

臨界磁場測定用半球形状空洞のアルミ製モデルでの TE₀₁₃ モード励振試験 TE₀₁₃ MODE EXCITATION TEST ON ALUMINUM MODEL OF HEMISPHERICAL CAVITY FOR CRITICAL MAGNETIC FIELD MEASUREMENT

服部 綾佳^{#, A)}, 相田 大翔^{A)}, 石井 朝陽^{A)}, 早野 仁司^{B)}
Ayaka Hattori^{#, A)}, Haruto Aida^{A)}, Asahi Ishii^{A)}, Hitoshi Hayano^{B)}
^{A)} NIT (KOSEN), Ibaraki College
^{B)} KEK

Abstract

The hemispherical cavity had been designed for critical magnetic field measurements of superconducting multilayer thin films. It is expected that superconducting multilayer thin films make the acceleration cavity highly gradient because it is predicted that superconducting multilayer thin films have higher critical magnetic field than Niobium which is material of superconducting cavity. To verify the RF critical magnetic field of superconducting multilayer thin films, the hemispherical cavity was designed to excite TE₀₁₃ mode which have the highest magnetic field on sample face of superconducting multilayer thin films. To stably excite the TE₀₁₃ mode, we designed an antenna for a hemispherical cavity. In order to evaluate the performance of the antenna, we made a model of the aluminum cavity and the antenna. The results of the TE₀₁₃ mode excitation test of the aluminum model are introduced.

1. はじめに

予測される臨界磁場の高さから超伝導加速空洞の高電界化につながる可能性のある超伝導薄膜[1]の RF 下での臨界磁場測定のため、半球形状空洞が設計された[2]。半球形状空洞は超伝導薄膜を成膜するサンプル面に最大表面磁場を与える TE₀₁₃ モードを励振できる構造になっており、その半球形状空洞に安定して TE₀₁₃ モードを励振するためのアンテナ設計を行った[3]。その設計したアンテナ性能を評価するため、アルミ製のモデル空洞を製造し、ターゲットである TE₀₁₃ モードを励振でき、かつ、TE₀₁₃ モードを共振周波数が近接する他の共振モードから明らかに分離でき、特定しやすい事を確認する試験を行なった。本発表ではその結果について報告する。

2. TE₀₁₃ モードの励振確認

2.1 TE₀₁₃ モードとは



Figure 1: A picture of the aluminum model cavity.

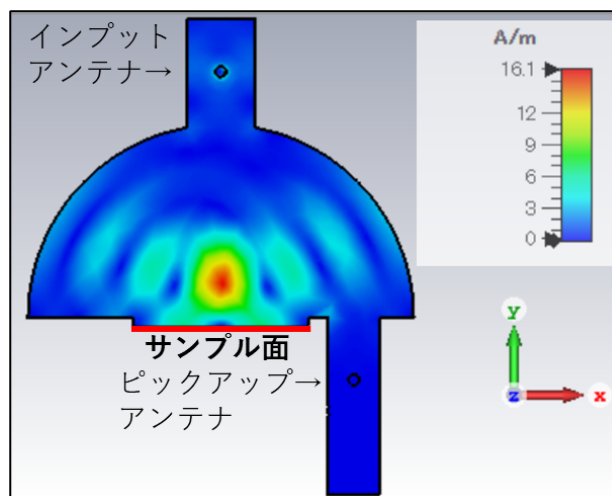


Figure 2: The magnetic field distribution of TE₀₁₃.

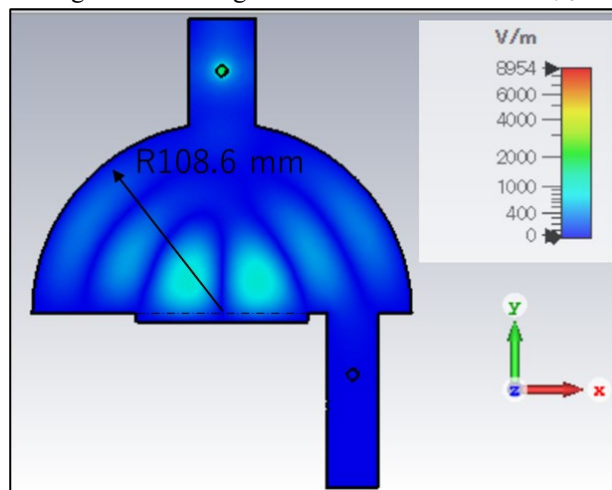


Figure 3: The electric field distribution of TE₀₁₃.

[#]hattori@ecc.ibaraki-ct.ac.jp

製作したアルミ製モデルの写真を Fig. 1 に示す。この空洞内に励振される TE₀₁₃ モードの磁場強度分布を Fig. 2 に、電場強度分布を Fig. 3 に示す。空洞の内部構造は半径 108.6 mm の半球部に直径 98 mm、高さ 5 mm の円柱サンプル部から成る。さらに、半球上部にインプットアンテナを取り付けるためのポートがあり、半球下部にはピックアップアンテナおよび真空引き用のポートが取り付けられる。

Figure 2 に示す TE₀₁₃ モードの磁場強度がサンプル面上で最大となり、ニオブ製空洞表面の約 2.1 倍となることより、ニオブの RF 臨界磁場 (200 mT) を超えると予測される超伝導薄膜の RF 臨界磁場を 400 mT 超まで測定可能とする設計である。

RF 臨界磁場測定時には、サンプル面に測定対象となる超伝導薄膜を成膜し、極低温 (2~5 K 程度) 下で RF パワーを投入する。RF 投入パワーを増やし、磁場強度を上げていくと、RF 臨界磁場を超え、超伝導から常伝導への転移が起きる。そのとき、表面抵抗の増加、Q 値の低下が生じるので、その時点での RF 投入パワーから最大表面磁場を算出し、RF 臨界磁場とする。

2.2 TE₀₁₃ モードの励振確認セットアップ

TE₀₁₃ モードの励振確認のため、ビーズ測定を実施し、ビーズ測定で得られる電場強度分布が TE₀₁₃ のシミュレーション計算から得られた電場強度分布と一致するかを確かめた。

このビーズ測定時のアンテナには Fig. 4 に示す SMA コネクタに銅線をハンダ付けしたダイポールアンテナを用い、それぞれの長さについては、インプットアンテナ長を 66 mm、ピックアップアンテナ長を 62 mm とし、ネットワークアナライザのポート1にインプットアンテナを、ポート2にピックアップアンテナを接続した。このとき、PTFE の長さと同様にアンテナ端板の厚みはともに 4.0 mm に揃えてあり、インプットアンテナポート・ピックアップアンテナポート内には Fig.4 に示した PTFE を除いたアンテナ長分が挿入されていることになる。それぞれのアンテナの TE₀₁₃ モードとのカップリング係数はインプットアンテナが 0.04、ピックアップアンテナが 0.001 であった。

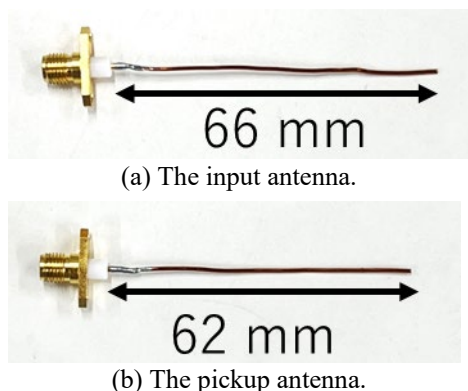


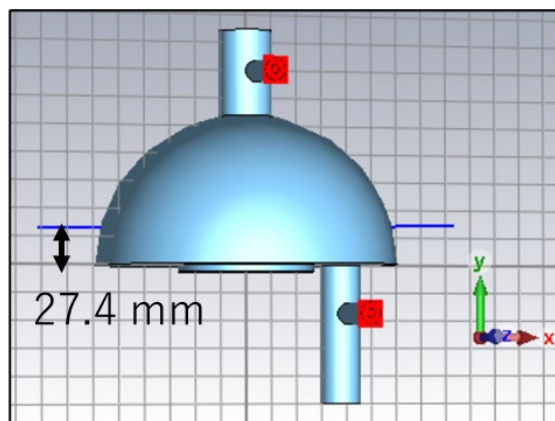
Figure 4: Antennas used during bead pull measurement.

本ビーズ測定では、電場強度分布を測定するため、ビーズにはセラミック球 φ4 mm を使用し、半球底面から

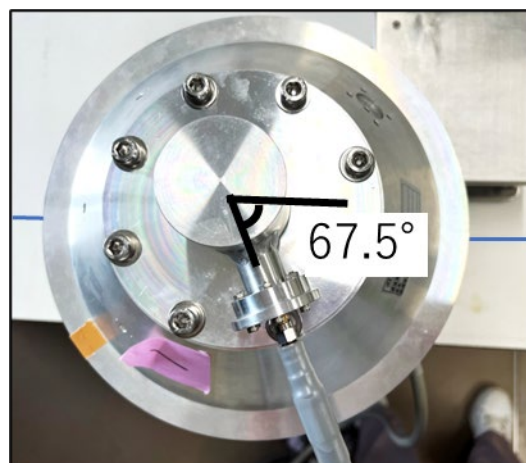
27.4 mm (Fig. 5(a)参照)、インプットアンテナおよびピックアップアンテナの挿入角から 67.5° 回転した軸 (Fig. 5(b)参照) 上でビーズを移動させ、TE₀₁₃ モードの共振周波数を S11 から測定した。共振周波数の変位量 $\Delta f = f(z) - f_0$ は電場強度と次式の関係にあることが知られている。

$$\sqrt{-\Delta f} \propto |\vec{E}| \quad (1)$$

この関係性を用いて、電場強度分布の一致を確認した。



(a) The offset of the bead pull axis.



(b) The rotation angle of the bead pull axis.

Figure 5: The bead pull axis.

2.3 測定結果

Figure 6 にビーズ測定から得られた電場強度分布と CST Studio Suite によるシミュレーション計算から得られた電場強度分布を示す。赤で示した測定値が計算値を示した青線と一致していることより、電場強度分布の一致を確認でき、アルミ製のモデル空洞において、設計したアンテナで TE₀₁₃ モードの励振を確認できた。

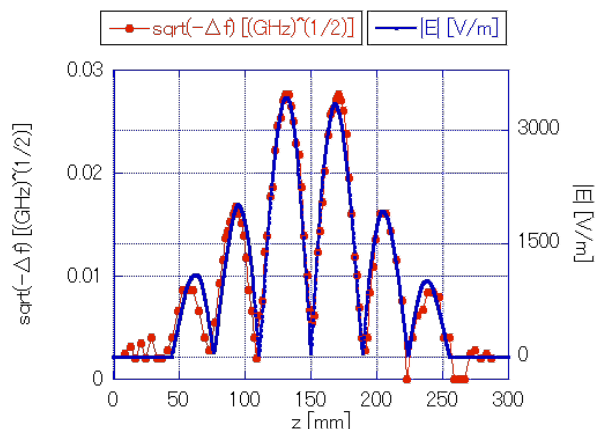


Figure 6: Comparison of electric field distribution between measurement and simulation.

3. TE₀₁₃ モードの特定しやすさの確認

3.1 周波数特性 S₂₁

TE₀₁₃ モードの共振周波数に近い共振がないか、分離可能かを確認するため、S₂₁ で周波数特性を確認したところ、アンテナ長により、S₂₁ に変化が見られることが分かった。ビーズ測定では、TE₀₁₃ モードとアンテナとのカップリングが高い状態で測定を行いたかったため、インプットアンテナ 66 mm、ピックアップアンテナ 62 mm を使用したが、低温試験時には空洞 Q 値の向上にあわせ、アンテナ長を決めるため、短いアンテナを使用することになる。アンテナ長は実機製造後にアンテナのカップリング係数測定を行い決めることになるが、現段階ではインプットアンテナ 35 mm、ピックアップアンテナ 41 mm 程度になると想定される。

そこで、短いアンテナ長での周波数特性を知るため、アンテナ長を変えての実測およびシミュレーション計算を実施した。Figure 7 にアンテナ長を変えて実測した 5.0 ~5.4 GHz の周波数範囲での S₂₁ を示す。

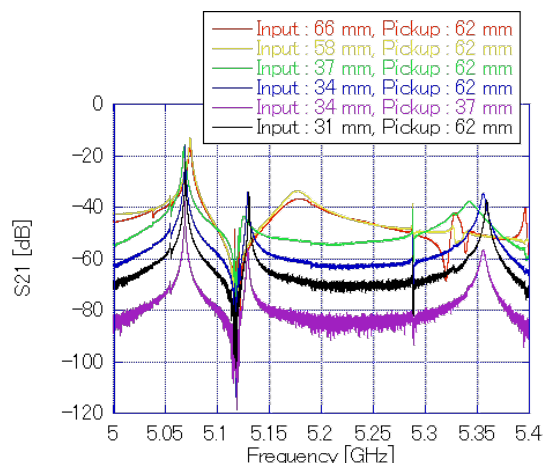


Figure 7: Comparison of S₂₁ with different antenna lengths (5.0~5.4 GHz).

TE₀₁₃ モードの共振は 5.288 GHz に見られており、37 mm 以下のインプットアンテナ長では TE₀₁₃ モードと近接する共振モードとは 50 MHz 程度は離れており、TE₀₁₃ モードの特定は容易にできることが確認できた。

しかし、TE₀₁₃ モードの S₂₁ 波形が近接する共振モードの裾野の影響を受け、左右非対称な形状となっていることが見受けられる。そのため、正確な Q 値を測定できない可能性があり、低温測定時にも Q 値を正確に測定できないと RF 臨界磁場測定に支障が出る。そこで、動向を探るため、TE₀₁₃ モードの周波数帯域、TE₀₁₃ モードより低周波側の周波数帯域、TE₀₁₃ モードより高周波側の周波数帯域の 3 つの周波数帯域を拡大し、以下にそれぞれの周波数帯域での特徴について記述する。

3.2 領域① TE₀₁₃ モードの共振周波帯域について

Figure 8 に TE₀₁₃ モードの共振周波数帯域を拡大した図を示す。TE₀₁₃ モードの共振周波数はアンテナ長を変えても 5.288 GHz のままであり、アンテナ長の変化が TE₀₁₃ モードの共振周波数に影響しないことが分かった。どのアンテナ長でも、S₂₁ の左右非対称性が見られているが、その非対称の形状に違いが見られる。

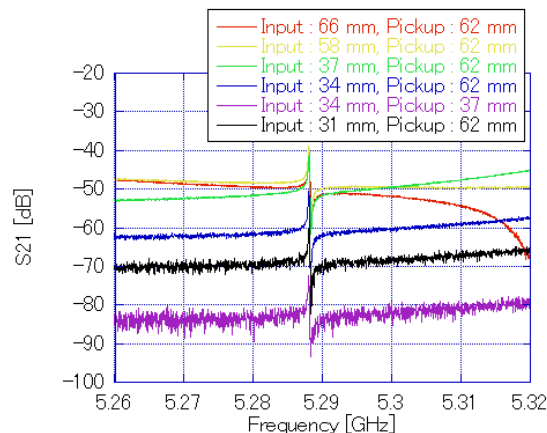


Figure 8: Comparison of TE₀₁₃ resonant frequency with different antenna lengths.

3.3 領域② TE₀₁₃ モードよりも低周波帯域について

TE₀₁₃ モードよりも低周波側の周波数帯域 5.10~5.25 GHz の S₂₁ を Fig. 9 に示す。インプットアンテナ長が 66 mm、58 mm のときは 5.18 GHz 見られる裾野の広い共振の影響を受け、TE₀₁₃ モードが左右非対称となっていたことが分かる。さらに、このモードはアンテナ長が 37 mm、34 mm、31 mm と短くなると共振されなくなり、TE₀₁₃ モードへの影響が減少することが分かった。

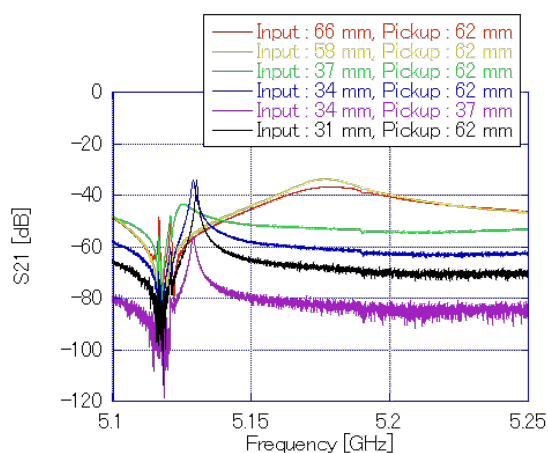


Figure 9: Comparison of S21 with different antenna lengths on the lower frequency side than TE₀₁₃ resonant frequency.

3.4 領域③ TE₀₁₃モードよりも高周波帯域について

TE₀₁₃モードよりも高周波側の周波数帯域を見るために5.25 GHz~5.40 GHzの領域を拡大した図をFig. 10に示す。インプットアンテナ長 66 mm、58 mm では5.3~5.35 GHzの間に共振が見られるが、TE₀₁₃のS21波形の非対称性への影響はあまり見られない。一方、37 mmより短いインプットアンテナ長では5.35 GHz近傍にある裾野の広い共振モードがTE₀₁₃モードのS21波形の非対称性に影響している。

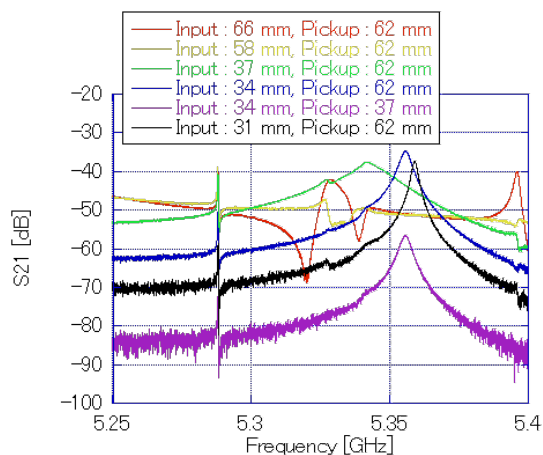


Figure 10: Comparison of S21 with different antenna lengths on the higher frequency side than TE₀₁₃ resonant frequency.

3.5 シミュレーション結果

実測と同様に、アンテナ長を変えたときのS21の変化をCST Studio Suiteでのシミュレーション計算においても、確認した。その結果をFig. 11に示す。シミュレーション結果においても、実測と同様に、TE₀₁₃の共振周波数は変化しない、低周波側の影響はアンテナ長が短くなると低減する、アンテナ長が短くなると高周波側の影響が見えてくるという傾向が見られた。また、シミュレーション計算より、アンテナ長が長いときにのみ、低周波側に見られる

5.2 GHz 近傍の共振は半球形状空洞の上部ポート内へのみ励振するモードであることが確認できた。

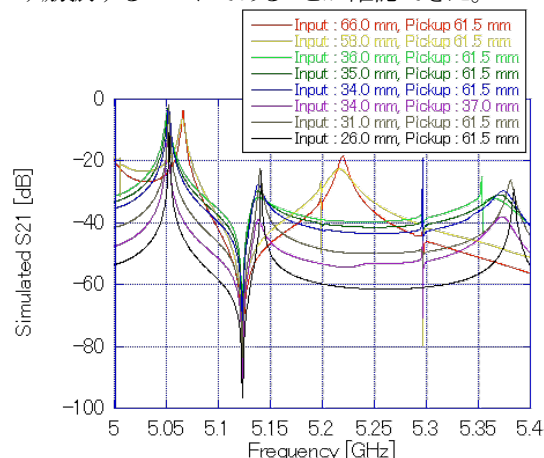


Figure 11: Comparison of simulated S21 with different antenna lengths (5.0~5.4 GHz).

4. 考察

アルミ製モデルによるTE₀₁₃モードの励振試験より、設計したアンテナ形状で、TE₀₁₃モードを励振できることを確認できた。TE₀₁₃モードの特定しやすさの点からは共振周波数の特定は容易であるが、他の共振モードの裾野にTE₀₁₃モードが影響され、S21の波形が左右非対称となっており、TE₀₁₃モードのQ値測定に影響を与える。臨界磁場測定を行う低温測定時には、超伝導になる空洞壁の抵抗が下がり、Q値が高くなるため、共振ピークはするどくなり、他共振モードのTE₀₁₃モードへの影響は減少すると考えられるが、その影響を見積もる必要がある。

5. 結論・今後の展望

アルミ製モデルによるTE₀₁₃モードの励振試験より、設計したアンテナ形状で、TE₀₁₃モードを励振できることを確認できた。今後、低温時の他共振モードの影響を見積もる必要がある。さらに、実機による低温試験に向け、ニオブ製の半球形状空洞の実機設計を進める。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 22K18128の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Kubo, "Multilayer coating for higher accelerating fields in superconducting radio-frequency cavities: a review of theoretical aspects", *Superconductor Science and Technology* 30, 023001, 2017.
- [2] H. Oikawa *et al.*, "Note: Design and resonant condition measurement of the mushroom-shaped Al test cavity for critical magnetic field evaluation of superconducting thin-film sample", *Review of Scientific Instruments* 89, 076102, 2018.
- [3] A. Hattori and H. Hayano, "臨界磁場測定用半球形状空洞のアンテナ設計", *Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, online (Kyusyu University), Oct. 18-21, 2022, pp. 456-460.