

NMR 用超伝導コイル及び常伝導コイルの Q_u-f 特性

Q_u-f characteristics of superconducting and normal coils for NMR

山形大学¹, 理研² ○小田 翔平¹, 入江 晃太郎¹, 高橋 雅人², 齊藤 敦¹

Yamagata Univ.¹, RIKEN², ○Shohei Oda¹, Kotaro Irie¹, Masato Takahashi², Atsushi Saito¹

E-mail: tdy88463@st.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

NMR(Nuclear Magnetic Resonance)は測定サンプルの対象核の選択性に優れ、分子構造を非破壊的に測定可能である利点を有し、一方で感度が低いという問題点があり、測定が長期化する要因となっている。先行研究によって検出コイルに超伝導体を用い Q 値を向上させることで感度が向上することを報告している[1][2]。これまでに超伝導コイルとしては溶液を対象とした 300-500 MHz 検出コイル[3]や 700MHz 検出コイル[4]の報告はあるが硫黄などの固体を対象としたコイルは報告されていない。固体 NMR 測定を想定すると、ゴム中の ^{33}S の NMR スペクトルは非常に広く低い周波数範囲に広がることに加え、どの周波数と磁場で測定することが最も効率的かも不明である。そこで従来よりも低周波、例えば 40 MHz で共振するコイルを作製する必要がある。しかしながら、40MHz においての高 Q_u のコイルが作製可能であることと 40~700MHz の周波数帯域での Q_u-f 特性は明らかになっていない。以上のことから超伝導コイルの Q_u-f 特性を明らかにする必要がある。常伝導体の表面抵抗は周波数の平方根に比例し、超伝導体の表面抵抗は周波数の 2 乗に比例すること、及び Q_u の定義から常伝導体と超伝導体の $Q_u-\omega$ (角周波数)特性はそれぞれ(1),(2)の式になると考えられる。

$$\text{常伝導体: } Q_u \propto \omega \frac{1}{\sqrt{\omega}} = \sqrt{\omega} \quad \cdots(1)$$

$$\text{超伝導体: } Q_u \propto \omega \frac{1}{\omega^2} = \frac{1}{\omega} \quad \cdots(2)$$

本研究では常伝導コイルと超伝導コイルがそれぞれ(1),(2)式の特性を持つことを解析と実験により調査した。

2. 解析方法及び実験方法

解析では、2.5 次元電磁界シミュレータ Sonnet-EM を用い、常伝導体の Cu コイルと超伝導の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) コイルの反射特性 S_{11} を比較した。r-Sapphire ($\epsilon_r=9.8$) を機基板として想定し、1 巻きと n 巻き($n \geq 1$) の 2 つの条件で解析を行った。

①1 巻き:コイルの巻き数を 1 巻きとし、コイルの長さ基板の大きさを変化

② n 巻き($n \geq 1$):基板の大きさとコイルの最外周を一定とし、コイルの長さ巻き数を変化

実験では② n 巻き($n \geq 1$)の条件で Au コイルと YBCO コイルを作製した。Au コイルはスパッタリング装置を用いて基板に Au を成膜後にレーザー描画装置を用いコイルパターンを薄膜に転写し、次にドライエッチングによりコイルパターンを形成した。作製したコイルは真空チャンバー内で冷却し、ベクトルネットワークアナライザによって反射特性 S_{11} を測定した。YBCO コイルは市販の YBCO 薄膜を使用してコイルを作製した。

3. 解析結果及び実験結果

Fig. 1 に Cu コイルの Q_u-f 特性の解析結果とコイルパターンを示す。Fig. 1 の Cu コイルは n 巻き($n \geq 1$) の($n=60$)である。1 巻きの場合は周波数の平方根に比例し、(1)式で説明でき、 n 巻き($n \geq 1$) の場合は低周波において 1 巻き

場合より Q_u が上昇した。 n 巻き($n \geq 1$) の Cu コイルの Q_u-f 特性は以下の (3)式でフィッティングできた。

$$Q_u = k\sqrt{f_0} + \frac{l}{f_0} \quad \cdots(3)$$

k, l は定数、 f_0 は共振周波数である。この結果はコイルの巻き数を増加させることで周波数に反比例した Q_u の増加が生じることを示す。

Fig. 2 に YBCO コイルの Q_u-f 特性の解析結果とコイルパターンを示す。Fig. 2 の YBCO コイルは n 巻き($n \geq 1$) の($n=60$)である。1 巻きの場合は周波数に反比例し、(2)式で説明でき、 n 巻き($n \geq 1$)の場合は低周波においては 1 巻きの場合より Q_u が上昇した。 n 巻き($n \geq 1$) の YBCO コイルの Q_u-f 特性は以下の(4)式でフィッティングできた。

$$Q_u = \frac{m}{f_0} + \frac{p}{f_0^{3.25}} \quad \cdots(4)$$

m, p は定数である。この結果はコイルの巻き数を増加させることで周波数の 3.25 乗に比例した Q_u の増加が生じることを示す。超伝導体は常伝導体よりも Q_u の向上が顕著であった。

Au コイルと YBCO コイルの Q_u-f 特性の実験結果に関しては講演で述べる。

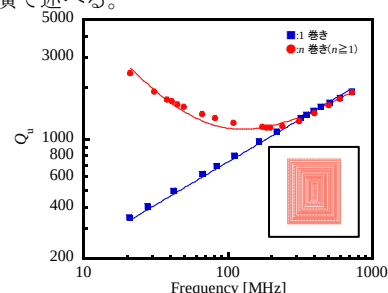


Fig. 1 Analysis results of Q_u-f characteristics of Cu coils and coil pattern.

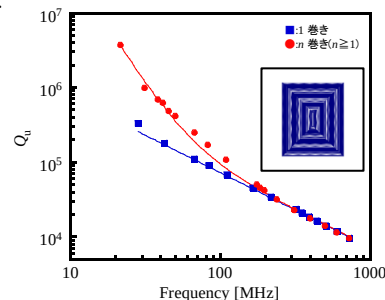


Fig. 2 Analysis results of Q_u-f characteristics of YBCO coils and coil pattern.

4. 参考文献

- [1] K. Yamada, TEION KOGAKU, Vol. 51 No. 3 pp. 64-70 (2016).
- [2] Howard D. W. Hill, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 7, No. 2, pp. 3750-3375 (1997).
- [3] H. Yamamoto et al., Journal of Physics: Conference Series, 97, 012137 (2008).
- [4] S. Oikawa et al., Journal of Physics: Conference Series, 507, 042028 (2014).