

先端研究拠点事業  
平成19年度 事業実績報告書

採用年度	平成18年度
種別	国際戦略型
分科細目	物理学
採用番号	15002

平成20年5月13日

独立行政法人 日本学術振興会理事長 殿

国立大学法人筑波大学長

拠点機関代表者・氏名

岩崎 洋一

コーディネーター職・氏名

教授 門脇和男

領域・分野	数物系科学
分科細目名（分科細目コード）	4306
採用番号	15002
研究交流課題名（和文）	超伝導ナノサイエンスと応用
研究交流課題名（英文）	Nano-Science and Engineering in Superconductivity (NES)
採用期間	平成18年4月1日～平成21年3月31日

《実施組織体制》

日本側

拠点機関名	国立大学法人筑波大学
実施組織代表者（職・氏名）	学長 岩崎 洋一
コーディネーター（職・氏名）	教授 門脇 和男
協力機関数	14
参加者数	48

相手国1

国名	EU
拠点機関名	Katholieke Universiteit Leuven
実施組織代表者（職・氏名）	Dean of Department Natuurkunde en Sternkunde Professor Michel Rots
コーディネーター（職・氏名）	Professor Victor Moshchalkov
協力機関数	18
参加者数	22
マッチングファンド （出資機関・プログラム名）	ESF Research Networking Programme: Nanoscience and Engineering in Superconductivity (NES)

相手国 2

国名	USA
拠点機関名	Argonne National Laboratory
実施組織代表者（職・氏名）	Director of Materials Science Division Dr. George W. Crabtree
コーディネーター（職・氏名）	Dr. Wai -K. Kwok
協力機関数	8
参加者数	21
マッチングファンド （出資機関・プログラム名）	Institute for Theoretical Sciences: Argonne National Laboratory and University of Notre Dame

## 交流目標の達成（見込）状況

### ① 平成19年度事業計画における達成目標

超伝導は電気抵抗がゼロで、磁場は量子化され、自然現象の中で最も特異で顕著な性質を示す現象である。この分野でナノテクノロジーを活用した新しい科学・工学の発展がめざましい。急速に進展しているナノテクノロジーによる材料加工技術により、量子コヒーレンスを用いた量子計算やジョセフソン接合を利用した様々な量子デバイスへの応用がその典型的な例である。従来、踏み込むことの出来なかったサブミクロン領域の超伝導体を自在に作製し、その性質を明らかにすることで、量子力学を基礎とした21世紀の新しい超伝導科学と応用の基礎を確立することを目標とする。このような流れを、世界の最先端研究拠点と連携を取りながら我が国が主導的に形成し、急速に発展するこの分野の世界の中心的研究拠点としての我が国の地位を確立することが目標である。

### ② 平成19年度事業計画の達成状況

これまで、2年間の先端研究拠点「拠点形成促進型」を経て、昨年度から「国際戦略型」へ移行した。先の「拠点形成促進型」を含め、これまでの活動を通して、日本、EU（ヨーロッパ）、アメリカ合衆国の先進3地域を枢軸とした「超伝導」と「ナノテクノロジー」を融合した「超伝導ナノサイエンスと応用」という新しい国際的な潮流が、先端研究拠点事業による様々な研究交流活動を通して形成され、国際的な広がりを持った大きな研究領域として定着しつつある。

#### A：学術的成果

平成19年度は、我が国を基点として研究において大きなブレークスルーがあった。それは、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合を用いて、強力なTHz波の発生に成功（門脇グループ、Kwokグループの共同研究）した事である。これは、ジョセフソン接合の集団を使ってレーザー発振が実現したことを意味している。まさに日本とアメリカ合衆国の共同研究の成果であり、CTCプログラムが果たした役割は極めて大きい。この結果は、先端研究拠点事業が日本側のCTCプログラム（JSPS-NES）とESFによるEU側のプログラム（ESF-NES）との間で共同開催した“Joint ESF-JSPS Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (VORTEX V)”で発表され、大きな反響を呼んだ。この成果は現在、広く認められつつあり、2008年8月に開催される世界第一級の国際会議である第25回国際低温会議(LT25)で「Josephson LASER」という新しいセッションが組まれるまでになっている。また、超伝導体と正常（磁性）金属や絶縁体との界面を通したスピン流や超伝導コヒーレンスとは異なった電子波動のコヒーレンスとの関係など新しい研究成果がナノ構造体を用いた超伝導の研究から生まれつつある。これも我が国の貢献（高柳、田中等）が大きい。そのほか、磁性体と超伝導体のハイブリッド系や超伝導ドット系など多数の新しい研究がスタートしている。

学術的な高い成果が生まれるためには中長期的な研究発展を支える組織上のメカニズムが必要である。このような成果も先端研究拠点プログラムによる「拠点形成型」、或いはそれ以前の前準備段階からの継続的な研究があり、そのような時間スケールの中で数多くの優れた研究成果が生まれてきた経緯がある。その顕著な現れとして、2003年のAbrikosov博士のノーベル物理学賞を初め、2005年のMoshchalkov博士のBelgium Konig Awardなどの受賞者が出現している。今後も、これに続く重要な受賞者がこの分野から続出すると考えられる。

#### B：持続的な協力関係の基盤構築

これまで先端研究拠点事業を基点として、ESFやNSFへのグローバルネットワーク推進の働きかけを行ってきた。その結果、ESFではEU諸国を中心として昨年1月より“Nanoscience and Engineering in

Superconductivity (NES)”を5年計画で立ち上げ、本格的なグローバルネットワークの形成に乗り出してきた。これはEU諸国の間もグローバルネットワークの考え方が重要であることを認識し始めたことを端的に表している。一方、アメリカ側はこれまで、NSFの中にはこれに該当する適当なプログラムがなく、一貫して個人ベースによる自己資金での参画(アルゴンヌ国立研究所とノートルダム大学の共同出資で運営されている理論科学センター)であったが、日本とEU側の動向に動かされ、遂に2007年10月、最も近いと考えられるMaterials World Network Programの一貫としてNSFに5年計画で申請し、NSF-NESを立ち上げる機運が一気に高まってきた。Materials Research Network Programに関連しているInternational Union Materials Research Society(IUMRS)の2008年の会議であるIUMRS-ICEM 2008(シドニーで開催予定)ではworld networkに関するセッションが設けられ、この問題が議論されることになっており、日・米・アジア各国からの招待講演が予定されている。日本側代表として門脇が参加し、この日米欧によるJSPS-ESF-NSF CTC Global Network Programについて概要を説明することになっている。CTCプログラムが発足し活動開始してから4年目に至り、ようやく世界的に本格的なグローバルネットワーク組織として大きな潮流となって動き始めてきた。今後の継続の方向性として、多くの国々に門戸を開放する必要があると考えられる。

現状の日・欧・米のNES CTC programでは毎年、国際ワークショップを開催し、この分野の幅広い活動を主導的に支えている。今回はギリシャのロードス島に於いて9月8～14日、“Joint ESF-JSPS Conference on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors (VORTEX V)”を開催した(詳細はWeb.サイトを参照：<http://www.kadowaki.ims.tsukuba.ac.jp/nest/>)。この会議で6月に発見され、確認された“固有ジョセフソン接合からの強力なTHz波発振”という大きな成果が発表され、反響を呼んだ。わが国内においては、年度末に研究会を有馬(神戸)で開催し、特に若手の新人を取り込んで国内の研究活動の活性化と新しい発想に基づく新しい分野の発掘を目指した。また、今後の活動方針として新構想JSPS CTC-NESを提案し、賛同をえた。そのほか、機会あるたびにインフォーマルミーティングを年間4、5回開催しており、国内の情報交換と研究者の交流に務めてきた。

#### C：若手研究者要請に於ける成果

毎年、開催される国際ワークショップは研究成果の発表が主であるが、この分野の幅広い活動を主導的に支える事は勿論のこと、次世代を担う若手人材の国際舞台での発表の機会を設け、育成に努めている。また、CTC programに関連する国際会議のみならず、様々な国際研究集会への参加を積極的に支援している。また、CTCメンバー以外の新しい人材を常に包含できるオープンな国内外での会議の開催運営方針を当初から貫いている。本年度、新たに積極的にCTCメンバーとして参加したいという希望者が若手の中から生まれており、少しずつこのような取組の効果が成果として現れてきていると思われる。このような気運が特に国内からでているのは、昨年度から実施している「若手研究者プログラム」、「International Autumn Seminar on Nanoscience and Engineering in Superconductivity for Young Scientists」の効果が大きい。これは全国的規模で公開アナウンスを行い、参加希望者を募り、この分野で最もアクティブな研究者を多数招待して1週間にわたり、参加者が全員一緒に滞在しながら講演や実演、討論を通して若手を育成しようとするプログラムで、参加者から高い評価を受けている。今後も継続的にこのような取組を実施していきたい。

#### D：国際的学術情報の収集整備

近年、科学技術に関する情報は、研究者レベルでは極めて迅速に収集できる環境になってきている。むしろ多くの情報の内、何が重要で何が重要でないかを研究者側が判断することが問題であり、情報量とス

ピードは問題ではなくなってきた。CTC 内部にメンバー間での情報交換サイトを一時設けたが、利用率は高くなく、廃止した。むしろオープンな環境が重要で、論文投稿前の段階でのプレプリントサーバーなどはアメリカを中心として整備されており、個別グループで特殊な実験データの共有解析など、特別な状況がない限り、ほとんどすべての情報は一般的な情報ソースの中から迅速に入手可能な状況がすでにできている。また、最近、ある種のジャーナルでは新しい方式としてインターネットで個々の論文にフリーアクセスできる方式を開始しており、ジャーナルの形式が今後、大幅に変更される事態も想定される。これに類似する一例であるが、最近、国内のいくつかの図書館でも試行的に実施されているリポジトリという取組(<https://www.tulip.tsukuba.ac.jp/portal/index.php>)があり、これは既成のジャーナルの枠を超えた検索システムとしてフリーに情報を獲得でき、大変有効に情報収集が可能となるポテンシャルを持っている。これに論文等を登録すると予想外のアクセス数、ダウンロード数が得られる事に驚かされる。特に、発展途上国など、図書館機能が充実していない状況や各個人が自宅等のフリーアクセスサイトから情報入手したい場合などでは極めて有効な情報入手手段となりうると思われる。

#### E：事業の波及効果

CTC プログラムを平成 15 年度から開始して以来、4 年目に至る。昨年度本格的に EU 側が CTC-NES に参画し、世界的な動きが一気に加速した。今年度から、アメリカ合衆国側が動き始め NSF への申請を 10 月に行ったことにより、当初予定していた日本・EU ヨーロッパ諸国・アメリカ合衆国の三枢軸が一体化され、全世界的な枠組みが生まれつつある。これを早急に実現させ、この世界的な枠組みの中から優れた研究成果を発信することが重要である。特に高温超伝導体の特性をうまく利用した新しいタイプのナノサイエンスの構築が重要であり、それは量子コヒーレンスが演じるサイエンスとエンジニアリングであろう。その 1 つの具体的な方向としては、THz 領域の電磁波の発振で有り、他の方向は巨視的量子コヒーレンスの問題である。固有ジョセフソン接合から発生する THz 波はジョセフソンレーザーと考えられ、従来の発光原理とは全く異なったジョセフソン効果による電磁放射現象であり、「第 3 の光」として画期的である。また、これまで、mK 領域でしか観測できないと考えられていた巨視的トンネル現象が高温超伝導体を用いれば液体 He 温度で観測できることが明らかにされ、量子コンピューターなどへの応用が一気に容易になるため、大変大きな話題を呼んでいる。このような重要な成果がこの JSPS-ESF NES の中から生まれており、今後、さらに大きな飛躍を求めて、継続的な活動が必要不可欠である。

## 実施状況

### 研究交流計画実施にあたる実施体制

本事業は日本、EU、アメリカ合衆国の各参加機関のオリジナルな研究内容を尊重し、各研究機関が独自のアイデアで研究を推進している、言わば small scale research である。その精神に則り、その中で必要不可欠な実験設備や施設、アイデア、人材などを、この先端研究拠点事業を通して共有し、活性化し、その中から物性物理学の新しい潮流の形成を目指すものである。研究に対しては発想のオリジナリティが重要視されねばならない。これを実現するために、毎年、国際会議やセミナーを開催すること、若手を中心とした人材交流を行うこと、試料の作成、実験などのため、研究拠点固有の特徴ある施設を共有し、有効活用すること、などを中心として組織作りを行ってきた。この研究交流に対するポリシーは国内、国外の区別無く、より高水準の国際共同研究体制を構築するという観点で実施している。特に、理論グループと実験グループの融合、国内外との共同研究などを通して若手研究者の交流を重視しており、若手研究者の研究場所の移動なども積極的に推進している。我が国ではあまり例が少ないが、実験系の大学院生の理論系のグループへの参入やその逆のケースなど、EU内では珍しくない。柔軟な思考力を養うためにも、現実から遊離した理論とならないためにも実験を直視する姿勢は実験、理論を問わずサイエンスの基礎であり、このような体制の構築を積極的に実施してきた。

### 日本側拠点機関における研究交流課題への取り組み（事務支援体制等の観点より）

我が国の拠点機関は 9 協力機関、31 名が参加しており、様々な機会に頻繁に情報や意見交換などが行われている。フォーマルなもののみならずインフォーマルなセミナーも頻繁に開催しており、これらのミーティングへの参加も必要に応じて、メンバー以外の研究者にも解放して広く、オープンに実施している。

国際的な共同研究に対する事務的な支援体制は一般的に、極めて貧弱である。これは残念なことである。その理由は、言語の問題、国際的な事務ルールの違いなど、あらゆるレベルにある。欧米諸国で日本語を英語と対等に扱うことは不可能であり、我が国の方が英語への対応を必然的に取らざるを得ない。現実の問題としては、書類等の翻訳が必要であり、大きな事務負担となっている。専門の事務員の雇用や人事配置を速やかに実施できる体制が必要不可欠である。現状ではコーディネーターがほとんどすべて行っており、研究自体に大きな負担となっている。このような状況を改善する人材（ホームページの作製や宿舎の手配などを含めて）および予算的な施策が先端研究拠点事業として必要不可欠と考えられる。

短期滞在の場合は多くの場合、宿泊場所をホテルに取るケースが多いが、中長期滞在では大学の施設を利用するケースが経費の上で選択せざるを得ない。この場合、必ずしも満足の行く対応は期待できず、多くはコーディネーターが不備をカバーしているのが現状である。このような状況も双方にとって負担となると同時に、快適な研究環境が必ずしもできないのは極めて残念である。

国内だけに限れば、国内の研究者に限った研究会を毎年1回(場合によっては2回)実施し、国内における、より緊密な共同研究体制の構築を行ってきた。特に、理論と実験の融合、国内の共同研究や大学院生や若手研究者の意見交流を重視している。平成19年度は特に、様々な機会を使ってこの交流を一層深めるための努力を行った。その結果、CTC メンバー以外の若手研究者からメンバーとして参加希望する者が現れ、平成20年度から正式に参加して頂くことになっている。尚、CTC 先端研究拠点事業に関しては専用のホームページが開設されており、様々な情報は容易に入手できる様に配慮されている。

## 共同研究

### 1. 固有ジョセフソン接合を用いた THz 発振の研究

平成19年6月16—7月28日、アルゴンヌ国立研究所から Dr. Wai -K. Kwok グループ (アメリカ側拠点機関) の Dr. Ulrich Welp が来日し、THz 発振の分光実験を筑波大学で共同で行った。これによって、固有ジョセフソン接合から THz 波である事が事実上、明確に確認された。これは CTC-NES 国際共同事業の重大な成果であり、この研究は今後も中心研究課題として継続した取組がおこなう予定である。

また、THz 波の発振の成功に伴い、世界的な関心が高まり、平成19年11月8日、スウェーデン Chalmers 工科大学の Microtechnology and Nanoscience, Quantum Device Physics Laboratories の professor Dag Winkler (Head of Department) および、アメリカ合衆国 Argonne National Laboratory の Materials Science Division Director である Dr. George Crabtree (アメリカ側拠点機関) が来日し、国内から参加したこの分野の研究者を交え、informal meeting を筑波大学で開催した。その後、実験室の視察を行い、実際の実験装置の説明などを実験現場で行った。

### 2. 固有ジョセフソン接合を用いた巨視的量子トンネル現象の解明

若手の人材交流の一貫として、昨年度末に Chalmers 工科大学 (スウェーデンの協力機関) に1名派遣したが、本年度は London 大学の London Center for Nanotechnology に所属する Dr. Warburton 氏 (英国の協力機関) の研究室に1ヶ月間、ポスドクを1名派遣した。また、若手研究者長期派遣により、さらに3ヶ月間、London Center for Nanotechnology に滞在し、最先端のナノ加工技術と、それに基づく微細な試料の加工の研究を行った。このナノテクノロジーセンターはロンドン市内の大学の共同センターで、最も進んだ FIB 加工技術を装備した装置がある。この様な装置によって加工を行い、MQT の試料サイズ依存性や加工効果などきわめて重要な実験を共同研究として行う。

第7回国際 AQDJJ 会議のあと、イタリアのサレルノ大学へ立ち寄って、ジョセフソン接合の研究施設を見学すると共に若手研究者を交えて最近の研究内容の討論を行った。イタリアは女性の物理学研究者が大変多く、実験系でも半数は女性であるのには驚かされる。

### 3. 境界条件のある高温超伝導体の磁束状態の研究

このテーマはこのコミュニティのほとんどの研究者が関係している最もポピュラーな研究課題であり、広く超伝導全般に関わっていることから強い求心力の源泉となっている。したがって、個別のアクティビティを取りあげることではできないので、特に行った課題について触れる。具体的には、この問題に関して、英国 Loughborough 大学の Professor Sergey Savel'ev (協力機関) による集中講義を平成19年7月11—12日、7月17日—18日の2回約20時間にわたり実施した。Savel'ev 氏はロシア出身でモスクワ大学を卒業したが、その後、ポスドクとして筑波大学に来日し、実験家と密接な議論を重ねつつ実績を積み上げ、理研から昨年イギリスの Loughborough 大学の教授となった若手では異例の経歴を持った理論家である。このような人材が我が国から、ぜひ輩出して欲しいと願っている。

一般的な課題として、若手育成のための支援として、”2<sup>nd</sup> International Autumn Seminar on Nanoscience and Engineering in Superconductivity for Young Scientists”を、平成19年11月25—12月2日、栃木県那須高原ホテルエピナール那須において開催した。これは昨年度に引き続き2回目であるが、今年は積極的に CTC プログラムに参加意志を示す若手研究者が出て来ており、これは大きな成果であると考えている。

## セミナー

今年度は大別してセミナーとして2つの国際会議を実施した。

1. 第5回 ESF と JSPS によるナノ構造超伝導体におけるボルテックスマターに関する合同会議（開催地：ギリシャ、ロードス島）

これは通算5回目となる（ほぼ2年ごとに開催）この分野の代表的な会議であるが、特に、2007年から新たにEU側が我々のCTC-NESの呼びかけに呼応する組織として、ESF-NESを立ち上げた事を記念する会議となった。ESF-NES側は、それ以前の会議とは全く構成や組織が変わったことによって支持国が大きく拡大し、参加メンバーも大幅に増え、組織的にも強大になり、現状ではこの分野で最も重要な会議という位置づけになっている。この成功を受け、アメリカ合衆国側でも積極的に組織作りを始めた。現在、NSFのMaterials Research Networkとして申請中である。これが実現すれば、日・欧・米の3拠点がNanoscience and Engineering in Superconductivity (NES)として統合されることになり、当初の計画はほぼ実現する事になる。

2. ESF と JSPS による第7回国際AQDJJ会議：ジョセフソン物理とナノサイエンスのフロンティア（開催地：イタリア、パリヌロ）

このセミナー（国際会議）はジョセフソン物理関連のエキスパートだけによる、専門的かつ特殊な会議であり、最近、ジョセフソン接合においてなされたTHz発振やMQT（巨視的量子トンネル現象）の実験結果などについて、進展状況を把握しながら、専門家の緊密な議論を行うための会議であり、極めて有益であった。

## 研究者交流

研究者交流として主に国際会議等への参加や、国際共同研究のための滞在などである。

固有ジョセフソン接合によるTHz波の発振現象の発見は、これまで10年以上の長期間に渡り研究を重ねてきた結果であり、我が国オリジナルな成果で、この分野のブレークスルーとなった。これに伴い、THzの発振実験の初期の実験が一段落した後、8月5日－9日、アメリカ合衆国アルゴンヌ国立研究所に於いて、この分野に関わるエキスパート数名が集まり集中的な討論を行った。これに参加した討論を行った。また、本年は超伝導の微視的理論であるBCS理論が発表されて丁度50年に当たり、BCS50周年記念行事として国際シンポジウムがBCS理論の発祥地であるイリノイ大学で行われた。これに参加し、BCS関係者を含め、多くの超伝導研究の歴史的な関係者と会う機会を得た。これは極めて貴重な体験であった。



## 若手研究者対象プログラム

今年度は第2回目であり、栃木県那須高原で、“2<sup>nd</sup> International Autumn Seminar on Nanoscience and Engineering in Superconductivity for Young Scientists”と題して11月25日～12月2日8日間にわたって開催した。今回も前回同様、全国的な公募を行い若手研究者を募った。全国から6名の応募者があり、ポスター発表やその他の交流の場で多くの招待講演者(18名内国外からの招待者(6名))と共に打ち解けた雰囲気の中で討論や議論をすることができた。1週間、基礎的な側面から up-to-date な研究の最先端まで、一流の研究者による講演、および討論は極めて重要であったと考えられる。この取組が次第に理解されてきたこともあってか、CTCメンバーとして参加したいとの申し出が出て来ている。