

# 産業ロボティクス応用に向けたハイブリッド量子センサの開発

## Development of a hybrid quantum sensor for industrial robotics applications

研究代表者 東京工業大学工学院 准教授 荒井慧悟

Keigo Arai

Human skin is a very complex and delicate tactile organ. To imitate its sense with a robot, developing a next-generation high-precision pressure sensor is essential. Quantum sensors using nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond are attracting attention as next-generation pressure sensors with unprecedented sensitivity, spatial resolution, and temporal resolution performance. Furthermore, this quantum sensor can not only detect pressure by itself but also detect magnetic fields with high precision, so it is possible to construct a hybrid system in combination with magneto-strictive materials that convert pressure into magnetic fields. In this study, we integrated a pressure device based on a diamond anvil cell and a diamond quantum sensing device to demonstrate pressure detection and imaging with high sensitivity. Furthermore, we examined a prototype for future device research and development. In the future, we aim to realize a small flexible device that can be attached to curved surfaces.

### 要旨

人間の皮膚は非常に複雑かつ繊細な触覚器官である。これをロボットで模倣するには、次世代の高精度な圧力センサの開発が欠かせない。高精度化にあたっては、ダイヤモンド中の窒素・空孔欠陥 (NV センター) を用いた量子センサが注目されている。この量子センサは、単独で圧力が検出できるだけでなく、磁場も高精度に検出できるため、圧力を磁場に変換する磁歪材料と組み合わせたハイブリッドシステムの構築も可能である。また、高い圧力感度、空間分解能、時間分解能を持つことが期待されている。本研究では、ダイヤモンド・アンビルセルを用いた加圧装置やダイヤモンド量子センシング装置を統合し、高感度での圧力検出・イメージングに取り組んだ。さらに、今後のデバイス研究開発に向けたプロトタイプの検討も行った。将来的には曲面に貼付可能な小型フレキシブルデバイスの実現を目指したい。

### 1. まえがき

ものづくりや医療現場において、人間の触覚は未だ重要な役割を担っている。例えば、自動車鋼板の不良や鋳物の表面粗さの検査工程では、熟練工が 3  $\mu\text{m}$  程度の凹凸検出を指の感覚で瞬時に行うという。これは、人間の触感が、最高性能の受容体で変位 0.1  $\mu\text{m}$  を検出する感度、3  $\mu\text{m}$  の空間分解能、10 ms の時間分解能を持つためになせる業である (表 1)。特に、人間の皮膚は機械刺激や温度刺激に敏感で、押し込み感の圧覚、パタパタ感・引っ張り感・微小刺激感

などの振動覚、温度感の温冷覚を、異なる変位感度、空間分解能を持つ受容体が知覚している。ただし、時間分解能については、脳への神経伝達速度等に律速されているためか、どれも 10 ms 程度となっているようである。

これら暗黙知や匠の技を定量化・可視化し、ゆくゆくは産業ロボティクスでおきかえるためには、触覚センサの開発が重要なカギを握る。ところが現段階では、様々な機械的刺激・温度刺激に対応できる人間の複雑な触覚刺激を、単一のセンサで高精度に検出するのが困難であるため、応用に向けての開発は滞っている。図 1 に様々なセンサの変位感度と空間分解能を示す。例えば、圧電センサは変位感度が高い一方、センサ自体が大きいため空間分解能が低い。また、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) は微小センサであるため高い空間分解能を実現できるが、変位感度は相対的に低くなってしまふ。

筆者は、新たな原理に基づいた高精度な触覚・圧力センサの開発を目指している。そのような次世代のセンサが、特に人間の感覚を超えた触感をロボティクスに提供し、産業界に眠る暗黙知や匠の技を顕在化することを期待している。本報告にて主要技術として用いたダイヤモンド中の窒素・空孔欠陥 (NV センター) は、ダイヤモンドに閉じ込められた安定な電子スピン系で、次世代の量子センサとして期待されている。初期試算によると、原理上は変位感度 0.03  $\mu\text{m}$ 、空間分解能 1  $\mu\text{m}$ 、時間分解能 1 ms の実現も射程圏内にあるのではないかと考えている。

表1 人間の触覚の分類と性能

刺激	感覚		受容体	触覚性能		
				変位感度	空間分解能	時間分解能
機械	圧覚	押し込み感	メルケル細胞(SAI)	~20 $\mu\text{m}$ @ DC	~1 mm	
		パタパタ感	マイスナー小体(FAI)	10 $\mu\text{m}$ @ 5 Hz	3 $\mu\text{m}$	
	振動覚	引っ張り感	ルフィニ終末(SAII)	20 $\mu\text{m}$ @ 50 Hz	(指先との相対	10 ms
		微小刺激感	パチニ小体(FAII)	0.1 $\mu\text{m}$ @ 250 Hz	運動がある場合)	
温度	温冷覚	温度感	自由神経終末	0.1 K	~1 mm	

## 2. 研究目的

本研究では、上述の技術実現に向けた最初の1歩として、ダイヤモンド量子センサの圧力センシングを実証し、プロトタイプ設計に落とし込むことを当初の目的とした。まずはNV センター自体が圧力に対して感度を持つことに着目し、ダイヤモンド単体の条件下で、圧力がNV センターにどのような影響を与えるか検証する。次に、NV センターが磁場に感度を持つことを利用し、圧力を磁場に変換する磁性体等と組み合わせたハイブリッドシステムを構築する。本研究は、NV センターを触覚・圧力センサに用いる世界初の試みとなるため、量子センシング分野の新たな可能性を開拓するという学術的な意義も持つ。

本研究は、前述のように半導体（ダイヤモンド）、磁性体といった、物性が大きく異なる材料を組み合わせることで触覚センシングという新たな機能の発現を目指すことが特徴であり、既存のセンサでは達成できない感度・解像度の両立を目指す点に先進性を見出そうとしている。長期的には、本研究の原理検証およびプロトタイプ設計に留まらず、社会実装を視野に入れた応用展開を目的としている。

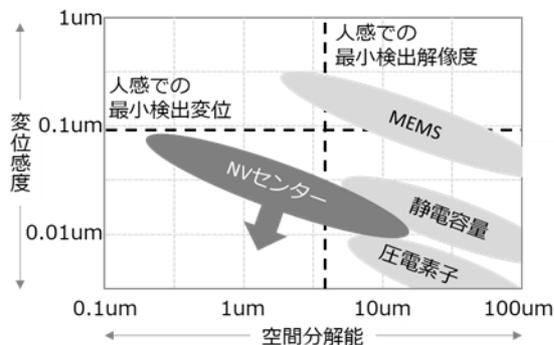


図1. 変動センサーの変位感度×空間分解能のマップ。既存手法が到達していない性能領域（左下）をNV センターで目指す。

## 3. 研究手法・原理

本提案で利用するダイヤモンド中の NV センターは、次世代量子センサのひとつである。NV センターの基底状態の共鳴周波数は、磁場・電場・温度に依存しており、それらを高精度に測定することが可能なため、ナノスケール磁場・電場・温度センサとして開発が進んできた<sup>(1)-(3)</sup>。これまでも細胞、タンパク質、物性材料、隕石の計測等、様々な学術的応用に使われてきた<sup>(4)-(7)</sup>。一方で、圧力のセンシングは、これまで単一NV センターを使用した理論的提案<sup>(8)</sup>に留まっている。そこで、本研究ではダイヤモンド量子センサの顕微鏡と圧力印加装置であるダイヤモンド・アンビルセル (DAC) や圧力・磁場転換材料を用いた手法で、圧力センシングを実証する。

### 3.1 ダイヤモンド中の窒素・空孔欠陥

NV センターは、ダイヤモンド結晶中の隣接する2つの炭素原子がそれぞれ窒素と空孔に置換された格子欠陥である (図 2A)。空孔には、炭素原子や窒素原子から供給された電子が捕獲されており、合計で6つの電子を持ち、荷数-1に帯電している。NV センターは、NV 軸の方向を量子化軸として、量子状態をレーザー光やマイクロ波で操作することにより量子センサーとして扱うことができる。特に、NV センターの電子は原子サイズの領域に存在しているため、ダイヤモンド量子センサーはナノスケールの分解能を強みとして持っている。

NV センターに付随する6つの電子が、電子軌道へどのように入るかが NV センターのエネルギー準位を決定する。電子軌道は、空孔を取り囲む3つの炭素と1つの窒素からなる4つの sp<sup>3</sup> 混成軌道であり、欠陥と同じ対称性を持つ。構成された軌道は、

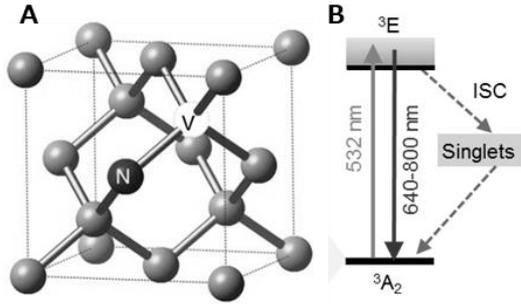


図2. NV センターの(a)結晶構造と(b)エネルギー準位. 基底状態はスピン三重項 ( $m_s = -1, 0, +1$ ) であり, 緑光 532 nm で励起するとスピン状態に依存した強度 ( $m_s = 0$  が最大) の赤色発光 (640-800 nm) が観測される. これは  $m_s = \pm 1$  の場合には状態間交換(ISC)によりある確率で非発光の一重項状態を経由した緩和をするためである.

エネルギーの小さい順に  $a_1, a_1', e_x, e_y$  と呼ばれる. エネルギーの低い  $a_1, a_1'$  は 4 つの電子に占有され, 閉殻となっている. また,  $e_x, e_y$  は縮退している. 残りの 2 つの電子が縮退した  $e_x, e_y$  に入った状態が NV センターの基底状態であり, 2 つの電子による全スピン量子数 1 のスピン三重項を形成している. 三重項状態は, 電子スピン-電子スピン相互作用によって準位が  $m_s = 0$  状態と  $m_s = \pm 1$  状態に分裂する (以降, 状態の表示方法として  $|0\rangle, |\pm 1\rangle$  を用いる).

### 3.2 光検出磁気共鳴

図 2B に示すように, 基底状態の NV センターに緑色レーザーを照射すると, 励起状態へと励起することができる. 励起された NV センターが取る緩和過程には, 637-840 nm の赤色蛍光を伴って直接に基底状態へ緩和するものと, 一度一重項に緩和してから非発光で基底状態へ緩和するものの 2 通りが存在する.  $|0\rangle$  状態である NV センターを励起した場合, 励起状態の  $|0\rangle$  状態から緩和されるときには, ほとんどの電子スピンの放射遷移でそのまま基底状態の  $|0\rangle$  状態に緩和される. 一方,  $|\pm 1\rangle$  状態にある NV センターを励起した場合には, 全体の約 70% が放射遷移でそのまま基底状態の  $|\pm 1\rangle$  状態に緩和される. 残りの約 30% は, 一重項を経由して基底状態に非放射遷移によって緩和される. そのため, NV センターを  $|\pm 1\rangle$  状態から励起した場合の赤色光の発光量は,  $|0\rangle$  状態から励起した場合に比べて約 70% に減少する. したがって蛍光強度の計測から状態がわかる.

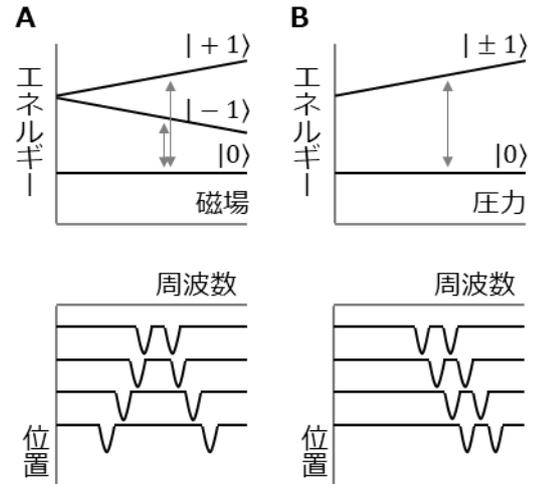


図3. 磁場と圧力が印加された際の NV センターの基底状態の変化. (A) 磁場に対する基底状態のエネルギー依存性 (上) と共鳴周波数の変化 (下). (B) 圧力に対する基底状態のエネルギー依存性 (上) と共鳴周波数の変化 (下).

基底状態のスピン状態は, マイクロ波照射により操作する.  $|0\rangle$  状態と  $|\pm 1\rangle$  状態とのエネルギー差に相当するマイクロ波を印加することで,  $|\pm 1\rangle$  状態にスピンを変化させることができる. またこのようなスピンの変化をもたらすマイクロ波の周波数を共鳴周波数と呼ぶ. このマイクロ波によるスピン操作と, 光による初期化・読み出しが NV センターを用いたセンシングに必要な手法となる.

### 3.3 圧力センシング

NV センターの基底状態のハミルトニアンは下記の式で与えられる.

$$H/\hbar = (D + M_z)S_z^2 + \gamma_e \vec{S} \cdot \vec{B} - M_x(S_x^2 - S_y^2) + M_y(S_x S_y + S_y S_x)$$

ここで  $\hbar$  はディラック定数,  $D$  はゼロ磁場分裂 (ZFS),  $\vec{M}$  は応力係数,  $\vec{S}$  はスピン演算子,  $\vec{B}$  は磁場を表す. このように各状態のエネルギーは, 磁場や圧力によって変動する. 例えば, 磁場の存在下ではゼーマン効果により  $|\pm 1\rangle$  状態が  $|-1\rangle$  状態と  $|+1\rangle$  状態に分裂する (図 3A). さらに等方的圧力がかけられれば, ゼロ磁場分裂が増加する (図 3B). この性質により, 上述の光検出磁気共鳴を用いて共鳴周波数を検出すれば, 印加された磁場や圧力が計測できる.

NVセンターを圧力センシングに適用するためには、ダイヤモンド単体で使用する手法と、圧力を磁場に変換する媒体とのハイブリッド系として使用する手法の2通りがある。後者はより感度の高い圧力センサとして期待される。また、ハイブリッド系は材料によってさらに2つの手法が提案されている。

(1) ダイヤモンド単体

ダイヤモンド単体で使用する場合は、上述のようにNVセンターのZFSが圧力に依存することを利用し、共鳴周波数の変化で読み出す。

(2) ハイブリッド系：エラストマ+磁性体 (図4A)

ナノダイヤモンドを埋め込んだエラストマ層を磁性体層の上に積層した構造を作る。厚さ10 μmのエラストマ層(ジメチルポリシロキサン材料など)は、外部からの圧力・振動等の機械刺激によって変形する。すると、エラストマ層の表面付近に埋め込まれたナノダイヤモンド(粒形~100 nm)から磁性体までの距離が変化する。磁性体はエラストマ層に磁場勾配を作るため、ナノダイヤモンドが感じる磁場は変化する。ナノダイヤモンド内部には、NVセンターが複数個含まれている。NVセンターで磁場を読み出すことにより、ナノダイヤモンドの位置変位を高精度に決定できる。本手法の磁性体・エラストマ材料はともに弾力性を持ち、ナノダイヤモンドも~100 nmと小さいことから、本構造は曲面状に展開することも可能である。計画当初は本手法を採用する予定であったが、検討を進めるにつれて、エラストマのヒステリシス(一度凹んだら元に戻りにくい特性)が懸念されるようになった。

(3) ハイブリッド系：磁歪材料 (図4B)

上記の課題の解決のため、最初の原理検証実験としては、代わりに磁歪材料を用いることにした。磁歪材料に圧力が加わると磁化が回転し、ダイヤモンド上での磁場が変化する。この変化をNVセンターで読み出すことで、変位を検出する。エラストマの磁歪材料への変更にもなると、量子センサはバルクダイヤモンド中の均一NVセンターを用いることとした。この利点としては、NVセンターの方向が一意に定まるために磁場ベクトルの計測ができることや、磁場感度を均一にできることが挙げられる。

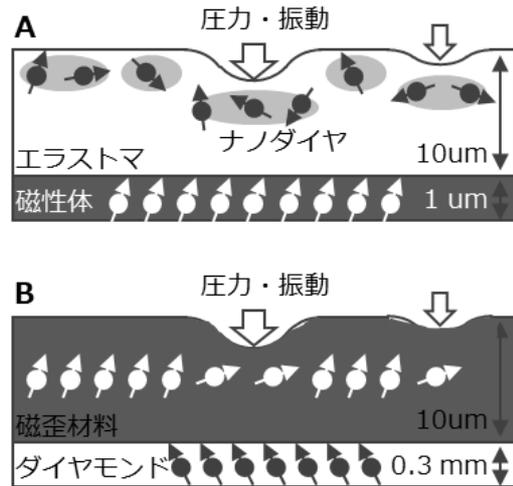


図4. 圧力・磁場転換材料を用いたハイブリッド系の模式図。(A) エラストマ内にナノダイヤモンドを埋め込み、磁性体薄膜上に塗布する方式。(B) 圧力によって変形し磁化の向きが変わる磁歪材料を用いる方式。

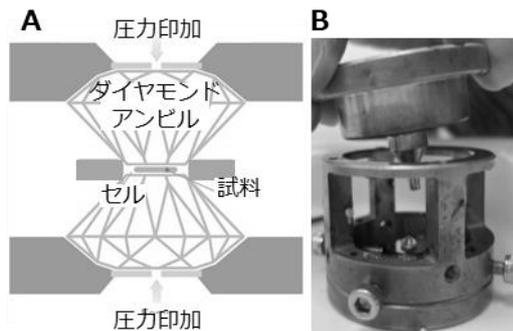


図5. ダイヤモンドアンビルによる圧力印加。(A) 断面図。(B) ダイヤモンドアンビルの固定治具の写真。セルと呼ばれる金属製の上下1組の部品に、アンビルと呼ばれる専用のダイヤモンドがセルのアンビル用台座の上に向かい合わせに取り付けられている構造をしている。文献(9)より引用

### 3.4 加圧装置としてのダイヤモンドアンビル

ダイヤモンド単体への高圧印加装置としては、ダイヤモンドアンビルセル(DAC)を用いた。DACは、先端を平らに研磨したダイヤモンド2つを相対して挟むことによって高圧環境を実現する装置である(図5)。また、ダイヤモンドは無色透明であるため、NVセンターの光を用いた読み出しにも適している。アンビルの先端は直径数百マイクロメートル程度の円形に加工されており、その面をキュレット面と呼ぶ。上下のセルを繋いでいるネジを締めるとキュレット面間に力が加わり、高圧が生み出される。

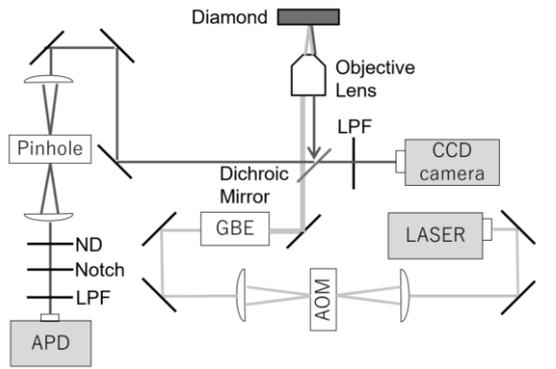


図6. 光学系模式図. AOMは音響光学素子, GBEはビームエキスパンダー, LPFはロングパスフィルター, NDは光量を減らすための中性濃度フィルター, Notchはノッチフィルター, APDはアバランシェフォトダイオードである. ピンホールは共焦点顕微鏡のために用いている. また, 図中で補足の無い黒斜線はミラーを, 半月上の物体はレンズを表す. 薄い灰色線は励起用のレーザー光を, 濃い灰色線はNVセンターの蛍光を示している. なお, 両線については, 直線はコリメートしていることを, 三角になっているところはレンズによって光が収束していることを, 太い線はビーム径が拡大されたことを表している. 文献(9)より引用

### 3.5 計測装置とイメージング

図6に示すような光学系を用いて実験を行った. 前半のレーザー光照射部では, 緑色光をNVセンターに照射する. 励起用の光源としては, 波長532nmのレーザーを音響光学素子(AOM)でパルス化して用いた. レーザー光のビーム径は対物レンズ入射前にビームエキスパンダーを用いてビーム径を5mmとした. 対物レンズには, Mitutoyo社のM Plan Apo SL 20xを用いた. また入射光と蛍光を分離するためにダイクロミックミラーを用いた. 励起光の検出部には, NVセンターの赤色蛍光を共焦点系もしくは広視野系のどちらかの方式を選択して検出する. 共焦点系ではアバランシェフォトダイオードを, 広視野系にはCCDカメラを使用した. 共焦点系でイメージングを行う場合は, ピエゾステージを用いてダイヤモンドを励起光に対して走査することで実現している. また, 基底状態の制御のため, ダイヤモンドには約3GHzのマイクロ波および静磁場を印加している. 上記の光学系を用いた光検出磁気共鳴の実験はPythonで書かれたプログラムによって制御している.

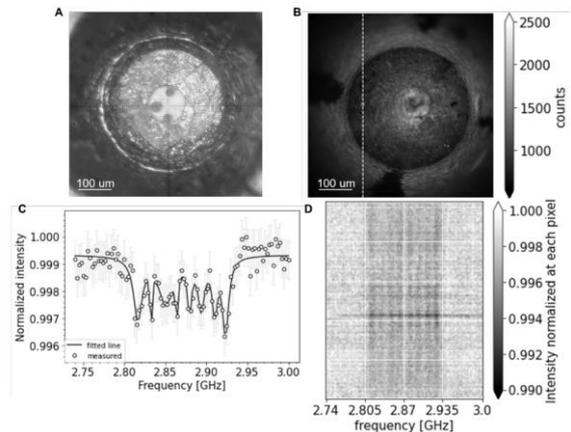


図7. 常圧下での計測結果. (A) 室内光で見たダイヤモンドアンビルの試料室の様子. (B) NVセンターの蛍光で見たダイヤモンドアンビルの試料室の様子. ダイヤモンド中を蛍光が伝播して, ダイヤモンドアンビルの端からも発光している様子がわかる. (C) 図Bの点の位置で記録した光検出磁気共鳴スペクトル. (D) 図Bの点線に沿って記録した光検出磁気共鳴スペクトル. どの位置でも同様のスペクトルが見えており, 中心周波数が2.87GHzのため, 常圧でイメージングができているといえる. 文献(9)より引用

## 4. 研究結果と考察

ダイヤモンド単体, ハイブリッド系の両手法において, 加圧した際に光検出磁気共鳴の共鳴周波数が変化することを確認した. その結果, ダイヤモンド単体およびハイブリッド系の感度はそれぞれ約15MHz/GPa, 約10kHz/kPaであった. またイメージングの空間分解能はそれぞれ数 $\mu\text{m}$ 程度と推定された.

### 4.1 常圧でのイメージング

本研究で構成した実験系が正常に動作することを確かめるために, まず常圧での測定を行った室内光で撮影した光学画像と, 本実験系のCCDカメラを用いて蛍光で撮影した画像とでキュレット面の見え方がよく一致していることを確認した(図7A&B). 次に, 光検出磁気共鳴のスペクトル取得とそのフィッティングを行った(図7C). ここで, フィッティングに用いた関数は, オフセットのあるローレンツ関数をピークの数だけ和を取ったものである.

$$F(f) = F_0 - F \frac{(\Delta f)^2}{(\Delta f)^2 + (f - f_0)^2}$$

ここで,  $F_0$ はマイクロ波オフ時の蛍光(オフセット),  $F$ は共鳴ピークの高さ,  $\Delta f$ はピークの半値半幅,  $f_0$ は共鳴周波数である. フィッティングの決定係数 $R^2$ は

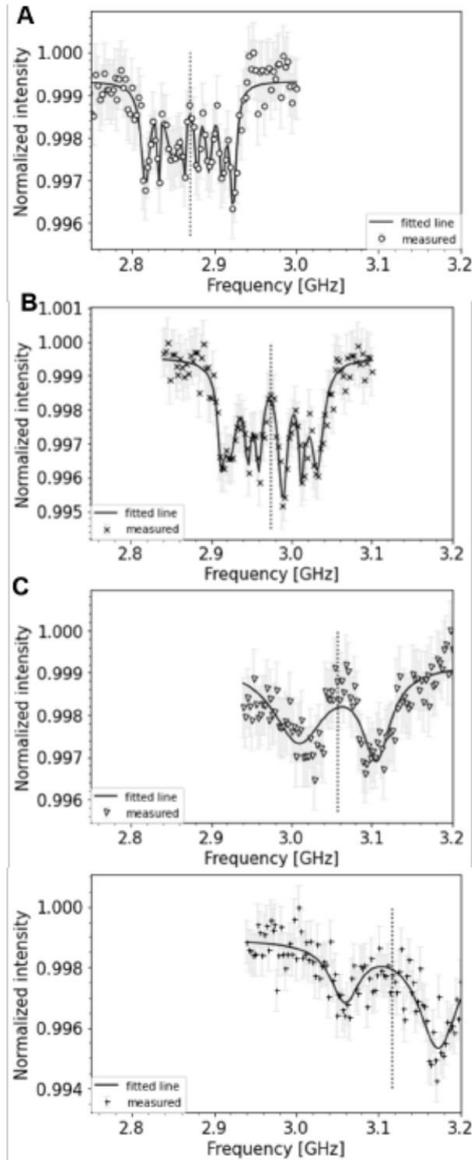


図 8. 常圧から高圧にかけての光検出磁気共鳴スペクトル. (A) 常圧, (B) 7.1 GPa, (C) 12.8 GPa, (D) 16.9 GPa. 文献 (9) より引用

0.86 であり、フィッティングモデルがデータをよく説明できていると考えられる. さらには、同様の解析を画像の各ピクセルについて行い、任意の位置でのスペクトルおよび共鳴周波数の計測が可能であることが示された (図 7D).

#### 4.2 ダイヤモンド単体での圧力センシング

続いて、高圧下においても常圧時同様にイメージングが行えることを確認した. まず、圧力を少しずつ印加しながら測定した光検出磁気共鳴のスペクトル (図 8) から、圧力の増加に従って共鳴周波数が

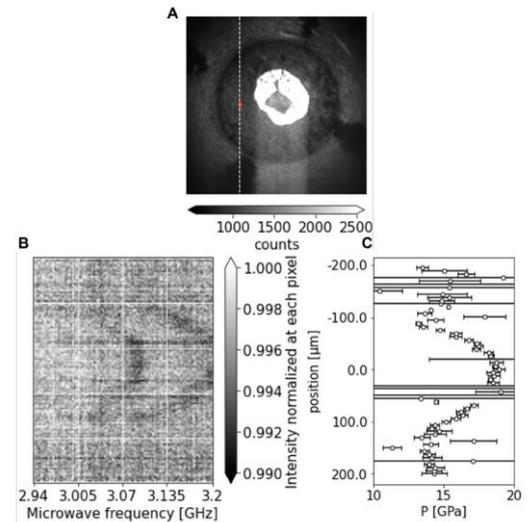


図 9. 高圧下 (16.9 GPa) イメージングの結果. (A) 圧力を加えた状態での蛍光画像. 暗いところほど黒く、明るいところほど白く表示されている. (B) 図 A の点線上のピクセルでの光検出磁気共鳴スペクトル. 白い部分は蛍光が強く、黒い部分は蛍光が弱いことを示している. (C) 図 B の各ピクセルにおいてフィッティングを行い、圧力を求めたもの. 上下方向の白線の中心が横軸の基準位置であり、中心より下を正の方向に取った.  $-100 \mu\text{m}$  から  $+100 \mu\text{m}$  にかけての試料室内では中心に向かうにつれて圧力が強まることがわかる. 誤差バーはフィッティングの 95% 信頼区間とした. 文献 (9) より引用

高周波数側にシフトすることが確認できた. 特に、共鳴周波数が常圧において 2.87 GHz, 16.9 GPa において約 3.12 GHz であることから、圧力感度は約 15 MHz/GPa となる. また、図 9 に示すように、中心周波数が位置によって変動する様子も観測された. 具体的には、試料室の中心付近で圧力が最大 (19 GPa) で、周辺では最小 (14 GPa) であった. 中心周波数を圧力に変換してプロットすることで、試料室の中心に向かって圧力が増加する様子も観測された.

#### 4.3 ハイブリッド系での圧力センシング

最後に、磁歪材料とのハイブリッド系を用いた圧力センシングを行った. 磁歪材料としては、2 次元の  $\text{SmFe}_2$  薄膜を 2 mm 角のダイヤモンド基板上に載せた. 圧力は磁歪材料の上に分銅を載せて調節した. この磁歪薄膜は、磁場を印加していくと磁化が大きく変化し、ヒステリシスも比較的小さいことを振動試料型磁量計 (VSM) による計測で確認した (図 10A).

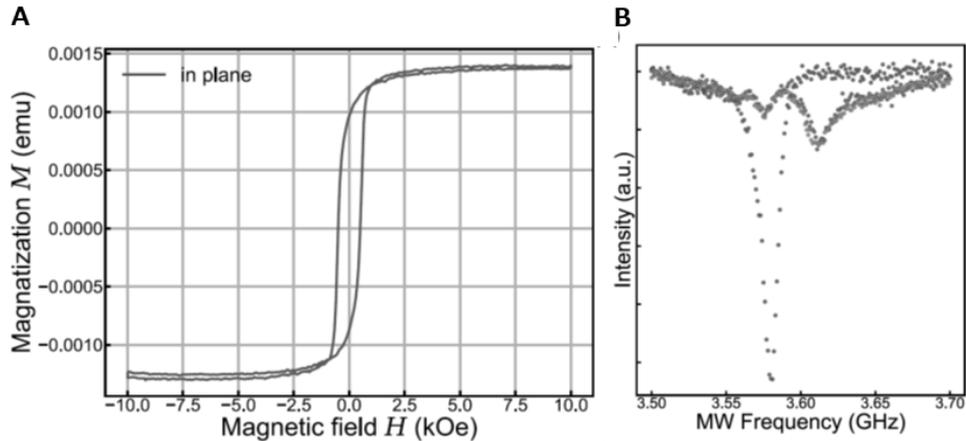


図10. 磁歪薄膜とのハイブリッド系での結果。(A) VSMによる磁化曲線の計測。(B) 圧力印加した際の光検出磁気共鳴スペクトルの変化の例。ゼロ圧力下では3.57 GHzにあった共鳴ピークが、圧力下では3.61 GHzに移動している。一部3.57 GHzに残っているのは、イメージングを実施した視野内で、圧力がかかっていない領域があったためである。圧力を変化させていった際の各ピクセルにおける共鳴周波数の移動量から、圧力感度が10 kHz/kPaと計算されている。文献(10)より引用

加圧実験の結果、圧力を高めていくと、光検出磁気共鳴スペクトル上で共鳴周波数が変化することを確認した(図10B)。また、各ピクセルで変化を解析すると、この変化の度合いが磁気ドメイン構造に大きく依存しており、特に磁気ドメインの中心部では変化率が大きい一方、ドメイン壁上では小さいことがわかった。本計測データの解析にあたっては、磁気ドメインの自動検出や磁気モーメントからの磁場再構成法(フィッティング)も実装している。

上記の光検出磁気共鳴スペクトルの解析を様々な印加圧力に対して実施した結果、本手法による圧力感度は約10 kHz/kPaであることがわかった。これはダイヤモンド単体での圧力感度に比べて約670倍の改善に相当している。

#### 4.4 触覚センサデバイスの設計・開発

ここまでの実証実験の結果をもとに、触覚センサのデバイス化への取り組み方針を検討した。プロトタイプとして、1 cm×1 cmの面視野を持つことをひとつの目標としており、図11のような構造を検討している。NVセンターの励起・制御は電気的に行うため、磁性体層下部には伸縮性・可塑性のあるナノワイヤを貼る。続いて、NVセンターからのシグナルを読み出す検出器(数mm程度のチップ)を側面に密着させ、効率的に蛍光を集める。

当初計画ではこの構造を実際に作製し、課題を洗

い出すところまでを目指していた。ところが、これまでの一連の計測から様々な技術的課題が浮き彫りとなったため、課題の抽出と改善方法の考案を優先した。特に、広面積での表面均一性を<1 μmに押さえ、磁場較正の実施により変位感度を保証することは未解決課題となっている。また、現在表面均一性を妨げている磁気ドメイン構造の課題も重要と考える。例えば、磁歪材料の合成環境を変更することで磁気ドメインをナノサイズに落とし込み、マクロスケールでは平均的均一性を保つことや、磁歪材料をマイクロスケールに区切ることで磁気ドメイン構造を制御するといった手法が考えられる。

#### 4.5 温度の影響の排除

ここまでの議論では触れてこなかったが、NVセンターのゼロ磁場分裂は温度によっても変化することがわかっている。その変化量は-77 kHz/Tと小さいが、今後微小な圧力を検出するうえでは無視できない効果であるため、温度変化による影響と圧力変化による影響をいかに分離するかが残課題となっている。これらを分離する方法は、これまで有効な手法は存在しないと考えられてきた。ところが、今回のダイヤモンド単体での計測中に、圧力を変化させた場合と温度が変化した場合とで、NVセンターの発光強度および信号コントラスト(ローレンツ関数の式のFに対応)が異なる振る舞いをするを偶然発

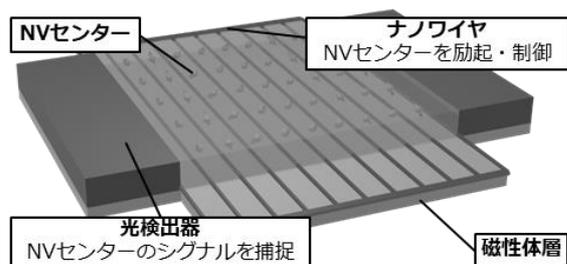


図 11. NV 圧力センサのプロトタイプ設計案. 磁性体と NV センターで圧力を検出する原理をデバイス化する. 特にマイクロ波はナノワイヤを張ることで均一に印加する. また NV センターからの発光は、光導波路構造でダイヤモンドを伝播し、端の光検出器に集光する.

見した. したがって、このような違いを利用することで、圧力と温度を分離できるのではないかと、という点が今後の新たな研究テーマとなりそうである.

## 5. まとめ

人間の皮膚は非常に複雑かつ繊細な触覚器官である. これをロボットで模倣することを目指して、本研究では、NV センターを用いたダイヤモンド量子センサの可能性を検討した. 特に、ダイヤモンド・アンビルセルを用いた加圧装置や磁歪材料など多様な装置をダイヤモンド量子センシングと統合し、高感度での圧力検出・イメージングを実現した.

NV センターは高精度な温度センサとしても機能し、その測定原理も磁場センシングと似ている. そのため、将来的には、触覚センサに温冷覚を追加することが可能となり、センサの応用範囲が広がると考えられる. その際には、前節の新たな圧力・温度分離法が必須の技術となることが予想される. さらに、筆者が先行研究で開発した超解像イメージング法<sup>(11)-(12)</sup>とも組み合わせ、空間分解能 $<0.1 \mu\text{m}$ のナノスケール触覚センサの開発も狙いたい.

本研究で開発を目指している触覚センサの最終形は、人間の感覚を超えた触感を次世代ロボティクスに提供する可能性がある. 現在、センサ側と並行して開発が進むアクチュエータと組み合わせることで、例えば遠隔医療現場では、より精細な指先の感覚を執刀医に提供できるかもしれない. また、製造業では、匠の技に頼ることなく自動化された高スループットな弾性試験・表面凹凸試験が実現される. さらに、NV センターの磁場センサ特性<sup>(13)-(14)</sup>も利用

すれば、より高精度なジャイロ・触覚センサを搭載した次世代 VR/AR 機への応用可能性も拓けるだろう. 本構想は、NV センターを触覚センサに用いる世界初の試みとなるため、量子センシング分野の新たな可能性を開拓することになるかもしれない.

## 発表論文

- [1] Arai *et al.*, High resolution imaging of stress and pressure using diamond quantum microscopes (in preparation).

## 口頭発表, 受賞等

- K. Arai, "Diamond quantum sensing and high-pressure imaging applications," Nano Frontier Materials Conference 2022

## 参考文献

- (1) Maletinsky *et al.*, A robust scanning diamond sensor for nanoscale imaging with single nitrogen-vacancy centres. *Nature Nanotechnology* 7, 320-324 (2012).
- (2) Dolde *et al.*, Electric-field sensing using single diamond spins, *Nature Physics* 7, 459-463 (2011).
- (3) Kucsko *et al.*, Nanometre-scale thermometry in a living cell, *Nature* 500, 54-58 (2013).
- (4) Igarashi *et al.*, Real-Time Background-Free Selective Imaging of Fluorescent Nanodiamonds in Vivo, *Nano Lett.* 12, 5726-5732 (2012).
- (5) Lovchinsky *et al.*, Nuclear magnetic resonance detection and spectroscopy of single proteins using quantum logic, *Science* 351, 836-841 (2016).
- (6) van der Sar *et al.*, Nanometre-scale probing of spin waves using single electron spins, *Nature Communications* 6, 7886 (2015).
- (7) Fu *et al.*, Solar nebula magnetic fields recorded in the Semarkona meteorite, *Science* 346, 1089-1092 (2014).
- (8) Cai *et al.*, Hybrid sensors based on colour centres in diamond and piezoactive layers, *Nature Communications* 5, 4065 (2014).
- (9) Oba, Dissertation (2023).
- (10) Kitagawa, Dissertation (2021).
- (11) Arai *et al.*, Fourier magnetic imaging with nanoscale resolution and compressed sensing speed-up using electronic spins in diamond, *Nature Nanotechnology* 10, 859-864 (2015).
- (12) Zhang *et al.*, Selective addressing of solid-state spins at the nanoscale via magnetic resonance frequency encoding, *npj Quantum Information*, 3, 31 (2017).
- (13) Arai *et al.*, Geometric phase magnetometry using a solid-state spin, *Nature Communications* 9 4996 (2018).
- (14) Arai *et al.*, Millimetre-scale magnetocardiography of living rats with thoracotomy, *Communications Physics* 5, 200 (2022).