

磁気浮上に関する研究

システム科学技術学部 機械知能システム学科

1年 金沢 威風

1年 高橋 勇毅

1年 太田 奨

指導補助 機械知能システム学専攻

1年 和田 祥平

指導教員 機械知能システム学科

助教 二村 宗男

教授 佐藤 明

1. 研究の背景

磁気浮上は、その効率の高さから超電導リニア（JR式 MAGLEV）を始めとする様々なシステムが開発され一般的になってきている。私たちは、そういった非接触で物体が浮上する現象について興味をもつと同時に、その原理を深く理解するために模型を製作して磁気浮上を再現し、どれほどの力が発生するのか調べる。

2. 浮上原理

超電導リニアの浮上原理に着目すると、両サイドのガイドウェイに敷き詰められているコイルが「8」の字型をしていることが確認できた。図1はコイルと車両に搭載された磁石の位置関係による磁極を模式的に表したものである。この8の字コイルの傍を磁石が高速で通過する際にコイルに誘導電流が流れ、「8」の字のため上部と下部の異なる極が磁石との吸引力と反発力を生み出し、中心位置(図1の点線位置)での浮上を実現される。

浮上力は、次式の「ファラデーの電磁誘導の法則」から求められる起電力 V に比例する。ここで、 N はコイルの巻き数、 Φ はコイル断面を通過する磁束を表している。

$$V = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

この式からコイルの巻き数とコイルを通過する磁束の時間変化がより大きな浮上力を得ることに影響していることが確認できる。また、磁束の時間変化 ($\Delta \Phi / \Delta t$) は磁石の磁束密度とコイル面積にも関係している。

本研究では超電導リニアの浮上原理を再現する模型として図2に示すようにアクリル板に複数のコイルを配置して回転させ、磁石に大きな浮上力を得るためには

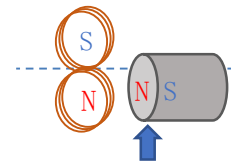


図1：超電導リニアの浮上原理

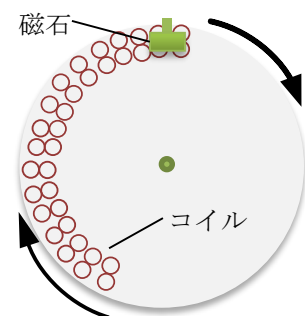


図2：製作モデルの模式図

どうすればよいかを、過去の自主研究で試作された旧式モデルを基に改良を加えて追究していく。

3. 浮上モデルの製作

前述した通り、より大きな浮上力を得るためには、コイルの巻き数とコイルの面積を大きくすることが有効である。そこで、図3に示すように様々な形状のコイルと、導線の太さについて試行錯誤し、電磁誘導の効率と作業性を考慮してコイル形状を検討した。ここで、最終的に決定したコイルの形状と旧式モデルのコイルの形状の比較を図4に示す。



図3：試行錯誤したコイル

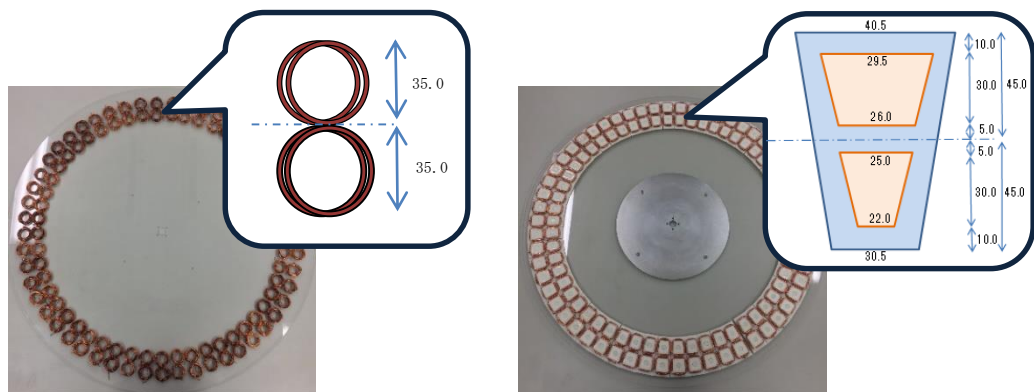


図4：旧式モデルのコイル(左) と今回の製作コイル (右)

旧式モデルのコイルは円板に固定した際、コイルとコイルの間に隙間が大きく、磁束のロスがあった。そこで、今回のコイルは、円周をコイルの個数で分割して余白が最小限になるように考慮した。その際に、コイル形状が複雑で、精度も必要になったことから、コイルの土台をCADで設計し3Dプリンタで造形して導線（ポリウレタン被覆銅線φ0.8mm）を巻くことで計58個のコイル1つ1つを製作した（図5）。なお、コイル1個当たり5回×4層巻き、計20回巻きとした。製作したコイルを、アクリル円板（図6）に樹脂製ボルトとナットで固定し、回転フレームに取り付けた。

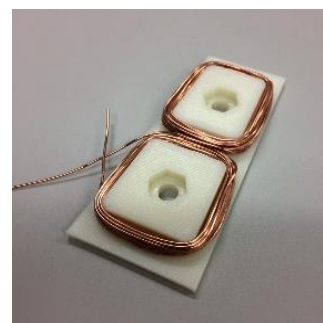


図5：製作したコイル

予備実験として、図7のアーム先端に永久磁石を取り付け、コイル円盤を高速回転させた。磁石の重量を、アームの他端の重りと釣り合わせることで打ち消して、微小な力でも動くようにした。コイルの回転によって磁石

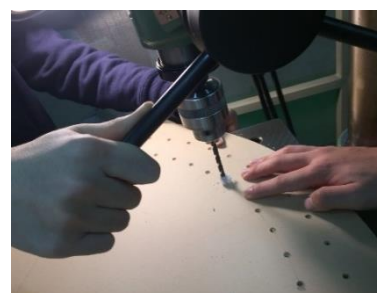


図6：コイル固定円板の加工

に浮上力がはたらき、アームが持ち上がることを確認できた。

円盤の回転によって得られた浮上力を測定するために図 8 のような測定システムを製作した。フォースゲージ (SIMPO 製 FGP-0.2) のプローブ先端に磁石 (ネオジム磁石: 70mm×40mm×5mm, 105g, 残留磁束密度 1200mT) を取り付け、円盤が回転したときに得られる力を計測する。計測値を±1V でアナログ出力し、AD 変換器 (USB Instruments 製 DM1M12) によって 12Bit のデジタル変換を行う。このデータをパソコンに取り込み、ロガーソフト (Easy Logger) によって記録した。

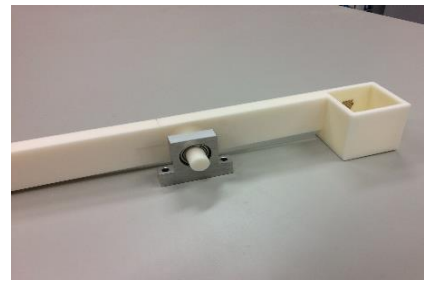


図 7 : 磁気浮上を確認するアーム

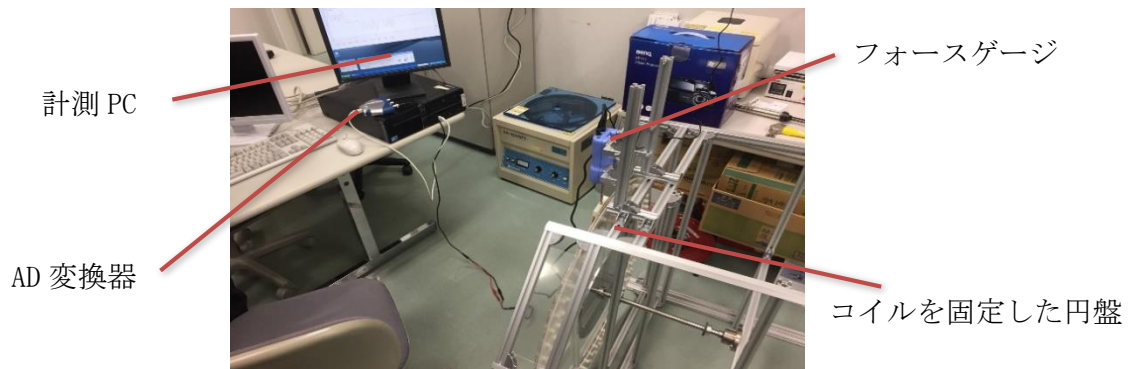


図 8 : 浮上力測定システム

4. 実験結果

製作した装置で、コイルを回転し、磁石にはたらく力を測定した。磁石の位置は図 9 に示す x の値が 22.5 mm と 25.5 mm の 2 ヲ所について測定した。

一定の回転で 1 分間計測した力の平均値を表 1 に、グラフを図 10 に示す。



図 9 : 回転盤と磁石の位置関係

表 1 : 各条件に応じて得られた浮上力 F [mN] の値

磁石位置 x [mm] \ 回転速度 v [rpm]	22.5	25.5
100	-0.585	1.230
150	-0.247	4.968
200	-4.463	2.646

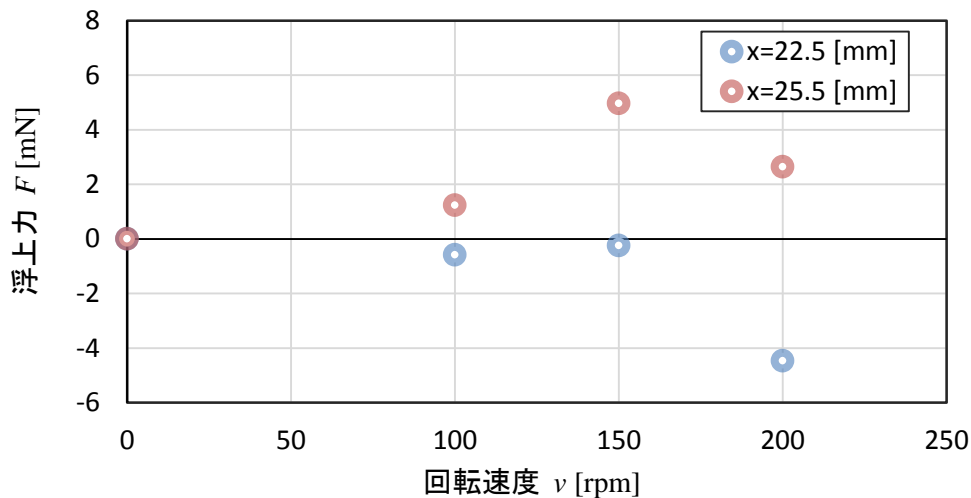


図 10 : 回転速度による浮上力の変化

上記の結果より、回転の増加とともに浮上力の絶対値がおよそ大きくなっている。

$x=25.5$ では正（上向き）の力、 $x=22.5$ では負（下向き）の力が大きくなっており、コイルの中心に向かう力が得られていることが確認できた。この力によって、超電導リニアは一定の高さで安定して浮上走行が可能である。

しかし、 $x=25.5$ では回転速度 200 rpm において力が減少している。この原因として、今回の測定では手で円盤を回転していたため、測定中の回転速度の低下が考えられる。その他、共振などによるフレームの振動による測定誤差などが考えられる。

5. まとめ

今回、超電導リニアの浮上原理について学び、これを再現するために、58 個のコイルを巻き、モデルを製作した。発生する力が小さいことが予想されたことから、効率的に磁気力を測定できるように磁束ロスの少ないコイルを設計し製作した。

コイルと磁石との相対速度の増加によって力が発生し、磁石を「8」の字の中心位置に留まり続ける向きに作用することを確認した。また、アーム(図 5)に取り付けた永久磁石の動きから、磁気浮上の原理そのものを視覚的に体験することができた。