

戦略的創造研究推進事業  
—個人型研究（さきがけ）—

研究領域「量子と情報」

研究領域事後評価用資料

平成21年2月6日

## 1. 戦略目標

本研究領域は、以下に示す2つの戦略目標の下で発足した。

### ①「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」(平成15年度設定)

#### <具体的な達成目標>

量子力学的もつれ効果を活用することにより超高速計算や大容量通信を行うことを可能とする量子情報処理の実現を目指し、光子、電子スピン、核スピン等を用いた量子情報処理素子の研究開発を行うとともに、アルゴリズムや回路、システムも含めた包括的な研究開発を同時並行的に行い、競争的環境下において実施することにより、最も有効なアプローチを抽出し、量子情報処理技術の実現を支える技術基盤を構築すること。

- ・量子情報処理技術の実現に向けた量子デバイスの研究開発(高性能化・多量子ビット化、長寿命化・安定化)
- ・量子情報処理技術の実現に向けたアルゴリズム、システム等の研究開発

#### <目標設定の背景及び社会経済上の要請>

- ・「量子重ね合わせ」現象を利用して多数の計算を同時に行い、全体として超高速の計算を実現する量子情報処理技術の確立は長期的課題ではあるが、その実現のあかつきには、情報通信分野における大きな革新をもたらすものである。具体的には、現在のスーパーコンピュータで何年～何十年もかかる医薬品や高機能ナノ材料などの構造・性能のシミュレーション、通信のセキュリティの究極的な確保、複雑な暗号を解読するような膨大な計算を瞬時に完了することができると言われている。
- ・本技術の研究開発については、長期的課題であるものの、現在欧米豪の三極で既に大規模プロジェクトが立ち上がり、競争が激化している。我が国においてもこれらの国に遅れをとることなく組織的に取り組まなければ、海外に基本特許等を押さえられるなど、本分野における国際競争力の弱体化といった弊害が想定される。
- ・量子情報処理技術の実現に向けた取組みについては、現段階では非常に基礎的な段階であり、不確定な要素も多いが、量子コンピュータの開発に必要な要素技術の開発により、新たなIT関連市場の創出も見込まれる。
- ・以上のことから、我が国においても、本技術の開発について早期に国家的に取り組む必要がある。

#### <目標設定の科学的裏付け>

- ・量子情報処理技術の実現に向けた取組みとしては、構成単位となる量子ビットを実現するデバイスの開発が行われており、現段階では、単量子ビットを実現する素子から多量子ビットを実現する素子の開発にまで至っており、この素子を用いた量子もつれ合いの解明が行われつつある。
- ・量子デバイスを用いた量子情報処理技術の実現のためには、デバイスの多量子ビット化及び長寿命化とともに、演算を行うための新しいアルゴリズムの開発が必要であり、こ

れらを組み合わせ、基本的な論理演算を行う素子を実現することが当面の目標とされている。

- ・上記のように、量子デバイスの開発については、基礎的な段階とはいえども方向性が見えてきた段階であり、今後、集中的・戦略的に取り組むことにより、大きなブレイクスルーが期待される。
- ・量子情報処理実現のための基盤技術の開発は、本分野において国際的なイニシアティブを取ることにつながることから、国際的にも競争が激化しており、海外においては国家的な取組みがなされようとしている段階である。
- ・我が国においては、各研究機関において独自に取組みが行われている状況であり、こうした状況を踏まえると、我が国としても、国家として戦略的に取り組む必要がある。
- ・また、本分野では長期間にわたる研究開発を必要とすること、また、本分野の研究開発が現在若手の研究者を中心として実施されていることから、次代を担うべき若手研究者を活用して研究開発を実施していくことが重要な鍵となる。
- ・以上のことから、複数のアプローチを同時並行的に競争的環境下で進めることにより、最も有用なアプローチを抽出し、世界に先駆けて量子情報処理の基盤技術を確立することが肝要である。さらに、若手研究者の活用にも重点を置く必要がある。

## ②「新しい原理による高速大容量情報処理技術の構築」(平成13年度設定)

現行のコンピュータをベースとした情報処理技術は、ハードウェア・ソフトウェア共に飛躍的な進歩を遂げ、20世紀における情報革命として社会の変革に多大な役割を果たしてきた。しかしながら、デバイスの微細化やアルゴリズム上の限界によりこれまでのペースでの性能・容量の向上は望めなくなっている。

一方、コミュニケーションの多様化に伴う通信・計算容量の増大や、立体映像データ処理や複雑系の解析を行うための高速演算の必要性等、高速大容量情報処理技術に対する社会的ニーズは依然として高く、これらのニーズに応じた技術の確立が喫緊の課題となっている。

このため、戦略目標として「新しい原理による高速大容量情報処理技術の構築」を設定し、量子コンピュータ、分子コンピュータ、ニューロコンピュータ等を含む新しい原理に基づく計算機構の探索を行うとともに、ノイマン型コンピュータにおいても全く新しい技術を導入し、新デバイスや通信技術も含めた高速大容量情報処理環境を構築するための要素技術を探求・確立することを目指す。

なお、本戦略目標の下で行われることが想定される研究としては、例えば、量子計算理論及び量子システムの探索・開発、生体工学と情報処理科学による新規原理・システム等の探索・開発等が考えられる。

## 2. 研究領域

「量子と情報」(平成15年度発足)

### 〈研究領域の概要〉

本研究領域は、量子力学的現象を利用した情報処理を実現するために、量子力学と情報処理の間に横たわる諸問題の解決に資する研究を対象とするものです。

具体的には、量子もつれ効果の強さと情報処理能力の関係についての理論的・実証的な研究、新しいアルゴリズムの創出、量子状態の評価技術、記憶方法、量子情報の高密度伝送方式、通信における符号化・誤り訂正・情報セキュリティ等、安全かつ高速の情報処理を実現するための基盤を拡充する抜本的、革新的な研究を対象とします。

## 3. 研究総括

細谷 暁夫 (東京工業大学大学院 教授)

#### 4. 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 上段:研究終了時 下段:応募時	研究課題	研究費*)
平成 15年度	石坂 智	日本電気(株) 基礎・環境研究所 主任研究員 日本電気(株) 基礎研究所 同上	量子纏れ最適回復プロトコル導出を可能にする 量子状態の判定・測定法	11
	北野 晴久	東京大学大学院 総合文化研究科 助手 同上	固有ジョセフソン接合と超伝導共振器を用いた 量子状態制御の研究	57
	黒田 隆	物質・材料研究機構 量子ドットセンター 主任研究員 同上 ナノマテリアル研究所 主任研究員	単一量子ドットにおける多光子量子操作	42
	清水 明	東京大学大学院 総合文化研究科 教授 同上 助教授	多体量子系としての量子計算機の分析	40
	村尾 美緒	東京大学大学院 理学系研究科 准教授 同上 助教授	量子鍵を用いた次世代量子暗号プロトコル	24
平成 16年度	池上 弘樹	理化学研究所 中央研究所 専任研究員 同上 研究員	量子ビット構築へ向けてのヘリウム液面電子量 子ドットの研究	33
	趙 福來	科学技術振興機構 さきがけ研究者 早稲田大学 各務記念材料技術研究所 客員講師	超伝導クーパー対を使用した電子 EPR 対高密度 ビームの開発	41
	長谷川 祐司	科学技術振興機構 さきがけ研究者 Atomic Institute of the Austrian Universities Research-assistant	光学実験を手段とした量子情報処理のための量 子力学的物理現象の研究	49
	濱田 充	玉川大学 学術研究所 准教授 科学技術振興機構 ERATO 今井プロジェクト 研究 員	代数的量子情報処理技術の研究	21

(百万円)

	森越 文明	日本電信電話(株) NTT 物性科学基礎研究所 研究主任 同上 研究員	量子非局所性を用いた情報処理における不可逆性	12
平成 17年度	阿部 真之	大阪大学大学院 工学研究科 准教授 同上 助教授	異種原子組み替えによる固体表面量子ビットの実現	64
	宇佐見 康二	科学技術振興機構 さきがけ研究者 科学技術振興機構 さきがけ「光と制御」領域 博士研究員	測定過程を使った非古典的な原子集団スピン励起の生成と制御	41
	小川 朋宏	電気通信大学大学院 情報システム学研究科 准教授 東京大学大学院 情報理工学系研究科 助手	量子通信路の可逆性と情報理論的・幾何学的保存量の評価	12
	松下 道雄	東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授 同上 助教授	単一分子分光による固体中の単一スピンの観測	55
	遊佐 剛	東北大学大学院 理学研究科 准教授 日本電信電話(株) NTT 物性科学基礎研究所 リサーチアソシエイト	新しい核磁気共鳴を用いた核スピンの量子状態制御	64
			総研究費	566

\*) 各研究課題とも3年間の総額

## 5. 研究領域のねらい

戦略目標は、①「情報通信技術に革新をもたらす量子情報処理の実現に向けた技術基盤の構築」と②「新しい原理による高速大容量情報処理技術の構築」で、その下で行われる研究として、量子情報科学とそのための基礎技術を対象とした。量子情報科学／技術の中には量子計算、量子通信、量子暗号が含まれ、そのための基礎技術としては半導体、超伝導、量子光学など極低温環境あるいは超精密な分子制御技術などが関係する。

研究領域のねらいは、それに対応して量子情報理論の展開と、量子情報技術に使える様々な物理系における量子操作の研究、さらにそのための基礎技術の芽を見出し発展させることである。この研究分野は、未来型であり長期的な視野が必要なので、後継者が育って行くことも重要と考えた。そして、量子情報技術を目標として、多彩な物理系を試行するので、その中で派生的にあるいは科学技術的に重要な発見と発明があれば、その潜在的社会的インパクトなども考慮して、目指す研究成果とした。

## 6. 研究課題の選考について

### 6-1. 選考方針

選考の基本的な考えは下記の通り。

- (1) 選考は「量子と情報」領域に設けた選考委員 11 名と研究総括で行う。
- (2) 選考方法は、書類選考、面接選考及び総合選考とする。
- (3) 選考に当たっては、募集要項に示した選考基準を基本としたが、以下の点に特に留意した。

量子と情報の分野を広く捉えて、理論・実験とも何かをやってくれる人であることを面接選考で十分に見たつもりである。所属機関(研究実施機関)・ジェンダー・年齢など、3年間を通してみると、結果的にバランスが取れたと考える。

### 6-2. 選考方法と結果

- (1) 書類選考は、一応募課題につき領域アドバイザー3名が書類審査し、書類選考会議において面接選考の対象者を選考した。書類審査は、個人の着想や独創性などからなる7項目の項目評価と3段階の総合評価を行い、その結果から評点が高い課題を面接対象とした。また、可能性を見出す面も重要視し、可能な範囲で面接対象とした。
- (2) 面接選考は、3段階で総合評価を行い、その評価結果及び意見交換の結果を総合的に判断して、採択課題を決定。競合する課題については、研究総括が最終的に判断した。
- (3) 選考結果は、添付資料(1. 応募件数・採択件数)に示す。

## 7. 領域アドバイザーについて

人選にあたっては、数学、情報科学、物理学、電気工学、材料工学など幅広い分野から応募者がいることが想定されたので、それらを広くカバーするようにした。

さらに、理論と実験のバランスを考え、物理実験の分野では量子光学とその他についてもカバーした。意見をはっきり述べる人柄の方々をお願いし、さらに詳しく言えば、激励型と辛口型のバランスも取った。

領域アドバイザー	終了時の所属	役職	任期
今井 浩	東京大学 大学院情報理工学系研究科	教授	平成 15 年 7 月～ 平成 21 年 3 月
井元 信之	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授	平成 17 年 4 月～ 平成 21 年 3 月
枝松 圭一	東北大学 電気通信研究所	教授	平成 15 年 7 月～ 平成 21 年 3 月
小澤 正直	名古屋大学 大学院情報科学研究科	教授	同上
北川 勝浩	大阪大学 大学院基礎工学研究科	教授	同上
佐々木 雅英	情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター	グループ リーダー	同上
高木 伸	富士常葉大学 環境防災学部	教授	同上
竹内 繁樹	北海道大学 電子科学研究所	教授	同上
蔡 兆申	日本電気(株) 中央研究所 ナノエレクトロニクス研究所	主席 研究員	同上
南 不二雄	東京工業大学 大学院理工学研究科	教授	同上
山本 喜久	スタンフォード大学 応用物理・電気工学科	教授	同上

## 8. 研究領域の運営の状況について

研究領域運営については、幅広い分野をカバーしている領域アドバイザーの意見を勘案し集約して行った。特に研究者の採択という重要事項では、長時間の討論で練り上げて決断した。第 1 期生と第 3 期生については手堅く成果を上げて貰えそうな人を、第 2 期生については、やや大胆な人選を行ったが、これは、領域アドバイザーの方々の強い後押しがあって踏み切ったものである。その意味で、領域アドバイザーと研究者が会する領域会議

を重要視した。

研究進捗状況の発表を領域会議で聞いて、領域アドバイザーから忌憚のない意見を出してもらった。一例を挙げると、北野晴久研究者はその中で、実験の方針を大きく転換して結果的に成功した。また、実験上の具体的なアドバイスも受けて、それが困難の解決になった例も複数ある。理論研究では、研究者本人が控えめに考えていることにも、その価値を認めて努めて激励してきた。それが、領域会議という場で行われて、他の研究者も助言に参画したことは、極めて重要であった。研究者間の共同研究自体はこの期間には無かったが、お互いの研究に共通の方向性を見出したこともまれではなかった。一例を挙げると、阿部真之研究者の AFM による原子配列操作に用いる主要な手段であるカンチレバーが、宇佐見康二研究者のマクロな量子系になるという展望が見えて来た。

研究費の配分については、研究者の必要度に応じて、大胆にコントラストをつけた。場合によっては、理論の研究者の分を削っても大事なところには配分した。例を挙げると、松下道雄研究者が注文した極低温下でも使える対物レンズの製作は何回も失敗したが、あきらめずに再注文し続けて 8 回目に成功した。また、遊佐剛研究者については、途中で研究実施場所が変わったことも考慮して、高価な希釈冷凍機の購入を決断した。

濱田充研究者の符号化研究の場合には、途中で公表することができないため、細心の注意が必要であったことも指摘しておく。また、実装に必要な計算機も購入したが、むしろ研究の中で理論上の大きな進展があったので、そちらを優先させた。その他の理論研究者の場合は、全くと言って良いほど干渉はせずに、研究者の自由な発想に任せた。

また、年に一度は研究実施場所を訪問し、直接研究者から研究進捗内容を聞くことで、よりきめ細かな助言を行い、さらに、領域会議では状況把握が困難で、より個別対応が必要な研究環境(実施環境、研究体制など)に関しては、経験を踏まえた助言も行った。

研究領域全体の広報活動としては、ホームページを作成して、研究内容・研究成果及び領域関係者全体のトピックスをタイムリーに掲載することで、外部への広報に加え、研究者間及び研究者・領域アドバイザー間の交流が、自由かつ活発に行われるように工夫した。

## 9. 領域のねらいに対する成果の達成状況

はじめに述べたように、研究領域のねらいは、量子情報理論の展開と、量子情報技術に使える様々な物理系における量子操作の研究、さらにそのための基礎技術の芽を見出し発展させることであった。その中で後継者が育って行くことも重要と考えた。

前者については、その研究内容は多様であるが、それぞれにねらいは達成されたと思う。理論研究の場合、石坂智研究者はエンタングルメント度については確固とした研究で国際的にも認められ、森越文明研究者の新しい時間的なエンタングルメントという視点はこれからの基礎理論の方向を予感させる。また、小川朋宏研究者の量子通信路容量に関する数

理的研究は、さきがけ期間の相当部分を数学の勉強に充てるという冒険が報われて、極めて体系だったものへと成長した。

実験研究の場合、派生したことから面白い展開が見られたものに、前出の北野晴久研究者と超流動の池上弘樹研究者の研究がある。双方とも物性物理学として興味深い結果を得ている。また、趙福來研究者は、超高真空中での電子銃の作製を進めるうちに、基礎技術の進歩がありそれに関する特許出願も行い、今後、日本の電子顕微鏡産業に貢献が期待される。

後継者育成という面でも、大学に籍を置く村尾美緒研究者、松下道雄研究者、遊佐剛研究者の各研究室では、博士課程進学者でこの分野を志す人が継続的に出てくるなど、成果が着実に現れている。

領域全体として特筆すべき研究としては、黒田隆研究者の単一量子ドットにおける多光子量子操作と、阿部真之研究者によるシリコン表面における原子配列が挙げられる。前者は、励起子のデコヒーレンス時間の直接計測に成功し、後者は、原子配列自体はさきがけ研究前からのものではあるが、その原子識別を行った点が独自の新しい成果である。

## 10. 科学技術上の進歩に資する成果、社会・経済・文化的な価値創出への期待

### <基礎科学技術上の進歩に資する成果>

中性子干渉を用いた長谷川祐司研究者と宇佐見康二研究者による光学的手段による量子力学の基本原則に関する実験的研究、森越文明研究者による時間的エンタングルメントに関する理論的研究は基礎科学に属する。しかし、P. ショアも述べているように、ある意味で曲がり角にきている量子情報科学／技術の次のブレークスルーは、非局所性など量子力学の基本概念に立ち戻ることから得られるかもしれない。

この意味で上記3つの研究は萌芽的である。

### <応用科学技術上の進歩に資する成果>

濱田充研究者による量子誤り訂正符号の系統的生成法は、情報科学として基礎的であると同時に、符号生成の実用としても有用であろう。黒田隆研究者の単一量子ドットにおける多光子量子操作は、このよく知られた系についての量子操作の可能性を切り開いている。

上記2課題については、その発表論文の数は充分であると自信を持って報告する。

### <社会・経済的価値創出>

阿部真之研究者によるシリコン表面における原子配列は、本研究により多くの人が使えるように汎用化したので、量子計算機の素子作成のための基礎技術だけではなく、ナノテクノロジーとして広範囲かつ有用な技術となるであろう。

### <文化的な価値創出>

数学から電気工学まで幅広い分野の研究者が領域会議に参集して、はじめは言葉も通じ

ない中から始めて、終わりには量子について熱く語るまでに至ったということ自体が、文化的な創造だったと思う。さきがけ研究の好例を作ったと自負している。

## 1 1. 総合所見

### <研究領域としての成果>

#### [理論的研究]

量子情報科学の要であるエンタングルメントについての理論的研究は、石坂智研究者のエンタングルメントの分類、村尾美緒研究者の量子鍵配送への利用、清水明研究者の量子計算の中間状態へのあらわれ方の研究、森越文明研究者の時間軸への転換などが、国際水準に達しており評価が高く、その中には日本初のものがある。量子通信路についての理論的研究としては、小川朋宏研究者による体系的な研究と濱田充研究者の符号生成の一般論が生み出された。これらは、古典情報理論にその深さの原因がある点で示唆に富む。

#### [実験的研究]

黒田隆研究者による量子ドットの研究が量子情報らしい研究成果のひとつである。上にも述べた長谷川祐司研究者と宇佐見康二研究者の量子力学の基礎に関する仕事にも成果があった。北野晴久研究者、池上弘樹研究者は派生して物性物理学に寄与した。趙福來研究者、阿部真之研究者はその技術が他分野に広く応用されるものを作り上げた。松下道雄研究者、遊佐剛研究者は単一量子ビットを観測するための研究の基礎を作った。

### <研究領域のマネジメント>

課題選考については、もっぱら研究課題の面白さと研究者の熱意に基づいて行ったが、結果として、所属機関(研究実施機関)・ジェンダー・年齢などバランスの取れたものになった。分野も概ねカバーできたと思う。領域運営は領域会議を中心にを行い、研究費配分は、研究総括の責任で大胆にメリハリを付けたつもりである。その他は、研究者の自由な発想に任せた。

### <本領域を設定したことの意義、問題点、展望>

意義は二つある、一つ目は、比較的萌芽的なものを伸ばし国際水準の研究者として活躍して貰う。二つ目は、その後継者を育てることである。前者については、ほぼ意義を達成し、後者については、合格点程度であったと考えている。

上にも述べたように、この研究分野は長期戦になるし、今が曲がり角なので、これからの方が重要である。従って、この領域の研究では、その展望が垣間見られた程度であったと思う。後は、各研究者と歴史に委ねるしかない。

### <感想>

極めて充実した、目から鱗のことが多い、忘れ得ぬ5年間であった。領域事務所の方々に深く感謝します。