はじめに

物理の勉強を，どのようにやっているのでしょうか．

① ある物理現象について，教科書（参考書）を読んで，その内容と公式の成り立ちを理解する．

② その公式を覚えて，関連問題を解く．

個人の勉強としては，だいたいこんなところでしょう．学校の授業は，①の作業を容易にするものと言えるかも知れません．で，何か文句があるのかというと，

「これでは，数学の勉強と変わりないではないか」

ということです．

数学との違いというと，真っ先に実験のことが頭に浮かぶことでしょう．運良くいくつかの実験をする機会に恵まれた人もいるでしょうが，設備や時間の関係で十分に実験をやっていない（あるいは全くやっていない）人も多いことと思います．

物理は，現実の世界に起こっている自然現象について，現象そのものを，あるいはその本質を理解する（説明する）学問と言えます．したがって，本格的な実験をするしないはともかく，何らかの形で現実世界との関係を持つ必要があります．そして，それはある程度可能であると思われます．

たとえば，簡単な実験を自分でやってみるのはどうでしょうか．……5円玉に糸を通して振ってみる，あるいは振り回してみる．ゴムひもにつけたおもりを上下に振動させてみる．……こんな簡単なことでも，工夫の仕方によっては，いろいろなことが「実感」として得られると思います．

また，日常体験を物理的な考えと結びつけるのもよいでしょう．満員電車の車輌の後部に乗っていると，電車が進行方向に加速したときまわりから圧迫されます．

そこで，

「電車が進行方向に加速度運動をしているとき，車両の前の方より後ろの方が空気の圧力が大きいはずだ．これは本当だろうか．」

さらに，学習したことを日常に生かす努力をするのもあります．……高いところから落ちてくる物体の運動量は大きいが，落下するのに時間がかかる．そこで，ビルの工事現場を通るときは，まず高い所を見て，ボルトなどが落下し始めていないことを確かめ，さっさと通り過ぎる．低いところから落ちてきたものなら大したことはない．……というようなものです．低いところから鉄骨が落ちてくると，これは悲惨ですが．

いささか冗談ぽい話になりましたが，要は学習した内容を現実世界と結びつける努力をしてみてはどうか，という提案です．そこから大したものは得られないかも知れませんが，物理を物理的に考える習慣は得られると思います．

とにかく現実を見つめてみましょう．そこで，もう一つの「現実」すなわち大学入試ですが，相変わらず難しい問題が出題されています．見たこともない装置，聞いたこともない話が出てくる難問もよく見かけます．では，大学はどうしてそのような問題を出題するのでしょう．応用力を見るためという意味もあるでしょうが，問題の素材となっている実験は有名なものである（高校の教科書には出てこないが）場合が多いようです．大学入試問題は，現実世界の物理現象をテーマにして出題されるのです．

しかし，そのような現象や実験すべてについて勉強しておくことは不可能です．そこで，過去に出題されたこの種の難問のいくつかを学習して，対応の仕方を勉強しておくしかありません．このことは，物理的に考える訓練をすると表現することもできるでしょう．

本書は，物理的に考えるための問題を集めたものですが，上に述べたような難問対策の意味もあり，使いこなすのは楽ではないでしょう．しかし，1題理解するごとに物理を勉強する楽しさも増すことと思います．

本書での学習を通して「物理を愉しむ」という気持ちになっていただければ幸いです．

1997年9月　　　　著　者

本書の利用法

【本書の扱う範囲】

本書は，大学入試に出題された物理の問題から，比較的高度であると思われる問題を集め，解説したものです．内容は，現行の「物理Ⅰ」「物理Ⅱ」に対応したものですが，両者の区別は明記していません．さらに，一応単元ごとに分類してありますが，複数の単元にまたがった問題もかなりあります．入試問題では，出題できる問題数の制限のこともあって，総合問題という形になっている場合が多く，このような形式に対応する練習も必要かと思われます．本書の中には，物理Ⅰの範囲で解決できる問題も含まれていますが，センター試験等の準備に向いているとは言えません．その意味で，本書は，出題範囲が「物理Ⅰ・Ⅱ」となっている大学を目指す人を対象としていると言えます．

【本書の目的・程度】

教科書等によって，一通りの基礎事項を学習し，公式も覚え，さらにある程度の量の練習問題も解いたとしましょう．入試問題の中には，それでも太刀打ちできないものが，かなりあります．これらの問題に対応するには，もう1レベル実力を上げる必要があります．その内容は，応用力を高める，物理的に考える力をつける，などと表現できるでしょう．

本書は，このような目的のために，過去の大学入試問題の中から比較的高度な問題を選び，解答する手順を詳しく解説するとともに，問題の周辺について検討を加えたものです．

やみくもに難問を集めた本ではありませんが，上のような目的のため収録した問題は「応用的」「総合的」なものになっています．したがって，一応の基礎学習を終えた後に取り組むのがよいかと思われます．

【本書の体裁】

一応の勉強をしてそれなりの学力をつけたあと，さらに実力を向上させるのはなかなか大変です．このようなとき，まず，ある1つのことについてかなり深く勉強するのも有効かと思います．

このことを実行しやすくするため，本書では，81回の内容をそれぞれ独立させ，2ページないし3ページの読み切りという形にしました．したがって，基礎学習さえ終えていれば，どの回からでも始めることが可能です．1回分の内容を解決するごとに，少しずつ実力をプラスするという設定です．

【問題の選択と類題について】

1回分をこなす労力の軽減と，取り組むことができる時期（基礎学習を済ませた時期，受験までの日数はそう多くないと思われます）を考慮して，1回分の問題は例題1つとし，特に類題・練習問題はつけませんでした．しかし，たいていの場合，内容的に近い問題の回があるので，1つの回でじっくり勉強したあと，別の回で腕試しをするのもよいでしょう．

【基礎事項の解説】

多くの問題では，はじめにその問題の主題となっている基礎事項について，一通りの一般的な解説をしておきました．このような部分の解説がよくのみこめない人は，教科書等で該当項目の基礎学習を行うのがよいと思われます．また，主題となっている単元以外の基礎事項については，解答の部分で簡単に触れるだけにしています．たいていのことは，本書のどこかには書いてあるはずですが，教科書などを見た方が能率がよいでしょう．

【解答とその解説について】

解説の中には，答えを出すだけなら必要のないことも書いてあります．また，解説そのものも必要以上にくどくなっている所があります．これらに対応する部分は，特にミスをしやすいところ，考えまちがいをしやすいところです．過去に受験生の答案の添削をしたり，質問に答えた経験をもとに書いてあります．よけいなお世話だ，わずらわしいと思う人もいるかも知れませんが，危ない場所として一応注目して下さい．

【微分方程式に関して】

いくつかの回には，微分方程式の話が出てきますが，興味のある人は別にして，特に微分方程式の勉強をしておく必要はありません．そこに書かれていることを，そんなものかと受け入れるだけでよいのです．このためには数学Ⅲの微分・積分の知識があれば十分でしょう．

なお，微分方程式について興味のある人は，「大学への数学」の別冊『解法の探求・微積分』の p.108，‘微分方程式速修講座’をご覧下さい．また，波動 3 の解説のところに空間座標における平面の方程式がでてきますが，それについては，同増刊号『新数学演習』の p.79，‘空間座標速修講座’をご覧下さい．

目 次

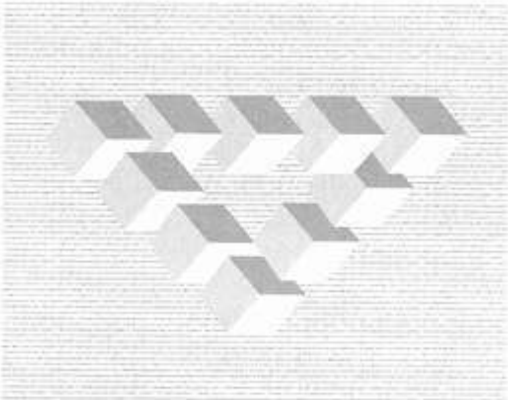
力学

熱力学

波動

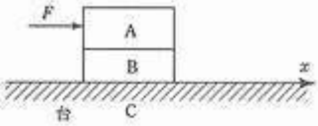
電磁気

原子



力学1　力と運動

A，B 2つの板を図のように水平な台C上に重ねておいた．A，Bの質量は，それぞれ，$2m$，m で，AB間，BC間の静止摩擦係数は，それぞれ，2μ，μ である．Aを指で水平方向に押して，A，Bが互いにすべることなく一体のまま台の上を運びたい．力が大きすぎるとA，Bは互いにすべりながら台上を動いてしまう．加える力の大きさを F，AB間，BC間にはたらく摩擦力の大きさを，それぞれ，f_1，f_2 とする．加える力の向きに x 軸をとり，重力加速度を g として各問に答えよ．



[1] A，Bの x 方向の加速度を a_1，a_2 とする．

（1）A，Bの x 方向の運動方程式を F，f_1，f_2 を用いて書け．

（2）Bが台Cから受ける垂直抗力の大きさを m，g を用いて表せ．

（3）$F=F_0$ のときA，Bは共に動かなかった．このときの f_1，f_2 を F_0 を用いて表せ．

[2] $F=F_1$ のときA，Bは互いにすべることなく一体となって，x 方向に加速度 a_0 で動いた．BC間の動摩擦係数は，$\mu/3$ である．

（4）このときの f_2 を μ，m，g を用いて表せ．

（5）F_1 の値を大きくしていったところ，値が F_m を越えたとき，AとBの間にすべりが生じた．F_m を求めよ．

（6）$F=F_m$ のときの加速度 a_0 を μ，g を用いて表せ．

[3] F_m の力でAを押し続けた後，しばらくして手を離した．その後，A，Bは一体のまますべり，やがて止まった．

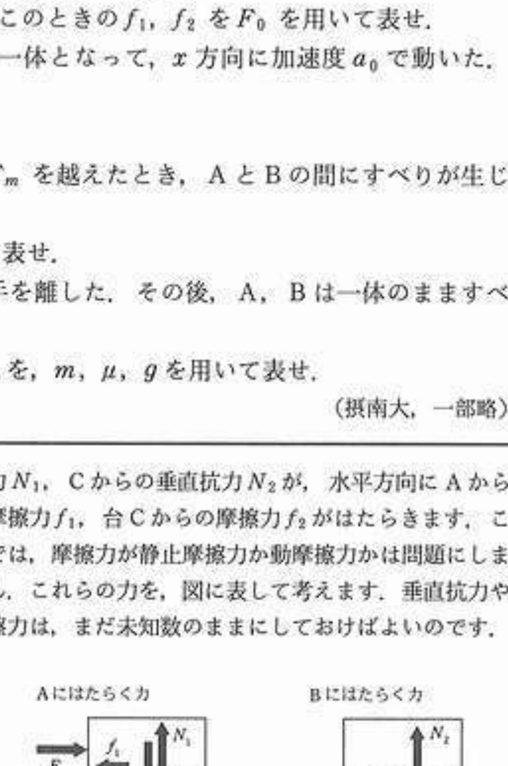
（7）手を離してから止まるまでの f_1 と加速度 a_0 を，m，μ，g を用いて表せ．

（摂南大，一部略）

物理の基本は力学と改めて言うまでもなく，大学入試問題においていちばん応用力が要求されるのは力学です．で，何がわかっていなければならないかというと，これを一言でいうのはむずかしいように思われます．読んで字の如く，「力」の扱い方ということでしょうか．ここでは，力のつりあいと運動方程式について基本的な取り扱い方を確認していこうと思います．力学の問題は苦手だという人は，どのあたりに問題があるかをチェックしてください．困難なく問題を解くことができる人は，より確実な解き方のための参考としてください．

まず図をかく

力学の問題を解くためには，まず物体にどのような力がはたらいているかを正確に知る必要があります．2つ以上の物体があるときは，その1つ1つについて考えます．この場合は物体A，Bそれぞれにはたらく力を考えます．Aには，鉛直方向に重力 $2mg$，Bからの垂直抗力 N_1 が，水平方向に外力 F，Bからの摩擦力 f_1 がはたらきます．Bには，鉛直方向に重力 mg，Aからの垂直抗力 N_1，Cからの垂直抗力 N_2 が，水平方向にAからの摩擦力 f_1，台Cからの摩擦力 f_2 がはたらきます．ここでは，摩擦力が静止摩擦力か動摩擦力かは問題にしません．これらの力を，図に表して考えます．垂直抗力や摩擦力は，まだ未知数のままにしておけばよいのです．



それぞれの力のはたらく根拠をしっかり考えれば，はたらいている力を忘れたり，余計な力をかくこともないでしょう．A，Bにはたらく重力は，地球からの万有引力で，これを忘れる人はまずいないでしょう．AとB，BとCが滑らかでない面で接していることから，垂直抗力と摩擦力がはたらくのです．これらの力は，互いに相手に対してはたらき，作用と反作用の関係にあります．

垂直抗力や摩擦力の向きは，AとB，BとCが互いに押し合っていること，相手が水平方向に運動するのを妨げていることから判断します．

式を立てる

鉛直方向については，運動しないと考えられるのでつりあいの式を，水平方向については，加速度運動する可能性があるので運動方程式をつくります．このとき大切なのは，複数個の物体があれば，物体の数だけ式を立てるということです．２つの物体をまとめて１つの物体とみなして問題を解くことが可能な場合も多いのですが，そのような解き方は，個々の物体について式をつくることに十分熟練してからにするべきです．能率よりも確実さを優先するということです．

さて，鉛直方向のつりあいの式は，

A：$N_1-2mg=0$，B：$N_2-N_1-mg=0$

となります(上下どちらかの向きを正とし，逆向きを負とします)．これらの式より，

$N_1=2mg$，$N_2=\boldsymbol{3mg}$　((２)の答え)

が得られます．水平方向の運動方程式は，x 軸の正の向きより，右向きを正として(左向きの力は負として)，

A：$\boldsymbol{2ma_1=F-f_1}$
B：$\boldsymbol{ma_2=f_1-f_2}$　((１)の答え)

となります．f_1，f_2 を具体的に表すのはこのあとの話で，ここでは一般的な場合を表す式を求めるだけです．つまり，この式は f_1，f_2 が静止摩擦力(最大静止摩擦力の場合も含む)であっても動摩擦力であっても成り立つのです．

摩擦力について

静止摩擦力は，接触面に平行な方向に相対運動をしないようにはたらきます．静止摩擦力の大きさには限度があって，その最大値が最大静止摩擦力 μN (静止摩擦係数×垂直抗力)です．いつも μN という静止摩擦力がはたらくわけではありません．この問題では，f_1，f_2 が静止摩擦力のとき，$f_1\leqq 2\mu N_1$，$f_2\leqq \mu N_2$

の関係が成り立ちます．

$F=F_0$ のとき，静止摩擦力 f_1，f_2 の大きさは，加速度が ０ ($a_1=a_2=0$) であることからわかります．(１)の答えより，水平方向のつりあいの式

$0=F_0-f_1$，$0=f_1-f_2$

が得られます．つりあいの式は運動方程式の特別な場合であるということです．

$\boldsymbol{f_1=F_0}$，$\boldsymbol{f_2=F_0}$　((３)の答え)

動摩擦力は，２つの物体が接触面の方向に互いに運動しているときに，相手の運動を妨げるようにはたらき，その大きさは一定(動摩擦係数×垂直抗力)とします．BとCが互いに運動するとき，

$$f_2=\frac{\mu}{3}N_2=\frac{\mu}{3}\times 3mg=\boldsymbol{\mu mg}\quad ((4)の答え)$$

最大静止摩擦力を考えるべき場合については，問題文の表現に注意する必要があります．たいていの問題では「すべりが生じた」とか「動きだした」などと書いてあります．これらは「静止摩擦力が最大限度に達した」と解釈する必要があります．動摩擦力を考えてはいけません．動摩擦力を使うのは「動いている」ときです．

$F=F_m$ のとき，f_1 は最大静止摩擦力となり，

$$f_1=2\mu N_1=2\mu\times 2mg=4\mu mg$$

です．f_2 は動摩擦力で，$f_2=\mu mg$　です．

したがって，$a_1=a_2=a_0$ (すべりが生じる直前のA，Bが同じ加速度で運動している状態)とすると，(１)の運動方程式は，

A：$2ma_0=F_m-4\mu mg$，B：$ma_0=4\mu mg-\mu mg$

となります．これより，

$\boldsymbol{a_0=3\mu g}$　((６)の答え)

$\boldsymbol{F_m=10\mu mg}$　((５)の答え)

が得られます．

話が変わっても

指で押すのをやめたら，今までとは全く別に考えなければならないでしょうか．そんなことはありません．摩擦力は相変わらず同じ向きにはたらいているので，(１)の運動方程式で $F=0$ とするだけでよいのです．ただし，f_1 は静止摩擦力(AとBは互いに運動しない)でその大きさは未知数とします．f_2 の方はやはり動摩擦力で，$f_2=\mu mg$　です．運動方程式は，

A：$2ma_0=-f_1$，B：$ma_0=f_1-\mu mg$

となり，これより，

$$\boldsymbol{f_1=\frac{2}{3}\mu mg},\ \boldsymbol{a_0=-\frac{1}{3}\mu g}\quad ((7)の答え)$$

が得られます．(１)の一般的な運動方程式が条件の異なるいくつかの場合(静止する場合も含めて)に適用できたということに注目してください．(１)の式は，２つの物体が別々に加速度運動する場合にも使えるのですが，そのような問題は，運動方程式とは違う扱い方も含めて別のところでとりあげることにします．

運動方程式の問題は，「どのような力がはたらくか」「どのように式を立てるか」という点さえしっかりしていれば解決できるはずです．

原子 1　光電効果

図 1 は光電管を含む回路である．光電管の陰極 K に光をあてると光電子がそこからとびだして陽極 P に達し，外部の回路に電流が流れる．スイッチ S_1 を閉じ S_2 を開いたままで，光電管に波長 $\lambda_1 = 0.50$ [μm] $= 0.50 \times 10^{-6}$ [m] の光を一定の強度 I で照射し続けたところ，B 点を基準にした A 点の電位 v はしだいに増加して一定値 1.8V になった．その間，図の矢印の方向に流れる電流 i はしだいに減少し，v と i の間に図 2 の実線の関係が得られた．以下の設問に答えよ．

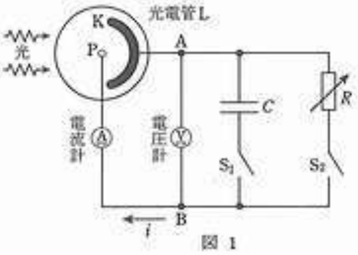


図 1

ただし，電子の電荷の大きさ $e = 1.6 \times 10^{-19}$ [C]，
プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34}$ [J·s]，光速度 $c = 3.0 \times 10^{8}$ [m/s]，
1 [eV] $= 1.6 \times 10^{-19}$ [J] とせよ．

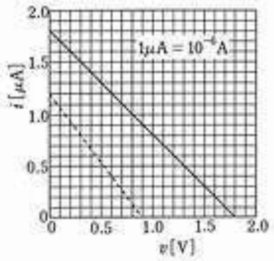


図 2

（1）　照射光の波長を λ_1 とし，電位 v が 0V のとき，陽極 P に到達した電子の最大の速さを求めよ．ただし，電子の質量を
$m \fallingdotseq 0.9 \times 10^{-30}$ [kg] と近似して計算せよ．

（2）　コンデンサー C に蓄えられた電荷を放電した後，S_1 を閉じ S_2 を開く．照射する光の波長を λ_2 にかえて，i と v の関係を同じように測定したところ，図 2 の破線の関係が得られた．波長 λ_2 を求めよ．

（3）　光の波長と強度をそれぞれもとの λ_1，I にもどし，スイッチ S_1，S_2 を閉じ可変抵抗 R を 2.0 [MΩ] $= 2.0 \times 10^{6}$ [Ω] に調整する．十分に長い時間が経過すると，回路には一定の電流が流れるようになる．その電流の大きさを求めよ．また，コンデンサーの容量を $C = 5.0$ [μF] とすると，このコンデンサーにはどれだけの電荷が蓄えられているか．

（4）　設問（3）における定常電流の値は可変抵抗 R によって変化する．この定常電流により可変抵抗で発生するジュール熱を最大にする R の値を求めよ．

（5）　可変抵抗値は 2.0MΩ，波長は λ_1 のまま照射光の強度を $I/2$ にして設問（3）の実験を行った．定常的になったときの電流の値を求めよ．　　（東京大）

光電効果の概要

金属（光電管）に光を当てると金属から電子が飛び出す（回路に電流が流れる）現象（光電効果）は，光を粒子（光子）と考え，電子が光子のエネルギーを吸収するとすることによって説明されます．振動数が ν の光（波長を λ，真空中の光速を c とすると，$c = \lambda\nu$ の関係がある）について，光子 1 個のエネルギー E は，

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (h \text{ はプランク定数})$$

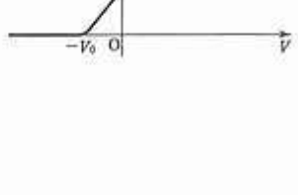
電子が吸収した光子のエネルギーから，仕事関数 W（金属内外の位置エネルギー差と考えればよい）を引いたものが，飛び出した電子の運動エネルギーの最大値になります．電子の質量を m，最大の速さを $v_{\max}$ とすると，

$$\frac{1}{2}m(v_{\max})^2 = \frac{hc}{\lambda} - W \quad \cdots\cdots ①$$

運動エネルギーの最大値は，光電管に逆電圧をかけ，電流が 0（陽極に達する電子数が 0）になるときの電圧 V_0 を測定することによって求められます．

$$eV_0 = \frac{1}{2}m(v_{\max})^2 \quad \cdots\cdots ②$$

なお，順方向に電圧をかけると，飛び出したすべての電子が陽極に到達するようになり，電圧を変えても電流は変化しません．右のグラフで，V_0 は光の波長によって，I_0 は光の強さによって決まります．



①，②より，

$$eV_0=\frac{hc}{\lambda}-W \quad \cdots\cdots③$$

通常は，この式を使って問題を解決します．

解答

（１） 電子が陽極に達することにより，コンデンサーが充電されて，光電管に逆電圧がかかる．グラフの横軸の切片より，$V_1=1.8$［V］として，②より，

$$eV_1=\frac{1}{2}mu_1{}^2$$

$$u_1=\sqrt{\frac{2eV_1}{m}}=\sqrt{\frac{2\times1.6\times10^{-19}\times1.8}{0.9\times10^{-30}}}$$

$$=\sqrt{64\times10^{10}}=\mathbf{8\times10^5\,[m/s]}$$

（２） グラフより $V_2=0.9$［V］として，③より，

$$eV_1=\frac{hc}{\lambda_1}-W,\ eV_2=\frac{hc}{\lambda_2}-W$$

$$e(V_1-V_2)=hc\left(\frac{1}{\lambda_1}-\frac{1}{\lambda_2}\right)$$

$$\lambda_2=\frac{1}{\dfrac{1}{\lambda_1}-\dfrac{e(V_1-V_2)}{hc}}$$

$$=\frac{1}{\dfrac{1}{0.50\times10^{-6}}-\dfrac{1.6\times10^{-19}\times(1.8-0.9)}{6.6\times10^{-34}\times3.0\times10^8}}$$

$$=\mathbf{7.9\times10^{-7}}\ [\mathrm{m}]$$

（３） 問題の図２のグラフは，前項の説明の中のグラフの第２象限の部分に対応するものである．光電管にかかる電圧 v［V］と，光電管を流れる電流 i［μA］の間には，グラフより，

$$i=1.8-v \quad \cdots\cdots④$$

の関係がある．また，可変抵抗にかかる電圧と電流（光電管の電圧・電流に等しい）の関係は，

$$i=0.5v \quad \cdots\cdots⑤$$

である（オームの法則，抵抗値は 2×10^6［Ω］）．

④，⑤より，

$$v=1.2\ [\mathrm{V}],\quad \mathbf{i=0.60}\ [\mu\mathrm{A}]$$

コンデンサーに蓄えられる電荷 q は，

$$\mathbf{q=Cv=5.0\times1.2=6.0}\ [\mu\mathrm{C}]$$

（４） 可変抵抗で消費される電力 p［μW］は，④より，

$$p=vi=v(1.8-v)=-(v-0.9)^2+0.81$$

p は，$v=0.90$［V］のときに最大になり，このとき，$i=0.90$［μA］となるから，

$$R=\frac{v}{i}=\frac{0.90}{0.90}=\mathbf{1.0}\ [\mathrm{M\Omega}]$$

（５） 陰極を飛び出す電子数は半分になるので，$v=0$［V］のときの電流も半分の $i=0.90$［μA］になる．しかし，電子の運動エネルギーの最大値に対応する電圧，すなわち，$i=0$［μA］に対応する電圧は変わらず $v=1.8$［V］である．したがって，この場合の電圧と電流の関係を示すグラフは，２点（0, 0.9），（1.8, 0）を通る直線，

$$i=0.5(1.8-v) \quad \cdots\cdots⑥$$

となる．

⑤（$R=2$［MΩ］の式）と⑥より，

$$v=0.90\ [\mathrm{V}],\quad \mathbf{i=0.45}\ [\mu\mathrm{A}]$$