

物理チャレンジ 2016
実験問題
2016年8月19日（金）

諸注意・実験器具確認	13:40	～	13:50
実験問題にチャレンジ	13:50	～	18:30
実験器具後片付け	18:30	～	18:40

実験問題にチャレンジを始める前に下記の<注意事項>をよく読むこと。

<注意事項>

1. 開始の合図があるまでは、机の上の問題冊子、解答用紙、下書き用紙、実験器具箱を開けてはいけない。
2. 監督者の指示があったら解答用紙の全てのページの所定の箇所にチャレンジ番号と氏名を記入しなさい。
3. チャレンジ開始後、次ページ以降に記載の実験で使用する器具・部品一覧により、全ての物品を確認した後、課題に取り組むこと。
4. 実験結果や計算結果、式の導出など、採点して欲しい事項は解答用紙の所定の場所に記入すること。下書き用紙は回収・採点しないので、解答はすべて解答用紙に記入すること。
5. 持参した筆記用具と、与えられた実験装置、部品、定規、電卓以外は使用してはならない。
6. 実験中に部品を壊した場合には、1回だけ新しいものと交換できるので、番号札を通路側に出して監督者に申し出ること。2回以上同じ部品を壊した場合には、さらに新品と交換できるが、減点となる。ただし、数には限りがあるので、交換できない場合もある。
7. チャレンジ開始後から17:10まではチャレンジを終了（放棄）することはできない。
8. チャレンジ時間中に気分が悪くなったときやトイレに行きたくなったとき、あるいは質問があるとき、チャレンジを終了するときには、番号札を通路側に出して監督者に知らせること。
9. 終了の合図があれば、解答をやめ、解答用紙を机の上に置き、監督者による回収がおこなわれるまで静かに待つこと。その後、実験器具をもと通りに箱に入れること。ゴミは机の上に1ヵ所に集めておくこと。問題冊子と下書き用紙は持ち帰ってよい。

実験で使用する器具・部品等

机上の物品を点検し、以下の器具・部品があることを確かめなさい。(1)(2) は箱外にある。すべて袋を開けず、仮止めを外さずに確認すること。部品不足の時は監督者を呼ぶこと。

表 1 実験で使用する器具・部品等一覧

品 名	数量	図	検
(1) デジタルオシロスコープ プローブ付き	1 個	1	
(2) 速さ測定器 (ビースピ V)	1 個	2	
(3)*アルミフレーム H 型脚	1 個	3	
(4)*アルミ縦フレーム① (20 mm×20 mm×400 mm) (金具付き)	1 個	4	
(5)*アルミ縦フレーム② (20 mm×20 mm×400 mm) ((12)を挿入済み)	1 個	5	
(6)*アルミ横フレーム① (20 mm×20 mm×100 mm) ((8)を取付け済み)	1 個	6	
(7) アルミ横フレーム② (20 mm×20 mm×100 mm) L 型金具付, 課題 2 用部品が輪ゴムで仮止めされている。	1 個	7	
(8)*アルミフレーム用 L 型金具① (6 個はフレームに取付け済み, 残 1 個)	7 個	8	
(9) 木板 (60 mm×100 mm×12.5 mm) 直径 18 mm の穴, (10)(11)取付け済み	1 個	9	
(10) アルミフレーム用 L 型金具② (木板に取付け済み)	1 個	10	
(11) 木ネジ (木板に L 型金具を付けるのに使用済み)	1 個	11	
(12)*アルミフレーム用ナット (M5) (18 個はフレームに取付け済み, もしくは挿入済み, 残 2 個, (8)と同梱)	20 個	12	
(13)*アルミプレート用板金プレート ((4)に取付け済み)	2 個	13	
(14)*ネジ① (M5 ボルト, 首下 10 mm, L 型金具用, 8 個使用済み, 残 8 個)	16 個	14	
(15)*ネジ② (M5 ボルト, 首下 8 mm, 板金プレート用, 全て(4)に取付け済み)	4 個	14	
(16) 円柱状ネオジム磁石 (直径 8 mm, 長さ 10 mm) 取扱注意	6 個	15	
(17) 細長透明アクリルパイプ① (直径 12 mm, 長さ 400 mm)	1 個	16	
(18) 細長透明アクリルパイプ② (直径 12 mm, 長さ 300 mm)	1 個	16	
(19) 銅パイプ (直径 10 mm, 長さ 300 mm, 肉厚 0.5 mm)	1 個	16	
(20) 薄肉アルミパイプ (直径 10 mm, 長さ 300 mm, 肉厚 0.5 mm)	1 個	16	
(21) 厚肉アルミパイプ (直径 11 mm, 長さ 300 mm, 肉厚 1 mm)	1 個	16	
(22) エナメル線 (直径 0.32 mm, 長さ 20 m)	1 個	17	
(23) 中太透明アクリルパイプ (直径 20 mm, 長さ 60 mm)	2 個	18	
(24) 太透明アクリルパイプ (直径 25 mm, 長さ 60 mm)	1 個	18	
(25) アルミパイプ (重りケース) (直径 8 mm, 長さ 20 mm, 肉厚 1 mm)	1 個	19	
(26) メッキ鉄ナット(M3)	3 個	20	

(27) 真ちゅう球（重り，直径 5 mm，質量 0.56 g，金色に近い色）	5 個	21	
(28) シール（大，小）（色は様々である）	各 1	22	
(29) 銅ワッシャー（外径 25.5mm，内径 12.7mm，厚さ 2.4mm）（切目無し）	3 個	23	
(30) 銅ワッシャー（(29)と同形状，切目有り）	3 個	23	
(31) ウレタンクッション（約 100 mm × 100 mm）	1 枚	24	
(32) 紙やすり	1 袋	25	
(33) デジタルクッキングスケール（以下，デジタル天秤(てんびん)と呼ぶ。 緑色のゴムは滑り止めだが，本課題では使用しない。箱内に電池。）	1 台	26	
(34) 樹脂パイプセット（5 本組）	1 組	27	
(35) テフロンチューブ（(34)と同じ袋の中。発展課題で使用する。）	1 個	28	
(36) PET 水容器（中に(34), (35), (37), (38)が入っている。）	1 個	29	
(37) 樹脂パイプ（コの字型）	1 個	30	
(38) ガラスピペット	1 個	31	
(39) シェーカー（保護容器兼用，中に(40)と(41)が入っている。）	1 個	32	
(40) ティッシュ	1 袋	33	
(41) ガラスコップ金具付き（*取扱い注意，ガラスのフチに触れぬこと）	1 個	34	
(42) ステンレス M5 総ネジ（長さ 150 mm）（(7)に仮止めされている。）	1 本	35	
(43) M5 ローレットつきナット（(7)に仮止めされている。）	1 個	36	
(44) 透明 ABS 樹脂スペーサー（(7)に仮止めされている。）	1 個	37	
(45) M5 ワッシャー（(7)に仮止めされている。）	3 個	38	
(46) 金属製スペーサー（(7)に仮止めされている。）	1 個	39	
(47) ステンレス蝶ナット（M5 用）	2 個	40	
(48) アルミ製コの字型回転止め	1 個	41	
(49)*ボールポイントドライバー	1 本	42	
(50)*定規（50 cm）	1 個	43	
(51)*はさみ	1 個	44	
(52) 糸（色は様々である）	1 個	45	
(53)*スコッチメンディングテープ（以下，スコッチテープと書く）	1 個	46	
(54) 両面テープ	1 個	47	
(55) 単 4 電池（ビースピ用）	1 個	48	

*実験課題 1, 2 で共通に用いる器具・物品

太線内の物品は一袋もしくは一体にまとめられている。

デジタル天秤とビースピを使用するときにはそれぞれ電池を入れること。



図1 デジタルオシロスコープ



図2 ビースピ



図3 H型脚

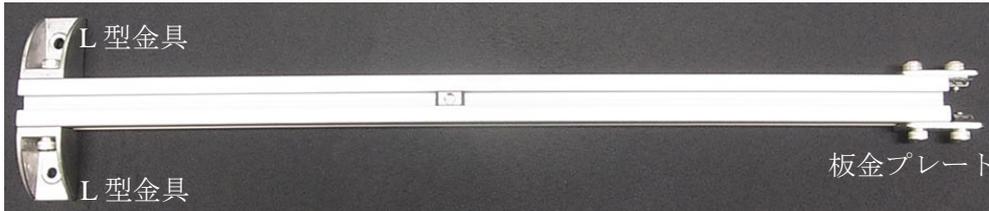


図4 アルミ縦フレーム①



図5 アルミ縦フレーム②

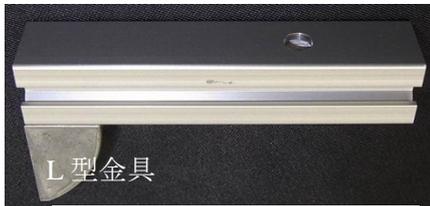


図6 アルミ横フレーム①



図7 アルミ横フレーム② (課題2用)



図8 L型金具①



図9 木板 (金具



図10 L型金具②



図11 木ネジ



図12 アルミフレーム用ナット(M5)



図 13 板金プレート



図 14 M5 ボルト
(上) 首下 10 mm
(下) 首下 8 mm



図 15 磁石

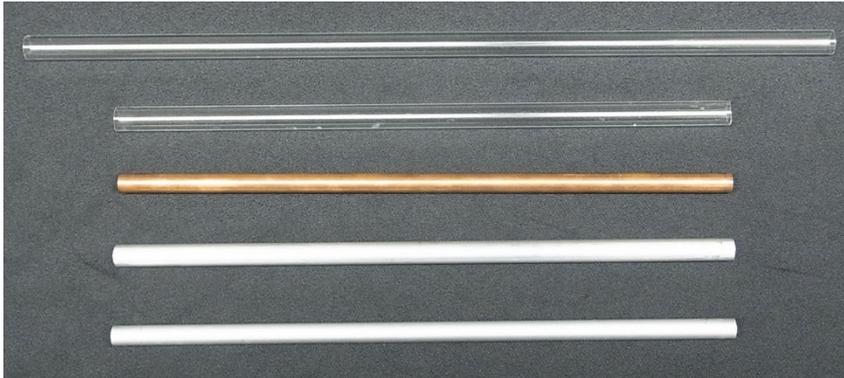


図 16 上から細長透明アクリルパイプ①, 細長透明アクリルパイプ②, 銅パイプ, 薄肉アルミパイプ, 厚肉アルミパイプ



図 17 エナメル線



図 18 透明アクリルパイプ
(左) (太) 直径 25 mm
(右 2 本) (中太) 直径 20 mm



図 19 アルミパイプ
(重りケース)



図 20 メッキ鉄ナット



図 21 真ちゅう球

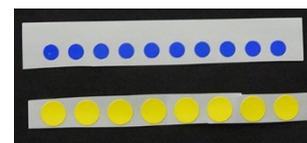


図 22 シール (大, 小)



図 23 銅ワッシャー
(上 3 個) スリット無し
(下 3 個) スリット有り

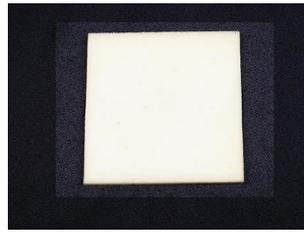


図 24 ウレタンクッション



図 25 紙やすり



図 26 デジタル天秤



図 27 樹脂パイプセット



図 28 テフロンチューブ
(非常に細い)



図 29 PET 水容器



図 30 樹脂パイプ



図 31 ガラスピペット



図 32 シェーカー



図 33 ティッシュ



図 34 ガラスコップ



図 35 M5 総ネジ



図 36 ローレットつきナット



図 37 透明 ABS 樹脂スペーサー



図 38 ワッシャー



図 39 金属製スペーサー



図 40 蝶ナット



図 41 アルミ製コの字型回転止め



図 42 ボールポイントドライバー

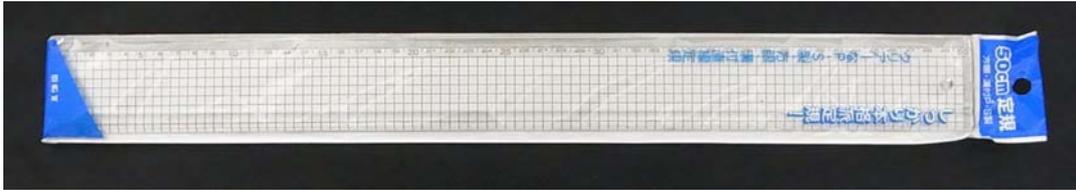


図 43 定規



図 44 はさみ



図 45 糸



図 46 スコッチテープ



図 47 両面テープ



図 48 単4電池

***注意** 物理量の値は、単位とする大きさを表す記号と、その何倍であるかを表す数値の積として表記される。今回の物理チャレンジの実験課題では、国際単位 (SI) 推奨の記法に従い、単位 U で表した物理量 X の数値を表やグラフに表す場合、欄や座標軸には、X/U と記し、そこに現れる数値が単位 U で表した物理量 X の数値であることを明示する。例えば、I/A は電流 I を A 単位で表したときの数値を表す。

<フレームの組み立て>

ここでは、課題1と課題2で共通に使用するフレームを手順に従って組立てる。
 フレームの組み立てに必要な部品は表2の通りである。

表2 フレーム用部品等の一覧

品名	数量	サイズ, 説明等	図
アルミフレーム H型脚	1	20mm×20mm×200mm と 20mm×20mm×140mm	3
アルミ縦フレーム①(金具付き)	1	20mm×20mm×400mm (接続金具付き)	4
アルミ縦フレーム②	1	20mm×20mm×400mm	5
アルミフレーム用L型金具①	7	必要な物は取り付けられている(予備1個)	8
L型金具付き木板	1	木ネジで木板にL型金具が取り付けられている	9
アルミフレーム用ナット(M5)	20	一部は既に脚等に使用されている。図49のようにアルミフレームに挿入して使用する。	12
アルミフレーム用板金プレート	2	アルミ縦フレーム①に取り付けられている	13
ネジ①(M5, 首下10mm)	16	フレームに一部使用済み(残8個)	14
ネジ②(M5, 首下8mm)	4	アルミ縦フレーム①に全て取付済み	14
ボールポイントドライバー	1	先端がボール型の六角レンチ(図50のようにネジの頭に斜めに差すことが可能)	42

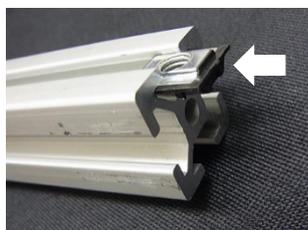


図49 アルミフレーム用ナット(左)とアルミフレームへの挿入図(右)



図50 ボールポイントドライバーはねじの頭に斜めに差すことが可能である。

組み立てるフレームの全体図を図 51 に示す。

表 2 の部品を以下の手順に従って、ボールポイントドライバーを用いて締め付けて組み立てる。

1. 図 52 を参考に、ネジ① (M5, 首下 10mm) 2 個とアルミフレーム H 型脚の溝に挿入されている 2 個のアルミフレーム用ナットを用いて、縦フレーム① (金具付き) を、端に取り付けられた 2 個の L 型金具で H



図 52

型脚と連結する。連結後立てたときにがたつきがある場合にはネジを一旦緩めてがたつきをなくしてから締め直すこと。

2. 図 53 を参考に、アルミフレーム用ナット 1 個とネジ① (M5, 首下 10mm) 1 個を用いて、木板を H 型脚に連結したアルミ縦フレーム①に取り付ける。



図 51 全体図

3. 図 54, 図 55 を参考に、アルミ縦フレーム①の上端に取り付けられたアルミフレーム用板金プレート、アルミフレーム用ナット、ネジ② (M5, 首下 8mm) 各 2 個を利用してアルミ縦フレーム②を一直線に連結する。一旦ネジを緩めるか、外す必要がある。



図 53

4. アルミ横フレーム①②については、各課題で指示に従って取り付けること。



図 54



図 55

実験課題 1 渦電流による制動力の測定

【導入】円柱状の磁石を金属パイプに通してみよう。(試しに銅のパイプを鉛直に立てて1個の円柱状磁石を通して確かめなさい。)自由落下させた場合に比べ、パイプの下から出てくるまでにかかる時間が非常に長いことに気付くであろう。この現象は、ガラスやプラスチックのパイプでは見られない。これは、磁石の運動によって導体中に生じた誘導電流の効果と考えられる。

導体の近くで磁石が動くと、ファラデーの電磁誘導の法則により、導体中に誘導起電力が生じ、ループ状に電流が流れる。これを渦電流という。渦電流が作る磁場は、磁石の運動による磁束の変化を妨げる向きに生じ(レンツの法則)、結果として、磁石に対し、その運動を妨げる向きの力(以下では「制動力」とよぶ)を及ぼす。

【目的】この課題では、導体パイプ中を運動する円柱状磁石が受ける渦電流からの力が、どのように定まるか(さまざまなパラメータにどのように依存するか)を次の3段階に分けて定量的に調べる。

- (1) 磁石の運動によりコイルに生じる誘導起電力のオシロスコープによる観測
- (2) 金属パイプに生じる渦電流による制動力の測定
- (3) 導体の形状による渦電流の制動力の違い

<課題 1 で使用する部品>

表 1-1 実験課題 1 で使用する部品・器具等の一覧

品名	数量	サイズ, 説明等	図
デジタルオシロスコープ	1	使用方法の練習を先におこなうこと。	1
速さ測定器(ビースピ)	1		2
フレーム	1	<フレームの組立て>で組立てたもの	51
アルミ横フレーム①	1		6
ネジ①	1	六角穴付ステンレス M5 ボルト, 首下 10 mm	14
円柱状ネオジム磁石(*)	6	直径 8 mm, 長さ 10 mm	15
細長透明アクリルパイプ①	1	直径 12 mm, 長さ 400 mm, 肉厚 1 mm	16
中太透明アクリルパイプ	2	直径 20 mm, 長さ 60 mm, 肉厚 3 mm	18
太透明アクリルパイプ	1	直径 25 mm, 長さ 60 mm, 肉厚 4 mm	18
エナメル線	1	直径 0.32 mm, 長さ 20 m	17
糸	1	色は様々なものがある	45
メッキ鉄ナット	3	M3 (磁石に付く)	20
スコッチテープ	1		46

両面テープ	1		47
細長透明アクリルパイプ②	1	直径 12 mm, 長さ 300 mm, 肉厚 1 mm	16
銅パイプ	1	直径 10 mm, 長さ 300 mm, 肉厚 0.5 mm	16
薄肉アルミパイプ	1	直径 10 mm, 長さ 300 mm, 肉厚 0.5 mm	16
厚肉アルミパイプ	1	直径 11 mm, 長さ 300 mm, 肉厚 1 mm	16
アルミパイプ (重りケース)	1	直径 8 mm, 長さ 20 mm, 肉厚 1 mm	19
真ちゅう球 (重り)	5	直径 5 mm, 質量 0.56 g	21
シール (大, 小)	各 1	色は様々である	22
銅ワッシャー (切目無し)	3	外径 25.5 mm, 内径 12.7 mm, 厚さ 2.4 mm	23
銅ワッシャー (切目有り)	3		23
ウレタンクッション	1	約 100 mm × 100 mm	24
紙やすり	1 袋		25

***注意**

円柱状ネオジム磁石は非常に強力なので、離れていてもお互いに力を及ぼし合って引き付け合い、手などを挟んでケガをしたり、腕時計などを破壊したりする可能性がある。また、見た目よりも割れやすいため、複数の磁石が勢いよく衝突すると割れてしまうことがある。取扱には十分注意すること。

課題 1-1 誘導起電力のデジタルオシロスコープによる測定

この課題では、円形コイルの中心軸に沿って、磁化軸を鉛直に保った磁石を落下させるときに、コイルに生じる誘導起電力をオシロスコープで観察する。

*本課題の前に巻末の<付録5 デジタルオシロスコープの利用手引き>を読み、一通りの操作方法を理解すること。

[コイルの製作]

まず、図 1-1 に示すようなコイルを製作する。使用するのは中太透明アクリルパイプ（直径 20 mm，長さ 60 mm，肉厚 3 mm）とエナメル線（20m 巻）である。アクリル透明パイプの中心部に 50 回巻き付けてコイルとする。エナメル線はスコッチテープを使って固定する。アクリル透明パイプの両端 20 mm ずつは、速さ測定器の検出光が通過できるように、エナメル線やテープの無い状態にすること。巻き終わったらエナメル線の端を切断し、両端の被覆を紙やすりで取り除く。同形状のアクリルパイプはもう一つあるが、そちらは予備である。

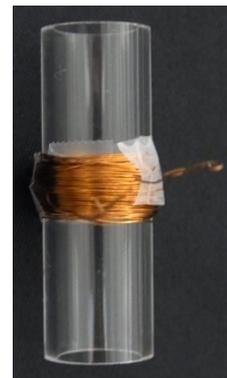


図 1-1

[実験装置の組み立て]

- ・実験装置の外観を図 1-2 に示す。
- ・図 1-2 を参考にして、アルミ横フレーム①を縦フレームに取り付ける。
- ・図 1-3 のように細長透明アクリルパイプ①（直径 12 mm，長さ 400 mm，肉厚 1 mm）の一端に糸（長さ 15~20 cm 程度）をスコッチテープで固定する。
(基本的に全てのパイプに同じ方法で糸を取り付ける。)

・図 1-4 のようにコイルを付けたアクリルパイプを木板の穴に合わせて置く。

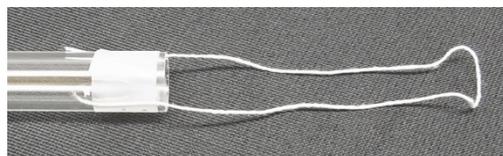


図 1-3



図 1-4

- ・細長透明アクリルパイプ①を、図 1-4 のようにコイルの付いたアクリルパイプと木板の穴の両方に通した後、図 1-5 のように横フレームの穴の付近につり下げる。2 つのアクリルパイプの中心ができるだけ一致するように調整し、位置が決まったらコイルの付いた



図 1-2

アクリルパイプや細長アクリルパイプをつるす糸を両面テープやスコッチテープで固定しておくが良い。



図 1-5

[測定の準備]

・図 1-6 のように、オシロスコープのプロブ（フックとワニロクリップ）を、上から見た時に、フック側からワニロクリップ側に向かってエナメル線がアクリルパイプを右回り（時計回り）に周回するような向きになるように、エナメル線両端の被覆を除去した部分に取り付ける。オシロスコープの示す電圧は、ワニロクリップ側を基準としたフック側の値である。

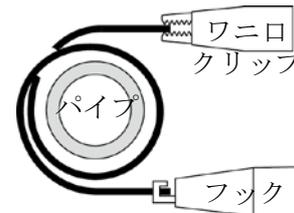


図 1-6

・速さ測定器（ビースピ）を図 1-7 のようにアクリルパイプの周りに置く。その際、磁石がパイプ中を落下する際、確実にビースピの測定用光路を遮るように、また、エナメル線やスコッチテープなど磁石以外の物が光路を遮ることがないように気を付けること。位置が決まったら、ビースピも両面テープで固定する。



図 1-7

・課題 1 では、細長透明アクリルパイプの上側から磁石を落として、ビースピでその落下速度を測定し、同時にコイル両端に生じる誘導起電力をオシロスコープで測定する。磁石は割れやすいので、図 1-2 のように落下位置にウレタンクッションを置いて衝撃を和らげること。

・磁石の落下開始位置（厳密には、磁石の下面の位置）とビースピの中間点の高さの差を h とする。 h を約 300 mm になるように固定し、正確な h を定規で測定しなさい。

・以下のようにビースピの動作確認をしなさい。どうしても測定ができないときには監督者を呼ぶこと。

(ア) ビースピの単位設定が **cm/s** となっていることを確認しなさい。なっていない場合、

【付録 4 ビースピの使用法】やビースピの使用説明書を読んで設定しなさい。

ただし、解答用紙に記入するときには単位を **m/s** に変換すること。

(イ) ビースピの **Start** ボタンを押し、単位の表示が点滅したら、磁石（直径 8 mm、長さ 10 mm）を落下させ、ビースピで速さを求めなさい。

(ウ) 重力加速度の大きさを $g=9.8 \text{ m/s}^2$ として、上で測定した h の値からビースピの測定位置での速さを理論的に求めて (イ) で求めた速さと比較しなさい。値が極端に異なる場合には何かの設定を間違えている可能性がある。見直すこと。

・次の手順に従い、図 1-8 を参考にオシロスコープを設定し、波形が観察されることを確認しなさい。どうしてもオシロスコープに波形が観測されない場合、監督者を呼ぶこと。

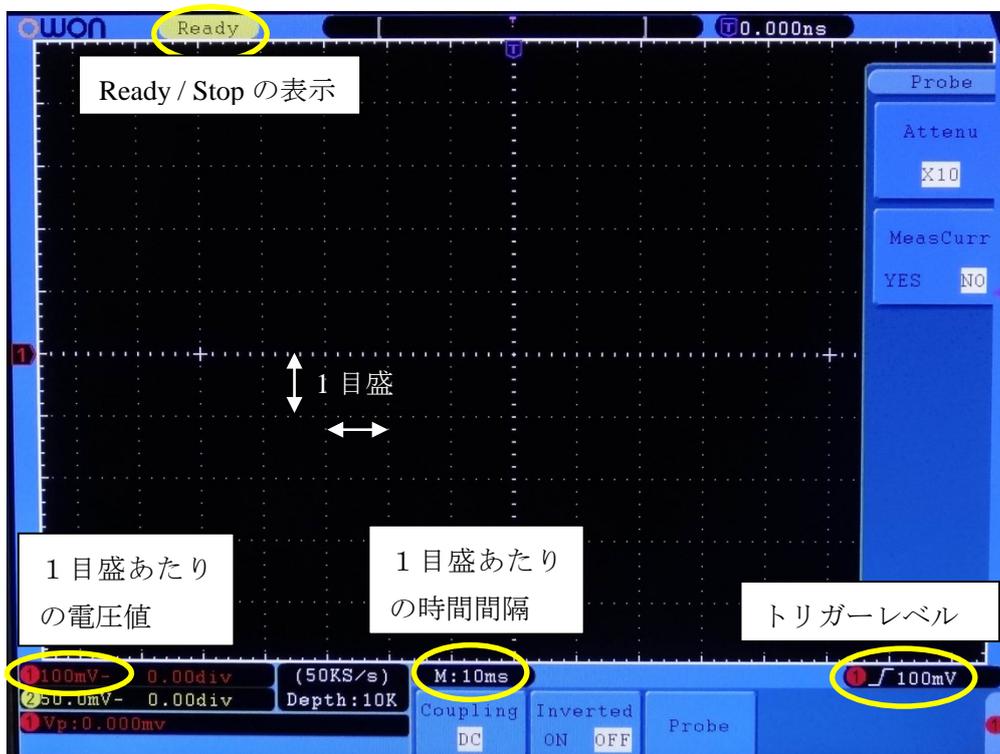


図 1-8

- (ア) 巻末のデジタルオシロスコープの利用手引きを読んでからおこなうこと。
- (イ) プローブを CH1 入力コネクタに取り付ける。
- (ウ) プローブ本体にあるアッテネーターの切り替えスイッチを確認し、10×側にする (図 A-10)。
- (エ) 赤い「CH1」ボタンを押し、画面下の設定が、「Coupling」は DC、「Inverted」は OFF となっていること、さらに、「Probe」の下の「H3」ボタンを押して画面の右側の設定が、「Attenu」は×10、「MeasCurr」は NO となっていることを確認する。設定が異なる場合、監督者を呼ぶこと。
- (オ) CH1「VOLTS/DIV」ダイヤルを回し、1目盛あたりの電圧値を 100 mV とする。
- (カ) 「SEC/DIV」のダイヤルを回し、1目盛あたりの時間間隔を 10 ms に設定する。
- (キ) オシロスコープの機能を用いて自動的に電圧を測定させる場合、付録 5 の「9. デジタルオシロスコープの測定機能の利用方法」を参照して、測定項目として PK-PK (V_{p-p}) を選択し、画面左下に「Vp :」を表示させる。
- (ク) 本体右中央の「TRIG LEVEL」ダイヤルを回しトリガーレベルを 100mV にする。
- (ケ) 本体右上の「Single」ボタンを押すとその上の「Run/Stop」ボタンが緑色になり、画面左上に黄色で「Ready」と表示される。すぐに「Run/Stop」ボタンが赤色になり、画面左上の表示が黄色の「Ready」から赤い「Stop」に変わるようだトリガーレベルが小さすぎるので、少しトリガーレベルを上げる。
- (コ) 「Single」ボタンを押して「Run/Stop」ボタンが緑色となり、画面左上に「Ready」と

表示されている間に磁石をアクリルパイプに落とすとオシロスコープに波形が観察される。「Run/Stop」ボタンが緑色のままで波形が観察されない場合、トリガーレベルが大きすぎると考えられるので、少し下げること。被覆のはがし方が不十分であったり、プローブの取付けが不完全であったりする可能性もある。確認すること。

- (サ) 波形が観察されたら、CH1の電圧と時間の設定つまみを調整して、波形が適当な大きさになるようにする。
- (シ) 新たに測定をおこなうときにはSingleボタンを押せばよいが、それでは画面上の表示は更新されない。磁石を落としてトリガーが働くと波形表示が更新される。

問 1-1 一部の磁石の片側にシールが貼り付けてある事を確認しなさい。シールの貼り付けられた磁石が一つも無い場合等には監督者を呼ぶこと。ビースピのStartボタンを押して単位が点減していることを確認し、オシロスコープの「Single」ボタンを押して画面左上に「Ready」が表示されていることを確認してから磁石一個を、(a) シールの貼られた面を下にしてパイプに入れて落とし、オシロスコープに現れた波形の概形を解答用紙に書き写しなさい。軸名、単位名、目盛りなども記入すること。同様に、(b) シールの貼られた面を上にして落した場合について、波形の概形を解答用紙に書き写しなさい。

問 1-2 落下距離 h を測定して解答用紙に記録し、重力加速度の大きさを $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ として理論的に予想される磁石の速さ v を計算しなさい。磁石を落して観察される最大電圧と最小電圧の差 V_{p-p} 及び v を何度か測定して平均値を表に記録しなさい。

問 1-3 シールの貼ってある側の極が何極か判定しなさい。

問 1-4 問 1-3 で判定した極性の場合、コイル両端の電圧が問 1-1(a)で観察されたような波形になる理由を図なども用いて説明しなさい。また、以上の結果から、観測された波形に関してどのようなことが定量的に言えるか、説明しなさい。

問 1-5 磁石を6個連結し、6個目（一番上）の磁石の落下距離が問 1-1の場合の落下距離 h と等しくなるような高さから落下させたときの波形を観察し、概形を解答用紙に書き写しなさい。得られた波形と磁石1個の場合の波形の違いを中心に、磁石の個数と観測される波形の関係を考察し、このような波形が観測された理由を説明しなさい。

問 1-6 磁石の数を1個に戻し、いくつかの異なる h において V_{p-p} および v を測定して表に記録し、 v に対する V_{p-p} のグラフを描きなさい。

問 1-7 V_{p-p} は v にどのように依存しているか、求めなさい。また、速さ v は観測される波形のかたちにどのように影響しているか、説明しなさい。

課題 1-2 渦電流による制動力の測定

この課題では、金属パイプ中を落下する磁石の運動におよぼす渦電流の影響を調べる。

【仮説】

重力 Mg と、速度に依存する「制動力」 f を受けて運動する質量 M の物体の落下速度はやがて一定の値になる。これを**終端速度**と言う。

大きさ v の終端速度で落下している質量 M の物体の力学的エネルギーは単位時間に Mgv だけ減少するが、これは非保存力である「制動力」 f が単位時間に物体にする仕事、すなわち、仕事率

$$P_f = -fv$$

の大きさに等しい。

この実験での「制動力」は渦電流の発生により生じている。パイプの壁を1周するループに生じる誘導起電力は落下する磁石の速さに比例し、ループに流れる電流は誘導起電力に比例するので、渦電流により単位時間に生じるジュール熱はパイプ全体では

$$P_J = kv^2$$

と表されると考えられる。このジュール熱は「制動力」 f が単位時間に物体にする仕事率 P_f の大きさに等しい。したがって、制動力の大きさと速度の大きさの間には、

$$f = kv$$

の関係が成り立つと予測される。比例係数 k は、磁石の強さのほか、パイプの材質（電気伝導率）や、形状（内径や肉厚）などに依存すると考えられる。

詳しくは付録3を参照すること。

【実験計画】

制動力の大きさと速度の大きさの間の比例係数 k がパイプの材質（電気伝導率）や、形状（内径や肉厚）などにどのように依存するかを調べるには、材質や形状の異なるパイプについて、落下速度の大きさと制動力の大きさのあいだの関係を調べればよい。

制動力の大きさは直接測定することは困難だが、終端速度に達していれば、制動力と重力は釣り合っているので、この課題では、磁石と一体となって落下する物体の質量と終端速度の関係を調べることにする。

【実験装置の組立て】

課題1-2で用いる主な部品、試料は以下の通りである。

- ・円柱状ネオジウム磁石（1個、質量 3.68 g）：落下させる磁石
- ・金属パイプ（3本、材質はアルミニウム、銅）：材質が共通で肉厚の異なるもの、肉厚が共通で材質の異なるもの（表1-2）。

表 1-2 試料パイプの特性

試料番号	材質	電気伝導度 $\sigma/(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$	内径 $2a/\text{mm}$	肉厚 δ/mm
1	銅	5.95×10^7	9.0	0.5
2	アルミニウム	3.77×10^7	9.0	0.5
3	アルミニウム	3.77×10^7	9.0	1.0

それぞれの一端に課題 1 - 1 の細長透明アクリルパイプ①と同じように糸を取り付ける。

- ・重り（質量 0.56 g, 4 個）：磁石を含む落体の質量を変えるために使用する。
- ・重りケース：アルミニウム製の重りケース（直径 8 mm, 長さ 20 mm, 肉厚 1 mm）にシールで底を作る。図 1-8 のように、シール（大）の 1 個を裏返し、その中央にシール（小）を図 1-9 のように貼り付ける。これを重りケースの片側に貼り付けて底とする。

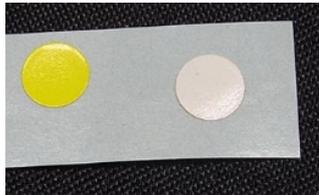


図 1-8

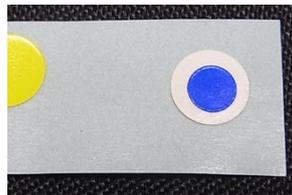


図 1-9

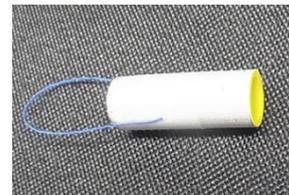


図 1-10

- ・課題 1 - 1 の細長透明アクリルパイプ①と同じように糸を取り付ける（図 1-10）。

- ・糸を 2 本長さ 400 mm 程度に切り、両方の一端を図 1-11 のように M3 のメッキ鉄ナットに結び付ける。1 本の糸の他端は図 1-12 のように重りケースに結び付け、もう 1 本の他端には何も付けない。



図 1-11

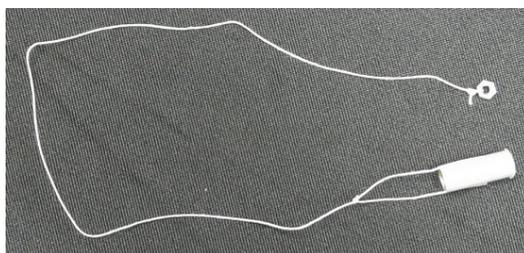


図 1-12

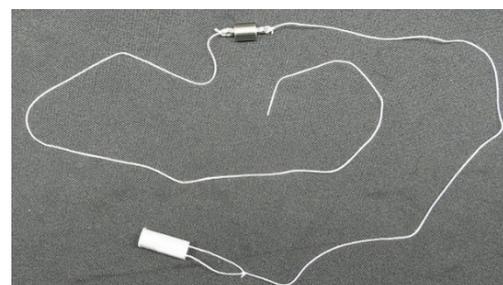


図 1-13

測定では、2 本の糸は、図 1-13 のように 1 個の強力磁石の両端に 2 個の M3 ナットを取り付けて一つながりとし、パイプの中を落下させる。

・以下の作業手順により、図 1-14 のような装置を組み立て、パイプの中を図 1-13 の糸でつないだ重りケース・磁石を通す。上部パイプは銅パイプ、薄肉アルミパイプ、厚肉アルミパイプのいずれかの金属パイプであり、その下に細長透明アクリルパイプ②を接続する。

1. アルミ横フレーム①を上側のフレームの上端に取り付ける。
2. 上部パイプのみを、図 1-15 のように横フレームにつり下げる。
3. 図 1-15 のように、一端に M3 のナットだけが付いた糸の何も付いていない側の端をスコッチテープで横フレームに仮留めし、ナットは横フレームの穴を通して上部パイプの中に通す。

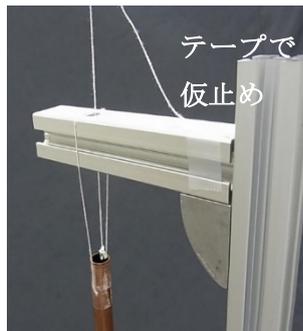


図 1-15

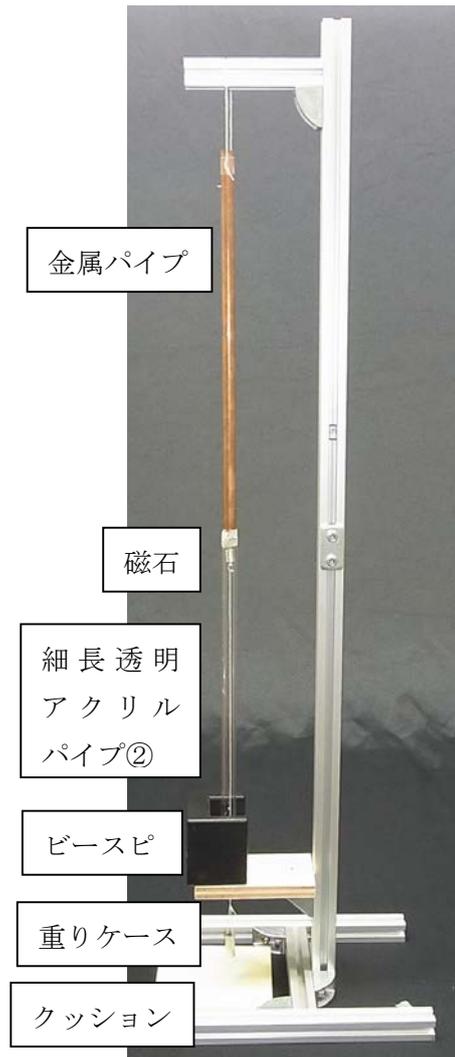


図 1-14

4. 図 1-16 のように、上部パイプを通り抜けた M3 のナットに磁石を吸い付かせ、さらに磁石の下面に重りケースと糸でつながれた M3 のナットを下から吸い付かせる。
5. 細長透明アクリルパイプ② (直径 12 mm, 長さ 300 mm) の下端を木板の穴に入れ、その上端から重りケース、糸、磁石を順に通してぶら下げたのち、アクリルパイプを上部パイプとスコッチテープで接続する (図 1-14)。上下のパイプが一直線をなし、鉛直になるように調節する。



図 1-16

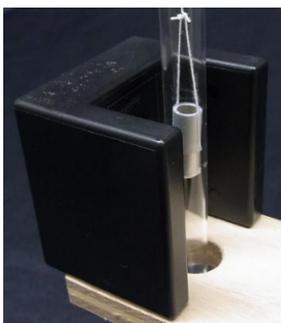


図 1-17

6. 上部パイプの上端から落下し始めた磁石が十分終端速度になっていると見なせる位置 (例えば、上部パイプの下端から 4 分の 1 程度の位置) に来たとき、重りケースの下端と、ビースピの中心の位置が一致する (図 1-17) ように、糸の長さや木板の高さを調節して固定する。

7. 糸の最上部は、全体を垂らしたとき、重りケースが細長透明アクリルパイプ②を完全に通り抜けるように、糸をフレームに貼り付けると、重りの出し入れ（図 1-18）が容易になる。



図 1-18

【予備測定】

重りケースに重りが入っていないことを確認する。下の【本測定】の間 1-8 の手順(1)・(2)を習熟するまで繰り返し、読み取った値のばらつき具合を参考にして、本測定における繰り返し測定回数を定めなさい。

【本測定】

問 1-8 3つの試料（パイプ）のそれぞれについて、次の測定を行い、結果を解答用紙の所定の箇所（表 1-2-1）に記録しなさい。

- (1) 磁石が金属パイプの上端に来るまで上の糸を真上に引き上げ、ビースピをスタートさせ、引き上げた糸を緩ませ、磁石と重りケースを落下させる。落下中に上の糸がピンと張ることがないように気を付ける。
- (2) ビースピの読みを記録する。
- (3) 信頼度を高めるため、(1)・(2)を予備測定で定めた回数繰り返し、平均値を求める。
- (4) 重りケース内の重りの個数が4つになるまで1つずつ加えて、(1)~(3)を繰り返す。
- (5) 重りケース内の重りをすべて取り出し、パイプを次の試料と交換して、(1)~(4)を繰り返す。

【仮説の検証】

問 1-9 前問の測定結果を表 1-2-2 に整理し、3つの試料（パイプ）のそれぞれについて、落体の金属部分（磁石、重りケース、メッキ鉄ナット2個と重り）に働く重力の大きさ M_0g と磁石の終端速度の大きさ v の関係を、試料ごとに記号を変えて1枚のグラフに表しなさい。3つの試料のそれぞれについて、制動力=落体に働く重力の大きさ Mg と落下速度の大きさ v との間に比例関係 $Mg = kv$ が成り立つと言えるか。言えない場合はそう判断した理由を、言える場合は比例係数 k を求め、算出過程とともに記しなさい。ただし、重り1個の質量を 0.56 g 、**重りが入っていないときの金属部分の質量を $M_0 = 5.58\text{ g}$** 、重力加速度の大きさを $g = 9.8\text{ m/s}^2$ とする。

【結論】

問 1-10 以上の結果から、渦電流が落下する磁石に及ぼす制動力の大きさ f は、磁石の速さ v 、パイプの肉厚 δ と電気伝導度 σ などのパラメータにどのように依存すると考えられるか説明しなさい。それぞれの結論について、その根拠となる実験結果や理論的に推定できることがらを挙げなさい。

課題 1-3 (発展課題) 導体の形状と渦電流によるジュール熱との関係

本課題は課題 1-1・2 及び課題 2-1~3 が終了し時間が余った場合に行うこと。

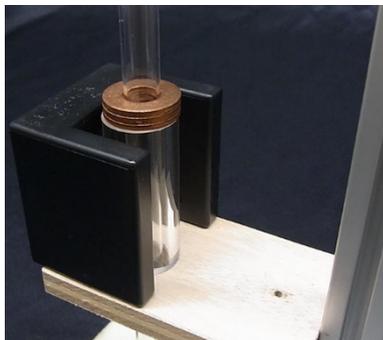


図 1-19

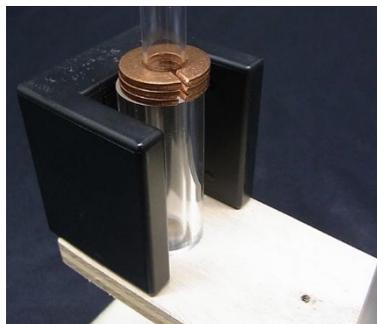


図 1-20

実験装置の配置は課題 1-1 とほぼ同じである。課題 1-1 のコイルの代わりに外径 25 mm, 長さ 60 mm の太透明アクリルパイプを置き, その上に銅のワッシャーを載せる。細長透明アクリルパイプ① (直径 12 mm, 長さ 400 mm) をワッシャー及びパイプの穴に通して, 上側で横フレームに引っかけてつるす。

磁石を細長いアクリルパイプの上端から落とし, 磁石がワッシャーを通過した後の速さをビースピドで測定する。ワッシャーには図 1-19 のようにスリットの入っていないものと, 図 1-20 のようにスリットの入ったものがある。それぞれの場合について, ワッシャーの枚数を 0 枚から 3 枚まで変えたときの速さの変化を測定し, ワッシャーの数やスリットの有無が磁石の速さに与える影響を考察する。落下の高さは 300 mm 程度で固定して測定すること。

問 1-11 スリットの入っていないワッシャーについて, 0 枚から 3 枚まで枚数を変えて速さを測定し表 1-2-3a 及びグラフに記入しなさい。

問 1-12 スリットの入ったワッシャーについて同様に速さを測定し表 1-2-3b 及びグラフに記入しなさい。その際, スリットの向きをそろえて重ねなさい。

問 1-13 スリットの有無による測定結果の異同について考察し, 渦電流によるジュール熱の大きさと導体の形状との関係を推定し, 説明しなさい。

問 1-14 上の推定をより確かなものにするための測定を, 今回与えられた装置・部品の範囲内で提案しなさい。もし余裕があれば, その実験を実施し, 結果を説明しなさい。

実験課題2 表面張力の測定

【導入】毛管（毛細管）現象などから、表面張力について最初に議論をしたのは、イギリスの物理学者、トーマス・ヤング（1773-1829）である。その考え方に従って、液体の表面張力現象を観察し、測定してみよう。

【目的】この課題では、まず毛管現象の現れ方を観察し、この現象の特徴と、そこで現れる規則性を体験する。その後、定量的に表面張力の値を計測する。

- (1) 樹脂パイプのセットを水につけて観察し、毛管現象に現れる定性的な規則性を観察する。
- (2) 表面張力の応用器具である、ガラスピペットを用いて、毛管現象の現れ方を観察する。
- (3) ガラスコップを用いて、古典的な表面張力の測定方法により水の表面張力定数を求める。

<課題2で使用する部品>

表 2-1 実験課題2で使用する部品・器具等の一覧

品名	個数	サイズ	材質	備考	図
樹脂パイプセット	1個	5本組	ABS樹脂	PET水容器内	27
ガラスピペット	1個	長さ10 cm	ガラス	PET水容器内	31
シェーカー	1個	容量450ccまでの計量機能つき	プラスチック	保護容器兼用、ふたは「小型水容器」	32
ガラスコップ （*取扱い注意）	1個	外径59 mm, 高さ103 mm	強化ガラス	つりさげ器具つき（保護容器内）	34
アルミフレーム	1台		アルミ	課題1と共用	51
アルミ横フレーム①	1個		アルミ	課題1と共用	6
アルミ横フレーム②	1個	課題2用	アルミ	部品が仮止め済み	7
蝶ナット	2個	M5用	ステンレス		40
コの字型回転止め	1個		アルミ		41
デジタル天秤	1台	最小感度 0.1 g		タニタ KD-192	26
PET水容器	1個	深さ40 mm, 直径120 mm	PET	コの字型樹脂パイプ付き	29
テフロンチューブ	1個	発展課題で使用する	テフロン	樹脂パイプセットの袋に同梱	28

*ガラスコップは、洗浄後シェーカーの中にポリ袋をかぶせ、保護されている。汚染を防ぐため、むやみに取り出さないこと。

これらに加え、水（PETボトル）を別に配布する。飲用と同じ水だが、実験が終るまで区別すること。定規、スコッチテープなどは、課題1と共用する。

<デジタル天秤の使用法>

課題2の実験開始前に、使用するデジタル天秤の使用法について簡単に説明する。

使用するデジタル天秤は、最大で2000gまで測定できるが、通常モードでの分解能は1gである。微量モードでは、測定範囲1000g以下では分解能0.5g、さらに200g未満では分解能0.1gで測定できる。そのため課題2では最高感度が必要なため200g以上加重しないようにする必要がある。また、電池の節約のために、6分以上同じ表示が続くと、電源が切れる（オートパワーオフ）ので注意する必要がある。なお、g/ml ボタンは使用しない。

1. 通常使用時は、[ON/OFF]ボタンを押し電源を入れると、約4秒後に、0を表示して計量できるようになる。最初は通常モードとなり小数点以下は表示されない。このモードでは上部に $\boxed{1}$ マークが表示される。

2. 電源の入った状態で、計量皿に容器などの測定物がのっけていても、[0表示/微量]のボタンを1回押すと、表示は0となり、容器の重量を差しひいた、追加の重量だけを測定できる。また、電源の切れた状態で計量皿に容器などの測定物を乗せた後、電源を入れた場合も同じ状態となる。



図2-1 デジタル天秤
(カバーなし)

3. 計量皿にのっている重量が200g未満のとき、もう一度、[0表示/微量]のボタンを押すと、微量モードとなり、重量表示は0.0となる。この微量モードでは上部に $\boxed{0.1}$ マークが表示される。課題2では、このモードで、ある最初の重量からの変化を測定する。この場合、計量皿の上の重量が[0表示/微量]のボタンを押したときの基準重量より軽くなると、表示はマイナスとなることに注意する。微量モードの場合は、わずかに表示がふらついて安定しないことがある。

【練習課題】

上記の機能を確認するために、何も物っていない状態で[ON/OFF]ボタンを押して4秒以上待ち、画面の表示テストが終了して表示が0となることを確認しなさい。次に空のPET水容器等をのせた後、[0表示/微量]ボタンを押して表示が0になることを確認しなさい。もう一度[0表示/微量]ボタンを押すと表示が0.0になることを確認しなさい。

次に、電源を切った状態でPET水容器等をのせ、電源を入れた場合は表示が0になり、[0表示/微量]ボタンを押すと表示が0.0になることを確認しなさい。表示がおかしいときには監督者を呼ぶこと。

【実験の準備】

表面張力の実験結果は、測定対象表面の汚れ（手の油、ゴミなど）に依存しやすい。このため、課題2-3の測定で使うガラスコップは、洗浄後、シェーカーの中にポリ袋をかぶせ、保護されている。ガラスコップは、壊れやすいので、取り扱いに注意する。シェーカーのふたは、ねじるとはずれ、小型水容器として使用できる。

課題2-1 樹脂パイプセットによる毛管現象の観察

樹脂パイプセットは、図2-2 に示すように、内径約 1.2, 1.5, 2, 3, 4 mm（パイプの内径には 0.1 mm 程度のばらつきがある）、長さ約 4 cm の樹脂パイプ5本が、テープでひとまとめにされている。



図 2-2

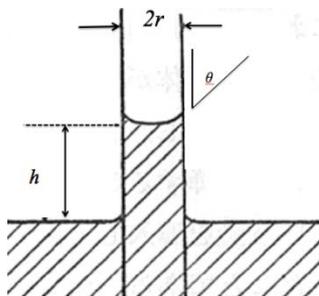


図 2-3

小型水容器（シェーカーのふた）に 3分の2 程度水を満たす。パイプセットのテープ部分を手で持ち垂直にテープ下端の近くまでゆっくり水に浸す。その後、パイプを静かに引き上げ、液面の高さを記録する。

パイプを水につけたときの様子は図2-3 のようになる。

図2-3 は断面図である。斜線部が液体を示す。パイプの内径は $2r$ 、パイプ外の液面を基準としたパイプ内の液面の高さが h 、液体とパイプ壁との接触する点で液体の表面がなす角（接触角）が θ である。接触角は表面の濡れやすさで

変わり、ガラスと水の場合は $\theta = 0$ と考えて良い。高さ h の液柱部分に働く重力をささえているのが表面張力である。一般に、液体の表面に、長さ l の線分を考えると、線分の両側には、その長さに比例し互いに引き合う力（表面張力） $F (= \gamma l)$ が働き、液体の形を最適化する（ γ は単位長さあたりの力で、表面張力定数と呼ばれる）。図2-3 では $2\pi r$ の長さの円周に、鉛直方向に表面張力による力 $2\pi r \gamma \cos \theta$ が働き、これが高さ h の液柱部分に働く力をささえていると考えることができるから、高さ h は

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{r\rho g} \quad (2-1)$$

となる。ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度の大きさである。

問 2-1 樹脂パイプ内の水面の高さ h を定規で測定し、パイプの内半径 r と高さ h を解答欄の表に記入しなさい。（液面の湾曲は無視してよい。静かに水につけ、ゆっくり引き上げて空気中に取り出したとき、パイプ中の水の高さに変化が無ければ、その状態で計測してよい。測定を繰り返してデータをとりなさい。水滴がパイプ内に残った状態で繰り返すと、正確な測定ができないことがある。）

問 2-2 式(2-1)で、 h が r の逆数に比例することを念頭において、問 2-1 で得られたデータをグラフとして示しなさい。

課題2-2 ガラスピペットによる水の表面張力の測定

毛管現象の性質を使って、実用上使われる器具にガラスピペットがある。ガラスピペットは、水溶液状の薬品を、表面張力を用いて一定量吸い取ることができる。

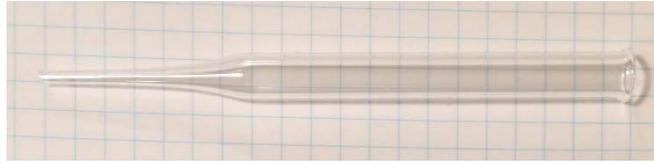


図 2-4 ガラスピペット

図2-4 は、細い部分の内径 $2r$ が約 1.6 mm、太い部分の内径が 約 6.0 mm のガラスピペットである。この測定では、課題2-1と同様に、水を満たした小型水容器に、ピペットの細い部分、太い部分を、順番に静かに水に浸し引き上げる。そして、それぞれの場合の水面の高さ h を記録する。実際のガラスピペット先端には内径の変化が有るが、この変化量は小さいため 1.6 mm で一定の内径であると今回は考えることができるとする。また太い部分のガラスのつば（表面張力で採取できる量以上の液を得るためなどに使う）も内径を大きく変えていないとみなすことにする。

問 2-3 ガラスピペットの両端を用いて、それぞれの場合の表面張力による水面上昇の高さ h を測定しなさい。ただし h の測定にあたっては、先端が水面に接した状態で測定すること。

問 2-4 得られた 2 点のデータから γ を推定するために、 r の逆数に対して h をグラフにプロットしなさい。

問 2-5 グラフから γ を評価せよ。 γ の値は単位とともに記しなさい。ただし接触角 θ はこの場合 0 とみなしてよい。水の場合、密度を $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、重力加速度の大きさを $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ とし、単位は力の単位 N と長さの単位 m の組み合わせで記しなさい。

課題 2-3 ガラスコップとデジタル天秤による水の表面張力の測定

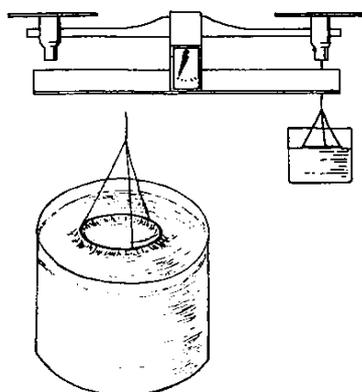


図2-5 天秤による表面張力測定
(AIP Teaching Introductory Physics による)

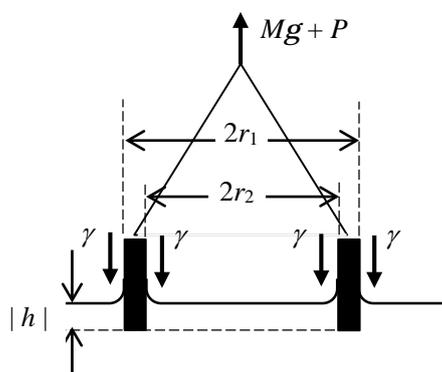


図 2-6 円環に作用する表面張力
(円環が一部水面下に沈んでいる)

図2-5は、古典的な天秤を用い、水中に糸でつるした円環（リング）を沈め、引き上げるときに液体から働く力から表面張力を求める方法の概念図である。

図2-6 は、円環に働く力を、模式化して示した断面図である。円環（外径 $2r_1$ 、内径 $2r_2$ 、図の黒い部分）に作用する表面張力を矢印で γ と表示している。円環の質量を M とし、円環をつりあげる力を $Mg+P$ とする。

この図は、円環の先端が深さ $|h|$ だけ、水面下に沈んでいる場合（ h は負の値と考える）を示している。この場合、円環は表面張力により、下方に引っ張られるが、同時に深さ $|h|$ の部分には、水による浮力で上方向の力を生じる。このとき、

$$P = 2\pi(r_1 + r_2)\gamma + \pi(r_1^2 - r_2^2)\rho hg \tag{2-2}$$

の関係がなりたつ。この式は、円環が水面以上に上昇した $h > 0$ の範囲でも、円環の底面全体（面積 $\pi(r_1^2 - r_2^2)$ ）が水に触れていれば成り立つが、この条件は h の値が小さければ近似的に満たされる。したがって h が 0 になる点での P を求めれば γ を決定できる。

この方法を、日常的に用いるガラスコップとデジタル天秤を使って実施し、水の表面張力を測定してみよう。本課題ではデジタル天秤に載った水の入った容器の上にガラスコップが逆さにつりさげられている。コップの縁が水につくと表面張力によって水とコップが引き合い、デジタル天秤の表示が変化する。つまり、この実験ではコップにはたらく力ではなく、その反作用である水にはたらく力を調べることになる。



図 2-7 測定用
ガラスコップ

【課題2-3の実験準備】

課題2-3では、円環のかわりとして、日常的に使われるガラスコップを用いて、表面張力を測定する。このために課題1と共通のアルミ

フレームから、コップをつり下げる。コップにはつり下げ用の袋ナット、ステンレス線がとりつけられている。

ガラスコップは洗浄後、ポリエチレンの袋をかぶせ、保護容器（シェーカー）の中に、水を吸い取るなどの用途に使うポケットティッシュとともに入っている。

コップの取り出しは、フレームの組み立てが終了してから行うこと。また、コップの、フチ（飲み口）の部分は直接手でさわらないこと。フレームの組み立て方は課題1の前に記載されている。

ここでは課題2に必要な部分を説明する。

課題1，課題2用の横フレームにはあらかじめ、L型金具がついている。これらを、縦フレームにとりつけるには、M5ボルト（10 mm），アルミフレーム用ナットを使う。工具はボールポイントドライバーを使う。

(1) M5 の 150 mm ネジ等が取り付けられている課題2の専用横フレームを縦フレームの下部に取り付ける（図2-8の下半分）。取り付け位置は下面の高さを机上から22 cm とする。取り付けが終わったら、運搬時固定用の輪ゴムは取り外す。

(2) 次に、課題1で使われる横フレームを、150 mm ネジが穴を貫通するように上からとりつける。貫通したネジの上部に蝶ナットを1つ、羽部が下になるようにねじこみ、これにアルミ製コの字型回転止めを、横フレームをまたぐようにとりつけ、もうひとつの蝶ナットを、羽部を上にしてねじこみ、2つの蝶ナットではさんで固定する。横から見た完成図は図2-8のようになる。

(3) フレームの H 型脚の間に、デジタル天秤、PET 水容器を置く。さらに、ガラスコップを取り出し、固定テープをはずして、袋ナットを、150 mm ネジの下部にねじ込む。

コップの内部と外部の気圧を均等にするため、図2-9にあるように、内部と外部をつなぐパイプをPET水容器にスコッチテープで数カ所固定する。水面は底から約 2 cm となるので、水にぬれな

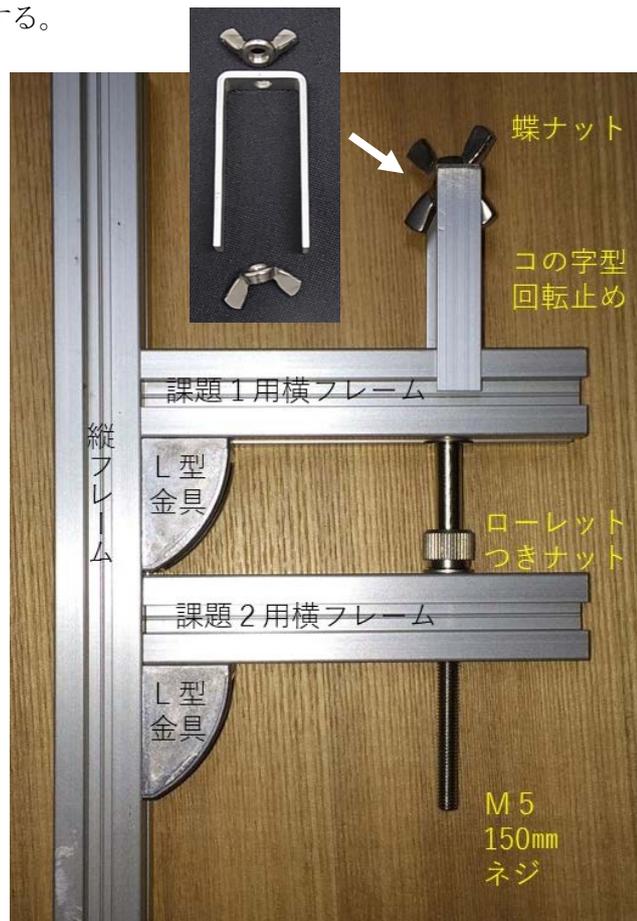


図2-8 フレーム完成図

横から見た完成図は図2-8のようになる。



図2-9 パイプの固定例

い部分でパイプが浮かないように特にしっかりテープで止める。パイプの中に水をいれないように注意する。シェーカーの目盛りで水を180 cc 測定し、PET 水容器の中にそそぐ。デジタル天秤上の重量が190 g を超えていないことを確認しておく。このためには、水容器を持ち上げた状態でデジタル天秤の電源を入れ、天秤上に容器をおろせばよい。装置全体の完成図は図2-10 のようになる。

【実験の手順】

下部横フレーム上のローレットつきナットを回転し、コップの下端が液面にふれる程度の位置にする。その後、コップが液面に触れていない位置までわずかに引き上げる。この位置でデジタル天秤の電源を入れ、数秒後、0 が表示されるのを待つ。その後、[0表示/微量] ボタンを押し、0.0 が表示され、画面に $\boxed{0.1}$ マークが表示されていることを確認する。水量が多すぎると表示されない ($\boxed{1}$ となる)。この位置を仮の原点として記録する。150 mm ネジのピッチは 0.8 mm なので、下側横フレーム上のローレットつきネジを回転すると、一回転で、0.8 mm コップを上下することができる。(ローレットつきネジ下部には、目印のために黒い印がつけてある。) コの字型アルミ板は、上下するときの、ネジの回転を防ぐ。



図 2-10 測定装置全体

問 2-6 水面上のコップの位置を徐々に下げ、ネジの回転数とデジタル天秤の表示値をデータとして記録し、表として示しなさい。特に、表示が負に変化する位置を記録する(この時、コップの縁を水が取り囲む)。測定は、コップ位置をさらに下げ、表示がふたたび 0.0 となる位置まで行いなさい。測定に時間がかかりすぎると、オートパワーオフ機能により表示が消えることがある。もし 0.0 までの途中で消えた場合にはコップの高さを仮の原点まで戻し、[ON/OFF] ボタンで電源を入れ、続いて [0表示/微量] ボタンを押し、0.0 の表示を確認して、測定をやりなおす。ただし、コップを水中まで下げ、表示が再度 0.0 となった状態のままオートパワーオフが動作した場合は、この位置のまま、電源を入れ、再度 [0表示/微量] ボタンを押し、0.0 を表示させ次の手順に移ってよい。また、0.0 表示の状態でも、2度 [0表示/微量] ボタンを押し再度 0.0 を表示させると、オートパワーオフまでの時間が初期化(延長)される。

問 2-7 つぎにコップ位置を少しずつ上げながら測定しなさい。この途中で水面を水平方向から観察し、コップの縁が水面と一致する位置を確認し記録する。コップの端面についた小さな黒いマークを利用するとよい。これを後の問 2-8 の $h=0$ の位置と

する。測定は $h=0$ を通り過ぎ、コップの縁が完全に水面を離れるまで続ける。

問 2-8 問 2-6, 2-7 のデータを、縦軸にデジタル天秤の表示、横軸をローレットつきナットの回転によるコップの移動距離に直してグラフ化しなさい。 $h=0$ の位置もグラフに矢印で示しなさい。

問 2-9 コップを上げてゆく過程で $h=0$ となる位置での デジタル天秤の値を示しなさい。 $h=0$ となる位置でのデジタル天秤の値は、コップを上げていく過程と下げていく過程で異なるだろう。以下では、表面張力定数の評価にコップを上げていく過程の値を使用するが、下げていく過程の値を使わない理由を、実験データを参照しながら考察しなさい。

問 2-10 式(2-2)から、水の表面張力定数 γ の値を求め、単位とともに示しなさい。コップの開口端の外径は 59 mm, 内径 57 mm である。

問 2-11 課題 2-2 で得られた γ と課題 2-3 で得られた γ を比較し、違いがあれば、その理由を考察しなさい。

課題 2-4 表面張力の振舞いについての考察 (発展課題)

本課題は課題 1-1・2 及び課題 2-1~3 が終了し時間が余った場合に行うこと。

これまでの実験結果から、日常生活にも関係した微小な力 (表面張力) の存在が確認できたはずである。課題2-3では、実験には水による浮力も問題になることを見た。ガラスでは接触角を 0 としたが、これになりたない場合がある。

問 2-12 課題 2-1 で ABS 樹脂のパイプで毛管現象を観測した。この場合の接触角を液面の形から考察し、ガラスの場合と比較しなさい。

問 2-13 接触角が 90° に近い材質 (たとえばテフロン) の場合、パイプの中の水面は、ガラスの場合と比較してどのようになるか観察し、説明しなさい。

問 2-14 ガラスのパイプに対し、接触角が 90° をこえ、表面張力の大きな液体がある (たとえば水銀)。この液体に立てた細いガラスパイプの中の液面は、どのようになるか考察しなさい。

【付録1 基礎事項：電磁誘導の法則】

鉛直上向きに z 軸をとる。図 A-1 のように、 z 軸方向に磁化した磁石が、 z 軸負の向きに速さ v で原点 O を通過する瞬間を考える。生じる磁場のようすは z 軸を対称軸として回転しても変わらないので、位置ベクトル \vec{r} で表される点 P における磁場の磁場ベクトル $\vec{H}(\vec{r})$ および磁束密度ベクトル $\vec{B}(\vec{r})$ は、点 P と z 軸を含む平面内にある。この平面内に、原点を通り z 軸と垂直に ρ 軸をとり、点 P の座標を (ρ, z) と表し、点 P における磁束密度ベクトル $\vec{B}(\rho, z)$ の ρ 軸方向成分を $B_\rho(\rho, z)$ と表す。

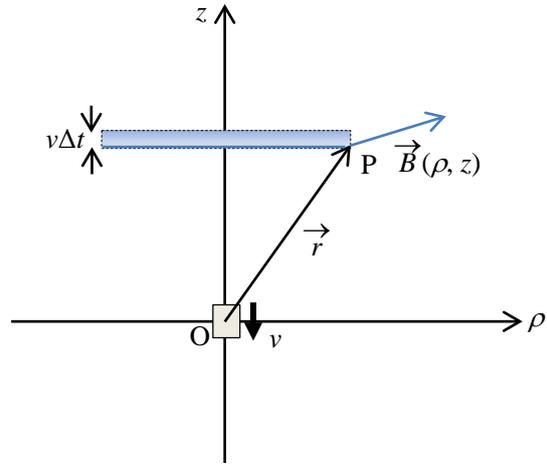


図 A-1

点 P を通り、 z 軸に中心をもつ半径 ρ の水平なリングを考える。このリングを上向きに貫く磁束を Φ と置く。原点にある磁石が、時間 Δt の間に、 $v\Delta t$ だけ落下するあいだに、リングを上向きに貫く磁束は、リングを縁とする高さ $v\Delta t$ の円柱面を外向きに貫く磁束の分だけ減少する。円柱面を貫く磁束は、円柱面の面積 $2\pi a v\Delta t$ と磁束密度の円柱面に垂直な (ρ 軸方向) 成分 $B_\rho(\rho, z)$ の積 $2\pi a v\Delta t B_\rho(\rho, z)$ で与えられるので、

$$-\Delta\Phi = 2\pi a v\Delta t B_\rho(\rho, z) \quad (\text{A1})$$

が成り立つ。

電磁誘導の法則より、リングに生じる誘導起電力は

$$V = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 2\pi a v B_\rho(\rho, z) \quad (\text{A2})$$

となる。すなわち、リングに生じる誘導起電力は、リングの位置における磁束密度の水平成分の大きさと速さの積に比例することが予想される。

【付録2 基礎事項：磁石のつくる磁場の磁束密度】

本実験では、直径 8 mm、高さ $d = 10$ mm の円柱状のネオジム磁石を用いる。この磁石では、大きさ q_m の正・負の磁気量が、上・下あるいは下・上の底面に一様に分布していると考えられる。以下では、簡単のため、円柱の太さを無視して、大きさ q_m の正・負の磁気量をもつ点磁極（点電荷に対応する）が間隔 d を隔てて中心軸上に存在すると仮定する。

磁気に関するクーロンの法則により、原点に磁気量 q_m をもつ点磁極が置かれたとき、位置ベクトル \vec{r} で表される点 P における磁場の磁場ベクトル $\vec{H}(\vec{r})$ および磁束密度ベクトル $\vec{B}(\vec{r})$ は、

$$\vec{B}(\vec{r}) = \mu_0 \vec{H}(\vec{r}) = \frac{q_m}{4\pi} \frac{\vec{r}}{r^3} \quad (\text{A3})$$

と表される。ただし、大気の透磁率は、真空の透磁率 μ_0 に等しいものとみなす。この場合、点 $P(\rho, z)$ における磁束密度ベクトルの円柱面に垂直な (ρ 軸方向) 成分 $B_\rho(\rho, z)$ は、

$$B_{\rho}(\rho, z) = \frac{q_m}{4\pi} \frac{\rho}{r^3} = \frac{q_m}{4\pi} \frac{\rho}{\sqrt{(\rho^2 + z^2)^3}} \quad (\text{A4})$$

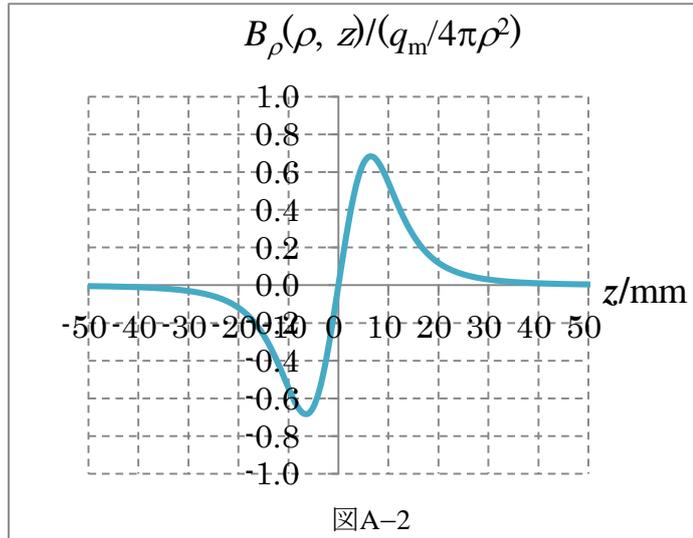
と表される。

磁石の中心が原点にあるとき、磁気量 $\pm q_m$ をもつ点磁極が z 軸上の $z = \pm d/2$ に置かれていることになるので、磁束密度ベクトルの ρ 軸方向成分 $B_{\rho}(\rho, z)$ は、

$$B_{\rho}(\rho, z) = \frac{q_m}{4\pi} \left(\frac{\rho}{\sqrt{[\rho^2 + (z - d/2)^2]^3}} - \frac{\rho}{\sqrt{[\rho^2 + (z + d/2)^2]^3}} \right) \quad (\text{A5})$$

で与えられる。

図A-2は、 $d = 10 \text{ mm}$, $\rho = 10 \text{ mm}$ の場合の $B_{\rho}(\rho, z)$ の概形を z の関数として描いたものである。その形と式 (A2) から、オシロスコープで観察される $V-t$ (誘導起電力-時間) 曲線の形が予測できる。



図A-2

【付録3 渦電流による制動力】

・終端速度 重力 Mg と、速度に依存する「制動力」 f を受けて運動する物体の落下速度はやがて一定の値になる。これを終端速度と言う。鉛直上向きを正の向きとすると、落下中の物体の運動方程式は、

$$Ma = -Mg + f \quad (\text{A6})$$

となり、速さが一定になった状態では、 $a = 0$ であるから、

$$f = Mg \quad (\text{A7})$$

が成り立つ。

・力学的エネルギーの減少率 大きさ v の終端速度で落下している質量 M の物体の重力による位置エネルギーは単位時間に Mgv だけ減少する。一方、運動エネルギー $\frac{1}{2}Mv^2$ は変わらない。したがって、

物体の力学的エネルギーは単位時間に Mgv だけ減少する。この値は、非保存力である「制動力」 f が単位時間に物体にする仕事、すなわち、仕事率

$$P_f = -fv \quad (\text{A8})$$

の大きさに等しい。

・エネルギーの保存 失われた物体の力学的エネルギー（もとは重力による位置エネルギー）は、「制動力」 f がする負の仕事（される仕事）となる。「制動力」は渦電流が運動する

磁石に及ぼす力であるから、「制動力」のされる仕事は、渦電流を流す仕事であり、導体中でジュール熱を発生させ、導体の内部エネルギーに変換される。

・渦電流によるジュール熱 次に、パイプ中を流れる渦電流により生じるジュール熱を図 A-3 のようなモデルで考える。鉛直上向きに z 軸をとる。内径（内側の直径） $2a$ 、薄い肉厚（側壁の厚さ） δ （したがって外径（外側の直径）は $2b = 2(a + \delta)$ ）、電気伝導率（抵抗率の逆数） σ の導体でできた長いパイプが z 軸を中心軸として固定されているとする。

対称軸方向に磁化した（例えば上面が N 極，下面が S 極）円柱状の磁石が、対称軸が z 軸に一致する姿勢を保って落下しており、その中心が原点を速さ v で通過する瞬間を考える。対称性から、磁石の作る磁力線はすべて、 z 軸を含む平面上にある。

パイプを微小な長さ Δz ごとに区切り、 $z = h$ の平面上のリングを考える。

電磁誘導の法則（式(A2)）より、リングに生じる誘導起電力は

$$V = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 2\pi a v B_{\rho}(a, h) \quad (\text{A9})$$

となる。リングは電気伝導率 σ の材質でできており、その断面が z 方向に Δz 、 r 方向に δ の小長方形であるから、断面積は $\Delta z \delta$ であり、長さは $2\pi a$ であるからリング 1 周の電気抵抗は、次式で与えられる。

$$R = \frac{2\pi a}{\sigma \delta \Delta z} \quad (\text{A10})$$

リングでの消費電力（単位時間に発生するジュール熱）は、

$$\Delta P = \frac{V^2}{R} = 2\pi a \Delta z \sigma \delta v^2 B_{\rho}^2(a, h) \quad (\text{A11})$$

となる。これは、 $z = h$ にあるリングにおける消費電力であるので、

$$\Delta P(h) = 2\pi a \Delta z \sigma \delta v^2 B_{\rho}^2(a, h) \quad (\text{A12})$$

と表すことにする。パイプを無数のリングに区切り、 j 番目のリングの z 軸方向の位置を h_j 、長さを Δz_j と置くと、長いパイプ全体での消費電力は、各リングでの消費電力の総和

$$P_j = \sum_j \Delta P(h_j) = 2\pi a \sigma \delta v^2 \sum_j B_{\rho}^2(a, h_j) \Delta z_j \quad (\text{A13})$$

で与えられる。これは、速さの 2 乗に比例するので、比例係数を k と置くと、単位時間あたりのジュール熱は、

$$P_j = k v^2 \quad (\text{A14})$$

と表される。

・制動力の落下速度依存性：渦電流により単位時間に生じるジュール熱と「制動力」 f が単位時間に物体にする仕事 P_f の大きさは等しいから、式 (A8) および (A14) から、制動力の大きさと、落下速度の大きさの間には、

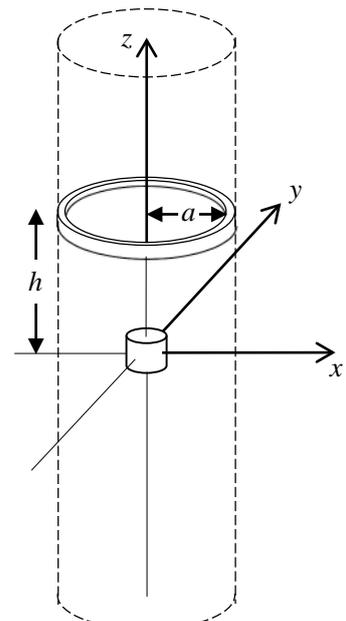


図 A-3

$$f = kv$$

(A15)

の関係が成り立つと予測される。

式 (A13) および (A14) を比較すると、比例係数 k は、磁石の強さのほか、パイプの材質（電気伝導率）や、形状（内径や肉厚）などに依存すると考えられる。

【付録4 速さ測定器（ビースピ）の使用方法】

1. 図 A-4 の start ボタンもしくは select ボタンを押すと電源が入る。電源が入らないときは、電池切れの可能性があるので、スタッフまで声をかけること。
2. 図 A-4 の単位表示部で sec が点滅していたら、ストップウォッチモードなので、start ボタンを長押しして、スピード測定モードにする。
注) m/s, km/h, cm/s のどれかが点燈もしくは点滅していればスピードモードである。
3. 単位が cm/s 以外の場合、select ボタンを長押しして単位を **cm/s** にすると**精度が高い**。
注) 単位が km/s の場合には1回長押し、m/s の場合には2回長押しすればよい。
4. start ボタンを1回短く押すと、スタンバイ状態となり単位部分が点滅する。
5. この状態で物体が図 A-5 の上下二か所のセンサーゲート部分を横切り、光路を遮って通過すると、その物体のスピードを測定できる。測定しているのは2カ所のセンサーゲート間の平均の速さである。
注) もう一度測定するときには合は start ボタンを押して測定スタンバイ状態（単位部分が点滅している状態）にする。
6. start ボタンと select ボタンを同時に長押しするか、操作せずに5分間放置すると電源が切れる。

より詳しいことが知りたいときには添付のマニュアルを読むこと。



図 A-4 ビースピ正面

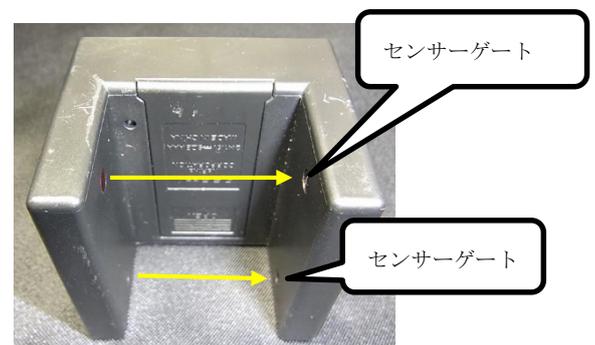


図 A-5 ビースピ測定部（矢印は光路）

【付録5 デジタルオシロスコープの利用手引き】

オシロスコープとは、電圧の振動 (=oscillation) を視覚的に表示させる (=scope) 装置である。テスター等では、電圧のその瞬間の値しか表示できないが、オシロスコープは、ある時間内の電圧の変化の様子を、グラフ表示させることができる。

実験課題で使用するオシロスコープは、デジタルオシロスコープ (型番 : SDS5032E) である。オシロスコープには、様々な機能があるが、ここでは、本実験課題で使用とされる機能や設定を、順に示していく。

1. オシロスコープの設置と表示の確認

まずは、オシロスコープを設置する。傾き具合を2段階で調整できる。後ろに折り畳みの踏台があるので、図 A-6 の様に引き出すと、全体を少し後ろに傾けた状態で安定させることができる。

電源コードを OA タップに接続し、オシロスコープ上部の左側にある電源スイッチを入れる。すると、メーカーのロゴが表示された後、写真 A-7 のように、黒地に白のドットのグラフに、赤と黄色のラインが表示される。この状態が、スイッチを入れた直後の、入力待ちの状態になる。(前にスイッチを切ったときの状態が保存されているので、図とは設定が異なる可能性がある。)



図 A-6 折り畳み式の踏台

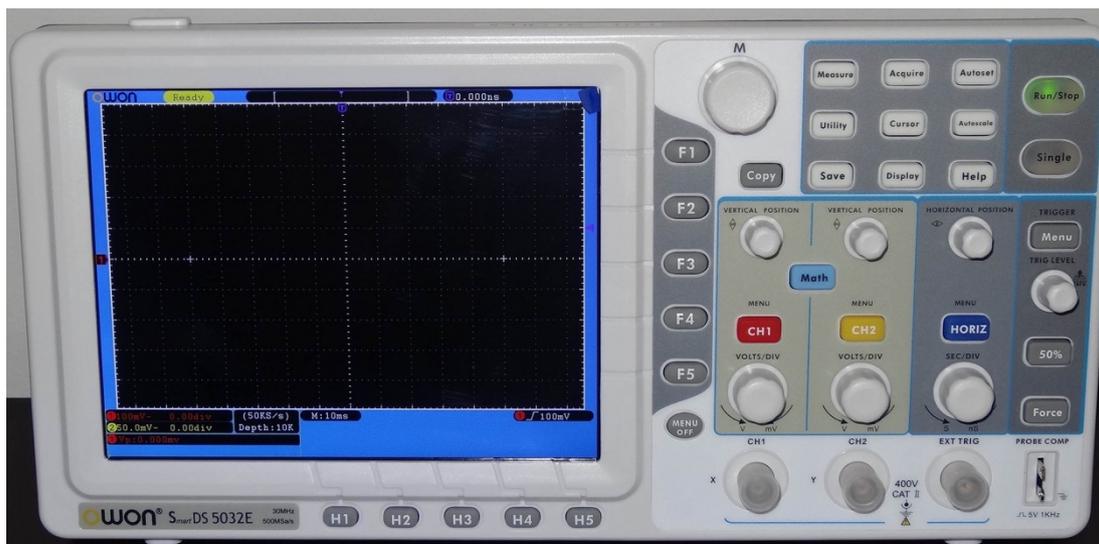


図 A-7 スイッチ ON の初期状態

2. 入力の表示・非表示の切り替え

赤いラインは、CH1に入力された信号を表示している。また、黄色いラインは、CH2に入力された信号を表示している。それぞれの表示・非表示は、正面右側に配列されているボタンとダイヤル類（図A-8）の、「CH1」または「CH2」のボタンを押して、切り替えることができる。この実験では、入力の一つしか使わないので、CH1を利用し、CH2は非表示にしておく。

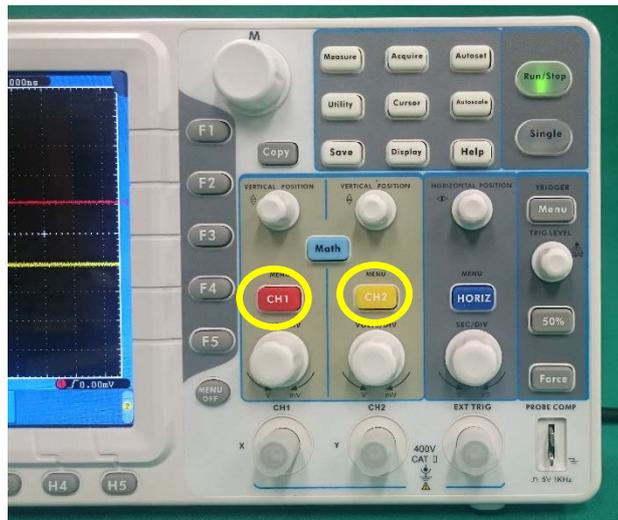


図 A-8 オシロスコープのボタン類

3. 信号入力に使用するケーブル

CH1にテスト信号を入力する。ケーブルには付属のプローブを使用する。プローブは同軸ケーブルで、中心（内部導体）を信号が伝わり、外側（外部導体）をグラウンド(0V)とすることで、信号の漏洩や外部からの影響が少なくなるよう、シールドされている。したがって、基本的にワニ口クリップ側をグラウンドと接続し、フック側を信号と接続する。フックは、カバーを引くことで先端が飛び出してくるので、それを端子に引っかける。もう一方の端は、BNC型プラグになっており、オシロスコープ側に接続する。



図 A-9 オシロスコープのプローブ

プローブの根元に、「1×」と「10×」と表示された切替スイッチがある。これはアッテネーターという信号の減衰器であるが、この実験では標準の、「10×」にしておく。



図 A-10 アッテネーターの切り替えスイッチ

4. 入力信号（テスト信号）の接続

プローブのBNC型プラグを、保護キャップを外してから、オシロスコープのCH1入力コネクタに接続する。コネクタ側には左右に出っ張りがあり、BNCコネクタにはその出っ張

入力、という意味である。また「M: 500us」と表示されているのは、時間間隔は1目盛りが500マイクロ秒、という意味である。ここで、1目盛は画面に表示されている正方形の一边の長さである。従って、図 A-12 の場合の波形は、0.5 ms ごとに、約 +5.0 V, 0 V の電圧が交互に繰り返されているので、周期は 1 ms (周波数は 1 kHz), 最大電圧と最小電圧の差 $V_{p-p} = 5 V$, となる。

手動で表示を調節したい場合は、以下のようにダイヤルを回して調節する。

- ① 縦軸：1目盛あたりの電圧値を変更することで、上下方向に拡大、縮小できる。目盛は、入力している CH1 の「VOLTS/DIV」のダイヤルを回すことで変更できる。反時計回りに回すと、1目盛あたりの電圧が大きくなるので、表示される波形は縦に縮むように見える。時計回りに回すと縦に拡大される。
- ② 横軸：1目盛あたりの時間間隔を変更するには、青い「HORIZ」ボタンの下のダイヤルを回す。反時計回りに回すと、1目盛あたりの時間が大きくなるので、波形は横に縮み、逆に、時計回りに回すと横に拡大される。ここで、時間の接頭辞は、m はミリ(10^{-3}), μ はマイクロ(μ , 10^{-6}), n はナノ(10^{-9}), を表す。

6. 表示を固定する場合

テスト信号は、周期的な変化なので、オシロスコープの画面に表示される波形は静止しているように見える。しかし、一度画面の端から端まで信号波形を描いたら、再び描き直しており、常に変化している。したがって、観測したい波形が得られたら、後からノイズが入ってきて描き直されてしまう前に、表示を固定しておく必要がある。

表示の固定は、オシロスコープの右上にある「Run/Stop」ボタンを押しておこなう（図 A-13）。緑色に点灯しているときは、連続的に信号を測定し描いている (=Run) が、一度ボタンを押すと、赤色に点灯し、ボタンを押した瞬間に一回だけ波形を測定し、表示が固定 (=Stop) される。

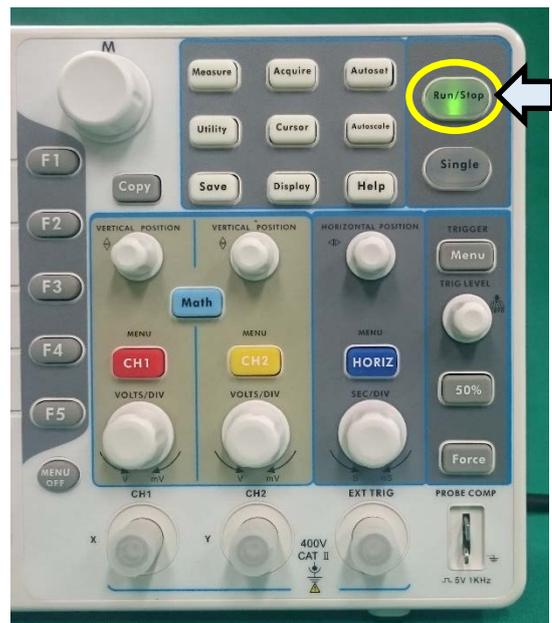


図 A-13 表示の固定

7. 単発（シングルショット）の入力信号を表示する場合

テスト信号は、周期的な信号で、かつ、連続的に発信されている。しかし、実験によっては、信号は単発的に、1回だけ発せられる場合もある。このようなシングルショット信号の波形をとらえて、表示を固定しておくには、以下のような手順をとる。

- ① トリガー：どのような入力を見るべき信号とするのか決めなくてはならない。このきっかけの事をトリガー（信号と見なす“引き金”）と言う。オシロスコープでは、ある一定値の電圧レベルを超えた場合に信号と見なす、という設定ができる。これをトリガーレベルと言う。右端中央にある「TRIG LEVEL」ダイヤルで調整でき、ダイヤルを回

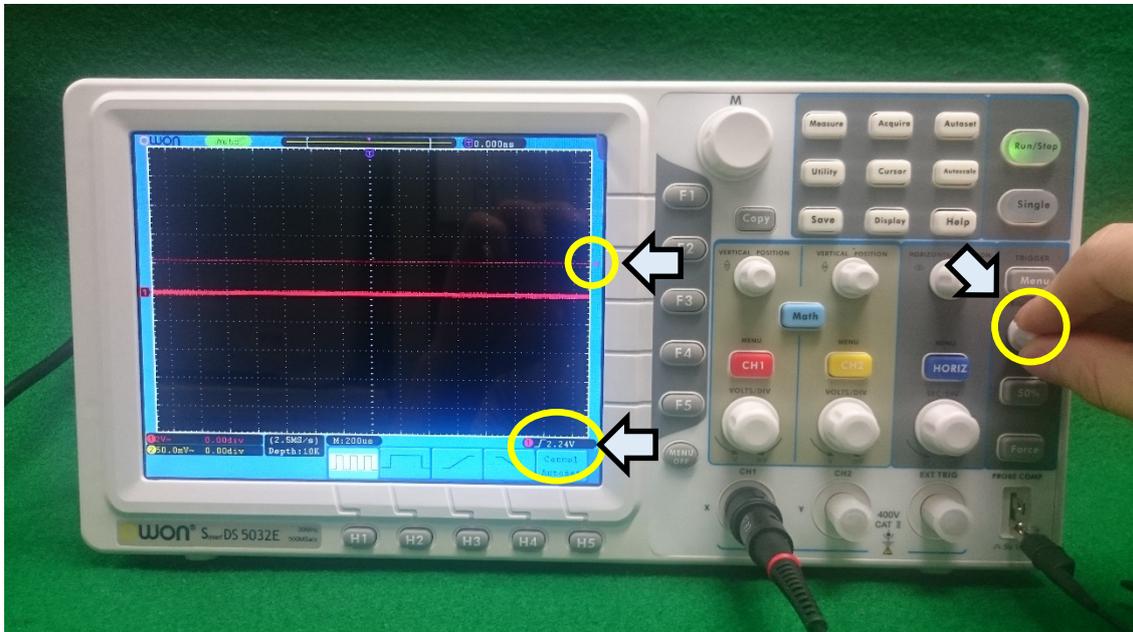


図 A-14 トリガーレベルの調整

すと自動でトリガーレベルの点線が画面に表示される（図 A-14）。しばらくするとトリガーレベルラインは消えるが、画面右端に、紫色の三角でレベル位置が常に表示され、その下に電圧が表示されている。┌のマークは電圧が上昇してトリガーレベルを超えるとときにトリガーが働き測定が開始されることを意味している。下側の「H1」～「H4」のボタンで切り替えることができるが、ここではそのままにしておく。トリガーレベルは、見たい信号の電圧値の範囲内で、かつ、ノイズの電圧値以上に設定しておくのが理想である（今回の実験では数十～百 mV 程度にする。）

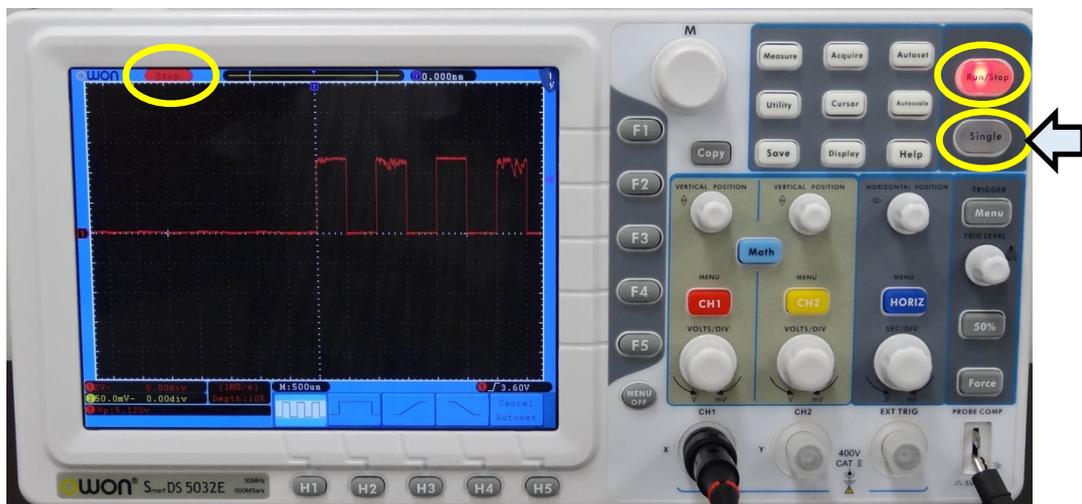


図 A-15 シングルショット表示

- ② シングルショット: 単発的に入力される信号を見る場合は、その信号が入力されたらすぐに表示を固定させる設定にしなくてはならない。トリガーレベルを設定した後、ボタン類の右上部にある「Single」ボタンを押す。そうすると、トリガーレベルを超える信号が入力されない間は、上の「Run/Stop」ボタンが緑に点灯し、液晶ディスプレイの左上に「Ready」の表示が出ているが、一旦トリガーレベルを超える信号が入ると、「Run/Stop」ボタンが赤色に点灯し、入力信号が固定表示される(図A-15)。液晶ディスプレイ左上の表示は「Stop」となる。この状態で、入力信号を観察し電圧等を測定する。

8. 表示の調整とカーソルによる測定

シングルショットでは、トリガーレベルを超える信号が、原点から表示されるので画面右側に偏っている。入力信号の表示位置を調整したい場合、CH1の「VERTICAL POSITION」ダイヤルで上下の、「HORIZONTAL POSITION」ダイヤルで左右の位置調整を行う(図A-16)。また、波形からその電位差や時間間隔を正確に測定したい場合、カーソルを使って測定

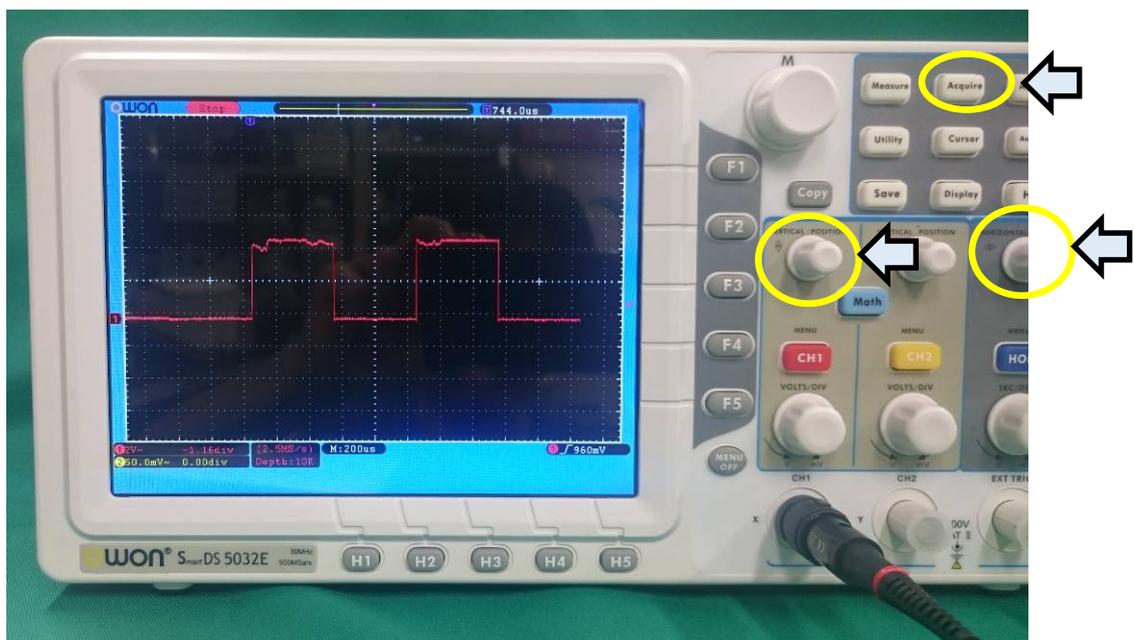


図 A-16 表示の位置調整とカーソルボタン

することができる。ボタン類の中央上部に「Cursor」というボタンがある(図A-16)。このボタンを押すと、画面下部にカーソルのメニューが表示される(図A-17)。「Source」はCH1のままにし、「Type」を「H1」ボタンを押して選択すると、画面右側に「OFF」、「Voltage」、「Time」の3種類が表示される(図A-17)。例えば、電位差を測定したい場合は、「Voltage」横の「F2」ボタンを押して選択する。すると、紫色の横線が表示され、同時に画面左下に、 Δy , $y1$, $y2$ の数値が枠で囲まれて表示される。この状態で、 $y1$ については、CH1の「VERTICAL POSITION」のダイヤルで横線の高さを調整でき、 $y2$ については、CH2の「VERTICAL POSITION」のダイヤルで横線の高さを調整することができる。読み取りたい位置に横線を配置したら、画面左下の値を読み取る(図A-18(左))。同様

に、「F3」ボタンを押して「Time」を選択すれば、縦線が表示され、同様に、2つの「VERTICAL POSITION」ダイヤルを操作することにより、時間を測定することもできる(図 A-18 (右))。

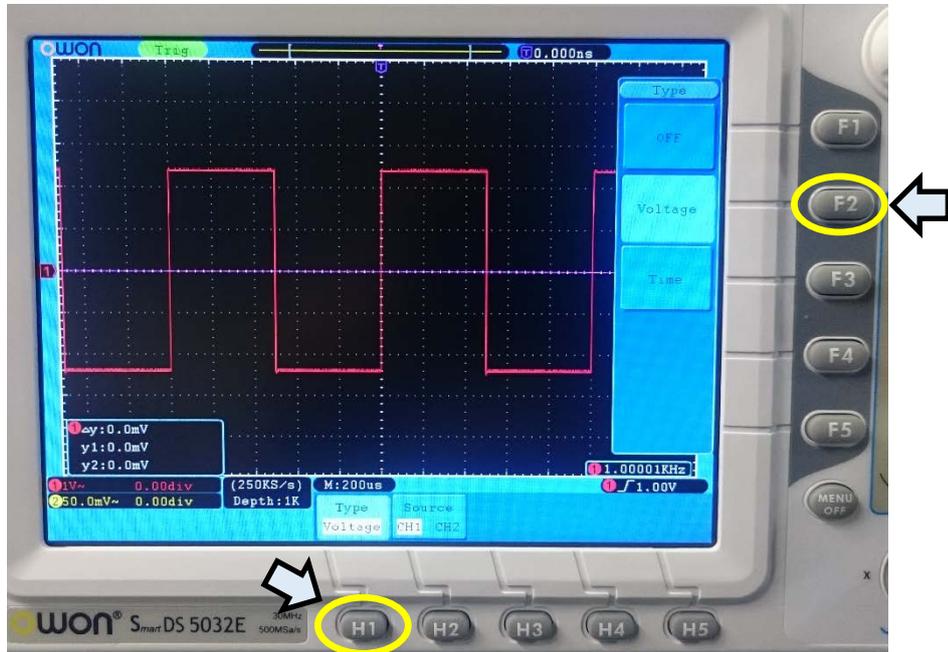


図 A-17 カーソル表示の設定

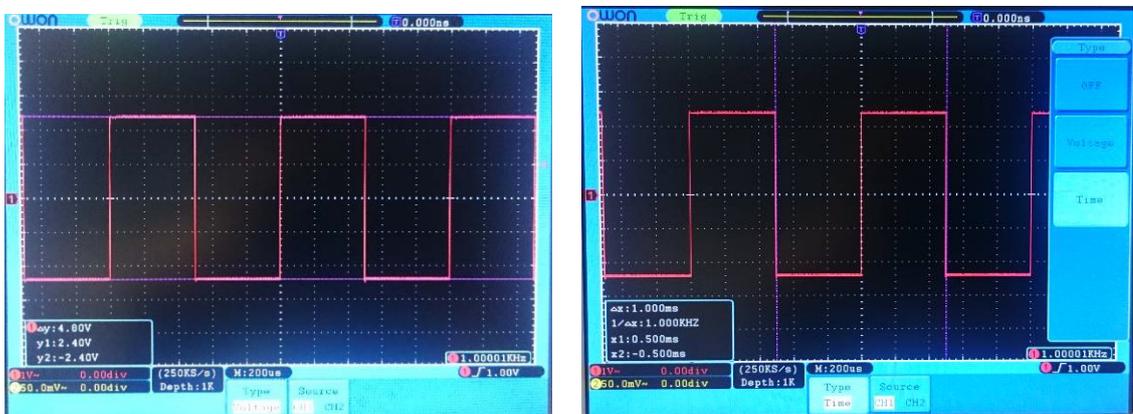


図 A-18 Voltage (左) と Time (右) のカーソル表示

9. デジタルオシロスコープの測定機能の利用方法

このデジタルオシロスコープにはいくつかの測定値を自動的に測定して左下の欄に表示する機能がある(図 A-19)。ボタン類の中央上部に「Measure」というボタンがある。このボタンを押すと、画面下部に測定項目の追加(Add)と消去(Remove)のメニューが表示される。Addの下にある「H1」ボタンを押すと、画面右側に上から Type, Source, ShowAll, Add の4つのメニューがしばらくの間表示される。消えた場合にはもう一度下側の「H1」ボタンを押すと表示される。Typeの右の「F1」ボタンを押すと、画面左側にTypeの小項目が上から

順番に Period, Freq, Mean, PK-PK, RMS, Max, Min, Vtop と表示される。これらは、それぞれ、周期、周波数、平均電圧、最大電圧と最小電圧の差（電位差）、電圧の実効値（二乗平均平方根）、最大電圧、最小電圧、・・・を表している。「M」と書かれたダイヤルを回すと測定する項目を選択することができ、Vtop の下にも数多くの項目が存在することが分かる。図 A-19 では PK-PK を選択して、「F4」ボタンを押した時の様子を表している。左下に Vp : 4.920V と最大電圧と最小電圧の差（電位差）(V_{p-p}) が表示されている。同時に4つの測定値を自動測定して表示させることができる。

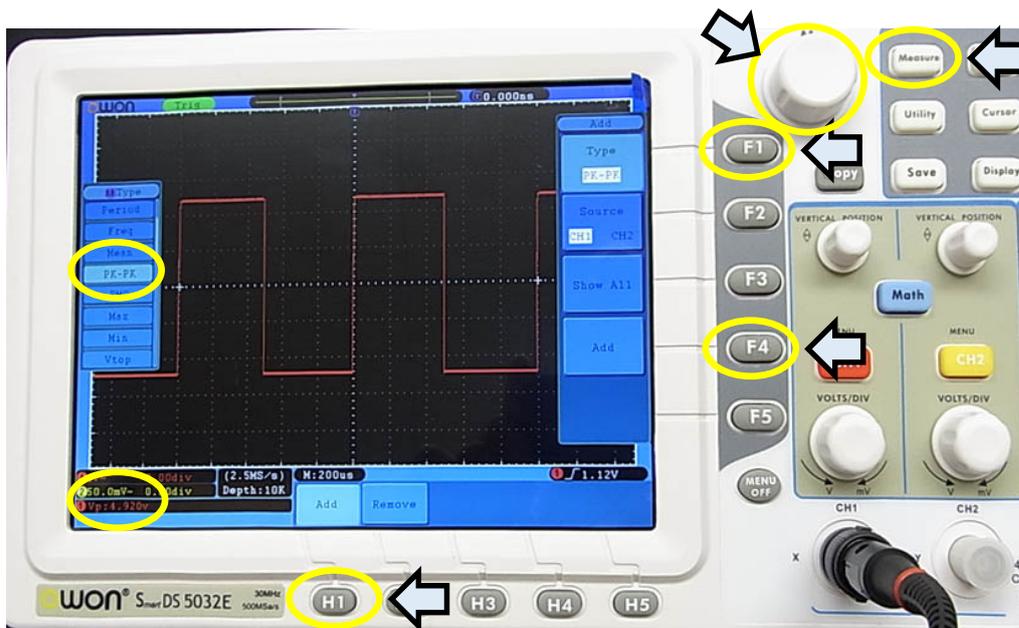


図 A-19 Measure ボタンと測定値自動表示の方法

自動測定の表示を消す場合には「Measure」ボタンを押して画面に表示される Remove の下にある「H2」ボタンを押し、画面右側に表示される Remove All の右にある「F1」ボタンを押せば一度に全ての表示項目を消去することができる。

10. HELP

その他の操作については、マニュアルを見るか、オシロスコープ内蔵の HELP を見なさい。オシロスコープの「Help」ボタンを押すと内蔵されているマニュアルが表示される。移動や選択は、「H1」から「H5」のボタンで操作する。

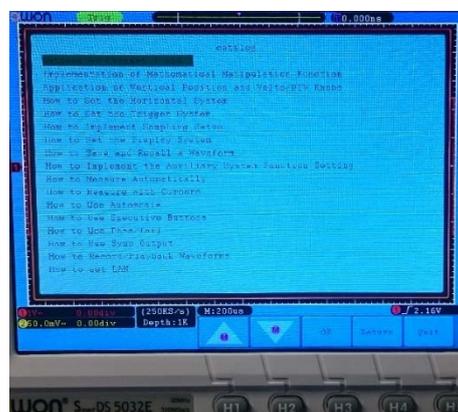


図 A-20 HELP 表示

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 1

課題 1-1 誘導起電力のデジタルオシロスコープによる測定

問 1-1 観察された波形の図

(10 点)

(a) シールを貼った面が下のとき

(5 点)

(b) シールを貼った面が上のとき

(5 点)

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 2

問 1-2 最大電圧と最小電圧の差及び磁石の速さ

(5 点)

磁石の落下距離	$h =$	mm
予想される速さ	$v =$	m/s

測定量	最大電圧と最小電圧の差	磁石の速さ
記号/単位	V_{p-p}/mV	$v/(m/s)$
1 回目		
2 回目		
3 回目		
回目		
回目		
平均値		

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 3

問 1-3 極性の判定

(5 点)

シールの貼ってある側の極は何極か。	極
-------------------	---

問 1-4

(10 点)

・磁石の極性が問 1-3 の時，波形が問 1-1(a)で観察されたような形になる理由 (5 点)

・観察された波形に関して定量的に言えること。 (5 点)

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

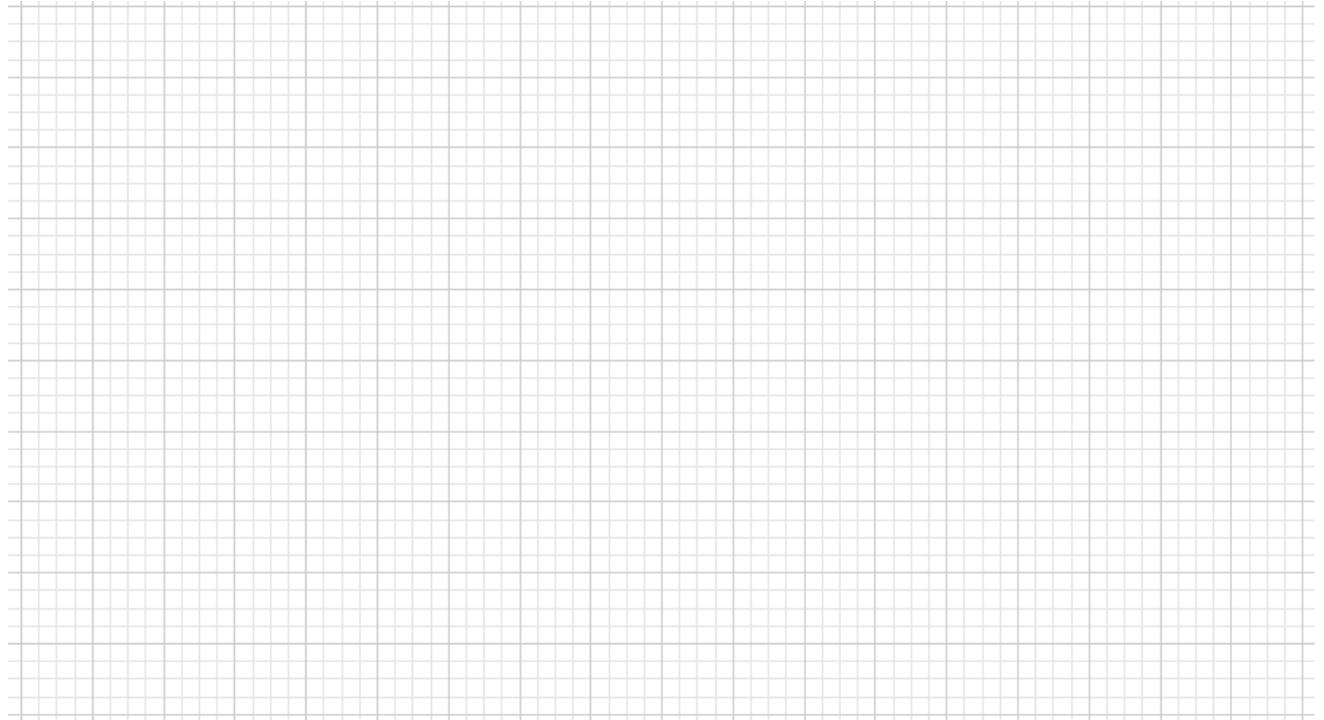
解答用紙 4

問 1-5 6 個連結した磁石

(10 点)

・ 観察された波形

(5 点)



・ このような波形が観察された理由

(5 点)

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 5

問 1-6 落下距離依存性

(10 点)

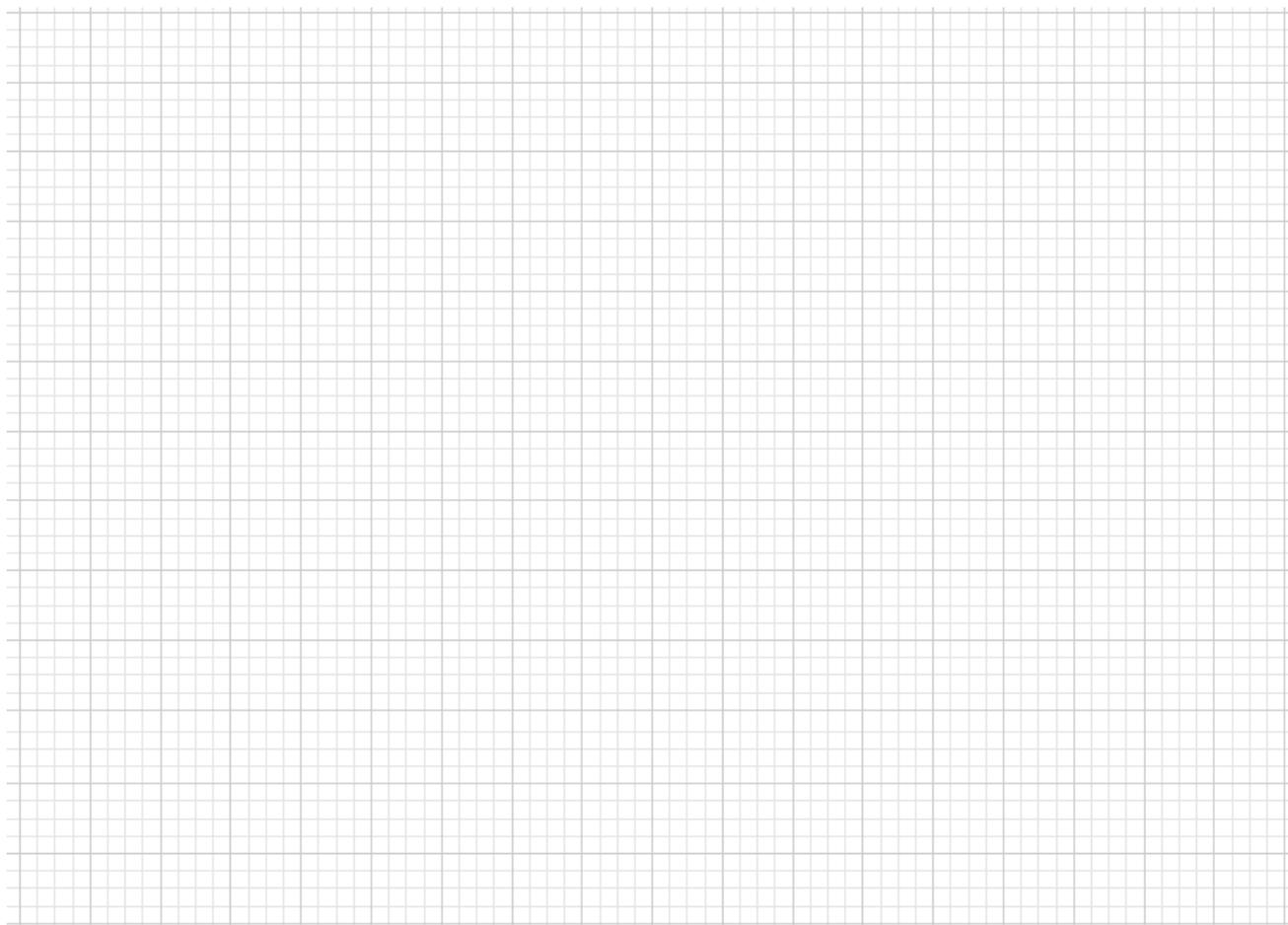
- ・最大電圧と最小電圧の差 V_{p-p} と磁石の速さ v の測定

(5 点)

落下距離 h/mm					
最大電圧と 最小電圧の 差 V_{p-p}/mV	1 回目				
	2 回目				
	3 回目				
	平均値				
磁石の速さ $v/(m/s)$	1 回目				
	2 回目				
	3 回目				
	平均値				

- ・グラフ

(5 点)



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 6

問 1-7 観測される波形と磁石の速さ v の関係

(10 点)

・ 最大電圧と最小電圧の差 V_{p-p} は磁石の速さ v にどのように依存するか。

(5 点)

・ 磁石の速さ v は観測される波形のかたちにどのように影響しているか。

(5 点)

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 7

課題 1-2 渦電流による制動力の測定

問 1-8 重りの個数と終端速度の関係

(15 点)

表 1-2-1

試料		速さ $v/(m/s)$				
		0	1	2	3	4
銅パイプ 肉厚 $\delta = 0.5\text{ mm}$	重りの数					
	1 回目					
	2 回目					
	3 回目					
	回目					
	回目					
	回目					
銅パイプ	平均値					
薄肉 アルミニウム パイプ 肉厚 $\delta = 0.5\text{ mm}$	重りの数					
	1 回目					
	2 回目					
	3 回目					
	回目					
	回目					
	回目					
薄肉 アルミニウム パイプ	平均値					
厚肉 アルミニウム パイプ 肉厚 $\delta = 1.0\text{ mm}$	重りの数					
	1 回目					
	2 回目					
	3 回目					
	回目					
	回目					
	回目					
厚肉 アルミニウム パイプ	平均値					

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 8

問 1-9 重力と終端速度の関係

(15 点)

表 1-2-2

試料番号		1	2	3
材質		銅	アルミニウム	アルミニウム
肉厚 δ/mm		0.5	0.5	1.0
重りの数	重力* M_0g/N	速さ $v/(\text{m/s})$	速さ $v/(\text{m/s})$	速さ $v/(\text{m/s})$
0				
1				
2				
3				
4				
比例関係の有無		有・無	有・無	有・無
比例係数	算出過程 あるいは 判断理由			
	$k/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m})$			

注：重力* M_0g は落体の金属部分に働く重力の大きさを表す。

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 9

問 1-10 測定結果の整理

(30 点)

表 1-2-3

試料番号	1	2	3
材質	銅	アルミニウム	アルミニウム
電気伝導度 $\sigma/(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$	5.95×10^7	3.77×10^7	3.77×10^7
内径 $2a/\text{mm}$	9.0	9.0	9.0
肉厚 δ/mm	0.5	0.5	1.0
比例係数 $k/(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m})$			

前問の結果を表 1-2-3 に転記せよ。

・制動力の大きさ f は、磁石の速さ v にどのように依存すると考えられるか：

・根拠：

・制動力の大きさ f は、パイプの肉厚 δ にどのように依存すると考えられるか：

・根拠：

・制動力の大きさ f は、パイプの電気伝導度 σ にどのように依存すると考えられるか：

・根拠：

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 10

課題 1-3 導体の形状と渦電流によるジュール熱との関係 (発展課題)

問 1-11 切れ目無しワッシャー通過後の磁石の速さ (5 点)

表 1-2-3a

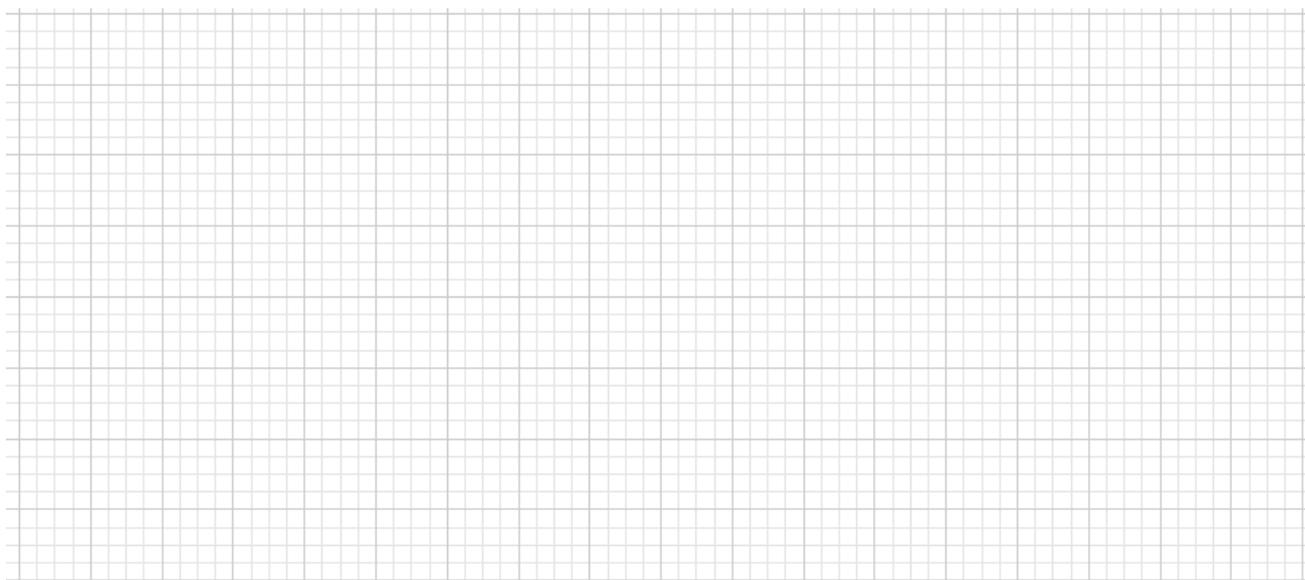
ワッシャー枚数		0	1	2	3
速さ $v/(m/s)$	1 回目				
	2 回目				
	3 回目				
	回目				
	回目				
	平均値				

問 1-12 切れ目有りワッシャー通過後の磁石の速さ (5 点)

表 1-2-3b

ワッシャーの枚数		0	1	2	3
速さ $v/(m/s)$	1 回目				
	2 回目				
	3 回目				
	回目				
	回目				
	平均値				

・ 問 1 および問 2 のグラフ



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

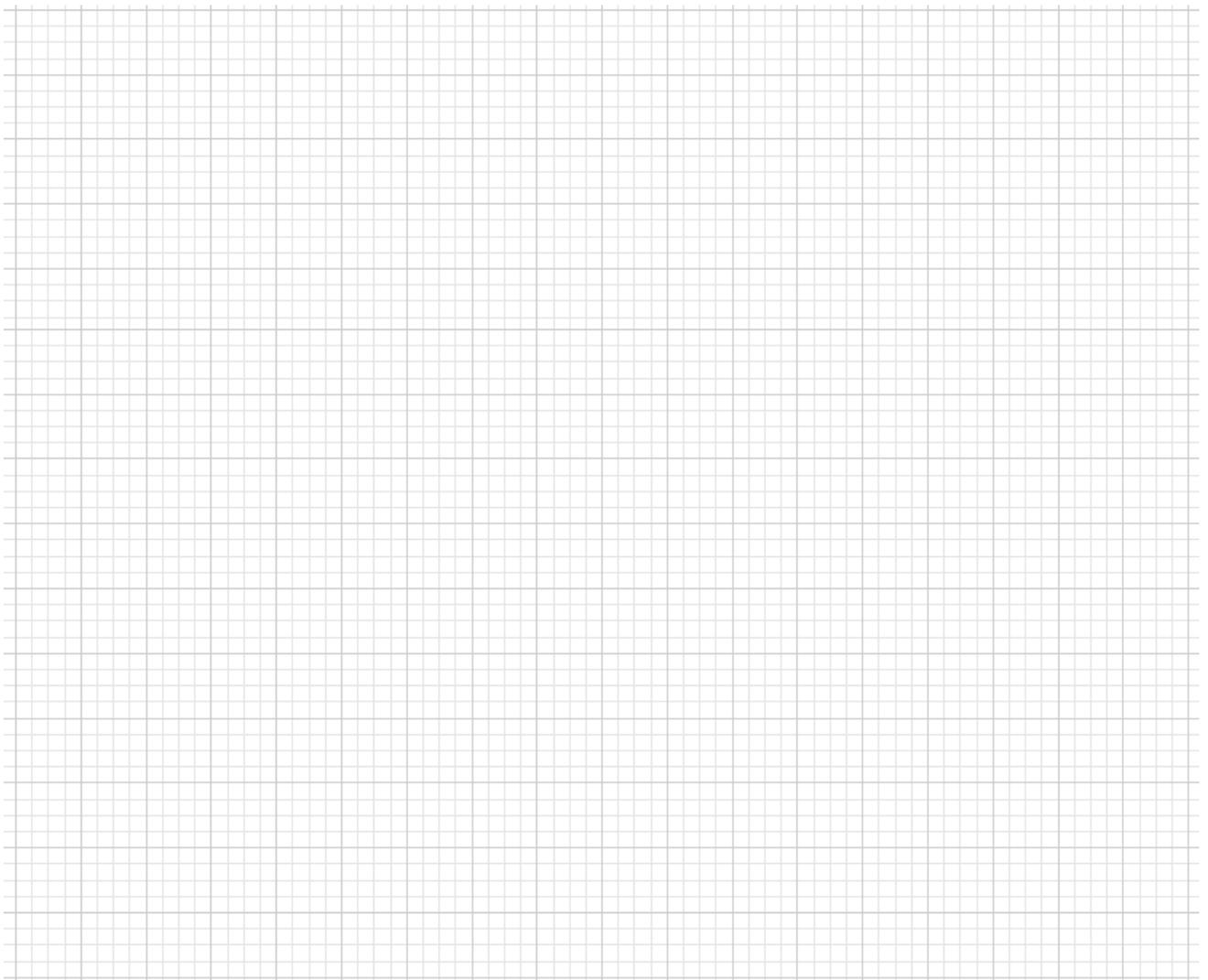
解答用紙 11

問 1-13 渦電流によるジュール熱の大きさと導体の形状との関係

(5 点)

問 1-14 追加実験の提案・実施結果などを自由に区切って記述しなさい。

(5 点)



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 12

課題 2-1 樹脂パイプセットによる毛管現象の観察

問 2-1

(5 点)

パイプの内径 $2r/\text{mm}$		1.2	1.5	2.0	3.0	4.0
水面の高さ h/mm	1 回目					
	回目					
	回目					
	回目					
	回目					
	平均値					

問 2-2

(10 点)

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 13

課題2-2 ガラスピペットによる水の表面張力の測定

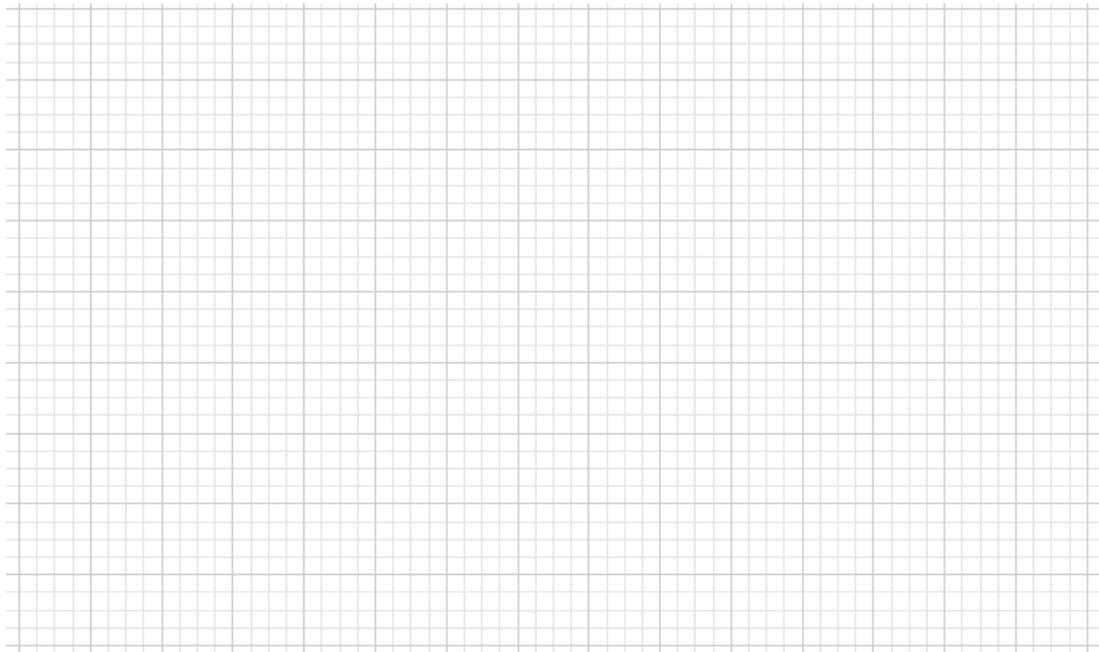
問 2-3

(5 点)

パイプの内径 $2r/\text{mm}$		1.6	6.0
$(1/r)/(1/\text{mm})$		1.3	0.33
水面の高さ h/mm	1 回目		
	回目		
	回目		
	回目		
	回目		
	平均値		

問 2-4

(10 点)



問 2-5

(5 点)

(計算)

$\gamma =$	
------------	--

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 14

課題2-3 ガラスコップとデジタル天秤による水の表面張力の測定

問 2-6

(10 点)

ネジの 回転数	デジタル 天秤の表示 m/g	移動距離 z/mm	ネジの 回転数	デジタル 天秤の表示 m/g	移動距離 z/mm
0	0.0	0.0			
コップの縁が水についた位置の移動距離 z/mm					

問 2-7

(10 点)

ネジの 回転数	移動距離 z/mm	デジタル 天秤の表示 m/g	ネジの 回転数	移動距離 z/mm	デジタル 天秤の表示 m/g
コップの縁が水面と一致する位置($h=0$)の移動距離 z/mm					

点

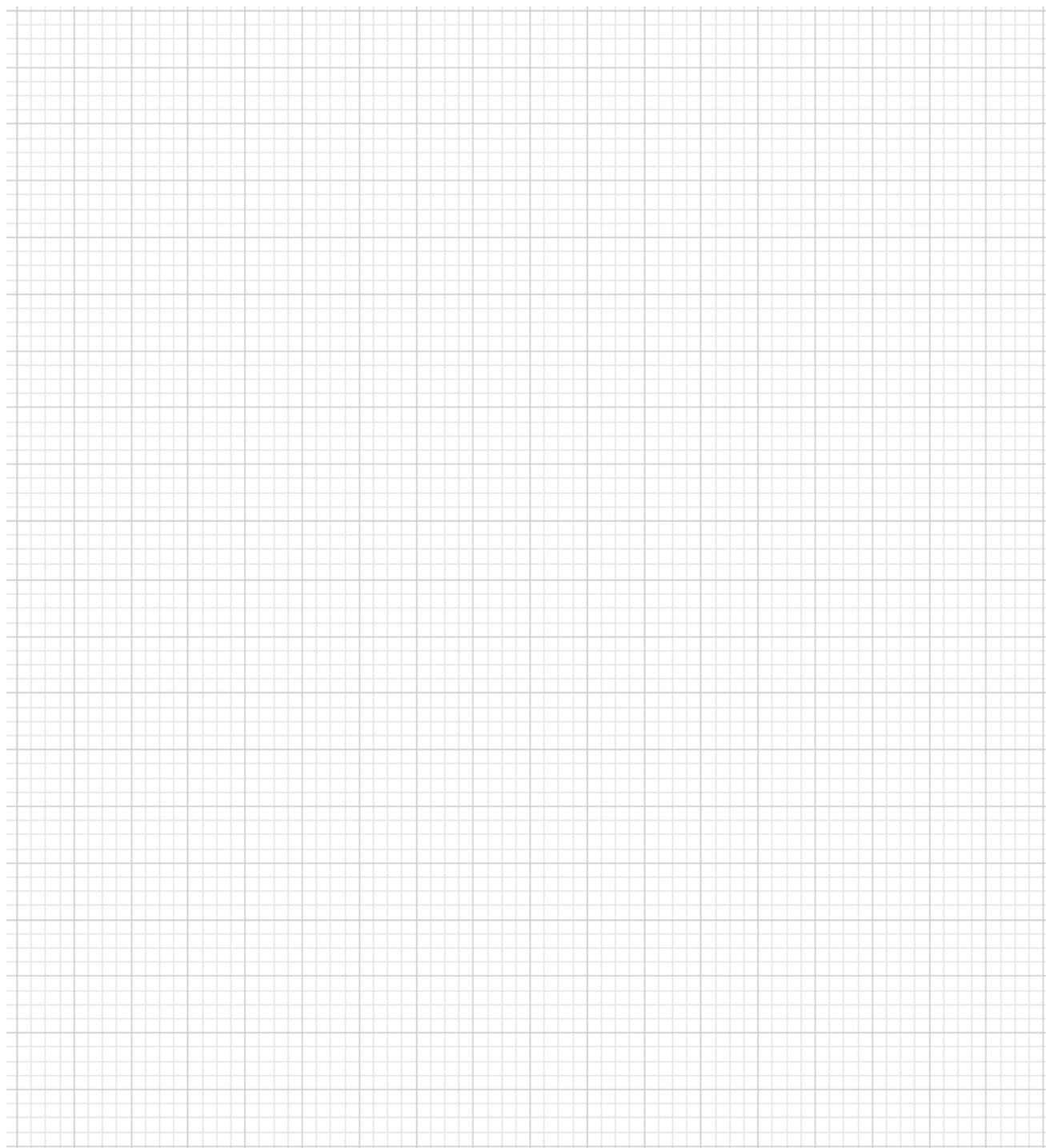
チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

問 2-8

解答用紙 15

(10 点)



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 16

問 2-9

(5 点)

$h=0$ となる点の デジタル天秤の値	
-------------------------	--

コップをさげてゆく過程でのデジタル天秤の値を使わない理由：

問 2-10

(5 点)

(計算)

$\gamma =$	
------------	--

問 2-11

(5 点)

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 17

課題 2-4 表面張力の振舞いについての考察 (発展課題)

問 2-12

(5 点)

問 2-13

(5 点)

問 2-14

(5 点)

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 1

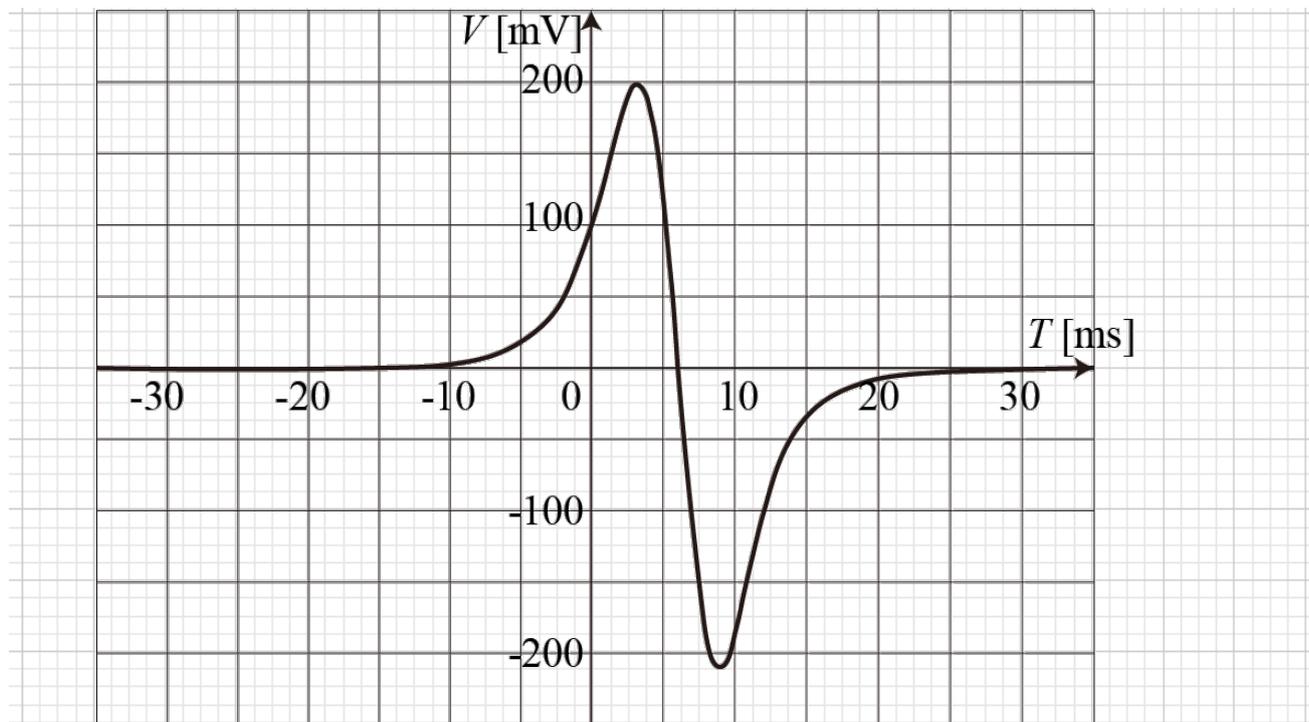
課題 1-1 誘導起電力のデジタルオシロスコープによる測定

問 1-1 観察された波形の図

(10 点)

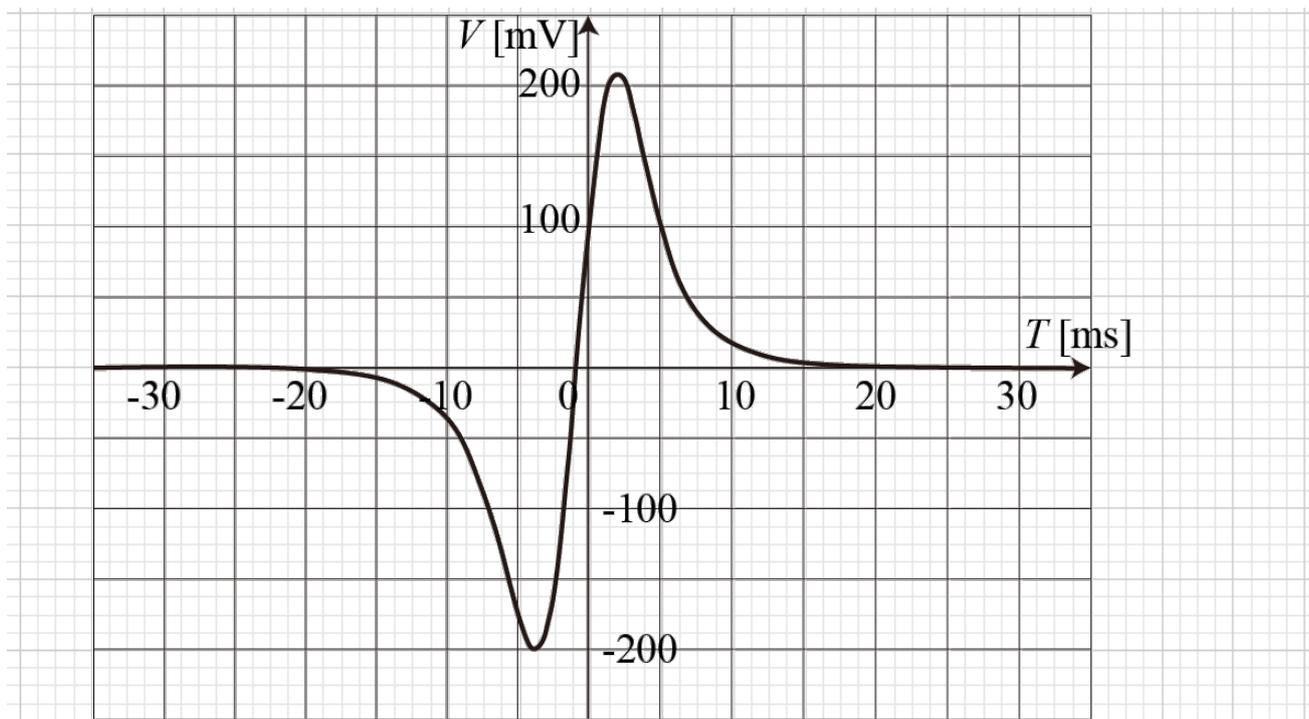
(a) シールを貼った面が下のとき

(5 点)



(b) シールを貼った面が上のとき

(5 点)



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 2

問 1-2 最大電圧と最小電圧の差及び磁石の速さ

(5 点)

磁石の落下距離	$h =$	300 mm
予想される速さ	$v =$	2.4 m/s

測定量	最大電圧と最小電圧の差	磁石の速さ
記号/単位	V_{p-p}/mV	$v/(m/s)$
1 回目	398	2.329
2 回目	402	2.367
3 回目	400	2.306
4 回目	404	2.359
5 回目	404	2.303
6 回目	400	2.363
7 回目	404	2.310
8 回目	408	2.358
9 回目	412	2.301
10 回目	402	2.311
平均値	403	2.331

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 3

問 1-3 極性の判定

(5 点)

シールの貼ってある側の極は何極か。	N 極
-------------------	-----

問 1-4

(10 点)

・磁石の極性が問 1-3 の時、波形が問 1-1(a)で観察されたような形になる理由 (5 点)

① 初めに山になる理由：N 極が上方からコイルに近づくと、コイルを下向きに通過する磁束（磁力線の数）が増加する。これを打ち消すように、コイル内に上向きの磁場をつくる向き、すなわち、図 1-6 の上から見た図で反時計回りに、電圧計として働くオシロスコープにフック側から入りワニ口から出る向きの誘導電流を流そうとする誘導起電力が生じるが生じるので、フックはワニ口より電位が高くなる。したがって、波形は 0 から正になり、山が始まる。

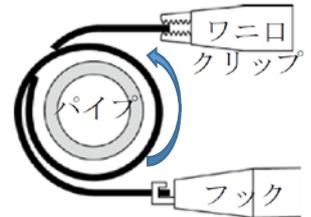


図 1-6

② 山の後に谷になる理由：磁石の中心とコイルの中心が一致するとき下向きの磁束は最大となり、誘導起電力は 0 となる。その後は下向きの磁束は 0 に向かって減少し、①と逆向きの誘導起電力が生じ、フックはワニ口より電位が低くなり、波形は谷となる。S 極がコイルから下方に遠ざかると、磁束は 0 に近づき変化しなくなり波形の谷が終わる。

・観察された波形に関して定量的に言えること。 (5 点)

理論的に予測できること（および問 1-1 で観測されたこと）の例： $h = 0.30 \text{ m}$ の場合

- ① $h = 0.30 \text{ m}$ 自由落下すると、磁石の速さは $v = \sqrt{2gh} = 2.4 \text{ m/s}$
- ② 両極の間隔は $d = 10 \text{ mm}$ だが、図 A-2 によれば、軸から 10 mm のコイルの位置で、磁束密度の垂直成分の最大と最小の距離は、 $d' = 13 \text{ mm}$ 、時間差は $\Delta t' = 5.0 \text{ ms}$ 、これをコイルの幅 $\sim 10 \text{ mm}$ で平均すると、山と谷のピーク間隔はさらに広がり $d'' = 15 \text{ mm}$ 、時間差は $\Delta t'' = 6.2 \text{ ms}$ となる。
- ③ 波形の谷と山の時間差は、 $\Delta t'' = 6.2 \text{ ms}$ 程度（実測では、約 6 ms ）。
- ④ 2 つのピークがコイルの中心を通過するときの速さの相対差は $\frac{\Delta v''}{v} = \frac{d''}{2h} = 0.025$
- ⑤ 誘導起電力は磁石の速さに比例するから、谷の深さは山の高さより、 2.5% 程度大きくなる（実測では、約 5% ）。

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

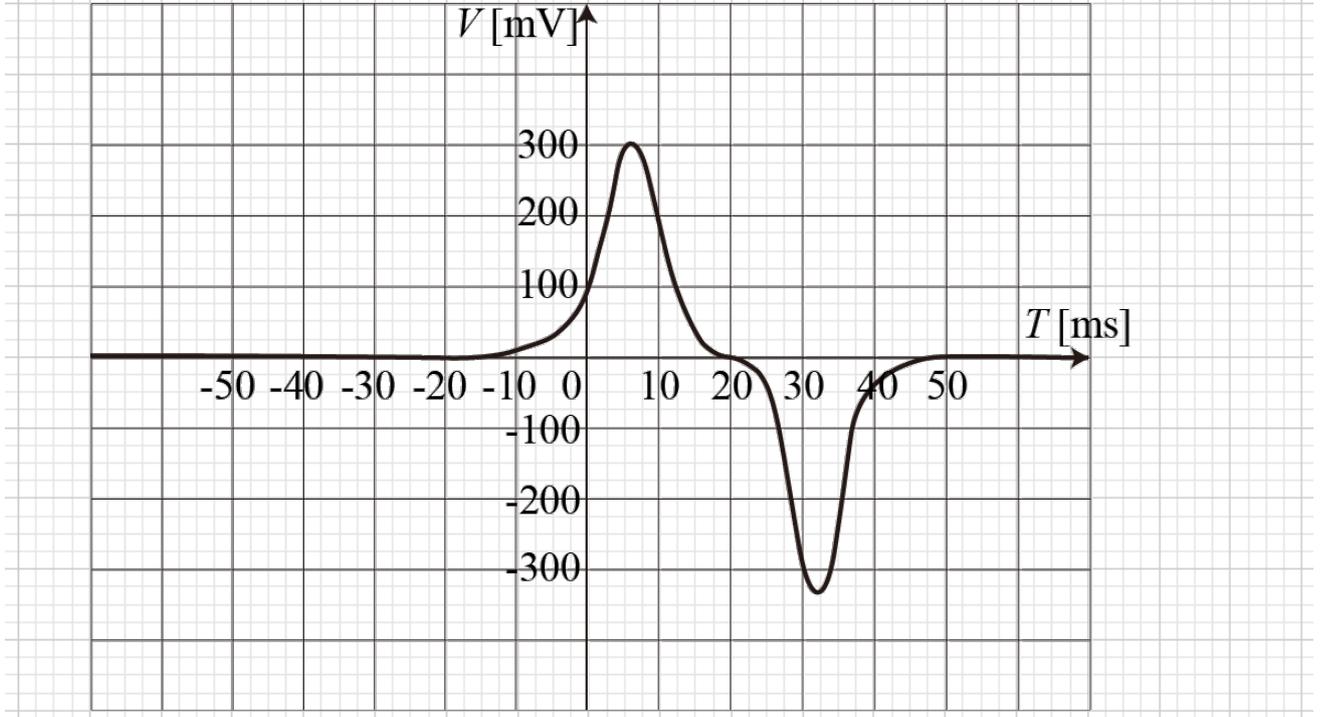
解答用紙 4

問 1-5 6 個連結した磁石

(10 点)

・ 観察された波形

(5 点)



・ このような波形が観察された理由

(5 点)

① 連結する磁石の数を増やして落下させると、山と谷の間隔が広がる。

理由： 同等な磁石を複数個連結すると、全体の両端のみに、1 個の場合と同じ絶対値をもつ正・負の磁気量の磁極が現れる。磁石 6 個の場合、 $h = 0.30 \text{ m}$ 、 $d = 10 \text{ mm}$ として谷と山の時間差は $\Delta t = \sqrt{2h/g} - \sqrt{2(h-6d)/g} = (0.2474 - 0.2213) \text{ s} = 26 \text{ ms}$ (実測では約 26 ms)

② 磁石の数を増やすと、1 個の時よりも山・谷の大きさが大きくなる。

理由： 磁石の全長がコイルの幅に比べて十分大きくない段階では、両極が互いに打ち消す効果が見える。磁石の全長が大きくなると、各極の効果が独立して見えるようになるため。初めは山・谷は大きくなるが、後ろの山・谷は一定の大きさに近づく。

後ろの磁極の落下距離は変わらないが、前の磁極の落下距離は磁石の長さ分だけ短くなり、コイルを通過する速度が減少するため、前の山・谷は、磁石の数とともに少しずつ小さくなる。前後の山の高さ (谷の深さ) の比は、理論的には

$$\sqrt{2g(h-6d)} / \sqrt{2gh} = \sqrt{(h-6d)/h} = \sqrt{240/300} = 0.89 \quad (\text{実測では, } 0.89 \text{ 程度})$$

で 1 個の時に比べて大きくなる。

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 5

問 1-6 落下距離依存性

(10 点)

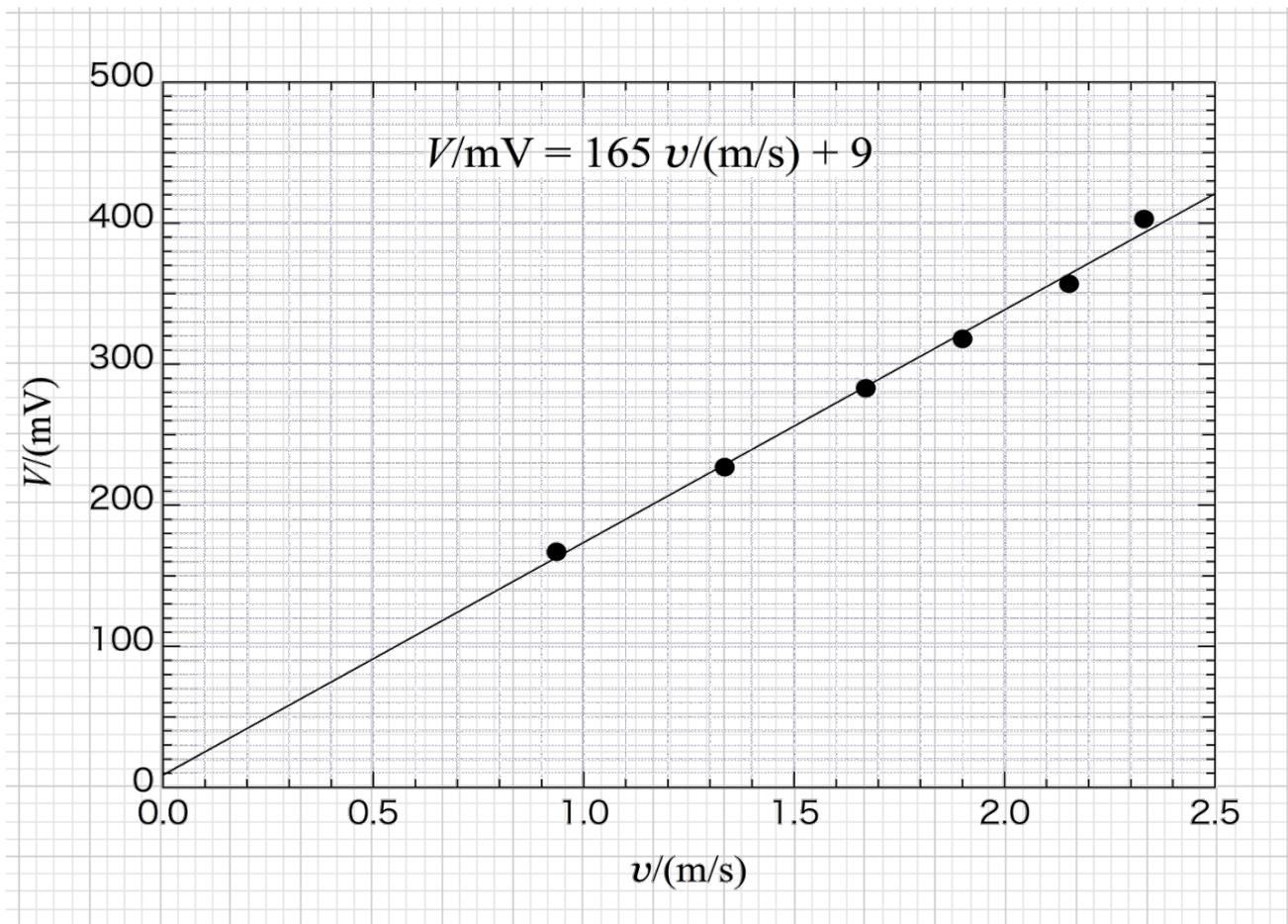
・最大電圧と最小電圧の差 V_{p-p} と磁石の速さ v の測定

(5 点)

落下距離 h/mm		50	100	150	200	250
最大電圧と 最小電圧の 差 V_{p-p}/mV	1 回目	168	232	276	312	352
	2 回目	166	218	286	326	360
	3 回目	168	232	286	316	366
	平均値	167	227	283	318	357
磁石の速さ $v/(\text{m/s})$	1 回目	0.937	1.315	1.663	1.880	2.123
	2 回目	0.925	1.315	1.685	1.940	2.171
	3 回目	0.944	1.375	1.662	1.881	2.164
	平均値	0.935	1.335	1.670	1.900	2.153

・グラフ

(5 点)



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 6

問 1-7 観測される波形と磁石の速さ v の関係

(10 点)

- ・最大電圧と最小電圧の差 V_{p-p} は磁石の速さ v にどのように依存するか。 (5 点)

V_{p-p} は v に比例する。

$$V_{p-p} = K v$$

と表すと、比例係数は、問 1-6 のグラフの勾配から、 $K = 165 \text{ mV}/(\text{m/s})$ となった。

- ・磁石の速さ v は観測される波形のかたちにどのように影響しているか。 (5 点)

理論的予測：

- ① 波高値 V_{p-p} は磁石の速さ v に比例する。
- ② 波形の谷と山の時間差は $\Delta t = d/v$ なので v に反比例する。
- ③ 谷と山の幅も v に反比例する。
- ④ 前後の谷の深さと山の高さの比は、速さ v が大きくなると 1 に近づく (相対差が v に反比例する)。

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 7

課題 1-2 渦電流による制動力の測定

問 1-8 重りの個数と終端速度の関係

(15 点)

表 1-2-1

試料		速さ $v/(m/s)$				
		0	1	2	3	4
銅パイプ 肉厚 $\delta = 0.5 \text{ mm}$	重りの数					
	1 回目	0.169	0.185	0.198	0.214	0.234
	2 回目	0.169	0.189	0.201	0.219	0.236
	3 回目	0.167	0.182	0.203	0.218	0.237
	4 回目	0.167	0.185	0.195	0.212	0.233
	5 回目	0.171	0.188	0.204	0.220	0.231
	6 回目	0.170	0.185	0.200	0.214	0.235
平均値	0.169	0.186	0.200	0.216	0.234	
薄肉 アルミニウム パイプ 肉厚 $\delta = 0.5 \text{ mm}$	1 回目	0.315	0.340	0.368	0.388	0.429
	2 回目	0.313	0.338	0.370	0.402	0.433
	3 回目	0.318	0.337	0.373	0.407	0.428
	4 回目	0.305	0.337	0.369	0.397	0.433
	5 回目	0.314	0.337	0.364	0.398	0.433
	6 回目	0.313	0.337	0.376	0.396	0.433
	平均値	0.313	0.338	0.370	0.398	0.432
厚肉 アルミニウム パイプ 肉厚 $\delta = 1.0 \text{ mm}$	1 回目	0.143	0.155	0.160	0.177	0.192
	2 回目	0.140	0.155	0.160	0.179	0.192
	3 回目	0.142	0.156	0.165	0.174	0.194
	4 回目	0.139	0.155	0.166	0.178	0.192
	5 回目	0.138	0.152	0.162	0.172	0.190
	6 回目	0.138	0.150	0.160	0.177	0.190
	平均値	0.140	0.154	0.162	0.176	0.192

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

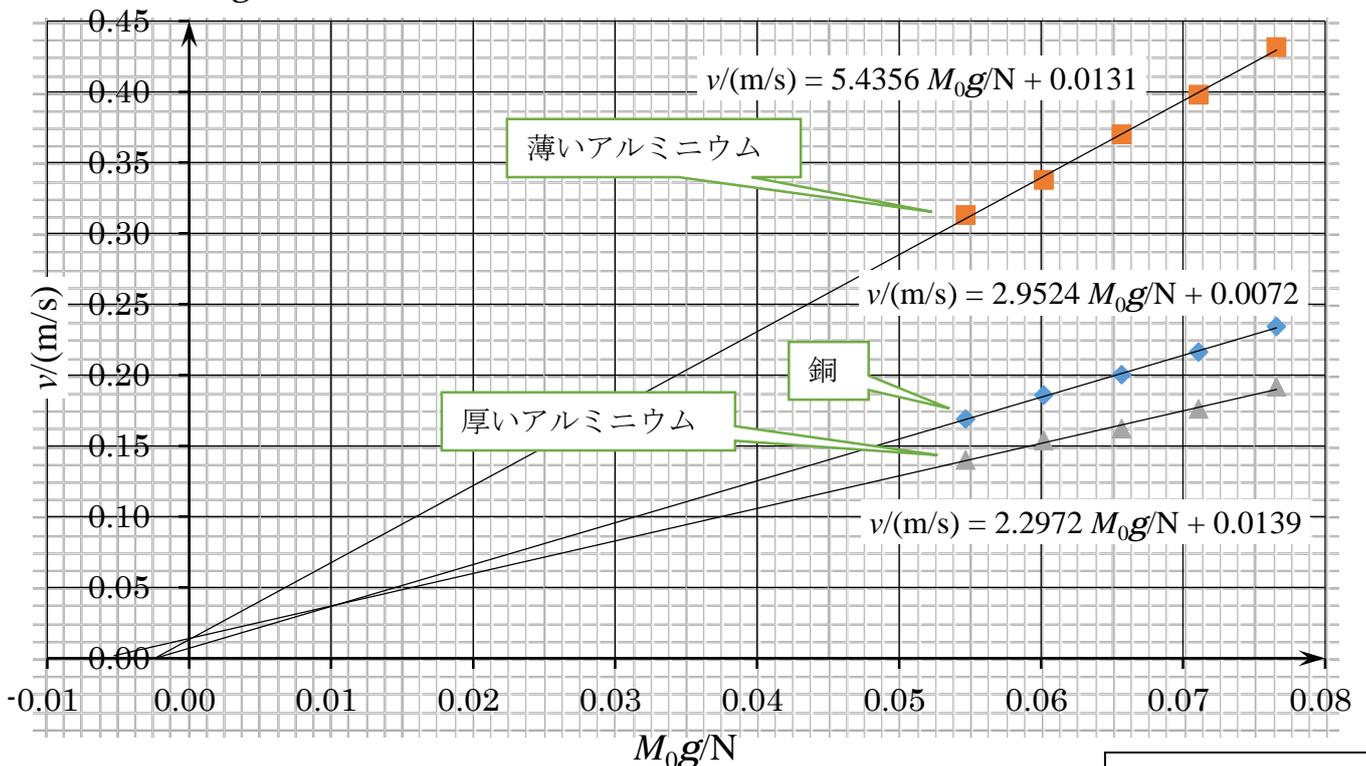
問 1-9 重力と終端速度の関係

(15 点)

表 1-2-2

試料番号		1	2	3
材質		銅	アルミニウム	アルミニウム
肉厚 δ /mm		0.5	0.5	1.0
重りの数	重力* M_0g /N	速さ v /(m/s)	速さ v /(m/s)	速さ v /(m/s)
0	0.0547	0.169	0.313	0.140
1	0.0602	0.186	0.338	0.154
2	0.0657	0.200	0.370	0.162
3	0.0711	0.216	0.398	0.176
4	0.0766	0.234	0.432	0.192
比例関係の有無		(有)・無	(有)・無	(有)・無
比例係数	算出過程 あるいは 判断理由	下のグラフから直線の勾配の逆数を求めると, $k = \frac{0.075 - 0.050}{0.229 - 0.155} = 0.338$	下のグラフから直線の勾配の逆数を求めると, $k = \frac{0.0712 - 0.0528}{0.400 - 0.300} = 0.184$	下のグラフから直線の勾配の逆数を求めると, $k = \frac{0.070 - 0.050}{0.175 - 0.129} = 0.435$
	k /(N·s/m)	0.338	0.184	0.435

注：重力* M_0g は落体の金属部分に働く重力の大きさを表す。



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 9

問 1-10 測定結果の整理

(30 点)

表 1-2-3

試料番号	1	2	3
材質	銅	アルミニウム	アルミニウム
電気伝導度 $\sigma(\Omega\cdot\text{m})^{-1}$	5.95×10^7	3.77×10^7	3.77×10^7
内径 $2a/\text{mm}$	9.0	9.0	9.0
肉厚 δ/mm	0.5	0.5	1.0
比例係数 $k(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m})$	0.338	0.184	0.435

前問の結果を表 1-2-3 に転記せよ。

- ・制動力の大きさ f は、磁石の速さ v にどのように依存すると考えられるか：

f は、 v に比例する。

- ・根拠：

問 1-9 のグラフで、いずれのデータ点も直線に乗っており、3 本とも、ほぼ共通の M_0g 切片 ($-mg = -0.0036 \text{ N}$) を通る。 m は落体の金属部分以外の質量に相当し、制動力の大きさは $f = (M_0 + m)g = kv$ と表されることになる。

- ・制動力の大きさ f は、パイプの肉厚 δ にどのように依存すると考えられるか：

制動力の大きさ f は、肉厚 δ が大きいほど大きい (実測結果)。

制動力の大きさ f は、肉厚 δ にほぼ比例する (理論的予測)。

- ・根拠：

肉厚 δ が薄ければ、1 周に生じる誘導起電力および導体の 1 周の長さは共通で、導体の断面積が肉厚 δ に比例する。制動力の大きさ f は生じるジュール熱に比例するので、抵抗に反比例し、肉厚 δ に比例する。

- ・制動力の大きさ f は、パイプの電気伝導度 σ にどのように依存すると考えられるか：

制動力の大きさ f は、パイプの電気伝導度 σ が大きいほど大きい (実測結果)。

制動力の大きさ f は、パイプの電気伝導度 σ に比例する (理論的予測)。

- ・根拠：

制動力の大きさ f は生じるジュール熱に比例するので、抵抗に反比例し、電気伝導度 σ に比例する。

参考: 表 1-2-3 のデータから試料 1, 2, 3 のパイプについて $k/\sigma\delta$ という量を計算すると、それぞれ、 $(k/\sigma\delta)/(\text{Wb}^2/\text{m}^2) = 1.14 \times 10^{-5}$, 0.98×10^{-5} , 1.15×10^{-5} となり、ほぼ一定となった。

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 10

課題 1-3 導体の形状と渦電流によるジュール熱との関係 (発展課題)

問 1-11 切れ目無しワッシャー通過後の磁石の速さ (5 点)

表 1-2-3a

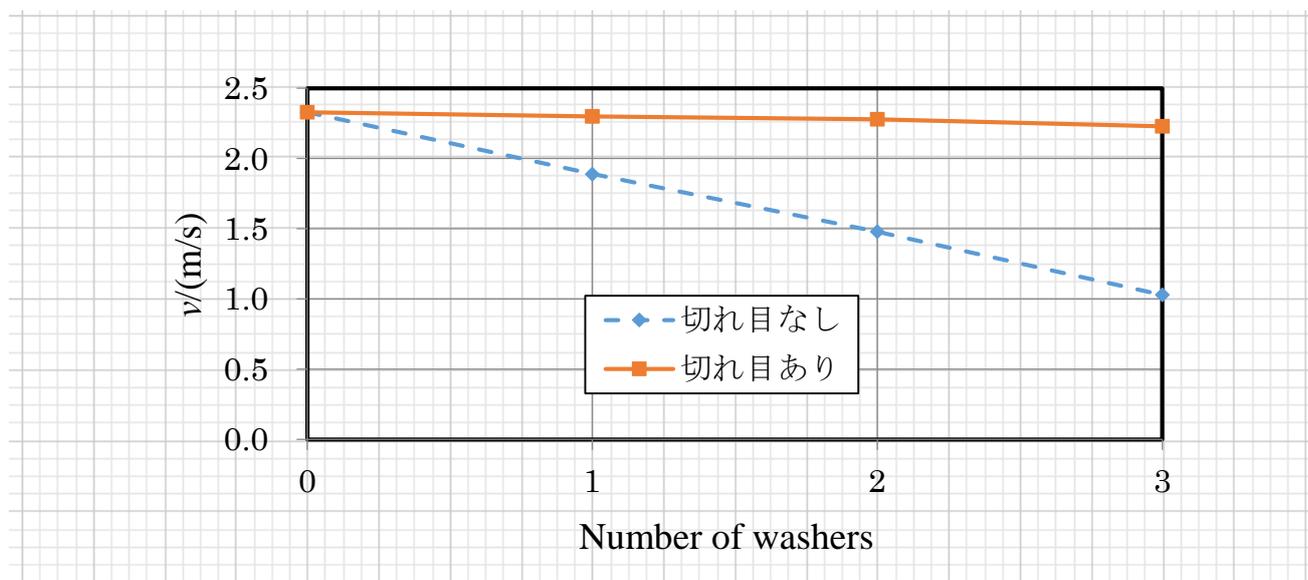
ワッシャー枚数		0	1	2	3
速さ $v/(m/s)$	1 回目	2.37	1.93	1.52	0.99
	2 回目	2.34	1.83	1.48	1.09
	3 回目	2.35	1.89	1.52	1.00
	4 回目	2.31	1.86	1.44	1.02
	5 回目	2.35	1.93	1.44	1.06
	平均値	2.33	1.89	1.48	1.03

問 1-12 値は表 1-1 に記入せよ。 (5 点)

表 1-2-3b

ワッシャーの枚数		0	1	2	3
速さ $v/(m/s)$	1 回目	2.36	2.28	2.28	2.22
	2 回目	2.31	2.31	2.29	2.25
	3 回目	2.34	2.27	2.29	2.24
	4 回目	2.35	2.31	2.28	2.23
	5 回目	2.31	2.32	2.26	2.20
	平均値	2.33	2.30	2.28	2.23

・ 問 1 および問 2 のグラフ



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 11

問 1-13 渦電流によるジュール熱の大きさと導体の形状との関係

(5 点)

磁石が運動することによって生じる誘導起電力は、磁石が通る道筋に垂直な面内で、磁石の道筋の周りを 1 周するように電流を流そうとする。

この 1 周する道筋が導体でできていて閉じていれば実際に電流が流れてジュール熱が発生する。

1 周する道筋を作る導体に切れ目があると、電流は誘導起電力の向きには 1 周することができず、誘導起電力の大きな道筋を進んだ後、誘導起電力の小さな道筋を逆行して元に戻らなければならない、流れる電流も発生するジュール熱も大幅に減少すると考えられる。

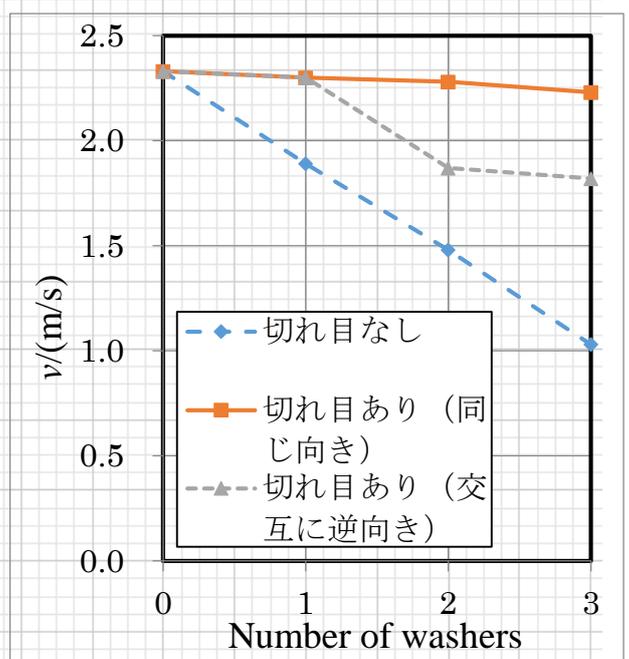
問 1-14 追加実験の提案・実施結果などを自由に区切って記述しなさい。

(5 点)

・実験の提案：問 1-12 と同じ測定を、ワッシャーの切れ目をそろえずに、1 枚おきに 180° 回転して重ねて行う。

・期待される結果：右図のように、1 枚のときは問 1-12 と変わらないが、2 枚目からは問 1-11 ほどではないが、2 枚目と 3 枚目では問 1-11 の 1 枚目程度の減速が見られる。

・理由：理由：2 枚以上重ねるとパイプの周りを 1 周する回路が閉じる。ただし、1 周する回路の最少の断面積はワッシャー 1 枚分であるので、減速効果は切れ目なしワッシャー 1 枚の場合に近いと考えられる。



・実測結果：実測してみると、右表のように、2 枚目で期待されるほどは減速効果が見られなかった。その理由は、単にワッシャーを重ねただけでは、表面の粗さや酸化物などのため、2 枚の間の接触抵抗が大きく、パイプの周りを 1 周する電流が期待したほどは流れなかったためと考えられる。

Number of washers	速さ $v/(m/s)$		
	切れ目なし	切れ目あり (同じ向き)	切れ目あり (交互に逆向き)
0	2.33	2.33	2.33
1	1.89	2.30	2.30
2	1.48	2.28	2.26
3	1.03	2.23	-

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 12

課題 2-1 樹脂パイプセットによる毛管現象の観察

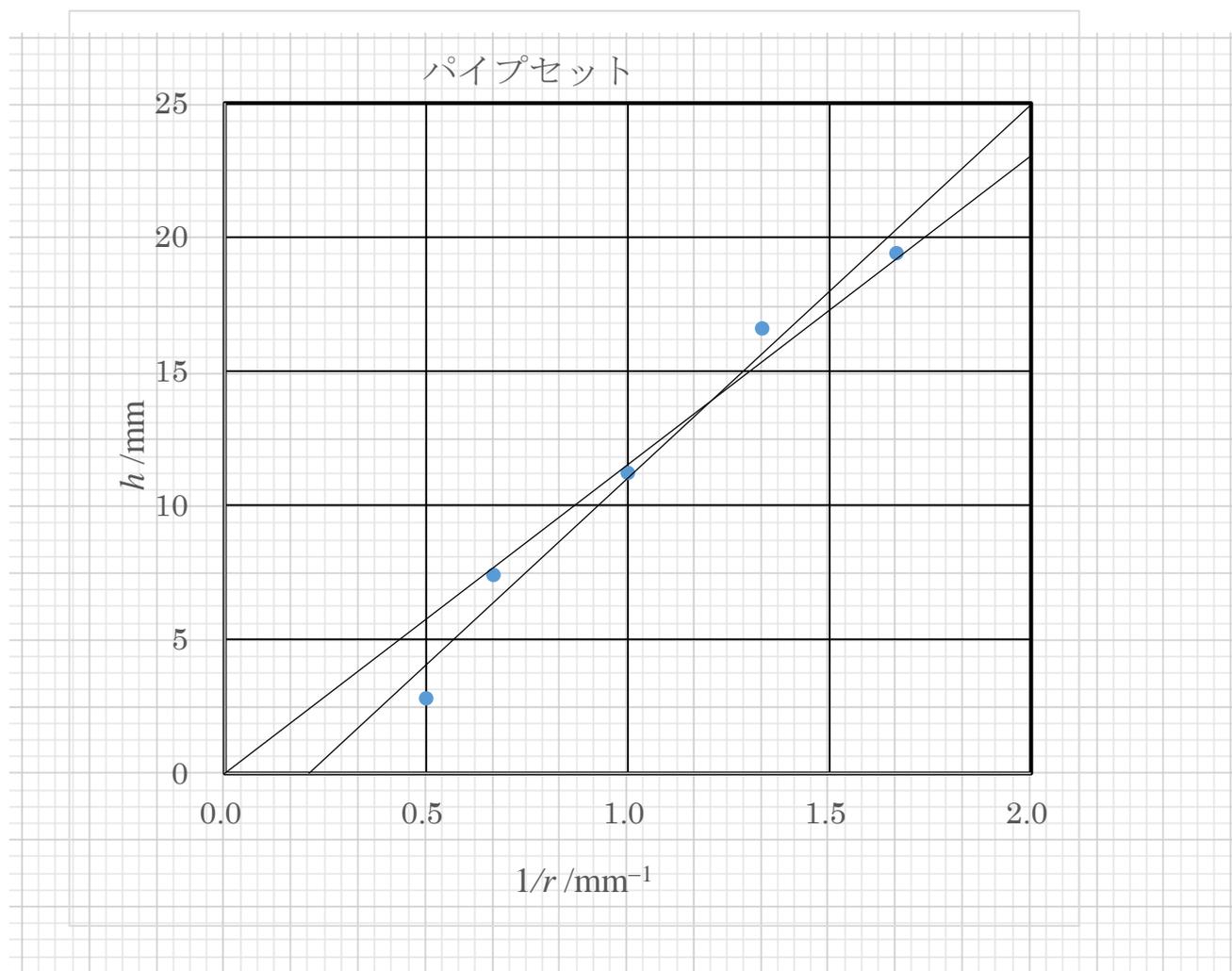
問 2-1

(5 点)

パイプの内径 $2r/\text{mm}$	1.2	1.5	2.0	3.0	4.0	
水面の高さ h/mm	1 回目	20.0	16.0	11.0	7.0	3.0
	2 回目	19.0	17.0	11.0	7.0	2.0
	3 回目	19.0	16.0	12.0	8.0	3.0
	4 回目	20.0	17.0	11.0	7.0	3.0
	5 回目	19.0	17.0	11.0	8.0	3.0
	平均値	19.4	16.6	11.2	7.4	2.8

問 2-2

(10 点)



個々のパイプセットには内径の微妙な差のためにばらつきがある。

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 13

課題2-2 ガラスピペットによる水の表面張力の測定

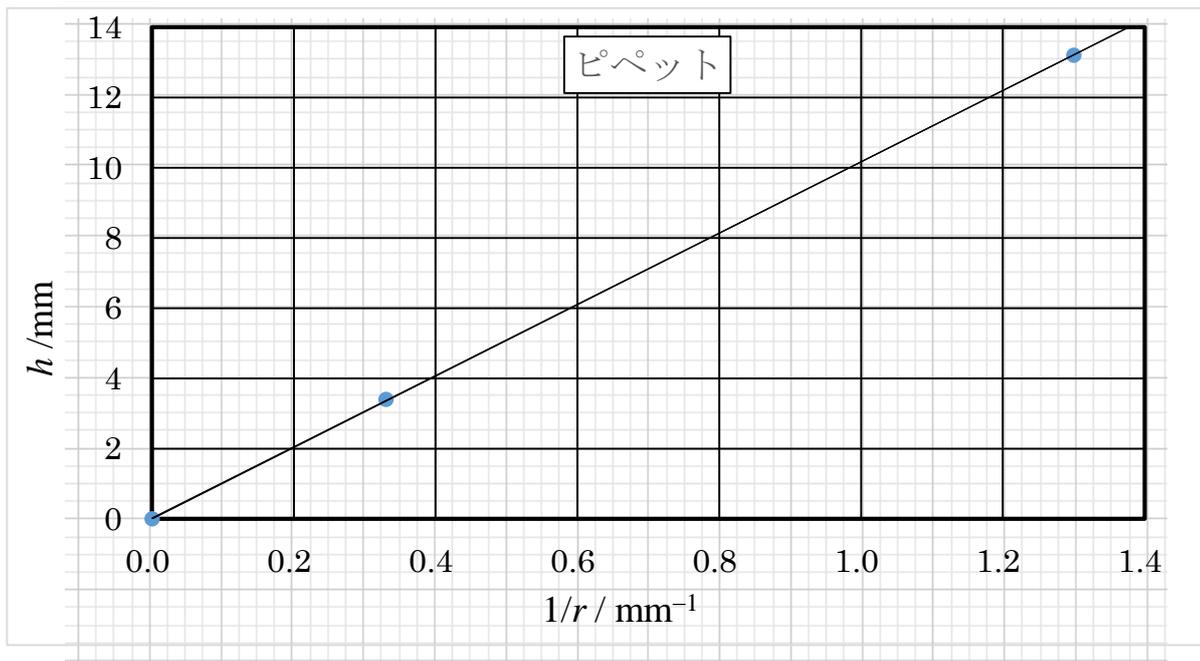
問 2-3

(5 点)

パイプの内径 $2r/\text{mm}$	1.6	6.0	
$(1/r)/(1/\text{mm})$	1.3	0.33	
水面の高さ h/mm	1 回目	13.0	3.0
	2 回目	12.0	5.0
	3 回目	15.0	2.0
	4 回目	14.0	3.0
	5 回目	12.0	4.0
	平均値	13.2	3.4

問 2-4

(10 点)



問 2-5

(5 点)

(計算) 式 (2-1) より

$$2\gamma \cos\theta / \rho g = hr$$

hr の値はグラフの傾きから求めることができ、 $13.2 \text{ mm} / 1.3 \text{ mm}^{-1} = 10 \text{ mm}^2$ となる。

γ について解いて、 $\theta = 0$ 、 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ および $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ を代入する。

$\gamma =$	$49 \times 10^{-3} \text{ N/m}$
------------	---------------------------------

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 14

課題2-3 ガラスコップとデジタル天秤による水の表面張力の測定

問 2-6

(10 点)

ネジの 回転数	デジタル 天秤の表示 m/g	移動距離 z/mm	ネジの 回転数	デジタル 天秤の表示 m/g	移動距離 z/mm
0	0.0	0.0	10	-1.2	8.0
1	0.0	0.8	11	-1.0	8.8
2	0.0	1.6	12	-0.9	9.6
3	0.0	2.4	13	-0.8	10.4
4	-2.3	3.2	14	-0.6	11.2
5	-2.0	4.0	15	-0.4	12.0
6	-1.7	4.8	16	-0.3	12.8
7	-1.5	5.6	17	0.0	13.6
8	-1.5	6.4			
9	-1.3	7.2			
コップの縁が水についた位置の移動距離 z/mm				3.2	

問 2-7

(10 点)

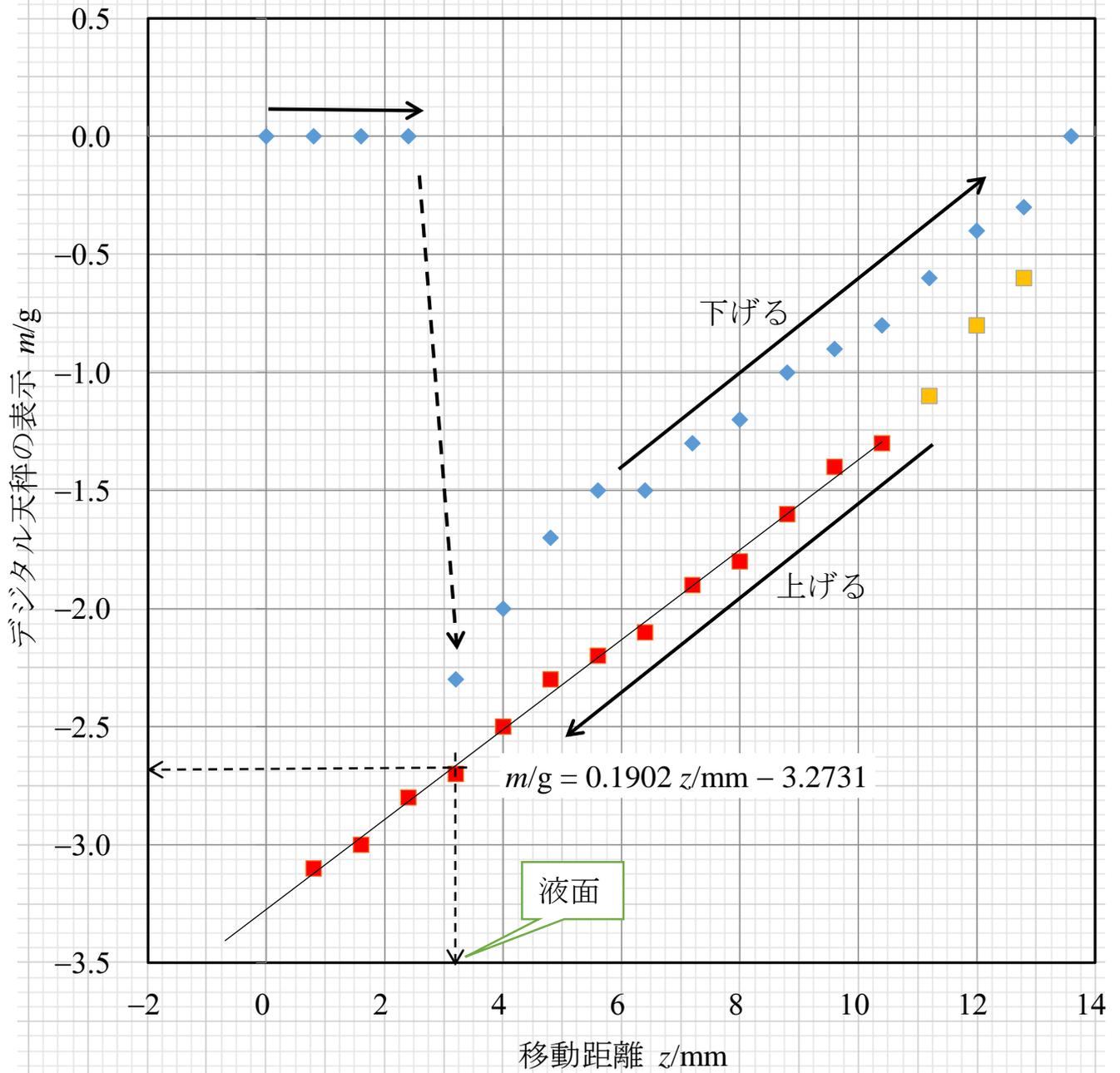
ネジの 回転数	移動距離 z/mm	デジタル 天秤の表示 m/g	ネジの 回転数	移動距離 z/mm	デジタル 天秤の表示 m/g
1	12.8	-0.6	12	4.0	-2.5
2	12.0	-0.8	13	3.2	-2.7
3	11.2	-1.1	14	2.4	-2.8
4	10.4	-1.3	15	1.6	-3.0
5	9.6	-1.4	16	0.8	-3.1
6	8.8	-1.6	17	0	
7	8.0	-1.8			
8	7.2	-1.9			
9	6.4	-2.1			
10	5.6	-2.2			
11	4.8	-2.3			
コップの縁が水面と一致する位置($h=0$)の移動距離 z/mm				3.2	

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

問 2-8



点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 16

問 2-9

(5 点)

$h=0$ となる点の デジタル天秤の値	-2.7 g
-------------------------	--------

コップをさげてゆく過程でのデジタル天秤の値を使わない理由：

表面張力の測定の過程で明らかなように、コップを下げてゆく過程と、上げてゆく過程では、測定結果が異なっている。(これをヒステリシスと呼ぶことがある)

ヒステリシスが生じる原因として、表面張力の振る舞いはコップの表面の状態に敏感であることが考えられる。コップの縁に丸みや凹凸があることや、水平に保たれないことのため、下げてゆく状態ではコップの表面の濡れ方が不十分で、接触角が 0° であり、底面全体が水に触れているという、表面張力の値を求める計算式の仮定を満たしていないと考えられる。そのため、いったん深くコップを沈め、十分濡れた領域を作り測定に使っている。

問 2-10

(5 点)

(計算)

$$2.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \times g = \gamma \pi (2r_1 + 2r_2)$$

コップの内径 $2r_1 = 57 \text{ mm}$ ，外径 $2r_2 = 59 \text{ mm}$ ，重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ を代入して

$\gamma =$	73 mN/m
------------	---------

問 2-11

(5 点)

ピペットの実験から得られた値は、コップの値の 70 パーセント程度であり、両者には明らかに差がある。

ピペット内にある液面が窪んだ水柱の高さ測定では、問 2-3 に示した様にばらつきが大きい。また、計算に用いたモデルは完全な円柱としている。しかし、実際のピペットを観察すると、先端 10 mm 程度はモデルの仮定がなりたっているが、それを超えるとふくらみが無視できない。6.0 mm 側も、内径は一様ではない。このため、この実験から求めた表面張力の値に含まれる誤差は大きいと考えられる。

一方、コップの実験は、式 (2-2) が成立する条件下で行われており、比較的高い信頼度の値が得られたと考えられる。

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2

解答用紙 17

課題 2-4 表面張力の振舞いについての考察 (発展課題)

問 2-12

(5 点)

ABS 樹脂の場合の液面のくぼみはガラスの場合より小さく、接触角がガラスの場合に仮定した 0° とは大きく異なると思われる。問 2-2 のグラフから、これを見積もってみる。データが原点を通る直線に乗ると仮定すると、式 (2-1) とグラフの傾きから、

$$2\gamma \cos\theta / \rho g = hr = 11.5 \text{ mm}^2$$

これを $\cos\theta$ について解いて、問 2-10 で求めた $\gamma = 73 \text{ mN/m}$ および $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ を順次代入して、

$$\cos\theta = \rho g \times 11.5 \text{ mm}^2 / (2 \times 73 \text{ mN/m}) = \rho g \times 7.88 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{N} = 0.772$$

よって、接触角は、 $\theta = \cos^{-1} 0.772 = 39^\circ$ と見積もられる。

問 2-13

(5 点)

内径が、約 1 mm のテフロンチューブは、ガラスの場合と振る舞いが同じならば、 10 mm 以上は管内の液面が上昇するはずである。

実際に水中に差し込んでみると、ほとんど、水面上昇は見られず、水から取り出すと、端面がわずかに水で閉じられた状態になる。

液面の形は、平面に近い。

問 2-14

(5 点)

水銀では、接触角 θ が鈍角となり、 $\cos\theta$ の値は負になる、この場合、液面は、くぼまず、膨らんだ形になる。(医師の使う血圧計で見ることができる。) 水の毛管現象の式 (2-1) はこの場合も成立すると考えられ、ガラスパイプを水銀ダメにさすと、管内の液面は外部の液面よりさがり、上に凸となることになる。