

燃焼ガスの熱物性に関する研究

川口 雅之・矢野 利明・鳥居 修一
(受理 平成6年5月31日)

Study on Thermophysical Properties of Burnt Gas

Masayuki KAWAGUCHI, Toshiaki YANO, and Shuichi TORII

The aim of the present study is to evaluate the Prandtl numbers of combustion gases by means of a method of chemical equilibrium calculation in which CO_2 , H_2O , N_2 and O_2 as the combustion products are considered. Methane, ethane, propane, methanol and ethanol are used as fuels. Emphasis is placed on the effects of viscosity, specific heat and thermal conductivity on the Prandtl number. It is disclosed from the present study that (i) the Prandtl number of combustion gas is substantially affected by thermal conductivity of H_2O , (ii) if the equivalence ratio (ϕ) or temperature is the same, the higher Prandtl number of combustion gas is evaluated for the case of ethanol, and (iii) the maximum value of the Prandtl number is obtained at $\phi = 1$ for any fuels used here.

1. 緒 論

ガスの基本的な輸送係数は3種類あり、拡散係数、粘性係数、熱拡散率である。これら3つの次元が同一であるので、これらを用いてプラントル数(Pr)、シュミット数(Sc)およびレイ数(Le)などの無次元数が求められる。

CO_2 , H_2O , N_2 などの純ガスの熱物性値(定圧比熱、粘性係数、熱伝導率)に関する研究は従来から行われており、それらの熱物性値を用いてプラントル数も求められている。しかしながら、高温領域での熱物性値の重要性は十分認識されているものの、その温度域の熱物性値に関するデータはほとんど存在しない。さらに、燃焼ガスのような高温でしかも多成分からなるガスの熱物性値は当然明確にされていない。

本研究では、各種燃料の燃焼ガスのPr数の算出を試みる。そこで、純ガスの熱物性値を用いてメタン、エタン、プロパン、メタノール、エタノールを常圧、当量比0.5~1.5で燃焼させたときのPr数を求める。

2. 記号説明

a	熱拡散率 [m^2/s]
c_p	定圧比熱 [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
$c_{p,m}$	混合気体の定圧比熱 [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
c_v	定容比熱 [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
Le	レイ数
M_i, M_j	i, j成分気体の分子量 [kg/kmol]
Pr	プラントル数
S	サザーランド定数
Sc	シュミット数
T	温度 [K]
x_i, x_j	i, j成分気体のモル分率

ギリシャ文字

η	粘性係数 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
η_m	混合気体の粘性係数 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
η_i, η_j	i, j成分気体の粘性係数 [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
θ	$T/1000$
λ	熱伝導率 [$\text{mW}/\text{m}\cdot\text{K}$]
λ_m	混合気体の熱伝導率 [$\text{mW}/\text{m}\cdot\text{K}$]
ν	動粘性係数 [m^2/s]

- ρ 密度 [kg/m³]
- σ T-273 [°C]
- ϕ 当量比

3. プラントル数

Table 1は燃焼を支配する基本的な輸送現象とその係数を示している。さらに、運動量、熱および物質の輸送現象はFig. 1で示すように相互間で結びついており、その各輸送を支配する無次元数としてプラントル数Pr、シュミット数Sc、ルイス数Leが挙げられる。

Pr数は以下の式で求められる。

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\frac{\eta}{\rho}}{\frac{c_p \eta}{\lambda}} = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (1)$$

当然、Pr数は定圧比熱、粘性係数および熱伝導率の3つの熱物性値により表される。

4. 計算方法

炭化水素系燃料を空气中で完全燃焼させたときの総

括反応で生成される化学種には、CO、H₂、OH、H、O、NOなども含まれるが、CO₂、H₂O、N₂およびO₂がほとんどである。そこで、燃焼ガスはCO₂、H₂O、N₂およびO₂の4成分で構成されているとみなし計算を試行した。

4.1 各成分気体の熱物性値

以下に各熱物性値の求め方を示す。

(a) 定圧比熱⁽¹⁾

定圧比熱は、次のように無次元温度 θ の多項式の形で表される。

$$\theta \geq 1.2 \quad c_p = a_1 + \frac{a_2}{\theta} + \frac{a_3}{\theta^2} + \frac{a_4}{\theta^3} + \frac{a_5}{\theta^4} \quad (2)$$

$$\theta < 1.2 \quad c_p = a_6 + a_7 \theta + a_8 \theta^2 + a_9 \theta^3 + a_{10} \theta^4 \quad (3)$$

Table 2は、双方の式に現れるa₁~a₁₀の値を各燃焼ガス成分について纏めたものである。

(b) 粘性係数⁽²⁾

温度T₁の粘性係数 η_1 が既知であるとき、T₂の粘性係数 η_2 は次式で与えられる。また、燃焼ガス成分のサザーランド定数Sと粘性係数 η の値はTable 3に

Table 1 Transport coefficient.

	Momentum transport	Material transport	Heat transport
Phenomenon	Viscosity	Diffusion	Heat conduction
Fundamental transport coefficient	Coefficient of viscosity	Diffusion coefficient	Thermal conductivity
Factor of transport	Velocity gradient	Concentration gradient	Temperature gradient

Table 2 The values of a₁~a₁₀ for composition of burnt gas.

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
a ₁	1.612	3.608	1.454	1.612
a ₂	-1.231	-1.574	-0.741	-0.139
a ₃	3.004	0.167	1.679	-2.575
a ₄	-3.890	-0.493	-2.285	4.912
a ₅	1.785	0.627	1.089	-2.653
a ₆	0.421	1.870	1.125	1.071
a ₇	1.885	-0.431	-0.610	-0.507
a ₈	-1.837	1.690	1.337	1.939
a ₉	0.997	1.107	-0.883	-1.816
a ₁₀	-0.231	-0.267	0.198	0.558

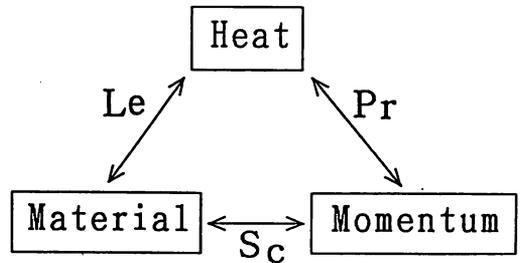


Fig. 1 Correlation of transport phenomenon.

Table 3 Sutherland constant and coefficient of viscosity (1atm, 273K).

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
S	240	650	104	125
η	14.7	12.1(373K)	17.6	20.4

示されている。

$$\eta_2 = \eta_1 \left(\frac{T_1 + S}{T_2 + S} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} \quad (4)$$

(c) 熱伝導率⁽³⁾

熱伝導率の温度依存性を考慮するために3次の近似式を適用した。

$$\lambda = b_1 + b_2 \sigma + b_3 \sigma^2 + b_4 \sigma^3 \quad (5)$$

式中の $b_1 \sim b_4$ は文献(3)のグラフより求め、これらをTable 4に示す。

4.2 混合気体(燃焼ガス)の熱物性値

燃焼ガスを構成する各成分の温度に対するモル分率は化学平衡計算によって求められ、これを基にして混合気体の各熱物性値はそれぞれ以下のように得られる。

(a) 混合気体の定圧比熱

混合気体の定圧比熱は次式で算出される。

$$C_{Pm} = \sum x_i C_{Pi} \quad (6)$$

(b) 混合気体の粘性係数⁽³⁾

混合ガスの粘性係数は、成分気体のモル分率と粘性係数をWilkeの式⁽³⁾に代入することによって求められる。

$$\eta_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{1 + \frac{1}{x_i} \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j \phi_{ij}}}{\eta_i} \quad (7)$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\frac{4}{\sqrt{2}} \left[1 + \frac{M_i}{M_j} \right]^{1/2}} \quad (8)$$

(c) 混合気体の熱伝導率⁽³⁾

混合気体の熱伝導率はLindsay-Bromleyの理論

Table 4 The values of $b_1 \sim b_4$ for composition of burnt gas.

	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
b_1	1.489 $\times 10^{-5}$	1.736 $\times 10^{-5}$	2.327 $\times 10^{-5}$	2.281 $\times 10^{-5}$
b_2	9.150 $\times 10^{-8}$	6.255 $\times 10^{-8}$	7.684 $\times 10^{-8}$	8.645 $\times 10^{-8}$
b_3	-2.023 $\times 10^{-11}$	8.637 $\times 10^{-11}$	-2.729 $\times 10^{-11}$	-1.600 $\times 10^{-11}$
b_4	1.135 $\times 10^{-15}$	-1.524 $\times 10^{-14}$	2.822 $\times 10^{-15}$	-3.290 $\times 10^{-15}$

式⁽³⁾によって求められる。

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{1 + \frac{1}{x_i} \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j A_{ij}} \quad (9)$$

$$A_{ij} = \frac{1}{4} \left[1 + \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{3/4} \frac{(1+S_i/T)}{(1+S_j/T)} \right)^2 \frac{(1+S_{ij}/T)}{(1+S_i/T)} \right] \quad (10)$$

$$S_{ij} = \sqrt{S_i S_j} \quad (11)$$

H₂Oのように有極性分子を含む混合気は下式より算出される。

$$S_{ij} = 0.733 \sqrt{S_i S_j} \quad (12)$$

5. 計算結果および考察

5.1 気体の熱伝導と粘性の関係

燃焼ガスを構成する各成分ガスの熱伝導率と粘性係数は文献(5)を基にして算出した。以下にその導出過程を簡単に示す。

単位面積、単位時間に通過する熱量 q は熱の流れる方向の温度勾配 $d\theta/dx$ に比例すると仮定され、次式で表される。

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (13)$$

気体の定容比熱を c_v とすれば、質量 m の分子の1個当たりの比熱は mc_v である。これは温度1Kの上昇ごとに分子に与えられる運動エネルギーに対応する。気体内に温度勾配 $d\theta/dx$ がある場合、距離 2ℓ だけ離れた位置の分子間の温度差は $(d\theta/dx) \cdot 2\ell$ である。これらの分子間では、エネルギーの差 q が保有される。

$$q = 2\ell mc_v (d\theta/dx) \quad (14)$$

分子は x, y, z の6方向にそれぞれ1/6ずつ運動していると一般に考えられる。従って、1 m^3 の気体中の分子数を N 個、その平均分子速度を V (m/h)とすれば、面積1 m^2 を一方向に通過する分子数は1時間に $NV/6$ 個である。この一個一個が前述のようにエネルギーを伝えており、その総和が(13)式の右辺に対応する。この関係は以下の式で表される。

$$\lambda \frac{d\theta}{dx} = 2\ell mc_v \frac{d\theta}{dx} \frac{NV}{6} \quad (15)$$

従って、熱伝導率は次式のようなのである。

$$\lambda = \frac{1}{3} Nm v \ell c_v = \frac{1}{3} \rho v \ell c_v \quad (16)$$

ここで、 $\rho = Nm$ は気体の密度である。さらに上式を変形すると次式が得られる⁽⁵⁾。

$$\lambda = \frac{1}{3} \frac{9\gamma - 5}{4\gamma} \rho v l c_v \quad (17)$$

γ は定圧、定容比熱の比 $\gamma = c_p/c_v$ である。

気体の粘性は分子の衝突で生じる。速度勾配のある気体内で衝突分子間の運動量の交換を考えれば、式(16)と同様の方法で粘性係数 η は求められる。

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v l \quad (18)$$

式(17)と式(18)を辺々で割れば、以下の関係式が得られる。

$$\frac{c_p \eta}{\lambda} = \frac{4\gamma}{9\gamma - 5} \quad (19)$$

これは Pr 数である。右辺の比熱比 γ は対象とするガスについては圧力と温度にほとんど依存しないので、Pr 数は圧力・温度に対してほぼ一定値を示すことが窺える。

5. 2 熱物性値の修正

Fig. 2 は、先に示した計算方法により、メタンを常圧、当量比1.0で燃焼させたときの燃焼ガス (BG) と燃焼ガスの各成分の Pr 数を示したものである。H₂O の Pr 数は温度が上がるにつれて大きく減少している。CO₂, N₂, O₂ の Pr 数は600~1000 K の範囲でほぼ一定であるが、1000~1600 K では多少増加している。燃焼ガスの Pr 数は約0.78から0.74へ多少減少している。H₂O 以外の燃焼ガス成分の Pr 数は温度に対して多少変化しているものの、大きな変化はみられない。H₂O の Pr 数が温度上昇に対して大きく減少しているが、これは先に述べた Pr の特性と矛盾するので、その要

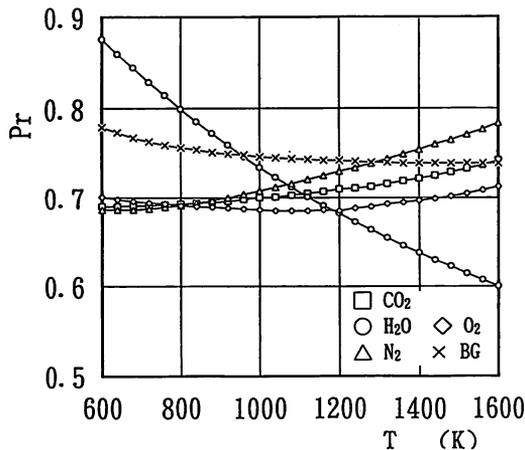


Fig. 2 Prandtl number versus temperature.

因を高温域での粘性係数の変化から検討する。

Fig. 3 は、文献(2)の理論式で求めた H₂O の粘性係数の値を文献(3)の実験値、文献(4)の値と比較したものである。文献(2)の理論式から算出した粘性係数は、温度が高くなるにつれて文献(3)、文献(4)の値と大きく異なることが分かる。そこで、上記と同様の方法で文献(3)の実験値を用いて Pr 数の算出を試みた。文献(3)の実験値より作成した H₂O の粘性係数は以下のように近似した。

$$\eta = 7.8900 \times 10^{-6} + 4.1388 \times 10^{-8} \sigma - 1.0842 \times 10^{-12} \sigma^2 + 5.3642 \times 10^{-16} \sigma^3 \quad (20)$$

Fig. 4 は、上式(20)を用いて燃焼ガスと各成分ガスの Pr 数を求めた結果を表している。H₂O の Pr 数の

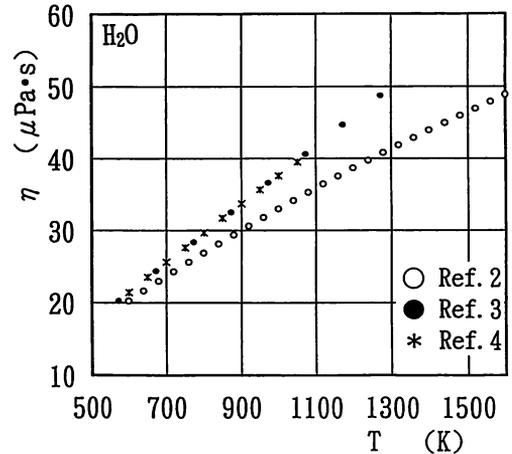


Fig. 3 Coefficient of viscosity versus temperature.

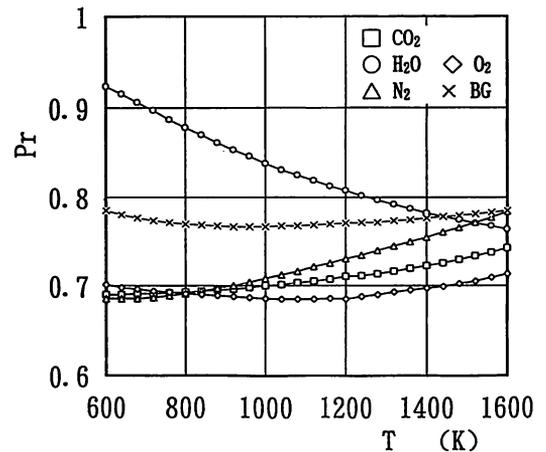


Fig. 4 Prandtl number versus temperature.

変化は、Fig. 2 の場合に比べて Fig. 4 では小さくなっているが、その変化はかなり大きい。H₂O の Pr 数が大きく変化する要因として、定圧比熱を以下で検討する。

Fig. 5 は、これまでに用いた文献(1)の定圧比熱を文献(3)と文献(4)の値と比較したものである。各文献の定圧比熱に大きな相違は見られない。

Fig. 6 は、H₂O の熱伝導率として文献(3)の代わりに文献(4)の値を用いて得られた Pr 数の計算結果を示している。算出に際し、文献(4)から H₂O の熱伝導率を以下の近似式で表して、これを使用した。

$$\lambda = (5.5226 + 1.6813 \times 10^{-2} T + 1.0119 \times 10^{-4} T^2 - 2.6214 \times 10^{-8} T^3) \times 10^{-6} \quad (21)$$

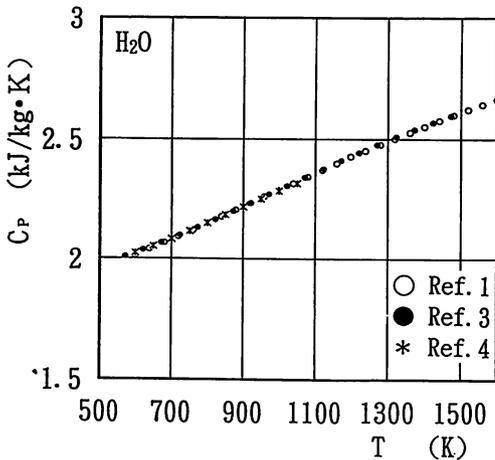


Fig. 5 Specific heat at constant pressure versus temperature.

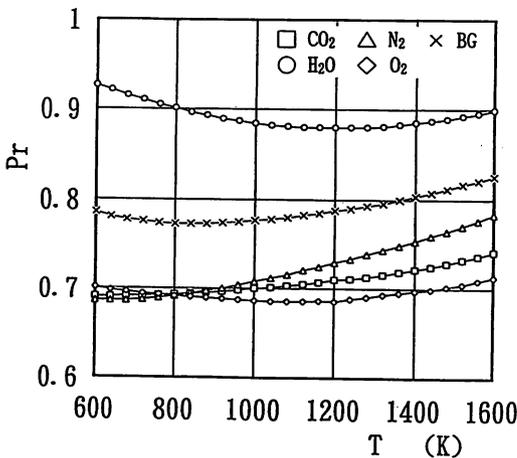


Fig. 6 Prandtl number versus temperature.

H₂O の Pr 数は約 0.9, N₂ は約 0.7 の値を示すことが分かる。CO₂, O₂ の Pr 数は約 900 K までほぼ一定であり、その値から 1600 K までやや上昇するものの、この傾向はかなり緩やかなものである。

5. 3 各燃料における燃焼ガスの Pr 数

前章では、燃焼ガスの各成分ガスの粘性係数、熱伝導率および比熱を修正することによって、比較的正しい Pr 数を得ることが可能となった。以下では、メタン、エタン、プロパン、および代替燃料として注目されている低級アルコール類のメタノール、エタノールの 5 種類の燃料を常圧、当量比 0.5~1.5、温度 1000~1600 K の範囲で計算し、各燃料の燃焼ガスの Pr 数を求めた。

Fig. 7 は、当量比が 1 の場合に、温度に対する Pr 数の変化を各燃料の燃焼ガスについて纏めたものである。

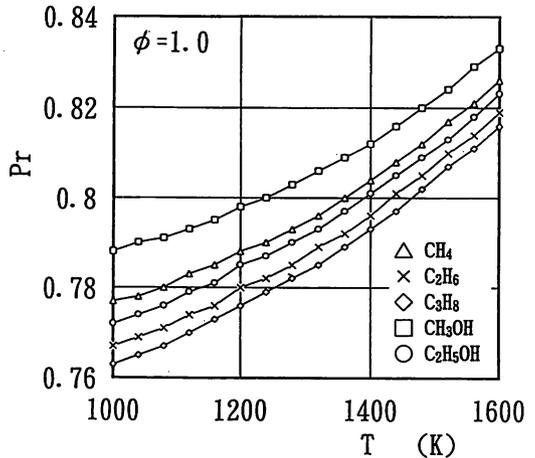


Fig. 7 Prandtl number versus temperature.

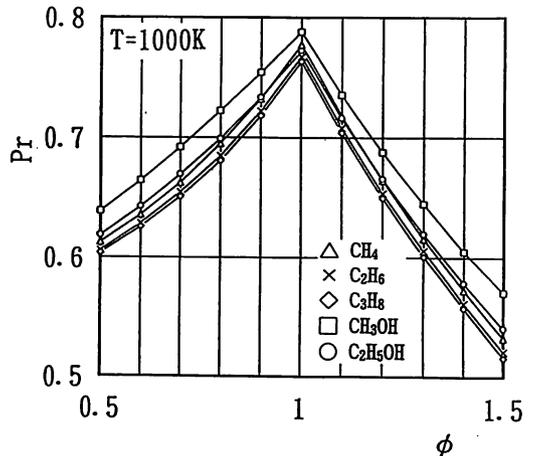


Fig. 8 Prandtl number versus equivalence ratio.

る。燃焼ガスの Pr 数は温度の上昇とともに単調に増加している。これは温度上昇にともない各ガスのモル濃度が増加したためであると考えられる。この傾向は何れの燃料においても見られ、特にメタノールの Pr 数は広い温度領域にわたり他の燃焼ガスに比べ大きな値を示している。

Fig. 8 は、各燃料における当量比と Pr 数の関係を示したものであり、 $T=1000\text{K}$ の場合の結果である。当量比が増加するにつれて、各燃焼ガスの Pr 数は増加し、 $\phi=1$ で最大値を示し、その後単調に減少している。

6. 結 論

各種燃料を当量比 0.5 から 1.5 まで変化させ、 $1000\sim 1600\text{K}$ の温度領域における燃焼ガスの Pr 数を計算した結果、有益な知見が得られたので以下に纏める。

(1) 高温領域における燃焼ガスを構成する各成分ガス

の粘性係数や熱伝導率を幾つかの文献を基にして近似式を作成し、これを用いて比較的正しい Pr 数を求めることができた。

- (2) 当量比や温度に関係なくメタノールの燃焼ガスの Pr 数は他の燃料に比べ大きな値を示す。
- (3) 各燃料の燃焼ガスの Pr 数は当量比 1.0 で最大値を示す。

参考文献

- (1) 水谷幸夫, 燃焼工学, 1989, (63), 森北出版.
- (2) 国立天文台, 理科年表, 1992, 物28 (448).
- (3) 日本機械学会, 伝熱工学資料(改訂第3版), 1975, (312).
- (4) 日本機械学会, 伝熱工学資料(改訂第4版), 1986, (328-329).
- (5) 甲藤好朗, 伝熱概論, 1969, (8-9), 養賢堂版.