

戦略的創造研究推進事業  
—さきがけ(個人型研究)—

研究領域  
「量子技術を適用した生命科学基盤の  
創出」

研究領域事後評価用資料

研究総括： 瀬藤 光利

2023 年 1 月

## 目 次

1. 研究領域の概要 .....	1
(1) 戦略目標 .....	1
(2) 研究領域 .....	1
(3) 研究総括 .....	1
(4) 採択研究課題・研究費.....	2
2. 研究総括のねらい .....	7
3. 研究課題の選考について .....	8
4. 領域アドバイザーについて .....	14
5. 研究領域のマネジメントについて.....	16
6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について.....	30
7. 総合所見 .....	42

## 1. 研究領域の概要

### (1) 戦略目標

「量子技術の適用による生体センシングの革新と生体分子の動態及び相互作用の解明」

### (2) 研究領域

「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」(2017 年度発足)

### (3) 研究総括

瀬藤 光利 (国際マスイメージングセンター センター長)

上記詳細は、以下 URL をご参照ください。

JST 公開資料「新規研究領域の事前評価」

<https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/index.html>

平成 29 年度新規研究領域の事前評価

[https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka\\_h29.pdf](https://www.jst.go.jp/kisoken/evaluation/before/hyouka_h29.pdf)

(4) 採択研究課題・研究費

表1 採択研究課題・研究費一覧

(百万円)

採択年度	研究者	所属・役職 採択時 <sup>2</sup>	研究課題	研究費 <sup>1</sup>
2017年度	石綿 整	東京工業大学環境エネルギー協創教育院 特任助教 (量子科学技術研究開発機構量子生命科学研究所 主任 研究員)	NV センタデルタドープ薄膜による生体分子の機能・相互作用解析	44
	井手口 拓郎	東京大学大学院理学系研究科 講師 (東京大学大学院理学系研究科 准教授)	超高感度ラベルフリーイメージング法の開発	47
	衛藤 雄二郎	産業技術総合研究所計量標準総合センター 主任研究員 (京都大学大学院工学研究科 准教授)	広帯域スクイーズド光源による低侵襲深部多光子分光	42
	鬼頭 宏任	筑波大学計算科学研究センター 研究員 (近畿大学理工学部エネルギー物質学科 准教授)	量子シミュレーション技術による未知の生体電子移動/機能発現の探索	25
	島添 健次	東京大学大学院工学系研究科	多光子時間空間相関イメージング手法の開発	44

	助教 (東京大学大学院工学系研究科特任准教授)		
塗谷 睦生	慶應義塾大学医学部 准教授	多光子現象を駆使した脳内化学情報伝達の可視化解析	42
平野 優	量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門 主任研究員 (量子科学技術研究開発機構量子生命科学領域主幹研究員)	高分解能立体構造解析によるタンパク質における量子現象の解析	37
藤井 麻樹子	横浜国立大学大学院環境情報研究院 特任教員(講師) (横浜国立大学大学院環境情報研究院 准教授)	反応性量子ビームによる細胞内生命現象の可視化	40
丸山 善宏	京都大学白眉センター 助教 (オーストラリア国立大学計算機科学科 講師)	生命と認知の量子情報理論：圏論的定式化とその応用	27
萬井 知康	コネチカット大学化学科 アシスタントプロフェッサー	磁場応答光プローブを用いた磁場による断層選択光イメージング	43
溝端 栄一	大阪大学大学院工学研究科 講師	時分割XFEL結晶解析で可視化する金属酵素の動的構造活性相関	49

	渡邊 宙志	東京大学先端科学技術研究センター 助教 (慶應義塾大学量子コンピューティングセンター 特任講師)	量子化学効果を取り込んだタンパク質のシームレスな動的解析法の開発と応用	25
2018 年度	五十嵐 龍治	量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所 主任研究員 (量子科学技術研究開発機構量子生命・医学部門 グループリーダー)	コンポジット量子センサーの創成 - 1 細胞から 1 個体まで	28
	市村 垂生	理化学研究所生命機能科学研究センター 上級研究員 (大阪大学先導的学際研究機構特任准教授)	音響フォノン計測で拓く超次元力学イメージング	35
	大島 悟郎	大阪府立大学大学院理学系研究科 准教授	量子トモグラフィを用いた密度行列分光法の開発	42
	尾瀬 農之	北海道大学大学院先端生命科学研究院 准教授 (北海道大学大学院先端生命科学研究院 教授)	生体分子中におけるアミンの量子特性を解明する	33
	香川 晃徳	大阪大学大学院基礎工学研究科 助教	生体内反応による核スピン量子もつれ生成の検証	33

	小西 邦昭	東京大学大学院 理学系研究科 助教 (東京大学フォ トンサイエンス 研究機構 准教 授)	真空紫外コヒーレント光を用いた 円二色性生体分光技術の開発	36
	近藤 徹	マサチューセッ ツ工科大学化学 科 研究員 (東京工業大学 生命理工学院 講師)	生体量子コヒーレンス顕微分光： 本当に量子効果は生命を駆動する のか？	48
	菅 倫寛	岡山大学異分野 基礎科学研究所 准教授 (岡山大学異分 野基礎科学研 究所 教授)	量子ビームが拓く光合成膜タンパ ク質のマルチモーダル構造解析	35
	Radostin Danev	東京大学大学院 医学系研究科 特任研究員 (東京大学大学 院医学系研究 科教授)	高速量子波面モジュレーション・ クライオ電顕	30
	東 雅大	琉球大学理学部 助教 (京都大学大学 院工学研究科 准教授)	光合成反応中心における初期電荷 分離過程の分子論的機構解明	20
	楊井 伸浩	九州大学大学院 工学研究院 准 教授	超核偏極ナノ空間の創出に基づく 高感度生体分子観測	46
	Neill Lambert	理化学研究所創 発物性科学研究 センター 研究	光合成における量子環境	20

		員 (理化学研究所 開拓研究本部 研究員)		
	渡邊 千鶴	理化学研究所生 命機能科学研究 センター 研究 員	量子構造生物学におけるプロト ン：相乗的効果と構造	20
2019 年度	Lewis M. Antill	埼玉大学大学院 理工学研究科 日本学術振興会 外国人特別研究 員 (埼玉大学大学 院理工学研究科 特定プロジェクト研究員)	動物磁気感受のためのクリプトク ロム時空間計測	43
	馬越 貴之	大阪大学大学院 工学研究科 助 教 (大阪大学高等 共創研究院 講 師)	生命ナノ動態をありのままに観察 するラベルフリー超解像顕微鏡	42
	小野 堯生	大阪大学産業科 学研究所 助教	量子容量を用いた生化学的界面の 計測と制御	42
	片山 耕大	名古屋工業大学 大学院工学研究 科 助教	構造基盤に立脚した色認識機構お よび色覚情報伝達機構の解明	41
	齊藤 諒介	マサチューセッ ツ工科大学地球 科学系 日本学 術振興会海外特 別研究員 (山口大学大学 院創成科学研究 科 助教)	太古の光合成タンパク質：量子効 果の誕生	50



	庄司 光男	筑波大学計算科学研究センター 助教	生体内量子多体系における特異的 化学反応の機構解明	31
	富田 英生	名古屋大学大学院工学研究科 准教授	個別化医療にむけた光量子による 放射性核種分離・分析法の開発	30
	藤橋 裕太	自然科学研究機構分子科学研究 所 特任研究員 (京都大学大学院工学研究科 特定助教)	時間分解量子もつれ分光法: 理論 基盤の構築と生体分子系への応用	10
	本蔵 直樹	浜松医科大学医学部医学科 助 教 (浜松医科大学医学部医学科 准教授)	非線形光学効果が照らす生体物質 交換の仕組み	44
	柳澤 啓史	ルートヴィヒ・マクシミリアン 大学ミュンヘン物理学科 DF Gプロジェクトリーダー (東京大学物性研究所 研究 員)	原子分解能・低速電子ホログラフ ィーの開発	51
	山崎 歴舟	国際基督教大学教養学部 准教 授	共振器オプトフルイディックスの 開発	39
			総研究費	1619

<sup>1</sup>各研究課題とも研究期間の総額、進行中の課題は予定を含む(2022年12月15日現在)

<sup>2</sup>変更/異動のあった場合、下段に括弧つきで記載

## 2. 研究総括のねらい

本研究領域の戦略目標は、最新の量子技術と生命科学研究をつなげ、生命科学フロンティアを開拓する新たな分野として期待されているものであり、近年の目覚ましい量子技術の進展や量子コンピューターの要素技術が現実となっている状況を受けて本研究領域が設定されたことは、我が国の科学技術戦略において極めて重要であった。例えば、量子ビーム、量子スピン、光量子センサー、量子エレクトロニクスなどの量子技術は量子暗号通信やtime crystal（時間結晶）の実現に至るような著しい進展をみせており、我が国でも世界をリードする技術シーズが創出されている。こうした量子技術は、生体分子の動態や相互作用を検出する新規生体計測技術の開発などのテクノロジーの創出や、生命現象で量子的な現象の生命科学的意義を見いだすなど革新的なサイエンスへの展開が期待されているにもかかわらず、欧米に比べ、本戦略目標の設定時点では我が国では十分に進んでいるとは言いがたかった。このような状況の下、量子技術をライフテクノロジー分野で積極的な応用を促すことで量子科学の分野と生命科学の分野の交流と融合を促進し、生命科学分野の一層の発展を築くことが、本研究領域に課せられた使命であると考えている。

近年、日本でも量子技術シーズの生命科学応用が少しずつ始まっている。ダイヤモンドNVセンターなどの量子センサー技術は、これまで不可能であった生体内の微弱な温度・磁場・電場などの高感度観測を可能とし、世界的に注目されている。また、量子もつれ光子を超解像顕微鏡と組み合わせることで、これまで可視化されなかった状態を高い空間分解能で捉える新たな生体内イメージング技術の開発が進められている。生体分子の構造解析技術においても、量子ビームの高度化などによって、生体分子の機能発揮において鍵を握る電子密度や水素位置を捉えるような、量子レベルの解像度を有する超精密構造解析時代に突入している。一方で、生命科学の研究者による量子技術への苦手意識や抵抗感と、量子技術者の生命科学への応用に関する意識の希薄さなどの課題があった。そこで本研究領域では、戦略目標の達成に向けて以下のような実現をねらった。

- (1) 量子科学・量子技術を生体や生体分子の計測に応用
- (2) 量子と生体の研究の交流と融合を促進
- (3) 量子・生命のハイブリッド人材を育成
- (4) ハイリスクなテーマにも積極的に挑戦

そのために、本研究領域に集う研究者自身が、量子技術もしくは量子科学の視点に基づいている研究課題であることを、どれだけ説得力をもって説明できるかの過程を重視し、従来のコンセプトをさらに深化させた量子技術の開発とそれらの生命科学への応用、生命現象の中に真の量子的な現象や生命機能を見いだそうとする発想やアイデアの育成を期待した。

### 3. 研究課題の選考について

本研究領域では、戦略目標の達成に向けて、さまざまな分野の研究者が研究課題を提案・

推進できる枠組みとして、以下の3つの具体的な募集領域を柱として設定の上、公募と選考を行った。

#### **募集領域 1. 「生命現象を量子技術の応用により解明」**

応募者として、主に具体的な生命現象を対象に研究している生物学や農学、医歯薬学などの研究者を想定。

(概要) 新しい生命現象、原理や物質の発見、病態解明、その解析ツールとして量子技術を導入するもの。構造生物学に用いられるビーム技術や光技術、バイオイメージング技術やセンサー技術、各種プローブの応用など。

#### **募集領域 2. 「生命科学に応用可能な計測技術を量子技術の利用により開発」**

応募者として、主に応用物理や化学の分野の研究者を想定。

(概要) 生命科学に応用可能な計測技術やそのプローブ開発、ダイヤモンド NV センターなどの量子センサー技術、磁気共鳴や電子スピンの利用、多光子などの光・量子技術、シリコンフォトニクスや原子層科学の応用など。

#### **募集領域 3. 「生命現象を量子科学的に理解」**

応募者として、主に理学部の量子研究者、物理化学の研究者、理論生物学、計算科学など、いわゆる狭義の量子生物学の研究者などを想定

(概要) 生物の量子科学的な理解を目的とする。そのための技術は必ずしも量子技術でなくてもかまわない。量子化学的な観点を踏まえた計算シミュレーションからのアプローチ、量子現象を生体系で観察するためのアイデアや手法など。

選考では提案技術の量子的な側面の説明、もしくは生命科学における量子科学的視点の説明に焦点をあて、量子技術もしくは量子科学の視点に基づいている提案であることを、どれだけ説得力をもって説明できているかを重視した。また、さきがけ研究期間の終了後に飛躍的な成果を挙げることが期待される挑戦的な提案に高い評価を行った。具体的には以下の選考方針に基づいて研究課題の選考を行った。

- 生命現象を解明する課題では、生命現象の原理や物理化学的な作用を考慮しつつ、その解明に必要な量子技術を独自の工夫やブラッシュアップにより最適化して導入すること。
- 量子技術として計測技術やプローブを開発する課題では、どのような生命現象・分子メカニズムを対象とするかを具体的に検討の上、それらを踏まえてどのような技術的優位性があるのかを説明できること（募集・選考における研究課題の提案時点では、まだ量子超越性（量子特有の優れている点）がなくても構わない）。

#### **① 2017年度（第1期）募集・選考について**

2017年度(第1期)の公募では、132件もの応募があった(男性;112人(85%)、女性;20人(15%)、国大;75件、公大;11件、私大;7件、国研・独法;31件、民間;0件、その他(海外研究機関など);8件)。提案のあった分野の内訳を見ると、量子というキーワードの下、生物学、生化学、生物物理学、物理化学、量子化学、応用物理学、光学、スピントロニクスなど幅広い分野からの応募があり、本研究領域が進める異分野融合への大きな期待感、意欲的な連携をそれらの提案内容から感じ取ることができた。選考はこれらの分野にわたる領域アドバイザーに意見を求め、それに基づく書類選考会での検討を経て、特に優れた29件の提案を面接選考の対象とした。さらに2日間にわたる面接選考の結果、最終的に12件を採択した(採択率:9.1%)。採択課題は、新たな量子プローブで生体情報のイメージングに取り組む課題、ダイヤモンド空孔を用いた量子センサーの感度向上を目指す課題、最先端の量子ビームを用いてタンパク質の水素原子・水分子の挙動や外殻電子の振る舞いに迫る課題、タンパク質内部の分子動力学法や量子シミュレーションなどのインフォマティクスの課題、生命と認知の量子情報に圏論で取り組む数学的な課題など、多岐にわたる。今後、研究領域内で量子技術、量子科学とライフサイエンスの融合や連携が期待される。一方で、次年度以降の公募では、上記に加えて、従来のコンセプト(概念)をさらに深化させた量子技術の開発とそれらの生命科学への応用、生命現象の中に真の量子的な現象や生命機能を見いだそうとするより挑戦的な提案を、公募説明会などで求めていくこととした。

## ② 2018年度(第2期)募集・選考について

2018年度(第2期)の公募では71件の応募があった(男性;61人(86%)、女性;10人(14%)、国大;42件、公大;7件、私大;3件、国研・独法;17件、民間;0件、その他(海外研究機関など);2件)。提案のあった分野の内訳を見ると、量子というキーワードの下、生物学、医学、生化学、物理化学、生物物理学、量子物理学、量子光学、ナノ材料科学など、前回と同様に幅広い分野からの応募であった。特に前年度のふりかえりを踏まえ、技術の量子的な側面、生命科学における量子科学的視点からレベルの高い提案を得ることができた。選考はこれらの分野にわたる領域アドバイザーに意見を求め、書類選考会での検討を経て、特に優れた24件の提案を面接選考の対象とした。さらに2日間にわたる面接選考の結果、最終的に13件を採択した(採択率:18.3%)。選考では特に、従来のコンセプト(概念)をさらに深化させた量子技術を開発して生命科学に応用しようとする提案、生命機能の中に真の量子的な現象を見いだそうとする、より挑戦的な提案に高い評価を行った。採択課題は、光合成反応や脳内の生体反応における量子コヒーレンス現象の測定に挑む課題、従来のダイヤモンド空孔とは異なるハイブリッド量子センサーの開発を目指す課題、光量子技術や動的核偏極法に工夫を凝らして高分解・高感度な細胞・組織イメージングに取り組む課題、最先端の量子ビームを用いてタンパク質の動的理解からスピン情報までの獲得に迫る課題、生体系のエネルギー輸送システムについて量子ダイナミクス計算や反応座標法の機能拡張により取り組む課題など多岐にわたった。これらを踏まえ、次年度(最終回)の公募

では、生命現象のメカニズムを分子レベルで想定の上、現在抱えている課題に対して、例えば、使用されている原子、電子、光子、スピンなどの性質を利用した技術について、どのように工夫したら見えなかった現象が見えてくるのかなど、生命現象の解明により挑戦する提案を求めていくこととした。

### ③ 2019年度（第3期）募集・選考について

2019年度（第3期）の募集では、64件の応募があった（男性；62人（97%）、女性；2人（3%）、国大；39件、公大；7件、私大；8件、国研・独法；6件、民間；0件、その他（海外研究機関など）；4件）。前年度と同様に幅広い分野からの応募であり、特に量子科学的視点からのレベルの高い提案を数多く得ることができた。選考はこれらの分野にわたる領域アドバイザーに意見を求め、書類選考会での検討を経て、特に優れた21件の提案を面接選考の対象とした。さらに2日間にわたる面接選考の結果、最終的に11件を採択した（採択率：17.2%）。採択した課題は、量子容量を持つナノ材料を利用して極微小の生化学的反応界面の測定に挑む課題、1生体分子の原子構造を観察できる原子分解能・低速電子顕微鏡の開発を目指す課題、集団自由電子の量子化によりラベルフリーの超解像顕微鏡の開発に取り組む課題、量子もつれ光による時間分解分光法の理論から光合成の光化学系エネルギー変換過程の解明に挑む課題、非線形光学効果を用いた多光子・高次高調波発生顕微鏡で単一赤血球の酸素結合度の計測に取り組む課題、動物の磁気受容メカニズムに取り組む課題、光共振器で生体系の量子現象検出に挑む課題など、多岐にわたった。

### ④ 第1期から3期までの募集・選考について（総合所見）

本研究領域の戦略目標では、最新の量子技術と生命科学研究をつなげ、生体内でこれまで観察されなかった現象の解明、生体分子の動態及び相互作用の精密な解明、産業応用や新しいサイエンス領域（量子生命科学）の開拓が期待されている。本研究領域の3回にわたる選考を通じ、その期待に応えるべく設定した3つの募集領域において、1期から3期までの合計36課題のさまざまな研究分野、かつバランスのとれたポートフォリオが形成できたと考えている。

本研究領域ではこれらの研究課題を中心に、量子技術、量子科学とライフサイエンスの異分野融合を促進しつつ、最先端の量子科学の知見と量子技術を総合的に利活用し、従来不可能であった極微の空間・時間・エネルギースケールあるいは超高感度での生体内部の観測、そして生体分子の計測・制御による生命機能のモデリングなどの技術革新の実現・応用に向けて取り組んだ。

## さきがけ量子生体 第1、2、3期採択 36課題 領域ポートフォリオ



図1 1期～3期採択 研究課題の領域ポートフォリオ  
(白) 1期 (2017年度) 採択課題  
(緑) 2期 (2018年度) 採択課題  
(橙) 3期 (2019年度) 採択課題

第1回採択 12 課題がカバーする分野

量子技術 対象	量子センサ 光量子	量子 ビーム	量子 プローブ	量子理論
生体・細胞 イメージング	NVセンサ薄膜 石綿 (東工大)	反応性量子 ビーム 藤井 (横国大)		
ケミカル イメージング	スキャンド光 イメージング 衛藤 (産総研)		磁気応答光 プローブ 萬井 (お茶大)	
脳・認知	赤外フォトリソ 振動分光イメージング 井手口 (東大)		脳内化学情報 逢谷 (慶応大)	量子情報理論 丸山 (京大)
光合成 酸化・還元 窒素固定	光子同時測定 イメージング PET, SPECT 島添 (東大)	中性子ビーム 結晶解析 平野 (豊研機構)		生体電子移動 理論 鬼頭 (筑波大)
生体量子効果 水分子摂動		X線自由電子 レーザー結晶解析 溝端 (阪大)		分子動力学 計算法 渡邊 (東大)

図2 1期 研究課題がカバーする研究対象

第2回採択 13 課題がカバーする分野

量子技術 対象	量子センサ 光量子	量子 ビーム	量子 プローブ	量子理論
生体・細胞 イメージング	メカバイオロ ジー 分子細胞弾性 アトムの歌乱 市村 (阪大)	高速量子波面 モジュレーション R.ダネフ (東大)		
ケミカル イメージング	真空紫外レ ゾ光 生体分子 小西 (東大)		超核偏極 ナノ空間 橋井 (九州大)	
脳・認知	NV量子センサ 五十嵐 (豊研機構)		脳内核スピ ン 香川 (阪大)	光合成 電子 シミュレーション 東 (筑波大)
光合成 酸化・還元 窒素固定	光合成アンテナ系 光反応 近藤 (東北大)	X線自由電子 レーザー 管 (岡山)		水素イオン位置 決定理論 渡邊 (理研)
生体量子効果 水分子摂動	密度行列分光 大島 (大阪府立大)	生体アミ ノ酸量子効果解析 尾瀬 (北大)		反応座標法 理論 N.フクロト (理研)

図3 2期 研究課題がカバーする研究対象

第3回採択 1 1 課題がカバーする分野

量子技術 対象	量子センサ 光量子	量子 ビーム	量子 プローブ	量子理論
生体・細胞 イメージング	近接場顕微鏡 馬越 (大阪大)		量子容量 グラフェン 小野 (大阪大)	
ケミカル イメージング	ヘモグロビン 物質交換 第三次高度医療検出 本藪 (浜松医大)	放射線各種分離 レーザー-共振励起イオン化 富田 (名古屋大)		
脳・認知		色覚情報伝達 片山 (名工大)		
光合成 酸化・還元 窒素固定	磁気感受 クリプトカム L.アフレ (埼玉大)			生体内多量子 系化学反応 庄司 (筑波大)
生体量子効果 水分子振動	太古光合成 蛋白質 斎藤 (MIT)	低速電子 和光グラフィー 柳澤 (早稲田大)		生体内多量子系 化学反応 藤橋 (分子科学研)
	共振器 わづろフレイク 山崎 (ICU)			

図4 3期 研究課題がカバーする研究対象

4. 領域アドバイザーについて

本研究領域では、量子技術と生命科学との融合を促進することによって、量子技術の適用により生命科学フロンティアの開拓が求められる。そこで、領域アドバイザーの選定にあたっては、応用物理や生命科学などの分野で高い専門性を有しつつも、科学技術分野における異分野融合について深い理解とご協力がいただけることを要件とした。特に量子科学分野での先進性を考慮して、生命科学分野にこだわることなく量子技術の専門家を加えた。また、量子技術と生命科学の間をつなぐ必要性を考慮して、化学や計算科学の専門家も含めた。さらに、量子技術の特性を活用した新規治療・診断法などへの産業展開につなげる観点から、計測装置・機器、量子情報技術関連の民間企業に所属する研究者を複数含めた。

表2 領域アドバイザー一覧

領域アドバイザー名 (専門分野)	着任時の所属 <sup>1</sup>	役職	任期
石川 顕一 (光工学・光量子科学、原子力学、医学物理学・放射線技術学)	東京大学大学院 工学系研究科	教授	2017年4月～2023年3月



井上 卓 (物理計測、光学/応用光学、量子光工学)	浜松ホトニクス (株) 中央研究所	室長	2017年4月～2023年3月
岡田 康志 (生物物理学、細胞生物学、一分子生物学)	国立研究開発法人理化学研究所 生命システム研究センター(生命機能科学研究センター)	チームリーダー	2017年4月～2023年3月
小澤 岳昌 (分析化学、生体関連化学、タンパク質化学、イメージング)	東京大学大学院理学系研究科	教授	2017年4月～2023年3月
菊地 和也 (ケミカルバイオロジー、生物分子科学)	大阪大学大学院工学研究科	教授	2017年4月～2023年3月
笹木 敬司 (単一光子制御デバイス、ナノ構造光共振器、量子もつれ合い光子)	北海道大学電子科学研究所	教授	2017年4月～2023年3月
城石 芳博 (超高密度磁気記録、ハードディスクドライブ)	(株) 日立製作所研究開発グループ	技術顧問	2017年4月～2023年3月
竹内 繁樹 (光量子情報、ナノフォトニクス、光量子計測)	京都大学大学院工学研究科	教授	2017年4月～2023年3月
田中 成典 (量子生物学、理論生命科学、計算構造生物学)	神戸大学大学院システム情報学研究科	教授	2017年4月～2023年3月
原田 慶恵 (生物物理学、量子センシング、ナノバイオ)	大阪大学蛋白質研究所	教授	2017年4月～2023年3月

サイエンス)			
平野 俊夫 (免疫学、細胞生物学、腫瘍病理学)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構	理事長	2017年4月～2023年3月
三木 邦夫 (構造生物学, タンパク質結晶学、生体物性学)	京都大学大学院理学研究科 (京都大学)	教授 (名誉教授)	2017年4月～2023年3月
水落 憲和 (量子センシング、量子情報科学、量子スピントロニクス)	京都大学化学研究所	教授	2017年4月～2023年3月
宮脇 敦史 (生物物理学、バイオイメージング、神経科学)	国立研究開発法人理化学研究所脳科学総合研究センター／光量子工学研究センター	チームリーダー／チームリーダー	2017年4月～2023年3月

<sup>1</sup>変更/異動のあった場合、下段に括弧つき記載

## 5. 研究領域のマネジメントについて

### (1) 研究課題の進捗確認と指導・助言

本研究領域に集う研究者は、量子と生体の研究の交流と融合を促進し、生命科学フロンティア開拓の創出する、いわば「量子生命科学」という全く新しい学問をめざすことから、その研究過程には構想、実現の道のり、開発方法、有効性の実証方法の検証が含まれている必要がある。また本研究領域を支えるJST 戦略的創造研究推進事業「さきがけ」は、研究者独自の発想・アイデアに基づく「個人型研究」であることから、それらは研究者自らが考えることが望まれる。

そこで、本研究領域では、研究マネジメントを推進するための指標として、本研究領域で共通視点となる ①領域運営方針（ビジョン、ミッション、基本方針）を定め、②研究課題で共通のマイルストーンを定めることで研究課題の進捗について研究者自らが考えるしくみを構築、さらに ③量子と生体の研究交流を促進するための工夫を行った。

研究マネジメントを実践する要となる領域会議（研究報告会、成果発表会）は計 11 回実施し、それぞれの会議ごとに目的を設定の上、研究課題の進捗確認について領域アドバイザーと協力しつつ指導・助言を行った。また、研究総括と JST 職員は、研究者の研究機関・研

研究室を訪問するサイトビジットを1期採択の研究者(1期生)、2期採択の研究者(2期生)、3期採択の研究者(3期生)に渡る36名全員に実施した。具体的には、研究者の上長との面談を行い、研究者が勤務する研究組織の状況や研究環境について確認した。その後、研究者と面談を行い、現在の研究進捗および準備状況に加えて、研究課題に関連する研究分野の全体状況や技術内容について個別の議論を行い、今後の研究方針についての指導と助言を行った。

### ① 領域運営方針(ビジョン、ミッション、基本方針)を共有した協力体制の構築

本研究領域の研究者が実現を目指す将来のありたい姿(ビジョン)、将来に果たすべき使命、存在意義(ミッション)、さきがけ研究期間3.5年の目標について研究領域内で共有を行い、本研究領域に集う研究者の目標意識をまとめた。

#### ビジョン

##### 量子生命科学の実現

量子生命科学とは、量子論・量子力学を基盤とした視点から生命全般の根本原理を明らかにすると同時に、医療・情報・工業・エネルギー・農産業・環境・などのさまざまな分野において革新的応用を目指す新たな学術領域です。

#### ミッション

最先端の量子科学の知見と量子技術を総合的に利活用し、従来不可能であった極微の空間・時間・エネルギースケールあるいは超高感度での生体内部の観測、そして生体分子の計測・制御による生命機能のモデリングなどの技術革新を実現・応用します。

#### 基本方針

1. 量子性を利用した技術(量子技術)で生命活動を計測する。  
シーズとなる量子技術を生命研究のために最適化し、生命活動・分子挙動の計測に応用するための技術基盤を確立します。
2. 生命現象の中に量子的な現象や生命機能を見いだす技術に挑戦する。  
量子トンネル効果や量子コヒーレンスなど、生命現象において仮説に留まっている量子現象について、実験的もしくは理論的に解明します。
3. 異分野融合を促進して生命科学フロンティアを開拓する。  
量子技術と生命科学の研究交流と異分野融合を促進し、量子生体を生命科学の新たな学問体系・科学技術として発信します。
4. 飛躍的な成果が期待できる個人型研究は、将来の異分野連携事業につなぐ。

## ② 研究課題の進捗について研究者自らが考えるしくみを構築

公募・採択時に予め提案された目標を既存技術や手法によって突破するという直線的なアプローチではなくて、何をすれば目的を達するのか、それ以前に、何を目標とすれば自らが目指す「量子生命科学の実現」に向けて有効なのかを立案して実施する、また、到達度に応じて実現する効用自身を再設計できる研究マネジメントが大切と考えた。本研究課題が挑戦性の高い内容であり、自らの専門性とは異なる分野の要素が関わる取組みであることから、自らモニタリングしつつ到達目標を更新することを認めることとした。

その取組みを支えるため、本研究領域では、さきがけ研究期間 3.5 年間における共通のマイルストーン（下記）を設定するとともに、本研究領域の研究者らがその研究進捗に応じ、研究総括や領域アドバイザーから気軽にアドバイスを受けることができる“場”を大切にしたい。具体的には、領域会議で研究発表を 3~4 課題行った後に直ちにそれらのポスターセッションを行い議論する、研究課題の近い分野ごとにブレイクアウトセッションを設けるなどで議論を深めた。研究者、研究総括そして領域アドバイザーは、研究者が自らの研究課題において「何の量子性を扱っているのか？」を常に確認しつつ、マイルストーンに対する研究課題の進捗をモニタリングし、場合によっては適宜計画の修正、見直しの提言を行う方法で研究課題を支えた。

### さきがけ研究 3.5 年のマイルストーン

#### 1.5 年目

- 予備実験などの結果を分析の上、わかってきた問題点とその対応策を明確にすること。
- 上記結果に基づき、提案する技術（測定や計算手法）の目標値・基本仕様が固まっていること。

#### 2.5 年目

- 提案技術において、標準品などを定めて再現性が確保できていること。
- 生命活動・分子挙動を計測するための準備が整っていること。

#### 3年4ヶ月目（研究課題の事後評価開始時）

- 提案技術が適している生命活動・分子挙動の計測を一つ以上見つけること、又はきっかけを見つめること。
- 生命現象の量子現象にアプローチできる手法もしくは理論の技術基盤が構築できること、又はきっかけを見つめること。

さらに領域会議の場では、学会などの研究発表形式に留まるのではなく、研究者自らが研究の方向性と計画の修正・見直しを促すための“問い”を設定し、それに回答する形式をとった。

#### 研究者が領域会議で回答が求められる“問い”の例

- さきがけ3年半以降の将来を見据えて、どのようなサイエンス、イノベーションを創出したのか?
- その実現のため、現在はどのような状況で、さきがけ研究は何を目指すのか?
- さきがけ3年半で、どこまで実現するのか?その間で超えるべき課題や問題は何か?
- その課題や問題を解決するためどのような量子性を扱うのか、そのための独創性や研究計画は何か?
- 各年次マイルストーンに対する研究進捗状況と問題・課題

### ③ 量子と生体の研究交流（異分野融合）を促進するための工夫

生命科学フロンティアを開拓する独創的な研究を目指すには、専門性の殻を破るための気づきに出合える機会、つまり異分野融合ができる仕組みや場が大切である。そのためには、異分野の研究者が理解できること、分かりやすく説明することを必要要件とし、研究課題に関する分野紹介とその分析について説明する機会を採択後できるだけ早い時期の領域会議で設け、研究領域内の相互理解を深めた。

#### 「研究課題に関連する分野の全体状況およびその分析」の項目例

- さきがけ研究に関連する研究分野の全体状況（背景、状況、国内外の競合関係など）
- その関連分野の整理と分析結果（今後の動向、自身の研究の立ち位置など）
- 最先端のトピックス（競合研究の論文や発表）の紹介

### ④ コロナ禍における研究マネジメント

2020年2月頃から感染状況が拡大した新型コロナウイルス（COVID-19 感染状況拡大）の影響を受けての領域運営を余儀なくされた。そのため、本研究領域の領域会議は当初予定していた対面式の会議を延期の末、感染拡大防止のためオンラインミーティングの形式で実施した。また、領域会議やサイトビジットなどはオンライン会議ツールを積極的に活用しての領域運営となった。Zoomによるプレゼンテーションのみならず、SpatialChatなどを利用したポスターセッションで議論の場を設けることができた。

オンライン会議手法を利用したサイトビジットは、研究者と研究総括との“気軽”な研究進捗確認や議論の手段となり、本研究領域において定着することとなった。1期生の海外研究者（萬井研究者（コネチカット大学（米国）））については、オンラインのサイトビジットで海外研究室の視察や研究内容の議論を行うことができた。3期生6名についてもオンラインを活用したサイトビジットを行い、研究総括はさきがけ研究者の上長と意見交換を行うとともに、研究者への積極的なアドバイスを行った。

一方で、全面的な対面形式の会議を望む研究者の要望は多かったが、2022年度10月まで、従来型研究交流スタイルである対面会議、合宿タイプの領域会議、ポスターセッション、ネットワークレセプション（懇親会）が一切開催できなかったことは残念であった。

この影響を受けて、2020年度に最終年度を迎えることとなった1期生12名については、希望によりJSTのコロナ延長支援を利用した6ヶ月間の研究期間延長を可能とした。その結果、1期生9名がこれに応じて2021年9月末日まで研究期間を延長し、さきがけ研究の完成度を上げることができた。

## ⑤ 本研究領域のイベントやサイトビジットの内容

### 1) 2017年度の状況

- ・第1回領域会議（10月10～11日、東京ガーデンパレス（東京都））

研究総括、領域アドバイザー12名、1期生12名（全員）、JST職員3名が出席した。この第1回領域会議では、1期生が各自の採択課題の内容とその年度の研究計画について、口頭発表（20分）とポスター発表（3課題あたり30分）を行った。特にこの領域会議では、異分野の研究者が理解できることを念頭に発表することを、あらかじめ1期生に指示した。それらの発表と参加者による議論を通じて、研究領域内の相互理解を深め、領域運営の目的である生命科学の研究者と量子技術の研究者の連携、異分野融合の促進への第1歩につなげた。

- ・サイトビジット

1期生6名に対して、研究総括とJST領域担当者はそれぞれの研究機関を訪問してサイトビジットを実施した。

### 2) 2018年度の状況

- ・第2回領域会議（4月17～18日、ホテルコスモスクエア国際交流センター（大阪市））

研究総括、領域アドバイザー11名、1期生12名（全員）、JST職員4名が出席した。この会議では、第1回領域会議で不十分であった、さきがけ研究に関連する研究分野の全体状況や今後の動向について、研究者（1期生）が分析した発表を中心に議論を行った。特に、その分析結果に対して現在のさきがけ研究の状況（自らの立ち位置）を対比することにより、今後のさきがけ研究を進めるうえで解決すべき課題と対策についての議論につなげた。4課題の口頭発表（1課題18分）ごとにポスター発表（4課題あたり60分）で議論を行うなどの工夫を凝らした。

- ・第3回領域会議（11月8～10日、プラザヴェルデ沼津（沼津市））

研究総括、領域アドバイザー13名、1期生2期生25名（全員）、JST職員3名が出席した。この会議では、新たに採択された2期生13名を迎え、異分野の研究者が理解できること（分かりやすく）を念頭に、研究領域内の相互理解と協力体制の向上を目指した。特にこの会議では、各研究課題について、何の量子性を扱っているのか、実験系ならばできれば具体的に明示すること（例えば、電子の量子性、電子スピンの量子性、核スピンの量子性、光子の量子性、イオンの量子性など）を念頭に発表することを、あらかじめ第1、2期生に指示した。1期研究者は、①研究課題の背景、②研究課題の概要、③進捗概略と抱えている課題について、口頭発表（10分）とポスター発表（3課題あたり30分）を英語で行った。2期研究者

は、採択課題の内容や研究計画について、口頭発表（15分）とポスター発表（4課題あたり60分）を日本語で行った。また、竹内繁樹 領域アドバイザー（京都大学 大学院工学研究科 教授）の特別講演を行った。

・サイトビジット

1期生4名、2期生5名に対して、それぞれの研究機関を訪問してサイトビジットを行った。

### 3) 2019年度の状況

・第4回領域会議（4月23～24日、ニチイ学館神戸ポートアイランドセンター（神戸市）研究総括、領域アドバイザー12名、1期生2期生25名（全員）、JST職員4名が出席した。この会議では研究データの議論を行うことに焦点をあて、その手法としてブレイクアウトセッション（4グループに分かれる）を設けることを試み、1期生の最新のデータに関する詳細な説明と議論の場（3課題で1時間半～2時間）を提供した。具体的には、①議論したい最新のデータ（1～2つ代表的なもの）と②データ取得に用いた方法（1.原理、2.材料、3.手順（計算方法も含む））について説明、③翌日の全体会合において、発表者が議論の結果をパネルディスカッションタイプでより具体的に報告（ラップアップ）する方法をとった。領域アドバイザーには各グループの座長をお願いした。一方、2期生はそれぞれの研究課題に関連する研究分野動向レポート（口頭発表、使用言語は英語）を行った。また、岡山大学異分野基礎科学研究所 教授 沈 建仁 先生が特別講演を行った。

・第5回領域会議（11月6～8日、札幌コンベンションセンター（札幌市）

研究総括、領域アドバイザー10名、1期生2期生3期生36名（全員）、JST職員3名が出席した。この会議では新たに採択された3期生11名を迎え、「量子生体」とは何か、その概念・構想をポンチ絵（1枚のエッセンス）で示すテーマセッションを新たに設けた。1～3期生の全員（36名）が各自の「量子生体」概念についてショートプレゼンテーションを行った後、4つのグループに分かれてディスカッションを行って意見をまとめ、最終日にグループ発表を行った。研究者や領域アドバイザーらがその情報を共有しつつ、グループディスカッションを通じて、これからの量子生命科学と量子技術のための議論を行った。「量子生体」に関する研究者の視点は、グループディスカッションを通じて一定の方向性を共有し、領域共通の目標を確認する上で大変良い機会だったと考える。新規採択した3期生は研究課題を紹介する口頭発表（10分）、2期生はブレイクアウトセッション（4グループに分かれる）で最新のデータに関する詳細な説明と議論（3課題で1時間半～2時間）を行った。1期生はポスター発表で研究進捗状況を説明した。また、笹木敬司 領域アドバイザー（北海道大学電子科学研究所 教授）の特別講演を行った。

・サイトビジット

2期生8名、3期生2名に対して、それぞれの研究機関を訪問してサイトビジットを行った。

### 4) 2020年度の状況

・第6回領域会議／1期生 成果報告会／事後評価委員会（10月28～30日 オンライン）

新型コロナウイルス（COVID-19 感染状況拡大）の影響を受けて、対面式の領域会議は当面延期することとした。その代わりに、オンラインミーティング形式の運営を検討し、本研究領域初の完全オンライン領域会議を開催した。オンラインツールとしてZoomを活用し、新型コロナウイルスの影響で1年ぶりの領域会議となったが、研究総括、領域アドバイザー13名、1期生2期生3期生36名（全員）、JST職員3名が出席した。2020年度は1期生の卒業年度のため、この領域会議では研究総括が、さきがけ「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」（量子生体）のビジョン・ミッションと最終年度のマイルストーンを確認するとともに、チャレンジングな研究領域のため、さきがけ研究期間に創出された論文数や学会発表数で成果を評価しないことについての説明を行った。本領域会議では「さきがけ研究成果報告会」として、卒業予定の1期生が口頭発表15分と質疑応答15分の発表を行った。また、2期生と3期生は5分間のショートプレゼンテーションを行い、研究トピックスと最新データについて紹介を行った。会議終了後には研究総括と領域アドバイザーによる1期生事後評価委員会を開催し、1期生の研究課題についての振り返り、成果（良かった点、改善すべき点）についての議論を行った。それらのコメントは1期生にフィードバックすることにより、1期生には終了報告書に反映してもらい、研究課題終了後のためのアドバイスを提供することができた。

・サイトビジット

1期生1名、3期生3名に対して、JST領域担当者とともにオンライン（Zoom）でサイトビジットを行った。

## 5) 2021年度の状況

・第7回領域会議（6月7～8日、オンライン）

研究総括、領域アドバイザー13名、1期生2期生3期生36名（全員）、JST職員3名が出席し、2021年度卒業予定の2期生が口頭発表12分と質疑応答8分の発表（「研究進捗報告：さきがけ卒業に向けて」）を行った。また、1期生の発表（「これまでの課題、延長6ヶ月の目標とその進捗」）と3期生の発表（「さきがけ研究に関連する研究分野の全体状況およびその分析」）として12分間のプレゼンテーションを行い、研究トピックスと最新データの共有を行った。

・第8回領域会議／2期生 成果報告会／事後評価委員会（11月8～9日、オンライン）

研究総括、領域アドバイザー13名、1期生2期生3期生36名（全員）、JST職員3名が出席した。本領域会議では「さきがけ研究成果報告会」として、卒業予定の2期生が口頭発表15分と質疑応答15分の発表を行った。またZoomとSpatialChatを併用し、Zoomによるプレゼンテーション（口頭発表）のみならず、SpatialChatを活用したバーチャル空間でのポスターセッションを行うなど、研究者間の議論の場を設ける工夫を行った。会議終了後には研究総括と領域アドバイザーによる2期生事後評価委員会を開催し、研究課題についての振



り返り、成果（良かった点、改善すべき点）について議論を行った。それらのコメントは2期生にフィードバックすることにより、2期生には終了報告書に反映してもらい、研究課題終了後のためのアドバイスを提供することができた。

・第9回領域会議（1月17日～19日、オンサイト（淡路夢舞台国際会議場（淡路市））／オンラインハイブリッド会議）

Zoomを使ったオンサイト・オンラインハイブリッド形式の領域会議を初めて運営・開催した。コロナ感染対策として、対面参加の人数を30名以下に限定するため、オンサイト会場への出席者は2期生と3期生及び研究総括とJST職員（オンサイト運営要員）とし、領域アドバイザーと1期生はオンラインから参加した。オンサイト会場では、研究総括、2期生11名、3期生11名、JST職員2名が参加し、オンラインからは1期生、一部の2期生3期生、領域アドバイザー11名、JST職員1名が参加した。1期生は「研究トピックス」について、2期生は「研究進捗報告」～最終報告～について、3期生は「研究進捗報告」～最終年度に向けて～について、それぞれ発表を行った。研究者の発表と議論を通じて、研究領域内の相互理解を深め、領域運営の目的である生命科学の研究者と量子技術の研究者の連携、異分野融合の促進につなげた。

・サイトビジット

3期生6名、1期生1名（萬井研究者（コネチカット大学（米国）））について、オンラインでサイトビジットを行った。オンライン会議であることを活用し、海外研究機関にある研究室の状況も確認することができた。このサイトビジットをもって、1期生12名、2期生13名、3期生11名を対象としたサイトビジットを全て完了した。

## 6) 2022年度の状況

・第10回領域会議／3期生 成果報告会／事後評価委員会（第1回目10月3日、第2回目10月24日、オンサイト（JST東京本部別館）／オンラインハイブリッド会議）

研究総括、領域アドバイザー13名、3期生全員（11名）と1期生2期生の希望者、JST職員4名が出席して「さきがけ研究成果報告会」を開催した。2022年度卒業予定の3期生は口頭発表15分と質疑応答15分の発表を行った。会議終了後には研究総括と領域アドバイザーによる3期生事後評価委員会を開催し、研究課題についての振り返り、成果（良かった点、改善すべき点）について議論を行った。それらのコメントは3期生にフィードバックするとともに、必要に応じて総括裁量経費で研究費の増額措置を行った。フィードバックした内容についての改善点は、次回領域会議（最終領域会議）で3期生が発表することとした。

・第11回領域会議（最終領域会議1月25日～27日、オンサイト（日本未来館（東京））／オンラインハイブリッド会議）

研究総括、領域アドバイザー11名、1期生（6名）2期生（8名）、3期生（11名）が合宿形式のオンサイトで参加し、それ以外はオンラインで参加した。1期生2期生は「さきがけ研究の概略紹介と近況報告、最新の研究トピックス・話題提供」について、3期生は「成果報

告会フィードバック」について、口頭発表 10 分と質疑応答 5 分の発表を行い、コロナ禍で 3 年以上実施できなかった 1 期～3 期までのポスター発表をオンラインで交えつつ、研究領域内の相互理解を深め、生命科学の研究者と量子技術の研究者の連携、異分野融合の促進、今後の協力関係について議論した。

## (2) 連携・協力の推進

本研究領域では、さまざまな分野の量子技術の研究者と生命科学の研究者が連携し、それぞれの研究課題を推進するための連携・協力体制を積極的に構築した。

### ① 連携提案

異分野研究者間の交流を促進する観点から、研究課題の応募の際、本研究領域に応募する量子技術の研究者と生命科学の研究者が、それら双方が連携する提案（連携提案）を行うことを可能とした。ただし「さきがけ」は、研究者独自の発想・アイデアに基づく個人型研究を推進し、科学技術イノベーションの源泉を創出することを目的としているため、連携提案が追加されている場合でも、「さきがけ」研究の基本である個人型研究に関する提案を重視した。

（連携提案の例）

- 1) 大畠悟郎 研究者（2 期生）\*と近藤徹 研究者（2 期生）\*\*  
「量子トモグラフィを用いた密度行列分光法の開発」\*  
「生体量子コヒーレンス顕微分光：本当に量子効果は生命を駆動するのか?」\*\*
- 2) 尾瀬農之 研究者（2 期生）\*と渡邊宙志 研究者（1 期生）\*\*  
「生体分子中におけるアミンの量子特性を解明する」\*  
「量子化学効果を取り込んだタンパク質のシームレスな動的解析法の開発と応用」\*\*
- 3) 齊藤諒介 研究者（3 期生）\*と近藤徹 研究者（2 期生）\*\*  
「太古の光合成タンパク質：量子効果の誕生」\*  
「生体量子コヒーレンス顕微分光：本当に量子効果は生命を駆動するのか?」\*\*
- 4) 富田英生 研究者（3 期生）\*と島添健次 研究者（1 期生）\*\*  
「個別化医療にむけた光量子による放射性核種分離・分析法の開発」\*  
「多光子時間空間相関イメージング手法の開拓」\*\*

### ② 領域間異分野研究交流の促進

- 1) さきがけ研究領域「生命機能メカニズム解明のための光操作技術」（七田芳則 総括 立命館大 客員教授／京大名誉教授）と「量子生体」X「光操作」スコーピング会議（2019 年 4 月 22 日、ニチイ学館 神戸ポートアイランドセンター（神戸市））を開催  
生命科学フロンティアを開拓する独創的な研究を目指すには、専門性の殻を破るための気づきに出合える機会、つまり異分野融合ができる仕組みや場が大切である。そこで両研究領

域の研究者が集って研究紹介を行い、異分野融合でどのようなことができるかを考えるスコーピング会議を下記の内容で開催した。

- (1) ライトニングトーク（各人1分間で研究課題を紹介）
- (2) ポスターセッション
- (3) 8グループでのグループディスカッション
- (4) ラップアップ（グループ発表）

この会議では、(i)他分野の人に自分が取り組んでいることの素晴らしさを分かりやすく話す、(ii)お互いが取り組んでいることを理解することを念頭に、さきがけ2研究領域の研究者が活発な議論を行った。両研究領域の研究総括、領域アドバイザー9名、本研究領域の研究者25名（1期生と2期生全員）、さきがけ研究領域「光操作」の研究者10名（1期生、2期生）、JST職員4名が出席した

## 2) 生物物理学会 さきがけ「量子生体」公開シンポジウム「量子科学で捉える生命現象」

（2019年9月25日、宮崎県シーガイアコンベンションセンター（宮崎市）を開催

本研究領域の研究者ら7名（市村研究者（2期生）楊井研究者（2期生）、渡邊（宙）研究者（1期生）、塗谷研究者（1期生）、丸山研究者（1期生）、井手口研究者（1期生）、石綿研究者（1期生））が最新の研究成果を紹介し、会場参加者との議論を通じ、量子科学と生物物理学の融合領域について将来展望を議論した。

## ③ 他の研究機関との協力

研究総括とJST領域担当者は、第3回QST国際シンポジウムQuantum Life Science（2019年12月4日、奈良春日野国際フォーラム麓（奈良市））に出席し、量子科学技術研究開発機構（QST）理事長（本研究領域の領域アドバイザー）および領域長に、本研究領域の運営状況について情報共有の上、共同ワークショップの開催や今後の新規事業などについて意見交換を行った。

## ④ 国際強化

- 1) 研究総括、田中成典 領域アドバイザーとJST領域担当者は、ワークショップ「Perspectives of Quantum Computing」（2018年11月30日、キャンパスプラザ京都）に出席し、Dr. Alan Aspuru-Guzik（トロント大学 教授、カナダ先端研究機構（CIFAR）シニアフェロー）と量子生命科学分野での国際協力やJSTとCIFARの協力について意見交換を行った。
- 2) 国際強化支援として、2019年度に島添研究者（1期生）とルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘン（ドイツ）の国際協力への支援（島添研究者をドイツ派遣するための旅費増額）を行った。
- 3) また量子生命科学分野において、新たな日本-英国との研究交流を促進するため、在日英国大使館及び英国バイオテクノロジー・生物科学研究会議（BBSRC）と協力し、英国側が

挙げた量子生命科学分野の英国研究者と本研究領域の研究者が研究交流を行う際に、JST 戦略研究推進部の国際強化支援プログラムで支援するしくみを設けた。具体的には本研究領域で研究課題を実施している3名の研究者が申請した日英研究交流案（英国への派遣と日本への招聘）を承認し、旅費の増額措置を実施した。しかしながらコロナ禍の影響を受けて、実際の派遣と招聘は中止となった。

### (3) 研究費配分上の工夫

領域会議やサイトビジットなどで把握した研究課題の進捗状況、連携促進（共同フィジビリティ（FS））、研究機関異動に伴う研究室立ち上げ（スタートアップ）、新型コロナウイルス感染研究のための追加的措置（増額）、災害からの研究施設復旧の観点から、積極的に予算見直しを行い、以下の観点から全51件の予算増額や次年度からの予算前倒し措置を行った。

- ・連携促進（共同FS）促進のための追加的予算増額
- ・スタートアップ支援
- ・新型コロナウイルス感染研究のための追加的措置（研究費増額）
- ・総括裁量経費活用による研究加速のための予算見直し（研究費増額）

### (4) 人材の輩出・成長の状況について

本研究領域では研究期間の間に新たなポストの獲得（13件）や昇進（7件）に至った研究者も数多く輩出しており、さきがけ研究のもう1つの主目的である将来の主導的研究者の養成についても一定の役割を果たしてきたと考えている。以下にその状況を説明する。

#### ① 2018年度の状況

- ・渡邊宙志 研究者（1期）は、東京大学先端科学技術研究センター（助教）から、慶應義塾大学大学院理工学研究科に異動し、特任講師としてのポストを獲得した。
- ・Radostin Danev 研究者（2期）は、東京大学大学院医学系研究科の特任研究員から教授に昇進した。
- ・東雅大 研究者（2期）は、琉球大学理学部（助教）から、京都大学大学院工学研究科に異動し、准教授としてのポストを獲得した。
- ・近藤徹 研究者（2期）は、応募時にマサチューセッツ大学化学科に所属していたが、採択後、東北大学大学院理学研究科（助教）にJST さきがけ専任研究者として異動した。

#### ② 2019年度の状況

- ・井手口拓郎 研究者（1期）は、東京大学大学院理学研究科の講師から准教授に昇進した。
- ・藤井麻樹子 研究者（1期）は、横浜国立大学大学院環境情報研究院の特任教員（講師）から講師に昇進した。

- ・島添健次 研究者（1期）は、東京大学大学院工学系研究科の特任講師から特任准教授に昇進した。
- ・丸山善宏 研究者（1期）は、2019年12月1日付けで京都大学白眉センター（助教）からオーストラリア国立大学コンピューターサイエンス学科に異動し、講師（パーマネント職）としてのポストを獲得した。それに先立ち、JSTはオーストラリア国立大学と海外契約締結を行った。
- ・斎藤諒介 研究者（3期）、米国マサチューセッツ工科大学地球科学系（日本学術振興会海外特別研究員）は異動し、2020年4月1日より東京大学大学院理学系研究科の特任助教、JST さきがけ専任出向研究者として、さきがけ研究を開始した。
- ・柳澤啓史 研究者（3期）、ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘン物理学科（DFGプロジェクトリーダー）は帰国し、2020年4月1日より東京大学物性研究所に異動し、リサーチフェロー、JST さきがけ専任出向研究者として、さきがけ研究を開始することとなった。

### ③ 2020年度の状況

- ・鬼頭宏任 研究者（1期）は、2020年10月1日付けで筑波大学計算科学研究センター（さきがけ専任研究者）から神戸大学システム情報工学科に異動し、特命准教授としてのポストを獲得した。
- ・近藤徹 研究者（2期）は、2020年11月1日付けで東北大学大学院理学研究科（助教、さきがけ専任研究者）から東京工業大学生命理工学院に異動し、講師としてのポストを獲得した。
- ・衛藤雄二郎 研究者（1期）は、2020年12月1日付けで産業技術総合研究所計量標準総合センター（主任研究員）から京都大学大学院工学研究科に異動し、准教授としてのポストを獲得した。
- ・斎藤諒介 研究者（3期）、採択時は米国マサチューセッツ工科大学地球科学系（日本学術振興会海外特別研究員）は、2020年4月1日より東京大学大学院理学系研究科の特任助教、JST さきがけ専任出向研究者としてさきがけ研究を開始していたが、2021年2月1日付けで山口大学大学院創成科学研究科に異動し、助教としてのポストを獲得した。

### ④ 2021年度の状況

- ・藤橋裕太 研究者（3期）は、2021年4月1日付けで自然科学研究機構分子科学研究所（特任研究員）から京都大学大学院工学研究科に異動し、特任助教としてのポストを獲得した。
- ・藤井麻樹子 研究者（1期）は、2021年4月1日付けで、横浜国立大学大学院環境情報研究院の講師から准教授に昇格した。
- ・尾瀬農之 研究者（2期）は、2022年1月1日付けで、北海道大学大学院先端生命科学研究院の准教授から教授に昇格した。

- ・本蔵直樹 研究者（3期）は、2021年11月1日付けで、浜松医科大学医学部医学科 助教から准教授に昇格した。

#### ⑤ 2022年度 の状況

- ・鬼頭宏任 研究者（1期）は、2022年4月1日付けで神戸大学システム情報工学科（特命准教授）から近畿大学理工学部エネルギー物質学科に異動し、准教授としてのポストを獲得した。
- ・Lewis M. Antill 研究者（3期）は、2023年度初めに英国の研究機関に異動する予定である。

#### ⑥ 受賞などの例

石綿整 研究者（1期生）

- ・14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2020/2021, Silver Best Oral Award（コロナ延長時の成果）

島添健次 研究者（1期生）

- ・次世代放射線シンポジウム優秀研究賞 「超音波を用いた二光子放出核種の角度相関に関する研究」（2020年度）

藤井麻樹子 研究者（1期生）

- ・Excellent Presentation Award, The 22nd International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry, (SIMS22), Kyoto, Japan (2019年)

丸山善宏 研究者（1期生）

- ・FUZZ-IEEE (2020)における5つのBest Paper Awardのうち1つを受賞
- ・人工知能のトップ会議IJCAI や圏論の科学応用の主要会議SYCO のプログラム委員歴任

溝端栄一 研究者（1期生）

- ・大阪大学賞「X線自由電子レーザーを応用したタンパク質構造解明法の研究」（2018年）

市村垂生 研究者（2期生）

- ・7<sup>th</sup> Biophysics and Physicobiology Editors' Choice Award (Biophysics and Physicobiology 誌、2020年)

近藤徹 研究者（2期生）

- ・日本物理学会若手奨励賞（2020年）

菅倫寛 研究者（2期生）

- ・日本光生物学協会奨励賞（日本光生物学協会 2020年度）
- ・Robin Hill Award（国際光合成学会、2022年）

楊井伸浩 研究者（2期生）

- ・The APA (Asian and Oceanian Photochemistry Association) Prize for Young Scientists (2021年)

- ・光化学協会 奨励賞 (2021 年)
- ・科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞 (2021 年)
- ・文科省 NISTEP ナイスステップな研究者 (2019 年)

渡邊千鶴 研究者 (2 期生)

- ・第 12 回理研 桜舞賞 (研究奨励賞、2021 年)
- ・“FMOB: The word’s first database of quantum mechanical calculations for biomacromolecules based on the fragment molecular orbital method” (2021 年)

Lewis M. Antill 研究者 (3 期生)

- ・Best Presentation Award, The 3rd Annual Meeting of the Quantum Life Science Society Conference (第 3 回量子生命科学会、2021 年)

小野堯生 研究者 (3 期生)

- ・大阪大学賞 若手教員部門「グラフェンを基盤とした生化学反応計測の研究」(2020 年)

片山耕大 研究者 (3 期生)

- ・第 13 回 分子科学会奨励賞 (2020 年)

庄司光男 研究者 (3 期生)

- ・量子生命科学会第 2, 3, 4 回大会、優秀講演賞受賞(2020, 2021, 2022 年)

富田英生 研究者 (3 期生)

- ・日本原子力学会 放射線工学部会 部会賞 奨励賞(2020 年)
- ・国際会議 IEEE Nuclear Science Symposium/Medical Imaging Conference 2021 Workshop, “Quantum sensing for biomedical application” の Organizer (島添健次 研究者 (1 期生)、富田英生 研究者 (3 期生)、2021 年)

藤橋裕太 研究者 (3 期生)

- ・日本物理学会第 15 回若手奨励賞 (2021 年)

本蔵直樹 研究者 (3 期生)

- ・第 6 回血管生物医学若手研究会 血管生物医学若手優秀賞 (2020 年)

##### (5) マネジメントに関する特記事項

2020 年度に最終年度を迎えることとなった 1 期生 12 名については、新型コロナウイルス感染に伴う緊急事態宣言などの影響を受けていたことを鑑み、希望により 6 ヶ月間の研究期間延長を可能とした。その結果、石綿整 研究者、衛藤雄二郎 研究者、鬼頭宏任 研究者、塗谷陸生 研究者、平野優 研究者、藤井麻樹子 研究者、丸山善宏 研究者、萬井知康 研究者、渡邊宙志 研究者、合計 9 名がこれに応募して 2020 年度 9 月末日まで研究期間を延長し、本研究課題の完成度を上げた。

## 6. 研究領域としての戦略目標の達成状況について

本研究領域は、戦略目標の達成目標として ①量子センサー技術を用いて生命科学などの新たな潮流を生み出す、②光量子検出技術などでこれまで可視化されなかった状態を捉える、③量子ビーム・計測技術の高度化で分子間相互作用や機能を解明する、を掲げて設定された。以下に、本研究領域から生まれた特に優れた研究成果について、戦略目標への貢献度の観点から、成果の具体的な内容について述べる。それらは今後、科学的・社会的にも大きなインパクトを与えることが期待できる成果と考えている。

なお、本研究領域では論文数や学会発表数で単純に評価しているわけではないが、科学的・技術的に大きなインパクトを期待できるか(論文)の観点から、研究領域全体のこれまでの国際論文発表もカウントしたところ、総計 243 報(2022 年 10 月 31 日時点)と多くの成果をあげていた。

### (1) 科学的・技術的に大きなインパクトのある特に優れた研究成果について

#### ① 達成目標 I「量子センサー技術を用いて生命科学などの新たな潮流を生み出す」観点

##### ○ 五十嵐龍治 研究者「量子センサー」(募集領域 2)

本研究課題ではワイドバンドギャップ半導体中の、ある種の格子欠陥が持つ量子センサーとしての性質に着目し、温度と粘性、温度とラジカル、温度と pH、温度と磁場など、物理化学パラメータの時空間計測技術の開発に成功した。この成果は、粒子径 5nm のナノ量子センサーの製法、生体親和性向上のための表面化学修飾法など、量子センサーに関わる基盤技術を地道に検討した結果によるものである。さらに本センサーを用いて生命現象への適用を試み、生体内の微小環境における様々なパラメータが測定可能であることを示している。特に、タンパク質の 3 次元回転運動が計測できる新展開を示したことは特筆すべき点である。考案した 3 次元トラッキング手法を用い、培養細胞系で薬剤応答に関わるタンパク質の 1 分子計測を実証した。また、pH 依存的な表面電荷の変化を検出する pH センサー、磁場検出に基づく微小環境の粘性の計測法に本技術を展開することにも成功した。

本技術がどのような生命活動・分子挙動の計測に応用できるかの方向性について、今後、RT-PCR やデジタルイムノアッセイなど、既存技術では困難であった超高感度で迅速なウイルス/疾患バイオマーカー検出のための量子診断プラットフォームの構築が期待できる、

##### ○ 萬井知康 研究者「磁場応答光プローブ」(募集領域 2)

本研究課題では磁場応答光プローブの開発に成功し、大きなブレイクスルーとなった。モデル分子における磁場による発光性制御に向けて、インテンシティボローイングと呼ばれる量子効果に着目し、長距離ラジカル対の電荷再結合において CT 発光が起きる分子群を開発することに成功した。モデル分子のドナーとアクセプターの酸化還元電位、ブリッジ分子



の長さなどを調節することで、常温・溶液中でラジカル対の距離が最大 24Å 離れている分子システム (1 分子では現在最長) でも CT 発光が起こることを確認するに至っている。また、これらの分子群では常温かつ目標の磁場強度において発光に顕著な磁場効果は見られなかったため、さらに新しい分子群を開発し、それら分子の遅延蛍光において顕著な磁場効果を確認した。特に遅延蛍光の磁場効果が室温で見られた成果はインパクトがあり、これまで報告されていたものより桁違いに大きな値である。開発したモデル分子で発光の磁場による変化をイメージングできることを確認していることから、この技術は全く新規なイメージング手法として新たな生命現象を見つけるような発展が期待できる。

本技術がどのような生命活動・分子挙動を計測できるかの方向性について、今後、ラジカル対内の項間交差が磁場により変化する量子性を生かした光プローブを用いた生体の膜タンパク質解析や断層選択イメージングを挙げられる。全く新規なイメージング手法として新たな発展が期待できる。なお、本研究課題の成果については、スピン相関ラジカル対の基礎的な理解の観点から、ブルックヘブン国立研究所で発展させる展開に繋がっている。

#### ○ 石綿整 研究者の「NV センタデルタドープ薄膜」(募集領域 2)

本研究課題ではスピン依存発光を持つ原子サイズのセンサーである NV センターに着目し、共焦点顕微鏡と核スピンイメージングの両方が可能なナノスケール NMR イメージングを実現する装置の開発に成功した。さらに、この NV センターが~5 ナノメートルの微小領域からの核スピン解析が可能であること、同時に高い温度分解能を持つ高感度な量子温度計測を可能とする性質に着目し、脂質二重層モデル系で相転移計測への応用を示した。例えば、デルタドープ薄膜上に脂質二重層を形成する技術を確立し、1°C 以下の精度による局所温度計測、ナノスケールの観測体積からの核スピン解析をラベルフリーで同時計測することで、細胞膜に見立てた薄い脂質二重層の微小領域を出入りするリン脂質の動きをラベルフリーで計測できることを示している。

本技術がどのような生命活動・分子挙動を計測できるかの方向性について、今後、生体分子における微小領域相転移計測や NMR のポテンシャルを活かした分子構造解析が挙げられる。特にイメージング技術と組み合わせることで、生体のさまざまな高次構造体への計測応用、リン脂質移動と疾患の関係を調べるための細胞診断技術などへの発展が期待できる。

これらの研究課題は、戦略目標の達成目標にある「生体内の微弱な温度・磁場・電場などの高感度観測を実現する」観点から、科学的・技術的に大きなインパクトが期待できると考える。

#### ② 達成目標 II 「光量子検出技術などでこれまで可視化されなかった状態を捉える」観点

##### ○ 井手口拓郎 研究者の「ラベルフリーイメージング」(募集領域 2)

本研究課題では位相差顕微鏡を用いた赤外フォトサーマル位相差顕微鏡の原理実証、デ

デジタルホログラフィ顕微鏡を用いた赤外フォトサーマル定量位相顕微鏡の原理実証、光回折トモグラフィの原理を用いた 3 次元赤外フォトサーマル定量位相顕微鏡の原理実証に成功している。その過程において感度向上のためのさまざまな新しい解決法を考案し、特にマイナス 6 乗の屈折率変化の検出に成功し、光回折トモグラフィで 3 次元分解を可能としている。それらの成果に基づき、位相感度が 1~2 桁高い赤外フォトサーマルラベルフリー定量位相顕微鏡（2 次元、3 次元）によるバイオイメージングの実証にもつなげ、特に生体応用では、生物系研究者（東京大学医学部および薬学部）からの細胞試料の提供体制を構築の上、腎細胞観察でかなりの品質でイメージが取得できてきている。

本技術がどのような生命活動・分子挙動を計測できるかの方向性について、今後、細胞内外での熱拡散に関する現象のラベルフリー計測、細胞内での液液相分離タンパク質のラベルフリー計測、細胞内の水の挙動の計測、極弱位相物体である微粒子（ウイルスやエクソソーム、サイズの大きなタンパク質分子など）の計測などへの発展が期待できる。

#### ○ 市村垂生 研究者の「音響フォノン計測」（募集領域 1）

本研究課題ではブリルアン散乱と他の物理量（ラマン散乱、蛍光、屈折率）を同時に計測するマルチモーダルイメージング装置系を開発し、心筋シート之力発生および上皮細胞の癌変異における弾性分布を観察するなど、本技術を生命現象に応用する可能性を示すことに成功した。例えば、ラマン散乱と蛍光によるイメージング機構を付加したマルチモーダルイメージングの開発では、核内クロマチンで蛍光タンパク質（ECFP）が発現するマウス ES 細胞株や上皮細胞を用いて、分裂期の細胞に特徴的な細胞内弾性分布、つまり核内の DNA の凝集に起因すると考えられる弾性状態の観察に成功した。生体内での力学特性を理解するため、弾性の大きさだけでなく方向性や異方性の計測にも取り組んだ。コラーゲン繊維束をモデル試料として用い、繊維軸と光軸の角度によってスペクトルが変化することを実測し、繊維軸と光軸の角度が大きくなるにつれてスペクトルのピークが低周波数側にシフトしていることを示すなど、今後の細胞計測において弾性の異方性を検出できる可能性を示した。特に市村研究者は応用物理出身ではあるが、研究領域内外の生命科学系研究者と積極的に連携研究を展開している姿勢は素晴らしく、本研究領域において模範となるケースとなっている。

本技術がどのような生命活動・分子挙動の計測に応用できるかの方向性について、今後、発生生物学や再生医療などへの応用を念頭に、細胞集団の状態が不連続に転移する現象への応用、細胞弾性や力発生の計測から新たな生命現象の仕組みを明らかにし、疾患メカニズムを解明するためのマルチモーダル観察・マルチスケール観察への応用への発展が期待できる。

#### ○ 近藤徹 研究者の「生体量子コヒーレンス顕微分光」（募集領域 1）

本研究課題ではフェムト秒時間分解が可能な 2 パルス pump-dump 顕微鏡を開発し、光合

成アンテナタンパク質であるアロフィコシアニン（APC）を測定することにより、1タンパク質内で生じる励起エネルギー移動の解析に成功した。APCは標準試料として利用できる汎用性の高い蛍光性タンパク質であり、これを上手く利用して1分子レベルでのエネルギー移動を初めて解析し、励起子のコヒーレント状態がエネルギー移動の安定化に寄与することを示唆している。蛍光検出型の pump-dump 法は試料の光退色が問題となっていたが、吸収検出を用いる pump-probe 法の装置を検討し、吸収スペクトル測定に向けて可視光域の波長可変光源を開発するなど、吸収顕微分光の基盤技術の確立に向けて着実に検討を進めた。1分子・1タンパクの計測を可能とする顕微鏡装置はアップグレードしつつ成果が積み重ねられている。また、生命科学系の研究者と積極的に連携を進め、緑色硫黄細菌が持つ巨大なアンテナ分子・クロロソームの模倣体である1次元ナノチューブ分子、ヘリオバクテリアのRC（hRC）などへも計測対象を広げ、1次元分子の解析による量子状態の寄与、タンパク質の構造的な揺らぎによる動的効果に対する量子状態の寄与についても計測を進めるなど、異分野融合を目指す本研究領域において模範となる連携を進めている。

本技術がどのような生命活動・分子挙動の計測に応用できるかの方向性について、今後、励起子状態などの量子状態と光合成光反応がどのように関連するかを明らかにすることで、人工光合成分野の高効率光電変換デバイス開発において新しい設計指針を提供することが期待できる。

#### ○ 富田英生 研究者の「光量子による放射性核種分離・分析法」（募集領域2）

本研究課題では、光量子のエネルギーを精密に制御したレーザーを用いた放射性核種を含む分子・原子のレーザー分光分析・分離技術について、特に<sup>14</sup>Cや<sup>3</sup>Hで標識した対象化合物の代謝物に対する適用を検討し、量子カスケードレーザー光源の安定性を高め、天然同位体比以下の<sup>14</sup>C分析を実現できる感度を達成した超高感度赤外レーザー吸収分光（Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS)）による分光システムの開発に成功している。それらの成果から計測装置メーカーと共同で実用化に向けた開発を進めており、今後生体トレーサー分析にむけた進展が期待できる。さらに富田研究者は、JSTのCREST「独創的原理に基づく革新的光科学技術の創成」に参画し、2021年にはSCORE 大学推進型（拠点都市環境整備型）の研究代表者として採択されている。このCRESTでは本研究の成果を活かし、世界最高の分光感度で、福島原子力発電所の廃炉作業における処理水中トリチウム分析を実施する計画であることも、特筆すべきトピックとして記しておく。

本技術がどのような生命活動・分子挙動の計測に応用できるかの方向性について、富田研究者は、個別化医療のための医薬品の有効性、副作用の発現の個人差を評価するための測定手法を挙げている。本技術は、化学的には同じ振る舞いをする同位体を分析する点で優位性があり、生体内は極微量にしか存在しない放射性同位体は、化合物の動態評価においてはバックグラウンドフリーである利点がある。一方で、<sup>14</sup>Cを連続測定できることは、さまざまな分野での応用が期待できる。多重置換同位体分子分析による炭素循環の解明や、有機資源

のバイオマス度や由来の迅速評価手法としても有望であり、有用化合物ラベルのデザインをより豊富にした展開が期待できる。

○ Lewis M. Antill 研究者の「クリプトクロム時空間計測」(募集領域 3)

This project succeeded in detecting an Earth strength magnetic field effect on Cryptochrome-like systems. Through the development of a new instrument for detecting magnetosensitive photochemistry in biological environments, he could demonstrate the magnetic field effect with single-photon avalanche diodes (SPADs) for the first time, which offers a novel approach for studying magnetosensitive photochemistry on protein-ligands at the single-molecular level. For instance, the coherent quantum mechanical processes between flavin and protein. By combining fluorescence intensity, fluorescence anisotropy and magnetic field effect measurements, a much clearer picture of the nature of the protein-ligand dynamics was demonstrated than had previously been possible. His work was introduced in a science society magazine as an invited article.

This project is also exploring candidate structures and oligomerization of cryptochrome using a combination of experimental and computational methods to identify its possible role in magnetoreception. Through the analysis of cryptochrome oligomerization and theoretical modelling, he suggests that an oligomerization equilibrium could regulate the magnetic sensing functions of cryptochrome. Dr. Antill is now leading many international collaborations in this research field. Together with the above outcomes, this project was successful and highly commendable. Further cryptochrome-based investigations are expected on this magnetosensitive photochemistry platform in the future.

これらの研究課題は、戦略目標の達成目標にある「量子イメージングと言える新たな生体イメージングを実現する」観点から、科学的・技術的に大きなインパクトが期待できると考える。

③ 達成目標Ⅲ「量子ビーム・計測技術の高度化で分子間相互作用や機能を解明する」観点

○ 菅倫寛 研究者の「量子ビームでの構造解析」(募集領域 1)

本研究課題では光化学系 II の結晶を光励起させるのに必要な光照射条件を決定する方法を確立し、光化学系 II (PSII) の  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  の 3 つの中間体状態を 2.15Å 分解能で解析した。その結果、PSII の反応機構がオキソ/オキシルの中間体状態を経て進むことを示し、基質となる水分子を取り込むための仕組みとその経路を明らかにすることに成功した。これまで時間分割シリアルフェムト秒で構造解析する技術は数多くあったが、これらを本研究

課題のテーマの PSII に直ちに適用することは困難であった。そこでシリアルフェムト秒回折実験のための様々な条件、回折データの処理（ソフトウェアおよびパラメーター）の最適化による分解能の改善などについて、極めて丁寧に検討を続けた結果、ナノ秒からミリ秒にかけて複数の遅延時間に相当するデータを測定し、原子レベルの分解能で構造解析するに至っている。さらに、中間体状態の寿命が長い PSII の  $S_2$  状態と  $S_3$  状態の結晶構造を 2.15 Å 分解能で解析することにも成功し、その成果は Science 誌に発表するとともにプレスリリースを行っている。

本研究からどのような生命現象の量子現象にアプローチできる手法もしくは理論につながるかの方向性について、今後、好気性生物に最も重要な反応である光合成水分解・酸素発生反応の触媒反応機構を動画的視点から考証して触媒反応の作動原理を明らかにすること、光合成反応における量子科学的な現象の理解に貢献する構造情報を提供すること、そして、光合成膜タンパク質が光エネルギーを高効率に利用するために必要な基本原理の解明から人工光合成への応用につなげることが期待できる。

○ Radostin Danev 研究者の「高速量子波面モジュレーション」（募集領域 2）

This project enabled real-time defocus modulation and successfully evaluated the practical performance of the system. Through his theoretical and numerical investigations of the proposed defocus modulator designs, he revealed practical challenges regarding the required electromagnetic field and overcame them through his new approach based on applying an electrostatic potential on the objective lens aperture. He also confirmed the system's performance and suitability for fast and accurate defocus modulation (FADE) and enabled the start of FADE experiments at the University of Tokyo. Regarding Cryo-EM experiments on the FADE system including the processing of non-standard FADE data, This project succeeded in producing the first high-resolution 3D cryo-EM reconstructions in the world and achieved a new resolution record for this type of electron microscope. Moreover, he installed a new electrostatic defocus modulator (EDM) on the development system and confirmed proper operation of the hardware and its added capability for beam intensity modulation. Dr. Danev now leads strong academic and industrial partners in this research field. Together with the above outcomes, this project was successful and highly commendable. Further EDM-based investigations are expected on the new microscope platform in the future.

○ 楊井伸浩 研究者「超核偏極ナノ空間の創出」（募集領域 2）

本研究課題では、従来はペンタセンの一択であった triplet-DNP の偏極源について、空气中で安定な偏極源、水溶性の偏極源、生体親和性のある偏極源を世界で初めて開発すること

に成功した。具体的には、空気中で安定な偏極源として、電子吸引性の窒素原子に着目したジアザペンタセンやジアザテトラセンを合成することに成功し、ペンタセンとほぼ同程度の偏極率の向上が得られている。この成果は J. Phys. Chem. Lett. 誌に掲載され、Editor's choice に選出など高い評価を受けている。また、親水性のポルフィリン類を triplet-DNP の偏極源として初めて用い、結晶性の天然分子であるエリスリトールの高核偏極化に成功するなど、生体適合性の偏極源として初めてポルフィリン類を新たに見出すことに至っている。さらにナノ多孔性材料である metal-organic framework (MOF) を用いたナノ偏極空間の構築にも取り組み、骨格構造を柔軟に変化させるナノ多孔性材料に着目し、抗がん剤であるフルオロウラシルを室温程度の triplet-DNP で高核偏極化することにも成功した。これは MOF 中のゲスト分子を triplet-DNP により高核偏極化することに成功した初めての例となっている。

本技術がどのような生命活動・分子挙動の計測に応用できるかの方向性について、今後、ナノ結晶から水への偏極移行、プロトン交換を介した多様な生体分子やタンパク質の高偏極化が期待できる。

これらの研究課題は、戦略目標の達成目標にある「生体分子の電子状態、水素原子の挙動、化学結合の状態などの量子レベルに至る超精密構造・機能解析」を実現する観点から、科学的・技術的に大きなインパクトが期待できると考える。

#### ④ 想定を超えた研究成果

○楊井伸浩 研究者（2 期生）「新しい核偏極リレー法により“水の高核偏極化”に成功～薬物スクリーニングや細胞内のタンパク質解析への道～」

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220921-4/>

磁気共鳴イメージング (MRI) では体内水分子の信号を利用しているが、室温下で検出できる核スピンは 0.001% (10 万個に 1 個) と非常に少なく、信号が弱いことが難点であった。その解決法として検出できる核スピンを増やす「動的核偏極」が知られていたが、マイナス 150 度以下の極低温測定、または測定に悪影響を及ぼすラジカル分子を加える必要があった。楊井研究者は、有機結晶中の核スピンの向きがそろった核偏極を水分子に移行する新たな手法として「核偏極リレー」を開発し、室温で初めて水を高核偏極状態にすることに成功した。結晶サイズが小さくなると、単位体積あたりの表面積が大きくなり、水分子と接触して核偏極リレーに利用できる面積が大きくなることで偏極移行の効率が上がると考えられる。そこで再沈殿法を用いて大きさの異なる有機ナノ結晶を作製・解析し、結晶サイズと水分子に対する核偏極リレー効率の関係を明らかにした。

これまで結晶を偏極する例はあっても偏極を液体に移した例はなく、今回の結果は不可能を可能にする、まさに 0 を 1 にした成果と言える。今後はさまざまな生体分子に対する NMR/MRI の感度向上につなげ、薬物のスクリーニングや生きた細胞内たんぱく質の構造解析

を行うための新たな手法として期待される。新しい偏極源・高核偏極化技術を開発し、それを利用してこれまで誰もできなかった水の核偏極に成功して、大きなブレイクスルーとなったと考える。



図 5 (a)測定に用いた有機結晶の作製方法 (再沈殿法) (b)線幅の狭い水の NMR 信号観測

○市村垂生 研究者 (2 期生)「0.01%の稀少細胞を検出！従来比 1000 倍の細胞 100 万個を同時観察する”トランススケールスコープ”を開発～スケール階層を越えて生命システムを理解する次世代生物学のツール～」

[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210819\\_1](https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210819_1)

従来の生物顕微鏡での細胞観察は  $10^3$  個程度まで、視野は数 mm 程度であったが、センチメートルを越える大視野の中の個々の細胞動態を観察できる光イメージング法の開発に成功した。細胞粒度で観察できるイメージング装置としては、10 万から 100 万にものぼる数の細胞を一つの視野 (世界最大の視野) の中で撮像でき、全ての細胞の動態を動画として観察することを可能とした。今後、強力な細胞計測機器として、基礎研究から人工細胞シートなどの品質管理のような医療応用まで、幅広いバイオイメージング分野での展開が大きく期待できるブレイクスルーである。

○丸山善宏 研究者 (1 期生)「生命と認知の量子情報理論」

丸山研究者は、認知科学における文脈依存性に対する圏論的論理学に基づく理論基盤、認知科学における量子現象一般に対する包括的な構造的量子性の理論のきっかけ、認知科学における文脈依存性に対する圏論的層理論に基づく理論基盤、圏論的量子 AI による記号的 AI と統計的 AI の圏論的統合について進めており、本研究課題で圏論という抽象数学を生命と認知の量子情報理論に適応した取組みは、領域アドバイザーを含む領域参加者全体や分野全体に深い洞察を与えた。本研究課題の研究成果は、圏論において最も伝統あるトップジャーナルである Journal of Pure and Applied Algebra において 2021 年に出版されている。

## (2) 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

本研究領域からは、社会的・経済的価値の創造や萌芽につながる先駆的で国際的にも高い水準の成果がいくつか生まれている。これまでに6件の国際特許出願、12件の国内特許出願もなされており、企業との共同開発に展開したものもある。また研究課題の成果を今後の社会的・経済的価値への創出につなげていくために、本研究領域では研究成果のプレスリリースを積極的に実施（合計12件）した。今後、本研究課題の成果をベースとした新たな連携や枠組みが始まることが期待できる。

また、研究期間中や研究終了後に新たな上級ポストの獲得に至った研究者も数多く輩出しており、社会的・経済的価値の創造の観点として、将来の主導的研究者の養成についても一定の役割を果たすことができた。

以下に、社会的・経済的価値の創造について3つの観点から、研究成果から期待できる波及効果や今後の将来性について述べる。

### ① 健康長寿社会（生命現象の理解に基づく治療法・新薬開発）や医療費抑制（機能性疾患や早期発見が困難な疾病の定量的な診断・予防法）の観点から

- ・ドーパミンの脳細胞・組織内での挙動を捉えることが可能となり、脳の健康と病気の理解を深める研究や薬の開発への利用が期待できる。（塗谷睦生 研究者（2期生））
- ・世界最小の3次元回転センサーとして、新薬研究や再生医療の幹細胞モニタリングなど、生命科学の新たな計測ツールとして幅広く活用できる。（五十嵐龍治 研究者（2期生））
- ・ありのままの細胞膜におけるリン脂質の分布や動きを計測できる分析技術や、創薬候補を探索するための基盤技術として応用できる。（石綿整 研究者（1期生））
- ・柔軟な多孔性結晶を応用した室温核偏極の技術により、医療で用いられるMRIの高感度化が期待できる。（楊井伸浩 研究者（2期生））

### ② Society5.0の産業競争力：小型低侵襲・高精度のセンサー・計測装置などの展開の観点から

- ・簡便に真空紫外領域の円偏光を発生させることが可能となり、生体分子のイメージング機器の小型化や、物質の電子スピン状態探索に役立つ分析技術への利用が期待できる。（小西邦昭 研究者（2期生））
- ・光で分子を振動させて細胞の形態と分子分布を同時に見る光学顕微鏡を開発し、蛍光標識なしに生きたままの細胞観察が必要となる再生医療や生物学研究への幅広い利用が期待できる。（井手口拓郎 研究者（1期生））
- ・新しい高速量子波面モジュレーションとそのためのシステム開発により、クライオ電子顕微鏡などで分子イメージング技術を格段に向上できる。（Radostin Danev 研究者（2期生））
- ・超高感度赤外レーザー吸収分光による分光システムを開発し、個別化医療のための放射性核種による生体内の代謝分析、福島原子力発電所の廃炉作業における処理水中トリチウ



ム分析への利用に期待できる。(富田英生 研究者 (3 期生))

- ③ 科学技術立国 (国際的存在感の向上、新規医療・技術シーズの持続的創出) の観点から
- ・光合成で「ゆがんだイス」型の触媒が酸素分子を形成する仕組みを解明しており、光で水を分解するための人工光合成触媒の設計に貢献できる。(菅倫寛 研究者 (2 期生))
  - ・新しい核偏極リレー法により“水の高核偏極化”に成功しており、さまざまな生体分子に対する NMR/MRI の感度向上が期待できる。(楊井伸浩 研究者 (2 期生))
  - ・従来比 1000 倍の細胞 100 万個を同時観察するトランススケールスコープの開発に成功しており、人工細胞シートなどの品質管理のような医療応用が期待できる。(市村垂生 研究者 (2 期生))

(参考) 本研究領域からのプレスリリースの例

### 「神経伝達物質を「見える化」するツールを開発～分子量の小さい生理活性物質の可視化に新たな光～」

塗谷睦生 研究者 (2 期生) <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210702-2/index.html>

- ◆ドーパミンは運動・認知・報酬などさまざまな脳の機能を担っている神経伝達物質の 1 つだが、蛍光たんぱく質の 100 分の 1 以下のサイズしかない非常に小さい分子で、これらで標識すると性質が大きく変わってしまい、本来の姿を捉えることができなかった。
- ◆ドーパミンよりずっと小さく、その後さまざまな形で観察・検出できるアルキン (アセチレン系炭化水素) でドーパミンを標識した「アルキン標識ドーパミン」を開発した。
- ◆これまで明らかにされていなかったドーパミンの脳細胞・組織内での挙動を捉えることが可能となり、脳の健康と病気の理解を深める研究や薬の開発に新たな道を拓くことが期待される。

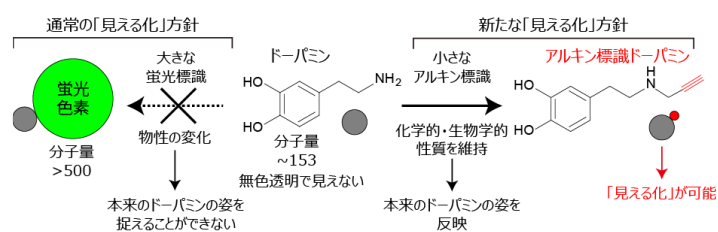


図 6 ドーパミンを「見える化」する新たな方法の概念図

### 「格子状に並んだナノサイズの穴を持つ薄い膜が、らせんの光の波長を変える～極短波長のそろった円偏光を簡単に作り出すことに成功～」

小西邦昭 研究者 (2 期生) <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200721/index.html>

- ◆波長 200nm 以下の短い波長 (真空紫外) で、電場の波がらせんのように回転する光 (円偏光) を、簡便かつ高効率に発生できる手法を開発した。

- ◆等しい間隔で並んだ正方形の格子の位置にナノサイズの穴を開けた薄い膜（フォトリック結晶ナノメンブレン）が、人が目で見える波長の円偏光を真空紫外領域の円偏光に波長変換する物質として有効であることを示した。
- ◆真空紫外領域の円偏光を簡便に発生させることが可能になり、生体分子のイメージングや、物質の電子スピン状態探索に役立つ分析技術への応用が期待される。

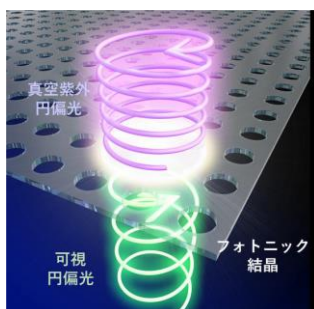


図7 開発した真空紫外コヒーレント円偏光発生法の概念図

可視光の円偏光フェムト秒レーザーを正方格子状に周期的な穴の開いた誘電体ナノ薄膜（フォトリック結晶）に照射すると、真空紫外領域の円偏光に変換される。

### 「細胞における分子1個の回転運動を3次元で検出するナノ量子センサーを実現 ～医学と生命科学の発展に幅広く貢献～」

五十嵐龍治 研究者（2期生） <https://www.qst.go.jp/site/press/40761.html>

- ◆ナノサイズの特異なダイヤモンドセンサーを用いて、生きた細胞で生体分子の運動を3次元で計測する新たな技術を開発した。
- ◆位置変化を伴わない回転運動は高性能な顕微鏡でも観察が難しかったが、たんぱく質の回転運動や薬剤反応による回転運動の変化など、細胞内の微小空間で1つの生体分子が示すナノスケールの運動情報を取得することに成功した。
- ◆世界最小の3次元回転センサーとして、新薬研究や再生医療の幹細胞モニタリングなど、生命科学の新たな計測ツールとして幅広い活用が期待できる。論文掲載当月の評価が特に高い研究内容として Spotlights で紹介および Supplementary Journal Cover に採択された。

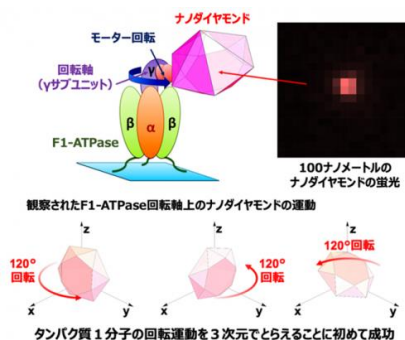


図8 ナノ量子センサーによるF1-ATPaseのモーター回転運動の1分子3次元観察

「ナノスケール量子計測からリン脂質の動きを捉えることに成功 ～創薬に向けた細胞診断への応用に期待～」

石綿整 研究者（1期生） <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20210219-2/index.html>

- ◆薄い膜状にしたダイヤモンド量子センサーで、細胞の反応をつかさどる脂質二重層（細胞膜）中のリン脂質分子の動きをラベルフリー計測できる手法を開発した。
- ◆量子センサーで脂質二重層中を動くリン脂質をナノ NMR（～6立方ナノメートル）により計測し、リン脂質分子の動きを示す拡散係数を計測できることを実証した。
- ◆ありのままの細胞膜におけるリン脂質の分布や動きを計測できる分析技術や、創薬候補を探索するための基盤技術への応用が期待される。

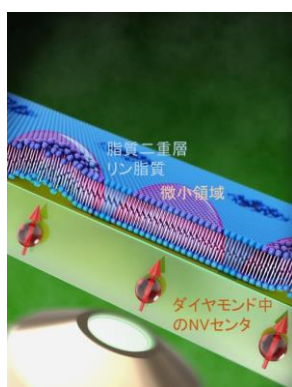


図9 ナノスケール量子計測を用いた脂質二重層相転移計測のイメージ図

「光で分子を振動させて、細胞の形態と分子分布を同時に見る光学顕微鏡を開発～標識不要な定量位相顕微鏡と分子振動顕微鏡のコラボレーション～」

井手口拓郎 研究者（1期生） <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20200420-2/index.html>

- ◆蛍光標識なしに細胞の高解像形態画像に生体分子の分布を示せる光学顕微鏡を開発。
- ◆赤外光で細胞内の分子に固有の振動を生じさせ、分子振動に伴う温度上昇による屈折率の変化を計測する原理で生体分子の分布を観察し、細胞形態と分子分布の情報を同時に取得することに成功した。
- ◆生きたままの細胞観察が必要となる再生医療や生物学研究への幅広い利用が期待される。

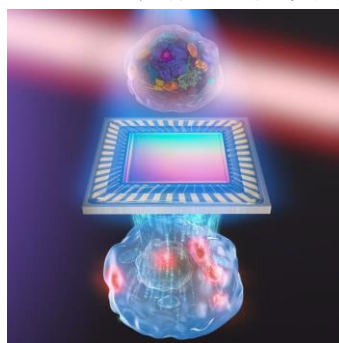


図10 赤外フォトサーマル定量位相顕微鏡の概念図

## 「光合成で「ゆがんだイス」型の触媒が酸素分子を形成する仕組みを解明～人工光合成触媒の合理的設計の糸口に～」

菅倫寛 研究者 (2期生) <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20191018/index.html>

- ◆光合成は光エネルギーを利用して、光化学系IIと呼ばれるタンパク質が水分子から酸素分子を形成する反応で始まるが、酸素分子が形成される仕組みは分かっていない。
- ◆量子ビームであるX線自由電子レーザーを用いて、光化学系IIの「ゆがんだイス」型の触媒が酸素分子を形成する直前の状態の立体構造を正確に決定した。

本研究成果は、光合成で水分子から水素イオンや電子を取り出す仕組みの解明だけでなく、光で水を分解するための人工光合成触媒の設計にも役立つことが期待される。

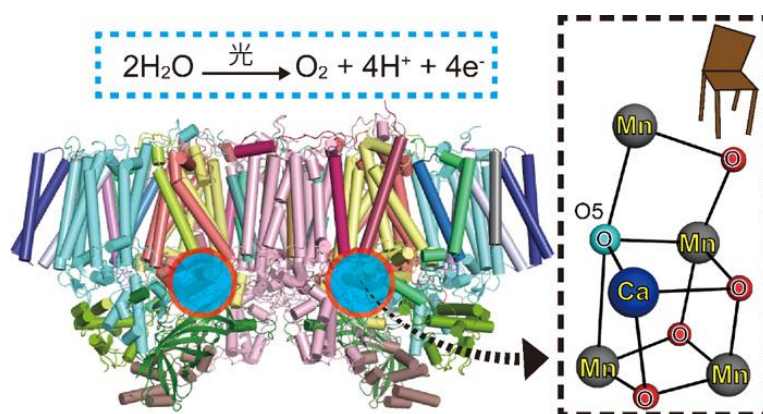


図11 光化学系IIの全体構造

## 7. 総合所見

### (1) 研究領域のマネジメント

本研究領域では、何をすれば目的を達するのか、それ以前に、何を目標とすれば自らが目指す「量子生命科学の実現」に向けて有効なのかを立案して実施する、また、到達度に応じて実現する効用自身を再設計することが大切と考えた。その研究マネジメントを推進するため、まず領域運営方針（ビジョン、ミッション、基本方針）を設定し、本研究領域で共通の視点を定めた。次にさきがけ研究期間3.5年間における共通のマイルストーンを定め、研究課題の進捗について研究者自らが考えるしくみを構築した。特に、研究者がその研究進捗に応じ、研究総括や領域アドバイザーから気軽にアドバイスを受けることができる“場”を大切にし、研究者が自ら研究進捗とマイルストーンを適宜照らし合わせ、「振り返り」と「気づき」ができるように、領域会議などのプログラムを工夫した。さらに量子と生体の研究交流を促進するため、研究者による連携提案の機会、他研究領域との研究交流の場、生物物理学会「さきがけ公開シンポジウム」の開催、他の研究機関との意見交換や国際協力を進めた。

飛躍的なチャレンジを鼓舞するには成果を研究期間中に創出された論文数や学会発表数で単純に評価することは必ずしも適切でなかろう。チャレンジングな研究課題ではすぐに

成果が出ることは通常困難であることから、研究成果の社会的な応用についても、それ以上に時間がかかることはやむを得ないとする。そこで安心してハイリスクなテーマにも積極的に挑戦できる研究領域の環境作りに努めた。

それらの取組みにより、本研究領域を立ち上げる際に戦略目標の達成に向けて実現を狙った ①量子科学・量子技術を生体や生体分子の計測に応用、②量子と生体の研究の交流と融合を促進、③量子・生命のハイブリッド人材を育成、④ハイリスクなテーマにも積極的に挑戦、は達成できたと考えている。

なお、2020年2月頃から感染状況が拡大した新型コロナウイルス（COVID-19 感染状況拡大）の影響を受けての領域運営を余儀なくされたが、オンライン会議手法を活用し、さきがけ研究者と研究総括との“気軽”な研究進捗確認や議論の場を提供することができたと考えている。また、コロナ禍の影響を受けて2020年度に最終年度を迎えることとなった1期生9名はJSTのコロナ延長支援を利用して6ヶ月間研究期間を延長し、さきがけ研究の完成度を上げることができたと考える。

今後、従来のコンセプトを深化させた量子技術の開発とそれらの生命科学への応用、生命現象の中に真の量子的な現象や生命機能を見いだそうとする発想やアイデアの育成がさらに進展し、想像を絶する成果がこの分野から出てくること、その一翼を担う研究者たちが本研究領域から数多く出てくることを期待したい。

## (2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

本研究領域では戦略目標の達成に向けて、研究者全員がビジョンを共有しつつ、将来に果たすべき使命（ミッション）「最先端の量子科学の知見と量子技術を総合的に利活用し、従来不可能であった極微の空間・時間・エネルギースケールあるいは超高感度での生体内部の観測、そして生体分子の計測・制御による生命機能のモデリングなどの技術革新を実現・応用する」ことを目指した。その取組みの結果、研究領域を立ち上げる際に戦略目標の達成に向けて実現を狙った、量子科学・量子技術を生体や生体分子の計測への応用につなげ、戦略目標の達成について貢献できたと考えている。

### ①達成目標Ⅰ「量子センサー技術を用いて生命科学などの新たな潮流を生み出す」観点

- ・粒子径 5nm のナノ量子センサーでタンパク質の 3 次元回転運動が計測できる新展開。
- ・磁場応答光プローブの開発に成功。
- ・ナノスケール NMR イメージングでリン脂質の動きをラベルフリーで計測。
- ・アルキン標識薬剤を開発し、ドーパミンなどの脳細胞・組織内の挙動を捉えることに成功。

### ②達成目標Ⅱ「光量子検出技術などでこれまで可視化されなかった状態を捉える」観点

- ・位相感度が 1~2 桁高い赤外フォトサーマルラベルフリー定量位相顕微鏡によるバイオイメージングを実証。

- ・ブリルアン散乱と他の物理量の同時計測装置を開発し、心筋シートの力発生および上皮細胞の癌変異における弾性分布を観察することに成功。
- ・フェムト秒時間分解が可能な2パルス pump-dump 顕微鏡を開発し、1タンパク質内で生じる励起エネルギー移動の解析に成功。
- ・レーザー分光学的手法に基づく放射性炭素およびトリチウム分析システムの開発に成功し、胆汁代謝物の HPLC 分画試料中  $^{14}\text{C}$  分析を実証。
- ・クリプトクロムモデル系で地磁気レベルの影響を計測できるシステム開発と実測に成功。
- ・フォトニック結晶ナノメンブレンで極短波長のそろった円偏光を簡単に作り出すことに成功。

### ③達成目標Ⅲ「量子ビーム・計測技術の高度化で分子間相互作用や機能を解明する」観点

- ・光化学系 II (PSII) の  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  の3つの中間体状態を高分解能で解析し、基質となる水分子を取り込むための仕組みとその経路を解明。
- ・クライオ電顕でリアルタイムのデフォーカス変調を可能にし、その実用的な性能を評価することに成功。
- ・生命活動・分子挙動の計測に適用が期待できる新しい偏極源・高核偏極化技術を開発し、それを利用してこれまで誰もできなかった水の核偏極に成功して大きなブレイクスルーを創出。

これらのように科学的・技術的に大きなインパクトのある成果が得られており、全体として、当初の戦略目標の達成に貢献する成果を十分に挙げることができたと考えている。また、本研究領域ではさきがけ研究期間や終了後に新たな上級ポストの獲得に至った研究者も数多く輩出しており、社会的・経済的価値の創造の観点として、将来の主導的研究者の養成についても一定の役割を果たすことができている。

戦略目標を達成するための研究マネジメントとして、3年4ヶ月目（研究課題の事後評価開始時）のマイルストーン「提案技術が適している生命活動・分子挙動の計測を一つ以上見つけること、又はきっかけを見つめること。もしくは生命現象の量子現象にアプローチできる手法もしくは理論の技術基盤が構築できること、又はきっかけを見つめること。」を設定した。この点を指標とした評価視点でも、本研究領域の研究課題の多くはその指標を達成する成果をあげたと考えている。一方で、十分な成果が得られなかった研究課題についても、当初計画から適宜修正が行われ、今後の飛躍が期待できる「きっかけ」が得られつつあることから、今後の成長と展開が楽しみである。

### (3) 本研究領域を設定したことの意義と妥当性(研究開始以前と現時点の比較を念頭に)

本研究領域が発足した頃は、日本国内では「量子生命科学」というキーワードは十分に広まっておらず、当時は危うささえ感じるとてもチャレンジングな公募であったが、数年たっ

た現在では遥かに世間にも理解されるシユアな領域になってきたと考える。その後、経済・社会的な重要課題に対して量子科学技術(光・量子技術)を駆使し、非連続的な解決(Quantum leap)を目指す研究開発プログラム「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」<sup>1</sup>が2018年に発足し、量子情報処理(主に量子シミュレータ・量子コンピュータ)、量子計測・センシング、次世代レーザー、量子技術の次世代を担う人材の育成を強化するための人材育成プログラムが整備されている。2019年には量子生命科学会が発足し、本研究領域に所属する研究者が中核的に活躍している。さらに2020年には、Q-LEAP「量子生命」Flagshipプロジェクト<sup>2</sup>が発足し、量子技術と生命・医療などを融合した「量子生命技術」を創製し、医学・生命科学研究において利活用される計測技術のプロトタイプ(TRL6)の実現を目標とし、生体ナノ量子センサー、量子技術を用いた超高感度MRI/NMR、量子論的生命現象の解明・模倣に関する研究開発の推進が始まっている。この間、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構には量子生命科学研究所が設立され、本研究領域の五十嵐研究者(2期生)や石綿研究者(1期生)らが異動して活躍している。

それらの取組みにさきがけて、本研究領域で取り組んだ基本方針①量子性を利用した技術(量子技術)で生命活動を計測、②生命現象の中に量子的な現象や生命機能を見いだす技術に挑戦する、③異分野融合を促進して生命科学フロンティアを開拓する、を実施できたことは誠に妥当であったと考える。さらに本研究領域の関係者や研究者らがそれらの新たな枠組みに入って貢献していることは、実質的に本研究領域から発展した新たな異分野連携事業につながっており意義深いと考える。

#### (4) 科学技術イノベーション創出に向けた、今後への期待、展望、課題

科学技術イノベーションを開拓する独創的な研究を目指すには、専門性の殻を破るための気づきに出合える機会、つまり異分野融合ができる仕組みや場が大切と考えている。そのためには、我が国の従来からの教育において、例えば理系・文系、物理・化学・生物学などに早くから分けられた教育体系の見直し、そのための人材育成プログラムの確立や見直しを急ぐ必要があると思われる。例えば、これまでの生物系の研究者は、「量子」という言葉に抵抗感があるかもしれない。しかし、生命現象のおもしろさを肌で感じているのもその生物系研究者である。生命のメカニズムを分子レベルで想定の上、現在抱えている課題に対して、例えば、使用されている原子、電子、光子、スピンなどの性質を利用した物理・工学系の技術を理解の上、「自らの専門分野を超えてどのように工夫したら見えなかった現象が見えてくるのか」を考えることができる資質の育成が望まれる。

異分野の研究者が理解できることを念頭に、どのような異分野融合ができるかを積極的に議論する場もますます必要になってくる。そのためには、今後の研究者には、以下の2つのポイントが重要であると考えている。

<sup>1</sup> <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/>

<sup>2</sup> <https://www.qst.go.jp/site/q-leap/about.html>

○他分野の人に自分が取り組んでいることの素晴らしさを分かりやすく話す

○お互いが取り組んでいることを理解する

あたりまえのようなことではあるが、この基本姿勢こそが、欧米のトップランナーと比較した場合、我が国の研究者に不足している点と感じている。

そのための意識改革を促しつつ、現在新たな人材育成に取り組んでいるのが「量子生命科学」である。その学問体系を「この世界を構成する物質や光を“波と粒子の性質をあわせ持つ量子性”から捉えることで、生命科学に新たな潮流を与える学問」などときちんと定義づけることも必要であろう。そして今後、「量子」というキーワードを基にして、量子技術の研究者と生命科学の研究者が連携して異分野融合を促進するための相互理解と協力体制がますます高まっていくことを期待したい。

#### (5) 所感、その他

本研究領域の設立後、2020年1月に統合イノベーション戦略推進会議から量子技術イノベーション戦略（最終報告）が示され、この戦略に基づいて量子技術を研究開発する国内8拠点（理研（中核拠点）、量研機構、産総研、東大&企業、阪大、東工大、NICT、NIMS）が設立されている。コンピューティングや暗号、生命・医療、マテリアルなど、量子技術に関わる幅広い分野の研究連携を進める新しい枠組みができており、具体的な共通課題やアクションプランなどの検討が進んでいる。本研究領域のメンバーがこれまでの議論を生かし、さらなる活躍の場が広がることを期待している。この枠組みを議論してきた有識者会議（量子技術イノベーション会議）で議論されたキーワードとして次の言葉が心に残っている。「今できること、真っ先に先行投資としてやらなければいけないのは人材育成、Quantum Native を育成することです。」本研究領域を巣立った研究者が Quantum Native のさきがけとなり、近い将来 Quantum Native を育成する新世代の指導者になることを望んでいる。

以上