

磁気浮上に関する研究

システム科学技術学部 機械工学科 2年 武田 公平
 2年 佐々木 郁
 2年 岩野 由季
 知能メカトロニクス学科 2年 森川 貴史

指導教員 システム科学技術学部 機械工学科
 助教 二村 宗男

1. 研究背景

近年，地球環境を守るために，再生可能エネルギーの利用とともに高効率な機械システムの使用が求められている．高効率で高速な輸送手段として，超電導リニア（JR 式 MAGLEV）が開業に向けて進められている．そこで，今後の普及が予想される超電導リニアの原理を理解し自分たちの将来につなげるために本研究を行う．電磁気や超伝導について学習し，磁気浮上の応用例として超電導リニアの模型を製作する．製作を通して，その原理や仕組みを深く理解するとともに，身近な磁石で浮上が可能かどうかといった条件を明らかにする．

2. 原理

超電導リニアのガイドウェイには「推進」「浮上」「案内」の役割があるが，本研究は「浮上」について調べるものである．

ガイドウェイの両側面には，上下2つのループが逆巻きになるようにつながった「8」の字型のコイルが設置されている．この8の字コイルのすぐ横を超電導リニア車両の超電導磁石が高速で通過するとき，電磁誘導によって8の字コイルに誘導電流が流れる．この誘導電流による磁場は，磁石が近いほうのループでは反発力が，もう一方のループには吸引力が発生するので，車両の磁石は8の字の中心位置に引き寄せられることになる．ガイドウェイにはこの8の字磁石が並んでいるので，車体は8の字の中心の高さに浮上することになる．

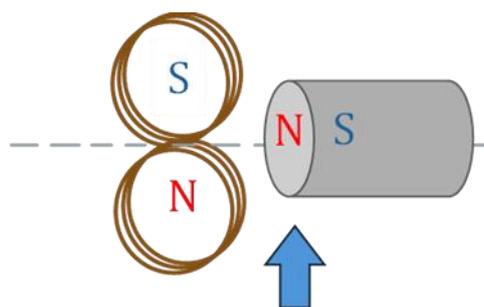


図 1 浮上力の原理

3. 実験

(実験手順)

- ① 8の字コイルを製作する．コイルの‘巻き数’，使用する導線の‘線径’について検討するために，予備実験として数種類の導線を用いて，巻き数の異なるコイルを製作し，磁石の電磁誘導でコイルに流れる電流をマルチメータで計って，コイルのパラメータを検討した．その結果，コイルの巻き数を増やすため，線径 0.26 mm の比較的細い銅線を使用し，8の字に 100×100 回ずつ巻くことに決定した．図 2, 3 に示す FDM-3D プリンタで製作した基盤に，0.26 mm ポリウレタン被覆銅線を図 4 のように上下 100 回ずつ8の字になるように巻線し，

両端は被覆を取り除いて半田結線した。このコイルを 54 個製作した。



図 2 3D プリンタで製作したコイル基盤

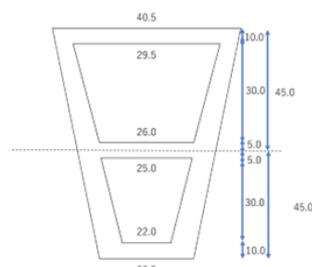


図 3 コイル基盤の寸法

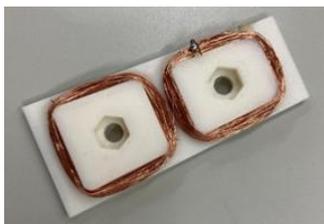


図 4 製作したコイル

- ② 製作したコイル 54 個を，コイル固定円板に固定する．円板は中央の回転軸で支えられており，任意のスピードで回転することができる．測定用のネオジム磁石（40×40 mm，厚さ 10 mm）を‘てこ’の先端に取り付け，コイルの回転する方向に対して法線方向（8の字の上下方向）に磁石が動くようにして，磁石の中央が8の字コイルの中心に位置するように設定した．装置の全体図を図 5 に示す．

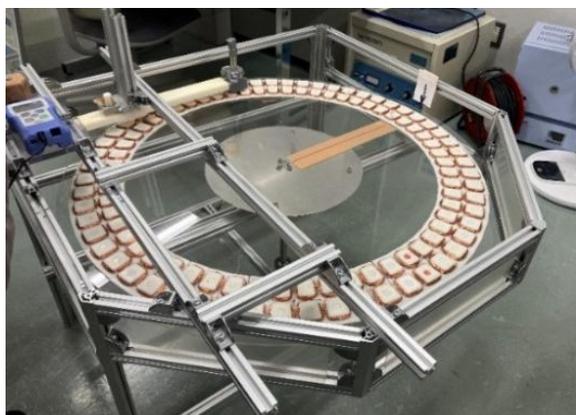


図 5 測定機の全体写真

- ① コイルを取り付けた円板を回転させ，磁石をコイル中心からずらした時にどの程度力を受けるのかを，磁石を取り付けた‘てこ’の他方に設置したデジタルフォースゲージ（日本電産シンポ FGP-0.2）によって計測する．浮上力によって磁石が静止する位置を 0 として，そこから円板を止めた状態で磁石を円の中心側に 1mm ずらしフォースゲージの零点設定をする．その後円板を回転させて 10～12 秒ほどフォースゲージの値を読み，その平均値をその位置における磁石にはたらく力とする．磁石の位置を 1mm ずつずらして計測を行い，浮上力によって 0 の位置に戻ることができなくなったところで，実験を終了した．これを低速回転時と高速回転時，そして，円板の中心方向とは逆の方向に 1mm ずつずらしていったときのデータをまとめる．測定時の磁石付近の様子を図 7 に示す．

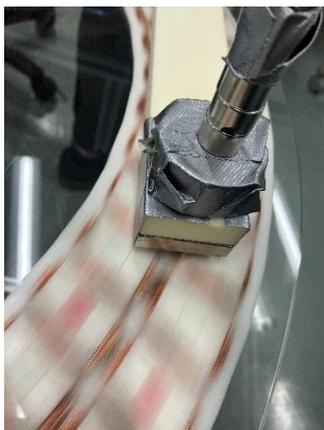


図6 回転する円板と磁石の様子

4. 結果

測定した復元力を図7に示す。

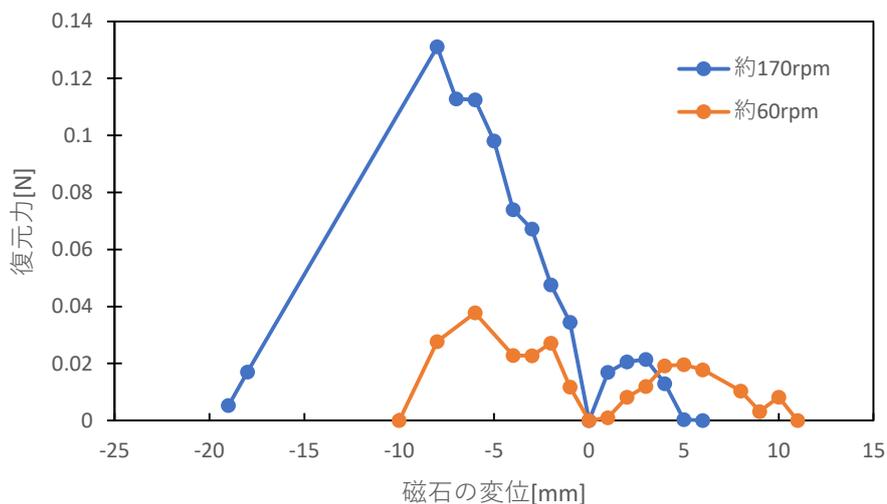


図7 磁石の変位と作用する復元力

図7の横軸は、図3における点線の部分（8字型コイルの2つのループの間）で力が発生しないところであり、これを横軸の原点に設定している。横軸の負方向は磁石を回転円板の中心側にずらした場合、横軸の正方向は回転円板の外側にずらした場合であり、各位置において0 mmに戻ろうとする復元力を計測して縦軸に示している。このグラフからわかることは、磁石が原点からどちら側にずれても、原点の位置に戻すように復元力が作用していることである。また、回転数が速いほど、大きな力がはたらいっている。高速回転時は回転円板の内側に変位したときのほうが外側への変位よりも強くなっていることがわかる。高速回転の時ほど回転の内側と外側のコイルの磁石に与える浮上力の差が大きいことがよくわかる結果となった。また、回転時に磁石がコイルの上部に来ると‘ブーン’という音を発していた。

5. 考察

はじめに、磁石が8の字コイルの中心（図3の点線）からどちら側に変位しても、元の位置に戻すように復元力がはたらいていることが確認できる。その力は、高速回転時の方が、低速時に比べて大きいことがよくわかる。これは、ファラデーの電磁誘導の式からもわかるように単位時間あたりに変化する磁束が回転数に依存しているためである。円運動では $v=r\omega$ の関係式からわかるように回転数が大きいと、磁石とコイルとの相対速度が大きくなり、コイルを貫く磁束の変化が大きくなることから発生する電磁力も大きくなったと考える。

次に磁石変位の方向の違いによる復元力の大きさを考える。ファラデーの電磁誘導の式やローレンツ力の式からわかるように、復元力はコイルの面積に比例することが一般的に知られている。これは面積が大きいと磁束の変化量も大きくなり、発生する誘電起電力、誘導電流が大きくなるからであり、つまり復元力はコイルの面積に比例する。

しかしながら、今回の実験では、図7の横軸の変位の方向に着目して復元力を見ると、円の中心側（負の方向）に位置するコイルは、コイル面積が小さいにも関わらず外側（正の方向）に位置するコイルよりも磁石の復元力が大きく、力が及ぶ範囲も広い傾向になった。これは高速回転時ほどより顕著に表れている。なぜこのような結果になったのかを考えると、実験器具や実験方法の問題点が見えてくる。まず、円板を手動で回転していることから、回転速度が安定しておらず、また、加速時の力によって振動が発生したことがある。次に、円板を回転するにあたって円板を支えているのは円の中心についているベアリング軸のみのため、ポリカーボ樹脂でできている円板はコイルの重さによって歪み、永久磁石の磁束が一定だとしても、円板の歪みによって磁石とコイルの距離を一定にできていないことが考えられる。最後に各コイルの個体差によるものであると考える。54個のコイルの規格を細かく設定し、巻く方向や丁寧な巻き数等を調整することで、安定的な数値を得られたのではないかと考える。

6. 結言

今回の実験を通して、電力供給を行わず電磁誘導の仕組みを用いることで使用した永久磁石が復元力を受けることが確認できたが、実験中にもあったように受ける力の差異が大きく磁石がなかなか安定しなかった。実験結果からも得られたように、電磁誘導によって磁石をより安定させるためには各コイルの巻き方や形状の仕様、磁石とコイル間の距離、安定した回転数をより工夫して実際に超電導リニアで使用されるような形にして全てのコイルの品質を揃えることができれば、磁石を安定させた位置で、なおかつ浮上現象をより顕著に実現して実験を行えたと思う。今回の目的にあるように浮上の力に着目し、実際の車両では磁石の走行の部分をコイル円板の回転に置き換えることによって磁石と8字型コイルとの相対速度を実現し、復元力の観察、測定を行うことで、超電導リニアの浮上原理を改めて確認できた。

参考文献

- ・山梨県立リニア見学センターWeb サイト, リニアの仕組み
<https://www.linear-museum.pref.yamanashi.jp/about/structure.html>