近畿大学

2024 年度　一般選抜　物理

（2 科目　120 分）

I　以下の設問 **I-A**，**I-B** にある空欄［ 1 ］～［ 16 ］に適切な式，［ あ ］に適切な数値，［ ア ］～［ エ ］に「正」もしくは「負」のどちらかを記入せよ。

図 1 に示す直方体の形状をした 1 種類の物質からなる不純物半導体を考え，直方体の横，縦，高さ方向の辺と平行になるようにそれぞれ x 軸，y 軸，z 軸をとる。直方体の横，縦，高さ方向の辺の長さをそれぞれ L_x〔m〕，L_y〔m〕，L_z〔m〕とする。図 2 で示すように，不純物半導体においては，純粋な半導体の結晶を組む原子のうちのごく一部が別の元素の原子，つまり不純物に置き換えられていて，この置き換えによって物質内にキャリアが生じる。結晶を組む大部分の元素のイオンを結晶イオン，不純物元素のイオンを不純物イオンと呼ぶ。直方体の左端に負極，右端に正極を取り付けて電圧 V〔V〕を加えると，大きさ I〔A〕の電流が半導体内を流れた。半導体の電気抵抗を R〔Ω〕とすると，V と I はオームの法則 $V = RI$ という比例関係で結ばれる。1 個のキャリアが持つ電気量の大きさを q〔C〕とする。半導体 $1\,\mathrm{m}^3$ あたりに含まれるキャリアの個数を n〔$1/\mathrm{m}^3$〕とする。ここで，n はアボガドロ定数と同じくらい大きい数である。

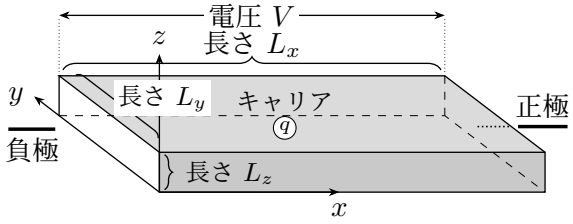

図 1

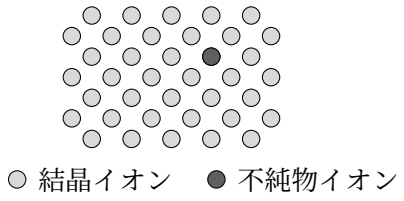

図 2

I-A

加えられた電圧の影響で半導体内には［ 1 ］〔N/C〕の大きさの一様な電場が生じているので，1 個のキャリアがこの電場から受ける力は $q\times$［ 1 ］〔N〕である。そのため，キャリアが電子の場合，x 軸の［ ア ］の向きに，キャリアが正孔の場合，x 軸の［ イ ］の向きに電流が流れる。

設問 **I-A** のこれ以降は，キャリアが電子である場合を考え，キャリア 1 個の質量を m〔kg〕とする。仮に電場からの力のみを受け続けるのであれば，電流の大きさは電圧の大きさに関わらず増え続

けるはずだが，実際にはオームの法則で示されるように，与えられた電圧に対して電流は一定の値に落ち着く。これは不純物イオンや熱運動する結晶イオンによって半導体内の全てのキャリアの集団（全キャリア集団と呼ぶ）が部分的に散乱されて減速し，キャリアの速度の全集団に関する平均をとると一定の値に落ち着くためである。この平均速度の x 成分の大きさを $\overline{v}$〔m/s〕とする。また，この平均速度の y 成分および z 成分はどちらもゼロである。

散乱について，次の 2 つの事項を仮定する。

(a) 任意の時刻 t〔s〕において，正の定数 T〔s〕を用いると，時刻 $t+\Delta t$〔s〕までに全キャリア集団のうちで散乱されるキャリアの割合は $\overline{v}$ によらず $\dfrac{\Delta t}{T}$ である。ただし，Δt は T に比べてはるかに小さい。ここで，T は 1 個のキャリアが散乱された直後から次に散乱されるまでのおおよその時間に対応する。

(b) 散乱直後に，全キャリア集団のうちで散乱された部分の平均速度がゼロになる。時刻 t から $t+\Delta t$ までに散乱された部分は，散乱直後から時刻 $t+\Delta t$ までの間に再び加速されるが，Δt が小さいため，この再加速の影響は無視する。

散乱に関する仮定 (a) および (b) の概念図を図 3 に示す。

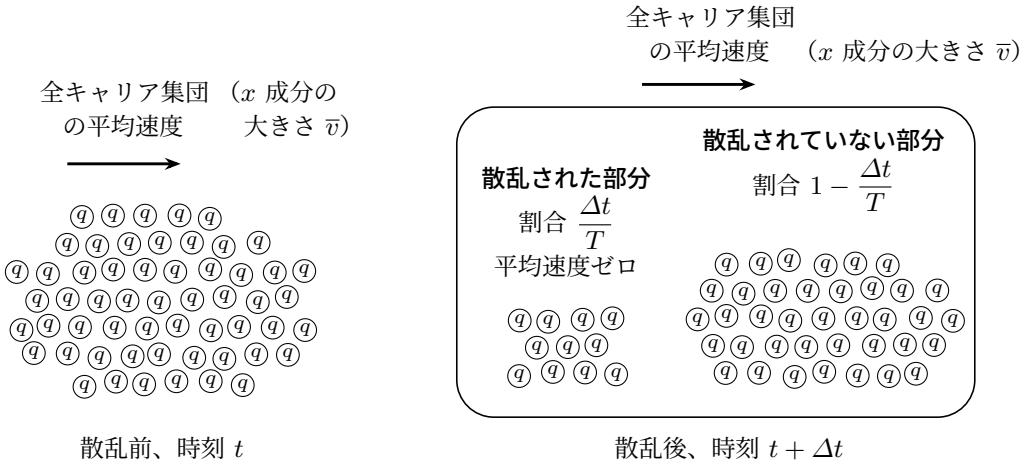

図 3

以下にある［ 2 ］～［ 13 ］には，V，n，q，T，Δt，L_x，L_y，L_z，m のうち必要なものを用いて表した式を記入せよ。半導体内の全キャリア集団におけるキャリアの総数 N は［ 2 ］個である。全キャリア集団の運動量の x 成分の大きさは $N\overline{v}\times$［ 3 ］〔kg·m/s〕である。ここで，全キャリア集団の運動量とは，各キャリアの運動量を全てたし合わせたものである。このことと仮定 (a) および (b) を合わせて考えると，時刻 t から $t+\Delta t$ の間に，N 個のキャリアのうち $N\times\dfrac{\Delta t}{T}$ 個のキャリアが散乱さ

れる。仮に電場による加速の影響がないと考えると，この散乱によって全キャリア集団の運動量の x 成分の大きさが $N\overline{v}\times$ 4 〔kg·m/s〕だけ失われることになる。この時間のうちに運動量が失われたということはそれに相当する力積を全キャリア集団が受けたことを意味する。この力積を与えた力を抵抗力と呼ぶことにすると，全キャリア集団は大きさ $N\overline{v}\times$ 5 〔N〕の抵抗力を進行方向と逆向きに受ける。ここで，全キャリア集団が受ける抵抗力とは，各キャリアが受ける抵抗力を全てたし合わせたものである。実際には電場による力も全キャリア集団に加わっており，その電場による力と抵抗力に関するつり合いの条件から，$\overline{v}$ は

$$\overline{v} = \boxed{6}\ 〔\mathrm{m/s}〕 \tag{1}$$

と表される。

次に，電流の大きさ I を $\overline{v}$ を用いて表すことを考える。I は x 軸と垂直な半導体の断面を単位時間あたりに通過する電気量の大きさである。時間 Δt の間に，その断面を通過するキャリアの数は，縦が L_y，高さが L_z，横が $\overline{v}\times$ 7 〔m〕の直方体に含まれるキャリアの数に等しい。したがって，時間 Δt の間にその断面を通過する電気量の大きさは $\overline{v}\times$ 8 〔C〕となる。このことから電流の大きさは

$$I = \overline{v} \times \boxed{9}\ 〔\mathrm{A}〕 \tag{2}$$

と表される。

式 (1) と式 (2) を用いると，

$$V = I \times \boxed{10}\ 〔\mathrm{V}〕 \tag{3}$$

のように，V が I の関数として表される。このとき，抵抗率 ρ〔Ω·m〕は 11 〔Ω·m〕である。$L_x = 1.0\,\mathrm{cm}$，$L_y = L_z = 1.0\,\mathrm{mm}$，$n = 1.0 \times 10^{24}/\mathrm{m}^3$，$m = 9.1 \times 10^{-31}\,\mathrm{kg}$，$q = 1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$，$\rho = 5.0 \times 10^{-6}\,\Omega\cdot\mathrm{m}$ として，有効数字 1 桁で T の数値を与えると，$T =$ あ s となる。

時間 Δt の間に大きさ $N\overline{v}\times$ 5 の抵抗力が全キャリア集団にする仕事の大きさは $N\overline{v}^2\times$ 12 〔J〕である。全キャリア集団のエネルギーのうち，この仕事の大きさの分がジュール熱に変換されるので，電流が流れているとき，この半導体の消費電力は $N\overline{v}^2\times$ 13 〔W〕である。

I-B

電圧 V に加えて，大きさ B〔T〕の磁束密度を持つ一様な磁場が z 軸の正の向きにかかっている状況を考える。キャリアは y 成分の大きさが有限のローレンツ力を受けるが，半導体の端よりも先には行けない。そのため，全キャリア集団の一部が端の近くにたまり，y 軸方向の電場を作る。磁場を加えてから十分に長い時間が経過したあとにはこの電場による力と磁場による力がつり合う。キャリアが電子の場合，磁場によって生じるこの電場の向きは y 軸の ウ の向きであり，キャリアが正孔の場合，それは y 軸の エ の向きである。

これ以降は，キャリアが電子である場合を考え，キャリア 1 個の質量を m〔kg〕とする。以下にある 14 〜 16 には，B，I，n，q，T，L_x，L_y，L_z，m のうち必要なものを用いて表した式を記入せよ。T の意味は設問 **I-A** と同じである。磁場を加えてから十分に長い時間が経過したあと，キャリア 1 個あたりに加わる磁場による力の大きさは 14 〔N〕である。磁場による力と電場による力の y 成分に関するつり合いの条件を用いると，電場の y 成分の大きさが 15 〔N/C〕となることがわかる。さらに，設問 **I-A** の式 (3) を用いると，x 方向の電圧 V〔V〕と y 方向の電圧 V_y〔V〕が $V_y = V \times$ 16 〔V〕のように関係付けられる。

II

以下の **II-A**，**II-B** にある空欄 1 〜 10 にあてはまるもっとも適切な式を入れよ。

十分大きい水槽に水を入れ，水平な床の上をなめらかに動くことができる台車の上に水槽を固定した。最初に水は水槽に対して静止している。次に，水面上の $2L$〔m〕離れた 2 点 S_1 と S_2 で水面を上下に単振動させると S_1，S_2 を波源とした円形波が水面に現れた。2 つの波源の振動は振幅が等しく同位相で，振動の周期を T〔s〕とする。また，波源から広がる円形波の水面を伝わる速さは V〔m/s〕であり，L は $L > 3VT$ を満たすとする。S_1 と S_2 の位置は床に対して常に固定されており，xy 座標を床に対して静止しているようにとる。xy 平面は水槽の静止した水面に平行で，S_1 と S_2 をむすぶ線分の中点を原点，S_1 と S_2 が x 軸上の $x = -L$，$x = L$ にあるようにとる。水面波の観測は波に影響を与えず，台車の運動により波は発生せず，S_1 と S_2 に到達した波は反射しないものとする。また，振幅の減衰は考えないものとし，波源から一方向に伝わる波は正弦波として考える。ただし，水槽が十分大きいため，水槽の壁面での反射は考えないものとする。必要であれば三角形の 3 辺の長さ a，b，c が満たす関係式 $c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma$ を用いても良い。ここで γ は長さが a，b の辺がなす角を表している。

II-A

台車を床に固定した場合を考える。以下にある 1 〜 3 には L，V，T のうち必要なものを用いて表した式を記入せよ。このとき図 1 のように，波源から発生した波は同心円状にひろがる。図 1 と図 2 にある円はそれぞれの波源から出た波の山の波面を表している。

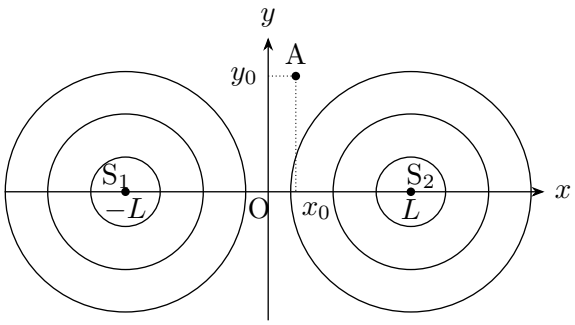

図 1　台車を床に固定した場合の概略図

十分波がひろがった後，S_1 と S_2 から出た波が干渉し，干渉模様が現れた。このとき，S_1 と S_2 の間にできる，x 軸上の隣り合った 2 つの弱めあう点の距離は［ 1 ］〔m〕となる。次に xy 座標が $(x, y) = (x_0, y_0)$ $(x_0 > 0,\ y_0 > 0)$ の点 A で観測される波を考える。x_0 と y_0 が 2 つの波が弱めあう点となる条件を満たし，S_1A〔m〕と S_2A〔m〕の差が最も小さい曲線上に点 A があるとする。このとき，S_1A と S_2A は，

$$S_1A - S_2A = \boxed{\ 2\ }$$

を満たす。

次に，図 2 のように焦点を S_1，S_2 とし，点 A を通る楕円上での波を考える。xy 座標が $(x, y) = (x_1, y_1)$ $(x_1 > 0,\ y_1 > 0)$ の楕円上の点 B で，波が弱めあったとする。また，この楕円上の点 A から点 B の区間には，点 A と点 B を除いて弱めあう点がないとする。このとき，S_1B〔m〕と S_2B〔m〕は

$$S_1B - S_2B = \boxed{\ 3\ }$$

を満たす。

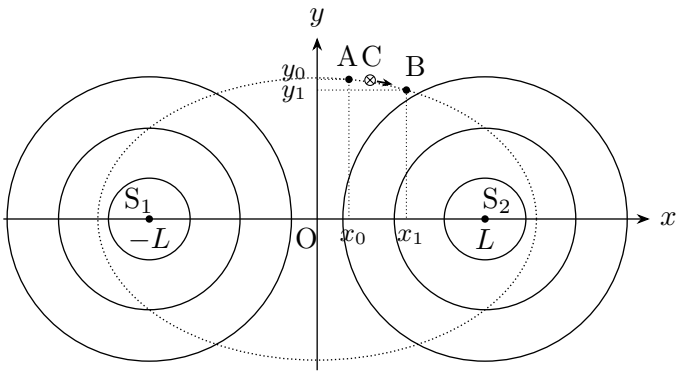

図 2　台車を床に固定した場合の概略図

波の高さを観測できる観測装置 C が，点 A から点 B まで楕円上を動いて波を観測したとする。C は時刻 $t = 0$ に点 A を出発し，点 B に到着するまでの時刻 t〔s〕で，S_1C〔m〕が $S_1C = S_1A + vt$ となるように運動したとする。ここで v〔m/s〕は V より小さい正の定数である。また，楕円軌道上では C から S_1，S_2 までの距離の和が常に一定であり，S_1C と S_2C〔m〕は $S_1C + S_2C =$ (一定) の関係を満たす。以下にある［ 4 ］～［ 6 ］には v，V，T のうち必要なものを用いて表した式を記入せよ。このとき C は，点 A を出発してから［ 4 ］〔s〕後に点 B に到達する。この間，C は 2 つの異なる周期 T_1〔s〕，T_2〔s〕の波の重ね合わせで表される波を観測する。周期 T_1 の波は，S_2 がないと仮定したときに C が観測する波で，$T_1 =$［ 5 ］である。周期 T_2 の波は，S_1 がないと仮定したときに C が観測する波で，$T_2 =$［ 6 ］である。

II-B

台車を y 軸正の向きに一定の速さ $w\left(< \dfrac{V}{2}\right)$〔m/s〕で静かに動かした場合に現れる干渉模様を考える。図 3a にある円は S_1 と S_2 から出た波の山の波面を表しており，中心が y 軸正の向きに速さ w で動き，半径が速さ V〔m/s〕で大きくなる円である。図 3b は，鉛直上向きを z 軸正の向きにとった，ある時刻における x 軸上の波の断面の概略図で，2 つの波は S_1 と S_2 から原点に向かって進む波を表している。

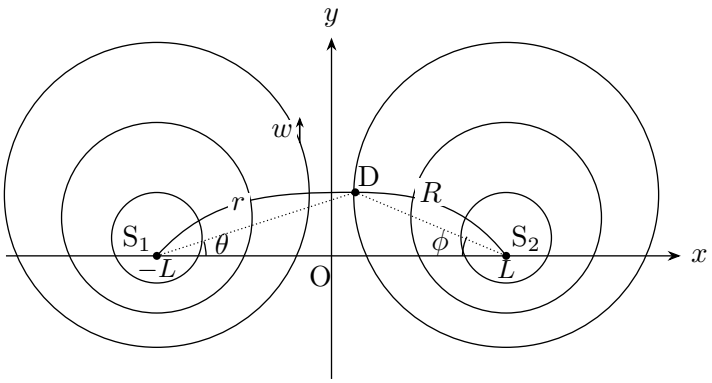

図 3a　台車を y 軸正の向きに静かに動かした場合の概略図

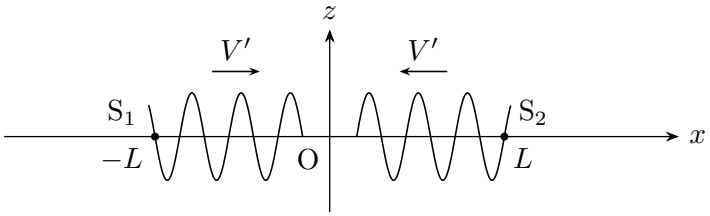

図 3b　x 軸上における波の断面の概略図

まず，十分波がひろがった時に x 軸上の 2 つの波源の間に現れる弱めあう点の位置を考える。弱めあう点の位置は，図 3b のとおり，S_1 と S_2 から原点の方向に向かって速さ V'〔m/s〕で進む 2 つの波の干渉を考えることで分かる。V' は V と w を用いて表すと $V' =$ [7] である。従って，S_1 と S_2 の間にできる，x 軸上の隣り合った 2 つの弱めあう点の距離は，L，V，T，w のうち必要なものを用いて表すと [8]〔m〕となる。

次に，十分波がひろがった時に，S_1 からの距離が r〔m〕，$\angle DS_1O = \theta$〔rad〕$\left(L < r\cos\theta < 2L,\ 0 < \theta < \frac{\pi}{2}\right)$ の位置にある点 D で波が弱めあう場合を考える。ここで図 3a のように点 D の y 成分は正であるとする。直線 S_1D 上を S_1 から点 D に向かう波の速さ V_1〔m/s〕は，V，w，θ を用いて表すと $V_1 =$ [9] である。また，直線 S_2D 上を S_2 から点 D に向かう波の速さ V_2〔m/s〕は，図 3a のとおり $S_2D = R$〔m〕，$\angle DS_2O = \phi$〔rad〕として，V，w，ϕ を用いて表すと $V_2 =$ [10] である。2 つの波の速さの違いを考慮すると，点 D において波が弱めあうために必要な条件が求まる。0 以上の整数 n を用いると，この条件を表す式は

$$\frac{r}{\boxed{9}} - \frac{R}{\boxed{10}} = \left(n + \frac{1}{2}\right)T$$

である。