

高温超伝導体における特異な電子状態と物性

東北大・金研 遠山 貴己
東北大・理学研究科 高橋 隆、 佐藤 宇史
東北大・工学研究科 小池 洋二、 足立 匡

1. はじめに

物性物理学に多大なインパクトを与えた高温超伝導の発見から20年になるが、その発見機構に関しては未だ確定した見解は得られていない。それどころか、高温超伝導機構に深く関わっていると考えられる、擬ギャップ、フェルミアーク、電荷不均一、ストライプ、量子臨界点、電子・ホール非対称性といった新しい現象、新しい概念が続々と明らかになってきている。これらは全て、電子間に強い相関が存在することに起因しており、モット絶縁体にドーピングされたキャリアが引き起こす異常物性として捉えることができる。本質的に多体効果のため、残念ながらその異常物性を完全に理解することには至っていない。

本共同研究は、高温超伝導体に見られる特異な電子状態や異常物性を、実験と理論が共同して解明しようというものである。理学研究科の高橋グループ（高橋・佐藤）は、角度分解光電子分光実験の専門家であり、擬ギャップやフェルミアークの観測、電子ドーピング系の常伝導・超伝導状態の解明など光電子分光法による高温超伝導研究を推進している。工学研究科の小池グループ（小池・足立）は、電荷不均一性の一つの現れであるストライプ状態を輸送特性やミューオンスピン共鳴を利用して精力的に研究している。本共同研究においては、両実験グループで得られた実験データに対して遠山が理論的な立場から解析を行い、電荷不均一や擬ギャップ、電子・ホール非対称性などの特異な現象の解明を目標としている。

2. 研究経過

(a) 共同研究

高橋グループは電子ドーピング型高温超伝導体の超伝導ギャップが従来の $d(x^2-y^2)$ 波対称性からずれた運動量依存性を持つことを見出した。この起源を明らかにすることは電子ドーピング系の特徴を解明するだけでなく、単純な d 波対称性の運動量依存性を示すホールドーピング型超伝導体との違い、ひいては高温超伝導のメカニズムにも関連するものと思われる。実際、この実験結果に触発されいくつかの理論的研究が行われている。その起源を明らかにするため本共同研究の一環として遠山グループにより3. 研究成果に述べるような理論的解析が行われた。

小池グループでは最近、高温超伝導物質の構成単位構造であるCu-O八面体の頂点位置の酸素をハロゲンに置き換えた新型電子ドーピング型超伝導体を作製することに成功した。ハロゲンの違いによりCu-O結合距離が変化する。その距離が電子状態や超伝導転移温度とどのように関連しているか明らかにできれば、今後の新超伝導物質探索にとっても重要な情報となるとと思われる。遠山グループは3. 研究成果に述べるようにイオン結晶模型に基づいてマードリングポテンシャルを計算し、電子ドーピングのしやすさとCu-O結合距離の関係を明らかにするとともに、超伝導転移温度との相関について議論した。

(b) ワークショップ

本共同研究を実りあるものとするため、高温超伝導体の物性に関して第一線の研究を行っている著名な研究者および若手研究者を集め、専門的な研究発表と討論を行うワークショップを8月24日(水)–25日(木)に金研講堂で開催した。特に、共同研究に関連ある電荷不均一性や擬ギャップ、電子系とホール系の非対称性などの議論を深めるため、走査トンネル顕微鏡・分光、角度分解光電子分光、中性子散乱、光学測定、伝導度測定や理論の研究者を集めそれぞれの研究の現状を整理すると同時に、未解決の問題点を明らかにすることを目標とした。

以下にワークショップ「高温超伝導体における特異な電子状態と物性」のプログラムを掲載する。

8月24日(水)

12:55-13:00はじめに

遠山 貴己 (東北大金研)

座長: 前川 禎通 (東北大金研)

13:00-13:30 電荷不均一性と擬ギャップ

内田 慎一 (東大理)

13:30-14:00 STM/STS で見たアンダードープ高温超伝導体の実空間電子状態

花栗 哲郎 (理研)

14:00-14:30 STM/STS から見た Bi₂212 の 4X4 電荷秩序と擬ギャップ

桃野 直樹 (北大理)

14:30-15:00 高温超伝導体におけるスピン揺らぎ・超伝導揺らぎとランダムネス

柳瀬 陽一 (東大理)

--- 休 憩 ---

座長: 山田 和芳 (東北大金研)

15:30-16:00 過剰ドープ領域での磁気励起と不純物効果

脇本 秀一 (原研)

16:00-16:30 LSCO のオーバードープ領域における T_c と超伝導体積分率の相関

— 磁化率からみたマイクロ相分離 —

足立 匡 (東北大工)

16:30-17:00 面外不均一性

永崎 洋 (産総研)

17:00-17:30 NMR による多層型高温超伝導体の超伝導と反強磁性

棕田 秀和 (阪大基礎工)

18:00-

懇親会 (於: 会議室)

8月25日(木)

座長: 小池 洋二 (東北大工)

9:00-9:30 高温超伝導体の磁気励起

佐藤 正俊 (名大理)

9:30-10:00 電子ドープ系の磁気励起と超伝導

藤田 全基 (東北大金研)

10:00-10:30 電子ドープ系における多体相互作用と超伝導対称性

佐藤 宇史 (東北大理)

--- 休 憩 ---

座長: 高橋 隆 (東北大理)

11:00-11:30 電子・ホール非対称性と長距離ホッピングの効果

遠山 貴己 (東北大金研)

11:30-12:00 擬ギャップとフェルミアーク

吉田 鉄平 (東大新領域)

12:00-12:30 酸素同位体で探る高温超伝導体における格子振動の役割

笹川 崇男 (東大新領域)

--- 昼 食 ---

座長: 遠山 貴己 (東北大金研)

13:30-14:00 光学応答から見た高温超伝導の謎

田島 節子 (阪大理)

14:00-14:30 ラマン・赤外分光による共鳴ピークの形成と

擬ギャップ・超伝導ギャップ

水貝 俊治 (名大理)

14:30-15:00 輸送現象で見る銅酸化物高温超伝導体の電子状態

安藤 陽一 (電中研)

15:00-15:30 変分法、高温展開からみた高温超伝導体

小形 正男 (東大理)

日本物理学会領域 8 のメーリングリストへワークショップ案内を流した結果、講演者以外の参加者も多く、約 80 名が参加した活発なワークショップとなった。本報告では個々の講演内容をまとめることはしない。どの講演者も高温超伝導研究の第一線で活躍されている方々であり、対象とする研究手段・物質に対する深い議論とともに、高温超伝導研究の現状をそれぞれの立場から述べていただいた。各講演に対する議論も活発であった。

参加者からは「近年、遷移金属酸化物全般に関する研究会は多いが、銅酸化物高温超伝導に集中した研究会は久しぶりであり大変充実していた」「高温超伝導研究の現状がよくわかった。今後もこのようなワークショップを毎年行っていただきたい」といった声が聞かれた。これは主催者・講演者・参加者の共通の思いであり、本ワークショップが成功であったことを物語っている。また、高温超伝導発見20年の節目に向けた高温超伝導研究の今後の方向性を示すよい機会であったといえる。今後も高温超伝導に関するワークショップを金研共同利用において継続していくことが期待される。

3. 研究成果

(a) 電子ドープ型高温超伝導体の超伝導ギャップの運動量依存性

高橋グループは電子ドープ型高温超伝導体 $\text{Pr}_{0.98}\text{LaCe}_{0.11}\text{CuO}_4$ の超伝導状態に対する高分解能角度分解光電子分光実験を行い、図1のようなフェルミエッジのシフトの運動量依存性を観測した [Phys. Rev. Lett. **95**, 017003 (2005)]。この量は超伝導ギャップの運動量依存性に対応する。図中の点線は単純な $d(x^2-y^2)$ 対称性の超伝導ギャップの運動量依存性を表している。実験データ(●)は明らかにこの d 波の関数形からずれており途中で極大値をもつ非単調な振る舞いをしている。

この振る舞いの物理的起源を理解するため、遠山グループは電子ドープ型超伝導体中のキャリア相関に関する理論計算を行った。理論モデルとしては高温超伝導体をよく記述すると考えられる $t-t'-t''-J$ モデルを用いた。ここで t は最近接格子点間のキャリアのホッピング、 t' 、 t'' はそれぞれ第2、第3近接格子点間のホッピングを表す。

上記の物質を記述するパラメータを用いて、ハーフフィールド $t-t'-t''-J$ モデルにドープされた2個の電子のキャリア間相関関数を20サイトクラスターに対する数値的厳密対角化法により計算した。図2にその結果(黒塗りの記号)を示す。横軸の $r=1$ での値は、2個の電子が隣り合うサイトにくる確率に比例している。キャリアがドープされていないときは2種類の副格子点を持つスピン系となっているので、 $r=1$ の場合は、2個の電子が隣り合う異なる副格子点に存在していることになる。同様に、 $r=2.236$ の場合も異なる副格子点の上に存在している。2個のホールがある場合(白抜き記号)と比較すると、異なる副格子点上に2個の電子が存在する確率が相対的に大きくなっていることがわかる。これは電子ドープ型では反強磁性秩序がキャリアドープによって破壊されずに生き残るため、その磁気的なエネルギーを得しようとする結果と考えられる。すなわち、キャリアが異なる副格子点にいればその周りの反強磁性的なスピン配列を乱すことはないからである。

上記の結果に基づき、2個の電子キャリアが隣り合う異なる副格子点($r=1$)でペアを作っているとしよう。このときペアの波動関数は2次元正方格子の運動量空間表示で

$$\phi_1 = \cos k_x - \cos k_y$$

と与えられる。これは単純な $d(x^2-y^2)$ 対称性の超伝導ギャップの運動量依存性と同じである。一方、 $r=2.236$ の場合は

$$\phi_2 = 2(\cos 2k_x \cos k_y - \cos k_x \cos 2k_y)$$

となる。

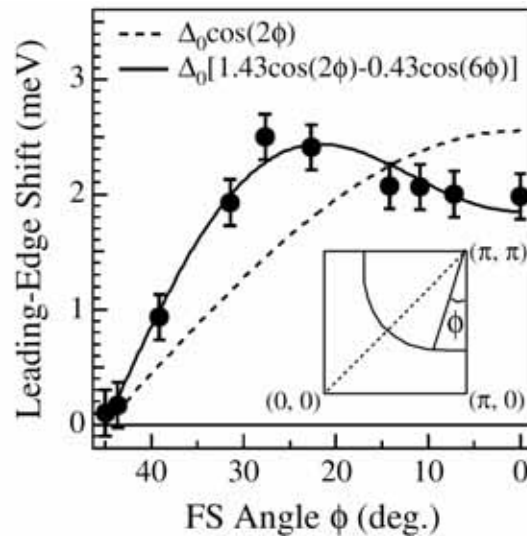


図1. 電子ドープ型高温超伝導体 $\text{Pr}_{0.98}\text{LaCe}_{0.11}\text{CuO}_4$ の超伝導ギャップの方向(運動量)依存性。黒丸は実験データ、実線はある関数形によるフィッティング。点線は単純な d 波対称性の場合である。[Phys. Rev. Lett. **95**, 017003 (2005)から引用]

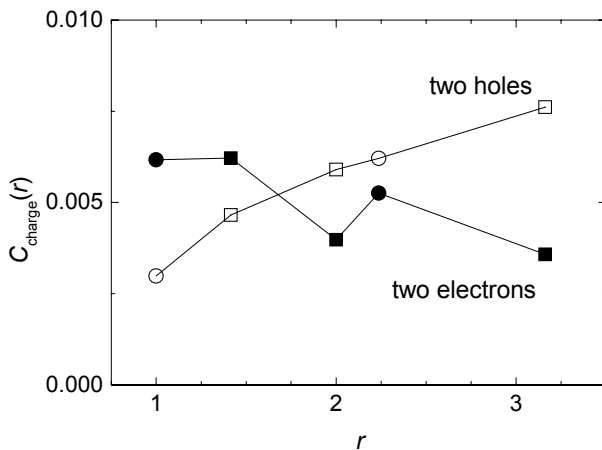


図2. 2個のキャリアがドーピングされた20サイト $t-t'-t''-J$ 模型に対するキャリア間相関関数。黒塗りの記号は電子キャリア、白抜きの記号はホールキャリアに対する結果である。

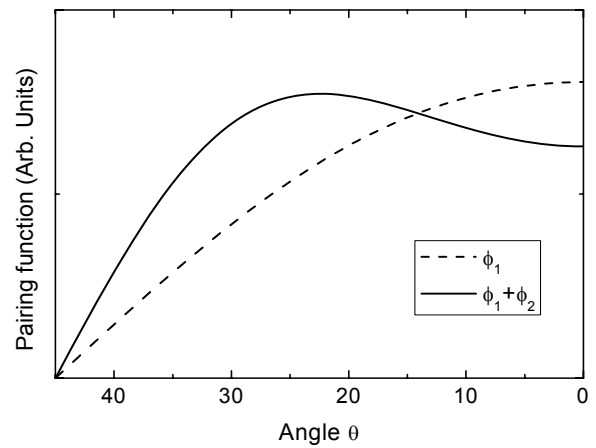


図3. ペア関数 ϕ_1 および $\phi_1 + \phi_2$ の角度依存性。横軸の角度は図1の横軸と同じである。

この関数形は $(k_x, k_y) = (0, 0) \rightarrow (\pi, \pi)$ 方向にノードを持っており、 ϕ_1 と同じ d 波対称性となっているが、その高調波成分に対応している。図3に ϕ_1 および $\phi_1 + \phi_2$ を図1と同じ角度の関数としてプロットした。 $\phi_1 + \phi_2$ は、電子ドーピング系の特徴である $r=2.236$ でのペアの寄与を加えたものであることに注意しよう。この形は図1の実験結果とよく対応している。この計算では超伝導ギャップを直接評価したわけではないが、得られた結果が実験データとよく対応していることは上記の考え方が電子ドーピング系の超伝導状態に対して有効であることを物語っている。すなわち、反強磁性的に配列したキャリアの周りのスピンの本質的に重要であることを示唆している。今後は、 $t-t'-t''-J$ 模型を用いて超伝導ギャップを直接計算してこの考え方が正しいことを示す必要がある。

(b) 頂点位置にハロゲンを持つ電子ドーピング型超伝導体の電子状態に関する考察

小池グループでは最近、高温超伝導物質の構成単位構造であるCu-O八面体の頂点位置の酸素をハロゲンに置き換えることにより、新型電子ドーピング型超伝導体を作製することに成功した [J.Jpn.Appl.Phys.43,L1480 (2004); Physica C 426- 431, 500 (2005)]。Liインターカレーションにより電子キャリアが注入され、 $\text{Li}_x\text{Sr}_2\text{CuO}_2\text{Br}_2$ で超伝導転移温度 $T_c=8\text{K}$, $\text{Li}_x\text{Sr}_2\text{CuO}_2\text{I}_2$ で $T_c=4.5\text{K}$ である。図4にその結晶構造を示す。Cu-O結合距離は他の電子ドーピング型高温超伝導体と同様大きい。

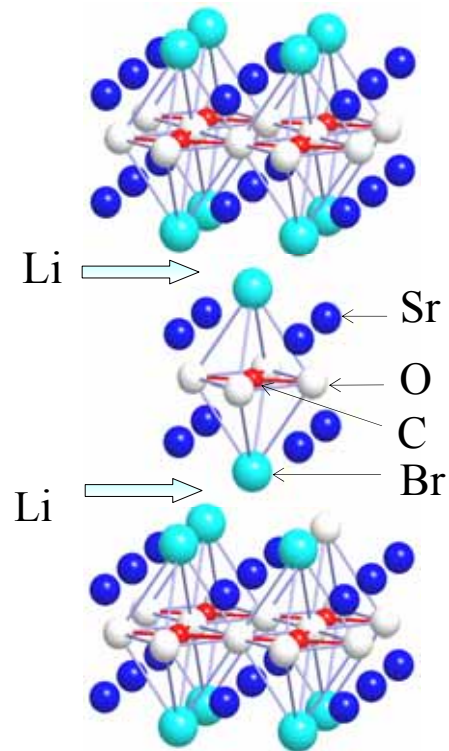


図4. $\text{Li}_x\text{Sr}_2\text{CuO}_2\text{Br}_2$ の結晶構造

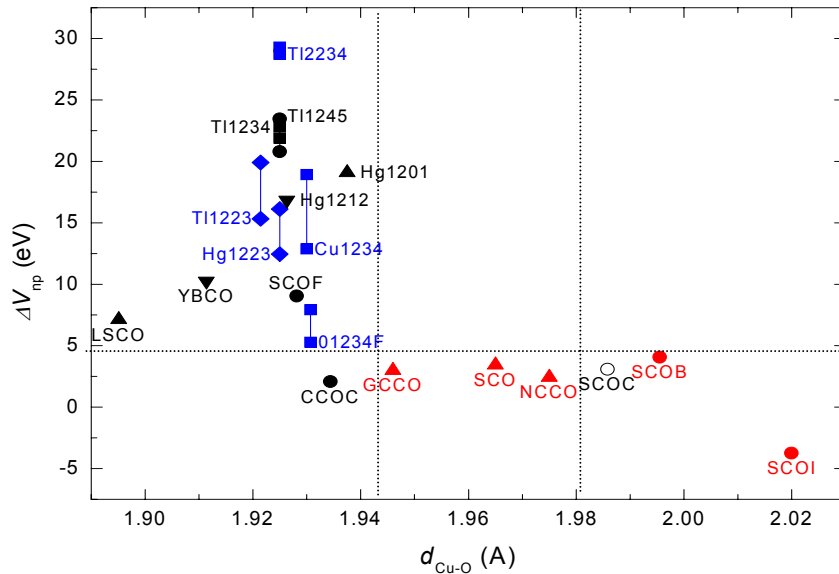


図5. 様々な高温超伝導物質のCuイオンとOイオンのマードルングポテンシャルの和とCu-O結合長の関係。この和が小さいものほどCuイオンへの電子ドーピングがしやすい。

上記の新型電子ドーピング物質の電子状態を明らかにするため、親物質に電子キャリアをドーピングするための条件をイオン結晶模型に基づくマードルングポテンシャル計算により調べた。図5には、様々な高温超伝導物質に対して計算されたCuO₂面内のCuイオンとOイオンのマードルングポテンシャルの和をCu-O結合距離の関数として示している。この量が小さいほどCuイオンに電子が入りやすくなる。実際、計算結果を見ると、電子ドーピング超伝導体（▲ ◆記号）は小さな値を示している。さらに、今回作製された物質（◇）はCu-O結合距離が長いことがわかる。同じ結晶構造で頂点位置にClを持つ物質（◇）には残念ながら電子キャリアをドーピングすることには成功していない。したがって、この計算結果の範囲内では超伝導転移温度とこれらの物理量との相関は見られなかった。今後、どのような因子がこの新しい電子ドーピング型超伝導体の転移温度を支配しているのか明らかにする必要がある。これは今後の新超伝導物質探索にとっても重要な情報となると思われる。

4. まとめ

本共同研究では、高橋グループで見出された電子ドーピング型高温超伝導体の超伝導ギャップの異常な運動量依存性と小池グループで最近発見した頂点ハロゲン電子ドーピング型超伝導体の電子状態を、遠山グループが理論的に解析した。まだそれらの起源を完全に理解したとはいえないが、今後の研究の方向性は明らかにできたのではと思われる。今後さらに共同研究を進めることによりさらに多くの成果を挙げていきたい。また、共同研究を実りあるものとするため、高温超伝導体の物性に関して第一線の研究を行っている著名な研究者および若手研究者を集め、専門的な研究発表と討論を行うワークショップを開催した。大変好評であり今後の高温超伝導研究の方向性を議論できた。今後もこのようなワークショップを定期的に行うしていきたい。

5. 発表（投稿）論文 特になし

超伝導体における渦糸状態の物理とその応用

東北大・金研 小林典男

1. はじめに

高温超伝導体の材料開発が進み、電力ケーブル、超伝導マグネット、磁気分離、微小磁気計測などのパワー応用からエレクトロニクス応用まで、様々な分野での実用化を目指した研究・開発が進められつつある。超伝導体の応用には、超伝導体中に侵入した渦糸の静的・動的状態を明らかにする必要がある。しかし、高温超伝導体の渦糸状態は、比較的高温で動作するために熱的揺らぎが大きいこと、弱いが多量の結晶欠陥によって渦糸の運動が阻害されることなどのために、従来の超伝導体とは極めて異なった性質を示す。

高温超伝導体の渦糸状態の研究は、従来型超伝導体との違いが明らかにされ始めた 1995 年頃から急速に活発になり、主として $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ および $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶を中心として行われた。その結果、明確な 2 次相転移線としての上部臨界磁場の消失、渦糸液体状態の存在、渦糸の配列が長距離秩序を持たない渦糸ガラスの存在、渦糸ガラスから渦糸液体への 2 次相転移、ブラッグガラスから渦糸液体への 1 次相転移などが明らかにされた。

これらの性質は超伝導体の対称性、酸素や不純物などの格子欠陥の種類と密度、異方性の強さ、キャリア濃度、温度、磁場、など種々の条件に強く作用される。現在、わが国では多くの研究者が高温超伝導体の渦糸状態の研究に携わっており、微細加工による人工的な渦糸ピン止め中心の導入や異種超伝導体間の接合、キャリア濃度制御による異方性の変化、磁場の方向や強さの制御、種々の実空間手法による渦糸の観察、渦糸のダイナミクスなど多彩な研究を行っている。また、高温超伝導体以外にも多くの化合物超伝導体が発見され、超伝導対称性と渦糸状態との関連についても研究がすすめられている。

これらの研究を行っている全国の研究者が集まって、それぞれの研究の現状と今後の研究方向を探るとともに、密接な繋がりを持ったコミュニティーを形成することによって、渦糸物理研究のより一層の発展を図ることを意図し、平成 17 年度東北大学金属材料研究所研究部共同研究(基盤研究)としてワークショップを開催した。

2. 研究会報告

ワークショップ「超伝導体における渦糸状態の物理と応用」は平成 17 年 12 月 16 日、17 日の 2 日間にわたって、約 80 名が参加して東北大学金属材料研究所の 2 号館講堂と会議室において開催され、30 件の口頭発表と 16 件のポスター発表が行われた。以下にプログラムを示す。

12 月 16 日(金)

開会の挨拶 9:30-9:35

東北大金研 小林典男

午前

前半 9:35-11:00

座長 為ヶ井強

MgB_2 単結晶の磁束状態における π バンドの寄与 (20 分)

東北大極低温科学セ 野島 勉

微小な $0-\pi$ ジョセフソン接合系の量子論的位相ダイナミクス (20 分)

東北大金研 小山富男

フェルミ原子ガスの量子渦糸：その新概念と高温超伝導体渦糸との比較 (25 分)

日本原子力研究開発機構 町田昌彦

超伝導渦糸のイメージング-SQUID 顕微鏡を中心として (20 分)

東北大院情報 林正彦

後半 11:15-12:40

座長 小林典男

微細孔格子を持つ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCuO}_{8+y}$ の磁束状態 (20 分)

物材機構 大井修一

古典 3 次元 及び 量子 2 次元における Bragg Bose Glass (25 分)

京大院理 池田隆介

ジョセフソン磁束系の基底状態における、回転格子描像と傾斜格子描像の統一的理解 (20 分)

物材機構 野々村禎彦

YBCO 単結晶におけるジョセフソン磁束系の相転移と面内異方性 (20 分)		北陸先端大	内藤智之
午後			
前半 13:40-14:45		座長	町田昌彦
メゾスコピック超伝導薄膜における渦糸状態間転移磁場の特異な振舞 (25 分)		筑波大数理物質	神田晶申
微細加工による超伝導ネットワークの製作と物性 (20 分)		阪府大院工	石田武和
超重力場処理した傾斜材料超伝導体の磁束量子状態 (20 分)		日本原子力研究開発機構	岡安 悟
ポスターセッション 14:45-16:15 (金研 2 号館 1 階会議室)		ポスター世話人	西寄照和
PS1	柱状欠陥を導入した渦糸状態のトラッピング転移	東大総合文化	浅沼伸雄
PS2	不足ドーパ LSCO 薄膜における KT 転移の観察と外部磁場効果	東大総合文化	大橋健良
PS3	カイラル p 波超伝導の対称性と渦糸芯半径	北大院工	瀧川光明
PS4	高温領域、弱磁場中での Bi-2212 ウィスカーにおける臨界電流密度の上昇	筑波大数理物質	丹下将克
PS5	Pb ナノワイヤーの超伝導特性	物材機構	石井聡
PS6	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ における磁束レンズ効果	東大院工	知久宏之
PS7	有機超伝導体 $\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu(NCS)}_2$ における磁束格子の量子融解	上智大理工	後藤貴行
PS8	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}(\text{Cu}_{1-x}\text{M}_x)_2\text{O}_{8+d}$ (M=Co, Ni, Zn) 単結晶における不純物の電子状態	筑波大数理物質	山本卓
PS9	Bi2212 微小固有接合における自己共振ステップのサイズ依存性	筑波大数理物質	郡 昌志
PS10	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ におけるロックイン転移の ab 面磁場依存性	筑波大数理物質	久保結丸
PS11	固有ジョセフソン接合における巨視的量子トンネル現象	日本原子力研究開発機構	町田昌彦
PS12	コルビノ形状超薄膜における磁場誘起 2 次元超伝導絶縁体転移	東工大極低温セ	大熊 哲
PS13	アモルファス $\text{Mg}_x\text{B}_{1-x}$ 膜の渦糸相図と渦糸ダイナミクス	東工大極低温セ	香原賢俊
PS14	Effects of mixing of ballistic and diffusive motion on vortex core structure in MgB_2 Department of Physics and Engineering Physics, University of Saskatchewan		田中佳織
PS15	非双晶 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶における渦糸状態の重イオン照射効果	東北大金研	春日邦章
PS16	非双晶 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶における渦糸ダイナミクスの面内異方性	東北大金研	西寄照和
午後			
後半 16:15-17:25		座長	野島 勉
NbSe ₂ 単結晶における動的磁束融解現象 (25 分)		筑波大数理物質	小久保伸人
量子液体相における異常な渦糸ダイナミクス (20 分)		東工大極低温セ	大熊 哲
交流伝導度測定でみた高温超伝導体の動的超伝導揺らぎ (25 分)		東大総合文化	前田京剛

12月17日(土)

午前

前半 9:00-10:25

FFLO相における渦糸状態 (25分)

座長 池田隆介

京大院理 松田祐司

重い電子系超伝導体CeCoIn₅の超伝導状態における異常輸送現象 (20分)

京大院理 笠原裕一

CeCoIn₅のFFLO状態と渦糸コアの電子状態 (20分)

北大院理 熊谷健一

非従来型超伝導体の異方的反磁性応答 (20分)

岡山大理 安立裕人

後半 10:40-12:00

座長 松田祐司

渦糸格子状態の比熱と低エネルギー励起構造 (20分)

京大基研 中井宣之

磁束渦糸状態におけるパウリ常磁性効果とナイトシフト (20分)

岡大院自然 市岡優典

擬1次元有機超伝導体の渦糸構造と核磁気緩和率 (20分)

北大院工 瀧川光明

NMR測定配置における異方的超伝導体中の磁場分布 (20分)

京大院理 芝内孝禎

午後

前半 13:00-14:25

座長 門脇和男

ナノ構造超伝導体の渦糸構造 (20分)

阪府大工 加藤勝

高温超伝導層間ジョセフソン渦糸系のスメクチック相 (25分)

物材機構 胡 曉

ジョセフソン磁束系のダイナミクス (20分)

物材機構 平田和人

Bi2212系固有ジョセフソン接合におけるジョセフソン磁束巨大ロックイン現象 (20分)

物材機構 羽多野 毅

後半 14:40-16:00

座長 平田和人

Bi2212固有ジョセフソン接合におけるFiske共鳴とプラズマモード (20分)

筑波大数理物質 掛谷一弘

固有ジョセフソン磁束系のTHz発振 (20分)

筑波大数理物質 門脇和男

ジョセフソン磁束によるパンケーキ磁束分布の制御 (20分)

東大院工 為ヶ井強

定量測定可能なリアルタイム磁気光学顕微鏡の開発 (20分)

東京農工大工 石橋隆幸

閉会の挨拶

東北大金研 小林典男

3. 研究成果

野島はMgB₂単結晶の磁化を磁気トルク法によって測定した結果から、異方性パラメータ γ の磁場依存性にステップが見られることを報告し、渦糸構造の回転を伴う相転移との関連について議論した。小山はs波超伝導体に埋め込まれたd_{x₂-y₂}超伝導体(d-ドット)の理論を報告し、d-ドット間隔がロンドン侵入長より短い場合の量子論的位相ダイナミクスを議論した。町田はフェルミ原子ガスの量子渦糸について弱結合BCSから強結合BECまで数値解析を行った結果を報告した。

渦糸状態の相図に関して、大井はFIBによって加工された微細孔格子を持つBi₂Sr₂CaCuO_{8+y}の渦糸状態の実験結果を報告した。池田はBragg Bose Glass相に関する理論とシミュレーションの結果を発表し、これまでの実験結果との対応について議論を行った。内藤はYBa₂Cu₃O₇のジョセフソン渦糸相図を電気抵抗の面内異方性に注目して議論を行った。野々村はジョセフソン渦糸系の基底状態における格子構造のシミュレーション結果を発表した。また、胡は高温超伝導体における層間ジョセフソン渦糸系のスメクチック相の存在を理論的に示し、物質パラメータを用いてYBa₂Cu₃O₇とBi₂Sr₂CaCuO_yの相図を定量的に求めた。

渦糸状態の可視化に関しては、岡安は超重力場処理したPb-Biの傾斜材料超伝導体中の渦糸をSQUID顕微鏡を用いて観測した結果を報告し、渦糸状態がPb/Bi量に依存することを示した。石田は同じくSQUID顕

微鏡を用いて、微細加工した超伝導ネットワーク中の渦糸構造の観測結果を報告し、Ginzburg-Landau 方程式を用いた林、海老沢らのシミュレーション結果と比較を行った。林は SQUID 顕微鏡を用いた渦糸測定の分解能を上げるための数学的手法を提案し、磁場の空間分解能が走査の精度まで向上させることが出来ることを示した。また、為ヶ井、芝内は磁気光学顕微鏡を用いた渦糸分布の測定結果を、石橋は磁気光学顕微鏡を用いた渦糸の可視化技術について発表を行った。為ヶ井はジョセフソン渦糸とパンケーキ渦糸の相互作用を利用し渦糸レンズ効果の実験を行い、ジョセフソン渦糸によってパンケーキ渦糸の分布が制御可能であることを実験的に示した。また、芝内は異方的超伝導体の NMR の配置において静磁場と微小横磁場の侵入を測定し、異方的超伝導体のナイトシフトの定量性について議論した。

神田は複数の微小トンネル接合を使つての超伝導ディスク内の超伝導電流分布を測定することにより、サイズがコヒーレンス長程度の試料の渦糸状態を調べた。その結果、複数の渦糸が合体した巨大な渦糸が試料中心に存在する巨大渦糸状態の観測に成功し、多重渦糸状態への相転移とその磁場依存性を報告した。加藤はナノ構造超伝導体について Bogoliubov-de Gennes 方程式を数値的に解き、準粒子構造から渦糸構造を求めた。

小久保はNbSe₂単結晶を用いて駆動された渦糸系の格子モードを捉えるモードロック実験を行った結果を報告し、得られた動的融解曲線から臨界電流のピーク効果と渦糸の融解減少との関連を議論した。大熊はアモルファスMoSi薄膜の複素インピーダンスの測定を報告し、渦糸量子液体相が存在することを示した。また、電圧のノイズスペクトラムの測定から、熱的液体相から量子液体相へクロスオーバーする時に渦糸ダイナミクスに異常が現われることを示した。前田はキャリア濃度を系統的に変化させたLaSrCuOを用いて複素伝導度の測定を行い、超伝導揺らぎのドーブ量依存性とユニバーサリティクラスを議論した。

松田はPauli limitを超える強磁場下で超伝導秩序変数が空間的に変調する不均一な超伝導状態であるFFLO状態についてレビューを行った。また、CeCoIn₅について超音波による音速の測定結果からtilt modulus C₄₄がソフト化することを見出し、FFLO状態に対応する結果であることを議論した。笠原はCeCoIn₅について熱ホール伝導率の測定を行い、準粒子の状態密度がH^{1/2}に比例することを示した。熊谷はCeCoIn₅のNMR測定結果を報告し、FFLO相で予測される空間変調した秩序変数が存在することを明らかにした。

安立はd波超伝導体の面内で磁場を回転させた時の磁化とトルクの角度依存性を理論的に求め、高温超伝導体の実験結果との対応を議論した。中井は準古典理論を用いた数値計算を行い、渦糸状態における電子比熱と状態密度の温度依存性からSTMスペクトルに対するKramer-Pesch効果の影響を議論した。市岡はs波とd波超伝導体について、パウリ常磁性効果による超伝導抑制について計算を行い、また、CeCoIn₅で議論されているFFLO状態での渦糸の空間構造と電子状態を議論した。瀧川は擬1次元有機超伝導体に対して核磁気緩和率を求め、解析結果から渦糸状態が核磁気緩和率に与える影響を議論した。

平田はBi₂Sr₂CaCuO_yのジョセフソン渦糸のフローダイナミクスの測定を行い、フロー抵抗の周期的な振動とジョセフソン渦糸の格子構造との関係、キャリア濃度依存性、高磁場特性などを報告した。羽多野はBi₂Sr₂CaCuO_yウイスキーを用いて固有ジョセフソン接合の試料サイズを調整することにより、磁場印加方向依存性に巨大ロックイン現象が観測されることを報告し、ジョセフソン渦糸状態を議論した。掛谷はBi₂Sr₂CaCuO_yの固有ジョセフソン接合の電流-電圧特性からFiske共鳴を観測しプラズマモードを議論した。門脇は固有ジョセフソン接合におけるジョセフソン渦糸の動特性について発表を行い、ポロメータを用いた測定からジョセフソン渦糸フロー状態において電磁波の発振が存在することを報告した。

4. まとめ

平成17年12月16日、17日に開催した「超伝導体における渦糸状態の物理と応用」ワークショップには80名を超える多くの参加者が得られ、高温超伝導体をはじめとする超伝導体の渦糸状態の物理とその応用について、最新の研究結果が実験と理論の両方面から合計46件報告された。超伝導体の渦糸状態の研究は、渦糸の相転移、ダイナミクス、電子状態などの基礎的な物理現象からそれらを利用した応用まで多岐にわたっており、これらの研究に携わっている研究者が2日間にわたって集中的に議論・意見交換を行うことができたため、超伝導体の渦糸状態の物理と応用の研究分野における最先端の研究内容について現状を総括することができた。また、得られた成果を通して今後のこの分野の研究の方向性について重要な指針が得られた。