



量子センサーが拓く 私たちの未来社会

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子技術基盤・量子生命拠点
National Institutes for Quantum Science and Technology

Quantum Sensor



Prologue

ダイヤモンドと量子。

想像できない掛け合わせが、つむぐ物語。

遡ること15年。2008年、アメリカ。

ハーバード大学の研究者たちが、

蛍光ナノダイヤモンドが

高感度のセンサーになることを

論文発表したことに始まる。

そして現在。2023年、日本。

QSTの研究者たちは、

ダイヤモンド量子センサーの

高性能材料開発から

生命科学、医学への応用を掲げ、

世界をリードする研究開発を進めている。

一粒のダイヤモンドの

可能性を広げるための挑戦は、

まだ、始まったばかり。

QSTが物語に仕掛ける伏線は、

結末でどう回収されるのか…

ダイヤモンドと量子がつむぐ物語も、

今、始まったばかり。

Prologue 01

QSTが研究開発を進める
量子センサーとは 02

Column
量子センサーの計測原理 05

量子センサーの社会実装を目指す
QSTの挑戦 06

量子技術で
調和のとれた未来社会の実現へ 11

Epilogue 13

C Contents



センサーは今や 私たちの暮らしには欠かせない存在に

センサーとは、「音・光・温度・圧力・流量など、計測の対象となる物理量を検知し、処理しやすい信号に変換する素子。また、その装置（大辞林より）」のことを言います。

温度センサー、人感センサーなど、私たちの身の回りはセンサーがあふれており、今や私たちの暮らしには欠かせない存在です。

量子技術をセンサーの分野に活用、応用する取り組みは、日本を含む各国で競争が激化しています。その主役が、ダイヤモンドを材料とした「量子センサー」です。

QSTはこれまで培ってきた量子ビームテクノロジーや物質・材料科学、医学・生命科学研究で得た知見や技術を活かし、ダイヤモンド量子センサーの材料開発から、生命科学、産業分野への応用まで、世界をリードする研究開発を進めています。

量子の特性を活かした
高感度・高品質な量子センサーの開発へ



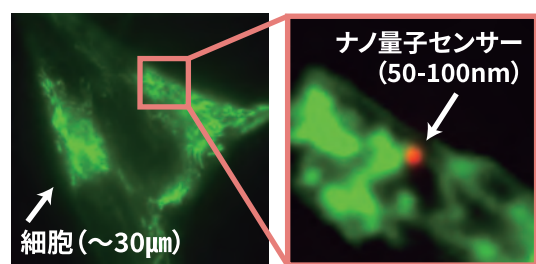
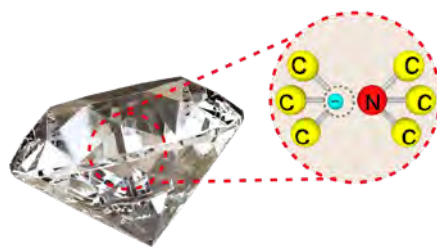
QSTが
研究開発を
進める

量子を用いた最先端センサー

ダイヤモンド 量子センサーとは



量子センサー材料の主流であるダイヤモンドは炭素からできていますが、不純物として窒素が入ったり、原子が抜けた空孔ができたりすることがあります。特に、ダイヤモンドの中で窒素(N)と空孔(V)が隣り合ってペアになったものは「NVセンター」と呼ばれます。NVセンターには電子が一つ閉じ込められ、その量子状態(電子のエネルギー準位)は、温度や磁場などによって変化します。ダイヤモンド量子センサーは、レーザー光やマイクロ波を使ってNVセンターの量子状態を測定することによって、温度や磁場のほか、pH、電場、粘性、分子の回転運動などを計測することができます。



細胞内に導入した量子センサー

一般的に、量子状態は極低温の環境下でないと捉えることができませんが、ダイヤモンド量子センサーは常温の状態ですぐにそれができ、大きな魅力の一つとなっています。

QSTは、世界最小サイズの5ナノメートルのダイヤモンド量子センサーの開発に成功しています。このセンサーを細胞の中に入れることで、生きたままの状態での細胞内の微小環境の変化を捉えることも可能です。

驚異的な性能と耐久性



ダイヤモンド量子センサーは温度であれば、0.001度の変化を計測することができます。これは8畳の部屋に人が一人入った時に上がる温度(約0.1度)の100分の1に相当します。磁場は1ピコテスラ(ピコ=1兆分の1)まで計測できます。これは新宿駅に貼ったポスターのマグネットの磁場を、約6キロ離れた東京駅で検知できるほどの感度です。

また、非常に堅牢なので、高温、高圧などの過酷な環境で使用しても、その耐久性は損なわれません。



世界最高品質を誇る 量子センサーを生み出すQSTの技術



高感度なダイヤモンド量子センサーを作るには、ダイヤモンド結晶中に方向の揃ったNVセンターをいかに高濃度に作るかが鍵となります。QSTは精密なイオンビーム、電子線照射技術に加え、これまでに培ってきた材料科学の知見を活かし、NVセンター形成技術で世界をリードしています。

ダイヤモンド量子センサーを作るには2つの方法があります。1つは、イオンビームを使う方法。不純物のないダイヤモンドに窒素イオンを打ち込むと、炭素がはじき出され窒素が入ると同時に空孔ができます。この方法は、NVセンターを狙った場所に作ったり、精度よくNVセンターを並べたりする場合に適しています。もう1つは電子線を使う方法。不純物として窒素を含んでいるダイヤモンドに高エネルギーの電子線を照射すると、炭素や窒素がはじき出されて空孔ができます。この方法は、NVセンターを一度にたくさん作ったり、高濃度に作ったりする場合に適しています。

QSTが作る世界最高品質を誇るダイヤモンド量子センサーは日本国内のみならず、アメリカ、ドイツ、オーストラリアなど、量子センサー研究が盛んな海外の大学や研究機関でも重用されています。

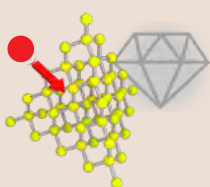


NVセンターの作り方

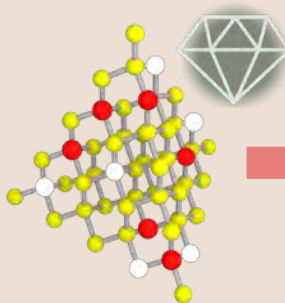
イオンビームを使う方法



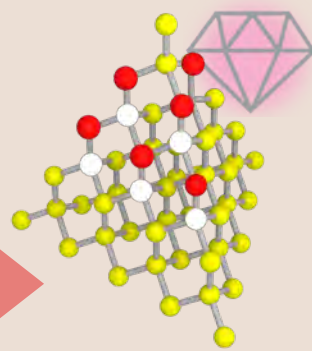
炭素だけでできた
ダイヤモンドに
窒素(N)イオンを
ぶつける



窒素イオンが炭素を
はじき出して中に入ると同時に空孔(V)ができる

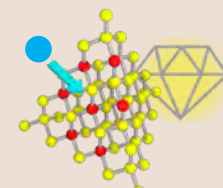


熱処理をして窒素と空孔を整列させる



NVセンターが
完成!
ダイヤモンドが
量子センサーに!

電子線を使う方法



窒素(N)が入った
ダイヤモンドに、
電子をぶつける

電子が炭素や窒素をはじき出して空孔(V)ができる



どうやって計測する？

量子センサーの計測原理

量子センサーは、NVセンターに閉じ込められた電子の量子状態の変化を読み出すことで、さまざまな物理量を計測することができます。

NVセンター中の電子は、磁気量子数 $M_s=0, \pm 1$ の3つのスピン状態をとることができます。電子が基底準位で $M_s=0$ 状態にいる場合、NVセンターは緑色のレーザー光で励起され、電子が励起準位から基底準位に戻るときに赤色の蛍光を出します(図1)。

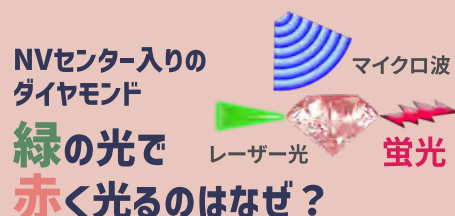
この赤色の蛍光が出ている状態で、NVセンターに特定の周波数(共鳴周波数)のマイクロ波を当てると、NVセンターが発する赤い蛍光が弱まります。

これは、NVセンターがマイクロ波を吸収することによって基底準位のスピン状態が $M_s=0$ から $M_s=\pm 1$ に移り、さらにレーザー光で励起されて励起準位 $M_s=\pm 1$ から基底準位に戻るとき、多くの割合で蛍光を出さないことにより起こる現象です(図2)。

マイクロ波の共鳴周波数は温度や磁場に依存します。マイクロ波の周波数を変えながら、NVセンターが発する蛍光強度の変化を光検出磁気共鳴(ODMR)顕微鏡で測定することで、温度や磁場を知ることができます。



光検出磁気共鳴 (Optically Detected Magnetic Resonance) 顕微鏡



NVセンター入りの
ダイヤモンド

緑の光で
赤く光るのはなぜ？

NVセンター中の電子が安定な状態にあるときに緑色のレーザー光を当てると、光のエネルギーによって電子が高いエネルギー状態へと励起され、不安定な状態になります。励起された電子は安定な状態に戻ろうと、エネルギーを赤い光として放出します。だから「緑の光で赤く光る」のです。



NVセンター入りのダイヤモンドは
緑の光を当てると赤く光る

図1

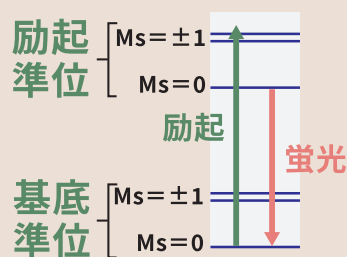
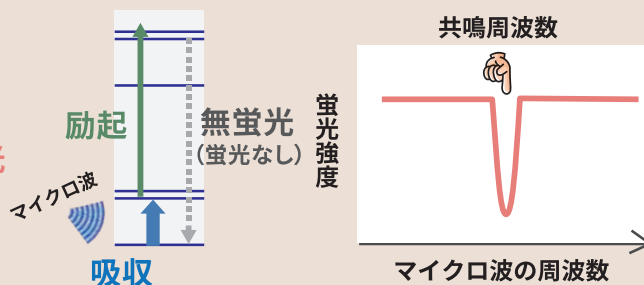
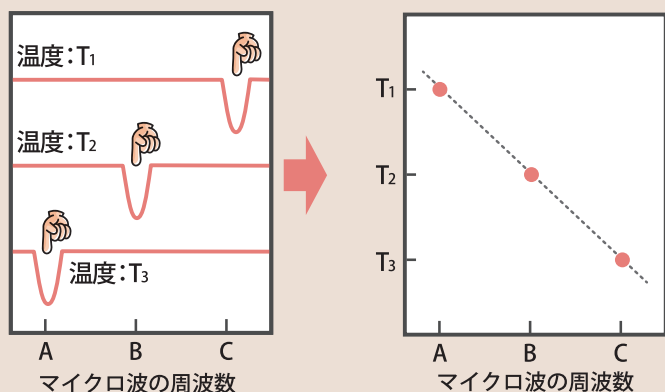


図2



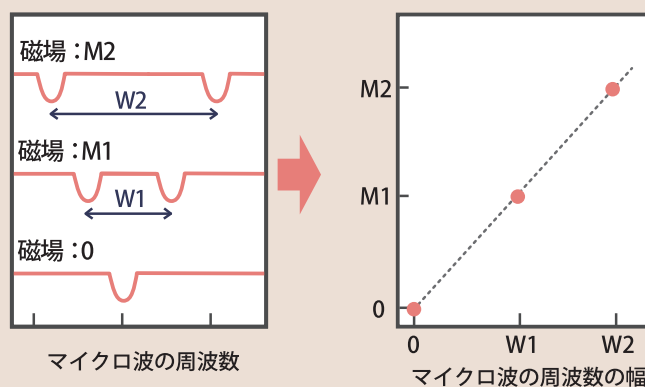
温度を測る



共鳴周波数は温度とともに変化します。蛍光が弱くなる共鳴周波数の値を測定することで温度を知ることができます。



磁場を測る



NVセンターに外部から磁場がかかると $M_s=\pm 1$ が $M_s=-1$ と $M_s=+1$ の二つの状態に分かれる「ゼーマン分裂」という現象が起こり、共鳴周波数が2つに分かれます。2つの共鳴周波数の差から、磁場の大きさを知ることができます。



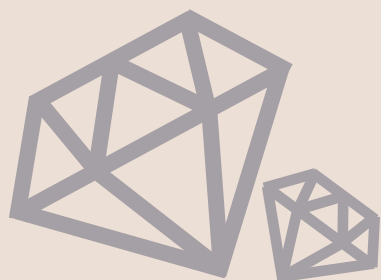
量子センサーの

量子センサーの応用先は多岐にわたります。産業分野、生命科学分野、医療分野…量子センサーが持つ可能性は無限、と言っても過言ではありません。

QSTは所有する研究開発施設や設備、実験装置を最大限利活用しながら、量子センサーを中心に「量子計測・センシング」技術の研究開発を進めています。

QSTで開発された量子センサーは事業化・産業化されることで私たちの社会に還元され、より豊かで安全な暮らしに貢献していきます。

社会実装を目指す QSTの挑戦



健康管理

心臓や脳の電気活動を小型、軽量の装置で測定可能となり患者さんの負担を減らす

医療

がん科学

がん細胞が自分の周囲の環境に応答し、それを自ら変えていくしくみを解明する

再生医療

iPS細胞が臓器に分化していく過程での内部状態と機能の変化をとらえる

生命科学

細胞生物学

細胞内で生じる「相分離※」などの物理現象と生命機能や疾患の関係を明らかにする

※水と油のように、濃度の異なる2種類の水溶液が分離する現象

脳神経科学

脳の健全性を維持する脳細胞の相互作用メカニズムやその異常による認知症の発症機序を読み解く

免疫学

さまざまな慢性疾患の原因である免疫系の暴走のしくみを解明する

極限探査

人工衛星にセンサーを取り付けて、惑星の表面磁場を計測するなど、地球内部や宇宙空間、惑星などの過酷な環境でのセンシングを実現。地球や宇宙の謎に迫る

資源調査

高いセンシング能力を活かし、海底や地中に眠る新たな資源を探る

くらし

ウェアラブルセンサー

日常生活での健康管理に役立てる

パワー半導体診断

EV、電車、家電などの動作状態をモニター。故障知らずの安心な生活を支える

産業

自然科学

世界
最高性能

量子センサー研究を支える
QSTの先端研究施設と社会実装に向けた取り組み



イオン照射研究施設
TIARA (高崎)



電子線
照射装置 (高崎)

NVセンターを
創る

高度な照射技術

付加価値を
生み出す

レーザー光による
スピン制御



レーザー実験施設
J-KAREN-P (木津)



材料開発



QIH
Quantum Innovation Hubs

量子技術イノベーション拠点として
国から指定



量子技術基盤拠点
量子機能創製研究センター (高崎)



生命科学
への応用



量子生命拠点
量子生命科学研究所 (千葉)



大型放射光施設専用ビームライン
SPring-8 (播磨)



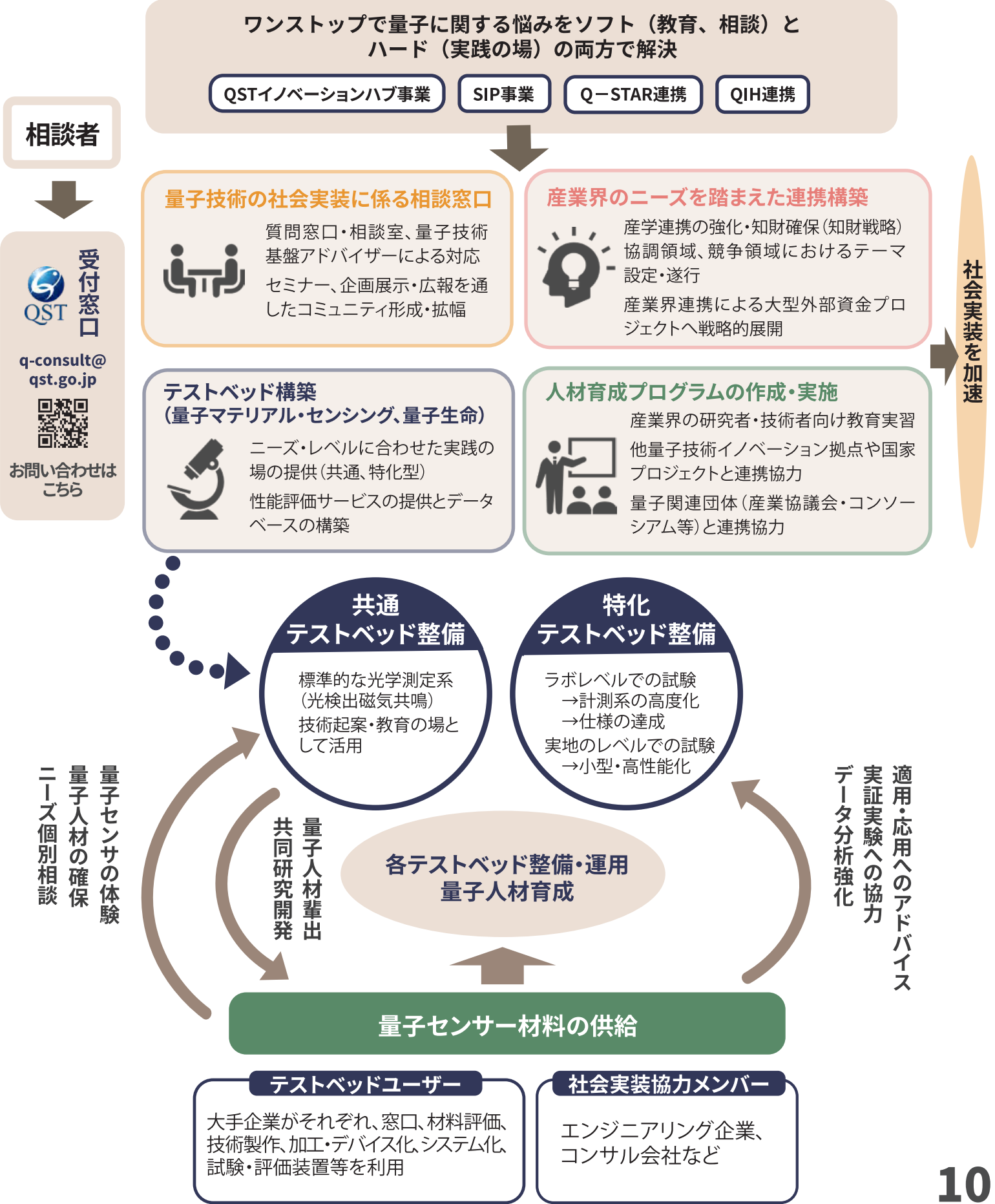
3GeV高輝度放射光施設
NanoTerasu (仙台)

高品質を保つ

放射光による
量子デバイス評価

QSTでは、世界最高性能の量子センサー研究開発を支える大型の量子ビーム施設を所有しており、大学、研究機関、産業界との「協創の場」として開かれた運用を行っています。

量子センサーに興味・関心がある、一緒に研究開発を進めたい企業、機関の方はぜひ、お問い合わせください。



量子 技術で

調和のとれた未来社会の実現へ

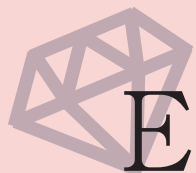
量子技術は、国の「量子技術イノベーション戦略」において、経済や社会等を飛躍的・非連続的に発展させる革新技术と位置付けられています。量子技術の研究開発の推進を担う「量子技術イノベーション拠点(QIH)」の枠組みにおいて、QSTはこれまでに培ってきた量子材料・物質科学や医学・生命科学研究の実績が認められ、「量子技術基盤」と「量子生命」の2つの拠点到指定されています。

「量子技術基盤拠点」では、高度な量子機能を発揮する量子マテリアルの開発・供給、量子技術を利用・試験・評価できる環境の整備・提供、企業等に対して量子マテリアル・量子センシングなどの利用や技術支援を行うとともに、量子ビーム技術や光科学技術を駆使して量子状態の高度な観測・制御等を実現する革新的技術・デバイスの開発など、量子技術の基盤をなす研究開発や産業支援を推進していきます。

また、「量子生命拠点」では、最先端の量子技術により従来不可能であった計測・分析を実現して新たな生命科学の地平を拓こうとする「量子生命科学」を推進します。原子・分子・細胞・組織・器官・個体の各階層及び階層を跨いで起こる生命現象を解き明かす量子計測・センシング技術を開発し、これを動物実験施設と一体のものとして、学術から医療・創薬・バイオなどの産業にわたる幅広い分野に対しテストベッドの形で提供していきます。

QSTの量子技術基盤・量子生命拠点は、革新的な量子技術の創出とその実用化、社会実装を通じて、科学技術イノベーションをもたらし、経済・社会・環境が調和した持続可能な未来社会の実現に貢献します。





Epilogue

ダイヤモンドと量子。
想像できない掛け合わせが、
宝飾品とは違う、価値のあるものに変えていく。
そのためには、美しいダイヤモンドに
傷をつけないといけない。
ためらいはない。
傷ついたダイヤモンドは、
極めて小さく、超がつくほどの
高感度なセンサーに生まれ変わるのだから。
小さな小さな細胞の、
ごくごく狭い場所の情報を捉えることができる。
宇宙や深海、地殻など、
人間が容易に近づけない過酷な環境にも耐え、
その機能を発揮できる。
そう、ダイヤモンドは炭素元素1つでできた、
最高硬度をもつ物質。
もともとタフなのだ。
そして、他の影響も受けにくい。
ひと粒のダイヤモンドが、
QSTの量子科学技術により
医学、生命科学、材料科学…
サイエンスの世界で物語をつむいでいく。
そしてその物語の結末は、
私たちの未来社会を輝かせ、
ハッピーエンドに導くに違いない。

量子センサーが拓く 私たちの未来社会

2024年1月16日発行

発行・編集

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

E-mail : q-consult@qst.go.jp

<https://www.qst.go.jp>

