

第2部

グリーンイノベーション

第1章 創発物性科学が拓く「第3のエネルギー革命」

第2章 コヒーレント光が実現する世界

第3章 資源・エネルギー循環型社会の実現へ

2013年から始まった理研の第3期中期計画の目標は、国の科学技術基本計画を色濃く反映したものとなっている。その柱の一つがこのグリーンイノベーションで、地球環境問題に貢献する省エネ技術や環境資源研究を指している。ここでは、この分類に含まれる創発物性科学研究センター、光量子工学研究領域、環境資源科学研究センターの三つに関して、そこに集約された組織も含め、主として2004年以降の組織的変遷・歴史と研究成果を取り上げる。

第1章

創発物性科学が拓く「第3のエネルギー革命」

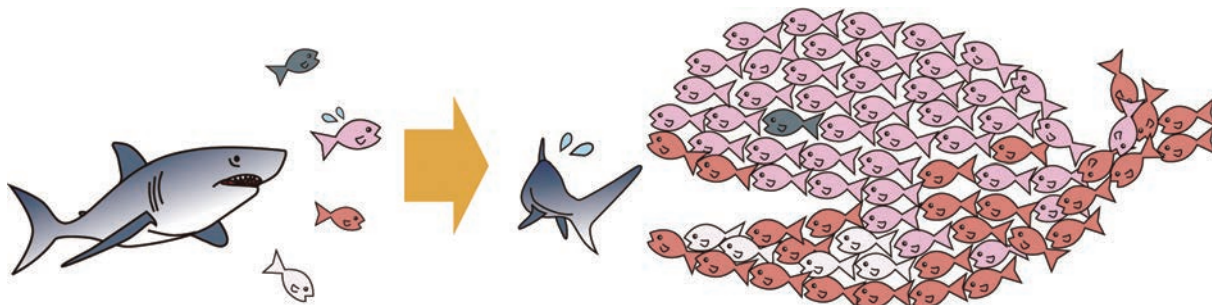
《創発物性科学研究センター》

創発物性科学研究センター（CEMS）が解決すべき挑戦的課題、実現すべき創発機能として挙げるのは、「第3のエネルギー革命」を先導する固体や分子内の電子が示すエネルギー機能である。電気エネルギーという極めて利用しやすいエネルギー形態と、その移送システムのインフラストラクチャーを、人類が手にしたのは、高々この120年の間。蒸気機関による力学エネルギーを電磁誘導によって電気エネルギーに変換するにあたって、燃焼エネルギーあるいは核エネルギーを用いたのが、それぞれ第1、第2のエネルギー革命であったとすれば、今は、力学エネルギーを介することなく、固体・分子内の電子の働きを利用する創発電磁気学の建設、すなわち「第3のエネルギー革命」が始まっている。半導体エレクトロニクス、太陽光発電、高温超伝導に続く、固体・分子内電子に基づく新しいイノベーションを希求した研究が、現在も加速しながら続いている。その目指すところは、従来技術・原理の改良や延長ではなく、物性科学基礎研究からのアプローチによってのみ可能な、性能指数に大きな不連続的飛躍をもたらし得る新原理・新物質の発見である。

第1節 創発物性科学研究センター（CEMS）とは

センターの理念

理化学研究所（理研）の創発物性科学研究センター（CEMS）は、現代の世界的課題である環境調和型持続型社会の実現を目指し、新しい物性科学を創成することでこの問題の解決に基盤的に貢献することを目的に、2013（平成25）年に設立された。その中心的思想は、センター名にも冠せられている「創発性」（emergence）という概念である。創発性とは、個々の構成要素からは想像もつかないような性質・機能が、それらの間の強い相互作用を介して集団として現れることを意味している。従来の物理科学の中心的思想であった還元主義に対して、多数の自由度があって初めて発現する現象と向き合い、その法則性を究めよ



創発性の概念図。小さな魚でも集団で巨大な力を発揮する。

うとする試みであり、最新の物質科学、物性科学研究を基礎として、エネルギー問題、環境問題に寄与することを目指している。

より具体的には、(i)多体系の創発現象の理念と原理を提案する強相関量子系の物性物理学、(ii)分子設計と元素戦略に基づく機能性ナノ構造体・物質系の超分子機能化学、(iii)量子科学の成果を応用へとつなげる量子情報エレクトロニクス、の3者を融合することで、組織としても「創発性」を発揮することを期している。中心的なテーマに、さまざまな方法論を持った研究者が「総掛かり」で取り組むこの研究手法は、世界的な大競争の時代に必要とされるものでもあった。

センター設立まで

以下、センターの設立までの経緯を時系列に沿ってその概略をまとめる。センターの前身は、フロンティア研究システムおよびそれを引き継いだ基幹研究所におけるいくつかの研究グループであるが、設立のための準備は2010年ごろから始まっていた。2010年2月8日、2009年度第1回基幹研究所将来構想委員会において、研究領域とセンター構想、計画の一つとして物質科学系センター構想が取り上げられ、同年5月17日、2010年度第3回基幹研究所将来構想委員会において、十倉好紀領域長（物質機能創成研究領域）より、“創発物質科学研究センター”の構想説明があった。同12月13日の第13回基幹研究所将来構想委員会において、十倉領域長の提案するセンターを基幹研究所として今後理研経営陣と打ち合わせる方向となった。

その後、物質系センターワーキンググループが発足し、2011年3月31日に初回を開催した。委員長は、石井俊輔（基幹研究所副所長）、委員は、相田卓三（基幹研究所 グリーン未来物質創成研究領域 機能性ソフトマテリアル研究グループ グループディレクター）、石橋幸治（基幹研究所 石橋極微デバイス工学研究室 主任研究員）、伊藤嘉浩（基幹研究所 伊藤ナノ医工学研究室 主任研究員）、十倉（基幹研究所 物質機能創成研究領域 領域長）、外村彰（基幹研究所 物質機能創成研究領域 単量子操作研究グループ グループディレクター）、古崎昭（基幹研究所 古崎物性理論研究室 主任研究員）、前田瑞夫（基幹研究所 前田バイオ工学研究室 主任研究員）であった。

年が明けて、2011年6月9日、野依良治理事長に対し、創発物性科学研究センター（仮称）についての説明を実施し、同7月11日2011年度第7回基幹研究所所長会議にて、物質系新センターワーキンググループ（石井委員長）からの検討報告があった。その中で新しいセンターは、「超低エネルギー消費エレクトロニクス」「環境調和型超高エネルギー収集・変換・貯蔵」を目指した物質科学を推進することが妥当、と報告された。

その年の暮れ12月14日付で理研の第3期中期計画における研究事業体制（案）（11.12.14）にて、物理・工学系の戦略センターとしての創発物性科学（仮称）が位置付けられた。また、同案（11.12.20）に添付されていた第2期中期計画から第3期中期計画への研究体制変更のイメージ11.12.20版にも、創発物性科学研究センターは戦略研究事業の一つとして位置付けられている。

ただし、このイメージ内では、創発物性科学研究センターは完全新規設置という位置付けであった。同年12月26日の2011年度第17回基幹研究所所長会議において、次期中期計画に関連した基幹研究所各領域の組織改編に関する検討状況の報告があり、次期中期の新たな戦略センターとして、創発物性科学研究センターが物質機能創成研究領域を発展させる形で組織されることが、場所がそれまでの横浜事業所ではなく、和光事業所で検討されていることが報告された。

2012年になると1月16日の2011年度第18回基幹研究所所長会議にて、2011年12月28日付の理事会議が作成した次期中期計画骨子が紹介された。この中で、(次期中期の)基本方針の実現に向けてとるべき措置の「1. 国家的・社会的なニーズを踏まえた戦略的・重点的な研究開発の推進」の最初の項目として創発物性科学研究(仮称、新設)が位置付けられ、その内容は「物質機能創成研究を発展させ、革新的なエネルギー技術を創る物質開発に関する研究を行う」とされた。また、同基幹研究所所長会議にて2012年度予算についても報告があり、政府予算原案で、創発物性科学研究センター(仮称)の準備を開始するための経費375百万円が措置された。

同年1月30日の2011年度第19回基幹研究所所長会議にて、1月24日付玉尾皓平基幹研究所長名で、2011年12月28日付け役員連名文書において位置付けられた創発物性科学研究について、新研究センターを効率的かつ効果的に運営していくための研究スペースの集約について、配慮を依頼する文書を発信したことが報告された。2月13日の2011年度第20回基幹研究所所長会議では、創発物性科学研究センター(仮称)設立に向け、次の準備組織を設置することが妥当とされた。

創発機能物性研究グループ

創発分子機能研究チーム 瀧宮和男(TL) 4月1日着任

創発量子機能研究チーム 樽茶清悟(TL) 4月1日着任(非常勤)

創発量子情報研究チーム 山本喜久(TL) 5月1日着任(非常勤)

※ TL: チームリーダー

2012年2月23日理事会議にて、基幹研究所に創発物性科学研究の開始に伴う準備組織として、上記1グループ3チームを2012年4月1日に新設することが承認された。研究センターそのものはこのグループだけではなく、既存の物質機能創成研究領域と、グリーン未来物質創成研究領域の機能性ソフトマテリアル研究グループも合わせて構成する構想であった。すでにこの時点で、物理学、化学、エレクトロニクスを融合し、物質科学の総合センターを設立するという理念が提示されていたと言える。続いて、3月22日理事会議にて、創発物性科学研究のための環境整備として4億円が措置された。4月13日理事会議にて、理研の将来に向けた拡充経費への追加予算配分経費として、創発物性科学研究に関する選考課題の実施に1億円が措置された。第3期中期計画において新たに開始予定である創発物性科学研究について、中期計画当初より円滑に研究を実施できるようにするため、新たに取り組むこととしている超分子機能化学および量子情報エレクトロニクスの2分野の一部を先行的に実施し、これらに必要な経費を措置した。

6月11日開催の2012年度第4回基幹研究所所長会議では、創発物性科学研究

センターは、物質機能創成研究領域（3グループ）とグリーン未来物質創成研究領域の機能性ソフトマテリアル研究グループを核に構成する案となっており、グリーン未来物質創成研究領域の電子複雑系機能材料研究グループは、課題解決型プログラムとしての位置付けで残存期間を消化する案となった。7月12日付で第3期中期計画の実現に向けた準備についての指示が文書であった。具体的には、基礎基盤研究推進部が、創発物性科学研究センター（仮称）および先端光科学研究領域（仮称）の準備を行うこと等であった。

9月13日理事会議において、10月1日より創発現象観測技術研究チームを追加することが認められた。2012年10月11日理事会議において、11月1日より創発量子システム研究チーム、創発物性計測研究チーム、創発スピン物性理論研究チーム、創発機能高分子研究チームを追加することが認められた。10月31日、センター準備状況に関して理事会議のヒアリングがあり、11月7日理事会議において、2012年11月8日より創発物性科学研究センター準備室発足（室長、十倉好紀）が発足することが決まった。このとき、すでに環境資源科学研究センター準備室およびライフサイエンス技術基盤研究センター準備室は、5月11日付で、先制医療プログラム準備室は5月24日に、統合生命科学研究センター準備室が9月27日に設置されていた。そして、2012年11月12日理事会議において、2013年度施行の創発物性科学研究センター組織・運営細則制定、合わせてセンターの研究管理職（PI：プリンシパル・インベスティゲイター）職員の発令が承認され、いよいよセンター設立が現実のものとなった。

2013年2月14日理事会議において、2013年度からの創発物性科学研究センターに物質評価支援ユニットを加えることが承認された。このユニットは基幹研究所の先端技術基盤部門物質評価チームを前身としているが、そのメンバーを精査して創発物性科学研究センターに参画することとなった。2012年度補正予算において、創発物性科学研究センター予算の前倒し措置がなされ、センターの研究装置類の充実が図られた。また、この補正予算で（理研内通称）ナノサイエンス実験棟の改修予算が措置されたが、検討の結果、既存棟の改修ではなく、隣接して新棟を建設整備することとなった。

2013年4月1日、創発物性科学研究センター（CEMS）が発足した。発足時の体制は以下のとおり。

センター長：十倉好紀

副センター長：永長直人、相田卓三、川崎雅司

強相関物理部門 部門長：永長直人

強相関物性研究グループ：十倉好紀（GD）

強相関理論研究グループ：永長直人（GD）

強相関界面研究グループ：川崎雅司（GD）

強相関物質研究チーム：田口康二郎（TL）

強相関量子伝導研究チーム：Harold Y. Hwang（TL）

強相関量子構造研究チーム：有馬孝尚（TL）

強相関量子科学研究支援チーム：平林泉（TL）

創発物性計測研究チーム：花栗哲郎 (TL)

量子物性理論研究チーム：古崎昭 (TL)

計算量子物性研究チーム：柚木清司 (TL)

超分子機能化学部門 部門長：相田卓三

創発ソフトマター機能研究グループ：相田卓三 (GD)

創発分子機能研究グループ：瀧宮和男 (GD)

創発生体関連ソフトマター研究チーム：石田康博 (TL)

創発デバイス研究チーム：岩佐義宏 (TL)

ソフトマター構造創発研究チーム：相田卓三 (GD)

創発機能高分子研究チーム：但馬敬介 (TL)

創発生体工学材料研究チーム：伊藤嘉浩 (TL)

物質評価支援ユニット：橋爪大輔 (UL)

量子情報エレクトロニクス部門 部門長：樽茶清悟

量子機能システム研究グループ：樽茶清悟 (GD)

量子光学研究グループ：山本喜久 (GD)

量子凝縮物性研究グループ：Franco Nori (GD)

巨視的量子コヒーレンス研究チーム：蔡兆申 (TL)

創発現象観測技術研究チーム：進藤大輔 (TL)

量子ナノ磁性研究チーム：大谷義近 (TL)

量子システム理論研究チーム：Daniel Loss (TL)

スピン物性理論研究チーム：多々良源 (TL)

創発物性科学研究支援チーム：秋元彦太 (TL)

量子効果デバイス研究チーム：石橋幸治 (TL)

量子凝縮相研究チーム：河野公俊 (TL)

統合物性科学研究プログラム プログラムディレクター：十倉好紀

※ GD：グループディレクター、TL：チームリーダー、
UL：ユニットリーダー

このうち、最後の統合物性科学研究プログラムは、次世代のリーダー育成を目的とした研究ユニットを配置するためのプログラムであり、CEMSを本務とするユニットリーダーと、外部に本務を持ちCEMSを非常勤とするユニットリーダーからなるユニット群を配する構想であった。非常勤ユニットリーダーについては、最先端研究開発プログラム (FIRST) で実施していた東京大学 (東大) 社会連携講座を、CEMSとして引き継いで維持し、そこの特任准教授もしくは特任講師をユニットリーダーとして採用し、また、北京の清華大学の物理学科と連携して類似の関係を構築する計画で進めた。また、十倉センター長、永長副センター長は、理研と東大のクロスアポイントメント第1号として理研が本務となった。

第2節 CEMSの組織

研究・運営体制と人事

CEMSの理念を実現するために、より具体的なテーマとして、超低エネルギー消費エレクトロニクスと環境調和型超高効率エネルギー収集・変換・貯蔵の実現が掲げられ、その研究を進めるための体制として、強相関物理部門、超分子機能化学部門、量子情報エレクトロニクス部門の三つの部門を置き、これに加えて3者間を橋渡しするとともに、若手研究人材を育成する統合物性科学研究プログラムを設置した。図1は2016（平成28）年の陣容である。十倉センター長の下に、相田、永長、川崎の3名の副センター長を配し、3部門の部門長として、それぞれ永長（強相関物理）、相田（超分子機能化学）、樽茶（量子情報エレクトロニクス）を置いた。CEMSの運営は、センター運営の重要事項の審議体としてのCEMSコアメンバー会議とCEMS全PIが参画するCEMS-PI会議をもって行うこととした。CEMSコアメンバー会議はセンター長、副センター長、部門長と創発物性科学研究推進室長、同室長代理に、2年の任期でセンター内から選ばれたグループディレクターまたはチームリーダーを加えたメンバーで構成される。両会議ともに月1回の実施とした。



CEMS 組織図

平成28年3月31日現在



図1 CEMSの組織図

CEMS外の有識者からなるアドバイザー委員会を置き、センターの評価とともに研究・運営に対する提言をいただくこととした。また、推進室が予算、人事、広報、対外連携などあらゆる面で強力にセンターをサポートし、CEMSコアメンバー会議、PI会議にも陪席することとした。

CEMSの職位は、PIとしては、センター長、副センター長、部門長、グループディレクター、チームリーダー、ユニットリーダーを置き、研究系職員としては上級研究員、研究員、特別研究員、協力研究員、リサーチアソシエイト、技術系職員としては、上級技師、技師、テクニカルスタッフⅠ、Ⅱ、そしてアシスタントを置いた。それぞれの職位に対応した詳細な人事手続きを設定し、透明性の高い、厳格な人事審査を行う仕組みを構築した。そして、人事書類は全てデータとして保存することとした。

予算とスペース

CEMSの設立は2013年4月であるが、スペースや予算の措置に関しては、設立前から幾重もの施策が講じられてきた。スペースについては、執筆時（2016年4月）までCEMSの中心拠点となる建物の新築が未達のため、和光キャンパスの13の建物に分散した状態ではあるが、理研の理事会議や関係部署の尽力により、一定のスペースを確保できた。予算についても、CEMS設立が第3期中期計画の最優先事項と位置付けられ、文部科学省や関係部署の尽力により、一定の予算を確保できた。以下に、経緯を記す。

設立時のCEMSには、2008年度に設立された基幹研究所に当初から所属していたPIと、それ以降に新たに理研外から採用したPIが所属している。前者はフロンティア研究システム由来のPIと主任研究員等で構成される。基幹研究所では、フロンティア研究システム由来研究室が約3100m²、主任研究員研究室等が約3400m²を使用しており、CEMSに引き継がれている。一方で、CEMSの創設センター長である十倉を中心研究者とするFIRST「強相関量子科学（2009-2013年度）」が、理研を支援機関として採択されたことを受け、2010年に基幹研究所に、強相関量子科学研究グループが創設されて新たにPIが採用され、同時に約400m²のスペースが措置された。また、CEMS設立の前年度にあたる2012年度には、基幹研究所に創発機能研究グループが設立され、CEMSに新たに参画予定のPIを前倒しで採用し、そのスペースとして約2300m²が措置された。以上の約9200m²が、設立時にCEMSが管理・使用するスペースとなった。この中には、ナノサイエンス実験棟や物質評価支援に関わるスペースも含まれている。その後も、PIの増加等に対応するため、2014年に新たに約900m²が措置され、2015年には創発科学実験棟が竣工して約800m²が使用可能になり、執筆時には総計1万1000m²のスペースを管理・使用するに至った。和光キャンパス以外では、(株)日立製作所の鳩山地区に電子顕微鏡を中心とする設備を置き、同社との共同研究契約に基づいて、CEMSの研究活動が展開されている。

予算に関しては、CEMS設立の前倒しとして概算要求を行い、2012年度に3億7500万円が措置され、基幹研究所運営費1億6400万円と理事長裁量経費5億

4900万円を合わせてCEMS設立の準備を行った。2013年度概算要求の要望施策として「高効率エネルギー変換の実現に向けた熱電変換材料等の開発」（以下、「省電力エレクトロニクス」という）の準備を進めていたところ、2012年度補正予算として、施設整備費4億5000万円と設備整備費16億1600万円が充当され、施設整備費は前述の創発科学実験棟の整備に結びついた。また、設備整備費は、2013年度補正予算の4億9700万円と合わせて、CEMSをスタートさせる設備の充実に大きく寄与した。2014年度概算要求には、「創発現象を利用した革新的超低消費電力デバイスの開発」の追加を要望施策として、2015年度概算要求には、「センシングシステムの基盤となる環境調和型超分子エネルギーデバイスの開発」を要望施策として準備した。これらの結果、留保やスペース課金等を除いた実行額としては、執筆時現在、毎年16億円程度の運営費が充当されている。以上の研究型事業とは別枠で、科学技術政策課題解決事業として、産業技術総合研究所との連携事業「革新的量子技術による省エネルギー社会の構築」を、2015年度の要望施策として準備し、「超伝導量子技術」の高度化研究を始動した。2016年度には、同施策に「有機エレクトロニクス」、「量子効果・制御」等の先鋭化研究を加え、スケールアップして要望施策として準備した結果、理研では、光量子工学研究領域、放射光科学総合研究センター、計算科学研究機構、主任研究員研究室群を加え、連携事業として予算が認められるに至っている。

上記の十倉FIRSTに加え、CEMS設立時には山本喜久グループディレクター（当時）が中心研究者を務める「量子情報処理プロジェクト」と、外村彰（フロンティア研究システム由来の基幹研究所グループディレクター）から引き継いだ日立中央研究所長長我部信行（当時）が中心研究者代行を務める「原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡の開発とその応用」の二つのFIRSTの一部もCEMS設立時の研究活力となっていた。また、CEMSは2014年度からスタートした革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の提案にも尽力した。山本グループディレクターが理研を退職してプログラムマネージャー（PM）に就任した「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現」と、東京大学の伊藤耕三教授がPMを務める「超薄膜化・強靱化「しなやかなタフポリマー」の実現」に参画し、研究プロジェクトの一翼を担っている。そのほかにも競争的外部資金や産業界等との共同研究などの資金調達にも鋭意努力しており、平均して年度あたり約5億7100万円を確保して研究を推進している。

第3節 設立からの歩み

以下、センターの設立からの沿革を時系列に沿ってまとめる。

2013（平成25）年6月7日、東京會館においてCEMS発足記念シンポジウムを開催した。シンポジウムの出席者は総計130名であった。2013年7月11日理事会において、創発物性科学研究プログラムにスピン創発機能研究ユニット（8月1日設置）、動的創発物性研究ユニット（10月1日設置）、ソフトマター物性研

究ユニット（10月1日設置）の設置が認められた。2013年10月24日理事会議において、清華大学との覚書締結が承認され、合わせて清華大学物理系とCEMSの連携講座の取り決め締結について報告が行われ、2013年11月13日に清華大学と、研究協力覚書と連携講座の運営に関する取り決めが締結された。

2013年12月12日理事会議において、超伝導量子エレクトロニクス研究チームの2014年2月1日設置が認められた。2014年1月16日理事会において、量子表面・界面研究ユニットと交差相関界面研究ユニットを清華大学との連携に基づくユニットとして2014年2月1日に統合物性科学研究プログラムに設置すること、量子多体ダイナミクス研究ユニットを2014年6月1日に、同じく統合物性科学研究プログラムに設置することが承認された。

2014年2月13日理事会議において、強相関量子科学研究支援チーム（平林チームリーダー）を2014年3月31日に廃止すること、計算物質科学研究チーム、創発超構造研究ユニット、創発計算物理研究ユニット、創発分光学研究ユニットをそれぞれ2014年4月1日に設置することが承認された。統合物性科学研究プログラムに設置するこれらの3ユニットは、東京大学社会連携講座に基づくユニットである。

2014年2月26日の2013年度第11回CEMSコアメンバー会議において、CEMS Awardを設けることを決定し、第1回の受賞者5名（劉明傑 特別研究員〈創発生体関連ソフトマター研究チーム〉、于秀珍 上級研究員〈強相関物性研究グループ〉、徳永祐介 上級研究員〈強相関物質研究チーム〉、尾坂格 上級研究員〈創発分子機能研究グループ〉、清水直 特別研究員〈創発デバイス研究チーム〉）を選出した。授賞式は2014年4月23日のCEMSが毎月開催しているコロキウムで行った。

2014年5月7日から9日、創発物性科学研究センターアドバイザー・カウンシル（CEMSAC）を開催した。カウンシルの委員は

委員長：北岡良雄 大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授

委員（アルファベット順）

Prof. Tord Claeson Micro Technology and Nano Science (MC2)
Chalmers University of Technology, Sweden

五神真 東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻 教授（現東京大学総長）

前川禎通 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センターセンター長

水島公一 東芝リサーチ・コンサルティング（株） エグゼクティブフェロー

Prof. Samuel I. Stupp Director of the Institute for
BioNanotechnology in Medicine Northwestern University, USA

高原淳 九州大学 先導物質化学研究所 教授

Prof. J.-M. Triscone Dean of the Faculty of Sciences,
University of Geneva, Switzerland

の8名であった。2014年7月10日理事会議において、CEMSACの報告を行った。2014年5月には、神戸のSTAP論文問題に関係して、発表論文の自己点検が行われるなどの事態となった。CEMSは、ただちに2014年度第1回CEMSコアメンバー会議（2014年5月13日）において議論を行い、疑義が生じたとしても論文不正を検証するための材料がそろわない事態を回避し、真摯に検証に協力するための仕組みを検討し、検討チームを置いて論文データ管理の仕組みを作ることとした。2014年度第3回CEMSコアメンバー会議に、検討チームからの論文データ管理案が報告された。骨子は、「論文作成に関連するオリジナルデータを含む全てのデータを一つのフォルダにしてサーバーにアップロードする。このフォルダを投稿者は修正できない。フォルダ作成時に取りこぼし等があれば、改めて新規別フォルダとしてアップロードする」というものであった。このシステムは現在順調に稼働している。

この年、革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）のプログラム・マネージャーは、その所属が独立行政法人の場合は、科学技術振興機構（JST）の専従者とする事とされたことに伴い、ImPACTプログラム・マネージャーに内定していた量子光学研究グループの山本グループディレクターが、CEMSを離れざるを得ない状況となった。2014年8月7日理事会議において、量子光学研究グループを10月1日付で量子凝縮体研究チームに改組すること、超伝導量子シミュレーション研究チームを10月1日に設置することが承認された。同年11月、創発科学実験棟が竣工した。

2014年12月11日理事会議において、メンターの配置等による研究者等の育成体制に関するガイドラインが制定されることとなった。CEMSでは、そもそも統合物性科学研究プログラムのユニットリーダーに対して、メンターを指定してきたが、ガイドラインでは第2メンターまで指名することとなったので、対応した。

2015年1月14日、2014年度第9回CEMSコアメンバー会議において第2回CEMS Award受賞者5名（Neill Lambert 研究員〈量子凝集物性研究グループ〉、Zhirong Lin 客員研究員〈巨視的量子コヒーレンス研究チーム〉、小椎八重航 上級研究員〈強相関理論研究グループ〉、金子良夫 上級技師〈強相関物性研究グループ〉、小川直毅 上級研究員〈強相関物性研究グループ〉）を選定した。授賞式は4月22日のコロキウムで実施した。2015年1月29日理事会議において、2015年3月31日をもって巨視的量子コヒーレンス研究チームを廃止することが承認された。2015年6月1日、量子技術イノベーションコアWorkshopを、理研和光事業所鈴木梅太郎ホールで、産業技術総合研究所と共催した。これは、2015年度概算要求にて、特定国立研究開発法人に予定されている理研と産業技術総合研究所（その当時の候補）の連携を実施する施策として位置付けて要求し、要求が認められたものである。2015年6月26日理事会議において、ソフトマター構造創発研究チームのチームリーダーに、2015年4月に着任した染谷隆夫主任研究員を採用し、チーム名称を創発ソフトシステム研究チームと2015年7月1日付で変更することが承認された。2015年8月20日理事会議において、創発光物

性研究ユニット、計算物質機能研究ユニットをそれぞれ9月1日付で設置することが承認された。計算物質機能研究ユニットは清華大学との連携に基づくユニットである。

第4節 不連続的な飛躍を目指す研究

強相関物理部門

上に述べたように、創発性とは、多数の要素が相互作用することで初めて実現する現象や機能を意味するが、特に物性物理学が対象とする電子やスピンは、創発性を示す量子力学的な多体系の代表例である。物質の性質を決めるこれらの自由度は、その単純な総和としての物性を超えて、巨大で高速、かつ低エネルギーの機能を示すことが可能である。強相関物理部門では、理論と実験との緊密な協働により、多彩な物質を舞台としてこの概念を実現すべく研究を進めてきた。

強相関電子系の研究は、その内部自由度と多体効果をもたらす多彩な物性、機能を対象に、CEMS発足以前にも、高温超伝導、巨大磁気抵抗効果、マルチフェロイクス、スピントロニクス、トポロジカル物質、などのテーマで大きな発展を見せていたが、2013年（平成25）以降の3年間に限っても、以下に述べるような進展があった。（これらの成果は、強相関物理部門内、および他部門との緊密な協働により得られたものであるために、個々のグループ、チーム名は省き、筆頭著者と年月のみを示した。）

モットロニクスと光発電

強相関電子系は、多くの電子が高密度に詰め込まれて強く相互作用している電子集団である。強相関電子系で現れる電荷整列状態では、動きうる電子が大量に存在しているため本来は金属となるはずの物質であっても、クーロン相互作用によって電子の電荷同士が反発し合い、格子状に電荷が整列して動かなくなってしまう絶縁体状態となる（図2）。これはいわば氷のような電子固体状態であるが、この絶縁体に光を照射すると、氷が解けて水になるように、止まっていた電荷が一斉に動き出して金属となることがしばしば起こる。これが、光誘起モット転移であり、究極の多重キャリア生成と言える。

この現象は、次世代太陽電池として期待されている強相関太陽電池で、光電変換効率を大幅に上昇させるための重要な原理の一つになると考えられる。このアイデアは、大規模な理論シミュレーションによって実際に起こりうることを示される一方（小椎八重航ら、2009年12月）、「ペロブスカイト型マンガ氧化物」と半導体をヘテロ接合した太陽電池を作製することで実証された（Zhigao Shengら、2014年8月）。実験では、LSMO（110）接合で、6テスラの磁場によって短絡電流密度が磁場をかけないときに比べて、12%増加することを見出し、接合界面近くのマンガ氧化物がモット転移近傍の相競合状態になり、光によって局所的に相転移が起こって多重キャリア生成を誘起、光電流の増

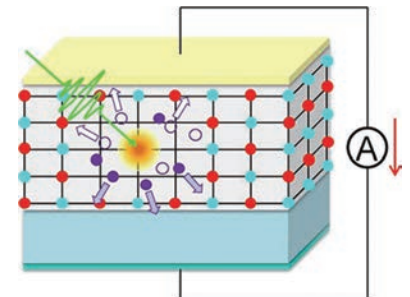


図2 ペロブスカイト型マンガ氧化物で現れる電荷整列状態と多重キャリア生成。

幅につながっていることが示された。また、関連してペロブスカイト太陽電池の基礎理論として、反転対称性が破れた結晶におけるトポロジカルベリー位相によるシフトカレントの理論を発展させた（森本高裕ら、2016年5月）。

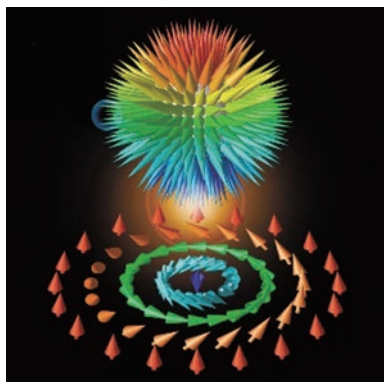


図3 スキルミオン

トポロジカルスピン構造スキルミオン

2010年に理研のグループによって実空間観測に成功したスキルミオンは、数十ナノメートル（nm、1nmは10億分の1メートル）程度の大きさをもつ渦状の磁気構造で（図3）、その小さなサイズ、トポロジーに保護された安定性、磁壁に比べて5-6桁小さい臨界電流密度で駆動される高い易動度、などの優れた性質から、次世代の高密度磁気メモリ素子への応用が期待されている。

このスキルミオンは、スピン構造が持つ立体角に由来する実空間の創発電磁場を伴う創発粒子として、多くの新奇な現象、効果、機能を示す（図4上図）。

CEMSの強相関物理部門では、このスキルミオンを中心テーマ

の一つに据えて、実験と理論の連携を通じて集中的に研究を進めた。まず、スキルミオンの電流下におけるダイナミクスに関する研究を進め、薄膜資料でも非常に低い臨界電流密度で駆動されることを実証し、並行して理論的にその原因がスキルミオンの持つ創発磁場のために不純物を避ける運動を起こすためであることを突き止めた（永長直人ら、2013年12月）（図4下図）。

また、室温付近・超室温のスキルミオン相の発見（徳永祐介ら、2015年7月）、絶縁体マルチフェロイックスキルミオン系の発見とその物性研究（関真一郎ら、2014年4月）、素子を想定した閉じ込められた空間でのシミュレーションによる電流下スキルミオン動力学の解明（岩崎惇一ら、2013年10月）、スキルミオンのサイズとヘリシティの混晶系による制御（柴田基洋ら、2013年10月）、マイクロ波のスキルミオン磁気共鳴（岡村嘉大ら、2013年8月）、スキルミオンマイクロ結晶の回転ブラウン運動の発見（望月維人ら、2014年3月）、歪によるスキルミオンの異方性制御とその第一原理計算（柴田基洋ら、2015年7月）、酸化物超格子

子におけるスキルミオンの発見（松野丈夫ら、2016年7月）、などの成果が次々に上がった。

そして、これらの知見を元に、スキルミオンを用いたエレクトロニクス—スキルミオニクス—の概念を提唱した。一方、スキルミオンに関連した構造としてMnGeではLTEMによる3次元モノポール結晶状態の実空間観測が行われ、モノポールがもたらす異常な磁気抵抗とフォノン物性が明らかにされた（金澤直也ら、2016年5月）。

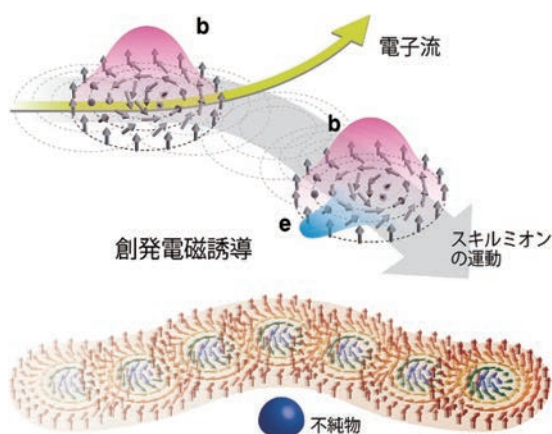


図4（上図）スキルミオンの示すいろいろな現象

スキルミオンにはピンクで示した創発磁場 b （スピンの立体角に対応）が付随し、それによって電子がホール効果を示すことでその流れが横成分を持つ。一方、スキルミオンは電子流によるスピントランスファートルクによって駆動されるが、そのとき b も運動するので、創発電磁誘導によって創発電場 e が発生する。

（下図）不純物を避けるスキルミオンの動き

不純物のピン止め力に対してスキルミオンはマグナスカによってその垂直方向へ動こうとするので、結果として不純物を避けることができる。

トポジカル絶縁体

トポジカル絶縁体は、内部は電流を流さない絶縁体状態だが、そのトポジカルに非自明な性質ゆえに、表面は金属状態となる物質群である。この表面金属状態は、質量を持たないワイル電子によって記述される。このワイル電子に、磁気秩序による交換相互作用、あるいは外部磁場が加わると、量子ホール効果を示すことが予言されていた。これは非散逸

性電流を実現する理想的な系と考えられる。CEMSでは、トポジカル絶縁体の一つ「 $(\text{Bi}_{0.12}\text{Sb}_{0.88})_2\text{Te}_3$ 」(Bi: ビスマス、Sb: アンチモン、Te: テル)の高品質薄膜の作製手法を確立し、ほとんど結晶欠陥のない(内部に電流が流ることがない)薄膜を成長させ、これを用いて電界効果型トランジスタ構造を作製して、この量子ホール効果を再現性良く実現することに成功した(吉見龍太郎ら、2015年4月)。さらに、外部電圧を制御することで、ディラック状態の整数量子ホール状態と絶縁的な状態を電氣的に制御できることを示した。また、この磁性トポジカル絶縁体において、スキルミオンが実現すること(安田憲司ら、2016年2月)、ホールコンダクタンスがゼロとなる特異な量子ホール状態が現れること、などを明らかにした(図5)。また、トポジカル絶縁体の表面で高効率のスピ流生成が行われることを見出した(近藤浩太ら、2016年7月)。

超伝導

銅酸化物における高温超伝導は、強相関電子系の示す最も顕著な現象の一つであるが、その発見から約30年たっても未だそのメカニズムは論争的である。CEMSでは、現在、大気圧下で最も高い転移温度 T_c (現時点でマイナス140℃程度)を示す高温超伝導銅酸化物の T_c を圧力によって上昇させることに成功した(山本文子ら、2105年12月)(図6)。これは、小さい元素への置き換えや薄膜化などによって擬似的な圧力が実現できれば、大気圧下でも、より T_c の高い超伝導体が得られる可能性があることを示している。また、並行して第一原理電子状態計算を用いて超伝導転移温度を正確に評価する手法を発展させた。これにより、フラーレンの電子相図をほぼ正確に再現することや、硫化水素系の転移温度を半定量的に再現することに成功し、高温超伝導物質設計への道を拓いた(野村悠祐ら、2015年8月)。

マルチフェロイックス

強誘電と磁気秩序が共存するマルチフェロイックス物質では、電気分極とスピンの間に強い結合が生じる。特に、螺旋型に電子スピンの配列したスピ流によ

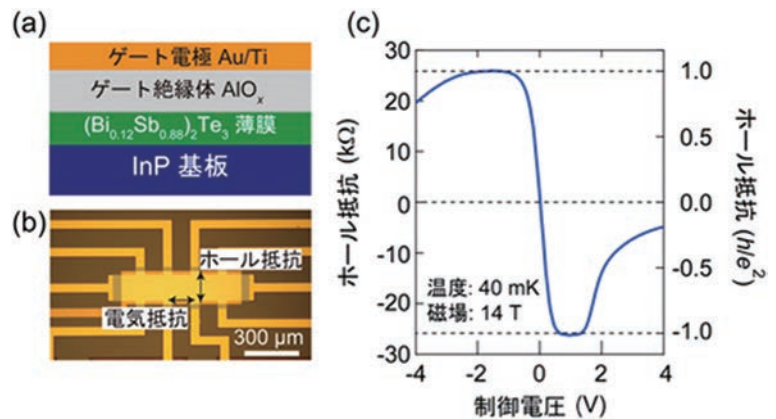


図5 磁性トポジカル絶縁体の素子構造(a)、(b)とホール抵抗の実験結果(c)

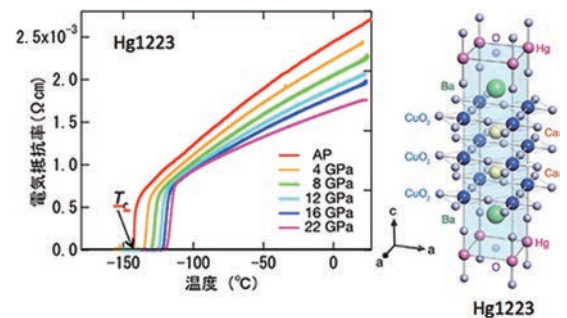


図6 高温超伝導体における圧力印可による転移温度の上昇(左)とその結晶構造(右)。

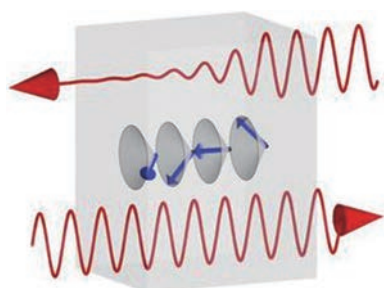


図7 磁気カイラル効果

るマルチフェロイックス物質の研究を進め、磁場により磁化を、また電場により磁化を反転することに成功した。さらに歪みによってマルチフェロイックスを制御する方法を開発した（中島多朗ら、2015年2月）。また、そのダイナミクスではギガヘルツからテラヘルツの周波数帯にエレクトロマグノンと呼ばれるスピンと電気分極の揺らぎが一体となった集団運動が現れる。このエレクトロマグノンにおいて、光の伝播方向によって屈折率や吸収係数が異なるという磁気カイラル効果が巨大となることを発見した（木林駿介ら、2014年8月）（図7）。この効果は、光アイソレーターや、光（電磁波）制御素子への展開が期待できる。

超分子機能化学部門

分子が集まって個々の分子にはない新しい機能を生み出している複合体を、超分子と呼ぶ。超分子機能化学部門では、分子一つ一つを精密に設計するとともに、分子が集合するプロセスを能動的に制御することで、ナノ・メソを超えた巨視スケールに至る階層的な異方構造の構築を行っている。これにより、無機材料の微細加工では困難な組織構造を創出し、地球規模のエネルギー問題・環境問題の解決につながる材料科学の学理樹立を目指している。

超分子機能化学系の研究もまた、CEMS発足以前より、電子の出し入れで伸縮する「螺旋状分子ワイヤー」、太陽電池の理想構造を具現化した「ソフトグラフェンナノチューブ」、光エネルギーを運動エネルギーに変える「ブラシ状高分子」、ほとんどが水よりなる究極の環境低負荷プラスチック代替「アクアマテリアル」などの成果をおさめていた。2013年度のCEMS発足以降、これら超分子ソフトマテリアルの開発（相田グループディレクター、石田チームリーダー）に加え、有機エレクトロニクスに基づく太陽光エネルギー変換（瀧宮グループディレクター、但馬チームリーダー）、物理・生物分野との融合（岩佐チームリーダー、伊藤チームリーダー）、X線などを駆使した精密構造解析（橋爪ユニットリーダー）、さらに、これらの超分子機能材料を集積したフレキシブルデバイスの開発（染谷チームリーダー）へと研究範囲を広げ、分子1個からナノ集合体、さらにはバルク材料に至るまでを対象とすることとなった。その結果、持続可能な社会に向けた超分子機能材料に関する研究が一層加速し、この3年間に限っても、以下に代表される発展があった。

超分子ソフトマテリアル分野においては、アクアマテリアル関連の研究に非連続的な目覚ましい進展があった。アクアマテリアルは、水中に分散した無機成分にごく微量の有機成分を作用させて3次元の網目を作り、水を固化することで得られる。元来、有機成分として16工程を要するポリマーを用いていたが、その構造を極限まで単純化し、同性能を示す合成容易なポリマーを新開発した。これにより、アクアマテリアルの実用化に向けて大きく前進するとともに、種々の有機成分を使った網羅的研究が可能となり、材料強度を高めるための指針も明らかとなった。

無機成分についても、元来用いていた粘土ナノシートを酸化チタンナノシートで置き換えることにより、材料の多様な機能化に成功した。酸化チタン特有の光触媒活性のため、この材料は望みの場所を何度でも光加工できる。さらに、水中に分散した酸化チタンナノシートが、磁場に応答して配向することを偶然発見し、この状態で水を固化した異方的アクアマテリアルを開発した。この配向状態では、負電荷を帯びたシートの上に異方的な静電反発力が働くため、この材料は縦の荷重に耐えながら横にしなやかに変形するという、前例なき力学特性を示す。

また、この静電反発力を能動的に増減することにより、大きく、早く、方向性を持つ、筋肉のような動きを生み出すことができる（図8）。また、アクアマテリアルとは別の切り口による環境低負荷ソフトマテリアルとして、長さが厳密に制御された超分子ポリマーの開発にも成功した。温和な条件下で原料を混ぜるだけでできる超分子ポリマーは、次世代高分子材料として期待されているが、通常は原料が勝手に重合してしまうため、長さを制御することができない。今回、原料の分子構造を巧みに設計することにより、超分子ポリマーの厳密な長さ制御が合理的に達成できることを初めて実証し、「混ぜるだけで誰もが精密合成できるポリマー材料」への道を拓いた。

また有機エレクトロニクス分野においては、センターのミッションの一つであるエネルギー問題の解決に向けて、特に有機薄膜太陽電池の研究について目覚ましい進展があった（図9）。有機薄膜太陽電池は軽量かつ柔軟な構造を持ち、半導体ポリマーの塗布によって作製できるため、低コストで環境負荷の低い次世代太陽電池として注目されている。実用化に向けてエネルギー変換効率を向上させるためには、高分子合成から超分子化学、デバイス工学にわたる幅広い分野の研究を、基礎から応用にかけてのさまざまな観点から推進する必要がある。

CEMSでは例えば、有機合成化学を駆使して新規材料を合成し、電気的・光学的に優れた特性を持つ有機半導体材料の開発を行ってきた。

さらにそれらの材料を薄膜中で適切なナノ構造に導くための方法論を開発するため、超分子化学の知見を加えた新たな材料設計についても研究を行ってきた。また、二つの異なる物質の界面における電荷分離や電荷輸送の過程は、太陽電池だけでな

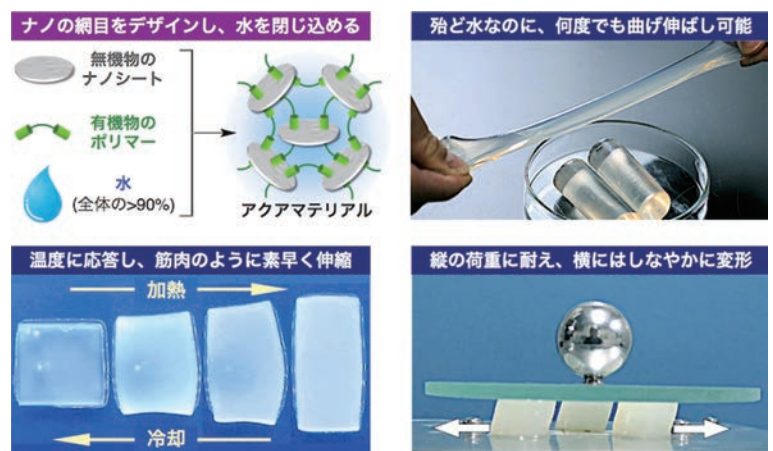


図8 アクアマテリアル

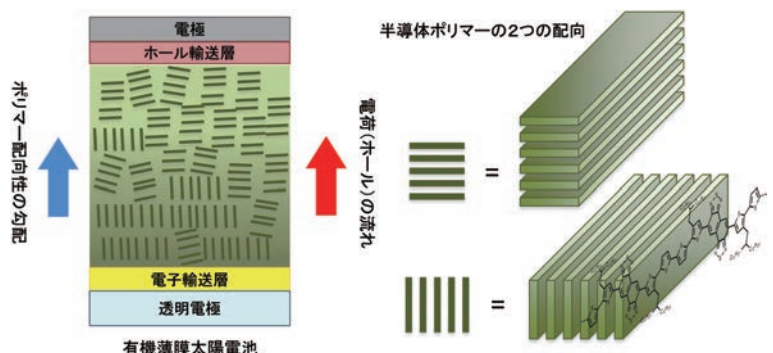


図9 有機薄膜太陽電池

く有機エレクトロニクス全般において極めて重要な研究対象であり、その制御と新奇物理現象の発見を目指したさまざまな研究を行ってきた。このようにさまざまな基礎的な研究成果を元にして、有機薄膜太陽電池の効率向上を目指した。

その結果、新規な半導体ポリマーを合成し、さらにそれらの薄膜中での配向（分子の向き）の精密な制御を行うことで、光によって発生した電荷が流れやすくなる構造を構築し、10%を超える世界最高クラスの太陽光エネルギー変換効率を達成することに成功した。これに加えて最近、従来の光電変換過程において大きな問題であった光エネルギーから取り出せるエネルギーのロスを、これまでの0.7-1.0eVから0.6eV以下にまで低減する画期的な分子設計を開発した。この成果によって、今後有機薄膜太陽電池の変換効率を15%程度まで向上させるための道を拓き、エネルギー問題へと大きく貢献することが期待できる。

量子情報エレクトロニクス部門

当該研究は、種々の量子系（スピン、超伝導、原子など）を制御することにより、量子科学、ナノ科学への応用に展開することを目的とする。CEMS発足時の研究体制は3グループと6チームであったが、その後1グループと1チームを解消し、3チームを新設した（執筆時現在は2グループと10チーム）。これまでに、上記の量子系について、単一の粒子や巨視的状态を操作、検出することを基本原理として、古典的な考え方で作られている従来型コンピュータ、電子回路ではできないクラスの情報処理・計算の技術開発および従来を凌駕する量子力学的実験、計測技術と理論解析のツール開発を行っている。以下にその主な概要を述べる。

(1)電子スピン、超伝導回路を用いて量子計算を中心とする量子情報技術を開発

している。量子機能システム研究グループでは、量子ドット中の電子スピンを量子ビットとして、ビット数の増加、論理演算を構成する量子ゲートの性能の向上、新しい量子技術の開発を行った。これまでにGaAs（ヒ化ガリウム）多重量子ドットの電子状態制御技術を確認し（Mathieu Delbecqら、2014年5月）、高速スピン操作法（米田淳ら、2014年12月）、4スピンのコヒーレント制御（大塚朋廣ら、2016年8月）、3スピンによる単一量子ゲート（野入亮人ら、2016年4月）、量子もつれゲート（Russell Deaconら、2015年7月）、非局所量子もつれ操作などを達成した（図10）。

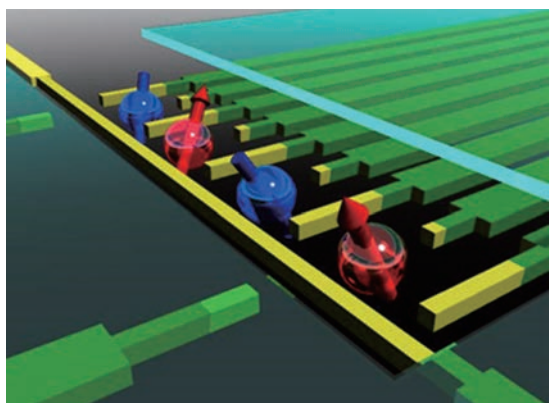


図10 4重量子ドットのスピン制御

環境雑音の時間相関を考慮した操作と計測の導入により、ゲート忠実度を2桁以上増大し（Mathieu Delbecqら、2016年1月）、またSi量子ドットのスピン操作の高速化により、誤り耐性量子ビットの実装に必要な量子操作の忠実度（99%以上）を達成できることを実証した（武田健太ら、2016年8月）。これらはいずれも量子計算の実装に向けた大きな成果で同分野の研究を主導する。

一方理論に関して、量子システム理論研究チームは、スピン量子技術の拡張性に関連して、機能システム多数のスピン量子ビットを結合、操作する方式として

共鳴を利用した遠隔操作法 (Peter Stanoら、2015年8月)、量子端状態を量子バスとする操作法 (Guang Yang、2016年2月) などを理論提案した。また、量子凝縮物性研究グループは、一連の量子技術の研究に関連して、原子物理、量子光学、ナノ科学、量子情報、および凝縮系物質などの種々のインタフェースについて先駆的な理論研究を行った。具体的には、超伝導回路、量子ハイブリッド系、量子シミュレーション、量子計測、量子生物学、ナノ・オプトメカニクス、電子渦ビーム、また、光に対する、結合マイクロ共振器、ダイオード、パリティー時間対称性、角運動量、量子スピホール効果、スピン軌道相互作用などの理論を開拓した。

(2)超伝導量子回路に関して、超伝導量子エレクトロニクス研究チームは、マイクロ波光子単一光子検出器を開発した。マイクロ波共振器と結合した超伝導量子ビット素子が、導波路より入射するマイクロ波光子を検出する。単一光子検出の量子効率 $66 \pm 6\%$ を実現し、さらに光子検出後に高速リセット動作が可能であり、1MHz以上の繰り返し周波数で動作可能なことを示した。10GHz付近の周波数帯において、任意波形(帯域約10MHz)を持つ波束に対して動作する。この成果はマイクロ波領域における量子光学実験の新たな可能性を切り拓くものであり、高感度な計測技術としても期待される。

超伝導量子シミュレーション研究チームは、一つの超伝導人工原子により構成される、オンデマンドな単光子源(マイクロ波領域)を実現した(Zhihui Pengら、2016年8月)。この単光子源は、伝送線に直結しているため、一般的な応用に対応できるオンデマンド単光子源であり、これまでになかった単光子源である。周波数は可変で、磁場により約6.7GHzから9.1GHzまで変調可能で、効率は75%程度と見積もられる。単光子性を示すアンチバンチング特性も観測されている。量子情報への応用に関しては、ボゾンサンプリングを用いる量子シミュレーションや、光子のクラスター状態の生成などが考えられる(図11)。

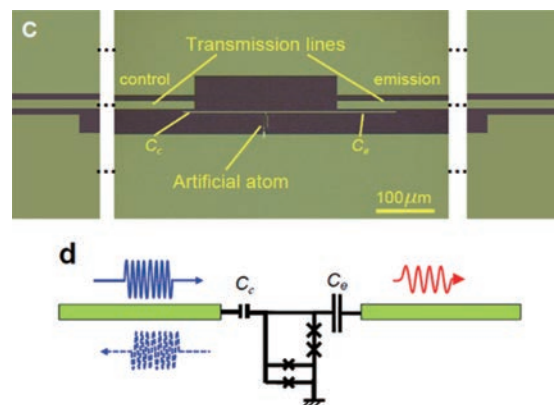


図11 超伝導回路の写真と等価

(3)原子に関しては、量子凝縮体研究チームが冷却原子系、量子凝縮相研究チームが超流動ヘリウムの研究を展開した。前者ではボソンの1次元系冷却原子気体を突然二つに分離すると、各部分系は(擬)熱平衡化するが、両者の非局所相関は量子エンタングルメントの効果のために熱平衡化しないという現象を発見した。この現象は、熱平衡化に量子エンタングルメントが本質的な役割を果たすことを示す初めての例であり、量子情報分野におけるデコヒーレンスフリー部分空間が、熱平衡化を妨げていると解釈することもできる。これによりエンタングルした量子多体系の理解が前進した。後者では、超流動ヘリウム3自由表面下に束縛した電子バブル(負イオン)およびスノーボール(正イオン)の移動度測定から、A相の空間異方性に起因したカイラリティーの直接観測に成功した(池上弘樹ら、2013年7月)。また、B相における表面からの距離に依存しない移動度の測定結

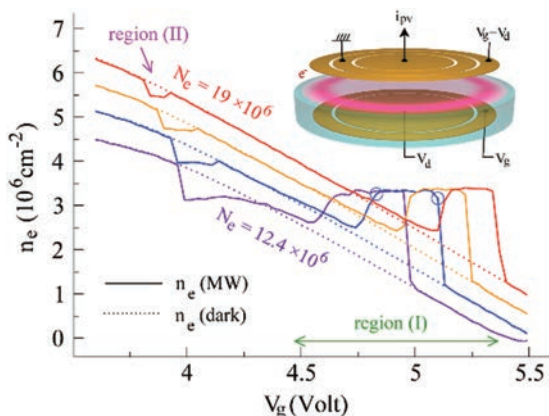


図12 同心円状の静電ポテンシャル (V_g) を掃引した際の中央付近のヘリウム液面電子の密度 (n_e)。マイクロ波照射がないと (dark) n_e は単調に変化 (破線)。垂直磁場下でマイクロ波照射すると n_e が一定となる非圧縮性領域が出現 (実線)。

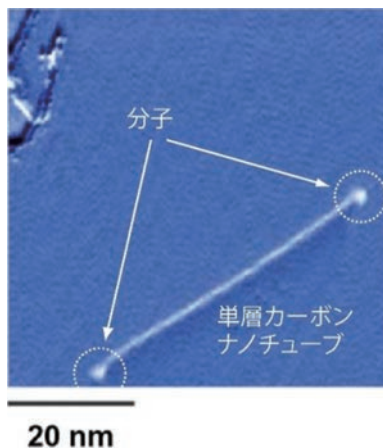


図13 ナノチューブの両端にコラーゲンモデルペプチド分子を結合した量子ドット構造の写真

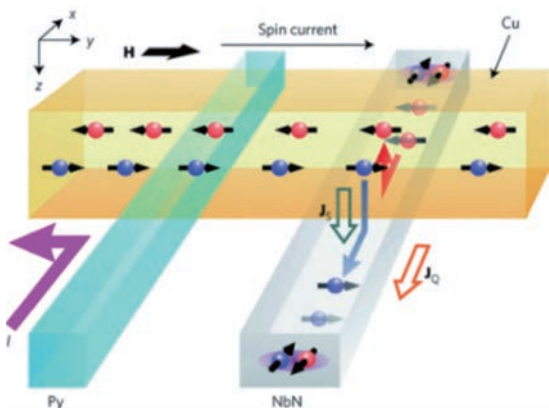


図14 準粒子誘起スピンホール効果の概念図

果からは、表面状態のマヨラナ性が強く示唆された (池上ら、2013年11月)。ヘリウム液面電子表面準位間の共鳴マイクロ波励起によって出現する、異常磁気抵抗効果の研究を進め、ゼロ抵抗状態の電子系が非圧縮性を示すことを明らかにした (Alexei Chepelianskii ら、2015年5月) (図12)。

(4) ナノ科学の推進に関して、量子効果デバイス研究チームはカーボンナノチューブを用いた機能性ナノ構造を開発した。ナノチューブはトップダウン技術では作製が困難なごく微小なサイズ (直径1 nm程度) を有することから、量子効果を利用するデバイスの Building Block に適している。人工的な機能性ナノ構造を作製するために、カーボンナノチューブと分子が化学結合したヘテロ接合を利用して量子ドット構造を作製することに成功した (図13)。分子は結合の様式によって電気双極子の向きが変わることに着目し、量子ドット中のポテンシャルを制御できることも明らかにした。さらに、単一の量子ドットからの励起子発光を観測するなど、ナノチューブの機能拡大を示す結果を得た。(飛田聡ら、2015年4月)

また、量子ナノ磁性研究チームでは、金属および超伝導体へのスピン注入およびスピンホール効果に関する系統的な研究を行った (新見康洋ら、2015年10月)。

その結果、銀ナノ細線中を10ミクロンにわたって集団スピンを一回転歳差運動させながら拡散伝導させ、実験結果を理論的に説明することに成功した (井土宏ら、2014年2月)。超伝導状態にあるニオブナノ細線に準粒子スピンを非局所注入することにも成功し (若村太郎ら、2014年1月)、この手法を用いて、準粒子スピンを媒介として巨大スピンホール効果が生じることを発見した (若村太郎ら、2015年5月) (図14)。スピン物性理論チームではスピン流と電流や光などとの変換メカニズムを微視的視点から理論的解明を進め、主に以下の成果を得た。1). スピン軌道相互作用を用いたスピン流から電流への変換が電子スピんに働く有効電磁場によって引き起こされていることを明らかにした。この電磁場は物質に特有のものである。2). こ

この有効電磁場が作る電子の流れがドップラー効果により、光応答において入射方向により透過率が変化する方向二色性を生み出していることを明らかにした。さらに反対称磁気相互作用も同様のドップラーシフトによることも示しその相互作用

用の新しい計算法を提案した。3). 温度勾配によって生じる輸送現象を記述する熱ベクトルポテンシャル理論の定式化を行った。

一方、創発現象観測技術研究チームでは、ナノスケールで電磁場を可視化できる電子線ホログラフィーを用いて、電子の動きに伴う電場の乱れを検出・追跡し、生体や誘電体表面での電子の蓄積と集団運動の様子を観察することに初めて成功した（進藤大輔ら、2014年8月）。図15は神経の微細線維（青）周辺の観察例である。観察初期（a）に比し、時間経過と共に電子の動きに伴う電場の乱れた領域（赤）が枝に囲まれた領域内（b、cの矢印）に観察され、試料から放出された2次電子が、正に帯電した試料に引き寄せられ、次第に蓄積し、集団的に移動する様子が捉えられている。

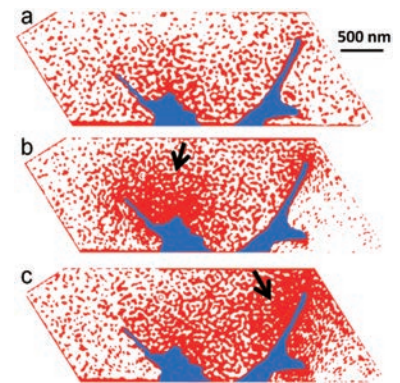


図15 神経の微細線維（青）周辺における電場の観察例

上記研究の試料作製に関しては、クリーンルーム管理、装置保守、技術指導など、創発物性科学研究支援チームが全面的にサポートしている。

統合物性科学研究プログラム

統合物性科学研究プログラムは、若手のPIを育成するとともに、上記の3部門の間を学際的に橋渡しする役割を担っている。以下にまとめるように、物理部門と化学部門、物理部門とエレクトロニクス部門にわたる成果が上がっている。

動的創発物性研究ユニット：強相関電子系の準安定相

強相関電子系の非平衡状態という観点から、冷却速度という、実験において通常重視されることのないパラメータが、平衡熱力学の枠組みを超えて最低温の電子状態の制御因子になりうることを発見し、実際に基底状態以外の電子状態を発現させることに成功した。CEMSで開発した急冷技術を用いることで、これまで実現できなかった隠れた電子状態や、圧力・磁場などの外場掃引という従来の

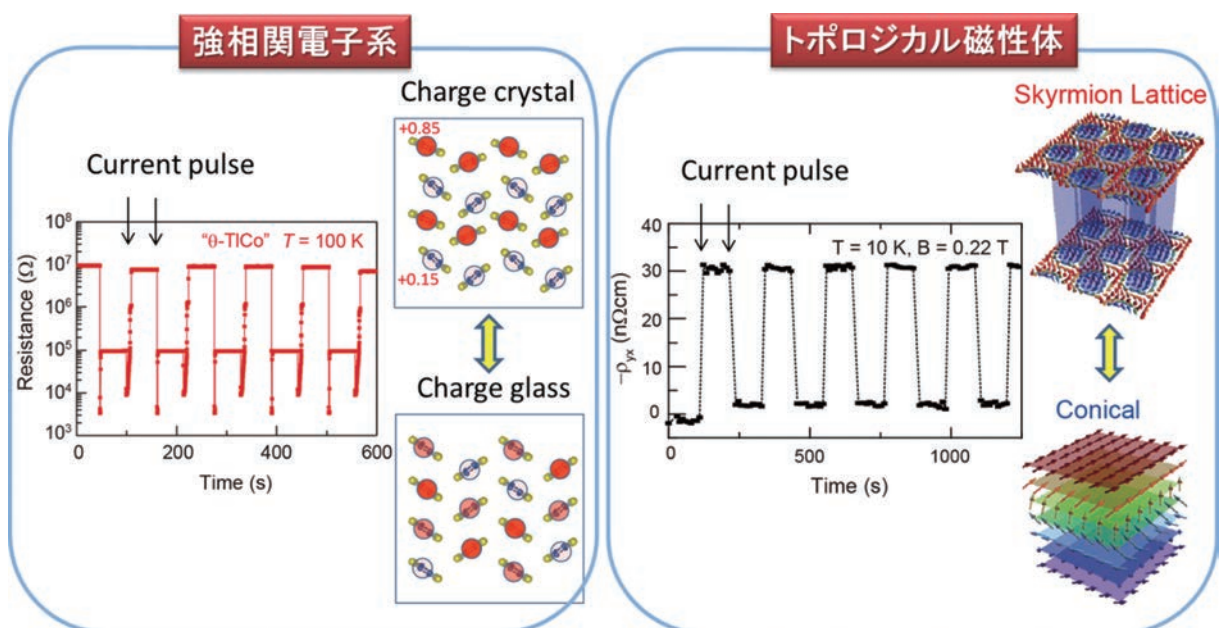


図16 急冷による強相関電子系の新しい電子相

手法とは異なった発想での相制御が、強相関電子系や磁性体を含むさまざまな系で実現できることが明らかになった（大池広志ら、2015年10月）（図16）。

スピントロニクス研究ユニット：スピン流制御

スピントロニクスは物理とエレクトロニクスが交差する分野である。スピン角運動量の流れであるスピン流は、電荷の流れである電流に比べてジュール発熱を伴わないという利点があり、エネルギー効率の高いエレクトロニクスを実現するための切り札として注目を集めている。従来、スピン流の研究は強磁性体に限られていたが、CEMSでは新たに、磁性体の大多数を占める反強磁性体中のスピン波が、スピン流の効率的な担い手として機能しうることを明らかにした。これは、反強磁性体を利用した次世代のスピントロニクスを基礎づける重要な成果である。また、右手系・左手系の区別のあるキラルな物質を用いることで、スピン波スピン流のダイオードを実現できることも新たに発見した（関真一郎ら、2016年6月）。

創発光物性研究ユニット：光によるスピン制御

強い電子相関やスピン軌道相互作用を特徴とするバルク結晶および薄膜／界面において、新しい光磁気効果の探索と非平衡電子・スピンの光制御の研究を行った。3次元ラッシュバ半導体中のディラック電子を用いたスピン偏極電流発生とその円偏光制御（小川直毅ら、2014年9月）、フェムト秒レーザーの光磁気効果による磁気スキルミオンの非熱的超高速励起／全光スピン波スペクトロスコピーを用いたヘリマグノン／スキルミオン集団モードの実時間観測、磁性絶縁体中で非吸収光による局所磁気弾性波発生、などを実現した。特にスピン波が音速で長距離伝搬する様子を画像化し、さらにこの磁気弾性波を各種磁壁／磁気バブルドメインに作用することにより、そのスピン波成分が磁壁と引力相互作用を示すことを明らかにした（小川直毅ら、2015年7月）。この成果は、局所光励起により微小磁区を自在に操作できる可能性を示す。

ソフトマター物性研究ユニット：超分子強誘電体

強誘電体は物理と化学にまたがる研究対象である。高分子・液晶・コロイドなどのソフトマター系におけるメソスコピックスケールの超分子構造の物理・機能物性の探究と制御を研究している。超分子強誘電体で、位相干渉SHG顕微鏡やケルビンプローブ表面力顕微鏡により極性スイッチングの微視的観察に成功した。また、表界面解析などに用いられる和周波発生法を適用することで、分子ダイナミクスの解明も行った（荒岡史人ら、2014年8月）。そのほかに、アキラル屈曲分子による超分子キラリティの能動制御（Kibeom Kimら、2015年9月）、分子キラリティを介さない超分子キラル構造の顕微円二色性分光法による判別（Cécile Rocheら、2014年4月、2015年11月）、有機ゼオライトに埋め込まれたアキラル分子の螺旋配列からキラル非線形光学効果を観測（Chunji Liら、2015年9月）、屈曲分子による巨大カー効果の発見（Khoa V. Leら2016年3月）、分子のネマチック液晶における捻れ弾性の異常の発見（Khoa V. Leら、2014年10月）などの成果を上げた。

量子多体ダイナミクス研究ユニット：冷却原子の量子ダイナミクス

光格子と呼ばれる極低温原子集団を周期的な構造に閉じ込めた実験系を用いて固体物理における重要なモデルを疑似的に実現し、その物理現象を調べる研究を行っている。その中でも特に、非平衡・量子ダイナミクスにフォーカスし、新たに光格子実験を構築している。また、一次元の偏極したスピン鎖において、中心のスピン向きを変えスピン不純物を導入することで引き起こされる量子ダイナミクスについて調べ、エンタングルメントが生成し、そして伝搬していく様子をこれまでの実験データを解析することで示した（福原武ら、2015年7月）。

第5節 国内外の大学や企業との連携

清華大学

理研と清華大学の研究交流、次世代を担う若手研究リーダーの育成および理研-清華大学との将来的な研究リーダーの人脈形成のため、連携講座を三つ設置し、清華大学のassistant professor（テニュアトラック）レベルの教員を採用した。同時に、CEMSにおける統合物性科学研究プログラムの招聘研究ユニットリーダーと位置付け、年に2カ月以上、基本3カ月間滞在して共同研究を推進している。

教員の人選については、清華大学側でその教員人事規則に従って行われるが、理研側からは候補者の推薦を行うとともに、清華大学側から提示された候補者につき、招聘ユニットリーダーとして適格かどうかを人事委員会（センター長〈オブザーバー〉、副センター長および部門長4名、および適宜専門の近いPIからなる）で審査することとした。このプログラムは2013（平成25）年度から3年間は理事長裁量経費によって、2016年度からはセンターの運営費によって実施されている。

当初は理研と清華大学の間MOUの調整などに時間を要し、2013年11月に清華大学研究担当副学長で、理研との窓口であるQikun Xue教授参加のもと、東京において締結のセレモニーが行われ、本格的にスタートした。3ユニットのうち、2ユニットは物性実験グループ、1ユニットは物性理論グループとする計画で、同年12月には清華大学側から、すでに清華大学で実験グループを主宰している2名のassistant professorが、連携講座のPIとして推薦されてきた。CEMSでは上記人事委員会を設置し、12月中に書類審査を行い、2名とも適格との判断を下し、CEMSコアメンバー会議における承認を経て、2014年2月から以下の二つの研究ユニットが発足した。

交差相関界面研究ユニット：Pu Yu（UL）

量子表面界面ユニット：Shuaihua Ji（UL）

※ UL：ユニットリーダー

この2ユニットはすぐに理研との共同研究を推進し、PI以外にも学生を含む研究室のメンバーが理研に滞在して、定期的に研究進捗報告を行うなど、活発に活動

している。

このほかに、2014年7月には、このプログラムのCEMS関係者が清華大学を訪れてワークショップが行われ、また2015年5月に理研で行われたワークショップには、Qikun Xue教授が参加するなど、研究交流が格段に強化された。その後、清華大学側から3人目の理論分野のPI候補者提案を受けることとした。その結果、清華大学のassistant professorであるYong Xu博士が推薦され、上記と同様の人事審査手続きを経て、2015年9月に

計算物質機能研究ユニット：Yong Xu (UL)
が設置され、活動を開始した。

これらのユニットリーダーには2名ずつのメンターを任命し、ユニットの研究、運営に関する助言を行うとともに、CEMSにおける共同研究を推進している。その結果、強相関遷移金属酸化物のエピタキシャル歪みとヘテロ界面の設計により、強い電気磁気結合を持つマルチフェロイック系の作製に成功し、その物性評価を完成させたり、磁性トポロジカル絶縁体 ($\text{Sb}_{1.7}\text{Cr}_{0.3}$) Te_3 の表面状態の走査型トンネル顕微鏡 (STM) による観測に成功し、磁場下でのランダウ準位と磁気モーメントとの結合によるエネルギーギャップを見出したり、強誘電体における光照射下で、自発的に流れる熱流の計算などの成果が上がっている。

東大社会連携講座

センターの設置にさかのぼる2010年4月、理研からの申し込みにより東大大学院工学系研究科において、4年間の契約で「創発物性科学」社会連携講座が設置された。その目的は、十倉領域長（当時）が中心研究者を務める最先端研究支援プログラム「強相関量子科学」において、若手研究リーダー人材を育成することであった。また、その名称は後年設置される創発物性科学研究センターのそれを先取りしたものであった。社会連携講座は2013年のセンターの発足後も継続し、2014年3月の最先端プログラムの終了とともに第1期を終え、同年4月より4年契約で第2期に入り現在に至っている。

社会連携講座では、独立した研究室を主宰する特任教員が雇用され、理研-東大の最先端研究環境下での共同研究と、工学系研究科における学部学生および大学院生の教育・研究指導を担当した。教員人事は、センターの研究テーマを十分に考慮したうえ、東大側で行われた。センター発足後の特任教員は全てセンターのユニットリーダーを兼務することとした。また、特任教員は独立研究室を主宰するPIではあるが、東大側のメンター教員および理研の複数のPIによる強力なメンターシップ体制をとり、共同研究、外部研究資金の獲得、キャリアパスに関する支援を行った。理研が、大学にこのようなポストを用意する理由は、PIとしての責任をもって学生を指導することが、若手研究リーダーの育成には非常に有効であるからである。

社会連携講座は常時、特任准教授1名、特任講師2-4名等の体制で運営されており、これまで延べ14名の特任教員が採用された。現職の3名を除き、11名全てが国内（9名）国外（2名）の大学教員あるいは研究機関PIに昇進・転出を果

たした。うち1名は短期間のうちに教授に昇進した。理研から採用された特任教員は3名、逆に特任教員からCEMSのユニットリーダーに採用されたのは2名であり、両機関の間の人事交流も盛んに行われた。若手人材の活発な活動は、東大の大学院生にもよい影響をもたらし、特任教員が教育を担当する物理工学専攻の高い博士課程進学率に結びついており、この社会連携講座は、東大側で非常に高い評価を得るに至った。

若手研究リーダーの継続的な育成は、理化学研究所に課せられた重要な使命であるが、大学との連携はその有力な手段である。この社会連携講座は、グループディレクターの大学とのクロスアポイントメントや、今後の理研-東大連携の中核を担うとともに、他大学との連携のモデルケースとなることが期待されている。

企業との連携

CEMSにおける企業との連携は、研究室ごと、あるいは複数研究室が合同で企業と共同研究契約を締結して進めることが主流となっている。2013年のCEMS設立から3年度で延べ40件余りの契約が締結され、合計で約4900万円の研究資金を受け入れ、約20件の特許の共同出願に至っている。

CEMS創設センター長の十倉が中心研究者として2010-2013年度に推進したFIRSTプログラムでは、研究活動とは別に三つの社会貢献活動を実施しており、そのうちの 하나가「未来技術アカデミア」である。この施策では、強相関量子科学の最先端研究成果を将来の技術開発の土台とするために、民間企業の若手研究者を常駐共同研究者として理研に受け入れ、応用の視点を持った研究を展開するとともに、世界最先端の基礎研究者との共同研究を通じて、将来において研究開発の指揮を執ることのできる企業人材の育成に取り組んだ。この精神はCEMSにも受け継がれ、企業の中央研究所あるいは基礎研究所の機能を理化学研究所に求めてほしいという積極的な呼びかけと、企業にとって魅力的な研究内容により、上記共同研究契約に基づき3年度で延べ約40人の企業研究者を受け入れている。

連携研究テーマは、強相関エレクトロニクス、マルチフェロイクス、スキルミオン、熱電材料、非線形光学材料、有機エレクトロニクス、アクアマテリアル、再生医療工学、バイオセンサー、量子情報処理、スピントロニクス、電子顕微鏡ホログラフィー等多岐にわたり、連携企業も国内外のエレクトロニクス、化学、薬品、素材等に関連した企業となっている。中でも、アクアマテリアルについては、2016年度から理研の産学連携本部が実施する「産業界との融合的連携研究制度」を活用して、日産化学工業（株）との連携研究チームを設置するまでに事業を発展させている。

第6節 創発性の実現

以上述べてきたように、CEMSは設立から3年を経たばかり（2016年時点）の新しい研究センターであるが、当初目指した「創発性」の概念を科学および組

織の上で発展させるという目標を順調に実現しつつある。一方で、理研における最初の物性科学分野の戦略研究センターとして、今後もわが国の同分野を牽引するとともに、世界に向けて研究成果を発信する使命があると肝に銘じている。

理研は現在、大きな変革期にあり、2015（平成27）年4月に着任した松本紘理事長の下で人事制度を含む新しい組織づくりが大詰めに近づいている。特に、無期雇用制度の開始に関連して、定年制と任期制の人事制度を一本化するという大きな転換が起こりつつあり、任期制の職員が多数を占めるCEMSにとっては直接影響がある問題である。人事関連としては、このほかに女性PIの採用が懸案となっていたが、この課題に対しては執筆時現在、女性限定のPI公募を行っており、これは理研では初めての試みである。

人口減や激動する世界環境によって、多くの問題に直面するわが国であるが、持続性のある安定した社会の構築に向けて、科学の立場から基盤づくりに寄与するとともに、次世代の学術および産業界のリーダーを育成する責務を全うしたい。