

核四重極共鳴を用いた爆薬検知技術の開発

近内 亜紀子^{*}、浅地 哲夫^{**}、小田野 直光^{*}

Explosive Detection using Nuclear Quadrupole Resonance

by

Akiko KONNAI, Tetsuo ASAJI and Naoteru ODANO

1. まえがき

空港保安検査場においては、X線装置を用いた手荷物検査および金属探知装置を用いた旅客検査が実施されている。X線手荷物検査装置においては透過画像から得られる物質の形状及びX線透過率情報を利用しているため、形状が特徴的な隠匿武器（刃物・銃等）の検知は可能であるが、爆薬等は判別することが難しい。特にプラスチック爆薬は形状変形が容易であり、近いX線透過率を持つ食品・日用品も多いため、誤検出率（爆薬でないものを爆薬として認識してしまう割合）が高いことが課題となっている。また、金属探知機を用いた旅客検査装置においては、ベルトやポケット内の小銭などにも反応してしまい旅客と検査員のトラブルの原因となったり、セラミックナイフ等の金属以外の銃刀類や爆薬の探知が困難であるという課題がある。

当所においては、上記の課題の解決を目的として、国土交通省からの受託研究により、次世代検査技術の研究開発を実施した。手荷物検査方法としては、ラジオ波帯の電波により物質内原子核に生じる核四重極共鳴（NQR: Nuclear Quadrupole Resonance）の爆薬探知への適用を検討し、装置開発を行った。この方法は、爆薬等に含まれる窒素原子核に生じるNQR周波数が物質固有であることを利用して、NQR信号の計測により爆薬の同定検知を行う方法である。また、旅客検査としては、人体から放射されるミリ波を画像化し、衣服下に隠匿した武器等を検出する方法を検討し、装置開発を行った。

本論文においては、空港保安のための次世代検査技術の開発動向を紹介するとともに、当所が実施したNQRを用いた爆薬検知装置の開発、空港における実証試験、NQRを用いた爆薬検知技術の手荷物検査への適用可能性について報告する。

2. 次世代検査技術の比較検討

本研究の実施に先立ち、各方面で研究が進められている次世代検査技術の調査を行った。

手荷物検査方法は爆薬検知を目的とした場合、表1に示すように、手荷物全体を直接検査する「バルク方式」と、手荷物に付着する微粒子等を収集し化学分析的手法を用いて検査する「トレース方式」に分類される。本研究で実施したNQRを用いた爆薬検知は、前者の「バルク方式」に当たる。

表1 手荷物検査

方式	バルク方式	トレース方式
概要	手荷物等の容器に内包された対象を遠隔で直接探知	内包物探知対象に起因して外面に出てくる微量物質を捕捉・探知
要求感度	対象物質の危険度等に依存するが一般的には数十から数百g	対象物質の物理・化学的特性に依存するが一般的にngオーダー
所要時間	検査時間: 秒オーダー	サンプリング時間: 数十秒 検査時間: 秒オーダー
適用技術	X線CT, 中性子分析, 核四重極共鳴(NQR)	質量分析, イオンモビリティ [※] スペクトロメリー, ガスクロマトグラフィー

^{*} 海洋リスク評価系、^{**} 日本大学文理学部化学科

原稿受付 平成22年 7月10日

審査済 平成22年 8月30日

一方、旅客検査方法は、現行の金属探知以外の方法として、X線やミリ波等の電磁波を用いた方法が検討されている（表2）。ミリ波を用いた方式としては、人体に電磁波を照射してその応答から隠匿武器を検知する「アクティブ方式」と熱源である人体から放射される輻射を利用してその受信画像から隠匿武器を検知する「パッシブ方式」に分類することができる。

表2 旅客検査

	金属探知	X線 (~0.3nm)	ミリ波 (~3mm)
検出方法	金属に反応	形状を識別	形状を識別
方式	電磁誘導	後方X線散乱	アクティブ方式 パッシブ方式
課題	非金属、非磁性体が検知不可	人体影響	人体影響 信号強度弱

なお、2009年12月25日に発生したデルタ航空機内爆破テロ未遂事件においては、軍用爆薬であるペンスリット爆薬（PETN）約80gおよび反応性の高い過酸化アセトン（TATP）が単体として持ち込まれたと報告されており、各国空港においては金属探知に代わる旅客検査装置の導入が一気に進んだ。我が国においても、2010年7月より衣服下に隠匿した物質の検知が可能な複数種類のボディースキャナの実証試験が国土交通省航空局の主導により成田国際空港にて実施されているところである。

3. NQRの原理と爆薬検知への応用

核スピン量子数 I が1以上である原子核には電荷の偏りが生じるため、核四重極モーメント eQ と周辺電子の作る電場勾配 eq との四極子相互作用によりエネルギー準位の分裂が生じる。多くの爆薬に含まれる窒素 ^{14}N の核スピン量子数は $I=1$ であり、一般に、縮退しない3つのエネルギー準位を持つ。窒素原子核のエネルギー準位のモデルと NQR 計測の概念を図1に示す。

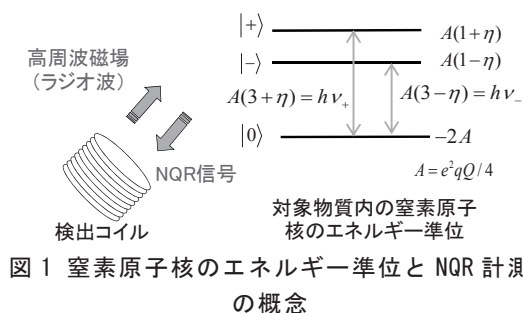


図1 窒素原子核のエネルギー準位と NQR 計測の概念

NQR とは、このエネルギー準位差に相当する周波数の電磁波を対象物質に照射することで生じる共鳴現象のことである。図1において、 e^2Qq は四重極結合定数、 η は電場勾配の非対称パラメータである。電場勾配 eq は、対象原子核周辺の価電子分布および分子全体の電子分布や周囲のイオン等の電荷分布により決定される。これらの電荷分布は物質の化学構造に依存するため、NQR 周波数は物質固有となる。したがって、NQR 信号を測定しその周波数を解析することによって物質の種類を特定した検知が可能となる。図2に主な爆薬の構造式とその NQR 周波数を示す。

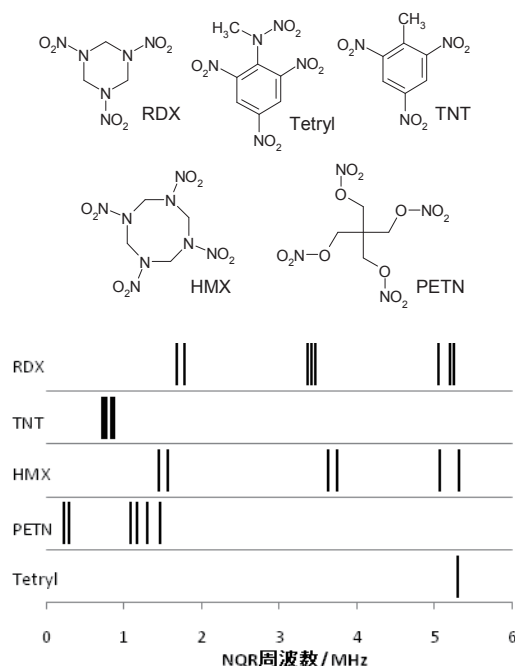


図2 主な爆薬の構造式と NQR 周波数

本研究においてはまず、比較的結晶性が高く強い NQR 信号を示すとされているヘキサヒドロ1,3,5-トリニトロ-1,3,5-トリアジン（通称 RDX）の遠隔探知を目標とした。RDX はヘキソゲンとも呼ばれ、1988年に起きたパンアメリカン航空103便爆破事件での使用により有名になった高性能軍用爆薬であり、死傷者182名を出した2006年のインド連続列車爆破事件において使用された爆薬も RDX である可能性が高いとされている。

本研究で開発した NQR 装置の性能評価には、まず亜硝酸ナトリウム NaNO_2 500g ($\nu_+=4640$ kHz, $\nu_-=3603.7$ kHz @295 K¹⁾), RDX の原料であるヘキサメチレンテトラミン HMT 414g (3306.2 kHz @299.6 K²⁾) を使い、最終的には不爆化した爆薬 RDX 300g および 500g ($\nu_+=5240$, 5192, 5047 kHz, $\nu_- = 3458$, 3410, 3359 kHz @298 K³⁾) を用いた。NQR を用いた RDX 検知に

おいては、NQR 信号強度が相対的に高いと報告されている $\nu_r = 5192$ kHz を計測することとした⁴⁾。

NQR 信号計測には、SORC(Strong off-Resonance Comb) パルス系列を用いる方式を用いた。この方式は、NQR 信号が十分に減衰する前に次々と高周波パルスを照射することで定常状態を作りパルスとパルスの間の NQR 信号を計測するものである。パルス繰り返し時間を横磁化減衰の時定数 T_2^* と同程度(数 ms) に設定するため、NQR 信号計測の時間短縮が可能となる。

4. NQR 検査装置試作機⁵⁾

4.1 NQR 検査装置試作機概要

本研究で試作した NQR 装置の概観を図 3 に示す。図 3 左側が、照射用高周波パルス生成および NQR 信号集録・処理を行うコントロール部分と、送信および受信信号の増幅器である。図 3 右側に示した検出コイルは検査対象物に応じていくつか試作した。最終的には、靴底に隠された爆薬を検査するグラジオメータ型コイルと電磁シールド内での手荷物検査を想定した大型ソレノイドコイルを製作し、その性能を評価した。

次に図 3 に示した NQR 検査装置のブロック図を図 4 に示す。任意波形発生器(National Instruments, NI, PXI-5421)にて高周波パルスを



図 3 NQR 装置の概観

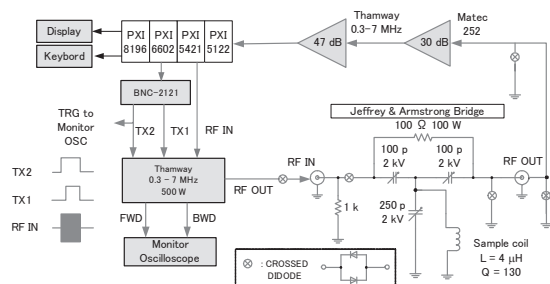


図 4 NQR 装置のブロック図

DDS (Direct Digital Synthesis) 方式により生成し、高周波電力増幅器(Thamway, 500 W)にて増幅後、コイルに送信する。これにより試料への高周波磁場パルス照射が行われる。高周波パルス照射の休止中、試料から発生する NQR 信号は、送信と同じコイルで受信され、前置同調増幅器(Matec 252)および受信増幅器(Thamway, 47 dB)で増幅される。本装置では、高周波パルスの送信および NQR 信号の受信を同一のコイルを用いて行うため、Jeffrey-Armstrong 型ブリッジ回路⁶⁾を用いてインピーダンス整合および送受信切り替えを行う仕様とした。NQR 信号は受信アンプ等による増幅後、高速デジタル化(NI, PXI-5122)にて 512 MB のオンボードメモリに集録され、PC メモリに FIFO (Fast in Fast out) 方式により転送される。その後逐次、積算、直交検波、FFT 等の信号処理が行われ、特定周波数が設定した閾値を超えるか否かにより爆薬の有無の判定を表示する仕様とした。製作した NQR 試作機の判定表示画面を図 5 に示す。

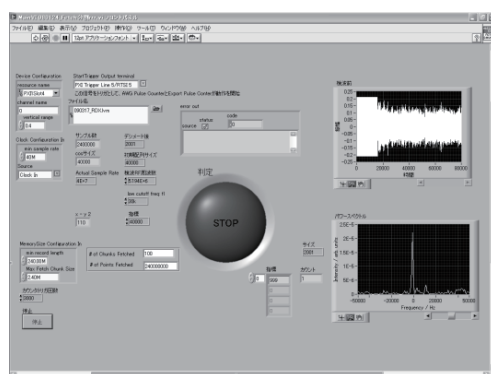


図 5 NQR 試作機の判定画面

PXI モジュール計測器及び高周波電力増幅器は、LabVIEW8.5 で作成したプログラムによりカウンタ(NI, PXI-6602)にて生成された 40 MHz パルスにて同期制御され、信号処理も同一プログラムで実行された。

4.2 NQR 検査装置試作機の性能評価

旅客の靴底検査を想定して作製したグラジオメータ型平面コイルを図 6 (左) に示す。本方式のコイルは、逆方向に巻いたコイルを並列に結合しているため、2 つのコイルに同時に入射する外来高周波ノイズをキャンセルすることが可能である。コイルのインダクタンス L は $4 \mu\text{H}$ 、 Q 値は 4.64 MHz において 120 であった。電磁シールド外においてコイル表面から 3.5 cm の距離に RDX 300 g を置いたときの NQR 信号を図 6 (右) に示す。

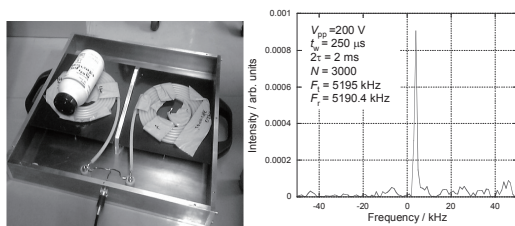


図6 グラジオメータ型コイルの概観（左）と観測されたRDX 300 gのNQR信号（右）

ここで、 V_{pp} は50 Ω 負荷に対する照射高周波電圧、 t_w はパルス幅、 2τ はパルス繰り返し時間、 N は信号積算回数、 F_L は照射周波数、 F_r はデータ処理時の検波周波数である。検出コイルが電磁シールド外であってもRDX 300 gが観測され、靴底等爆薬検査への適用可能性が示された。

手荷物検査を想定した大型コイルは、5 mm 厚の亚克力板で作製した30 cm $\times$ 60 cm $\times$ 45 cmの枠に、銅板（18 mm 幅、0.2 mm 厚）を巻いたものである。この大きさは、機内持込手荷物制限サイズを参考にしたものである。インダクタンス L は4 μ H、 Q 値は5.19 MHzにおいて130であった。

手荷물에金属製品が含まれる場合、高周波の送信およびNQR信号の受信の妨害となると予想される。そこで、金属プレート、ペンチ、ハサミ等の金属製品を手荷物に入れて、RDX 300 gが検知できるかを試験した。手荷物試料中身の概観および手荷物検査用大型コイルで測定されたNQR信号スペクトルを、図7に示す。

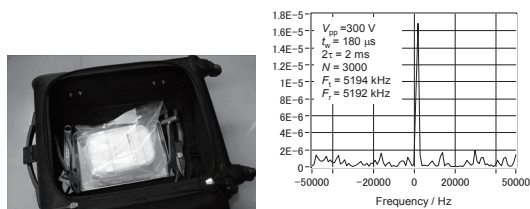


図7 金属とRDXが入った手荷物の概観（左）と検出されたRDX 300 gのNQR信号（右）

手荷物中に金属製品が存在する場合、検出コイル内の透磁率が変化するためインピーダンスの不整合が生じ、再調整が必要となったが、RDX 300 gは検知可能であった。検査に要する時間はパルス繰り返し時間2 ms、積算回数3000回の条件で10秒程度であった。

5. NQR 検査装置試作機の空港実証試験

NQRを用いた爆薬検知技術が空港における手荷物検査に適用可能であるか検証することを目的とし

て、実証試験を行った。場所および実施期間は、羽田空港第2ターミナルビル保安検査場A1ゲート、2008年2月21～22日の二日間である。NQR検査装置と保安検査場に設置されたX線手荷物検査装置の爆薬検知性能を比較するために、模擬手荷物を用いたブラインド試験を実施した。NQR爆薬検知装置の実証試験の様子を図8に示す。

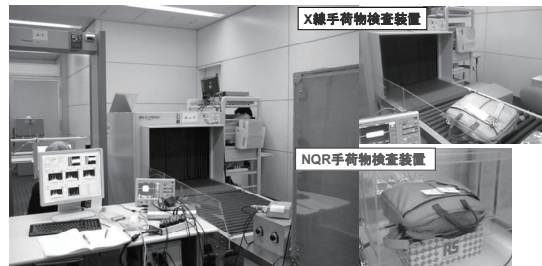


図8 空港保安検査場における実証試験の様子

ブラインド試験に用いる模擬手荷物試験体は、3種類の旅行鞆に不爆化RDX爆薬300 gまたは500 g、爆薬と近いX線透過率をもつ食品や日用品等をランダムに詰めて、検査者からは見えない場所において作製された。50体の手荷物試験体について、X線手荷物検査、NQR手荷物検査の順で検査を行った。

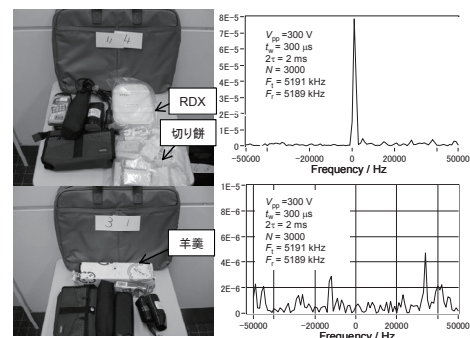


図9 空港手荷物検査ブラインド試験の結果例 RDX爆薬有り（上段）、RDX爆薬無し（下段）

図9に、手荷物試験体の例と、その試験体から計測されたNQR信号を示す。図9上段に示した爆薬有りの手荷物試験体においてはRDXのNQR信号が検出され、設定した閾値により、爆薬の存在が自動検出された。一方、図9下段に示した爆薬を含まない手荷物に対しては、NQRによる検査においてはRDXのNQR周波数は計測されず、爆薬が存在しないことが確認されたが、X線手荷物検査装置においては、図9に示された食品（切り餅および羊羹）も爆薬である可能性があるものとして自動検出された。これは、誤検出（False Positive Alarm）と呼ばれる誤報であり、通常検査官は、X線検査画面における起爆装置の有無に

よる判断や、荷物を開けて目視による再検査を行っている。

ブラインド試験結果から算出された NQR 爆薬検知装置の誤検出率は、X 線手荷物検査装置の 10 分の 1 程度であった。X 線手荷物検査の自動判定においては誤検出率が高く、再確認や再検査が必要であることが改めて認識され、NQR を用いた検査においては RDX 爆薬にのみ反応することが確認された。なお、False Negative Rate (爆発物が存在するのに検出できない割合) はどちらも十分に低く抑えられていることが確認された。これらの結果から、現行の手荷物検査に NQR 爆薬検知装置を併用することによって、空港手荷物検査における爆薬自動検知の確度が向上することが示された。

6. おわりに

NQR 爆薬検知装置を開発し、不爆化 RDX 等を用いた遠隔検出実験によりその有用性を検証した。平面コイルを用いた NQR 装置においては、電磁シールドのない環境下でも、RDX 300 g が 3.5 cm の距離で検出可能であることを確認した。また、NQR 手荷物検査装置においては、空港保安検査場における実証試験として X 線検査装置との比較ブラインド試験を実施し、NQR 検査における誤検出率が X 線検査に比べて 10 分の 1 程度と低く抑えられることを確認した。以上の結果より、NQR 技術の爆薬検知への適用可能性及び有用性が実証された。

謝 辞

本研究は、国土交通省総合政策局からの受託研究

「交通機関におけるテロ対策強化のための次世代検査技術の研究開発」の一部として実施された。

羽田空港実証試験においては、国土交通省、(財)空港保安事業センター、全日空空輸(株)にご協力いただいた。

参考文献

- 1) V. T. Mikhaltsevitch and T. N. Rudakov, The transient processes in multi-pulse nitrogen-14 NQR, Solid State Nucl. Magn. Reson., 24, pp.263-285 (2003)
- 2) G. D. Watkins and R. V. Pound, The pure nuclear electric quadrupole resonance of ^{14}N in three molecular solids, Phys. Rev., 85, 1062 (1952)
- 3) R. J. Karpowicz and T. B. Brill, Librational motion of hexahydro-1,3,5-trinitro-s-triazine based on the temperature dependence of the nitrogen-14 nuclear quadrupole resonance spectra: the relationship to condensed-phase thermal decomposition, J. Phys. Chem., 87, pp.2109-2112 (1983)
- 4) J. H. Flexman, T. N. Rudakov, P. A. Hayes, N. Shanks, V. T. Mikhaltsevitch, and W. P. Chisholm, The detection of explosives in airport luggage using the direct NQR method, in *Detection of Bulk Explosives*, eds. H. Schubert and A. Kuznetsov, pp.113-124, Kluwer Academic Publishers (2004)
- 5) A. Konnai, T. Asaji, H. Nohmi, and N. Odano, Development of NQR explosive detection technique for transportation security, Sci. Tech. of Energetic Materials, 70, No.3, pp.55-60 (2009)
- 6) K. R. Jeffrey and R. L. Armstrong, Simple bridge for pulsed Nuclear Magnetic Resonance, Rev. Sci. Instrum., 38, pp.634-636 (1967)

