

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	生体磁気計測に向けたダイヤモンド量子センサ
Title(English)	Diamond quantum sensors for biomagnetic field sensing
著者(和文)	西谷大祐
Author(English)	Daisuke Nishitani
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12369号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:波多野 睦子,中川 茂樹,宮本 恭幸,小寺 哲夫,岩崎 孝之
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12369号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	西谷 大祐	
論文審査 審査員		氏名	職名		
	主査	波多野 睦子	教授	岩崎 孝之	准教授
	審査員	中川 茂樹	教授		
		宮本 恭幸	教授		
		小寺 哲夫	准教授		

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は”Diamond quantum sensors for biomagnetic field sensing” (ダイヤモンド量子センサによる生体磁気計測) と題し、英文 5 章から構成されている。

第 1 章”Introduction” (序論) では、研究の背景と目的を述べている。現状の自動車産業の問題である交通事故抑制に対して、ドライバの監視、特に脳活動のモニタの重要性について説明している。現在用いられている脳波計測や光トポグラフィ技術に対し、非接触・非拘束で脳活動がモニタできる脳磁計測の必要性を述べている。脳磁の大きさはサブ pT と非常に小さく、雑音が多い車載環境下で検出することが課題であるが、ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) センタを用いた量子センサの可能性について説明し、本研究の目的とすることを述べている。

第 2 章”Principles” (原理) では、ダイヤモンド中の NV センタの理論について、さらに DC~数 100 kHz の周波数範囲の磁気計測の原理と課題について示している。2 つの計測方法である連続-光検出磁気共鳴 (CW-ODMR) 計測と Ramsey 計測に関して、動作原理とショットノイズ感度を導出し、理論的な限界感度の達成を阻害するノイズ源を考察し、それらの対策をまとめている。

第 3 章” Demonstration of magnetocardiographic imaging of living rats” (ラットの心磁イメージング) では、生体磁気計測システムについて述べている。ラットの心磁を長時間にわたって安定して計測可能なシステムを提案し、構築した。エネルギー準位差を用いた量子プロトコルである CW-ODMR 計測にロックイン検出と差動検出を組み合わせることで、ノイズの低減を図る技術を提案した。また、生体維持のための生体温度調整システムによる温度変化に対し、温度フィードバックを組み合わせることを提案した。それらを含めたシステムを構築することによって磁気感度 $140 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ を実現し、心磁の計測とイメージング、さらには心臓のダイナミックな電流の再構成を実証した。さらに CW-ODMR 計測における光とマイクロ波が与える影響について解析し、センサ体積によるセンサ感度の向上を説明し、 1 mm^3 のセンサ体積に均一なマイクロ波磁気が照射可能なアンテナを試作してその有効性を示した。

第 4 章” Development of advanced quantum protocols based on Ramsey method toward brain monitoring” (脳のモニタリングに向けた Ramsey 計測をベースとした高度量子プロトコルの開発) では、脳磁の検出に向けて、CW-ODMR 計測よりも高感度化が期待できる Ramsey 計測に、2 つのスピン状態の共鳴周波数を同時に励起する Double Quantum 法を搭載した量子プロトコルについて説明し、磁気計測に有利な<111>軸のダイヤモンドに対してマイクロ波アンテナが必要なことを述べている。センサ体積に均一で広帯域な強いマイクロ波磁気を生成することができる穴を備えた T 型アンテナを提案し、電磁界解析と Rabi 計測によりそのアンテナの効果を検証している。また従来の Ramsey 計測は高速のデジタイザを用いて NV センタの蛍光信号の時間変化を取得しているため、長時間かつリアルタイム測定には不向きであることを指摘している。また、NV センタのスピン状態に依存した蛍光量はオフセットを有しているため、実際のデジタイザの分解能に対してスピン状態に依存した蛍光量の分解能が低下することを指摘している。これらの課題を解決するため、Double Quantum 法を適用した Ramsey 計測にロックイン検出を組み合わせた計測システムを構築し、磁気信号のリアルタイム検出を実現したことを示している。またショットノイズ感度と実測の磁気感度の乖離の要因を分析し、アンプ・検出系の電気ノイズが支配的であることを示している。さらにノイズ低減の方法とその効果を解析し、脳磁検出が可能なサブ $\text{pT/Hz}^{1/2}$ の感度を実現するために必要な要素技術について述べている。

第 5 章”Conclusion and outlook”では本論文の結論と今後の展望をまとめている。

以上を要するに、本論文では、ダイヤモンド中の NV センタの量子センサの応用に関する研究を行い、CW-ODM 計測にロックイン検出と差動検出を組み合わせた生体磁気計測の構築、Double Quantum 法を適用した Ramsey 計測にロックイン検出を組み合わせた計測系の構築と動作実証など、将来的に高感度磁気計測、生体磁気計測などに幅広く応用が期待されるダイヤモンド量子センサに新たな道を拓いたもので、工学上、貢献するところが大きい。よって、我々は本論文が博士 (工学) の学位論文として十分な価値があると認める。