

一般的注意事項: 実験試験

実験試験は5時間で、合計20点満点である。

試験の開始と終了は試験監督が合図する。試験開始の合図の前に問題の入った封筒やフォルダーを開けないこと。経過時間のアナウンスが、1時間ごと、および終了15分前にある。

試験中

- ペンまたはボールペンを使用すること。鉛筆で図やグラフなどの下書きをしてもよいが、コントラストよく明瞭にスキャンされるように、最終的な答えはペンで輪郭をなぞる、鉛筆で特に濃くはっきりと書くなどの注意をすること。

- Aと書かれた解答用紙は、最終的な解答を書き、グラフを描くためのものである。問題文の指示に従って、必要な観測結果を適切な表やボックスに書き、対応するグラフを描くこと。Wと書かれた白紙のワーキングシートは、詳細な作業のためのものである。解答には必ず問題番号を記入し、その問題のワーキングシートを使用すること(ヘッダーの問題番号を確認せよ)。シートに採点されたくないことが消し残っているときはその部分にバツをつけること。すべてのページの表側だけを使うこと、また、枠外には何も書かないこと。

- 白紙の用紙が足りない場合は、試験監督に申し出ること。受け取った用紙のヘッダーに、国番号、学生番号(ワーキングシートからコピーせよ)、ページ番号を記入すること。

- 解答はできるだけ簡潔に。可能な限り、方程式、論理演算子、考え方を表すスケッチなどを使って、どう考えたかを説明すること。長い文章は避けること。

- 明示的に要求されない限り、誤差の計算は必要ない。ただし、数値の答えが求められたときには、適切な有効桁数に注意すること。また、特に指示がない限り、データ点の数や測定の繰り返しの回数も適切に決めること。

- それより前にある問題を解いていなくても、後の問題は解けることがある。

- 試験中はすべて監視され記録される。許可なく机を離れることはできない。トイレやその他の必要(シートやペン、水やお菓子の追加)がある場合は、試験監督に知らせること。

試験終了時に

- 試験の終了が告げられたら、直ちに筆記を中止すること。

- すべての問題について、対応するシートを次の順序で揃えておくこと: 上から、カバーシート、解答用紙(A)、ワーキングシート(W)、空白または余分なシート。これらのシートは、試験監督によってスキャンされ、サーバーにアップロードされる。

- 一つの問題に属するすべてのシートを同じ封筒またはフォルダーに入れる。一般的注意事項(G)と問題シート(Q)は、封筒またはフォルダーに入れずに机の上に置いておくこと。

- 試験監督が許可したら、試験会場を離れることができる。試験場から何も持ち出すことはできない。

シミュレーションプログラム

Exp1.exe, Exp2.exe が問題 Q1, Q2のシミュレーションプログラム。

PCにコピーし実行して authorization code 8675309を入力するとインストールが確認できる。インストールが確認できたら一度 Control+C で実行を終了し、再度実行して、問題文にあるauthorization code 12345678.888 を入力するとシミュレーションが始まる。(PCは「実行してよいか」聞いてくるが実行してよい: このプログラムにはウイルスはない。)

ただし、これらはOSがWindowsのPC用 (Exp1.exeの動作にはWindows 11が必要)。

OSがWindowsでない場合のシミュレーションプログラムはIPhO2022のホームページでExam Problems -> Experiment Exam からダウンロードできる

(<https://ipho2022.com/exam-problems/experiment-exam/>)。

以下は試験時に与えられたガイド

Software of IPhO2022

July 11, 2022

There are two Windows PC files: Exp1.exe and Exp2.exe

The programs can be installed on a PC and then tested by using the test authorization code 8675309

You might be told that you can't run because the source is not known. Try opening with right-click instead of left, or vice-versa.

You could get a message saying that the code is not trusted, and asking if you are sure about running. Though you should always check code with a virus scanner before running, we think the code is clean.

If there is a problem upon running, please attempt the following:

Restart your computer

Make sure that your computer is up to date

Place a half-filled glass of water on the table to the right of the computer

Okay, that last step won't do anything. Instead, if it still doesn't run, then immediately send a screenshot of the error message to iphosecretary@gmail.com.

The programs have both been demonstrated to run on a variety of PCs

If it does do the installations test successfully, then thanks!

日本語訳

(試験時の案内です。2022年7月11日)

ここに2つのWindows PC用ファイルがある。 Exp1.exeとExp2.exeである。

これらのプログラムをPCにインストールし、テスト用認証コード8675309を使用してテストすることができる。

ソースが不明なため実行できないと言われることがある。左クリックではなく右クリックで開く、またはその逆を試してみる。

コード（プログラム）が信頼できないことを示すメッセージと、実行してもよいかどうかを尋ねるメッセージが表示されることがある。実行する前に必ずウイルススキャナーでコードをチェックする必要があるが、私たちはこのコードがクリーンであると信じている。

実行時に問題がある場合は、以下を試すこと。

コンピュータを再起動する。

コンピュータが最新の状態であることを確認する。

テーブルの上でコンピュータの右側に水を半分入れたグラスを置く。

最後のステップは、実行の役に立ちませんが、実行されない場合は、すぐにエラーメッセージのスクリーンショットを iphosecretary@gmail.com に送信すること。

これらのプログラムは、さまざまなPCで動作することが実証されている。

インストールテストに成功したら、おめでとう。ありがとうございました。

— — — — —

追記： 他のOSを用いてのプログラムは、IPhO2022のホームページより利用可能です。

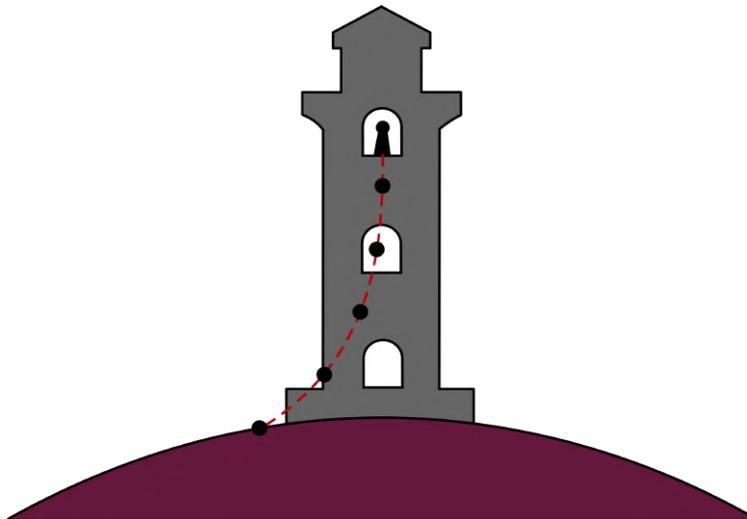
惑星 (12 points)

あなたは、どうやってそこに来たのか分からないまま、異星人の惑星にいることに気づきました。あなたはまず、自分がいる惑星についてもっと知ろうとします。ガリレオが玉を落とす実験をしたことを思い出し、それにヒントを得て、高さ $H = 2000\text{m}$ の完全に垂直な塔を建てます。塔ができ、あなたは、塔の任意の高さ h からボールを落とすことができます (ボールが放される直前のボールの底面と地面との間で測定)。ただし、材料に制限があるため、半径 $5\text{cm} \leq r \leq 50\text{cm}$ 、密度 $0.1\text{g/cm}^3 \leq \rho \leq 10\text{g/cm}^3$ のボールしか落とせません。

ボールを落とす時は、ボールを静止状態から静かに放し、ボールの落下時間 t と、ボールを落とした地点から落下位置までの水平距離 s を測定することができる。

実験を始める前に、惑星について次のようなことが分かっている。

- 太陽の動きから、自分が惑星の赤道上にいる。
- 惑星には大気があるが、空気の密度が小さいので、それによる浮力を無視することができる。
- 地面の温度は $T_0 = 20^\circ\text{C}$ である。
- 赤道に沿って吹いている風は、タワーの高さまでの範囲では高さに関わらず一様である。タワーの影響による風速の変化は無視してよい。



アーティストによる問題の誇張表現。

シミュレーションソフトの説明

このコマンドライン・プログラムは、ボールを落とす高さ h 、半径 r 、密度 ρ を与えると、落下時間 t とタワーの根本からのずれた距離 s の計測をシミュレートする。入力パラメータのすべての値は、対応するプロンプトの後にキーボードから入力し、**Enter** キーを押すことで有効になる。

プログラムをスタートさせるために、プロンプトが表示されたら、次の認証キーを使用しなさい。

Enter Valid Authorization Key: 12345678.888

無効な値を入力すると、プログラムがテストモードになり、プログラムを再起動する必要がある。

プログラムでの1回のシミュレーションサイクルの典型的な出力は次のようになる。

Experiment



Q1-2

Japanese (Japan)

```
0 < h (m) < 2000 | h (m): 90
5 < r (cm) < 50 | r (cm): 13
0.1 < rho (g/cm^3) < 10.0 | rho (g/cm^3): 2
...
t (s) = 3.5, s (m) = 0.1
=====
0 < h (m) < 2000 | h (m):_
```

まず、高さ h (0~2000 の数値) を m 単位で、次にボールの半径 r (5~50 の数値) を cm 単位で、最後にボールの密度 ρ (0.1~10 の数値) を g/cm^3 単位で入力する。各入力 Enter キーで確定される。するとプログラムは t を s 単位で、 s を m 単位で出力する。

その後、プログラムはループして、高さの入力に戻る。

実験の範囲外の値を入力すると、エラーメッセージが表示される。

Value Out Of Bounds!

その後、再びその値の入力用プロンプトに戻る。

入力された高さ h は 1m 単位、 r は 1cm 単位、そして ρ は 0.01g/cm^3 単位に四捨五入される。(これ以上細かい数値を入力しても無駄である)。

実験結果には、実生活での限られた精度をシミュレートしているために、ランダムな誤差を伴う。誤差の大きさは、出力のゆらぎを観察することで知ることができる。

プログラムを終了するときは、いつでも **Ctrl+C** キーを押してください。

物理定数と有効な関係式のリスト

万有引力定数 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

理想気体の気体定数 $R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$,

$0^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K}$.

密度 ρ_a の空気中において、断面積 A 、速度 v のボールのへの空気抵抗は、以下のように表せる。

$$F_d = 0.24A\rho_a v^2.$$

断熱的な大気は、次の式で与えられる密度プロファイルをもつ。

$$\rho_a(h) = \rho_{a0} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\mu g h}{RT_0}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = \rho_{a0} \left(1 - \frac{h}{H_0}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}},$$

$T = 0\text{K}$ となる大気圏最上部まで有効である。ここで、 γ は比熱比、 μ は空気 (すなわち、惑星の大気) のモル質量、 g は重力加速度の大きさ、 h は地面からの高さである。

パートA．惑星の性質 (3.0点)

- | | | |
|-----|---|-------|
| A.1 | 適切な測定を行い、与えられたスペースに適切なグラフを描くことによって、惑星での重力加速度の大きさ g を決定せよ。結果の不確かさを分析せよ。 | 2.0pt |
| A.2 | 赤道に沿って塔から離れていくと、 $L = 230\text{km}$ 離れた所まで塔が見える (L はあなたと塔の頂上との距離である)。この惑星の半径 R はいくらか？ 身長は塔の高さより十分小さいと仮定してよい。 | 0.5pt |
| A.3 | 惑星の質量 M を推定せよ。結果の不確かさを分析せよ。
M の推定値の精度に最も大きな影響を与える物理効果は何か？ 解答用紙の適切な効果に印をつけよ。 | 0.5pt |

パートB．大気の性質 (6.5点)

- | | | |
|-----|--|-------|
| B.1 | 適切な測定を行い、与えられたスペースに適切なグラフを描くことによって、惑星表面の風速 u を決定せよ。結果の不確かさを分析せよ。 | 2.0pt |
| B.2 | 追加データを収集するか、以前のデータを再利用して、与えられたスペースに適切なグラフを描いて、惑星表面の空気密度 ρ_{a0} を決定せよ。結果の不確かさを分析せよ。 | 1.0pt |
| B.3 | 大気が比熱比 $\gamma = 1.4$ の断熱状態であると仮定して、適切な測定を行い、与えられたスペースに適切なグラフを描くことによって、大気の厚さ H_0 を決定せよ。結果の不確かさを分析せよ。 | 3.0pt |
| B.4 | 空気のモル質量 μ と塔の根本の気圧 p_0 を決定せよ。結果の不確かさを分析せよ。 | 0.5pt |

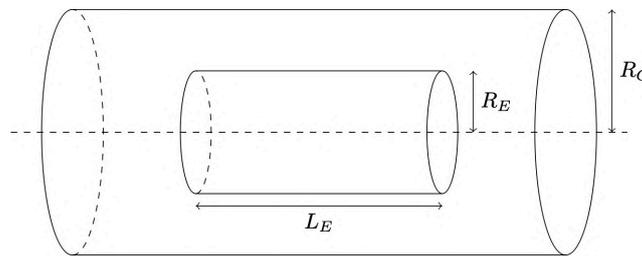
パートC．1日の長さ

- | | | |
|-----|---|-------|
| C.1 | 適切な測定を行い、与えられたスペースに適切なグラフを描くことによって、惑星での1日の長さ T_p を決定せよ。また、結果の不確かさを分析せよ。 | 2.5pt |
|-----|---|-------|

シリンダリカル（円筒型）ダイオード (8.0 pts)

実験のセットアップと課題

円筒型真空ダイオードは、同軸の円筒を2つ組み合わせたものである。半径 R_E 、長さ L_E のエミッタは電子を放出し、この電子は真空中を半径 R_C 、実効長無限大のコレクタへ移動する。コレクタは正電位 V であり、エミッタは接地されているので、電子はエミッタからコレクタに引き寄せられる。



エミッタは加熱されており、電位差によりコレクタに向かって加速される電子が常に十分に存在する。電子は真空をプラズマで満たす。プラズマの特性上、ダイオードに流せる最大電流が存在し、それはコレクタの電位とシステムの幾何学的な形状に依存している。

この問題を通して、測定は $R_C \geq 5R_E$ の範囲に限られるとすること。

L_E が R_C に比べて十分に大きいとき、ダイオードを通る最大電流は次のようになると仮定される。

$$I_\infty = GR_C^\alpha L_E^\beta V^\gamma \quad (1)$$

ここで $G = G(R_C/R_E)$ は定数ではなく、無次元の比 R_C/R_E の関数である。

L_E が R_C と同程度の大きさの場合、上記の式に補正を加える必要があり、ダイオードを流れる最大電流は次の式で与えられる。

$$I_L = I_\infty F(R_C, R_E, L_E, V) \quad (2)$$

ここで、 F は、 R_C, R_E, L_E , 及び V の全てもしくは一部を変数とする無次元の関数である。式 (1) は、式 (2) で $F = 1$ とした特殊な場合である。

この実験では、0.1 cm から最大 20.0 cm まで 0.1 cm 刻みの半径の円筒を、1.0 cm から 99.0 cm まで 0.1 cm 刻みの長さで使用することができる。コレクタに 0~2000 V の正電圧を供給できる模擬電源と、ダイオードを流れる電流を測定できる電流計が用意されている。

効率的なデータ収集のために、作業を始める前にすべての課題に目を通しておくことを勧める。

シミュレーションソフトの説明

Exp2 と名付けられたこのシミュレーションプログラムでは、さまざまな入力パラメータ（コレクタ半径 R_C 、エミッタ半径 R_E と長さ L_E 、エミッタとコレクタ間の電位差 V ）に対して最大電流 I の測定を無制限に実行することができる。入力パラメータのすべての値は、対応するプロンプト（入力を促す記号）の後にキーボードを用いて入力し、**Enter** キーを押すことによって決定される。

測定を開始するには、認証キー（authorization key）の入力を促すプロンプトに対して、次の認証キーを用いよ。

Enter Valid Authorization Key: 12345678.888

間違った値を入力すると、プログラムはテストモードに入るため、プログラムを再起動する必要がある。プログラムのシミュレーションにおける1回のサイクルでの入力の様子は次のようになる。

```
0.1 < R_C (cm) < 20.0 | R_C (cm): 18.5
0.1 < R_E (cm) < 20.0 | R_E (cm): 13.2
0.1 < L_E (cm) < 99.0 | L_E (cm): 35.3
1.0 < V_C (V) < 2000.0 | V_C (V): 207
```

```
I (A) = 1.04
```

```
=====
0.1 < R_C (cm) < 20.0 | R_C (cm):
```

最初にコレクタの半径、次にエミッタの半径、その次にエミッタの長さを、それぞれ cm の単位で入力し、最後に電位差を V 単位で入力する。それぞれの入力は **Enter** キーで確定される。

その後、プログラムはコレクタの半径を尋ねる質問に戻り、繰り返しとなる。

実験の範囲外の値を入力すると、次のエラーメッセージが表示され、

Value Out Of Bounds

間違った値を入力したパラメータの入力を促すプロンプトへ戻る。

長さはすべてミリメートル単位、電圧はすべてボルト単位で記録されており、より細かい数値を入力しても測定値は改善されない。しかし、長さには 0.5 mm、電圧には 0.5 V の不確かさがあるため、繰り返し測定すると、異なる電流値の結果が得られる可能性がある。

電流計は、有効数字 3 桁のみを表示するオートレンジ式で、A スケールと mA スケールを適宜切り替えて表示する。不確かさは、最後に表示された桁の $\pm \frac{1}{2}$ である。mA と A、どちらの単位で表示されているかに注意すること。

電流計の定格電流 40 A を超えると、電流計は焼損する。プログラムはこれを通知し、次の測定のために電流計を自動的に修理する。

再起動するためにプログラムを終了する必要がある場合には、いつでも **Ctrl+C** を押すこと。

パート A: 指数の決定 (4.5 pts)

式 (1) の指数を不確かさの解析を示して決定せよ:

A.1	変数 V の指数 γ を見つけるために使用できるデータのセットを収集せよ。与えられたスペースに適切なグラフを描け；便宜上、線形グラフ用紙と両対数グラフ用紙の両方が用意されているが、描画する必要があるのは1つのグラフだけである。得られた指数 γ の値を示し、その値の不確かさの解析を示せ。	1.5pt
-----	---	-------

A.2	変数 L_E の指数 β を見つけるために使用できるデータのセットを収集せよ。与えられたスペースに適切なグラフを描け；ひとつのグラフで十分である。得られた指数 β の値を示し、その値の不確かさの解析を示せ。	1.5pt
-----	---	-------

- A.3** 変数 R_C の指数 α を見つけるために使用できるデータのセットを収集せよ。与えられたスペースに適切なグラフを描け；ひとつのグラフで十分である。得られた指数 α の値を示し、その値の不確かさの解析を示せ。 1.5pt

パート B: 係数 G の決定 (1.0 pts)

$R_C = 10R_E$ が成立するとして未知の関数 G を求めよ：

- B.1** 追加データを収集するか、すでに収集したデータを用いて、 $R_C = 10R_E$ の条件で、 G の値を決定せよ。また、その値の不確かさの解析を示せ。 1.0pt

パート C: 無次元関数 F の決定 (2.5 pts)

R_C, R_E, L_E, V のうちどれが関数 F に影響を与えるかを実験的に決めよ。ただし、式 (2) において L_E は R_C と同程度の大きささせよ：

- C.1** 解答用紙の変数のリストで、影響の現れ方を説明せよ；例えば、 R_C が増加したとき、 F が増加するか、減少するか、それとも変わらないかを示せ。 0.5pt

- C.2** $L_E \approx R_C$ のとき、 F がひとつの変数 x の簡単な関数として記述されることが確認できる。ここで x は R_C, R_E, L_E, V の中の 2 つの変数の関数である。解答用紙にくつかの可能性がある関数 x の候補が示されている。 F の主な挙動を再現する関数をひとつ選べ。 0.5pt

- C.3** $L_E \approx R_C$ として $F(x) = A + Bx$ の形の線形関数を仮定し、実験的にパラメータ B を決定せよ。ただし、範囲は $R_C/2 \leq L_E \leq 2R_C$ に制限する。 F を線形関数と近似できる適切な x の値における F の適切なグラフを描け。不確かさの解析は不要である。 1.5pt



パートA. 惑星の性質

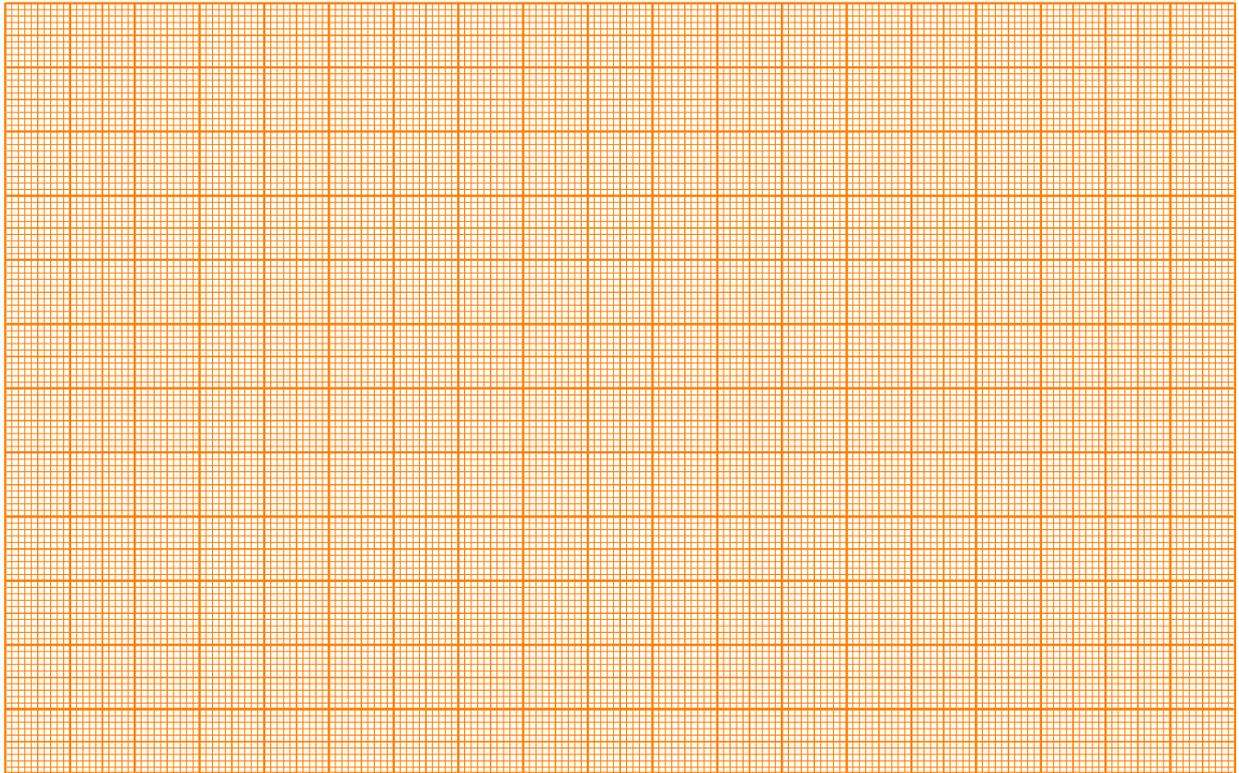
A.1 (2.0 pt)

$$g =$$

$$\Delta g =$$



A.1 (cont.)



A.2 (0.5 pt)

$R =$

A.3 (0.5 pt)

 $M =$
 $\Delta M =$

M の精度に最も大きな影響を与える効果にチェックを入れなさい。

ボールに作用する空気抵抗。	<input type="checkbox"/>
ボールに働くコリオリ力 $F_C = 2m\vec{v} \times \vec{\omega}$ 。ここで $m, \vec{v}, \vec{\omega}$ は、それぞれボールの質量と速度、惑星の角速度である。	<input type="checkbox"/>
一般相対性理論による重力の高次補正。その相対的な大きさは、惑星の重力によって光子が偏向される角度のオーダーになる。	<input type="checkbox"/>
ボールに作用する遠心力。	<input type="checkbox"/>
落下の過程で変化する地面までの距離による g の変動。	<input type="checkbox"/>

Experiment



A1-4

Japanese (Japan)

パート B. 大気の性質

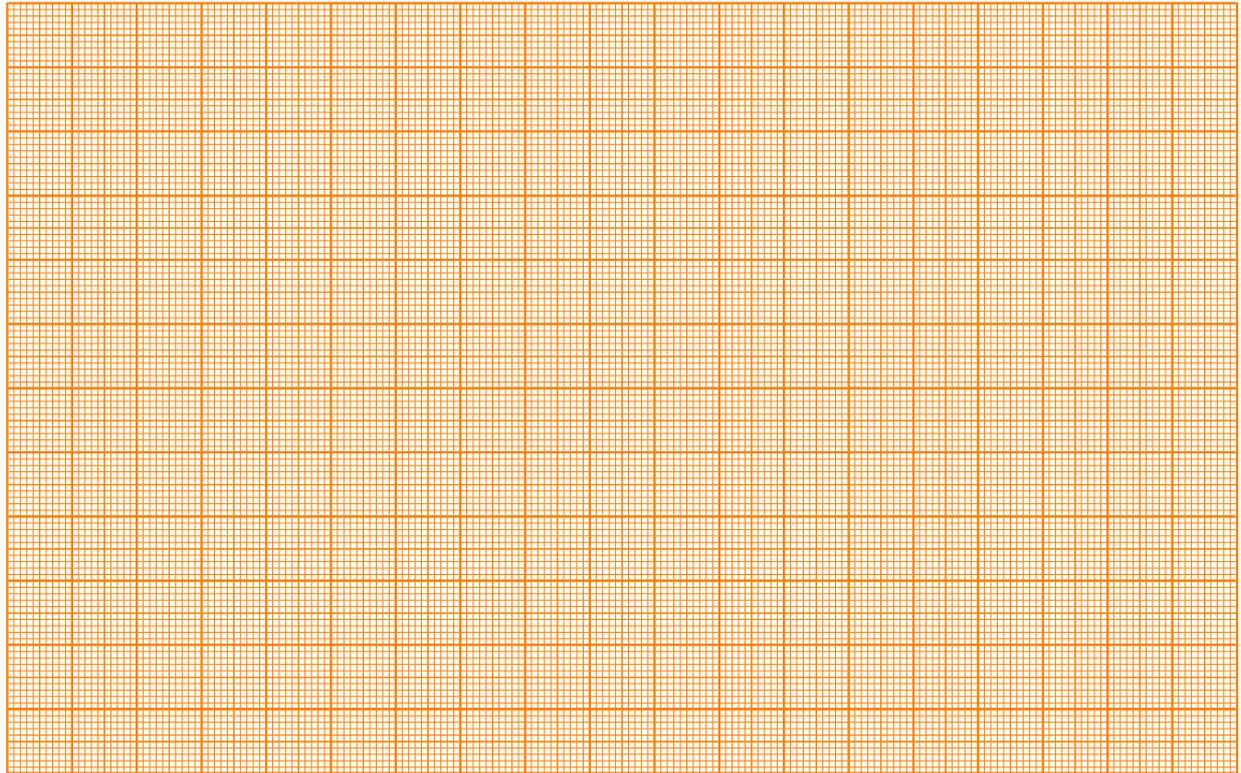
B.1 (2.0 pt)

$u =$

$\Delta u =$



B.1 (cont.)

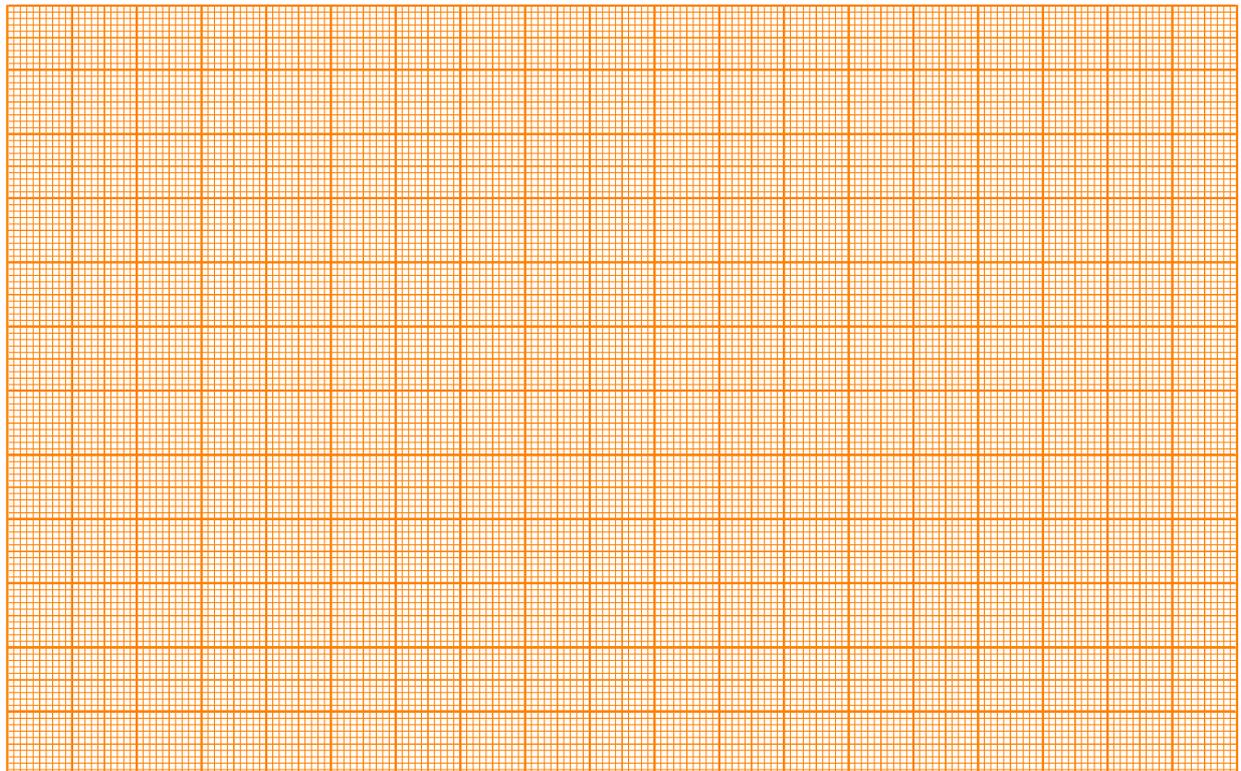




B.2 (1.0 pt)

$$\rho_{a0} =$$

$$\Delta\rho_{a0} =$$



Experiment



A1-7

Japanese (Japan)

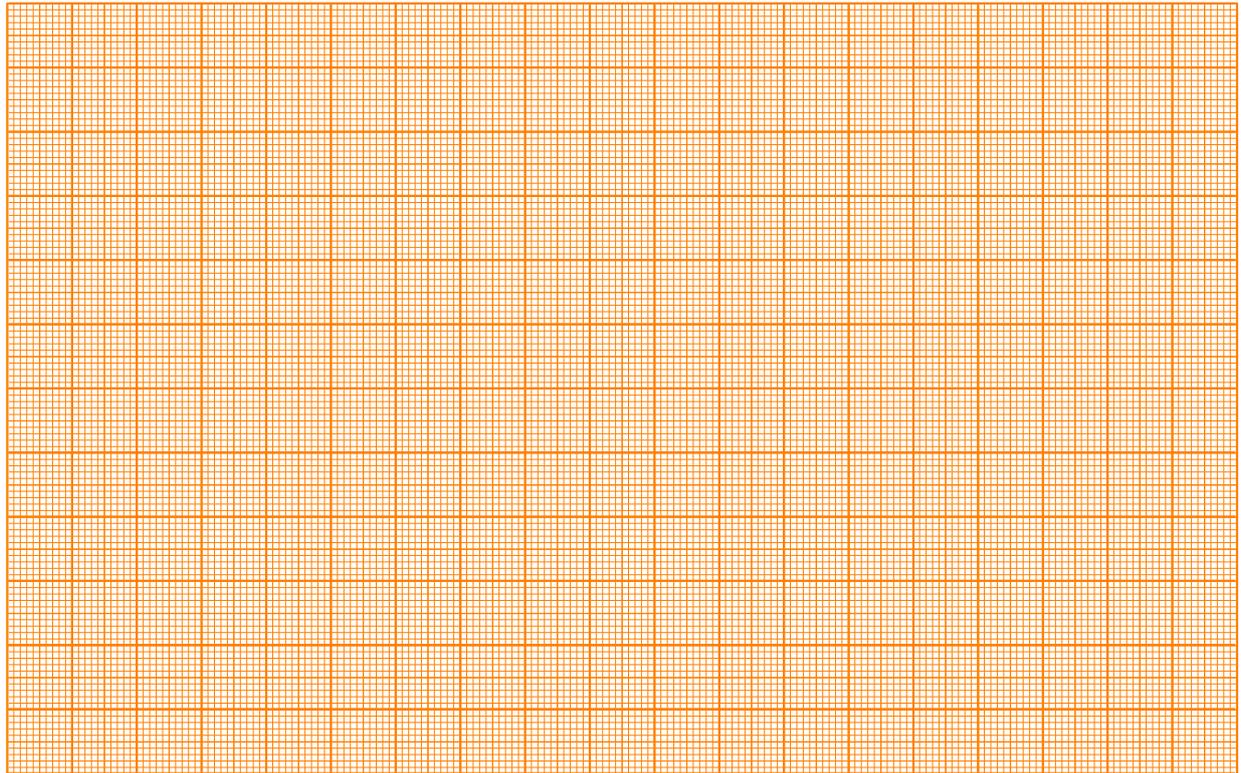
B.3 (3.0 pt)

$$H_0 =$$

$$\Delta H_0 =$$



B.3 (cont.)



B.4 (0.5 pt)

$\mu =$

$\Delta\mu =$

$p_0 =$

$\Delta p_0 =$



パート C. 惑星の1日

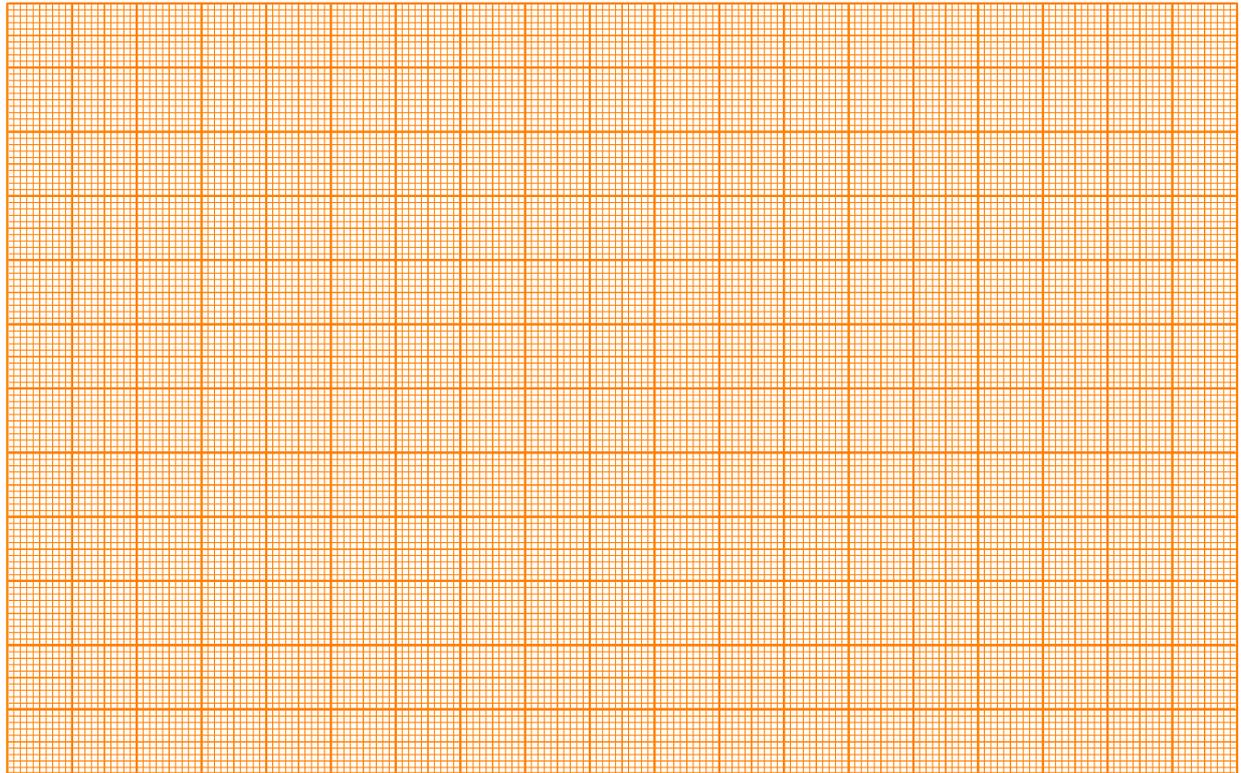
C.1 (2.5 pt)

$$T_p =$$

$$\Delta T_p =$$

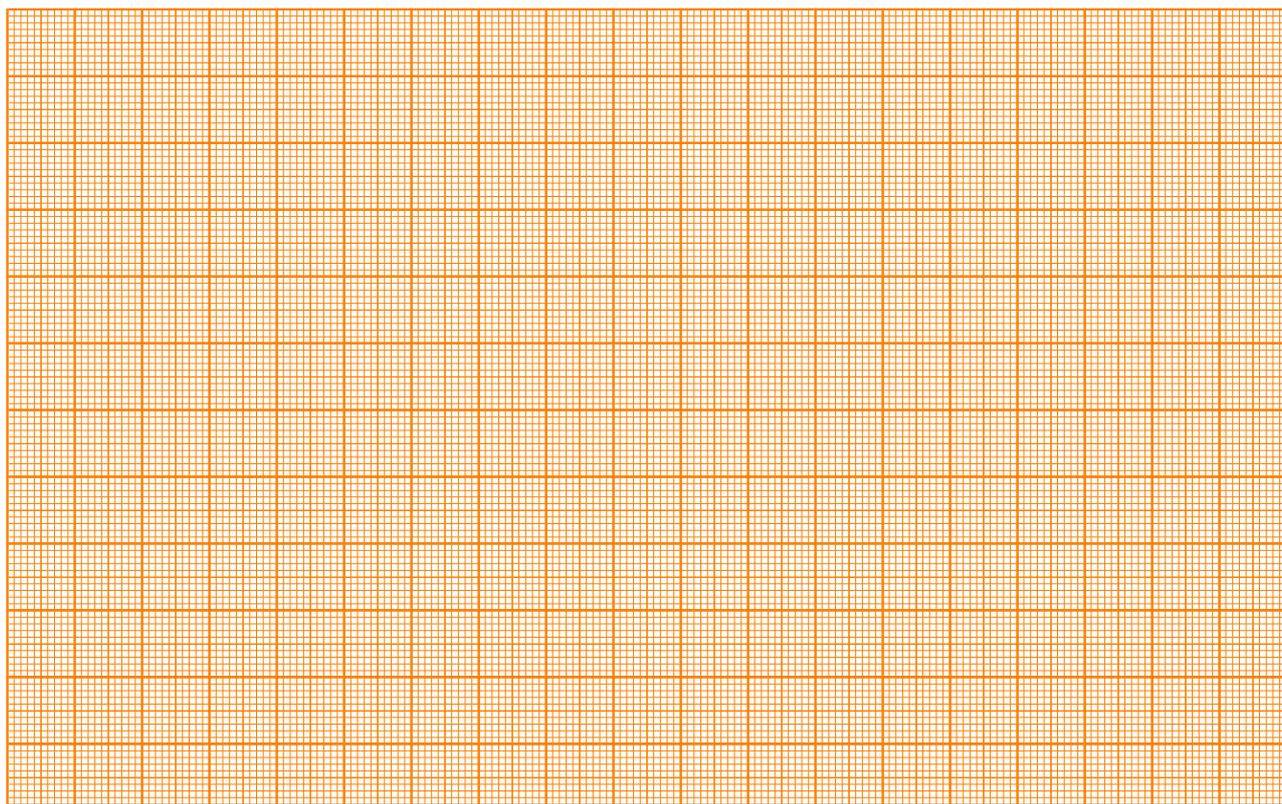
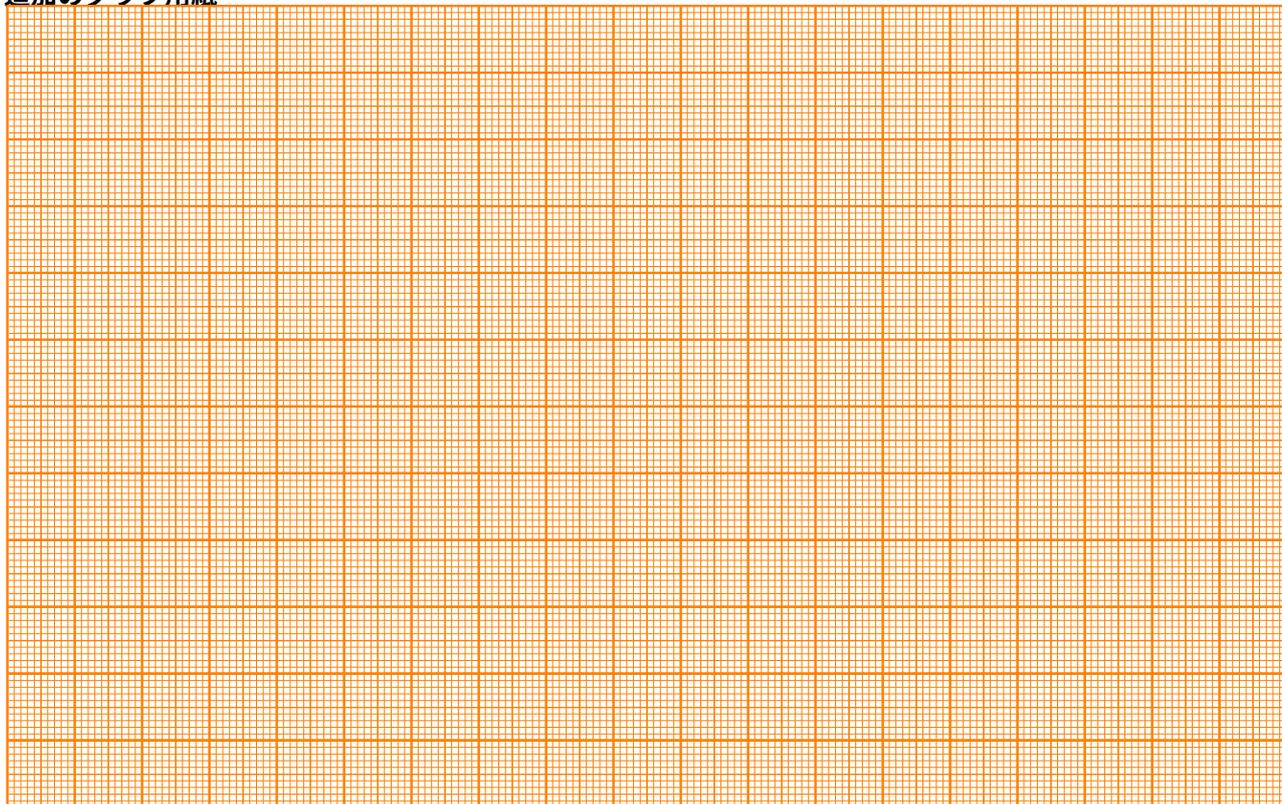


C.1 (cont.)





追加のグラフ用紙



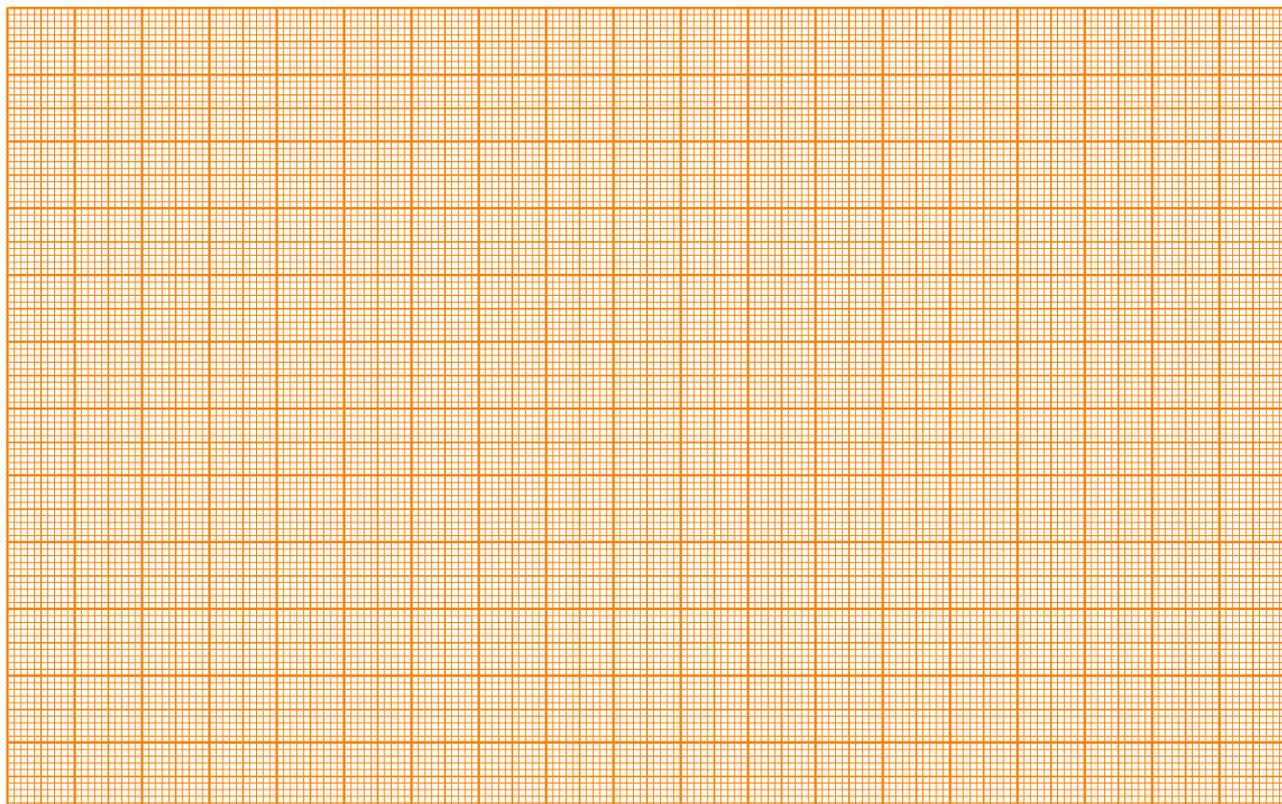
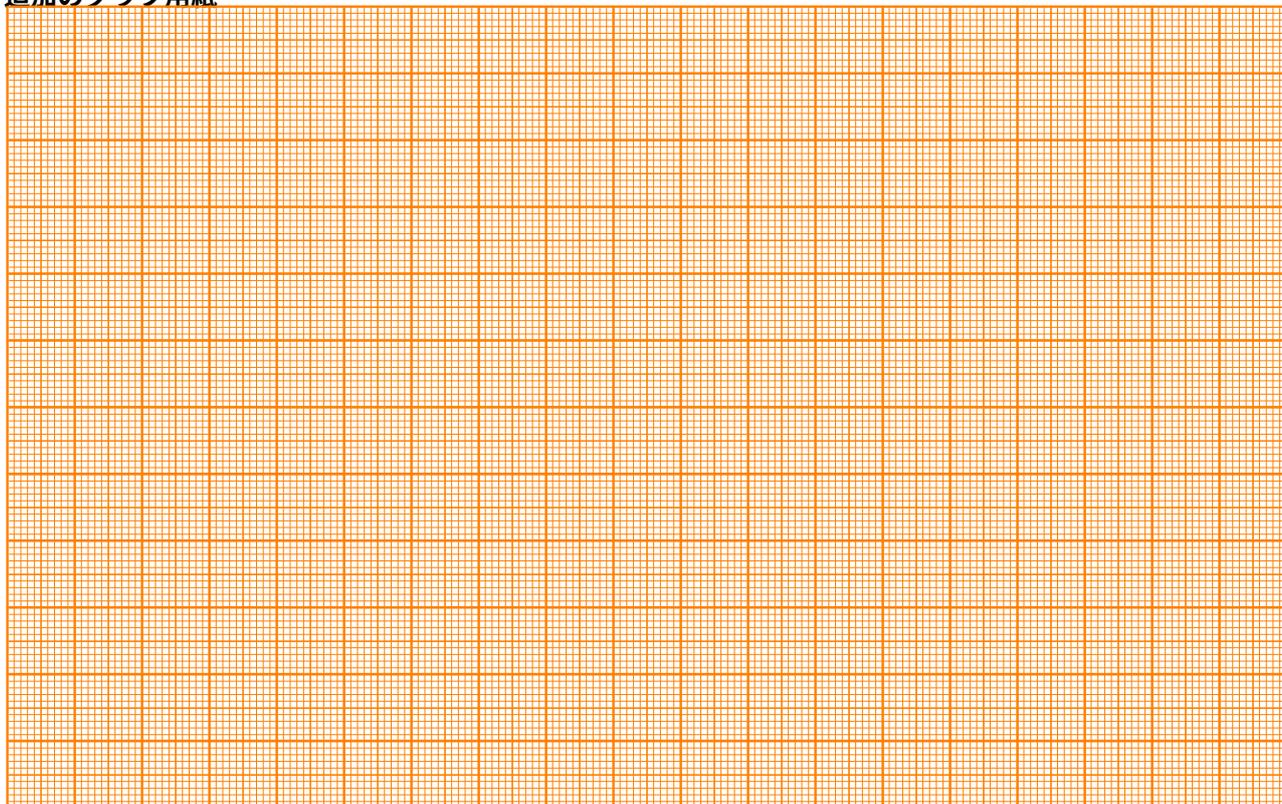
Experiment



A1-12

Japanese (Japan)

追加のグラフ用紙



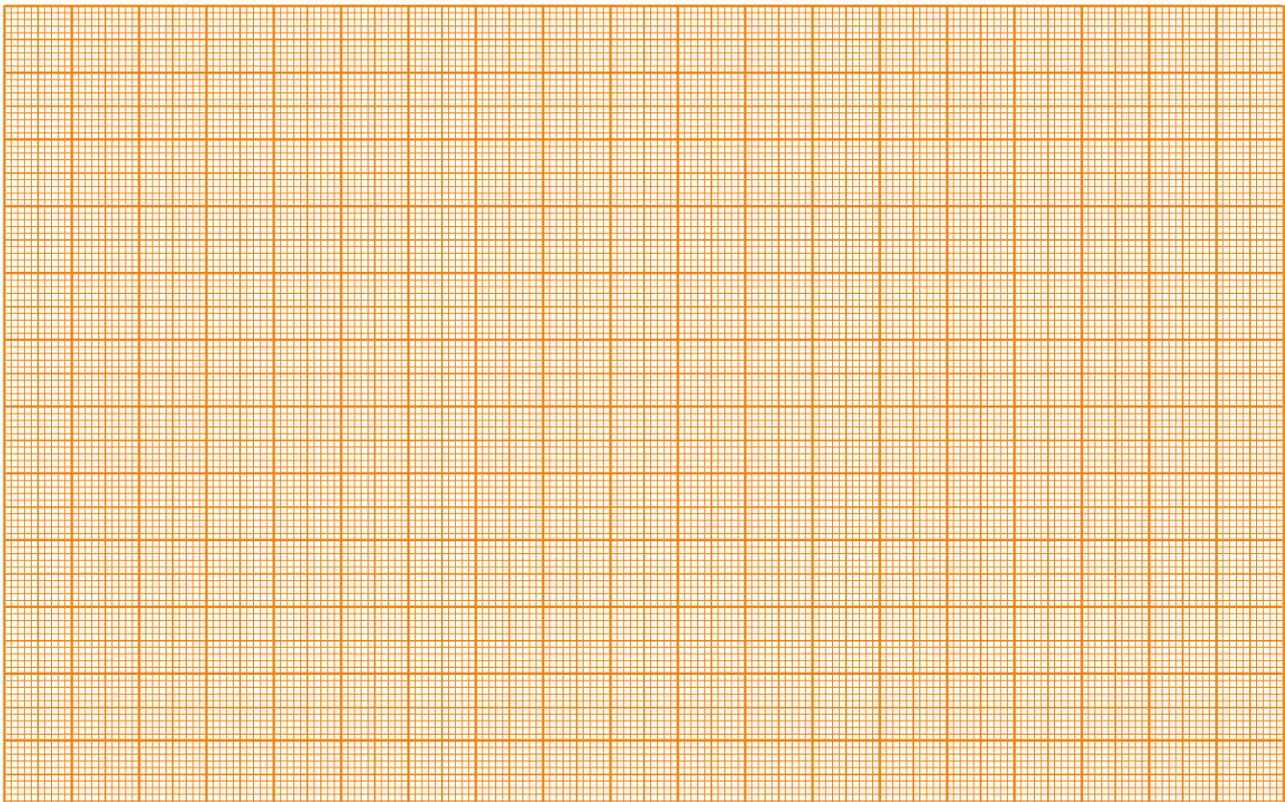
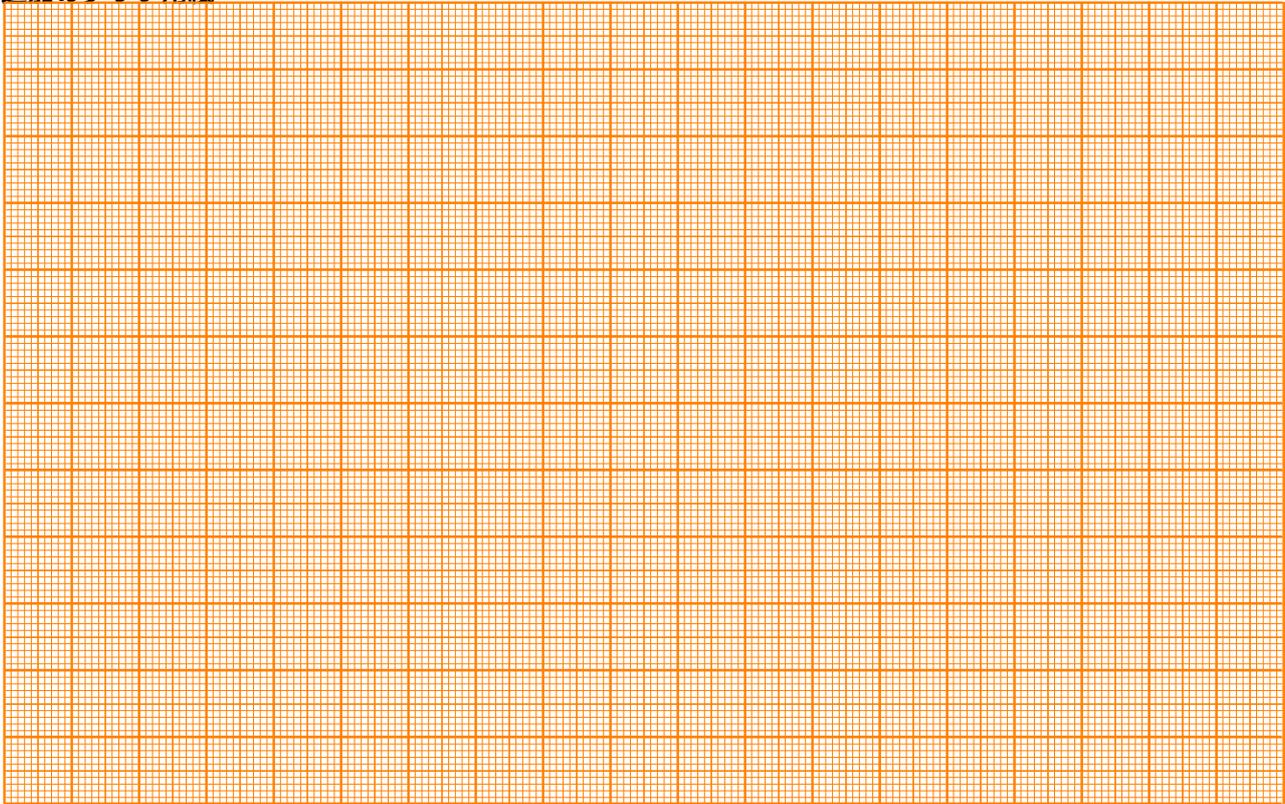
Experiment



A1-13

Japanese (Japan)

追加のグラフ用紙



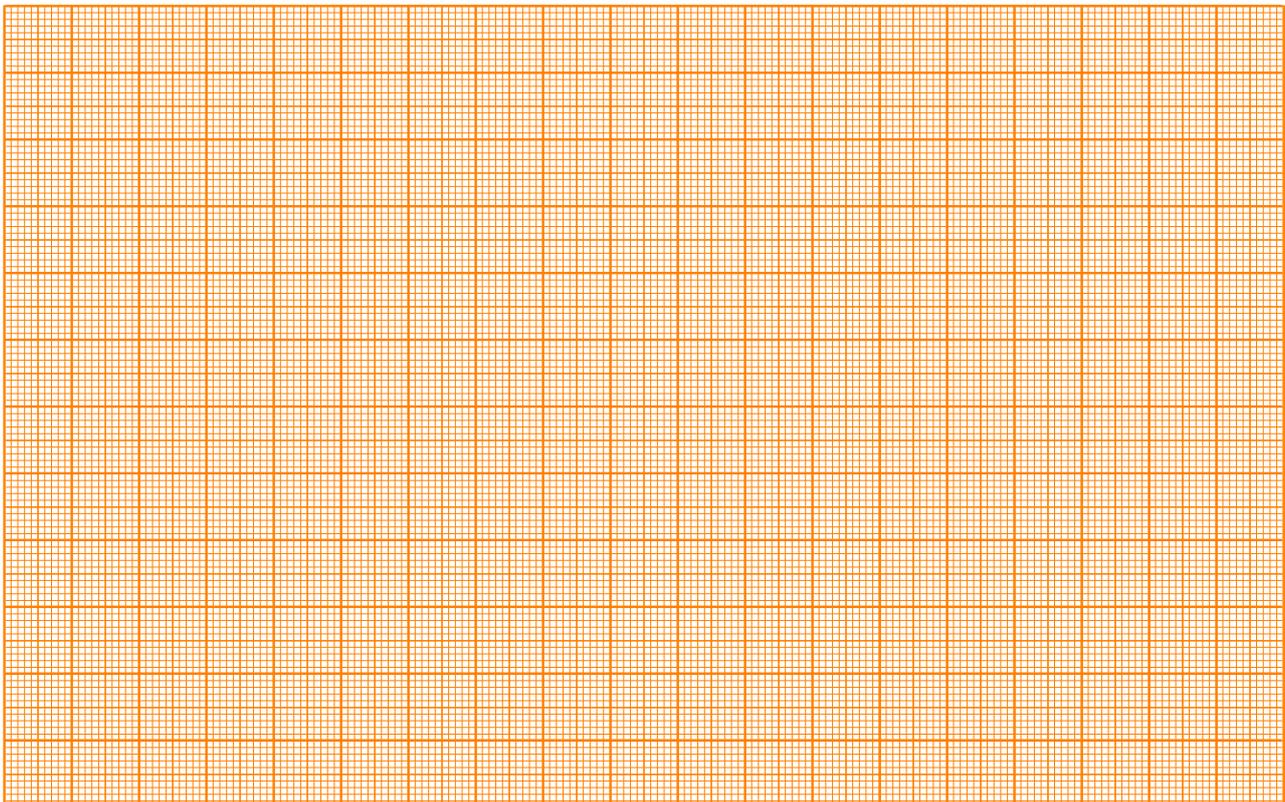
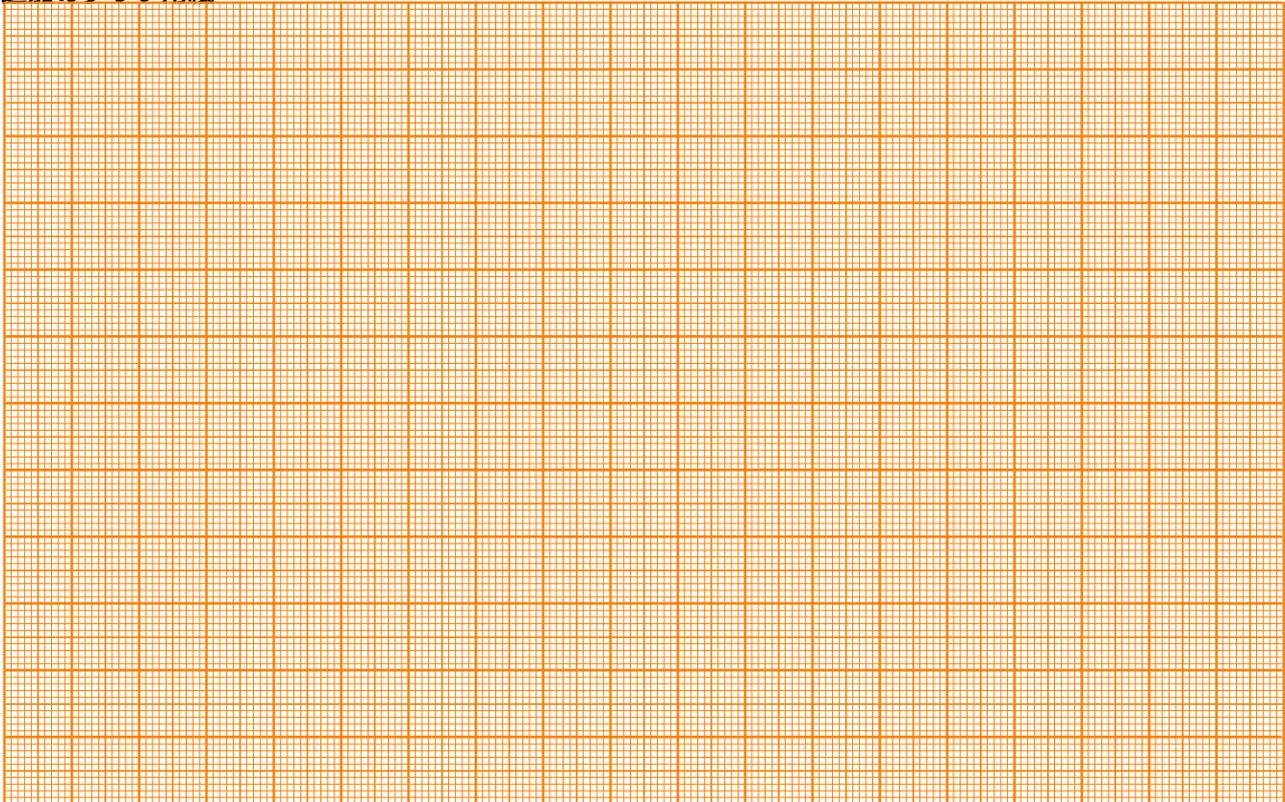
Experiment



A1-14

Japanese (Japan)

追加のグラフ用紙



Experiment



A1-15

Japanese (Japan)

Experiment



A2-1
Japanese (Japan)

シリンダリカル（円筒型）ダイオード

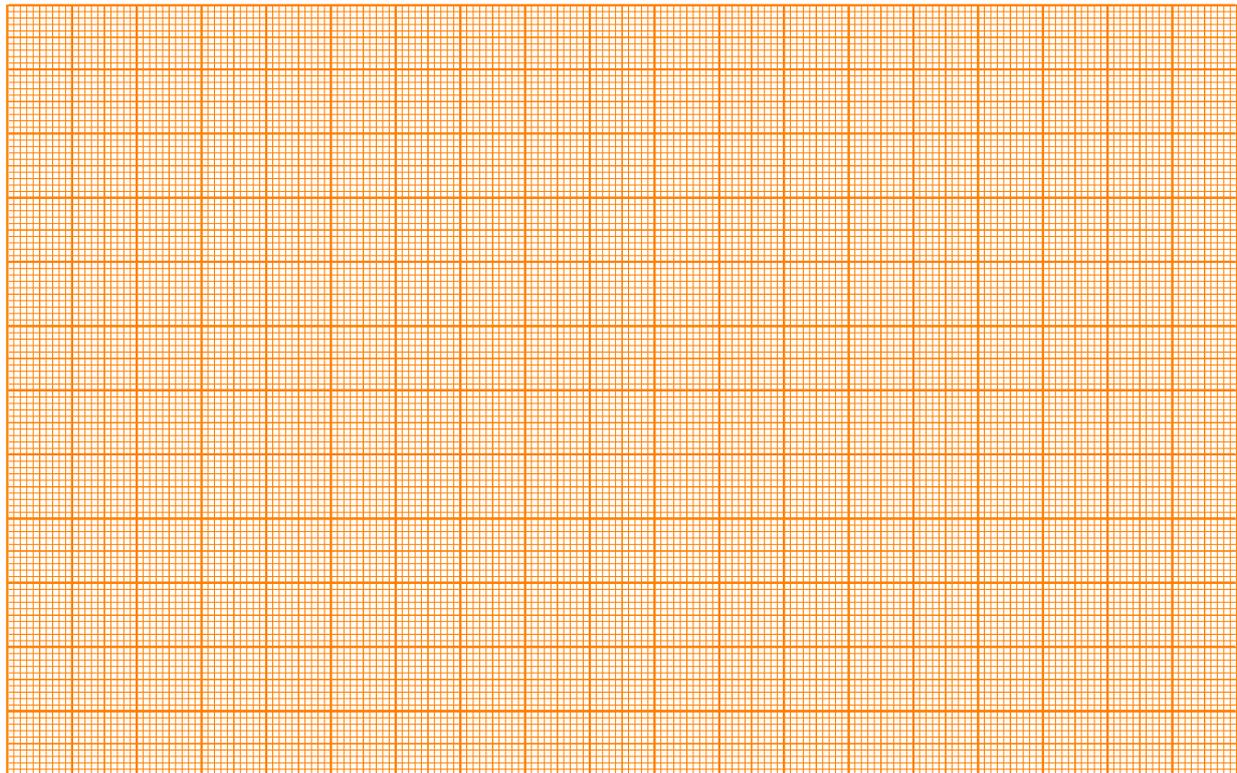
パート A: 指数の決定 (4.5 pts)

A.1 (1.5 pt)

データの表



A.1 (cont.)



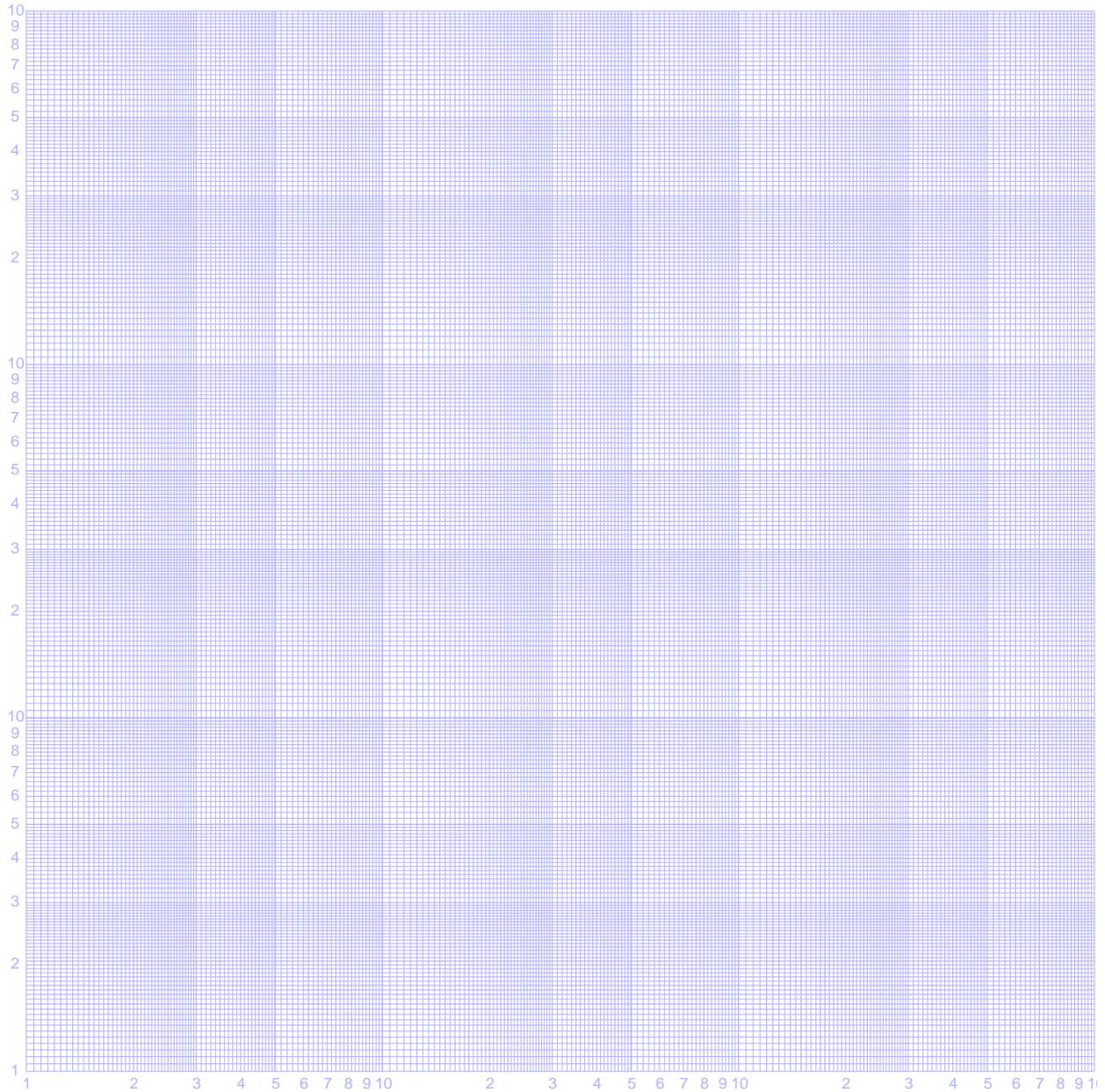
$\gamma =$

$\delta\gamma =$



A.1 (cont.)

両対数プロットはオプションである。A.1 ではグラフを 1 つだけ描けば良い。



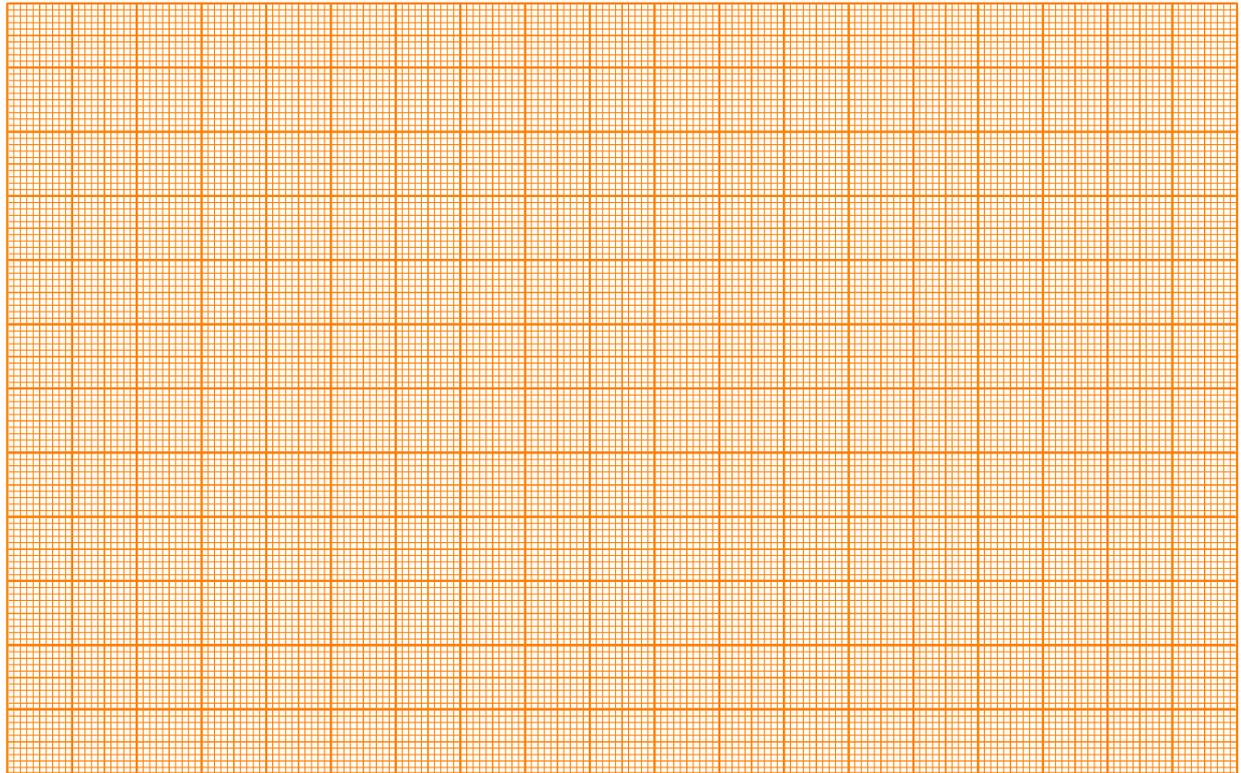


A.2 (1.5 pt)

データの表



A.2 (cont.)



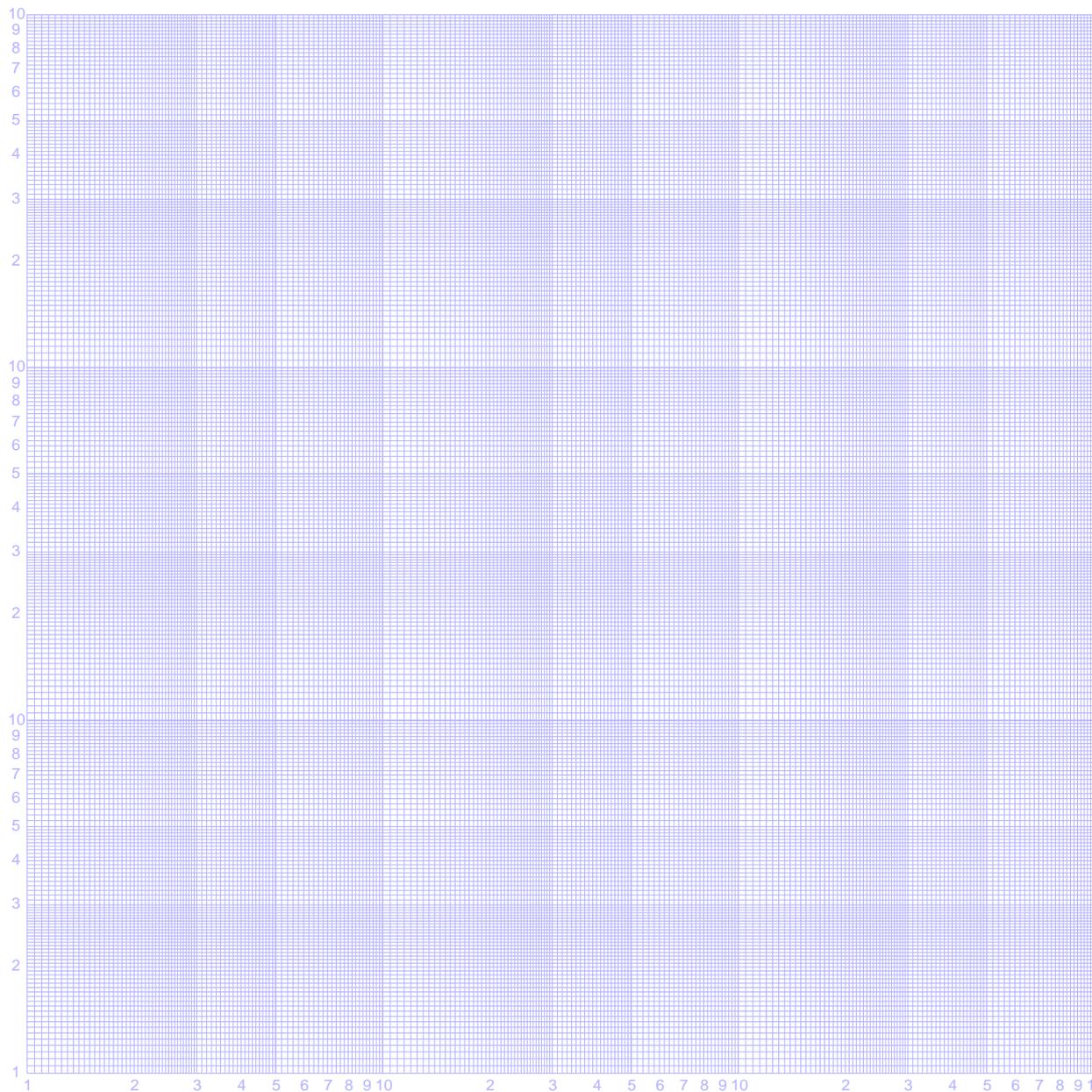
$\beta =$

$\delta\beta =$



A.2 (cont.)

両対数プロットはオプションである。A.2 ではグラフを 1 つだけ描けば良い。



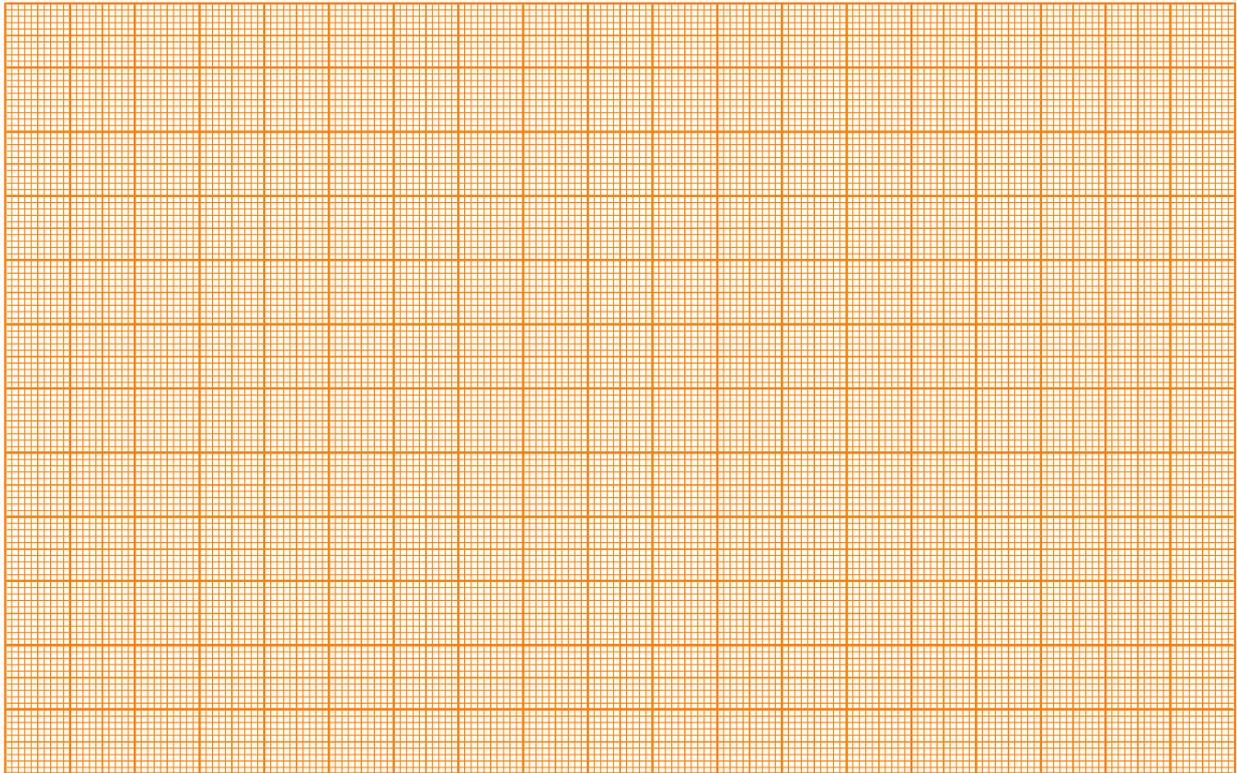


A.3 (1.5 pt)

データの表



A.3 (cont.)



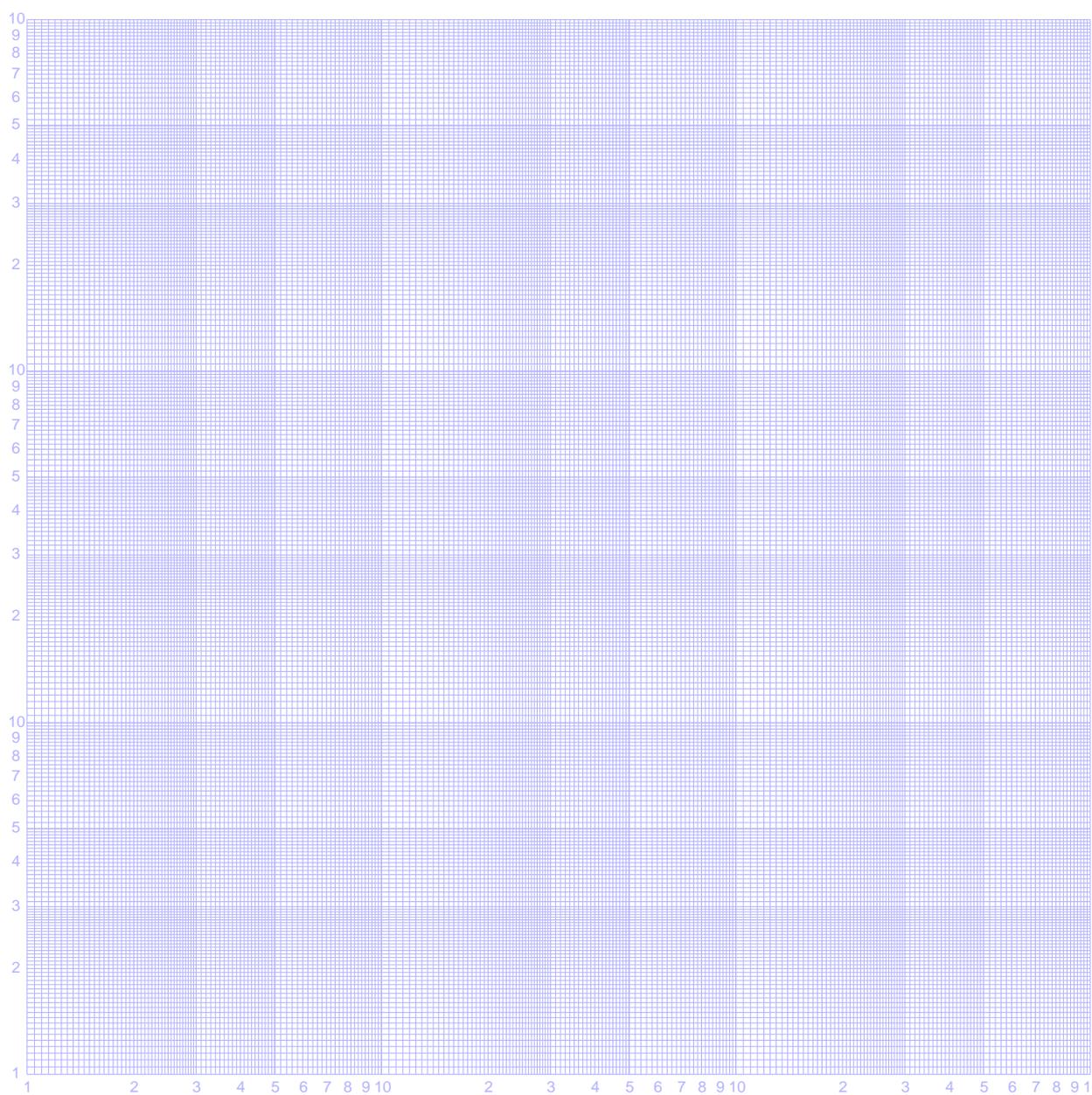
$\alpha =$

$\delta\alpha =$



A.3 (cont.)

両対数プロットはオプションである。A.3 ではグラフを 1 つだけ描けば良い。



Experiment



A2-10

Japanese (Japan)

パート B: 係数 G の決定 (1.0 pts)

B.1 (1.0 pt)

$C =$

$\delta C =$

パート C: 無次元関数 F の決定 (2.5 pts)

C.1 (0.5 pt)

下記のそれぞれの場合、 \uparrow (増加)、 \downarrow (減少)、 \leftrightarrow (変化なし) のいずれかの矢印記号で示せ。

R_C の増加に対して、 F は、

R_E の増加に対して、 F は、

L_E の増加に対して、 F は、

V の増加に対して、 F は、

Experiment



A2-12

Japanese (Japan)

C.2 (0.5 pt)

表に $F(x)$ における関数 x の提示：下の表に $F(x)$ における関数 x の候補がいくつか提案されている：もっとも適切な関数をひとつ選べ。

$R_C L_E$	$R_C V$	$R_C R_E$	$L_E V$
R_C / R_E	R_C / V	R_C / L_E	L_E / V

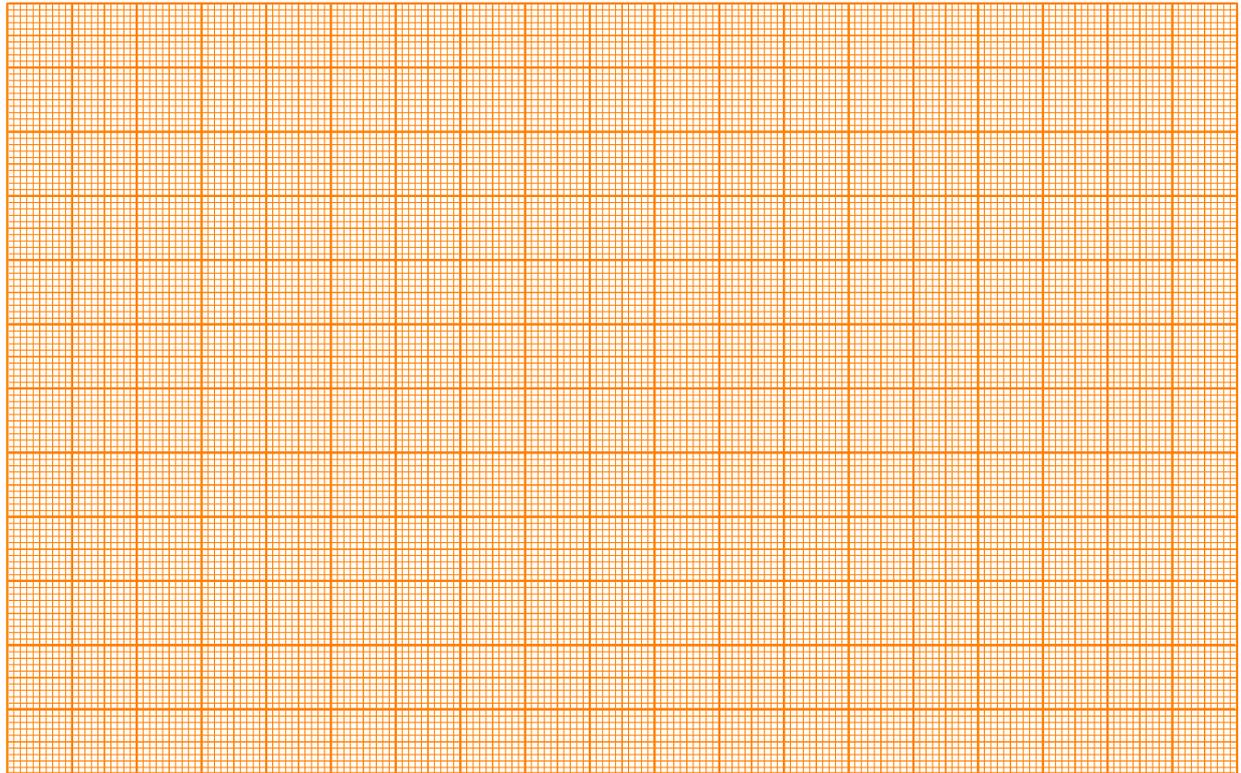


C.3 (1.5 pt)

データの表 (必要な場合):



C.3 (cont.)



$F(x) = A + Bx$ の傾き :