

戦略的創造研究推進事業

－CRESTプログラム－

研究領域「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」

研究領域中間評価用資料

平成18年3月3日

## 1. 戦略目標

戦略目標：情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製（平成14年度設定）

### 1. 名称

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

### 2. 具体的な達成目標

2010年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う新たな情報処理・通信用デバイス・材料・システム開発をめざす。この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方の取組みを実施する。

また、これらデバイス・材料・システムを活用するためのインターフェースとしても有用な各種センシング技術（最先端的計測法・先端センサー素子とセンサー管理システムの開発等）による健康・環境計測法の実現を目指す。

これらの目標達成のため、革新的な物性を有する物質創成からデバイス・システム開発までの総合的な推進を目指す。

このため、2010年代に実用化・産業化を図るべく、以下のような成果等を目指す。

- ・現在の半導体よりも演算速度を2桁向上するとともに、消費電力を2桁以上低減する情報通信用デバイスの探索。
- ・革新的なナノ素材とナノプロセスの開拓、新機能・新特性を持つ超集積素子の実現及び、医療応用・障害克服などに貢献するための集積システムの生体親和性の飛躍的向上。
- ・革新機能を付与した単一分子の合成及び高度集積化法の開拓等、機能分子を望むように集積して回路を形成する技術の確立及び分子デバイスシステムへ応用
- ・ナノメモリーの原理・素材・方式の解明を通じ、現在のハードディスクの記録密度の1000倍程度の記録密度を目指す。
- ・固体量子ビット素子、超伝導系量子磁束素子、相関電子素子、相関光子素子、スピン制御素子、ナノチューブ・ナノワイヤ素子等、新原理素子の探索及び技術的な壁の打破
- ・大容量・超高速の光通信技術に必要な光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などへの革新につながるナノ構造フォトンクスや材料の開発を通じた次世代光技術の創製
- ・バイオ分子の自己組織化を利用したナノスケールの新素子、新材料の創製を通じた高集積バイオチップの開発
- ・半導体、酸化物や磁性体中の電子の持つもう1つの自由度であるスピンを電子デバイスにおける新しい自由度として積極的に活用した、新しいナノ構造を利用したスピンエレクトロニクス材料の探索・創製
- ・超分子を用いたバイオナノ超分子センサー、導電性超分子スイッチング素子、ナノマシンなどの分子デバイス、ナノ材料の開発
- ・フラーレンの集積化、ナノデバイスへの応用に不可欠なCNT超微細加工技術、コンポジット材料開発
- ・フラーレン、ナノチューブに次ぐ新たなナノ集合体材料の創製と開発を通じたクラ

- スター・ナノ粒子集合体をベースにした素子の実用化
- ・従来は全く異なる物質・材料として扱われてきた有機物質と無機物質とをナノスケールで融合させた構造を持つ全く新しい物質・材料群による素子の開発

### 3. 目標設定の背景及び社会経済上の要請

経済のグローバル化と国際競争の激化等に伴う産業競争力の低下、雇用創出力の停滞といった現下の経済社会の課題を科学技術、産業技術の革新により克服し、我が国の産業競争力を強化し、経済社会の発展の礎を着実に築くことが不可欠である。このような革新的な科学技術、産業技術の発展の鍵を握るものとして、ナノレベルで制御された物質創製、観測・評価等の技術であるナノテクノロジーが、近年急速に注目されている。

具体的には、

- ①半導体を用いた高速・高集積・低消費電力デバイス技術に関し、国際競争力を確保することに加え、
- ②全く新しい原理を用いた次世代のデバイス・材料の礎を確立することが長期的展望にたった我が国の国際的な技術競争力の確保にとり必要不可欠である。

また、これらの実用化・産業化の目標を達成するためには、ナノレベルでの計測・評価、加工、数値解析・シミュレーションなどの基盤技術開発や、革新的な物性、機能を有する新物質創製への取組みが必須である。

なお、総合科学技術会議分野別推進戦略（平成13年9月）においても、情報通信分野においては、国家的・社会的課題の克服のため、「次世代情報通信システム用ナノデバイス・材料」が5つの重点領域の1つとして位置づけられているところである。

### 4. 目標設定の科学的な裏付け

情報通信分野における我が国の技術競争力は、欧米に比べて全体的に低下傾向にある。これまで大きな役割を果たしてきた民間の研究開発については、その投資額の日米格差が急速に拡大しており、内容的にも製品開発に重点を移しつつあるため、我が国の競争力強化に向け、リスクの高い研究開発等について国の役割が一層重要となっている。

特に、次世代情報通信システム用ナノデバイス材料においては、2010年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う多様な新原理デバイス・材料・システムの構築に向け、現在、各国が世界標準の獲得競争のまっただ中にある。我が国として、次世代情報通信用デバイス開発において、世界を凌駕するための取り組みを緊急に準備することが必要であるが、この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方について産業化を見据えながら段階的な目標設定も行いつつ、戦略的に取り組むことが必要である。

ソフトウェア無線等の新規通信方式への転換につれて、通信システムの急速な高速・大容量化が今後とも予想されているが、半導体の集積化・高機能化はムーアの予測に従い、3年で4倍のペースで進んでおり、2005年には素子の最小寸法が100nmを切り、ナノデバイス時代に突入することとなる。このため、大容量、高演算速度、省エネルギー、高セキュリティーその他の画期的な機能を有する新原理デバイス・材料・システムの開発が急がれている。

具体的には、

- ・現在の延長の技術においては、高速化限界、セキュリティー問題、消費電力等の課題の克服に加え、量子効果等により現れる素子の動作や製造技術上の物理的な限界、

- 製造 コスト等の問題を回避するための革新的なナノ素材やプロセスの開発、量子ドット、量子細線、ナノチューブ等を取り込んだスイッチ素子の開発が求められる。
- ・現在使われているLSIメモリ、磁気ディスク、光ディスクの性能限界の壁をうち破るとともに、強誘電体メモリーなどの次世代メモリーの開発が求められている。
  - ・更に、現在の方式の集積回路とは全く異なる新たな原理に基づくデバイスとして、単一分子素子、各種固体Qビット素子、超伝導系新量子磁束素子、スピントロニクス等の技術開発も次世代の世界標準獲得の観点から積極的に取り組むべき重要な課題である。
  - ・加えて、このようなデバイスやシステムの開発に際しては、革新的な物性、機能を有する新物質創製が必須であり、超分子、カーボンナノチューブ、フラーレン、クラスター・ナノ粒子をはじめとした積極的开发が必要である。

## 5. 重点研究期間

ナノテクノロジー分野については、競争が激しく多くの研究領域を推進する必要があるため初年度のための公募とし、次年度以降には新たに同じ研究領域での公募は行わない。1研究課題は概ね5年の研究を実施する。(なお、優れた研究成果を上げている研究課題については、厳正な評価を実施した上で、研究期間の延長を可能とする。)

## 2. 研究領域

「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」

(平成13年度発足)

### 領域の概要

この研究領域は、量子系の新しい物理現象や動作原理、および、それを用いて新しいデバイス・システム等を実現するための研究を対象としている。

具体的には、ナノスケールにおいてはじめて現われる電子系やスピン系の物理的特性を応用して演算、記憶等のアクティブな情報処理機能をもつ新しいデバイスの実現、ナノスケールの局所的特性を対象として電気、機械、光等の物理的手法や動作原理を用いてセンシング、操作、制御等を行うデバイスや新たな情報処理システムの創製を目指す研究等が含まれる。また、既存技術の限界を打破する新しい技術領域の創出に発展する新しい物理現象の発現のためのナノデバイスに係わる構造研究、現在まだ対象とするものの性質の研究にとどまっている現象をデバイスに結びつける研究等も含まれる。

## 3. 研究総括

梶村皓二 (機械振興協会 副会長 技術研究所長)

#### 4. 採択課題・研究費

(百万円)

| 採択年度        | 研究代表者  | 所 属・役 職                                  | 研 究 課 題                               | 研究費   |
|-------------|--------|------------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| 平成<br>13 年度 | 猪俣 浩一郎 | 東北大学 工学研究科 教授                            | スピン量子ドットメモリ創製のための要素技術開発               | 584   |
|             | 岩佐 義宏  | 東北大学 金属材料研究所<br>教授                       | ナノクラスターの配列・配向制御による新しいデバイス<br>と量子状態の創出 | 436   |
|             | 大串 秀世  | 産業技術総合研究所 ダイヤ<br>モンド研究センター 招聘研<br>究員     | 高密度励起子状態を利用したダイヤモンド紫外線ナノデ<br>バイスの開発   | 463   |
|             | 河田 聡   | 大阪大学 工学研究科 教授                            | 非線形ナノフォトニクス                           | 506   |
|             | 小森 和弘  | 産業技術総合研究所 グルー<br>プリーダー                   | 光量子位相制御・演算技術                          | 478   |
|             | 三澤 弘明  | 北海道大学 電子科学研究所<br>教授                      | 量子相関光子ビームナノ加工                         | 577   |
| 平成<br>14 年度 | 石原 一   | 大阪府立大学 工学研究科<br>教授                       | 光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製               | 435   |
|             | 板谷 謹悟  | 東北大学 工学研究科 教授                            | 固液界面反応のアトムプロセスの解明とその応用                | 374   |
|             | 高柳 英明  | NTT 物性科学基礎研究所<br>所長                      | 超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現                 | 224   |
|             | 松本 和彦  | 大阪大学 産業科学研究所<br>教授                       | カーボンナチューブ単一電子・スピン計測システムの確立            | 492   |
| 平成<br>15 年度 | 赤穂 博司  | 産業技術総合研究所 強相関<br>電子技術研究センター 副研<br>究センター長 | 強相関界面エンジニアリングによるスピントンネル機能<br>の巨大化     | 296   |
|             |        |                                          | 5 総 研 究 費                             | 4,865 |

## 5. 研究総括のねらい

当該研究領域は平成13年度、CRESTのナノテクノロジー2領域のひとつである物理系として設定された。公募に当たって、領域運営の意図を先述の「領域の概要」として示した。

この領域の研究の向かう先は4重点分野（ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料）のいずれにもあるとの認識に立って、特に初年度の募集では、単に物理現象のみではなく化学、生物現象をあわせ利用することも含め、既存の領域を越えた融合的な提案で、ブレークスルーをもたらす研究も含めた。優れた提案を進めていく過程で、他分野にしみ出したものを促進することも、当該領域の存在意義と考えた。

## 6. 選考方針

- (1) 物理系全般にわたるスペクトル（一部化学系、生物系との境界・融合領域を含む）の応募に対応するため、後述するアドバイザーボードを構成して選考に当たった。
- (2) 書類選考では、一課題を3名が査読判断した。総合的にナノテクノロジーを牽引する期待のある群と、リスクは高いが成功すれば強いインパクトを持つ群に分けて検討した。CRESTの予算規模を考慮して、選考課題数を年度ごとに5課題を目安とした。最終的には前群と後群を合わせて総合的に議論した。
- (3) 研究代表者との議論を深め、研究の進展に応じて、デバイス化への道筋の議論の機会を増やせるよう、JST、アドバイザーと協議の上、採択課題を適正な数に絞りこんだ。その結果、平成13年度6課題、平成14年度4課題、平成15年度1課題（15年度の1課題はナノテクノロジー分野別バーチャルラボ10領域の合同審査で選び、当領域に組み込んだ）の11課題を採択した。
- (4) 民間企業からの提案を期待していたが、応募件数も極端に少なく、採択が叶わなかったことは心残りである。しかしいくつかの課題の中に重要な役割を果たしている企業のグループがあり、産学連携の一形態として望ましい方向に進むことを支援したい。

## 7. 領域アドバイザー

| 領域アドバイザー | 所 属                                 | 役 職                  | 任 期      |
|----------|-------------------------------------|----------------------|----------|
| 青野 正和    | 物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所                 | 所長                   | 平成13年9月～ |
| 板生 清     | 東京理科大学専門職大学院<br>総合科学技術経営研究科         | 教授<br>研究科長           | 平成13年9月～ |
| 片山 良史    | 筑波大学産学リエゾン共同研究センター                  | シニアコー<br>ディネーター      | 平成15年9月～ |
| 川辺 光央    | 物質・材料研究機構ナノマテリアル研究所                 | 特別研究員                | 平成14年9月～ |
| 榊 裕之     | 東京大学生産技術研究所                         | 教授                   | 平成13年9月～ |
| 早川 尚夫    | (財)国際超伝導産業技術研究センター超電導工学研究所<br>名古屋大学 | グループリー<br>ダー<br>名誉教授 | 平成13年9月～ |
| 堀池 靖浩    | 物質・材料研究機構 ナノマテリアル研究所                | フェロー                 | 平成13年9月～ |
| 前川 禎通    | 東北大学 金属材料研究所                        | 教授                   | 平成14年9月～ |
| 横山 直樹    | (株)富士通研究所ナノテクノロジー研究センター             | センター長                | 平成13年9月～ |

大学、国研、産業界で今日のナノテクノロジーの礎を築いてきた研究者で、深耕経験、先見性、総合判断力を持ったアドバイザーの助言をもらうこととした。システムについての課

題採択は想定していなかったが、システム化も視野に入れた課題への取り組みに有益な助言を期待して造詣の深い研究者にも参画してもらった。採択課題決定後、的確なアドバイスを全課題に対して充実させるべく陣容を増強した。上表のうち榊裕之氏と板生清氏は後に CREST の研究総括に就き、青野正和氏と前川禎通氏は研究代表者となったが、日本のナノテクノロジーを強化するために引き続いて領域運営に協力していただいている。

## 8. 研究領域の運営

### 運営の基本方針

- (1) ナノテクノロジーへの期待から出口論だけに傾斜し過ぎないようにする。研究代表者の構想実現に向け、組まれたチームの目的志向型の研究成果が戦略目標に資するよう、研究総括が適切に運営することを基本とするという CREST の基本精神を遵守する。
- (2) 将来新しいロードマップを生み出せる実用デバイス群につないでいくためにナノサイエンスの理解を深める。
- (3) 社会の要請を先取りし、次世代を切り開く研究リーダーの視野拡大の道場とする。

### 具体方策

- (1) それぞれの研究開始時点で、研究代表者の拠点を訪問し運営の方針を個別にも伝えた。その際、領域のアクティビティが見えるようにするために「これまでも増して機会を捉えて PR を」とのお願いもした。その一環として領域事務所のホームページを領域活動開始間もなく開設するとともに各研究代表者のホームページ開設も依頼した。
- (2) 当該領域は総勢 330 名近いプロジェクト集団であり、かつバーチャルラボであることから、全員の意思疎通は容易ではない。CREST の基本は誰が研究し、誰が総括するかといった属人的なものであるとの認識のもと、機会を捉えて研究代表者と議論することに加えて、拠点でのチーム研究会やグループ研究会にも極力参加している。
- (3) 研究の方向性は代表者と議論を尽くした上で、代表者の挑戦意欲と嗅覚に任せている。しかし大きく方向性を変えざるを得ない状況に立ち至った場合は臨時のアドバイザリーボードを開催して結論を出した。
- (4) 予算配分は研究計画を精査し結論の前に研究代表者納得の上で決定している。これとは別に総括プールを設け、研究の進展を見て研究加速にあてるべく追加配賦した。予算が逼迫してプールが取れない年度や、緊急配賦が有効と判断した場合は本部の協力を得て手当てしている。
- (5) 研究予算に恵まれ、研究パワーが拡大することで成果も出るが、展開も拡大、分散する傾向も出る。課題ごとに研究の進捗と時期を見ながら、絞り込みを要請し、研究代表者が納得した修正計画に沿って推進している。
- (6) 実用デバイスを 5 年の期間内に作り上げるプロジェクトは、必ずしも CREST に合致するとは考えない。しかし、特許と無縁の研究者も多かったが、啓蒙によりマインドも高くなってきている。今後も発明の明細書作成のレベルアップは課題であり、まだ研修など多くの支援が必要である。
- (7) 領域運営の考え方を理解してもらうと共に、相互啓発の場として研究者交流会（通称 梶村塾）を定期的に領域事務所で開いている。これまで延べ 40 人を超える研究者が参加した。運営の考え方をすべての領域研究者とじかに討論するのは困難であることから、第一回領域シンポジウムの概要集巻末に激励、要望、警告を含む「梶村語録」をつけ、領域運営に資するよう心がけた。

## 9. 研究の経過

### 研究領域全体としての特筆すべき研究成果

- (1) 新たな分野を拓く  
非線形ナノフォトンクス分野：近接場コヒーレントアンチストークスラマン顕微鏡による分子イメージング（河田チーム）
- (2) 技術限界の突破（研究の流れを創る）

MR AM大容量化基盤技術（スピン注入磁化反転低電力化、フルホイスラー合金によるトンネル磁気抵抗効果の増強など）（猪俣チーム）

（3）挑戦的長期テーマのマイルストーン

- （a）紫外域量子もつれ光子対を半導体で生成（石原チーム）
- （b）超伝導磁束量子ビットでの真空ラビ振動観測（高柳チーム）
- （c）励起子結合の光制御での多ビット化実証（小森チーム）
- （d）高効率もつれ合い多光子ビーム発生確認（三澤チーム）

（4）カーボンナノチューブデバイス応用の基盤技術

- （a）カーボンナノチューブデバイス作成制御技術（ $n$ 型半導体、カイラリティー制御、ヒステリシスフリーなど）（松本チーム）
- （b）材料機能拡大（有機内包伝導タイプ制御、ハイドレード化など）（岩佐チーム）

（5）基礎科学へのインパクト

- （a）超高品質ダイヤモンド薄膜における高密度励起子状態の理解（高温でのボーズ・アインシュタイン凝縮発見の期待）（大串チーム）
- （b）アイスナノチューブの発見（岩佐チーム）
- （c）スピントンネル機能の巨大化のための界面観察技術（赤穂チーム）
- （d）固液界面をデバイス構築の場として捉らえるための動的解析手法（板谷チーム）

研究成果の科学技術・国民生活・社会経済等に対する効果への展望

当該研究領域が目指す、情報処理・通信における集積・機能限界の克服のためのナノデバイス・材料・システムの創製に向けて生み出されていく基礎研究成果が産業界に技術移転される期待は高い。しかしながら現実に商品、サービス、社会インフラを通じて国民生活をより望ましい満足度に高め、生み出される税金が更なる科学技術研究の後押しをするといった理想循環パスに、限られた期間、限られた財政支援のプロジェクト成果を結び付けて語るのは、リスクも大きい。中間段階ではあるが、上記（1）～（5）に挙げた代表的な成果は、即効性は無くとも必ず社会に還元されていく重要な成果を含んでいると判断している。さらにこの期間内にプロジェクトに参画した若手人材の中から次代を担う力を蓄える機会として捉えている研究者も少なくないことは心強い。

今後の期待や展望、懸案事項

- （1）河田チームは近接場コヒーレントアンチストークスラマン顕微鏡を開発し 15 nm の空間分解能で DNA や単層カーボンナノチューブの分子イメージングに成功し、1 nm を切る空間分解能達成を目指し更に研究が進んでいる。また松本チームはカーボンナノチューブ電界効果トランジスタの電気的検出により 1 fmol/l といった最高感度で、DNA のハイブリダイゼーションを観察している。このチームの単一電子計測プローブは、通常の電界効果トランジスタの 100 倍を超える感度達成が見込まれている。これらの研究進展によっては、細胞や DNA、たんぱく質でこれまで見ることはできなかった世界を見ることが現実になる期待がある。
- （2）当該領域で推進しているナノデバイス・システムの向かう先は主として情報処理・通信にある。しかし、物理の理解をベースにしたナノテクノロジーが、バイオ分野を下支えする意義も大きいと見ている。CREST の制度、特にナノテクノロジー分野別バーチャルラボの考え方に照らした時、提案された研究代表者の思いを尊重し、化学やバイオ分野にインパクトを与える期待のある研究に対しても積極的な支援を継続していきたいと考えている。
- （3）社会還元への舵取りが極端になることを恐れる反面、JST 内の基礎的研究発展推進事業（SORST）が今年度で終息するのは残念なことである。限られた資源を活かして、時代の要請に沿いつつ成果を極大化する視点から、JST の新しい経営がなされていくことを期待している。



## 10. 総合所見

### 現時点での研究領域としての成果

- (1) 領域設定に当たってデザインした方向で着実に運営され、領域全体としては成果があがっていると判断している。これまでの代表的な研究成果は、「9. 研究の経過」で述べたように、基礎科学への大きなインパクトが期待されるものから近い将来産業界に展開されることが十分期待されるものまで、中間評価の段階であるがバラエティーに富んだ優れた成果であると考えている。
- (2) 外部に発信された成果は、量の面でチーム間のばらつきはあるが、特許出願、新聞発表、解説記事や総説等には無縁であったチーム、消極的であったチームも、「これまでもましていろんな機会を捉えてPRを」とお願いした方向で努力した成果が数字になって現れているものと考えている。プロジェクト期間内の成果としても評価しているが、マインドが醸成されたことでの持続的貢献も期待できる。
- (3) 中間評価では、戦略目標に照らしたゴールの設定について徹底的に議論した。具体的に研究代表と研究総括とが共有化したゴールの成果が、将来社会に対してメッセージ性のあるものとなるよう研究総括としてアドバイザーから意見をもらいながら、後半、責任を持って進めていけるとの確信を得た。

### 本研究領域が存在したことによるメリット、基礎研究に対する功績、問題点等

- (1) 当該研究領域はナノテクノロジー分野別バーチャルラボ10領域発足の1年前にスタートした。ナノテクノロジーとは何かが必ずしもクリアでない状況で、多くの研究者が本領域に応募した。90件近い応募の中には、基礎研究の課題として優れたものも少なくなかったが、領域のスコープを理解していないと思われる提案も含まれていた。選考過程での評価や議論、応募者へのフィードバック等により、ナノテクノロジーの理解が進んだ。そのことはナノテクノロジー・材料を重点分野として推進するという国の決定が、JSTにおいてナノテクノロジー分野別バーチャルラボの形で展開されていく上で意義があったと考える。
- (2) バーチャルラボの1領域として広いスペクトルがその後も維持されたことで、本領域を設定したために採択された融合テーマもある。また物理系のナノテクノロジーのあり方について、研究推進の過程で実践を通じての具体的な議論が深まり、理解が増進したこともメリットである。この議論は基礎研究の社会への還元につながる実戦的な議論として次代を拓く研究リーダーにとっては意味あることと思っている。本領域での活動を通して知財に関するマインドを持った研究者が増えてきていることも、社会が期待する基礎研究のパワーアップにつながると考えている。
- (3) ナノデバイスや、既存のデバイス原理をナノテクノロジーにより飛躍させることを狙った基礎研究において、要素研究成果の組み合わせで可能性を議論している段階から一歩実証の世界に踏み込む努力は今後も継続し、産業界とのギャップを狭める面で貢献していきたい。

### 研究領域単位で研究を遂行することの意義

当該領域は、発足の経緯もあって物理系のナノテクノロジーの一領域としてはJSTのナノテクノロジー分野別バーチャルラボのミニ版の課題集合体として融合展開も視野に入れて運営している。バラエティーのある課題構成は、チーム構成にも現れている。そのことが領域の特徴でもあると認識している。

領域内のコラボレーションとして行った光技術をベースにした国際会議を開催したが、これに参加した領域外の研究者を後にチームに迎え、チーム力強化を図った例や、早期に理論グループを強化した例、研究の進展の過程でバイオ系の民間企業の参画で展開が広がるなどのチーム型研究推進上の成功事例が積みあがっている。将来、社会に還元される技術シーズを生み出すことを狙うには、先駆的な基盤技術、それを保護する知的財産確保、継続的に国際競争力を高めていける研究人材の育成、輩出といった総合的な研究成果が求められる。研究を進める過程で、柔軟なチーム強化が進められるのは研究領域単位で研究が遂行される重

要な意義であろう。

#### 感想

- (1) 現実の研究所であれば、取れた運営上の判断や措置がバーチャルラボゆえ通用しないといった限界はある。その条件を受け入れた上で、研究のフリーダムを侵さない範囲で、時に厳しい議論をしながらも、基本的には研究者をエンカレッジする運営に携わっていることは喜びである。残された期間も当該領域とナノテクノロジー分野別バーチャルラボの存在意義を持たせる運営に尽力したい。
- (2) 現時点で JST が担っているナノテクノロジーの基礎研究は強力である。領域横断のワークショップのひとつに DNA 対象のワークショップがある。そこに参加して感じるのは、研究協力や共同研究はあっても、本質的な融合には大きなエネルギーが要ることである。日本の研究者が経験不足の融合研究課題は、ナノテクノロジーによって新しい産業分野を生み出す上で厳しい国際競争にさらされる。ナノテクノロジーに期待する経済効果に対して様々な予測が発表されているが、それらを現実に近い上でもナノテク融合は本質に迫るものでなければならない。日本でもっともこの分野の基礎研究を推進するにふさわしい、知的資産と運営ノウハウを蓄積しつつあるのはナノテクノロジー分野別バーチャルラボであろう。その継続進化が特に望まれる。
- (3) JST は、独立行政法人化、推進体制の変更（CREST タイプは研究事務所を持たないなど）などにより変貌しつつある。研究拠点として最大の基礎研究パワーを抱える大学も改革の途上にある。流動しているもの同士の整合を取るの簡単ではないが、中長期的な視点を合わせて基礎研究の国際競争力強化に取り組み続けてほしい。

領域評価用資料 添付資料 (CREST タイプ)

研究領域「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」

## 1. 応募件数・採択件数

| 採択年度   | 応募件数 | 採択件数 |
|--------|------|------|
| 平成13年度 | 87   | 6    |
| 平成14年度 | 30   | 4    |
| 平成15年度 | 8    | 1    |
| 平成16年度 | 25※  | 0    |
| 採択数 計  |      | 11   |

※ 平成16年度は戦略目標（3目標）毎に公募し、ナノテク分野別バーチャルラボ9領域全体で選考した。

## 2. 主要業績

### 2-1：外部発表

#### 平成13年度採択課題

| 研究代表者  | 国内論文 | 海外論文 | 国内学会 | 国際会議 | その他 | 特許 (JST) | 特許 (所属機関) | PCT 出願 |
|--------|------|------|------|------|-----|----------|-----------|--------|
| 猪俣 浩一郎 | 12   | 96   | 144  | 137  | 26  | 12       | 4         | 5      |
| 岩佐 義宏  | 0    | 132  | 321  | 81   | 41  | 5        | 7         | 1      |
| 大串 秀世  | 10   | 81   | 151  | 104  | 11  | 3        | 2         | 0      |
| 河田 聡   | 0    | 56   | 214  | 154  | 54  | 1        | 0         | 1      |
| 小森 和弘  | 2    | 35   | 45   | 50   | 0   | 4        | 2         | 1      |
| 三澤 弘明  | 0    | 57   | 99   | 25   | 36  | 6        | 17        | 3      |

#### 平成14年度採択課題

|       |   |    |     |     |    |    |   |   |
|-------|---|----|-----|-----|----|----|---|---|
| 石原 一  | 0 | 44 | 100 | 87  | 22 | 5  | 0 | 4 |
| 板谷 謹悟 | 6 | 62 | 156 | 102 | 5  | 1  | 0 | 0 |
| 高柳 英明 | 0 | 35 | 63  | 50  | 27 | 2  | 2 | 0 |
| 松本 和彦 | 3 | 29 | 59  | 66  | 22 | 12 | 1 | 6 |

#### 平成15年度採択課題

|       |   |   |    |    |   |   |   |   |
|-------|---|---|----|----|---|---|---|---|
| 赤穂 博司 | 0 | 8 | 31 | 12 | 4 | 0 | 4 | 0 |
|-------|---|---|----|----|---|---|---|---|

#### 領域合計

|  |    |     |      |     |     |    |    |    |
|--|----|-----|------|-----|-----|----|----|----|
|  | 33 | 635 | 1383 | 868 | 258 | 51 | 39 | 21 |
|--|----|-----|------|-----|-----|----|----|----|

(平成17年11月末現在)

### 2-2：代表論文概要

#### 猪俣チーム

1. Y. Jiang, T. Nozaki, S. Abe, T. Ochiai, A. Hirohata, N. Tezuka and K. Inomata,

“*Substantial reduction of critical current for magnetization switching in an exchange-biased spin-valve*”, Nature Materials, **3** (2004) 361-363.

**概要：**ハードディスク用磁気ヘッドや、MRAMメモリの要素として期待されるスピンバルブ型 CPP-GMR (current perpendicular to the plane-giant magnetoresistance) 素子のスピン注入磁化反転に関するものである。スピン注入磁化反転法は磁性素子の大きさが小さくなるほど小さな電流で磁化反転でき、MRAM の大容量化には欠かせない技術である。しかし従来、電流密度が  $10^7$  A/cm<sup>2</sup> 以上と大きく、強磁性トンネル接合に適用するためにはその低減が必要であった。本論文は  $2 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> の電流密度を達成し、MRAM の大容量化に道筋をつけたことで高く評価されている。また、本課題のテラビット級スピンメモリ開発にも重要な成果である。

2. T. Nozaki, Y. Jiang, H. Sukegawa, Y. Kaneko, A. Hirohata, N. Tezuka S. Sugimoto and K. Inomata, “*Spin-dependent quantum oscillation in magnetic tunnel junctions with Ru quantum well*”, Phys. Rev. B **70** (2004) 172401/1-4.

**概要：**MgO(110)基板上に Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub>/Ru/AlO<sub>x</sub>/Co<sub>90</sub>Fe<sub>10</sub> からなる強磁性トンネル接合素子を作製し、Ru 非磁性金属中に多数スピン (↑) 電子のみの量子井戸を形成させることに成功した。これによって TMR (tunneling magnetoresistance) のバイアス電圧および Ru 膜厚による振動現象を室温で観測した。これは本プロジェクトの目標とするスピン共鳴トン

ネル効果素子の開発に繋がる成果である。この技術をベースに強磁性層内にスピン偏極した量子井戸を形成させる技術開発を現在展開中である。

3. K. Yakushiji, F. Ernult, H. Imamura, K. Yamane, S. Mitani, K. Takanashi, S. Takahashi, S. Maekawa and H. Fujimori, “*Enhanced spin accumulation and novel magnetotransport in nanoparticles*”, Nature Materials, **4** (2005) 57-61,

概要： 極薄の Co 系ナノグラニューラ薄膜の上下を電極ではさんだ微小 CPP (current perpendicular to the plane) 素子を作製し、Co ナノ粒子におけるスピン蓄積効果が磁気伝導現象に与える影響について調べた。4.2 K において、TMR (tunneling magnetoresistance) のバイアス電圧依存性が符号反転を伴って振動現象を示すことを見出した。理論計算と比較した結果、Co ナノ粒子中でのスピン蓄積が TMR の符号反転現象に重要な役割を果たしていることがわかった。また、Co ナノ粒子中での伝導電子のスピン緩和時間が 100 ns 程度と見積もられ、バルク (10 ps 程度) に比べて著しく増大していることを発見した。これは、ナノ粒子のスピンエレクトロニクス素子としての応用に道を開く、重要な成果と言える。

#### 岩佐チーム

1. Y. Maniwa, H. Kataura, M. Abe, A. Ueda, S. Suzuki, Y. Achiba, H. Kira, K. Matsuda, H. Kadowaki, and Y. Okabe, “*Ordered water inside carbon nanotubes: formation of pentagonal to octagonal ice-nanotubes*”, Chem. Phys. Lett. **401** (2005) 534-538.

概要：カーボンナノチューブに水分子が内包されアイスチューブ構造を作るという、2003 年の発見に引き続き、ナノチューブ直径を変化させると、水分子が 5 員環チューブから 8 員環チューブまで系統的に変化することを発見した。特に、5 員環アイスチューブは室温常圧で始めて実現した氷であり、ナノ空間に閉じ込められた水分子の振る舞いを明らかにすることによって基礎物理化学分野に多大なインパクトを与えた。

2. S. Kobayashi, T. Nishikawa, T. Takenobu, S. Mori, T. Shimoda, T. Mitani, H. Shimotani, N. Yoshimoto, S. Ogawa and Y. Iwasa, “*Control of carrier density by self-assembled monolayers in organic field-effect transistors*”, Nature Materials **4** (2004) 337-341.

概要：有機トランジスタの研究において、従来、易動度の上昇のみが注目されてきたが、将来の実用にとっては制御すべきデバイスパラメータがいくつかある。本研究では、有機半導体とゲート絶縁膜に極性を有する分子を精密に配向させた自己組織化単分子膜を挿入することによって、キャリア数については閾値 ( $V_{th}$ ) と呼ばれるデバイスパラメータを制御する手法を提案した。有機トランジスタにおいて、易動度以外のデバイスパラメータを積極的に化学的に制御する方法を示した最初の論文として、当該分野に重要な貢献をした。

3. T. Takenobu, T. Takano, M. Shiraishi, Y. Murakami, M. Ata, H. Kataura, Y. Achiba and Y. Iwasa, “*Stable and controlled amphoteric doping by encapsulation of organic molecules inside carbon nanotubes*”, Nature Materials **2** (2003) 683-688.

概要：カーボンナノチューブの中に物質を挿入し、機能性を探索する研究が世界各国ですすめられているが、本研究ではナノチューブの中に有機分子を挿入することにはじめて成功し、内包された有機分子とナノチューブ間の電荷移動が起こることを見出した。この手法は、ナノチューブへの、空気中でも安定なキャリアドーピング法としてユニークな手法を提供するとともに、ナノチューブの誘導体の開発研究にも新しい視点を提供した。

#### 大串チーム

1. Hideyo Okushi, Hideyuki Watanabe and Shokichi Kanno “*Characteristics of Excitonic Emission in Diamond*”, Phys. Stat. Sol. (a), **202** (2005) 2051.

**概要：**ダイヤモンドにおける高密度の励起子による発光特性についての理論的考察とカソードルミネッセンスによる実験的研究の報告である。ダイヤモンドにおける励起子発光のスペクトル形状を間接遷移型半導体の特徴であるフォノンを介在する場合の一般的扱いから理論的に導くとともに、その理論に基づいて、カソードルミネッセンス法で得られた高品質ダイヤモンド薄膜からの励起子発光スペクトルを解析した。この結果から、当チームで合成した高品質ダイヤモンド薄膜を用いることにより、 $10^{18}/\text{cm}^3$ 以上の高密度な励起子状態を室温でも実現することが可能であることを明らかにした。更にこのことから、ダイヤモンドはボーズ粒子の1つである励起子に期待されるボーズ・アインシュタイン凝縮を観測できる材料であることを明らかにした。

2. Hiromitsu Kato, Satoshi Yamasaki and Hideyo Okushi, “*n-type doping of (001)-oriented single-crystalline diamond by phosphorus*” Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 222111.

**概要：**従来困難とされていた、ダイヤモンド単結晶薄膜の(001)面へのP(磷)原子による *n* 型ドーピングを行い、(001)面での *n* 型の制御に成功し、(001)面での *n* 型ダイヤモンド合成が可能であることを世界に先駆けて明らかにした。ダイヤモンドの *n* 型ドーピングはP(磷)原子を用いて(111)面で成功しているが、(111)面は結晶面として硬度が高く研磨が困難で、へき開面以外では原子レベルの平坦性が期待できず、機械研磨による平坦化や微細加工、エッチングが容易な(001)面での *n* 型ドーピングが要望されていた。本研究はこの要望を満たす成果である。

3. Toshiharu Makino, Hiromitsu Kato, Masahiko Ogura, Hideyuki Watanabe Sung-Gi Ri, Satoshi Yamasaki and Hideyo Okushi, “*Strong Excitonic Emission from (001)-oriented Diamond p-n Junction*”, Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L1190. (JJAP Express Letter)

**概要：**ダイヤモンド単結晶(001)面を用いた *p-n* 接合を作製しこの接合から 235 nm の励起子発光による強い紫外線を観測することに世界に先駆けて成功し、ダイヤモンド (001)面を用いた *p-n* 接合の有効性を明らかにした。将来のダイヤモンド電子デバイスの1つである紫外線発光素子への応用を考えると実用化にとって重要な(001)面を用いた *p-n* 接合の試作の成功と発光素子動作確認の成功はダイヤモンドの電子デバイス実用化へ大きく近づくものとして期待できる。

#### 河田チーム

1. Taro Ichimura, Norihiko Hayazawa, Mamoru Hashimoto, Yasushi Inouye and Satoshi Kawata, “*Tip-Enhanced Coherent Anti-Stokes Raman Scattering for Vibrational Nanoimaging*”, Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 220801/1-4.

**概要：**ナノスケールの空間分解能で分子の光学像を取得できる近接場コヒーレントアンテナーストックスラマン散乱(CARS)顕微鏡を世界で初めて提案し、実際に、DNA分子を構成する一要素のアデニンに特有な分子振動[五員環伸縮振動モード( $1337\text{ cm}^{-1}$ )]を可視化することに成功した。とくに、DNAナノネットワーク構造のイメージングにおいて、15 nmもの空間分解能を達成した。

本論文で提案した近接場CARS顕微鏡は、従来のプローブ顕微鏡がモノクロのイメージングであったのに対して、カラーイメージを取得できるものである。しかも、蛍光観察のような染色処理も不要であり、分子本来の“色”を分析できる。本方法はDNA分子だけでなく、あらゆる分子材料や半導体材料の分析に応用可能であり、極めて有効なナノ材料分析ツールとなることが期待される。

2. Hiroyuki Watanabe, Yasuhiro Ishida, Norihiko Hayazawa, Yasushi Inouye and Satoshi Kawata, “*Tip-enhanced near-field Raman analysis of tip-pressurized adenine molecule*”, Phys. Rev. B **69** (2004) 155418/1-11.

**概要：**銀をコートした原子間力顕微鏡(AFM)ナノプローブを用い、その先端における局所電場増強効果によりアデニンのナノ微結晶のラマン散乱を局所増強し、近接場ラマンスペ

クトルを取得した。銀チップによるラマン増強度はおよそ2700倍であった。また、試料を1次元に走査しながらスペクトルを取得した結果、約30 nmの空間分解能でのスペクトルマッピングを実現した。得られたアデニンの近接場ラマンスペクトルでは、おもに8つのバンドに増強が見られた。密度汎関数法(DFT)によりアデニン分子の振動解析を行った結果、各ラマンピークをそれぞれ固有の振動モードに帰属することができた。チップ増強ラマンスペクトルにおいて、幾つかのバンドが、通常の銀コロイド粒子を用いた表面増強ラマン散乱(SERS)で観測される振動数に比べて、最大で $20\text{ cm}^{-1}$ 程度もシフトする現象が観測された。この現象の原因を明らかにするために、銀とアデニンの4種類の複合体について、銀-アデニン間の結合長をオングストロームオーダーで平衡位置から変化させた状態を、それぞれDFTにより振動解析した。その結果、結合長をおよそ $0.5\text{ \AA}$ 短くした状態の振動数が、観測された振動数と一致した。このことから、振動数シフトが、AFM制御されたチップから分子に印加される一軸性応力による銀-アデニン複合体の形状変化によるものであることを初めて見出した。

### 3. Takayuki Okamoto, Fekhra H'Dhili, and Satoshi Kawata, "*Towards plasmonic bandgap laser*", Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 3968-3970.

**概要：**プラズモニック結晶におけるバンドギャップ端でのエネルギーの閉じ込め効果のレーザー発振への応用可能性を検討した。銀表面に六方格子状の凹凸を作成し、その表面に色素を堆積した素子を作成した。その素子からの蛍光スペクトルを観測し、表面プラズモンの効果による蛍光増強を確認した。とくに、色素としてメチル・レッドを用いたときにはその増強度は150倍にも達することがわかった。このような大きな増強度はこれまで観測されていなかったものである。また、表面プラズモンの増幅によるレーザー発振の提案自体これまでに例がなく、この提案が世界で初めてのものである。

表面プラズモンは光の波長と比べて、非常に小さい領域にエネルギーを閉じ込めることができ、それを利用して導波路などが提案されている。しかしながら、欠点はその吸収が大きいことである。表面プラズモンの増幅を行うことができれば、この欠点の克服が可能になり、応用範囲拡大が期待される。

### 小森チーム

#### 1. N. Tsurumachi, K. Komori, and T. Hattori, "*Coherent control of inhomogeneously broadened system by area-regulated pulse sequence*", Appl. Phys. Lett. **48** (2004) 2235-2237.

**概要：**半導体量子ナノ構造物質の超高速光学素子への応用を考えた場合、応答時間は励起子のエネルギー緩和時間で制限される。超高速応答を実現するためには単一量子ドットのように均一広がりのある系において、位相ロックパルス対によるコヒーレント制御が必要とされてきた。本論文では、位相だけでなくパルス面積も考慮した光パルス列を用いた新しいコヒーレント制御法を提案し、数値シミュレーションにより、これまで困難とされてきた量子ドット集合体のような不均一広がりのある系に対しても励起子数制御が可能であることを見出した。量子ドット集合体はデバイス化に優位であり、この手法はエネルギー緩和時間に制限されない超高速光デバイスへの応用が期待される。

#### 2. S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima, T. Sugaya and T. Takagahara, "*Observation of Interdot Correlation in Single Pair of Electromagnetically Coupled Quantum Dots*", Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 182103/1- 3.

**概要：**2つの量子ドットを用いた量子論理ゲートを実現する為には量子ドット間に相関を起こさせる事が必須である。そこで、トンネリングによるキャリア移動を抑制させた単一結合量子ドット構造を作製し、キャリア移動が起こらない条件下での量子ドット間相関の観測を試みた。2波長励起分光法による観測によって、各々の量子ドットに閉じ込められたキャリア間に顕著な発光相関関係がある事が明らかになった。この結果は、キャリア移

動の無い電磁気学的結合量子ドットにおけるドット間相関の初めての観測例であり、スケーラビリティの面から発展性が期待される。

3. K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohash and T. Sugaya, “*Observation of Exciton Molecule Consisting of Two Different Excitons in Coupled Quantum Dots*”, Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 253110/1-3.

概要：励起子を用いた量子ゲートとして、世界で初めて多ビット化が可能な 2 qubit 量子ゲート素子構造の開発に成功した。励起子を用いた量子ゲート素子 (2 ビット素子) では、単一ドット中の 2 つの励起子を用いた素子構造と演算動作実証がミシガン大学から報告されたが、多ビット化できない構造での原理実証にとどまっていた、多ビット化可能な素子構造の開発が望まれていた。本論文では、自己形成法によって層厚方向に結合させた結合量子ドット中の 2 つの励起子状態を利用した多ビット化可能な励起子・量子ゲート素子を提案し、実際に、2 qubit 量子ゲートとしての必要条件を満たす 2 ビット状態の観測に初めて成功し、多ビット化可能な素子構造として利用可能であることを明らかにした。

### 三澤チーム

1. V. Jarutis, S. Juodkakis, V. Mizeikis, K. Sasaki and H. Misawa, “*Ultrabright femtosecond source of biphotons based on a spatial mode inverter*”, Opt. Lett. **30** (2005) 317-319.

概要：従来の量子相関光子ビーム源は、量子情報処理、量子通信、量子暗号などへの利用を目指して開発されているため、加工に必要不可欠な大きな光量を有する光源は全く存在しなかった。本研究においては、空間モードインバータと呼ばれる独創的な光学系を開発し、極めて大きな光量の量子相関光子を発生させることにはじめて成功した。この研究成果は、「量子相関光子対による分子系の 2 光子吸収の誘起」へ向けて大きく前進したことになる。

2. K. K. Seet, V. Mizeikis, S. Matsuo, S. Juodkakis and H. Misawa, “*Three-Dimensional Spiral-Architecture Photonic Crystals Obtained By Direct Laser Writing*”, Adv. Mater. **17** (2005) 541-545.

概要：微弱な量子相関光子対を用いて分子系の 2 光子吸収を誘起しナノ加工を行うためには、光子対と分子系を強く結合させる光反応場が必要となる。3 次元スパイラル構造を有するフォトニック結晶は、極めて強く光を閉じ込めることが可能であり、上記光反応場としては最も有望であることがシミュレーションより示されているが、従来の半導体加工技術では加工することが不可能であった。本研究においては、フェムト秒レーザー加工により 3 次元スパイラルフォトニック結晶構造を作製することにはじめて成功し、その光学特性も評価した。本研究成果は Science 誌の Editor's Choice にも紹介され国際的にも高く評価されており、今後、量子相関光子対による光反応場としてだけではなく、様々なフォトニックデバイスへの応用・展開が期待される。

3. K. Ueno, V. Mizeikis, S. Juodkakis, K. Sasaki and H. Misawa, “*Optical properties of nanoengineered gold blocks*”, Opt. Lett. **30** (2005) 2158-2160.

概要：3 次元フォトニック結晶同様、金属ナノ構造の局在プラズモンは分子系と強く結合し、量子相関光子対による 2 光子吸収を増強できる光反応場になると考えられる。本研究においては、電子線描画とリフトオフ法を用いて様々な縦横比 (アスペクト比) を有する金のナノブロック構造を作製し、アスペクト比により局在プラズモンの吸収帯を自在に制御できることをはじめて示した。本研究成果を基礎に、現在、金ナノブロック構造間距離を 0~10 nm で制御し、極めて高い光電場増強 (>1000 倍) の観測にも成功している。これまで局在プラズモンの研究分野において未踏であった金属間距離がシングルナノメートルの領域における新しい現象の解明に大きな手がかりを与える極めて重要な研究成果である。

### 石原チーム



1. K. Edamatsu, G. Oohata, R. Shimizu, and T. Itoh, "Generation of ultraviolet entangled photons in a semiconductor", *Nature* **431** (2004) 167-170.

**概要**：マクロな距離に渡って量子力学的な重ね合い状態が保持される「もつれ合い状態」は、近年量子情報通信や量子コンピューターへの応用が期待されている。特に光子によるものは遠距離に渡ってもつれ合い状態が保持されるため有効な量子情報媒体と考えられており、デバイス化へ向け、半導体による生成技術の開発が待たれていた。本論文ではそのような中、CuCl 単結晶における励起子分子の Hyper-Raman 散乱を用い、世界にさががけて半導体からの「もつれ合い光子対」生成を報告した。本論文で報告された「もつれ合い光子対」は従来のパラメトリック下方変換によるものと異なり、(1) 2つの入射光子に対しもつれ合い光子対が生成される、(2) 入射光子と同じ周波数帯のもつれ合い光子が生成される、(3) 世界初の短波長もつれ合い光子である、など従来にない性質を持っており、本結果はもつれ合い光子の応用範囲を画期的に広げるものとして注目されている。

2. K. Koshino and H. Ishihara, "Evaluation of Two-photon nonlinearity by Semiclassical Method", *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 173601.

**概要**：物質系と光の相互作用を最も厳密に記述する理論的枠組みは両方を量子化する全量子論であるが、一方で輻射場を古典的に取り扱う半古典論は多数の光子モードを直接扱わなくてよいため、特に凝集系など多自由度を含む系を対象とする場合にその威力を発揮してきた。近年、量子位相ゲート実現を目指して2光子非線形性の研究が重要度を増してきたが、本来古典的振幅の概念が成り立たない光子領域での議論であるため、この分野では全量子論的アプローチが不可欠と考えられていた。そのような中、本論文では光子の量子力学的な非線形位相変化であっても、系が与える最大量については半古典的な計算から導き出せることを、全量子論と半古典論の詳細な比較から明らかにした。このことは光子数状態の位相変化のような純量子力学的情報が、凝集系を対象とした場合でもその自由度に打ち勝って導き出せることを意味しており、本結果は将来的に量子光学と光物性の両分野を繋ぐ重要な役割を果たすものと考えられる。

3. A. Syouji, B. P. Zhang, Y. Segawa, J. Kishimoto, H. Ishihara, K. Cho, "Interchange of quantum states of confined excitons caused by radiative corrections in CuCl films", *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 257401/1-4

**概要**：薄膜に閉じ込められた励起子の光学応答の研究は30年以上の歴史を持ち、ナノ系光学応答研究のプロトタイプとも言える。それにもかかわらずいわゆるボラリトンの干渉問題以外、その研究のほとんどは長波長近似の枠内にとどまっており、閉じ込め励起子と光の結合系がどのようなモード構造を持っているか、今日まで十分な議論がなかった。本研究では、長波長近似を超えて非双極子の励起準位まで含め、総合的にモード構造を明らかにした石原らの理論的結果を、入射光との干渉を巧みに回避する2光子散乱法を用いて実験検証し、特に非長波長領域に特有な「膜厚の増大にともなう量子状態の入れ替わり」などを明瞭に観測した。現在励起子閉じ込め系の非長波長的な効果が、巨大な非線形性や高速輻射緩和に現れることが議論されているが、提案されていた特異なモード構造はこのような現象を理解する上での基礎となる。本論文はこれに実験的な確証を与えた点で重要な意味を持つ。

#### 板谷チーム

1. S. Yoshimoto, Y. Honda, Y. Murata, M. Murata, K. Komatsu, O. Ito, and K. Itaya, "Dependence of Molecular Recognition of Fullerene Derivatives on the Adlayer Structure of Zinc Octaethylporphyrin Formed on Au(100) Surface", *J. Phys. Chem. B* **109** (2005) 8547.

**概要**：Au(100)単結晶表面上に吸着した、Zn-Octaethylporphyrin は、固液界面で非常に規則正しい吸着構造を取る事を確認した。その吸着層上に、種々の機能が期待される、オープンフラレン（開口フラレン分子）を吸着した所、下地のポルフィリン分子に対し、1 :

1 の比で第二層目が形成される事が、STMによって判明した。エピタキシャル多層膜形成の重要な知見を与えるものである。

2. S. Ogawa, T. Naijio, Y. Kimura, H. Ishii, and M. Niwano, "Photoinduced doing effect of pentacene field effect transistor in oxygen atmosphere studies by displacement current measurement", Appl. Phys. Letts. **86** (2005) 252104.

概要：代表的な  $p$  型有機半導体であるペンタセンを用いて、酸素ガスが FET 素子に与える影響を評価した。その結果、酸素ガス中の素子に、さらに光があたることによって大きな特性変化があることを観測した。この結果は、酸素ガスが素子作製プロセス内に存在していても、光を遮断していれば酸素の影響を抑制することができることを示唆しており、素子作製プロセス上有益な知見が得られた。さらに、照射する光の量によって FET 素子の変化の度合いを制御でき、有機半導体素子の新しい特性制御法の確立が期待できる。

3. Y. Sato, H. Noda, F. Mizutani, A. Yamakata and M. Osawa, "In Situ Surface-Enhanced Infrared Study of Hydrogen Bond Pairing of Complementary Nucleic Acid Bases at the Electrochemical Interface", Anal. Chem. **76** (2004) 5564.

概要：DNAは、アデニン(A)ーチミン(T)、シトシン(C)ーグアニン(G)間の水素結合対によって構成される究極の分子認識系である。こうした共役塩基対を固体基板に固定した人工分子認識素子を、DNAシークエンサー、バイオセンサー、バイオコンピュータなどに利用する試みが行われている。しかしながら、こうした人工分子認識素子は、必ずしも期待された機能を発現しないことが少なくない。本研究では、こうした応用の基礎として、金基板上に自己組織化したアデニン単分子膜と水溶液中のシトシン誘導体との水素結合を、表面増強赤外分光で検討した。その結果、溶液pHと電位を精密に制御しなければ、A-T型の水素結合対が形成されないことが明らかとなった。また、金属ナノ微粒子の特異な光学的性質を利用する表面増強赤外分光が、固液界面での分子挙動を明らかにする手段として有効であることが示された。

## 高柳チーム

1. S. Saito, M. Thorwart, H. Tanaka, M. Ueda, H. Nakano, K. Semba, and H. Takayanagi, "Multiphoton Transitions in a Macroscopic Quantum Two-State System", Phys. Rev. Letts. **93** (2004) 037001-1.

概要：磁束量子ビットにおいては、右向き超伝導電流と左向きの電流状態が、二つの巨視的量子重ね合わせ状態を形成する。この二つの状態間の3光子までの多光子吸収過程の観測に成功し、その特性解析を行った。理論解析は実験結果を見事に説明し、このような巨視的量子系の光（マイクロ波）に対する応答が明らかとなった。特に2光子以上で通常の固体に比べて大きな吸収係数が観測されたことは、この系において、なんら散乱要因や選択則の無いことを意味しており、純粋物理系としての量子ビットの存在が鮮明になった。このような物理的成果にプラスして、本成果は、吸収より更に重要なラビ振動（特に多光子ラビ振動）の観測の成功（投稿中）への道を開くことに大きく貢献している。

2. T. Kutsuzawa, H. Tanaka, S. Saito, H. Nakano, K. Semba, and H. Takayanagi, "Coherent control of a flux qubit by phase-shifted resonant microwave pulses", Appl. Phys. Letts. **87** (2005) 073501.

概要：単一量子ビットのマイクロ波制御法には、単一パルスによるラビ振動と、2つのマイクロ波パルスによるラムジーフリンジ(Ramsey fringe)がある。後者に関しては、従来法では、2つのパルスの間にある時間間隔を置く必要があった。これは最初のパルスを構成するマイクロ波の周波数を共鳴周波数よりわずかにずらして、この差周波数の逆数の時間だけ量子ビットがブロッホ球の赤道面で回転するのを待つ必要があったからである（この従来法をdetuning methodと呼ぶ）。これに対して我々は、最初マイクロ波パルスの周波数には、共鳴周波数をそのまま使用し、その代わり第二のパルスの位相を故意にある大ききずらす方法を開発した。この方法では、量子ビットの赤道面での回転を待つ必要がな

いために、従来法よりおよそ100倍速いラムジーフリンを確認できた。この手法とラビ振動による制御法を組み合わせることによって、従来より高速で（約100倍）量子ビットの任意制御を行うことが可能となる。量子ビットには短いコヒーレンス時間内に何回のゲート操作が可能か、という命題が付きまといっているが、この命題に対しても一つの明快な答えを与えることができると考えられる。

3. H. Terashima and M. Ueda “*Nonunitary quantum circuit*”, Internl. J. Quantum Inf. **3** (2005) 633-647.

概要：量子計算は論理ゲートとよばれる基本ユニットから構成されるが、これらはユニタリーな論理演算をおこなう。本論文では、これを観測過程を含む非ユニタリーな論理ゲートを含む量子回路への拡張を行った。非ユニタリー演算はユニタリー演算を特別な場合として含むので、本論文により従来よりもより広いクラスの論理演算が可能になることが示されたといえる。本論文で提案された方法は、正しい答えが得られる確率が従来の方法に比べて低いが、与えられた論理演算を実行するために必要なキュービットの数が少なくすむために、キュービットの数が厳しく制限されている現状では有効な方法であると考えられる。

#### 松本チーム

1. K.Maehashi,Y.Ohno,K.Inoue and K.Matsumoto, “*Chirality selection of single-walled carbon nanotubes by laser resonance chirality selection method*”, Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 858-860.

概要：従来カーボンナノチューブの電気的特性を左右するカイラリティーを制御することは全く不可能であった。本研究において、レーザーを共鳴吸収させることにより、特定のカイラリティーを有するカーボンナノチューブを選択的に除去する手法を初めて開発した。これはカーボンナノチューブのカイラリティーを制御した初めての研究成果である。

2. K.Maehashi,K.Matsumoto,K.Kerman,Y.Takamura and E.Tamura, “*Ultrasensitive Detection of DNA Hybridization Using Carbon Nanotube Field-Effect Transistors*”, Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L1558-L1560 (Express Letter).

概要：従来、DNAのハイブリダイゼーション現象の検知は、標識試薬を用い、さらにレーザー計測を行う等大がかりな装置を必要とするものであった。本研究において、カーボンナノチューブ電界効果トランジスタの高感度特性を利用して、電氣的に非常に簡便にDNAのハイブリダイゼーション現象を検知することに成功した。またその感度は電氣的に検知したものでは世界最高の感度を得ることができた。

3. D.Kaminishi,H.Ozaki,Y.Ohno,K.Maehashi,K.Inoue and K.Matsumoto, “*Air-stable n-type carbon nanotube field-effect transistors passivation films fabricated by catalytic chemical vapor deposition*”, Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 113115.

概要：従来、カーボンナノチューブにプラズマCVD等で保護膜を作成すると、プラズマの高エネルギーの為にカーボンナノチューブを破壊してしまい、保護膜を作製することが極めて困難であった。本研究において、Catalytic CVD法という熱フィラメントを用いてガスを分解する堆積手法で、カーボンナノチューブを破壊することなく窒化シリコン保護膜を作製することに成功し、大気中において安定動作するカーボンナノチューブ電界効果トランジスタを実現した。

#### 赤穂チーム

1. H. Yamada, Y. Ogawa, Y. Ishii, H. Sato, M. Kawasaki, H. Akoh, Y. Tokura, “*Engineered interface of magnetic oxides*”, Science, **305** (2004) 646.

概要：磁化誘起第二高調波発生(MSHG)とよばれる現象を新しい「界面磁性プローブ」として活用し、 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  (LSMO)/絶縁体  $\text{SrTiO}_3$  (STO) 界面の磁性を直接的に評価した。その結果 STO/LSMO ( $x=0.4$ ) 界面では全温度範囲でMSHGは殆ど観測されず、

STO/LSMO 界面に dead layer が存在していることがわかった。そしてこの dead layer の存在が LSMO/STO/LSMO トンネル接合の TMR 比を低減させていると判断し、かつこの現象は界面における電子移動(LSMO 層へのオーバードーピング)により説明できると考えた。その仮説の下に、界面の電荷移動を相殺するべく、「傾斜組成界面」界面、すなわち LSMO ( $x=0.4$ ) を電極層として用い、界面付近のみ徐々にアンダードーピングした構造を考案した。本研究では、STO と LSMO の間に 2 分子層 (0.8 nm) の  $\text{LaMnO}_3$  (LMO) を挿入した界面構造を作製して MSHG 測定を行った。LMO 自体は反強磁性絶縁体であるが、STO と LSMO よりホールをドーピングされ、界面の電荷移動を相殺して強磁性を示すと期待できる。実際この STO/LMO/LSMO 界面では、MSHG は非常に大きく、バルクに匹敵する温度依存性をもつ。即ち、STO 界面近傍であってもバルクのような強靱な界面強磁性を実現できた。またこのヘテロ接合界面を実際の素子構造に応用することにより、スピントンネル接合におけるトンネル磁気抵抗率を飛躍的に向上させることにも成功した。

2. Y. Ishii, H. Yamada, H. Sato, H. Akoh, M. Kawasaki, and Y. Tokura, “*Perovskite manganite magnetic tunnel junctions with enhanced coercivity contrast*”, Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 022509,.

**概要**：磁気トンネル接合素子では、2つの強磁性電極は印加磁場に対して異なる保磁力を持つことが要求される。高スピン偏極ペロブスカイト酸化物( $\text{La,Sr}$ ) $\text{MnO}_3$  (LSMO)電極においては、形状異方性による保磁力差の形成での特性向上は不十分で、明瞭な階段状の TMR 応答が得られにくかった。この解決のため LSMO 薄膜において Mn サイトの一部を Ru で置換し、LSMO の磁氣的・電氣的な特性をほぼ損なうことなく、制御性よく保磁力を増大させることに成功した [H.Yamada *et al.* Appl. Phys. Letts. **86** (2005) 192505]。本論文では、この( $\text{La,Sr}$ )( $\text{Mn,Ru}$ ) $\text{O}_3$  (LSMRO)を一方の電極として採用した磁気トンネル接合素子を作製し、その特性を従来型の LSMO 接合と比較した。上部電極層に LSMRO を用いた接合においては、期待通りに高磁場側のトンネル抵抗スイッチング磁場の大幅な増大が得られ、その結果、階段状の TMR 応答を再現性よく得ることができるようになった。この保磁力差の拡大は、温度の上昇とともに減少するものの、200 K 付近の温度域においても明瞭な TMR 応答を観測するのに十分な 100 Oe 以上の保磁力差が残存した。今回実証した Ru ドーピングによる LSMO 保磁力の制御は、高スピン偏極材料 LSMO の磁気デバイス応用へのポテンシャルをさらに広げるものとして期待される。

3. A. Sawa, T. Fujii, M. Kawasaki, and Y. Tokura, “*Hysteretic current-voltage characteristics and resistance switching at a rectifying  $\text{Ti/Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  interface*”, Appl. Phys. Lett. **85** (2004) 4073.

**概要**：近年、遷移金属酸化物を金属電極で挟んだ接合素子にパルス電圧を印加すると、異なった抵抗値間を可逆に変化する電界誘起抵抗変化メモリ (Colossal Electro-Resistance Memory: CERM) 効果が報告され、この現象を利用した不揮発メモリ素子 Resistance Random Access Memory (RRAM) が次世代のユニバーサルメモリの候補として注目されている。しかし、この CERM 効果の動作メカニズムが未解明であった。本論文で金属電極と遷移金属酸化物の接合界面にショットキー的な空乏層領域が形成され、その空乏層領域への電荷蓄積が CER 効果とその可逆なメモリ効果と関連していることを明らかにした。また、これまで制御不可能であった素子特性の一つである抵抗変化の方向性についても我々が開発した素子構造を用いることで、ショットキー的な界面に順方向の電圧を印加することで低抵抗状態に、逆方向の電圧を印加することで高抵抗状態に変化させることができるようになった。CERM 効果の動作メカニズム解明の手がかりと素子特性の制御・設計の指針を与える重要な成果である。

### 3. 受賞等

平成17年12月28日現在

| 受賞者名   | 賞の名称                      | 授与者名                              | 受賞日（時期）     |
|--------|---------------------------|-----------------------------------|-------------|
| 猪俣 浩一郎 | 日本応用磁気学会業績賞               | 社団法人 日本応用磁気学会                     | 平成14年9月     |
| 岩佐 義宏  | 金属材料科学助成賞                 | 金属研究助成会                           | 平成14年10月31日 |
| 河田 聡   | OSA Fellow of the Society | 米国光学会（Optical Society of America） | 平成14年12月    |
| 河田 聡   | 島津賞                       | 財団法人 島津科学技術振興財団                   | 平成15年2月3日   |
| 高梨 弘毅  | 功績賞                       | 社団法人 日本金属学会                       | 平成15年3月27日  |
| 高柳 英明  | 超伝導科学技術賞                  | 未踏科学技術協会                          | 平成15年6月24日  |
| 前川 禎通  | 日本応用磁気学会賞                 | 社団法人 日本応用磁気学会                     | 平成15年9月     |
| 板谷 謹悟  | 紫綬褒章                      | 日本国天皇                             | 平成15年11月3日  |
| 岩佐 義宏  | IBM 科学賞（物理分野）             | 日本 IBM                            | 平成16年11月24日 |
| 板谷 謹悟  | 日本化学会 学会賞                 | 日本化学会                             | 平成17年3月27日  |
| 河田 聡   | 平成17年度文部科学大臣表彰科学技術賞       | 文部科学省                             | 平成17年4月20日  |
| 井上 康志  | 第二回堀場雅夫賞                  | （株）堀場製作所                          | 平成17年7月21日  |
| 小池 和幸  | 第五回山崎貞一賞                  | 財団法人 材料科学技術振興財団                   | 平成17年9月22日  |
| 三澤 弘明  | 光化学協会賞                    | 光化学協会                             | 平成17年9月     |

このほかに学会優秀論文賞や講演賞、奨励賞など29件の受賞あり

### 4. シンポジウム等

| シンポジウム名  | 日時         | 場所        | 入場者数 | 特記事項 |
|----------|------------|-----------|------|------|
| 公開シンポジウム | 平成16年10月4日 | 私学会館（市ヶ谷） | 200名 |      |

### 5. その他の重要事項（新聞・雑誌・テレビ等）

- （1）アイスチューブの発見 [岩佐チーム]；CNT内で氷のチューブができる。室温以上で存在しうる。  
新聞発表（H14.9, H15.6）、フジテレビ「とくダネ!」（H16.12）  
「ニュートン」に4ヶ月連載（H17.6～8）、第一学習社高校化学副読本に掲載
- （2）有機分子内包チューブで各種半導体開発 [岩佐チーム]；ナノチューブ半導体が安定に  
新聞発表（H15.9）、構造モデル図が、ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター発行のメルマガヘッダー部分に採用される。
- （3）単分子膜を用いた有機トランジスタの特性制御、低電力駆動化に成果 [岩佐チーム]  
新聞発表（H16.4）
- （4）スピン注入磁化反転の低電硫化に成功 [猪俣チーム]；スピンバルブ素子にスピンのフィルター機能を持たせて電流を2桁低減  
新聞発表（H16.5）
- （5）界面の磁性を光で検出可能に [赤穂チーム]；TMR 素子高性能化などに有用、非線形磁

気光学効果を利用、偏波面の強度変化を計測可能に

新聞発表 (H16. 7)

- (6) 超伝導磁束量子ビット、マイクロ波で多光子制御 [高柳チーム]; 理想的な量子2状態系を検証

新聞発表 (H16. 9)

- (7) 半導体を用いた量子もつれ光子の発生に成功 [石原チーム]; 紫外領域での量子もつれ光子作成

新聞発表 (H16. 9) その後、新聞、週刊誌などで半導体での成果に注目しているとして多く取り上げられている。

- (8) 金属ナノ粒子中の電子スピン寿命を観測 [猪俣チーム]; アルミナ中にコバルトナノ粒子を分散させたグラニュー構造でバルクの1万倍の寿命を確認

新聞発表 (H16. 12)

- (9) n型ダイヤモンド半導体の合成に成功 [大串チーム]; (001)面n型を合成、 $p$ - $n$ 接合による紫外発光確認

新聞発表 (H17. 5)

- (10) レーザー光でたんぱく質制御 [河田チーム]; 特定のたんぱく質の機能停止を瞬時にがん治療など期待

新聞発表 (H17. 6)

- (11) 量子計算機用の光制御型基本素子開発 [小森チーム]; 励起子相互作用による、2キュービット演算素子構造開発、多ビット化に有利

新聞発表 (H17. 12)

これらのトピックスは Nature、Science、Nature Materials、Nature Methods、Applied Physics Letters などに論文掲載時期に合わせての発表である。これらの発表に関連した取材、大学発ベンチャー、大学法人化、などに関連しての取材記事も50件を超えて広く科学技術の理解促進への寄与が認められる。

## 6. その他の添付資料

なし

## 7. 中間評価結果

平成13年度採択課題 (平成16年度中間評価結果)

### 1-1. 研究課題名:

スピン量子ドットメモリ創製のための要素技術開発

### 1-2. 研究代表者:

猪俣 浩一郎 (東北大学大学院 工学研究科 教授)

### 1-3. 研究概要

MOS トランジスタを使わない大容量スピンメモリの創製を目指し、その要素技術として(1)メモリセル構造、(2)低電力書き込み技術、(3)高出力読出し技術に関する研究を行った。(1)ではスピン共鳴トンネル効果素子およびスピン単一電子素子を検討、いずれも電圧によるTMRの振動を観測し、セル選択機能を持ち得ること、(2)ではスピン注入磁化反転を検討、従来より二桁小さな電流で磁化反転可能な素子構造を開発、(3)ではフルホイスラー合金ハーフメタルと自己差動検出法を検討、いずれも有望な技術であることを実証している。

#### 1-4. 中間評価結果

##### 1-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本チームは、東北大学(3グループ)と東芝の計4グループから構成される。MOSトランジスタを使用しないメモリセル構造研究、低電力書き込み技術の研究、ハーフメタル材料の研究、室温条件でのトンネル磁気効果の電圧制御の研究、2次元ナノドット配列作製研究、スピン依存伝導の理論的研究、自己差動増幅アーキテクチャと自己差動検出素子の要素技術研究が進められている。メモリセル構造の研究においてスピン単一電子素子のほかに、スピン共鳴トンネル効果素子の研究を加えた以外は、各要素とも、ほぼ計画通り順調に進んでいる。本提案のメモリ要素技術の後半の課題の難度は高いが、各グループの研究レベルの高さが本提案の実現に直接貢献するよう整合性を見直し、重点化することで目標に届くことが見込まれる。

##### 1-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

スピン注入磁化反転技術において、書き込み電流密度を従来比較で二桁低減、素子サイズ依存のない磁化反転を可能にした反平行結合膜の実用性発見、トンネル磁気抵抗効果を飛躍させる可能性の高い、ハーフメタルで従来注目されていなかった結晶構造のフルホイスラー合金の有望性発見、ナノ粒子のスピン寿命の決定等、特筆すべき成果が多く出ている。

本研究チームの研究を追跡する機関も出てきており、今後は重点化とデバイス化を想定した基礎検討により、世界をリードし続ける成果が出てくると期待される。

##### 1-4-3. 今後の研究に向けて

個々のグループの研究レベルは高く、数多くの成果は出ているが、本提案の構想実現のための整合性、融合性の面で見直しが必要である。全体としてはほぼ計画に沿って実験的検証によって研究は進んできているので、後半の計画に個別要素技術を組み合わせた時に発生する本質的課題の抽出を加え、2ビットメモリーのデモンストレーションによってその課題抽出を進めることにより、科学、技術両面で一層インパクトのある成果となることが期待される。

##### 1-4-4. 戦略目標に向けての展望

本課題はデジタル機器の高機能化にとって極めて重要な、大容量、高速性、低消費電力、不揮発性の全てを兼ね備えたユニバーサルメモリーにも貢献できる要素技術に取り組むものである。研究はMRAMのロードマップのみに固執せずに進められており、学術的にも価値の高い研究としてMRAM以外への波及も大いに期待できる。

##### 1-4-5. 総合的評価

個別要素技術の研究としては、各々大変優れているが、チーム型研究としての成果をより大きくする観点で再考が求められる。優れた個別要素研究のゴールは必ずしも一致していなくても良いが、出口のデバイスを想定したときに、各要素が組み合わせられ本質問題を発生させないかの検討を2ビットメモリーのデモンストレーションによって実施することが有益であると考ええる。そうすることで戦略目標に高いレベルで合致する成果になることが期待できる。

## 2-1. 研究課題名:

ナノクラスターの配列・配向制御による新しいデバイスと量子状態の創出

## 2-2. 研究代表者:

岩佐 義宏 (東北大学 金属材料研究所 教授)

## 2-3. 研究概要

本研究チームは、ナノクラスター(分子、フラーレン、ナノチューブなど)の集積、配列・配向制御によって、新しい複合形を創製し、薄膜・分子デバイスに応用するとともに、新しいデバイス概念や物理現象を見出すことを目的としている。具体的には、ナノスケールで制御された複合物質系を合成・作製し、これによってデバイス・物質系の物性を制御し新機能を創出することを目指している。これまでに、水分子をはじめとするさまざまな分子を内包したナノチューブの合成や、極性を有する自己組織化単分子膜と有機、フラーレンなどの複合構造からなる有機トランジスタを作製し、キャリアの数、注入の制御が可能であることを示し、フラーレン分子配列の極限操作にも成功している。

## 2-4. 中間評価結果

### 2-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、東北大(2 グループ)、東京都立大、北陸先端科学技術大学院大学、岡山大学とで構成されている。ナノクラスターの配列・配向制御による新しいデバイスと量子状態の創出のために、新規複合物質の開発、デバイス要素としての界面制御の研究、新しい概念に基づくナノクラスター物質の探索研究、新奇物性発現機構の研究、ナノクラスターデバイス評価技術の研究、主としてフラーレン薄膜のデバイス応用のための基礎技術の研究が関連をもって進められている。研究活動を開始直後、本チームはベル研の論文捏造問題の影響を受けた。アドバイザリーボードは、FET(電界効果トランジスタ)超伝導を直接追求するのではなく、デバイス構造によってはじめて引き出されるナノクラスター物質の新たな学理構築の手段の一つとしてデバイス化を位置づけることでの研究継続を確認した。その方向性のもと修正目標に向かってよく努力されており、夫々のグループは修正計画に沿って順調に進んでいる。今後もデバイス構造を利用しての、物性探索を基本にして有機デバイスの基盤技術構築に向けて、放射光X線、STMなどを主要な解析手段とするチーム個性をいかした研究の進展が見込める。

### 2-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

これまで、カーボンナノチューブ内に水分子や有機分子を内包したチューブの研究では、室温での氷の実現や、カーボンナノチューブの伝導制御に於いてインパクトのある成果がでている。又、機能性を有する SAMS(自己組織化単分子膜)による界面修飾は、素子制御技術として物性研究や有機トランジスタ開発に展開可能な成果といえる。今後は、蓄積されたデバイス構造を用いた評価技術を広く展開することで、デバイスの特性飛躍因子の明確化、伝導機構解明などにつながる成果が見込まれる。

### 2-4-3. 今後の研究に向けて

最近の特筆すべき成果として、フラーレン単分子の操作技術が見出されたことが挙げられる。この研究の進展によっては、「構造・電子状態の制御」から「量子状態の創出」へつながる成果も期待できる。又、5つのグループが独自に展開してきた研究をマージすることで、研究の深化が進むと同時にデバイス物性の基礎となる特色ある技術成果が期待できる。

### 2-4-4. 戦略目標に向けての展望



本研究は、情報処理に直接的に出口を有する具体的なデバイスを狙うということではなく、デバイス構造を用いたナノクラスター新奇材料の物性探索を基軸として、将来のデバイス開発に資する基礎学理を構築することが目指すところである。成熟したインフラをベースに先端技術を創出し続けているシリコンデバイスとの直接競合ではない、新しい展開をユビキタス社会に対して提案できる基盤作りへ貢献することが期待できるからであり、その方向性は維持することが望ましい。

#### 2-4-5. 総合的評価

本研究は、際立ったデバイスのデモンストレーションを直近のターゲットとするより、デバイスの基礎であるナノクラスターの固体物理・材料科学の構築が先行すべきとの認識に立って、個々のグループは優れた研究成果を上げてきている。さらに今後は本チームの持つユニークな解析技術をいかに、材料合成デバイス物性解析、クラスター配列制御を連携させることで、電子状態操作から量子状態創出へと成果の拡大が期待される。

#### 3-1. 研究課題名

高密度励起子状態を利用したダイヤモンド紫外線ナノデバイスの開発

#### 3-2. 研究代表者

大串 秀世（（独）産業技術総合研究所 ダイヤモンド研究センター 副センター長）

#### 3-3. 研究概要

本研究チームは、ダイヤモンド薄膜における励起子の紫外線発光の特異な非線形現象をデバイスに利用することを目的に、ダイヤモンドの高密度励起子の発光機構の解明やダイヤモンドによるナノデバイス化プロセスの基本的要素技術の確立を展開した。特に発光機構の解明では、40K付近で励起子系のガス温度と格子温度が一定な擬似平衡状態で、ボーズアインシュタイン凝縮(BEC)の特徴である系の化学ポテンシャルがゼロになる結果を得ている。また紫外線発光ダイオードに必要な要素技術として、pn 接合制御低接触オーミック電極形成等の材料プロセスの研究を展開し、理想的な電流特性を観測している。

#### 3-4. 中間評価結果

##### 3-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、産総研、茨城大(平成 15 年度で完了)、環境研、北大、早大の 5 グループ構成である。超高品質ダイヤモンド薄膜の合成、pn 接合制御技術、励起子発光(紫外域)機構解明、高密度励起子状態の理論的検討、新紫外線センサーの開発、ナノスペースのデバイス構造の原子スケール観察、発光デバイスのナノ加工プロセスの研究を進めている。本研究の特異的な研究成果の起源は、原子平坦性をもつ超高品質ダイヤモンド薄膜にある。その薄膜ゆえに起きていると考えられる励起子の擬似状態を再現よく発現させる研究設備の開発は極めて挑戦的であり、予想外の時間が費やされたことから、紫外線発光デバイスの要素研究にやや遅れが発生している。今後は、産総研の整備されたプロセスを活用し、本チームのみが到達し得る超高品質ダイヤモンド薄膜応用デバイスのデモンストレーションのひとつとして、紫外線発光素子を実現することが見込める。

##### 3-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

紫外線発光ナノデバイスへの応用を想定した、ダイヤモンドの励起子発光の非線形現象解明に

において、励起子系でのボーズアインシュタイン凝縮(BEC)の発見の可能性を見出した。BEC を立証できたとするには、まだ検証データに不足はあるが、この立証に成功すれば、科学的インパクトの大きさは計り知れない。一方ナノデバイス化のための pn 接合技術やオーミックコンタクトの形成技術等、デバイス開発への着実な前進も図られており、研究リソースの配分の重点化、適正化により初期の目標達成は可能であると判断している。

#### 3-4-3. 今後の研究に向けて

本チームの最大の武器は、比類なき高品質のダイヤモンド薄膜を持っていることである。室温レベルでの紫外線ナノ発光素子が励起子の BEC に由来するものであれば、物理学に大きな足跡を残すことになるが、プロジェクト期限内での完遂にはハードルが高いと言わざるを得ない。しかし紫外線ナノ発光素子のデモンストレーションは極限デバイスの実現性能を示唆することとして意義深い成果になることが期待される。

#### 3-4-4. 戦略目標に向けての展望

ダイヤモンド半導体は、その有する物性からシリコン半導体で実現困難な特徴あるデバイスを提案できる素材として注目されている。前半の研究では基礎物理学の関心事に注力したきらいがあるが、デバイス化の基礎検討は着実に進んでおり、工学的視点での推進を強化することで、戦略目標のひとつである限界突破の基礎となる科学・技術成果の提供が可能になるであろう。

#### 3-4-5. 総合的評価

励起子系の BEC の立証は、物理学積年の大テーマのひとつであり、極めて挑戦的である。今後は現在までに得られた成果についてピアレビューを受ける(有力論文誌に投稿する)ことで、コミュニティでの議論を踏まえた推進に切り替えることが望まれる。平行して進めてきた紫外線発光ナノデバイスの準備も進展しており、デバイスのデモンストレーション重点化を実現すれば、超高品質ダイヤモンド薄膜によって実現し得る極限性能を明示する成果が期待される。

### 4-1. 研究課題名

非線形ナノフォトニクス

### 4-2. 研究代表者

河田 聡 (大阪大学大学院 工学研究科 教授)

### 4-3. 研究概要

非線形光学と近接場光学を融合した非線形ナノフォトニクスを確立することを目的とし、光子を用いてナノスケールで“観て”、“操って”、“創る”技術開発を推進してきた。非線形ラマン散乱分光である CARS 分光を光学的ナノメートル計測法である近接場顕微鏡と組み合わせて、世界最高峰の空間分解能(15nm)で分子の振動を“観る”技術を開発した。細胞内の特定の場所に遺伝子導入によって発現させた蛍光タンパク質のみを多光子過程により励起することで、その蛍光タンパク質の周辺数ナノメートルの機能性タンパク質の機能を阻害する(“操る”)ことにも成功した。また、多光子過程を用いて 100nm 分解能で同時に複数の 3 次元構造物や光ナノデバイスを“創る”技術や、このナノ加工技術に最適なナノ微粒子( $\text{TiO}_2$  や  $\text{CdS}$ )を高濃度を含む機能性複合材料を“創る”技術も確立した。

#### 4-4. 中間評価結果

##### 4-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、大阪大学、理化学研究所、京都府立医大、中国科学院理化技術研究所に所属する研究者が機能別に4グループを構成して連携しながら研究を推進している。夫々のグループが全体の中の役割を良く理解し、計画を上回る進捗であり、特に分子イメージングに関しては、当初目標を超えて、機能性タンパク質の不活性化反応メカニズムの解明を目指して活動することが計画されている。グループ間の連携を強めた展開によって、インパクトのある進展が期待される。

##### 4-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

近接場ラマン散乱(CARS)顕微鏡を開発し、DNAの塩基固有の分子振動のイメージングや、多光子過程による三次元ダイヤモンド構造を有するフォトニック結晶作製、液晶フォトニックレーザ発振の確認、非線形光学を用いた標的分子の不活性化を数ナノメートルオーダーで確保する技術の開発に成功している。今後はグループ毎に進める個別課題の発展と各グループの共同研究対象として、細胞のナノ観測技術の応用、大規模機能性ナノマシン・ナノデバイスを意図した並列マイクロ・ナノ造形法の展開や、近接場CARS顕微鏡での材料解析や光反応過程の解析応用での成果が見込まれる。

##### 4-4-3. 今後の研究に向けて

これまでの進捗とグループのもつ能力から、提案計画を超えた広がりの中で、優れた成果を上げることが期待される。既にバイオ分野への非線形ナノフォトニクス応用として、細胞内局所ナノ機能制御システムの構築を目指した進展が見られるが、ナノテクノロジーへの大きな期待のひとつであるバイオ分野への応用展開可能な潜在ニーズを更に広く捉え、非線形ナノフォトニクス独自の応用分野開拓も視野に入れての研究推進を期待する。

##### 4-4-4. 戦略目標に向けての展望

本研究は、IPネットワークの通信トラフィック量の拡大に対応できる次世代通信機構の求める光デバイス、光集積回路のプラットフォームの有力候補であるフォトニック結晶の三次元同期構造の形成や、非侵襲性医療システム実現のための生物系ナノ構造体や材料に係わる基礎的解析に資する非線形ナノフォトニクスの展開が期待される。

##### 4-4-5. 総合的評価

ナノテクノロジー分野において、非線形光学が重要化する点に着目した、独自性の高い優れた研究提案であり、順調に進捗している。初期から細胞刺激などのバイオロジー分野への関心を課題として取り上げてはきているが、振動イメージングの有力ツールの開発に成功したことを、このツール固有のバイオ現象発見などへの貢献につなげていく方向を加えることや、更なるバイオロジー分野に応用展開できれば、インパクトは最大になると期待できる。

#### 5-1. 研究課題名

光量子位相制御・演算技術

#### 5-2. 研究代表者

小森 和弘（（独）産業技術総合研究所 光技術研究部門 グループリーダー）

#### 5-3. 研究概要

本研究は、位相緩和時間の長い高品質量子ナノ構造の開発とコヒーレント量子制御技術の開発の双方を通して、量子状態のコヒーレンス光の制御を利用する全く新しい光デバイスの実現を目的としている。これまでに、スケーラブル 2 キュービット量子論理ゲート素子構造の基礎検討を進め、1 キュービットの操作(ラビ振動操作)とパルス列による制御を達成し、結合ドット中の励起子間の相関(2 キュービット間相関)を得ている。

#### 5-4. 中間評価結果

##### 5-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、産総研光技術研究部門のみから構成され、研究の進展に応じて外部との共同研究を取り込む方策をとってきている。高品質量子ナノ構造の作成技術、微小領域計測・制御の 2 つの研究グループから成っている。初期、チーム構成が単色であることから組織目標との整理棲み分けに時間を取られた面があるが、その後は良く努力され絞り込まれた計画に沿ってほぼ予定通り進んでいる。キュービットは世界的な競争であるが半導体量子構造としては唯一の取り組みであるので、理論と実験検証のバランスなどを見直し、デモンストレーションを目指して研究は進展すると見込まれる。

##### 5-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

2 キュービット量子論理ゲート素子の基本構造として、厚み方向に結合させる構成や多キュービットへ発展させる点でスケーラビリティのある横方向結合や量子ドット集合体の形成について、基礎データの集積を終了した。制御については 2 波長励起顕微鏡技術を開発、1 キュービットでの要素確認を終えた。一方、量子ドットの製造バラつきを容認する実用制御性の確保を目指した理論検討では、超高速制御を可能にする条件を明らかにすることに成功している。今後はこれまでの基礎固めを進展させ、スケーラビリティのある 2 キュービット系で、理論と実験両面共絞り込むことでインパクトの大きな成果が期待される。

##### 5-4-3. 今後の研究に向けて

固体量子情報素子研究は世界的に加熱している中で、本提案は挑戦的な方向であり、ハードルも高い。これまで、世界の研究の流れが必ずしも本提案の方向に生まれていない理由のひとつに、世界に向けて夢を語る論文が十分に発信されていないことが挙げられる。世界に先駆けての半導体素子でのスケーラブル 2 キュービットゲート実証に向け、重点化しての推進と成果の発信が望まれる。

##### 5-4-4. 戦略目標に向けての展望

情報処理・通信技術の限界突破のひとつの方向として、光と量子状態の位相制御技術が期待されている。本研究の提案の本質は、従来光の強度制御であったものに、コヒーレンス項を制御項に加えることで、超並列、超高速を実現するというコンセプトにある。このコンセプトの立証に向けて準備がほぼ終わることから、実証モデルを絞り込めば、自己形成量子ドットの励起子での 2 キュービット操作といった有望なスケーラビリティを持つ系の実現が見込める。

#### 5-4-5. 総合的評価

実用化されたときの利点が明確に位置づけられた提案の実現に向け、着実に研究が進められ、要素の準備はかなり進んでいる。今後は学術的なインパクトと技術実証による戦略的インパクトを最大にすべく、持てるパワーの重点化と、不足パワーの重点補強を共同研究の形で推進することでスケラブル 2 キュービット系での実証が期待される。

#### 6-1. 研究課題名

量子相関光子ビームナノ加工

#### 6-2. 研究代表者

三澤 弘明（北海道大学 電子科学研究所 教授）

#### 6-3. 研究概要

従来のフォトリソグラフィーが有する高いスループットを活かし、かつ光の回折による制約を受けないナノ加工技術の開発が望まれている。本研究チームは新しい光物理現象である「量子相関を有するもつれ合い光子」を用い、回折限界をはるかに超える高い加工分解能を実現する多光子ナノ加工技術の開発を目的としている。これまで、もつれ合い光子の発生を確認し、加工に必要なビーム量に高めるための研究や、材料、反応場からのアプローチも進め、もつれ合い光子による世界初のナノ加工の実証への基盤作りに成功している。

#### 6-4. 中間評価結果

##### 6-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは北海道大学、徳島大学、松下電工、産総研の研究者により、もつれ合い多光子励起プロセスによるナノ加工技術の開発、もつれ合い多光子ビーム発生光源開発、量子相関光子ビーム加工に反応性の良い材料の開発により、光の回折限界を超えたリソグラフィー実現に向けた研究が推進されている。前半の研究進捗は、ほぼ計画通りといえる。もつれ合い光ビームの発生確認と総合技術としてのナノ加工のための必要と考えられる各要素の準備を終えた状況にある。今後これらの組み合わせで新しい3次元リソグラフィーとしてのナノ加工のプレリミナリーなデモンストラーションを重ねることで、量子リソグラフィーの工学的位置づけを明示できるであろう。

##### 6-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

もつれ合い光子ビーム源開発では、信号光とアイドラー光の空間モードを一致させる工夫により量子もつれ合い光子対を確保、Z-スキャン法適用による 2 光子吸収材料の開発加速、増強反応場の検討では表面プラズモン利用の有効性を見出す等の成果に加えて、多光子多光束干渉を用いた三次元フォトニック結晶の作製にも成功するなど科学的・技術的なインパクトは比較的高い。今後はナノ加工に向けて夫々の要素を磨き上げ、プロセス最適化を図れば、量子もつれ合い光子の相関測定等で従来行われている電気的手段ではなく、光反応プロセスを介したイメージングにより量子もつれあい光子の相関確認が可能になり、新たな展開も期待できる。

#### 6-4-3. 今後の研究に向けて

量子通信や量子コンピュータを実現する上で重要であると位置づけられている量子もつれ合い光子の研究は、活発化している。その中であって、本提案は光の回折限界を凌駕したナノ加工の世界を拓こうとするもので希少な挑戦である。もつれ合い光子の増幅機構、もつれ合いを安定に保持する光学系や多光子吸収に適した反応や材料設計合成等難度の高い課題ではあるが、量子リソグラフィーの可能性を示すデモンストレーションに特化して進めることで十分成果が期待できる。

#### 6-4-4. 戦略目標に向けての展望

安心安全の高度化という社会的要望にひとつの解を与える量子通信や、大量の情報をグローバルに流通させる光ネットワークに展開可能な基盤技術の創出につながる提案である。シリコンテクノロジーにおける先端のリソグラフィーでの短波長光源が2次元リソグラフィーであるのに対して、3次元加工の分解能を高めていく本研究は差別化のドメインを有しており、研究のゴールに至るまでの過程で得られる副産物的知見も加えて次世代光デバイスナノ加工技術への応用に貢献しうるものである。

#### 6-4-5. 総合的評価

量子もつれ合い光子ビームを、ナノ加工に応用することを目指している唯一のグループである。前半の実験と理論解析により、最適解を与える光学系、材料、反応増強場などのシステムアップの方向と課題が明らかにされた。後半は、もつれ合い光子の品質を向上させ多光子多光束干渉法でのナノ加工を超える3次元ナノリソグラフィーとしての光ナノ加工が実現されることを期待する。

### 平成14年度採択課題（平成17年度中間評価結果）

#### 7-1. 研究課題名

光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製

#### 7-2. 研究代表者

石原 一 大阪府立大学大学院工学研究科 教授

#### 7-3. 研究概要

本課題では物質系の広域空間コヒーレンスを積極的に活かした光機能による、超高効率な、或いは新奇なデバイス動作の実証を目指している。最も基本的な構造を持つ薄膜のポテンシャルを最大限引き出すためのⅠ-Ⅶ族化合物の成膜やⅢ-V族複合構造作製技術の向上、量子位相ゲート動作を実現させるための相関光子対発生や干渉計測技術の開発などを行い、電子共鳴非線形応答としては異例のフェムト秒クラス応答速度の観測や、世界で例のない短波長の「もつれあい光子対」の高効率生成などに成功している。

#### 7-4. 中間報告結果

##### 7-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本チームは、現在大阪府立大学、大阪大学、東北大学、情報通信研究機構の4グループ構成である。スタート時点は大阪大学（理論と実験グループ）と、三菱電機の構成であったが、主要な研究者の移動により今日の強力なチーム構成となっているものの、移動による研究環境整備などによって一部に遅れが発生した。後半に入って、理論グループのリーダーシップのもと、重点化と、グループ間の連携の一層の強化によって計画を超えることが十分期待できる。

#### 7-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

本課題は従来無視されてきた内部電場の空間構造を活用し、トレードオフになりがちな主要性能を限界性能でバランスさせる光機能設計につなげていくことを目指している。これまでチームで蓄積してきた、高品質塩化銅 (CuCl) 膜、複合多層膜技術の更なる高度化を進めながら、世界初の半導体での量子相関光子対の発生などの顕著な成果を引き出している。また研究の進展の過程で CuCl 膜でのフェムト秒クラスの超高速緩和や光マニピュレーションでの量子ドット操作、量子ドット集団からの超放射現象の発見など新たな方向での成果も上げている。今後は薄膜、複合薄膜の巨大非線形光学応答、量子位相ゲートに向けた非線形位相シフト評価、量子ドット超放射過程を応用したデバイス機能実証にフォーカスすることで、波及効果の大きな成果が生まれることが期待される。

#### 7-4-3. 今後の研究に向けて

個々のグループの研究レベルは高く、これまで数多くの成果が出ている。

本チームの特徴である、超高速光スイッチから量子ゲートまでの広範囲のターゲットを理論グループが束ねていくといった研究推進の妙が見える形になるまで連携が進むよう、後半の進め方に工夫がなされると更にインパクトが強まるであろう。

#### 7-4-4. 戦略目標に向けての展望

本チームが前半に挙げた「量子もつれ光子対」の発生は半導体で成し遂げたことから注目度が高い。期待される量子通信や量子計算機に必須の基幹技術まで高める上で、更に高い障壁を超えていく基礎的なつめが望まれる。本課題は高度化していくネットワーク社会に、これまでの常識を覆す光機能での飛躍を提供することを追求するものである。理論と実証を両輪に、学術的にはもとより、波及効果の高いブレークスルー技術も大いに期待できる。

#### 7-4-5. 総合評価

幅広い研究分野を理論グループが総合的にリードし、独自性の高い領域に挑戦するもので、チーム型研究としても価値ある課題である。前半の研究成果を見ても、画期的な成果に繋がる芽が出てきており、グループ連携の強化により、それらが戦略目標に対して一層のインパクトを持つ成果に結実すると期待される。

### 8-1. 研究課題名

固液界面反応のアトムプロセスの解明とその応用

### 8-2. 研究代表者

板谷 謹悟 東北大学大学院工学研究科 教授

### 8-3. 研究概要

本研究は、広義の固液界面反応を、原子・分子レベルで制御し、固液界面をデバイス構築の場として捉え、ドライプロセスでは得られない新しいナノデバイスの創製を目指している。これまでに、固液界面において、分子レベルで規定された規則構造体の成長過程に関する基礎的知見を基に、ナノデバイスに応用可能な、高度に構造規制された分子性ナノ構造体の構築を可能とする基礎的検討を終えた。

### 8-4. 中間報告結果

#### 8-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本チームは、東北大学（2グループ）と北海道大学の計3グループから構成される。本研究はドライプロセスでは得られない新しいナノデバイスの創出を目指して開始された。研究代表者が拓いてきた固液界面を原子レベルで制御する反応系を、分子レベルで規定された規則構造体作製に優位的に展開させるための予備検討を終えた段階である。今後は固液界面解析力とデバイス構成による評価解析（化学、

物理の連携)の強力な連携で推進することにより、当初目標に向かった進展が期待される。

#### 8-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

原子・分子レベルで制御された、超薄膜、結晶成長及び単結晶薄膜の化学合成法の確立とナノデバイスへの応用を目指し、固液界面をデバイス構築の場として捉え、新たな解析手法の高度化や、固液界面反応の動的解明のための直接観察、ポーラスアルミナのシリコン表面への構造転写とDNAハイブリダイゼーションへの展開、有機電界効果トランジスタへの光誘起ドーピングの提案など成果を蓄積するとともに、固液界面反応、電気化学反応がナノデバイス構築に優位である方向探索にも注力し、一定の成果を得ている。今後はグループ間の連携強化により、主流である物理学手法に勝る特徴あるデバイス構築に向け、具体的な成果となることが見込まれる。

#### 8-4-3. 今後の研究に向けて

これまでの優れた研究成果は、個々のグループの高い研究能力によっているといえる。今後はドライプロセスで届かないデバイス開拓への道筋を示していくことへの挑戦に期待がかかっている。後半でその価値ある構想を実現していくには、グループの役割を広げた上での整合性、融合性の面で見直し強化を進めつつ、最終の仕上がりのイメージのつめを早期に共有化することで、基礎科学に対する知見はもとより、工学サイドの期待に対するインパクトも強まるであろう。

#### 8-4-4. 戦略目標に向けての展望

本課題はナノテクノロジーの基幹技術として期待されているボトムアップテクノロジーに深くかかわる。高機能化・集積化にとって基本的にデバイスのダウンサイズ化が有効な方向とは別に、低消費電力、不揮発性などは、材料によって限界を突破できる可能性もある。そのひとつの有望な方向として期待される分子デバイスに対して、研究チームが世界をリードしてきた固液界面の原子、分子レベルでの制御を武器にして取り組むことで、インパクトのある成果が生まれ、その成果が性能限界突破に結実するプロセス革新に繋がっていく流れが生み出されると期待される。

#### 8-4-5. 総合評価

個別要素技術の研究としては各々大変優れているが、チーム型研究としての成果を大きく刈取る観点で再考が求められる。優れた個別要素研究のゴールは必ずしも一致していなくても良いが、課題が、固液界面反応ならではの提案デバイスの優位性をデモンストレーションする難度の高い挑戦にあることから、チーム一体となつての後半戦での加速が求められる。

そうすることで戦略目標に高いレベルで合致する本質的な研究成果を期待する。

### 9-1. 研究課題名

超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現

### 9-2. 研究代表者

高柳 英明 NTT物性科学基礎研究所 所長

### 9-3. 研究概要

2つの量子ビットの量子もつれ状態の実現を通して、最も基本的な量子ゲート動作である、制御NOT動作確認を行うことを目的とする。そのために、数ある量子ビットの候補の中から、微小な超伝導リングに3個のジョセフソン接合を配置した磁束量子ビットを採り上げ、この量子ビットの高速パルスによる制御法を開発してきた。現在までに、単一量子ビットの任意制御に成功し、更に2つの巨視的量子系(量子ビットと外部共振器)の間のもつれ状態の形成にまで至っている。



## 9-4. 中間報告結果

### 9-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本チームは、NTTと東京工業大学、横浜国立大学の計3グループから構成される。ほぼ計画に沿って、世界のトップ集団として成果を挙げている点は高く評価できるが、グループとしての取り組み、相互連携が、成果の極大化に明確に繋がっているかが見えにくい面が見られる。今後は一層の連携強化によって、挑戦的な取り組みと、堅実な取り組みにおいてバランスの取れた、更なるステップアップが期待できる。

### 9-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

これまで、マイクロ波パルスによる量子ビット制御に関しては、多光子ラビ振動や、ラムゼー・フリンジの観測に成功し、コヒーレンス時間も数百ナノ秒にまで延びてきている。システム展開上キーになる外部共振器と量子ビットの結合に関しては、固体量子ビットで世界初の真空ラビ振動観測にも成功している。これらの成果は、地道なノイズとの戦いから行き着いたオンチップフィルターの効果が大きく、基礎研究の推進方法にとっても示唆的な成果といえる。これをベースに2量子ビットと共振器を備えた新回路の試作が進んでおり、世界をリードする成果を引き出せる見込みである。

### 9-4-3. 今後の研究に向けて

高度な技術を用いた実験が着実に行われており、世界トップレベルの成果を出している。後半はこれまでの3グループを、実質的に、理論と実験グループにくくったマネージメントで推進するということであり、連携効果はよりクリアに出てくると期待される。世界のトップランナーの自覚の下、世界的な交流も続けられており、引き続き量子情報分野に重要な貢献が期待できる。

### 9-4-4. 戦略目標に向けての展望

インターネットが社会を変えてきたことは明らかである。その根幹技術がコンピュータと通信技術であることは理解できても、「量子インターネット」の世界の描像を、今明示的に示すのは容易なことではない。しかし世界的に熾烈な競争が展開されている量子情報処理分野で先駆的な成果を問いつけることは、新しい持続可能な発展の軸を提供する上で、重要なリーダーの役割である。

### 9-4-5. 総合評価

量子情報処理実現までに時間がかかるとのコンセンサスは得られているものの、中間的な成果や、波及的な成果を世に問う姿勢も大切である。世界をリードする学術的貢献に加えて、継続的に重点推進される分野に位置づけられるための社会に向けての啓蒙的発信活動にも期待する。  
そうすることで多くの研究が戦略目標に高いレベルで合致する成果に集約していくものと期待される。

## 10-1. 研究課題名

カーボンナノチューブ単一電子・スピン計測システムの確立

## 10-2. 研究代表者

松本 和彦 大阪大学産業科学研究所 教授

## 10-3. 研究概要

カーボンナノチューブの成長制御、カイラリティー制御を行い、これらの基礎技術をもとにカーボンナノチューブ電界効果トランジスタの高性能化および、正確な欠陥導入による単一電子トランジスタの室温動作化を達成した。さらにカーボンナノチューブデバイスを用いた高感度バイオセンサーの実現を達成し、DNA、たんぱく質の電気的検知に成功した。また

カーボンナノチューブに特異なバリスティック伝導、一次元量子伝導特性を発見した。

#### 10-4. 中間報告結果

##### 10-4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本チームは、大阪大学と産業技術総合研究所、富士通の3グループから構成される。日本発のナノ材料の代表であるカーボンナノチューブ（CNT）の成長制御やデバイス化において、特筆できる成果を多く挙げている。計画全体の進捗で評価すると、究極の単一電子計測に向けての研究は順調であるが、スピンについては早期に方向性を明確にすることが望まれる。前半に蓄積した技術を高度に磨き上げると同時にグループ成果の融合を進めることにより、実用化へ向けて望まれるブレークスルーが見込まれる。

##### 10-4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

課題のゴールに向けて、CNTの成長制御、伝導特性制御、デバイスとしてのトランジスタの高度化、デバイス応用、官能基による化学修飾とそのセンサ応用を平行推進してきており、CNTの本数制御や、カイラリティーのレーザ選択消去、欠陥導入による単一電子トランジスタの室温動作、電界効果トランジスタの高性能化技術、DNA、たんぱく質の高感度検出、ドライプロセスでの共有結合修飾などの具体的成果を挙げている。究極の計測への挑戦のための、単一電子プローブの試作も完了し、個別要素の更なる高度化と、それらの要素の総合化で顕著な成果を見込むことができる。

##### 10-4-3. 今後の研究に向けて

個々のグループの研究レベルは高く、CNTをデバイスに展開していく上で、重要なブレークスルーを達成している。

後半は「望んだ位置に欲しいCNTを成長させる」技術の確立を視野に入れて、優れた着想の具現化により、究極の単一電子計測へ前進させていく方向性は維持されることが望ましい。

##### 10-4-4. 戦略目標に向けての展望

本課題は、情報処理・通信における集積・機能限界を克服する上で国際的にも多くの研究者が取り組んでいるCNTのデバイス化に向け、キーとなるテクノロジーを生み出すための基盤として重要な貢献となることが展望される。これまでCNTを応用したデバイスのポテンシャルの高さを示す研究成果は多く報告されているが、産業界を本気にさせるには、CNTを「デバイスエンジニアリングできる材料」にまで完成度を高めることが求められている。このグループの挙げる成果が広く評価され、工学サイドからの要望に更なる研究パワーが集まっていくことが望まれる。

##### 10-4-5. 総合評価

単一電子・スピン計測システム確立に向けて、CNTを用いた単一電子トランジスタの室温動作を世界に先駆けて達成、電界効果トランジスタでのバイオセンサーへの展開など、計画を上回った進捗である。またその過程で、デバイス化技術の基盤となる研究成果を多く挙げてきている点は高く評価できる。一方スピン系については早期に方向性を明確にし、CNTの制御技術の完成度を高めながら、究極計測による新たな発見を含めた応用へのダイナミックな展開が期待される。

#### 平成15年度採択課題（平成17年度中間評価結果）

##### 11-1. 研究課題名

強相関界面エンジニアリングによるスピントンネル機能の巨大化

## 1 1 - 2. 研究代表者

赤穂 博司 (独) 産業技術総合研究所強相関電子技術研究センター  
副研究センター長

## 1 1 - 3. 研究概要

本研究は、ハーフメタルの強相関遷移金属酸化物に対して、その界面磁性の直接観察と制御技術(界面エンジニアリング手法)を新たに開発するとともに、この直接観察を元に界面デザインを行い、強相関スピントネル機能の巨大化の実現を目的としている。さらに、この界面エンジニアリング手法を拡張し、新たな強相関界面デバイス機能の開拓にまで発展させることを目指している。

これまで、磁化誘起第二高調波発生(MSHG)による界面磁性直接観察技術を開発し、界面磁性劣化要因の解明および界面磁性の改良実現をはじめ、電場誘起抵抗変化効果(CER効果)に対する界面モデルの提唱とエピタキシャルヘテロ接合による実証に成功している。

## 1 1 - 4. 中間報告結果

### 1 1 - 4 - 1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究チームは、産業技術総合研究所と北海道大学の2グループから構成されている。本課題は、研究実施期間が4年間であることから界面エンジニアリングのコンセプトを実現する界面解析用の新しいツールの導入に集中投資を行った。導入設備に挑戦的な部分があつて、一部立ち上げに計画外の時間を要したため一部計画からの遅れが発生した。一方研究の進展に応じて、当初の計画には含まれていなかった「電場誘起抵抗変化効果」の界面解析も意欲的に推進している。グループ内の連携強化で、強相関界面デバイスの開拓の共通コンセプトに向かって進展が期待される。

### 1 1 - 4 - 2. 研究成果の現状と今後の見込み

これまで(1)MSHGによる界面磁性直接観察技術の開発、MSHGによる $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO)/ $\text{SrTiO}_3$ 構造での界面磁性劣化要因の解明および傾斜組成界面形成による強靱な界面磁性の実現、(2)LSMO膜表面での析出粒子出現制御手法の開発とスピントネル特性の均一性および再現性の向上、(3)界面エンジニアリング手法によって理想分極が示す領域の巨大スピントネル抵抗(TMR)比の実証、(4)スピン偏極SEMによるLSMO薄膜表面の磁区構造観察、(5)電場誘起抵抗変化効果(CER効果)に対する界面モデルの提唱とエピタキシャルヘテロ接合による実証など、着実な成果を挙げている。今後はスピントネル機能の巨大化を室温レベルで実現するために、界面エンジニアリングのコンセプトを貫くことでの進展が見込める。

### 1 1 - 4 - 3. 今後の研究に向けて

酸化物界面の研究で世界のトップランナーの実力を、界面エンジニアリングといった優れたコンセプトでみせていくには、デバイス志向をする以上、競合技術の先行研究成果を抜くための筋書きを持つことが望まれる。当初のスピントネル機能の巨大化に加えて、産業界の期待するCER効果を研究対象とすることが、相乗的に界面エンジニアリング確立に貢献する方向となるような研究運営が望まれる。

### 1 1 - 4 - 4. 戦略目標に向けての展望

本課題は情報処理技術分野の突破技術として期待されている「スピントロニクス」に、科学・技術両面での貢献を、新しい手法によって実現しようと言うものである。界面エンジニアリングの概念は、スピントネル機能の巨大化だけに限らず、CER効果のメカニズムを明らかにし、新しい不揮発ランダムアクセスメモリーの超高密度化実現に対して新たな指針を与える期待も大きい。

### 1 1 - 4 - 5. 総合評価

界面エンジニアリングのコンセプトの裾野はきわめて広い。強相関遷移金属酸化物をはじめ酸化物界面研究での実績をベースに、界面で発現する機能の制御をデバイス化の基礎として積み上げていき、その有用性を具体的に示していくことで、裾

野を広げる研究パワーの集約が始まることを期待する。学術的にも価値の高い研究として、デバイス物理を深く理解するための計測、観察技術のブレークスルーも後半でも期待され、新手法としての波及効果も多いに期待したい。