

研究課題

遷移金属を含んだ超伝導体の電子状態と物性

研究代表者

東北大学・金属材料研究所・森 道康

研究分担者

京都大学・基礎物理学研究所・遠山 貴己

東北大学・金属材料研究所・藤田 全基

1. はじめに

高い臨界温度をもつ超伝導体の発見は、物性の新概念を生み出し、基礎科学の発展に重要な寄与をしてきた。銅酸化物超伝導体の発見はその良い例である。この物質は単に超伝導転移温度(T_c)が高いだけでなく、モット絶縁体を母物質とした強相関電子系であり、それまでのバンド絶縁体や単純な金属とは異なった電子状態と物性が知られている。例えば、電荷ストライプなどの電荷不均一性や、特定の格子振動の特異なソフトニングなどが挙げられる。これら未解決の問題は強相関電子系の電荷ダイナミクスと密接に関わっており、その解明が重要課題となっている。

一方、最近発見された鉄系超伝導体は、それまで磁性のシンボルであった鉄元素が超伝導の担い手になりうることを示した。銅酸化物同様に層状構造を持つが、多様な積層パターンと元素の組み合わせの多さから新物質としての広がり極めて大きい。Fe の d 軌道が砒素の p 軌道と強い混成をしつつ 50K 以上の高い臨界温度を持つメカニズムは現時点では不明である。この物質の超伝導発現機構が解明されれば、その先にはより高い臨界温度の実現を含め、多くの基礎科学の発展が待ち受けていると期待される。

銅酸化物および鉄系超伝導体の研究の進展はきわめて速く多岐に渡っており、プレプリントサーバーなどに投稿される論文の数も毎月平均約 150 報以上と膨大な数になっている。また、大型放射光施設 (SPring-8) や大強度陽子加速器施設 (J-PARC) など、世界トップレベルの実験施設が整えられ、電子状態を明らかにするための各種スペクトロスコープが急速に発展してきている。そして、これまでの実験データを質的にも量的にも遙かに上回る結果が次々と得られている。このような研究の進展の速さと数に追随し、それを越えていくため、各種スペクトロスコープを用いた実験研究者および理論研究者が一堂に会し、最新の成果について情報交換するワークショップを開催することとなった。

2. 研究経過

このワークショップでは、X線散乱、中性子散乱、角度分解光電子分光(ARPES)、光吸収・ラマン散乱など各種分光法や走査型トンネル顕微鏡 (STM)、核磁気共鳴 (NMR) などの専門家がお互いのデータの整合性を議論した。これまではそれぞれ個々に研究が進められてきており、異なるデータ間の整合性を議論する機会が少なかった。このワークショップを通じて、強相関電子系の異なる手法を持つ専門家がお互いのデータの整合性を議論し、未解決となっている電荷ダイナミクスの研究に対する方向性を探った。このような試みは、今後の強相関電子系の研究に新しい方向性を示すものと期待される。

ワークショップを開催するにあたり、金属材料研究所 ICC (International Collaboration Center) からの財政的支援を得て共同開催とし、海外から 4 名の講演者を招待した。また、研究内容で密接な関係を持っている科学研究費特別推進「4次元空間中性子探査装置の開発と酸化物高温超伝導体の研究」(代表者: 日本原子力研究機構 新井正敏) と共催し、海外からの講演者 1 名に対する財政的支援を受けた。

講演者の選定に当たっては、研究の最前線に立つ若手および中堅からの発表を中心に構成し、議論する時間も十分取れるように考慮した。

3. 研究成果

ワークショップは、金属材料研究所の講堂において 2009 年 6 月 24 日(水)~26 日(金)の日程で開催した。プログラムは口頭発表 38 件で構成し、うち 7 件が海外からの発表であった。講演内容で大まかに分類すると、鉄系超伝導体が 22 件、高温超伝導体が 16 件、また、実験 30 件、理論 8 件という構成であった。参加者は 70 名、うち 12 名が海外からの参加者で、活発な議論がなされた。

以下にプログラムの詳細を掲載する。

June 24 (Wed)

13:20-13:30 Opening

Chair: S. Maekawa (Tohoku)

13:30-13:55 H. Eisaki (AIST)
Transport properties of LnFeAsO_{1-y} superconductors

13:55-14:20 M. Sato (Nagoya)
Various kinds of studies on the superconducting symmetry of Fe-As systems

14:20-14:45 Y. Takano (NIMS)
Superconductivity in FeSe and FeTe

Break

Chair: H. Eisaki (AIST)

15:00-15:25 N. L. Wang (Institute of Physics, China)
Optical spectroscopy study on Fe- and Ni-based pnictide superconductors

15:25-15:50 A. Fujimori (Tokyo)
Angle-resolved photoemission spectroscopy of Fe pnictide superconductors

15:50-16:15 S. Shin (ISSP)
Laser-ARPES on $(\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x)\text{Fe}_2\text{As}_2$

Break

Chair: T. Tohyama (Kyoto)

16:30-16:55 T. Fukuda (JAEA/Spring-8)
Phonon properties on iron-based new superconductors

16:55-17:20 R. Arita (Tokyo)
Does Fermi surface nesting favor an s_{\pm} pairing in iron-based superconductors ?

17:20-17:45 J. A. Riera (Rosario, Argentina)
Correlated multi-orbital models for superconducting Fe-pnictides

18:00-20:00 Banquet

June 25 (Thu)

Chair: J. Mizuki (JAEA)

9:00-9:25 P. C. Dai (ORNL, USA)
Neutron scattering studies of iron arsenide superconductors

9:25-9:50 D. Reznik (Karlsruhe, Germany)
Effect of magnetism on phonons in 122 pnictides

9:50-10:15 S. Shamoto (JAEA)
Magnetic excitation spectrum in $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ system

Break

Chair: M. Fujita (Tohoku)

10:30-10:55 T. J. Sato (ISSP)
Neutron inelastic scattering study on the BaFe_2As_2 and related superconducting phases

10:55-11:20	D. Louca (Virginia, USA) The local atomic structure of superconducting Fe-Se-Te
11:20-11:45	M. Ogata (Tokyo) 'Unscreening' effect on superconductivity in Fe-Pnictides
11:45-12:10	T. Morinari (Kyoto) Fermi surface topology effect on inter-layer magnetoresistance in layered multi-band systems: Application to LaFeAsO _{1-x} F _x
Lunch	
Chair: M. Sato (Nagoya)	
13:30-13:55	K. Ishida (Kyoto) NMR Studies on LaFeAs(O _{1-x} F _x)
13:55-14:20	H. Mukuda (Osaka) ⁵⁷ Fe-NMR study on Fe pnictide superconductors LaFeAsO _{1-y} and Ba _{0.6} K _{0.4} Fe ₂ As ₂
14:20-14:45	H. Kotegawa (Kobe) NMR and resistivity studies under pressure in Fe-based superconductor FeSe and SrFe ₂ As ₂
Break	
Chair: N. L. Wang (Institute of Physics, China)	
15:00-15:25	Y. K. Bang (ACTP, Korea) Resonant impurity scattering on the $\pm s$ -wave state of the iron-based superconductors
15:25-15:50	T. Hanaguri (RIKEN) Spectroscopic-imaging STM studies on iron-based superconductors
15:50-16:15	N. Miyakawa (Tokyo University of Science) Point-contact tunneling spectroscopy of NdFeAsO _{1-y} with $T_C \sim 51$ K
Break	
Chair: M. Sigrist (ETH, Switzerland)	
16:30-16:55	S. Uchida (Tokyo) Coherence and incoherence in high- T_C cuprates
16:55-17:20	Y. J. Kim (Toronto, Canada) X-ray scattering study of charge stripes in cuprates
17:20-17:45	K. Ishii (JAEA) Charge excitations associated with charge order in cuprates
June 26	
Chair: T. Hanaguri (RIKEN)	
9:00-9:25	S. Tajima (Osaka) High T_C cuprates as a multi-ordered system
9:25-9:50	Y. Kohsaka (RIKEN) Visualizing formation of symmetry breaking excitations in lightly-doped Ca _{2-x} Na _x CuO ₂ Cl ₂
9:50-10:15	K. Kudo (Tohoku) Magnetic field effects on the local electronic states of Pb-substituted Bi ₂ Sr ₂ CuO _{6+δ} studied by the scanning tunneling microscopy/spectroscopy
Break	

Chair: K. Yamada (Tohoku)

- 10:30-10:55 A. Fujimori (Tokyo)
Pseudogap, Fermi arc, and kink in cuprate superconductors
- 10:55-11:20 A. Ino (Hiroshima)
Low-energy ARPES study of doping-dependent gap structure in high- T_c cuprates
- 11:20-11:45 H. Mukuda (Osaka)
NMR in multilayered cuprate - Phase diagram of CuO_2 plane -
- 11:45-12:10 M. Mori (Tohoku)
Apical site and electronic states in multi-layered cuprates

Lunch

Chair: Y. Koike (Tohoku)

- 13:30-13:55 M. Fujita (Tohoku)
Incommensurate spin correlations in single-layered high- T_c cuprates $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ and $(\text{Bi,Pb})_{2+x}(\text{Sr,L a})_{2-x}\text{CuO}_{6+x}$
- 13:55-14:20 Y. Tanabe (Tohoku)
Crossover between hole-trapping and Kondo effect in Ni-substituted $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_4$
- 14:20-14:45 K. Tsutsui (JAEA)
Exact diagonalization study for Ni substitution effect in d-p Model

Break

Chair: M. Arai (JAEA)

- 15:00-15:25 D. Reznik (Karlsruhe, Germany)
Photoemission kinks and phonons in cuprates
- 15:25-15:50 P. C. Dai (ORNL, USA)
Dynamic stripes and incommensurate spin excitations in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$
- 15:50-16:15 H. Yamase (NIMS)
Pomeranchuk instability in cuprate superconductors
- 16:15-16:30 Closing

ワークショップの前半は鉄系超伝導体、後半は銅酸化物超伝導体の講演で構成した。

まず、新たに発見された鉄系超伝導について総合的に議論が行われた。鉄系超伝導体は、多様な積層パターンと多くの元素の組み合わせのため、全体像を捕らえるのが困難な現状となっている。そのため、多様な研究手法を持つ専門家が一堂に会し、様々な角度から膨大な種類の物質およびそれらの実験データに関して比較検討を行うことが不可欠である。今回のワークショップでは、フェルミ面のネスティングと超伝導秩序パラメータの対称性、あるいはスピン密度波状態で観測されている磁気モーメントの大きさとの関係が議論された。鉄系超伝導体は Γ 点周りとM点周りをそれぞれ囲むようなフェルミ面を持つことがARPESを用いて明らかになってきている。これら繋がっていないフェルミ面間のスピン揺らぎにより s_{\pm} -波超伝導状態が安定化するという理論研究がある。鉄とカルコゲン元素で構成された11系と呼ばれる系に対してSTMを用いた実験研究は、超伝導の対称性が s_{\pm} 波であることを示した。一方、1111系や122系と呼ばれる系の磁気秩序相に関して、実験で観測されている磁気秩序とは異なるパターンが安定化しうるということが理論研究で指摘された。このことから、繋がっていないフェルミ面間のスピン揺らぎが超伝導の起源であるかどうかには議論の余地が残った。実際、超伝導状態は通常のs波超伝導状態であり、様々な乱れの効果が従来型の超伝導物質とは異なった物性の起源になっているという報告もあった。また、鉄元素の周りに四面体を構成しているニクトゲン元素やカルコゲン元素の原子位置と超伝導やスピン密度波状態との関連が議論された。磁気秩序相に関して、円偏向した入射光を用いたARPESの実験研究の報告があり、磁気秩序相においても依然としてフェルミ面が存在しており、ある特定のd軌道の電子で構成されていることが報告された。中性子散乱による実験では、金属状態であるにも関わらずスピン波の分散関係が見事に観測されていた。また、フォノンモードが理論的な予測に一致しない点が問題となった。

銅酸化物超伝導体については、未解決となっている電荷ダイナミクスの研究に対する方向性や、超伝導ギャップと擬ギャップの関係、ギャップの空間的不均一性と T_c との相関などが議論された。電荷ダイナミクスに関しては、特にストライプ相に関して X 線散乱、中性子散乱の実験結果を相互に比較検討する議論が行われた。ARPES を用いた観測では、 $(\pi/2, \pi/2)$ 周りは超伝導転移以下にならないとギャップが現れないのに対して、 $(\pi, 0)$ 周りは T_c 以上でもギャップが残っていることが分かってきた。この結果は、 $(\pi/2, \pi/2)$ 周りの超伝導ギャップと $(\pi, 0)$ 周りの擬ギャップという異なる 2 種類のギャップの存在を示唆している。STM を用いた研究でも同様な結果が報告された。しかし、異なるギャップがフェルミ面上に発達する電子状態が可能であるのか疑問が残る。Resonating Valence Bond 状態を仮定すると、この二つのギャップは共に磁気的交換相互作用という同一の起源を持つギャップと考えることもでき、2 種類のギャップという仮定は不要なのかもしれない。しかし、結論は今後の研究の進展を待つこととなった。ギャップの空間的不均一性と T_c との相関については、 CuO_2 面内の不均一性のみならず、面間の不均一性についても検討された。多層系銅酸化物と呼ばれる系では、 T_c が単位胞に含まれる CuO_2 面の数に依存する。超伝導と反強磁性の共存が NMR を用いた研究で明らかになっており、ワークショップではその最新データが示された。また、同じ多層系銅酸化物に対する ARPES の最新データも報告された。NMR と ARPES では、 CuO_2 面のキャリア密度を見積もることが可能である。しかし、多層系銅酸化物に対するこれらの測定結果には異なる部分があり、今後同一のサンプルを用いて比較する必要があるが出てきた。

4. まとめ

このワークショップでは、各種分光法の専門家や理論家が、お互いのデータや計算結果の整合性を議論した。鉄系超伝導体と銅酸化物超伝導体に関する最新の研究成果が報告された。鉄系超伝導体では、多様な結晶構造に加え、電子の軌道自由度があるため、電子状態の全体像を捕らえるのが困難な現状となっていたが、多様な研究手法を持つ専門家が一堂に会し、様々な角度から膨大な実験データに関して比較検討をすることで幾つかの問題点を解決することが出来た。銅酸化物超伝導体に関しても、異なる測定手法によって得られた実験データを比較検討することで、より正確な理解と新たな問題を見出すことが出来た。本ワークショップと関連するシンポジウムが日本物理学会第 65 回年次大会で開催されるなど、超伝導研究を切り口としたスペクトロスコーピーの研究が急速に進展している。金属材料研究所は、各種スペクトロスコーピーを用いた強相関電子系の研究で世界をリードしており、この分野で研究の方向性を世界に向け発信していくことが重要であると考えられる。