

戦略的創造研究推進事業
－CRESTプログラム－

研究領域「高度情報処理・通信の実現に向けた
ナノファクトリーとプロセス観測」

研究領域事後評価用資料

平成20年3月24日

1. 戦略目標

「情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製」

2. 研究領域

「高度情報処理・通信の実現に向けたナノファクトリーとプロセス観測」
(平成14年度発足)

領域の概要

高度情報処理・通信に資するナノデバイス等の実現に向けた新しいプロセッシング技術、ナノ構造体の機能を観察・計測・評価する新しい計測評価技術等に係わる研究を対象とする。具体的には、新たなプロセッシング技術の確立に向けた、ナノ構造を作り出す光・X線・電子ビーム・イオンビーム等の新たな活用に係わる研究、分子・原子を制御することにより結晶・組織等をナノレベルで形成する技術に係わる研究、および、構築されたナノ構造体の機能を計測・評価、検証する技術に係わる研究等が含まれる。

3. 研究総括

蒲生 健次 (大阪大学 名誉教授/ (独) 情報通信研究機構関西先端研究センター
専攻研究員)

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 14年度	石橋 幸治	理化学研究所 主任研究員	カーボンナノ材料を用いた量子ナノデバイスプロセスの研究	542.3
	市川 昌和	東京大学 教授	超高密度・超微細ナノドット形成とナノ物性評価技術	473.0
	彌田 智一	東京工業大学 教授	高信頼性ナノ相分離構造テンプレートの創製	602.9
	川勝 英樹	東京大学 教授	超高速・超並列ナノメカニクス	553.4
	木下 博雄	兵庫県立大学 教授	位相差極端紫外光顕微鏡による機能性材料表面観察・計測技術	295.3
	大門 寛	奈良先端科学技術大学院大学 教授	ナノ構造解析のための立体原子顕微鏡の開発	312.0
	松井 真二	兵庫県立大学 教授	高機能ナノ立体構造デバイス・プロセス	484.2
平成 15年度	本間 芳和	東京理科大学 教授	カーボンナノチューブ形成過程その場観察と物性制御への展開	431.7
			総研究費	3,694.8

5. 研究総括のねらい

情報、通信分野にあっては電子デバイスの微細化は高機能、低消費電力、高速、大容量化など性能の向上、コスト低減をもたらす。このため、微細化は絶えることなく進められており、将来には分子・原子の持つ機能を応用したデバイスの必要性も指摘されるようになってきた。このようなデバイスの実現のためには数 10nm 以下から原子・分子スケールまで、自由に形成、加工、操作できるナノ加工・プロセス技術とナノ構造やナノ素子の組成、形状、物性、機能を観測・評価するナノ計測技術が必要である。しかし、半導体産業界においては、現在では数 10nm 以下の製造技術実現の見込みはまだ不明というのが世界的なコンセンサスである。一方、ナノ構造は電気的特性のみならず、化学、光学、熱、力学的性質など広範囲の物性に於いて新規な特性を示すため、種々の新規機能性材料の開発や触媒、生体、医療など、多くの材料工学、科学技術分野に於いても重要で、これら各領域の共通基盤技術であるナノ加工・計測技術を確立することによって、ナノ構造の機能を駆使するナノテクノロジー分野が拓かれる。

この時点にあって、その先を見据える先端ナノ加工、計測技術を世界に先駆けて実現することは我が国の電子産業や関連分野の発展を持続し、高度情報化社会のさらなる進展をもたらす上で極めて重要である。ナノメータ領域の加工・計測技術の開発は多くの挑戦的な課題を含んでおり、探索的な基礎研究の積み重ねによって実現されるものである。また、探索的な段階にあっては、課題は集中するよりも可能性のある手法をバランスよく追求していくことが必要である。また、専門分野の異なる研究者を集めて組織し、相互の協力を行って知識・技術の融合のもとに研究を進めることが望まれる。また、独創的なナノテクノロジーを世界に先駆けて開拓するには、手法の開拓と共にそれを実現する独創的な装置を開拓することが必須である。そこで、本領域では、新しい手法の探索、可能性の評価、基礎過程の解明と共に、画期的な装置を開発することも重要課題として取り上げている。具体的には、本研究領域では、ナノ加工においては加工精度(サイズ、位置の制御、ゆらぎなど)を決定している基礎過程を探索し、ナノ構造を制御して作製できる精度向上の可能性を追求した。また、これらの加工プロセスによって得られるデバイス特性の評価と原子サイズにまで及ぶ微細構造、物性計測技術や加工プロセスのナノ計測技術の開発を進めた。

6. 選考方針

優れた提案が多数寄せられ、その中で少数しか採択できないため選考は公平、慎重に進めた。提案を評価するに当たっては、目的が明確であるか、新規性は何か、提案が具体的であるか、目的を達成するための問題点とその解決策は何か、大きな成果、インパクトが期待できるか、実現の可能性、遂行能力は大きいかなどを判定のポイントとした。これまでの成果と研究チームの組織も実現の可能性、遂行能力を判定する上で一つのポイントである。また、新技術の実用化には企業との協力も望まれるので、この点も考慮にいった。

共通の戦略目標の下に複数のチームが参加して研究を推進することは、バックグラウンドが異なる異分野との交流、情報交換を密にするよい機会である。広い知識の融合によって生まれる極限技術の開発には、特に前述のように分野のバランスが必要である。このため、課題、分野、手法など集中することなくバランスを取るように心がけた。

7. 領域アドバイザー

領域アドバイザー名	所属	役職	任期
青柳 克信	立命館大学	招聘教授	平成 14 年 7 月～平成 20 年 3 月
石原 直	東京大学	教授	平成 14 年 7 月～平成 20 年 3 月
大泊 巖	早稲田大学	教授	平成 14 年 7 月～平成 20 年 3 月
小川 正毅	名古屋大学	教授	平成 14 年 7 月～平成 20 年 3 月
古室 昌徳	(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構	プログラムマネジャー	平成 14 年 7 月～平成 20 年 3 月
志水 隆一	国際高等研究所学	上席研究員	平成 14 年 7 月～平成 20 年 3 月

デバイスプロセス、材料プロセスおよび計測分野において十分の研究実績と広い見識を持つ人を選んだ。また、専門分野のバランスと所属も考慮した。すなわち、この分野では産業界の意見も重要であるので産業界の人にも加わって頂いた。推進途中で大学に移られたため結果的に大学の研究者が多くなっているが、企業の経験を生かした貴重な助言を頂いた。

8. 研究領域の運営

融合的な研究分野において成果をあげるために、情報の流通を円滑にし、また、研究協力の機会を高めることを重視した。このために、オンサイトミーティングを重視した。オンサイトミーティングは、アドバイザーと全研究参加者に参加を呼びかけ、研究成果の紹介のみでなく研究室の見学も行い、実験のノウハウなど広く情報の交換が出来るように努めた。また、ポスター発表も行い、特に若手研究者の切磋琢磨、研鑽の場になるようにも努めた。これによって、研究代表者間で相互協力ができる研究を発展させることが出来た例も生まれた。また、他分野との協力では、ワークショップや国際シンポジウムの共催なども行った。オンサイトミーティングは同時に、研究総括が具体的に進捗状況を把握するだけでなくアドバイザーの方々にも研究現場を訪問して具体的に研究の進捗状況を把握して、適切な助言を戴くためにも行った。

研究の推進は基本的には研究者の計画を尊重した。課題の評価、研究方針に対する助言は、必要に応じてアドバイザーも参加したオンサイトミーティングおよび各年度末に行った成果報告会での発表などをもとにして行った。また、必要な場合は研究事務所に研究代表者に来て頂いて研究総括と議論の上、研究方向の確定、追加の予算などの決定を行った。

領域中間評価では、オンサイトミーティングについて、研究チーム間の研究協力を促進し、バーチャルラボラトリーの狙いに添うものとして高く評価して頂いたので、さらに積極的に進めた。また、成果の一般への発表が足りない指摘された。これは、一つには公開シンポジウムを成果報告会として終了年度に予定しており、領域中間評価時点ではまだ開催していなかったためとも思っている。成果報告会は、ナノバーチャルラボラトリー全体で行うこととなったので、予定していたシンポジウムの代わりに、相互理解を深めて、プロジェクト終了後の研究協力、連携を深めるためのネットワーク形成に資することを目的として泊まり込みの研究会を実施した。代わって一般への広報は2編の成果報告集を作製、配布した。第2編の成果報告集では、専門外の人と研究者が共同で執筆して一般にわかりやすくなるように心がけた。

9. 研究を実施した結果と所見

ナノ加工・計測技術はいろいろな新しい方法が提案され、開発が試みられている。しかし、現状では制御性、信頼性の向上が大きな課題である。ナノ加工技術では、ナノ構造はいくつかの高度な技術、経験を要する方法で作成され、その物性やデバイス機能の測定などが行われているが、これまでの方法は、極言すれば、試行錯誤で手探りで作製し、たまたま出来たものを選んでいく段階である。ナノ計測技術では、プロセスの計測評価技術と、得られるナノ構造の形状、組成、物性を、多数のナノ構造の集合ではなく一つ一つの構造を区別して測定できる局所計測技術が必要である。本研究領域はこれらの課題の解決に資することを目指した。このために、加工・計測の基礎過程を解明および新規装置の開発を行った。

その結果、これらについて新しい成果を得ており、高度に制御できたナノ加工技術の可能性が示されナノ加工・計測技術の発展に大きく貢献したと考えている。企業から注目され、共同研究が始まっている成果や、さらに、ベンチャー企業の設立、特許実施準備契約の締結など、具体的な社会・経済の発展に貢献する成果も得られている。また、多くの国際会議で招待講演を行っており、成果は国際的にも注目されている。特に、独自に設計・合成した側鎖液晶型ブロック共重合体を用いて、メートル単位におよぶ大面積に高精度の周期性を持って $\leq 10\text{nm}$ のナノパターンを形成した高信頼性ナノ相分離テンプレート薄膜を作製した例、カーボンナノチューブの成長過程を走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡でその場観察して、成長するカーボンナノチューブの構造決定に対する触媒の寄与を明らかにするとともに、得られるナノチューブの構造制御の可能性を示した例などは自己組織化プロセスに望まれている制御性の向上が実現できることを実証したものである。また、国立科学博物館での科学博で、開発した立体原子顕微鏡で観測した原子配列の立体写真を展示し、また集束イオンビームプロセスによって作製したナノ三次元構造が高校の教科書に紹介されるなど、広く一般の人々のナノテクノロジーへの興味と理解増進に大きな貢献をした。これらのことから判断して、狙い通りの成果をほぼ達成したものと考えている。

一部で、あまりに挑戦的な課題であったため、期間内に期待された成果が得られなかった課題もあった。しかし、これらは重要な課題であり、また、研究体制も整えているので、今後の急速な発展を期待している。

個々の研究課題に対する具体的な研究の結果と成果は、別紙、領域評価用捕捉資料に記載されているので、ここでは省略する。

以下に特筆すべき研究成果をまとめて記す。

1. 科学技術の進歩に資する成果

1) 科学技術のブレークスルー、フロンティア開拓等

カーボンナノチューブ(CNT)形成機構の解明とカイラリティ制御の可能性(研究代表者: 本間芳和)

CNTは最も注目されているナノ構造体であり、将来の機軸材料となる可能性を有している。しかし、電子デバイスへの応用においては、CNTを位置・方向を制御して配置するとともに、CNTの物性をも制御する技術を確立することが不可欠であり、現在多くのグループによってこれらの制御の可能性の追求が精力的に進められている。この研究グループは電子顕微鏡および分光によって成長過程のその場観察を行い、さらには、CNT生成触媒種の検討から、CNT生成におけるナノ触媒の役割を解明し、これまで触媒作用がないと思われていた多くの材料について触媒作用があることを実証し、プロセスの自由度、CMOSプロセスなど他プロセスとのコンパチビリティを実現するとともに、結晶性触媒粒子からのエピタキシャル成長によりCNTのカイラリティ制御を行える見通し

を得た。今後、さらに研究を進めてこの見通しを実証すれば、CNTのデバイス応用の上で大きなブレークスルーが達成される。

CNT人工原子の実現とデバイス応用の可能性（研究代表者：石橋幸治）

CNTを用いて人工原子を実現し、大きなソースドレイン電圧でクーロン振動ピークを測定することにより電子殻に電子が1個ある場合と2個ある場合のエネルギースペクトルを測定することに世界で初めて成功した。また、人工原子がテラヘルツ波に対して量子的に（光子として）応答することを示した。テラヘルツ波に対する量子応答の観測は世界で初めての成果である。

2) 革新技術の創製および展開

高速低振幅AFMの開発と水和構造の観測（研究代表者：川勝）

独自のヘテロダイナミックドップラー計による変位計測、カンチレバーの光熱振動励起等により、10pmの低振幅で原子像が観測できるAFMを実現し、高精度の力の場の計測および溶液中での原子像の観測を行った。また、世界で初めて水和構造の観測に成功した。これは、低振幅横振動モードを使うことによって測定対象への擾乱を極力抑えられた結果、初めて得られたものと考えている。この成果は、液中での表面観察、動的反応の観察、水和とその役割の解明、拘束を受けた液体の微視的構造の解明等、広く学術、産業分野に貢献することが期待される。

集束イオンビームプロセスを用いた三次元ナノ構造の作製（研究代表者：松井真二）

集束イオンビームプロセスを用いて、他のプロセスでは出来ない三次元ナノ構造作製プロセスを開発した。これを用いたバイオナノインジェクタ、ナノマニピレータの作製とその応用に関して、2社と共同研究を実施している。

位相差極端紫外光顕微鏡の開発とX線マスク検査（研究代表者：木下）

極端紫外光を用いた露光法(EUVL)は、次世代高集積デバイスのリソグラフィプロセスの主流となる技術として期待され、世界的な開発競争が進められている。EUVLの実用化を実現するための大きな課題の一つは、無欠陥マスクの作成技術であり、そのための測定技術・装置の開発が喫緊の要事である。ここでは、欠陥の明視野像も観測できる位相差極端紫外光顕微鏡システムを世界で初めて開発し、マスク欠陥を実際に露光して確認することなく、直接評価できることを示した。この装置は世界的にも注目され、SEMATECH(米国)が特性の評価を行い、またSELETE(日本)は本装置を使用してマスク評価を実施する予定である。

科学研究費補助金特定領域研究「カーボンナノチューブナノエレクトロニクス」への展開（研究代表者：石橋幸治、本間芳和）

CNTの研究は、「ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ」の中その他領域に於いても取り上げられ、多くの優れた成果を出した。本領域に於いても先に述べたように優れた成果を得ている。本領域研究者は中心人物の一人として活躍して、上記研究プロジェクト（期間：5年間、予算：約14億円）の立ち上げに多大の貢献をした。これらの研究者は、これまでの成果をさらに発展させて、新しいナノエレクトロニクス分野の開拓に大きく貢献するものと期待できる。

2. 社会的及び経済的効果・効用に資する成果

1) 応用・実用化及び社会的価値に繋がる重要な発見・発明とその後の取り組み

高信頼性ナノ相分離構造テンプレートの創製（研究代表者：彌田智一）

ナノ加工と自己組織化プロセスの課題である大規模化と制御性の向上を実現した。すなわち、材料の精密合成技術を駆使し、100種以上のジブロック共重合体の分子構造、ナノ構造、熱力学的データのデータベース作製を行い、ナノ相分離構造創成メカニズムと物性の解明をしたことは優れた成果である。また、完全配向制御された高品質のナノ相分離構造体を大面積に大量に低コストで製造する技術の開発と、系統的な応用先の開拓を行うとともに、これを基に作成したテンプレートを内外の機関に提供して共同研究

を通じての応用展開を行ったことなどインパクトの大きい成果を出した。これらの成果によって、平成19年度文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)を受賞している。企業6社との共同研究、および、5社との本格的共同研究の前の調査段階の共同研究を進めている。

2) 経済・産業への展開に繋がる取り組み

超広角電子レンズの開発 (研究代表者:大門 寛)

本研究は原子配列構造を、理論計算を援用することなく直視し、立体的に解析できるユニークな立体原子顕微鏡の技術を確立した。さらに、より簡便に測定できる小型で高性能の分析器を製作するとともに、見たいところを選べるようにするため、低倍率での顕微鏡像も得られる顕微鏡機能システムの基礎的な開発を進めた。これにより、s軌道しか持たない元素(炭素、ボロン)について実験を行い、グラファイトやダイヤモンドおよびダイヤモンドに微量にドーピングされたボロンの立体原子写真をきれいに取れることを世界で初めて証明した。このことは、測定対象元素には制限が無いことを示しており、立体構造観測技術の応用性を大きく高めた。同時に低倍率顕微鏡像システム開発のために超広角低収差対物レンズを実現した。これは、海外企業と特許実施準備契約を締結して、すでに契約料が納付されている。また、ベンチャー企業(株Daisy Micro Tech)を設立し、新しい二次元表示型分析器への応用などの実用化を進めている。

10. 総合所見

ナノ加工・計測はナノテクノロジーの共通基盤技術であり、現在、世界的にその確立を目指して研究が進められている。共通基盤技術であるが故に応用分野に対応して多様な手法や技術に対する要求がある。これらを本研究領域に全て網羅することは、限られた予算内では採択件数に制限があり不可能である。また、評価する側の専門分野による制約もある。さらに、公募では応募状況を考えると全てを揃えることはできないこともある。これらによって、採択課題は自ずと制約を受ける。例えば、トップダウンとボトムアッププロセスの特長を融合したプロセスは、新しいナノ加工技術として期待できる。また、分子デバイスもポストシリコン時代の極限のデバイスとして期待されている。さらに、このような新規ナノデバイスを用いた回路やシステム構成はこれまでのものと違うことも考えられ、システム構成から考えた加工技術の開発も望まれる。しかし、このような制約のもとで、これらを主テーマとする優れた課題は採択できなかったが、採択されたものはいずれも、この分野で重要な課題に挑戦しているものである。

ナノテクノロジーは、まだ初期的な探索の段階である。このような時点では、異分野との研究情報の交換、協力が重要である。このような交流は学会などでも可能であるが、集約した目標に沿って研究するグループをまとめることは、より効率的である。このため、本領域内では、課題は集中するよりも可能性のある手法をバランスよく追求し、また、専門分野の異なる研究者を集めて組織し、相互の協力を行って知識・技術の融合のもとに研究を進めることを目指した。同時に、この利点を生かすため、オンサイトミーティングを積極的に行い、互いに研究現場を訪問して、研究成果のみならず、研究手法、実験技術など生の情報の交換、相互理解の促進に努めた。これによって、8件の共同研究や研究協力が始まり、具体的な成果が得られた例も生まれている。また、研究員や学生の交流も行われ、研究室、組織の枠を越えた教育のよい機会になるとともに、領域横断シンポジウムも開催でき領域横断研究会、異分野交流のよい機会ができた。

ナノ加工・計測は基礎科学技術への貢献だけでなく産業応用を目指している。この点で、産業界からの提案、参加も期待したが、応募は多くなく、採択にはいたらなかったのは残念であった。しかし、必要に応じて研究グループでは、基礎科学技術の研究だけではなく、明確な出口を求めて産業界との協力、情報交換や実用化への試みが行われた。

この結果、特許実施準備契約の締結や企業との共同研究、企業による実証試験が行われるなど、企業に大いに興味を持ってもらえる成果を得たことは、企業からも高い評価を受けていることを示している。また、研究者の多くは、得られた成果が評価されて引き続いて(独)科学技術振興機構の研究補助金や科学研究費補助金を得ており、これまでの成果をさらに発展させるものと期待できる。

半導体産業と、関連するエレクトロニクスへの応用は、ナノ加工・計測技術開発の最も大きな出口であろう。この分野ではまだ、30nm のパターン描画技術の実用化の見込みがないと考えるのが世界的なコンセンサスであり、現状の技術水準を考えるとポストシリコン時代に必要な 10nm 以下のナノ加工技術との間には大きなギャップがあり、その確立には大きな努力と基礎研究の積み重ねが必要である。この点においても CREST 事業の必要性と期待は大きいといえる。

海外では、ナノデバイスを用いたシステム、回路構成についても具体的な研究が進められ、これに基づいたデバイス開発が進められている。「ナノテクノロジー分野別バーチャルラボラ」プロジェクトでは、加工プロセスからナノ材料、デバイスおよび環境、バイオまで含めて横方向の連携、協力を目指した研究が進められた。これらの要素技術の研究、異分野交流が進むにつれて、今後はシステム、回路構成を含めた縦方向の連携を行い、高度情報処理・通信システムの実現に向けた、たて方向に深く突き進む研究領域が重要になる。

研究終了にあたり、研究課題の採択、進捗状況や成果の評価、シンポジウムなどの場のみならず、時に応じて数々のご指導を賜った領域アドバイザーの諸先生方に感謝を申し上げます。また、遅滞なく研究を遂行できるようご尽力いただいた科学技術振興機構本部ならびに領域事務所の各位に深く感謝したい。