

EQ1: 模範解答

A.1 (1.0点)

それぞれの軸に沿って磁石を動かし、磁場の変化を測定する。例えば、もし磁石のN/Sの向きをスマートフォンの長手方向にして、磁石を長さ方向に動かすと、磁石が磁気センサーのある高さを通過するときに磁場の符号が変化する。

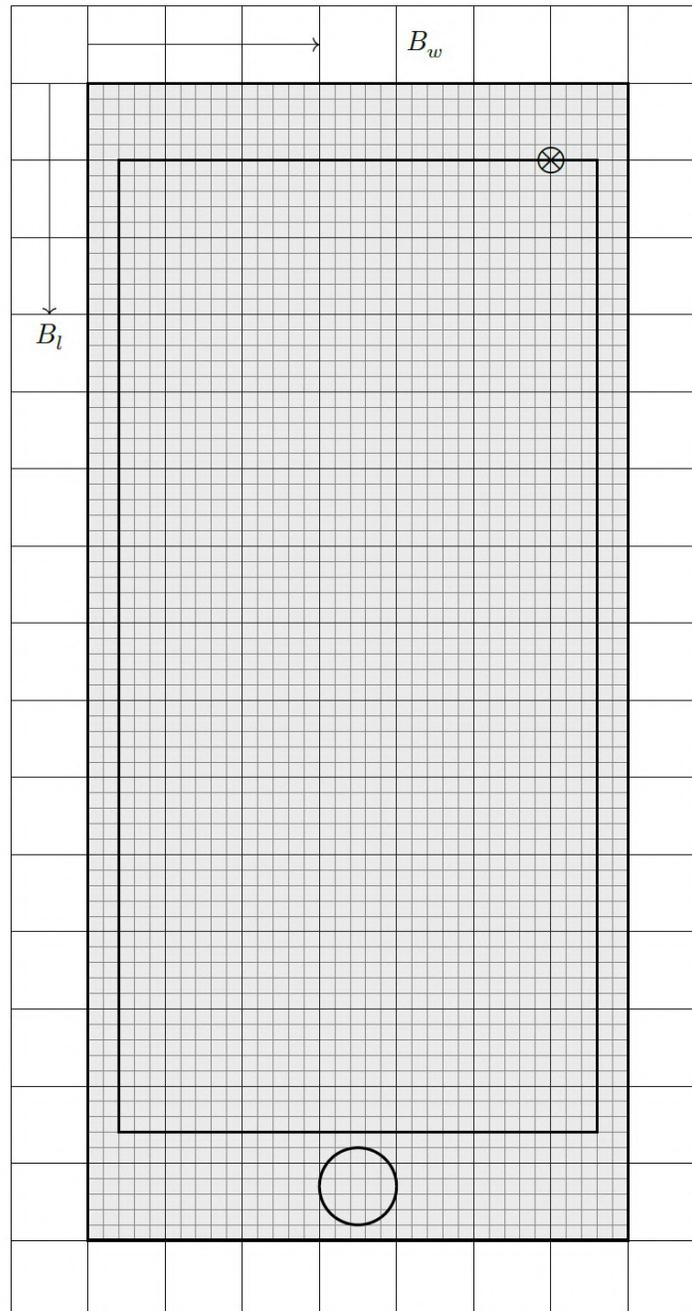


図 1

A.2 (2.3点)

双極子モーメントを測定するための部品配置の例

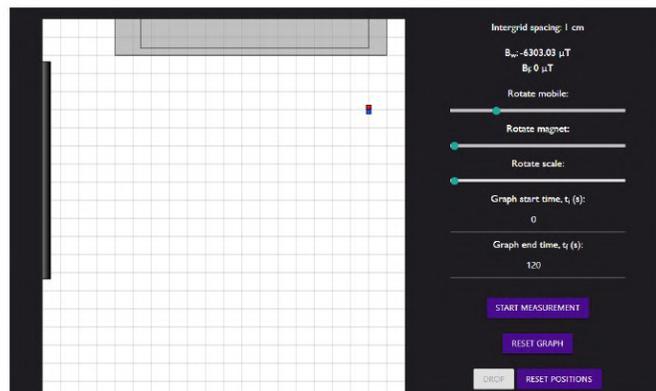


図 2

双極子の中心から距離 x ($x \gg d$) の位置における点双極子の磁場 B_w は次式のように近似できる。

$$B_w = \frac{\mu_0 M}{2\pi x^3} \quad (1)$$

式を変形すると、次式が得られる。

$$B_w = \frac{\mu_0 M}{2\pi} \times \frac{1}{x^3} \quad (2)$$

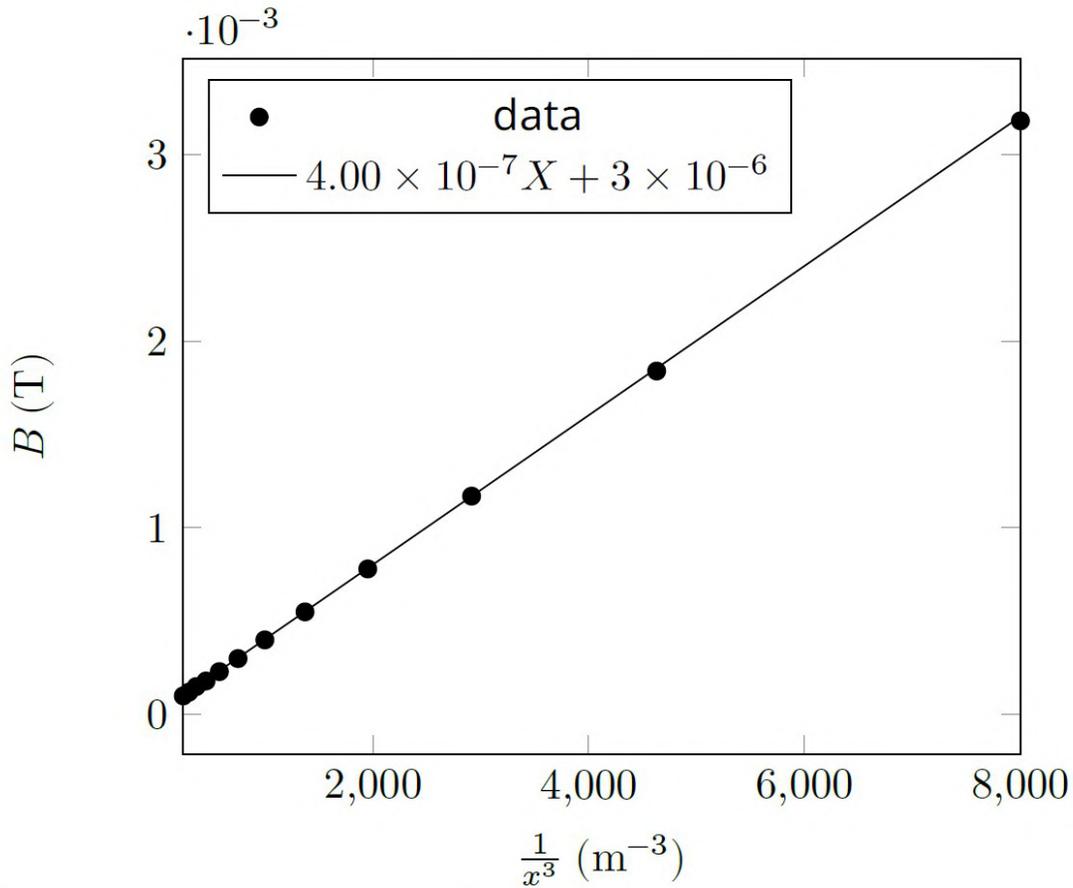
(2) 式から、 B_w を $1/x^3$ に対してプロットすると、原点を通る直線が得られることが分かる。傾きを求めることで、磁石の双極子モーメントが得られる。

A.2 (続き) 磁石の双極子モーメント:
適切な物理量を表に記入する。

Sr.No	x (cm)	B_w (μT)	$\frac{1}{x^3}$ (m^{-3})	B_w (T)
1	5	3177.63	8000	0.00317763
2	6	1841.06	4629.63	0.00184106
3	7	1170.34	2915.45	0.00117034
4	8	783.69	1953.13	0.00078369
5	9	550.22	1371.74	0.00055022
6	10	403.42	1000	0.00040342
7	11	301.21	751.31	0.00030121
8	12	231.96	578.7	0.00023196
9	13	181.58	455.17	0.00018158
10	14	146.03	364.43	0.00014603
11	15	118.72	296.3	0.00011872
12	16	98.18	244.14	0.00009818

(2) 式から、 B_w を $1/x^3$ に対してプロットすると、原点を通る直線が得られることが分かる。磁石の双極子モーメントは傾きから計算される。

A.2 (続き)

 B_w vs $\frac{1}{x^3}$ のグラフ

グラフの傾き : $4.00 \times 10^{-7} \text{ Nm}^2/\text{A}$

磁石の双極子モーメント : 2.00 Am^2

B.1 (0.3点)

下図のように、スマートフォンを回転し、磁石とパイプをスマートフォンの幅方向に沿って配置する。

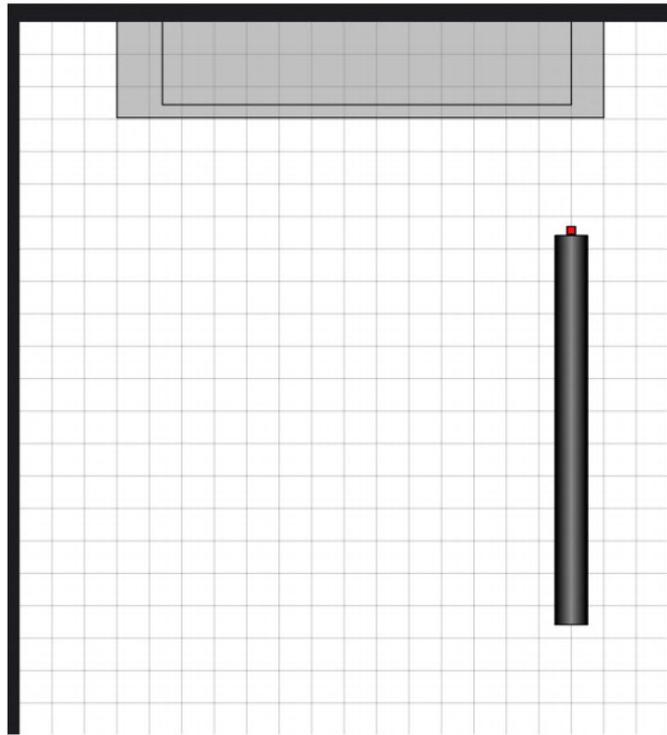


図 3

磁気センサーの位置を原点とし、そこから x_0 の距離に磁石を静止して置く場合を考える。パイプの軸に沿って磁石を離すと、磁石はパイプの中を落ちて始める。パイプの導電性のある部分においては、渦電流による抵抗によって、磁石は短時間加速された後に終端速度 v に到達する。この場合、磁気センサーにより測定される磁場 B_w の時間変化は次式のようなになる。

$$B_w(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{M}{(x_0 + vt)^3} \quad (3)$$

(3) 式を変形すると (4) 式になる。

$$\left(\frac{\mu_0 M}{2\pi B_w(t)} \right)^{1/3} = vt + x_0 \quad (4)$$

B.1 (続き)

得られた磁場の時間変化の様子は、磁石の運動に3つの領域 (AB, BC, 及びCD) が存在することを明確に示している (図4参照)。

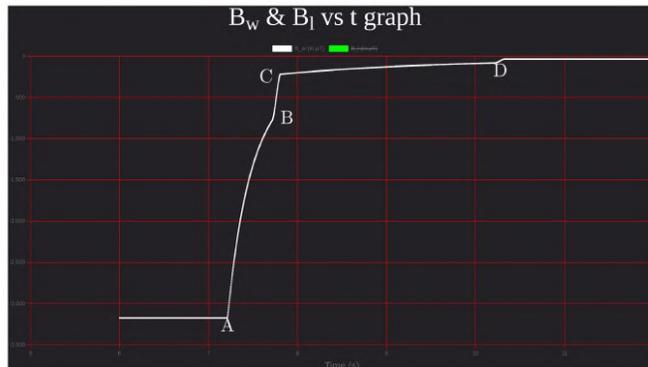


図4

3つすべての領域に対して (B_w と t) のデータを収集し、式(4)にしたがってプロットする。パイプの加速領域 (木の部分) では、グラフは直線ではなく、パイプの導電性の部分 (アルミニウム (Al)と銅 (Cu)) では、磁石は終端速度で運動し、グラフは直線となる。パイプの導電性の部分で終端速度に達するまでに加速するのに要する時間はほぼ無視できる。

次ページ以降の解答に示すグラフから、明らかに次のような順番であることが分かる。

Section	Section number
Aluminium	1
Copper	3
wood	2

導電性は銅の方がアルミニウムよりも高いため、終端速度は銅の部分の方がアルミニウムの部分よりも遅い。

B.2 (2.6点)

アルミニウム部分における磁石の終端速度:

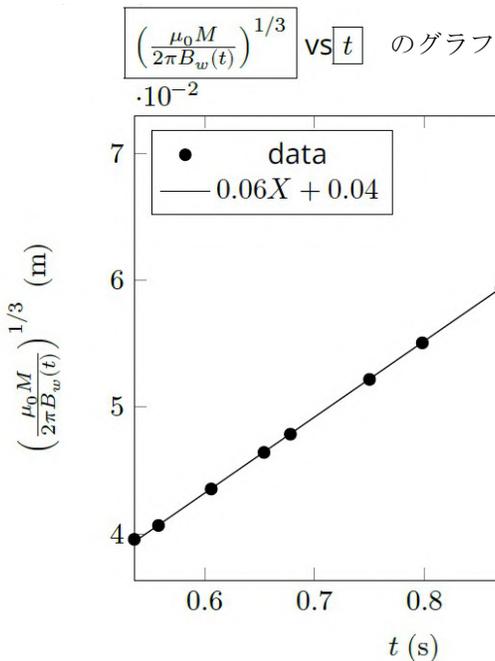
適切な物理量を表に記入する。

Sr.No	B_w (μT)	t (s)	$\left(\frac{\mu_0 M}{2\pi B_w(t)}\right)^{1/3}$ (m)	v (m/s)
1	6462.28	0.534	0.0396	0
2	6462.28	0.536	0.0396	0.01
3	5954.24	0.558	0.0407	0.06
4	4850.05	0.606	0.0435	0.06
5	4002.02	0.654	0.0464	0.06
6	3651.48	0.678	0.0478	0.06
7	2817.43	0.75	0.0522	0.06
8	2397.97	0.798	0.055	0.06
9	1911.68	0.87	0.0594	0.06
10	1548.47	0.942	0.0637	0.06
11	1448.01	0.966	0.0651	0.06
12	1356.06	0.99	0.0666	0.06
13	1194.26	1.038	0.0694	0.06
14	1188.09	1.04	0.0696	0.14
15	1142.95	1.05	0.071	

速度 v の列は前方差分で得られる。 $\frac{x_{n+1} - x_n}{t_{n+1} - t_n}$.

(4) 式から $\left(\frac{\mu_0 M}{2\pi B_w(t)}\right)^{1/3}$ を t に対してプロットすると、直線になる。直線の傾きから終端速度が得られる。

B.2 (続き)



グラフの傾き： 6 cm/s

アルミニウム部分における磁石の終端速度： 6 cm/s

アルミニウム部分の長さ：

グラフの傾き： 使用しない

グラフの y 切片： 使用しない

[訳者注： 別解 使用する (傾きから速度を求め、通過時間を乗じてアルミニウム部分の長さを求める)]

上の表の第4列の値は、実際には磁気センサーから磁石までの距離を表している。速度(第5列)は前方差分により計算した。0.536 sにおいて磁場の変化が始まったことに注意しよう。これは、磁石が落ち始めた時間を表している。磁石は直ちに終端速度 6 cm/s に到達している。速度の変化(もしグラフをプロットすると速度と時間のグラフが直線から外れる)が1.040 sで起きている。これは、この時点で磁石がパイプのアルミニウムの部分から外に出たことを示唆している。

アルミニウム部分の長さ = $(1.040 - 0.536) \times 6 \text{ cm} = 3.024 \text{ cm}$

[訳者注： 原文では長さを4桁で表示されているが、速度の有効桁(グラフから2~3桁)を考慮すると2桁が妥当]

B.3 (2.2点)

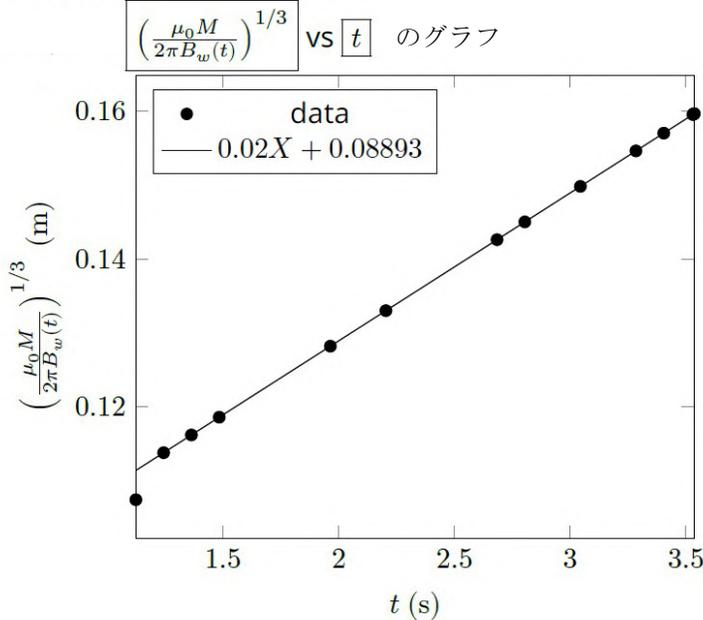
銅部分における磁石の終端速度：
適切な物理量を表に記入する。

Sr.No	B_w (μT)	t (s)	$\left(\frac{\mu_0 M}{2\pi B_w(t)}\right)^{1/3}$ (m)	v (m/s)
1	338.23	1.122	0.106	0.85
2	322.39	1.124	0.1075	0.87
3	271.32	1.244	0.1138	0.02
4	254.86	1.364	0.1162	0.02
5	239.70	1.484	0.1186	0.02
6	189.79	1.964	0.1282	0.02
7	169.97	2.204	0.1330	0.02
8	137.91	2.684	0.1426	0.02
9	131.17	2.804	0.1450	0.02
10	118.96	3.044	0.1498	0.02
11	108.22	3.284	0.1546	0.02
12	103.34	3.404	0.1570	0.02
13	98.52	3.53	0.1595	0.02
14	98.44	3.532	0.1596	0.02
15	98.37	3.534	0.1596	0.02
16	98.30	3.536	0.1597	0.05
17	98.22139	3.538	0.1597	

速度 v の列は前方差分で得られる。 $\frac{x_{n+1} - x_n}{t_{n+1} - t_n}$.

(4) 式から $\left(\frac{\mu_0 M}{2\pi B_w(t)}\right)^{1/3}$ を t に対してプロットすると、直線になる。直線の傾きから終端速度が得られる。

B.3 (続き)



グラフの傾き : 2 cm/s

銅部分における磁石の終端速度 : 2 cm/s

銅部分の長さ :

グラフの傾き : 使用する

グラフの y 切片 : 使用しない

[訳者注 : 別解 使用しない (磁場の大きさから距離を求め、入る時刻、出る時刻での距離の差から銅部分の長さを求める)]

パイプの銅部分の長さは $v_c t_c$ で計算される。ここで、 v_c はパイプの銅部分における磁石の終端速度、 t_c はパイプの銅部分を磁石が通過するのにかかる時間である。

上の表から、磁石は銅部分に 1.124 s において入り、急激な速度変化が見られる 3.536 s に出ている。

$$\text{銅部分の長さ} = (3.536 - 1.124) \times 2 \text{ cm} = 4.842 \text{ cm}$$

[訳者注 : 原文では長さを 4 桁で表示されているが、速度の有効桁 (グラフから 2~3 桁) を考慮すると 2 桁が妥当]]

B.4 (1.6点)

木製部分の長さ：

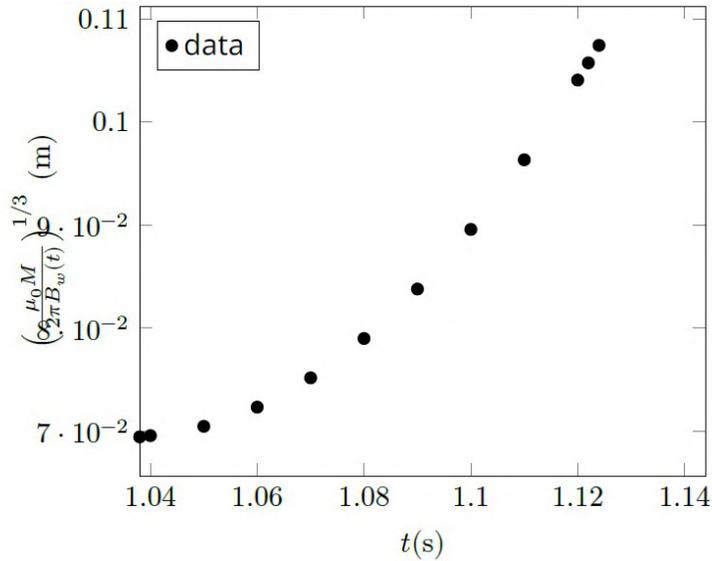
適切な物理量を表に記入する。

Sr.No	B_w (μT)	t (s)	$\left(\frac{\mu_0 M}{2\pi B_w(t)}\right)^{1/3}$ (m)	v (m/s)	a (m/s^2)
1	1194.26	1.038	0.0694	0.06	4
2	1188.09	1.04	0.070	0.14	5.66
3	1142.95	1.05	0.071	0.15	9.8
4	1056.94	1.06	0.072	0.25	9.8
5	941.55	1.07	0.075	0.34	9.8
6	811.40	1.08	0.079	0.44	9.8
7	679.75	1.09	0.084	0.54	9.8
8	556.44	1.1	0.090	0.64	9.8
9	447.31	1.11	0.096	0.74	9.8
10	354.74	1.12	0.104	0.83	9.8
11	338.23	1.122	0.106	0.85	-334.92
12	322.39	1.124	0.108	0.18	0.31
13	271.32	1.244	0.114		

と $\frac{v_{n+1} - v_n}{t_{n+1} - t_n}$ の前方差分で得られる。

速度 v と加速度 a の列は、それぞれ $\frac{x_{n+1} - x_n}{t_{n+1} - t_n}$

B.4 (続き)



木製部分はパイプの中央の部分である。既にアルミの部分についての解析で、アルミ部分を 1.040 s に出ていること分かっている。ここでは、速度と時間の表を作成する。磁石の速度が 1.124 s で急激に遅くなることに注意する。この時点で、磁石は胴の部分に入り、渦電流による抵抗の影響を受けている。パイプの長さは、

$$\left(v_{Al} t_w + \frac{g t_w^2}{2} \right)$$

により計算される。ここで、 v_{Al} は、パイプのアルミニウム部分での磁石の終端速度であり、 t_w は、パイプの木製部分を磁石が通過するのにかかる時間である。

パイプの木製部分を通過するのにかかる時間は、 $t_w = (1.124 - 1.040) \text{ s} = 0.084 \text{ s}$

パイプの木製部分の長さ = 3.96 cm

[訳者注： 原文では長さを3桁で表示されているが、重力加速度や通過時間の有効桁を考慮すると2桁あるいは小数点以下1桁(0.1 cmの桁)が妥当]

APhO 2022 実験試験の解答例

Q-2 音響ブラックボックス

A1 :

0.2 点

$$x(t) = vst \cos(\beta) + R \cos(\omega t + \phi) + Xc \quad (1)$$

$$y(t) = vst \sin(\beta) + R \sin(\omega t + \phi) + Yc \quad (2)$$

A.2 :

1.2 点

下図は、データ点間隔 0.02 s で得られたグラフである。

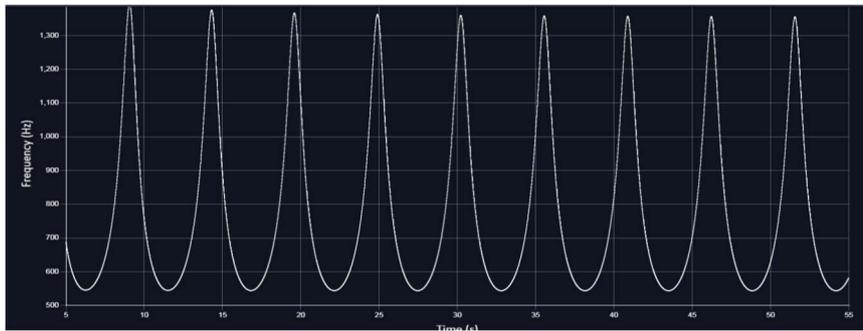


図 1 : 測定結果の表示の一例

表 1

測定番号	t / s	f_{\min}
1	6.26	545.36
2	11.52	544.4
3	16.82	544.03
4	22.14	543.85
5	27.46	543.75
6	32.8	543.69
7	38.14	543.65
8	43.5	543.62
9	48.84	543.59
10	54.18	543.58

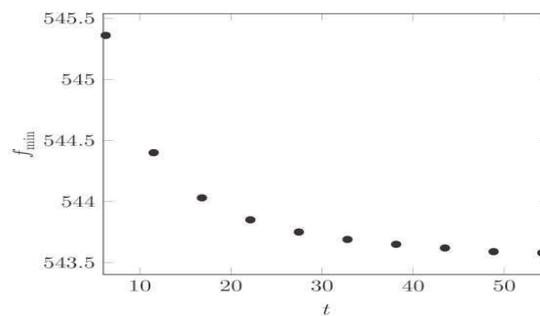


図 2 : f_{\min} の t への依存性

A.3 :

1.2 点

検出器と音源がそれぞれ速度 v_D と v_s で移動している一般的なケースを考えてみる。また、線源と検出器を結ぶ線は、問題文の図 1 で定義されているように、 x 軸と角 α をなしている。

α は時間の関数であることに注意。音源と検出器を結ぶベクトルを \hat{n} とする。このとき線源が検出器に接近している場合、検出器で検出される周波数は以下である。

$$f(t) = f_0 \{c - v_D \cdot \hat{n}(t)\} / \{c - v_D \cdot \hat{n}(t)\} \quad (3)$$

$$= f_0 [c - v_D \cos(\gamma - \alpha(t))] / \{c - [(v_s + R\omega) \cdot \hat{n}(t)]\} \quad (4)$$

$$= f_0 [c - v_D \cos(\gamma - \alpha(t))] / \{c - [(v_s \cos(\beta - \alpha(t)) + R\omega \cos(\omega t + \phi + \pi/2 - \alpha))]\} \quad (5)$$

$$= f_0 [c - v_D \cos(\gamma - \alpha)] / \{c - [(v_s \cos(\beta - \alpha(t)) - R\omega \sin(\omega t + \phi - \alpha(t))]\} \quad (6)$$

同様に、検出器から遠ざかっていく音源に対しては、

$$f(t) = f_0 [c - v_D \cos(\gamma - \alpha)] / \{c + [(v_s \cos(\beta - \alpha(t)) - R\omega \sin(\omega t + \phi - \alpha(t))]\} \quad (7)$$

漸近極限 ($t \rightarrow \infty$) における最小周波数の式は、

$$f_{\min} = f_0 c / [c + (v_s + R\omega)] \quad (8)$$

A.4 :

1.4 点

音源の初期位置： 検出器を x 軸 ($x_1, 0^\circ$) に、次に y 軸に配置する (例えば $y_1, 90^\circ$)。スクリーン上のグラフから、最初の信号が検出器に到達するまでの時間を書き留める。これらの時間をそれぞれ $\Delta t_{x1}, \Delta t_{y1}$ とする。

$$(x - x_1)^2 + y^2 = (c\Delta t_{x1})^2 \quad (9)$$

$$x^2 + (y - y_1)^2 = (c\Delta t_{y1})^2 \quad (10)$$

上記の 2 つの方程式を解くと、音源の座標が求まる。シミュレーションの結果、 $x_1 = 500$ m の場合と $y_1 = 500$ m 場合では、 $\Delta t_{x1} = 1.5344$ s と $\Delta t_{y1} = 1.2727$ s である。上の連立方程式からは 2 つの解がありうる。検出器を 3 番目の場所に設置し、正しいペアを選択することができる。答えは、

$$x_a = 419.99 \text{ m}, \quad y_a = 499.99 \text{ m}$$

A.5 :

2.1 点

音源が遠い距離から検出器に近づき (例えば左側から)、検出器を横切り、その後遠い距離へと (右側に) 離れて行く位置に検出器があるとす。このとき漸近極限 (左端と右端、 $\beta \approx \alpha$) では、2 組の周波数が検出器によって測定されることになる。 $v_D = 0$ と設定する。左端では

$$f_{\max} = f_0 c / [c - (v_s + \omega R)] \quad (11)$$

$$f_{\min} = f_0 c / [c - (v_s - \omega R)] \quad (12)$$

右端では

$$f_{\max} = f_0 c / [c + (v_s - \omega R)] \quad (13)$$

$$f_{\min} = f_0 c / [c + (v_s + \omega R)] \quad (14)$$

式 (11) と 式(12) によって

$$(f_{\max} + f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min}) = (c - v_s) / \omega R \quad (15)$$

式(13) と 式(14) によって

$$(f_{\max} + f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min}) = (c + v_s) / \omega R \quad (16)$$

また、 $t = 0$ では、音源と検出器の間に有限の距離がある。これによって、信号の遅延を引き起こす。 Δt を2つのピーク (f_{\max}) 間の時間間隔とする。この場合に、

$$\Delta t = 2\pi(1 + v_s / c) / \omega \quad (17)$$

式(15-17)を合わせて解くと、 v_s 、 ω 、 R の値を得ることができる。このように検出器を座標(x_D , y_D)に固定し、音源が検出器に遠い距離から接近し、交差した後、遠ざかることを想定する。なお、スクリーン上のグラフの極値がほぼ一定になる領域で漸近的な振る舞いを確認することができる。また、検出器の原点からの距離が、 $\beta \approx \alpha$ 満たすような場合、グラフが急激に変化することが予想される。距離を 8000m に固定し、 θ の値 (検出器位置の x 軸からの角度) をいろいろ変えて試してみる。

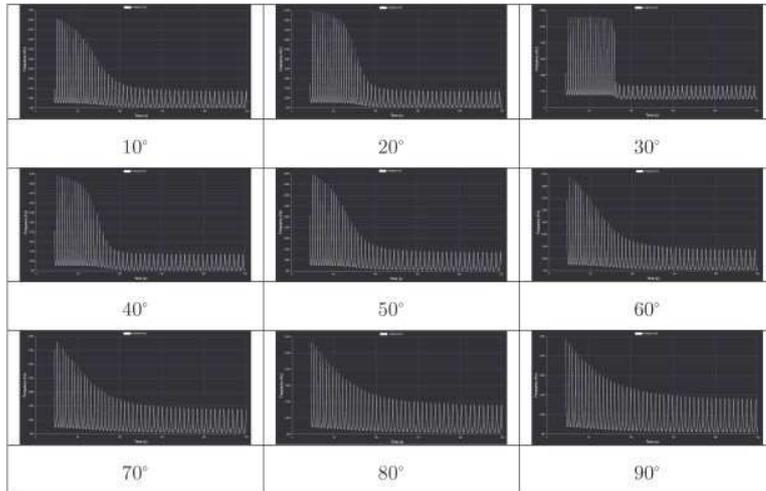


図3： 種々の θ (10度—90度) での観測データの写真

$\theta = 30^\circ$ では、グラフの左端と右端が漸近的な挙動を示し、ピーク周波数は顕著な変化を示さない。この領域では、グラフの左側のピーク周波数の値が、グラフの右側のピーク周波数の値よりも高いことに注目してほしい。これは、グラフの右側で音源が検出器から遠ざかっていることを示している。検出器は過渡領域のどこかに配置されている。より正確な値を得るために、データポイントの間隔を小さくして (例えば 0.001)、左端の領域でグラフを拡大すると、 f_{\max} と f_{\min} の数値がより正確になる。その値は、 $f_{\min} = 788.24$ Hz、 $f_{\max} = 5569.59$ Hz である。これを式(15)に代入すると、

$$(f_{\max} + f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min}) = 1.33 = (c - v_s) / \omega R \quad (18)$$

右端の領域では

$f_{\min} = 543.96$ Hz、 $f_{\max} = 1353.45$ Hz である。これを式(16)に代入すると、

$$(f_{\max} + f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min}) = 2.34 = (c + v_s) / \omega R \quad (19)$$

式(18,19)から、 $v_s = 91.1$ m/s、 $\omega R = 179.66$ m/s が得られる。また、漸近的な場合における任意の2つのピークについて場合

$$\Delta t = 148.84 - 143.48 = 5.36 = 2\pi(1 + v_s / c) / \omega \quad (20)$$

$v_s = 91.1 \text{ m/s}$ の値を用いて、 $\omega = 1.49 \text{ rad s}^{-1}$ とする。 $\omega R = 179.66 \text{ m/s}$ から、 $R = 120.57 \text{ m}$ となる。 f_0 を得るには、式(8)の右端に $f_{min} = 5327.82 \text{ Hz}$ を挿入して f_0 を解けばよい。

(訳者注：5327.82 Hz ではなくて、543.96 Hz が正解、式(8)ではなくて、式(14)が適切である。他にも数個所に、数式番号の誤りがあったが、訂正してある。)

これにより、 f_0 は、990.26 Hz となる。

表 2 (解答) :	f_0 (Hz)	ω (s^{-1})	R (m)	v_s (m/s)
	990.26 Hz	1.49 s^{-1}	120.57 m	91.1 m/s

A.6 :

2.0 点

β の決定： 下図は模式図であり、S は非常に遠い距離の音源である。P と Q は、二つの異なる瞬間での検出器の位置を表す。

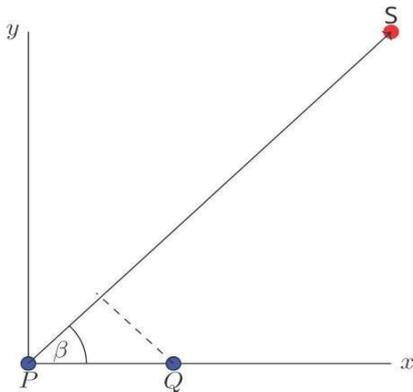


図 4： S と PQ の位置関係の模式図

距離が遠い場合、音信号が P の検出器に到達するまでの時間： $t_0 = 1009.61 \text{ s}$ 、音信号が Q 検出器に到達するまでの時間を $t_1 = 1007.85 \text{ s}$ とする。

P と Q の間の距離は 660 m で、音信号がそれぞれの検出器に到達するまでの時間はそれぞれ 1009.61 s と 1007.85 s である。時間差の式は次のように与えられる。

$$t_0 - t_1 = (PQ) \cos(\beta) / c \tag{21}$$

$$\cos(\beta) = (t_0 - t_1)c / (PQ) \tag{22}$$

$\beta = 28.36^\circ$ となる。

A.6 (続く)

β の決定の別解:

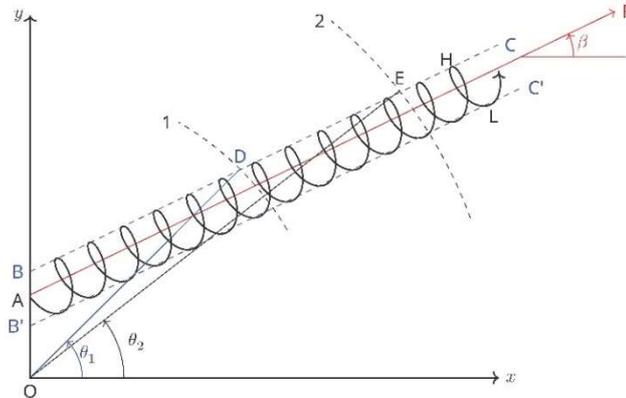


図 5： 音源の進行方向を見出すための計測の模式図

赤線 AF は音源の軌道円の速度 v_s の方向を表す。 v_s が x 軸となす角度 β を求める。

検出器によって検出される周波数の値は、2つの側面によって決まる。音信号を発生しながら描くサイクロイド（円弧）と検出器自身の位置に依存する。

信号源の軌道の1サイクル中の点 H と点 L は、それぞれ音源の速度が最大と最小になる位置を示している。これは、 v_s が回転の接線速度成分と平行または反平行であるためである。

音源が円弧上を n 回ると、円形の弦 1 上の異なる角度位置の検出器では、その位置に対応する異なる値の f_{max} を検出する。 x -軸 (0°) に近い角度位置から始まり、 (θ_1) の点 D に至るまで f_{max} は増加し続ける。実際、AF に平行な線分 BC 上のどの位置でも、すべての f_{max} のうち最大のものを検出する。同様に、検出器が AF に平行な線分 $B'C'$ 上の任意の位置にある場合、検出器は周波数の最小値を検出する。シミュレーションでは、検出器の x, y 座標を変えて、角度を変えることと同様のことができる。その際、速度はゼロのまま保っておく。

検出器の位置を円形の弦 2 に変えて、この想定を繰り返してみる。円弧を横切るように走査してみる。角度 θ_2 は、検出器が最大値 f_{max} を検出することに対応する。

角度位置 θ_1 と θ_2 が決まれば、点 D と E の座標を使い、セグメント DE の角度を計算することができる。これが角度 β である。もし点 D と E の座標をそれぞれ (x_1, y_1) と (x_2, y_2) とすると、

$$\beta = \arctan [(y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)] \quad (23)$$

このプロセスを下表と次のページのグラフに示す。まず、検出器を原点から 8000m 離れた場所に設置し、対応する角度位置の座標を $0^\circ - 90^\circ$ に順次変えて行く。任意の一定周期（この場合は 10 回目）の f_{max} を記録する。 f_{max} vs θ のプロットからわかるように、 θ_1 は 25° から 35° の間であることがわかる。

表 3 :

θ	f_{\min}	f_{\max}
5	676.08	2670.30
10	722.99	3620.51
20	763.49	4957.28
30	781.46	5478.86
40	753.98	4032.21
50	711.98	3007.44
60	677.39	2486.46
70	651.25	2185.81
80	630.99	1987.99
90	614.68	1845.65

θ_1 をより正確に決定するために、より小さなステップで測定を行う。以下に、 $25^\circ - 35^\circ$ の変動の様相を表とグラフ（前の測定結果もふくむ）に示す。

表 4 :

θ	f_{\min}	f_{\max}
25	777.95	5538.23
26	779.67	5589.40
26.9	780.80	5609.15
27	780.90	5609.74
27.3	781.18	5609.546
27.5	781.33	5607.78
28	781.62	5597.66
29	781.81	5553.37
30	781.46	5478.86
31	780.58	5377.65
32	779.17	5254.35

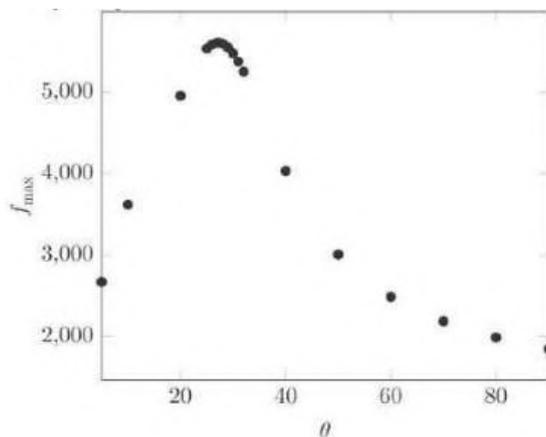


図 5 : 周波数の極大値の θ への依存性

表とグラフから、 $\theta_1 = 27^\circ$ であることは明らかである。これを別の距離 16000 m について繰り返す。その表とグラフを以下に示す。

表 5 :

θ	f_{\min}	f_{\max}
25	781.12	5589.093
26	781.47	5602.27
27	781.70	5609.05
27.4	781.76	5609.95
27.5	781.77	5610.01
28	781.81	5609.34
29	781.80	5603.16
30	781.66	5590.544
31	781.41	5571.60
32	781.04	5546.48

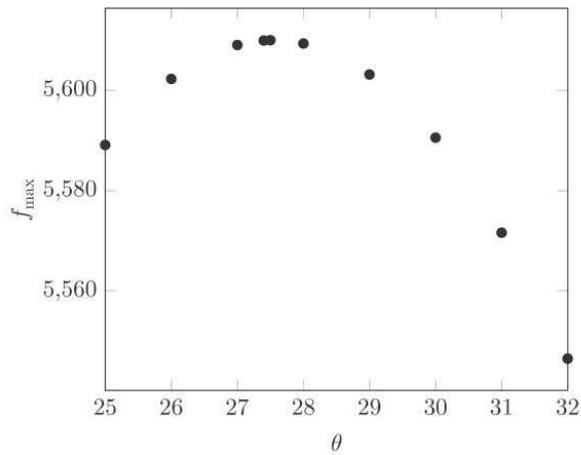


図 6 : θ の詳細な変化に対する周波数の極大値の変化

これにより、 $\theta_2 = 27.5^\circ$ が得られる。 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 の対応する値を取り、式 (23) を使用すると、

$$\beta = \arctan [(7468.77 - 3631.92) / (14192.17 - 7128.052194)] = 28.5^\circ \quad (24)$$

A.7 :

2.1 点

円軌道の中心の座標： このパートでは、検出器を y -軸上のある固定した位置に置いておく。音源と検出器の初期位置の模式図を下图に示す。

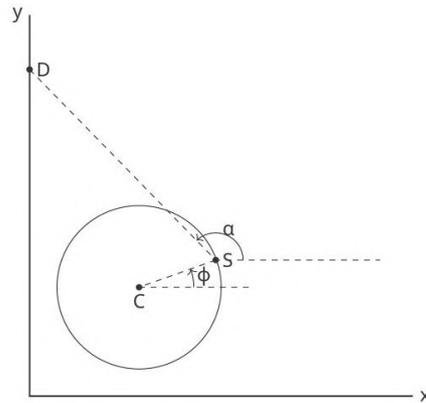


図 7 : 音源の軌道中心と検出器の模式図 (大きさは正確ではない)

音源から送られた最初の信号の検出された周波数を記録する。 R と音源の初期座標は既にながわかってい
る。 $t=0$ 、検出器を y -軸上の 500 m の位置に置いた場合、最初の信号の検出周波数は、 795.69 Hz とな
る。音源の座標を $419.99, 499.99\text{ m}$ とした場合、

$$\tan(180^\circ - \alpha) = 0 / 419.99 \quad (25)$$

$$\alpha = 180^\circ \quad (26)$$

検出周波数と α の値を式(6)に代入する、

$$795.69 = (990.26 \times 330) / [330 - 91.1 \times \cos(28.5^\circ - 180^\circ) + 179.66 \times \sin(\phi - \alpha)] \quad (27)$$

$$\Rightarrow \phi \approx 0^\circ \quad (28)$$

これにより、音源の軌道中心の座標は $(299.42, 499.99)\text{ m}$ となる。

(訳者注： A.4、A.5、A.6 の正解値 (概ね 4 桁以上が示されている) に関して、設定値、演算過程の
内容を考慮すると、有効桁数は 3 桁程度が適切である。またどの表でも単位名が記入していないが、周
波数 f の単位は、 Hz である。)