

チャレンジ番号	氏名

実験課題 1

解答用紙 1

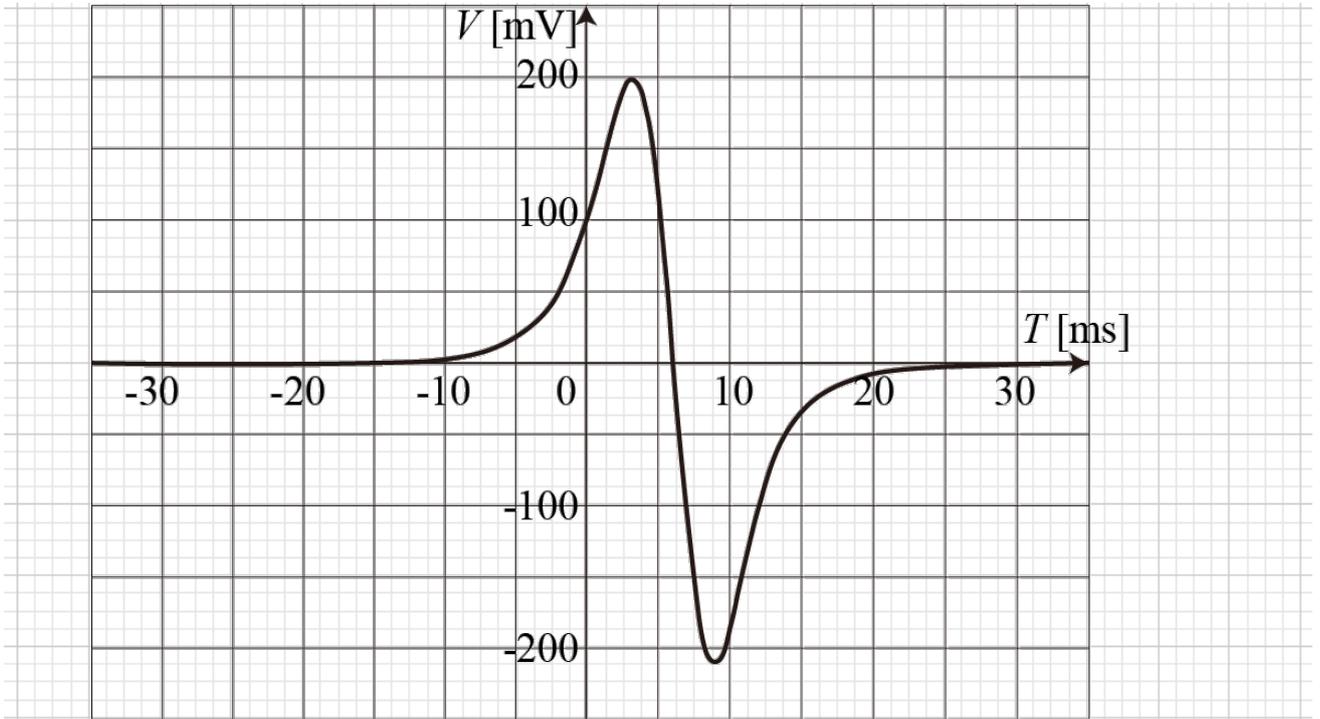
課題 1-1 誘導起電力のデジタルオシロスコープによる測定

問 1-1 観察された波形の図

(10 点)

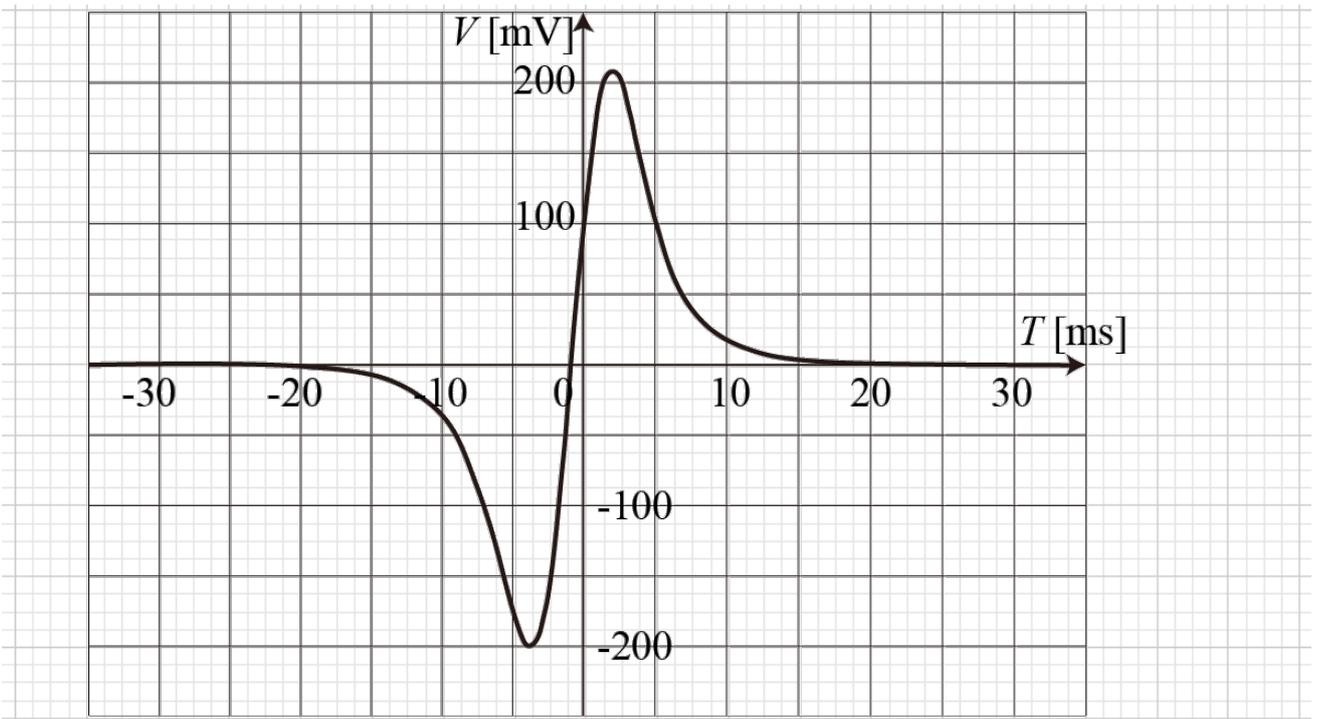
(a) シールを貼った面が下のとき

(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。

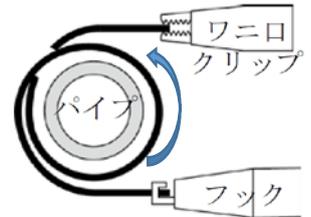


図 1-6

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

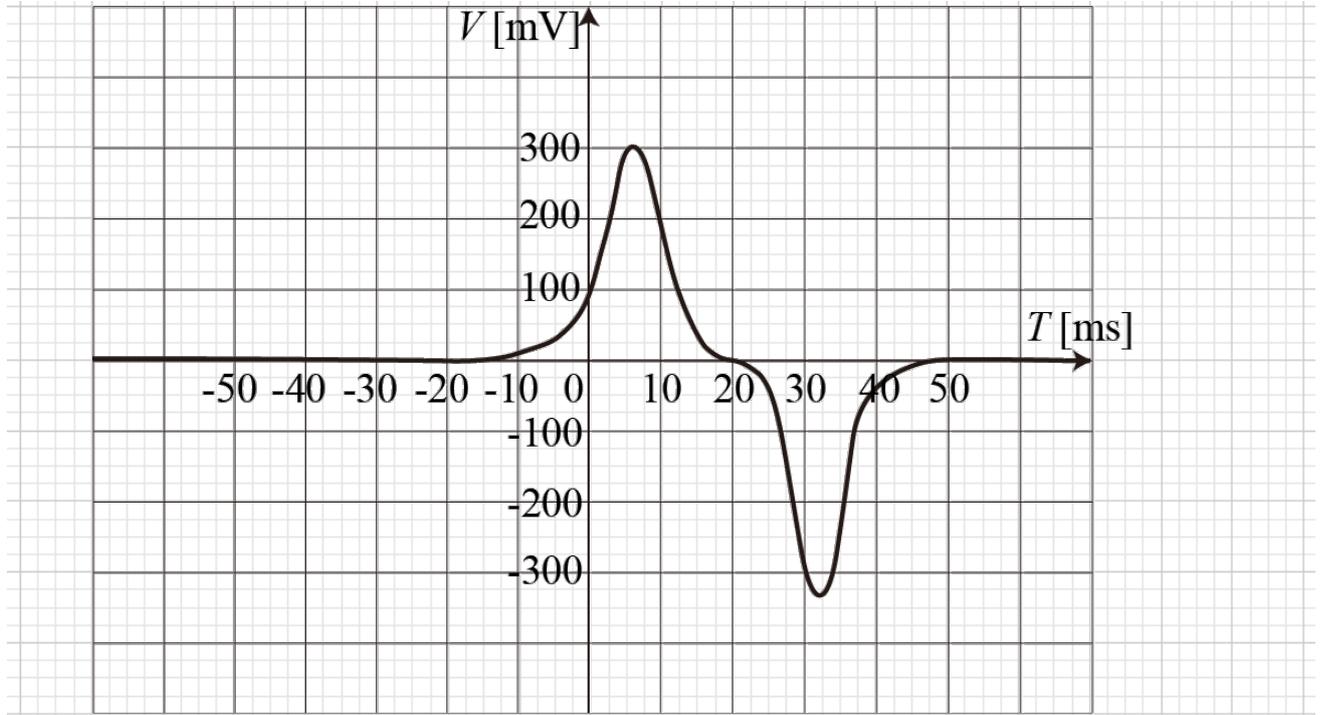
解答用紙 4

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)

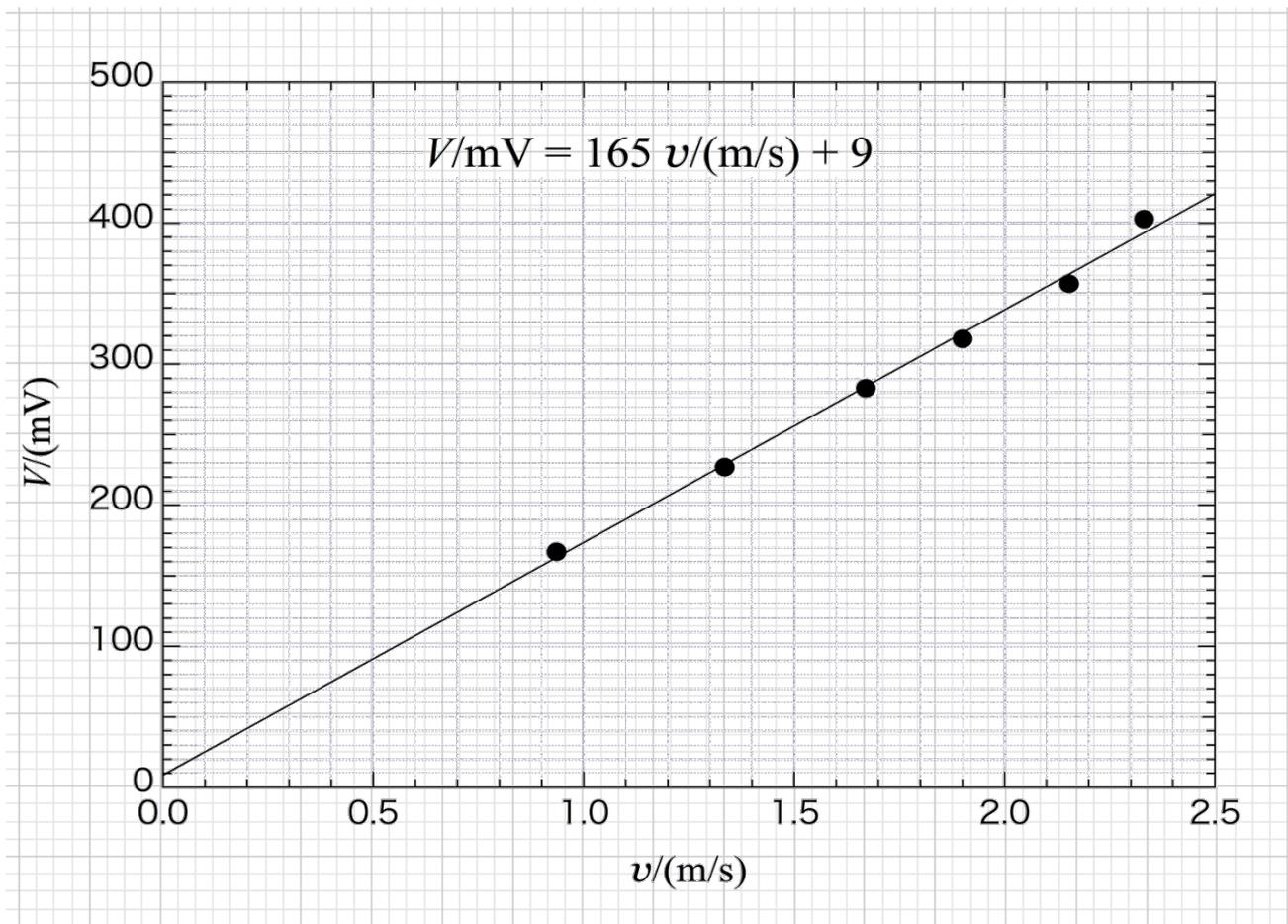
・最大電圧と最小電圧の差 V_{p-p} と磁石の速さ v の測定

(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		速度 $v/(m/s)$				
		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

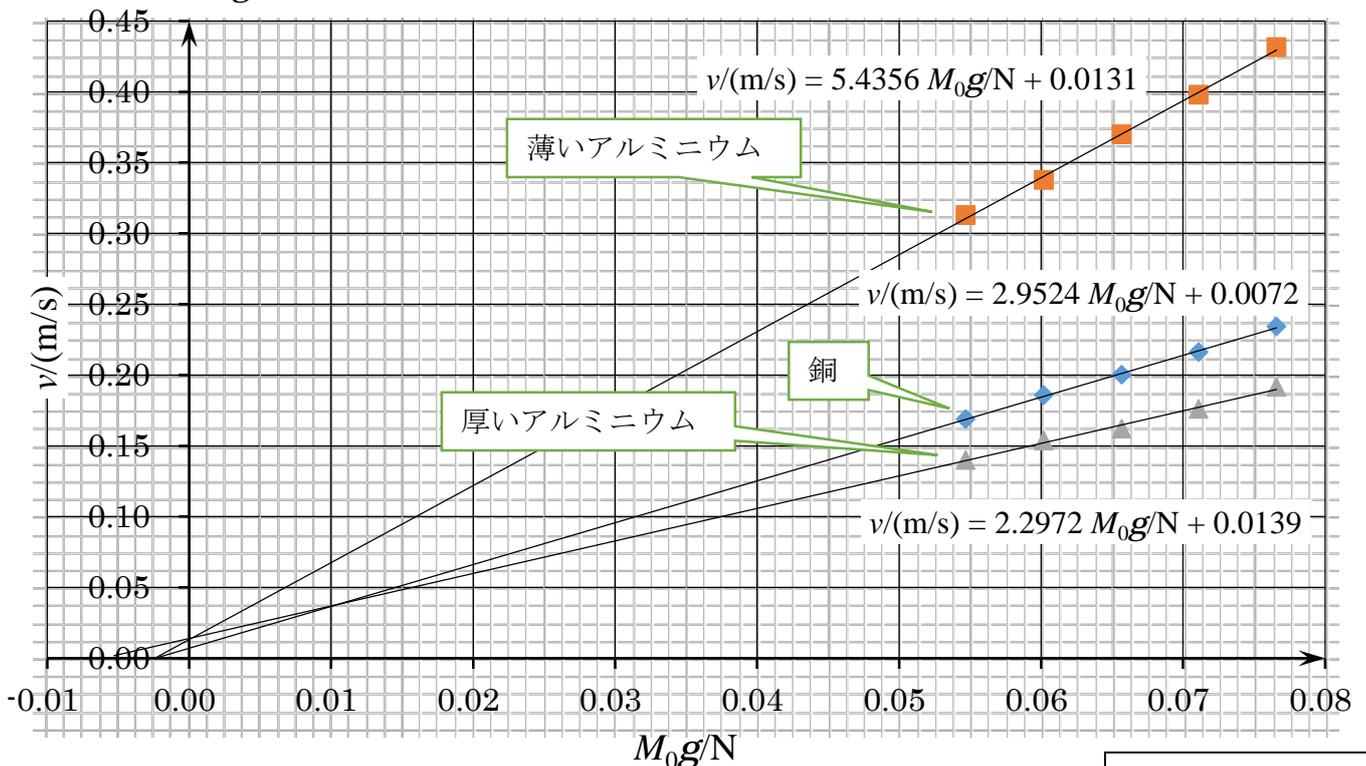
問 1-9 重力と終端速度の関係

(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

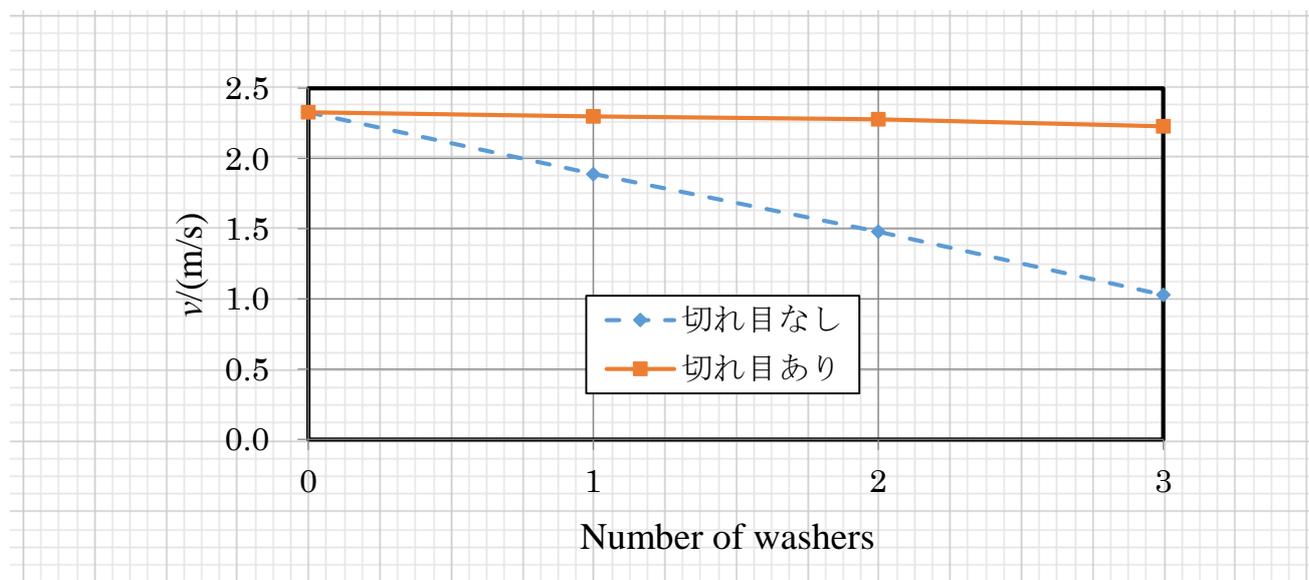
ワッシャー枚数		0	1	2	3
速さ $v/(m/s)$	1 回目	2.37	1.93	1.52	0.99
	2 回目	2.34	1.83	1.48	1.09
	3 回目	2.35	1.89	1.52	1.00
	4 回目	2.31	1.86	1.44	1.02
	5 回目	2.35	1.93	1.44	1.06
	平均値	2.33	1.89	1.48	1.03

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。

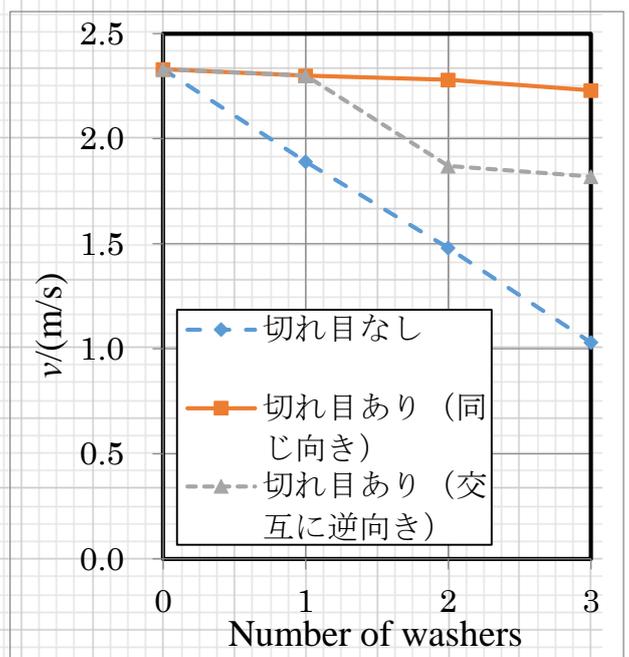
問 1-14 追加実験の提案・実施結果などを自由に区切って記述しなさい。

(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

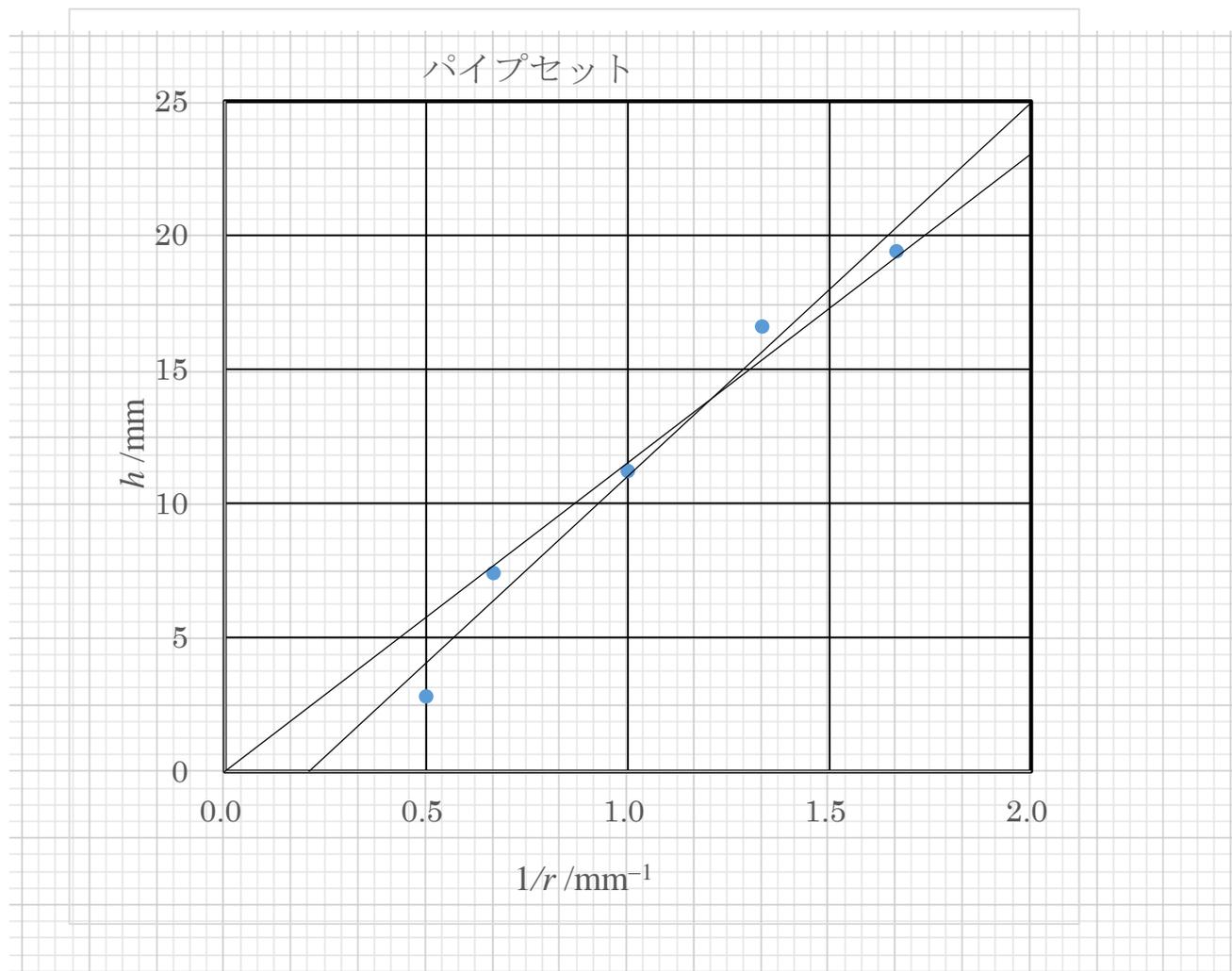
問 2-1

(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

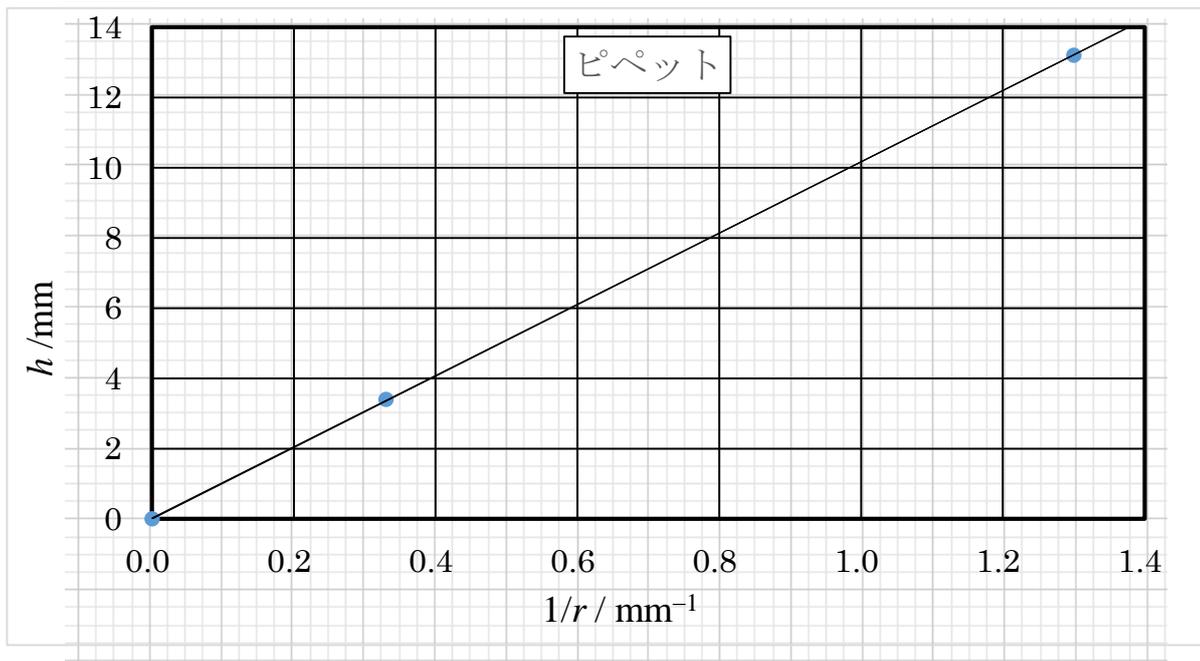
問 2-3

(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)

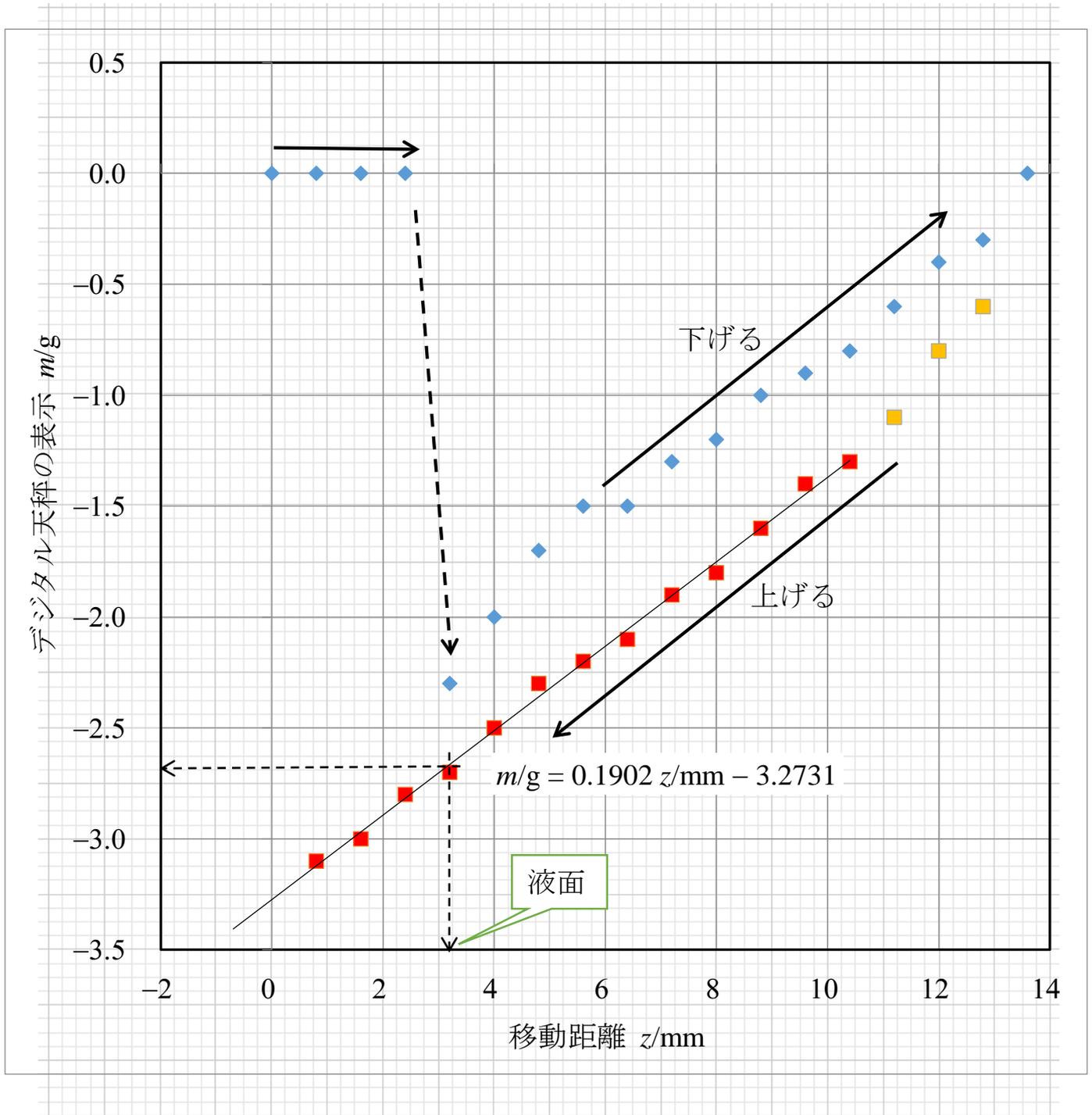
ネジの 回転数	移動距離 z/mm	デジタル 天秤の表示 m/g	ネジの 回転数	移動距離 z/mm	デジタル 天秤の表示 m/g
1	12.8	-0.6	12	4.0	-2.5
2	12.0	-0.8	13	3.2	-2.7
3	11.2	-1.1	14	2.4	-2.8
4	10.4	-1.3	15	1.6	-3.0
5	9.6	-1.4	16	0.8	-3.1
6	8.8	-1.6	17	0	
7	8.0	-1.8			
8	7.2	-1.9			
9	6.4	-2.1			
10	5.6	-2.2			
11	4.8	-2.3			
コップの縁が水面と一致する位置($h=0$)の移動距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

点

チャレンジ番号	氏名

実験課題 2
問 2-8

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	-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。