

レールを組替えられる超電導体磁気浮上ジェットコースターの試作

多田 康平

京都大学 大学院工学研究科 附属桂インテックセンター

京都大学 環境安全保健機構 低温物質管理部門

1. はじめに

超電導体のマイスナー効果とピニング効果を利用して、液体窒素温度に冷却した高温超電導体を、ネオジム磁石を並べてつくったレールの上でジェットコースターのように走行させる、いわゆる「超電導体磁気浮上ジェットコースター」は、液体窒素や超電導をテーマとした人気のあるデモンストレーションのひとつとして広く行われている。その原理や構成はいくつかの文献に見出すことができる^[1-3]。

一般的に超電導体磁気浮上ジェットコースターのレールは、曲線状あるいは環状の金属板を土台として、その上にネオジム磁石を敷詰めることで製作される。そして、土台の金属板に柔軟性がなかったり、レールをパーツに分解することができなかったりするために、一度製作されたレールは、容易には組替えたり製作しなおしたりすることができないのが普通である。

もしレールを組替えることが容易にできれば、見学者がレール組立の場面で積極的に参加できるようになり、この超電導体磁気浮上ジェットコースターのデモンストレーションをより楽しく、より効果的なものにできるのではないかと考えた。そこで市販の子供向けのおもちゃを参考にして、組替えられるレールを検討、試作したので、報告する。

2. 検討と試作

レールの組替えを可能とするために、長い1枚の金属板を土台とするのではなく、比較的短い金属板に磁石を取り付けたパーツを多数用意し、それをつなげることでジェットコースターのレールを組立てることを考えた。正方形や長方形といったブロック形状のレールパーツを組合わせて1本の長いコースをつくる、論理的思考力の養成やプログラミング教育を志向したおもちゃが市販されている。そのようなおもちゃの例としては、株式会社くもん出版の「ロジカルルートパズル」^[4]や「ロジカルロードメーカー」^[5]が挙げられる。これらのおもちゃを模した、正方形のブロック状のパーツを製作することにした。株式会社タカラトミーの「プラレール」^[6]のような、細長い形状のレールパーツを製作することも検討したが、汎用の工作機械を用いて金属板を曲線状に切削したりパーツ末端のジョイント部分を加工したりすることが困難に思われたので、今回はこのようなレール形状は採用しなかった。

正方形のパーツから組替えられるレールを構築するために必要と考えた3種類のパーツを図1に示す。曲線パーツと直線パーツは、これらをつなげてレールをつくるための部品である。始点・終点パーツは、周回コースでは必要ないが、一本道のレールをつくる際に末端に配置し、レール上を走行してきた超電導体がレール末端から落下するのを防ぐ役割を担う。これらのパーツを組合わせれば、図2に示すように、多様なレールを組立てることができると考え、このような設計とした。これらの3種類のパーツは、いずれも正方形の金属板の上にネオジム磁石を短いレール状に配置して製作することとした。金属板の材質としては、非磁性であること、低温脆性を示さないこと、切削加工性が良いこと、比重が比較的小さく取り回しやすいことから、アルミニウム合金を選択した。磁石の配置としては、文献^[2]を参照して、ネオジム磁石を3列並べ、超電導体の進行方向に平行な方向には同じ極が並び、進行方向に垂直な方向にはN極とS極が交互になるようにした。

今回は試作のため、図1に示した3種類のパーツをすべて製作するのではなく、曲線パーツのみ4枚製作することとした。4枚の曲線パーツがあれば、周回コースも、一本道の周回でないコース（ただし始点・終点パーツが無い場合、末端で超電導体は落下する。）も、両方つくることができからである。図3に曲線パーツの設計図を示す。製作は以下に行った。厚さ5mmのアルミニウム板（A5052）を一辺150mmの正方形に切り出した。ネオジム磁石は、一辺10mmの正方形で厚さ5mm、M3皿ネジ穴付きのもの（株式会社サンギョウサプライ、材質N35、磁化方向は厚さ方向、表面磁束密度370mT）を採用した。この磁石を3列、90度の同心の円弧状になるよう並べることとした。これらの円弧の中心

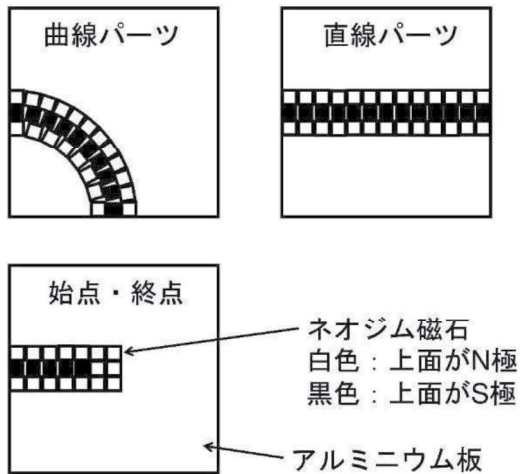


図1 3種類のレールのパーツ。

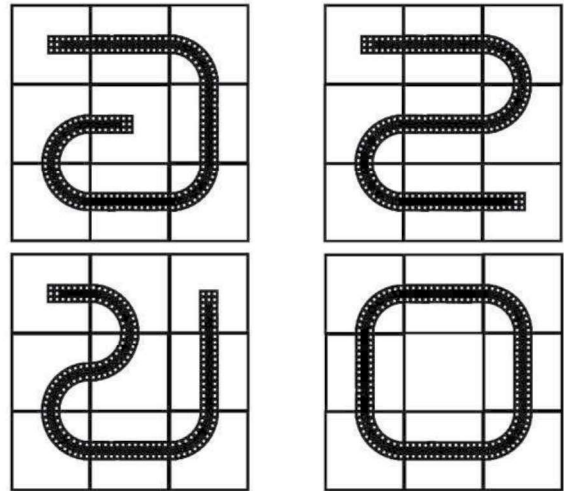


図2 3種類のパーツを使ったレール組立例。

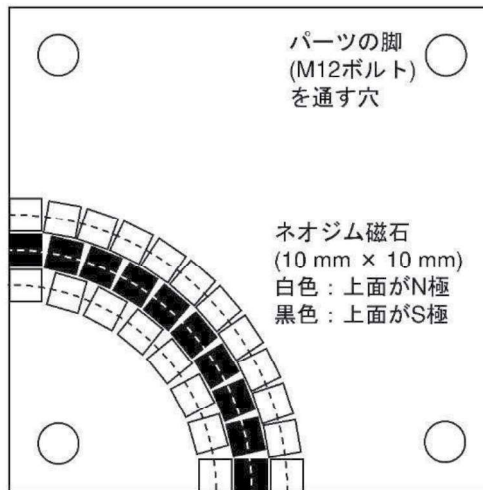


図3 曲線パーツの設計図。

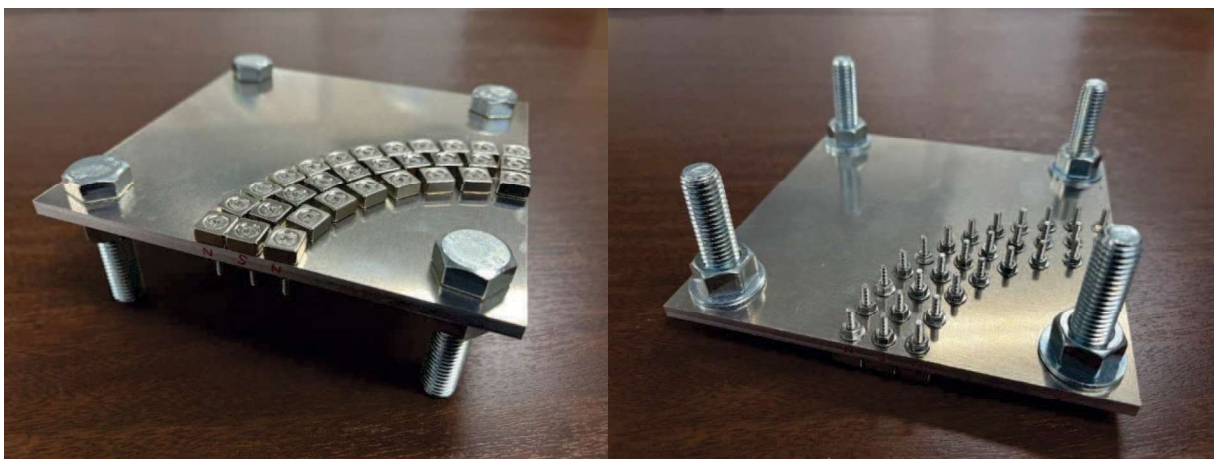


図4 製作した曲線パーツ（左：表側、右：裏側）。



図5 磁力によってパーツがずれる様子。

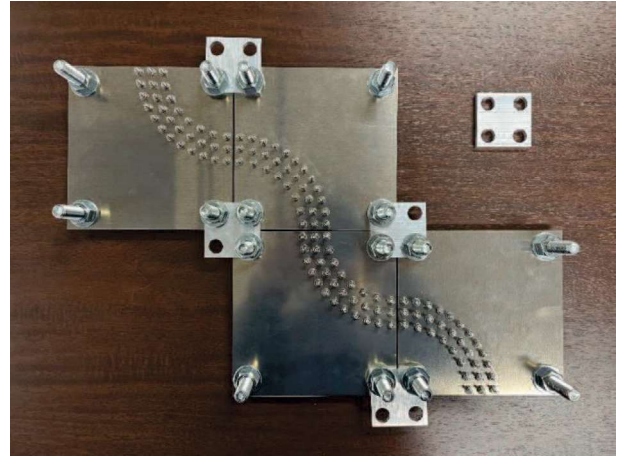


図6 ジョイントで曲線パーツを組合わせた様子。

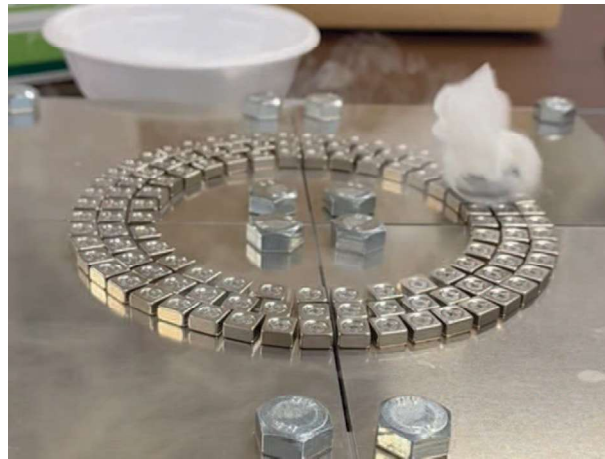


図7 環状に組立てたレールでの走行テストの様子。

はアルミニウム板のひとつの角に一致させ、円弧の半径は、内側から 64 mm、75 mm、86 mm とした。結果、曲線パーツ 1 枚を製作するのに 30 個の磁石を要することとなった。アルミニウム板のネオジウム磁石を固定する 30 箇所に M3 皿ねじを通す貫通穴を開けた。非磁性のステンレス (SUS304) でできた M3 皿ねじ、ナット、ワッシャーでネオジウム磁石をアルミニウム板に取付けた。磁石を固定した M3 皿ねじの端がアルミニウム板の裏面に飛び出したため、そのままでは曲線パーツをテーブル等の上に安定して置くことができなかつた。そこで、アルミニウム板の四隅付近に M12 ボルトを固定するための貫通穴を開け、市販の M12 ボルトを脚として取付けることで、曲線パーツを安定して置けるようにした。こうして製作した曲線パーツの写真を図 4 に示す。

3. 組立と走行テスト

複数個の曲線パーツを隣り合わせに置いていくだけでは、首尾よくレールを組立てることができなかつた。それは、図 5 に示すように、超電導体の進行方向に垂直な方向には磁石の N 極と S 極が交互になるように配置されているために、磁石 1 個分ずれている状態で引力がはたらき安定だからである。このような磁力に対抗してレールを正しく組立てられるようにするため、ジョイント (連結するためのパーツ) を製作した。手近にあったアルミニウム板 (A6063) を一辺 50 mm の正方形に切り出し、M12 ボルトが通るように貫通穴を開けてジョイントを製作した。ジョイントの材質としては、切削加工性等の利点のためにアルミニウム合金を選択したが、必ずしも A6063 である必要はない。図 6 に、ジョイントを

使用して曲線パーツ 4 枚を組合わせてつくった、蛇行した一本道のレール（裏側）を示す。図 6 右上に、単体のジョイントも併せて示す。実際はこのジョイントを使用しても図 5 に示したようなパーツのずれの問題は完全には解決しなかったが、ジョイントをはめ込み、曲線パーツの脚として取付けられている M12 ボルトとナットを固く締めることで、曲線パーツの動きの自由度が制限されて、超電導体の走行に支障のないレベルでレールを組立てることができた。

図 6 のような蛇行した一本道のレールから組替えて、環状に組立てたレールを用いて、高温超電導体の走行テストを実施した。その様子を図 7 に示す。この走行テストでは、市販の Gd-Ba-Cu-O 系の高温超電導体（直径 30 mm、厚さ 5 mm）を使用した。図 7 において走行している超電導体をキムワイプで包んでいるのは、このキムワイプに液体窒素をしみ込ませることで、超電導体の温度が短時間で上昇しないようにして、超電導体が比較的長い時間走行し続けられるようにするためである。この走行テストの結果、曲線パーツ内の曲線的なレール部分はもちろんのこと、曲線パーツ間の境目部分を通過するときにも、超電導体がスムーズに走行できることが確認できた。

4. まとめと今後の課題

市販されている子供向けのおもちゃを参考にして、ブロック状のパーツを組合わせる形態の、超電導体磁気浮上ジェットコースターのレールを検討、試作した。おおむね想定したとおりにレールを組立てることができ、組立てたレール上を超電導体がスムーズに走行できることを確認した。

今後の課題としては、以下の 4 点が考えられる。(1) 図 1 に示した直線パーツおよび始点・終点パーツを製作することで、図 2 のように、より大きく、より多様なレールに組替えられるようにする。(2) ボルト・ナットを緩めたり締めたりする作業は、作業者によっては必ずしも短時間で容易にできるものではないので、さらに短時間で容易に組替えられる仕組みを模索する。(3) 本稿では 2 次元（平面）的に組替えられるレールを試作したのであるが、それを拡張し、斜面の上昇、下降、ひねり、宙返りといった、3 次元（立体）的にも組替えられるレールの設計を検討する。(4) 上述の (2) および (3) の課題に関連して、パーツの製作を容易とするため、土台となる板の製作に 3D プリンタやレーザー加工機を使用することを検討する。

参考文献

- [1] H. Suzuki, K. Yogiashi, K. Kusano and M. Takashige, *Elect. Eng. Jpn.*, **116** (5), 18-27 (1996).
- [2] 高重正明、勝呂吏湖、橋本明美、山口俊久、明星大学理工学部研究紀要, **52**, 5-12 (2016).
- [3] 高重正明、山口俊久、清水俊希、明星大学理工学部研究紀要, **54**, 41-46 (2018).
- [4] 株式会社くもん出版、「かんがえる」シリーズ、ロジカルルートパズル
URL: <https://www.kumonshuppan.com/kumontoy/kumontoy-syousai/?code=54783>（最終閲覧日 2023 年 2 月 17 日）
- [5] 株式会社くもん出版、「かんがえる」シリーズ、ロジカルロードメーカー
URL: <https://www.kumonshuppan.com/kumontoy/kumontoy-syousai/?code=54731>（最終閲覧日 2023 年 2 月 17 日）
- [6] 株式会社タカラトミー、プラレール
URL: <https://www.takaratomy.co.jp/products/plarail/>（最終閲覧日 2023 年 2 月 17 日）