

「極限環境状態における現象」
平成7年度採択研究代表者

門脇 和男

(筑波大学物質工学系 教授)

「極限環境を用いた超伝導体の臨界状態の解明」

1. 研究実施の概要

この研究は、高温超伝導体を中心に、超伝導体の極限状態（強磁場中での臨界磁場や、臨界電流近傍、超高周波領域での量子限界にせまる超高速現象など）における新しい物質的特性や性質を明らかにし、その知見を基にこれらの新しい諸物性を広範に応用し、将来の豊かな社会を実現する可能性を探求することにある。

高温超伝導体は、その発現温度が液体窒素（液体空気）の沸点 77 K（絶対温度目盛り）をはるかに越える高い転移温度を示し、その臨界電流密度や臨界磁場においては従来の超伝導体に比べて遜色無いばかりか、その数倍から 10 倍以上も高い。このような特性を利用すれば、エネルギー損失のない大電力輸送や超高速交通、通信技術、医療技術など、極めて多くの分野において省エネルギー化、高速化、高感度化が可能となる。しかしながら、このような夢のような特徴を持つ高温超伝導材料も、発見以来すでに 13 年もの歳月経て、激しい研究にもかかわらずその実用化はほとんどの分野で進んでいないのが現状である。その理由は、高温超伝導体を持つ酸化物物質特有の困難を未だ克服できていないからである。強磁場中で、大電流が流れている状態で、超高速動作過程で、理想的には優れている高温超伝導体の潜在的特性は、現実の様々な障害によって特性が劣化し、結局、従来の超伝導体と同様かあるいはそれよりもはるかに超伝導としての特性が悪くなってしまう。

このような様々な障害を取り除くためには、高温超伝導体の物質の性質をよく理解し、障害克服の対策を講ずるための基礎研究が必要不可欠である。本研究は、このような観点から、高温超伝導体の臨界状態の様々な特性を理解し、その知識を基にこの素晴らしい物質の性質を制御し、改善し、様々な応用技術を開発する方法を模索することにある。

このような目的を達成するため、本研究では以下のような 4 研究項目に着目した研究を行う。これらは、高温超伝導体の高品質大型単結晶の育成、GHz-THz 帯における超伝導電磁エレクトロニクス工学の基礎研究、高温超伝導体の磁束状態の解明、及び、超伝導体の混合状態で現れる磁束系の現象の極限環境下における静的・動的性質の研究である。各項目の研究内容の詳細は、2. 研究実施内容を参照のこと。

2. 研究実施内容

上記のように、本研究は、具体的には、高温超伝導体の高品質大型単結晶の育成、GHz-THz帯における超伝導電磁エレクトロニクス工学の基礎研究、高温超伝導体の磁束状態の解明、及び、超伝導体の混合状態で現れる磁束系の現象の極限環境下における静的・動的性質の研究の4部から成る。

高温超伝導体の高品質大型単結晶の育成

これは、本研究の最も基幹となるものであり、高品質単結晶なしには研究が実施できないことから、この研究計画で最も中心的研究課題である。従って、この研究に関しては集中的な努力が払われ、当初のほぼ一年間において目標とした研究設備上の整備は実質上達成された。すなわち、初年度、改良型の単結晶育成装置である「高純度大型単結晶育成装置」及び「雰囲気制御型大型単結晶育成装置」を導入し、1997年5月頃からテスト運転、基礎実験を重ね、同年12月、我々の中心的課題であった大型かつ高品質の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ の単結晶育成に成功した。その後、単結晶の高品質化と大型化という二重に困難な問題を解決すべく方法として、我々独自の新しい手法であるILSTSfZ法を開発した。この方法は、10年以上にわたる酸化物単結晶育成における経験と単結晶育成法を深く再検討した結果考案されたものであり、酸化物高温超伝導体のように分解反応型物質の単結晶育成に極めて有効である新しい手法である。この方法、及びこれを実現するための改良型装置は現在特許申請中である。



図1. 育成された $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ 大型単結晶の一例

育成された単結晶は、図1に見られるように、直径が約7mm、長さが10cmであり、それを切断して高品質の部分のみ取り出す。取り出された結晶は(図2参照)大きさが、幅約7mm、長さ約10cm、厚さ0.3mm程度である。この系は、結晶自身、極めて2次元的であり、得られる単結晶は2次元的な劈開性を持ち、薄片状でマイカのようである。従って、これまで厚い結晶が得られず、特に、バルク状の試料が必要な実験は困難であった。この研究によって得られた大型の単結晶は厚さが0.2-0.5mmであっても結晶の質が劣化しないことが分かった。単結晶試料の厚さの限界は、結晶が冷却する際に起こるひずみにより自然劈開することにある。今後、このようなひずみを除去する対策が更に大型の単結晶育成には必要不可欠であることが分かった。今後、単結晶の大型化に伴う装置の改良とともに、1/2インチ程度の高品質単結晶育成を目指す。

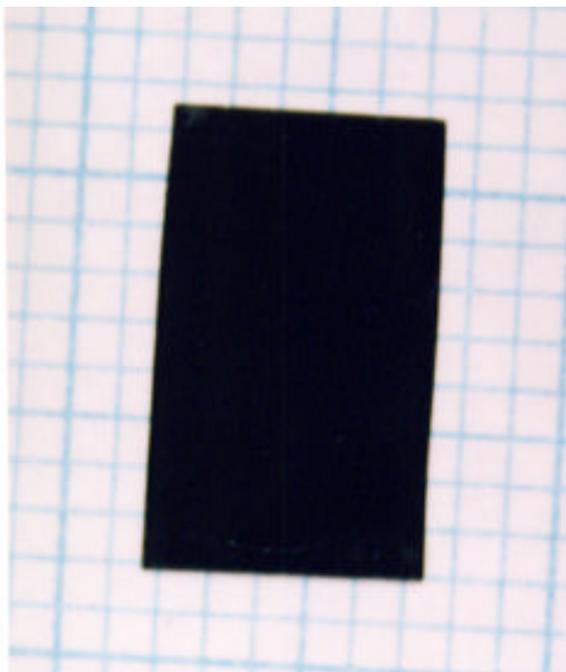


図2-(1). 切断後の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 単結晶写真(劈開平面) 1目盛り1mm。

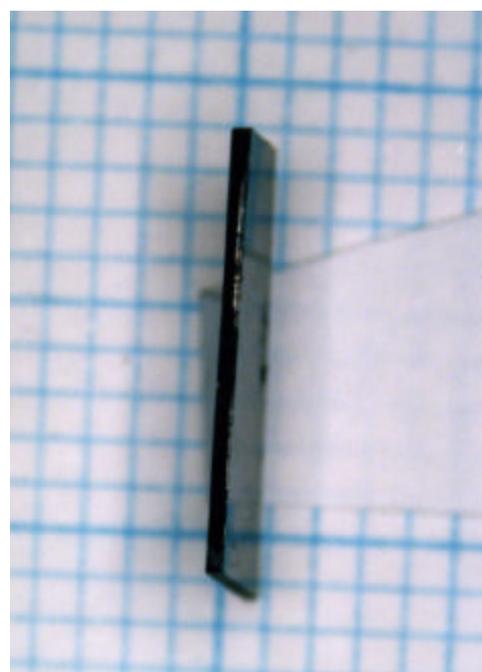


図2-(2).切断後の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 単結晶写真(厚さ方向から)。

このようにして得られた単結晶の品質はこれまで様々な物理的、化学的手法によって詳細に検討され、その結果、高温超伝導体ではこれまでに得られたことのないほど高品質な結晶であることが分かってきた。

その結果の一例として、中性子小角散乱において結晶格子の長周期構造の揺らぎを調べたところ、結晶の主軸に関するロッキングカ-ブは 0.5° 以内で、装置の分解能の限界であることが判明した。また、2結晶平行X線による同様の実験では、

ブラ - グ点 (0,0,12)の反射のロッキングカ - プの半値幅は 0.025° と極めて鋭いことが分かった (図3 参照)。この結果は、現在得られている $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 系の単結晶としては世界で最も高品質であるといえる。

低温 STM によれば、劈開表面における原子像が観測されている。STM 装置で観測できる範囲内で表面は原子レベルで平坦あり、ステップ構造や、その他の結晶粒界、双晶など全く観測されない。超伝導状態では ($T_c=89$ K であり、転移点の幅は約 0.5 K である) 大きな超伝導ギャップが観測され、 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 以上ものサイズ

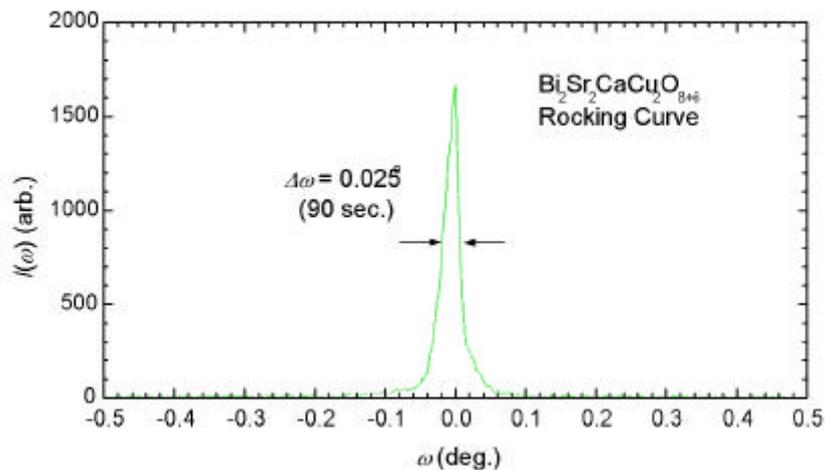


図 3. 2 結晶平行 X 線による単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の (0,0,12) Bragg 反射のロッキングカ - プ。

の表面で超伝導ギャップの大きさは全く表面の位置によらない。これまで、他のグループから提供された単結晶で観測される超伝導ギャップの異なった縞状の部分や、

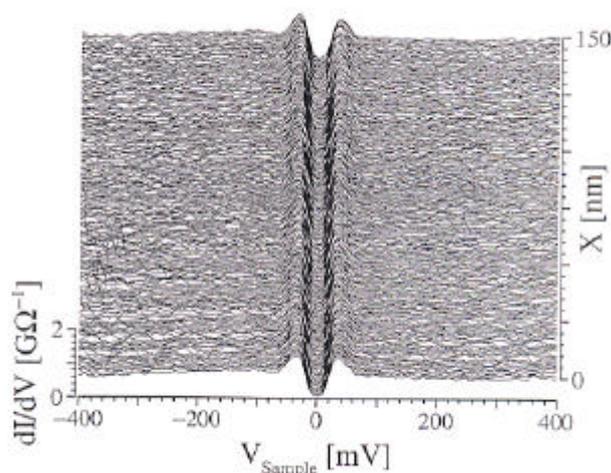


図 4. 単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 劈開表面の STM による超伝導状態 (4.2 K) でのエネルギー - ギャップの ab -面内での空間依存性。

あるいは非超伝導部分などは全く観測されない。従って、以前の結果は結晶の不完全性が原因であったと結論できる。

また、同様の結果が我々が行っている最近の AFM の実験によっても示されている。すなわち、単結晶劈開面は測定誤差 $\pm 2 \text{ \AA}$ の範囲、 $500 \text{ \AA} \times 500 \text{ \AA}$ の走査範囲内で、全く有意な表面構造を持っていないことがわかった。今後、このような AFM を用いた研究は単に結晶の質の評価のみでなく、結晶自身の物理的性質の研究にも極めて重要であると思われる、新しい研究の方向性として本研究テーマの大きな主題の一つとして今後早急に整備したい。その他、この結晶を用いた角度分解型光電子分光(ARPES)、ジョセフソンプラズマ、磁場中での電気抵抗測定などの実験に用いられ、様々な分野で磁束系の理解や超伝導機構の解明に決定的に重要な数多くの実験結果を提供する試料として用いられてきている。

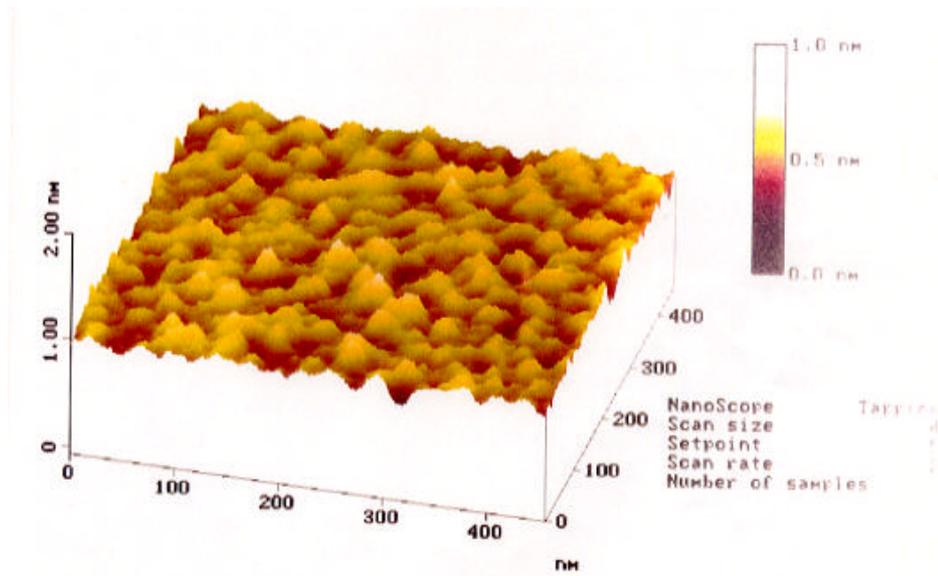


図5. 単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 劈開表面における AFM 像 (常温、吸気中)。

特筆すべきこととして、現在、約 500 mg 程度の $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 単結晶を用いて、アンダ - ド - プ領域で ($T_c=70 \text{ K}$) の中性子非弾性散乱の実験がスイス - フランスのチームとの共同研究として始まろうとしている。これは、超伝導機構解明に決定的に急用な役割を果たすものと期待されている。

これまでの研究の多くは単結晶試料がもっとも得やすい as-grown で得られるやや過剰ド - ピング領域での試料を用いた研究が主であった。高温超伝導の基礎物性研究では、特に、超伝導機構の研究に関しては様々な物性のド - ピング依存性を調べることは極めて重要である。そこで、本年度から単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ のド - ピングレベルを積極的に制御する手法として、従来通りの異なった酸素分圧を用いたアンニ - ル法に加えて新たに陰イオン (アニオン) 置換法を試みた。置換効果を

利用してド - ピングを制御する場合、 Ca^{2+} を Y^{3+} や他の 3 価の希土類イオンに置換する手法が一般に用いられているが、この方法では Y^{3+} の増加に伴い、結晶構造が不連続的に変化し、従って、電子構造が不連続的に変化することが予想され、過小ド - ピング領域での正確な物性を知ることはできない。これを改善するため、我々は新たにアニオンの置換、即ち、 O^{2-} を F^- で置換することでド - ピングレベルを制御する手法を考案した。その結果、まだ予備的段階ではあるが、酸素分圧とアンニールの制御では T_c が 70 K 以下は困難であったが、この新しい手法では T_c が 20 K 程度まで連続的に得ることができた。今後、 F^- イオンの置換をうまく制御することで完全な絶縁体に到達できるかもしれない。

GHz-THz 帯における超伝導電磁エレクトロニクス工学の基礎研究

高温超伝導体は、超伝導を担う CuO_2 面が 2 次元的層状構造を作り、それが c-軸方向に弱く結合した積層構造を持つため、超伝導状態は c-軸方向にジョセフソンのような弱結合状態にあることがこれまでの研究によって明らかにされてきている。このような高温超伝導体のジョセフソン弱結合状態は、従来の超伝導体における単一ジョセフソン接合系と比較して以下のようないくつかの点において際だった特徴を持っている。

- (a). 超伝導状態では弱結合性によってプラズマ周波数が異方性パラメータ分だけ下がる。異方性の大きな超伝導体、たとえば $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 等ではこの下がりが顕著で、プラズマエネルギーは超伝導ギャップ ($2D=80$ meV)の中に入ってしまう。従って、超伝導プラズマはダンピングの影響を受けにくく、従って、電磁波の照射によって鋭い吸収が観測される。この物質のプラズマ周波数は、ド - ピング状態で変わるが、最適ド - ピング付近で約 100-200 GHz のマイクロ波領域にある。
- (b). 高温超伝導体は、構造上、等価な原子層レベルの超伝導 CuO_2 薄膜が多数直列に積層している系と見なすことができる。超伝導層が原子レベルに薄い CuO_2 層であることから、通常のジョセフソンの式は成り立たない。これを拡張する必要がある。このような変更を行うことによって、単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ におけるマイクロ波領域の超伝導プラズマ現象が極めて良く説明されることがわかった。たとえば、超伝導プラズマ共鳴周波数は温度依存性を示し、 T_c 近傍では強くソフト化する。このようなプラズマ現象は高温超伝導で初めて明らかになった新しい現象の一つである。
- (c). そもそも超伝導プラズマ励起（厳密には縦励起）は、超伝導相への転移に際してゲ - ジ場の対称性が破れることにより現れるゴ - ルドスト - ンモードである。超伝導電子系は電荷を持つことから、この対称性の破れに伴う素励起、プラズマはギャップを持つ（アンダーソン - ヒッグス - キップル機構、Anderson-Higgs-Kibble Mechanism）。このようなギャップの発生は電弱相互作用の統一場理論

(電弱理論)であるワインバ - グ - サラム (Weinberg-Salam) 理論と空間の自由度の数は異なるが数学的構造は同等である。この理論が正しいことはこれまでの多くの実験で検証されてきているが、唯一、残された問題はヒッグズ粒子が発見されていないことである。これが検証されれば弱い相互作用と電磁気相互作用の統一理論が完成することになる。これは現在の加速器のエネルギー - 領域でも達成可能な範囲にあることから、この理論を検証することは現在の素粒子物理学における最も重要な実験の一つとして注目されている。超伝導体のプラズマを用いることによってまさにこれと同等の実験が可能である。即ち、超伝導ギャップエネルギー - は電弱理論においては Z 粒子と W 粒子に当たる。ヒッグズ粒子は超伝導の場合、即ち、超伝導のク - パ - ベアに相当する。このように、超伝導体は素粒子理論の格好の遊び場 (play ground) である。

- (d). 超伝導体のプラズマは対称性の破れによって発現する縦プラズマ (縦波) と、もう一つ、超伝導体の中を進む電磁波 (横波) としての横プラズマが存在する。これらふたつのプラズマ波は性質が大きく異なっているが、実験的な分離観測はこれまでなされていない。
- (e). 高温超伝導体は第 2 種超伝導体であるから、磁場中では磁束が超伝導体に進入し磁束状態が出現し、この磁束状態は従来の超伝導体のそれとはその性質を大きく異にする。電磁波領域、とくにマイクロ波領域では磁束の高周波におけるダイナミクスに関する重要な情報がえられる。特に、磁束線格子融解現象に伴う磁束系の状態の変化 (磁束液体 - 磁束ガラス、磁束液体 - 磁束線格子状態など) とジョセフソンプラズマの関連、柱状欠陥を導入した単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ において柱状欠陥の量とプラズマ周波数の関係、ジョセフソンプラズマの角度依存性や、また、*ab*-面内近傍におけるジョセフソンプラズマはこれまで調べられていない新しいプラズマ状態である。このように、多種多様な新しい現象が高温超伝導体のプラズマ現象の特徴としてあげることができ、これらについて実験的な解明を行ってきた。その成果は次の通りである。

(1). 縦プラズマと横プラズマの分離 (d 及び c に関連)

電磁波は真空中では横波で、自由度は電場と磁場の二つである。しかし、物質中では必ずしもそうではない。特に、電荷が存在する系においてはマクスウエルの電磁気学においては電磁場は 3 成分ある。超伝導の場合も例外ではない。その内訳は、2 成分は横プラズマ、残りの 1 成分は縦プラズマである。横プラズマは物質中を電荷を引きずって進む電磁波で通常の電磁波と同類のものである。

(c)で述べたように、この 2 つのプラズマモードのうち、縦振動モードは超伝導の相転移に伴って発生するゴ - ルドスト - ンモード (Goldstone Mode) である。これを検証した実験は過去に存在しない。また、これは電磁場と電子のク - パ - 対の場合

が、あたかも電磁場と弱い相互作用の場の統一理論に対応するシナリオが存在することに当たり、超伝導の場合、これを実験的に直接検証できることから極めて興味深い。

実験は、横プラズマと縦プラズマの分離に焦点をおいた。単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ を用い、マイクロ波周波数領域で実験を行った。縦プラズマの場合、電場はプラズマの波数ベクトル k と同一方向であるから、図 6-(A)の配置を、横プラズマ励起に関しては波数ベクトル k とプラズマ振動方向は垂直であるから図 6-(B)の配置を用いた。このような配置をとることで励起モードを制御可能である。これは、空洞共振器の特性を用いることによって初めて可能であり、他の手法、たとえば、より周波数の高い遠赤外領域の電磁波ではこのような分離は技術的に極めて困難になることは明らかである。

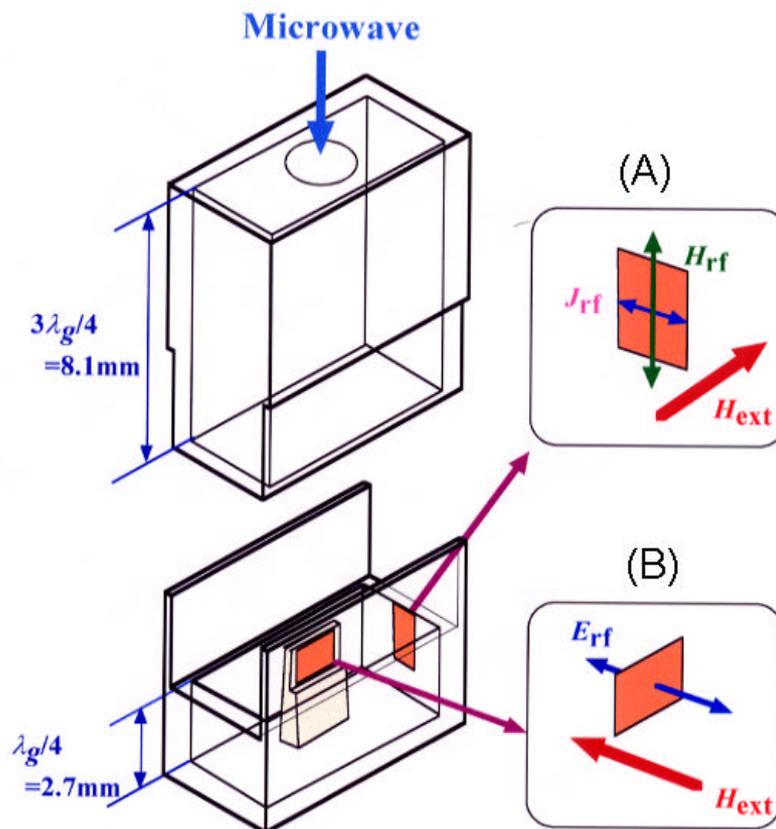


図 6. 超伝導プラズマの縦モードと横モードの分離のための空洞共振器内の試料の配置とマイクロ波の電場と磁場の関係

このような実験的な考察の上実験を行い、縦モードと横モードの分離に成功した。具体的には、縦モードは試料の大きさに依存しないが、横モードは試料の大きさに依存した共鳴磁場の変化が理論的に予想される。この違いを使って実験的に検証が

行われ、実験結果は極めて良く理論的予測と一致することがわかった。

この結果は、縦プラズマのみを実験的に観測することができたことを意味し、よって超伝導の相転移に伴う対称性の破れから発生するゴ - ルドスト - ンモ - ド (南部 - ゴ - ルドスト - ンモ - ド) を直接実験的に検証できたことになる。

(2). プラズマ共鳴モ - ドの温度依存性

ジョセフソンプラズマは磁場がゼロであっても観測される。実験的には便宜上磁場を掃引して吸収を観測するが、これは空洞共振器を用いているため、周波数掃引ができないことによる。磁場の存在が本質的ではなく、むしろ、磁場をかけることによって磁束が試料内へ進入することから超伝導プラズマがそれと結合し、むしろ磁束状態の情報を得るための有効な手段として使われる。超伝導プラズマ固有の性質を知るためにはむしろゼロ磁場での実験が重要である。

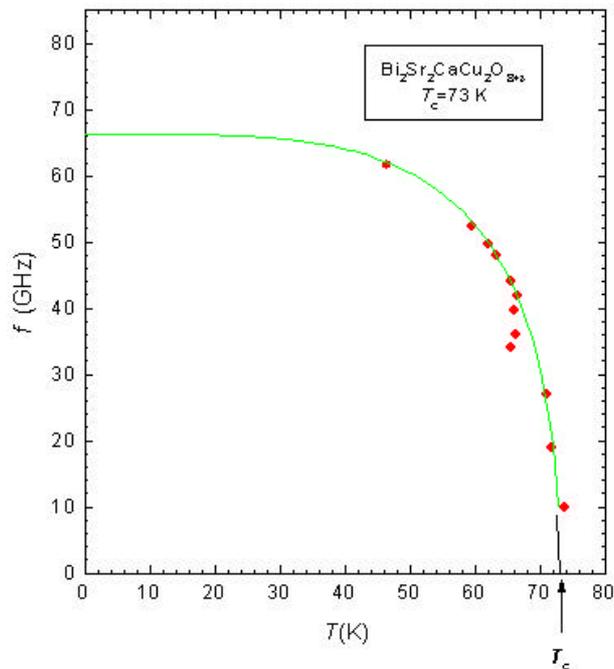


図 7. アンダ - ド - プ領域 ($T_c=73$ K) の単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ゼロ磁場における超伝導プラズマモ - ドの温度依存性。実線は 2 流体モデルを用いた理論式。

ゼロ磁場で空洞共振器を用いた実験を行うためには温度掃引方を用いる。その結果、超伝導プラズマのエネルギー - ギャップは T_c 付近で温度と共に急速に減少してゼロに落ちていく様子が観測された。図 7 はこの様子を示す。このことは、プラズマギャップを作る電荷の遮蔽効果が何らかの原因で有効性を失ってしまうためと考えられる。この点を超伝導電子が絶縁体層をトンネルする際、そのトンネル確率が

あるしきい値以下になるともはやク - ロン相互作用の遮蔽が有効でないことを示し、実験結果と一致することを示した。また、全く異なった観点からも同様の結果を得ている。即ち、 c -軸方向（超伝導面に垂直方向）に何らかの理由により準粒子に強い散乱があるとき、その散乱の効果が十分強ければもはや準粒子は c -軸方向にコヒ - レントに移動することができなくなり、 T_c 近傍では超流体成分の電子密度が消滅することに伴ってプラズマギャップは消滅していくことを示した。両者はモデルは異なるものの実験事実をよく説明する。正常状態でプラズマ励起が観測されないこととも両者の理論は矛盾しない。

超伝導機構に関して、最近、ジョセフソン結合自身が超伝導の誘発機構になっているとする新しい説が P. W. Anderson によって提唱されている。ジョセフソンプラズマは直接ジョセフソン結合状態を探ることができるから、この新しい超伝導機構に関して重要な実験的な情報を提供することができる。従って、超伝導プラズマの基礎物性としての最も興味ある側面は、超伝導状態と正常状態において、電荷の層間での移動がどのようなダイナミクスに支配されているかを知ることができることにある。この点については実験的な取り扱いを現在考察中であり、今後に残された重要研究課題の一つある。

(2). 様々な磁束状態におけるジョセフソンプラズマ共鳴現象

これまでの研究の多くは、できるだけ良質の単結晶を用い、ジョセフソンプラズマ励起固有の性質を調べる研究であった。磁場中では、すでに触れたように、磁束が超伝導体内に進入していわゆる磁束状態（混合状態）を形成する。高温超伝導体はそれ自身極めて強い異方性を有するために、磁束状態も強い異方性を示す。この点については次の研究テーマで詳細に報告する。磁束は不純物などがあると超伝導が弱められるので磁束のエネルギー - を下げることができ、従って磁束は不純物などと強く相互作用し、様々な形態の磁束状態を形成することが知られている。高温超伝導体の場合、磁束液体状は最も顕著に従来の超伝導体とは異なった状態であり、その性質を理解することは大変興味深い。本プロジェクトにおいてもジョセフソンプラズマのもう一つの側面としてこの観点から研究されてきた。

図 8 はモデル化された高温超伝導体の超伝導層 CuO_2 間での磁束の様子を示している。この場合、理論的解析によれば、プラズマ周波数は $\langle \cos j_{1,1+1} \rangle$ に比例する形で表されることから、ジョセフソンプラズマ周波数を測定することによって超伝導層間のゲ - ジ不変な位相差 j そのものを観測することができる。このことは、これまでの磁束状態の研究には無かった、微視的な磁束間の相関に関する情報が得られることから極めて重要であると考えられる。

先ず、磁束液体状態では初期の研究からこの相関は $\langle \cos j_{1,1+1} \rangle$ が磁場と温度の逆数に比例することが実験的に得られ、理論的にも磁束間の相互作用を無視した近似で

は実験と一致する結果が得られている。磁束液体状態は有効なピン止め効果も見られないことからむしろ理解が簡単である。しかし、このような状態が高温領域でどこまで適用できるかは実は自明ではなく、むしろ極めて興味深い。実験によれば、ほぼ平均場の $H_{c2}(T)$ 線付近でプラズマ共鳴の信号が消失する結果が得られている。高温側の振る舞いは、実は、上記した理論の近似が悪くなることから適用できないことは自明である。このような磁束液体状態のより正確な既述は今後の研究課題として重要な問題である。

液体状態ある磁束系は低温になると磁束線固体状態へ相転移をする。現在知られている最も欠陥の少ない単結晶においても、温度を下げていくと低磁場領域では磁束線融解現象を経由してアブリコソフ格子状態へ、また高磁場側では磁束ガラス状態へと転移する。このような低温磁束固体相での実験はこれまでほとんどなされていなかった。

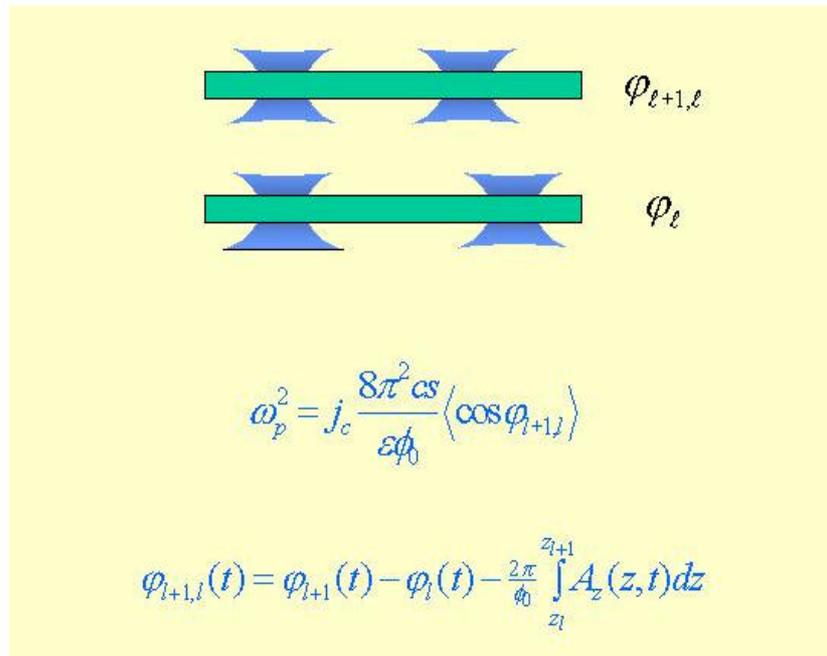


図 8. 高温超伝導体における磁場中のジョセフソンプラズマのモデル。ジョセフソンプラズマ周波数の超伝導層間の位相差 j との関係式

図 9 は周波数を少しずつ上げ、磁束液体状態から磁束固体状態へ移行するときのようにジョセフソンプラズマ共鳴が変化するかを調べたものである。マイクロ波周波数を高くしていくと磁束液体状態の共鳴磁場は低下してくるが、磁束液体 - 磁束固体への転移点になると一旦周波数依存性が無くなるが、やがて共鳴は磁束固体相へ進入してくる様子が分かる。このことは、磁束液体 - 磁束固体状態の境界ではプラズマ周波数に飛びがあることを示しており、この相境界が 1 次転移であることと矛盾しない。しかしながら、共鳴周波数の飛びは 1 次転移から予想される飛びと

は異なって驚くほど小さく、この相転移が弱い1次転移であることを表している。即ち、磁束液体状態と磁束固体状態は磁束の相関に関して大きな差異が無いことを示している。固体状態では、アブリコソフ格子の集団励起モードと結合する可能性もあるが、そのような兆候は現在までのところ見つかっていない。

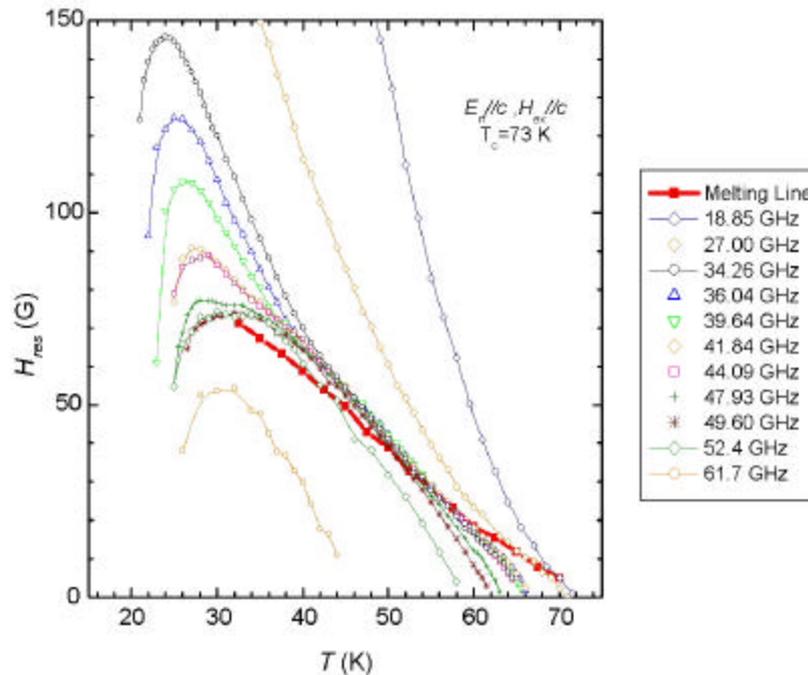


図 9. 磁束液体状態から磁束固体状態へのジョセフソンプラズマ共鳴の移行の様子。

さらに、この問題を磁束のピンングが強い系に拡張する。その一例が、重イオン照射による柱状欠陥の導入である。柱状欠陥は欠陥の大きさがイオンの種類によってほぼ一定（約 5 nm 程度）でランダムで、かつ欠陥の数を性格に制御でき、さらに、直線的な構造を持つことから、欠陥としての性質が比較的良好に理解されている。これまで、主に、 c -軸方向に試料を貫通する柱状欠陥を導入し、そのジョセフソンプラズマ共鳴の柱状欠陥の効果を調べた。その結果、柱状欠陥によって磁束液体状態のプラズマ周波数が、 $T < 80$ K ではほぼ欠陥量に比例して高周波数側へシフトする。このことは、磁束液体状態で有効な層間ジョセフソン結合が欠陥量に比例して大きく増大したと理解される。ジョセフソンプラズマ共鳴の角度変化はこの温度領域では、欠陥導入量に呼応してあたかも次第に異方性が小さくなるように振る舞う。また、磁場が ab -面内近傍において特異な構造をもったジョセフソンプラズマ共鳴の低下が観測される。この低下が始まる角度は柱状欠陥量に比例して大きくなり、照射すればするほど ab -面内から遠くはずれた角度から始まる。 $80 \text{ K} < T < T_c$

の領域ではジョセフソンプラズマ共鳴磁場は照射していない場合からほとんど変わらない。角度依存性も同様である。即ち、この領域では柱状欠陥があるにも拘わらずほとんど磁束系の層間の相関には影響がないことを示唆している。

高温超伝導体のような層状構造を持つ超伝導体の層方向に磁場をかけた時、磁束は超伝導の秩序パラメータが弱い面間がより安定なので、そこへ進入すると考えられている。これをジョセフソン磁束という。ジョセフソン磁束は超伝導面を横切る磁束のパンケキとは異なり、特異な振る舞いを示すことが予想されている。このような場合、ジョセフソンプラズマの励起も磁場が c -軸方向に賭けられたとき発生する磁束のパンケキの場合とは大きく異なることが予想される。

このような実験は、我々のグループによって最近なされ、極めて特異なジョセフソンプラズマ共鳴が観測されている。その一例を図 10 に示す。特徴的なことは以下の点である。共鳴磁場が温度で二つの領域に分離すること。これは、勿論、周波数によって変化する(図 10 参照)。周波数が高いほど分離が大きい。アンダドプの試料を用いたのはこの分離をより明確に見るためである。高温側のブランチは、一旦、磁場と共に低温側へシフトするように見えるが、やがて大きく高温側へのび、やがて強度が弱くなり次第に消滅して行く。顕著な線幅の増大が観測され

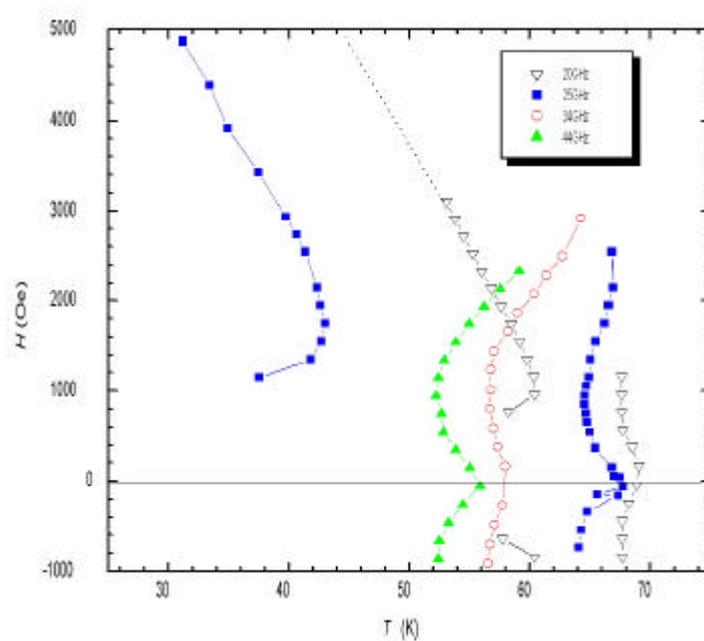


図 10. 単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ におけるアンダドプ試料 ($T_c=72\text{ K}$) のジョセフソンプラズマ共鳴の温度 - 磁場共鳴図。磁場は ab -面内方向。

ない。この消滅する付近では共鳴は明らかにゼロ磁場での値より高温側にある。即ち、磁場を加えるとより高温側へシフトすることを意味し、パンケキのある場合

のジョセフソンプラズマ共鳴の場合とは逆向きであり、全く異なった振る舞いを示すことが分かる。これは、磁場が印可されることによってジョセフソンプラズマ共鳴周波数がむしろ高くなることを意味している。このことは、ジョセフソン結合が有効的に磁場と共に強くなることを意味しており、このようなことは通常考えられない。むしろ、ジョセフソン磁束の集団励起状態とジョセフソンプラズマ励起モードとが強く結合したことによって発生する音響的モード(acoustic mode)である可能性が高い。理論的扱いも非線形であることから解明が進んでおらず、今後の重要な研究課題の一つである。低温側のブランチは磁場の掃引に対して履歴を伴う。これは高温側のブランチがそうでないことと対照的である。さらに、線幅が広いことから磁束固体相での共鳴である可能性が高い。

(3). ジョセフソン接合系のデバイスとしての展望

これまで、単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ を用いて包括的な実験を行い超伝導プラズマ、磁束状態のダイナミクスに関する総合的な研究を行ってきた。ここでは、これらの性質を巧みに利用したデバイス作成の可能性に触れてみよう。そのためには、現在のマイクロ波周波数帯である 65 GHz から 100 GHz 帯(あるいはそれ以上)まで拡張し、より広範囲の実験を行うこと、プラズマ状態とジョセフソン結合状態の電磁波特性を総合的に研究することが今後の課題となる。ジョセフソンプラズマ共鳴のド-ピング依存性や、高品質単結晶を基板として用いたホモエピタキシャル薄膜のジョセフソン接合状態における各種の電磁特性、プラズマ共鳴などの実験を行う必要がある。これによって、一方では高温超伝導体のジョセフソン接合系としての電磁波特性の純粹に物理的側面と、それを用いた応用的側面を総合的に把握することができるものと期待される。特に、後者の課題は超伝導エレクトロニクスの工学的基礎を与えるものとして重要であり、現在、薄膜作成技術では世界トップレベルであるドイツのグル-プトとの共同研究で行なっている。この方面の研究は理論的興味も高く、国内外の理論研究者との意見交換の場も必要不可欠である。

高温超伝導体の磁束状態の解明

高温超伝導体の磁場中での性質は通常の金属系の超伝導とは大きく異なっている。このため初期の研究ではその基本的な考え方に混乱があった。現在ではその違いの原因は高温超伝導体の持つ特異な超伝導パラメータ-のために発生するものと考えられており、従来の超伝導体の概念を覆すものではない。そのパラメータ-とは、コヒ-レンス長 λ が短い(λ_{ab} が 1.5-2.0 nm 程度で通常の超伝導体の 1/10 から 1/100 である)。このため、上部臨界磁場が極めて高い(10 倍から 100 倍高いため 100 T を越えるものと予想される)。伝導が 2 次元的であり、異方性が極端に大きい(典型的な物質である $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ ではド-ピング領域にもよるが異方性パラメータ- g が約 200-300 アンダ-ド-ブ領域では g はもっと大きく、オ

-バ-ド-ピング側では少し小さい)。 T_c が従来の超伝導体の数倍から10倍高く100 K領域にある。電荷密度が通常の金属の1/10であるから磁場進入長 l が長く、従ってギンツブルグ-ランダウパラメ-タ- k が極めて大きい(k は100程度)。このような状況下では、通常の超伝導体では極めて有効であった平均場近似が成り立たず、従って、超伝導揺らぎの効果を考慮する必要がある。厳密には、従来の超伝導体の上部臨界磁場 H_{c2} は平均場近似で発現するもので、さらに高次の近似では H_{c2} はもはや相転移ではなく、単なるクロスオーバーであることが分かっている。

図11はこのような高温超伝導体の磁束状態の様子を模式的に示したものである。超伝導状態は高温側から H_{c2} 付近を通過するにつれ超伝導揺らぎが発達し、次第に真の超伝導状態に近づくが、低磁場ではそれは磁束線格子融解線に至って初めて可能となる。これは1次の相転移であり、 H_M で表す。磁場が高いとそれは磁束ガラス相への転移を経て真の超伝導相へ移行する。この過程は2次転移であり、ここでは便宜上、 H_{depin} と表す。この転移は、本来、磁束のピンングがあって生じるものと考えられるから、2次の効果であると考えられることもできることがその理由である。

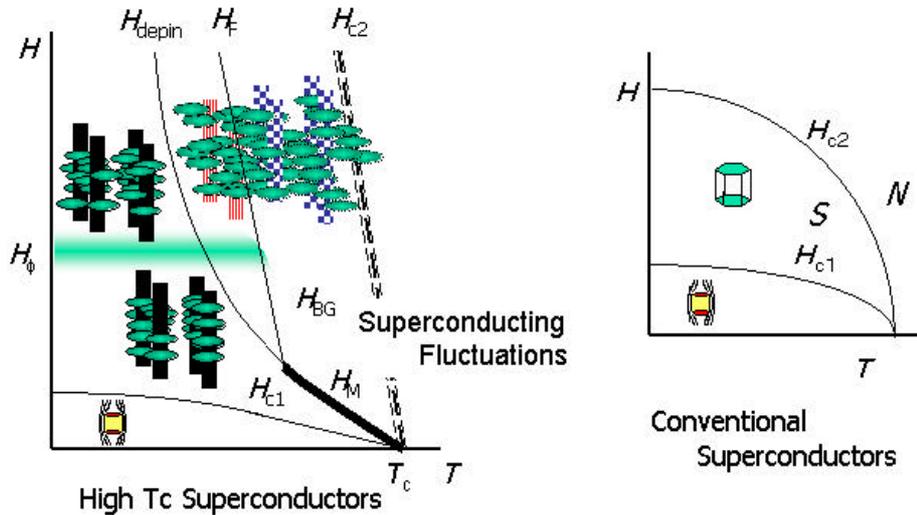


図11. 高温超伝導体の磁束状態の相図(左)。磁場は超伝導層に垂直方向。通常の第2種超伝導体の磁束状態図(右)

理想的な場合、1次転移がずっと高磁場まで続くものと考えられている。

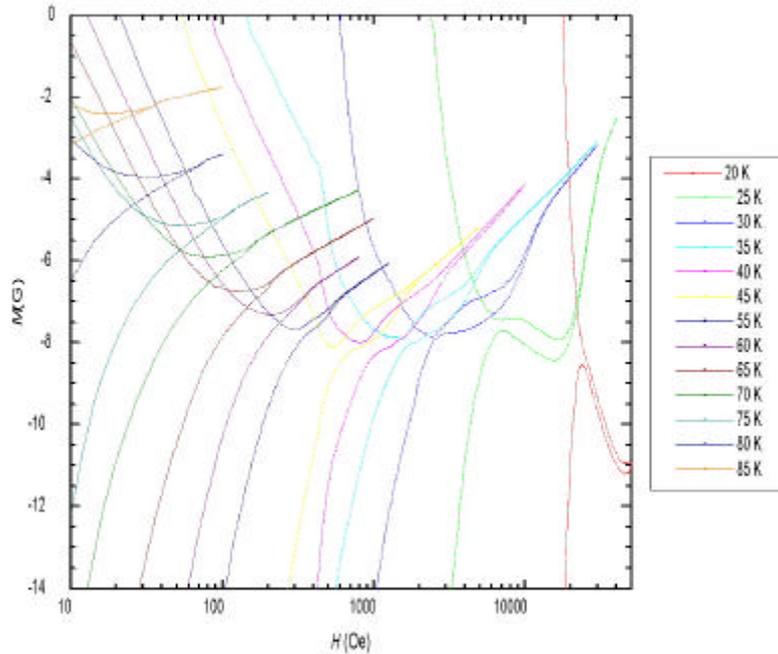


図 12. 単結晶における様々な温度における磁化曲線。温度が約 45 K 以下になると磁化が一旦閉じた後、小さいがまた再び履歴を持ち、さらに高磁場で消失することがわかる。

上部臨界磁場のスケールが通常、実験的に得られる磁場のスケールよりはるかに高いことから、この磁束状態図は低磁場部分にほんの一部に過ぎないと考えられる。より高磁場側がどのようなものであるか大変興味深いものがある。

現状では良質の単結晶といえども低温でのピン止め効果をなくすまでには至っていない。このピン止め効果を生む原因が必ずしも明らかではないが、試料中の微量の酸素欠陥などの点欠陥がその原因であろうと推測されている。その場合、集団的なコレクティブなピン止め効果が有効となろう。

このようなピン止め効果がある場合、磁束系は磁束ガラス状態へと転移することが知られている。これは一種の真の超伝導状態で、臨界電流が存在する。この磁束ガラス状態が温度上昇につれ磁束液体状態へ転移するが、この際、磁束線は液体状態へどのように転移するのであろうか？磁束線としてのアイデンティティを H_{depin} で一挙に捨て去り、ほとんど相関のないパンケキ状の液体状態へ転移するのであろうか？それとも、中間的な磁束線らしき領域が存在するのであろうか？これは最近、理論的にも大きな興味を持たれており、超伝導体の磁束状態として、また新しい磁束相の認識にもつながるため極めて価値ある問題であると考えられる。この問題に答える重要な実験結果が最近の我々の研究で生まれつつある。

実験の発端は、単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8-\delta}$ の精密磁化測定であった。特に、磁束液

体状態において、磁束ガラス転移よりも高温高磁場側での測定結果に、弱いピ - ク効果が観測されたことによる。この典型的な例を図 12 に示す。これは、通常、測定上の問題などとして無視されてきた側面も否定できない。我々は、これは試料の大きさや厚さに依存しないことから本質的であると判断した。これをさらに確認するため、試料のピン止め状況を微妙に変え、最も理想的な状態に近い試料から出発し、次第にピン止め効果が強い試料を測定することによって系統的にこの効果を調べた。試料のピン止め効果は、異なったバッチの単結晶を丁寧に調べることで、また柱状欠陥を極めて少ない量から出発し、次第に欠陥量を増やすことで系統的にこの異常を調べた。これらの結果は、 H_{depin} より高温高磁場側で磁化がわずかな履歴を持つ状態が存在し、その領域は 1 次転移が消失した後に発現すること、さらに高磁場へ行くと履歴が消失すること、等の事実が得られ、この現象が新しい磁束状態に伴うものであると強く示唆している。この結果は、詳細な電気抵抗（後述）の測定結果とも極めて整合性がよい。

図 13 はこのような測定から決定された単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 系の相図である。この図は、純粋な単結晶と柱状欠陥を磁場換算で 50 G、100 G、200 G、0.2 T 導入

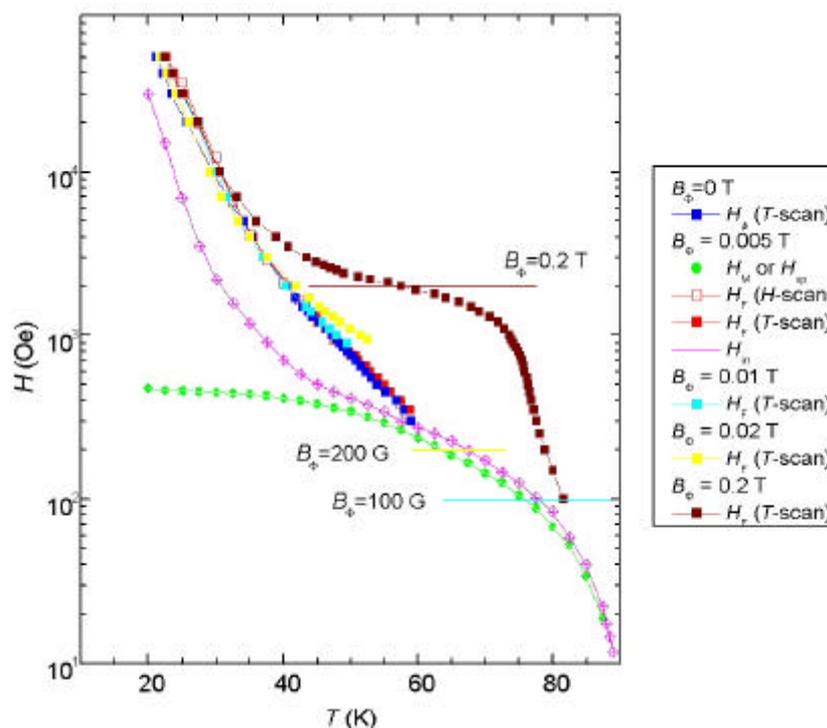


図 13. 単結晶における磁束状態の相図。柱状欠陥(50 G、 100 G、 200 G、 2000 G) を導入した試料の結果も示す。

した場合の結果である。磁束格子融解曲線は約 55 K 以下で 1 次転移から 2 次転移

へと移行し、その分岐点から新たに相境界 (H_F) が始まるように見える。この H_F 線はほぼ不可逆線 H_{irr} (これは H_{depin} に相当) と並行に高磁場側へのび、両者は 5 T までの磁場範囲内では交わることは無い。この H_F 線は柱状欠陥を増加するにつれ、次第に高温高磁場側へ移行すると同時に、磁束格子融解線との分岐点も高温側へ移行してやがて途中で 2 次転移となっていくようである。柱状欠陥量を増加していくと約 200 G 以上の試料では 1 次転移が次第にぼやけ、明確な 1 次転移は観測されない。これ以上柱状欠陥量を増加しでも状況の本質はこれ以降は変わらない。

最近、この系では表面バリア - 効果が強く、試料の端に強いピン止め領域があることから磁化や電気抵抗に特異な異常が現れ、このような状態での測定は真のバルク状態の性質を反映しないことが主張されている。実施の実験では、試料の表面をなくすことは不可能であるからこれは大変面倒な問題である。特に、磁化測定の場合は結晶全体の情報であるからこの表面効果は排除することができない重大問題である。

この面倒な問題を例外的に回避する方法がある。それはコルビノ (Corbino) 法による電気抵抗の測定である。コルビノ法とは、電流を円形板状試料の半径方向へ流し、電圧端子をやはり半径方向の 2 点からとる方法である。この方法は、試料の端が関与しないから、その効果を考慮する必要が無く、理想的な測定法であるが、一方で、電流密度が一定でないため、電流密度に依存するような非線形性のある場合は実験結果の解釈に困難が伴う欠点もある。

図 14 は、このようにして得られた単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ の電気抵抗の測定結果である。低磁場領域では電気抵抗は磁束融解曲線に到達すると突然として鋭く減少する様子がよく分かる。これは通常の板状試料での測定結果と比べてはるかに鋭い転移を示している。表面ピンング効果が排除されたため、より均一な磁束線格子融解現象をとらえることができたためと考えられる。驚くべきことはわずか数 Oe の磁場中でも明らかに磁束格子融解に伴う転移が観測されていることである。このような低磁場では磁束線間隔が大きいため、格子を作りにくいと言われており、事実、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 系では低磁場では磁束線格子融解に伴う異常は観測されていない。先に述べた磁化測定ではこのような低磁場では観測できなかったが、これは測定の感度の問題であろう。

磁束格子融解は低温になると徐々に高磁場へ移行していき、約 60 K 以下になるとやがてその異常が小さくなって、45 K では 1 次転移に対応する鋭い飛びが観測されなくなる (試料によって多少異なる)。これは、磁束線格子融解が 1 次転移から 2 次転移へと移行したものと考えられる。この 1 次転移の消失点は磁化のピ - ク効果から測定される臨界点よりずっと高温側にある。同様の試料の磁化測定の結果と比較するとこの 1 次転移が終息する点がちょうど新しい相境界が始まる点に相当して

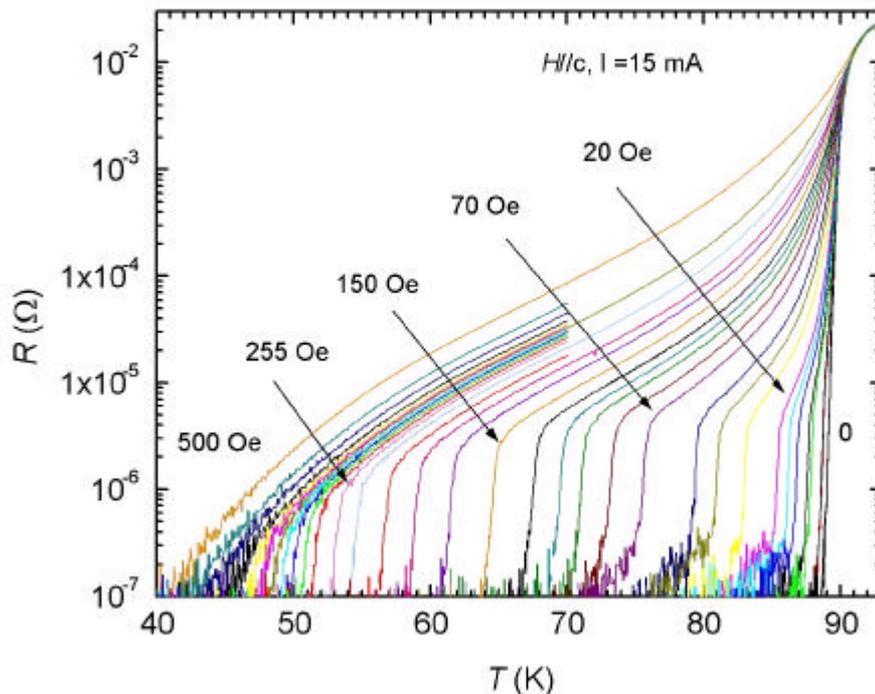


図 14. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ 単結晶におけるコルビノ法による電気抵抗。磁場は c -軸方向、電流は ab -面内である。

いる。このことは、1 次相転移が 2 つの 2 次転移へと分岐しているように見える。このような結果は本研究によって初めて明らかにされたことである。

磁束線格子融解現象は磁場を c -軸から傾けていくときどのような振る舞いをするであろうか？磁束液体状態での電気抵抗や多くの物理量は 3 次元異方的 GL (Ginzburg-Landau) スケ - リングに従うと考えられてきた。事実、実験結果もそれを支持しているように解釈されてきた。しかしながら、最近、このスケ - リングは磁束融解現象や磁束固体状態では成り立たないことが指摘されている。この問題は低温で磁束線が通常の磁束線としての振る舞いをする、磁場を傾けたとき、磁束線が超伝導層間に入り込み、一様な 3 次元異方的超伝導状態では既述できない層状性の効果が顕著に現れるためと考えられる。この効果は磁場が ab -面内にあるとき最も顕著になるであろうと予想され、これは現在進行中の研究課題であり、今後発展が期待される。

磁束線の集団的な動的な振る舞いはすでに上記したようにジョセフソンプラズマの実験で調べることができる。静的な振る舞いの微視的な観察手法は、磁性体微粒子を振りかける古典的なビッタ - 法 (デコレ - ション法) や MFM(Magnetic

Force Microscope)、STM(Scanning Tunneling Microscope)が知られている。このうち、ビッタ - 法は比較的簡単に実験が可能であることから磁束の分布を知る上で有効な手段として用いられるが、空間分解能はせいぜい $1\ \mu\text{m}$ 程度であり、しかも、空間的な磁場分布などの詳細な情報は得られない。MFM は空間分解能は高いが、磁場分布の絶対値が得られない。STM は本質的に超伝導の波動関数を観測するため、磁束の芯は観測できるが磁束の磁場分布は測定できない。高温超伝導の対称性が d-波といわれており、これを反映して磁束自身の磁場分布に構造が現れることが期待されるが、これを測定する試みはこれまでなされていない。

そこで、我々は SSQM(Scanning Squid Microscope)を開発し磁束の構造を明らかにすることを試み、この装置の開発を行っている。研究はまだ予備的ではあるが、高品質 YBCO 薄膜を用いた磁束線の観察に最近成功している。

図 15 はその一例である。このように、極めて鮮明な磁束の影像がえられる。磁束 1 個を空間で積分すると量子化磁束の値、 $2.07 \times 10^{-7}\ \text{Gcm}^2$ の値が 1%以内の誤差精度で得られる。このような高い定量性は他の測定手段では得られないこの手法の特徴である。しかしながら、装置の性能にはまだまだ不十分である。今後、さらに空間分解能を高めるなど改良が必要である。今後の課題である。

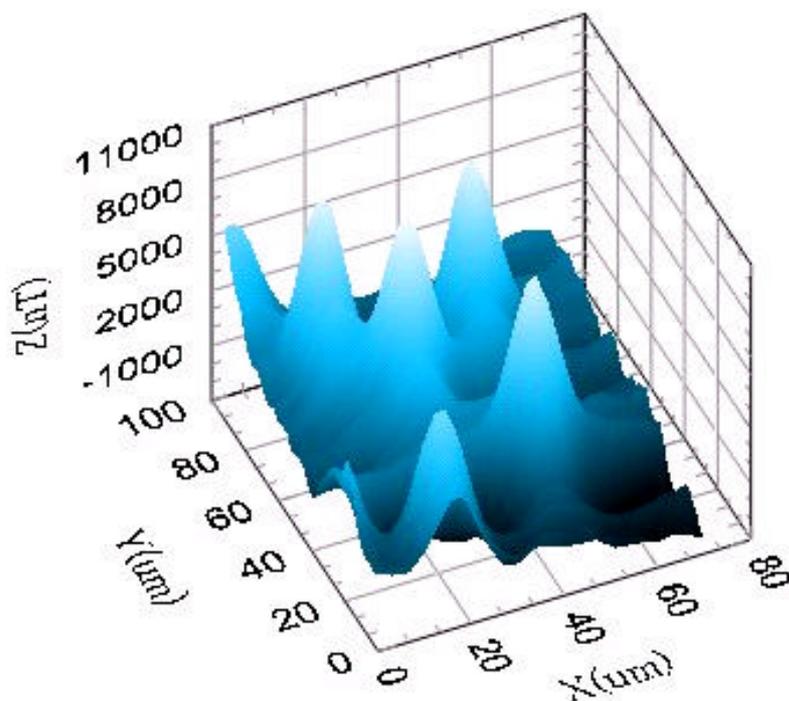


図 15. SSQM で観測された YBCO 薄膜にトラップされた磁束の一例。

超伝導体の混合状態で現れる磁束系の現象の極限環境下における静的・動的性質の研究

(1) ジョセフソンプラズマ共鳴を用いた超伝導状態および磁束状態の研究

高温超伝導体においてジョセフソン電流と電磁波の結合波であるジョセフソンプラズマの存在が明らかにされて以来、超伝導層間のコヒーレンスを探る手段としてジョセフソンプラズマ共鳴の実験が本研究グループによって精力的に行われてきた。一昨年までに異方性の強い $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ (BSCCO) 単結晶に重イオン照射を行なって柱状欠陥を導入した試料において、磁束液体相でパンケーキ状のデカップルした液体から、磁場の増加に伴って再び c 軸方向に強くカップルしたライン上の渦糸液体に変化すること(リカップリング)が明らかにされたが、その後の研究により、これらの異常は、当初提案されいたような熱力学的相転移ではなく、磁場によって起こる転移もしくはクロスオーバーであると考えられることがわかった。この磁場誘起「転移」が起こる磁場 B^* は等価照射磁場 B よりかなり小さく、ドーピングを変化させても、常に等価照射磁場の 0.2-0.3 倍にあることも明らかになった。この現象は欠陥分布のむらと関係づけられて説明される。一方、柱状欠陥密度をかなり低くした場合には、渦糸間の相互作用が原因となってリカップリングが起こると考えられる。

また、融解転移を連続的に通過するように、ジョセフソンプラズマ共鳴の詳細なデータがとられ、融解転移において共鳴周波数が急激に変化する事が明らかにされたが、その解釈に関しては、現在論争中である。ジョセフソンプラズマ共鳴現象の非線形性についての研究も開始された。

一方、技術的にも、BWO 発信器を用いることにより、周波数を 30 GHz から 180 GHz まで連続的に変化させてジョセフソンプラズマ共鳴の実験を行うことに成功した。これにより BSCCO におけるジョセフソン接合の強さの絶対値とその温度変化、 c 軸方向の準粒子伝導度などがジョセフソンプラズマ共鳴実験からも議論されるようになった。

(2) 磁束系の相転移の研究

磁束格子融解線が明確に定義できる良質な非双晶 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (YBCO) 単結晶を作製し、30 T の高磁場領域まで渦糸系の相転移の相図を調べた。その結果、今までに渦糸固体状態において、数テスラから 10 テスラ程度の磁場で渦糸格子状態と渦糸グラス状態を分ける境界があることを見出した。本年度は、さらに、高圧酸素処理や還元処理を行い、様々なキャリアドーピングの良質単結晶を作成し、おのこのドーピングの試料について、同様の相図を作成した。特に、アンダードープ領域では、これまで全く発見されていなかった新しい相図が作成され、今後の展開が楽しみになった。また、結晶中に導入された弱い不規則性が渦糸相図

に与える効果を調べるために電子線照射を行い、電子線照射により導入されたランダムな点欠陥が渦糸液体の揺らぎを増加させることを明らかにした。また、固体相においては、導入された点欠陥によって渦糸グラス状態が安定化されることが分かった。これらの結果は、渦糸構造の相転移(規則 - 不規則転移)に基づいた最近の理論によってよく説明できる。

異方性の非常に大きな BSCCO において、磁場を超伝導面から傾けることにより、新たな磁化異常が現れることを明らかにした。この異常より低磁場では一様に傾いた磁束格子が不安定化し新たな磁束状態が生じていると考えられる。また、面内磁場の影響により磁束転移(磁束格子融解転移・ピーク効果)の角度依存性が単純な異方的 GL 理論とは大きく異なることを示した。また、高圧下では、磁束転移が高磁場にシフトすることを見いだした。これは、圧力印加により系の異方性が小さくなった為と考えられる。

(3) 磁束のダイナミクス・内部電子状態に関する研究

磁束液体相における磁束系のダイナミクスを(1)直流伝導度測定(2)局所磁化とその揺らぎ測定によって研究した。特に、平成10年には、局所プローブの利点を生かし、揺らぎの空間相関を測定することに成功し、また、それらの温度依存性を系統的に調べることに成功した。その結果は、少なくとも Bi₂Sr₂CaCu₂O_y 系において、プラスチックフローと呼ばれる運動形態が存在する事が確実となった。

一方、磁束のダイナミクスは磁束コアの電子状態と密接に関連している。Bi₂Sr₂CaCu₂O_y 系において、初めて磁束融解転移をまたいで、高周波(40-100 GHz)伝導度を測定した。その結果、表面リアクタンスのみ、磁場依存性が、磁束融解転移やピーク効果磁場で顕著な異常を示す事が発見された。観測された現象は、融解転移磁場あるいは次元クロスオーバー磁場でかなりの対破壊が起こっていると考えないと解釈できない。このように、磁束の状態が電子状態に大きな影響を及ぼしていることは、これまで、知られていなかったことである。これらが、d 波の vortex の構造と関係した新しい現象なのか否か、極めて興味をもたれる。

電子状態とボルテックスのダイナミクスの関連に関して、このほかにも興味深い発見があった。オーバードープ Tl:2201 では磁場中で電気抵抗は急激に変化し、あたかもピン止めの強い従来の低温超伝導体と類似しているように見えるが抵抗転移磁場の温度依存性は BCS 理論とは大きく異なっている事がこれまでよく知られていた。この謎を解くため、マイクロ波吸収とコラムナ欠陥導入による抵抗転移の変化を測定した。その結果直流抵抗測定で定義される転移磁場以上でもマイクロ波測定では超伝導状態にあるということを見いだした。さらにコラムナ

一欠陥により抵抗転移温度は大きく高磁場側にシフトする事が分かった。これらの結果は Tl:2201 の抵抗転移が上部臨界磁場による物ではなく渦糸の融解によるものであることを示している。

(4) 直接観察による磁束の微視的構造の解明

磁束の微視的構造を明らかにする目的で、走査型トンネル顕微鏡による磁束観察を行うため装置の整備を進め、4.2 K、7T の磁場中で Bi₂Sr₂CaCu₂O_y の原子像を観察した。今後、磁束系の相転移の研究に用いられた YBCO 単結晶を利用して磁束観察を行い、マクロな測定から得られた磁束構造との対応を明らかにしていく予定である。走査型ホール素子顕微鏡を開発し、磁束格子融解転移の観察を行った。さらに分解能の向上を目指して改良を行っている。

(5) 高温超伝導材料の臨界特性に関する研究

液体窒素温度で次回特性の優れた高温超伝導線材を実現するための基盤研究として、Tl-1223 相の新しい作製プロセスを開発し、組織と臨界特性との関連を探った。Pb を高濃度に添加した Bi 系超伝導体で、ac 面に平行に形成される面状欠陥が、実際に面状ピン止め中心として働いていることを、磁場 - 磁化曲線の角度依存性の測定から確認した。

(類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ)

国内的には、本プロジェクトの研究課題に関して、本プロジェクト構成員のアクティビティーが国内の実験的研究のかなりの部分になり、その意味で、本プロジェクトが、国内のアクティビティーを断然リードしていると自負している。

一方、国際的には、このプロジェクトの課題に関して、諸外国でもかなり質の高い研究が行われているが、個別の成果についてはオリジナリティーの高い結果が本プロジェクトからいくつも出されている。その意味で、本研究課題とそのアクティビティーは、国際的にも十分に認知されているとあってよい。以下に、具体的な記述をおこなう。

(1) 単結晶育成について

極めて良質の Y 系非双晶単結晶を作成し、臨界点が 27 T をこえる試料の作成に成功している。また、Bi 系単結晶を世界各地の研究機関に提供するという形で共同研究を行っている。

(2) 平衡状態の相図に関して

良質の Y 系において、30 T の高磁場まで、抵抗・磁化測定を行い、平衡状態の相図を議論した仕事は世界的にも例がない。従って、それらの照射効果、ドーピング効果は、もちろん世界でも本チームのみが行っている。

(3) ダイナミックな相図について

局所プローブを用いた局所ノイズ測定は、世界でも本チームのみが行っており、このような方法で、初めて、ダイナミックな相図の実験的議論が可能になった。この仕事は、これまで高温超伝導体の混合状態でノイズ測定を行ってきた世界のいくつかの研究グループや、計算機シミュレーションのグループの間で反響を呼んでいる。

(4) 磁束のダイナミクス並びに電子状態との関連について

混合状態の交流応答に関しては、国内外で先駆的な仕事がいくつかあるものの、基本的理解もなされていない。このような中で、本チームによる、磁束格子融解転移に伴う大きな対破壊の発見は、磁束系の秩序と微視的電子状態の関連を具体的に指摘した初めての例であり、実際、既に世界でも一部には大きな反響を与えている。

また、最近の本チームによるホール効果の仕事も、世界で反響を呼んでいる。

(5) ジョセフソンプラズマ共鳴について

本チームは、この現象の発見者の一人であり、現在に至るまで、この現象の理解に対して、世界的に先駆的な成果を出し続けており、これは本チームの研究者が数多くの招待講演をこなしていることでもよく理解できよう。

このように、世界の研究動向の中で評価しても、本プロジェクトでは、多くのオリジナリティーある、質の高い成果が得られ続けているとあってよい。

(今後の研究の予定、研究成果の見通し)

(1) 磁束のイメージングに関して

磁気光学効果を用いた局所磁場測定装置の改良を行う。すなわち、通常の磁気光学効果を用いた局所磁場測定装置では、顕微鏡の視野全体に光を照射し観察を行う。この場合、ある場所での光強度が他の場所からの散乱光に影響され、コントラストの悪い像になってしまう。この問題を解決するため、レーザー光を光源とし1 μm 程度に絞り、この光を走査することにより局所磁場に対応する像を得るように改良を行う。さらに、光学系を共焦点とすることにより位置分解能を一層向上させる。また、現在改良中のホール素子顕微鏡に $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ 以下の有効面積を持つホール素子を取り付け、一分解能の一層の向上を目指す。これらの改良により単一磁束の観測を可能とする。また、この装置を用いて、磁束固体-液体の共存領域に見られる空間的な不均一の起因を明らかにする。

(2) 平衡状態の相図に関して

上記研究成果(3)のアンダードープ非双晶 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶の渦糸相図を詳細に調べる。具体的には、電気抵抗のヒステリシスと磁化の測定から渦糸格子融解線を、電流 - 電圧測定などから渦糸グラス転移線を決定し得られた相図を議論する。

また、オーバードープ領域の結果も含め、重イオン照射により柱状欠陥を導入した非双晶 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶の渦糸相図を調べる。特に、マッチング磁場 B とピーク効果などの磁化異常との関係、相転移線に与える影響などに注目して研究を行う。これにより、単結晶の渦糸相図を系統的に理解する。

また、高温超伝導体や有機超伝導体以外の興味有る物性を示す超伝導体の磁束状態の解明を目指す。特に、 p 波超伝導体であると考えられる Sr_2RuO_4 における自発磁化の測定、磁束状態の解明を行う。

(3) ダイナミクスに関して

局所プローブによる局所ノイズ測定に関して、様々な向き、配置のプローブに対して同様の測定を行い、動的相図を詳細に実験的に作成する。そのためには、照射効果も有用である。また、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 単結晶において、同様の局所測定を行うために、高磁場まで使用可能な局所プローブを開発する。

(4) 電子状態に関して

i) 低温 STM による磁束コアの観察

1998 年度に導入された低温磁場中トンネル顕微鏡を用いて渦糸の直接観察を行い、渦糸構造の相転移を調べる。また、渦糸内部の電子状態密度の測定を行い、波動関数の対称性や渦糸内部の電子状態に関する研究をおこなう。

ii) 混合状態の高周波応答

また、磁束融解転移にともなう、巨大対破壊効果に関して、詳細な周波数依存性を測定し、交流応答の中から、磁束の運動の寄与と対破壊効果の寄与を定量的に分離する。また、ドーピングを変化させた系で実験を行い、擬ギャップの有無と超伝導状態のフラックスフローの対応の定量的比較を行う。

iii) Tl:2201 系の超伝導転移

Tl:2201 の輸送現象の研究を継続する。特に、マイクロ波による表面インピーダンスの測定から、渦糸の電子状態についての知見を得る。さらに電子線照射により準粒子の平均自由行程を変化させて抵抗転移の研究を行う。

iv) 希釈冷凍機温度における熱伝導度の研究、様々な超伝導体での磁束状態の解明

ベクトル磁石中で希釈冷凍機中を回転させることにより超伝導体に対し様々な方向に磁場をかけて熱伝導度を測定する。これにより高温超伝導体、重い電子系、Ru 超伝導体等の s 波以外の対称性を持つ超伝導体の超伝導ギャップの方向依存性を明らかにする。さらに磁場中における超伝導の対称性の変化についても研究を行う。

(1) ジョセフソンプラズマ共鳴に関して

- i) 柱状欠陥を導入した $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+y}$ における磁束状態の角度依存性
柱状欠陥の方向を制御することにより、ピン止めポテンシャルエネルギーそのものを制御することが可能であることが明らかとなってきた。そこで、斜めに重イオンを照射した試料におけるジョセフソン・プラズマ共鳴および局所磁化測定や、印加磁場の方向を変化させた状況における磁束状態を明らかにする。
- ii) 周波数連続スイープの実験装置によるジョセフソンプラズマ共鳴の研究を継続し、以下の事柄を明らかにする。
 - a) ゼロ磁場における高温超伝導体のジョセフソン接合の強さと温度変化
 - b) c 軸方向の準粒子散乱時間の測定
 - c) 渦糸格子融解に伴うジョセフソン接合の変化
 - d) 第 2 ピーク磁場におけるジョセフソン接合の変化
- iii) 高温超伝導体のメサ加工試料の作成
 - a) メサ加工により試料の c 軸方向に大きな電流を流すことが可能となる。これにより高温超伝導体の擬ギャップの温度依存性やドーピング依存性の系統的測定を行う。
 - b) さらにジョセフソンプラズマを用いた電磁波放出の実験を行う。

以上、これまでの主な研究成果を述べた。個別の問題に関しては文献を参照していただきたい。

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

“*Scanning Tunneling Spectroscopy of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$* ”, S. Kaneko, N. Nishida, K. Mochiku and K. Kadowaki, *Physica* **C298** (1998) 105-114.

“Effect of Pressure on The Superconducting Properties of $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ ”, G. Oomi, H. Takeya and K. Kadowaki, *Rev. High Pressure Sci. Technol.*, **7** (1998) 592-594, (Proceedings of the AIRAPT-16 & HPCJ-38, Aug. 25-29, 1997, Tanabe, Kyoto, Japan).

“*Pseudogap Precursor of the Superconducting Gap in Under- and Overdoped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$* ”, Ch. Renner, B. Revaz, J.-Y. Genoud, K. Kadowaki and O. Fischer, *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) 149-152.

“Observation of The Nambu-Goldstone Mode in High Temperature Superconductor $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, K. Kadowaki, I. Takeya and K. Kindo, *Europhys. Lett.* **42** (1998) 203-208.

“Precise Magnetization Measurements of Single Crystalline $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”,

K. Kadowaki and K. Kimura, Phys. Rev. **57** (1998) 11674-116.

“Moving Vortex States Studied by Current Flow in Single Crystal $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, J. Mirkovic, K. Kimura and K. Kadowaki, Phys. Rev. Lett. **82** (No.11) (1999) 2374-2377.

“Evolution of Magnetic and Superconducting Fluctuations with Doping of High- T_c Superconductors”, G. Blumberg, M. V. Klein, K. Kadowaki, C. Kendziora, P. Guptasarma and D. Hinks, to appear in J. Phys. Chem. Solids, (Proceedings of the SNS'97 (Spectroscopy in Nobel Superconductors), Sept.14-18, 1997, Cape Cod, USA).

“First-Order Vortex Lattice Melting Transition in Tilted Magnetic Fields in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, Kazuhiro Kimura and Kazuo Kadowaki, “Advances in Superconductivity (X)”, p107-110, Springer Verlag, (Proceedings of the 10th International Symposium on Superconductivity, Gifu, Japan, October 27-30, 1997).

“Temperature Dependence of Collective Josephson Plasma Modes in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, K. Kadowaki, T. Wakabayashi and D. Sugawara, “Advances in Superconductivity (X)”, p111-114, Springer Verlag, (Proceedings of the 10th International Symposium on Superconductivity, Gifu, Japan, October 27-30, 1997).

“*Destruction of The Fermi Surface in Underdoped High T_c Superconductor*”, M. R. Norman, H. Ding, M. Randeria, J. C. Campuzano, T. Yokoya, T. Takeuchi, T. Takahashi, T. Mochiku, K. Kadowaki, P. Guptasarma and D. G. Hinks, Nature **392** (1998) 157-160.

“*Observation of The Low Temperature Pseudogap in Vortex Cores of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$* ”, Ch. Renner, B. Revaz, K. Kadowaki, I. Maggio-Aprile and O. Fischer, Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 3606-3609.

“*Superconducting Plasma Phenomena in Josephson Coupled High T_c Superconductors (I)*”, Kazuo Kadowaki, Itsuhiro Kakeya, Ryo Nakamura, Tetsu Wakabayashi, Daomon Sugawara, and Naruki Kataoka, Spectroscopy of Superconducting Materials, Chapter 17, pp245-277, (Proceedings of the 215th American Chemical Society National Meeting, March 29-April 2, 1998, Dallas, Texas, USA).

“Collective Plasma Modes in Superconductors and Dynamical Properties of Quasiparticles in High T_c Superconductors”, Kazuo Kadowaki, Ryo Nakamura, Itsuhiro Kakeya, Tetsu Wakabayashi, Daimon Sugawara and Naruki Kataoka,

(Proceedings of the NATO-ASI on Materials Science, Fundamental Properties and Future Electronic Applications of High Tc Superconductors, September 14-25, 1998, Albena, Bulgaria).

“Dynamical Resistivity Behavior above and below Bortex-Lattice Melting Transition in Single Crystals $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, J. Mirkovic, K. Kimura and K. Kadowaki, “Advances in Superconductivity (XI)”, pp. 575-578, (Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity, Fukuoka, Japan, November 16-19, 1998).

“Small-angle Neutron Scattering Observation of Vortices in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ ”, J. Suzuki, N. Metoki, S. Miyata, M. Watahiki, M. Tachiki, K. Kimura, N. Kataoka and K. Kadowaki, “Advances in Superconductivity (XI)”, pp.553-557, (Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity, Fukuoka, Japan, November 16-19, 1998).

“A Systematic Study of Vortex States by Means of Josephson Plasma Resonance”, I. Kakeya, R. Nakamura and K. Kadowaki, “Advances in Superconductivity (XI)”, pp.609-612, (Proceedings of the 11th International Symposium on Superconductivity, Fukuoka, Japan, November 16-19, 1998).

“*Observations of Suppression of Static and Dynamic Disorder in $\text{Bi}_{2.15}\text{Sr}_{1.85}\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ Crystals by Columnar Defects*”, S. L. Lee, C. M. Aegerter, S. H. Lloyd, E. M. Forgan, C. Ager, M. B. Hunt, H. Keller, I. M. Savic, R. Cubitt, G. Wirth, K. Kadowaki and N. Koshizuka”, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 5209-5212.

“*Superconducting Gap Anisotropy with Doping and Quasiparticle Interactions: A Doping Dependent Photoemission Study*”, J. Mesot, M. R. Norman, H. Ding, M. Randeria, J. C. Campuzano, A. Paramchanti, H. M. Fretwell, A. Kaminski, T. Takeuchi, T. Yokoya, T. Sato, T. Takahashi, T. Mochiku and K. Kadowaki, Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 840-843.

他 41 件