

令和6年度 卒業論文概要					
所 属	物理情報工学科・電子物理工学コース				
学生番号	212C3047	学生氏名	清水 拓真	指導教員	小田部 荘司
論文題目	超伝導線材とハルバツハ配列の永久磁石を用いた磁気浮上工具の有限要素法による電磁界解析				

1. 緒言

超伝導の性質であるピン止め効果による反発力を利用した磁気浮上技術がある。これを応用した中空加工技術では、部品形成時間の長さによる生産性の低さや、加工の難しさが課題となっている。その解決策の1つとして、主に超伝導バルクと永久磁石で構成されている磁気浮上工具に注目している^[1]。超伝導バルクの性能向上の一方で、近年は超伝導体の線材化の研究が進み、高性能な線材が開発されている。また、従来の研究では、リング状の片側4極永久磁石と、超伝導バルクもしくは超伝導線材が用いられていたが、超伝導バルクでは軽量化が難しく、超伝導線材では強い反発力を得ることが困難であるという問題があった。コンパクトさと強い反発力を両立するためには、永久磁石に対する工夫が必要であると考え、本研究では、5つの棒状の永久磁石をハルバツハ配列に並べ、超伝導線材を用いたモデルと、従来のリング状の片側4極永久磁石と超伝導線材を用いたモデルの2種類を用いて電磁界解析を行い、コンパクトで強い反発力を得る方法を調べた。

2. 解析方法・モデルの詳細

本研究ではこの磁気浮上工具の基本的な電磁界解析として、シミュレーションソフト JMAG-Designer 23.1 で有限要素法(FEM)を用いて磁気浮上工具の解析を行った。

ハルバツハ配列について、Fig. 1は(a)がハルバツハ配列、(b)がリング状片側4極磁石であり、それぞれの磁束線を描いたものである。ハルバツハ配列は、中央の磁石を対称に90°ずつ回転させるようにして配置する方法であり、この配置方法によって、リング状片側4極磁石では無駄となっている永久磁石よりも上側の磁束線を、片側のみに集中させることが可能となり、より強い反発力を得られるのではないかと考えた。なお、これ以降は棒状の永久磁石をハルバツハ配列にしたモデルをハルバツハモデル、従来の研究のモデルをリングモデルと称する。

GdBa₂Cu₃O_{7-δ}超伝導線材のサイズは長さ72 mm、幅

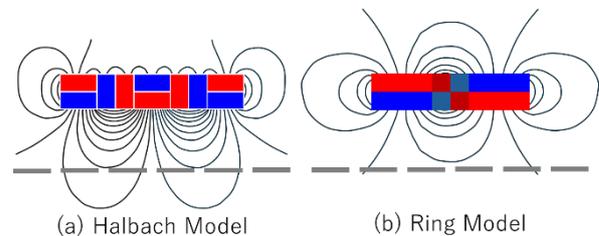


Fig. 1 Magnetic flux line distribution diagrams for the two models.

12 mm、厚さ2 μmで、1層に6枚使用し、積層する際は超伝導線材の下に100 μm間隔で上の層と同様な層を作成する。永久磁石について、ハルバツハモデルでは長さ70 mm、幅8 mm、厚さ8 mmのものを5つ使用し、ハルバツハ配列を用いて超伝導線材方向に磁力が強くなるように配置し、リングモデルでは内径10 mm、外径29.5 mm、厚さ10 mmのリング状片側4極ネオジウム磁石を使用した。どちらの永久磁石も磁石表面での磁場を450 mTとし、永久磁石を超伝導線材の上にて着磁位置10 mmで着磁を行い、永久磁石を超伝導線材方向に垂直に10 mmから1 mmまで移動させ、発生する超伝導線材から永久磁石への反発力を1 mmごとに計算した。

ハルバツハモデルでは、超伝導線材層数が1層、3層、5層、10層のモデルと、超伝導線材4枚を1層として3層に積層したモデルを、リングモデルでは、超伝導線材層数が10層のモデルを作成し解析した。

3. 結果および考察

3.1. 2つのモデルの反発力の比較

超伝導線材層が10層におけるハルバツハモデルとリングモデルのFEMによる反発力の計算結果をFig. 2に示す。グラフより、全体的にリングモデルよりもハルバツハモデルの方が、より大きな反発力を得られていることがわかる。これはハルバツハモデルの方が、超伝導線材側での磁束密度 B が高いため、 $F_p = J_c \times B$ より求められるピンニング力 F_p も比較的大きくなったと考えられる。

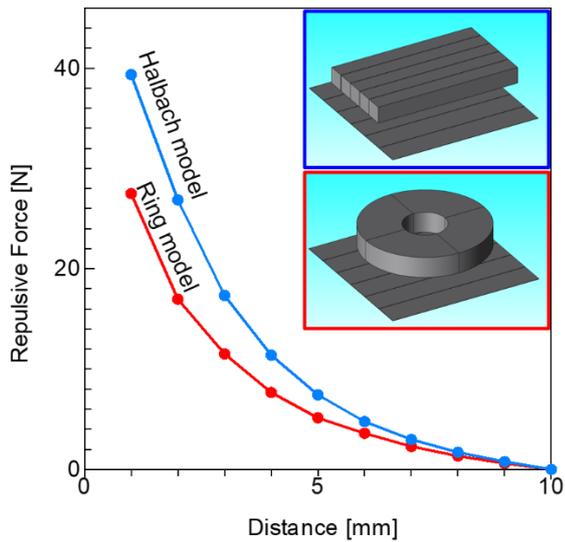


Fig. 2 Comparison of repulsive force from 10 mm to 1 mm magnetization distance in two models.

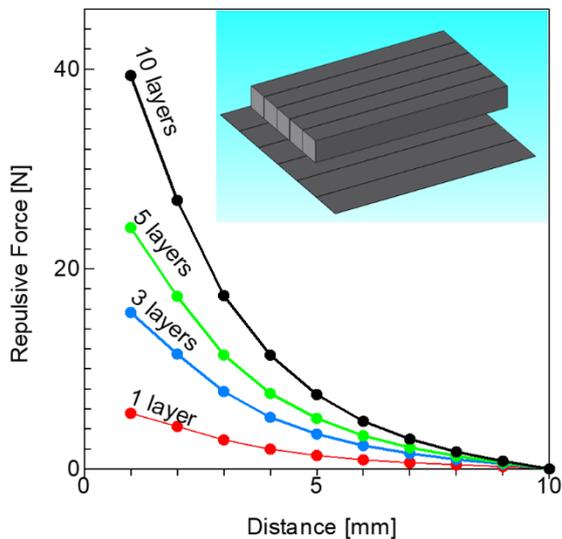


Fig. 3 Comparison of the number of layers and repulsive force in the Halbach model.

ハルバッハモデルにおいて、超伝導線材層を1層、3層、5層、10層と変化させたときの反発力の計算結果を Fig. 3 に示す。

グラフより、層数を増加させると反発力が大きくなっていくのがわかるが、それぞれのモデルにおける1層あたりの平均反発力は、層数が増えるごとに減っている。これは、永久磁石の着磁距離は超伝導線材層1層目から10 mmの位置としており、積層すればするほど2層目以降の超伝導線材が着磁される距離が永久磁石から遠くなっていき、下層になるほど各超伝導線材上での磁束密度が低くなるため、層数と反発力が比例していないと考える。

ハルバッハモデルにおいて、超伝導線材を1層6枚とし

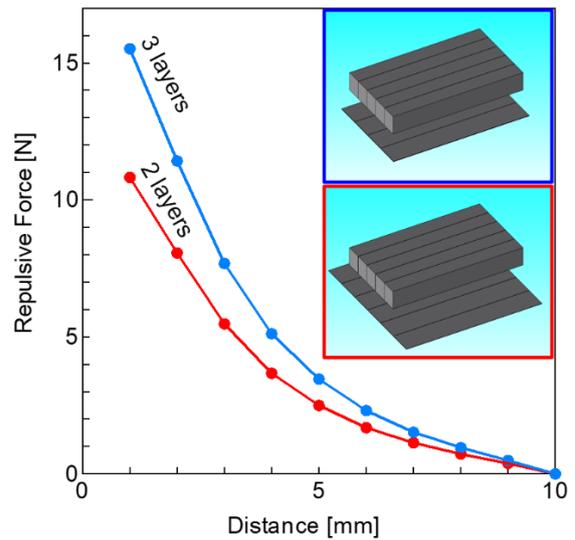


Fig. 4 Comparison of repulsive force before and after repositioning of superconducting wires in Halbach model.

た2層モデルと、1層4枚とした3層モデルの2種類の積層方法での反発力の計算結果を Fig. 4 に示す。

これらのモデルは、どちらも用いた超伝導線材の本数は12本で、積層位置のみ変えたものであると言える。

このグラフから、6枚2層の場合での両端の超伝導線材からの反発力よりも、4枚3層の場合での3層目からの反発力の方が大きいことがわかる。これは一部の超伝導線材が、永久磁石により近い位置に移動したことで、移動前よりも多くの磁束線を捉えることができたと考えられる。

4. 結言

本研究では、永久磁石と超伝導線材から構成される磁気浮上工具で、より大きな反発力を得るためにリングモデルとハルバッハモデルにおいてFEMを用いた電磁界解析によって反発力の比較を行った。結果より、リングモデルよりもハルバッハモデルの方がより大きな反発力を得ることができ、ハルバッハモデルにおいては、超伝導線材の積層位置によっても得られる反発力が向上することが分かった。

参考文献

(1) Y. Kinoshita, et al.: J. Phys. Conf. Ser. 1590(2020) 012023

研究実績

清水 拓真ほか、“超伝導線材とハルバッハ配列永久磁石を用いた磁気浮上工具の有限要素法による電磁界解析”、2024年度応用物理学会九州支部学術講演会、7Bp-14