

特集

量子生命科学による精神神経疾患のメカニズム解明に向けた挑戦

1. 量子生命科学とは

須原 哲也*

抄録：量子生命科学は新しい計測技術の開発とともに、生命のなかの量子性をも探ることをめざした領域として、2017年には幅広い領域の研究者を集めた量子生命科学研究会の形で発足した。2020年に量子生命科学の推進に向けて始まったQ-LEAPのプロジェクトでは(A)生体ナノ量子センサの開発と応用、(B)量子技術を用いた超高感度MRI/NMR、(C)量子論的生命現象の解明・模倣の3つの柱のもとに研究が進められている。生体ナノ量子センサはダイヤモンドNVセンタの超高感度蛍光物質としての応用と、生体内温度、pHセンサとしての応用が進められており、超偏極MRIは生体内の高感度代謝分析が進められている。量子論的生命現象の解明は、現状で量子論的説明が提案されているのは渡り鳥の磁気コンパスで、脳の研究領域に関してはAI技術や量子コンピューターの応用と、量子論的な数理モデルの認知科学への応用が進んでいる。

日本生物学的精神医学会誌 35 (3) : 105-108, 2024

Key words : quantum mechanics, quantum sensor, NV center, hyperpolarized NMR/MRI, quantum cognition

20世紀の生命科学は分子生物学の発展によって飛躍的な発展を遂げた。その根本にあったのは生命の設計図としての遺伝子の解析とその操作技術の発展であり、それによってiPS細胞のような万能細胞が作れるようになり、ゲノム編集技術によって設計図の修正も可能になってきた。生命科学の発展はこれまでもその計測技術の発展によるところが大きかった。たとえば細胞の観察が可能になったのは顕微鏡が発明されたからであり、骨の状態が外から見えるようになったのはX線が発見され利用されるようになったからである。そのような観点から現代の半導体技術の根幹を形成した20世紀の第一次量子革命は、現在の我々が使っているコンピューターの劇的な進歩を可能にし、大規模化したメモリーはすでに人間の能力をはるかに超えている。このようななかで生成AIや量子コンピューターの出現は、人間だけがもっていると思われた思考や意識といったものが機械の中にも形成できるのではないかという考えさえもたれるようになってきた。実際量子力学の生みの親の一人でありシュレディンガー方程式で有名なシュレディンガーは、すでにその著書の中

で決定論と自由意志に関しても言及している。しかし量子という視点から精神医学を論じるにはAIも量子コンピューターも発展途上と言ってよく、それらを含む新しい技術がどのように精神医学に新しい道を示してくれるかは、これからの技術の発展とその展開にかかっている。医学領域はすでに技術として確立した方法を疾患に応用することで発展してきたが、近年の激しい技術的進歩は、技術の確立を待つのではなく技術開発と併走した応用分野の開拓が求められるようになってきている。本特集では量子生命科学という新しい研究領域の、現在の立ち位置とその技術的可能性を紹介することにより、精神医学への展開の可能性を考えるきっかけになってもらえれば幸いである。

1. 量子生命科学とは

そもそも量子生命科学という言葉は、2016年に放射線医学総合研究所に日本原子力研究開発機構の核融合部門と量子ビーム部門が移管統合されて発足した、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機

Introduction of quantum life science

* 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1) Tetsuya Suhara : National Institutes for Quantum Science and Technology. 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan

【須原 哲也 E-mail : suhara.tetsuya@qst.go.jp】

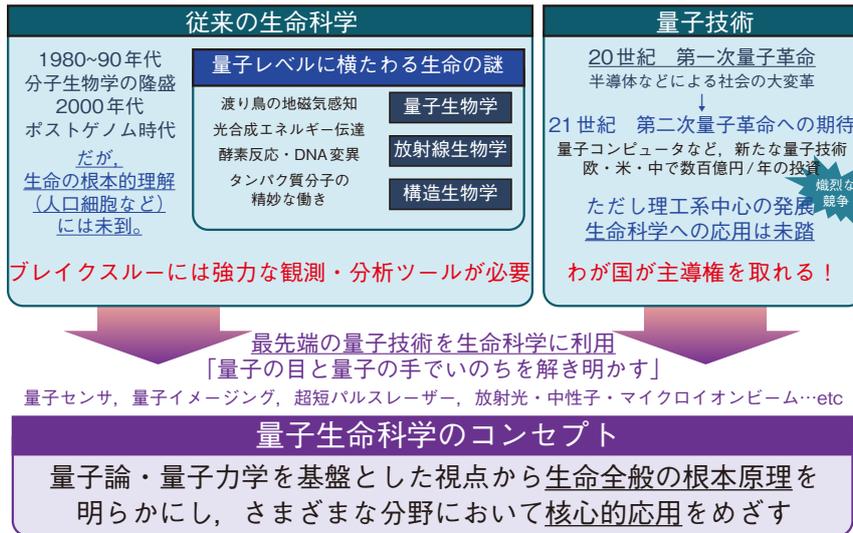


図1 量子生命科学誕生の背景

構 (National Institutes for Quantum Science and Technology : QST) の初代理事長の平野俊夫氏の発案から始まっている (図 1)。量子力学を用いて生物の感覚受容機構を考察する動きは以前から量子生物学とよばれてきた^{2, 6)}。そのなかで多様な可能性が検討されてきたが、その量子性を証明する精度の高い計測技術が不十分であったことから、必ずしも大きな流れとはなってこなかった。しかし近年多様な計測技術が進歩するとともに、膨大なデータを処理できる計算機の能力の向上もあり、これまで独立に発展してきた領域を相互に結びつけて新しい流れを作ろうという動きも出てきた。そのなかで、工学系の研究組織と医学系の研究組織というまったく異質な研究組織が統合することになった QST は、このような流れを実現するうえで格好の組織と思われた。2016 年に戦略的理事長ファンドによる分野横断的なバーチャルな組織を形成し、2017 年には幅広い領域の研究者を集めた量子生命科学研究会が設立された。一方アメリカや中国を中心とした量子コンピューターや量子暗号、量子通信の研究の発展を追いかける形で、2020 年には内閣府・統合イノベーション推進会議が量子技術イノベーション戦略を発表し、このなかで国の推進すべき「量子技術イノベーション」を明確に位置づけた。ここで主要技術領域として取り上げられたのは、量子コンピューター、量子計測・センシング、量子通信・暗号、量子材料で、量子融合イノベーション領域として量子 AI、量子生命、量子セキュリティが設定された。国の戦略に記載されたことで 2020 年には量子生命科学の推進に向けて光・量子飛躍フラッグシッププログラム (quantum leap flagship program : Q-

LEAP) のプロジェクトが採択され、さらに 2021 年には国内に 8 つの量子技術イノベーション拠点が指定され、QST は量子生命拠点として国の量子イノベーション戦略を担うこととなった。

2. 量子生命科学のトピック

Q-LEAP プロジェクトで進められている量子生命科学は現在 3 つの大きな柱からなっている (図 2)。(A) 生体ナノ量子センサの開発と応用、(B) 量子技術を用いた超高感度磁気共鳴画像法 (magnetic resonance imaging : MRI) / 核磁気共鳴 (nuclear magnetic resonance : NMR)、(C) 量子論的生命現象の解明・模倣で、本特集でははじめにそれぞれの柱を構成する基本的な技術について述べる。生体ナノセンサに関して五十嵐先生が「極微小・極微量の生命計測を可能にする生体ナノ量子センサー技術」を、量子技術を用いた超高感度 MRI/NMR に関して高草木先生が「量子計測技術としての動的核偏極法と超高感度代謝イメージング」を、量子論的生命現象の解明・模倣に関しては八幡先生が「量子コンピューティング技術の生命科学研究への応用可能性：現状と将来展望」を解説されている。特に生体ナノ量子センサは、宝石として知られているダイヤモンドが量子ビームの照射によって結晶内に空孔と窒素原子を取り込むことで、蛍光を放つセンサに変化するものであり実用化に近い技術である。蛍光物質としてのナノダイヤはダイヤの特性として変質せず、なおかつ 5nm まで小さくできる。この蛍光ダイヤが優れているのは、量子操作により背景光を極限まで低減することができるため¹⁾、



図2 Q-LEAP 量子生命科学プロジェクト

きわめて高感度な蛍光標識が可能になることである。この性質を利用して微小炎症を少量の血液で高感度に検出するプラットフォームの構築に関しては北條先生、村上先生らによる「ムーンショット微小炎症プロジェクトと連携した脳内炎症を標的とした量子診断プラットフォーム形成の試み」で解説される。一方ナノダイヤのセンサとしての応用は田桑先生によって「脳疾患基礎研究における2光子顕微鏡の利点と欠点と新たな量子計測技術の可能性」で解説されている。ナノダイヤは温度、pH、粘度などの複数のパラメータを同時に計測できることから、モデルマウスにおける脳内の血管周囲マクロファージの細胞内の温度やpHからその活性を評価する試みなどに応用されている。

MRIは今や臨床においてなくてはならない診断機器であり特に脳の分野では研究に必須な測定機器となっている。しかしMRIで画像化しているのは生体内に多量に存在している水素原子の核スピン由来の信号で、それ以外の原子核の信号は非常に小さく、安定同位体で標識された化合物の反応や代謝を可視化するのは困難であった¹⁾。超偏極技術は量子技術を用いて¹³CなどのNMR信号を1万倍以上に増強することにより、これまで不可能であった生体内の経時的な代謝イメージングを可能にした。海外ではすでに¹³Cピルビン酸を用いたがん組織における代謝の報告などがなされているが、より多様な分子プローブを開発することにより、たとえば神経細胞やグリア細胞の代謝の変化を測定できれば、精神疾患の病態解明にも資することが期待される。超偏極MRIの脳研究に対する応用の可能性に関し

ては、高堂先生による「超偏極MRSによる脳エネルギー代謝評価系を用いた精神疾患の病態研究への展望」で解説される。

量子生命において量子論的生命現象の解明はもっとも重要なテーマであるが、現状で量子論的説明が提案されているのは渡り鳥の磁気コンパスで、鳥の網膜にあるクリプトクロムタンパクが光を吸収してラジカル対を形成し、このラジカル対に生じる量子効果によって磁場を感知しているというものである⁴⁾。脳の研究領域においては現在のAI技術や量子コンピューターがどのように応用できるかという点から研究が進んでいる一方、量子論的な数理モデルの認知科学への応用をめざした研究も進められている。これはペンローズら⁵⁾が提案しているような脳の働きの中に何らかの量子メカニズムを見いだそうというのではなく、量子力学がもつ数理モデルをヒトの認知行動の解析に応用しようとするものである。量子論的数理モデルで、ヒトの意思決定などがうまく説明できるのは、意思決定の過程において好きか嫌いかの二者択一しか許されないモデルに対して、量子論的モデルでは好きでも嫌いでもない重ね合わせの感情の仮定が可能になるからである。このように量子論的数理モデルを利用することにより、ヒトの曖昧な感情を取り込んだ行動予測ができるようになると考えられており^{3,7)}、このことは玉木先生、山田先生が「信念更新における量子ゼノン効果」のところで解説される。

3. 量子生命科学がもたらすイノベーションと 量子生命科学研究所の役割

本特集で取り上げたように量子生命科学はきわめて学際的で、多くの技術領域を包含するものである。そのため既存の専門領域にはまらない部分も多いが、このことは逆に新しい視点でこれまでの研究領域をみる視点とツールを提供できる場となる可能性をもっている。本特集で取り上げた精神医学への応用可能性のほかにも、量子論的解析に基づく人工酵素などを開発する量子生命分子工学分野や、細胞の量子操作による医薬品の高効率生産などをめざした量子細胞工学など、量子生命科学を基盤とした幅広い応用も期待されている。このような量子生命科学の発展の拠点となるべく、QSTには2022年に量子生命科学研究所の新しい研究棟が完成した。ここでは高度なクリーン環境が必要な2次元フォトンエコー法による高精度の分析装置などを備えた実験室と動物実験室が近接して設置されている。QSTの関西光量子科学研究所のようなクリーン環境を必要とする光科学実験室は、通常動物の持ち込みができない形で運用されているが、量子生命科学研究所では、各部屋の気圧を管理することで高精度な実験装置を *in vivo* の動物実験にも展開できる環境を備えている。また幅広い研究者にも利用できるようなオープンプラットフォームとしての運用も進んでいる。このような体制のなかで今後分野横断の新しい

研究の種が多く出てくることが期待されている。
開示すべき利益相反は存在しない。

文 献

- 1) 五十嵐龍治, 根来誠, 須原哲也 (2021) 量子科学技術が実現する超高感度・迅速バイオセンシング・デバイス. AI・ナノ・量子による超高感度・迅速バイオセンシング (馬場嘉信, 柳田剛, 加地範匡/監), シーエムシー出版, 東京, pp19-26.
- 2) ジム・アル＝カリーリ, ジョンジョー・マクファーデン 著, 水谷淳 訳 (2015) 量子力学で生命の謎を解く. SBクリエイティブ, 東京
- 3) 丸山善宏 (2024) 量子情報理論から見た生命と認知. 量子生命科学ハンドブック (瀬藤光利, 荒牧修平/監), NTS, 東京, pp319-336.
- 4) PJ ホア, H モウリットセン (2022) 高精度ナビの仕組み 鳥には地磁気が見えている. 日経サイエンス, (8) : 49-54.
- 5) ロジャー・ペンローズ 著, 竹内薫, 茂木健一郎 訳・解説 (2006) ペンローズの〈量子脳〉理論—心と意識の科学的基礎をもとめて. 筑摩書房, 東京
- 6) 田中成典 (2020) 量子と生命. 現代思想, 48 (2) : 97-107.
- 7) 筒井泉 (2014) 量子で囚人を解き放つ. 別冊日経サイエンス 量子の逆説 (細谷暁夫/編), 日経サイエンス社, 東京, pp92-99.

■ ABSTRACT

Introduction of quantum life science

Tetsuya Suhara

National Institutes for Quantum Science and Technology

The quantum life science field was created aiming to elucidate the quantum mechanism of life together with development of new measurement technology as a study group in 2017. Q-LEAP project was started in 2020. The three major targets of the project were (A) development of quantum sensor for life science use, (B) hyperpolarized technique for highly sensitive NRI/NMR, (C) quantum mechanism in living organism. The researches of quantum sensor are the application of diamond NV center as a super sensitive fluorescent material and *in vivo* sensor for temperature and pH. Hyperpolarized MRI is used for highly sensitive measurement of the metabolism. One quantum mechanism in animal is expected in magnetic compass in migrating bird. The application of AI and quantum computer are discussed in brain research. Quantum methods are also discussed in cognitive neuroscience.

(Japanese Journal of Biological Psychiatry 35 (3) : 105-108, 2024)