

(独) 科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
チーム型（さきがけ）

研究領域事後評価用資料

「ナノ製造技術の探索と展開」
(2006-2011)

研究総括 横山直樹

2012 年 3 月 30 日

目次

戦略目標	1
1. 研究領域	2
2. 研究総括	2
4. 採択課題・研究費	2
5. 研究領域のねらい	4
6. 研究課題の選考について	5
7. 領域アドバイザーについて	6
8. 研究領域の運営の状況について	7
8.1 研究総括の運営方針	7
8.2 研究計画	8
8.3 予算配分	8
8.4 研究課題の進捗と推進	9
「月報」	9
「研究計画ヒアリング」	9
8.5 研究拠点訪問と相談対応	10
8.6 研究評価の手続き	10
8.7 研究支援活動	11
9. 領域のねらいに対する成果の達成状況	13
9.1 研究領域全体としての特筆すべき研究成果	13
9.2 個別研究成果と科学技術・社会に対する効果、今後の期待や展望	15
スピントロニクスデバイス技術：	15
バイオ生体技術：	16
ナノ化学技術：	17
カーボン材料技術：	20
デバイス技術：	23
加工・リソグラフィ技術：	27
10. 科学技術上の進歩に資する成果、社会・経済・文化的な価値創出への期待	28
スピントロニクス分野：	28
ナノ高分子分野：	29
熱電変換材料分野：	29
ナノ加工分野：	30
ナノ光リソグラフィ分野：	30
11. 総合所見	31

戦略目標

「ナノデバイスやナノ材料の高効率製造及びナノスケール科学による製造技術の革新に関する基盤の構築」（平成 18 年度設定）

<達成目標>

将来のナノテクノロジーの本格的な実用化時期に必須となる「ナノ製造技術」の基盤を以下の一連の研究により提供することを目的とする。

- i. ナノデバイスやナノ材料を高効率に製造する技術群、例えば、ナノ構造の設計技術・創製技術・転写技術、ナノ材料の高再現性・大規模生産技術、ナノ自己組織化を適用した製造技術、ナノ構造の評価・検査技術などを支える基礎基盤の構築、および、これらのナノ製造を実現する装置の創製。
- ii. 構築したナノ製造技術の基盤の応用による具体的実施例の提示。
- iii. ナノ製造に関する現象のナノスケール科学による解明。
- iv. 様々なデバイス、システム、材料などの製造技術基盤のナノスケール科学による革新。例えば、広義の工具と被加工物との相互作用をナノスケールで理解し、制御することによる再現性や均一性の向上、ナノスケール科学に基づく製造工程の高度化・環境負荷の低減など。

<戦略目標設定の背景>

ナノテクノロジーの急速かつ着実な進展、およびその成果の産業応用・社会還元への強い期待が存在する。このため、現行のナノテクノロジー関連の戦略目標に基づく諸研究（ナノテクノロジー・バーチャル・ラボラトリーなど）の成果をイノベーションに繋げるために、ナノテクノロジー重点化政策開始から 5 年余を経た現在において、必然性が高く時宜に適った戦略目標である。

ナノテクノロジーの重点化により、様々なナノ材料やナノデバイス、ナノ加工技術、ナノプロセス技術が開発されている。しかしながら、これらは実験室の試行段階であり、高速・大規模に再現性よく実現することとは、技術的に大きな隔たりがあるため、将来、ナノテクノロジーの本格的実用化を迎える際に、深刻な問題の一つになると考えられる。本戦略目標は、第一に、その隔たりを埋めうる新しい技術群を支える基礎基盤を、ナノスケールの現象理解に基づいて創出することである。一方、ナノテクノロジーに基づく製品として、顔料やカーボンナノチューブ混練樹脂のように、それ自体がナノスケールの材料であるものと、材料や製造工程といった付加価値を生み出す鍵となる要素にナノテクノロジーが用いられるものがある。本戦略目標は、第二に、ナノスケール科学の適用による製造技術基盤の革新で、これらのナノテクノロジー製品を生み出す基盤を構築することである。

諸外国において、ナノ製造技術は、ナノテクノロジーの根幹をなす技術として重点的に研究がなされている。「ナノ製造技術」は、米国では 2005 年の最重点投資課題であり、欧州ではフレーム・ワークプログラム 7 の重点課題として取り上げられている。したがって、本戦略目標は国際競争力維持の観点からも緊急性を有することは明らかである。国内のナノテクノロジー研究者は、これまでの重点化施策によって、ナノ加工、ナノ計測、ナノプロセス、ナノ材料などに関して十分なシーズを蓄積しており、これらのシーズを「ナノ製造技術」として高度化／統合する準備は整っている。また、本戦略目標により、総合技術である「ナノ製造技術」を構築するに必要な分野融合と知識統合とが必然的に生まれると考えられ、それを土壌に、新しいナノテクノロジーの着想や展開が生まれることが求められる。

1. 研究領域

「ナノ製造技術の探索と展開」 （平成 18 年度発足）

＜研究領域の概要＞

本研究領域は、ナノテクノロジーの本格的な実用化時期に必須となる「ナノ製造技術」の基盤を提供することを目的とし、ナノデバイスやナノ材料を高効率に製造するための技術群に関わる様々な現象を、ナノスケール科学により解明することを目指す独創的な研究を対象とする。

具体的には、応用を目したナノ構造の設計・創製技術、ナノ材料の高再現性・大規模生産技術、様々なナノ加工技術の統合など、ナノスケール科学に基づき製造の効率化・低環境負荷化をもたらす研究であり、新しいナノスケール科学に基づく方法論の創出や革新的な技術展開に資するための独創的な研究が含まれる。

2. 研究総括

横山 直樹

（産業技術総合研究所 連携研究体グリーン・ナノエレクトロニクスセンター
連携研究体長／(株)富士通研究所 フェロー）

4. 採択課題・研究費

平成 18～20 年度の採択課題 28 件の研究者の所属・役職、研究課題、研究費を下表に示す。（なお平成 20 年度採択の鈴木健二研究者は、平成 23 年度に逝去し、本領域事後評価の実績には反映していない）

採択 年度	研究者	所属・役職 括弧内は応募時	研究課題	研 究 費
平成 18 年 度	赤松 謙祐	甲南大学フロンティアサイエンス学部 准教授 [同上 理工学部 講師]	有機・無機ナノ複合体の創製と精密 微細構造制御	39
	斎藤 毅	産業技術総合研究所 ナノチューブ応用研究センタ ー 研究チーム長 [同上 研究員]	SWNT 量産用自動直径制御 合成システムの構築と SWNT 加工 プロセス基礎技術の開発	40
	内藤 泰久	産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 研究員 [同上 研究員]	金属ナノギャップ電極による抵抗 スイッチ効果の発生メカニズムの 解明	40
	平塚 祐一	北陸先端科学技術大学院大学 マテリアルサイ エンス研究科 講師 [東京大学 特任助手]	生体分子モーターを動力源とした マイクロマシン	40
	前田 優	東京学芸大学教育学部 准教授 [同上 助手]	バンド構造制御によるカーボンナ ノチューブ電子材料の創製	40
	松井 淳	東北大学多元物質科学研究所 助教 [同上 助手]	界面場を用いたナノ材料集積化技 術の創製	40
	吾郷 浩樹	九州大学先端物質化学研究所 准教授 [同上 准教授]	SWNT の電子構造/カイラリティ制 御に向けた精密合成法の探索	57
	一柳 優子	横浜国立大学大学院工学研究院 准教授 [同上 講師]	医療応用に向けた磁気ナノ微粒子 の開発	40
平成 19 年 度	上野 貢生	北海道大学電子科学研究所 准教授 [同上 助教]	ナノ光リソグラフィによる金属 ナノパターン作製技術の開発	44
	笠井 均	東北大学多元物質科学研究所 准教授 [同上 准教授]	有機ナノ結晶を用いた次世代型光 機能材料の創出	40
	櫻井 英博	自然科学研究機構 分子科学研究所 准教授 [同上 准教授]	有機化学手法によるカーボンナノ チューブのキラリティ制御	45
	長谷川 裕之	科学技術振興機構 さきがけ研究者 [情報通信研究機構 特別研究員]	高性能有機ナノ結晶トランジスタ の低環境負荷製造法の開発	40
	原 真二郎	北海道大学量子集積エレクトロニクス研究 センター 准教授 [同上 准教授]	基本論理素子に向けたナノスピン バルブ構造の選択形成	40
	樋口 昌芳	物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研 究拠点 独立研究者 [同上 主幹研究員]	単層マルチカラーエレクトロクロ ミック材料	39

平成 20 年 度	藤田 淳一	筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授 [同上 准教授]	超尖鋭プローブによる局在場制御 と新材料創成	43
	村上 達也	京都大学物質-細胞統合システム拠点 助教 [藤田保健衛生大学 助教]	生体ナノ粒子を模倣した医療用金 属ナノ粒子の創製	41
	池田 輝之	科学技術振興機構 さきがけ研究者 [カリフォルニア工科大学 博士研究員]	相変態を利用したバルク熱電材料 のナノ構造化	40
	内田 建	東京工業大学大学院理工学研究科 准教授 [同上 准教授]	ナノ半導体への不純物ドーピング 効果の解明と低抵抗ナノフィルム 半導体の創製	37
	太田 裕道	名古屋大学大学院工学研究科 准教授 [同上 准教授]	電界誘起二次元伝導層の熱起電力 と制御	40
	佐藤 義倫	東北大学大学院環境科学研究科 准教授 [同上 助教]	グラフィン融合助剤を用いた高強 度軽量カーボンワイヤーの創製	34
	寺尾 潤	京都大学大学院工学研究科 准教授 [同上 准教授]	被覆共役ポリマーの合成とそのナ ノ分子デバイスへの応用	38
	長浜 太郎	北海道大学大学院工学研究院 准教授 [産業技術総合研究所 研究員]	強磁性絶縁体超薄膜を用いた新規 スピントロニクスデバイスの創製	42
		産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス		36
	野崎 隆行	研究センター 任期付研究員 [大阪大学 助教]	ナノ構造スピン系の電界制御	
	堀 顕子	北里大学 理学部 助教 [同上 助教]	異種分子接合型ナノワイヤー の精密構造制御と機能	41
	柳田 剛	大阪大学 産業科学研究科 准教授 [同上 助教]	酸化物ヘテロナノワイヤ構造体に よる不揮発性メモリ素子の創製	39
	総研究費 (研究領域全体)			1,131

5. 研究領域のねらい

ナノテクノロジーは、原子レベルの配列をナノスケールで自在に制御できる技術に始まり、望みの性質を持つ材料や望みの機能を発現するデバイスを実現する手段として、産業に展開すべく基幹技術としての役割がある。その分野は、素材、情報、バイオ、医療、環境、エネルギーなど幅広い産業に関わるものであり、より快適で健康な社会を実現するための21世紀の最重要の技術として捉えられている。今世紀に入り、米欧がナノテクノロジーを国家的戦略目標とし、我が国でも同様な重点政策を掲げることで多くのナノテクノロジー研究開発が勢いを増し、現在、最も活発な科学技術研究分野の一つに至り、また世界

的には日本が高いポテンシャルを有している分野でもある。

本領域では、このような背景の下、ナノテクノロジーの本格的な実用化到来に向けて必須となる「ナノ製造技術」の基盤技術を構築することを主たる目的とし、カーボンナノチューブ、バイオナノ材料・デバイス、有機・分子デバイス、半導体デバイス、磁性材料・デバイス、熱電材料、ナノ材料・加工技術などの幅広い材料・デバイス分野にわたるナノテク基礎技術を製造基盤技術へと昇華させることで技術振興と産業貢献をはかることを目標とした。より具体的な技術群として、ナノカーボン材料やナノ材料の大規模生産技術の基盤確立、ナノ構造の設計・創製技術、ナノ構造の加工・転写技術、ナノ自己組織化を適用した製造構築化技術、ナノ構造の評価基盤技術、トップダウン加工と自己組織化との組み合わせによるデバイス創製、ナノ構造を実現する革新的な創製技術、ナノ構造に関わる現象の基礎科学による解明、材料・デバイス・システムなどの製造基盤の科学的解明、等に関する幅広い技術群に関わる研究テーマを採択することとし、これら技術群の構築と並んで科学的解明の視点からの理論的基礎研究も採択するように努め、これらにより世界をリードできる独創的な研究成果が創出されることをねらいとした。

本領域は、幅広い技術研究テーマにわたり、理学、工学を問わず多くの分野の研究者により構成されるため、異分野の研究者が一同に介するバーチャル・ラボによる相互交流が多いに期待される。その意味において、このさきがけ研究の機会を利用して、研究者間のネットワークづくりや専門分野外との積極的な相互交流をはかるべく、領域外のみならず、とくに領域内での共同研究の推進に力を入れた。また製造技術群を基盤とする領域であることより、研究成果の具体的アウトプットである特許創出による社会還元と我が国の技術競争力強化に向けた視点において特許推進にも啓発を行った。なお同時に、研究者の多くが30歳代の若い研究者であることより、物心両面でのきめ細かなサポートを指向することで、世界レベルでの研究人材の育成をはかることも大切な役割とした。

6. 研究課題の選考について

選考の基本的な考えは下記にて行った。

- (1) 選考は「ナノ製造技術の探索と展開」領域に設けた領域アドバイザー14名の協力を得て研究総括が行った。
- (2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とした。
- (3) 選考に当たっては、研究構想が本領域の戦略目標や趣旨に合致していること、特に高い独創性を有し、新規性があること、また工学的な発展性が期待できることを重視した。さらには提案者の目的意識や研究意欲をも考慮した。
- (4) 選考の経緯として、一応募課題につき領域アドバイザー3名が書類審査し、書類選考会議において面接選考の対象者を選考した。続いて、面接選考および総合選考により、採用候補者を選定した。
- (5) 選考結果

3年間で総勢 29 名の研究者（内、女性研究者 2 名）を採択した。
 （なお平成 20 年度採択の研究者が 1 名、さきがけ研究期間中にて逝去）

選考年度	書類選考	面接選考	採用者(女性)
平成 18 年度	108 名	20 名	9 名
平成 19 年度	91 名	21 名	10 名(1 名)
平成 20 年度	75 名	20 名	10 名(1 名)

7. 領域アドバイザーについて

本領域のアドバイザー選定にあたっては

- 戦略目標に沿って、研究総括と共に研究を評価・指導できること
- 領域の幅広い技術範囲をカバーするために、専門分野やテーマのバランスを考慮し、工学、理学の幅広い分野での第一人者を選ぶこと
- 高度な専門知識のみならず科学技術や社会動向など幅広い見識を持っていること
- 実用化を目した製造技術を主眼とする研究領域であるため、技術の専門性を有するとともに、製造技術の開発に携わった経験と見識を持ち、適切なアドバイスが行える産業界からのアドバイザーも加えること。
- 若手研究者の育成に重きを置いてアドバイスが行えること

などを基本にして、下記先生方をお願いをした。

領域 アドバイザー	所属 (括弧は初年度就任時)	現役職 (就任時)	任期
雨宮好仁	北海道大学 大学院情報科学研究科 (同上)	教授 (同上)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
居城邦治	北海道大学電子科学研究所 (同上)	教授 (同上)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
上田 修	金沢工業大学 大学院工学研究科 (同上)	教授 (同上)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
魚崎浩平	物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (北海道大学 大学院理学院理学院)	主任研究者 (教授)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
大島まり	東京大学大学院情報学環/生産技術研究所 (同上)	教授 (同上)	平成 18 年 7 月 ～平成 24 年 3 月

木村紳一郎	超低電圧デバイス技術研究組合 (日立中央研究所 ULSI 研究部)	副プロジェクトリ ーダー (主管研究員)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
谷口研二	奈良工業高等専門学校 (大阪大学大学院工学研究科)	校長 (教授)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
鳥光慶一	NTT 物性科学基礎研究所 (同上機能物質科学研究部)	主席研究員 (部長)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
中村志保	東芝 研究開発センター 記憶材料・デバイスラボラトリー (同上)	研究主幹 (同上)	平成 18 年 7 月 ～平成 24 年 3 月
平本俊郎	東京大学 生産技術研究所 (同上)	教授 (同上)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
福井孝志	北海道大学 情報科学研究科 (同上)	教授 (同上)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
堀池靖浩	物質・材料研究機構 CREST 領域総括 (同上)	名誉フェロー (フェロー)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
松本和彦	大阪大学 産業科学研究所 (同上)	教授 (同上)	平成 18 年 6 月 ～平成 24 年 3 月
横山 浩	オハイオ州ケンツ州立大学液晶研究所 (産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門)	教授 (部門長)	平成 18 年 6 月 ～平成 20 年 3 月

8. 研究領域の運営の状況について

8.1 研究総括の運営方針

さきがけ研究者には独創的内容に果敢にチャレンジするよう、また失敗を恐れずに高い自立性の精神でもって研究に挑んでもらう方針で臨んだ。とくに領域の主たる使命として実用化に向けた技術開発を展望していることより、出口イメージのあり方を常に意識し、小さな要因にとらわれずに、しっかりとした基盤技術を構築できうる研究成果を目指すよう指導を行った。また大きく発展できるテーマや十分な成果が得られたテーマには、テーマ枠の拡大や総括采配にて重点投資できることを研究者に伝えることで、当初の提案を超えた良好な成果も幾つか得られ、その後の発展的研究へと継続している。他方、年2回開催した領域会議では、1～3期生の枠に捉われず、領域内での異分野の研究者との共同研究の実施や連携協力など研究者間ネットワーク構築への推奨をはかった。また同時に、日本の技術競争力の確保に向け、研究成果を産業界に還元すべく、質の良い特許取得を頭の隅において研究に励むよう要請した。なお領域アドバイザーへは、専門分野のみならず社会的経験を生かした見識を含めて、研究者への個別相談や温かいご指導・ご鞭撻をお願いした。

また領域参事には、物心両面から研究者の立場に立ってきめ細かなサポートを行うよう要請した。

8.2 研究計画

全体の研究期間にわたる研究計画は応募時の提案書をもとに、さきがけ研究者が具体的研究内容の記載、さきがけ研究期間3.5年間の研究計画、3.5年間の予算計画書を作成し領域事務所へ提出した。研究計画書の回議は、領域事務所での確認と訂正、研究総括による確認と承認を経て、最終的にさきがけ本部へ提出し最終承認がなされた。さらに各年度終了時において、研究者は研究進捗状況に応じて次年度研究計画書と委託（共同）研究申込書等を作成した。研究総括はこれらの研究計画書を細部に検討し研究遂行上の問題が無いかどうか、設備導入が適切か否か、予算の使途が適切か否かを見極め、不備があれば再提出を要請し承認を与えることで、実際の研究が実施された。当初の研究計画につき、領域会議やサイトビジット等の機会を含めて適宜見直し、研究者の要望を尊重しながら研究総括の判断のもとで変更を加えた。例えば、H19年度採択の藤田淳一研究者は、超尖鋭プローブによる局所場制御と新材料創成の目標に沿って研究テーマを遂行していたが、研究推進の過程で固体アモルファスカーボンと液体ガリウムとの個液界面におけるグラフェン形成の発見をもとにテーマ拡大の総括了承が行われ、固層グラフェンの合成法の確立とグラフェンFETの動作実証を行うことで、次世代の新材料ナノデバイスの創出技術としてインパクトある研究成果を得た。

8.3 予算配分

基本的には各研究者の研究計画に沿った予算配分に準拠したが、研究進捗に伴う予算の大小の増額要求が幾人かの研究者にあった。研究者からの要望の合理性を検討し、研究計画の妥当性や研究者本人の意志力を勘案して、許容範囲内で研究総括が判断することで、本部への増額要求を行って対応をはかった。他方、研究者の研究進捗状況を判断し、より大きな成果が期待できる場合や、進捗に依存して設備導入変更が生じた場合は、総括の再判断により増額等の要求を行った。また研究期間中に所属を移動する研究者の設備移設や研究環境の整備についても、円滑に推進できるように総括と領域事務所にて可能な限り配慮を行った。

例えば、H20年度採択である野崎隆行研究者は、電界によるナノ構造スピン系制御法の解明を目標として研究遂行していたが、研究進捗により測定系の早急な確立が必要となり新たに高周波測定プローバの前倒し購入の総括承認、また研究期間中での異動による設備移設の増額承認、移設後の研究環境整備のための設備導入変更等の了承対応により、研究実施環境を逐次整備して研究を円滑に促進した。その結果、最終的に世界で初めてとなる電界によるスピン制御法を実証し、大きな成果へと繋げることが出来た。

またH19年度採択者である吾郷浩樹研究者は、単層カーボンナノチューブのカイリティー制御に向けた精密合成法の研究を遂行していたが、さきがけ研究の途中から並行して検討を進めていた独自のグラフェン膜成長技術の進展が見られたことにより、テーマ拡大の総括了承を得、その後にて総括による研究加速のための設備予算増額に対応することで、高品質で六員環の方向が揃った単層グラフェン膜の初の合成に成功し、インパクトある貢献とベンチャー企業によるグラフェン膜実用化販売へと漕ぎ着けることができた。

8.4 研究課題の進捗と推進

さきがけ研究者へは、基本的には半期毎に研究進捗報告書の提出を依頼し、研究経過および進捗状況、成果内容、今後の予定ならびに外部発表、特許出願の状況等をまとめて報告して頂いた。研究総括は進捗を把握・確認すると共に今後の研究予定について承認し、あるいは必要に応じて提案を行った。これらの承認後にて、さきがけ本部宛へ半期報告書の提出を行った。また研究者サイドからは、学会等での外部発表（論文、招待講演、口頭発表、ポスター発表、出版物等）を行う時は、事前に技術参事経由にて総括へ外部発表連絡票の提出をしてもらい、学会提出前の論文原稿等を読み通して承認を受け発表対応を行った。さらに論文掲載時には、研究者より提出された掲載論文を受理し、総括はより詳細な研究内容と進捗を把握することができた。

「月報」

本研究領域では研究総括が企業出身であること、また領域の役割が基礎研究よりも技術研究にウエイトを置いていることも反映して、研究者側からの月報報告を推奨することで、別途、月ごとのきめ細かな報告や進展あるいは問題点・相談等を自由に記載して頂く環境を整えた。本月報に関しては、研究者側に負担が掛からないよう、あくまでも自主的なこと、また必ずしも厳格に1ヶ月毎でもなく、2～3ヶ月毎でも可能とすることで、タイムリーに研究者側の研究進捗や問題点把握・相談対応が行えたことで、他領域にはない有益な手段となり得た。

「研究計画ヒアリング」

- ・新規採択の研究者には、採択年度初めのサイトビジットを通じて、全期間の研究計画の詳細を研究総括に直接説明する機会を設けた（10～11月頃）。出席者は採択研究者と研究総括、および領域内技術参事、事務参事、本部担当の参加にてヒアリングを行った。ここではおよそ一人につき1～1.5時間程度の時間をかけて、研究計画における目標と課題、各年度の研究アプローチ、期待する成果と出口イメージ、研究予算、設備導入内容、研究遂行にあたる懸案事項等について、プレゼンテーションと質疑応答を行った。この説明会は研究者と研究総括とが直接ディスカッションするもので、これにより研究開始の際の相互理解が深まり、その後の研究展開にも有効であった。

- ・さきがけ最終年度に入る前に、当該期の研究者全員に対して、最終年度における研究計画説明会を開催招集（2～3月頃）した。出席者は、研究者、総括、領域参事、本部担当、

また場合により領域アドバイザーにも出席頂いて終日にて実施した。一人につき1時間程度の時間にて、最終年度の研究計画につき討論を進めた。本説明会により、最終年度における研究の纏め方、最後の研究アプローチのあり方、出口成果の具体的イメージの共有、さらに産業界等へのインパクトある成果創出の指導等、研究者にとって非常に有益であり、最終成果のあり方と、どのような点にウエイトを置いて研究遂行すべきかを学ぶ良い機会であった。

8.5 研究拠点訪問と相談対応

平成18年秋～平成22年までに領域内研究者29名全員の研究拠点を訪問した。また適宜、必要に応じて総括や技術参事・事務参事が研究者を訪問した。訪問に際しては、研究計画の説明やその後の進捗を中心に、研究環境として研究スペースや研究設備、さらには研究スタッフなど物的・人的両面でのサポート体制を把握し、必要があれば支援対応を進めた。また初回の訪問では、上司先生等へのご挨拶とともに、さきがけの制度・趣旨のご説明、さきがけへの協力サポートをお願いした。なお研究期間中に所属機関（研究拠点）の異動があった研究者へは再度訪問し、新しい研究環境の状況把握と研究継続のための支援の要否等を対応した。

研究者訪問は、実験装置の具体的稼働や、時間を掛けた議論ができたため、研究内容・進捗・問題点を把握することに加えて、研究への姿勢に関する議論もでき有益であった。

とくに東日本大震災にて被害を蒙った平成20年度採択者である東北大・佐藤義倫研究者に対しては、メール・電話等のやり取りの他に、震災後の2ヶ月後にて東北大・青葉山キャンパスを技術参事が訪問し、被災設備状況や、今後のさきがけ研究対応につきヒアリングを行った。実験室の破壊ならびに設備の損傷や回復の見通し、また修理費用の見込みと研究遅れにつき把握し今後の対応をはかった。その後のさきがけ研究対応として、後日にて総括・本部・研究者との三者会談を進め、研究ハンディーがあるものの期間延長せずに従来の研究期間内を目指して頑張るとのことで合意結論した。

なお特許出願に関わる相談訪問や購入物品の納入把握のため、技術・事務参事の訪問も随時行った。

8.6 研究評価の手続き

研究者が作成した研究終了報告書ならびに1～3期生の各最終年度に開催した研究報告会での成果報告をもとに、領域アドバイザーの意見を参考に、研究総括が評価を行った。評価は、以下の点を重視した。

- 研究計画から見た最終進捗や成果の達成度、産業界への貢献度
- 新たな方向性や新規展開などの今後の展望と期待の度合い
- 研究成果の技術的・科学的なインパクト、内外研究と比較しての重要性

各研究者の評価は、領域活動・評価報告書ならびに研究課題別評価書としてまとめた。

8.7 研究支援活動

「領域会議の開催」（非公開シンポジウム）

領域会議を各年上期・下期の2回開催し、研究者全員から研究の進捗状況や今後の計画等についての報告・討論を行った（添付資料p.27、領域会議）。領域会議は、総括やアドバイザーの都合上、1泊2日を基本とした合宿制で行い、成果の視点のみならず、研究を推進する上での問題点や課題などを率直に報告することで、総括・領域アドバイザーが研究者に対して活力ある討論を行うことができ、研究の方向性や課題解決のための手法など、有益なアドバイスを多く提示することが出来た。また発表会とともに懇親会でも熱意のこもった討論が交わされ、上下も含めた研究者間親交が深まり、領域としての一体感にも役立った。また同時に総括からの積極的な推奨もあり、領域会議を通じて研究者同士が刺激しあい、領域内研究者間の共同研究体制が28件程度と数多く生まれた。

「合同シンポジウムの開催」（非公開シンポジウム）

平成20年10月にて、さきがけ「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」研究領域（H19年度発足）との研究総括双方からの提案・合意で2領域での合同シンポジウムを実施した。両領域にはデバイスを指向している共通項があり、2領域が一つとなって相互に交流することにより大きな飛躍につながる機会、ならびに研究者相互間での刺激による共同研究などへの展開が期待された。領域を代表する6名の研究者発表（スピントロニクスやカーボンナノチューブ等）およびその後の全研究者による3回に分けてのポスター発表を実施し、総勢80名の出席にて、双方の領域アドバイザーが20名参加、研究者発表・ポスター発表では所属領域にとらわれず活発な質疑応答が交わされ、研究者の交流も予想以上に深まった。また2つの領域が1つの領域のような枠を超えての一体感のある会合が実現したことから、領域を超える新たなネットワーク連携への発展が期待できる意義深いシンポジウムとなった。

「研究報告会の開催」（公開シンポジウム）

研究成果の対外的発信の場として、各研究者の終了年度に一般公開の研究成果報告会を開催した（添付資料p.28、研究報告会）。その際に、研究テーマが比較的近い分野、参加者の相乗効果、領域間の交流を深める、相互の刺激をはかるなどの趣旨で共同開催を企画した。平成18年度採択研究者（1期生）の研究報告会では、さきがけ「界面の構造と制御」研究領域（川合眞紀研究総括）と「物質と光作用」研究領域（筒井哲夫研究総括）との「3研究領域合同研究報告会」として2日間で開催した。‘もう一つ先の世界を求めて’と題したテーマにて、特別講演も含めてパラレルでの8セッションで33名の研究者発表とポスターセッションを行い、2日間で述べ283名に参加頂き好評であった。続く平成19年度採択研究者（2期生）の研究報告会も、前回と同様に「3研究領域合同研究報告会」とし、他方、企画では

特別講演も含めてシングルセッションとし30名の研究者発表とポスター掲示として開催した。2日間で延べ333名に参加頂いた。平成20年度採択研究者（3期生）の研究報告会は、諸般の事由により単独開催にて1日終日とし、‘ナノテクに挑む若き研究者たち’と題し、9名の研究者による成果発表、故・鈴木健二（3期生）の上司でもある理研・東大所属の先生による特別講演、ならびに領域内全研究者28名によるポスター発表の企画にて実施した。参加人数は、144名と単独開催では多くの参加者があり、ナノテク分野でもあるため企業からの出席が9割を占めていた。なお研究報告会の開催実施に当たり、最終年度の報告会ではとくに、10学会以上へのリーフレット配布依頼、過去参加者・総括関連研究機関・さがけ&CRESTの領域ADへの個別配布、産学連携部へのイベント配布依頼、数種のメールマガジン関連による案内が功を奏した。

「国際交流活動」

研究者は専門分野の国際学会などを通じて海外研究機関との交流を頻繁に行っており、海外との共同研究推進、日本と海外、例えばJSPS二国間交流事業や日仏先端工学シンポジウム、大学間での研究分野交流などを通じて、幅広い視野での国際交流活動（添付資料p.29、国際交流活動実績）を行った。国際交流活動としては、研究発表と研究者間交流が多いが、とくに有能な研究者は運営に関する責任者をも務めた。

「産学官連携活動・実用化展開活動」

本研究領域は、我が国のナノテクノロジーの基盤技術を強化すると共に新たな技術イノベーション創出による社会貢献を目指しているが、研究成果における社会的還元として産学官連携活動・実用化展開活動にも積極的に取り組んだ。例として、国際ナノテクノロジー総合展・技術会議、ライセンス可能な特許に基づく新技術を公開するJST新技術説明会、イノベーション・ジャパンー大学見本市、マイクロマシン/MEMS展等への参加を積極的に行い、幅広い分野の大学・企業研究者へ実用化に繋がる新規なナノテクノロジー技術をアピールした。またJST研究成果最適展開支援プログラム事業A-StepやNEDO事業などへの応募により、研究期間終了後の実用化を指向した研究展開も推進した（添付資料36P、産学官連携活動・実用化展開活動）。

他方、研究者自身の研究資質に対して、将来、世界の科学・技術をリードすることが期待される潜在性を持った研究者に対して支援される「最先端・次世代研究開発支援プログラム」へも研究者自らが応募し4名の研究者（2期生-吾郷浩樹研究者、3期生-内田建研究者、寺尾潤研究者、柳田剛研究者）が採択された。

「特許出願支援」

ナノテクノロジーへの新しい研究開発や産業展開に資する研究課題が多いこと、また日

本の競争力確保や産業界への技術展開の重要性から、諸機会を利用して特許出願の推奨と相談に応じた。研究者の特許意識は、個人差はあるが全般的には高く、また良好な特許出願については、国内出願に引き続きPCT外国出願を行うことを促進した。なお日本版バイ・ドール法から、研究者の所属機関からの出願を前提としたが、所属機関元の出願予算有無の理由から出願が出来ない案件等は、所属機関からの特許不継承の承認を得てJST から出願対応をはかった。PCT出願に当たっては、主に外部機関に依頼して先行文献調査を行い、新規性・進歩性・産業上の利用可能性を有することを確認前提とし、JST の知的財産審査委員会において評価承認を受けて出願した。出願国としては、米国、韓国、台湾・中国、EU（独、仏）等がナノテク分野での主たる出願国であった。出願実績は、国内 53件（研究期間終了後の特許出願支援 1 件含む）、外国（PCT 出願ベース）17件であった（添付資料22P、特許出願件数）。出願内容としては、競争が著しいカーボンナノチューブやグラフェン分野が多くあった。また出願に際しては、物質特許・製造特許を区別してクレーム・明細書などの出願内容の検討・先行文献調査・国際予備審査等への各対応を研究者・弁理士・技術参事の連携により出願をはかった。

「広報活動」

著名な研究論文雑誌等に掲載されたインパクトの大きい研究成果については、研究者・組織側とともにJST本部・広報・文科省との連携を通じてプレス発表・レクチャー・配布資料対応などの広報活動を活発に行った（添付資料p.28、広報活動状況）。他方、インパクトの大小に関わらず研究成果、受賞、昇進、異動、諸案内等を研究領域のホームページにて掲載に努めた。

「研究期間終了後のフォロー」

1～2期生については研究期間終了後も研究の進展をフォローするために、領域会議にてその後の研究展開や発展性などをフランクに発表して頂き、アドバイザーによる討論を積極的に推奨することで、さらなる飛躍をはかった。また終了後の成果発表制度や特許出願制度を利用して、発展的な内容も含めてさきがけ研究の集大成の国際会議での発表が数多くあり、また国内出願やPCT出願への権利化への実施をはかった。

9. 領域のねらいに対する成果の達成状況

9.1 研究領域全体としての特筆すべき研究成果

本領域研究は、我が国のナノテクノロジーの本格的な実用化時期に必須となるナノ製造の基盤技術を提供すると共に、新たな技術イノベーションの創出、さらにはナノテクノロジーに係わる現象をナノスケール科学により解明することを目的とし、世界や産業界をリ

ード出来る独創的な研究成果が創出されることをねらいとした。

さがけ期間での活発な研究が展開された結果、カーボンナノチューブやグラフェンなどのカーボン材料系の産業化応用に繋がる技術進展、有機材料や微細加工また生体内応用に結びつくナノ結晶材料・粒子創成技術、高精度・量産化技術に結ぶつくナノ構造・加工形成技術、またスピントロニクス分野での画期的なスピン制御法や、ナノスケール半導体における幾多の知見向上、さらには熱電材料分野として巨大熱起電力の実証やバルク材料での特性向上など、幅広い分野でナノテクノロジー基盤技術に貢献できる研究成果が生み出された。これら研究成果は、ナノテクノロジーが関わる広範な分野において有効に機能できる基盤を提供するものであり、また産業製造技術のポテンシャル向上にも役立つと思われる。

より具体的には、カーボン材料として、単層カーボンナノチューブの精密直径制御による高効率・低コストな量産化技術の基盤構築、金属・半導体カーボンナノチューブの分離技術と透明導電性薄膜実証の成功、独創的なグラフェン製膜技術による高品質な単層グラフェン膜合成技術に成功し、実用化への道に繋がったことが挙げられる。

他方、本研究領域内において注目していた課題である、単層カーボンナノチューブのカイラリティーを制御した精密合成技術の確立という大変チャレンジングで難易度が高い課題に対しては、構造制御を考える上での幾つかの重要な成果が認められたものの、道半ばとなり、今後の更なる独創的なアイデアと英知による実用化展開に期待したい。

またナノ結晶材料分野では、有機/金属ハイブリッドポリマーの開発を行って単層のマルチカラーエレクトロクロミック化の基盤技術を実現したことより、カラー電子ペーパーへの実用化展開を可能としたこと、次世代のエレクトロニクス材料として有望な π 共役ポリマーの問題点を解決すべく被覆共役ポリマーの合成に成功し、今後のナノ分子デバイスへの応用展開を期待できることが挙げられる。

ナノ構造・加工技術の分野では、半導体加工技術の基盤である光リソグラフィ技術の加工限界に対して、ナノギャップ構造を利用した局所的な非線形光反応誘起による10nmレベルの高分解能ナノ光リソグラフィ基礎技術を実現した意義は大きい。

またデバイス関連分野では、熱電変換材料の創製として、酸化物熱電材料 SrTiO_3 を用いた独創的な電界効果トランジスタ構造を用いることで、バルクの5倍である巨大熱起電力を実証したことで熱電変換材料の探索加速に対する大きな貢献があった。

さらにスピントロニクス分野では、大容量・低消費電力スピントロニクスデバイス実現への夢に対して、ナノ構造磁性体に直接的に電界を印加することで、スピンを直接ダイナミックに制御できうる革新的な電圧磁気異方性制御に初めて成功し、スピントロニクス分野への多大な貢献を行ったことは特筆に値し、世界をリードできた意義は大きいと言える。

以上の研究成果への導きには、多岐にわたる分野から構成される領域アドバイザーからの常日頃の適切なご指導とご鞭撻、またさがけ研究者間の交流体制に負う所が大きいと言えよう。

9.2 個別研究成果と科学技術・社会に対する効果、今後の期待や展望

本研究領域の研究テーマは、ナノテクノロジー研究開発として、産業社会に展開すべく基幹技術としての役割を担い、素材、情報、バイオ、医療、環境、エネルギーなどの幅広い産業分野に関わり、より快適で健康な社会を実現するための研究課題として捉えられる。またリスクの高いチャレンジングな研究テーマを探索し、新たな技術開拓をめざす側面もある。従って、近い将来の事業でも有り、国民生活や社会経済に結びつき、工業化・製品化の視点において貢献して行く必要がある。ここではスピントロニクスデバイス技術、バイオ生体技術、ナノ化学技術、カーボン材料技術、様々なデバイス技術、加工・リソグラフィ技術などを対象に取り組んだ。結果として、近い将来において実用化に供されるレベルの成果が多く得られた。なかでも特許出願を行った研究成果は、実用化ステージへの期待に応えるのに相応しい技術である。

スピントロニクスデバイス技術：

長浜太郎研究者は、「強磁性絶縁体超薄膜を用いた新規スピントロニクスデバイスの創製」の研究課題において、強磁性絶縁体トンネルバリアを用いた高機能スピンフィルター接合を開発することで、新規スピントロニクスデバイスとしてスピンフィルタートランジスタ（SFT）の実現を目指した。その結果、スピンフィルター材料としてスピネルフェライト酸化物である NiFeO_4 を主体にスピンフィルターに適した磁性絶縁膜を開発し、実際にスピンフィルター接合を作製することで、ダウンスピンに偏極したマイナスのスピンフィルター効果を実証、さらに（110）結晶方位の結晶を用いて12%の負の磁気抵抗効果を観測できた意義は大きい。さらに半導体Geを用いてハンレ効果および逆ハンレ効果を観測することで、半導体へのスピン注入現象を改めて実証確認することが出来た。スピントランジスタ実現に向けた高機能スピンフィルター開発への見通しが得られ、高効率スピン注入への第一歩を示すことができたことは評価できる。

原真二郎研究者は、「基本論理素子に向けたナノスピンバルブ構造の選択形成」の研究課題において、研究者が独自に開発してきた強磁性体 MnAs ナノ構造の有機金属気相選択成長法により、結晶軸が揃った強磁性体／半導体ヘテロ接合構造を、ナノメータ領域で任意の位置に形成できるビルドアップ型作製技術の確立を目指した。その結果、横方向ナノ磁気抵抗素子に向けた高均一ナノクラスタ列の形成技術では、熱的により安定な AlGaAs を用いたナノピラーバッファ層の導入を行うことで、サイズ均一性の高い等方性 MnAs のナノクラスタ列が形成できることを確認し、 SiO_2 絶縁膜によるトンネル障壁層を用いたプロトタイプ素子構造を試作できるレベルに至った。また MnAs ナノクラスタの基礎的な磁化方向制御において、単磁区化では磁化容易軸（ a 軸）のうちの1方向に長軸を持つ形状異方性ナノクラスタ構造の導入が必要不可欠であることを明らかにし、外部磁場方向に依存してナノクラスタが磁化方向に反転する基本動作を確認した。これらの研究結果は、当初目

標の実現には到達しなかったものの、研究者の必死のさきがけ研究努力により、ビルドアップ型結晶成長形成技術に関する問題解明などの多くの要素が摘出された。これら研究結果の一部は、J of Appl. Phys.誌にも掲載されている。

バイオ生体技術：

村上達也研究者は、「生体ナノ粒子を模倣した医療用金属ナノ粒子の創製」の研究課題において、金属ナノ粒子を医療分野に適用させるために、生体分子で被覆して“生体分子と見える”ようにする独自の戦略に立ち、金属ナノ粒子と血清蛋白質であるapoA-Iの複合型ナノ粒子を創生することで、高い生体適合性を付与することを目指した。その結果、N末端43アミノ酸残基を欠損させたapoA-Iの変異体であるリング状apoA-I(44-243)を用い、これとリン脂質を混合して作製したナノディスクND(44-243)に各種の制癌剤を内包させることで、疎水性度の高い制癌剤が定量的に内包され、NDのサイズコントロールが可能であることを見出した。さらに細胞膜透過性ペプチドであるTatペプチドを融合した変異体apoA-I(44-243)tatを作りND(44-243)tatを作製することで細胞内移行活性を確認し、同時に制癌剤の内包を確認して、培養癌細胞と癌モデルマウスを用いて高い抗腫瘍効果があることを明らかにした。そしてオレイン酸被覆体マグネタイトやAuナノロッドの金属ナノ粒子を用いてND(44-243)tatを添加することで、ND(44-243)tat吸着金属ナノ粒子が形成され、生理的条件下で分散安定化できることを明らかにし、これらの金属ナノ粒子の培養細胞中での細胞内移行も確認した。いずれもND(44-243)あるいはND(44-243)tatで被覆された金属ナノ粒子の生体適合性を培養細胞レベルで実証できたことで、金属ナノ粒子を医療分野で利用可能とする基本プロセスを創出した意義は大変大きく、多大な貢献が行えた。今後は、これら金属ナノ粒子の実験動物レベルによる生体適合性検証など、実用化に向けての技術の有用性と新しいドラッグキャリアの開発に期待したい。これら一連の技術は、2011年6月において基礎出願がなされている。

一柳優子研究者は、「医療応用に向けた磁気ナノ微粒子の開発」の研究課題において、ナノサイズでの強磁性あるいは超常磁性の磁気ナノ微粒子を生成し、本ナノ微粒子に官能基を修飾して医療応用へ展開することを目標とした。その結果、CoZnフェライトなど様々なアモルファスSiO₂に内包された2-40nm粒径の磁気ナノ微粒子を創製し、その磁気パラメータの最適化をはかることで、新たな多様な磁気ナノクラスターを得ることができた。さらに官能基としてアミノ基、カルボキシル基、チオール基などを修飾できることを確認し、機能性を有する磁気ナノ微粒子を生成でき、薬剤やタンパク質などで化学物質を結合することが可能となった。具体的にこれらの機能性磁気微粒子を生体内へ適用すべく、薬酸を修飾することで、癌細胞に選択的に導入できること、また一方では、磁気ナノ微粒子のイオン化機能支援により、高解像度のイメージング技術への展開可能なことも明らかにし、医療応用に対するいくつかの有用性が示された。また発熱量の最適化や制御、ならびに生体擬似サンプルでの発熱特性等、癌細胞への温熱療法に向けた基礎データを取得できた。

ステルス化など今後の様々な課題解決を含めて、さらなる医療展開応用に期待したい。これらの技術は、特願2010-109165「マグネタイトナノ微粒子の製造方法」として出願され、他方、JST新技術説明会やイノベーション・ジャパン等の産学官連携活動において技術説明を数多く行った。さらなる実用化を目指して、JST 研究成果最適展開支援プログラムA-STEP等にて研究が継続されている。

平塚祐一研究者は、「生体分子モーターを動力源としたマイクロマシン」の研究課題において、モーター蛋白質であるキネシン・微小管と半導体微細加工技術で作製した微小構造を連結させた、生体分子モーターを動力源としたマイクロマシンを構成することに挑戦した。レジスト材料と界面活性剤により、キネシン分子をマイクロパターンに結合させ微小管の運動を制御できること、凹部を設けた円形トラックが、微小管運動をトラック中心に移動させるのに有効であることを見出した。さらに微小管と人工材料を安定に繋ぐリンカー分子として、変異キネシンを利用することで微小管の動きを伝達させることに成功し、微小構造の輸送を実現させた。最終的に10分間程度安定に回転する微小回転モーターを世界で初めて実現させたことで、当初目標をクリアし、生体分子モーターを動力源としたマイクロマシン実用化への第一歩を踏んだ意義は大きく評価できる。本研究の貢献は、化学エネルギーを力学的仕事に変換する生体分子により駆動する初のモーターであり、従来の静電・電磁モーターとは質的に異なるマイクロマシン分野への新展開が期待される。

ナノ化学技術：

赤松謙祐研究者は、「有機・無機ナノ複合体の創製と精密微細構造制御」の研究課題において、微細構造パラメータを独立に制御したナノコンポジット材料の高効率製造手法の確立を目指した。その結果、高分子マイクロスフィアを用いて、加水分解とイオン交換反応による独自の化学的手法に基づいて金属イオンをドーブし、引き続く水素還元により金属ナノ粒子を析出させることで、金属ナノ粒子のサイズと粒子間距離を独立に制御できうる手法の開発に初めて成功した。これは粒子サイズと粒子間距離の物性を独立に評価できることを意味し、物性因子を明らかにする上で大変有用な成果であり、これにより当初の基本的な目標は十分に達成された。またナノコンポジットの左手系材料に関する興味あるデータも得られ、今後の展開が期待できる。これらの研究成果により、2007年において表面技術協会・進歩賞を受賞した。さきがけ終了後は、科研費若手Aを受託し、「ソフトリソグラフィーとダイレクトメタライズ法の融合による樹脂上への微細配線形成」のテーマで、金属ナノ粒子分散薄膜を樹脂上に作製した基板を接着層として利用する新しい接合様式を提案し、フレキシブル回路基板作製への実用化を念頭においた基礎研究を行っている。

柳下崇研究者は、「高規則性陽極酸化ポーラスアルミナによる膜乳化」の研究課題において、ナノメータースケールの細孔が規則的に配列した高規則性陽極酸化ポーラスアルミナを膜乳化法に適用し、微細な単分散エマルションの作製とその応用を目指した。その結果、乳化膜として用いるポーラスアルミナの細孔径を変化させることでサイズが制御された単分散液滴粒子の作製が可能であり、とくに細孔径が 65nm のポーラスアルミナを用いた場合

は、液滴の平均サイズが 95nm であったことから、微細化することで 100nm 以下の単分散エマルションの作製が可能であることを明らかにした。また得られた液滴を反応場や鋳型として利用することにより、有機系材料や無機系材料からなる単分散固化粒子の形成も可能であることを確認し、単分散固化粒子を高スループットで作製するための技術としての有用性も示すことができた。本手法がサイズ均一性、制御性に優れたナノ微粒子の高効率な製造技術として有望であることを示した意義は大きく、新しい手法として高く評価できる。今後は、単分散ナノ粒子を用いた機能性デバイスの構築に期待したい。これらの技術は、特開 2009-179922「ファイバー状構造体及びその製造方法」、特開 2009-178699「凝集粒子の製造方法」、特開 2009-178698「膜乳化法により形成される単分散エマルションおよびその製造方法ならびにその方法を用いたポリマー微粒子およびコンポジット粒子の製造方法」として出願を行っている。

堀頭子研究者は、「異種分子接合型ナノワイヤーの精密構造制御と機能」の研究課題において、芳香族化合物の面と面で働く静電的相互作用（アーレン・フルオロアーレン相互作用）を駆動力として金属を並べることを目的とし、金属を内包した異なる二種類の分子ブロックを混ぜるだけで交互に配列させ、結合を介せずに近接させた異種金属ナノワイヤーを創製することで、新しい結晶性ナノデバイスの高効率な合成と新しい機能発現を目指した。その結果、2 種類の分子ブロックとしてフッ素置換金属錯体と無置換金属錯体を用い、とくに平面性の高い β -ジケトン金属錯体を主に用いてフッ素置換が及ぼす分子間相互作用を検討し、共結晶として $\text{PtF5}(\beta\text{-ジケトンナト白金錯体})$ を導入することで金属イオン径が大きくなるほど混合後速やかに生成し、細い針状晶が得られるなどの知見を得た。そして共結晶成長として数 10nm から数百 μm の幅、最長数 cm の長さの異方性結晶の合成に成功した。さらに白金のファンデルワールス径が配位子の厚さを超える新規 PtF0-PtF5 共結晶において、発光特性が見られ、かつ柔らかく曲がった結晶成長が観測されるなど有意義な知見を得、さらに伝導度測定では 10^{-7}S/cm 程度の導電率、また亜鉛フタロシアニン錯体系では 10^{-4}S/cm の半導体特性を示したことより、伝導率を保持したままで共結晶化やナノデバイス作製への可能性を示すことができたことで、ナノワイヤー創製に向けての第 1 歩を進めた意義は評価できる。他方、基礎的考察として、フェニル基上にてどのようにフッ素を置換すれば静電的相互作用が発現するかを β -ジケトンナト銅錯体を対象に系統的に調べた結果、置換数 5（結合手以外の全てのフェニル基上の水素をフッ素に置換）でアーレン・フルオロアーレン相互作用によるナノワイヤー型共結晶化が発現することを明らかにした意義は大きい。今後のさらなるナノワイヤー創製による新機能を有する電気・磁気・光複合材料への展開に期待したい。これらの手法は、特願 2010-206274「フッ素置換ジベンゾイルメタニドを配位子とするアルミニウム錯体」で出願なされている。

笠井均研究者は、「有機ナノ結晶を用いた次世代型光機能材料の創出」の研究課題において、当研究者がすでに独自に開発した有機ナノ結晶の作製法である「再沈法」を用いて、サイズ・晶形を制御した有機ナノ結晶を実現し、これを電場・磁場により配向制御させる

こと、またポリマーにより固定化させたナノ結晶配向材料を作製することで、従来にはない発想に基づく次世代型偏光発光材料を創出することを目指した。その結果、ナノ結晶化における時間分解能測定を導入することで、溶液濃度や貧溶媒の温度等の条件により、ナノ結晶形成速度を制御でき、古典核形成理論に従うこと、貧溶媒中での過飽和度が大きいほどナノ結晶形成は速くなり、生成するナノ結晶のサイズが小さくなることなどを明らかにした。これらサイズ・晶形の制御が可能となったことで、ナノ顔料やナノ薬剤等有機ナノ結晶を利用する産業分野に対しても、超微細ナノ粒子化への貢献ができる意義は非常に大きい。なお有機ナノ結晶の配向制御ならびに次世代型偏光発光材料の創出に関しては、道半ばであり現段階では充分とは言えないが、電場印加による配向の確認、また自己組織化法によっても配向可能なことを見出し、現時点において数倍程度の偏光度が得られることを明らかに出来たことで、引き続き新たな材料の展開も含めて継続した研究を望みたい。さらに応用展開として、最終年度でさきがけ研究者との共同研究連携により、ナノ薬剤への応用展開をはかり、抗癌性薬剤であるイリノテカンの活性代謝物であるSN-38に着目し、SN-38二量体ナノ粒子を創生して強い抗癌特性が認められたという、有用で優れた成果が得られたことは、抗癌剤開発分野への大きな貢献であり、高く評価できる。今後はin vivoでの有用性データやナノ抗癌薬剤の実用化に向けて鋭意努力して頂きたい。なおナノ薬剤製法の技術は、特願2010-133486「薬剤多量体微粒子及びその製造方法」にて出願がなされている。さきがけ終了後は、さらなるナノ薬剤の実用化を指向して、JST 研究成果最適展開支援プログラムA-STEP(探索タイプ)にて「制癌剤としての応用を目指した新規2量体ナノ薬剤の作製と薬効評価」の研究テーマ等で進展をはかっている。

樋口昌芳研究者は、「単層マルチカラーエレクトロクロミック材料」の研究課題において、従来のエレクトロクロミック材料の概念を打ち破り、電圧を変化させることにより単層でRGB（赤、青、緑）カラーと無色透明を表現できる革新的エレクトロクロミック材料を開発することを目指した。その結果、有機モジュールとしてビスターピリジン誘導体を用い、鉄やコバルトまたルテニウムなどの金属イオンと錯形成させることで、有機モジュールと金属イオンが交互に連結した種々の有機／金属ハイブリッドポリマーを開発することにいち早く成功した。これにより金属イオンの選択や有機モジュールへ様々な電子吸引基や電子供与基を導入することで、色調を自在制御することが可能となり、他方、金属イオンを電気化学的に酸化することで消色できることを見出し（エレクトロクロミック機能）、これにより当初のさきがけ目標である単層によるマルチカラーエレクトロクロミック化の基盤技術を実現させたことは非常に優れた成果であり高く評価できる。またハイブリッドポリマーの利用は有機部位での構造変化を生じさせないため、高い繰り返し安定性を有していることも実証し、さらに応用展開に向けては、10インチサイズの固体表示デバイスや、印加電圧を変えるだけで5つのパターンが表示できるマルチカラー表示デバイスの実製作にも漕ぎ着けることができ、電子ペーパー等の省エネルギー型の次世代表示デバイスへの実用展開に向けた重要な基礎データを取得できた意義は大きい。今後のさらなる研究展開

に期待する。これらの研究成果は、2008年4月での表題「電子ペーパーのマルチカラー化に成功」NHK(BS)・読売新聞・Newton等9メディア、2009年8月での表題「電子ペーパー」ラボマイスター(フジテレビ)、2010年4月での「電子ペーパーの紹介」NHKニュース(茨城県版)などで幅広く研究紹介された。また08年の高分子学会日立化成賞、2010年の丸文学術研究交流財団による丸文学術賞、2011年5月での在日ドイツ商工会議所によるドイツ・イノベーション・アワードを受賞した。これら一連の技術は、特願2008-552104(PCT/JP2007/074761)「ビス(ターピリジン)化合物金属集積体とそのハイブリッドポリマー及びこのハイブリッドポリマーを用いたエレクトロクロミック装置並びにビス(ターピリジン)化合物金属集積体の合成方法」、特願2009-515275(PCT/JP2008/059475)「有機-無機ハイブリッドポリマーとその製造方法ならびに分子量調整方法」、特願2009-145842(PCT/JP2010/059638)「表示素子とそれを用いたカラー電子ペーパー」として出願されている。さらにさきがけ終了後は、引き続きCREST「プロセスインテグレーションによる機能発現ナノシステムの創製」領域での研究代表者として、「エレクトロクロミック型カラー電子ペーパー」の研究課題により実用化を目指した研究開発を遂行している。

カーボン材料技術：

櫻井英博研究者は、「有機化学手法によるカーボンナノチューブのキラリティ制御」の研究課題において、キラリティ制御を含めた単一組成単層カーボンナノチューブの自在合成という困難な実現に向け、ナノチューブ先端構造である「バッキーボウル」を基盤としたボトムアップ製造技術の開発に果敢にチャレンジした。その結果、 C_3 対称キラルバッキーボウルであるトリメチルスマネン((C)-4)の不斉合成に成功し、バッキーボウルのエナンチオマー(光学異性体)合成に関する初の例とした意義は大きいと言える。また本スマネンのメチル基部位に対して、ホルミル基やヒドロキシ基を有する変換合成を実現することで、様々な官能基への変換を可能とし、半球キラルバッキーボウル合成への実現可能性を導いた。さらにベンジル位を酸素酸化させたトリメチルスマネントリオンを合成し、これがキラルカラムにより光学分割可能であることを見出すことで、「不斉合成」「光学分割」という、キラリティ制御に不可欠な2種類の手法をバッキーボウル合成において実現させたことは、難易度が高いバッキーボウルの自在合成に近づけた研究者努力を高く評価したい。今後も引き続き独創的なアイデアと英知により、今後のブレークスルーを目指して頑張りたい。

吾郷浩樹研究者は、「SWNTの電子構造/カイラリティー制御に向けた精密合成法の探索」の研究課題において、最もチャレンジングな課題である、電子構造やカイラリティーの選択合成を最終目標とし、SWNTの精密成長法に関する研究を目指した。その結果、研究者のオリジナルであるサファイア単結晶上でのSWNTの水平配向成長技術を基盤に、水平配向SWNTにおいて、サファイア結晶面に依存してカイラル角に特定の傾向があることを初めて明らかにし、カイラル角の制御に発展できる知見を得た。また炭素同位体を用いてSWNT

成長過程を可視化するユニークな手法で、触媒が根元にとどまって成長する「根本成長」が起こっていることを解明できたことで、構造制御を考える上での重要な成果が得られた。しかしながら、これらをさらに進めて直径の制御をも含めた選択合成法を確立するまでには至らなかったが、さきがけで得られた成果を基に今後の発展的な研究に期待したい。一方、集積化を目指したSWNTの高次な配向制御は、折り曲げ成長、二方向成長、片方向成長など、ユニークで新しい現象を数多く見出すことができた。さらには、さきがけ研究の途中から検討を進めたグラフェン成長技術に関しては、独自のエピタキシャル金属触媒を利用したCVD法により、高品質で六員環の方向が揃った単層グラフェン膜を初めて合成できたことは、さきがけ研究としては注目に値し、産業界へのインパクトもあり、高く評価できる。今後の大いなる実用化展開に期待したい。これらの成果により、2008年の文部科学大臣表彰若手科学者賞、同年のナノ学会第6回大会産業タイムズ社賞を受賞した。またグラフェン関連の技術は、特願2009-200982「グラフェン薄膜の製造方法およびグラフェン薄膜」、特願2010-45930「グラフェン薄膜の製造方法およびグラフェン薄膜」、国際特許PCT/JP2010/64848「グラフェン薄膜とその製造方法」として出願されている。さらには開発された単層グラフェン製膜技術は、現在、大学発ベンチャー企業である(株)名城ナノカーボンより1cm四方程度のサイズにて製品市販化されている。他方、内閣府最先端・次世代研究開発支援プログラムの採択により、研究課題「グラフェンの成長制御と加工プロセスを通じたカーボンエレクトロニクスへの展開」にて引き続き質の高い研究を進展させている。

前田優研究者は、「バンド構造制御によるカーボンナノチューブ電子材料の創製」の研究課題において、金属性 CNTs と半導体 CNTs の分離と化学修飾による CNTs のバンド構造の制御法を探索し、CNTs の電子特性を最大限に利用できるナノ炭素電子材料の創製を目指した。その結果、フラレノールと界面活性剤、あるいはタンパク質とアルコール添加など分散性制御の新たな開拓を行った。さらにアミンを用いた CNTs の分散・分離・精製の実用的手法を確立し、高濃度に濃縮された金属性 CNTs の応用として、 $3 \times 10^3 \Omega/\square$ 程度と実験室レベルでは良好な特性を持つ透明導電性薄膜の作製に成功した。このことにより、本 CNT 分散・分離技術が、有力な実用技術として実証できたことで大きく評価できる。また、化学修飾による CNTs の電子特性制御を行うための、置換基効果による化学修飾率制御も明らかにしたことで、CNT を機能化する上での研究進展が見られたことは意義深く、今後の展開が期待される。これらの成果により、2008 年の日本化学会「優秀講演賞（学術）」、2010 年の文部科学大臣表彰若手研究者賞を受賞した。また関連技術は、特願 2007-181411（PCT/JP2008/062521）「透明導電性薄膜とその製造方法」、特願 2009-060193（特許出願 PCT/JP2010/054137）「有機修飾カーボンナノチューブの製造方法」、特願 2009-256563「半導体性のカーボンナノチューブの濃縮方法」、特許出願 2010-23553「金属性のカーボンナノチューブが選択的に化学修飾されたカーボンナノチューブの製造方法」等として出願されている。さらに開発された CNT 分散・分離技術等は、1～2 の外部企業へ技術指導が行われ実用化展開へと発展している。

松井淳研究者は、「界面場を用いたナノ材料集積化技術の創製」の研究課題において、界面場がエネルギー的に活性であることに着目し、液／液界面を新たなナノ材料集積場としてとらえ、多様なナノ材料の集積化と、これらを用いた光電子機能の発現を目指した。その結果、水とヘキサンによる液-液界面の構築とエタノール滴下による表面電位制御により、多層カーボンナノチューブによる単層高密度集積膜の作製、無修飾単層カーボンナノチューブによる 10nm 厚さ以下の高透過率・高伝導度な高密度集積膜を実現し、またポリジアセチレン PDA ナノ結晶やフラーレン C60 ナノ結晶の集積化にも成功した。さらに独自の界面交換法により、バインダーを用いないハイブリッド集積体の構築を実現し、これらによる光電子機能の発現をも実証したことで、当初の目標は達成され、液／液界面がナノ材料集積場として創出できたことの意義は大きく評価できる。今後のナノ材料集積場を用いた高効率な機能素子発現への展開を期待する。これらの成果により、2010 年に（財）トーキン科学技術振興財団より第 20 回トーキン科学技術振興財団研究奨励賞を受賞した。また集積場技術は、特願 2008-262653「カーボンナノチューブ配向膜の作製法」として出願されている。

佐藤義倫研究者は、「グラフィン融合助剤を用いた高強度軽量カーボンワイヤーの創製」の研究課題において、余計な母材を入れずに、カーボンナノチューブ同士を結合もしくは融合させ、1 本のカーボンナノチューブが有する優れた強度特性をバルク体まで引き出すという研究者の独創的な概念を基に、グラフィン面結合・融合助剤としてホウ素を用いることで、高強度軽量カーボンワイヤーを創製・実現することを目標とした。その結果、ホウ素の効果を確認するために放電プラズマ焼結法を用いて、ホウ素添加カーボンナノチューブの固化強度特性を調べることで、固化温度の上昇と添加量の増加に伴い、3 点曲げ強度と弾性率が数倍へと増加し、また 1800℃の固化温度では、スティック状グラファイト物質が観測されたことで、ホウ素がナノチューブの構造変形に寄与していることを実験的に明らかにした。次にカーボンナノチューブ繊維を作製するために、Fe 触媒厚さやアセチレンノ濃度・温度・反応時間などの各パラメータを制御することで、垂直配向したマルチウォールカーボンナノチューブの合成を可能とし、これら合成したチューブの側面からナノチューブを引き出し、回転・伸張により約 8 ミクロンの直径サイズをもつカーボンナノチューブの繊維を作製することに成功した。さらにこの繊維にホウ素分散液を通した後、ねじりながら繊維を引き出し、荷重をかけて 2,000℃程度の熱処理を施したカーボンワイヤー繊維につき機械強度特性を評価した結果、ホウ素無添加の未処理繊維と比較して、比強度 1.5 倍、比弾性率 1.8 倍、また破壊エネルギーとして市販の炭素繊維トレカと比べて 2.5 倍の強度比を得た。これらの繊維強度は、従来のトレカなどの炭素繊維に比べて同程度以上の強度繊維を創製できたと言え、独創性ととも実用に向けた一步を踏み出したことで大いに評価したい。本研究は、東日本大震災の被害を受け半年余りの遅延を蒙ったものの研究者の負けじ魂により、最終成果レベルに漕ぎ着けることが出来たことは、さきがけ研究に相応しい姿勢が示されたと言えよう。これらの技術は、特願 2009-59160「カーボンナノチュ

ープの評価方法」、特願 2009-139927「カーボンナノチューブおよびその製造方法」、特願 2009-210370「単層カーボンナノチューブフィルムおよびその製造方法」、2010-116874「カーボンナノチューブおよびその製造方法」等その他として出願されている。

斎藤毅研究者は、「SWNT 量産用自動直径制御合成システムの構築と SWNT 加工

プロセス基礎技術の開発」の研究課題において、従来の CNT 合成法の長所を併せ持つ研究者独自の発案である改良直噴熱分解合成法（eDIPS 法）において、量産化技術の鍵となる反応効率や高純度化に結びつく反応メカニズムの解明を進め、エチレンやビニルラジカルなどの SP2-C2 種が最も効率的な炭素前駆体であることを見出した。また直径制御技術として、分解が容易なエチレンを第 2 炭素源として利用することで、1nm 以下の直径をもつカイラリティーがほぼ揃った半導体 SWNT を精密に合成可能とするなど、半導体性 SWNT の応用展開に極めて有益な合成技術を確認できたことは大いに評価できる。さらに産業界へのインパクトも大きく、SWNT でしか成し得ない応用分野へ貢献できうる画期的な技術として位置づけられる。これらの成果により、2007 年のフラーレンナノチューブ学会より飯島賞を受賞している。また本技術は、特願 2007-178585（PCT/JP2008/061917）「カーボンナノチューブ成膜方法及び成膜装置」、特願 2008-113270「カーボンナノチューブからなる立体構造物とその製造方法」、国際特許 PCT/JP2008/061917「カーボンナノチューブ成膜方法、成膜装置及びカーボンナノチューブ膜」等として出願されている。なお SWNT の精密直径制御技術に関連して、本成果により得られた SWNT 直径と電子遷移相関式が、ISO における技術文書（ISO/TS 10868:2011）として直径評価の国際標準プロトコルに採用・発行されている。また引き続き本技術は、単層 CNT 融合新材料研究開発機構 TASC へ参画することで、実用化開発の展開がはかられている。

デバイス技術：

内藤泰久研究者は、「金属ナノギャップ電極による抵抗スイッチ効果の発生メカニズムの解明」の研究課題において、微小間隙 10nm 程度を有するナノギャップ金属間に電圧印加を行うと、特徴的な抵抗スイッチ効果〔ナノギャップスイッチ NGS 効果〕を示すことを見出し、メカニズム解明に係わる研究を目指した。その結果、スイッチ効果としての低抵抗変化は、原子が電界によりイオン化し静電引力で物資移動することでギャップが狭まっていること、また高抵抗変化は電流によるエレクトロウインドフォースによる物質移動が支配的なことなど、トンネル抵抗を反映したキーパラメータを見出し、かつナノギャップスイッチ効果が非常に幅広い材料依存性を有していることも確認したことで、メカニズム解明に向けた貢献は大きい。最終的に封止構造が不要なことも明らかにしたことで、スイッチ効果に関する多くの知見が得られ、ナノギャップスイッチ NGS 効果を展開する上での有益な寄与を行った。さらなる発展を期待する。

これらの研究成果は、2007 年 5 月にて日本経済新聞「金属ナノギャップ電極を用いた新しい不揮発メモリの開発」、同年 6 月にて日経エレクトロニクス/Tech-On!「次世代の超小型

不揮発性メモリに利用可能な原子スイッチの基本原則を産総研が確認」、同年7月での週刊ナノテク「金属ナノギャップ電極を用いた新しい不揮発性メモリ」、2008年12月でのニュートン「ナノの「すき間」で記憶する」等にて掲載され、また2007年(株)産業タイムズ社の週刊ナノテク賞を受賞した。本技術は、特開2008-198948「2端子抵抗スイッチ素子及び半導体デバイス」、特開2008-311449 (US12/213054)「シリコンによる2端子抵抗スイッチ素子及び半導体デバイス」にて出願公開されている。本デバイス技術の実用化を指向した研究展開では、NEDO支援事業・ナノエレクトロニクス制度において、外部企業と連携して不揮発性メモリ研究開発も行われた。

柳田剛研究者は、「酸化物ヘテロナノワイヤ構造体による不揮発性メモリ素子の創製」の研究課題において、30nm以下の極微ナノ領域での金属酸化物ナノワイヤ構造体を自己組織化法で作製し、これを用いて不揮発性メモリ効果の本質的なメカニズム解明を行うと共に、従来性能を凌駕する不揮発性メモリ特性を実証することを目的とした。その結果、金属酸化物ナノワイヤ構造体の形成では、金属酸化物材料MgOによるVLS成長の基礎メカニズムを明らかにすることで、良好な単結晶MgOナノワイヤ構造体を実現でき、これを用いてナノワイヤ表面上にヘテロ構造を導入するという新規な発想により、NiOやCo₃O₄等の酸化物ヘテロナノワイヤ構造体の創製を可能としたことは、ナノ領域におけるReRAMの実用展開に対する突破口を開いたことで、その意義は非常に大きい。またSiO₂/Si基板上に酸化物ナノワイヤ構造体を配列し、電極接合・架橋を行うナノ電極架橋法を新たに構築することで、10nmサイズ領域における不揮発性メモリ効果の発現確認、10⁴秒以上のメモリ保持時間、10⁸回以上のメモリ書換え回数、多値化動作の実証等、単一ナノワイヤ構造体における不揮発性メモリ効果の諸特性を実証することで、ナノ空間での実用メモリ展開の有効性を明らかにした。またさきがけ研究の大きな目標であった不揮発性メモリ効果のメカニズム検証という課題に対しては、抵抗変化現象がどの部位で発現するかについて、p型酸化物材料ではカソード近傍での抵抗変化を検証、反応性ガスの導入によりメモリ効果がチャネルの酸化・還元反応と密接に関連することなど、従来素子では構造内部に隠れていた電気輸送メカニズムを抽出し、解明への大きな前進をはかることが出来た。さらにナノワイヤのクロスバー構造体を形成することで、駆動電圧を一桁程度劇的に低減できることを見出し、電極間距離に依存したスケールアップ効果の解釈、またバイポーラ型とユニポーラ型に対する極性依存への解明も進み、最終的に素子サイズが極性動作に決定的な役割を果たしていることを明らかにできた。これら原理的な諸問題に関しては、十分な知見が得られているレベルであり、近い将来にて詳細な解明が達成できると思われる。本分野での今後の継続した研究により、ナノワイヤ構造体によるメモリ素子実証への大きな進展が期待できる。これらの研究成果については、The 10th International Symposium on Sputtering and Plasma Processes (ISSP 2009、2009年7月)でのBest Poster Award、17th International Workshop on Oxide Electronics(WOE17、2010年9月)でのBest Poster Award、アメリカ材料学会(2010年11月)でのBest Poster Award、ISSP 2011でのBest Poster Award等を受賞している。なお本メ

メモリ技術は、特願2009-168919「抵抗変化型不揮発性メモリ素子、および、抵抗変化型不揮発性メモリ素子の製造方法」にて出願されている。さらには内閣府最先端・次世代研究開発支援プログラムの採択により、研究課題「自己組織化酸化物ナノワイヤを用いた極微デバイスによるグリーンイノベーション」にて引き続き研究を展開させている。

内田建研究者は、「ナノ半導体への不純物ドーピング効果の解明と低抵抗ナノフィルム半導体の創製」の研究課題において、ナノ構造半導体において、高濃度に不純物をドーピングするための手法を開発し、低抵抗のナノ構造シリコンを創製すること、さらに高濃度ドーピングされたナノ半導体のキャリア輸送機構を明らかにし、量子効果による不純物準位やイオン化率などの基本特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。その結果、高濃度に不純物をドーピングするための手法として、60nm程度と比較的厚いSOI層を用いてイオン注入と結晶性回復のためのアニールを行い、その後にSOI層の酸化工程と続く酸化膜剥離を繰り返すことで、濃度を少し濃縮しながらSOIを薄膜化するプロセスを立案し、最終的には $\sim 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 程度にて結晶性が良好な高不純物濃度を有する3nm以下のSOI極薄膜を作製することに成功した。ただし本技術は、研究レベルでは有益と考えられるが産業上の実用的見地からは別途技術開発が必要であり、今後のさらなる研究検討をお願いしたい。また高不純物濃度と極薄膜SOI層の移動度特性に関しては、50nmレベルのSOI膜では濃度・移動度の関係はバルクと一致するが、10nmレベル以下の薄膜では、2倍程度に移動度が著しく向上することを新たに明らかにした。本移動度向上の結果は、クーロンポテンシャルのシミュレーションにより、ドーピング濃度は同一であっても、バルクに比べてSOI層では近傍の酸化膜中には不純物イオンが存在しないために、トータルのクーロンポテンシャルが減少していることに起因するとの結論を導き、さらに移動度の向上率をSOI膜厚と不純物間の平均距離の比で整理することで、移動度向上の特性を系統的に説明することができた。これらの新たな知見は、ナノスケール半導体へのこれからの展開に対して十分価値ある成果と考えられ評価できる。さらにSOI層における不純物のイオン化エネルギーについても研究を進め、SOI膜が数nmレベルに薄くなると、化合物半導体と同様にイオン化エネルギーが増大することが明らかにされている。未解明な部分もあるが、疑問点を整理しつつ基本現象の解明を進めて頂きたい。Si産業のさらなる発展に向けて、本テーマは重要な役割を果たしていると考えられ、今後の研究深化と実用技術化に向け一層の鋭意努力による貢献をお願いしたい。これらの研究成果は、国際会議International Electron Device Meeting 2009および2010において採択発表されている。また2011年3月にて丸文財団による丸文研究奨励賞を受賞した。さらには内閣府最先端・次世代研究開発支援プログラムの採択により、研究課題「ナノ半導体におけるキャリア輸送熱輸送の統合理解によるグリーンLSIチップの創製」にて引き続き研究展開を行っている。

長谷川裕之研究者は、「高性能有機ナノ結晶トランジスタの低環境負荷製造法の開発」の研究課題において、当研究者が既に独自に考案した、電極間にて有機導電体ナノワイヤを成長させることで、単結晶ナノワイヤを形成でき、かつ電気伝導に有利な分子の配向性が

得られる「ナノ電解法」を用いて、高パフォーマンスな有機ナノ電子デバイスの製造手法を開発することを目的とした。その結果、電子状態の異なる、部分酸化型、完全酸化型、バンド絶縁体型に属する各フタロシアニン系有機材料を幅広く適用して、単結晶ナノワイヤが作製でき、また長軸方向に π スタックが形成されることを確認することで、本手法による有機材料の高導電性が期待される結果を得た。またトランジスタ構造の作製法では、多様な有機材料によるギャップ部への選択作製法の確立、ポリアセチルセルロース膜のパッチ法による固定・埋め込み化を確立した。そしてこれらナノ単結晶デバイスの電氣的評価を行ったところ、トランジスタ性能としては未だ不十分ではあったが、電界効果特性を確認することができた。さらに電極材料として金と ITO のナノインクを用いて印刷電極を作製しナノ電解法を適用したところ、いずれもナノ単結晶による架橋構造を作製でき、「オール大気中プロセス」でのナノデバイス作製法を実現した。有機導電体単結晶ナノワイヤを用いた有機トランジスタの開発において、一定の成果が得られたことを評価する。これらの成果により、2008 年日本化学会より日本化学会優秀講演賞(産業)を受賞した。また本技術は、特願 2009-208247「ナノ電解法を利用したバンド絶縁体型ナノワイヤの作製法」、特願 2010-151505「 π 電子系分子導電体の結晶からなる分子性導体膜を形成する方法」等にて出願が行われている。さらに開発したナノ結晶製法であるナノ電解セルユニットが、岩田硝子工業(株)から 2011 年度内にて製品市販化される予定であり、製品化のトピックは、2012 年 2 月での表題「有機デバイスやナノ配線が簡単に作れる“ナノワイヤ作製キット”を開発」としてプレス発表が行われた。

池田輝之研究者は、「相変態を利用したバルク熱電材料のナノ構造化」の研究課題において、相変態の原理を利用してバルク材料にナノ構造を自発的に形成させ、ナノ構造による高密度界面の導入により格子熱伝導率を低下させ、性能向上をはかることを目標とした。その結果、溶解度の温度依存性を利用して、PbTe 基材料 (SbTe, BiTe, AgTe) においてウイドマンステッテン構造 (板状析出物) を導入できることを明らかにし、また PbTe-Sb₂Te₃ 系では、共析変数を利用してラメラ構造を導入できることを明らかにした。そして与えられた系にてどのような相変態を利用できるかを見極めるには、急温度勾配下・低速ブリッジマン法による一方向凝固が有効であり、状態図・微細構造・熱電特性などのバルク・コンビナトリ研究としての有用性を明らかにした。さらに固相相変態で得られるナノコンポジット構造により熱伝導率を低下させることができ、界面密度が大きいほど熱伝導率の低下が大きいことを明らかにした。これらにより、ナノ構造サイズの定量化・制御、界面密度を制御することで、擬三元 PbTe-AgSbTe 系において、PbTe 系に比べ格子熱伝導率が 50-70%程度低下し、0.5W/mK レベルなる値を得た意義は大きい。さらに新たなナノ構造化法の提案として、メカニカルアロイング法を利用した非平衡プロセスを提案し、実際、環境親和性に優れた新しい熱電材料として注目を集めている Mg₂Si を用いた実験により、Mg₂Si 中に球状のナノ Si 粒を均一に分散させることに成功し、ナノ構造化の寄与がない従来の Mg₂Si に比べて格子熱伝導率が 3 割低下したことを実証した。熱電材料分野にて新た

な有用な手段を提供できた意義は大きいと言える。今後も引き続き、熱電材料の詳細探索とナノ構造化技術により、熱電材料指数が大きく、かつ実用化に耐えられるバルク構造探索を期待する。本技術成果の一部は、米国からの仮出願を終了し、引き続き本出願を3月にて申請する予定である。

加工・リソグラフィ技術：

丸尾昭二研究者は、「3次元ナノ光造形マルチモールドイング」の研究課題において、3次元ナノ光造形技術を用いてマイクロ・ナノ立体構造を作製し、種々の機能性材料に転写する技術を開発するために、ソフトモールドイングとハードモールドイングの手法を用いて、マイクロ・ナノ構造体を形成することを目標とした。その結果、母型構造体を高精度に作製するために、超臨界洗浄・乾燥プロセスを新たに導入し、表面張力の影響なく造形物を取り出す手法を確立した。ソフトモールドイングでは、母型に円筒や平面薄膜を付与すること、また実験条件を最適化することで、マイクロ可動部品など複雑な3次元立体構造の複製率を75%程度までに向上させ、可動部品を同時に複数複製することを可能とした。また複製した可動部品の駆動にも成功し、光ピンセットによる遠隔駆動、光照射高速スパイラルモータを用いた粘性ポンプ開発、また微弱レーザー光による光電駆動マイクロマシン等、幾多の提案と実証が行えたことは、本技術が実用技術として十分なレベルに達していることとして大きく評価できる。さらにハードモールドイングでは、最終的にはクラックのないシリカ構造体の転写に成功し、マイクロ構造体の複製も実証できたことは大きな成果である。今後は、3次元MEMSデバイスや、ラボオンチップ、マイクロ医療ツールなど幅広い分野への応用の期待がもてる。これらの研究成果により、2007年11月でのIEEE International Symposium on Micro-nanomechatronics and Human Science (MHS2007)にてBest paper award、2008年2月での(財)手島工業教育資金団による工業技術研究賞、2011年11月でのMHS2011にてBest paper awardを受賞した。また本技術は、特願2007-8572「マイクロポンプ」、特願2007-062681「微小構造体の移動方法」、特願2007-228176「微細構造造形方法」、特願2009-212415「光電駆動マイクロマシン及び微小可動部材の駆動方法」等にて出願が行われている。

三村秀和研究者は、「ラージスケールナノ精度加工・計測・転写プロセスの構築」の研究課題において、X線用光学素子作製のためのナノ精度の加工・計測による表面創成プロセスの高度化とともに、ラージスケール領域においてナノメートルレベルの転写精度を持つ光学素子作製のための革新的な生産プロセスの構築を目指した。その結果、ナノ精度表面創成プロセスでは、 $200\mu\text{m}\Phi$ の微小加工痕の精度をもち、 $30\mu\text{m}$ の横分解能で計測領域全面にわたり自動計測を可能とし、ミラーを設置するだけで所定領域を計測することが可能な高分解能表面創成システムを開発した。これをX線ミラーの作製に適応し、数 $100\mu\text{m}$ 周期の細かな形状誤差の改善、集光X線周辺における形状誤差に起因する散乱X線の除去等により、7keV用のX線集光ミラーにて理想的な集光特性を確認した意義は大きい。またナノメートル精度をもつミラーを量産するために、「多孔質裏打ち電鋳法」としてのナノ精度転

写プロセスを新提案し、アルミナ多孔質材料と Ni 電析金属との選択、かつバインダー層の工夫により、50mmx5mm の評価領域にてピーク・バレー値で 100nm 以下の表面粗さを実現することで、世界最高の転写精度を達成できた意義は非常に大きく、極限のナノ精度転写プロセス実現への道が開けたと言える。将来のナノ精度をもつ光学素子の大量生産手法として期待したい。これらの研究成果により、2009 年 1 月にて日本放射光学会より第 13 回放射光学会奨励賞の受賞、また 2010 年 3 月にて精密工学会からアフェリエイトの認定を受けている。なお本技術は、特願 2007-260639「電鋳法における形状転写導電層の形成方」、特願 2007-237233「電鋳法による超精密部品の製造方法及び超精密光学部品」の出願を行っている。さらに本技術の展開として、当研究者は国家基幹技術である X 線自由電子レーザー XFEL の集光光学系を担当し、X 線用自由電子レーザー用大型ミラーの開発に成功している。

10. 科学技術上の進歩に資する成果、社会・経済・文化的な価値創出への期待

本研究領域で遂行され最終的に得られた研究成果は、これからのナノテク製造基盤技術に貢献できる研究成果を挙げていると言える。他方、領域の趣旨に合致する科学技術上の進歩とも言えるべき基礎科学領域や応用科学領域の進歩に貢献できる成果も数多く得られた。これらの研究課題は、研究者自らが見出したシーズ研究をベースにして発展させた研究であり高い独創性を有する。スピントロニクス、ナノ高分子、熱電変換材料、ナノ加工、ナノ光リソグラフィの分野において、新規概念の創出、革新的な技術構築、新規構造体形成などの観点で多くの成果が得られており、これらは我が国の基礎研究基盤の強化に資するものと思われる。

以下、このような具体例を分類して示す。

スピントロニクス分野：

野崎隆行研究者は、「ナノ構造スピン系の電界制御」の研究課題において、膜厚 1nm オーダーの極薄ナノ構造磁性体に絶縁体を介して電界を印加することにより、磁気異方性の起源となっている電子軌道を直接操作し、磁化反転を含めたスピンをダイナミックに制御できる革新的技術を確認することを目指した。その結果、1nm 以下の超薄膜強磁性層を有するトンネル接合素子を作製し、膜面内方向へ外部磁場を加えることで、負バイアス下で飽和磁界の増大、すなわち垂直磁気異方性の増大等を観測することで、電圧磁気異方性制御に初めて成功し、スピン制御の現実的で新たな手段を獲得できた意義は非常に大きい。さらに、同様な素子を用いて高周波電界印加による強磁性共鳴励起にチャレンジしホモダイナ検波測定を行うことで、電界による磁気異方性変化を起源とする分散型のスペクトルを観測できたことで、電界による強磁性共鳴励起の実証に世界で初めて成功した。そして消費電力としては、従来のスピントルク励起と比べて約 1/1000 の低電力動作であることを実証

できた。これらスピン制御と強磁性共鳴励起手法を新たな手段で獲得できたことは、スピントロニクス分野への多大な貢献であり、今後のスピン関連応用展開も十分に期待され大きく評価できる。これらの方法は、2011年8月において基礎出願がなされている。

ナノ高分子分野：

寺尾潤研究者は、「被覆共役ポリマーの合成とそのナノ分子デバイスへの応用」の研究課題において、水酸基を全てメチル化した完全メチル化シクロデキストリン誘導体を用い、これに π 共役ゲスト分子が連結した分子を作り、続く分子内自己包接による擬[1]ロタキサンを形成し、その後キャッピングを行って固定化された[1]-ロタキサンモノマーを合成し、最後に本モノマーを重合することで、被覆共役[1]-ロタキサンポリマーを得るという、研究者の深い洞察力に基づいた独創的手法をいち早く実現し、被覆共役ポリマーの新しい合成法として成功した。今後益々の発展が見込まれる共役ポリマーに関する実用レベルの成果である。具体的に得られたポリマーは、溶解性が高く、発光特性が極めて高く、他方、フェニレンエチニレン骨格をもつ分子ワイヤ（被覆ポリフェニレンエチニレン）の合成にも成功し、被覆率が高く剛直性が向上したことで、コレステリック液晶相の発現を明らかにし、また分子内電荷移動度測定により、アモルファスシリコンに匹敵する $0.5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ と共役ポリマーとしては最高値を実現することで、被覆型分子ワイヤの有効性が発揮できたインパクトは大きい。さらには分子配線技術を開発したことで、今後の分子エレクトロニクスデバイスの作製法としての将来展開が大きく期待できる。これらの研究成果により、2009年のシクロデキストリン学会奨励賞、2010年の第26回シクロデキストリンシンポジウム・ポスター最優秀賞を受賞した。

熱電変換材料分野：

太田裕道研究者は、「電界誘起二次元伝導層の熱起電力と制御」の研究課題において、より実用的でかつ簡便な視点に立って独創的なアイデアである電界効果トランジスタ構造を採用することで、高電界印加による伝導層厚さを制御して二次元伝導層を形成し、これにより生じる巨大ゼーベック係数を利用した高効率熱電変換材料の創製を目指した。その結果、酸化物熱電材料である SrTiO_3 を用い、ゲート絶縁膜としてアルミナセメントの主成分として知られる $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C12A7})$ を用いることで良好な SrTiO_3 -FETの作製に成功した。そして水を含む多孔性ガラスを新たに開発することで、水の電気分解を利用して 10^{15} cm^{-2} レベルの高濃度シートキャリア（薄層金属）の蓄積効果を発現出来た意義は非常に大きい。含水ナノ多孔性ガラスを開発してゲート絶縁膜とすることで、熱電能のV字型回復が観測され、バルクの5倍に相当する熱電能の電界変調の実証に成功したことは、新しい熱電変換材料の加速探索に対して、大きな貢献があったと認められ学術的な視点においても大きく評価できる。これらの研究成果は、2010年11月でのNature Communications 誌掲載に伴うプレス発表（レクチャー）、2011年12月でのAdvanced Materials誌掲載に伴うプレス発表にて、

NHKでの放映、多数の新聞紙上ならびにWebニュース等において掲載された。

ナノ加工分野：

藤田淳一研究者は、「超尖鋭プローブによる局在場制御と新材料創成」の研究課題において、超尖鋭プローブの合成手法を確立し、かつこれを用いた高分解能電子顕微鏡下において、局所電界分布の2次元可視化に成功し、電界強度が同定できる局所電界可視化技術を生み出した。さらに超尖鋭プローブを利用したナノカーボン構造体の形成法として、CNTの欠陥修復の操作、グラフェン6員環構造からなる炭素カプセルの人工形成、座屈したDWNTの構造修復形成と電氣的相関、ならびに引っ張り応力下での低加速電子線照射によるCNT収縮現象の発見など、多岐に渡るカーボン人工構造体形成に関する基盤操作を獲得・解明できたことは、次世代トップダウン型ナノ加工技術を一層深く掘り下げることができ優れた成果を創出した。また研究の過程で、固体アモルファスカーボンと液体ガリウムとの固液界面にて、熱処理によりグラフェンが形成されることを新たに見出し、これによる固相合成グラフェンFET動作の実証、ならびに今後のグラフェン材料合成技術の可能性示唆など、次世代の新機能・新材料ナノデバイスの創出技術に向けた期待される大きな研究貢献があった。これらの技術は、特願2008-21638、特願2008-81187、PCT/JP2009/054901「局所電界分布可視化方法とその装置」、ならびに特願2009-080307、PCT/JP2010/054602「グラフェン膜の製造方法および基板へのグラフェン膜の転写方法」として出願がなされている。

ナノ光リソグラフィー分野：

上野貢生研究者は、「ナノ光リソグラフィーによる金属ナノパターン作製技術の開発」の研究課題において、ナノギャップを有する金ナノ構造が示す空間的な光電場増強効果を利用し、局所的な非線形光反応を誘起することにより、高分解能パターンが形成できるナノ光リソグラフィー技術を開発することを目的とした。その結果、ナノギャップ金2量体構造をフォトマスクとして、フェムト秒レーザー光を照射することで、10nmレベル以下の精度をもつフォトレジストパターンの形成、ならびに線幅5nm長さ1 μ mのフォトマスクを用いた同精度のレジストパターン転写実証など、光リソグラフィーによる最小レベルの分解能を実現できた「ナノギャップリソグラフィー技術」は注目されるべき研究成果と言える。さらにプラズモン共鳴に基づいて放射モードと結合した散乱光が、フォトレジストを伝播する現象を利用して、様々な金属ナノパターンを数nm内の標準偏差ばらつきで形成できる新しい「プラズモンリソグラフィー技術」をも開発できたことで、ナノインプリントに代わる新たなナノパターンニング技術への展開が今後に期待される。いずれも現行の光リソグラフィー技術より一桁高い加工分解能を有し、従来技術とは異なる原理に基づくナノ光リソグラフィー技術を実現できたことは、大きな成果である。今後の実用化への展開が期待できる。これらの研究成果により、2010年の光化学協会奨励賞、2011年の日本化学会進歩賞を受賞し、

さらに2011年2月と8月にてプレス発表を行った。また引き続き、さきがけ「ナノシステムと機能創発」研究領域にて「ナノギャップ金属構造を利用した赤外・テラヘルツ光検出システム」の研究課題として応用展開を指向したテーマに取り組んでいる。

11. 総合所見

本研究領域は、ナノテクノロジーの実用化に向けて必須となる製造基盤技術を構築することを目的とし、幅広い材料・デバイス分野にわたりナノテクノロジーの産業貢献をはかる「ナノ製造技術」に係わる研究分野である。研究期間中においては、多くの異分野の研究者と領域アドバイザーにより、時間と場所を問わず活発な相互研究協力が行われ、それによる啓発と刺激により多くのナノテクノロジー関連の技術成果が生まれたものとする。その意味において、研究者世界での人的ネットワークの大切さを改めて痛感した次第である。ここで創出されたカーボン系材料・デバイス、バイオナノ材料・デバイス、有機・分子デバイス、半導体・スピンドバイス、熱電材料、ナノ材料・加工技術などの幅広い材料・デバイス技術群は、新たな産業基盤技術として製造展開へと結びつくことが可能であろうし、さらに基礎研究分野へも波及する内容であると期待する。

研究成果の指標として、学術論文は総数375報（1人平均13報）で、その内9割以上が国際論文である。これらには、Phys.Rev., Nature Communications, J of Appl. Phys., Appl. Phys. Lett., J.Am.Chem.Soc., J.Phys.Chem., Adv.Mater., J.Cryst.Growth, IEEE Electron Devices, J.Vac.Sci.Technol.等の著名な論文誌への掲載が多く含まれている。一方、チャレンジ性の高い研究課題ほど学術論文の数という指標では少ない場合もあるが、貴重な手がかりや問題解決のヒントとなり得るデータが見え始めた研究者も見られる。さらに、さきがけ終了後にもさきがけ研究成果の集大成としての国際学会発表が多くなされており、領域全体としては目標に向けた研究成果が達成されていると言える。これらの多くの研究論文は、各々のナノテク分野において各々インパクトを与えていると考えられ、日本のナノテクノロジー基盤の強化に寄与すると思われる。

他方、製造技術に係わる研究領域としての成果指標でもある特許出願件数は、総数70件、一人平均2.5件であり、またその内の17件が国際PCT出願である。ほとんどの特許は、指定国移行も含めて未だ審査中の段階で未成立であり、現時点で権利評価を行うことはできないが、特許出願数に関しては、領域としての使命や研究者への特許啓蒙により、他さきがけ領域の多くが20件程度以下であることと比べ、多いと言える。また幾人かの研究者が、初めて特許出願プロセス、とりわけPCT出願に関するJST知的財産審査委員会での審査等を経験したことは非常に有意義と考えられ、さらに外部弁理士や技術参事の連携にて、クレームや実施例の構築、また国際予備審査や指定国での審査、他特許との係争対応など、実用化への問題点に直面すべく多くの課題に取り組んだことは、産業実用化ステージに対しての良質な経験になったと考える。

さきがけ研究者は、これらの基礎成果の波及をより具現化するため、外部機関向けあるいは次なる展開ステージに向けて活発な発信活動を行った。とくに実用化への展開に繋がるであろう研究成果は、産学官連携による企業化段階に向けての展開活動が行われ、ライセンス可能な特許に基づく新技術を公開するJST 新技術説明会やイノベーション・ジャパンなどで積極的にアピールが行われた。他方、さきがけ研究期間終了後は、JST 研究成果最適展開支援事業A-StepやNEDO産業技術研究助成事業（若手ブランド）などを主に、さらなる実用化指向研究を促進している幾人かの研究者がいる。これら研究成果を社会還元しようとする意識は、研究者のさらなる研究深耕と研究者自身をより成長させる貴重な機会となる。

また研究成果のアウトリーチ活動は研究成果の社会的還元としても大切であり、顕著な論文発表などを主に対外発信を行った。幾多の成果がプレスリリースされ、新聞紙上やウェブニュース等に取り上げられ報道された。これら一連の活動が、研究者の評価を高め、研究者自身に数多くの受賞や昇進異動のチャンスをもたらすことで、人材育成の観点からも成果が挙げたと考える。

本領域の運営に関しては、領域アドバイザー14名の存在と協力が非常に大きかった。ナノテクノロジーを代表する幅広い分野にて、それぞれの専門領域の知識と経験を踏まえた適正な評価が、さきがけ課題選考に際しても将来性ある有能な研究者の採択に繋がり、また領域会議や研究報告会での研究者への課題解決の糸口や研究展開などに際して大変貴重な提言を数多く頂いた。さらには研究期間終了後の課題評価に際しても、領域会議や研究報告会を通じてのアドバイザーの評価が貴重な判断材料となった。

本領域では、専門領域の異なる幅広い分野から参加したナノテクノロジーを基本理念とした合計29名の研究者が、それぞれの分野で独創的な発想に基づきこれまでにない革新的な技術の創成を目指して研究開発を遂行してきた。その中には、研究期間中に不慮にして逝去された研究者、また東日本大震災の被害を蒙った研究者、ライフイベントにも関わらず継続して研究遂行した研究者がいたものの、研究者仲間と領域アドバイザーに支えながら研究本務を全うしてくれたことに、改めて深い感謝の意を表したい。そして各研究者にとっては3年半という短い研究期間ではあったものの、半数以上の研究者は各々の自己目標に到達できたと言える。目標達成が充分ではなかった研究者も、継続して課題解決に取り組み、今後の方向性や次なる技術展開を深く考察していることで、近い将来においてさらなる次世代ナノテク技術の創出や技術展開が期待できるものと、研究代表者の立場から判断する。各研究者が本研究領域での研究を契機に産業化技術の進展に一層貢献するものと確信する。

最後に、本研究領域は基礎ステージが多いさきがけ研究領域の中にあり、産業応用・社会還元への期待が込められたテクノロジー開発を主体とする初めての研究領域であり、この分野での多くの尖鋭な若手研究者に対して、物心両面での研究支援を行うことができたことと自負する。本領域の終了後も、将来の我が国におけるナノテクノロジー革新のために、

引き続きこの分野での研究支援制度が実施されることを希望する。