

超伝導コースターの磁気力測定

システム科学技術学部 機械工学科

1年 藤田 恭平

1年 本間 竜也

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

教授 佐藤 明

1. はじめに

超伝導はリニアモーターカー（JR-Maglev）などに使われている技術である。後述する超伝導磁気浮上によって磁石と超伝導体との間隔を保持した状態で支持する。さらに、磁場が変化しない方向には超伝導体が移動可能で、摩擦抵抗がないため効率よくエネルギーを運動に変換できる。このような非接触浮上の利点に興味を持ち、超伝導の原理を学習し、それを用いた最先端技術について理解を深めるために本研究を行う。超伝導体と磁石の間に作用する力の大きさを調べ、どの程度の力が加わると、超伝導体が磁石レールから外れる(脱線する)のかを検討する。

2. 超伝導と磁気浮上の原理

2-1 超伝導とは

ある温度以下で直流電気抵抗がゼロになると共に、完全反磁性を示す物質の状態である。完全反磁性とは、磁場強度と大きさが等しく向きが反対に磁化する磁氣的性質のことである。超伝導を示す物質のことを超伝導体と呼ぶ。

2-2 磁気浮上の原理

図1に超伝導磁気浮上の様子を示す。超伝導体内の結晶格子欠陥、析出物、結晶粒界などの微小領域(ピンニング・センタ)によって、超伝導体の内部に入り込んだ量子化磁束が“ピンで留めた”ように捕捉されることをピン止め効果という。ピン止め効果によって超伝導体と磁石の位置関係が固定されて、センサ制御を使わなくても安定して浮上することが超伝導体の磁気浮上である。磁場が変化しない磁石の動き(例えば図1の円柱磁石が回転する)は、超伝導体のピン止め磁束に影響しないので浮上したまま運動することができる。同様に、永久磁石のレール上に超伝導体が浮上して移動することも可能であり、これを利用した超伝導コースターがある。



図1 磁気浮上の様子
(上：永久磁石 下：超伝導体)

2-3 超伝導コースター

自主研究グループが製作した超伝導コースターを図2に示す。この超伝導コースターは、由利本荘市内の子供や一般の方を対象としたイベントである科学フェスティバル（由利本荘市主催）に毎年出展しており、今年度も私たちが担当して参加した。

このコースターは、磁石レール上に浮上した超伝導体が1mほどの高さのスタート地点から、レールに沿って滑り降りるものである。磁石レールは曲がりくねっており、浮上だけでなく壁面走行やぶら下りの箇所もあるが、超伝導体は脱線することなくレールに沿って摩擦なく進む。この超伝導コースターにおいて、超伝導体とレールとの間に作用する力を測定する。進行方向に対して横方向のズレに対する復元力を測定することで、どの程度まで脱線することなくレール上に安定浮上を持続できるのかを検証する。

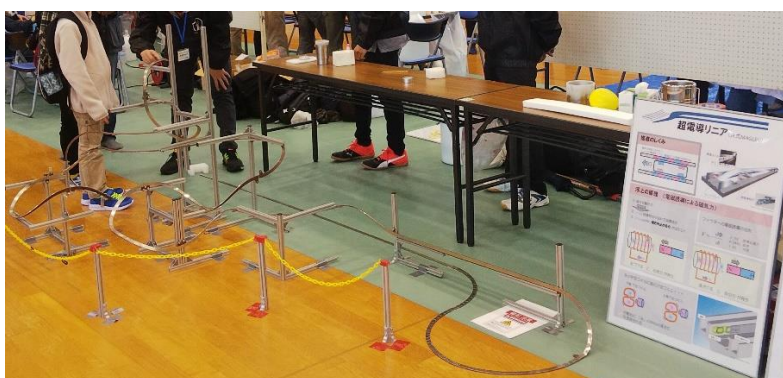


図2 科学フェスティバルにおける超伝導コースターの様子

● 実験手順

- (1) 測定には、レールと同じ磁極配置で進行方向長さは短い（磁石2個分）ものを使用する（図3）。ネオジム磁石の3列がN-S-Nの極になって超伝導体に向く。これによって超伝導体は極が変わる横方向には移動せず、極が変わらないレールに沿っては移動できる。この磁石をポリエチレン樹脂でフォースゲージの測定部に固定した。
- (2) 測定の前に、磁石の磁束を超伝導体にピン止めさせる。動かないように断熱容器内にグリスで固定した超伝導体の上に厚さ5mmのアクリルスパーサーで間隔を作り冷却用磁石レールを載せて、液体窒素で15分間冷却する。図4に冷却の様子を示す。
- (3) 冷却後、冷却用磁石レールを除いて、測定用のレールを取り付けたフォースゲージで進行方向に対して垂直方向の力を測定する。フォースゲージはx軸ステージに取り付けられており、0.5mm間隔で移動しながら測定した。図5に測定部の様子を示す。



図3 レールの取り付け

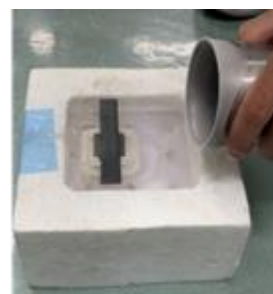


図4 冷却の様子

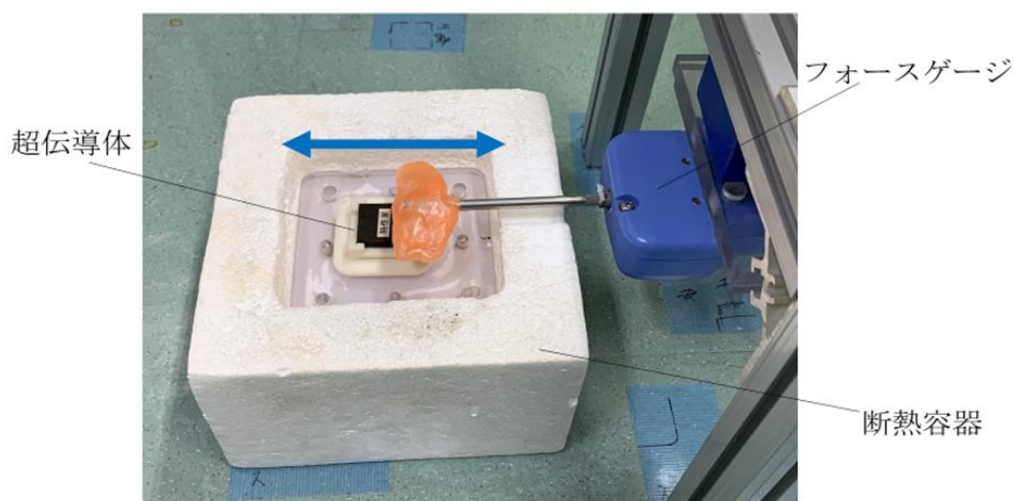


図5 測定部の様子

3. 測定結果

測定結果を図6に示す．原点 ($x=0$) は冷却した時の初期位置である．力の大きさは原点付近では負の傾きであり，これは原点に引き戻すように復元力が作用していることを示している．およそ $x=\pm 4$ mm までは変位が大きくなると復元力も大きくなる．復元力のピークは $x=\pm 4$ mm の位置で，復元力の大きさの平均値はおよそ 0.05 N である．変位がそれ以上大きくなると復元力は小さくなり，およそ ± 7 mm でゼロを超えて力の符号が反転した．これは磁石をレールから遠ざける向きに力が作用していることを示す．この遠ざける力は変位とともにさらに大きくなり， ± 10 mm でピークの後，徐々にゼロに近づく．

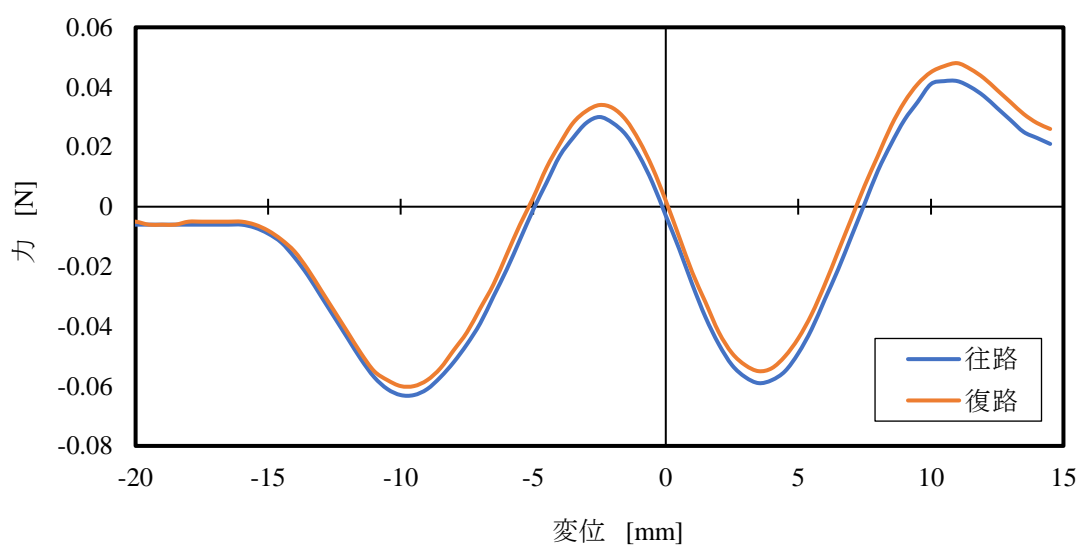


図6 磁石レールと超伝導体との間に作用する力の横方向成分

4. 考察

実験結果から、復元力の大きさの最大値がおよそ 0.05 N とわかったので、計算によりどの程度の半径までカーブを脱線せずに通過できるか求める。

カーブを通過するときに超伝導体に作用する遠心力を F [N]、超伝導体の質量を m [kg]、半径を r [m]、物体の速度を v [m/s] とすると

$$F = mv^2/r$$

であるから半径 r は

$$r = mv^2/F$$

ここで重力加速度を g [m/s²]、超伝導コースターの始点の高さを h [m]、カーブの位置の高さを h' [m] とすると力学的エネルギー保存の法則より速度 v は

$$v = \sqrt{2g(h-h')}$$

以上より求める半径 r は

$$r = 2mg(h - h')/F$$

となる。

ここでは計算を簡単にするため、コースターの始点の高さとカーブする高さの差は 1.00 m、重力加速度を 9.8 m/s²、空気抵抗は考えないものとする。今回使用した超伝導体の質量は 20.75g である。上記の半径を求める式にそれぞれの値を代入すると

$$r = \frac{2 \times 0.02075 \times 9.8 \times 1.00}{0.048875}$$
$$r = 8.321$$

したがって、今回の条件を用いた超伝導コースターは半径 8.32 m までのカーブに対応可能となる。実際に製作したレールのカーブは半径 0.03 m であり、そのカーブを脱線せずに進むことができる。実験結果から求めた値と実際が異なるのは、実際は空気抵抗などで計算ほどのスピードは出ていないことと、測定のために装置の都合で超伝導体と磁石間の距離が少し遠いために実際の走行よりも力が弱くなったためだと考えられる。

5. まとめ

超伝導コースターのレールと走行する超伝導体との間に作用する力を測定し、遠心力の計算からどの程度の半径カーブまで脱線しないかを調べた。測定から求めた結果と、実際の値は異なったが、その原因は明らかであり、超伝導体と磁石との間の距離によって曲がるための復元力が大きく変わることがわかった。

測定する際に、変位を変えてから計測値が安定するまでに時間がかかり、また液体窒素の補充によっても値が変化したり、霜が付着して値が変化するなど、測定の困難さを体験した。超伝導体と磁石との距離などいろいろな条件を変えて測定することで、さらに超伝導の原理を用いた技術の理解が深まると考えられる。