

[面白い量子技術]

7 ダイヤモンド量子センサの可能性

—ピンクダイヤモンドが 高感度なセンサに—

応
般

波多野睦子 | 東京工業大学工学院

ニューノーマルでの ダイヤモンド量子センサへの期待

コロナ禍で急速に普及したオンラインでの講義や会議のハンゴに、そろそろ限界を感じている。集中力が散漫になり、妙な疲れが蓄積していく。何よりも相手の「オーラ」や「本音」を掴み切れず、それがまたストレスとなる。人に届くまでは情報は高速に通信されているが、それから先の脳に届くまではきわめてアナログ・低速であり、さらに脳における情報処理機構の全約はまだ明らかになっていないことも原因の1つであろうか。

ニューノーマルでは、より人間が重視され、人間の行動や心の変化が技術革新をリードする時代になるに違いない。視覚と聴覚だけでなく、触覚、臭覚、味覚、さらにはそれを司る脳や心のモニタが必要になり、高精度かつ非侵襲で計測できる高度なセンサの進化が重要となる。

本誌 (Vol.59, No.1 (2018)) の特集「脳情報科学が拓く AI と ICT」において、脳機能の解明が ICT 社会にとって役に立つ技術と認識されるようになり、さらに広い分野の科学の相互作用の進化の重要性が指摘されている。特に多くの人間情報を収集して解析するために必要な、実環境で使える BMI (Brain Machine Interface: 脳とコンピュータなどの機器とのインタフェース) の発展が不可欠と論じられている。

本稿で紹介するダイヤモンド量子センサは、量子力学的効果を利用して感度や分解能を物理法則の極限まで高められる次世代センサとして注目され、世界中で研究開発が活発化している^{1), 2)}。まだ基礎研究の段階にあるが、先述のニーズを実現できる可能性がある。

本稿では、ダイヤモンド量子センサの可能性を中心に、その原理、人工的に作製する技術、量子プロトコルを用いた計測、および応用の一部を紹介する。

量子センサのカギとなるのは、NV センタ (炭素を置換した窒素 (N) と隣接位置の空孔 (V) との複合欠陥) である。後述するが、熱的にも機械的にも安定なダイヤモンド結晶に閉じ込められているという特異な状態のため、NV センタの電子スピンは広い温度範囲で安定した振る舞いを示し、量子状態が長く維持される。したがって、さまざまなアプリケーションが期待される。さらに計測対象の範囲は広く、ナノからマクロスケールまでの空間分解能の磁場・温度・電場・圧力センサとして機能する。

図-1 に横軸に空間分解能、縦軸に磁気感度を取り、磁場センサとしての応用例を示す。蛋白質や生体分子の構造解析に必要なナノメータ領域、ドラッグデリバリーや免疫検査に適用される細胞計測に必要なミクロンの領域、生体・自動車・構造物の非侵襲計測に必要なミクロン以上の領域まで、空間分解能に対してスケーラブルな応用が拓ける。

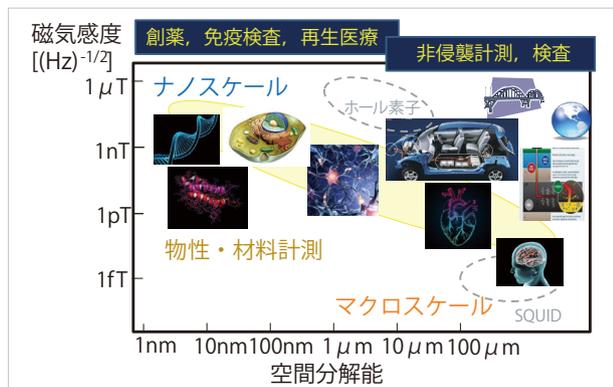
表-1 にダイヤモンド量子センサの特徴を、超伝導量子

特集 Special Feature

干渉計，光ポンピング原子磁気センサと比較して示す。ダイヤモンドセンサは，以下の他のセンサにない特長がある。

- 広い温度範囲，かつ大気中で動作
- 拡張性が高く，チップ化やアレイ化，集積化が容易なため，より高度なデバイスが実現可能
- イメージングができ，NV 軸方位を利用したベクトル磁場を検出
- 代表的な微弱磁気信号であり，NMR（核磁気共鳴）計測で計測対象となる，ACの核磁化信号も，脳磁・神経等の DCの生体磁気信号も計測可能
- 飽和性が実用的になくダイナミックレンジが広い
- 個々の NV センタがナノスケールのセンサとして動作
- 情報（磁場・電流）とエネルギー（温度）の同時計測

これらの特長を活かせば，システムの小型モ



■ 図-1 空間分解能と磁気感度から見たダイヤモンド固体量子センサの応用の可能性

■ 表-1 高感度な量子センサのベンチマーク

性能／機能	超伝導量子干渉計	光ポンピング原子磁気センサ	固体量子センサ	優位性
動作環境	極低温要	高温 (>100℃) 要	mk-600Kの広範囲で動作可能	耐環境性
状態	固体 (超伝導体)	気体 (アルカリ金属蒸気セル)	固体 (ダイヤモンドや SiC)	全電気，チップ化，アレイ・積層化
イメージング	単体では不可	単体では不可	可能	ベクトルイメージング
感度 [1/√Hz]	<10fT	<1fT	～ pT	高感度向上が重要
ダイナミックレンジ	飽和性あり	飽和性あり	飽和性なし	
空間分解能	mm 以上	mm 以上	nm ～ mm	スケーラブル (nm ～ mm)
温度計測	不可	不可	可	エネルギー (温度) と情報 (磁場，電流) の同時計測

ジュール化を実現するほか，表-1に示したような従来の磁気センサ単体では不可能であったベクトル磁場計測により，神経ネットワーク内の信号の発生と伝播の方向性，外部刺激に対する脳内反応の経路が解析できるようになり，脳内，特に脳深部の神経電流の分布を推定する精度が向上する。細胞から生体までの階層的でスケーラブルな計測結果とあわせ，脳機能のダイナミクスを脳磁図から解析可能となることが期待される。さらに磁場と温度の計測により，情報伝達と活性化度の両方が同時に取得できる従来にはないセンサシステムを創出することができる。

ダイヤモンド中の量子ビット NV センタ

ダイヤモンドは，炭素原子が正四面体状に完全に規則的に並びお互いに結合の手をつなぐことで非常に強く結びついている。ダイヤモンドが最も硬い宝石たるゆえんである。

NV センタは，その結晶の完全性を崩す構造的欠陥 (図-2 (a)) であるが，赤色の蛍光を示し (図-2 (b))，宝石としての価値が高まるとともに，室内光中でもピンク色を示すいわゆるピンクダイヤモンドとなる (ピンクダイヤモンドは天然にも存在するが希少であり，宝石的価値が高い)。そして，量子センサとして科学的な価値が高まる。

NV センタは，バンドギャップの大きなダイヤモンドの深い準位にあることに起因して，室温・大気下でも

特集
Special Feature

優れたスピコヒーレンス性を持ち、量子状態の初期化（偏極）と読み出し（検出）を光で行えるという稀有な特長を備えている。

さらに NV センタの電子スピン状態を量子的に精密に制御・観測することで高感度化が図れる。パルス磁気共鳴法を用いて、マイクロ波やラジオ波のパルス列を印加することで、スピンを操作することにより、デコヒーレンスを抑制するだけでなく、スピン間の量子効果を利用した検出感度の向上も可能である。

NV センタの形成方法としては、ダイヤモンド結晶中への窒素イオン注入、窒素を含むダイヤモンドに電子や陽子などの量子線照射を行う方法、あるいはマイクロ波プラズマ化学気相成長（CVD）法によるダイヤモンド膜合成中に NV センタを形成する方法、などが用いられている。

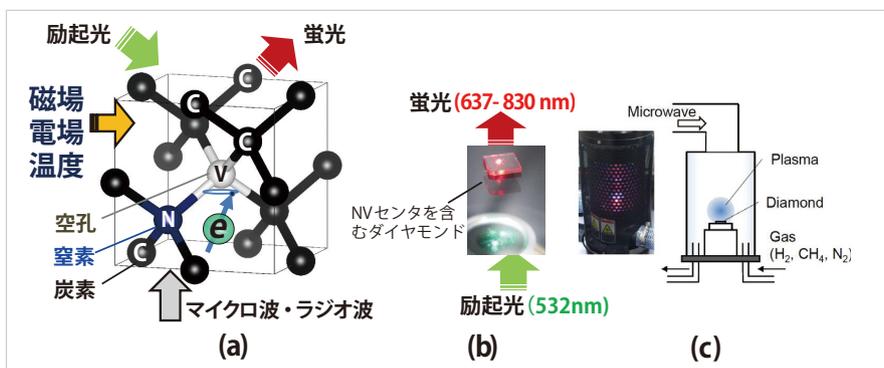
CVD 法においては、メタンと水素の混合ガスを

プラズマで分解することでダイヤモンドが合成される。さらに合成中に少量の窒素ガスを混合することで、ダイヤモンド膜中に NV センタが形成される（図-2 (c)）。CVD 法の長所は N-V 軸（N 原子から見た空孔（Vacancy）の方位で、炭素結晶内に 4 方位が存在し得る）の配向制御であり、アンサンブル NV センタを用いた感度向上に有効である。

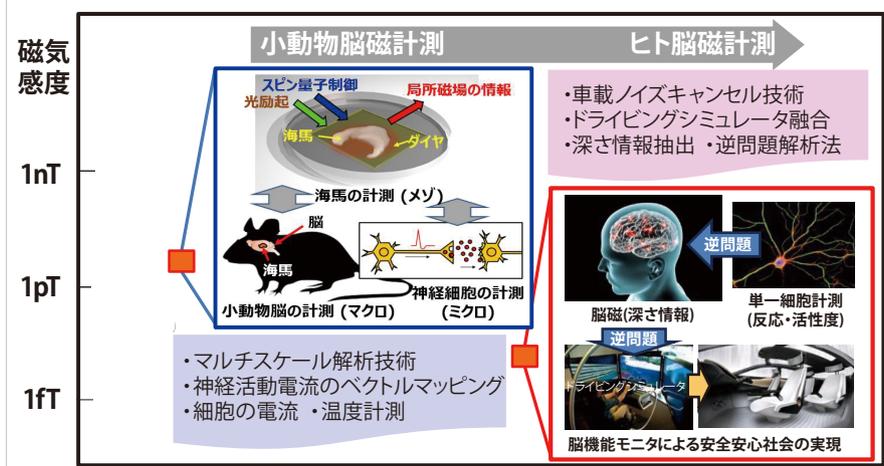
ダイヤモンド量子センサのターゲットと原理検証実験

量子センサの他のセンサにない特徴として、生体親和性が優れていること、また堅牢で広い温度範囲（mK ~ 600K）でも安定であることが挙げられる。これより応用として特に生体計測、およびエネルギーデバイスのモニタリングが注目されている。

前者は図-3 に示すように、小動物の脳磁→ヒト



■ 図-2 高感度センサになるダイヤモンド中の窒素-空孔複合体（NV センタ）
(a) 構造, (b) 磁場, 電場, 温度を赤色の蛍光変化で検出, (c) ダイヤモンドの合成方法：高密度プラズマによる化学気相成長法（CVD）



■ 図-3 生体計測への応用

特集 Special Feature

の脳磁のスケラブルな計測をターゲットとする。材料・デバイス・量子プロトコルによる高感度化に加え、断熱距離が不要で頭蓋に密着可能なこと、ベクトルイメージングが可能な利点も活かして、より高感度・高機能な計測実現が期待できる。

脳磁計測においては頭蓋外部で計測される磁場から頭部内部の神経の活動を推定する逆問題を解く必要があり、そのためには脳内組織や神経細胞の活動の理解とモデル化が不可欠である。単一神経細胞内信号計測、神経ネットワークの活性化度の計測、脳磁図計測を連携させた階層的研究の各階層におけるNVセンタの寄与により、逆問題解析のモデル精度を向上可能である。

脳磁計測の用途としては医療応用のみでなく、ヘルスケアや安全運転のための運転者のモニタも期待されている。実際の適用には、アクティブシールドを含め、磁気ノイズと脳磁信号の分離とノイズキャンセリングを行う技術も開発する必要がある。

ダイヤモンド量子センサの応用先として注目されているもう1つの分野がエネルギーデバイスのモニタリングである。エネルギーデバイスは一般にナノからマイクロスケールのパワーデバイス、マクロスケールのパワーエレクトロニクス機器、電池などから構成され、全体の高信頼性・高性能化には各レベルでのスケラブルなモニタリングが重要である(図-4)。

パワーデバイス、パワーエレクトロニクス機器に

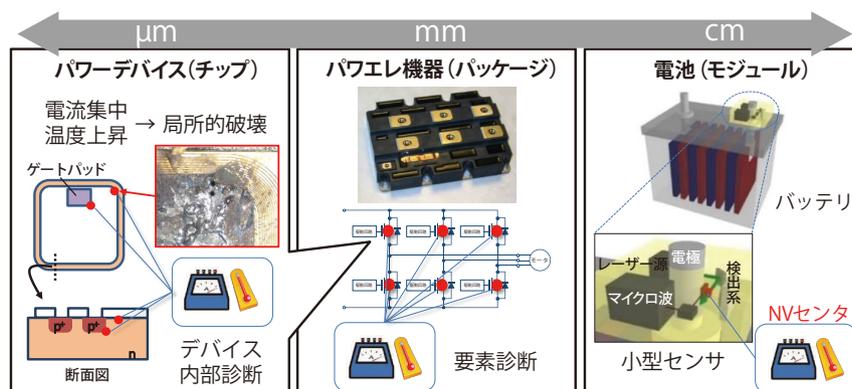
は、故障・破壊リスク予測のための局所電界、温度、電流の評価が重要である。ダイヤモンドパワーデバイスの内部診断にはNVセンタを、炭化ケイ素(SiC)パワーデバイスにおいてはシリコン空孔(VSi)をセンサとして利用する。

電池システムとしては、現行のEV車の電池モニタに使用されている電流センサの精度は1A程度である。これを10mAまで向上できると、電池の充放電電流の計測精度が向上し、その積算値としての電池残量予測精度が向上する。これにより、電池容量24kWhのEVにおける実質走行可能距離の約10%の向上が期待できる。そのため、車載の高雑音環境下でも大電流から微弱電流までの広いダイナミックレンジを測定でき、かつ電流・温度を同時に計測できるセンサが必要とされている。

ダイヤモンド量子センサは、現時点は可能性を検証している段階であり、社会や人へ役立つように進化させるには、物理、材料、デバイス、回路、システム、情報のレイヤ間の連携や異分野の融合を進めなければならないと考えている。本会での研究との連携を期待し、筆者らが取り組んでいる原理検証実験の例を紹介したい。図-5にその概要を示す。

(1) ナノスケールの核磁気共鳴(NMR)計測

核磁気共鳴(NMR)計測は、静磁場中では物質中の核スピンのエネルギー準位がわずかに分裂(Zeeman分裂)するため、分裂の大きさに対応した周波数のAC電磁波の共鳴吸収が生じることを



■図-4 エネルギーデバイス(電池、パワーデバイス)モニタリングへの応用

特集
Special Feature

利用し、物質の分析を行う技術である。AC電磁波の計測をコイルなどで行う現行のNMRでは、計測対象に 10^{13} 程度のスピンの必要である。

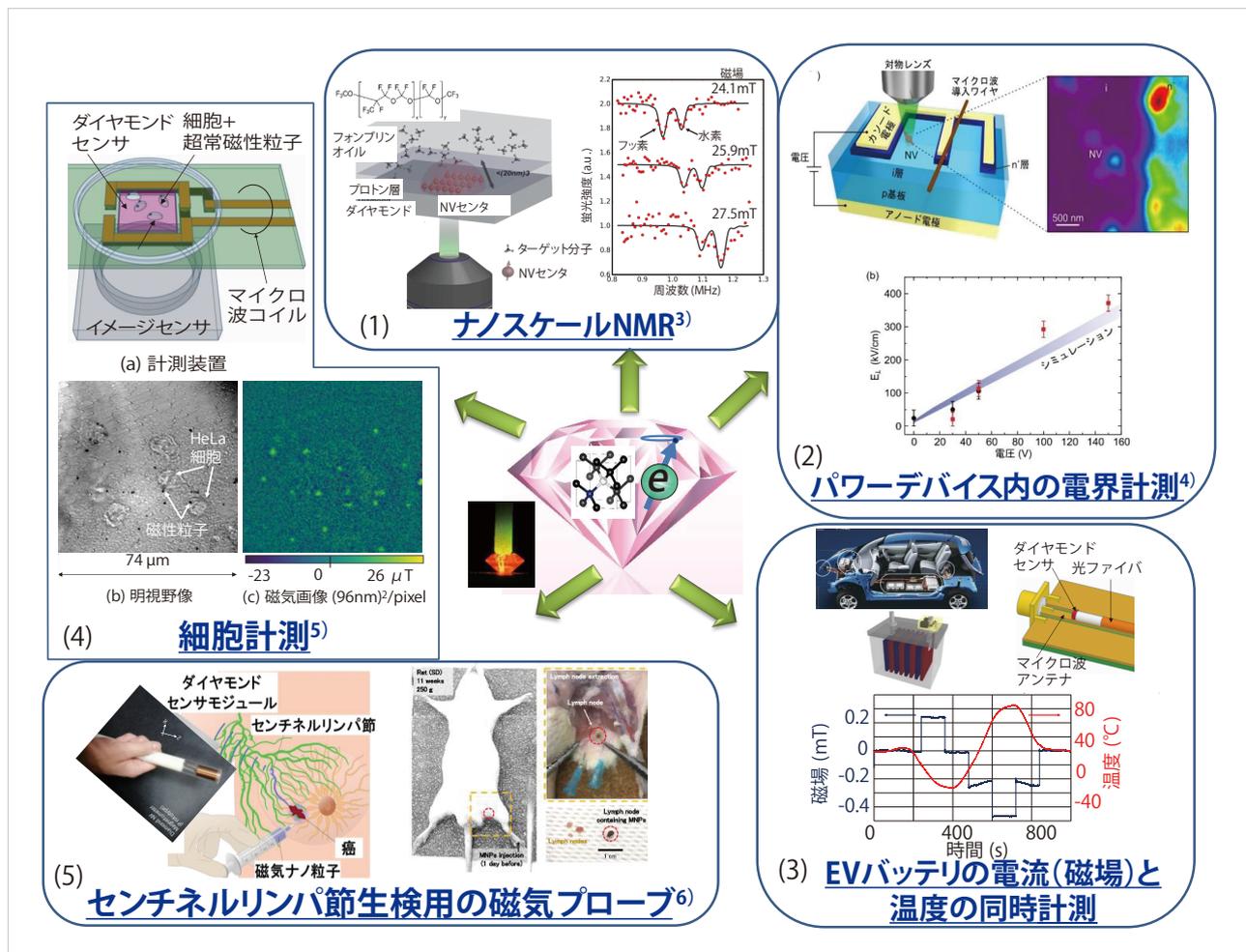
一方NVセンタは高感度である上に、ダイヤモンドセンサの表面に試料を密着させられることから、ナノスケールの体積中の 10^4 程度の核スピンを検出可能である。AC磁場の検出においては、ACの半周期ごとにNVセンタに共鳴するマイクロ波パルス照射してそのスピンの向きを反転し、AC磁場以外の雑音の影響を打ち消して高感度化する、ダイナミカルデカップリングという量子センサならではのスピンの操作が適用可能である。このため、ナノスケールNMRは、NVセンタの特徴を活かした計測

の1つである。

ダイヤの表面に約1nm程度の炭化水素層を介して、フッ素を高濃度に含むフォンブリンオイルの計測を行った結果を、図-5(1)に示す³⁾。検出された2つのピークは、磁場を変化させピークのシフトを測定することで、水素、フッ素の核スピンの信号であることが確認できる。また、このピーク高さからNVセンタの深さを算出するとおよそ9.2nmであり、検出体積を見積もると、約 5.2×10^{-21} Lと極微量であることが分かった。

(2) パワーデバイス内の電界計測

ナノスケールでのエネルギーデバイスのモニタリングとして、パワーデバイス内部の電場分布の計測



■図-5 ダイヤモンド量子センサの原理検証(例)

を行っている⁴⁾。絶縁破壊がパワーデバイスの耐圧を決定するため、保持できる電場の強さを知ること、パワーデバイスにとって重要なパラメータである。しかしながら、従来のセンサではデバイス内部の電界を直接定量することは困難であった。デバイス内にNVセンタを内包することで逆バイアス下での電場を定量検出できており、他の手法では測定困難な状況でも計測できることを示している(図-5(2))。

(3) EV用のバッテリーの電流と温度の同時計測

電池の充放電電流を模擬した $+0.5\text{mT} \sim 1.2\text{mT}$ の印加磁場、および $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ の温度変化をダイヤモンドセンサにより検出した。さらに、磁場と温度を分離しかつ同時に計測することに成功している(図-5(3))。

(4) 細胞計測

図-5(4)に示すように磁性粒子によるHela細胞に付随するダイナミックな磁気イメージが得られ⁵⁾、神経ネットワークの計測等へ応用可能である。光障害がないため、長時間に渡る生きたままの細胞計測が可能となる。今後、バイオエンジニアリングや創薬などイノベーションへの展開が期待できる。

(5) 乳癌のセンチネルリンパ節生検用の磁気プローブ⁶⁾

癌の性状を特定するために、ダイヤモンド量子センサを用いて、癌組織近傍に投与され、リンパ節中に蓄積された磁性ナノ粒子を検出する。量子センサを用いることで、検出距離が伸長され、個人差によらずリンパ節を検出可能とする。外科医による術中使用も視野に入れ、磁気センサモジュールを試作してハンドヘルドプローブへと搭載した。動物実験を実施し、ダイヤモンド量子センサを用いて生体組織

内の磁気ナノ粒子を検出できることを実証している(図-5(5))。

ダイヤモンド量子センサの研究は、世界的に競争が激しく日々新しい結果が公開される状況である。国内外を含むレイヤ間の連携、および異分野間の融合の促進が重要である。量子技術の特長を活用することにより、今まで得られなかったデータを取得し、さらに本会に関連する研究者の方々とタグを組めば、新たな価値を社会に展開できるイノベーションにつながると信じている。

特に脳や神経などの生体計測技術の革新は、ヘルスケア、脳疾患の予防や治療などの医療、さらには脳型情報処理などの応用に繋がると考える。たとえば、脳情報からのマインドリーディングによる新たなサービスの提供、脳科学を活用した新しい探索エンジンの登場が予測されている。常温大気下での高感度化に加え、装置の小型化が実現すれば、特に超高齢化社会での大きな寄与が期待される。

参考文献

- 1) Neumann, P. et al. : Science 329, 542 (2010).
- 2) Le Sage, D. et al. : Nature 496, 486 (2013).
- 3) Ishiwata, H. et al. : Appl. Phys. Lett. 111, 043103-1 ~ 5 (2017).
- 4) Iwasaki, T. et al. : ACS Nano 11, 1238 (2017).
- 5) Hatano, Y. et al. : Physica Status Solidi (A), 215, 22-1800254 (2018).
- 6) Kuwahata, A. et al. : Scientific Reports 10, 2483 (2020).

(2021年1月1日受付)

謝辞 本研究は、文科省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS011807395により行われました。

■波多野睦子 hatano.m.ab@m.titech.ac.jp

東京工業大学工学院教授。慶應義塾大学卒業後、日立製作所中央研究所入社。途中フォルニア州立大学バークリ校客員研究員。2010年より現職。現在応用物理学会会長。