

## 実験問題 2

実験問題は 2 問である。机の上にある実験器具は両方の問題に共通である。試験時間は 2 問で 5 時間である。

### 実験問題 2: 2 つの磁石に働く力, 安定性と対称性の概念

#### 導入

面積  $S$  の円形回路を流れる円電流  $I$  は  $m = IS$  の大きさの磁気モーメントを生み出す (図 1 (a))。永久磁石は、鉄原子(Fe)の持つ小さな磁気モーメントの集まりと考えることができる。そして、それぞれは円電流の作る磁気モーメントとみなせる。この磁石についてのアンペールのモデルを、図の 1(b)に示した。磁石の磁気モーメントの合計は、S 極から N 極へ点在する小さな磁気モーメントの和である。

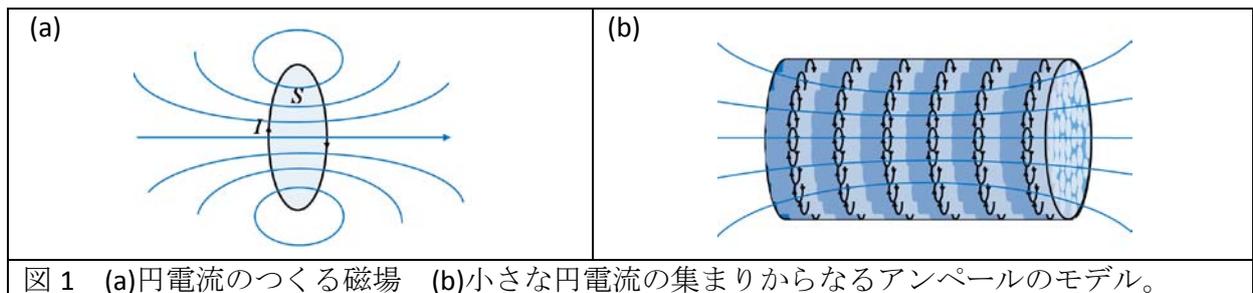


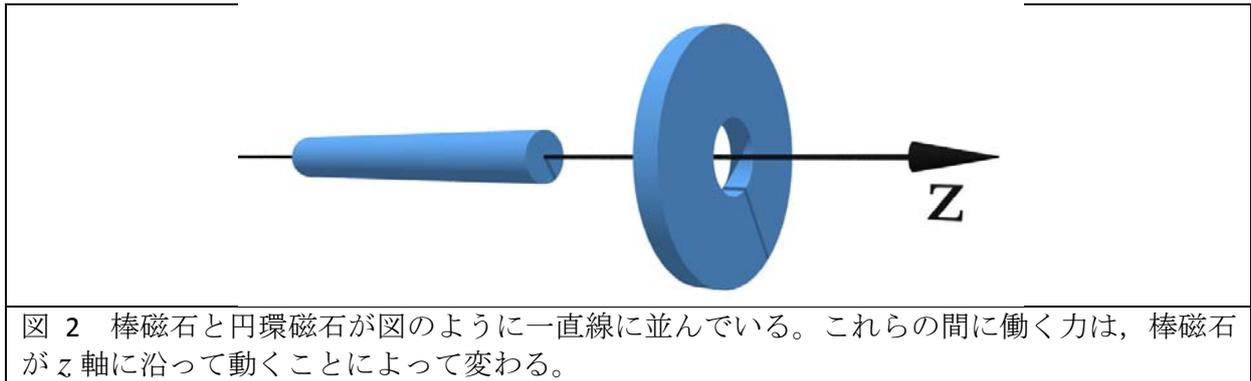
図 1 (a)円電流のつくる磁場 (b)小さな円電流の集まりからなるアンペールのモデル。

#### 磁石の間に働く力

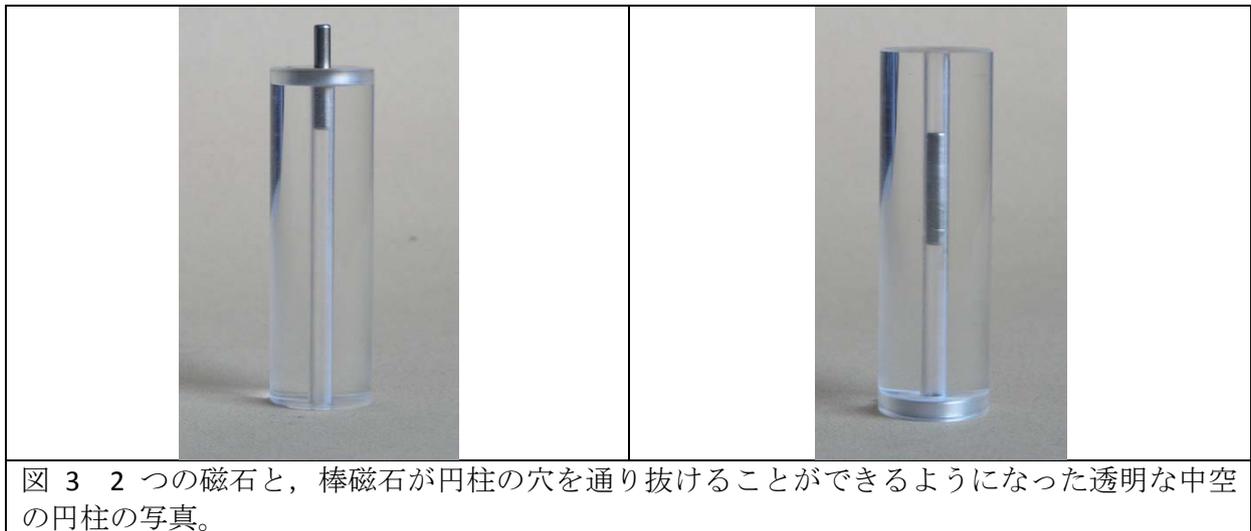
2 つの磁石の間に働く力を計算することは、難問である。2 つの磁石の同極は反発し、異極は引き合うことは知られている。2 つの閉じた電流間に働く力は、そこを流れる電流の強さ、形状、相互の距離に依存する。もし、その閉じた回路の 1 つを流れる電流の向きを反対にした場合、働く力の大きさは変わらないが向きが正反対になる。

この問題では、円環磁石と棒磁石の 2 つの磁石間に働く力を実験的に詳細に調べる。図 2 のように、幾何学的に 2 つの磁石の対称軸が一致する場合は興味深い。棒磁石は、 $z$  軸に沿って左側から、円環磁石を通過し、右側へ向かって動くことができる。

以下の問題では、磁石間に働く力を  $z$  の関数として見積もりなさい。2 つの磁石の中心が一致する場合を、原点  $z = 0$  としなさい。



対称軸 ( $z$  軸) に沿って動く棒磁石の運動方向を保持するために、 $z$  軸に沿って細い穴があけられている透明な円柱に、円環磁石がしっかりと埋め込まれている。棒磁石は、図 3 のように、その穴の中心を貫く  $z$  軸に沿ってのみ動く。その棒磁石は、 $z$  軸に沿って磁化している。



## 実験手順 (実験問題 2)

実験問題 2 で使用する実験道具は以下のとおりである。

1. ブロック (石) のおもりを載せた圧縮板。必要であればカバーシートの説明を読みなさい。
2. 電子天秤 (5000g まで計測可能であり、ゼロ点に補正する機能がある。もし必要であれば、カバーシートの説明を読みなさい。)
3. 端に円環磁石が埋め込まれた透明な中空円柱
4. 棒磁石
5. 細い木製の棒 (円柱から棒磁石を取り出すのに用いる。)

図4に示す装置は、磁石間に働く力を測定するために用いられる。上の板は上下を裏返し、細いアルミニウムの棒を下にせよ。細いアルミニウムの棒は、中空円柱に棒磁石を押し込むのに必要である。電子天秤で、棒磁石を押しこむ力（質量）を計測する。上の圧縮板は留めねじを用いて上下に動かすことができる。

**重要：留めねじは 360 度回転させると 2mm 動く。**

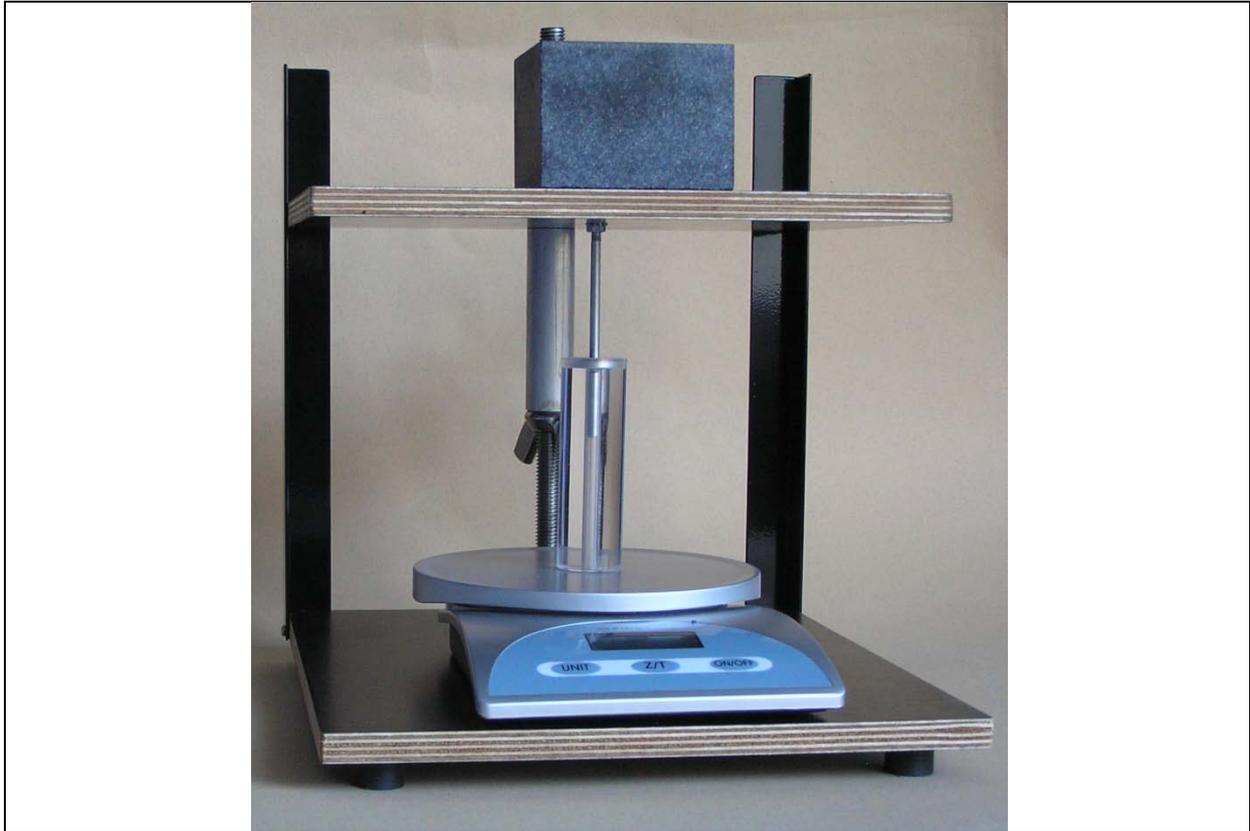


図4 実験装置を組み上げた写真。2つの磁石間に働く力を測定する方法を示している。

## 問

- ここでは、中空円柱を手で水平に持ち、木の棒を用いて実験しなさい。図2のように、 $z$ 軸が水平になっていると仮定して、2つの磁石がつり合う全ての位置関係を、実験を行うことによって決定し、解答用紙に図示しなさい。そして、安定 (S) または不安定 (U) を示すラベルに丸を付けなさい。安定点では、磁石に少し力を加えても元に戻る。 (2.5点)
- まず、中空円柱に磁石を入れた状態で、ゼロ点補正しなさい。次に、図4の装置を用いて、 $z$ 座標の関数として2つの磁石の間に働く力を決定しなさい。 $z$ 軸の正の向きを、透明な中空円柱の中に向かう向きとする（正の方向へ向かうとき、力も正とする。）。

力の対称性を見つけたら、解答用紙に力に関する式で書きなさい。磁気モーメントの配置が平行同じ向きのときは  $F_{\uparrow\uparrow}(z)$  で示し、平行逆向きときは  $F_{\uparrow\downarrow}(z)$  で示せ。

**重要：棒磁石の質量は無視（働く重力も無視）せよ。そして、磁石間に働く力の対称性を利用して、グラフの異なる領域に同じ測定値を用いなさい。**

測定値は、全て解答用紙に書きなさい。その際、実験値を記した表には、それぞれ、どのような磁石の向きと位置で実験したのかも合わせて図示しなさい。（例が挙げられている。） (3.0 点)

3. 問 2 の実験結果から、 $z > 0$  での  $F_{\uparrow\uparrow}(z)$  の  $z$  依存性をミリ単位のグラフに描き入れなさい。

曲線  $F_{\uparrow\uparrow}(z)$  と  $F_{\uparrow\downarrow}(z)$  の形を ( $z$  軸の正負の領域にわたって) 図示しなさい。それぞれのグラフについて、安定なつり合いの位置を点で書き入れ、問 1 と同様にその磁石の向きと位置を図示しなさい。 (4.0 点)

4.  $z$  軸を鉛直方向にとる。棒磁石の質量を考えると、本質的に新たな安定なつり合いの位置が現れるだろうか。もし現れる場合は、新たに現れるすべての場合を、問 1 と同様に、図で示しなさい。 (0.5 点)