

(独) 科学技術振興機構  
戦略的創造研究推進事業  
個人型研究 (さきがけ)

追跡調査報告書

「ナノと物性」  
(2001-2006 年度)

研究総括 神谷武志

2012 年 3 月 31 日

## 目次

要旨 .....	1
第 1 章 追跡調査について .....	4
1.1 調査の目的 .....	4
1.2 調査の対象 .....	4
1.3 研究領域の概要 .....	4
第 2 章 研究領域終了から現在に至る状況 .....	10
2.1 参加研究者全体の動向 .....	10
2.1.1 研究者の職位の推移 .....	10
2.1.2 原著論文の発表件数 .....	10
2.1.3 特許出願件数 .....	13
2.1.4 研究者の受賞 .....	23
2.1.5 研究者の研究助成金獲得状況 .....	26
2.2 参加研究者の研究成果の発展状況 .....	36
2.2.1 第 1 期生(10 名) .....	36
2.2.2 第 2 期生(11 名) .....	47
2.2.3 第 3 期生 (7 名) .....	61
2.3 第 2 章のまとめ .....	70
第 3 章 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果 .....	73
3.1 「無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料の開発」 .....	73
3.1.1 研究成果の発展状況 .....	73
3.1.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献 .....	75
3.1.3 社会経済への波及 .....	77

## 要旨

本資料は、戦略的創造研究推進事業の個人型研究さきがけにおいて、研究終了後一定期間を経過したのち、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活動状況を明らかにし、JST 事業及び事業運営の改善等に資するために追跡調査をした結果をまとめたものである。

「ナノと物性」は、原子・分子レベルで制御された物質、それらの集合体、異種材料の複合、さらに組成や構造をナノメートルレベルで制御・加工した材料、すなわち「ナノ材料」に関する研究を対象とする。具体的には、新規ないし高度な機能発現を目指した材料設計、合成・形成の方法、またナノ物性評価やデバイス試作に関する研究等が含まれる。その第3期の研究者が研究を終了したときから4年を経過した時点で、参加研究者28名全員を対象に調査を行った。

まず、参加研究者全体の動向を把握するため、「職位」、「原著論文発表件数」、「特許出願件数」、「受賞状況」、「研究助成金獲得状況」について調査を行った。

調査の結果、職位については、さきがけ採択時には准教授が10名であったのが、追跡調査時点では、教授が12名、准教授が11名になっているなど、少なくとも23名は明確に上位の職に就いていることが認められた。原著論文発表件数では、1名あたりに換算した数値で見て、さきがけ期間中15.3報、さきがけ終了後27.9報であり、さきがけ終了後の原著論文数の全原著論文数に対する割合は65%とさきがけ終了後に増加していることが分かった。特許出願に関しては、さきがけ期間中（一部さきがけ終了後）に出願した217件中69件が登録されており、登録率は約32%と高く、研究の独創性の高さを示すものと考えられる。特に、湯浅の「磁気抵抗素子」に関する登録特許6件は、「トンネル磁気抵抗素子」が量産化されていることから、非常に価値が高い特許と考えられる。受賞に関しても、世間的にも知られた賞の受賞件数が、さきがけ終了後は13件とさきがけ期間中の2件に比較して大幅に増加している。助成金に関しても、数名の研究者を除いて大方の研究者は、さきがけ終了後も継続的に助成金を獲得している。さきがけ終了後に獲得した大型の助成金に関しても、JST CRESTの研究代表者に4名、ALCAに1名、科研費の新学術領域に4名が採択されたのを始めとして、NEDOの産業技術研究助成事業、科研費若手S、A、基盤A、B、特定領域などに多くの研究者が採択されていることが確認できた。以上の結果から、さきがけ期間中に比較して、さきがけ終了後に研究活動がより活発化していると言える。

次に、参加研究者の研究成果の発展状況について調査を行った。その結果、ほぼ全員の研究者が、さきがけ研究の中心的課題の発展を進めており、原著論文数からも見られる通り、多くの成果が得られつつあることが分かった。

分類別に概観すると、最も大きな進展が見られる分野は、＜産業技術基礎／集積エレクトロニクス＞であり、湯浅の「トンネル磁気抵抗素子の量産化とHDD磁気ヘッドへ

の製品化」、塚越の「フレキシブル・エレクトロニクス実現のための有機トランジスタの動作機構の解明」、菅原の「ハーフメタル強磁性体を用いた MOSFET 型スピントランジスタ」、舟窪の「サイズ効果フリー誘電体によるコンデンサ」など、非常に大きい成果が数多く得られている。

次いで大きな進展がみられる分野は、〈ナノテク基礎／機能材料開発〉であり、大友の「原子レベル制御による酸化物界面の創製と高移動度電子デバイス応用」、田中健の「金属イオン配列制御と機能発現」、田中秀の「強相関電子デバイスの創製に向けた微細加工プロセス確立」、須田の「界面ナノ制御による次世代型パワー半導体」、大野の「カーボンナノチューブの光電子デバイスやプラスチック基板上のカーボンナノチューブ集積回路」などの大きな成果が得られている。

次に、研究者個別で見ると、特筆すべき研究成果としては、下記のもの等が挙げられる。

第一に特筆大書すべき成果としては、湯浅がさがけ研究で実現化した巨大トンネル磁気抵抗効果をベースに結晶性 MgO をトンネル障壁に用いたトンネル磁気抵抗素子 (MgO-MTJ 素子) の開発に成功し、さらにキヤノンアネルバ (株) と共同で量産技術を確立し、この MgO-MTJ 素子を用いたハードディスクドライブ (HDD) 磁気ヘッドは 2007 年から製品化され、現在生産されている HDD のほぼ全てに搭載され、世界をリードする HDD の大容量化に貢献していることである。この特大の成果に対して、6 件の著名な賞が授与されている。今後、巨大トンネル磁気効果を応用した磁気記録式不揮発性メモリー (MRAM) である「スピン RAM」の基本技術の確立が期待されている。

次に特筆すべき成果は、大友がさがけ研究成果をベースにして、ZnO/MgZnO 界面において、酸化物としては世界最高の電子移動度 ( $180,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) の達成に成功したことである。この成果は、青色発光素子に続く次世代素子として着目されている紫外線発光素子や透明トランジスタの実用化など酸化物材料の世界を切り開くものと期待されている。この成果に対しても、3 件の著名な賞が授与されている。

また、他の特筆すべき成果は、塚越が一貫して追求している、有機材料の特有の機能を活かしたフレキシブル・エレクトロニクス実現のための有機トランジスタの動作機構の解明の研究成果である。

研究成果の実用化による社会還元観点から見ると、湯浅の「トンネル磁気抵抗素子の量産化と HDD 磁気ヘッドへの製品化」は、HDD ヘッドの市場規模が世界で約 6000 億円ということであり、社会還元に大きく寄与したと言える。規模は小さいが、高村の「生体高分子を選択的に捕獲・分離する微小流体チップ」は、大学付属病院による高血圧症の診断体制の構築に活用されようとしている。また、ハンディタイプの元素分析機器の製品化に成功している。古園の「無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料」に関しては、抗感染性カテーテルとして、技術移転先等体制を整えて、承認

申請を行った後、早期の臨床応用を目指すもあり、その進展に関心が持たれる。

以上、調査したすべての観点から、さきがけ終了後も、非常に活発に研究が進められており、さきがけ研究の成果が大きく発展しつつあると言える。

# 第1章 追跡調査について

## 1.1 調査の目的

戦略的創造研究推進事業の個人型研究さきがけにおいて、研究終了後一定期間を経過したのち、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活動状況を明らかにし、JST 事業及び事業運営の改善等に資するために追跡調査を行う。

## 1.2 調査の対象

本追跡調査は、さきがけ研究領域「ナノと物性(2001-2006 年度)」の 28 研究課題全てを対象とする。表 1-1 に調査対象と調査対象期間を示す。なお、さきがけは個人型研究であるため、各研究者がそれぞれに 1 研究課題を設定し、研究を展開しているので、参加研究者全員を調査した。

表 1-1 調査対象と調査対象期間

	さきがけ期間	さきがけ終了後調査対象期間	研究課題数
第 1 期	2001 年 12 月－2005 年 3 月	2005 年 4 月－2011 年 9 月	10
第 2 期	2002 年 12 月－2006 年 3 月	2006 年 4 月－2011 年 9 月	11
第 3 期	2003 年 12 月－2007 年 3 月	2007 年 4 月－2011 年 9 月	7

## 1.3 研究領域の概要

「ナノと物性」の総括責任者は神谷武志であり、研究領域の概要は以下のとおりである。

この研究領域は、原子・分子レベルで制御された物質、それらの集合体、異種材料の複合、さらに組成や構造をナノメートルレベルで制御・加工した材料、すなわち「ナノ材料」に関する研究を対象とする。具体的には、機能材として従来のバルク材にならぬ特異な能力を発揮することが期待される究極の人工物質であるナノ材料が、今後情報、医療、エネルギー等、あらゆる産業分野を支える技術となる状況を踏まえ、新規ないし高度な機能発現を目指した材料設計、合成・形成の方法、またナノ物性評価やデバイス試作に関する研究等が含まれる。

このように、本領域はナノメートルレベルで制御・加工した「ナノ材料」に着目し、情報、医療、エネルギー等、あらゆる産業分野への展開と研究を進めている。この領域の概要に沿った研究を行うため 9 名の領域アドバイザーを定め、研究者の指導にあたった。表 1-2 に領域アドバイザーを示す。

表 1-2 領域アドバイザー

領域 アドバイザー	所属	役職	任期
青柳 克信	東京工業大学大学院総合理工学研究科	教授	平成13年4月～平成19年3月
荒川 泰彦	東京大学 先端科学技術研究センター	教授	同上
小倉 睦郎	独立行政法人 産業技術総合研究所 光技術研究部門	グループ リーダー	同上
片岡 一則	東京大学大学院 工学系研究科	教授	平成15年7月～平成19年3月
川畑 有郷	学習院大学 理学部物理学科	教授	平成13年4月～平成19年3月
神原 秀記	株式会社 日立製作所 中央研究所	フェロー	同上
曾根 純一	日本電気株式会社 基礎・環境研究所	所長	同上
樽茶 清悟	東京大学大学院 工学系研究科	教授	同上
横山 浩	独立行政法人 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門	研究部門長	同上

[所属・役職は研究領域終了時を記載]

研究課題（研究者）の公募は平成13年度から3年間にわたり、3度行い、総計28件の研究課題を採択した。表1-3に各期の研究課題、研究者ならびに所属機関と役職を示す。

ナノメートルレベルで制御・加工した新材料、すなわち「ナノ材料」を主軸にした新たな産業分野が21世紀の日本を支える分野として発展すると期待されていることを踏まえて、本研究領域の基本方針としては物理、化学、生物などの既存の科学分野の枠にとらわれず、パイオニア性の高い研究提案を優先して採択する方針を採った。表面科学や原子分子科学の優れた提案も寄せられたが、既存の学問領域を超えたインパクトという観点を重視した。

社会経済へのインパクトの考え方として、単に製造産業への貢献のみならず人類社会の共通した課題である環境問題や医療・福祉への効果が期待されるものについても重視した。

パイオニア性を重視するため即効性のある応用研究のみに偏ることなく、今後ナノサイエンス、ナノテクノロジーで重要性が増すと思われる課題領域の基礎研究も重視した。28件の研究課題を俯瞰すると、産業技術的な成果を挙げたもの6件、環境・医療に貢献するもの5件、ナノテクノロジー基礎として成果が得られたもの17件（スピン制御、極限計測、物性評価、機能材料開発）であった。

さきがけ期間中の成果には世界的に傑出したものが多く、領域事後評価報告書では、特筆すべき成果として下記が挙げられている。

本研究領域の優れた成果として、トンネル磁気抵抗素子の新しい作成法の考案による世界最高のオンオフ比の実現（湯浅）、ナノ無機－有機コンジット材料開発とそれによる細胞感染抑制機能を持つ経皮デバイスの開発（古菌）、高分解能近接場光学顕微鏡による量子ドット励起子波動関数の観察（松田）、ガドリニウム内包フラーレンによる超伝導トンネル接合素子の作成（塚越）、自己組織化ナノ有機分子による機能性集合体構築（磯部）などが挙げられる。この他、固体中のスピン制御やフラーレン、ナノチューブ関連研究で優れた研究成果が多数あった。また、ナノ材料を利用する為には、界面の役割を理解しその制御を行うことが本質的である。本領域において、その本質を捉えた先導的成果が多数あった。

研究成果は多数の原著論文および特許として報告され、成果は質量共に十分である。多くの受賞や研究者の昇進実績がこの成果を裏付けている。

表 1-3 研究課題と研究者（第1期、第2期、第3期）（2011年10月調査）

期 (採択年 度)	研究課題	研究者	所属		
			さががけ採択時	さががけ終了時	調査時
1期 (2001年度) (10名)	カーボンナノチューブの非線形および磁気光学特性の研究	市田正夫	甲南大学理工学部 講師	甲南大学理工学部 講師	甲南大学理工学部物理学科准教授
	ナノプロセッシング技術による高性能ガス吸蔵体の創製	王正明	(独)産業技術総合研究所海洋資源環境部門 研究員	(独)産業技術総合研究所海洋資源環境部門 研究員	産業技術総合研究所 イノベーション推進企画部 企画主幹
	半導体ナノ構造中に現れる新スピン物性の制御と応用	古賀貴亮	NTT 物性科学基礎研究所 リサーチアソシエイト	北海道大学大学院 助教授	北海道大学大学院情報科学研究科情報エレクトロニクス専攻 准教授
	エピタキシャル強磁性トンネル接合を用いた強磁性体/半導体融合デバイス	菅原聡	日本学術振興会 リサーチアソシエイト	東京大学大学院工学系研究科助手	東京工業大学像情報工学研究所&総合理工学研究科 准教授
	量子ドット中のキャリアスピン操作	竹内淳	早稲田大学理工学部 助教授	早稲田大学理工学部 教授	早稲田大学理工学部 教授
	ナノスケール機能調和人工格子による強相関デバイスの創製	田中秀和	大阪大学産業科学研究所 助手	大阪大学産業科学研究所 助教授	大阪大学産業科学研究所産業科学ナノテクノロジーセンター 教授
	時空間制御光を用いた単一量子ドットの量子状態制御	戸田泰則	北海道大学大学院工学研究科 助教授	北海道大学大学院工学研究科 助教授	北海道大学大学院工学研究科 准教授
	無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料の開発	古菌勉	厚生労働省国立循環器病センター研究所 室長	厚生労働省国立循環器病センター研究所 室長	近畿大学生物理工学部臨床工学 教授
	ナノ新材料開発のための表面微小構造解析法による原子位置決定	水野清義	九州大学大学院総合理工学府 助教授	九州大学大学院総合理工学府 助教授	九州大学総合理工学府物質理工学専攻 教授
	超ヘテロ・ナノ結晶の創製と光・電子新機能	渡辺正裕	東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教授	東京工業大学大学院総合理工学研究科 助教授	東京工業大学 総合理工学研究科 准教授
2期 (2002年度) (11名)	半導体人工原子・分子における高周波電子スピン操作	ウィルフレッド ヴァンデルウイール	東京大学 大学院工学系研究科 客員研究員	Twente University, Institute for NanoTechnology Research Program Director	Twente University, Institute for Nano Electronics Professor
	強相関ナノ電子構造の光誘起協同現象による超高速スイッチング	岩井伸一郎	(独)産業技術総合研究所 強相関電子技術研究センター 主	東北大学大学院理学研究科 助教授	東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 教授

		任研究員		
	ナノ強磁性半導体におけるスピン注入磁化反転の研究	大岩顕 東京工業大学像情報工学研究施設 助教授	東京大学大学院工学系研究科講師	東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 講師
	新しい多面体ナノ炭素物質の創製と機能発現	尾上順 東京工業大学原子炉工学研究所 助教授	東京工業大学原子炉工学研究所 助教授	東京工業大学 准教授
	副格子交換ヘテロ構造半導体の高度制御	近藤高志 東京大学大学院工学系研究科助教授	東京大学大学院工学系研究科助教授	東京大学工学部マテリアル工学科 教授
	界面ナノ構造制御によるワイドギャップ半導体の機能融合とパワーデバイスへの展開	須田淳 京都大学大学院工学研究科助手	京都大学 大学院工学研究科講師	京都大学大学院工学研究科電子工学専攻・半導体物性工学准教授
	錯体型人工DNAを用いた金属イオン配列制御と機能発現	田中健太郎 東京大学大学院理学系研究科助教授	東京大学大学院理学系研究科助教授	名古屋大学大学院理学研究科物質理学専攻 教授
	量子ホール系における核磁気共鳴を利用した固体量子ビット素子の開発	町田友樹 科学技術振興事業団基礎的研究発展推進事業 研究員	東京大学生産技術研究所 助教授	東京大学生産技術研究所 准教授
	極限ナノプローブによる半導体ナノ構造の波動関数イメージング・操作	松田一成 (財)神奈川科学技術アカデミー研究員	京都大学化学研究所 助教授	京都大学エネルギー理工学研究所エネルギー変換機能複合機能変換過程領域 教授
	ナノ複合体を用いた遺伝子治療による内科的再生医療	山本雅哉 京都大学再生医科学研究所助手	京都大学再生医科学研究所助手	京都大学再生医科学研究所生体組織工学研究部門生体材料学分野 准教授
	超 Gbit-MRAM のための単結晶 TMR 素子の開発	湯浅新治 (独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門主任研究員	(独)産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門スピントロニクス グループ長	産総研エレクトロニクス研究部門スピントロニクスグループ グループリーダー
3 期 (2003 年度) (7 名)	自己組織化ナノ有機分子による機能性集合体の構築	磯部寛之 東京大学大学院理学系研究科助手	東京大学大学院理学系研究科助教授	東北大学有機化学 教授
	光・電波境界領域における高機能・低消費電力量子カスケードレーザーの開発	大谷啓太 東北大学電気通信研究所 助手	東北大学電気通信研究所 助手	東北大学電気通信研究所ナノ・スピン実験施設 助教
	酸化物量子井戸構造を用いた発光素子及び光非線形性素子の開発	大友明 東北大学金属材料研究所 助手	東北大学金属材料研究所 助手	東京工業大学大学院理工学研究科応用化学専攻 教授
	ピーボッドヘテロ接合量子効果デバイスの創製	大野雄高 名古屋大学大学院工学研究科助手	名古屋大学大学院工学研究科助手	名古屋大学工学研究科 准教授
	生体・溶液系ナノデバイス研究の為の微小流体チップ開発	高村禪 北陸先端科学技術大学院大学'材料科学研究科 助教授	北陸先端科学技術大学院大学'材料科学研究科 助教授	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教授
	1 nm サイズ分子素子伝導物性およびその制御	塚越一仁 (独)理化学研究所和光研究所中央研究所 研究員	(独)理化学研究所和光研究所中央研究所 前任研究員	(独)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 主任研究者
	2次元ナノレイヤー積層による新規誘電特性の発現	舟窪浩	東京工業大学'大学院総合理工学研究科 助教授	東京工業大学'大学院総合理工学研究科 助教授	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 物質科学創造専攻 准教授

## 第2章 研究領域終了から現在に至る状況

### 2.1 参加研究者全体の動向

#### 2.1.1 研究者の職位の推移

職位は、研究成果の蓄積が社会から認められたことを確認する一つの指標であると考えられるため、研究者全員のさきがけ採択時、終了時及び調査時の職位の推移を図 2-1 に示した。

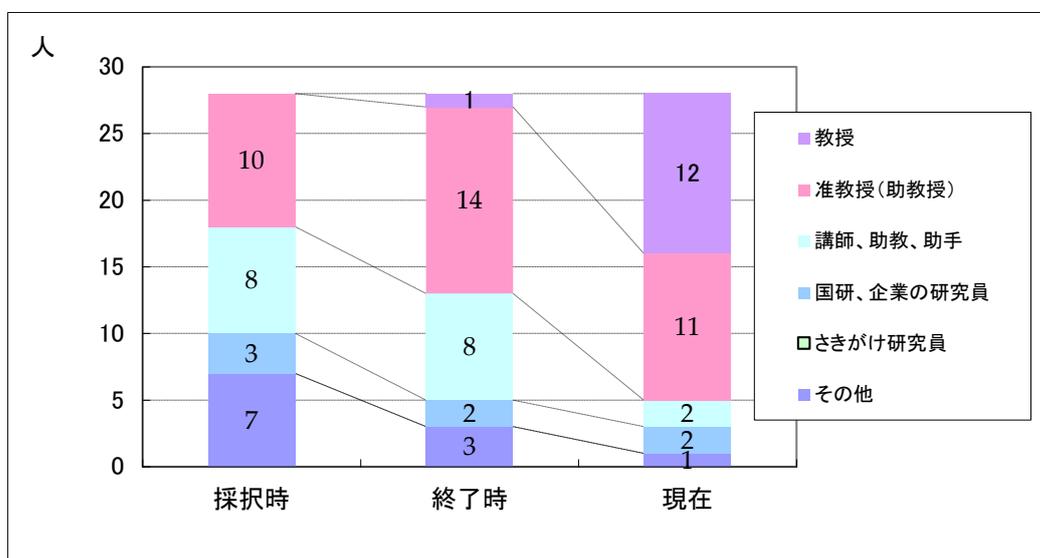


図 2-1 研究者のさきがけ採択時、終了時および調査時の職位の推移

まず、目を引くのが、7名研究者が国研・企業等から大学へ異動したことである。さきがけ採択時に10名いた内、7名が大学に異動し、追跡調査時点で、4名が教授、3名が准教授となっている。

全体的に見ると、さきがけ採択時には准教授が10名であったが、さきがけ終了時には、教授が1名、准教授も14名に増加している。さらに、追跡調査時点では、教授が12名、准教授が11名になっているなど、23名は明確に上位の職についていることが確認される。

#### 2.1.2 原著論文の発表件数

原著論文発表件数の推移は研究者の研究活動状況を示す最も的確な指標の一つであると考えられるため、表 2-1 に、各研究者別にさきがけ開始時から現在までの原著論文数を①に、さきがけ期間終了後から現在までの原著論文数を②に示した。特に、さきがけ

期間終了後の発展状況を見る参考として、両者の比②/①も示した。

表 2-1 研究者の論文（原著論文数）数 (2011年8月末検索 DB:SCOPUS)

期 (採択年度)	研究課題	研究者	①PJ開始 時からの 論文数	②PJ終了 後の論文 数	% (②/①)
1期生 (2001年度)	カーボンナノチューブの非線形および磁気光学 特性の研究	市田正夫	12	7	58.3%
1期生 (2001年度)	ナノプロセッシング技術による高性能ガス吸蔵体 の創製	王 正明	24	15	62.5%
1期生 (2001年度)	半導体ナノ構造中に現れる新スピン物性の制 御と応用	古賀貴亮	14	6	42.9%
1期生 (2001年度)	エピタキシャル強磁性トンネル接合を用いた強 磁性体/半導体融合デバイス	菅原 聡	40	32	80.0%
1期生 (2001年度)	量子ドット中のキャリアスピン操作	竹内 淳	24	16	66.7%
1期生 (2001年度)	ナノスケール機能調和人工格子による強相関 電子デバイスの創製	田中秀和	65	51	78.5%
1期生 (2001年度)	時空間制御光を用いた単一量子ドットの量子 状態制御	戸田泰則	30	25	83.3%
1期生 (2001年度)	無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生 体活性材料の開発	古菌 勉	30	24	80.0%
1期生 (2001年度)	ナノ新材料開発のための表面微小構造解析法 による原子位置決定	水野清義	36	25	69.4%
1期生 (2001年度)	超ヘテロ・ナノ結晶の創製と光・電子新機能	渡辺正裕	10	8	80.0%
2期生 (2002年度)	半導体人工原子・分子における高周波電子ス ピン操作	Wilfred van der Wiel	22	20	90.9%
2期生 (2002年度)	強相関ナノ電子構造における光誘起協同現象 による超高速スイッチング	岩井伸一郎	8	6	75.0%
2期生 (2002年度)	ナノ強磁性半導体におけるスピン注入磁化反 転の研究	大岩 顕	26	11	42.3%
2期生 (2002年度)	新しい多面体ナノ炭素物質の創製と機能発現	尾上 順	29	21	72.4%
2期生 (2002年度)	副格子交換ヘテロ構造半導体の高度制御	近藤高志	23	11	47.8%

2 期生 (2002 年度)	界面ナノ構造制御によるワイドギャップ半導体の機能融合とパワーデバイスへの展開	須田 淳	71	58	81.7%
2 期生 (2002 年度)	錯体型人工 DNA を用いた金属イオン配列制御と機能発現	田中健太郎	15	7	46.7%
2 期生 (2002 年度)	量子ホール系における核磁気共鳴を利用した固体量子ビット素子の開発	町田友樹	24	22	91.7%
2 期生 (2002 年度)	極限光ナノプローブによる半導体ナノ構造の波動関数イメージング・操作	松田一成	36	28	77.8%
2 期生 (2002 年度)	ナノ複合体を用いた遺伝子治療による内科的再生医療	山本雅哉	29	17	58.6%
2 期生 (2002 年度)	超Gbit-MRAMのための単結晶TMR素子の開発	湯浅新治	88	70	79.5%
3 期生 (2003 年度)	自己組織化ナノ有機分子による機能性集合体の構築	磯部寛之	48	28	58.3%
3 期生 (2003 年度)	光・電波境界領域における高機能・低消費電力量子カスケードレーザーの開発	大谷啓太	17	7	41.2%
3 期生 (2003 年度)	酸化物量子井戸構造を用いた発光素子及び光非線形性素子の開発	大友明	66	38	57.6%
3 期生 (2003 年度)	ピーポッドヘテロ接合量子効果デバイスの創製	大野雄高	48	24	50.0%
3 期生 (2003 年度)	生体・溶液系ナノデバイス研究のための微小流体チップ開発	高村 禪	66	31	47.0%
3 期生 (2003 年度)	1nm サイズ分子素子伝導物性およびその制御	塚越一仁	107	71	66.4%
3 期生 (2003 年度)	2次元ナノレイヤー積層による新規誘電特性の発現 -サイズ効果フリー高誘電体の創製-	舟窪 浩	201	101	50.2%
全体			1209	780	64.5%

さきがけ期間中の原著論文数 429 報、さきがけ終了後 780 報合計 1209 報である。1 名あたりに換算すると、それぞれ、15.3 報、27.9 報、43.2 報である。さきがけ終了後の原著論文数の全原著論文数に対する割合は 64.5% であり、さきがけ終了後に研究活動がより活発化していることを示している。研究者別に見ると、舟窪が 201 報（内さきがけ終了後 101 報）、塚越 107 報（71 報）、湯浅 88 報（70 報）、須田 71 報（58 報）、大友 66 報（38 報）、高村 66 報（31 報）、田中秀 65 報（51 報）がトップ 7 名である。

### 2.1.3 特許出願件数

特許出願件数は、基礎研究から産業への貢献を分析する一つの指標であると考えられる。中でも、登録された特許件数は、独創性、進歩性、産業への活用の可能性を客観的に認められたものであり、特に重要な産業への貢献を示す指標と考えられる。表 2-2 に、登録された特許リストを各研究者別に示した。

表 2-2 特許リスト (2011年8月末検索 DB:ATMS)

採択年度	研究者	出願番号	公開番号	特許番号	発明者/考案者	出願人/権利者	発明の名称	国際出願番号
2001年度 (平成13年)	市田正夫	特願 2004-188270	特開 2006-011055	特許 004338600号 (2009.07.10)	市田 正夫, 中村 新男	独立行政法人科学技術振興機構	カーボンナノチューブを用いた光スイッチング素子及びその製造方法	-
2001年度 (平成13年)	市田正夫	特願 2004-188379	特開 2006-011063	特許 004742382号 (2011.05.20)	市田 正夫	独立行政法人科学技術振興機構	光スイッチング装置	-
2001年度 (平成13年)	王正明	特願 2001-392871	特開 2003-192316	特許 003882072号 (2006.11.24)	王 正明, 星野尾 恭美子, 加納 博文, 大井 健太	独立行政法人産業技術総合研究所	多孔質グラファイト複合材料及びその製造方法	-
2001年度 (平成13年)	王正明	特願 2002-059527	特開 2003-261322	特許 003834618号 (2006.08.04)	中辻 みのり, 石井 亮, 王 正明, 大井 健太, 加納 博文	独立行政法人産業技術総合研究所	アルキル基含有粘土架橋体及びその製造方法	-
2001年度 (平成13年)	王正明	特願 2002-381293	特開 2004-210583	特許 004246487号 (2009.01.16)	王 正明, 星野尾 恭美子, 大井 健太	独立行政法人科学技術振興機構, 独立行政法人産業技術総合研究所	新規メソポーラス炭素構造体の製造法	-
2001年度 (平成13年)	王正明	特願 2003-004964	特開 2004-217450	特許 004263491号 (2009.02.20)	王 正明, 松尾 吉 晃, 大井 健太	独立行政法人科学技術振興機構, 独立行政法人産業技術総合研究所	グラファイト酸化物の層間拡張方法、及びそれを用いる含炭素多孔体複合材料の合成	-
2001年度 (平成13年)	王正明	特願 2003-205003	特開 2005-047737	特許 004238351号 (2009.01.09)	王 正明, 星野尾 恭美子, 山岸 美貴	独立行政法人産業技術総合研究所	新規な炭素系の炭化水素吸蔵体、及びその製造法	-
2001年度 (平成13年)	王正明	特願 2004-151471	特開 2005-330162	特許 004552022号 (2010.07.23)	王 正明, 楚 英豪, 山岸 美貴, 廣津 孝弘	独立行政法人科学技術振興機構, 独立行政法人産業技術総合研究所	グラファイト酸化物層間への有機金属種の挿入方法、及びそれを用いる含炭素多孔体複合材料の合成	-
2001年度 (平成13年)	王正明	特願 2005-098907	特開 2006-272266	特許 004474531号 (2010.03.19)	王 正明, 楚 英豪, 廣津 孝弘	独立行政法人産業技術総合研究所	グラファイト酸化物の層間に酸化チタンを含有してなる光触媒、及びその製造方法	-
2001年度 (平成13年)	古賀貴亮	特願 2002-329500	特開 2004-165426	特許 004451593号 (2010.02.05)	古賀 貴亮, 新田 淳作	独立行政法人科学技術振興機構, 日本電信電話株式会社	スピンフィルター装置	-

2001年度 (平成13年)	古賀貴亮	特願 2002-329648	特開 2004-165438	特許 004259851号 (2009.02.20)	古賀 貴亮, 新田 淳作	独立行政法人科学技術振興機構, 日本電信電話株式会社	スピンフィルター	-
2001年度 (平成13年)	古賀貴亮	特願 2002-356574	特開 2004-193200	特許 004148407号 (2008.07.04)	古賀 貴亮, 渡辺 正裕	独立行政法人科学技術振興機構	超格子熱電材料	-
2001年度 (平成13年)	菅原聡	特願 2003-086145	特開 2004-111904	特許 004477305号 (2010.03.19)	菅原 聡, 田中 雅 明	独立行政法人科学技術振興機構	スピントランジスタ及びそれを用いた不揮発性メモリ	WO2004012272 (A1) 2004-02-05 (CN100470844 (C)2009-03-18 KR100977829 (B1)2010-08-24 US7423327 (B2)2008-09-09 US7671433 (B2)2010-03-02 US7825485 (B2)2010-11-02)
2001年度 (平成13年)	菅原聡	特願 2003-434847	特開 2005-197271	特許 004415146号 (2009.12.04)	菅原 聡, 田中 雅 明	国立大学法人 東京大学	強磁性半導体を用いた電界効果トランジスタ及びこれを用いた不揮発性メモリ	-
2001年度 (平成13年)	菅原聡	特願 2005-504130		特許 004143644号 (2008.06.20)	菅原 聡, 松野 知 紘, 田中 雅明	独立行政法人科学技術振興機構	スピン依存伝達特性を有するトランジスタを用いた再構成可能な論理回路	WO2004086625 (A1) 2004-10-07 (CN1333528 (C)2007-08-22 KR100789044 (B1)2007-12-26 US7545013 (B2)2009-06-09 JP4143644 (B2)2008-09-03)
2001年度 (平成13年)	菅原聡	特願 2005-504240		特許 004500257号 (2010.04.23)	菅原 聡, 田中 雅 明	独立行政法人科学技術振興機構	スピン依存伝達特性を有するトンネルトランジスタ及びそれを用いた不揮発性メモリ	WO2004088753 (A1) 2004-10-14 (CN100589247 (C)2010-02-10 KR100737030 (B1)2007-07-09 JP4500257 (B2)2010-07-14 US7397071 (B2)2008-07-08 US7714400 (B2)2010-05-11)
2001年度 (平成13年)	菅原聡	特願 2007-078925	特開 2008-243922	特許 004742276号 (2011.05.20)	菅原 聡, 高村 陽 太	国立大学法人東京工業大学	強磁性体の形成方法並びにトランジスタ及びその製造方法	WO2008123321 (A1) 2008-10-16 (US7960186 (B2)2011-06-14)
2001年度 (平成13年)	菅原聡	特願 2007-509157		特許 004574674号 (2010.08.27)	田中 雅明, 菅原 聡, ファム ナム ハ イ	独立行政法人科学技術振興機構	論理回路および単電子スピントランジスタ	WO2006100835 (A1) 2006-09-28 (JP4574674 (B2)2010-11-04)

								US7851877 (B2)2010-12-14)
2001年度 (平成13年)	田中秀和	特願 2003-010746	特開 2004-228121	特許 003972096号 (2007.06.22)	川合 知二, 田中 秀和, 朴 影根, 李 恵よん, 神吉 輝夫	国立大学法人大 阪大学	不揮発性光メモリ、光情報の記憶 方法、及び光情報の読出方法	-
2001年度 (平成13年)	田中秀和	特願 2003-579288		特許 004326968号 (2009.06.19)	田中 秀和, 川合 知二	独立行政法人科 学技術振興機構	半導体接合素子	WO03081680 (A1) 2003-10-02 (JP4326968 (B2)2009-09-09 US7309903 (B2)2007-12-18 US7468282 (B2)2008-12-23)
2001年度 (平成13年)	戸田泰則	特願 2003-048811	特開 2004-258303	特許 003962811号 (2007.06.01)	戸田 泰則	国立大学法人 北海道大学	光入力方法、光入出力方法及び光 入出力装置	-
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2002-259269	特開 2004-097007	特許 004666335号 (2011.01.21)	岸田 晶夫, 古菌 勉, 宮崎 幸造, 増澤 徹	岸田 晶夫, 増澤 徹	機械的振動による生物機能の制御 方法とその装置	WO2004022726 (A1) 2004-03-18 US7468263 (B2)2008-12-23
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2003-122961	特開 2004-051952	特許 003836444号 (2006.08.04)	古菌 勉, 岸田 晶 夫, 田中 順三, 松田 篤	独立行政法人科 学技術振興機構, 国立循環器病セ ンター総長, 独立 行政法人物質・材 料研究機構	ハイドロキシアパタイト複合体およ びその製造方法、ならびに、それを 用いた医療用材料	WO03102059 (A1) 2003-12-11 (CA2475023 (C)2009-11-24 US7473731 (B2)2009-01-06)
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2003-125958	特開 2004-331723	特許 004145711号 (2008.06.27)	古菌 勉, 岸田 晶 夫	独立行政法人科 学技術振興機構, 国立循環器病セ ンター総長	リン酸カルシウム複合体およびそ の製造方法、ならびに、それをを用 いた医療用材料	-
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2003-208902	特開 2004-143417	特許 004061376号 (2008.01.11)	古菌 勉, 岸田 晶 夫	国立循環器病セ ンター総長	酸化チタン複合体およびその製造 方法、ならびに、それをを用いた医 療用材料	WO2005019317 (A1) 2005-03-03 (CA2479670 (C)2009-09-08 US7611782 (B2)2009-11-03 JP4061376 (B2) 2008-03-19)

2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2003-307549	特開 2005-075679	特許 004265946号 (2009.02.27)	古菌勉, 田中順三, 岸田晶夫, 安田昌司	独立行政法人科学技術振興機構, 国立循環器病センター総長, 独立行政法人物質・材料研究機構	板状リン酸カルシウムおよびその製造方法、ならびにそれを用いた医療用材料およびリン酸カルシウム複合体	-
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2003-318960	特開 2005-082465	特許 004573236号 (2010.08.27)	古菌勉, 岸田晶夫, 田中順三, 安田昌司	独立行政法人科学技術振興機構, 国立循環器病センター総長, 独立行政法人物質・材料研究機構	リン酸カルシウム集合体の製造方法	-
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2003-385811	特開 2005-146120	特許 004473557号 (2010.03.12)	古菌勉, 岸田晶夫, 田中順三, 安田昌司	独立行政法人科学技術振興機構, 国立循環器病センター総長, 独立行政法人物質・材料研究機構	アルコキシシリル基導入方法および導入物、並びに、それを用いた複合体の製造方法、複合体	-
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2004-274148	特開 2006-089778	特許 004649654号 (2010.12.24)	古菌勉, 田中順三, 岡田正弘, 安田昌司	独立行政法人科学技術振興機構, 財団法人ヒューマンサイエンス振興財団, 独立行政法人物質・材料研究機構	官能基導入無機化合物および複合体の製造方法	-
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2004-321101	特開 2006-130007	特許 004570445号 (2010.08.20)	古菌勉, 安田昌司	独立行政法人科学技術振興機構, 財団法人ヒューマンサイエンス振興財団	ハイブリット複合体を表面に備える体内留置型医療用デバイスの製造方法	-
2001年度 (平成13年)	古菌勉	特願 2005-136697	特開 2005-342508	特許 004686743号 (2011.02.25)	古菌勉, 岸田晶夫, 田中順三, 安田昌司	独立行政法人科学技術振興機構, 財団法人ヒューマンサイエンス振興財団, 独立行政法人物質・材料研究機構	経皮端子および医療用チューブ	-

2001年度 (平成13年)	水野清義	特願 2003-270105	特開 2005-026169	特許 003945775号 (2007.04.20)	水野 清義	独立行政法人科学技術振興機構	電界放出低速電子回折用引き込み電極及びそれを用いた電子回折装置	-
2001年度 (平成13年)	渡辺正裕	特願 2002-328204	特開 2004-165344	特許 004701375号 (2011.03.18)	渡辺 正裕	独立行政法人科学技術振興機構	結晶成長方法	-
2001年度 (平成13年)	渡辺正裕	特願 2002-356574	特開 2004-193200	特許 004148407号 (2008.07.04)	古賀 貴亮, 渡辺正裕	独立行政法人科学技術振興機構	超格子熱電材料	-
2002年度 (平成14年)	岩井伸一郎	特願 2003-329123	特開 2005-092147	特許 004427294号 (2009.12.18)	岩井 伸一郎, 岡本博	独立行政法人科学技術振興機構, 独立行政法人産業技術総合研究所	有機電荷移動錯体のコヒーレントコントロールによる遠赤外光スイッチ	-
2002年度 (平成14年)	岩井伸一郎	特願 2005-188677	特開 2007-010781	特許 004676263号 (2011.02.04)	岩井 伸一郎, 山本薫, 薬師 久弥, 岡本博, 森 初果, 柏崎 暁光, 平松 扶季子	独立行政法人科学技術振興機構	光媒体及びそれを用いた光素子	-
2002年度 (平成14年)	岩井伸一郎	特願 2005-196441	特開 2007-017518	特許 004659539号 (2011.01.07)	岩井 伸一郎, 山本薫, 薬師 久弥, 柏崎 暁光, 平松 扶季子, 中屋 秀貴	独立行政法人科学技術振興機構	光媒体及び光素子	-
2002年度 (平成14年)	大岩顕	特願 2003-172473	特開 2005-011907	特許 004297739号 (2009.04.24)	大岩 顕, 宗片 比呂夫, 守谷 頼, 樫村之哉	独立行政法人科学技術振興機構	量子サイズ効果を用いたスピン注入磁化反転磁気抵抗素子	-
2002年度 (平成14年)	大岩顕	特願 2004-100417	特開 2005-286867	特許 004139348号 (2008.06.13)	大岩 顕, 宗片 比呂夫, 黒澤 良太	独立行政法人科学技術振興機構	キャリア誘起強磁性体を用いた素子又は高周波素子	-
2002年度 (平成14年)	須田淳	特願 2003-300647	特開 2005-072280	特許 004392210号 (2009.10.16)	須田 淳, 木下 博之	京セラ株式会社, 須田 淳	レーザー反射鏡およびそれを用いたレーザー光学系	-
2002年度 (平成14年)	須田淳	特願 2005-503747		特許 004382748号 (2009.10.02)	須田 淳, 松波 弘之, 小野島 紀夫	独立行政法人科学技術振興機構	半導体結晶成長方法	WO2004084283 (B1) 2004-12-16 JP4382748 (B2)2009-12-16 KR100715828 (B1)2007-05-10 US7625447 (B2)2009-12-01

2002年度 (平成14年)	須田 淳	特願 2005-512064		特許 004526484号 (2010.06.11)	須田 淳, 松波 弘之	独立行政法人科学技術振興機構	電界効果トランジスタ及びその製造方法	WO2005010974 (A1) 2005-02-03 (JP4526484 (B2)2010-08-18 KR100801544 (B1)2008-02-12 US7622763 (B2)2009-11-24)
2002年度 (平成14年)	町田友樹	特願 2003-550291		特許 004088927号 (2008.03.07)	町田 友樹, 小宮山進, 山崎 智幸	独立行政法人科学技術振興機構	固体中核スピン量子演算素子	WO03049197 (A1) 2003-06-12 (JP4088927 (B2)2008-05-21 US7291891 (B2)2007-11-06)
2002年度 (平成14年)	松田一成	特願 2004-020432	特開 2005-214745	特許 004427343号 (2009.12.18)	松田 一成, 齋木敏治, 穂坂 紀子	独立行政法人科学技術振興機構	近接場光学顕微鏡	-
2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2004-259280	特開 2006-080116	特許 004292128号 (2009.04.10)	ダビット ジャヤブラウイラ, 恒川 孝二, 長井 基将, 前原 大樹, 山形 伸二, 渡辺直樹, 湯浅 新治	キヤノンアネルバ株式会社, 独立行政法人産業技術総合研究所	磁気抵抗効果素子の製造方法	-
2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2006-069533	特開 2006-295908	特許 004677589号 (2011.02.10)	鈴木 義茂, 湯浅新治, 福島 章雄, アーシュイン トラブルカール	独立行政法人科学技術振興機構, 独立行政法人産業技術総合研究所	伝送回路一体型マイクロ波発生素子並びにマイクロ波検出方法、マイクロ波検出回路、マイクロ波検出素子及び伝送回路一体型マイクロ波検出素子	WO2006101040 (A1) 2006-09-28 (US7764136 (B2)2010-07-27)
2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2006-204713	特開 2008-034523	特許 004385156号 (2009.10.09)	湯浅 新治, 福島 章雄	独立行政法人産業技術総合研究所	CCP-CPP型巨大磁気抵抗素子	-
2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2006-511062		特許 004082711号 (2008.02.22)	湯浅 新治	独立行政法人科学技術振興機構, 独立行政法人産業技術総合研究所	磁気抵抗素子及びその製造方法	-
2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2007-155008	特開 2008-310403	特許 004625936号 (2010.11.19)	福島 章雄, 久保田均, 薬師寺 啓, 湯浅新治, 安藤 功兒	独立行政法人産業技術総合研究所	乱数発生器	WO2008152845 (A1) 2008-12-18
2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2007-210197	特開 2008-004956	特許 004581133号 (2010.09.10)	湯浅 新治	独立行政法人科学技術振興機構, 独立行政法人産業技術総合研究所	磁気抵抗素子	-

2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2007-267238	特開 2009-099628	特許 004538614号 (2010.07.02)	中山 昌彦, 薬師寺 啓, 池川 純夫, 湯浅 新治, 甲斐 正, 永瀬 俊彦, 天野 実, 相川 尚徳, 岸 達也, 與田 博明	株式会社東芝, 独 立行政法人産業 技術総合研究所	磁気抵抗効果素子の設計方法及 び磁気ランダムアクセスメモリの設 計方法	KR101010167 (B1) 2011-01-20
2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2008-544594		特許 004724871号 (2011.04.22)	前原 大樹, 久保田 均, 福島 章雄, 湯浅 新治, 鈴木 義茂, 永 峰 佳紀	キヤノンアネルバ 株式会社, 独立行 政法人産業技術 総合研究所	磁気抵抗素子を用いた増幅装置	WO2009047857 (A1) 2009-04-16 (JP4724871 (B2)2011-07-13)
2002年度 (平成14年)	湯浅新治	特願 2008-544596		特許 004682367号 (2011.02.18)	前原 大樹, 久保田 均, 福島 章雄, 湯浅 新治, 鈴木 義茂, 永 峰 佳紀	キヤノンアネルバ 株式会社, 独立行 政法人産業技術 総合研究所	磁気抵抗効果を用いた負性抵抗素 子	WO2009040939 (A1) 2009-04-02 (JP4682367 (B2)2011-05-11 US8013408 (B2)2011-09-06)
2003年度 (平成15年)	大友明	特願 2004-015502	特開 2005-206890	特許 003944584号 (2007.04.20)	川崎 雅司, 福村 知昭, 大友 明, 豊 崎 秀海, 山田 康 博, 大野 英男, 松倉 文礼	国立大学法人東 北大学	コバルトドーピング二酸化チタン膜の作 製方法、コバルトドーピング二酸化チタ ン膜、及び多層膜構造	KR100642563 (B1)2006-11-10 KR100731947 (B1)2007-06-25
2003年度 (平成15年)	大友明	特願 2004-031194	特開 2005-223219	特許 003834658号 (2006.08.04)	川崎 雅司, 大友 明, 福村 知昭, 塚崎 敦, 大谷 亮	国立大学法人東 北大学	薄膜及びp型酸化亜鉛薄膜製造方 法と半導体デバイス	WO2005076341 (A1) 2005-08-18
2003年度 (平成15年)	大友明	特願 2004-046540	特開 2005-231979	特許 004102880号 (2008.04.04)	川崎 雅司, 福村 知昭, 大友 明, 豊 崎 秀海, 山田 康 博, 大野 英男, 松倉 文礼	国立大学法人東 北大学	多層膜構造体、及び素子構造	-
2003年度 (平成15年)	大友明	特願 2004-066119	特開 2005-259815	特許 004543148号 (2010.07.09)	大友 明	独立行政法人科 学技術振興機構	酸化物量子井戸構造及びそれを用 いた光デバイス	-
2003年度 (平成15年)	大友明	特願 2004-231061	特開 2006-049704	特許 004243689号 (2009.01.16)	大友 明, 川崎雅司, 西村 潤, 大久保敦 史	国立大学法人東 北大学	ワイドギャップ導電性酸化物混晶 及びそれを用いた光デバイス	-
2003年度 (平成15年)	大友明	特願 2006-160273	特開 2007-329353	*	中原 健, 湯地 洋 行, 田村 謙太郎, 赤 坂 俊輔, 川崎 雅 司, 塚崎 敦, 大友 明	ローム株式会社, 国立大学法人東 北大学	ZnO系半導体素子	WO2008004405 (A1) 2008-01-10 (US7741637 (B2) 2010-06-22 )

2003年度 (平成15年)	大友明	特願 2008-021953	特開 2008-211203	特許 004362635号 (2009.08.28)	中原 健, 湯地 洋 行, 川崎 雅司, 大友 明, 塚崎 敦, 福村 知昭, 中野 匡規	ローム株式会社, 国立大学法人東 北大学	ZnO系半導体素子	WO2008093873 (A1) 2008-08-07
2003年度 (平成15年)	大野雄高	特願 2004-032036	特開 2005-187309	特許 003749951号 (2005.12.16)	岸本 茂, 水谷 孝, 大野 雄高, 小島 慶祐	国立大学法人名 古屋大学	カーボンナノチューブの作製方法、及び カーボンナノチューブの作製装置	-
2003年度 (平成15年)	高村禪	特願 2004-093484	特開 2005-283163	特許 004643921号 (2010.12.10)	高村 禪, 民谷 栄 一, 西村 尚樹	独立行政法人科 学技術振興機構, 高村 禪	流路における流体の通過を検出する方 法および流体の流れを制御する方法	-
2003年度 (平成15年)	高村禪	特願 2005-285657	特開 2007-092694	特許 003947794号 (2007.04.27)	高村 禪, 下村 忠 寛, 民谷 栄一	国立大学法人北 陸先端科学技術 大学院大学	マイクロポンプ、及び、マイクロポンプを 備える流体移送デバイス	-
2003年度 (平成15年)	高村禪	特願 2006-511513		特許 003932368号 (2007.03.30)	高村 禪, 飯塚 亜 紀子, 民谷 栄一	国立大学法人北 陸先端科学技術 大学院大学	プラズマ発生装置	WO2005093394 (A1) 2005-10-06 (JP3932368 (B2))2007-06-20 US7875825 (B2)2011-01-25
2003年度 (平成15年)	塚越一仁	特願 2004-195131	特開 2006-019464	特許 004458958号 (2010.02.19)	沖仲 元毅, 塚越 一仁, 青柳 克信	独立行政法人理 化学研究所	微細パターン形成方法および微細パター ン形成装置	WO2006003921 (A1) 2006-01-12
2003年度 (平成15年)	塚越一仁	特願 2004-240998	特開 2006-059701	*	藤井 利昭, 阿部 正男, 重藤 訓志, 川村 稔, ア レクバー ユー カスモフ, 塚越 一仁, 青柳 克信	エスアイアイ・ナノ テクノロジー株式 会社, 独立行政法 人理化学研究所	荷電粒子ビーム装置およびそれを 用いた狭ギャップ電極形成方法	US7301159 (B2) 2007-11-27
2003年度 (平成15年)	塚越一仁	特願 2004-255133	特開 2006-071448	特許 004451252号 (2010.02.05)	齊藤 結花, 村上 貴, 河 田 聡, 井上 康志, 塚越 一仁, 伊與木 誠人	エスアイアイ・ナノ テクノロジー株式 会社, 独立行政法 人理化学研究所	近接場顕微鏡用プローブおよびそ の製造方法ならびにそのプローブ を用いた走査型プローブ顕微鏡	US7241987 (B2) 2007-07-10
2003年度 (平成15年)	塚越一仁	特願 2005-000350	特開 2006-188378	特許 004633475号 (2010.11.26)	片浦 弘道, 上野 太郎, 大窪 清吾, 塚越 一仁, 鈴木 信三, 阿知波 洋次	独立行政法人産 業技術総合研究 所	孤立カーボンナノチューブの製造方 法	-
2003年度 (平成15年)	塚越一仁	特願 2008-050715	特開 2009-212127	*	加納 正隆, 塚越 一仁, 三成 剛生	大日本印刷株式 会社, 独立行政法 人理化学研究所	有機トランジスタの製造方法および 有機トランジスタ	US7939453 (B2) 2011-05-
2003年度 (平成15年)	舟窪浩	特願 2004-225991	特開 2006-047015	特許 004413706号 (2009.11.27)	舟窪 浩, 本田 佳久, ナ バトバーガバイン, ナタリア, 寺井 飛鳥	株式会社堀場製 作所	光学特性解析方法、試料測定装 置、及び分光エリブソメータ	US7280208 (B2) 2007-10-09

2003年度 (平成15年)	舟窪浩	特願 2004-280568	特開 2006-093633	特許 004490777号 (2010.04.09)	舟窪 浩, 本田 佳久, ナバトバーガバイン, ナタリア, 寺井 飛鳥	株式会社堀場製作所	製膜条件特定方法	US7567872 (B2) 2009-07-28
2003年度 (平成15年)	舟窪浩	特願 2005-001364	特開 2005-223318	特許 004250593号 (2009.01.23)	青木 活水, 武田 憲一, 福井 哲朗, 舟窪 浩, 岡本 庄司, 浅野 剛司	キヤノン株式会社, 舟窪 浩	誘電体素子、圧電体素子、インクジェットヘッド及びその製造方法	-
2003年度 (平成15年)	舟窪浩	特願 2006-196114	特開 2008-024532	*	伊福 俊博, 武田 憲一, 福井 哲朗, 舟窪 浩	キヤノン株式会社, 国立大学法人東京工業大学	圧電体、圧電体素子、圧電体素子を用いた液体吐出ヘッド及び液体吐出装置	WO2008010583 (A1) 2008-01-24 (US7948154 (B2) 2011-05-24)
2003年度 (平成15年)	舟窪浩	特願 2006-231238	特開 2007-288123	*	伊福 俊博, 松田 堅義, 青木 活水, 舟窪 浩, 横山 信太郎, 金 容寛, 中木 寛, 碓山 理究	キヤノン株式会社, 国立大学法人東京工業大学	エピタキシャル酸化物膜、圧電膜、圧電膜素子、圧電膜素子を用いた液体吐出ヘッド及び液体吐出装置	WO2007029850 (A1) 2007-03-15 (US7804231 (B2) 2010-09-28 KR100978145 (B1) 2010-08-25)
2003年度 (平成15年)	舟窪浩	特願 2007-053507	特開 2008-218675	*	伊福 俊博, 福井 哲朗, 武田 憲一, 舟窪 浩, 中木 寛, 碓山 理究, 坂田 修身	キヤノン株式会社, 財団法人高輝度光科学研究センター	圧電体、圧電体素子、圧電体素子を用いた液体吐出ヘッド及び液体吐出装置	US7622852 (B2) 2009-11-24
2003年度 (平成15年)	舟窪浩	特願 2008-322831	特開 2010-143788	*	齋藤 宏, 松田 堅義, 三浦 薫, 高嶋 健二, 東 正樹, 飯島 高志, 舟窪 浩, 岡村 総一郎, 熊田 伸弘, 和田 智志	キヤノン株式会社, 国立大学法人京都大学, 国立大学法人東京工業大学, 国立大学法人山梨大学, 独立行政法人産業技術総合研究所, 学校法人東京理科大学	酸窒化物圧電材料及びその製造方法	US7931821 (B2) 2011-04-26
2003年度 (平成15年)	舟窪浩	特願 2009-122468	特開 2010-006688	*	古田 達雄, 三浦 薫, 武田 憲一, 久保田 純, 舟窪 浩, 東 正樹, 熊田 伸弘, 和田 智志, 飯島 高志, 岡村 総一郎	キヤノン株式会社, 国立大学法人山梨大学, 国立大学法人京都大学, 独立行政法人産業技術総合研究所, 学校法人東京理科大学, 国立大学法人東京工業大学	金属酸化物、圧電材料及び圧電素子	US7906889 (B2) 2011-03-15

主にさきがけ期間中（一部さきがけ終了後）に出願された特許 217 件中 69 件が登録されており、登録率は約 32% と高く、研究の独創性の高さを示すものと考えられる。研究者別に登録特許件数を見て見ると、古園 10 件、湯浅 9 件、王 7 件、田中秀 6 件、大友 6 件がトップ 5 名である。特筆すべきことは、湯浅の 6 件の特許は「磁気抵抗素子」に関する特許であり、特に、内 2 件は産総研が共同で「トンネル磁気抵抗素子（MgO-MTJ 素子）」の量産化技術開発を行ったキャノンアネルバ（株）との共同出願特許であり、MgO-MTJ 素子が量産化されていることから、非常に価値の高い特許であると考えられることである。

#### 2.1.4 研究者の受賞

各種の機関からの受賞は、研究者の成果が外部から高く評価されている重要な指標の一つである。特に、世間的にも名の知られた賞の受賞は、研究者の成果が、専門分野内だけでなく広く社会的な範囲で認められたことの証左と考えられる。さきがけ期間中と終了後の受賞について、表 2-3(a) と表 2-3(b) にそれぞれ示した。

表 2-3 受賞リスト (2011 年 8 月末検索)

(a) さきがけ期間中

採択年度	受賞者名	賞の名称	授与機関	受賞年
1 期生 (2001 年度)	王 正明	源内賞	(財)エレキテル尾崎財団	2003/3
	古賀 貴亮	物性科学基礎研究所所長表彰業績賞	NTT	2004/3
	竹内 淳	JJAP 論文賞	応用物理学会	2004/9
	田中 秀和	学術奨励賞(内山賞)	日本応用磁気学会	2004/12
	田中 秀和	Best Poster presentation award	Korean Physical Society	2004
	田中 秀和	春期研究発表会 講演奨励賞	粉体工学会	2004/4
	田中 秀和	講演奨励賞	応用物理学会	2003/3
	田中 秀和	第 27 回学術講演会優秀講演賞	日本応用磁気学会	2003/11
	渡辺 正裕	東工大挑戦的研究賞	東京工業大学	2004
	渡辺 正裕	研究奨励賞	丸文研究交流財団	2002/3
2 期生 (2002 年度)	尾上 順	手島記念研究賞	(財)手島工業教育資金団	2006/2
	近藤 高志	高岡市民文化賞	高岡市	2003/4
	須田 淳	第 33 回結晶成長国内会議講演奨励賞	日本結晶成長学会	2003/11
	田中 健太郎	研究奨励賞	錯体化学会	2003/9

	松田 一成	研究表彰	光科学技術研究振興財団	2004/3
	湯浅 新治	平成 17 年度理事長賞	産業技術総合研究所	2006/3
	湯浅 新治	第 9 回丸文学術賞	丸文研究交流財団	2006/3
	湯浅 新治	JJAP 論文賞	応用物理学会	2005/9
	湯浅 新治	市村学術賞(貢献賞)	新技術開発財団	2005/4
	湯浅 新治	平成 17 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2005/4
	湯浅 新治	優秀研究賞	日本応用磁気学会	2004/9
	湯浅 新治	第 13 回つくば奨励賞:若手研究部門	(財)茨城県科学技術振興財団	2003/2
3 期生 (2003 年度)	磯部 寛之	進歩賞	日本化学賞	2004/3
	磯部 寛之	大澤賞	フラーレン・ナノチューブ学会	2005/1
	大谷 啓太	平成 18 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2006/4
	大谷 啓太	研究奨励賞	丸文研究交流財団	2005/3/7
	塚越 一仁	学術賞	丸文研究交流財団	2007/3/5
	舟窪 浩	秋季第 66 回応用物理学会講演奨励賞	応用物理学会	2005/9
	舟窪 浩	MRS Fall Meeting, Poster award	MRS	2005/11

(b)さきがけ終了後

採択年度	受賞者名	賞の名称	授与機関	受賞年
1 期生 (2001 年度)	田中 秀和	ISSP2005 優秀ポスター賞	ISSP2005	2005/6
	田中 秀和	第 43 回日本産業映画・ビデオコンクール 経済産業大臣賞	社)日本産業映画協議会、毎日新聞社	2005/6
	田中 秀和	テピアハイテクビデオコンクール 優秀作品賞	(財)機械産業記念事業財団(TEPIA)	2005/5
2 期生 (2002 年度)	岩井 伸一郎	第 16 回日本物理学会論文賞	日本物理学会	2011/3
	須田 淳	SSDM Papar Award	SSDM 2005	2006/9
	田中 健太郎	平成 18 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2006/4
	松田 一成	BCSJ Award Article	日本化学会	2010/12
	松田 一成	第 1 回日本物理学会 若手奨励賞	日本物理学会	2007/9

	松田 一成	研究奨励賞	丸文研究交流財団	2007/3
	松田 一成	平成 18 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2006/4
	湯浅 新治	第 6 回日本学術振興会賞	日本学術振興会	2010/3
	湯浅 新治	2009 年度つくば賞	(財)茨城県科学技術振興財団	2009/11
	湯浅 新治	平成 21 年度井上春成賞	日本経済新聞社、 (財)新技術振興渡辺記念会	2009/7
	湯浅 新治	日本表面科学会賞第 5 回会誌賞	(社)日本表面科学会	2008
	湯浅 新治	内閣総理大臣賞	産学官連携推進会議	2008/6
	湯浅 新治	2007 年度朝日賞	朝日新聞社	2008/1
	湯浅 新治	第 21 回日本 IBM 科学賞	日本 IBM	2007/11
	湯浅 新治	ゴールド・メダル 東京テクノ・フォーラム 21 賞	東京テクノフォーラム 21	2006/4
3 期生 (2003 年度)	磯部 寛之	コニカミノルタ画像科学奨励賞	コニカミノルタ科学技術振興財団	2010/2
	磯部 寛之	野副記念奨励賞	基礎有機化学会	2009/9
	磯部 寛之	平成 20 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	文部科学省	2008
	磯部 寛之	万有製薬研究企画賞	有機合成化学協会	2007
	大谷 啓太	研究奨励賞	(財)みやぎ産業科学振興基金	2007
	大友 明	ゴットフリード・ワグネル賞	ドイツ連邦教育研究大臣、 ドイツ学術交流会 (DAAD)、フラウンホーファー研究機構、ドイツ語圏日本学術振興会研究者同窓会、ドイツ外務省、 (独)科学技術振興機構、 (独)日本学術振興会	2011
	大友 明	日本表面科学会賞第 6 回会誌賞	(社)日本表面科学会	2009
	大友 明	平成 21 年度文部科学大臣表彰若手科学者賞	文部科学省	2009
	大友 明	サー・マーティン・ウッド賞	ミレニアム・サイエンス・フォーラム	2007

塚越 一仁	第 58 回電気科学技術奨励賞	(財)電気科学技術奨励会	2010
塚越 一仁	Poster Award	4th International Meeting on Molecular Electronics	2008
塚越 一仁	MNE Best Poster Award	MNE	2008
塚越 一仁	平成 19 年度文部科学大臣表彰若 手科学者賞	文部科学省	2008
塚越 一仁	第 29 回応用物理学会論文賞	応用物理学会	2007
舟窪 浩	第 62 回日本セラミックス協会賞学 術賞	日本セラミックス協会	2007

学会における若手科学者に対する一定の高い評価の基準と考えられる文部科学大臣表彰 若手科学者賞で見ると、さきがけ期間中に 2 名（湯浅、大谷）、さきがけ終了後に 5 名（田中健、松田、磯部、塚越、大友）の合計 7 名が受賞しており、4 名に 1 名の割合である。世間的にも名の知られた賞で見ると、さきがけ終了後に、湯浅が 6 件（ゴールド・メダル賞、日本 IBM 科学賞、朝日賞、井上春成賞、つくば賞、日本学術振興会賞）を受賞しており本研究者の磁気抵抗素子に関する成果が社会に与えたインパクトが如何に大きかったかを如実に示している。次いで、大友が、さきがけ終了後に、3 件（サー・マーティン・ウッド賞、ゴッドフリード・ワグネル賞、若手科学者賞）を受賞しており、本研究者の酸化物ヘテロ界面に関する成果が非常に大きかったことを示している。なお、さきがけ終了後の受賞数で見ると、湯浅 8 件、塚越 5 件、松田、磯部、大友が各 4 件とトップ 5 名である。

#### 2.1.5 研究者の研究助成金獲得状況

研究助成金の獲得は、研究者にとって、大幅な研究推進を図るために必須の要件であり、同時に、研究内容の重要性や実現性が外部から認められた証左と考えられる。各研究者のさきがけ期間終了後の研究活動状況の重要な指標として、さきがけ期間終了後の研究助成金の獲得状況を表 2-4 に示した。

表 2-4 研究者の研究助成金獲得状況 (2011年8月末検索 DB:科研費 DB等)

【1期生】

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
古賀 貴亮			1期生		さきがけ期間後								
	科研費 基盤研究(B)	InGaAs系量子井戸におけるメソスコピック・スピン輸送効果の検証											
	科研費 若手研究(A)	半導体量子井戸における零磁場スピン分離の定量的研究とメソスコピック物理への応用											
菅原 聡			1期生		さきがけ期間後								
	科研費 若手研究(A)	シリコン系強磁性半導体の創製とそのスピンデバイスへの応用											
	JST CREST	次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究「ハーフメタル強磁性体を用いたスピン機能MOSFETの開発」											
	NEDO 産業技術研究助成事業 平成17年度第1回採択	シリコン・スピントランジスタの開発とその新機能・高機能集積回路への展開											
竹内 淳			1期生		さきがけ期間後								
	科研費 基盤研究(B)	円偏光光源のための高偏極長寿命スピン緩和量子ドット											
	科研費 基盤研究(B)	光による結合量子ドットのスピン操作											
	科研費 特定領域研究	超高速スピン応答光デバイス											
	科研費 特定領域研究(A)	超高速スピン応答光デバイス											
	科研費 特定領域研究	スピン生成と緩和の光制御と応用											
田中 秀和			1期生		さきがけ期間後								
	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	自己組織化酸化ナノスピントロニクス											
	科研費 若手研究(S)	強相関酸化ナノエレクトロニクス構築に関する研究											
	科研費 基盤研究(B)	強相関電子酸化ナノ構造による室温スピントロニクスデバイスの創成											
	科研費 特定領域研究	DNAプログラム自己組織化を用いたナノ粒子光磁気材料の創成											
	科研費 特定領域研究	シナプス接着分子カドヘリンのダイナミズムと分子間相互作用の可視化・生理的意義											
	科研費 特定領域研究(C)	神経活動依存的なNカドヘリン・アーカドリンのシナプスにおける分子間相互作用											
	科研費 奨励研究(A)→若手研究(B)	金属酸化物人工格子による強相関電子デバイスの創成											
	科研費 奨励研究(A)→若手研究(B)	シナプス活動性依存的なNカドヘリンの構造・機能変化のメカニズムと生理的意義											
	科研費 特定領域研究(A)	スピンフラストレーション人工格子による高温量子スピン流体の創製											
	NEDO 若手研究グラント	サステナブルFe酸化物高温強磁性半導体を用いたスピントロニクス素子の開発											
戸田 泰則			1期生		さきがけ期間後								
	科研費 基盤研究(B)	多光子吸収による窒化物半導体の3次元ナノスケールイメージング											
	JST シーズ発振試験	四光波光回折技術を利用した表面解析装置の開発											

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11		
古菌勉			1期生		さきがけ期間後										
	科研費 基盤研究(B)	超高強度・超撥水性を有する新規医用材料の開発:含フッ素ポリアミドの合成と特性解析	■												
	JST 育成研究 平成16年度採択	細菌感染防止を実現する界面融和型経皮デバイスの開発			■										
	NEDO 革新融合	カテーテルの感染防止と効果を定量化する新しい評価法の確立と標準化			■										
	NEDO 産業技術助成事業	生体内安定性と抗菌性発現の制御機能を持つインテリジェント型インプラントの開発			■										
厚生労働科学研究費補助金 疾病・障害対策研究分野 循環器疾患等生活習慣病対策総合研究事業【がん、心筋梗塞、脳卒中を除く】	内シャント狭窄治療を目的としたナノセラミックス複合化ステントグラフトの開発			■											
水野清義			1期生		さきがけ期間後										
	科研費 基盤研究(B)	シリコンカーバイド上の酸化シリコン膜とその上に形成する薄膜の構造解析									■				
	科研費 若手研究(A)	ナノ新材料開発のための低速電子回折による迅速な表面結晶構造解析			■										
	科研費 基盤研究(B)	表面磁性研究のためのナノメートルスケールスピニ偏極走査電子顕微鏡の開発	■												
	JST 平成20年度シーズ発掘試験(A:発掘型)	電界誘起酸素エッチングによる探針先端の原子レベル先鋭化									■				
NEDO 若手研究 Grant ナノテクノロジー・材料	微小領域への低エネルギー電子線照射とナノ材料の表面構造解析			■											
渡辺正裕			1期生		さきがけ期間後										
	科研費 基盤研究(B)	超ヘテロ・ナノ結晶の創製と光-電子新機能デバイスへの応用			■										
	JST SORST	超ヘテロ・ナノ結晶による光-電子新機能デバイスの創製					■								

科研費	特別推進		
	特定領域		
	新学術領域		
	基盤(S)	基盤(A)	基盤(B)
	若手(S)	若手(A)	若手(B)
JST			
その他	NEDO、厚生省など国の競争的資金制度に採択されたもの		



【2期生】

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
岩井伸一郎			2期生			さがりけ期間後							
	科研費 基盤研究(A)	赤外10フェムト秒パルス列による強相関電子系の電子-フォノンコヒーレント制御											
	科研費 基盤研究(B)	テラヘルツ超高速分光法による光誘起伝導制御の研究											
	科研費 基盤研究(B)	強相関電子系における光励起状態の位相緩和ダイナミクス											
	JST CREST	先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開 「先端超短パルス光源による光誘起相転移現象の素過程の解明」											
	大川情報通信基金 研究助成 基礎分野	超高速、顕微、圧力下分光による強相関二次元有機結晶の超高速光スイッチング											
	公益財団法人カシオ科学振興財団	HPより											
池谷科学振興財団	HPより												
大岩 顕			2期生			さがりけ期間後							
	科研費 基盤研究(A)	単一光子-単一電子スピン結合系における量子状態転写の研究											
	科研費 基盤研究(B)	単一光子注入による少数電子系の電子・核スピン制御の研究											
研究分担グループ長	JST CREST					さがりけ期間後							
尾上 順			2期生			さがりけ期間後							
	科研費 新学術領域研究(研究課題提案型)	新たな曲面量子物性学理の基盤構築											
	研究分担グループ長	JST CREST			さがりけ期間後								
	住友財団基礎科学研究助成	HPより											
	池谷科学技術振興財団	HPより											
	村田学術振興財団研究助成	HPより											
	電源開発(株)先端技術研究助成	HPより											
日本テレコムSCAT助成	HPより												
近藤高志			2期生			さがりけ期間後							
	科研費 基盤研究(B)	半導体波長変換デバイスの電流注入による高機能化の研究											
	科研費 特定領域研究	窒化物半導体の非線形光学定数の精密評価と内部電界による制御											
	科研費 基盤研究(A)	非線形光・電子集積回路の基盤技術に関する研究											
	科研費 基盤研究(B)	半導体疑似位相整合波長変換素子を用いた超小型赤外コヒーレント光源の開発											
	科研費 特定領域研究	化合物半導体疑似位相整合デバイスを用いた波長変換の研究											
科研費 基盤研究(B)	化合物半導体を用いたカスケード非線形光学素子の研究												

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
須田 淳			2期生		さきがけ期間後								
	科研費 基盤研究(B)	新しい結晶構造を持つ窒化アルミニウムの物性制御と深紫外発光デバイスへの展開											
	科研費 若手研究(A)	ヘテロバレルト・ヘテロポリタイプSiC上III族窒化物結晶成長の総合的理解と制御											
	科研費 奨励研究(A)→若手研究(B)	ワイドギャップ半導体ヘテロ界面の電子物性制御とパワーデバイスの高性能化への展開											
	JST 平成17年度 シーズ育成試験	波長変換素子を目的としたワイドギャップ半導体分極反転構造の作製											
	NEDO 産業技術研究助成事業	省エネルギーデバイス基盤材料SiC基板上AINヘテロエピタキシャルテンプレートのトータルプロセスの確立											
田中 健太郎			2期生		さきがけ期間後								
	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	金属錯体の階層的な組織化によるソフトな化学空間の配位プログラミング											
	科研費 基盤研究(B)	プログラムに基づく金属錯体の階層的組織化と機能的化学空間の創製											
	科研費 特定領域研究	生体高分子をテンプレートとした金属錯体の機能集積											
	科研費 特定領域研究	生体高分子をテンプレートとした金属錯体の機能集積											
	科研費 若手研究(A)	生体高分子をモチーフとした金属錯体集積場の構築と動的機能発現											
研究分担 グループ長	JST CREST	ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成 「高精度にサイズ制御した単電子デバイスの開発」											
町田 友樹			2期生		さきがけ期間後								
	科研費 基盤研究(B)	量子ホール系における核スピン制御と電子スピン物性探求											
	科研費 若手研究(A)	量子ホール系端状態における局所的スピン偏極率決定											
研究分担 グループ長	JST CREST	ナノ界面技術の基盤構築 「ナノギャップ電極/ナノ量子系接合による新機能の創出」											
松田 一成			2期生		さきがけ期間後								
	科研費 基盤研究(B)	ナノカーボン物質における量子制御とナノカーボン・フォトリソの開拓											
	科研費 特定領域研究	カーボンナノチューブの光機能性発現に向けた光学応答制御											
	科研費 特定領域研究	ナノプラズモニクスによるカーボンナノチューブの新規光機能性の発現											
	科研費 基盤研究(B)	カーボンナノチューブにおけるコヒーレント量子光制御											
	科研費 若手研究(A)	光ナノプローブによる単一カーボンナノチューブの光物性の探索と量子光デバイス応用											
	JST 平成21年度シーズ発振試験A(発振型)	金属ナノ構造を用いた半導体量子ドットの発光高輝度化とその応用											

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
山本雅哉			2期生			さががけ期間後							
	科研費 若手研究(A)	基礎医学研究のツールとしての幹細胞動員・増幅能をもつ体内インキュベータの開発											
	科研費 基盤研究(B)	生体因子グラジエント化足場材料を利用した幹細胞からの骨-軟骨組織界面の再生											
	科研費 若手研究(A)	幹細胞再生医療のための細胞増殖因子グラジエント化足場の創製											
	科研費 奨励研究(A)→若手研究(B)	徐放性細胞増殖因子と人工細胞外マトリックスとを用いた筋組織の再生医工学											
	JST 研究成果最適展開支援事業A-Step【FS】探索タイプ平成22年度採択	生体組織に近い貯蔵弾性率をもつ高分子ハイドロゲル培養基材の開発											
	JST 独創モデル化	核酸物質の導入、作用発現のための徐放性非ウイルスベクターの開発											
	京都大学教育振興財団第1号事業 海外派遣助成	幹細胞を利用した生体組織工学による再生誘導のための人工ニッチの創製											
湯浅新治			2期生			さががけ期間後							
	JST CREST	次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究「革新的プロセスによる金属/機能性酸化物複合デバイスの開発」											
	JST SORST	MgO障壁TMR素子の高性能化と次世代MRAMへの応用											
主たる共同研究者	JST CREST												

科研費	特別推進		
	特定領域		
	新学術領域		
	基盤(S)	基盤(A)	基盤(B)
	若手(S)	若手(A)	若手(B)
JST			
その他	NEDO、厚労省など国の競争的資金制度に採択されたもの		

	科研費
	JST
	NEDO
	その他

【3期生】

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
磯部寛之					3期生		さきがけ期間後						
	科研費 若手研究(A)	単結合多重連結による原子欠損グラフェンモデルの合成											
	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	$\pi$ 電子豊富分子の生体内化学											
	科研費 若手研究(A)	極性官能基を冠状配置したフラレンの高効率合成と機能性ホスト分子としての応用											
	科研費 特定領域研究(A)→特定領域研究	生体内ポリアミンの機能制御分子の設計・合成とその機能探索											
	JST震災地域を対象とした「研究シーズ探索プログラム」採択	有機電子材料開発に資する環状芳香族分子の構造多様化											
大谷啓太					3期生		さきがけ期間後						
	科研費 若手研究(A)	偏光制御可能な多重波長量子カスケードレーザー											
	科研費 若手研究(A)	ナローギャップ半導体短波長量子カスケードレーザー											
大友明					3期生		さきがけ期間後						
	科研費 若手研究(A)	透明酸化物の微細構造における量子物性の開拓											
	科研費 基盤研究(B)	高効率酸化亜鉛系青色・紫外発光素子の開発											
	科研費 若手研究(A)	酸化亜鉛電界効果ドーピングと紫外発光素子											
	JST CREST	ナノ界面技術の基盤構築 「原子レベル制御による金属酸化物界面の創製と高移動度電子デバイス応用」											
	JST ALCA(先端的低炭素化技術開発)	ユニバーサル透明導電性基板の開発											
	旭硝子財団「若手継続 Grant」	酸化物量子効果デバイスの開発											
大野雄高					3期生		さきがけ期間後						
	科研費 若手研究(B)	カーボンナノチューブにおける単一光子放出現象の研究											
	科研費 若手研究(B)	カーボンナノチューブの光物性と光電子デバイス応用に関する研究											
	科研費 日本学術振興会国際学会等派遣事業	第2回ナノチューブの光学とナノ分光に関する国際ワークショップ(カナダ, オタワ市)への派遣											
	NEDO 産業技術研究助成	GaN HEMTの高性能化および信頼性向上の研究											
	NEDO 産業技術研究助成 平成20年度採択	高性能カーボンナノチューブ薄膜トランジスタの開発											
	第18回 立松財団 特別研究助成	透明フレキシブル電子デバイスのための簡易カーボンナノチューブ薄膜形成技術の開発											
	総務省 SCOPE 若手ICT研究者育成型研究開発	ナノゲート・カーボンナノチューブFETの研究開発											
	名古屋産業科学研究所海外渡航援助	カーボンナノチューブの電子デバイス応用に関する研究											
	名古屋大学 電気系COE若手フォーラム プロジェクト	カーボンナノチューブ発光素子の創製と量子光通信への展開											
	立松財団 海外調査研究助成	第30回化合物半導体国際シンポジウムで研究発表と情報収集											
	新世代研究所 研究助成	顕微共鳴ラマン分光法を用いたカーボンナノチューブトランジスタの特性解析											
	高村禪					3期生		さきがけ期間後					
科研費 基盤研究(B)		液体電極プラズマの素過程の解明と高機能統合分析デバイスへの応用											
科研費 特定領域研究		テーパ状流路を用いた単一細胞からの瞬間RNA抽出と解析研究											
科研費 特定領域研究		テーパ状流路を用いた単一細胞からの瞬間RNA抽出研究											
科研費 基盤研究(B)		電気浸透リニアステッピングアクチュエータを用いたバイオケミカル集積チップの開発											
JST研究成果最適展開支援事業(A-STEP) FSステージ(シーズ顕在化)平成22年度終了		マイクロポンプとマイクロ流路チップを用いた細胞解析・分離装置(平成16年度採択, 22年度には終了)											
JST 大学発ベンチャー創出推進事業 平成16年度採択		液体電極プラズマを用いた超小型原子発光分光分析装置の開発											
塚越一仁					3期生		さきがけ期間後						
	科研費 基盤研究(A)	電界誘起バンドギャップによるグラフェン原子薄膜高速トランジスタ											
	科研費 基盤研究(A)	ナノ薄膜層状伝導システムの創生とコヒーレント伝導制御											
	JST CREST	ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成 「ナノ界面・電子状態制御による高速動作有機トランジスタ」											
	JST A-STEP シーズ顕在化タイプ 平成23年度採択	グラフェン産業創出のための液相グラフェン成長技術の応用展開											

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
磯部寛之					3期生					さきがけ期間後			
	科研費 若手研究(A)	単結合多重連結による原子欠損グラフェンモデルの合成											
	科研費 新学術領域研究(研究領域提案型)	$\pi$ 電子豊富分子の生体内化学											
	科研費 若手研究(A)	極性官能基を冠状配置したフラレンの高効率合成と機能性ホスト分子としての応用											
	科研費 特定領域研究(A)→特定領域研究	生体内ポリアミンの機能制御分子の設計・合成とその機能探索											
	JST震災地域を対象とした「研究シーズ探索プログラム」採択	有機電子材料開発に資する環状芳香族分子の構造多様化											
大谷啓太					3期生					さきがけ期間後			
	科研費 若手研究(A)	偏光制御可能な多重波長量子カスケードレーザー											
	科研費 若手研究(A)	ナロウギャップ半導体短波長量子カスケードレーザー											
大友明					3期生					さきがけ期間後			
	科研費 若手研究(A)	透明酸化物の微細構造における量子物性の開拓											
	科研費 基盤研究(B)	高効率酸化亜鉛系青色・紫外発光素子の開発											
	科研費 若手研究(A)	酸化亜鉛電界効果ドーピングと紫外発光素子											
	JST CREST	ナノ界面技術の基盤構築 「原子レベル制御による金属酸化物界面の創製と高移動度電子デバイス応用」											
	JST ALCA(先進的低炭素化技術開発)	ユニバーサル透明導電性基板の開発											
	旭硝子財団「若手継続 Grant」	酸化物量子効果デバイスの開発											
大野雄高					3期生					さきがけ期間後			
	科研費 若手研究(B)	カーボンナノチューブにおける単一光子放出現象の研究											
	科研費 若手研究(B)	カーボンナノチューブの光物性と光電子デバイス応用に関する研究											
	科研費 日本学術振興会国際学会等派遣事業	第2回ナノチューブの光学とナノ分光に関する国際ワークショップ(カナダ, オタワ市)への派遣											
	NEDO 産業技術研究助成	GaN HEMTの高性能化および信頼性向上の研究											
	NEDO 産業技術研究助成 平成20年度採択	高性能カーボンナノチューブ薄膜トランジスタの開発											
	第18回 立松財団 特別研究助成	透明フレキシブル電子デバイスのための簡易カーボンナノチューブ薄膜形成技術の開発											
	総務省 SCOPE 若手ICT研究者育成型研究開発	ナノゲート・カーボンナノチューブFETの研究開発											
	名古屋産業科学研究所海外渡航援助	カーボンナノチューブの電子デバイス応用に関する研究											
	名古屋大学 電気系COE若手フォーラム プロジェクト	カーボンナノチューブ発光素子の創製と量子光通信への展開											
	立松財団 海外調査研究助成	第30回化合物半導体国際シンポジウムで研究発表と情報収集											
	新世代研究所 研究助成	顕微共鳴ラマン分光法を用いたカーボンナノチューブトランジスタの特性解析											
	高村禪					3期生					さきがけ期間後		
科研費 基盤研究(B)		液体電極プラズマの素過程の解明と高機能統合分析デバイスへの応用											
科研費 特定領域研究		テーパ状流路を用いた単一細胞からの瞬間RNA抽出と解析研究											
科研費 特定領域研究		テーパ状流路を用いた単一細胞からの瞬間RNA抽出研究											
科研費 基盤研究(B)		電気浸透リニアステップングアクチュエータを用いたバイオケミカル集積チップの開発											
JST研究成果最適展開支援事業(A-STEP) FSステージ(シーズ顕在化)平成22年度終了		マイクロポンプとマイクロ流路チップを用いた細胞解析・分離装置(平成16年度採択, 22年度には終了)											
JST 大学発ベンチャー創出推進事業 平成16年度採択		液体電極プラズマを用いた超小型原子発光分光分析装置の開発											
塚越一仁					3期生					さきがけ期間後			
	科研費 基盤研究(A)	電界誘起バンドギャップによるグラフェン原子薄膜高速トランジスタ											
	科研費 基盤研究(A)	ナノ薄膜層状伝導システムの創生とコヒーレント伝導制御											
	JST CREST	ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成 「ナノ界面・電子状態制御による高速動作有機トランジスタ」											
	JST A-STEP シーズ顕在化タイプ 平成23年度採択	グラフェン産業創出のための液相グラフェン成長技術の応用展開											

研究者	研究費	研究テーマ名	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11
舟窪浩					3期生				さきがけ期間後				
	科研費 基盤研究(B)	高品質チタン酸ジルコン酸鉛単結晶膜の作製とその基礎特性解明											
	科研費 特定領域研究	チタン酸ジルコン酸鉛単結晶モデル粒界を用いたナノドーパントの圧電制御機構の解明											
	科研費 基盤研究(B)	サイズ効果フリー誘電体の誘電特性におよぼす残留歪と温度の影響											
	科研費 基盤研究(B)	ナドメインエンジニアリングによる巨大圧電特性膜の創製											
	科研費 基盤研究(B)	ナノ構造をもつ層状強誘電体薄膜を用いた超高密度メモリの作製											
	JST A-STEPシーズ顕在化タイプ(平成21年度採択)	水熱合成法によるフレキシブル基板上へのKNbO <sub>3</sub> 膜の低温形成技術構築											
NEDO 産業技術研究助成事業革新的融合平成21年度採択	サイズ効果フリー特性を有するc軸配向ビスマス層状誘電体を用いた高温対応大容量薄膜コンデンサの開発												

科研費	特別推進		
	特定領域		
	新学術領域		
	基盤(S)	基盤(A)	基盤(B)
	若手(S)	若手(A)	若手(B)
	JST		
その他	NEDO、厚労省など国の競争的資金制度に採択されたもの		

	科研費
	JST
	NEDO
	その他

数名の研究者を除いて大方の研究者は、さきがけ終了後も継続的に助成金を獲得して、活発な研究活動を続けている。さきがけ終了後に獲得した大型の助成金としては、JST CREST の代表研究者に4名（菅原、岩井、湯浅、塚越）、ALCA に1名（大友）が採択されている。科研費では、新学術領域に4名（田中秀、尾上、田中健、磯部）、若手Sに1名（田中秀）、基盤Aに4名5件（岩井、大岩、近藤、塚越2回）、若手Aに11名13件（古賀、菅原、水野、須田、田中健、町田、松田、山本2回、磯部2回、大谷、大友）、比較的大型の特定領域に1名（田中秀）、基盤Bに20名22件が採択されている。他に、古園が比較的大型の厚労省科研費に採択されている。また、NEDO の産業技術研究助成事業には5名（菅原、古園、須田、大野、船窪）が採択されている。なお、上記の件数には、さきがけ最終年度やその前年度に科研費や NEDO の産業技術研究助成事業等に採択されて、それらの助成がさきがけ終了後も続いていた場合の件数も含めている。それらの助成が、さきがけ終了後の研究の発展に大いに寄与していると考えられるためである。

## 2.2 参加研究者の研究成果の発展状況

### 2.2.1 第1期生(10名)

#### (1) 市田正夫 「カーボンナノチューブの非線形および磁気光学特性の研究」

##### ① さきがけ期間中の主な研究成果

###### <基礎・物性評価>

市田はカーボンナノチューブの高速な光学応答をフェムト秒ポンププローブ分光によって調べた。金属性チューブではキャリア・キャリア散乱による初期の非平衡分布形成と、キャリア・フォノン散乱による電子系の冷却によって緩和し、半導性チューブでは構造欠陥による無輻射緩和が支配的であることがわかった。

##### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後、研究助成金の獲得はないが、引き続き、「単層カーボンナノチューブの非線形光学応答の研究」に関して、フェムト秒非線形分光法を用いて、単層カーボンナノチューブにおける非線形光学応答とその起源について調べ、新しい光デバイス材料としての評価を行っている。また、「単層カーボンナノチューブの磁気光学効果の研究」に関して、10Tの超強磁場装置を用いて、単層カーボンナノチューブの磁気光学スペクトルを測定して、特異な構造に由来した新奇な磁気光学特性とその起源について検討を行っている。最新の論文でも、半導性単層カーボンナノチューブのキャリア・フォノン散乱による無輻射緩和の直径依存性についての成果を発表している。

なお、さきがけ期間中にJSTから出願した「カーボンナノチューブを用いた光スイッチング素子」に関する特許が2件登録されている。

##### ③ 主要論文<sup>1</sup>

Ichida, M., Mizuno, S., Saito, Y., Kataura, H., Achiba, Y., Nakamura, A. **Coulomb effects on the fundamental optical transition in semiconducting single-walled carbon nanotubes: Divergent behavior in the small-diameter limit**(2002) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 65 (24), art. no. 241407, pp. 2414071-2414074. Cited 73 times.

Ichida, M., Mizuno, S., Kataura, H., Achiba, Y., Nakamura, A. **Anisotropic optical properties of mechanically aligned single-walled carbon nanotubes in polymer**(2004) *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 78 (8), pp. 1117-1120. Cited 36 times.

---

<sup>1</sup> 基本的にはさきがけ採択以降～現在までの論文をSCOPUSを用い、名寄せ、所属等で検索を行い作成した論文リストの中から、基本的には被引用件数の多い方から、さきがけとの関連性を確認し、抽出した。

Ichida, M., Hamanaka, Y., Kataura, H., Achiba, Y., Nakamura, A. **Ultrafast relaxation dynamics of photoexcited carriers in metallic and semiconducting single-walled carbonnanotubes**

(2004) *Journal of the Physical Society of Japan*, 73 (12), pp. 3479-3483. Cited 16 times.

(2)王正明 「ナノプロセッシング技術による高性能ガス吸蔵体の創製」

① さきがけ期間中の主な研究成果

<環境・医療基礎・エネルギー貯蔵>

王はメタンなどエネルギー源物質吸蔵用に多孔質カーボン構造作製技術を開発した。メカノケミカルな手法を使用し、グラファイト酸化物層間への有機シリカ源のインタカレンションを誘発させ、シリカ架橋体を炭素の層間に挿入した。この方法によりシリカを架橋体とする規則炭素層状構造を作ることができ、経常的に表面積が  $1000\text{m}^2/\text{g}$  以上の複合体を合成できた。

② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後、研究助成金の獲得はないが、引き続き、「グラファイト酸化物層間への有機シリカ等を挿入したナノ複合体」の高比表面積化の研究を進めている。最近では、研究の対象を、「グラフェン酸化物とシリカの複合体」に広げている。最新の論文でも、グラフェン酸化物の分散性及びコロイド性質を利用して規則性メソポーラスシリカの合成条件と巧みに組み合わせることにより単一グラフェンの（還元グラフェン酸化物）の両表面をベースとした垂直細孔配列メソシリカグラフェンサンドイッチナノコンポジットを合成して、この複合体が半導体性質を示し、その電気伝導度が吸着質の量に敏感に応答することを発表している。

なお、さきがけ期間中に研究機関から出願した「多孔質グラファイト複合体」等に関する特許が6件登録されている。

③ 主要論文

Liu, Z.-H., Wang, Z.-M., Yang, X., Ooi, K. **Intercalation of organic ammonium ions into layered graphite oxide** (2002) *Langmuir*, 18 (12), pp. 4926-4932. Cited 71 times.

Wang, Z.-M., Hoshinoo, K., Xue, M., Kanoh, H., Ooi, K. **A novel nanoporous graphitic composite**

(2002) *Chemical Communications*, (16), pp. 1696-1697. Cited 23 times.

Wang, Z.-M., Hoshinoo, K., Shishibori, K., Kanoh, H., Ooi, K. **Surfactant-mediated synthesis of a novel nanoporous carbon-silica composite** (2003) *Chemistry of Materials*, 15 (15), pp. 2926-2935. Cited 35 times.

### (3)古賀 貴亮「半導体ナノ構造体中に現れる新スピン物性の制御と応用」

#### ① さきがけ期間中の主な研究成果

<基礎・個体スピン制御>

古賀は InGaAs 系量子閉じ込め構造半導体に微細リング構造を設け、右回りと左回りの電子波動関数の干渉で起きる極低温での振動的な磁気抵抗効果の観測から Rashba スピン軌道相互作用の大きさを初めて見積もることに成功した。

#### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後も、引き続き、科研費 若手(A)「半導体量子井戸における零磁場スピン分離の定量的研究とメゾスコピック物理への応用」(2007～2010 年度)、科研費 基盤(B)「InGaAs 系量子井戸におけるメゾスコピック・スピン輸送効果の検証」(2011 年度～)において、さきがけ研究の発展を進めている。

科研費研究において、半導体におけるスピン軌道相互作用は、量子情報素子を始めとする次世代エレクトロニクスの基本原則として重要であるとの認識に立って、その基本モデルとも言える InGaAs/InAlAs 量子井戸を取り上げ、スピン干渉効果をはじめとする低温での電気伝導測定によりスピン軌道相互作用定数を定量的に決定することに成功している。さらに、最新の成果として、NTT と共同で、「スピン軌道相互作用」の大きさを精密に決定する実験に初めて成功し、半導体内の電子スピンをトランジスタのゲート電圧で自在に制御できることを示した。これにより、量子コンピューターや低消費電力素子など電子スピンを使った次世代デバイスの開発が加速されることが期待されている。

なお、さきがけ期間中に JST と NTT から共同出願した「スピンフィルター」関係の特許が 2 件登録されている。

#### ③ 主要論文

Koga, T., Nitta, J., Takayanagi, H., Datta, S. **Spin-filter device based on the Rashba effect using a nonmagnetic resonant tunneling diode** (2002) *Physical Review Letters*, 88 (12), .1266011-1266014. Cited 270 times.

Koga, T., Nitta, J., Akazaki, T., Takayanagi, H. **Rashba spin-orbit coupling probed by the weak antilocalization analysis in InAlAs/InGaAs/InAlAs quantum wells as a function of quantum well asymmetry** (2002) *Physical Review Letters*, 89 (4), art. no. 046801, pp. 046801/1-046801/4. Cited 178 times.

Koga, T., Nitta, J., Van Veenhuizen, M. **Ballistic spin interferometer using the Rashba effect** [8] (2004) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 70 (16), art. no. 161302, pp. 1-4. Cited

#### (4)菅原 聡「エピタキシャル強磁性トンネル接合を用いた強磁性体／半導体融合デバイス」

##### ① さきがけ期間中の主な研究成果

###### <産業技術基礎・集積エレクトロニクス>

菅原はハーフメタル強磁性体をソースとドレインに用いた MOSFET 型のスピントランジスタ (スピン MOSFET) を提案した。理論解析の結果、スピン MOSFET がスピン依存伝達特性と高性能特性を有することを明らかにした。本提案のスピン MOSFET は半導体の将来展望で権威ある米国 ITRS のロードマップに掲載され、また NEDO 産官学共同のプロジェクト (ナノテク先端部材実用化研究開発) が発足した。

##### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ最終年度から開始した科研費 若手(A)「シリコン系強磁性半導体の創製とそのスピンドデバイスへの応用」(2004～2006年度)、及び、さきがけ終了後開始したNEDO 産業技術研究助成事業「シリコン・スピントランジスタの開発とその新機能・高機能集積回路への展開」(2005～2008年度)、さらには、JST CREST「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」領域の代表研究者として「ハーフメタル強磁性体を用いたスピン機能 MOSFET の開発」(2007年度～)により、さきがけ研究の中心課題である「MOSFET型スピントランジスタ」の発展に精力的に取り組んでいる。

CRESTにおいては、従来のエレクトロニクスの分野で用いられることのなかったキャリアのスピンや材料の磁性に関する自由度・機能をMOSFETに導入し、スピンの自由度を用いた新しいシリコン集積回路技術を構築するための基礎体系を創出することを目的として研究を進めている。特に、「ハーフメタル強磁性体ソース/ドレイン・スピンMOSFETの開発」ではスピンMOSFET実現の要であるハーフメタルソース/ドレインの形成技術について開発を行い、ハーフメタル強磁性体であるフルホイスラー合金 $\text{Co}_2\text{FeSi}$ や $\text{Co}_2\text{FeSi}_{1-x}\text{Al}_x$ をCMOSプロセスに整合できるRTA (Rapid thermal annealing) によるシリサイド化反応を用いて形成することに成功している。さらに、フルホイスラー合金のハーフメタル性に重要な規則度の評価方法を新たに提案・確立して、本方法によって、RTAによって形成したフルホイスラー合金が極めて高い規則度を有することを明らかにしている。今後、以上の成果を用いて、ハーフメタルをソース/ドレインとするスピンMOSFETの実現を目指すとしており、2010年度に行なわれたCRESTの中間評価においても高い評価を得ており、新しい低消費電力化アーキテクチャである不揮発性パワーゲーティングへの結実が望まれている。

科研費研究においては、SiやGeといったIV族半導体をホスト材料として強磁性半導体を実現することを目標とした研究を行っている。Siをホスト材料とする強磁性半導体に関しては、Si中にMn,Cr,Feをドーブしたが、バンド構造のスピン分裂によって磁性を発現させているものは得られなかった。一方、GeについてはMnやFeをドーブすることによって容易に強磁性を示す試

料が得られ、強磁性半導体が実現できることを明らかにしている。

なお、さきがけ期間中にJSTや研究機関から出願した「スピントランジスタ」等の特許4件とさきがけ終了後に出願した「単電子スピントランジスタ」等の特許2件が登録されている。

### ③ 主要論文

Sugahara, S., Tanaka, M. **Tunneling magnetoresistance in fully epitaxial MnAs/AlAs/MnAs ferromagnetic tunnel junctions grown on vicinal GaAs(111)B substrates** (2002) *Applied Physics Letters*, 80 (11), pp. 1969-1971. Cited 39 times.

Sugahara, S., Tanaka, M. **A spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistor using half-metallic-ferromagnet contacts for the source and drain** (2004) *Applied Physics Letters*, 84 (13), pp. 2307-2309. Cited 106 times.

Sugahara, S., Lee, K.L., Yada, S., Tanaka, M. **Precipitation of amorphous ferromagnetic semiconductor phase in epitaxially grown Mn-doped Ge thin films** (2005) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, 44 (46-49), pp. L1426-L1429. Cited 32 times.

## (5)竹内 淳「量子ドット中のキャリアスピン操作」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

<基礎・個体スピン制御>

竹内は半導体中の近接した量子ドットに付随するスピン偏極電子状態間の光学遷移を円偏光パルス光によって誘起し、光学的にスピンを操作できる可能性を示した (JJAP 論文賞受賞)。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後、引き続き、科研費 基盤(B)「光による結合量子ドットのスピン操作」(2006~2008年度)、及び、科研費 基盤(B)「円偏光光源のための高偏極長寿命スピン緩和量子ドット」(2010~2011年度)によって、さきがけ研究の中心課題である「光による量子ドットのスピン操作」の研究を推進している。

半導体量子ドットのスピンを光によって操作するには、高いスピン偏極率や、長いスピン緩和時間の実現が望まれるが、科研費研究において、均一性が高い量子ドットの第二励起準位で、円偏光励起によって45%もの高いスピン偏極率の初期値が得られることを明らかにしている。また、柱状の形状を持ち縦方向に量子力学的に結合したコラムナ量子ドットで、円偏光励起によって5.3 nsもの長いスピン緩和時間が得られることも明らかにしている。

### ③ 主要論文

Neogi, A., Lee, C.-W., Everitt, H.O., Kuroda, T., Tackeuchi, A., Yablonovitch, E. **Enhancement of spontaneous recombination rate in a quantum well by resonant surface plasmon coupling** (2002) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 66 (15), art. no. 153305, pp. 1533051-1533054. Cited 147 times.

Kuroda, T., Tackeuchi, A. **Influence of free carrier screening on the luminescence energy shift and carrier lifetime of InGaN quantum wells** (2002) *Journal of Applied Physics*, 92 (6), p. 3071. Cited 50 times.

Tackeuchi, A., Ohtsubo, R., Yamaguchi, K., Murayama, M., Kitamura, T., Kuroda, T., Takagahara, T. **Spin relaxation dynamics in highly uniform InAs quantum dots** (2004) *Applied Physics Letters*, 84 (18), pp. 3576-3578. Cited 32 times.

## (6) 田中 秀和「ナノスケール機能調和人工格子による強相関電子デバイスの創製」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <基礎・機能材料開発>

田中(秀)は(La,Ba)MnO<sub>3</sub>/Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>強磁性酸化物電界効果トランジスタ構造を作成し、ゲート電圧による金属-半導体転移温度の制御を達成した。ペロブスカイト Mn 酸化物の金属-絶縁体転移は強磁性転移を伴うため、室温での強磁性の電界スイッチングに世界で始めて成功したといえる。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ最終年度から開始した科研費 基盤(B)「強相関電子酸化物ナノ構造による室温スピントロニクスデバイスの創成」(2004~2006年度)、及び、さきがけ終了後開始した科研費 若手(S)「強相関酸化物ナノエレクトロニクス構築に関する研究」(2009~2011年度)、NEDO 若手研究グラント「サステイナブル Fe 酸化物高温強磁性半導体を用いたスピントロニクス素子の開発」(2009年度~)、さらには、科研費 新学術領域(研究領域提案型)「自己組織化酸化物ナノスピントロニクス」(2011年度~)において、さきがけ研究の課題である「強相関電子デバイスの創製」を目指して研究を進展させている。

科研費研究では、強相関電子系酸化物ヘテロ構造デバイスの作製と物性解析の研究を行い、スピネル系 Fe 酸化物を用いた強磁性酸化物電界効果トランジスタをレーザ MBE 法により作製し、強誘電ゲート層へ電界印加によりスピネル系 Fe 酸化物強磁性酸化物チャネルのキャリア変調による抵抗変化を計測することに成功している。

最近の研究では、「強相電子デバイスの創製」実現の鍵となる、ナノ加工技術手法の

開発に精力的に取り組んでおり、文科省 先端研究施設共用イノベーション創出事業「阪大複合機能ナノファウンダリー」の支援を受けて、数十ナノレベルで精密に空間制御された酸化物ナノ構造体を一括大面積に成形できる微細加工プロセスの確立に成功している。

なお、さきがけ期間中に JST、及び、研究機関から出願した「半導体接合素子」等の特許 2 件が、登録されている。また、さきがけ終了直後の 2005 年に、第 43 回日本産業映画・ビデオコンクール 経済産業大臣賞等 3 件の賞を受賞している。

### ③ 主要論文

Kanki, T., Li, R.-W., Naitoh, Y., Tanaka, H., Matsumoto, T., Kawai, T. **Nanoscale observation of room-temperature ferromagnetism on ultrathin (La,Ba)MnO<sub>3</sub> films** (2003) *Applied Physics Letters*, 83 (6), pp. 1184-1186. Cited 24 times.

Kanki, T., Park, Y.-G., Tanaka, H., Kawai, T. **Electrical-field control of metal-insulator transition at room temperature in Pb(Zr<sub>0.2</sub>Ti<sub>0.8</sub>)O<sub>3</sub>/La<sub>1-x</sub>BaxMnO<sub>3</sub> field-effect transistor** (2003) *Applied Physics Letters*, 83 (23), pp. 4860-4862. Cited 46 times.

Ishikawa, M., Tanaka, H., Kawai, T. **Preparation of highly conductive Mn-doped Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> thin films with spin polarization at room temperature using a pulsed-laser deposition technique** (2005) *Applied Physics Letters*, 86 (22), art. no. 222504, pp. 1-3. Cited 31 times.

## (7) 戸田 泰則「時空間制御光を用いた単一量子ドットの量子状態制御」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <基礎・物性評価>

戸田は電子密度波物質 1T-TaS<sub>2</sub> の時間分解反射応答における振動成分の周波数が温度上昇とともに低くなり、電荷密度波の臨界温度で飛躍することから、コヒーレントフォノンが励起されていると結論づけた。あわせて GaAs 系単一量子ドットの時間分解分光から興味深い知見を得ている。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ最終年度に開始した科研費 基盤研究(B)「多光子吸収による窒化物半導体の 3 次元ナノスケールイメージング」(2004~2006 年度)、及び、さきがけ終了後に開始した JST シーズ発掘試験「四光波光回折技術を利用した表面解析装置の開発」(2006 年度)等により、さきがけ研究の発展を進めている。

科研費研究において、デバイスの性能に直結する半導体中の欠陥や歪を計測可能とする 3 次元ナノスケールイメージング技術の開発を行い、非線形光学遷移の利用に着目して、

バンド端以下の光子エネルギーを利用した2光子吸収(TPA)による3次元イメージングと励起子非線形性を用いた歪の高感度検出の実現に成功している。これらの研究成果はナノ構造を含む幅広いデバイス物質に応用可能であり、高機能物性評価手法として今後の展開が期待できるとしている。

なお、さきがけ期間中に研究機関から出願した「光入出力方法」に関する特許が1件登録されている。

### ③ 主要論文

Toda, Y., Tateishi, K., Tanda, S. **Anomalous coherent phonon oscillations in the commensurate phase of the quasi-two-dimensional 1TTaS<sub>2</sub> compound** (2004) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 70 (3), art. no. 033106, pp. 033106-1-033106-4. Cited 4 times.

Toda, Y., Adachi, S., Abe, Y., Hoshino, K., Arakawa, Y. **Optical diffraction spectroscopy of excitons in uniaxially strained GaN films** (2005) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 71 (19), pp. 1-4. Cited 11 times.

Ishiguro, T., Toda, Y., Adachi, S. **Exciton spin relaxation in GaN observed by spin grating experiment** (2007) *Applied Physics Letters*, 90 (1), art. no. 011904, . Cited 8 times

### (8) 古菌勉 「無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料の開発」

#### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <環境・医療基礎・医療基礎技術>

古菌は体内に貫通する経皮デバイスの細菌感染予防具としてセラミックスの安定性と人体への親和性を兼ね備えた複合材料の開発に取り組んだ。100nmレベルの焼結ヒドロキシアパタイト(HAp)粒子を、絹繊維上にグラフト重合した中間材を介して固定し、ナノ無機-有機コンポジットを形成した。これを用いて作成した三次元経皮デバイスは良好な細胞接着性を示した。日本人工臓器学会論文賞の対象となった。

#### <特筆すべき成果>

医療分野での影響力の強い研究成果は古菌が成し遂げたナノ無機-有機コンポジット材料開発とそれを用いた細胞感染抑制機能を持つ経皮デバイスの開発である。基本性能の実証の後、工業生産技術の開発をJST成果活用プラザ大阪の支援による「育成研究」で実施するかたわら安全性試験、標準化にも取り組んでいる。腹膜透析などの治療に用いられているカテーテルなどの体内留置型機器では従来、生体とのなじみが悪いために細菌の感染経路が形成され、生存率制限の大きな要因となっていたが、この問題を解決する有力な方法が見出された、といえる。

## ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中から開始したNEDO産業技術研究助成事業「生体内安定性と抗菌性発現の制御機能を持つインテリジェント型インプラントの開発」（2003～2006年度）、NEDO革新融合「カテーテルの感染防止と効果を定量化する新しい評価法の確立と標準化」（2004～2005年度）、厚生労働科研費「内シャント狭窄治療を目的としたナノセラミックス複合化ステントグラフトの開発」（2004～2006年度）、及び、さきがけ終了後開始した JSTイノベーションプラザ大阪の育成研究「細菌感染防止を実現する界面融和型経皮デバイスの開発」（2005～2009年度）によって、さきがけ研究で開発した「無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料基礎技術」の多方面の医療用途への展開を精力的に進めている。

NEDO 革新融合によるカテーテルの開発に関しては、カテーテルの感染防止効果を定量的に評価できる評価方法を確立し、この評価方法を活用して感染防止効果の高いカテーテルの開発を進めている。

厚生労働科研費による表面にナノスケールのアパタイトを結合させた新規なステントグラフトの開発に関しては、高分散性ナノアパタイト微粒子製造法の創出、アパタイトナノコーティングの精密制御等の技術開発により試作品を作製し、*in vivo* 試験を経て、臨床応用によって内シャント狭窄防止システムが実現できることが期待できるとの評価を得ている。

JST育成研究による感染防止界面融和型経皮デバイスの開発に関しては、結晶性が高く、かつ高い分散性を有するナノスケールのアパタイト単結晶を独自技術で調製し、当該単結晶をポリマー基材表面に化学結合にて結合させる手法（ソフトナノセラミック・プロセッシング）を開発することによって、動物実験による効能実証試験で、当該デバイスは早期に安定した材料／生体組織界面を形成することから、抗感染性カテーテルとして好適であることを明らかにすることに成功している。今後、技術の移転先等体制を整えて、承認申請を行った後、早期の臨床応用を目指すとのことである。

なお、さきがけ期間中に JST、国立循環器病センター、NIMS等から出願した「ハイドロキシアパタイト複合体およびそれを用いた医療用材料」等の特許が9件登録されている。

## ③ 主要論文

Furuzono, T., Wang, P.-L., Korematsu, A., Miyazaki, K., Oido-Mori, M., Kowashi, Y., Ohura, K., Tanaka, J., Kishida, A. **Physical and Biological Evaluations of Sintered Hydroxyapatite/Silicone Composite with Covalent Bonding for a Percutaneous Implant Material** (2003) *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 65 (2), pp. 217-226. Cited 36 times.

Furuzono, T., Kishida, A., Tanaka, J. **Nano-scaled hydroxyapatite/polymer composite I. Coating of**

**sintered hydroxyapatite particles on poly( $\gamma$ -methacryloxypropyl trimethoxysilane)- grafted silk fibroin fibers through chemical bonding** (2004) *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 15 (1), pp. 19-23. Cited 32 times.

Furuzono, T., Yasuda, S., Kimura, T., Kyotani, S., Tanaka, J., Kishida, A. **Nano-scaled hydroxyapatite/polymer composite IV. Fabrication and cell adhesion properties of a three-dimensional scaffold made of composite material with a silk fibroin substrate to develop a percutaneous device** (2004) *Journal of Artificial Organs*, 7 (3), pp. 137-144. Cited 18 times.

(9) 水野清義 「ナノ新材料開発のための表面微小構造解析法による原子位置決定」

① さきがけ期間中の主な研究成果

<基礎・極限計測法>

水野は電子線回折と走査電子顕微鏡を融合して微細構造を持つ表面の原子配列を調べる手段を確立することを目標に、装置の設計、製作と調整を行った。単結晶タングステン探針からの電界放出電子線により、電子レンズを用いずに Cu 清浄表面からの低速電子回折パターンを得ることに成功した。

② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中から開始した科研費 若手(A)「ナノ新材料開発のための低速電子回折による迅速な表面結晶構造解析」(2003~2006年度)、及び、さきがけ終了後開始した NEDO 若手研究 Grant「微小領域への低エネルギー電子線照射とナノ材料の表面構造解析」(2005~2008年度)、JST シーズ発掘試験「電界誘起酸素エッチングによる探針先端の原子レベル先鋭化」(2008年度)、科研費 基盤(B)「シリコンカーバイド上の酸化シリコン膜とその上に形成する薄膜の構造解析」(2008~2010年度)により、さきがけ研究の中心課題である「表面微小構造解析」の研究を進展させている。

最近の研究でも、シリコンカーバイド (SiC) 表面上に酸化シリコン (SiON) 超薄膜の作製し、その表面周期構造を低速電子線解析により解析し、従来法で作製した SiO<sub>2</sub>/SiC 界面では成しえなかった理想的な構造と電子状態であることを明らかにしている。この新物質が絶縁膜/SiC 界面問題のマイルストーンとなるとの期待がある。

また、電界放出電子源に用いるタングステン針先端の先鋭化についても研究を進めて、電界誘起酸素エッチング法により先鋭化 (10-3nm) できることを見つけて、電子線の放出領域と拡がり角度が狭くなると共に、電界放出に必要なバイアス電圧を低くできることを明らかにしている。これにより、さらに微小領域の回折パターンの解析の可能性が期待される。

なお、さきがけ期間中に JST から出願した特許「回折装置」が 1 件登録されている。

③ 主要論文

Mizuno, S., Mizuno, Y.O., Tochiara, H. **Structural determination of indium-induced Si(111) reconstructed surfaces by LEED analysis:  $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$  and  $(4\times 1)$**  (2003) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 67 (19), art. no. 195410, pp. 1954101-1954108. Cited 37 times.

Shirasawa, T., Mizuno, S., Tochiara, H. **Electron-beam-induced disordering of the Si(001)-c $(4\times 2)$  surface structure** (2005) *Physical Review Letters*, 94 (19), art. no. 195502, . Cited 13 times

Mizuno, S., Rahman, F., Iwanaga, M. **Low-energy electron diffraction patterns using field-emitted electrons from tungsten tips** (2006) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, 45 (4-7), pp. L178-L179. Cited 13 times.

(10) 渡辺正裕 「超ヘテロ・ナノ結晶の創製と光・電子新機能」

① さきがけ期間中の主な研究成果

<基礎・機能材料開発>

渡辺は深い障壁を持つ  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  共鳴トンネルダイオードについてローカルエピタキシー法を開発して高いオンオフ比と良好な均一性を持つ特性を実現した。また、同一材料の量子カスケード構造を試作して、高効率のインターサブバンド発光特性を確認した (SORST 研究として継続中)。これらは次世代の産業応用の芽として有望な基礎研究である。

② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中に開始した科研費 基盤 (B) 「超ヘテロ・ナノ結晶の創製と光-電子新機能デバイスへの応用」 (2003~2005 年度)、および、さきがけ研究に引き続いて行った JST SORST 「超ヘテロ・ナノ結晶による光-電子新機能デバイスの創製」 (2004~2006 年度) により「超ヘテロ・ナノ結晶」に関するさきがけ研究の発展を進めている。

SORST による研究に関しては、さきがけで開発した微小領域エピタキシー法を改良して、シリコンデバイスでは一般的なシリコン (100) 面ではなく (111) 面に高品質なフッ化物 ( $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$ ) 量子構造を作製し、シリコン上での光・電子融合デバイスの可能性を開くことに成功している。特にシリコン基板上のヘテロ構造デバイスおよび光・電子融合回路応用については実用化の有力候補であるとの高い評価を得ている。

科研費研究では、さきがけ研究で  $\text{CdF}_2/\text{CaF}_2$  共鳴トンネルダイオード (RTD) のデモンストレーションに成功した成果を受けて、RTD を MOS トランジスタと集積する新不揮発性メモリを提案するとともに、その作製プロセスの要素技術の確立を行い、今後、トランジスタ構造の作製と特性の評価を進めるとしている。

なお、さきがけ期間中に JST から出願した特許「超格子熱電材料」が 1 件登録されて

いる。

### ③ 主要論文

Niiyama, Y., Watanabe, M. **BeMgZnSe-based ultraviolet lasers** (2005) *Semiconductor Science and Technology*, 20 (12), pp. 1187-1197. Cited 8 times.

Jinen, K., Kikuchi, T., Watanabe, M., Asada, M. **Room-temperature electroluminescence from single-period (CdF 2/CaF2) inter-subband quantum cascade structure on Si substrate** (2006) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 45 (4B), pp. 3656-3658. Cited 4 times.

Kanazawa, T., Morosawa, A., Fujii, R., Wada, T., Suzuki, Y., Watanabe, M., Asada, M. **Suppression of leakage current of CdF2/CaF2 resonant tunneling diode structures grown on Si(100) substrates by nanoarea local epitaxy** (2007) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 46 (6A), pp. 3388-3390. Cited 3 times.

## 2.2.2 第 2 期生(11 名)

### (1) Wilfred van der Wiel 「半導体人工原子・分子における高周波電子スピン操作」

#### ① さきがけ期間中の主な研究成果

##### <基礎・個体スピン制御>

Van der Wiel は半導体量子ドット中の電子スピンを電子スピン共鳴を用いて制御する新しい方法として傾斜磁場の利用を提案し、理論予測をするとともに、表面超音波を用いて電子フォノン結合の強さを推定する実験を行った。電子スピんに量子ビットを担わせるための基礎研究として重要である。

#### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後も、ナノスケールでのエレクトロニクス、スピントロニクスの革新的デバイスの創出、そのためのナノ構造形成技術、ナノ構造解析技術の研究を進展させている。

2007年の論文で、非磁性である SrTiO<sub>3</sub> と LaAlO<sub>3</sub> 界面で磁性が生じることを明らかにしている。TiO<sub>2</sub> で終端した SrTiO<sub>3</sub>(001)基板上にパルスレーザー堆積法で LaAlO<sub>3</sub> 薄膜をエピタキシャル成長させシート抵抗と磁気抵抗の温度依存性を評価し、低温におけるシート抵抗の測定から磁気ヒステリシスの存在を明らかにした。負の磁気抵抗を観測した。今後、磁性が発生するメカニズムを検討することである。2009年の論文では、顕著な電子特性と電子材料としての応用性のために独特の2D材料として注目されているグラフェンシートをシリコン酸化物基質上に薄膜として接合して、低コスト薄膜トラン

ジスタのような電子デバイスへの応用の可能性を示している。また、最近の論文では、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  トンネル障壁を経由して強磁性体 Co 電極伝導チャンネルへのトンネル結合を有する単結晶ルブレン電界効果トランジスタについて検討して、この電界効果トランジスタがスピントロニクスの一の主要なゴールである電界効果トランジスタとスピンバルブ機能を統合した素子実現に向けた有意なステップとなる可能性を示している。

### ③ 主要論文

Van Der Wiel, W.G., Stopa, M., Kodera, T., Hatano, T., Tarucha, S. **Semiconductor quantum dots for electron spin qubits** (2006) *New Journal of Physics*, 8, art. no. 28, . Cited 17 times.

Tokura, Y., Van Der Wiel, W.G., Obata, T., Tarucha, S. **Coherent single electron spin control in a slanting zeeman field** (2006) *Physical Review Letters*, 96 (4), . Cited 38 times.

Brinkman, A., Huijben, M., Van Zalk, M., Huijben, J., Zeitler, U., Maan, J.C., Van Der Wiel, W.G., Rijnders, G., Blank, D.H.A., Hilgenkamp, H. **Magnetic effects at the interface between non-magnetic oxides** (2007) *Nature Materials*, 6 (7), pp. 493-496. Cited 219 times.

## (2) 岩井 伸一郎「強相関ナノ電子構造における光誘起協同現象による超高速スイッチング」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <基礎・物性評価>

岩井は遷移金属錯体（ハロゲン架橋ニッケル錯体）への光パルス照射による光モット転移を観測した。また、中性-イオン性転移系電荷移動錯体において、生ずる光誘起常誘電-強誘電性転移の初期過程を明らかにした。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後に開始した JST CREST 「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」領域の代表研究者として課題「先端超短パルス光源による光誘起相転移現象の素過程の解明」（2008 年度～）、及び、科研費 基盤 (B) 「テラヘルツ超高速分光法による光誘起伝導制御の研究」（2008～2010 年度）ならびに科研費 基盤 (A) 「赤外 10 フェムト秒パルス列による強相関電子系の電子-フォノンコヒーレント制御」（2011 年度～）により、さきがけ研究の発展を進めている。

CRESTによる研究においては、極短パルス光を用いて、“光誘起相転移現象”の解明に挑み、強相関電子系物質の電子的性質を光で自由自在に制御する方法への道を拓くことを目指して研究を進めて、二次元有機伝導体 ( $\alpha$ -(ET) $_2$ I $_3$ ) における光誘起電荷秩序絶縁体-金属転移の初期過程を明らかにすることに成功し、さらに、類似物質の検討を通じて 有機伝導体における光誘起相転移のより一般的な理解への展開を進めたいとしている。また、自ら構築し

た光励起-THzプローブ分光装置を用いて、強誘電酸化物(LuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)における光誘起相転移のダイナミクスを明らかにすることに成功している。さらに、最近の大きな成果として、有機二次元モット絶縁体κ-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Brを対象として特定な波長の光(近赤外光)を選択することで、有機絶縁体を瞬時に金属的伝導体に転換することに成功している。今後、光誘起超伝導など新しい物理現象の開拓につながる事が期待されている。

なお、さきがけ期間中にJST、産総研から出願した「光素子」の特許が3件登録されている。また、研究課題「電子型の強誘電性に基づく有機伝導体の高い光学非線形性とその超高速応答」に対して2011年に第16回日本物理学会論文賞を受賞している。

### ③ 主要論文

Iwai, S., Ono, M., Maeda, A., Matsuzaki, H., Kishida, H., Okamoto, H., Tokura, Y. **Ultrafast optical switching to a metallic state by photoinduced Mott transition in a halogen-bridged nickelchain Compound** (2003) *Physical Review Letters*, 91 (5), pp. 574011-574014. Cited 92 times

Okamoto, H., Ishige, Y., Tanaka, S., Kishida, H., Iwai, S., Tokura, Y. **Photoinduced phase transition in tetrathiafulvalene-p-chloranil observed in femtosecond reflection spectroscopy [42]** (2004) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 70 (16), art. no. 165202, pp. 1-18. Cited 44 times.

Kawakami, Y., Iwai, S., Fukatsu, T., Miura, M., Yoneyama, N., Sasaki, T., Kobayashi, N. **Optical modulation of effective on-site coulomb energy for the Mott transition in an organic dimer insulator** (2009) *Physical Review Letters*, 103 (6), art. no. 066403, .

### (3)大岩 顕 「ナノ強磁性半導体におけるスピン注入磁化反転の研究」

#### ① さきがけ期間中の主な研究成果

##### <基礎・個体スピン制御>

大岩は強磁性半導体(Ga<sub>x</sub>Mn<sub>1-x</sub>)As への円偏光パルスによって時定数数十ピコ秒で緩和する強い光カー効果が見られることを発見した。1個の正孔あたり100個以上Mnスピン状態が変化する強い効果である。

#### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後から開始した科研費 基盤 (B) 「単一光子注入による少数電子系の電子・核スピン制御の研究」(2006~2008年度)、ならびに科研費 基盤 (A) 「単一光子—単一電子スピン結合系における量子状態転写の研究」、及び、JST CREST「ナノ界面技術の基盤構築」領域の分担研究者としての課題「超伝導ナノギャップ接合の物理とスピンを利用した情報処理技術の研究」へとさきがけ研究中心課題「スピン注入磁化反転」から「量子ドットにおけるスピン軌道相互作用の電氣的制御」に関する研究へと

発展させている。

科研費研究において、量子情報の長距離伝送実現のための中継技術の基盤開発として、単一光子から量子ドット中の単一電子スピンへの状態転写を目指す検討を行い、単一光子検出用横型量子ドットを開発し、単一光子を量子ドット中の電子へ変換する単一光子検出の実現に成功している。

CREST において、InAs 量子ドットにおけるスピン軌道相互作用エネルギーを電氣的に制御することに成功し、スピン量子情報にとって理想的な機能を有する従来にない素子の提案と実証へと展開することが期待されている。

極最新の CREST の成果として、NTT と共同で InGa 量子ドットを用いてスピン—電子軌道相互作用を利用した消費電力を限りなくゼロに近づけられる新しい半導体素子の開発に成功している。

なお、さきがけ期間中に JST から出願した「スピン注入磁化反転素子」等の特許が 2 件登録されている。

### ③ 主要論文

Mitsumori, Y., Oiwa, A., Słupinski, T., Maruki, H., Kashimura, Y., Minami, F., Munekata, H.

**Dynamics of photoinduced magnetization rotation in ferromagnetic semiconductor p-(Ga,Mn)As**

(2004) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 69 (3), art. no. 033203, pp. 332031-332034. Cited 56 times.

Wang, J., Sun, C., Kono, J., Oiwa, A., Munekata, H., Cywiński, A., Sham, L.J. **Ultrafast quenching of ferromagnetism in InMnAs induced by intense laser irradiation** (2005) *Physical Review Letters*, 95 (16), art. no. 167401, pp. 1-4. Cited 34 times.

Kanai, Y., Deacon, R.S., Takahashi, S., Oiwa, A., Yoshida, K., Shibata, K., Hirakawa, K., Tokura, Y., Tarucha, S. **Electrically tuned spin-orbit interaction in an InAs self-assembled quantum dot** (2011) *Nature Nanotechnology*, . Article in Press.

## (4)尾上 順「新しい多面体ナノ炭素物質の創製と機能発現」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <基礎・機能材料開発>

尾上はフラーレン薄膜に電子線照射することにより、室温・大気下で金属的導電性を示すピーナツ型フラーレンポリマーを発見した。電子分光によりスペクトルがフェルミ端を横切る金属的バンド構造をもつことを確認した。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ研究と同時期に開始したJST CREST「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」領域の分担研究者の課題「フラーレンの電子線照射による重合とその金属化」(2002～2007年度)、及び、さきがけ終了後開始した科研費 新学術領域(研究課題提案型)「新たな曲面量子物性学理の基盤構築」(2009～2011年度)によりさきがけ研究の中心課題である「ピーナッツ型フラーレンポリマー」研究を進展させている。

CRESTにおいて、ピーナッツ型フラーレンポリマーの電子輸送特性、及びデバイスへの応用について検討を行っている。電子輸送特性については、熱的励起による伝導機構であり、その活性化エネルギーがカーボンナノチューブと同程度であることを明らかにした。デバイスへの応用については、シリコン基板上でのフラーレン薄膜の電子線重合の検討を行い、基板上にピーナッツ型フラーレンポリマーを生成することが出来、電界効果トランジスタなど電子デバイスへの応用展開が期待できることを示した。科研費研究において、正負のガウス曲率が交互周期的に並んだ1次元金属ピーナッツ型ナノカーボンの低温での電子構造を調べ、1次元金属の電子挙動であるTomonaga-Luttinger液体挙動を再現性良く観測することができ、そのベキ乗指数として約0.6の結果を得ている。なお、単層金属ナノチューブのベキ乗指数0.5に対して若干であるが大きくなる原因を理論的に初めて明らかにしている。

### ③ 主要論文

Onoe, J., Nakayama, T., Aono, M., Hara, T. **Structural and electrical properties of an electron-beam-irradiated C60 film** (2003) *Applied Physics Letters*, 82 (4), pp. 595-597. Cited 60 times.

Beu, T.A., Onoe, J., Hida, A. **First-principles calculations of the electronic structure of one-dimensional C60 polymers** (2005) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 72 (15), pp. 1-5. Cited 14 times.

Onoe, J., Ito, T., Kimura, S.-I., Ohno, K., Noguchi, Y., Ueda, S. **Valence electronic structure of cross-linked C60 polymers: In situ high-resolution photoelectron spectroscopic and density-functional studies** (2007) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 75 (23), art. no. 233410, . Cited 11 times.

### (5) 近藤 高志「副格子交換ヘテロ構造半導体の高度制御」

#### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <産業技術基礎・光エレクトロニクス>

近藤は半導体非線形光学素子(GaAs/AlGaAs系)の高効率化に必要な周期構造の作成のために副格子交換エピタキシー法を提案し、最適化をはかることによって単位長あ

たりの変換効率の記録を達成した。のこる課題である導波路損失の低減化についても再成長の際の平坦化条件を見出した。

## ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中から開始した科研費 基板 (B) 「半導体疑似位相整合波長変換素子を用いた超小型赤外コヒーレント光源の開発」(2005～2006 年度)、及び、さきがけ終了後に開始した科研費 特定領域「窒化物半導体の非線形光学定数の精密評価と内部電界による制御」(2007～2008 年度)、科研費 基盤 (A) 「非線形光・電子集積回路の基盤技術に関する研究」(2007～2010 年度)、ならびに、科研費 基盤 (B) 「半導体波長変換デバイスの電流注入による高機能化の研究」(2011 年度～)により、さきがけ研究の成果をベースにして「化合物半導体導波路を用いた波長変換素子」の進展に取り組んでいる。

一貫して、非線形光学結晶を用いて第二高調波を発生する研究に取り組んでいるが、極最近の成果として、さきがけ研究の成果をベースにした副格子交換エピタキシー技術を用いて作製した化合物半導体 AlGaAs 導波路型波長変換素子において、低温 MBE 成長法を導入することによって、コアクラッド界面の段差を抑制し低損失化を実現し、従来最高の規格化変換効率(970%/W-cm<sup>2</sup>)の達成に成功している。因みに、さきがけ期間中に達成した値は、140%/W-cm<sup>2</sup>である。さらに、AlGaAs コアに空間反転積層構造を導入することにより大幅な高効率化が可能であると新たな提案を行っている。なお、科研費研究において、上記の高屈折率差 AlGaAs 導波路における波長変換の高効率化について初めて理論的な検討を行い、基本波波長 1.5 $\mu$ m での規格化変換効率にして 40,000%/W-cm<sup>2</sup>にも及ぶ高効率波長変換が可能であることを明らかにしている。さらに、今後、GaAs 基板上で上記の電流注入 GaAs/AlGaAs 疑似位相整合(QPM)導波路デバイスを作製する際の問題点(結晶性や発光特性など)について検討した上で、良質なデバイスを作製するためのプロセスの開発に取り組むとしている。

## ③ 主要論文

Yamamura, T., Matsushita, T., Koitabashi, T., Kondo, T. **Influence of anisotropic diffusion of Ga atoms on GaAs growth on alternately inverted (100) substrates** (2005) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, 44 (46-49), pp. L1397-L1399. Cited 6 times.

Matsushita, T., Yamamoto, T., Kondo, T. **Epitaxial growth of spatially inverted GaP for quasi phase matched nonlinear optical devices** (2007) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, 46 (17-19), pp. L408-L410. Cited 4 times.

Ishikawa, H., Kondo, T. **Birefringent phase matching in thin rectangular high-index-contrast**

## (6) 須田 淳「界面ナノ構造制御によるワイドギャップ半導体の機能融合とパワーデバイスへの展開」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <基礎・機能材料開発>

須田はMBE法を用い界面を制御したn-GaN/p-SiCヘテロ構造バイポーラトランジスタを作製し動作を確認した。また世界で初めてSiC上へのAlNのレイヤーバイレイヤー成長を達成し、高品質AlN/SiCの基礎を確立した。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中から開始した科研費 若手 (A) 「ヘテロバレント・ヘテロポリタイプ SiC 上 III 族窒化物結晶成長の総合的理解と制御」(2004~2006 年度)、NEDO 産業技術研究助成事業「省エネルギーデバイス基盤材料 SiC 基板上 AlN ヘテロエピタキシャルテンプレートのトータルプロセスの確立」(2004~2007 年度)、ならびに JST シーズ育成「波長変換素子を目的としたワイドギャップ半導体分極反転構造の作製」(2005 年度)、及び、さきがけ終了後に開始した科研費 基盤 (B) 「新しい結晶構造を持つ窒化アルミニウムの物性制御と深紫外発光デバイスへの展開」(2008~2010 年度)により、さきがけ研究で基礎を確立した「界面ナノ制御によるパワーデバイス」の発展を進めている。

NEDO による開発においては、ウェハー毎のばらつき、ウェハー面内の不均一性、デバイスの寿命などの課題を、SiC 基板の切断・研磨から、表面制御、AlN ヘテロエピタキシーまで全体を一つとして捉え、SiC 基板メーカーと連携して AlN/SiC のトータルプロセスの確立を行い、事後評価において優秀との評価を得ている。

極最近の成果として、SiC 製バイポーラトランジスタにおいて、熱や酸で処理する工程を新たに開発して炭素とケイ素の電子配列に生じる欠陥を改善することにより、室温での電流増幅率 335 を達成して、従来最高の 130 台を大幅に上回ることに成功している。これにより、次世代型パワー半導体として、太陽発電システムのパワー・コンディショナ、電動車両用のパワー・コントロール・ユニットなどでの利用が視野に入ったとのことである。

なお、さきがけ期間中に JST 等から出願した「半導体結晶成長方法」等に関する特許が 3 件登録されている。また、2006 年に課題「High-Voltage 4H-SiC RESURF MOSFETs Processed by Oxide Deposition and N<sub>2</sub>O Annealing」に対して SSDM Paper Award を受賞している。

### ③ 主要論文

Onojima, N., Suda, J., Kimoto, T., Matsunami, H. **4h-polytype AlN grown on 4H-SiC(112\*0) substrate by polytype replication** (2003) *Applied Physics Letters*, 83 (25), pp. 5208-5210. Cited 36 times.

Armitage, R., Suda, J., Kimoto, T. **Epitaxy of nonpolar AlN on 4H-SiC (1-100) substrates** (2006) *Applied Physics Letters*, 88 (1), art. no. 011908, . Cited 20 times.

Horita, M., Suda, J., Kimoto, T. **High-quality nonpolar 4H-AlN grown on 4H-SiC (112\*0) substrate by molecular-beam epitaxy** (2006) *Applied Physics Letters*, 89 (11), art. no. 112117, . Cited 27 times.

### (7)田中 健太郎「錯体型人工DNAを用いた金属イオン配列制御と機能発現」

#### ① さきがけ期間中の主な研究成果

##### <基礎・機能材料開発>

田中(健)は水素結合による塩基対形成を金属錯体に置き換えた人工DNAを構築し、デザインした数の金属イオンを定量的に集積化する場として有効に働くこと、金属イオン上のスピンを精密に集積化できることを見出した。

#### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後に開始した科研費 特定領域「生体高分子をテンプレートとした金属錯体の機能集積」(2006～2007年度)、科研費 基盤(B)「プログラムに基づく金属錯体の階層的組織化と機能的化学空間の創製」(2008～2010年度)、ならびに、科研費 新学術領域(研究領域提案型)「金属錯体の階層的な組織化によるソフトな化学空間の配位プログラミング」(2009年度～)、及び、JST CREST「ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成」領域の分担研究者として課題「高精度にサイズ制御した単電子デバイスの開発／ペプチド型ポルフィリンアレイの合成と同定」によりさきがけ研究の中心課題である「金属イオン配列制御と機能発現」の発展を図っている。

分子と分子間のコミュニケーションを制御して、複合的な機能を生み出すためには、分子間の空間的な相対配置をデザインどおり精密に構築した分子組織とすることが必要であるが、さきがけ研究では、DNA 二重鎖間の会合力を担う核酸塩基間の水素結合を金属配位結合に置き換えた金属錯体型人工DNAを構築し、人工DNAをテンプレートとした異種金属イオンの集積プログラミングを行ってきた。一連の科研費による研究においては、ペプチド二重らせん構造をモチーフとしたラダー型ポルフィリン組織体をテンプレートとして金属イオンの集積プログラミングを行うなど種々の検討を進めている。最終的には、このような階層的な分子構築を行うことにより、将来的に電子的な相互作用や複合的な反応性を分子や分子集合体の中に精密にプログラムできるようになることを目指している(カラム相を形成することによりナノレベルチャンネルとする)。

なお、さきがけ終了直後の 2006 年 4 月に若手科学者賞を課題「超分子化学分野における錯体型人工 DNA 分子システムの研究」に対して受賞している。

### ③ 主要論文

Tanaka, K., Tengeiji, A., Kato, T., Toyama, N., Shionoya, M. **A discrete self-assembled metal array in artificial DNA** (2003) *Science*, 299 (5610), pp. 1212-1213. Cited 220 times.

Takezawa, Y., Tanaka, K., Yori, M., Tashiro, S., Shiro, M., Shionoya, M. **Soft metal-mediated base pairing with novel synthetic nucleosides possessing an O,S-donor ligand** (2008) *Journal of Organic Chemistry*, 73 (16), pp. 6092-6098. Cited 11 times.

Takezawa, Y., Maeda, W., Tanaka, K., Shionoya, M. **Discrete self-assembly of iron(III) ions inside triple-stranded artificial DNA** (2009) *Angewandte Chemie - International Edition*, 48 (6), pp.1081-1084. Cited 14 times.

## (8) 町田 友樹「量子ホール系における核磁気共鳴を利用した固体量子ビット素子の開発」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <基礎・個体スピン制御>

町田は半導体中の核スピンを制御する方法として量子ホール効果素子の端電子状態間の電子遷移を利用することを提案し、パルス磁場の時間幅変化による反転核スピン量の振動的変化 (Rabi 振動) から位相緩和時間が 160 $\mu$ s であることを明らかにし、量子ビットの処理に適用する可能性について検討した。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後に開始した科研費 若手 (A) 「量子ホール系端状態における局所的スピン偏極率決定」 (2006~2008 年度)、科研費 基盤 (B) 「量子ホール系における核スピン制御と電子スピン物性探求」 (2009~2011 年度)、及び、JST CREST 「ナノ界面技術の基盤構築」領域の分担研究者として課題「量子ドット/強磁性電極接合の物理と応用の研究」 (2007 年度~) によって、さきがけ研究の中心課題である「量子ホール系におけるスピン制御」に関する基礎研究を進展させている。

一連の科研費による研究において、量子ホール系の電子輸送現象においては量子ホール端状態が重要な役割を果たすことを示し、鍵となる情報が局所的な電子スピンの偏極率であるとの認識に立って、本研究者が開発した量子ホール中のナノスケール領域の核スピンのみを選択的に制御・検出する手法を利用して、核スピンをプローブに用いることによって、局所的な電子スピンの偏極率分布を実験的に決定する方法の確立に成功している。

なお、さきがけ期間中に JST から出願した「量子演算素子」の特許 1 件が登録されている。

### ③ 主要論文

Machida, T., Yamazaki, T., Ikushima, K., Komiyama, S. **Coherent control of nuclear-spin system in a quantum-Hall device** (2003) *Applied Physics Letters*, 82 (3), pp. 409-411. Cited 66 times.

Masubuchi, S., Hamaya, K., Machida, T. **Knight shift detection using gate-induced decoupling of the hyperfine interaction in quantum Hall edge channels** (2006) *Applied Physics Letters*, 89 (6), art. no. 062108, . Cited 6 times.

Kawamura, M., Takahashi, H., Sugihara, K., Masubuchi, S., Hamaya, K., MacHida, T. **Electrical polarization of nuclear spins in a breakdown regime of quantum Hall effect** (2007) *Applied Physics Letters*, 90 (2), art. no. 022102, . Cited 9 times.

## (9) 松田 一成「極限光ナノプローブによる半導体ナノ構造の波動関数イメージング・操作」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <基礎・極限計測法>

松田は近接場光学の原理によって波長より短い分解能を持つ顕微鏡の性能を格段に向上（分解能 20nm）させ、半導体中のエキシトン波動関数に対応するイメージを得た（さきがけライブで実態展示）。

#### <特筆すべき成果>

ナノテクノロジーの極限を広げた研究成果として松田による光近接場顕微鏡の大幅な分解能向上（30nm 以下）がある。空間分解能は走査トンネル顕微鏡に及ばないが、分光情報から電子のエネルギーに関する情報が得られる特色があり、半導体以外にも生体物質への適用への展開が図られている。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間の最終年度から開始した科研費 若手 (A) 「光ナノプローブによる単一カーボンナノチューブの光物性の探索と量子光デバイス応用」(2005~2007 年度)、及び、さきがけ終了後に開始した科研費 基盤 (B) 「カーボンナノチューブにおけるコヒーレント量子光制御」(2008~2010 年度)、科研費 特定領域「ナノプラズモニクスによるカーボンナノチューブの新規光機能性の発現」(2008~2009 年度)、科研費 特定領域「カーボンナノチューブの光機能性発現に向けた光学応答制御」(2010 年度~)、科研費 基盤 (B) 「ナノカーボン物質における量子制御とナノカーボン・フォトニクスの開拓」(2011 年度~)、ならびに、JST シーズ発掘「金属ナノ構造を用いた半導体

量子ドットの発光高輝度化とその応用」(2009年度)など、さきがけ研究で開発した光近接場顕微鏡の大幅な分解能向上技術(30nm以下のナノ光計測技術)の活用などにより、ナノ複合材料による新規光機能発現と高効率光電変換に向けて精力的に研究を発展させている。

一連の科研費による研究において、理想的な一次元構造を有し光物性に興味を持たれている単層カーボンナノチューブについて、光機能材料としては発光量子効率が低いことが問題であるとの認識に立って、その原理の解明、及び発光量子効率の向上に取り組んでいる。カーボンナノチューブにおいて、光励起電子—正孔対(励起子)の量子干渉(アハラノフ・ボーム効果)を直接観察することに成功するなど成果を挙げている。さらに、ナノ材料の持つポテンシャルを光エネルギー—高効率変換や新しい光機能性創出に向けた研究において、カーボンナノチューブでは、紫外光の一つの光子で複数の電子—正孔対を生成できることを実証した。これは、高効率光・電子(キャリア)変換実現の可能性を意味し、ナノ材料をベースにした新しい原理の高効率太陽電池などに発展が期待できる大きなマイルストーンと考えられている。

なお、さきがけ期間中にJSTから出願した特許「近接場光学顕微鏡」1件が登録されている。また、さきがけ期間終了直後の2006年4月に若手科学者賞を課題「ナノ光学分野における量子構造のナノイメージング分光の研究」に対して、2007年に丸文研究交流財団から研究奨励賞を課題「「ナノイメージング分光の開拓とそれを用いた半導体量子構造の波動関数マッピングに関する研究」に対して、第1回日本物理学会若手奨励賞を課題「「近接場ナノイメージング分光による半導体量子構造の電子状態の研究」に対して受賞している。

### ③ 主要論文

Matsuda, K., Saiki, T., Nomura, S., Mihara, M., Aoyagi, Y., Nair, S., Takagahara, T. **Near-Field Optical Mapping of Exciton Wave Functions in a GaAs Quantum Dot** (2003) *Physical Review Letters*, 91 (17), pp. 1774011-1774014. Cited 104 times.

Chollet, M., Guerin, L., Uchida, N., Fukaya, S., Shimoda, H., Ishikawa, T., Matsuda, K., Hasegawa, T., Ota, A., Yamochi, H., Saito, G., Tazaki, R., Adachi, S.-I., Koshihara, S.-Y. **Gigantic photoresponse in 1/4-filled-band organic salt (EDO-TTF) 2PF6** (2005) *Science*, 307 (5706), pp. 86-89. Cited 134 times.

Ito, Y., Matsuda, K., Kanemitsu, Y. **Mechanism of photoluminescence enhancement in single semiconductor nanocrystals on metal surfaces** (2007) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 75 (3), art. no. 033309, . Cited 30 times.

### (10)山本 雅哉「ナノ複合体を用いた遺伝子治療による内科的再生医療」

① さきがけ期間中の主な研究成果

＜環境・医療基礎・医療基礎技術＞

山本は遺伝子-高分子キャリア複合体の物理化学的性質が *in vivo* での遺伝子発現に与える影響について検討した。肝臓親和性をもつ多糖であるプルランヘスペルミンを導入し、プルラン誘導体と遺伝子との複合体を用いて、マウス肝臓への遺伝子導入を行い有望な結果を得た。

② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後開始した JST 独創的シーズ展開事業「核酸物質の導入、作用発現のための徐放性非ウイルスベクターの開発」(2006 年度)、科研費 基盤 (B) 「生体因子グラジエント化足場材料を利用した幹細胞からの骨-軟骨組織界面の再生」(2006~2007 年度)、科研費 若手 (A) 「基礎医学研究のツールとしての幹細胞動員・増幅能をもつ体内インキュベータの開発」(2009~2011 年度)、及び、JST A-Step(FS) 「生体組織に近い貯蔵弾性率をもつ高分子ハイドロゲル培養基材の開発」(2010 年度) 等で、「ナノ複合体を用いた再生医療」の研究を進展させている。

まず、JST 独創的シーズ展開事業によって、さきがけ研究の成果を用いて、多糖の分子量やカチオン基の導入率を変化させた非ウイルスベクターについて検討を行って、発現効率の向上を図っている。その後は、遺伝子治療と並行して、幹細胞や細胞増殖因子による再生医療の基礎研究にも力を入れている。特に、骨、軟骨分化に関与する細胞増殖因子や転写因子などの生体因子の濃度勾配が空間的に制御された、幹細胞のための生体因子グラジエント化足場材料を創製することについて研究を進めて、細胞増殖因子の徐放化の効果等を明らかにしている。

③ 主要論文

Yamamoto, M., Takahashi, Y., Tabata, Y. **Controlled release by biodegradable hydrogels enhances the ectopic bone formation of bone morphogenetic protein** (2003) *Biomaterials*, 24 (24), pp. 4375-4383. Cited 97 times.

Takahashi, Y., Yamamoto, M., Tabata, Y. **Osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells in biodegradable sponges composed of gelatin and  $\beta$ -tricalcium phosphate** (2005) *Biomaterials*, 26 (17), pp. 3587-3596. Cited 92 times.

Jo, J.-i., Ikai, T., Okazaki, A., Yamamoto, M., Hirano, Y., Tabata, Y. **Expression profile of plasmid DNA by spermine derivatives of pullulan with different extents of spermine introduced** (2007) *Journal of Controlled Release*, 118 (3), pp. 389-398. Cited 16 times.

## (11)湯浅 新治「超 Gbit-MRAM のための単結晶 TMR 素子の開発」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <産業技術基礎・集積エレクトロニクス>

湯浅はトンネル磁気抵抗素子の新しい作成法を考案し、世界最高のオンオフ比(400%)を実現した。従来との根本的な違いはトンネル障壁層として単結晶 MgO をエピタキシャル成長させたことで、トンネリング効率の飛躍的向上となった。さらに大面積加工に適するスパッタリング法でも良好な結果を出した。数多くの受賞、国際会議での招待講演はパイオニア性認知の証しである。

#### <特筆すべき成果>

集積エレクトロニクス産業に大きな影響を及ぼした研究として湯浅が開発したトンネル磁気抵抗素子がある。研究開発直前にオンオフ比が 70 程度であったが本研究により最高 400 まで到達し、また大面積化にも成功したため、次世代のハードディスクや高速不揮発メモリー (MRAM) 候補として注目され、NEDO の支援による大型の「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」(6 年間)へ発展している。同氏の所属する産業総合技術研究所、および東北大学、米国の IBM が世界のトップグループを形成している。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後、産総研と装置メーカーのキャノンアネルバ(株)が共同で行った「MgO-MTJ 素子の量産化技術の開発」、及び、NEDO 支援による大型の「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」(2005~2010 年度)に産総研グループの中心的研究開発者として参画して、さきがけ研究成果の展開・実用化を精力的に進めた。さらに、JST CREST「次世代エレクトロニクスデバイスの創出に資する革新材料・プロセス研究」領域の代表研究者として課題「革新的プロセスによる金属/機能性酸化物複合デバイスの開発」(2009 年度~)に取り組み、さきがけ研究成果の実用化とさらなる発展を図っている。

さきがけ研究で実現化した巨大トンネル磁気抵抗効果をベースにして、キャノンアネルバ(株)と共同で行ったトンネル磁気抵抗素子 (MgO-MTJ 素子) の量産化技術の開発においては、従来実用化されている下部構造「SyF 型ピン層」の上に MgO トンネル障壁層を積層できない問題を、下部構造にアモルファス CoFeB 合金を用いることにより 1 年弱で解決している。この成果により、HDD メーカー各社は、2007 年に MgO-MTJ 素子を用いた第二世代のトンネル磁気抵抗ヘッド (TMR ヘッド) (MgO—TMR ヘッド) の製品化に成功している。この MgO-TMR ヘッドが第一世代の TMR ヘッドに比べて格段に高性能であったため、最新の垂直記録媒体と組み合わせることで 250Gbit/inch<sup>2</sup> (従来の 2 倍) を超える超高密度 HDD が実現している。

NEDO 支援の「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」においては、Gbit 級の大容量スピン MRAM 実現に不可欠となるスピントルク磁化反転による低電力書き

込み技術の実用化に取り組み、MgO-MTJ におけるスピントルク磁化反転を世界に先駆けて実現し、新規開発の垂直磁化電極と結晶 MgO トンネル障壁を組み合わせた垂直磁化 MgO-MTJ 素子を用いた究極のスピントルク MRAM の基本技術の開発を進めている。

CREST においては、金属性材料と機能性金属酸化物の複合構造による新しい不揮発性スイッチング機能の創出を目指して、革新的プロセスの開発に取り組んでいる。

本研究者の特筆大書すべき成果である「酸化マグネシウム (MgO) をトンネル絶縁層に用いたトンネル磁気抵抗素子 (MgO-MTJ 素子) を開発し、従来技術の 2 倍を超える画期的な高性能を実現し、さらに、キャノンアネルバ (株) と共同で MgO-MTJ 素子の量産技術の開発に取り組み、アモルファス層の上に結晶層を成長させる独創的な手法により MgO-MTJ 素子の産業応用を可能にしたこと、さらに、この MgO-MTJ 素子を用いたハードディスクドライブ (HDD) 磁気ヘッドは 2007 年から製品化され、現在生産されている HDD のほぼ全てに搭載され、世界をリードする HDD の大容量化に貢献している。」ことに対して、数々の賞が授与されている。まず MTJ 素子の研究開発に対しては、2006 年に「ゴールド・メダル 東京テクノ・フォーラム 21 賞」、2007 年に「第 21 回日本 IBM 科学賞」、MTJ 素子の開発・実用化に対しては、「2007 年度朝日賞」、2008 年に「産学官連携推進会議／内閣総理大臣賞」、2009 年に「平成 21 年度井上春成賞」、「2009 年度つくば賞」、2010 年に「第 6 回日本学術振興会賞」が授与されており、本研究者の成果の社会へ与えたインパクトが如何に大きかったかを示している。

また、上記の成果に関係して、さきがけ期間中、及び、さきがけ終了後、産総研、JST、キャノンアネルバ (株) 等から出願された特許が 9 件登録されている。トンネル磁気抵抗素子 (MgO-MTJ 素子) が量産化されていることから、「磁気抵抗素子」に関する 6 件の特許は、特に価値の高い特許であると考えられる。

### ③ 主要論文

Yuasa, S., Nagahama, T., Fukushima, A., Suzuki, Y., Ando, K. **Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions** (2004) *Nature Materials*, 3 (12), pp. 868-871. Cited 849 times.

Djayaprawira, D.D., Tsunekawa, K., Nagai, M., Maehara, H., Yamagata, S., Watanabe, N., Yuasa, S., Suzuki, Y., Ando, K. **230% room-temperature magnetoresistance in CoFeBMgOCoFeB magnetic tunnel junctions** (2005) *Applied Physics Letters*, 86 (9), art. no. 092502, pp. 1-3. Cited 262 times

Tulapurkar, A.A., Suzuki, Y., Fukushima, A., Kubota, H., Maehara, H., Tsunekawa, K., Djayaprawira, D.D., Watanabe, N., Yuasa, S. **Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions** (2005) *Nature*, 438 (7066), pp. 339-342. Cited 169 times.

### 2.2.3 第3期生(7名)

#### (1)磯部 寛之「自己組織化ナノ有機分子による機能性集合体の構築」

##### ① さきがけ期間中の主な研究成果

##### <環境・医療基礎・医療基礎技術>

磯部は疎水性のフラーレンおよびカーボンナノチューブと関連物質に親水性の置換基を導入して両親媒性とし、さらに機能性分子をつけること機能性物質を実現することを試みた。両親媒性フラーレンの高効率合成、遺伝子導入の試み、毒性評価などで成果を挙げた。日本化学会進歩賞受賞のほか多数の招待講演をおこなっている。

##### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中から開始した科研費 若手 (A) 「極性官能基を冠状配置したフラーレンの高効率合成と機能性ホスト分子としての応用」(2005~2007年度)、及び、さきがけ終了後開始した科研費 新学術領域(研究領域提案型)「 $\pi$ 電子豊富分子の生体内化学」(2008~2011年度)、科研費 若手 (A) 「単結合多重連結による原子欠損グラフェンモデルの合成」(2009~2011年度)により、さきがけ研究の発展を進めている。

一連の科研費での研究において、さきがけ研究の成果である高効率、高選択的な両親媒性フラーレン・炭素クラスターの合成法を利用し、効率的にフラーレン・炭素クラスター上に分子認識場を構築、ホスト分子として機能する分子を創出することを目的とした検討を行い、「フラーレンの分子二重膜」が通常の細胞膜の一万倍も水を通しにくいこと、しかも、加熱するとより水を通さないようになることを見出だしている。この特性は、新しい材料開発につながると期待をされている。最近では、「原子欠陥グラフェン」という最近電子顕微鏡構造解析により見出された新しい  $n$  電子共役系をもつ分子群の設計・合成とその特性研究に基づく機能探索の研究に発展している。

なお、2008年に平成20年度若手科学者賞、2009年に野副記念奨励賞等の賞を受賞している。

##### ③ 主要論文

Nakamura, E., Isobe, H. **Functionalized Fullerenes in Water. The First 10 Years of Their Chemistry, Biology, and Nanoscience** (2003) *Accounts of Chemical Research*, 36 (11), pp. 807-815. Cited 346 times.

Isobe, H., Tanaka, T., Nakanishi, W., Lemiègre, L., Nakamura, E. **Regioselective oxygenative tetraamination of [60]fullerene. Fullerene-mediated reduction of molecular oxygen by amine via ground state single electron transfer in dimethyl sulfoxide** (2005) *Journal of Organic Chemistry*, 70 (12), pp. 4826-4832. Cited 36 times.

Isobe, H., Tanaka, T., Maeda, R., Noiri, E., Solin, N., Yudasaka, M., Iijima, S., Nakamura, E.

**Preparation, purification, characterization, and cytotoxicity assessment of water-soluble, transition-metal-free carbon nanotube aggregates** (2006) *Angewandte Chemie - International Edition*, 45 (40), pp. 6676-6680. Cited 60 times.

## (2)大谷 啓太「光・電波境界領域における高機能・低消費電力量子カスケードレーザーの開発」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <産業技術基礎・光エレクトロニクス>

大谷は中赤外ないし遠赤外領域での小型コヒーレント光源として有望な量子カスケードレーザーにつき、新材料系 InAs/AlGaSb の技術開発とバンド構造理論に基づく詳細設計を行い、中赤外域で高効率、高温動作性、出力の総合特性が優れたレーザーを実現した。複数の表彰、多くの招待講演の対象となっている。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中に開始した科研費 若手 (A) 「偏光制御可能な多重波長量子カスケードレーザー」 (2006~2008 年度) 等により、さきがけ研究の発展を進めている。

さきがけ研究の成果である InAs/AlGaSb 量子カスケードレーザーに関しては、注入部分のドーピング濃度により、サブバンド間遷移のみ (高ドーピング)、バンド間遷移 (低ドーピング)、両遷移 (中間ドーピング) と同時レーザー発振の選択を可能にすることを明らかにしている。その後は、バンド間・サブバンド間 2 波長発振に成功した InAs/AlSb 量子カスケードレーザーの高性能化を目指した研究を進めている。

なお、2007 年に(財)みやぎ産業科学振興基金から「量子カスケードレーザーの研究」に対して研究奨励賞を受賞している。

### ③ 主要論文

Ohtani, K., Ohno, H. **InAs/AlSb quantum cascade lasers operating at 10  $\mu\text{m}$**  (2003) *Applied Physics Letters*, 82 (7), pp. 1003-1005. Cited 34 times.

Ohtani, K., Fujita, K., Ohno, H. **A low threshold current density InAs/AlGaSb superlattice quantum cascade laser operating at 14  $\mu\text{m}$**  (2004) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, 43 (7 A), pp. L879-L881. Cited 12 times.

Ohtani, K., Fujita, K., Ohno, H. **Mid-infrared InAsAlGaSb superlattice quantum-cascade lasers** (2005) *Applied Physics Letters*, 87 (21), art. no. 211113, pp. 1-3. Cited 9 times.

### (3)大友 明「酸化物量子井戸構造を用いた発光素子及び光非線形性素子の開発」

#### ① さきがけ期間中の主な研究成果

##### <基礎・機能材料開発>

大友はパルスレーザー堆積法による高品質 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ ヘテロ構造結晶の作製と界面構造に依存した電気・光学物性の評価を行い、また、 $\text{ZnO}/\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$ ヘテロ界面の量子ホール効果観測に成功するなど、ワイドギャップ材料における量子効果デバイスへの可能性を示した。

#### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中に開始した科研費 基盤 (B) 「高効率酸化亜鉛系青色・紫外発光素子の開発」(2006～2007年度)、及び、さきがけ終了後開始した科研費 若手 (A) 「透明酸化物の微細構造における量子物性の開拓」(2008～2010年度)、JST CREST「ナノ界面技術の基盤構築」領域の分担研究者としての課題「原子レベル制御による金属酸化物界面の創製と高移動度電子デバイス応用」(2007～2011年度)、ならびに、JST ALCA (先端的低炭素化技術開発)「ユニバーサル透明導電性基板の開発」(2010年度～)などによりさきがけ研究の発展を精力的に進めている。

さきがけ研究における  $\text{ZnO}/\text{Mg}_x\text{Zn}_{1-x}\text{O}$  ヘテロ界面の量子ホール効果観測に成功した成果をベースに、透明酸化物半導体の微細構造制御と量子機能を結びつける研究に取り組み、大きな成果を挙げている。分子線エピタキシーを用いた結晶成長技術において、酸化物薄膜作製条件を成長速度に着目して最適化することで、 $\text{ZnO}/\text{MgZnO}$  界面において、極めて高純度かつ平坦な界面を実現し、酸化物としては世界最高の電子移動度 ( $180,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) を達成することに成功している。さらに、この試料の低温・強磁場下での電気伝導特性を調べた結果、これまで GaAs 系化合物半導体やグラフェンなどごく限られた材料でしか観測例のなかった分数量子ホール効果を、酸化物同士の界面において世界で初めて見出している。この成果は、青色発光素子に続く次世代素子として着目されている紫外線発光素子や透明トランジスタなどの実用化など酸化物材料の世界を切り開くものと期待されている。さらに、酸化物が環境に優しい材料であることから、JST ALCA では、ガラス基板上に酸化物結晶を大面積かつ安価に作製する結晶作製法を確立することで、酸化物の優れたデバイス機能を実用化レベルの技術に発展させることに取り組んでいる。

なお、上記の非常に優れた業績に対して、2007年にサー・マーティン・ウッド賞が課題「原子レベル制御による酸化物界面の創製と物性開拓」に対して、2009年に平成21年度若手科学者賞が課題「原子レベル制御による酸化物界面の創製と量子伝導の研究」に対して、2011年にゴットフリート・ワグネル賞が課題「原子レベル制御による金属酸化物界面の創製と高移動度電子デバイス応用」に対して授与されている。また、さきがけ期間中に研究機関、JST から出願した「酸化物半導体」等の特許が6件登録されてい

る。

### ③ 主要論文

Ohtomo, A., Hwang, H.Y. **A high-mobility electron gas at the LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> heterointerface**

(2004) *Nature*, 427 (6973), pp. 423-426. Cited 569 times.

Tsukazaki, A., Ohtomo, A., Onuma, T., Ohtani, M., Makino, T., Sumiya, M., Ohtani, K., Chichibu, S.F.,

Fuke, S., Segawa, Y., Ohno, H., Koinuma, H., Kawasaki, M. **Repeated temperature modulation**

**epitaxy for p-type doping and light-emitting diode based on ZnO** (2005) *Nature Materials*, 4 (1), pp.

42-45. Cited 896 times.

Tsukazaki, A., Ohtomo, A., Kita, T., Ohno, Y., Ohno, H., Kawasaki, M. **Quantum hall effect in polar**

**oxide heterostructures** (2007) *Science*, 315 (5817), pp. 1388-1391. Cited 149 times.

## (4)大野 雄高「ピーポッドヘテロ接合量子効果デバイスの創製」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <基礎・機能材料開発>

大野はカーボンナノチューブの内部にフラーレン分子を内包させた構造（ピーポッド）をチャンネルとする FET を試作し、電極材料の仕事関数を利用した FET 特性制御とピーポッド物性の解明を行った。

### ② きがけ終了後の発展状況

さきがけ期間中から開始した科研費 若手 (B) 「カーボンナノチューブの光物性と光電子デバイス応用に関する研究」(2006～2007 年度)、さきがけ終了後開始した科研費 若手 (B) 「カーボンナノチューブにおける単一光子放出現象の研究」(2008～2009 年度)、及び、NEDO 産業技術研究助成事業「高性能カーボンナノチューブ薄膜トランジスタの開発」(2008 年度～)によりさきがけ研究の発展を進めた。

さきがけ終了後は、カーボンナノチューブの光電子デバイス（発光素子）としての可能性の検討に取り組んでいる。カーボンナノチューブの光学的特性を解析するとともに、デバイス化のためのキャリア注入制御について検討して、絶縁膜界面に導入される固定電荷を制御することにより注入キャリア（電子／正孔）を制御する方法を見出だし、部分ゲートを導入した p/n ダイオードを作製して、カーボンナノチューブへの電子と正孔の同時注入の実現に成功している。

極最近の成果として、世界で初めてプラスチック基板上でカーボンナノチューブ集積回路の動作に成功している。フレキシブル・エレクトロニクスにおいては、従来の硬いシリコン基板に代わってプラスチック素材の上に高速かつ安価に高性能な集積回路を

実現する技術が求められている。カーボンナノチューブを大気圧下の化学気相法により連続的に成長し、フィルター濾過・収集した後、基板に転写するという簡単な方法で均一で清浄なカーボンナノチューブの薄膜を実現した。この試料において、高い移動度 ( $35\text{cm}^2/\text{Vs}$ )、オン/オフ比  $6 \times 10^6$  を達成した。上記の方法を用いて、透明で柔軟なプラスチック基板上にカーボンナノチューブの TFT を集積化して、リング発振器などの動作に成功した。

なお、さきがけ期間中に研究機関から出願した「カーボンナノチューブ作製方法」に関する特許が 1 件登録されている。

### ③ 主要論文

Shimada, T., Sugai, T., Ohno, Y., Kishimoto, S., Mizutani, T., Yoshida, H., Okazaki, T., Shinohara, H. **Double-wall carbon nanotube field-effect transistors: Ambipolar transport characteristics** (2004) *Applied Physics Letters*, 84 (13), pp. 2412-2414. Cited 70 times.

Ohno, Y., Iwasaki, S., Murakami, Y., Kishimoto, S., Maruyama, S., Mizutani, T. **Chirality-dependent environmental effects in photoluminescence of single-walled carbon nanotubes** (2006) *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 73 (23), art. no. 235427, . Cited 46 times

Sun, D.-M., Timmermans, M.Y., Tian, Y., Nasibulin, A.G., Kauppinen, E.I., Kishimoto, S., Mizutani, T., Ohno, Y. **Flexible high-performance carbon nanotube integrated circuits** (2011) *Nature Nanotechnology*, 6 (3), pp. 156-161. Cited 1 time.

## (5)高村 禪「生体・溶液系ナノデバイス研究の為に微小流体チップ開発」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果 <環境・医療基礎・医療基礎技術>

高村は生体分子を選択的に捕獲、分離する微小流体チップの開発を目標に、テーパー流路を用いた生体分子のトラップ（テーパー状流路を流れるDNA等に圧力勾配と逆向きの電場勾配を設け、釣合い条件下でトラップ）および微小化ポンプの開発を行なった。トラップ、ポンプ、バルブを組み合わせることでDNA抽出チップを試作し、有望な実験結果を得ている。データの再現性、設計の確実性に課題が残されている。

### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後に開始した科研費 特定領域「テーパー状流路を用いた単一細胞からの瞬間 RNA 抽出と解析研究」（2007～2008 年度）、科研費 基盤 (B) 「液体電極プラズマの素過程の解明と高機能統合分析デバイスへの応用」（2008～2010 年度）、及び、JST A-Step「マイクロポンプとマイクロ流路チップを用いた細胞解析・分離装置」（2010

年度)によって、さきがけ研究の発展を進めている。

まず、さきがけ研究で得られた DNA 等長鎖状の分子を選択的にトラップ・抽出・濃縮できる技術を用いて、mRNA を抽出・精製するチップの開発を行っている。特に、影響が大きいランニングバッファの最適化により、20~100 塩基程度の RNA を効率よくトラップできるようになり、今後、RNA 干渉などの実験への応用を期待している。さらに、さきがけ研究の成果である電気浸透流ポンプを企業が開発したマイクロ流路チップ・フローサイトメーターに適用してマイクロ流路チップ上で細胞を解析・分離する装置の実用化を目指した検討を行っている。同時に市場調査を行って具体的なニーズを把握し、今後、試作機とチップを用いてニーズへの適用性検証を行うとしている。

金沢大学附属病院等は、2008 年に本研究者らの開発した DNA チップを使ってホルモン（コルチゾール）過剰分泌に起因する高血圧症「原発性アルドステロン症」の診断体制を構築している。本研究者らも「迅速コルチゾール測定法」として関連機器の特許も出願、新たな診断技術の定着を目指している。また、本研究者らは、JST 大学発ベンチャー推進事業に 2004 年に採択され、研究開発成果を事業展開するために設立した（株）マイクロエミッションで「液体電極プラズマによる原子発光分析法を用いたハンディ元素分析器“MH-5000”」の商品化に成功して、第 21 回「中小企業優秀新技術・新製品賞」において中小企業長官賞を受賞している。

なお、さきがけ期間中に JST,研究機関から出願した「流体移送デバイス」等の特許 3 件が登録されている。

### ③ 主要論文

Okuno, J., Maehashi, K., Matsumoto, K., Kerman, K., Takamura, Y., Tamiya, E. **Single-walled carbon nanotube-arrayed microelectrode chip for electrochemical analysis** (2007) *Electrochemistry Communications*, 9 (1), pp. 13-18. Cited 39 times.

Maehashi, K., Katsura, T., Kerman, K., Takamura, Y., Matsumoto, K., Tamiya, E. **Label-free protein biosensor based on aptamer-modified carbon nanotube field-effect transistors** (2007) *Analytical Chemistry*, 79 (2), pp. 782-787. Cited 196 times.

Okuno, J., Maehashi, K., Kerman, K., Takamura, Y., Matsumoto, K., Tamiya, E. **Label-free immunosensor for prostate-specific antigen based on single-walled carbon nanotube arraymodified microelectrodes** (2007) *Biosensors and Bioelectronics*, 22 (9-10), pp. 2377-2381. Cited 83 times.

## (6)塚越 一仁「1nmサイズ分子素子伝導物性およびその制御」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <産業技術基礎・集積エレクトロニクス>

塚越は極微の単分子スイッチ素子とフレキシブルエレクトロニクスの基本素子である有機トランジスタに共通の課題は金属電極と有機分子の間の電子注入制御であるとの認識に基づいて新しい製法を探索した。特性改善されたペンタセン微小トランジスタと有機発光素子を組み合わせたフレキシブル表示素子を試作し、またナノギャップ間にガドリニウム内包フラーレンを挿入して超伝導 S/N/S プロキシミティ効果を観測した。

<特筆すべき成果>

ナノテクノロジーの極限を広げた研究成果として塚越が行なったタングステン針で 2nm ギャップを作り、ガドリニウム内包フラーレンをはさむことで超伝導トンネル接合素子を作成し、現時点で分子デバイスのひとつの到達点を示した。これを発展させるべく 2006 年後半から同氏が代表となる CREST テーマ「ナノ界面・電子状態制御による高速動作有機トランジスタ」が開始されている。

#### ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ最終年度から開始した JST CREST「ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成」領域の代表研究者としての課題「ナノ界面・電子状態制御による高速動作有機トランジスタ」（2006～2009 年度）、科研費 基盤（A）「ナノ薄膜層状伝導システムの創生とコヒーレント伝導制御」（2006～2008 年度）、及び、さきがけ終了後開始した科研費 基盤（A）「電界誘起バンドギャップによるグラフェン原子薄膜高速トランジスタ」（2009～2011 年度）、JST A-Step「グラフェン産業創出のための液相グラフェン成長技術の応用展開」（2011 年度）により、さきがけ研究の発展に取り組んでいる。

さきがけ研究終了後も、一貫して、有機材料の特有の機能を活かしてプラスチック・エレクトロニクス（フレキシブル・エレクトロニクス）を実現することを目指してプラスチック・エレクトロニクスの主要要素である有機トランジスタの動作機構の基礎解明と制御の研究を精力的に進めている。有機トランジスタの特性に対する最大の課題は極めて高い端子抵抗であるとの認識に基づいて、金属／有機半導体界面に電荷を供給しうる分子もしくは薄膜を挿入する検討を行って、界面での電荷トラップサイトの低減と端子抵抗の相関を見出すことに成功している。さらに、電荷トラップサイトの無いトラップフリー界面を実現するため、有機トランジスタの新たな作製法の開発に取り組み、有機溶媒に溶解した有機半導体と絶縁ポリマーを基板上に滴下し自己組織化によって自発的に層分離をさせる「層分離塗布法」と溶媒蒸気を短時間当てて結晶成長を促進する「溶媒アニール法」を組み合わせた独自の 2 段階自己組織化法の開発に成功した。これにより、溶媒から作ったトランジスタとして世界最高の電界効果移動度 ( $9.1\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) を達成している。

最近では、グラフェンを半導体などに使う研究にも精力的に取り組んでおり、まず、グラフェンにソース・ドレイン電極を形成した後グラフェン上に直接アルミニウムを蒸

着してゲート電極とした二層グラフェントランジスタを作製して、電圧のかけ方を変えてシリコン製半導体のように電流のオンオフ制御できることを実証し、シリコンを超える微細回路への道を開いたと評価されている。グラフェンの結晶性を向上する必要性が明確になったとして、この点に注目した特性解明と特性向上の技術開発を進めている。本研究者がグラフェンをチャンネル層として用いて試作したトランジスタが「nano tech 2009」の富士通のブースに出展されて注目を浴びたとのことである。

なお、上記の優れた業績に対して、2008年にH20年度若手科学者賞を課題「ナノカーボンエレクトロニクス創成と展開の研究」に対して、2010年に第58回電気科学技術奨励賞を課題「金属/有機半導体界面の電流注入解明に基づく高性能有機トランジスタの開発」に対して受賞している。2007年に第29回応用物理学会論文賞を課題「Hall Effect of Quasi-Hole Gas in Organic Single-Crystal Transistors」に対して受賞するなど3件の賞を得ている。また、さきがけ期間中に理化学研究所、産総研等から出願した「微細パターン形成方法」等の特許が3件登録されている。

### ③ 主要論文

Yagi, I., Tsukagoshi, K., Aoyagi, Y. **Direct observation of contact and channel resistance in pentacene four-terminal thin-film transistor patterned by laser ablation method** (2004) *Applied Physics Letters*, 84 (5), pp. 813-815. Cited 75 times.

Yagi, I., Tsukagoshi, K., Aoyagi, Y. **Modification of the electric conduction at the pentacene SiO<sub>2</sub> interface by surface termination of SiO<sub>2</sub>** (2005) *Applied Physics Letters*, 86 (10), art. no. 103502, pp. 1-3. Cited 99 times.

Takenobu, T., Takahashi, T., Kanbara, T., Tsukagoshi, K., Aoyagi, Y., Iwasa, Y. **High-performance transparent flexible transistors using carbon nanotube films** (2006) *Applied Physics Letters*, 88 (3), art. no. 033511, pp. 1-3. Cited 54 times.

## (7)舟窪 浩「2次元ナノレイヤー積層による新規誘電特性の発現 - サイズ効果フリー高誘電体の創製 -」

### ① さきがけ期間中の主な研究成果

#### <産業技術基礎・集積エレクトロニクス>

舟窪は高密度集積エレクトロニクス用コンデンサ材料として有望なペロブスカイト構造酸化物が持つ困難（膜厚を薄くした場合に誘電率が低下する現象）を詳細に調べ、サイズ効果フリー高誘電体として酸化ビスマスを含むペロブスカイト結晶の存在を見出すとともに、その物性的起源を明らかにした。

## ② さきがけ終了後の発展状況

さきがけ終了後開始した科研費 基盤 (B) 「サイズ効果フリー誘電体の誘電特性におよぼす残留歪と温度の影響」(2007~2008 年度)、科研費 特定領域「チタン酸ジルコン酸鉛単結晶モデル粒界を用いたナノドーパントの圧電制御機構の解明」(2008~2009 年度)、科研費 基盤 (B) 「高品質チタン酸ジルコン酸鉛単結晶膜の作製とその基礎特性解明」(2009~2011 年度)、JST A-Step 「水熱合成法によるフレキシブル基板上への KNbO<sub>3</sub> 膜の低温形成技術構築」(2009 年度)、及び、NEDO 産業技術研究助成事業「サイズ効果フリー特性を有する C 軸配向ビスマス層状誘電体を用いた高温対応高容量薄膜コンデンサの開発」(2009 年度~)によりさきがけ研究成果をベースにした「サイズ効果フリー誘電体によるコンデンサ」に関する研究開発を進めている。

サイズ効果フリー誘電体に関して、薄膜作製方法についての検討をおこない、高圧力下でのスパッタリング法やパルス MOCVD 法(有機金属化学気体相法)が多成分からなるペロブスカイト構造酸化物の 3 次元構造の作製に有利であることを明らかにしている。また、誘電特性の残留歪と温度の影響を調べて結晶方位依存性があり(011)配向が最も温度依存性が小さいが、C 軸 1 軸配向膜でも温度依存性が小さいことを明らかにしている。さらに、電気回路構成部品の中で最も遅れていた高温対応高容量コンデンサの実現を目指して、C 軸配向ビスマス層状誘電体を用いガラスや金属箔上でも約 300°C まで特性劣化のないコンデンサ材料の開発に取り組んでいる。並行して、高い圧電特性を有するチタン酸ジルコン酸鉛について本研究者が世界で初めて成功した単結晶厚膜作製の成果をベースにして、高品質の単結晶の作製と得られた単結晶を用いた基礎物性解析にも取り組んでいる。

なお、さきがけ期間中に(株)堀場製作所やキャノン(株)から出願した「誘電素子」等の特許が 3 件登録されている。また、2007 年に第 62 回日本セラミックス協会賞学術賞を課題「MOCVD 法を用いた高品質誘電体薄膜の作製と物性に関する研究」に対して受賞している。

## ③ 主要論文

Takahashi, K., Suzuki, M., Kojima, T., Watanabe, T., Sakashita, Y., Kato, K., Sakata, O., Sumitani, K., Funakubo, H. **Thickness dependence of dielectric properties in bismuth layer-structured dielectrics** (2006) *Applied Physics Letters*, 89 (8), art. no. 082901, . Cited 7 times.

Watanabe, T., Funakubo, H. **Controlled crystal growth of layered-perovskite thin films as an approach to study their basic properties** (2006) *Journal of Applied Physics*, 100 (5), art. no. 051602, . Cited 8 times.

Yasui, S., Nishida, K., Naganuma, H., Okamura, S., Iijima, T., Funakubo, H. **Crystal structure analysis**

## of epitaxial BiFeO<sub>3</sub>-BiCoO<sub>3</sub> solid solution films grown by metalorganic chemical

vapor deposition (2007) *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 46 (10 B), pp. 6948-6951. Cited 21 times.

### 2.3 第2章のまとめ

まず、参加研究者全体の動向に関しては、さきがけ期間中とさきがけ終了後から追跡調査時点までの、職位、原著論文発表件数、特許出願件数、受賞状況、助成金獲得状況などを比較したが、さきがけ期間中に比較して、さきがけ終了後に研究活動がより活発化していることが認められた。

職位については、さきがけ採択時には准教授が 10 名であったのが、追跡調査時点では、教授が 12 名、准教授が 11 名になっているなど、少なくとも 23 名は明確に上位の職に就いていることが認められる。原著論文発表件数でも、1 名あたりに換算した数値で見て、さきがけ期間中 15.3 報、さきがけ終了後 27.9 報であり、さきがけ終了後の論文数の全論文数に対する割合は 65%とさきがけ終了後に研究活動がより活発化していることを示している。特許出願に関しては、さきがけ期間中（一部さきがけ終了後）に出願した 217 件中 69 件が登録されており、登録率は約 32%と高く、研究の独創性の高さを示すものと考えられる。特に、湯浅の「磁気抵抗素子」に関する登録特許 6 件は、「トンネル磁気抵抗素子」が量産化されていることから、非常に価値が高い特許と考えられる。受賞に関しても、世間的にも名を知られた賞の受賞件数が、さきがけ終了後は 13 件とさきがけ期間中の 2 件に比較して大幅に増加している。研究助成金に関しても、数名の研究者を除いて大方の研究者は、さきがけ終了後も継続的に助成金を獲得している。さきがけ終了後に獲得した大型の助成金に関しても、JST CREST の代表研究者に 4 名、ALCA に 1 名、科研費の新学術領域に 4 名が採択されたのを始めとして、NEDO の産業技術研究助成事業に 5 名、科研費若手 S に 1 名、若手 A に 11 名 13 件、基盤 A に 4 名 5 件、基盤 B に 20 名 22 件、比較的大型の特定領域 1 名、厚生科研費 1 名など多くの研究者が採択されており、さきがけ期間中以上に活発な研究活動が行われていると言える。

次に、参加研究者の研究成果の発展状況に関しては、ほぼ全員の研究者が、さきがけ研究の中心的課題の発展を進めており、原著論文数からも見られる通り、多くの成果が得られつつある。

分類別に概観すると、〈ナノテクノロジー基礎／個体スピン〉に関しては、古賀、竹内、ウルフレド、大岩、町田の 6 名がいるが、古賀の「スピン軌道相互作用定数の精密決定、及び、電子スピンのゲージ電圧による制御」、大岩の「InGa 量子ドットを用いたスピン電子軌道相互作用を利用した低消費電力の新しい半導体」等の成果が得られている。

〈ナノテク基礎／極限計測法〉には、水野、松田の 2 名がいるが、松田の「ナノ光計

測技術を活用したナノカーボンによる新規光機能発現と高効率光・電子変換」や水野の「表面微小構造解析技術の活用による理想的 SiO<sub>2</sub>/SiC 界面の形成」などの成果が得られている。

<ナノテク基礎／物性評価>には、市田、戸田、岩井の3名がいるが、岩井の「強相関電子系物質の光誘起相転移のダイナミクス解明」などの成果が得られている。

<ナノテク基礎／機能材料開発>には、田中秀、渡辺、尾上、須田、田中健、大友、大野の7名がいるが、大友の「原子レベル制御による酸化物界面の創製と高移動度電子デバイス応用」、田中健の「金属イオン配列制御と機能発現」、田中秀の「強相関電子デバイスの創製に向けた微細加工プロセス確立」、須田の「界面ナノ制御による次世代型パワー半導体」、大野の「カーボンナノチューブの光電子デバイスやプラスチック基板上のカーボンナノチューブ集積回路」などの大きな成果が得られている。

<産業技術基礎／集積エレクトロニクス>には、菅原、湯浅、塚越、舟窪の4名がいるが、湯浅の「トンネル磁気抵抗素子の量産化と HDD 磁気ヘッドへの製品化」、塚越の「フレキシブル・エレクトロニクス実現のための有機トランジスタの動作機構の解明」、菅原の「ハーフメタル強磁性体を用いた MOSFET 型スピントランジスタ」、舟窪の「サイズ効果フリー誘電体によるコンデンサ」など、非常に大きい成果が数多く得られている。

<産業技術基礎／光エレクトロニクス>には、近藤、大谷の2名がいるが、近藤の「化合物半導体導波路を用いた波長変換素子」の成果などが得られている。

<環境・医療基礎・エネルギー貯蔵>には、王、古園、山本、磯部、高村の5名がいるが、古園の「無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料」、高村の「生体高分子を選択的に捕獲・分離する微小流体チップ」などの成果が得られている。

次に、研究者個別で見ると、特に注目に値する研究成果としては、下記のもの等が挙げられる。

第一に特筆すべき成果としては、湯浅がさがけ研究で実現化した巨大トンネル磁気抵抗効果をベースに結晶性 MgO をトンネル障壁に用いたトンネル磁気抵抗素子 (MgO-MTJ 素子) の開発に成功し、さらにキャノンアネルバ (株) と共同で量産技術を確立し、この MgO-MTJ 素子を用いたハードディスクドライブ (HDD) 磁気ヘッドは 2007 年から製品化され、現在生産されている HDD のほぼ全てに搭載され、世界をリードする HDD の大容量化に貢献していることである。この特大の成果に対して、6 件の著名な賞が授与されている。今後、巨大トンネル磁気効果を応用した磁気記録式不揮発性メモリー (MRAM) である「スピン RAM」の基本技術の確立が期待されている。

次に特筆すべき成果は、大友がさがけ研究成果をベースにして、ZnO/MgZnO 界面において、酸化物としては世界最高の電子移動度 (180,000cm<sup>2</sup>/Vs) の達成に成功したことである。この成果は、青色発光素子に続く次世代素子として着目されている紫外線発光素子や透明トランジスタの実用化など酸化物材料の世界を切り開くものと期待され

ている。この成果に対しても、3件の著名な賞が授与されている。

また、他の特筆すべき成果は、塚越が一貫して追求している、有機材料の特有の機能を活かしたフレキシブル・エレクトロニクス実現のための有機トランジスタの動作機構の解明の研究成果である。

上記に続く注目すべき成果としては、菅原の「ハーフメタル強磁性体を用いたMOSFET型スピントランジスタ」の研究、古園の「無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料」の研究、岩井の「強相関電子系物質の光誘起相転移のダイナミクス解明」、近藤の「化合物半導体導波路を用いた波長変換素子」の研究、田中健の「金属イオン配列制御と機能発現」、松田の「ナノ光計測技術を活用したナノカーボンによる新規光機能発現と高効率光・電子変換」の研究等が挙げられる。

研究成果の実用化による社会還元の観点から見ると、湯浅の「トンネル磁気抵抗素子の量産化とHDD磁気ヘッドへの製品化」は、HDDヘッドの市場規模が世界で約6000億円ということであり、社会還元が大きく寄与したと言える。規模は小さいが、高村の「生体高分子を選択的に捕獲・分離する微小流体チップ」は、大学附属病院による高血圧症の診断体制の構築に活用されようとしている。また、ハンディタイプの元素分析機器の製品化にも成功している。古園の「無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料」に関しては、抗感染性カテーテルとして、技術移転先等体制を整えて、承認申請を行った後、早期の臨床応用を目指すもあり、その進展に関心を持たれる。

以上、調査したすべての観点から、さきがけ終了後も、非常に活発に研究が進められており、さきがけ研究の成果が大きく発展しつつあると言える

## 第3章 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果

### 3.1 「無機ナノ粒子・有機・細胞三元複合体による生体活性材料の開発」

古菌勉

#### 3.1.1 研究成果の発展状況

ハイドロキシアパタイト(HAp)は、骨や歯のような硬組織だけではなく軟組織に対しても高い親和性を有するため、体外から体内へと貫通する経皮デバイスの細菌感染防止具への応用が試みられてきたが、硬く脆いというセラミックス固有の性質が臨床応用への壁となっていた[1]。このような背景から、さきがけ研究では、セラミックスの安定性と人体への親和性を兼ね備えた複合材料の開発に取り組んだ。

マイクロエマルジョン法を独自に改良することで、ロッド状の構造<sup>2</sup>を有しナノスケールで粒径を制御したナノ HAp の合成法<sup>3</sup>を提起した[2-4]。また、アルコキシシリル基、イソシアネート基、カルボシル基といった反応性基<sup>4</sup>を有するポリマーを基材表面にグラフト重合し、このグラフト鎖を足場に HAp ナノ粒子をほぼ単層でコーティングした[4-6]。このナノ HAp 粒子と繊維上にグラフトポリマーの官能基を介して共有結合させ二元複合体<sup>5</sup>を創出した。[7]。更に、界面上での共有結合を介したナノ無機-有機コンポジットから成る三次元経皮デバイス<sup>6</sup>(写真 1)は良

<sup>2</sup>複合化に用いた HAp ナノ粒子は長径 100~200nm で板状~ロッド状構造をなし、構造中にカーボネートを含むことから高い生体活性を有することが推察された。リンカーとして

poly( $\gamma$ -methacryloxypropyl trimethoxysilane)を無機・有機界面に導入した。未処理基材にナノ粒子を吸着させた場合、超音波処理で簡単に粒子が剥離するが、共有結合を導入した場合、粒子は強固に結合していた。

<sup>3</sup>シルク繊維上にグラフトした poly (4-methacryloyloxyethyl trimellitate anhydride) を加水分解しジカルボン酸を形成させた。この官能基に対してハイドロキシアパタイトナノ粒子をイオンの相互作用で結合させたナノ無機・有機複合材料を調製した。界面での相互作用を赤外分光法で同定・推察し、生体材料の可能性を示唆した。

<sup>4</sup>アルコキシシリル基及びイソシアネート基は HAp 結晶骨格の水酸基と共有結合し、カルボシル基は HAp 表面の  $\text{Ca}^{2+}$  とイオンの相互作用する。

<sup>5</sup>得られた繊維の機械的特性は未処理繊維とほぼ同一でありながら、その表面はセラミックスの特性を示した。

<sup>6</sup>二元複合体からなるボタン状構造体に細胞機能を付与するために、動物同腹仔の歯根膜線維芽細胞、骨髄細胞および自家皮膚細胞を複合化させた。調製した HAp 化繊維を繊維長約 100 $\mu\text{m}$  に切断し、シリコーンラバーで成型加工したボタン状基板に複合繊維を植毛法にて三次元的にコートして、ボタン状構造体を製造した。ボタン状構造体の中心部に空けた孔を通してカテーテル本体を挿入すること

好な細胞接着性<sup>7</sup>を示した[8-9]. 2004年の J Artif. Organs. に掲載された論文[7] “Nano-Scaled Hydroxyapatite/Polymer Composite IV. Fabrication and Cell Adhesion of a 3D Scaffold Made of Composite Material with a Silk Fibroin Substrate to Develop a Percutaneous Device”は日本人工臓器学会論文賞(2005年)の対象となった.

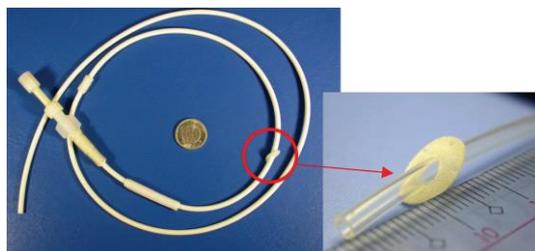


写真 2 経皮ボタンを装着した中心静脈カテーテル試作品

<http://www.jst.go.jp/kisoken/presto/complete/nanostructure/pdf/h13/08furuzono.pdf>

この他, i)水系溶媒中におけるアルコキシシリル基含有グラフト重合法の確立<sup>8</sup>, ii) ナノ粒子球状自己集合体の創出<sup>9</sup> [10], iii) 高分散性・高結晶性 HAp ナノ粒子の創出<sup>10</sup>などの成果も得られた. 詳細には、融着防止剤（マトリクス）中にナノ単結晶体を内包することで、焼成時におけるナノ HAp の融着を防止する新規焼成法（マトリクス支援焼成法）を開発[11-12]し、焼成後に融着防止剤を除去することで個々の単結晶体を取り出した[13]. 後述するが、このナノ HAp 単結晶は(株)ソフセラより商品名 SHAp として販売されている.

---

により、経皮デバイス試作品を製造した. 経皮ボタンの大きさ、角度、孔径等は、動物実験を繰り返すことにより最適化した.

<sup>7</sup>短期動物インプラント試験において、術後三日目で繊維性細胞外マトリクスの形成を確認できた. 対照サンプル（二元複合体）と比較して早期の創傷治癒効果が認められた. これは移植前に細胞が生着することにより新鮮なコラーゲン等の接着性タンパク質を放出し、細胞外マトリクスを形成したことによる効果と考えられ、外来細胞が生体代謝系に準じて長期に生着することにより、長期に安定した生体接着性が得られることが期待される.

<sup>8</sup> アルコキシシリル基を有する物質は水と激しく反応し当該官能基が分解するため、一般に禁水系溶媒で用いられている. さきがけ研究では、生体に対する安全性およびコスト面の有利性から、水中でアルコキシシリル基の反応性を保ったまま試用できる技術を開発した.

<sup>9</sup> 当該研究にて用いたナノ HAp 微粒子を特定の溶媒中で超音波処理を施すことにより、微粒子が自己集合化することを見いだした. この粒径分布は、市販の最も粒度分布が狭いとされる製品に比較して著しく狭いことが明らかとなった. 一般的な球状粒子製造法（プラズマスプレー法）に比較して、製造法が単純であり大きな設備を必要としないことから、工業的に有利であることが見出された.

<sup>10</sup> これまで、HAp 焼結体を製造する場合に、焼結時に粒成長および粒凝集が生じ二次粒子が生成されるため、分散媒中で HAp 粒子を分散させることは非常に困難であった. 粒子焼結前にカルシウム塩過飽和溶液と混合することにより、HAp ナノ粒子を分散媒中でほぼ単分散で分散できる HAp 製造法を開発した.

### 3.1.2 研究成果の科学技術の進歩への貢献

さきがけ研究終了後、JST 成果活用プラザ重点地域研究開発推進プログラム育成研究「細菌感染防止を実現する界面融和型経皮デバイスの開発」(2005~2007)、厚生労働科学研究費補助金循環器疾患等総合研究事業(生活習慣病)「内シャント狭窄治療を目的としたナノセラミックス複合化ステントグラフトの開発」、科研費「ハイドロキシアパタイト単結晶複合体ナノ界面の細胞機能」(2007~2009)などの研究プロジェクトを推進した。また、2010年度より近畿大学教授に転出・着任し、現在、学科長として学科運営を主導している。

本項では、特に JST 成果活用プラザ大阪育成研究「細菌感染防止を実現する界面融和型経皮デバイスの開発」(2005~2007)、NEDO/ナノテク・先端部材実用化研究開発 自己治癒力を誘導する抗感染性カテーテルの開発(2007~2009)、NEDO/ナノテク・先端部材実用化研究開発 虚血下肢の切断回避を実現する細胞移植用ナノスキャフォールドの開発(2009~2011)、および JST 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP (ハイリスク挑戦タイプ) (2011~2013)について詳述する。

#### (1) JST 成果活用プラザ大阪重点地域研究開発推進「細菌感染防止を実現する界面融和型経皮デバイスの開発」(2005~2007)[14]

さきがけ研究において開発した技術を基に生体と長期に密着し体外からの細菌感染を防止する経皮デバイス(カテーテル)の開発に展開した。2005年からJST 成果活用プラザ大阪の"事業化のための育成研究"の一環として「細菌感染防止を実現する界面融和型経皮デバイスの開発」においてナノテクノロジーを活用して製造した経皮端子を装着した中心静脈カテーテルを開発した。この研究課題では、東京工業大学、(株)井元製作所、(株)東海メディカルプロダクツ、(株)ソフセラとの共同研究体制<sup>11</sup>を組み、製造技術の機械化、動物実験およびウサギを用いた予備的な生物学的安全性試験を行った[15]。なお、当該技術は国内外有力メーカーと連携して事業化戦略が進行している。

焼結アパタイト(バルク体)を用いた経皮デバイスは、カテーテル感染の防止に有効であることから既に実用化されている。しかしながら、カテーテル素材とアパタイトとの接合の長期安定性という点で不完全さが残り、臨床に根付くには依然として壁

---

<sup>11</sup>経皮デバイスの原料であるナノアパタイトやアパタイト複合体については、(株)ソフセラ(後述)および協力企業の連携による供給体制を確立している。また、経皮デバイスは、(株)井元製作所にて製作した自動製造装置を用い、プラザ大阪で作成した標準操作手順書(SOP)に従い製造体制を構築した。更に、(株)東海メディカルプロダクツおよび(株)ソフセラの協力により経皮端子一体化中心静脈用カテーテルを JIS T3218 に準拠して組み立てを行い、実用化への方針を立て、早期における当該カテーテルの臨床応用を目指している。

があった。これは硬くて脆い焼結アパタイトと柔軟なポリマーエラストマー（カテーテル素材）との機械的特性の違いによるものと推察され、焼結アパタイトには、容易に溶解しない高い結晶性、さらにセラミックスそのものの柔軟さが求められる。古菌らは、結晶性が高く高分散性も有するナノスケールアパタイト単結晶を独自技術で調製し、当該単結晶をポリマー基材表面に化学結合させる手法（ソフトナノセラミック・プロセッシング）を開発した。特に、JST 成果活用プラザ大阪育成研究では次の各課題を中心に抗感染性経皮デバイスの開発を進めた。

- i) ナノアパタイト大量製造法の開発,
- ii) フロック加工（自動デバイス）製造装置の開発,
- iii) アパタイト複合繊維により三次元加工した経皮デバイス製造法の開発,
- iv) 動物実験による効能実証

この内、効能実証試験においては、マクロファージ等の炎症性細胞の浸潤が低減された状態で、埋植後早期に皮下組織が端子表面に植毛したアパタイト複合繊維間に浸潤する様子が観察された。これは、当該デバイスが早期に安定した材料/生体組織界面を形成（界面融和）することによりデバイスと皮下組織が密着しダウングロース（皮膚の陥落）等の感染源とされる状態が緩和されたということで、抗感染性カテーテルとして好適であることを示唆する結果である [16]。

## **(2) NEDO/ナノテク・先端部材実用化研究開発 自己治癒力を誘導する抗感染性カテーテルの開発(2007～2009)**

当該研究開発は、さきがけ研究の概念を発展させた研究課題である。体内留置カテーテル等の出口部でのトンネル感染防止策として、アミノ化した酸化チタンナノ粒子をシリコーンシート表面に共有結合させた酸化チタン複合シートを用いて被覆し生体に適した周波数帯及び出力で超音波照射を行うことでOH ラジカルを発生させ、滅菌や血管新生による抗感染効果を発現させる方法を検討<sup>12</sup>し、本法の実現可能性が示唆される結果を得た[17-18]。当該技術を応用し、体外からの物理刺激（超音波照射）にて非侵襲的に必要な時に必要な量だけ抗菌性を付与する体内留置カテーテルのモデルを創出した。

## **(3) NEDO/ナノテク・先端部材実用化研究開発 虚血下肢の切断回避を実現する細胞移植用ナノスキヤフォールドの開発[19]**

当該研究課題で開発した細胞移植用ナノスキヤフォールドの製造に、さきがけ研究

---

<sup>12</sup>基礎的な検討として、メチレンブルーを用いた色素脱色評価、サリチル酸トラップ法によるOH ラジカル発現評価を行った。その結果、酸化チタン複合体との組み合わせにより、低出力レベルの超音波照射で色素脱色及びOH ラジカル発生が確認された。

で開発した高分散性・高結晶性ナノアパタイト単結晶と高分子複合化技術を応用している。生活習慣病の蔓延と高齢化社会の到来に伴い、糖尿病による足病変や動脈硬化による末梢動脈疾患が急増している。下肢切断を余儀なくされる症例も増加傾向にあり、糖尿病に起因する下肢切断症例数は日本で年間 2～3 万人に及ぶと推定されている[20]。こうした末梢動脈疾患に対して、細胞移植による血管新生療法<sup>13</sup>が有効とされるが、移植細胞の多くが患部に留まらないことや多量の細胞摂取を要することなどの問題も残り、移植細胞を減らしつつ移植細胞を患部に長時間留めるような治療法が求められている。古菌らは生体吸収性高分子微粒子に、細胞接着性に優れる HAp ナノ結晶を単層コーティングし細胞移植用担体として用いた[12,21-23]。L929 線維芽細胞を用いて細胞接着性を検討した結果、HAp コーティング群 PLLA 微粒子が未処理の PLLA 微粒子と比較して 8 倍の細胞接着性を示した。

当該細胞移植用ナノスキャフォールドを骨髄単核細胞と混合して下肢虚血モデルマウスによる下肢壊死回避実験を行ったところ、単核細胞単独に比較して約 3 倍の治療効果を示した[24]。この成果は、NEDO の推薦により nano tech（国際ナノテクノロジー総合展・技術会議）2010～2013 にて 3 年連続で展示公開された。

現在、JST 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP（ハイリスク挑戦タイプ）（平成 23 年度採択、研究機関 2 年間）課題名「虚血下肢の治療を目的とした Injectable cell scaffold の前臨床試験」（研究代表者：大阪市立大学大学院医学研究科福本真也、企業：グンゼ株式会社）へとステージを進め前臨床試験を実施中であり、実用化へ向けた研究が継続的に進められている[25]。

### 3.1.3 社会経済への波及

本研究課題は社会経済への波及が既に顕現し始めているため、本項ではこの観点から述べることとする。

#### (1) 感染防止を実現する医療機器

日本における中心静脈用カテーテル留置時の感染率は約 10%、またカテーテル感染による菌血症に起因する死亡は 2.3 万人/年と推定されており細菌感染は極めて重要な課題である[26][20]。これまで多くの方法論により、皮膚貫通部の密着性を効能として細菌侵入を防ぐデバイスが開発されてきた。米国では抗菌材コートカテーテルが推奨<sup>14</sup>されているが、日本では

---

<sup>13</sup>骨髄や末梢血により分離した幹細胞を虚血下肢に注入し新生血管を誘導し血行再建を達成しようという治療法[20]。次のような理由から治療効果は十分ではなかった。i) 移植細胞のうち新生血管に直接分化する割合は 10%弱、ii) 70～80%の移植細胞が 48 時間内で体循環に移行してしまう、iii) 移植細胞が複数のサイトカインを分泌することが血管新生に重要であるにもかかわらず、移植細胞の留まりが悪い、iv) 多量の細胞採取により患者への侵襲が大きい。

<sup>14</sup> 米国疫病管理予防センター(CDC)では、抗微生物薬/抗菌物質を含浸した抗菌カテーテルを水晶している。

過敏症による死亡例<sup>15</sup>から販売中止となっておりカテーテル感染を防止する有効な危機が現存していない[古菌, 高分子]. カテーテル感染の原因部位としては, 薬液, ハブ部(輸液チューブとの接続部), 皮膚刺入部(出口部), 血管内先端部の4箇所が考えられている. 内, 皮膚刺入部(出口部), 血管内先端部の2箇所<sup>16</sup>については, バイオマテリアル研究による課題解決が期待される[20]. 外界からの細菌感染を防止できる経皮デバイスができれば, 患者の"生活の質"の向上, 在宅治療推進による医療費削減が期待される. 古菌らが開発した技術は, これまでの有機高分子基材に留まらず金属表面に生体親和性アパタイト粒子を被覆させるもので, 医療器具への応用は極めて広がる. 代表的な例であるステントへの応用は, 埋め込んだ後に異物として認識されにくいために炎症反応の発症を抑制するなど, 患者の"生活の質"の改善や負担軽減に繋がるのが期待される. この他, 元来ハイドロキシアパタイトは骨や歯といった硬組織に親和性の高い材料であることから, 整形外科分野や歯科分野へも応用展開されている.

## (2) 在宅血液透析を目的とした自己穿刺補助具の開発 [27]

在宅血液透析においては自己穿刺に対して患者が敬遠しがちになることや介助者が必要であることから自己穿刺の容易性の向上が求められる. 古菌らは三次元立体造形技術によりアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合体(ABS)樹脂を用いて自己穿刺補助具のプロトタイプを製造した.(日機装株式会社静岡製作所, 芦屋坂井瑠実クリニックと共同研究開発)補助具は, 台座部, 延設部, アーム部, 突起部, および血管を圧迫固定するための弾力的な付勢手段としてのトーションバネから主に構成された. 穿刺する際, アーム部をトーションバネの付勢力に抗して揺動させて腕を挿通し, 突起部にて血管を押圧し, 更にその押圧状態から患者の腕を穿刺方向にわずかにずらすことにより, 血管を伸展固定できるように設計された[28]. 当該補助具は, 既に日機装株式会社より販売されている.

## (3) (株)ソフセラ設立

育成研究にて開発された技術を含めた関連技術の移転先として, 株式会社ソフセラ(本社:東京, 社長:河邊カーロ和重, 平成24年12月1日時点における資本金:2億25百万円)を設立した(登記日:2007年10月10日). JST 育成研究期間中に(株)ソフセラを中心とした共同研究企業および協力企業の連携により, 経皮デバイス子一体化中心静脈用カテーテルの製造および医療機器申請の準備体制を確立している. 当該経皮デバイスの原料であるナノアパタイトやアパタイト複合体については, (株)ソフセラおよび協力

<sup>15</sup> クロロヒキシジン/スルファジアジン銀コーティングカテーテル使用例において, アナフィラキシーショックによる死者が出た.

<sup>16</sup> 薬液汚染には二液性パックへの改良や防菌フィルタ装着, 一方, ハブ部には紫外線照射装置やイソジンキットなどを用いた感染症防止法の改善が図られている[20].

企業の連携による供給体制を確立している。

2010年には、古菌らが手掛けた表面修飾技術を基に、オゾン水で「ステンレス表面へのアパタイト粒子複合化技術」を開発した[29]。これは、岩谷産業株式会社(本社:大阪・東京, 社長: 牧野明次, 資本金 200 億円)と共同で、分子基材に比べ極めて難しいとされてきたステンレスなどの金属表面に生体親和性材料であるハイドロキシアパタイト<sup>17</sup>のナノ粒子を化学的に結合させる複合化技術(図 2)で、ステントなど医療用デバイス、歯科医療分野への応用を目指すものである。ステンレス表面に高濃度オゾン水<sup>18</sup>を作用させると、ハイドロキシアパタイトを結合させるのに有効な官能基(水酸基)を効率よく形成できることを突き止め、さらに、国立循環器病センターで進めてきた技術を発展させ、オゾン水プロセスだけでなく、前後のプロセスや条件の最適化を行うことにより、量産も目論める効率的な被覆技術の確立に至った。今後は、医療用デバイスとして用いられている各種金属、合金類へのアパタイト複合化プロセスも確立させていく。また、医療承認を得るために、ソフセラ社が中心となってアメリカで動物実験をスタートさせる運びである。

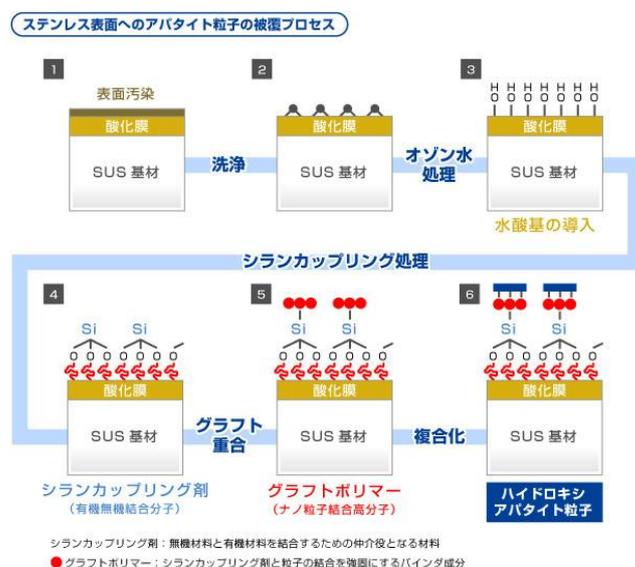


図 2

通常自然酸化膜に覆われている金属表面(被覆プロセス図 2)。この自然酸化膜は非常に安定でハイドロキシアパタイトのナノ粒子を被覆できないため、精密洗浄を行った後、強い酸化力を有する高濃度オゾン水を用い、金属表面に反応活性を有する水酸基(-OH 基)を導入。(この水酸基が最終的にハイドロキシアパタイトを複合化させる基点となる。)(被覆プ

<sup>17</sup> ハイドロキシアパタイトは、歯や骨の主成分である生体親和性材料であり、感染症のリスクが軽減できることなどから、ステント(血管等の管腔を内部から広げる医療機器)など医療用デバイスや金属アレルギー対策などへの応用が期待される。

<sup>18</sup> オゾンを使わない方法としては、硝酸のような強酸やチオール(硫黄を末端に持つ有機化合物)のような極めて臭気の強い薬液を使う方法が研究レベルで提案されているが、両社が確立したような均一かつ高効率に結合させることができないことや、危険な薬品を使うことに大きなデメリットがある。

プロセス図 3). 続いて, 無機材料と有機材料を結合させるためシランカップリング剤を反応させる (被覆プロセス図 4). 更に, 反応性モノマーをシランカップリング剤にグラフト重合することによってグラフトポリマーを形成させる (被覆プロセス図 5). グラフトポリマーを形成させた表面をハイドロキシアパタイト粒子分散溶液で処理し, 最終的にグラフトポリマーの側鎖官能基であるアルコキシシリル基(-Si(OR)<sub>3</sub>基)とハイドロキシアパタイト(水酸化リン酸カルシウム:Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>)の水酸基(-OH基)を縮合反応させる (被覆プロセス図 6).

ソフセラ社では中核技術「SHAp (ハイドロキシアパタイトナノ粒子)」(写真 2)を化粧品用原材料として販売され, また, 研究用試薬として「nano-SHAp (焼成ハイドロキシアパタイト高分散性ナノ粒子)」も新たに販売を開始している。SHAp は売上を着実に達成しており、今後数千万円規模に拡大することが見込まれている[30-31].

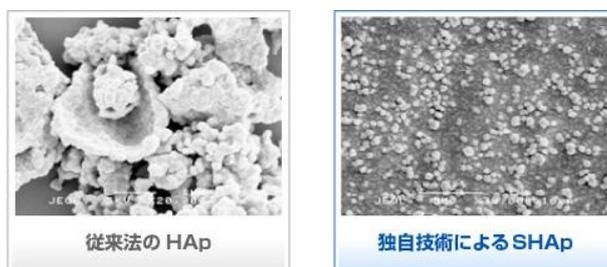


写真 2 ソフセラ社 SHAp (ハイドロキシアパタイトナノ粒子)

<http://sofsera.co.jp/tech1.html>

この他, 第 9 回世界バイオマテリアル学会大会(9th World Biomaterials Congress, 中国・成都, 2012 年 6/1~6/5)では, 古菌が基調講演を行い, ”Nano-Inorganic/Organic Microspheres for Angiogenesis Therapy”と題してソフセラ社のテクノロジーを紹介した.

#### 参考文献

- [1] 古菌勉ら, 循環器病研究の進歩, XXV, 1, 2004
- [2] T.Furuzono et al., J. Mater. Sci. Lett., 20, 111, 2001
- [3] K.Sonoda, et al., Solid State Ionics, 151, 321, 2002
- [4] A. Korematsu, et al., “Nano-scaled hydroxyapatite / polymer composite III. Coating of sintered hydroxyapatite particles on poly(4-methacryloyloxyethyl trimellitate anhydride)-grafted silk fibroin fibers.”, J. Mater. Sci. 16, 67, 2005
- [5] 7A.Korematsu, et al., J. Mater. Sci., 39, 3221, 2004
- [6] T.Furuzono, et al., J. Artif. Organs., 7, 137, 2004
- [7] T. Furuzono, et al., “Nano-scaled hydroxyapatite / polymer composite I. Coating of sintered hydroxyapatite particles on poly(gamma-methacryloxypropyl

- trimethoxysilane) -grafted silk fibroin fibers through chemical bonding", *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 15, 19, 2004
- [8] T.Furuzono, et al., " Increase in cell adhesiveness on a poly(ethylene terephthalate) fabric by sintered hydroxyapatite nanocrystal coating in the development of an artificial blood vessel", *ASAIO JOURNAL*, 52, 3, 2006
- [9] 国立循環器病研究センター研究所生体医工学部 HP  
<http://www.ncvc.go.jp/res/divisions/biomedical-engineering/bme-005.html>
- [10] Furuzono, T, et al., "Unique preparation method of self-assembled spherical particles consisting of hydroxyapatite nanocrystals modified by amino groups", *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, 40, 9-10, 2627, 2005
- [11] M,Okada and T.Furuzono, *J. Mater.Sci.*,41,6134,2006] [
- [12] Okada, M., Furuzono, T., " Nano-sized ceramic particles of hydroxyapatite calcined with an anti-sintering agent ", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 7, 3, 848, 2007
- [13] 古菌勉ら, *機能材料*, 27,11,40, 2007]
- [14] <http://www.jst.go.jp/chiiki/pamphlet/seika.pdf>
- [15] [http://www.jst.go.jp/chiiki/ikusei/seika/h19/h19\\_osaka01.pdf](http://www.jst.go.jp/chiiki/ikusei/seika/h19/h19_osaka01.pdf)
- [16] Furuzono, T. et al, " Histological reaction of sintered nanohydroxyapatite-coated cuff and its fibroblast-like cell hybrid for an indwelling catheter", *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials* ,89, 1, 77, 2009
- [17] Nitta, N, et al., *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, 49, 7, 2010 ]]
- [18] Furuzono, T, et al., " In vitro secretion of TNF-alpha from bone marrow mononuclear cells incubated on amino group modified TiO<sub>2</sub> nano-composite under ultrasound irradiation", *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING B-ADVANCED FUNCTIONAL SOLID-STATE MATERIALS*, 173 , 1-3, 191, 2010
- [19] <http://www.nedo.go.jp/content/100080350.pdf>
- [20] 古菌, *セラミックス*, 45, 8 ,645, 2010
- [21] S.Fujii, et al., *J. Colloid. Interface. Sci.*, 315, 287, 2007][
- [22] S.Fujii, et al., *Langmuir*, 25, 9759, 2009][
- [23] Okada, M, Furuzono, T, "Hydroxyapatite nanocrystal coating on biodegradable microspheres", *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING B*,173, 1, 2010]
- [24] Miwa Y, et al., "Enhancement of Cell-Therapeutic Angiogenesis using a Novel Type of Injectable Scaffolds of Hydroxyapatite-Polymer Nanocomposite Microspheres", *PLoS ONE*, 7, e35199, 1-12, 2012
- [25] <http://www.jst.go.jp/a-step/kadai/h23-1honkaku.html>
- [26] 古菌勉, *高分子*, 2007

- [27] 古菌勉ら, 透析会誌, 43,3,325, 2010
- [28] 古菌勉, 臨牀透析, 27, 10, 99, 2011
- [29] <http://sofsera.co.jp/news/n100629.html>
- [30] 科学技術振興機構, 地域イノベーション創出総合支援事業成果集, 2010.
- [31] (独)科学技術振興機構 JST イノベーションプラザ大阪編, 共創・協奏 - 産学連携成功のキーワード -, アドスリー(2011)p.35-46