HamaMed-Repository
浜松医科大学学術機関リポジトリ
浜松医科大学
Hamamatsu University School of Medicine

量子生命科学と光 －現状と今後の可能性－

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2022-09-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 荒牧, 修平, 瀬藤, 光利 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10271/00004182

量子生命科学と光- 現状と今後の可能性-

荒牧修平[1]・瀬藤光利[1,2,3,4]

1. 浜松医科大学細胞分子解剖学講座 〒431-3192　静岡県浜松市東区半田山 1 丁目 20 番 1 号
2. 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）さきがけ[量子生体]　研究総括
3. 光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）量子生命　審査委員
4. 株式会社プレッパーズ 代表取締役

Quantum life science and light- Present and future possibilities-

Shuhei ARAMAKI[1] and Mitsutoshi SETOU[1,2,3,4]

1. Hamamatsu university school of medicine 〒431-3192　1-20-1 Handayama Higashiku Hamamatsu city Shizuoka prefecture Japan.
2. Japan Science and Technology Agency sakigake [Quantum Bio] Research Supervisor
3. Quantum Leap Flagship Program Quantum life Adviser
4. Preppers Inc. Chairman

E-mail : 41242936@hama-med.ac.jp, setou@hama-med.ac.jp

Synopsis

The advance of quantum technology has been remarkable, and quantum biology has come under the spotlight again in these last few years. Under these circumstances, quantum life science has been established. In this article, we defined quantum life science as being composed of life science, quantum science, and quantum technology. We mainly discussed the present and future possibilities of quantum life science. The momentum for quantum life science has been accelerated all over the world. We tried to introduce promising researches and the Japanese government's policy for quantum life science. We also introduced quantum information science, which is related to quantum life science genuinely. In the last part, we discussed that what connection between quantum and life is. We look forward to the future of the new field of quantum life science.

Key words: Quantum life science、Quantum technology, Quantum biology, Quantum information science

和文要旨

近年の量子技術の劇的な発展に伴い、量子＋バイオの量子生命科学分野にも期待が高まっている。本稿では、量子生命科学について、生命科学、量子科学、量子技術にまたがる融合領域とみなし、その現状について論じる。さらに今後の期待として量子生命科学分野とのかかわりが今後進展すると筆者が考える量子情報科学分野についても触れる。最後に、量子生命科学会や量子生命のさきがけのアドバイザーやメンバーでのこの分野の将来像についての議論の一端をご紹介する。

また、量子生命科学を「光学」で述べることの意義は、本文中でも何度か触れているが、量子生命科学という分野が技術の進歩、特に計測技術の進歩に支えられていることである。計測技術により量子生命科学の世界から有用な情報を検出・観察するには、光が大きな役割を果たしている。本稿が量子生命科学分野と光学研究者との化学反応を引き起こし、新たな手法やテーマが創出されることを期待する。

はじめに

この原稿を依頼された 2020 年の年初と現在 2020 年の 4 月 8 日、たった 4 か月で世界はコロナウイルスパンデミックによって大きく変わっている。この原稿を読む後世の人に、筆者から見た現時点での 4 か月の変化について述べてきたい。それは、この時代に量子生命科学についてどのように理解され、捉えられ、期待されていたのか、ということを振り返る上で、それなりに意義があることと思われる。

まず、2020 年年初はどのような時代であったか。米国ダウ平均は史上最高値を更新し続けリーマンショック後 2008 年につけた 6500 ドルから 4 倍以上の 29000 ドルを突破、史上最長の好景気に沸いていた。日本も後に延期されることになる東京オリンピックを控えて震災後 6000 円台だった株価は 24000 円をつけて高度成長期よりも長いこれまた史上最長の景気拡大期にあった。特に GAFA と呼ばれる Google, Apple, Facebook, Amazon といった巨大 IT 企業が巨額の時価総額をつけていた。その世界的な好景気の背景の一つは中国を筆頭とするインドネシアやインドといったアジアの新興国の高度成長とグローバリゼーションであった。そんな中、GDP で世界二位となった中国は 6 %以上の高度成長を続け、2010 年には工業生産高では米国を抜いて世界一となっていた。工業生産高トップの国が交代するのは 100 年前にイギリスから米国に交代して以来のことである。ついで科学技術も中国の猛追激しく、先述の GAFA と中国系 IT 企業が量子コンピューター開発競争を繰り広げ、グーグル社がいわゆる量子超越性を示したと Nature 誌に報告した。次世代情報通信の分野では民間においても中国が相当先行し、さらに軍事で非常に重要な暗号通信の分野において中国が墨子号を打ち上げ人類初の量子暗号衛星通信に成功した。

1957 年にソ連が人類初の人工衛星打ち上げに成功したことはスプートニクショックと言われる反応を引き起こし、宇宙分野への政策研究開発投資を呼び込み、ケネディ大統領のアポロ計画につながった。覇権が挑戦されるときに必ず緊張が起きるといういわゆるツキジデスの罠

と呼ばれる現象により、必然的に米中の潜在的な緊張が高まっていたところに、この中国の墨子号は第二次スプートニクショック、ムーンショット再び、と呼ばれる反応を引き起こした。軍や政治家からの量子関連の研究を加速せよという強い要望を背景に様々なプログラムが日米で開始された。日本は独自の光・量子科学技術を東大京大阪大東工大、NTT、NEC、理研特に光量子工学研究センター、筆者の所属する（旧）光量子医学研究センターが古くから磨いており、量子研究機構や阪大の量子情報量子生命研究部門などが直近さらに重点化整備されつつあった。

そこに 2020 年年初、中国湖北省武漢を初発とする新型コロナウイルス　COVID１９の世界的大流行パンデミックが起きた。2 月には二千万人の人口の武漢が都市封鎖され、約一万人の死者を出したのち 4 月 8 日現在収束して解除された。3 月にはイタリアやスペインで医療崩壊が起き一万人を超える死者が出て全土で罰則を伴う外出制限令が出た。米国でも一万人を超える死者でニューヨークがロックアウトしている。日本も 4 月 8 日緊急事態が宣言された。東京都では医療、警察、消防、以外は原則在宅勤務でという通達が来ている。理研も東大も原則在宅勤務になっている。オンライン会議や授業で通信トラフィックニーズが急増し、また医療ニーズが爆発的に増加している。学会が軒並み中止になり、量子生命科学会も量子生体さきがけの領域会議も秋以降に延期になった。目下は研究どころではない毎日である。明らかに世界史的な大事象であり、この事態以前をビフォーコロナ、事態が収束したのちをアフターコロナなどと呼び、アフターコロナ社会の在り方についての議論が始まっている。そこで改めて、情報通信と生命科学が持つ根源的な価値について、大衆の理解が浸透するのではないかと語られ始めている。

1.　量子生命科学

1.1　量子生命科学とは

本稿では、量子生命科学を量子科学、量子技術、生命科学がぼやっと重なった領域と捉えて話を進めたい(図 1)。そのすべてが重なった真部分集合というよりも、それらの和集合といったイメージである。量子科学技術も、生命科学も、あらゆる科学と技術の分野の中でも最も急速に進展し広がっているツートップの分野でありそれぞれの広がりが流動的である。量子生命科学はその二つの分野が領地を広げる中で重なってきた新興の融合分野であり、ほんの 3 年前の理解に比べても現在の理解は相当に深くなりかつ広がっている。まして 10 年も経つとすっかり様相が違うことであろうが、有意義な異分野間交流を促進するためのたたき台として各種の公募などで使われている。図 1 の I は生命科学と量子科学が重なる領域を示し、量子科学による生命現象の解明などが含まれる。II は生命科学と量子技術が重なる領域を示し、量子技術の生体応用が含まれる。III は、量子科学と量子技術が重なる領域を示し、量子コンピュータなどの量子科学と量子技術の双方を必要する分野が含まれる。IV は生命科学と量子科学、量子技術が重なる領域を示し、量子技術を用いて、生命現象を量子科学的に解明する研究などが含まれるだろう。繰り返すが本領域はまだ答えがない部分も多く発展途上であるため、図 1 を排他的な使い方ではなく、イノベーション想起に用いていただければ幸いである。

1.2 量子2.0　、量子超越性、量子インスパイア

量子技術の大競争の中でも、計算が早いというベンチマークが誰にとってもわかりやすいのが量子コンピューターである。多種多様な量子技術をベースとした計算手法が百花繚乱し、それらの成功に対して、それは本当に量子かという相互の検証や議論も白熱した。そもそも普通の半導体やレーザーも、古典力学ではなく量子力学に基づいて設計され動作している。では半導体を用いたパソコンは量子コンピューターなのか、といえば違うだろう。そこで量子もつれ、つまりエンタングルメント制御等の最新技術を量子 2.0 と表し、既存の量子技術を量子 1.0 と呼んで昨今の進展を強調する語法が発案され流布している。さらにそうした量子 2.0 の計算の中で、実際にそのパフォーマンスが量子 1.0 の計算機では実現できないものを量子超越性と呼び、2019 年末に量子超越性を示したというグーグル社の発表は大きなマイルストンとして受け

止められた。また、量子 2.0 での計算アルゴリズムに触発されて量子 1.0 の計算アルゴリズムも一面で急速に進歩した面があり、量子インスパイアなどと呼ばれている。

1.3 再脚光を浴びた量子生物学

量子力学を確立した立役者の一人エルヴィン・シュレーディンガーは、1940 年代のダブリンで「生命とは何か」というテーマで講義を行なった。量子と生命に関しての考察において、DNA 二重螺旋構造発見前に、遺伝情報継承の安定性を量子力学による構造の離散性や変化の飛躍性に求めるなど、その際の講演は生物物理学、分子生物学の大きな指導指針となってきた。一方で、量子×生命という彼やその後の主に理論物理学者からの問題提起は、おそらく主に分析技術、実験技術の限界に阻まれて、当初期待されたほどの進展はもたらしてこなかった。

量子×生命が再び、脚光をあびることになった出来事の一つに、2007 年のカリフォルニア大学バークレー校のフレミングらのグループによる光合成系における量子コヒーレンス現象の超高速分光法による検出がある[1]。ようやくこうした議論ができるレベルに分析技術が追いついたのである[2]。その後、他稿にて前田公憲氏に解説いただくように、渡り鳥が地磁気を感知するのに光受容タンパク質クリプトクロム内でエンタングルメントを利用している可能性が報告された[3]。また、同じく光受容体タンパク質であるロドプシンは、視覚の第一ステップとして、11 シス型レチナールの全トランス型への光異性化反応を担うが、異性化の量子収率が約 0.7 と高く多くの研究が進行している[4]。他にも、酵素反応[5]や感覚器[6]、細胞膜イオンチャネル[7]においても、古典力学的には説明がつかない、生物が量子効果を利用している可能性が示唆される機構の発見の報告が相次ぎ、量子生物学のちょっとしたブームになっている[8]。

ここで議論されている生体内の量子性の発見の多くは前項での議論での量子 1.0 であるということには少し注意が必要であろう。生体が常温で実際に量子コヒーレンスや量子エンタングルメント、量子 2.0 で議論されている物理現象を利用しているのかということになるとまだ議

論がある。一方で量子 1.0 を高い効率を実現するために利用しているという点においては、そもそも量子性が分子の物理化学現象の根幹である以上、分子で成り立つ生体がそれを利用していることは自明であるという指摘も成り立つだろう。分析科学者寄りの筆者の私見としては、そうしたことが議論できるレベルの精密な分析が可能になったこと自体が、７０年の時を経て、シュレディンガー、ファインマンらの夢を叶えており素晴らしいと捉えている。また、生体が量子 2.0 を利用しているのかどうかという科学の問いに答えるためには、結局のところ量子 2.0 の計測や操作の技術がもっと進むことが必要であり、ここでも技術と科学の両輪が支えあって時代を進めていくことが観察されていると捉えている。

2　日本と量子生命科学

こうした量子技術の発展や量子生物学の再興に伴い、日本では、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）のさきがけ「量子生体」や量子生命科学会が発足し、さらに光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）に「量子生命」が加わるなど、この数年間で量子生命科学分野が急速に発展している。それは海外でも同様で、英国政府のNational Quantum Technologies Programmeや欧州委員会のQuantum Flagshipにも生命科学との融合が明確に位置付けられている。またドイツが大学を中心とした欧米融合の拠点となって、産業界も巻き込んで医療応用などを目指した研究を進めており、シュツットガルト大学及びウルム大学に、それぞれ量子センサ及び量子生物学を強化する研究センターが設置される予定である。これらの国外動向の下、我が国研究グループの高度な量子センサ等の作製技術への関心は高く、既に、海外の研究グループからの引き合いで材料提供されている状況にある。また、細胞や組織中における量子力学的な効果の探索研究が萌芽的になされており、2012年には量子生物学に係る初の国際会議が英国で開催されている9。しかし、欧米における量子生命科学は、図１におけるⅠ領域とⅡ領域が、別個に発展している印象を受ける。それに対して、日本では、量子科学、量子技術、生命科学を融合する学問として量子生命科学を掲げている。それにより、図1のⅣのような領域が生まれるなど、それぞれの

分野による相互作用を誘起し、イノベーション創出が期待できる。

2.1 さきがけ［量子生体］

本研究領域は、文部科学省の選定した戦略目標「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」のもとに、平成 29 年度に発足した。本領域発足にいたる経緯について文部科学省ホームページ[9]を参照すると、「我が国においては、これまでの連綿とした光・量子に係る基礎研究から、世界をリードする技術シーズが生まれてきている。例えば、量子センサの作製技術は、我が国の機関が国際的にも高い技術を有しており、海外研究グループからも材料提供の依頼を受けている。また、本特集で竹内繁樹氏らによって解説していただいている量子もつれ光を用いた顕微鏡は我が国発の技術であり、さらに、量子ビームの高度利用による超精密構造・機能解析についても、世界に先駆けた研究を創出している。これらの量子技術は、生命科学への応用も期待されており、海外では強く推進され始めているものの、我が国においては、量子技術分野と生命科学分野の交流の遅れにより、その生物応用が十分に進んでいない。さらに、このままではこれらの高度量子技術の国外流出も危惧されている。そのため、本戦略目標において、量子技術と生命科学との融合を促進することにより、日本の優位性を保持しつつ、細胞内の生体分子が有する機能を量子レベルから統合的に理解する生命科学フロンティアを開拓する。これにより、新規治療・診断法等への応用が図られるとともに、量子技術の特性を利用した新規計測装置・機器による産業へと展開していくことが期待される。」とある。そして達成目標としては、(1) 量子センサ技術を用いて、生体内の微弱な温度・磁場・電場等の高感度観測を実現し、生命科学や医療・産業応用の新たな潮流を生み出すこと、(2) 量子もつれ光子や多光子、光量子検出技術等の最新の量子技術を、超解像顕微鏡や革新的新規プローブと組み合わせ、いわば量子イメージングと言える新たな生体内イメージングを実現し、可視化されなかった状態を高い空間分解能で捉えること、(3) 量子ビーム利用・計測の高度化技術を用いて、生体分子の電子状態、水素原子の挙動、化学結合の状態等の量子レベルに至る超精密構造・機能解析を行い、分子間の相互作用や反応といった生体分子の

機能を解明することが掲げられている。以上を踏まえて、平成 29 年度から令和元年度までの間に 36 課題が採択された。今後の量子生命科学分野を担う研究であるため、ここに紹介する。

2.2 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

平成 30 年 7 月に、大阪大学先導的学際研究機構に量子情報・量子生命研究センターが設置された。部門長は、次に紹介する第一回量子生命学会で基調講演を行った北川勝浩氏が務める。ホームページ[11]によると、「量子情報は量子物理学と情報科学・計算機科学との学際融合領域として発展し、量子暗号、量子コンピュータ、量子シミュレータなど、古典物理学に基づく現在の情報通信・情報処理技術を凌駕する量子技術を生み出しつつある。また、渡り鳥のコンパスや光合成など生命でも量子現象が発見され、量子情報と生命科学の学際融合領域として量子生命科学が誕生した。量子情報で生まれた「量子もつれ」などの新概念は、ブラックホールからミクロな量子多体系、生命までを繋ぐ共通言語として、学術のさらなる融合・深化の触媒として期待される。量子情報・量子生命研究センターは、量子コンピューティング、量子情報融合、量子情報デバイス、量子通信・セキュリティ、量子計測・センシング、量子生命科学の６つの研究グループから構成され、それぞれの分野の研究を発展させるとともに、これらの分野間および他の学問分野との学際融合研究を推進する。また、国際的な量子イノベーション拠点として、海外の研究拠点との交流を推進するとともに、人材育成から社会実装まで担う。」とある。量子情報科学の進歩は近年著しく、世界中で産学官が連携して開発が日進月歩で進んでいる。特に量子コンピュータは、ソフトとハードの両面において量子生命科学との関わりが深い。後に「佐藤文隆先生と量子生命科学」の章でも触れるが、現在の量子コンピュータは数十から数百の量子系であり、既存の量子化学よりも生体に近い系でのシミュレーションが可能となる。また、ハードの面では、量子技術の発展が期待できる。例えば、動的核偏極法（DNP）は、量子コンピュータ開発の中で発展し、今では Q-LEAP「量子生命」の中核を担う技術の一つとなっている[12]。このように、量子コンピュータ開発の中で生まれたり発展したりする技術を生命科学に応用することが期待できる。また、冒頭で量子コンピュータは図１のⅢに属すると述べ

たように、テクノロジーの進歩だけでなく、サイエンスとしての進歩も伴っている。例えば、アロシュとワインランドは「個別の量子系を測定し操作する」ことを可能にした功績で 2012 年にノーベル物理学賞を受賞したが、これは量子科学の常識を覆した。このように量子コンピュータの発展は、量子技術の発展だけでなく、量子科学の発展も伴っており、様々な面で量子生命科学へ影響を及ぼすだろう。

2.3 量子生命科学会

日本で、第 1 回量子生命科学研究会が行われたのは、平成 29 年 4 月 12 日であった。それから 2 年が経ち、平成 31 年 5 月 23 日に量子生命科学会が発足した。学会ホームページ[13]によると、量子生命科学会は、「最先端の量子技術あるいは量子科学の知見を総合的に利活用し、従来不可能であった極微の空間・時間スケールあるいは超高感度での生体内部の観測や生体分子の計測、生命機能のモデリングなどを実現することにより、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・工業・情報・宇宙・環境・農業・エネルギー等の分野において革新的産業応用等を目指す新たな学術領域「量子生命科学」の普及・促進のため、会員相互の支援、交流を図ることを目的とする」とある。日本は、量子分野、生命分野ともに世界のトップランカーであり、それらを融合する量子生命科学領域には期待が集まる。第一回における基調講演は、京都大学名誉教授の佐藤文隆氏と中辻博氏、大阪大学院基礎工学研究科の北川勝浩氏により行われ、それぞれテーマは、「量子生命科学への期待」、「量子生命科学への量子化学によるアプローチ」、「量子情報と量子生命」であった。また、セッションでは、本特集でも取り上げられているＮＶセンターと磁気受容タンパク質をテーマに講演が行われた。量子生命科学分野の学会発足は世界初である。この勢いを失速させることなく日本が世界を先導していける分野となることを願う。

2.4 光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）

Q-LEAP とは、経済・社会的な重要課題に対し、量子科学技術（光・量子技術）を駆使して、

非連続的な解決（Quantum leap）を目指す研究開発プログラムである[12]。令和 2 年度の公募に「量子生命」が新たに加わった。量子生命実施方針として、公募要領では、以下の 3 つの目標が設定されている。「(A)生命現象の機能解明や疾患の早期発見、再生医療における細胞の品質管理等への活用を見据えた、広視野で高い解像度を有する多項目同時計測生体ナノ量子センサシステムを開発する。(B) 従来手法では困難な初期がん・深部がんの早期発見、抗がん剤等の効果の早期判定、新薬開発における高速な薬剤スクリーニング等、国民の QOL の向上や医療の効率化を可能とする、量子符号化センサ等の量子技術に基づいた超高感度 MRI/NMR の研究開発を実施する。新規の長寿命・低毒性の超偏極プローブ分子を開発し、ヒトでの高感度・高精度疾患診断に向けた前臨床試験をクリアする。また、大幅な小型化・低コスト化により超偏極装置の爆発的な普及が期待される室温超偏極技術において高感度化を達成し、高速薬剤スクリーニングや動物でのリアルタイム代謝イメージングを実現する。(C) 光合成など生物機能を模倣した技術の実現により、省エネルギー化や有用物質生産による持続可能社会の実現や、高感度センサによる安全・安心社会の実現など、幅広い分野への波及が期待される。様々な生体反応において本質的に寄与するとされる量子効果を観測する技術を確立し、生体の機能の学理を解明する。」特に(A)と(B)に関しては具体的なマイルストーンが設定されている。5 年後のマイルストーンは、「(A) 単一のナノ粒子で生体細胞の温度や磁場、pH 等 3 項目以上の情報を取得可能な生体ナノ量子センサシステムを開発する。 (B) 新規の長寿命・低毒性の超偏極分子プローブを開発し、有望な超偏極分子プローブをモデル動物に適用し、病態検出の有用性を実証する。また、室温超偏極技術により従来 MRI/NMR を大幅にしのぐ高感度化を実現し、高速の薬剤スクリーニングと小動物でのリアルタイム代謝イメージングを実現する。」となっている。また、10 年後は、「(A) 小動物内の生体組織及び細胞における温度や磁場、pH 等 3 項目以上の情報の同時計測とこれらの時間変化を追跡可能な広視野イメージングを実現する生体ナノ量子センサシステムを開発する。(B) 超偏極分子プローブの高度化により、代謝や病巣の環境による病態評価を実証し、有望な超偏極分子プローブの前臨床試験をクリアする。また、室温超偏極技術のヒトでの臨床を見据え、大型動物のリアルタイム代謝イメージングを実現す

る。」と設定されている。つまり、(A)生体ナノ量子センサと(B) 超偏極分子プローブに重点を置くことが明記されている。ここでは光という観点から生体ナノ量子センサを中心に述べる。

2.4.1 生体ナノ量子センサ

生体ナノ量子センサとして、ナノダイヤ量子センサー（NVC）は生体細胞の温度や磁場、pHなどの計測が期待されている。NVC については他稿にて、大阪大学研究所の原田慶恵教授とQST の五十嵐龍治氏が詳しく解説されているため、ここでは、光と関連する生体ナノ量子センサとして、量子ドットを紹介する。

量子ドットとは、10^2 から 10^4 個の原子から構成される直径約 10nm 以下の導電性ナノ結晶のことを指す。微小な空間に電子を閉じ込めるために人工的に作られる。大きな結晶ではエネルギー準位は連続的に分布しているのに対して、量子ドットのような微小なサイズでは量子閉じ込め効果によってエネルギー順位は原子のように離散化する。こうした量子ドットのもつエネルギースペクトルのバルク結晶からの劇的な変化は、電子・正孔や励起子の位相緩和やエネルギー緩和にも大きな影響を及ぼす。すなわち、離散性が位相緩和を制限し離散的なエネルギースペクトルの均一幅を狭くする。これにより、量子ドットは抗光退色性と蛍光スペクトルの鋭さを有することになる。さらに、バイオ系傾向プローブとして応用する上で特に優れているのが、発光波長のサイズ依存性である。量子ドットのバンドギャップは、サイズが大きくなるとともに減少する（量子サイズ効果）（図 2)。それにより、量子ドットの発光波長はサイズ依存性を示すことになる。量子ドットではバンドギャップより大きなエネルギーの光ならどんな波長の光でも吸収するため、量子ドットの吸収スペクトルは非常に幅広い。

生体イメージング応用に関しては、従来の CT や MRI、PET などのイメージング技術が組織レベルでの撮像なのに対して、量子ドットを用いると細胞レベルからの高感度イメージングが可能であり[14]、より正確にがんをイメージングすることが期待されている[15]。また、イメージングだけでなく治療も一緒に行うセラノスティクスとしての活躍も期待されている[16]。例えば、抗癌剤に量子ドットを付加しドラッグデリバリーを担うことや[14]、治療評価をリアルタイムで

行うこと、光線力学療法の新たな材料としての可能性などが考えられている[17]。ここで出てきた光線力学療法とは、光感受性物質を静脈注射して腫瘍組織に集積させ、レーザー光を照射することにより光化学反応を引き起こし､腫瘍組織をアポトーシスに誘導するがん治療法である。この治療効果は、レーザー光と光感受性物質との光化学反応によって生成される一重項酸素の酸化作用によるものと考えられている[18]。

2.4.2 超偏極分子プローブ

超偏極分子プローブは、核偏極率を向上させることにより MRI 感度の飛躍的な上昇を実現する。それにより、MRI の造影剤のような役割が期待されている。偏極率をあげる方法はいくつかあるが、動的核偏極(DNP : Dynamic Nuclear Polarization)法により ^{13}C を偏極させたピルビン酸を超偏極分子プローブとして用いた臨床試験は海外ですでに進行している（表 2)。DNP は、ラジカルより分極を標的化合物に転移する方法であるが、超低温を必要とし、一度凍らせてから偏極後に溶解し体内に注入するという行程が必要である。超低温を維持するランニングコストも問題である。そこで、室温でも超偏極を実現するトリプレット DNP やパラ水素付加（PHIP : Para-Hydrogen Induced Polarization)の実用化が期待されている[20]。また、現在の臨床試験で用いられている分子プローブは、全てピルビン酸であるが、ピルビン酸以外の分子プローブ応用も期待されている。

2.4.3 量子 AI

令和 2 年度の光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）のもう一つの柱は、量子ＡＩである[12]。量子コンピュータは、特定の問題に対して、古典コンピュータをはるかに凌駕する計算性能が期待され、機械学習やクラスタリングなどの AI 技術については、相補性が高いキラーアプリケーションの一つとして期待が高まっている。これら量子ＡＩの開発目標例には、量子化学（マテリアルズインフォマティクス、ケモインフォマティクスなど）への適用や画像診断による疾病予測、症状や疾病履歴に基づく処方箋の作成などの医療への応用も含まれてい

る。

また、近年、量子認知科学という分野も発展を遂げている。量子認知科学では量子論的な数理モデルを用いて心理学などの実験結果を説明する。統計的モデルとして量子確率論的なモデルを用いる[21]。つまり、脳神経細胞の中でミクロな量子効果が働いて意識が生まれるといったことではなく、量子論の構造が人の認知や心理を説明し得る可能性があるといったことである。これは、圏論的量子力学（圏論に基づいた量子力学）が物質的量子性ではなく構造的量子性に新たな理解を見出していることに起因している。そして、この構造的量子性を AI のアルゴリズムに取り入れるのが量子 AI であり、そういった点では、量子 AI の使い道に医療があるだけでなく、量子 AI そのものが、人の認知や意思決定の解明といった点で、量子生命科学に未来を担っていく存在である。

3. 量子生命科学の未来

3.1 佐藤文隆先生と量子生命科学

第一回量子生命科学会で、佐藤氏に講演していただく前に、筆者らは、2019 年 2 月に量子生命科学について対談する機会があった。理論物理学者が見た量子生命科学の未来について、この場をお借りしてその様子をお伝えしたい。

まず、佐藤氏の量子力学の変遷について語る姿が印象的であった。佐藤氏が理論物理学の研究を始めようと大学院に入ったときは、量子力学をテーマにすると結果が出ない時代だったため、職業としては宇宙物理学を専攻し、定年してからゆっくり量子力学のことを考えようとしたそうである。ところが、蓋を開けてみると、量子力学は得体の知れないものというよりむしろ、半導体産業で大活躍し、もはや誰も疑うことはなくなっていたのである。そして、2012 年のノーベル物理学賞では、「重なった状態」を”重なったまま”で外部から操作することができるようになり、エンタングルメントや重ね合わせを応用する量子 2.0 の時代に突入した。さらに、医学系の筆者らが量子生命科学の看板を掲げて訪ねて来たことに、量子力学もここまで来たかというような感覚に浸られていたように見えた。

量子生命科学に関しては、量子化学と半導体の間という表現をされていた。量子化学の１分子系や半導体のように無限に近似した系は、物理学の系としてシンプルであるため、量子力学の矛先はまずそれらに向けられた。それが、量子コンピュータの発展に代表されるように数十という量子系に応用される時代になった今、まさに量子生命科学の時代がやってきたというわけだ。これに関しては、細谷暁夫氏が現代思想「量子コンピュータ」[22]で、「量子力学の公理は、個別には実験的に確かめられているものの、それらの大量の組み合わせに対しても全て大丈夫かという議論の余地が残る。例えば、測定公理あたりに破綻が出てこないとも限らない。統計力学の対象である巨視的な量子系について標準的な量子力学は破綻を見せていないので、何か起こるとしたら、中途半端に大きな系であろう。」と述べられていたことを連想させる。これは、量子コンピュータについての意見であるが、量子生命科学にも当てはまることである。果たして、この中途半端な系である生体において量子力学はどのような振る舞いを見せるのだろうか。そもそも生体内で量子力学を語ることは可能なのだろうか。この問題は、図１のＩ領域において、長い間議論が続いている興味深い問題である。佐藤氏の意見は、より多くのものがコヒーレント状態にあるならば一部がデコヒーレンスしようとしても全体に影響が及ばないのではないかというものであった。この辺りはまだまだ議論の余地は残っているものの、いずれにしても第一回量子生命科学会での基調講演のテーマにも現れているように佐藤氏が量子生命科学に期待されていることはこの上ない喜びである。

3.2 量子生命科学論議

量子生命科学はこのように量子技術に基づいた計測技術を中心に近年発展してきた。そして、分子生物学を突き詰めた中で、生体内分子の挙動に、物性としての量子性が寄与していることが、特に光合成や光受容、磁気受容において示されてきた。

では一方で、そうしたミクロ環境において一つ一つの量子効果が働いていることが、我々の生物としてのマクロな活動にどれだけの影響を及ぼしているかという問いがあるとするならば、

それは階層性によってほとんど直接的な影響を及ぼすことはないというのが我々生物学者としての現在の主流の一つの答えである。それではもう少しマクロに、分子生物学や生命科学というよりも、生物学として量子性を問うことはできないだろうか。

現在、量子論理や量子情報、量子計算、量子圏論といった近年爆発的に進歩しているツールを、計算とは何か、意識とは何か、意思決定とは何かいった概念に当てはめることでマクロなヒトを理解していくという取り組みが始まっている。量子論理や量子情報、量子認知科学における量子というのは、圏論の道具を使うことにより、ミクロ量子系ではなくマクロな現象でも量子論理の構造と相同な論理構造が成り立つことがあるということであり、ミクロから組み立ててマクロに至るということではない。むしろ、量子コンピューティングでいうところの量子インスパイアや量子シミュレーション、量子論理を使うことでメカニクスは古典のままであるが、これまでの古典計算よりずっと早く、見通しのよくなる計算を量子コンピューターと呼ぶことに近いかもしれない。量子コンピューティングによって急速に展開している量子情報、量子論理、量子操作などの分野によって切り開かれ、拡大され、一般化され、延長される、確率や認識や意思決定といった生命現象の理解に重要な概念の深化や変容は、私たちの生命観も変えていくのではないか、第二次量子革命が生命の理解に与えるそうした変容の現場が量子生命科学分野になるのではないかと大変期待している。

文　献

1. G.S. Engel TRC, E.L. Read, T.-K. Ahn, T. Mancal, Y.-C. Cheng, R.E. Blankenship and G. R. Fleming : Nature, **446**(2007)782-786.
2. 田中成典 ： 現代思想. **48**(2020)97-107.
3. Kiminori Maeda, Alexander J. Robinson, Kevin B. Henbest, Hannah J. Hogben, Till Biskup, Margaret Ahmad, Erik Schleicher, Stefan Weber, Christiane R. Timmel, and P. J. Hore : Proceedings of the National Academy of Sciences, **109**(2012)4774-4779.
4. Dario Polli, Piero Altoè, Oliver Weingart, Katelyn M. Spillane, Cristian Manzoni, Daniele Brida, Gaia Tomasello, Giorgio Orlandi, Philipp Kukura, Richard A. Mathies, Marco Garavelli & Giulio Cerullo : Nature, **467**(2010)440-488.
5. Klinman JP, Kohen A : Annual review of biochemistry, **82**(2013)471-496.
6. Franco MI, Turin L, Mershin A, Skoulakis EM: Proceedings of the National Academy of Sciences, **108**(2011)3797-3802.
7. Bernroider G, Summhammer J : Cognitive Computation, **4**(2012)29-37.
8. ジム・アル＝カリーリ、ジョンジョー・マクファデン、水谷淳訳. *量子力学で生命の謎を解く*. SB Creative; 2015.
9. 文部科学省　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 https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11293659/www.mext.go.jp/b_menu/houdou/29/03/attach/1383133.htm. Accessed.
10. さきがけ［量子生体］量子技術を適用した生命科学基盤の創出. https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/research_area/ongoing/bunyah29-1.html. Accessed.
11. 大阪大学先導的学際研究機構量子情報・量子生命研究センター. https://qiqb.otri.osaka-u.ac.jp/. Accessed.
12. 令和 2 年度　光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）　公募要領.

https://www.mext.go.jp/content/2.02.00218-mxt_kibanken02.000004954_1.pdf. Accessed.

13. 量子生命科学会. http://jsqls.kenkyuukai.jp/about/. Accessed.

14. Zrazhevskiy P, Gao X : Nature communications, **4**(2013)1-12.

15. Xiaohu Gao YC, Richard M Levenson, Leland W K Chung and Shuming Nie: Nature Biotechnology, **22**(2004)969-976.

16. Ho Y-P, Leong KW: Nanoscale, **2**(2010)60-68.

17. Jiechao Ge, Minhuan Lan, Bingjiang Zhou, Weimin Liu, Liang Guo, Hui Wang, Qingyan Jia, Guangle Niu, Xing Huang, Hangyue Zhou, Xiangmin Meng, Pengfei Wang, Chun-Sing Lee, Wenjun Zhang & Xiaodong Han: Nature communications, **5**(2014)1-8.

18. Dolmans DE, Fukumura D, Jain RK : Nature reviews cancer, **3**(2003)380-387.

19. Norah O'Farrell AH, Benjamin R Horrocks : Int J Nanomedicine, **1**(2006)451– 472.

20. Makoto Negoro, Akinori Kagawa, Kenichiro Tateishi, Yoshiki Tanaka, Tomohiro Yuasa, Keigo Takahashi, Masahiro Kitagawa : The Journal of Physical Chemistry A, **122**(2018)4294-4297.

21. 丸山善宏 : 現代思想, **48**(2020)84-96.

22. 細谷暁夫 : 現代思想, **48**(2020)46-53.

荒牧修平, 瀬藤光利

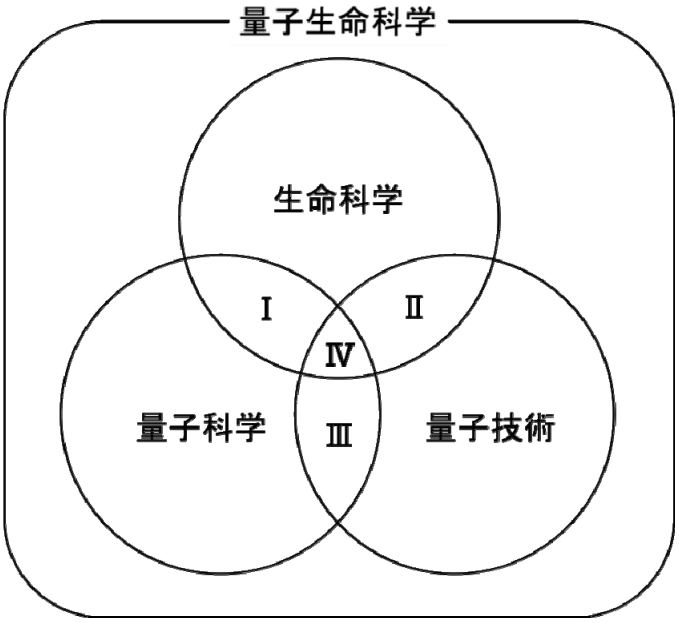

図 1. 量子生命科学の広がり

Ⅰ は生命科学と量子科学が重なる領域を示す。Ⅱは生命科学と量子技術が重なる領域を示す。Ⅲは、量子科学と量子技術が重なる領域を示す。Ⅳは生命科学と量子科学、量子技術が重なる領域を示す。

荒牧修平, 瀬藤光利

表 1. さきがけ「量子生体」採択課題（ホームページ[10]掲載順）

	採択課題
平成 29 年度	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
	超高感度ラベルフリーイメージング法の開発
	広帯域スクイーズド光源による低侵襲深部多光子分光
	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
	多光子時間空間相関イメージング手法の開拓
	多光子現象を駆使した脳内化学情報伝達の可視化解析
	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
	反応性量子ビームによる細胞内生命現象の可視化
	生命と認知の量子情報理論：圏論的定式化とその応用
	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
	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
	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
	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―
平成 30 年度	音響フォノン計測で拓く超次元力学イメージング
	量子トモグラフィを用いた密度行列分光法の開発
	生体分子中におけるアミンの量子特性を解明する
	生体内反応による核スピン量子もつれ生成の検証
	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
	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？
	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
	高速量子波面モジュレーション・クライオ電顕

	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
	超核偏極ナノ空間の創出に基づく高感度生体分子観測
	光合成における量子環境
	量子構造生物学におけるプロトン：相乗的効果と構造
	動物磁気感受のためのクリプトクロム時空間計測
令和元年度	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
	量子容量を用いた生化学的界面の計測と制御
	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
	蘇る太古の光合成タンパク質：量子効果の誕生
	生体内量子多体系における特異的化学反応の機構解明
	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
	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
	非線形光学効果が照らす生体物質交換の仕組み
	原子分解能・低速電子ホログラフィーの開発
	共振器オプトメカニカルフルイディックスの開発

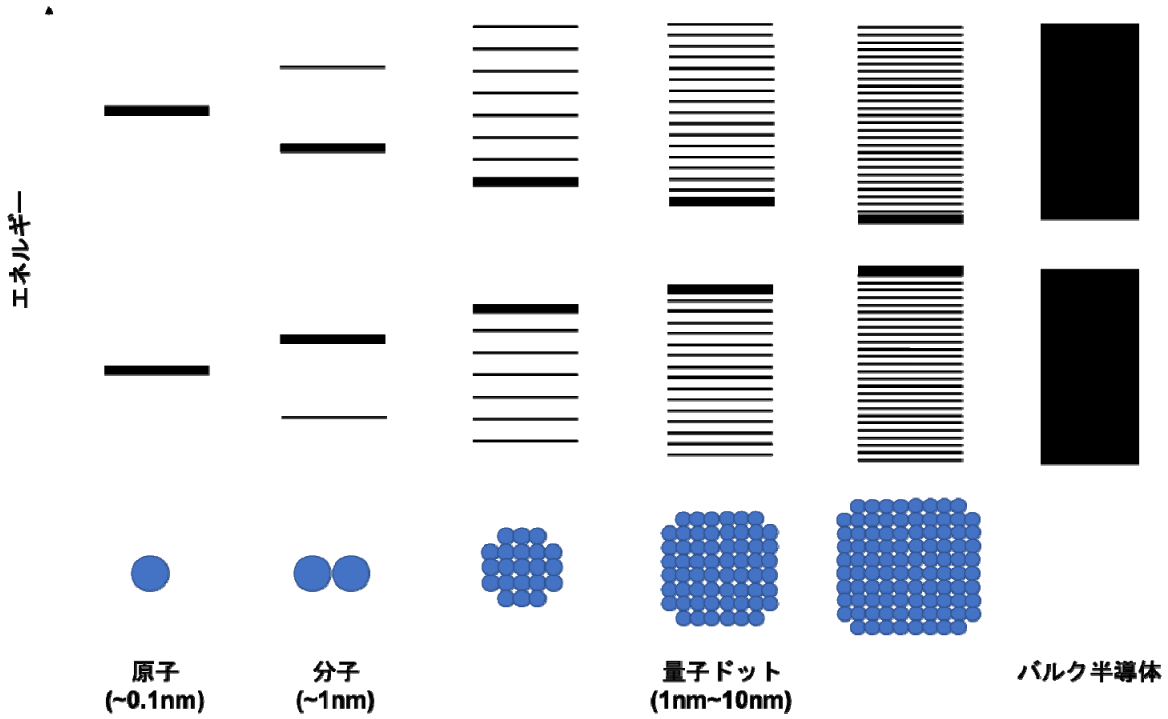

図 2. 量子ドットのエネルギー準位　[19]より改変

原子、分子、量子ドット、バルク半導体の相関を示す。量子ドットはサイズ依存性があり、サイズが大きくなるほどバンドギャップが狭くなる。また、バルク半導体と違い量子ドットでは電子のエネルギー準位が離散化していることがわかる。

荒牧修平，瀬藤光利

表 2. 超偏極分子プローブ（ピルビン酸）を用いた臨床試験

治験内容	対象	機関	研究開始
Hyperpolarized Carbon C 13 Pyruvate in Diagnosing Glioma in Patients With Brain Tumors	神経膠腫	MDACC	2019/5
Hyperpolarized Carbon C 13 Pyruvate Magnetic Resonance Spectroscopic Imaging in Predicting Treatment Response in Participants With Prostate Cancer	前立腺癌	MDACC	2019/2
Hyperpolarized Carbon C 13 Pyruvate Magnetic Resonance Spectroscopic Imaging in Detecting Lactate and Bicarbonate in Participants With Central Nervous System Tumors	中枢神経系悪性腫瘍	SUMC	2018/11
Effect of Fatty Liver on TCA Cycle Flux and the Pentose Phosphate Pathway	脂肪肝	UTSW	2018/10
Effect of Cardiotoxic Anticancer Chemotherapy on the Metabolism of [1-13C]Pyruvate in Cardiac Mitochondria	乳癌	UTSW	2018/7
Imaging of Traumatic Brain Injury Metabolism Using Hyperpolarized Carbon-13 Pyruvate	外傷性脳損傷	UTSW	2018/6
Role of Hyperpolarized 13C-Pyruvate MR Spectroscopy in Patients With Intracranial Metastasis Treated With (SRS)	脳転移腫瘍	SHSC	2017/11
Hyperpolarized 13C MR Imaging of Lactate in Patients With Locally Advanced Cervical Cancer (LACC) Cervical Cancer	子宮頸癌	SHSC	2017/11
Study to Evaluate the Feasibility of 13-C Pyruvate Imaging in Breast Cancer Patients Receiving Neoadjuvant Chemotherapy	乳癌	SHSC	2017/11
Hyperpolarised 13C-Pyruvate MRI Study	がん、心血管系疾患	UCL	2017/7

Metabolic Characteristics of Brain Tumors Using Hyperpolarized Carbon-13 Magnetic Resonance Spectroscopic Imaging (MRSI)	脳腫瘍	UTSW	2017/2
UTSW HP [13-C] Pyruvate Injection in HCM	肥大型心筋症	UTSW	2017/1
Pilot Study of Safety and Toxicity of Acquiring Hyperpolarized Carbon-13 Imaging in Children With Brain Tumors	小児脳腫瘍	UCSF	2017/1
Hyperpolarized C-13 Pyruvate as a Biomarker in Patients With Advanced Solid Tumor Malignancies	前立腺癌	UCSF	2016/9
Magnetic Resonance (MR) Imaging With Hyperpolarized Pyruvate (HP) (13C) in Castration-Resistant Prostate Cancer	前立腺癌	UCSF	2016/9
Hyperpolarized Carbon-13 Imaging of Metastatic Prostate Cancer	前立腺癌	SHSC	2016/6
Metabolic Imaging of the Heart Using Hyperpolarized (13C) Pyruvate Injection	肥大型心筋症	SHSC	2015/12
Multiparametric MRI for Prostate Cancer Localization and Characterization Using Hyperpolarized Pyruvate (13C) Injection	前立腺癌	SHSC	2015/12
A Pilot Study of (MR) Imaging With Pyruvate (13C) to Detect High Grade Prostate Cancer	前立腺癌	UCSF	2015/8
MRI With C13 Pilot Study Prostate Cancer	前立腺癌	UCSF	2015/5
Characterization of Hyperpolarized Pyruvate MRI Reproducibility	固形悪性腫瘍	MSKCC	2015/4
Hyperpolarized Pyruvate Injection in Subjects With Prostate Cancer	前立腺癌	UCSF	2010/10