

物性値プログラムに使用した式,数値データに関するレポート

01/12/11

1. 目的

物性値は、伝熱計算や流体計算等様々な場面で登場する。本書は、頻繁に使用する物性値の算出方法及び出典について記載し、その都度説明を加える代わりに本書を引用することで作業の効率化を図ることを目的として作成した。常圧付近での適用を前提としており、圧力の影響は密度等を除き、原則として考慮していない。

2. 物性値の算出方法及び出典

2.1 定圧比熱

(1) 単分子の定圧比熱

定圧比熱は文献[1],[2]等にデータが記載されている。文献[2]においては近似式の係数のみが記載されている。近似式は温度の多項式の形で与えられる。近似性の良くない分子に対しては、高次式や適用温度範囲を分けた数種類の近似式を使用する。

(2) 混合ガスの定圧比熱

$$C_p[J/mol/K] = \sum_i y_i C_{p,i} \dots (2.1), \quad C_p[J/kg/K] = \sum_i w_i C_{p,i} \dots (2.2)$$

$$C_p[J/mol/K] = C_p[J/kg/K] \cdot M[kg/mol] \dots (2.3)$$

ここで、 y_i はモル分率、 w_i は重量分率、 M は分子量である。式 2.1 と式 2.2 は単位が異なっているだけであり、相互の変換は各成分レベルで行っても混合ガスとして行っても同じである（以下、証明）。常圧付近の圧力で使用する。

$$\bar{M} = \sum_i y_i M_i \dots (2.4), \quad w_i = \frac{y_i M_i}{\sum_i y_i M_i} = \frac{y_i M_i}{\bar{M}} \dots (2.5)$$

$$\bar{C}_p[J/mol/K] = \sum_i y_i C_{p,i} = \sum_i \frac{\bar{M} w_i}{M_i} C_{p,i} = \bar{M} \sum_i w_i \frac{C_{p,i}}{M_i} = \bar{M}[kg/mol] \cdot \bar{C}_{p,i}[J/kg/K] \dots (2.6)$$

2.2 エンタルピ

(1) 顕熱

比熱より、積分形であるエンタルピの方が扱いやすいので、特に必要がない限り比熱は用いていない。文献[1]には、一般的なガスのエンタルピ（ $H(T) - H(298.15)$ ）が数表として 100[K]刻みで与えられている。298.15[K]から T[K]までの顕熱を温度 T に関する多項式で近似して熱バランス計算等で使用している。文献[1]には C2 以上の炭化水素に関する情報がほとんど無い。それらについては、文献[2]に、温度に関する 3 次多項式近似の係数が記載されている。この場合、自分で積分して利用

している。 $H(T) - H(298.15)$ から温度を求める必要性が数値解析等で生じることがあるが，その場合は Newton 法等を用いる。

$$H(T) - H(298.15) = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad \dots(2.7)$$

(2) 潜熱

主として水の潜熱を用いる。温度に対する依存性は考慮しないで済むよう，100 における潜熱として利用するようにしている。

水の潜熱は， 2.27×10^6 [J/kg] を使用している^[3]。

(3) 反応熱

1.01325×10^5 [Pa]，298.15 [K] における反応熱は，各化学種ごとに固有の数値である標準生成エンタルピー ΔH_f° [kJ/mol]^{[1][2]} を用いて算出する。燃焼反応の場合，LHV，HHV が算出できる。

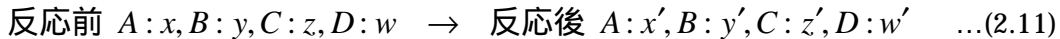


$$\Delta H_{298.15K} = z\Delta H_{f,C}^\circ + w\Delta H_{f,D}^\circ - x\Delta H_{f,A}^\circ - y\Delta H_{f,B}^\circ \quad \dots(2.9)$$

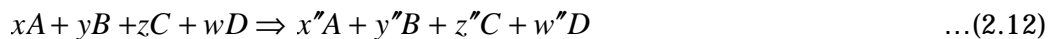
任意の温度における反応熱は $\Delta H_{298.15K}$ を利用して求める。

$$\Delta H_{T[K]} = \{H_{\text{reactant}}(T) - H_{\text{reactant}}(298.15)\} + \Delta H_{298.15K} - \{H_{\text{product}}(T) - H_{\text{product}}(298.15)\} \quad \dots(2.10)$$

反応の化学式が正確に分からない場合，別の手法で反応熱を計算する。例えば，反応前後の A, B, C, D のモル分率



から，C, H, O, N...等の各元素バランスがとれた化学反応式 2.12 を得る。この時，生成物側の係数を定数倍することになる。



$$x + y + z + w = x' + y' + z' + w' = 1, \quad \frac{x''}{x'} = \frac{y''}{y'} = \frac{z''}{z'} = \frac{w''}{w'} = \text{const} \quad \dots(2.13)$$

式 2.12 において反応熱は次式で計算される。

$$\Delta Q_{298.15K} = \{(x'' - x)\Delta H_{f,A}^\circ + (y'' - y)\Delta H_{f,B}^\circ + (z'' - z)\Delta H_{f,C}^\circ + (w'' - w)\Delta H_{f,D}^\circ\} \cdot f \quad \dots(2.14)$$

$\Delta Q_{298.15K}$: 反応熱[W]， f : 反応前のガス流量[mol/s]

式 2.9 は，ある物質（例えば A）の変化量に着目して反応熱を計算する。式 2.14 ではガス流量をかけて反応熱を算出する。

(4) 平衡定数

298.15 [K] における平衡定数 K_p はギブスエネルギーの変化より求める。 ΔG_T は上記 ΔH_T と同様にして算出する。標準生成ギブスエネルギーは文献[1][2]等から引用する。

$$\ln K_p = -\frac{\Delta G_T}{RT} \quad \dots(2.15)$$

文献[1]には各温度における ΔG_f が与えられているが，文献[2]には標準生成ギブスエネルギーしか

記載されていない。この場合、各温度における ΔG_f をガスの定圧比熱の近似式を用いて推算する方法が文献[2]に記載されている。

2.3 密度

理想気体であると仮定し、状態方程式を用いる。

$$PM = rRT \quad \dots(2.16)$$

P : 圧力[Pa], M : 分子量[kg/mol], r : 密度[kg/m³], R : ガス定数[J/mol/K], T : 温度[K]

$R = 8.314472$ [4]である。

2.4 分子量

分子量は、IUPAC が定めた国際原子量表より算出して用いる^[9]。

2.5 物理定数

NIST のホームページ^[4]等を参照している。

2.6 粘性係数、熱伝導率

(1) 単成分に対する算出方法^{[2][7][8]}

低密度の単原子気体に関する推算式 (10~300kPa) ...Chapman-Enskog の分子運動論

$$\begin{aligned} m &= 2.6693 \times 10^{-8} \frac{\sqrt{M_r T}}{S^2 \Omega_v} \\ I &= 8.3224 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{T/M_r}}{S^2 \Omega_v} \end{aligned} \quad \dots(2.17), (2.18)$$

m : 粘性係数[Pa s], M_r : 分子量[-], I : 熱伝導率[W/m/K], Ω_v : Lennard-Jones パラメータ

S : 衝突直径[nm], e : 分子間力の特性エネルギー

$$\begin{aligned} \Omega_v &= \frac{1.16145}{T^{*0.14874}} + \frac{0.52487}{\exp(0.77320T^*)} + \frac{2.16178}{\exp(2.43787T^*)} \\ &\quad - 6.435 \times 10^{-4} T^{*0.14874} \sin(18.0323T^{*-0.76830} - 7.2731) \quad \dots(2.19), (2.20) \\ T^* &= \frac{kT}{e} \end{aligned}$$

極性分子に対しては L-J ポテンシャルではなく改良 Stocmayer ポテンシャルを用いる。

$$\begin{aligned} \Omega_{stoc} &= \Omega_v + \frac{0.2d^2}{T^*} \\ \text{H}_2\text{O} : S &= 0.252[\text{nm}] \quad e/k = 775[\text{K}], d = 1.0[-] \quad \dots(2.21) \\ \text{CH}_3\text{OH} : S &= 0.369[\text{nm}] \quad e/k = 417[\text{K}], d = 0.5[-] \end{aligned}$$

e/k , S は、文献[2][6][8]等に記載されている。粘性係数は文献値と良く合うので式 2.17 を使用し

ていると考えられるが、熱伝導率は式 2.18 をそのまま用いたものではないようである。

(2) 混合気体に対する算出方法^{[2][7][8]}

Sutherland の式 , Wilke の方法

$$\mathbf{m}_{mix} = \sum_i \left\{ y_i \mathbf{m}_i^0 / \sum_j y_j \mathbf{f}_{ij} \right\} \quad \dots(2.22) , \quad \mathbf{f}_{ij} = \frac{\left\{ 1 + \left(\frac{\mathbf{m}_i^0}{\mathbf{m}_j^0} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right\}^2}{\left\{ 8 \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right\}^{1/2}} \quad \dots(2.23)$$

Wassiljewa の式 , Mason-Saxena の式

$$\mathbf{l}_{mix} = \sum_i \left\{ y_i \mathbf{l}_i^0 / \sum_j y_j A_{ij} \right\} \quad \dots(2.24) , \quad A_{ij} = 1.065 \mathbf{f}_{ij} \quad \dots(2.25)$$

 y_i はモル分率である。式 2.25 の係数は , 1 や 1 より小さい値とする説もある^[2]。**2.7 分子拡散係数**(1) 二成分相互拡散係数^{[2][7][8]}

低密度の気体に関する推算式 (10~500kPa) ...Chapman-Enskog の分子運動論

$$D_{12} = 1.8344 \times 10^{-10} \frac{\sqrt{T^3 \left(\frac{1}{M_{r,1}} + \frac{1}{M_{r,2}} \right)}}{p \mathbf{s}_{12}^2 \Omega_D} \quad \dots(2.26)$$

$$\mathbf{s}_{12} = \frac{\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2}{2} \quad \dots(2.27), (2.28)$$

$$\mathbf{e}_{12} = \sqrt{\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2}$$

$$\Omega_{D(L-J)} = \frac{1.06036}{T^{*0.15610}} + \frac{0.19300}{\exp(0.47635T^*)} + \frac{1.03587}{\exp(1.52996T^*)} + \frac{1.76474}{\exp(3.89411T^*)} \quad \dots(2.29)$$

 D_{12} ; 相互拡散係数[m²/s] , p : 圧力[MPa] , \mathbf{s} : 衝突直径[nm]

$$\Omega_{D(Stoc)} = \Omega_{D(L-J)} + \frac{0.19 \mathbf{d}_{12}^2}{T^*} \quad \dots(2.30)$$

$$\mathbf{d}_{12} = \sqrt{\mathbf{d}_1 \mathbf{d}_2} \quad \dots(2.31)$$

(2) 多成分系の拡散係数^[5]

Wilke の式

$$D_{li} = \frac{1 - y_i}{\frac{y_2}{D_{12}} + \frac{y_3}{D_{13}} + \dots + \frac{y_n}{D_{1n}}} \quad \dots(2.32)$$

 y はモル分率[-]

3. 各化学種の物性データ

3.1 エンタルピ

エンタルピ $H - H_{298.15K}(T)$ を，最小二乗法を用いて温度に関する 3 次多項式で近似した。表 3.1 に係数を示す。 T^3 の係数が負のものが多く，高温域でエンタルピが負になる不都合から，適用範囲はいずれも 2500 K 程度までである。温度差によるが，近似誤差は約 1.5% 以下である。

表 3.1 エンタルピ^[1]

	H-H _{298.15} (T) [kJ/mol] T[K]			
	a	bT	cT ²	dT ³
CH ₄	-7.89865620E+00	1.61047176E-02	3.51395050E-05	-5.13939393E-09
H ₂ O	-8.72032799E+00	2.70945437E-02	8.46437774E-06	-8.20889010E-10
CO	-8.06943722E+00	2.57911588E-02	4.66164193E-06	-6.75137818E-10
CO ₂	-1.25807441E+01	3.78619788E-02	9.54913573E-06	-1.25771002E-09
H ₂	-8.28210376E+00	2.76560222E-02	1.14491992E-06	1.62905261E-10
N ₂	-8.22155938E+00	2.64323165E-02	3.76599052E-06	-4.52431393E-10
O ₂	-9.04515792E+00	2.88706630E-02	3.27266758E-06	-3.32252127E-10

	H-H _{298.15} (T) [kJ/kg] T[K]			
	a	bT	cT ²	dT ³
CH ₄	-4.93666013E+02	1.00654485E+00	2.19621907E-03	-3.21212121E-07
H ₂ O	-4.84462666E+02	1.50525243E+00	4.70243208E-04	-4.56049450E-08
CO	-2.88194186E+02	9.21112816E-01	1.66487212E-04	-2.41120649E-08
CO ₂	-2.85926001E+02	8.60499518E-01	2.17025812E-04	-2.85843186E-08
H ₂	-4.14105188E+03	1.38280111E+01	5.72459959E-04	8.14526305E-08
N ₂	-2.93627121E+02	9.44011303E-01	1.34499662E-04	-1.61582640E-08
O ₂	-2.82661185E+02	9.02208219E-01	1.02270862E-04	-1.03828790E-08

文献[1]に載っていない分子については，他資料に載っている比熱の近似式を積分して使用する。この場合，温度に関する 4 次式になる。表 3.2 に比熱の近似式の係数を示す。

表 3.2 比熱の近似式係数^[2]

	C _p (T) [J/mol/K] T[K]			
	a	bT	cT ²	dT ³
CH ₄	1.9252E+01	5.2130E-02	1.1970E-05	-1.1320E-08
H ₂ O	3.2244E+01	1.9240E-03	1.0560E-05	-3.5970E-09
CO	3.0871E+01	-1.2850E-02	2.7890E-05	-1.2720E-08
CO ₂	1.9796E+01	7.3440E-02	-5.6020E-05	1.7150E-08
H ₂	2.7144E+01	9.2740E-03	-1.3810E-05	7.6450E-09
N ₂	3.1151E+01	-1.3570E-02	2.6800E-05	-1.1680E-08
O ₂	2.8107E+01	-3.6800E-06	1.7460E-05	-1.0650E-08
CH ₃ OH	2.1153E+01	7.0930E-02	2.5870E-05	-2.8520E-08
C ₂ H ₆	5.4100E+00	1.7810E-01	-6.9380E-05	8.7130E-09
C ₃ H ₈	-4.2250E+00	3.0630E-01	-1.5860E-04	3.2150E-08
n-C ₄ H ₁₀	1.1163E+01	3.3130E-01	-1.1080E-04	-2.8220E-09
i-C ₄ H ₁₀	-1.3900E+00	3.8470E-01	-1.8460E-04	2.8950E-08

表 3.2 の比熱を積分してエンタルピーを求める近似式にした際の係数を表 3.3 に示す。

表 3.3 エンタルピー^[2]

$H - H_{298.15}(T)$ [J/mol]	T [K]				
	a	bT	cT ²	dT ³	eT ⁴
CH ₄	-8.1404E+03	1.9252E+01	2.6065E-02	3.9900E-06	-2.8300E-09
H ₂ O	-9.7853E+03	3.2244E+01	9.6200E-04	3.5200E-06	-8.9925E-10
CO	-8.8543E+03	3.0871E+01	-6.4250E-03	9.2967E-06	-3.1800E-09
CO ₂	-8.7053E+03	1.9796E+01	3.6720E-02	-1.8673E-05	4.2875E-09
H ₂	-8.3983E+03	2.7144E+01	4.6370E-03	-4.6033E-06	1.9113E-09
N ₂	-8.8982E+03	3.1151E+01	-6.7850E-03	8.9333E-06	-2.9200E-09
O ₂	-8.5132E+03	2.8107E+01	-1.8400E-06	5.8200E-06	-2.6625E-09
CH ₃ OH	-9.6316E+03	2.1153E+01	3.5465E-02	8.6233E-06	-7.1300E-09
C ₂ H ₆	-8.9332E+03	5.4100E+00	8.9050E-02	-2.3127E-05	2.1783E-09
C ₃ H ₈	-1.1017E+04	-4.2250E+00	1.5315E-01	-5.2867E-05	8.0375E-09
n-C ₄ H ₁₀	-1.7069E+04	1.1163E+01	1.6565E-01	-3.6933E-05	-7.0550E-10
i-C ₄ H ₁₀	-1.5111E+04	-1.3900E+00	1.9235E-01	-6.1533E-05	7.2375E-09

表 3.1 と表 3.3 の係数を用いた値の比較を図 3.1~3.7 に示す。

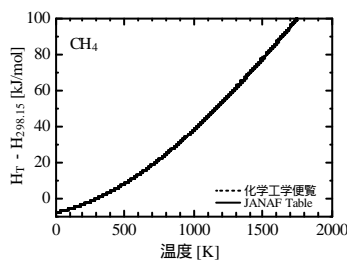


図 3.1 CH₄ の場合

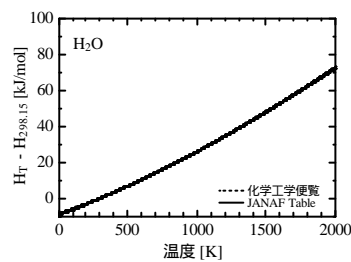


図 3.2 H₂O の場合

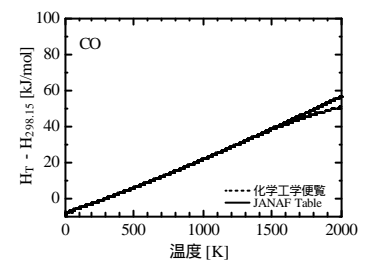


図 3.3 CO の場合

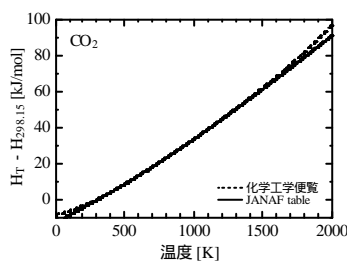


図 3.4 CO₂ の場合

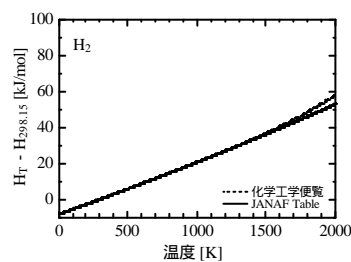


図 3.5 H₂ の場合

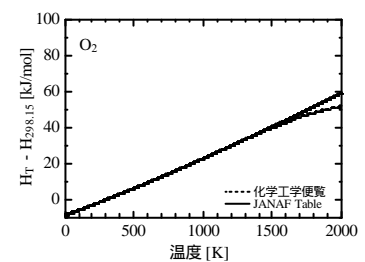


図 3.6 O₂ の場合

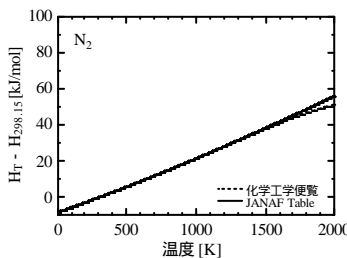


図 3.7 N₂ の場合

表 3.3 の適用範囲は 1500K 程度までである。[1]に記載されていない化学種については、やむを得ず表 3.3 に示す近似式を使用する。

比熱 C_p は、表 3.1 に示す近似式を微分して得る方法と、表 3.2 に示す近似式から得る方法がある。図 3.8, 3.9 に示すように、常温～1000K の範囲では前者がはずれ、1000K 以上では後者が大きくはずれてくるため、温度域で使い分けるか、新たに近似式を作成する必要がある。本計算では後者の方法を採用しているため、1000K 以上は基本的に適用範囲外となる。

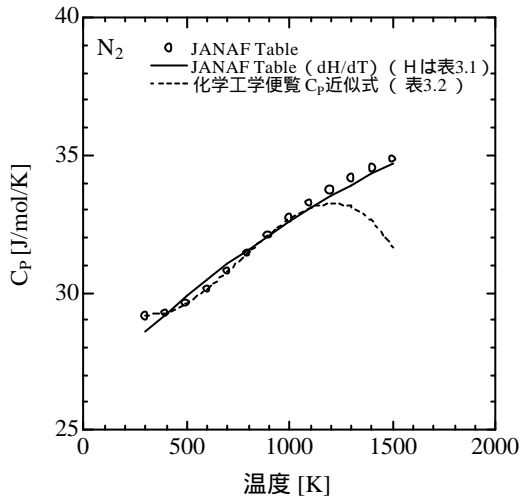


図 3.8 比熱とその近似式 (N_2)

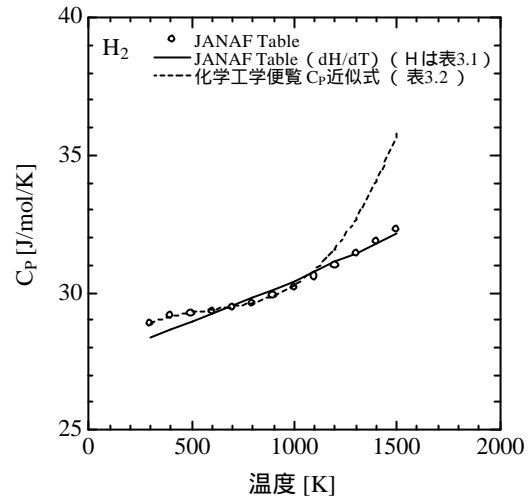


図 3.9 比熱とその近似式 (H_2)

3.2 粘性係数

粘性係数については式 2.17 が良い近似式である。念の為、各化学種について計算値と他の文献値と比較した結果を図 3.10~3.14 に示す。ややずれる化学種もあるが、統一的に式 2.17 を用いる。さらに簡便のため、式 2.17 を多項式で近似して使用する。

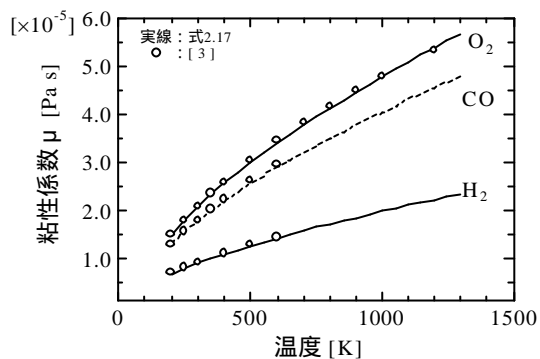


図 3.10 粘性係数(H_2 , CO , O_2)

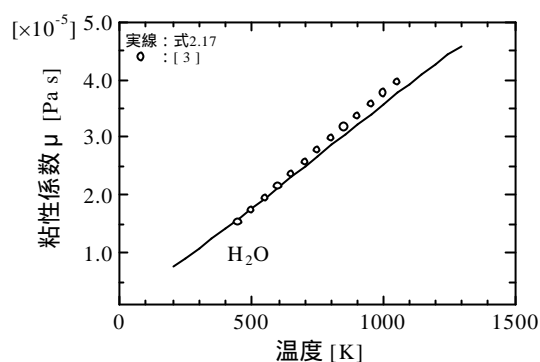


図 3.11 粘性係数(H_2O)

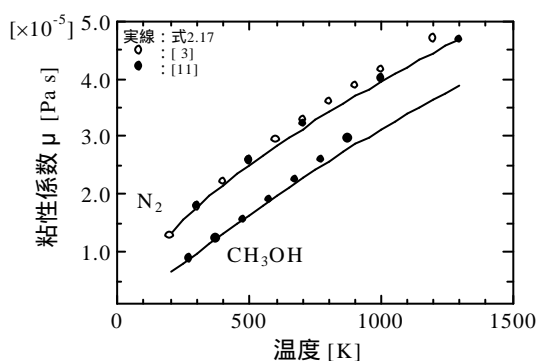


図 3.12 粘性係数(N_2 , CH_3OH)

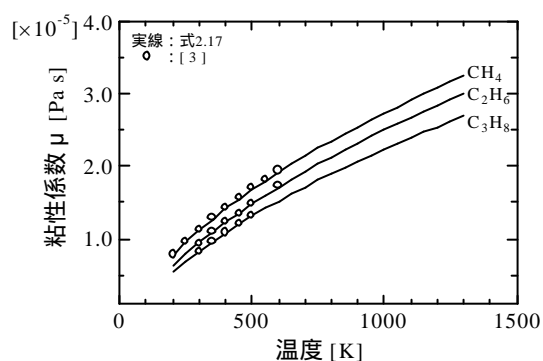


図 3.13 粘性係数(CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8)

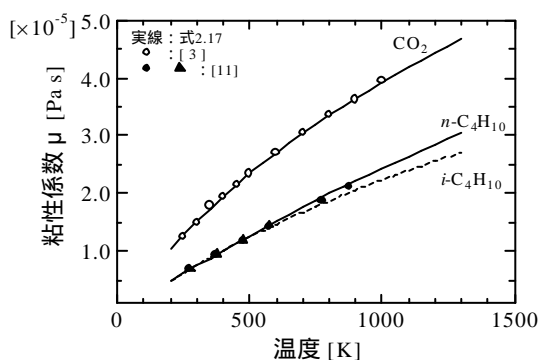


図 3.14 粘性係数(CO_2 , C_4H_{10})

H_2O , CH_3OH に関しては改良 Stocmayer ポテンシャルを用いている。

式 2.17 を 3 次式で近似した際の各項係数を表 3.4 に示す。適用範囲は常温～1500K 程度である。特に，最高次の係数が負になっている CH_3OH , H_2O , $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ については注意を要する。

表 3.4 粘性係数近似式係数

	a	bT	cT ²	dT ³
CH_3OH	-1.1476677E-06	3.8514412E-08	-5.9611753E-12	-2.7688343E-16
H_2O	5.1860015E-07	2.8155575E-08	1.3631201E-11	-6.1114434E-15
O_2	2.1563363E-06	7.0784324E-08	-3.5662383E-11	1.0398011E-14
N_2	3.2522370E-06	5.5076092E-08	-2.6649398E-11	7.8073363E-15
CO_2	-7.3865412E-07	6.0911254E-08	-2.9018432E-11	7.9360327E-15
CO	2.4293659E-06	5.8520810E-08	-2.9230250E-11	8.5743796E-15
H_2	1.8736799E-06	2.6607276E-08	-1.2462517E-11	3.6173645E-15
CH_4	2.7871457E-07	4.1907527E-08	-2.0845518E-11	5.9099822E-15
C_2H_6	-7.0102347E-07	3.8748596E-08	-1.7903922E-11	4.7880009E-15
C_3H_8	-7.8900459E-07	3.4396370E-08	-1.5243891E-11	3.9516034E-15
$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	-2.3531805E-07	2.5697641E-08	1.1314295E-12	-2.1886153E-15
$i\text{-C}_4\text{H}_{10}$	-9.9122356E-07	3.1518280E-08	-1.0155146E-11	1.9285452E-15

3.3 熱伝導率

式 2.18 と文献値（これも計算値）とはあまり合わない。従って，文献[3],[11],[12]に記載の値を用いて近似式を作成した。多項式近似の場合，最高次の係数が負の時に扱いにくい。例えば図 3.15 に示したメタンについては，1600～1700K 以上で熱伝導率が負になるという事態が生じる。そこで，最高次の係数が正になるような近似式を採用した。

表 3.5 に係数を示す。

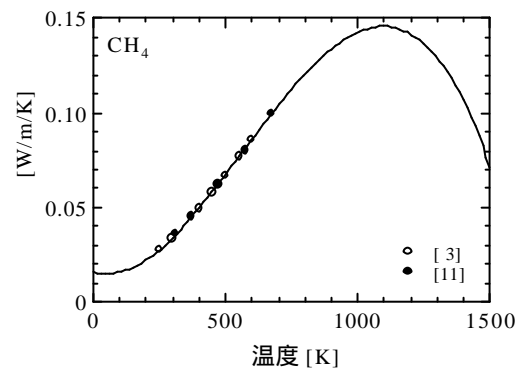


図 3.15 負の最高次係数をもつ多項式

表 3.5 熱伝導率近似式係数

	a	bT	cT ²	dT ³
H_2O	-2.8315887E-03	5.5274622E-05	4.5130536E-08	0.0000000E+00
O_2	-7.8217232E-04	9.7745569E-05	-3.2632829E-08	7.2755614E-12
N_2	9.7072063E-03	6.0273818E-05	-7.2609169E-09	1.4816627E-12
CO_2	-1.1616122E-02	9.9095481E-05	-2.2362225E-08	3.1306214E-12
CO	2.2645635E-03	8.2833386E-05	-2.5939297E-08	7.2318718E-12
H_2	6.0945532E-02	4.3460567E-04	-7.3109497E-08	3.0636569E-11
CH_4	-6.6170285E-03	1.1898100E-04	5.6438998E-08	0.0000000E+00
C_2H_6	-3.6552665E-02	2.3863874E-04	-2.0342700E-07	1.6497960E-10
C_3H_8	-5.6342232E-03	4.7013665E-05	1.0880892E-07	0.0000000E+00
$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	-1.0104071E-02	6.0793444E-05	8.8286713E-08	0.0000000E+00
$i\text{-C}_4\text{H}_{10}$	-1.0383751E-02	7.6537458E-05	4.2915780E-08	0.0000000E+00
CH_3OH	-2.2587225E-02	1.6757147E-04	-1.9724969E-07	2.0517464E-10

近似式と文献値との対応性を図 3.16~3.27 に示す。

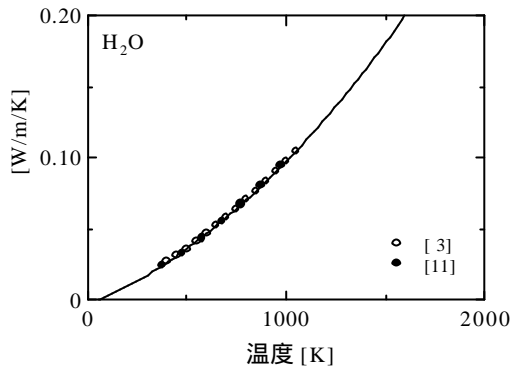


図 3.16 H₂O の熱伝導率

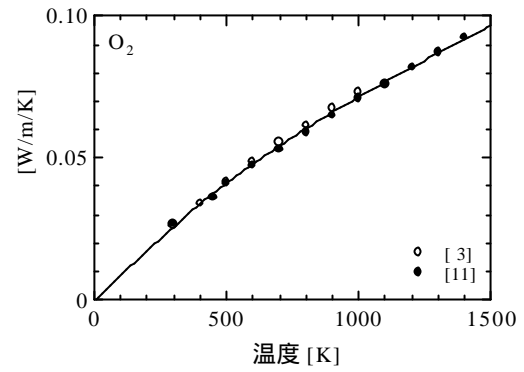


図 3.17 O₂ の熱伝導率

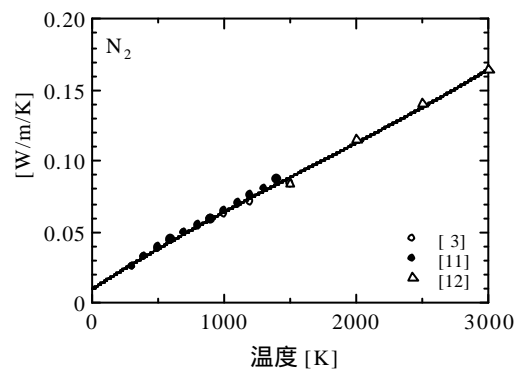


図 3.18 N₂ の熱伝導率

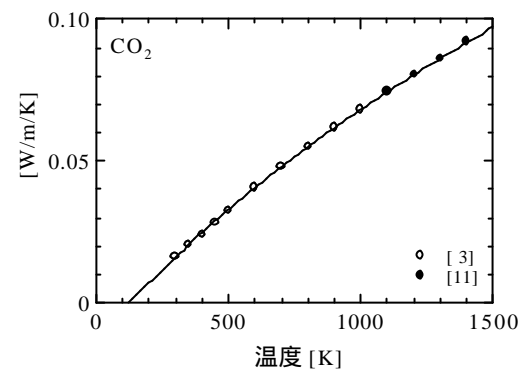


図 3.19 CO₂ の熱伝導率

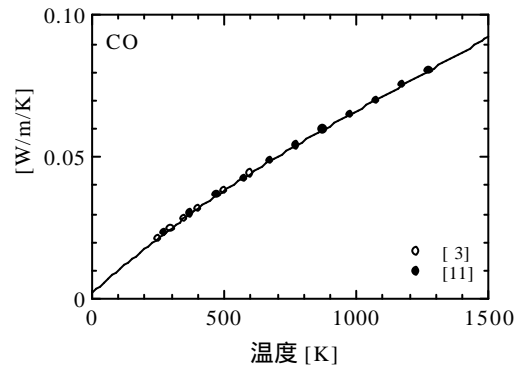


図 3.20 CO の熱伝導率

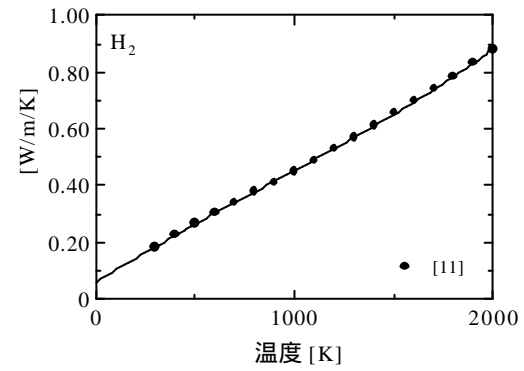


図 3.21 H₂ の熱伝導率

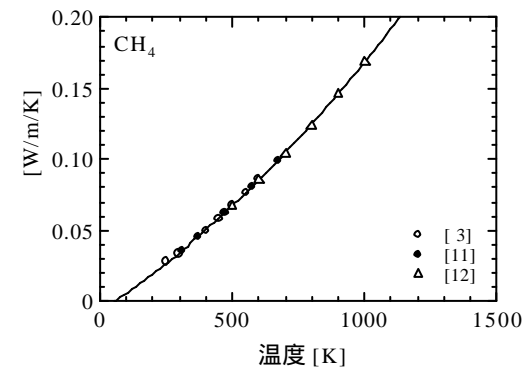


図 3.22 CH₄ の熱伝導率

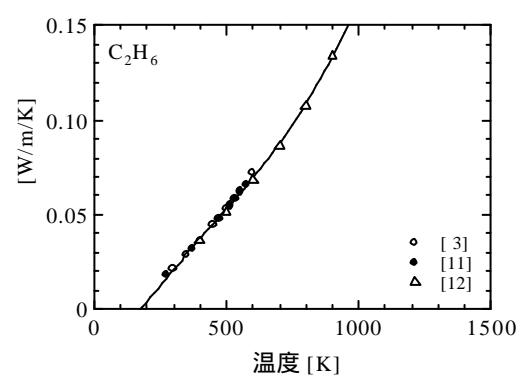
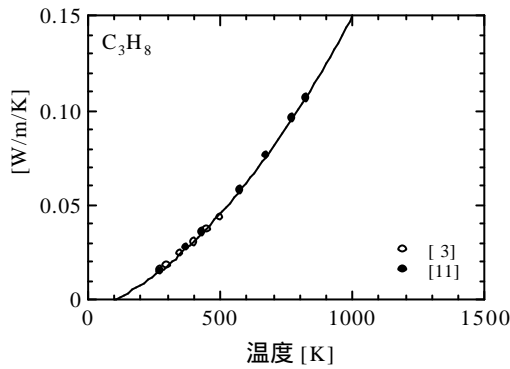
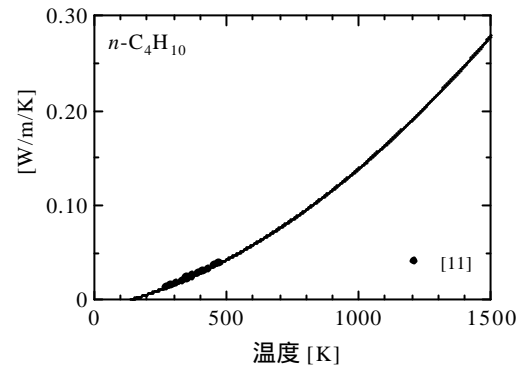
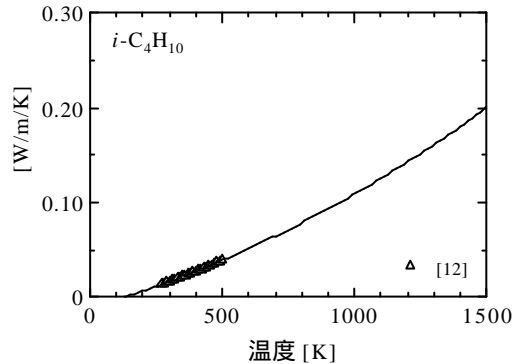
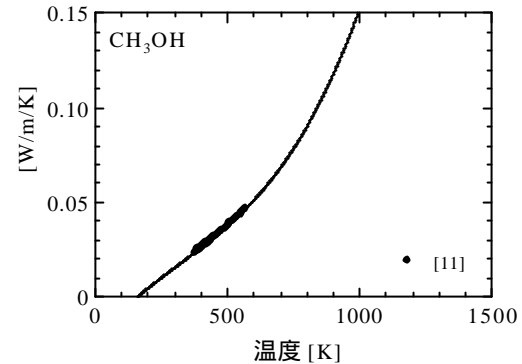


図 3.23 C₂H₆ の熱伝導率

図 3.24 C₃H₈の熱伝導率図 3.25 n-C₄H₁₀の熱伝導率図 3.26 i-C₄H₁₀の熱伝導率図 3.27 CH₃OH の熱伝導率

3.4. 混合ガスのプラントル数

Pr は次式で定義される無次元数である。

$$Pr = \frac{C_p m}{I} \quad \dots(3.1)$$

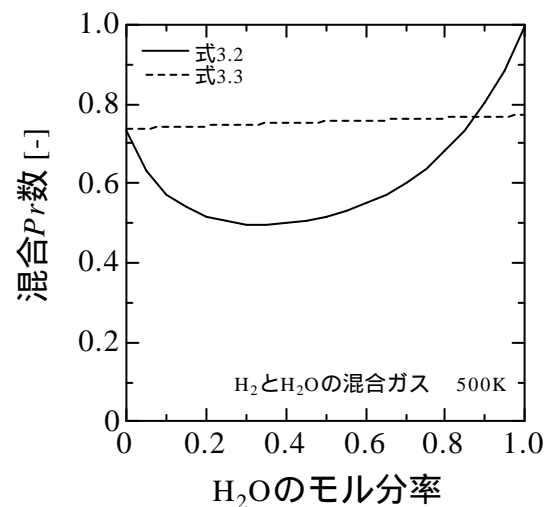
従って、混合ガスの物性値を用いて、 Pr_{mix} を求めることができる。

$$Pr_{mix} = \frac{C_{p_{mix}} m_{mix}}{I_{mix}} \quad \dots(3.2)$$

Pr_{mix} を計算する式として、Eucken の式^[7]も知られている。

$$Pr = \frac{C_{p_{mix}}}{C_{p_{mix}} + 1.25 R / M_{mix}} \quad \dots(3.3)$$

式 3.2 で計算される Pr_{mix} は、混合割合に対して極値をもつことがある。1 例を図 3.28 に示す。一方、式 3.3 は極値を示さない。図 3.28 中で両グラフの右端が合っていないのは、式 3.3 の適用対象が非極性多原子分子であるためであると考えられる。実現象として奇異な感じがあるが、 Pr_{mix} の値は、式 3.2 を用いている。

図 3.28 混合ガスの Pr 数 (極値を示す例)

【添付参考資料】

- (1) 気体のエンタルピー，定圧比熱，ギブスエネルギー等^[1]
- (2) 気体の定圧比熱等^[2]
- (3) 気体の熱物性値^{[3][11][12]}
- (4) 単位変換^[4]
- (5) 物理定数^[4]
- (6) 分子物性値^[8]
- (7) 原子量表^[9]
- (8) 燃焼熱^[10]

【出典】

- [1] Chase, M. W., NIST-JANAF Thermochemical Tables, Non Applicable(1998).
- [2] 化学工学協会，化学工学便覧 第 6 版，丸善(1999).
- [3] 日本機械学会，伝熱工学資料 第 4 版，丸善(1997).
- [4] NIST homepage (<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>)
- [5] 佐藤，物性定数推算法，丸善(1982).
- [6] Poling, Bruce E. *et.al.*, Properties of gases and liquids, McGraw Hill(2000).
- [7] Bird, Transport Phenomena, Wiley & Sons.
- [8] 大矢，諸岡，移動速度論，技報堂出版(1992).
- [9] コットン，ウィルキンソン，ガウス，基礎無機化学，培風館(1998) .
- [10] 水谷，燃焼工学 第 2 版，森北出版(1994).
- [11] N.B.ヴァルガフティック，気体と液体の熱物理的性質，日ソ通信社(1974).
- [12] Y.S.Touloukian, P.E.Liley, S.C.Saxena, Themophysical Properties of Matter, Vol.3, Plenum(1970).