

令和3年度 卒業論文概要					
所 属	電子情報工学科				
学生番号	17232006	学生氏名	石井 皓也	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有限要素法による電磁界解析に関する研究				

## 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。その技術を応用している中空加工技術には、部品形成時間が長くなることによる生産性の低さや、高硬度金属部品の形成が困難という問題点がある。その解決策の一つとして磁気浮上工具に注目している。磁気浮上工具は主に超伝導バルクと永久磁石で構成されている。(1)近年、超伝導体の線材化の開発が進み、高性能な長尺線材を得られるようになり、実用化に向かっている。そこで、超伝導線材を用いた磁気浮上工具の性能評価をする必要があると考えた。本研究では、永久磁石と超伝導線材のみのモデル2つを用いて電磁界解析を行い、より強い反発力を得る方法を調べた。

## 2. 解析方法

### 2.1. 磁気浮上工具の解析方法

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 20.0 で有限要素法(FEM)を用いて磁気浮上工具の解析を行った。 $GdBa_2Cu_3O_{7-x}$ 超伝導線材のサイズは長さが20 mm、幅が12 mm、厚さが1  $\mu m$  で、1層に6枚使用し、2通りのモデルを製作した。その図を Fig. 1 に示す。モデルはそれぞれ、磁気浮上工具の中心から等間隔で方位角状に6枚置いたものを Type A、放射状に6枚置いたモデルを Type R とする。更に超伝導体の下に50  $\mu m$  間隔で上の層と同様な層を4層分まで作成し、それぞれ解析をした。ここで永久磁石は内径10 mm、外径29.5 mm、厚さ10 mm で磁石表面での磁場が450 mT のリング型4極ネオジウム磁石を用いた。

超伝導バルクを用いた磁気浮上工具の電磁界解析も同じ環境で行った。超伝導バルクは1辺35 mm、厚さ10 mm の $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 超伝導バルクを4つ使用し、正方形になるよう配置した。永久磁石は超伝導線材を用いた磁気浮上工具と同じものを用いた。

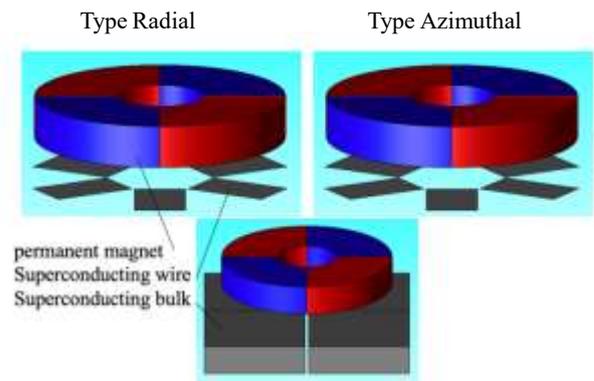


Fig. 1: Superconductor Assisted Machining

### 2.2. 超伝導線材の層を追加させた際の電磁界解析

磁気浮上工具の性能向上のために、超伝導線材の層を増やした場合の解析を行う。超伝導線材の厚さは1  $\mu m$  だが、超伝導線材は本来、保護層、超伝導層、中間層、金属基盤、安定化層から構成されているので、新しい層を追加するときに超伝導線材間の距離をそれらの層も考慮した全体の大きさである50  $\mu m$  離して、モデルを作成する。モデルの作成には計算の簡易化のため、磁気浮上工具に必要な最低限の超伝導線材、永久磁石、空気の3要素のみで構成し、解析を行う。超伝導層間の距離を50  $\mu m$  離し、層を増やすことによる性能の変化について評価を行う。そして、超伝導バルクと比較することで超伝導線材の性能評価をする。

## 3. 結果と考察

### 3.1. 線材を用いたモデルの反発力の比較

磁気浮上工具の Type R と Type A それぞれのモデルの超伝導線材の層を1層から4層まで増加させた際のFEMによる反発力計算結果を Fig. 2 に示す。横軸は永久磁石と超伝導線材の距離を表しており、縦軸は永久磁石に働く反発力を表している。また、Type R のモデルの結果を点線で示し、Type A のモデルの結果を実線で示し、モデルに対する

超伝導線材の層の数を Fig. 2 内の右上に示す。超伝導線材は層を増やすことで大きな反発力を得ることができる。また、層が 2 層より多く永久磁石と超伝導線材の距離が 5 mm より近ければ Type A のモデルの方が高い反発力を得られていることがわかる。

### 3.2. バルクと線材の反発力の比較

超伝導線材と超伝導バルクを比較するために、超伝導バルクの厚さ 10 mm なので、同じ厚さになるように超伝導線材の層を積み重ねる。そのため、超伝導線材の層を 200 層積み上げる必要がある。今回の研究において、超伝導線材 200 層の反発力解析は難しいため、層を追加した際の反発力の変化から、200 層での反発力を推測する。また層を追加した際の反発力の結果より、反発力においてモデル Type A の方が優れていることがわかっているため、超伝導線材のモデルが Type A の場合と超伝導バルクの場合についてのみ比較を行なった。1 層、2 層、3 層、4 層、8 層、16 層、における反発力から推測した近似式のグラフを Fig. 3 に示す。横軸は層の数を表し、縦軸は反発力を示す。この結果から、超伝導体と同じ厚さ 10 mm の場合、超伝導バルクの反発力の大きさは 85 N、超伝導線材の反発力の大きさは 140 N となり、超伝導体と同じ厚さの場合、超伝導線材の方が大きな反発力を得られる。また、超伝導線材の反発力を超伝導バルクの反発力 85 N と同じにするためには、超伝導線材が 120 層 (6 mm) でモデルを作成すればよいとわかる。

### 4. 結言

本研究では、FEM を用いて磁気浮上工具の反発力の解析を A-φ法によって計算した。反発力解析では、永久磁石を超伝導線材に近づけた場合について解析を行なった。

FEM 結果より、1 層では永久磁石を近づけるほど反発力が大きくなることがわかった。また、モデル Type R、Type A の間で超伝導線材が 1 層の場合、大きな違いは見られなかったが、層が増えていくにつれて Type A の方が高い反発力を得られることがわかった。

また、超伝導線材の層を追加させた場合の反発力は、層が追加されるごとに大きくなる。そして、超伝導バルクと同じ厚さである 10 mm まで層を積み重ねるとバルクより、大きな反発力を得ることができる。よって、反発力におい

ては超伝導バルクよりも超伝導線材の方が優れていることがわかった。

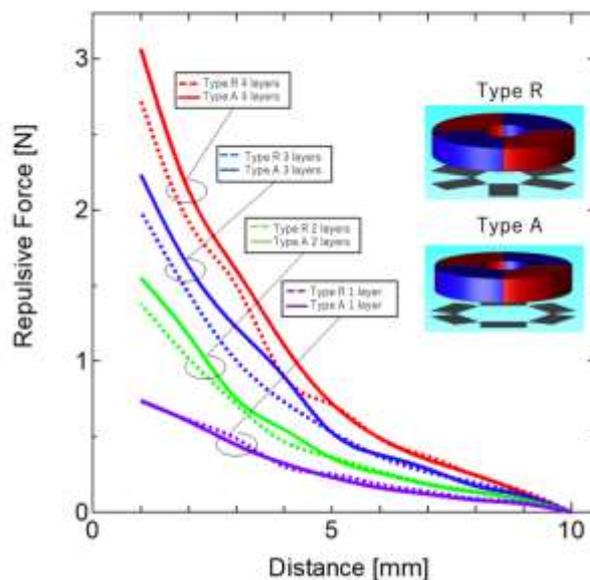


Fig. 2: Repulsive force when magnetized distance is 1 – 10 mm for Type A and R

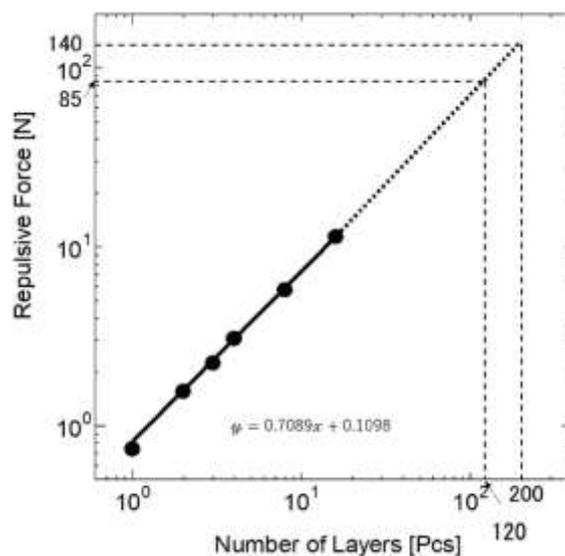


Fig. 3: Repulsive force when magnetized distance is 1 – 16 layers for Type A

### 参考文献

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

### 研究業績

石井皓也ほか、“超伝導線材を用いた磁気浮上工具の性能向上に関する研究”、令和3年度応用物理学会九州支部学術講演(2021)、4Cp-16