付録　演習問題の詳しい解答

第１章の演習問題

(1) (a) 水分 = (0.023 / 1.030)×100 = 2.23 %

(b) 灰分 = (0.179 / 1.070)×100 = 16.73 %

(c) 揮発分 = (0.333 / 0.998)×100－水分 = 33.37－2.23 = 31.14 %

(d) 固定炭素 = 100－(2.23＋16.73＋31.14) = 49.90 %

(e) 燃料比 = 固定炭素／揮発分 = 49.90 / 31.14 = 1.60

(2) 比重 $d = 0.80$ であるから，θを温度 [℃]，p を圧力 [Pa] とすると，

式(1. 4)より，$\mathrm{API}^{\mathrm{o}} = 141.5 / d - 131.5 = 141.5 / 0.80 - 131.5 = 45.38$

式(1. 5)より，$B\acute{e} = 140 / d - 130 = 140 / 0.80 - 130 = 45.00$

表 1. 7 より，高発熱量 $H_{\mathrm{h}} = 51.9 - 8.8\, d^{2} = 46.27$ MJ / kg

$$H_{\mathrm{h}} = 51.9\, d - 8.8\, d^{3} = 37.01 \text{ MJ / L}$$

蒸気の比体積：$v_{\mathrm{v}} = 8.32\cdot 10^{4}\,(\theta + 273)\,(1.03 - d\,) / (p\cdot d) = 2.39\cdot 10^{4}\,(\theta + 273) / p$　[m^{3} / kg]

液の熱伝導率：$\lambda_{l} = 1.17\cdot 10^{-4}\,(1000 - 0.54\theta) / d = 1.46\cdot 10^{-4}\,(1000 - 0.54\theta)$　[W / (m･K)]

液の比熱：$c_{l} = (1.69 + 0.0034\,\theta) / \sqrt{d} = 1.89 + 0.0038\,\theta$　[kJ / (kg･K)]

$= (1.69 + 0.0034\,\theta)\sqrt{d} = 1.51 + 0.0030\,\theta$　[kJ / (L･K)]

蒸発の潜熱：$r = (250 - 0.4\,\theta) / d = 310 - 0.5\,\theta$　[kJ / kg]

$r = 250 - 0.4\,\theta$　[kJ/L]

液の比エンタルピ：$h_{l} = (1.69\,\theta + 0.00170\,\theta^{2})\sqrt{d} = 1.51\,\theta + 0.00152\theta^{2}$　[kJ / L]

蒸気の比エンタルピ：$h_{\mathrm{v}} = 250 + (1.69\sqrt{d} - 0.38)\,\theta + 1.70\cdot 10^{-3}\sqrt{d}\,\theta^{2}$

$= 250 + 1.13\,\theta + 1.52\cdot 10^{-3}\,\theta^{2}$　[MJ / m^{3}]

(3) 火花点火機関のノッキングはエンドガスが火炎到達前に自発着火するために起こる．したがって，燃料の自発着火性が低いほどよい．

ディーゼル機関のノッキングは着火遅れ期間内に噴射された燃料が一斉に着火するために起こる．したがって，燃料の自発着火性が高いほどよい．

(4) 確認埋蔵量は探査努力と回収技術の進歩によって増加して行くが，地質学的に推定される可採埋蔵量を越えることはできない．したがって，この推論は正しくない．

(5) 石炭は産出後，ほとんど加工することなく供給される．したがって，産地によって燃料比等の性質が大幅に異なる．

石油製品は製油所で工業規格に合わせて加工・調整される工業製品である．したがって，産地を気にする必要はない．

第２章の演習問題

(1) 式(2.22)より，$A_0 = (A/F)_{st} = 11.48\,c + 34.2\,h + 4.31\,(s - o)$

$$= 11.48\times 0.846 + 34.2\times 0.154 = 14.98 \text{ kg / kg}$$

$$A = (A/F) = \alpha\,(A/F)_{st} = 14.98\,\alpha = 18 \text{ kg / kg}$$

よって，燃空比　$(F/A) = 1 / (A/F) = 1 / A = 1 / 18 = 0.0556$ kg / kg

空燃比　$(A/F) = 18$ kg / kg

空気比　$\alpha = A / A_0 = 18/14.98 = 1.20$ kg / kg

当量比　$\phi = 1 / \alpha = 0.832$

(2) 式(2.25)より，$A_0 = 9.53\,\{CH_4\}$　[m^3/m^3]．また，題意より$\{CH_4\} = 1$, $\alpha = 1.1$

よって，$A_0 = 9.53\times 1 = 9.53$ m^3 / m^3,　$A = \alpha A_0 = 1.1\times 9.53 = 10.48$ m^3 / m^3

(3) 題意より，$\{CO_2\} = 0.11$,　$\{CO\} = 0.27$,　$\{H_2\} = 0.02$,　$\{N_2\} = 0.60$

式(2.35)と式(2.36)より,

$H_h = 12.75\,\{H_2\} + 12.63\,\{CO\} = 12.75\times 0.02 + 12.63\times 0.27 = 3.665$ MJ / m^3_N

$H_l = 10.79\,\{H_2\} + 12.63\,\{CO\} = 10.79\times 0.02 + 12.63\times 0.27 = 3.626$ MJ / m^3_N

式(2.24)と式(2.25)より,

$O_0 = 0.5\,\{H_2\} + 0.5\,\{CO\} = 0.5\times 0.02 + 0.5\times 0.27 = 0.5\times 0.29 = 0.145$ m^3 / m^3

$A_0 = O_0 / 0.210 = 0.690$ m^3 / m^3

式(2.54)と式(2.55)より,

$V_{w0} = 2.88\{CO\} + 2.88\,\{H_2\} + \{CO_2\} + \{N_2\}$

$= 2.88\times 0.27 + 2.88\times 0.02 + 0.11 + 0.60 = 1.545$ m^3 / m^3

$V_{d0} = 2.88\{CO\} + 1.88\,\{H_2\} + \{CO_2\} + \{N_2\}$

$= 2.88\times 0.27 + 1.88\times 0.02 + 0.11 + 0.60 = 1.525$ m^3 / m^3

空気比$\alpha = 1.2$ で燃焼させる場合の各成分の発生量を表 2.7 より計算すると,

CO_2: $\{CO\} + \{CO_2\} = 0.27 + 0.11 = 0.380$ m^3_N / m^3_N fuel

H_2O: $\{H_2\} = 0.020$ m^3_N / m^3_N fuel

N_2:　$0.790\alpha A_0 + \{N_2\} = 0.790\times 1.2\times 0.690 + 0.60 = 1.261$ m^3_N / m^3_N fuel

O_2:　$0.210\,(\alpha - 1)\,A_0 = 0.210\,(1.2 - 1)\times 0.690 = 0.029$ m^3_N / m^3_N fuel

V_w:　$0.380 + 0.020 + 1.261 + 0.029 = 1.690$ m^3_N / m^3_N fuel

項　　目	単　　位	CO_2	H_2O	O_2	N_2
生　成　量	m^3_N / m^3_N fuel	0.380	0.020	0.029	1.261
V_w	m^3_N / m^3_N fuel	1.690			
体 積 分 率 r_i	m^3 / m^3	0.2249	0.0118	0.0172	0.7462
c_{pi} (298～1600K)	k J / (m^3_N K)	2.316	1.813	1.517	1.436
$\Sigma\,(c_{pi} r_i)$	k J / (m^3_N K)	1.640			

式(2.77)より，$T_{bt} = H_l / (V_w c_{pm}') + T_0 = 3626 / (1.690 \times 1.640) + 298 = 1606$ K

(4) (a) $$\frac{1}{\alpha} \equiv \phi = 3.76 \frac{(O_2) - 0.5(CO)}{(N_2) - \frac{\{N_2\}}{V_d}} \qquad (2.75)$$

題意より，$(O_2) = 0.043$,　$(CO) = 0.009$,　$(CO_2) = 0.086$,　$(N_2) = 0.862$,　$\{N_2\} = 0.000$

燃料は純メタンであるから，式(2.52) から，$N_{Cm} = \{CH_4\} = 1.000$

$\therefore 1 / \alpha = 1 - 3.76\,[0.043 - 0.5 \times 0.009] / 0.862 = 0.832$,　$\alpha = 1.000 / 0.832 = 1.202$

(b) $V_d = \dfrac{N_{Cm}}{(CO_2) + (CO)}$ $[m^3_N / m^3_N]$ (2.58)　$V_w = \dfrac{N_{Cm}}{(CO_2) + (CO)} + \dfrac{1}{2} N_{Hm}$ $[m^3_N / m^3_N]$ (2.59)

$V_d = 1 / (0.086 + 0.009) = 10.53\ m^3_N / m^3_N$ fuel,

$V_w = 10.53 + 4\,\{CH_4\} / 2 = 12.53\ m^3_N / m^3_N$ fuel

(c) 式(2.83)より，$\Delta H_l = V_d\,[12.63\,(CO) + 59.03\,(UHC) + 33.9\,(C) + 10.79\,(H_2)] + 33.9\,\Delta c$

$= 10.5 \times 12.63 \times 0.009 = 1.194\ MJ / m^3_N$.

表 2. 4 より $H_l = 35.79\ MJ / m^3_N$

$\therefore \eta_c = 1 - \Delta H_l / H_l = 1 - 1.194/35.79 = 0.967$．すなわち，96.7%

(5) まず，廃熱ボイラの熱勘定表を平炉排ガスの顕熱が 27.5%になるように，すべての項目に 27.5 / 97.0 を掛けて修正する．しかる後，平炉の熱勘定図に廃熱ボイラの熱勘定図を連結して描くと，271 ページの図 **E-1** が得られる．10%の熱損失がある場合は 27.5%の平炉排ガス顕熱を 27.5×0.1%の放熱損失と 27.5×0.9%の平炉入熱に分け，廃熱ボイラの熱勘定図の各項目の幅を比例的に縮小する (図は省略する).

(6) $M = (30\ ton / h) / (5.5\ ton / h) = 5.45$ kg / kg fuel, $H_l = 20.9$ MJ / kg fuel.

$Q_e = M\,(h_o - h_i) = 5.45\,(3183 - 84) = 16.90 \times 10^3$ kJ / kg fuel = 16.90 MJ / kg fuel.であるから，

これらを式(2-102)に代入すると，$\eta_t^* = 16.90 / 20.90 = 0.809$．すなわち 80.9%.

(7) 完全燃焼では　$C_nH_{2n} + (3/2)n\,O_2 = n\,CO_2 + n\,H_2O$

$n\,(12.01 + 2 \times 1.008)$ kg　　$(3/2) \times 32.0\,n$ kg

$\therefore A_0 = (1 / 0.232) \times (3 / 2) \times 32.0\,n / [(12.01 + 2 \times 1.008)\,n] = 14.75$ kg / kg fuel.

$G_w = 1 + \alpha A_0 = 1 + 14.75\,\alpha$ [kg / kg fuel]

廃ガス損失：$Q_E = c_p G_w (T_o - T_i) = 1.21 \times (1 + 14.75\alpha)\,(900 - 0)$

$= 1089 + 16063\,\alpha$ [kJ / kg fuel] $= 1.089 + 16.06\,\alpha$ [MJ / kg fuel]

熱効率：$\eta_t = 1 - Q_E / H_l = 1 - (1.089 + 16.06\,\alpha) / 41.8 = 0.974 - 0.384\,\alpha$

(8) (a) メタノール（液）：$H_l = 19.91$ MJ/kg,　$\rho_l = 792$ kg / m^3.

$\therefore$ 単位発熱量当たりの体積 $V = 1 / (\rho_l H_l) = 63.4 \cdot 10^{-6}\ m^3$ / MJ = 63.4 cm^3 / MJ

単位発熱量当たりの質量 $G = 1 / H_l = 50.2 \cdot 10^{-3}$ kg / MJ = 50.2 g / MJ

n-ヘキサン（液）：$H_l = 44.74$ MJ / kg,　$\rho_l = 659$ kg / m^3

∴単位発熱量当たりの体積 $V = 1 / (\rho_l H_l) = 33.9 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^3 / MJ} = 33.9\ \mathrm{cm^3 / MJ}$

単位発熱量当たりの質量 $G = 1 / H_l = 22.4 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg / MJ} = 22.4\ \mathrm{g / MJ}$

したがって必要なタンク容量は n-ヘキサンの 1.87 倍，質量は 2.24 倍である．

(b) メタノール：$CH_4O \quad + \quad (3/2)\, O_2 \quad = CO_2 + 2\, H_2O$

32.04 kg　　(3/2)×32.00 kg

∴$O_0 = (3/2) \times 32.00 / 32.04 = 1.498$ kg / kg fuel，$A_0 = O_0 / 0.232 = 6.457$ kg / kg fuel

n-ヘキサン：$C_4H_{14} \quad + \quad 9.5\, O_2 \quad = 6\, CO_2 + 7\, H_2O$

86.17kg　　9.5×32.00kg

∴$O_0 = 9.5 \times 32.00 / 86.17 = 3.528$ kg / kg fuel，$A_0 = O_0 / 0.232 = 15.21$ kg / kg fuel

(c) メタノール：$G_w = 1 + A = 1 + \alpha A_0 = 1 + 1.3 \times 6.457 = 9.394$ kg / kg

$G_w / H_l = 9.394 / 19.91 = 0.4718$ kg / MJ

n-ヘキサン：$G_w = 1 + A = 1 + \alpha A_0 = 1 + 1.3 \times 15.21 = 20.77$ kg / kg

$G_w / H_l = 20.77 / 44.74 = 0.4643$ kg / MJ

(d) メタノール：$\theta = H_l / (G_w c_{pm}) + \theta_u = 19.91 \times 10^6 / (9.394 \times 1.29 \cdot 10^3) + 25 = 1668$℃,

n-ヘキサン：$\theta = H_l / (G_w c_{pm}) + \theta_u = 44.74 \times 10^6 / (20.77 \times 1.29 \times 10^3) + 25 = 1695$℃

(e) メタノールは H_l が 1/2 以下だが，O を含むため A_0 も 1/2 以下，

したがって G_w が 1/2 以下となり，θ_b に大差はなくなる（27℃の差）

(9) (a) 式(2.37)より，$H_h = 12.75\,\{H_2\} + 12.63\,\{CO\} + 39.72\,\{CH_4\}$

$= 12.75 \times 0.40 + 12.63 \times 0.25 + 39.72 \times 0.04 = 9.846\ \mathrm{MJ / m^3_N}$

式(2.38)より，$H_l = 10.79\,\{H_2\} + 12.63\,\{CO\} + 35.79\,\{CH_4\}$

$= 10.79 \times 0.40 + 12.63 \times 0.25 + 35.79 \times 0.04 = 8.905\ \mathrm{MJ / m^3_N}$

(b) 燃焼ガス 1 $\mathrm{m^3_N}$ 中のカーボン量 m_C は,

$m_C = 12.011\, [\{CO_2\} + \{CO\} + \{CH_4\}] / 22.414$

$= 12.011\, [0.30 + 0.25 + 0.04] / 22.414 = 0.3162\ \mathrm{kg / m^3_N}$

(c) 元素の保存則より，グラファイト（$c = 1.00$）1 kg から発生する燃焼ガス中のカーボン量は燃焼前の質量 (= 1 kg) と等しいから，$V_g = 1 / m_C = 3.163\ \mathrm{m^3_N}$ / kg graphite

(d) グラファイト 1 kg の発熱量 $H_{hC} = 32.76$ MJ / kg．一方，グラファイト 1 kg から発生する燃料ガスの発熱量 $V_g H_h = 3.163 \times 9.846 = 31.14$MJ / kg graphite.

∴ 損失エネルギー率 $= (H_{hC} - V_g H_h) / H_{hC} = (32.76 - 31.14) / 32.76 = 0.0495$（約 5%)

(e) 完全燃焼反応や不完全燃焼反応（第 1 章の反応 (R2)と(R3)）で発生した燃焼熱を系外にほとんど出すことなく，発生炉ガス反応（第 1 章の反応(R4)）や水性ガス反応（第 1 章の反応(R5)と(R6)）の吸熱反応熱として系内にキープしておくため.

(10) (a) $V_d = (\alpha - 0.210)\, A_0 + (1.87 + 0.93\xi)\, c + 0.80\, n + 0.70\, s \quad [\mathrm{m^3_N / kg}]$ 　　(2.47)

$A_0 = 8.89\, c + 26.5\, h + 3.33\, (s - o) \quad [\mathrm{m^3_N / kg}]$ 　　(2.23)

において，$\alpha = 3$，$\xi = 0$ であり，かつ平均分子式 C_nH_{2n} より，

c = 12.01n /(12.01n + 1.008×2n) = 0.8563, h = 1.008×2n /(12.01n + 1.008×2n) = 0.1437.

∴ A_0 = 8.89×0.8563 + 26.5×0.1437 = 11.421m^3_N / kg fuel.

V_d = (3.0−0.210)×11.421 + 1.87×0.8563 = 33.46 m^3_N / kg fuel.

(b) 表 2. 6 より, $(O_2) = 0.210\,(\alpha-1)\,A_0/V_d = 0.210\,(\alpha-1)\times 11.421/V_d = 2.398\,(\alpha-1)\,/V_d$

式(2.47)より, $V_d = (\alpha - 0.210)\,A_0 + 1.87\,c = 11.421\,(\alpha - 0.210) + 1.87\times 0.8563$

∴ $(O_2) = 2.398\,(\alpha-1) / V_d = 2.398\,(\alpha-1) / (11.421\alpha - 0.7972)$

題意により(O_2) = 0.05　　∴ $0.05\,(11.421\alpha - 0.7972) = 2.398\,(\alpha-1)$

したがって, α = 1.291

(c) $V_d = 11.421\alpha - 0.7972 = 11.421\times 1.291 - 0.7972$ = 13.95 m^3_N / kg fuel.

(d) $[(NO_x)V_d]_{\alpha=3.0} = [(NO_x)V_d]_{\alpha=1.291}$ より, $(NO_x)_{\alpha=1.291}$ = 50×33.46 / 13.95 = 120 ppm.

第３章の演習問題

(1) 発生熱量 $Q = -\Delta_r H^0$ であるから, 反応 (R2) における発生熱量は,

$Q_{R2} = -\Delta_r H^0(R2) = -\Delta_f H^0_{CO2}$ = 393.522 kJ / mol

以下, 左辺を省略して記すと,

$-\Delta_r H^0(R3) = -\Delta_f H^0_{CO}$ = 110.527 kJ / mol

$-\Delta_r H^0(R4) = -2\Delta_f H^0_{CO} + \Delta_f H^0_{CO2}$ = 2×110.527−393.522 =−172.468 kJ / mol

$-\Delta_r H^0(R5) = -\Delta_f H^0_{CO} + \Delta_f H^0_{H2O}$ = 110.527−241.826 =−131.299 kJ / mol

$-\Delta_r H^0(R6) = -\Delta_f H^0_{CO2} + 2\,\Delta_f H^0_{H2O}$ = 393.522−2×241.826 =−90.130 kJ / mol

$-\Delta_r H^0(R7) = -\Delta_f H^0_{CO2} + \Delta_f H^0_{CO} + \Delta_f H^0_{H2O}$ = 393.522−110.527−241.826 = 41.169 kJ / mol

$-\Delta_r H^0(R8) = -\Delta_f H^0_{CH4}$ = 74.873 kJ / mol

$-\Delta_r H^0(R9) = \Delta_f H^0_{CH4} - \Delta_f H^0_{H2O} + \Delta_f H^0_{CO}$ = 74.873 + 241.826−110.527 = 206.172 kJ / mol

(2) $R = -d[F]/dt = F\exp(-E/RT) = F\exp[(-E/(8.314T)]$

	$E\times 10^{-3}$	T = 1000K		T = 1500K		T = 2000K	
	[J/mol]	$-E/8.314T$	R_{1000}/R_{1500}	$-E/8.314T$	R_{1500}/R_{1500}	$-E/8.314T$	R_{2000}/R_{1500}
H_2	239	−28.747	exp(−9.583)	−19.164	1	−14.373	exp (4.791)
CO	327	−39.331	exp(−13.11)	−26.221	1	−19.666	exp (6.555)
CH_4	121	−14.554	exp(−4.851)	− 9.703	1	− 7.277	exp (2.426)

したがって,

	1000K	1500K	2000K
H_2	$6.89\cdot 10^{-5}$	1	120
CO	$0.202\cdot 10^{-5}$	1	703
CH_4	$782\cdot 10^{-5}$	1	11.3

(3) $CO + 1.2\times 1/2\,[O_2 + (0.790 / 0.210)\,N_2] = CO_2 + 0.1O_2 + 0.6\times(0.790 / 0.210)\,N_2$

$H_u = \Delta_f H^0_{CO}(T_0) + 1.2\times 1/2\,[\Delta_f H^0_{O2}(T_0) + (0.790 / 0.210)\,\Delta_f H^0_{N2}(T_0)]$

$= \Delta_f H^0_{CO}(T_0) = -110.527$ kJ / mol.　　表 3. 2 を参考に，付録 A を用いて，

項　　目		単　　位	CO_2	O_2	N_2
	生成モル数 n	mol /mol fuel	1.0	0.10	2.257
	$\Delta_f H^0(T_0)$	kJ / mol	−393.52	0.00	0.00
T_b = 2400K	$H^0(T_b)-H^0(T_0)$	kJ / mol	115.78	74.45	70.64
	$H^0(T_b)$	kJ / mol	−277.74	74.45	70.64
	$nH^0(T_b)$	kJ / mol fuel	−277.74	7.45	159.43
	$\Sigma[nH^0(T_b)]$	kJ/mol fuel	−110.86		
T_b = 2600K	$H^0(T_b)-H^0(T_0)$	kJ / mol	128.07	82.22	77.96
	$H^0(T_b)$	kJ / mol	−265.45	82.22	77.96
	$nH^0(T_b)$	kJ /mol fuel	−265.45	8.22	175.96
	$\Sigma[nH^0(T_b)]$	kJ / mol fuel	− 81.27		

$T_b = 2400 + (2600-2400)\,[(-110.53)-(-110.86)] / [(-81.27)-(-110.86)] = 2402$ K

(4) $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ の反応熱を$\Delta_r H$ とすると，付録Aから生成熱を読み取って，

$\Delta_r H = \Delta_f H^0_{CO2} + 2\Delta_f H^0_{H2O} - \Delta_f H^0_{CH4} = (-393.52) + 2\times(-241.83) - (-74.87)$

$= -802.31$ kJ /mol，$H_l = -\Delta_r H = 802.31$ kJ / mol CH_4，$H_u = -74.87$ kJ / mol CH_4

$H_b = H_u - H_l / 2 = -74.87 - 802.31 / 2 = -476.025$ kJ / mol CH_4

表 3. 2 参考に，次表を作成する．

項　　目		単　　位	CO_2	H_2O	O_2	N_2
	生成モル数 n	mol / mol CH_4	1	2	0.6	9.781
	$\Delta_f H^0(T_0)$	kJ / mol	−393.52	−241.83	0.00	0.00
T_b = 1100K	$H^0(T_b)-H^0(T_0)$	kJ / mol	38.884	30.191	26.212	24.760
	$H^0(T_b)$	kJ / mol	−354.636	−211.639	26.212	24.760
	$nH^0(T_b)$	kJ / mol fuel	−354.636	−423.278	15.727	242.178
	$\Sigma[nH^0(T_b)]$	kJ / mol CH_4	−520.009			
T_b = 1200K	$H^0(T_b)-H^0(T_0)$	kJ / mol	44.473	34.506	29.761	28.109
	$H^0(T_b)$	kJ / mol	−349.047	−207.324	29.761	28.109
	$nH^0(T_b)$	kJ / mol CH_4	−349.047	−414.648	17.857	274.934
	$\Sigma[nH^0(T_b)]$	kJ / mol CH_4	−470.904			

$T_b = 1100 + (1200-1100)\,[(-476.025)-(-520.009)] / [(-470.904)-(-520.009)] = 1190$K

(5) 空気比 1.0 で燃焼させる場合：　$\alpha = 1.0$, $H_u = -74.873$ kJ / mol fuel.

$$CH_4 + 2\,[O_2 + (0.790/0.210)\,N_2] = CO_2 + 2H_2O + 2\times(0.790 / 0.210)\,N_2$$

$T_{bt} = 2400$K と仮定：$H_b = (-393.404 + 115.779) + 2\,(-241.826 + 93.741) + 7.524\times70.640$
$= -42.300$ kJ / mol fuel.

項　　目	単　　位	CO_2	H_2O (g)	O_2	N_2
生成モル数 n_j	mol / mol fuel	1	2	0	7.524
$[H^0(T_b)-H^0(T_0)]_j$	kJ / mol fuel	111.191	89.804	——	67.943
$n_j\,[H^0(T_b)-H^0(T_0)]_j$	kJ / mol fuel	111.191	179.608	——	511.201
$\Sigma n_j\,[H^0(T_b)-H^0(T_0)]_j$	kJ / mol fuel	802.000			
$S^0_j(T_0)$	J / (mol K)	213.795	188.834	——	191.609
$S^0_j(T_b)$	J / (mol K)	318.458	272.637	——	257.536
$[S^0(T_b)-S^0(T_0)]_j$	J / (mol K)	104.663	83.803	——	65.927
$n_j\,[S^0(T_b)-S^0(T_0)]_j$	J / (mol_{fuel} K)	104.663	167.605	——	496.031
$\Sigma n_j\,[S^0(T_b)-S^0(T_0)]_j$	J / (mol_{fuel} K)	768.299			

$T_{bt} = 2300$K と仮定：$H_b = (-393.404 + 109.660) + 2\,(-241.826 + 88.421) + 7.524\times66.995$
$= -86.484$ kJ / mol fuel.

$\therefore T_{bt} = 2300 + 100\times[(-74.873)-(-86.484)] / [(-42.300)-(-86.484)] = 2326$ K.

$\Sigma n_j\,[H^0(T_b)-H^0(T_0)]_j = 802.000$ kJ/ mol fuel,　$\Sigma n_j\,[S^0(T_b)-S^0(T_0)]_j = 768.299$ J/ (mol_{fuel} K)

$E_u = 818.903$kJ/mol fuel,　$E_b = 802.000 - 298.15\cdot10^{-3}\times768.299 = 572.932$ kJ/ mol fuel.

$\therefore \Delta E / E_u = 1 - 572.932/818.903 = 0.3004$,　燃焼によるエクセルギー損失は 30.0%.

空気比 1.5 で燃焼させる場合：　$\alpha = 1.5$, $H_u = -74.873$kJ/mol fuel.

$$CH_4 + 2\times1.5\,[O_2 + (0.790/0.210)\,N_2] = CO_2 + 2H_2O + O_2 + 2\times1.5\,(0.790 / 0.210)\,N_2$$

$T_{bt} = 1800$K と仮定：$H_b = (-393.404 + 79.431) + 2\,(-241.826 + 62.693) + 51.673$
$+ 11.286\times48.978 = -67.800$kJ/mol fuel.

$T_{bt} = 1700$K と仮定：$H_b = (-393.404 + 73.480) + 2\,(-241.826 + 57.758) + 47.958$
$+ 11.286\times45.429 = -127.390$kJ/mol fuel.

$\therefore T_{bt} = 1700 + 100\times[(-74.873)-(-127.390)] / [(-67.800)-(-127.390)] = 1788$K.

項　　目	単　　位	CO_2	H_2O(g)	O_2	N_2
生成モル数 n_j	mol / mol fuel	1	2	1	11.286
$[H^0(T_b)-H^0(T_0)]_j$	kJ / mol fuel	78.717	62.101	51.227	48.552
$n_j\,[H^0(T_b)-H^0(T_0)]_j$	kJ / mol fuel	78.717	124.202	51.227	547.959
$\Sigma n_j\,[H^0(T_b)-H^0(T_0)]_j$	kJ / mol fuel	802.105			

$S^0{}_j(T_0)$	J / (mol K)	213.795	188.834	205.147	191.609
$S^0{}_j(T_b)$	J / (mol K)	302.560	259.112	264.541	248.061
$[S^0(T_b)-S^0(T_0)]_j$	J / (mol K)	88.765	70.278	59.394	56.452
$n_j\,[S^0(T_b)-S^0(T_0)]_j$	J / (mol_{fuel} K)	88.765	140.557	59.394	637.112
$\Sigma n_j\,[S^0(T_b)-S^0(T_0)]_j$	J / (mol_{fuel} K)	925.828			

$\Sigma n_j\,[H^0(T_b)-H^0(T_0)]_j$ = 802.105 kJ/ mol fuel,　$\Sigma n_j\,[S^0(T_b)-S^0(T_0)]_j$ = 925.828J/(mol_{fuel} K)

E_u = 818.903 kJ / mol fuel,　E_b = 802.105－298.15・10^{-3}×925.828 = 526.069 kJ/mol fuel.

$\therefore \Delta E/E_u$ = 1－526.069 / 818.903 = 0.3576.　損失は 30.0%から 35.8%まで 5.8%増加.

(6)　　　　　$CO_2 \rightleftarrows CO + 1/2\,O_2$　（平衡定数：K ）

$\log K = \log K_{fCO} + 1/2 \log K_{fO2} - \log K_{fCO2} = \log K_{fCO} - \log K_{fCO2}$　（$\because K_{fO2} \equiv 1$）

T = 2000K に加熱：$\log K$ = 7.470－10.351 = －2.881,　$K = 10^{-2.881}$= 0.001315

$\therefore$　$p_{CO}\,p_{O2}{}^{1/2}/p_{CO2}$ = 0.001315　　(a)　一方，$p_{CO2} + p_{CO} + p_{O2} = p_0$ (= 1 bar)　　(b)

反応式より $p_{O2} = 1/2\,p_{CO}$　　(c)　式(b)と式(c)より $p_{CO2} = p_0 - 3/2\,p_{CO}$　　(d).

式(d)を式(a)に代入すると，$p_{CO}\,(1/2\,p_{CO}) / (p_0 - 3/2\,p_{CO})$ = 0.001315.

$p_{CO}{}^3 = 2 \times 0.001315^2\,(p_0 - 3/2\,p_{CO})^2 \fallingdotseq 3.458 \cdot 10^{-6}\,p_0{}^2$.　　$\therefore p_{CO} \fallingdotseq 1.512 \times 10^{-2}\,p_0{}^{2/3}$.

p_0 = 1 bar：$p_{CO} \fallingdotseq$ 0.0151 bar = 1.51 kPa.　　　p_0 = 10 bar：$p_{CO} \fallingdotseq$ 0.0702 bar = 7.02 kPa.

解の精度を上げるためには，２行前の厳密式（左辺と中辺）を試行錯誤法で解き直す.

(7)　　　　　$SO_2 + 1/2\,O_2 \rightleftarrows SO_3$　（平衡定数：K ）

$K = p_{SO3} / (p_{SO2}\,p_{O2}{}^{1/2})$　であるから，分圧比 $r = p_{SO3} / p_{SO2} = K\,p_{O2}{}^{1/2}$

また，$\log K = \log K_{fSO3} - \log K_{fSO2} - 1/2 \log K_{fO2}$

(a) T = 1000K,　p_{O2} = 0.1 bar の場合：$\log K$ = 15.338－15.081 = 0.257

$K = 10^{0.257}$ = 1.807, $r = K\,p_{O2}{}^{1/2} = 1.807 \times 0.1^{1/2}$ = 0.571.

(b) T = 1000K,　p_{O2} = 0.01 bar の場合：K は温度だけの関数だから変わらず，K = 1.807.

$r = K\,p_{O2}{}^{1/2} = 1.807 \times 0.01^{1/2}$ = 0.181.　$r_{0.01bar}/r_{0.1bar} = (0.01/0.1)^{1/2}$ = 0.316.

(c) T = 400K,　p_{O2} = 0.01 bar の場合：$\log K$ = 47.304－39.303 = 8.001

$K = 10^{8.001} = 1.0023 \times 10^8$,　$r = K\,p_{O2}{}^{1/2} = 1.0023 \times 10^8 \times 0.01^{1/2} = 1.0023 \cdot 10^7$.

$r_{400K} / r_{1000K} = 1.0023 \cdot 10^7 / 0.181 = 5.54 \cdot 10^7$.

(8) $K = p_C{}^2 / (p_A\,p_B)$ = 0.2　　(a),　　$p_A + p_B + p_C$ = 1 bar　(b),　　$p_A = p_B$　(c).

式(a)と式(c)より，$p_A{}^2 = 5\,p_C{}^2$　(d)　　　　式(b)と式(c)より，$p_C = 1 - 2\,p_A$　(e).

式(e)を式(d)に代入すると，$p_A{}^2 = 5\,(1 - 2\,p_A)^2$　　$\therefore 19\,p_A{}^2 - 20\,p_A + 5 = 0$

$$p_A = \left(20 \pm \sqrt{20^2 - 4 \times 19 \times 5}\right) \Big/ \left(2 \times 19\right) = \left(20 \pm 4.472\right) / 38$$

p_C が正でなければいけないから負号の方をとって，

$p_A = p_B$ = 0.4086 bar.　$p_C = 1 - 2\,p_A$ = 0.1827 bar.

第４章の演習問題

(1) 図 4. 3 の記号を用いて，$S_u = U_u \sin\alpha$,　$\sin\alpha = S_u/U_u = 0.42/2 = 0.21$　$\therefore \alpha = 12.12°$

$S_p = U_u \cos\alpha = 2\cos 12.12° = 1.955$ m/s,

$S_b = S_u T_b/T_u = 0.42\times 2269.15 / 288.15 = 3.307$ m/s,

$U_b = (S_p^2 + S_b^2)^{1/2} = (1.955^2 + 3.307^2)^{1/2} = 3.842$ m/s

$\tan\beta = S_b/S_p = 3.307/1.955 = 1.692$　　$\therefore \beta = 59.41°$

流れ場は 273 ページの図 E-2 のようになる.

(2) 火炎球の直径 D_F の増加率：$dD_F/dt = 2S_b = 2S_u T_b/T_u = 2\times 0.4\times 2073.15/298.15$

$= 5.563$ m/s

(3)　$dD_F/dt = 2S_b$　連続則より，$\rho_u S_u = \rho_b S_b$

$\therefore S_u = (\rho_b/\rho_u) S_b = (1/2)(\rho_b/\rho_u)\, dD_F/dt = (1/2)(1/7.3)\times 5.2 = 0.356$ m/s

(4)　$S_u/S_u^0 = (p/p_0)^\alpha$,　$0.3/0.4 = (1/0.1)^\alpha = 10^\alpha$　$\therefore \alpha = \log 10\,(0.3/0.4) = -0.125$

$\alpha = N/2 - 1$ であるから，　$N = 2(\alpha + 1) = 2(1 - 0.125) = 1.75$

(5) 式(4.16)から，

$\delta = \lambda_i/c_{pm}\rho_u S_u) = 0.027/(1.01\cdot 10^3\times 1.09\times 0.42) = 0.0584\cdot 10^{-3}$ m $= 58.4$μm

図 4. 7 を参照して，

$\delta_r = \delta(T_b - T_i)/(T_i - T_u) = 58.4\,(2300-1200)/(1200-298.15) = 71.2$ μm,

$\delta_f = \delta + \delta_r = 58.4 + 71.2 = 129.6$ μm

(6) 混合気の流速分布：$u = 2u_m(1 - r^2/R^2)$　　混合気の体積流量：$V_u = \pi R^2 u_m$

バーナリムにおける速度勾配：$g_u = \left|2u_m\left(-2r/R^2\right)\right|_{r=R} = 2\left(V_u/\pi R^2\right)\left(2/R\right) = 4V_u\big/\left(\pi R^3\right)$

吹飛び限界速度勾配を g_{ub} とすると，$V_u = (\pi/4)\, g_{ub} R^3$

$(V_u)_{R=10}/(V_u)_{R=5} = (10/5)^3 = 8.0$　　$\therefore\ (V_u)_{R=10} = 9\times 8 = 72$ L/min

(7) 式(4.16)から $\delta = \lambda_i/(c_{pm}\rho_u S_u) = 0.027/(1.01\cdot 10^3\times 1.09\times 0.42) = 58.39\cdot 10^{-6}$ m

$u = 2u_m(1 - r^2/R^2)$ より，$du/dr = -4u_m r/R^2$

$$\left|du/dr\right|_{r/R=0.8} = 0.8\times 4u_m/R = 0.8\times 4\times 2\big/\left(5\cdot 10^{-3}\right) = 1280\ \mathrm{s^{-1}}$$

$$\left|u\right|_{r/R=0.8} = 2u_m\left(1 - 0.8^2\right) = 1.44\ \mathrm{m/s}$$

$$\therefore\ K = \left|du/dr\right|\left(\delta/u\right) = 1280\times 58.39\cdot 10^{-6}\big/1.44 = 0.0519$$

(8) 式(4.27)より $\delta/R = K\cos^2\theta\ \csc\theta$.　式(4.25)より $K = g_u\delta/U_u$

$\therefore\ R = (\delta/K)\sin\theta\ \sec^2\theta = (U_u/g_u)\sin\theta\ \sec^2\theta$.

一方，$S_u = U_u\sin(\pi/2 - \theta) = U_u\cos\theta$ より，

$$U_{\rm u}\sin\theta = U_{\rm u}\sqrt{1-\cos^2\theta} = \sqrt{U_{\rm u}{}^2 - S_{\rm u}{}^2}\ ,\quad \sec^2\theta = (U_{\rm u}/S_{\rm u})^2$$

$$\therefore\quad R = U_{\rm u}^2\sqrt{U_{\rm u}{}^2 - S_{\rm u}{}^2}\Big/\left(g_u S_u{}^2\right) = U_{\rm u}^2\sqrt{U_{\rm u}^2 - 0.4^2}/(5000\times 0.4^2) = U_{\rm u}^2\sqrt{U_{\rm u}^2 - 0.16}/800\quad [\mathrm{m}]$$

$$= U_{\rm u}^2\sqrt{U_{\rm u}^2 - 0.16}/0.8\quad [\mathrm{mm}]$$

$U_{\rm u}$ [m/s]	1	2	5	10
R [mm]	1.15	9.80	156	1250

(9) U = 10 m/s,　u' = 10×0.05 ＝0.5 m/s,　$L_{\rm E}$ = 3 mm = 0.003 m.

(a) 式(4.36)より，$l_{\rm T}{}^2 = c\,\nu\,L_{\rm E}/u'$ = 48.64×1.6・10^{-5}×3・10^{-3}/0.5 = 4.669×10^{-6} m

$\therefore$ $l_{\rm T}$ = 2.16・10^{-3} m = 2.16 mm

式(4.33)より，$\varepsilon = 15\,\nu(u')^2/l_{\rm T}{}^2$ = 15×1.6・10^{-5}×0.5^2 / (4.669・10^{-6}) = 12.85 m^2/s^3

式(4.37)より，$l_{\rm K} = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$ = [(1.6×10^{-5})^3/12.85]$^{1/4}$ = 1.336×10^{-4} m = 0.134 m

$R\,T = l_{\rm T}\,u'/\nu$ = 2.16×10^{-3}×0.5 / (1.6×10^{-5}) = 67.5

(b) u' = 0.5 m/s,　$S_{\rm L}$ = 0.42 m/s,　$l_{\rm K}$ = 0.134 mm,　δ = 0.054 mm

$\therefore$ $u' < 2S_{\rm L}$, $l_{\rm K} > \delta$. すなわち，火炎はしわ状層流火炎領域にある．

よって，式(4.39) を適用して，

$S_{\rm T}/S_{\rm L} = \{1 + k_1[(u'/S_{\rm L})(L_{\rm E}/\delta)]^2\}^{1/2}$

= {1 + 0.125 [(0.5/0.42) (3×10^{-3}/(0.054・10^{-3}))]^2}$^{1/2}$ = 23.4

$\therefore$ $S_{\rm T}$ = 23.4×0.42 = 9.8 m/s

(c) 式(4.44)より，$S_{\rm T}/S_{\rm L} = k_3 R_{\rm T}$ = 0.048×67.5 = 3.24.　　$\therefore S_{\rm T}$ = 3.24×0.42 = 1.36 m/s

(10) $r' = r/r_1$ と置く．

(a) 式(4.50)～(4.52)より，

$$G_{\rm a} = \int_0^R (wr)(\rho u)(2\pi r)\,\mathrm{d}r = 2\pi\rho r_1^3 uw\int_1^2 r'^2\mathrm{d}r' = 2\pi\rho r_1^3 uw\left[r'^3/3\right]_1^2$$

$$= (2/3)\pi\rho r_1^3\,u\,w\,[8-1] = (14/3)\,\pi\,\rho\,r_1^3\,u\,w$$

$$G_{\rm t} = \int_0^R\left(\rho u^2 + p\right)(2\pi r)\,\mathrm{d}r = 2\pi r_1\left(\rho u^2 + p\right)\int_1^2 r'\mathrm{d}r = 2\pi r_1^2\left(\rho u^2 + p\right)\left[r'^2/2\right]_1^2$$

$$= 3\pi r_1^2(\rho u^2 + p)$$

$$S = G_{\rm a}/(G_{\rm t}\,r^3) = (14/3)\,\pi\,\rho\,r_1^3\,u\,w\,/\,[3\pi r_1^3(\rho u^2 + p)(3r_1)]$$

$$= (14/27)\,(w/u)\,/\,(1 + p/\rho u^2)$$

題意より，w / u = 1,　$p/(\rho u^2)$ = 500 / (1.20×30^2) = 0.463

$\therefore S$ = (14 / 27) [1 / (1 + 0.463)] = 0.354.

(b) S＜0.5 であるから，中央円柱後流と外周ステップ下流以外に循環渦は形成されない．したがって，流れ模様は 273 ページの 図 E-3 のようになると推定される．

(11) 4.5.1 項で述べたように，最小点火エネルギー $E_{\rm c}$ は圧力 p の－2 乗に比例する．

p_1 = 0.1013 MPa,　p_2 = 1.9MPa,　$(E_{\rm c})_{p1}$ = 0.25mJ であるから，

$(E_{\rm c})_{p2} = (E_{\rm c})_{p1}(p_1/p_2)^2$ = 0.25 (0.1013 / 1.9)^2 = 0.711・10^{-3} mJ = 0.711 μJ

(12) 4.5.2Ａ項～Ｃ項を参照のこと．

(13) $CH_4 \quad + \quad 2\,O_2 \quad = \quad CO_2 \quad + \quad 2\,H_2O$ 　$\therefore\ O_0 = 2\times32.00/16.04 = 3.989$ kg

16.04 kg　2×32.00 kg　　　$A_0 = O_0/0.232 = 17.19$ kg.

$\phi = A_0/A$ より $A = A_0/\phi = 17.19 / 0.2 = 85.97$.　また，$G_w = 1 + A = 86.97$kg/kg.

予熱後の混合気温度を T_u とすると，$T_b = H_l / (G_w c_{pm}) + T_u$

$\therefore\ T_u = T_b - H_l / (G_w c_{pm}) = 1400 - 50.01\cdot10^6 / (86.97\times1.13\times10^3)$

$= 1400 - 508.9 = 891.13$K.

第５章の演習問題

(1)

d_i	10	20	30	40	50	Σ
$d_i^2\Delta n_i$	15,000	20,000	9,000	4,800	2,500	51,300
$d_i^3\Delta n_i$	150,000	400,000	270,000	192,000	125,000	1,137,000
$\Sigma d_i^3\Delta n_i$	150,000	550,000	820,000	1,012,000	1,137,000	

$d_{m32} = 1{,}137{,}000/51{,}300 = 22.16\mu$m,　$(1/2)\,\Sigma d_i^3\Delta n_i = 1{,}137{,}000/2 = 568{,}500$.

$\therefore d_{md} = 10\times(568{,}500-550{,}000) / (820{,}000-550{,}000) + 20 = 20.69\ \mu$m

(2) ロジンーラムラーの分布関数：　$R_m(d) = \exp(-b\,d^{\beta})$　(a)

$\therefore\ f_m(d) = -m_T dR_m(d)/dd = m_T b\,\beta\,d^{\beta-1}\exp(-b\,d^{\beta})$　(b)

一方，抜山－棚沢の分布関数は，$f_m(d) = m_T A' d^{\alpha+3}\exp(-B\,d^{\beta})$　(5.15)　(c)

ただし，$A' = \beta B^{\alpha+4} / [\Gamma(\alpha+4)/\beta]$　(d)

式(b)と式(c)において，$b\beta = A'$，$\beta - 1 = \alpha + 3$（$\therefore \beta = \alpha + 4$），$b = B$ とおくと，両式は一致する．（証明終わり）

(3) 式(5.18)で定義されるザウテル平均粒径 d_{m32} を積分式の形で表現した式，

$d_{m32} = \int_0^\infty d^3 f_n(d)\,dd \Big/ \int_0^\infty d^2 f_n(d)\,dd$ に抜山－棚沢の分布関数で$\beta = 1$ と置いた式を代入.

$$\int_0^\infty d^3 f_n(d)\,dd = n_T A\int_0^\infty d^{\alpha+3}\exp(-Bd)\,dd = n_T A(\alpha+3)!/B^{\alpha+4}$$

$$\int_0^\infty d^2 f_n(d)\,dd = n_T A\int_0^\infty d^{\alpha+2}\exp(-Bd)\,dd = n_T A(\alpha+2)!/B^{\alpha+3}$$

$\therefore\ d_{m32} = [n_T A(\alpha+3)!/B^{\alpha+4}]\{B^{\alpha+3}/[n_T \boldsymbol{A}(\alpha+2)!]\} = (\alpha+3)/B$

一方，$df_m(d)/dd = m_T A'[(\alpha+3)\,d^{\alpha+2} - B\,d^{\alpha+3}]\exp(-B\,d)$

$= n_T A'[(\alpha+3) - Bd]\,d^{\alpha+2}\exp(-Bd)$

$df_m(d)/dd = 0$ と置くと，$d = (\alpha+3)/B = d_{m32}$

したがって，$f_m(d)$ は d_{m32} にピークを持つことが証明できた.

(4) 噴孔直後から噴霧流が始まる条件は，ジェット数 $Je = (\rho_l D_n v_l^2/\sigma_l)(\rho_g/\rho_l)^{0.55} \geqq 400$.

$v_l{}^2 \geqq (\sigma_l / \rho_l D_n)(\rho_l / \rho_g)^{0.55} \times 400$

$= [0.073 / (998 \times 0.25 \times 10^{-3})](998/1.161)^{0.55} \times 400 = 4810\ \mathrm{m^2/s^2}$

$\therefore v_l \geqq 69.4\mathrm{m/s}$. ところが，$v_l = c_v \sqrt{2p_j / \rho_l}$

$\therefore p_j = (\rho_l/2)(v_l / c_v)^2 \geqq (998/2)(69.4/0.95)^2 = 2.659 \cdot 10^6\ \mathrm{Pa}$.

(5) $p_j = 4.0\ \mathrm{MPa} = 4.0 \cdot 10^6\ \mathrm{Pa}$　　$\therefore v_l = c_v\sqrt{2p_j/\rho_l} = 0.95\sqrt{2\times 4.0\times 10^6/998} = 85.06\mathrm{m/s}$

式(5.3)より，$d_m = 47(D_n/v_l)(g\sigma_l/\rho_g)^{0.25}[1 + 3.31\mu_l / (\sigma_l \rho_l D_n)^{0.5}]$

$= 47(0.25 \cdot 10^{-3}/85.06)(9.81 \times 0.073/1.161)^{0.25}$

$\times [1 + 3.31 \times 1.01 \cdot 10^{-3} / (0.073 \times 998 \times 0.25 \cdot 10^{-3})^{0.5}] = 125.45 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m}$.

$\therefore d_m = 125\mu\mathrm{m}$.　$d_{max} = (2\sim2.5)\, d_m = 251 \sim 314\ \mu\mathrm{m}$

(6) (a) $d_{m32} = \int_0^\infty d^3 f_n(d)\,\mathrm{d}d \Big/ \int_0^\infty d^2 f_n(d)\,\mathrm{d}d = n_T A \int_0^\infty d^3 \exp(-Bd)\,\mathrm{d}d \Big/ n_T A \int_0^\infty d^2 \exp(-Bd)\,\mathrm{d}d$

$= (3!/B^4)/(2!/B^3) = 3/B = 3/40 = 0.075\mathrm{mm} = 75\mu\mathrm{m}$

質量メディアン直径を d_{md} とする．

$\int_{d_{md}}^\infty d^3 f_n(d)\,\mathrm{d}d = \frac{1}{2}\int_0^\infty d^3 f_n(d)\,\mathrm{d}d$

$(2/B^4)\exp(-Bd_{md})(B^3 d_{md}^3 + 3B^2 d_{md}^2 + 6Bd_{md} + 6) = 3!/B^4$

$\therefore y = B^3 d_{md}^3 + 3B^2 d_{md}^2 + 6Bd_{md} + 6 - 3\exp(Bd_{md}) = 0$

試行錯誤法で解を求めると，　$Bd_{md} = 3.67$

$\therefore d_{md} = 3.67/B = 3.67/40 = 0.092\mathrm{mm} = 92\ \mu\mathrm{m}$.

(b) $d_{max} = 2.5\, d_{m32} = 2.5 \times 0.075 = 0.1875\mathrm{mm}$

着火してからの寿命時間をτ_lとすると，　$\tau_l = d_{max}^2 / C_b = 0.1875^2 / 0.8 = 0.0439\ \mathrm{s}$

燃焼器所要長さ $L = u_m \tau_l = 20 \times 0.0439 = 0.879\ \mathrm{m}$

(7) 受け止め粒度分布 $f_n'(d) = u(d) f_n(d)$を求める．

式(5.12)の抜山－棚沢の分布関数で$\alpha = 0, \beta = 1$ と置くと，$f_n(d) = n_T A \exp(-Bd)$

また $u(d) = k\,d$ であるから，$f_n'(d) = n_T A k d \exp(-Bd)$

これを用いて，$f_n(d_0)$に対する $f_n(2d_0)$と $f_n'(2d_0)$の相対値を計算すると，

$f_n(2d_0)/f_n(d_0) = \exp(-2Bd_0) / \exp(-Bd_0) = \exp(-Bd_0)$.

$f_n'(2d_0) / f_n(d_0) = 2d_0 \exp(-2B\,d_0) / [d_0 \exp(-B\,d_0)] = 2\exp(-Bd_0)$

後者は前者の２倍になっている．

(8) $C_{16}H_{34}$ + $24.5\ O_2$ = $16\ CO_2$ + $17\ H_2O$

$12.01 \times 16 + 1.008 \times 34\mathrm{kg}$　　$24.5 \times 16.00 \times 2\mathrm{kg}$

よって，量論酸素－燃料比：$i = 24.5 \times 16.00 \times 2 / (12.01 \times 16 + 1.008 \times 34) = 3.462\ \mathrm{kg/kg}$.

$\lambda = 0.08\mathrm{W/(m \cdot K)}$, $c_p = 1.2 \cdot 10^3\ \mathrm{J/(kg \cdot K)}$,　$\rho_l = 750\ \mathrm{kg/m^3}$, $m_{O\infty} = 0.1$，$H_l = 43.95 \cdot 10^6\ \mathrm{J/kg}$

表 2.5 中のセタン液と蒸気の標準生成熱の値を用いて，

$L = [(-1.655) - (-2.014)] \cdot 10^6\ \mathrm{J/kg} = 0.359 \cdot 10^6 \mathrm{J/kg}$，$T_\infty - T_s = 800 - 286.8 = 513.2\mathrm{K}$

これらを Wise の式(5.37)に代入する．

$C_b = [8\times0.08/(1.2\cdot10^3\times750)]\cdot\ln[1 + (0.1\times43.95\cdot10^6/3.462$
$+ 1.2\cdot10^3\times513.2)/(0.359\cdot10^6)] = 1.303\cdot10^{-6}\ \mathrm{m^2/s} = 1.303\ \mathrm{mm^2/s}$

ここで，改めてこの C_b を C_{b0} と置く．

さらに式(5.38)において，$Re = vd/\nu = 1\times1\cdot10^{-3}/(1.8\cdot10^{-4}) = 5.556.$　$Pr = 0.7$ であるから，

$C_b/C_{b0} = 1 + 0.276\times0.7^{1/3}\times5.556^{1/2} = 1.577.$　$\therefore C_b = 1.577\times1.303 = 2.056\ \mathrm{mm^2/s}$

(9) $(A/F)_{st} = 14.8$,　当量比 $\phi = 3$ より，$A/F = 14.8/3 = 4.93$.

燃料滴 1 個当たりの質量：$m_d = (\pi/6)\,d^3\rho_l = (\pi/6)\times(3\cdot10^{-5})^3\times820 = 1.159\cdot10^{-11}$ kg

滴 1 個当たりの空気量：　$m_a = m_d\times A/F = 1.159\cdot10^{-11}\times4.93 = 5.715\cdot10^{-11}$ kg

滴 1 個当たりの空気体積：$V_{ad} = m_a/\rho_g = 5.715\cdot10^{-11}/1.2 = 4.763\cdot10^{-11}$

滴 1 個当たりの占有体積：$V_d = V_{ld} + V_{ad} = (\pi/6)\,d^3 + V_{ad} = 1.414\cdot10^{-14} + 4.726\cdot10^{-11}$
$= 4.764\cdot10^{-11}\ \mathrm{m^3}$.

平均液滴間距離：　$l = V_d^{1/3} = 3.625\cdot10^{-4}\ \mathrm{m} = 362.5\ \mu\mathrm{m}$

液滴とガスの相対速度は零であるから，$Re = 0$

上記の数値を式(5.46)に代入．$G = 1.5Le\,(1 + 0.276\,Sc^{1/3}Re^{1/2})\,n_T^{2/3}(d/l)$
$= 1.5\times1\times(1+0)\times n_T^{2/3}\,(3\cdot10^{-5}/3.625\cdot10^{-4}) = 0.124\,n_T^{2/3}$

$\therefore n_T = (G/0.124)^{3/2}$．また液滴塊の体積は $\pi D^3/6 = n_T V_d$ であるから，$D = (6n_T V_d/\pi)^{1/3}$

単滴燃焼（$G < 10^{-2}$）：$n_T < 22.9\cdot10^{-3}\ \fallingdotseq\ 0$

$D < (6n_T V_d/\pi)^{1/3} = (6\times22.9\cdot10^{-3}\times4.764\cdot10^{-11}/3.14)^{1/3} = 1.277\cdot10^{-4}\ \mathrm{m} = 127.7\ \mu\mathrm{m}$

（ただし，$n_T \fallingdotseq 1$ で単滴燃焼が起こることは自明である）

内部群燃焼（$G = 10^{-2}$ ～1）：$n_T = 0$～23，D = 0～1.28 mm（ただし，下限はこの判定法の適用限界から外れており，現実には，n_T の下限は数個以上であろう）

外部群燃焼（$G = 1$～10^2）：$n_T = 23$～22,900，$D = 1.28$～12.8 mm

外殻燃焼（$G > 10^2$）：$n_T > 22{,}900$，$D > 12.8$ mm.

このように，単滴燃焼の生起が理論と現実とで食い違う噴霧というものも存在し得る．

(10) (a) 前沢の経験式(5.49)より，$x_F \propto 1/\tan\theta$

$$4\,x_F/(x_F)_{\theta=30} = \tan 30^\circ/\tan\theta = 0.577\cot\theta$$

(b) 式(5.49)より，$x_F \propto \dot{m}_f$

(c) 式(5.49)より，$x_F \propto \dot{m}_f\big/\sqrt{G_t}$　　$G_t = \dot{m}_a u_a \propto \sqrt{\Delta p_a}\bullet\sqrt{\Delta p_a} = \Delta p_a$

$G_t \propto \dot{m}_f^2$ のとき x_F は一定に保たれるから，$\Delta p_a \propto \dot{m}_f^2$ に保たねばならない．

ところが，$\dot{m}_a \propto \sqrt{\Delta p_a}$ であるから，$\dot{m}_a \propto \dot{m}_f$．$\therefore \dot{m}_a$ は $\dot{m}_f$ に比例して変化する．

第６章の演習問題

(1) 式(6.2)より，

$k_v = 3.7 \exp[-73.7\cdot10^3/(8.314\cdot10^3)] + 1.46\cdot10^{13} \exp[-251.2\cdot10^3/(8.314\cdot10^3)]$

$= 52.26 + 1.103 = 53.36\ \mathrm{s}^{-1}$

したがって，石炭 1 kg からの揮発分発生率は，$1\times \mathrm{d}m_v/\mathrm{d}t = k_v = 53.4$ kg/s

揮発分の総放出量は，$1\times0.25\times Q = 0.25\times1.2 = 0.30$ kg

分解燃焼期間は，$0.30 / 53.4 = 5.62\cdot10^{-3}$ s = 5.6 ms

なお，$i = 1$ の反応による揮発分発生量

$= 52.26\times5.62\cdot10^{-3} = 0.294\mathrm{kg/kg} < \alpha_1$ (= 0.39 kg/kg)

$i = 2$ の反応による揮発分発生量

$= 1.103\times5.62\cdot10^{-3} = 0.006\mathrm{kg/kg} < \alpha_2$ (= 0.80 kg/kg)

で，両者共に割り当て発生限界量を超えていないから，計算値を修正する必要はない.

(2) 粒子の直径を d，質量を m，表面積を A とすると，燃焼率$-\mathrm{d}m/\mathrm{d}t = A\,\dot{m}_C$

ここで， $m = (\pi/6)\rho_a d^3$，$A = \pi d^2$. ただし，ρ_a は見かけ密度で，$0.8\cdot10^3 = 800$ kg/m^3

$\therefore -(\pi/6)\rho_a\times3d^2\times\mathrm{d}d/\mathrm{d}t = \pi\,\dot{m}_C\,d^2$，$\mathrm{d}d/\mathrm{d}t = -2\dot{m}_C/\rho_a$，$[d]_{d_0}^{0} = -(2\dot{m}_C/\rho_a)[t]_0^{\tau}$

したがって，　　燃焼期間 $\tau = \rho_a d_0 / (2\dot{m}_C)$

これに$\rho_a = 800$ kg /m^3，$\dot{m}_C = 1.0\cdot10^{-4}$ kg/(m^{2}s), $d_0 = 100$ μm $= 1.0\cdot10^{-4}$ m を代入

$\tau = [800 / (2\times1.0\cdot10^{-4})](1.0\cdot10^{-4}) = 400$ s

(3) (a) V_d' [(CO) + (CO_2)] = (22.41/12.01) $c\,G$ = (22.41/12.01)$\times0.8\times10 = 14.93$ m^3_N / (m^{2}h)

(b) $V_d' = 14.93$ / [(CO) + (CO_2)] = 14.93 / [0.01 + 0.1] = 135.7 m^3_N / (m^{2}h)

(4) (a) ガス化剤が酸素と水蒸気の場合の燃料ガス組成：

$\{H_2\} = 0.40$,　$\{CO_2\} = 0.30$,　$\{CO\} = 0.25$,　$\{CH_4\} = 0.04$,　$\{N2\} = 0.01$

燃料ガス 1 m^3_N あたりのガス化剤中の酸素量 O_0 は,

$O_0 = \{CO_2\} + 1/2\,\{CO\} = 0.30 + 0.25/2 = 0.425$ m^3_N

空気をガス化剤とした場合に追加される窒素量 N_0 は

$N_0 = (0.790 / 0.210)\,O_0 = 1.599$ m^3_N.

∴燃料ガス体積は $V_f' = \{H_2\} + \{CO_2\} + \{CO\} + \{CH_4\} + \{N_2\} + N_0 = 2.599$ m^3_N に増加する

新しい燃料ガス組成を$\{H_2\}'$等で表すと,

$\{H_2\}' = 0.40/2.599 = 0.115$,　　$\{CO_2\}' = 0.30/2.599 = 0.115$,

$\{CO\}' = 0.25/2.599 = 0.096$,　　$\{CH_4\}' = 0.04/2.599 = 0.015$,

$\{N_2\}' = [\{N_2\} + N_0] / 2.599 = 0.619$

(b) グラファイト 1 kg から発生する燃料ガス量：

$V_g(V_f'/V_f) = 3.163\times2.599/1 = 3.221$ m^3_N/kg.

顕熱損失の相対差：

$V_g' c_p (700-60) / H_{hC} = 8.221\times1.47\cdot10^3 (700-60) / (32.76\cdot10^6) = 0.236$

(5) C 重油の低発熱量：$H_{l\,\mathrm{O}}$ = 4 2 MJ/kg

COM の低発熱量：$H_{l\,\mathrm{M}}$ = 0.5×42 + 0.5×22 = 32 MJ/kg

C 重油 1kg と同じ熱量を得るに要する COM の量：$m_{\mathrm{M}} = H_{l\,\mathrm{O}}/H_{l\,\mathrm{M}}$ = 42/32 = 1.313 kg

この中に含まれる C 重油の量：$m_{\mathrm{O}} = 0.5\, m_{\mathrm{M}}$ = 0.656 kg

すなわち，65.6%に減少する．

(6) 石炭 1kg 当たりの水の量：m_{W} = 30/70 = 0.4286 kg

石炭 1kg 当たり低発熱量の減少率：$r\, m_{\mathrm{W}}/H_{l\,\mathrm{C}}$ = 2.44×0.4286/22 = 0.0475

4.75%減少する．

第 7 章の演習問題

(1) R′= 287 J/(kg K), T_1= 298K, p_1=1.0 bar = 1.0· 10^5 Pa, M_1 = 3.0, k = 1.40

状態方程式(7.9)より，$v_1 = R'\,T_1/p_1$ = 287.2×298/(1.0・10^5) = 0.8559 m^3/kg

これらの数値を式(7.13) に代入

$$3.0^2 = [0.8559 / (1.40\times1.0\cdot10^5)]\,(p_2-1.0\cdot10^5) / (v_2-0.8559)$$

$$\therefore\ v_2 = 0.8559-[0.8559/(1.4\cdot10^5\times3^2)]\,(p_2-1.0\cdot10^5) = 0.9238-0.06793\cdot10^{-5}p_2$$

q = 0 と置いた式(7.11) 中の p_1, v_1, v_2 に上の値を代入すると，

$$[1.4 / (1.4-1)]\,[p_2\,(0.9238-0.06793\cdot10^{-5}p_2)-1.0\cdot10^5\times0.8559]$$
$$= (1/2)\,(p_2-1.0\cdot10^5)\,(0.9238-0.06793\cdot10^{-5}p_2 + 0.8559)$$

両辺に 10^{-5} を掛けて整理すると，$0.4076\,(10^{-5}p_2)^2-4.619\,(10^{-5}p_2) + 4.212 = 0$

$$10^{-5}p_2 = \frac{4.619\pm\sqrt{4.619^2-4\times0.4076\times4.212}}{2\times0.4076} = 10.33 \quad (p_2>0,\ \therefore \pm\text{は正号をとる})．$$

p_2 = 10.33 bar，$v_2 = 0.9238-0.06793\cdot10^{-5}\times10.33\times10^5 = 0.2219$ m^3/kg,

$T_2 = p_2 v_2/R'$ = 10.33×10^5×0.2219 / 287.2 = 798.3 K

(2) 禁止領域は断面 1 に対応する点 1 を原点とした場合の第 1 ・第 3 象限．その理由は，そこでは $\dot{m}^2 = -(p_2-p_1) / (v_2-v_1) < 0$．すなわち，$\dot{m}$ が虚数となるから．

(3) ① 一次元定常流れの中でもっとも安定であること，② M_2 = 1 となること，③ すべてのデトネーションの中で最低の速度を持つこと．

(4) 層流火炎伝ぱは亜音速現象であるから，熱伝導や拡散の影響を強く受ける．ところが，一次元気体力学では，それらは無視されている．一方，デトネーションは超音速現象であるから，熱伝導や拡散にはほとんど影響されない．

(5) 一次元気体力学の基礎式である式(7.1)～(7.3)は，２断面間の質量・運動量・エネルギーの保存則にすぎず，出入り口断面での一次元性さえ保証されていれば，たとえ両断面間

で非一次元現象が起きていようと成立する（熱力学における「流れ系」もしくは「開いた系」が，出入り口を除いては任意の形状を持っていることを連想せよ）．

(6) $q = 0$ と置いたランキン－ウゴニオの式(7.11)を v で微分すると，

$[\kappa/(\kappa-1)]\,(v\,dp/dv + p) = (1/2)\,(v + v_1)\,dp/dv + (1/2)\,(p - p_1)$

点 1 においては $p = p_1$，$v = v_1$ であるから，$[1/(\kappa-1)]\,v_1 (dp/dv)_1 = [\kappa/(\kappa-1)]\,p_1$.

∴ $(dp/dv)_1 = -\kappa p_1/v_1 = -\kappa R\,T_1 \rho_1^2 = a_1^2 \rho_1^2$ (a) （a_1 は点 1 での音速）

一方，レーリー線の勾配 g_R は式(7.6)と(7.1)より，

$g_R = (p_2 - p_1)/(v_2 - v_1) = -\dot{m}^2 = -(\rho_1 u_1)^2$ (b)

図 7. 2 において，$(dp/dv)_1$ と g_R を比較する．

① デトネーションに対しては： $|dp/dv|_1 < |g_R|$

よって，式(a)と(b)より， $\rho_1 a_1^2 < \rho_1 u_1^2$，$a_1^2 < u_1^2$ ∴ $M_1^2 = u_1^2/a_1^2 > 1$

② デフラグレーションに対しては： $|dp/dv|_1 > |g_R|$

よって，式(a)と(b)より， $\rho_1 a_1^2 > \rho_1 u_1^2$，$a_1^2 > u_1^2$ ∴ $M_1^2 = u_1^2/a_1^2 < 1$

（証明終わり）

第 8 章の演習問題

(1) $L_f = 0.90\,d_f = 0.90 \times 1 = 0.9$ m

$\varepsilon_f = 1 - \exp(-KL_f) = 1 - \exp(-0.8 \times 0.9) = 1 - 0.4868 = 0.5132$

$E_b = \sigma T_f^4 = 5.669 \cdot 10^{-8} \times 1500^4 = 2.870 \cdot 10^5$W/(m^2 K)

$I_0 = \varepsilon_f E_b/p = 0.1532 \times 2.870 \cdot 10^5/\pi = 4.69 \cdot 10^4$ W/m^2 = 46.9kW/m^2

(2) 式(8.18)より，$\varepsilon_{fm} = 0.282\,[\,0.25\,(\gamma - 0.5)\,] + 0.002\,T_{bp} -\ 0.462$

$= 0.282\ \ln\,[0.25\,(6.0 - 0.5)] + 0.002 \times 520 - 0.462 = 0.668$

火炎 1m 当たりの熱放射率：$Q_r = \varepsilon_{fm} \sigma T_f^4 A$ [W/m]

単位長さ当たり火炎表面積：$A = \pi D \times 1 = \pi \times 0.5 \times 1 = 1.571$ m^2/m

$\sigma = 5.669 \cdot 10^{-8}$ W/(m^2 K^4)， $T_f = 1500$K.

∴ $Q_r = 0.668 \times 5.669 \cdot 10^{-8} \times 1500^4 \times 1.571 = 3.01 \cdot 10^5$ W/m = 301 kW/m

第 9 章の演習問題

(1) 反応式：$C_4H_{10} + (1/1.1) \times 6.5O_2 = x\,CO_2 + 9y\,CO + y\,C_2H_4 + z\,H_2O$

これ以外に，(1 / 1.1)×6.5×0.790 / 0.210 = 22.23 m^3/m^3 fuel の N_2 が存在する

C バランス：$4 = x + 9y + 2y$ (a)， H バランス：$10 = 4y + 2z$ (b)

O バランス：$2 \times 6.5/1.1 = 2x + 9y + z$ (c)， 式(a)より， $x + 11y = 4$ (a′)

式(b)より， $2y + z = 5$ (b′)， 式(c)より， $2x + 9y + z = 11.82$ (c′)

式(a′)～(c′)を連立させて解くと，$x = 3.133$， $y = 0.0788$， $z = 4.842$

∴ CO_2 : x = 3.133m^3/m^3 fuel， CO : $9y$ = 0.7091 m^3/m^3 fuel，

C_2H_4 : y = 0.0788 m^3/m^3 fuel， H_2O : z = 4.842m^3/m^3 fuel， N_2 : 22.229 m^3/m^3 fuel.

V_w= 3.133+ 0.7091 + 0.0788 + 4.8424 + 22.229 = 30.99 m^3/m^3 fuel.

∴ CO : 100×0.7091 / 30.99 = 2.29%, UHC : 100×0.0788 / 30.99 = 0.25%

(2) 反応式：C_4H_{10} + 1.2×6.5 O_2 = 4 CO_2 + 5 H_2O + 0.2×6.5 O_2

これ以外に 1.2×6.5×0.790 / 0.210 = 29.34 m^3/m^3 fuel の N_2 が加わる

これから，燃料 1m^3 当たりの各燃焼ガス成分の体積は，

CO_2 : 4m^3, H_2O: 5m^3, O_2 : 0.2×6.5 = 1.3m^3, N_2 : 29.34m^3

∴ V_w= 4 + 5 + 1.3 + 29.34 = 39.64m^3

全圧 p = 1.013bar としたときの分圧は，

CO_2 : 4×1.013 / 39.64 = 0.1022 bar，H_2O : 5×1.013 / 39.64 = 0.1278 bar,

O_2 : 1.3×1.013 / 39.64 = 0.0332 bar，N_2 : 29.34×1.013 / 39.64 = 0.7498 bar

付録Aの NO の表から，K_{fNO} (1700K) = $10^{-2.116}$ = 0.007656. ここで $K_{fNO} = p_{NO}/(p_{N2}\cdot p_{O2})^{1/2}$

∴ $p_{NO} = K_{fNO}(p_{N2}\, p_{O2})^{1/2}$ = 0.007656×(0.7498×0.0332)$^{1/2}$ = 0.001208 bar = 121 Pa

NO の体積分率 $r_{NO} = p_{NO} / p$ = 0.001208 / 1.013 = 0.001192 = 1192 ppm

(3) C_nH_{2n} の 1/n mol 当たり，N が x g 原子，S が y g 原子だけ含まれているとする.

C_nH_{2n} の分子量は (12.011 + 2.016) n = 14.027 n，N と S の原子量は 14.007 と 32.066.

題意から，100×14.007x / (14.027 + 14.007x + 32.066y) = 0.25 (0.25%) (a)

100×32.066y / (14.027 + 14.007x + 32.066y) = 2.00 (2.00%) (b)

整理すると， 0.03507－13.972 x + 0.08017 y = 0 (a′)

0.28054－0.28014 x + 31.425 y = 0 (b′)

式(a′)と(b′)を連立させて解くと，x = 0.002561，y = 0.008950

Fuel N を N*と表記すると，

$$1/n\, C_nH_{2n} + x\, N^* + y\, S + 1.1\,(3/2 + y)\,[O_2 + (0.790 / 0.210)\, N_2]$$
$$= CO_2 + H_2O + x\, N^*O + y\, SO_2 + [0.1\,(3/2 + y) - (1/2)\, x]\, O_2$$
$$+ 1.1\,(3/2 + y)\,(0.790/0.210)\, N_2$$

C_nH_{2n} の 1/n mol 当たり湿り燃焼ガス量 V_w は，

$$V_w = 1 + 1 + x + y + 0.1\,(3/2 + y) - (1/2)\, x + 1.1\,(3/2 + y)\,(0.790 / 0.210)$$
$$= 1 + 1 + 0.15 + 0.5\, x + 1.1\, y + 4.138\, y + 6.207 = 8.357 + 0.5\, x + 5.238\, y = 8.405$$

∴ N*O の体積分率 $r_{NO} = x / V_w = 3.047\cdot 10^{-4}$ = 305 ppm

SO_2 の体積分率 $r_{SO2} = y / V_w = 1.065\cdot 10^{-3}$ = 1065 ppm = 1.065%

(4) 298.15K (25℃) において，つぎの２種類の反応を比較する.

完全燃焼反応：C_4H_{10} + 6.5 O_2 = 4 CO_2 + 5 H_2O (a) 反応エンタルピー $\Delta H_{r\,(a)}$

部分燃焼反応：C_4H_{10} + 2.5 O_2 = 4 C + 5 H_2O (b) 反応エンタルピー $\Delta H_{r\,(b)}$

298.15K における各化学種のモルエンタルピーH^0は，付録Aの表より，

化 学 種	単　位	C_4H_{10}	O_2	CO_2	C	H_2O
H^0 (298.15 K)	kJ/mol	−147.5	0.0	−393.5	0.0	−241.8

$\Delta H_{r\,(a)} = 4\,H^0_{CO2} + 5\,H^0_{H2O} - H^0_{C4H10} - 6.5\,H^0_{O2}$

$= 4\times(-393.5) + 5\times(-241.8) - (-147.5) - 6.5\times 0.0 = -2635.5$ kJ/mol

$\Delta H_{r\,(b)} = 4\,H^0_{C} + 5\,H^0_{H2O} - H^0_{C4H10} - 2.5\,H^0_{O2} = 4\times 0.0 + 5\times(-241.8) - (-147.5) - 2.5\times 0.0$

$= -1061.5$ kJ/mol

発熱量 $H_l = -\Delta H_r$ であるから，$|\Delta H_{r\,(b)}|\ /\ |\Delta H_{r(a)}| = 1061.5\ /\ 2635.5 = 0.403$

40.3％に減少する．