

超伝導マッシュルーム空洞のビーズ摂動法による電磁場分布評価手法の検討

STUDY ON EVALUATION METHOD OF ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN THE SUPERCONDUCTING MUSHROOM CAVITY BY BEAD PERTURBATION METHOD

相田大翔[#], 服部綾佳
Haruto Aida[#], Ayaka Hattori
NIT (KOSEN), Ibaraki College

Abstract

Recently, superconducting thin films, which are expected to have a high critical field, have attracted much attention as a material for superconducting accelerating cavities. A mushroom cavity has been designed to excite the TE₀₁₃ mode in order to measure the critical field of superconducting thin films under RF. It has been confirmed by bead measurements in an aluminum cavity for room temperature tests that the designed geometry can excite the TE₀₁₃ mode. The aim of this study is to devise a method to confirm that the TE₀₁₃ mode is indeed excited at room temperature in a niobium mushroom cavity for cooling tests during production, and to confirm the validity of this method. The problem is that the niobium mushroom cavity is structurally not able to be strung with a wire through which the beads can be threaded. A method was therefore proposed to identify the electromagnetic field distribution in the cavity by inserting a ceramic rod through an opening in the niobium mushroom cavity to attach an RF critical field evaluation target. The method was performed on an aluminum mushroom cavity where the TE₀₁₃ mode excitation had already been confirmed by bead measurements, and the measurement results were compared with the results calculated from CST simulations. The results showed that the trend of the variation of the two modes with the insertion length of the ceramic rod was similar, but there was a difference in the amount of variation. The causes of the differences will be discussed in this presentation.

1. はじめに

超伝導加速空洞の空洞内表面に、超伝導薄膜を多層に成膜し、高い臨界磁場を得る方法の開発研究が行われている[1]。その超伝導薄膜の RF 臨界磁場評価のために、評価サンプル面に強い磁場を印加できる TE₀₁₃ モードを共振するマッシュルーム空洞が設計された[2]。これまでの研究で、その設計に基づき製造された室温試験用のアルミ製空洞で TE₀₁₃ モードの共振がビーズ測定により確認されている[3]。本研究では、冷却試験用ニオブ製マッシュルーム空洞[4]でも、たしかに TE₀₁₃ モードが励振されることを、室温で確認するための方法を提案し、その方法の妥当性を検討することを目的とする。ここで、課題となるのが、ニオブ製マッシュルーム空洞には、構造上、ビーズ測定のためのワイヤーを張れないことである。そこで、ニオブ製マッシュルーム空洞内に評価サンプルを挿入するための開口部からセラミック円柱を挿入し、ニオブ製マッシュルーム空洞内へのセラミック棒の挿入量と共振周波数の変化量から共振モードを特定する方法を提案し、その方法の検証を、すでに TE₀₁₃ モードの共振を確認できているアルミ製マッシュルーム空洞に対して行い、実測値と CST Studio Suite 2022 によるシミュレーションからの算出値とを比較した。その結果、両者のセラミック棒の挿入長に対する変化の傾向は類似したものであったが、変化量に差がみられた。本発表ではその差の原因について検討した結果を踏まえ、提案した方法の妥当性を議論する。

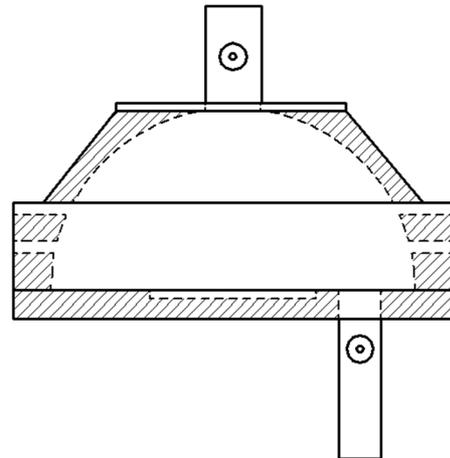


Figure 1: An aluminum mushroom cavity for testing at room temperature.

2. セラミック円柱を摂動体に用いた電磁場分布評価方法

2.1 マッシュルーム空洞

室温試験用アルミ製マッシュルーム空洞の概略図を Fig. 1 に示す。空洞は、半径 108.6 mm の半球状の上部と半径 49 mm、深さ 5 mm の平らな平面のサンプル部をもった空洞共振器である。この形は底板平面上に強い RF 磁場を励起するのに適している。その一方で、底面以外の空洞内表面にはサンプルと比較して弱い交流磁

[#] ac24201@gm.ibaraki-ct.ac.jp

場が励起される。このため、多層薄膜超伝導体を底板部分に設置することで、強い RF 磁場を印加し試験することができる。空洞の上部にはインプットアンテナ、下部にはピックアップアンテナ用のポートがある。冷却試験用ニオブ製マッシュルーム空洞もおおむね同様の構造を持つが、アルミ製空洞にある半球部に空いた穴はない。

2.2 考案した電磁場分布の評価方法

アルミ製空洞内に TE₀₁₃ モードが共振していることを確認した研究[3]では直径 4.0 mm のセラミック球を振動体とし、ビーズ振動法により電磁場分布を特定した。そのときは、空洞の半球部にある穴からビーズを付けた糸を通し、ビーズの位置を変化させたときの共振周波数の変化量から空洞内の電場分布を推定し、TE₀₁₃ モードの共振を確認したが、先述した通りニオブ製空洞は液体ヘリウムで 4 K まで冷却し、RF パワーを投入することを目的とした空洞のため、半球部に穴をあけることはできない。

そのため、冷却試験用ニオブ製マッシュルーム空洞でも TE₀₁₃ モードの共振を確認するためには、これまでとは異なる測定方法が必要となった。そこで、電磁場分布を特定するために、本研究ではセラミック製の円柱棒を利用した新しい方法を考案した。その測定法の概略図を Fig. 2 に示す。マッシュルーム空洞のサンプル部を構成する端板の代わりにマッシュルーム空洞に接続できる電磁場分布測定時に使用するセラミック棒支持用端板を作る。その端板にはセラミック棒を通す穴があり、穴にセラミック棒とボルトを通す。そのボルトを回転させ、セラミック棒の挿入長を変化させると、空洞内の共振周波数が変化する。変化した共振周波数 Δf と電磁場 E, H は以下のような関係があることで知られている。

$$\Delta f = \int (\mu H^2 - \epsilon E^2) dl \quad (1)$$

この関係から電磁場分布を特定することが出来る。

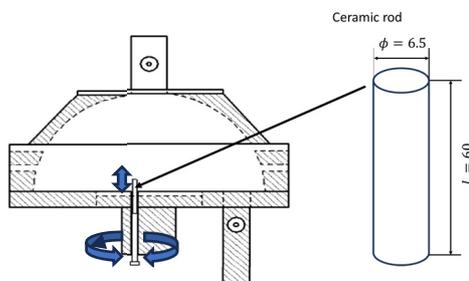


Figure 2: Diagram of bead-pull measurement method using ceramic rod.

2.3 電磁場シミュレーションによるセラミック棒挿入長に対する共振周波数変化量の推定

セラミック棒を振動体とした電磁場分布評価を行うために、まず、セラミック棒支持用端板の穴の位置を決める必要があった。そこで、CST Studio Suite 2022 を用いて電磁場分布のシミュレーションを行った。そのシミュレーションで得られたマッシュルーム空洞内の電場分布を Fig. 3 に示す。セラミック棒の挿入方向が電場の影響を受けやすい方向であることと、セラミックの透磁率が約 1

であることに対し、誘電率は約 10 であることより、まずは電場からの影響を推定した。

半球底面中心からの距離 $r = 15 \text{ mm}, 20 \text{ mm}, 25 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 35 \text{ mm}$ を半径とする円周上に、半球部底面に対して垂直な直線を 45° 間隔で配置した。ここで、ピックアップアンテナ用のポートがある方向を 0° としている。その直線上での電場強度の数値データから、セラミック棒の挿入範囲で算出した電界の積分値を Fig. 4 に示す。

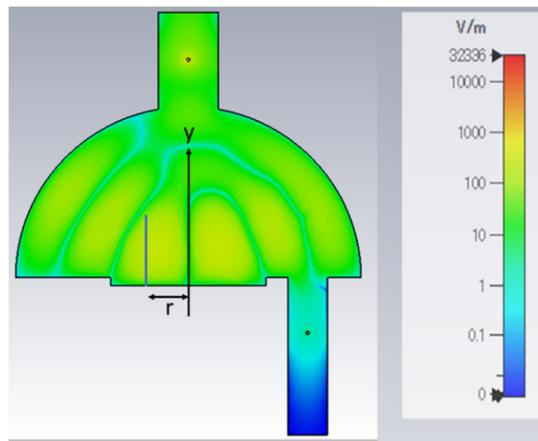


Figure 3: Electric field distribution in the mushroom cavity.

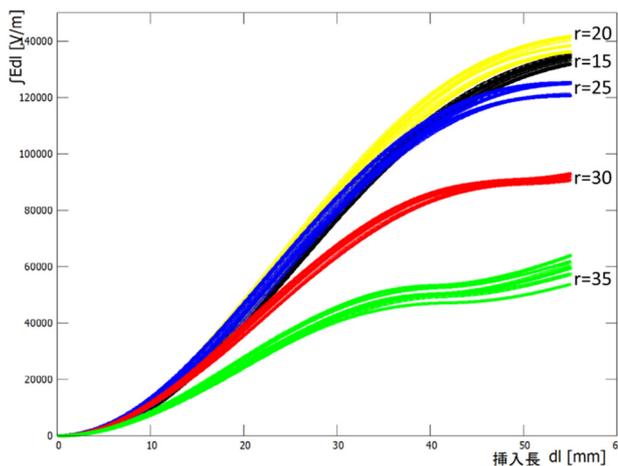


Figure 4: Electric field distribution in mushroom cavity.

Figure 4 より挿入長変化による電場の積分値の変化量が $r = 20 \text{ mm}$ の時に最も大きくなることが分かった。よって、セラミック棒支持用端板の穴の位置には $r = 20 \text{ mm}$ を採用することにした。また角度は、ピックアップアンテナ用のポートと反対方向にあたる 180°を採用することにした。

次に、マッシュルーム空洞にセラミック棒挿入時の共振周波数変化を電磁場シミュレーションから推定するために、マッシュルーム空洞内に共振させる TE₀₁₃ モードの磁場による影響も見積もった。 $r = 20 \text{ mm}$ のときの各高さでの磁場強度を Fig. 5(a)に、各高さでの $\mu H^2 - \epsilon E^2$ を算出した値を Fig. 5(b)に、 $\mu H^2 - \epsilon E^2$ をセラミック棒の挿入範囲で積分したものを Fig. 5(c)に示す。(1)式より得られたこの Fig. 5 (c)と実測値とを比較検討することで、考案した評価方法の検証を行う。

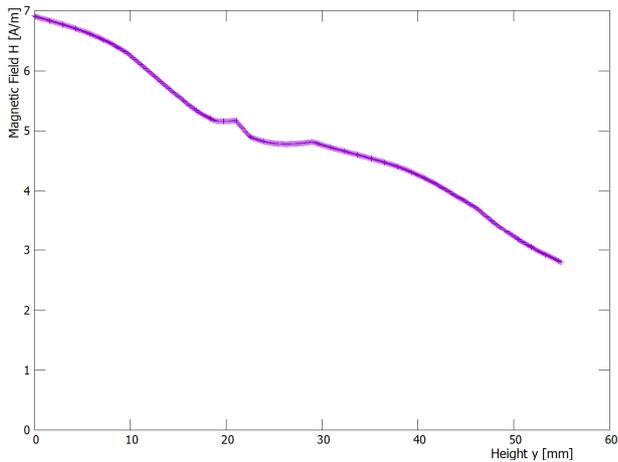


Figure 5(a): Magnetic field distribution along y-axis at $r = 20$.

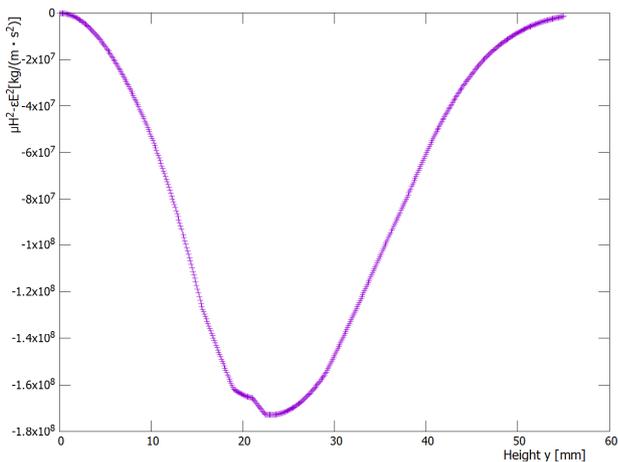


Figure 5(b): $\mu H^2 - \epsilon E^2$ along y-axis where $\mu = 1$ $\epsilon = 9.8$.

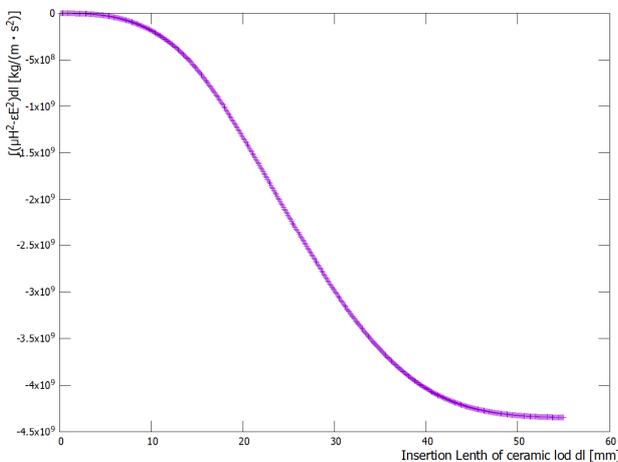


Figure 5(c): The integral of $\mu H^2 - \epsilon E^2$ with respect to the insertion length dl along y-axis at $r = 20$.

3. アルミ製マッシュルーム空洞での実測

考案した評価方法の検証のため、すでに TE_{013} モード

の共振を確認できているアルミ製マッシュルーム空洞で、実際にセラミック棒を摂動体とした共振周波数変化の測定を行った。その測定のセットアップを Fig. 6 に示す。マッシュルーム空洞の上部にある入力アンテナをネットワークアナライザの port1 に接続し、空洞下部にあるピックアップアンテナは port2 へ接続した。ネットワークアナライザと PC を USB で接続し、測定データの記録は PC で行った。

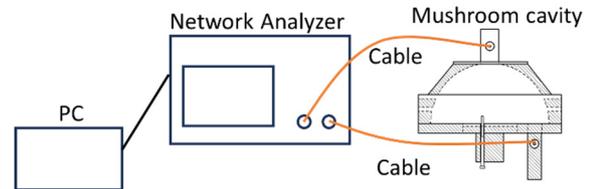


Figure 6: Measurement setup diagram.

ボルトを一回転する毎に、その時の周波数を測定した。ボルトの回転数に 1.25 mm を掛けた値をセラミック棒の挿入長として横軸にとり、セラミック棒が挿入されていない時の共振周波数とボルトを回転させた時の共振周波数の差を縦軸にとり、Fig. 7 に示す。また、Fig. 7 には Fig. 5(c) で得られたシミュレーション値も示している。実測値とシミュレーションから算出した値を比較すると、変化量には差が見られたが、傾向は概ね一致した。

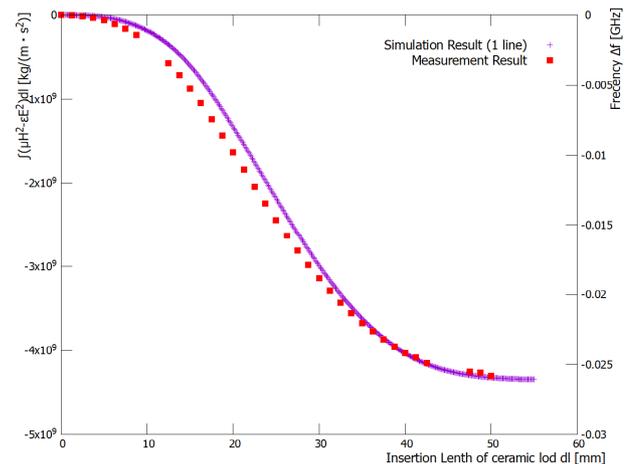


Figure 7: Comparison of measurement results and simulation results.

4. 議論

Figure 7 で見られた実測値と算出値との差の原因として、次の2点を検討した。

- (1) 実測でのセラミック棒の挿入長
- (2) シミュレーションからの算出方法

4.1 実測でのセラミック棒の挿入長

まず、実測でのセラミック棒の挿入長について検討する。共振周波数の変化量測定中はセラミック棒の挿入長を直接目視で確認できないため、確かに、セラミック棒が設計通りに1回転で 1.25 mm 挿入されているか、セラミック棒支持用端板を取り外して測定した。ボルト 0~40 回転の範囲でのノギスによるセラミック棒の挿入長測定を全5

回実施した。その全5回の平均をとったデータを Fig. 8 に示す。Figure 8 より、ボルトの回転数に対するセラミック棒の挿入長のグラフの傾きが 1.25 mm であることから、ボルトが 1 回転するごとにセラミック棒の挿入長が設計通りに 1.25 mm ずつ変化していることを確認できた。

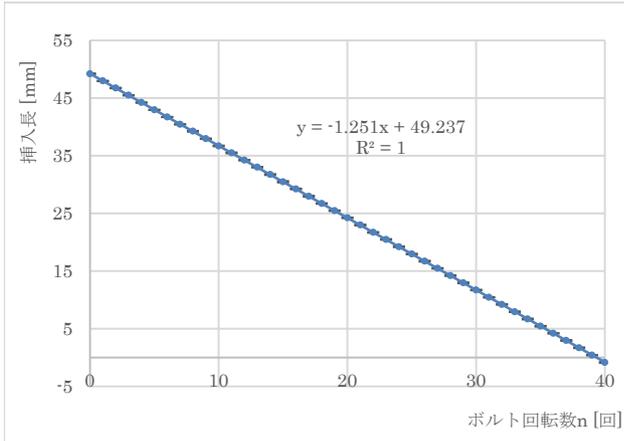


Figure 8: Change in insertion length of ceramic rod relative to number of bolt rotations.

4.2 シミュレーションからの算出方法

次に、シミュレーション方法について検討した。Figure 7 の実測と比較した際に使用したシミュレーションからの算出値 (Fig. 5(c)) は、セラミック棒の中心軸上で $\mu H^2 - \epsilon E^2$ を線積分した結果になっている。しかし、実際には、セラミック棒は円柱であるため、体積積分をしなければならない。そこで、半球底面を真上から見たとき、Fig. 9 の赤点で示した直線上での線積分を合算することで、より実測に近い条件での値を算出した。Figure 9 の一番外側の円はセラミック棒の円周を示し、その内側にある3つの円は外側から順に円周を 3/4, 1/2, 1/4 倍したものである。これらの円周上それぞれを 15° ずつに分けた 13 か所で電場と磁場の強度から算出した。積分範囲が中心軸のみのときと、52 本 (13 か所 × 4) の直線を追加したときとの比較を Fig. 10 に示す。

セラミック棒の中心での線積分からセラミック棒の太さを考慮した体積積分に近づけたことで、少しではあるが算出値が実測値に近づいた。今後は Fig. 9 の下半分についても同様にシミュレーションし、実測と比較していく。

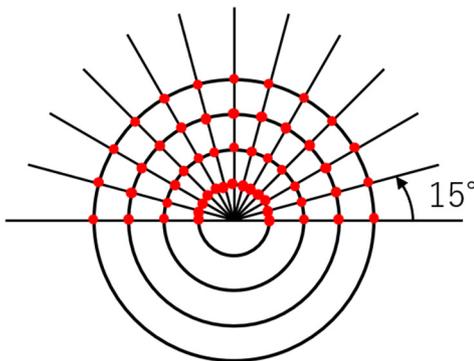


Figure 9: Measurement points added for simulation.

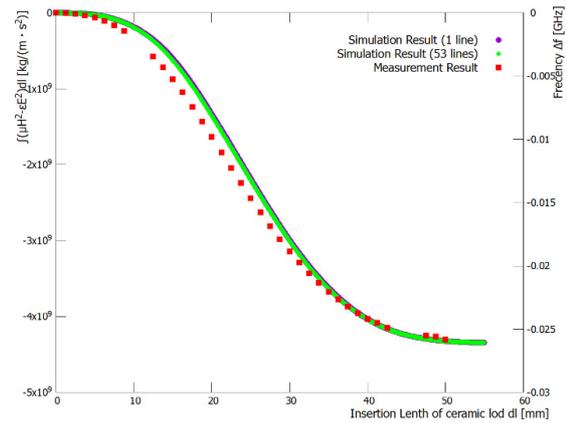


Figure 10: Simulation results with changed calculation method.

5. 結論・今後の展望

考案したセラミック円柱を摂動体に用いた電磁場分布評価方法をシミュレーションからの算出値と実測値の比較より検証したが、両者の間には差が見られる結果となった。その原因候補として、実測でのセラミック棒の挿入長と、シミュレーションからの算出方法について検討したところ、実測時のセラミック棒の挿入長は設計通りに動いていることを確認でき、シミュレーションからの算出方法については、積分する範囲 (直線数) を増やすことで実測値にわずかに近づく結果が得られたが、原因の特定には至らなかった。

今後は、シミュレーションする直線数をさらに増やす、隣接モードの影響について検討する、算出値と実測値の比例係数を特定するなど、原因を追究する。差の原因の特定ができ次第、ニオブ製空洞用のセラミック支持用端板の設計を始める。

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. Sasaki *et al.*, “Study of multilayer thin-film structures in superconducting acceleration cavities”, in Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2024, Yamagata, pp. 966-970.
- [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 *et al.*, “TE013 mode excitation test on aluminum model of hemispherical cavity for critical magnetic field measurement”, in Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 29 - September 1, 2023, Funabashi pp. 636-696.
- [4] A. Hattori, H. Hayano “Study of critical magnetic field measurement method using hemispherical superconducting cavity”, in Proceedings of the 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan July 31 - August 3, 2024, Yamagata pp. 673-677.