

## 論文の内容の要旨

氏名：近内 亜紀子

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：核四重極共鳴を用いた爆薬遠隔検知に関する研究

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。著者は 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。

1章においては、まず航空保安の現状として、爆薬を用いた過去の航空テロ事例および航空法等で規定されている持ち込み禁止物品等についてまとめた。

現在、空港保安検査場においては、危険物等の持ち込み防止を目的として手荷物検査および旅客検査が行われているが、固体爆薬については現行の X 線透過や金属探知を用いた検査のみでは検出できない可能性があることが指摘されている。保安検査場で一般に用いられている X 線透過方式による手荷物検査は、対象手荷物に X 線を照射し、手荷物内物質の形状及び密度（X 線透過率）から持ち込み禁止物品の有無を判断する方法である。このため、銃刀器類など形状に特徴のある物品を検出することは得意とするが、X 線透過率が爆薬と近い値である日用品は多く存在するため誤検知率も高く、変形自在なプラスチック爆薬を検出する方法としては十分であるとは言えない。また、金属探知機を用いた旅客検査は、起爆装置に含まれる金属は検出可能であるが、爆薬そのものは検出対象とはなっていない。そのため近年様々な原理に基づく爆薬検出方法が提案され、研究されている。現在空港保安検査場に導入されている検査装置の課題と、それを補完する新技術として技術開発が行われている爆薬検出技術について述べ、その中で NQR を用いた爆薬検出技術と他の新技術との比較を行った。

2章においては、NQR の原理及び計測方法について述べ、特にパルス方式を用いた NQR 計測について計測原理をまとめた。

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。NQR の計測方法としては、物質に照射する高周波の周波数を連続的に変更して共鳴周波数を計測する continuous wave (cw) 方式が最初に応用された。cw 方式は、未知の共鳴周波数の探索には利便性があるが、NQR 信号は一般に非常に微弱であるため、この方式では計測に長時間を要する。爆薬検出のように対象物質が定まっておりその共鳴周波数も既知である場合、後年開発されたパルス計測方式の適用が可能であり、これは、試料に対して高出力の高周波パルスを繰り返し照射し受信信号を積算することで、信号の S/N 比を高める方式である。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。

3章においては、NQR を用いて検出可能な爆薬の種類と計測に係る諸定数をまとめた。また、NQR の爆薬検出への適用検討の歴史と他のグループの研究状況についてまとめた。

パルス方式を用いた NQR 計測においては、核スピン系が熱平衡に戻るのに十分な時間間隔をとって測定を行わないと、対象原子核のエネルギー準位が飽和し信号強度が落ちることが知られており、短時間に多数の高周波パルスを照射することは、長い間 NQR 計測時に避けるべき常識として考えられていた。しかし、共鳴周波数から少しずれた周波数の高周波パルスを用いて NQR 信号が減衰する前に次のパルスを照射する場合、パルス間隔を短くするほど信号強度が高まるという結果が 1982 年に Marino 氏らによって報告され、これによりパルス照射の繰り返し時間を短くした高速 NQR 計測の実現可能性が示された。このような照射パルス系列は Strong off-resonance comb (SORC) と呼ばれる。ここで Strong とは、共鳴周波数からのずれ  $\Delta\omega$  よりも  $\gamma H_1$  が大きくなるくらい強い高周波磁場  $H_1$  を用いるという意味である。また、off-resonance というのは、従来の検波方式では  $\Delta\omega = 0$  の場合、信号強度がゼロになるため、これを避けるという意味である。なお、4章で詳述されるように本研究で開発された方式を用いた場合、照射周波数が

off-resonance である必要はないことが明らかにされた。

4章においては、SORC等のマルチパルスを用いたNQR計測方法と、計測されるNQR信号強度のパルス条件依存性について検討した。特に、従来の位相敏感検波方式と本研究で開発した計測方法の比較を行った。

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重大な課題として考えられていた。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MHz~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。

著者は、位相敏感検波を用いた場合のSORC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、連続した高周波信号をパルス化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こととした。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とした。DAおよびAD変換、高周波アンプは40MHzの同一クロックで同期させ、すべての操作を制御する計測制御プログラムを作成した。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を評価することとした。この装置を用いて、SORC照射条件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、非常に重要な点である。

5章においては、実際の検査を想定した検出部を製作しNQR装置の爆薬検知への適用性について検証した。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、その性能を評価した。

靴底爆薬を対象とした平面コイルは、コイル表面から離れてもできるだけ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を確認し、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検討した。グラジオメータ型コイルにおいては、NQR信号の平面内2次元強度分布を計測し、コイルから発生される高周波磁場強度との関係を考察した。

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、性能を評価した。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を検討した。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ったが、RDX爆薬等のNQR信号が計測可能であることを確認した。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を行い、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を実施した。RDX爆薬および模擬手荷物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、誤検知率を従来の値の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。

最後に6章において、これまでの議論を総括し、NQR技術の爆薬検知への適用可能性と今後の展望についてまとめた。