

# シンプル構造で目を引く物理実験2題

桐蔭学園高等学校教諭 鈴木邦彦

## 1. はじめに

桐蔭学園高校では、理数科の教育内容の一つである「課題研究」を高校2年の1年間を中心に行っています。今年筆者が担当したテーマのうち、物理の教材としても使えて学園祭でも好評を博した2つの実験を紹介します。どちらもシンプルな構造が特徴です。

## 2. 「磁気車輪」を用いた磁気浮上列車

磁石を埋め込んだ円板を磁気車輪といいます。これを銅板上で回転させると銅板内に生じる「うず電流」により浮上力が発生します。この磁気車輪を取りつけた車体を適当に配置した銅板上に置くと、浮上力と共に推進力および案内力を受けます。これにより細長い2本の銅板上をガイドレール（側壁）もなく数程浮上しながら、力強く加速していきます。リニアモーターカーのように多数の磁石やコイル、また制御回路等も一切ない単純構造ですが、車体の進む様子はまさに「磁気浮上体」です（写真1）。

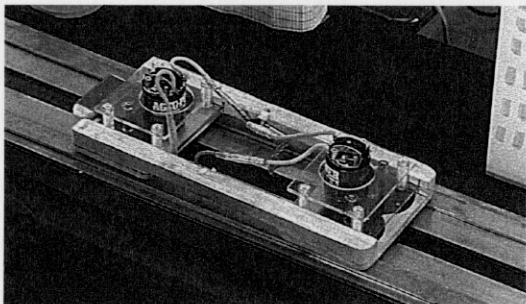


写真1

### ①磁気車輪の原理

磁石を金属板に対して動かすと、金属板内には「うず電流」が発生しますが、金属板に対して垂直に動かす場合はもちろん、平行に動かした場合も磁石はうず電流から常に「制動力（動きを妨げられる力）」を受けることになります（図1）。

ここで平行に動かす場合、金属板に対する相対速度がある程度大きくなると、制動力に加えて「浮上

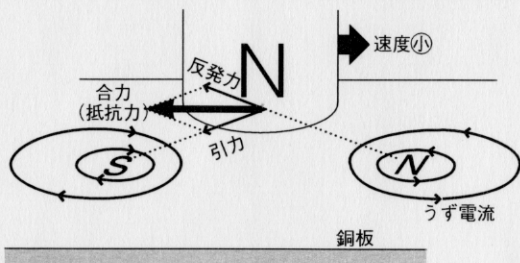


図1

力」も発生します。いくつかの資料から移動中の磁石の前後に生じるうず電流の「非対称」が原因であることが示されています（ネット上で「磁気車輪」で検索すると見ることができます）。要するに磁石の前方に生じるうず電流（磁石に反発力を及ぼす）の中心が、後方に生じるうず電流（引力を及ぼす）よりも磁石に近いために、それらの合力が進行方向に対して後方斜め「上向き」となるという説明です（図2）。うず電流が前後非対称となる原理は、まだ筆者（および周囲の物理教員）は実はまだ理解していません。「原理も正しく理解しないでけしからん」と批判を受けそうですが、一方で実際に製作したもので実感する浮上力は明瞭で、約0.8kgの車体を約4mm程浮上させることができます。

現在、JRで開発が進むリニアモーターカーも、軌道に埋めこまれた固定コイル上を、車載されている超伝導磁石が高速で通過することで誘導電流による浮上力を得ており、ある速度になって初めて浮上するわけです。コイルに対して磁石が直線運動するかわりに、銅板上で磁石を高速回転させることによって同様の効果を狙ったのがこの磁気車輪のアイデア

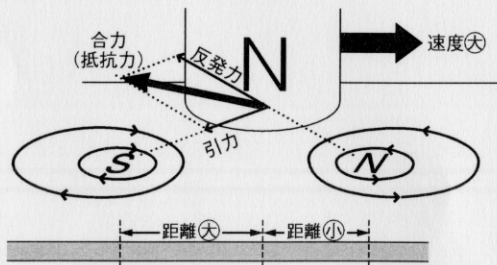


図2

アと思われます。

浮上の原理はさておき、「推進」と「案内」は比較的単純に理解できます。軌道となる2列の銅板は2層からなり、下層は主に浮上力発生用で左右の磁気車輪に大部分重なるように配置します。上層の細かい銅板は互いに逆回転する磁気車輪の外側に配置します(図3)。こうするとその部分に強い制動力が働くために車体全体として推進力を受けることになります。左右の磁気車輪を逆回転させることにより回転力はキャンセルします。同時にこの細かい銅板による浮上力は車体が軌道中心からずれたときに中心に戻す働きをも兼ねており、これによって機械的な壁が無くとも銅板に沿って進むことができます。これは磁気的な低い壁による効果と考えられます(図4)。

## ②材料

材料は身近なところから調達できます。磁石は可能な限り強力なものが必要ですが、教材会社でも扱っている「ネオジウム磁石」を用います。これを4個一組として一つの磁気車輪にN、S交互に埋めこみます。合計16個で車体一台分となります。

車体の素材は誘導電流によるエネルギー損失を避けるために非金属で作る必要があります。ただし磁石を埋めこむ円板は高速回転による遠心力に十分耐えるアルミ等の軽い金属で作った方が安全です。実際にアクリル材料で試作し、過剰な回転数を加えたところ破損して周囲に磁石と破片が飛び散ってしまいました。その他の材料は、軽量である程度の強度があればプラスチック、木材等が利用できます。

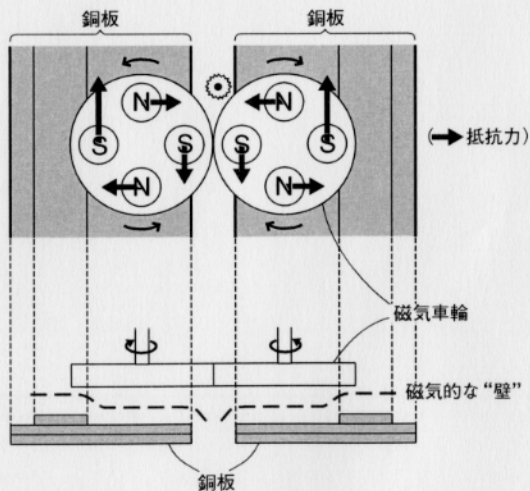


図3(上部)と図4(下部)

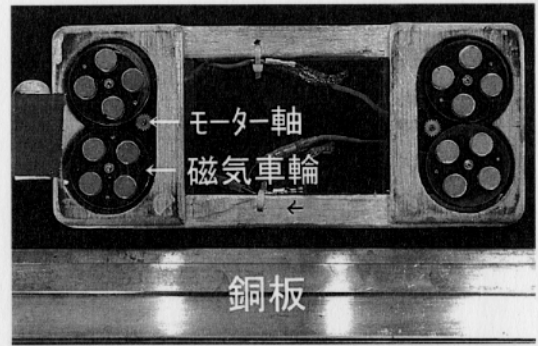


写真2

モーターは制動力に負けないパワーを持ったラジコンカー用を用い、ギアでさらに減速して必要なトルクを得ることができます。モーターやギア、その他の材料は模型店、DIY店等ですべて揃えることができます。写真2に、車体下部の様子を示します。

軌道となる銅板は高価ですから、なるべく専門の業者に依頼した方が価格も安く、また自由なサイズに切断してくれます。

電源は学校にある電源装置で間に合いますが、もし容量が足りなければ2台並列に接続して間に合わせる事も可能です。

## ③設計と製作

素人工作ですから、なるべく「工作しない」で完成させるのが早道です。適当な材料が集まったあとで、それらに合わせて設計します。構造自体は単純ですから、なるべく軽く作ることを念頭に置けば良いと思います。

ただ、磁石を埋める穴あけ作業や、磁気車輪のシャフトの軸受け等の工作は、どうしてもある程度の工作機械が必要となります。ボール盤や旋盤が揃っている学校は多くはないでしょうが、いわゆる「ミニ旋盤」と呼ばれるホビーユースの工作機械は価格も手頃で、これ一台あればちょっとした教材の製作に非常に重宝します。

表1 今回の制作データ

使用電池	ネオジウム磁石 $\phi$ 14mm×t 5mm
磁気車輪	$\phi$ 50mm×t 4mm×4個
モーター	田宮模型 Act Power Formula×2個
ギア歯数	モーター20、磁気車輪100、(比1:5)
車重	$\phi$ 50mm×t 4mm×4個
消費電力	約100W (6A×8V×前後2)

生徒の工作レベルは最初非常に低いものですが、道具になれてくるとある程度は自在に工作できるようになります。「物作り」を体験する良い機会にもなります。

#### ④実験と展示

まず磁気車輪を単体で回転させて銅やアルミ板に近づけてみると、大きな制動力を受けます。床に置いた銅板も磁気車輪の回転に引きずられて回転を始めてしまうほどです。この部分だけで物理の演示実験に使えます。

金属板の種類はいろいろ試してみましたが、浮上力の大きさは銅、アルミ、真鍮の順で大きく、組み上がった車体が浮上したのは結局銅板の場合だけでした。

また銅板の厚さや枚数については多くのデータを取ったわけではありませんが、厚さ3mmの銅板の場合、2枚重ねた状態で実用的な浮上力を得ることができます。厚い銅板1枚と、薄い銅板を多数重ねた場合の相違については未確認です。

銅板の配置は実験を繰り返しながら最適値を探していくこととなりますが、用意できる銅板のサイズに限りがありましたので他にもいろいろ考えられそうです。

車体への電力供給は左右の銅板にそれぞれ+、-接続し、パンタグラフ（浮上時にうまく接触するようなものなら何でもよい）から集電すれば自由に走行できます。

前後の磁気車輪を同方向に回転させた場合の車体の加速は予想以上に強烈で、学園祭では全長10mの軌道の端からスタートさせたところ、約2秒強でゴール地点に達します。一方、前後の磁気車輪を逆回転させると車体はその場に浮き上がって静止しますが、前後の重量バランスを崩すと、重い側（浮上高が小さくなる側）の推進力が勝ってゆっくりと加速します。

今回、結果的に浮上走行実験は大成功でした。磁気車輪の直下の銅板から常に浮上力を受けるため本質的に安定性の高い方法と考えられます。

理論面の理解に関しては今後の課題としたいと思います。

### 3. 簡単ホログラフィ

3次元画像を記録するホログラフィは、今では目新しさを感じるものでもありません（誕生後50年だそうです）。しかし、その製作には高度な技術が必要と思われる傾向もあります。ここでは誰でも簡単に、中学や高校の実験室ならどこにでもあるものを利用したホログラフィの製作法を紹介します。

#### ①原理

一般的に文献に示されている「フレネルホログラフィ」の配置図を図5に示します。レーザー光をハーフミラーで2光束に分け、各々レンズで拡散して、一方は物体に当てその散乱光を乾板に、もう一方は直接乾板に当てる（参照光）と、それらによる干渉縞が記録されます。現像後、乾板を元の位置に置いて参照光を当てると、3D像が浮かび上がります（再生）。これは干渉縞を回折格子とした一次回折光による虚像を見ていることとなります（図5）。光の干渉の教材としてホログラフィは魅力的ですが、実際に図5の実験をやってみようとしたとき、困ってしまう点は「ハーフミラーやミラー、乾板はどんな種類のものを用いればいいのか？またその入手方法は？調整方法は？」というところでしょうか。

完成品のホログラフィカメラを購入すれば全ては解決しますが、それでは実験の面白みもありませんし、何より高価です。本格的に実験するなら、大きな定盤や光学素子の支持金具、高精度の表面鏡やハーフミラーなどを揃えることになるのでしょうが、敷居は高くなるばかりです。

そこで多少問題はあっても、とりあえず3次元画像の感動を味わう方法はないものかと思い、図6のような配置を考えてみました。ミラーもハーフミラーも無く、被写体と乾板を並べて、レーザー光（顕

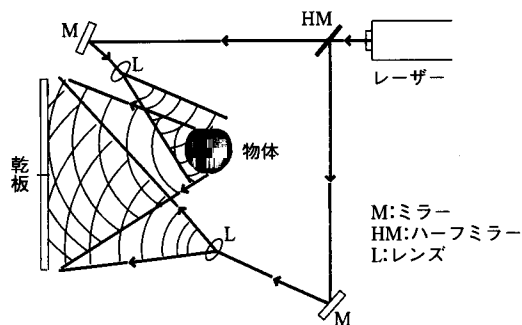


図5 一般的な配置

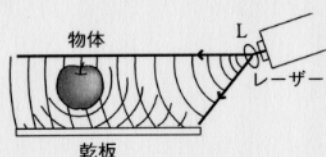


図6 今回の配置

顕微鏡の対物レンズで広げる)を当てるだけです。こんなものでホログラフィができるのかと思われるでしょうが、実際に写真3のように鮮明な3D像が浮かびあがります。右側に置かれたウサギの置物は、撮影時には左側の乾板内に見える再生像の位置に置かれていたものです。

### ②用意したもの

- ・ He-Ne レーザー
- ・ 顕微鏡対物レンズ (×40)
- ・ ホログラフィ用乾板
- ・ 乾板ホルダ (ありあわせのアルミ角材で製作)
- ・ 丈夫な台 (岩石研磨用鉄板)

このうち、乾板だけは普通の写真用感光材では粒子サイズが大きすぎて代用にはなりません。フィルム形式のホログラフィ用感光材もあり、ガラス板にはさんで使用します。こちらの方が安価です。

### ③実際の撮影と再生

乾板-被写体間の相対振動があるとまず失敗します。これらは丈夫な鉄板上に固定します。今回、被写体は剛性の高い陶器とし、また自作した乾板ホル

ダは瞬間接着剤で鉄板上に固定したところ、その後の実験はほぼ成功しました。レーザー光源の振動許容量はこれより甘いと考えられますので、鉄板から少し離れた位置に適当に固定します。乾板全体と被写体の両方にレーザー光を照射させるために、顕微鏡の対物レンズで拡散させますが、40倍でもさほど拡がらず、レーザー光源をある程度離して光束の大きさを確保します。

今回は低感度のロシア製乾板しか入手できなかったため、1回の露光時間は10分以上となり、近くに振動源(ドア閉めや人間が動き回る際の振動)がある間は失敗続きでした。露光中は暗室内でじっと息を殺していることになります。

配置上、注意すべき点は、

- ・ 乾板の全面に参照光が当たるようにする
  - ・ 中心の明るい部分は被写体に当てる
  - ・ 乾板の乳剤が塗ってある面を被写体側にする
  - ・ 被写体による影が乾板上に生じないようにする
- 位ですが、これらを満たす配置はほぼ決まっています。

現像処理は通常の写真と同じで、最後に漂白過程が加わります。漂白液等は乾板を扱っている業者から購入できます。再生は乾燥を終えた乾板とレーザーを撮影時の位置に置くだけです。撮影時と少々ずれていても全く問題ありません。

### ④メリットとデメリット

配置図や作例を見れば分かりますが、この方法の最大の欠点はレーザー光が逆光に近い状態、つまり斜め後方から被写体に当たることです。当然、再生像も逆光状態で再生されます。

一方、光路中にミラー等が一切ない単純構成のメリットで再生像は非常に鮮明です。そして何より、専門的な実験器具を必要とせず、また細かい調整もなく3D像を作ることができるのが最大のメリットといえます。



写真3

発行所 数研出版株式会社 編集部 TEL. (03) 3262-9591

東京 〒102-0073 東京都千代田区九段北1-12-11 TEL. (03) 3265-0811(代表)  
 京都 〒604-0867 京都市中京区烏丸丸太町西入ル TEL.(075) 231-0161(代表)

頒価 100円  
 (年3回発行予定)