



京都大学
KYOTO UNIVERSITY



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



ハイブリッド量子技術による核磁気共鳴のレーザー光検出 —化学分析や磁気共鳴画像（MRI）診断の高感度化に期待—

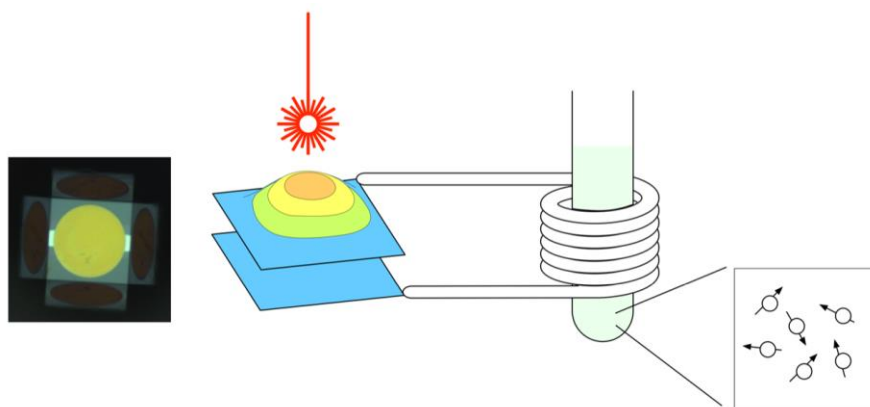
- 核磁気共鳴（NMR）は、物理・化学・生物学において、物質の構造等を分析する強力なツールですが、信号が微弱であることが弱みであり、測定の感度を改善するための様々な試みが行われてきました。
- 本研究において、NMR 信号検出の原理として、電気・機械振動子・光のハイブリッド系を応用し、光による新しい核磁気共鳴（NMR）の検出法を開発・実証しました。
- 本成果により、化学分析及び NMR の原理を応用した磁気共鳴画像（MRI）診断の高感度測定が期待されます。

概要

京都大学大学院理学研究科の武田和行准教授、東京大学先端科学技術研究センターの宇佐見康二准教授らの国際共同研究グループは、光による核磁気共鳴（NMR）の新しい検出法を開発・実証しました。NMR は、物質中の原子核が持つミクロな「磁石」が、物質の性質や構造を反映して振る舞う様子を捉えて物質を分析する有用な手段で、化学分析に威力を発揮しているだけではなく、NMR の原理を応用した磁気共鳴画像（MRI）診断は医療現場に欠かせないツールとなっています。NMR の信号は、原子核内の磁石の運動により発生する電気信号を増幅することで得られます。しかし、電気信号を増幅する際には必然的に新たな雑音が付け加わり、測定の感度が制限されてしまいます。

本研究グループは、電気—機械—光ハイブリッド量子技術（注）を用いて高周波電気信号をレーザー光へ変換することができる独自の NMR 実験システムを開発して、薄膜機械振動子を介した NMR 信号の光検出に初めて成功しました。今回のレーザー光 NMR 信号検出法は、通常の NMR や MRI で測定・撮像されている対象にそのまま適用可能で、かつ信号の受信過程における雑音の混入を極めて少なくできるため、化学分析および MRI 診断の高感度化に役立つことが期待されます。

本研究成果は、2018年2月1日付（米国東部時間）発行の米国科学誌「Optica」に掲載されました。



核磁気共鳴の光検出法のイメージ図。試験管内の物質中の原子核が持つ「磁石」の運動が、発電機の原理により電気信号を発生。それがコンデンサーの電極に用いられている薄膜を揺さぶる。その薄膜の変位をレーザー光で検出する。左は金蒸着した窒化シリコン薄膜の拡大写真。

1. 背景

核磁気共鳴（NMR）は、物理的・化学的・生物学的に関心のある液体および固体材料の構造および動力学の情報を提供する強力な分析ツールです。ただし信号が微弱であることが NMR の弱みであり、測定の信号対雑音比を改善するための様々な試みが行われてきました。一方ごく最近、量子光学・量子エレクトロニクス分野では電気-機械-光ハイブリッド量子技術を用いて電気信号を光に変換する技術が開発されました。電気信号の検出に比べて、光の測定は非常に低雑音で行うことができるため、電気信号を扱う様々な分野において計測の感度を劇的に向上させる可能性が示されました。そこで今回本研究グループは、NMR の電気信号を光に変換するプロジェクトを立ち上げました。これまでもファラデー回転、力検出、蛍光、および原子磁気測定のような光で NMR を検出する方式の報告がなされてきましたが、これらは全て、特殊な試料でしか測定できないものでした。今回のプロジェクトで本研究グループは、生体を含む、多種多様な系を測定対象とすることが可能な、光による NMR の検出法を確立することを目指しました。

2. 研究手法・成果

光による NMR 信号検出の原理として、ハイブリッド量子技術の一つである共振器オプトメカニクスの原理を応用しました。金属で被覆した窒化シリコン膜を電気回路のコンデンサー電極および光学干渉計のミラーとして用い、NMR 信号をラジオ波（RF）から光に周波数を変換しました。ここで、RF 電気回路と光干渉計は、太鼓の膜のように機械的に振動する窒化シリコン膜を介して結合され、互いに相互作用します。その結果、電気回路に発生した NMR 信号は窒化シリコン膜の機械的振動に変換されます。さらに振動する薄膜の変位は、レーザー光を用いた光干渉計により光信号に変換されます。この原理を用いて、水に含まれる水素原子核の NMR 信号を光に変換する実験に初めて成功しました。こうして化学分析および磁気共鳴画像（MRI）診断に利用されている既存の電氣的 NMR 検出手法との高い互換性を持つ光 NMR 検出が実現しました。

3. 波及効果、今後の予定

今回の新しい光 NMR 検出法の信号対雑音比は、窒化シリコン膜のブラウン運動に起因する熱雑音および付加的な技術的雑音によって現在制限されていますが、装置の改良および実験条件の最適化で、従来の電気方式と比較してより優れた感度を提供できることを理論的に示しました。今回の光 NMR 検出法は、今後 NMR や MRI の感度をさらに高める道を開くであろうと期待できます。また、共振器オプトメカニクスの原理を活用することで、NMR 信号の機械的なパラメトリック増幅や核スピンの冷却の可能性も示唆され、巨視的な物理系の量子制御を目指したハイブリッド量子技術の応用範囲がさらに広がることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

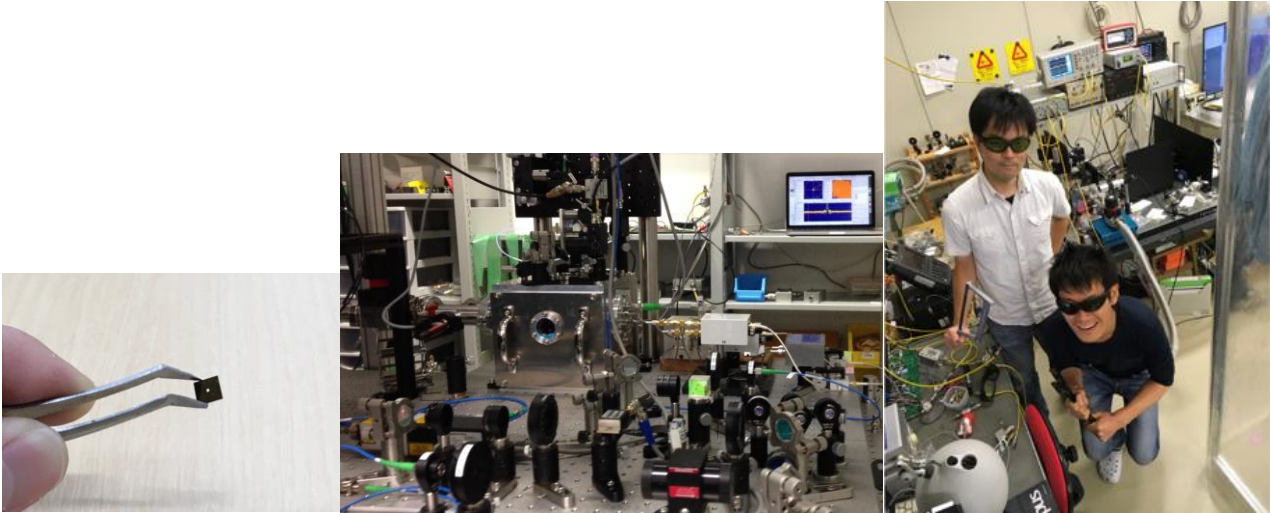
本研究の一部は、科学技術振興機構（JST）研究成果展開事業 先端計測技術・機器開発プログラム「全原子を測定対象とする次世代型 NMR 装置の開発」（課題番号：14537844、代表者：山田和彦）、戦略的創造研究推進事業 総括実施型研究（ERATO）「中村巨視的量子機械プロジェクト」（課題番号：JPMJER1601、研究総括：中村泰信）による支援を受けて行われました。本研究は、東京大学先端科学技術研究センター、理化学研究所創発物性科学研究センター、早稲田大学理工学術院岩瀬英治准教授およびアメリカ国立標準技術研究所のジェイク・テイラー研究員と共同で行ったものです。

5. 注記

ハイブリッド量子技術：

異なる2つ以上の量子系を統合させ、1つの量子系としてみなし、量子情報を測定・制御する技術。近年、共振器オプトメカニクスと呼ばれる光と薄膜機械振動子との間で量子情報がやりとりされる光-機械の系や、エレクトロメカニクスと呼ばれるコンデンサーと薄膜機械振動子との間で量子情報がやりとりされる電気-機械の系が開発されています。この技術により、複雑に組み合わせられた量子系を制御することができると期待されています。

<イメージ図>



左：0.5mm 角、薄さ 50nm の窒化シリコン薄膜。中央：構築した実験システム。数多くの光学部品と高周波電気回路からなる。右：実験装置をバックにレーザー保護眼鏡をかけた状態でのスナップショット（武田：左、宇佐見：右）。この研究成果は、核磁気共鳴、ナノメカニクス、量子光学という異なる分野にまたがる学際領域の研究を異なる専門分野、経験、ノウハウを結集させた国際共同研究体制で実現しました。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Electro-mechano-optical detection of nuclear magnetic resonance

著者：Kazuyuki Takeda, Kentaro Nagasaka, Atsushi Noguchi, Rekishu Yamazaki, Yasunobu Nakamura, Eiji Iwase, Jacob M. Taylor, and Koji Usami

掲載誌：Optica