

領域略称名：ハイブリッド量子
領域番号：2703

平成29年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「ハイブリッド量子科学」

(領域設定期間)

平成27年度～平成31年度

平成29年6月

領域代表者 (東北大学・理学研究科・教授・平山 祥郎)

目 次

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究の進展状況	6
3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況	9
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	11
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	14
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	19
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	21
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 総括班評価者による評価	23
10. 今後の研究領域の推進方策	25

研究組織 (総括：総括班, 支援：国際活動支援班, 計画：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00	15H05866 ハイブリッド量子科学 の研究総括	平成27年度 ～ 平成31年度	平山 祥郎	東北大学・理学研究科・教授	5
Y00	15K21727 ハイブリッド量子科学の進展 に向けた国際活動強化支援	平成27年度 ～ 平成31年度	平山 祥郎	東北大学・理学研究科・教授	5
A01 計	15H05867 電荷・スピンハイブリッ ド量子科学の研究	平成27年度 ～ 平成31年度	石橋 幸治	国立研究開発法人理化学研究所・石橋 極微デバイス工学研究室・主任研究員	11
A02 計	15H05868 フォトンハイブリッド 量子科学の研究	平成27年度 ～ 平成31年度	平川 一彦	東京大学・生産技術研究所・教授	5
A03 計	15H05869 フォノンハイブリッド 量子科学の研究	平成27年度 ～ 平成31年度	山口 浩司	日本電信電話株式会社・NTT 物性科学基礎研究 所・量子電子物性研究部・上席特別研究員	11
A04 計	15H05870 ハイブリッド量子科学 の理論的研究	平成27年度 ～ 平成31年度	根本 香絵	国立情報学研究所・情報学プリンシ プル研究系・教授	6
総括・支援・計画研究 計6件					
A01 公	16H01045 インターバンドラシユ バを用いたスピン軌道 ブロッケードの最適化	平成28年度 ～ 平成29年度	古賀 貴亮	北海道大学・情報科学研究科・准教 授	1
A01 公	16H01048 格子歪を介した単一ス ピンと機械的振動との 結合	平成28年度 ～ 平成29年度	黒田 眞司	筑波大学・数理物質系・教授	1
A01 公	16H01053 量子気体顕微鏡による 光格子中原子スピンと フォトンのハイブリッ ド量子制御	平成28年度 ～ 平成29年度	高橋 義朗	京都大学・理学研究科・教授	1

A02 公	16H01052 光子・電子・核子スピン 量子もつれエンジニア リング	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	小坂 英男	横浜国立大学・大学院工学研究院・ 教授	1
A02 公	16H01055 共振器量子電気力学系 の非局所コヒーレント 結合の研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	青木 隆朗	早稲田大学・理工学術院・教授	1
A02 公	16H01057 ノンスピバス希土類 フォトリック結晶によ るフォトンスピンコ ヒーレント結合	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	俵 毅彦	日本電信電話株式会社 NTT 物性科 学基礎研究所・量子光物性研究部・ 主任研究員	1
A03 公	16H01049 傾斜歪超構造によるス ピン・フォノン結合制御 とフォトン励起	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	田畑 仁	東京大学・大学院工学系研究科(工学 部)・教授	1
A03 公	16H01054 超高Q値ボトル型光共 振器によるフォトン フォノン量子系	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	山本 俊	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	1
A04 公	16H01046 カーボンナノチューブ のスピンメカニクス	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	泉田 渉	東北大学・理学研究科・助教	1
A04 公	16H01047 量子ポイントコンタク ト構造における微小磁 化と核スピン相関の理 論的解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	青野 友祐	茨城大学・工学部・准教授	2
A04 公	16H01050 ハイブリッド量子系を 用いた量子操作・量子測 定アルゴリズムの実装 理論	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	村尾 美緒	東京大学・大学院理学系研究科(理学 部)・教授	1
公募研究 計 11 件					

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

1. 研究の学術的背景

量子ナノ構造において電荷、スピン、核スピンの量子コヒーレント操作を行う研究は、量子計算を目指して世界中で活発に研究され、物理量の新しい量子操作として、学術的に大きなインパクトをもたらした。しかし、その一方で、大規模な量子計算の実現は未だ不確実で、量子操作の別の観点からの発展が模索されている。通常の量子計算よりかなり簡単な方法で量子シミュレーションを行う D-Wave が脚光を浴びたが、昨今、より身近な方向として量子結合にベースをおいた、量子高感度計測、量子プローブ、量子高能デバイスなどを目標にする **Quantum Enabled Technology（量子コヒーレンスの制御によって可能となる科学技術）** が世界レベルで急速に進展している。計測は科学技術の進展のベースであり、理学、工学から医学に至るまでの広範な分野での応用が期待される。

こういった背景を受けて、応用物理学会において新領域研究グループ「量子情報研究」が 2013 年 1 月に発足している。この研究グループにおける活動で明らかになったことは、これらの新しい応用では、異なる物理系の間で量子エンタングルメントを受け渡す手法が本質的な役割を果たすという点である。すなわち、その実現には、様々な物理量の量子情報の小規模な量子トランスデューサ機能が必須となる。特に、量子情報を異なる場所に運び測定系に載せるために光子、フォノンが重要になる。光子は以前から離れた量子系を接続する媒体として広く研究されてきたが、フォノンの重要性が最近世界的に着目され、フォトニック結晶ならずフォノン結晶の研究も進展している。

これらの状況を勘案して、**電荷（クーパ対を含む）、電子スピン、核スピン、光子、フォノン**でそれぞれに実績を上げている研究者が集まり、異なる物理系の間で小規模な量子トランスデューサを実現し、**Quantum Enabled Technology、特に量子高感度計測に役立てるためにその基礎を確立する「ハイブリッド量子科学」の研究分野を提案したのが本領域**である。図 1 に本領域の簡単な概念を示す。Quantum Enabled Technology の分野では理論と実験の融合が不可欠であることから、電荷（クーパ対を含む）、電子スピン、核スピン、光子、フォノンの分野でこれまで実績をあげてきた研究者で構成する A01 電荷・スピン班、A02 フォトン班、A03 フォノン班に加えて、ハイブリッド量子科学に関連する理論で世界をリードしている理論研究者を A04 理論班に配置する。また、様々な物理量の量子的な結合、さらには量子計測には異なる仕組みが必要であることから、ナノ材料、ナノ構造の研究者を巻き込んだ領域となっている。計画研究班が 4 つと少なく、項目も設けていないが、これは本領域の戦略として、細分化することを避けたためである。様々な量子間のハイブリッド化が最も重要な本領域では、あまり細分化しないことで計画研究内、計画研究間の融合を推進し、最終段階では電荷、スピン、核スピン、光子、フォノンが広範囲に量子的に結合した小規模ネットワークの実現を目指す。さらに、公募研究についても各計画研究班を跨ぐような研究課題を積極的に採用し、公募研究が計画研究間の融合をさらに促進するような状況を実現する。

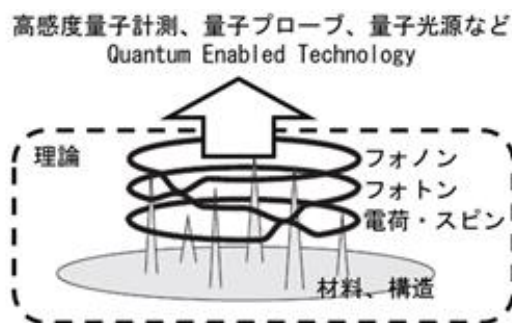


図 1
本領域の
簡略化した
概念図

2. 我が国の学術水準の向上・強化から見た研究領域の重要性

第一に、量子情報技術の世界的傾向として、Quantum Enabled Technology に着目する方向が顕著になっ

ているが、この方向を目指すことで参加メンバーが有している研究の優位性をより一層活かせる方向に発展させることができ、それぞれの分野で我が国の学術レベルの向上に貢献する点がある。具体的には、電荷・スピン班には電荷(クーパ対を含む)や電子スピンの制御、電子スピン系と核スピン系の結合や核スピンを利用した計測で世界をリードしているグループがあるが、これらの研究方向に新しい方向を加えることで、それぞれの学術水準が強化される。フォトニック結晶による光制御、THz と量子構造の結合に関する分野、ダイヤモンド NV 中心と電磁波との結合などで世界の第一線を行く研究を展開しているフォトングループ、さらには、弾性体に周期構造を与えることでフォノン結晶を実現し、フォノン伝搬の電氣的制御で世界に先駆けているフォノングループも同様である。特に最近着目されているフォノン制御技術を単一フォノンのレベルに拡張できれば、この分野で世界をけん引できる発展性が期待できる。理論グループは Quantum Enabled Technology を提唱するなど、世界的に活躍しているメンバーがそろっているが、この分野も実験系と議論しながら課題を追究することで研究の底上げが期待される。公募研究と連携することでさらに各研究のレベルが向上することも期待できる。

第2に、これが最も重要であるが、それぞれの量子系で世界的に優位に立っている研究グループが集結して、さらに第一線の理論的研究と協力して、Quantum Enabled Technology の基礎を内外に先駆け実証していくことで、国内外に例を見ない独創性、新規性と優位性が期待され、世界的に重要性を増しているこの分野で、我が国の研究レベルを大幅に増強できる点がある。まだ領域がスタートしてから2年弱に過ぎないが、領域全体で、公募研究も含めて計画班を跨いだ融合研究をプッシュしたことで、本領域がなければ実現されていないと思われる革新的な研究がスタートしている。大変重要な成果も出てきており、我が国の学術水準の向上・強化の観点から大きな役割を果たしている。

第3の重要な役目は、高感度量子計測などを様々な計測分野で実現するには新しいナノ材料、ナノ構造が不可欠であることから、ナノテク分野で世界をリードするグループが参画している点である。日本はナノテク材料が強く、高い材料、構造作製技術を有しているが、これまでは古典的なデバイスを中心に研究してきたグループが多い。古典的な方向だけでは行き詰まりを感じているグループも多いが、これらのグループにハイブリッド量子という新しい研究方向を提示することで、高い技術・ノウハウが新しい方向を見出し、日本のナノテク分野のさらなる進展に貢献することが見込まれる。ナノテクグループを巻き込めたことは、様々な角度からの要請が出現する量子ハイブリッド系に希少な材料、構造をスムーズに導入できる点で、本領域全体にとっても大変な優位性がある。

量子計算を目指した研究活動を通して、日本では量子制御、特にコヒーレントな制御に関する研究が理研などに集中しており、大学では少ないという問題点があるが、それを解決するのが第4の重要性である。本領域の研究活動は大規模な量子結合を目指すものではないことから、本領域に参加するグループを通して、量子を扱うグループを国内に広げ、量子に馴染みのある若手研究者を育成する役割を担っている。量子の分野は今後重要性を増すことが予想され、本領域がこの分野の底上げに貢献することは、我が国の学術水準の向上・強化から見て大変重要である。

上述した我が国の学術水準の向上・強化へ貢献するため、本領域では以下の戦略を取っている。電荷、スピン(核スピン)、フォトン、フォノンなど様々な物理量を小規模に量子力学的に結合し、そのコヒーレント性を制御するとともに、得られた結果を、高感度計測など、古典限界を超える動作に結びつける。特に信号を中長距離に転送し、中長距離で異なる量子を結合するにはフォトン、フォノンが不可欠になることから、これらを独立して計画研究班(A02、A03)とし、その制御技術の確立に力を入れる。さらに、本領域の特徴として優れたナノ材料、ナノ構造をハイブリッド量子系のプラットフォームとして利用することから、材料班は設けずに、各計画班の中に取り込んでいる。

2. 研究の進展状況 [設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する] (3 ページ以内)

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

電荷 (クーパ対を含む)、電子スピン、核スピン、フォトン、フォノンでそれぞれに実績を上げている研究者が集まり、異なる物理量の間で小規模な量子結合を実現し、Quantum Enabled Technology に役立つためにその基礎を醸成する「ハイブリッド量子科学」の確立に向けて研究を展開してきた。以下にこの2年間の研究進捗状況を計画テーマ (計画班) ごとに示す。

電荷・スピンを中心にしたハイブリッド量子系の研究: A01 班を中心に量子としての電荷 (クーパペアを含む) とスピン (電子スピンと核スピン) を中心にそれらの間の相互変換を可能とする物理メカニズムを解明するとともに、他の量子、フォトン、フォノン等とのハイブリッド化を探索し、情報処理、極限計測に結び付けることを目的として研究を展開した。電子およびクーパペア、電子スピン、核スピンの量子状態を独立に制御する技術は必ずしも十分ではないので、その方向を引き続き改良するとともに、フォトン、フォノン等との結合を目指した。また、新材料やナノテクノロジーのハイブリッド量子構造への応用を加速することも重要な目標であり、これらの目標に対して下記の進展を得た。

① **ナノカーボンを使ったハイブリッド量子構造**については、伝統的な半導体材料に比べてプロセス技術に困難が多いため、独自のナノ加工技術を開発し、ハイブリッド化へつながるユニークな成果を得た。具体的には、1本の単層カーボンナノチューブの両端を化学結合によって結合した直径1ミクロン以下の微細なリングで電子波干渉リングを作製し、8Kで振幅が80%にも及ぶ干渉効果による抵抗振動を得た。

核スピンを効果的に利用するためには ^{12}C と ^{13}C を制御性良く組み合わせた構造が必要になるが、固体触媒から成長の駆動力を制御する成長法を独自に開発し、同位体制御単層カーボンナノチューブの作製に成功した。多層カーボンナノチューブを用いた量子ドットについては、集束イオンビームを用いて再現性良くトンネル障壁を作る技術を確立し、さらに、位置制御に関するプロセス技術を改善し、A03 フォノン班との連携により 中空に浮いた多層 CNT の中に2重結合量子ドットなどの機能的な量子ドットを作製することが可能となった。その他、三次元的な構造を用いてグラフェンナノ構造のひずみ制御を行う取り組みにも進展があった。

② **化合物半導体ナノ構造を用いた量子ハイブリッド構造**については、半導体プロセス技術を駆使して、電子とフォトン、核スピンに関するハイブリッド化につながる量子ドットや量子細線を作製した。具体的には、InSb や Si/Ge ナノワイヤで作製した量子ドットをマイクロ波回路共振器の中に組み込み、量子ドットの電荷状態に応じたマイクロ波の共振特性を調べ、フォトンが1個以下の領域で電子1個とフォトンの量子的相互作用を実現することに成功した。核スピンの制御とハイブリッド化に向けた基礎研究として、量子ホール状態における電流による核スピン偏極の基本的な振る舞いを明らかにするとともに、走査プローブを用いて、核スピン偏極の様子に加えて電子スピン偏極によるナイトシフトをミクロスコピックに可視化することに世界ではじめて成功した。新材料を取り組む試みでは、国際共同研究により 2次元トポロジカル絶縁体である HgTe と超伝導ジョセフソン接合の結合構造を実現し、そのマイクロ波応答特性からコヒーレンスに優れたマヨラナ状態の存在を強く示唆する結果を得た。

フォトンを中心にしたハイブリッド量子系の研究: 固体内の量子情報を遠方に伝送するために、フォトンと他の物理系 (電子、スピン、フォノン) との相互作用の解明と制御は極めて重要である。A02 班を中心に、主に半導体量子ドット、ダイヤモンド NV センター、単一分子など極限的な零次元量子系における電子、スピン、フォノン (分子振動も含む) を電磁波で制御し、フォトンと他の物理量が相互作用するハイブリッド量子系の学理と基盤技術の確立を行うことを目標に研究を進めた。特に、異種材料系のハイブリッド性と、電荷、スピン、フォトン、フォノンという異なる物理量のハイブリッド性の2つの側面を活用して、従来にはない高感度計測、高機能デバイスを実現しようとしている。これらの目標に対して下記の進展を得た。

①量子ドットとフォトニックナノ構造・フォノンナノ構造の相互作用とその応用に関して、三次元カイラルフォトニック結晶と量子ドットのハイブリッド系でカイラルフォトニック結晶による輻射場制御と量子ドットの円偏光発光制御を実現した。さらに、分布ブラック反射鏡を用いた光共振器中に、多重積層量子ドットを配置し、量子ドット集合体と光子とのコヒーレント相互作用を増強することに成功するとともに、不均一性の大きな量子ドット集合体に有効なコヒーレント制御技術を提案し、その有効性を理論的および実験的に実証した。その他、フォトニック結晶・フォノン結晶を用いて輻射場およびフォノン場を制御し、量子ドット励起子系のコヒーレンスを向上させる新規プロジェクトを光子班とA03 フォノン班の4グループの連携のもとスタートし、構造の基本的設計と試料作製プロセスに関わる基礎的条件出しを完了した。②ダイヤモンドNV中心を用いた量子センサーの開拓に関しては、NV中心生成技術および特性制御技術の開発を進め、電界印可による電子スピンコヒーレンス時間の長時間化（従来の約10倍）、スピンポンピング法によるダイヤモンドへの偏極スピン注入に成功した。さらに、光子班内の連携やA04理論班も含めた領域内外共同研究を推進し、高配向率を有するNV中心集合体アレイの生成に成功した。これらはセンサー感度向上を可能にする重要な成果である。さらに、A04理論班との連携のもと電子スピンと核スピンの量子ハイブリッド系を用いたセンサーの理論提案、電子スピン多周波制御によるベクトル磁場センサーの提案などを行い、一部特許出願を行なった。また、A01電荷・スピン班と連携でNV中心を用いた微小電流検出をカーボンナノチューブデバイスセンシングへ応用する試みをスタートし、その基盤技術を確立した。③テラヘルツ（THz）電磁波を用いた単一分子・原子ダイナミクスと伝導制御に関しては、ナノギャップ電極をTHz電磁波に対するアンテナとして使い、回折限界を大きく超えて原子レベルまでTHz電磁波を集光することに成功し、単一分子を介したTHz光子支援トンネルの観測に成功した。さらに、開発したナノギャップ電極技術とブロードバンドTHz電磁波（THzパルスまたは黒体輻射）を組み合わせて、単一分子（C60分子）の重心運動やフラーレン分子に内包された単一原子の振動スペクトルを測定する画期的成果を得た。④機械的振動を用いた新しいTHz電磁波検出は当初、計画していなかったテーマであるが、A03フォノン班と共同で、MEMS両持ち梁機械振動子構造の共振周波数のシフトを信号とする新しい室温動作・高速ボロメータの提案・試作を行い、従来の室温動作熱型THzセンサーと同等の感度で動作速度が100-1000倍速い検出器の試作に成功した。今後動作原理に量子効果を取り込むことで格段に高感度なTHz検出方法への発展が期待される。

フォノンを中心にしたハイブリッド量子系の研究：A03班では、高周波ナノフォノン構造を半導体やカーボンナノ材料、超伝導ナノ材料により実現し、量子性を活用するための基盤技術を確立すること、さらに、量子性を活用した素子動作を実現し、異なる物理系間を量子的に結合させることで、最終目標であるフォノンを介した異なる物理系間の量子トランスデューサを実現するための基礎研究を展開した。これらに向けて、トップダウン的、ボトムアップ的アプローチ、ならびにそれらを融合したアプローチを行い、この2年間で下記の重要な成果を得た。

①トップダウン的アプローチによるフォノン操作においてはフォノン結晶の非線形分散を用いた時間的フォノンフォーカシング技術を確立した。この技術では所望の時刻、場所において空間的に鋭く局在したフォノンパルスを生成することが可能であり、高感度のセンシング技術への応用が期待される。さらに、フォノンの弾道的輸送特性の利用による空間的フォノンフォーカシング技術を確立した。この技術によりフォノン散乱を低減し、量子ビットのコヒーレンス時間の延長が期待できる。また、フォノン結晶と機械振動子を結合させたフォノンルーティング技術を確立した。これにより、フォノンの伝搬ルートを周波数によって選択することができ、フォノンによる情報伝達に役立つ。②ボトムアップ的カーボン構造を用いたフォノン制御においては、単一架橋単層カーボンナノチューブの熱伝導計測を実現した。さらに、グラフェン結晶成長で ^{12}C と ^{13}C を周期的に配列した同位体超格子構造を作製することに成功した。フォノン結晶構造ともいふべきこの構造は様々なフォノン制御技術に活用できることが期待される。

③両アプローチを融合したフォノン系として、フォノン輸送の評価ならびに制御に向けた架橋 CNT 素子の開発を A01 電荷・スピン班とも連携して推進し、InAs ナノワイヤの架橋構造の作製に成功した。これらにより、本研究課題の最も重要なターゲットのひとつである量子ナノ構造とフォノン構造とのハイブリッド化に向けた研究について順調な進捗が得られた。さらに、半導体量子ドットを機械振動子に組み込み、機械振動により発生した歪ならびに圧電効果による両者の結合動作に成功した。63fm という極めて高感度の変移を抵抗値の変化として検出するとともに、半導体量子ドットからの反作用により、機械共振のダンピングが変化することも確認した。さらに、薄膜の上部に周期的に円柱を配置する新しいタイプのフォノン結晶構造を提案した。

理論を中心としたハイブリッド量子系の研究：ハイブリッド量子科学の確立を目指す本領域において、A04 理論班は理論的な提案による先導的なトップダウン的アプローチと、実験結果に基づく理論的解析を中心としたボトムアップ的アプローチ、さらにこれらが融合したもので領域全体をけん引することを目指して研究を展開した。

①理論トップダウン的研究では、量子的な状態をプローブとして用いる量子計測の評価に関して、プローブの準備時間も考慮した統合的なスキームにおいて比較を行い、量子測定の優位性を数量的に明らかにした。さらに、集団系における非古典的な状態の生成を扱い、新しい非古典的な状態生成方法の提案、ハイブリッド量子系の擬確率関数を用いた状態表示の開発などに進展があった。②実験系とタイアップしたボトムアップ的研究では、A01 電荷・スピン班で実験が進む InAs、InSb 等の半導体ナノワイヤに微小なゲート電極を接合した系の輸送特性の解析を進め、実験計画班の多くが用いるカーボンナノチューブについて、単位胞に 2 個の原子を含む 1 次元系であり、トポロジカル絶縁体になり得ることに着目し、公募班と共同でカーボンナノチューブへの軸方向への磁場印加によりトポロジカル相転移が引き起こされることを示した。さらに、A03 フォノン班で進めるナノワイヤのフォノン物性について、1 次元ナノワイヤの熱輸送解析を行った。また、電子フォノン間で物理量が量子論的に行き来する様子を計算できるよう、電子フォノン相互作用を導入したプログラムを完成した。A01 班電荷・スピン班で進めるグラフェンランジスタを考慮し、弱く結合した多層グラフェンにおける電子状態を計算し、層間相互作用が十分小さい場合、ディラック電子特有の輸送特性を保ったままチャネル長を長くできることが分かった。③実験系とタイアップした協同現象の解明では、A01 電荷・スピン班と共同で、量子ホール効果のある系を用いて核スピンの集団現象をモデル化し、集団現象としては、量子光学的なモデルと等価であることを示した。また、A01、A03 班と共同で 4300 個の超伝導磁束量子ビットをマイクロ波共振器に結合させた素子の作製と分光測定を行い、250MHz という巨大な周波数シフトを観測した。この理論解析から周波数シフトは超伝導磁束量子ビット集団の協調的な結合に由来することが明らかになった。

公募班によるハイブリッド量子系の研究：公募班でも多くの優れた研究がハイブリッド量子の実現に向けて展開された。特に重要な進展として、ダイヤモンドの NV 中心の電子スピンを用い、自己誤り耐性のあるホロノミック（幾何学的）量子ビットを考案し、ホロノミックスピンエコーと呼ぶ新原理で自律的に安定化することに成功した。また、この量子ビットを 1 ナノ秒かつ従来の約 3 倍の精度で制御できるホロノミック量子操作を実証した。本成果は書き込み、ゲート制御、読み出しを一括して光操作可能な量子集積チップの実現に道を開くものである。また、A01 電荷・スピン班と共同で進める量子ポイントコンタクト (QPC) 近傍における動的な核スピン分極 (DNP) の研究、微小光共振器の強い光閉じ込めによる新しい光機能、例えば、輻射圧による共振器の励起によるフォノンレーザーの実証などでも進展があった。後者は人的な交流もあり今後 A03 フォノン班との有機的な連携に発展する予定である。

3. 審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

審査結果の所見「本研究領域は、電荷、クーパー対、電子スピン、核スピン、フォトン、フォノンなど異なる物理量の小規模な量子力学的結合を実現し、ある物理量の量子情報を別の物理量に受け渡す手法、すなわち「量子トランスデューサ」を可能にすることで超高感度の量子計測技術の実現を目指すものである。実現性が未だに不確実な大規模量子計算ではなく、小規模な量子ネットワークの実現から古典限界を超える量子高感度計測を目指す着想は独創性に優れている。量子トランスデューサが実現すれば、理学、工学、医学の広い分野に波及する応用が比較的近い将来に期待できる。

研究組織は、電荷・スピン、フォトン、フォノンといった物理量の量子結合系で世界的優位に立つ実験系計画研究と高感度量子計測理論の観点から領域全体の方向性をサポートする理論系計画研究から構成されている。領域代表者の強いリーダーシップの下、緊密な連携と量子ハイブリッド化に向けた意識の共有が強化されれば、全体として優れた成果が期待できる。

一方で、海外に比べて大学の研究グループが少ない量子情報分野で優秀な若手研究者を育成していくには、本研究領域の若手育成プログラムを充実させ、本研究領域からの情報発信を強化することが強く望まれる。また、研究期間終了後に新たな学術領域の創成を目指すには、各研究成果の背後にある普遍的概念の創出に向けた取組を明確化していく必要がある。」

⇒領域代表の強いリーダーシップとして、領域会議、国際会議、勉強会、ニュースレターなどを通して「ハイブリッド量子科学」の概念と領域内の共同研究が最も重要であることを繰り返し強調することで、本領域の考え方が着実に領域へ浸透している。また、領域内のハイブリッド量子科学に向けた連携を後押しする意味で、領域内インターンシップなども充実した。若手育成プログラムとして、領域会議での若手育成セッション、国際支援の充実を受けた若手の海外派遣などに加えて、当初予定していなかった若手主体の会議を設置した。また、様々な国際会議、ニュースリリース、アドバイザーの設置などを通してハイブリッド量子科学を領域内外にアピールするとともに、市民講座などを通して一般への広報活動も行っている。主要研究者によるハイブリッド量子科学分野の教科書執筆なども今後進めたいと考えている。

各研究成果の背後にある普遍的概念の創出に向けた取組を明確化していく必要

⇒これはもっとも重要でもっとも難しいものである。量子結合は本質的には同じハミルトニアンで記述できるが、扱う物理量により実験的には何が重要になるかが異なる。A04 理論班においては、高感度量子計測に関して、スピンを前提にしながらも、一般性を失わない理論提案を心掛けている。今後、教科書などの執筆などを考える中で、量子トランスデューサ全般に通用するような普遍的な概念の創出を目指す。

留意事項「博士研究員の雇用に関する人件費が過大に見受けられるものがあり、研究項目 A04 の理論班において、その傾向が顕著である。研究員の雇用なしでは遂行が困難と思われる研究計画を精査した上で、見直しを行うことが必要である。」

⇒この留意事項は領域立ち上げ時に最も重要な項目として総括班を中心に精査し、博士研究員の数を他のプロジェクトとの兼務も含めて必要不可欠なところまで縮小すること、雇用する博士研究員の将来のキャリアパスにも配慮することを考え、当初計画では H27-29 年度にかけて総括班 1 人、電荷・スピン班 2-4 人、フォトン班 2-3 人、理論班 3-4 人（計画年度により異なる）であったものを、実質人数として、総括班 0.5 人、電荷・スピン班 0.5 人（テクニカルスタッフとしての博士課程学生の雇用は 1 人）、フォトン班 2 人、理論班 2 人に抑えている。（0.5 人は例えば 1 人ずつ雇用する計画だったものを、兼務で雇用するなどして、トータルの人数を削減したためである。）なお、フォノン班は当初計

画では博士研究員の雇用予定はなかったが、研究の必要性から1.4人雇用している。しかし、全体では8-12人であった当初予定が、現時点で6.4人に抑えられており、留意事項にきちんと配慮している。また、雇用に際しては外国人、女性、若手（学位取得後6年以内）を優先する点も配慮している。

参考意見「公募研究について、本研究分野では高度の実験技術と装置が求められることから、若手研究者の新規参入障壁が高く、応募が少ない可能性が懸念されるため、総括班や計画研究から提供可能なサポートなどを公募研究の募集時に明示した方がよいのではないか、との意見があった。」

⇒公募時に高価なプロセス装置や測定装置(電子ビームリソグラフィ装置、ウェハボンディング装置、希釈冷凍機)の供用の可能性を明記し、実際に電子ビームリソグラフィ装置、ウェハボンディング装置については領域内で供用している。同様の共用装置の明記は、平成29年度の第2回目の公募についても同様に行う予定である。

4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

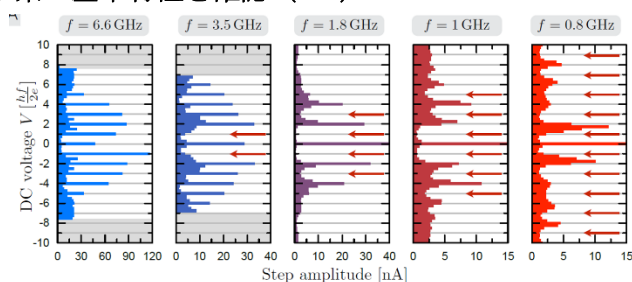
研究項目ごとに述べるが、領域内共同研究によるものは若い番号のところでその旨明記して記述する。

○量子ホール系における動的核スピン偏極の基本的な振る舞いを確認（A01）

半導体における核スピン偏極の基本になる量子ホール強磁性(QHF)状態で生じるドメイン構造を用いた核スピン偏極について、InSb 二次元系の $\nu=2$ の QHF を用いて、カイラルエッジチャンネルの重要性とそれにに基づく相反性を実験的に確認した。2017 年に Nature Comm. に掲載。報道発表。国際共同研究の成果。

○2次元トポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッド系の基本特性を確認（A01）

HgTe/CdTe 2次元トポロジカル絶縁体と超伝導体のジョセフソン接合を形成し、そのシャピロステップをマイクロ波を照射して測定することでトポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッド量子系に特徴的な特性を見出した。2017 年に Nature Nano. に掲載。国際共同研究の成果。

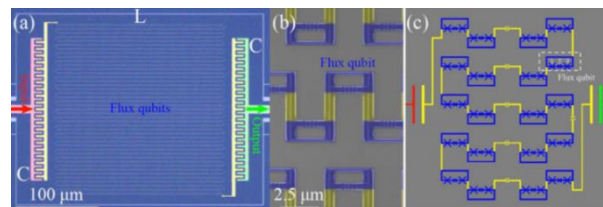


○超伝導量子干渉素子（dc-SQUID）を用いた高感度スピン共鳴（A01、A03、A04 の共同）

dc-SQUID と Er ドープ YSO とを直接張り合わせた素子を作製し、Er スピンの電子スピン共鳴をオンチップで実現することに成功した。0.1 pL のサイズにおいて 10^6 程度のスピン検出に成功しており、高感度・高位置分解能のスピン共鳴手法としての応用が期待される。2016 年 APL に掲載。

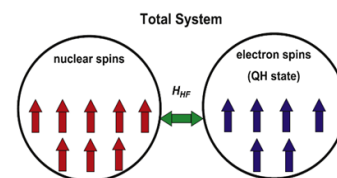
○複数の量子ビットとマイクロ波共振器の結合（A01、A03、A04 の共同）

量子センシング技術においては、量子ビットのアレー化により、古典限界を超えた高い磁場センシング感度が得られることが期待されている。この実現に向けて、4300 個の量子ビットを単一のマイクロ波共振器と結合させる実験にとりくんだ。実験結果とシミュレーションとの比較により、実際に殆どの量子ビットが共振器と結合していることが示された。2016 年 PRL に掲載。



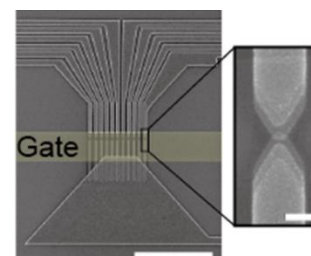
○核スピン系と電子スピン系の多体相関による協同現象（A01、A04 の共同）

二層量子ホール系の傾角反強磁性状態のように電子スピン系に線形な分散があり、それが偏極した核スピンと超微細相互作用する場合にディッケ型超放射が生じる可能性を指摘。実験結果とも整合。得られた定式化は、そのまま様々な固体系へ応用でき、協同現象が引き起こす量子現象、量子統計的性質の新しい可能性を拓くものである。2016 年に NJP に掲載。



○量子ポイントコンタクト近傍における動的な核スピン分極の研究（A01、公募の共同）

量子ポイントコンタクト（QPC）を流れる伝導電子による核スピンのスピン反転率を、QPC を流れる電子の散乱行列を用いて求め、その結果 QPC 近傍の核スピン偏極の分布が双極子型になることがわかった。また、この核スピン偏極分布のあるときとないときのコンダクタンスの変化を明確にした。



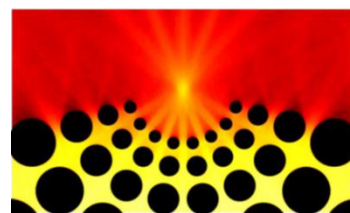
○単一 C60 分子を介した光子支援トンネル効果の観測（A02）

THz アンテナ形状に加工された原子スケールの間隙を有するナノギャップ電極を用いて THz 電磁波を電界増強して集光することに成功した。これを

用いて、2.5 THz の THz 電磁波を照射したときの C60 分子を介した光子支援トンネル効果を観測。2015 年 PRL に掲載。

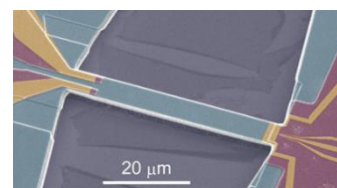
○フォノンの空間的・時間的フォーカシング (A03)

フォノンナノ構造が有するフォノン伝搬の制御技術を活用し、フォノンフォーカシングを空間軸ならびに時間軸の両側面において実現することに成功した。まず、半導体薄膜に形成する円孔の配置を工夫することで、特定の方向に輸送されるフォノンを選択的に透過させ、空間的な指向性を持たせることに成功した。さらに、非線形分散を活用し、フォノンの時間レンズと呼ぶべき手法を開拓し、所望の時刻において鋭く局在したフォノンパルスを生成する時間的フォーカシング手法も実証した。2017 年 Nature Comm. に掲載。報道発表。



○量子ドットメカニカル振動子による高感度変位検出 (A03)

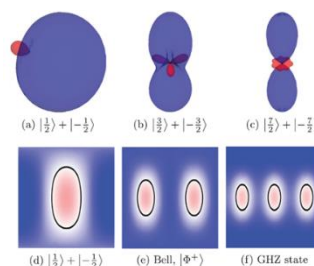
半導体量子ドットを機械振動子に組み込み、機械振動により発生した歪ならびに圧電効果による両者の結合動作に成功し、わずか 63fm という極めて小さな機械振動を抵抗値の変化として検出することに成功した。2016 年に Nature Comm. に掲載。報道発表。A04 班との討論が成果に活かされている。



○任意の量子系に対するウィグナー関数 (A04)

ハイブリッド量子系の状態やダイナミクスを記述、解析するために、量子光学で大きな成功を収めたウィグナー関数の方法を、ハイブリッド系に普遍的に見られる Composite 系へ応用し、擬確率関数の負値などから状態のもつ量子性を解析する方法を検討した。Wigner 関数

がもつカーネルの性質に注目することで、任意の Composite 系へ Winger 関数を拡張することに成功した。これにより、任意の次元をもつ部分系を任意に組み合わせた系で、Winger 関数表示を用いることができるようになった。この方法は、状態だけでなく量子プロセスの表示にも応用できる。量子情報処理に限らず、広く量子科学の数理的、数値的な解析ツールとして応用できる。2016 年 PRL に掲載。

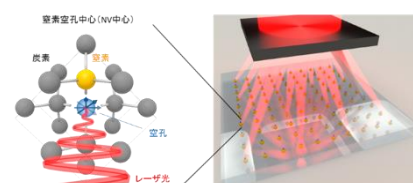


○カーボンナノチューブのトポロジカル的な性質を解明 (A04 と公募の共同)

トポロジカル物質としてのカーボンナノチューブに着目し、軸方向への磁場印加によりトポロジカル相転移が引き起こされることを示した。トポロジカル相転移に伴い、エネルギーギャップ中に生じる端状態は系全体に広がるバンド状態へと移り変わる。この振舞いは局所電子密度の観測により実験的に見いだすことができると考えられる。2017 年 JPSJ に掲載。

○ダイヤモンド NV センターを用いた新しいタイプの量子ビット (公募)

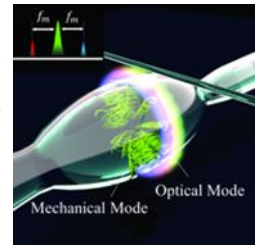
ダイヤモンド中の NV 中心の電子スピンを用い、量子情報処理の基本要素である量子ビットの新しい形態として自己誤り耐性のあるホロノミック (幾何学的) 量子ビットを考案し、ホロノミックスピンエコーと呼ぶ新原理で自律的に安定化することに成功した。また、この量子ビットを 1 ナノ秒かつ従来の約 3 倍の精度で制御するホロノミック



量子操作を考案し、実証した。本成果により量子メモリーへの書き込み・ゲート制御・読み出しを一括して光操作可能な量子集積チップの実現に道を開いた。2016 年 Nature Comm.、2017 年 Nature Photonics に掲載。報道発表。

○ファイバー共振器を用いたフォノンクス (公募)

微小光共振器の強い光閉じ込めによる新しい光機能、例えば、輻射圧による共振器の励起によるフォノンレーザーの実証およびフォノンのレーザー冷却の可能性を実証した。人的な交流があり、今後はA03 フォノン班との有機的な連携を元に光子とフォノンのハイブリッド量子系を推し進める。2016年 Nature Comm. および Laser & Photonics Review に掲載。



5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

<A01>電荷・スピン班

- *E. Bocquillon, R. S. Deacon, J. Wiedenmann, P. Leubner, T. M. Klapwijk, C. Brüne, K. Ishibashi, H. Buhmann, and L. W. Molenkamp, “Gapless Andreev bound states in the quantum spin Hall insulator HgTe”, Nature Nanotechnology 査読有, 12, 137-143 (2017).
- ▲H. Tomizawa, K. Suzuki, *T. Yamaguchi, S. Akita, and K. Ishibashi, “Control of tunnel barriers in multi-wall carbon nanotubes using focused ion beam irradiation”, Nanotechnology 査読有, 28, 165302-1-5 (2017).
- *M. Korkusinski, P. Hawrylak, H. W. Liu, and Y. Hirayama, “Manipulation of a nuclear spin by a magnetic domain wall in a quantum Hall ferromagnet”, Scientific Reports 査読有, 7, 43553-1-7 (2017).
- ▲K. F. Yang, K. Nagase, Y. Hirayama, T. D. Mishima, M. B. Santos, and *H.W. Liu, “Role of chiral quantum Hall edge states in nuclear spin polarization”, Nature Communications 査読有, 8, 15084-1-7 (2017).
- ▲*M. Mogi, M. Kawamura, R. Yoshimi, A. Tsukazaki, Y. Kozuka, N. Shirakawa, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura, ” A magnetic heterostructure of topological insulators as a candidate for an axion insulator”, Nature Materials 査読有, 16, 516-521 (2017).
- R. Wang, R. *S. Deacon, D. Car, E. P. A. M. Bakkers, and K. Ishibashi, “InSb nanowire double quantum dots coupled to a superconducting microwave cavity”, Appl. Phys. Lett. 査読有, 108, 203502-1-4(2016) selected as an editor’s pick.
- ▲*A. Hida, T. Suzuki, and K. Ishibashi, “Detecting the formation of single-walled carbon nanotube rings by photoabsorption spectroscopy”, Appl. Phys. Express 査読有, 9, 085102-1-3 (2016).
- ▲*S. Maeda, S. Miyamoto, M. H. Fauzi, K. Nagase, K. Sato, and Y. Hirayama, “Fabry-Perot interference in a triple-gated quantum point contact”, Appl. Phys. Lett. 査読有, 109, 143509-1-4 (2016).
- ▲*S. Miyamoto, T. Miura, S. Watanabe, K. Nagase, and *Y. Hirayama, “Localized NMR mediated by electrical-field-induced domain wall oscillation in quantum-Hall-ferromagnet nanowire”, Nano Lett. 査読有, 16, 1596-1601 (2016).
- A. Srinivasan, K. L. Hudson, D. Miserev, L. A. Yeoh, O. Klochan, K. Muraki, Y. Hirayama, O. P. Sushkov, and *A. R. Hamilton, “Electrical control of the sign of the g factor in a GaAs hole quantum point contact”, Phys. Rev. B (RC) 査読有, B94, 041406-1-5 (2016).
- ▲*K. Akiba, K. Nagase, and Y. Hirayama, “Simultaneous measurement of resistively and optically detected nuclear magnetic resonance in the $\nu=2/3$ fractional quantum Hall

regime” , Phys. Rev. B (RC) 査読有, B94, 081104-1-5 (2016).

12. *R. Negishi, M. Akabori, T. Ito, Y. Watanabe, and Y. Kobayashi, “Band-like transport in highly crystalline graphene films from defective graphene oxides” , Scientific Reports 査読有, 6, 28936-1-10 (2016).

13. *H. Tanaka, R. Arima, M. Fukumori, D. Tanaka, R. Negishi, Y. Kobayashi, S. Kasai, T. Yamada, and T. Ogawa, ” Method for controlling electrical properties of single-Layer graphene nanoribbons via adsorbed planar molecular nanoparticles” , Scientific Reports 査読有, 5, 12341-1-8 (2015).

<A02> フォトン班

1. ▲*K. Yoshida, and K. Hirakawa, “Stochastic resonance in bistable atomic switches” , Nanotechnology 査読有, 28, 125205-1-5 (2017).

2. T. Shimo-Oka, Y. Tokura, Y. Suzuki, *N. Mizuochi, “Fast phase manipulation of the single nuclear spin induced by electric field” , Phys. Rev. A 査読有, 95, 32316-1-8 (2017).

3. *A. Matsumoto, K. Akahane, T. Umezawa, N. Yamamoto, “Extremely stable temperature characteristics of 1550-nm band, p-doped, highly stacked quantum-dot laser diodes” , Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 56, 04CH07-1-4 (2017).

4. ▲*Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. Ndebeka-Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa, “Excited-state charging energies in quantum dots investigated by terahertz photocurrent spectroscopy” , Phys. Rev. B 査読有, 93, 235313-1-5 (2016).

5. ◎*Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa, “Room temperature, very sensitive thermometer using a doubly clamped microelectromechanical beam resonator for bolometer applications” , Appl. Phys. Lett. 査読有, 108, 163503-1-4 (2016).

6. ▲K. Sasaki, Y. Monnai, S. Saijo, R. Fujita, H. Watanabe, J. I. Hayase, K. M. Itoh and *E. Abe, “Broadband, large-area microwave antenna for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond” , Review of Scientific Instruments 査読有, 87, 053904-1-5 (2016).

7. *K. Kuruma, Y. Ota, M. Kakuda, D. Takamiya, S. Iwamoto and Y. Arakawa, “Position dependent optical coupling between single quantum dots and photonic crystal nanocavities” , Appl. Phys. Lett. 査読有, 109, 0711110-1-5 (2016).

8. *I. Kim, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, “Design of quasi-one-dimensional phononic crystal cavity for efficient photoelastic modulation” , Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 55, 08RD02-1-6 (2016).

9. ▲*S. Iwamoto, S. Takahashi, T. Tajiri, and Y. Arakawa, “Semiconductor three-dimensional photonic crystals with novel layer-by-layer structures” , Photonics 査読有, 3, 34-1-12 (2016).

10. *H. Watanabe, H. Umezawa, T. Ishikawa, K. Kaneko, S. Shikata, J. I. Hayase, and K. M. Itoh, “Formation of nitrogen-vacancy centers in homoepitaxial diamond thin films grown via microwave plasma-assisted chemical vapor deposition,” IEEE Transactions on Nanotechnology 査読有, 15, 614-618 (2016).

11. *K. Akahane, T. Umezawa, A. Matsumoto, N. Yamamoto, T. Kawanishi, “Characteristics of highly stacked InAs quantum-dot laser grown on vicinal (001) InP substrate” , Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 55, 04EJ16-1-4 (2016).

12. ◎▲M. Fujiwara, K. Yoshida, T. Noda, H. Takashima, A. W. Schell, N. Mizuochi, *S.

Takeuchi, “Manipulation of single nanodiamonds to ultrathin fiber-taper nanofibers and control of NV-spin states toward fiber-integrated λ -systems”, Nanotechnology 査読有, 27, 455202-1-8 (2016).

13. ▲N. Fukui, *H. Morishita, S. Kobayashi, S. Miwa, *N. Mizuochi, Y. Suzuki, “Ferromagnetic resonance induced electromotive forces in Ni₈₁Fe₁₉p-type diamond”, Solid State Comm. 査読有, 243, 44-48 (2016).

14. ▲*K. Yoshida, K. Shibata, and K. Hirakawa, “Terahertz field enhancement and photon-assisted tunneling in single-molecule transistors”, Phys. Rev. Lett. 査読有, 115, 138302-1-5 (2015).

15. T. Endo, J. I. Hayase, and *H. Maki, “Photon antibunching in single-walled carbon nanotubes at telecommunication wavelengths and room temperature”, Appl. Phys. Lett. 査読有, 106, 113106-1-5 (2015).

16. *Y. Zhang, K. Shibata, N. Nagai, C. N. Bandou, G. Bastard, and K. Hirakawa, “Gate-controlled terahertz single electron photovoltaic effect in self-assembled InAs quantum dots”, Appl. Phys. Lett. 査読有, 107, 103103-1-4 (2015).

<A03> フォノン班

1. ▲Y. Anno, Y. Imakita, K. Takei, S. Akita, and *T. Arie, “Enhancement of graphene thermoelectric performance through defect engineering”, 2D Materials 査読有, 4, 025019-1-6 (2017).

2. ▲*R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and M. Nomura, “Heat guiding and focusing using ballistic phonon transport in phononic nanostructures”, Nature Communications 査読有, 8, 15505-1-8 (2017).

3. ▲R. Yanagisawa, J. Maire, A. Ramiere, R. Anufriev, and *M. Nomura, “Impact of limiting dimension on thermal conductivity of one-dimensional silicon phononic crystals”, Appl. Phys. Lett. 査読有, 110, 133108-1-5 (2017).

4. ▲*J. Maire, R. Anufriev, and M. Nomura, “Ballistic thermal transport in silicon nanowires”, Scientific Reports 査読有, 7, 41794-1-8 (2017).

5. ▲Kihara K, A. Ishitani, T. Koyama, M. Fukasawa, T. Inaba, M. Shimizu, and *Y. Homma, “Raman imaging of millimeter-long carbon nanotubes grown by a gas flow method”, Appl. Phys. Express 査読有, 10, 025103-1-4 (2017).

6. ◎▲*Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, and H. Yamaguchi, “Gate-controlled electromechanical backaction induced by a quantum dot”, Nature Communications 査読有, 7, 11132-1-6 (2016).

7. ◎▲*I. Mahboob, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, “An electromechanical Ising Hamiltonian”, Science Adv. 2, e1600236-1-7 (2016).

8. ◎▲H. Okamoto, R. Schilling, H. Schütz, V. Sudhir, D. J. Wilson, H. Yamaguchi, and T. J. Kippenberg, “A strongly coupled Λ -type micromechanical system”, Appl. Phys. Lett. 査読有, 108, 153105-1-4 (2016).

9. ▲M. Ito, H. Yajima, and *Y. Homma, “Strain effect of cellulose-wrapped single-walled carbon nanotubes measured by photoluminescence and Raman scattering spectroscopy”, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 55, 075101-1-5 (2016).

10. Y. Anno, K. Takei, S. Akita, and *T. Arie, “Enhancing the thermoelectric device performance of graphene using isotopes and isotopic heterojunctions”, Adv. Electron. Mater. 査

読有, 1, 1500175-1-6 (2015).

<A04> 理論班

1. ▲*A. Iwasaki and M. Eto, “Enhanced current fluctuation in Coulomb blockade regime of semiconductor quantum dot”, J. Physics: Conference Series 査読有, in press (2017).
2. *F. Hashimoto, N. Mori, O. Kubo, and M. Katayama, “Electronic states of coupled graphene nanoribbons”, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, 56, 045001-1-8 (2017).
3. ▲*L. Turyanska, O. Makarovskiy, L. Eaves, A. Patane, and N. Mori, “Mobility enhancement of CVD graphene by spatially correlated charges”, 2D Materials 査読有, 4, 025026-1-6 (2017).
4. ▲*Y. Matsuzaki and S. Benjamin, “Magnetic-field sensing with quantum error detection under the effect of energy relaxation”, Phys. Rev. A 査読有, 95, 032303-1-8 (2017).
5. ▲*N. Lambert, *Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, N. Ishida, S. Saito, and F. Nori, “Superradiance with an ensemble of superconducting flux qubits”, Phys. Rev. B 査読有, 94, 224510-1-8 (2016).
6. ◎▲*Y. Matsuzaki, T. Shimooka, H. Tanaka, Y. Tokura, K. Semba, and N. Mizuochi, “Hybrid quantum magnetic field sensor with an electron spin and a nuclear spin in diamond”, Phys. Rev. A 査読有, 94, 052330-1-6 (2016).
7. ▲*K. Kakuyanagi, Y. Matsuzaki, C. Deprez, H. Toida, K. Semba, H. Yamaguchi, W. J. Munro, and S. Saito, “Observation of collective coupling between an engineered ensemble of macroscopic artificial atoms and a superconducting resonator”, Phys. Rev. Lett. 査読有, 117, 210503-1-6 (2016).
8. ▲*G. C. Knee, *K. Kakuyanagi, M. C. Yeh, Y. Matsuzaki, H. Toida, H. Yamaguchi, S. Saito, A. J. Leggett, and W. J. Munro, “A strict experimental test of macroscopic realism in a superconducting flux qubit”, Nature Communications 査読有, 7, 13253-1-5 (2016).
9. ▲*T. Tilma, M. J. Everitt, J. H. Samson, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Wigner functions for arbitrary quantum systems”, Phys. Rev. Lett. 査読有, 117, 180401-1-5 (2016).
10. ▲*D. M. Di Paola, M. Kesaria, O. Makarovskiy, A. Velichko, L. Eaves, N. Mori, A. Krier, and A. Patane, “Resonant Zener tunnelling via zero-dimensional states in a narrow gap diode”, Scientific Reports 査読有, 6, 32039-1-8 (2016).
11. ▲*S. Dooley, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Quantum metrology including state preparation and readout times”, Phys. Rev. A 査読有, 94, 052320-1-7 (2016).
12. ▲*Y. Matsuzaki, H. Morishita, T. Shimooka, T. Tashima, K. Kakuyanagi, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, N. Mizuochi, and S. Saito, “Optically detected magnetic resonance of high-density ensemble of NV⁻ centers in diamond”, J. Physics: Condensed matter. 査読有, 28, 275302-1-8 (2016).
13. ▲*Y. Hama, M. H. Fauzi, K. Nemoto, Y. Hirayama, and Z. F. Ezawa, “Dicke model for quantum Hall systems”, New J. Phys. 査読有, 18, 023027-1-10 (2016).
14. *S. Souma, A. Sawada, H. Chen, Y. Sekine, M. Eto, and T. Koga, “Spin blocker using the interband Rashba effect in symmetric double quantum wells”, Phys. Rev. Appl. 査読有, 4, 034010-1-9 (2015).
15. ▲*N. Mori, R. J. A. Hill, A. Patane, and L. Eaves, “Monte Carlo study on anomalous carrier diffusion in inhomogeneous semiconductors”, J. Physics: Conference Series 査読有, 647, 012059-1-4 (2015).

公募班

1. ◎▲Y. Sekiguchi, N. Niikura, R. Kuroiwa, H. Kano, and *H. Kosaka, “Optical holonomic single quantum gates with a geometric spin under with a zero field”, Nature Photonics 査読有, 11, 309–314 (2017).
2. ▲*R. Okuyama, W. Izumida, M. Eto, “Topological phase transition in metallic single-wall carbon nanotube”, J. Phys. Soc. Jap. 査読有, 86, 013702-1-4 (2017).
3. *S. Yang, Y. Wang, T. H. Tran, S. A. Momenzadeh, M. Markham, D. J. Twitchen, R. Stohr, P. Neumann, H. Kosaka, and *J. Wrachtrup, “High fidelity transfer and storage of photon states in a single nuclear spin”, Nature Photonics 査読有, 10, 507–511 (2016).
4. ◎Y. Sekiguchi, Y. Komura, S. Mishima, T. Tanaka, N. Niikura, and *H. Kosaka, “Geometric spin echo under zero field”, Nature Communications 査読有, 7, 11668-1-6 (2016).
5. ▲*M. Asano, *K. Y. Bliokh, *Y. P. Bliokh, A. G. Kofman, R. Ikuta, T. Yamamoto, Y. S. Kivshar, L. Yang, and N. Imoto, “Anomalous time delays and quantum weak measurements in optical micro-resonators”, Nature Communications 査読有, 7, 13488-1-9 (2016).
6. ◎▲M. Asano, Y. Takeuchi, W. Chen, *Ş. K. Özdemir, R. Ikuta, N. Imoto, L. Yang, and *T. Yamamoto, “Observation of optomechanical coupling in a microbottle resonator”, Laser & Photonics Reviews 査読有, 10, 603–611 (2016).

書籍

「半導体量子構造の物理」平山祥郎、山口浩司、佐々木智、朝倉書店

ホームページ

ハイブリッド量子科学 web ページ <http://hybridqs.org/>

イベントサイト <http://hybridqs-workshop.com/>

主催シンポジウムなどを掲載

2016/06/13-14 Frontiers in Quantum Materials and Quantum Devices Workshop (FQMD2016)

2016/11/10-11/11 German-Japanese Meeting on the Science of Hybrid Quantum Systems

(開催予定)2017/09/10-13 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HQS2017)

一般向けアウトリーチ活動

2016/5/27 NII オープンハウス「ハイブリッドで変わる量子の世界」

216/7/28 日本学術振興会「先端ナノデバイス・材料テクノロジー」第 151 委員会第二回研究会「ダイヤモンドにおける光子・電子・核子の量子もつれと量子通信応用」(小坂英男)

2016/10/13 日英 Quantum Communication Workshop Series III 「Quantum teleportation-based deterministic repeater」(小坂英男)

2017/3/1 NII 市民講座「情報学最前線」ナノサイズの「揺れ」がもたらす新分野 —フォノンデバイス技術の最前線—(山口浩司)

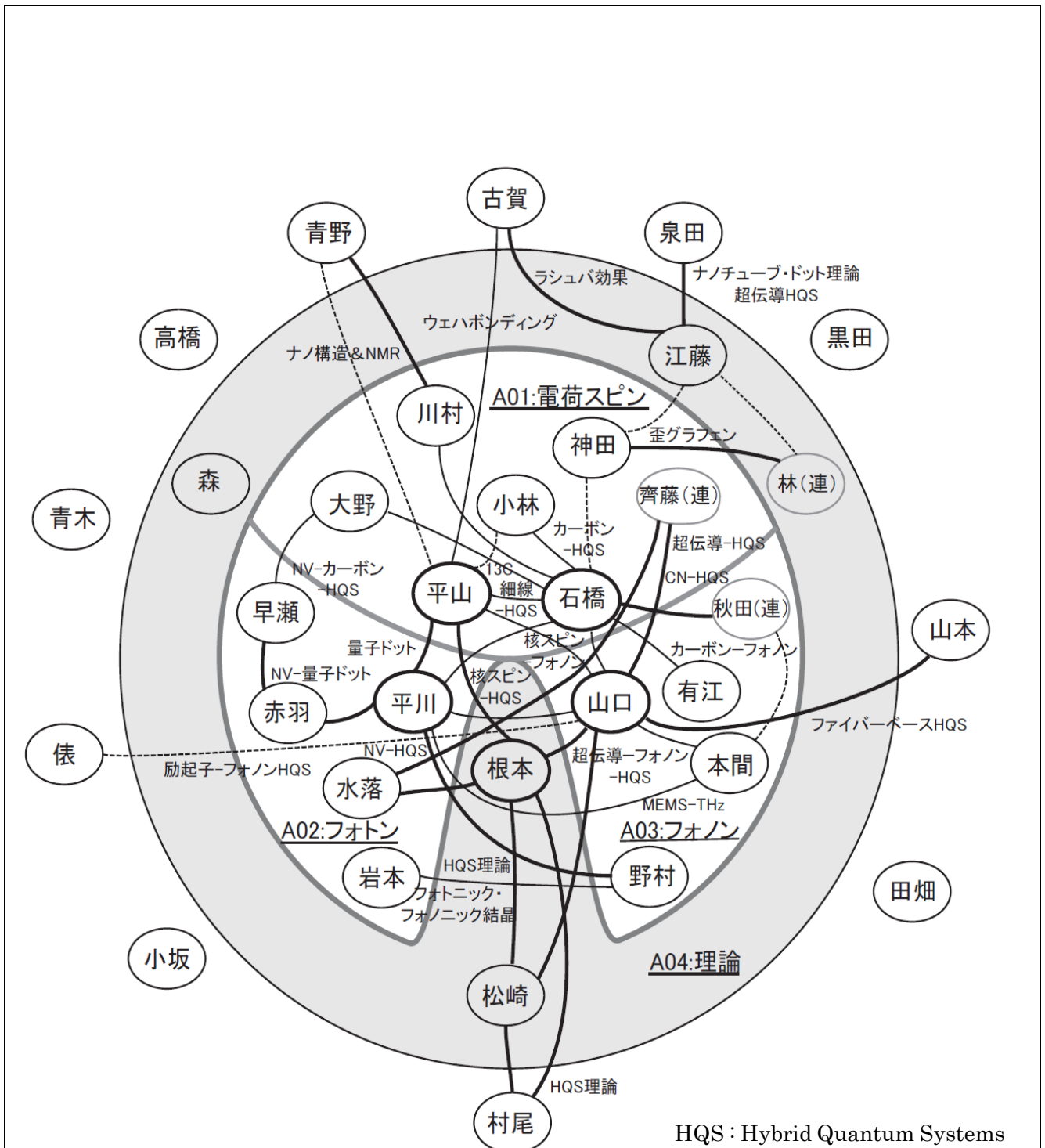
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

総括班が中心となり、(1) 電荷(クーパー対を含む)、スピン、核スピンの量子的な結合の制御に加えて、これらとフォトン、フォノンの量子的な結合、(2) フォトンの高度な制御技術の確立とフォトンと他の物理量の量子的な結合、(3) フォノンの高度な制御技術の確立とフォノンと他の物理量の量子的な結合、(4) ハイブリッド量子科学の実現に向けた理論構築の4つの計画研究を有機的に連携させ、研究期間終了までにハイブリッド量子科学の分野で日本の優位性を確立することを目指している。特に、領域内での研究の有機的な結合により、新たな研究の創造が期待できる点として、日本が優位な位置にあるナノ構造、ナノ材料分野を、量子制御の分野に引き込み発展させることのほか、実験研究と理論研究、異なる材料系(半導体系、カーボン系、ダイヤモンドなど新規材料)、フォノン制御とフォトン制御などの有機的な結合の推進を目指している。実際に、融合に向けて、領域会議から小さな勉強会まで多くの試みが、総括班のみならず、A01 から A04 の計画研究班で積極的に行われ、公募研究も巻き込んだ連携が確立されつつある。

次ページに領域内の現時点での共同研究相関図を示す。合同で勉強会を開催しているなどはすべての公募研究も含めて行われているが、この図にはより進展した連携を載せている。全部の連携研究について述べることは難しいが、ダイヤモンド NV 中心の電子スピン、核スピンと超伝導量子系のカップリングの研究が世界的にも高いレベルで A01 から A02、A03、A04 班のすべての計画班を結んで進められている。さらに、領域内に独自の作製技術を有するカーボンナノ材料を A01、A03 班のみでなく、広く領域で共有して研究を進める体制が整いつつあり、A02 班とも協力して、電荷、スピンの量子制御や THz との結合を目指す取り組みに進展している。A02 班の量子ドット作製技術も、A02 班内での活発な連携に留まらず領域内全体への波及効果が見られる。核スピンと電子スピンの多体のコヒーレントな相関の研究は A01、A04 の連携で進められ、 ^{13}C をエンリッチした構造を作製することでカーボンナノ材料を用いた核スピン関係の研究にも道を拓こうとしている。量子ポイントコンタクトの核磁気共鳴も含めた伝導特性については A01 班と公募班の連携が非常に密に進められており、A04 班と公募の理論研究の間でも密な連携が進展している。面白い進展は A02 班と A03 班を結んだメカニカルシステムを用いた THz の高感度計測の研究やフォトニック・フォノニック結晶が結合した系の研究にも見られる。ダイヤモンド NV 中心を用いて実際のデバイスの電流分布を高感度に測定しようとする高感度計測としてもまたデバイス物理としてもアピール性の高い共同研究もスタートしている。A03 班と公募班での光ファイバー共振器を用いた共同研究は人的な移動も伴い進展が期待され、A04 理論班と公募班の連携も順調に推移している。半導体のナノ構造やウェハボンディングなど装置類を公募研究も含めた各グループで必要に応じて共用する体制も整えられた。

これから公募班が2年目の後半を迎える段階で、さらに多くの公募班を含めた研究連携を整えていく必要があるが、当初目標にした A01、A02、A03 で電荷・スピン、フォトン、フォノンの量子的な結合と制御の研究を積極的に推進するとともに、A04 理論班との連携に加えて、A01 班はフォトン、フォノンとの結合、A02 班は電荷・スピンとフォノンとの結合、A03 班は電荷・スピンとフォトンとの結合を常に念頭において研究を進めていくという領域の方針がほぼ実現されていることが確認できる。領域内共同研究相関図は複雑であり、きれいに切り分けて表現することが難しいが、このこと自体がハイブリッド量子系の実現に向けて様々な連携を実現し、新しい研究領域、研究体制を構築していくという新学術領域としての目的が実現されつつあることを明確に示しており、今後後半の研究の進展で本領域から多くの新しい共同研究が世界的にも高く評価される形で生まれていくことが期待される。



領域内の共同研究相関図

実験を主に行う計画研究班（A01 電荷・スピン班、A02 フォトン班、A03 フォノン班）を A04 理論班がまとめ、さらに公募研究が加わった領域全体に、すでに共著の論文、会議発表など成果につながる共同研究が行われているものを太い実線、まだ、発表などの成果に至っていないが共同実験などにすでに具体的な共同研究活動に着手しているものを細い実線。さらに、相互に行き来があり、議論を行う中で今後共同研究に進展する可能性の高いものを点線で示している。なお、中央の太い○で囲った平山、石橋、平川、山口、根本が総括班メンバーである。なお、通常の勉強会の共同開催などはここには特に記述していない。

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

本新学術領域では、“ハイブリッド”と”量子”という言葉を中心として、多様な専門分野の一流の研究者が集結している。この状況は、特に狭いコミュニティ内の活動に留まりがちな若手研究者にとっては、異分野の見識を取り入れ自身の研究にオリジナルな発展性を持たせるための絶好の環境である。また、異分野とはいえ本領域内ではハイブリッド量子という共通テーマでつながっているため、研究内容の相互理解も速く、目的の共有化が促進されるというアドバンテージがある。この環境をフル活用するために、年に2回の若手研究会を開催している。研究会開催にあたり、(1)若手メンバーがハイブリッド量子に関する研究に関して幅広い分野の見識を深め、多角的な視点を持ってもらうこと、(2)若手メンバー同士が刺激し合う風土を作ることで、ボトムアップ的に本領域を活性化させることを目標として掲げている。この趣旨のもとに、本領域の電荷・スピン班、フォトン班、フォノン班、理論班の各班から1~2名の若手研究員の代表を選出し、計5名からなる若手委員会を立ち上げ、研究会の企画、運営の打ち合わせを行うようにしている。

第1回若手研究会(2016年8月24日、開催地:東京理科大学)は、チュートリアル講演と若手メンバーのポスターセッションを開催した。初回は、若手メンバーが恥ずかしがらずに思い切った意見交換ができるよう交流を活性化するため、参加者をほぼ若手研究者に限定した。チュートリアル講演は、量子性が介在するナノメカニクス、冷却原子系、テラヘルツ光技術の3分野について実施し、講演内容には、最新の研究のみならずハイブリッド量子の研究に役立つ技術や考え方などを多く盛り込んだ。質疑応答では、熱意のある若手メンバーから研究のアプローチや基礎原理に関して独自の視点の質問が飛び交った。ポスターセッションは、開始時こそ固い雰囲気だったものの、徐々にポスターの前での議論が白熱し、お互いの意見をぶつけ合う様子が伺えた。若手間の親交も急速に深まり、専門以外の研究に触れることで融合研究に対する意識が芽生え、第一回若手研究会は大成功に終わった。

初回は、参加者を若手に限定したが、第一線で活躍するシニア研究者の方々に対しても積極的に研究をPRし議論する経験も必要と考え、**第2回若手研究会**(2017年2月28日、開催地:理化学研究所)は、講演者を若手メンバーとし、シニア研究者にもご参加いただく講演会を開催した。実際には第4回領域会議にあわせて若手研究者セッションを設け、10名の若手メンバーが20分間の持ち時間で、英語で発表を行った。

聴講者には、領域アドバイザー、企業アドバイザーに加え、量子デバイスや量子計測に関して世界的に著名な4名の国際アドバイザーを招き、研究内容や成果についてご討論いただいた。講演内容は、研究開始段階の研究紹介もあれば、まとまった成果の説明もあり様々であったが、講演者は皆、自身の目的意識をもって研究を進めている様子が伺えた。質疑応答時はホワイトボードを使うなどして白熱した議論も繰り上げられた。領域会議の最後の国際アドバイザーの講評では、若手研究者の研究に対する熱意に関して高い評価をいただいた。

次期若手研究会は、若手メンバーの異分野研究の基礎や学問の理解促進を目的として、学部4年生を対象とした内容の講演会を検討中であり、2017年9月14日に東北大学での開催を予定している。

このように、若手委員会では毎回研究会のコンセプト及び目的を明確にし、それを実現するように企画・運営を行い、研究会の反応、反省点を踏まえ次の研究会に役立てるようにしている。将来的に若手研究者ならではの柔軟性や適合力を引き出し、ボトムアップ的に本領域の融合研究を加速させていくことを目指し、今後も大小様々な規模のイベントを企画していく予定である。

8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

研究費の使用について、大きな規模の設備投資の使用状況から記述する。

A03 班に導入した**メカニクス用無冷媒希釈冷凍機**はフォノンを量子レベルで制御するには従来の希釈冷凍機を超えた極低温、超低雑音が必要であることから、H29年2月にNTTに納入されたものであり、現時点では予備実験による立ち上げ段階である。現在、ベース温度（約 20 mK）における電気伝導特性が測定できた段階であり、今後、本来の目的であるハイブリッド素子の電気機械的特性の測定を進めて行く。将来的には、領域内、ならびに国際共同研究に用いる予定である。具体的には、フォノン班東大メンバーとのフォノン結晶の少数フォノン状態における実験、A01 東北大と核スピン・フォノン結合実験、量子ポイントコンタクトと機械振動子のハイブリッド素子の極低温における国際共同実験などを進める。同じく A03 班の**顕微レーザーラマン装置**は大阪府大に設置され、同位体制御カーボン構造の作製などに応用され、さらにカーボンをベースにした構造の歪測定などで領域内で共用する計画が進行している。A02 班では**差周波発生用波長可変光源、光学実験用温度可変装置**を東大に設置した。前者はわずかに異なる周波数で発振する 2 台の半導体レーザの光を混合して、フォトダイオードに入れ、連続的にテラヘルツ放射を得ることができる装置で、テラヘルツ信号の強度が大幅に改善し、研究進展に大いに貢献している。また、後者は、半導体量子ドット・ナノワイヤー、単一分子・カーボンナノチューブなど極限ナノ構造のテラヘルツ分光の安定した長時間測定に活かされている。A02 班の**低振動光学測定用極低温冷却装置**は半導体量子ドットやその他の半導体結晶の低温（5K 以下）での特性評価を迅速に行い、試料作製にフィードバックするのに高い稼働率で使用されており、**高感度冷却 LNCCD 検出器**は高量子効率、かつ低ノイズでダイヤモンド NV 中心からの発光を測定するのに活用され、サンプルの高品質化に非常に役立っている。A01 班では**グローブボックス**があるが、これは、グラフェンを含む 2 次元物質をクリーンに扱うために使用されている。

総括班では、上記のようにメカニクス用無冷媒希釈冷凍機など高価な設備を領域内で共同使用する方向を積極的に推進するほか、領域内のメンバーが所有する設備についても、領域内で共用することを推進している。具体的には領域代表が所有する電子ビームリソグラフィ、ウェハボンディングなどの装置を、公募研究を募集する際に共同利用できる装置としてアナウンスし、実際に電子ビームリソグラフィを A02 班関連の研究に共用しているほか、ウェハボンディング装置は公募班の試料作製に役立てられている。この試みは、平成 29 年度に行われる後半の公募研究の募集に際しても継続する予定である。

総括班はハイブリッド量子科学の確立に向けて円滑に目標を達成できるように、様々な総括活動を総務、会議、広報、国際共同担当と連携して進めており、具体的には年 2 回の領域会議を開催し、領域全体にハイブリッド量子に向けた領域の活動方針を徹底するとともに、国際共同研究を支援するための国際インターンシップや計画研究班や公募研究をまたぐ研究交流をより一層促進するために、**領域内インターンシップ**を充実している。領域内インターンシップなどを通して、装置類の共用も進んでおり、例えば A01 班においては、阪大のカーボン系デバイスの作製について、作製ノウハウから、実際に装置を使用してのデバイス作製、さらには液体ヘリウム温度での電気伝導測定も理研で行った。また、A01、A02、A03 班が共同で進めるフォノンとフォトンのハイブリッド化を目指す研究においても、電流を流すことのできるサスペンドしたカーボンナノチューブの作製に関して、A03 班の研究者と大学院生が理研のクリーンルームを使ってすべてのプロセスを行っている。¹²C と ¹³C からなるグラフェンヘテロ構造などについても理研の顕微ラマンや Tip Enhanced Raman を共用して測定している。

9. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

本領域では異なる視点からの評価、アドバイスを得ることを目標に総括班評価者として、

領域アドバイザー：青野正和（物質・材料研究機構、国際ナノアーキテクニクス研究拠点（MANA）機構長）、小谷元子（東北大学、原子分子材料科学高等研究機構（AIMR）機構長）、榊裕之（豊田工業大学、学長）、横山直樹（富士通研究所、フェロー）

企業委員（アドバイザー）：東和文（島津製作所）、棚本哲史（株式会社東芝研究開発センター）、藤井英治（パナソニック株式会社）、綿引達郎（三菱電機株式会社）

国際アドバイザー：Gerald Bastard 教授（École Normale Supérieure）、Jorg Kotthaus 教授（ミュンヘン大学）、Ian Walmsley 教授（オックスフォード大学）、Robert Westervelt 教授（ハーバード大学）、Hongqi Xu 教授（北京大学/ルンド大学）

をおいており、領域ならびに企業アドバイザーは第2回以降の領域会議に招待し、参加された方から継続的に評価を頂いている。国際アドバイザーの方には Walmsley 教授を除く4人の方に参加頂き、第4回領域会議の機会に国際アドバイザリボードを開催した。これまでに頂いている評価コメントを以下にまとめる。

領域アドバイザーから頂いた評価コメント：

領域が進める研究に関しては、1. 超高速、超高感度に加えて、ハイブリッドとしてプラスアルファがあると良い。2. 量子ネットワークの方向性が示せると良い。3. 量子ネットワークが何に使われるか？アカデミックなものにプラスして、やはり実社会に使えるものが必要。4. ダイヤモンドの NV の中継ネットワークなど、既存の光ネットワークに対し、どのような役割があるのかを明確にすると良い、などのコメントに加えて、5. 大きなパワーを感じる、6. 企業にいると流れは AI で半導体は終わったかなの感じがあるが、量子は大切、期待しているので頑張ってもらいたい、などの評価コメントがあった。ハイブリダイゼーションの実現に関しては、1. それぞれの研究に留まらないハイブリダイゼーションは大切。WPI 委員会でも融合は強調されている。2. トップダウンで強引にやった方が良い結果がでることもある。3. 融合しようとする、物づくりが重要。微細加工だけではなく、他も考えておく必要がある、などのアドバイスを頂いた。若手の活性化については、1. 若手で集まる勉強会に旅費を出してはどうか。2. 学生さんが集まりやすい企画に。3. 若手融合研究提案に対して研究予算を考えては、などのご意見を頂いた。情報発信については、その重要性が改めて指摘され、わかりやすい情報をどんどん発信していき、部外者の人にも認識してもらおう努力の必要性和、ホームページに行くもとは報道発表であり、新学術の名前の入った報道発表を積極的に行う必要があることが指摘された。

企業委員（アドバイザー）から頂いた評価コメント：

領域が進める研究に関して、1. どのテーマも目立った進展があり、進捗感を大きく感じる。今後の発展が大きく期待できる。2. 質・量ともに大変に活発な活動内容であるなどのポジティブな意見を頂いた。領域内の連携や若手の活性化については、1. 発表や議論の中で連携の数が増えてきているのを実感する。2. 新学術領域の枠組みの内外において、共同研究などの連携が進んでおり、大変良い。3. 若手の発表のセッションは良い取り組み。4. 優秀な人材の育成は非常に重要な課題であり、幅広い視野と人脈に加えて、それを生かせるコミュニケーション力・リーダーシップを有する人材を育成して欲しいとのコメントがあった。情報発信、特に企業との連携を目指す方向については、1. 協働活動の糸口が掴めたらと期待をしながら参加している。2. 産学連携に向けて是非引き続き議論させて頂きたい。3. 将来の応用を見据えた量子科学研究（例えば、脳磁計測等のブレークスルー）に興味があるなどの将来へ期待するコメントに加えて、4. 研究している技術に関してベンチマーク（性能比較、ライバル、etc）を発表内容に加えると企業の視点

からは分かりやすい。5. ハイブリッド量子科学の研究内容を企業活動に繋げるためにはアイデアが必要という厳しい指摘も頂いた。

国際アドバイザーから頂いた評価コメント：

国際アドバイザーには第4回領域会議に全日程参加頂き、特に時間をかけて評価頂いた。ここには代表的なものとして2人のreviewerのコメントの全文を掲載する。残りのreviewerのコメントも主旨はほぼ同じである。

(Reviewer#1)

I fully enjoyed the participation in the project meeting on „Hybrid Quantum Systems “ and wish to thank you for giving me the opportunity to participate and your gracious hospitality.

I was impressed by the breadth of the program ranging from manipulating quantum bits based on confined spins, charges, photons, and flux quanta in a large variety of material systems and their coupling in complex hybrid systems, also including phonon-photon coupling in cavity structures. The increasing collaborations between teams of different expertise also supported by fundamental theoretical work demonstrated the enormous potential for realizing and further studying coupled hybrid systems and quantum networks, areas that deserve particular attention.

I was also impressed by the enthusiasm of the young researchers that may be further enhanced by regular topical workshops for junior scientists, which increase scientific interactions and also mediate presentation techniques and potential for applications by addressing some basics on patent writing and entrepreneurship.

Your program is likely to be very successful in international comparison and I wish you further outstanding scientific results in the coming years.

(Reviewer#2)

This was an impressive meeting with a broad range of interesting talks. Hybrid quantum systems is a timely and exciting topic, because recent progress in quantum materials and devices has opened the way for the interacting quantum systems. The Center’s administration has done a great job putting together an excellent group of experts in materials growth, device fabrication and testing and theory to carry out this research.

The projects aim to develop interacting quantum devices and networks with capabilities that go beyond conventional electronics, ranging from new magnetic materials, to very high Q optical fiber resonators in optical networks, to phononic devices that channel and manipulate sound waves. Theoretical investigators explore new approaches to quantum networks. Overall, it is an excellent program.

To bring people together from different institutions with different expertise, the Center could choose a few high-level scientific and/or application goals, which could be discussed at ‘all hands’ brainstorming meetings.

I thank the organizers for inviting me to this meeting, and look forward to following the Center’s progress in the future.

10. 今後の研究領域の推進方策（2 ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

これまでの成果を引き継ぎ、異なる物理量の量子的結合を幅広く実現し Quantum Enabled Technology の基礎を作るハイブリッド量子分野の確立を目指す。具体的には、各計画研究班を中心に下記の取り組みを進めていく。

A01 電荷・スピン班では、これまで個々の量子の性質を重点的に調べてきたグループも含めて、今後は異なる量子間のハイブリッド化を実証するフェーズに入る。マイクロ波を中心にしたフォトンと電荷・スピンのハイブリッド量子系の研究を進める。また、トップダウン技術によって作製プロセスが確立している化合物半導体に加えて、多層・単層カーボンナノチューブやグラフェンとフォノンのハイブリッド量子系を実現する。さらに、核スピン、電子スピンのコヒーレント結合に加え、化合物半導体機械振動系において核スピンとフォノンの結合系の研究を展開する。なお、フォトンが関連するものは A02 班、フォノンが関連するものは A03 班と密に連携する。

A02 フォトン班は量子ドット／フォトニック結晶系、量子ドット集合体－光共振器ハイブリッド構造、NV 中心系、THz 分光・デバイス系を研究の柱として、ハイブリッド量子系の構築と物理の解明、応用への展開を図る。量子ドット系などでは A01 班と連携する。また、A03 班と連携で量子ドット－フォトニック結晶・フォノニック結晶ハイブリッド構造に関する研究を展開する。ダイヤモンド NV 中心系では A04 理論班との連携を深めながら、センサー感度向上への研究に取り組むとともに、新規量子センシング技術開発の実証を進める。THz 分光・デバイスについては、ナノギャップ電極を用いた回折限界を大きく超えた THz 電磁波集光を継続して使用し、単一分子、単一原子のスペクトロスコーピを継続する。また、A03 班と協力して、MEMS を用いた高感度 THz 検出の可能性を探る。

A03 フォノン班は前半において大きな進展のあった量子ドット構造とフォノニック構造のハイブリッド素子の研究を、スピン系ならびに量子ドット励起子を含めたハイブリッド構造に発展させる。また、フォノニック結晶の研究においては、これまでに得られている空間的ならびに時間的なフォーカシング手法を発展させ、より高度なフォノン流の制御、さらには電荷・スピン・フォトン系との結合動作等を目指す。カーボンナノ構造においては、フォノン・電子（励起子）ハイブリッド系の研究を展開するとともに高感度熱量センサーを実現する。さらに、トップダウン手法ならびにボトムアップ手法の両者を組み合わせたハイブリッドデバイスの実現を目指す。これらの研究遂行にあたり、電荷・スピン系では A01 班とフォトン系では A02 班と密に協力し、また、常に A04 理論班と連携する。加えて、公募研究として参加している山本グループ、俵グループとの共同研究を開始する。

A04 理論班ではこれまでの研究成果をもとに、量子高感度測定についての理論研究を継続するとともに引き続き各実験班と密に協力する。トップダウン的アプローチでは量子高感度測定の新しい方法の提案や、協同現象などの Quantum Enabled Technology への新しい応用について検討する。ボトムアップ的アプローチでは超伝導磁束量子ビット、フォノン系、スピン集団等のハイブリッド系について A01、A02、A03 の各実験グループと協力して実験データの理論的検討ならびに実現性の高い実験方法の提案を進める。また、材料選択・デバイス構造最適化に向けて、より高速に動作するシミュレータを開発する。

公募研究については平成 30 年度からスタートする後半の公募研究に関して、前半同様にハイブリッドと量子の色合いの濃い研究を中心に採択し、各計画研究班とともにハイブリッド量子科学分野の確立を目指す。

国内外との連携強化に関しては、国際活動支援の枠組みをフルに活用して Mainz 大、ポール・ドルーデ研

究所、ベルリン工科大、Wurzburg 大、Ulm 大、Stuttgart 大、ENS、Eindhoven 工科大学、Twente 大、EPFL、Aalto 大、Ottawa 大、Sherbrooke 大、Harvard 大、Purdue 大、Oklahoma 大、UNSW、IIT ボンベイ、北京大などとの研究者の相互往来を含めた交流を展開する。領域内にはカーボン系材料の CVD 技術など優れた材料技術を有するメンバーがおり、領域内にハイブリッド量子系の実現に向けて様々な構造を提供する準備ができていますが、進展の早い新規材料を含めてすべてを領域内でカバーすることは難しい。従って、InSb 材料に関する北京大 Prof. Xu との協力など、特に、半導体ナノワイヤ、トポロジカル絶縁体などについての連携を強める。この点に関しては、国内との連携も重要である。センシングに適した NV 中心サンプル作製や窒化ボロンと高品質グラフェンのヘテロ構造などに関しては、本領域内に留まらず、優れたノウハウ、技術を有する領域外の国内研究機関とも積極的に連携する。