductivity, International conference on study of matter at extreme conditions (SMEC2013), on ship, Miami, USA, March 23~30, 2013.

④ Y. Toda, T. Mertelj, P. Kusar, T. Kurosawa, M. Oda, M. Ido, D. Mihailovic, A study of pseudogap in UD- Bi2212 using ultrafast optical spectroscopy, International Workshop on Spintronic Nano-Materials, Convention Center Sapporo, Japan, November 20~23, 2012.

⑤ 山路潤, 八田暁, 宮崎弘, 黒澤徹, 桃野直樹, 小田研, 伊土政幸、STM/STS から見た Bi 系超伝導体の電荷秩序とストライプ、日本物理学会 2012 年 9 月 23 日～27 日 (横浜国立大学)

⑥ Y. Toda, T. Mertelj, P. Kusar, T. Kurosawa, M. Oda, M. Ido, D. Mihailovic, Impact of pseudogap on photoinduced superconducting phase transition in underdoped Bi2212 , 9th International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors and Related Materials (New3SC-9), GRAND HOTEL VILLA TUSCOLANA, Frascati- Rome, Italy, September 15~22, 2012.

⑦ N. Momono, N. Saikai, T. Kurosawa, Y. Amakai, S. Murayama, H. Takano, M. Oda, M. Ido, Nodal superconducting gap of $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{Ln}_x\text{CuO}_{6+\delta}$ ($\text{Ln}=\text{La}, \text{Eu}$) investigated by electronic specific heat measurements, Ninth International Conference on New Theories, Discoveries and Applications of Superconductors and Related Materials (New3SC-9), GRAND HOTEL VILLA TUSCOLANA, Frascati- Rome, Italy, September 15~22, 2012.

⑧ T. Kurosawa, N. Momono, M. Oda, and M. Ido, Study on Ni-impurity effects on the superconducting gap of $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ by electronic specific heat measurements, International Conference on Phase Separation and Superstripes in High Temperature Superconductors and Related Materials, Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture, Erice, Italy, July 20~27, 2012.

⑨ 小田 研, 黒澤 徹, 桃野直樹, 戸田泰則, 伊土政幸、STM/STS から見た銅酸化物高温超伝導体の擬ギャップ/電荷秩序と超伝導、科研費新学術研究領域「超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア」第 2 回領域会議, 北海道大学, 2012 年 8 月 27 日～9 月 1 日

⑩ N. Momono, N. Saikai, T. Kurosawa, Y. Amakai, S. Murayama, H. Takano, M. Oda, M. Ido, Nodal superconducting gap of Bi2201 investigated by low temperature specific heat measurements, The 19th International Conference on Magnetism (ICM2012) Hotel Busan, Korea, July 24~29, 2012.

⑪ 戸田泰則, T. Mertelj, P. Kusar, 黒澤徹, 小田研, 伊土政幸, D. Mihailovic, UD- Bi2212 の光誘起超伝導相転移における準粒子ダイナミクス、日本物理学会 第 67 回年次大会 2012 年 3 月 25 日～28 日 (関西学院大学)

⑫ 宮崎弘, 山路潤, 山上佳丈, 黒澤徹, 桃野直樹, 小田研, 伊土政幸、STM/STS から見た Bi 系超伝導体における電荷秩序と実効的超伝導ギャップ、日本物理学会 2011 年 9 月 21 日～24 日 (富山大学)

⑬ 八田暁, 竹内卓総, 山路潤, 黒澤徹, 桃野直樹, 小田研, 伊土政幸、STM/STS から見た Bi-La-2201 の電荷秩序とギャップ構造のホール濃度依存性、日本物理学会 2011 年 9 月 21 日～24 日 (富山大学)

⑭ M. Oda, T. Kurosawa, Y. Kitajima, N. Momono, Y. Toda and M. Ido, Competition between inhomogeneous antinodal-pseudogap and homogeneous nodal-SC-gap in high- T_c cuprates: STM/STS studies on dichotomy of the Fermi surface, International Conference on Study of Matter at Extreme Conditions, on ship Miami, March 27 ~ April 2, 2011.

⑮ T. Kurosawa, Y. Kitajima, N. Momono, M. Oda, and M. Ido, STM/STS study for the electronic charge order, large-pseudogap, and SC gap in Bi-based high- T_c cuprates, International

Conference on Study of Matter at Extreme Conditions, on ship, Miami, March 27 ~ April 2, 2011.

⑩ M. Oda, T. Kurosawa, Y. Kitajima, N. Momono, Y. Toda and M. Ido, Role of the Fermi-surface dichotomy in high-Tc cuprate superconductivity, International Conference on stripes and superconductivity, Rome University, Italy, July 10 ~ 16, 2011.

⑪ 北島裕介、黒澤徹、横内嵩之、桃野直樹、小田研、伊土政幸、STM・STS から見たアンダードープ Bi2212 の超伝導ギャップ、擬ギャップと電荷秩序、日本物理学会 2010 年 9 月 23 日~26 日 (大阪府立大学)

⑫ 竹内卓総、八田暁、黒澤徹、桃野直樹、小田研、伊土政幸、STM/STS から見た Bi-La-2201 の 2 次元電荷秩序とフェルミ面でのギャップ構造、日本物理学会 2010 年 9 月 23 日~26 日 (大阪府立大学)

⑬ 山上佳丈、宮崎弘、黒澤徹、桃野直樹、小田研、伊土政幸、STM・STS から見た Bi2212 の Cu-O 面における電荷秩序と実効的超伝導ギャップ、日本物理学会 2010 年 9 月 23 日~26 日 (大阪府立大学)

⑭ M. Oda, T. Kurosawa, N. Momono and M. Ido STM/STS studies on the pseudogap, electronic charge order and superconductivity of high-Tc cuprate $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, International conference on high-Tc superconductivity (STPIPES 2010), July 7~15, 2010, Ettore Majorana Foundation and Centre for Scientific Culture, Erice, Italy.

⑮ T. Kurosawa, Y. H. Liu, N. Momono, M. Oda, and M. Ido, STM/STS study for the electronic charge order, antinodal large-pseudogap and nodal SC gap of underdoped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$, The 9th International Conference on Spectroscopies in Novel Superconductors, May 23-28, 2010, Shanghai University, China

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小田 研 (ODA MIGAKU)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号 : 7 0 2 0 4 2 1 1

(2) 研究分担者

戸田 泰則 (TODA YASUNORI)
北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号 : 0 0 3 1 3 1 0 6

伊土 政幸 (IDO MASAYUKI)
北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号 : 9 0 1 1 1 1 4 5

(3) 連携研究者

なし