

受 験 番 号					

東京大学大学院新領域創成科学研究科

物質系専攻

平成 21（2009）年度大学院入学試験問題

修士課程・博士後期課程共通

専 門 科 目

平成 20（2008）年 8 月 27 日（水）

13：30～16：30（180 分）

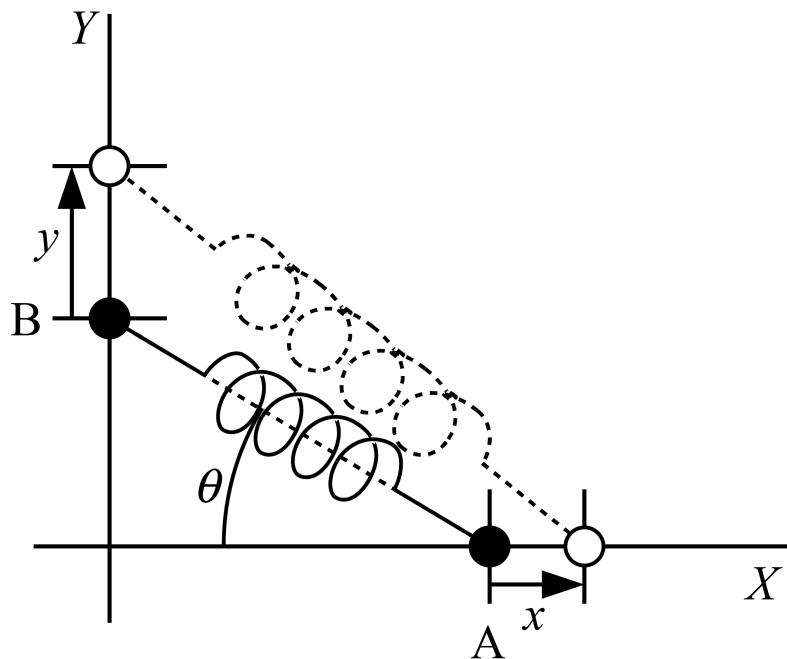
注意事項

1. 試験開始の合図があるまで、この冊子を開いてはいけません。
2. 本冊子の総ページ数は 28 ページです。落丁、乱丁、印刷不鮮明な箇所などがあった場合には申し出て下さい。
3. この問題冊子の中にある第 1 問から第 13 問までの中から 4 問を選択し、解答して下さい。各 1 問につき解答用紙 1 枚を使って下さい。必要ならば裏面を使用しても構いません。その場合、裏面に続くことを明記して下さい。
4. 解答には必ず黒色鉛筆（または黒色シャープペンシル）を使用して下さい。
5. 解答は日本語または英語で記入して下さい。
6. 配布された解答用紙（4 枚）の指定箇所に、受験番号とその解答用紙で解答する問題番号を忘れずに記入して下さい。
7. この問題冊子にも必ず受験番号を記入して下さい。問題冊子は試験終了後に回収します。
8. 試験開始後は、たとえ棄権する場合でも退室することはできません。

第1問

図に示すように、水平面内で X 軸上に運動を拘束された質点 A と Y 軸上に運動を拘束された質点 B がある（質量は共に m ）。この2つの質点を自然長 ℓ でばね定数 k のばねで結ぶ。最初、ばねが自然長の状態ではばねと X 軸のなす角が θ であった。質点の運動は滑らかで摩擦はなく、ばねは軽く理想的なものとする。なお、 t は時間を表わす。

- (1) 最初の位置から、それぞれの軸に沿って A を x 、 B を y だけ変位させる。この時、ばねの伸び $\Delta\ell$ はいくらになるか。 ℓ 、 θ 、 x 、 y を用いて表せ。
- (2) $|x| \ll \ell$ 、 $|y| \ll \ell$ として、 $\Delta\ell$ を x 、 y の1次までの近似で表せ。
- (3) (2)の結果を用いてこの系のラグランジュ関数を求め、 x と y に対する運動方程式を求めよ。
- (4) 得られた運動方程式から単振動を表す方程式を導き、共振振動数を求めよ。
- (5) $t=0$ で、 B を最初の位置 ($y=0$) のままで、 A を $x=a$ ($|a| \ll \ell$) まで移動させて、両方を静かに離す。その後の x と y を t の関数として表わせ。



第2問

図のように、真空中から導体に垂直に角振動数 ω の平面波が入射したときの導体中の電磁波の振る舞いについて考える。導体の電気伝導度は σ 、誘電率は ε 、透磁率は μ である。また、真空と導体の境界面は xy 面にあり、電場 \mathbf{E} は x 方向、磁場 \mathbf{H} は y 方向を向いているものとする。導体中の電磁波が満たすマクスウェル方程式は、以下のようになる。

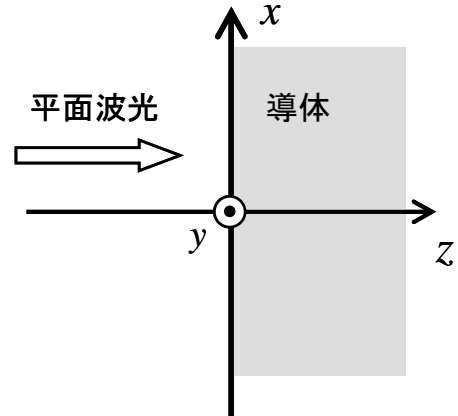
$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$$

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \sigma \mathbf{E}$$

ここで、 $\mathbf{E} = (E_x, 0, 0)$ 、 $\mathbf{H} = (0, H_y, 0)$ である。



- (1) 導体中の電場および磁場に関する波動方程式をそれぞれ求めよ。
- (2) 導体中の波動方程式の解を、 $E_x = E_0 \exp\{i(kz - \omega t + \phi_E)\}$ 、および、 $H_y = H_0 \exp\{i(kz - \omega t + \phi_H)\}$ とする。ここで、 k は複素数であり、 $k = k_1 + ik_2$ であるとする。また、 E_0 、 H_0 は実数である。 k_1 と k_2 を、 σ 、 ε 、 μ 、 ω を用いて表せ。
- (3) H_y と E_x の関係を、 k_1 、 k_2 、 μ および ω を用いて表せ。
- (4) 導体中の電磁波のポインティングベクトル \mathbf{S} の時間平均 $\bar{\mathbf{S}}$ を、 k_1 、 k_2 、 μ 、 ω 、 E_0 を用いて z の関数として表せ。なお、 $\bar{\mathbf{S}}$ は、電磁波の周期を $T(=2\pi/\omega)$ として以下で与えられる。
$$\bar{\mathbf{S}} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{S} dt$$
- (5) (4)の結果を使って、 z 方向に単位距離進む間に電磁波が失うエネルギーを求めよ。電磁波からエネルギーが失われる理由を定性的に述べよ。
- (6) $(\sigma/\varepsilon)^2 \gg \omega^2$ が成り立つとき、 k_1 および k_2 を求めよ。また、導体の表面付近における電場の空間変化の概略を、 $t=0$ 、 $\phi_E=0$ として z を横軸にとり図示せよ。

注) 必要ならば、直交座標系で成り立つ以下の公式を使ってよい。

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{A}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$$

第3問

図のような幅 a の 1 次元ポテンシャル井戸

$$V(x) = \begin{cases} \infty & (x < 0) \\ -V_0 & (0 < x < a) \\ 0 & (x > a) \end{cases}$$

に束縛された電子（質量 m ）の状態を考える。

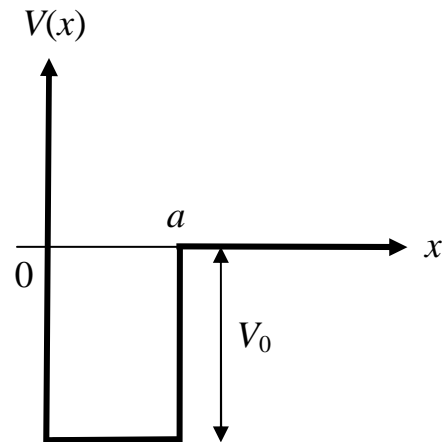
シュレーディンガー方程式

$$\begin{cases} -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\varphi}{dx^2} - V_0\varphi = E\varphi & (0 < x < a) \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\varphi}{dx^2} = E\varphi & (x > a) \end{cases}$$

の $E < 0$ である波動関数（固有関数）は、

$$\varphi = \begin{cases} A \sin k_1 x & (0 < x < a) \\ B e^{-k_2 x} & (x > a) \end{cases}$$

の形をしている (A, B は規格化定数、 \hbar はプランク定数を 2π で割ったもの、また、 $k_1 > 0$ かつ $k_2 > 0$)。以下の問に答えよ。



- (1) 固有エネルギー E を、 k_1 を用いて表せ。
- (2) k_1 、 k_2 は次の連立方程式を満たすことを示せ。

$$\begin{cases} k_1 \cot k_1 a = -k_2 \\ k_1^2 + k_2^2 = \frac{2mV_0}{\hbar^2} \end{cases}$$

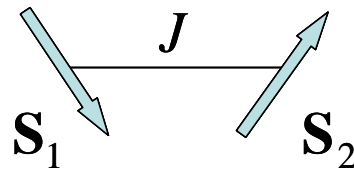
- (3) 定数 A を k_1 を用いて表せ。
- (4) $k_1 a$ 、 $k_2 a$ 平面上で上の方程式の表すグラフを考えることにより、束縛状態が 2 個だけ存在する条件を m 、 a 、 V_0 を用いて表せ。
- (5) 固有エネルギーを $E = -(1 - \delta) V_0$ と表す。 $k_1 a = \frac{7}{4} \pi$ となる束縛状態が存在するとき、この状態の δ を求めよ。また、このときの波動関数 φ の概形を描け。
- (6) (5) の条件において、基底状態のエネルギー E_1 について、

$$E_1 < -\frac{41}{49} V_0$$

であることを示せ。

第4問

大きさ $1/2$ のスピンの2個あり (\mathbf{S}_1 、 \mathbf{S}_2)、それらのスピン間には交換相互作用が働いている。その相互作用の大きさを定数 J で表わすと、ハミルトニアンは



$$H = J \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2$$

で与えられる。図はこの系を模式的に表わしたものである。いま、 $J > 0$ (反強磁性的) とする。なお、ボルツマン定数を k_B とする。

- (1) この2スピン系の基底状態と励起状態のスピンの大きさ、およびエネルギーを求めよ。全スピンは $\mathbf{S}_{\text{total}} = \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2$ と書ける。この式の両辺を2乗して考えよ。
- (2) 磁束密度 B の中に置かれたこの2スピン系が、温度 T の熱浴に接して熱平衡状態にあるとする。この系の分配関数を求めよ。ただし、スピン \mathbf{S} に伴う磁気モーメントは、比例係数 μ を用いて $\mu \mathbf{S}$ で表わされるものとする。
- (3) 温度 T における、この系の磁気モーメントの磁束密度に平行な成分の平均値 m を求めよ。
- (4) 以下の式で定義される磁化率 χ の温度依存性を議論せよ。

$$\chi = \lim_{B \rightarrow 0} \frac{m}{B}$$

第5問

一定の厚さの結晶板があり、板面に垂直な方向から単色光を入射し、透過後の偏光の変化を偏光板で調べる実験を行った。この結晶板では、特定の方向に光の電場ベクトルが向くと屈折率が n_e であり、それに直交する方向に光の電場ベクトルが向く場合は屈折率が n_o であるとする（一軸性結晶と呼ぶ）。なお、偏光板とは特定の方向に振動する光の電場成分のみ透過させるものである。以下の問に答えよ。

- (1) z 軸方向に進む単色光の (x, y) 面内における電場ベクトル \mathbf{E} が

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \cos(kz - \omega t) \\ A \cos(kz - \omega t + \delta) \end{pmatrix}$$

で書けるとする。ここで、単色光の波数と角振動数をそれぞれ k , ω とした。 A は振幅であり、 x 成分と y 成分で等しい。また、 δ は位相差を表わす。

- (a) $\delta = \pi$ のとき、特定の面 ($z = \text{一定}$) でこの単色光を観察するとき、ベクトル \mathbf{E} の終点の軌跡を (x, y) 面に描け。また、このような偏光を何と呼ぶか。
- (b) 同じように、 $\delta = \pi/2$ のとき、ベクトル \mathbf{E} の終点の軌跡を描け。このような偏光を何と呼ぶか。

- (2) 図1に示すように、単色光を偏光板に入射し透過した光の強度 (I_t で表わす) を計測した。偏光板を z 軸の周りに角度 θ だけ回転させて I_t を調べると、図2の実線が得られた。この単色光は、(1) の(a)、(b)どちらの状況であったと判断できるか。なお、 x 軸方向に振動する電場成分を最もよく透過させる偏光板の位置を $\theta = 0$ としてある。

- (3) 図3のように結晶板を偏光板の前に置いた。結晶板面に平行に X 軸および Y 軸をとるとき、単色光の電場ベクトルが X 軸を向いているときに屈折率が n_e であるとする。 (X, Y) 面と (x, y) 面を平行にし、かつ、 x 軸と X 軸を一致させたとき、 I_t は図2の破線に変わった。その理由を述べよ。なお、この結晶の n_e および n_o はそれぞれ 1.49 および 1.66 である。また、ここで使用した単色光の波長は 633 nm である。結晶板の厚さはどれだけであったと考えられるか。

- (4) (3) の状態から、 X 軸を x 軸と平行な位置から (x, y) 面内で $+45^\circ$ まで傾けた。図2の破線がどのように変化していくか記述せよ。

- (5) (3) の結晶板をその 2 倍の厚さの結晶板に交換した。ただし、 (x, y) 面内で X 軸を x 軸から $+30^\circ$ 傾けて置いた。図2のデータはどのように変わるか。横軸を偏光板の回転角 θ 、縦軸を I_t としてグラフを描け。

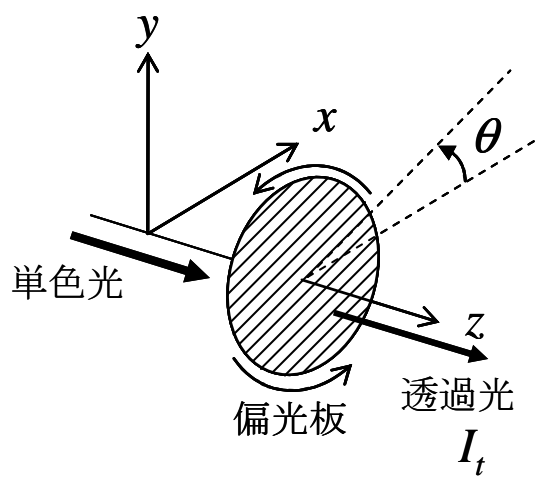


图 1

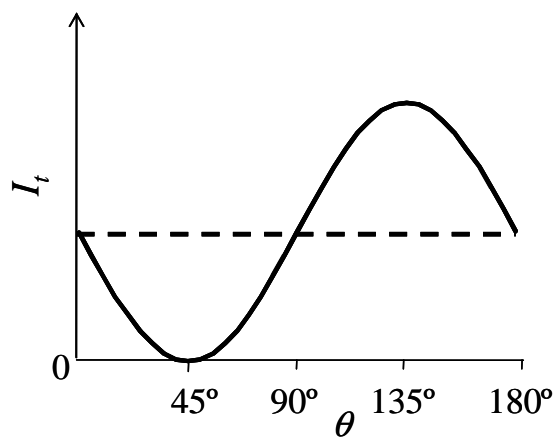


图 2

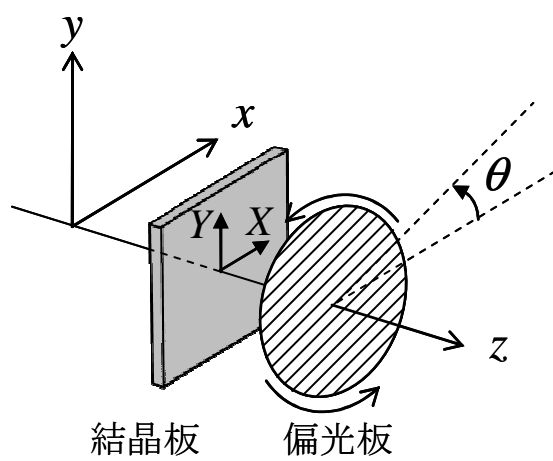
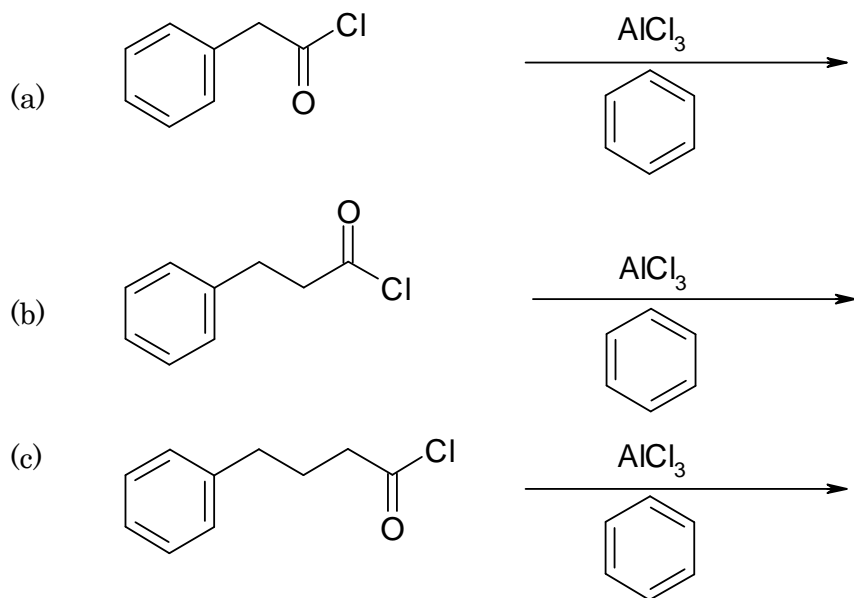


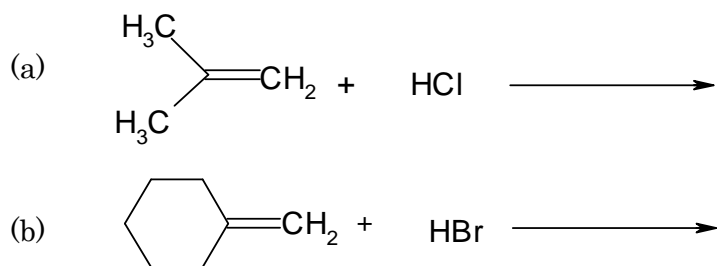
图 3

第6問

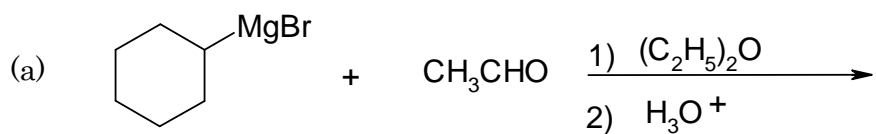
- (1) 次の化合物に AlCl_3 とベンゼンを加えて反応させたとき、主に得られる生成物を示せ。

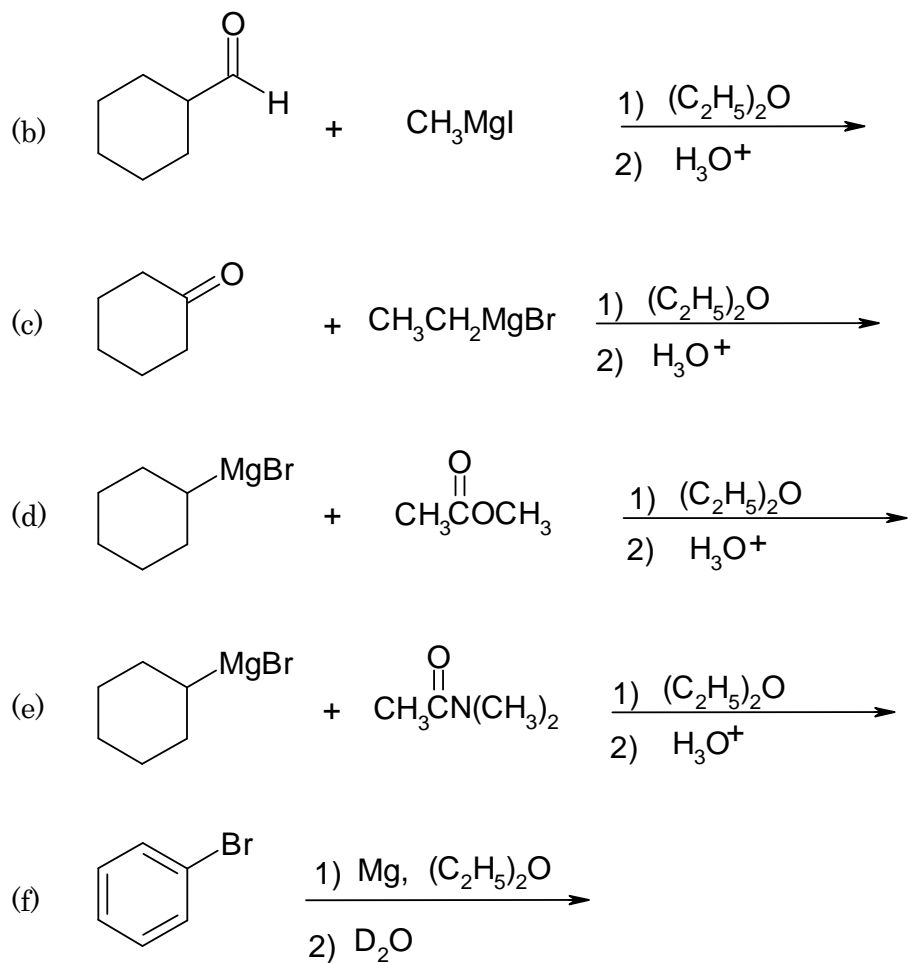


- (2) 次の反応について、生成する可能性のある化合物を2種類示し、どちらが主生成物となるか理由を述べて説明せよ。

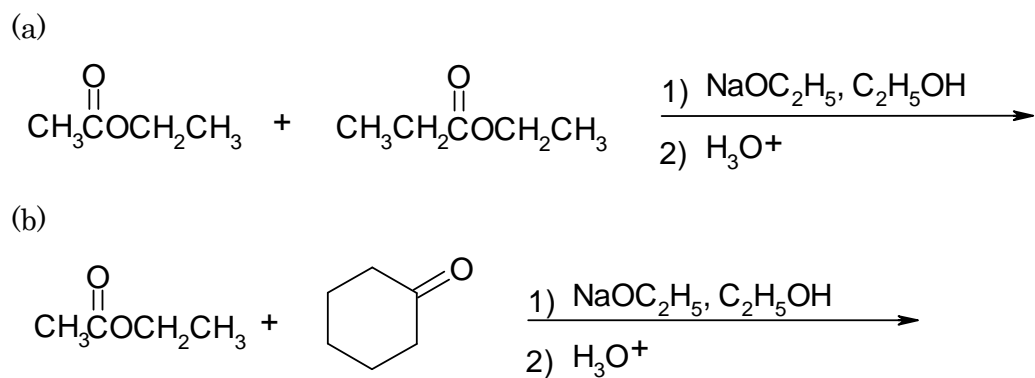


- (3) 次の反応で得られる主生成物の構造式を書け。ただし、反応に過不足のない量を加えるものとし、1)中で反応させた後、2)を加えるものとする。



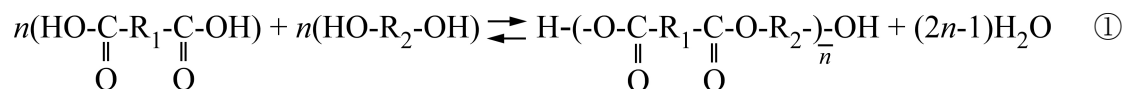


(4) 次の反応について、可能な縮合生成物をすべて答えよ。主に生成されると思われるものがあれば、理由を説明してそれを示せ。ただし、1)中で反応させた後、2)を加えるものとする。



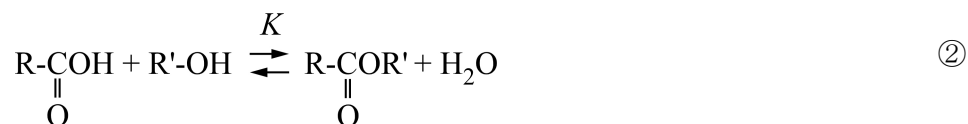
第7問

ペットボトルや衣服に使われているポリエステルは、ジカルボン酸とジオールの縮合反応が繰り返し起こることによって得られる。その一連の化学反応式を一つの式にまとめると形式的に以下のように書くことができる。



ここで n はモル数であり、それぞれ n モルのジカルボン酸とジオールから平均重合度 \bar{n} のポリエステルができることを示している。平均重合度としたのは、実際には種々の重合度のポリエステルができるからである。以下の問に答えよ。

- (1) 反応①の素反応は、次の平衡反応②で表される。



ここで、 K は平衡定数である。化学反応式中の成分 X の濃度を $[X]$ のように表し、平衡定数を示せ。

- (2) ジカルボン酸とジオールそれぞれ 1 モルから p モルのエステルが生成するとき反応度を p とする。 p を K の関数として求めよ。
- (3) ポリエステルを材料として使うには最低でも重合度が数百であることが必要である。平衡定数は、一般に温度や圧力の関数であるが、この反応の平衡定数は、温度や圧力を変えても大きく変化しない。そこで、生成する水を反応系から取り除くことで重合度を上げることが行われている。ジカルボン酸とジオールそれぞれ 1 モルが反応したとき、反応後に系内に残存する水は w モルであった。このときの反応度 p を K 、 w で表せ。また、 w が無視できるほど小さいとき、 p はどうなるか説明せよ。
- (4) 反応①において、反応を開始してからある時間経過後にはジカルボン酸とジオールは消費され、さまざまな重合度のポリエステルが生成している。この

ときの反応度 p は、反応によって消費されたジカルボン酸とジオールの官能基の総数を反応前の官能基の総数で割ったものとして与えられる。反応前のジカルボン酸とジオールそれぞれの分子数を N_0 、生成ポリエステルの総数を N として、反応度 p 、および生成したポリエステルの平均重合度 \bar{n} を求めよ。ただし、未反応のジカルボン酸およびジオールの分子数は、無視してよいものとする。

- (5) (4)において、 $w=p/10^4$ のとき、生成したポリエステルの平均重合度 \bar{n} は、いくらになるか。ただし、 $K=4$ とする。

- (6) この縮合反応は、ジカルボン酸とジオールの等モル反応である。ジカルボン酸（またはジオール）の消費速度は、

$$-dC/dt = kC^2$$

で与えられる。ここで k は反応速度定数、 C はジカルボン酸およびジオールの濃度である。また、生成する水は系から除去されるものとする。ジカルボン酸およびジオールの初期濃度を C_0 として、生成するポリエステルの平均重合度 \bar{n} の時間変化を式で表せ。ただし、反応速度定数 k は重合度によらないとする。また、 \bar{n} は C_0 とどのような関係にあるか、図を用いて説明せよ。

第 8 問

Fe^{2+} イオンを含む錯体の電子状態と磁性について以下の問に答えよ。

- (1) Fe^{2+} イオンの 3d 軌道の電子数はいくつか。
- (2) 電子配置を決めるフント則では、全スピン角運動量が最大になるように配置が決まる。その理由をパウリの排他律と電子間のクーロン反発エネルギーの観点から説明せよ。
- (3) Fe^{2+} イオンがほぼ孤立した状態にあるとき、フント則に従い、全角運動量 J 、軌道角運動量 L 、全スピン角運動量 S を求めよ。
- (4) Fe^{2+} イオンが 6 個の陰イオンが形成する八面体の中央に位置するとき、5 重縮退の軌道は 2 重縮退の e_g 軌道と 3 重縮退の t_{2g} 軌道に分裂する。これら 5 つの軌道の波動関数について、実空間の概形を描け。その形状が e_g 軌道と t_{2g} 軌道のエネルギーの大小関係を決める。エネルギーの大小関係を示した上で、その理由を説明せよ。
- (5) 磁性 Fe^{2+} イオンを含む多くの錯体において、1 イオンあたりの磁気モーメントの大きさは、 S だけで決まっている。その理由を説明せよ。
- (6) 鉄ピコリルアミン錯体 $[\text{Fe}(\text{2-ピコリルアミン})_3]\text{Cl}_2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ は、図 1 に示すように窒素八面体に囲まれた Fe^{2+} イオンを有する錯体である。磁化測定の結果によれば、この錯体中の Fe^{2+} イオンは室温で磁気モーメントを有する。ところが液体窒素温度 (約 77 K) まで冷却すると、錯体の色が黄色から濃赤色に変化すると同時に、 Fe^{2+} イオンの磁気モーメントは消失する。構造解析の結果は、Fe-N の結合距離が室温と液体窒素温度の間に大きく変化することを示していた。これらの情報をもとに、 Fe^{2+} イオンの磁気モーメントが消失した理由を説明せよ。

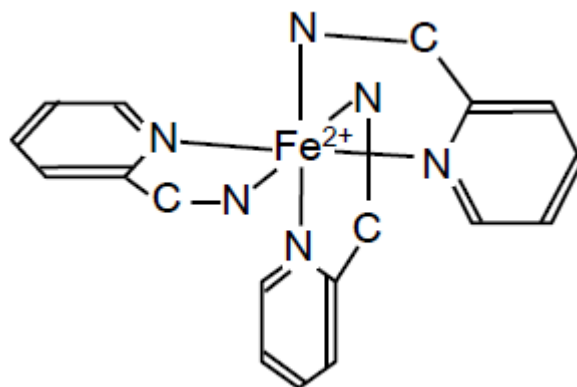


図1 鉄ピコリルアミン錯体における窒素八面体に囲まれた Fe^{2+} イオン（水素原子は省略している）。

第9問

原子 X と水素原子からなる XH_2 型の 3 原子分子の形を考える。ここで、原子 X は周期表第 2 周期の Be から O を表している。図 1 は、ウォルシュ図と呼ばれ、 $H-X-H$ のなす結合角 θ が 90° から 180° まで変化するとき、原子 X の $2s$ および $2p$ 軌道と水素原子の $1s$ 軌道からなる分子軌道 (①から⑥) のエネルギーがどのように変化するかを、表したものである。以下の問に答えよ。

- (1) 水素原子と原子 X の結合を担う分子軌道を考えるとき、 X の $1s$ 軌道は無視してもよい。原子 X の $1s$ 軌道のエネルギーを見積もり、その理由を説明せよ。ただし、水素の $1s$ 軌道のエネルギーは、 -13.6 eV である。
- (2) 図 1 の分子軌道②、③、④について、 $\theta = 90^\circ$ と $\theta = 180^\circ$ のときの分子軌道の形を図 2 の例に倣って描け。各原子軌道の符号関係が分かるようにすること。また、各分子軌道の形を基に分子軌道②、③、④のエネルギーが図 1 のように結合角の関数として変化することを説明せよ。
- (3) BeH_2 から H_2O までの 5 種類の 3 原子分子について、電子基底状態における形が直線形か折れ線形か、ウォルシュ図を使って説明せよ。
- (4) 電子基底状態にある NH_2 の結合角 θ は、第一電子励起状態ではどのように変化すると考えられるか、理由を述べて説明せよ。

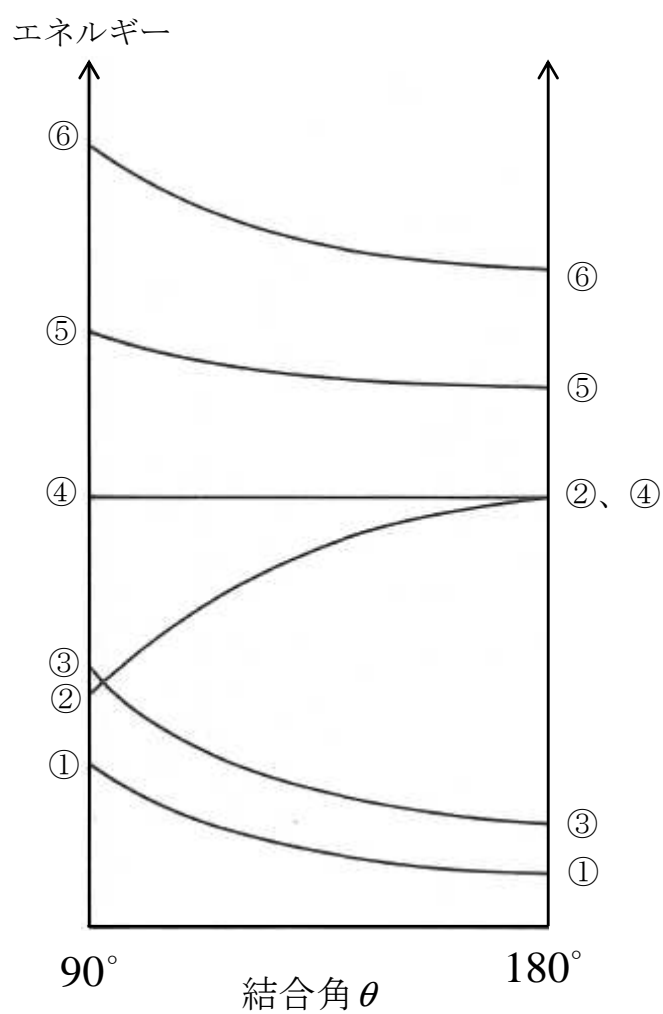


図1 XH_2 型 3 原子分子のウォルシュ図

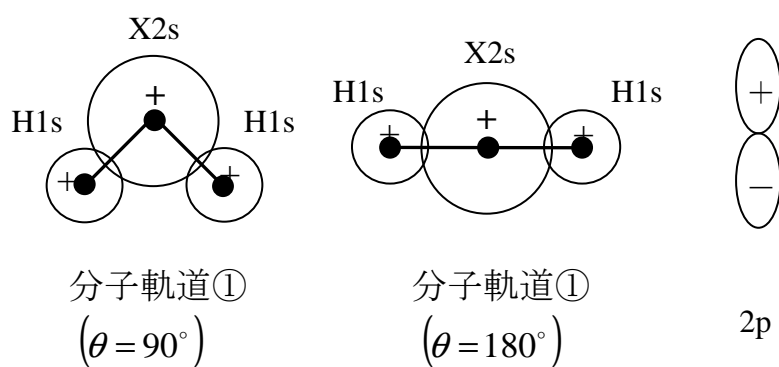


図2 $\theta = 90^\circ$ と 180° のときの分子軌道①の概形と 2p 原子軌道

第 10 問

以下の問に答えよ。式の導出過程、計算過程を示すこと。気体定数を R とする。

成分 A と成分 B からなる二元系溶液について考え、二元系溶液の全ギブスエネルギーを G とする。成分 A、B の化学ポテンシャル μ_A 、 μ_B は、圧力 P 、温度 T 、各成分のモル数 n_A 、 n_B の関数であり、次式で表される。

$$\mu_A = \left(\frac{\partial G}{\partial n_A} \right)_{n_B, P, T}, \quad \mu_B = \left(\frac{\partial G}{\partial n_B} \right)_{n_A, P, T}$$

- (1) 二元系溶液の全ギブスエネルギー G は μ_A 、 μ_B を用いてどのように表されるか。
- (2) 定温、定圧でのギブス・デュエムの式 $n_A d\mu_A + n_B d\mu_B = 0$ を導出せよ。
- (3) 二元系溶液の成分 A の化学ポテンシャル μ_A と純物質基準の成分 A の活量 a_A の関係を示せ。 μ_A° を純物質 A の化学ポテンシャルとする。
- (4) 二元系溶液の成分 A が低濃度であり、活量とモル分率の関係がヘンリーの法則に従うとき、成分 B の活量とモル分率の関係がラウールの法則に従うことを示せ。
- (5) 二元系溶液の成分 A の部分モルエンタルピー \bar{H}_A は、ある温度で A のモル分率 x_A の関数として次式で表される。

$$\bar{H}_A = 1250 (1 - x_A)^2 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$$

成分 B の部分モルエンタルピー \bar{H}_B を B のモル分率 x_B の関数として表せ。

- (6) (5) のモルエンタルピーの式を用いて 40 mol% A – 60 mol% B 溶液の混合モルエンタルピーを求めよ。

第 11 問

以下の問に答えよ。

- (1) プランクの放射式によると、波長 λ の光の単色黒体放射熱流束 $E_{B\lambda}$ は式①で表わされる。

$$E_{B\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left[\frac{hc}{\lambda k_B T}\right] - 1} \quad \text{①}$$

ただし c は真空中での光速、 h はプランク定数、 k_B はボルツマン定数、 T は温度を表す。

式①は、それ以前に提示されていた、長波長領域でのみよく一致するレーリー・ジーンズの放射式 (式②) と、短波長領域でのみよく一致するウイーンの放射式 (式③) で示されていた単色黒体放射熱流束の光の波長依存性を一つの式で表すことに成功したものである。

式①は、長波長領域ではレーリー・ジーンズの放射式 (式②) に、また、短波長領域ではウイーンの放射式 (式③) になることを導け。

$$E_{B\lambda} = \frac{2\pi k_B T}{\lambda^4} \quad \text{②}$$

$$E_{B\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \exp\left[-\frac{hc}{\lambda k_B T}\right] \quad \text{③}$$

- (2) 式①で表わされる単色黒体放射熱流束から、ステファン・ボルツマンの放射式と呼ばれる黒体放射熱流束 E_B を表す式④が導かれることを示せ。

$$E_B = \sigma T^4 \quad \text{④}$$

ただし、 σ は、 $\sigma = \frac{2\pi k_B^4}{c^2 h^3} \frac{\pi^4}{15} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ で表わされるステファ

ン・ボルツマン定数であり、また、 $\int_0^\infty \frac{x^3}{\exp(x) - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}$ である。

- (3) 無限に広い 2 枚の対向する平板 (平板 1 ; 温度 900 K、および、平板 2 ; 温度 300 K) がある場合、定常状態における、これらの平板間の放射熱流束を求めよ。ただし、この 2 枚の平板は黒体であるとする。次に、2 枚の平板の間に 1 枚の薄い黒体板を新たに置いた場合、定常状態における放射熱流束を求めよ。

- (4) 次の 3 種類の温度計の測定原理について説明せよ。

(a) 放射温度計 (b) 熱電対温度計 (c) サーミスター温度計

第 12 問

下記の問に答えよ。

- (1) 図 1 は Al—Cu 二元系状態図の一部を示している。
- (a) 図中の A 点と B 点、A 点と C 点、B 点と D 点を結ぶ線をそれぞれ何と呼ぶか。
また、C 点で生じる反応の名称を答えよ。
- (b) 図中に示した (ア) ～ (ウ) の領域に存在する相をそれぞれ答えよ。
- (c) 組成 X の融液を室温まで冷却する。このとき得られる組織は冷却速度に依存する。
下記の問に答えよ。なお、必要であれば図 1 に示した温度 T_1 、 T_2 、 T_3 を用いてよい。
- ① 平衡を保ちながら十分ゆっくりと冷却した。このときの組織変化を、冷却過程に従って模式的に示し説明せよ。
 - ② 固相内での拡散が十分生じない速度で非平衡的に冷却した。このときの組織変化を、冷却過程に従って模式的に示すとともに、①のように冷却したときの組織変化との違いについて説明せよ。
- (d) 組成 X の融液を室温まで冷却した後、熱処理を行うと合金強度が向上した。この熱処理の方法を説明し、強度向上の理由を説明せよ。
- (2) 図 2 は Cu—Zn 二元系状態図の一部を示している。
- (a) 図 2 中に示した (ア) および (イ) の領域に存在する相をそれぞれ答えよ。
- (b) 図 2 中の A 点と B 点を結ぶ線は何を表しているか答えよ。
- (c) 図 2 中の破線で囲まれた領域では包晶反応が生じる。この部分の状態図を示せ。
- (d) この合金系では、(1) で用いられている強度向上のための手法は用いられていない。この合金で主に用いられる強度向上の手法を答え、強度が向上する理由を説明せよ。
- (3) 図 3 は Fe—C 二元系の準安定系状態図の一部を示している。
- (a) この合金系では図 3 以外に安定系状態図がしばしば用いられる。準安定系状態図および安定系状態図の違いについて説明せよ。
- (b) 図 3 に示した A 点で生じる反応の名称を答えよ。
- (c) この合金系では熱処理温度および冷却条件で複雑に組織が変化する。図 4 は恒温熱処理線図を模式的に示している。図には変態開始および変態終了の線図が描かれており、また、図に示した温度 T_1 は図 3 の A 点で生じる反応の温度と一致している。
- ① 温度 T_2 および T_3 では、どのような変態が開始、終了するか答えよ。
 - ② 図に破線で示した熱処理を行うとどのような組織が得られるか。得られる組織の名称を答えよ。
 - ③ 図 4 を答案用紙に書き写し (図中に示した破線を書き写す必要はない)、その線図中にパーライト組織を得るための熱処理操作を記入せよ。
- (d) 図 4 を利用して、鋼の強度を向上させる手法について説明せよ。

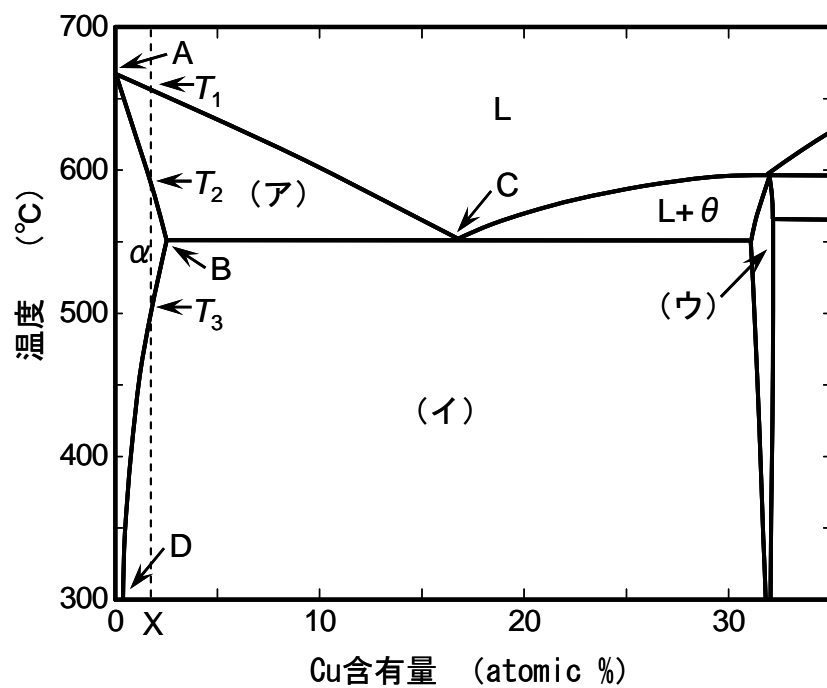


図 1

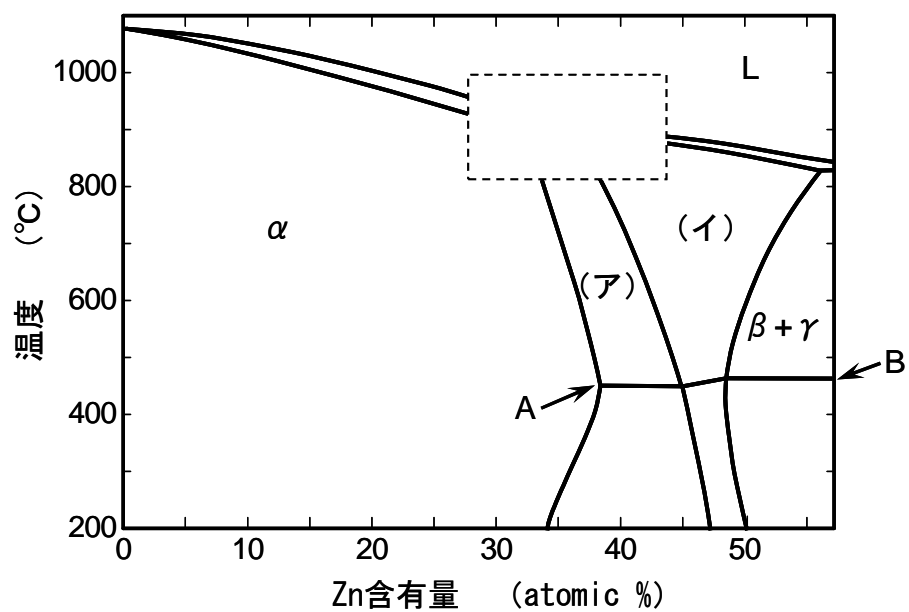


図 2

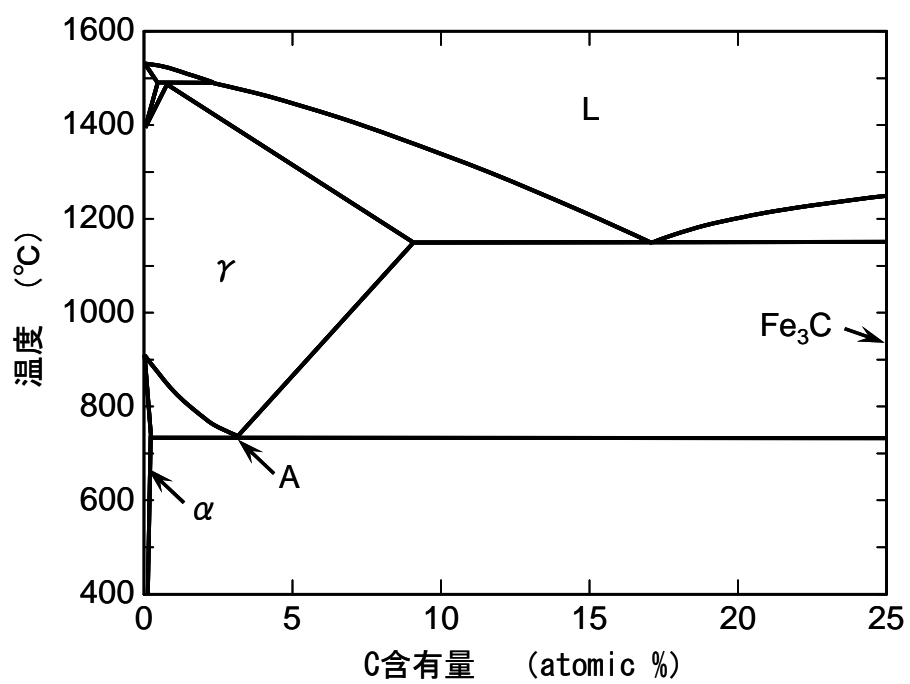


図 3

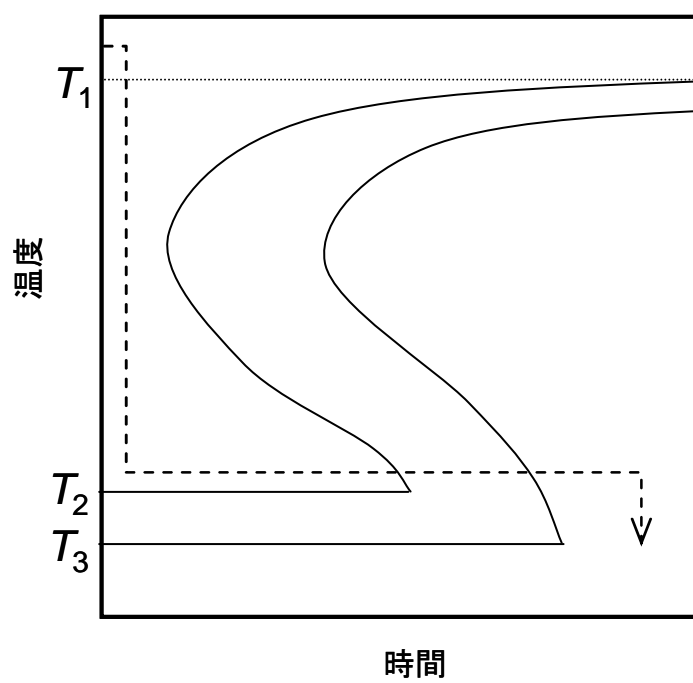


図 4

第 1 3 問

以下の問に答えよ。

- (1) III-V 族半導体である GaAs に、(a) 極微量の Se (VI 族元素) を添加した場合、および、(b) 極微量の Cd (II 族元素) を添加した場合、それぞれについてどのような電子準位が新たにできるか説明せよ。
- (2) 図 1 に GaAs の可視・紫外領域での室温の光吸収係数を示す。この図より、バンドギャップエネルギーを、eV 単位で求めよ。ただし、プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 、光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、電気素量 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ を使ってよい。
- (3) GaAs の光デバイスへの応用例をひとつ挙げ、どのような原理を利用しているか答えよ。
- (4) 電子を一次元方向に閉じ込め、二次元の運動の自由度を残した系を量子井戸と呼ぶ。無限大障壁をもつ量子井戸の状態密度が階段状になることを導く。
- (a) z 軸方向に閉じ込めた量子井戸の幅を l とする。 xy 平面内では二次元の自由電子と考えて良い。井戸の中のシュレディンガー方程式と、 x 軸、 y 軸方向に長さ L ($L \gg l$) の周期的境界条件を使った場合の解は、次のようになる。

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi(\mathbf{r}) = \varepsilon \psi(\mathbf{r})$$

$$\psi(\mathbf{r}) = \psi_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{2}{L^2 l}} e^{i(k_x x + k_y y)} \cdot \sin(k_z z)$$

ここで、 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ で、 m 、 \mathbf{r} 、 k_x 、 k_y 、 k_z は、電子の質量、位置ベクトル、波数ベクトル \mathbf{k} の x 、 y 、 z 成分である。

k_x 、 k_y 、 k_z は、どのように量子化されるか、答えよ。

- (b) エネルギー ε 以下の単位面積当たりの状態の数 $\rho(\varepsilon)$ を求めよ。さらに、単位面積当たりの状態密度 $D(\varepsilon)$ を求め、 $D(\varepsilon)$ を ε に対して図示すると階段状になることを示せ。
- (5) AlGaAs/GaAs/AlGaAs のような半導体量子井戸の作製プロセスとして、おもに分子線エピタキシー法が用いられる。この方法の原理と特徴について説明せよ。
- (6) 上記のような半導体量子井戸の光デバイスは、(4) (b) のような状態密度となることにより、量子井戸構造とならない GaAs の光デバイスに比べて、どのような利点があるか、ひとつ答えよ。

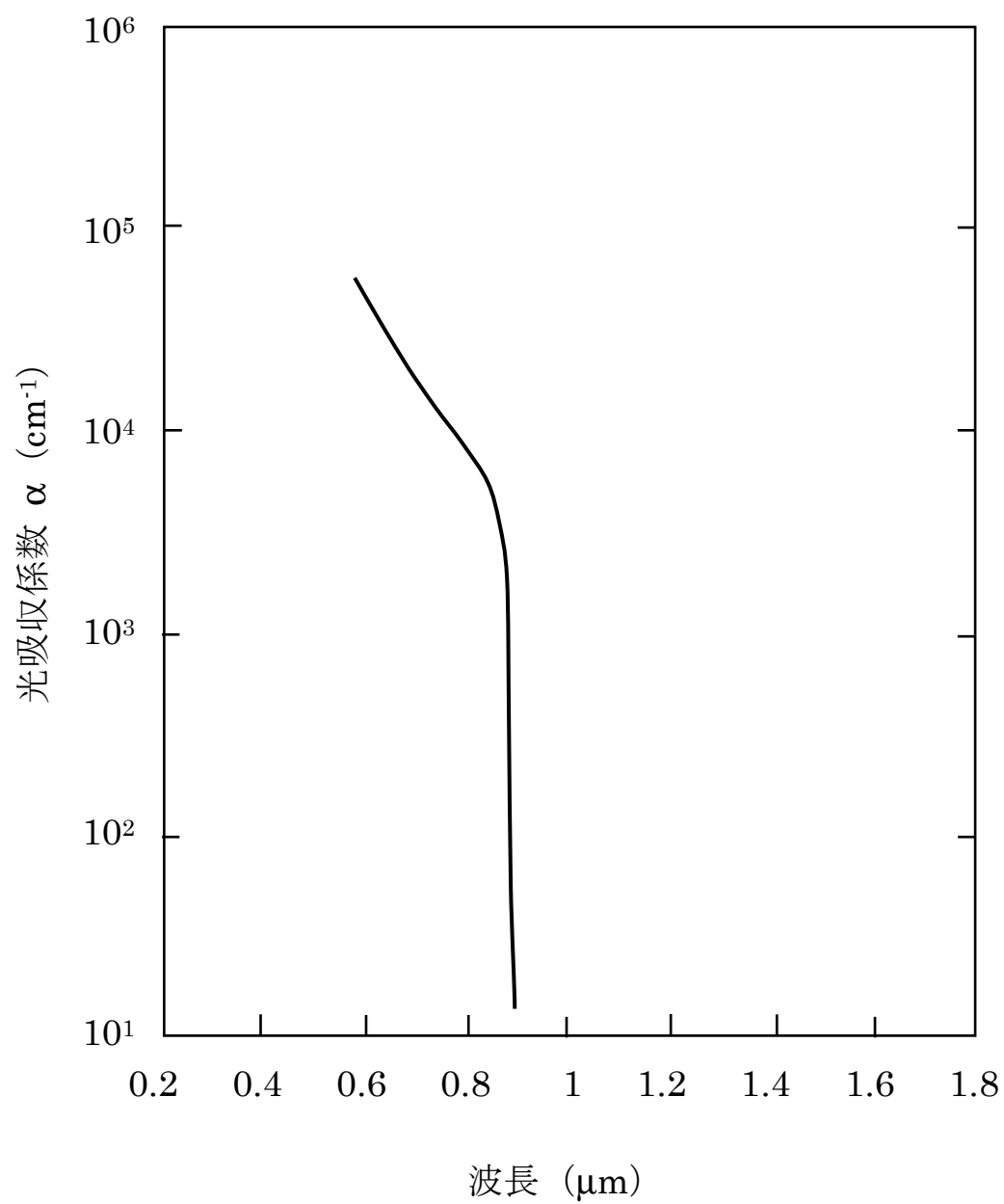


図 1