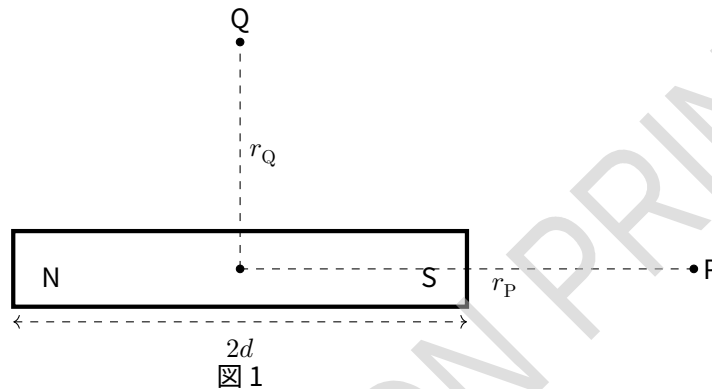


磁気ブラックボックス:

スマートフォンは、ホール効果を利用した磁気センサーを有しており、磁場を測定することができる。磁気センサーで、磁場の直交した3つの成分が測定される。磁気センサーはスマートフォンの回路基板上にあり、外部からは見えない。

磁石の磁場

図1は、長さ $2d$ と磁気双極子モーメント M をもつ小さな棒磁石を示す。



軸上の点 P における棒磁石による磁場の大きさ (B_{axial}) と磁石の垂直二等分線上の点 Q における磁場の大きさ ($B_{\text{equatorial}}$) は次の式で与えられる。

$$B_{\text{axial}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2Mr_P}{(r_P^2 - d^2)^2} \quad (1)$$

$$B_{\text{equatorial}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{(r_Q^2 + d^2)^{3/2}} \quad (2)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率 ($\mu_0/4\pi = 10^{-7} \text{N A}^{-2}$) であり、 r_P, r_Q はそれぞれ棒磁石の中心から磁場が測定される P 点と Q 点までの距離である。この問題では磁石を点双極子とみなす (すなわち $d \ll r_P, r_Q$ と仮定する)。

実験試験の試験ポータルで「EQ1-Magnetic Black Box」リンクをクリックせよ。

画面上のシミュレーションについて：

画面上に白い背景の方眼が表示される。この方眼の表示面は、実験が行われている鉛直面の一部である。表示面には4つのオブジェクトがある。

1. スマートフォン
 2. 青 (S) と赤 (N) に着色した磁石
 3. 均一な肉厚の黒色の中空パイプ
 4. 物差し (「SHOW/HIDE SCALE」ボタンをクリックすると有効になる)
- 方眼の間隔は 1cm である。

Experiment

Q1-2

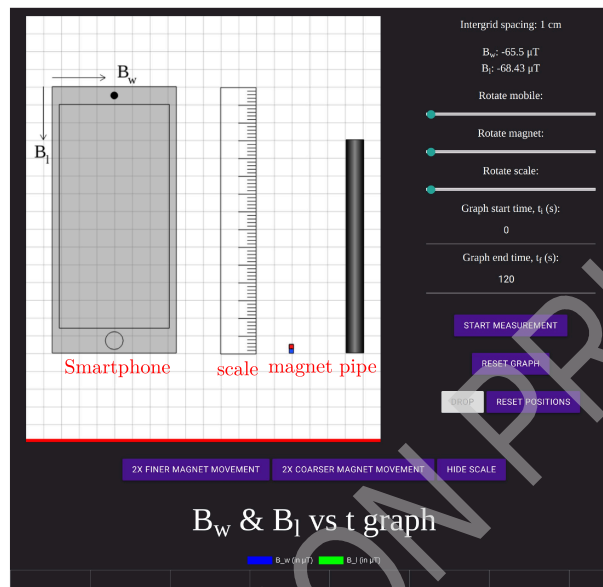


図 2: シミュレーションのスクリーンショット

実験準備：

マウスでドラッグすると、オブジェクトを移動できる。スマートフォン、物差し、マグネットも画面内で回転させることができる。回転制御スライダーは右側のパネルにある。スライダーをドラッグして向きを変えることができる。より細かく制御したいときは、スライダーをクリックした後、矢印キーを使用してオブジェクトを回転させることができる。

スマートフォンには、近くに置いた磁石の磁場を測定する磁気センサーが内蔵されている。スマートフォンの磁気センサーの正確な位置は示されていない。磁気センサーの位置に応じて、右側のパネルには、図 2 に示すように、スマートフォンによって測定された磁石の磁場の成分 B_w と B_l が、それぞれスマートフォンの幅方向と長さ方向の値で表示される。成分 B_w の正の向きはスマートフォンの表示面に向かって右向きである。成分 B_l の正の向きは、スマートフォンの長さ方向に沿って下向きである。

測定：

[START MEASUREMENT (測定の開始)] をクリックすると、時間の関数として B_w と B_l の変化のグラフも表示される。「RESET GRAPH」は、このグラフに記録されているすべての値を消去する。得られたグラフの曲線上にマウスを移動すると、データ点の値を確認できる。[Graph start time (グラフの開始時刻) (t_i)] と [Graph end time (グラフの終了時刻) (t_f)] の入力欄に時刻を入力すると、グラフの一部を拡大できる。

Experiment



Q1-3

スマートフォンは、高磁場にさらされると損傷する可能性がある。これを防ぐために、スマートフォンで測定された正味の磁場値が $6500 \mu\text{T}$ を超えると、測定が停止し、右側のパネルに「Maximum Magnetic field exceeded (最大磁場を超えた)」という警告が表示される。磁石がスマートフォンから十分離れると、すぐに測定機能は復帰する。

その他の機能：

磁石はキーボードの矢印キーで上下左右に動かすことができる。ただし、そのためには、マウスカーソルを方眼表示面上に置く必要がある。磁石のより細かい、あるいは、より粗い動きを実現するには、「2X FINER MAGNET MOVEMENT (磁石倍細動)」あるいは「2X COARSER MAGNET MOVEMENT (磁石倍粗動)」をクリックせよ。これらのボタンをクリックするたびに、動きは2倍細かく、あるいは、粗くなる。

重力は、画面の下部に向かって下向きである。床は赤い線で示されている。すべてのオブジェクトは画面の平面内にあると考えよ。パイプに関する詳細は、パート (B) の前に記載されている。

画面上の任意の場所に磁石を配置すると、磁石はその位置に静止して保持される。「Drop (ドロップ)」ボタンをクリックすると磁石が落下する。「START MEASUREMENT (測定開始)」ボタンをクリックしてから磁石を落とすこと。「RESET POSITION (リセット)」ボタンをクリックすると、磁石は最後に落とした位置に戻る。必要なら、オブジェクトを方眼表示領域の外に移動できる。

この実験では、磁石を点双極子とみなす。
この問題では誤差の評価は必要ない。

A.1 スマートフォンの磁気センサーの位置を求めよ。解答しやすいように解答用紙のスマートフォンを図の内側に細かい方眼が描かれている。細かい方眼の間隔は 2mm である。スマートフォンの適切な場所に「 \otimes 」を描き、磁気センサーの位置を示せ。 1pt

A.2 適切な軸を設定して直線グラフをプロットし、グラフから磁石の双極子モーメントを求めよ。利用した測定方法での記録データを表に記入せよ。 2.3pt

非磁性の材料でできた均一な肉厚を持つ中空のパイプが垂直に保持された状態で画面に表示される。

磁石をパイプ内に落とすには、磁石の位置をパイプの中心軸上に正しく合わせる必要がある。

「DROP (落とす)」ボタンをクリックすると、磁石が落下する。パイプ内の磁石の動きは見えない。磁石をパイプ内に落としたとき、磁石が下降するときに傾いたり回転したりしないと仮定せよ。

パイプは 3 つの異なる部分で構成されている：1 つの部分は木 (W) で作られ、別の部分は電気伝導率 $= 3.77 \times 10^7 \Omega^{-1}/\text{m}$ のアルミニウム (Al) で作られ、残りの部分は電気伝導率 $= 5.96 \times 10^7 \Omega^{-1}/\text{m}$ の銅 (Cu) で作られている。これらの3つの材料の順序は上記の通りであるとは限らない。

磁石が鉛直に (つまり、 y 軸に沿って) 落下した場合、磁石は次の運動方程式にしたがって落下する。

$$m\ddot{y} = mg - k\dot{y} \quad (3)$$

ここで、 m は磁石の質量、 g は重力加速度 ($g = 9.8\text{m/s}^2$)、 k はパイプ内の渦電流による抵抗力の比例定数である。木、アルミニウム、および銅の部分の比例定数は、それぞれゼロ、 k_{Al} 、および k_{Cu} である。次の手順に従って、磁石をパイプ内に落下させる。

Experiment



Q1-4

1. スマートフォン、磁石、およびパイプを適切に配置する。
2. 「Start Measurement (測定開始)」 ボタンをクリックする。
3. 「DROP (ドロップ)」 ボタンをクリックする。

磁気センサーは、パイプ内の渦電流によって生成される非常に小さな磁場は測定できない。磁石がパイプを通過して下降すると、時間の関数としての B_w と B_l のグラフが画面に表示される。

B.1 画面に表示される磁場と時間のグラフから、パイプを構成する材料の順番を決めよ。上から下の順に、パイプの材質の横に部分番号を記入して答えを示せ：1は上段、2は中段、3は下段である。 0.3pt

B.2 適切な直線グラフをプロットして、パイプのアルミニウム部分での磁石の終端速度を決定せよ。 2.6pt

解答用紙には、シミュレーション画面に似た方眼が印刷されている。この問題のデータを取得するために用いた、スマートフォン、パイプ、および磁石の正確な位置と方向を描け。スマートフォンは四角で示せ。

グラフのプロットに使用している関連データを表に記入せよ。パイプのアルミニウム部分の長さを決定せよ。パイプのアルミニウム部分の長さを測定するために、グラフから決める方法とグラフを使わずにデータから決める方法がある。グラフ/データを使用して長さを決定している場合は、表の追加の列を使用して、関連するデータを記録せよ。

B.3 適切な直線グラフをプロットして、パイプの銅部分の磁石の終端速度を決定せよ。パイプの銅部分の長さを決定せよ。パイプの銅部分の長さを測定するために、グラフから決める方法とグラフを使わずにデータから決める方法がある。グラフ/データを使用して長さを決定している場合は、表の追加の列を使用して、関連するデータを記録せよ。 2.2pt

B.4 パイプの木製部分の長さを決定せよ。パイプの木製部分の長さを測定するために、グラフから決める方法とグラフを使わずにデータから決める方法がある。グラフ/データを使用して長さを決定している場合は、表の追加の列を使用して、関連するデータを記録せよ。 1.6pt