



## 一般的な指示 実験試験 (20点)

以下の条件を満たさない場合、失格となることがある。

2025年7月19日

試験時間は5時間で、合計20点満点。

試験の開始と終了は、アナウンスで示されるほか、1時間ごとに経過時間が示され、試験終了の30分前、15分前、5分前にも示される。

指示があるまで封筒や箱を開けないこと。

机上に用意されている次のものを使用してよい。(1) ボールペン、(2) シャープペンシル、(3) 消しゴム、(4) 目盛付き定規、(5) コンパス、(6) 電卓。

### 試験中

- 指定されたボールペンを使うこと。メモ、図、表、グラフの下書きにシャープペンシルを使う場合は、最終版のアウトラインをボールペンで必ずなぞること。
- 最終的な解答には、**A**と書かれた専用シートを使用すること。適切な箇所に解答と必要な考察を記入すること。求められているグラフを描くこと。不要な答えは取り消し線で消しておくこと。
- 下書き用に**W**と書かれた白紙のワーキングシートが用意されている。指定されたものを使用すること。採点してほしいくない解答や下書きは取り消し線で消しておくこと。各シートの表(おもて)のみを使用し、枠外の余白には記入しないこと。
- 必要ならば、**Z**と書かれた追加のワーキングシートを使うことができる。「Help」の旗を掲げて、試験監督に知らせること。
- 解答は読みやすく、かつ簡潔に書くこと。方程式、論理演算子、記号、スケッチなど、考えたことを最もよく伝えるものを使うこと。採点者は多言語に対応していない可能性があるため、長文や冗長な表現は避けること。
- 特に指定がない限り、誤差(不確かさ)の評価は必要ない。また、特に指示がない限り、データの点数や測定回数は自分の判断で決めてよい。
- 許可なくブースを離れないこと。トイレ休憩やその他のサポートが必要な場合は、「Toilet」「Water」「Help」と書かれた旗を上げて試験監督に知らせること。

### 試験終了時

- 試験の終了が告げられたら、すぐに筆記をやめること。
- 表紙を上にして、表向きに、一般的注意、問題用紙(**Q**)、解答用紙(**A**)、作業用紙(**W**)、(もしあれば)追加作業用紙(**Z**)の順に重ねる。それぞれはページ番号順にする。すべてのシートを窓付き封筒に入れ、最後に、カバーシートのID、氏名、座席番号が窓から見えることを確認すること。
- 退出は試験監督の指示に従うこと。**何も持って出ないこと**。時間の許す限り、すべてを元の状態に戻しておくこと。ご協力をお願いします。

### 特に注意する事項

答案では、特に断りのない限り、常に問題文に示された物理量を用いること。複数回測定をした場合には、結果を表に明示し、プロットした物理量が異なっている場合にはそれも表に明示すること。すべてのグラフは、関係する物理量を明確に示すこと。すべての場合において、使用したすべての物理量の単位を示すこと。



## 地球の磁場測定 (10 points)

### イントロダクション

この問題の目的は、地球の磁場（磁界）の水平成分を測定することである。この磁場を測定する前に、まず、いわゆるグーイの磁気天秤を使って磁石の特性を調べる。

問題全体において、不確かさは個々の実験値からではなく、グラフのフィッティングから求めよ。

### 実験装置のリスト

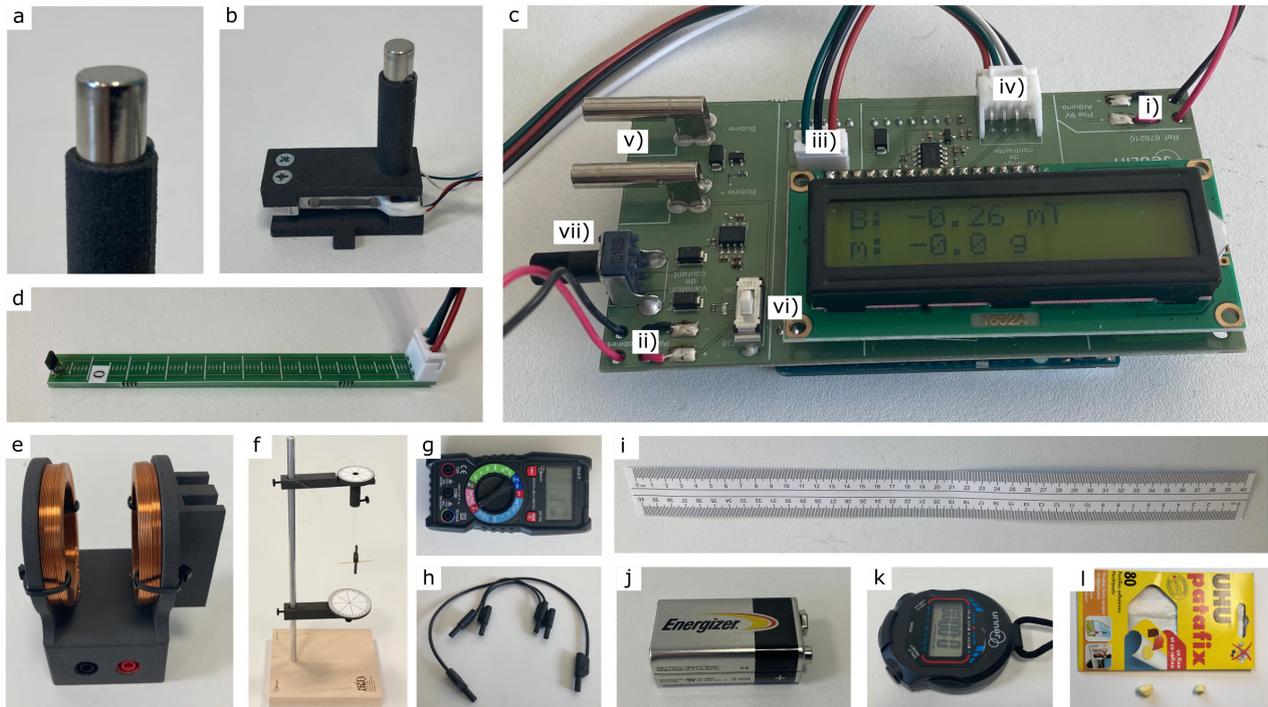


図 1. 全実験装置の写真。

実験装置のリストを以下に示し、写真を図 1 に示す。部品の数が多い場合は、その数が [ ] 内に示されている。何かがうまく機能していないように思える場合には、助けを求めよ。

- (a) 磁石 [3]。1つの磁石は力センサー (b) に取り付けられており、取り外してはならない。もう1つの磁石はポッド (f) に挿入されており、指定されるまで取り外してはならない。最後の磁石は A.5 で使用する。磁石はすべて同じと考える。
- (b) 力センサー。Arduino マイコン (c) に接続されたこのセンサーは、軸に沿った力を測定する ( $m_f$ )。単位はグラム重 ("g") であり、重力場 ( $g_0 = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) の下で地表にある 1 グラムの質量が受ける力である。このセンサーには磁石 (a) が 1 つ取り付けられている。スイッチを入れ直すたびに、センサーの表示は状況に関係なく 0 にリセットされる。このセンサーには 200g を超える荷重をかけてはいけない。開梱する際には十分注意すること。
- (c) デジタルディスプレイ付き Arduino マイコン。この機械は、コイル (e) に電力を供給し、力と磁場の測定を行うために使用され、それぞれをグラム重 ("g") と mT の単位で直接表示する。Arduino マイコンに電力を供給する電池 (j) はスロット (i) に、コイル (e) に電力を供給する電池 (j) はスロット (ii) に接続する必要がある (接続するときには、極性に注意すること)。力センサー (b) と磁場センサー (d) はそれぞれスロット (iv) と (iii) に、コイル電源ケーブルはスロット (v) に接続する。スイッチ (vi) はコイル供給回路 (LED で表示) を閉じ、その電流は (vii) で制御できる。

- (d) 定規付き磁場センサー。Arduino マイコン (c) に接続し、定規の方向 ( $\vec{e}_z$ ) に沿った磁場 ( $B_z$ ) を mT 単位で測定する。
- (e) 反ヘルムホルツ構成 (互いに逆向きに巻かれている) のコイル。これらのコイルを電流計 (g) と Arduino マイコン (c) に直列に接続して磁場を作る必要がある。
- (f) 木製の土台の上に金属製のスタンドがあり、磁石 (a) が最初に挿入される吊り下げ式ポッドと、角度マーカーが付いている。この装置の詳細な組み立て方は下で説明する。
- (g) マルチメーター。10A レンジの電流計としてのみ使用する。使用しないままにしておくで、マルチメーターの電源が切れるので、「OFF」の位置に戻して電源を入れ直す必要がある。マルチメーターのケースに付属している 2 本のケーブルは使用しない。
- (h) 導線 [3]。
- (i) 40 cm 定規。
- (j) 9V 電池 [3]。その容量は、300 mA·h のオーダーである。
- (k) ストップウォッチ。
- (l) 接着剤。問題全体で用いることができる。 粘着性のあるペーストもしくはパテ

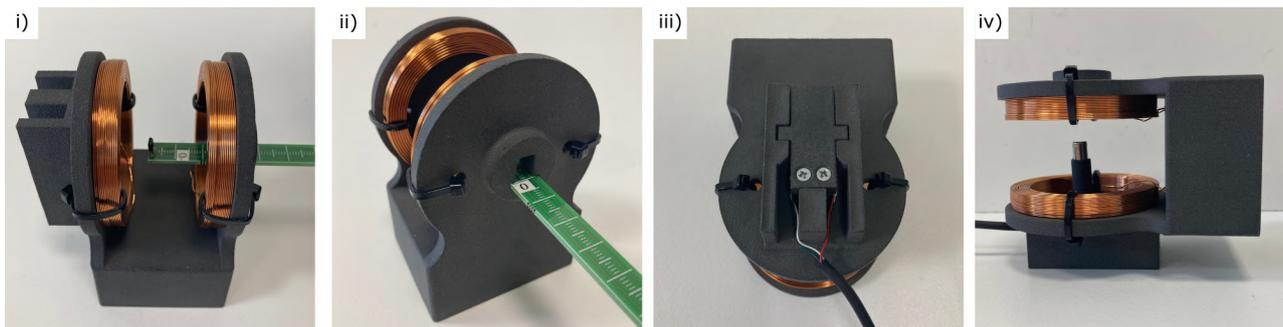


図 2. 反ヘルムホルツ・コイル内部のセンサーの使用。

### Arduino マイコンに取り付けられたセンサーの使用法 (図 2)

磁場センサー (d) は図 2(i) に示すようにコイル (e) 内をスライドさせ、その軸上の磁場を測定することができる。センサーの  $z = 0$  の位置は図 2(ii) に示されており、コイル内を移動するにつれて  $z$  が増大する。

力センサー (b) は図 2(iii) のようにコイルに挿入してから、図 2(iv) のようにコイルを回転させ、力センサーが鉛直になるようにする。その際、電気配線は必ず付けられている溝を通すこと。

**実験装置 (f) の設置 (図 3)。** 34 cm の長さのワイヤーを使用し、パート B を開始する直前に取り付けること。

- 金属製の支柱 (f0a) をプラスチック製の脚 (f0b) 付きの木製プレートに差し込み、スタンド (f0) を作製する。
- 部品 (f1) は下部に取り付け、ポッドの角度をマークする。アーム (f1b) をネジ (f4) で金属の支柱に取り付け、部品 (f1a) をもう一つのネジ (f4) で固定する。
- 部品 (f2) は上部に取り付け、ポッドを支えるワイヤーを保持する。アーム (f2b) をネジ (f4) で金属の支柱に取り付け、その上に部品 (f2a) を差し込む。
- ポッド (f3) を作るには、磁石 (a) がすでに挿入されているキャリア部品 (f3a) に慣性バー (f3b) と爪楊枝 (f3c) を挿入する。ポッドを支えるワイヤーを部品 (f2a) に挿入し、ネジ (f4) で固定する。部品 (f2a) を回すと、ワイヤーを取り付ける角度が変わる。爪楊枝でポッドの角度位置を正確に測定できる。

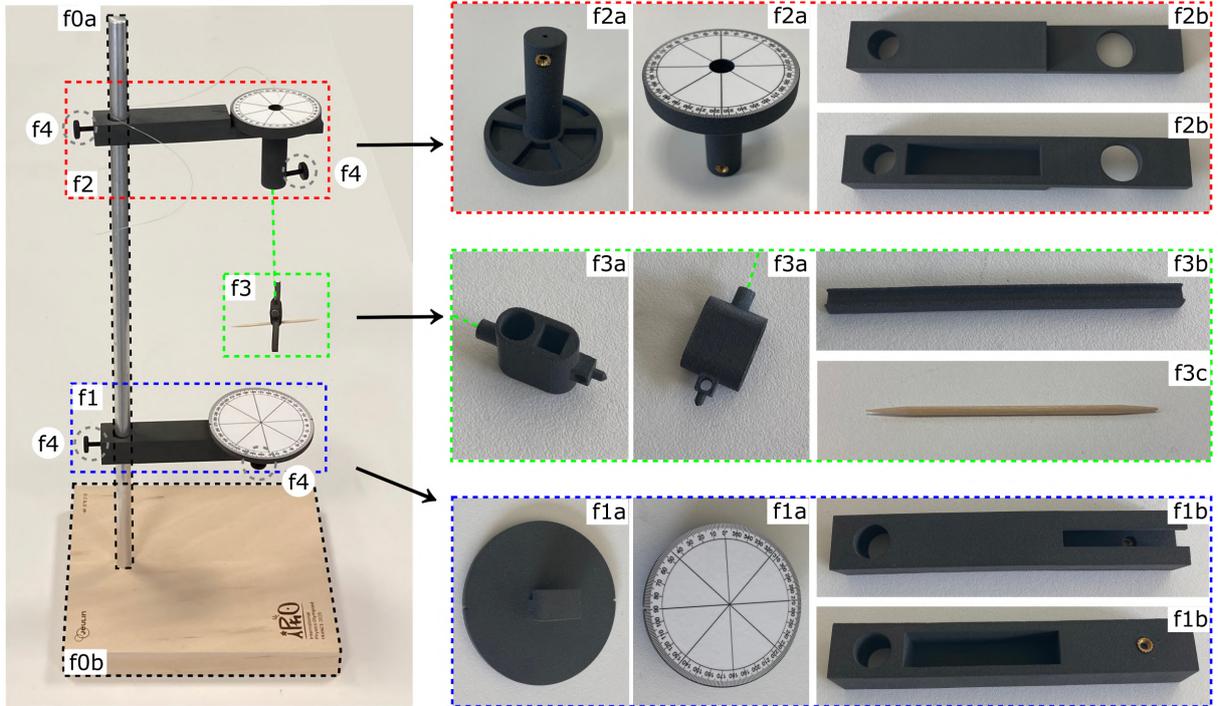


図3. 金属製スタンドへのポッドの取り付け。部品 (f1a)、(f1b)、(f2a)、(f2b)、(f3a) については、2つの異なる角度から示している。また、同じプラスチック製ネジ (f4) が4つある。

## Part A. グーイの磁気天秤と磁気モーメント

### モデル化

磁石は磁気モーメント  $\vec{m}_m$  の磁気双極子として扱うことができると仮定する。このようなモーメント  $\vec{m}_m = m_m \vec{e}_z$  の双極子が磁場  $\vec{B} = B(z) \vec{e}_z$  の中で受ける力は次のように書ける。

$$\vec{F} = m_m \frac{dB(z)}{dz} \vec{e}_z. \quad (1)$$

電流  $i$  が反ヘルムホルツ・コイルに流れると、その回転対称軸  $\vec{e}_z$  上の磁場  $\vec{B}$  は次のようになる。

$$\vec{B}(z) = \alpha i (z - z_0) \vec{e}_z. \quad (2)$$

この式は装置の中心付近でのみ有効であり、中心の位置は  $z = z_0$  である。

### コイルの中の磁場

- A.1** 実験で使用する1個の電池について、電流が2Aのオーダーのときの典型的な動作時間  $\tau$  を数値的に見積もれ。 0.2pt

後で実験手順を考える際、コイルがパート A でのみ使用されることを考えた上で、この結果を考慮に入れなければならない。必要であれば予備の電池が提供される。

図 2 に示すように、磁場センサーをコイルに挿入する。コイル内のセンサー位置の特定についても、図 2 を参照すること。

**A.2** 一定の電流  $i_0 \approx 1.0\text{A}$  において、磁場  $B_z$  をコイルの軸上のセンサーの位置  $z$  の関数として測定し、グラフを描け。この実験において磁場が位置に対して直線的に変化する最大の領域  $[z_{\min}, z_{\max}]$  を求めよ。 0.8pt

**A.3** この線形の依存性を持つ領域内の 2 つの位置  $(z_1, z_2)$  にセンサーを配置することにより、式 (2) で与えられる  $\vec{B}$  の電流に対する依存性を検証するためのグラフを描き、 $\alpha$  の値を不確かさを含めて決定せよ。 0.9pt

### グーイの磁気天秤

コイルから磁場センサーを取り外し、図 2 のように力センサーを内部に慎重に配置する。特に、溝の中の電気配線の配置に注意すること。

**A.4** グラム重単位の力  $m_f$  を電流  $i$  の関数として実験的に測定せよ。磁石の磁気モーメント  $m_m$  の値を、その不確かさとともに決定するための適切なグラフを描き、 $m_m$  の値を求めよ。 0.8pt

### 磁気モーメントの代わりにの測定方法

双極子近似では、磁気モーメント  $m_m$  の磁石の回転対称軸  $z$  軸上での磁場は次のように書ける。

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 m_m}{2\pi(z - z_a)^3}, \quad (3)$$

ここで、 $z_a$  は必ずしも磁石の幾何学的中心ではない。また、 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$  である。

**A.5** 自由な磁石の回転対称軸に沿った磁場  $B_z$  を、距離  $z$  の関数として測定せよ。式 (3) で与えられたモデルを検証するためのグラフを描き、その実験的なずれを示せ。 $m_m$  の新しい値を不確かさを含めて求めよ。 1.3pt

**A.6** A.4 と A.5 で得られた 2 つの結果から、 $m_m$  の最終的な実験値をその不確かさを含めて提案せよ。 0.2pt

## Part B. 地球の磁場の決定

### モデル化

ここで、地球磁場の水平成分  $B_e$  の値を推定するために、水平面内での磁石の振動運動を調べる。図 3 および図 3 の上の組み立て説明書を参照せよ。磁石の入ったポッド (f3) は、垂直軸の周りのトルク（力のモーメント）を 2 つ受ける：

- ワイヤーからの力のモーメントは、 $\Gamma_f = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0)$  とモデル化する。ここで、 $C_f$  は定数、 $L$  はワイヤーの 2 つの取り付け部分の間の長さ、 $\theta_0$  はワイヤーがねじられていない状態を 0 とする角度である。

## Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# Q1-5

Japanese (Japan)

- 地球磁場の角度が  $\theta_e$  で与えられるとき、地球磁場による力のモーメントは、 $\Gamma_e = -m_m B_e \sin(\theta - \theta_e)$  で与えられる。

ポッドと磁石アセンブリの垂直軸周りの未知の慣性モーメントを  $J$  とすると、角運動量の定理を用いて、回転の運動方程式は次のようになる。

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = \Gamma_f + \Gamma_e = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0) - m_m B_e \sin(\theta - \theta_e). \quad (4)$$

$\sin(\theta - \theta_e) \approx \theta - \theta_e$  の近似が有効な場合、周期  $T$  の正弦的な調和振動が発生する。この Part では、接着剤ペースト (I) を任意の形状やサイズに成形して、他のデバイスに接着可能である。

注意 外部磁場による妨害を避けるため、磁石は金属物や磁気源（他の磁石を含む）から少なくとも 20cm 離して設置する必要がある。

### 実験のセットアップと最初の実験

粘着性のあるペーストもしくはパテ

質問 B.1~B.5 では、ワイヤーの長さを  $L = 34\text{ cm}$  とし、ワイヤーがねじれていないことを確認せよ。この設定では、初めに、ワイヤーからの力のモーメントは地球の磁場からの力のモーメントに対して無視できると仮定せよ。

$\theta_0$  を  $\theta_e$  に合わせるために、ピース (f2a) を使って  $\theta_0$  を調整し、磁石を取り外してもポッド (f3) が回転しないようにせよ。その後、磁石をポッドに再び挿入し、B.5 まで  $\theta_0$  を変化させないこと。

**B.1**  $B_e$  を決定するための実験手順を提案せよ。測定するさまざまな物理量とその単位を書け。これらの物理量を詳細な模式図に描き、指示で与えられた物理量と式で関連付けよ。各物理量について、それが実験手順全体を通して固定 (F) させるか変化 (V) させるかを明記すること。 0.3pt

**B.2** 上述の実験手順を用いて、 $B_e$  の最初の値を決定するためのグラフを描き、不確かさを含めて求めよ。 1.1pt

### ワイヤーからの力のモーメントの評価

**B.3**  $L = 34\text{ cm}$  を保持したまま、磁石のないポッドの運動を調べ、2 回の周期測定を使用して、実験的な不確かさを含めて  $C_f$  の値を決定せよ。 $C_f$  と測定した物理量との関係式を明らかにせよ。 0.7pt

**B.4** これまでの測定値を用いて、 $\Gamma_f$  中の  $C_f/L$  と  $\Gamma_e$  中の  $m_m B_e$  が等しくなる臨界長  $L_c$  の式を導き、数値を求めよ。B.2 では、比  $(C_f/L)/(m_m B_e)$  は何だったか？ [A, B] が、A 以上 B 未満であることを表すとして、[0%, 1%]; [1%, 5%]; [5%, 20%]; [20%, 50%]; [50%, ∞%] の中から選べ。 0.3pt

### 静的な状態の測定

ここで、静的な地球磁場の測定を提案する。磁石をポッドに再び挿入せよ。図 3 の部品 (f2a) を使って角度  $\theta_0$  を調整せよ。これでワイヤーがねじられる。



**B.5**  $L = 34 \text{ cm}$  をまだ固定したままで、磁石の平衡位置  $\theta_{\text{eq}}$  が角度  $\theta_0$  にどのように依存するかを調べるために、適切なグラフを描き、 $B_e$  の 2 番目の値を、その不確かさを含めて決定せよ。 1.1pt

**B.6** ワイヤーからの力のモーメントの  $L$  依存性を検証するために、長さ  $L$  を変化させ、他の 2 つの長さについて上と同じ測定を繰り返せ。すべての依存関係をまとめた最終的なグラフを使用して、 $B_e$  の新しい値を、その不確かさを含めて決定せよ。 2.3pt

## 砂のクレーターと砂丘 (10.0 点)

NASA の探査車スピリット (図 1.(a)) は、火星の地質と水の存在の可能性を調査するため、2004 年に火星に着陸した。着陸地点 (図 1.(b)) は大小さまざまなクレーターに囲まれている。探査中、探査車は火星の砂丘にはまらないようにしなければならない。

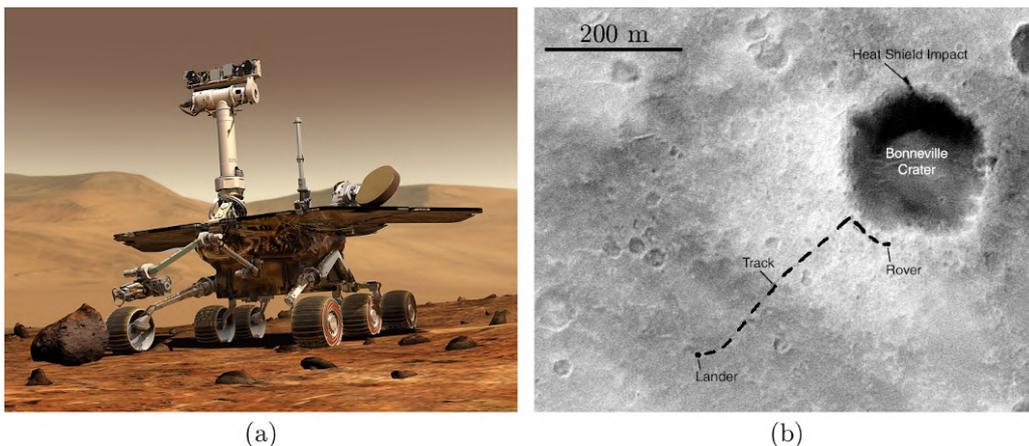


図 1. (a) スピリットの想像図。(b) 火星着陸地点。スケールバーは 200m を表す。

この問題には 2 つの独立した部分 A (クレーター形成) と B (砂の捕捉) があり、どのような順番で答えても構わない。機材のリストを以下に示し、図 2 に写真を示す。

- (a) プラスチック製の箱 箱は実験中にあふれた砂を集めるのに使うため空にしておくこと。
- (b) ボウル
- (c) 砂の入った瓶
- (d) 容器に入れてある 6 個の鋼球。ボールの直径は 4 種類あり、一番小さい 3 つは同じ大きさである。
- (e) 巻尺
- (f) ゴム足付き木製トレイ (f1)、クランプスクリュー (f2)、水平ロッド (f3)、垂直ロッド (f4) からなる保持装置。各要素は写真のように組み立てなければならない。
- (g) ふるい：小さなボールが砂の中に紛れ込んでしまったときに、それを見つけるために使う。
- (h) アルミニウム製レール、長さ 1m
- (i) ブラシ 必要であればレールとボールの砂を落とすために使う
- (j) 木製のトラック
- (k) ストップウォッチ
- (l) 接着パテ
- (m) 最後に砂を箱に戻すのに使う扇形
- (n) スプーン
- (o) 定規

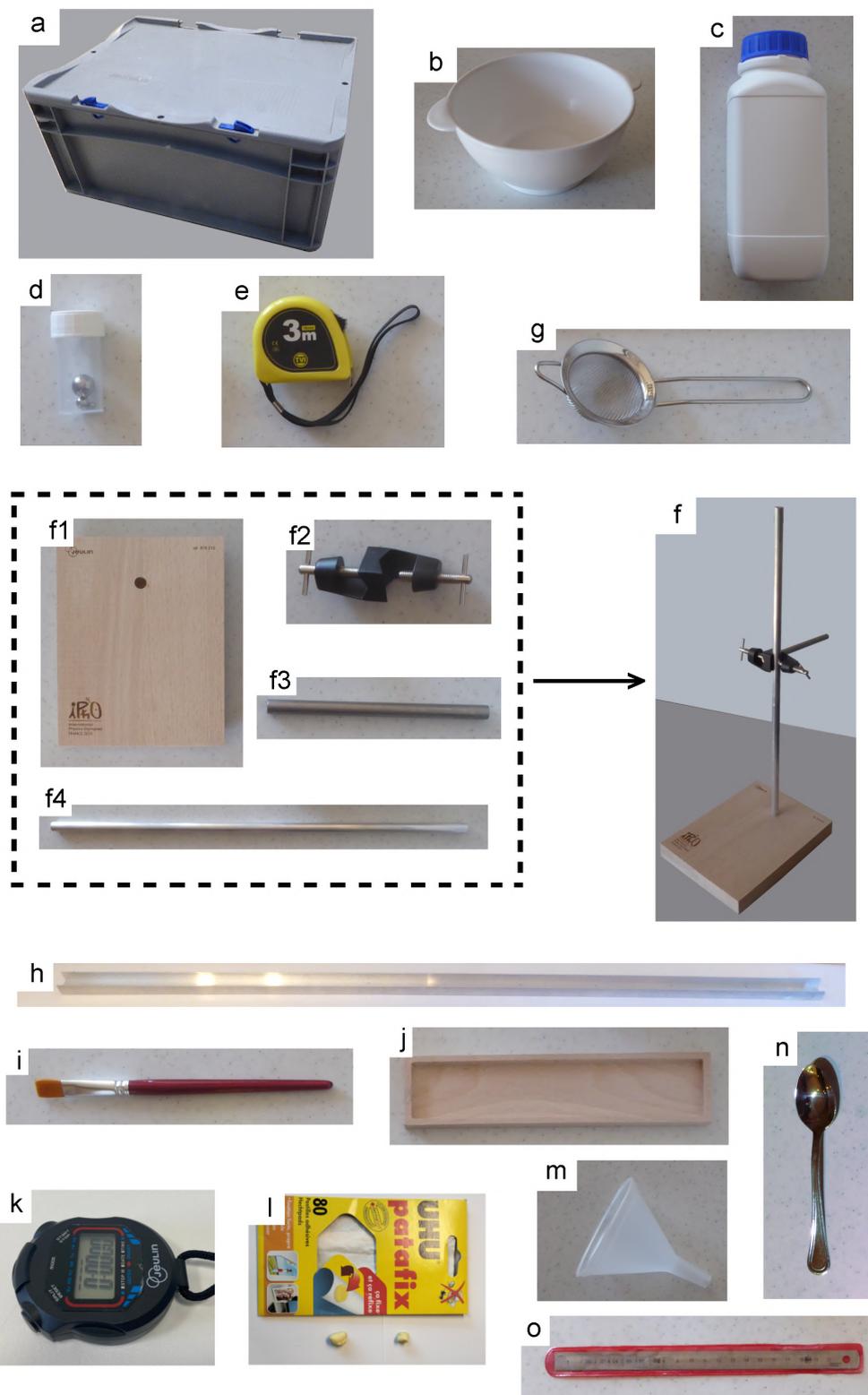


図 2. 全機材の写真

## A. 衝突クレーター

火星のクレーターは、直径  $D$  が約 10m から数百 km まで様々で、隕石の衝突によって生じる。衝突のパラメータである衝突体の直径  $d$ 、エネルギー  $E$  に、 $D$  がどのように依存するかを予測するさまざまなモデルがある (図 3)。

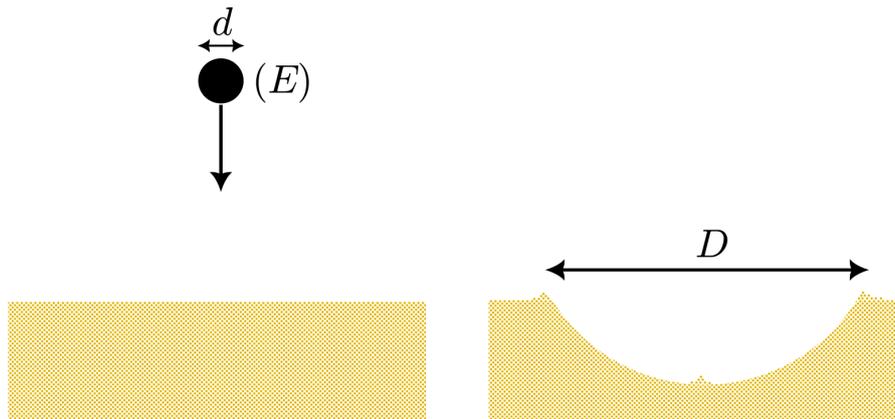


図 3. クレーターの形成

**モデル 1:**  $D$  は衝突体の直径  $d$  にのみ依存するとするもの。

$$D = c_1 d, \quad (1)$$

ここで  $c_1$  は  $E$  にも  $d$  にも依存しない無次元数である。

**モデル 2:** 隕石のエネルギー  $E$  は衝突の間に体積的な変化の過程を通して変換されるとするもの。このモデルでは、 $D$  は  $E^{1/3}$  に比例すると予測される。

$$D = c_2 E^{1/3} \quad (2)$$

ここで  $c_2$  は  $E$  にも  $d$  にも依存しないパラメータである。

**モデル 3:**  $E$  はクレーター外への物質放出に使われるとするもの。

この仮定では、

$$D = c_3 E^{1/4}. \quad (3)$$

ここで  $c_3$  は  $E$  にも  $d$  にも依存しないパラメータである。

ここでは、3つのモデルを比較するために、cm スケールでのクレーター形成実験を行う。直径  $d$  と質量  $m$  の異なる剛球 (密度  $\rho_a = 7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) (機材リスト (d)) を隕石とした。

ボール #1	$d_1 = 2.0 \text{ mm}$	$m_1 = 0.033 \text{ g}$
ボール #2	$d_2 = 5.0 \text{ mm}$	$m_2 = 0.51 \text{ g}$
ボール #3	$d_3 = 9.0 \text{ mm}$	$m_3 = 3.0 \text{ g}$
ボール #4	$d_4 = 16.0 \text{ mm}$	$m_4 = 17 \text{ g}$

砂 (c) を入れたボウル (b) を、余分な砂を集めるのに役立つ空のプラスチック箱 (a) の中に入れる。ボウルを砂で完全に満たし、定規 (o) で慎重に表面を摺り切って平らにする。ボールをボウルの上から落とすには、棒と蝶ネジが付いたスタンド (f) を使います。このスタンドは、ボールをボウルの真上で放すためのガイドとして使い、また、巻尺 (e) を使って、表面からの落下高さ  $h$  を測定する。

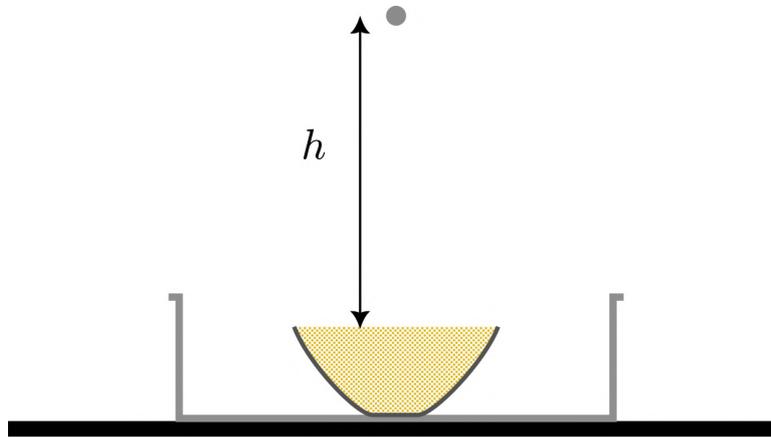


図 4. クレーター形成実験のセットアップ

ボール #3 を高さ  $h = 50 \text{ cm}$  から落とし、形成されたクレーターの直径  $D$  を測定する。この実験を 5 回繰り返さない。各衝突の後、スプーン (n) で砂を混ぜ、注意深く定規で摺り切って水平にする。必要に応じて、ふるい (g) を使って、砂の中に紛れ込んだボールを見つけなさい。

**A.1** 結果を表にして、 $D$  をその不確かさとともに評価しなさい。

0.6pt

落下中、空気による抗力は次の式で与えられる。

$$F = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho_0 C_x v^2 \quad (4)$$

ここで  $v$  はボールの速度、 $\rho_0 \approx 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  は空気の密度。  $C_x$  は 1 のオーダーの無次元の係数である。

空気による抗力は、ボールが最大落下高さ  $h_{\max}$  よりも低い高さから落下する場合には無視できる。ここで、空気による抗力が重力の大きさの 10% 以下である最大の高さを  $h_{\max}$  とする。

**A.2** 最大落下高さ  $h_{\max}$  の理論式を決定せよ。利用可能な 4 種類のボールについて  $h_{\max}$  を数値的に計算しなさい。

0.5pt

序論で示した 3 つのべき乗則を比較するために、 $D$  と  $E$  の関係を実験的に調べる。実験したエネルギーの範囲で指数が変化するかどうかを調べる。そのためには、異なる高さからボールを落として一連の測定を行う。広範囲のエネルギーをカバーしなければならない。**A.2.** で確立した条件を満たしつつ  $E$  が高い値になる

## Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# Q2-5

Japanese (Japan)

ために、ボールを落とす高さは  $h = 2\text{m}$  まで取ることができる。各パラメータについて実験は2回だけ行い、 $D$  の平均値を求めよ。

**A.3** 測定したボールの質量  $m$ 、落下高さ  $h$ 、衝突エネルギー  $E$ 、およびクレーターの直径  $D$  を表に示しなさい。 1.7pt

**A.4** 結果をグラフ（対数または方眼）にプロットせよ。モデル1、2、3に対応する3本の線を加えよ。3つの理論モデルのうち、実験結果に最も良く一致するのはどれか。 1.2pt

### B. 砂地での転がりと泥沼化

着陸から5年後、探査機スピリットは火星の砂丘の砂に埋まった。砂の中での転がりは、砂粒の運動が多くのエネルギーを散逸させるため、特にデリケートである。ここでは、砂の中を転がるボールのブレーキを調べる。最初は静止しているボールを、角度  $\theta$  で傾斜したレールの上で加速させ、次に砂のベッドの上で減速させる。

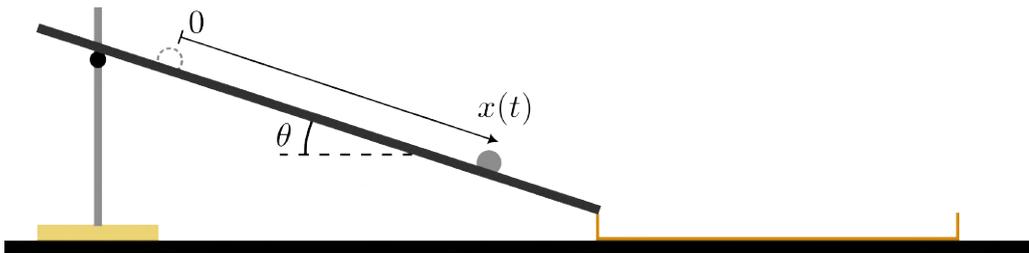


Fig. 5. 傾斜レール (h) と木製トラック (j) の組み合わせ

#### レールに沿ったボールの動き

ボール #4 は、 $x$ -軸の原点 ( $x=0$ ) として選ばれたレール (h) 上の任意の点から、初速なしで静かに放出される (図5)。レールに沿ってボールの位置を  $x(t)$  とする。質量  $m$ 、直径  $d$  のボールの中心を通る軸に対する慣性モーメントは  $J = md^2/10$  で与えられる。角速度  $\omega$  で回転しながら速度  $v$  で移動するボールの運動エネルギー  $K$  は次式で与えられる。

$$K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2. \quad (5)$$

ボールはレール上を滑ることなく転がり、エネルギー散逸は無視されると仮定する。

**B.1**  $x(t)$  を  $t$ 、 $\theta$  および  $g$  で表しなさい。 0.4pt

レール (h) の一端は木製トラック (j) の端に置かれ、この時点ではトラックには砂がない。レールのもう一方の端は、水平に対して傾斜角度  $\theta = 5^\circ$  となるようにスタンド (f) で支えるように慎重に調整する。レールは接着パテ (l) で (両側とも) 固定する。

ストップウォッチ (k) を使って、ボールがレールに沿って距離  $l = 50\text{cm}$  を移動するのにかかる時間  $t_{50}$  を測定する。

## Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# Q2-6

Japanese (Japan)

**B.2** 5回の測定を行い、その結果を示し、統計的不確かさの桁も示せ。 0.7pt

少なくとも8個の異なる値の $\ell$ について $t$ を測定し、統計的不確かさとともに示しなさい。

**B.3** 結果を表にまとめなさい。 0.8pt

**B.4** 問B.1で示された法則を確認するために、結果をプロットしなさい。定数 $g$ の実験的推定値とその不確かさを求めなさい。 1pt

### 砂の中のボールの動き

ここで、 $\ell$ はボールがレール上を移動した距離である。砂の上では、ボールは $L$ (図6を参照)の距離を移動した後、停止する。

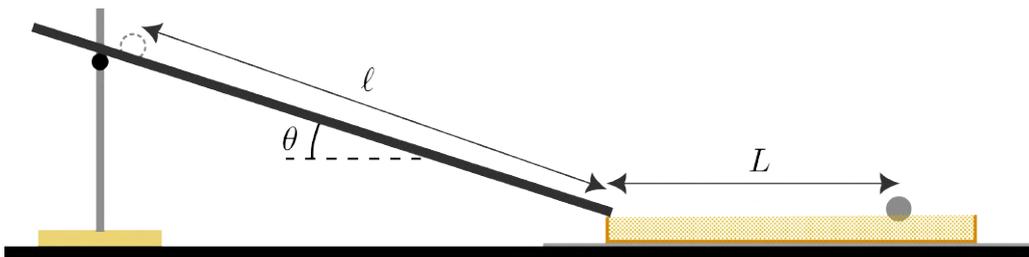


図6. 距離 $\ell$ 間での加速と、停止するまでの距離 $L$

$L$ の間では、抗力( $T$ )によって減速される。この抗力には2つの原因が考えられる：

- モデル #1 (固体摩擦)：相対運動する2つの固体の間で、ボールは砂による一定の抗力 $T = -\mu_{\text{eff}} mg$ を受ける。ここで、 $\mu_{\text{eff}}$ はボールと砂の接触の有効抗力係数、 $m$ はボールの質量である。
- モデル #2 (流体抗力)：抗力はボールの速度に比例する。 $T = -kv$ 。ここで、 $k$ は定数、 $v$ は速度の大きさである。

ここでの目標は、観測されたブレーキ挙動を最もよく説明する法則を決定することである。

ここで、砂場中を動くボールは質点としてモデル化します。レールの傾斜角が小さい場合は、レールから砂場に落ちる際のエネルギー損失は無視する。2つの状況(固体摩擦または流体抗力)のそれぞれにおいて、 $L$ と $\ell$ を結びつける理論法則を導きたい。この2つから、指数 $\alpha$ が2つの異なる値をとる $L \sim \ell^\alpha$ の形のべき乗則が導かれる。

**B.5** モデル #1 とモデル #2 について、 $L$  と  $\ell$ 、 $\alpha$  の値の関係を示しなさい。 0.6pt

木製トラック(j)を紙の上に置く。トラックに砂を入れ、定規で丁寧に表面を平らにし、均一でなめらかな表面を作ります。砂を圧縮しないように注意する！レールの角度を再度慎重に調整し、 $\theta = 5^\circ$ とする。ボール #4 ( $d_4 = 16.0 \text{ mm}$ )を傾斜レールから放し、レールの移動距離が $l = 50 \text{ cm}$ になるようにします。

## Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# Q2-7

Japanese (Japan)

各走行の前に、砂をかき混ぜ、再度砂を平らにしてください。ブラシ (i) を使ってレールとボールの砂を落とす。実験の最後に、扇型 (m) を漏斗代わりにして、余分な砂を瓶に戻す。

**B.6** ボールが止まるまで砂の中を移動した距離 ( $L_{50}$ ) を測定する。 $L_{50}$  およびその不確かさを決定するために、数回 (少なくとも 5 回) の測定を行いなさい。 0.8pt

**B.7**  $\theta = 5^\circ$  を維持しつつ、少なくとも 8 個の異なる値の  $l$  について  $L$  を測定した後、 $L$  を  $l$  の関数としてプロットし、どのモデルが抗力  $T$  を最もよく記述しているかを結論づけなさい。 1.5pt

**B.8** 選択したモデルに基づいて、抗力  $T$  を特徴付ける係数  $\mu_{\text{eff}}$  または  $k$  の値を指定しなさい。 0.2pt





## 地球の磁場測定 (10 points)

次の表に 0 から 9 の数字を書け：

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

### グーイの磁気天秤と磁気モーメント

A.1 (0.2pt)

$\tau =$

DELEGATION PRINT

# Experiment



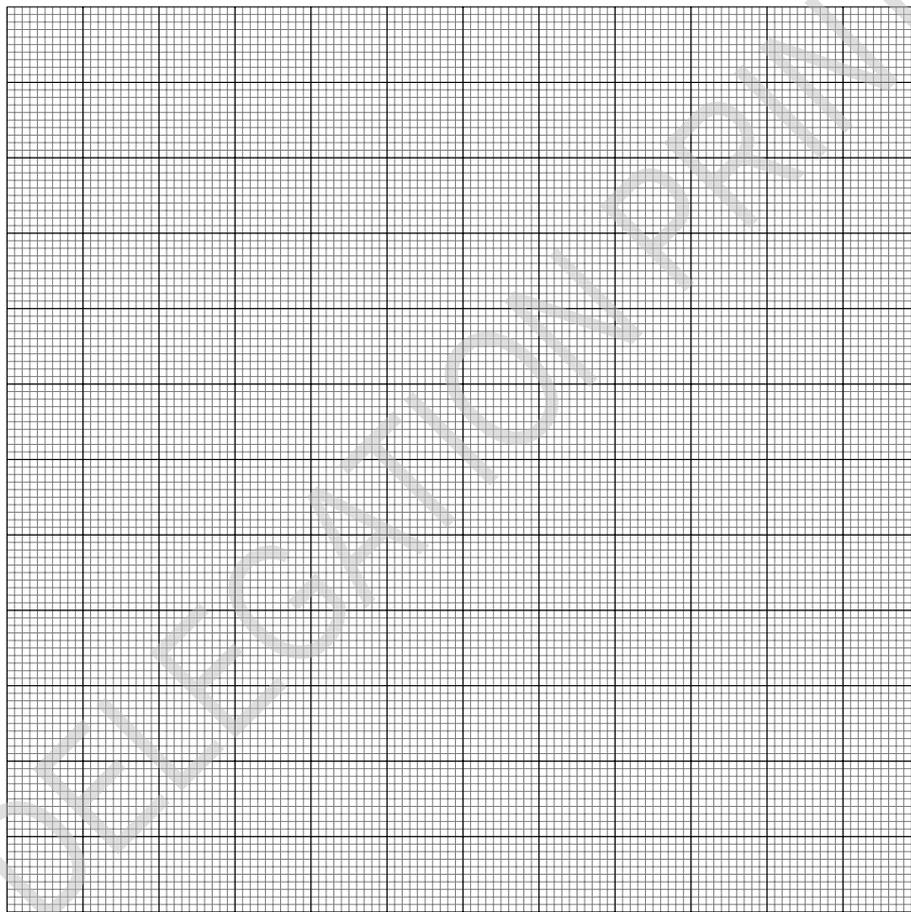
International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A1-2

Japanese (Japan)

## A.2 (0.8pt)

$z$ (mm)														
$B_z$ (mT)														



$[z_{\min}, z_{\max}] =$                       mm

# Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A1-3

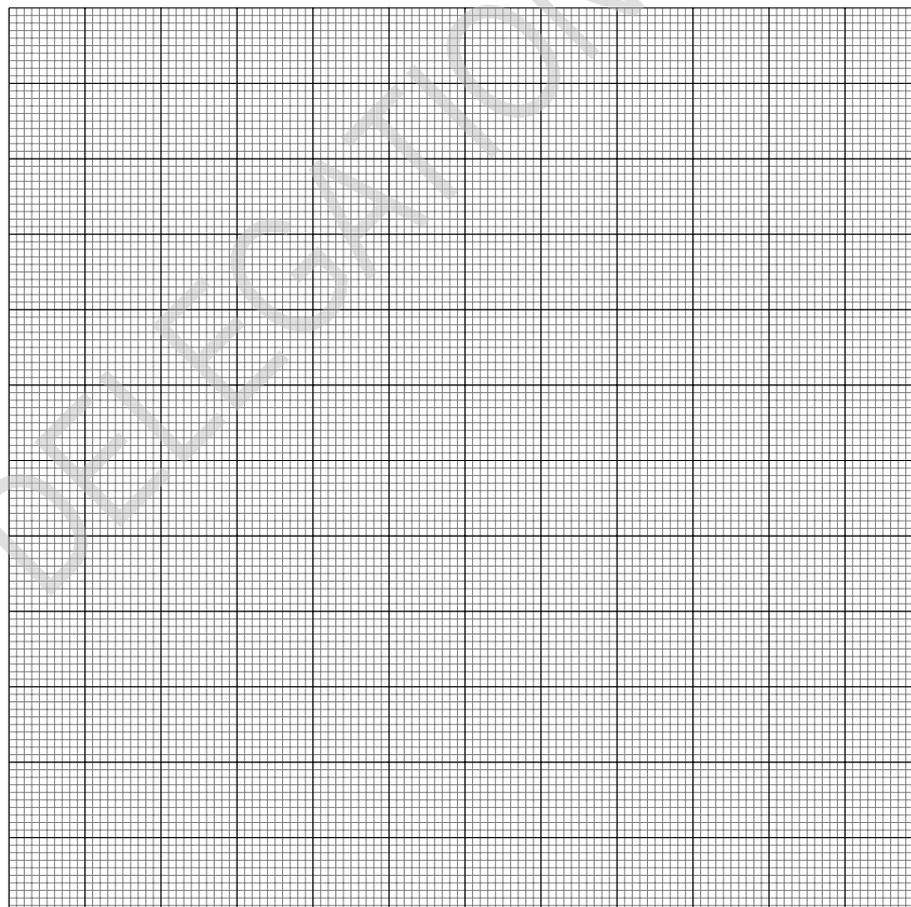
Japanese (Japan)

## A.3 (0.9pt)

$(z_1, z_2) =$                       mm

$i$ (A)										
$B_{z_1}$ (mT)										
$B_{z_2}$ (mT)										

プロットした物理量 (単位):

$\alpha =$                        $\pm$

# Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

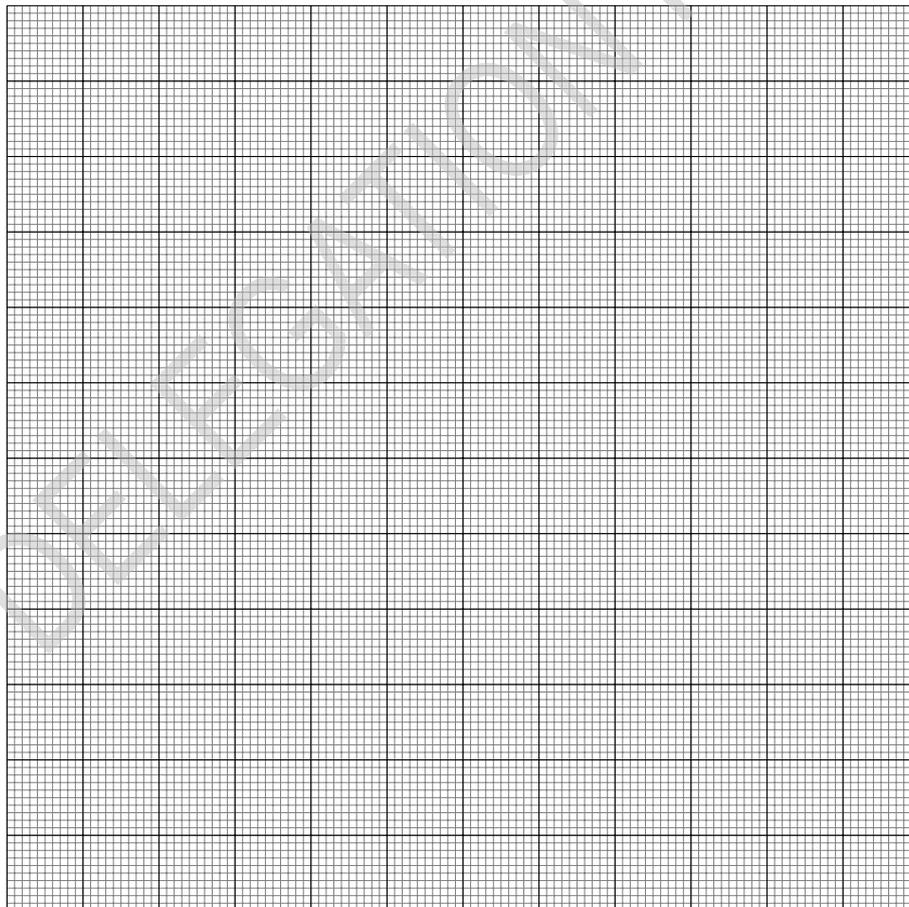
# A1-4

Japanese (Japan)

## A.4 (0.8pt)

$i$ (A)																			
$m_f$ (g)																			

プロットした物理量 (単位) :

$m_m =$              $\pm$

# Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

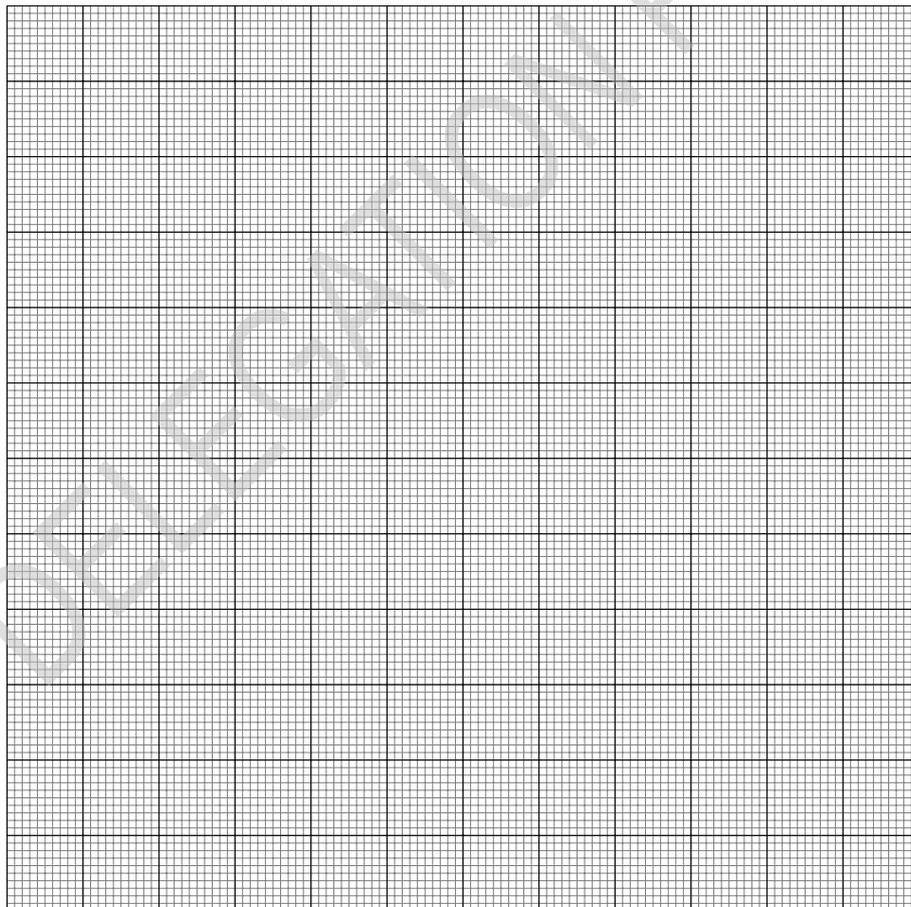
# A1-5

Japanese (Japan)

## A.5 (1.3pt)

$z$ (mm)										
$B_z$ (mT)										

プロットした物理量 (単位) :

$m_m =$        $\pm$

## Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A1-6

Japanese (Japan)

**A.6** (0.2pt)

$$m_m = \quad \pm$$

DELEGATION PRINT



## 地球の磁場の決定

B.1 (0.3pt)

物理量	単位	固定 (F) / 変化 (V)

物理量についての方程式：

概略図：

DELEGATION PRINT

# Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

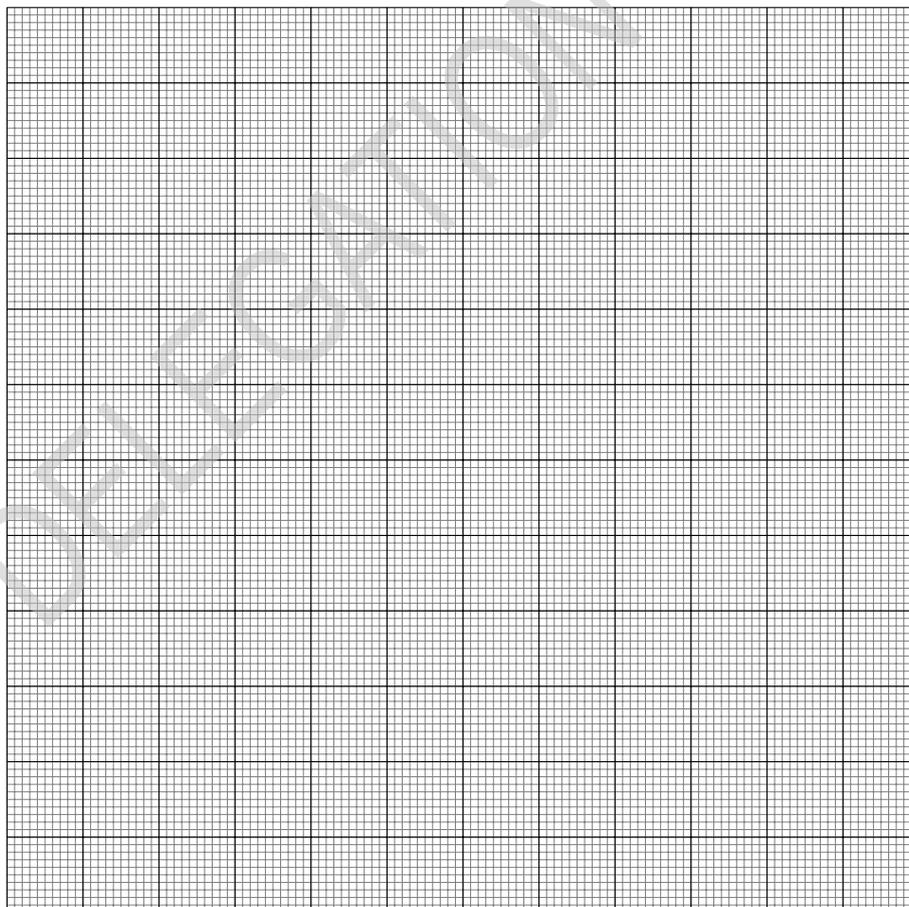
# A1-8

Japanese (Japan)

## B.2 (1.1pt)

測定した物理量 (単位) :


プロットした物理量 (単位) :

$B_e =$        $\pm$



**B.3 (0.7pt)**

それぞれの測定に関連する物理量を指定する：

測定 1 に関連する物理量 (単位)：

周期  $T_1 =$

測定 2 に関連する物理量 (単位)：

周期  $T_2 =$

$C_f$  の関係式：

$C_f = \quad \pm \quad \text{N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{rad}^{-1}$

**B.4 (0.3pt)**

$L_c$  の式：

数値  $L_c =$

$(C_f/L)/(m_m B_e) \in$

DELEGATION PRINT

# Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A1-10

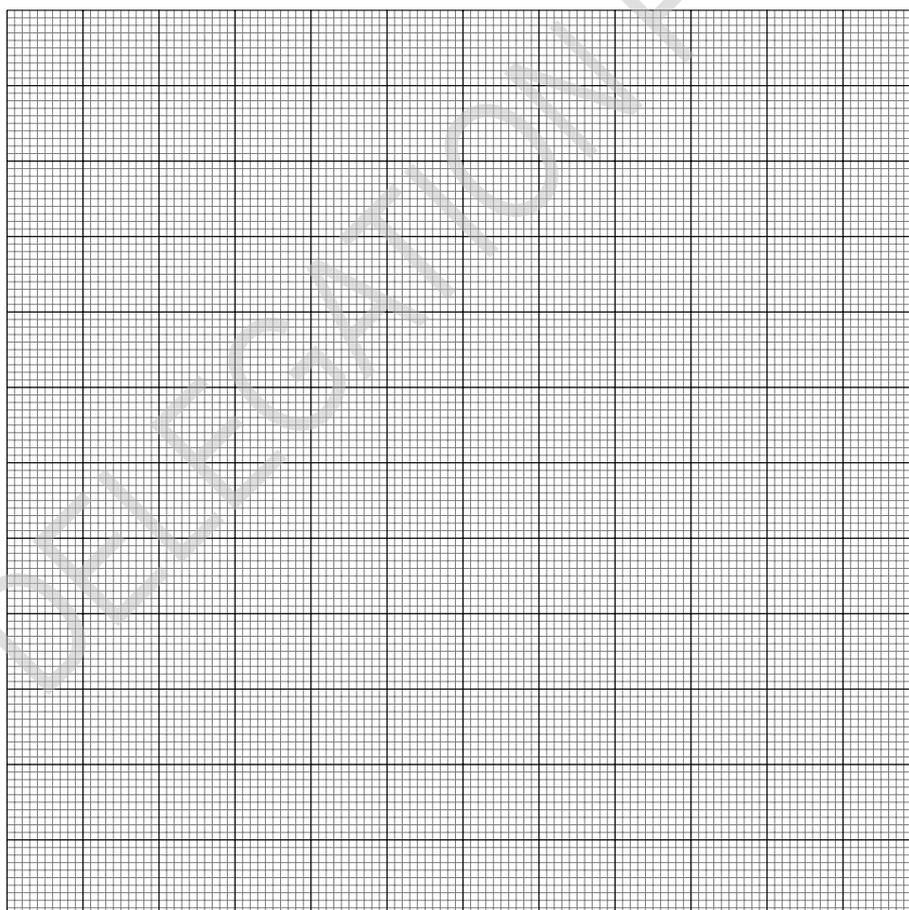
Japanese (Japan)

## B.5 (1.1pt)

平衡 1 :  $L = 34 \text{ cm}$

$\theta_0$ (rad)										
$\theta_{\text{eq}}$ (rad)										

プロットした物理量 (単位) :

$B_e =$        $\pm$

# Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A1-11

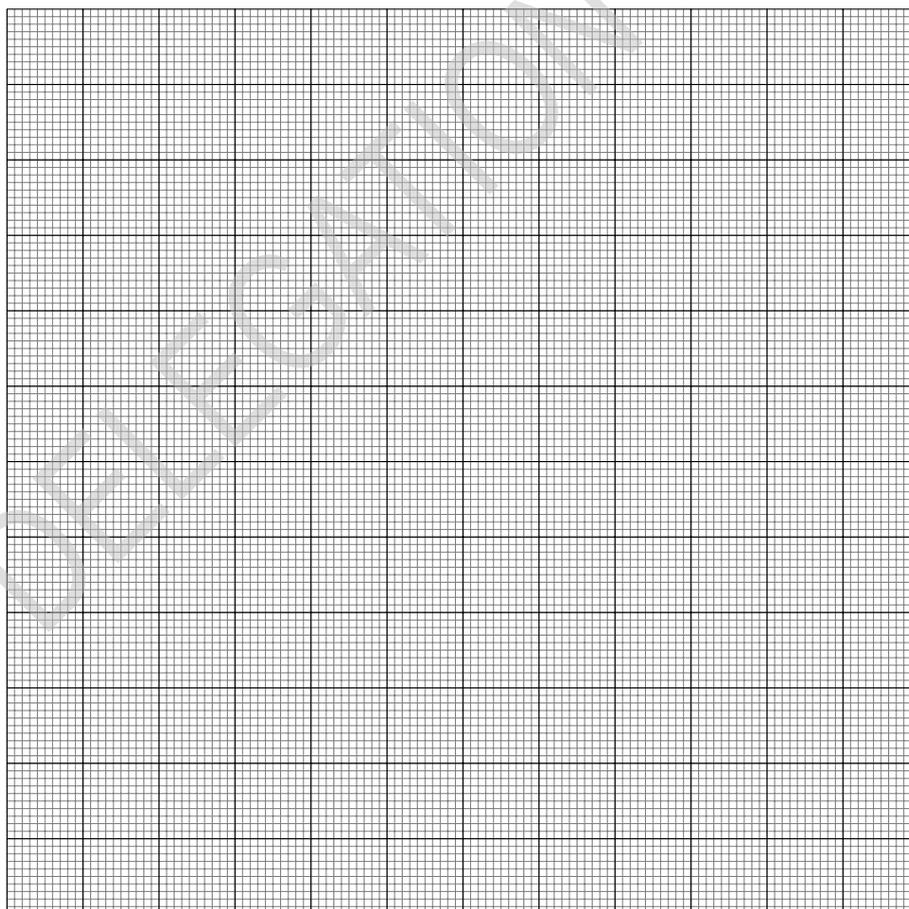
Japanese (Japan)

## B.6 (2.3pt)

平衡 2 :  $L =$

測定した物理量 (単位) :


プロットした物理量 (単位) :

# Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A1-12

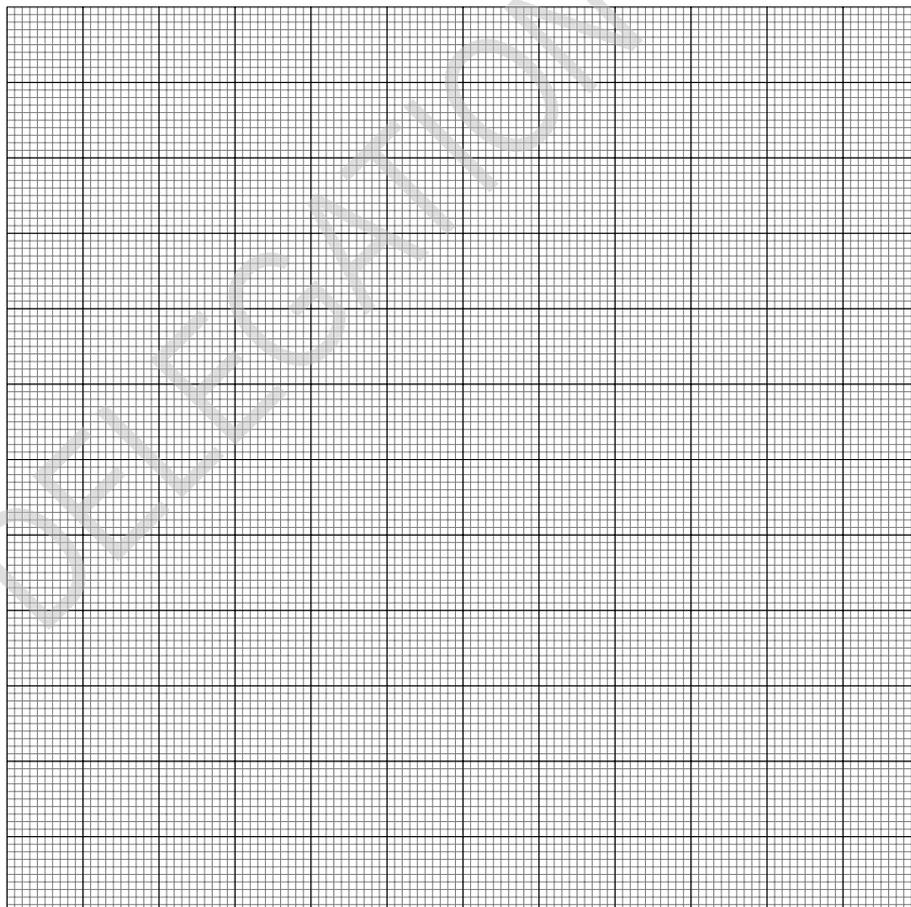
Japanese (Japan)

## B.6 (cont.)

平衡 3 :  $L =$

測定した物理量 (単位) :


プロットした物理量 (単位) :

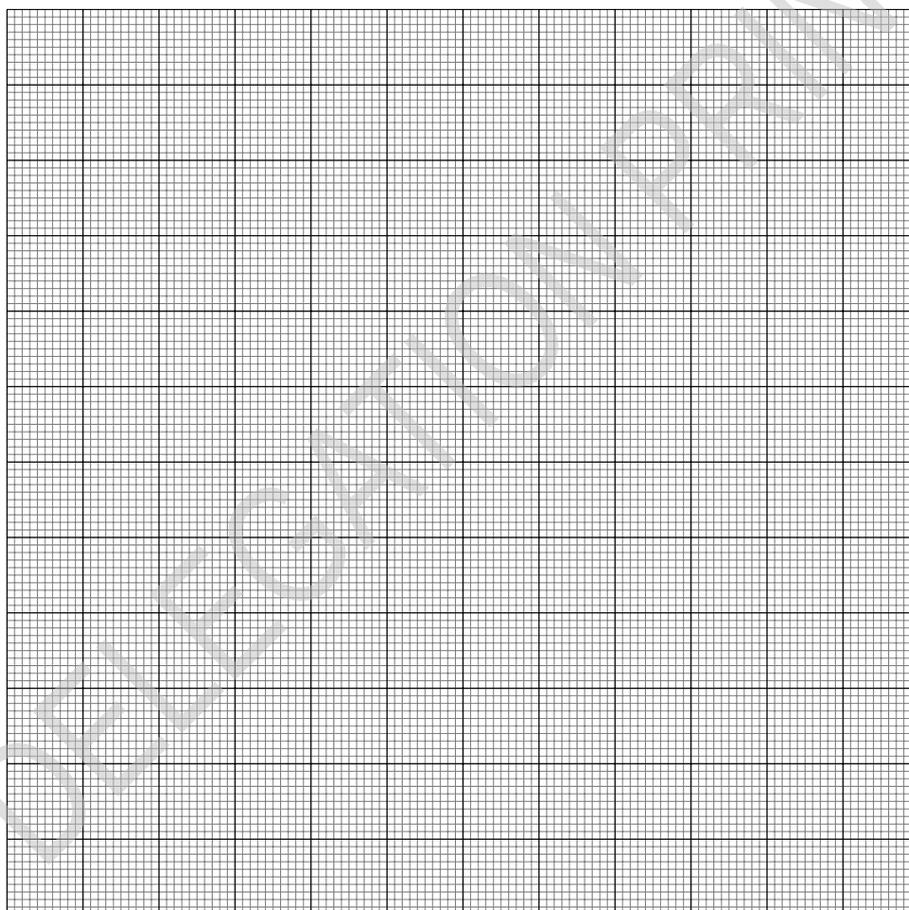





**B.6 (cont.)**

プロットした物理量 (単位) :

	平衡 1	平衡 2	平衡 3



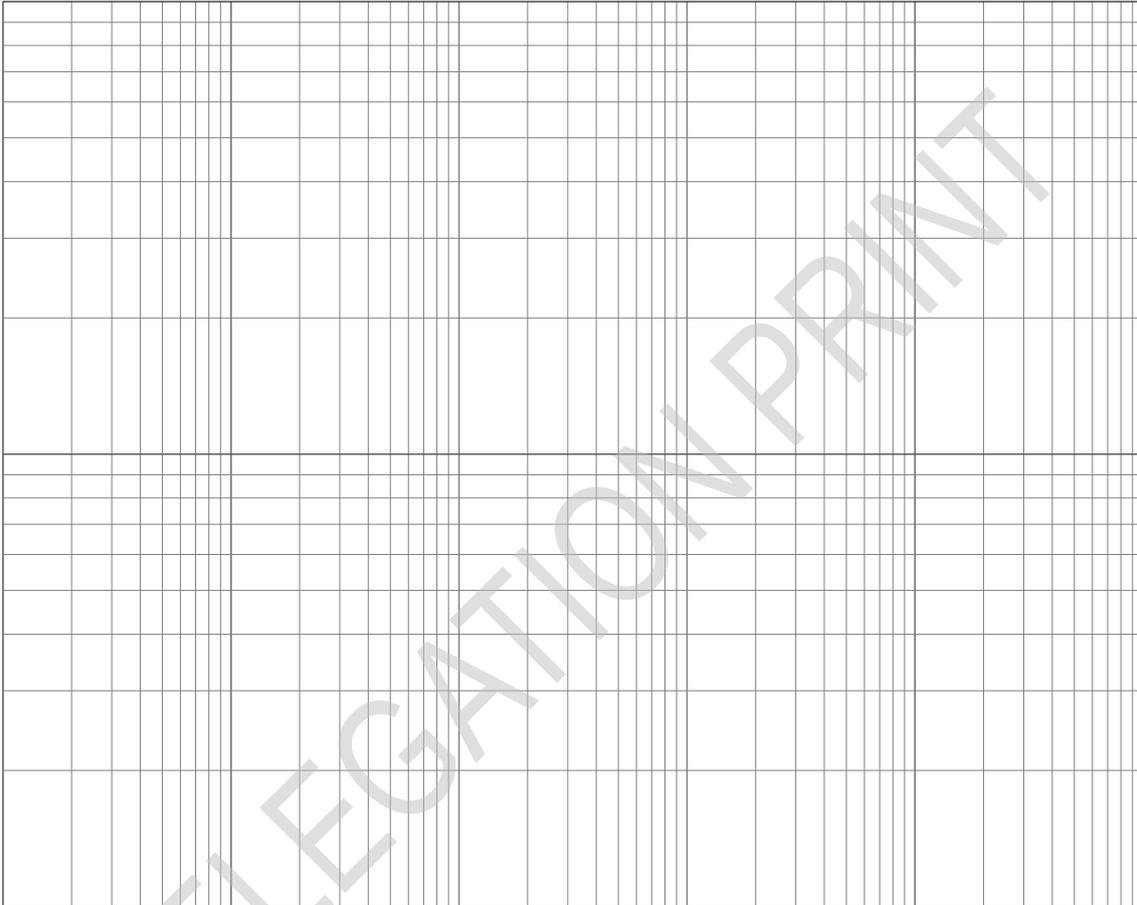
$B_e =$              $\pm$







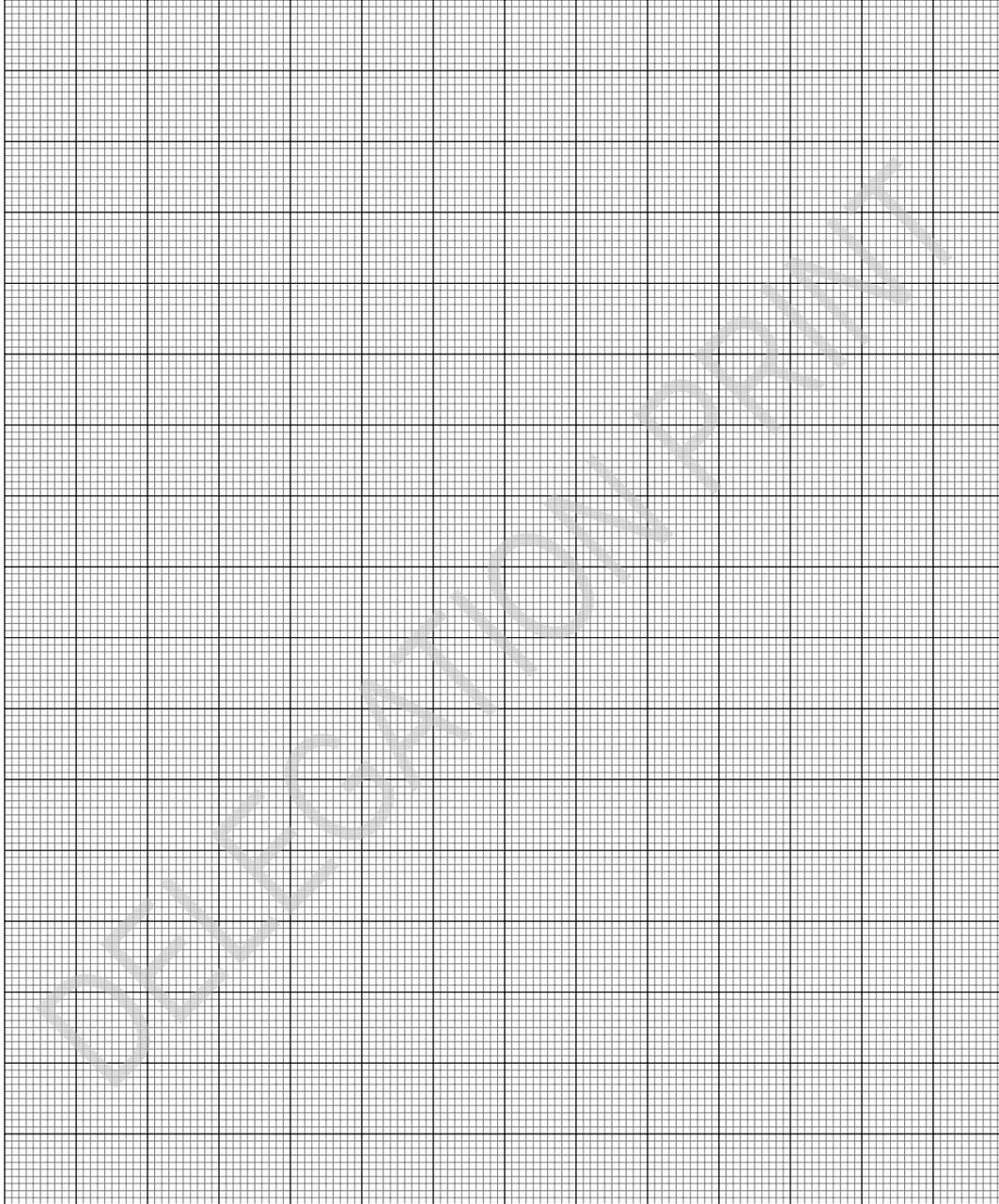
A.4 (1.2pt)



結論：



**A.4 (cont.)**



結論：



# Experiment

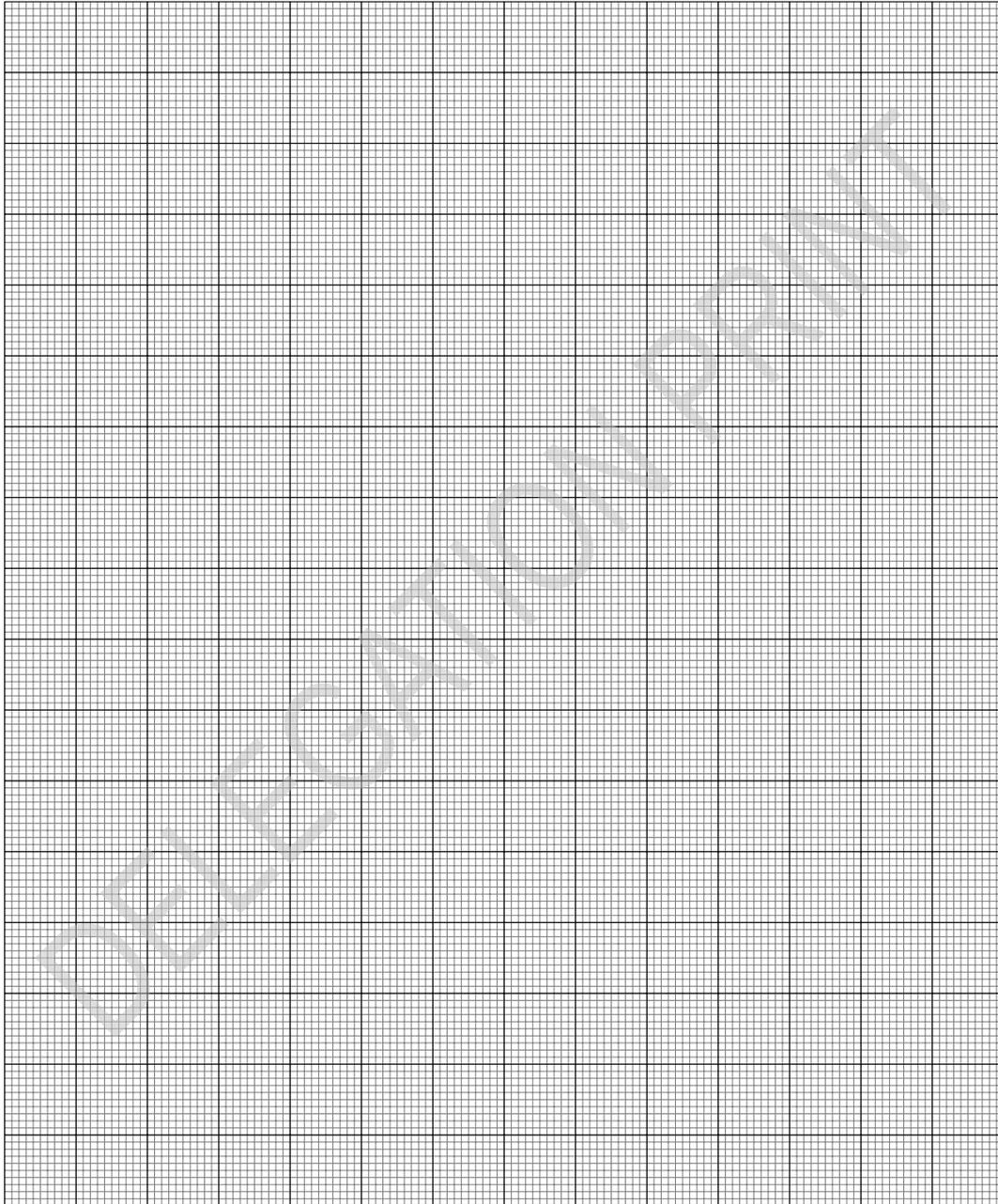


International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A2-5

Japanese (Japan)

**B.4** (1pt)



$g =$

## Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A2-6

Japanese (Japan)

### B.5 (0.6pt)

モデル #1 :

•  $L =$

•  $\alpha =$

モデル #2 :

•  $L =$

•  $\alpha =$

### B.6 (0.8pt)

$L_{50}$ (cm)					
---------------	--	--	--	--	--

$L_{50} =$                        $\pm$                       cm

## Experiment



International  
Physics Olympiad  
FRANCE 2025

# A2-7

Japanese (Japan)

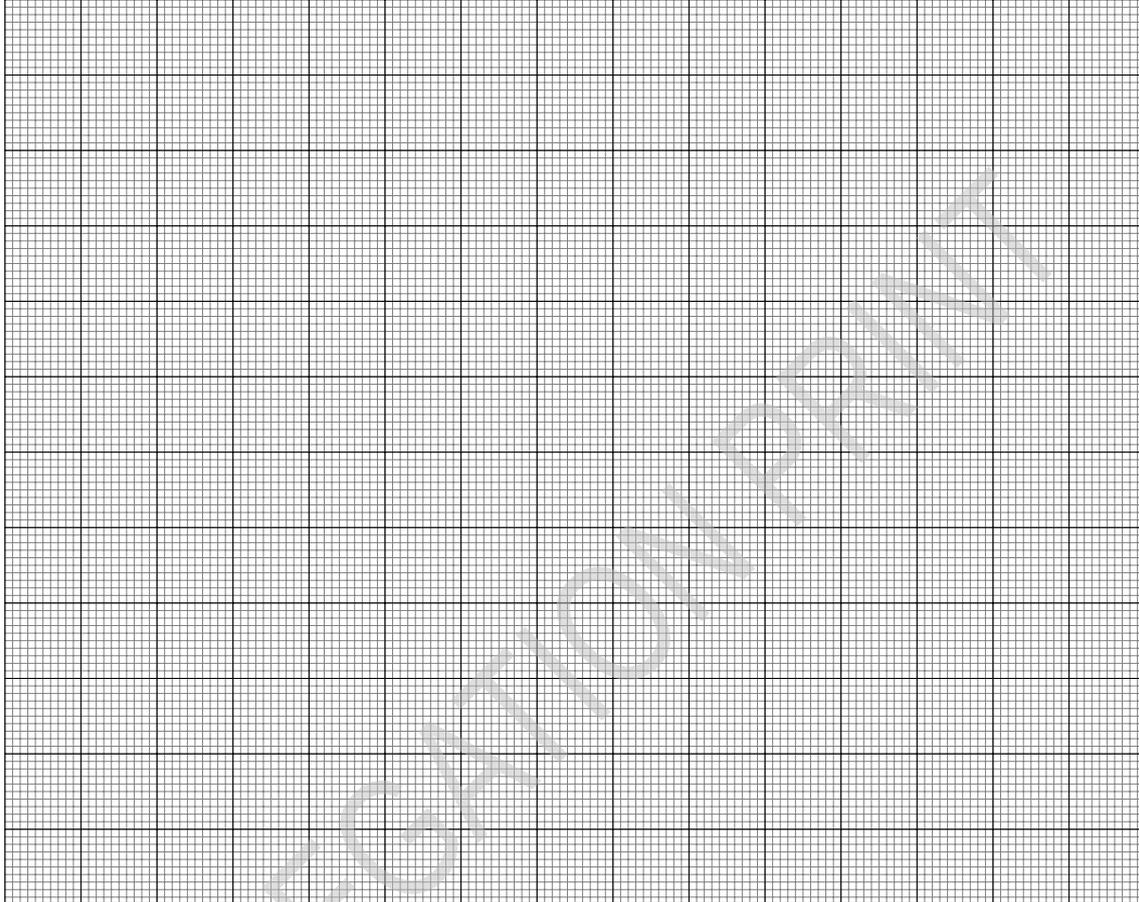
**B.7** (1.5pt)

$l$ (cm)	$L \pm \Delta L$ (cm)

DELEGATION PRINT



**B.7 (cont.)**



最も適したモデルは：

**B.8 (0.2pt)**

モデル #1 の場合： $\mu_{\text{eff}} =$

モデル #2 の場合： $k =$