

## 論文審査の結果の要旨

氏名：近内 亜紀子

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題目：核四重極共鳴を用いた爆薬遠隔検知に関する研究

審査委員：（主査） 教授 浅地哲夫

（副査） 教授 藤森裕基

（副査） 教授 永井尚生

核四重極共鳴（Nuclear Quadrupole Resonance: NQR）とは、核スピン量子数が1以上の原子核が結晶中で不均一な電場（電場勾配）を受ける場合に生じるエネルギー準位間で観測される磁気共鳴である。数百 kHz から数百 MHz の周波数領域の高周波の共鳴吸収となることが多く、ラジオ波分光学の一分野である。申請者は NQR を爆薬検知に応用することを目的として本研究を実施した。これは、爆薬の多くが、核スピン量子数が1である窒素原子核（ $^{14}\text{N}$ ）を含む結晶であり、固有の NQR 周波数を持つという事実に着目し、発想されたものである。それぞれの爆薬固有の NQR 周波数を検出することにより種類を特定した爆薬の検知が可能となるため、現行の検査方法を補完する技術として期待される。

申請者は、まず、空港等における危険物等の持ち込み防止を目的とした保安検査の実情を調査し、特に爆薬検知に関する種々の検査方法の特徴と課題を整理した。その中で、物質を特定した検知が可能な NQR 法の優位性に注目し、その原理と計測方法を検討し装置開発を行った。さらに、その有用性を羽田空港保安検査場にて実証試験するとともに、検出される信号の詳細を調べ、従来の観測結果と異なる結果が得られていることを見出した。そして、その原因について考察し、信号検出の新しい方式の可能性を提起した。

NQR 信号計測を手荷物検査に応用することを考えた場合、短時間での計測および物質同定が必要となるが、高出力の高周波パルスを連続的に照射するとき、定常的な NQR 信号が観測できるという実験事実の発見によって、この方式の可能性が飛躍的に向上した。申請者も基本的にはこの原理に基づいた信号の検出を計画した。しかし、従来のパルス NQR 計測方式においては、測定条件に依存して NQR 信号強度が変化することが報告されており、爆薬検知においては改善されるべき問題であった。従来方式においては、高周波発生器で生成した連続的な高周波をパルス波形にチョッピングすることで照射用高周波パルスを生成し、受信においては照射パルス生成に用いられた連続高周波を試料からの信号電圧に掛け合わせてから信号を集録する方法が採られていた。この計測方法は、いわゆる位相敏感検波（Phase Sensitive Detection）であり、位相敏感検波は数十 MHz 程度の NQR 信号の周波数を DC レベル付近に変換することで、集録に必要なサンプリングレートを下げデータ数を減らすという利点があるが、照射周波数等に依存して NQR 信号が弱まることが報告されていた。

申請者は、位相敏感検波を用いた場合の、定常的な NQR 信号の信号強度のモデル式を検討し、NQR 信号強度の照射周波数およびパルス間隔依存性の原因について考察した。その結果、この検波方式では、NQR 信号を構成する2つの成分の干渉が信号強度の変化の原因になっているとの結論に達した。

そこで、照射と受信を独立させた設計で、マルチパルスを用いた NQR 計測装置の開発を行った。照射パルスは、位相連続的な連続高周波をチョッピングして高周波パルスを生成する従来の方式ではなく、デジタルデータと任意波形発生器を用いて、照射のたびに同初期位相の高周波パルスを生成する方法がとられた。このような高周波パルスを用いる場合、高周波パルスと高周波パルスの間に観測される NQR 信号も位相が揃っていると予想されるので、集録前に検波することなく直接 AD 変換して集録し、集録後にデータ処理として検波やフィルタリングを行う仕様に設計された。高周波アンプならびに、DA あるいは AD 変換は、40 MHz の同一のクロックで同期され、一つの計測制御プログラムで制御された。さらに、時間の関数として計測した NQR 信号に Fourier 変換を行い、周波数スペクトルのピーク面積で信号強度が評価された。この装置を用いて、高周波パルスの連続的照射下における原子核スピン系の応答メカニズムを検証し、この方式では NQR 信号強度が、照射及び検波周波数に依らず一定となることを明らかにした。これは、NQR を用いた爆薬検知において安定な計測を実現するために、非常に重要な新発見と考えられる。

実際の検査を想定した検出部が製作され、NQR 装置の爆薬検知への適用性について検証実験が実施さ

れた。検査対象としては、靴底および手荷物に隠匿された爆薬を想定し、それぞれ複数種類の検出コイルについて、その性能が評価された。

靴底爆薬を対象とする平面コイルとして、コイル表面から離れてもできるだけ一様な高周波磁場を発生するように不等間隔に巻かれた非線形螺旋型コイルと、環境ノイズを相殺するために2つのコイルを組み合わせたグラジオメータ型コイルを作製し、対象物のNQR信号強度のコイル表面からの距離依存性を計測した。500gの亜硝酸ナトリウム( $\text{NaNO}_2$ )を対象とした場合、非線形螺旋型コイルにおいてはシールド内で18.5cm、グラジオメータ型コイルにおいてはシールド外で8.5cmという検出限界距離が見積もられた。軍用爆薬RDX 300gがシールド外においても検出可能であることが確認された。放出されるNQR信号が検出器位置に作る磁場強度を見積もることで、製作した検出コイルの感度を推定し爆薬検知に必要な検出感度を議論した。グラジオメータ型コイルにおいては、NQR信号の平面内2次元強度分布の計測から、コイルの発生する高周波磁場強度分布について実験データが得られた。

手荷物検査を想定した検出部としては、機内持ち込み荷物を想定した大型のソレノイドコイルを作製し、性能評価を行った。NQRを用いた手荷物検査においては、金属類や電子機器が手荷物中に存在する場合、コイルと対象物間の電磁波伝搬の障害になると考えられるため、そのような状況下で対象物が検出できるかが検討された。金属板や工具類が手荷物にある場合、コイル内の透磁率の変化によりインピーダンス整合の再調整が必要であるが、RDX爆薬等のNQR信号が計測可能であることが確認された。最終的には、羽田空港第2ターミナルビル保安検査場において実証実験が行われ、現場に配置されているX線手荷物検査装置との比較による性能評価が実施された。RDX爆薬および模擬手荷物をを用いたブラインド試験結果を、X線手荷物検査装置のものと比較した結果、誤検知率を従来値の1/10程度にまで低減することが確認され、NQRを用いた爆薬検知技術の有用性が示された。

以上のように、本申請論文は、爆薬検知におけるNQR法の有用性を実証した、国内で2例目の成果である。また、照射のたびに同初期位相の高周波パルスを生成し、それに対する原子核スピン系の応答をダイレクトに積算し、その後種々の信号処理を行う方法を用いることにより、NQR信号強度の照射周波数依存を除去できることを、初めて実証したものであり、その独創性は高く評価できると思われる。

よって本論文は、博士(理学)の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上

平成29年1月10日