

熱科学演習第二

～ 基礎燃焼学 解答編 ～

m.fueta

1 2003/10/23(木)

問題 1 都市ガス 13A の理論酸素量および理論空気量を求めよ。

解答 式 (2.26)

$$\begin{aligned} O_0 &= 0.5\{H_2\} + 0.5\{CO\} + 2.0\{CH_4\} + \cdots - \{O_2\} \quad m_N^3/m_N^3 \\ &= \{2.0 \times 0.855 + 3.5 \times 0.046 + 5.0 \times 0.054 + 6.5 \times 0.015\} \\ &= 2.30 \end{aligned}$$

式 (2.27)

$$A_0 = O_0/0.210 = 10.95$$

問題 2 酸素－空気混合気において当量比 1.0 のとき、水素の体積割合を求めよ。

解答

$$\begin{aligned} H_2 + \frac{1}{2}(O_2 + 3.76N_2) &= H_2O + 1.88N_2 \\ \frac{1}{1 + \frac{1}{2}(1 + 3.76)} &= 0.296 \end{aligned}$$

問題 3 都市ガス 13A $0.02m_N^3/s$ に対して乾き空気が $0.24m_N^3/s$ で供給されるとき、空気比 α を求めよ。

解答 式 (2.35)

$$\alpha = \frac{(F/A)_{st}}{(F/A)} = \frac{0.24/0.02}{10.95/1.0} = 1.10$$

問題 4 表 1 の都市ガスについて次の 2 種の高発熱量を求めよ。

名称	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	CO	CO ₂	O ₂	O ₂
13A	-	88.5	4.6	5.4	1.5	-	-	-	-
6C	46	22	-	5.0	-	5.0	10	2.0	10

表 1: 都市ガスの組成

解答

$$\begin{aligned} 13A \quad H_h &= 39.72 \times 0.885 + 69.64 \times 0.046 + 99 \times 0.054 + 128.4 \times 0.015 \\ &= 45.6 \text{ MJ/m}^3\text{N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 6C \quad H_h &= 12.75 \times 0.46 + 39.72 \times 0.22 + 99 \times 0.05 + 12.63 \times 0.05 \\ &= 20.2 \text{ MJ/m}^3\text{N} \end{aligned}$$

問題 5 表 1.10 のの発生炉ガス、高炉ガス、水性ガスの低発熱量を求めよ。

解答 発生炉ガス $H_l = 35.79 \times 0.01 + 12.63 \times 0.26 + 10.79 \times 0.10 = 4.72 \text{ MJ/m}_N^3$

高炉ガス $H_l = 12.63 \times 0.21 + 10.79 \times 0.03 = 2.98 \text{ MJ/m}_N^3$

水性ガス $H_l = 35.79 \times 12.63 + 0.31 \times 10.79 + 0.052 = 9.88 \text{ MJ/m}_N^3$

問題 6 都市ガス 13A と空気を供給して燃焼させるとき燃料 1m_N^3 あたりの湿り燃焼ガス体積 V_w 及び、乾き燃焼ガス体積 V_d を求めよ。

ただし、空気比を 1.0 とし一酸化炭素は生成されなかったものとする。

解答

$$V_W = 10.52 \times 0.885 + 18.17 \times 0.046 + 25.82 \times 0.054 + 33.47 \times 0.015$$

$$= 12.05 \text{m}_N^3$$

$$\frac{1}{2}N_{Hm} = 2 \times 0.885 + 3 \times 0.046 + 4 \times 0.054 + 5 \times 0.015$$

$$= 2.199$$

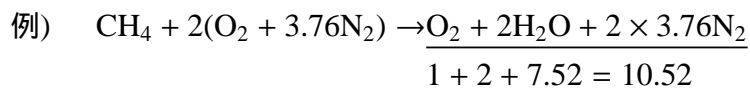
$$N_{cm} = 0.885 + 2 \times 0.046 + 3 \times 0.054 + 4 \times 0.015$$

$$= 1.199$$

$$V_W = (1 - 0.21)[9.53 \times 0.885 + 16.67 \times 0.046 + 23.82 \times 0.054 + 30.97 \times 0.015] + 1.199 + 2.199$$

$$= 12.05 \text{m}_N^3$$

$$V_D = V_W - \frac{1}{2}N_{Hm} = 9.85 \text{m}_N^3$$

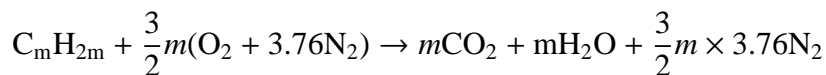


問題 7 ガソリンエンジンの排気ガスを分析したところ、酸素の体積割合が 2.5% であった。一酸化炭素は 0.1% とし、窒素は 79% とする。このときの空燃比を求めよ。ただし、燃料は C_mH_{2m} とする。

解答

$$\frac{1}{\alpha} \approx 1 - \frac{3.76(0.025 - 0.5 \times 0.001)}{0.79} = 0.88$$

$$\alpha = 1.14$$

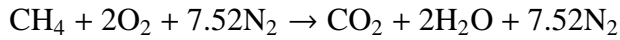


$$(12 + 2)m : \frac{3}{2}m \times (32 + 3.76 \times 28) = 1 : 14.7$$

$$(A/F) = \alpha(A/F)_{st} = 1.14 \times 14.8 = \underline{\underline{16.9}}$$

問題 8 メタンを当量比 1.0 で完全燃焼させたときの理論断熱燃焼温度を求めよ。また、空気を 700 K に予熱している場合はどうか。

解答



	CO_2	H_2O	N_2
モル	1	2	7.52
モル分率	0.095	0.190	0.715

2200K として C'_{pm} を求める。

$$2.429 \times 0.095 + 1.951 \times 0.190 + 1.486 \times 0.715 = 1664 \text{kJ}/(\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{K})$$

$$T_{bt} = \frac{35.79 \times 10^3}{1.664 \times 10.52} + 298 = 2342.5 \text{K}$$

2450K とすると、

$$2450 \times 0.095 + 1.979 \times 0.190 + 1.495 \times 0.715 = \underline{1.678 \text{kJ}/(\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{K})}$$

$$T_{bt} = \frac{35.79 \times 10^3}{1.678 \times 10.52} + 298 = \underline{2325 \text{K}}$$

700 (1000K) における空気の平均比熱は

$$C'_{pa} = 1.443 \times 0.21 + 1.364 \times 0.79 = 1.381 \text{kJ}/\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{K}$$

2800K とすると、

$$C'_{pa} = 2.504 \times 0.095 + 2.059 \times 0.190 + 1.522 \times 0.715 = 1.717 \text{kJ}/\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned} T_{bt} &= \frac{35.79 \times 10^3 + 9.52 \times 1.381 \times (1000 - 298)}{1.717 \times 10.52} + 298 \\ &= \underline{2788.9 \text{K}} \end{aligned}$$

2 第3章

問題 1 1.3.3 節に記されたガス化反応 (R2) ~ (R9) による発生熱量と吸収熱量を、付録 A に記載された JANAF の表を用いて正確に計算しなせ。ただし、C はグラファイトとみなし、反応条件は 0.1 MPa , 298.15 K とする。



解答



$$\begin{aligned} \Delta_r H^\circ &= \Delta_f H^\circ_{\text{CO}_2} - (\Delta_f H^\circ_{\text{C}} + \Delta_f H^\circ_{\text{O}_2}) \\ &= -393.522 \text{ [kJ/mol]} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Delta_r H^\circ &= \Delta_f H^\circ_{\text{CO}} + \Delta_f H^\circ_{\text{H}_2} - (\Delta_f H^\circ_{\text{C}} + \Delta_f H^\circ_{\text{H}_2\text{O}}) \\ &= -110.527 + 0 - (0 - 241.826) = 131.299 \text{ [kJ/mol]} \end{aligned}$$

問題 2 2.2.1 節に与えられた燃料の一段不可逆総括反応式 (R14) に対する反応速度の経験式 (2.5) において、 m と n が定数、 $k = 0$ として、 $T = 1000, 1500, 2000, \text{K}$ における水素、一酸化炭素、メタンの反応速度を計算し、1500K に対する相対値の形で回答せよ。なお、総括活性化エネルギーの値としては、本文に推奨された $E = 239, 327, 121 \text{ kJ/mol}$ を用いよ。

解答



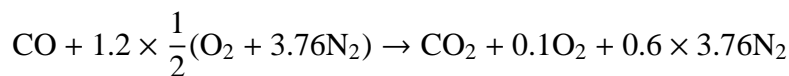
$$-\frac{d[\text{F}]}{dt} = f[\text{F}]^m[\text{O}]^n T^k \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

水素… $E = 239 \text{ kJ/mol}$, $R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$

$$\begin{array}{lcl} 1000\text{K} & \exp\left(-\frac{2.39 \times 10^3}{8.314 \times 1000}\right) & = 3.277 \times 10^{-13} \quad | \quad 6.89 \times 10^{-5} \\ 1500\text{K} & & = 4.753 \times 10^{-9} \quad | \quad 1 \\ 2000\text{K} & & = 5.724 \times 10^{-7} \quad | \quad 120 \end{array}$$

問題 3 一酸化炭素を初期温度 25 、空気比 1.2 で理論断熱燃焼させたときの燃焼温度をエンタルピーバランス法で計算せよ。

解答



$$\begin{aligned} \text{前} \cdots H_u &= \Delta_f H_{\text{CO}}^\circ(T_0) + 1.2 \times \frac{1}{2} \left[\Delta_f H_{\text{O}_2}^\circ(T_0) + 3.76 \Delta_f H_{\text{N}_2}^\circ(T_0) \right] \\ &= 110.527 \text{ kJ/mol fuel} \end{aligned}$$

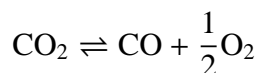
$T_b = 2400\text{K}$ と仮定すると JANAF より

$$\begin{aligned} \text{後} \cdots H_b &= 1 \times (115.779 - 393.522) + 0.1 \times (74.453 + 0) + 0.6 \times 3.76 \times (70.640 + 0) \\ &= -110.933 \text{ kJ/mol fuel} \end{aligned}$$

前 $H_u \doteq H_b$ 後とみなせるので、 $T_b = 2400\text{K}$

問題 6 0.1 MPa の圧力以下で、 CO_2 を 2000K に加熱したとき、分圧にして、いかにどの CO が生じるか。また、同温度で 1 MPa に加圧すると、CO の分圧はどれだけ変化するか。ただし、 $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{O}_2$ 以外の化学種は考慮しなくてよい。また、CO の分圧は全圧に比べて小さいとして、概算してよい。

解答



$$\log K = \log K_{f\text{CO}} - \log K_{f\text{CO}_2}$$

2000K において、

$$\log K = 7.470 - 10.351$$

$$K = 1.315 \times 10^{-3}$$

$$K = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{CO}_2}}$$

ここで、 $p_{\text{O}_2} = \frac{1}{2} p_{\text{CO}}$

$$\therefore K = \frac{p_{\text{CO}} (\frac{1}{2} p_{\text{CO}})^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{CO}_2}}$$

また、 $p = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{O}_2} \rightleftharpoons p_{\text{CO}_2}$

0.1MPa のとき、1bar で、

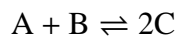
$$1.315 \times 10^{-3} = (\frac{1}{2})^{\frac{1}{2}} p_{\text{CO}}^{\frac{3}{2}}$$

$$p_{\text{CO}}^{3/2} = 1.8597 \times 10^{-3}$$

$$p_{\text{CO}} = 0.0151 \text{ bar} = 1.51 \text{ kPa}$$

1MPa のときは同様に 7.02kPa

問題 8 同体積の A 分子のガスと B 分子のガスからなる混合気があり、反応



によって、C 分子のガスが生成されるものとする。反応の間、混合気は 1 bar, 25 に保たれるものとして、平衡状態における各成分ガスの分圧を計算せよ。ただし、25 における上記反応の平衡定数 K は 0.2 とする。

解答

$$K = \frac{p_{\text{C}}^2}{p_{\text{A}} p_{\text{B}}} = 0.2 \quad (1)$$

$$p = p_{\text{A}} + p_{\text{B}} + p_{\text{C}} = 1 \text{ bar} \quad (2)$$

ここで、 $p_{\text{A}} = p_{\text{B}}$ であるから、式 (1)、式 (2) より

$$K = \frac{p_{\text{C}}^2}{p_{\text{A}}^2} = 0.2 \quad (3)$$

$$p = 2p_{\text{A}} + p_{\text{C}} = 1 \quad (4)$$

式 (3) から $p_{\text{C}} = \sqrt{0.2} p_{\text{A}}$ より、式 (4) に代入して、

$$\therefore 2p_{\text{A}} + \sqrt{0.2} p_{\text{A}} = 1$$

$$p_{\text{A}} = \frac{1}{2 + \sqrt{0.2}} = 0.409 \text{ bar}$$

よって、

$$\begin{cases} p_A = 0.409 \text{ bar} \\ p_B = 0.409 \text{ bar} \\ p_C = 0.183 \text{ bar} \end{cases}$$

3 第4章

問題 1 プロパン-空気量論混合気 15 , 1atm を 2m/s の速度でスロットバーナから静止空気中に噴出して、テント状の層流火炎を作ったという。火炎面と流線の形状、並びに流線に沿う流速の変化を計算せよ。ただし、層流燃焼速度は 0.42m/s、断熱火炎温度は 1996 で、燃焼によって平均分子量は変化しないものとする。

解答 ノートを参照

問題 2 燃焼速度 0.4m/s の可燃混合気が十分大きな球形容器に詰められている。容器の中心で火花点火した後、まだ定圧燃焼と見なせる時間内での火炎級の成長速度(直径の増加率)はいか程か。ただし、燃焼前後の混合気の温度は 25 と 1800 、燃焼による平均分子量の増減は無いものとする。

解答

$$S_u = \left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right) S_b = \left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right) \frac{dr_f}{dt}$$

より

$$\begin{aligned} \frac{dr_f}{dt} &= S_u \frac{\rho_u}{\rho_b} = 0.4 \times \frac{273 + 1800}{273 + 15} = 2.88 \text{ [m/s]} \\ \frac{dD_f}{dt} &= 2 \frac{dr_f}{dt} = 5.76 \text{ [m/s]} \end{aligned}$$

問題 3 シャボン玉の中にプロパン-空気混合気を詰めて、中心で火花点火したところ、火炎級の直径が 5.2m/s に割合で増加するのが観測された。一方、未燃混合気と燃焼ガスの密度比を化学平衡を仮定して計算したところ、7.3 : 1 であった。このデータから混合気の燃焼速度を決定せよ。

解答

$$S_u = \left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right) \frac{dr_f}{dt} = \left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right) \left(\frac{dD_f}{dt} \right) / 2 = \frac{1}{7.3} \times 5.2 / 2 = 0.356 \text{ [m/s]}$$

問題 4 ある可燃混合気の層流燃焼速度を測定したところ、圧力 0.1MPa で 0.4m/s, 1MPa で 0.3m/s であったという。層流火炎の熱理論が当てはまるとして、この混合気の総括反応次数を求めよ。ただし、混合気の熱的性質や火炎温度は圧力の影響を受けないものとする。

解答

$$S_u \propto P^{(N/2)-1}$$

P が 10 倍のとき、 $S_u = 0.3/0.4$

$$10^{(N/2)-1} = 0.75 \quad \therefore N = 1.75$$

問題 5 25 , 1atm のプロパン-空気量論混合気の層流火炎の予熱帯厚み δ 、反応帯厚み δ_r 、並びにそれらの和である火炎帯厚み δ_f を推定せよ。ただし、混合気の熱伝導率、定圧比熱、密度はそれぞれ 0.027W/(m・K), 1.01kJ/(kg・K), 1.09kg/m³、層流燃焼速度と断熱火炎温度は 0.42m/s と 2300K、着火温度は 1200K とする。

解答 $S_u = \frac{\lambda_i}{C_{pm}\rho_u\delta}$ より、

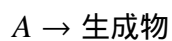
$$\delta = \frac{\lambda_i}{C_{pm}\rho_u S_u} = \frac{0.027}{1.01 \times 10^3 \times 1.09 \times 0.42} = 0.0584 \text{ [mm]}$$

$$\delta_r = \frac{2300 - 1200}{1200 - 298} \times \delta = 0.0712 \text{ [mm]}$$

$$\delta_f = \frac{2300 - 298}{1200 - 298} \times \delta = 0.1296 \text{ [mm]}$$

4 2/4 の課題

問題 6



となる反応の反応速度定数を k_1 、初期の A の濃度を $[A]_0$ とするとき、時間 t 経過後の濃度 $[A]$ を求めよ。また、 $[A] = \frac{[A]_0}{2}$ なるときの時間 t を求めよ。

解答

$$A \rightarrow B \quad \begin{cases} \frac{d[B]}{dt} = k[A] \cdots (1) \\ -\frac{d[A]}{dt} = k[A] \cdots (2) \end{cases}$$

$$t = 0 \text{ において } [A] = [A]_0^t$$

$$\therefore [A] = [A]_0 e^{-k_1 t}$$

(2) から変数分離を使って、

$$\begin{aligned} \int \frac{d[A]}{[A]} &= \int k_1 dt \\ \ln [A] &= -k_1 t + C \\ [A] &= C_1 e^{-k_1 t} \end{aligned}$$

$$\frac{[A]_0}{2} = [A]_0 e^{-k_1 t} \text{ より、}$$

$$k_1 t = \ln 2$$

$$t = \frac{\ln 2}{k_1}$$