



《第65回》核四極共鳴を用いた固体試料計測技術

大田垣 祐衣

1. はじめに

地雷、テロでの爆発物、違法薬物は深刻な国際問題である。核四極共鳴 (NQR) を利用すれば、物質固有の共鳴周波数から爆薬や薬物等の種類・有無を判別でき、これらの物質の効果的な検出方法として期待できる。筆者は学生時代から、NQR の装置開発をテーマに研究を行ってきた。地雷探知を中心に、その内容とこれからの構想について紹介する。

2. NQR の原理

NQR は、核スピン 1 以上の原子核を有する物質に対し物質固有の共鳴周波数の RF パルスを照射することにより生じる共鳴現象の一種である¹⁾。共鳴した原子核から緩和過程に生じる信号を検出することによって、固体の対象物質が同定できる (図 1)。NQR は核磁気共鳴 (NMR) の一種であるが、結晶内の電場勾配によりエネルギー準位が分裂するため、通常の NMR と異なり静磁場を必要としない。特に、固体の薬物や爆発物の多くは、通常の化合物と比較し核スピン 1 の ^{14}N を多く含むため、NQR によって非破壊、非接触かつ安全な探知が可能であり、NQR はこれらを高感度に検知する強力なツールとして活用できる可能性がある。

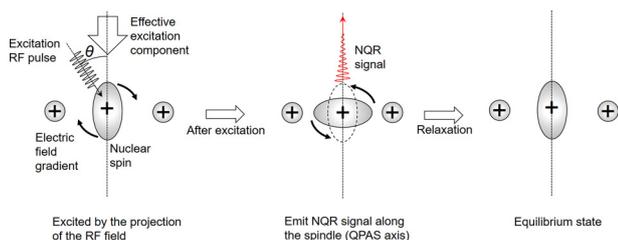


図 1 NQR 信号発生の原理

3. 可搬型 NQR 装置の研究

従来の地雷探知機は金属探知が主流であり、この方法では地雷の容器・信管を検知するが、地雷と銃弾の破片等の地雷以外の金属を区別することができないという問題があった。NQR を爆薬探知に応用できれば、地雷の容器ではなく使用されている爆薬を検知するので、誤探知率の低減や探索時間の短縮が期待できる。

学部・博士前期課程では、爆薬の一種である硝酸アンモニウムと RDX (トリメチレントリニトロアミン) を検出するための可搬型 NQR 装置の電子回路の設計・試作等を行っていた。NQR 信号受信用プリアンプの多段化、ノイズフィルタ挿入の検討と、送信アンプの設計等を行った。開発した NQR 装置は、従来から用いられてきた $50\ \Omega$ 送受信回路とは異なる低インピーダンス回路で構成した。この装置の受信用アンプは低コストかつ低ノイズを実現するため、特定の周波数に対して SNR を最適化するように設計し、対象物質の共鳴周波数に合わせて素子を選択してプリント基板上に作製した。さらに、計測可能な距離を向上するため、低インピーダンス回路に合わせた送信用アンプの設計・試作などに取り組んだ。

博士後期課程は、英国のロンドン大学キングスカレッジロンドンに進学した。キングスカレッジロンドンでは実験環境が地雷探知機の研究により適していると考え、留学を決意した。ここでは、これまでの屋外で利用できる高感度な核四極共鳴装置の開発 (図 2) を継続するとともに、新しく機械学習を使った誤探知率の低減に取り組んだ^{2), 3)}。従来の NQR 信号計測では、取得した信号のフーリエ変換後のスペクトルを閾値と比較することで対象物質の有無を判定していた。NQR は信号が弱く、環境ノイズや熱雑音の影響で SNR が低くなってしまうため、一般的に積算回数を増やすことで SNR を改善するという対策が取られているが、計測に時間がかかって

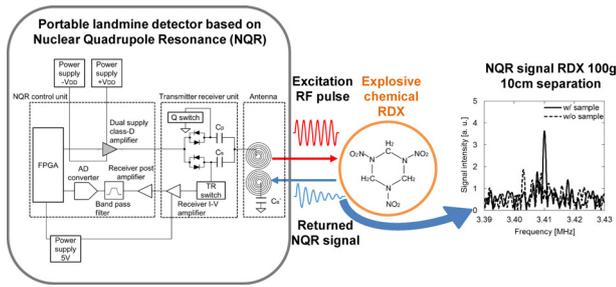


図 2 可搬型 NQR 装置の概要²⁾



図 3 採石場でのフィールド実験のようす

しまうという問題がある。そこで、機械学習を用いて誤探知率の低減に取り組んだ。図 3 の写真は開発した装置の試験のために、実際に英国のプリストルにある採石場でフィールド実験を行っているところである。

留学する前は電子回路などを主に扱っていた私にとって、信号処理やシミュレーションを専門に扱う研究者と関わることになり、初めて学ぶことが多く、解決まで苦労することもあったが、より広い視野で課題に取り組めるようになった。また、所属していた研究室では、地雷除去に取り組む団体との共同プロジェクトを進めており、実際の地雷探知機に求められる条件や試作機のフィードバックなどを得ることができた。さらに、以前はセンサの性能にばかり目が行っていたが、学内のアプリリーダーシップセンターやロンドンビジネススクールとも提携したプロジェクトであったため、地雷除去が周辺のコミュニティに及ぼす社会経済的影響についても知ることができた。たとえば、地雷除去作業自体に経済効果があり、地雷除去団体が滞在することによって宿泊費等が発生するし、除去には人手が必要になるためその地域の人々の雇用が増えることになる。したがって、利益を求める現地の人に地雷があるかを尋ねるだけでなく、本当に地雷が埋設されている地帯であるかどうかを見極めることも重要であると他分野の専門家から聞き、これまで考えたことのなかった意見に驚いた。

4. 今後の構想

現在は三重大学工学研究科高周波フォトニクス研究室

に所属している。高周波フォトニクス研究室では、これまで取り組んできた NQR の研究だけでなく、フォトニクスとマイクロ波工学を融合させたマイクロ波フォトニクスの研究も進めている。近年、5G/Beyond 5G 移動体通信システムが導入・検討され、さらなる高速通信、多数端末同時接続、低遅延が要求されるようになった。そのために、無線信号を光ファイバーネットワークを通して自由に変換・制御する変調器の研究に取り組んでいる。また、移動体通信技術に加え、高周波・光応用技術を用いた地中埋設インフラの非破壊診断の研究を行っている。

この環境を活かし、NQR とフォトニクスを組み合わせた新しい技術の研究も実施している。受信する信号が微弱であるという NQR の課題を克服するため、電気光学効果を利用した光電界センサを使った精密な励起電磁場解析や信号受信時の擾乱の低減に挑戦し、検出精度向上に取り組んでいる。NQR の励起電磁場や信号の分布の詳細な解析は行われておらず、擾乱の低減も従来の方法では限界があった。そこに着目し、NQR とフォトニクスを融合させた新しい技術の開発を目指している。

(2024 年 3 月 1 日受付)

参考文献

- 1) 糸崎, 太田, 立木: 核四極共鳴を利用した化学物質のリモートセンシング, 計測と制御, **45**-6, 547/551 (2006)
- 2) Y. Otagaki, Y. Miyato, J. Barras, H. Sato-Akaba, and P. Kosmas: Development of a Low-Cost, Portable NQR Spectrometer for RDX Explosives Detection, *IEEE Sens. J.*, **21**-5, 6922/6929 (2021)
- 3) Y. Otagaki, J. Barras, and P. Kosmas: Improving Detection of a Portable NQR System for Humanitarian Demining Using Machine Learning, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **60**, 1/11 (2022)

[著者紹介]

おた が き ゆ い
大田垣 祐衣 君

大阪大学基礎工学部電気工学科卒業, 大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻博士前期課程修了, University of London, King's College London, Faculty of Natural, Mathematical and Engineering 修了, 工学博士. 2021 年三重大学工学研究科高周波フォトニクス研究室に着任. 高周波環境におけるアンテナ・フォトニクスデバイス・RoF システムの研究を進めている. 強誘電性結晶を用いた電気光学変調器の設計・解析・評価や, インフラ非破壊診断の実験などを行う. さらに, 薬物検査等への応用を目指した NQR に関する研究も行い, 装置の開発や機械学習を利用したシステムの検出精度を向上にも取り組んでいる. マイクロ波を使用した地中埋設パイプラインのインフラ非破壊診断の研究等にも従事. 現在に至る.

E-mail: otagaki@elec.mie-u.ac.jp

所属: 三重大学工学研究科電気電子工学専攻

三重県津市栗真町屋町 1577