

## 2次元における電気伝導度 (10点)

問題に着手する前に、別の封筒に入っている「全般的な注意」をよく読むこと。

### イントロダクション

コンピュータチップや太陽電池など、半導体技術に基づく次世代デバイスを開発するにあたり、研究者は、低い電気抵抗率を持つなど、優れた輸送特性を示す材料を探している。それらの特性の測定は、有限の大きさの試料、有限の接触抵抗、そして特定の形状の接点を用いて行われる。材料の真の特性を求めるためには、これらの効果を考慮しなければならない。また、薄膜材料は分厚い材料と振る舞いが異なる可能性がある。

この課題では、電気的特性の測定を扱う。それに関し、以下の二つの量を定義する。

- **抵抗  $R$ :** 抵抗は、試料ないしはデバイスの電気的な性質で、様々なサイズの、個々の試料についての測定値である。
- **抵抗率  $\rho$ :** 抵抗率は、抵抗を決定する物質の特性である。それは、物質、そして温度などの外部パラメータに依存するが、試料の形状には依存しない。

本課題では、いわゆる面抵抗率を測定する。これは、抵抗率を薄い膜の厚さで割った値のことである。

我々は、薄膜の電気抵抗の測定に関し、次のパラメータの影響を調べる：

- 測定に用いる回路、
- 測定電極の配置、
- そして試料の形状。

試料としては、導電性の紙と、シリコンウェハ（半導体デバイスの原料）に金属膜を付けたものを用いる。

## 材料のリスト

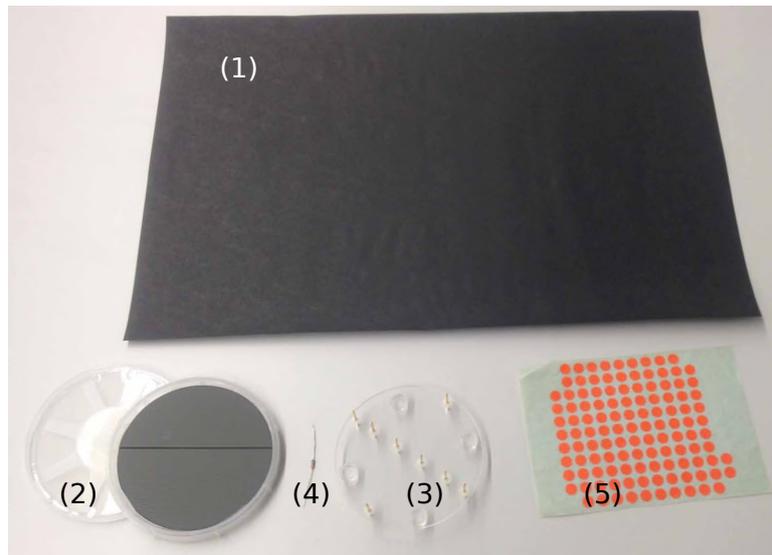


図 1: この実験問題用の追加の器具

1. 黒鉛でコーティングされた導電性の紙
2. クロム金属が薄くコーティングされているシリコンウェハ（ウェハ容器の中にしまっている）
3. バネ付きピンが 8 本取り付けられているアクリルガラス
4. オーム抵抗
5. 色付きのシール

## 重要な注意

- ・ シリコンウェハは落としたり曲げたりすると破損してしまう。金属のコーティングされている光沢面に触れたり引っかいたりしないこと。

## 指示

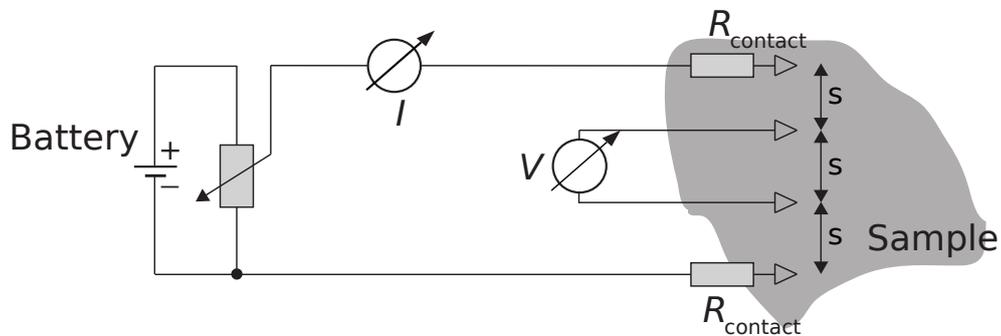
- ・ 以下括弧内の番号は、「全般的な注意」中の写真で示された番号に対応する。この実験では、信号発生器を直流電源として用いる。このモードでは、信号発生器は一定の電圧を *voltage* ソケット (5) と *GND* ソケット (7) 間に出力する。
- ・ 電圧 (0V から 5V の範囲) は、左側の *adjust voltage* と書かれたポテンシオメーター (3) でドライバーを用いて調整することができる。
- ・ この実験を行う際には、信号発生器のスピーカー駆動機能が切り替えスイッチ (8) によってオフになっていることを確認せよ。このことは、*speaker amplitude* ソケット (6) と *GND* ソケット (7) 間の電圧を測定することで確認できる。スピーカー駆動機能がオフになっていれば、これら 2 端子間の電位差は 0 である。

## Part A. 四端子 (4PP) 測定法 (1.2 points)

試料の抵抗率を正確に測定するためには、電圧測定のための接触端子と、電流を流すための接触端子は別のものとするべきである。

このような測定方法は、四端子 (4PP) 測定法と呼ばれている。4つの接触端子はなるべく単純で対称に配置される。電流  $I$  は、外側の端子から試料に流され、試料中のあらゆる可能な経路を通して反対側の外側の端子から出て行く。その途中、試料上のある区間  $s$  において電圧  $V$  の測定を行う。

以下の図に示すように、各接触端子間の距離を等しく  $s$  として対称な配置にすることで、様々なことが単純になる。(図中の単語の訳: Sample= 試料、Battery= 電源、contact= 接触)



$I$  対  $V$  の曲線は 試料の  $I-V$  特性を表し、これを用いて試料の抵抗を決定することができる。以下の問では、4PP 測定法のみを用いることとする。まず始めに、次の写真で示されているような8つの接触端子のうち、4つの等間隔な端子を用いる。

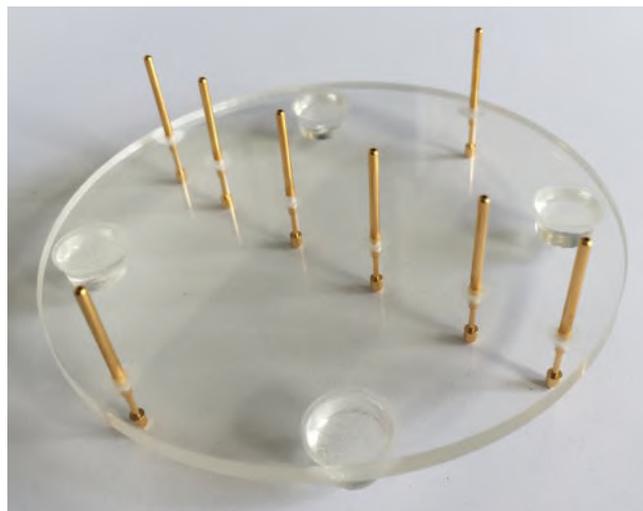


図 2: 四端子測定法で用いる 4つのゴム足と 8つの接触端子付きアクリルガラス板

次の測定では、導電性の紙のシート全体を用いること。

## 以下の全ての測定に関する重要なヒント

- シートの長辺が基準となる辺である。4端子はこれと平行な向きに配置されなければならない。
- コーティングされた黒い面を用いることに注意せよ。裏側の茶色い面ではない。正しい面に、色付きシールで目印を付けても良い。
- シートに穴が空いていないことを確認せよ。
- これらの測定では、可能な限り試料の中央に端子を接触させること。
- 試料に正しく接触させるため、各端子を十分よく押し付けること。プラスチックの足が表面に付けばよい。

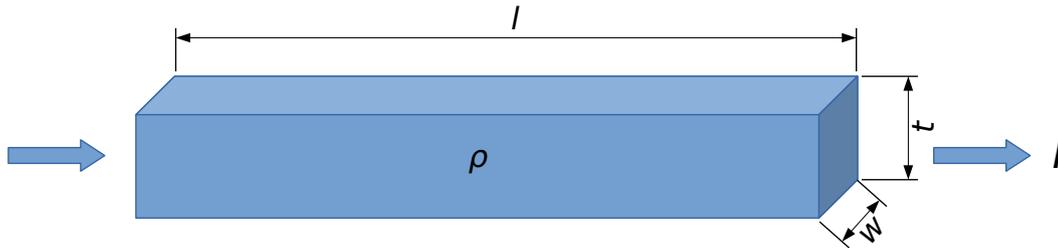
<b>A.1</b>	四端子 (4PP) 測定: 長さ $s$ の区間での電位降下 $V$ を、電流 $I$ の関数として測定せよ。4つ以上の電流値に対して測定を行い、測定した電圧降下と電流を表にまとめた上で、 <b>グラフ A.1</b> にグラフとしてプロットせよ。	0.6pt
------------	--	-------

<b>A.2</b>	<b>グラフ A.1</b> から得られるシート全体での実効的な電気抵抗 $R = \frac{V}{I}$ を決定せよ。	0.2pt
------------	---	-------

<b>A.3</b>	<b>グラフ A.1</b> を用いて、この 4PP 測定による抵抗 $R$ の不確かさ $\Delta R$ を求めよ。	0.4pt
------------	---	-------

## Part B. 面抵抗率 (0.3 points)

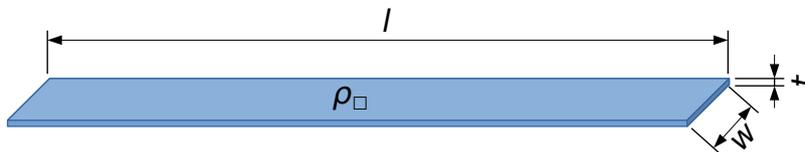
抵抗率  $\rho$  は物質の材料特性である。抵抗率を用いると、与えられた大きさの 3 次元的な導体の抵抗を計算することができる。まず、長さ  $l$ 、幅  $w$ 、厚さ  $t$  の角柱を考えよう。



上の図のように分厚い導体の電気抵抗は、次の式で与えられる。

$$R = R_{3D} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \quad (1)$$

同様にして、厚さが  $t \ll w$ 、 $t \ll l$  であるような 2 次元的な導体についての抵抗率を定義することができる。



$$R = R_{2D} = \rho_{\square} \cdot \frac{l}{w}, \quad (2)$$

ここで、 $\rho_{\square} \equiv \rho/t$  ( $\rho_{\square}$  は、 $\rho$  に四角記号の添字) は面抵抗率である。面抵抗率の単位は、オームである ( $[\rho_{\square}] = 1 \Omega$ )。

**重要:** 式 (2) は一様な電流密度で導体の断面が等電位な場合にのみ成り立つ式である。端子を点状に接触させている場合にはこの式は成り立たず、代わりに以下の式によって抵抗と面抵抗率を関係づけることができる。

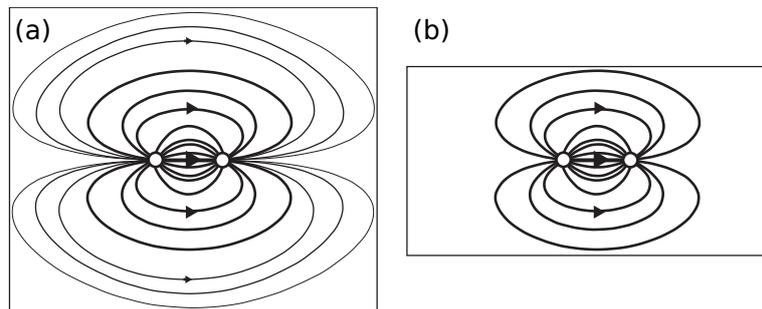
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

ただし、 $l, w \gg t$  である。

- B.1** Part A での四端子測定の結果から、このシートの面抵抗率  $\rho_{\square}$  を計算せよ。以下で 0.3pt  
は、シート全体の大きさは接触端子の間隔  $s$  に比べて十分に大きいので ( $l, w \gg s$ )、  
この問いで計算した値を  $\rho_{\infty}$ 、また Part A で求めた抵抗を  $R_{\infty}$  と呼ぶことにする。

## Part C. 異なる試料サイズでの測定 (3.2 点)

これまでは、試料が有限の大きさ  $w$  と  $l$  を持つことは考慮してこなかった。試料が小さくなれば、電圧が同じでも電流値は減少する。図の二つの端子（白丸）に電圧をかけると、電流は図に曲線で示したような（互いに交差しない）あらゆる経路を流れる。経路が長いほど、電流は小さいことを、図では線の太さで表現している。図 (b) のように小さな試料に同じ電圧をかけた場合、電流の経路の数が減るので、試料を流れる全電流は小さくなる。すなわち、抵抗が大きくなる。



一方、面抵抗率は、試料の大きさには依存しない。すなわち、測定した抵抗値から式 (3) によって面抵抗率を求める際には、補正係数  $f(w/s)$  を導入する必要がある：

$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{R(w/s)}{f(w/s)} \quad (4)$$

試料の長さが  $l \gg s$  であるとき、係数  $f$  は比  $w/s$  のみに依存し、1 より大きい。すなわち  $f(w/s) \geq 1$  である。簡単化のため、我々は試料は十分に長いものとし、幅  $w$  への依存性のみを扱うことにする。そして、十分に幅が大きな試料の場合には、正しい結果  $\rho_{\square}$  に近づくと仮定する。つまり、

$$R(w/s) = R_{\infty} \cdot f(w/s) \quad \text{with} \quad f(w/s \rightarrow \infty) \rightarrow 1.0. \quad (5)$$

**C.1** 四端子法を用い、抵抗  $R(w, s)$  を、0.3 から 5.0 の間の 4 つの  $w/s$  において測定し、結果を表 C.1 に記せ。常に試料の長さが端子間隔の 5 倍以上、すなわち  $l > 5s$  であるようにせよ。また、試料の長さ  $l$  は、常に紙の同じ（長い）方向に沿うようにせよ。  
 $w/s$  の各々の値について、電圧を 4 つの異なる電流で測定し、その 4 つの値から抵抗の平均値  $R(w/s)$  を求めよ。結果を表 C.1 に記入せよ。 3.0pt

**C.2** 測定の各々について、 $f(w/s)$  を求めよ。 0.2pt

## Part D. 形状補正係数とスケール則 (1.9 点)

Part C では、抵抗値が試料の幅と端子の距離の比率  $w/s$  とともに変化することがわかった。Part C で得たデータを表す関数として、次のものを用いることにする：

$$\text{データを表す関数} \quad f(w/s) = 1.0 + a \cdot \left(\frac{w}{s}\right)^b \quad (6)$$

$w/s$  が非常に大きい場合、 $f(w/s)$  は 1.0 にならねばならないことに注意せよ。

**D.1** Part C で得られたデータを、式 (6) の曲線でフィッティングするため、最も適切なグラフ用紙 (方眼紙**グラフ D.1a**, 片対数**グラフ D.1b**, または両対数**グラフ D1.c**) を選択し、データをプロットせよ。 1.0pt

**D.2** 前問のグラフのフィッティングにより、パラメータ  $a$  と  $b$  を求めよ。 0.9pt

## Part E. シリコンウェハと van der Pauw 法 (3.4 点)

半導体や金属薄膜の電気抵抗（ないしは面抵抗）はデバイスの性質を決定づけるものであり、その測定は半導体産業において非常に重要である。以下の課題では、シリコンウェハを用いる。ウェハの光沢面には、クロム金属を非常に薄く付けてある。

ウェハの容器を開けて（RELEASE の矢印の向きに回す）、ウェハを取り出しなさい。ウェハを落としたり破損しないように気を付けなさい。また、光沢面に触れたり引っかいたりしないこと。測定では、光沢面が上を向くように机に置きなさい。

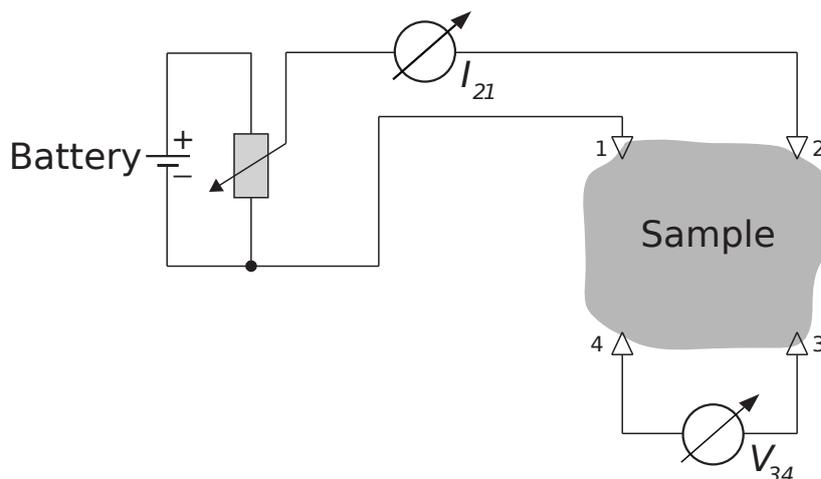
**E.1** 以前と同じ四端子セットアップを用い、電圧  $V$  を電流  $I$  の関数として求めよ。 0.4pt  
解答用紙に、使用しているウェハの番号を書き込め。番号は、プラスチック製のウェハの枠に書いてある。

**E.2** データを **グラフ E.2** にプロットし、抵抗  $R_{4PP}$  を求めよ。 0.4pt

**E.3** ウェハのような円形の試料についての補正を求めるため、試料の実効的な幅  $w$  をウェハの直径  $D = 100 \text{ mm}$  で近似する。この仮定を用いて比  $w/s$  を計算せよ。式 (6) の関数と、以前決めた二つのパラメータ  $a$  と  $b$  から、補正係数  $f(w/s)$  を求めよ。 0.2pt

**E.4** 式 (4) を用いてクロム膜の面抵抗率  $\rho_{\square}$  を求めよ。 0.1pt

形状補正なしに面抵抗率を求めるため、フィリップス社の技術者 L.J. van der Pauw は、簡単な測定法を開発した。すなわち、任意の形状の試料の縁に、以下の図に示すように4つの端子（1～4）を取り付ける。電流を、隣接する2つの端子間（たとえば1と2）に流し、端子3と4の間で電圧を測定する。この測定で得られた抵抗を  $R_{I,V} = R_{21,34}$  と書く。（図中の単語の訳: Sample= 試料、Battery= 電源）



対称性より  $R_{21,34} = R_{34,21}$  かつ  $R_{14,23} = R_{23,14}$  である。Van der Pauw は、（穴が空いていない）任意の形状の試料と点状の接点の場合は、次の式が成り立つことを示した：

$$e^{-\pi R_{21,34}/\rho_{\square}} + e^{-\pi R_{14,23}/\rho_{\square}} \equiv 1. \quad (7)$$

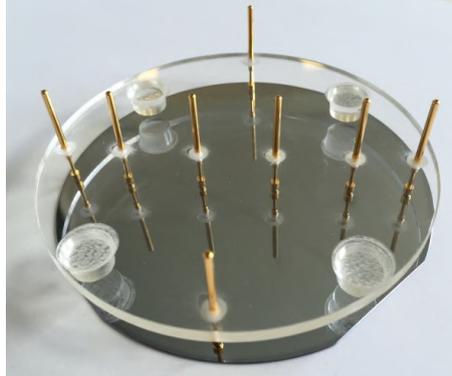


図 3：金属コーティングされたシリコンウェハの上に四端子装置を置いた様子。円形のウェハの右側がまっすぐに切り落としてあることに注意。以下では、この部分をフラットと呼ぶ。

測定点が正方形になるように、4つの電極の各々にワニ口クリップを接続せよ。そのうち、隣り合った二つを電流計を通して電流源に接続し、残りの二つを電圧計に接続せよ。電極の正方形を回転して、その一辺が、ウェハのフラットと平行になるようにせよ。

**E.5** 電流を流す電極と、ウェハのフラットの相対位置が分かるように図示せよ。電流値  $I$  を等間隔で6つ以上とって電圧  $V$  を測定し、結果を表 E.5 に記入せよ。 0.6pt

**E.6** 今度は電流を流す二つの電極がフラットに垂直になるようにして、上の測定を繰り返せ。結果を表 E.6 に記入せよ。 0.6pt

**E.7** E.5 と E.6 の実験ごとに異なる色・記号を用い、全てのデータを一枚のグラフ E.7 に表示せよ。二つの曲線から、平均値  $\langle R \rangle$  を求めよ。 0.5pt

**E.8** 式 (8) のすべての抵抗値  $R_{kl,mn}$  を  $\langle R \rangle$  で置き換えた上で式 (7) を  $\rho_{\square}$  について解き、クロム薄膜の面抵抗率  $\rho_{\square}$  を計算せよ。 0.4pt

**E.9** 電極を一直線にした場合 (課題 E.4) の結果と、van der Pauw 法 (課題 E.8) の結果を比較せよ。両者の測定の差を、相対誤差としてパーセント表示せよ。 0.1pt

**E.10** クロム (Cr) の膜の厚さの公称値は  $8 \text{ nm}$  である。この値と、van der Pauw 法の最終結果を用い、式 (1) と (2) を利用して、クロムの抵抗率を計算せよ。 0.1pt



## 飛び跳ねるビーズ：相転移と不安定性のモデル (10 点)

問題を解き始めるまえに、別の封筒のなかにある「全般的な注意」を読みなさい。

### イントロダクション

相が変わる現象（相転移現象）は、日常生活のなかでもよく知られた現象である。たとえば、水は固体・液体・気体の異なる状態をとる。これらの異なる状態は、相転移する。相転移においては、物質のなかの分子の集団的挙動が変化する。そして、相転移の際には、状態変化にともなう転移温度が常に重要である。たとえば、先に挙げた例では、水の凝固点や沸点が転移温度に対応する。

しかし、相転移はもっと幅広い現象であり、他の系でも現れる。たとえば、磁石では、転移温度以下では常磁性相から強磁性相にマクロな状態が変化する。また、超伝導体では、転移温度以下ではふつうの伝導体から超伝導体に変化する。

いわゆる秩序変数と呼ばれるものを導入すると、これらのすべての相転移現象は、共通の枠組みで理解できる。たとえば、磁性においては、秩序変数は、原子の磁気モーメントの並び方に関する。

いわゆる連続相転移と呼ばれる相転移現象では、秩序変数は臨界温度より高い温度では常にゼロになり、転移温度より低い温度では連続的に増加する（下の図 1 に示したとおりである）。連続相転移における転移温度は、臨界温度と呼ばれる。また、図 1 のなかでは、磁石の場合におけるミクロな秩序状態、または無秩序状態が矢印を用いて表現されている。臨界温度より低温の強磁性相では、個々の磁気モーメントは同じ向きにそろい、マクロな磁化が生まれる。一方で、臨界温度より高温の常磁性相では、個々の磁気モーメントの向きは不均一であり（ランダムであり）、マクロな磁化はゼロになる。

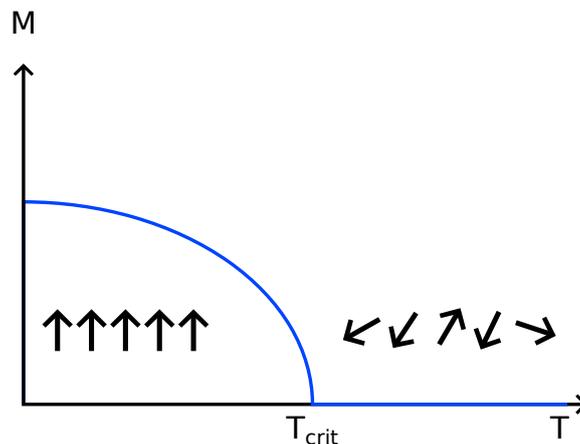


図 1：相転移における、秩序変数  $M$  の温度依存性。臨界温度  $T_{\text{crit}}$  より高温では、秩序変数はゼロとなるのに対して、臨界温度  $T_{\text{crit}}$  より低温になると、秩序変数は連続的に増加して、ゼロではない値をとる。

連続相転移では、一般に秩序変数は臨界点の近くでべき乗的な振舞いを示す。たとえば、磁性に関しては、臨界温度  $T_{\text{crit}}$  以下で磁化  $M$  は次のように与えられる：

$$M \begin{cases} \sim (T_{\text{crit}} - T)^b, & M < T_{\text{crit}} \\ = 0, & M > T_{\text{crit}} \end{cases} \quad (1)$$

なお、 $T$  は温度である。ここで、驚くべきことは、このべき乗的振舞いは普遍的であるということである。すなわち、べき乗則におけるべき乗の指数は、多くの異なる相転移現象において同じ値をとる。

## 課題

この問題では、連続相転移におけるいくつかの特徴を調べられる簡単な例について考える。ここで扱う「連続相転移におけるいくつかの特徴」の一つは、不安定性が粒子の集団的な振舞いにどのように影響を与え、相転移へといたるかである。それに加えて、マクロな状態変化が粒子の励起にどのように依存するかを調べる。

ふつうの相転移現象では、粒子の励起は温度によって制御される。しかし、この問題で扱われる状況では、スピーカーの振動によって加速される、粒子の運動エネルギーに励起は対応する。ここで考えている相転移現象におけるマクロな状態変化は、小さな壁で仕切られている円筒の一方に、ビーズが分かれることに対応する。

ビーズ（粒子）がシリンダーの片方に入れている状態から、スピーカーの振幅を増加させたとき、ある程度まで振幅を増加させると、最終的には壁の両側で粒子の個数が等しくなることに気付くだろう。これは、臨界温度よりも高温まで熱したことに対応する。

この問題の目的は、ここで議論となっているモデル相転移の、臨界指数を求めることである。

## 実験器具のリスト

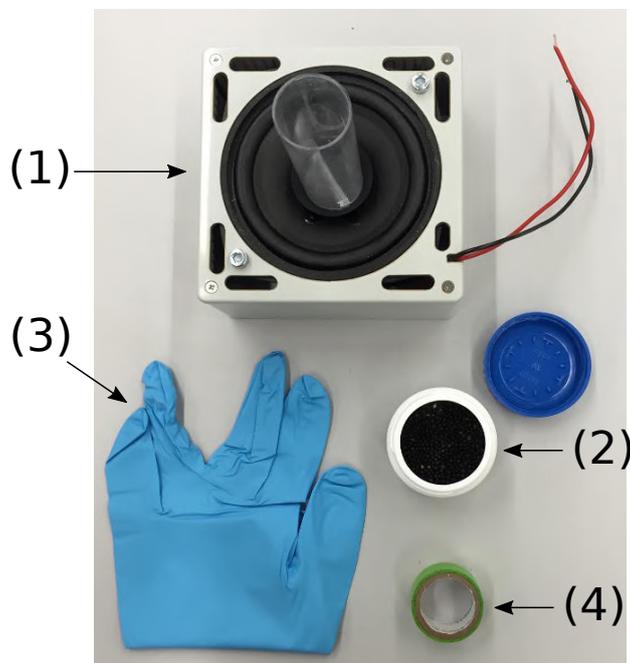


図 2：この実験のための、追加の実験器具。

1. 上にプラスチックの円筒が付いたスピーカー
2. (プラスチック容器中の) 約 100 個のケシの実 (この問題におけるビーズ、あるいは粒子とは、このケシの実のことである)
3. 手袋

## 4. 粘着テープ

### 重要な事前注意

- スピーカー上に付いたプラスチックの円筒には、横から過剰な力を加えてはいけません。スピーカーの膜が破れたり、プラスチックの円筒がとれても、器具の取り替えはおこなわない。
- 使用していないときには、スピーカーの電源はオフにせよ。これは、電池の不要な消耗を防ぐためである。
- この実験では、信号発生器の側面にあるスピーカ端子から、4 Hz の、のこぎり波の信号が出力される。
- のこぎり波の信号の振幅は、(4) のポテンショメーターを用いることで調整することができる。信号の振幅に比例した直流電圧は、(GND ソケット (7) を基準として) モニターソケット (6) に出力される。ここで指示した ( ) つきの番号は、「全般的な注意」の信号発生器の箇所の写真 (図 2) の番号に対応する。
- スピーカーの膜は繊細で破れやすい。垂直方向にも水平方向にも、余計な力がかからないように注意せよ。

## Part A : 臨界励起振幅 (3.3 点)

実際に問題に取り組むまえに、スピーカーを信号発生器の端子に接続せよ（正しい極につないでいるか確認すること）。次に、スピーカーの上に設置されたシリンダーのなかにケシの実をいくつか（たとえば 50 個）入れて、ケシの実が出ないように与えられた手袋の切れ端を用いて円筒の上部をふさぎなさい。スイッチ (8) を用いて励起をオンにして、与えられたドライバーを使ってポテンシオメーター (4) を回して振幅を調整せよ。異なる振幅についていろいろ試してみて、ビーズの分かれ方を観察してみよ。

この問題の最初の課題は、相転移にともなう臨界励起振幅を求めることである。そのためには、壁によって仕切られた容器の一方と他方のそれぞれに入ったビーズの数  $N_1$  と  $N_2$  を ( $N_1 \leq N_2$  とする)、デジタルマルチメーターに表示される電圧振幅  $A_D$  の関数として決定する必要がある。ここで、 $A_D$  とは、ソケット (6) を測定して得られる電圧のことである（「全般的な注意」の信号発生器の箇所を参照せよ）。この電圧は、スピーカーを動かすのこぎり波の電圧に比例する。ひとつの電圧について、少なくとも 5 回の測定をおこなうこと。

ヒント：

- 粒子がここで考察の対象となるような運動を常にしていることを保証するために、スピーカーの振幅電圧が  $0.7\text{ V}$  より大きな振幅の場合について実験を行うこと。最初は、ビーズを数えずに、電圧をゆっくり変化させたときの系の挙動を観察してみよ。静電気力の影響で、いくつかのビーズは飛び跳ねずに下に貼り付いたままであるかもしれないが、そのようなビーズは数えてはならない。

<b>A.1</b>	さまざまなスピーカーの振幅 $A_D$ に対して、壁によって仕切られた容器の一方と他方のそれぞれに入った粒子の数 $N_1$ と $N_2$ を測定せよ。その測定結果を、 <b>表 A.1</b> に記録せよ。	1.2pt
------------	---	-------

<b>A.2</b>	$N_1$ と $N_2$ の測定値の標準偏差を計算し、 <b>表 A.1</b> にその結果を記入せよ。そして、 <b>グラフ A.2</b> に、 $N_1$ と $N_2$ のそれぞれを、スピーカーの振幅 $A_D$ の関数としてプロットせよ。誤差もグラフのなかに示すこと。	1.1pt
------------	--	-------

<b>A.3</b>	臨界値 $A_{D,\text{crit}}$ では、定常状態となるほどに十分長く待つと、 $N_1 = N_2$ となる。そこで、前問で得られたグラフをもとにして、デジタルマルチメーターに表示された振幅の臨界値 $A_{D,\text{crit}}$ を求めよ。	1pt
------------	--	-----

## Part B : 較正 (こうせい、キャリブレーション) (3.2 点)

デジタルマルチメーターに表示される振幅は、スピーカーに加えられている電圧に対応している。しかし、物理的に関心のある量は、スピーカーの振動にともなうスピーカーの膜の変位の最大値  $A$  である。なぜなら、 $A$  はどれくらい激しくビーズが励起されるかに関係しているからである。よって、表示された振幅を較正する必要がある。この較正のために、与えられた器具や道具はすべて用いてよい。

<b>B.1</b>	励起振幅、すなわち振動の 1 周期におけるスピーカーの膜の変位の最大値 $A$ (単位は mm) を測定するための実験の概略図を描け。	0.5pt
------------	---	-------

<b>B.2</b>	適切な数の測定点について、振幅 $A$ (単位は mm) を決定せよ。すなわち、デジタルマルチメーターに表示される振幅 $A_D$ の関数として振幅 $A$ を <b>表 B.2</b> に記録せよ。また、測定誤差も示しなさい。	0.8pt
------------	--	-------

<b>B.3</b>	データを <b>グラフ B.3</b> にプロットせよ。誤差もグラフのなかに示すこと。	1.0pt
------------	---	-------

**B.4** 較正関数  $A(A_D)$  を求めるための適切なフィッティングを用いて、その線の特徴づけるパラメーターを決定せよ。 0.8pt

**B.5** ケシの実の臨界励起振幅  $A_{\text{crit}}$  を求めなさい。 0.1pt

### Part C : 臨界指数 (3.5 点)

この問題で考察の対象となっている系においては、(ふつうの相転移現象における) 温度は、飛び跳ねの運動エネルギーに対応する。このエネルギーは、スピーカーの振動の速さの 2 乗に比例する。振動の速さとは、すなわち、 $v^2 = A^2 f^2$  である (ここで  $f$  は信号発生器の振動数である)。この Part では、この関係が成り立っているかどうかを検証し、秩序変数のべき乗的な振舞いを決定する指数  $b$  (式 (1) を見よ) を求めよう。

**C.1** 数の不均一さ (アンバランスさ)  $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$  は、この問題で考えている系における秩序変数になる。なぜなら、この不均一さは、臨界振幅よりも強い振幅ではゼロになり、臨界振幅が弱いときには 1 になるからである。そこで、振幅  $A$  の関数として秩序変数  $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$  を求めよ。すなわち、 $A$  に対応する  $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$  の値を、表 C.1 に記録せよ。 1.1pt

**C.2**  $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$  を  $|A_{\text{crit}}^2 - A^2|$  の関数として、グラフ C.2 にプロットしなさい。グラフ C.2 として、横軸も縦軸も対数スケールのも (両対数グラフ) も与えられているが、どちらのグラフを利用しても良い。計算のために、表 C.1 の余った欄を用いてもよい。また、プロットをおこなうと、そのプロットは直線上に乗っていないように見えるかもしれないが、臨界指数の公式に従うような直線の上に乗っているとみなしなさい。 1pt

**C.3** 指数  $b$  と、その誤差を求めよ。 1.4pt



## 問題 1: 2 次元における電気伝導度 (10 点)

次の表に 0 から 9 までの数字を書き込みなさい。

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

### Part A. 四端子測定法 (4PP) (1.2 点)

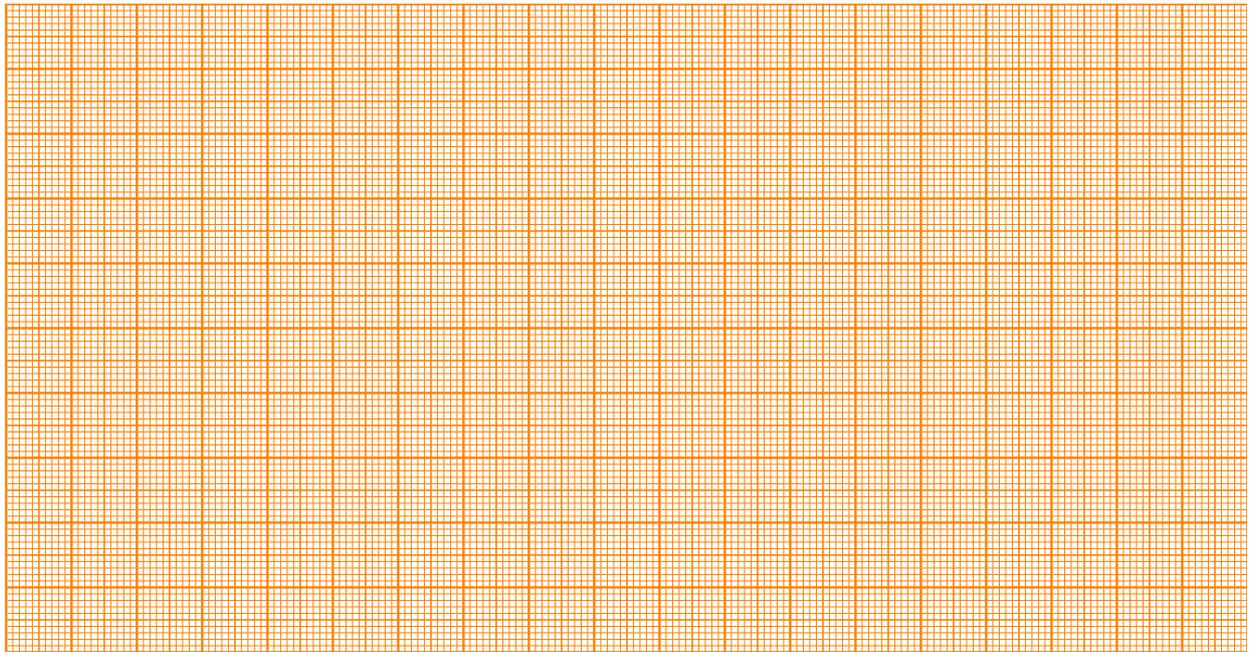
#### A.1 (0.6 pt)

$s =$

$I$	$V$	$I$	$V$

データを **グラフ A.1.** にプロットしなさい

グラフ A.1:  $I$  vs.  $V$



**A.2 (0.2 pt)**

$$R =$$

**A.3 (0.4 pt)**

$$\Delta R =$$

## Part B. 面抵抗率 (0.3 点)

**B.1 (0.3 pt)**

$$\rho_{\square} \equiv \rho_{\infty} =$$



## Part D. 形状補正係数 (1.9 points)

### D.1 (1.0 pt)

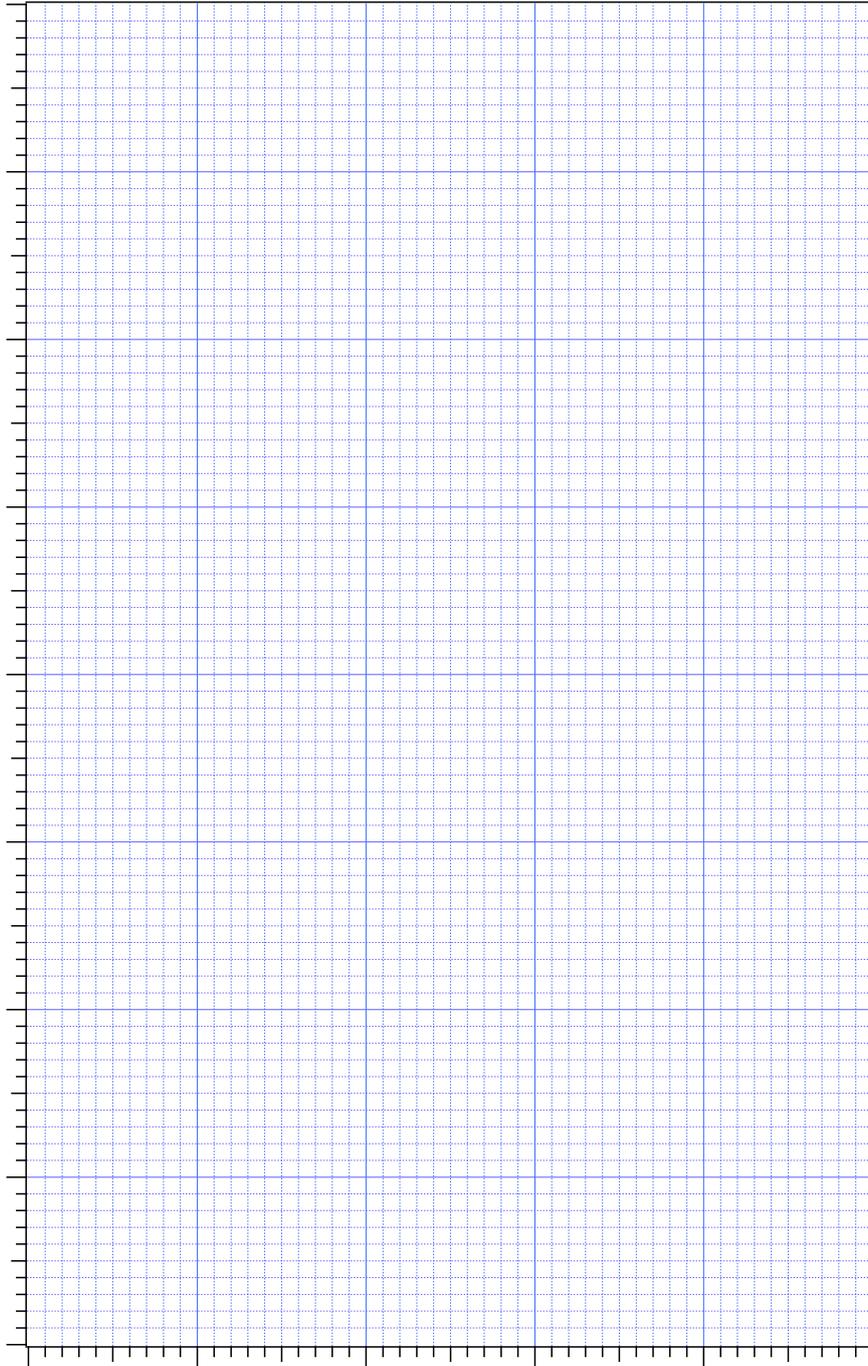
データを、後のページにある方眼 (グラフ D.1a)、片対数 (グラフ D.1b)、両対数 (グラフ D.1c) のうち最も適切なグラフ用紙にプロットしなさい。

### D.2 (0.9 pt)

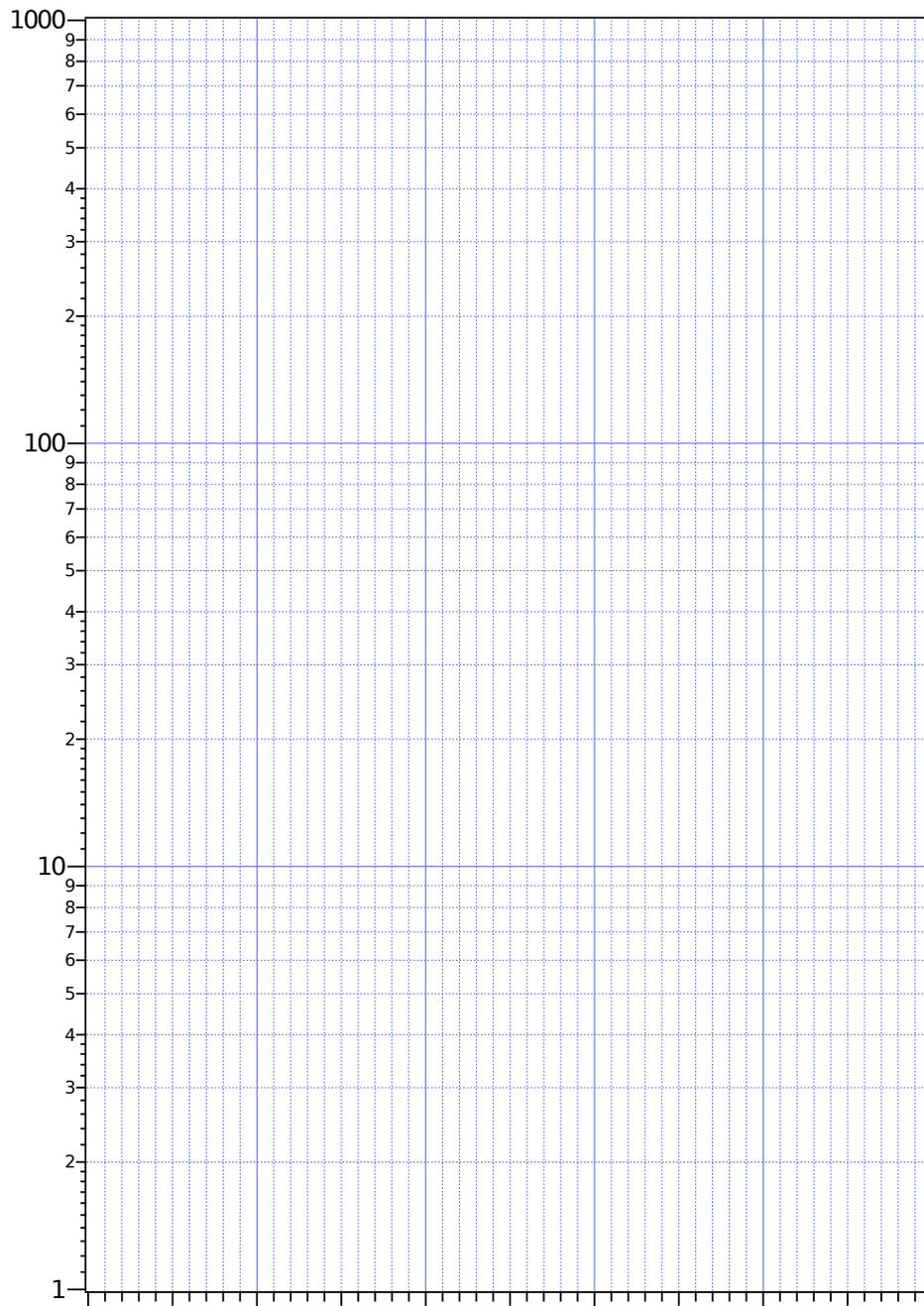
$a =$

$b =$

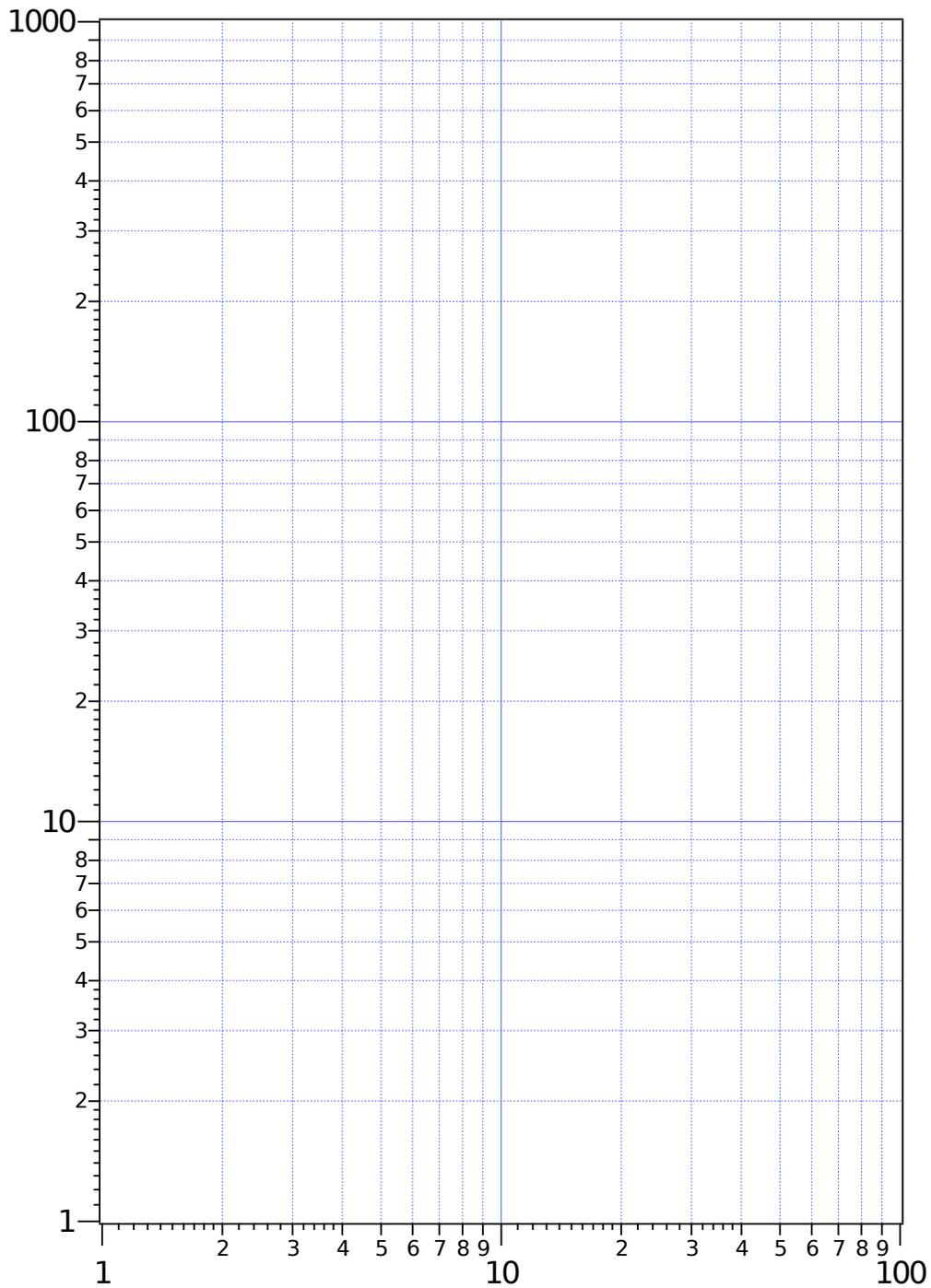
グラフ D.1a: 方眼目盛:



グラフ D.1b: 片対数目盛:



グラフ D1c: 両対数目盛:



**Part E. シリコンウェハと van der Pauw 法 (3.4 points)**

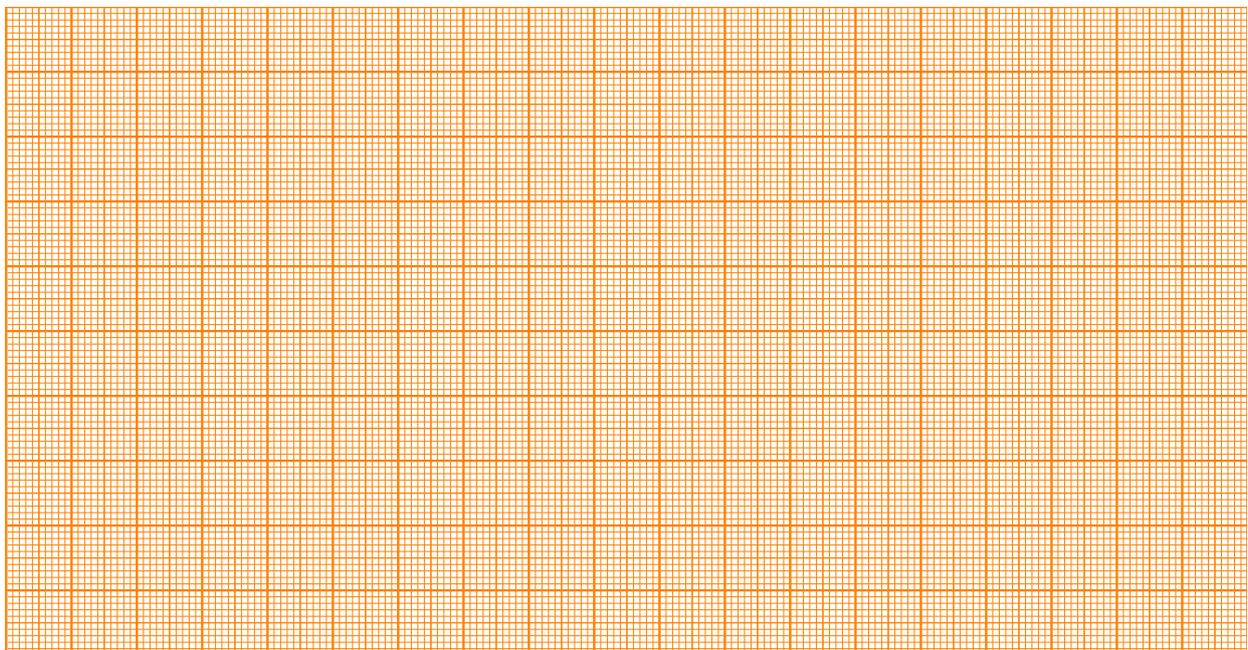
あなたのウェハの番号を書きなさい：

**E.1 (0.4 pt)**

$I$	$V$	$I$	$V$

**E.2 (0.4 pt)**

グラフ E.2:  $I$  vs  $V$



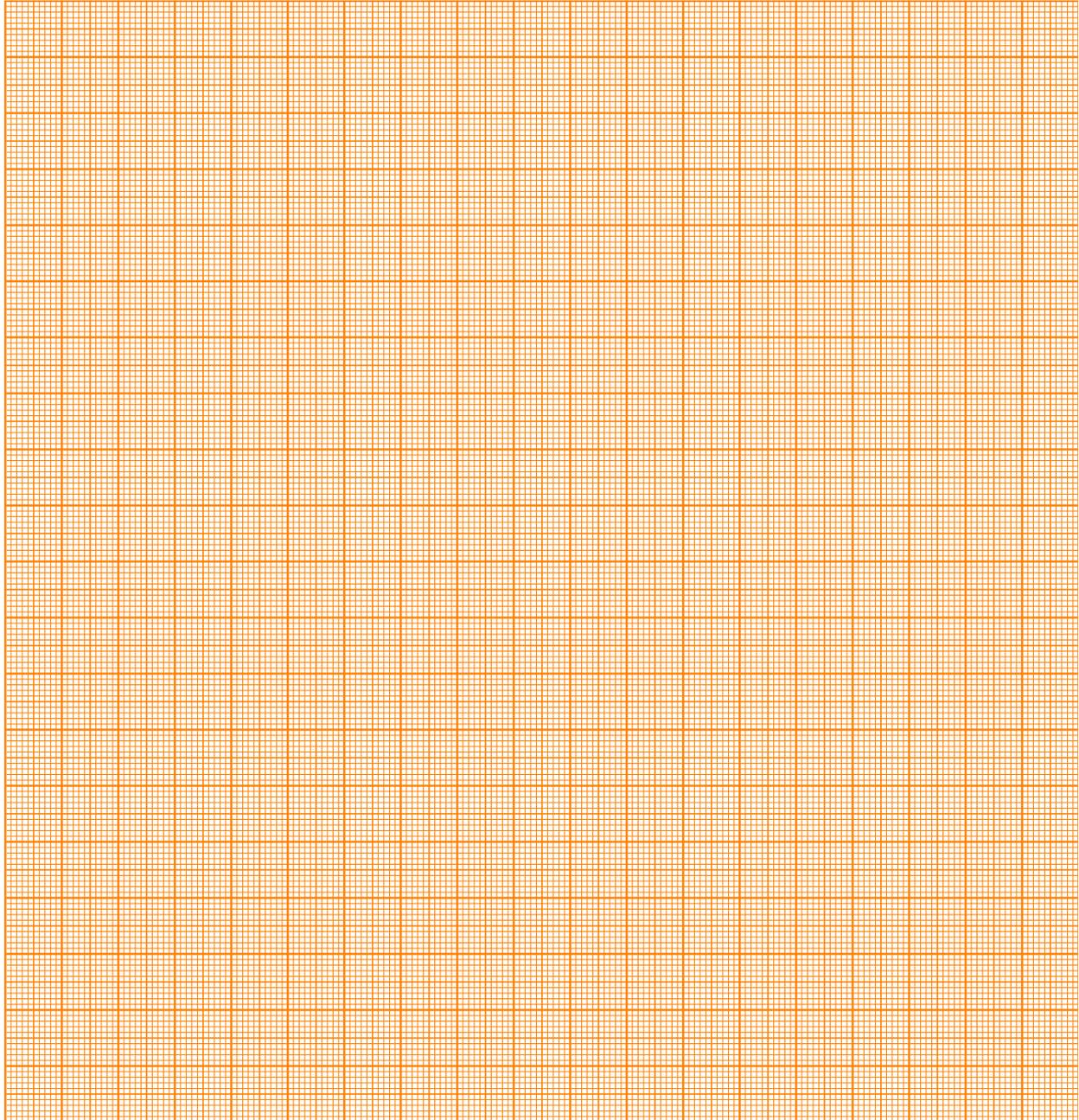
$R_{4PP} =$





**E.7 (0.5 pt)**

グラフ E.7:  $I$  vs.  $V$



$\langle R \rangle =$

**E.8 (0.4 pt)**

計算:

$$\rho_{\square}(\text{vdP}) =$$

**E.9 (0.1 pt)**

$$\frac{\Delta\rho_{\square}}{\rho_{\square}(\text{vdP})} = \quad = \quad \%$$

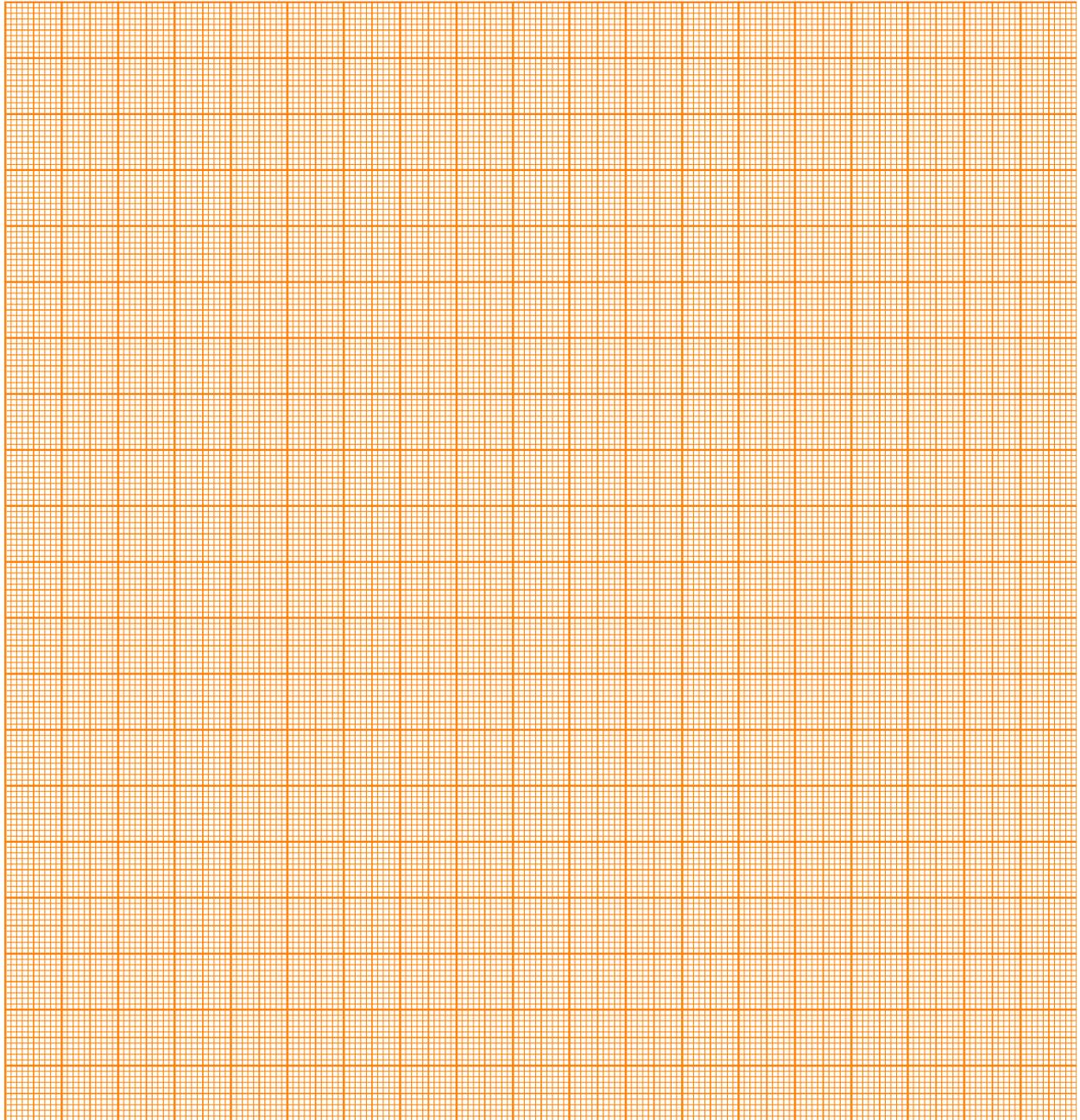
**E.10 (0.1 pt)**

クロム膜の抵抗率  $\rho =$



**A.2 (1.1 pt)**

グラフ A.2:  $A_D$  に対する  $N_1, N_2$  のグラフ



**A.3 (1.0 pt)**

$A_{D, \text{crit.}} =$

## Part B : 較正 (キャリブレーション) (3.2 点)

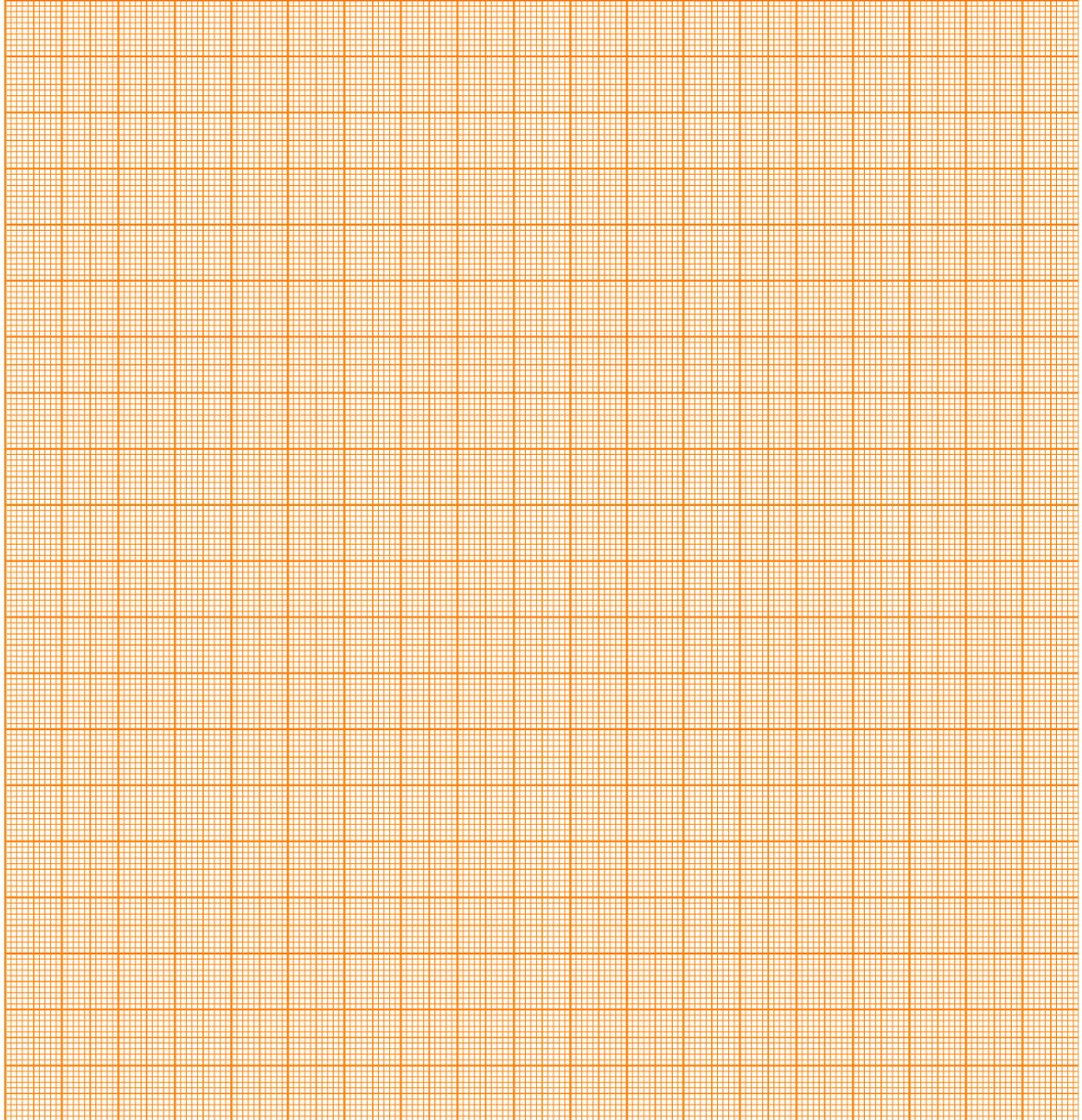
### B.1 (0.5 pt)

実験のセットアップのスケッチ：



**B.3 (1.0 pt)**

グラフ B.3 :  $A_D$  に対する  $A$  のグラフ



**B.4 (0.8 pt)**

関数  $A(A_D)$  :

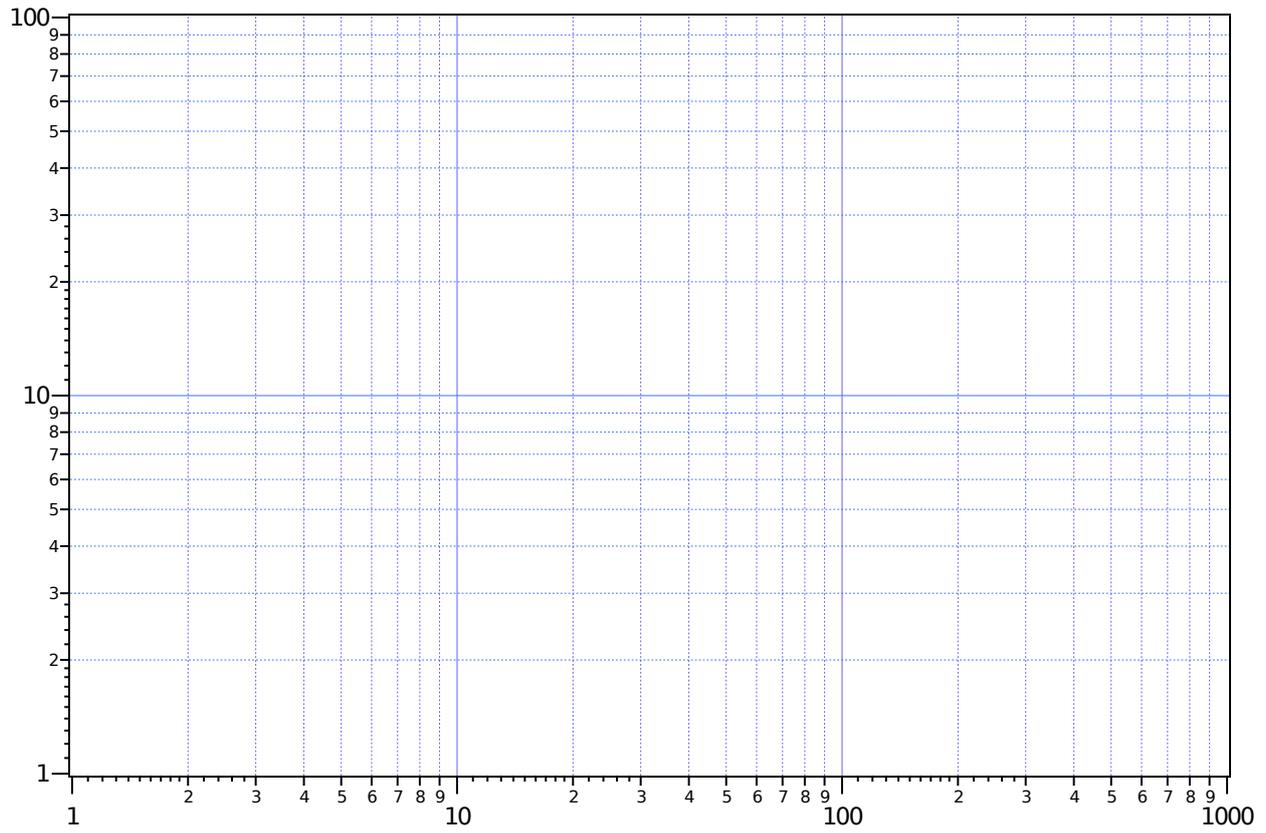
曲線のパラメーター :

**B.5 (0.1 pt)**

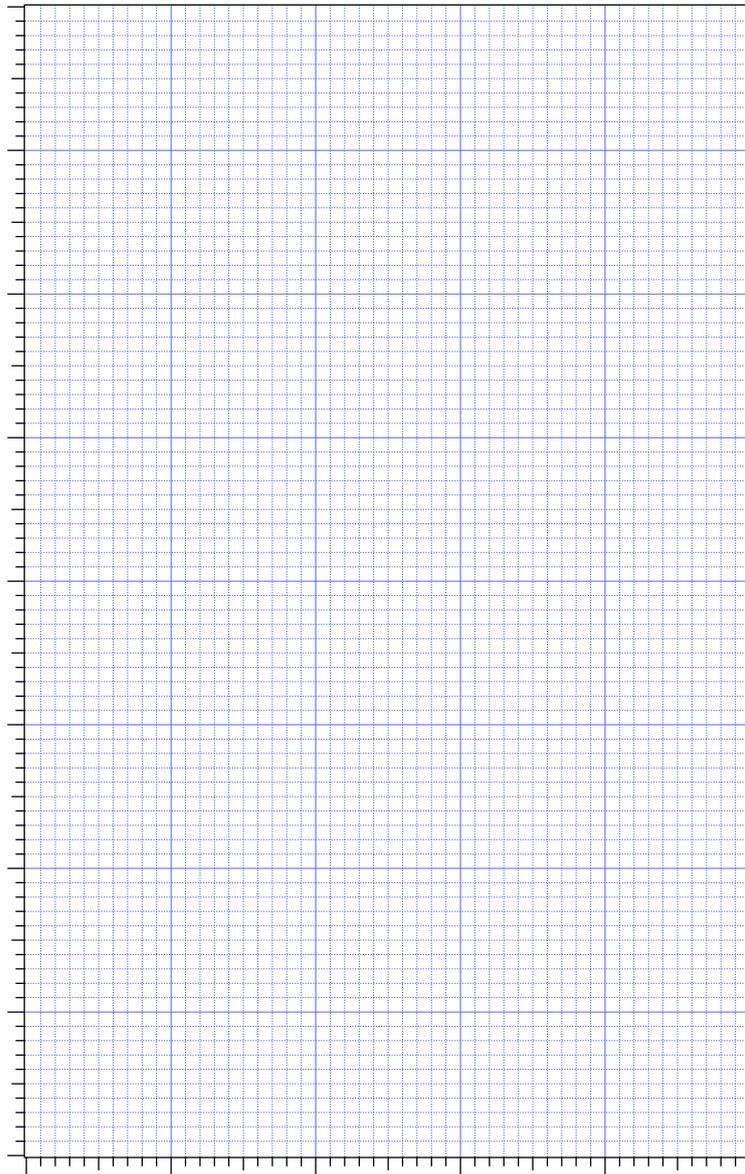
$A_{\text{crit.}} =$



グラフ C.2a : 両対数グラフ



グラフ C.2b : 線形グラフ (リニアグラフ)



**C.3 (1.4 pt)**

$b =$

$\Delta b =$