

平成**年度 エネルギー変換 学期末試験問題

1. 地球温暖化について下記の問いに答えなさい。

- (1) 地球温暖化は、人間の産業活動から排出された温室効果ガスによって引き起こされている、と考えられている。地球温暖化の機構について、「大気」「二酸化炭素」「化石燃料」「太陽放射」「地表」「可視光」「赤外吸収」「温室効果」等の語句を全て用いて説明しなさい。また、必ず図をも用いること。
- (2) 温室効果ガスの増加の原因は何であると考えられているか。「産業革命」「二酸化炭素」「メタン」「化石燃料」「森林破壊」等の語句を全て用いて、100字程度で説明しなさい。
- (3) 将来に地球温暖化がさらに進行すると、全世界の人間社会に対してどのような深刻な影響を及ぼすと考えられているのか。具体的な例を挙げて「異常気象」「降水量」「海水面」「生態系」「農業」等の語句を全て用いて、100字程度で説明しなさい。
- (4) 地球温暖化の影響は全地球規模に及ぶため、温暖化対策を全世界の国々が協力して進める必要がある。しかしながら、現在のところ対策は遅々として進んでいない。地球温暖化に対する対策として、どのような事象が国際的に議論されているのか。「先進工業国」「新興工業国」「発展途上国」「温室効果」「化石燃料」「省エネルギー」「省資源」等の語句を全て用いて、100字程度で説明しなさい。

2. 遷移確率について、以下の問に答えなさい。

問1. 光と分子との相互作用における遷移確率について説明しなさい。ただし、必要に応じて数式を用いること。

問2. 光が分子に吸収され量子状態 ψ_l から ψ_m へ遷移する確率は

$$\text{遷移確率} = \frac{1}{\hbar^2} |\mu_{lm}|^2 E_0^2 t \quad - (1)$$

と表される。ここで $|\mu_{lm}|$ は遷移双極子モーメントである。

$$|\mu_{lm}| = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_m^* \mu |\psi_l| d\tau \quad - (2)$$

赤外吸収によって分子の振動準位間を遷移する場合に、振動座標を q とすると、

$$\text{遷移確率} \propto \left(\frac{d\mu}{dq} \right)_0 \quad - (3)$$

となることを、数式を用いて説明しなさい。

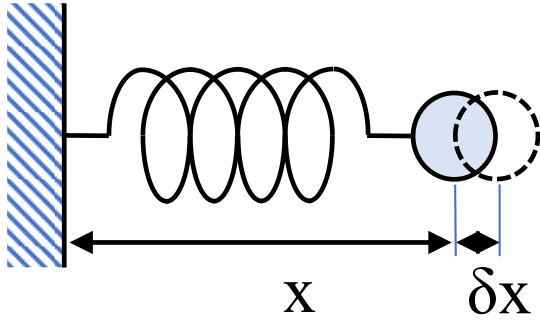
※ヒント：双極子モーメントを q でテイラー展開する。遷移双極子モーメントの積分では1次の項が残る。

問3. 地球大気の主成分である窒素、酸素などの分子は赤外線を吸収しない。一方、水蒸気、二酸化炭素、メタンなどの分子は赤外線を吸収する。その理由について(3)式に基づいて簡潔に説

明しなさい。

3. 単一粒子の振動：C-H 結合

このモデルでは、粒子（H 原子）がバネ（結合）によって壁（分子の残りの部分）に結び付けられている。

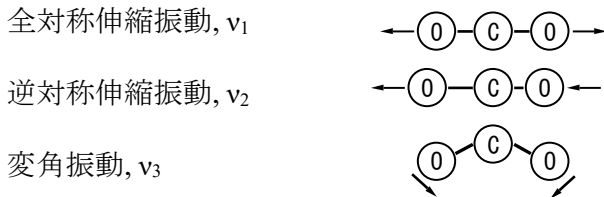


バネ定数： $k = 5.00 \times 10^2 \text{ (kg s}^{-2}\text{)}$

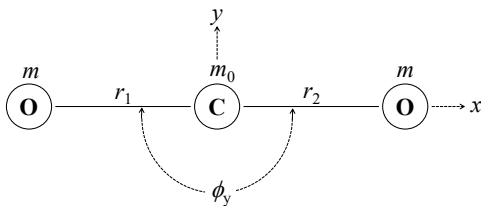
H 原子の質量： $m_H = 1.66 \times 10^{-27} \text{ (kg)}$

であるとき、C-H 結合の振動数 $\nu \text{ (s}^{-1}\text{)}$ を求めなさい。

4. 二酸化炭素, CO_2 , には、以下に示すような 3 つの振動モードがある。



二酸化炭素, CO_2 , の分子内座標を下図に示す。



振動の運動エネルギー T_v , 位置エネルギー V は以下のように与えられる。

$$T_v = \frac{1}{2} m \left(\frac{\Delta \dot{r}_1 + \Delta \dot{r}_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\Delta \dot{r}_1 - \Delta \dot{r}_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{\mu}{2} \left[(r_0 \Delta \dot{\phi}_y)^2 + (r_0 \Delta \dot{\phi}_z)^2 \right]$$

$$V = \frac{1}{2} (K + k) \left(\frac{\Delta r_1 + \Delta r_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{1}{2} (K - k) \left(\frac{\Delta r_1 - \Delta r_2}{\sqrt{2}} \right)^2 + \frac{1}{2} H \left[(r_0 \Delta \phi_y)^2 + (r_0 \Delta \phi_z)^2 \right]$$

ここで、酸素原子の質量を m 、炭素原子の質量を m_0 とする。 K は結合伸縮に関するバネ定数、 H は結合角 ϕ の変化に関するバネ定数、 k は 2 つの結合の間の相互作用を表す定数である。また、換算質量 μ は以下のように与えられる。

$$\frac{1}{\mu} = \frac{2}{m_0} + \frac{1}{m}$$

- (1) Lagrange の運動方程式は以下のように与えられる。

$$L = T - V$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{S}} \right] - \frac{\partial L}{\partial S} = 0$$

これを用いて、各振動モードの振動数が、下式で与えられることを示しなさい。

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K+k}{m}}$$

$$\nu_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K-k}{\mu}}$$

$$\nu_3 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2H}{\mu}}$$

- (2) 各振動モードの振動数を以下に示す。

$$\nu_1 = 4.01 \times 10^{13} (\text{S}^{-1}), \nu_2 = 7.05 \times 10^{13} (\text{S}^{-1}), \nu_3 = 2.00 \times 10^{13} (\text{S}^{-1})$$

※あるいは、各振動モードの波数 $\tilde{\nu}$ (cm^{-1}) を以下に示す。

$$\tilde{\nu}_1 = 1337 (\text{cm}^{-1}), \tilde{\nu}_2 = 2349 (\text{cm}^{-1}), \tilde{\nu}_3 = 667 (\text{cm}^{-1})$$

ここで、波数とは波長 λ の逆数である。 $\tilde{\nu}_1 = \frac{1}{\lambda}$ 光速は、 $c = 3.00 \times 10^8 (\text{ms}^{-1})$ である。

また、酸素原子の質量 m と炭素原子の質量 m_0 は以下のとおりである。

$$m = 2.66 \times 10^{-26} (\text{kg}), m_0 = 1.99 \times 10^{-26} (\text{kg})$$

バネ定数、 K, k, H を計算しなさい。ただし、単位は kgs^{-2} で算出すること。

5. プランクの輻射式について下記の問いに答えなさい。

- (1) プランクの輻射式について数式を用いて説明しなさい。
- (2) 太陽放射の波長分布を図示しなさい。
- (3) 地表からの熱輻射の波長分布を図示しなさい。

5. プランクの分布関数について以下の問いに答えなさい。

空間の角振動数 ω を持つ振動モードは、エネルギー量子 $\hbar\omega$ を単位として励起される。

モードに s 個の量子を持つエネルギー状態 ε_s は

$$\varepsilon_s = s\hbar\omega \quad - (1)$$

である。

これは、空洞内のいたるところに分布する量子化された調和振動子のエネルギーに等しい。

このとき、分配関数、 $Z(\tau) = \sum_{s=0}^{\infty} \exp(-\varepsilon_s / \tau)$, ($\tau = k_B T$) は

$$Z(\tau) = \sum_{s=0}^{\infty} \exp(-s\hbar\omega/\tau) \quad - (2)$$

と与えられる。

問1. 分配関数、 $Z(\tau)$, が

$$Z(\tau) = \frac{1}{1 - \exp(-\hbar\omega/\tau)} \quad - (3)$$

となることを示しなさい。

系がエネルギー量子 $s\hbar\omega$ を持つ状態 s にある確率 $P(s)$ は、ボルツマン因子、 $P(\varepsilon_s) = \frac{\exp(-\varepsilon_s/\tau)}{Z(\tau)}$, より

$$P(s) = \frac{\exp(-s\hbar\omega/\tau)}{Z(\tau)} \quad - (4)$$

である。これより、 s の熱平均値は

$$\langle s \rangle = \sum_{s=0}^{\infty} s \times P(s) = \frac{\sum_{s=0}^{\infty} s \times \exp(-s\hbar\omega/\tau)}{Z(\tau)} \quad - (5)$$

である。

問2. (3)式と(5)式からプランク分布関数

$$\langle s \rangle = \frac{1}{\exp(\hbar\omega/\tau) - 1} \quad - (6)$$

を導きなさい。

6. 断熱変化について下記の問いに答えなさい。

- 問1. 断熱変化 ($dQ=0$) において、系の体積を変化させるときの仕事 dw は $dw = -PdV = C_v dT$ である。ここで、 C_v は定容熱容量である。また、気体の状態方程式は $PV = nRT$ である。系が (V_i, T_i) から (V_f, T_f) まで断熱変化したとき、

$$V_f T_f^c = V_i T_i^c, c = \frac{C_v}{nR}$$

となることを示しなさい。

- 問2. 下式を示しなさい。

$$PV^\gamma = \text{constant}, \gamma = \frac{C_v + nR}{C_v}$$

7. 熱機関について下記の問いに答えなさい。

- 問1. 熱機関について、カルノーサイクルを例として説明しなさい。ただし、横軸を体積、縦軸を圧力とする等温線と断熱線に関するグラフを用いること。
- 問2. なぜ、高温熱源と低温熱源とが熱機関に必要となるのか。適宜図を用いて詳しく論じなさい。
- 問3. 内燃機関と外燃機関の違いを説明しなさい。
- 問4. オットーサイクル（自動車のガソリンエンジン）について説明しなさい。ただし、エンジンの構造図、および横軸を体積、縦軸を圧力とする等温線と断熱線に関するグラフを必ず描くこと。

8. 原子力発電について下記の問いに答えなさい。

- 問1. 火力発電では化石燃料を燃やして熱を発生させているが、原子力発電では核分裂反応で熱を発生させている。このふたつの違いは、熱の発生のさせかたが違うだけである。そこで、原子力発電の構造と原理について、図を描いて説明しなさい。ただし、「ウラン濃縮」「原子炉」「原子核分裂」「減速材」「熱中性子」「連鎖反応」「臨界」「冷却材」「蒸気」「タービン」「発電機」等の語句を全て用いて 200 字程度で説明しなさい。
- 問2. 核燃料集合体の間に挿入される制御棒の、原子炉の運転において果たす役割とは何か。問1で描いた図に基づいて簡潔に述べなさい。
- 問3. タービンを通じた後、水蒸気が再び原子炉へ帰還する前に、復水器において冷却され再び液体の水に戻される必要があるのはなぜか。その理由を問1で描いた図に基づいて簡潔に説明しなさい。
- 問4. 原子炉を安全に運転するには、原子核分裂の連鎖反応が定常的となる臨界状態を維持する必要がある。臨界状態を維持する機構について、問1で描いた図に基づいて簡潔に述べなさい。

- 問5. 原子力発電の利点と問題点について **200 字程度**で論じなさい。ただし、「地球温暖化対策」「化石燃料資源の枯渇」「使用済み核燃料のリサイクル」「プルサーマル」「放射性廃棄物の貯蔵」「核燃料の軍事転用」「原子力発電所の事故」等の語句を全て用いること。
- 問6. 原子力発電において、不測の事態により原子炉が緊急に運転停止しウランの核分裂が止まった後も、原子炉の冷却機構がしばらく動いている必要がある。その理由を説明しなさい。また、全ての冷却機構が失われた場合には、最終的にどのような深刻な事故が想定されるだろうか。以上について **200 字程度**で述べなさい。
9. 今日、現代文明は曲がり角に直面している。今後、環境問題やエネルギー問題を解決するために、我々は個人としてどのような貢献ができるだろうか。あなたの思うところを 200 字程度で述べなさい。
10. 以下の語句について簡単に説明しなさい。必要に応じて図や数式を用いても良い。
- (ア) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 気候変動に関する政府間パネル
 - (イ) 京都議定書
 - (ウ) 温室効果
 - (エ) 黒体輻射
 - (オ) プランクの輻射則
 - (カ) 熱力学第一法則
 - (キ) エントロピー
 - (ク) 産業革命
 - (ケ) カルノーサイクル
 - (コ) 内燃機関と外燃機関
 - (サ) シュテファン・ボルツマンの法則
 - (シ) プランクの輻射則
 - (ス) 原子番号と質量数
 - (セ) 同位体
 - (ソ) 放射線と放射能、放射線の種類
 - (タ) ウラン ^{235}U と ^{238}U 、プルトニウム
 - (チ) PWR と BWR
 - (ツ) プルサーマル