

領域略称名：ハイブリッド量子  
領域番号：2703

令和2年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「ハイブリッド量子科学」

領域設定期間

平成27年度～令和元年度

令和2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

## **研究組織**

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

## **研究領域全体に係る事項**

3 交付決定額	6
4 研究領域の目的及び概要	7
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	9
6 研究目的の達成度及び主な成果	11
7 研究発表の状況	16
8 研究組織の連携体制	21
9 研究費の使用状況	22
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	24
11 若手研究者の育成に関する取組実績	25
12 総括班評価者による評価	26

**研究組織**

(令和2年3月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	15H05866 ハイブリッド量子科学の研究総括	平成27年度 ～ 令和元年度	平山 祥郎	東北大学・理学研究科・教授	5
Y00 国	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 ～ 令和元年度	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 ～ 令和元年度	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	6
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 ～ 令和元年度	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 ～ 令和元年度	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	4
A04 計	15H05870 ハイブリッド量子科学の理論的研究	平成27年度 ～ 令和元年度	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	4
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 6 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	16H01045 インターバンドラッシュ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 ノンスピン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

A01 公	18H04284 固体の電子波の量子もつれ制御	平成 30 年度 ～ 令和元年度	山本 倫久	東京大学・工学系研・准教授	1
A01 公	18H04287 高品質トンネルスピンインジェクタを用いた電荷・スピン・超伝導複合効果の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	島田 宏	電気通信大学・情報理工・准教授	1
A01 公	18H04289 スピン波で接続したハイブリッド量子スピン系の実現	平成 30 年度 ～ 令和元年度	AN TOSHU (安東秀)	北陸先端科技大・准教授	1
A01 公	18H04294 分極場による遷移金属ダイカルコゲナイドのバレー・スピン制御	平成 30 年度 ～ 令和元年度	毛利 真一郎	立命館大学・理工学部・助教	1
A01 公	18H04295 ダイヤモンド超伝導 3 次元ハイブリッド量子系	平成 30 年度 ～ 令和元年度	久保 結丸	沖縄科学技術大学院大学・研究員	1
A02 公	18H04283 光-電子スピン-核スピン格子ハイブリッド系の量子コヒーレント制御	平成 30 年度 ～ 令和元年度	野村 晋太郎	筑波大学・数理物質・准教授	1
A02 公	18H04288 テラヘルツ近接場による超高速ナノ空間電子マニピュレーション	平成 30 年度 ～ 令和元年度	武田 淳	横浜国立大学・工学系研・教授	1
A02 公	18H04292 プラズモニック量子デバイスの開発とその量子ウォークへの応用	平成 30 年度 ～ 令和元年度	井上 修一郎	日本大学・理工学部・教授	1
A02 公	18H04293 多原子と多光子の強結合ハイブリッド量子系の研究	平成 30 年度 ～ 令和元年度	青木 隆朗	早稲田大学・理工学術院・教授	1
A03 公	18H04285 非対称人工格子によるスピン・フォノン結合制御とフォトン励起	平成 30 年度 ～ 令和元年度	田畑 仁	東京大学・工学系研・教授	1
A03 公	18H04291 光とフォノンのハイブリッド量子システム	平成 30 年度 ～ 令和元年度	山本 俊	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	1
A04 公	18H04282 カーボンナノチューブにおけるマヨラナ粒子	平成 30 年度 ～ 令和元年度	泉田 渉	東北大学・理学系・助教	1
A04 公	18H04286 ハイブリッド量子系における量子動力学プロセッサの実装理論	平成 30 年度 ～ 令和元年度	村尾 美緒	東京大学・理学系・教授	1

A04 公	18H04290 光励起輸送の自律組織化を目指した制御プロトコルの開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	内山 智香子	山梨大学・総合研究部・教授	1
公募研究 計 25 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	245,700,000 円	189,000,000 円	56,700,000 円
平成 28 年度	255,320,000 円	196,400,000 円	58,920,000 円
平成 29 年度	175,890,000 円	135,300,000 円	40,590,000 円
平成 30 年度	164,060,000 円	126,200,000 円	37,860,000 円
令和元年度	15,6520,000 円	120,400,000 円	36,120,000 円
合計	997,490,000 円	767,300,000 円	230,190,000 円

## 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

### 1. 研究領域の背景

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。その一方で、大規模な量子計算を目指す方向とは異なる、量子操作の別の観点からの発展が模索されてきた。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、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)** が世界的に急速に進展してきた。計測は科学技術のベースであり、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推進された内外の研究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、フォノンの重要性も最近着目され、フォトニック結晶ならずフォノン結晶の研究も発展してきた。

これらの状況を勘案して、**電荷 (クーパー対を含む)、電子スピン、核スピン、光子、フォノン**で活躍している研究者が集まり、異なる物理系の間で革新的なハイブリッド系を実現し、小規模な量子結合などを通して **Quantum Enabled Technology** 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に本領域提案時に描いた簡単な概念を示す。ハイブリッド量子科学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 (クーパー対を含む)、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・スピン計画研究、A02 フォトン計画研究、A03 フォノン計画研究に加えて、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 理論計画研究に配置した。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光子、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た。また、様々な物理量の量子的な結合、さらには、新規材料、革新的構造が不可欠であることから、ナノ材料、ナノ構造の研究者を巻き込んだ。計画研究が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、細分化するのを避けたためである。様々なハイブリッド化が最も重要な本領域では、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することを目指した。さらに、公募研究についても各計画研究班を跨ぐ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に努めた。

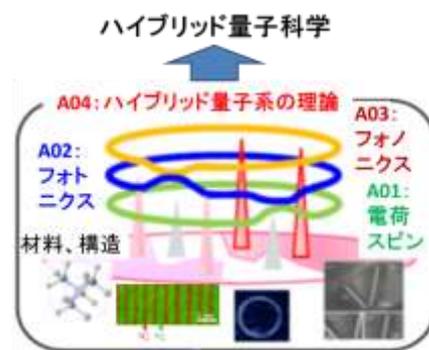


図1  
本領域の  
簡略化した  
概念図

### 2. 我が国の学術水準の向上・強化から見た重要性

第一に、ハイブリッド量子科学に着目するなかで、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(クーパー対を含む)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た。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。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なされた。さらに、公募研究が連

携することで各研究のレベルが一層向上した。

第二に、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、ハイブリッド化を内外に先駆け達成していくことで、後述するように国内外を牽引する革新的、創造的研究が実現され、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。領域全体で、公募研究も含めて計画研究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た。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・強化に大きな役割を果たしている。

第三の重要な役目は、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た点である。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かった。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、様々な要請が出現する量子ハイブリッド系に新規材料、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有用であった。

第四に、広く様々な分野をハイブリッド量子に巻き込むことで、大学では少ないという問題点がある量子分野の研究者、特に若手研究者のすそ野を広げる点である。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、それぞれのグループがそれぞれのベースで量子に手を出すことができ、量子を扱うグループを国内に広げるのに役立った。特に領域内の若手委員会はこの役割に大いに貢献した。今後の量子分野の重要性を考えると、量子分野の底上げは、我が国の学術水準の向上・強化から見て大変重要である。

### 3. 革新的・創造的な学術研究の発展と終了後への期待

領域全体の成果を通して様々な物理系の量子トランスデューサ機能の研究が進展する一方、ハイブリッド量子が意味する幅も広がった。ハイブリッド系には古典 100%から量子 100%まで様々な段階があるが、量子 100%でなくても魅力があることを示せた点は、産業界への展開の可能性としても重要なものである。それぞれの計画班の中では、トポロジカル絶縁体やトポロジカルジョセフソン接合の研究、電子スピン系と核スピン系の相関を利用した高感度計測と二重スピン系の量子相関、理論による多様な量子技術の可能性の実証、ノイズ下でも量子ゲインが得られる量子計測手法の提案など大きな成果が得られた。数桁にわたるエネルギー領域で様々な物理系のハイブリッド量子科学の理論体系を示し、それを実験系へ応用することで、多様な現象を生み出すことに成功した点も本領域での融合が活かされた成果である。本領域で力を入れたフォトン、フォノン系の制御の高度化に関しては、カイラルフォトニック結晶による量子ドットの円偏光発光制御、フォトニック結晶にトポロジーの概念を導入したトポロジカルフォトニクス分野の開拓と後方散乱のない光導波効果の実現、ダイヤモンド中の NV 中心をベースにした超高感度・局所計測、様々な独創的機能を有するフォノニック結晶の世界に先駆けた実現など革新的で未来につながる成果が得られた。メカニカル振動子は「巨視的」物理系の代表例であり、「微視的」な物理系の代表である電子、スピン、光子との「もつれ状態」の実現は、我々が日常的に接している巨視的な世界と量子力学が支配する微視的な系がどのように連続的につながるのかという、根本的な命題に挑戦できる重要なプラットフォームであり、学術的にも重要性が高い。

さらに本領域の革新的・創造的な部分として、計画研究、公募研究を超えて電荷、スピン、フォトン、フォノンのハイブリッド化が進んだ点がある。将来に発展がきるインパクトのある成果として、金属ナノギャップにトラップされた分子による電荷、フォノンと THz の結合がある。「THz ナノサイエンス」という新しい学問領域の扉を開くとともに電荷、スピン、フォトン（分子振動）、THz フォトンのすべてを量子的に結合できる可能性を示している。MEMS 共振器構造における機械振動と THz のハイブリッドでは、量子に行く前の段階で既存デバイスを超える THz 電磁波検出性能が実証された。スピン系と超伝導量子系の量子結合も実現され、ナノファイバー共振器 QED 系を光ファイバーで接続し、多数の共振器 QED 系がフォトン、フォノンを介してコヒーレントに結合する独創的な量子ネットワークの基礎研究も進展した。超伝導量子ビット、量子メモリーとして期待される電子・核スピン、量子状態を遠距離伝播させるフォトン等の異なる物理系のインターフェースとしての独創的なメカニカル系の研究も進んだ。これらは、量子トランスデューサとして未来の量子ネットワークの鍵になる可能性が広く議論されている。

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価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、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### ○ 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

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、(中略)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。」

⇒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化の推進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、本領域の目的が着実に領域へ浸透した。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を充実した。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(若手会議)を設置し、若手の自由な発想による若手交流会を実施した。結果的に大学院学生を含む若手研究者が、楽しい雰囲気量子に興味を持つ足掛かりにもなったと思う。また、市民講座などを通して一般への広報活動も行なった。

「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。」

⇒これはもっとも重要でもっとも難しいものである。A04においてはハイブリッド量子系の理論体系の導出により普遍的な概念の創出に取り組むと同時に、ユニバーサルな理論体系の多様な物理的状況下での実装に実験系と共同で取り組むことで、量子協働現象などの普遍的概念の確立と多様で新しい物理現象を生み出すことができた。また、この取組では、ハイブリッド量子系の概念を高感度量子計測や量子トランスデューサといった多様な量子技術へ応用する際の指針を明らかにし、その際は十分な実現性と、一般性を失わない理論提案を心掛けた。

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、中間審査時に具体的に報告しているように A04 の雇用人数を中心に削減し、全体での本プロジェクトによる雇用人数は当初予定よりかなり縮小した。

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、希釈冷凍機など)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などについて供用している。この方針に加えて、ハイブリッド量子では小規模なハイブリッド化でも対応できる点もあり、公募研究の応募は当初の心配とは異なり相当数に上り、大変レベルの高い、さらに計画研究を結び付けるような公募研究に参加してもらうことができた。

## ○ 中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況

### 評価結果：A（研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる）

所見：「本研究領域では、研究領域の設定目的である量子トランスデューサを実現するための基礎の確立に向けて、電荷、スピン、フォトン、フォノンの量子基礎研究で重要な成果が得られており、期待どおりの進展が認められる。中間評価時点では「ハイブリッド量子科学」創成の端緒におり、今後普遍的概念の創出や実用化につながる技術への発展に向け、個々の量子分野での成果も含め一層の進展が期待される。また大型の装置については、本研究領域内で共用を基本とした運営がされており、既存の装置や施設なども計画研究・公募研究を問わず公平に公開している点は高く評価できる。毎年、海外で国際集会および国際会議を主催するなど、国際交流にも積極的である点が認められる。採択時の所見で指摘された点についても、領域代表者のリーダーシップの下で研究領域内の連携に取り組み、若手研究者を中心とした勉強会が企画されるなど研究者の育成にも注力しており、適切な対応が図られている。」

⇒ 採択時の所見、留意事項、参考意見が役に立ち改善が図られた部分も多いが、普遍的概念の創出や実用化につながる技術への発展に向けた個々の量子分野での成果の充実、大型の装置の共同利用や領域内インターンシップの強化、海外での国際会議の主催など国際交流の推進、若手研究者を中心とした勉強会や若手会議の積極的運営には研究代表者、総括班を中心に常に配慮した領域運営を行った。

留意事項：「研究項目 A04 については、実験研究との共同研究をより一層推進し、実験系の研究項目の成果の解釈に貢献するだけでなく、本研究領域内の理論的支柱になることが望まれる。現段階では論文発表による成果も少ないように見受けられるため、今後論文発表を含めた成果の発信を進めることが求められる。」

⇒ A04 についてはハイブリッド量子研究の理論的支柱になるべくその活性化に努めた。その結果、高感度量子計測を支える理論として、従来の限界を超えた現実的なノイズ環境下での高感度量子計測の理論的枠組みを確立し、NV 中心等を用いた具体的な実装方法の提案により、電子スピンと核スピンの量子ハイブリッド系における大幅な磁気感度向上を可能にした。また、ハイブリッド量子の概念をさらに押し進め、カオスの運動と局所的運動のハイブリッドや量子プロトコル、量子アルゴリズムのハイブリッド化など、当初は予定していなかった飛躍的に発展する可能性をもつ新しい量子科学への道も拓いた。数桁にわたるエネルギー領域、ゼロ温度から高温極限わたる様々な物理系を統一的に扱い、それぞれの分野で固有の現象として予言、観測されてきたものを、ユニバーサルに捉えることを可能にした貢献も重要である。具体的な例では、量子光学で予言され、数十年にわたり実現が困難であることが知られていた超放射が、ハイブリッド量子科学の考えに基づくことで、電子スピンとマイクロ波、核スピンと南部ゴールドストーンモード等、様々な物理系で対称性を満たす時にユニバーサルに起こる現象であることを示した。これらを中心に論文発表の活発化も行われている。

参考意見：本研究領域が唱える「ハイブリッド」の概念について十分に明確化されていない印象があり、これを明確化し、本研究領域と共に概念について広く理解が得られるような成果の発信を今後期待したい。

⇒ ハイブリッド量子の定義は大変難しい。電荷、スピン、フォトン、フォノンという異なる物理量の量子トランスデューサを目指して研究を推進したが、量子 100%でなくても魅力的なものがあることが分かり、革新的な機能が期待できるものについてはこれらの研究も領域として積極的に推進した。最近では、古典と量子をハイブリッドしたハイブリッド量子の世界もあり（ハイブリッド自動車の概念はむしろこれに近い）、量子シミュレータなどでも優れた特性が示されている。100%量子は開発に時間がかかる中で、これらのハイブリッド系には産業と結び付けられる可能性のあるものも出てきている。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を進める中で、必然的に系のトポロジーも含めて異種材料のハイブリットという側面も出てきており、学術的に特色ある成果がここからも出現している。領域の成果については、主な領域メンバーが各章を担当する形で Springer-Nature 社から「Hybrid Quantum Systems」、「Quantum Hybrid Electronics and Materials」を出版予定であり、これらを通して本領域のハイブリッドのイメージを発信していきたい。

## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(1) 各計画研究で領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか。

### 電荷・スピン計画研究(A01)ならびに関連する公募研究

量子的な情報担体としての電子・クーパペア、電子・核スピンの単一及び集団的量子的な制御とその背景物理の解明、そしてそれらの間、あるいはフォトン、フォノンとの量子トランスデューサ機能を目標に研究した。量子媒体のハイブリッド化には材料のハイブリッド化が必要であることから、伝統的な化合物半導体ナノ構造に加え、カーボンナノ材料、トポロジカル絶縁体など新規材料系に研究を拡張した。上記目標に対して、電子スピン、核スピン集団の量子的な制御をシリコン極微細トランジスタや化合物半導体ナノ構造など特徴ある系で確立するとともに、高感度核スピン計測を実現した。加えて、カーボンナノチューブ中での励起子の量子制御の実現にも成功した。異なる物理系のハイブリッド化に関して、スピン系とマイクロ波フォトンあるいはフォノンの相互作用メカニズムを明らかにすることができた。これらは量子情報処理や量子計測における異種量子のハイブリッド化への発展が期待される成果である。特徴のある材料系として積層薄膜化した磁性トポロジカル絶縁体やトポロジカル絶縁体と超伝導体のハイブリッド構造で量子技術の新たな担い手となる量子状態発現の足掛かりを得ることができた。

### フォトン計画研究(A02)ならびに関連する公募研究

フォトンを中心にした量子トランスデューサ機能とその実現に向けたフォトン制御の高度化を目標に研究を推進した。この目標に対して、ダイヤモンド中のNV中心を用いた超高感度・局所量子計測技術の開拓に取り組み、室温での固体系電子スピンT2の世界最長時間の実現、核スピンコヒーレンスの世界初の電氣的検出、単一NV中心での世界最高磁場感度の実現など大きな成果が挙げられた。ナノフォトニクス的高度化では、三次元カイラルフォトニック結晶における量子ドット円偏光発光制御に成功した。さらに、光の軌道運動量制御やトポロジカルフォトニクスなど、計画時には想定していなかった革新的な展開が開けた。ナノファイバー共振器QED系を光ファイバーで融着接続し、共振器QED系をコヒーレントに結合する試みも大きな進展があった。THzアンテナとして機能する金属ナノギャップ電極を用いて、単一分子をトラップし、分子振動が電子伝導に与える影響を明らかにした。この成果をベースにテラヘルツスペクトロスコーピ分野を開拓するとともに、分子をベースに電荷、フォノン、THzフォトン量子結合する基礎を築いた。さらに、機械的共振を用いた新しい原理による高性能テラヘルツ検出器も実現した。

### フォノン計画研究(A03)ならびに関連する公募研究

フォノンを中心にした量子トランスデューサ機能とその実現に向けたフォトン制御の高度化を目標に研究を推進した。この目標に対して、フォノン結晶の作製技術や、量子ドット・メカニカル共振器の量子ハイブリッド構造作製技術が大きく進展し、グラフェン成長の同位体制御など全く新しいナノ構造作製技術も確立された。量子性を活用した素子動作の実現については、量子ドットを用いた超高感度振動センサの実現、核スピンとフォノンの量子もつれ状態生成技術、ボトル型光共振器と半導体電気機械共振器との融合による光電気機械ハイブリッドシステムの実証など量子トランスデューサのマイルストーンとなる基盤技術を獲得した。その他にも、フォノンの量子性に着目したフォノン伝導制御を提案・実証した。これらの成果は十分な学術的価値と新技術を生み出し、目的は高いレベルで達成できた。

### 理論計画研究(A04)ならびに関連する公募研究

ハイブリッド量子科学の系統的な理論体系の創出、Quantum Enabled Technologyの実現へ向けた設計指針と提案、様々な物理系のハイブリッド量子系の理論的理解を目指して研究を進めた。この目標に対して、電荷、スピン、フォトン、フォノンと様々な物理系が持つ、量子光学、超伝導、半導体物性、ナノ構造物理などさまざまな分野での現象や概念を融合し、ハイブリッド化を通してユニバーサルな物理として捉えるための理論を構築した。具体例としては、ハイブリッド量子系での超放射現象のエネルギー領域で数桁にわたる拡張などがある。また、カーボンナノチューブのトポロジカル絶縁体としての性質を明らかにし、ハイブリッド量子系の振る舞いにフォノンが与える影響を解明した。さらに、ハイブリッド量子系で可能となる新しいリソースの活用や、量子テレポーテーションなどの量子プロトコルとのハイブリッド化などを通して現実的なノイズ下でも量子優位性を発揮する量子計測手法を示した。また、量

子トランスデューサをユニバーサルに捉えることで、様々な組み合わせでの設計において共通に見られる特徴や問題点を設計上のノウハウとして明らかにした。

なお、本領域では Nature 1 件、Nature Physics 1 件、Nature Photonics 2 件、Nature Nano. 3 件、Nature Communications 16 件、Communication Physics 3 件、Science Advances 4 件、Phys. Rev. Lett. 17 件など、IF の高いジャーナルへの活発な論文発表が期間中になされており、これも高いレベルの研究達成を反映している。

## (2) 本研究領域により得られた主な成果

得られた主要な成果を計画研究ごとに後半にそれぞれに所属する公募研究の成果も含めて示す。本領域の性格上、計画研究や公募研究をまたいだ成果が多いが、ここでは主要な貢献があった項目に掲載する。

### 電荷・スピン計画研究(A01)ならびに関連する公募研究

#### ○ マイクロ波光子とスピンの量子的相互作用

スピンは電界と直接相互作用しないため、Ge/Si コアシェルナノワイヤにおけるホールの強いスピン軌道相互作用を介して量子ドット中の単一スピンとマイクロ波回路共振器中の単一光子の量子的な相互作用を観測することに成功した (Nano Lett. 2019)。

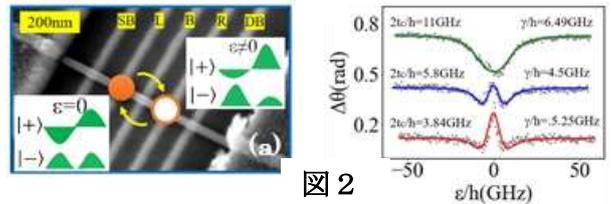


図 2

#### ○ 積層薄膜磁性トポロジカル絶縁体の新しい量子状態

独自に発想した磁気変調ドーピングに基づき、トポロジカル絶縁体  $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}$  と、それに磁性元素 Cr を添加した磁性トポロジカル絶縁体  $\text{Cr}_x(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_{2-x}\text{Te}_3$  による磁性/非磁性/磁性の三層薄膜を作製した。この薄膜を調べたところ、二つの磁性層の磁化が反平行になる状態で表面が絶縁化した (図 3)。この結果は、理論的に予測されていた特殊な電気磁気効果の発現であり、この効果の利用に向けた物質基盤が確立された (Nature Mat. 2017)。

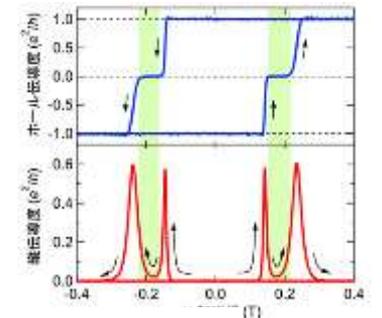


図 3

#### ○ トポロジカルジョセフソン接合からのマイクロ波放射

トポロジカル絶縁体である HgTe 薄膜を用いて形成したジョセフソン接合デバイスからのマイクロ波放射を測定した。図 4 に示すように通常のジョセフソン周波数に加えて、その半分の周波数のマイクロ波放射が観測された。これは、新しい量子媒体であるマヨラナゼロモードに対応した  $4\pi$  周期の電流位相関係を示唆している (Phys. Rev. X, 2017)。

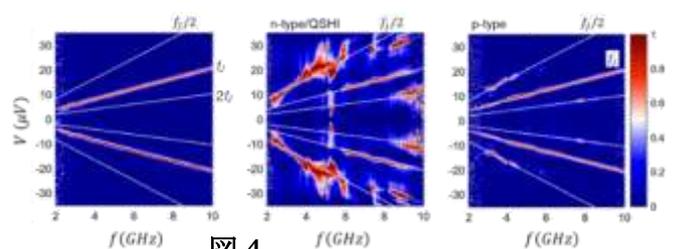


図 4

#### ○ 抵抗検出 NMR などを用いたミクロスコピックな高感度物性計測

電子スピン・核スピン相互作用を利用した抵抗検出 NMR を用い、これまで観測することが困難であった量子構造のミクロスコピックな物性を明らかにした。図 5(a) は走査ゲートによる核スピン制御を利用した量子ホール降伏状態での電子スピン偏極度の空間分布のイメージング (Nat. Comm. 2018) であり、図 5(b) は擬一次元系でチャンネルの位置をナノスケールで移動すると電子が感じる歪が大きく変化することを四重極分離から明らかにしたものである (PRB(RC) 2019)。

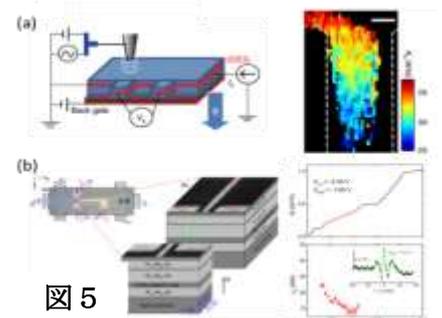


図 5

#### ○ 近藤クラウドの空間的広がり観測

人工原子とそれを遮蔽する近藤クラウドを図のようなシステムで形成し、どれくらい離れたゲートの操作まで近藤温度に影響を与えるかを精密に測定することで、近藤クラウドの広がりを決定した。近藤クラウドの広がり数は数ミクロンに及んでおり、空間的に離れたスピンの量子結合に使える可能性がある (Nature 2020)。



図 6

**フォトン計画研究(A02)ならびに関連する公募研究**

**○ ダイヤモンド NV 中心を用いた超高感度・局所計測技術の開拓**

量子計測で重要なダイヤモンド NV 中心について、A04 などとの共同研究で高配向率を有する NV 中心集合体アレイや高配向 NV 中心を有するピラー構造作成に成功した。NV 中心のスピンの量子状態制御および電氣的検出の研究にも取り組み、NV 中心の電子スピンと電磁波のドレスト状態の生成を実証し、図のように電子スピニコヒーレンス時間の2桁以上の長時間化を示した。また、核スピニコヒーレンスの電氣的検出を実現した。室温で電氣的に核スピニコヒーレンスを観測した例は、他材料を含めても世界初の成果である (Sci. Rep2020)。さらに、n 型ダイヤモンドを用い、室温での固体系電子スピン  $T_2$  の世界最長時間を実現し、単一 NV 中心での世界最高磁場感度を達成した (Nat. Comm. 2019)。

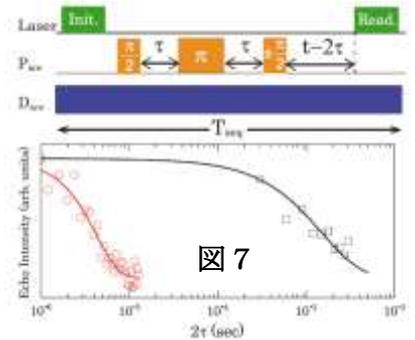


図 7

**○ 半導体ナノフォトニクスの高度化**

量子技術で重要な役割を担う円偏光状態の輻射場の制御とその応用を目指した研究を進め、三次元カイラルフォトニック結晶における量子ドット円偏光発光制御の実現に成功した。さらに、領域内での議論などが契機となり、光の軌道運動量制御やトポロジカルフォトニクスなど、計画時にはなかった新たな展開も進んだ。図は異なるバンドトポロジを有するフォトニック結晶ナノビームの界面に現れるトポロジカル局在状態を活用した光共振器であり、GaAs に埋め込まれた InAs 量子ドットを利得媒質とすることで、回折限界に近いモード体積を有する世界初のトポロジカルナノ共振器レーザを実現した (Comm. Physics 2018)。

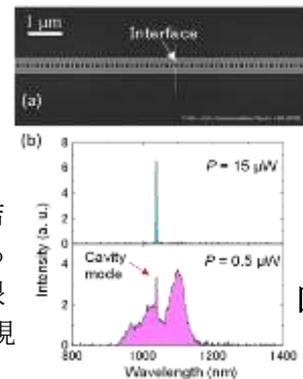


図 8

**○ ナノファイバー共振器をベースにした量子ネットワークの基礎検討**

2 台のナノファイバー共振器 QED 系を光ファイバーで融着接続し、全ファイバー結合共振器 QED 系を構築した。このような結合共振器 QED 系の構築は、世界で初めての成果である。弱励起領域での透過スペクトルを測定し、結合共振器 QED 系の固有モード (右図) の観測に成功した。この成果は、多数の共振器 QED 系がコヒーレントに結合した大規模量子ネットワークの構築につながるものである (Nat. Comm. 2019)。

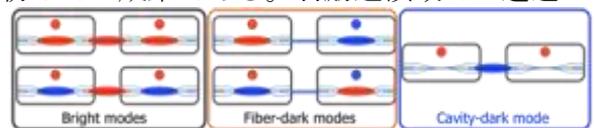


図 9

**○ 極微ナノ領域のテラヘルツダイナミクスの研究**

ナノ量子系における典型的なエネルギースケール、時間スケールは、ほとんどテラヘルツ/赤外領域に包含される。しかし、電磁波の長波長性ゆえに、単一分子などのダイナミクスを観測することは極めて困難であった。本研究では、通電断線法で作製したナノギャップ電極で分子を捕獲するとともに、その電極をテラヘルツアンテナと電流検出に用いることにより、単一分子を介した電子伝導において、分子の重心運動が大きな影響を与えることや、フラーレン分子内に内包された金属原子がカオス的に運動

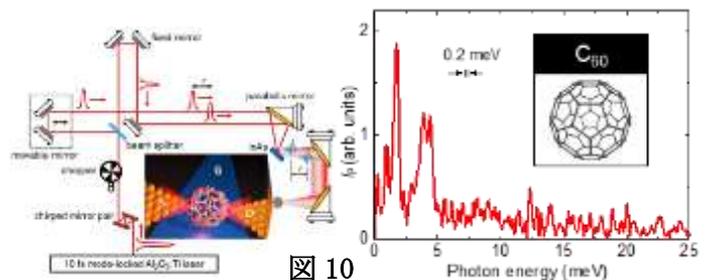


図 10

する

ことなどを明らかにした (Nat Photonics2018)。さらに、キャリア・エンベロープ位相を制御した単一サイクルの高強度テラヘルツ波と走査型トンネル顕微鏡を組み合わせた THz-STM を開発した。

**○ 機械的共振を用いた高性能テラヘルツ検出**

A03 でノウハウを蓄積してきた GaAs 系 MEMS 両持ち梁共振器構造を用いて、新概念テラヘルツ検出素子の開発を行った (右図)。MEMS 梁に入射したテラヘルツ電磁波が熱に変換された時に発生する梁の熱膨張による共振周波数の変化を読み出すという photo-thermo-mechanical ハイブリッドな動作原理に基づいており、室温動作のみならず、高感度性・高速性を持つ実用的な素子であることが実証された (APL2016)。素子の高感度化に向けた改良も順調に進んでいる。

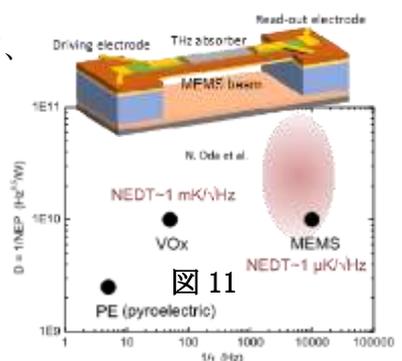


図 11

○ **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**

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ニック（幾何学的）量子ビットを考案し、ホロニックスピネコーと呼ぶ新原理で自律的に安定化することを示した。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ニ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 (Nat. Comm. 2016, Nat. Photonics 2017)。

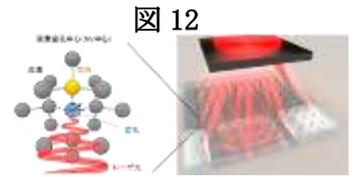


図 12

**フォノン計画研究(A03)ならびに関連する公募研究**

○ **量子ドット・メカニカル振動子による高感度変位計測**

半導体量子ドットをメカニカル振動子に組み込み、歪ならびに圧電効果を利用した機械振動と電荷の結合動作に成功した。実験ではわずか 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できた (Nat. Comm. 2016)。A01 との討論が成果に活かされている。

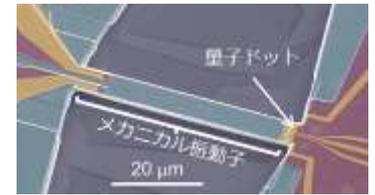


図 13

○ **核スピンとフォノンのもつれ状態生成技術**

A01 班との討論をベースに、核スピンとメカニカル振動子の相互作用の詳細を調べ、核磁気共鳴のサイドバンド励起に成功した。和周波励起は核スピンとフォノンのもつれ状態生成技術、差周波励起は、それらの間のコヒーレント状態変換技術であり、核スピンとフォノンの量子トランスデューサに応用できる (Nat. Comm. 2018)。

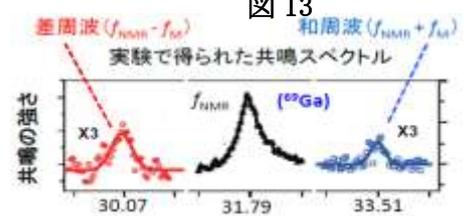


図 14 加えた電磁波の周波数 (MHz)

○ **フォノンの空間的フォーカシング**

人工結晶構造の短距離秩序を制御することで熱伝導制御に成功した (Sci. Adv. 2017)。また幾何光学のような光の直進性と対応し、フォノンの弾道性を積極的に利用することで、本来拡散的な熱流に指向性を与え (ACS Nano 2018)、さらには放射状のナノ構造を利用すれば集熱すら可能なことを実証した (Nat. Comm. 2017)。

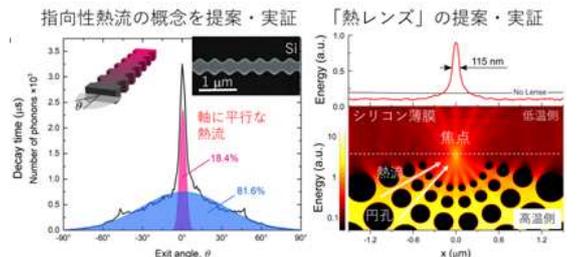


図 15

○ **フォノンの時間的フォーカシング**

非線形分散を活用してフォノンの時間レンズと呼ぶべき独創的なパルス制御手法を開拓し、所望の時刻において鋭く局在した歪を生成する時間的フォーカシング手法を実証した (Nat. Comm. 2017)。

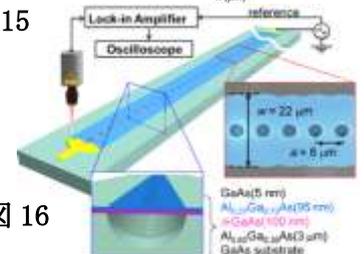


図 16

○ **架橋 CNT におけるフォノンモード解析**

基板上的の試料では不可能な CNT からの蛍光やフォノン散乱の定量評価を、架橋構造を用いることにより実現した。CNT 特有のフォノンモードに対して分子吸着・内包効果を定量的に解明し、CNT 本来の振動の CNT 直径依存性を抽出した。さらに、CNT に固有の有限運動量フォノンモードの起源とその強度に対する欠陥の影響を解明した。さらに A02 と連携し、ナノファイバと単一 CNT との相互作用の研究を進め、近接場光によるラマン散乱光を検出することに成功した。

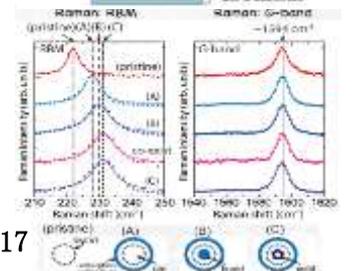


図 17

○ **グラフェンの同位体・欠陥制御**

フォノンが主な熱キャリアであるナノカーボン材料、特にグラフェンをモデル材料とし、同位体エンジニアリングでフォノン伝導制御を目指した。<sup>12</sup>C と <sup>13</sup>C の界面を有するグラフェンにおいて、界面での熱抵抗が最大 10 倍程度に上昇することを確認した。同位体界面の周期幅をフォノンの平均自由行程程度にしたグラフェンフォノン結晶では、フォノンの弾道的輸送に起因した熱抵抗の大幅な増大も確認した。界面の構造揺らぎが数 nm 以下に収まっていることが A01 との連携で明らかになり、フォノンの量子性に由来する物理現象の探求が期待できる。

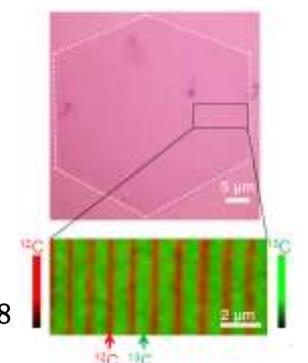


図 18

**理論計画研究(A04)ならびに関連する公募研究**

○ **複数の量子ビットとマイクロ波共振器の結合**

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み、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を示した (PRL2016)。

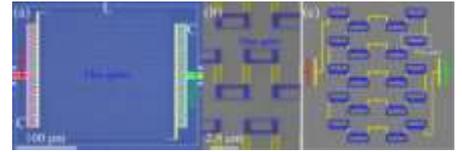


図 19

○ **核スピン系と電子スピン系の多体相関による協同現象**

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超放射が生じる可能性を指摘した (NJP2016)。また、A01 との共同研究及び国際共同研究 (Nat. Physics2018) により、超放射を様々なハイブリッド系で実証した。さらに、協同現象やマルチ緩和過程など、ハイブリッド量子系に共通に登場する系の対称性が引き起こす量子統計について系統的な理論を定式化した。

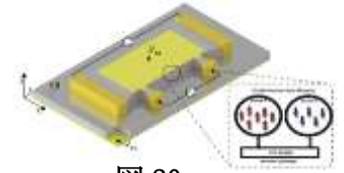


図 20

○ **高感度量子計測手法の提案と実証**

高感度量子計測について様々な角度から研究を行った。量子テレポーテーションを用いた量子プロトコルのハイブリッド化により、高感度な量子センサーを構成する手法を提案し、測定時間 (T) に対して、古典限界を上回る推定誤差 (1/T) で小さくなるプロトコルを開発した。また、A04、A02 との共同研究により超伝導量子回路と電子スピンの結合系を用いたエネルギー射影測定に関する理論提案や、NV ダイアモンドなどのスピン集団を用いた新しい量子センサーを提案した (npj QI2019)。



図 21

○ **電子・フォトンのハイブリッド量子系の理論研究**

量子ドットに THz 光を照射したときの光電流を考察し、単一量子ドットにおける光電流の表式を理論的に導くことで A02 の実験結果を説明した。複数の量子ドットの並列系における光電流を定式化し、量子ドット間のエンタングルメント生成による光電流の増大機構を提案した。

○ **未知パラメータを含むハイブリッド量子系制御**

未知パラメータを特定することなく量子系の動力学を制御する「量子動力学プロセッサ」のシステムをハイブリッド量子系で実現することを目指し、現実的な物理系に適応した新しい量子アルゴリズムの提案に成功した。また、未知パラメータを含む2量子ビットの量子動力学系に対して、一方の量子ビットの制御ハミルトニアンをパルス列でプログラミングすることで、任意の2量子ビットゲートを実装するロバスト動力学制御の方法を示した。

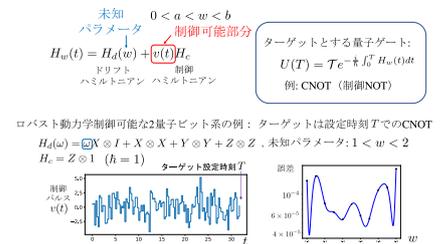


図 22

## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

### <A01>電荷・スピン班

#### 雑誌論文

1. V. Borzenets, J. Shim, J. C. H. Chen, A. Ludwig, A. D. Wieck, S. Tarucha, H.-S. Sim, and \*M. Yamamoto, “Observation of the Kondo screening cloud”, *Nature* 579, 210-213 (2020).
2. R. Wang, \*R. S. Deacon, J. Sun, J. Yao, C. M. Lieber, and K. Ishibashi, “Gate Tunable Hole Charge Qubit Formed in a Ge/Si Nanowire Double Quantum Dot Coupled to Microwave Photons”, *Nano Lett.* 19, 1052-1060 (2019).
3. \*M. Mogi, T. Nakajima, V. Ukleev, A. Tsukazaki, R. Yoshimi, M. Kawamura, K. S. Takahashi, T. Hanashima, K. Kakurai, T.-H. Arima, M. Kawasaki, and \*Y. Tokura, “Large Anomalous Hall Effect in Topological Insulators with Proximitized Ferromagnetic Insulators”, *Phys. Rev. Lett.* 123, 16804-1-6 (2019).
4. J. Sun, \*R. S. Deacon, R. Wang, J. Yao, C. Lieber, and K. Ishibashi, “Helical Hole State in Multiple Conduction Modes in Ge/Si Core/Shell Nanowire”, *Nano Lett.* 18, 6144-6149 (2018).
5. \*K. Hashimoto, T. Tomimatsu, K. Sato, and Y. Hirayama, “Scanning nuclear resonance imaging of a hyperfine-coupled quantum Hall system”, *Nat. Commun.* 9, 2215-1-7 (2018).
6. T. Masuda, K. Sekine, K. Nagase, K. S. Wickramasinghe, T. D. Mishima, M. B. Santos, and Y. Hirayama, “Transport characteristics of InSb trench-type in-plane gate quantum point contact”, *Appl. Phys. Lett.* 112, 192103-1-5 (2018).
7. R. S. Deacon, J. Wiedenmann, \*E. Bocquillon, T. M. Klapwijk, P. Leubner, C. Brüne, S. Tarucha, K. Ishibashi, H. Buhmann, and L. W. Molenkamp, “Josephson radiation from gapless Andreev bound states in HgTe-based topological junctions”, *Phys. Rev. X* 7, 021011-1-7 (2017).
8. R. Negishi, K. Yamamoto, H. Kitakawa, M. Fukumori, \*H. Tanaka, T. Ogawa, and Y. Kobayashi, “Synthesis of very narrow multilayer graphene nanoribbon with turbostratic stacking”, *Appl. Phys. Lett.* 111, 201901-1-4 (2017).
9. T. Tomita, S. Nakajima, I. Danshita, Y. Takasu, and \*Y. Takahashi, “Observation of the Mott insulator to superfluid crossover of a driven-dissipative Bose-Hubbard system”, *Sci. Adv.* 3, e1701513-1-8 (2017).
10. \*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”, *Nat. Nanotech.* 12, 137-143 (2017).
11. J. Wiedenmann, E. Bocquillon, R. S. Deacon, S. Hartinger, O. Herrmann, T. M. Klapwijk, L. Maier, C. Ames, C. Brüne, C. Gould, A. Oiwa, K. Ishibashi, S. Tarucha, H. Buhmann, and \*L. W. Molenkamp, “ $4\pi$ -periodic Josephson supercurrent in HgTe-based topological Josephson junctions”, *Nat. Commun.* 7, 10303-1-7 (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”, *Sci. Rep.* 6, 28936-1-10 (2016).

#### 学会発表

1. Y. Hirayama (invited), “Electron Spin Characteristics Unveiled by Resistively-detected NMR”, Rocky Mountain Conference - 42nd International EPR Symposium, Denver, USA, 2019
2. K. Ishibashi (invited), “Quantum structures with carbon nanotubes”, 700. WE-Heraeus-Seminar on One-Dimensional Systems for Quantum Technology, Physikzentrum, Ban Honnef, Germany, 2019
3. M. Yamamoto (invited), “Measurement of the Kondo Cloud Length”, *Frontiers in Quantum*

Materials & Devices Workshop, Tokyo, Japan, 2019

4. Y. Hirayama (invited), "Resistively - Detected Nuclear - Magnetic - Resonance in Microscopic Scale", International Symposium on Quantum Hall Effects and Related Topics, Stuttgart, Germany, 2018

#### 産業財産権

1. スピンメーザーを使ったマイクロ波増幅、2020-035699、久保結丸(30%)、Jason Ball (30%)、Petr Moroshkin (30%)、Denis Konstantinov (10%)、2019、OIST、国内
2. スピンメーザーを使ったマイクロ波増幅、2019-089451、久保結丸(30%)、Jason Ball (30%)、Petr Moroshkin (30%)、Denis Konstantinov (10%)、2019、外国
3. 電子デバイス、特願 2018-162967、大野雄高、西尾祐哉、廣谷潤、2018、名古屋大学、外国
4. 伝熱制御装置、特願 2018-167859、廣谷潤、大野雄高、2018、名古屋大学、国内

#### 書籍

1. 平山祥郎、山口浩司、佐々木智 半導体量子構造の物理 現代物理学「展開シリーズ」第5巻 (2016) 朝倉書店 165 ページ

### <A02> フォトン班

#### 雑誌論文

1. H. Morishita, S. Kobayashi, M. Fujiwara, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, and \*N. Mizuochi, "Room Temperature Electrically Detected Nuclear Spin Coherence of NV centers in Diamond", Sci. Rep. 10, 792-1-8 (2020).
2. \*Y. Minami, B. Ofori-Okai, P. Sivarajah, I. Katayama, J. Takeda, K. A. Nelson, and T. Suemoto, "Macroscopic Ionic Flow in a Superionic Conductor  $\text{Na}^+$   $\beta$ -Alumina Driven by Single-Cycle Terahertz Pulse", Phys. Rev. Lett. 124, 147401-1-5 (2020).
3. D. H. White, S. Kato, N. Német, S. Parkins, and \*T. Aoki, "Cavity Dark Mode of Distant Coupled Atom-Cavity Systems", Phys. Rev. Lett. 122, 253603-1-5 (2019).
4. S. Kato, N. Német, K. Senga, S. Mizukami, X. Huang, S. Parkins, and \*T. Aoki, "Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics", Nat. Commun. 10, 1160-1-6 (2019).
5. \*Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, S.-H. Song, and K. Hirakawa, "Fast and sensitive bolometric terahertz detection at room temperature through thermomechanical transduction", J. Appl. Phys. 125, 151602-1-6 (2019).
6. A. Yangui, M. Bescond, T. Yan, N. Nagai, and \*K. Hirakawa, "Evaporative electron cooling in asymmetric double barrier semiconductor heterostructures", Nat. Commun. 10, 4504-1-7 (2019).
7. E. D. Herbschleb, H. Kato, Y. Maruyama, T. Danjo, T. Makino, S. Yamasaki, I. Ohki, K. Hayashi, H. Morishita, M. Fujiwara, and \*N. Mizuochi, "Ultra-long coherence times amongst room-temperature solid-state spins", Nat. Commun. 10, 3766-1-6 (2019).
8. H. Morishita, T. Tashima, D. Mima, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, M. Fujiwara, and \*N. Mizuochi, "Extension of the Coherence Time by Generating MW Dressed States in a Single NV Centre in Diamond", Sci. Rep. 9, 13318-1-8 (2019).
9. K. Yahata, Y. Matsuzaki, S. Saito, H. Watanabe, and \*J. Ishi-Hayase, "Demonstration of simultaneous vector magnetic field sensing with nitrogen-vacancy centers in diamond via multifrequency control of microwave pulses", Appl. Phys. Lett. 114, 022404-1-5 (2019).
10. T. Tsurugaya, \*K. Yoshida, F. Yajima, M. Shimizu, Y. Homma, and K. Hirakawa, "Terahertz spectroscopy of individual carbon nanotube quantum dots", Nano Lett. 19, 242-246 (2018).
11. S. Du, K. Yoshida, Y. Zhang, I. Hamada, and \*K. Hirakawa, "Terahertz dynamics of electron-vibron coupling in single molecules with tunable electrostatic potential", Nat. Photonics 12, 608-612 (2018).
12. \*Y. Ota, R. Katsumi, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Topological photonic crystal nanocavity laser", Commun. Phys. 1, 86-1-8 (2018).
13. K. Yoshioka, \*I. Katayama, Y. Arashida, A. Ban, Y. Kawada, K. Konishi, H. Takahashi, and \*J. Takeda, "Tailoring Single-Cycle Near-Field in a Tunnel Junction with Carrier-Envelope Phase-Controlled Terahertz Electric Fields", Nano Lett. 18, 5198-5204 (2018).
14. 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. 108, 163503-1-4 (2016).

15. 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 94, 052330-1-6 (2016).

#### 学会発表

1. K. Hirakawa (plenary), “Fast and sensitive bolometric terahertz detection at room temperature through thermomechanical transduction”, 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019), Maison de la Chimie, Paris, France, 2019
2. K. Hirakawa (invited), “Terahertz dynamics of single molecules and single atoms studied by using nanogap electrodes”, 21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 21), Nara Kasugano International Forum “IRAKA”, Nara, Japan, 2019

#### 産業財産権

1. TUNNEL CURRENT CONTROL APPARATUS AND TUNNEL CURRENT CONTROL METHOD、16/108447 (米国出願)、Y. Kawada, H. Takahashi, J. Takeda, I. Katayama, Y. Arashida, K. Yoshioka、2018、浜松ホトニクス、外国

#### <A03> フォノン班

#### 雑誌論文

1. \*S. Chiashi, Y. Saito, T. Kato, S. Konabe, S. Okada, T. Yamamoto, and Y. Homma, “Confinement Effect of Sub-nanometer Difference on Melting Point of Ice-Nanotubes Measured by Photoluminescence Spectroscopy”, ACS Nano 13, 1177-1182 (2019).
2. \*Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, S. Nakamura, N. Kaneko, and H. Yamaguchi, “Dynamical coupling between a nuclear spin ensemble and electromechanical phonons”, Nat. Commun. 9, 2993-1-8 (2018).
3. \*R. Ohta, H. Okamoto, T. Tawara, H. Gotoh, and H. Yamaguchi, “Dynamic control of the coupling between dark and bright excitons with vibrational strain”, Phys. Rev. Lett. 120, 267401-1-6 (2018).
4. K. Yoshino, T. Kato, Y. Saito, J. Shitaba, T. Hanashima, K. Nagano, S. Chiashi, and \*Y. Homma, “Temperature Distribution and Thermal Conductivity Measurements of Chirality-Assigned Single-Walled Carbon Nanotubes by Photoluminescence Imaging Spectroscopy”, ACS Omega, 3, 4352-4356 (2018).
5. \*M. Asano, R. Ohta, T. Yamamoto, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, “An opto-electro-mechanical system based on evanescently-coupled optical microbottle and electromechanical resonator”, Appl. Phys. Lett. 112, 201103-1-5 (2018).
6. T. Inoue, Y. Mochizuki, K. Takei, T. Arie, and \*S. Akita, “Tuning of the temperature dependence of the resonance frequency shift in atomically thin mechanical resonators with van der Waals heterojunctions”, 2D Mater. 5, 045022-1-7 (2018).
7. \*R. Anufriev, S. Gluchko, S. Volz, and M. Nomura, “Quasi-ballistic heat conduction due to levy phonon flights in silicon nanowires”, ACS Nano 12, 11928-11935 (2018).
8. \*M. Kurosu, D. Hatanaka, K. Onomitsu, and H. Yamaguchi, “On-chip temporal focusing of elastic waves in a phononic crystal waveguide”, Nat. Commun. 9, 1331-1-7 (2018).
9. Y. Anno, M. Takeuchi, M. Matsuoka, K. Takei, S. Akita, and \*T. Arie, “Effect of defect-induced carrier scattering on the thermoelectric power of graphene”, Appl. Phys. Lett. 110, 263501-1-4 (2017).
10. \*J. Maire, R. Anufriev, A. Ramiere, R. Yanagisawa, S. Volz, and \*M. Nomura, “Heat conduction tuning by wave nature of phonons”, Sci. Adv. 3, e1700027-1-6 (2017).
11. \*R. Anufriev, A. Ramiere, J. Maire, and \*M. Nomura, “Heat guiding and focusing using ballistic phonon transport in phononic nanostructures”, Nat. Commun. 8, 15505-1-8 (2017).
12. \*I. Mahboob, H. Okamoto, and H. Yamaguchi, “An electromechanical Ising Hamiltonian”, Sci. Adv. 2, e1600236-1-7 (2016).

13. \*Y. Okazaki, I. Mahboob, K. Onomitsu, S. Sasaki, and H. Yamaguchi, “Gate-controlled electromechanical backaction induced by a quantum dot”, Nat. Commun. 7, 11132-1-6 (2016).

#### 学会発表

1. M. Nomura (Plenary), “Phonon Engineering Learns Photonics for Heat Conduction Control”, International Symposium on Numerical Methods in Heat and Mass Transfer, Plenary Talk 3, Hangzhou, China, 2019
2. H. Yamaguchi (Invited), D. Hatanaka, and M. Kurosu, “Propagation control of acoustic waves in GaAs-based phononic crystal waveguide”, 34th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2018), Montpellier, France, 2018
3. H. Yamaguchi (Invited), “Mechanical Systems Hybridized with Semiconductor Quantum Structures”, Gordon Research Conference -Mechanical Systems in the Quantum Regime-, Ventura, US, 2016

#### 書籍

1. S. Chiashi, Y. Homma and S. Maruyama, Ed. by R Bruce Weisman and Junichiro Kono, Chapter 9, Raman Spectroscopy for Practical Characterization of Single-Wall Carbon Nanotubes in Various Environments in Handbook of Carbon Nanomaterials Vol. 10: Optical Properties of Carbon Nanotubes, pp. 49-73, World Scientific Publishing, 2019
2. 「フォノンエンジニアリング～マイクロ・ナノスケールの次世代熱制御技術」 株式会社エヌ・ティー・エス 2017年9月 塩見淳一郎、有江隆之、野村政宏、中村芳明、宮崎康次、他

#### 産業財産権

1. 半導体デバイスおよびその製造方法、特願 2019-205568、レデックアイン、金田真悟、大矢忍、田中雅明、関宗俊、田畑仁、2019、東京大学、国内
2. 熱流方向性制御構造、特願 2017-095459、野村政宏、R. Anufriev, A. Ramiere, and J. Maire、2017、東京大学、国内

#### <A04> 理論班

##### 雑誌論文

1. \*H. Toida, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, X. Zhu, W. J. Munro, H. Yamaguchi, and S. Saito, “Electron paramagnetic resonance spectroscopy using a single artificial atom”, Commun. Phys. 2, 33-1-7 (2019).
2. \*S. Dooley, M. Hanks, S. Nakayama, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Robust quantum sensing with strongly interacting probe systems”, npj Quantum Information 4, 24-1-7 (2019).
3. \*R. Okuyama, W. Izumida, and M. Eto, “Topological classification of the single-wall carbon nanotube”, Phys. Rev. B 99, 115409-1-10 (2019).
4. M. T. Quintino, Q. Dong, A. Shimbo, A. Soeda, and M. Muraio, “Reversing Unknown Quantum Transformations: Universal Quantum Circuit for Inverting General Unitary Operations”, Phys. Rev. Lett. 123, 210502-1-5 (2019).
5. R. Sakai, A. Soeda, M. Muraio, and D. Burgarth, “Robust controllability of two-qubit Hamiltonian dynamics”, Phys. Rev. A 100, 042305-1-7 (2019).
6. \*V. M. Bastidas, B. Renoust, K. Nemoto, and W. J. Munro, “Ergodic-localized junctions in periodically driven systems”, Phys. Rev. B 98, 224307-1-10 (2018).
7. \*A. Angerer, K. Streltsov, T. Astner, S. Putz, H. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, W. J. Munro, K. Nemoto, J. Schmiedmayer, and J. Majer, “Superradiant emission from colour centres in diamond”, Nat. Phys. 14, 1168-1172 (2018).
8. \*C. Uchiyama, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Environmental engineering for quantum energy transport”, npj Quantum Information 4, 33-1-7 (2018).
9. \*Y. Matsuzaki, S. Benjamin, S. Nakayama, S. Saito, and W. J. Munro, “Quantum Metrology beyond the Classical Limit under the Effect of Dephasing”, Phys. Rev. Lett. 120, 140501-1-6 (2018).
10. \*Y. Hama, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Relaxation to Negative Temperatures in Double Domain Systems”, Phys. Rev. Lett. 120, 060403-1-6 (2018).
11. H. Kim, S. Park, R. Okuyama, \*K. Kyhm, M. Eto, \*R. A. Taylor, G. Nogués, L. S. Dang, M.

- Potemski, K. Je, J. Kim, J. Kyhm, and J. Song, “Light Controlled Optical Aharonov-Bohm Oscillations in a Single Quantum Ring”, Nano Lett. 18, 6188-6194 (2018).
12. \*A. Angerer, \*S. Putz, D. O. Krimer, T. Astner, M. Zens, R. Glattauer, K. Streltsov, W. J. Munro, K. Nemoto, S. Rotter, J. Schmiedmayer, and J. Majer, “Ultralong relaxation times in bistable hybrid quantum systems”, Sci. Adv. 3, e1701626-1-6 (2017).
13. \*Y. Matsuzaki, S. Nakayama, A. Soeda, S. Saito, and M. Murao, “Projective measurement of energy on an ensemble of qubits with unknown frequencies”, Phys. Rev. A 95, 62106-1-6 (2017).
14. \*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”, Nat. Commun. 7, 13253-1-5 (2016).
15. \*K. Kakuyanagi, Y. Matsuzaki, C. Déprez, 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. 117, 210503-1-6 (2016).
16. \*T. Tilma, M. J. Everitt, J. H. Samson, W. J. Munro, and K. Nemoto, “Wigner Functions for Arbitrary Quantum Systems”, Phys. Rev. Lett. 117, 180401-5 (2016).

#### 学会発表

1. K. Nemoto (Plenary), “DISTRIBUTED QUANTUM INFORMATION PROCESSING”, SPIE. Optics + Photonics 2019, 2019
2. K. Nemoto, “Superradiance and thermalization in hybrid quantum systems”, AIP Congress 2018, 2018

#### 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 <https://www.hqs2019.org/index.html>

#### 主催シンポジウム

2016/06/13-14 Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop (FQMD2016)  
 2016/11/10-11 German-Japanese Meeting on the Science of Hybrid Quantum Systems  
 2017/09/10-13 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HQS2017)  
 2018/10/1-2 FRANCE-JAPAN BILATERAL WORKSHOP ON HYBRID QUANTUM SYSTEMS  
 2019/01/8 International Workshop on Hybrid Quantum Systems  
 2019/05/26-27 Frontiers in Quantum Materials and Devices Workshop (FQMD2019)  
 2019/06/27-27 Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems  
 2019/12/1-4 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017 (HQS2019)  
 2020/2/3-6 The Future of Quantum Science and Technology 2020

#### 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」  
 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)  
 2017/6/9-10 NII オープンハウス「光をめぐるハイブリッド量子科学+量子の世界を可視化する」  
 2017/8/25 NII 市民講座「情報学最前線」ダイヤモンドと量子情報(小坂英男)  
 2018/6/22-23 NII オープンハウス「量子コンピュータへの挑戦+多様化するハイブリッド量子科学」  
 2019/1/23 NII 市民講座「情報学最前線」テラヘルツ電磁波の新展開(平川一彦)  
 2019/5/31-6/1 NII オープンハウス「量子情報技術を支える誤り訂正+電荷・スピンをめぐるハイブリッド量子科学」  
 2020/1/21 NII 市民講座「情報学最前線」トポロジーで光を操る(岩本 敏)  
 なお、ウェブコンテンツによる広報ページ <http://www.ryosi.com/> もある。

## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

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、これらと光子、フォノンの量子的な結合、(2)光子の高度な制御技術の確立と光子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的牽引と様々な物理系を総括する理論の構築の4つの計画研究を有機的に連携させた。特に、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)、フォノン制御と光子制御などの連携を実現した。実際に、研究の融合に向けて、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た。

図23に領域内の共同研究相関図を示す。実験を主に行う計画研究班(A01電荷・スピン班、A02光子班、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、共同で実験や研究を行ったり、共同での研究発表があったりする連携を実線で示している。勉強会を開催するなど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中心などの電子スピンと超伝導量子系のカップリングの研究がA01からA02、A03、A04班のすべての計画班を結んで進められ、ダイヤモンドNV中心をベースにした高感度量子計測がA02、A04に公募研究が連携して行われた。さらに、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班を中心にしたTHz分子スペクトロスコピの研究は電荷、スピン、フォノンとの結合も視野に入ってきた。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の連携で進められ超放射のような新概念にたどり着いており、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、A03、公募研究を結んだフォトニック・フォノン結晶の研究や、メカニカルシステムや光ファイバー共振器を用いたフォノン、

光子、電荷、スピンの融合研究であり、小規模ハイブリッド量子ネットワークにつながる礎が築かれつつある。半導体のナノ構造作製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。実現された連携体制は、A01班は光子、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・スピンと光子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を示している。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が実現され、本新学術領域を通して新しい研究グループ、研究体制が構築されたことを示している。

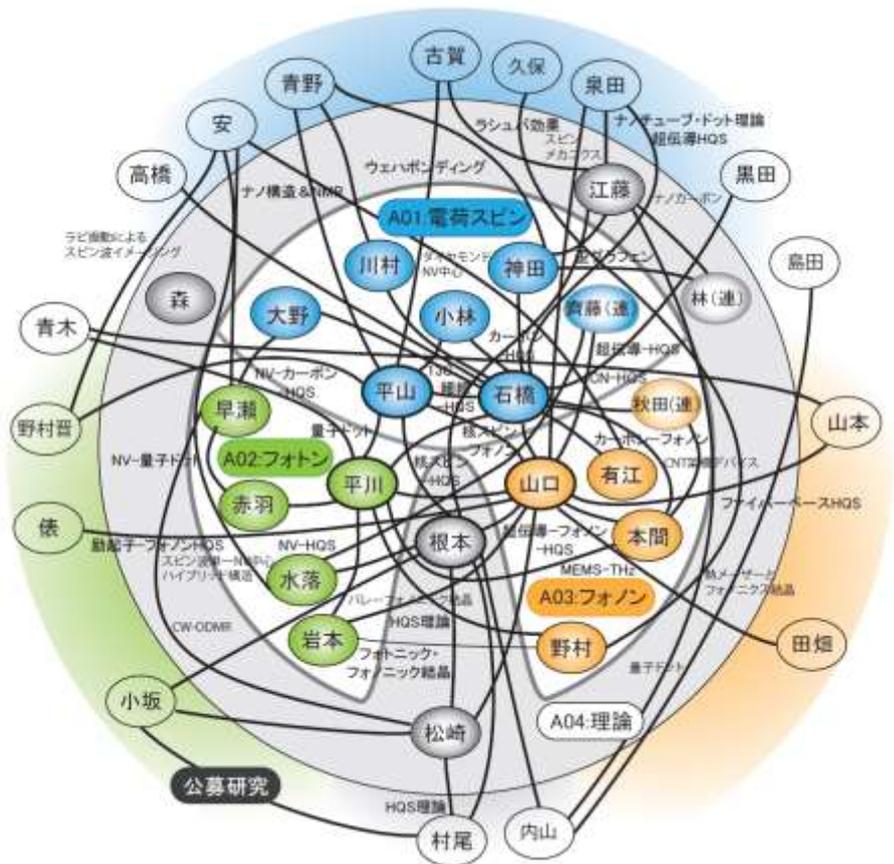


図23 領域内共同研究相関図

## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、設備等（本研究領域内で共用する設備・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、研究費の使用状況や効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

### ○ 設備等の活用状況、研究費の使用状況や効果的使用の工夫

設備の活用状況に関しては大きな規模の設備投資の活用状況を中心に記述する。

A02 では光学実験用温度可変装置、差周波発生用波長可変光源、テラヘルツ発生器(以上東大)を設置した。光学実験用温度可変装置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おり、後者の2点は、わずかに異なる周波数で発振する2台の半導体レーザーの光を混合して、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、この装置の導入により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。

LD 励起レーザーシステム、単一光子検出器 COUNT-20C、高感度冷却 LNCCD 検出器(以上慶応大)はNV 中心の評価およびセンシングデモンストレーションが実行可能な光検出磁気共鳴顕微鏡を増設することに使用され、研究推進を加速した。また、慶応グループに複数のベクトル信号発生器を導入することで、多周波数ベクトルセンシングのデモンストレーションが可能となり、大きな成果につながった。高価なベクトル信号発生器を複数台購入するには、相当の備品購入費が必要であり、本研究費が大変有効に役立った。

A02 ではピエゾステージ、シングルモードグリーンレーザー、磁気シールド(以上京大)も設置した。ピエゾステージとシングルモードグリーンレーザーの導入により、高空間分解共焦点レーザー顕微鏡イメージ像の長時間の安定的な測定が可能となった。また、磁気シールドの導入により、外来の磁気ノイズを除去でき、コヒーレンス時間の長時間化、ノイズ機構の解明のこれも大変重要な成果につながった。

また、低振動光学測定用極低温冷却装置、プローブ付き外筒下部および専用シールド(以上情報研究機構)は前者が半導体量子ドットの低温における光学測定のための冷却装置として、量子ドットの低温における光物性の評価に用いられ共同研究に用いられた高品質量子ドットの作製に寄与した。後者は極低温冷凍機に対して電流印加が可能なプローブであり、低温における量子ドットの光学特性評価の際に電圧印可および電流注入を行うことが可能になり、量子ドットの発光特性の注入電流依存性などの評価に寄与した。

さらに、マイクロマニピュレータ、時間相関単一光子計数モジュール(以上東大)を設置した。前者は光学顕微鏡下での3次元フォトニック結晶の作製を可能にする重要な設備であり、カイラルフォトニック結晶における円偏光共振器の実現などに大いに貢献した。後者は量子ドットなどの時間分解発光測定に広く利用されている。

A03 班に導入したメカニクス用無冷媒希釈冷凍機(NTT)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音、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る。装置の立ち上げは完了し、20mKの極低音における電気機械特性の研究に活用している。主たる研究用途は、①量子極限が期待されるギガヘルツ高周波フォノン結晶の評価、②ナノワイヤメカニカル振動子における量子輸送に対する歪効果、③量子ポイントコンタクトを組み込んだメカニカル振動子におけるターンスタイル動作の3つであり、設備の有効活用としては、②に関して東北大ならびに理研との共同研究、③に関しては国際共同研究加速基金を用いたロシア科学アカデミーとの国際共同研究が進展している。残念ながら量子極限の達成という当初の目標に至る成果の創出には到達していないが、その準備実験の成果として、①に関しては2020年のPhysical Review Applied誌、②に関しては2019年のPhysica Status Solidi B誌、③については2019年のJETP Letters誌に論文が掲載されている。今後はこれらの成果を発展させ、量子極限領域におけるフォノン振動子の研究を進める予定である。

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た。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を進めてきた。現時点では論文化に至る成果は得られていないが、本領域終了後も引き続き共同利用に向けた取り組みを継続する予定である。

A01、A04では特に大きな設備の導入はなかったが、東北大や理研グループに設置している低温電気伝導

測定システムやナノ加工装置を、領域内共同研究を通して領域内の共同研究者が活用できるようにした。

効果的な設備の活用に関しては上記にすでに述べられているが、総括班でも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た。具体的には東北大や理研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加工装置を、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、実際に公募研究や研究計画間の共同研究などに活用された。この新学術領域を通して確立されたこれらのつながりは今後も積極的に維持していく予定である。

### ○ 総括班の活動状況

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させた。特に領域内インターンシップについては、これを促進するために、有意義な提案については総括班で旅費などの交流経費を追加でサポートした。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、相互に行き来して構造作製や精密測定ノウハウを共有する状況を築くことができた。また、国際交流の推進と新学術領域の研究で得られた成果の国際的アピールを兼ねて、国際交流加速基金も用いて、国際会議を積極的に開催した。特に、国外で国際ワークショップを開催することにも力を入れ、2017年9月に仙台、2019年12月に松江で開催した大規模な国際シンポジウムに加えて、2016年11月ベルリン、2018年10月パリ、2019年6月オタワでそれぞれハイブリッド量子科学に関心を持つ現地の関連研究機関と共同で国際ワークショップを開催した。特に、オタワで開催された際はカナダ側の国際交流促進に向けた熱意もあり、国際会議のレセプションはオタワの日本大使公邸で大使やカナダ側の科学技術政策責任者も参加して開催された。

### ○ 領域設定期間最終年度の繰り越し

総括班では、2019年度末に予定していた計画研究をまたいだ領域内インターンシップ、ならびに企業アドバイザーの協力のもと大阪で開催予定であった企業研究者と新学術研究者の意見交換会が共に新型コロナウイルスの影響で中止を余儀なくされた。企業研究者との意見交換会は本領域で得られた成果の産業応用を考えると大変重要であり、新型コロナウイルスの感染拡大が収まった段階で再度企画する予定である。領域内インターンシップに関しても計画研究をまたいだ共同研究として大変魅力的なものであり、これも新型コロナウイルスによる状況が改善した後に再開する予定で、予算の繰り越しも認めてもらっている。

A01 計画研究では東北大で研究に使用していた希釈冷凍機にトラブルが生じたため、量子ポイントコンタクトにおける電子スピン・核スピン相関の低温磁場中での測定が遅延した。今後、回復した測定系を用いて、エラーフリーな量子情報処理にも応用できる可能性のある分数量子ホール状態測定や0.7構造の抵抗検出NMR測定を完成させる予定である。また、2020年3月にボストンで計画されていたHarvard大学とのワークショップが新型コロナウイルスの影響で中止になったため、この旅費も繰り越している。A04 計画研究でも、2020年春の米国物理学会での発表が新型コロナウイルス感染拡大により延期になり、その繰り越しを行っている。これらに関しても、2020年度に感染状況が落ち着いたら、Harvardとの会議（ボストン開催）を再度計画したり、アメリカ物理学会あるいは同等の学会に参加したりする予定であり、これらに関する繰り越しも認めて頂いている。

## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本研究領域は「(1) 既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」として提案した。ここには、当該ならびに関連学問分野への貢献を、特に、革新的・創造的な学術研究の発展への貢献の観点からまとめる。

高感度量子計測に代表される Quantum Enabled Technology の発展は、ナノテクノロジーからバイオサイエンス、医療に至るまで大きな波及効果がある。この中で、本領域ではダイヤモンド NV 中心の実験において電子スピンコヒーレンス時間の2桁以上の長時間化を実証し、NV 中心の新しい量子制御、特性の電気的な読み出しに関しても革新的・創造的な学術成果を上げた。理論面でも、核スピンとの量子ハイブリッド系において電子スピンのみの系に比べ1桁の磁気感度向上が得られることを示し、現実的なノイズ環境下で高感度量子計測を可能とするこれまでの予測を覆す具体的な方法を提案した。これらはダイヤモンド中の NV 中心に関する量子計測、量子制御の発展に大きく寄与するもので、大きな波及効果が期待される成果である。

量子ネットワークや新しい量子技術に波及する革新的成果も得られている。領域内インターンシップを利用して、原子と光子の高効率な結合を可能にするナノファイバー共振器 QED 技術と原子共鳴波長光子を通信波長光子に変換する量子波長変換器技術を融合することが行われ、光通信波長で結合することが可能な原子系とフォノン系のハイブリッド量子ネットワークの構築が視野に入った。この成果は将来の量子ネットワークへの大きな波及効果が期待される。量子技術として重要なパラメトリック機械振動子の研究も進展しており、カオス信号の新しい生成手法に関する成果が得られている。この成果は機械学習において重要視されているリザーバー計算への応用など、新しい融合技術への展開が期待される。

電荷、スピン、フォトン、フォノンを舞台として研究する研究者が、連携を意識してハイブリッドしたことによる成果も多数生まれ、革新的で創造的なものも多い。例えば、材料系の融合による量子状態が長く維持されるマヨラナモードを示唆する成果、物性研究者とフォトニクス研究者の交流によるフォトニクスの新領域「トポロジカルフォトニクス」の活性化とその進展がある。THz系とMEMSと呼ばれる機械的な自由度を持つ系の融合は、我が国発の新しい概念のテラヘルツ検出器に結びついた。さらに、機械的な共振器構造が内包する材料物性に由来する非線形性を利用することにより、機械的な系の中に非線形光学の概念を持ち込むことができ、分野横断的な概念による高感度検出器の開発に繋がると考えられる。まさに「既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指す成果」である。フォノン制御技術に関しても波動及び粒子的描像の両側面から熱フォノン輸送特性を探索する新しい熱制御手法の研究を進め、光学とのアナロジーに基づき、熱制御技術へ改革をもたらすフォノンエンジニアリングの学理構築に貢献した。古くから試みはあったが、信頼性や制御性で大きな問題があった単一分子ナノエレクトロニクスについても、独創的アイデアで良く制御された単一分子系を実現し、分子振動の周波数に整合するテラヘルツ電磁波で、分子伝導のダイナミクスを明らかにする革新的成果を得た。単一分子の構成要素である原子のうちの1つに注目することで、電荷、スピン、フォノン、THzフォトンの量子ハイブリッド化を単一分子上で実現できるインパクトのある可能性が出てきた。これらはいずれも革新的デバイスや新しい学術領域の創成につながる革新的で大きな波及効果が見込まれる成果である。

波及効果のある革新的・創造的な研究は理論主導でも行われた。カオスの運動と局所的運動のハイブリッド、量子プロトコル、量子アルゴリズムのハイブリッド化など、新しい概念によるハイブリッド化を提案し、新興領域として飛躍的に発展する可能性をもつ新しい量子科学への道を拓いた。理論的成果としては、ハイブリッド量子科学を通して数桁にわたるエネルギー領域における様々な物理系を統一的に扱い、それぞれの分野で固有の現象として予言、観測されてきたものを、ユニバーサルに捉えることを可能にした貢献もある。具体的な例では、超放射はもともと量子光学で予言され、数十年にわたり実現が困難であることが知られていたが、ハイブリッド量子科学の考えに基づくことで、超放射現象は、電子スピンとマイクロ波、核スピンと南部ゴールドストーンモード等、様々な物理系で対称性を満たす時にユニバーサルに起こる現象であることを示し、実証を導いている。このユニバーサルな捉え方は新学問領域を様々な分野に生み出す波及効果がある。

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

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。この環境を若手研究者育成の場としてフル活用すべく、様々な企画を盛り込んだ若手研究会を年2回の頻度で開催した。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わ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た。

前半は、ハイブリッド量子科学分野の第一線で活躍する研究者の講演や、若手研究者の研究発表を中心に研究会を企画した。講演の質疑応答では、熱意のある若手メンバーから様々な独自の視点の質問が飛び交った。若手メンバーのみで企画したポスターセッションでも、セッション終了時刻をオーバーするほどの活発な討論が行われた。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も芽生えた。若手研究者が本領域の国際アドバイザーの前で直接研究発表を行うセッションでは、ホワイトボードを使った白熱した議論も繰り広げられ、目的意識をもって研究を進めている様子が伺えた。国際アドバイザーからは、若手研究者の研究に対する熱意に関して非常に高い評価をいただいた。

後半は、研究発表に加え”若手の意見の発信と議論”を更に促進するため、研究会にグループディスカッションや、アクティブラーニングを積極的に取り入れた。分野を異にする若手メンバーの専門テーマや要素技術を組み合わせ新たなハイブリッド研究ができないかを議論いただくグループディスカッションでは、メンバー間で真剣な議論を通して融合研究のモデルケースとなるような斬新な提案も生まれた。更に、領域代表の講演「タイトル：若手メンバーへ期待すること」を通して、自身の体験談やシニア視点での研究への向き合い方を若手に伝える場も設けた。このような活動を通して、若手の横のつながりのみならず、シニアメンバーとの縦のつながりの強化も図ることができた。

こうした通常の研究ワークショップでは行わない斬新な企画に挑戦したことで、若手研究者ならではの柔軟性や適合力を引き出し、量子研究に関する高いレベルでの知識共有と本領域研究の活性化が達成された。量子研究の応用や、研究以外の一般的な議題で議論してもらう機会もあり、産業界に貢献する視点からの人材育成もできたのではないかと考えている。表1に、若手研究会の主な実施事項を示す。

表1 若手研究会における実施事項

日時	開催地	実施事項
2016年8月24日	東京理科大学	講師によるチュートリアル講演、ポスターセッション
2017年2月28日	理化学研究所	若手メンバーによる研究発表、国際アドバイザーとの議論
2017年9月14日	東北大学	講師によるチュートリアル講演、ラボツアー
2018年1月5日～6日	国立情報学研究所	講師によるチュートリアル講演、グループディスカッション(議題：新たなハイブリッド研究の提案)
2018年8月8日	名古屋大学	アクティブラーニングを取り入れたチュートリアル講演、領域代表の講演
2018年10月26日	東京理科大学	“量子センサー”をテーマとした勉強会とポスターセッション
2019年1月10日～11日	沖縄科学技術大学院大学	講師によるチュートリアル講演、ラボツアー、グループディスカッション(議題：量子研究の課題や最近の研究者事情について)
2019年8月6日～7日	しいのき迎賓館	演習を導入したチュートリアル講演、他己紹介、ポスター発表

これらのアクティビティを反映して、領域の若手の活躍は素晴らしいものがあり、野村政宏准教授(東大)がISCS Young Scientist Award、R. S. Deacon 博士(理研)が文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞したほか、助教、大学院生などの国際、国内学会での講演奨励賞やベストポスター賞の受賞が25件以上に上った。

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

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トニクス研究拠点（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）、小田川明弘（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回領域会議と国際会議 HQS2019 の機会に国際アドバイザーボードを開催した。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：

頻繁に領域会議の議論に加わっていただき、領域が進める研究に関して、1. 大きなパワーを感じる、2. 企業にいと流れはAIで半導体は終わった感じがあるが、量子は大切、期待しているので頑張ってほしい、などの評価コメントをいただいた。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。最終年度の講評としては、1. 量子に関する過酷な競争の中で、本領域の研究グループは善戦している、2. 日本が「量子」の分野を牽引する存在になるために、本領域終了後も違ったスキームで研究体制を作り、情報共有を絶やさず引き続き国全体で量子研究を進めることが不可欠である、とのコメントをいただいた。「本領域の若手研究員はモチベーションが高い」とのお言葉もいただき、次世代の量子関連研究分野を牽引すべき若手研究者への「引継ぎ」の重要性も強調された。

### 企業委員（アドバイザー）から頂いた評価コメント：

総じて「本領域の研究内容は、一見して事業と直接結びつかない基礎的なものであるが、企業の立場からは色々な切り口で将来の応用が期待できる。」との評価をいただいた。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. 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。2. 優秀な人材の育成は非常に重要な課題であり、若手の発表のセッションは良い取り組み、とのコメントがあった。企業との連携を目指す方向については、1. 協働活動の糸口を探るために是非引き続き議論させて頂きたい。2. 量子研究の応用先として、脳磁計測や、車載用温度センサー等の技術分野が期待できるのでは？、ヘルスケア分野も視野に入れたらどうか、などの将来へ期待するコメントがあった。一方で、3. サンプルスケール等の応用の観点からの情報提供や、本領域の技術の優位性、実現可能性の議論は、理解の助けになるので活発に行ってほしい、4. 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。5. 対外的な PR のためには、学術領域発展と社会実装の両極端のビジョンをバランスよく説明する必要がある、との指摘も頂いた。

#### 国際アドバイザーから頂いた評価コメント：

第4回領域会議と国際会議 HQS2019 のアドバイザー委員会で、国際アドバイザーからいただいたコメントの要約を掲載する。

(第4回領域会議でのコメント(2名))

“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 including 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.”

“This was an impressive meeting with a broad range of interesting talks, 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. To bring people together from different expertise, the Center could choose a few high-level scientific and/or application goals, which could be discussed at ‘all hands’ brainstorming meetings.”

(HQS2019 での国際アドバイザー会議議長 (その場でアドバイザー間の相談で決定) のコメント)

Lots of research achievements of world leading quality and originality were presented in the HQS conference, and the project in general has been remarkably successful and made great impact onto the scientific community. The advisory board is very happy to have watched that young scientists have been fostered by the HQS project during these five years and have demonstrated their potentials to become the leading scientists of the next generation.

The advisory board strongly agrees that betting on a single technology would be a serious error as one cannot separate quantum technology from, e.g., quantum communications or quantum measurements and sensing or quantum information processing and computing. Also, at this stage, it is not possible to predict which directions will produce the largest economic impact. Thus, the strategy and efforts of the HQS consortium, namely to combine different quantum systems in order to develop applicable advanced quantum technologies, are in accordance with the world frontier of the quantum technology development and promise to make leading contributions and great impacts to the field worldwide.

The advisory board would like to strongly emphasize that the outputs of this project have reached an excellent level that definitely makes a continuation of the activities highly desirable. It is the unanimous opinion of the advisory board that the present research activities of this HQS program should be continued, probably by using an appropriate different scheme of research funding.