

令和4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	192C3072	学生氏名	中塘 彩友美	指導教員	小田部 荘司
論文題目	超伝導線材を用いた磁気浮上工具の性能向上及び電磁界解析				

## 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の技術がある。これを応用している中空加工技術は、部品形成が容易かつ消費電力削減のため、短時間で加工可能であることが求められている。その解決策の一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た[1]。既に九州工業大学大学院情報工学研究院知的情報系鈴木研究室では、超伝導バルクを用いた磁気浮上工具で永久磁石を6 mm 浮上させ、約40 Nの反発力の測定に成功している。更なる性能向上のため、超伝導バルクに比べ、臨界電流密度 $J_c$ と磁束密度 $B$ を用いた超伝導特性を表す $J_c - B$ 特性が優れている超伝導線材を使用し、磁気浮上工具(SUAM)の性能評価が必要であると考へた。本研究では、永久磁石と超伝導線材を用いた円型モデルと積層モデルを作成し、電磁界解析を行い、より強い反発力を得る方法を調べた。

## 2. 解析

### 2.1. 解析方法およびモデルの作成

本研究では、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 20.0 で有限要素法(FEM)を用いて解析を行った。

超伝導線材を用いた1つ目のモデル作成について、 $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 超伝導線材で、理想円型にカットし解析を行った。線材のサイズは、内径9.5 mm、外径29.5 mm、厚さ10  $\mu\text{m}$ に設定し、反発力と切断数、切断の角度の影響を見るために5つのモデルにて比較を行った(Fig. 1)。また、永久磁石は内径10 mm、外径29.5 mm、厚さ10 mm、磁石表面の磁束密度が450 mTのリング型4極ネオジウム磁石を用いた。

2つ目のモデル作成について、1つ目のモデルは、現在、幅の広い線材が商品として無く、実現が難しいため、本モデルでは、実際に鈴木研究室で使用されている長尺線材の幅のサイズを基に作成をおこなった。線材のサイズは長さ72 mm、幅12 mm、厚さ2  $\mu\text{m}$ に設定した。1層に6枚使

用し(Fig. 2 内上)、2通りのモデルを製作した。超伝導線材を6枚正方形の形に1枚の平面を作り、それぞれ平行に5層100  $\mu\text{m}$ 間隔で積み上げたものをParallel type(Fig. 2 内左下)、互い違いに積み上げたものをAlternate type(Fig. 2 内右下)とした。ここで100  $\mu\text{m}$ 間隔について、超伝導線材は保護層、超伝導層、中間層、金属基盤、安定化層の5つの層で構成されており、その中の超伝導層の厚さは2  $\mu\text{m}$ である。これらの層と積層する際に生じる隙間を考慮し、100  $\mu\text{m}$ 空けて積層モデルを作成している。永久磁石については上述したもので内径が9.5 mmのものを用いた。

また、モデル作成の際は、計算の簡易化のため、永久磁石、超伝導線材、取り巻く空気の3要素のみで構成し、解析を行なった。反発力については、永久磁石を超伝導線材に近づけていくことで解析を行なった。

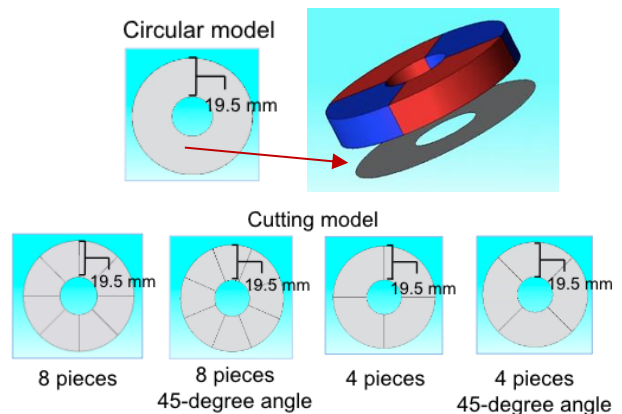


Fig. 1 Five circular models using superconducting tapes changing the number of cutting and changing the angle

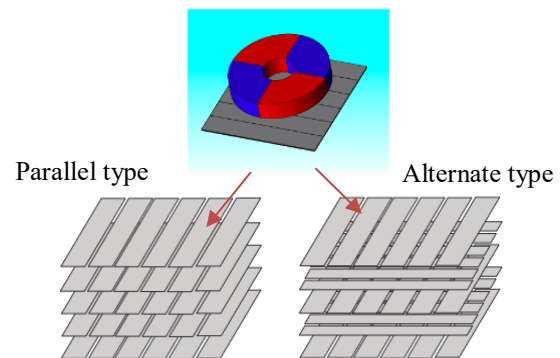


Fig. 2 Two models, Parallel type and Alternate type, stack up to 5 layers using superconducting tapes

## 2.2. 電磁界解析内容

永久磁石を超伝導線材または超伝導バルクのモデルの上部にて着磁位置 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 まで移動した際に発生する超伝導線材から永久磁石への反発力を計算した。

また、超伝導バルクと超伝導線材を組み合わせ用いた際の反発力の比較および側面に線材を配置した際の影響を見るため、上述同様に着磁を行い、反発力を計算した。

## 3. 結果および考察

### 3.1. 線材を用いた理想円モデルの反発力比較

磁気浮上工具の理想円モデルの FEM による反発力の計算結果を Fig. 3 に示す。グラフより、切断数の少ないモデルの方が、より反発力が大きく、その中でも角度をつけたものは、永久磁石の NS 極との境界線上に切断による隙間が重なったものの方がわずかながら反発力が大きい結果が得られた。これは、45°テーブに流れる電流が磁石の境界線で分断され、より狭い範囲で電流が流れるため、十分な磁束密度が得られないことが影響していると考えられる。

### 3.2. 現実的な線材を用いたモデルの反発力比較

磁気浮上工具の Parallel type と Alternate type の FEM による反発力の計算結果を Fig. 4 に示す。グラフより、着磁位置の距離 10 mm では力はゼロであり、着磁位置から永久磁石を近づけると反発力が働き、近づく程反発力は大きな値を示すことが分かる。また、わずかながら Alternate type の方が、反発力が大きいことが分かる。

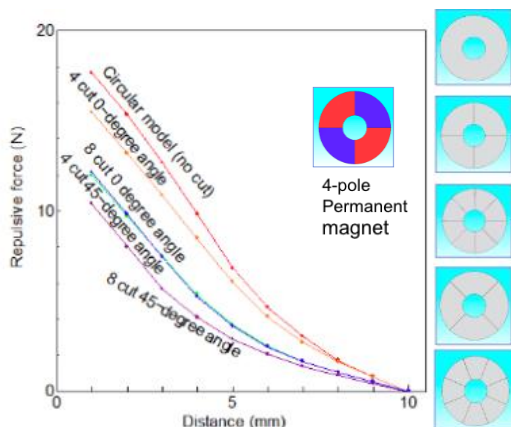


Fig. 3 Repulsive force when magnetized distance is 1 – 10 mm for five types of models changing the number of cutting, 0, 4 and 8 cuts, and with changing the angle for 45 degree

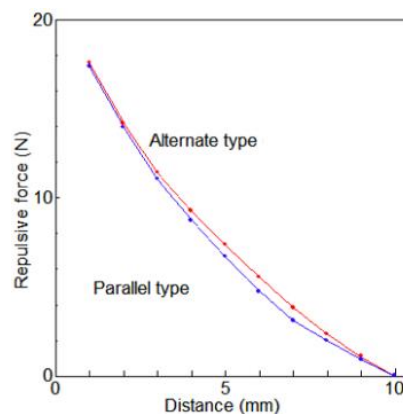


Fig. 4 Repulsive force when magnetized distance is 1 – 10 mm for Alternate type and Parallel type

これは線材間の隙間による磁束線を受け取る面積の差が Alternate type の方が少ないからであると考えられる。

## 4. 結言

本研究では、超伝導線材を用いた磁気浮上工具の性能向上のため、FEM を用いて電磁界解析と反発力比較を行った。結果より、切断数が少なく、切断されたモデルでも、切断による隙間が永久磁石の境界線と重なるモデルの方が、反発力が大きくなることがわかった。また、永久磁石の影響が得やすい面積の大きいモデルの方が反発力を大きくなることがわかった。そのため、わずかながらではあるが、隙間の面積が 36 mm<sup>2</sup> である Parallel Type と、0.25 mm<sup>2</sup> である Alternate type とでは、隙間の少ない Alternate type の方が高い反発力が得られた。

以上より、切断数が少ないモデルかつ、切断する際は切断の隙間が永久磁石の NS 極の境界線上に重なるよう設計すると反発力が多く得られると考えられ、また、磁石の影響を多く得るために、切断による隙間を埋められる重ね方、すなわち Alternate type のように設計すると反発力がより得られると考えられる。

## 参考文献

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

## 研究実績

A. Nakato, S. Iwasaki, H. Ishii, E.S. Otabe, K. Matuo, K. Suzuki, The 7th Asian Applied Physics Conference (Asian-APC), November 26 – 27, 2022, Oita University, Dannoharu Campus