平成２７年度

東京大学大学院 工学系研究科
マテリアル工学専攻
入学試験問題

マテリアル工学基礎

平成 26 年 8 月 26 日（火）　13:00 ～ 16:00

受験番号(Candidate No.)					

- 注意事項 -

1) 試験時間は 180 分である。
2) 問題は全部で 8 問ある。この中から 4 問を選択して解答すること。5 問以上解答した場合は全問無効となる。
3) 解答は必ず 1 問を 1 枚の解答用紙に記入すること。解答用紙には選択した問題の番号を記入すること。用紙の表面だけで書ききれない場合には，その旨を記入して裏面を使用すること。
4) 日本語か英語で解答すること。
5) 計算には問題冊子の余白などを適宜使用すること。
6) 問題冊子にも受験番号を記入すること。
7) 問題冊子は持ち帰らないこと。

（計算用紙）

（計算用紙）

【第 1 問】

以下の各問いに答えよ。但し，気体定数を R: 8.314 J·K^{-1}·mol^{-1}，気体は理想気体と見なし，標準圧力は 1.0 atm とする。なお，有効数字 2 桁で解答せよ。

1. 次の気相反応において，1.0 mol の A と 1.0 mol の B を混合し，298 K で平衡にしたとき，ガスは全圧 1.0 atm で 0.90 mol の D を含んでいた。

   A + B　→　C + 3D

   1) 平衡における各ガス種のモル分率，平衡定数 K，標準反応 Gibbs エネルギー$\Delta_r G°$（kJ·mol^{-1}）を求めよ。

   2) この反応の標準反応エンタルピーは，298 K と 400 K の間では一定とみなすことができ +10 kJ·mol^{-1} である。400 K における平衡定数 K を求めよ。

   3) 400 K，全圧 2.0 atm で平衡にした時の各ガス種の分圧を求めよ。

2. 電気化学に関する以下の問いに答えよ。但し，ファラデー定数を F: 9.649 × 10^4 C·mol^{-1} とする。(g)，(s)，(aq)の表記は，それぞれの物質が気体，固体，水溶液の状態であることを示している。

   1) 以下の文章を読み，空欄に適切な語句，数字，反応式を埋めよ。

   電池は二つの電極を組み合わせて作製され，作った電池の__①__の測定から，用いた電極の電極電位の差を求めることはできる。しかしながら，それぞれの電極の電極電位の値を求めることはできない。そこで，(1)式に示す__②__の電極電位を 0 V と決めて，この電極と他の電極を組み合わせて電池を作り，作った電池の__①__の値から他の電極の電極電位を求めることにしている。

   Pt (s), H_2 (g)(P_{H_2} = 1 atm) | H^+ (aq)(a_{H^+} = 1)　$E°$ = 0 V　　(1)

電池を組んだとき、 ② の方がカソードとして働く時には，他方の電極は ③ の電極電位を有している。

二つの電極を組み合わせて作った次の電池

$$Zn \mid ZnSO_4\,(aq) \parallel AgNO_3\,(aq) \mid Ag$$

のアノードおよびカソードでは，それぞれ以下の反応が起こり，

アノード：＿＿＿＿④＿＿＿＿

カソード：＿＿＿＿⑤＿＿＿＿

全体では，＿＿＿＿⑥＿＿＿＿の反応が起こる。

2) 298 K において，以下の還元半反応の標準電極電位が分かっている。

$Cu^{2+}\,(aq) + 2e^- \rightarrow Cu\,(s) \quad E° = +0.340\ V$

$Cu^{+}\,(aq) + e^- \rightarrow Cu\,(s) \quad E° = +0.522\ V$

この時，以下の反応の標準電極電位を計算せよ。

$Cu^{2+}\,(aq) + e^- \rightarrow Cu^{+}\,(aq)$

3) 2)の結果を利用して，298 K における以下の反応に対する平衡定数を計算せよ。

$2Cu^{+}\,(aq) \rightarrow Cu\,(s) + Cu^{2+}\,(aq)$

【第２問】

酸化インジウム（In_2O_3）は常温，常圧において，立方晶に属するビックスバイトと呼ばれる構造をとる。この構造は蛍石（CaF_2）型構造（図 1）から一部の原子を取り除いたものとみなすことができる。In_2O_3 は可視光を透過する性質を持っており，特に，In サイトの数%程度を Sn で置換した ITO（indium tin oxide）は，高濃度の電子キャリアが安定して生成し，ディスプレイ用の透明導電層に利用されている。以下の問いに答えよ。

1. 図 1 の蛍石型構造が属するブラベー格子の名称を答えよ。

2. 図 1 の蛍石型構造の Ca と F をそれぞれ In と O で置き換えると，In を囲む O が占めることのできる位置（サイト）は 8 個ある。しかし，実際の In_2O_3 結晶では In に対する O の配位数は 6 である。即ち，ビックスバイト構造では、8 個の O のサイトのうち，2 つは空サイトのままとなる。空サイトは互いに隣り合わないように配置されることを考慮すると，In を取り囲む酸素の配置には，結晶学的に等価ではない 2 通りがある。この 2 つの配置の違いについて図を用いて説明せよ。ただし，In 原子を中心に置き，それを取り囲む O 原子を描いた図とすること。

3. ITO では，In サイトを置換した Sn 原子が Sn^{4+}イオンへ変わることにより電子キャリアを 1 つ生成する。この反応をクレーガー=ビンク（Kröger–Vink）の表記法を用いて表現せよ。ただし，In サイトに入った Sn 原子を Sn_{In} と表わし，これを左辺とせよ。また，正の電荷にはドット（・），負の電荷にはダッシュ（′）を付けること。

4. ITO の導電率は，その熱処理を酸化雰囲気中で行ったときの方が，同じ処理を還元雰囲気中で行った場合よりも低下する傾向がある。この現象の理由として考えられるものを「酸素の空サイト」「電子」の 2 つの言葉を用いて 100 字以内で説明せよ。

5. In^{3+}と O^{2-}のそれぞれのイオン半径を 0.80 Å，1.38 Å とし，In_2O_3 結晶を格子

定数 a の蛍石型構造から O 原子を引き抜いたものとみなす。In と O の結合距離を In^{3+} と O^{2-} のイオン半径の和で近似できるもの仮定するとき，a の値を有効数字 2 桁で計算せよ。計算過程も示すこと。

6. 組成が $In_{1.94}Sn_{0.06}O_3$ で表わされる ITO において, Sn を導入することによってのみキャリアが生成し，導入された Sn がそれぞれ 1 つの電子キャリアを生成すると仮定する。問 5 で求めた格子定数を用いて，キャリア濃度を有効数字 2 桁で推定せよ。ただし，Sn 置換によって生じる結晶構造や格子定数の僅かな変化は無視してよい。計算過程も記述すること。

7. ITO の In サイトのうち，Sn によって置換される割合 x を増やしたときに格子定数 a が変化する様子について，図 2 に模式的に示した。Sn^{4+} のイオン半径が In^{3+} よりも小さいことに留意し，以下の問いに答えよ。ただし，格子間原子の影響は無視してよいものとする。
   1) x が小さいときに a が一旦低下する理由を述べよ。
   2) さらに x を増やすと a が増大する理由を簡潔に述べよ。

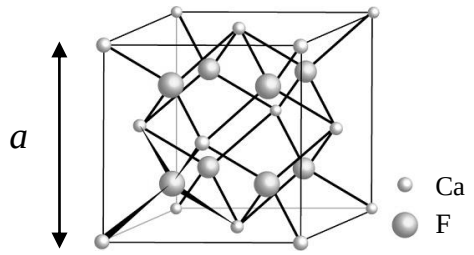


図 1

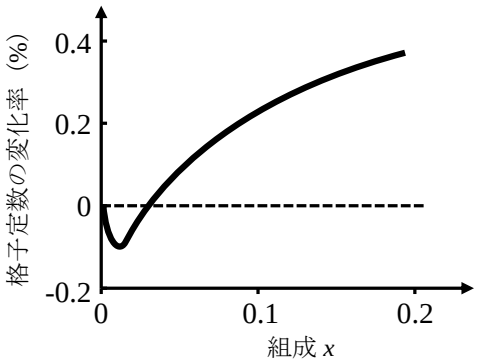
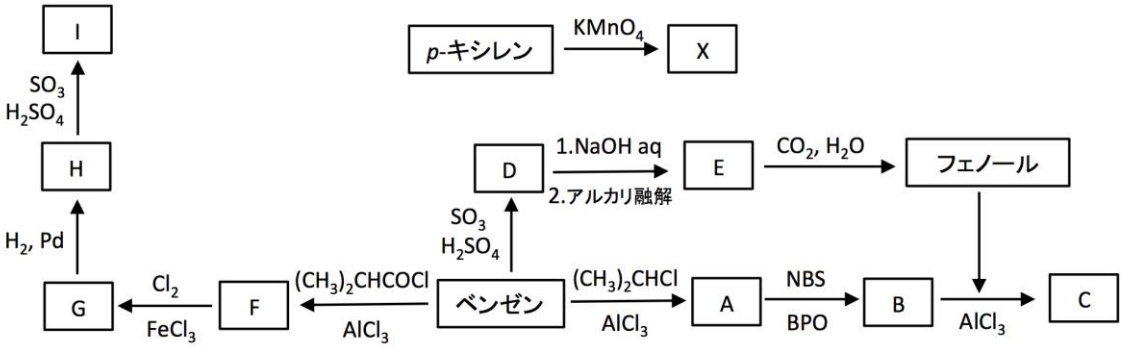


図 2

【第３問】

以下の図は，ベンゼンおよびその誘導体を出発物質として種々の化合物を合成する反応経路を示している。次の文章 I〜III を読み，以下の問いに答えよ。



注）NBS：*N*-ブロモスクシンイミド，BPO：過酸化ベンゾイル

I. 化合物 C のパラ位をヒドロキシ化した化合物はビスフェノール A と呼ばれる。ビスフェノール A とジフェニルカーボネートとの［ a ］交換反応により重合を進行させると，ポリカーボネートと呼ばれるポリマーP1（エンジニアリングプラスチックの一種）を合成することができる。このとき同時に生成物として［ b ］が生じる。

II. ポリエチレンテレフタレート（PET）は，<u>化合物 X とジオール化合物 Y の縮合重合（重縮合）</u>によって得られる。また X の代わりにそのジメチル［ a ］である化合物 Z を用いても PET を合成することができる。この場合，Z とそれに対し二当量の Y を加熱すると［ a ］交換反応により化合物 W が生成される。そのとき同時に生成するのは［ c ］である。さらに加熱すると，［ a ］交換反応により化合物 W が重合して PET が生成する。このとき同時に生成するのは［ d ］である。

III. スーパーエンジニアリングプラスチックの一種であるポリマーP2 は，高耐熱性・難燃性であり，かつ合成高分子繊維の中で最高レベルの引張り強度を有している。ポリマーP2 は，X と 4,6-ジアミノベンゼン-1,3-ジオ

ールを出発原料として二段階で合成される。まず重縮合によりポリマーP2 の前駆体であるポリマーP2*を合成する。その後 P2*を 300°C 以上に加熱すると分子内脱水縮合反応が進行し，ポリマーP2 が得られる。

1. 化合物 A〜I の構造式を記せ。ただし，G は主生成物の構造式，I は三置換ベンゼンとして考えられる異性体のすべての構造式を記せ。

2. ポリマーP1，P2*および P2 の構造式を記せ。

3. 空欄 a 〜 d にあてはまる語句あるいは化合物名を記せ。

4. 化合物 W の構造式を記せ。

5. 酸を触媒とした下線部の反応において，最初に X と Y の物質量が等しく，重合反応が平衡に達したとき，平衡定数 K を反応率 p（$0 < p < 1$）を用いて表せ。環状ポリマーは生成しないものとする。

6. 問 5 の条件において，数平均重合度 x_n を K を用いて表せ。

7. 一般的に K の値は 10 よりも小さい。問 6 の結果から，合成繊維として使える十分な強度を持つ PET（x_n が 100 程度）を合成するためには反応中どのような操作をすればよいか理由とともに 50 字程度で簡潔に述べよ。反応中温度は一定に保つものとする。

【第４問】

1. 質量 M，半径 a の剛体球が水平面上に静止している。この球に対して図１のように，中心を含む鉛直面内で水平面からの高さ h のところに水平な撃力 P を加えたときの球の運動を考える。以下の問いに答えよ。ただし，球と面の動摩擦係数はμ，重力加速度をgとする。また，ここで球が水平面上ですべらずにころがる際のエネルギー損失は無視できるものとする。

   1) 球の中心を回転軸としたときの慣性モーメント I が $\frac{2}{5}Ma^2$ になることを示せ。

   2) 球に水平な撃力 P を加えた直後から速度 u_0 で動き，角速度ω_0 で転がり始めたとする。このように球がすべらずに転がるためにはどの高さに撃力を加える必要があるか求めよ。ここで，すべらず転がる条件は水平面に対する球の接点の速度 v_0 が 0 の場合とする。

   3) 球の中心の高さ（$h = a$）に水平な撃力 P を加えた場合を考える。球がすべらずに転がり始めるまでに要する時間 t_1 が $\frac{2P}{7M\mu g}$ となることを示せ。

   4) 引き続き，球の中心の高さ（$h = a$）に水平な撃力 P を加えた場合を考える。十分に離れた位置に水平面となす角θ の斜面がある。球がこの斜面をすべらずに転がり上がるとき，どの高さまで上がるか求めよ。ただし，θは十分に小さいものとする。

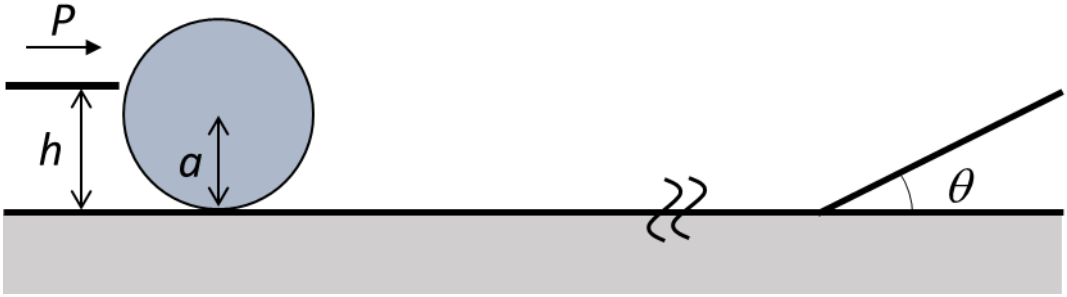


図１

2. 自動車の衝突安全性および軽量化について考える。以下の問いに答えよ。

1) 図 2 に示すように長さ L の両端支持ばりの中央部に高さ H から重さ W の剛体を落下させる。この衝撃の際の最大たわみを求めよ。ただし，このはりのヤング率を E，断面 2 次モーメントを I_z とする。また，剛体の大きさを無視し中央部に衝撃荷重が加わるとする。ここで，静的な集中荷重 P を中央部に作用させたときの中央部のたわみ量は$y = \frac{PL^3}{48EI_z}$で与えられる。

2) 衝突の際の押し込み深さ量を維持しつつ構造部材の軽量化を図りたい。同じ材料を用い, 幾何形状のうち断面のみを変える場合, 断面形状 10 cm × 10 cm の正方形の場合よりも 50%軽量化するためにはどのような断面形状にすればよいか具体的な例を一つ形状およびその大きさも示せ。ただし，その導出過程を示すこと。

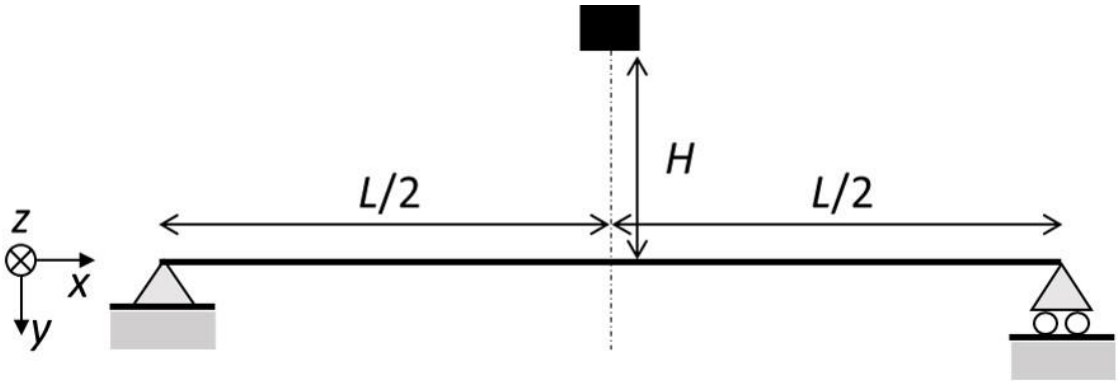


図 2

【第５問】

Maxwell 方程式は電磁場の振る舞いを決定する基本方程式であり, 次式で表される。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \tag{3}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t \tag{4}$$

ここで，$\mathbf{D}$，$\mathbf{B}$，$\mathbf{E}$，$\mathbf{H}$はそれぞれ電束密度，磁束密度，電場，磁場を表すベクトルである。さらに，tは時間，ρは電荷密度であり，$\mathbf{J}$は電流密度ベクトルである。

1. 電荷および導電性のない誘電体中を伝搬する電磁波を考える。ここで，$\exp(-i\omega t)$（iは虚数単位，ωは角振動数）の時間依存性をもつ電磁波が伝搬するとき，Maxwell方程式(1)，(2)，(3)および(4)はどのように書き直せるか。偏微分$\partial/\partial t$は消去すること。左辺はそのままでよい。

2. 図1のように，真空中（誘電率ε_0）から平坦な表面をもつ誘電体1（誘電率$\varepsilon_1 (> \varepsilon_0)$）に向かって，$\exp(-i\omega t)$の時間依存性をもつ電磁波が入射した。透磁率$\mu_0$は一様とする。また，$x$，$y$，$z$方向は図1に示したように定義し，それぞれの方向への単位ベクトルを$\vec{x}$，$\vec{y}$，$\vec{z}$で表す。入射波の磁場の時間に依存しない項が$\mathbf{H}_{\mathrm{i}} = \vec{x} H_{\mathrm{i}x} = \vec{x} H_0 \exp\left[i\left(k_{0y} y - k_{0z} z\right)\right]$で表されるとする。$H_0$は振幅，$+k_{0y}$および$-k_{0z}$はそれぞれ入射波の波数ベクトル$\mathbf{k}_{\mathrm{i}}$の$y$および$z$方向成分である。入射波の電場の時間に依存しない項$\mathbf{E}_{\mathrm{i}}$を求めよ。導出過程も示せ。

3. 真空と誘電体1の境界面においては電磁波の反射および透過が生じる。反射波および透過波の磁場の時間に依存しない項をそれぞれ

$$\mathbf{H}_{\mathrm{r}} = \vec{x} H_{\mathrm{r}x} = \vec{x} r_{01} H_0 \exp\left[i\left(k_{0y} y + k_{0z} z\right)\right] \tag{5}$$

$$\mathbf{H}_{\mathrm{t}} = \vec{x}H_{\mathrm{t}x} = \vec{x}t_{01}H_0 \exp\left[i\left(k_{1y}y - k_{1z}z\right)\right] \tag{6}$$

と表す。ここで，r_{01}は反射係数，t_{01}は透過係数である。$+k_{0y}$および$+k_{0z}$はそれぞれ反射波の波数ベクトル$\mathbf{k}_{\mathrm{r}}$のyおよびz方向成分，$+k_{1y}$および$-k_{1z}$はそれぞれ透過波の波数ベクトル$\mathbf{k}_{\mathrm{t}}$のyおよびz方向成分である。境界面においては，磁場および電場の接線成分がそれぞれ連続になる。r_{01}およびt_{01}を誘電体1の屈折率n_1（$=\sqrt{\varepsilon_1/\varepsilon_0}$），入射角$\theta_0$および屈折角$\theta_1$を用いて表せ。導出過程も示すこと。なお，$|\mathbf{k}_{\mathrm{i}}| = |\mathbf{k}_{\mathrm{r}}| = k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$，$|\mathbf{k}_{\mathrm{t}}| = n_1 k_0$および$k_{0y} = k_{1y}$であり，$\theta_0$および$\theta_1$は図1のように定義する。

4. $k_{0y} = k_{1y}$の関係に基づいて，n_1をθ_0とθ_1を用いて表せ。さらに，問3で得られた反射係数r_{01}の式からn_1を消去し，r_{01}を$\tan(\theta_0+\theta_1)$および$\tan(\theta_0-\theta_1)$を用いて表せ。$\sin\theta_0\cos\theta_0 \pm \sin\theta_1\cos\theta_1 = \sin(\theta_0 \pm \theta_1)\cos(\theta_0 \mp \theta_1)$の関係を用いて良い。導出過程も示すこと。

5. 入射角θ_0を適切に設定すると反射光が消失する。反射光が消失するときのθ_0をn_1を用いて表せ。また，この現象をどのように使うことができるかを5行程度で説明せよ。

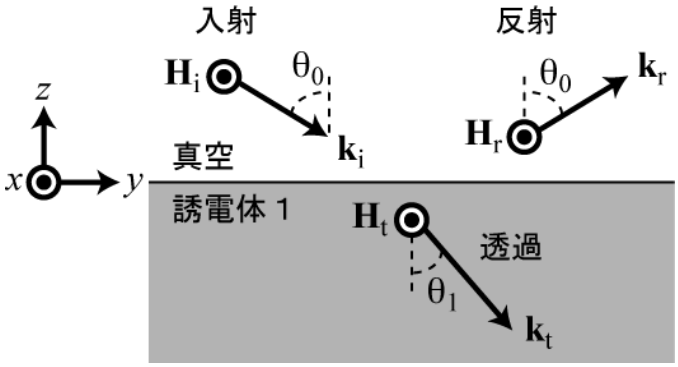


図 1

【第６問】

1. 固体を構成する原子の振動は様々な材料物性とかかわる重要な現象である。図 1 のように質量 M の原子同士がバネ定数 S のバネでつながれて一次元鎖を形成している場合を考える。外部からの熱などにより各原子が平衡位置からずれ，わずかに変位する。そのとき原子に働く力は平衡原子間隔からのずれの大きさに比例し，相互作用は両隣原子との間にだけ働き，各原子は x 軸方向のみに変位するものと考える。以下の問いに答えよ。

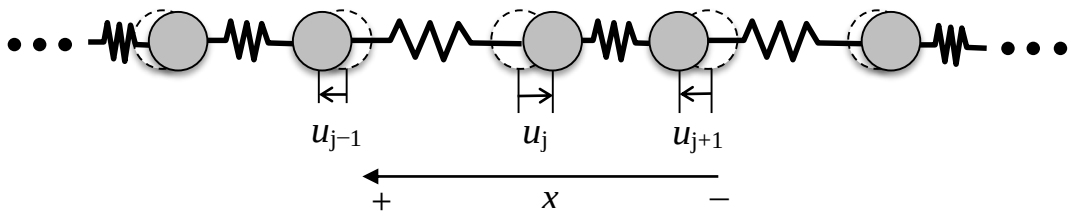


図 1

1) 平衡位置での原子間距離を a，j–1，j，j+1 番目の原子の平衡位置からの変位を u_{j-1}，u_j，u_{j+1}，時間を t とした場合，j 番目の原子に関する運動方程式を M，u_{j-1}，u_j，u_{j+1}，S，t を用いて表せ。

2) すべての原子が同じ角振動数ωで振動し，上問 1)で得られた運動方程式の解が波数 k とωを用いて $u_j = \mathrm{A}\exp[-i(\omega t - jka)]$で与えられる場合，$k$ に対するωの分散関係を，S，k，M，a を用いて表せ。ただし，A は振幅（定数）であり，i は虚数単位である。

3) 上問 2)で得られた分散関係を，縦軸ω，横軸 k として第一ブリルアンゾーンの範囲で図示せよ。ただし，ωの極大値とその時の k を明記すること。

2. 次に，図 2 に示すように質量 M の原子がバネ定数 S_1 と S_2 のバネで交互につながれた一次元鎖を考える。隣接原子間距離の平衡値が $a/2$ である。図 2 に示すように，原子は両隣の原子とのみ相互作用し，各原子は x 軸方向のみに変位するものと考える。以下の問いに答えよ。

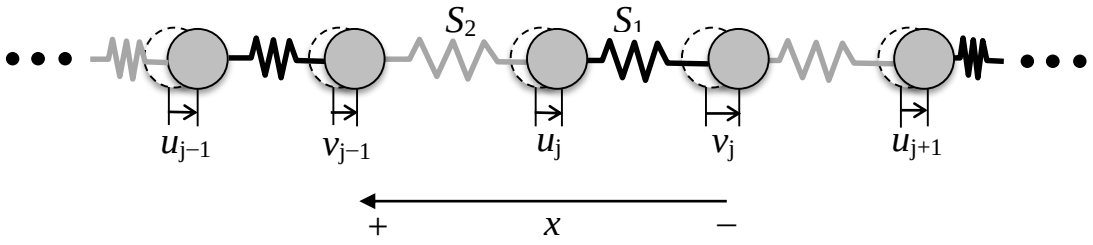


図 2

1) 各原子の平衡位置からの変位を u および v で表し, 時間を t とした場合, j 番目のそれぞれの原子の運動方程式を M，u_j，v_j，v_{j-1}，u_{j+1}，S_1，S_2，t を用いて表せ。

2) すべての原子が同じ角振動数 ω で振動し，問 1)で得られた運動方程式の解が波数 k と ω を用いてそれぞれ $u_j = A\exp[-i(\omega t - jka)]$，$v_j = B\exp[-i(\omega t - jka)]$ で表わされるとき k に対する ω の分散関係を S_1，S_2，k, a，M を用いて表わせ。ただし，A, B は振幅（定数）であり，i は虚数単位である。

3. 固体の格子振動を実験的に測定する手法を一つ原理も含めて 100 字程度で説明せよ。

【第７問】

1. 結晶材料の塑性変形について考える。

   1) ミラー指数には，{hkl}，(hkl)，<hkl>，[hkl]の４つの表示の仕方があるが，それぞれ何を示すのか記せ。

   2) すべり系（すべり面, すべり方向）を決める因子について述べ, 面心立方晶（FCC）および体心立方晶（BCC）の代表的なすべり系を記せ。

   3) 断面積 S の単結晶の丸棒に，長手方向の引張り力 F を負荷して塑性変形した場合を考える。この時，引張り方向とすべり面の法線のなす角度を φ，引張り方向とすべり方向のなす角度を λ とした場合，臨界分解せん断応力 τ_0 を求めよ。

2. 結晶の異方性や粒界破壊の効果を考慮しないセラミックスの理想破壊強度を考える。

   1) 結晶の平衡原子面間距離を a_0，ヤング率を E，表面エネルギーを γ_s とした際，固体の理想強度が $\sigma_c = \sqrt{\dfrac{E\gamma_s}{a_0}}$ で表されることを，結晶間に働く応力を原子の位置を変数とした正弦関数で近似して導け。

   2) 平面応力状態を仮定し，この固体の無限体に引張り応力 σ を印加したところ，固体内部に付加方向と垂直に奥行き無限大の楕円状き裂（長軸の長さ $2c$）が発生した。この場合に解放される単位厚さあたりの弾性エネルギーは，$W_{el} = \dfrac{\pi\sigma^2 c^2}{E}$ で表される。一方，亀裂の表面エネルギーは，単位厚さあたり $W_s = 4c\gamma_s$ で表される（γ_s：単位面積あたりの表面エネルギー）。W_{el} と c，W_s と c の関係を図示し，Griffith の式を導出せよ。

3. セラミックスは通常その破壊応力が降伏応力よりも小さいために塑性変形する前に脆性破壊してしまうが，セラミックスでも高温にすれば塑性変形する。

1) 転位運動による塑性変形の場合のみ考慮し，パイエルスポテンシャルの大小からこの現象を考察せよ。

2) 実際にセラミックスで観察される強度の温度依存性について図示して説明せよ。なお，弾性率の温度依存性は無視できるほど小さいとする。

4. パイエルスポテンシャルは純金属の変形応力と密接に関係している。BCC 金属は，らせん転位の運動に対して大きな抵抗を示す。この理由について，BCC 金属の[111]方向から投影された原子配列を図示し，結晶構造の観点から簡潔に説明せよ。

5. 小傾角粒界（LATGB）は刃状転位列で記述できる。刃状転位のエネルギーを $E_{\mathrm{d}} = \dfrac{Gb^2}{4\pi(1-\nu)} \ln \dfrac{R}{R_0} + B$（$G$ は剛性率，b は転位のバーガースベクトル，νはポアソン比，R_0 は転位芯半径，R は転位によってひずみが発生している領域の半径，B は転位芯エネルギー）と表せるとした場合，LATGB のエネルギーE_{gb} を傾角θの関数で表し，そのおおよその関係をグラフで示せ。この際，転位間隔を h とし，R および R_0 を，それぞれ h，b と仮定して良い。

【第８問】

以下の鉄および鉄鋼製造の記述に関する 1～7 の問いに答えよ。

鉄鋼の主成分である鉄（Fe）は，クラーク数※第 4 位，地球全球での存在割合は第 ① 位の元素であり，鉄器時代以降，代表的な材料として文明の発展を担ってきた。現在，我が国の粗鋼の年間生産量は約 ② 億トンであり，その 75～80%は鉄鉱石を主原料とした高炉－ ③ 法によるものである。高炉（溶鉱炉）では上方から原料（鉄鉱石，コークス，石灰石など）を挿入し，下方（羽口）から(A)加熱された空気および微粉炭を吹き込み反応させることで，(B)鉄鉱石中の酸化鉄（Fe_2O_3）が還元され，(C)炭素でほぼ飽和した溶銑が高炉底部にスラグとともに溜まる。

次に，高炉スラグと分離された溶銑に含まれる ④ や(D)リン，硫黄等の不純物を除去した後， ③ で(E)酸素を吹き付ける（吹錬する）ことにより，炭素が除去され，その後の二次精錬プロセスで(F)さらなる不純物除去や合金成分調整が行われた後，連続 ⑤ プロセスを経て鋼片が得られる。さらに熱処理や加工，表面処理などを経て目的とする機能を持った製品部材に形を変えていく。

※ 地球上の地表付近に存在する元素の推定重量割合（mass%）。

1. 上記 ① ～ ⑤ の中に入る適切な用語または数字（整数）を記せ。

2. 下線部(A)で，吹き込まれた微粉炭やコークス中の炭素が，熱風中の酸素により燃焼する反応式と，その際生成したガスにより下線部(B)の反応が起きる場合の反応式を示せ。

3. 下線部(C)で，1773 K の溶銑が炭素で飽和した場合，炭素濃度はいくらになるか。次ページの Fe-C 二元系状態図（実線および破線は，それぞれ安定系および準安定系）を用い有効数字 2 桁で答えよ。

4. 黒鉛が安定相として存在する状態図中の実線が，Fe_3C 相が準安定相として存在する破線に較べて高温側にある。この理由を(混合の)Gibbs エネルギー曲線を用いて，共晶温度を例にとって図式的に説明せよ。文字数は問わない。

5. 下線部(D)で溶銑中からリンおよび硫黄がスラグ中に除去される機構について，化学反応式（イオン反応式）を用いて示し，それぞれの反応を促進させるための条件を，温度，酸素分圧，スラグの塩基度の観点から述べよ。

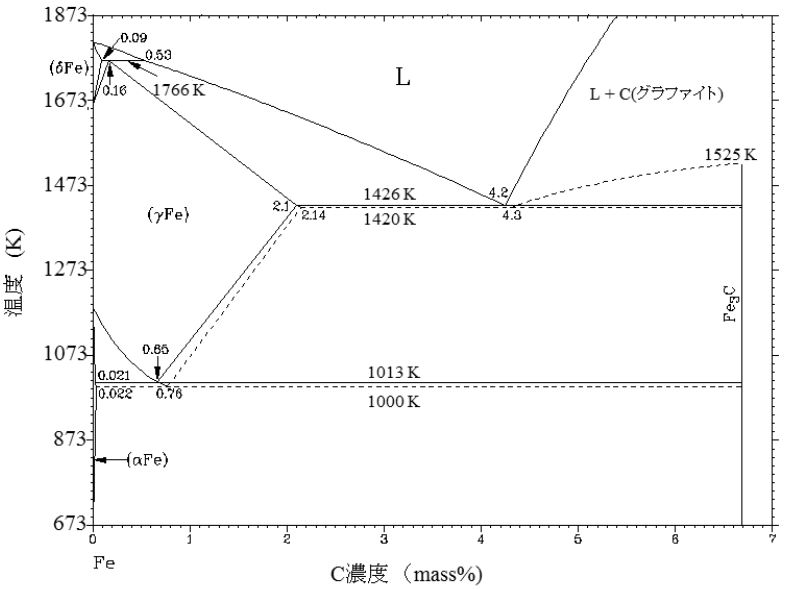


図　Fe-C 二元系状態図

6. 下線部(E)において，炭素濃度がゼロになるわけではなく，減少し続ける。特に，溶鋼中の炭素濃度が 1 mass%以下の領域では，溶鋼中での炭素の移動が律速するため，脱炭反応は 1 次反応として進行する。溶鋼中炭素濃度が 0.80 mass%から 2.0×10^2 s の吹錬で 0.20 mass%に達した時，引き続き何秒の間，吹錬することにより 0.020 mass%に到達するか。なお，プロセス中の温度変化や反応界面の面積の変化は無視できるものとする。

7. 下線部(F)で除去される典型的な成分である酸素の除去には，通常酸素との親和性の高い元素が添加される。例えばアルミニウムが添加されると，溶鋼中に原子状で溶解した酸素が(1)式の反応に従い，固体 Al_2O_3 として分離除去され溶鋼中の酸素濃度を下げることが出来る。

$$2\underline{\mathrm{Al}}\,(1\,\mathrm{mass\%\ in\ Fe}) + 3\underline{\mathrm{O}}\,(1\,\mathrm{mass\%\ in\ Fe}) \rightarrow \mathrm{Al_2O_3(s)} \qquad (1)$$

$$\Delta_r G^\circ = -867400 + 222.5\,T \qquad (\mathrm{J{\cdot}mol^{-1}}) \qquad (2)$$

1873 K において，溶鋼中に添加したアルミニウム濃度が 0.050 mass%となり，生成した Al_2O_3 と平衡するとき、溶鋼中の酸素濃度はいくらか。(1)式の標準反応 Gibbs エネルギーは(2)式で与えられ，(1)式の反応式において，(　)内の 1 mass% in Fe および s は基準状態を表し，それぞれ，溶鋼中濃度が 1 mass%および純粋固体であることを，また，＿ は溶鋼中であることを示す。なお，気体定数 R = 8.314 $\mathrm{J{\cdot}K^{-1}{\cdot}mol^{-1}}$ とし，溶鋼中での酸素およびアルミニウムの全ての相互作用は無視できるものとする。

（計算用紙）

（計算用紙）

（計算用紙）