

研究終了報告書

「ダイヤモンド中の電子スピンを用いたマルチモダル量子センサの開発」

研究期間:2020 年 12 月～2024 年 3 月

研究者:荒井 慧悟

1. 研究のねらい

Society5.0 の実現に向けた試金石は、次世代サイバー・物理空間の構築である。その鍵を握る技術のひとつは、物理空間から情報を得るセンシングである。なかでも複数の物理量をセンシングできる「マルチモダル性」は、サイバー空間の拡充に欠かせない。高度なマルチモダル化によって、製造業向けサイバー空間の充実化や AI 創薬の効率化などが可能になると期待されている。

そのような可能性を秘めたセンシング・プラットフォームの候補として、ダイヤモンド中の窒素・空孔欠陥(NV センター)を提案する。NV センターは、磁場・温度・圧力・回転等に感度を持ち、極低温～1,200℃、極低圧～数百 GPa といった幅広い環境で機能する。感度単体の性能では競合技術に劣るものの、NV センターほど多くの強み(マルチモダル性、極限環境での動作性、ナノスケール空間分解能等)を備えた情報担体は他にない。ところが現在に至るまで、これらの NV センターの複合性能を活かす技術開発は進んでおらず、その応用先も明確になっていない。

本研究では、NV センターを情報担体とする量子センシング技術において、磁場・温度・圧力等のマルチモダル性を実証し、社会実装を見据えたデバイス化・システム化への方針を得ることをねらいとした。また、その達成に向けて下記の研究項目を設定した。

- **研究項目 A「マルチモダル実証」:** NV センターの精密制御によって複数物理量の計測を新たな付加価値として引き出すことを目的とした。また、その価値を様々な科学分野へ提供し、各分野の問題解決に資するツールとして昇華することを目指した。
- **研究項目 B「デバイス・プロトタイプ設計」:** 上記マルチモダル量子センシング技術を様々な応用に展開するため、各用途にカスタマイズされたシステム構築を目的とした。また、その応用範囲を社会実装にまで広げるため、小型化・ポータブル化を見据えたデバイス・プロトタイプの設計を目指した。
- **研究項目 C「ユースケース開発とシステム効率化」:** 上記システムの社会実装に向けた有望なユースケースの開拓を目的とした。また、現場で要求される性能を満たすべく、機械学習などの手法と組み合わせたシステムの効率化を目指した。

以上のうち、研究項目 A をメインテーマ、研究項目 B への着手および研究項目 C の提案までをサブテーマとした。また、これら一連の取り組みで、未来の産業創出や起業につながる技術的発明等の成果も積極的にねらうこととした。

2. 研究成果

(1) 概要

研究のねらいで述べた研究項目 A, B, C の目的達成に向けて、複数のプロジェクトに取り組んだ(表 1)。取り組み①では磁場・温度の計測を行い、それをラットの心臓が作る電流の再構成に応用した。取り組み②では、温度・圧力の計測を行うと同時に極限環境で磁場センシングが可能なことを示し、地球科学・超伝導科学への応用を拓いた。取り組み③では、核スピンを利用した回転・空間曲率の計測を行い、NV センターがトポロジカルな量子プローブとして転用可能なことを示した。取り組み④では、マルチモダル性を新たな付加価値として、次世代 IoT 応用に向けた研究に着手した。

これらの取り組み①から④の結果、様々な物理量の同時検出の実証に成功しており、研究項目 A「マルチモダル実証」については、計画当初のねらい以上の成果を得られたと言える。また、それぞれの取り組みに付随して、生体計測向けのセンサヘッドや、極限環境向けの加温・加圧システム、次世代 IoT 向けの小型デバイスなどの創出につながっており、起業を視野に入れたプロトタイプ開発も進んでいる。そのため、研究項目 B「デバイス・プロトタイプ」についても十分な成果を得られた。研究項目 C「ユースケース開発とシステム効率化」については、社会実装を見据えた複数の具体的なユースケースが見えてきた。一方で、システムを最適化する具体的アルゴリズムの発案には至っていないため、完全に達成できたとは言い難い。このように、様々な取り組みを試す紆余曲折があったものの、基礎研究から社会実装ユースケースの萌芽まで、一貫通貫で横串を通せたことを大変うれしく感じている。

本研究を通じ、当さがけ領域内の研究者との連携のみならず、領域外の研究者(特に韓国 KIST、米国メリーランド大学、ドイツマインツ大学等)との共同研究も進展した。さらには、企業との共同開発や、起業に向けた投資機関との連携など、産業界とのつながりにも結びついた。

表1: 4つの取り組みにおける研究項目A-Cの達成度の自己評価

取り組み	研究項目A： マルチモダル実証			研究項目B： デバイス・プロトタイプ設計			研究項目C： ユースケース開発とシステム効率化		
	①	②	③	④	①	②	③	④	⑤
	ラット心磁 イメージング	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	極限環境 イメージング	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	トポロジカル・ シミュレーション	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	次世代IoT向け 社会実装	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
総合評価		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

(2) 詳細

研究のねらいで述べた研究項目 A,B,C の達成に向けて、4 つの取り組みを実施した。特に取り組み①から③までの様々な物理量の同時計測およびシステム開発に関する試行錯誤が、最終的には取り組み④の社会実装ユースケースの萌芽につながったと言える。これらの研究成果のうち①から③について、研究目的の達成状況および領域内外との連携状況についての詳細を下記に述べる。

取り組み①「ラット心磁イメージング」

本取り組みでは、温度・磁場の同時計測を実施するとともに、磁場の発生源である電流を再構成する機械学習アルゴリズム(非線形重回帰)を考案・実証した。その技術を生きたラットの心臓を流れる電流が作る磁場のイメージングに活用した。

- **研究成果:** NV センターの 2 つの共鳴ピークを使用する生体システム専用の計測系を立ち上げ、ラットの心臓電流が作る磁場のイメージングに適用した。得られた磁場情報から心臓内部を流れる電流をミリメートルスケールの空間分解能で再構成することに成功した。実験の実施にあたっては、微小磁場を計測するために、レーザーノイズ、低周波回路ノイズ、温度ノイズの低減手法を 3 段階で組み合わせて感度改善を図った。その結果、光ショットノイズが $20 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ に対し、回路ノイズが $30 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 、磁場感度が $140 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ に達し、生体磁場に活用したシステムとしては当時世界最高感度を記録した。本成果は *Communications Physics* 誌にプレスリリースとともに発表し(成果(1)-1, (3)-5)、応用物理学会での招待講演や MRS 国際会議での講演賞受賞につながった(成果(3)-1, (3)-4)。
- **研究目的の達成状況:** 本取り組みは、電流・磁場・温度の同時イメージング技術の実証によって研究項目 A の達成に資するに留まらず、将来的な生体磁気応用に向けたセンサデバイスや磁気シールドとの統合システムの設計に至るなど、研究項目 B にも大いに貢献した。特に、本実験で採用したマイクロ波印加、レーザー励起・蛍光集光、放熱の設計方法は、後述する取り組み④のプロトタイプ設計にも生かされている。また、本研究での成果を技術シーズとして、生体の筋磁場や脳磁場をイメージングできるシステムへ昇華することを視野に入れて研究を継続しており、研究項目 C のユースケース開発にもつながっている。
- **領域内外との連携状況:** 東京大学関野研究室、東北大学桑波田研究室、QST 大島グループ、NIMS 谷口・寺地グループとの連携を図り、共著での論文発表に至った。

取り組み②「極限環境イメージング」

本取り組みでは、NV センターを加圧用ダイヤモンド・アンビルセルや加温用ヒーターに統合し、高温(数百℃)や高圧(数十 GPa)下での量子イメージングを実証した。また、圧力感度を一層向上させるため、磁歪薄膜とのハイブリッド・システムの考案にも別途取り組んだ。

- **研究成果:** 本さがけプログラムの初期段階に立ち上げた計測装置(共焦点顕微鏡、CCD イメージング一体型)に対し、高圧を印加するためのダイヤモンド・アンビルセル、高温を印加するための抵抗ヒーターを組み込んだ。そして、高温・高圧下での磁性体の磁化消失(相転移)の観測や温度・圧力計測の独立分離プロトコルの考案に取り組むなど、NV セン

ターに極限環境マルチモダルセンサとしての付加価値を見出すことに成功した。また、高圧下での金属配線の困難性を解消するための技術を開発している。さらには、磁歪薄膜と NV センターのハイブリッド系を構築することで、圧力センサとしての感度をダイヤモンド単体に比べて約 550 倍向上できることを *Physical Review Applied* 誌に発表した。

- **研究目的の達成状況:** 本取り組みは、温度と圧力および磁場のイメージング実証によって研究項目 A の達成に資する結果を出すことができた。また、高温・高圧の極限環境を生成するための加温・加圧システムを NV センターの量子イメージング装置に組み込んだことで、極限環境での物質の研究を行う地球内部科学や高圧超伝導科学へ新たなイメージング・ツールを提供することになり、研究項目 B および C も十分に達成できたと言える。さらには、極限環境を強いられる次世代 IoT 向けのユースケースの発掘にもつながっている。
- **領域内外との連携状況:** 高温高圧下の NV イメージングおよび地球科学応用の模索については、ドイツマインツ大学 Budker 研究室や東京工業大学太田研究室、SPRING-8 と連携して研究を展開してきた。特に温度・圧力の較正のために大輝度 X 線回折による格子定数計測を行っており、SPRING-8 から多大な協力をいただいた。超伝導応用については NIMS 高野研究室との共同研究に発展している。

取り組み③「トポロジカル・シミュレーション」

本取り組みでは、NV センターを用いて空間曲率やトポロジカル不変量を検出できることを実証した。また、実証に際し、NV センターの量子状態を任意に制御するためのマイクロ波の高精度制御システムや、核スピン等の多体系を含む量子計算ツールを構築している。

- **研究成果:** NV センターに付随する窒素核スピンを回転座標系における疑似的な 3 つの磁気モノポールとして見立て、そのモノポールが作る疑似的磁場を空間曲率として検出できることを実証した。この空間曲率は、NV センターの制御ハミルトニアンのパラメータ形状に依存しており、さらに曲面上で積分することによりトポロジカル不変量(チャーン数)を得ることができる。また、量子系では上記のハミルトニアンを自在に変更できる特長を活かして、トポロジカル不変量間の相転移も計測することに成功した。本成果は、*npj Quantum Information* 誌へ掲載され(成果(1)-2)、東京工業大学末松賞の受賞につながった(成果(3)-3)。
- **研究目的の達成状況:** 本取り組みは、空間曲率や不変量の検出によって NV センターのマルチモダル性の意義の拡張に資する(研究項目 A)に留まらず、新たなトポロジカル物質の探索に向けて、NV センターをトポロジカル量子シミュレータとして活用できる可能性を拓いた(研究項目 C)。
- **領域内外との連携状況:** 韓国科学技術研究院 Lee 研究室、米国メリーランド大学 Walsworth 研究室と国際共同研究を展開している。現在は NV センターどうしのエンタングルメント状態や核スピン量子メモリを積極的に活用するなど、制御の自由度を高める方向に発展させている。また、従来の磁気共鳴によるスピン制御では、空間分解能の制限が課題として将来的に立ちほだかることから、電気共鳴による精密制御技術を新たに開拓するべく、さがけ領域内の東北大学森下研究室との共同研究に着手した。

3. 今後の展開

研究項目 A で見出した NV センターの付加価値や研究項目 B、C で明確化した新たな応用筋をより発展させるため、今後は基礎研究・応用研究・社会実装の 3 本柱で研究を展開させていく。

基礎研究への展開:量子情報担体としての付加価値の一層の向上

本研究で情報担体と規定する NV センターには、エンタングルメント状態や付随する核スピンの量子メモリ利用など、量子スピン系としての潜在的価値がまだまだ残されている。

- **研究目的:** 取り組み③の発展系として、NV センターどうしのエンタングルメント状態や核スピン量子メモリを介した、標準量子限界に律速されない感度を持つ次世代の量子センシングを実証することを目指す。
- **研究資金および協力体制:** 足元は韓国 KIST と実施中の JSPS 二国間交流事業を成功させる。また、現在申請中の研究費が採択された場合には、すでに共同研究の議論を重ねている米国の研究室と国際共同研究を開始したい。
- **社会実装シナリオとおおよそのタイムスパン:** 多体スピン系の大規模エンタングルメントを忠実度高く制御するブレークスルーが必要であり、現有アイデアの 3 年以内の実証を目指す。

応用研究への展開:極限環境量子センサとしての室温超伝導体探索への活用

近年、高圧(数百 GPa)をかけると室温付近で超伝導転移する物質が立て続けに予言されている。しかし、目下のところ加圧器内部の温度・圧力・磁場を高空間分解能にイメージングできるセンサが存在しないため、これらの物質が本当に超伝導体であるかどうかの証拠を掴めていない。

- **研究目的:** 取り組み②の発展系として、NV センターを新たな高圧超伝導体の探索に活用することを目指す。
- **研究資金および協力体制:** 足元は NIMS 松本研究員および東京工業大学東助教と共同実施中の科研費基盤研究(B)に注力する。また、ドイツマインツ大学 Budker 研究室と引き続き国際共同研究を実施する。
- **社会実装シナリオとおおよそのタイムスパン:** 3 年以内にこのような環境下で超伝導の直接的証拠となる磁化率イメージングを可能にできれば、様々な超伝導体の物性評価がより精密になり、より室温に近い超伝導体の社会利用も進んでいく可能性がある。

社会実装への展開:インフラや産業財の遠隔モニタリング

本研究で実証している次世代 IoT 向けのセンシング技術を産業財やインフラの保守保全に展開することを期待している。

- **研究目的:** 産業財やインフラ保守保全を目的としたシステム開発を目指す。
- **研究資金および協力体制:** 現有センシング技術に興味を持つ企業と協働で研究開発を進める。
- **社会実装シナリオとおおよそのタイムスパン:** プロトタイプ作製およびビジネスモデル策定を 1,2 年以内に行う。

4. 自己評価

ア 研究課題等の研究目的の達成状況

本課題では、ダイヤモンド量子スピンについて情報担体としての「マルチモダル性」を引き出すことを目的とし、さらに将来的な社会実装に向けてデバイス・プロトタイプ的设计・作製やユースケース／システム開発を進めることを目指した。具体的には、ダイヤモンド量子スピンを用いて、磁場・電流・温度・圧力・回転など様々な物理量を計測できること、もしくはデータ解析によって抽出できることを実証しようというものである。また、将来の社会実装に向けてターゲット応用を模索し、それに向けた適切なセンシングの構成を探ろうとしている。実際には、これらのうちの2,3つまでの実証に留まったが、磁場・電流の計測をラットの心臓のイメージングに応用したり、スピンを幾何的に制御することでトポロジカル構造をシミュレーションするなど、当初の範囲を超えたユースケースを見出すことに成功している。これらの一連の成果は、著名な論文誌への発表や学会での招待講演、文部科学大臣表彰「若手科学者賞」等の受賞にもつながっており、当該分野内でも高い評価を得られた賜物と言える。さらには、企業との共同研究やスタートアップ設立に向けた応用的開発にも展開が及んでおり、当初の研究目的は概ね達成されたとと言える。このように、様々な取り組みを試す紆余曲折があったものの、最終的には基礎研究から社会実装ユースケースの萌芽まで、一気通貫で横串を通せたことを大変うれしく感じている。

イ 研究実施体制及び研究費執行状況(総括裁量経費を含む)

本研究は報告者が遂行の中心となり、また国内外の機関との協力関係のもと共同で研究を進めた。研究開始当初は文字通りに単独で奮闘していたが、次第に国内外の協力者が増えていき、さらに自らが PI となって研究室を立ち上げた時点から研究を加速することができた。まず、さきがけ領域内では、スピンの電氣的検出の共同研究を東北大学と開始している。続いて国内では、ダイヤモンド合成の研究グループから量子計算の理論家、極限環境の実験家、他科学分野の専門家、社会実装に向けた企業群・投資家との連携に至るまで、研究のバリューチェーンを垂直統合するような形で協力関係を築くことができた。さらには、韓国や米国、ドイツとの相補的な協力体制の構築も進み、定期オンライン・ミーティングや不定期セミナーを実施している。

研究費としては、基盤の研究費 35,000 千円に加え、スタートアップ支援制度(9,275 千円)、出産・子育て・介護支援制度(975 千円)、総括裁量経費(2,520 千円)の合計 47,770 千円をいただいた。本プログラム終了時までの執行率は 100%となっている。特に高額備品としては、取り組み①から④の実験を進めるにあたって必要となる光学機材(レーザー4,389 千円、顕微鏡 2,066 千円)やマイクロ波機材(シグナルジェネレータ4,778 千円、大強度アンプ1,946 千円、スペクトラムアナライザ 1,591 千円)、検出器(CCD3,366 千円、分光器 1,931 千円)等の購入に使用した。また、人件費・謝金としては、出産・子育て・介護支援制度を利用して技術支援員およびRAを雇用した。以上の支出により、さきがけ前半時点で量子イメージング装置を一台構築することができ、PI として独立した後半時点には、発展した様々な実験用途に合わせた新たな装置二台の構築に着手することができた。

ウ 研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果、特に今後の展開・見込み

今回得られた研究成果は、先述のように、バイオメディカル工学や物性物理学、地球科学などの科学技術へ波及効果があるだけでなく、次世代 IoT センサとしても社会実装に向けたデバイス開発につながっている。特に今後は本技術を活用したい企業との共同研究や、スタートアップ起業を経て技術を普及する活動が見込まれる。

- **科学技術への波及効果:**まず、ラット心磁実験で得られた成果により、生きた生体の体内電流を遠隔的に計測できることが明らかとなった。将来的には、医学用として心不全などの基礎研究や臨床試験用に転用される可能性もある。次に、圧力や温度計測で得られた成果により、極限環境下での物質のナノスケール・イメージング技術が発展した。今回設計した加圧・加温システムにより、今後は高圧超伝導体の探索や地球内部の鉱物の相転移などに応用されることが期待される。
- **社会・経済への波及効果:**特に遠隔で電流を検出する成果は、インフラのモニタリングや、工場や機械のモニタリングなどに応用できる可能性がある。今後は、本技術がビジネスモデルと結びつくことで分野間のユースケース横展開が可能となり、人間の知覚の地平線を広げるとような新たな市場が創出されていくものと考えている。

エ 外国の研究機関等と共同して研究を実施した場合の相手機関との研究交流状況

本課題では、取り組み②「極限環境イメージング」においてドイツマインツ大学 Budker 教授と、取り組み③「トポロジカル・シミュレーション」において韓国科学技術研究院 Lee 主任研究員および米国メリーランド大学 Walsworth 教授と共同して研究を実施した。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:4件

1. K. Arai <i>et al.</i> , “Millimetre-scale magnetocardiography of living rats with thoracotomy,” <i>Communications Physics</i> 5 , 200 (2022).
心磁図検査は、心臓内の電流伝播を非接触に画像化する手法である。従来のセンサは高い感度を持つ一方、その空間分解能はセンチメートルスケールに制限されており、心室不整脈に関連する回転波などの現象を捉えるには不十分であった。本研究では、ダイヤモンド量子センサを使用して、生きたラットの心磁図をミリメートルスケールで実証した。取得した磁気画像は、信号源が右心房基部からプルキンエ線維束を介して左心室頂点に向かうことをよく捉えている。本技術により、粗動、細動、頻脈などのさまざまな不整脈の原因と進行の研究が可能になると期待される。
2. J. Lee <i>et al.</i> , “Controllable tunability of a Chern number within the electronic-nuclear spin system in diamond,” <i>npj Quantum Information</i> 9 , 66 (2023).
チャーン数は、さまざまな物理システムにおけるトポロジカルな位相を特徴づける。ただし、外部摂動に対してトポロジは影響を受けにくいことから、異なるトポロジ間の遷移を調査することは実験的に困難である。本研究では、NV センターのスピン系を使用して、チャーン数の 0 か

ら 3 への遷移を観測した。測定されたトポロジカル相図は、数値計算と一致しており、相互作用する 3 量子ビット系にも数学的にマッピングできることを示した。NV 系はさらに高いチャーン数へのアクセスも可能であるため、よりエキゾチックなトポロジックなトポロジカル量子情報の探索に活用できる。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 件 (特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

(3)-1 招待講演

2023 年 3 月

“Imaging of biomagnetism using diamond quantum sensors”

The 70th JSPS Spring Meeting, Tokyo, JAPAN.

(3)-2 受賞

2023 年 9 月

東京工業大学 末松賞 革新的価値創造の基礎と展開

「固体スピン系の幾何学的制御とトポロジカル量子シミュレーションへの展開」

(3)-3 受賞

2023 年 4 月

文部科学大臣表彰 若手科学者賞

「ダイヤモンド量子センサの高性能化と次世代応用の研究」

(3)-4 受賞

2022 年 3 月

2021 MRS Fall Meeting Best Presentation Award

“Magnetocardiography of Mammalian Animals Using Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond”

(3)-5 プレスリリース

2022 年 8 月

「ダイヤモンド量子イメージング、心臓が作る磁場をミリメートルスケールで可視化」

<https://www.titech.ac.jp/news/2022/064679>