

量子生命科学の推進に関する提言 量子でヒトを理解する、しあわせにする。～生命科学を場とした第二量子革命～

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]

(1) 世界における量子技術革新

- 20世紀の「第一次量子革命」に続き、21世紀は量子コンピュータ等、量子現象を積極的に利用する「第二次量子革命」の時代
- EU、中国では国家的な巨額投資。我が国も量子技術に注目

(2) 生命科学分野における量子革命

- 最新量子技術による生命の観測等により、生命の「量子から細胞・個体まで」の総体的理解を実現し、パラダイムシフトをめざす
- **欧米の量子革命は理工系中心。生命科学は日本が主導権を**

(3) 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) 「量子でヒトを理解する」～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/突然変異/酵素反応
- 階層間の連絡性の解明 放射線作用と病態発現/神経細胞と意識/マルチスケール生物学
- 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 細胞内小器官/分子構造と活性/実在の生命を前提としない生物学
- 発生・老化メカニズムの理解 がんの発生機構/細胞の分化機構

(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～

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 光合成や呼吸の量子効果を模倣したエネルギー技術/農業・畜産・食料生産への量子技術の応用/脳を模倣した量子コンピュータによるスマート化加速
- 量子による健康長寿社会 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/量子技術を内蔵した細胞による治療/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社会 光合成の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危険物探知/量子技術による食品検査・環境調査/新しい技術の社会受容

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

- 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/酵素反応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・修復の電荷・エネルギー移動/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/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

- 量子で測る 量子センシング応用 ダイヤモンドNVセンター等の量子センサの応用(脳磁、細胞内パラメータ、生体分子)/量子センサ材料開発/量子もつれ光による高感度センシング/FRETを応用したDNA解析/等
- 量子でひもどく 分子構造解析 量子ビームと量子シミュレーションによる生体分子の精密動構造解析と機能解明/超偏極NMRによる超高感度構造解析/異常タンパク蓄積病の解明/高次構造に基づく分子デザイン/等
- 量子で変える 細胞への介入 マイクロイオンビーム/Cellレーザー/量子デバイス内蔵細胞/物理化学的な生命操作/分化・増殖の制御/等
- 量子で描く 量子イメージング・計測の利用 量子状態制御MRI/超偏極MRI/高度化MRI・多光子顕微鏡等の低侵襲イメージング/量子もつれを利用した超偏極造影剤/量子もつれ光による高分解能光トモグラフィ/FRETの計測・イメージング利用/超短パルスレーザーによる高時間分解能の細胞分析・細胞イメージング/等

(3) イノベーションを目指した研究開発

- 量子で治す 医療応用
【計測】 量子センサを応用した検査、治療、薬剤送達/量子イメージング診断/等
【再生医療】 量子技術によるiPS細胞評価/量子デバイス内蔵細胞による自動治療/等
【がん・免疫】 放射線治療・がん医療/免疫機能の制御/等
【加齢・脳】 抗老化/動脈診断/認知症・神経変性疾患・痛み等の診断/等
【創薬】 分子設計の効率化、創薬の加速/等
- 量子で考える 情報技術 意識に倣った量子コンピュータ/量子計測データを扱うAI/等
- 量子で産み出す 工業・エネルギー 光合成・呼吸を模倣したパワーデバイスと環境浄化/生物の嗅覚・磁気受容を模倣したセンシング技術/等
- 量子で育てる 農業・環境 突然変異制御とイメージングによる育種/量子センサ等による環境モニタリング/産地トレーサビリティ/食品安全・アレルギー物質検査/他
- 量子で拓く 宇宙 宇宙の特殊な放射線の人体影響解明
- 量子をやさしく 生命倫理・安全 環境・安全・社会問題の検討、社会受容、国際標準化

5. 必要とされるグローバルな研究推進体制 [推進方針] 「量子生命科学会」の発足（2019年4月）、量研/QST・大阪大における研究組織形成（2016～19年）に続けて

- (1) 学術領域の結集 異分野連携/分野横断的ネットワーク形成/積極的な学会活動/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/国内外の連携の具体例
- (2) 中核拠点の形成 内外の研究者が利用し共同開発できる拠点/本格的な産学連携の枠組み構築/柔軟性の高い資金・人材支援/既存・新設の実験施設の活用/企業とのビジョン共有
- (3) 人材育成 理学・工学・数学・情報・農学・医療・人文社会学等の横断的人材育成プログラムと拠点/大学・国研・企業の連携と人的交流制度(クロスアポイントメント)
- (4) 情報発信・交流 市民・企業・政府への夢ある未来の提示/博物館、研究機関等における展示活動

量子でヒトを理解する、しあわせにする。

～ 生命科学を場とした第二次量子革命 ～

量子生命科学の推進に関する提言

平成31年3月

量子生命科学研究会・有識者会議

目次

1. 概要	2
2. はじめに [背景]	3
世界における量子技術革新／生命科学分野における量子革命／本提言の目的	
3. 量子生命科学の目指すもの [目標・展望]	5
(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～	
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]・・・	8
(1)量子論の観点からの生命研究テーマ	
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	
1) 量子で測る ～量子センシング技術～	
2) 量子でひもとく ～分子構造解析技術～	
3) 量子で変える ～細胞介入技術～	
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	
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) 量子をやさしく ～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]	14
(1)複数学術領域の結集	
(2)本格的な産学官連携のための中核拠点の形成	
(3)研究人材の育成	
(4)市民・企業・政府への積極的情報発信・交流	
6. 参考資料	16
【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	
量子生命科学研究会・有識者会議メンバー	

1. 概要

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・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。

本提言では、まず量子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 について述べ、次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 について述べる。

2. はじめに [背景]

世界における量子技術革新

20世紀初頭に誕生した量子力学により、人類は原子や電子や光の振る舞いを理解し、それらを制御する半導体やレーザー技術を手にして、「量子革命」と呼ばれる激変を社会にもたらした。1990年代、量子コンピュータや量子暗号の理論・実験的研究を端緒として、量子の状態（スピンなど）を制御し、その干渉やもつれといった量子特有の現象を積極的に利用しようとする量子技術と発想の革新が始まった。その流れは今世紀に入り爆発的に発展し、欧米では「第二次量子革命」とも位置づけられるに至っている。

現在、米欧中を中心に、量子技術をこれまでの常識を凌駕し社会に変革をもたらす重要な技術と位置付け、EUでは2019年から量子技術フラッグシップとして10年間で1,300億円の投資を開始し、中国では量子技術に関連して1.6兆円を投じて拠点を整備するなど、政府主導で研究開発戦略を策定し、研究開発投資額を増加している。一方、我が国でも、第5期科学技術基本計画（平成28年1月閣議決定）において、新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術として「光・量子技術」を挙げ、統合イノベーション戦略（平成30年6月閣議決定）では、特に取り組みを強化すべき主要分野に「光・量子基盤技術分野」を挙げている。世界的な競争が激化する中、我が国は、量子技術をどのように推進するかの岐路に立たされている。

生命科学分野における量子革命

ここに重要なコンセプトがある。それは、「生命科学分野における量子革命」である。今、最新の量子技術を生命科学の分野に利用することで、従来不可能であった精度や感度での量子レベルの生命現象の計測・モデリング等を実現することや、生きたままの細胞・器官・個体における多様な生命現象の観測が、大きく期待できる状況となっている。前者の例としては、光合成や呼吸の過程の極めて効率的なタンパク質間のエネルギーの受け渡しにおける量子力学的効果を極短パルスレーザーを用いて計測すること、後者の例としては、ナノサイズの蛍光ダイヤモンドを利用したナノ量子センサを生きたままの細胞内に導入して、がん細胞などへの分化過程における細胞内部の局所的な温度・イオン輸送・硬さ等をモニタリングすること等が挙げられる。つまり、個々の分子機能や分子間相互作用から細胞・器官・個体といった階層の生体システムまでに至る、生命の全体像を総体的・動的に理解することが、まさに可能になろうとしている。この、いわば「構造から機能へ」の生命科学のパラダイムシフトを実現しようとするのが、新たな学術領域である「量子生命科学」である。

これまで、量子技術による革新についての議論は、ものづくり、通信、IoT等の理工系分野が中心であった。生命科学分野への応用は、研究者の専門性の違い等から、欧米でも開始が遅れて

いる状況にある。したがって、量子技術の生命科学分野への積極的な利活用は、日本が世界に先駆けて主導権を握り、今後大きな成長が期待できる有望な方向性といえる。科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会量子科学技術委員会は、平成29年8月に「量子科学技術(光・量子技術)の新たな推進方策の報告書」をまとめている。この中で量子センサによる生体内計測や量子光学による生体イメージング、これらの解析情報を用いた細胞、組織における量子力学的な効果の探索研究の大きな可能性を述べている。

「量子生命科学」は第二次量子革命の中核になりうる。すなわち、量子生命科学は量子技術の重要なターゲット分野として、新たな価値の創出に取り組み、知見と基盤技術を集約してイノベーションを創出するという役割も担うものである。

本提言の目的

今まさに成立しようとする量子生命科学の発展と、それによる我が国の量子技術イノベーションのためには、ビジョンを明確にし、課題を抽出しておく必要がある。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。

3. 量子生命科学の目指すもの [目標・展望]

「量子でヒトを理解する、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「生老病死の根本原理の理解と克服」と「人間の能力の拡張」を人類にもたらし、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)「量子でヒトを理解する」～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、「生命の階層性の統合的理解」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、「熱や放射線エネルギーがDNA分子の一部に損傷を与える」、「突然変異が起こる」、「がん細胞が分化・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「DNA内の電子の量子力学的状態の変化」を出発点としたストーリーの一場面であるから、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(網膜における量子もつれ現象が磁気受容を可能にしている)において、得られ始めている。

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、ナノ量子センサや量子イメージングといった技術が細胞・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 放射線生物学(放射線の量子エネルギーがマクロな生命現象に与える影響を探究する)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
光合成や呼吸、磁気受容、突然変異、酵素反応など、極微の階層における量子効果が個体の階層にまで影響を及ぼすと考えられている現象の普遍性・共通性の探究。
- 階層間に横たわる未知の連絡性の解明
 - 放射線生物学
いかにして、放射線による量子レベルのエネルギーの付与が分子レベルの異常(突然変異等)につながり、細胞レベルを経て、個体レベルの病態発現につながるか。
 - 認知神経科学
いかにして、個々の神経情報は結びつけられ、階層を超えて、ヒトの意識の中で1つの認識(感覚や記憶、自己認識など)に統合されるか。
 - マルチスケール生物学
異なる長さスケールの科学を結び付けることによる、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。

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。

- 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。
- 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、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を制御・改良できるか。
- 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。生物種間で保存される分子構造と活性の相関の解明。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。
- 発生と老化のメカニズムの理解
[例]がんはどのようにして発生・発達するのか、細胞はどのようにして分化するのか。

(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～

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。

例えば、量子センサや次世代 MRI を用いたがん組織の性質の計測は、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、「手遅れの無い医療」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も、量子センサ・量子計測技術との連携により、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

[例]光合成や呼吸の量子効果を模倣した高効率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。脳をなぞらえた量子コンピュータによるスマート化の加速。

- 量子による健康長寿社会

[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と、がんや認知症、老化の予防、診断、治療。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社会

[例]光合成や呼吸に倣った超省エネ型電池や環境浄化システム。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社会受容。

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

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。

- 光合成や呼吸のエネルギー輸送・電子伝達系における量子コヒーレンスの寄与の解析
- 酵素反応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の寄与の解析
- 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・痛みなどの原理解明
- 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

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。

- 脳磁計測など、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センター以外の固体量子センサ(特に近赤外領域の発光波長)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、細胞内局所における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等)計測技術の確立
- 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を持つ、量子センシング技術の開発
- 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)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、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
- 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

2) 量子でひもとく ～分子構造解析技術～

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。

- 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

- 精緻な構造情報と量子計算等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
- 生体内環境下(37°C、高塩濃度、高タンパク質濃度溶液)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
- 「生物種間の分子の類似性」について、我が国固有のバイオリソース基盤(国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)によるナショナルバイオリソースプロジェクト(NBRP)など)と連携し、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。特に情報伝達物質と受容体等の結合に必要な構造の抽出と、それに基づく新たな機能分子デザインの実現。

3) 量子で変える ～細胞介入技術～

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、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
- Cell laser や Cell maser 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
- 量子デバイスを組み込んだ「スマート細胞」、「スマート臓器」の開発。それを利用した疾病の克服や人体機能の強化。
- 生命機能(遺伝、免疫、代謝など)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(DNA、タンパク質、酵素など)からの制御と、生化学反応における量子性の計測・操作、ミクロ(分子)-マクロ(細胞・組織)のクロスオーバーによる新機能創成
- 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
- 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

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。

- 量子状態制御と高度ナノ粒子技術によるナノセンサ MRI 造影剤およびナノ光センサの開発と応用、超高速超解像 MRI 技術の開発
- 従来の千倍以上の感度を持つ「超偏極 MRI」の開発。ペンタセンやダイヤモンド NV などの電子スピンを活用した「室温超偏極」用造影剤の実現。
- 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造影剤の開発
- 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)
- 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

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
 - 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)
 - 大規模 1 細胞解析による細胞多様性の把握と制御
 - 量子センサと生体試料(細胞、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
 - 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)
- 再生医療への応用
 - ナノ量子センサを用いた iPS 細胞の分化過程の解明

- 量子イメージングによる iPS 細胞および分化細胞・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による自動治療技術
- 発がんメカニズムやがんの本態の解明によるがん予防、がん医療の加速
 - がん細胞の放射線・薬剤応答の解明によるがん治療の効率化
- 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病等の次世代治療法の開発
- 老化のメカニズムの解明による多様なアンチ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認知症・精神疾患・神経変性疾患・痛みの診断
- 心血管の疾病の超早期診断の実現
 - 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
 - 生体分子構造とその分子間相互作用の相関の量子科学的解明
 - 指向性進化による自由自在な分子の生成

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
- 量子生命データの解析を可能にする量子機械学習の発展
- 生体データに機械学習や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
- 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
- 脳や意識の情報の量子デバイスへのコピー

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

- 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、石油を消費しない社会の実現
- 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

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作物の作成による農業生産性の向上
- 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、水や大気的环境モニタリング
- 量子センサと生体試料(細胞、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～

宇宙放射線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。

- 放射線の生体影響の解明による宇宙開発への人間の適応

6) 量子をやさしく ～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・安全分野の研究も進める必要があり、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)検討による量子技術および量子生命科学の社会受容促進
- 量子技術からもたらされる利益の社会還元と安全性に関する国際標準化

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・工学・情報分野の専門家だけでなく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・プル型の観点を盛り込むことが自然かつ肝要である。つまり、複数の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。

現在までに、こうした体制作りのためにいくつかの準備がなされている。一つは国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(量研/QST)が全国の研究者に呼びかけ、平成29年4月に発足した「量子生命科学研究会」である。この研究会は量子生命科学に関係する研究者の初めてのコミュニティであり、これまでに2回の研究集会が開催された。会員数も増加してきたため、更なる発展を目指し、平成31年4月に「一般社団法人量子生命科学会」に改組する予定である。これらは、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ研究領域「量子技術を適用した生命科学基盤の創出」とも歩みを合わせたものである。

二つ目は、研究機関における量子生命科学分野を対象とした組織の設置である。量研/QSTは、平成28年4月の発足以来、「QST 未来ラボ・量子細胞システム研究グループ」の設置や国際シンポジウム「量子生命科学 —Quantum Life Science—」(平成29年7月)開催等、量子生命科学を推進する先駆的取り組みを進めてきた。これを発展させ、平成31年4月1日に13の研究グループからなる正式研究組織として、「量子生命科学領域」を新たに発足させる。この組織は将来の日本における量子生命科学の中核拠点となることを目指し、外部にも広く開かれ、外部機関の研究者をリーダーとする「連携ラボ」の設置を始めとした、国内外との積極的な連携を展開する方針を掲げている。また、このような動きは量研/QST 外でも広がりがつつある。例えば、大阪大では、平成30年7月1日、先導的学際研究機構に部局横断的なバーチャル組織である量子情報・量子生命研究部門を設置した。この部門には量子情報を中心に20名以上のPI (principal investigator) が兼任として在籍し、量子生命科学の研究にも着手している。

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、まだまだ不十分ながらも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、まだ世界的にも数少ない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) 複数学術領域の結集

- 理論研究、各種量子効果の解明の連携など、異分野間の連携
 - 異分野横断的な意見交換ができる研究会・学会などのネットワーク形成
 - 積極的な学会活動：定期的な集会、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
- 研究開発協力や共同利用実験施設の窓口・情報集約等、産学連携のハブ機能
- 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」の大型共同研究の促進

(3) 研究人材の育成

- 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・教育プログラムの開発および拠点の設置
- 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の活用

(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
- 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（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	量研、東大、京大、阪大、名大、東工大、他	Surrey 大(英)、RMIT 大(豪)、Melbourne 大(豪)、Stuttgart 大(独)、Fraunhofer(独)
光量子イメージングの実現と生体計測への応用	量研、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	量研、東大、京大、阪大、名大、九大、北大、岡山大、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)、California Institute of Technology(米)、Stanford 大(米)、CEA(仏)、NeuroSpin(仏)、Max Planck Tuebingen(独)、ブルガリア科学アカデミー(ブルガリア)、Sofia 大(ブルガリア)、他
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	量研、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)	量研	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	量研、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	量研、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	大阪府大、大阪市大、阪大、早稲田大、京大、東大、産総研、慶応義塾大、北大、他	Ton Duc Thang 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)

量子生命科学研究会・有識者会議

平成 31 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	平野 俊夫
有識者会議委員長	大阪大学 名誉教授	藤堂 剛
有識者会議副委員長	名古屋大学 大学院工学研究科	馬場 嘉信
有識者会議委員	大阪府立大学 LAC-SYS 研究所	飯田 琢也
	広島大学 放射光科学研究センター	泉 雄大
	東京大学 大学院薬学系研究科	岡部 弘基
	早稲田大学 教育・総合科学学術院	加藤 尚志
	大阪大学 先導的学際研究機構 量子情報・量子生命研究部門	北川 勝浩
	東京大学 大学院理学系研究科	合田 圭介
	東京大学 大学院工学系研究科	山東 信介
	量子科学技術研究開発機構	島田 義也
	京都大学 大学院工学研究科	白川 昌宏
	岡山大学 異分野基礎科学研究所	沈 建仁
	東京医科歯科大学 難治疾患研究所	菅野 純夫
	量子科学技術研究開発機構	須原 哲也
	浜松医科大学 国際マスメーシングセンター	瀬藤 光利
	京都大学 大学院工学研究科	竹内 繁樹
	神戸大学 大学院システム情報学研究科	田中 成典
	東京工業大学 大学院理工学研究科	波多野 睦子
	京都大学 大学院工学研究科	浜地 格
	大阪大学 蛋白質研究所	原田 慶恵
	自然科学研究機構 分子科学研究所	藤田 貴敏
	京都大学 名誉教授	三木 邦夫
千葉大学 大学院理学研究科	村田 武士	
筑波大学 大学院数理物質系	安野 嘉晃	
事務局	量子科学技術研究開発機構	藤巻 秀