

戦略的創造研究推進事業
－CRESTタイプ－

研究領域「物質現象の解明と応用に資する
新しい計測・分析基盤技術」

研究領域中間評価用資料

平成21年 2月 9日

1. 戦略目標

「新たな手法の開発等を通じた先端的な計測・分析機器の実現に向けた基盤技術の創出」（平成16年度設定）

1) 名称

新たな手法の開発等を通じた先端的な計測・分析機器の実現に向けた基盤技術の創出

2) 具体的な達成目標

全く新しい発想に基づく技術開発、新原理の探索を通じた新たな手法の開発等、多方面の先端科学技術分野における創造的な研究活動を支える新たな計測・分析機器の実現に向けた基盤技術の確立を目指す。

特に、細分化、多様化が進む先端分野の研究開発において、画期的な進展もたすため、あるいは全く新しい領域を切り拓くため、従来技術では不可能であった現象や事象について、新たな方法論の開拓と多分野の技術の融合等を併行して進める。具体的には、例えば、以下のような領域について、先端計測分析機器の開発につながる基盤技術を確立する。

- ・ 無機材料や有機材料、生体・環境試料中に含まれる極微量物質の化学形態を計測・分析する基盤技術の確立
- ・ 無機材料や有機材料、生体・環境試料の固体－固体界面、固体－液体界面の状態を計測・分析する基盤技術の確立

3) 目標設定の背景及び社会経済上の要請

我が国が科学技術分野で真に諸外国を先導するためには、世界最先端の研究データ、独自の研究データを取得できる先端計測分析技術・機器を整備していくことが重要である。世界最先端の研究データ・独自の研究データは、具体的な研究ニーズに基づく創意工夫による技術開発や、新たな方法論の開拓や多分野の技術の融合を通じた新しい測定機器によって生み出されるものであるが、このような新しい手法の開発等を通じた測定機器の開発自体も極めて新規性・独創性の高い研究である。

また、新しい手法の開発を通じた先端的な計測・分析技術基盤の確立は、次の開発段階である実用化・汎用化をすることにより産業応用も可能となるものであり、社会経済上大きな波及効果も期待できるものである。

具体的には、例えば、生体中又は環境試料中の極微量物質が、生体又は環境に与える影響は、化学物質の存在形態により大きく異なるものであり、このような極微量物質の存在形態を可視化することは生体反応・化学反応を設計する

基礎的知見を与えるものである。また、次世代の超高集積化素子を実用化する際にはナノ（１０億分の１メートル）領域の界面の制御技術が鍵となり、物質界面の化学状態を明らかにすることは重要である。さらに、ナノレベルの材料が生体内にどのような影響を与えるかを解析するためには、ナノ材料と生体物質の接触界面の情報を明らかにすることが重要である。

このような技術の開発は、ライフサイエンス分野における分子認識に基づく生命現象の解明、ナノテクノロジー（１０億分の１メートルのレベルの精度を扱う超微細技術）・材料分野における物質間の相互作用の解明、環境分野における生体影響の解明等の他様々な分野において鍵となるものであり、また、新規ナノバイオ（分子のレベルで物質を操るナノテクノロジーと、生命の仕組みを解明するバイオテクノロジーを組み合わせ、医療や環境の中に存在する微量物質の検出などに応用する新しい研究領域）材料の開発、新規集積化素子等の開発に資するものであり、多大な経済効果も期待できるものである。

これまでは、我が国においては、新しい測定機器に関する研究・技術開発を、各研究機関及び個々の研究者・技術者が個別に進めてきたが、これらの研究を行うにあたっては分野横断的に体系的に基盤技術を確立していくことが重要であり、また、本基盤技術の確立のためには、全く新しい発想に基づく研究が適切な規模で長期間実施される必要がある。

以上のことから、我が国においても、本基盤技術の開発について早期に国家的に取り組む必要がある。

４） 目標設定の科学的裏付け

新しい手法の開発を通じた先端的な測定機器を確立する基盤技術の研究開発は、各研究機関又は各研究者・技術者個人において独自に取り組まが行われているものの、未だ不確定な要素が多く、全く新しい発想による体系的な取り組みが必要となる。

本戦略目標は広汎な先端科学技術分野において根本かつ普遍的な価値を有する基盤技術を確立するものであり、国家として戦略的・長期的に取り組む必要がある。また、技術動向に応じて適宜新しい技術を確立していく必要もあるので、次世代を担うべき若手研究者の育成も重要な課題となっている。

以上のことから、複数の技術開発を同時並行的に競争的環境下で進めることにより、最も有用な計測・分析技術を抽出し、世界に先駆けて世界標準となる基盤技術を確立することが重要である。さらに、２０代、３０代の若手研究者・技術者の育成にも重点を置く必要がある。

また、本戦略目標は、新しい手法の開発を通じて新規性・独創性を有する計測・分析基盤技術を確立するものであるが、その開発の推進にあたっては、我が国において実施されている他の先端計測分析技術・機器を開発する事業と情

報交換をしつつ、連携をとりながら推進していくことが重要である。

5) 重点研究期間

平成16年度から平成19年度までの4年間にわたり、新規研究課題の募集を実施する。研究期間は1研究課題につき概ね5年の研究を実施する。(なお、優れた研究成果を挙げている研究課題については、厳正な評価をした上で、研究期間の延長を可能とする。)

2. 研究領域

「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」
(平成16年度発足)

本研究領域は、物質や材料に関する科学技術の発展の原動力である新原理の探索、新現象の発見と解明に資する新たな計測・分析に関する基盤的な技術の創出を目指す研究を対象とするものです。

具体的には、新材料や新規なデバイスの創出、新規な微細加工技術の創出等に資する計測・分析技術、環境中等に含まれる極微量物質の化学的存在形態に関する新規な計測・分析技術等を対象とします。また、ナノスケールでの物質の形態に応じた物性や、表面、界面の化学組成や物性に関する新規な計測・分析技術も対象とします。

さらに、既存の基本原則に基づく技術であっても、計測・分析の速度、感度、精度を飛躍的に向上させる技術あるいはその限界に挑む技術等、新原理の探索や新現象の発見と解明に資する研究や物質科学技術にブレークスルーをもたらすことが期待できる研究を含めます。

3. 研究総括

田中 通義(東北大学 名誉教授)

4. 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	中間評価時 所属・役職	研究課題	研究費*
平成 16年度	米田 忠弘	東北大学 教授	低次元ナノマテリアルと単一分子の振動分光・ESR 検出装置開発	334
	重川 秀美	筑波大学 教授	フェムト秒時間分解走査プローブ顕微鏡技術の開拓と極限計測	317
	下山 雄平	室蘭工業大学 教授	多量子遷移 ESR による巨大分子の構造解析	231
	高田 昌樹	(独)理化学研究所 主任研究員	反応現象の X 線ピンポイント構造計測	438
	高柳 邦夫	東京工業大学 教授	0.5 Å 分解能物質解析電子顕微鏡基盤技術の研究	551
	並河 一道	東京学芸大学 教授	高いコヒーレンスをもつ軟 X 線レーザーを利用した新固体分光法の構築	261
平成 17年度	瀬戸 誠	京都大学 教授	物質科学のための放射光核共鳴散乱法の研究	403
	高橋 隆	東北大学 教授	バルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置の開発	282
	竹腰 清乃理	京都大学 教授	材料開発に資する高感度多核 NMR 法の開発	295
	内藤 康秀	光産業創成大学院大学 准教授	超高分解能高速イメージング質量分析技術（質量顕微鏡）の構築	296
	福谷 克之	東京大学 教授	水素のナノスケール顕微鏡	283
平成 18年度	河田 聡	大阪大学 教授	プラズモニク走査分析顕微鏡	322
	小宮山 進	東京大学 教授	半導体量子構造の探索とテラヘルツ波計測技術開拓	329
	末永 和知	(独)産業技術総合研究所 研究チーム長	ソフトマターの分子・原子レベルでの観察を可能にする低加速高感度電子顕微鏡開発	410
	宝野 和博	(独)物質・材料研究機構 フェロー	レーザー補助広角 3 次元アトムプローブの開発とデバイス解析への応用	272
	水谷 五郎	北陸先端科学技術大学院大学 教授	高機能光和周波顕微鏡の開発	205
総研究費				5,229

* 研究費：平成 20 年度当初計画までの総額

5. 研究総括のねらい

科研費の費目から試験研究という項目が無くなってから久しい。そのために計測・分析用の機器開発のための研究費目がなくなってしまった。機器開発に主眼を置いてきた研究室の数はどんどん減ってゆき、研究者たちの多くは材料科学に転向した。世の中はますます近視眼的になり、目先の材料開発偏重になり、材料開発にかこつけなければ機器の開発ができないような状態が続いてきた。さらに、貿易摩擦による外圧から、外国製の機器を調達せよとの号令がかかり、機器開発の意欲は一層そがれた。その結果、研究に使用する計測・分析機器は日本製から外国製に置き換わっていった。この間、計測・分析手法やそれらの技術の研究の振興を図る施策は殆どなかったと言える。気がついてみれば、材料開発への大きな投資のうち、そこで費やされる費用の大きな部分が外国製の評価・分析機器の購入に当てられるという事態になった。10年以上に及ぶこのような方針のせいで、機器開発に携わってきた大学人の数が大幅に減ってしまったことは憂慮に堪えない。このように研究の方向とそれに伴う投資が極端な方向に行くのは、まだまだ日本の科学・技術に対する考え方が未成熟だからであろう。新原理の探索や新現象の発見と解明には、計測・分析手法とその技術の開発と発展が不可欠である。平成15年度に文部科学省に先端計測分析技術・機器開発に関する検討会が設けられ、我が国発の先端計測分析技術・機器が実現されていく方策等について検討された。ようやく機器開発の重要性が再認識されてきた。平成16年度より独立行政法人科学技術振興機構において「先端計測分析技術・機器開発事業」が開始した。これは3年度にわたるプロジェクト研究で、開発される機器の実用化を目指している。

今回の「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・基盤技術」研究領域は、次世代の産業にもつながるナノスケールの計測・分析や極微量物質の計測・分析などにかかわる基盤技術の開発・発展を促すものである。CRESTは、より将来を見据えた基礎的な研究開発に重点をおき、必ずしもすぐに実用に供するための研究開発を目的としていない。今回の事業は機器開発に携わる研究者にとって干天の慈雨のごときものである。そこで、本研究領域では、これまで、こつこつと努力していながら日の当らなかった、あるいは注目されてこなかった計測・分析技術の研究者を発掘し、これらの研究者を勇気付け、新規なあるいは極めて高度でインパクトのある計測・分析の手法・技術を世界に向かって発信し、今後、世界標準になりうるような計測・分析基盤技術が開発されることを目指した。また、機器や手法の開発に関わる研究者が大学に研究室を確保できるようにすることも目標の一つとした。このことなしには若手研究者、後継者の育成はできないからである。

計測・分析手法の探針としては、電子、光、X線、イオン、原子などがあり、MAS、NMR、ESRなどが含まれるが、必ずしもこれらに限らず広い分野から選考することを目指した。最近の先端的な計測の研究の中には、いろいろな原理を組み合わせた手法が試され百花繚乱の観を呈している分野もあるが、流行の分野にばかりとらわれず、ユニークなもの、古典的なものでもその奥を窮めるようなものにも配慮した。

CRESTは研究のシーズ作りではなく、すでに研究の種があるものに援助することによって、大きく発展させるのが役目と考えられる。今回採択する研究が新規性を狙った単なる提案でなく、すでに確実な種があり、それを発展させることによって、その成果が計測・分析の基盤技術で世界をリードできるものであり、他の方法では得られない知見が得られる技術・装置で、助成することで何かが開けるものを目指した。一方では基礎科学の発展のための研究も大切にしながら、他方では将来広く使われることになるような計測・分析機器の開発、あるいはそれに繋がる課題かどうかとも考慮した。

6. 選考について

1) 選考方針

材料の評価・分析技法には別表1に挙げたような多岐にわたる方法がある。このような手法を参照しながら、提案書の中から、なるべく多くの手法を網羅するように配慮して選考した。研究提案には、きわめて基礎的研究に属するものから実用に近い研究までに亘っていたが、基礎とか実用とかにはとらわれず選考した。また、資金的に豊かな研究者の採択を避け、資金的に恵まれない大学の研究者や、次世代を担う研究者の発掘、育成を主眼に置いて、優れた研究あるいはユニークであると判断される研究を採択することにした。計測・分析の基盤技術という今回の目的を踏まえて、物質・材料開発に主眼をおいた課題の採択は避けた。さらに、提案書の出来の良し悪しだけでなく、出来る限り提案者自身の研究歴、研究に対する姿勢などについても調べて、この研究者には是非やっていただきたいというような申請を探し出したいと考えた。本領域は、そのカバーする分野が広いので、このような人を探すのはそれぞれの専門分野の研究者人脈に精通していることが必要なので、領域アドバイザーの先生方の専門分野における知識をお借りした。開発にかかる費用についてはそれが適正かどうか、今回提案されている研究費の規模にあっているかどうか（少ない場合も多い場合も）を領域アドバイザーの助言を得て十分検討した。本領域はカバーする分野が非常に広いので、違う分野の申請に優劣をどうつけるかは難しい

問題であったが、あらかじめ採択する分野を想定していたことが、この困難を回避するのに十分に役立った。

2) 選考結果

1 年目は応募数 122 件の中から 6 チーム採択した。米田チームの研究は単一スピンを走査トンネル顕微鏡で検出するという野心的なもので、信号の検出限界に挑むきわめて基礎的な研究である。重川チームの研究はフェムト秒レーザーと走査トンネル顕微鏡を組み合わせ、材料におこる高速現象を原子スケールで観察する手法の開発で、時代の研究の方向に沿ったものである。下山チームの研究は、ESR の高感度性を生かして、NMR では得られない長距離の分子間の距離情報を得ようとするものである。高田チームの研究は、DVD のピコ秒での光記録過程等を構造的に解明する装置を開発し、光による消去過程を物理的に明らかにする研究で、実用研究に資する装置開発である。高柳チームの研究は、加速電圧 300kV で世界最高分解能 0.5Å を得ることを目指す装置開発で、アメリカの政府支援による TEAM プロジェクトと対抗しようとするものである。並河チームの研究は、物質の揺らぎや励起状態のピコ秒の時間相関をコヒーレント X 線で解明するための装置開発で、次世代の自由電子レーザーによる研究に先駆けるものである。

2 年目は応募数 69 件の中から 5 チームを採択した。瀬戸チームの研究は、連続光源である放射光を使って原子核の励起を利用して物質の状態を解明しようとするもので、メスバウアー法を Fe 以外の異なる核種でも行えるようにしようとするものである。高橋チームの研究は、光電子分光装置用の新光源を開発して、光電子分光法をバルク敏感型にし、合わせて物質のスピン電子状態を解明する研究である。バルクの電子状態を検出できるようにすることは光電子分光研究者のひとつの目標であり、スピン電子状態の解明は高温超電導体等の研究に有力な方法である。竹腰チームの研究は、固体材料の研究のための高感度 NMR 法とそのプローブを開発するもので、従来、タンパク質の構造研究に向けた高周波化とは違う NMR 法の開発である。内藤チームの研究は、走査型でなく投影型の質量分析カメラを開発し、物質分布を迅速に取得することを目指すもので、成功すれば実用的価値は高い研究である。福谷チームの研究は、固体の脆性などに重要な役割を果たす固体中の水素の 3 次元分布を、核反応を通してみようとするものである。この研究は、事前に想定した研究分野には無かったが、きわめて重要かつユニークな研究なので採択した。

3 年目は 34 件の中から 5 チーム採択した。採択最終年度に当たっては応募数が前 2 年度よりかなり減少した。前 2 年度に比べ、既に当該分野で実績のある

研究者も含まれる採択となった。河田チームの研究は、物理的荷重による物質の状態の変化をプラズモニク走査顕微鏡で観察しようとするものである。小宮山チームの研究は、物質が発する超微弱なテラヘルツ光を計測する検出器の開発である。従来のテラヘルツ領域の研究はテラヘルツ光源の研究が多いが、本研究はテラヘルツ光のパッシブな検出を考えるとところがユニークな発想である。末永チームの研究は、高分子材料などの軟物質の観察を可能にする低加速電圧の電子顕微鏡を開発し、それに必要な色収差補正技術を開発しようとするものである。色収差補正技術はアメリカの TEAM プロジェクトでも開発を進めている技術で、早急な独自技術の開発が待望されている。宝野チームの研究は、材料・ナノデバイスのナノ領域の原子分布を 3 次元的に観察しようとするもので、従来は金属でしか成功していなかったこの手法を、レーザーアシストすることにより、半導体や絶縁体にまで、その応用範囲を広げようとするものである。水谷チームの研究は、二つの異なる周波数の光を物質に照射し、発光する微弱な和周波光を観察して、特にキラルな状態を選択的に観察しようとするものである。

3 年間にわたって採択された課題はかなり広い分野にわたっているが、走査顕微鏡に関する提案件数はきわめて多く、優秀な研究も多かったことから、この分野から 3 件採択した。もちろんそれらの研究内容には全く重複はない。電子顕微鏡に関しては、その装置作製は日本のお家芸といわれていたが、近年、外国メーカー特に FEI 社の成長が著しく、アメリカの TEAM プロジェクトを背景にしてさらなる世界制覇に乗り出している。緊急で根幹になる技術である球面補正および色収差補正技術を含めた電子顕微鏡の開発研究を 2 件採択した。その他の分野では採択を各 1 件にとどめた。想定外の研究課題として、上に述べた課題“水素の 3 次元検出の顕微鏡”を採択した。

7. 領域アドバイザーについて

氏名	現在の所属	役職	任期
雨宮 慶幸	東京大学大学院新領域創成科学研究科	教授	平成 17 年 6 月～
市ノ川 竹男	早稲田大学	名誉教授	平成 16 年 7 月～
一宮 彪彦	日本女子大学理学部／名古屋大学	教授／名誉教授	平成 17 年 6 月～
大島 忠平	早稲田大学理工学術院	教授	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
交久瀬 五雄	大阪大学	名誉教授	平成 16 年 7 月～
茅 幸二	(独) 理化学研究所次世代スーパーコンピュータ開発実施本部	副本部長	平成 16 年 7 月～
黒田 孝二	大日本印刷(株) 研究開発センター	理事・主席研究員	平成 16 年 7 月～
巨瀬 勝美	筑波大学大学院数理物質科学研究科	教授	平成 16 年 7 月～
坂田 誠	名古屋大学	名誉教授	平成 18 年 4 月～
末元 徹	東京大学物性研究所	教授	平成 16 年 7 月～
寺部 茂	兵庫県立大学	名誉教授	平成 17 年 7 月～
入戸野 修	福島大学理工学群／同大学共生システム理工学類	学群長／学類長	平成 16 年 7 月～
橋詰 富博	(株) 日立製作所基礎研究所	主任研究員	平成 16 年 7 月～
平山 祥郎	東北大学大学院理学研究科	教授	平成 16 年 7 月～
山内 淳	京都大学／(有) ミネルバライトラボマイクロ波応用計測部	名誉教授／部長	平成 16 年 7 月～

本研究領域は分野横断型の領域であり物質現象を扱うすべての分野を含んでいる。このような広い領域の計測、分析技術にすべて精通している方は居られないので、あらかじめ研究提案の分野を想定し、分野ごとに日本を代表する研究者で適切なアドバイスをしていただけるような方を領域アドバイザーとした。そのために領域アドバイザーの数は、他領域よりも多くなっている。本領域は装置や技術の開発を目的としているので、純粋な理論家の選定は避けた。

領域全体の運営に関する総合的なアドバイスをしていただける方として理研の茅幸二先生をお願いした。また、JST からの要請により、さがけ「構造機能と計測分析」領域の寺部茂研究総括には、さがけ領域との情報交換のために領域アドバイザーとして参加していただいた。

提案が予想される研究分野について、研究総括および JST の双方から領域アドバイザーの候補者を出し、双方で協議し選定した。結果として 6 割程度の領域アドバイザーを研究総括、残りの 4 割程度の領域アドバイザーを JST から提案のあった候補者から選んだ。開発される装置は将来民間で使われる可能性があるので、民間企業からの視点が必要と考え、領域アドバイザーを民間からも選出した。課題採択後、不足している分野を補強するために若干名の領域アドバイザーの補充を行った。大島忠平先生には補強のために領域アドバイザーをお願いしたが、健康上の理由から退任を申し出られたので、ご無理と判断し、途中退任いただいた。全領域アドバイザーの氏名は上の表に記した通りである。

8. 研究領域の運営について

(領域運営方針、研究指導、研究費の配分について)

CREST はトップダウン型研究ではあっても、各テーマ自体は研究代表者の提案によるものであり、研究者の自発的な発想によって展開されるべきものであり、研究者の自発性を損なわないような管理、指導を念頭に置いている。

研究のより良い発展を図るために、各チームにつき主担当 1 名、副担当 2 名の領域アドバイザーを割り当て、年に 1 度サイトビジットを行っている。サイトビジットでは各研究担当者から研究発表を求め、建設中の装置を見学し、研究が適正に行われているかをチェックしている。研究発表の直後に、研究の進捗状況を領域アドバイザーで審議し、そのあと研究者を交えて、評価と今後の研究方向についてアドバイスを行っている。研究代表者には発表のパワーポイント資料の提出を求め、アドバイザーには後日サイトビジットレポートを提出していただき、JST 担当者にはアドバイザーによる審議内容及び研究者を交え

た討論のメモを作成して頂き、現状の把握と次回以降への資料としている。これらの資料は研究総括、アドバイザーおよび JST で共有している。進捗状況が思わしくないチームに対しては、さらに頻繁なサイトビジットを行い、また定期的な進捗状況の報告を課すなど、指導を強めている。

年に1度、各年度に採択した全課題の研究者を集め進捗報告会を行っている。各研究チームの進捗状況を全員の領域アドバイザーの前で報告していただき討論を行い、直後に全領域アドバイザーによる討論、評価を行い、今後のアドバイスとして纏めている。それらの内容は記録している。事後、主担当アドバイザーから研究代表者に、上記の討論を踏まえたアドバイスを与えている。主、副担当アドバイザーに、所定の様式による評価以外に、担当研究チームについて所見を書いていたっている。進捗報告会の後に交流会を行い、アドバイザーを含めた研究者相互の自由な意見交換及び討論の場を提供している。サイトビジット及び進捗報告会は研究チームに適度な緊張感と研究の状況の整理の機会を与え、研究のより良い進展に効果を発揮している。研究領域の運営において、下山チームの課題中止や高橋チームの研究期間延長など、重要な方向性の決定については、事前に担当の領域アドバイザーとサイトビジット等で研究進捗状況を十分把握し、また研究チームとも十分な意見交換を行った上で、全アドバイザーの承認を得て行っている。

研究の進捗状況を踏まえて、追加資金の必要性が生じた場合、研究総括がアドバイザーおよび JST 担当者と協議し、最終的に研究総括が判断して、効果的な追加資金の投資、配分を行っている。十分な成果が出はじめているチームには、研究を一層加速させるために追加の予算措置を講じている。研究者からの要求をそのまま受け入れるような予算措置は全く講じていない。

領域内の連携については、他の研究領域と違い研究分野が非常に違っており、相互に役立つようなシンポジウム等を開くことは必ずしも容易ではなく、無理な会議の設定は行っていない。しかし、領域全体で会議を持つことの意義を認識し、各研究チームの多くの研究者が共通の関心を持てるように、機器開発、技術開発という点に特化して、互いの研究成果や問題点を披瀝しあうことで、研究者相互の情報交換と交流を図るワークショップを平成 21 年 4 月 25 日に開催することとしている。また研究成果の公開シンポジウム等については、この領域の成果が極めて専門的かつ基礎的であることから、JST とも意見交換し、一般向けの成果の公開は行っていない。研究を途中中止にしたパルス ESR については関係学会のシンポジウムとしてその成果を報告した。しかしながら、当領域の成果は、分析機器メーカーには有用な情報を提供できると考えられるので、分析工業会主催の“分析展”での成果発表が有効と考え、平成 21 年度に展示およびシンポジウムを企画している。

9. 研究の経過と所見

多くの研究チームで、世界をリードし、世界のトップレベルの研究成果が得られている。ただ18年度採択チームについては、十分な研究成果を問うのは時期尚早である。以下に各チームの現在までの研究成果と所見について述べる。

1) 米田チーム

スピントロニクス、量子コンピュータの基礎になると期待される単一のスピン・単一分子の振動を検出・制御する電子スピン共鳴－走査トンネル顕微鏡（STM－ESR）装置を開発することで、原子分子単位の超微細分析を行うことを目的とするプロジェクトである。STM－ESR 信号検知処理技術（東北大）、RF 信号処理が最適化された STM ヘッド（理研）、分子追跡システム（東大）を統合して、トンネル電流に反映される Larmor 歳差運動の周期を高精度で検知することで単一スピンの存在とその周波数の変化を精度よく検知する低温超高真空対応 STM－ESR システムを東北大に構築した。

この装置を用いて、孤立したスピン検出に成功したと考えられるデータを取得している。シリコン表面の微量酸素吸着において、酸素吸着に起因する ESR 信号が吸着の種類によって異なることを世界で始めて明らかにしつつあり、インパクトの高い成果として発表を準備中である。単一スピンの検出はプローブ顕微鏡を用いたものに限ってもいくつかの手法でしのぎを削っているが、本プロジェクトで開発している Larmor 歳差運動を検出する手法は有力な手法として世界的に認識されつつあるようである。

また、単一分子の振動分光においては世界最高の感度と分解能をもったスペクトルが得られ、アルカンチオールについての測定結果が *Physical Review Letters* 誌に掲載され、新聞発表を行った。さらに高性能 STM 開発の副産物として質の高い STM 像が得られるようになり、電子干渉についての成果が *Physical Review Letters* 誌に掲載された。

2) 重川チーム

原子スケールの空間分解能を有するが時間分解能はミリ秒程度が限界であった走査トンネル顕微鏡（STM）とフェムト秒までの時間分解能を有する光ポンプ・プローブ法を組み合わせ、時間分解能と空間分解能をともに有する測定装置を実現しようとするプロジェクトである。

走査トンネル顕微鏡の発明以来、ベル研究所や IBM をはじめとし、多くの研究者が、STM に超短パルス光を組み合わせることで、時間・空間両領域で極限的な分解能を持つ顕微鏡を開発する試みに取り組んできたが、熱膨張や変位電流の問題など解決すべき障壁は高く実現は不可能であった。二つのパルスの遅

延時間を変調する方式で熱による影響を除去し、さらに新しい光パルスピックアップ法を導入することで広い時間範囲での測定を可能にした。この方法については特許（外国特許を含む）を出願しているが、本装置のみならずレーザーパルスを用いるすべての測定に応用可能なものであり、汎用性の高い特許になると思われる。

この装置を用いて GaAs 表面の単原子ステップにより近傍のキャリア寿命が短くなる現象を捉えることに成功し、ナノ秒の寿命の変化を数ナノメートルの空間分解能で測定した。さらに、低温成長 GaAs を用いピコ秒のキャリア寿命が測定できることを確認した。これらの実験は既存の装置では測定できなかった時間分解能と空間分解能が新たに作製した装置で達成できることを示したものであるが、現在、さらに優れた時間分解能と空間分解能を実証すべく実験を進めている。

3) 下山チーム

パルス ESR 分光法を使用して、多量子遷移(MQC)を誘起し、スピン間の双極子相互作用の応答を観測して巨大分子（たんぱく質）の距離情報を得るプロジェクトである。感度向上のため、ESR の使用マイクロ波周波数を Ku バンド（17.5GHz）に設定して装置開発を行った。MQC を有効に観測するには広帯域励起が必要なので、非常に狭いパルス幅のマイクロ波パルスと共振器に対して非常に高いマイクロ波磁界が不可欠である。Ku バンドパルス ESR の性能として、1) 2ns パルス幅、2) マイクロ波磁場 $B_1 \sim 5\text{mT}$ 、3) 帯域 $> \pm 120\text{MHz}$ を達成し、4) 位相サイクルの精度の改良をおこなった。加えて高速データ処理に関する開発を行った。X-バンド（9GHz）との感度比較において SN 比 5.3 に達し、高速化により積算所要時間は半減した。

この装置を用いて、多量子遷移のうち 2 量子遷移 (DQC) エコーを観測し、そのフーリエ変換から電子スピン間の距離を求めた。27.5 Å の標準試料について変調振幅と距離誤差が改善されたことを確認し、もう 1 つの距離測定法である 2 重共鳴 (PELDOR あるいは DEER) よりも精度がよいことを示すことができた。応用研究ではトロポニン C たんぱく質のスピンラベル体（距離 4~7nm）での DQC エコーの測定に成功した。また試料自身による緩和時間のために少し精度は悪いが、ATPase では 56 Å の距離観測を記録し、目標とした 50 Å 以上の距離測定に成功した。

上記の広帯域励起の開発については専門誌である Journal Magnetic Resonance 191 (2008) 1-8 に、計測の高速化の開発については Review of Scientific Instruments 79 (2008) 1-8 に掲載された。また 2008 年の電子スピン学会(SEST2008)においてミニシンポジウムを開催し、成果発表を行った。

中間評価において、当初予定していた Q バンド(35GHz) - MQC 装置の開発は残された研究期間で着手し期待される研究成果を得ることが困難であると判断されたこと等から、研究を Ku バンドの範囲に留め、H19 年 9 月末で研究終了とした。

パルス ESR は軍需技術との関連が深くアメリカ、ロシアが先進国であり、日本のメーカーでの開発は困難を伴ってきた。今回の産学協同での研究開発により、大学における数少ないパルス ESR 技術をメーカーに移転できた。本研究で開発した Ku バンド(17.5GHz)-ESR-DQC 装置開発は完成の見通しが立ち、実用化が期待できる。今後は、多くのサンプルを測定し、巨大分子への応用研究あるいは先端機能性材料への展開を図り、開発装置の有用性を高めていくことが期待される。研究終了後も、研究者および日本電子(株)へ、その後の状況についての追跡調査を行っている。特に日本電子(株)からは、国際会議などでの日本電子(株)のパルス ESR の発表が高く評価され、日本電子(株)のこの分野でのステイタスの向上と関連製品の販売増加につながっているとの報告を受けている。

4) 高田チーム

SPring-8 の高輝度放射光 X 線光源を用いた時間分割 (ピコ秒)・空間分割 (サブミクロン) のピンポイント構造計測システムを開発し、それを DVD 材料の光記録の構造ダイナミクスの解明等に応用するプロジェクトである。

X 線パルスとレーザーパルスを同期するシステムを開発し、任意の時間遅延時間において $40\pm 8\text{ps}$ の精度を実現し、X 線ビームサイズは実験目的によってサブミクロンと数ミクロンを選択でき、いずれも世界最高レベルの X 線強度を実現した。この装置を用いて、DVD 材料の光記録の原理である、高速 (ナノ秒) のアモルファス→結晶相変化現象(消去過程に相当)の時分割実験に成功し、速い相変化速度と関連がある新しい結晶化過程を見出した。成果は欧文雑誌 *Applied Physics Express* に 2008 年発表し、新聞報道も行われた。この高度な計測技術は、1) 今回開発し製品化された時分割実験の精度を数ピコで制御できる高精度パルス遅延器 (特許出願中)、2) 今回作製した効率のよい X 線集光のためのフレネルゾーンプレート、および 3) DVD に関する松下電器産業 (株) (現パナソニック(株))との密接な連携研究、によって実現された。

さらに、このシステムのシアノ錯体の光誘起現象への応用も確実に進めつつある。また、電気パルスと X 線パルスを高精度で同期するシステムの開発も進め、本計測システムをより広範な対象に応用できるような取り組みを進めている。達成度は世界的にも高いレベルにある。

5) 高柳チーム

結像系と照射系の対物レンズの球面収差を補正する機能を装備した $0.5\text{\AA}$ の空間分解能を持つ TEM/STEM の両機能を同時に備えた新しいタイプの加速電圧 300kV の透過型電子顕微鏡を試作するプロジェクトである。

非対称型 12 極子収差補正装置を独自に考案し、Rose-Haider らの対称型より高性能な収差補正法を開発した。非対称補正装置と 300kV 加速の冷陰極型電界放射電子銃を組み込んだ電子顕微鏡(TEM-STEM)を開発した。STEM 像の種々の収差係数を秒単位で高精度に計測する方法 (SRAM 法) を考案し、収差自動制御システムを構築した (特許申請中)。

冷陰極電界放射型電子銃を開発した。試作ではあるが、エミッション電流は長時間ほぼ一定に保たれる。8時間連続観察におけるプローブ電流値変化は10%であるので、フラッシング無しで連続実験が行える。

この装置を用いて、STEM 像において、Si、GaN、Ge 試料について、それぞれ、 78pm 、 63pm 、 47 pm だけ分離した原子列の対を分離して観察した。このように 50pm 分解能を達成し、空間分解能では世界トップの高い性能を出している。シリコン原子を薄い炭素支持膜上分散させた試料を作製し、STEM 観察すると 50pm サイズの明るい点が見られた。

TEM モードでの収差補正は、通常行われる Zemlin-Tableau による収差計測・補正システムを採用した。Young-Fringe テストにより、 50pm の情報まで伝達していることを確認した。

今後、軽元素を含む物質や炭素系物質解析のために、冷陰極電界放射型電子銃の性能のさらなる向上が望まれる。この分野での熾烈な技術競争の中で、日本のレベルを本研究によって世界のトップクラスに導いた意義は大きい。

日本電子(株)は米国ミシガン大学および英国シェフィールド大学から、本研究で開発した電子顕微鏡を受注した。

6) 並河チーム

ダブルターゲット方式プラズマ X 線レーザーの他に比類のない高いコヒーレンスと短パルス性を利用して、他の光源では実現できない固体の軟 X 線分光法を実現しようとするプロジェクトである。

その第一の課題は、軟 X 線スペckルによる極めて短い ($10\text{ps}\sim 2\text{ns}$) 緩和時間をもつナノスケールの動的ゆらぎの研究であり、第二の課題は、軟 X 線の非線形吸収によって原子内 $2p$ 殻に 2 個のホール形成し、2 ホールのトリプレット状態とシングレット状態に対する $3d$ 電子の遷移を見ることによって、電子相関に関する知見を得ようとするものである。

レーザープラズマからの軟 X 線 (波長 13.9nm) パルスをマイケルソン干渉計

によってダブルパルス化して、試料に照射し、第 1 パルスと第 2 パルスの散乱光を、ストリークカメラを用いて時間分離するというユニークな方法による、スペックルの強度相関分光法を構築し、その装置を作製した。

この装置を用いて、 BaTiO_3 の相転移の前駆現象として現れるナノスケール分極クラスターの緩和時間 ($\sim 80\text{ps}$) の測定に成功し、強誘電相転移点 T_c と異なる温度で臨界緩和が起る現象を見出した。相関時間の温度依存性を詳しく調べた結果、ドメインの分極の大きさは転移点より 4K 上でピークを迎えてそれより高温で緩やかに減少するのに対して、相関時間もまた転移点より 4K 上の温度でピークを迎えるが高温側で急速に短くなるという非常に興味深い結果を得た。この成果は、関係の国際会議で招待講演となった。この方法を他の強誘電体試料等へ応用を試みている。

第二の課題については、2 ホール分光実験装置を製作し、光源強度の増強による S/N 比の改善に努力中である。

7) 瀬戸チーム

放射光を利用した核共鳴散乱法の新しい分光法を開発するプロジェクトである。具体的には以下の 4 つのテーマを展開している。その成果としては、

1. 高エネルギー核種における核共鳴散乱・吸収分光法の開発研究では、高エネルギー・短寿命励起状態を有する核種の 1 つとして Ge-73 の核共鳴吸収スペクトルの観測に成功した。それにより、これまで主として低エネルギー核種に限定されていた核共鳴散乱測定が 80keV 程度の高エネルギー核種にまで可能となり、対象となる核種が飛躍的に増えた。
2. neV 超高分解能 X 線分光法の開発研究では、neV オーダーの超単色 X 線を生成し、4 つの検出器を配置して異なる 4 つの運動量遷移を同時測定可能な時間領域測定法を開発した。これを用いてイオン液体についての予備的な研究を行い、過冷却状態におけるイオンのスローダイナミクスを反映した準弾性散乱スペクトルの温度変化を観測することに成功した。この方法では、他の方法では測定不可能な大きい運動量遷移を測定可能にしている。
3. 顕微分光法のための超単色 X 線の生成と利用に関する開発研究では、高出力核ブロッグモノクロメーターを開発した。これにより、超高压下でのメスバウアー分光が可能になり、超高压下における FeH の強磁性—常磁性転移に関するメスバウアースペクトルの観測に成功した。
4. 多核種核共鳴非弾性散乱法の開発研究では、鉄系高温超伝導体の Fe - フォノン状態密度を測定し、強い電子・格子相互作用が存在しないことから超伝導が主としてフォノンによるものではないとの考察を行っている。

これらの成果発表として国際学会・ワークショップなどにおいて招待講演を

行った。

8) 高橋チーム

キセノンプラズマ放電管を開発して、バルク敏感の高分解能の光電子分光装置を開発し、さらに、その光電子をスピンにまで分解して計測しようとするプロジェクトである。新型のキセノンプラズマ放電管を4号機まで作製し、8-10eVの範囲で非常に高強度、長寿命(1000時間以上)の発光を実現した。超高分解能光電子分光装置については、当初の分解能の目標である1meVを超える900 μ eVを到達した。角度分解光電子検出では、一回で測定できる角度範囲は $\pm 7^\circ$ で、ブリューアンゾンの1/3程度カバーできるシステムを完成した。この装置を用いて、YbおよびCoS_{2-x}Se_x試料についてバルク敏感性を検証した。

キセノン放電管の開発を中心とするこれらの成果は、Nature Physics誌をはじめとする多数の論文、および国内外会議の招待講演において発表された。現在、米国やドイツなど世界各地からの研究者の見学や問い合わせが相次いでおり、世界的に極めて高い評価を得ている。また、国内の新聞にも報道された。

モット検出器については、市販品では効率が低いと判断して、散乱電子の取り込み角度を増やした新型モット検出器を設計製作している(旧型:30°、新型42°)。試作した偏向器の透過効率はほぼ1に近いことを確認しているが、設計値の25kVでは放電するため対策中である。今後、超高分解能光電子分光装置に関して、応用上インパクトのある物質についてのバルクのバンド分散の研究を行う計画である。

9) 竹腰チーム

微量試料を含む固体NMRの高感度化、および四極子核を含む固体NMRの多核化を目指すプロジェクトである。第一の研究目標は、測定サンプルは温度可変とし、検出コイルを低温に冷却して、検出コイルから発生する熱雑音を低減させることにより、固体高分解能NMRにおける信号対雑音比を向上させ、本計測手法を、これまで計測が困難であった化合物などへと計測対象を広げることである。これに対し、本チームは、サファイアのコイルボビンを使用し、低温で使用できるデュプレクサ(送受信切替器:特許出願中)を新規開発して、検出コイル、デュプレクサ、プリアンプのすべてを冷却したことにより、市販のプロープの約3倍のSN比を達成し、論文発表を行った。

第二の研究目標は、直径が1mm以下のマイクロコイルを送受信コイルとし、試料と共に高速回転することにより、微量の試料においても、高い信号対雑音比の固体高分解能NMR信号を得ることである。これに対し、本チームは、マイクロコイルMASプロープの開発および改良を行った。マイクロコイルが強い

高周波磁場を発生できることに着目して、強力な高周波磁場を自在に操ることの出来る NMR 分光計を自作した（論文発表 2 件）。これにより既存の分光計では実施困難であった複雑な多重パルス高精度良く実現することに成功した。さらに、微小コイルで実現する極めて強い高周波磁場を利用した四極子核の高分解能測定法の研究を行っている。

国際会議での招待講演があり、国内特許も出願しており、十分な成果が上がっている。

10) 内藤チーム

位置分解能 $0.1\mu\text{m}$ 、質量分解能($m/\Delta m$) 10000、測定時間 10 分以内の機能を持つ投影型によるイメージング質量分析装置の実用化を目指すプロジェクトである。現在、静電レンズ光学系を装備した MALDI イオン源、多重周回飛行時間型質量分析計(MULTUM)、蛍光面付き MCP と CCD カメラによる検出器によるシステムを完成し、評価用の微小ドット模様サンプルを用いて、MULTUM で 10 周回(総飛行距離 14m)させた像を $7.6\mu\text{m}$ の分解能で観測することに成功している。この像を観察したのと全く同じ条件で質量分解能 2300 が確認されている。また、装置内のイオン軌道を正確に計算するソフトを開発し、装置設計や最適な実験条件の探索に活用している。他方式との比較においては、走査型では位置分解能 $15\mu\text{m}$ ・質量分解能 20000・測定時間 17 時間、また投影型では位置分解能 $4\mu\text{m}$ ・質量分解能 500・測定時間 1 分という機能の装置が開発されているが、本研究で開発されている装置はこれらの装置と比べても十分な競争力をもっている。

現在までは、検出器に蛍光面付き MCP を用いた実験が行われているが、新しい検出器である Delay Line Detector (DLD)の単体での評価実験が進んでおり、これをメインシステムへ組み込むことで飛来するイオンの位置と質量を同時に高分解能で観測することを計画している。今後、像拡大率の高いリニア部分の光学系の開発及び装置の組み付け方法の改良によるアラインメントの向上を行うことで、目標性能の達成に努力している。

産業界からは現時点で達成された性能でも製品化や利用研究を望むという評価がある。

11) 福谷チーム

^{15}N イオンと水素原子との核共鳴反応を利用して、固体中の水素の 3 次元分布を可視化する水素顕微鏡を開発するプロジェクトである。 ^{15}N イオン源として、東京大学工学系研究科タンデム加速器施設に新たにマイクロビーム用ビームラインを建設した。ビームをマイクロビーム化して面内分解能を高めるために、

短焦点レンズ系とガラスキャピラリーを用いた光学系を構築し、10 μ m 径のビームを実現し、 ± 1.5 mrad の極めて小さい角度での収束に成功している。¹⁵Nビームのガラスキャピラリーを用いた収束法は本研究で始めて開発されたものである。このビームを用いて固体中に埋め込まれたイットリウム金属細線中に吸収された水素の空間分布を計測することに成功した。またキャピラリーの低ガスコンダクタンスを利用して、80mbar のガス雰囲気下で、深さ分解能 20nm、面内分解能 25 μ m で水素の空間分布計測に成功した。これらの値は世界最高レベルの分解能を実証した。さらに Pd 膜に水素が透過する様子のその場観察を行った。1mm 径のマクロビームで測定すると連続的に見えた相転移が、面内位置分解を上げると、場所ごとに異なるタイミングで相転移していることを発見した。

水素の局所分析が可能な方法として弾性反跳検出法があるが、本手法はそれに比べて、深さ分解能とガス雰囲気測定への適応性という点で格段に優れている。中性子回折や NMR による方法は、感度が低く局所分析は困難である。

今後の問題として、さらに効率の良いキャピラリーの開発と大気中での固体中の水素分布を測定可能にすることである。

国際会議での本研究の招待講演数もあり、国際的にも評価されている。

1 2) 河田チーム

プラズモニック走査分析顕微鏡の性能を最大限に引き出し、試料に圧力を印加し、その歪みを光学応答の変化としナノイメージングするプロジェクトである。試料分子にピコニュートンレベルの力を印加したときの分子の歪みを光学応答の変化として検出することに成功し、5nm の空間分解能の光学イメージングを世界で初めて実現した。金属ナノワイヤを扇形状に束ねたナノレンズによるナノイメージング法の開発でも世界の最先端を走る研究を進めている。新たに計画に加わったもので、プラズモニック・プローブ（金属ナノ構造）を用いた、細胞などを対象とする 3 次元的ナノ顕微イメージングも画期的な提案であり、金属ナノ微粒子が生細胞内に取り込まれて細胞内を移動していく様子の観察にすでに成功している。光学顕微鏡の国際会議（FOM2008）での JST スポンサーセッションの開催、80 件を超える招待講演、プラズモニクスに関する本の執筆と成果のアピールをエネルギーギッシュに進めている点は特筆に値する。論文発表も活発で Nature Photonics や PRL などの一流誌へ論文を多数発表している。

1 3) 小宮山チーム

半導体量子構造を利用した新たなテラヘルツ計測技術を創出するプロジェクトである。具体的には、従来型検出器に比べて桁違いの高感度を有する検出器

ラインアップを実現し、そのうち数種類をアレイ検出器に発展させ、テラヘルツ顕微鏡を開拓する。

赤外線によって作られたキャリアを量子井戸に蓄積し、その電荷を、近傍を通る電流の変化として検出するという新しい原理（電荷敏感型赤外トランジスタ方式）により、従来のあらゆる赤外線検出器に比べて、感度だけでなく、動作温度、異なる波長の設計可能性など、多くの点で優れた特性を持つ検出器を開発した。当初、電荷の飽和のためにダイナミックレンジが小さいという欠点があったが、本プロジェクトにより開発した電荷リセット方式により、ダイナミックレンジを 10^6 まで高めることに成功した。

この結果は、**IEEE transactions on electron devices** に掲載された。これにより、走査型非開口光学顕微鏡の実現に近づいたと言える。赤外線検出素子のアレイ化の作業には、パターンニングの歩留まりといった技術的な問題を解決する必要があるが、原理的には非常に高い性能が期待でき、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) との連携により天体観測用として赤外線天文衛星 (SPICA) に搭載する可能性も検討されている。

以上の成果の一部は特許に出願している。また日経産業新聞 (本年 5 月 14 日) で紹介されたほか、多数の国際会議から招待講演の依頼を受けている。

1 4) 末永チーム

30kV から 60kV の低加速電圧で球面収差と色収差を同時に補正できる TEM/STEM の機能を備えた透過電子顕微鏡を開発し、ソフトマテリアルの分子構造や挙動を観察することを目的とするプロジェクトである。

新設計による球面収差と色収差を補正できるシステム系を設計・開発中である。平成 20 年 11 月には球面収差を装備した電子顕微鏡が作製され、現在、性能テストを行っている。平成 21 年夏には色収差補正器も搭載した電子顕微鏡を完成する予定になっている。これらの装置の完成によって低元素からなるソフトな分子構造がどこまで観察できるようになるかが興味の対象である。予備実験として 120kV、200kV の加速電圧でカーボン・ナノチューブの原子の配列やチューブ内に閉じ込めたレチナール分子の挙動に関する研究がある。フラーレン単分子の構造を原子レベルで決定しその配向を決定した最初の例として、**Nature** 誌の **Research Highlight** でも紹介され、ヨーロッパ顕微鏡学会やゴードンカンファレンスなどの国際会議において招待講演として発表を行った。

1 5) 宝野チーム

フェムト秒パルスレーザーによる蒸発を用いた広角 3 次元アトムプローブ (3DAP) 法を開発し、従来以上の広領域の分析を可能にするとともに、これま

で困難であった難分析金属、半導体、セラミックスへの応用を目指すプロジェクトである。すなわち、3次元アトムプローブ(3DAP)では導電性針状が必要で、原理上の制約から、半導体、絶縁体、それらの構築物であるデバイスの3次元原子レベル解析を行うことができなかった。この制約を克服するために、フェムト秒パルスレーザーにより高電気抵抗試料の広範な領域から原子分布表示の行えるレーザー補助広角3DAPを開発した。この装置は、微細加工法による特定領域試料作製装置を装備している。それを用いた応用研究として、難分析材料である磁性材料の結晶粒界組成を初めて定量的に解析した。また高密度磁気記録媒体の分析において、従来解析が困難であった絶縁体層の組成分析から、一部の元素の界面への偏析を明らかにし、高密度磁気記録媒体の開発への指針を与えた。それらの成果は国際誌に発表され、国際的に高く評価されている。

16) 水谷チーム

光和周波発生現象を用いて高機能化した光学顕微鏡を開発し、光和周波顕微鏡の特徴である物質のキラルな部分を選択的に観察することを目的とするプロジェクトである。具体的には、顕微鏡の高感度化と自動光掃引技術、および光第二高調波像の観測と組み合わせた表面電子状態と振動状態の同時観察装置、および超高真空槽中の試料が観察できる装置を開発した。赤外光源の出力増強、集光光学系の改良、自動光学パス合わせ機構の導入により、目標の感度増強200倍を越える270倍を達成した。この装置を用いて、シリコン表面の水素終端を赤外光によりリング状に解離させた部分をつくり観察した結果、 $2067\sim 2127\text{cm}^{-1}$ のSi-H振動領域で赤外周波数を変化させると、パターンがさまざまに変化することから、赤外光照射によりダイハイドライド SiH_2 が生成されることを確認した。このことから、分子選択的な観測が可能であることが実証された。

この結果はSurface Scienceに投稿中である。また、共焦点光学系と組み合わせた共焦点光和周波顕微鏡を開発し、横方向および深さ方向で約 $10\mu\text{m}$ の分解能を確認することができた。この結果はphysica status solidi誌に受理された。今後、光学系の改造により、1000倍の感度増強の作業が予定通り進行すれば実用レベルの装置が完成すると期待される。

10. 総合所見

平成16、17年度採択の課題については、すでに中間評価を終わり成果の見通しがついてきている。現時点で特筆すべき成果として以下のものを挙げたい。

高柳チームではSTEM像で世界最高の分解能 $0.5\text{\AA}$ を凌ぐ電子顕微鏡が開発

され、製作会社の JEOL は 2 台の受注を受けたことである。昨今、FEI 社におされぎみの日本の電子顕微鏡のフラッグシップ機の失地回復につながると確信している。高田チームは SPring-8 に、X 線パルスとレーザーパルスを同期するシステムを開発し、任意の遅延時間において $40\pm 8\text{ps}$ の精度を実現し、サブミクロンの X 線ビームサイズで世界最高レベルの X 線強度を実現した。この装置を用いて、DVD 材料の光記録の原理である、高速（ナノ秒）のアモルファス→結晶相変化現象の時分割実験に成功した。この手法は今後多くのユーザーに解放されるはずである。高橋チームでは強力でしかも長寿命(>1000hr)のキセノン光源が開発され、バルク敏感な光電子分光法が実現された。さらにスピン分解に挑戦しており、基礎的な研究として高く評価される。竹腰チームでは固体研究用の NMR プローブで、送受信切替器（特許出願中）を新規に開発して市販品の 3 倍の SN 比の NMR プローブを開発した。このプローブは今後実用に供されてゆくものと期待される。また、マイクロコイル MAS プローブの開発および改良を行い、マイクロコイルが強い高周波磁場を発生できることに着目して、強力な高周波磁場を自在に操ることの出来る NMR 分光計を自作した。さらに、微小コイルで実現する極めて強い高周波磁場を利用した四極子核の高分解能測定法の研究にチャレンジしている。

以上、代表して 4 件を選んだが、前項で記述したように、他のチームもこれらに劣らぬ成果を挙げており、今後のさらなる成果を期待している。

とくに、電子顕微鏡については、過去には世界における日本のシェアは過半数を超えたこともあった。しかし、近時には外国勢に、特に、球面収差補正技術で優位性を奪われ、最上位機種では FEI 社（旧フィリップス社）製の TITAN 機に完敗を喫するに至った。さらにアメリカの国家プロジェクトである TEAM プロジェクトでは 80 億円を投じて FEI と協力して、電子顕微鏡の更なる高度化と色収差補正器の開発に取り組んだ。このような状況下において、本領域では、これに対抗すべく、300kV の電子顕微鏡に新型の球面収差補正器を開発して搭載し、空間分解能 $0.5\text{\AA}$ を凌駕する電子顕微鏡を開発する高柳チームの研究と、ソフトマテリアルの研究に特化した球面収差および色収差補正器を搭載した 30-60kV 電子顕微鏡を開発する末永チームの研究を採択した。前者の研究では STEM および TEM モードで $0.5\text{\AA}$ を超える空間分解能を達成し、分解能競争では世界のトップに躍り出た。さらに、安定度が高く長時間の使用に耐える冷陰極型電解放出電子銃を開発した。日本電子(株)は、この研究で開発した技術を用いて、商用機の作製に踏み切り、海外から 2 台の受注を受けた。日本電子(株)はそのフラッグシップ機で世界競争ができる段階に達した。後者の研究では、全く日本のオリジナルな球面収差および色収差補正方式を考案し、補正器を設計した。球面収差補正器についてはすでに試作し、6 回非点収差も補正して、

50mrad まで位相のそろったビームを得ることに成功した。色収差補正については製造に取り掛かる段階にある。これが完成し成功すれば、今後の世界トレンドであるソフトマテリアル観察用の電子顕微鏡において、世界をリードできると考えられる。これらの研究は基礎研究を超えて、産業化に直接結びつく CREST の大きな成果であり、CREST による研究によって日本の電子顕微鏡産業を再興へと導くための貢献ができたのではないかと考える。

選考に関しては、資金の豊かでない大学の研究者に十分配慮した選考を行った。研究の進捗を大きく支配するのは、有能で意欲のある若手研究者をいかに確保するかにかかっている。旧帝大など以外の大学では、持続的に研究資金を確保することが困難なことから、若手研究者の確保が容易でなく、研究の遂行に非常に苦労していることが分かった。研究資金が極端に集中するような行過ぎたシステムについては、今後に向けた改善が強く求められる。

本領域では比較的若い研究者も採択した。それらの研究者が本 CREST の効果もあって教授あるいは責任ある地位に昇任し、装置開発ができる研究室が大学等に確保できた。このことは本 CREST の大きな成果と言える。具体的には竹腰氏、福谷氏、瀬戸氏が教授昇任を果たし、高田氏は部門長に昇任した。また、各チームで直接研究に携わっている若手研究者に、機器開発への意欲と興味を植えつけられたことは、今後これらに研究者の進路に大きな影響を与えたと確信している。

領域の運営に関しては、サイトビジットを入念に行い、研究者に一定の時期毎に自身の研究を見直す機会を与え、アドバイザーによる適切なアドバイスは、研究のよりよい発展に十分寄与したと考える。アドバイザーの献身的な努力とそれを率直に受け入れた研究者の協力関係は大変良いものであった。今後もこの関係を維持してゆきたいと考えている。報告会へのアドバイザーの出席率はほぼ 100%であった。

冒頭にも述べたが、これまで、研究費の多くが物質・材料の開発につぎ込まれ、機器開発はないがしろにされてきた。今回の領域設定は、機器開発にとって極めて意義深いものである。材料開発に比べて機器開発は地味であり、縁の下の力持ち的存在であるが、機器開発は材料開発にとっても大変重要である。日本の機器開発力を高め、理化学機器メーカーの力を増強するためにも、今回の領域が単発に終わることなく、引き続き、新たな CREST が立ち上げられることを切に希望する。

ナノメータ評価・分析技術

構造解析

- (1) STM, AFM, MFM, キャパシタンス-M
- (2) TEM, STEM, REM, SEM
- (3) RHEED, LEED, TED, CBED
- (4) atom-probe FIM
- (5) ion-scattering
- (6) EXAFS
- (7) EXELFS
- (8) X線定在波法
- (9) X線回折+MEMイメージング
- (10) 赤外分光
- (11) ラマン分光
(特にマイクロプローブラマン)
- (12) 電子チャネリングパターン
(粒界の分布像を出す)
- (13) 小角X線 (for nano-granular materials)
- (14) EBIC (電子線励起電流像)
- (15) 光電子顕微鏡、光電子回折、
光電子ホログラフィー
- (16) NMR

電子状態

- (1) XPS, UPS, その逆過程
- (2) ペニングイオン電子分光
- (3) X線吸収端分光 (XANES)
- (4) EELS
- (5) 2次電子放出分光
- (6) CL
- (7) PL
- (8) Deep Level Transition Spectroscopy
- (9) ESR
- (10) テラヘルツ

組 成

- (1) Auger
- (2) EPMA
- (3) SIMS
- (4) RBS
- (5) グロー放電質量分析 (GDMS)
- (6) 電子衝撃脱離 (ESD)
- (7) 陽電子消滅
- (8) 蛍光X線法
- (9) レーザーイオン励起 MAS