



## 一般的な注意：実験試験

実験試験の時間は5時間であり、2種類の実験からなる。それぞれが10点の配点で20点満点となる。既にセットアップがなされている1つ目の実験に先に取り組み、その後2つ目の実験に移ることを推奨する。また、実験にとりかかる前に、それぞれの実験の初めに記載されている指示をよく読むこと。

先に取り組み1つ目の実験で使用する器具は、机の上（や机の上の箱の中）におかれている。2つ目の実験で使用する器具は、机の下におかれた2つ目の箱に入っている。試験終了時には、器具をもともと入っていた箱に戻すこと。ただし、2つ目の実験で使用する水の容器については、水で満杯となるはずなのでそのままが良い。

試験開始と終了の合図は音声でなされる。試験開始を報せる音が鳴るまで、問題が入った封筒および実験器具の箱を開けてはならない。1時間毎に経過時間を報せるアナウンスがあり、試験終了の15分前にもアナウンスがある。

### 試験中

- 支給されたペンだけを使用すること。
- 答えは、専用の解答用紙に記載すること。実験記録や測定データは、Aと書かれた解答用紙の適切な表、空欄、およびグラフに記入すること。各問題に対して、詳細な作業を行うためのWと書かれた白紙のワーキングシートも用意されている。解答用紙Aの最後には追加のグラフ用紙もついている。**必ずその時解いている問題に付属したワーキングシートを用いること**（ヘッダーの問題番号をチェックすること）。解答した内容で採点を望まない部分があれば  をつけること。全てのページについて、表側のみを使用すること。
- 解答はできるだけ簡潔に書くこと：自分の考えを説明する際には、式、論理記号、図を可能な限り用いること。長文の使用は避けること。
- 数値で答えるときは、適切な桁数の有効数字で示すこと。必要な場合は誤差の計算もすること。特に指示のない限り、データ点の数や測定の回数は自分で適切に決めること。
- 前の方の問題を解かなくても後ろの問題を解ける場合がある。
- 許可なく机を離れないこと。助けが必要な場合には、与えられた旗を用いてスタッフに知らせること（トイレに行きたい時は”WC”，水が欲しい時は”H2O”，紙が欲しい時やその他の助けが必要な場合には”HELP”を用いよ）。

### 試験終了時

- 試験が終了したら、ただちに答案を書くことをやめなければならない。
- それぞれの実験に対して、次の順番で用紙を並べ替えなさい：表紙（C）を一番上とし、問題（Q）、解答用紙（A）、ワーキングシート（W）を順に下に並べ、白紙や余分な用紙（Z）が一番下となる。
- 1つの実験に対応する全ての用紙を同じ封筒に入れること。封筒の透明窓から Student Code が見えるようにすること。用紙が入った各実験問題の封筒と、この「一般的な注意」の紙を、大きな封筒に入れること。試験会場からは、いかなる紙も持ち出してはならない。
- 筆記用具は机においていくこと。
- 試験終了時には、器具をもともと入っていた箱に戻すこと。ただし、2つ目の実験で使用する水の容器については、水で満杯となるはずなのでそのままが良い。
- 封筒が回収されるまで、自分の机で待っていること。回収後、試験会場の外へ案内される。





## 光学的測定

この実験では、与えられた器具だけを用いて、サンプルの光学的な性質をできるだけ高い精度で正確に測定することを目指す。

注意：机の下に水のボトルが2本あるが、これは2つ目の実験に使用するものである - 飲まないこと

Part A では、透明な円盤（円柱）の屈折率を2つの方法で測定する。第1の方法は古典的であるが、第2の方法は可能な限り高い精度の測定が可能な新しい方法である。

Part B では、レーザー光の波長  $\lambda$  と回折格子の格子定数  $d$  の比をできるだけ高い精度で正確に測定することを目指す。

Part C では、三角プリズムの屈折率を測定する。これもまた、できるだけ高い精度で正確に測定することを目指す。

測定のために、試験開始後 20 分から 100 分間、試験会場全体を暗くする（必要に応じて卓上ライトを使用してもよい）。Part A の実験は暗い方がし易いが、その大部分は明るくても行える。

個室の壁はスクリーンとして使用することができ、粘着テープを貼ってもよい。

この実験では、光源としてダイオードレーザーを用いる。

### レーザーに関する安全上の注意：

- **ビームを直視しないこと！**
- 実験全体を通して、ビームは水平面内で照射すること。ビームがスクリーン等に当たる位置を測定する際には、**頭が常にビームの水平面より上にあるように気を付けること。**
- 個室の開口部にビームを向けないこと。
- 測定時以外の必要のない場面では電源を切ること。

### 実験器具

器具 1～9 は、全部の問題を通して使用する。器具 10～12 は、問題に応じて使用する。実験に用いる複数の光学素子が全て揃っていることを確認すること。また、各素子の鉛直断面を汚さないように、直接手で触れないように注意すること。

1. 定規：長さ 60 cm
2. スライダー：定規に沿って移動できる。
3. レーザー光源装置：スライダー上に設置する。光源の高さは2つのレベルにセットでき、Part A 用のレベル 3A と Part B, C 用の高レベル 3B、電源スイッチの位置は、図の 3C に示されている。
4. ネジ 4A と 4B の調整によって、装置の向きや位置を固定できる。また、小さな金属棒 4C でレーザーの向きを微調整できる。さらに、4C の向きを 180 度反転すると、レーザーの高さを変えることができる。偏光方向はあらかじめ調整してあるので、光軸周りにレーザーを回転してはいけない。
5. スクリーン：個室の壁を利用し、隣り合う壁は直交しているとみなしてよい。
6. 粘着テープ：器具を机に固定するために使用できる。
7. 巻き尺
8. 各種定規・分度器
9. 卓上ライト
10. 透明円盤：直径 20.00 cm、板に分度器とともに固定された状態で使用する (Part A)。使用前に、4つの木片を取り除くこと。

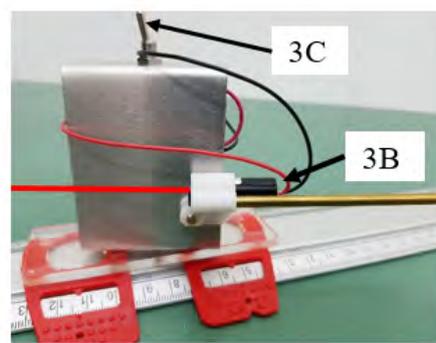
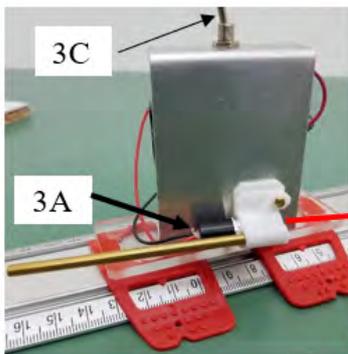
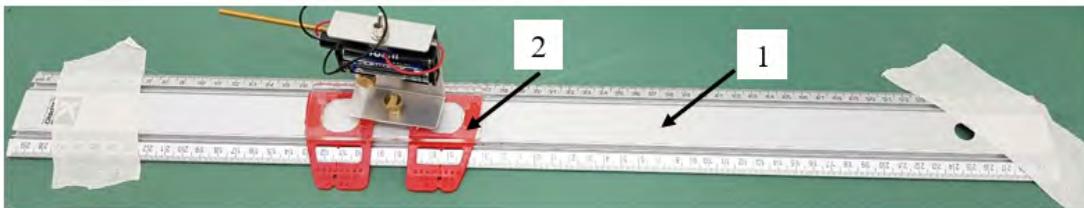
## Experiment



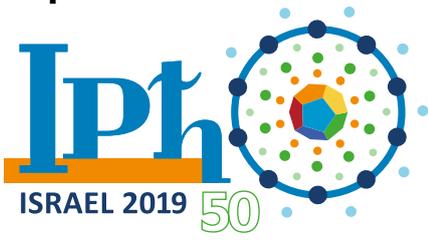
# Q1-2

Japanese (Japan)

11. 羊皮紙：一時的に円盤の側面に沿って（手で）当てることにより透過スクリーンとして使用し、円盤の外へ出射する位置を円盤の側面を汚すことなく測定することができる (Part A). 図に示すように、紙に直線を描いておくと、位置がより正確に測定できる。
12. 板 (12A) と円柱ホルダー (12B) を組み合わせ、ホルダーに載せた回折格子 (12C) もしくは三角プリズム (12D) を鉛直軸周りに回転させることができる。

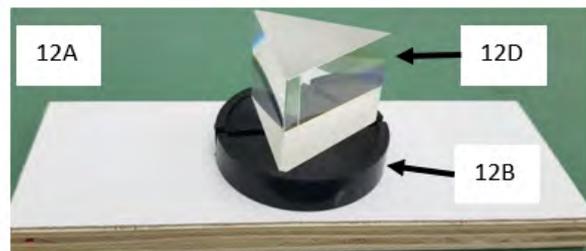
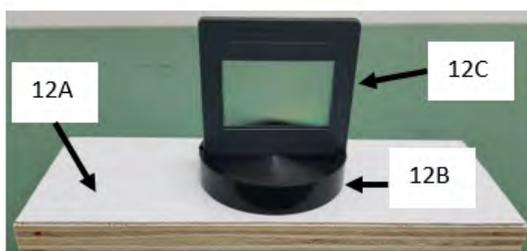
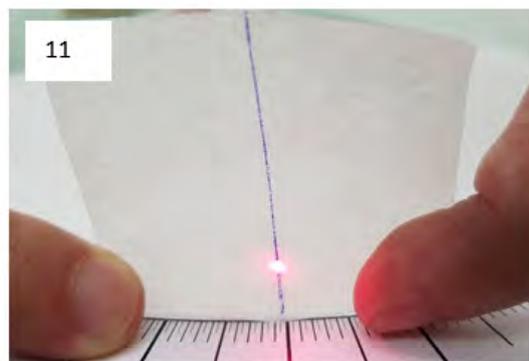
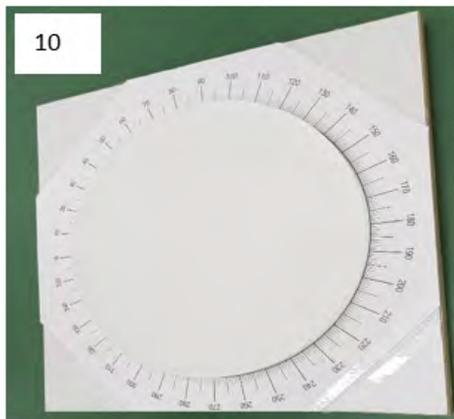
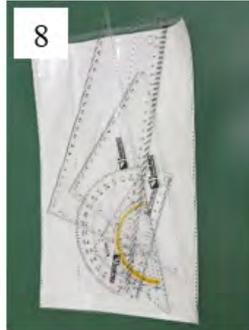
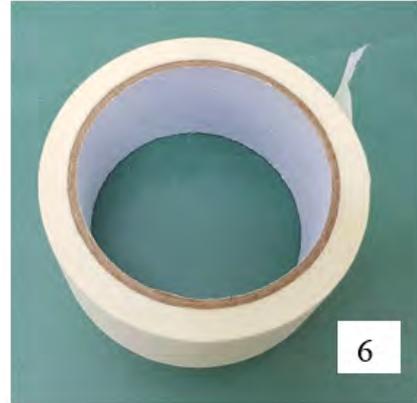
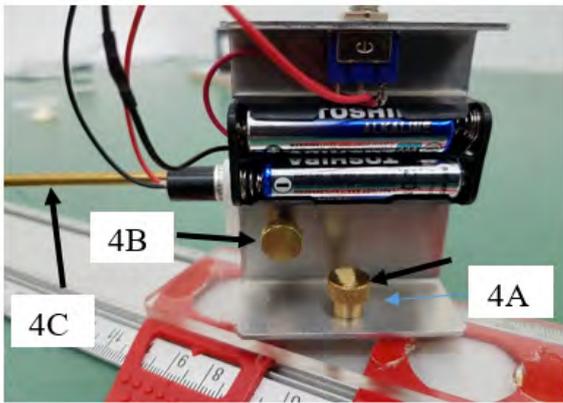


# Experiment



# Q1-3

Japanese (Japan)



## Experiment

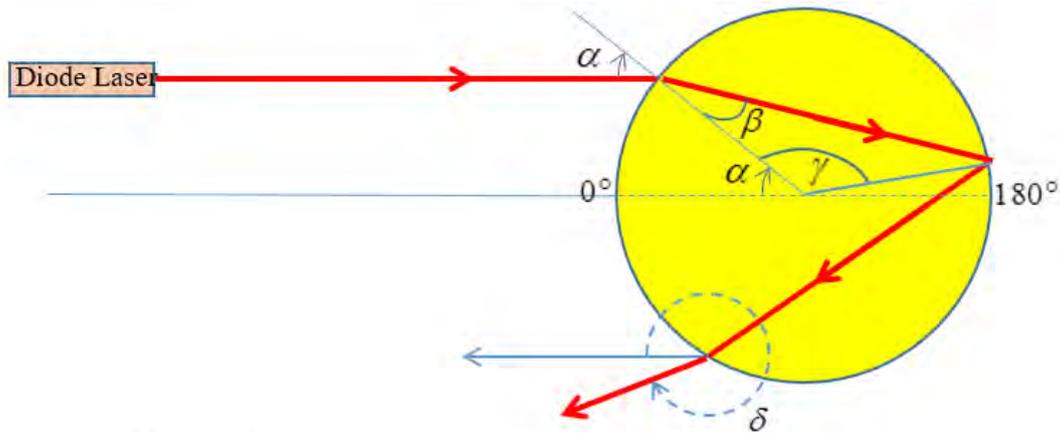


# Q1-4

Japanese (Japan)

### Part A : 円盤の屈折率 (5.5 points)

この Part では、円盤中で反射・屈折される光線がとる経路を観察することにより、透明な円盤の屈折率を測定する。



実験の模式図

#### 物理量の定義と記号

$\alpha$	円盤に入射する光の入射角
$2\Delta\alpha$	入射角の広がり, すなわち, 入射するビームの入射角 $\alpha$ の円周上での幅を示す値
$\beta$	円盤内の屈折角
$\gamma$	$= 180^\circ - 2\beta$
$n$	円盤の材質の屈折率
$N$	円盤から空気へ光が出ていく前に, 円周の境界に達する回数 (図では $N = 3$ ).
$\delta$	"円盤へ入る光と逆の向き"と"円盤から出る光の向き"のなす角で, 時計回りを正とする (図では $N = 3$ での $\delta$ を示している).
$2\Delta\delta$	角度 $\delta$ の広がり

角度  $\alpha$ ,  $\beta$  と  $\delta$  の間には, 次の関係がある.

$$\delta = 2\alpha + (N - 1)(180^\circ - 2\beta). \quad (1)$$

この関係式は, 導出なしに用いてよい.

レーザービームの入射角を変えることができるように, 粘着テープで定規をテーブルに固定し, 入射角が容易に測定できるようにレーザー光源装置を調整せよ. 次に, 粘着テープで板の露出した四隅をテーブルに貼り付け, 円盤の位置を固定せよ. さらに, 金属バー 4C を用いて, 傾きを調整せよ. レーザー光源は, 各 Part によって設置する高さが異なる: PartA では低い高さ, PartB と C では, 高い高さにそれぞれ設置する. このレーザー光源装置は, 装置からの入射光が S 偏光 (反射光が強くなる偏光) となるよう調整されている. したがって, 入射光の偏光面を変更してはならない (レーザー光源装置を光軸周りに回転してはいけない) !

## Experiment



# Q1-5

Japanese (Japan)

**A.1** スライダー付の定規と円盤から成るシステムのスケッチを描き、レーザービームの経路を描き入れよ。入射角  $\alpha$  も示せ。入射角  $15^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$  の範囲において測定を実行せよ。  $\alpha, \Delta\alpha, \delta, \Delta\delta$  を Table 1 に書き入れよ。  
注意:  $\delta$  の測定にあたっては、円盤の周上で  $\delta/2$  を直接測定した方が簡便である。

**A.2** 前問の測定結果を用いて、屈折率  $n$  および不確かさ  $\Delta n$  を導出するためのグラフの概形を描き、  $n$  および  $\Delta n$  を求めよ。何か追加すべき物理量を計算する必要があるならば、計算値を Table 1 の空欄に書き入れよ。

**A.3** A.1 で行った測定結果より、  $\delta$  のグラフを  $\alpha$  の関数として描け。それぞれの測定点に、  $\Delta\delta$  および  $\Delta\alpha$  の値をエラーバーを用いて記入せよ。最小の  $\delta$  およびその時の  $\alpha$  を正確に求めるために、追加の測定を行うこと。それらを  $\delta_{\min}$  および  $\alpha_{\min}$  の記号で記せ。  
最小値を最も正確に定めるために、個室の壁をビームを当てるスクリーンとして使用して構わない。

### 屈折率を測定するための2つ目の方法

このセクションでは、高い精度の結果を得られる別の測定方法を考える。測定は可能な限り高い精度で行わねばならないが、**不確かさを見積もる必要はない**。ただし、結果を得るために使用した式は解答用紙に詳述すること。

**A.4** A.3 で得られたグラフの振る舞いに基づいて、屈折率を求める測定を行うのに最適な角度を選べ。考えた測定方法で屈折率を求めるために必要な式を記せ。

**A.5**  $N = 3$  のとき、A.4 で考え出した方法によって高い精度で屈折率を導くために、必要な測定を行え。

- 円盤とビームの経路を図で描き、どの物理量を測定したのか図中に示すこと
- どのような測定を行ったのか、その結果も合わせて記述せよ。
- 測定結果の解析を行い、できるだけ高い精度で円盤の屈折率  $n$  を求めよ。必要に応じて、追加で配布されるグラフ用紙を用いること。

**A.6**  $N = 4$  と  $N = 5$  の場合について、前問の過程を繰り返せ（実験装置とビームの経路を描く必要はない）。

- $N = 4$  の場合について、どのような測定を行ったのか、その結果も合わせて記述せよ。
- $N = 4$  の場合について、測定結果の解析を行い、できるだけ高い精度で円盤の屈折率  $n$  を求めよ。
- $N = 5$  の場合について、どのような測定を行ったのか、その結果も合わせて記述せよ。
- $N = 5$  の場合について、測定結果の解析を行い、できるだけ高い精度で円盤の屈折率  $n$  を求めよ。
- $N = 3, N = 4, N = 5$  の場合の測定から求めた屈折率の値を用いて、屈折率の平均値  $\langle n \rangle$  を求めよ。

## Experiment



# Q1-6

Japanese (Japan)

### Part B : 回折格子のパラメータ (2.5 points)

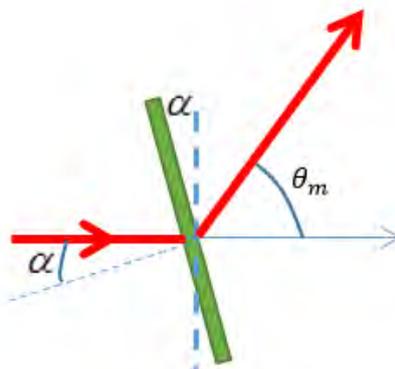
この問題では、不確かさを見積もる必要はない。

この問題では、レーザー光の波長  $\lambda$  と回折格子の格子定数 (隣り合うスリット間の距離)  $d$  の比  $\lambda/d$  を求める。レーザービームが回折格子を通過すると、レーザービームが入射する方向と回折光が最大強度 ( $m$  次における) となる方向がなす角  $\theta_m$  は次のような関係がある：

$$d \cdot (\sin \alpha + \sin(\theta_m - \alpha)) = m\lambda \quad (2)$$

ここで、

$m$	回折の次数
$\alpha$	回折格子へのレーザー光の入射角
$\theta_m$	レーザービームの入射する方向と $m$ 次の回折光が最大強度となる方向がなす角
$d$	回折格子の格子定数 (回折格子の隣り合うスリットの中心間距離)



高次の回折光ほど、波長が異なる回折光がよく分離できる。ゆえに、高次の回折光を利用するによって、値  $\lambda/d$  の相対的な不確かさを減らすことができる。

4B のネジを緩めてレーザーの高さを変更せよ。変更は、レーザーをビーム方向と垂直な水平軸について 180 度回転して 3B に示す状態まで行え (ワイヤに注意すること)。これで Part B と C の実験ができるようになる。さらに金属棒 4C を用いてレーザーの向きを微調整し、回折格子を用いた測定に適した高さに揃えることができる。レーザービームがスクリーンと垂直になるよう調整すること。ホルダーのスリット 12B に回折格子をセットする。回折格子には向きがあり、スティッカーが片面だけに貼られている。貼られた側がレーザーに向くよう、スティッカーが上部にくるよう配置すること。回折格子は固有の ID を有し、スティッカーに書かれてある。自分が使用している回折格子の ID を解答用紙の指示された場所に記すこと。

この Part では、PartA の 2 つ目のセクションのアイデアと似た考えが役に立つ。

## Experiment



# Q1-7

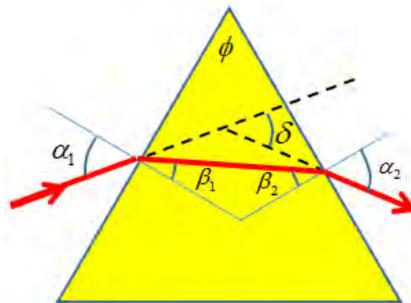
Japanese (Japan)

- B.1** 0.7pt
- 解答用紙に実験装置のセットアップの図を描け。図中には、テーブル上のレーザー光源装置、回折格子がどこにあるか、またレーザー光の軌跡を記し、レーザーがスクリーンに当たる点の位置と何を測定した値で付記すること。
  - $m = 1$  での測定を行ってその結果を記し、比  $\lambda/d$  の値を算出せよ。
  - $m = 2$  での測定を行ってその結果を記し、比  $\lambda/d$  の値を算出せよ。

- B.2** 1.8pt
- 高次の回折光を用いて、比  $\lambda/d$  を求める ( $m > 2$ ).
- $m = 3$  と  $m = 4$  について、それぞれ実験装置の配置を解答用紙に図示せよ。レーザー光源装置、回折格子、レーザービームの経路、スクリーンに現れる輝点、およびどの物理量を測定したのか図中に示すこと。
  - $m = 3, 4$  のそれぞれについて、測定結果を記せ。それぞれの  $m$  について、比  $\lambda/d$  を算出せよ。

### Part C: 三角プリズムの屈折率 (2.0 points)

ほぼ正三角形の三角柱プリズムが配布されている。プリズムの表面は平坦で鏡面に研磨されている。プリズムの角度の  $60^\circ$  からのずれは大きくても  $0.7^\circ$  以下である。プリズムの角度を測定する必要はない。このセクションの到達目標はプリズム材料の屈折率を測定することである。誤差を小さくするためにプリズムの角度の小さなずれに対する補正には小角近似 ( $\sin x \approx x$ ,  $\cos x \approx 1$ ,  $x$  はラジアン単位) を用いる。このセクションでは、不確かさの計算が必要である。図はプリズムの1つの面から入射して他の面から出射する光線の例を示している。



レーザーを用いた測定の精度ができるだけ高くなるように、スライド式の定規をテーブル上の適切な場所に設置せよ。

プリズムを 12B で示されたホルダーに設置せよ。

- C.1** 0.4pt
- $\alpha_1 = \alpha_2$  の対称性がある場合、次の関係が二等辺三角形のプリズムについて成り立つ:  $n = 2\sin(\delta_{\text{sym}}/2 + 30^\circ)$ .
- プリズムの屈折率を最も高い精度で求める方法を考えよ。
  - 屈折率を求めるために用いる一連の式を解答用紙に書け。

- C.2** 1.6pt
- 測定したパラメータ名と数値（および不確かさ）を解答用紙に記録せよ。
  - レーザーの波長におけるプリズムの屈折率と不確かさを求めよ。



## ヴィーデマン-フランツの法則

金属では、熱は主に電子によって運ばれる。このため、熱伝導度と電気伝導度は関連している。これはヴィーデマン-フランツの法則として知られている。

この実験の到達目標は、いくつかの金属の熱的及び電気的性質を十分に高い精度に測定することである。パート A では、銅、真鍮及びアルミニウムの電気伝導度を測定する。パート B では、銅の熱伝導度を測定する。パート C では、銅の比熱を測定する。パート D では、真鍮とアルミニウムの熱伝導度を測定する。最後にパート E では、測定した金属の物理的な性質の間の普遍的な関係を確認する。

**この実験では、不確かさの値の見積りをおこなう必要はない。**

パート B とパート D では待ち時間が **15 分** 存在する。それを考慮して実験を計画すること。

### 安全対策

全てのリード線や許可されていない機器は、220V/25A のコンセントに直接接続しないこと。コンセントに接続して良いのは何の変更改も加えていない与えられた電源（AC アダプター）のみである。

### 実験装置のリスト



Figure 1

1. 中空の銅 (Copper) の円筒パイプ (長さ 200.0 mm, 内側の直径 (内径) 6.0 mm, 外がわの直径 (外径) 20.0 mm)
2. 中空の真鍮 (Brass) の円筒パイプ (長さ 200.0 mm, 内径 6.0 mm, 外径 19.0 mm)
3. 中空のアルミニウム (Aluminum) の円筒パイプ (長さ 200.0 mm, 内径 6.0 mm, 外径 20.0 mm)
4. 質量 1.2 g の小さな永久磁石。
5. 水の容器。容器の蓋には内側に熱交換器, 外側上部には熱交換器と繋がったオスネジが取り付けられている。容器を満たすための 4 リットルの水 (2 リットル容器 2 本) が供給される。

6. Rod #1 - 直径 20.0 mm の銅のロッド．ケーブルソケット端子は内蔵された 8 つの温度センサーに接続されており，赤いリード線は内蔵されたヒーターに繋がれている (figure 2.a)．赤いリード線は，回路を通して直流電源（部品 15 番の AC アダプター）に接続されることを想定したものである．ロッドは黒い断熱材で覆われている．
7. Rod #2 - 直径 20.0 mm の複合材のロッド．ケーブルソケット端子は内蔵された 8 つの温度センサーに接続されており，赤いリード線は内蔵されたヒーターに繋がれている (figure 2.b)．赤いリード線は，回路を通して直流電源（部品 15 番の AC アダプター）に接続されることを想定したものである．ロッドは黒い断熱材で覆われている．
8. ロッドの端面を断熱するためのキャップ．
9. デジタル表示器のための 12V の直流電源（AC アダプター）．
10. デジタル表示器．これはロッドに内蔵された 8 つの温度センサーの読み及び時間を表示する（下の説明を読むこと）．また，ストップウォッチとしても用いる．
11. ロッドの 8 つの温度センサーとデジタル表示器とを接続するケーブル．
12. 電圧計（電圧計のセレクターは 20V DC にセットすること．(Figure 3)）
13. 電流計（電流計のセレクターは 10A DC にセットすること．(Figure 3)）
14. 電線
15. 9V の AC アダプター（バナナプラグでヒーターに接続して電源として用いる．）

**注意:** 1. 供給されている（通常の AC プラグの付いた）電源（AC アダプター）だけを 200V の電源タップに接続すること．個別のリード線や他の機器を電源タップに接続することは，大変危険なので，決してしないこと．

2. ロッドを水の中に漬さないこと．

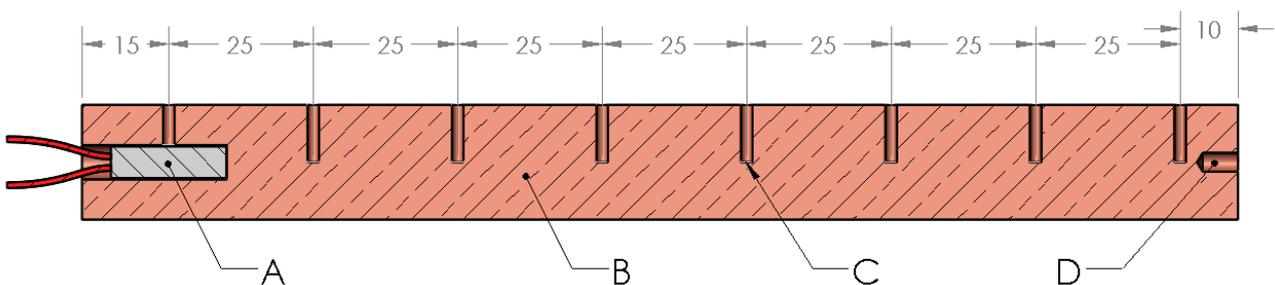


Figure 2.a - Rod #1 の構造図

距離は 0.1 mm の精度で，mm の単位で示されている．

- (A) 赤いリード線に接続されたヒーター，(B) 銅のロッド，(C) 8 個の温度センサー（1 つだけ矢印で示されているが，全て同じ形状の切込みで描かれている．），  
 (D) 水の容器の蓋のオスネジに取り付けるためのメスネジ．

## Experiment



# Q2-3

Japanese (Japan)

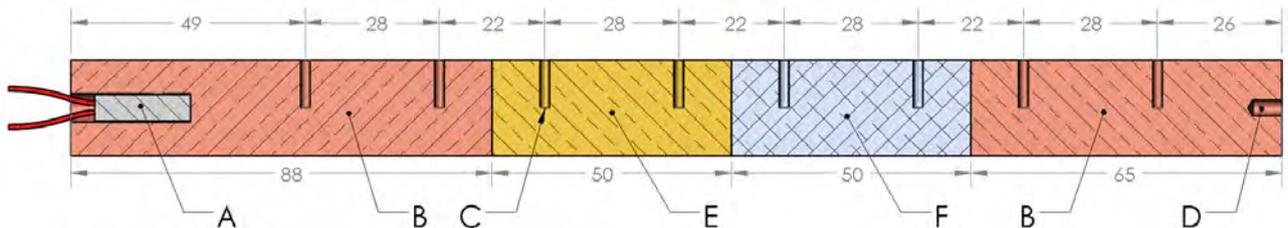


Figure 2.b - Rod #2 の構造図

距離は 0.1 mm の精度で、mm の単位で示されている。

- (A) 赤いリード線に接続されたヒーター，(B) 銅のロッド，(C) 8 個の温度センサー（1つだけ矢印で示されているが、全て同じ形状の切込みで描かれている。）  
(D) 水の容器の蓋のオスネジに取り付けるためのメスネジ。  
(E) 真鍮のロッド，(F) アルミニウムのロッド。

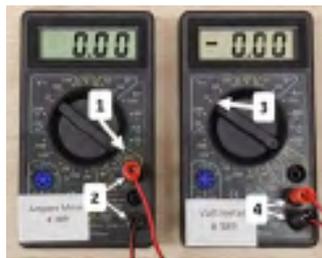


Figure 3 - 電流計と電圧計

- (1) -実験では、セレクターを 10A にすること。(2) 電流測定用の入力端子を用いること。  
(3) -実験では、セレクターを 20V にすること。(4) 電圧測定用の入力端子を用いること。

## デジタル表示器の使用法

デジタル表示器を 12V の直流電源（AC アダプター）に接続せよ。

デジタル表示器には、ストップウォッチと温度表示器の 2 つの動作モードがある。センサーからのケーブルが表示器に取り付けられると、表示器は自動的に温度センサーの読み取り値を表示する。ケーブルが取り外されると自動的にストップウォッチモードに変わり、画面に「Timer mode」と示される。

温度表示モードにおいて：

- 赤いボタンを 3 秒間押し続けると、時間がリセットされる。
- 赤いボタンを短く押すと、表示がホールドされる（その間、表示器は最後にリセットされてからの時間を計測し続けているが、それは表示されない。）
- 赤いボタンをもう一度短く押すと、現在の温度と時間の表示に戻る。

ストップウォッチモードにおいて：

- 赤いボタンを押すと、ストップウォッチの計測がスタートする。
- 赤いボタンをもう一度押すと、ストップウォッチの計測がストップする。
- 赤いボタンをさらにもう一度押すと、ストップウォッチがゼロにリセットされる。

## Experiment



# Q2-4

Japanese (Japan)

デジタル表示器は、それぞれのロッドについて、最初に使用する前に校正する必要がある。実験で用いられている8つの温度センサーは厳密に同じものではない。従ってロッドが熱平衡にあるとき、8つ全ての温度センサーで同じ温度が表示されるように校正したい。そのため次の手順をおこなう。まず、温度センサー接続用ケーブルの一端をロッドに接続する。次に、赤いボタンを押しながら温度センサー接続用ケーブルの另一端をデジタル表示器に接続する。表示器を電源とセンサーケーブルの両方から切り離してもこの校正は消去されない。

**注意:** 校正はロッドを熱浴の水容器に接続する前およびヒーターを電源に接続する前におこなうこと。これによってロッドの温度が校正の間一様であることが保証される。

デジタル表示器に何らかの問題が生じた場合、デジタル表示器から直流電源（ACアダプター）を一旦取り外し、再び繋げると清浄になる場合がある。デジタル表示器は最後の校正を記憶している。

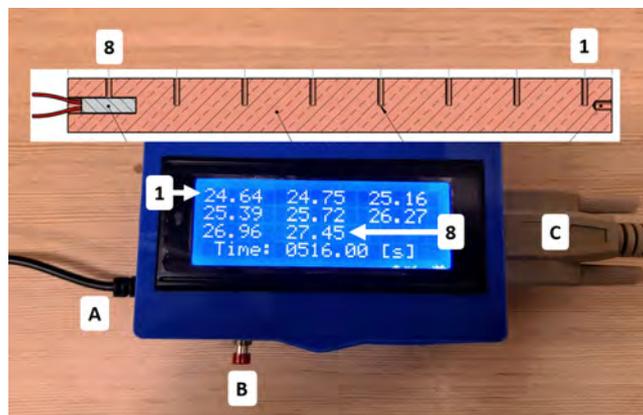


Figure 4 - デジタル表示器

(A) 12 Vの直流電源（ACアダプター）のケーブル。(B) 多機能の赤いボタン。

(C) 温度センサー接続用ケーブル。(1-8) ロッドの図の上に示された番号の順に並んでいる温度センサーの温度（°C）が、表示器の図の順番で表示される。

### Part A: 銅、アルミニウム及び真鍮の電気伝導度 (1.5 points)

#### 理論

永久磁石が中空の導電性パイプの中を落下するとき、誘導される渦電流に起因する摩擦力を受ける。それにより、磁石は終端速度に達する。今の場合、終端速度は次の式で表される。

$$v_{terminal} = \frac{8\pi m g a^2}{\mu_0^2 (\pi r_m^2 M)^2 \sigma w f(\frac{d}{a})}. \quad (1)$$

ここで  $m$  は磁石の質量、 $\sigma$  はパイプの材料の電気伝導度、 $a$  はパイプの内側の孔の半径、 $r_m$  および  $d$  は、それぞれ、磁石の半径および長さである。 $M$  は磁石の残留磁化、 $w$  はパイプの壁の厚さ、 $f(\frac{d}{a})$  はスケール比によって決まる数である。ここでは、 $a \approx r_m$ 、 $d = 2r_m \approx 2a$ 、 $f(2) \approx 1.75$  とする。従って、磁石がパイプを通過するのにかかる時間は近似的に次の式で表される：

$$t = 0.22 \frac{\pi r_m^2 (\mu_0 M)^2 w L_0}{m g} \sigma. \quad (2)$$

## Experiment



# Q2-5

Japanese (Japan)

ここで、 $L_0 = 0.2 \text{ m}$  は、パイプの長さであり、磁石は落下し始めてすぐに終端速度に達すると仮定する。

計算に必要なパイプと磁石の特性値は次のようになる：

$$\mu_0 M = 0.65 \text{ T}, w_{\text{Aluminum}} = w_{\text{Copper}} = 7.0 \times 10^{-3} \text{ m}, w_{\text{Brass}} = 6.5 \times 10^{-3} \text{ m}, m = 1.2 \times 10^{-3} \text{ kg}, r_m = 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}, g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

## Experiment



# Q2-6

Japanese (Japan)

### 実験

**A.1** ストップウォッチモードでデジタル表示器を用い、磁石がアルミニウム (Aluminum), 銅 (copper), 真鍮 (brass) でできた中空のパイプを通り抜けて落ちるのにかかる時間を測定せよ。テーブル A1 に測定結果を書け。 1.0pt

**A.2** 上の式を用いて、3つの材質それぞれの電気伝導度  $\sigma_{\text{Aluminum}}$ ,  $\sigma_{\text{Copper}}$ ,  $\sigma_{\text{Brass}}$  を求めよ。 0.5pt

### Part B: 銅の熱伝導度 (3.0 points)

このセクションの到達目標は定常状態に近いときの銅の熱伝導度を求めることである。

### 理論

熱伝導度  $\kappa$  は  $P(x) = -\kappa A \cdot \frac{\Delta T(x)}{\Delta x}$  で定義される。この式は、材質の断面を通して流れる局所的な熱が、局所的な温度勾配に比例することを示す。ここで、 $P(x)$  は、座標  $x$  において、断面を通して流れる熱、 $A$  はロッドの断面積、 $\Delta T(x)/\Delta x$  は座標  $x$  における温度勾配である。

### 実験

デジタル表示器を直流電源 (AC アダプター) に接続し、Rod #1 を校正せよ。4リットル (ボトル2本分) の水を容器に入れ、熱交換器を完全に水に浸して蓋を閉じよ。

**B.1** テーブル上に置いたときの Rod #1 の初期温度を解答用紙に書け。 0.1pt

Rod #1 からデジタル表示器のケーブルを外せ。断熱用のキャップを取り除き、熱浴の水容器の蓋のオスネジに Rod #1 のメスネジをねじ込んで取り付けよ。その後、Figure 5 に示されているように、デジタル表示器にケーブルを再接続せよ。ねじ込む際にトルクをかけ過ぎないように注意すること。



Figure 5

## Experiment



# Q2-7

Japanese (Japan)

- B.2** ヒーターに電力を供給して電力を測定するための回路を描け。回路には次のものが必要である：9Vの電源、ヒーター（既にロッドに接続されている）、電圧計、電流計および配線。配線を、回路を開いたり閉じたりするスイッチとして用いて良い。 0.5pt

熱伝導度は、ロッドの一端を水の熱浴と同じほぼ一定の温度に保ちながら、もう一端に熱を供給することで測定する。

8つ全ての温度センサーが定常状態に近くなることを目指す。セクション B2 で描いた回路を接続し、ヒーターに電力を供給せよ。

- B.3** ヒーターに供給される電力  $P$  を計算する適切な測定をおこない、解答用紙に書き下せ。 0.1pt

電力を供給しながら 15 分待て。（この時間を利用して実験の計画を立てよ。）

- B.4** 約 15 分、約 17.5 分、約 20 分における 8 つ全ての温度センサーでの測定温度を解答用紙の表に書け。 0.5pt

- B.5** グラフ用紙の一つに、3 つの測定時間における温度のグラフを、それぞれ場所の関数として描け。これらのグラフはパート D でも用いられる。 1.0pt

- B.6** 時間約 17.5 分でのデータを用い、グラフから銅の熱伝導度  $\kappa_0$  を求めよ。ここでは、熱の逃げについては考えなくて良い。時間 17.5 分でのロッドの温度変化の平均的な割合  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$  を見積もれ。 0.5pt

- B.7** 実際の  $\kappa$  の値に比べて、 $\kappa_0$  の値は、高い/低い/等しい のどれが期待されるか、正しいものを丸で囲め。 0.3pt

### Part C : 銅の熱損失と熱容量の見積もり (4.0 points)

#### 理論

熱容量  $C$  は次のいずれかの式で定義される：

$$\Delta Q = C\Delta T, \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \left( \frac{\Delta T}{\Delta t} \right). \quad (3)$$

ここで、 $\Delta Q/\Delta t$  は、物質に伝えられる単位時間あたりの正味の熱であり、 $\Delta T/\Delta t$  は温度の変化率である。比熱  $c_p$  は単位質量あたりの熱容量である。銅ロッドの質量は 0.58 kg とせよ。

#### 実験

ヒーターの電源を切れ。回路を取り外し、ねじをゆるめて Rod # 1 をテーブル上に置け。先の実験で外した、ロッドの端面を断熱するためのキャップをロッドに再び取り付けよ。ヒーター回路を再接続し、ヒーター電

## Experiment



# Q2-8

Japanese (Japan)

源はオフにしたままで、ロッドをデジタル表示器に再接続せよ。

**注意:** この Part では、温度変化の様子を確認せずにヒーターを長時間つけたままにはしないこと。

一連の冷却、加熱、再冷却の過程を利用して、物質における熱の逃げと熱容量の両方を求めることができる。加熱の段階では、平均温度を約  $2.5^{\circ}\text{C}$  変化させよ。この段階で必要な精度は、全体として 10-15 分かかると一連の冷却-加熱-再冷却の過程で得られる。

ここでは、Part B においてほぼ定常状態となった際の平均温度付近で実験を行うことを目指す。

ロッドに蓄えられる全ての熱的なエネルギーを説明するために、ロッドの平均温度の変化を追いたい。ロッドの中心の温度は、平均温度の良い近似となる。

<b>C.1</b>	平均温度を求めるため、一連の冷却-加熱-冷却を行って Table C1 に測定値を記録せよ。	1.0pt
------------	--	-------

<b>C.2</b>	グラフ用紙に、平均温度を時間に対してプロットせよ。	1.0pt
------------	---------------------------	-------

<b>C.3</b>	グラフを利用して、Part B の平均温度付近での比熱 $c_p$ と単位時間あたりの熱の逃げ $P_{\text{loss}}$ を計算せよ。図と式を用いて、計算した方法を説明せよ。	1.0pt
------------	--	-------

Part B で求めた熱伝導度の精度を向上させるために、考慮すべきメカニズムが主に 2 つある。

- 断熱材を通して動径方向に熱が逃げている。
- 測定時に系が定常状態に達していなかった。

一次の近似では、これらの機構に起因する、ロッドに沿った熱流の単位長さあたりの変化  $\Delta P(x)/\Delta x$  は一定としてよい。

<b>C.4</b>	両方のメカニズムを考慮して、Part B で得た熱伝導度に一次の補正を入れた式を書き下せ。補正された熱伝導度 $\kappa_{\text{Copper}}$ を、Part B と Part C で出てきた $\kappa_0, P, c_p, m, P_{\text{loss}}, \frac{\Delta T}{\Delta t}$ で表し、その値も計算せよ。	1.0pt
------------	---	-------

### Part D: 真鍮 (brass) とアルミニウム (aluminum) の熱伝導度 (1.0 points)

熱的に絶縁された Rod #2 をデジタル表示器に接続し、このロッドの温度センサーの校正を、パート B の最初に示されているようにおこなえ。

<b>D.1</b>	テーブル上に設置したときの Rod #2 の初期温度を解答用紙に書け。	0.1pt
------------	-------------------------------------	-------

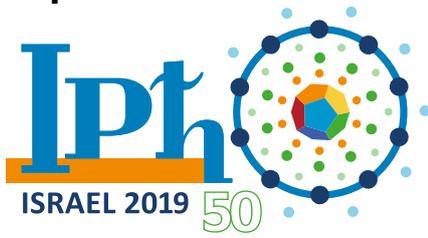
Rod #2 からデジタル表示器のケーブルを外せ。Figure 5 のように熱浴の水容器の蓋のオスネジにロッド 2 のメスネジをねじ込んで取り付けよ。その後、デジタル表示器にケーブルを再接続せよ。

Part B で用いた手順を繰り返す、加熱しながら定常状態に近い状態とせよ。

測定を始める前にヒーターには少なくとも **15 分間** 電力を供給せよ。

このパートで要求されている精度では、ロッドが定常状態にあると仮定して良い。加えて、ロッドに沿った単位長さあたりの熱の逃げは一定であると仮定して良い。

<b>D.2</b>	Rod #2 の 8 つ全ての温度センサーの温度を解答用紙に書け。さらに、各セクションにおける温度勾配 $\Delta T/\Delta x$ を書け。	0.2pt
------------	--	-------



1 次の近似としては，問題 C.4 での仮定と同じ仮定を用いて良い．つまり  $\Delta P(x)/\Delta x$  は一定として良い．

- D.3** これまでの測定を用いて真鍮の熱伝導度  $\kappa_{\text{Brass}}$  とアルミニウムの熱伝導度  $\kappa_{\text{Aluminum}}$  を表し，数値的に見積もれ． 0.7pt

## Part E: ヴィーデマン-フランツの法則 (0.5 points)

ヴィーデマン-フランツの法則は，熱伝導が伝導電子に支配されている金属において，熱伝導度と電気伝導度の比が絶対温度に線形に比例すると主張する．さらに，この関係における傾き  $L = \frac{\kappa}{\sigma T}$  (ローレンツ係数と呼ばれる) がほとんどの金属で同じであり，自然界の普遍定数で書けることも主張する．現実には，この法則は室温の金属に対して約 10% の精度で成り立つ．

- E.1** Table E1 に，熱伝導度と電気伝導度 ( $\kappa, \sigma$ ) について実験で得られた結果を書け．熱伝導度が一次までの近似では温度に依存しないことを仮定し，それぞれの物質に対して  $L$  の値を計算して同じ table E1 に書け． 0.5pt







**B.2** (0.5 pt)

**B.3** (0.1 pt)

$P =$

**B.4** (0.5 pt)

時間	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$

**B.5** (1.0 pt)

(末尾にある) 追加のグラフ用紙に, 温度を場所の関数として描け.



**B.6** (0.5 pt)

$$\kappa_0 =$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} =$$

**B.7** (0.3 pt)

正しい答えを丸で囲め：

$$\kappa > \kappa_0 \text{ or } \kappa < \kappa_0 \text{ or } \kappa = \kappa_0$$



## Experiment



# A2-5

Japanese (Japan)

**C.2** (1.0 pt)

(末尾にある) 追加のグラフ用紙に, 平均温度を時間の関数として描け.

**C.3** (1.0 pt)

表式:

$$c_p =$$

$$P_{loss} =$$

Value:

$$c_p =$$

$$P_{loss} =$$

**C.4** (1.0 pt)

表式:

$$\kappa_{copper} =$$

値:

$$\kappa_{copper} =$$

### Part D: 真鍮とアルミニウムの熱伝導度の測定 (1.0 points)

**D.1** (0.1 pt)

Rod #2 :  $T =$

# Experiment



# A2-6

Japanese (Japan)

## D.2 (0.2 pt)

温度を読み取った時間：

$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$

$\Delta T_{Copper-1}/\Delta x$	$\Delta T_{Brass}/\Delta x$	$\Delta T_{Aluminum}/\Delta x$	$\Delta T_{Copper-2}/\Delta x$

## D.3 (0.7 pt)

表式：

$$\kappa_{Aluminum} =$$

$$\kappa_{Brass} =$$

値：

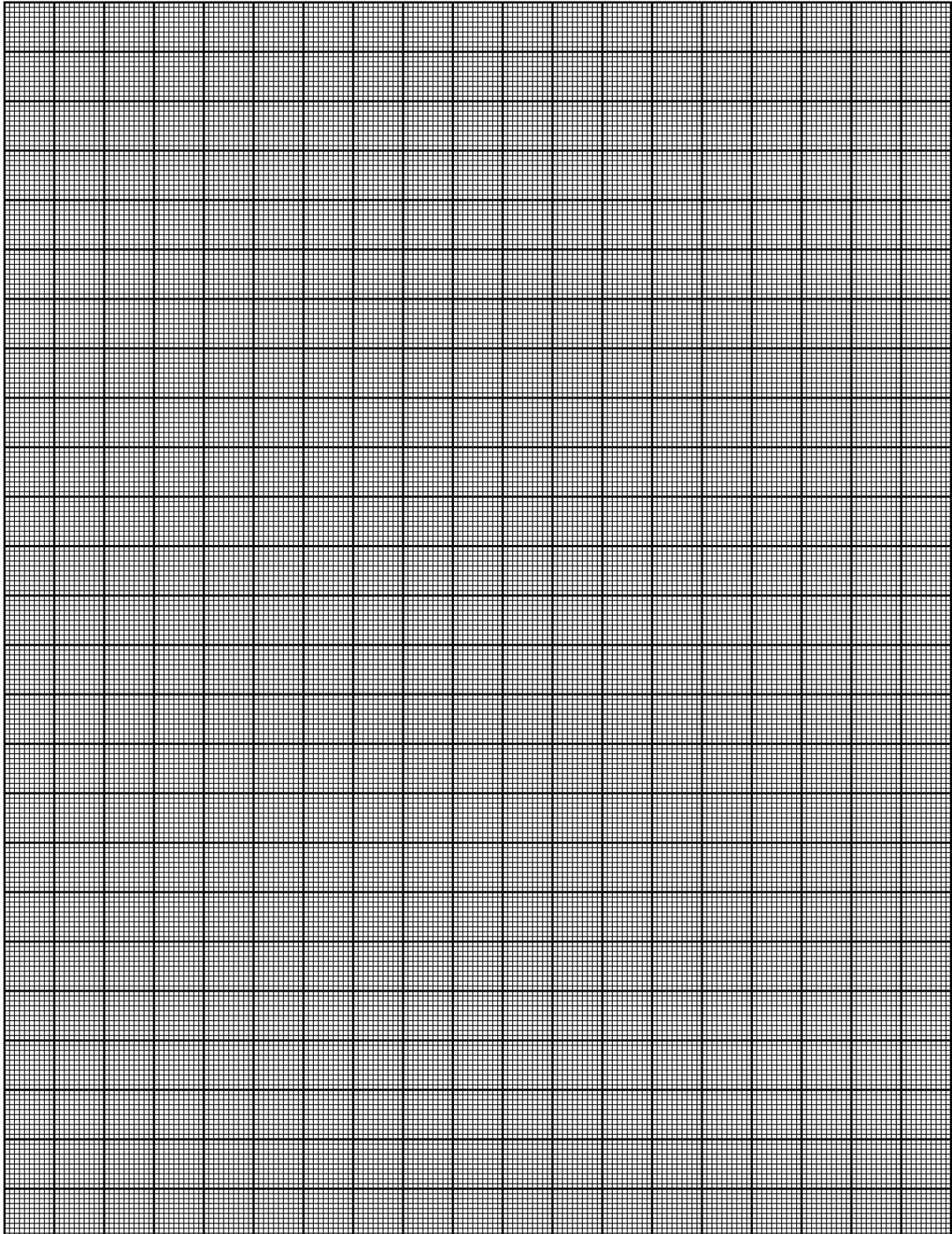
$$\kappa_{Aluminum} =$$

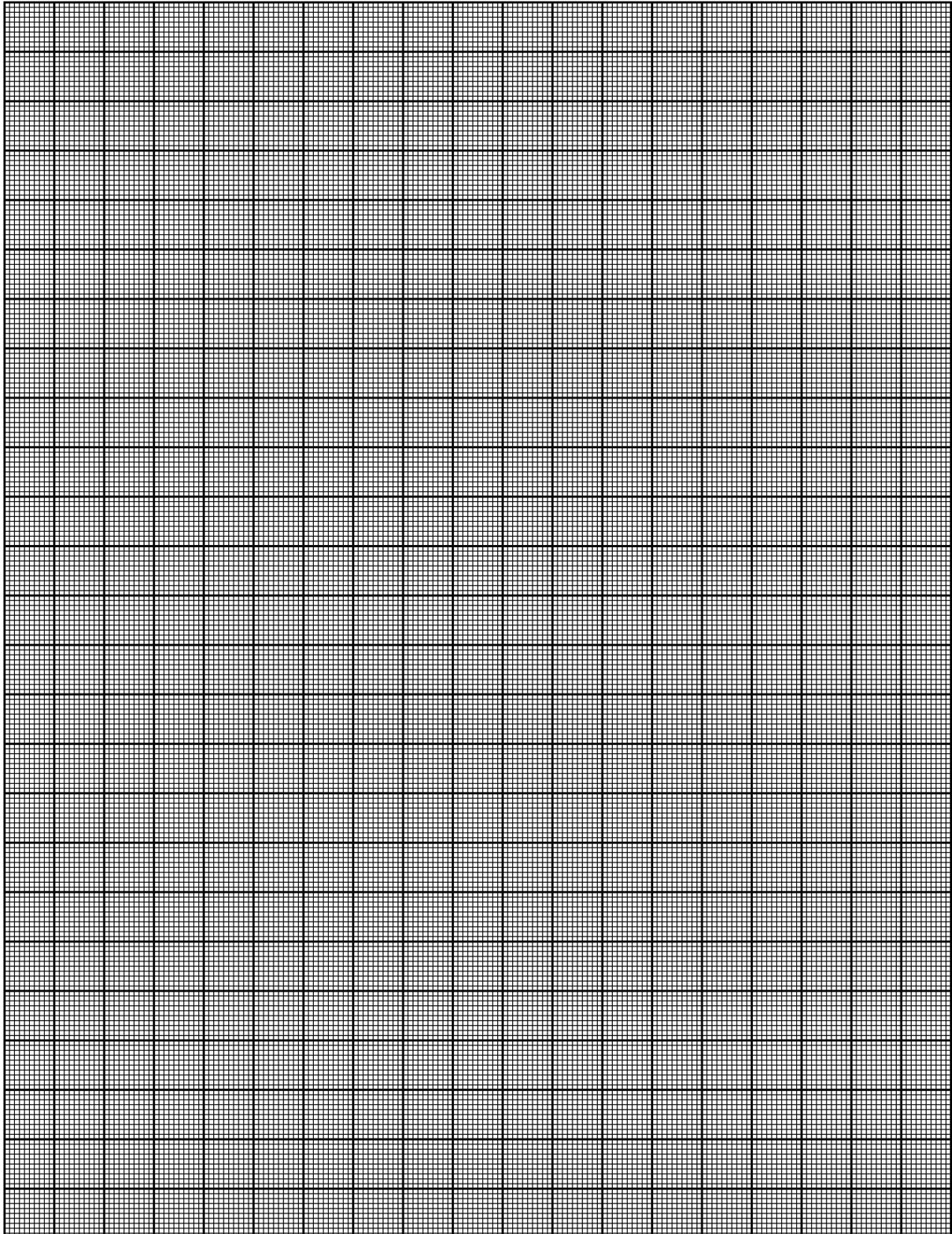
$$\kappa_{Brass} =$$

## Part E: ヴィーデマン-フランツの法則 (0.5 points)

### E.1 (0.5 pt)

	銅	アルミニウム	真鍮
電気伝導度			
熱伝導度			
ローレンツ数			

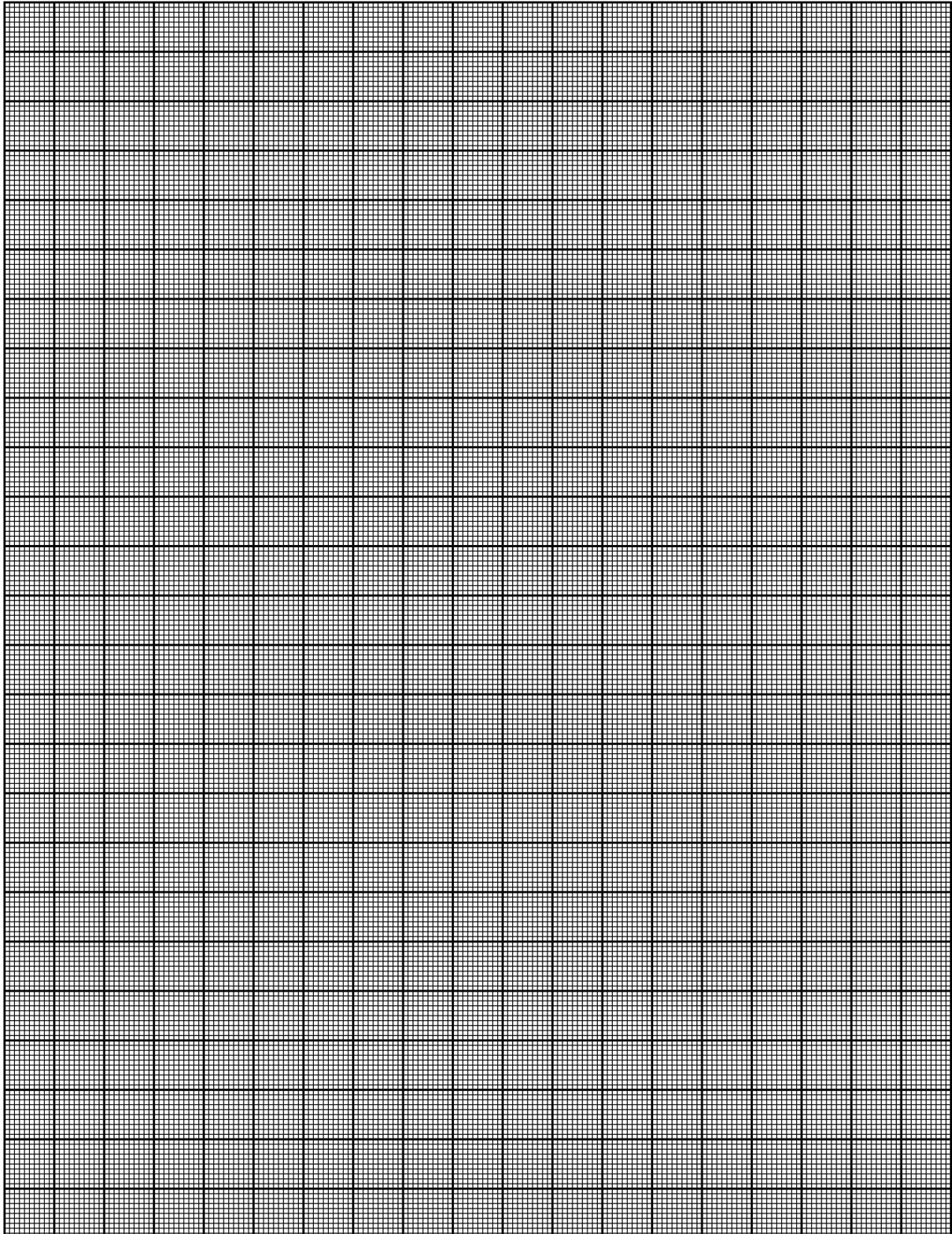




Experiment



**A2-9**  
Japanese (Japan)



Experiment



# A2-10

Japanese (Japan)

