

超伝導・核四極共鳴を利用したセンシング技術の開発

糸崎 秀夫

大阪大学大学院基礎工学研究科
システム創成専攻

あらまし： 超伝導、核四極共鳴を利用したリモートセンシング技術の開発を進めた。超伝導では、SQUID（超伝導量子干渉素子）グラジオメータを試作し、ノイズの多い環境下でも動作が期待できる微小磁場信号を検出するセンサを開発した。それを用いたNDE（非破壊検査）、異物検査、レーザSQUID顕微鏡などの応用を進めている。NQR（核四極共鳴）では、特定波長のMHz帯のラジオ波を照射・検出することにより、爆発物・不正薬物のリモートセンシング技術の開発を進めた。NQR手荷物検査装置、NQR身体検査装置、NQR靴検査装置の開発を実施し、数秒から一秒以内の短時間で非破壊、非接触に隠匿されている物質を検知することが可能であった。

1. 高温超伝導SQUIDグラジオメータ

1.1 はじめに

SQUIDは、現在最も高感度な磁気センサとして、NDE（非破壊検査）、異物検査、レーザSQUID顕微鏡、医療や地質調査等、非常に幅広い分野において応用が期待されている。今日、実用化されているのは金属系の超伝導体を用いたSQUIDが中心であり、本研究で作製したYBCOを初めとする、より汎用性の高い、高温超伝導体を用いたSQUIDは未だ研究・開発段階である。本研究ではYBCO高温超伝導体を用い、最適化された薄膜作製・微細加工プロセス条件により、SQUIDを作製した。応用として、特に研究を進めているNDEや異物検出を目的として、ノイズの多い環境下でも動作が期待できる、平面一次微分型SQUIDグラジオメータを作製し、特性評価を行った[1, 2]。

1.2 高温超伝導SQUIDグラジオメータの作製

(100) STO バイクリスタル基板(10×10 mm²)上に、PLD（パルスレーザ堆積）法により、YBCO 薄膜を堆積した。成膜条件は、酸素分圧15Pa、レーザ周波数10Hz、レーザパワー103 mJ、堆積時間5分、基板温度推定値は768℃、堆積膜厚は240 nmであった。基板はフォトリソグラフィによりレジストをパターンニング後、Ar⁺ イオンビームエッチングによりYBCO 薄膜に微細加工を行った。銀および金による電極を真空抵抗加熱蒸着装置により形成した。これをチップキャリアに固定し、ウェッジボンダにより配線を施してカバーを接着し実装を行った。図1.2.1 に実装したSQUIDグラジオメータの光学顕微鏡写真を示す。

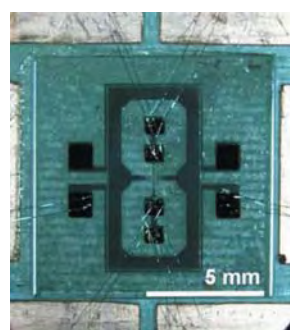


図 1.2.1 実装したSQUIDグラジオメータの光学顕微鏡像

1.3 高温超伝導SQUIDグラジオメータの特性評価

図 1.3.1 に、フラックスゲートおよびシールド内外において評価を行ったSQUIDグラジオメータのノイズ特性を示す。(a)にフラックスゲート、(b)にシールド外、(c)にシールド内におけるSQUIDグラジオメータの特性結果である。図1.3.1 (a), (b)の比較により、ホワイトノイズレベルが1/7程度下がっていることがよく分かる。また、ノイズの振幅やピーク強度も落ちており、SQUIDグラジオメータによるノイズ除去効果が確認できた。さらにシールド内での測定結果(c)から、磁気シールドの併用により、ノイズがさらに低減されることが確認できた。

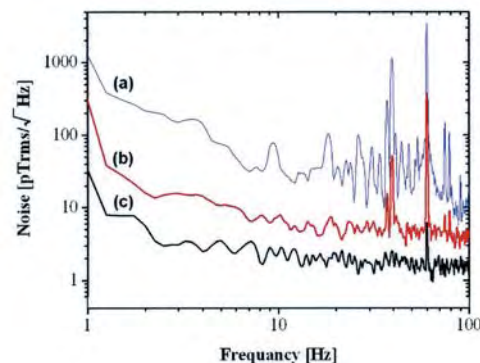
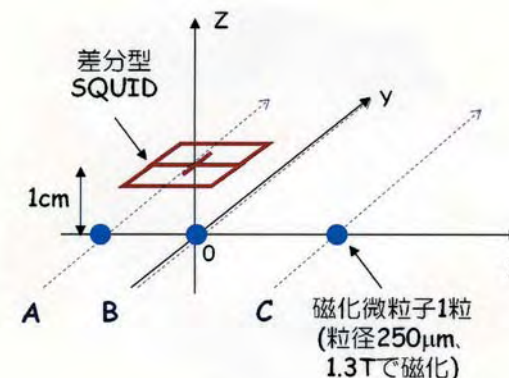
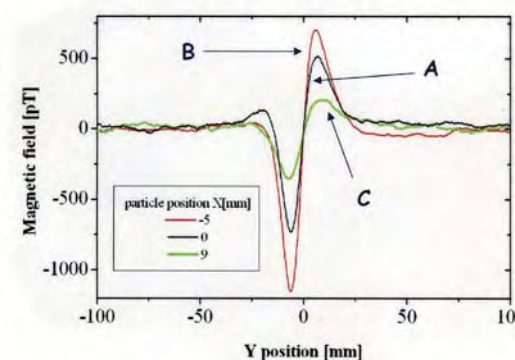


図 1.3.1 SQUIDグラジオメータのノイズ特性

グラジオメータの差分型構造の特性評価と、異物検査としての磁性金属微粒子の検出応用を目的として、SQUIDグラジオメータによる磁化微粒子検出実験を行った。磁化微粒子走査方向(Y軸)に対し、ベースラインを平行に配置(図 1.3.2 (a))した場合、SQUID信号強度は、図 1.3.2 (b)に示す通り、磁場強度の微分波形が得られ、微粒子との距離に応じた磁化信号を良好に検出した。



(a) 実験系の概略図



(b) Y軸方向に走査した場合の信号強度変化

図 1.3.2 SQUIDグラジオメータによる磁化微粒子の検出

2. NQR爆発物・不正薬物検査装置

2.1 はじめに

近年、人々の間で安全・安心な社会の構築が叫ばれている。米国の9.11同時多発テロ事件やロ

ンドンでの爆破テロ事件をはじめ、テロリストによる公共交通機関を使った無差別爆破テロ事件が後を絶たない。また、不正薬物の密輸に目を向ければ、荷物袋の中や服の中、果ては身体の中にまで薬物を隠匿し、国内へ持ち込まれている。最近のテロ事件では機内に爆発物を持ち込むケースが発生している。爆発物は非金属物であるため、金属探知機で検出することはできない。また、ペットボトル等、一般的に安全とされる容器の中に隠し持ち、X線検査をすり抜けることもできる。爆発物に限らず、麻薬等の不正薬物についても同様のことが言える。このような事例にどう対応していくのかが、非常に重要な課題となっている。本研究では、爆発物、不正薬物を検出するための新たなセンシング技術として、電波を利用した核四極共鳴法(NQR)を用い、NQR検査装置の開発を行った[3-6]。

2.2 NQRの原理と測定信号

核四極共鳴とは、スピン量子数 $I \geq 1$ の原子核に電波を照射すると、特定の波長において原子核に共鳴が起きる現象である。核四極共鳴の原理を図 2.2.1に示す。安定状態にある原子核に、共鳴させるための周波数をもった電波を照射すると、原子核は共鳴して高いエネルギー状態へと遷移する。遷移した後に電波の照射を止めると、原子核はエネルギーを放出しながら元の安定状態へと戻っていく。この時に放出されたエネルギーは電波として観測することが出来る。その電波は先に原子核に照射した電波と同じ周波数を持つ。この共鳴周波数は、物質の分子構造の違いによって変化する。分子内における電場勾配が共鳴周波数を決定付ける要因となっており、分子構造が違えば、その電場勾配もまた違うため、共鳴周波数は物質ごとに異なる。

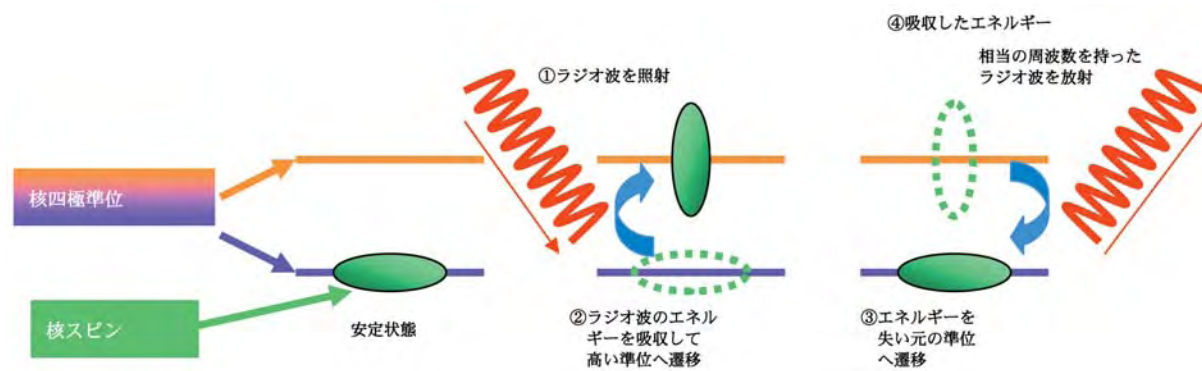


図 2.2.1 核四極共鳴の原理

照射電波は、パルス状にして物質に照射する。NQR信号はおおよそ1 msの間、減衰しながら放射される。この放射時間は測定物質特有のものであり、物質によって変化する。特定波長のMHz帯のラジオ波を、爆発物や麻薬などに照射すると、それらの物質に含まれた窒素原子核が核四極共鳴し、分子構造を特定できる。これにより爆発物や麻薬を電波で検出可能となる。図2.2.2に爆発物であるRDX（シクロトリメチレントリニトロアミン）を測定したNQR信号を示す。

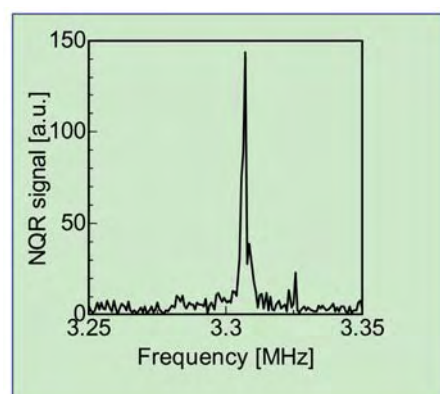


図 2.2.2 爆発物RDXのNQR信号

2.3 NQR検査装置

前項で述べた原理を応用して開発したNQR手荷物検査装置を図2.3.1に示す。現在空港で使用されているX線手荷物検査装置と同様、ベルトコンベアに荷物を載せ、荷物ごとセンシングする。荷物を開けることなく、荷物の中にある物質（爆発物・不正薬物）そのものが検査できる。電波を照射し、NQR信号を取り込むためのアンテナは検査装置の中央部に配しており、運ばれた荷物はそのアンテナにより検査される。検査時間は数秒程度で可能であった。荷物の中に様々な物質が混ざっていたとしても、爆発物や不正薬物を検知し、特定することが可能であった。

開発したNQR身体検査装置（NQR Body Checker）を図2.3.2に示す。NQRは、衣服や身体の中にある物質を検知することができる。その特徴を生かし、衣服や身体の中にある物質を任意の箇所で検査できる小型の検査機を開発した。検査時間は1秒以内であり、素早い検査が可能であった。実際の運用に際しては、服の中に金属製の凶器を隠している場合に備えて、金属探知機を組み合わせた検査装置にすることが望ましい。

NQR身体検査装置を応用した、NQR靴検査装置（NQR Shoe Checker）を図2.3.3に示す。現在空港で行われている靴検査は、乗客一人一人が靴を脱いで検査しなくてはならないため、非常に手間と時間がかかる。そのため、靴検査を非破壊、非接触で検知する技術が望まれている。NQR靴検査装置は、靴をはいたまま靴の中をセンシングすることができる。検査時間は約4秒であった。靴に付属している金具等に影響されず、検知率は非常に高かった。靴底にナイフやはさみなどの凶器類を忍ばせている場合や、靴底に鉄板などの金属を貼り付け、電波を遮断させている場合に備えて、金属探知機と併用して使用することが有効である。

以上、NQR法は、金属探知機やX線検査装置で検知できなかった状況を改善することができ、検知率を大幅に上げることのできる有効な検査方法であることを実証した。



図 2.3.1 NQR手荷物検査装置



図 2.3.2 NQR身体検査装置



図2.3.3 NQR靴検査装置

参考文献

- [1] 呉松沙織, 成田裕一, 関天放, 孔祥燕, 糸崎秀夫, “高温超伝導SQUIDグラジオメータの作製と評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 108, No. 420, pp. 27-30, (2009).
- [2] X. Y. Kong, Y. Nakatani, A. Yutani, T. Maki, H. Itozaki, “First-order High Tc SQUID Gradiometer,” Physica C, Vol. 468, pp. 1946-1949, (2008).
- [3] G. Ota, H. Itozaki, “Emission of nuclear quadrupole resonance from polycrystalline hexamethylenetetramine,” Solid State Nuclear Magnetic Resonance, Vol. 33, No. 3, pp. 36-40, (2008).
- [4] D. F. He, M. Tachiki, H. Itozaki, “N-14 NQR using a high-Tc rf SQUID with a normal metal transformer,” Superconductor Science & Technology, Vol. 21, No. 1, p. 015023, (2008).
- [5] D. F. He, M. Tachiki, and H. Itozaki, “Detecting the N-14 NQR signal using a high-Tc SQUID,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 843-845 (2007).
- [6] Go Ota, Hideo Itozaki, “Nuclear quadrupole resonance echoes from hexamethylenetetramine,” Solid State Nuclear Magnetic Resonance, Vol. 30, p135-140, (2006).