

(独)科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
チーム型研究(CREST)
追跡評価用資料

研究領域「電子・光子等の機能制御」
(1998-2005)

研究総括 菅野卓雄

2012年 3月27日

目次

第1章 調査概要	1
1.1 調査の対象と調査方法	1
(1) 調査方法	1
1.2 全研究課題の調査の纏め	1
(1) 研究者情報	1
(2) 研究助成金 (外部資金)	2
(3) 論文	2
(4) 特許	3
(5) 受賞	3
1.3 代表事例について	7
第2章 研究領域における研究の継続・発展状況	8
2.1 研究領域の概要	8
(1) 戦略目標	8
(2) 領域名称	8
(3) 領域の概要	8
(4) 研究総括	8
(5) 研究領域としてのねらいと達成状況	9
2.2 研究課題ごとの研究のねらいと研究期間中の達成状況および研究終了後の継続・発展 の状況	11
(1) 量子相関機能のダイナミクス制御 (研究代表者：青柳克信)	11
(2) 最高性能高温超伝導材料の創製 (研究代表者：田中康資)	13
(3) 表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス (研究代表者：川原田 洋) 13	
(4) 関連エレクトロニクス (研究代表者：平山祥郎)	14
(5) 量子スケールデバイスのシステムインテグレーション (研究代表者：鳳 紘一郎) 15	
(6) ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索 (研究代表者：小田俊理)	16
(7) 核スピンネットワーク量子コンピュータ (研究代表者：北川 勝浩)	18
(8) 人工光物性に基づく新しい光子制御デバイス (研究代表者：中野義昭)	19
(9) ナノサイズ構造制御金属・半金属材料の超高速光機能 (研究代表者：中村新男) 20	
(10) 光・電子波束制御エンジニアリング (研究代表者：覧具博義)	21
(11) 固体中へのスピン注入による新機能創製 (研究代表者：鈴木義茂)	22
(12) 量子暗号の実用化を可能にする光子状態制御技術 (研究代表者：中村和夫) ...	23

(13) フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス (研究代表者：野田 進)	
24	
(14) 強相関電子系ペロブスカイト遷移金属酸化物による光エレクトロニクス (研究代表者：花村 榮一)	
25	
第3章 詳細調査.....	27
3.1 表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス (研究代表者：川原田 洋).	27
(1) 研究期間中における状況	27
(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況	27
(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果.....	28
3.2 関連エレクトロニクス (研究代表者：平山 祥郎).....	29
(1) 研究期間中における状況	29
(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況	29
(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果.....	30
3.3 ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索 (研究代表者：小田 俊理).....	31
(1) 研究期間中における状況	31
(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況.....	31
(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果.....	32
3.4 固体中へのスピン注入による新機能創製 (研究代表者：鈴木 義茂).....	33
(1) 研究期間中における状況	33
(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況.....	33
(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果.....	35
3.5 フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス (研究代表者：野田 進).36	
(1) 研究期間中における状況	36
(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況.....	36
(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果.....	37
3.6 第3章のまとめ	38

第1章 調査概要

1.1 調査の対象と調査方法

(1) 調査方法

まず、(i) 調査を実施するに当たって必要な事前情報を把握する目的で事前調査を行ない、(ii) 事前調査結果概要を取り纏め、(iii) 研究総括へのヒアリングを実施した。目的は、研究領域全体を俯瞰するのに相応しい課題(インタビュー候補)の抽出、および本領域全体としての成果・意義等を明らかにすることである。次いで、(iv) 抽出課題について、本研究終了後の継続・発展の状況や、研究成果から生み出された波及効果等を詳細に調査する目的で、研究代表者へのインタビューを実施し、(v) 上述の調査結果を取り纏めて、最終的に本追跡調査報告書を作成した。

1.2 全研究課題の調査の纏め

(1) 研究者情報

表 1.1 研究代表者の職位の変化

研究者名	採択時	終了時	現在
青柳克信	東京工業大学大学院総合理工学研究所教授	東京工業大学大学院総合理工学研究所 教授	東工大名誉教授 立命館大学特別招聘教授 理研 名誉研究員
伊原英雄 (代行) 田中康資	産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門 グループリーダー	産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 グループリーダー	産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 グループリーダー
川原田 洋	早稲田大学理工学部 教授	早稲田大学理工学部 教授	早稲田大学理工学部 教授
平山祥郎	日本電信電話(株) 物生科学基礎研究所 部長	日本電信電話(株) 物生科学基礎研究所 部長	東北大学大学院理学研究科 教授
鳳 紘一郎	東京大学大学院情報学域成産学研究所 教授	東京大学大学院情報学域成産学研究所 教授	故人
小田俊理	東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター 教授	東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター 教授	東京工業大学量子ナノエレクトロニクス研究センター 教授
北川勝浩	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授	大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授
中野義昭	東京大学先端科学技術研究センター 教授	東京大学先端科学技術研究センター 教授	東京大学先端科学技術研究センター センター 長 教授
中村新男	名古屋大学大学院 工学研究科 教授	名古屋大学大学院 工学研究科 教授	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
覧具博義	東京農工大学工学部物理システム工学科 教授	東京農工大学工学部物理システム工学科 教授	東京農工大学 名誉教授
鈴木義茂	電子技術総合研究所材料科学部 量子材料研究室 室長	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授	大阪大学大学院基礎工学研究科 教授
中村和夫	日本電気株式会社 基礎・環境研究所 研究部長	物質材料研究機構 若手国際研究拠点 室長	物質材料研究機構 つくばイノベーションアリーナ推進室 室長
野田 進	京都大学 大学院工学研究科 教授	京都大学 大学院工学研究科 教授	京都大学 大学院工学研究科 教授
花村榮一	千歳科学技術大学光科学部 教授	千歳科学技術大学光科学部 教授	東京大学名誉教授

(2) 研究助成金 (外部資金)

科研費やNEDOなどの研究助成金に関しては、別添の資料を参照されたいが、数量的には、青柳克信(19件)、川原田洋(10件)、小田俊理(12件)、中野義昭(11件)、中村新男(10件)、鈴木義茂(7件)、野田進(9件)が多い。

(3) 論文

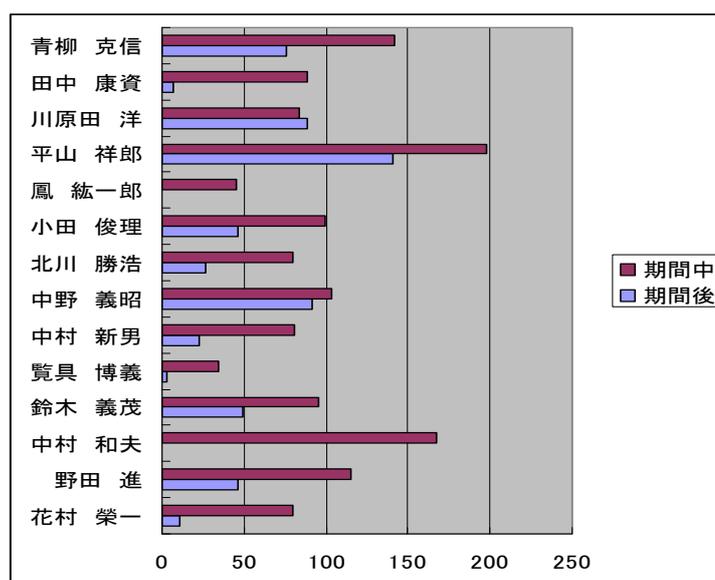
論文に関してはプロジェクト期間中とプロジェクト期間後の件数推移を表6に示した。論文の検索は、各研究課題のプロジェクト終了報告書、ReaD (Directory Database of Research and Development Activities :研究開発支援総合ディレクトリ)、トムソンロイター社のWOS (Web of Science)、応用物理学会誌特集号などで調査した。被引用件数の調査は主にWOSを用い、補足的にElsevier社のSCOPUSも利用した。

この結果から以下のことが分かる。

- 川原田洋氏を除いた全ての研究代表者の論文はプロジェクト期間中がプロジェクト期間後より多い。川原田氏は、プロジェクト期間後の件数がプロジェクト期間中の件数よりも5件増加している。
- プロジェクト期間中に50件以上に達している研究代表者は12人、100件以上が6人で、このCREST研究領域の高い研究活動が裏付けられる。

被引用件数の多い論文に関しては、第2章において研究代表者毎に記述を行った。

表 1.2 論文件数の推移



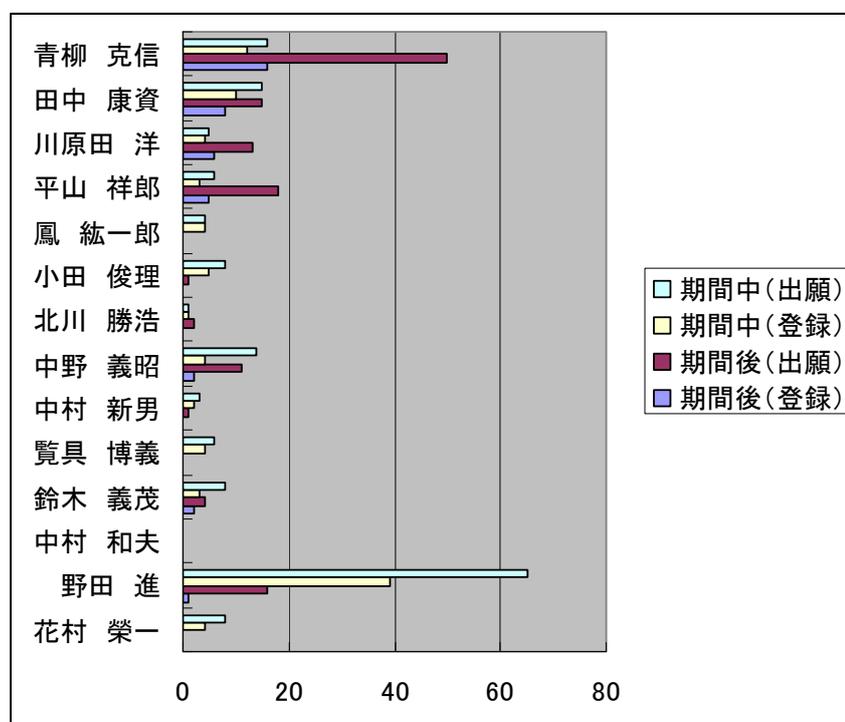
(4) 特許

詳細内容は別添資料をされたいが、特許出願件数と登録件数の推移を表7に示す。

この結果から以下のことが分かる。

- プロジェクト期間中の特許出願が5件以上は10人で、産業応用への高い意識が窺える。
- プロジェクト期間後も出願件数は減少していない研究代表者は4名(青柳, 田中, 川原田, 平山)である。
- 表1.2と表1.3を比較すると、論文件数が多い研究代表者は特許出願件数も比較的に多い傾向にある。

表 1.3 特許出願および登録件数



(5) 受賞

受賞については研究代表者ごとに表1.4にまとめた。ただし、北川勝浩、中村新男および中村和夫に関しては、今回の調査では存在しなかった。

表 1.4 研究代表者の受賞

青柳 克信

受賞名	年 度
応用物理学会論文賞	2007

応用物理学会フェロー表彰	2007
マイクロプロセス国際学会 Best Paper Award	2002
MNC 最優秀論文賞	2002
MRS 最優秀ポスター賞	1999
マイクロプロセス国際学会 Best Paper Award	2002
科学技術長官賞	1997
応用物理学会賞	1995
全国発明表彰特別賞弁理士会長賞	1993
市村学術賞特別賞	1991
大河内記念技術賞	1983

田中 康資

受賞名	年 度
ベストポスター賞	2001
通商産業大臣賞	1999
超伝導科学技術賞	1999

川原田 洋

受賞名	年 度
応用物理学会フェロー表彰	2010
超伝導科学技術賞	2007

平山 祥郎

受賞名	年 度
応用物理学会フェロー表彰	2009
応用物理学会論文賞	2008
SSDM Paper Award	2007
Fellow of Institute of Physics (IOP, London)	2004
Japanese Journal of Applied Physics, Best Paper Award	2004
Japanese Journal of Applied Physics, Editorial Contribution Award	2004
NTT 先端技術総合研究所所長表彰(業績賞)	2001

鳳 紘一郎

受賞名	年 度
東京都科学技術振興功労表彰	2003

第3回 LSI IP デザイン・アワード	2001
----------------------	------

小田 俊理

受賞名	年 度
応用物理学会フェロー表彰	2007
藤野研究賞	2002
第25回半導体物理国際会議 Young Author Best Paper Awards	2000
Materials Research Society Fall Meeting, Graduate Students Paper Awards	2000
Performance Awards, ISTEC and MRS	1995
手島研究賞	1983

中野 義昭

受賞名	年 度
IEEE フォトニクスソサイエティ功労感謝状	2010
財団法人光産業技術振興協会 創立30周年記念功労者表彰	2010
APEX/JJAP Editorial Contribution Award	2010
IEICE Service Recognition Award	2009
応用物理学会フェロー	2009
第23回桜井健二郎氏記念特別賞	2007
第39回市村賞受賞	2007
内閣総理大臣賞	2007
JPCA 標準化功労賞	2007

覧具 博義

受賞名	年 度
応用物理学会フェロー表彰	2007
第8回 桜井健二郎氏記念賞	1992

鈴木 義茂

受賞名	年 度
第42回市村学術賞貢献賞	2010
第20回つくば賞	2009
第29回応用物理学会論文賞	2007

野田 進

受賞名	年 度
第 6 回江崎玲於奈賞	2009
IEEE Photonics Society 2009 Best Student Paper Award	2009
第 1 回応用物理学会関西支部貢献賞	2009
IEEE Nanotechnology Pioneer Award	2009
文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)	2009
第 25 回応用物理学会講演奨励賞	2008
IEEE Fellow 受賞	2008
LEOS 2007 Best Student Paper Award 受賞	2007
応用物理学会フェロー表彰 第 1 回受賞	2007
第 26 回電子材料シンポジウム EMS 賞	2007
第 31 回レーザー学会業績賞 論文賞解説部門	2007
丸文学術特別賞	2006
Optical Society of America, Joseph Fraunhofer Award / Robert M. Burley Prize	2006
第 28 回(2006 年度度)応用物理学会論文賞(JJAP 論文奨励賞)	2006
Awarded as New Hot Papers by Thomson ISI for highly rated citation of "Ultra-high-Q photonic double heterostructure nanocavity" published in Nature Materials	2006
Gent 大学名誉博士号受賞	2006
Award in recognition and appreciation for service on the LEOS Nano Photonic Technical Committee, IEEE Lasers and Electro-Optics Society	2006
IEEE/LEOS Distinguished Lecture Award	2005
Laser Focus World Commendation for Excellence in Technical Communication on Photonic Crystal Lasers	2005
LEOS/Newport/Spectra-Physics Research Excellence Award 受賞	2005
応用物理学会 光量子エレクトロニクス業績賞	2005
IEEE Distinguish Lecture Award	2005
IEEE/LEOS Distinguished Lecture Award	2004
平成 16 年度度国際コミュニケーション基金優秀研究賞	2004
第 22 回大阪科学賞	2004
電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞	2004
第 17 回(2004 年度秋季)応用物理学会講演奨励賞	2004

Best Poster Award of PECS-V (InterNational Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structure)	2004
IEEE Distinguish Lecture Award	2004
IEEE/LEOS Distinguished Lecture Award	2003
光設計奨励賞	2003
IEEE Distinguish Lecture Award	2003
第 14 回応用物理学会講演奨励賞	2003
第 18 回櫻井健二郎氏記念賞	2002
第 14 回日本 IBM 科学賞	2000
IBC 2000 Outstanding Scientist of 20th Century	2000
第 6 回応用物理学会講演奨励	1999
1999 年度応用物理学会賞 B	1999
電子情報通信学会平成 10 年度度学術奨励賞	1999
第 2 回丸文学術研究奨励賞受賞	1999

花村 榮一

受賞名	年度
仁科記念賞	1975

1.3 代表事例について

前節に示した調査結果および研究総括へのヒアリング結果を基にして、詳細調査の対象として 5 課題を抽出した。それら 5 課題を研究代表者名で示すと、川原田洋、平山祥郎、小田俊理、鈴木義茂、野田進である。詳細はそれぞれ第 3 章で記述する。

第 2 章 研究領域における研究の継続・発展状況

2.1 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「分子レベルの新機能発現を通じた技術革新」

(2) 領域名称

「電子・光子等の機能制御」

(3) 領域の概要

電子や光子等の静的、動的特性を制御することで、新しい機能を発現しうる技術の可能性を探索する研究を対象としている。具体的には、信号の発生、増幅、処理、変換等の信号処理機能を発現させるための物理的、化学的メカニズムや、その実現に向けた技術的可能性の探索を行う研究等が含まれている。特に、界面を含む物質内部、表面における電子や光子等に関する量子力学的現象の発見、解明、利用およびその具体化のための材料、構造作成技術の研究等が含まれている。

(4) 研究総括

研究総括は、戦略目標達成に向けた研究を推進するため、バーチャルインスティテュートとなる研究領域の長として、採択課題の決定、研究計画(研究費、研究チーム編成を含む)の調整、研究代表者との意見交換、研究への助言、課題評価、その他必要な手段を通じ研究領域の研究マネジメントを行う。本領域の研究総括の所属機関等を表 2.1 に示す。

表 2.1 研究総括(敬称略)

氏名	所属(当時)		所属(現)
菅野 卓雄	東洋大学	学長 (プロジェクト開始時)	東京大学 名誉教授
	東洋大学	理事長(プロジェクト終了時)	

(5) 研究代表者と研究課題一覧

表 2.2～表 2.4 に、本調査の対象とした各研究課題の研究代表者名と研究課題名を、採択年度ごとに一覧の形に纏めて示す。採択年度は平成 10 年度から平成 12 年度までの 3 年間に亘っており、研究期間は各々平成 10 年 12 月～平成 15 年 11 月、平成 11 年 11 月～平成 17 年 3 月、平成 12 年 11 月～平成 18 年 3 月である。

表 2.2 研究代表者と研究課題一覧(平成 10 年度採択分)

No.	研究代表者名	研究課題名
1	青柳 克信	量子相関のダイナミクス制御
2	伊原 英雄 (代行)田中 康資	最高性能高温超伝導材料の創製
3	川原田 洋	表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス
4	平山 祥郎	相関エレクトロニクス
5	鳳 紘一郎	量子スケールデバイスのシステムインテグレーション

表 2.3 研究代表者と研究課題一覧(平成 11 年度採択分)

No.	研究代表者名	研究課題名
1	小田 俊理	ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索
2	北川 勝浩	核スピンネットワーク量子コンピュータ
3	中野 義昭	人工光物性に基づく新しい光子制御デバイス
4	中村 新男	ナノサイズ構造制御金属・半金属材料の超高速光機能
5	覧具 博義	光・電子波束制御エンジニアリング

表 2.4 研究代表者と研究課題一覧(平成 12 年度採択分)

No.	研究代表者名	研究課題名
1	鈴木 義茂	固体中へのスピン注入による新機能創製
2	中村 和夫	量子暗号の実用化を可能にする光子状態制御技術
3	野田 進	フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス
4	花村 栄一	強相関電子系ペロブスカイト遷移金属酸化物による光エレクトロニクス

(5) 研究領域としてのねらいと達成状況

(a) 平成 10 年度採択の 5 研究課題

「相関エレクトロニクス」に於いては半導体中のキャリア相関に関し世界中より注目を浴びた多くの物理現象を発見するなど多大な成果を挙げており、「キャリア相関を用いた量子コヒーレントシステム」として平成 15 年度の戦略的創造研究推進事業の継続研究課題となっている。「量子相関機能のダイナミクス制御」においては半導体量子ドットやカーボンナノチューブを用いて量子情報処理デバイスの分野で新しい可能性を示すなどの成果を報告しており、「量子スケール

デバイスのシステムインテグレーション」では量子コンピュータエミュレータを試作することにより量子コンピュータの研究開発に重要な指針を与えると同時に共鳴エージェントによる簡易な連想システムを実証するなど実用性の点でも優れた研究成果を挙げた。「最高性能高温超伝導材料の創製」では研究代表者の独創による $(\text{Cu}_x\text{Tl}_{1-x})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の薄膜結晶作成に成功してその特性の優れていることを実証する等の成果を挙げ、「表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス」では高出力・超高周波デバイス用のみならずセンサ用としてもダイヤモンド表面が有用な素材であることなどを示した。

(b) 平成 11 年度採択の 5 研究課題

「ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索」の研究では、粒径数 nm のナノ結晶シリコン量子ドットを、間隔 1~2nm に制御し配列させる新材料「ネオシリコン」を提案し、その機能を探索した。実施にあたっては、研究全体を(1)ネオシリコン作製と構造制御、(2)ネオシリコン電気特性制御、(3)ネオシリコン発光・電子放出特性制御、(4)ネオシリコンの素子応用検討、の4つの大きなタスクに分け、国際産学連携チームで、互いに密接な連携を図りながら推進した。「核スピンネットワーク量子コンピュータ」の研究チームでは量子コンピュータの強力な量子並列性を発揮させるために高分子や結晶の規則的に配列した核スピンを量子ビットとして使用して量子ビットの数を増すことを目標に、物質固有の核スピンネットワークを活かした量子回路構成法の研究、核スピンの初期化の研究、量子コンピュータに適した物質の探索・開発等を行なった。「人工光物性に基づく新しい光子制御デバイス」の研究では半導体材料のマクロな光物性を一原子層単位で設計・制御されたマイクロな人工結晶構造により変革し、電気光学効果、相互位相変調、四光波混合、磁気光学効果など、広義の光非線形性を飛躍的に高め、デジタル波長変換器、光ロジックなどの全光子制御デジタルデバイス/回路を実現した。

「ナノサイズ構造制御金属・半金属材料の超高速光機能」研究チームでは金属や半金属をナノスケールにした場合に現れる量子力学的効果を利用して光により光学的機能、磁氣的機能、電氣的な機能が制御できるような新しい材料を開発するための研究を行なった。「光・電子波束制御エンジニアリング」の研究においては光の位相を制御することにより光エレクトロニクスに新しい自由度を導入することを目指し、フェムト秒光パルスとこれにより量子ナノ構造材料中に誘起される電子波束との相互作用を用いて光位相を精密且つ超高速に制御する技術の開発を行なった。小田チームは「ネオシリコンによるナノメカ・情報エレクトロニクス」として、中野チームは「非相反デジタル光集積回路の開発と全光ネットワークへの応用」として SORST に採択され、引き続き科学技術振興機構の支援の下で研究が継続されることになった。

(c) 平成 12 年度採択の 4 研究課題

「固体中へのスピン注入による新機能創製」では電子の有する電荷とスピンの両方の性質を利用したデバイスを考案する上での基礎としてスピン偏極電流の固体内への注入に関する研究を行い、トンネル磁気抵抗効果におけるスピンに依存した電子の干渉効果、スピン注入による磁

化反転、スピン注入トルクを用いた高速磁化反転、磁気トンネル接合におけるスピントルクダイオード効果など多くの興味ある物理現象を発見し、デバイスへの応用の可能性が示された。「量子暗号の実用化を可能にする光子状態制御技術」に於いては特に相関光子源、量子もつれ合い状態にある光子を利用した量子中継器や光子検出器の研究等を行い遠距離の量子中継を可能にするための要素技術の研究において優れた研究成果が挙げられた。「フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス」の研究においては2次元及び3次元フォトニック結晶作製技術の確立、フォトニック結晶の特性を利用した光子の自然放出の抑制、フォトニック結晶への人為的欠陥導入による光子の捕獲や放出、フォトニック結晶中へのヘテロ構造の導入による分波機能の発現、100万にも及ぶ超高Q値ナノキャビティの実現等、世界の学会をリードする研究成果が発表された。「強相関電子系ペロブスカイト遷移金属酸化物による光エレクトロニクス」の研究においては従来高温超伝導材料として注目されてきたが、光学結晶としては注目されていなかったペロブスカイト構造の酸化物結晶に於いて非常に大きな光学的非線形性、特異なラマン散乱特性など多くの興味ある現象を発見し、またn型、p型超伝導体で絶縁層を挟むnS-I-pS構造により超放射を得ようとする意欲的な研究が行なわれた。

鈴木チームは総務省が進める戦略的情報通信研究開発推進制度に於いて「スピン注入トルクを用いた超高速非線形素子の開発」として、野田チームは戦略的創造研究推進事業においてCREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域(研究総括:伊澤達夫)の中の研究課題「フォトニック結晶を用いた究極的な光の発生技術の開発」として引続き研究費の支援を受けて発展している。

2.2 研究課題ごとの研究のねらいと研究期間中の達成状況および研究終了後の継続・発展の状況

この節では、研究代表者14名に関してそれぞれ、研究のねらい、論文、外部資金獲得状況、特許、受賞の状況について記述する。外部資金と特許に関しては、添付資料も参照されたい。

(1) 量子相関機能のダイナミクス制御 (研究代表者: 青柳克信)

1998/12 ----2003/11

プロジェクト期間中においては半導体量子ドットやカーボンナノチューブを用いて量子情報処理デバイスの分野で新しい可能性を示すなどの成果を報告しているが、プロジェクト期間後にもCNTを用いた量子現象の研究やレーザープロセスを用いた有機薄膜トランジスターの研究を行い高い被引用件数を獲得している。

論文に関しては、被引用数の多いものをトムソンロイター社のWOS(Web of Science)で調べると以下のようなものである。

◇ プロジェクト期間中

2001 年発行(被引用数 66)

K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida and Y. Aoyagi: "**Formation of coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes**", Appl. Phys. Lett. 79 (12) 1864-1866 (2001)

2002 年発行(被引用数 58)

M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Toratani, D. Tsuya, and Y. Aoyagi: "**Tunnel barrier formation using Argon ion irradiation and single quantum dots in multi-wall carbon nanotubes**", Appl. Phys. Lett. 81, 2273-2275 (2002)

2001 年発行(被引用数 37)

M. Suzuki, K. Ishibashi, T. Ida, D. Tsuya, K. Toratani, and Y. Aoyagi: "**Fabrication of single and coupled quantum dots in single-wall carbon nanotubes**", J. Vac. Sci. Technol., B19 (6), 2770-2774 (2001)

2000 年発行(被引用数 26)

K. Ishibashi, M. Suzuki, T. Ida, K. Tsukagoshi and Y. Aoyagi: "**Quantum dots in carbon nanotubes**", Jpn. J. Appl. Phys. 39, 7053-7057 (2000)

◇ プロジェクト期間後

2005 年発行(被引用数 88)

Yagi, I; Tsukagoshi, K; Aoyagi, Y: "**Modification of the electric conduction at the pentacene/SiO₂ interface by surface termination of SiO₂**", APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 86, Issue 10, 7 March 2005, Article number 103502, Pages 1-3

2005 年発行(被引用数 75)

Moriyama, S; Fuse, T; Suzuki, M; Aoyagi, Y; Ishibashi, K: "**Four-electron shell structures and an interacting two-electron system in carbon-nanotube quantum dots**", PHYSICAL REVIEW LETTERS, Volume 94, Issue 18, 13 May 2005

2004 年発行(被引用数 75)

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**", APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 84, Issue 5, 2 February 2004, Pages 813-815

外部資金に関しては、プロジェクト期間中から文科省系の競争的資金である科研費を多数獲得している。内容は光および電子デバイスの基礎に関するものが多いが、その一方で NEDO から大学発事業創出実用化研究開発事業助成金「高出力深紫外半導体発光素子の開発(超低消費電力・超高速情報通信用ナノデバイス集積回路の研究)」(2009-2011)を得ている。特許に関しては、プロジェクト期間後も出願 50 件中、登録件数 16 件で高いレベルを維持している。受賞も PJ 期間から

現在まで6件あり、高レベルの研究成果を継続していることが分かる。

(2) 最高性能高温超伝導材料の創製 (研究代表者：田中康資)

1998/12 -----2003/11

プロジェクト期間中にCu系の高温超伝導薄膜結晶($\text{Cu}_x\text{Tl}_{1-x}$) $\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 作成に成功して成果を挙げ、さらに期間後も継続して多層型高温超伝導体などで成果を上げている。田中康資氏によるプロジェクト期間後の重要な論文は、応用物理学会の最近の展望『多層型高温超伝導体における分数量子渦』(2010年 第79巻 第1号)の参考文献を用いた。

プロジェクト期間後に7件の論文があり、引用数の多いものを以下に示す。

2007年発行(被引用数14)

Y.Tanaka, A.Crisan, D.D.Shivagan, A.Iyo, K.Tokiwa and T. Watabane: "Interpretation of abnormal AC loss peak based on vortex-molecule model for a multicomponent cuprate superconductor", Jpn. J. Appl. Phys. 46, 134 (2007) Volume 46, Issue 1, 10 January 2007, Pages 134-145

2004年発行(被引用数5)

A. Sundaresan, H. Asada, H. Kito, Y. Tanaka, A. Iyo, M. Kusunoki and S. Ohshima: "Effect of surface needles on microwave surface resistance in $\text{Tl}(\text{Ba},\text{Sr})_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconductor films on a LSAT substrate ", Supercond. Sci. Technol. 17, 350(2004).

2007年発行(被引用数16)

Shimizu, S., Mukuda, H. , Kitaoka, Y. , Iyo, A. , Tanaka, Y. , Kodama, Y. , Tokiwa, K. , Watanabe, T.:" Uniform mixing of antiferromagnetism and high-temperature superconductivity in electron-doped layers of four-layered $\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_8\text{F}_2$: A new phenomenon in an electron underdoped regime", Physical Review Letters , Volume 98, Issue 25, 21 June 2007

外部資金は1件のみ、特許はプロジェクト中とプロジェクト後合わせて30件、そのうち18件が登録されており、高温超伝導分野では権利化の意識が高い。受賞に関しては、通商産業大臣賞(1999年)等3件を獲得している。

(3) 表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス (研究代表者：川原田 洋)

1998/12 -----2003/11

ダイヤモンドデバイスに関する研究に関して、期間中から期間後も世界的に大きな成果を上げている。「ダイヤモンドデバイス」では応用分野として高出力・超高周波デバイス用のみならずセンサ用としても注目され、さらにはプロジェクト後もダイヤモンドの超伝導に関する研究も推進してい

る。

論文で被引用数の多いものを WOS で調べると以下のようなものである。

◇ プロジェクト期間中

2001 年発行(被引用数 72)

Kawarada, H; Araki, Y; Sakai, T; Ogawa, T; Umezawa, H:" **Electrolyte-solution-gate FETs using diamond surface for biocompatible ion sensors**", PHYSICA STATUS SOLIDI A-APPLIED RESEARCH, Volume 185, Issue 1, May 2001, Pages 79-83

1999 年発行(被引用数 65)

Tsugawa, K; Kitatani, K; Noda, H; Hokazono, A; Hirose, K; Tajima, M; Kawarada, H:" **High-performance diamond surface-channel field-effect transistors and their operation mechanism**", DIAMOND AND RELATED MATERIALS, Volume 8, Issue 2-5, March 1999, Pages 927-933

◇ プロジェクト期間後

2004 年発行(被引用数 145)

Takano, Y; Nagao, M; Sakaguchi, I; Tachiki, M; Hatano, T; Kobayashi, K; Umezawa, H; Kawarada, H:" **Superconductivity in diamond thin films well above liquid helium temperature**", APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 85, Issue 14, 4 October 2004, Pages 2851-2853

2005 年発行(被引用数 101)

Yokoya, T; Nakamura, T; Matsushita, T; Muro, T; Takano, Y; Nagao, M; Takenouchi, T; Kawarada, H; Oguchi, T:" **Origin of the metallic properties of heavily boron-doped superconducting diamond**", NATURE, Volume 438, Issue 7068, 1 December 2005, Pages 647-650

外部資金に関しては、期間中から現在に至るまで。文科省関連で 6 件、NEDO 関連で 2 件を獲得している。内容は主にダイヤモンドデバイスやセンサに関するものである。特許に関しては、プロジェクト期間中(出願 5, 登録 4)からプロジェクト後(出願 13, 登録 6)と増加している。受賞に関しては、2 件(応用物理学会フェロー表彰 2010 超伝導科学技術賞 2007)を獲得している。

(4) 関連エレクトロニクス (研究代表者：平山祥郎)

1998/12 -----2003/11

プロジェクト期間中は半導体中のキャリア相関に関し世界中より注目された多くの研究成果を残し、さらに本 CREST (1998 - 2003)の研究代表者に続き、『キャリア相関を用いた量子コヒーレントシステム』SORST (2003 - 2007)の研究代表者：平山祥郎(東北大学大学院理学研究科 教授、2006 年 7 月に NTT 物性基礎研究所より異動)を推進した。さらに、平山核スピンエレクトロニクスプロジェクト ERATO (2007 - 2012)の研究総括に就任している。論文で被引用数の多いものを WOS で

調べると以下のようなものである。

◇ プロジェクト期間中

2003 年発行(被引用数 357)

Hayashi, T; Fujisawa, T; Cheong, HD; Jeong, YH; Hirayama, Y: " **Coherent manipulation of electronic states in a double Quantum dot**", PHYSICAL REVIEW LETTERS, Volume 91, Issue 22, 28 November 2003, Pages 226804/1-226804/4

2002 年発行(被引用数 248)

Fujisawa, T; Austing, DG; Tokura, Y; Hirayama, Y; Tarucha, S: " **Allowed and forbidden transitions in artificial hydrogen and helium atoms**", NATURE, Volume 419, Issue 6904, 19 September 2002, Pages 278-281

この論文は人工水素原子と人工ヘリウム原子の許容および禁止遷移に関するもので、被引用数はかなり多い。共著者として、十倉好紀(ERATO 十倉スピンの超構造(2001~2006))および樽茶清悟(ERATO 樽茶多体相関場(1999 ~2004))が含まれている。

2002 年発行(被引用数 91)

Hashimoto, K., Muraki, K., Saku, T., Hirayama, Y. : " **Electrically controlled nuclear spin polarization and relaxation by quantum-hall states**", PHYSICAL REVIEW LETTERS, Volume 88, Issue 17, 29 April 2002, Pages 1766011-1766014

◇ プロジェクト期間後

2006 年発行(被引用数 125)

Fujisawa, T; Hayashi, T; Tomita, R; Hirayama, Y: " **Bidirectional counting of single electrons**", SCIENCE, Volume 312, Issue 5780, 16 June 2006, Pages 1634-1636

2005 年発行(被引用数 92)

Yusa, G; Muraki, K; Takashina, K; Hashimoto, K; Hirayama, Y: " **Controlled multiple Quantum coherences of nuclear spins in a nanometre-scale device**", NATURE, Volume 434, Issue 7036, 21 April 2005, Pages 1001-1005

このように、プロジェクト中およびプロジェクト後ともに被引用件数の多い論文が多く、この分野を世界的にリードしていることが窺える。外部資金は科研費 1 件、特許に関しては、プロジェクト期間中から現在に至るまでに出版 24 件(登録 8 件)と多い。受賞も応用物理学会関連など 7 件と多い。

(5) 量子スケールデバイスのシステムインテグレーション (研究代表者：鳳 紘一郎)

1998/12 -----2003/11

プロジェクト期間中は電子・光子等の新機能に関する物理学的研究から電子・光子等の新規な

機能に着目した材料、デバイス更に量子力学的効果を利用した情報処理システムへの展開を目標とする研究を行った。論文に関しては下記に示すように被引用件数が多いのは、単電子回路のシミュレーションに関する論文(Single-electron circuit simulation)であり、MOSFETとの集積化にも応用できる内容である。

◇ プロジェクト期間中

1998 年発行(被引用数 29)

Amakawa, S; Majima, H; Fukui, H; Fujishima, M; Hoh, K: "**Single-electron circuit simulation**", IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS, Volume E81-C, Issue 1, 1998, Pages 21-28

1998 年発行(被引用数 8)

Fujishima, M; Amakawa, S; Hoh, K: "**Circuit simulators aiming at single-electron integration**", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS PART 1-REGULAR PAPERS BRIEF COMMUNICATIONS & REVIEW PAPERS, Volume 37, Issue 3 SUPPL. B, March 1998, Pages 1478-1482

◇ プロジェクト期間後

2003 年発行(被引用数 5)

Fujishima, M; Saito, K; Hoh, K: "**16-Qubit quantum-computing emulation based on high-speed hardware architecture**", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS PART 1-REGULAR PAPERS SHORT NOTES & REVIEW PAPERS, Volume 42, Issue 4 B, April 2003, Pages 2182-2184

外部資金に関しては、プロジェクト期間中に2件の科研費(単電子デバイスのアーキテクチャーや作製方法に関して)を獲得している。2005年に逝去されたが、第3回 LSI IP デザイン・アワードおよび、東京都科学技術振興功労表彰を受けている。

(6) ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索 (研究代表者：小田俊理)

1999---2005

粒径数 nm のナノ結晶シリコン量子ドットを間隔 1~2nm に制御し配列させる新材料「ネオシリコン」を提案し、その機能を探索した。(i) ネオシリコン作製と構造制御、(ii) ネオシリコン電気特性制御、(iii) ネオシリコン発光・電子放出特性制御、(iv) ネオシリコンの素子応用検討、の4つの大きなタスクに分け、国際産学連携チームで、互いに密接な連携を図りながら推進された。特に、ネオシリコン作製グループでは、ネオシリコン構造制御、ナノ結晶シリコン量子ドット単電子デバイス、ナノ結晶シリコン平面型電子放出素子、NEMS メモリデバイスに注力した。

被引用件数の多い論文は以下のようなものである。

◇ プロジェクト期間中

2003 年発行(被引用数 83)

Huang, SY; Banerjee, S; Tung, RT; Oda, S : **"Electron trapping, storing, and emission in nanocrystalline Si dots by capacitance-voltage and conductance-voltage measurements"**, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Volume 93, Issue 1, 1 January 2003, Pages 576-581

2002 年発行(被引用数 62)

Nishiguchi, K; Zhao, X; Oda, S: **"Nanocrystalline silicon electron emitter with a high efficiency enhanced by a planarization technique"**, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Volume 92, Issue 5, 1 September 2002, Page 2748

2000 年発行(被引用数 44)

Dutta, A; Oda, S; Fu, Y; Willander, M: **"2Electron transport in nanocrystalline Si based single electron transistors"**, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS PART 1-REGULAR PAPERS SHORT NOTES & REVIEW PAPERS, Volume 39, Issue 7 B, 2000, Pages 4647-4650

◇ プロジェクト期間後

2005 年発行(被引用数 17)

Rafiq, MA; Tsuchiya, Y; Mizuta, H; Oda, S; Uno, S; Durrani, ZAK; Milne, WI: **"Charge injection and trapping in silicon nanocrystals"**, APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 87, Issue 18, 31 October 2005, Article number 182101, Pages 1-3

2005 年発行(被引用数 17)

Huang, SY; Oda, S: **"Charge storage in nitrided nanocrystalline silicon dots"**, APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 87, Issue 17, 24 October 2005, Article number 173107, Pages 1-3

2006 年発行(被引用数 14)

Tsuchiya, Y; Takai, K; Momo, N; Nagami, T; Mizuta, H; Oda, S; Yamaguchi, S; Shimada, T: **"Nanoelectromechanical nonvolatile memory device incorporating nanocrystalline Si dots"**, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Volume 100, Issue 9, 2006, Article number 094306

プロジェクト終了後もシリコン系のナノ粒子を用いたデバイスに関連する研究を推進している。発展研究 SORST「ネオシリコンによるナノメカ・情報エレクトロニクス」(研究代表者:小田俊理)において、ネオシリコンの集積構造制御とトップダウン型シリコンプロセスとの融合を進めるとともに、エレクトロ&メカニカル量子特性の精密エンジニアリングによる機能制御技術・素子応用技術(例えば、ネオシリコン NEMS メモリ)を更に発展させることで、新たな研究分野「ナノメカ・情報エレクトロニクス」提案し、発展させた。

外部資金に関しては、科研費をプロジェクト期間中 5 件、プロジェクト期間後に 6 件と、バランス良く継続的に獲得している。特許に関しては、プロジェクト期間中に 8 件を出願し、内 5 件が登録されている。受賞に関しては、プロジェクト開始から 4 件(応用物理学会フェロー表彰など)を受賞している。

(7) 核スピンネットワーク量子コンピュータ (研究代表者：北川 勝浩)

1999---2005

プロジェクト期間中、量子コンピュータの強力な量子並列性を発揮させるために高分子や結晶の規則的に配列した核スピンを量子ビットとして使用して量子ビットの数を増すことを目標に、物質固有の核スピンネットワークを活かした量子回路構成法の研究、核スピンの初期化の研究、量子コンピュータに適した物質の探索・開発等を行なった。

被引用数の多い論文を以下に示す。

◇ プロジェクト期間中

2001年発行(被引用数 34)

Ulam-Orgikh, D; Kitagawa, M: "**Spin squeezing and decoherence limit in Ramsey spectroscopy**", PHYSICAL REVIEW A, Volume 64, Issue 5, November 2001, Pages 521061-521066

2005年発行(被引用数 10)

Rahimi, R; Sato, K; Furukawa, K; Toyota, K; Shiomi, D; Nakamura, T; Kitagawa, M; Takui, T: "**Pulsed endor-based quantum information processing**", INTERNATIONAL JOURNAL OF QUANTUM INFORMATION, Volume 3, Issue SUPPL. 1, November 2005, Pages 197-204

◇ プロジェクト期間後

2009年発行(被引用数 14)

Sato, K; Nakazawa, S; Rahimi, R; Ise, T; Nishida, S; Yoshino, T; Mori, N; Toyota, K; Shiomi, D; Yakiyama, Y; Morita, Y; Kitagawa, M; Nakasuji, K; Nakahara, M; Hara, H; Carl, P; Hofer, P; Takui, T: "**Molecular electron-spin Quantum computers and Quantum information processing: pulse-based electron magnetic resonance spin technology applied to matter spin-Qubits**", JOURNAL OF MATERIALS CHEMISTRY, Volume 19, Issue 22, 2009, Pages 3739-3754

2007年発行(被引用数 10)

Morita, Y; Yakiyama, Y; Nakazawa, S; Murata, T; Ise, T; Hashizume, D; Shiomi, D; Sato, K; Kitagawa, M; Nakasuji, K; Takui, T: "**Triple-Stranded Metallo-Helicates Addressable as Lloyd's Electron Spin Qubits**", JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, Volume 132, Issue 20, 26 May 2010, Pages 6944-6946

2006年発行(被引用数 7)

Peng, WK; Takeda, K; Kitagawa, M: "**A new technique for cross polarization in solid-state NMR compatible with high spinning frequencies and high magnetic fields**", CHEMICAL PHYSICS LETTERS, Volume 417, Issue 1-3, 9 January 2006, Pages 58-62

外部資金に関しては、プロジェクト終了後に科研費(新学術領域研究(研究領域提案型)代表者)

「量子サイバネティクス - 量子制御の融合的研究と量子計算への展開」を獲得している。特許に関しては、プロジェクト期間中から現在まで3件を出願し、内1件が登録されている。受賞は現時点ではない。

(8) 人工光物性に基づく新しい光子制御デバイス (研究代表者：中野義昭)

1999 / 11-----2004 / 10

「人工光物性に基づく新しい光子制御デバイス」の研究では半導体材料のマクロな光物性を一原子層単位で設計・制御されたマイクロな人工結晶構造により変革し、電気光学効果、相互位相変調、四光波混合、磁気光学効果など、広義の光非線形性を飛躍的に高め、デジタル波長変換器、光ロジックなどの全光子制御デジタルデバイス/回路を実現した。

引き続き、発展研究 SORST(非相反デジタル光集積回路の開発と全光ネットワークへの応用)の研究代表者になった。この中で、全光信号処理に向けた非相反デジタル光集積機能回路の開発にフォーカスして、(i) 要素デジタル光デバイス、非相反導波路の設計・試作、(ii) 磁性半導体や強磁性金属の成長・集積プロセス技術開発、(iii) これらデバイスのモノリシック集積化技術開発、(iv) 光ネットワーク用デジタル光集積機能回路の試作・実証、を中心に研究を進めた。

また、最近は太陽電池向けの新素材として、光吸収波長をナノテクで人工的に調整した新素材(量子井戸構造)の研究も行っている。

論文はプロジェクト期間中 103 件、期間後も 92 件と多く研究活動の勢いが感じられる。その中で、被引用件数が多い論文を以下に示す。

◇ プロジェクト期間中

2000 年発行(被引用数 71)

Yokoi, H; Mizumoto, T; Shinjo, N; Futakuchi, N; Nakano, Y: "**Demonstration of an optical isolator with a semiconductor guiding layer that was obtained by use of a nonreciprocal phase shift**", APPLIED OPTICS, Volume 39, Issue 33, 20 November 2000, Pages 6158-6164

2003 年発行(被引用数 36)

Waki, I; Kumtornkittikul, C; Shimogaki, Y; Nakano, Y: "**Shortest intersubband transition wavelength (1.68 μ m) achieved in AlN/GaN multiple quantum wells by metalorganic vapor phase epitaxy**", APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 82, Issue 25, 23 June 2003, Pages 4465-4467

◇ プロジェクト期間後

2005 年発行(被引用数 59)

Takenaka, M; Raburn, M; Nakano, Y: "**All-optical flip-flop multimode interference bistable laser diode**", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Volume 17, Issue 5, May 2005, Pages 968-970

2006 年発行(被引用数 44)

Shimizu, H; Nakano, Y: "Fabrication and characterization of an InGaAsp/InP active waveguide optical isolator with 14.7 dB/mm TE mode nonreciprocal attenuation", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Volume 24, Issue 1, January 2006, Pages 38-43

外部資金に関しては、プロジェクト期間中から現在に至るまでに、科研費 7 件(基盤研究(S)「デジタルフォトンクス-光エレクトロニクスのパラダイムシフト」代表者)、および NEDO(「フォニックネットワーク技術開発」代表者)を獲得している。

特許に関しては、プロジェクト期間中 14 件出願(内 4 件登録)、プロジェクト期間後は 11 件出願(内 2 件登録)している。共同研究も 5 件ある。

受賞に関しては、プロジェクト期間中から現在に至るまで、応用物理学会フェロー賞や内閣総理大臣賞など 9 件獲得している。

(9) ナノサイズ構造制御金属・半金属材料の超高速光機能 (研究代表者：中村新男)

1999 /11 ----- 2005 /3

プロジェクト期間中は、金属や半金属をナノスケールにした場合に現れる量子力学的効果を利用して光により光学的機能、磁氣的機能、電氣的な機能が制御できるような新しい材料を開発するための研究を行なった。

被引用数の多い論文を以下に示す。

◇ プロジェクト期間中

2000 年発行(被引用数 131)

Moritomo, Y; Akimoto, T; Takeo, M; Machida, A; Nishibori, E; Takata, M; Sakata, M; Ohoyama, K; Nakamura, A: "Metal-insulator transition induced by a spin-state transition in $\text{TbBaCo}_2\text{O}_{5+\delta}$ ($\delta=0.5$)", PHYSICAL REVIEW B, Volume 61, Issue 20, 15 May 2000, Pages R13325-R13328

1999 年発行(被引用数 102)

Moritomo, Y; Machida, A; Mori, S; Yamamoto, N; Nakamura, A: "Electronic phase diagram and phase separation in Cr-doped manganites", PHYSICAL REVIEW B, Volume 60, Issue 13, 1999, Pages 9220-9223

◇ プロジェクト期間後

2006 年発行(被引用数 12)

Moritomo, Y; Kamiya, M; Nakamura, A; Nakamoto, A; Kojima, N: "Cooperative formation of high-spin species in a photoexcited spin-crossover complex", PHYSICAL REVIEW B, Volume 73, Issue 1, 2006, Pages 1-4

外部資金に関しては、科研費：基盤研究(b)「超高速レーザー分光によるカーボンナノチューブの新奇光学応答と非線形性巨大化の研究」など、プロジェクト期間中から現在まで 10 件を獲得している。

特許に関しては、プロジェクト期間中から現在まで 4 件出願して、内 2 件(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など)が登録されているが、受賞に関してはない。

(10) 光・電子波束制御エンジニアリング (研究代表者：覧具博義)

1999 /11 ----- 2005 / 3

プロジェクト期間中は、光の位相を制御することにより光エレクトロニクスに新しい自由度を導入することを目指し、フェムト秒光パルスとこれにより量子ナノ構造材料中に誘起される電子波束との相互作用を用いて光位相を精密且つ超高速に制御する技術の開発を行なった。

プロジェクト期間後の論文件数は多くないが、下記のようにプロジェクト期間以降、被引用件数が多い論文があり、この分野で質の高い業績を上げている。

◇ プロジェクト期間中

2000 年発行(被引用数 65)

Uskov, AV; Jauho, AP; Tromborg, B; Mork, J; Lang, R: "**Dephasing times in quantum dots due to elastic LO phonon-carrier collisions**", PHYSICAL REVIEW LETTERS, Volume 85, Issue 7, 14 August 2000, Pages 1516-1519

1999 年発行(被引用数 34)

Uskov, AV; Nishi, K; Lang, R: "**Collisional broadening and shift of spectral lines in quantum dot lasers**", APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 74, Issue 21, 24 May 1999, Pages 3081-3083

◇ プロジェクト期間後

2007 年発行(被引用数 8)

Horikoshi, K; Misawa, K; Lang, R: "**Rapid motion capture of mode-specific quantum wave packets selectively generated by phase-controlled optical pulses**", JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS, Volume 127, Issue 5, 2007, Article number 054104

2006 年発行(被引用数 8)

Horikoshi, K; Misawa, K; Lang, R; Ishida, K: "**Sensitive femtosecond wave-packet spectrometer**", OPTICS COMMUNICATIONS, Volume 259, Issue 2, 15 March 2006, Pages 723-726

外部資金に関しては、プロジェクト期間中に 1 件(科研費 基盤研究(B))を獲得している。特許に関しては、プロジェクト期間中に 6 件出願し、内 4 件(光多重送信装置、光多重受信装置、光多重

送受信装置、光多重通信方法などが登録されている。受賞に関しては、応用物理学会フェロー表彰を2007年に獲得している。

(11) 固体中へのスピン注入による新機能創製 (研究代表者：鈴木義茂)

2000 / 11 -----2006 / 3

プロジェクト期間中は電子の有する電荷とスピンの両方の性質を利用したデバイスを考案する上での基礎としてスピン偏極電流の固体内への注入に関する研究を行い、トンネル磁気抵抗効果におけるスピンに依存した電子の干渉効果、スピン注入による磁化反転、スピン注入トルクを用いた高速磁化反転、磁気トンネル接合におけるスピントルクダイオード効果など多くの興味ある物理現象を発見し、デバイスへの応用の可能性を示した。第3章で詳しく紹介するが、スピントロニクス分野を活性化した大きな成果を生み出した。下記に示す論文の被引用数からもこのことは窺える。

◇ プロジェクト期間中

2005年発行(被引用数 273)

Djayaprawira, DD; Tsunekawa, K; Nagai, M; Maehara, H; Yamagata, S; Watanabe, N; Yuasa, S; Suzuki, Y; Ando, K: "**230% room-temperature magnetoresistance in CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junctions**", APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 86, Issue 9, 28 February 2005, Article number 092502, Pages 1-3

2006年発行(被引用数 123)

Yuasa, S; Fukushima, A; Kubota, H; Suzuki, Y; Ando, K: "**Giant tunneling magnetoresistance up to 410% at room temperature in fully epitaxial Co/MgO/Co magnetic tunnel junctions with bcc Co(001) electrodes**", APPLIED PHYSICS LETTERS, Volume 89, Issue 4, 2006, Article number 042505

◇ プロジェクト期間後

2007年発行(被引用数 61)

Ohishi, M; Shiraishi, M; Nouchi, R; Nozaki, T; Shinjo, T; Suzuki, Y: "**Spin injection into a graphene thin film at room temperature**", JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS PART 2-LETTERS & EXPRESS LETTERS, Volume 46, Issue 25-28, 13 July 2007, Pages L605-L607

2009年発行(被引用数 56)

Maruyama, T; Shiota, Y; Nozaki, T; Ohta, K; Toda, N; Mizuguchi, M; Tulapurkar, AA; Shinjo, T; Shiraishi, M; Mizukami, S; Ando, Y; Suzuki, Y: "**Large voltage-induced magnetic anisotropy change in a few atomic layers of iron**", NATURE NANOTECHNOLOGY, Volume 4, Issue 3, March 2009, Pages 158-161

外部資金に関しては、プロジェクト期間中から現在まで7件(基盤研究(S)代表者「高周波スピント

ロニクスの研究」など)を獲得している。

特許に関しては、プロジェクト期間中から現在までに12件出願して、内5件(トンネル磁気抵抗素子および磁気ランダムアクセスメモリ等)は登録されている。

受賞に関しては、2010年に第42回市村学術賞貢献賞など3件を受賞している。

(12) 量子暗号の実用化を可能にする光子状態制御技術 (研究代表者：中村和夫)

2000 / 11 -----2006 / 3

プロジェクト期間中、特に相関光子源、量子もつれ合い状態にある光子を利用した量子中継器や光子検出器の研究等を行い遠距離の量子中継を可能にするための要素技術の研究において優れた研究成果が挙げられた。

元研究代表者は、現在、独立行政法人物質・材料研究機構において、要職について活躍されており、以下のように兼務である。

(i) 中核機能部門 事務統括室 室長

(ii) つくばイノベーションアリーナ¹推進室 室長

プロジェクト期間中の論文数は多く、主要論文の被引用件数を示す。

2002年発行(被引用数 81)

A. Tomita and K. Nakamura: "**Balanced, gated-mode photon detector for Qubit discrimination at 1550 nm**", Optics Letters 27 (2002) pp. 1827-1829.

2002年発行(被引用数 41)

Y. Nambu, K. Usami, Y. Tsuda, K. Matsumoto, K. Nakamura, : "**Generation of Polarization-entangled LED Photon Pairs in a Cascade of Two Type-I Crystals, Pumped by Femtosecond Pulses**", Phys. Rev. A66, issue 3, p338160 (2002)

2003年発行(被引用数 10)

K.Usami, Y.Nambu, Y.Tsuda, K.Matsumoto, K.Nakamura: "**Accuracy of Quantum-state estimation utilizing Akaike's information criterion**", Physical Review A 68, 022314 (2003)

2004年発行(被引用数 1)

K.Usami, Y.Nambu, B. Shi, A. Tomita, K.Nakamura : "**Observation of Antinormally Ordered Hanbury Brown and Twiss-type Correlation**", Physical Review Lett. Vol.92, No.11, 113601 (2004)

2005年発行(被引用数 4)

Y. Nambu and K. Nakamura: "**Experimental Investigation of a Nonideal Two-Qubit Quantum-State Filter by Quantum Process Tomography**", Phys. Rev. Lett. 94, 010404 (2005).

¹ つくばイノベーションアリーナ ナノテクノロジー拠点(TIA-nano): 第4期中期計画(2010年度~2014年度)の策定について先端ものづくり国家としてのわが国の繁栄と世界的な課題解決に貢献するナノテクノロジー拠点

2005 年発行(被引用数 8)

S. Kono, A. Kirihara, A. Tomita, K. Nakamura, J. Fujikata, H. Saito, and K. Nishi: "**Excitonic molecule in a quantum dot: Photoluminescence lifetime measurement of an InAs/GaAs single quantum dot**", Phys. Rev. B 72, 155307 (2005)

プロジェクト期間中から現在まで、外部資金、特許出願、受賞等はない。

(13) フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス (研究代表者：野田 進)

2000 / 11 -----2005 / 10

プロジェクト期間中の研究においては 2 次元及び 3 次元フォトニック結晶作製技術の確立、フォトニック結晶の特性を利用したフォトンの自然放出の抑制、フォトニック結晶への人為的欠陥導入によるフォトンの捕獲や放出、フォトニック結晶中へのヘテロ構造の導入による分波機能の発現、100 万にも及ぶ超高 Q 値ナノキャビティの実現等世界の学会をリードする研究成果が発表された。

第 3 章でも紹介するが、フォトニック結晶に関しては世界的トップレベルの成果を生み出している。特に、高い Q を達成した論文と欠陥導入によるフォトンの発生制御に関する論文は被引用件数が高い。また、フォトニック結晶を用いた自然放光の制御に関しても注目されており、このような優れた研究成果を元に将来の光デバイスの応用としては、大面積半導体レーザーが有望である。

被引用件数の特に多い論文を以下に示す。

◇ プロジェクト期間中

2003 年発行(被引用数 945)

Akahane, Y; Asano, T; Song, BS; Noda, S: "**High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal**", NATURE, Volume 425, Issue 6961, 30 October 2003, Pages 944-947

2000 年発行(被引用数 660)

Noda, S; Chutinan, A; Imada, M: "**Trapping and emission of photons by a single LED effect in a photonic bandgap structure**", NATURE, Volume 407, Issue 6804, 5 October 2000, Pages 608-610

◇ プロジェクト期間後

2007 年発行(被引用数 190)

Noda, S; Fujita, M; Asano, T: "**Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities**", NATURE PHOTONICS, Volume 1, Issue 8, August 2007, Pages 449-458

2007 年発行(被引用数 65)

Takahashi, Y; Hagino, H; Tanaka, Y; Song, BS; Asano, T; Noda, S: "**High-Q nanocavity with a 2-ns**

photon lifetime", Optics Express, Volume 15, Issue 25, 12 December 2007, Pages 17206-17213

外部資金は、プロジェクト期間中から現在まで、科研費の基盤研究(S)(代表者「フットニック結晶の動的制御と新機能の創出」など、8件を獲得している。また、最先端研究開発支援プログラム(内閣府・JSPS「フットニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発(中心研究者:荒川泰彦)2009-2013」)の主要メンバーである。

特許は、プロジェクト期間中から現在まで、81件を出願して、内40件(2次元フットニック結晶面発光レーザー光源 特許004294023号(2009.04.17) (京都大学とローム(株)共同出願)などが登録されている。

受賞は、第6回江崎玲於奈賞2009など多く、35件を受けている。

(14) 強相関電子系ペロブスカイト遷移金属酸化物による光エレクトロニクス (研究代表者:花村 榮一)

2000 / 11 -----2006 / 3

プロジェクト期間中の研究においては従来高温超伝導材料として注目されてきたが、光学結晶としては注目されていなかったペロブスカイト構造の酸化物結晶に於いて非常に大きな光学的非線形性、特異なラマン散乱特性など多くの興味ある現象を発見した。また n 型、p 型超伝導体で絶縁層を挟む nS-I-pS 構造により超放射を得ようとする意欲的な研究も行なわれた。

また、本 CREST (2000 - 2005)に時期が重なって、さきがけ「光と制御」(2001 - 2006)の研究総括になり、22名の研究者の研究活動を纏めた。この研究領域の概要は、『受光と発光、光の伝達制御、スイッチング等に用いられる光デバイス等の実現に向けて、光と物質の相互作用や光機能性材料創製に関する研究を対象にする』である。

被引用件数の多い論文を以下に示す。

◇ プロジェクト期間中

2001年発行(被引用数31)

Iizuka-Sakano, T; Hanamura, E; Tanabe, Y: "Second-harmonic-generation spectra of the hexagonal manganites RMnO_3 ", JOURNAL OF PHYSICS-CONDENSED MATTER, Volume 13, Issue 13, 2 April 2001, Pages 3031-3055

2004年発行(被引用数30)

Tomita, A; Sato, T; Tanaka, K; Kawabe, Y; Shirai, M; Tanaka, K; Hanamura, E : "Luminescence channels of manganese-doped spinel", JOURNAL OF LUMINESCENCE, Volume 109, Issue 1, July 2004, Pages 19-24

◇ プロジェクト期間後

2007 年発行(被引用数 18)

Matsuki, H; Inoue, K; Hanamura, E: "**Multiple coherent anti-Stokes Raman scattering due to phonon grating in KNbO₃ induced by crossed beams of two-color femtosecond pulses**", PHYSICAL REVIEW B, Volume 75, Issue 2, 2007, Article number 024102

2007 年発行(被引用数 13)

Inoue, K; Kato, J; Hanamura, E; Matsuki, H; Matsubara, E: "**Broadband coherent radiation based on peculiar multiple Raman scattering by laser-induced phonon gratings in TiO₂**", PHYSICAL REVIEW B, Volume 76, Issue 4, 2 July 2007, Article number 041101

このように、プロジェクト期間後も、最先端の光物理領域で第一線の研究成果を上げている。さらに波及効果として、2008 年 1 月に北海道大学の末宗幾夫教授らは JST 基礎研究事業の一環として、花村榮一教授によって予言されていた超伝導による超放射を「超伝導による発光ダイオードの発光増強」として世界で初めて実証に成功した。外部資金に関しては、文科省 COE 形成基礎研究費特別推進研究(COE)研究分担者(スピン-電荷-光・結合系の相制御)(1997~2002)がある。特許は、プロジェクト期間中に 8 件出願して、内 4 件(発光材料及びそれを用いた光源装置ど)が登録された。受賞は、プロジェクト開始前であるが、1975 年の仁科記念賞を獲得している。

第3章 詳細調査

3.1 表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス (研究代

表者：川原田 洋)

(1) 研究期間中における状況

期間中の特筆すべき成果は、ダイヤモンドFET高周波トランジスタ、ダイヤモンド系単電子トランジスタ、DNA やバイオセンサの研究開発に関するものである。このプロジェクトにおいてダイヤモンド高周波トランジスタは動作周波数が数十GHzを実現したが、これは当時の世界最高レベルであった。これらの成果は、ダイヤモンドのもつ優れた特性(広禁制帯半導体、耐熱性、高熱伝導性、生体適合性)を引出すことが可能になったデバイスプロセス技術の研究開発が果たした役割が大きい。特に本プロジェクトでは、水素終端表面で生じる低抵抗のp型伝導層に着目し、これを利用した表面チャンネル型FETの研究を中心軸にして、以下のデバイスの研究開発を行った。

- i) 高品質のホモエピタキシャル表面を使用したハイパワーの高周波デバイス
- ii) 平坦表面のナノ改質による単正孔トランジスタ等の量子デバイス
- iii) 強酸強塩基中でも動作するFETに生体分子を固定したバイオセンサ

また同時に、重要な要素技術ならびに基盤研究として、ダイヤモンドのn型化、ヘテロエピタキシャル成長、p型表面伝導層の機構についての解明が進展した。

(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

ダイヤモンド高周波トランジスタの研究は、その後NEDOのプロジェクトにも繋がった。NEDOプロジェクトでは、パワー半導体素子、とくにポスト・シリコンカーバイトデバイスへの期待がある。プロジェクト中は、独創的なダイヤモンドの水素終端技術でp型伝導を達成して、デバイス研究を牽引した。しかしながらその一方で、耐久性のあるトランジスタ実現にはドーピングが重要であるとの認識に立って研究を継続している。

DNA センサはその後、RNA チップおよびプロテイン・マイクロアレーの研究／開発に繋がった。その後、ダイヤモンドに高濃度のボロン(ホウ素)を導入して低抵抗の薄膜を形成し、薄膜ダイヤモンドとしては世界初の超伝導を発現させた。(APL 2004 “ Superconductivity in diamond thin films well above liquid helium temperature ”) 今後、超伝導性と半導体性の両側面をもつ新

たなデバイス実現への可能性が期待されている。

2001年にはCREST「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」(研究総括:梶村皓二)において、川原田氏は研究分担者になった。

論文に関しては期間中61、期間後は89で、引き続きダイヤモンドFETやセンサ関連、あるいは超伝導の研究が活発である。一方、公開特許件数は期間中は5、期間後は10である。期間中はダイヤモンドの水素終端プロセス技術を用いたFET製造技術に関する特許出願、期間後は、ダイヤモンドJJ素子、ダイヤモンドFET用の薄膜技術、DNAセンサ、カーボンナノチューブ配線技術に関する出願が多い。

(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果

高速トランジスタの分野では、ダイヤモンドの物質中最高の熱伝導率と高い絶縁破壊電界を利用したハイパワー高周波トランジスタを開発中して、ゲート長100nm以下のトランジスタが作製され、50GHz以上で動作することを確認している。また移動体通信の基地局や航空機用レーダーのパワーアンプ等への応用も期待される。

バイオセンサに関しては、表面修飾性に富み、安定したダイヤモンド表面を利用した新型のDNA、RNAチップおよびプロテイン・マイクロアレーの開発中である。

カーボンナノチューブの応用については、高密度プラズマから発生するラジカルの利用により単層、2層のナノチューブを低温で高密度に、しかも1cm近く成長させる技術を世界に先駆けて開発した。ナノチューブの電気伝導性と安定性を利用し、ULSIやナノエレクトロニクスでの新しい配線技術への応用が期待されている。

超伝導ダイヤモンドに関しては、高濃度のボロン(ホウ素)を導入して低抵抗の薄膜を形成し、薄膜ダイヤモンドとしては世界初の超伝導を観測した。今後、超伝導性と半導体性の共存により、新たなデバイスの開発が期待される。

社会的・経済的な効果・効用の視点では、C(カーボン)系のデバイスが、既存のデバイスを全面的に置き換えている状況ではないが、材料そのものが大きな可能性を秘めていることが基礎研究における試作デバイスで示された。今後の波及効果はエネルギー材料、情報通信、バイオエレクトロニクス各分野で極めて大きい。

3.2 相関エレクトロニクス (研究代表者：平山 祥郎)

(1) 研究期間中における状況

半導体におけるキャリア相関は物性研究においては重要な役割を果たしていたが、様々な材料で得られている超伝導や液体ヘリウムの超流動のように、工学的にもインパクトを持つ相関現象の発現には至っていなかった。「相関エレクトロニクス」プロジェクトでは半導体中の様々なキャリア相関、さらにはそのコヒーレント制御の基礎研究を遂行し、その中から将来の画期的な半導体デバイスコンセプトに繋がるような相関現象をピックアップすることを目標に研究を進めた。具体的には、キャリア超流動のような強い相関、将来の量子コンピュータに繋がるような相関現象を見つけ、それらを実現する半導体システムを構築することを目指した。当初、キャリア相関として、クーロン相互作用とキャリアスピンの相関を考えていたが、研究の途中で核スピンを含む新展開があり、キャリアスピンと核スピンの相関も含めて研究を展開した。不純物や欠陥の影響を受けずにキャリア相関の研究を進めるために、高品質半導体薄膜構造ならびにナノ構造の作製技術の確立にも力を注いだ。

当時、世界的に量子コンピュータや量子通信の研究は立ち上がりつつあったが、時宜を得た本プロジェクトの中で世界をリードする研究成果を次々にあげることができ、今日のスピントロニクスへの貢献にも繋がった。特に、量子ドットにおける電荷スピンの制御、および電子スピンと核スピンの相互作用の制御に焦点をあてたことで、安定した量子デバイスへの基礎を築いた。後者は、現在進行中の ERATO 平山核スピンエレクトロニクス(2007~)に繋がった。

(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

電子スピンと核スピンを比較すると、コヒーレンス時間は核スピンが長く、ゆっくりと変化する。歴史的にみると、NMR は試験管の中で、ある程度大きなサンプルを測定しないと信号が観測されないという常識に捕らわれていた。しかし、この研究課題では、ナノデバイス(2次元閉じこめ、電子ドット)の電子スピンの相互作用を利用すれば、応用範囲が広がるとの方向性を打ち出した。その結果、新しい測定技術開発による新現象の観測などを通じて新しい相関エレクトロニクス分野のデバイス概念に到達した。

その後、電子スピンと核スピンの相互作用の制御は、現在進行中の ERATO 平山核スピンエレクトロニクスに繋げることができた。このプロジェクトでは、核スピンの精密制御を軸にして、量子情報処理のための半導体デバイス(例えば多量子ビット量子デバイス)や超高感度 NMR への展開を目指している。

このように、研究成果は着実にあげているが、大きな目標の一つである高性能な量子コンピュータの実現にはまだ、2~3 件以上の材料/デバイス構造/アルゴリズムに関する大きな発明や発見

が必要と予測できる。

統計データを以下に示す。

◇論文： 期間中 46 件、期間後 79 件でその後の成果も活発である。

◇公開特許：期間中 12 件(半導体結晶成長法など)で期間後は 11 件(原子核スピン制御・検出、多量子ビット情報処理技術の関連)。

(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果

現状をみると、量子通信は実用化に向けて着実な進歩をみせているが、量子コンピュータに関しては多くの研究課題が累積している。しかしながら、本プロジェクトにより、世界をリードする研究成果を次々にあげることができ、今後の突破口への期待が高まっている。

特に、量子ドットにおける電荷スピンの制御、および電子スピンと核スピンの相互作用の制御に焦点をあてたことで、安定した量子デバイスへの基礎を築いた。さらに後者は、現在進行中の ERATO 平山核スピンエレクトロニクスに繋げることができた。ただし、高性能な量子コンピュータの実現にはまだ長期間の基礎研究が必要であり、社会的なインパクト実現への道はいまだに遠い。

また、この分野に関しては、リスクはあっても外国の模倣でなく日本発の成果を狙う意気込みが続いている。このことは、人材育成へも良い影響があり、当時の多くの研究協力者は大学等での分野の継続的発展に貢献している。

3.3 ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索 (研究代表

者：小田 俊理)

(1) 研究期間中における状況

「ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索」の研究では、粒径数 nm のナノ結晶シリコン量子ドットを、間隔 1~2nm に制御し配列させる新材料「ネオシリコン」を提案し、独自のアイデアによりこれを形成して、その機能を探索した。実施にあたっては、研究全体を(i)ネオシリコン作製と構造制御、(ii)ネオシリコン電気特性制御、(iii)ネオシリコン発光・電子放出特性制御、(iv)ネオシリコンの素子応用検討、の 4 つの大きなタスクに分け、国際産学連携チームで、互いに密接な連携を図りながら推進された。研究形態として、英国のキャベンディッシュ研究所内にある日立ケンブリッジと効率的な研究協力を行い、主に、サンプルは東京工業大学で作り、電気測定は英国のキャベンディッシュ研究所で行った。ここでの電気測定はハイレベルで研究の進展に大きな貢献があった。このような国際共同研究は今後のよいモデルケースになるであろう。

このような状況下で、量子ビットメモリ、シリコン間接遷移型発光素子および NEMS(Nano Electro-Mechanical Systems)の研究に注力した。シリコン間接遷移型発光素子では、極薄シリコンに直接、電極を付けてキャリア注入を行った。これにより、赤外領域の発光を観察した。しかし、高効率の高速変調では、レーザ発振が好ましい。そのために、極薄シリコン構造で、光学利得があるかどうかを調べた。NEMS では、GHz 帯域まで振動する両持梁構造(可動フローティングゲート)の高速性を生かした新メモリデバイスの提案と試作を行った。

(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

CREST から発展研究 SORST への継続発展があった。SORST に CREST 関連テーマの約 80% が引き継がれ、さらにナノインクなどのプロセス開発も行った。この SORST「ネオシリコンによるナノメカ・情報エレクトロニクス」プロジェクトでは、トップダウン微細加工技術とボトムアップ技術との融合により、ナノ構造を制御したネオシリコン技術と MEMS 技術を融合させたナノメカニカル素子(例えば、可動浮遊 NEMS メモリデバイスは低消費動作かつ、情報保持が長寿命である)の原理検証に焦点を絞り、将来のナノメカ・情報エレクトロニクスへの展開を図ることを目的にした。具体的には以下の項目である。

- i. シリコンナノドット配列技術、ボトムアップ&トップダウン融合技術を含むネオシリコン集積化技術の確立
- ii. ネオシリコン集積構造を伝導層とする素子の伝導メカニズム解析とエレクトロメカニカル動作原理探索およびネオシリコン NEMS 融合デバイスの動作実証

- iii. ネオシリコンを用いた ULSI チップ間弾道電子線インターコネクション素子のプロトタイプ試作と原理検証

その他、Si ナノインク、表面修飾したナノ粒子の塗布、噴射パターンニングなどネオシリコン集積化技術の確立を行った。また、次世代量子ドット太陽電池や音響伝達モードのギャップ(ナノフォノン状態)の研究も行った。また、ネオシリコン材料としては、シリコンナノドットの他に、新機能開拓とデバイス設計の自由度を増すためにシリコン ナノワイヤーも研究に加えた。

今後の研究方向としては、以下の3項目である。

- i. 低温プロセスを用いてナノ領域に電流注入構造を形成する研究
(薄膜トランジスタTFT、発光素子への応用)
- ii. NEMS と CMOS との融合
- iii. 量子ドット結合(3つ以上)、電子スピンおよびナノワイヤの研究
(量子コンピュータ、次世代量子効果太陽電池への応用)

(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果

最初に、科学技術的な波及効果について記述する。シリコンという材料は既に半導体集積回路のウエハ材料として不動の地位を築いている。さらに微細加工技術の進展により新しい機能を発現させることが可能になり、量子ビットメモリ、シリコン発光素子、そしてNEMSに関する基礎研究が大きく進展した。

これらの基礎研究がどのような形態で社会的・経済的な効果・効用を将来もたらすかは、以下のようなデバイスやシステムの進展に依存すると推測できる。

- 高機能薄膜トランジスタ、
 - 発光素子を組込んだシリコン集積回路
 - NEMS と CMOS との融合デバイス
 - 3個以上の量子ドットを結合したデバイス
- 量子コンピュータ
 - 次世代量子効果太陽電池

社会的・経済的な効果・効用・波及効果を分析するときに、この研究領域は現時点での実績というよりも、“将来”を意識することが重要である。なぜならば、現在のデバイスが壁に直面しているパラメータ、例えば、集積度、動作速度、情報処理時間、光変換効率、に対して課題を解決する可能性を秘めているからである。無論、それぞれの課題に対して、複数のブレークスルーが依然として必要であるが、その結果として得られる社会と経済に対する効果・効用・波及効果は莫大である。

3.4 固体中へのスピン注入による新機能創製 (研究代表者：鈴木義茂)

(1) 研究期間中における状況

研究課題『固体中へのスピン注入による新機能創製』に関しては、最も重要な成果は、本CREST によって、トンネル磁気抵抗効果、スピンホール効果、スピン流等に関する目的基礎研究および応用研究が日本において加速できた事である。ある意味で、日本に於けるスピントロニクス最初の流れを作ったともいえる。このような成果を得るに至った背景とその後の展開に関して以下に詳述する。

日本におけるこの分野の源流としては、科研費 特定研究 京都大学 新庄教授 『金属人工格子の物性と機能』(1992 年度)と、金研 藤森 啓安教授が研究分担者として参加した『微小領域の磁性と伝導』(1996 年度)があげられる。その影響も受けて、鈴木教授が CREST の中で、固体中へのスピン注入による新機能創製を実行する。その展開中に、研究分担者の湯浅新治氏がさきがけ「ナノと物性」(研究総括:神谷武志;2001-2006)において研究テーマ『超 Gbit-MRAM のための単結晶 TMR 素子の開発』を 2002 年に開始し、このような動きが功を奏してハードディスクの大容量化で大きな成果を生むきっかけとなった。

TMR(トンネル磁気抵抗効果)素子は高感度の磁気ヘッドおよび高速・大容量・不揮発ランダムアクセスメモリー(MRAM)の有力な候補として世界的に激しい研究開発が続けられている対象であり、この研究ではトンネルを担うスピン偏極電子のコヒーレンスを劣化させないようにトンネルバリア層に結晶性MgO を用いるというアプローチを取った。

その後、総務省SCOPE(研究代表者:鈴木義茂「スピン注入トルクを用いた超高速非線形素子の開発」)、さきがけ「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」(研究総括:佐藤勝昭;2007-2012)の中の研究テーマ「分子を介したスピン流の制御」(白石誠司 教授)、NEDO(スピンRAM;2006-2010)、さらにCREST「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」(研究総括:渡辺久恒;2007-)でスピン関連の研究が大きく進展する。詳細は次節(2)で述べる。

(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

プロジェクト期間中、終了後から研究プロジェクトの流れを俯瞰すると、科研費特定研究、CREST、さきがけ、NEDO 応用研究、総務省プロジェクト等が有機的に繋がり、現在も日本のスピントロニクスを世界のトップレベルに維持する役割を果たした。

当時の研究展望としては、新分子構造や電圧制御を利用したスピン制御(注入・伝達・蓄積)が重要になると予測されていた。その後、以下に概要を記述するプロジェクトに発展、波及していった。

すなわち、実際に本CRESTに参加していた研究者が、新たなプロジェクトにおいて核となる成果を創出している例が見受けられる。以下にこのようなプロジェクトを列記する。

◇ NEDO スピン RAM 2006-2010

『スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト』

平成 18 年度～平成 22 年度 5 年間 (2006-2010)

次世代 MRAM であるスピン RAM とスピン新機能素子の実現に向けたプロジェクト

事業期間:平成 18 年度～平成 22 年度、平成 22 年度予算:3.0 億円

プロジェクトリーダー:安藤 功兒(独立行政法人 産業技術総合研究所 フェロー)

目標を以下に略記する。

『電子の電荷自由度のみならず、電子のスピン向きも利用するスピントロニクス技術は、将来のエレクトロニクスにおける中核的な基盤技術として期待される。スピンの最大の特長である磁気ヒステリシス効果を利用する不揮発性機能は、待機電力をほとんど必要としないスピン不揮発性デバイスを可能にする。これらのデバイスを使用することで、電子情報機器の超低消費電力化が実現する。強磁性金属のナノ構造体を基本とし、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピン RAM のための基盤技術、また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子実現のための基盤技術を確立する。』

◇ 総務省 SCOPE 高周波プロジェクト 2005 - 2009

総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)

特定領域重点型研究開発(情報通信新機能・デバイス技術)

「スピン注入トルクを用いた超高速非線形素子の開発」

研究代表者 鈴木義茂:大阪大学大学院基礎工学研究科(物質創成専攻物性物理工学領域)教授

◇ さきがけ 2007-2012

「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」(研究総括:佐藤 勝昭 東京農工大学名誉教授)

研究テーマ「分子を介したスピン流の制御」白石誠司 大阪大学 准教授)

分子スピントロニクスの確立を目指して新機能素子の創出を行っている。材料としては CNT、C₆₀ からグラフェンにも展開している。

◇ CREST(平成 19 年度開始)

研究領域「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」(研究総括 渡辺久恒)

H21 年度採択研究課題 『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』

研究代表者 湯浅 新治:(独)産業技術総合研究所 ナノスピントロニクス研究センター センター長

金属磁性材料と機能性金属酸化物材料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、材料選択、製膜条件最適化などを通して革新的プロセスを開発し、そのデバイス実証を行う。また、このチームの中にメンバーとして大阪大学 鈴木義茂教授が CREST 電圧効果シングルスピンを研究している。

(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果

本研究課題によって、トンネル磁気抵抗効果、スピンホール効果、スピン流等に関する基礎研究および応用研究が進展して、CREST、さきがけ、NEDO 応用研究、総務省プロジェクト等が有機的に繋がり、さらに大きな社会・経済効果を生み出すデバイスの実用化が加速された。物理的限界、技術とコストの壁が迫っている電子の移動や蓄積を用いた半導体集積回路やデバイスに代わって、あるいは補足するものとしてスピndeviceは今後、大きな飛躍時期を迎える可能性が高い。既存の集積回路や情報記録媒体を徐々に置換え、新しい方式のパソコン(例えば待機電力ゼロ)の実現に繋がれば、その経済的な波及効果は計りしれない。

3.5 フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス (研

究代表者：野田 進)

(1) 研究期間中における状況

当時はフォトニック結晶の基礎理論から多様な可能性が示唆されていたが、より厳密な計算機解析ソフトを開発し、2次元および3次元のフォトニック結晶の設計を厳密に行った。その結果、光導波モードの選択的励振構造の提案と実験、光エネルギー閉じこめ構造の性能指数である Q 値の大幅改善、新しいレーザ構造の提案に繋がった。具体的には、不要モードの除去と欠陥導入による光閉じこめによる Q 値の改善が重要である。Q 値とは(共鳴周波数/半値幅)で定義されるが、この値が大きいほど共振器の構造が優れ、新しい光機能素子技術への展開が可能になる。Q 値の年代推移はおおよそ以下のようなものである。

2005 年	600,000	この年、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」(研究総括：伊澤達夫)において研究課題「フォトニック結晶を用いた究極的な光の発生技術の開発」の研究代表者となる。
2006 年	1,000,000	
2007 年	2,500,000	
2009 年	3,500,000	
2010 年	4,000,000	

研究成果が順調に得られた背景には以下のような要因がある。

- 3次元フォトニック結晶の研究に展開する前に、二次元フォトニック結晶から研究開発する戦略を採用した。
- 研究駆動力として電磁界解析計算機シミュレータ(独自開発のソフトによる)デバイス設計を行った。
- 結晶成長装置、エッチング装置、微細加工用EB描画装置など高度のプロセス技術を積極的に導入した。

(2) 研究終了後の基礎研究としての継続・発展状況

このような成果により、CREST 終了後も継続して成果が生み出され、その後の新しいCREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」(研究総括：伊澤達夫)において研究課題「フォトニック結晶を用いた究極的な光の発生技術の開発」(200年度採択)を推進している。研究内容としては、先

行した CREST(フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス)の約 80%が発展的に新 CREST に引き継がれている。新規の研究対象として、光ナノ共振器と量子ドット(電子系)との結合効果(量子アンチゼノ効果)にも範囲を広げている。

(3) 研究成果から生み出された科学技術的・社会的・経済的な効果・効用および波及効果

フォトニック結晶およびそれを核とする光デバイス研究において、基礎研究のみならず、産業展開をも目指した極めて活発な活動を展開しており、企業を巻き込んだ研究開発に発展している。フォトニック結晶は、次世代高速光通信ネットワーク用部品、高輝度 LED、ハイパワー面発光デバイス等の主要構成要素として使用される可能性が高く、これらの市場規模は極めて大きい。将来的には、3次元結晶や、超高 Q 値ナノ共振器のさらなる発展により、量子情報、通信分野や、電気を介さない光バッファメモリなど、新たな産業展開も期待される。

3.6 第3章のまとめ

第3章においては、研究成果から生み出された科学技術的、社会的および経済的な波及効果に関して、以下の5つの研究課題に焦点を当てた。

表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス	研究代表者:川原田 洋
関連エレクトロニクス	研究代表者:平山 祥郎
ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索	研究代表者:小田 俊理
固体中へのスピン注入による新機能創製	研究代表者:鈴木 義茂
フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス	研究代表者:野田 進

要約すると以下のようなものである。

◇表面吸着原子制御による極微細ダイヤモンドデバイス

高速トランジスタでは、PJ 期間中にハイパワー高周波トランジスタを開発中して、ゲート長100nm以下のトランジスタが作製され、50GHz以上で動作することを確認している。広禁制帯半導体であるダイヤモンドは、SiCやGaNと競合関係にはあるが、移動体通信の基地局や航空機用レーダー用のパワーアンプ等への応用が期待される。

バイオセンサに関しては、PJ 期間中の基礎研究を進展させ、安定したダイヤモンド表面を利用した新型のDNA、RNAチップおよびプロテイン・マイクロアレーの開発が進行中である。

また、現時点での派生的な研究としては、カーボンナノチューブの電気伝導性と安定性を利用し、ULSIやナノエレクトロニクスでの新しい配線技術への応用、高濃度のボロン(ホウ素)を導入した超伝導薄膜ダイヤモンドの研究がある。

社会的・経済的な効果・効用の視点では、C(カーボン)系のデバイスが、既存のデバイスを全面的に置き換えている状況ではないが、材料そのものが大きな可能性を秘めている。今後の波及効果はエネルギー材料、情報通信、バイオエレクトロニクス各分野で極めて大きい。

◇関連エレクトロニクス

当時、世界的に量子コンピュータや量子通信の研究は立ち上がりつつあったが、時宜を得たこの研究課題の取り組みにより、世界をリードする研究成果を次々にあげることができ、今日のスピントロニクスへの日本における地位確立に貢献している。

特に、量子ドットにおける電荷スピンの制御、および電子スピンと核スピンの相互作用の制御に焦点をあてたことで、安定した量子デバイスへの基礎を築き、現在進行中のERATO平山核スピネレクトロニクスに繋げることができた。ただし、高性能な量子コンピュータの実現にはまだ、2~3件以上の材料/デバイス構造/アルゴリズムに関する大きな発明や発見が必要である。

◇ ネオシリコン創製に向けた構造制御と機能探索

粒径数 nm のナノ結晶シリコン量子ドットを、間隔 1~2nm に制御し配列させる新材料「ネオシリコン」を提案し、研究開発を経て、多くの科学技術成果を得た。特に量子ビットメモリ、シリコン発光素子、そして NEMS に関する基礎研究が大きく進展した。これらの基礎研究がどのような形で社会的・経済的な効果・効用を将来もたらすかは、以下のようなデバイスの実用化に向けた進展に依存している。

高機能薄膜トランジスタ TFT

発光素子を組み込んだシリコン集積回路

NEMS と CMOS との融合デバイス

3 個以上の量子ドットを結合したデバイス

量子コンピュータ

次世代量子効果太陽電池

◇ 固体中へのスピン注入による新機能創製

この研究課題の中で、トンネル磁気抵抗効果、スピンホール効果、スピン流等に関する目的基礎研究および応用研究が日本において加速でき、スピントロニクス最初の流れを作ったことである。研究プロジェクトの流れから見ても、科研費特定研究、CREST、さきがけ、NEDO 応用研究、総務省プロジェクト等が有機的に繋がり、現在も日本のスピントロニクスを世界のトップレベルに維持する役割を果たした。

社会・経済効果の視点では、技術とコストの壁が迫っている電子の移動や蓄積を用いた半導体集積回路やデバイスに代わって、あるいは補足するものとしてスピンドバイスは今後、大きな飛躍時期を迎える可能性が高い。既存の集積回路や情報記録媒体を徐々に置き換え、新しい方式のパソコン(例えば待機電力ゼロ)の実現に繋がれば、その経済的な波及効果は計りしれない。

◇ フォトニック結晶による究極の光制御と新機能デバイス

2 次元および 3 次元のフォトニック結晶の設計を厳密に行い、光導波モードの選択的励振構造の提案と実験、光エネルギー閉じこめ構造の性能指数である Q 値の大幅改善、新しいレーザ構造の提案等を行った。

現時点でも、フォトニック結晶およびそれを核とする光デバイス研究において、基礎研究のみならず、産業展開をも目指した極めて活発な活動を展開しており、企業を巻き込んだ研究開発に発展している。フォトニック結晶は、次世代高速光通信ネットワーク用部品、高輝度 LED、ハイパワー面発光デバイス等の主要構成要素として使用される可能性が高く、これらの市場規模は極めて大きい。将来的には、3 次元結晶や超高 Q 値ナノ共振器のさらなる発展により、量子情報・通信分野や電気を介さない光バッファメモリなど、新たな産業展開が間近に迫っている。

まとめとして、本CREST領域は、特筆すべき上記の5つの研究課題の成果で典型的に示されるように、戦略目標「分子レベルの新機能発現を通じた技術革新」に沿って多くの科学技術的課題を解決しながら大きな産業市場を創出する駆動力を生み出しつつある。