

21世紀COEプログラム 平成15年度採択拠点事業結果報告書

機 関 名	東京大学	学長名	小宮山 宏	拠点番号	G08	
1．申請分野	F <医学系> <u>G <数学、物理学、地球科学></u> H <機械、土木、建築、その他工学> I <社会科学> J <学際、複合、新領域>					
2．拠点のプログラム名称 (英訳名)	強相関物理工学 (Applied Physics on Strong Correlation)					
研究分野及びキーワード	<研究分野：応用物理・工学基礎>(強相関系)(量子情報)(ソフトマターの物理)(物質開発)(量子ビーム)					
3．専攻等名	大学院工学系研究科物理工学専攻、大学院新領域創成科学研究科物質系専攻					
4．事業推進担当者	計 24 名					
ふりがな<ローマ字> 氏 名	所属部局(専攻等)・職名	現在の専門 学 位	役割分担 (事業実施期間中の拠点形成計画における分担事項)			
(拠点リーダー) <TOKURA YOSHINORI> 十倉 好紀 <TAKAGI HIDENORI> 高木 英典 <NAGAOSA NAOTO> 永長 直人 <KANODA KAZUSHI> 鹿野田 一司 <MIYANO KENJIRO> 宮野 健次郎 <KIMURA KAORU> 木村 薫 <YOSHIZAWA HIDEKI> 吉澤 英樹 <SHIN SHIK> 辛 埴 <HAROLD Y. HWANG> Harold Y. Hwang (平成15年10月1日追加) <GONOKAMI MAKOTO> 五神 真 <ICHIKAWA MASAKAZU> 市川 昌和 <ONABE KENTARO> 尾鍋 研太郎 <FURUSAWA AKIRA> 古澤 明 <OKAMOTO HIROSHI> 岡本 博 <WATANABE SHUNTARO> 渡部 俊太郎 <TANAKA HAJIME> 田中 肇 <ITO KOHZO> 伊藤 耕三 <MIYASHITA SEIJI> 宮下 精二 (平成19年3月31日辞退) <AMEIYA YOSHIYUKI> 雨宮 慶幸 <MAEDA KOJI> 前田 康二 <TAMEGA I TSUYOSHI> 為ヶ井 強 <TOMISHIGE MICHIO> 富重 道雄 (平成15年10月1日追加) <TARUCHA SEIGO> 樽奈 清悟 (平成19年4月1日追加) <IMADA MASATOSHI> 今田 正俊 (平成19年4月1日追加)	大学院工学系研究科物理工学専攻・教授 大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・教授 先端科学技術研究センター・教授 (物理工学専攻 大学院担当) 大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・教授 物性研究所・教授 (物質系専攻 大学院担当) 大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・准教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・教授 大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・教授 物性研究所・教授 (物理工学専攻 大学院担当) 生産技術研究所・教授 (物理工学専攻 大学院担当) 大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・教授 大学院理学系研究科物理学専攻・教授 (物理工学専攻 大学院担当) 大学院新領域創成科学研究科物質系専攻・教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・准教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・准教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・教授 大学院工学系研究科物理工学専攻・教授	物性物理工学 工学博士 物質科学 工学博士 物性理論 理学博士 物性物理工学 工学博士 物性物理工学 Ph.D 物性実験 理学博士 中性子散乱 理学博士 光物性 理学博士 物質科学 Ph.D 光物性・量子光学 理学博士 半導体物理学 理学博士 半導体物理学 工学博士 量子情報 工学博士 光物性 工学博士 レーザー物理 工学博士 ソフトマター物理 工学博士 ソフトマター物理 工学博士 統計力学 理学博士 X線物理学 工学博士 応用物理学 工学博士 物性実験 理学博士 ソフトマター物理 博士(学術) 半導体物理学 工学博士 物性理論 理学博士	全体の統括・強相関電子物性の開拓 強相関エレクトロニクスの統括 強相関電子系理論 NMRによる物性研究 固体中の光誘起動的現象の研究 新規な固体構造とクラスター科学 中性子散乱による相関系の研究 高エネルギー光による相関系の研究 酸化物ヘテロ構造の機能開拓 量子相関光学の統括 ナノ半導体系の研究 光機能を持つ半導体の開発 量子情報・テレポーテーションの研究 光物性と非線形光学素子の研究 レーザーを用いた相関系の研究 強相関ソフトマター物理の統括 ソフトマターの構造と機能の制御 強相関系の統計力学理論 X線を用いた相関系の研究 固体中欠陥の制御と物性の研究 ボータックスマターの物理 生体ソフトマターの分子計測 半導体量子情報物理学 強相関エレクトロニクスの理論			
5．交付経費 (単位：千円) 千円未満は切り捨てる () : 間接経費						
年 度(平成)	1 5	1 6	1 7	1 8	1 9	合 計
交付金額(千円)	160,000	145,000	145,000	164,870 (16,487)	166,000 (16,600)	780,870 (33,087)

6．拠点形成の目的

多粒子・多自由度系における時空相関の基礎学理とそれを自由に操る工学基礎までの学問を強相関物理工学として掲げ、強相関エレクトロニクス、量子相関光学、強相関ソフトマター物理の三課題を基軸とし、さらにはこれらの融合を促進することで、研究教育拠点の形成をはかることを目的とする。時代を創る新しい技術の背景には常に基盤となる新鮮な物理概念が存在する。次の時代が礎とし得る物理概念のひとつが、「多粒子・多自由度系における時空相関の発現とその制御」を目指す強相関物理工学である。本プログラムの担当者は、これまでに、強相関電子物理と量子光学物性の融合を目指してCOEプログラム「スピン・電荷・光・結合系の相制御」を推進し、特定領域研究「強相関ソフトマテリアルの動的制御」の主要構成員として強相関ソフトマター物理を開拓してきた。これらの研究教育活動は、強相関物理工学として共通の重要概念を多くもつ。本プログラムでは、これらの研究教育活動の協調と統合を戦略的に図ることで、新しい物理概念に基づく革新的科学技術を創成し、応用物理学分野において次世代の国際的リーダーを輩出する世界最高水準の研究教育拠点をつくることを目的とする。

7．研究実施計画

従来は個別に展開されてきた、強相関エレクトロニクス、量子相関光学、強相関ソフトマター物理の3つの研究を、本21世紀COE拠点で融合し、さらに発展させる。これらの分野は「ナノ構造」、「自己組織化」、「コヒーレンス」、「多自由度系」、「場の理論」、「巨大応答」などのキーワードを共有するにもかかわらず従来その間の連携は世界的に見てもほとんど行われていなかった。これらを、実験方法論としては光学的諸手法が、概念的には理論研究が有機的に繋ぐ役割を果たす。

強相関エレクトロニクス： 強相関電子系では、電子の持つ3つの内部自由度 - 電荷・スピン・軌道 - が複雑に絡み合いながら、量子力学的なコヒーレンスを発達させ、量子液体・液晶・固体状態など多彩な電子相が発現する。革新的物性・機

能を有する物質相を開拓し、微弱な電磁場、光入力による高速巨大応答のエレクトロニクス学理を創製する。より具体的には、以下の研究を実施する。多相競合の視点のもと、外場に対して巨大応答を示す強相関電子材料を設計・開発する。理論的原理提案、第一原理計算、良質の単結晶作成、圧力・磁場・電場などの外場制御、界面制御技術の開発によって無機物、有機物、有機・無機ハイブリッド系など多様な物質群の中から、革新的な物性・機能を発現させ、新規デバイスの原理構築を進める。

量子相関光学： 量子情報技術の実現には、量子論的な位相が一定時間保持される量子コヒーレンスに加えて、複数の量子系をエンタングルさせることが必要となる。この難題を乗り越える物理系（人工ナノ構造や分子系超構造）を見出し、量子情報技術のハード面での前進に貢献する研究を行い、「量子場の科学と技術」の基礎を築く。より具体的には、以下の研究を実施する。光と物質の相互作用を巧みに利用して、物質系に量子力学的なコヒーレンスを発現させる。それを制御し、伝達再生する技術を追求し、量子力学的非局所相関を操り利用する新しい工学の道筋をつける。そのためにナノ構造量子系の量子コヒーレンスの制御、情報入出力のための電磁波等による非接触制御法の開拓、極低温原子系のコヒーレント操作技術を開拓する。遠隔地に量子情報を伝達する「量子テレポーテーション」は本プログラム分担者が世界に先駆けて実証している。本研究ではこれを発展させ、量子情報のネットワークを構築する為の技術を開拓する。

強相関ソフトマター物理： 高分子・液晶・ゲル・両親媒性分子・生体分子系などのソフトマターは、高エントロピー系であり、複数の秩序変数の強い結合を反映した、複合的相転移現象を示す。相互作用の制御による質的に新しいソフトマターの創製と、そこに内包させた複数自由度の強相関時空間制御を達成する。

より具体的には、以下の研究を実施する。ソフトマター系特有の多自由度（秩序変数）間の強い結合を積極的に利用することで、生体機能特有の複合性、多様性、階層性を有する21世紀型多機能材料を実現する。ソフトマターの階層構造に対応

した新しいシミュレーション手法の開発、複雑な分子運動をリアルタイムで可視化する測定手法の開発、相分離を利用した複雑なナノ構造の作成および動的制御、ソフトマターの特異な幾何学的構造を利用した機能性超分子システムの構築などを通じて、コロイド、棒状分子（液晶）、環状分子、高分子、膜などの構造とそれに付随する秩序変数が互いに強く関連したソフトマターを創出し、新しい機能を開拓する。

8. 教育実施計画

基礎理学のフロンティアを開拓しながら応用を展開し、21世紀の我が国の科学技術分野での国際競争力強化に先導的な役割を果たす人材を育成することを本拠点の教育目標とする。学界だけでなく産業分野でもリーダーとなる人材を博士課程大学院生およびポスドクのなかから輩出するようなシステム作りを行う。そのための具体的な教育実施計画は以下のとおりである。

- (1) 博士課程教育における競争的環境の整備：優れた博士課程教育を行っている研究室が優遇される仕組みを作る。例えば教育予算や大学院生スペースの重点的な集約的運用、研究室間の院生定員緩和などの方策で、博士課程の学生が自分の望みの研究室で指導が受けられるような体制を整える。
- (2) 英才（エリート）教育：博士論文賞等の顕彰制度の設定、国際会議発表の旅費援助、海外大学における長期滞在など、大学院の博士課程において成果があり将来有望と思われる学生については特別の便宜を図ることによってそのインセンティブを高める。
- (3) スタンフォード大学応用物理学科、コロネビア大学ナノセンターとの応用物理アライアンス：個別にはすでに海外拠点大学と関連研究者との間で海外からの中期の学生受け入れや、学生派遣などが行われているが、21世紀COEプログラムでこれを拡大して制度化し、年間1 - 2名で学生派遣と受け入れを行う。また、国際会議・ワークショップの共同開催を行い、そこに学生を参加させる。
- (4) RAおよびTA制度：勉学や研究に集中する環境を整えるためにRAやTAの制度を整備する。

これは単なる“奨学金”ではなく、実際に教育に参加することで自らの理解を深化させたり、研究の現場を知るなどの本人の成長に有効な仕事を与える。

- (5) 博士課程学生やポスドクにも有益な講義カリキュラムの整備：本拠点は異なる専攻にまたがっているが学部を共通して持つという強みがある。これを最大限に生かし、他分野から入ってきた場合など多様な志向と深度の人々に応じて拠点の研究テーマの基礎を最大効率で習得できる講義カリキュラムを提供する。これに対しては既に学部から量子力学1 - 3、統計力学1 - 3、物理数学1 - 2、固体物理学1 - 4など基幹科目の徹底を学部教育で行うとともに、工学基礎に欠かせない情報、数理などに関連した諸科目を計数工学科との連携で行っている。また、本プログラムの目的を俯瞰的に理解させる講義「強相関物理工学概論」を開講する。
- (6) インターンシップ制度：NTT基礎研究所などの民間研究所や産総研などの国立研究所との連携による博士課程学生の研究インターンシップ制度を充実させる。これについては既に個別には実績がある。
- (7) 日常的教育プログラム：以上の他に定期的、日常的に以下の教育活動を行う。これらは既に物理工学専攻では実施されているものばかりであるが、拠点形成後は両専攻にまたがって拡大した形で行い、学際的な発展の契機とする。
 - a. 応用物理学輪講：研究発表の機会提供、議論の訓練を目的に週1回順番に大学院の学生に発表させる。
 - b. QPECチュートリアルレクチャー「物理と工学」：毎年1回一線の研究者を招き、拠点からの研究者の2名で、チュートリアルレクチャーを行う。（2002年度は日立中研の外村彰氏、十倉好紀が行った。）
 - c. 強相関物理工学COEセミナー：拠点内の協力関係を促進し、同時に共通の問題意識を育てるために、外部から一流の研究者を招きセミナーをしてもらう。また、拠点内部の教官が順番で大学院学生やポスドクを対象にレビュー的なチュートリアルレクチャーを行う。

9. 研究教育拠点形成活動実績

目的の達成状況

1) 世界最高水準の研究教育拠点形成計画全体の 目的達成度

我々は、上述の研究教育拠点形成を目指して、(1) 世界レベルの若手教員の採用と研究室立ち上げの支援、(2) 博士課程大学院生に対する研究支援のための R A 雇用、早期自立を促す拠点内グラントの設立、海外共同研究等への渡航援助、(3) 強相関物理工学を強く意識した大学院カリキュラムの整備、(4) 海外拠点大学との応用物理学アライアンスの形成による世界レベルの研究教育ネットワークの構築、(5) 本プログラムの成果を世界に向けて発信するための「強相関物理工学」国際シンポジウムの開催、等を計画・実行した。本プログラムの期間中に、上記の計画のすべてを成功裡のうちに達成できた。プログラム内の異分野間協力が推進され、多くの学術的成果が上がった。新進の若手助教授 3 名を採用し、研究室立ち上げを支援した結果、それぞれ多くの受賞により象徴されるように注目すべき成果を出し、研究者として大きく成長した。大学院生は RA としての雇用、グラントの申請、R A キャンプを通じて研究者としての自覚を持ち始め、その研究レベルは飛躍的に向上した。大学院講義「強相関物理工学入門」を開講、応用物理アライアンスの活動、国際シンポジウムの開催とともに活発に行なわれ、国内外成果発信をするとともに海外からの著名な研究者にプログラムに対する高い評価を得た。以上をまとめると応用物理学における世界最高水準の研究教育拠点が形成された。以上より「1. 目的は十分達成した」に該当する。

2) 人材育成面での成果と拠点形成への寄与

本プログラムでは、博士課程大学院生、および若手教員の育成に尽力した。本プログラム「強相関物理工学」の強相関エレクトロニクス分野と強相関ソフトマター分野においてそれぞれ新進の若手助教授と研究室助手を採用し、研究室立ち上げのための各種設備の整備を支援した結果、短期間で研究を推進することが出来た。また、強相関エレクトロニクス分野と量子相関光学分野で先駆的な研究が期待できる若手研究者各 1 名が COE 特任講師として加わり、本事業担当者との共同研究を行なった。以下は博士課程大学院生に対する具

体的な施策とその成果である。

- (1) R A の雇用；研究に対する高いインセンティブを与える目的で、平成15年度に42名、平成16年度に40名、平成17年度に60名、平成18年度に59名、平成19年度に53名のRAを雇用した。
- (2) 院生グラント「すだち」； 院生が自ら立案した研究を支援する「すだち」を設立し、平成15年度3件、16年度3件、17年度4件、18年度3件、19年度3件を採択した。終了時には英語による成果発表・評価会を行った。
- (3) 研究成果発表； 国際舞台での成果発表を早くから経験させるために、国際シンポジウムを毎年計 5 回行い、ノーベル賞受賞者を含む海外からの著名な招待講演者を招聘して博士課程学生との交流を推進するとともに数名の学生が口頭発表、全員がポスター発表を行って国際的な成果発表の機会を作った。また、博士課程学生の国際会議発表を中心とする海外渡航援助を 5 6 件行なった。
- (4) 応用物理アライアンスとインターンシップ；共同研究先への大学院生の海外派遣を計 8 名行い、海外での研究生生活を体験させた。また、外国人学生・研究者招聘を計 1 5 名行い、国際的な研究環境を作るのにも大いに貢献した。また、インターンシップで産総研に大学院生 2 名が長期滞在して研鑽を積んだ。
- (5) COE セミナー；世界レベルの研究成果に常に触れる機会を与えるために、海外から研究者を招きこれまでに計24回の 2 1 世紀 COE 「強相関物理工学」セミナーを開催した。また、チュートリアルレクチャー「物理学と工学」を2回開催した。（平成 1 6 年度：小川誠二氏、樽茶清吾教授、平成 1 8 年度鶴田匡夫氏、土井正男教授）
- (6) 大学院講義；「強相関物理工学入門」を平成 16, 17, 18, 19, 20 年度に連続して開講した。強相関エレクトロニクス、量子相関光学、強相関ソフトマター物理の 3 分野からそれぞれ 1 - 2 名の教員がプログラムの狙いや研究の最前線について横断的な講義を行なった。
- (7) RA キャンプ；研究室やキャンパスの枠を超えて交流を深めるとともに、研究者としての自立を促すことを目的とし、RA が自主的に企画する合宿形式の拠点内研究会を実施した。平成 1 7 年度（2 泊 3 日）、1 8、1 9 年度

(3泊4日)の計3回、招待講演者2名、本プログラムからの教員2名、博士課程の学生は原則全員参加の形で行った。博士課程大学院生が、開催場所、講演プログラム、招待講演者の決定や当日の研究会運営などをすべて自主的に行い、ポスター発表、口頭発表を通じた議論により、互いの分野についての理解を深めるとともに、学生間の白熱した議論を行った。研究会後には、詳細なアンケートを実施し、その結果の分析をも行った。

3)研究活動面での新たな分野の創成や、学術的知見等

本プログラムにより、3つの分野にまたがる大きなパラダイム「強相関物理工学」創成され、それらの融合発展から多数の成果が得られた。

(1)強相関エレクトロニクス:(高木、十倉、永長、鹿野田、宮野、木村、吉澤、辛、Hwang、今田)強相関エレクトロニクスの本質である電子相制御と基礎学理構築、新物質・物性の開拓、先端分光技術の開発などで顕著な成果をあげた。強誘電性と磁性が共存(いわゆる「マルチフェロイック」)と呼ばれる研究分野を拓き、世界の研究を先導している。基礎学理の構築では、ベリー位相の概念の幅広い応用が展開され、新物質・新物性の開拓では、量子スピン液体状態が発見された。また、酸化物界面の電子相開拓で世界の研究をリードするに至った。先端分光技術ではレーザー光電子分光装置を開発し、総合分解能 $150\text{ }\mu\text{eV}$ 、試料最低到達温度 2.2 K を達成し、高温超伝導銅酸化物、 MgB_2 、ホウ素炭化物などの超伝導ギャップの微細構造が次々と明らかにされたことは世界に衝撃を与え、現在各地で追従するためにレーザー光電子分光装置の建設が進んでいる。

(2)量子相関光学(五神、古澤、市川、尾鍋、岡本、渡部、樽茶)

光と物質の相互作用を巧みに利用して、物質系と光の状態を制御する技術の開拓とその学理の研究を進めた。前半では、3者間の量子テレポーテーションネットワークの実証、光格子時計の実証、有機トランジスタをフレキシブル基板上に集積する構造制御技術の開発などの大きな進展があった。後半では、物質科学の視点を取り入れた研究に注力し、強相関エレクトロニクス分野との連携を強めた。半導体等のナノ構造制御による新規

光機能発現、金属薄膜による人工キラル構造による偏光制御の観測、一次元モット絶縁体の高速・巨大光応答の解明、強磁性半導体からのテラヘルツ放射の観測、サブケルビン領域での励起子トラップ、などの成果を挙げた。光の制御に関しては、アト秒パルスの波形・位相同時測定に世界で初めて成功した。また、光格子トラップによる原子時計が2006年10月に“秒”の国際2次表現の候補として採択された。

(3)強相関ソフトマター物理:(田中、伊藤、宮下、雨宮、前田、為ヶ井、富重)

強相関ソフトマターの特徴である多自由度間の動的結合についての研究が進展した。濃度場・速度場・歪場の結合により引き起こされる粘弾性相分離現象が、普遍的に見られることを明らかにした。また、全く新しい流体・固体のずり変形下での不安定化の機構を発見した。ガラス転移において、臨界現象的な性格を持つことを明らかにした。さらに、分子性液体として初めての液体・液体相転移現象とそれに伴う臨界現象を発見した。「環動ゲル」において、特異な力学応答を発見し、その動的応答の機構を微視的レベルで解明するとともに、ベンチャー企業を立ち上げ、国内外の大手企業との共同開発を通じて商品化のめどをつけた。生物分野では、分子モータータンパク質キネシンの歩行運動を一分子レベルで解明した。

4)事業推進担当者相互の有機的連携

まず、本プログラム「強相関物理工学」の目指すところを事業担当教員と大学院生が共有する目的で、拠点リーダーによる全員参加のスタートアップセミナー「交差相関物理学のすすめ」を初年度に開催し、続いて、本プログラム参加の二専攻(本郷キャンパスと柏キャンパス)の地理的疎遠に対処すべく、柏キャンパスにおいて両専攻の教官によるチュートリアルレクチャーを開催した。研究に関しては、プログラム内で以下に示す数多くの共同研究が実行され、それぞれが共著論文としてまとめられている。また、COEの経費で購入したX線解析装置などの共通装置が、プログラム内での協力関係を有効に推進することにもなった。強相関エレクトロニクスと量子相関光学の中では、量子位相を中心概念とした強相関物性の研究、超高速・巨大応答の研究などが共同研究と

して大いに進展した。また、ソフトマターで重要なテーマである液晶の知見は複雑系としての強相関電子系の研究に応用され、実際に各種のテクスチャー構造が解析されるに至った。また、光・X線による実時間観測によってソフトマターの局所構造の動的変化の追跡に成功するなど、異分野間の協力ならではの成果が得られたことを特筆したい。

5) 国際競争力ある大学づくりへの貢献度

本プログラムの研究実施計画は、応用物理学分野において世界を牽引することを前提として立案され、また、教育実施計画も世界レベルでの活躍を念頭においたエリート教育となっている。プログラム開始後でも、教員の国際的な受賞、多くの国際会議での招待講演および一流誌への論文出版が、研究レベルの国際性を証明している。2004年10月および2007年9月に開催した2回のCOE国際シンポジウムへの招待者がノーベル賞受賞者を含む世界トップレベルの研究者であったことに加え、彼らがRAの成果発表に格段の賛辞を与えていたことを本プログラムの大学院生の国際的な評価として強調したい。また、この国際シンポジウムが第一線の外国の研究者と大学院生が抵抗なく交流できる場を提供することになり、彼らの意識改革を行なうことができたことも（すぐに数字となって現れるものではないが）将来に向けて大きな成果であると考えている。外国からの長期滞在の院生を受け入れたり、応用物理アライアンスの相手からの訪問者があつたりして、研究室に外国人が滞在していることが多くなり、セミナーも英語が常態化するなど実践的な国際競争力向上に本プログラムは資するところ大であった。

6) 国内外に向けた情報発信

各教員は多くの国際会議・国内会議での招待講演および一流誌への多数の論文出版を行い、世界の中のCOEとしての情報発信を国内外に行ってきた。それは多数の国内外での受賞にも表れている。国際的な共同研究も常態化し、日本と世界との垣根は全くなかったと言ってよい。また、全体会議としてのCOEシンポジウムを2004年、2007年に2回、分野ごとのワークショップをそれぞれ平成15年（量子相関光学、本郷）、平成1

7年度（強相関エレクトロニクス、柏）、平成18年度（強相関ソフトマター物理、駒場）で開催し、国際的な成果発信を行った。応用物理アライアンスはさらに発展をしつつあり、国際的存在感を内外に示した。

7) 拠点形成費等補助金の使途について（拠点形成のため効果的に使用されたか）

本プログラムの経費は、主に、新任若手助教授の研究支援、特任教員の雇用、博士課程大学院生を対象としたRA雇用/グラント/海外共同研究や国際会議参加のための渡航費、プログラム内共通実験設備の整備、外国人招聘を伴う国際シンポジウムの開催、およびプログラム運営のための事務員の雇用に充てられ、ほぼ計画通りに執行された。

今後の展望

研究成果の戦略的な発信や共同ワークショップによって共通の問題意識が育ち、共通の物理概念・手法が強相関物理工学として統合的に提示されたことで、世界的な応用物理学の研究教育拠点として機能し続けるであろう。本事業終了後も量子相エレクトロニクス研究センター(QPEC)が核となり研究教育の支援を継続する。後続プログラムであるGlobal COEでは理学系研究科物理学専攻との連携により、人類の物理学の知見を深め、広い視野を持った物理学人材を育成することを提案している。21世紀において人類が直面する化石エネルギー枯渇の問題や地球環境持続といった人類社会の存続を脅かす課題に対し、物理学に根ざした発想力を存分に活かし、その課題解決にむけて、人類社会に貢献する創造的活動に意欲をもって取り組む多数の高度物理人材を輩出し続けていくことができると確信している。

その他（世界的な研究教育拠点の形成が学内外に与えた影響度）

数々の受賞や招待講演などに象徴されるように本プログラムの世界的な認知度は群を抜いている。応用物理学研究における日本の地位が格段に向上し、人と情報の流れが推進された。その影響は、博士課程大学院生の意識変革にもつながり、キャッチアップでない創造的な研究活動がどのようなものであるかを、実際に理解できるようになったことは特筆に価する。

21世紀COEプログラム 平成15年度採択拠点事業結果報告書

機 関 名	東京大学	拠点番号	G08
拠点のプログラム名称	強相関物理工学		
1. 研究活動実績 この拠点形成計画に関連した主な発表論文名・著書名【公表】 ・事業推進担当者（拠点リーダーを含む）が事業実施期間中に既に発表したこの拠点形成計画に関連した主な論文等〔著書、公刊論文、学術雑誌、その他当該プログラムにおいて公刊したもの〕 ・本拠点形成計画の成果で、ディスカッション・ペーパー、Web等の形式で公開されているものなど速報性のあるもの 著者名（全員）、論文名、著書名、学会誌名、巻(号)、最初と最後の頁、発表年（西暦）の順に記入 波下線（ ）：拠点からコピーが提出されている論文 下線（ ）：拠点を形成する専攻等に所属し、拠点の研究活動に参加している博士課程後期学生 [1] H. Yamada, Y. Ogawa, Y. Ishii, H. Sato, M. Kawasaki, H. Akoh, and Y. Tokura, "Engineered Interface of Magnetic Oxides", Science 305, 646-648, (2004). [2] T.Kimura, T.Goto, H.Shintani, K.Ishizaka, T.Arima, and Y.Tokura, "Magnetic control of ferroelectric polarization", Nature 426, 55-58 (2003). [3] S. Horiuchi, Y. Okimoto, R. Kumai, and Y. Tokura, "Quantum Phase Transition in Organic Charge-Transfer Complexes", Science 299, 229-232 (2003). [4] Murakami S, Nagaosa N and Zhang SC, "Dissipationless quantum spin current at room temperature", Science 301, 1348-1351 (2003). [5] Onoda M, Murakami S and Nagaosa N, "Hall effect of light", Phys. Rev. Lett. 93, 083901-1-4 (2004). [6] GH.Gweon, T.Sasagawa, S.Y.Zhou, J.Graf, H.Takagi, D.H.Lee and A.Lanzara, "An unusual isotope effect in a high-transition-temperature superconductor", Nature 430, 187-190 (2004). [7] T. Hanaguri, C. Lupien, Y. Kohsaka, D.-H. Lee, M. Azuma, M. Takano, H. Takagi and J. C. Davis, "A 'checkerboard' electronic crystal state in lightly hole-doped $\text{Ca}_{2-x}\text{Na}_x\text{CuO}_2\text{Cl}_2$", Nature 430, 1001-1005 (2004). [8] A. Ohtomo and H. Y. Hwang, "A High-Mobility Electron Gas at the $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ Heterointerface", Nature 427, 423-426 (2004). [9] D. A. Muller, N. Nakagawa, A. Ohtomo, J. L. Grazul, and H. Y. Hwang, "Atomic-scale Imaging of Nanoengineered Oxygen Vacancy Profiles in SrTiO_3", Nature 430, 657-661 (2004). [10] M.Tokunaga, Y. Tokunaga, and T. Tamegai, "Imaging of percolative conduction paths and their breakdown in phase separated $(\text{La}_{1-y}\text{Pr}_y)\text{O}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ with $y=0.7$", Phys. Rev. Lett. 93, 037203-1-4 (2004). [11] Z. Wang, Y. Shimizu, T. Sasaki, K. Kawaguchi, K. Kimura and N. Koshizaki, "Catalyst-free Fabrication of Single Crystalline Boron Nanobelts by Laser Ablation", Chem. Phys. Lett. 368, 663-667 (2003). [12] T. Mukaiyama, H. Katori, T. Ido, Y. Li, M. Kuwata-Gonokami, "Recoil-Limited Laser Cooling of ^{87}Sr Atoms near the Fermi Temperature", Phys. Rev. Lett. 90, 113002-1-4 (2003). [13] H. Yonezawa, T. Aoki, and A. Furusawa, "Demonstration of a quantum teleportation network for continuous variables", Nature 430, 431-433 (2004). [14] T. Sekikawa, A. Kosuge, T. Kanai, and S. Watanabe, "Nonlinear optics in the extreme ultraviolet", Nature 432, 605-608 (2004). [15] H. Matsuzaki, W. Fujita, K. Awaga and H. Okamoto, "Photoinduced Phase Transition in an Organic Radical Crystal with Room Temperature Optical and Magnetic Bistability", Phys. Rev. Lett. 91, 17403-17406 (2003). [16] Y. Nakamura, Y. Nagadomi, K Sugie, N. Miyata and M. Ichikawa, "Formation of ultrahigh density Ge nanodots on oxidized $\text{Ge}/\text{Si}(111)$ surfaces", J. Appl. Phys. 95, 5014-5018 (2004). [17] R. Kurita and H. Tanaka, "Critical-Like Phenomena Associated with Liquid-Liquid Transition in a Molecular Liquid", Science 306, 845-848 (2004). [18] Sadaki Samitsu, Takeshi Shimomura, Kohzo Ito and Masahiko Hara; "Immobilization of molecular tubes on self-assembled monolayers of			

- cyclodextrin and dodecanethiol inclusion complexes", Appl. Phys. Lett. **85**, 3875-3877 (2004).
- [19] A. Yildiz, M. Tomishige, R. D. Vale and P. R. Selvin, "Kinesin walks hand-over-hand", Science **303**, 676-678 (2004).
- [20] B. Lake, K. Lefmann, N.B. Christensen, G. Aeppli, D.F. Mcmorrow, H.M. Ronnow, P. Vorderwisch, P. Smeibidl, N. Mangkorntong, T. Sasagawa, M. Nohara and H. Takagi, "Three-dimensionality of field-induced magnetism in a high-temperature superconductor", Nature Materials **4** (9), 658-662 (2005).
- [21] Mannella N, Yang WL, Zhou XJ, Zheng H, Mitchell JF, Zaanen J, Devereaux TP, Nagaosa N, Hussain Z, Shen ZX, "Nodal quasiparticle in pseudogapped colossal magnetoresistive manganites", Nature **438** (7067), 474-478 (2005).
- [22] Katsura H, Nagaosa N, Balatsky AV, "Spin current and magnetoelectric effect in noncollinear magnets", Physical Review Letters **95** (5), Art. No. 057205 (2005).
- [23] F. Kagawa, K. Miyagawa and K. Kanoda, "Unconventional critical behavior in a quasi-two-dimensional organic conductor", Nature **436**, 534-537 (2005).
- [24] Yasutaka Iwashita and Hajime Tanaka, "Self-organization in phase separation of a lyotropic liquid crystal into cellular, network and droplet morphologies", Nature Materials Vol. 5, No. 2, 147-152 (2006).
- [25] Hiroshi Shintani and Hajime Tanaka, "Frustration on the way to crystallization in glass", Nature Physics, Vol. 2, No. 3, 200 - 206 (2006).
- [26] K. Munakata, N. Takubo, H. Tamaru, and K. Miyano, " Inhomogeneous transport properties in phase-separated manganite thin films ", Appl. Phys. Lett. **89**, 052105-1-3 (2006).
- [27] A. Furukawa, H. Tanaka, "Violation of the incompressibility of liquid by simple shear flow", Nature **443**, 434 - 438 (2006).
- [28] K. Kanoda, "Metal-insulator transitions in κ -(ET)₂X and (DCNQI)₂M: Two contrasting manifestation of electron correlation ", J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051007 (2006).
- [29] Yuya Shinohara, Kentaro Kayashima, Yasushi Okumura, Changming Zhao, Kohzo Ito and Yoshiyuki Amemiya; "Small-angle X-ray scattering study of the pulley effect of slide-ring gels", Macromolecules, **39**, 7386-7391(2006).
- [30] S. Yuan, H. De Raedt and S. Miyashita, "Quantum Dynamics of Spin Wave Propagation through Domain Walls", J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 084703 1 (2006).
- [31] J. B. Héroux, Y. Ino, M. Kuwata-Gonokami, Y. Hashimoto and S. Katsumoto, "Terahertz radiation emission from GaMnAs", Appl. Phys. Lett., **88**, 221110_1_3 (2006)
- [32] Y. Yamasaki, H. Sagayama, T. Goto, M. Matsuura, K. Hirota, T. Arima, Y. Tokura, "Electric Control of Spin Helicity in a Magnetic Ferroelectric", Phys. Rev. Lett. **98**, 147204-1-4 (2007).
- [33] S. Fujiiyama, A. Shitade, K. Kanoda, H. M. Yamamoto, and R. Kato, "Suppression of electronic susceptibility in metal-Mott-insulator alternating material, (Me_{0.5}-DIP)[Ni(tmdt)₂]₂ observed by ¹³C NMR ", Phys. Rev. B **77**, 060403-1-4 (2008).
- [34] T. Kiss, T. Yokoya, A. Chainani, S. Shin, T. Hanaguri, M. Nohara and H. Takagi, "Charge-order-maximized Momentum-dependent Superconductivity", Nature Physics **3**(10), 720-725 (2007).
- [35] T. Misawa, Y. Yamaji and M. Imada, "Marginal quantum criticality of metal-insulator transitions", J. Magn. Magn. Mater. **310**, 925-927 (2007).
- [36] D. A. Muller, L. Fitting Kourkoutis, M. Murfitt, J. H. Song, H. Y. Hwang, J. Silcox, N. Delby, and O. L. Krivanek, "Atomic-Scale Chemical Imaging of Composition and Bonding by Aberration-Corrected Microscopy", Science **319**, 1073 (2008).
- [37] S. Ishiwata, Y. Taguchi, H. Murakawa, Y. Onose, Y. Tokura, "Low-Magnetic-Field Control of Electric Polarization Vector in a Helimagnet", Science **319**, 1643-1646 (2008).
- [38] K. Ishizaka, T. Kiss, S. Izumi, M. Okawa, T. Shimojima, A. Chainani, T. Togashi, S. Watanabe, C.-T. Chen, X. Y. Wang, T. Mochiku, T. Nakane, K. Hirata, and S. Shin, "Doping-dependence of nodal quasiparticle properties in high-T_c cuprates studied by laser-excited angle-resolved photoemission spectroscopy", Phys. Rev. B **77**, 064522(1-5) (2008).

国際会議等の開催状況【公表】

(事業実施期間中に開催した主な国際会議等の開催時期・場所、会議等の名称、参加人数(うち外国人参加者数)、主な招待講演者(3名程度))

平成15年9月16日 東大(本郷)山上会館

スタンフォード大学-東京大学応用物理アライアンスワークショップ

"Quantum Correlation and Coherence" 参加者150名

<招待講演者> John Doyle (Harvard Univ.), Steven Chu (Stanford Univ., 1997年ノーベル物理学賞受賞), Yoshihisa Yamamoto (Stanford Univ.), Mark Kasevich (Stanford Univ.) など5名

平成16年10月6日～8日 東大(本郷)武田ホール

International Symposium on "Applied Physics on Strong Correlation"

参加者508名(うち外国人38名)

<招待講演者> J. G. Bednorz (IBMチューリッヒ研究所 1987年ノーベル物理学賞) J. M. Triscone (ジュネーブ大学)

D. Vanderbilt (ラトガース大学) T. A. Witten (シカゴ大学) など7名。

平成18年1月13日～14日 東大(柏)柏図書館メディアホール

Workshop on Advances in Strongly Correlated Electronics

参加者114名(うち海外招待講演者6名)

<招待講演者> Z.-X. Shen (Stanford), D. R. Hamann (Bell Labs), J. Zaanen (Leiden) など6名

平成18年8月21日～23日 東大(駒場)生産技術研究所

"Recent Advances in Soft Matter Physics"

参加者130名(うち海外招待講演者10名)

<招待講演者> Patricia Bassereau (Institut Curie, France), Ard A. Louis (University of Cambridge, United Kingdom), C. -Y. David Lu (National Taiwan University, Taiwan), Takao Ohta (Kyoto University, Japan) など15名

平成19年9月27日～29日 東大(本郷)武田ホール

International Symposium on "Strongly-Correlated Applied Physics"

参加者205名(うち海外招待講演者12名)

<招待講演者> Leo Kouwenhoven (オランダ・カブリ・ナノサイエンス研究所・教授), Henning Sirringhaus (イギリス・ケンブリッジ大学・教授), Philip Kim (アメリカ・コロンビア大学・教授) など12名

2. 教育活動実績【公表】

博士課程等若手研究者の人材育成プログラムなど特色ある教育取組等についての、各取組の対象（選抜するものであればその方法を含む）、実施時期、具体的内容

- (1) RAの雇用；研究に対する高いインセンティブを与える目的で、平成15年度に42名、平成16年度に40名、平成17年度に60名、平成18年度に59名、平成19年度に53名のRAをCOE推進委員会での厳正な審査（研究計画書、業績リスト、指導教員の推薦書による）を経て雇用し、採用後は出勤簿を毎日登録させ、勤務状態の管理を徹底した。
- (2) 院生グラント「すだち」；院生が自ら立案した研究を支援する「すだち」を設立し、自立を促した。COE推進委員会での厳正な審査（研究計画書、業績リスト、指導教員の推薦書による）を経て、平成15年度3件、16年度3件、17年度4件、18年度3件、19年度3件を採択し、それぞれの計画に対して予算額を決定した。また、終了時には英語による成果発表・評価会を行い、本人に将来の研究の指針とするように伝えた。
- (3) 大学院講義；「強相関物理工学入門」を平成16,17,18,19,20年度に連続して開講した。強相関エレクトロニクス、量子相関光学、強相関ソフトマター物理の3分野からそれぞれ1 - 2名の教員がプログラムの狙いや研究の最前線について横断的な講義を行なった。
- (4) RAキャンプ；本拠点形成プログラムでは、RAが自主的に企画する合宿形式の拠点内研究会を実施した。これは、研究室やキャンパスの枠を超えて交流を深めるとともに、研究者としての自立を促すことを目的としている。平成17年度（2005年5月11日～13日に南伊豆国民休暇村）、18年度（2006年5月29日～6月1日に（株）人材開発センター富士研修所（山梨県富士吉田市））、19年度（平成19年度も6月19日～6月22日に三泊四日で茨城県守谷市のDUPLEXセミナーホテル）の計3回、招待講演者2名、本プログラムからの教員2名、博士課程の学生は原則全員参加の形で行なった。博士課程大学院生が、開催場所、講演プログラム、招待講演者の決定や当日の研究会運営などをすべて自主的にを行い、ポスター発表、口頭発表を通じた議論により、互いの分野についての理解を深めるとともに、学生間の白熱した議論を行なった。研究会後には、毎回詳細なアンケートを実施し、その結果の分析を行なって、改善のための基礎資料とした。
- (3) COEセミナー；博士課程の学生が、世界レベルの研究成果に常に触れる機会を与えるために、海外から研究者を招き計24回の21世紀COE「強相関物理工学」セミナーを開催した。これにより一流の研究者とじかに議論する機会が与えられた。また、チュートリアルレクチャー「物理学と工学」を2回開催し、基礎物理と応用の双方を俯瞰できるよう教育に努めた。（平成16年6月7日：小川誠二氏、樽茶清吾教授、平成18年鶴田匡夫氏、土井正男教授）2回とも大勢の参加者があり、熱心な議論が行なわれた。
- (4) 応用物理アライアンスとインターンシップ；共同研究先への大学院生の海外派遣を計8名行い、比較的長い期間での海外での研究生活を体験させた。また、外国人学生・研究者招聘を計15名行い、各研究室での共同研究を推進した。これは、プログラム自体の国際的な研究環境を作るのにも大いに貢献した。また、インターンシップで産総研に大学院生2名が長期滞在して研究の現場に接し、研鑽を積んだ。
- (5) 研究成果発表；国際舞台での成果発表を早くから経験させるために、国際シンポジウム・ワークショップを毎年計5回行い、ノーベル賞受賞者を含む海外からの著名な招待講演者を招聘して博士課程学生との交流を推進した。会議では数名の大学院生が口頭発表、博士課程学生全員がポスター発表を行って国際的な成果発表を行った。また、推進委員会における厳正な審査の後博士課程学生の国際会議発表を中心とする海外渡航援助を、56件行なった。

21世紀COEプログラム委員会における事後評価結果

(総括評価)

設定された目的は十分達成された

(コメント)

本研究教育拠点プログラムは「強相関エレクトロニクス」「量子相関光学」及び「強相関ソフトマター物理」の3課題を基軸としており、世界最高水準の研究教育拠点形成を目指し、世界レベルの若手教員の採用と研究室立ち上げの支援を行い、また、博士課程学生の研究支援のために、院生グラント「すだち」を設立し、海外共同研究などへの渡航援助並びに大学院カリキュラムの整備を行った。さらに、海外拠点大学との世界レベルの研究教育ネットワークの構築、成果を世界に発信するための「強相関物理工学」国際シンポジウムの開催などを行った。これらは、それぞれ成果をあげ、全体として、世界最高水準を目指した研究教育拠点形成の計画は達成されたと評価できる。

人材育成面については、博士課程学生のRA（リサーチ・アシスタント）雇用を行い、また、若手の研究成果発表体験のために、国際シンポジウムを毎年開催し、さらに、博士課程院生の国際会議発表を中心とする海外渡航援助を行い、共同研究先への大学院生の派遣、外国人大学院生と研究者の招聘、RAが自主的に企画する拠点内研究会を行っており、評価できる。

研究活動面については、3研究分野のそれぞれで多数の研究成果をあげており、「強相関エレクトロニクス」分野では、強誘電性と磁性が共存する研究分野を拓くなど、電子相制御と基礎学理構築、新物質・物性の開拓、先端光技術の開発などで成果をあげた。「量子相関光学」分野では、光と物質の相互作用を利用して、物質系と光の状態を制御する技術と学理の研究で成果をあげている。「強相関ソフトマター物理」分野では、全く新しい流体、固体のずり変形下での不安定化の機構の発見、ガラス転移における臨界現象的な性格を明らかにし、分子性液体における液体・液体相転移現象とそれに伴う臨界現象を発見するなどの成果をあげており、評価できる。

本事業の終了後は、量子相エレクトロニクス研究センターが核となって、強相関物理工学の研究教育は持続的に展開されると思われることから、今後の更なる発展を期待する。