

## 一般的な注意

### オンライン実験のためのソフトウェア

START EXAM ボタンをクリックするとウインドウが現れ録画が開始されます。

全画面を共有としなければならない。一つのウインドウあるいはタブを共有としたのではシミュレーションを開始できない。

録画が開始されてからシミュレーションを開始できます。

共有を許可すると、Stop sharing と Hide の選択肢を含む箱 (dialogue box) が画面の下に出てくる。Hide をクリックしてこの箱を隠す。

シミュレーションの途中でやり直したり 2 つのシミュレーションを切り替えたりすることができます。

試験が終了したら finish button をクリックする。

画面共有を誤って早く終了すると、ID、パスワードによる再ログインが必要になる。

**画面は常に録画されている。他の Window/Tab/Program などを許可なく開くと失格になる。**

誤って finish button を押したり、PC がダウンしたりしたら、再ログインして試験を続けることができる。この経緯は後日、ログにより確認する。正当な理由なしにログアウトしたことが分かれば、失格になる。

シミュレーションがフリーズした時には次を試みよ:

1. REFRESH ボタン (FINISH ボタンの隣にある) を押す。
2. REFRESH ボタンが応答しないときは、website を更新する (URL バーの隣に refresh のボタンがある)。
3. 2. でうまくいかないときには、ブラウザを閉じて再ログインする。ログにより後日 (適切に行動したか) 確認される。

制御についての入力場所とグラフィック領域とが重なってしまうことがある。この場合には:

1. 100% に拡大する (規定値, コントロール +0)。
2. REFRESH ボタン (FINISH ボタンの隣にある) を押す。
3. 拡大・縮小を元に戻す (重なりはなくなっているはず)。

重なりがまだある時にはこれらを繰り返す。

### 試験開始の前に

Q1, Q2, General instructions(G0) と書かれた 3 つの A4 大の封筒が実験試験。

封筒には student code が書かれている。

試験開始・終了は合図で知らせる。試験開始の合図までは問題の封筒を開けてはならない。

試験監督が、試験開始前の 15:25, 試験開始の 15:30, 試験終了前の 20:00, および、試験終了の 20:30 に合図をします。

### 試験中は

試験開始 5 分前 (15:25) の監督の合図により、封筒を開く。またこの時、シミュレーションのポータルにログインしてよい。

## Experiment



# G0-2

画面は常に録画されている。他の Window/Tab/Program などを開くような、許可されない行為をすると失格になる。

自分の student code が入った、問題、解答用紙、一般的注意のセットが揃っていることを確認しなさい。

試験開始は 15:30.

答は定められた答案用紙に書きなさい。A と書かれた答案用紙の表 (ひょう), 箱 (粹), グラフに答えを書きなさい。どの問題にも W と書かれた、詳細を書くためのワーキングシート (計算用紙) が付いています。計算用紙の上の問題番号を確かめて、正しい問題番号の計算用紙に記入しなさい。どの用紙の場合でも、採点してほしくないことを書いてしまったら、その部分にはバツを付けて下さい。答案用紙・計算用紙とも、表 (おもて) だけを使います。

答は簡潔に: 式, 論理記号, 図による表現などを用いて, どのように考えたかがわかるように書きなさい。あまり長文にならないように。

課題では、誤差評価は求めている。特に指示がないときには、データ点の数, 測定を繰り返す回数は自分で判断する。数値を答えるときには有効桁数に気を付けるように。

問題の前の部分が解けなくても後ろの方は解けることがよくあります。

3 ページ目に物理定数の値があります。

許可なく席を離れないこと。例えばトイレなどのときはカードを掲げて試験監督の指示を受けるように。

20:00 に、残り時間は 30 分と監督が知らせます。

20:30 に試験終了の合図があります。

### 試験終了後は

20:30 に試験時間が終了したら、直ちに書くのをやめなさい。問題ごとに、表紙 (C), 問題 (Q), 答案 (A), 計算用紙 (W) の順に揃えなさい。ブランクの計算用紙も含めて、問題ごとに、すべての答案用紙・計算用紙を問題番号の記された封筒に入れなさい。また、問題と一般的注意は、general instructions(G0) と書かれた別の封筒に入れなさい。

筆記用具は机に置いたままにしてください。

封筒が回収される間、席に着いたまま静かに待ちます。すべての回収が終わってから、試験監督から、試験室を出てもよい、などの指示があります。

## 物理定数

重力加速度の大きさ	$g = 9.81 m \cdot s^{-2}$
ホルツマン (Boltzmann) 定数	$k_B = 1.38 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$
現在の太陽質量	$M_s = 2.00 \times 10^{30} kg$
現在の太陽半径	$R_s = 7.00 \times 10^8 m$
電子電荷の大きさ	$e = 1.60 \times 10^{-19} C$
電子質量	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} kg$
陽子質量	$m_p = 1.67 \times 10^{-27} kg$
中性子質量	$m_n = 1.67 \times 10^{-27} kg$
真空の透磁率 (磁気定数)	$\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} T \cdot m \cdot A^{-1}$
真空の誘電率 (電気定数)	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$
プランク (Planck) 定数	$h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$
アボガドロ (Avogadro) 定数	$N_A = 6.02 \times 10^{23} mol^{-1}$
シュテファン・ボルツマン (Stefan-Boltzmann) 定数	$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
気体定数	$R = 8.31 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
重力定数	$G = 6.67 \times 10^{-11} N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$
ウイーン (Wien) 定数	$b = 2.90 \times 10^{-3} m \cdot K$
$\ln 2$	$\approx 0.69$
$\ln 3$	$\approx 1.10$
$\ln 10$	$\approx 2.30$
自然対数の底 $e$	$\approx 2.72$

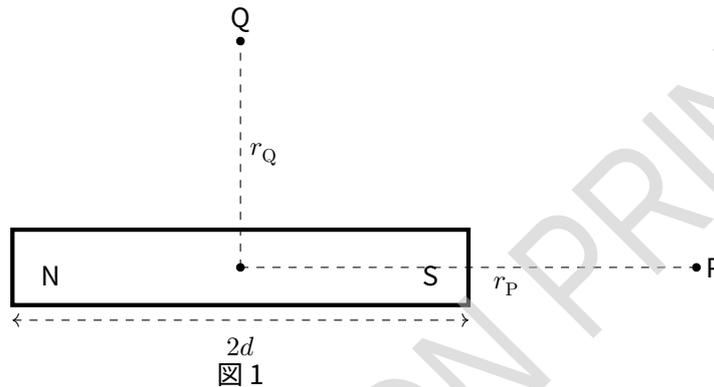


## 磁気ブラックボックス:

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

### 磁石の磁場

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



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

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

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

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

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

画面上のシミュレーションについて：

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

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

## Experiment

# Q1-2

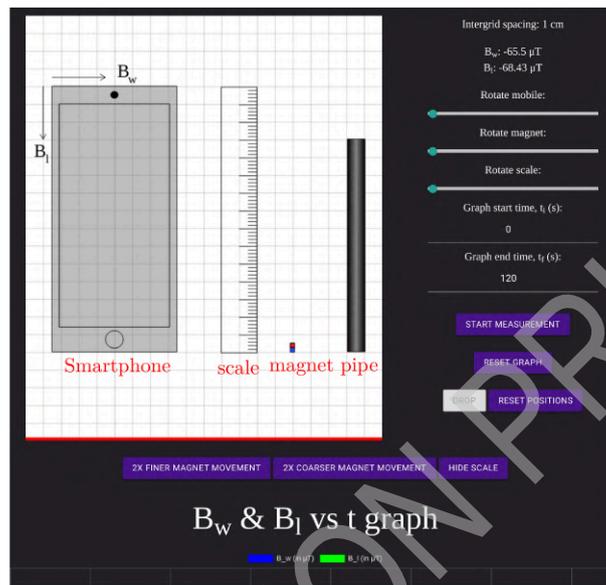


図 2: シミュレーションのスクリーンショット

### 実験準備:

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

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

### 測定:

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

## Experiment



# Q1-3

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

その他の機能：

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

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

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

この実験では、磁石を点双極子とみなす。  
この問題では誤差の評価は必要ない。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## Experiment



# Q1-4

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

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

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

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

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

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

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

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

## 音響ブラックボックス

音源が、 $x$ - $y$  平面上の半径  $R$  の円周上を一定の角速度  $\omega$  で運動している。また、円は  $x$ -軸と角度  $\beta$  ( $0^\circ < \beta < 90^\circ$ ) をなし、一定速度  $v_s$  で移動している。図 1 は、音源の軌跡を赤色で示したものである。時刻  $t = 0$  において円の中心は  $C$  にあり、座標  $(X_C, Y_C)$  からの音源の位置はベクトル  $\vec{CA}$  で与えられる。さらに、音源  $S$  は時刻  $t = 0$  で周波数  $f_0$  の音を発すると同時に反時計回り（図 1 参照）に動き始める。ベクトル  $\vec{CA}$  は  $t = 0$  のとき  $x$  軸に対して角度  $\phi$ （図 1 (a) では  $\angle BCA = \phi$ ）となる。検出器  $D$  は、原点からの距離と、位置ベクトルが  $x$  軸となす角が、それぞれ  $r_D$  と  $\theta$  となるように、同じ平面 ( $x$ - $y$  平面) 内に置かれる（図 1 (b)）。検出器  $D$  と音源  $S$  を結ぶ線は  $x$ -軸と角度  $\alpha$  をなしている。音源と検出器の運動はすべて  $x$ - $y$  平面上だけである。音速  $c$  は  $330\text{m/s}$  である。また、音源の正味の速さは  $c$  より小さい。

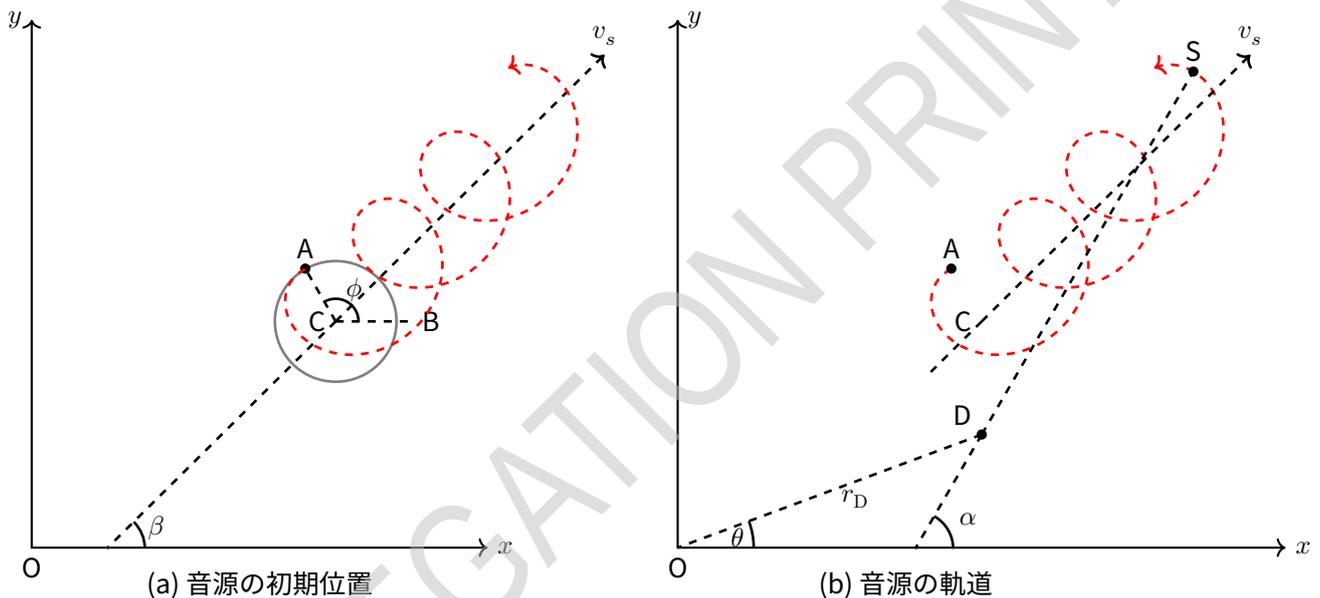


図 1

音源から発せられた音は、時刻  $t$  に周波数  $f(t)$  で検出器に検出される。シミュレーションでは、検出された周波数  $f(t)$  を表示する。

### 課題 A.1

A.1 音源の軌道  $(x(t), y(t))$  の方程式を  $\beta, \phi, v_s$ , そして関連する量で求めよ。

0.2pt

実験試験の受験ポータルサイトで「EQ2: Acoustic Black box」をクリックする。

### シミュレーションの概要

シミュレーションは2つのパートに分かれている。上部は検出器のパラメータを入力するパネルで、下部は時間  $t$  に検出器が検出した周波数  $f(t)$  のグラフ出力を表示するパネルである。

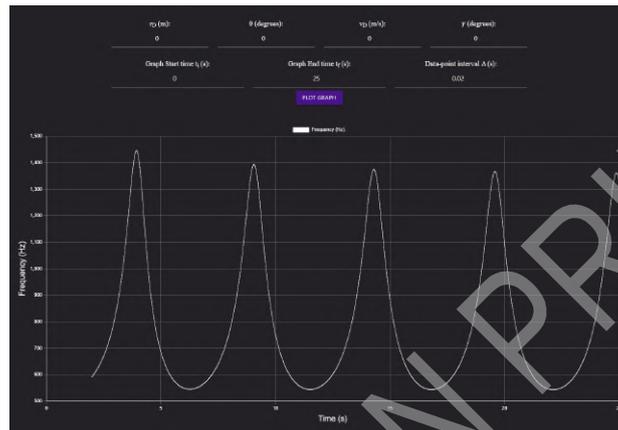


図2：初期のシミュレーションスクリーン

入力パネルに  $r_D$  と  $\theta$  の値を入力すると、検出器の位置を変更することができる。パネルで値を変更した場合、変更された  $f(t)$  の出力を見るには「PLOT GRAPH」をクリックする必要がある。「Data-point interval  $\Delta$ 」の所で、データを収集する間隔を変更することができる。この時間間隔は 0.001s の倍数のみ設定可能であることに注意すること。

速度  $v_D$  と、速度ベクトル  $v_D$  が  $x$ -軸となす角度  $\gamma$  を入力することで、検出器を一定運動させることができる。この場合も「PLOT GRAPH」をクリックして、変更したパラメータに対する出力を表示する必要があります。

「PLOT GRAPH」をクリックすると、「Graph Start time ( $t_i$ )」から「Graph End time ( $t_f$ )」の区間でグラフが表示される。図2では、0~25s間のグラフが表示されている。

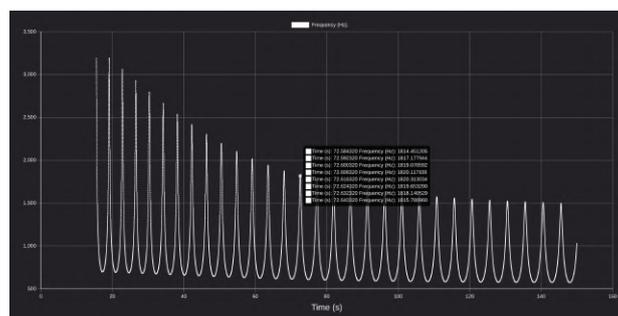


図3：入力値を変更した場合のシミュレーション画面

## Experiment



# Q2-3

グラフの開始時間と終了時間の入力、グラフの一部を拡大するためにも使用できる。例として、図3は角度  $78^\circ$  で  $5000\text{m}$  に検出器を配置した場合の出力である。グラフの出力は  $10\sim 150\text{s}$  の間でプロットされている。データは  $0.008\text{s}$  ごとに収集される。曲線のデータポイントにカーソルを重ねると、データポイントの値が表示される。時間間隔が非常に小さいため、曲線にカーソルを重ねると複数のデータポイントの値が表示される場合がある。図3では、8つのデータポイントが表示されている。

**注意：**データポイントの間隔 ( $\Delta$ ) を非常に小さくして (例えば  $0.001$ )、長い時間間隔 (例えば Graph Start time ( $t_i = 0$ ) から, Graph End time ( $t_f = 25$ )) でプロットすると、シミュレーションに時間がかかり、マシンの容量によってはフリーズする可能性がある。

このような状況に陥った場合は、「一般的な説明」に記載されている手順で対処してください。非常に小さな  $\Delta$  は、プロットの小さな時間間隔の場合にのみ使用することができます。シミュレーション実行中、グラフ終了時間 ( $t_f(s)$ ) に関係なく、シミュレータがプロットできる最大データ点数は  $25000$  点です。

シミュレーションで検出器のパラメータをいろいろな値で試し、出力を注意深く観察すること。グラフの出力は、次のパートの計算に使用する。必要であれば、どのパートでもグラフ用紙を使用することができる。

### 課題 A.2

- A.2** シミュレーションでは、検出器を  $r_D = \theta = 0$  で静止させる。出力グラフの開始時刻  $5\text{s}$  と終了時刻  $55\text{s}$  の間の  $f(t)$  出力を観察しなさい。その範囲内のすべての極小値  $f_{\min}$  とそれに対応する時間  $t$  を表に記入し、 $f_{\min}$  と  $t$  の関係をプロットせよ。 1.2pt

### 課題 A.3

- A.3** 検出器を静止させた場合に最終的に検出できる最小の周波数について式を求めよ。 1.0pt  
答えは  $v_s, \omega, R$  と関連する変数で表せ。

パネル内の各種入力値を使って、以下のパートの答えを求めることになる。A2-4 ページの表に示してある、量や途中式を求めるために使った  $r_D, \theta, v_D, \gamma, t_i, t_f$ , と  $\Delta$  の各物理量の値を報告しなさい。また、入力値に対して、対応する量やその式を記載すること。

この問題を解くための公式や方程式は、必ずワーキングシートに詳しく記述しなさい。最終的な解答のみでは採点されません。グラフを使用する場合は、解答用紙にグラフ用紙の番号を記載すること。この問題では、誤差の推定は必要ないことに注意すること。

次の4問を好きな順番で解いてよい。

### 課題 A.4

- A.4** 音源の初期位置  $(x_A, y_A)$  すなわち時刻  $t = 0$  における点 A の座標をメートル単位で求めよ。 1.4pt

### 課題 A.5

- A.5**  $f_0, \omega, R, v_s$  の値を求めよ。 2.1pt

### 課題 A.6

## Experiment



# Q2-4

A.6  $\beta$  の値を度単位で求めよ。

2.0pt

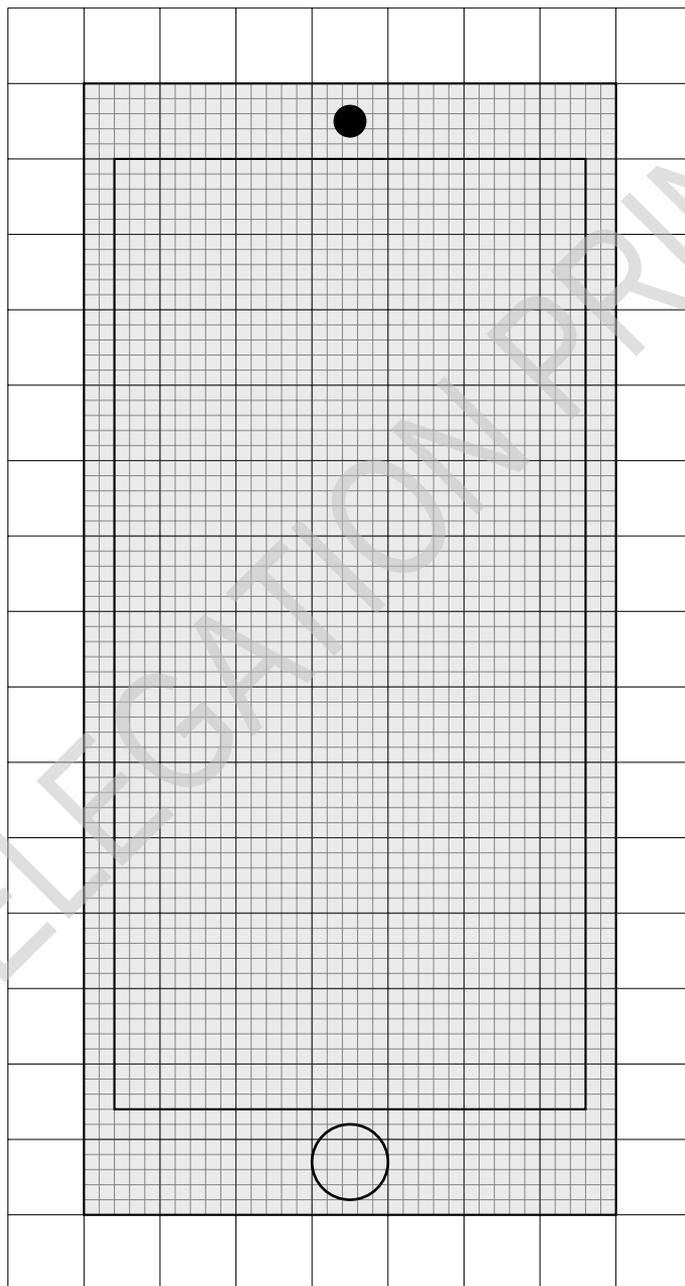
### 課題 A.7

A.7 音源の軌道中心の初期位置  $(X_C, Y_C)$ 、すなわち点 C の座標をメートル単位で求めよ。2.1pt

DELEGATION PRINT

## 磁気ブラックボックス 解答用紙

A.1 (1.0 pt)





## Experiment



# A1-3

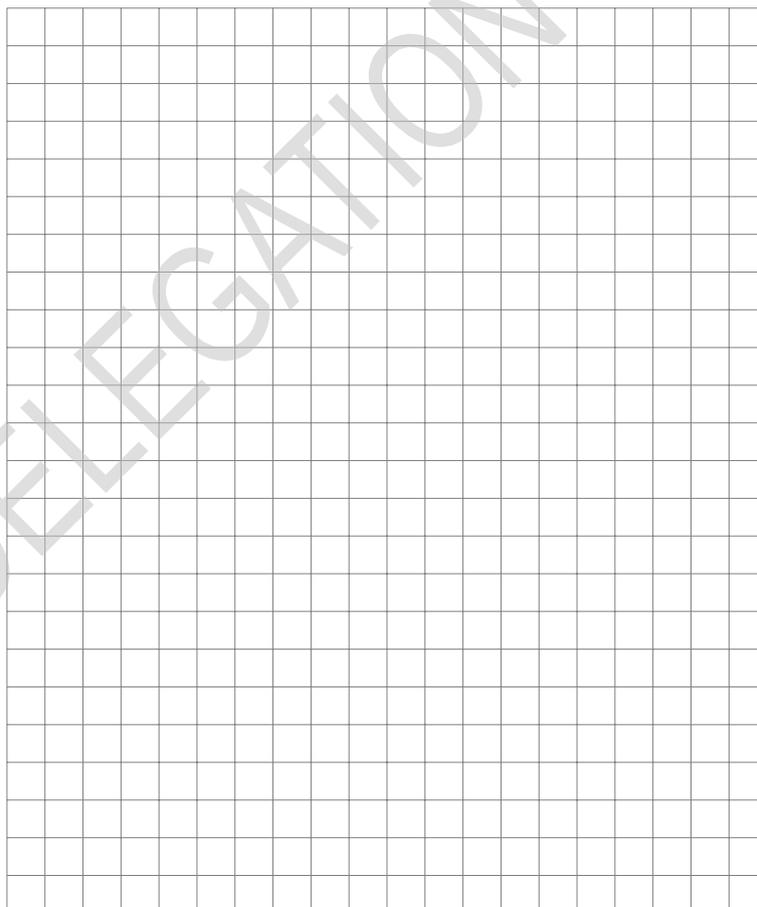
### B.1 (0.3 pt)

材質	部分番号
アルミニウム (Al)	
銅 (Cu)	
木 (W)	

### B.2 (2.6 pt)

アルミニウム部分での磁石の終端速度:

実験の配置図を下に描け。





## Experiment



# A1-5

### B.2 (cont.)

アルミニウム部分の長さ:

使用した場合のみ記載せよ

と

のグラフ

グラフの傾き:

グラフの切片:

アルミニウム部分の長さ (cm):

対応するグラフがある場合のページ番号: A1 -

DELEGATION PRINT



## Experiment



# A1-7

### B.3 (cont.)

銅部分の長さ:

使用した場合のみ記載せよ

と

のグラフ

グラフの傾き:

グラフの切片:

銅部分の長さ (cm):

対応するグラフがある場合のページ番号: A1 -

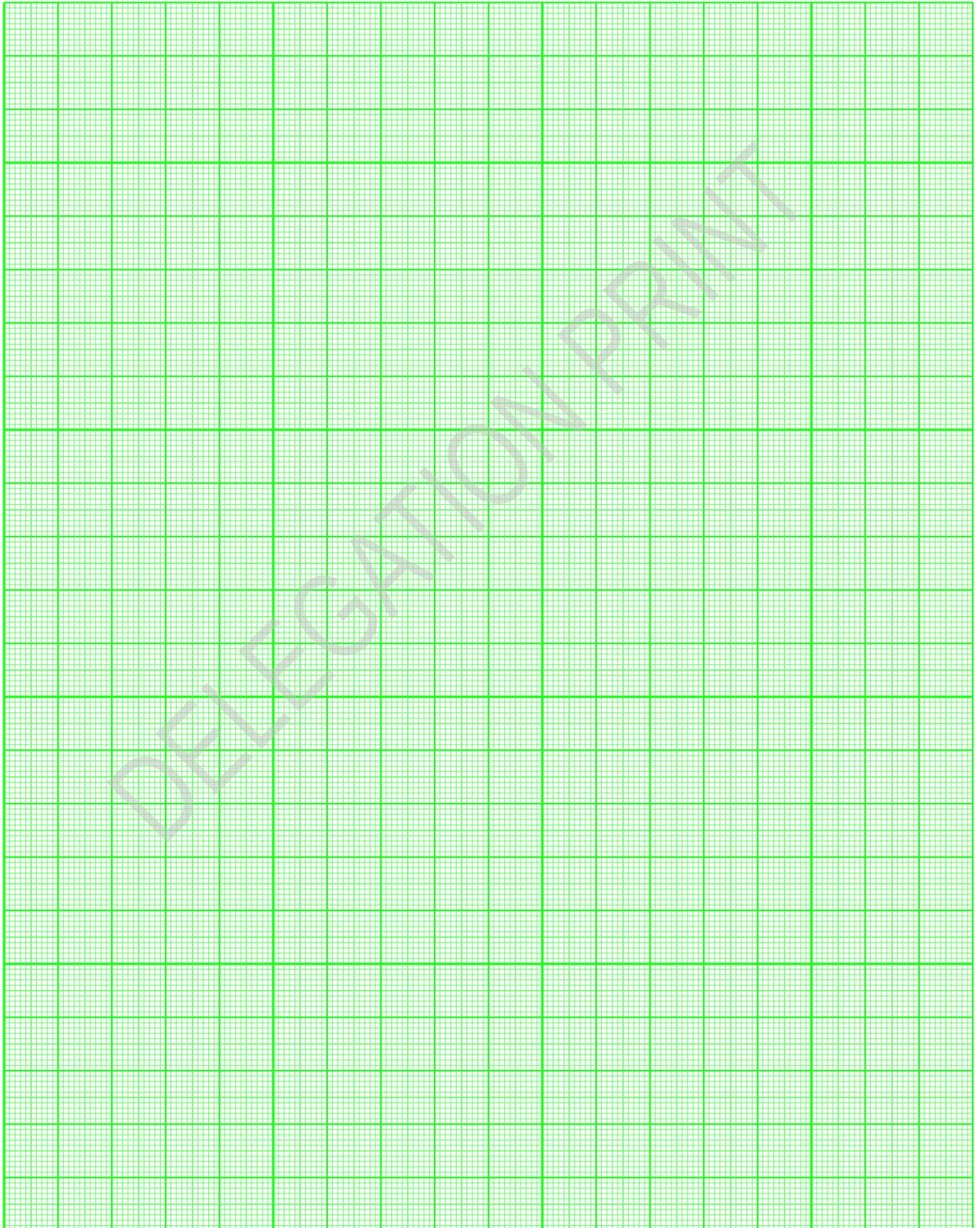
DELEGATION PRINT



## Experiment



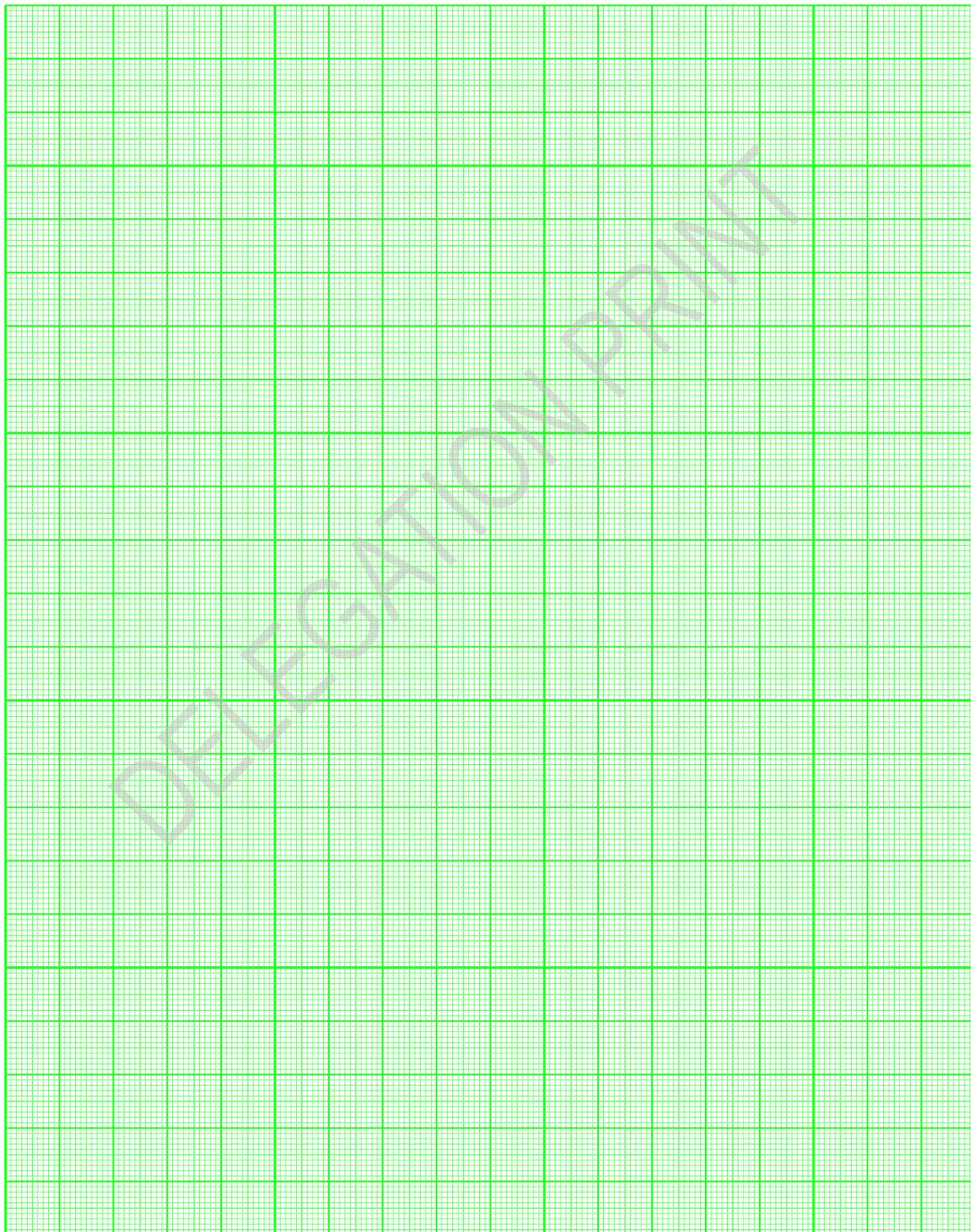
# A1-9



## Experiment



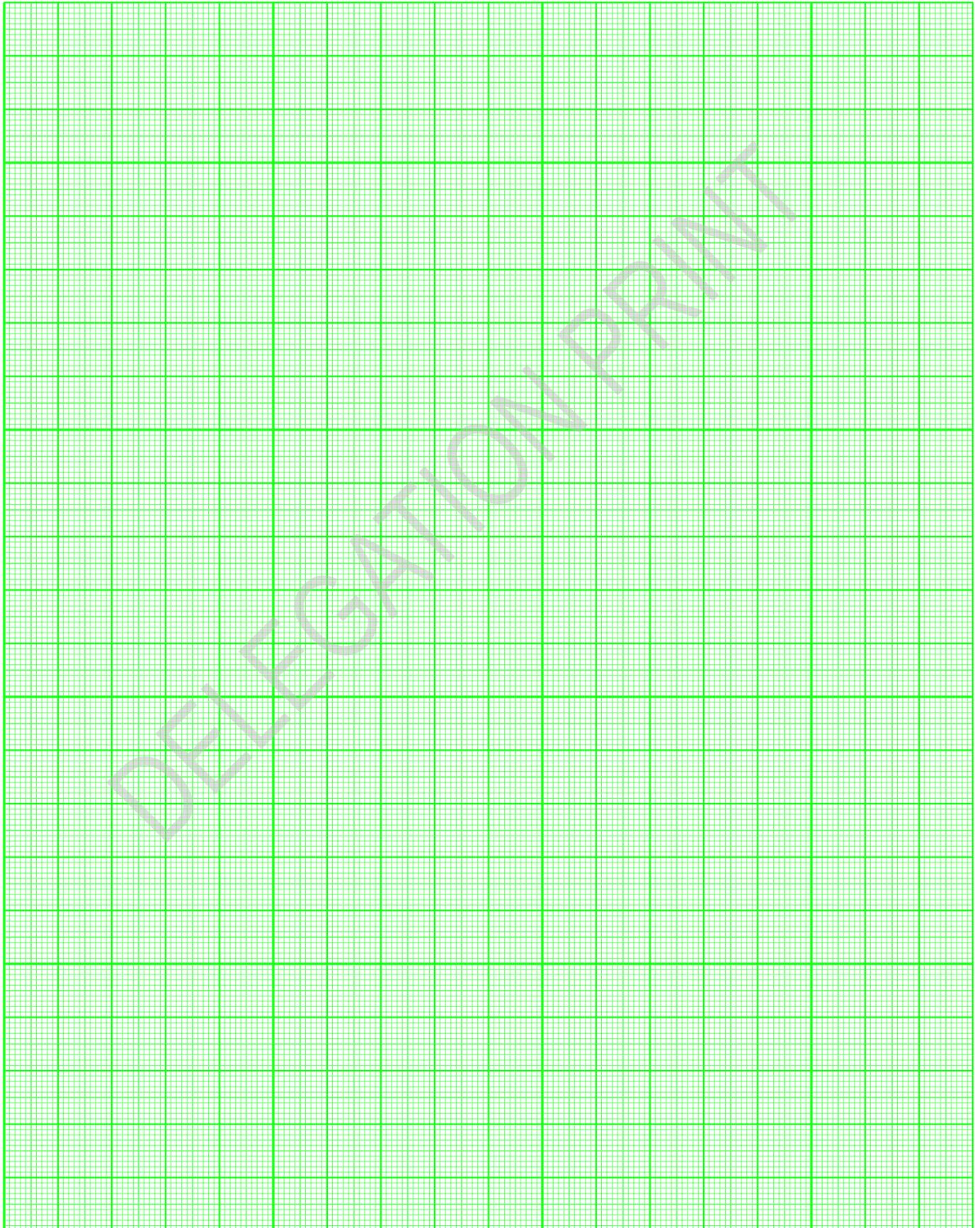
# A1-10



## Experiment



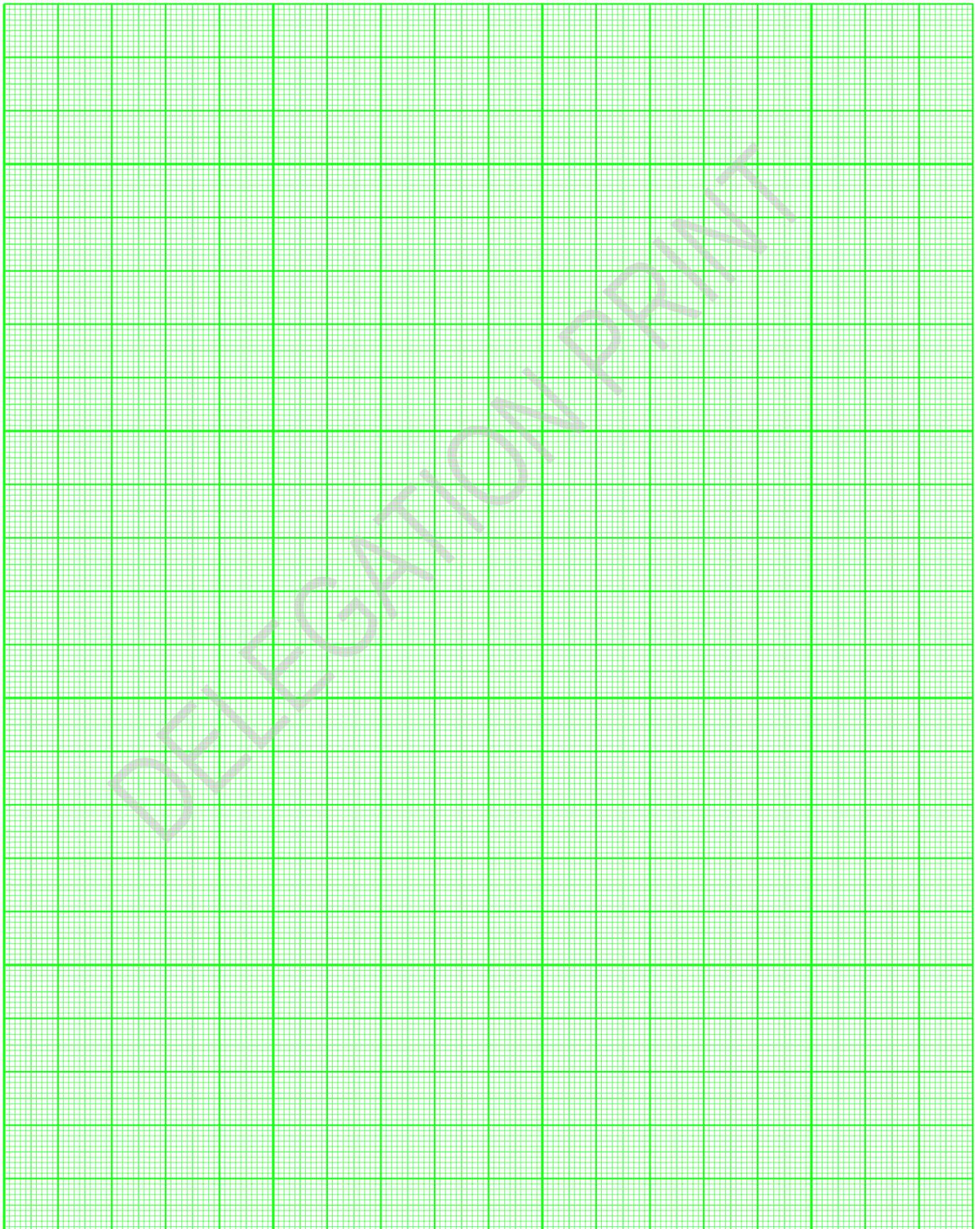
# A1-11



## Experiment



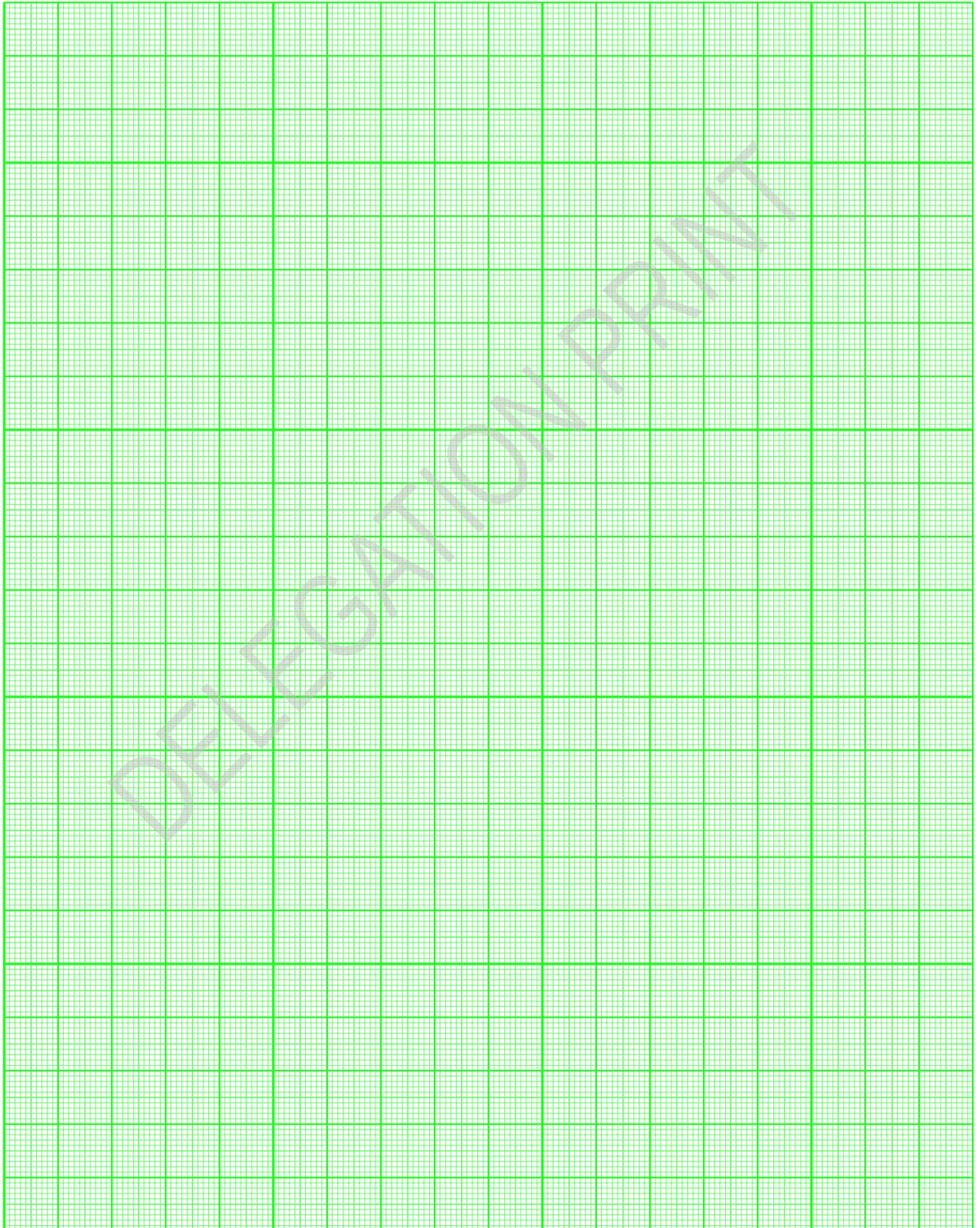
# A1-12



## Experiment



# A1-13





## Experiment



# A2-1

### 音響ブラックボックス 解答用紙

**A.1** (0.2 pt)

$x(t) =$

$y(t) =$

DELEGATION PRINT

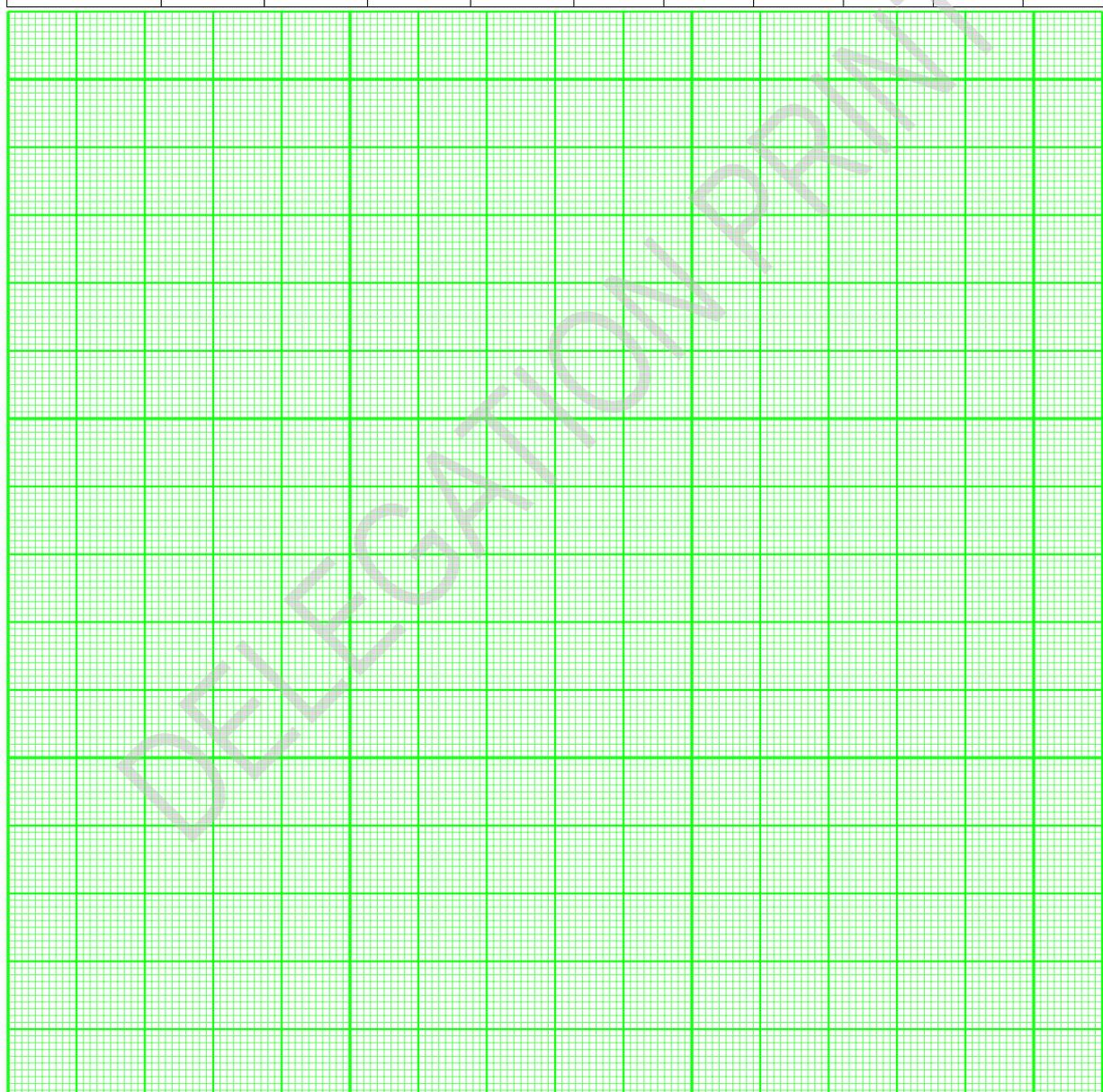
# Experiment



# A2-2

**A.2** (1.2 pt)

No.	1	2	3	4						
$t(s)$										
$f$ (Hz)										



## Experiment



# A2-3

**A.3** (1.0 pt)

最小周波数の表式:

**A.4** (1.4 pt)

音源の初期位置:

$(x_A, y_A)$ :

**A.5** (2.1 pt)

$f_0$ (Hz)	$\omega$ ( $s^{-1}$ )	$R$ (m)	$v_S$ (m/s)

**A.6** (2.0 pt)

$\beta$  (度の単位で) =

**A.7** (2.1 pt)

音源の中心の初期位置:

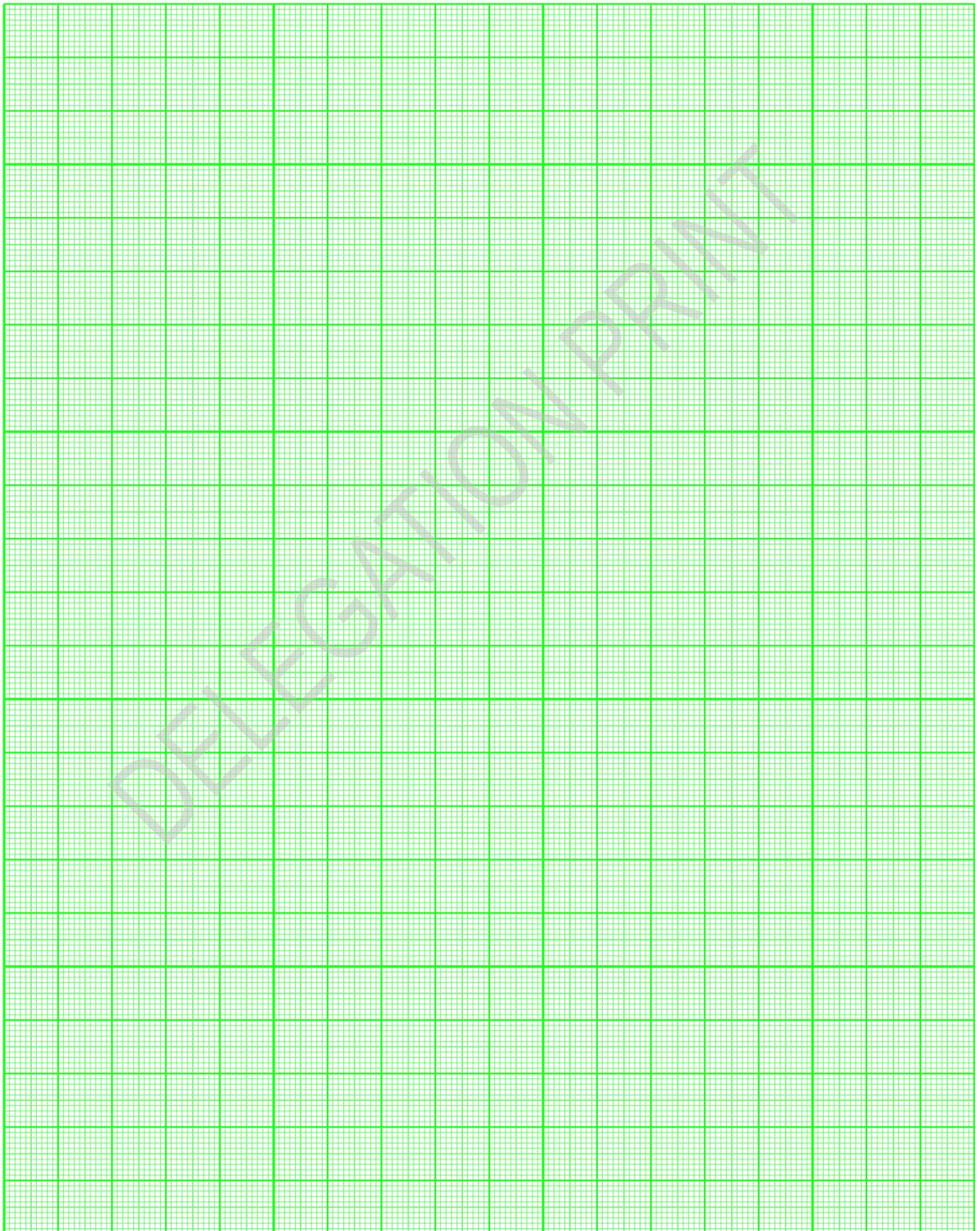
$(x_C, y_C)$ :



## Experiment



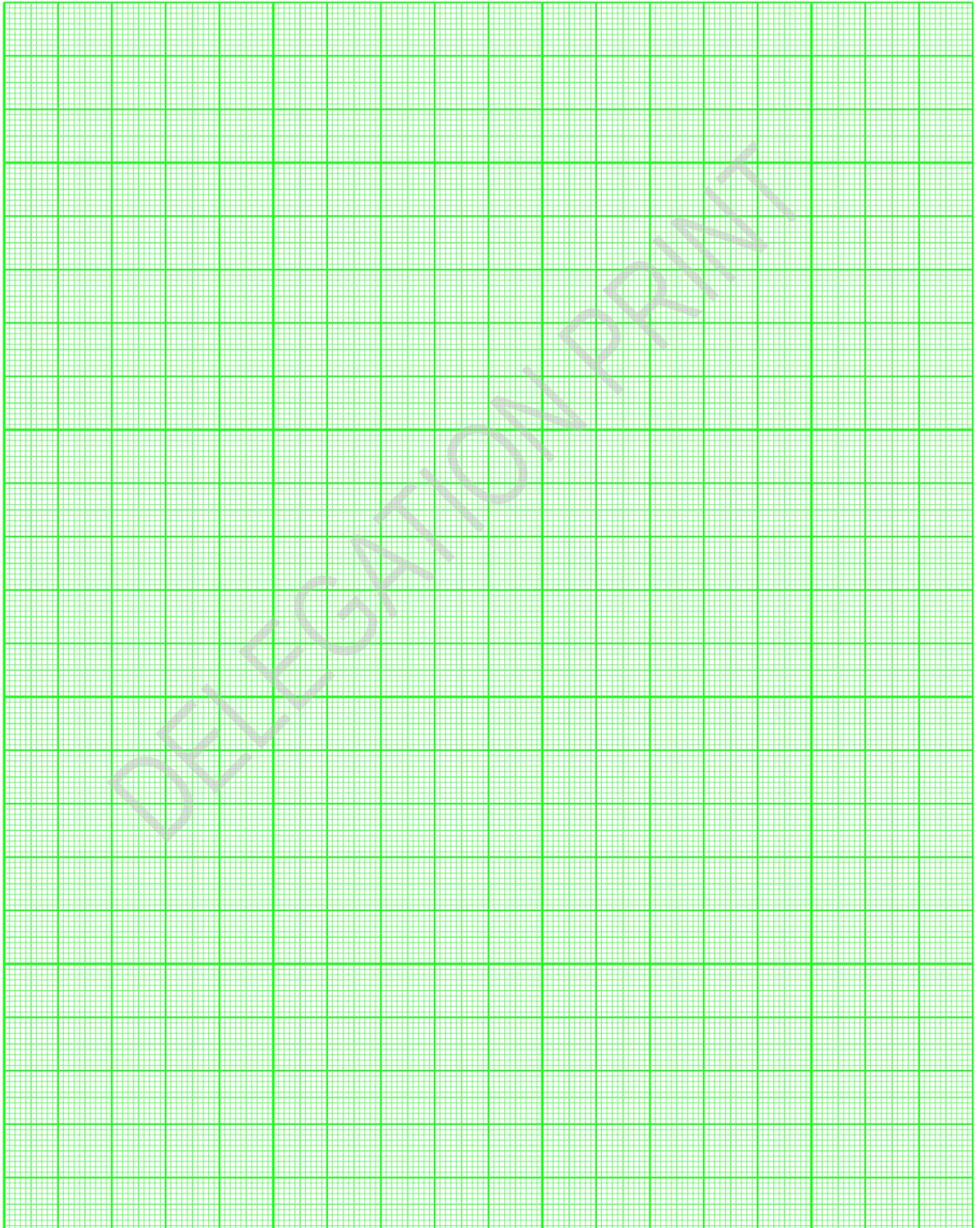
# A2-5



## Experiment



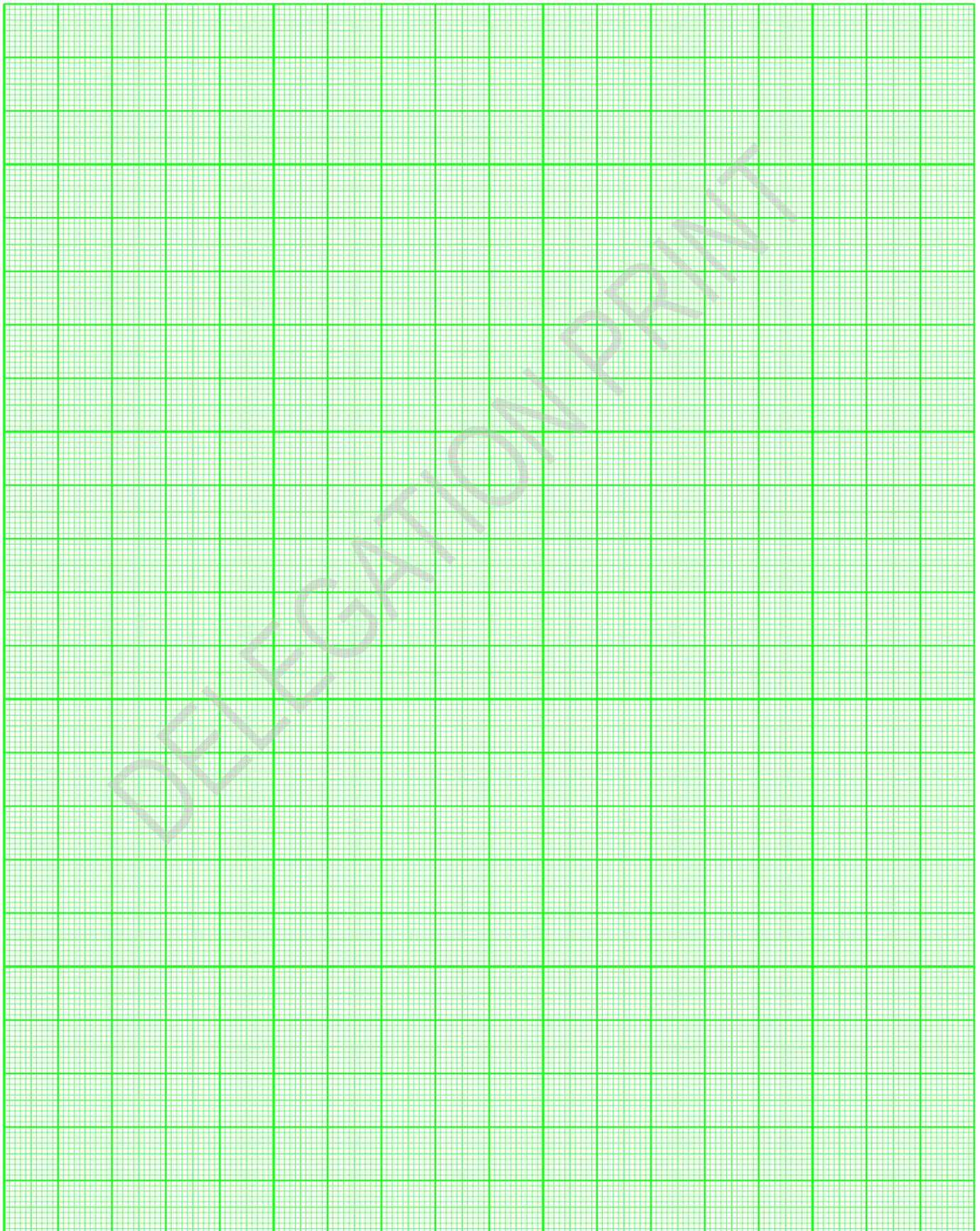
# A2-6



## Experiment



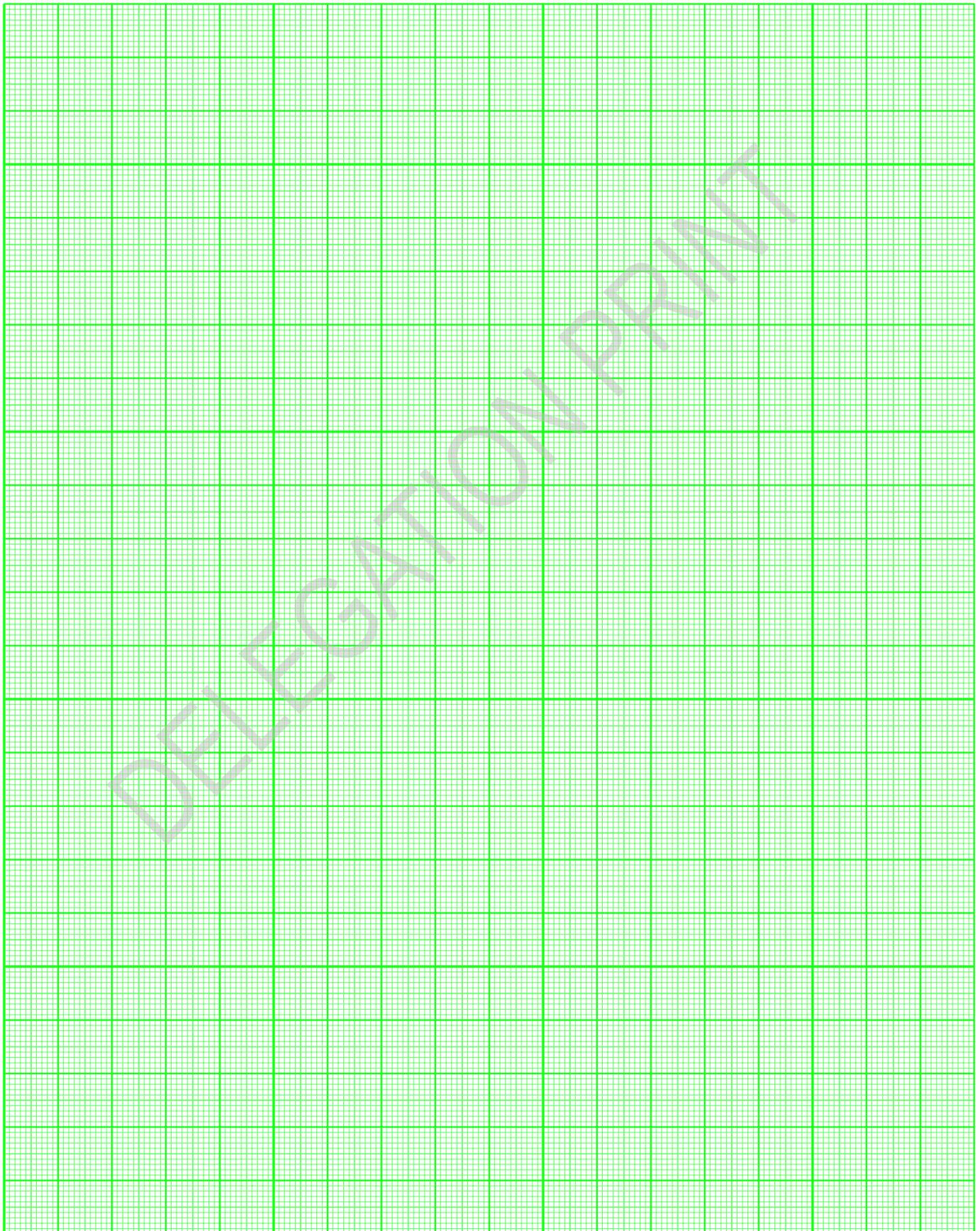
# A2-7



## Experiment



# A2-8



# Experiment



# A2-9

