

別紙 HP 公開資料

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－インド研究交流）

1. 研究課題名：「Feasibility study on the application of multiple-order parameters in materials to information processing（多重秩序材料の情報通信技術への応用探索）」
2. 研究期間：平成 20 年 2 月～平成 24 年 3 月
3. 支援額： 総額千八百万円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	田中康資	独立行政法人 産業技術総合研究所 電子光研究部門 酸化物デバイスグループ	主任研究員
研究者	伊豫 彰	独立行政法人 産業技術総合研究所 電子光研究部門 超伝導エレクトロニクスグループ	主任研究員
研究者	寺田教男	鹿児島大学・大学院・理工学研究科 電気電子工学専攻 (工学部・電気電子工学科)	教授
研究者	常盤和靖	東京理科大学基礎工学部電子応用工学科	准教授
研究者	渡辺恒夫	東京理科大学基礎工学部電子応用工学科	嘱託教授 (事業後、東京理科大学常務理事)
研究者	山元徹朗	鹿児島大学・大学院・理工学研究科	博士課程学生(事業参加後 博士取得)
参加研究者 のべ 9 名			

インド側（研究代表者を含め 6 名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	A. Sundaresan	Chemistry and Physics of Materials Unit, Jawaharlal Nehru Centre for Advanced	准教授

		Scientific Research	
研究者	R. V. K. Mangalam	同上	博士課程学生（事業参加後 博士取得）
研究者	P. Mandal	同上	博士課程学（事業参加後 博士取得）
研究者	A. Shipra	同上	博士課程学（事業参加後 博士取得）
研究者	N. Kumar	同上	博士課程学生
研究者			
参加研究者 のべ 5 名			

5. 研究・交流の目的

インドは科学技術大国を自任し、自らの科学技術の歴史に誇りを持った国です。そのような国と、相互信頼・尊敬の関係を築くことは、インド-日本の将来にとって必要で大切な事です。次世代に資する重要な情報通信技術の基盤をゼロからともに創り上げていくことは、その仕事が困難であればあるほど、互いの絆を強くするでしょう。

挑戦する題材として、私たちは、「多重秩序材料」の開発が適していると考えました。「秩序」というのは、全てが「揃っている」状態です。団体が整列したり、行進している状況を思い浮かべればよいでしょう。「多重秩序」というのは、団体で行進している集団が一つではなく二つ以上あり、それが、混ざっているように見えるが、一つ一つの集団が、ばらばらにならないで、集団のままにいる状態です。集団が一つしかないときより、その挙動はバラエティーに富み、多くの情報や機能を持つことができる高度な秩序状態です。

量子力学は、通常は、ナノスケール以下の電子や原子といったものに適用されます。一方で、マクロな秩序状態で、量子力学的性質を持つ状態を、巨視的量子状態といい、超伝導はその代表選手です。一方、秩序の組み合わせ方によって、電気的秩序（誘電体）磁気的秩序（磁性体）などを組み合わせたマルチフェロイック材料があります。超伝導にも、二つ以上の超伝導秩序を組み合わせた多成分超伝導などがあります。これらを「多重秩序材料」とまとめて考え、材料開発から、物理、デバイス原理まで俯瞰して研究を推進しました。

6. 研究・交流の成果

6-1 研究の成果

本事業では、超伝導の分野で、多くの興味深く、今後新しいエレクトロニクスへ向けて研究が発展しそうな現象が見つかりました。

超伝導状態は粘土の塊のようなものです。なにか基本的な小さな単位（原子のようなもの）が集まって粘土ができていると考えることもできます。しかし、巨視的量子状態では、まず大きな粘土という分ち難いものがあって、その粘土を伸ばしたり、変形させたり、ねじったり、粘土の一部に穴をあけたりして、大きな構造から小さな構造までを作っていると考えます。

その時重要になるのは、3次元空間一点一点に貼りつくもう一つ余計な次元です。この余計な次元を、内部空間、その空間における「位置」を量子位相ということがあります。この次元は、3次元の空間とは異なり、どんどん進んでもぐるっと回って元に戻ってくるよう

な空間です。太さのない紐で作った輪のような空間を思い浮かべると良いでしょう。超伝導状態では、3次元の隣り合う点で、この量子位相が連続的に繋がっていると考えます。どのような経路をたどっても、元いた点に戻れば、内部空間でも同じ場所に戻るという条件が、巨視的量子状態という「粘土」をこねくり回す条件になります。超伝導以外の巨視的量子状態でも同じ考え方をとることができます。

マルチフェロイックや、多成分超伝導では、この内部空間が細い糸で作った輪ではありません。2成分系では、内部空間は厚みのない皮でできた中身のないドーナツのようなものと考えます。ちょうど将棋盤の右端と左端、上端と下端を繋げたようなものです。このように内部空間の「形」が異なる事を、「位相構造が違う」とか「トポロジーが違う」と表現することもあります。多バンド超伝導の内部空間は、従来の超伝導の内部空間と形が異なり、従来の超伝導の粘土ではできないねじり方ができます。私たちは10年以上前に、ねじり方の一つ（バンド間位相差ソリトン）を示すことによってこれを提示しました。本研究交流では、その考え方をさらに発展させ、他の巨視的量子状態との関係を整理し、それらを一堂にまとめる大きな枠組みを構築していくことに力を注ぎました。多バンド超伝導では、結晶構造によって、超伝導になる前の電子構造は複数のバンド（異なるグループ）に分かれています。さらに同じグループの中では位相をそろえようとする力が、バンド間で位相をそろえようとする力に比べて圧倒的に強い場合、あたかも二つの成分が独立の位相を持ち、超伝導全体では複数の量子位相を持った多成分超伝導のように振舞います。このように多成分化した超伝導を「多バンド型多成分超伝導」と呼んでいます。この見方は、直観的な考察を可能にする便利な見方です。

二つの3次元空間上の異なる地点を結んで、内部位相の変化を見たとき、バンド間の位相差が360度回るようなねじれがある時、そのねじれをバンド間位相差ソリトンと言います。このソリトンを、電子の代わりに使ったら、電子ではできないエレクトロニクスが創成できるのではないかと、その可能性を探っているのが私たちの研究です。

多バンド型多成分超伝導でも通常はバンド間で位相をそろえようとしします。しかし、180度変えようとする力が主になり、その結果2バンドの超伝導では、バンド間の位相が180度反転してしまっている超伝導もあります。さらにこの位相を反転させようとする力が、3バンドに働いている場合はどうなるのでしょうか。この場合、互いにバンド間の位相は180度ずつ避け合おうとしますが、全ての位相差を180度にすることは不可能なので（全てを180度にすると合計が360度を越えてしまう）、中途半端な位相差を持って、ばらばらにばらけます（フラストレーションのある超伝導）。この超伝導は、多バンド型カイラル超伝導と呼ぶことができます。この超伝導では、内部空間で「右」と「左」の異なる超伝導が縮退しています。超伝導状態では、「右」か「左」のどちらかだけが選択され対称性は破れています。（「右」と「左」の状態について直観的に把握するためには、時計を思い浮かべれば良いでしょう。時計の長針と短針と秒針が、バンド1, 2, 3の位相と考えると、7時59分20秒が「右」で4時0分40秒が「左」になります。）3バンドの場合のフラストレーションのある超伝導の報告は、Tesanovicのグループに半年遅れましたが、180度の位相差を取ろうとする多バンド超伝導におけるフラストレーション、カイラル不安定性自身に関しては、10年以上前に我々も言及しています。

「多バンド型多成分超伝導」の見方では、フラストレーションのある超伝導でも、バンド間位相差ソリトンなどの位相構造を容易に理解することができます。通常バンド間位相差ソリトンでは、位相差は360度回ります。カイラル超伝導におけるソリトンでは、回る位相差は、中途半端になります。また、右と左の二つの超伝導が実現できるということは、超伝導の状態のままメモリーを作ることができるということです。多バンド型多成分超伝導エレクトロニクス」創成に向けて一つの要素技術が加わったことになりました。

従来の超伝導ですと、超伝導の「粘土」に穴をあけるのは「磁場」です。磁場は自分を囲んでいる超伝導の位相を回します。そして、穴の回りを一周すると元の位相に戻るという要求から、穴の中に入る磁束の量も量子化されています。しかし、この穴に位相差ソリ

トンが寄生した場合（丸いお皿の真ん中に穴があいているとすると、お皿の中心から縁にひびが走るようにソリトンによる位相欠陥線が伸びます。位相のずれは、欠陥線の走る方向と垂直方向に起こります。）ソリトン自身も穴の回りの超伝導の位相を回しますので、磁場はその分の位相を回すことは禁じられ、穴の中にある磁束の量は、磁束量子の量の整数倍ではなくなります。この量子化条件の崩れは、現象としては「分数磁束量子」と呼ばれ、薄い多層膜で作った擬似的な多バンド超伝導でも観測されています。（本物の多バンド超伝導では、私たちを含むグループが探索を続けています。傍証は見つかっていますが、直接的な検証はまだなされていません。）

超伝導の中に磁束が入り込むと、磁束量子を超伝導電流が取り囲む（遮蔽する）磁束のチューブができます。これを渦糸と呼んでいます。渦糸は、普通の超伝導では円筒形をしていて、六角形の鉛筆を束ねるように、正六角形の格子（アブリコソフ格子）を組んでいます。バンド間位相差ソリトンが生成されると、「渦糸分子」の構造ができます。渦糸分子では、磁束量子が二つに分割され分数量子磁束を持った渦糸を、ソリトンが繋いでいます。渦糸分子は丸くありませんので、渦糸の伸びている方向を軸として回転の自由度があり、これらが回転臨界減速を起こします。これは、従来のアブリコソフ格子にはないダイナミクスです。渦糸分子は、多バンド超伝導体の一つである $\text{CuBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の交流帯磁率に実験的に見つかった複数のロスピークを解釈するために考えられた理論で、ロスピークやその温度変化は、渦糸分子の生成とその回転臨界減速を示唆するものです。私たちは、これを、ソリトン発生の傍証の一つと考えています。

カイラル超伝導では、「右」と「左」の二つの超伝導状態が実現可能ですが全体が「右」になってしまった場合、「左」はドメイン（絶海の離れ小島のようなもの）として、生成することになります。このドメインに渦糸が捕獲された場合、渦糸は分数渦糸に分割されますが、その分割のされ方は、あたかも陽子や中性子（ハドロン）中のクォークの分数電荷を思わせるものです。

このように、「多バンド型多成分超伝導」は数学的に、素粒子論・原子核論と近い関係にあるようです。その分野の方々と協力して、2011年6月14日には東京神楽坂で、「Super/Vacuum/Universe（宇宙・真空・超伝導）」と銘打った国際ミニワークショップを開くことができました。

「多重秩序材料」は、物理や数学的構造の深いところで、素粒子論などと意外な関係を持っていることは不思議なことです。裏を返せば、素粒子間に働く「強い力」や「弱い力」のように素粒子論などでしか登場しなかった概念に相当するものが、ナノテクノロジーや材料科学を使って、固体材料の中に再現できるという事です。超伝導に対する考察から南部陽一郎先生は「自発的対称性の破れ」という概念を生み出し、それが、現在の素粒子論の起点になっています。私たちの行っていることは南部先生の道を逆にたどることによって、現代の素粒子論から新しい指導原理を学び、それをエレクトロニクスに活用できるように翻訳し、また、そのための材料を開発していることになります。

次に材料開発について述べます。マルチフェロイック材料の開発に対して、インド側開発能力は大変高く、いろいろな新しい材料を生み出しています。その中で、常圧合成ではどうしても実現できない材料や組成を、日本の高圧合成技術を導入して合成し、高圧合成手法の有用性を検討するというのが、インドと日本の間の一つの協同作業となりました。たくさんの材料を試しましたが、 BiAlO_3 、 $\text{BiMnO}_{3-\delta}$ 、 $\text{BiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ 、 $\text{BiCr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$ に関しては、合成から詳しい材料特性までを総合的に調べ、学術的な報告書として纏めております。

さらに、エレクトロニクス展開を目指して、「多層型高温超伝導体薄膜」の開発を、日本インド両方協力して進めました。高圧合成で20年以上前に見つけた $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ とその類縁化合物の薄膜化は、私たちの悲願です。この材料は典型的な「多バンド型多成分超伝導体」であると考えています。実は、私たちの「多バンド型多成分超伝導」の研究は、この材料の超伝導特性を理解するために始まったものです。

薄膜材料開発においては、 $\text{CuBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_y$ 薄膜の構成要素となる $(\text{Cu}, \text{C}) \text{Ba}_2\text{O}_y$ ブロック、 CaCuO_2 ブロックの超伝導特性、電子構造、結晶構造などをじっくり調べながら、研究を進め

ました。この仕事については、インド、日本両方で薄膜作りを進めました。また、インドに導入された最新鋭の電子顕微鏡の助けも借り、目指した構造ができているか、確認しながら研究を進めました。

本事業で、物理、材料開発の現状が、広く知られるようになり、分数磁束量子の測定を得意とする研究グループもこの研究に加わってくれることになりました。今後、測定の専門家とも力を合わせ、多重秩序状態を使った新しいエレクトロニクス創成に向けて研究を進展させていきたいと思っています。

6-2 人的交流の成果

若手を中心に相互滞在研究や、相互訪問を進めました。博士課程に在籍していたメンバーは順次博士号を獲得し、本プロジェクトに関わった4名は、それぞれに研究者のキャリアを踏み出し、世界中で活躍を始めました。

本事業を推進するにあたって、最も苦勞したのは、鳥インフルエンザ問題や東日本大震災等の社会的状況の劇的な変化への対応でした。今後は、2011年くらいから広く普及してきたクラウドコンピューターを利用して、この状況に対処していこうと思っています。実際に2011年6月14日の国際ワークショップでは、ネット会議システムの能力を試すことができました。ネットワーク会議サービスは、まだ発展途上であり、サービスを提供する会社毎に使い勝手が大きく異なり、インド等とのやりとりに適したサービスを提供している会社と、そうではない会社があります。安定し、コストのかからないシステムを構築することを急いでいます。

インドに限らず、日本国内、ヨーロッパ、米国に広がるネットワークセミナーやネットワーク国際会議の開催が、現実的にそれほど難しくないことが分かりました。この理解は、今回の国際ミニワークショップ開催や、2011年11月22日に行ったインターネットを使ったセミナーの経験に基づいています。これらの経験は、次の研究交流に向けた大きなヒントと励みになっています。今後、この研究分野で、大学院向け、専門家向けなどグレードに分けた国際勉強会を開く事できないか企画中であります。本報告書で、私たちの研究活動に興味を持たれ、私たちの活動への参加を希望される方もいらっしゃるかもしれません。今までにはない研究スタイルになりますので、一朝一日というわけにはいかないかも知れませんが、ご連絡いただければ、最大限ご希望に添えるように努力いたします。

7. 主な論文発表・特許等（5件以内）

相手国側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	田中康資(産総研)、P.M. Shirage(産総研)、伊豫彰(産総研) A. Iyo, Disappearance of Meissner effect and specific heat jump in a multi-band superconductor, Ba _{0.2} K _{0.8} Fe ₂ As ₂ , J. Supercond. Nov. Magn. 23 (2010) 253.	
論文	田中康資(産総研)、柳澤孝(産総研)、Chiral Ground State in Three-band Superconductors, J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 114706.	
論文	M. Pranab(JNCASR), 伊豫彰(産総研), 田中康資(産総研), A. Sundaresan (JNCASR), C. N. R. , Rao(JNCASR), Structure, magnetism and giant dielectric constant of BiCr _{0.5} Mn _{0.5} O ₃ synthesized at high pressures, J. Mat. Chem. 20 (2010) 1646.	20th Anniversary Article

		cle に選 ばれ た。
論文	山元 徹朗 (鹿児島大)、田中広志 (鹿児島大)、山中彬裕 (鹿児島大)、奥田哲治 (鹿児島大)、小原幸三 (鹿児島大)、常盤和靖 (東理大)、渡辺恒夫 (東理大)、伊豫 彰 (産総研)、田中 康資 (産総研)、A. Sundaresan (JNCASR)、寺田教男 (鹿児島大)、Synthesis of smooth and superconducting (Cu, C)-Ba-O/CaCuO ₂ /(Cu, C)-Ba-O films using SrCuO ₂ buffer 、Physica C 470 (2010) S71.	
論文	田中康資 (産総研)、Phase fluctuation in multiband superconductors, Physics Procedia 27 (2012) 17.	