

産業技術総合研究所
エレクトロニクス研究部門
超伝導材料グループ
主任研究員

田中 康資^(*)

「最高性能高温超伝導材料の創製」

研究期間：平成10年12月1日～平成15年11月30日

(*)故伊原英雄研究代表者に代わって、平成14年3月29日以降、田中康資氏を研究代表代行者とし当該研究課題について継続して研究を実施した。

目次

1 . 研究実施の概要	1
2 . 研究構想	4
3 . 研究成果	
3 . 1 チーム全体の成果	7
3 . 2 材料開発	10
(1)研究成果の内容	10
TiCu-1223薄膜作製法の開発	10
$T_c > 130\text{K}$ のTiCu-1223バルクの開発	17
T_c の圧力依存性	22
常圧合成Ti-1223、Ti-1234へのフィードバック	23
Cu系薄膜超伝導体の開発	24
ナノドットによる柱状欠陥の導入	25
酸素17の新しい導入法の開発	26
(2)得られた研究成果の評価及び今後期待される効果	26
3 . 3 物性評価	32
(1)研究成果の内容	32
結晶学的に非等価な CuO_2 面の積層	32
選択的ドーピング	33
オーバードープでの高い T_c の維持	34
T_c の CuO_2 面数依存性	35
二つの T_c	36
成分制御	38
多成分型超伝導体の異方性	39
反強磁性秩序と超伝導の共存	41
多成分型超伝導	44
(2)得られた研究成果の評価及び今後期待される効果	45
4 . 研究実施体制	
(1)体制	48
(2)メンバー表	49
5 . 研究期間中の主な活動	53
6 . 主な研究成果物、発表等	54
7 . 結び	73

1. 研究実施の概要

このプロジェクトの成果は、(1) 90K動作が可能な $(\text{Cu}_x\text{Tl}_{1-x})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (TlCu-1223)の薄膜の薄膜作製技術の確立、(2) 130K以上の超伝導転移温度(T_c)をもつバルクのTlCu-1223の開発と T_c 向上の機構解明、(3) 多層型高温超伝導体の科学の発見である。

研究の基本方針と目標は、高温超伝導体の実用への道を開くための材料開発であった。そのために、高温超伝導体中でもっとも優れた性質をもつ材料を物性評価の立場から追及した。物性評価の立場から、実用上の優位性を示す指標は、 T_c と、不可逆磁界(H_{irr})である。(超伝導材料は、 T_c 以下の温度、 H_{irr} 以下の磁場でその機能が発現する。) $T_c > 130\text{K}$ のTlCu-1223バルク材料の開発はその成果である。

また、最終的な「工業製品」を念頭におき、高温超伝導体の「市場価値」を判断できる薄膜材料の製造技術の確立を目指した。最終的な「工業製品」としては、移動体通信用マイクロ波フィルターを想定し、「市場価値」の判断材料としては、表面抵抗(R_s)を選択した。その成果が、TlCu-1223薄膜である。プロジェクトの設定目標であった高性能(低 R_s に相当)を証明する材料開発の域から脱し、フィルター回路のテストへの提供を可能にする1インチ両面薄膜製造法の確立まで、研究は進展した。

プロジェクトの計画段階で、高 H_{irr} を達成するために、指導原理として「超伝導波動関数制御」を通じた、低い超伝導異方性パラメーター()、d波からs波へ波動関数の変換(d+is波の達成)を提案した。この指導原理の探求のために、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 等の「従来の高温超伝導体」とは異なる物性を示す、オーバードープの $\text{Cu}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ (Cu-1234)に物性研究を集中させた。この物質での特異な物性は、超伝導の性能向上に結びついていると考えた。この研究の成果が「多層型高温超伝導体の科学の発見」である。Cu-1234を代表とする、 $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Tl-1223)、 $\text{Cu}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Cu-1223)、 $\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ (Tl-1234)、 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ (Hg-12(n-1)n)(ただし、 $n > 3$)、 $\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n(\text{O}_{1-y}\text{F}_y)_2$ (02(n-1)nF)(ただし、 $n > 3$)らは、単位胞に複数種の結晶学的に異なる CuO_2 面が存在する「多層型高温超伝導材料」として一つのファミリーを構成することを提言した。

130K以上の T_c をもつTlCu-1223の発見は、プロジェクトの開始直後にえられた大きなブレイクスルーであった。この発見は高圧合成技術を駆使した結果得られた。この発見を契機にTl-1223で世界最高の T_c をもつHg-1223($T_c=135\text{K}$)に匹敵する $T_c > 133.5\text{K}$ を達成し、Tl-1223のもつ性能を世に示した意義は大きい。も14程度であり、100K以上の動作温度を確保できる超伝導線材が開発できる潜在能力を証明した。また、 T_c を極める過程で、残留炭酸基の高感度検出法、原料から炭酸基を完全に除去する方法が開発され、この方法によりTl-1223、Tl-1234の反応温度が著しく下げられることを見出した。常圧合成手法を用いても、銀シース線材内での直接反応によるTl-1223合成が可能で、一軸配向できることも示し、化学的な性質も線材化に適していることをこの

プロジェクトで証明した。これらの材料開発は産総研グループが中心に、渡辺グループの支援を受けて進められた。

$T_c > 133.5\text{K}$ のTl-1223については、 T_c 向上の機構解明が、物性研究の立場からなされた。ディスオーダーが著しく抑えられた理想的な CuO_2 面が実現でき、この面が T_c を担うこと、Tlの価数を高く保つことによって、複数の CuO_2 面のドーピングレベルが均一化することなどがその起源であると特定された。 $T_c > 133.5\text{K}$ のTl-1223は、「多層型高温超伝導体」の特徴を捉え、それを良く制御したことによって実現したことを意味している。この研究は、産総研グループ、寺田グループ、浜田グループ、北岡グループ、渡辺グループが、連携して行った。

バルクのTl-1223の研究は、主にその化学的な性質の理解が、薄膜作製技術の確立に100%還元された。薄膜作製においては、 $(\text{Cu}_x, \text{Tl}_{1-x})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (TlCu-1223)で、 $x < 0.2$ の作製法の確立を行った。この組成の薄膜は一般的にはTl-1223と記述されるが、 $x > 0.1$ の組成での特許を産総研が保有していること、電荷供給層のCuが性能へ寄与していることを明確にするときには、TlCu-1223(またはCuTl-1223)との表記を使う。Tl-1223は異方性が低く、高温(90K以上)高磁場(おおむね1T以上)で性能が期待できる材料であるが、 10mm^2 以上の面積の薄膜は作製が難しく、その作製の報告例は稀有であり、世界的に見て確立しているとはいえない。我々は、 $(\text{LaAlO}_3)_{0.3}(\text{Sr}_2(\text{Al}, \text{Ta})\text{O}_6)_{0.7}$ (LSAT)を基板に選択し、 $T_c = 108\text{K}$, 90Kにおける $R_s = 500\ \mu$ (10GHz換算)の薄膜を作製した。さらに1インチ両面の作製法を確立した。我々が開発した薄膜の磁束捕捉力は非常に大きく、厚み500nmの超伝導薄膜で、0.5mmの厚みの基板ごと常伝導磁石で吊り上げることができる(液体窒素冷却)。このことは薄膜の高性能を示す事実として特記すべき事項であろう。

90K以上の動作温度が確保できる超伝導体は、Cu系、Hg系、Tl系など限られるが、実用に展開できるだけの十分な合成法の研究がなされているのは、Tlを含む系だけであり、その研究がこのプロジェクトでなされたことを意味する。Tl系では、異方性が100以上と高い(高磁場下での性能がTl-1223に対して著しく劣る。)が合成法がTl-1223より容易なTl-2212薄膜が実用に供されている。しかし、Tl-2212の薄膜でさえも実用に耐えられる性能を出せるアクティビティは我々を除くと世界に2~3箇所しかない。本プロジェクトで確立した手法はTl-2212にも当然適用でき、Tlを含む高温超伝導体の実用化に貢献できるものである。この研究は、材料開発を産総研グループ、高周波物性評価を大嶋グループが担当し、薄膜性能向上に関しては、立木グループからの理論的なアドバイスもうけておこなった。

材料開発と並行し、材料自身の性質を探索した。Cu-1234を代表とする「多層型高温超伝導体」の科学は「従来型高温超伝導体」とはその骨組みが異なり、だけでは性能の比較や予測ができないことがプロジェクトで明らかにされた。

結晶学的に異なる CuO_2 面ごとに個別にドーピング量が定義される選択的ドーピングの現象と機構が、材料開発(産総研グループ、渡辺グループ)、NMR(北岡グループ)とバンド計算(浜田グループ)の結果を集大成し明らかにされた。研究の中心であっ

たCu-1234では、単位胞に4枚あるCuO₂面は電荷供給層に近いOuter Plane (OP)と電荷供給層からはなれたInner Plane(IP)の2種類に分類される。Cu-1234では、平均的なドーピング量を著しく増加させても、118Kにちかい高いT_cが維持されることがHall係数とT_c、材料開発の点から系統的に(渡辺グループ)明らかにされていた。この現象は、選択的ドーピングの考え方により、“IPのドーピング量が一定に保たれ、T_cを担っているため”と解釈した。IPとOPの間のドーピング量が著しく異なる場合には、OP固有のT_cが、T_{c2}として、T_cより低温で観測されることを、北岡グループがはじめて見出した。T_{c2}はNMRのような微視的な物性のみならず、比熱や磁束格子融解磁場(B_m)というマクロな量にも影響を及ぼしていることも明らかにされた(産総研グループ)。また、アニールによる酸素量の調整により、T_{c2}の出現が制御できることが、NMR、ラマン分光や磁束格子融解磁場(産総研グループ、北岡グループ)から明らかにされた。NMRの実験の立場から見ると“IP上の超伝導ギャップ”、“OP上の超伝導ギャップ”とギャップを空間的に分離して理解するのが便利であるが、バンド計算の上からはIP由来のバンドとOP由来のバンドというk空間で分離しているそれぞれのバンドの上のギャップという描像もとれる。バンド描像をとると、多層型高温超伝導体は典型的な多バンド超伝導体である。バンド間の相互作用が著しく弱い(BCS対のホッピングが小さい)ときにしかT_{c2}の存在は許されず、そのような超伝導体はいまだかつてなかった。T_{c2}が存在できるという事実は、「多層型高温超伝導体」では、これが実現しているということの意味する。このような系の超伝導は「多成分型超伝導」と位置づけられることをプロジェクトでは明らかにした。「多成分型超伝導」では、成分ごとにコヒーレンス長や超伝導キャリアの有効質量が定義されるために、単一成分のGL理論やLawrence-Doniachモデルは破綻し、性能予測が単一のにより可能である「従来型高温超伝導体」の延長線上に無いこともあきらかにした。は上部臨界磁場の温度依存性、バンド計算(浜田グループ)、トルク測定(渡辺グループ)、B_mから導出され、それぞれ多バンド超伝導体の立場にたって相互に関連つけられた。性能指数としてのはB_mから逆算したものが妥当であるとの結論も得た。

単位胞にCuO₂面を9枚まで増やした「超多層型高温超伝導体」でも高いT_cが保たれる現象(産総研グループ)、CuO₂面を5枚にしたときに現れる反強磁性秩序と超伝導の共存系の開発と発見(渡辺グループ、北岡グループ)、バンド間位相差ソリトン(*i*-soliton)の理論的発見(産総研グループ)の重要な発見が、「多層型高温超伝導体」の研究でなされた。

プロジェクトでは、タリウム用実験室の改造、薄膜作製装置、電子ラマン分光装置、高H_{irr},高J_c測定装置、バンド構造計算機、比熱測定装置、薄膜X線回折装置、磁気特性測定システム(産総研グループ)、高磁場下異方的特性測定装置(渡辺グループ)、超伝導特性計算装置(浜田グループ)、高周波物性評価装置(大嶋グループ)が導入され、それぞれフル稼働で研究に貢献した。

2. 研究構想

高温超伝導体の実用化への道をつけるため、Y系やBi系に代わるあらたな高温超伝導材料を開発し、その工業的な作製法を開発するためにこのプロジェクトは企画された。そのために、材料開発と作製法を産総研グループが全面的に担当し、他の6グループは物性評価の立場から支援する体制を敷いた。ただし、材料開発に関しては、物性評価用としてのバルク材料の開発の一部を渡辺グループが担当し、特に、系統性が必要なものなどに関して、産総研グループと共同して対応した。また、プロジェクト後半においては、産総研グループの薄膜開発を渡辺グループ、寺田グループが大きく支援した。浜田グループは、プロジェクトの最大の難問であった多層型高温超伝導体における選択的ドーピング、異方性の問題にバンド計算の立場から大きく切り込んだ。バンド計算の結果は、実験結果の直感的な把握を可能にした。

プロジェクト開始時に、Cu-1234において、絶対零度での H_{c2} ($H_{c2}(T=0K)$) を T_c 近傍の上部臨界磁場 H_{c2} の温度依存性から外挿して求め、さらに、その $H_{c2}(T=0K)$ から c 軸方向のコヒーレンス長さ (ξ_c) を評価すると、その長さが1nm程度になる事実が知られており、このことが研究の発端のひとつであった。結晶学的に見たとき、超伝導層 (CuO₂面4枚で構成) の厚みは $0.32\text{nm} \times 3 = 0.96\text{nm}$ であり、この超伝導層全体に超伝導キャリアの対が広がっていると考えた場合と、1nmという長い ξ_c は、直感的によく一致していた。この考え方を推し進めると超伝導異方性 ξ_c/ξ_{ab} は1.6程度になる。一方で、Cu-1234はかなりのオーバードープ (バルクの H_{a11} 係数の逆数 R_{H11}^{-1} は最適ドープ時の4倍程度) にもかかわらず T_c は118K程度の高い水準を保ち、ドーピング依存性が無いことを明らかにしていた。低異方性と、オーバードープでの高い T_c の維持という二つの特徴を検証し、 $T_c=90K$ 、 $\xi_c/\xi_{ab}=5\sim 8$ のYBa₂Cu₃O₇を凌駕する材料を創製することを目指した。また、電荷供給層にTIを導入して、合成条件を緩和する方法や、新たな薄膜作製法を開発することにより、実用に供することのできるバルク材料作製技術、薄膜作製技術の確立も志した。

異方性については、 H_{c2} という量が、超伝導の核生成時の核の大きさを反映する量であるため、これと相補的な決め方として、渦糸状態における、渦糸周りの超伝導電流の有効質量を反映する量が導けるトルク法を導入した。「従来の高温超伝導体」においては、 H_{c2} から求めた ξ_c とトルク法により求めた ξ_c はほぼ一致することが知られていた。Cu-1234に限って、出発組成とドーピング量を徹底的に変えて、トルク法により低異方性を検証した (渡辺グループ)。またこれに相当する理論値をバンド計算により明らかにした (浜田グループ)。

バンド計算による κ は「従来の高温超伝導体」においては、トルク法で求める値の下限値を与えるものである。その一方で、「従来の高温超伝導体」で定式化された κ と不可逆磁界(Hirr)の関係式から期待される高いHirrが得られるかどうかの検証もおこなった(産総研グループ)。

トルクで求められた κ は11~20、バンド計算から求められた異方性は10程度であり、 H_{c2} から求めた $\kappa = 1.6$ や、電気伝導度の異方性から求められていた5.5~6とは大きくことになっており、この原因と性能への影響の評価はプロジェクトでは最大の懸案となった。これらのばらつきは、「多層型高温超伝導体」特有のものであると結論され、その詳しい検討は「多層型高温超伝導体の科学」に集約されていった。

一方で、オーバードープ領域の高 T_c の維持は、北岡グループのNMRの結果により確立した選択的ドーピングという物理現象によるもので、ゆるぎない事実となった。

高いHirrに関しては、重粒子線照射による磁束の個別ピンニングにより、77Kで30T以上であることを示唆する結果が、交流帯磁率の測定から得られた。しかし、Hirrは、材料本来の性質を反映したものというより、ピン止め中心の性質を強く反映するものであるとの考え方から、プロジェクトの後半では、Hirrの代わりに、弱ピンニング極限の磁束格子融解磁場(B_m)を指標と置きなおし、それを簡便に評価する方法を開発し、Cu-1234、TI-1223、Y-123に関して比較を行い、前者二つの材料が90K以上で持つ優位性を明らかにした。この比較のために、 B_m から逆算した“性能指数としての κ ”も定義し、Cu-1234に関しては、90K以上で9、TI-1223では14、比較のためのY-123では、5.4となることがわかった。

材料開発においては、Cu-1234に多量にTIを添加することにより、Cu-1234($T_c=118K$)や従来のTI-1234(T_c が120K程度)では実現できない $T_c=126K$ が実現することから、(Cu,TI)-1234が全率固溶で存在することが期待された。この方向で、高い T_c と純粋な(Cu,TI)系を実現すべく、出発組成を(Cu_{0.5},TI_{0.5})Ba₂Ca₂Cu₃O_yに固定し、徹底的に合成条件をつめた。その結果、従来Hg-1223でしか超えることのできないと考えられていた $T_c=130K$ の壁を突破し、 $T_c=132K$ のCuTI-1223を見出した(産総研グループ)。組成分析の結果得られた材料は、(Cu_{0.2},TI_{0.8})Ba₂Ca₂Cu₃O_yもしくは、(Cu_{0.4},TI_{0.6})Ba₂Ca₂Cu₃O_yであることが判明した。また、高 T_c を実現するためには、過剰Cuが有利に働くことは確かであるが、 T_c の上昇は、CuとTIの固溶に直接の原因があるわけではなく、純粋なTI-1223でも T_c が133.5Kまで上昇することが明らかになった。この材料開発の段階

で、TIを含む材料の化学的な性質がよく理解された。また、 $(\text{Cu}_{0.4}, \text{TI}_{0.6}) \text{Ba}_2 \text{Ca}_2 \text{Cu}_3 \text{O}_y$ 等の組成を実現できないことはないが、その実現は、純粋なCu系を合成するよりも難しく、現時点では、実用材料として採用できないとの結論にいたった。

一方で、TI-1223の異方性は低く、実用材料としての潜在能力はCu-1234と同じくらい高いと考えるにいたった。プロジェクトでは、バルクの合成法も発展させ、TI-1223やTI-1234が銀シースによる線材化に向いていることを証明した。

薄膜作製においても、上記のTI-1223の優位性を生かし、薄膜作製技術がプロジェクト内で実用材料を実現できる域まで達成できる見込みのある材料として、TI-1223が最も適しているとの判断をプロジェクトの半ばで行い、アモルファスエピタキシー法（APE法）と名づけた、アモルファス膜をTI蒸気中で結晶化させるという作製法を確立した。TI-1223の薄膜作製技術の確立には、産総研グループを中心にチームが総力をあげてあたった。特に、大嶋グループの表面抵抗測定法の確立とそれを駆使した薄膜作製技術そのものにまで踏み込んだ助言と協力が大きかった。Cu-1234の薄膜に関しては、layer by layerの方法でプロジェクトの初期段階において、 $T_c=10\text{K}$ の薄膜を実現していたが、再現性を支配している要素が抽出できず、作製法の確立を果たすことができなかった。

Cu-1234の物性研究を通して確立した「多層型高温超伝導体の科学」はその後、発展し、反強磁性秩序と超伝導が共存するHg-1245という材料の開発を実現した。（渡辺グループ、北岡グループ）北岡グループは二つの T_c を発見し、その発現条件を明らかにすることにより、「多成分型超伝導」の概念の発見を促した。研究当初野心的な試みとして提案されたオーバードープ状態でのd+s波の発現は、そのもの自身はプロジェクト内で実現に至らなかったが、「多成分型超伝導」の概念と融合して、バンド間位相差ソリトンの理論的発見につながった。

3. 研究成果

3.1 チーム全体の成果

このプロジェクトの成果は、(1) 90K動作が可能な $(\text{Cu}_x, \text{Tl}_{1-x}) \text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (TlCu-1223)の薄膜の薄膜作製技術の確立、(2) 130K以上の超伝導転移温度(T_c)をもつバルクのTlCu-1223の開発と T_c 向上の機構解明、(3) 多層型高温超伝導体の科学の発見である。

伊原チームは、すべてグループが、産総研グループの材料開発を中心に研究を収束させた。ここで挙げた成果は、すべてチームの連携の下に得られた、チームとして達成した成果である。また成果の内容は互いにオーバーラップしているが、大別して(1)と(2)は材料開発(3)は物性評価の研究における成果となる。

$(\text{Cu}_x, \text{Tl}_{1-x}) \text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (TlCu-1223、またはTl-1223)で、($x < 0.2$)の作製法の確立は、研究段階から実用材料への架け橋を意識して、本プロジェクトで一番力を入れたテーマである。謀らずも、基礎研究と実用研究の間にあるとされる「死の谷」克服への挑戦であり、論文よりも、実際に膜ができるかどうかの評価の対象となる。その意味で、Tl-1223の実用レベルの薄膜作製法を完成させているグループは、われわれだけであり、その意義は大きい。マイクロ波フィルター用の膜として、研究用世界標準となっているドイツTHEVA社の123系の薄膜(T_c は90K程度)より T_c が高く、商業用として市場標準になっているTl-2212薄膜よりも異方性が低いので、今後われわれがこの膜を研究用として市場に供給できれば、世界標準の薄膜の地位を占めることができよう。Tl-2212を入れても、Tlを含む超伝導体の実用レベルの薄膜作製技術を保有しているグループは、われわれを入れて3~4グループのみである。薄膜作製法自体もその報告が国際会議でベストポスターに選ばれることに示されているように、学術的な評価も高い。プロジェクトの最後の国際会議の報告とそれに伴う外国研究機関の訪問では、作製法、薄膜とも熱烈なオファーを受けている。

$T_c > 130\text{K}$ のTl-1223のバルク開発は、その後のTl-1223およびTl-1234の銀シース線材の基本技術の開発、薄膜作製技術への技術の移転等実用化に直結する数々のノウハウを生み出した点を指摘したい。実用化技術の反面、高温超伝導体の「真の T_c 」は何Kなのかという、学術的に重要な問題にたいして大きな貢献もしており、理想的な研究展開ができたと自負している。高 T_c 化の機構解明、電子構造の理解においては、チームを構成する6グループがそれぞれ、一番の得意技を繰り出して研究を展開した。国際的な評価が高いことは、その当時、新しい雑誌を立ち上げていた、Nature publishing group がその目玉として、我々の成果をweb上で取り上げるとともに、新雑誌Nature MaterialsのReviewでもとりあげていることからわかる。さらに実用化を目指した材料開発という観点から言えば、2003年の春の段階で書かれた、R. Hott著“High Temperature Superconductivity ~ Materials aspects of High T_c Superconductors for application”というReview Article (2004年出版予定)ではわれわれのプロジェ

クトで報告された論文が6件引用されるとともに、代表的な材料としてリストアップされた51の材料中、7件までの T_c がわれわれの仕事からとられていることを指摘しておく。このように、実用化を目指したわれわれの研究とその取り組みは確実に評価されてきている。

Tl系超伝導体の線材化研究は、日本ではやや勢いが無いが、近年韓国で活発に行われている。Dr. Jeong率いるグループからは、協力関係を申し込まれており、CRESTの成果は、韓国で生かされるかもしれない。

「高温超伝導体の科学の発見」に関していえば、選択的ドーピング、オーバードープにおける高 T_c の維持、二つの T_c とその制御、反強磁性秩序と超伝導の共存、多成分型超伝導、 f -solitonといくつかの付随する概念を具体的事項として提出し、それを実証してきたのが、プロジェクトで行ったことであった。

「多成分型超伝導」は、40年間以上に発見された多バンド超伝導体の発展版であるが、それ以外は、すべて完全に独自の概念であり、学会の研究の流れと一種隔絶したものであった。それゆえ、時流にのった研究のように、すぐに人目につくことはなく、むしろ新しい流れを作り出すものとなった。選択的ドーピングの発端は、プロジェクトより3年前にあり、プロジェクトでは、その概念の確立に力が入れられ、初期の段階で、ほぼ形作られ、NMRの実験を中心に、Physical Review誌や、Journal of Physics and Chemistry誌にその報告が掲載されている。まったく新しい概念であったため、査読過程でその価値を編集側に認めさせるのには非常な努力が必要であり、投稿から掲載まで1年以上かかることも稀ではなかった。1999年に掲載された論文が、頻りに引用されるようになってきたのは、2002年を過ぎてからであり、高温超伝導体研究のコミュニティーも、この新規の概念を受け入れるのに時間がかかっている。しかし、NMRの実験は、今や、「選択的ドーピング」や「多層型高温超伝導体の科学」を議論する他グループにあっては、実験グループ、理論グループに限らず「バイブル」的論文として引用している。

二つの T_c については、今のところ、Cu-1234とその類似系に限られた話であり、その重要性がコミュニティに真に認識されるのには時間がかかるであろう。仕事の内容自体は、日本物理学会の会誌に紹介されたり、国内外のシンポジウムで取り上げられたりもしているので、受け入れられていることは確かである。

反強磁性秩序と超伝導の共存については、2003年のM²Sで招待講演に取り上げられるなど、評価され始めてきている。CuO₂ネットワークという同一のバックボーンで、ドーピングレベルをかえることで超伝導と反強磁性秩序をそれぞれ具現し、さらにそれを重ねることによって両者を共存させるというその手法自体への理解は浅いといつてよい。1980年代に確立している、磁性超伝導体の研究や、電荷供給層に磁性イオンを導入して作られた磁性高温超伝導体との「区別」がつけられていないということ、また、CuO₂面一枚で盛んに議論されているストライプ秩序形成による磁性と超伝導の共存（非一様な超伝導）、磁束コアにおける反強磁性秩序の形成との相違点を認識させるに

いたっていないのがその原因である。この関連論文は、いくつかの論文誌で発表されるとともに、Physical Review Letter誌にも投稿中であるが、1年以上も係争中のままである。パイオニアワークの宿命であろう。

「*i*-soliton」は、Physical Review Letters誌に投稿されたが、「読者が興味を持たない」ことを理由に、査読に回さず、編集者から即日掲載拒否を受けた経緯もある。その後、ようやく掲載されるにいたった。投稿から掲載まで8ヶ月以上というLetter誌としては、非常に時間のかかる査読プロセスとなったが、その間に、にたような論文が同じ雑誌に投稿されるということもあり、ユニークな仕事のあり方について考えさせられる点がおおかった。仕事自身は、その後、ウィンスコンシン大・アルゴンヌ国立研究所の著名な理論家によって発展させられ、「*i*-soliton」発生器も考案された。「*i*-soliton」はCu-1234を代表とする「多層型高温超伝導体」のために考えられた理論ではあったが、一般性があり、広く「多バンド超伝導体」に適用できる。プロジェクトでは、プロジェクトとの関連性にすくなからず疑問があったこと、薄膜開発など、「先にやらねばならない仕事」を優先したため、その後の発展には力を入れなかった。プロジェクト後も、この仕事を実質的に発展させる手立てを打つことに成功しているとはいえ、その実験的発見や応用といった更なるブレークスルーには、今後数十年要することも考えられる。

総括としては、伊原チームの行ったプロジェクトは、世の潮流を見ながら随時それを取り入れ、学会の発展と寄り添ってともに発展していくといった通常の手法をとらず、独自性や新たな流れを生み出すことを最重要視して研究を推進した。学会と一線を画した研究手法は、必ずしも生産性を要求される国家プロジェクトのやり方として適切ではなかったかもしれないし、諸外国を含む同一内容の研究との比較で容易にその研究水準が示せず、プロジェクト後の研究について多くの理解を得られなかった点で、研究のマネジメント上の問題点はあった。ただ、このプロジェクトでは、「高温超伝導体」の研究という非常に多くの研究者が携わり、独自性とその発見者に集約されがちな分野において、「次世代」を生み出そうという気概、「Cu-1234」の独自性へのこだわりという点を「魂」として、「独創性」を至上のものとして研究を遂行しようとした。実用材料を生み出すという点では、これらは足枷となることもあり、妥協やむなき点もあったが、「高温超伝導体」から発し、その実用から「高温超伝導体」を超えた「次世代超伝導研究」の一端までも広くカバーし、しかもそれらがすべて融合して、材料開発という一つの礎から発し、その礎に戻るといって、「科学」としては理想的な形態を取れたと自負している。

3.2 材料開発

(1) 研究成果の内容

材料開発研究における成果は (1) 90K動作が可能な $(\text{Cu}_x, \text{Tl}_{1-x}) \text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (TlCu-1223)の薄膜の薄膜作製技術の確立、(2) 130K以上の超伝導転移温度 (T_c) をもつバルクのTlCu-1223の開発と T_c 向上の機構解明である。

TlCu-1223薄膜作製法の開発

図1は、確立した薄膜作製法を概念的に表した図である。アモルファス膜を基板上に積み、それを、密封容器内で、酸化タリウム蒸気により結晶化させる。この方法は一般的には「Two Step法」または、「ex-situ法」と呼ばれており、Tlを含む高温超伝導体薄膜の一般的な薄膜形成法として、10年来採用されているものである。図2に示すように、面内配向性にこだわらなければ、基板にc軸が垂直にたった薄膜はプロジェクトの当初より作製されており、その T_c も120K近くと極めて高かった。しかし、実用材料としては、a軸もそろった、2軸配向性が必要であるとともに、大面積化や、コストにも対応する必要があった。このような薄膜作製を考えると、単に、「Two Step法」または、「ex-situ法」といった、「作製手法」を名前にしたような考え方で作製するのではなく、どのように薄膜が成長するか成長機構を念頭におかなければならない。批判的な意見もあるが、「Amorphous Phase Epitaxy Method」(APE法)は、この成長機構を重要視して薄膜作製法の確立を目指したことを意味する。

「Amorphous Phase Epitaxy Method」(APE)では、密封雰囲気中で、実質的な結晶化反応が5分から長くても15分程度で完了する。その後の熱処理は焼鈍化の過程にあると考えている。しかもその反応時間で、アモルファス膜は、基板の結晶配列をテンプレートとしてコピーし、2軸配向化すると考えている。この反応プロセス自体が研究対象になるほど、複雑かつ深遠なものであるが、プロジェクトの資源が限られていることを考えれば、研究の重点をそこにおくこと

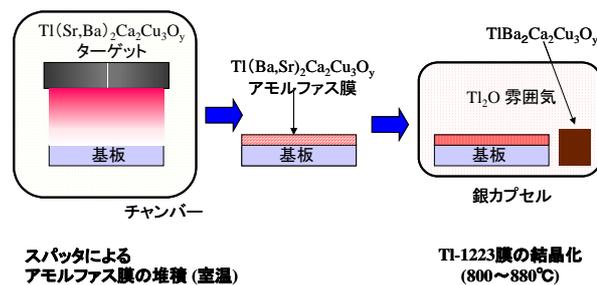


図1 Amorphous Phase Epitaxy (APE 法) の概念図。室温で堆積したアモルファスを、密封容器中で酸化タリウムと反応させて結晶化させる。室温におけるアモルファス層の堆積は将来的には溶液塗布後の乾燥と言う形に置き換えられる可能性もある。この方法は、極めて安価であり、マイクロ波応用などに使う大面積両面膜の作製に有利でもある。

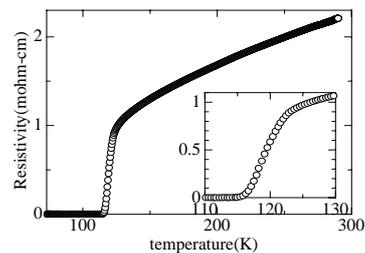


図2 MgO 基板上に作製した Tl-1223 薄膜の電気抵抗率温度依存性。面内配向性にこだわらなければ、基板にc軸が垂直にたった薄膜は、プロジェクトの当初より作製されており、その T_c も 120K 近くと極めて高い。

はできない。また、APE法自体の有意性を証明する以前に、そのプロセスを詳細に吟味することは、実用薄膜材料を開発する観点からいえばアンバランスでもあった。プロセスの研究自身は、今回開発した薄膜作製法が、工業化されたときに、製品を作製しながら、その品質の向上という立場から、もう一度詳しく吟味することが、より有効であろうと考える。

APE法の開発を行うときに、まず基板の選択が重要になる。実用目的として、マイクロ波フィルターを想定している。この目的に照らして、表1には、検討された基板の性質を比較している。性能評価はプロジェクト後になるが、われわれが現在試作を試みているデモンストレーション用フィルター回路の写真を参考のために図3にしめす。(回路面の裏側にも、接地面(グランドプレーン)となる薄膜が形成されている。) STOは誘電率が大きすぎ、図3に示す現在提案されているような両面薄膜でのフィルター回路作製には適さないとされており、マイクロ波応用を考える場合には、実用基板としては採用されない。LAOは、マイクロ波を基板が吸収する度合い(誘電損失)となる $\tan \delta$ (大きいほうが基板損失が大きい)もちいさく、誘電率も、20程度であるので、誘電率の面から見た場合有効な候補ではある。しかし、低温で双晶となる相転移が知られており、この相転移がマイクロクラックを誘発する可能性を考えると、かならずしも実用基板向きではない。LSATは、ここ数年開発された新しい基板であるが、その誘電特性は、結晶構造相転移を抑えたLAOと考えることができ、採用できる。新しい基板であるので、この基板を使ったマイクロ波フィルターの報告はないが、マイクロ波応用のコミュニティーでは、これを基板とした研究も期待されていた。MgOやSapphireは、通常採用される基板である。誘電率が9程度と、LSATの半分ほどしかないので、フィルターの回路の大きさが、ほぼ1.4倍になる。フィルターの小型化、ひいては、マイクロ波フィルターを用いた低温動作の移動体通信受信基地局用フロントエンドの小型化にはLSAT基板の方が有利である。また、それ以外に、この後詳しく述べることにするが、MgOや、サファイアの場合、基板と超伝導材料の間の格子の整合性を生み出すために緩衝層(バッファ層)の形成が必要となる。バッファ層の形成は、

表1 マイクロ波応用のために検討された基板の性質

基板	SrTiO ₃	LaAlO ₃	LSAT	MgO	α -Al ₂ O ₃
結晶構造	立方晶系	菱面体系	立方晶系	立方晶系	六方晶系
格子定数(Å)	3.905	3.79	3.858	4.212	4.758
誘電率 ϵ	2000	23.6	22.7	9.7	9.4
誘電体損失 $\tan \delta$	10 ⁻³	10 ⁻⁵	2 × 10 ⁻⁴	<10 ⁻⁶	<10 ⁻⁶
Tl-1223膜との ミスフィット(%)	1.66	1.32 <small>(低温での構造相転移が問題)</small>	0.72	8.83	19.3



cf. Tl-1223=3.84 (Å)
LSAT:(LaAlO₃)_{0.3}(SrAl_{0.5}Ta_{0.5}O₃)_{0.7}

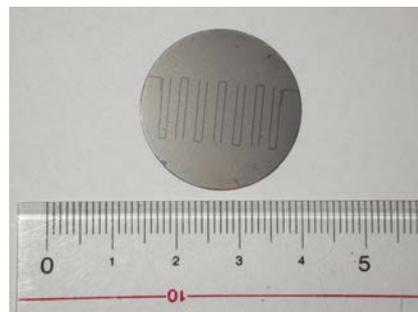


図3 デモンストレーション用フィルター回路。1インチLSAT基板上の両面薄膜をアルゴンイオンエッチングして作製したものである。

薄膜作製プロセスを複雑にする上、コスト高に繋がるので、薄膜作製上からは、できれば採用を控えたい。プロジェクトの研究を通じて、LSAT基板では、バッファ層が不要であるが明らかになった。このような観点からLSAT基板の採用が薄膜作製法の確立という面から見ても、フィルター応用という目的から見ても、結果的にベストの選択であることを、プロジェクトの研究を通して、認識することになった。今後、得られる基板面積が大きいこと、よりtan δ が小さいことから、Sapphire基板の採用がより適切となるケースもあると考えられるが、そのような用途に対しても、100%ではないにせよ、本プロジェクトで道筋は示している。MgOは、STI社が現在採用している基板であることを除けば、基板コストも高く、バッファ層も必要であるから、LSAT基板やSapphire基板が使える限り、特に採用するメリットはないということが、プロジェクトの結論である。

まず、Sapphire基板を用いた薄膜作製法について、研究の成果をまとめる。Sapphire基板を用いた場合、前述のように、バッファ層が必要であり、通常CeO₂が採用されている。われわれもこのバッファ層を採用した。CeO₂を用いた場合の結晶格子不整合の調整を概念的に表したものが、図4である。TI-2212のように反応温度が840 程度以下と低いものに関しては、CeO₂のバッファ層はきわめて有効であり、図5に示すように、RsもTHEVA社の標準的な123系薄膜と同じ程度、Tcはそれ以上を実現できる。STI社は、MgO基板上に123系の薄膜をバッファ層として形成してから、TI-2212を形成していると述べている。基板性能のよいSapphireとCeO₂バッファ層で、TI-2212が形成できるということは、われわれの研究よ

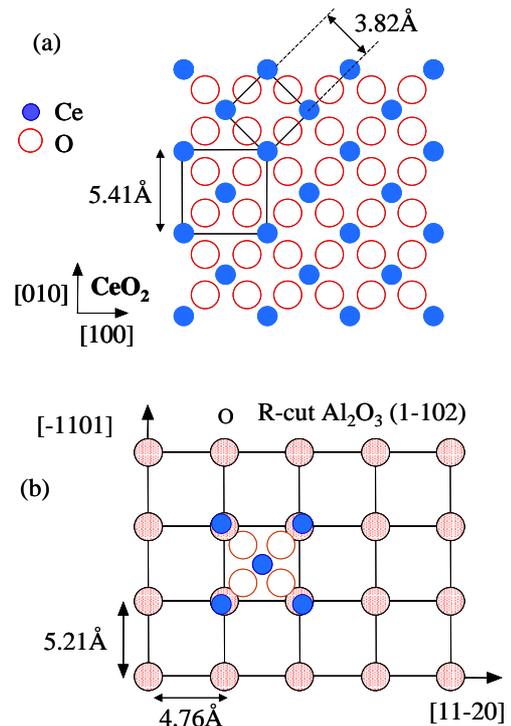


図4 サファイアを基板として用いたときの基板とTI-1223薄膜の結晶格子の関係。3.84ÅはTI-1223の格子定数である。(a)バッファ層としてのCeO₂の格子 (b) サファイアの格子。赤く塗りつぶした丸がサファイアのアルミ原子。CeO₂の一部も重ねて示した。

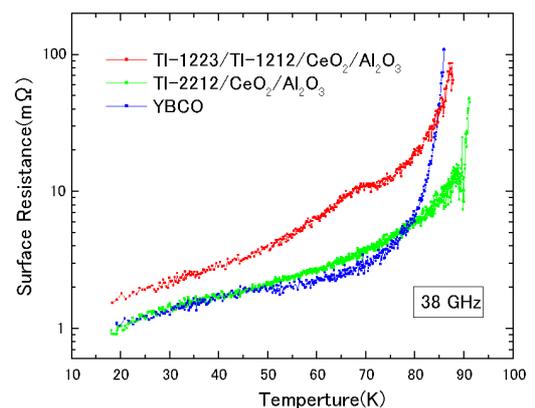


図5 サファイア基板を用いた場合の表面抵抗 (Rs) の温度依存性。APE法によって、研究業界の標準のYBCOの特性を越えるTI-2212の作製が可能となった。TI-1223も、第二のバッファ層のTI-1212を薄くすれば、TI-2212より良い特性が得られるはずであるとの結論が得られ、バッファ層不用のLSAT基板の採用を決めた。

りおおよそ1年前に、ドイツのJena研のSchneidewindのグループも成功しており、それ自体重要なことである。また、通常840 というと、 CeO_2 とBaが反応して BaCeO_2 になってしまう温度であるが、Tlを含む系の場合、Tl系超伝導体の反応が先行し、バッファ層とアモルファス層の反応が進む前に薄膜が成長する利点もある。アモルファス膜にTlをあらかじめ含有させない場合には、Tl-2212が生成する反応と、バッファ層とアモルファス層の反応が拮抗する。じつは、研究者個人の外国グループとのインフォーマルな情報交換においては、Tl-2212薄膜自体の再現性得ることも、なかなか難しいとされていることが判明している。この難しさが、Tl-2212薄膜の普及を妨げている原因の一つであろう。アモルファス膜にTlを含有させない方法の場合には、Tl-2212が基板の格子配列を受けてエピタキシャル成長をする前に、基板とBaの反応など、他の反応が先行するのではないかとわれわれは結論している。

Tl-2212は、Sapphire上にバッファ層を用いることにより、われわれのAPE法の範疇で成長することがわかった。われわれのTl-2212自身の T_c は95K程度と、本来Tl-2212のポテンシャル $T_c=110\text{K}$ 、STIが自分たちのTl-2212薄膜の T_c として公式に示している107~108Kよりまだ低い、この T_c の違いは、最適化によって埋めることができると判断して、Tl-2212の研究はそれ以上続けてはいない。実際われわれの目的は、薄膜作製自身よりも実用薄膜の薄膜作製法の確立にあり、その意味から、Tl-2212に適用できた方法が、Tl-1223に適用できるかどうかを確認する必要があった。

しかし、Sapphire上に CeO_2 のバッファ層を用い、Tl-1223をAPE法で作成しようとした場合は、バッファ層とBaの反応の問題に直面した。Tl-1223の相生成の場合、反応を進行させるためには、850 から860 程度まで上昇させる必要がある。わずか10~20 の上昇なのであるが、この温度では、もはや CeO_2 がバッファ層として十分機能しなくなることを意味している。われわれの試した組成は、アモルファス膜の組成として、ほぼ、 $\text{Tl}(\text{Ba}_{0.5}, \text{Sr}_{0.5})_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ を目指したものであるが、この組成では、どうしても反応が起きてしまう温度まで上昇させないとTl-1223の相生成が見られなかった。そのほかの多くの組成を試すことはしなかったが、第二のバッファ相として、 $\text{TlSr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ を導入した。この方法を採用することにより、 $\text{TlSr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ のバッファ層が反応の初期段階においてBaの基板への拡散を防ぎ、BaとCeの直接反応を抑制する。BaがCeの反応が起きる前に超伝導層を得るという方法で、薄膜成長という面からいえば、これは成功した。しかし図5に示すように、 R_s が十分小さくならないという問題はある。これについては、第二のバッファ層の T_c が低く、その影響であると結論した。バッファ層を薄くするという方法で、この問題は解決されると考えている。

実用材料を考えた場合、APE法がTl-1223の作製にとって真に有効であることを確認するためには、バッファ層を薄くする研究をするより、バッファ層なしで、その有効性を示すことが優先される。そこで、われわれは、基板と超伝導材料のあいだで、結晶格子の整合性が極めてよい、LSAT基板を採用をし

た。LSAT基板は、新しい基板で、マイクロ波デバイス用基板として実績が乏しかったが、先に述べたように、フィルターの小型化に寄与できる可能性がある等のメリットもある。基板のコストも小型化により廉価になるので、実用化を阻むほどではない。LSAT基板では、作製温度を870 程度まで試すことができ、Tl-1223の相生成温度領域をカバーすることができた。しかし、Tl-1223の相生成において、Tl-1212を第二のバッファ相として採用したときにはおきない別の問題があった。Tl-1212を第二のバッファ層として採用しない場合には、 $Tl(Ba_{0.5},Sr_{0.5})_2Ca_2Cu_3O_y$ を目指した組成では、Baが多い部分と、Srが多い部分とに、アモルファス層から結晶化する前の段階で相分離がおきる傾向があった。Baの多い部分は、昇華温度が下がり、Srが多いところはTl-1223の相生成温度があがる。BaとSrの組成比のムラ自身は、ピンング力を上げるなど効果があるのでそれ自身悪いことではないが、あまりにムラが大きいと、Srのおおい部分でTl-1223の相生成を目指す温度にすると、Baの多い部分は昇華して、Ba欠乏領域となり、超伝導性が著しく失われてしまい、良好な R_s がえられない。密閉系ではなく、管状炉で還元雰囲気や酸化雰囲気など雰囲気も制御して、この問題の解決策を探したが、最終的には、BaとSaの比を変更して、 $Tl(Ba_{0.75},Sr_{0.25})_2Ca_3Cu_3O_y$ とすることで、この問題を回避した。

その後、Tl-1223の相生成は順調になったが、どのような、表面状態が良好な R_s を達成できるのかが不明であり、最適化には R_s 測定以外の簡便な手法の導

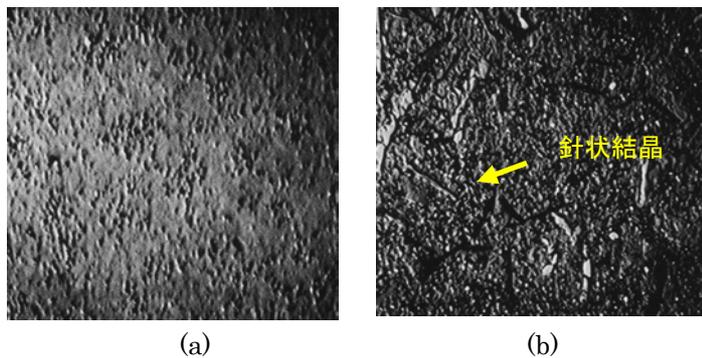


図 6 Tl-1223 の光学顕微鏡像。(a) 良い R_s を示す膜。(b) R_s が高く(悪く)なる膜

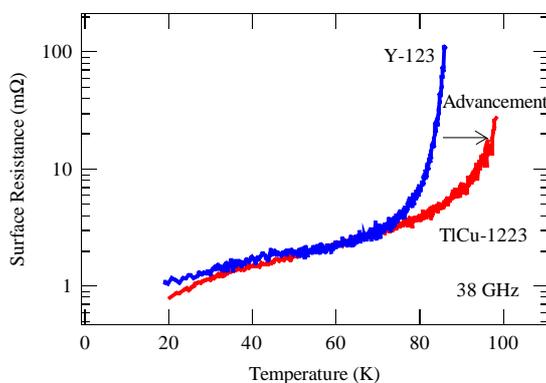


図 7 R_s 、プロジェクトで作成した TlCu-1223 と研究業界標準の Y 系薄膜 ($DyBa_2Cu_3O_y$) の R_s との比較。

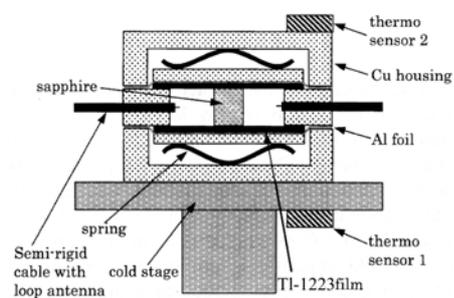


図 8 R_s の測定に用いた誘電体共振器法の概略図

入が必要になった。この手法についての説明は後述する。

結果的に光学顕微鏡像として、図6(a)に示すようなもので、良好な R_s を得る事ができた。 R_s 自身については、図7に研究業界における標準的な薄膜であるT HEVA社の123系の薄膜 ($\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$) の R_s と比較して掲載した。測定は10mm × 10mmの薄膜について行い、測定手法は誘電体共振器法と呼ばれるものであり、マイクロ波の周波数は38GHzである。測定手法の概略については、図8に示してある。他の周波数のマイクロ波に対する R_s は、マイクロ波の周波数の二乗に比例するとして評価することができる。(この評価法は2流体モデルから理論的に与えられた評価法であるが、実験的にも良くあう。) 90Kにおける、 R_s は38GHzで、 $7\text{m}\Omega$ 程度である。フィルター動作のためには10GHz換算で、 $500\mu\Omega$ 以下の表面抵抗が望ましいが、我々の膜は90Kでそれを達成していることを示しており、90K動作のマイクロ波フィルター作製用薄膜をわれわれのAPE法で作製できることを証明したことになる。

光学顕微鏡像としては、図6(b)に示すように、薄膜表面に針状結晶ができることがある。このような薄膜は、反応温度が僅かに低いときや、密閉が完全でないときに生じる傾向にある。このような膜での J_c も77Kでは、 1MA cm^{-2} をゆうに越えており、過去の知見によれば、高い R_s が得られてもよいはずであった。しかし、直流特性においては高い性能を示す図6(b)でも、表面に付着した針状結晶があると良好な R_s がえられない。組成分析の結果からは、付着結晶もTl-1223である事が判明したが、おそらく、X線には出てくることはない、微量のa軸配向の結晶(つまり、c軸が基板表面に対して平行)との推測がなされた。理論的な考察によれば、そのような結晶は、針状結晶のc軸に対して平行な電場成分を持つマイクロ波と共鳴を起こすジョセフソンプラズマがある。しかし、Tl-1223のような異方性の低い材料では、このジョセフソンプラズマは、測定に使用しているマイクロ波の周波数より格段に高い周波数にあるか、超伝導ギャップより大きい周波数にあるので、通常は、その影響は測定にはかかってこないはずである。しかし、実際には、針状結晶が付着しているc軸配向膜が、“ダンパー”として働き、ジョセフソンプラズマの半値幅を非常に大きくして、オーバードンプ状態にするため、ジョセフソンプラズマ共鳴の裾野が、測定周波数にひかかってくると結論された。薄膜の性能が芳しくないときには、他にも疑わしいところが山ほど出てくるが、これをいちいち潰しているほどの余裕は、プロジェクトの人的、時間的制約からはできない。理論的な考察の助けもかり、本質的な問題点を見抜き、大きな問題点から解決していくことが、問題の早期解決につながり、満足できる薄膜作製法の完成を可能にしたという点で、高く自己評価している。

さて、我々の採用したAPE法は、いったん顕微鏡像と R_s の関係が判明してしまえば、80%以上の再現性で良質の薄膜を作製することができる。しかし、その関係を導き出すことは、容易ではない。当初は、 R_s を昼夜兼行で測定してなんとかこの問題に対処していたが、更なる評価手法の合理化が必要であった。最終的に、薄膜の品質に判定を下すためには、 R_s の測定が不可欠であることに

変わりはないが、 R_s の測定をしなくても、大雑把に薄膜のよしあしを一瞬である程度ふるいにかける判定の開発無くしては、プロジェクト内で、実用薄膜の作製法を開発することはまず無理であった。TIを含む超伝導体の海外の研究グループが、研究段階において、薄膜の品質の再現性にかなり手を焼いている現状の裏には、ある程度手間や時間が必要な R_s の測定と相補的な迅速かつ有効な測定手法の開発の欠如がその原因のひとつとしてある。

表面抵抗に限らず、超伝導材料や薄膜の性能評価の手法として近年盛んに研究され、その派生的手法も多岐にわたり提案させているものに、交流電磁界誘導法による3次高調波の測定がある。この手法を我々も研究の途中で取り入れて大きな研究の促進が図られたが、 $10 \times 10\text{mm}^2$ や1インチ丸といった、中途半端に大きなサイズの薄膜に関しては、市販の交流帯磁率計の中にはそもそも、そのままでは押し込めないし、大型の薄膜を一度に何枚も測定する装置では、いちいち、大量の窒素を必要とするので、実験準備までの手間が馬鹿にならない事情があった。帯に短し褌に長しといった状態であったが、我々が開発している膜にあわせて誘導コイルや励起コイルをいちいち開発できるほどの余裕はないのは明らかであった。また、3次高調波法では、一般的にダイナミックレンジが小さく、良質の薄膜になればなるほど、励起コイルに多くの電流を流さなければならず、 $1 \sim 10\text{MA}/\text{cm}^2$ を越える薄膜の品質を判断するのに大型の電源などが必要となり、必ずしも簡便な測定法とはいえなくなってしまう問題点も検討しているうちに明らかになった。

一方で、大嶋グループがプロジェクトで実験的に明らかにしたように、臨界電流と表面抵抗の間には、反比例の法則、 $R_s(22\text{GHz}) \times J_c = 2 \times 10^7 \text{ Am}^{-2}$ があり、 10GHz で 0.5m 以下という目安は、そのまま、 $J_c > 1 \text{ MA cm}^{-2}$ の目安になる。この目安を一瞬に見分ける方法として、「超伝導フィッシング法」が開発された。

「超伝導フィッシング法」は、図9に示すように、永久磁石で、超伝導薄膜に磁力線を突き刺し、それを持ち上げるという方法でよい膜と悪い膜を区別する方法で

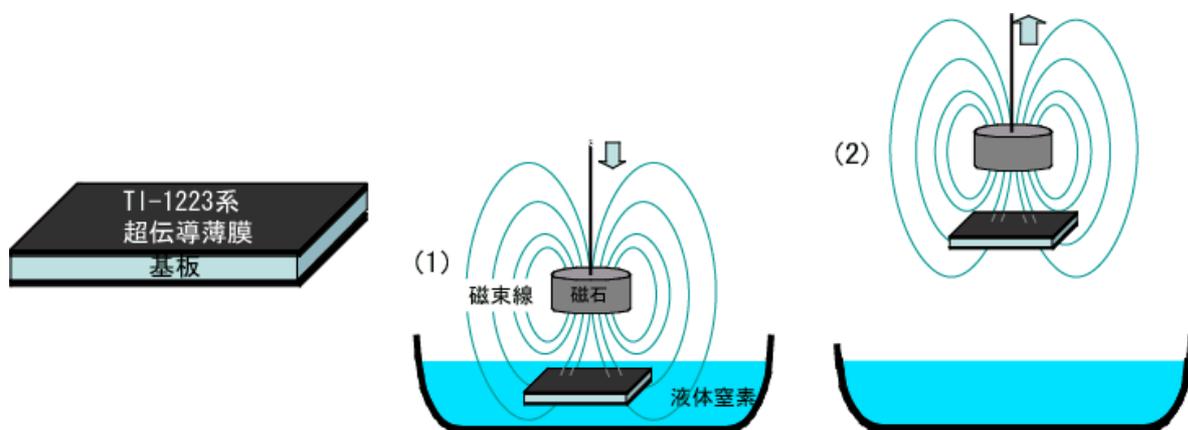


図9 超伝導フィッシング法による高 J_c 薄膜の選別。磁束線を超伝導体に突き刺して持ち上げることができれば、その膜は高い J_c と低い R_s を持つ。持ち上げることのできない膜は、 J_c が低くマイクロ波応用には適さない。

ある。それ自体簡単な原理であるが、僅か500nmの厚みの超伝導薄膜で、0.5mmの厚みの基板ごと持ち上げるためには、薄膜の J_c が非常に高くなければいけない。目安として、ちょうど、 $J_c > 1 \text{ MA cm}^{-2}$ 程度の J_c が必要であった。0.1 MA cm^{-2} 以下の J_c では釣り上げることができない。実際この方法で、図10のように持ち上げられた超伝導薄膜は、良好な低い R_s を示し、そうでない薄膜は高い R_s を示す(図11)。基板に錘を付け加えることで、 $J_c > 1 \text{ MA cm}^{-2}$ 以上のより高い J_c の見積もりも可能で、その意味で、高い J_c のほうに関しては、ダイナミックレンジは無限である。このような利点は、従来の電磁誘導による3次高調波を測定する手法にはない。実際この手法の導入後1週間で、薄膜作製法の最適化が収束し、満足すべき R_s がえられた事実を付け加えておく。原理は簡単で、あまりにも粗野との見方もあるかもしれないが、材料開発のような分野では、このような原理を良く理解した素朴な手法の導入も、複雑な観測手法を駆使するのと同じくらい重要で価値があることを示す教訓であろう。今後この手法は、マイクロ波用薄膜の性能評価にとどまらず、有効で簡素な性能評価手法の開発が望まれている、超伝導線材の評価にも応用されていくことは確実で、「超伝導フィッシング法」として、一分野をなしていくと考えている。

Tc>130KのTlCu-1223バルクの開発

Tl-1234やTl-1223の T_c は、1988年のこの材料の開発以来120K程度と考えられていた。本プロジェクトで、実際の T_c はTl-1234で127K、Tl-1223で133.5K以上である事を明らかにした。この T_c は、現在公認世界記録である、Hg-1223の $T_c = 135\text{K}$ に迫るものである。

Cu-1234とTl-1234の間を繋ぐものとして、プロジェクトでは、電荷供給層における、Cu,Tlの固溶についての研究に大きな比重がかけられた。0%から100%までの固溶体が可能であれば、常圧で合成可能なTl-1234からスタートして、

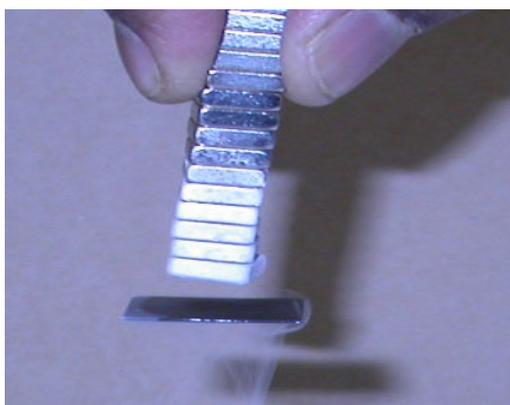


図 10 超伝導フィッシングの写真。 $J_c > 1 \text{ MA cm}^{-2}$ を越える膜は、500nmの厚みの膜で0.5mmの基板ごと持ち上げることができる。

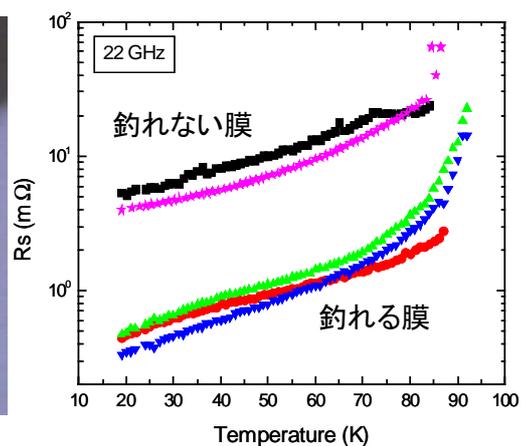


図 11 釣り上げることのできる薄膜と、釣りあがらない薄膜の R_s

高压でしか合成ができないCu-1234にちかづくことができると考えた。結果的には、Cu,Tlの比率は、Cuの比率が20%から100%未満では、4:6などの特定の相生成は認められるものの、その組成を自由に制御することはCu-1234を合成するより困難であることが明らかになった。

その研究の過程で、Cu:Tl=1:1の出発組成が重点的に調べられたが、CuTl-1234の組成で、126KのTcがえられることが、プロジェクトの開始段階で判明していた。Cu-1234や、当時知られていたTl-1234より明らかに高いTcを示すことは、当初は、CuTl-1234 (Cu:Tl=1:1) の実現の証拠とも考えられていた。

CuとTlの固溶体に対する知見をより詳しく得るために、1234系より構造が簡単な1223系を重点的に調べた。ここでもCu:Tl=1:1に固定してプロジェクト開始直後に徹底的に材料開発が行われた。最高のTcを見極めるために、高压合成直後のCuTl-1223を窒素中で還元アニールしたところ、100K程度であったTcが130Kを越えて、Tc=132Kに到達した。このTcの向上がCuとTlの固溶によるものなのかどうかを、確認するために、Tl-1223でのTc向上の有無を検討したところ、Tc=133.5Kを見出した。これらのTcに関しては図12にまとめた。CuTl-1223の組成も調べると、電荷供給層のCuとTlの比は2:8または4:6であると考えられ、またTc向上の原因は、Tl-1223自体にあると結論された。

このTcの向上については、合成上の原因、機構について、詳しく検討された。まず、図13にT-1223の結晶構造を示す。Tl-1223では、超伝導を担うCuO₂面が単位胞に3枚あり、そのCuO₂面の間にCaイオンを挟む形で超伝導層を形成している。3枚のCuO₂面のうち、Caイオンに挟まれているCuO₂面を便宜上 Inner Plane (IP) それ以外の二つのCuO₂面をOuter Plane (OP)と我々は名づけている。超伝導層はさらに2枚のBaO層、1枚のTlO層で挟まれている。合成手法を中心とした、材料開発主体の研究では、Tc > 130Kを越えるためには、次の点が必要であることがわかった。

- (1) 高压合成したオーバードープの試料を還元アニールすること。

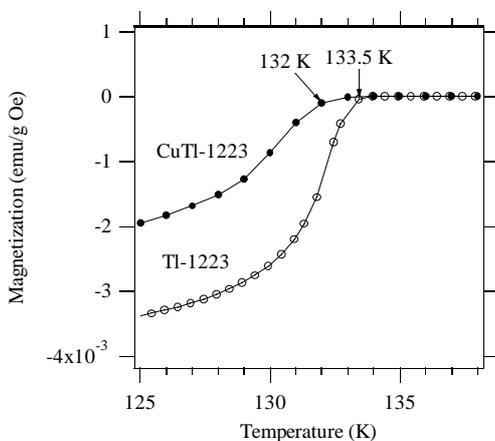
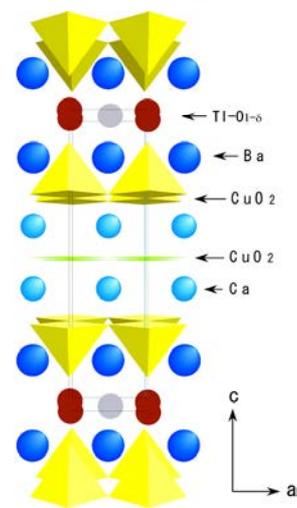


図12 Tc>130KのCuTl-1223とTl-1223の超伝導。



$TlBa_2Ca_aCu_{30-8}$ (Tl-1223)

図13 Tl-1223の結晶構造

- (2) BaとCaの組成は、なるべく化学量論組成にすること。
- (3) 出発原料から、徹底的に残留炭素を除くこと。
- (4) Tlの量は、化学量論組成より10~20%程減じる。

Tlの量は必ずしも、減じる必要はないが、減らしたほうが $T_c > 130\text{K}$ の試料を得やすいことが研究から明らかになった。この結果「合成」の立場から、 $T_c > 130\text{K}$ の T_c 向上の機構を考えると、BaとTlのサイト置換の抑制が第一要因として働いていることが考えられ、これは、特性X線分析による組成分析の結果からも明らかになった。BaとTlのサイト置換は、過剰なTlの量を抑え、高圧で合成することによって著しく抑制できると考えられ、この抑制によって、結晶中に、サイト置換によって生じるランダムポテンシャルも抑制することができるというのが直接的な原因の一つであると考えられる。

特性X線組成分析のような、ある範囲内での「平均的な組成」ではなく、サイトの占有率を直接見積もる方法として、NMRスペクトルの解析があり、 $T_c > 130\text{K}$ の T_c 向上の機構はNMRによっても詳しく研究された。図14に T_c が 130K を越えないTl-2223のNMRとTl-1223のNMRを示す。このスペクトルから分析できることは、Caサイトに混入したTlイオンの量である。Caサイトに対するTlイオンの混入がなければ、スペクトルに観察されるピークは、本来のTlサイト上のTlイオンから来るものだけになり1本となる。しかし、Caサイトに対する置換があるときには、相当するサイドバンドがメインのピークの横に出現してくる。このサイドバンドの大きさが、Caサイトに対する、Tlイオンの混入の指標となる。 $T_c > 130\text{K}$ のTl-1223では、Tl-2223に比較してそれが抑制されていることがわかる。NMRの結果からは、Caサイトに対するTlイオンの置換が抑制されることによって、IPに作用するランダムポテンシャルが抑制されていると考えることができる。そして、このIPが T_c を担うため、 T_c が向上する。これが T_c 向上の二つ目の原因であると考えられる。

ここまでは、ランダムポテンシャルを抑制し、サイト置換効果を抑えるとい

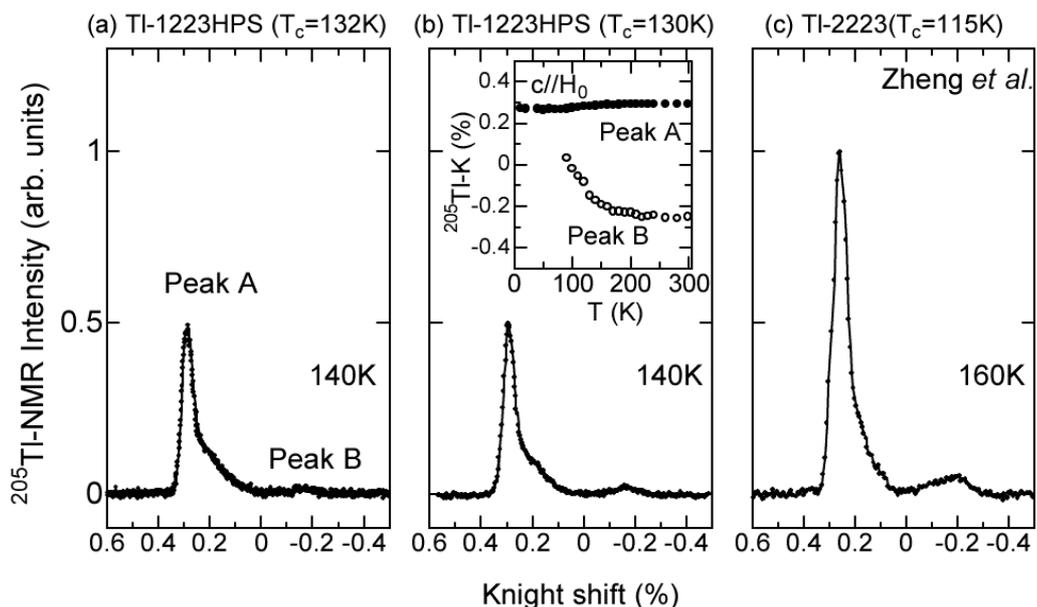


図14 $T_c < 130\text{K}$ のTl-2223と $T_c > 130\text{K}$ のTl-1223のNMRスペクトルの比較

うことが、Tcに貢献するという考え方である。

一方、実験的には、光電子分光が一番初めに明らかにしたことであるが、TI-1223では、還元アニールに伴いTIイオンや、Cuイオンの価数が複雑に変化する。TIイオンの価数は、TI原子の $4f_{7/2}$ 軌道の結合エネルギーを光電子スペクトルによって評価することで、見積もることができる。典型的な価数変化を示したものが図16である。高圧合成した試料は、アニール前には、TIイオンの価数は3価であるが、アニールをするに従って、ほぼ2価近くまで下がっていく様子がわかる。この様子をより分かりやすくまとめたものが図17である。図17では、高圧合成の $(\text{Cu}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (CuTI-1223), $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (TI-1223), および、常圧合成の $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (TI-1223)のTI原子の $4f_{7/2}$ 軌道の結合エネルギー、Cu原子の $2p_{3/2}$ の結合エネルギーを図示している。高圧合成のTI-1223では、アニールにより、TIイオンの価数が主に変化し、Cuイオンの価数の変化は小さい。もし、TIイオンの価数変化がなければ、酸素の離脱にあわせて、 CuO_2 面のホール数は減少する。しかし、TIイオンの価数変化がホールの減少を補償する形で CuO_2 面にキャリアを補給してい

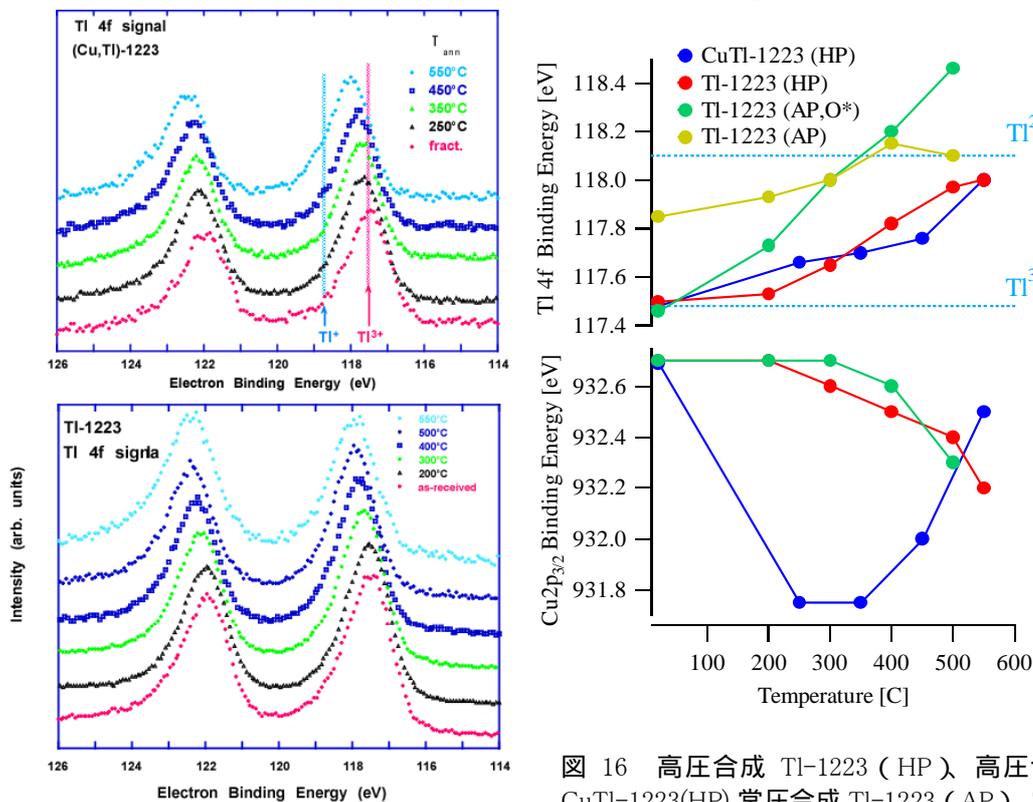


図 15 TI-1223 と CuTI-1223 における $4f_{7/2}$ の結合エネルギーのアニール依存性。下から上に順番にアニール温度が高くなっている。光電子スペクトルは超高真空中で破断した面をアニールすることによっておこなっている。TIイオンの価数変化がはっきりと観測されている。

図 16 高圧合成 TI-1223 (HP)、高圧合成 CuTI-1223(HP)、常圧合成 TI-1223 (AP)、常圧合成を活性酸素処理した TI-1223 (AP, O*) の TI イオンと Cu イオンの価数変化のアニール依存性。高圧合成した試料や活性酸素処理した試料では、アニール前は TI の価数がほぼ 3 価になっている。高い TI の価数は、アニールに伴う酸素によるホール数の減少を補償する形で、Cu の価数を高く保とうとする。その結果、常圧合成のものより、高い価数のまま、最適ドーピングの状態になることができる

ると考えることができる(自己再ドーピング、セルフドーピングまたは、電荷再分配と呼ぶ)。このようなTlイオンの価数変化を伴う、電荷再分配機構が働いている状況下で、CuO₂面のドーピングレベルが最適値に達すると、T_c>130Kが具現すること解釈できる。CuTl-1223では、電荷再分配の過程はより劇的であり、アニールにともなって一旦CuO₂面のホール数が実際に減少してから、Tlイオンの価数変化がおき、CuO₂面のホールを再び増やす様子が光電子分光によってつまびらかにされた。一方T_c>130Kを越えない常圧合成のTl-1223では、Tlイオンの価数は、もともと3価より低く、アニールによって、減少するCuO₂面のホール数を充分補償する能力がない。もっとも、アニールによってTlイオンの価数が徐々に2価側にシフトする傾向は、高压合成試料と同じである。光電子分光の研究の立場からT_c上昇の機構の大きな要因としてあげることができるのは、常圧合成試料と、高压合成試料で、CuO₂面のホール数は共に同じ程度で、T_cの最高値を記録できるが、高压合成資料では、この最適値にTlの価数をより高く保ったまま到達できるということである。マードルンエネルギーの立場から言えば、Tlの価数を高く保つことは、電荷供給層から供給したホールをより遠くまで押し回すことを意味する。Tl-1223の場合、これは、CuO₂面3枚の間にあるドーピングレベルの差を小さくすることを意味しており、より均一なドーピングを達成することになる。均一なドーピングがT_c上昇への重要な要因であることは、T_c>130KのTl-1223と最高のT_cをもつHg-1223のNMRスペクトルに対する類似性からも指摘されている。

サイト置換の立場に戻れば、Caサイトや、BaサイトにTlイオンが入るといふことは、電荷供給層のTlの価数を下げる方向に働き、少な

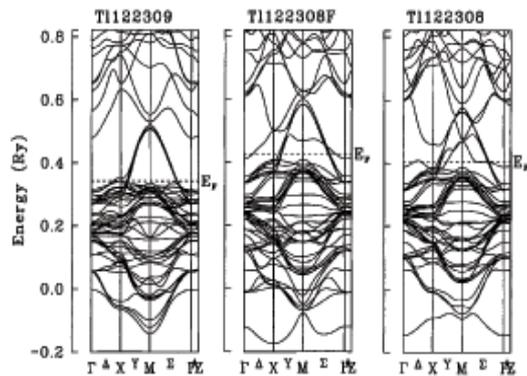


図 17 Tl-1223 バンド計算のアニール依存性を再現したもの。左から右に向かって還元していくことに相当する

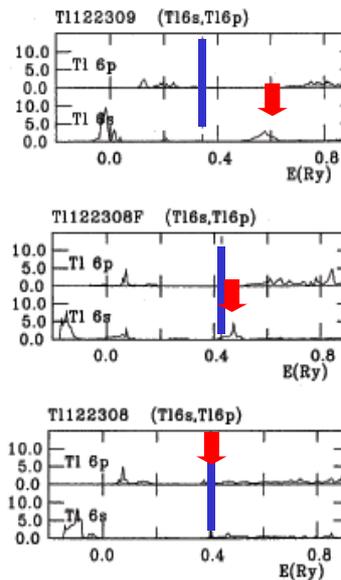


図 18 Tl-1223 状態密度。上からしたへ向かって還元処理していることに相当する。

で Tl イオンの関連するバンドの位置を示す。太い線は、フェルミレベルを示したものである。

くとも、「Tlの価数をなるべく高く保つ」といった状況をおこしづらくなっていることにも相当する。

このような電子構造の変化は、バンド計算の上からも詳しく検討された。図17には、アニールに相当する状況を計算機上で再現するために、 $TlBa_2Ca_2Cu_3O_9$, $TlBa_2Ca_2Cu_3O_8F$, $TlBa_2Ca_2Cu_3O_8$ の化学量論組成を考えている。順番にオーバードープから、還元状態を再現していることになる。還元をするに従って、Tl6sのバンドが、フェルミ面近傍に下降し、Cuの伝導バンドと混成していることをこの計算結果は示している。これは、実験で得られたTlイオンの価数変化に相当していると考えられることができる。図18には、状態密度を示しているが、電荷供給層由来のTlイオンの軌道がフェルミ面まで降りてくる様子がはっきりとわかる。このバンド計算の結果で重要なことは、Tl-1223では、Tlイオンの価数が低いことは T_c に対してはハンデになるが、電荷供給層の金属化を通して異方性を下げ超伝導の磁場に対する特性を向上させる働きがあるということを示していることである。物性評価のところでも再び述べることになるが、Tl-1223の異方性は、計算で20以下であり、実験でも14程度と銅酸化物超伝導体の異方性としては、Y系の5~8、Cu系の~11に次いで低い値になっている。Tl-1223については、電荷供給層が薄いことから、以前より、その低い異方性は注目されており、この物質を使った実用材料開発の大きな動機付けとなっていたが、 $T_c > 130K$ のTl-1223の材料開発とその機構解明の研究は、これに対する回答も与えている。

ここで、 $T_c > 130K$ のTl-1223の T_c 上昇機構をまとめると以下のようなになる。

- (1) BaサイトやCaサイトに対するTlイオンの置換を抑制し、ディスオーダーポテンシャルの発生を防止する。
- (2) Tlイオンの価数をより高く保ち、3枚の CuO_2 面のドープレベルをなるべく一様にする。

複数の結晶学的に異なる CuO_2 面におけるドーピングレベルの問題に関しては、「選択的ドーピング」として、物性評価のところでも取り上げる。また、 T_c は超伝導特性のうちでも一番大切な量であるので、より高性能の超伝導体を具現化する材料開発の研究の一環としての意味合いもあり、 T_c の極限值の追求という立場から、次に圧力効果の成果についてふれておく。

Tcの圧力依存性

図19に示したのは、 T_c の圧力依存性である。 T_c が100Kを越える多層型高温超伝導体においては、 T_c の圧力依存性は大きく、1GPaあたり、1K程度の T_c の向上は当たり前のようにおきる。圧力自身は、電荷供給層と超伝導層の間の電荷バランスをかえる役割を果たすこともある。圧力をかけ

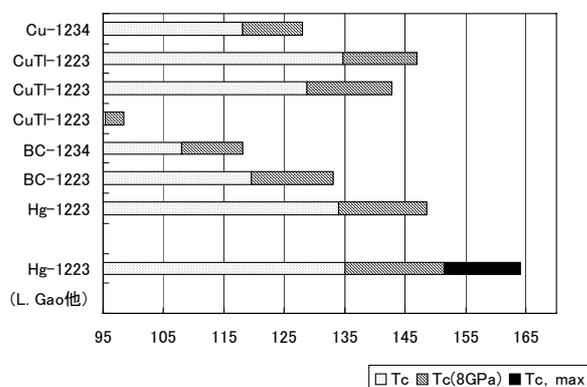


図19 T_c の圧力依存性

ることによる、電荷供給層から超伝導層へのキャリアの注入による T_c の変化を、それに独立な T_c の変化と区別して考えることを我々は提案しており、後者を、“intrinsic”な圧力効果とよんでいる。Cu-1234では特にHall係数の圧力依存性が極めて小さく、4枚の CuO_2 面全体に仕込まれているホールとしてのキャリア数は一定であると考えられ、しかも仮にキャリア数が変わったとしても、常圧の実験からキャリアの総数が T_c に与える影響は極めて小さい材料である。このようなCu-1234において観測される、1GPaあたりおよそ1Kの”intrinsic”な圧力効果は、プロジェクト内では結論は出なかったが、130Kをこえた T_c を目指すためには、Tl-1223でおきているような、キャリアの一様性以上の要因も取り入れて行かなければならぬことを示唆している。

常圧合成Tl-1223、Tl-1234へのフィードバック

$T_c > 130\text{K}$ のTl-1223の研究においては、Tl-1223、Tl-1234の常圧合成に対する知見も新たになった。炭酸基の迅速な評価法と、完全なる除去法の両方を確立することで、原料から炭酸基を完全に除去し、Tl-1223とTl-1234の合成条件を著しく緩和することに成功した。Tl-1223などの反応温度を下げるため、従来は、BiやPbを添加する方法が採用されていた。また、炭酸基を除く方法としては、Baの一部をSrに置換することがよく採用されていた。Srの量をふやせば、原料中の炭酸基は確かに少なくなるが、同時に反応温度も上がる。合成の立場からみれば、BiやPbを添加する方法は、じつは、Sr添加であがってしまった反応温度をもう一度下げるとも、考えることができる。

原材料中に含まれる炭酸がTl-1223の反応においては、悪い影響を及ぼすという考え方は、以前からあった。しかし、組成的に、モル比にして、Tlの10%程度の炭素の存在を効率よく測定する方法はなかった。燃焼法により発生する炭酸ガスを赤外分光により測定する方法や、バルク中の CO_3 を直接KBr錠剤法と呼ばれる方法で、KBr中に分散させて、その赤外分光をする方法などが採用されていた方法である。前者では、測定前に、十分に装置中から炭酸ガスを除去し、雰囲気安定化してから測定しなければならず、一つの試料を測定するのに数時間の準備が必要であることや、100mg程度以上の大量のサンプルが必要なこと、装置が大掛かりであるなど、便宜性に完全な欠陥がある。後者は、KBr中に分散させる段階で、不純物の混入が避けられないこと、また、調剤中に、雰囲気の炭酸ガスを吸い込むなど、これまた問題の多いやり方である。

本プロジェクトでは、炭酸基の定量は至上命令であったので、それに適した簡便な測定法を編み出した。この方法では、密封容器中で硝酸などにより試料を溶解して、離脱した炭酸ガスを赤外分光で測定する。原料や、炭酸基を含む銅酸化物は基本的には炭酸塩であるので、炭酸より強い酸で溶解すれば、イオン化傾向により、炭酸ガスが離脱する基本的な性質を用いたものであるが、これが非常に効率の良い方法で、数mgから10mgで、目的とする炭酸量を定量することができるし、感度も極めて高い。容器も樹脂製の円形の物が流用できる。環境の CO_2 ガスは、あらかじめ空の容器を測定して、引き算するので、市販の専門の分析器のように長時間のパージに時間をかける必要もない。一般的な赤

分光器と100円ショップで手に入る容器で、済ませた話なので、特に成果としてあげることに対しては、躊躇もあるが、その効果は非常に大きく、プロジェクト期間内に特許も成立した。

さて、この分析手法により、原料や合成した試料中の炭酸基の分析が容易になったので、次には、原料から完全に炭酸基を除去した。これも、原料となる炭酸バリウムを脱炭酸した酸素雰囲気中で根気良く焼くという作業が基本になる。図20に示すように、この手法により、TI-1223の相生成が促進されていることがわかる。常圧合成したTI-1223のTcも124Kまで到達し、明らかに性能の向上が見られた。また反応温度も下がり、図23に示すように、銀シース線材内での直接反応による単相化も可能なことを示した。Cuの添加量をふやすことで、反応温度の更なる抑制が可能であり、銀ホイール内で、c軸方向が揃った、一軸配向が実現できることも明らかにした。これらは、CREST外の成果としてではあるが、特許化もなされている。プロジェクトでは、過去のTIを含む超伝導体の線材化に向けた合成法とは全く異なった手法、つまり、基本的な元素以外は添加しない、むしろ純化による反応促進という合成ルートを明らかにし、この手法が、TI-1223、TI-1234という材料の線材化を可能にすることを証明した。

このようなバルク開発の成果は、薄膜合成においても100%還元された。特に、アモルファス膜は炭酸ガスを吸いやすい。アモルファス膜の場合、その膜中の炭酸基の除去や、分析法は、プロジェクトでは、カバーしなかったが、炭酸基の割合をいかに一定に保つかということに関しては、最大限の注意が払われた。

Cu系薄膜超伝導体の開発

TIの含有率をへらしたCu系超伝導薄膜の開発については、APE法ではカバーでき

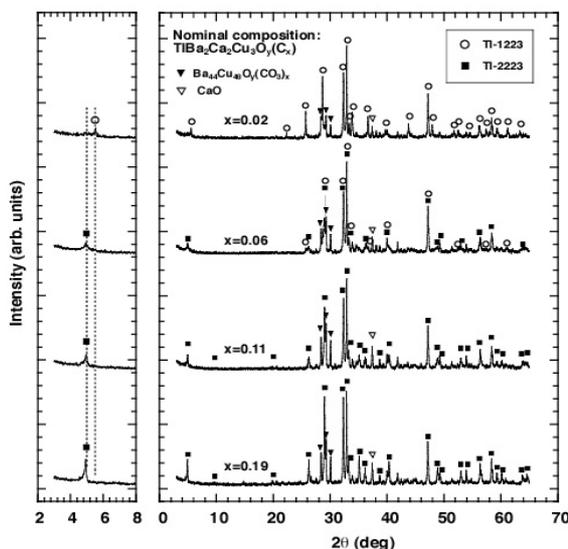


図 20 TI-1223、TI-1234 の合成に対する残留炭素の影響を示す図。例は TI-1223。下から上に向かって残留炭素の量が減っている。炭素が多いときには、TI-2223 が生成し、炭素をすくなくすると、TI-1223 の生成がスムーズになる。

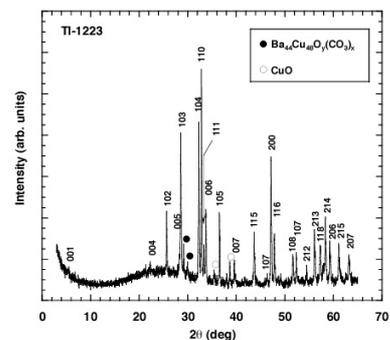


図 21 銀シース線材における直接反応による TI-1223 相の合成。従来の TI-1223 の合成では、TI を徐々に飛ばしながら、TI-2212、TI-1212、TI-2223、TI-1223 と合成を進行させていた。銀シース線材内で一発反応による TI-1223 の相生成は、TI-1223 線材化を可能にする。ここには示さないが、この方法により、1 軸配向試料も合成可能なことを確認している。

ないので、高周波スパッタによる人工積層格子の手法を用いて、その合成ルートが探索されたが、結果的には、超伝導発現のファクターを洗い出すことはできなかった。図22のように、X線では、はっきりとした超格子構造を示し、伝導も金属的であるが、大半は、低温においては、アンダーソン局在により、絶縁体となる。図23のように10~20K程度のTcを得ることもあったが、作製法自身の確立にはいたらなかった。このときには、スパッタのターゲット自身にはTIを含有させ、作製した薄膜には特性X線分析で検出できるほどのTIが残らないという、特殊な手法が用いられていた。結果的に作製された薄膜にはTIが残らないので、プロジェクト当初目指した、TIを触媒とした薄膜形成がされているとの見方もあったが、結論は出せなかった。一方、図24のように無限層においても、Tcを出すことはできた。Ndを入れなくて、CuO₂ネットワークの一部の酸素を抜くことによって、ネットワークを壊しながら電子をドーピングし、電子ドーピング系を実現するという手法で、学術的にはそれなりの意味はあった。しかし、アンダーソン局在が起こるほどのディスオーダーが発達する直前で超伝導を出すという手法は、作製法の確立や実用薄膜開発への適用という点では限界もある。

ナノドットによる柱状欠陥の導入

柱状欠陥を薄膜に導入する方法として、薄膜作製以前に、基板上にナノメートルスケールの粒をスパッタにより作製しておき、これにより、薄膜作製時に自動的に磁束のピン中心が成長するという手法を提案した。この手法の主な利点は、非常に安価であるという点である。TI-

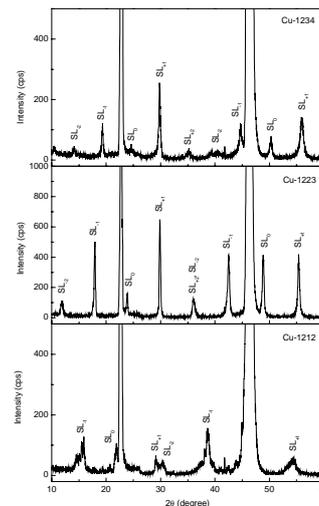


図 22 人工積層格子によるCu系超伝導薄膜。この膜は金属性を示すが、超伝導にはなっていない

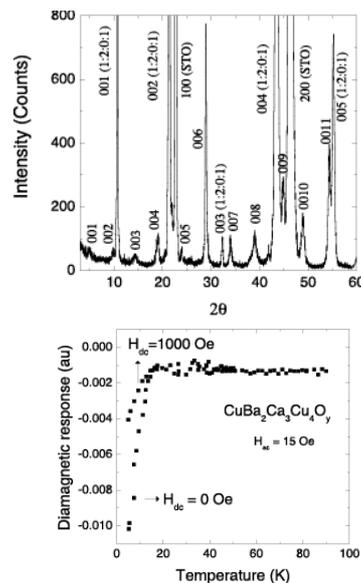


図 23 超伝導を示す Cu-1234 薄膜の X 線パターン(上)とその超伝導 (下)。

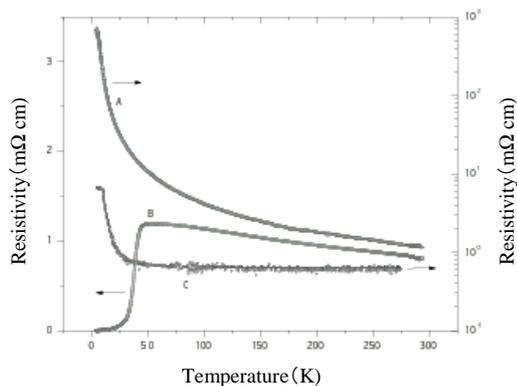


図 24 無限層の超伝導。低酸素分圧下でスパッタした無限層は、抵抗率が下がり、ついには超伝導になる。しかし、酸素分圧を下げすぎると、室温の抵抗率はさがるものの、超伝導は消失する。

1223薄膜は、現状で、十分な J_c を有することから、この手法の導入がすぐ必要になることはないが、将来的には、TI-1223の薄膜に限らず、他の材料にも適用されていくことになる。Cu-1234では、バルクに対する重粒子線照射の実験によりナノドットによるHirr向上の限界の目安がシミュレートされており、それによれば、ピーク効果により、77Kで30T以上が期待できることが示されている。また、ISS2003では、他グループによりこの手法が実際にYBCO系の超伝導テープ線材に適用できることが報告されている。

酸素17の新しい導入法の開発

Cu-1234の超伝導の発達の温度依存性に関して、Cuサイト上と酸素サイト上で違いがあるか調べるために、酸素17を試料に導入することが求められた。d+is波の検証のために必要であった。結果的にはd+is波に対する肯定的な結論は得られなかったが、このために開発された酸素17の導入法は取り上げておくべきであろう。従来の高温超伝導体では、酸素17雰囲気中でアニールすれば、勝手に酸素は置き換わっていく。機密性のよい酸素17環流炉でのアニールが標準的な方法である。高圧安定相であるCu-1234にはこの方法は適切ではなく原料に酸素17を仕込む必要があった。そのためには、酸素17を含むプリカーサーをまず作らなければならない。材料の金額は科学的な意味をもたないことかも知れないが、リッター数万円で、1回実験に失敗したら、数十万から数百万円が無駄になるというプレッシャーの実験は度胸勝負のところがあり、しかも、試料を作ったことが直接パブリケーションに繋がるわけではない。大変地味だがこの仕事は酸素17導入の新しい手法の開発も含めて、十分評価されるべきであろう。

(2)得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

マイクロ波フィルター用高温超伝導薄膜の世界の開発現状と、プロジェクトの研究成果との比較を表2に示す。プロジェクトの成果として、実用材料としてのTI-1223の薄膜の作製法を確立したが、この技術を保有しているのは、われわれだけである。もちろんTI-1223薄膜の作製法は、TI-2212薄膜の作製にも転用でき、その薄膜作製を著しく容易にする。現在、実用材料としてのTI-2212薄膜を作ることのできるアクティビティは米に2箇所、ドイツの1箇所だけである。また、イギリスのTI系超伝導材料開発グループからは、TI系超伝導薄膜作製についての技術供与を非公式に依頼されている。また、韓国のグループとは、線材化も含めて、12月に話し合いを持つ予定になっている。オーストリアやイギリスのグループからの試料提供に対する打診も頻繁になってきている。

このような意味で、2002年秋に確立し、その後発展を遂げている薄膜作製技術は、「超伝導フィッシング」のデモンストレーションも有効に働き、ゆっくりとではあるが、世界的に認められ、TI系超伝導材料の実用化にむけた流れを作り出して

表2 マイクロ波フィルター用高温超伝導体薄膜の世界の研究の現状

超伝導体	基板	Tc	動作温度	会社名
YBCO (異方性)	MgO 5~8)	90K (Bulk 90K~95K)	70K	THEVA(独)
TI-2212 (異方性)	MgO >100)	107K (Bulk 110K)	80K	STI(米、商用) DuPont(米)
TI-1223 (異方性)	LSAT 11~20)	108K (Bulk 133.5K)	90K	CREST/AIST

いる。この研究成果の本当の価値というのは、論文というよりも、TI系超伝導材料の薄膜作製技術といった「無形の技術」、また、「実用薄膜」といった現物そのもので評価されてきており、実用材料の作製法と材料そのものを創り出すというプロジェクトの看板にかなったものとなっている。学術的にも、国際会議「超伝導材料及び磁性体材料に関する国際シンポジウム2001、ASMM2D-20001」でベストポスター賞に採択されているように、薄膜作製技術の確立以前の早い段階から、評価されていたことを明記しておく。

高温超伝導材料の実用化というのは、TI系超伝導体ではとくにそうであるが、競争の時代はすでに終わっており、今後、実用高温超伝導体の開発コミュニティーのコミュニティー自身の社会への責任として、互いに協調しながら、「産業上役に立つもの」を出していくというフェーズになっているのは、この分野の研究者の共通の認識である。その意味で、われわれの確立した薄膜作製法の積極な活用、技術移転の道を探り出し、普及していく活動が求められている。そのような活動が、プロジェクトの成果の効率的な社会還元には必要となろう。

バルク材料に関していえば、Nature Publishing GroupのWebサイト(Materials update 2002/4/25)に取り上げられるように、特別な評価をされている。物性研究上の新物質開発に行き詰っている感のある、高温超伝導の学術研究の分野で、まさに物質開発の立場から、超伝導体の最も本質的な性質であるTcの上限はどこかといったテーマで、新雑誌の立ち上げPRの一環としてのような、取り上げられかたをしたことは、大変に意義が大きい。プロジェクトの研究とわれわれの主張が先導する形で、TI-1223が100Kを超えるTcを持つ高温超伝導体の標準的モデル物質と認められつつあることをこの事実は示している。

論文について

論文は、2001年以降は、SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY誌を中心に投稿されている。同誌のImpact Factorは2.138であり、超伝導の専門誌としては、現在最も高くなっている。我々が投稿している、それ以外の雑誌のImpact Factorは次のようになっている。

APPLIED PHYSICS LETTERS	4.207
IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY	1.266
JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN	1.596
PHYSICAL REVIEW B	3.327
PHYSICAL REVIEW LETTERS	7.323
PHYSICA C-SUPERCONDUCTIVITY AND ITS APPLICATIONS	0.912
SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY	2.138
INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS B	0.604
JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS	1.139
JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDS	1.140
PHYSICA B-CONDENSED MATTER	0.609

(1) "Effect of surface needles on microwave surface resistance in $Tl(Ba,Sr)_2Ca_2Cu_3O_y$ superconductor films on LSAT substrate", A. Sundaresan et. al., Supercond. Science & Technol. 採択済み

我々のプロジェクトで最重要視した実用超伝導薄膜TI-1223の作製法をまとめた論文であり、最重要論文であると位置づけられる。この論文の将来的な価値は、我々が開発した作製法の普及の度合いによって決定させることになる。

(2) "A simple test for high J_c and low R_s superconducting thin films", A. Sundaresan et. al., Supercond. Science & Technol. Vol.16 (2003) L23-L24. 被引用回数 0回。

我々が作製した薄膜の性能を「超伝導フィッシング」によって実証した論文。同時に J_c の新しい評価法を提供した。Supercond. Science & Technol.誌では、1号につき、1件から数件の論文が、購読が無料の論文に指定され、促販用として利用されるが、その促販用論文として採択されている。

(3) "Growth of $TlBa_2Ca_2Cu_3O_y$ superconducting thin film on CeO_2 buffered sapphire substrate", A. Sundaresan et. al., Physica C vol.378 (2002) 1283-1286. 外部被引用回数 1

サファイア上のTI-1223の超伝導薄膜作製法の報告。 R_s に影響がでる、TI-1212のバッファ層を使っているが、直流応用にはこの手法は問題を起さないので、韓国のTI-1223線材開発グループが、引用している。

(4) " $TlSr_2CaCu_2O_y$ template for the growth of superconducting $Tl(Ba,Sr)_2Ca_2Cu_3O_y$ thin films on CeO_2 buffered sapphire", A. Sundaresan et. al., Supercond. Science & Technol. Vol. 15 (2002) 960. 自己引用4回。

論文(3)とあわせて、サファイア上のTI-1223薄膜の作製法をまとめた論文。この仕事に関しては、我々のグループとしては、この論文を標準論文として扱い、継続的に引用し、仕事の内容を関連付けながら発展させていることを学会にアピールしている。

(5) "Preparation of TI-2212 and TI-1223 superconductor thin films and their microwave surface resistance", A. Sundaresan et. al., IEEE T APPL SUPERCON 13 (2): 2913-2916 Part 3 JUN 2003, 被引用回数0

我々のTI-1223薄膜作製の手法が、サファイアを基板としたTI-2212作製でも問題なく使え、有効であることを示した論文。TIを含む薄膜の開発として、重要な論文となるであろう。ASC2001で登壇発表に採択された仕事。

(6) "Relationship between the surface resistance and depairing current density of superconductors", S. Ohshima et. al., IEEE T APPL SUPERCON 13 (2): 3578-3580 Part 3 JUN 2003, 被引用回数0

J_c と R_s の関係について、実験と理論両面から関連付けを行った報告。 R_s を実用薄膜の特性の指標として取り上げた本プロジェクトにとって、薄膜開発の重要な指針を与え続けた内容である。また、(2)の仕事に適用され、新しい J_c 評価法の発明のヒントになった。

(7) "Preparation of $CuBa_2Ca_3Cu_4O_y$ superlattice thin film by self-ass

embling epitaxy method”

Sundaresan A et. al., PHYSICA C 357 (2001) 1403-1406, 自己参照 1

10 ~ 20KのTcをもつCu-1234を交互積層の高周波スパッタによって作製したことを報告。プロジェクト後のCu-1234薄膜開発の行方によって、この論文の価値は決まる。

(8) “Artificially layered (Cu,C)Ba₂Ca_{n-1}Cu_nO_x (n=1-4) films by sputtering deposition”, N. Kikuchi et. al., PHYSICA C 2003年中に採択の見込み、高周波スパッタによる交互積層のCu系の薄膜作製に関する報告。超伝導については言及していない。同じ内容の国際会議等の発表では、米空軍の研究機関や富士通研究所の研究者が強い関心を示していた。

(9) “Electron-doped superconductivity induced by oxygen vacancies in as-grown Sr_{0.6}Ca_{0.4}CuO_{2.8} infinite-layer films”, J. C. Nie et. al., Supercond. Science & Technol. Vol. 16 (2003) L01-L03. 被引用回数 0 回。電子系無限層超伝導薄膜の超伝導の報告。促販用購読無料論文に選択されている。

(10) “Sputtered nanodots: A costless method for inducing effective pinning centers in superconducting thin films”, A. Crisan et. al., Appl. Phys. Lett., vol.79 (2001) 4547-4549., 自己引用回数 7回。ナノドット導入による薄膜作製時と同時に自動的にピンニングセンター形成させる方法を提案した論文。著者の一人のCrisanが提案したこの方法は、他グループにも採用され始めている。ISS2003では、YBCOに対する適用例が発表されていた。また、交流帯磁率による薄膜のJcの見積もり方に関する方法も提示しており、この仕事以降、市販の装置に入れることができる小面積の薄膜のJcの評価に関しては、われわれのグループはこの方法を標準法としている。超伝導の分野で優れた仕事の再編纂誌であるVirtual Journal of Applications of Superconductivityにも採択されている。

(11) “Strong reduction of thermally activated flux jump rate in superconducting thin films by nanodot-induced pinning centers”, A. Crisan et. al., Appl. Phys. Lett., vol.80 (2002) 3566-3568., 自己引用回数 2 回。(10)の論文と対になり、実証を試みた論文。Virtual Journal of Applications of Superconductivityにも採択されている。

(12) “Third-harmonic susceptibility for studying dissipation in heavy ion irradiated (Cu,C)Ba₂Ca₃Cu₄O_{12-y} high-temperature superconductors”, A. Crisan et. al., Supercond. Science & Technol. Vol. 15 (2002) 1240-1243. 被引用回数 0 回。(10)や(11)の名のドットテクノロジーを採用した場合、Cu-1234で期待できる効果を重粒子線照射でシミュレートした仕事。ピーク効果により、77Kで30T以上の不可逆磁界が得られるとした。

(13) “Oxygen isotope effect of high-pressure synthesized (Cu,C)Ba₂Ca₃Cu₄O_y”, A. Iyo et. al. Physica C vol. 378 (2002) 298-302. 被引用回数 0 回 d+is波の検証のために必要となったCu-1234に対する酸素17の導入法の報告。地味であるが必要不可欠な重要な仕事。

(14) “Tl valence change and T-c enhancement (> 130 K) in $(\text{Cu,Tl})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ due to nitrogen annealing”, K. Tanaka et. al., Phys. Rev. B 63 (2001)064508. 自己引用回数6回。CuTl-1223が130Kを越えるTcをもつことを報告した第1報。プロジェクトの材料開発全体の方向性に決定的な役割を果たした論文。この仕事が育ち、その後世間に評価されていくことになる。

(15) “Photoemission study of $(\text{Cu, Tl})\text{-1223}$ and Tl-1223 with T-c above 130 K”, N. Terada et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 11 (2001)3126-3129. 被引用回数0回。Tc $>$ 130KのTI-1223におけるTIイオン、Cuイオンのアニールによる価数の異常な変化の報告。Tc $>$ 130Kの機構解明の発端の一つになった。

(16) “Carrier reentrance by selective reduction in Tl1223-system”, I. Hase et. al., 被引用回数0回。(15)の実験を、計算の立場から説明。光電子分光の実験と相前後して行われ、実験遂行の上の重要な指針となった。

(17) “Study on enhancement of T-c (≥ 130 K) in $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconductors”, A. Iyo et. al., Supercond. Sciece & Technol. Vol. 14 (2001) 504-510. 自己引用回数10回。Review Bookでの引用1回。Review Bookは、2003年の春の段階で書かれた、R. Hott著 “High Temperature Superconductivity ~ Materials aspects of High Tc Superconductors for application”。(2004年出版予定)。Tc $>$ 130K のTI-1223の学術的な意義を確定した、プロジェクトの中核論文。この論文により、我々のグループの公式の国際発信の雑誌として、Supercond. Sciece & Technol.誌の選択が規定路線になる。その後、Supercond. Sciece & Technol.誌のImpact Factorが超伝導の専門誌の中ではトップになり、この選択が正しいことを証明。同誌もこの論文以来、我々の投稿に対して好意的である。

(18) “High-pressure synthesis of $\text{TlBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n=3$ and 4) with T-c =133.5 K ($n=3$) and 127 K ($n=4$)”, A. Iyo et. al., Physica C 357 (2001) 324-328. 内部引用6回、外部引用2回 (Nature Materials 誌の”顔”となるReview Articleと、R.HottのReview Bookに引用されている)。(17)の関連報告。

(19) “Effects of residual carbon on phase formation of $\text{TlBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n=3$ and 4) superconductors”, A. Iyo et. al., Physica C 370(2002) 205-209. 引用回数0回。残留炭素のTI-1223の相生成にかかわる影響を報告。TI-1223, TI-1234の線材化への道を敷きなおした報告。

(20) “Superconducting and magnetic characteristics in the multilayered high-T-c cuprates $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-y}$ with T-c > 130 K probed by Cu and Tl NMR: High value for T-c”, H. Kotegawa et. al., Phys. Rev. B. 65 (2002) 184504. 内部引用1回。外部からの被引用回数1回 Nature Publishing GroupのMaterials Updateで、(17)の論文などの一群をなす仕事の内容を紹介する記事があったが、そこで、アブストラクト全文が再掲載されたのがこの論文。TI-1223のTc $>$ 130Kの機構解明をNMRで行った報告。

(21) “Pressure effect on Hall coefficient in multilayered high-T-c

cuprates ”, T. Watanabe et. al., J. Low. Temp. Phys. 131 (2003) 681-685.,被引用回数0回 最高のTcを求めて圧力効果を行った報告。

3.3 物性評価

(1) 研究成果の内容

このプロジェクトにおける、物性評価における成果は、多層型高温超伝導体の科学の発見である。多層型高温超伝導体の科学をキーワードとして表すとすると以下のようなになる。

- (1)結晶学的に非等価なCuO₂面の積層
- (2)選択的ドーピング (CuO₂面ごとに異なるドーピングが定義される)
- (3)オーバードープでの高いT_cの維持
- (4)多バンド、多成分型超伝導

結晶学的に非等価なCuO₂面の積層

多層型高温超伝導体の概念的な結晶構造をCu-1234を例にとって図にしたのが図25である。BaO層を含む電荷供給層が、CaとCuO₂面の交互積層構造で構成する超伝導層を挟む構造をとっている。超伝導を担うホールはCuO₂面上に存在するが、そのCuO₂面が4枚存在する。我々は電荷供給層に近いCuO₂面をOuter Plane(OP)とよび、Caに挟まれていたCuO₂面をInner Plane (IP)となづけている。この命名はプロジェクト開始よりちょっと前に北岡グループによってなされたものであるが、プロジェクトを通して、この命名に相応しい現象の発見があり、定着してきた。定着したということは、プロジェクトを通して、IPやOPと名づけるに足る新しい物理が多層型高温超伝導体にあることをしめし、新しい分野を切り開いたことを意味する。

従来の高温超伝導の理論では、等価なCuO₂面の積層または、単一のCuO₂面を仮定しており、複数種類のCuO₂面の存在は、単に問題をややこしくしているだけで、本質的な現象はなにもないとされていた。しかし、そのような従来理論が、「超伝導層がCuO₂面3枚で構成されるときに、その高温超伝導体はファミリー中一番高いT_cを持つ」理由を全く説明できないことも確かであった。

このような従来の高温超伝導体の科学に、新しい考え方を導入し、それがゆっくりとではあるが学会に浸透していっていること自体はプロジェクトの大きな成果である。

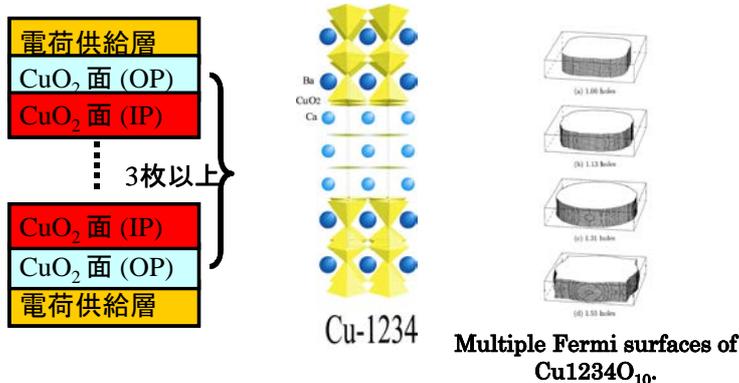


図 25 Cu-1234 を例にとった場合の多層型高温超伝導体の結晶構造の概念図。真ん中が結晶構造。左が、ポンチ絵。右が 4 枚の CuO₂面が作る 4 枚のフェルミ面。

選択的ドーピング

「電荷供給層からキャリアであるホールが超伝導層に供給されるが、キャリアを供給し負側に偏った電荷供給層の発生する静電ポテンシャルのために、注入されたホールは、なるべく電荷供給層に近いところにとどまる。」というのが「選択的ドーピング」である。この概念もこのプロジェクトで提出、定着したものである。命名は伊原によってなされた。このため一般的にIPのドーピングレベルはOPのそれに比較して小さくなる。

材料合成研究者は、その概念が命名される以前から、選択的ドーピングを暗黙のうち念頭において材料合成に取り組んでいた。

このプロジェクトで、Cu-1234における、選択的ドーピングが、バンド計算によって理論的に明らかにされ、暗黙的な知識は、定量的な数値を伴った明瞭な物理現象として捉えなおされた。この様子を示したものが、図26である。バンド計算では、ドーピングレベルを変化を、BaO層にある酸素（頂点酸素）の半分のFに変更したり、電荷供給層におけるCu層の酸素の数をかえたりしてシミュレートする。バンド計算では、4枚のCuO₂面に由来する4枚のフェルミ面が出現するが、このうち、IPの成分を多く含むIP由来のバンドのホール数は、ほぼハーフフィルドに相当する1に固定されている。これに対し、OP由来のバンドでは、オーバードープから、電子ドープ（hole数1以下）側まで大きく変化している。バンドでのハーフフィルド以下のホール数と実空間のCuO₂面での電子ドープとの関係を結びつける議論には注意も必要であるが、F置換のものについては、電荷供給層のCuが1価であると

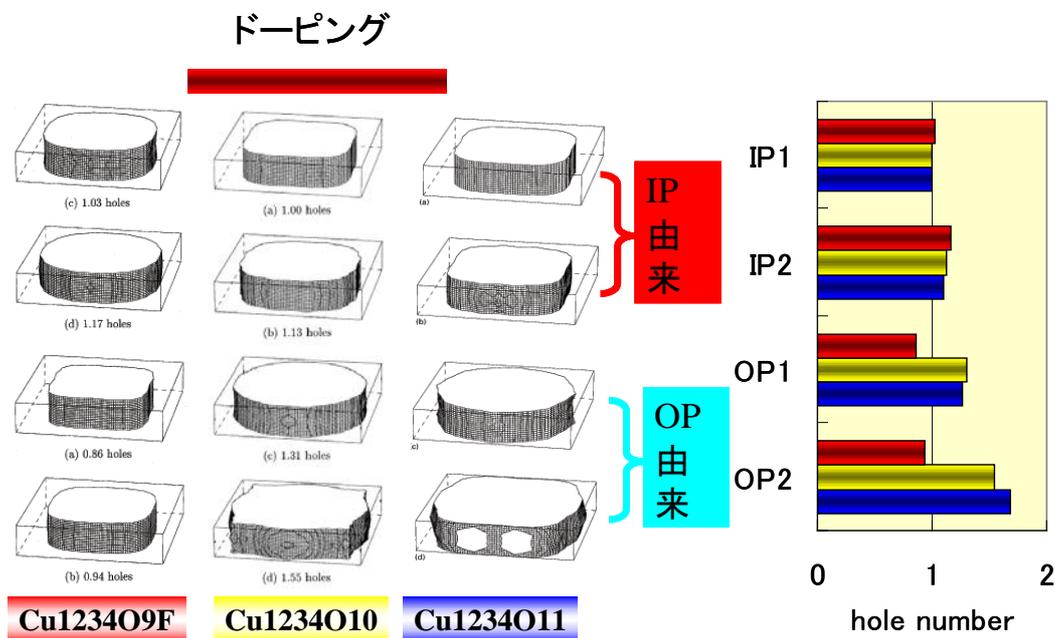


図 26 バンド計算からみた選択的ドーピング。矢印の方向に向かってドーピングが増加する方法。OP 由来のフェルミ面はドーピングが進行すると“太って”くる。IP 由来のフェルミ面はそれほどかわらない。それぞれのフェルミ面に対してドーピングが進行するに従ってどのようにhole数が変わるかを右に示す。この図では、各フェルミ面で上から下にドーピングが進行している。

考える限り、結晶全体の電荷バランスから、ホールドーピングのCuO₂面と電子ドーピングのCuO₂面がCa層を挟んで隣接するといった物質設計に相当することになる。現実の系では残念ながら実現していないが、似たような系でのホールドーピングのCuO₂面と電子ドーピングのCuO₂面の共存の探索という動機付けを与え、頂点F系や反強磁性秩序と超伝導の共存系であるHg-1245の研究に大きな刺激となった。バンド計算の結果は、実在の材料で起きている選択的ドーピングの説明にとどまらず、極端条件における新物性の予言で、材料開発を牽引した点でその意義は大きい。また、ラマン分光による多層型高温超伝導体独特のスペクトル形状の実験と説明もバンド計算にもとづいた多バンド超伝導体のモデルに基づきなされている。

選択的ドーピングは、実験的には、NMRにより明確に示され、静電ポテンシャルによる直感的な説明も与えられた。高温超伝導体の研究コミュニティにたいして、この概念を認めさせたのは、NMRの詳細な実験と、直感的説明によるところが大きい。実際に、2002年以降徐々に増えてきた我々以外のグループの多層型高温超伝導体の研究の報告では、理論の報告であれ、実験の報告であれ、NMRの論文を引用している。NMRでは、⁶³Cuの室温におけるナイトシフトがドーピングレベルと相関をもつため、IP、OPのおおののドーピングレベルを空間的に分離して評価することができる。この手法が、非常に多層型高温超伝導体に対して有効であることをしめしたことが、大きな成果であり、大きな一歩であった。これを元に図27のように、選択的ドーピングを系統的に整理した。IPとOPのドーピングレベルの差と、平均的なドーピング量との関係には、CuO₂面の枚数ごとに統一的な直線関係が実験的に導かれる。その関係を、直感的なモデルでも説明できる(図27の右)。この知見が、その後のHg-1245の超伝導と反強磁性秩序の共存の発見へのステップにもなっている。

オーバードープでの高いT_cの維持

プロジェクトの4年前にすでに、Cu-1234において、T_cが容易にドーピングレベルに依存しないことが知られていた。ドーピングレベルに対して、T_cがベル型と呼ばれる曲線に従い、非常に敏感にかわる従来の超伝導体の研究の延長線上では、どうしても理解できない現象で、高温超伝導体のコミュニティも容易にその事実を受け入れなかった。歴史的には、CuO₂面が4枚ある高温超伝導体(4枚系)で、T_cがドーピングレベルに極めて鈍感であるということの報告が、「選択的ドーピング」を実験的にひっかけた初めての報告となっている(1996年)。その結果4枚系は、従来の高温超伝導体では、超伝導の発現が極めて難しいか、低いT_cしかえられな

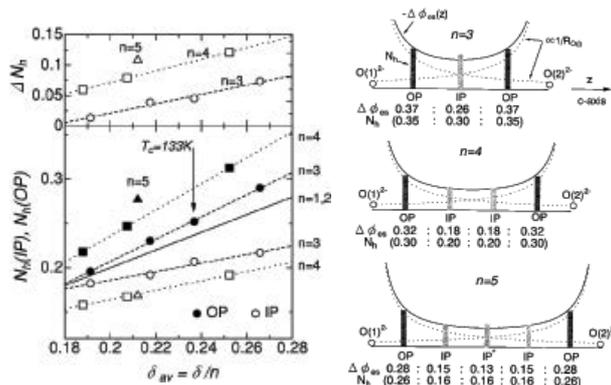


図 27 NMR からみた選択的ドーピング。左図は、⁶³Cu のナイトシフトから評価した各 CuO₂ 面上のドーピング量。ホールは IP より OP に入りやすい。右図は、頂点酸素による静電ポテンシャルから、直感的にホール数を求めたもの。両者の一致は非常によい。

いと考えられていた超オーバードープ領域で、依然として高い T_c を保つことができる、これが、「オーバードープにおける高い T_c の維持」である。振り返ると、伊原らが発見した、 $Tl-1234$ (1988年)や $Cu-1234$ (1993年)が何れも発見当初から、高い T_c を発現したのは、「オーバードープにおける高い T_c の維持」によるものと考えられる。4枚系にこだわっていた姿勢は、材料開発研究者が、選択的ドーピングを暗黙のうちに念頭において材料合成に取り組んでいた事実の現われでもある。

「オーバードープにおける高い T_c の維持」は、 T_c の主要な決定要因となっている CuO_2 面と「随伴している」 CuO_2 面の二つがあるということを暗黙的に仮定している。図28に T_c のドーピングレベル依存性を従来の高温超伝導体と比較して概念的に示した。 $Cu-1234$ では、IPのドーピングレベルがほぼ一定に保たれ、このIPが T_c を決めている。OPはドーピングレベルも変化し、「内在的な固有の T_c 」もそれに伴って変化するが、 T_c を決める主要な CuO_2 面ではない。当たり前のようにあるが、こうなっていると何が起きるのか？ どうしてこのようなことが可能なのか？ といった問題が、「選択的ドーピング」と「オーバードープにおける高い T_c の維持」の二つの概念から、「多成分型超伝導」の概念につながっていく。その成果の説明の前に、「選択的ドーピング」のもっとも美しい例として、5枚以上の CuO_2 面を単位胞に含む「“超”超多層型高温超伝導体」の T_c について、その成果を述べる。

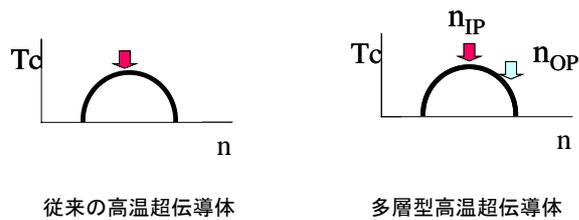


図 28 多層型高温超伝導体の T_c のドーピング依存性の概念図

T_c の CuO_2 面数依存性

高温超伝導体では、一般に CuO_2 面が1枚から3枚に増えると T_c が上昇する。3枚系が存在するファミリーでは、その T_c は一般的に100Kを越えてくる。4枚系が果たして、3枚系より T_c が高いかどうかというと、確たる実験があったわけではなく、また、さらに CuO_2 面を増加させていったときには、 T_c はある枚数で0Kになると考えられてきた。本プロジェクトでは、今まで、4枚系のほうが若干 T_c が高いとされてきた $Tl-12(n-1)n$ も実は3枚系のほうが高く、3枚系で T_c が最高になるという経験則は、高温超伝導体

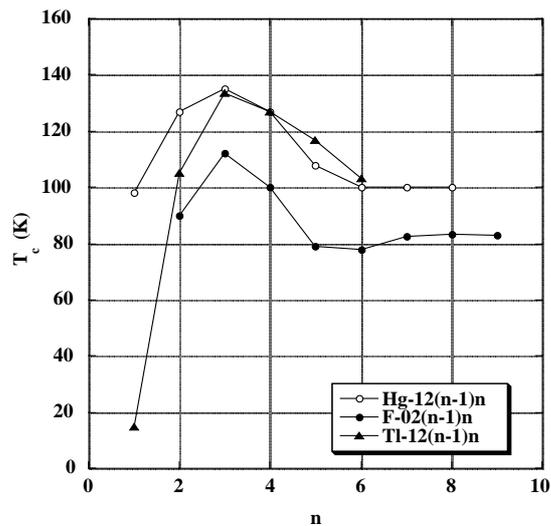


図 29 T_c の CuO_2 面数依存性。 CuO_2 面が 3 枚の時に T_c は最高になる。4 枚以上でも高い T_c は保たれる。

のどの物質系でも普遍的に成立していることを明らかにした。それを示したものが図29である。この研究を通して、5枚系以上でも T_c は100K程度の高い温度で一定に保たれることが明らかにされた。 CuO_2 面の枚数が増えたとしても、ホールの供給源である電荷供給層は一枚だけなので、もし平均的にホールが分布してしまうと、 CuO_2 面一枚あたりのキャリア数は減り、超伝導が発現しなくなると考える考え方もあり、従来の外部研究グループの薄膜の実験などはこれを支持していた。しかし、図29は「選択的ドーピング」により、注入されたキャリアは、特定の CuO_2 面に集中し、そこで超伝導を発現していることを意味している。そしてその面が系全体の T_c を決定している。 T_c を決定している面は、3枚系、4枚系ではIP、6枚系以上ではOPとなっている。また、 CuO_2 面間の電荷の不均一が起きたときの T_c の抑制は、30 K程度であることも明らかにされた。

超多層型高温超伝導体での T_c の維持は、「選択的ドーピング」と T_c を決める支配的な CuO_2 面があるという事実を明確にしているとともに、「最高」の T_c を発現するためには、面間の電荷の不均一性をなくす必要がある点も示している。

二つの T_c

「選択的ドーピング」と個々の CuO_2 面に固有の T_c があるという考え方は、実験的にみれば、Cu-1234において、NMRで発見された二つの T_c にその起源を求めることができる。室温のナイトシフトは、局所的なドーピングレベルを与えるが、その温度変化は、超伝導ギャップの発達の情報を持っているので、個々の CuO_2 面の固有の T_c を調べる有力なツールとなる。

図30に示すように、IPとOPではナイトシフトの温度変化が大きくことなり、ギャップの発達の仕方が異なることがわかる。 ^{63}Cu と ^{17}O のナイトシフトが同様の温度変化を示すことから、ギャップの発達は同じ CuO_2 面上では空間的に一様である。IPでは、超伝導ギャップは T_c 直下からBCS的に急速に発達していくのに対し、OPでは、 T_c 直下では、ゆっくりと発達し、ある温度以下で、BCS的な振る舞いになると考えると、このナイトシフトの温度依存性は説明できる。OPで、ギャップの発達がBCS的に変化する温度は、 T_{c2} と名づけられた。この T_{c2} が、OPの固有の T_c であると考えられるわけである。

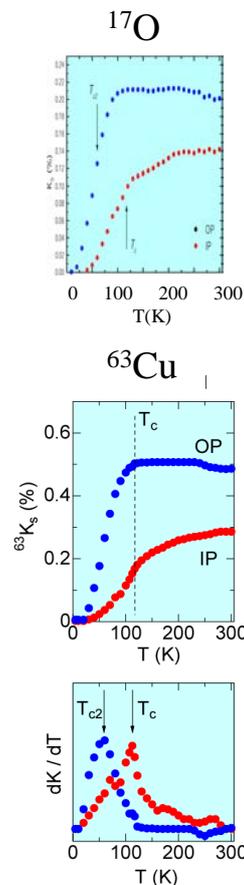


図30 Cu-1234のNMR。従来の高温超伝導体の場合、ナイトシフトの温度依存性の変極点が超伝導転移温度に相当する。Cu-1234の場合には、通常の超伝導転移に相当する T_c より低いところに“ T_{c2} ”がある。この T_{c2} より上では、OP上のGapの発達は通常のBCS型にならない。このような、振る舞いはCuイオン上でも、酸素イオン上でも観測され、Gapの異常な発達は、結晶全体で一様に起きていることが分かる。

このように、ひとつの超伝導体の中に二つのTcが存在し、ギャップの温度依存性も異なるという考え方は、超伝導の概念そのものに対する挑戦でもあった。単一のTcで、ひとつの巨視的状态におちていくのが超伝導であるから、「超伝導におけるTcはひとつ」は超伝導の大原則である。専門家であればあるほど、二つのTcは受け入れがたい議論である。このような状況をわかった上での「二つのTc」の概念の提出であったが、予想通り、投稿論文の審査も難航した。

二つのTcの考え方は、BCS理論の発見の直後、そのBCS理論を多バンド超伝導体に拡張して、提出されていた(1959年)。理論では、多バンド超伝導体の基本方程式とギャップの発達について報告されているが、多バンド超伝導体でも普通はバンドがひとつしかない超伝導と似たりよったりのギャップの発達をし、Tc2がギャップの発達にあらわにはでてこない。バンド間の相互作用(バンド間のBCS対のホッピングの確率)が大変小さいという非常に特殊なケースのときに現れる例外としてTc2の存在が、言及されており、どの程度小さければ良いかは議論の対象にはなっていなかった。

このような事情から、40年間、二つのTcを持つよう超伝導体が見つかっていなかった。Cu-1234において、初めて二つのTcが確認されたのである。図31に、理論をCu-1234のケースに合わせて計算しなおしたものを示した。教科書に掲載され「超伝導におけるTcはひとつ」という命題の根拠になっているギャップの発達も比較のために示した。左側の図では、バンド間の相互作用は、バンド内の相互作用のおよそ2%程度に設定してあ

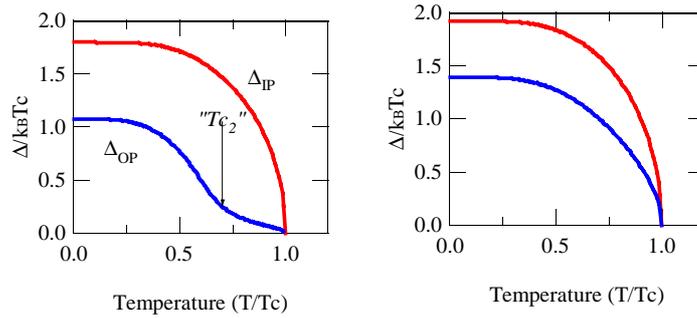


図31 二つバンドがある場合のギャップの発達とTc2。右が普通多バンド超伝導体。左は、バンド間の相互作用が非常に弱い場合におきる。Cu-1234では、このようなギャップの発達になっていると考えられる。このような現象が見つかったのは、Cu-1234がはじめて

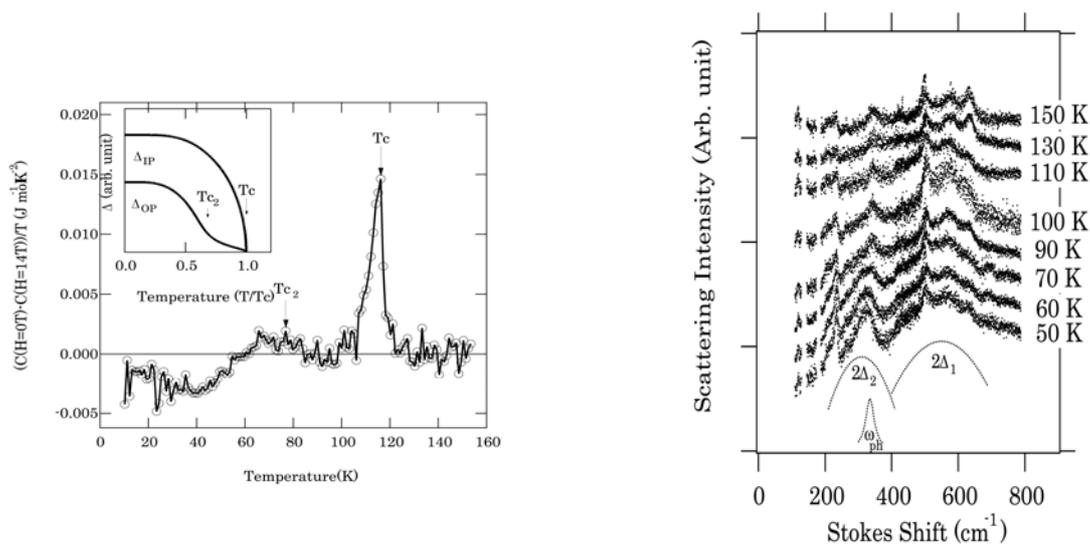


図32 左は比熱で見たTc2。右はラマン分光で見た二つの超伝導ギャップ。

り、右側では、20%程度に設定してある。Cu-1234の二つのTcは比熱やラマンの実験でも確認されている(図32)。ラマン分光で観測されている強い格子振動の構造は、多バンド超伝導でA.J.Leggettが予言した集団励起モードと結合した結果と解釈している。バンド間の相互作用が弱く、バンド毎にたつ超伝導が、お互いに半独立状態にあるという状況を的確に表すという意味では、このような超伝導体はむしろ、「多成分型超伝導」と呼ぶべきであろう。バンドは複数の超伝導成分を作り出す「境界条件」を与えているだけで、その境界条件に名前をつけたのが「多バンド超伝導」である。「多成分型超伝導」は、「境界条件」がどのような形で与えられるかは特に問わない。

Tc2の存在は、「弱い成分間相互作用」があり、成分毎の「固有のTc」が大きく異なるときに出現する。「多成分型超伝導」の本質を、Tc2の存在ではなく、「弱い成分間相互作用」だとすると、たとえTc2がないとしても、すべての「多層型高温超伝導体」は「多成分型超伝導」を発現する材料ということになる。

成分制御

いろいろな多層型高温超伝導体のNMRの実験結果を系統的に整理すると、IPとOPのドーピングレベルの差が、0.07を超えると、Tc2が出現することが示された(図33)。また、一つの試料をアニールすることにより、「選択的ドーピング」で、OPのみのドーピングレベルを変え、Tc2の出現を制御することができる。Cu-1234における、アニールによるTc2の制御を模式的に表したものが図34である。図34には、理論モデルで予想されるGapの発

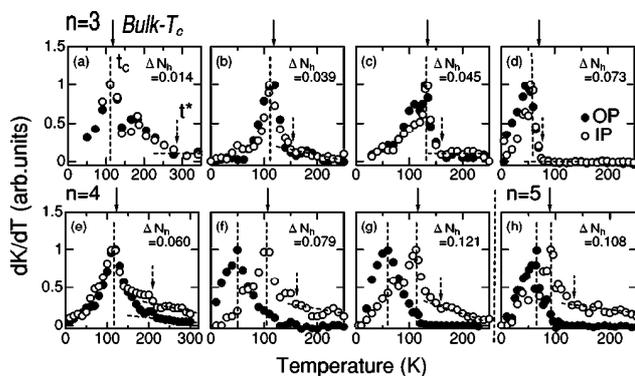


図33 NMRによるTc2出現条件の決定。IPとOPのドーピングレベルの差が臨界値0.07を越えるとTc2が現れる。

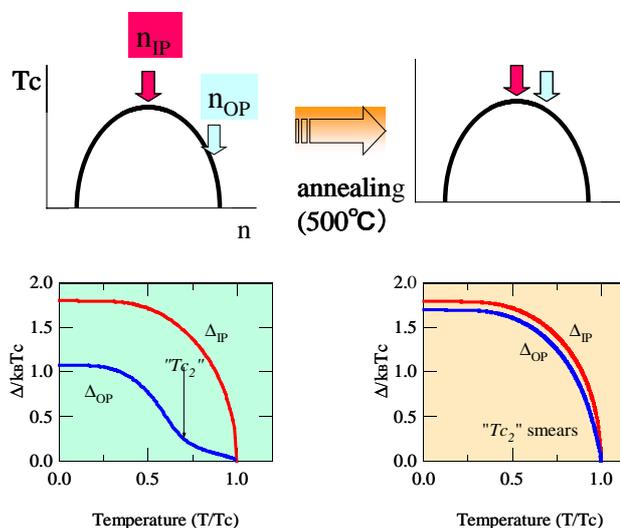


図34 Cu-1234における、アニールによるTc2の制御の模式図。アニールによりIPとOPのドーピングレベルの差が縮まり、Tc2が消える。上は、ドーピングレベルの概念図。下は、ギャップの発達を示す

達も示した。Cu-1234は、 T_c 自体はアニールによってもほとんど変化しないので、 T_{c2} の研究には適していた。 T_{c2} の制御は、磁束格子融解磁場という、マクロな物理量に影響を及ぼしているほか、そのアニールによる消失はNMRで確認され、OP上の小さなGapの消失もラマン分光でも追認された(図35、図36左図)。特に、磁束格子融解磁場のアニール依存性は、オーバードープ領域で、磁場に対する超伝導特性が良いことを示している。これは、 T_c はIPが担い、磁場に対する抵抗力は、OPが担うという役割分担が起きていることを意味している。このような役割分担は4枚系特有のものであり、実用材料設計に貴重な示唆を与えている。Cu-1234では、この役割分担による性能変化を確認するため、不可逆磁場(H_{irr})のアニール依存性も詳しく追っており、矛盾しない結果を得ている(図36右図)。

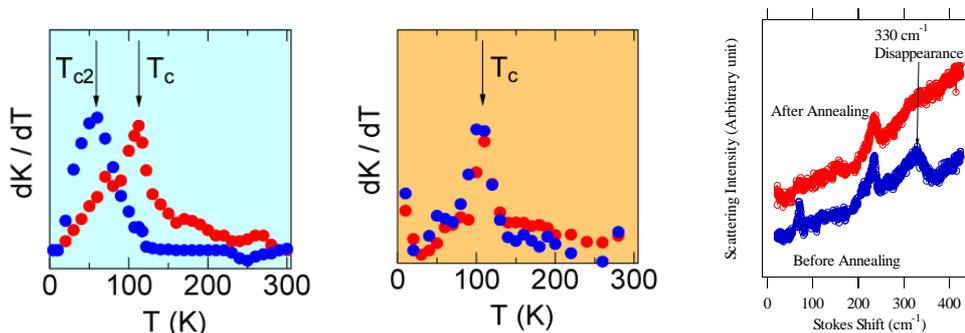


図 35 アニールにより T_{c2} は消失し (NMR、左図がアニール前、右図がアニール後)、OP 上の小さな Gap も消失する (右図)。

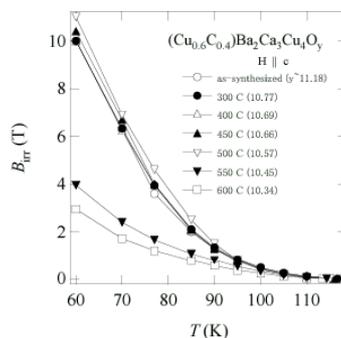
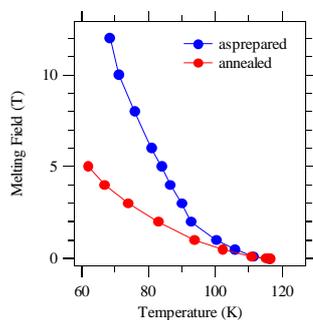


図 36 アニールにより T_c はほとんどかわらないが、磁束融解磁場は低くなり、90K 付近の異常も消失する (左図)。右図は不可逆磁界 (Birr または Hirr) のアニール依存性。Hirr の向上に寄与していた OP のドーピングレベルが下がると、高い Hirr が保てなくなると解釈できる。

多成分型超伝導体の異方性

絶対零度での H_{c2} ($H_{c2}(T=0K)$) を T_c 近傍の上部臨界磁場 H_{c2} の温度依存性から外挿して求め、さらに、その $H_{c2}(T=0K)$ からコヒーレンス長さ () を評価するのが、もっとも古くから行われているの見積もり方法である。Cu-1234 にこの方法を適用し c 軸方向のコヒーレンス長さ (ξ_c) を評価すると、その長さが 1nm 程度になる。結晶学的に見たとき、超伝導層 (CuO_2 面 4 枚で構成) の厚みは $0.32nm \times 3 = 0.96nm$ であり、この超伝導層全体に超伝導キャリアの対が広がっていると考えた場合と、1nm という長い ξ_c は、直感的にそのスケールと一致していた。この考え方を推し進め、 a 軸方向のコヒーレンス長さ (ξ_a) も見積もりその比をとることによって超伝導異方性 を求めると 1.6 程度になる。

従来的高温超伝導体では、単一成分の超伝導体の現象的理論 (異方的 Ginzburg-Land

au理論)とLawrence-Doniachモデルを用いて、この から超伝導の性能を整理し、予測することができたので、 は性能指数として使用されていた。従来理論をそのまま使えば、同じ方法で求めた が5~6のYBCOを凌駕する性能を期待できた。

Cu-1234の低異方性の決定には、 H_{c2} の実験値の確かさ、温度依存性から求めた $H_{c2}(T=0K)$ の確かさといった実験的な曖昧さもあった、これを回避するために、トルク法による異方性の決定をおこなった(図37)。一方で、バンド計算から理論的な異方性も求めた。オーバードープ領域では、トルクで実験的に求めた は11~20程度、計算で求めた は10程度で、両者は一致した。トルクは、超伝導の渦糸状態において、渦糸周りの超伝導電流の質量の平均値を測定していることに相当する。バンド計算での見積もりも複数あるバンドを含めた、波数空間における質量を求めているので、両者が良く一致することは、きわめて理解しやすい結果である。これに対して、 H_{c2} は、上部臨界磁場付近の超伝導の核生成の情報であり、一部の成分のみを選択的に抽出する傾向がある。このような選択的な抽出は、コヒーレンス長の異なる2つの超伝導体を空間的に隣り合わせて積

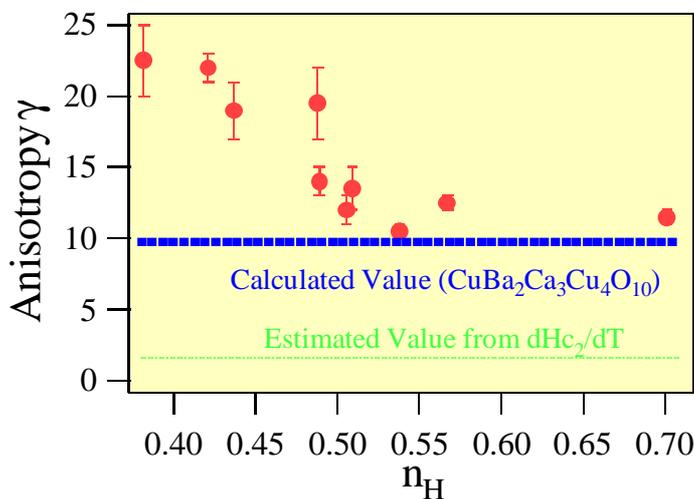


図 37 トルク法による異方性。計算値と H_{c2} の温度依存性から求めた値も併記した。

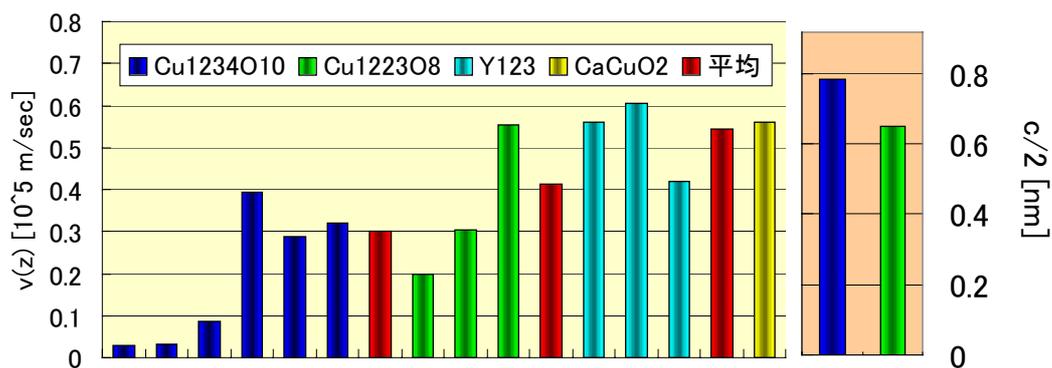


図 38 c 軸方向のバンドごとのフェルミ速度。Cu-1234、Cu-1223、Y123、CaCuO2 に関しては左側からそれぞれ、6、3、3、1 個のフェルミ面のフェルミ速度を記述。各物質に関して、フェルミ面個々の値の一番右側に平均値を記してある。右側の図は、Pippard のコヒーレンス長

$\xi \approx a_{BCS} \frac{\hbar v_F}{k_B T_c}$ が $c/2$ に成るときのフェルミ速度を、 $a_{BCS} \approx 0.18$ 、 $T_c = 120K$ としてスケールして比較したもの。

層させたときなどに、1980年代の半ばにすでに立木らが報告しており、Cu-1234でも似たような状況になっていると結論した。

コヒーレンス長は、Pippardが行った不確定性原理に基づく議論と従来のs波で等方的BCS理論の範疇からは、フェルミ速度と比例関係にある。バンド計算では、フェルミ速度を計算するのであるが、c軸方向のフェルミ速度は図38のように大きなばらつきがある。このようなばらつきが、測定手法によってことなる ξ を出しているものであると結論している。

多層型高温超伝導体と従来の高温超伝導体で、送電線などの従来型の超伝導の応用を考えた場合、その比較を行う必要がある。 ξ は従来の超伝導体で性能指数として広く採用されているので、多層型高温超伝導体に関しても、比較のための ξ の定義をしておく必要がある。 ξ は磁場に対する超伝導の強さを表す指標として用いられている。そうであれば、 ξ のかわりに不可逆磁界 (H_{irr}) がひとつの目安になるが、 H_{irr} には、ピン止め中心の性質や数や配置といった要因のほうが、物質本来の性質より強く作用する場合もあり、材料を構成するための物質の物性そのものの比較にはむかない。その意味で、ピン止め力が弱い極限での、磁束格子融解磁場 (B_m) が良い指標になる。従来型高温超伝導体で使われている ξ と B_m の関係式を用いて、 B_m から逆求めた ξ が性能比較にはもっとも適切な ξ となる (図39)。図39にまとめた結果から言えば、Cu系やTI系は、90K以上の温度での応用で優位性を示すことがはっきりとわかるとともに、TI-1223もY系やCu系に次いで低い ξ をもち、その T_c が高いことを考えれば、実用に適した材料であることがわかる。

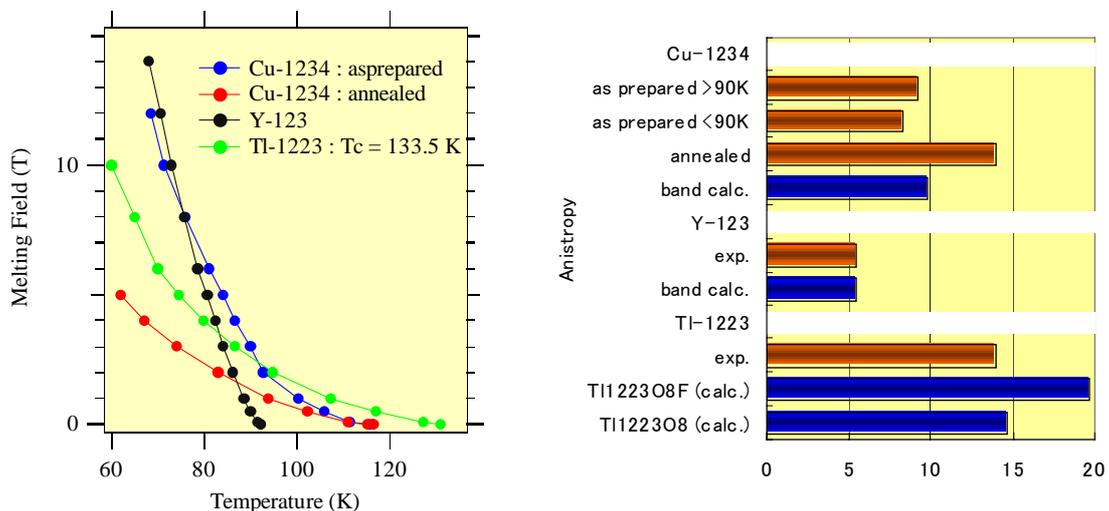


図 39 磁束格子融解磁場 (左図) とそれから求めた ξ (右)

反強磁性秩序と超伝導の共存

多層型高温超伝導体の物質設計の成功例がHg-1245における反強磁性秩序と超伝導の共存の実現である。材料開発の上からは、1993年のCu-1234の発見以前にまでさかのぼって物性評価に耐えるHg-1245などのHg系の超多層型高温超伝導体の材料合成法の開発

が進められていた。NMRにより「選択的ドーピング」の全貌があきらかになるのと同じに、Hg-1245における電子状態に新たなメスが入れた。Hg-1245は、 $T_c=108\text{K}$ という高い T_c を持つ超伝導体であるが、4Kの μSR は、 μ 中間子の明らかな歳差運動を捉えており、反強磁性秩序が成り立っていることを示している(図40)。反強磁性秩序は、60Kで3枚のIPを中心に成立し、40Kで電荷供給層を超えて3次的に発達していると見られる。反強磁性秩序が成立している温度領域では、超伝導が支配的なOPと反強磁性秩序が支配的なIPとが隣り合って積層し、それぞれの秩序は、お互いに染み出しあっていると考えている。順番からいうと、反強磁性秩序と超伝導の共存を示す報告はNMRによってなされた(図41)。従来の高温超伝導体では、アンダードープ状態では、 ^{63}Cu のナイトシフトは、擬ギャップがあくとされる温度で、ナイトシフトの温度微分が負から正にかわり山ができ、状態密度がへってきていると解釈される。そしてさらに低温で、強い反強磁性ゆらぎによって、NMRスペクトルからピークが見えなくなる。Hg-1245のIPはアンダードープであるにもかかわらず、擬ギャップと特定できるナイトシフトの温度微分における符号の逆転がなく、そのままシグナルが見えなくなり、強い反強磁性揺らぎの状態になる。さらに低温では、OPのシグナルがブロードになる。これはIPで反強磁性秩序が生じている影響だと考えることができる。IPとOPのそれぞれのドーピングレベルをかえ

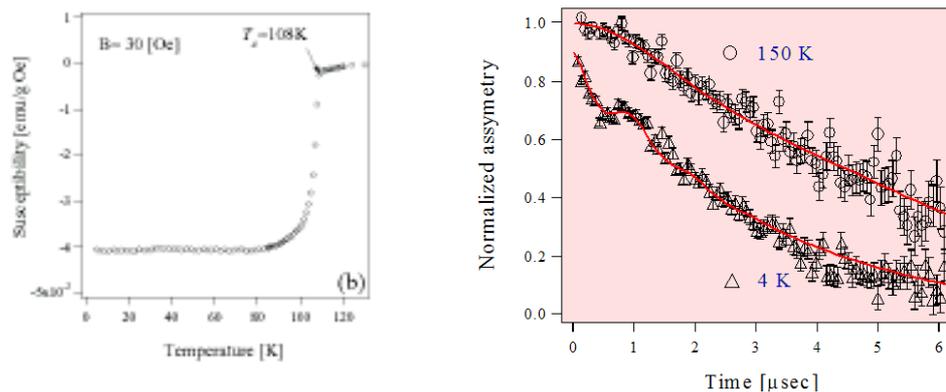


図40 Hg-1245の超伝導と μSR 。超伝導であるにもかかわらず、4Kでは μ 中間子の歳差運動が示すように反強磁性秩序が成立していることを意味している。

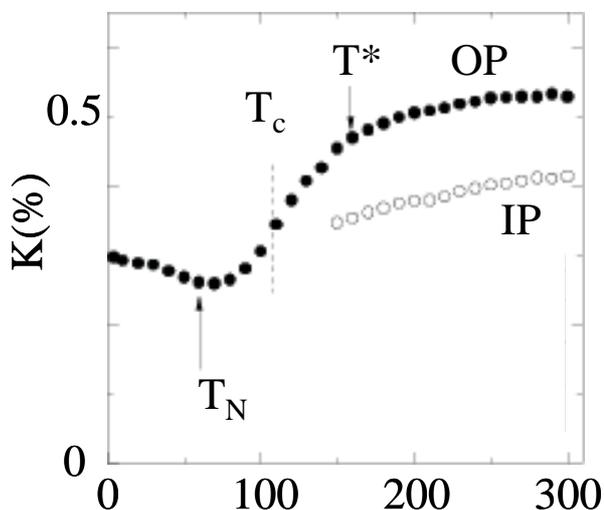


図41 Hg-1245のNMRの温度変化。IPの信号は、強い反強磁性揺らぎによって消失する。OPの信号に低温(T_N)で異常が現れるが、これは、IPで成立した強い反強磁性揺らぎによる影響を受けたものである。

ることによって、実現する電子状態の違いを反映したNMRスペクトルが観察されるが、それを系統的に示したものが、図42である。図42では、左から右に向って、全体がアンダードープの度合いが激しい材料となっている。IP、OPともそれほどアンダードープになっていない、頂点フッ素系においては、低温までIPが存在する。OPの線幅も低温で異常に広がることはない。しかし、よりアンダードープ側の頂点フッ素系では、IPが消える。しかし、低温で、OPの線幅が特に広がることはない。これは、IPの反強磁性揺らぎが秩序を形成するにいたっていないことに相当すると考えられる。そして、IPが十分にアンダードープになったHg-1245でOPの線幅に拡幅は明確に観測される。また、ゼロ磁場でも信号が見えることから、明確な反強磁性秩序を確認することができ、そのモーメントも決定できた（図43）。

Hg-1245は、多層型高温超伝導体の科学に基づく物質設計が成功し新しい現象の発見につながった大きな成功例であり、大きく評価している。国際会議にも招待されている。ただ、パイオニアワークの宿命で、Physical Review Letters誌に投稿している2件の報告は、審査が長期間に及んでおり、プロジェクト期間内に掲載は決定されなかった。

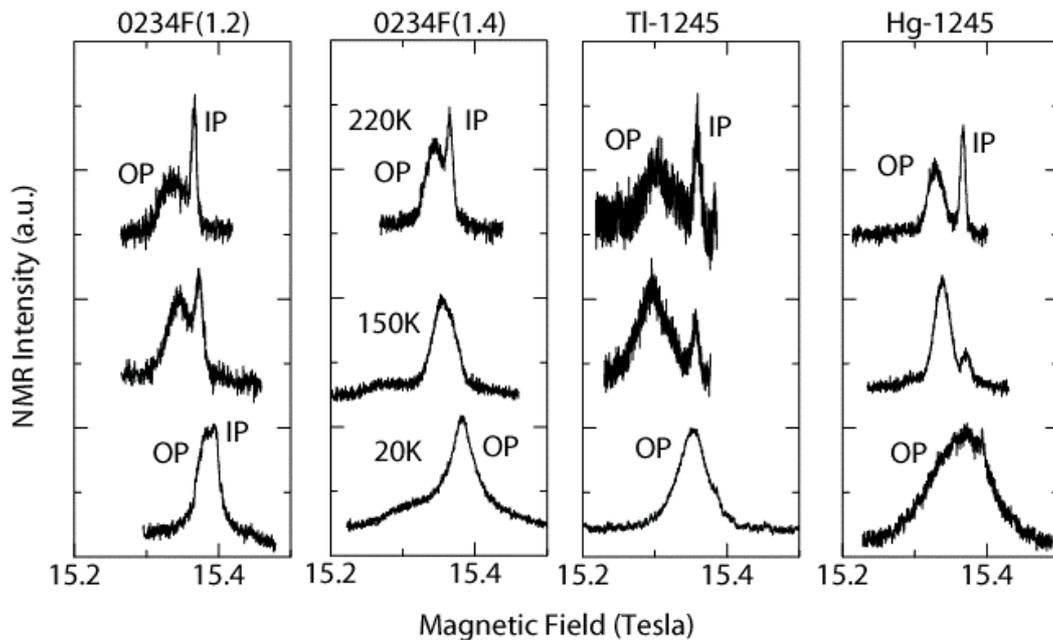


図 42 IP をアンダードープ側に振っていったときの、反強磁性秩序と超伝導の共存の発現を系統的に示した図。左側から右側に向かって、IP のドープレベルはアンダードープになっていく。それにつれて、反強磁性揺らぎが大きくなっていき、IP の信号が消失する。さらにアンダードープ側にもっていくと、低温で IP に反強磁性秩序が生じ、そのために、OP の線幅が広がる。

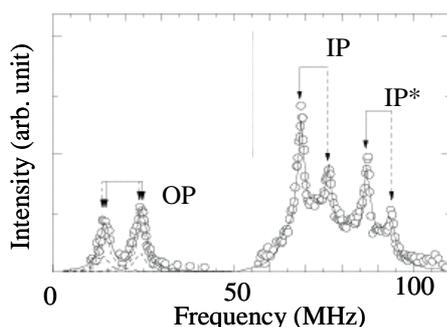


図 43 Hg-1245 のゼロ磁場下での NMR スペクトル。

多成分型超伝導

多層型高温超伝導体の超伝導の本質は何かと問われれば、「多成分」ということになる。「多成分」はmultiple componentsの訳語として使っており、「多成分型超伝導」は造語である。通常は多ギャップ、多バンド超伝導という言葉を使うが、それは、ギャップ方程式の基底状態の解の形や、ハミルトニアンの様態を表現しただけであり、単一バンド、s波の従来型超伝導体との質的違いを表現したものとはいえない。多成分型超伝導は、そこでの超伝導の新しいダイナミクスや、物理の本質にイマジネーションを与えるための造語である。

「多バンド超伝導体」を「内部自由度を持つ量子凝縮状態」の一種と考え、A.J.Leggett(2003年ノーベル物理学賞)は1960年代精力的に研究を展開していた。この理論では、多バンド超伝導体の特徴である集団励起モードの観測などは、「精密な実験」が要求されるため、困難であろうとされた。観測されたとしてもその効果はわずかで、多バンド超伝導体で単一バンドと一線を画す実験的に明確でドラスティックな現象があるとは思われていなかった。

Cu-1234のバンド構造、NMR、比熱、ラマン分光の研究を通して、一つの超伝導体の中で複数の成分が緩く結合している超伝導という考え方が生まれた。超伝導は1つの位相で指定される状態への相転移であるが、多成分型超伝導では、成分毎に独立に位相が定義できることになる。基底状態では、成分間の位相差はゼロである。A.J.Leggettの議論した「集団励起モード」はこの位相差の揺らぎである。「多バンド超伝導体」という言葉を使った場合、バンド間の相互作用こそが超伝導の発現に支配的であると考え、バンド間の相互作用の方を、バンド内の相互作用より大きくとることのほうが普通のセンスである。Cu-1234の研究における「多成分型超伝導」では、バンド間相互作用がバンド内相互作用よりはるかに小さいと考えることがむしろ本質的である。このような逆転の発想に基づけば、Ginzburg-Landau理論とA.J.Leggettの理論の融合で「集団励起モード」の非線形領域での振る舞いである「ソリトン解」を見つけることができる。これがバンド間位相差ソリトン(“inter-band phase difference soliton” (*i*-soliton))で、成分間の位相差が2回回るソリトンである。(*i*-solitonは、産総研 エレクトロニクス研究部門の部門長の命名で、“i”は、部門長のイニシャル。)

成分間の位相差がゼロになるソリトンの頭と尻尾の間では、位相差が生じる。(空間

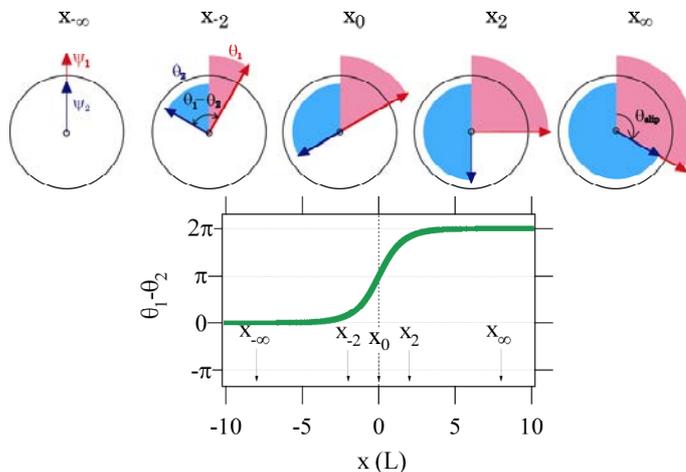


図 44 バンド間位相差ソリトン。下の図にバンド間の位相差の空間的な変化を書いた。上の図に示した矢印の場所で、二つの成分の絶対的な位相がそれぞれどうなっているかを示したものの。

的な位相差と、成分間の位相差という二つの位相差が出てくるので、注意してほしい。)空間的に位相が一様である超伝導体中にソリトンが発生するという事は、位相に欠陥(dislocation)が生じるということであり、ソリトンは位相欠陥そのものと考えることができる。量子凝縮状態における位相欠陥は、宇宙論においては宇宙そのもの、素粒子論においては粒子そのものとかんがえる考え方があるようで、量子力学の根幹を成す基本的な考えかたである。

i-solitonはプロジェクトでは理論的発見にとどまっている。残念ながら検証にはいたらなかった。しかし、概念の発見に使った、「弱いバンド間相互作用」は、ソリトンの必要条件ではなく、ソリトンの概念は広く多バンド超伝導体に適用できる考え方である。単一バンドでは、ソリトンを作るとソリトンの部分でおきる局所的な電流により超伝導電子の吹き溜まりが生じてしまうので、ソリトンは安定とならないが(1959年のAndersonの議論)、いくつかのバンドがあると、一つのバンドで流れた電流を、もう一つのバンドで「汲み戻し」、電流の合計をゼロにすることができるので、吹き溜まりが生じない。これが、*i*-solitonのトリックである。

i-solitonは位相欠陥であるから、超伝導リング中に生じると、そのリングの中の境界条件がかわって、リングの中には、中途半端な量子数を持つ磁束が生じることになる(Fractional Flux)。Abrikosovの渦糸での量子化に見られるような単位磁束を基本にした従来型超伝導とは一線を画す性質が*i*-solitonにはあり、これを使った、量子計算機の原理も含む、新しい超伝導エレクトロニクスがプロジェクトでは考案されている。

(2) 得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

「多層型高温超伝導体の科学の発見」はプロジェクトの独自性そのものの成果であり、学会や、高温超伝導のコミュニティーとは独立してまったく新しい境地を開いたことは高く評価されるべきであろう。コミュニティーのアクティビティーにぶら下がることなく独自の進化をしたため、仕事の内容全般をコミュニティーが受け入れがたいことも確かであった。高温超伝導体の研究が、その発見より12年以上も経過し、物性評価とはいえ物質開発を芯にした研究が、コミュニティーから過去のものと思われていた感もある。その中で、ようやく我々の仕事の真価を認める研究グループが出てきたことが、我々の仕事がいかに本質的であったかを証明している。引用のされ方も、議論の根幹となる部分で、概念そのものが引用されるケースがほとんどである。引用する研究者が良く内容を理解し、報告を熟読している現われであろう。また、「多層型高温超伝導体の科学」の一部である「多成分型超伝導」の概念は、広く他の「多バンド超伝導体」と呼ばれる物質の基本的な物理も包含し、新しい超伝導エレクトロニクスに発展する可能性を秘めている。それにとどまらず、その量子力学的物理概念自体は、宇宙論、素粒子論の研究者が取り上げるほど普遍的なものであり、原子気体のボーズ凝縮の研究にも新しい示唆を与えているなど、基礎科学に対しても大きな影響を与え始めている。

(1) “How to achieve the best performance superconductor based on Cu-1234”, H. Ihara, Physica C 364 (2001) 289-297. 外部引用回数1回 (R. HottのReview Book). プロジェクトの基本計画の骨子をまとめた報告。本プロジェクトの基本路線とコンセプトが明確に記述されている総合的な報告。本プロジェクトにおいては、一番重要な報告である。

(2) “Electronic band structure of $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{10+x}$ ($x=0, 1$)”, N. Hamada et al., 内部引用回数10回、Physica B vol.284 (2000) 1073.

Cu-1234のバンド計算。Cu-1234とプロジェクトの物理の基本ガイドであり続けた。

(3) “Electronic band structures of $\text{CuBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2}$ and $\text{CuBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+1}\text{F}$ ($n=3-5$)”, Hamada N, 内部引用回数10回、Physica C Vol.357 (2001) 108. 内部引用回数1回、Cu-1234の選択的ドーピングをバンド計算の立場から明らかにした報告。選択的ドーピングの研究の基本ガイドであった。

(4) “Carrier distribution and superconductivity in multilayer high-T-c cuprates proved by Cu-63 NMR”, Y. Tokunaga, J. Low Temo. Phys Vol. 117 (1999) 473., 被引用回数14回 そのうち外部3件, 多層型高温超伝導体の選択的ドーピングをNMRの研究から確立した仕事。

(5) “NMR study of carrier distribution and superconductivity in multilayered high-Tc cuprates”, H. Kotegawa et. al., J. Phys. Chem. Solid. Vol. 62(2001) 171. 内部引用回数8回, 選択的ドーピングに直感的な説明を与えた報告。

(6) “Carrier doping and superconducting properties in Cu-1234 and CuTi-1223 superconductors”, T. Watanabe et. al., Physica B 284 (2000) 1075.

内部引用回数6回、外部引用 R. HottのReview Book 1回、選択的ドーピングを輸送現象と化学的な方法によるキャリア数の分析から議論した報告。

(7) “Effect of carrier distribution on superconducting characteristics of the multilayered high-T-c cuprate $(\text{Cu}_{0.6}\text{Ca}_{0.4})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_{12+y}$: Cu-63-NMR study”, Y. Tokunaga et. al., Phys. Rev. B 61 (2000) 9707., 被引用回数24回、そのうち外部8件。Tc2の発見の論文。プロジェクトの物理研究の方向性を決定した仕事。物性評価の中では、一番重要な成果の報告である。

(8) “Unusual magnetic and superconducting characteristics in multilayered high-T-c cuprates: Cu-63 NMR study”, H. Kotegawa et. al., Phys. Rev. B. Vol. 64 (2001) 064515., 被引用回数15回 うち外部7件, Tc2の出現の条件を明らかにした報告。理論から実験の複数のグループに引用されており、多層型高温超伝導体のバイブル的な論文として扱われている。

(9) “Magnetism of Multi-Layer $\text{HgBa}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_y$ Superconductor Studied by μSR Measurements”, K. Tokiwa et. al., Int. J. Mod. Phys. Vol.17 (2003) 3540-3543. 被引用回数0回

Hg-1245の磁性と超伝導の共存を μSR の立場から報告。関連論文の第一報はPhysical Review Letter誌にも投稿されているが、現在審査中。

(10) “Microscopic coexistence of antiferromagnetism and superconductivity in $\text{HgBa}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_y$: Cu-NMR study”, H. Kotegawa et. al., PHYSICA C 388 (20

03) 237., 被引用回数0回

Hg-1245の磁性と超伝導の共存をNMRで発見した報告。

この内容で、M2Sへの招待講演を受けた。

関連論文の第一報はPhysical Review Letter誌で現在審査中。

(12) “ High-pressure synthesis and properties of $Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n}(O,F)_2$ ($n=2-5$) superconductors ” , A. Iyo et. al., Physica C 366 (2001) 43-45.

被引用回数1回 (R.Hott著のReviewBook)

多層型高温超伝導体のTcの枚数依存性に関する報告。

(13) “ Low superconducting anisotropy ($\gamma=5-11$) in (Cu,Tl)-1223 superconductors ” , K. Tanaka et. al., Physica B 284 (2000) 1081-1082.

被引用回数3回 うち外部1件 (R. Hott著のReviewBook)

(Cu,Tl)-1223の異方性のトルクによる観測の報告

(14) “ Vortex melting line and anisotropy of high-pressure-synthesized Tl $Ba_2Ca_2Cu_3O_{10-y}$ high-temperature superconductor from third-harmonic susceptibility studies ” ,A. Crisan et. al., Appl. Phys. Lett. Vol. 83 (2003) 506-508. ,引用回数0回、Tl-1223について、磁束格子融解磁場、異方性を議論した報告。この仕事によって、多層型高温超伝導体と従来の超伝導体の性能比較が、実験的にも実用面からも可能になった。

(15) “ Anomalous behavior of irreversibility lines in a multi-layered superconductor $(Cu,C)Ba_2Ca_3Cu_4O_y$ ” , M. Hirai et. al., Supercond. Sciece & Technol. 採択済み

アニールによる不可逆磁界の変化とTc2の有無を議論した報告。

(16) “ The role of multiple gaps on the Raman spectrum of $(Cu_xC_{1-x})Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ ” ,Y. Tanaka et. al., Physica C378(2002)283-286. 内部引用回数2回

多ギャップ超伝導での、集団励起モード、格子振動がどのようになるかを実験と理論から議論した報告。Tc2 とソリトン理論の間を繋ぐ理論と実験を組み合わせた論文二つが繋いでいるが、そのうちの一つ。

(17) “ Specific heat study on $Cu_xBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ ”、 Y. Tanaka et. al., Physica C357(2001)222-225. 内部引用回数 5 回。二つの Tc の起源を比熱を使って、実験と理論の両面から議論した報告。(16)と(17)がTc2とソリトン理論を繋いでいる。

(18) “ Soliton in two-band superconductor ” ,Y. Tanaka, Phys. Rev. Letters, Vol.88 (2002) art no. 017002. 被引用回数 4 回 内外部 2 件。ソリトン理論。素粒子・宇宙論の研究グループからも注目されている。

(19) “ Crystal growth of $Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n}(O,F)_2$ ($n = 3$ and 4) multi-layered superconductors under high pressure ” , A. Iyo 他, Supercond. Sciece & Technol. Vol. 17 (2004) 143-147. 被引用回数0回

多層型高温超伝導体の新しい典型材料の単結晶育成の報告。今後の多層型高温超伝導体の物性研究の種になる仕事。

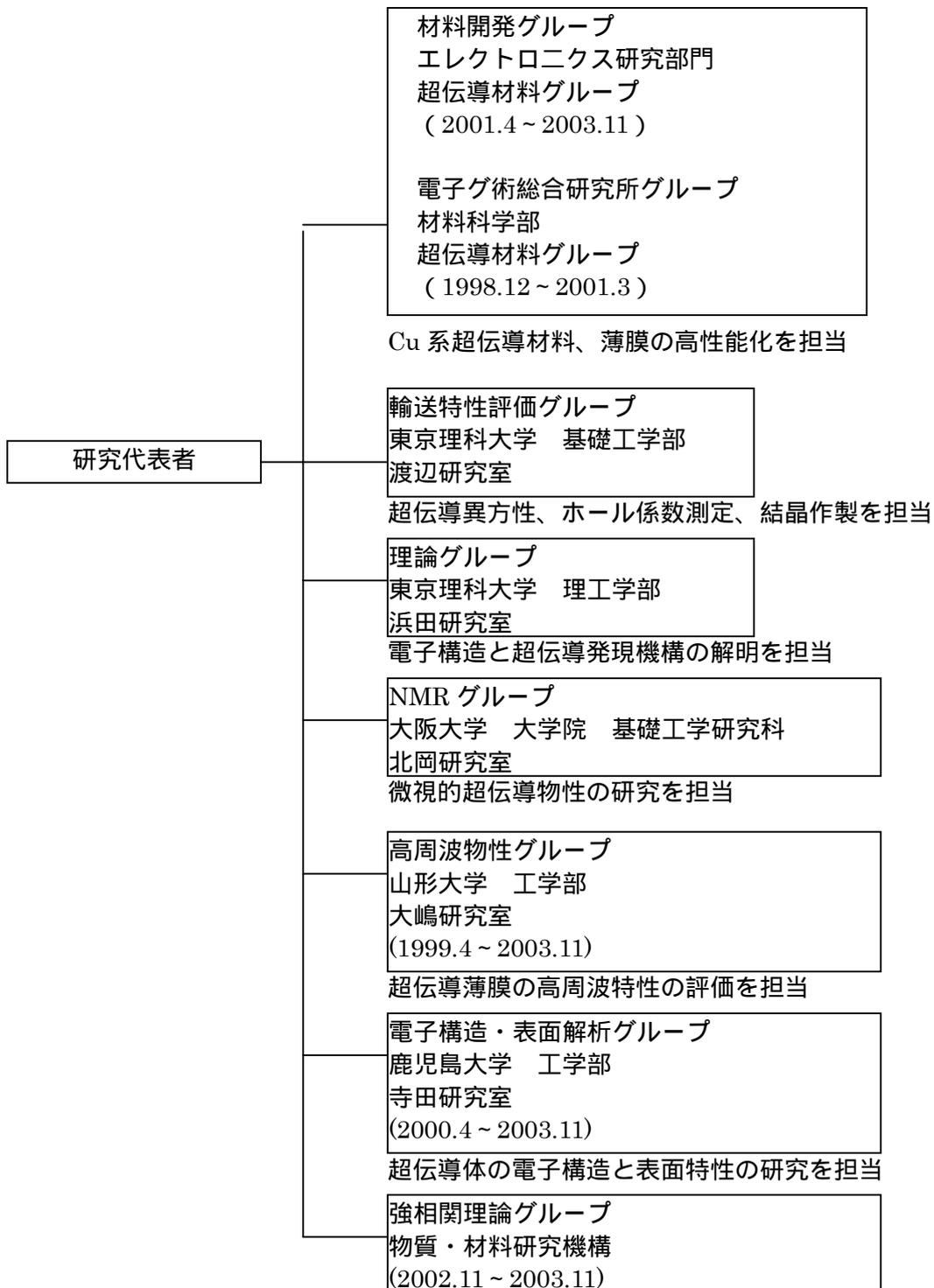
(20) “ Vibronic mechanism of high-T-c superconductivity ” , M. Tachiki他, Phys.Rev.B. 67 (2003) 174506. 被引用回数0回

超伝導発現機構としてオーバースクリーニング機構を定式化した仕事。

この仕事に関して、国際会議の招待講演を8回依頼される。(1回は辞退)

4. 研究実施体制

(1)体制



(2)メンバー表

研究グループ名：材料開発グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
伊原英雄	産総研	グループリーダー	総括、Cu系超伝導材料の高性能化	H10.12 ～H13.1	
田中 康資	産総研	主任研究員	総括、薄膜作製	H10.12 ～H15.11	
伊豫 彰	"	"	バルク合成、Cu-1223の高性能化、超伝導異方性	"	
児玉 泰治	"	"	スパッタによる薄膜作製、高圧酸素アニール処理法の開発	H13.4 ～H15.11	
長谷 泉	"	"	バンド計算による電子構造の解明	H12.4 ～H15.11	
遠藤 和弘	"	部門付主任研究員	MOCVD法による薄膜作製	H14.4 ～H15.11	
A. Sundaresan	事業団	CREST研究員	CuTl系薄膜作製	H11.4 ～H15.11	
寺田 教男	電総研	主任研究員	光電子分光による電子構造の研究	H10.12 ～H15.11	H12.4 ～は電子構造・表面解析グループ
菊地直人	事業団	CREST研究員	スパッタによる薄膜作製	H14.10 ～H15.11	
平井 学	東理大	実習生	Cu-1223の高性能化、超伝導異方性	H12.4 ～H15.11	
高橋 聡雄	東理大	連携大学院生	スパッタによる薄膜作製、ラマン分光	H14.4 ～H15.11	
鬼頭 聖	産総研	主任研究員	バルク、薄膜の組成解析と品質、特性向上	H10.12 ～H15.3	
徳本 圓	産総研	グループリーダー	磁気特性評価	H10.12 ～H14.3	
伊藤利光	電総研	主任研究官	磁氣的異方性測定	H10.10 ～H12.3	
佐藤弘	電総研	主任研究官	ジョセフソン接合特性評価	H10.10 ～H12.3	
石田 克英	電総研	特別研究員	薄膜作製、配向性評価、Si、鋼板上のバッファ層の開発	H10.10 ～H11.12	
N.A.Khan	電総研	STAフェロー	Cu1234薄膜作製、APE法、Jc測定	H10.10 ～H11.5	
関田吉泰	電総研	支援協力員	Cu1234薄膜作製、APE法、組成分析	H10.10 ～H12.3	
山本博司	電総研	支援協力員	薄膜作製、Si基板上へのバッファ層の作製	H10.10 ～H12.3	
P. Badica	産総研	STAフェロー	薄膜、バルクの合成技術開発	H12.8	

				~ H14.7	
I.A.Crisan	産総研	"	磁束のダイナミクス、ナノテク 利用ピン止め技術開発	H13.4 ~ H14.8	
轟 家財	産総研	CREST 研究員	スパッタによる薄膜作製	H11.9 ~ H14.8	
石浦由美子	産総研	CREST 技術員	Jc 測定、パターンニング、基板 研磨	H11.1 ~ H13.9	
林 邦彦	電総研	CREST 嘱託員	バッファ層と薄膜作製	H11.9 ~ H12.12	
齊藤 美和	産総研	CREST 研究補 助員	会計事務、文献検索整理、 データベース作製、 研究データ整理	H11.4 ~ H14.8	
遠藤 恵	産総研	CREST 研究補 助員	事務	H14.10 ~ H15.1	
Liliana Badica	産総研	CREST 研究補 助員	ホームページ作製、研究論文作 製支援	H13.6 ~ H14.3	
丹能紀子	電総研	CREST 研究補 助員	研究事務	H11.3	
小島 孝広	電総研	CREST 研究補 助員	ターゲット開発、薄膜作製	H10.10 ~ H12.9	
館合 文子	東理大	連携大学院生	Jc 結晶方位依存性、超伝導対称 性評価	H10.10 ~ H12.3	
河村 政宏	東理大	連携大学院生	CuTl1234 系薄膜作製 (APE 法) 超伝導特性の向上	H11.4 ~ H13.3	
相澤泰行	東理大	実習生	CuTl1234 系の基礎物性	H12.4 ~ ~ H14.3	
藤原真吾	東理大	連携大学院生	CuTl1234 系薄膜作製 (APE 法) 超伝導対称性評価	H12.4 ~ H14.3	
浅田 秀人	東理大	連携大学院生	CuTl 系薄膜作製	H13.4 ~ H15.3	
加藤 玄樹	東理大	実習生	単結晶育成技術の開発	H14.4 ~ H15.3	

2. 研究グループ名：輸送特性グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
渡辺 恒夫	東京理科大学 基礎工学部	教授	輸送特性、ホール効果測定	H10.12 ~ H15.11	
常盤 和靖	"	講師	輸送特性、Cu 系薄膜作製、超伝 導異方性	"	

3. 研究グループ名：バンド理論グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
浜田 典昭	東京理科大学 理工学部	教授	バンド計算、超伝導異方 性	H10.12 ~ H15.11	
梅川 雅文	"	大学院生	有限温度のバンド計算	H14.4 ~ H15.11	
薄田 学	東京理科大学	大学院生	バンド計算	H10.12 ~	

	理工学部			H14.3	
立木 昌	独立行政法人 物質・材料研究機構	特別研究員	超伝導発現機構	H10.12 ~ H14.10	H14.1 1 ~ 強 相関理 論グル ープ
上村 洸	東京理科大学 理学研究科	教授	電子・スピン状態と超伝導発現機構	H11.4 ~ H14.3	
濱田 剛	東京理科大学 理学研究科	博士課程大学院生	電子・スピン状態と超伝導発現機構	H11.4 ~ H14.3	
潮 秀樹	東京工業高専	助教授	電子・スピン状態と超伝導発現機構	H11.4 ~ H14.3	
松野 俊一	東海大学	非常勤講師	電子・スピン状態と超伝導発現機構	H11.4 ~ H14.3	

4. 研究グループ名：NMR グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
北岡 良雄	大阪大学 基礎工学研究科	教授	NMR による微視的特性の研究	H10.12 ~ H15.11	
鄭国慶	"	助教授	高速 NMR による研究	H12.4 ~ H15.11	
小手川 恒	"	学振研究員	試料合成戦略の確立 高速 NMR による研究	H12.4 ~ H15.9	
荒木 賀洋	"	大学院生	Hg1245 の ¹⁷ O の NMR	H14.4 ~ H15.11	
石田 憲二	"	助手	NMR による微視的特性の研究	H10.12 ~ H14.3	
徳永 陽	"	学振研究員	"	"	
水戸 毅	"	"	高速 NMR による研究	"	

5. 研究グループ名：高周波物性グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
大嶋 重利	山形大学 工学部	教授	高周波表面抵抗の評価	H11.4 ~ H15.11	
齋藤 敦	"	助手	薄膜の表面抵抗の評価	H15.4 ~ H15.11	
楠 正暢	"	助手	超伝導パッシブデバイスの設計と評価	H11.4 ~ H15.3	
岡井 大祐	"	博士課程大学院生	磁場侵入深さの精密測定	H11.4 ~ H14.3	

6. 研究グループ名：電子構造・表面解析グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
寺田 教男	鹿児島大学工学部	教授	光電子分光による電子構造の研究、高酸素分圧スパッタの開発	H12.4 ~ H15.11	
奥田 哲治	鹿児島大学工学部	助教授	光電子分光による電子構造の研究、高酸素分圧スパッタの開発	H14.4 ~ H15.11	
大木康太郎	鹿児島大学理工学研究科	大学院生	活性ビームを用いた高温超伝導体の電子状態の制御	H14.9 ~ H15.11	
宮之前卓	鹿児島大学理工学研究科	大学院生	光電子分光による高温超伝導体の電子状態の評価	H14.9 ~ H15.11	

7. 研究グループ名：強相関理論グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期	備考
立木 昌	物質・材料研究機構	特別研究員	超伝導発現機構	H10.12 ~ H15.11	平成14年10月31日まではバンド理論グループのメンバー

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成 10 年 12 月 10 日	TCI 共催 講演会 及び 伊原チーム インフォーマルミーティング	電子技術総合研究所	40 名	北岡良雄先生講演“NMR 研究から見た最高性能高温超伝導材料の創製の展望”
平成 11 年 12 月 20 日	高性能超伝導体を開発するための実験及びの検討会	東京理科大学野田校舎	42 名	8 人の講演者による講演と討論。
平成 13 年 2 月 1 日	TCI 共催 講演会	電子技術総合研究所	30 名	大嶋重利先生講演会 “低マイクロ波損失高温超伝導薄膜の作製と超伝導フィルタの動向-21 世紀への展望- “
平成 13 年 4 月 17 日	講演会	産業技術総合研究所	40 名	立木昌先生講演会 “高温超伝導体における電荷、フォノン、スピンの相互作用の役割”
平成 14 年 3 月 11 日	Cu-1234 の低異方性と薄膜作製に関する現状分析と今後について	産業技術総合研究所	16 名	平成 14 年度以降の研究の基本方針を検討し、決定した。
平成 15 年 9 月 11 日	エレクトロニクス講演会	産業技術総合研究所	27 名	立木昌先生講演会および、討論会。

6 . 主な研究成果物、発表等

(1)論文発表 (国内 7 件、海外 89 件)

- 1) 伊原英雄、田中康資、伊豫彰、鬼頭聖、寺田教男、徳本圓、石田克英、関田吉泰、山本博司、林邦彦、N.A.Khan, A. Sundaresan, J. Nie, 小島孝広、原島栄喜、石浦由美子、館合文子、河村政宏 「Cu-1234 系を基にした最高性能高温超伝導材料の創製に関する研究」 (“Creation of the Best Performance High- T_c Superconductor Based on Cu-1234”) 電子技術総合研究所彙報 63 (1999) 67.
- 2) H. Ihara, Y. Sekita, H. Tateai, N.A.Khan, K. Ishida, E. Harashima, T. Kojima, H. Yamamoto, K. Tanaka, Y. Tanaka, N. Terada, H. Obara, “Superconducting Properties of $\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x\text{-(Ba,Sr)}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-y}$ Thin Films”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity 9 (1999) 1551.
- 3) 徳永陽、石田憲二、北岡良雄、伊原英雄 「Cu 系多層型高温超伝導体における二つの超伝導転移温度」 日本物理学会誌 54 (1999) 730.
- 4) Y. Tokunaga, H. Kotegawa, K. Ishida, G. -q. Zheng, Y. Kitaoka, K. Tokiwa, A. Iyo, H. Ihara, “Carrier distribution and superconductivity in multilayer high- T_c cuprates proved by ^{63}Cu NMR”, J. Low Temp. Phys. 117 (1999) 473.
- 5) T. Watanabe, H. Kashiwagi, S. Miyashita, N. Ichioka, K. Tokiwa, A. Iyo, Y. Tanaka, S.K.Agarwal, H. Ihara, “Synthesis and Physical Properties of $(\text{Cu},\text{M})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_z$ ($\text{M}=\text{C},\text{Mg},\text{Ni},\text{Al},\text{Zn},\text{Tl}$)”, J. Low Temp. Phys. 117 (1999) 753.
- 6) K. Tokiwa, C. Kunugi, H. Kashiwagi, T. Nibe, H. Aota, N. Ichioka, T. Watanabe, A. Iyo, Y. Tanaka, S.K.Agarwal, H. Ihara, “Pressure Effects on Resistive Transition in $(\text{Cu},\text{M})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ ($\text{M}=\text{C},\text{Al},\text{Tl},\text{Mg},\text{Zn}$) Superconductors”, J. Low Temp. Phys. 117 (1999) 903.
- 7) Y. Tokunaga, K. Ishida, Y. Kitaoka, K. Asayama, K. Tokiwa, A. Iyo, H. Ihara, “Effect of carrier distribution on superconducting characteristics of the multilayered high- T_c cuprate $(\text{Cu}_{0.6}\text{C}_{0.4})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{12+y}$: ^{63}Cu -NMR study”, Phys.Rev. B 61 (2000) 9707.
- 8) 伊原英雄 「Cu-1234 系による最高性能超伝導材料の可能性」 固体物理 35 (2000) 301
- 9) K. Tokiwa, H. Aota, C.Kunugi, K. Tanaka, Y. Tanaka, A. Iyo, H. Ihara, T. Watanabe, “Pressure effect on T_c in $(\text{Cu}, \text{Tl})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconductor”, Physica B 284-288 (2000) 1077.
- 10) K. Tanaka, A. Iyo, Y. Tanaka, K. Tokiwa, M. Tokumoto, M. Ariyama, T. Tsukamoto, T. Watanabe, H. Ihara, “Low superconducting anisotropy ($\gamma=5 \sim 11$) in $(\text{Cu},\text{Tl})\text{-1223}$ superconductors”, Physica B 284-288 (2000) 1081.
- 11) K. Tanaka, A. Iyo, Y. Tanaka, K. Tokiwa, N. Terada, M. Tokumoto, M. Ariyama, T. Tsukamoto, S.Miyashita, T. Watanabe, H. Ihara, “ T_c beyond 130 K on a high-pressure synthesized $(\text{Cu},\text{Tl})\text{-1223}$ superconductor”, Physica B 284-288 (2000) 1079.
- 12) A. Iyo, Y. Tanaka, N. Terada, M. Tokumoto, H. Ihara, “Annealing effect on the irreversibility line in $(\text{Cu}, \text{C})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ”, Physica B 284-288 (2000) 867.
- 13) T. Watanabe, S. Miyashita, N. Ichioka, K. Tokiwa, K. Tanaka, A. Iyo, Y. Tanaka, H. Ihara, “Carrier doping and superconducting properties in Cu-1234 and CuTl-1223 superconductors”, Physica B 284-288 (2000) 1075.
- 14) H. Ihara, K. Tanaka, Y. Tanaka, A. Iyo, N. Terada, M. Tokumoto, F. Tateai, M. Kawamura, K. Ishida, S. Miyashita, T. Watanabe, “Selective reduction for hole-doping in $\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x\text{-1223}$ ($\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-y}$) system with $T_c > 132$ K”, Physica B 284-288 (2000) 1085.
- 15) N. Hamada, H. Ihara, “Electronic band structure of $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{10+x}$ ($x=0,1$)”, Physica B 284-288 (2000) 1073.
- 16) N. Terada, K. Tanaka, Y. Tanaka, A. Iyo, K. Tokiwa, T. Watanabe, H. Ihara, “Photoemission study of chemical bond nature of $(\text{Cu},\text{Tl})\text{-1223}$ with T_c above 130 K”, Physica B 284-288 (2000) 1083.
- 17) H. Ihara, A. Iyo, Y. Tanaka, N. Terada, K. Tokiwa, T. Watanabe, Y. Tokunaga, K. Ishida, Y. Kitaoka, N. Hamada, “Selective-over-doping in Cu-1234 ($\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{12-y}$) system with high $T_c > 116$ K and low superconducting anisotropy 1.6”, Physica B 292 (2000) 238.
- 18) H. Kamimura, T. Hamada, M. Nishimura, H. Ushio, “Theoretical Study on the Pseudogap based on the Kamimura-Suwa Model”, Physica C 341-348 (2000) 133.

- 19) H. Ihara, K. Tanaka, Y. Tanaka, A. Iyo, N. Terada, M. Tokumoto, M. Ariyama, I. Hase, A. Sundaresan, N. Hamada, S. Miyashita, K. Tokiwa, T. Watanabe, "Mechanism of T_c Enhancement in $\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x\text{-1234}$ and -1223 System with $T_c > 130$ K", *Physica C* 341-348 (2000) 487.
- 20) S. Ohshima, Y. Takano, M. Mukaida, M. Kusunoki, K. Ehata, T. Chiba, K. Suzuki, M. Inadomaru, "Fabrication of low R_s YBCO films and its application to patch antennas", *Physica C* 341-348 (2000) 2565.
- 21) Y. Tokunaga, H. Kotegawa, K. Ishida, Y. Kitaoka, K. Tokiwa, A. Iyo, H. Ihara, "Unconventional superconducting characteristics in the multilayered high- T_c cuprate ($\text{Cu}_{0.6}\text{C}_{0.4}$) $\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{12+y}$ probed by ^{63}Cu NMR", *Physica C* 341-348 (2000) 2121.
- 22) 伊豫彰、田中康資、徳本圓、伊原英雄 「 T_c が 130K を越える $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の合成」 Forum of Superconductivity Science and Technology (FSST) NEWS 8 (2000) 1.
- 23) 伊豫彰、田中康資、徳本圓、伊原英雄 「Hg 系に匹敵する超伝導転移温度 ($T_c > 130$ K) を示す Tl 系銅酸化物超伝導体の開発」 ETL NEWS 611 (2000) 6.
- 24) Shigetoshi OHSHIMA, Katsufumi EHATA, Md. Idris ALI and Katsuaki SATO, "Fabrication and Characterization of HTS Antennas for Satellite Communication and Security System", Proceedings of the (APMC2000) 2000 Asia-Pacific microwave CONFERENCE 1 (2000) 604.
- 25) H. Kamimura, T. Hamada, H. Ushio: "Theoretical Study on the Origin of the Pseudogap", *Int. J. Mod. Physics B* 14 (2000) 3500.
- 26) H. Kotegawa, Y. Tokunaga, K. Ishida, G.-q. Zheng, Y. Kitaoka, K. Asayama, H. Kito, A. Iyo, H. Ihara, K. Tanaka, K. Tokiwa, T. Watanabe, "NMR study of carrier distribution and superconductivity in multilayered high- T_c cuprates", *J. Phys. Chem. Solids* 62 (2001) 171.
- 27) K. Tanaka, A. Iyo, N. Terada, K. Tokiwa, S. Miyashita, Y. Tanaka, T. Tsukamoto, S.K. Agarwal, T. Watanabe, H. Ihara, "Tl valence change and T_c enhancement (>130 K) in $(\text{Cu,Tl})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ due to nitrogen annealing", *Phys. Rev. B* 63 (2001) 064508.
- 28) Y. Tanaka, A. Iyo, N. Shirakawa, M. Ariyama, M. Tokumoto, S.-I. Ikeda, H. Ihara, "Specific Heat Study on $\text{Cu}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ ", *J. Phys. Soc. Jpn.* 70 (2001) 329.
- 29) H. Kamimura, T. Hamada: "Further Understanding of the Electronic Structure of Cuprate Superconductors: Role of Local Distortions", AIP Conference Proceedings (2001) 3.
- 30) 伊原英雄 「研究グループ紹介 JST-CREST, (電総研) 最高性能超伝導材料研究チーム」 電気学会論文誌 A 121-A (2001) 497.
- 31) A. Crisan, A. Iyo, Y. Tanaka, M. Hirai, M. Tokumoto, H. Ihara, "Superconducting properties from AC susceptibility and harmonic generation in $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ bulk superconductors", *Physica C* 353 (2001) 227.
- 32) N. Terada, A. Iyo, Y. Tanaka, K. Obara, H. Ihara, "Photoemission Study of $(\text{Cu, Tl})\text{-1223}$ and Tl-1223 with T_c above 130 K", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 11 (2001) 3126.
- 33) N. Terada, S. Ikegawa, Y. Motoi, K. Obara, H. Ihara, "Photoemission Study of Chemical Bond Nature of Pb-3212 Epitaxial Films", *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* 11 (2001) 2707.
- 34) J. C. Nie, A. Sundaresan, K. Hayashi, Y. Ishiura, H. Ihara, "Stoichiometry and thickness distribution of BaCuO_2 and CaCuO_2 thin films by off-axis RF sputtering", *Thin Solid Films* 389 (2001) 261.
- 35) H. Kotegawa, Y. Tokunaga, K. Ishida, G.-q. Zheng, Y. Kitaoka, H. Kito, A. Iyo, K. Tokiwa, T. Watanabe, H. Ihara, "Unusual magnetic and superconducting characteristics in multilayered high- T_c cuprates: ^{63}Cu -NMR study", *Phys. Rev. B* 64 (2001) 064515.
- 36) A. Sundaresan, M. Hirai, J.C. Nie, K. Hayashi, Y. Ishiura, H. Ihara, "Preparation of $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ superlattice thin film by self-assembling epitaxy method", *Physica C* 357-360 (2001) 1403.
- 37) A. Iyo, Y. Aizawa, Y. Tanaka, M. Tokumoto, K. Tokiwa, T. Watanabe, H. Ihara, "High-pressure synthesis of $\text{TlBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n=3$ and 4) with $T_c=133.5$ K ($n=3$) and 127 K ($n=4$)", *Physica C* 357-360 (2001) 324.
- 38) H. Kitô, A. Iyo, M. Tokumoto, S. Okayasu, H. Ihara, "Effect of the neutron irradiation of the high temperature superconductor $(\text{Cu,C})\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Ca}_n\text{O}_{2n+4}$. ($n=3, 4$ and 5)", *Physica C* 357-360 (2001) 234.
- 39) I. Hase, N. Hamada, A. Iyo, N. Terada, Y. Tanaka, H. Ihara, "Carrier reentrance by selective reduction in Tl1223 -system", *Physica C* 357-360 (2001) 153.
- 40) Y. Tanaka, A. Iyo, N. Shirakawa, M. Ariyama, M. Tokumoto, S.I. Ikeda, H. Ihara, "Specific heat study on $\text{Cu}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ", *Physica C* 357-360 (2001) 222.

- 41) N. Hamada, H. Ihara, “Electronic band structures of $\text{CuBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2}$ and $\text{CuBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+1}\text{F}$ ($n=3-5$)”, *Physica C* 357-360 (2001) 108.
- 42) J.C.Nie, A.Sundaresan, K. Hayashi, Y. Ishiura, Y. Tanaka, H. Ihara, “Growth of $\text{Sr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{CuO}_2$ film and $(\text{CaCuO}_2)_m/(\text{SrCuO}_2)_n$ superlattice by reactive sputtering”, *Physica C* 357-360 (2001) 1407.
- 43) Akira Iyo, Yasumoto Tanaka, Yumiko Ishiura, Madoka Tokumoto, Kazuyasu Tokiwa, Tsuneko Watanabe, Hideo Ihara, “Study on enhancement of T_c (>130 K) in $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconductors”, *Supercond. Sci. Technol.* 14 (2001) 504.
- 44) H. Ihara, Possibility of the Best Performance High- T_c Superconductor based on Cu-1234 System, Proceedings of the 8th Asia-Pacific Physics Conference (APPC2000) (2001) 328.
- 45) H. Ihara, “How to Achieve the Best Performance Superconductor based on Cu-1234”, *Physica C* 364-365 (2001) 289.
- 46) H. Kamimura, “Theory of high temperature superconductivity – from electronic structure to d-wave pairing –”, *Physica C* 364-365 (2001), 87.
- 47) A. Crisan, S. Fujiwara, J.C.Nie, A. Sundaresan, H. Ihara, “RF-sputtered nano-dots: a costless method for inducing effective pinning centers in superconducting thin films”, *Appl. Phys. Lett.* 79 (2001)4547.
- 48) Y. Tanaka, A. Iyo, H. Kato, K. Tokiwa, T. Watanabe, H. Ihara, “The role of multiple gaps on the Raman spectrum of $(\text{Cu}_x\text{C}_{1-x})\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ”, *Physica C* 378-381(2002) 283.
- 49) A. Iyo, Y. Aizawa, Y. Tanaka, J. Arai, H. Ihara, “Oxygen isotope effect of high-pressure synthesized $(\text{Cu,C})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ ”, *Physica C* 378-381 (2002) 298.
- 50) H. Kitô, A. Iyo, M. Hirai, A. Crisan, M. Tokumoto, S. Okayasu, M.Sasase, H. Ihara, “Superconducting properties of the Heavy-ions and Neutron Irradiated $(\text{Cu,C})\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4-\delta}$ ($n=3,4$ and 5)”, *Physica C* 378-381 (2002) 329.
- 51) A. Sundaresan, J.C. Nie, M. Hirai, P. Baetica, S. Fujiwara, H. Asada, Y. Ishiura, H. Ihara, “Growth of $\text{Tl}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconducting thin film on CeO_2 buffered sapphire substrate”, *Physica C* 378-381 (2002) 1283.
- 52) J.C. Nie, A. Sundaresan, M. Hirai, Y. Ishiura, P. Badica, A. Crisan, H. Ihara, “ $\text{Cu}_{m-1}\text{Ba}_m(\text{Sr,Ca})\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2m+2n+1}$ superconducting thin film by self assembly epitaxy method”, *Physica C* 378-381, (2002) 1278.
- 53) A. Crisan, A. Iyo, H. Kito, Y. Tanaka, M. Hirai, M. Sasase, S. Okayasu, H. Ihara, “AC Susceptibility and Higher Harmonics Studies of Heavy-Ions Irradiated $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ Bulk Superconductor with Highest Irreversibility Field above Liquid-nitrogen Temperature”, *Physica C* 378-381 (2002) 112.
- 54) P. Badica, A. Crisan, H. Ihara, “The influence of Tl and O content from the starting mixture on phase formation in (Cu,Tl)-1234 system”, *Physica C* 378-381 (2002) 683.
- 55) A. Crisan, S.K.Agarwal, T. Koganezawa, R. Kuroda, K. Tokiwa, T. Watanabe, A. Iyo, Y. Tanaka, H. Ihara, “The effect of pinning centers in Zn-doped $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{12-y}$ high-temperature superconductors”, *J. Phys. Chem. Solids* 63 (2002) 1073.
- 56) A. Iyo, Y. Tanaka, M. Tokumoto, H. Ihara, “High-pressure synthesis and properties of $\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n}(\text{O,F})_2$ ($n=2-5$) superconductors”, *Physica C* 366 (2001) 43.
- 59) Y. Tanaka, “Soliton in Two-Band Superconductor”, *Phys. Rev. Lett.* 88 (2002), 017002.
- 57) A. Iyo, Y. Ishiura, Y. Tanaka, P. Badica, K. Tokiwa, T. Watanabe, H. Ihara, “Effects of residual carbon on phase formation of $\text{TlBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n=3$ and 4) superconductors”, *Physica C* 370 (2002) 205.
- 58) H. Kotegawa, Y. Tokunaga, K. Ishida, G.-q. Zheng, Y. Kitaoka, A. Iyo, Y. Tanaka, H. Ihara, “Superconducting and magnetic characteristics in the multilayered high- T_c cuprates $\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-y}$ with $T_c > 130$ K probed by Cu and Tl NMR: High value for T_c ”, *Phys. Rev. B* 65 (2002) 184504.
- 59) A. Crisan, P. Badica, S. Fujiwara, J.C. Nie, A. Sundaresan, Y. Tanaka, H. Ihara, “Strong reduction of thermally activated flux jumps rate in superconducting thin films by nanodot-induced pinning centers”, *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002) 3566.
- 60) A. Sundaresan, A Crisan, J C Nie, M Hirai, H Asada, H Kito, Y Tanaka, H Ihara, “ $\text{TlSr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ template for the growth of superconducting $\text{Tl}(\text{Ba, Sr})_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thin films on CeO_2 buffered sapphire, *Supercond. Sci. Technol.* 15 (2002) 960.
- 61) P. Badica, A. Iyo, A. Crisan, Y. Ishiura, A. Sundaresan, H. Ihara, “ $(\text{Cu,Tl})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_x$ compositions: I. The influence of synthesis time and temperature on the phase formation and evaporation-condensation mechanism”, *Supercond. Sci. and Technol.* 15 (2002) 964.

- 62) P. Badica, A. Iyo, A. Crisan, H. Ihara, “(Cu,Tl)Ba₂Ca₃Cu₄O_x compositions:II. Heating rate applied to synthesis of superconducting ceramics”, Supercond. Sci. Technol. 15 (2002) 975.
- 63) A. Crisan, P. Badica, M. Hirai, H. Kito, A. Iyo, Y. Tanaka “Third harmonic susceptibility for studying the dissipation in heavyion irradiated (Cu,C)Ba₂Ca₃Cu₄O_{12-y} high temperature superconductor”, Supercond. Sci. Technol. 15 (2002) 1240.
- 64) M. Tachiki, “High T-c superconductivity caused by vibronic mechanism”, Current Applied Physics 2 (2002) 431.
- 65) M. Tachiki, “High-T-c superconductivity driven by overscreening of Coulomb interaction”, J. Supercond. 15 (2002) 643.
- 66) P. Badica, A. Sundaresan, A. Crisan, J. C. Nie, M. Hirai, S. Fujiwara, H. Kito and H. Ihara, “TlBa₂Ca₂Cu₃O_y superconducting films on MgO with different morphologies”, Physica C 383 (2003) 482.
- 67) A. Sundaresan, Y. Tanaka, A. Iyo, M. Kusunoki, A. Ohshima, “A simple test for high J_c and low R_s superconducting thin films”, Supercond. Sci. Technol. 16 (2003) L23.
- 68) M. Tachiki, M. Machida and T. Egami, “Vibronic mechanism of high-T-c superconductivity”, Phys. Rev. B 67 (2003) 174506.
- 69) Y. Tanaka, A. Iyo, K. Tokiwa, T. Watanabe, “*i*-soliton, fractional flux and breakdown of time reversal symmetry in multi-band superconductor”, Physica C 388-389 (2003) 70.
- 70) H. Kotegawa, Y. Tokunaga, Y. Araki, G. -q. Zheng, Y. Kitaoka, K. Tokiwa, T. Watanabe, A. Iyo, H. Kito, Y. Tanaka and H. Ihara, “Microscopic coexistence of antiferromagnetism and superconductivity in HgBa₂Ca₄Cu₅O_y:Cu-NMR study”, Physica C 388-389 (2003) 237.
- 71) K. Tokiwa, S. Ito, H. Okumoto, W. Higemoto, K. Nishiyama, A. Iyo, Y. Tanaka and T. Watanabe, “μ SR study on multi-layered HgBa₂Ca₄Cu₅O_y (Hg-1245) superconductor”, Physica C 388-389 (2003) 243.
- 72) T. Watanabe, K. Tokiwa, S. Ito, N. Urita, S. Mikusu, H. Okumoto, Y. Hashinaka, A. Iyo and Y. Tanaka, “Thermal conductivity in HgBa₂Ca₄Cu₅O_y (Hg-1245)”, Physica C 388-389 (2003) 353.
- 73) A. Iyo, M. Hirai, K. Tokiwa, T. Watanabe, M. Tokumoto, M. Ariyama and Y. Tanaka, “Anomalous suppression of T_c in an overdoped region of TlBa₂Ca₂Cu₃O_{9.δ}”, Physica C 388-389 (2003)365.
- 74) P. Badica, A. Crisan, M. Hirai, A. Iyo, H. Kito, G. Aldica and Y. Tanaka, “LiF addition to (Cu,C)Ba₂Ca₃Cu₄O_y superconductor”, Physica C, 388-389 (2003) 395.
- 75) A. Crisan, P. Badica, M. Hirai, H. Kito, A. Iyo and Y. Tanaka, “Intra- and inter-grain critical current density in (Cu,C):1234 superconductors”, Physica C 388-389 (2003) 421.
- 76) M. Hirai, A. Iyo, H. Kito, A. Crisan, K. Tokiwa, T. Watanabe, J. Arai and Y. Tanaka, “Annealing effect of the irreversibility fields in (Cu,C)Ba₂Ca_{n-1}Cu_nO_y (n=3 and 4)”, Physica C, 388-389 (2003) 427.
- 77) A. Sundaresan, H. Asada, A. Crisan, J. C. Nie, H. Kito, A. Iyo, Y. Tanaka, M.Kusunoki and S. Ohshima, “Preparation of Tl-2212 and -1223 superconductor thin films and their microwave properties”, Physica C 388-389 (2003) 473.
- 78) H. Kito, A. Iyo, A. I. Crisan, M. Hirai, M. Tokumoto, S. Okayasu, M. Sasase, H. Ihara and Y. Tanaka, “Heavy-ion irradiation dependence of the superconducting properties of (Cu,C)Ba₂Ca₃Cu₄O_{10.5-d}”, Physica C 388-389 (2003) 711.
- 77) K. Tokiwa, S. Ito, H. Okumoto, S. Mikusu, A. Iyo, Y. Tanaka, T. Watababe, “High Pressure Synthesis and Properties of HgBa₂Ca₄Cu₅O_y (Hg-1245) Superconductor”, J. Low Temp. Phys. 131 (2003) 637.
- 78) A. Iyo, Y. Tanaka, M. Hirai, K. Tokiwa, T. Watanabe, “Zn and Ni Doping Effect on Anomalous Suppression of T_c in an Over Doped Region of TlBa₂Ca₂Cu₃O_{9.δ}”, J. Low Temp. Phys. 131 (2003) 643.
- 79) T. Watanabe, K. Tokiwa, M. Moriguchi, R. Horike, A. Iyo, Y. Tanaka, H. Ihara, M. Ohashi, M. Hedo, Y. Uwatoko, N. Môri, “Pressure Effect on Hall Coefficient in Multilayered High-T_c Cuprates”, J. Low Temp. Phys. 131 (2003) 681.
- 80) N. Terada, K. Ohki, A. Ohtomi, S. Miyanomae, K. Obara, H. Akoh, H. Sato, T. Yamada, E. Fujimoto, “In-situ characterization of engineered surfaces of c-YBCO films for sandwich type junctions”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 813.
- 81) A. Sundaresan, H. Asada, A. Crisan, J. C. Nie, H. Kito, A. Iyo, Y. Tanaka, M. Kusunoki, S. Ohshima, “Preparation of Tl-2212 and Tl-1223 superconductor thin films and their microwave surface resistance”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13 (2003) 2913.

- 82) S. Ohshima, M. Kusunoki, M. Inadomaru, M. Mukaida, Y. Tanaka, H. Ihara, "Relationship between the surface resistance and depairing current density of superconductors", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** (2003) 3578.
- 83) A. Crisan, P. Badica, S. Fujiwara, J. C. Nie, A. Sundaresan, A. Iyo, Y. Tanaka, "Nanodots-induced pinning Centers in thin films: Effects on critical current density, activation energy and flux jump rate", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **13** (2003) 3726.
- 84) A. Crisan, A. Iyo, and Y. Tanaka, "Vortex melting line and anisotropy of high-pressure-synthesized $TlBa_2Ca_2Cu_3O_{10-y}$ ", high-temperature superconductor from third-harmonic susceptibility studies", *Appl. Phys.Lett.*, **83** (2003) 506..
- 85) M. Tachiki, T. Egami and M. Machida, "Vibronic Mechanism of High Tc Superconductivity", *Inter. J. of Mod. Phys. B* **17** (2003) 3266.
- 86) K. Tokiwa, H. Okumoto, T. Imamura, S. Mikusu, K. Yuasa, W. Higemoto, K. Nishiyama, A. Iyo, Y. Tanaka and T. Watanabe, "Magnetism of Multi-Layer $HgBa_2Ca_4Cu_5O_y$ Superconductor Studied by μ SR Measurements", *Inter. J. of Mod. Phys.* **17** (2003) 3540.
- 87) N. Miyakawa, K. Tokiwa, S. Mikusu, J. F. Zasadzinski, L. Ozyuzer, T. Ishihara, T. Kaneko, T. Watanabe and K. E. Gray, "Tunneling Studies of Multilayered Superconducting Cuprate $(Cu,C)Ba_2Ca_3Cu_4O_{12-\delta}$ ", *Inter. J. of Mod. Phys.* **17** (2003) 3612.
- 88) Y. Kodama, A. Iyo, M. Hirai, H. Kito and Y. Tanaka, "Annealing study of superconducting properties in a Cu-1223 superconductor using O_2 -HIP apparatus", *Physica C* **392** (2003) 77.
- 89) Y. Tanaka, A. Iyo, S. Takahashi, M. Hirai, H. Okumoto, H. Kato, K. Tokiwa and T. Watanabe, "Dynamics of multiple order parameters in the multi-band superconductor studied by Raman spectroscopy", *Physica C* **392** (2003) 161.
- 90) A. Iyo, M. Hirai, K. Tokiwa, T. Watanabe and Y. Tanaka, "Preparation of polycrystals with various Tc and single crystal growth of $Ba_2Ca_3Cu_4O_8(O_{1-y}F_y)_2$ under high pressure", *Physica C*, **392** (2003) 140.
- 91) H. Kito, A. Iyo, M. Hirai, A. Crisan, M. Tokumoto, S. Okayasu, "Heavy-ions irradiation dependence of superconducting properties of the Cu-based $(Cu,C)Ba_2Ca_3Cu_4O_{11-\delta}$ ", *Physica C*, **392** (2003) 181.
- 92) 寺田教男、「多層系高温超伝導体の電子構造制御」, 未来材料, 第3巻、第9号、16ページ
- 93) A.Sundaresan, H. Asada, H. Kito, Y. Tanaka, A. Iyo, M. Kusunoki, and S. Ohshima, "Effect of surface needles on microwave surface resistance in $Tl(Ba,Sr)_2Ca_2Cu_3O_y$ superconductor films on LSAT substrate", *Supercond. Sci. Technol.* (accepted).
- 94) M. Hirai, A. Iyo, Y. Kodama, A. Sundaresan, J. Arai, Y.Tanaka, " Anomalous behavior of irreversibility lines in $(Cu,C)Ba_2Ca_3Cu_4O_y$ ", *Supercond. Sci. Technol.* (accepted).
- 95) A. Iyo, M. Hirai, K. Tokiwa, T. Watanabe and Y. Tanaka, "Crystal growth of $Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n}(O,F)_2$ (n=3 and 4) multi-layered superconductors under high pressure", *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) 143-147.
- 96) N. Kikuchi, A. Sundaresan, N. Terada, M. Hirai, Y. Tokiwa, T. Watanabe, Y. Kodama, A. Iyo, Y. Tanaka, "Epitaxial growth of $(Cu,C)Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_x$ (n=1) film deposited on $SrTiO_3$ substrate by r. f. sputtering", *Vacuum* (accepted).

(2) 口頭発表

招待、口頭講演 (国内64件、海外 22件)

ポスター発表 (国内17件、海外 61件)

- 1) 田中浩介、渡辺恒夫(東京理科大学)、伊豫彰、伊原英雄(電総研):「 $(\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x)\text{-1234}$ の選択ドーピング」、応用物理学会(東京理科大学) 99.3.31
- 2) 柏木博史、常盤和靖、渡辺恒夫(東京理科大)、伊豫彰、伊原英雄(電総研):「 Cu_xC_y -および $\text{Cu}_x\text{M}_z\text{C}_y\text{-1234}$ ($\text{M}=\text{Al}, \text{Ni}$)の合成と物性評価」、応用物理学会(東京理科大学) 99.3.31
- 3) 青田秀晃、常盤和靖、渡辺恒夫(東京理科大)、伊豫彰、伊原英雄(電総研):「Cu系超伝導体の T_c の圧力依存性」、同上
- 4) 浜田典昭(東京理科大学)、伊原英雄(電総研):「 $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{10+x}$ (Cu1234)のバンド計算」、日本物理学会(広島大学) 99.3.28
- 5) 小手川恒、徳永陽、石田憲二、北岡良雄(大阪大学)、常盤和靖(東京理科大)、伊豫彰、伊原英雄(電総研):「 $\text{CuTiBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Cu-1223)のNMR」、日本物理学会(広島大学) 99.3.31
- 6) 伊豫彰、田中康資、寺田教男、徳本圓、伊原英雄(電総研):「 $(\text{Cu}, \text{C})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ における不可逆磁界の熱処理効果」、日本物理学会(広島大学) 99.3.28
- 7) K. Tokiwa(SUT, CREST), H. Aota(SUT), C. Kunugi(SUT), K. Tanaka(SUT), Y. Tanaka(ETL, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), H. Ihara(ETL, CREST), T. Watanabe(SUT, CREST): “Pressure effect on T_c in $(\text{Cu}, \text{Tl})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconductor”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo and Helsinki, Finland, Aug. 6, 1999
- 8) K. Tanaka(SUT, ETL), A. Iyo(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), K. Tokiwa(SUT, CREST), M. Tokumoto(ETL, CREST), M. Ariyama(SUT, ETL), T. Tsukamoto(SUT), T. Watanabe(SUT, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Low superconducting anisotropy ($\approx 5 \sim 11$) in $(\text{Cu}, \text{Tl})\text{-1223}$ superconductors”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo and Helsinki, Finland, Aug. 6, 1999
- 9) K. Tanaka(SUT, ETL), A. Iyo(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), K. Tokiwa(SUT, CREST), N. Terada(ETL, CREST), M. Tokumoto(ETL, CREST), M. Ariyama(SUT, EYL), T. Tsunemoto(SUT), S. Miyashita(SUT), T. Watanabe(SUT, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “ T_c beyond 130 K on a high-pressure synthesized $(\text{Cu}, \text{Tl})\text{-1223}$ superconductor”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo and Helsinki, Finland, Aug. 6, 1999
- 10) A. Iyo(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), N. Terada(ETL, CREST), M. Tokumoto(ETL, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Annealing effect on the irreversibility line in $(\text{Cu}, \text{C})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo and Helsinki, Finland, Aug. 9, 1999
- 11) T. Watanabe(SUT, CREST), S. Miyashita(SUT), N. Ichioka(SUT), K. Tokiwa(SUT, CREST), K. Tanaka(SUT), A. Iyo(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Carrier doping and superconducting properties in Cu-1234 and CuTi-1223 superconductors”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo and Helsinki, Finland, Aug. 6, 1999
- 12) H. Ihara(ETL, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), N. Terada(ETL, CREST), K. Tokiwa(SUT, CREST), T. Watanabe(SUT, CREST), Y. Tokunaga(Osaka Univ., CREST), K. Ishida(Osaka Univ., CREST), Y. Kitaoka(Osaka Univ., CREST), N. Hamada(SUT, CREST): “Selective-over-doping in Cu-1234 ($\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{12-y}$) system with high $T_c > 116$ K and low superconducting anisotropy 1.6”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo and Helsinki, Finland, Aug. 6, 1999
- 13) H. Ihara(ETL, CREST), K. Tanaka(SUT), Y. Tanaka(ETL, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), N. Terada(ETL, CREST), M. Tokumoto(ETL, CREST), F. Tateai(SUT, CREST), M. Kawamura(SUT, CREST), K. Ishida(ETL, CREST), S. Miyashita(SUT), T. Watanabe(SUT, CREST): “Selective reduction for hole-doping in $\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x\text{-1223}$ ($\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10-y}$) system with $T_c > 132$ K”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo and Helsinki, Finland, Aug. 6, 1999
- 14) N. Hamada(SUT, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Electronic band structure of $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{10+x}$ ($x=0,1$)”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo

and Helsinki, Finland, Aug. 6, 1999

15) H. Ihara(ETL, CREST), K. Tanaka(SUT), Y. Tanaka(ETL, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), N. Terada(ETL, CREST), M. Tokumoto(ETL, CREST), M. Ariyama(SUT, ETL), F. Tateai(SUT, ETL), M. Kawamura(SUT, ETL), K. Ishida(ETL, CREST), S. Miyashita(SUT), K. Tokiwa(SUT, CREST), T. Watanabe(SUT, CREST): “Selective Reduction Method for T_c Enhancement over 130K in $Cu_{1-x}Tl_x$ -1223 System”, International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide Superconductors(MOS99), Kungliga Tekniska Hoegskolan, Stockholm, Sweden, July 30, 1999

16) K. Tokiwa(SUT, CREST), C. Kunugi(SUT), H. Kashiwagi(SUT), T. Nibe(SUT), H. Aota(SUT), N. Ichioka(SUT), T. Watanabe(SUT, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), S.K. Agarwal(ETL), H. Ihara(ETL, CREST): “Pressure Effects on Resistive Transition in $(Cu,M)Ba_2Ca_3Cu_4O_y$ (M=C,Al,Tl,Mg,Zn) Superconductors”, International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide Superconductors(MOS99), Kungliga Tekniska Hoegskolan, Stockholm, Sweden, July 30, 1999

17) T. Watanabe(SUT, CREST), H. Kashiwagi(SUT), S. Miyashita(SUT), N. Ichioka(SUT), K. Tokiwa(SUT, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), S.K. Agarwal(ETL), H. Ihara(ETL, CREST): “Synthesis and Physical Properties of $(Cu,M)Ba_2Ca_3Cu_4O_z$ (M=C,Mg,Ni,Al,Zn,Tl)”, International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide Superconductors(MOS99), Kungliga Tekniska Hoegskolan, Stockholm, Sweden, July 29, 1999

18) Y. Tokunaga(Osaka Univ., CREST), H. Kotegawa(Osaka Univ.), K. Ishida(Osaka Univ., CREST), G. -q. Zheng(Osaka Univ.) Y. Kitaoka(Osaka Univ., CREST), K. Tokiwa(SUT, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Carrier distribution and superconductivity in multilayer high- T_c cuprates proved by ^{63}Cu NMR”, International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide Superconductors(MOS99), Kungliga Tekniska Hoegskolan, Stockholm, Sweden, July 31, 1999

19) 田中浩介(東理大) 伊豫彰(電総研、CREST) 田中康資(電総研、CREST) 常盤和靖(東理大、CREST) 塚本恒世(東理大) 渡辺恒夫(東理大、CREST) 伊原英雄(電総研、CREST): 「 $(Cu_{1-x}Tl_x)$ -1223 の超伝導異方性のトルクによる評価」, 平成11年秋季第60回応用物理学学会学術講演会 神戸市 甲南大学 99.9.2

20) N.A.Khan(電総研) 河村政宏(東理大、CREST) 館合文子(東理大、CREST) 関田吉泰(電総研、CREST) 石田克英(電総研、CREST) 石浦由美子(CREST) 寺田教男(電総研、CREST) 渡辺恒夫(東理大、CREST) 伊原英雄(電総研、CREST): 「 $(Cu_{1-x}Tl_x)$ -1234[$(Cu_{1-x}Tl_x)Ba_2Ca_3Cu_4O_y$]薄膜の作製と超伝導特性」, 同上

21) 伊豫彰(電総研、CREST) 田中康資(電総研、CREST) 寺田教男(電総研、CREST) 徳本圓(電総研、CREST) 伊原英雄(電総研、CREST) 常盤和靖(東理大、CREST) 渡辺恒夫(東理大、CREST): 「 $(Cu,Tl)Ba_2Ca_2Cu_3O_y$ ($T_c > 130K$)の高圧合成と物性評価」, 日本物理学会 1999 年秋の分科会 岩手大学 99.9.27

22) H. Ihara(ETL, CREST): “Creation the Best Performance Superconductor based on Cu -1234($CuBa_2Ca_3Cu_4O_{12-y}$) System”, Materials Research Society Fall meeting 99, Hines Convention Center and Boston Marriott Copley Place, Boston, Massachusetts, Nov. 29, 1999 (招待講演)

23) N. Terada(ETL, CREST), K. Tanaka(SUT), Y. Tanaka(ETL, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), K. Tokiwa(SUT, CREST), T. Watanabe(SUT, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Photoemission study of chemical bond nature of (Cu,Tl) -1223 with T_c above 130 K”, XXII International Conference On Low Temperature Physics, Espoo and Helsinki, Finland, Aug. 6, 1999

24) H. Ihara(ETL, CREST), K. Tanaka(SUT), Y. Tanaka(ETL, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), N. Terada(ETL, CREST), M. Tokumoto(ETL, CREST), M. Ariyama(SUT, ETL), K. Ishida(ETL, CREST), I. Hase(ETL), N. Hamada(SUT, CREST), S. Miyashita(SUT), K. Tokiwa(SUT, CREST), T. Watanabe(SUT, CREST): “Mechanism of T_c Enhancement in $Cu_{1-x}Tl_x$ -1234 and -1223 System”, 6th International Conference Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors, George R. Brown Convention Center and Hyatt Regency Hotel-Downtown, Houston, Feb. 21, 2000 (口頭発表)

25) S. Ohshima(Yamagata Univ., CREST), Y. Takano(Yamagata Univ.), M. Mukaida(Yamagata Univ.), M. Kusunoki(Yamagata Univ., CREST), K. Ehata(Yamagata Univ.), T. Chiba(Yamagata

- Univ.), K. Suzuki(Yamagata Univ.), M. Inadomaru(Yamagata Univ.): “Fabrication of low YBCO films and its application to patch antenna”, 6th International Conference Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors, George R. Brown Convention Center and Hyatt Regency Hotel-Downtown, Houston, Texas, Feb. 24, 2000
- 26) H. Kamimura(SUT, CREST), T. Hamada(SUT, CREST), M. Nishimura(SUT), H. Ushio: “Microscopic Origin of the Pseudogap”, 6th International Conference Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors George R. Brown Convention Center and Hyatt Regency Hotel-Downtown, Houston, Feb. 21, 2000
- 27) 伊豫彰 (電総研、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 寺田教男 (鹿児島大、電総研、CREST) 石浦由美子 (CREST) 常盤和靖 (東理大、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST) 有山稔 (東理大、電総研) 徳本圓 (電総研、CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $TiBa_2Ca_2Cu_3O_y$ ($T_c > 130K$) の高圧合成と物性評価」, 日本物理学会 2000年春の分科会 大阪府吹田市 関西大学 00.3.23
- 28) 有山稔 (東理大、電総研) 伊豫彰 (電総研、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 寺田教男 (鹿児島大、電総研、CREST) 常盤和靖 (東理大、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST) 徳本圓 (電総研、CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $TiBa_2Ca_2Cu_3O_y$ の T_c と超伝導体積分率のアニール効果」, 同上
- 29) 長谷泉 (電総研) 浜田典昭 (東理大、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $TiBa_2Ca_2Cu_3O_9$ のバンド構造とドーピング効果」, 応用物理学会 2000年 春季講演会 青山学院大学
- 30) S.K.Agarwal (電総研) 有山稔 (東理大、電総研) 河村政宏 (東理大、CREST) 伊豫彰 (電総研、CREST) 寺田教男 (鹿児島大、電総研、CREST) 徳本圓 (電総研、CREST) 宮下至幸 (東理大) 常盤和靖 (東理大) 渡辺恒夫 (東理大、CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $(Cu_{1-x}Tl_x)_{1234}[(Cu_{1-x}Tl_x)Ba_2Ca_3Cu_4O_y]$ 系の Cs 置換効果」, 同上
- 31) A. Sundaresan, K. Hayashi, Y. Sekita, Y. Ishiura, H. Ihara: “On the building blocks, $Ba(Cu,Tl)O_{3-y}$ and $CaCuO_2$ for the preparation of $(Cu,Tl)Ba_2Ca_3Cu_4O_y$ superconductor thin film”, 同上
- 32) 石浦由美子 (CREST) 田中康資 (電総研、CREST) A. Sundaresan (CREST) 関田吉泰 (電総研、CREST) 河村政宏 (東理大、CREST) 館合文子 (東理大、CREST) 伊豫彰 (電総研、CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $(Cu,Tl)BaCa_nCu_{n+1}O_y$ 関連物質中の簡便な CO_3 測定法」, 同上
- 33) 伊豫彰 (電総研、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 寺田教男 (電総研、鹿児島大、CREST) 石浦由美子 (CREST) 常盤和靖 (東理大、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST) 有山稔 (電総研、東理大) 徳本圓 (電総研、東理大、CREST) 伊原英雄 (電総研、東理大、CREST): 「130K 以上の T_c を示す $TiBa_2Ca_2Cu_3O_y$ 系超伝導体の合成」, 2000年 春季低温工学・超伝導学会 つくば市 工業技術院筑波研究センター共用講堂 00.5.30
- 34) H. Ihara(ETL, CREST): “Possibility of the Best Performance High- T_c Superconductor based on Cu-1234 System”, The 8th Asia Pacific Physics Conference(APPC2000), Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, Aug. 8, 2000 (招待講演)
- 35) A. Sundaresan(ETL, CREST), M. Hirai(ETL, CREST), K. Hayashi(ETL, CREST), Y. Ishiura(ETL, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Preparation of $(Cu_{1-x}Tl_x)Ba_2Ca_3Cu_4O_y$ superrattice thin film by Self Assembling Epitaxy(SAE) method”, 2000年秋季 第61回応用物理学会学術講演会 札幌市 北海道工業大学 00.9.5
- 36) J.C.Nie(ETL, CREST), A. Sundaresan(ETL, CREST), Y. Tanaka, K. Hayashi(ETL, CREST), Y. Ishiura(ETL, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Preparation of $(SrCuO_2)_m/(CaCuO_2)_n$ multilayer thin film”, 同上
- 37) 田中康資 (電総研、CREST) 伊豫彰 (電総研、CREST) 白川直樹 (電総研) 徳本圓 (電総研、CREST) 有山稔 (東理大) 池田伸一 (電総研) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $(Cu_{0.6}Co_{0.4})Ba_2Ca_3Cu_4O_y$ の比熱」, 00.9.3
- 38) 伊豫彰 (電総研、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 寺田教男 (電総研、鹿児島大、CREST) 石浦由美子 (CREST) 常盤和靖 (東理大、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST) 徳本圓 (電総研、CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $TiBa_2Ca_2Cu_3O_y$ (T_c

130K)の高圧合成」, 同上

39) 石浦由美子 (CREST) 平井学 (電総研、東理大) 田中康資 (電総研、CREST) 伊豫彰 (電総研、CREST) A.Sundaresan (CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $(\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x)\text{-1234}$ の常圧合成における炭酸放出効果」, 同上

40) 河村政宏 (東理大、電総研) 藤原真吾 (東理大、電総研) 石浦由美子 (CREST) 平井学 (東理大、電総研) 田中康資 (電総研、CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $(\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x)\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$, $(\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x)\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜作製の低温化」, 00.9.4

41) 平井学 (電総研、東理大) A.Crisan (電総研、NIMP-Bucharest, Romania) 伊豫彰 (電総研、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 徳本圓 (電総研) 新井重一郎 (東理大) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ の臨界電流密度、pinning ポテンシャル、不可逆磁場の AC 帯磁率による評価」, 同上

42) 柗田大司 (鹿児島大) 木上善貴 (鹿児島大) 林拓郎 (鹿児島大) 永瀬英樹 (鹿児島大) 中津隆行 (鹿児島大) 伊豫彰 (電総研、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 小原幸三 (鹿児島大) 伊原英雄 (電総研、CREST) 寺田教男 (鹿児島大、電総研、CREST): 「光電子分光による $(\text{Cu,C})\text{-1223}$ の電子状態・化学的結合状態の評価」, 00.9.3

43) 木上善貴 (鹿児島大) 柗田大司 (鹿児島大) 永瀬英樹 (鹿児島大) 中津隆行 (鹿児島大) 林拓郎 (鹿児島大) 伊豫彰 (電総研、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 小原幸三 (鹿児島大) 伊原英雄 (電総研、CREST) 寺田教男 (鹿児島大、電総研、CREST): 「常圧合成 Tl-1223 の表面処理・評価」, 同上

44) 橋本義宏 (東理大) 小関隆夫 (東理大) 藤原真吾 (東理大) 北脇仁史 (東理大) 佐川裕祐 (東理大) 常盤和靖 (東理大、CREST) 伊豫彰 (電総研、CREST) 田中康資 (電総研、CREST) 伊原英雄 (電総研、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST): 「 $(\text{Cu,C})\text{1201}$ 薄膜の作製及びビアニール効果」, 00.9.5

45) 上村洸 (東理大、CREST) 濱田剛 (東理大、CREST) 潮秀樹 (東京高専、CREST): 「擬ギャップのミクロな起源」, 日本物理学会第 55 回年次大会 新潟市 新潟大学, 00.9.24

46) N. Terada(Kagoshima Univ., ETL, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), K. Obara(Kagoshima Univ.), H. Ihara(ETL, CREST): “Photoemission Study of $(\text{Cu, Tl})\text{-1223}$ and Tl-1223 with T_c above 130 K”, Applied Superconductivity Conference 2000(ASC2000), Virginia Beach, VA, USA, Sep. 18, 2000

47) N. Terada(Kagoshima Univ., ETL, CREST), S. Ikegawa(Toshiba Corp.), Y. Motoi(Toshiba Corp.), K. Obara(Kagoshima Univ.), H. Ihara(ETL, CREST): “Photoemission Study of Chemical bond nature of Pb-3212 Epitaxial Films”, Applied Superconductivity Conference 2000(ASC2000), Virginia Beach, VA, USA, Sep. 19, 2000

48) 田中康資 (電総研、CREST) 伊豫彰 (電総研、CREST) 白川直樹 (電総研) 徳本圓 (電総研、CREST) 有山稔 (東理大) 池田伸一 (電総研) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「 $\text{Cu}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ の比熱」, 日本物理学会第 55 回年次大会 新潟市 新潟大学 00.9.23

49) 鬼頭聖 (電総研、CREST) 伊豫彰 (電総研、CREST) 徳本圓 (電総研、CREST) 岡安悟 (原研東海) 伊原英雄 (電総研、CREST): 「多層型高温超伝導体 $(\text{Cu, C})\text{1245}$ 系の中性子線照射効果」, 同上

50) A. Iyo(ETL, CREST), Y. Aizawa(ETL, CREST), Y. Tanaka(ETL, CREST), M. Tokumoto(ETL, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “High-Pressure Synthesis of $\text{TlBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n=3$ and 4) with $T_c=133.5$ K ($n=3$) and 127 K ($n=4$)”, 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, Toshi Center Hotel Tokyo, Tokyo, Oct. 16, 2000 (口頭発表)

51) N. Hamada(SUT, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Electronic Band Structure of $\text{CuBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2+x}$ ($n=3-5$)”, 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, Toshi Center Hotel Tokyo, Tokyo, Oct. 16, 2000 (口頭発表)

52) Y. Tanaka(ETL, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), N. Shirakawa(ETL), M. Ariyama(SUT), M. Tokumoto(ETL, CREST), S. I. Ikeda(ETL), H. Ihara(ETL, CREST): “Specific Heat Study on $\text{Cu}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ”, 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, Toshi Center Hotel Tokyo, Tokyo, Oct. 15, 2000

53) H. Kito(ETL, CREST), A.Iyo(ETL, CREST), M. Tokumoto(ETL, CREST), S. Okayasu(J.A.E.R.I), H. Ihara(ETL, CREST): “Effect of the Neutron Irradiation of the High Temperature superconductor $(\text{Cu,C})\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ ($n=3,4$ and 5)”, 13th INTERNATIONAL

- SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, Toshi Center Hotel Tokyo, Tokyo, Oct. 15, 2000
- 54) I. Hase(ETL, CREST), N. Hamada(SUT, CREST), A. Iyo(ETL, CREST), N. Terada(ETL, CREST, Kagoshima Univ.), Y. Tanaka(ETL, CREST), H. Ihara(ETL, CREST): “Carrier Reentrance by selective reduction in Tl1223-system”, 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, Toshi Center Hotel Tokyo, Tokyo, Oct. 15, 2000
- 55) A. Sundaresan, M. Hirai, J. C. Nie, K. Hayashi, Y. Ishiura, H. Ihara(ETL and CREST): “Preparation of $(\text{Cu}_{1-x}\text{M}_x)\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ Superlattice thin film by Self Assembling Epitaxy (SAE) Method”, 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, Toshi Center Hotel Tokyo, Tokyo, Oct. 16, 2000
- 56) J. C. Nie, A. Sundaresan, K. Hayashi, Y. Ishiura, M. Hirai, Y. Tanaka, A. Iyo, H. Kito, H. Ihara(ETL and CREST): “ $(\text{CaCuO}_2)_m/(\text{Sr}_x\text{Ca}_{1-x}\text{CuO}_2)_n$ superlattice growth by reactive sputtering”, 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY, Toshi Center Hotel Tokyo, Tokyo, Oct. 16, 2000
- 57) Shigetoshi OHSHIMA(Yamagata Univ.), Katsufumi EHATA(Yamagata Univ.), Md. Idris ALI(Yamagata Univ.), Katsuaki SATO(Yamagata Univ.): “FABRICATING AND CHARACTERIZATION OF HTS ANTENNAS FOR SATELLITE COMMUNICATION AND SECURITY SYSTEM”, 2000 Asia-Pacific microwave CONFERENCE(APMC2000), Sydney, Australia, Dec. 6, 2000
- 58) H. Ihara(ETL, CREST & Asso. Of Energy Super-Highway): “How to Achieve the Best Performance Superconductor based on Cu-1234”, The Third International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials(New³SC-3), Honolulu, Hawaii, USA, Jan. 18, 2001 (招待講演)
- 59) H. Kamimura(SUT, CREST): “THEORY OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY - FROM ELECTRONIC STRUCTURE TO d-WAVE PAIRING -”, The Third International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials(New³SC-3), Honolulu, Hawaii, USA, Jan. 19, 2001
- 60) H. Kamimura(SUT and CREST), T. Hamada(SUT and CREST), H. Ushio(Tokyo National College of Technology and CREST): “Are the itinerant holes in cuprates heavy-mass carriers?”, The annual March Meeting 2001 of The American Physical Society, Washington State Convention Center, Seattle, Washington, USA, Mar. 13, 2001
- 61) 伊豫彰(電総研、CREST) 石浦由美子(CREST) 田中康資(電総研、CREST) 常盤和靖(東理大、CREST) 渡辺恒夫(東理大、CREST) 徳本圓(電総研、CREST) 伊原英雄(電総研、東理大、CREST): 「 $\text{TlBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ ($n=3,4$)相生成に及ぼす残留炭素の影響」, 春季 第48回 応用物理学関係連合講演会 東京都千代田区 明治大学 01.3.28
- 62) 鬼頭聖(電総研、CREST), 伊豫彰(電総研、CREST), 徳本圓(電総研、CREST), 伊原英雄(電総研、CREST): 「 (Cu,Tl) -1245系の高圧合成と超伝導特性」, 同上 01.3.29
- 63) A. Sundaresan, M. Hirai, J.C.Nie, Y. Ishiura, H. Ihara(ETL and CREST): “Stabilization of $\text{CuBa}_2\text{CuO}_y$ phase for the preparation of superlattice $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ thin film by Self Assembling Epitaxy Method”, 春季 第48回 応用物理学関係連合講演会 東京都千代田区 明治大学 01.3.30
- 64) J.C.Nie, A. Sundaresan, Y. Ishiura, H. Ihara(ETL and CREST): “ $[(\text{Cu, Ti})\text{Ba}_2\text{CuO}_x]_m/[(\text{Sr, Ca})\text{CuO}_2]_n$ superlattice preparation by off-axis rf magnetron sputtering”, 同上
- 65) 田中康資(電総研、CREST) 伊豫彰(電総研、CREST) 白川直樹(電総研) 池田伸一(電総研) 伊原英雄(電総研、CREST): 「 $\text{Cu}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ の比熱 II」, 日本物理学会 第56回年次大会 中央大学
- 66) 河合貴之(東理大) 平根誠一(東理大) 小金沢健尚(東理大) 常盤和靖(東理大、CREST) 塩田重雄(田中貴金属) 伊豫彰(電総研、CREST) 田中康資(電総研、CREST) 伊原英雄(電総研、CREST) 渡辺恒夫(東理大、CREST): 「Cu系超伝導体の熱伝導率」, 同上 01.3.28
- 67) 伊藤賢(東理大) 大谷到(東理大) 常盤和靖(東理大、CREST) 伊豫彰(電総研、CREST) 田中康資(電総研、CREST) 塩田重雄(田中貴金属) 伊原英雄(電総研、CREST) 渡辺恒夫(東理大、CREST): 「高圧合成法による $\text{HgBa}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_y$ (Hg-1245)の作製」, 春季 第48回 応用物理学関係連合講演会 東京都千代田区 明治大学 01.3.29
- 68) 大島真希(東理大) 森口将明(東理大) 大谷到(東理大) 常盤和靖(東理大、CREST)

- 伊豫彰 (電総研、CREST)、田中康資 (電総研、CREST)、伊原英雄 (電総研、CREST)、塩田重雄 (田中貴金属)、渡辺恒夫 (東理大、CREST): 「高压合成法による $Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_y(Tl-22(n-1)n:n=2, 3)$ の作製」、同上
- 69) A. Crisan, S. Fujiwara, J. C. Nie, A. Sundaresan, H. Ihara(AIST and CREST): “Nano-dots Induced Extended Pinning Centers in HTS Thin Films.”, 8th International Superconductive Electronics Conference (ISEC '01), Osaka Sun Palace, Osaka, Japan, June 21, 2001
- 70) H. Ihara, Y. Tanaka, A. Iyo, H. Kito, Y. Kodama, A. Sundaresan, J. C. Nie, A. Crisan, P. Badica, Y. Ishiura, M. Hirai, S. Fujiwara, Y. Aizawa, H. Asada(AIST and CREST): “Perspective of the 3rd Generation High- T_c Superconductor Cu-1234 beyond Y-, Bi-, Tl- and Hg-Systems”, 同上 June 22, 2001 (招待講演)
- 71) A. Sundaresan, J. C. Nie, M. Hirai, S. Fujiwara, H. Asada, Y. Ishiura, H. Ihara(AIST and CREST): “Preparation of $Cu_{1-x}Tl_xBa_2Ca_3Cu_4O_y$ thin films by Self Assembling Epitaxy (SAE) Method”, 同上
- 72) J. C. Nie, A. Sundaresan, Y. Ishiura, H. Ihara(AIST and CREST): “Cu(Tl)-1234 thin film preparation by self assembly epitaxy method”, 同上
- 73) P. Badica, Y. Ishiura, A. Crisan, A. Iyo, M. Kawamura, A. Sundaresan, H. Kito, H. Ihara(AIST and CREST): “NORMAL PRESSURE SYNTHESIS OF THE BULK (Cu, Tl)Ba₂Ca₃Cu₄O_x SUPERCONDUCTOR”, 同上 June 20, 2001
- 74) N. Terada (Kagoshima Univ., CREST and AIST), T. Fukida (Kagoshima Univ.), A. Iyo (AIST and CREST), Y. Tanaka (AIST and CREST), K. Obara (Kagoshima Univ.), H. Ihara (AIST and CREST): “Study of Electronic Structure of Tl-1223 Superconductors Synthesized under Ambient- and High-Pressure for High T_c above 130 K”, 同上 June 21, 2001
- 75) A. Sundaresan, J. C. Nie, M. Hirai, P. Badica, S. Fujiwara, H. Asada, Y. Ishiura, H. Ihara(ETL and CREST): “Growth of (100) CeO₂ buffer layer on sapphire for the preparation of $Cu_{1-x}Tl_xBa_2Ca_3Cu_4O_y$ superconducting thin film by SAE method”, 応用物理学会 2001年(平成13年)秋季講演会 愛知県豊田市 愛知工業大学
- 76) A. Crisan, A. Iyo, Y. Ishiura, P. Badica, Y. Tanaka, H. Ihara(AIST and CREST): “High-field magnetization loops and critical current densities of high-pressure and normal pressure grown $(Cu_{1-x}Tl_x)Ba_2Ca_2Cu_4O_y$ ($x=0, 0.5$ and 1) high temperature bulk superconductors”, 同上
- 77) 寺田教男 (鹿児島大、産総研、CREST)、木上善貴 (鹿児島大)、大木康太郎 (鹿児島大)、大富淳生 (鹿児島大)、佐藤弘 (産総研)、山田寿一 (産総研)、藤本英司 (産総研)、赤穂博司 (産総研)、小原幸三 (鹿児島大)、伊原英雄 (産総研、CREST): 「C-軸配向 YBCO 膜改質表面の評価」、同上
- 78) 柗田大司 (鹿児島大)、宮之前卓 (鹿児島大)、渡辺孝夫 (NTT フォトニクス研)、藤井武則 (早大)、松田梓 (NTT 基礎物性研)、小原幸三 (鹿児島大)、伊原英雄 (産総研、CREST)、寺田教男 (鹿児島大、CREST): 「X 線光電子分光による $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$, $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ 単結晶における電子構造変化の評価」、同上 01.9.14
- 79) 鬼頭聖 (産総研、CREST)、平井学 (産総研、CREST、東理大)、伊豫彰 (産総研、CREST)、徳本圓 (産総研、CREST)、岡安悟 (原研東海)、笹瀬雅人 (原研東海)、伊原英雄 (産総研、CREST、東理大): 「Cu-1234 系の中性子線照射及び、重粒子線照射による不可逆磁界 H_{irr} の向上」、同上
- 80) 田中康資 (産総研、東理大、CREST)、伊豫彰 (産総研、CREST)、加藤玄樹 (東理大)、常盤和靖 (東理大、CREST)、渡辺恒夫 (東理大、CREST)、伊原英雄 (産総研、CREST): 「 $Cu_xBa_2Ca_3Cu_4O_y$ のラマン分光」、日本物理学会 第 56 回秋季大会 徳島県徳島市 徳島文理大学 徳島キャンパス 01.9.18
- 81) 伊豫彰 (東理大、CREST)、相澤泰行 (東理大、CREST)、田中康資 (産総研、CREST)、新井重一郎 (東理大)、伊原英雄 (産総研、CREST): 「酸素同位体置換(Cu, C)-1234 の高压合成と T_c の同位体効果」、同上
- 82) 鬼頭聖 (産総研、CREST)、平井学 (東理大、産総研、CREST)、伊豫彰 (産総研、CREST)、徳本圓 (産総研、CREST)、岡安悟 (原研東海)、笹瀬雅人 (原研東海)、伊原英雄 (産総研、東理大、CREST): 「多層型高温超伝導体(Cu, C)-12(n-1)n 系(n=3, 4, 5)の重粒子線照射、及び中性子線照射効果」、同上

- 83) 小手川恒 (阪大、CREST) 徳永陽 (阪大、CREST) 石田憲二 (阪大、CREST) 北岡良雄 (阪大、CREST) 伊藤賢 (東理大) 常盤和靖 (東理大、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST) 伊豫彰 (産総研、CREST) 田中康資 (産総研、CREST) 鬼頭聖 (産総研、CREST) 伊原英雄 (産総研、CREST): 「多層型 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_y$, $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ の ^{63}Cu -, ^{17}O -NMR による研究」, 同上
- 84) Y. Tanaka(AIST, SUT, CREST), A. Iyo(AIST, CREST), H. Kato(SUT), K. Tokiwa(SUT, CREST), T. Watanabe(SUT, CREST), H. Ihara(AIST, CREST): “Raman study on $(\text{Cu}, \text{C})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ ”, 14th International Symposium On Superconductivity (ISS 2001), 兵庫県神戸市神戸国際会議場 01.9.26
- 85) A. Iyo(AIST, CREST), Y. Aizawa(SUT, AIST, CREST), Y. Tanaka(AIST, CREST), J. Arai(SUT), H. Ihara(AIST, CREST): “Oxygen isotope effect of high-pressure synthesized $(\text{Cu}, \text{C})\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ ”, *ibid.*
- 86) H.Kito(AIST, CREST), A.Iyo(AIST, CREST), M.Hirai(SUT, AIST, CREST), A.Crisan(AIST, NIMP, Bucharest, Romania), M.Tokumoto(AIST, CREST), S.Okayasu(JAERI), M.Sasase(JAERI), H.Ihara(AIST, CREST): “Superconducting properties of the Heavy-ions and Neutron Irradiated $(\text{Cu}, \text{C})\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4-d}$ ($n = 3, 4$ and 5)”, *ib.*
- 87) A. Sundaresan(AIST, CREST), J.C.Nie(AIST, CREST), M. Hirai(SUT, CREST), P. Badica(AIST, NIMP, Bucharest, Romania), S. Fujiwara(SUT, AIST), H. Asada(SUT, AIST), Y. Ishiura(AIST, CREST), H. Ihara(AIST, CREST): “Growth of $\text{Cu}_{1-x}\text{Tl}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ superconducting thin film on CeO_2 buffered sapphire substrate”, *ibid.*
- 88) J. C. Nie(AIST, CREST), A. Sundaresan(AIST, CREST), M. Hirai(AIST, CREST), Y. Ishiura(AIST, CREST), P. Badica(AIST, NIMP, Bucharest, Romania), A. Crisan(AIST, NIMP, Bucharest, Romania), H. Ihara(AIST, CREST): “ $\text{Cu}_{m-1}\text{Ba}_m(\text{Sr}, \text{Ca})_n\text{Cu}_{n+1}\text{O}_{2m+2n+1}$ superconducting thin film by self assembly epitaxy method”, *ibid.*
- 89) P. Badica(AIST, NIMP, Bucharest, Romania), A. Crisan(AIST, NIMP, Bucharest, Romania), H. Ihara(AIST, CREST): “The influence of Tl and O content from the starting mixture on phase formation in (Cu, Tl) -1234 system”, *ibid.*
- 90) A. Crisan(AIST, NIMP, Bucharest, Romania), A. Iyo(AIST, CREST), H. Kito(AIST, CREST), Y. Tanaka(AIST, CREST), M. Hirai(SUT, AIST), M. Sasase(JAERI), S. Okayasu(JAERI), H. Ihara(AIST, CREST): “AC Susceptibility and Higher Harmonics Studies of Heavy-Ions Irradiated $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ Bulk Superconductor with Highest Irreversibility Field above Liquid-nitrogen Temperature”, *ibid.*
- 91) A. Crisan(AIST, NIMP, Bucharest, Romania), S.K. Agarwal(SUT, NPL, New Delhi, India), T. Koganezawa(SUT), R. Kuroda(SUT), K. Tokiwa(SUT, CREST), T. Watanabe(SUT, CREST), A. Iyo(AIST, CREST), Y. Tanaka(AIST, CREST), H. Ihara(AIST, CREST): “The Effect of Pinning Centers in Zn-Doped $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{12-y}$ High-temperature Superconductors”, International Symposium the Institute for Solid State Physics-Kashiwa 2001(ISSP-Kashiwa 2001), Kashiwa, Chiba, Oct. 4, 2001
- 92) 田中康資 (産総研、東理大、CREST) 伊豫 彰 (産総研、CREST) 加藤玄樹 (東理大、CREST) 常盤和靖 (東理大、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST): 「 $\text{Cu}_x\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ のラマン分光 (II)」, 日本物理学会第 57 回年次大会 (2002 年) 京都府、立命館大学、びわこ・くさつキャンパス、2002.3.25
- 93) 伊豫 彰 (産総研、CREST) 田中康資 (産総研、東理大、CREST) 常盤和靖 (東理大、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST) 伊原英雄 (産総研、東理大、CREST): 「Tl-1223 系超伝導体のオーバードープ領域における T_c 異常の Zn ドープ効果」, 同上、2002.3.25
- 94) 伊原英雄 (産総研、東理大、CREST) 常盤和靖 (東理大、CREST) 伊豫 彰 (産総研、CREST) 田中康資 (産総研、東理大、CREST) 渡辺恒夫 (東理大、CREST): 「C-S 系コンポジットの合成と評価」, 同上、2002.3.24
- 95) 鬼頭 聖 (産総研、CREST) 平井 学 (東理大、CREST) 伊豫 彰 (産総研、CREST)

- 徳本 圓(産総研、CREST)岡安 悟、笹瀬雅人(原研東海)伊原英雄(産総研、東理大、CREST):「多層型高温超伝導体(Cu, C)-12(n-1)n系(n=4)の重粒子線照射」, 同上、2002.3.25
96) A. Crisan(AIST、CREST、NIMP) P. Badica(AIST、CREST、NIMP) J.C. Nie(CREST) S. Fujiwara(TUS、CREST) A. Sundaresan(CREST) Y. Tanaka(AIST、TUS、CREST) H. Ihara(AIST、TUS、CREST):「Nanotechnology of pinning centers in superconducting thin films」, 2002年(平成14年)春季第49回応用物理学関係連合講演会、2002.3.29
97) J. C. Nie(CREST) M. Hirai(TUS、CREST) P. Badica(AIST、CREST、NIMP) A. Sundaresan(CREST) A. Crisan(AIST、CREST、NIMP) Y. Tanaka(AIST、TUS、CREST) H. Ihara(AIST、TUS、CREST):「Superconductivity in $Sr_xCa_{1-x}CuO_2$ and Na-doped $CaCuO_2$ Infinite Layer Thin Films」, 同上、2002.3.29
98) H. Ihara(AIST、TUS、CREST):「Physical Properties of Cu-1234, -1223 and -1245」, 2001 Japan-EU Workshop on Superconductors、2001.12.13 (招待講演)
99) 伊豫 彰(AIST、CREST):「Tl系およびCu系」, 「応用物理学会超伝導分科会主催第24回研究会」, 2002.12.11
100) P. Badica(AIST、CREST、NIMP) M. Hirai(TUS、CREST) H. Kito(AIST、CREST) A. Sundaresan(CREST) A. Iyo(AIST、CREST) Y. Tanaka(AIST、TUS、CREST):「Tl-Based Superconducting Phases Obtained by Evaporation Condensation Technique」, 10th International Ceramics Congress & 3rd Forum on New Materials (CIMTEC2002)、International Florence Congress Center、フローレンス(イタリア) 2002.7.17
101) A. Iyo(AIST、CREST)、M. Hirai(TUS、CREST) M. Ariyama(AIST、TUS) M. Tokumoto(AIST、CREST) T. Watanabe(TUS、CREST) K. Tokiwa(TUS、CREST) Y. Tanaka(AIST、CREST):「Zn and Ni doping effect on anomalous suppression of T_c in an over doped region of $TlBa_2Ca_2Cu_3O_{9-\delta}$ 」, 2002 International Conference on Physics and Chemistry of Molecular and Oxide Superconductors (MOS2002)、新竹 国立清華大学(台湾) 2002.8.14
102) A. Crisan(AIST、CREST、NIMP) P. Badica(AIST、CREST、NIMP) S. Fujiwara(AIST、TUS) J.C.Nie(CREST) A. Sundaresan(CREST) A. Iyo(AIST、CREST) Y. Tanaka(AIST、TUS、CREST):「Nanodots-induced Pinning Centers in Thin Films: Effects on Critical Current Density, Activation Energy and Flux Jump Rate.」, Applied Superconductivity Conference & Superconductivity Expo 2002, George R. Brown Convention Center, Huston, Texas(USA) ,2002.8.9
103) S. Ohshima、M. Kusunoki、M. Inadomaru、M. Mukaida、(Yamagata Univ、CREST.):「Relationship between the Surface Resistance and Depairing Current Density of Superconductors」, 同上、2002.8.6 (口頭発表)
104) A. Sundaresan(CREST) Y. Tanaka(AIST、TUS、CTRST) A. Iyo(AIST、CREST) H. Asada(TUS、CREST) A. Crisan(AIST) M. Hirai(TUS、CREST) M. Kusunoki、S. Ohshima(Yamagata Univ、CREST):「Preparation of $Tl_2Ba_2CaCu_2O_y$ and $Tl(Ba,Sr)_2Ca_2Cu_3O_y$ Superconductor Thin Films and its Microwave Surface Resistance」, 同上、2002.8.9 (口頭発表)
105) Y. Kodama(AIST、CREST) J.C. Nie(CREST) A. Sundaresan(CREST) Y. Tanaka(AIST、TUS、CREST):「Annealing Effects on $[BaCuO_2]_m/[CaCuO_2]_n$ Superlattice Thin Film」, 23rd International Conference on Low Temperature Physics、広島県広島市、広島観光コンベンションビューロ、2002.8.21
106) H. Kito(AIST、CREST) A. Iyo(AIST、CREST) A Crisan(AIST、CREST、NIMP) M. Hirai(TUS、CREST) M. Tokumoto(AIST、CREST) S. Okayasu(JAERI) M. Sasase(JAERI) Y. Tanaka(AIST、TUS、CREST) H. Ihara(AIST、TUS、CREST):「Heavy-ion Irradiation dependence of the Superconducting properties of $(Cu,C)Ba_2Ca_3Cu_4O_{10.5-\delta}$ 」, 同上、2002.8.22
107) A. Crisan(AIST、NIMP、CREST) P. Badica(AIST、NIMP、CREST) M. Hirai(TUS、CREST) H. Kito(AIST、CREST) A. Iyo(AIST、CREST) Y. Tanaka(AIST、TUS、CREST):「Intra- and inter-grain critical current density in (Cu,C):1234 superconductors」, 同上、2002.8.22
108) Y. Tanaka(AIST、TUS、CREST) A. Iyo(AIST、CREST) K. Tokiwa(TUS、CREST) T. Watanabe(TUS、CREST):「*i*-soliton, fractional flux and breakdown of time reversal symmetry in multi-band superconductor」, 同上、2002.8.23

- 109) A. Iyo (AIST, CREST), M. Hirai (TUS, CREST), K. Tokiwa (TUS, CREST), T. Watanabe (TUS, CREST), M. Tokumoto (AIST, CREST), M. Ariyama (TUS), Y. Tanaka (AIST, TUS, CREST), “Anomalous suppression of T_c in an over doped region of $TlBa_2Ca_2Cu_3O_{9-\delta}$ ”, 同上, 2002.8.23
- 110) A. Sundaresan (CREST), H. Asada (TUS, CREST), H. Kito (AIST, CREST), A. Iyo (AIST, CREST), Y. Tanaka (AIST, TUS, CREST), M. Kusunoki, S. Ohshima (Yamagata Univ.): “Preparation of Tl-1223 and 2212 superconductor thin film and their microwave properties”, 同上, 2002.8.25
- 111) M. Hirai (TUS), Akira Iyo (AIST, CREST), H. Kito (AIST, CREST), Y. Kodama (AIST, CREST), A. Crisan (AIST, CREST, NIMP), K. Tokiwa (TUS, CREST), T. Watanabe (TUS, CREST), J. Arai (TUS), Y. Tanaka (AIST, CREST): “Annealing effect of the irreversibility fields in $(Cu, C)-12(n-1)n$ ($n = 3, 4$)”, 同上, 2002.8.25
- 112) J.C. Nie (CREST), P. Badica (AIST, NIMP, CREST), M. Hirai (TUS, CREST), Y. Kodama (AIST, CREST), A. Crisan (AIST, NIMP, CREST), A. Sundaresan (CREST), Y. Tanaka (AIST, TUS, CREST), H. Ihara (AIST, TUS, CREST): “Electron-doped superconductivity in $(Sr,Ca)CuO_2$ infinite-layer thin films”, 同上, 2002.8.23
- 113) P. Badica (AIST, NIMP, CREST), A. Crisan (AIST, NIMP, CREST), A. Iyo (AIST, CREST), H. Kito (AIST, CREST), M. Hirai (TUS, CREST), Y. Tanaka (AIST, TUS, CREST): “Addition of LiF to $(Cu,C)-1234$ bulk superconductor”, 同上, 2002.8.25
- 114) 田中康資 (産総研、東理大、CREST), 高橋聡雄 (東理大、CREST), 平井 学 (東理大、CREST), 伊豫 彰 (産総研、CREST), 奥本秀明、加藤玄樹 (東理大), 常盤和靖 (東理大、CREST), 渡辺恒夫 (東理大、CREST): “多層型 (マルチバンド) 高温超伝導体のラマン散乱”, 日本物理学会 2002 年秋季大会、愛知県春日井市、中部大学, 2002.9.6
- 115) 鬼頭 聖 (産総研、CREST), 平井 学 (東理大、CREST), 伊豫 彰 (産総研、CREST), 徳本 圓 (産総研、CREST), 岡安 悟、笹瀬雅人、左高正雄 (JAERID), 伊原英雄 (産総研、東理大、CREST), 田中康資 (産総研、東理大、CREST): “多層型高温超伝導体 $(Cu, C)-1245$ 系の重粒子線照射効果”, 同上, 2002.9.6
- 116) 伊豫 彰 (産総研、CREST), 常盤和靖 (東理大、CREST), 渡辺恒夫 (東理大、CREST), 田中康資 (産総研、東理大、CREST): “頂点 F 系超伝導体 $Ba_2Ca_3Cu_4O_8(O_{1-y}F_y)_2$ の高圧合成と物性評価”, 2002 年 (平成 14 年) 秋季第 63 回応用物理学会学術講演会、新潟市、新潟大学, 2002.9.24
- 117) 浅田秀人 (東理大、CREST), A. Sundaresan (CREST), P. Badica (産総研、CREST, NIMP), 伊豫 彰 (産総研、CREST), 田中康資 (産総研、東理大、CREST), 楠 正暢、大嶋重利 (山形大、CREST): “マイクロ波応用を目指した、Tl 系薄膜の開発”, 同上, 2002.9.26
- 118) 平井 学 (東理大、CREST), 伊豫 彰 (産総研、CREST), 鬼頭 聖 (産総研、CREST), 児玉泰治 (産総研、CREST), 田中康資 (産総研、TUS, CREST): “ $(Cu, C)-1223$ 及び $(Cu, C)-1234$ 高温超伝導体における不可逆磁界のアニール効果”, 同上, 2002.9.24
- 119) A. Iyo, M. Hirai, K. Tokiwa, T. Watanabe, Y. Tanaka, “Preparation of polycrystals with various T_c and single crystal growth of $Ba_2Ca_3Cu_4O_8(O_{1-y}F_y)_2$ under high pressure”, The 15th International Symposium on Superconductivity (ISS2002), 横浜市、パシフィコ横浜 会議センター, 2003/11/13 (口頭発表)
- 120) H. Kito, A. Iyo, M. Hirai, A. Crisan, M. Tokumoto, S. Okayasu, M. Sasase, H. Ihara, Y. Tanaka, “Heavy-ions Irradiation dependence of Superconducting properties for the Cu-based $(Cu,C)Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4-\delta}$ ($n=4$)”, 同上, 2003/11/12
- 121) Y. Kodama, A. Iyo, M. Hirai, H. Kito, Y. Tanaka, “Annealing study of superconducting properties in a Cu-1223 superconductor using O_2 -HIP apparatus”, 同上, 2002/11/12
- 122) Y. Tanaka, Y. Tanaka, A. Iyo, S. Takahashi, M. Hirai, H. Okumoto, H. Kato, K. Tokiwa and T. Watanabe, “Dynamics of multiple order parameters in the multi-band superconductor studied by Raman spectroscopy”, 同上, 2002/11/12
- 123) A. Crisan (Bath Univ., CREST), D. Cole (Bath Univ.), S. Bending (Bath Univ.), A. Iyo (AIST,

- CREST), Y. Tanaka(AIST, CREST), 「 Unconventional melting lines of vortices in (Cu,C)Ba₂Ca₃Cu₄O₁₂ 」, International Workshop "Frontiers of Unconventional Superconductivity", organized by Institute of Physics (UK), Birmingham, 2002.11.27 (ポスター講演).
- 124). S. Ohshima (Yamagata Univ.) Y. Tanaka (AIST, CREST) 「 Design and fabrication of compact superconducting filters and antennas using high quality YBCO thin films 」, 2002 Taiwan-Japan Symposium on SQUID and Communication Electronics, 2002.11.28 (招待講演).
- 125) M.Tachiki(物材機構), 「 Vibronic Mechanism Of High Tc Superconductivity 」 Fourth International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials, San Diego, California USA, 2003/1/19 (招待講演).
- 126) 鬼頭 聖(産総研、CREST), 伊豫 彰(産総研、CREST), 徳本 圓(産総研), 岡安 悟(原研 東海), 伊原 英雄(産総研、CREST), 田中 康資(産総研、CREST), 「多層型高温超伝導体(Cu, C)-1234 系の中性子線照射効果」, 日本中性子科学会 第 2 回年会、熊取町公民館及びふれあいセンター, 2002.12.9.
- 127) K. Tokiwa (TUS,CREST), H.Okumoto (TUS), T.Imamura (TUS), S.Mikusu (TUS), K.Yuasa (TUS), W.Higemoto (KEK-MSL), K. Nishiyama (KEK-MSL), A. IYO (AIST,CREST), Y. Tanaka (AIST,CREST), T. Watanabe (TUS,CREST), 「 Magnetism of Multi-layer HgBa₂Ca₄Cu₅O_y Superconductor Studied by μ SR Measurements 」, 同上 2003/1/19 (ポスター講演).
- 128) N. Miyakawa(TUS), K. Tokiwa(TUS,CREST), S. Mikusu(TUS), J. F. Zaszinski(Argonne National Laboratory,Illinois Institute of Technology), L. Ozyuzer (Izmir Institute of Technology), T. Ishihara (TUS), T. Kaneko (TUS), T. Watanabe (TUS,CREST) and K. E. GRAY (Argonne National Laboratory), 「 Tunneling Studies of Multilayerd Superconducting Cuprate (Cu,C)Ba₂Ca₃Cu₄O₁₂₊ 」, 同上 2003/1/21 (招待講演).
- 129) 堀家竜二(東理大 基礎工), 三楠聡(東理大 基礎工), 常盤和靖(東理大 基礎工、CREST), 伊豫彰(産総研、CREST), 鬼頭聖(産総研、CREST), 平井学(東理工、産総研、CREST), 田中康資(産総研、CREST), 辺土正人(東大物性研), 上床美也(東大物性研), 塩田重雄(田中貴金属), 渡辺恒夫(東理大基礎工、CREST), 「(Cu, C)Ba₂Ca₂Cu₃O_y の Tc およびホール係数の圧力効果」, 日本物理学会第 58 回年次大会, 東北大学川内キャンパス, 2003/3/28.
- 130) 黒田亮(東理大 基礎工), 常盤和靖(東理大 基礎工、CREST), 伊豫彰(産総研、CREST), 田中康資(産総研、CREST), 塩田重雄(田中貴金属), 渡辺恒夫(東理大 基礎工、CREST), 「(Hg_{1-x}, Cu_x)Ba₂Ca₂Cu₃O_y 超伝導体の高圧合成と特性の評価」, 同上, 2003/3/28.
- 131) 加藤玄樹(東理大 基礎工), 今村和人(東理大 基礎工), 常盤和靖(東理大 基礎工、CREST), 伊豫彰(産総研、CREST), 田中康資(産総研、CREST), 塩田重雄(田中貴金属), 渡辺恒夫(東理大 基礎工、CREST), 「CuBa₂Ca₃Cu₄O_y の高圧下での単結晶育成」, 同上, 2003/3/28.
- 132) 鬼頭 聖(産総研、CREST), 平井 学(産総研、CREST、東理大 理工), 伊豫 彰(産総研、CREST), 岡安 悟(原研 東海), 左高正雄(原研 東海), 伊原 英雄(産総研、CREST), 田中 康資(産総研、CREST), 「多層型高温超伝導体 TI-1245 系の重粒子線照射効果」, 同上, 東北大学川内キャンパス, 2003/3/28.
- 133) 田中康資(産総研、CREST), Adrian Crisan(産総研、CREST), 伊豫 彰(産総研、CREST), 高橋聡雄(東理大 基礎工), 平井学(東理大、理工 T), 加藤玄樹(東理大 基礎工), 奥本秀明(東理大 基礎工), 常盤和靖(東理大 基礎工、CREST), 渡辺恒夫(東理大 基礎工、CREST), 「複数オーダーパラメーターのダイナミクスの実験的制御 ~ ラマン分光と磁束格子融解磁場の見地から ~ 」, 同上, 2003/3/29.
- 134) 平井 学(東理大 理工), 伊豫彰(産総研、CREST), 児玉泰治(産総研、CREST), 鬼頭聖(産総研、CREST), 新井重一郎(東理大 理工), 田中康資(産総研、CREST), 「(Cu,C)Ba₂Ca₃Cu₄O_y の不可逆磁界のアニール効果」, 同上, 2003/3/31.

- 135) 伊豫彰(産総研、CREST),平井学(東理大 理工),常盤和靖(東理大 基礎工、CREST),渡辺恒夫(東理大 基礎工、CREST),田中康資(産総研、CREST),「頂点 F 系銅酸化物超伝導体 $Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n(O,F)2}$ ($n=3, 4$) の高圧下での単結晶育成」, 同上、2003/3/31.
- 136) 三楠 聡(東理大基礎工),瓜田直功(東理大基礎工),橋中義武(東理大基礎工),常盤和靖(東理大基礎工、CREST),渡辺恒夫(東理大基礎工、CREST),伊豫 彰(産総研、CREST),田中康資(産総研、CREST),「高圧下で合成された TI-1223 超伝導体の熱起電力測定」,2003 年(平成 15 年度)春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会 神奈川大学 横浜キャンパス、2003/3/27.
- 137) 楠正暢(山形大 工),大嶋重利(山形大 工),向田昌志(山形大 工),アシナラ ヤナン スンダレサン(産総研、CREST),田中康資(産総研、CREST),荒木猛司(超工研),平林泉(超工研),田辺圭一(超工研),ミヒヤエル ローレンツ(ライプチヒ大),ホルガー ホフムス(ライプチヒ大)「マイクロ波デバイス用高温超伝導膜の開発の現状」, 同上、2003/3/29.
- 138) A. Sundaresan(産総研、CREST),H. Asada(東理大 基礎工), H. Kito(産総研、CREST),A. Iyo(産総研、CREST),Y. Tanaka(産総研、CREST),M. Kusunoki(山形大 工),S. Ohshim(山形大 工),「Low microwave surface resistance at 90 K in TI-1223 superconducting thin films fabricated on LSAT substrate」, 同上、2003/3/30.
- 139) M.Tachiki(物材機構),「Phonon-assisted strong Cooper pair interaction in highly correlated cuprate systems」, Highlights in Condensed Matter Physics, Castello Arechi, Salerno, 2003/5/9-11, (招待講演).
- 140) H. Kotegawa (Osaka Univ), Y. Araki (Osaka Univ), G. -q. Zheng (Osaka Univ), Y. Kitaoka (Osaka Univ), K. Tokiwa (TUS), T. Watanabe (TUS), A. Iyo (AIST), H. Kito (AIST), Y. Tanaka (AIST), 「NMR Study on the coexistence of superconductivity and antiferromagnetism in 5 layered high-Tc cuprates」7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors, Rio de Janeiro, Brazil, 2003/5/26 (ポスター講演).
- 141) H. Kito(AIST,CREST), A. Iyo(AIST,CREST), N. Hirai(TUS), M. Tokumoto(AIST,CREST), S. Okayasu(JAERI), M. Sasase(JAERI), M. Sataka(JAERI), H. Ihara(AIST,CREST), Y. Tanaka(AIST,CREST), 「Ion Irradiation dependence of the Superconducting properties of $(Cu, C)Ba_2Ca_3Cu_4O_{10.5}$ 」, 同上、2003/5/27 (ポスター講演).
- 142) Y. Kitaoka (Osaka Univ), H. Kotegawa (Osaka Univ), Y. Tokunaga (Osaka Univ), Y. Araki (Osaka Univ), G. -q. Zheng (Osaka Univ), K. Tokiwa (TUS), T. Watanabe (TUS), A. Iyo(AIST), Y. Tanaka (AIST) and H. Ihara (AIST), 「Coexistence of AF order and superconductivity in 5-layered Hg compounds」, 同上、2003/5/29 (招待講演).
- 143) N. Kikuchi (CRSET,AIST), A. Sundaresan (CREST,AIST), N. Terada (Kagoshima Univ.,CREST) M. Hirai(TUS), Y. Tokiwa(TUS,CREST), T. Watanabe(TUS,CREST), Y. Kodama(AIST,CREST), A. Iyo(AIST,CREST) and Y. Tanaka(AIST,CREST), 「Epitaxial growth of $(Cu,C)Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_x$ ($n=1$) film deposited on $SrTiO_3$ substrate by r.f. sputtering」, The seventh international symposium on sputtering & plasma processes, Kanazawa, Japan, Sponsored by The Vacuum Society of Japan", Kanazawa Kanko Hotel 2003/6/11, (ポスター講演).
- 144) Sundaresan Athinarayanan(AIST,CREST), 「A simple method to identify high Jc films with large area」, The 11th International workshop on Critical Currents in superconductors, Nihon University Centenary Hall, Organized by the Graduate School of Basic Integrated Sciences, and the Institute of Natural Science, NihonUniversity, 2003/7/31 (口頭発表).
- 145) 三楠 聡(東理大基礎工),常盤和靖(東理大基礎工、CREST),及川健一(原研東海),伊豫 彰(産総研、CREST),田中康資(産総研、CREST),塩田重雄(田中貴金属),渡辺恒夫(東理大基礎工、CREST),「高圧合成した $T_c > 130K$ を有する $TlBa_2Ca_2Cu_3O_y$ (TI-1223) 超伝導体の中性子線回折」, 2003 年秋季、第 64 回応用物理学学会学術講演会、福岡大学、七隈キャンパス、2003/8/30.
- 146) 児玉泰治(産総研、名工大、CREST),平井 学(東理大理工),鬼頭 聖(産総研),伊豫 彰(産総研、CREST),田中康資(産総研、CREST),種村 榮(名工大),「高圧酸

素処理による(Cu,C)-1223 相超伝導体の酸化法」,同上、2003/8/30.

147) A. Sundaresan(CREST, AIST), Y. Tanaka(AIST, CREST), A. Iyo A (AIST,CREST), M. Kusunoki (Yamagata Univ.), S. Ohshima (Yamagata Univ), 「Microwave performance of double sided Tl-1223 films on LSAT substrate; A possible operation of device at 90 K」, 6th European Conference on Applied Superconductivity, Sorrento Napoli - Italy Hilton Sorrento Palace Plan, 2003/9/15 (口頭発表).

148) S. Miyanomae (Kagoshima Univ), K. Fujita (Kagoshima Univ.), T. Okuda (Kagoshima Univ., CREST), K. Obara (Kagoshima Univ.) , N. Kikuchi (AIST, CREST), A. Iyo (AIST, CREST), Y. Tanaka (AIST, CREST), N. Terada (Kagoshima Univ., CREST), 「Study of Carrier Doping into Thin Films of In-finite Layer and Cu-system Cuprates」, 同上, 2003/9/17 (ポスター発表).

149) K. Ohki (Kagoshima Univ.), A. Ohtomi (Kagoshima Univ.), T. W. Rusminto (Kagoshima Univ.), T. Okuda (Kagoshima Univ., CREST), K. Obara (Kagoshima Univ.), H. Sato (AIST), H. Akoh (AIST), N. Terada (Kagoshima Univ., AIST, CREST), 「In-situ Characterization of Thermal Stability and Depth Profile of Electronic Structure of Engi-neered Surfaces of c-axis YBCO films」, 同上, 2003/9/17 (ポスター発表).

150) 荒木賀洋(阪大院基礎工), 小手川恒(阪大院基礎工), 鄭国慶(阪大院基礎工), 北岡良雄(阪大院基礎工), 鬼頭聖(産総研), 伊豫彰(産総研), 田中康資(産総研), 常盤和靖(東理大 基礎工), 渡辺恒夫(東理大 基礎工), 伊原英雄(産総研), 「五層系銅酸化物高温超伝導体における超伝導と反強磁性の共存についての NMR による研究」, 2003 年 日本物理学会秋季大会、岡山大学 津島キャンパス, 2003/9/21.

151) 橋中義武(東理大 基礎工), 小西史恵(東理大 基礎工), 三楠聰(東理大基礎工), 常盤和靖(東理大 基礎工、CREST), 伊豫彰(産総研、CREST), 田中康資(東理大 基礎工、産総研、CREST), 塩田重雄(田中貴金属), 渡辺恒夫(東理大 基礎工、CREST), 「頂点フッ素系超伝導体 $Ba_2Ca_3Cu_4O_8(O, F)_2$ の熱伝導率測定」, 同上、2003/9/22.

152) 平井学(東理大理工, 産総研, CREST), 伊豫彰(産総研, CREST), 児玉泰治(産総研, CREST), 田中康資(産総研, CREST), 「(Cu, C) $Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ (n=4, 5) の酸素量による物性の変化」, 同上、2003/9/22.

153) 三楠聰(東理大 基礎工), 小西史恵東理大基礎工, 橋中義武東理大基礎工, 常盤和靖(東理大基礎工, CREST), 伊豫彰(産総研、CREST), 田中康資(東理大 基礎工、産総研、CREST), 塩田重雄(田中貴金属), 渡辺恒夫(東理大 基礎工、CREST), 「高圧下で合成された多層型高温超伝導体 $TlBa_2Ca_2Cu_3O_y(T_C > 130K)$ の物性」, 同上、2003/9/22.

154) 伊豫彰(産総研, CREST), 平井学(東理大 理工, CREST), 常盤和靖(東理大 基礎工、CREST), 渡辺恒夫(東理大 基礎工、CREST), 田中康資(産総研, 東理大 基礎工、CREST), 「頂点 F 系超伝導体 $Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n}(O, F)_2$ (n>4) の合成と T_c の n 依存性」, 同上、2003/9/22.

155) 東理大基礎工 A, 高工ネ機構 B, 産総研 C, 田中貴金属 D, CRESTE 常盤和靖(東理大 基礎工, CREST), 奥本秀明(東理大 基礎工), 湯浅宏一郎(東理大 基礎工), 三楠聰(東理大 基礎工), 髭本亘(高工ネ機構), 西山樟生(高工ネ機構), 伊豫彰(産総研、CREST), 田中康資(産総研、CREST), 塩田重雄(田中貴金属), 渡辺恒夫(東理大 基礎工, CREST), 「多層型銅酸化物超伝導体 $HgBa_2Ca_4Cu_5O_y$ (Hg-1245) の SR 測定」, 同上、2003/9/22.

156) A. Sundaresan(AIST,CREST), A. Iyo(AIST,CREST), Y. Tanaka(AIST,CREST), M. Murugesan(AIST), H. Obara (AIST), A. Saito (Yamagata Univ.) and S. Ohshima (Yamagata Univ.), 「Fabrication and microwave properties of double side Tl(Ba,Sr) $_2$ Ca $_2$ Cu $_3$ O $_y$ films on LSAT substrate」, The 8th International Union of Materials Research Societies International Conference on Advanced Materials, Yokohama, Japan, 2003/10/12 (口頭発表).

157) S. Miyanomae (Kagoshima Univ.), K. Fujita (Kagoshima Univ.), N. Kikuchi (AIST,CREST), Y. Tanaka (AIST,CREST), N. TERADA* (Kagoshima Univ., CREST, AIST), 「Study of Dopability of Infinite Layer and Cu-system Films」, 同上、2003/10/12 (口頭発表).

158) Y. Kodama (AIST, CREST), M. Hirai (TUS), H. Kito (AIST), A. Iyo(AIST, CREST), Y. Tanaka(AIST, CREST) and S. Tanemura (Nagoya Inst. Tech.), 「Anomalous oxygen annealing effects on (Cu,C)-1223」, 同上、2003/10/13 (口頭発表).

159) K. Ohki (Kagoshima Univ.), R. T. Widodo (Kagoshima Univ.), K. Obara (Kagoshima Univ.),

- Hiroshi Sato (AIST), Hiroshi Akoh (AIST), Tetsuji Okuda ((Kagoshima Univ.,CREST), Norio Terada (Kagoshima Univ. CREST), 「In-situ Characterization of Electronic Structure of Engineered Surfaces of c-axis YBCO films for Sandwich type Junctions」, 同上、2003/10/13 (招待講演) .
- 160) N. Kikuchi (CREST, AIST), A. Sundaresan (CREST, AIST), N. Terada (Kagoshima Univ., CREST), K. Tokiwa (TUS, CREST), T. Watanabe (TUS, CREST), Y. Kodama (AIST, CREST), A. Iyo (AIST, CREST), Y. Tanaka (AIST, CREST), 「Artificially Layered (Cu,C)Ba₂Ca_{n-1}Cu_nO_x (n=1-4) Films by Sputtering Deposition」, The 16th International Symposium on Superconductivity (ISS2003), Tsukuba, 2003/10/29 (ポスター講演) .
- 161) Y. Kodama (AIST, CREST, Nagoya Institute of Technology), M. Hirai (TUS), H. Kito (AIST), A. Iyo (AIST,CREST), Y. Tanaka (AIST, CREST), S. Tanemura (Nagoya Institute of Technology), 「Annealing Effects on (Cu,C)-1223 Superconductors by High Oxygen Pressure Treatment Using an O₂-HIP Apparatus」, 同上、2003/10/29 (ポスター講演) .
- 162) 田中康資、「多バンド超伝導体のソリトン」、千葉大夏目研主催セミナー、千葉市、千葉大学、2003/6/6
- 163) 伊豫 彰、「高温超伝導体の高圧合成とその物性—新物質探索、単結晶育成、高 T_c 化—」、静岡大学物性セミナー、静岡市、静岡大学、2003/11/14
- 164) 田中康資、「マルチバンド超伝導体の新展開」、鹿児島大学 理工学研究科特別講義、鹿児島市、鹿児島大学、2003/11/26

(3)特許出願 (国内 9 件、海外 4 件)

- 1) 伊原英雄, 「選択還元型高温超伝導体及びその製造方法」, JST, 産業技術総合研究所, 特願平 11-85003(1999.3.26), PCT 出願(PCT/JP00/01669, 2000.3.17), PCT 出願時自国指定あり (特願 2000-607930), 国際公開番号・国際公開日(WO00/58218, 2000.10.5), 米国, EP(独・仏・英)へ移行中
- 2) 石浦由美子, 田中康資, 伊原英雄, 伊豫彰, 「赤外分光法を利用した酸化物高温超伝導体中の炭酸基の絶対量測定方法およびその装置」, JST, 産業技術総合研究所, 特願 2000-257016(2000.8.28), 特開 2002-71563(2002.3.8), 特許第 3401537 号(登録日:2003.2.28)
- 3) 伊原英雄, A. Sundaresan, J. C. Nie, 「複合酸化物系薄膜の作製方法及びその装置並びにそれにより作製した複合酸化物系薄膜」, JST, 産業技術総合研究所, 特願 2000-266132(2000.9.1), 特開 2002-68894(2002.3.8), PCT 出願(PCT/JP01/07280, 2001.8.24), 米国, EP(独・仏・英)へ移行中, EP1342820A1(2003.9.10)
- 4) 田中康資, 伊豫彰, 白川直樹, 池田伸一, 伊原英雄, 常盤和靖, 渡辺恒夫, 上村彰, ジョン・エリス・マッカーサー・ザ・サード, 「磁場依存性を有する温度計の磁場校正方法」, JST, 産業技術総合研究所, 日本カンタムデザイン(株), 特願 2000-386049(2000.12.19), 特開 2002-188967(2002.7.5), 特許第 3416685 号(登録日:2003.4.11)
- 5) 伊原英雄, 「量子欠陥磁束ピン止め型高性能超伝導材料とその製造方法」, JST, 産業技術総合研究所, 特願 2001-009276(2001.1.17), 特開 2002-220230(2002.8.9)
- 6) 伊原英雄, I. A. Crisan, 「ナノドットを利用した柱状ピン止め中心を有する超伝導薄膜及びその製造方法」, JST, 産業技術総合研究所, 特願 2001-185597(2001.6.19), PCT 出願 (PCT/JP02/06007, 2002.6.17), 米国, EP(独・仏・英)へ移行中
- 7) 伊原英雄, A. Sundaresan, 「酸化物高温超伝導体の作製方法」, JST, 産業技術総合研究所, 特願 2001-270445(2001.9.6), PCT 出願(PCT/JP02/09049, 2002.9.5), PCT 出願時自国指定あり, 米国, EP(英, 独, 仏, フィンランド, スウェーデン), 中国, 日本へ移行中
- 8) アシナラヤナン スンダレサン, 田中康資, 大嶋重利, 楠正暢, 「超伝導膜の超伝導特性の評価方法」, JST, 産業技術総合研究所, 特願 2002-381028(2002.12.27)
- 9) 田中康資, 伊豫彰, 寺田教男, 川畑史郎, アシナラヤナン スンダレサン, 菊地直人, 渡辺恒夫, 常盤和靖, 「量子チューリング機械」, 産業技術総合研究所, JST, 特願 2003-3159(2003.9.9)

(4)新聞報道等

新聞報道

“ In brief: Superconductors respond well to pressure”, Nature Publishing GroupのWebサイト (Materials update)

Tc>130KのTI-1223の紹介記事

受賞

・受賞

1. 超伝導科学技術賞 1999年4月
2. 通商産業大臣賞 1999年6月
3. ベストポスター賞 (International Symposium on Advances in Superconductivity & Magnetism : Materials, Mechanisms & Devices (ASMM2D-2001) September 25-28, 2001, Mangalore, India) 2001年9月

・主な招待講演

1. Materials Research Society Fall Meeting 99 (MRS'99), Boston, Nov. 29, 1999
2. THE 8TH Asia Pacific Physics Conference (APPC2000), TAIPEI, Aug. 8, 2000
3. The Third International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials (New³SC-3), Honolulu, USA, Jan. 18, 2001
4. The 7th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M²S-HTSC), Rio de Janeiro, Brazil, May 29, 2003.

(5) その他特記事項

「超伝導膜の超伝導特性の評価方法」特願2002-381028の試作機が、山形大学と東北精機工業株式会社によって開発される。

7. 結び

理想と高い目標を掲げたプロジェクトであり、その遂行には研究者個人、研究グループの協調と力量が問われ続けた5年間であった。科学技術振興機構の本部と「電子・光子等の機能制御」領域の関係各位に、これを支え続けていただいたことを、心から感謝したい。

戦略的創造研究推進事業では、各研究グループが属する組織運営の論理と、事業推進の論理が必ずしも一致するものではなく、円滑な事業推進においては、実際のケースに合わせて、組織が自ら行う事業との違いを社会学的に研究していくことは常に必要であろう。

また、研究費の適切な執行についての注意喚起もたびたびあったが、このようなことは、その適切な執行について、技術上の問題を解決していくことは当然ながら、その問題点は、哲学的、社会学的に根源的なところに端を発しており、そのこと自身を、科学技術振興機構が深く研究していくことで、より効率的で、有益な事業推進の道が見えてくると信じる。我々のプロジェクトは、学術的な内容以外に、そのような視点にも有益な示唆を与える事例も多く生み出したと考える。

最後に、このプロジェクトのマスコットを紹介して、結びとする。

