

国際量子科学技術年記念 量子生命科学の推進に関する提言2025 量子で生命を理解する、世界をしあわせにする。

- 1. 概要**
- 量子生命科学は、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し、様々な分野において革新的応用を目指す、新たな学術領域である
 - 量子生命科学の長期的目標と、その実現に向けた基本方針（重点研究開発テーマ、必要とされるグローバルな研究推進体制）について提言する

2. はじめに [背景]

★量子生命技術開発戦略と拠点形成

- 2020年以降、国による量子技術3戦略の策定と量子技術イノベーション拠点が指定され、それらを軸として量子生命技術開発および拠点間ネットワークの形成による研究開発や人材育成を推進

★世界の量子技術研究開発の状況

- 世界各国で国家戦略が策定され、産業界からの大幅な投資拡大により、量子技術に関する異分野融合研究開発が進展
- 大型国プロの推進により日本が量子生命科学研究を牽引

★本提言の目的

- 量子生命科学の長期的目標、重点的に推進すべきテーマ、幅広い学術領域・産学官連携体制について提言

3. 量子生命科学の目指すもの [目標・展望]

(1)「量子で生命を理解する」～基礎科学における長期目標～

量子から分子・細胞・個体の階層にまたがる生命理解に、量子技術の応用で迫る

- **生命における量子効果の役割の探究** 光合成/磁気受容/酵素反応/認知神経科学
- **量子効果に基づく高次生命現象の解明** 突然変異/環境への適応/発生/進化/老化/疾病
- **生命の進化(秩序化)と熱力学(無秩序化)の止揚・統合** 突然変異/生命の起源/進化
- **生命の分子機構の予測・再構築** 細胞内エネルギー/生体分子の作用/細胞の制御/改良
- **分子と細胞の構造と機能** 細胞間コミュニケーション/細胞シミュレータ・ヒューマンデジタルツイン構築
- **発生・老化・疾病メカニズムの理解** 未病を含む疾病の機構/細胞の分化機構/新興感染症

(2)「量子で世界をしあわせにする」～イノベーションにおける長期目標～

生命研究向け量子技術や量子生命科学の知見を応用、高インパクトの技術を創出

- **量子による生産性革命と地球環境との調和** 生命の量子効果を模倣したカーボンニュートラル/農畜産・食品生産等への応用/生命の情報処理を模倣した量子コンピュータによるスマート化加速
- **量子による健康寿命の延伸** 検査・診断・治療への量子計測、量子イメージング・トモグラフィ等の応用/新興感染症や未病を含む疾病・障害の予防/量子レベルの分子機能理解に立脚した創薬
- **量子による安全安心の確保** 量子効果等を模倣した省エネ・環境浄化/磁気受容等を模倣した病原体を含む危険物探知/量子技術による食品検査・環境調査/新技術の倫理的課題解決

4. 量子生命科学において重点的に推進すべき研究開発テーマ [研究課題]

(1)量子論的観点の生命研究 (基礎的テーマ)

- **量子を知る** 生命における量子効果の役割 光合成等における量子コヒーレンス/分子間相互作用における量子トンネル効果/磁気・光・化学感覚における量子もつれ/DNA複製・転写・変異・修復における電子物性/細胞内メソスペースの物理化学的理解/等
- **量子になぞらえる** 量子論的な数学モデル 量子確率論・量子情報科学と脳機能計測による意識システムと病態の解明/認知に関する情報伝達と現象との関係性の解明/生体内の波動・周期的現象が生体機能を制御する仕組み/等

(2)最新量子技術の応用による生命研究(技術開発)

- **量子で測る** 量子センシング技術 ダイヤモンドNVセンター等の量子センサの応用/量子センサ材料開発/単一スピレベルでの超高感度検出/単一分子計測法や外場誘導による生体分子の個別・集団の量子性解明/等
- **量子でひもどく** 分子構造・量子計算技術 精緻な構造情報と量子コンピュータを利用したシミュレーションによる生命機能の共通原理の解明/超偏極NMRによる超高感度動的構造解析/高次構造トポロジーに基づく分子デザイン/計算科学による微生物ネットワーク解析と環境応答の理解/等
- **量子で変える** 生命機能への介入 細胞レーザーや細胞メーザーによる生体分析技術/量子デバイス内蔵細胞/量子レベルの介入と量子性の計測・操作による生理現象の最適化/細胞シミュレーター/等
- **量子で描く** 量子イメージング・計測技術 ダイヤモンドNVセンターや量子センサ/超偏極MRI/超偏極分子プローブ/量子もつれ光を利用した量子赤外分光による赤外・紫外域の低侵襲イメージング/等

(3)イノベーションを目指した研究開発(社会実装)

- **量子で治す** 医療分野
 - 【計測】 量子センサを応用した非侵襲的超早期診断・治療融合技術/等
 - 【再生医療】 量子技術による新たな分化誘導技術と機能評価/超早期疾患治療/等
 - 【疾患】 量子センシングによるがんの超早期発見と予防/免疫機能の制御/等
 - 【老化・脳】 老化プロセスの制御/脳機能の変容の解読と制御/等
 - 【創薬】 量子コンピュータを活用した新規分子の設計/創薬の加速/等
- **量子で考える** 情報分野 量子技術と融合したAI技術による生命現象の理解/等
- **量子で産み出す** 工業・エネルギー分野 光合成等を模倣した超省エネ型パワーデバイスと環境浄化/シンセティックセル・リビングマテリアル・リビングデバイス創製によるバイオものづくり/等
- **量子で育てる** 農産業・環境分野 突然変異制御と有用生物育種/量子イメージングによる環境モニタリングおよび農産物管理/食品安全・アレルギー物質検査/他
- **量子で拓く** 宇宙分野 宇宙環境の解明に基づく医療被曝の軽減や通信デバイスの開発
- **量子でいのちを護る** 生命倫理・安全性 量子生命技術の社会受容促進/他

5. 必要とされるグローバルな研究推進体制 [推進方針] QIH拠点の指定と中核拠点の形成、量子生命科学関連戦略目標の決定、大型国プロの推進、連携大学院設置

(1)異分野学術領域の結集

異分野融合研究の促進/分野横断的ネットワーク形成/国際会議の開催/個別専門分野の実績/デファクト集団と認知される国際評価の獲得

(2)中核拠点ネットワークの形成

量子技術イノベーション拠点/テストベッド整備とユースケースの開拓/本格的な産学連携の枠組み構築

(3)量子生命科学ネイティブの育成

大学院カリキュラムの開発/連携大学院の設置/教科書出版/幼少中高生を含む学生・教員・企業研究者への教育体制構築とリスキングの促進

(4)情報発信・交流

市民・企業・政府への夢ある未来の提示/書籍・新聞・テレビ・ラジオ・インターネットなどの媒体や市民公開講座等での発信/国際展示会等での展示活動

量子で生命を理解する、世界をしあわせにする。

量子生命科学の推進に関する提言 2025

国際量子科学技術年記念

2025 年 4 月

量子生命科学会・有識者会議

目次

1. 概要	2
2. はじめに [背景]	3
量子生命科学会の設立と量子生命科学の推進に関する提言/量子技術3戦略等による量子生命技術開発戦略・ロードマップ策定および拠点形成/世界における量子技術研究開発の進展/量子生命科学研究の最前線/本提言の目的	
3. 量子生命科学の目指すもの [目標・展望]	8
(1)「量子で生命を理解する」～基礎科学における長期目標～	
(2)「量子で世界をしあわせにする」～イノベーションにおける長期目標～	
4. 量子生命科学において重点的に推進すべき研究開発テーマ[研究課題]・・・	13
(1)量子論の観点からの生命研究テーマ(基礎的テーマ)	
1) 量子を知る ～生命現象における量子効果の役割の解明～	
2) 量子になぞらえる ～量子論の数学的枠組を利用した解析～	
(2)最新量子技術の応用による生命研究テーマ(技術開発)	
1) 量子で測る ～量子センシング技術～	
2) 量子でひもとく ～分子構造解析・量子計算技術～	
3) 量子で変える ～生命機能への介入技術～	
4) 量子で描く ～量子イメージング・計測技術～	
(3)イノベーションを目指した研究開発テーマ(社会実装)	
1) 量子で治す ～医療分野～	
2) 量子で考える ～情報分野～	
3) 量子で産み出す ～工業・エネルギー分野～	
4) 量子で育てる ～農産業・環境分野～	
5) 量子で拓く ～宇宙分野～	
6) 量子でいのちを護る ～生命倫理・安全性(ELSI/EHS)分野～	
5. 必要とされるグローバルな研究推進体制 [推進方針]	21
(1)複数の異分野学術領域の結集	
(2)本格的な産学官連携のための中核拠点ネットワークの形成	
(3)研究人材・量子生命科学ネイティブの育成	
(4)市民・企業・政府への積極的情報発信・交流	
6. 参考資料	25
【別表】量子生命科学分野における国内外の研究連携の具体例	
量子生命科学会・有識者会議メンバー	

1. 概要

量子生命科学は、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・宇宙等の様々な分野において革新的応用を目指す新たな学術領域である。そのため、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。

量子生命科学会は、量子力学の誕生 100 周年である 2025 年が国連総会によりユネスコの「国際量子科学技術年(IYQ)」と宣言されたことを記念して、生命科学がもたらす未来として、基礎科学とイノベーションの長期的目標について提言するとともに、その実現に向けた量子生命科学の推進の基本方針として、重点的に推進すべき研究開発テーマと必要とされるグローバルな研究推進体制について提言する。

2. はじめに [背景]

量子生命科学会の設立と量子生命科学の推進に関する提言

量子生命科学研究会は、2017年4月に発足し、毎年研究会を開催することで量子生命科学の研究開発をリードしてきた。さらに、量子生命科学研究会・有識者会議は、2019年3月に『量子生命科学の推進に関する提言(以下、提言2019)』^{注1)}を発表した。量子生命科学研究会は、2019年4月に一般社団法人量子生命科学会へと発展し、毎年大会(第1回東京大学、第2回京都大学、第3回東京大学、第4回神戸大学、第5回大阪大学、第6回早稲田大学、第7回東北大学)を開催し、量子生命科学の発展に大きく貢献している。

提言2019は、量子生命科学の目指すものとして、(1)「量子でヒトを理解する」～基礎科学における長期目標～、(2)「量子でヒトをしあわせにする」～イノベーションにおける長期目標～を明確化するとともに、量子生命科学において重点的に推進すべき研究開発テーマと必要とされるグローバルな研究推進体制を示した。提言2019における量子生命科学の目標・展望および研究課題は、後述の量子技術イノベーション戦略における量子生命科学の技術開発戦略・ロードマップ策定に反映されるとともに、推進方針は、後述の拠点形成、文科省・光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)の開始、人材育成、産学連携体制強化などに反映されるなど、我が国の量子生命科学領域の戦略の推進に大きく寄与している。

量子技術3戦略等による量子生命技術開発戦略・ロードマップ策定および拠点形成

内閣府・統合イノベーション戦略推進会議は、2019年にイノベーション政策強化推進のための有識者会議「量子技術イノベーション」(以下、量子技術イノベーション会議)を設置し、2020年1月に量子技術イノベーション戦略(2022年4月改訂)^{注2)}を策定した。本戦略は、主要技術領域として設定した量子コンピュータ、量子計測・センシング、量子通信・暗号、量子マテリアルに加えて、量子技術と他分野を融合・連携させた量子融合イノベーション領域として量子生命科学に関する技術開発戦略を策定するとともに、技術体系の全体像を俯瞰した中長期ロードマップとして、量子生命科学における3分野((1)生体ナノ量子センサ、(2)量子技術を用いた超高感度MRI/NMR、(3)量子論的生命現象の解明・模倣)について、2040年までのロードマップを策定した。さらに、民間からの投資を呼び込む形での大規模な産学連携研究開発プロジェクトとして、文科省・光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)量子計測・センシング領域においてQ-LEAP『量子生命技術の創製と医学・生命科学の革新』^{注3)}が、2020年8月に開始され、大学・国立研究開発法人16機関、企業10社が参画した産学連携研究開発が大きく進展している。

量子科学技術研究開発機構(QST)が2019年に設立した量子生命科学研究領域(2021年に量子生命科学研究所に改組)は、2021年に量子技術イノベーション戦略に基づいた量子技術の基礎研究から技術実証まで一貫通貫で行う量子生命拠点に指定されるとともに、2022年には量子

生命科学研究所新棟が完成し、量子生命の拠点形成が加速している。量子生命拠点は、国内外大学・研究機関・企業等と連携して、基礎研究から技術実証、オープンイノベーション、出口戦略・知財戦略、人材育成を一元的に実施するとともに、量子コンピュータ開発拠点等の 12 拠点が参画する量子技術イノベーション拠点(QIH)^{注4)}の一翼を担い、我が国の量子技術の研究開発を推進している。さらに、QIHとして、大阪大学量子情報・量子生命研究センター・量子ソフトウェア研究拠点、東京科学大学・量子センサ拠点、QST 量子技術基盤拠点、産業技術総合研究所・量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル拠点(G-QuAT)、東海国立大学機構・量子化学産業創出拠点、物質・材料研究機構(NIMS)・量子マテリアル拠点、京都大学・光量子拠点(仮)などが指定され、量子生命科学をめぐる中核拠点の形成が進展した。

量子技術による新産業創出協議会(Q-STAR)は、「量子技術イノベーション立国」の実現に貢献するとともに、日本の産業の振興と、国際競争力の強化を図るために 2021 年に設立され、Q-STAR と QIH の連携による量子技術の社会実装を目指した取り組みが進展している。QIH は、内閣府、関係省庁、Q-STAR 等と連携して、2021 年から国際会議 Quantum Innovation^{注5)}を毎年開催しており、量子技術の国際連携を推進している。

量子技術の研究開発戦略である量子技術イノベーション戦略に基づき、量子技術の進展や各国の戦略、国内外の実用化・産業化の状況変化に対応するために、2022 年 4 月に社会変革に向けた戦略(未来ビジョン、目標等)である量子未来社会ビジョン^{注2)}、2023 年 5 月に量子技術の実用化・産業化戦略である量子未来産業創出戦略^{注2)}が策定された。これら量子技術 3 戦略により、2030 年目標として、(1)国内の量子技術の利用者を 1,000 万人、(2)量子技術による生産額を 50 兆円規模、(3)未来市場を切り拓く量子ユニコーンベンチャー企業の創出が定められ、量子生命技術を含めた量子技術の利活用を促進するテストベッド整備と産学官利活用拡大、ユースケース開拓が推進された。さらに、量子技術 3 戦略を強化し補完するために、2024 年 4 月に量子産業の創出・発展に向けた推進方策^{注2)}が策定され、量子技術分野の国際連携のさらなる発展に加え、QST が Q-STAR のアカデミア会員となり Q-STAR 量子 MDS(マテリアル・デバイス・センシング)部会における産学連携体制強化、QST と大学との量子生命連携講座・コース等設置による人材育成体制強化が進んだ。

文科省 Q-LEAP に加えて、2023 年から、内閣府・第 3 期 SIP『先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進』により量子生命科学の社会実装を目指した研究開発が推進されるとともに、文科省・2023 年度戦略目標『量子フロンティア開拓のための共創型研究』、文科省・2024 年度戦略目標『「生命力」を計る』、文科省・2025 年度戦略目標『非連続な技術革新を目指す量子マテリアル研究』が設定され、量子生命科学の研究が、CREST およびさががけにより推進されている。

政府・量子技術 3 戦略に加えて、2025 年に決定された政府・健康・医療戦略および 2024 年に決定されたがん研究 10 か年戦略(第 5 次)においても、医薬品・医療機器の研究開発、がんの研

究・開発等において、量子技術、量子センサの応用展開の重要性が指摘されている。

世界における量子技術研究開発の進展

量子技術の研究開発の急速な進展にともない、2018年には米国で、2021年には欧州で、産学官のコンソーシアムが発足した。我が国でも2021年に前述のQ-STARが発足し、世界における産業界からの大幅な投資拡大が進んでいる。さらに、先端分野である量子技術の進展は著しく、異分野融合も進展しており、2023年には、前述の量子未来産業創出戦略と同様に、世界各国(米国、EU、NATO、イギリス、ドイツ、デンマーク、フィンランド、アイルランド、カナダ、オーストラリア、インド、韓国、中国)が、国家戦略を策定し^{注2)}、量子技術に対する国際的な関心は益々向上している。各国の国家戦略においても、主要な技術領域として、我が国の量子技術3戦略と同様に、量子コンピュータ、量子計測・センシング、量子通信・暗号を設定しており、これらの分野における、日米、日EU、日加などの国際連携が急速に進展している。量子技術の急速な進展と国際連携の拡大を背景に、量子力学が誕生したとされる1925年から100年の節目を迎える2025年は、国際量子科学技術年として国連総会で決定された。

量子技術と生命科学・バイオ分野の融合領域では、当初、量子生物学(Quantum Biology)を中心に研究が進んできたが、我が国が世界に先駆けて開拓している量子生命科学分野が、世界においても研究の最先端になってきている。生体ナノ量子センサの研究開発と生物応用研究^{注6)}においては、ドイツ・米国およびオーストラリアが先行して行ってきた。また、近年になってオランダや中国のグループもこの分野で一定の成果を上げており、スウェーデンにおいては、Centre for Quantum Life Scienceが設置されている。また、量子技術を用いた超高感度MRI/NMRの研究開発分野^{注7)}においては、デンマーク工科大学に低温超偏極装置の開発拠点、フランス・リヨン大学等に低温超偏極の前臨床研究拠点、カリフォルニア大学やNIH等に低温超偏極の臨床応用研究の先導的研究グループがある。EU Quantum Flagshipで2018年始動したMetaboliQsプロジェクトはNVセンターを用いた室温超偏極代謝イメージングを目指し、2019年10月にはデンマーク工科大とウルム大学による室温超偏極の共同研究プロジェクトが開始されている。量子論的生命現象の解明・模倣の研究分野^{注8)}においては、オックスフォード大学、カリフォルニア大学に磁気受容の先導的研究、ローレンスバークレー研究所、シカゴ大学、トロント大学等に光合成の先導的研究が進展しているのに加え、デンマーク・コペンハーゲン大学にQuantum for Life Centreが、韓国・成均館大学にInstitute for Quantum Biophysicsが設置されている。

国際会議としては、2009年から毎年、Quantum Effects in Biological Systems Workshops (QuEBS)が開催されているのに加え、2010年には第22回化学ソルベール会議が“Quantum Effects in Chemistry and Biology”と題して開催された。量子生命科学分野における研究の進展により、イギリス・サリー大学、米国・カリフォルニア大学が中心となり、2022年からオンライン講演

会である Big Quantum Biology Meeting を毎週開催しており、2023 年から隔年でゴードンコンファレンス・Quantum Biology^{注9)}が開始された。次回のゴードンコンファレンスは、2027 年に開催予定である。また、2021 年から毎年開催されている前述の国際会議 Quantum Innovation においては、量子生命科学のセッションが毎回開催されている。

量子生命科学研究の最前線

提言 2019 を発表して以降、量子生命科学における 3 分野((1)生体ナノ量子センサ、(2)量子技術を用いた超高感度 MRI/NMR、(3)量子論的生命現象の解明・模倣)において、前述の通り、国際的な研究が大きく発展している。我が国においても、前述の文科省 Q-LEAP、内閣府第 3 期 SIP、JST CREST 等の研究によって、量子生命科学の研究開発が急速に進展してきた。^{注10)}

生体ナノ量子センサの研究開発においては、世界的にも最高精度の温度計測を実現している。さらに、磁場計測、pH 計測、ラジカル計測等の高精度化と多項目計測等を可能とする生体ナノ量子センサ開発と新規 ODMR (光検出磁気共鳴)顕微鏡開発に成功し、生きた小動物の脳神経細胞内の温度およびラジカル計測を実現している。また、ODMR 顕微鏡は、テストベッドとして整備され、大学・企業等の研究者が利活用するとともに、新規ユースケース開拓に活用されている。

量子技術を用いた超高感度 MRI/NMR の研究開発においては、室温超偏極技術および長寿命低温超偏極センサ分子技術で先進的研究成果をあげて当該分野を世界的に牽引している。さらに、超高感度 MRI/NMR のテストベッドを整備し、前臨床研究拠点を形成することで、超偏極 MRI/NMR の新規ユースケースの開拓を推進している。

量子論的生命現象の解明・模倣の研究開発においては、光合成、磁気受容、嗅覚や遺伝子変異等における量子効果の研究について、人工タンパク質調製、量子コヒーレンス計測技術開発、量子化学計算等の連携により先進的研究成果をあげている。また、中性子を活用したタンパク質等の超精密構造解析技術では世界を先導しており、中性子構造解析により、生命現象を模倣した人工タンパク質の研究が進展している。

本提言の目的

量子生命科学研究会・有識者会議が、提言 2019 を発表した後に、量子技術 3 戦略および量子産業の創出・発展に向けた推進方策により、量子生命科学に関する技術開発戦略および中長期ロードマップが策定された。さらに、QST 量子生命科学研究所が量子生命拠点に指定されるとともに、大規模な産学連携研究開発プロジェクトとして、文科省・Q-LEAP『量子生命技術の創製と医学・生命科学の革新』、第 3 期 SIP、CREST・さきがけ「量子フロンティア」および「生命力」などが開始され、産学官の連携により、量子生命科学の研究開発は大きく発展してきた。

量子生命科学会は、2019 年以降の量子生命科学研究の大きな発展に鑑み、国際量子科学技

術年にあたる 2025 年に、量子生命科学の推進に関する提言 2025 をとりまとめることで、量子生命科学の今後のより一層の発展方向を展望することとした。

以下の章では、量子生命科学の長期的目標と展望、そしてこれを実現するために重点的に推進すべき研究開発テーマについて取り上げる。さらに、その推進に必要な、幅広い学術領域の連携や国際動向も踏まえた産学官の望ましい協働体制についても述べる。

注¹⁾量子生命科学の推進に関する提言: <https://quliss.org/strategy>

注²⁾量子技術イノベーション戦略、量子未来社会ビジョン、量子未来産業創出戦略、量子産業の創出・発展に向けた推進方策: <https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshigijutsu>

注³⁾文科省・Q-LEAP 量子生命: <https://www.qst.go.jp/site/q-leap/>

注⁴⁾量子技術イノベーション拠点(QIH): <https://qih.riken.jp/>

注⁵⁾ Quantum Innovation: <https://quantum-innovation.riken.jp/>

注⁶⁾生体ナノ量子センサ総説(*Adv. Sci.*, 2022, 9, 2200059; *Nature Rev. Phys.*, 2023, 5, 157; *APL Mat.*, 2023, 11, 090603; *Acc. Chem. Res.*, 2023, 56, 95)

注⁷⁾ 超偏極 MRI/NMR 総説(*Chem. Rev.* 2023, 123, 1417; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2021, 60, 14779)

注⁸⁾Quantum Biology 総説(*Sci. Adv.*, 2020, 6, eaaz4888)

注⁹⁾Gordon Research Conference, Quantum Biology: <https://www.grc.org/quantum-biology-conference/2025/>

注¹⁰⁾量子生命科学総説(週刊 医学のあゆみ, 2024, 290 巻 4 号, *Chem. Soc. Rev.* 2025, doi.org/10.1039/D4CS00650J; 現代化学, 2025, No. 646, 42-43; *ACS Nano.* 2025.)

3. 量子生命科学の目指すもの [目標・展望]

「量子で生命を理解する、世界をしあわせにする。」…本提言のタイトルに掲げたキャッチフレーズは、量子生命科学こそがいつの日か「生命の根本原理の理解と自然との調和、幸福の実現」を人類にもたらず、という考えを表現したものである。以下、本章では長期的スパンに立ち、量子生命科学の学術的な目標と展望について述べる。

(1)「量子で生命を理解する」～基礎科学における長期目標～

生命現象は、光子・電子・原子などのマイクロなレベルから、分子、細胞、組織、器官、個体、生態といったレベルへと至る階層構造を有している。量子生命科学を象徴するキーワードは、「生命の階層性の革新的理解」である。すなわち、生命現象を階層ごとの分野別に研究するだけでは生命の真の理解に至らないとし、こうした階層構造を断絶なく包含した仕組みの中にこそ生命の本質があると考え、なおかつその最下層を量子レベルにまで拡張するところに量子生命科学の特徴的な視点がある。例えば、「生体分子が熱や光、放射線、化学物質等からエネルギーを吸収する」、「突然変異が起こる」、「酵素反応やシグナル伝達が起こる」、「細胞が分化・発生し、増殖する」、「新しい生物種が生まれる(進化)」、という階層も空間・時間スケールも全く異なる生命現象に対し、これらはすべて「生体分子内の量子力学的状態の変化」を出発点として、生命現象が顕現するというストーリーの各一場面であるから、これらの現象と各階層間に横たわる未解明の連絡性を物理学の言葉で統合的に説明しよう、と考えるのである。実際、近年、量子レベルの原理の影響が階層を飛び越えてマクロの生命現象に現れるという知見が、光合成(葉緑体における量子コヒーレンスが極めて高いエネルギー輸送効率を実現している)や鳥の渡り(網膜における量子コヒーレンスや量子もつれが磁気受容を可能にしている)、突然変異(DNA内で量子トンネル効果があり遺伝情報が変化する)、酵素反応(反応速度定数に量子力学を考慮した補正を入れるとマクロな現象に影響を与える)等において、得られ始めている。また、ヒトの認知は古典的モデルよりも量子論的モデルによってよりよく説明できるとの研究も進んでいる。すなわち、分子生物学はDNA分子内の情報を元にしたセントラルドグマによって生命現象の説明に成功したが、量子生命科学は生体分子内の量子現象を元にした生命現象の理解、量子論の枠組みによる生命現象の理解をめざす。

このような視点を持つに至る技術的背景には、研究ツールとしての新しい量子技術の登場、すなわち、極短パルスレーザーや放射光、中性子ビーム等に基づく技術が量子レベルの計測実験を可能にし、また、量子センサや超偏極を用いた量子計測・イメージング技術が細胞・器官・個体レベルにおける多様な低侵襲的観測を可能にしつつあること、さらには、量子コンピュータを用い

たシミュレーションが実現に向かっていることが挙げられる。したがって量子生命科学は、量子生物学(光合成や渡り鳥の磁気受容など、古典物理学の範疇を超えた量子効果によって生命現象を説明する)や構造生物学(特に、タンパク質などの生体分子の動的構造と機能を精緻な計測と量子化学計算によって推定するもの)、そして温度生物学・光生物学・放射線生物学・ケミカルバイオロジー(熱、光、放射線、電磁場等の量子エネルギーや生体分子の原子レベルの現象がより高次の生命現象に与える影響を探究する)、数理生物学・システムズバイオロジー(生命現象を数学的に表現することで、高次の現象の成り立ちを理解する)、認知神経科学・脳科学(神経細胞の電気的活動を元にヒトの意識や精神疾患の成り立ちを理解する)などを自らの中に取り込むと同時に、それら極微の階層における現象が上位の階層の現象にどのように寄与しているのか、そしてそのような寄与がどれだけ普遍的であるかを、量子技術を研究ツールとして追究することを通して、生命科学全体の「横串」的学術領域となることを目指す。

具体的には、量子生命科学は以下の謎に挑戦していく。

- 生命における量子効果の普遍的役割の探究

光合成、磁気受容はもちろんのこと、これまで古典的に理解できると思われていた突然変異、酵素反応、シグナル伝達などの現象においても、極微の階層における量子効果がより高次の生命現象、さらには個体の階層にまで影響を及ぼす可能性の探究。たとえば、以下のような研究。

- マルチスケール生物学

異なる長さスケールの科学を定性的・定量的に結び付けることによる、生体分子内の量子現象の多様性、1分子の多様性、1細胞の多様性、1個体の多様性の関係性、階層間の情報交換の解明。

- 温度生物学、光生物学、放射線生物学、ケミカルバイオロジー

いかにして、熱、光、放射線、電磁場や生体分子の電子状態や振動等による量子レベルのエネルギー変動が分子レベルの現象(突然変異、酵素反応、シグナル伝達等)につながり、細胞レベルを経て、個体や個体群レベルの生命現象及び病態発現につながるか。

- 認知神経科学

不確定性原理を人間の認知に適用し、古典論で捉えられない認知の複雑性と柔軟性を解明し、これにより、認知と脳の精緻なモデル構築や高度なニューラルネットの実装を目指す。さらに、意識が量子観測の役割を担うと仮定することで、量子力学の新たな発展と、意識の数学的記述の道を模索し、量子論を活かした意識や認知の理解を、人間の精神的幸福へ結びつける。

これらはさらに、次のような基礎研究へとつながっていく。

- 量子効果に基づく高次の階層の生命現象の解明

- 生命系における、「進化と熱力学法則」、「秩序化と無秩序化」の対概念の止揚・統合
[例]突然変異はどのようにして起きるのか。最初の生命はどのようにして生まれたか。進化の実相はいかなるものか。極限環境や地球外の環境で生命はどのように存続できるか、あるいは新たに誕生し進化しえるか。
- 生命の分子機構の完全な予測と再構築
[例]細胞内において、エネルギーはどのように発生し、あるいは受容され、伝わるのか。DNA やタンパク質や薬剤の分子はどのように働いているのか。タンパク質フォールディング、シグナル伝達ネットワーク等の生体機能を制御・改良し、人工知能等によって予測できるか。高次の生命機能を量子レベルの現象を考慮して人工的に合成できるか。
- 分子と細胞の構造と機能
[例]どのようにして細胞内の各小器官は構築され、その形態および効率的な機能が調和的に維持されるのか。不均質な環境下でどのようにして細胞がその機能実現のために必要な分子や微粒子(細胞外小胞など)を受容し、細胞間のコミュニケーションを実現しているのか。生物種間で保存される分子構造と活性の相関の解明。革新的な細胞シミュレータ・ヒューマンデジタルツインの構築。実在の生体分子を前提とせず生命システムに必須な物理・化学的条件を考える「普遍的生物学」の探究。
- 発生と老化、疾病と障害のメカニズムの理解
[例]様々な身体及び精神の機能、また、その破綻や環境との不調和としての様々な疾病・障害(がんや認知症、発達障害、老化、未病を含む)は、どのようにして発生・進行するのか。細胞はどのようにして分化し機能するのか。新規の感染症はどのように発生し、伝わるのか。それらをどのようにコントロールできるか。

(2)「量子で世界をしあわせにする」～イノベーションにおける長期目標～

量子生命科学において研究ツールとして利用される量子技術や、量子生命科学により得られた基礎科学における知見(生命現象の階層性の物理法則による統合的理解)を生命の観測と制御・介入、生命現象の模倣に応用すれば、社会に極めて大きなインパクトをもたらし、人類をしあわせにする技術を得ることが期待できる。量子力学の知見に基づいて量子技術が発展してきたように、量子生命科学の知見にインスパイアされた量子生命工学、量子医学、量子農学等

が実現できるはずである。

例えば、革新的な量子センサや超偏極技術の開発は、がん組織の性質の計測により従来の腫瘍マーカーに代わる全く新しい超早期診断と治療効果の即時判定をもたらし、「手遅れのない医療」を実現させ、健康寿命の向上に資するであろう。量子生命科学で得られた生体分子の構造・機能情報も、新たな機能分子デザインの実現を通じて、医学・創薬に革新をもたらすことが期待できる。2018年のノーベル物理学賞となった光ピンセットや、21世紀に発展した多数の細胞や生体物質の運動を迅速かつ大面積に制御できる光濃縮のような量子力学的原理を利用した外場による生命機能の制御、2018年、2023年にノーベル物理学賞を受賞した超短パルス光による測定技術、2023年にノーベル化学賞となった量子ドット技術、2024年にノーベル化学賞となったAIによるタンパク質構造予測・デザインも、量子センサ・量子計測技術・量子化学計算との連携により、医療、農産業、工業の新たな道を拓く可能性がある。

また、鳥の羽の機能の流体力学的解明が航空機開発に利用されてきたように、生物の模倣は今後も多くの技術の発展につながるであろう。イヌや回遊魚、渡り鳥といった動物の持つ驚異的な嗅覚や磁気受容等の仕組みを量子科学的に解明し、それらを新しいセンシング技術の開発に応用すれば、医療・食品安全・環境保全・対テロリズム等の幅広い分野においてイノベーションを多く生み出すであろう。一方、光合成や呼吸のような超高効率のエネルギー変換システムの理解は、太陽光エネルギーの高効率利用や化学エネルギーへの変換、パワーデバイス開発への応用等により、SDGsに掲げられる環境・エネルギー問題を解決する可能性がある。さらには、量子論の数学的枠組を導入した脳科学が脳における意識の発現や認知のプロセスを解明し、その成果を量子コンピュータの高度化に応用できれば、人間社会における「知」のあり方そのものに歴史的変革をもたらすであろう。

量子生命科学は、次のような未来社会・イノベーションを実現する。

- 量子による生産性革命と地球環境との調和
[例]光合成やその他の生命の量子効果を模倣した高効率でカーボンニュートラルなエネルギーの輸送・生産。量子技術の農業・畜産への応用による食料の安定的生産。脳、意識、その他の生命の情報処理の働きをなぞらえた量子コンピュータ・量子ソフトウェアによるスマート化・省電力化の加速。
- 量子による健康寿命の延伸
[例]量子計測技術、量子イメージング、量子トモグラフィによる検査技術。がんや認知症、老化、新興感染症を含む、身体的・精神的・社会的な疾病・障害及び未病状態の予防、診断、治療。量子技術を利用して品質保証した細胞や、量子技術を内蔵した細胞による病気の治療。量子レベルの分子構造・分子機能理解に立脚した創薬。
- 量子による安全安心の確保

[例]光合成や窒素固定に倣った環境浄化システム。磁気受容や嗅覚など動物の驚異的感覚を模倣した危険物や病原体の探知技術。量子技術による食品検査や環境モニタリング。量子生命科学応用技術の倫理的課題の解決と社会受容。

また、これらを実現するための量子ネイティブ人材を育成することも、量子技術イノベーションを将来にわたって持続させるために重要である。

4. 量子生命科学において重点的に推進すべき研究開発テーマ

[研究課題]

量子生命科学において挑戦すべき課題は極めて幅広い。最先端の量子技術を利用した、時間／空間分解能の極めて高い、あるいは侵襲性の極めて低い計測・観察手法の開発、その応用による生体分子・細胞・組織の構造と機能の解明、量子力学や量子論の数学的枠組に基づいた生命現象の理解、得られた情報を元にした先端的な人工知能や量子コンピュータ等も活用した計算科学による生命機能の再構築と模倣、さらにこれらの知見と技術の産業利用(エンジニアリング)への展開などが考えられる。こうした成果が将来、超高齢化社会や自然破壊等の諸問題に解決策をもたらすことが期待できる。

量子生命科学において重点的に推進すべきと考えられる研究開発テーマの代表例を以下に挙げる。

(1) 量子論の観点からの生命研究テーマ(基礎的テーマ)

生命を量子論の観点から理解しようと試みる、様々な基礎科学的研究である。

1) 量子を知る ～生命現象における量子効果の役割の解明～

生物のマクロな営みの根底に量子力学的効果に依存したメカニズムが存在するような生命現象を探究する、いわゆる量子生物学の研究は、「生命が量子力学の原理を積極的に利用している」という仮説を実証しようとするものであり、具体的には以下のようなものが挙げられる。これらの研究には、(2)で述べる空間分解能の高い解析技術等が必要とされる。

- 光合成や呼吸に関わる分子やタンパク質超複合体によるエネルギー輸送・電子伝達系における量子コヒーレンスの寄与、環境適応性等の生命現象との関連の解析
- 酵素反応、リガンド・レセプターの相互作用、シグナル伝達における量子トンネリングの寄与の解析
- 嗅覚、視覚、磁気を受容等における量子もつれや量子コヒーレンスの寄与の解析と量子情報から分子情報への変換に関する理解
- DNA の複製・転写・変異・修復過程の電荷(電子・ホール・プロトン)、スピンやエネルギー(仮想光子・励起状態)移動における電子物性の役割の解明
- 細胞内メゾ空間(ナノとバルクの間、10～100 nm スケールの世界)の現象と物理化学環

境の包括的理解(ミクロとマクロの関係性の解明)

2) 量子になぞらえる ～量子論の数学的枠組を利用した解析～

量子論の数学的枠組みと同様のモデルを用いて、生命の営みを記述し理解しようと試みる研究テーマには、以下のようなものがある。

- 量子確率論・量子情報科学と脳機能計測の融合による意識システムの解明、認知症・精神神経疾患、痛み・味・匂いの認知などの情報伝達の原理解明
- 細胞や神経レベルの情報伝達とマクロな認知現象との関係性を、量子論の数学的枠組みで解明し理解する
- Ca^{2+} 振動などにみられる生体における波動・周期的現象が生体機能を制御する仕組みの理解

(2)最新量子技術の応用による生命研究テーマ(技術開発)

第二次量子革命がもたらす量子技術は、量子レベルの生体分子計測や、細胞～個体レベルの様々な革新的生命現象観測を可能にするであろう。

1) 量子で測る ～量子センシング技術～

量子センサによる計測技術や量子もつれを利用した光量子技術は、分子、細胞、個体レベルの生体計測への応用が大いに期待されており、以下のような研究テーマが挙げられる。

- ダイヤモンド NV センターを利用した量子センサの多様な生命科学分野への応用
- 量子計測技術を支える材料開発、ダイヤモンド NV センター以外の量子センサ(例:近赤外領域の発光波長など多色化、複数のセンサの同時使用が可能な多色発光、NV センターを超える輝度やスピンコヒーレンス時間、光検出以外の磁気共鳴への適用性、ペンタセンなどの分子性量子センサなど)の開発
- ダイヤモンド NV センター等を用いたナノ量子センサによる、細胞内微小環境の幅広い物理パラメータ(温度、磁場、電場、圧力、粘性・分子動態、pH、ラジカル等)の可視化技術の確立
- 単一スピンレベルでの超高感度検出技術の生命計測への応用
- 量子センサを用いたオルガノイドや動物生体内、さらにはヒト体内といった多成分・多階層で複雑な環境における物理・化学パラメータの非侵襲かつ高感度な計測技術の確立
- 微生物の動態をリアルタイムに追跡・計測可能な量子センシング技術の開発
- 量子もつれを利用した光量子技術による、古典理論の限界を超えた飛躍的に高い感度

や高い信号雑音比を持つ、量子センシング技術の開発

- 疾患の早期・未病段階に体液中へわずかに現れる微量バイオマーカーを高感度で検出可能な量子センサ技術の確立
- バイオマーカーとなる生体分子(DNA や RNA などの核酸、タンパク質など)や微粒子(細胞外小胞など)と選択的結合をする分子で修飾したナノ量子センサ(量子ドット、ナノダイヤモンド、金属ナノ粒子など)の結合や物理化学的手段(光・電場・磁場・流体効果などの外場)による場所選択的な誘導・濃縮および制御・計測の高効率化(例として光濃縮による生化学反応の光誘導加速など)、異種粒子混合による光圧・光熱の増強効果を介した PCR フリーな超高感度核酸計測を利用した一塩基変異の計測と二重鎖形成における量子性の解明(量子トンネル効果、量子もつれ)、抗原抗体反応の結合定数・解離定数の光制御と免疫検査の革新
- 特定の化学構造を目印として、分子上あるいは分子間の距離を定量的に計測する FRET (蛍光共鳴エネルギー移動)技術の確立と、DNA 損傷や分子間相互作用の解析等への応用、単一分子計測法による生体分子の量子性解明、物質中の量子もつれの定量化を可能とする密度行列分光法など

2) 量子でひもとく ～分子構造解析・量子計算技術～

従来よりも精緻で動的な分子構造解析と量子シミュレーションにより、生体分子の機能を量子レベルから理解することを目指す研究であり、以下のようなテーマが挙げられる。

- 量子コンピュータと量子アルゴリズムの利用により、生命体の進化上の最適解を見出す
- 精緻な構造情報と量子コンピュータを利用したシミュレーション技術の確立による、多様な生命機能に横たわる共通原理の解明
- 複数の量子ビームの相補利用により得られる精緻な生体分子構造と、その動的な理解を可能にする解析技術の開発
- 生体内環境下(37°C、高塩濃度、高タンパク質濃度溶液、分子夾雑系)におけるタンパク質の構造解析手法の確立
- 超偏極 NMR 分光の開発と、それによるタンパク質の超高感度・高速な動的構造解析手法の確立
- 認知症など、生体の老化に伴うタンパク質の構造と機能の変化の解明
- 従来の一次構造のホモロジー比較に代わり高次構造トポロジー(3D ホモロジー)で比較することによる、生物種間で保存される真に重要な分子構造と活性の相関の解明と新たな機能分子デザインの実現
- AI を中心とした計算科学を用いた生態系の理解に資する微生物ネットワークの解析とそ

れによる微生物の環境応答・適応メカニズムの理解ならびに最適化

3) 量子で変える ～生命機能への介入技術～

量子デバイスや量子ビームによって細胞、組織を操作して生命原理の理解につなげたり、量子技術や生命の量子性に基づいて細胞に新たな機能を付与したりしようとする研究であり、次のようなテーマが挙げられる。

- マイクロイオンビームによって細胞内の任意の限局部位に任意のエネルギーを付与する技術を用いた、細胞応答システムの解析
- 細胞レーザーや細胞メーザーなどによる生体分析技術の開発
- 量子デバイスを内蔵した細胞の作製に向けた要素技術開発。細胞が捉えた外部情報の量子デバイスへの入力機構や、量子デバイスによって細胞機能を制御する出力機構などの、基本原理となる技術の開発
- 量子デバイスを細胞に組み込んだ、物質生産のための「スマート細胞」や医療のための「デザイナー細胞」、それらから作った臓器、そして完全人工合成の「シンセティックセル」、「リビングマテリアル」、「リビングデバイス」の開発。それを利用した疾病の克服や人体機能の強化。また、地球にやさしいバイオものづくり技術の開発。
- 遺伝、免疫、代謝などの生理現象への物理化学的手段(光・電場・磁場・流体効果など)による分子レベル・量子レベルの介入と、量子コヒーレンスや量子トンネル効果などの量子性の計測・操作を組み合わせ、分子から生体まで制御・最適化する新規の方法論の開発
- 上記の新規方法論による生体内の細胞の分化・増殖・代謝(老化・がん等)の人為的・自由自在な制御法の開発
- 量子ビットから構成される高密度集積回路による細胞小器官の情報伝達の再現
- 細胞シミュレーター、ヒューマンデジタルツインを利用した介入技術

4) 量子で描く ～量子イメージング・計測技術～

量子もつれ光、高度化した MRI、超短パルスレーザー等を用いて細胞、組織、個体の低侵襲・高空間／時間分解能イメージングを実現し、生命理解につなげる研究であり、以下のような研究テーマが挙げられる。

- ダイヤモンド NV センターや分子性量子ナノセンサなどを用いたイメージング
- 量子状態制御と高度ナノ粒子技術によるナノセンサ MRI 分子プローブおよびナノ光センサの開発と応用、超高速 MRS 技術の開発
- 従来の十万倍以上の感度を持つ「超偏極 MRI」の開発。ペンタセンやラジカルペア、ダイヤモンド NV センターなどの電子スピンを活用した「室温超偏極」用分子プローブの実現。
- 高度化された MRI や多光子顕微鏡等による低侵襲的生体イメージング

- 量子もつれを利用した古典限界を超えた超偏極用分子プローブの開発
- 量子もつれ光を利用した、従来よりも高い分解能を持つ光トモグラフィ技術の実現(組織内や、培養組織片内部での細胞形状の観察・スクリーニングなど)
- 量子もつれ光を利用した量子赤外分光により、可視域用の高感度・高分解能イメージセンサを用いた赤外・紫外域の低侵襲イメージングの実現
- FRET を利用した生体分子のイメージングと定量的分子計測
- 超短パルスレーザーを利用した高時間分解能ポンプ・プローブ細胞分析、高時間分解能細胞イメージング

(3) イノベーションを目指した研究開発テーマ(社会実装)

量子論や量子技術に基づいた基礎科学で得られる知見を、生命の観測、介入、模倣等に応用することで、社会的インパクトの大きなイノベーションを創成できるであろう。

1) 量子で治す ～医療分野～

医療は、生命科学の進展により直接的なイノベーションが期待できる分野である。以下のような研究テーマが挙げられる。

- 分子・細胞計測技術の開発
 - ナノ量子センサによる超微量多目的細胞検査技術
 - 微量バイオマーカーを高感度で検出可能な量子センサ技術を応用した量子リキッドバイオプシーによる疾患診断の社会実装
 - 量子イメージングによる生体内小分子の動態可視化 (*in situ* quantum imaging)
 - 生体外および生体内における大規模 1 細胞解析による細胞多様性の把握と制御
 - 量子センサ技術や超偏極技術を駆使したと各種バイオプシーを含む生体試料(細胞、細胞外小胞、微生物、核酸、タンパク質、糖鎖など)の外場による制御・計測技術、それを応用した診断・治療技術の確立
- メゾ～生体計測技術の開発
 - 量子イメージングによる非侵襲・超高画質診断技術、内視鏡やカテーテルと量子イメージングを組み合わせた診断・治療融合技術
 - 量子センサ(量子ドット、ナノダイヤモンド、金属ナノ粒子など)と薬剤の生体内での場所選択的誘導技術の開発(がん・脳・心血管・再生医療分野における薬効評価・将来予測・予防技術)
 - 細胞・組織・個体における微小環境の変化を量子イメージング・計測技術で可視化

することによる、未病時の超早期診断や病態解明技術の開発

- 再生医療への応用
 - ナノ量子センサを用いた iPS 細胞や体性幹細胞等の分化過程の解明、すなわち新たな分化誘導技術の開発
 - 量子イメージングによる、iPS 細胞や体性幹細胞等から誘導した分化細胞・オルガノイド・組織の機能・安全性評価
 - 量子デバイスを内蔵したスマート細胞等による超早期＝未病状態を含めた疾患治療
- 発がんメカニズムやがんの本態の解明によるがん予防、がん医療の量子生命技術による加速
 - がんの超早期発見や変異した体細胞の発見のための量子センシング、量子イメージング等による診断技術、それらの病変・細胞の除去によるがん予防技術
 - がん細胞の放射線・薬剤・免疫応答等の解明によるがん治療の効率化や革新的ながん治療法の開発
- 免疫細胞の活性化・不活性化機序の量子力学や量子センサ等を用いた解明と応用
 - がんや感染症、アレルギーや自己免疫疾患等の次世代治療法の開発
- 老化のメカニズムの解明と老化プロセスの制御による多様なアンチエイジングおよびリバーサエイジング技術の開発
- 超高画質脳イメージング技術開発による精神疾患や薬物依存等における脳機能の変容に関する意識や思考の解読や制御
- 循環器疾患の超早期診断および治療の実現
 - 量子もつれ光を利用した、細胞レベルでの超高分解能光トモグラフィ観察による、動脈硬化の超早期診断
- 分子設計の効率化と創薬全般の加速
 - 量子コンピュータを活用した生体分子構造とその分子間相互作用の相関の量子化学的解明および、それに基づいた指向性進化(進化を模した方法による分子の機能向上法)による自由自在な新規分子の生成

2) 量子で考える ～情報分野～

生命における情報処理を模倣した新しい情報技術の開発や、量子論・量子技術に基づく新しい生命科学研究から得られる従来と質の異なる大規模データの解析などの需要に伴って、以下のような研究テーマが考えられる。

- 量子確率論に基づいた、脳と意識のしくみに倣った量子コンピュータ設計の高度化

- 脳や意識の情報の量子ライクネットワークによる表現
- 生体データに量子技術と融合したAI技術を適用することで様々な生命現象の規則性を認識、背後にあるメカニズムの理解を深化させることができる情報解析技術の発展量子技術を利用した、既存のAI技術では困難な生体スモールデータに基づく生体現象の理解(多くのサンプル数または症例数確保が困難な問題の検討に要する)、ないし複数モダリティ・時間情報を含んだデータに基づく予測技術の大幅な向上(データ同化など)。
- 量子計測・外場誘導によりハイスループット化されたバイオ分析技術による研究現場とビッグデータの双方向通信システムの確立によるバイオインフラの拡充

3) 量子で産み出す ～工業・エネルギー分野～

生命の持つ高効率のシステムについて量子論の観点から得られた知見を応用し、人工的なエネルギー技術、センサ技術を開発する以下のようなテーマがある。

- 高効率の生物のエネルギー伝達系(光合成、呼吸)に倣った超省エネ型パワーデバイス(微生物燃料電池、微生物太陽電池など)および生分解による環境浄化システムの開発および大規模化を目指した研究開発
- 光合成の原理を応用した人工光合成システムの開発により、太陽光から水素などのエネルギー物質を合成し、カーボンニュートラル社会の実現
- 生物の嗅覚や磁気受容に倣ったセンサの開発と安全・運輸分野等への応用
- 生命現象の量子論的解析、AI活用による人工酵素設計・合成と量子デバイスを組み込んだ「シンセティックセル」、「リビングマテリアル」、「リビングデバイス」創製によるバイオものづくり技術の開発と脱化石資源化・再生可能原料転換

4) 量子で育てる ～農産業・環境分野～

光と生命の関係性や突然変異について、量子論の観点から得られる知見を応用した以下のような研究テーマが挙げられる。

- 突然変異メカニズムの解明による、人為制御された(指向性の高い)突然変異誘発技術の確立と有用生物育種の加速
- 光量子への応答性の最適化を図った生物資源の作成による生産性の向上
- 量子イメージングによる植物体内元素動態の解明や植物-土壤微生物間の分子クロストークの解明による、農業生産性・不良環境耐性・食品安全性の向上
- 量子技術による産地トレーサビリティ技術(ブランド偽装防止技術)の開発
- 光量子技術やスピン量子センサ技術、超偏極技術を利用した、超高感度での環境物質計測やそのオンサイト化による、水や大気等の環境モニタリング及び農産物等の管理
- 量子センサと生体試料(細胞、細胞外小胞、微生物、核酸、タンパク質、糖鎖など)の外場

による制御・計測、食品検査技術(産地トレーサビリティ、微生物検査、アレルギー検査)のハイスループット化

5) 量子で拓く ～宇宙分野～

宇宙環境と生命の関係についての量子レベルからの理解は、以下のような研究につながる。

- 宇宙放射線、微小重力、閉鎖環境等の生体影響の量子レベルでの解明による宇宙開発への人間の適応
- 宇宙放射線の生体影響の量子レベルでの解明を通じた X 線・CT 診断での被曝影響軽減
- 太陽フレアの影響を軽減できる生体模倣電子通信デバイスの開発と実装、人工光合成による酸素供給
- 量子レベルの生物機能の理解に基づいた、宇宙環境に適応もしくは宇宙環境において最大の生産性を発揮する生物資源の開発

6) 量子でいのちを護る ～生命倫理・安全性(ELSI/EHS)分野～

上述のイノベーションが社会にもたらすインパクトを考慮し、倫理・安全分野の研究を進める必要があり、以下のようなテーマが挙げられる。

- 量子生命技術の環境・健康・安全面(EHS)および倫理的・法的・社会的問題(ELSI)検討による量子生命技術および量子生命科学の社会受容促進
- 量子生命技術からもたらされる利益の社会還元と量子生命技術とその安全性に関する国際標準化
- 量子生命科学と量子生命技術が拓く未来を広く国民と共有することで、正しく量子生命科学と量子生命技術を理解し教育にも活かせる仕組みづくり

5. 必要とされるグローバルな研究推進体制 [推進方針]

量子生命科学は「生命科学」と「量子技術」の両輪からなり、また時代の潮流の中で相互のニーズが合致したことによって成立するといえる。したがって、量子生命科学の推進においては、量子技術の開発の初期段階から、物理・化学・工学・情報分野の専門家だけでなく医学・生命科学分野の専門家が協働し、シーズ・プッシュ型になりがちな量子技術の開発にニーズ・プル型の観点を入れ込むことが自然かつ肝要である。つまり、複数の異分野学術領域の結集こそが量子生命科学の推進の鍵であるが、その実現のためには、中核研究拠点ネットワークの形成、学会・国際会議等の積極的な開催、「量子も生命も専門とする研究人材」の育成、市民・企業・政府への積極的な情報発信と交流が必須である。

提言 2019 が発表された直後の 2019 年 4 月に一般社団法人量子生命科学会が発足し、毎年大会(第 1 回東京大学、第 2 回京都大学、第 3 回東京大学、第 4 回神戸大学、第 5 回大阪大学、第 6 回早稲田大学、第 7 回東北大学)を開催し、提言 2019 が目指した複数の学術領域の結集を進めることで、量子生命科学研究が大きく発展してきた。また、2021 年から毎年開催されている Quantum Innovation における量子生命科学セッション、2023 年から隔年で開催されている Gordon Research Conference Quantum Biology など、国際会議により国内外の量子生命科学研究が進展している。

提言 2019 が提言した量子生命科学の中核拠点の形成については、2020 年以降に策定された量子技術イノベーション戦略をはじめとした量子技術 3 戦略および量子産業の創出・発展に向けた推進方策により、量子科学技術研究開発機構(QST)量子生命科学研究所・量子生命拠点および大阪大学量子情報・量子生命研究センター・量子ソフトウェア研究拠点が、量子生命科学に直接関係する量子技術イノベーション拠点(QIH)として指定された。さらに、関連する QIH として、東京科学大学・量子センサ拠点、QST 量子技術基盤拠点、産業技術総合研究所・量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル拠点(G-QuAT)、東海国立大学機構・量子化学産業創出拠点、物質・材料研究機構(NIMS)・量子マテリアル拠点、京都大学・光量子拠点(仮)などが指定され、量子生命科学をめぐる中核拠点の形成が進展した。

提言 2019 が提言した量子生命科学の大型共同研究の促進については、量子技術イノベーション戦略に基づき開始された大規模な産学連携研究開発プロジェクトとして、文部科学省・光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)量子計測・センシング技術領域 Flagship プロジェクト「量子生命技術の創製と医学・生命科学の革新」が 2020 年度に開始されるとともに、2023 年度に開始された内閣府・第 3 期戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進」においても量子生命科学のプロジェクトが推進されており、さらに、文部科学省・戦略目標においても「量子フロンティア」、「生命力」、「量子マテリアル」が選定され、量子生命

科学分野の CREST/さきがけ等の研究開発が進むなど、量子生命科学を支える研究プロジェクトが充実しつつある。

提言 2019 が人材育成を提言した後に、大学と QST との連携大学院として、2022 年度から東北大学医学系研究科 量子生命・分子イメージング連携講座、2023 年度から千葉大学融合理工学府 先進理化学専攻 量子生命科学コース、2024 年度から東京科学大学 生命理工学院 量子生命科学分野などが創設され、量子生命科学の人材育成が本格的に開始された。また、量子生命科学学会、文科省・Q-LEAP 量子生命、QST 量子生命科学研究所が連携して、2022 年度から量子生命科学サマーセミナーとして量子生命科学講義の動画配信を開始し、2024 年度までの 3 年間で 1,000 名近い講義登録者が受講している。本セミナーは、当初、大学生・大学院生を対象としていたが、現在は、さらに小中高校生にまで対象を広げるなど、いわゆる量子ネイティブとして「量子も生命も専門とする研究人材」の育成が開始されている。さらに、量子生命科学学会が中心となり量子生命科学のモデルカリキュラムが検討され、今後の大学・大学院等における人材育成の加速が期待される。

以上のように、物理学や理工学技術と生命科学の異分野領域の融合に欠かせない研究者コミュニティの場としての学会組織、実際に異分野領域の研究者が連携して研究を推進する研究拠点、そして研究を支える研究資金など、新しい研究領域である量子生命科学を推進する国内環境は整いつつある。また、国際シンポジウムの開催など、海外研究者コミュニティとの連携もすでに開始されている。この動きをさらに加速させ、国内外の幅広い学術領域から研究者を結集して量子生命科学を推進することは、同時に我が国の強みを生かした量子科学技術の発展と人材育成にも大きく役立つと考えられる。推進にあたっての具体的な課題として、以下が挙げられる。

(1) 複数の異分野学術領域の結集

- 理論研究、各種量子効果の解明、光物理・生物物理・分析化学・創薬の分野横断、医学・生命科学の応用など、異分野間の連携
- 科学研究費助成事業の審査区分表に量子生命科学に関連する内容を加えることによる異分野融合研究の促進
- 異分野横断的な意見交換ができる量子生命科学学会を中心とした研究会・学会などのネットワーク形成
- 量子生命科学学会の大会開催と関連学会・国際会議との連携、国際会議などの開催
- 参画する各々の専門性が高水準である実績作り
- 量子生命科学分野のデファクト集団として認知される国際評価の獲得

【別表】量子生命科学分野における国内外の研究連携の具体例

(2) 本格的な産学官連携のための中核拠点ネットワークの形成

- 全国および全世界の研究者が利用でき、共同開発できる拠点として量子技術イノベーション戦略に基づいて設置された量子生命科学拠点である QST・量子生命拠点、大阪大学・量子ソフトウェア研究拠点において、研究開発協力や共同利用実験施設の窓口・情報集約等、量子センサ・イメージング、超偏極 MRI、量子コヒーレンス計測などのテストベッド整備・拡張と新規ユースケースの開拓、産学官連携のハブ機能強化
- QST・量子生命拠点、大阪大学・量子ソフトウェア研究拠点と量子技術イノベーション戦略に基づいて設置された量子生命科学関連拠点である東京科学大学・量子センサ拠点、QST・量子技術基盤拠点、産総研・G-QuAT、東海国立大学機構・量子化学産業創出拠点、NIMS・量子マテリアル拠点、京都大学・光量子拠点(仮)などとの連携ネットワーク形成
- 量子拠点と国際卓越研究大学、地域中核・特色ある研究大学強化促進事業(J-PEAKS)採択大学などの大学、千葉大学量子生命構造創薬センターや大阪公立大学 LAC-SYS 研究所など大学における量子生命関連研究所・センター および公的研究機関、企業との連携ネットワーク形成
- 共同開発に対する柔軟性の高い資金・人材支援
- 既存および新設の実験施設の活用(例えば、放射光施設によるタンパク質等生体分子の精密構造解析、機能研究、物性科学の先進的分光測定など)
- 民間企業と将来のビジョンを共有することによる「組織」対「組織」の本格的産学連携共同研究の促進

(3) 研究人材・量子生命科学ネイティブの育成

- 生物学、物理学、化学、工学、数学、情報科学、農学、医歯薬学、人文社会科学などを横断し複数領域を複眼視する人材育成のための、研究・教育プログラム、大学院カリキュラムの開発、教科書出版および拠点の設置
- 大学における量子生命科学に関連した学科・専攻・講座等の設置および量子拠点を形成している国立研究開発法人と大学との連携大学院の設置による人材育成
- 大学・公的研究機関・企業の連携、優秀な研究者が所属機関の壁を越えて活躍できるクロスアポイントメント制度および大学院博士課程の活用
- 幼小中高校生・高専生・大学生・大学院生・教員・企業研究者などを対象とした量子生命

科学のセミナー・講義・ネット教育体制(Open Course Ware)の構築と教科書・入門書出版などによる量子生命科学ネイティブの育成、リスキリングの促進

(4)市民・企業・政府への積極的情報発信・交流

- 夢ある未来の提示
- 書籍、新聞・テレビ・ラジオ、漫画・アニメ・映画、動画・電子コンテンツ・SNS、市民公開講座、サイエンスカフェ、オープンキャンパス、研究所一般公開などでの発信
- 成果物の展示等による直感的理解を可能にする場の創出(国際展示会、博物館、研究機関等における展示活動など)

6. 参考資料

【別表】量子生命科学分野における国内外の研究連携の具体例

研究テーマ	参画する研究機関(予定も含む)	
	国内	国外
ダイヤモンド NV センターの汎用化	QST、東大、京大、阪大、名大、東京科学大、他	Surrey 大(英)、RMIT 大(豪)、Melbourne 大(豪)、Stuttgart 大(独)、Fraunhofer(独)、Chicago 大(米)
光量子イメージングの実現と生体計測への応用	QST、京大、阪大、九大、電通大、国立天文台、NICT、他	MIT(米)、Boston 大(米)、Bristol 大(英)、シンガポール大(シンガポール)、Griffith 大(豪)他
超偏極およびナノ量子造影剤開発	QST、東大、京大、阪大、名大、岐阜大、九大、北大、理研、原子力機構、他	NIH(NCI および NINDS)(米)、MIT(米)、Harvard MGH(米)、MD Anderson がんセンター(米)、UCSF(米)、MSKC(米)、California Institute of Technology(米)、Stanford 大(米)、CEA(仏)、NeuroSpin(仏)、Max Planck Tuebingen(独)、
生体分子内の電荷・エネルギー移動に関する実験及び理論	QST、分子研、神戸大、東大、東京農工大、茨城大、広島大、岡山大、理研、KEK・PF、SPring-8、HiSOR、J-PARC、原子力機構、他	UPMC(仏)、他
細胞間・細胞小器官における生命維持機能解析(マイクロビーム関連)	QST	Surrey 大(英)、IRSN(仏)、Columbia 大(米)
細胞検索エンジンの開発	東大、京大、名大、理研など	UCLA(米)、Columbia 大(米)、清華大(中)など
情報科学関連	QST、国際電気通信基礎技術研究所、産総研、NTT コミュニケーション科学基礎研究所、理研・革新知能統合研究センター(API)	
意識の脳科学的基盤	QST、Araya Inc、京大、東大、理研、北大、阪大、他	London 大(英)、Wisconsin Institute for Sleep and Consciousness(米)、Reed 大(米)、Jagiellonian 大(ポーランド)、Psychologische Hochschule(独)、Monash 大(豪)、Cercare Medical(デンマーク)、Aarhus 大(デンマーク)、Cardiff 大(英)、Bernstein Center for Computational Neuroscience(独)、Victoria University of Wellington(ニュージーランド)
生体機能の外場制御と生体計測への応用	大阪公立大学、阪大、早稲田大、京大、岡山大、東大、産総研、慶応義塾大、北大、名古屋市立大学、浜松医科大学、QST、他	Van Lang 大(ベトナム)、Copenhagen 大 Niels Bohr Institute(デンマーク)、ICFO - The Institute of Photonic Science(スペイン)、Nanyang Technological University(シンガポール)、ETH(スイス)、

量子生命科学会・有識者会議

令和 5 年 3 月現在

役 職	所 属	氏 名
提言全体統括	量子科学技術研究開発機構/名古屋大学	馬場 嘉信
有識者会議委員	大阪公立大学	飯田 琢也
	量子科学技術研究開発機構/東京科学大学	五十嵐 龍治
	分子科学研究所	泉 雄大
	量子科学技術研究開発機構	今岡 達彦
	東京大学/理化学研究所	上田 泰己
	量子科学技術研究開発機構	大島 武
	早稲田大学	岡野 俊行
	東京大学	岡部 弘基
	早稲田大学	加藤 尚志
	大阪大学	北川 勝浩
	東京大学	合田 圭介
	量子科学技術研究開発機構	河野 秀俊
	量子科学技術研究開発機構	小安 重夫
	奈良工業高等専門学校/東京科学大学	近藤 科江
	東京大学	山東 信介
	京都大学	白川 昌宏
	岡山大学	沈 建仁
	量子科学技術研究開発機構	須原 哲也
	浜松医科大学	瀬藤 光利
	量子科学技術研究開発機構	高草木 洋一
	京都大学	竹内 繁樹
	神戸大学	田中 成典
	量子科学技術研究開発機構	玉田 太郎
	大阪大学/量子科学技術研究開発機構	根来 誠
	東京科学大学	波多野 睦子
	京都大学	濱地 格
	大阪大学	原田 慶恵

	大阪大学/量子科学技術研究開発機構	平野 俊夫
	神奈川工科大学/慶應義塾大学	広井 賀子
	量子科学技術研究開発機構	藤田 貴敏
	埼玉大学	前田 公憲
	京都大学	水落 憲和
	北海道大学/量子科学技術研究開発機構/生理学研究所	村上 正晃
	千葉大学	村田 武士
	東京大学	楊井 伸浩
	量子科学技術研究開発機構	山田 真希子
	量子科学技術研究開発機構/名古屋大学	湯川 博
事務局	量子科学技術研究開発機構	今岡 達彦
	分子科学研究所	泉 雄大
	量子科学技術研究開発機構	河野 秀俊
	量子科学技術研究開発機構	玉田 太郎
	量子科学技術研究開発機構	川野 光子