

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### ジェットエンジンサイクル検討における 熱力学物性値について(その2)

二村 尚夫

2014年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# ジェットエンジンサイクル検討における熱力学物性値について(その2)\*

二村 尚夫\*<sup>1</sup>

## Thermodynamic properties of working substances on jet engine cycle studies (2<sup>nd</sup> report)\*

Hisao FUTAMURA\*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

Thermodynamic properties of air is calculated accounted for real gas effect and compared with available data. Equations of state for pure substances and air are introduced and tabulated and drawn on charts for the thermodynamic functions.

Keywords; thermodynamics; real gas effect; standard atmosphere; thermodynamic function; equation of state; virial coefficient; Helmholtz energy; phase transition; fugacity

### 概要

前報に引き続き、ジェットエンジンにおける熱力学、内部空気力学に重要となる空気の熱力学物性値に関し、実在気体として取り扱う場合の基本的な状態方程式、データ数表を紹介する。

### 記号<sup>1</sup>

A	ヘルムホルツエネルギー	V	容積
C <sub>p</sub>	モル定圧熱容量	v	モル容積
C <sub>v</sub>	モル定容熱容量	Z	圧縮因子, 分配関数
E <sub>0</sub>	零点エネルギー	α	無次元ヘルムホルツエネルギー
f	自由度, フガシティ	γ	フガシティ係数
G	ギブズエネルギー	δ	換算密度
g	モルギブズエネルギー	θ	特性温度
H	エンタルピー	τ	逆換算温度
h	モルエンタルピー	X	モル分率
k <sub>B</sub>	ボルツマン定数	上添字	
n	モル数	°	理想気体状態
N <sub>A</sub>	アボガドロ数	r	剰余特性
P	圧力, 分圧	下添字	
Q	熱	0	標準状態
R	一般ガス定数	r	参照状態
S	エントロピー	cr	臨界状態
s	モルエントロピー	trans	並進
T	温度	rot	回転
U	内部エネルギー	vib	振動
u	モル内部エネルギー	elec	電子

\* 平成 25 年 12 月 20 日受付 (Received 20 December, 2013)

\*<sup>1</sup> 航空本部 航空技術実証研究開発室  
(Technology Demonstration Research Office, Institute of Aeronautical Technology)

## 1. はじめに

JAXA 航空プログラムグループでは、平成 15 年度より「クリーンエンジン技術の研究開発」事業を実施した。当事業の目的とする航空エンジンの環境適合性改善に関する指標、すなわち、エンジン騒音低減、エンジン排気中の有害物質低減、二酸化炭素排出の削減の度合いは、定められたモデル大気に対して、実際の飛行時、もしくは地上運転時におけるデータを修正する形で評価されるのが標準であり、当事業もなるべく、これに沿った形式での評価を目指している。この際、飛行状態とエンジン運転状態の組み合わせにより、エンジンサイクル中の代表点における温度、圧力、燃焼ガス組成は大きく変化し、各要素の性能、全体性能にも影響が及ぶ可能性がある。このエンジン内部の熱的、流体的状態の概略を把握する基になるのが熱力学によるエンジンサイクル計算であり、作動流体の熱物性データである。JAXA では従来より、ジェットエンジン、ロケットエンジンの性能推定および極超音速空気力学の分野で化学熱力学計算を利用している<sup>2-5)</sup>。第 2 報では低温高压で顕著となる空気の実在気体効果についてまとめる。

## 2. 非理想性に関する熱力学的取り扱いの背景

物質が基本的に 3 態(固体、液体、気体)を取ることにについては、氷雪が融けて水となること、湯が沸いて蒸気となることなどを通じて古くから知られていた。18 世紀の蒸気機関の発明以来、この物質の相変化という現象を動力として利用しながら物理学、熱工学が進歩してきたため、理想気体の熱力学とほぼ平行して水、アンモニア、二酸化炭素といった常温近辺で相変化を生じる物質の非理想性が研究されてきた。空気の液化は 1895 年(Linde)、水素 1898 年(Dewar)、ヘリウム 1908 年(Kammerlingh Onnes)と、航空機の誕生(ライト兄弟 1903 年)と相前後し、現在では航空宇宙用推進機関に関しても、液体水素、液化天然ガス等の持つ空気冷却能力による熱効率の向上、二酸化炭素排出の削減につなげる試みがなされている。

### 2.1 非理想性の熱力学的取り扱い

1923 年時点でルイス・ランドールの教科書<sup>6)</sup>にあるように『古典力学の全体の基礎は、19 世紀の中葉までにできあがった。Black, Rumford, Hess, Carnot, Mayer, Joule, Clausius, Kelvin, Helmholtz の仕事は、エネルギー理論の基本原則を確立したのであった。…われわれが現在直面している熱力学発展の第三段階は、熱化学的データの系統的な集積と利用をおこなうとともに、もっと特殊な熱力学の方法を開発すること、およびそれらを特定の化学過程に対して適用することがその特色である。』これに加えて、1949 年のプリゴジヌ・デフェイの教科書<sup>7)</sup>にある『統計的方法が著るしく進歩したことによって、古典熱力学の重要性が少なくなることは決してなかった。…すなわち、現象論的熱力学と統計熱力学とは互いに相補的なものである。』とあり、Boltzmann により 20 世紀初頭に創始され、発展した量子統計力学により、マクロな視点とミクロな視点の双方向から物質の平衡挙動は理解することが可能となっている。計算技術上の見通しを良くするため、このエンジンサイクル検討における熱力学物性においては、統計力学的側面については、結果のみを受け入れることとする。

理想気体の状態方程式

$$PV = nRT \quad (1)$$

に対し、前報にもあるが、気体の熱力学的非理想性については、状態の変化に応じた化学的組成の変化、すなわち解離や電離の影響と、分子間力に起因して、理想気体の状態方程式と異なる  $P$ - $v$ - $T$  関係を持つ部分に繋がる影響があり、前者は概して高温状態、後者は低温状態で顕著であることから、これらの影

響を分離して考えるのが妥当とされている。現在、ガスタービンの最高圧力は 50 気圧、温度が 1800K、航空用再熱器で 2300K 程度。蒸気タービンで 310 気圧、1000K であるため、電離、プラズマなどの高エネルギー状態の考慮は不要として扱う。

### 2.1.1 熱力学関数の構成

冒頭の熱力学の教科書等から熱力学関数の構成をおさらいする。最も古典的な熱力学における、ボイル・シャルルの法則、ゲイ・リュサックの法則を気体分子運動論で解釈すると、理想気体を弾性衝突する質点の集合として捉え、並進エネルギーに相当する定容熱容量  $C_v$  が温度、圧力に関わらず一定であるとするところから、熱力学の関係が構成されている。

$$C_{v,trans}^{\circ} = \frac{3}{2}R \quad (2)$$

ここに  $R$  は一般ガス定数であり、アボガドロ数  $n_a$  とボルツマン定数  $k_B$  の積である。この結論は単原子分子のエネルギー分布をガウス分布として統計力学的に取り扱うことでも変わらない<sup>8)</sup>。

稀ガスなどの単原子分子については上記は比較的良く当てはまるが、多原子分子については原子の質量と原子間距離に応じた回転エネルギーがその自由度  $f$  分だけ付加され、原子間距離を一定とした剛体分子モデルについて

$$C_v^{\circ} = C_{v,trans}^{\circ} + C_{v,rot}^{\circ} = \frac{3}{2}R + f * \frac{1}{2}R \quad (3)$$

$$C_p^{\circ} = C_v^{\circ} + R = \frac{5}{2}R + f * \frac{1}{2}R \quad (4)$$

即ち、二原子分子および直線分子では回転自由度が  $f=2$  加わり、 $C_v^{\circ} = \frac{5}{2}R$ ,  $C_p^{\circ} = \frac{7}{2}R$  直線以外の三原子以上の分子では回転自由度が  $f=3$  加わり、 $C_v^{\circ} = \frac{6}{2}R$ ,  $C_p^{\circ} = \frac{8}{2}R$  となる。回転特性温度は水素を除いて絶対温度で数度であるため、常温の気体では励起されているとみなせる<sup>9)</sup>。また、熱振動、電子励起が基底状態にあれば、この気体は温度に依らず熱容量が一定となる「熱量的な完全性」であり、これに古典的分子構造と分子内の原子間の力学的関係を加味して、内部エネルギーの基礎となる定容熱容量が表現される。

理想気体の内部エネルギー  $u^{\circ}$  の増分  $\Delta u^{\circ}$  は、この定容熱容量を初期温度から最終温度まで積分したものであり、次式で表わされる。

$$\Delta u^{\circ} = \int_{T_0}^T C_v^{\circ} dT = \int_{T_0}^T \frac{3}{2}R dT = \frac{3}{2}R(T - T_0) \quad (5)$$

定圧プロセスに関して定圧熱容量  $C_p$  と内部エネルギー増分に外部仕事を加えたエンタルピー  $h$  が定義され次式で表わされる。

$$C_p^{\circ} = \frac{5}{2}R \quad (6)$$

$$\Delta h^{\circ} = \int_{T_0}^T C_p^{\circ} dT = \int_{T_0}^T \frac{5}{2}R dT = \frac{5}{2}R(T - T_0) \quad (7)$$

温度に依存する熱容量としては、二原子以上の分子では、分子内の振動を加味した剛体 - 調和振動子モデルが考案され、振動分の熱容量が次のように表される。

$$C_{v,vib}^{\circ} = R \left( \frac{\Theta_{vib}}{T} \right)^2 \frac{e^{-\Theta_{vib}/T}}{(1 - e^{-\Theta_{vib}/T})^2} \quad (8)$$

$\Theta_{vib}$  は固有振動温度と呼ばれる。

分子内部における電子の励起は分配関数に与える影響を電子の基底状態からの励起の度合いに応じて

$$q_{elec} = g_{e1} + g_{e2}e^{-\beta\epsilon_{\theta 2}} + \dots = \sum_{s(state)} \exp\left(-\frac{\epsilon_{s(elec)}}{k_B T}\right) \quad (9)$$

$$\text{但し, } \theta_{s(elec)} \equiv \frac{\Delta\epsilon_{s(elec)}}{k_B T}$$

または,

$$Z_{elec} = \sum_n g_n \exp\left(-\frac{\epsilon_n}{k_B T}\right) = g_0 \exp\left(-\frac{\epsilon_0}{k_B T}\right) + g_1 \exp\left(-\frac{\epsilon_1}{k_B T}\right) + g_2 \exp\left(-\frac{\epsilon_2}{k_B T}\right) + \dots \quad (10)$$

より, 電子励起分の熱容量は,

$$C_{v\_elec}^\circ = \frac{\partial}{\partial T} \left( Nk_B T^2 \left( \frac{\partial \ln Z_{el}}{\partial T} \right) \right) \quad (11)$$

により, 求められる. 微視的には熱エネルギーは上記の 3 次元空間の並進エネルギー, 回転エネルギー, 振動エネルギーと電子励起エネルギーの和として全定容熱容量は次式のように表わされる.

$$C_v^\circ = C_{v\_trans}^\circ + C_{v\_rot}^\circ + C_{v\_vib}^\circ + C_{v\_elec}^\circ \quad (12)$$

電子励起はハロゲン以外では, 励起温度が高く, 考慮されないことが多い.

上記のように, 内部エネルギーの温度変化が理論づけられ, 「熱力学的完全性」を特徴とする, 理想気体の熱力学特性が形成されている.

### 2.1.2 実在気体の熱力学関数

18 世紀には原子の発見が相次ぐ中, 1811 年アボガドロの気体反応における多原子よりなる分子概念の導入により, 多くの原子, 分子の存在が明らかにされ, 気体の構成単位が大きさや方位性を持たない仮想的な粒子から構造をもった粒子(分子)とみなされるようになった. 気体の研究を進めると, もっとも身近な流体である空気が常温では, ほぼ理想的であるのに対し, 1869 年の Andrews による二酸化炭素における臨界現象の発見<sup>10)</sup>等, 二酸化炭素などの非理想性が顕著となり, これを説明するため, 原子分子の構造と分子の力学的関係が模索された. 多原子分子の構造を考慮した時点ですでに質点としての取り扱いが崩れているが, 実在気体の  $P$ - $v$ - $T$  関係を説明する上で, 分子が有限の体積を占めることを比容積  $v$  から分子の体積を除外することは自然な流れであり, さらに壁面近傍における分子の偏在から分子間引力に基づく圧力の減少分が密度の二乗に比例すると考え, ファン・デル・ワールスは 1873 年に

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \quad (13)$$

なるファン・デル・ワールスの熱力学方程式を導いた. これが実在気体の熱力学の原点となっている. 式(13)の係数  $a$  は壁面付近における圧力減少を,  $b$  は単位質量当りの分子自身の大きさにもとづく排除体積と解釈される<sup>11)</sup>. (13)式の欠点は, 係数  $a$ ,  $b$  を温度, 圧力に関わらず定数であると仮定するところにある. 後述の分子間力, および固体, 液体の圧縮性, 熱膨張等の現象から, 定量的には不満足であることがわかる. これを補うために一般気体および特定の気体に対して各種の実用状態式が求められている.

このうち, Thiesen が提唱し, Kamerlingh Onnes が詳しく研究した状態式(14)は, 温度, 密度のべき乗に展開された型式をもち, ビリアル状態方程式, その係数はビリアル係数と呼ばれている.

$$Z = \frac{Pv}{RT} = 1 + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^3} + \dots \quad (14)$$

$$\text{ただし } B = b_1T + b_2 + \frac{b_3}{T} + \frac{b_4}{T^2} + \dots, \quad C = c_1T + c_2 + \frac{c_3}{T} + \frac{c_4}{T^2} + \dots$$

また,

$$Z = \frac{Pv}{RT} = 1 + B'P + C'P^2 + \dots \quad (15)$$

$$\text{ただし } B' = b_1T + b_2 + \frac{b_3}{T} + \frac{b_4}{T^2} + \dots, \quad C' = c_1T + c_2 + \frac{c_3}{T} + \frac{c_4}{T^2} + \dots,$$

の表式もよく用いられる．式(15)は「圧力に展開したビリアル方程式」の呼称も使われる<sup>12)</sup>．これをビリアル状態方程式，ビリアル係数と呼ぶかどうかは書物により異なるので注意が必要である．圧縮因子を密度の無限べき数列であらわすことで， $P$ - $v$ - $T$  関係は数学的には，正則範囲については完全に記述できる．理論物理学はさらに原子の内部構造である原子核と電子，電子のエネルギー準位の量子性から量子力学を生み，これらは統計力学を通じて固体，液体，極低温における熱力学にフィードバックされている．物理化学的には，さまざまな原子，分子の非平衡的特性の解明が進められるとともに，イオン，極性分子，相の概念，臨界特性などの純粋化学と精密な化学データを基にプロセスを研究する応用化学の分野，生物学，地球科学など多方面での利用が進んでいる．このほかの歴史的に興味深い状態方程式を付録 A に示す．

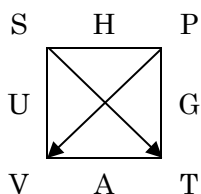
式(1)(2)のように， $P$ - $v$ - $T$  関係を圧力の陽形式で表すことが一般的であるのは，熱素説と分子運動論の相克の中で熱力学第 1 法則の成立上，熱が状態関数ではないことが熱量の定量的評価により裏打ちされ，以降，熱物性測定方法として，一定温度条件下(熱浴)で容器に一定量の物質を封入し，容積を変化させて圧力の変化を観ることで，温度  $T$  をパラメータにして圧力  $P$  の挙動を  $v$  の変化に対して表すことができることと， $Pv$  線図がクラウジウスの熱力学第 2 法則の説明，レシプロエンジンに関するワットのインジケータ線図などで，熱サイクルの仕事と効率を表すのに直観的なためであろう<sup>13)</sup>．熱力学第 2 法則の説明としては，ほかに最大仕事だけに基づく説明も可能である<sup>14) 15)</sup>．熱力学第 2 法則の理解の上からは温度  $T$  とエントロピー  $S$  で状態を表す  $TS$  線図が有効であるが，相変化に対して縮退しており， $vS$  線図が相平衡の説明，評価に用いられることもある．エントロピー(entropy)なる名はクラウジウスがギリシャ語  $\epsilon\nu$ (内へ)と  $\tau\rho\omicron\mu\eta$ (移ること)とから案出したもので一方へ進むことを示している<sup>16)</sup>．

熱力学の理論では，一般生活になじみ深い温度，圧力，容積，熱量，仕事などの物理量は不完全な熱力学関数であり，単独で熱力学関係を表わすことができない．この点において Lewis の命名による完全な熱力学関数(fundamental equations)は，熱力学関数を特定の 2 変数により表した関数である．これらの表現の特長としては，補助方程式を用いずにルジャンドル変換を用いることで，積分を必要とせずに，偏微分のみで他の熱力学関数を導出できるという利点がある．特に  $T$  と  $V$  で表されたヘルムホルツエネルギー  $A(T, V)$  および  $P$  と  $T$  で表されたギブスエネルギー  $G(T, P)$  はカノニカル関数(canonical function)と呼ばれる<sup>17)</sup>．表 1 に熱力学関数と自然な変数についてまとめる<sup>18)</sup>．

表 1 完全な熱力学関数のまとめ

熱力学関数	ルジャンドル変換 による微分式	対応するマクスウェルの関係式
内部エネルギー $U(S, V)$	$dU = TdS - PdV$	$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$
エンタルピー $H(S, P)$	$dH = TdS + VdP$	$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$
ヘルムホルツエネルギー $A(T, V)$	$dA = -SdT - PdV$	$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$
ギブズエネルギー $G(T, P)$	$dG = -SdT + VdP$	$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$
$J = -PV = F - G$	$dJ = -SdT - PdV$	
エントロピー $S$	$dS = dU/T + PdV/T$	
Massieu 関数 $\Psi = -F/T$	$d\Psi = -Ud(1/T) + PdV/T$	
Planck 関数 $\phi = -G/T$	$d\phi = -Hd(1/T) + VdP/T$	
Kramers 関数 $q = -J/T$	$dq = -Ud(1/T) + PdV/T$	

熱力学関数は、独立する 2 変数で表わされることから熱力学第 1 法則を表す  $U$ ,  $H$ ,  $A$ ,  $G$  と変数  $P$ ,  $T$ ,  $v$ ,  $s$  の間にはルジャンドル変換により相互に変換が可能であり、覚えやすいように熱力学平方 (Thermodynamic Square) が Max Born によって紹介されている。作者により様々なバリエーションがあるが、ここでは、小出、妹尾の教科書にある図を熱力学関数の記号を変えて示す<sup>19)</sup>。

図 1 熱力学平方の例<sup>19)</sup>

<使い方>辺上の熱力学関数に関して変数と矢印の向きで全微分が表される。 $dU = TdS - VdP$  等。

状態方程式から熱力学関数の導出のしかたとして一般的にはギブズエネルギー  $G$  をもとにビリアル係数を用いて、他の熱力学関数の表現を得ている<sup>20)</sup>。ここでは、さらにフガシティを用いて実在気体と理想気体の熱力学関数と関係づける。

まず実在気体の熱力学関数については、ビリアル状態方程式を用いて圧縮因子を圧力で展開し

$$Z = \frac{Pv}{RT} = 1 + B'P + C'\frac{P^2}{2} + D'\frac{P^3}{3} + \dots \quad (16)$$

ギブズエネルギーの偏微分で表した比容積の式に代入することより

$$\left(\frac{\partial g}{\partial P}\right)_T = v = \left[1 + B'P + C'\frac{P^2}{2} + D'\frac{P^3}{3} + \dots\right] \frac{RT}{P} \quad (17)$$

となり、G. N. Lewis により導入されたフガシティ  $f$  とフガシティ係数  $\gamma = f/P$  が定義される。

$$\begin{aligned}
 g &= g^0 + RT \ln \frac{P}{P^0} + RT \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] + \dots \\
 &= g'^0 + RT \ln \frac{f}{f^0} \\
 &= g'^0 + RT \ln \gamma
 \end{aligned} \tag{18}$$

同様にビリアル係数およびフガシティ係数  $\gamma$  を用いて他の熱力学関数も次のように表される.

比容積

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{RT}{P} + RT \left[ B' + C'P + D' \frac{P^2}{2} + \dots \right] + \dots \\
 &= v^{id} + RT \left[ B' + C'P + D' \frac{P^2}{2} + \dots \right] + \dots \\
 &= v^{id} + RT \frac{\partial}{\partial P} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] + \dots \\
 &= v^{id} + RT \frac{\partial}{\partial P} \ln \gamma
 \end{aligned} \tag{19}$$

定圧熱容量

$$\begin{aligned}
 C_p - C_p^0 &= -RT \left[ 2 \frac{dB'}{dT} + T \frac{d^2 B'}{dT^2} \right] P - \frac{RT}{2} \left[ 2 \frac{dC'}{dT} + T \frac{d^2 C'}{dT^2} \right] P^2 + \dots \\
 &= -2RT \frac{d}{dT} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] - RT^2 \frac{d^2}{dT^2} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] + \dots \\
 &= -2RT \frac{d}{dT} (\ln \gamma) - RT^2 \frac{d^2}{dT^2} (\ln \gamma) + \dots
 \end{aligned} \tag{20}$$

エンタルピー

$$\begin{aligned}
 h - h^0 &= -RT^2 \frac{dB'}{dT} P - RT^2 \frac{dC'}{dT} \frac{P^2}{2} - RT^2 \frac{dD'}{dT} \frac{P^3}{3} + \dots \\
 &= -RT^2 \frac{d}{dT} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] \\
 &= -RT^2 \frac{d}{dT} (\ln \gamma)
 \end{aligned} \tag{21}$$

エントロピー

$$\begin{aligned}
 s - s^0 &= -R \ln P - R \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} \right] - RT \left[ \frac{dB'}{dT} P + \frac{dD'}{dT} \frac{P^2}{2} \right] + \dots \\
 &= -R \ln P - RT^2 \frac{d}{dT} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} \dots \right] \\
 &= -R \ln P - RT \ln \gamma - RT \frac{d}{dT} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] \\
 &= -R \ln P - RT \ln \gamma - RT \frac{d}{dT} \ln \gamma
 \end{aligned} \tag{22}$$

などと表される.



実在気体の熱力学特性が分子間力に基づくものであることから、理想気体の熱力学関数を右肩付の  $^{id}$ 、標準状態(298.15K, 1bar 等)の熱力学関数を右肩付きの  $^{\circ}$  で表すと、実在気体の熱力学関数との差分は残余熱力学関数(右肩付  $^r$  で表す)として次のように定義される(1 モルあたりで表わす)。

剰余比容積

$$\begin{aligned} v^r &= v - v^{id} = RT \left[ B' + C'P + D' \frac{P^2}{2} + \dots \right] \\ &= RT \frac{\partial}{\partial P} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] \\ &= RT \frac{\partial}{\partial P} \ln \gamma \end{aligned} \quad (23)$$

剰余定圧熱容量

$$\begin{aligned} c_p^r &= c_p - c_p^{id} = -RT \left[ 2 \frac{\partial B'}{\partial T} + T \frac{\partial^2 B'}{\partial T^2} \right] P - \frac{RT}{2} \left[ 2 \frac{\partial C'}{\partial T} + \frac{\partial^2 C'}{\partial T^2} \right] P^2 + \dots \\ &= -2RT \frac{\partial}{\partial T} (\ln \gamma) - RT^2 \frac{\partial^2}{\partial T^2} (\ln \gamma) + \dots \end{aligned} \quad (24)$$

剰余エンタルピー

$$\begin{aligned} h^r &= h - h^{id} = -RT^2 \frac{dB'}{dT} P - RT^2 \frac{dC'}{dT} \frac{P^2}{2} - RT^2 \frac{dD'}{dT} \frac{P^3}{3} + \dots \\ &= -RT^2 \frac{d}{dT} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] \\ &= -RT^2 \frac{d}{dT} (\ln \gamma) \end{aligned} \quad (25)$$

剰余エントロピー

$$\begin{aligned} s^r &= s - s^0 = -R \ln P - R \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] - RT \left[ \frac{dC'}{dT} P + \frac{dD'}{dT} \frac{P^2}{2} \right] + \\ &= -R \ln P - RT^2 \frac{d}{dT} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] \\ &= -R \ln P - RT \ln \gamma - RT \frac{d}{dT} \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] \\ &= -R \ln P - R \ln \gamma - RT \frac{d}{dT} \ln \gamma \end{aligned} \quad (26)$$

剰余ギブズエネルギー

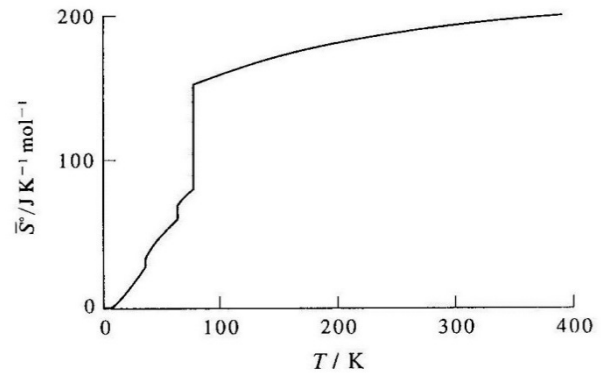
$$\begin{aligned} g^r &= g - g^{id} = g - g_0^0 + RT \ln \frac{P}{P_0} \\ &= RT \left[ B'P + C' \frac{P^2}{2} + D' \frac{P^3}{3} + \dots \right] = RT \ln \gamma \end{aligned} \quad (27)$$

これらは、分子間力の効果を表すものであり、非理想性の指標であるフガシティ係数により明確に表すことができることを示している。

熱力学系の構成に関し、熱力学第 0 法則と第 3 法則を統一的に扱おうとすると、純物質の結晶が絶対

零度においてエントロピーが等しくなることが Nernst により示され、さらに Planck により純物質の結晶のエントロピーは絶対零度で 0 と仮定されて熱力学第 3 法則が定義されているため<sup>21)</sup>、気体の状態を論じるのに固体の状態を基準にする必要があり、図 2 に示すように、熱力学関数は相変化に伴う、転移、融解、蒸発などの変曲点、一次転移など不連続を自ずから含むこととなり、計算機のなかった時代には、実用の妨げとなった。

特に熱工学、応用化学の分野では物質の熱物性の特質を利用して、熱機関の効率向上、薬品、化学工業材料の合成、分離、精製が行われるため、標準状態、パラメータ、単位の異なる物性表が作成された。各国で作成された蒸気表の統一と、第一報でも述べた、JANAF、IUPAC の熱化学表群作成の動機がここにあると考えられる。


 図 2 窒素の理想モルエントロピーの温度変化<sup>21)</sup>

### 2.1.3 フガシティ利用の問題点

JANAF 熱化学表においては、その序文にもあるように、理想気体特性とフガシティを用いて実在効果を記述する。この方法による熱力学関数値の計算は気相反応における化学平衡計算に向いている。実在気体特性としては、臨界点において等温線上で圧力の勾配と曲率がゼロとなり、しかも密度の変曲点となることから  $P$  を  $v$  の 3 次式で表す、様々な 3 次状態方程式が開発されている。一方で、相変化を伴う状態変化を計算するには、液相、固相では容積変化が小さいため、低温、高压になるほどフガシティ係数が大きくなり、臨界点においては定容熱容量、定圧熱容量が発散する。即ち、

$$c_p = T \int_{\infty}^0 \left( \frac{\partial^2 P}{\partial T^2} \right)_v dv - \frac{T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v^2}{\left( \frac{\partial P}{\partial v} \right)_T} + c_p^0(T) - R \quad (28)$$

において、臨界点では

$$\left( \frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = 0, \quad \left( \frac{\partial^2 P}{\partial v^2} \right)_T = 0 \quad (29)$$

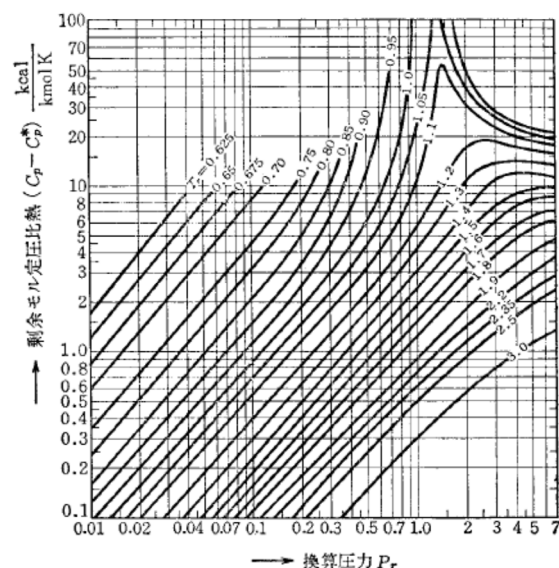
であり、(28)式第 2 項が発散する(図 3<sup>22)</sup>)。

### 2.1.4 分子間力利用の問題点

実在気体効果を分子間力ポテンシャルにより表す方法は純物質については成功しているが、大気、燃焼ガス等の混合気体では、異分子間の分子間力に起因する混合のエントロピーの残余エントロピーの生成を考慮する必要があるが、化学種の数  $N$  とすると、第 2 ビリアル係数の元となる 2 種類

$$\text{の化学種の組み合わせは } {}_N C_2 = \frac{N!}{(N-2)!2!} = \frac{N^2 - N}{2} \text{ と}$$

$N$  の約 2 乗で増加し、第 3 ビリアル係数以上の係数に関わる多分子間のポテンシャルを考慮する必


 図 3 一般化した剰余定圧比熱線図<sup>22)</sup>

要がある場合には、Nが大きくなると極めて大きい組み合わせとなるため、この係数はほとんど求められていない。例えば第1報<sup>23)</sup>で扱った90種の化学種の2元干渉パラメータを用意するには、4005種類の精密なデータが必要となる。

### 2.1.5 新しい状態方程式

空気の状態方程式は、構成ガス(窒素、酸素、アルゴン等)の定圧熱容量の測定から圧力=0における理想気体状態の定圧熱容量  $c_p^\circ$  を基に、フガシティ係数をビリアル係数の多項式として表すことにより、実在気体効果を取り入れる方向に進んだ。化学工業の分野では、平衡定数、相変化の圧力・温度特性の差を利用して、反応物質の濃縮、分離の効率化が進み、それに伴って、アンモニア、二酸化炭素などの気体の相特性が必要になった。1960年代に化学工業が進み、エチレン、ベンゼンを中心とした石油化学工業の発展、天然ガスの採掘と輸送、貯蔵が必要になるにつれて、メタン、エタンなど比較的低分子の炭化水素の熱力学特性を高精度の式で表す必要が生じた。前述のビリアル方程式では、実験計測上の制約から高次の係数を広い圧力、温度の範囲で決定するのは困難であり、第4ビリアル係数以下を切り詰めることが多く、音速、熱伝導率などの誤差を産む元となった。1940年、Benedictは打ち切られたビリアル状態方程式の剰余項に積分可能な指数表示を導入し、BWR式にまとめた<sup>24)</sup>。

$$\frac{P}{\rho RT} = Z(\tau, \delta) = 1 + \sum_{i=1}^{I_{Pol}} n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} + \sum_{i=I_{Pol}+1}^{I_{Pol}+I_{Exp}} n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \delta^2) \quad (30)$$

Benedictによる(30)式は全8項からなっていたが、その後、Starling(1973)は11項、Strobridge(1962)は15項、Bender(1970)はべき乗13項と指数6項、Jacobsen&Stewart(1973)はべき乗19項と指数13項からなっている。いわゆるMBWR(Modified Benedict-Webb-Rubin)式である<sup>24)</sup>。

NISTのまとめた熱力学関数表はMBWR式により算出されている<sup>25)</sup>。

### 2.1.6 ヘルムホルツエネルギーによる状態方程式

元来、臨界領域を作動範囲としていた蒸気機関(ボイラ、蒸気タービン、復水器等)では、熱量測定に基づく蒸気表が盛んに作られ、1969年の米国機械学会蒸気表の作成において、Keenanによりヘルムホルツエネルギー表示の状態方程式が用いられた<sup>26)</sup>。この表式は補助方程式を必要とせず、気相、液相、気-液平衡を表現し得るものであったが、当時は蒸気表としての利用が一般的であった。メタンに対しては1960年代にPeng-Robinsonが3次状態方程式を開発していたが、1970年代後半から、天然ガスの利用が増えるにつれ、メタンを主成分とする混合物の熱力学特性の推定が工業上重要となった。Starling他はガスの剰余特性分を換算ヘルムホルツエネルギーで表すAGA8-DC92状態方程式として開発し、良い精度での気相特性を得ていたが、これに対し、Schmidt他は、すでに酸素などの参照状態方程式を開発していたので<sup>27)</sup>、同僚のWagner等とともに、精密な熱量計測法と関数形の最適化手法を開発し、メタン、二酸化炭素、アルゴン、窒素、水(これはIAPWS95として標準となった<sup>28)</sup>)などの純物質のマルチパラメータ状態方程式を開発した。背景には状態方程式の表式として、ヘルムホルツエネルギーは完全な熱力学関数のうち測定可能な変数を持ち、相境界で二次転移しない唯一の関数であることが上げられる<sup>29)</sup>。2004年には天然ガスの主たる18の成分からなるGERG-2004状態方程式が開発された<sup>30)</sup>。この状態方程式は拡張性に優れ、さらに3成分を加えて21の成分からなるGERG-2008状態方程式が開発されている<sup>31)</sup>。空気に関しては、Lemmon他により、窒素、酸素、アルゴンからなるヘルムホルツエネルギー表示の状態方程式が開発されている<sup>32)</sup>。これらの状態方程式は、ヘルムホルツエネルギーを理想気体

分と剰余分の和として表し,

$$a(\rho, T) = a^0(\rho, T) + a^r(\rho, T) \quad (31)$$

さらに, 換算密度  $\delta = \frac{\rho}{\rho_r}$ , 逆換算温度  $\tau = \frac{T_r}{T}$  で無次元化して, 対応状態原理の適用を容易にしている. 参照状態としては純物質に関しては臨界密度  $\rho_c$ , 臨界温度  $T_c$  が選ばれることが多い.

$$\alpha(\delta, \tau) = \alpha^0(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau) \quad (32)$$

理想気体ヘルムホルツエネルギー分は,

$$a^0 = u^0(T) - Ts^0(T, P) = h^0(T) - RT - Ts^0(T, P) \quad (33)$$

であり,

理想気体の定圧熱容量  $c_p^0(T)$  を用いて,

$$h^0(T) = \int_{T_0}^T c_p^0(T) dT \quad (34)$$

$$s^0(T, P) = \int_{T_0}^T \frac{c_p^0(T)}{T} dT + \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (35)$$

を代入して算出することができる. 理想気体の定圧熱容量は, 統計力学, 量子力学をもとに, 水素, ヘリウムについてはパウリの排他律, 相対性理論を加味して理論的に算出することができる. したがって, 状態方程式を解析的に組立てるためには, 定圧熱容量の可積分性が問題となる.

多くの研究の結果, 定圧熱容量の関数形としては, 上記を考慮して次の様な無次元関数が提案されている<sup>33)</sup>.

$$\frac{c_p^0}{R} = n_0^* + \sum_{i=1}^{I_{pol}} n_i^* T_i^{t_i^*} + \sum_{k=1}^{K_{PE}} m_k \left(\frac{\theta_k}{T}\right)^2 \frac{e^{(\theta_k/T)}}{(e^{(\theta_k/T)} - 1)^2} \quad (36)$$

右辺第3項の級数は, 元来結晶格子の原子をプランク分布に従う調和振動子とみなす, いわゆる Planck-Einstein 関数である<sup>34)</sup>. 式(34), (35)より, 積分操作によって, 理想気体分のエントロピー, エンタルピーが計算され, 換算ヘルムホルツエネルギーを導出するため,  $\tau = \frac{T_r}{T}$ ,  $n_0 = n_0^* - 1$ ,  $n_i = n_i^* \cdot T_r^{t_i^*}$ ,  $t_i = -t_i^*$ ,  $\vartheta_k = \theta_k/T_r$  の変換により, 定容熱容量が換算変数により表現され,

$$\frac{c_v^0(\tau)}{R} = n_0 + \sum_{i=1}^{I_{pol}} n_i \tau^{t_i} + \sum_{k=1}^{K_{PE}} m_k (\vartheta_k \tau)^2 \frac{e^{(\vartheta_k \tau)}}{(e^{(\vartheta_k \tau)} - 1)^2} \quad (37)$$

が得られる. 結果として理想気体分の無次元理想気体ヘルムホルツエネルギーは

$$\alpha^0(\delta, \tau) = C^{\text{II}} + C^{\text{I}} \tau + C_0 \ln(\tau) + \sum_{i=1}^{I_{pol}} C_i \tau^{t_i} + \sum_{k=1}^{K_{PE}} m_k \ln(1 - e^{-\vartheta_k \tau}) + \ln(\delta) \quad (38)$$

となる. 一方, 非理想気体分に相当する剰余換算ヘルムホルツエネルギーはつぎのようになる.

$$\alpha^r(\tau, \delta) = \sum_{i=1}^{I_{pol}} n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} + \sum_{i=I_{pol}+1}^{I_{pol}+I_{Exp}} n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \delta^{p_i}) \quad (39)$$

冷媒や水などでは飽和液線をエンタルピーとエントロピー, または内部エネルギーとエントロピーの零点基準とする慣わしがあり, 式(38)の積分定数  $C^{\text{I}}$ ,  $C^{\text{II}}$  は剰余ヘルムホルツエネルギーの任意の関数となるため, 理想気体のヘルムホルツエネルギーの定数により一意に定めることはできない<sup>35)</sup>. 炭化水素

の定圧熱容量に関しては、Jaesche により、双曲線関数を用いたさらに精密な次の様な形式も提案されている。後述の GERG 状態方程式はこれを用いている<sup>36)</sup>。

$$\frac{c_p^0}{R} = n_0^* + \sum_{k=1, 3} \left( \frac{\vartheta_k \tau}{\sinh(\vartheta_k \tau)} \right)^2 + \sum_{k=2, 4} \left( \frac{\vartheta_k \tau}{\cosh(\vartheta_k \tau)} \right)^2 \quad (40)$$

## 2.2 エンジンシステム解析の視点

固体、液体、気体の全ての相を含む混合物の熱力学モデルは未だに十分なデータベースが揃っていない状況である。このため、Span 等の見通しに基づき<sup>37)</sup>、GERG-2008 状態方程式を基本として、必要なだけの混合における非理想性を取り入れることが現実的である。また、熱力学関数の計算に当たっては、理想気体分と非理想気体分の和として表す。理想気体分の  $\alpha^0$  については、定圧熱容量(NIST 気体表)を温度の関数として表し、基準温度、圧力における各関数値から温度に関する定積分により求める。他の状態方程式、ベリアル係数などが明らかな成分に対しては、純物質の剰余分を考慮することは精度向上に寄与し得る。一方、2 成分混合の剰余分に関しては、データの入手がほとんど絶望的であるため、古典的な混合則を適用する。

## 2.3 GERG-2008 状態方程式の概要

GERG-2008 状態方程式は、天然ガス等の混合物流体(気体、液体、超臨界状態)を記述することを目的に開発されている。現在のところ、対象とされている物質は表 2 のとおりである。状態方程式の構成としては、純粋物質の特性を理想気体分および剰余分を別々のヘルムホルツエネルギー表示の状態方程式の和で表し、これらを理想混合した時の剰余分を、また別のヘルムホルツエネルギー表示の状態方程式で表すことになっている。さらにこれらのヘルムホルツエネルギーについては、同じ関数形を用いて表示することにより、複雑にならざるを得ない、偏微分係数の間違い、プログラムの組みやすさが考慮されている。注意しなければならない点としては、関数の無次元化に用いられる参照温度と参照密度の取り方、擬似臨界状態領域における関数の収束半径である。

表2 GERG-2008 で考慮される化学種とパラメータ<sup>38)</sup>

非炭化水素	分子式	モル質量[g/mol]	$\rho_{cr}$ [mol/dm <sup>3</sup> ]	T <sub>cr</sub> [K]	P <sub>cr</sub> [MPa]
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0134	11.1839	126.192	3.3958
Carbon Dioxide	CO <sub>2</sub>	44.0095	10.624978698	304.1282	7.3773
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.0155	14.94	33.19	1.3150
Oxygen	O <sub>2</sub>	31.9988	13.63	154.595	5.0430
Carbon Monoxide	CO	28.0101	10.85	132.86	3.4935
Water	H <sub>2</sub> O	18.01528	17.873716090	647.096	22.064
Hydrogen Sulfide	H <sub>2</sub> S	34.08088	10.19	373.1	9.1100
Helium	He	4.002602	17.399	5.1953	0.2275
Argon	Ar	39.948	13.407429659	150.687	4.8630
炭化水素	分子式	モル質量[g/mol]	$\rho_{cr}$ [mol/dm <sup>3</sup> ]	T <sub>cr</sub> [K]	P <sub>cr</sub> [MPa]
Methane	CH <sub>4</sub>	16.04246	10.139342719	190.564	4.5992
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.06904	6.870854540	305.322	4.8718
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.09562	5.000043088	369.825	4.2471
n-Butane	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.1222	3.920016792	425.125	3.7960
Isobutane	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.1222	3.860142940	407.817	3.6400
n-Pentane	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.14878	3.215577588	469.7	3.3700
Isopentane	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.14878	3.271	460.35	3.3957
n-Hexane	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.17536	2.705877875	507.82	3.0340
n-Heptane	n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.20194	2.315324434	540.13	2.7360
n-Octane	n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.22852	2.056404127	569.32	2.4970
n-Nonane	n-C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.2551	1.81	594.55	
n-Decane	n-C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.28168	1.64	617.7	

### 3. データ

#### 3.1 温度圧力の範囲

温度、圧力に関しては、基礎となる GERG-2008 状態方程式(係数も含めて)の精度範囲(通常 90-450K, 圧力 35MPa 以下, 拡張域で 60-700K, 70MPa 以下), および系に加わる純物質の熱力学データ(NIST であれば 100-6000K)に対し, 成層圏温度から圧縮機出口状態(温度 200-1200K, 圧力 10MPa 以下)の空気がエンジンサイクル検討の状態範囲となるので, 外挿に関し適応性に関するテストが必要となる。なお, 燃焼ガスについては続報で検討する。水素, ヘリウムの臨界点は超低温であり, 液体水素の利用など, 液相での状態量が必要であるが, ジェットエンジンの作動流体の主成分である窒素, 酸素, 水, 二酸化炭素などはその温度範囲では流動性を失っているため, あくまで熱交換器などでの利用に限定される。

#### 3.2 採用する成分と状態方程式

サイクル計算に必要なシステムとしては GERG-2008 の内, 窒素, 酸素, アルゴン, 二酸化炭素, 水

素，酸素，一酸化炭素，水に NIST 等の熱力学データから一酸化窒素，二酸化窒素，水素単原子，酸素単原子を考慮するのが適切である。

## 4. 計算結果

航空用エンジンは，レシプロエンジン，ジェットエンジンともに内燃機関であり，主たる作動流体は空気，燃焼ガスである．空気は窒素，酸素，アルゴン，燃焼ガスはこれらに燃焼生成物である水，二酸化炭素，一酸化炭素，その他の成分を含む混合物である．

### 4.1 純物質の熱物性近似

航空機産業では，性能評価の基準となる国際標準大気を定めており，これは乾燥空気であるとされている(表 3)．本報では，混合物の検討対象を空気に限定し，窒素，酸素，アルゴン，水等について，身近なデータ源について，理想気体としての特性と実在効果分について，それぞれの比較を行う．

表 3 国際標準大気の組成<sup>39)</sup>

化学種	分子記号	分子量[kg/kmol]	モル分率	累積
窒素	N <sub>2</sub>	28.0134	0.78084	0.78084
酸素	O <sub>2</sub>	31.9988	0.209476	0.990316
アルゴン	Ar	39.948	0.00934	0.999656
二酸化炭素	CO <sub>2</sub>	44.00995	0.000314*	0.99997
ネオン	Ne	20.183	0.00001818	0.99998818
ヘリウム	He	4.0026	0.00000524	0.99999342
クリプトン	Kr	83.80	0.00000114	0.99999456
キセノン	Xe	131.30	0.000000087	0.99999543
メタン	CH <sub>4</sub>	16.04303	0.000002	0.99999743
水素	H <sub>2</sub>	2.01594	0.0000005	0.99999793

#### 4.1.1 理想気体特性

理想気体の特性は，分子間力の働かない，それぞれ孤立した気体分子のエネルギー状態を統計力学的に記述することに基づいており，分光学的計測などで求めた特性値を用いて比定圧熱容量  $c_p^\circ(T)$  の多項式が提案されており，この式の積分操作等により比エントロピー，比エンタルピー，ギブズエネルギー，圧力平衡定数等が求められる．NIST-JANAF の熱力学データ集には多数の物質の理想気体データが表になっており，多くは 6000K までの値が掲載されている<sup>40)</sup>．一方，近似式としては，絶対温度の 1 次式，2 次式が古くから教科書に掲載されているが，化学種も限定されており，現在では，EXCEL，Mathematica，Maple などのソフトウェアを用いて所要のべき級数を NIST-JANAF の表から創出することができるので，定圧熱容量について広く使われてきたと思われる文献<sup>31)・41)~44)</sup>との比較に留める．

・定圧熱容量が温度のべき級数で表されるもの(PROTHERO，水谷)

$$c_p^\circ = \sum_i n_i T^i \quad (41)$$

$$h^\circ = \int c_p dT = \sum_i \frac{n_i}{i+1} T^{i+1} + \ln(T)_{\text{for } i=-1} + C \quad (42)$$

$$s^{\circ} = \int \frac{c_p}{T} dT = \sum_i \frac{n_i}{T} T^i + \ln(T)_{\text{for } i=0} + C' \quad (43)$$

・定圧熱容量が指数関数で表されるもの(Lemmon, Span)

$$\frac{c_p^{\circ}}{R} = \sum_{i=1}^{n_{\text{pol}}} n_i T^i + \sum_{i=n_{\text{pol}}+1}^{n_{\text{pol}}+n_{\text{exp}}} n_i \left\{ \frac{ue^u}{e^u-1} \right\} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \frac{h^{\circ}}{R} &= \int \frac{c_p^{\circ}}{R} dT = \sum_i \frac{n_i}{i+1} T^{i+1} + \ln(T)_{\text{for } i=-1} \\ &+ \sum_{i=n_{\text{pol}}+1}^{n_{\text{pol}}+n_{\text{exp}}} n_i \frac{uT}{e^u-1} + C \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \frac{s^{\circ}}{R} &= \int \frac{c_p^{\circ}}{RT} dT = \sum_i \frac{n_i}{i} T^i + \ln(T)_{\text{for } i=0} - \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \\ &+ \sum_{i=n_{\text{pol}}+1}^{n_{\text{pol}}+n_{\text{exp}}} n_i \left\{ \frac{ue^u}{e^u-1} - \ln(e^u-1) \right\} + C \end{aligned} \quad (46)$$

・定圧熱容量が双曲線関数で表されるもの(GERG2008)

$$\frac{c_p^{\circ}}{R} = \sum_{i=1}^{n_{\text{pol}}} n_i T^i + \sum_{i=n_{\text{pol}}+1}^{n_{\text{pol}}+n_{\text{exp}}} n_i T^i \exp() \quad (47)$$

$$h^{\circ} = \int c_p^{\circ} dT = \sum_i \frac{n_i}{i+1} T^{i+1} + \ln(T)_{\text{for } i=-1} + C \quad (48)$$

$$s^{\circ} = \int \frac{c_p^{\circ}}{T} dT = \sum_i \frac{n_i}{i} T^i + \ln(T)_{\text{for } i=0} + C' \quad (49)$$

JANAF<sup>40)</sup>, Hilsenrath<sup>41)</sup>, 水谷<sup>42)</sup>, Prothero<sup>43)</sup>, GERG2004<sup>36)</sup>, Lemmon<sup>32)</sup>について比較する。  
なお図4以下のグラフに関しては巻末に集約する。

#### 4.1.1.1 窒素の特性

図4, 図6より, 300K以下でProthero, 水谷のずれが大きい。2000K以上ではGERG2004のずれが大きい。

#### 4.1.1.2 酸素の特性

図5, 図7より, 300K以下でProthero, 水谷のずれが大きい。1000K以上ではGERG2004のずれが大きい。

#### 4.1.1.3 アルゴン他のデータ源の特性

図8, 図9より, アルゴンは6000K以下で一定(2.5R)。差は気体定数, 単位系間の換算による。

水素については図11にあるようにパラ水素: オルト水素=3:1のノーマル水素で代表する。図12からは300K以下でずれてくるが, 200K以下ではGERG2004, LeachmanがJANAFより低い値となる。このためJANAF基準では前2者が低温で誤差が小さく見えるが, 低温では後者の方がより精確である。1000~4000KではGERGが少し高く, 3000K以上ではLeachmanが低くなる。

図13, 15からは200K以下でProthero, 水谷のずれが大きい。2000K以上ではGERGが2500K以上ではSpanも低めになる。

図14, 16からは300K以下でProthero, 水谷のずれが大きい。1500K以上ではGERGが低めとなる。



図 17, 18 からは 300K 以下で Prothero, 水谷のずれが大きい. 1500K 以上では GERG が低めとなる.

図 19~24 では微量成分は比較的よく合っている.

#### 4.1.2 実在気体特性

実在気体特性のデータに関しては数表化されたもの, NIST の熱物性値集等を比較する.

- ・状態方程式がヘルムホルツエネルギーで表されるもの

下記の無次元ヘルムホルツエネルギー  $\alpha = \alpha^o + \alpha^r$  による各熱力学関数の微分表示において  $\alpha^r \equiv 0$  とすることで理想気体における物性値が得られる

$$\alpha = \alpha^o + \alpha^r \quad (50)$$

$$Z = \frac{p}{\rho RT} = 1 + \delta \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_\tau \quad (51)$$

$$\frac{u}{RT} = \tau \left[ \left( \frac{\partial \alpha^o}{\partial \tau} \right)_\delta + \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \tau} \right)_\delta \right] \quad (52)$$

$$\frac{h}{RT} = \tau \left[ \left( \frac{\partial \alpha^o}{\partial \tau} \right)_\delta + \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \tau} \right)_\delta \right] + \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_\tau \quad (53)$$

$$\frac{s}{R} = \tau \left[ \left( \frac{\partial \alpha^o}{\partial \tau} \right)_\delta + \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \tau} \right)_\delta \right] - \alpha^o - \alpha^r \quad (54)$$

$$\frac{g}{RT} = 1 + \alpha^o + \alpha^r + \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_\tau \quad (55)$$

$$\frac{c_v}{R} = -\tau^2 \left[ \left( \frac{\partial^2 \alpha^o}{\partial \tau^2} \right)_\delta + \left( \frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \tau^2} \right)_\delta \right] \quad (56)$$

$$\frac{c_p}{R} = \frac{c_v}{R} + \frac{\left[ 1 + \delta \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_\tau - \delta \tau \left( \frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \delta \partial \tau} \right) \right]^2}{\left[ 1 + 2\delta \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_\tau + \delta^2 \left( \frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \delta^2} \right)_\tau \right]} \quad (57)$$

$$\frac{w^2 M}{RT} = \frac{c_p}{c_v} \left[ 1 + 2\delta \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_\tau + \delta^2 \left( \frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \delta^2} \right)_\tau \right] \quad (58)$$

図 25~29 の窒素<sup>45)</sup>, 図 30~34 の酸素<sup>46)</sup>, 図 35~39 のアルゴン<sup>47)</sup>, 図 40~44 の二酸化炭素<sup>48)</sup>, 図 45~49 の水<sup>49)</sup>, 図 50~54 の一酸化炭素<sup>50)</sup>, 図 55~59 の水素<sup>51)</sup>については, 圧縮因子, 密度, エンタルピー, エントロピー, 定圧熱容量とも GERG<sup>36)</sup>の計算値は 1000K, 20MPa 以下の範囲で最新のデータと良く合っている. 圧縮因子の傾向から, 1000K 以上では 10MPa までであれば, ほぼ理想気体とみなしてよいと考えられる.

## 4.2 空気の熱物性近似

混合物の熱物性に関しては、理想気体の場合には、ドルトンの分圧の法則により、成分の理想気体熱物性を分圧の重みを掛けて和をとることで容易に得ることができる。実在混合気体に関しては、Lewis の提案として全圧における成分の実在気体物性をモル比の重みを掛けて和をとる方法があり、経験的に広い範囲で有効とされている(Prigogine と Defay によると 1000 気圧まで有効とされている)が混合の効果が考慮されていない<sup>52)</sup>。図 60~63 に空気の実在気体としての熱物性値(密度、エンタルピー、エントロピー、定圧熱容量)のデータ比較<sup>44) 53) 41) 54) 55) 56)</sup>を掲げる。60K 以上 20MPa 以下で実在気体としての空気の特性は良く一致している。

### 4.2.1 GERG による特性

GERG-2004, 2008 状態方程式は、そもそもが天然ガスの相変化物性の記述を目的としているため、採用する純物質の理想気体および実在気体特性は  $90\text{K} \leq T \leq 450\text{K}$  で  $p \leq 35\text{MPa}$  の気相、液相、気液平衡、超臨界状態の炭化水素に合うように制作されている。空気の主成分である窒素、酸素、アルゴンの混合物に対しては、次式の第 2 項における  $F_{ij}$  は 0 とされているため結果として、Lewis の混合則に一致することになる。

$$\alpha^r(\delta, \tau, \bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i \alpha_{oi}^r(\delta, \tau) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N x_i x_j F_{ij} \alpha_{ij}^r(\delta, \tau) \quad (59)$$

また、換算密度、逆換算温度の参照値は

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^3 x_i^2 \frac{1}{\rho_{ci}} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 2x_i x_j \beta_{v, ij} \gamma_{v, ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v, ij}^2 x_i + x_j} \frac{1}{8} \left( \frac{1}{\rho_{c, i}^{1/3}} + \frac{1}{\rho_{c, j}^{1/3}} \right)^3 \quad (60)$$

$$T_r(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N x_i^2 T_{c, i} + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 2x_i x_j \beta_{T, ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T, ij}^2 x_i + x_j} \left( T_{c, i} \cdot T_{c, j} \right)^{0.5} \quad (61)$$

で定められている。

### 4.2.2 Lemmon による特性

Lemmon 等による空気の熱物性特性<sup>44)</sup>は、Ruhr 大学 Bochum 校の Wagner, Span, NIST の Lemmon 等が推進するヘルムホルツエネルギーによる状態方程式整備の一環と捉えられる活動の結果であり、GERG 状態方程式と深い関係がある。GERG が 700K までであるのに対し 2000K までの精度範囲を有する。

$$a = a^{idmix} + a^E \quad (62)$$

$$a = \sum_{i=1}^3 x_i [a_i^0(\rho, T) + \alpha_i^r(\delta, \tau) + RT \ln x_i] \quad (63)$$

$$\frac{a^E}{RT} = \alpha^E(\delta, \tau, \mathbf{x}) = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 x_i x_j F_{ij} [-0.00195245 \delta^2 \tau^{-1.4} + 0.00871334 \delta^2 \tau^{1.5}] \quad (64)$$

であり、 $F_{ij}$  が 0 でないとされているところが GERG と異なる。また、換算の参照値の取り方も式(67)(68)のように異なっている。

$$\delta = \rho / \rho_{red} \quad (65)$$

$$\tau = T_{red} / T \quad (66)$$

$$\rho_{red} = \left( \sum_{i=1}^3 \frac{x_i}{\rho_{ci}} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 x_i x_j \xi_{ij} \right)^{-1} \quad (67)$$

$$T_{red} = \sum_{i=1}^3 x_i T_{ci} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 x_i x_j \zeta_{ij} \quad (68)$$

### 4.2.3 提案する特性計算モデル

4.2.1, 4.2.2 にあるように, GERG の熱力学推定法をもとに熱サイクル計算を進めるうえで, 空気のモデル化における, 窒素, 酸素, 二酸化炭素の理想気体分の外挿性を改善し, 一方で, 実用範囲と隔たりのある臨界領域特性の精度劣化を許容することが提案できる.

## 5. まとめ

エンジンサイクル検討に必要な各種流体物質および空気の熱力学物性値について最新の状態方程式, データ, 数表について調査を行った. 現時点で GERG による物性値の方程式群を用いるのが妥当であることがわかった.

### 5.1 今後考慮が必要な事項

#### 5.1.1 微量成分の取扱い

標準大気の組成は表 3 のようなものであり, 理想気体として扱うことになっている. Lemmon による空気の物性値特性計算では, 窒素, 酸素, アルゴンの実在混合気体として 2000K までが計算されている. NASA の化学平衡空気計算では, 解離を考慮して, 少なくとも 11 種の化学種としている. O, NO, N 等に関しては, NIST-JANAF に理想気体の物性値表があるが, 実在気体としての純物質物性の状態式, 物性値表は存在しない. 燃焼ガス, 極超音速流では, 気体成分が解離を起こすことが分かっているため, 解離成分にまで実在気体効果を考慮しようとする, N, O, OH など単独では不安定な成分の実在効果を推定しなければならない.

#### 5.1.2 水分の取扱い

地球大気において, 高度による温度圧力分布, 緯度による温度分布, 季節による温度変化の他に, 大気成分として水分の変化が顕著である. また, 水, CO<sub>2</sub> などは, 大気状態では凝結, 凝固するため, 例えば, 飛行機雲生成が高空大気環境に及ぼす影響, エンジン着氷などを考えるためには, 相平衡の考慮が必要となる.

付録として, 多くの教科書より状態方程式例, 無次元ヘルムホルツエネルギーの偏微分式, 重要な文献の序文訳, GERG および Lemmon の状態方程式と定数, 0.101325~50MPa, ~2000K までの GERG2008 状態方程式による空気の熱物性計算値を示す.

## 参考文献

- 1) 日本化学会, IUPAC 物理化学で用いられる量・単位・記号 第 3 版, 講談社サイエンティフィク, 2007
- 2) 斉藤隆・鈴木邦男, 航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究(I)—現状とその検討—, 航空宇宙技術研究所, NAL TM-230, 1972
- 3) 相波哲朗, 航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究(II)—燃焼ガスの化学平衡計算と NO 濃度の計算—, 航空宇宙技術研究所, NAL TM-273, 1975

- 4) 平林則明・松崎利一, 分配関数に対する多項式近似とその応用, 航空宇宙技術研究所, NAL TM-434, 1981
- 5) 若松義男・荻田丈士・冠昭夫, 液水／液酸ロケットの推進剤および燃焼ガスの物性値高速計算用プログラム, 航空宇宙技術研究所, NAL TM-564, 1987
- 6) ルイス・ランドル 熱力学, 岩波書店, 1971, p.3
- 7) プリコジューヌ・デフェイ, 化学熱力学 1, 2, みすず書房, 1966, p.v
- 8) 北原和夫・杉山忠男, 統計力学, 講談社基礎物理学シリーズ 8, 講談社, 2010, p.21
- 9) マッカーリ, サイモン, 物理化学(上・下), 東京化学同人, 2000, p.785
- 10) 吉岡甲子郎, 物理化学大要第 2 次改著, 養賢堂, 1978, p.57
- 11) マッカーリ, サイモン, 物理化学(下), 東京化学同人, 2000, p.676
- 12) SENGERS et. al., EQUATIONS of STATE for FLUID and FLUID MIXTURES PART I, IUPAC, 2000, p.40
- 13) 山本義隆, 熱学思想の史的展開 3, ちくま学芸文庫, 筑摩書房, 2009, p.246
- 14) 田崎晴明, 熱力学=現代的な視点から, 新物理シリーズ 32, 培風館, 2000
- 15) 清水明, 熱力学の基礎, 東京大学出版会, 2007
- 16) 芝亀吉, 熱力学, 岩波全書, 1950, p.32
- 17) 谷下市松, 工学基礎熱力学 SI 全訂版, 裳華房, 1971, p.179
- 18) 久保亮五編. 大学演習 熱学・統計力学 修訂版, 裳華房, 1998, p.90
- 19) 小出 妹尾, 統計熱力学, 化学物理講座 2, 共立出版, 1970, p.15
- 20) マッカーリ, サイモン, 物理化学(下), 東京化学同人, 2000
- 21) マッカーリ, サイモン, 物理化学(下), 東京化学同人, 2000, p.902
- 22) 谷下市松, 工学基礎熱力学 SI 全訂版, 裳華房, 1971, p.177
- 23) 二村尚夫, ジェットエンジンサイクル検討における熱力学物性値について, JAXA-RM-10-016, JAXA, 2011
- 24) R. Span, Multiparameter Equations of State, Springer, 2000,p.5
- 25) B. A. Younglove, Thermophysical Properties of Fluids II, JPCRD vol.11, NBS, 1982
- 26) R. Span, Multiparameter Equations of State, Springer, 2000,p.10
- 27) W.Wagner, et al., Oxygen International Thermodynamic Tables of the Fluid State -9, IUPAC, Blackwell Scientific Publication, 1987
- 28) W. Wagner, A. Pruss, The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, J. Phys. Chem. Ref. Data 31, 2002, p.387-535
- 29) SENGERS et.al. ,EQUATIONS of STATE for FLUID and FLUID MIXTURES PART II, IUPAC, 2000, p.859
- 30) O.Kunz et al., The GERG-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures, GERG TM15 2007, GERG, 2007,p.6
- 31) O.Kunz et al., The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An Expansion of GERG-2004, Journal of chemical & engineering Data 2012, vol.57, pp3032-3091, 2012

- 32) E. W. Lemmon, et.al, Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen From 60 to 2000K at Pressures to 2000MPa, J. Phys. Chem. Ref. Data 29, No.3 ,2002
- 33) R. Span, Multiparameter Equations of State, Springer, 2000,p.19
- 34) 青木昌治, 応用物性論, 基礎工業物理講座 6, 朝倉書店, 1969, p.121
- 35) R. Span, Multiparameter Equations of State, Springer, 2000,p.22
- 36) O.Kunz et al., The GERG-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures, GERG TM15 2007, GERG, 2007,p.18
- 37) J. Gernert, R. Span, Equation of State for Combustion Gases and Combustion Gas Like Mixtures, Seventeenth Symposium on Thermophysical Properties ID232,NIST ,2009
- 38) O.Kunz et al., The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An Expansion of GERG-2004, Journal of chemical & engineering Data 2012, vol.57, pp3032-3091, 2012,p.3075
- 39) International Standardization Organization, STANDARD ATMOSPHERE, ISO 2533:1975,1975
- 40) M. W. CHASE, JR., NIST-JANAF THERMOCHEMICAL TABLES FOURTH EDITION, JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL REFERENCE DATA MONOGRAPH NO. 9, JANUARY 1998
- 41) J. Hilsenrath 他,TABLES OF THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF AIR, ARGON, CARBON DIOXIDE, CARBON MONOOXIDE, HYDROGEN, NITROGEN, OXYGEN, AND STEAM, PERGAMON PRESS, 1960
- 42) 水谷幸夫, 燃烧工学 第2版, 森北出版, 1989
- 43) A PROTHERO, COMPUTING WITH THERMO CHEMICAL DATA, COMBUSTION AND FLAME, VOL. 12, FEBRUARY 1969
- 44) E. W. Lemmon 他, Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen From 60 to 2000K at Pressures to 2000MPa, J.Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 29, No. 3, 2000
- 45) R. Span 他, A Reference Equation of State for the Thermodynamic Properties of Nitrogen for Temperatures from 63.151 to 1000K and Pressures to 2200MPa, J.Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 29, No. 6, 2000
- 46) W. Wargner, Thermodynamic Properties of Oxygen from the Triple Point to 300K with Pressure to 80MPa, J.Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 20, No. 5, 1991
- 47) C. Tegeler 他, A New Equation of State for Argon Covering the Fluid Region for Temperatures From the Melting Line to 700K at Pressures up to 1000MPa, J.Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 28, No. 3, 1999
- 48) R. Span 他, A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100K at Pressures up to 800MPa, J.Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 25, No. 6, 1996
- 49) IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, 2009
- 50) R. Goodwin 他, Carbon Monoxide Thermophysical Properties from 68 to 1000K at Pressures to 100MPa, J.Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 14, No. 4, 1985

- 51) J. Leachman 他, Fundamental Equations of State for the Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen, J.Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 38, No. 3, 2009
- 52) プリコジーン・デフェイ, 化学熱力学 1, 2, みすず書房, 1966, p.154
- 53) 日本機械学会編, 技術資料 流体の熱物性値集, 丸善, 1983
- 54) W. C. Reynolds, THERMODYNAMIC PROPERTIES IN SI, Stanford University, 1979
- 55) CRC, Handbook of Chemistry and Physics 90<sup>th</sup> edition, CRC, 2009
- 56) H. D. Baehr 他, Die thermodynamischen Eigenschaften der Luft, Springer-Verlag, 1961

## 付録 A 種々の熱力学状態方程式

クラジウスの状態式(1880)<工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.159>

$$\left(p + \frac{a'}{T(v+b')^2}\right)(v-b) = RT \quad (A1)$$

ゼーリグマンの状態式(1924)<工業熱力学応用編 第3版,谷下,p.54> 空気

$$\left(p + \frac{a}{T(v+h)^2}\right)(v-b) = RT \quad (A2)$$

$$\text{ただし, } a = d - mT + \frac{n}{T}$$

フレーリッヒの状態式(1934)<工業熱力学応用編 第3版,谷下,p.54> 空気

$$\left(p + \frac{a}{(v+h)^2}\right)(v-b) = RT \quad (A3)$$

$$\text{ただし, } a = d - mT + \frac{n}{T}$$

谷下の式(1951)<工業熱力学応用編 第3版,谷下,p.55> 空気

$$v = \frac{RT}{p} + a_1 - \frac{a_2}{\left(\frac{T}{100}\right)^{b_2}} + \frac{a_3}{\left(\frac{T}{100}\right)^{b_3}} P + \frac{a_4}{\left(\frac{T}{100}\right)^{b_4}} P^2 + \frac{a_5}{\left(\frac{T}{100}\right)^{b_5}} P^3 \quad (A4)$$

ベルテロートの状態式(1903)<工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.159>

$$\left(p + \frac{a'}{Tv^2}\right)(v-b) = RT \quad (A4)$$

ディーテリチの状態式(1898)<工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.160>

$$p * e^{\frac{a}{vRT}} * (v-b) = RT \quad (A5)$$

レードリッヒ-ウォンの状態式(1949)<工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.160>

$$\left(p + \frac{a}{T^{1/2}v(v+h)}\right)(v-b) = RT \quad (A6)$$

ペン-ロビンソンの状態式(1976)

$$\left(p + \frac{a}{v(v+b)+b(v-b)}\right)(v-b) = RT \quad (A7)$$

カレンダーの状態式<工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.161>

$$pv = RT + BP, \quad B = b - a'/T^n \quad (A8)$$

ボールの状態式(1914)<工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.161>

$$p = \frac{RT}{v-b} + \frac{a}{Tv(v-b)} + \frac{c}{T^{4/3}v^3} \quad (A9)$$

カメリンオンネスの状態式(1885)<工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.161 他>

$$pv = RT + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^3} + \dots \quad (A10)$$

$$\text{ただし } B = b_1T + b_2 + \frac{b_3}{T} + \frac{b_4}{T^2} + \dots \quad C = c_1T + c_2 + \frac{c_3}{T} + \frac{c_4}{T^2} + \dots$$

または,

$$\frac{pv}{RT} = 1 + B'P + C'P^2 + \dots$$

プランクの状態式(1936)<工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.162>

$$p = \frac{RT}{(v-b)} + \sum_{i=2}^5 f_i(T)(v-b)^{-i} \quad (A11)$$

マーチン-ハウの状態式(1955) <工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.162>

$$p = \frac{RT}{(v-b)} + \sum_{t=2}^5 \frac{f_t(T)}{(v-b)^t} + \sum_{t=6}^7 \frac{f_t(T)}{e^{\alpha v}} \quad (\text{A12})$$

$$\text{ただし, } f_t(T) = a_t + b_t T + c_t e^{-KT/T_c}$$

ビーティ-ブリッジマンの状態式(1928) <工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.162>

$$p = \frac{RT \left(1 - \frac{c}{vT^3}\right)}{v^2} \left[ v + B_0 \left(1 - \frac{b}{v}\right) \right] - \frac{A_0}{v^2} \left(1 - \frac{a}{v}\right) \quad (\text{A13})$$

ベネディクト-ウェブ-ルービンの状態式(1940) <工学基礎熱力学 SI 全訂版,谷下,p.163>

$$p = \frac{RT}{v} + \left( B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \frac{1}{v^2} + (bRT - a) \frac{1}{v^3} + \frac{aa}{v^6} + \frac{c(1 + \frac{\gamma}{v^2})}{T^2 v^3} e^{-\gamma/v^2} \quad (\text{A14})$$



## 付録 B

式(38)で表された無次元換算ヘルムホルツエネルギーの偏微分式

$$\alpha^0(\delta, \tau) = C^{\text{II}} + C^{\text{I}} \tau + C_0 \ln(\tau) + \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} C_i \tau^{t_i} + \sum_{k=1}^{\text{KPE}} m_k \ln(1 - e^{-\vartheta_k \tau}) + \ln(\delta) \quad (\text{B1})$$

$$\left( \frac{\partial \alpha^0(\delta, \tau)}{\partial \delta} \right)_{\tau} = \alpha_{\delta}^0 = \frac{1}{\delta} \quad (\text{B2})$$

$$\left( \frac{\partial^2 \alpha^0(\delta, \tau)}{\partial \delta^2} \right)_{\tau} = \alpha_{\delta\delta}^0 = -\frac{1}{\delta^2} \quad (\text{B3})$$

$$\left( \frac{\partial^2 \alpha^0(\delta, \tau)}{\partial \delta \partial \tau} \right)_{\tau} = \alpha_{\delta\tau}^0 = 0 \quad (\text{B4})$$

$$\left( \frac{\partial \alpha^0}{\partial \tau} \right)_{\delta} = \alpha_{\tau}^0 = C^{\text{I}} + \frac{C_0}{\tau} + \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} C_i t_i \tau^{t_i-1} + \sum_{k=1}^{\text{KPE}} m_k \vartheta_k \left( \frac{1}{1 - e^{-\vartheta_k \tau}} - 1 \right) \quad (\text{B5})$$

$$\left( \frac{\partial^2 \alpha^0}{\partial \tau^2} \right)_{\delta} = \alpha_{\tau\tau}^0 = C^{\text{I}} + \frac{C_0}{\tau} + \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} C_i t_i \tau^{t_i-1} + \sum_{k=1}^{\text{KPE}} m_k \vartheta_k \left( \frac{1}{1 - e^{-\vartheta_k \tau}} - 1 \right) \quad (\text{B6})$$

式(40)で表された無次元換算ヘルムホルツエネルギーの偏微分式

$$\alpha^0 = \ln(\delta) + c^{\text{II}} + c^{\text{I}} \tau + c_0 \ln(\tau) + \sum_{k=1,3} m_k \ln|\sinh(\vartheta_k \tau)| - \sum_{k=2,4} m_k \ln|\cosh(\vartheta_k \tau)| \quad (\text{B7})$$

$$\left( \frac{\partial \alpha^0(\delta, \tau)}{\partial \delta} \right)_{\tau} = \alpha_{\delta}^0 = \frac{1}{\delta} \quad (\text{B8})$$

$$\left( \frac{\partial^2 \alpha^0(\delta, \tau)}{\partial \delta^2} \right)_{\tau} = \alpha_{\delta\delta}^0 = -\frac{1}{\delta^2} \quad (\text{B9})$$

$$\left( \frac{\partial^2 \alpha^0(\delta, \tau)}{\partial \delta \partial \tau} \right)_{\tau} = \alpha_{\delta\tau}^0 = 0 \quad (\text{B10})$$

$$\left( \frac{\partial \alpha^0}{\partial \tau} \right)_{\delta} = \alpha_{\tau}^0 = C^{\text{I}} + \frac{C_0}{\tau} + \sum_{k=1,3} m_k \frac{\vartheta_k \tau}{\tanh \vartheta_k \tau} - \sum_{k=2,4} m_k \vartheta_k \tanh(\vartheta_k \tau) \quad (\text{B11})$$

$$\left( \frac{\partial^2 \alpha^0}{\partial \tau^2} \right)_{\delta} = \alpha_{\tau\tau}^0 = 0 - \frac{C_0}{\tau^2} - \sum_{k=1,3} m_k \frac{\vartheta_k^2}{(\sinh(\vartheta_k \tau))^2} - \sum_{k=2,4} m_k \frac{\vartheta_k^2}{(\cosh(\vartheta_k \tau))^2} \quad (\text{B12})$$

式(39)で表された無次元換算ヘルムホルツエネルギーの偏微分式

$$\alpha^r(\tau, \delta) = \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} + \sum_{i=\text{Ipol}+1}^{\text{Ipol}+\text{IExp}} n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \delta^{P_i}) \quad (\text{B13})$$

$$\left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_{\tau} = \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} n_i d_i \tau^{t_i} \delta^{d_i-1} + \sum_{i=\text{Ipol}+1}^{\text{Ipol}+\text{IExp}} n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i-1} (d_i - \gamma_i P_i \delta^{P_i}) \exp(-\gamma_i \delta^{P_i}) \quad (\text{B14})$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \delta^2} \right)_{\tau} &= \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} n_i d_i (d_i - 1) \tau^{t_i} \delta^{d_i-2} \\ &+ \sum_{i=\text{Ipol}+1}^{\text{Ipol}+\text{IExp}} n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i-1} ((d_i - \gamma_i P_i \delta^{P_i})(d_i - 1 - \gamma_i P_i \delta^{P_i}) - \gamma_i P_i \delta^{P_i}) \exp(-\gamma_i \delta^{P_i}) \end{aligned} \quad (\text{B15})$$

$$\left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \tau} \right)_{\delta} = \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} n_i t_i \tau^{t_i-1} \delta^{d_i} + \sum_{i=\text{Ipol}+1}^{\text{Ipol}+\text{IExp}} n_i t_i \tau^{t_i-1} \delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \delta^{P_i}) \quad (\text{B16})$$

$$\left( \frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \tau^2} \right)_{\delta} = \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} n_i t_i (t_i - 1) \tau^{t_i-2} \delta^{d_i} + \sum_{i=\text{Ipol}+1}^{\text{Ipol}+\text{IExp}} n_i t_i (t_i - 1) \tau^{t_i-2} \delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \delta^{P_i}) \quad (\text{B17})$$

$$\left( \frac{\partial^2 \alpha^r}{\partial \delta \partial \tau} \right)_{\delta} = \sum_{i=1}^{\text{Ipol}} n_i t_i d_i \tau^{t_i-1} \delta^{d_i-1} + \sum_{i=\text{Ipol}+1}^{\text{Ipol}+\text{IExp}} n_i t_i \tau^{t_i-1} \delta^{d_i-1} (d_i - \gamma_i P_i \delta^{P_i}) \exp(-\gamma_i \delta^{P_i}) \quad (\text{B18})$$

## 付録 C

「マルチパラメータ状態方程式<sup>33)</sup>」の序文訳

印刷された物性の線図、表の基礎として、経験的なマルチパラメータ状態方程式は、この30年間、精確な熱力学物性データの最も重要な源であった。しかしながら、コンピュータ計算における熱力学物性データの精度向上要求と適切なソフトウェアツールの入手性に対する要求、そして進歩し続ける計算機能力の向上により、これらの状態方程式は日常の有用なツールとなりつつある。この式の開発には、多くの科学者、技術者、学生が参加しており、今後も続くものと考えられる。

それにも関わらず、この種の熱力学物性と科学分野の進歩に関する常識は極めて限られている。マルチパラメータ状態方程式については工学、自然科学の熱力学の授業で中心的に取り上げられるトピックには属さず、また、書物や新聞雑誌の記事は、特定の物質についての熱力学物性を取り扱うことがほとんどで、用いられている状態方程式の理論的背景には触れないのが普通である。これらの事柄に対し、私の関心はマルチパラメータ状態方程式の理論的背景を調査し、その応用と式の開発に供することにある。この本はマルチパラメータ状態方程式のユーザーで、応用上、背景に関する情報を必要とする者、および、この種の状態方程式の開発に従事する者、そして、そこに加わろうとする者のために書かれている。最新の、そして詳細な著作のように、この本はマルチパラメータ状態方程式の常識を改善し、その応用に燃料を与え、より多くの科学者をこのような熱力学物性モデルの研究に引き付けることを意図している。…

## 付録 D

GERG-2004<sup>30)</sup>の序文訳

天然ガスと天然ガス成分の混合物に関する精確な熱力学的特性の知識は、基礎工学と技術プロセスの性能にとって欠くべからざる重要性を有している。天然ガスのプロセス、輸送、貯蔵は広範囲の混合物組成、作動条件において均一な気体、液体、超臨界領域、気-液平衡の計算を必要とする。これらのデータは状態方程式から有利に計算される。天然ガス工業で用いられる既存の状態方程式の弱点と制限を克服するため、数年前に Ruhr 大学 Bochum 校の熱力学講座は天然ガスとその他の混合物について、天然ガスの熱力学計算を必要とする、すべての応用において、標準国際方程式として採用されるだけの品質を備えた新しい広範囲な状態方程式を開発することを決定した。作業は DVGW(ドイツ・ガス水技術科学協会)と欧州のガス会社(E. ON Ruhrgas, ドイツ; Enagas, スペイン; Gasunie, オランダ; Gaz de France, フランス; Snam Rete Gas, イタリア; Statoil, ノルウェー)の支援を受けた。協会と会社は GERG(Group European de Recherches Gazieres)のメンバーである。新しい式により、第2のプロジェクトとして前述の欧州天然ガス会社の支援により、強固で効率の良い計算ルーチン(ソフトウェア)が開発された。ルーチンは任意の条件で混合物の熱力学特性を”blind”で計算できるものである。

このモノグラフは新しい状態方程式について詳らかに紹介するもので、これは2004年にGERGにより採用されたもので、GERG-2004状態方程式、短くはGERG-2004と呼ばれる。まず最初に既存の混合モデルについて、特に天然ガス工業で用いられてきた状態方程式について紹介する。次いで新しいモデルに対して定義された基本的要求について述べる。最近の開発と同様に新しい広範囲の定式はヘルムホルツエネルギーで陽に表現されている。混合モデルは各混合成分について基本式と同じ精確な状態方程式を剰余混合挙動を考慮した2成分混合物の開発した式と合わせて使っている。したがって、純粋物質の状態方程式と現代のアプローチの一般特性についても述べられている。しかしながら、記述は背景情

報と考えられるので、新しい方程式の構造に興味のある人々に必要なものではない。第 6 章では新しい混合モデルの開発と評価に用いられた実験データについて概説する。入手可能なデータの質と範囲は式の精度を制限する。新しい状態方程式の数学的構造、その有効範囲、異なる熱力学物性の不確かさ、2 成分方程式の開発についての詳細な情報は、第 7 章に与えてある。その上、この章は新しい状態方程式から熱力学特性の計算の大筋と、2 次収束法を用いた進んだ混合特性の計算についての基本的原理を与えている。これには、安定性解析、フラッシュ特性の解、飽和点計算、相包絡線の構築が含まれている。新しい方程式の質と推定力については 8 章で実験データ及び従来の混合モデルによる結果との比較により検討している。最後に、新しい状態方程式について将来の拡張の可能性を提案している。

このモノグラフは新しい状態方程式から、密度、エンタルピー、エントロピー、定圧熱容量、フガシィ係数などを計算するのに必要な完全な数学的情報が第 7 章に書かれている。しかしながら、相の安定性、即ち、特定の条件で混合物が均一か 2 相(または多相)に分離するかを決定し、相平衡計算を実行できるようにするためには特別なアルゴリズムが必要である。上述のように、この目的のために手順が第 7 章に述べられている。

著者らは、GERG ワーキンググループ 1. 3 4 とワーキンググループ 1. 4 6 に各研究プロジェクトの財政的支援、そして協力と忍耐をいただいたことに感謝する。我々は又、方程式プロジェクトで測定を実施してくれた実験技術者に、および出版前に新しい測定データを提供してくれた人々、公表されていないデータを提供してくれた人々に感謝する。特に、M. L. Michelsen には、相平衡計算アルゴリズムの計算コードと複雑な手順の理解を助けてくれたことを感謝する。さらに、G. Lauernam と Gas Processors Association には GPA 熱力学データベースを提供してくれたことを感謝する。我々は、暖かい感謝を D. Lecaplain, J. Kirschenbaum, J. Bierwirth, K. Gockeler に仕事をいろいろ手伝って頂いたことを述べたい。特に我々の一人(O. K.)は A. Grve に、このモノグラフを書く手伝いをしてくれたこと、式をタイプしてくれたことを感謝している。最後に E. W. Lemmon には、全原稿を丁寧に読んでもらい、議論と提案を頂いたこと、そして英文スタイルの改良をしてくれたことに感謝する。

Bochum, April, 2007

O. Kunz, R. Klimeck, W. Wagner, M. Jaeschke

付録 E (参考) 状態方程式の式および定数

表 E1 GERG2008 による純物質の理想無次元ヘルムホルツエネルギー

	$\alpha^{\circ}_{oi}(\rho, T) = \frac{R^*}{R} \left[ \ln \left( \frac{\rho}{\rho_{c,i}} \right) + n^{\circ}_{oi,1} + n^{\circ}_{oi,2} \frac{T_{c,i}}{T} + n^{\circ}_{oi,3} \ln \left( \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right. \\ \left. + \sum_{k=4,6} n^{\circ}_{oi,k} \ln \left  \sinh \left( \vartheta^{\circ}_{oi,k} \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right  + \sum_{k=5,7} n^{\circ}_{oi,k} \ln \left  \cosh \left( \vartheta^{\circ}_{oi,k} \frac{T_{c,i}}{T} \right) \right  \right]$						
化学種	N2	O2	Ar	CO2	H2O	CO	H2
$n^{\circ}_{oi,1}$	11.08340749	10.001843586	8.3166315	11.925152758	8.20352069	10.81334074	13.79644339
$n^{\circ}_{oi,2}$	-22.202102428	-14.99609514	-4.9465026	-16.11876226	-11.99630644	-19.83473396	-175.8644873
$n^{\circ}_{oi,3}$	2.50031	2.50146	1.5	2.50002	3.00392	2.50055	1.47906
$n^{\circ}_{oi,4}$	0.13732	1.07558		2.04452	0.01059	1.02865	0.95806
$n^{\circ}_{oi,5}$	-0.1466	1.01334		-1.06044	0.98763	0.00493	0.45444
$n^{\circ}_{oi,6}$	0.90066			2.03366	3.06904		1.56039
$n^{\circ}_{oi,7}$				0.01393			-1.3756
$\vartheta^{\circ}_{oi,4}$	5.25182262	14.46172257		3.022758166	0.415386589	11.6698028	6.891654113
$\vartheta^{\circ}_{oi,5}$	-5.393067706	7.223325463		-2.844425476	1.763895929	5.302762306	9.84763483
$\vartheta^{\circ}_{oi,6}$	13.78898821			1.589964364	3.874803739		49.76529075
$\vartheta^{\circ}_{oi,7}$				1.12159609			50.3672793

表 E2 GERG2008 による純物質の剰余無次元ヘルムホルツエネルギー

	$\alpha^r_{oi}(\delta, \tau) = \sum_{k=1}^{K_{pol,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} + \sum_{k=K_{pol,i}+1}^{K_{pol,i}+K_{Exp,i}} n_{oi,k} \delta^{d_{oi,k}} \tau^{t_{oi,k}} e^{-\delta^{c_{oi,k}}}$							
化学種	N2				CO2			
$K_{pol,i}$	6				4			
$K_{Exp,i}$	18				18			
$k$	$n_{oi,k}$	$c_{oi,k}$	$d_{oi,k}$	$t_{oi,k}$	$n_{oi,k}$	$c_{oi,k}$	$d_{oi,k}$	$t_{oi,k}$
1	0.59889711801201		1	0.125	0.526465648046530		1	0
2	-1.694155748073100		1	1.125	-1.499572504259200		1	1.25
3	0.245797361917180		2	0.375	0.273297867337820		2	1.625
4	-0.237224567551750		2	1.125	0.129495000227860		3	0.375
5	0.017954918715141		4	0.625	0.154040883418410	1	3	0.375
6	0.014592875720215		4	1.5	-0.581869509468140	1	3	1.375
7	0.100080659362060	1	1	0.625	-0.180224948382960	1	4	1.125
8	0.731571153855320	1	1	2.625	-0.095389904072812	1	5	1.375
9	-0.883722723363660	1	1	2.75	-0.008048681931768	1	6	0.125
10	0.318876602467080	1	2	2.125	-0.035547751273090	1	6	1.625

11	0.207664917287990	1	3	2	-0.280790148824050	2	1	3.75
12	-0.019379315454158	1	6	1.75	-0.082435890081677	2	4	3.5
13	-0.169366415549830	2	2	4.5	0.010832427979006	3	1	7.5
14	0.135468460417010	2	3	4.75	-0.006707399316110	3	1	8
15	-0.033066712095307	2	3	5	-0.004682790760052	3	3	6
16	-0.060690817018557	2	4	4	-0.028359911832177	3	3	16
17	0.012797548292871	2	4	4.5	0.019500174744098	3	4	11
18	0.005874366410730	3	2	7.5	-0.216091375071660	5	5	24
19	-0.018451951971969	3	3	14	0.437727949269720	5	5	26
20	0.004722662204247	3	4	11.5	-0.221307901135930	5	5	28
21	-0.005202407968060	6	5	26	0.015190189957331	6	5	24
22	0.043563505956635	6	6	28	-0.015380948953300	6	5	26
23	-0.036251690750939	6	6	30				
24	-0.002897402686654	6	7	16				
化学種	H2O				H2			
$K_{pol,i}$	7				5			
$K_{Exp,i}$	9				9			
$k$	$n_{oi,k}$	$c_{oi,k}$	$d_{oi,k}$	$t_{oi,k}$	$n_{oi,k}$	$c_{oi,k}$	$d_{oi,k}$	$t_{oi,k}$
1	0.827284087495860		1	0.5	5.357992845125200		1	0.5
2	-1.860222041658400		1	1.25	-6.205025253059500		1	0.625
3	-1.119900961374400		1	1.875	0.138302413270860		2	0.375
4	0.156357539760560		2	0.125	-0.071397954896129		2	0.625
5	0.873758448590250		2	1.5	0.015474053959733		4	1.125
6	-0.366744037157310		3	1	-0.149768064057710	1	1	2.625
7	0.053987893432436		4	0.75	-0.026368723988451	1	5	0
8	1.095769021449900	1	1	1.5	0.056681303156066	1	5	0.25
9	0.053213037828563	1	5	0.625	-0.060063958030436	1	5	1.375
10	0.013050533930825	1	5	2.625	-0.450439420271320	2	1	4
11	-0.410795204344760	2	1	5	0.424788402445000	2	1	4.25
12	0.146374433441200	2	2	4	-0.021997640827139	3	2	5
13	-0.055726838623719	2	4	4.5	-0.010499521374530	3	5	8
14	-0.011201774143800	3	4	3	-0.002895590286682	5	1	8
15	-0.006606275806810	5	1	4				
16	0.004691852200454	5	1	6				
化学種	O2	Ar			CO			
$K_{pol,i}$	6	6			6			
$K_{Exp,i}$	6	6			6			
$k$	$n_{oi,k}$	$n_{oi,k}$			$n_{oi,k}$	$c_{oi,k}$	$d_{oi,k}$	$t_{oi,k}$

1	0.888782863697010	0.850957148039690	0.923100414008510		1	0.25
2	-2.487943331214800	-2.400322294348000	-2.488584520580000		1	1.125
3	0.597501907758860	0.541278414764660	0.580952137833960		1	1.5
4	0.009650181706188	0.016919770692538	0.028859164394654		2	1.375
5	0.071970428712770	0.068825965019035	0.070256257276544		3	0.25
6	0.000223374430002	0.000214280328153	0.000216870432695		7	0.875
7	0.185586863914740	0.174298953219920	0.137583310151820	1	2	0.625
8	-0.038129368035760	-0.033654495604194	-0.051501116343466	1	5	1.75
9	-0.153522453830060	-0.135267998576910	-0.148653574833790	2	1	3.625
10	-0.026726814910919	-0.016387350791552	-0.038857100886810	2	4	3.625
11	-0.025675298677127	-0.024987666851475	-0.029100433948943	3	3	14.5
12	0.009571430212367	0.008876920481571	0.014155684466279	3	4	12

表 E3 J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 29, No. 3, 2000 による空気の状態方程式

	$\alpha^o(\delta,\tau)=\ln\delta+\sum_{i=1}^5N_i\tau^{i-4}+N_6\tau^{1.5}+N_7\ln\tau$ $+N_8\ln[1-e^{-N_{11}\tau}]+N_9\ln[1-e^{-N_{12}\tau}]+N_{10}\ln\left[\frac{2}{3}+e^{N_{13}\tau}\right]$							
N <sub>1</sub>	0.605719400×10 <sup>-7</sup>	N <sub>5</sub>	17.275266575	N <sub>9</sub>	0.212236768	N <sub>13</sub>	87.31279	
N <sub>2</sub>	-0210274769×10 <sup>-4</sup>	N <sub>6</sub>	-0.195363420 × 10 <sup>-3</sup>	N <sub>10</sub>	-0.197938904			
N <sub>3</sub>	-0.158860716×10 <sup>-3</sup>	N <sub>7</sub>	2.490888032	N <sub>11</sub>	25.36365			
N <sub>4</sub>	-13.841928076	N <sub>8</sub>	0.791309509	N <sub>12</sub>	16.90741			
	$\alpha^r(\delta,\tau)=\sum_{k=1}^{10}N_k\delta^{i_k}\tau^{j_k}+\sum_{k=11}^{19}N_k\delta^{i_k}\tau^{j_k}e^{-\delta^{l_k}}$							
k	N <sub>k</sub>	i <sub>k</sub>	j <sub>k</sub>	k	N <sub>k</sub>	i <sub>k</sub>	j <sub>k</sub>	l <sub>k</sub>
1	0.118160747229	1	0	11	-0.101365037912	1	1.6	1
2	0.713116392079	1	0.33	12	-0.173813690970	3	0.8	1
3	-1.618241920670	1	1.01	13	-0.047210318373	5	0.95	1
4	0.071414017897	2	0	14	-0.012252355425	6	1.25	1
5	-0.086542139665	3	0	15	-0.146629609713	1	3.6	2
6	0.134211176704	3	0.15	16	-0.031605587982	3	6	2
7	0.011262670422	4	0	17	0.000233594806	11	3.25	2
8	-0.042053322884	4	0.2	18	0.014828789198	1	3.5	3
9	0.034900843198	4	0.35	19	-0.009387828847	3	15	3
10	0.000164957183	6	1.35					

	$\alpha^E(\delta, \tau, x) = \left\{ \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 x_i x_j F_{ij} \right\} [-0.00195245\delta^2\tau^{-1.4} + 0.00871334\delta^2\tau^{1.5}]$			
		F <sub>ij</sub>	ξ <sub>ij</sub> (K)	ξ <sub>ji</sub> (dm <sup>3</sup> /mol)
Nitrogen-Argon		1.121527	-1.237713	-0.00076031
Nitrogen-Oxygen		1	-0.856350	-0.00041847
Argon-Oxygen		0.597203	-2.115126	0.00041232

付録 F GERG2008 状態方程式に基づく空気の熱物性計算値

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
	0.101325	MPa	Isobar				
59.77	33.160	-4731.1	-4728.0	70.65	34.91	56.37	1044.4
60	33.128	-4718.1	-4715.0	70.86	34.84	56.35	1042.3
62	32.842	-4605.7	-4602.6	72.71	34.21	56.14	1024.6
64	32.554	-4493.6	-4490.5	74.49	33.63	55.98	1006.8
66	32.263	-4381.8	-4378.6	76.21	33.10	55.87	988.8
68	31.968	-4270.1	-4266.9	77.87	32.61	55.81	970.6
70	31.671	-4158.5	-4155.3	79.49	32.15	55.80	952.4
72	31.370	-4046.9	-4043.7	81.06	31.72	55.83	933.9
74	31.064	-3935.3	-3932.0	82.59	31.31	55.90	915.3
76	30.755	-3823.4	-3820.1	84.09	30.93	56.01	896.5
78	30.441	-3711.3	-3707.9	85.54	30.57	56.16	877.5
78.9	30.298	-3660.7	-3657.4	86.19	30.41	56.25	868.9
81.72	0.15506	1633.7	2287.2	160.48	21.45	31.14	177.3
82	0.15446	1639.9	2295.9	160.59	21.44	31.11	177.7
84	0.15036	1684.1	2357.9	161.33	21.35	30.91	180.1
86	0.14649	1727.9	2419.6	162.06	21.28	30.73	182.5
88	0.14284	1771.5	2480.9	162.76	21.23	30.59	184.9
90	0.13938	1815.0	2541.9	163.45	21.18	30.46	187.2
92	0.13609	1858.2	2602.7	164.12	21.13	30.35	189.5
94	0.13297	1901.3	2663.3	164.77	21.10	30.25	191.7
96	0.13000	1944.3	2723.7	165.40	21.06	30.16	193.9
98	0.12716	1987.2	2784.0	166.03	21.03	30.08	196.1
100	0.12446	2029.9	2844.1	166.63	21.01	30.01	198.3
102	0.12187	2072.6	2904.0	167.23	20.99	29.95	200.4
104	0.11939	2115.2	2963.9	167.81	20.96	29.89	202.5
106	0.11702	2157.7	3023.6	168.38	20.95	29.84	204.5
108	0.11474	2200.2	3083.2	168.93	20.93	29.79	206.6
110	0.11256	2242.5	3142.8	169.48	20.91	29.74	208.6
112	0.11045	2284.9	3202.2	170.01	20.90	29.70	210.6
114	0.10843	2327.1	3261.6	170.54	20.89	29.67	212.5
116	0.10649	2369.3	3320.9	171.06	20.88	29.63	214.5
118	0.10461	2411.5	3380.1	171.56	20.87	29.60	216.4
120	0.10280	2453.7	3439.3	172.06	20.86	29.57	218.3
122	0.10106	2495.8	3498.4	172.55	20.85	29.54	220.2



## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
124	0.09937	2537.8	3557.5	173.03	20.84	29.52	222.1
126	0.09775	2579.9	3616.5	173.50	20.83	29.50	223.9
128	0.09617	2621.9	3675.4	173.96	20.83	29.47	225.8
130	0.09465	2663.8	3734.4	174.42	20.82	29.45	227.6
132	0.09317	2705.8	3793.2	174.87	20.81	29.43	229.4
134	0.09175	2747.7	3852.1	175.31	20.81	29.42	231.2
136	0.09036	2789.6	3910.9	175.75	20.80	29.40	232.9
138	0.08902	2831.5	3969.7	176.18	20.80	29.38	234.7
140	0.08772	2873.3	4028.5	176.60	20.79	29.37	236.4
142	0.08646	2915.2	4087.2	177.02	20.79	29.36	238.2
144	0.08523	2957.0	4145.9	177.43	20.79	29.34	239.9
146	0.08404	2998.8	4204.6	177.83	20.78	29.33	241.6
148	0.08288	3040.6	4263.2	178.23	20.78	29.32	243.3
150	0.08175	3082.4	4321.8	178.62	20.78	29.31	245.0
155	0.07907	3186.8	4468.3	179.59	20.77	29.28	249.1
160	0.07655	3291.1	4614.7	180.51	20.76	29.26	253.2
165	0.07420	3395.3	4760.9	181.41	20.76	29.24	257.1
170	0.07199	3499.5	4907.1	182.29	20.76	29.23	261.1
175	0.06990	3603.7	5053.2	183.13	20.75	29.21	264.9
180	0.06794	3707.8	5199.3	183.96	20.75	29.20	268.8
185	0.06608	3811.9	5345.2	184.76	20.75	29.19	272.5
190	0.06432	3915.9	5491.2	185.54	20.75	29.18	276.2
195	0.06266	4019.9	5637.0	186.29	20.74	29.17	279.9
200	0.06108	4123.9	5782.9	187.03	20.74	29.16	283.5
210	0.05815	4331.9	6074.4	188.45	20.74	29.15	290.5
220	0.05549	4539.7	6365.9	189.81	20.74	29.14	297.4
230	0.05306	4747.5	6657.2	191.11	20.74	29.13	304.1
240	0.05084	4955.4	6948.6	192.35	20.75	29.13	310.7
250	0.04879	5163.2	7239.8	193.53	20.75	29.13	317.1
260	0.04691	5371.0	7531.1	194.68	20.76	29.13	323.4
270	0.04516	5578.9	7822.4	195.78	20.76	29.13	329.6
280	0.04355	5786.8	8113.7	196.84	20.77	29.13	335.6
290	0.04204	5994.8	8405.0	197.86	20.78	29.14	341.6
298.15	0.04089	6164.4	8642.6	198.67	20.79	29.15	346.3
300	0.04063	6202.9	8696.5	198.85	20.80	29.15	347.4

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
310	0.03932	6411.1	8988.0	199.80	20.81	29.16	353.1
320	0.03809	6619.5	9279.7	200.73	20.83	29.18	358.7
330	0.03693	6828.0	9571.6	201.63	20.85	29.19	364.2
340	0.03584	7036.7	9863.6	202.50	20.87	29.21	369.7
350	0.03482	7245.6	10156	203.34	20.89	29.23	375.0
360	0.03385	7454.8	10448	204.17	20.92	29.26	380.3
370	0.03293	7664.2	10741	204.97	20.94	29.28	385.4
380	0.03207	7873.9	11034	205.75	20.97	29.31	390.5
390	0.03124	8083.9	11327	206.51	21.01	29.34	395.6
400	0.03046	8294.2	11621	207.26	21.04	29.38	400.5
450	0.02707	9351.6	13094	210.73	21.25	29.58	424.2
500	0.02436	10421	14579	213.86	21.51	29.83	446.4
550	0.02215	11503	16078	216.71	21.80	30.13	467.3
600	0.02030	12602	17592	219.35	22.13	30.45	487.1
650	0.01874	13717	19123	221.80	22.47	30.79	505.9
700	0.01740	14849	20671	224.09	22.82	31.14	523.9
750	0.01624	15999	22237	226.25	23.16	31.48	541.2
800	0.01523	17165	23820	228.30	23.50	31.82	557.9
900	0.01354	19549	27035	232.08	24.15	32.47	589.6
1000	0.01218	21994	30311	235.53	24.73	33.05	619.6
1100	0.01108	24493	33642	238.71	25.25	33.56	648.2
1200	0.01015	27041	37021	241.65	25.70	34.01	675.5
1300	0.00937	29631	40443	244.39	26.09	34.40	701.8
1400	0.00870	32257	43901	246.95	26.43	34.74	727.1
1500	0.00812	34915	47390	249.36	26.72	35.04	751.6
1600	0.00761	37600	50907	251.63	26.98	35.29	775.4
1700	0.00717	40310	54447	253.77	27.20	35.51	798.5
1800	0.00677	43039	58009	255.81	27.39	35.71	820.9
1900	0.00641	45788	61588	257.74	27.56	35.88	842.8
2000	0.00609	48552	65184	259.59	27.71	36.03	864.2
	0.5	MPa	Isobar				
59.84	33.171	-4730.2	-4715.1	70.66	34.91	56.33	1045.8
60	33.148	-4721.2	-4706.1	70.81	34.86	56.31	1044.4
62	32.863	-4608.9	-4593.7	72.65	34.23	56.09	1026.8
64	32.576	-4497.1	-4481.7	74.43	33.66	55.93	1009.0

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
66	32.286	-4385.4	-4370.0	76.15	33.12	55.82	991.1
68	31.993	-4274.0	-4258.4	77.82	32.63	55.76	973.1
70	31.697	-4162.7	-4146.9	79.43	32.17	55.73	954.9
72	31.397	-4051.3	-4035.4	81.00	31.74	55.76	936.5
74	31.094	-3939.9	-3923.9	82.53	31.33	55.82	918.1
76	30.786	-3828.4	-3812.1	84.02	30.95	55.92	899.4
78	30.474	-3716.6	-3700.1	85.47	30.59	56.07	880.6
80	30.156	-3604.4	-3587.8	86.90	30.25	56.26	861.6
82	29.834	-3491.8	-3475.1	88.29	29.93	56.49	842.3
84	29.505	-3378.8	-3361.8	89.65	29.62	56.78	822.9
86	29.170	-3265.1	-3247.9	90.99	29.33	57.12	803.2
88	28.828	-3150.6	-3133.3	92.31	29.06	57.52	783.2
90	28.478	-3035.4	-3017.8	93.61	28.80	57.99	762.9
92	28.118	-2919.1	-2901.3	94.89	28.55	58.54	742.2
94	27.749	-2801.6	-2783.6	96.15	28.31	59.18	721.1
96	27.369	-2682.8	-2664.5	97.41	28.09	59.92	699.5
96.12	27.345	-2675.6	-2657.3	97.48	28.08	59.97	698.2
98.36	0.69411	1839.5	2559.9	151.22	22.96	36.67	185.4
100	0.67764	1881.6	2619.4	151.82	22.69	35.94	187.8
102	0.65894	1931.7	2690.5	152.53	22.44	35.22	190.6
104	0.64154	1981.0	2760.4	153.21	22.25	34.64	193.3
106	0.62528	2029.5	2829.2	153.86	22.09	34.15	195.9
108	0.61003	2077.4	2897.0	154.50	21.96	33.74	198.4
110	0.59567	2124.8	2964.1	155.11	21.85	33.38	200.9
112	0.58212	2171.6	3030.6	155.71	21.75	33.06	203.3
114	0.56928	2218.1	3096.4	156.29	21.67	32.79	205.7
116	0.55710	2264.3	3161.8	156.86	21.60	32.54	208.0
118	0.54553	2310.1	3226.6	157.42	21.53	32.32	210.3
120	0.53450	2355.6	3291.0	157.96	21.47	32.12	212.5
122	0.52397	2400.9	3355.1	158.49	21.42	31.94	214.7
124	0.51392	2445.9	3418.8	159.00	21.37	31.77	216.8
126	0.50429	2490.7	3482.2	159.51	21.33	31.62	218.9
128	0.49506	2535.3	3545.3	160.01	21.29	31.48	221.0
130	0.48621	2579.8	3608.1	160.50	21.26	31.36	223.0
132	0.47771	2624.1	3670.7	160.97	21.22	31.24	225.1

付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
134	0.46953	2668.2	3733.1	161.44	21.19	31.13	227.1
136	0.46166	2712.2	3795.3	161.90	21.17	31.03	229.0
138	0.45407	2756.1	3857.2	162.36	21.14	30.94	231.0
140	0.44676	2799.9	3919.0	162.80	21.12	30.85	232.9
142	0.43970	2843.5	3980.6	163.24	21.10	30.77	234.8
144	0.43288	2887.1	4042.1	163.67	21.08	30.70	236.6
146	0.42628	2930.5	4103.4	164.09	21.06	30.62	238.5
148	0.41990	2973.9	4164.6	164.51	21.04	30.56	240.3
150	0.41373	3017.1	4225.7	164.92	21.02	30.50	242.1
155	0.39911	3125.0	4377.8	165.91	20.99	30.36	246.6
160	0.38556	3232.5	4529.3	166.87	20.96	30.24	250.9
165	0.37296	3339.6	4680.2	167.80	20.93	30.13	255.2
170	0.36120	3446.3	4830.6	168.70	20.91	30.04	259.3
175	0.35019	3552.9	4980.6	169.57	20.89	29.96	263.4
180	0.33987	3659.1	5130.3	170.41	20.88	29.89	267.4
185	0.33017	3765.2	5279.6	171.23	20.86	29.83	271.3
190	0.32103	3871.1	5428.6	172.03	20.85	29.77	275.2
195	0.31240	3976.8	5577.3	172.80	20.84	29.72	279.0
200	0.30424	4082.4	5725.8	173.55	20.83	29.68	282.7
210	0.28918	4293.2	6022.2	175.00	20.82	29.60	290.0
220	0.27558	4503.6	6317.9	176.37	20.81	29.54	297.0
230	0.26323	4713.6	6613.1	177.69	20.80	29.49	303.9
240	0.25197	4923.4	6907.8	178.94	20.80	29.45	310.6
250	0.24165	5133.0	7202.1	180.14	20.80	29.42	317.2
260	0.23216	5342.4	7496.1	181.29	20.80	29.39	323.6
270	0.22340	5551.8	7789.9	182.40	20.80	29.37	329.8
280	0.21529	5761.0	8083.5	183.47	20.81	29.35	336.0
290	0.20775	5970.2	8376.9	184.50	20.81	29.34	342.0
298.15	0.20199	6140.7	8616.0	185.31	20.82	29.34	346.8
300	0.20073	6179.4	8670.3	185.50	20.82	29.33	347.9
310	0.19418	6388.7	8963.6	186.46	20.84	29.33	353.6
320	0.18804	6598.0	9257.0	187.39	20.85	29.33	359.3
330	0.18229	6807.4	9550.3	188.29	20.87	29.34	364.9
340	0.17688	7016.9	9843.7	189.17	20.89	29.35	370.3
350	0.17178	7226.6	10137	190.02	20.91	29.36	375.7

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
360	0.16697	7436.5	10431	190.85	20.93	29.38	381.0
370	0.16243	7646.6	10725	191.65	20.96	29.39	386.2
380	0.15813	7856.9	11019	192.43	20.99	29.42	391.3
390	0.15405	8067.5	11313	193.20	21.02	29.44	396.4
400	0.15018	8278.4	11608	193.95	21.05	29.47	401.4
450	0.13343	9338.2	13085	197.43	21.26	29.65	425.1
500	0.12006	10409	14574	200.56	21.51	29.89	447.4
550	0.10913	11493	16075	203.42	21.81	30.17	468.3
600	0.10003	12593	17591	206.06	22.13	30.49	488.1
650	0.092338	13709	19124	208.51	22.47	30.82	506.9
700	0.085744	14842	20673	210.81	22.82	31.16	524.9
750	0.080030	15992	22240	212.97	23.17	31.50	542.1
800	0.075032	17160	23824	215.02	23.51	31.84	558.8
900	0.066702	19544	27040	218.80	24.15	32.48	590.5
1000	0.060038	21990	30318	222.26	24.74	33.06	620.5
1100	0.054585	24490	33650	225.43	25.25	33.57	649.0
1200	0.050041	27038	37030	228.37	25.70	34.02	676.3
1300	0.046196	29629	40452	231.11	26.09	34.41	702.6
1400	0.042900	32255	43910	233.68	26.43	34.75	727.9
1500	0.040043	34913	47400	236.08	26.72	35.04	752.4
1600	0.037542	37599	50917	238.35	26.98	35.30	776.1
1700	0.035336	40308	54458	240.50	27.20	35.52	799.2
1800	0.033375	43038	58020	242.54	27.40	35.71	821.6
1900	0.031620	45787	61600	244.47	27.57	35.88	843.5
2000	0.030040	48551	65195	246.32	27.72	36.03	864.8
	1	MPa	isobar				
59.93	33.183	-4729.0	-4698.8	70.68	34.91	56.27	1047.6
60	33.174	-4725.0	-4694.9	70.75	34.89	56.26	1047.0
62	32.890	-4613.0	-4582.6	72.59	34.26	56.04	1029.5
64	32.604	-4501.4	-4470.7	74.36	33.69	55.87	1011.8
66	32.316	-4390.0	-4359.1	76.08	33.15	55.76	994.0
68	32.024	-4278.9	-4247.6	77.74	32.66	55.69	976.1
70	31.730	-4167.8	-4136.3	79.36	32.20	55.66	958.0
72	31.432	-4056.8	-4025.0	80.93	31.77	55.67	939.8
74	31.130	-3945.7	-3913.6	82.45	31.36	55.72	921.5

付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
76	30.824	-3834.5	-3802.1	83.94	30.98	55.81	903.0
78	30.514	-3723.1	-3690.3	85.39	30.62	55.95	884.3
80	30.199	-3611.4	-3578.3	86.81	30.28	56.12	865.5
82	29.879	-3499.3	-3465.8	88.20	29.96	56.34	846.5
84	29.554	-3386.7	-3352.8	89.56	29.65	56.61	827.2
86	29.222	-3273.5	-3239.3	90.89	29.36	56.93	807.8
88	28.883	-3159.7	-3125.1	92.21	29.09	57.31	788.0
90	28.537	-3045.1	-3010.0	93.50	28.82	57.75	768.0
92	28.182	-2929.5	-2894.0	94.77	28.58	58.26	747.6
94	27.818	-2812.9	-2776.9	96.03	28.34	58.86	726.9
96	27.443	-2695.0	-2658.5	97.28	28.12	59.55	705.8
98	27.056	-2575.6	-2538.6	98.52	27.91	60.35	684.1
100	26.656	-2454.5	-2417.0	99.74	27.71	61.29	661.9
102	26.240	-2331.5	-2293.4	100.97	27.53	62.40	639.0
104	25.805	-2206.0	-2167.3	102.19	27.37	63.72	615.3
106	25.349	-2077.7	-2038.3	103.42	27.23	65.31	590.6
106.22	25.297	-2063.4	-2023.9	103.56	27.21	65.51	587.8
108.1	1.3813	1883.7	2607.7	146.82	24.43	44.12	185.7
110	1.3362	1941.1	2689.5	147.57	23.87	42.16	189.1
112	1.2934	1999.1	2772.2	148.31	23.45	40.59	192.4
114	1.2546	2055.0	2852.1	149.02	23.12	39.37	195.6
116	1.2190	2109.5	2929.8	149.70	22.86	38.37	198.6
118	1.1861	2162.6	3005.7	150.35	22.65	37.54	201.5
120	1.1556	2214.7	3080.1	150.97	22.47	36.84	204.3
122	1.1271	2265.9	3153.2	151.57	22.32	36.24	207.0
124	1.1004	2316.4	3225.1	152.16	22.19	35.72	209.6
126	1.0753	2366.1	3296.1	152.73	22.08	35.26	212.1
128	1.0517	2415.3	3366.2	153.28	21.98	34.85	214.6
130	1.0293	2464.0	3435.5	153.82	21.89	34.48	217.0
132	1.0081	2512.1	3504.1	154.34	21.81	34.15	219.3
134	0.98792	2559.9	3572.1	154.85	21.74	33.86	221.6
136	0.96873	2607.3	3639.6	155.35	21.68	33.59	223.9
138	0.95043	2654.4	3706.5	155.84	21.62	33.34	226.1
140	0.93295	2701.1	3773.0	156.32	21.57	33.12	228.3
142	0.91622	2747.5	3839.0	156.79	21.52	32.91	230.4

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
144	0.90019	2793.7	3904.6	157.25	21.47	32.72	232.5
146	0.88480	2839.7	3969.9	157.70	21.43	32.54	234.5
148	0.87002	2885.4	4034.8	158.14	21.39	32.38	236.6
150	0.85581	2930.9	4099.4	158.57	21.36	32.23	238.6
155	0.82252	3043.9	4259.7	159.62	21.28	31.90	243.4
160	0.79205	3155.9	4418.4	160.63	21.21	31.61	248.2
165	0.76404	3267.1	4575.9	161.60	21.16	31.37	252.7
170	0.73815	3377.5	4732.2	162.53	21.11	31.16	257.2
175	0.71414	3487.3	4887.6	163.43	21.07	30.98	261.5
180	0.69179	3596.6	5042.1	164.30	21.04	30.83	265.8
185	0.67091	3705.4	5195.9	165.15	21.01	30.69	269.9
190	0.65136	3813.8	5349.0	165.96	20.99	30.57	273.9
195	0.63301	3921.8	5501.5	166.76	20.96	30.46	277.9
200	0.61573	4029.5	5653.6	167.53	20.95	30.36	281.8
210	0.58404	4244.1	5956.3	169.00	20.91	30.19	289.4
220	0.55562	4457.8	6257.6	170.40	20.89	30.06	296.7
230	0.52998	4670.8	6557.6	171.74	20.87	29.95	303.8
240	0.50671	4883.1	6856.7	173.01	20.86	29.86	310.7
250	0.48547	5095.0	7154.9	174.23	20.85	29.78	317.4
260	0.46601	5306.5	7452.4	175.39	20.85	29.72	323.9
270	0.44810	5517.7	7749.3	176.52	20.85	29.67	330.3
280	0.43156	5728.6	8045.8	177.59	20.85	29.63	336.5
290	0.41623	5939.4	8341.9	178.63	20.85	29.59	342.6
298.15	0.40454	6111.1	8583.0	179.45	20.86	29.57	347.4
300	0.40198	6150.0	8637.7	179.64	20.86	29.57	348.5
310	0.38870	6360.6	8933.3	180.60	20.87	29.55	354.4
320	0.37628	6571.1	9228.7	181.54	20.88	29.53	360.1
330	0.36465	6781.6	9523.9	182.45	20.89	29.52	365.7
340	0.35374	6992.2	9819.1	183.33	20.91	29.52	371.2
350	0.34347	7202.8	10114	184.19	20.93	29.52	376.7
360	0.33378	7413.6	10410	185.02	20.96	29.52	382.0
370	0.32464	7624.5	10705	185.83	20.98	29.53	387.2
380	0.31600	7835.6	11000	186.62	21.01	29.55	392.4
390	0.30780	8047.0	11296	187.38	21.04	29.56	397.4
400	0.30003	8258.6	11592	188.13	21.07	29.59	402.4

付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
450	0.26646	9321.3	13074	191.63	21.27	29.74	426.3
500	0.23970	10394	14566	194.77	21.53	29.96	448.6
550	0.21785	11481	16071	197.64	21.82	30.23	469.5
600	0.19968	12582	17590	200.28	22.14	30.53	489.3
650	0.18432	13699	19124	202.74	22.48	30.86	508.1
700	0.17116	14833	20675	205.04	22.83	31.19	526.1
750	0.15976	15984	22244	207.20	23.17	31.53	543.3
800	0.14979	17152	23829	209.24	23.51	31.87	560.0
900	0.13317	19538	27047	213.03	24.16	32.50	591.7
1000	0.11988	21985	30326	216.49	24.74	33.07	621.6
1100	0.10900	24486	33660	219.67	25.25	33.58	650.1
1200	0.099939	27035	37041	222.61	25.70	34.03	677.3
1300	0.092267	29626	40464	225.35	26.09	34.42	703.6
1400	0.085690	32253	43923	227.91	26.43	34.75	728.8
1500	0.079989	34911	47413	230.32	26.73	35.05	753.3
1600	0.074999	37597	50931	232.59	26.98	35.30	777.0
1700	0.070596	40307	54472	234.74	27.20	35.52	800.1
1800	0.066681	43037	58034	236.77	27.40	35.71	822.5
1900	0.063178	45786	61614	238.71	27.57	35.88	844.3
2000	0.060025	48550	65210	240.55	27.72	36.03	865.6
5 MPa isobar							
60.64	33.284	-4719.2	-4569.0	70.84	34.90	55.81	1061.5
62	33.098	-4644.3	-4493.2	72.07	34.48	55.64	1050.1
64	32.822	-4534.5	-4382.2	73.84	33.91	55.44	1033.3
66	32.544	-4425.1	-4271.4	75.54	33.38	55.28	1016.4
68	32.264	-4316.0	-4161.0	77.19	32.88	55.17	999.4
70	31.981	-4207.1	-4050.7	78.79	32.42	55.09	982.2
72	31.696	-4098.4	-3940.6	80.34	31.99	55.04	965.1
74	31.408	-3989.7	-3830.5	81.85	31.59	55.03	947.8
76	31.117	-3881.1	-3720.5	83.31	31.21	55.06	930.4
78	30.823	-3772.5	-3610.3	84.74	30.85	55.11	913.0
80	30.526	-3663.8	-3500.0	86.14	30.51	55.20	895.4
82	30.224	-3554.9	-3389.5	87.50	30.19	55.32	877.8
84	29.919	-3445.8	-3278.7	88.84	29.88	55.47	860.0
86	29.609	-3336.4	-3167.6	90.15	29.59	55.66	842.2



## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
88	29.295	-3226.7	-3056.0	91.43	29.31	55.88	824.2
90	28.975	-3116.6	-2944.0	92.69	29.05	56.15	806.0
92	28.650	-3005.9	-2831.4	93.93	28.80	56.45	787.8
94	28.319	-2894.7	-2718.2	95.14	28.55	56.81	769.3
96	27.981	-2782.9	-2604.2	96.34	28.32	57.21	750.7
98	27.636	-2670.2	-2489.3	97.53	28.11	57.67	731.9
100	27.282	-2556.7	-2373.4	98.70	27.90	58.19	712.8
102	26.920	-2442.2	-2256.5	99.86	27.70	58.78	693.5
104	26.548	-2326.6	-2138.3	101.00	27.51	59.45	673.9
106	26.165	-2209.7	-2018.6	102.14	27.33	60.22	654.0
108	25.770	-2091.3	-1897.3	103.28	27.17	61.10	633.7
110	25.361	-1971.3	-1774.1	104.41	27.02	62.10	613.1
112	24.937	-1849.3	-1648.8	105.54	26.88	63.27	592.0
114	24.495	-1725.1	-1520.9	106.67	26.75	64.62	570.3
116	24.032	-1598.2	-1390.2	107.80	26.64	66.20	548.1
118	23.545	-1468.3	-1255.9	108.95	26.55	68.08	525.2
120	23.029	-1334.7	-1117.6	110.11	26.48	70.35	501.4
122	22.479	-1196.6	-974.20	111.30	26.45	73.12	476.7
124	21.886	-1053.1	-824.62	112.52	26.45	76.60	450.9
126	21.239	-902.55	-667.14	113.77	26.50	81.08	423.7
128	20.522	-742.92	-499.28	115.10	26.61	87.09	394.8
130	19.709	-570.84	-317.15	116.51	26.83	95.58	363.8
132	18.755	-380.67	-114.08	118.06	27.20	108.49	330.1
134	17.578	-161.75	122.69	119.84	27.82	130.42	293.2
136	16.002	108.91	421.37	122.05	28.87	173.58	253.1
138	13.691	479.05	844.26	125.14	30.40	253.30	215.3
140	10.967	923.38	1379.3	128.98	30.48	252.23	198.1
142	9.1668	1256.0	1801.4	131.98	28.98	173.71	199.0
144	8.1075	1481.6	2098.3	134.06	27.67	128.08	203.1
146	7.4002	1651.7	2327.3	135.64	26.70	103.20	207.4
148	6.8797	1790.7	2517.5	136.93	25.98	88.05	211.5
150	6.4719	1910.3	2682.9	138.04	25.42	77.95	215.4
155	5.7328	2159.1	3031.3	140.33	24.44	63.14	224.3
160	5.2167	2366.6	3325.1	142.19	23.79	55.07	232.3
165	4.8243	2550.4	3586.8	143.80	23.32	49.97	239.6

付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol·K)	(J/mol·K)	(J/mol·K)	(m/s)
170	4.5099	2718.7	3827.4	145.24	22.96	46.46	246.3
175	4.2492	2876.3	4053.0	146.55	22.68	43.89	252.6
180	4.0275	3025.8	4267.3	147.76	22.46	41.92	258.6
185	3.8354	3169.2	4472.8	148.88	22.27	40.37	264.2
190	3.6664	3307.7	4671.5	149.94	22.11	39.12	269.6
195	3.5161	3442.4	4864.4	150.94	21.98	38.09	274.7
200	3.3809	3573.7	5052.6	151.90	21.86	37.22	279.7
210	3.1467	3828.7	5417.7	153.68	21.68	35.86	289.0
220	2.9495	4075.9	5771.0	155.32	21.54	34.85	297.9
230	2.7803	4317.0	6115.4	156.85	21.44	34.06	306.2
240	2.6327	4553.6	6452.7	158.29	21.35	33.43	314.1
250	2.5025	4786.5	6784.5	159.64	21.29	32.93	321.7
260	2.3864	5016.4	7111.6	160.93	21.23	32.52	329.0
270	2.2820	5244.0	7435.0	162.15	21.19	32.17	336.1
280	2.1876	5469.6	7755.3	163.31	21.16	31.88	342.9
290	2.1015	5693.6	8072.9	164.43	21.14	31.64	349.4
298.15	2.0367	5875.1	8330.0	165.30	21.12	31.47	354.7
300	2.0226	5916.2	8388.2	165.50	21.12	31.43	355.8
310	1.9501	6137.6	8701.6	166.52	21.11	31.26	362.1
320	1.8830	6358.1	9013.4	167.51	21.10	31.11	368.1
330	1.8209	6577.9	9323.8	168.47	21.10	30.98	374.0
340	1.7630	6796.9	9633.0	169.39	21.11	30.86	379.8
350	1.7090	7015.4	9941.2	170.29	21.12	30.77	385.4
360	1.6584	7233.5	10248	171.15	21.13	30.69	391.0
370	1.6109	7451.2	10555	171.99	21.14	30.62	396.4
380	1.5663	7668.7	10861	172.81	21.16	30.57	401.7
390	1.5242	7886.0	11166	173.60	21.19	30.52	406.9
400	1.4844	8103.2	11471	174.37	21.21	30.49	412.0
450	1.3145	9189.5	12993	177.96	21.38	30.42	436.2
500	1.1807	10281	14515	181.16	21.62	30.49	458.6
550	1.0724	11381	16044	184.08	21.90	30.65	479.6
600	0.982722	12494	17582	186.75	22.21	30.88	499.3
650	0.907190	13621	19132	189.24	22.54	31.15	518.0
700	0.842631	14763	20697	191.56	22.88	31.44	535.9
750	0.786782	15921	22276	193.73	23.22	31.74	553.0

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
800	0.737968	17096	23871	195.79	23.56	32.04	569.4
900	0.656671	19491	27105	199.60	24.19	32.64	600.8
1000	0.591639	21945	30397	203.07	24.77	33.18	630.4
1100	0.538403	24453	33739	206.25	25.28	33.67	658.5
1200	0.494002	27007	37128	209.20	25.73	34.10	685.5
1300	0.456397	29602	40557	211.95	26.11	34.47	711.5
1400	0.424131	32233	44021	214.51	26.45	34.80	736.5
1500	0.396139	34894	47516	216.93	26.74	35.09	760.7
1600	0.371622	37583	51037	219.20	27.00	35.33	784.2
1700	0.349969	40295	54582	221.35	27.22	35.55	807.0
1800	0.330705	43027	58146	223.38	27.41	35.74	829.3
1900	0.313455	45777	61729	225.32	27.58	35.91	850.9
2000	0.297917	48543	65327	227.17	27.73	36.05	872.1
10 MPa isobar							
61.52	33.406	-4706.4	-4407.1	71.03	34.89	55.29	1078.4
62	33.343	-4680.5	-4380.6	71.46	34.74	55.22	1074.6
64	33.078	-4572.7	-4270.4	73.21	34.17	54.98	1058.6
66	32.811	-4465.4	-4160.6	74.90	33.64	54.79	1042.6
68	32.543	-4358.5	-4051.2	76.53	33.15	54.63	1026.5
70	32.274	-4251.9	-3942.1	78.12	32.69	54.50	1010.4
72	32.002	-4145.7	-3833.2	79.65	32.26	54.40	994.3
74	31.729	-4039.6	-3724.4	81.14	31.86	54.34	978.1
76	31.454	-3933.7	-3615.8	82.59	31.48	54.30	961.9
78	31.176	-3828.0	-3507.2	84.00	31.13	54.28	945.6
80	30.896	-3722.3	-3398.7	85.37	30.79	54.29	929.4
82	30.613	-3616.7	-3290.1	86.71	30.47	54.32	913.1
84	30.328	-3511.1	-3181.4	88.02	30.16	54.38	896.7
86	30.040	-3405.4	-3072.5	89.30	29.87	54.46	880.4
88	29.749	-3299.6	-2963.5	90.56	29.59	54.57	864.0
90	29.454	-3193.7	-2854.2	91.78	29.32	54.70	847.6
92	29.156	-3087.7	-2744.7	92.99	29.07	54.85	831.1
94	28.855	-2981.4	-2634.8	94.17	28.83	55.04	814.6
96	28.549	-2874.8	-2524.5	95.33	28.59	55.24	798.0
98	28.239	-2767.9	-2413.8	96.47	28.37	55.48	781.4
100	27.924	-2660.7	-2302.6	97.60	28.16	55.75	764.8

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
102	27.604	-2553.0	-2190.8	98.70	27.95	56.05	748.1
104	27.279	-2444.9	-2078.4	99.79	27.76	56.38	731.3
106	26.949	-2336.3	-1965.2	100.87	27.57	56.76	714.5
108	26.612	-2227.1	-1851.3	101.94	27.39	57.17	697.6
110	26.268	-2117.2	-1736.5	102.99	27.22	57.62	680.7
112	25.918	-2006.6	-1620.8	104.03	27.05	58.12	663.6
114	25.559	-1895.2	-1504.0	105.07	26.90	58.68	646.5
116	25.193	-1783.0	-1386.0	106.09	26.75	59.28	629.3
118	24.817	-1669.8	-1266.8	107.11	26.61	59.95	612.1
120	24.432	-1555.5	-1146.2	108.12	26.48	60.69	594.7
122	24.036	-1440.0	-1024.0	109.13	26.35	61.50	577.3
124	23.629	-1323.3	-900.13	110.14	26.24	62.39	559.9
126	23.210	-1205.2	-774.37	111.15	26.13	63.37	542.3
128	22.777	-1085.6	-646.57	112.15	26.03	64.45	524.8
130	22.330	-964.32	-516.50	113.16	25.95	65.64	507.2
132	21.867	-841.24	-383.94	114.17	25.87	66.94	489.7
134	21.388	-716.22	-248.67	115.19	25.80	68.36	472.2
136	20.890	-589.12	-110.43	116.21	25.74	69.91	454.9
138	20.374	-459.79	31.041	117.25	25.69	71.58	437.7
140	19.837	-328.13	175.98	118.29	25.65	73.38	420.9
142	19.279	-194.06	324.62	119.34	25.62	75.28	404.4
144	18.701	-57.593	477.14	120.41	25.59	77.24	388.5
146	18.102	81.191	633.61	121.49	25.57	79.22	373.2
148	17.485	222.05	793.96	122.58	25.55	81.12	358.8
150	16.853	364.58	957.95	123.68	25.52	82.83	345.4
155	15.241	723.56	1379.7	126.45	25.40	85.30	317.4
160	13.686	1072.9	1803.6	129.14	25.17	83.52	298.6
165	12.306	1396.7	2209.3	131.64	24.85	78.39	288.1
170	11.149	1688.4	2585.4	133.88	24.48	71.97	283.4
175	10.201	1949.1	2929.5	135.88	24.12	65.79	282.4
180	9.4244	2183.8	3244.9	137.65	23.78	60.52	283.6
185	8.7817	2397.6	3536.3	139.25	23.49	56.22	286.1
190	8.2418	2595.1	3808.4	140.70	23.24	52.73	289.3
195	7.7814	2779.6	4064.7	142.03	23.01	49.89	292.9
200	7.3834	2953.8	4308.2	143.27	22.82	47.56	296.7

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
210	6.7272	3278.5	4765.0	145.50	22.49	44.00	304.7
220	6.2050	3580.0	5191.6	147.48	22.24	41.45	312.8
230	5.7765	3864.9	5596.1	149.28	22.04	39.54	320.7
240	5.4163	4137.6	5983.9	150.93	21.89	38.08	328.4
250	5.1079	4400.9	6358.6	152.46	21.76	36.92	335.8
260	4.8397	4656.9	6723.1	153.89	21.66	36.00	343.1
270	4.6036	4907.0	7079.2	155.23	21.58	35.24	350.1
280	4.3937	5152.4	7428.4	156.50	21.51	34.62	356.9
290	4.2052	5393.9	7771.9	157.71	21.46	34.09	363.5
298.15	4.0652	5588.3	8048.2	158.65	21.42	33.73	368.7
300	4.0349	5632.2	8110.5	158.86	21.42	33.65	369.9
310	3.8799	5867.7	8445.1	159.96	21.38	33.27	376.1
320	3.7381	6101.0	8776.2	161.01	21.36	32.95	382.2
330	3.6077	6332.3	9104.2	162.02	21.34	32.67	388.1
340	3.4873	6562.0	9429.6	162.99	21.33	32.43	393.8
350	3.3756	6790.4	9752.8	163.92	21.33	32.22	399.5
360	3.2717	7017.5	10074	164.83	21.33	32.03	405.0
370	3.1747	7243.6	10394	165.70	21.33	31.87	410.4
380	3.0838	7468.9	10712	166.55	21.34	31.74	415.7
390	2.9986	7693.5	11028	167.38	21.35	31.62	420.9
400	2.9184	7917.5	11344	168.17	21.37	31.51	426.0
450	2.5785	9032.2	12910	171.86	21.51	31.19	450.0
500	2.3139	10145	14467	175.14	21.73	31.09	472.2
550	2.1011	11263	16022	178.11	21.99	31.14	492.9
600	1.9257	12389	17582	180.82	22.29	31.28	512.4
650	1.7783	13528	19151	183.34	22.61	31.48	530.8
700	1.6526	14680	20731	185.68	22.94	31.72	548.4
750	1.5439	15846	22323	187.87	23.28	31.98	565.2
800	1.4489	17028	23929	189.95	23.61	32.25	581.4
900	1.2908	19435	27182	193.78	24.24	32.79	612.3
1000	1.1643	21898	30487	197.26	24.81	33.31	641.4
1100	1.0607	24413	33841	200.46	25.31	33.77	669.2
1200	0.97412	26973	37239	203.41	25.76	34.18	695.7
1300	0.90074	29573	40675	206.16	26.14	34.54	721.3
1400	0.83771	32208	44146	208.73	26.47	34.86	746.0

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
1500	0.78298	34874	47646	211.15	26.76	35.13	770.0
1600	0.73499	37565	51171	213.42	27.02	35.37	793.2
1700	0.69257	40280	54719	215.57	27.24	35.58	815.7
1800	0.65479	43015	58287	217.61	27.43	35.77	837.7
1900	0.62094	45768	61872	219.55	27.60	35.93	859.2
2000	0.59042	48536	65473	221.40	27.74	36.07	880.1
50 MPa isobar							
68.21	34.266	-4589.7	-3130.6	72.50	34.87	52.36	1196.1
70	34.080	-4504.2	-3037.1	73.85	34.47	52.12	1185.7
72	33.871	-4409.3	-2933.1	75.31	34.05	51.87	1174.0
74	33.663	-4314.9	-2829.6	76.73	33.66	51.63	1162.5
76	33.456	-4221.1	-2726.6	78.10	33.29	51.42	1151.0
78	33.249	-4127.7	-2623.9	79.44	32.93	51.22	1139.7
80	33.042	-4034.9	-2521.7	80.73	32.60	51.03	1128.4
82	32.835	-3942.6	-2419.8	81.99	32.29	50.85	1117.2
84	32.629	-3850.6	-2318.3	83.21	31.98	50.68	1106.1
86	32.424	-3759.2	-2217.1	84.40	31.70	50.52	1095.1
88	32.218	-3668.1	-2116.2	85.56	31.42	50.37	1084.2
90	32.013	-3577.4	-2015.6	86.69	31.16	50.23	1073.4
92	31.809	-3487.2	-1915.2	87.80	30.91	50.09	1062.7
94	31.604	-3397.3	-1815.2	88.87	30.67	49.96	1052.1
96	31.400	-3307.7	-1715.4	89.92	30.44	49.84	1041.7
98	31.197	-3218.6	-1615.8	90.95	30.21	49.72	1031.3
100	30.993	-3129.8	-1516.5	91.95	30.00	49.60	1021.1
102	30.790	-3041.3	-1417.4	92.93	29.79	49.49	1010.9
104	30.588	-2953.2	-1318.5	93.89	29.59	49.39	1000.9
106	30.386	-2865.4	-1219.9	94.83	29.40	49.28	991.0
108	30.184	-2777.9	-1121.4	95.75	29.21	49.18	981.3
110	29.982	-2690.8	-1023.1	96.66	29.03	49.09	971.6
112	29.781	-2604.0	-925.05	97.54	28.86	48.99	962.1
114	29.580	-2517.5	-827.17	98.41	28.69	48.90	952.7
116	29.380	-2431.3	-729.46	99.26	28.53	48.81	943.4
118	29.180	-2345.4	-631.93	100.09	28.37	48.72	934.2
120	28.980	-2259.9	-534.58	100.91	28.21	48.63	925.2
122	28.781	-2174.7	-437.40	101.71	28.06	48.55	916.3

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
124	28.582	-2089.7	-340.39	102.50	27.92	48.46	907.5
126	28.384	-2005.1	-243.55	103.27	27.78	48.38	898.8
128	28.186	-1920.8	-146.87	104.03	27.64	48.30	890.3
130	27.989	-1836.8	-50.350	104.78	27.51	48.22	881.9
132	27.792	-1753.1	46.005	105.52	27.38	48.14	873.6
134	27.596	-1669.7	142.20	106.24	27.26	48.06	865.5
136	27.400	-1586.6	238.23	106.95	27.13	47.98	857.5
138	27.205	-1503.8	334.10	107.65	27.02	47.90	849.6
140	27.010	-1421.3	429.82	108.34	26.90	47.82	841.8
142	26.816	-1339.2	525.37	109.02	26.79	47.74	834.2
144	26.623	-1257.3	620.76	109.69	26.68	47.66	826.8
146	26.430	-1175.8	716.00	110.34	26.57	47.58	819.4
148	26.238	-1094.6	811.06	110.99	26.47	47.49	812.2
150	26.047	-1013.7	905.97	111.63	26.37	47.41	805.1
155	25.572	-812.78	1142.5	113.18	26.13	47.20	788.0
160	25.102	-613.91	1378.0	114.67	25.90	46.99	771.8
165	24.637	-417.08	1612.4	116.12	25.69	46.76	756.4
170	24.179	-222.32	1845.6	117.51	25.49	46.53	741.8
175	23.727	-29.647	2077.6	118.85	25.30	46.29	728.1
180	23.282	160.90	2308.5	120.15	25.13	46.04	715.1
185	22.845	349.31	2538.0	121.41	24.96	45.78	703.0
190	22.415	535.56	2766.2	122.63	24.80	45.51	691.7
195	21.993	719.64	2993.1	123.81	24.65	45.23	681.1
200	21.580	901.54	3218.5	124.95	24.51	44.94	671.2
210	20.780	1258.8	3665.0	127.13	24.25	44.35	653.5
220	20.017	1607.5	4105.4	129.18	24.02	43.73	638.5
230	19.292	1947.8	4539.6	131.11	23.81	43.10	625.7
240	18.605	2280.0	4967.4	132.93	23.63	42.47	615.0
250	17.956	2604.4	5389.0	134.65	23.46	41.85	606.1
260	17.343	2921.5	5804.4	136.28	23.30	41.24	598.8
270	16.766	3231.6	6213.8	137.82	23.17	40.64	592.9
280	16.223	3535.3	6617.4	139.29	23.04	40.07	588.2
290	15.711	3833.0	7015.4	140.69	22.93	39.53	584.5
300	15.230	4125.1	7408.1	142.02	22.84	39.02	581.7
310	14.776	4412.1	7795.9	143.29	22.75	38.53	579.7

## 付録F GERG2008状態方程式に基づく空気の熱物性計算値 (続き)

Temperature	Density	Internal energy	Enthalpy	Entropy	cv	cp	Speed of sound
(K)	(mol/dm <sup>3</sup> )	(J/mol)	(J/mol)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(J/mol-K)	(m/s)
320	14.349	4694.4	8178.9	144.51	22.67	38.08	578.3
330	13.947	4972.4	8557.5	145.67	22.60	37.65	577.6
340	13.567	5246.5	8932.0	146.79	22.54	37.25	577.3
350	13.208	5517.0	9302.7	147.86	22.49	36.89	577.4
360	12.868	5784.2	9669.8	148.90	22.45	36.54	577.9
370	12.546	6048.5	10034	149.90	22.41	36.22	578.6
380	12.242	6310.0	10394	150.86	22.39	35.93	579.7
390	11.952	6569.1	10752	151.79	22.36	35.66	581.0
400	11.678	6826.0	11108	152.69	22.35	35.41	582.5
450	10.486	8083.8	12852	156.80	22.34	34.43	592.0
500	9.5326	9311.6	14557	160.39	22.44	33.81	603.6
550	8.7507	10523	16237	163.59	22.62	33.44	616.2
600	8.0968	11729	17904	166.49	22.84	33.25	629.1
650	7.5407	12934	19564	169.15	23.11	33.19	642.1
700	7.0612	14143	21224	171.61	23.39	33.21	655.1
750	6.6429	15359	22886	173.91	23.69	33.29	668.0
800	6.2742	16584	24553	176.06	23.98	33.41	680.7
900	5.6532	19064	27909	180.01	24.56	33.71	705.7
1000	5.1490	21586	31297	183.58	25.09	34.05	730.0
1100	4.7305	24149	34718	186.84	25.56	34.38	753.6
1200	4.3771	26749	38172	189.84	25.97	34.69	776.6
1300	4.0742	29383	41655	192.63	26.34	34.97	799.1
1400	3.8115	32047	45165	195.23	26.65	35.22	821.0
1500	3.5813	34737	48699	197.67	26.93	35.44	842.4
1600	3.3778	37451	52253	199.97	27.17	35.64	863.3
1700	3.1966	40185	55826	202.13	27.37	35.82	883.8
1800	3.0341	42937	59416	204.18	27.56	35.97	903.8
1900	2.8875	45704	63020	206.13	27.72	36.11	923.4
2000	2.7547	48486	66637	207.99	27.86	36.23	942.7



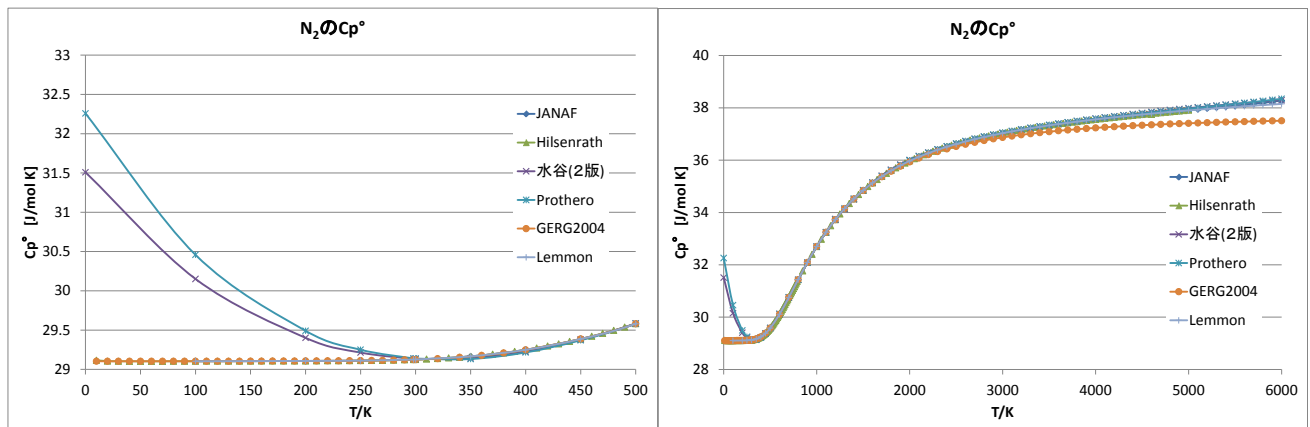


図 4 窒素の理想気体分定圧熱容量の比較

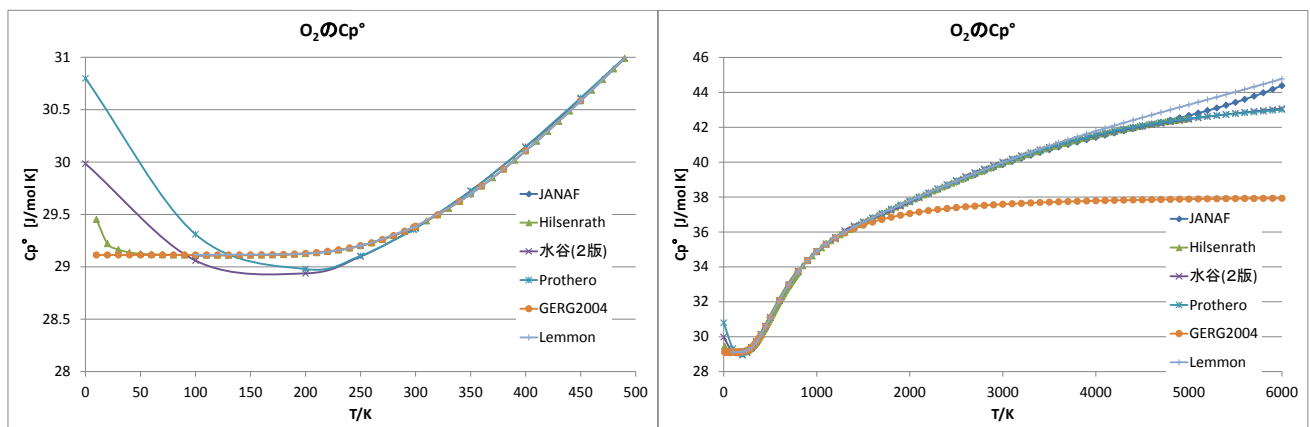


図 5 酸素の理想気体分定圧熱容量の比較

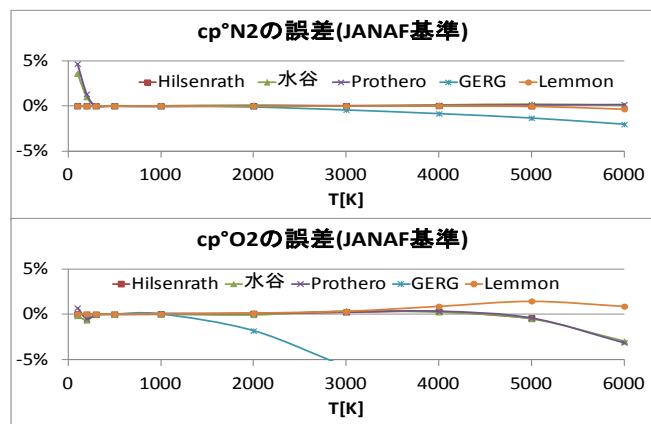


図 6,7 窒素,酸素の理想気体分定圧熱容量の誤差

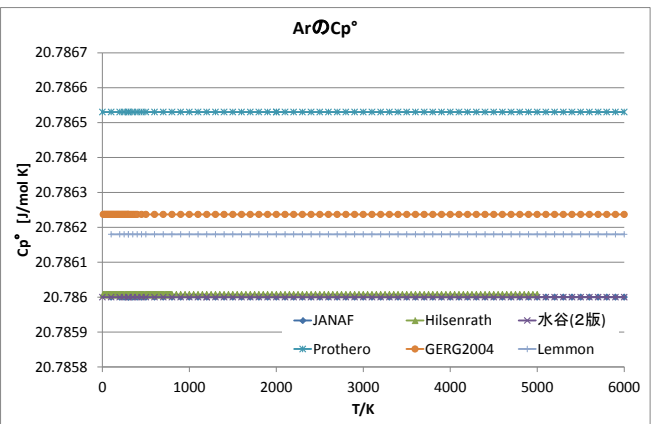


図 8 アルゴンの理想気体分定圧熱容量の比較

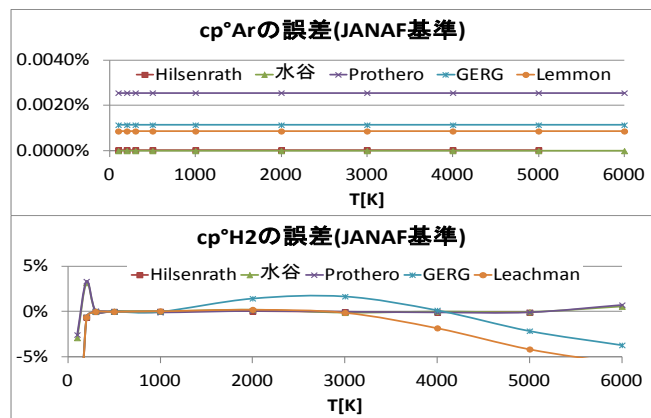


図 9,10 アルゴン,水素の理想気体分定圧熱容量の誤差

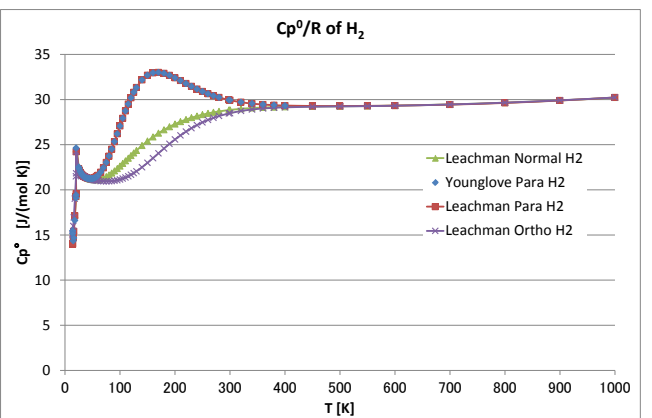


図 11 パラ,オルト,ノーマル水素の理想気体分定圧熱容量の比較

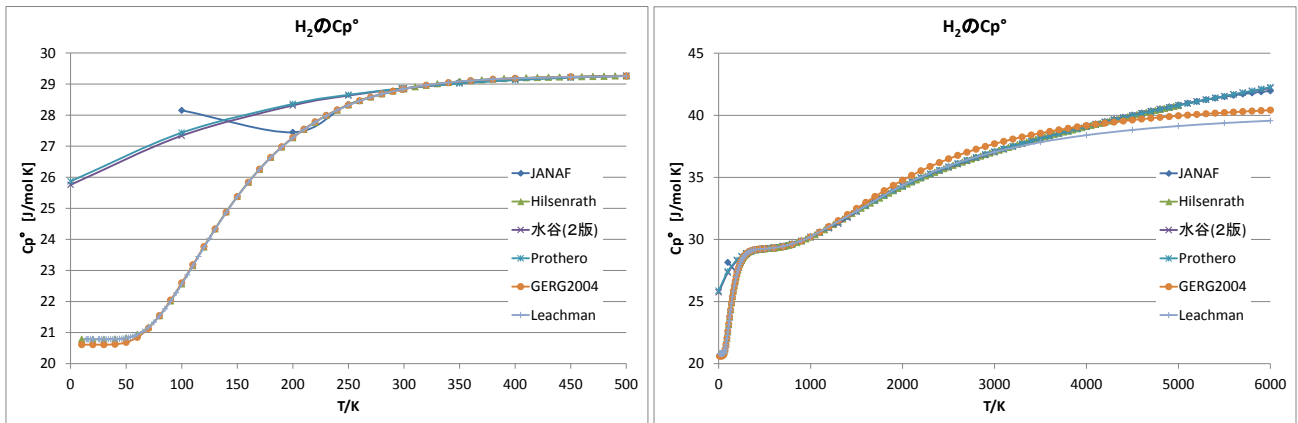


図 12 水素の理想気体分定圧熱容量の比較

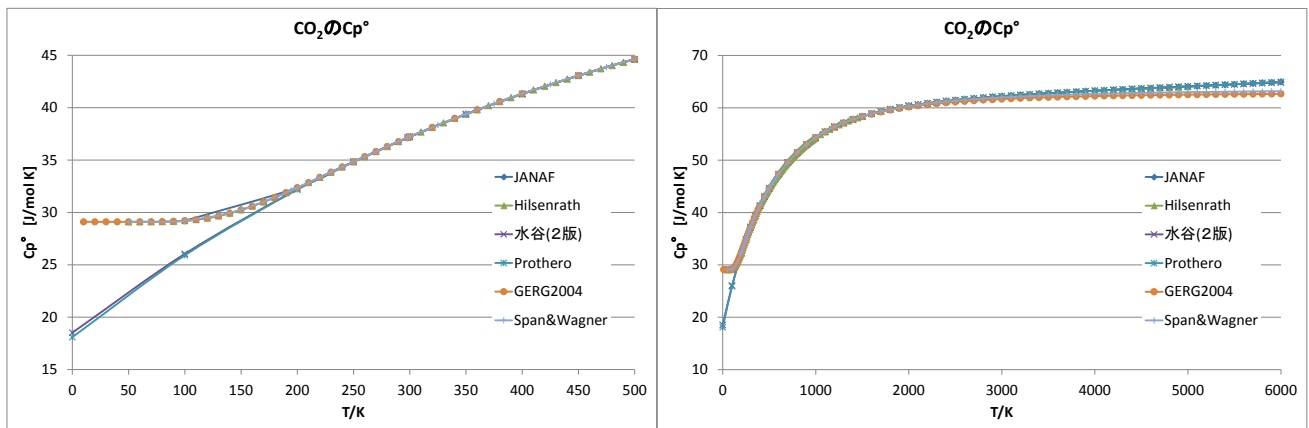


図 13 二酸化炭素の理想気体分定圧熱容量の比較

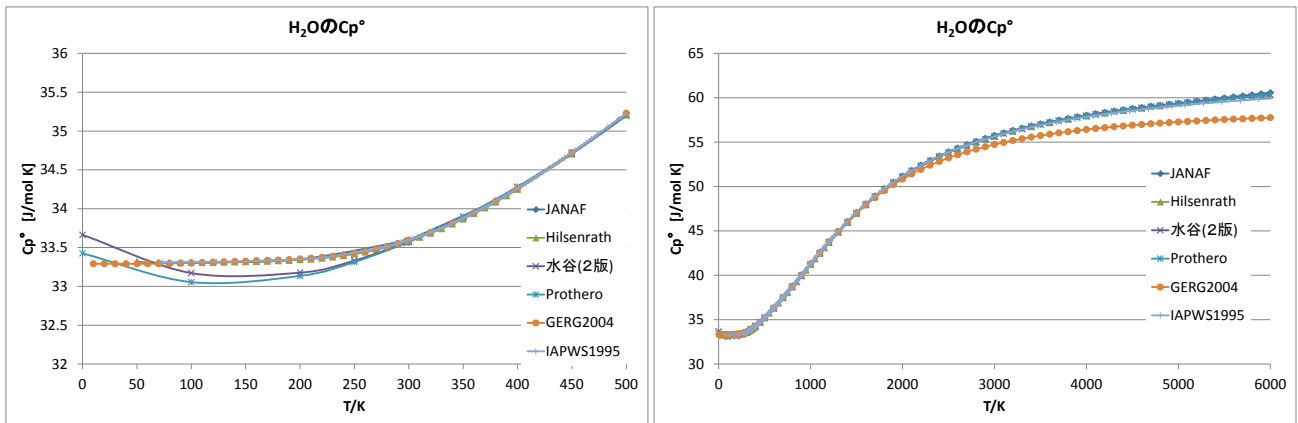


図 14 水の理想気体分定圧熱容量の比較

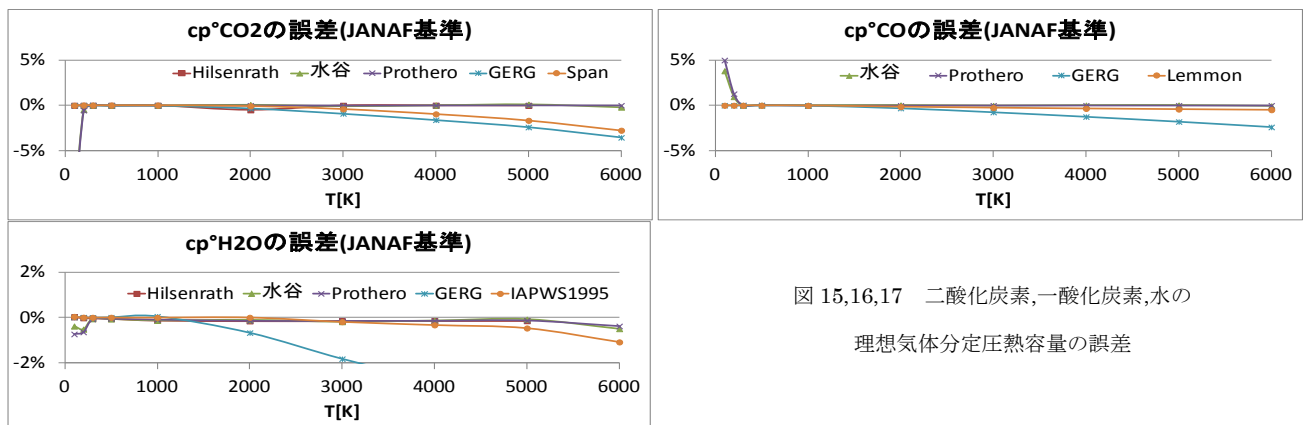


図 15,16,17 二酸化炭素,一酸化炭素,水の理想気体分定圧熱容量の誤差

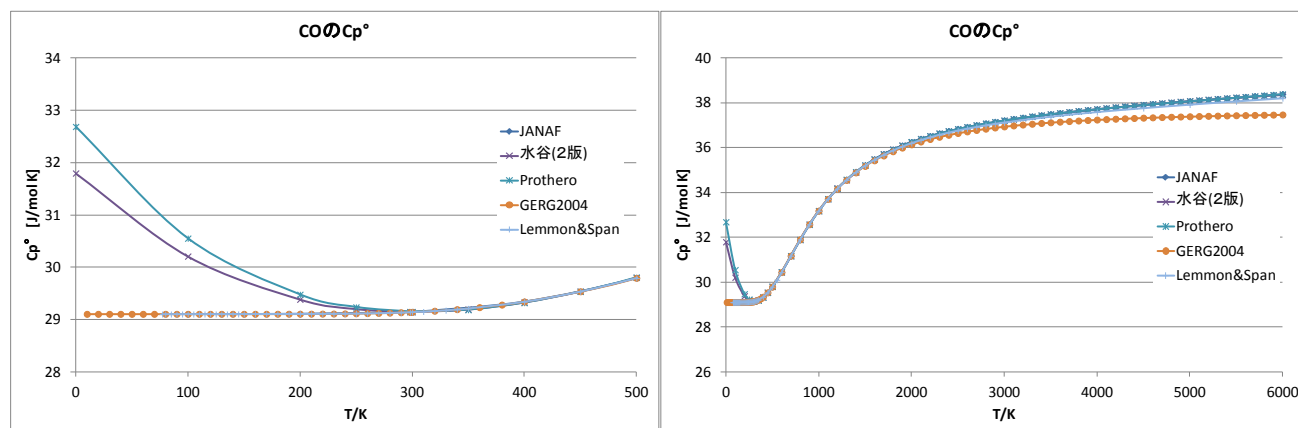


図 18 一酸化炭素の理想気体分定圧熱容量の比較

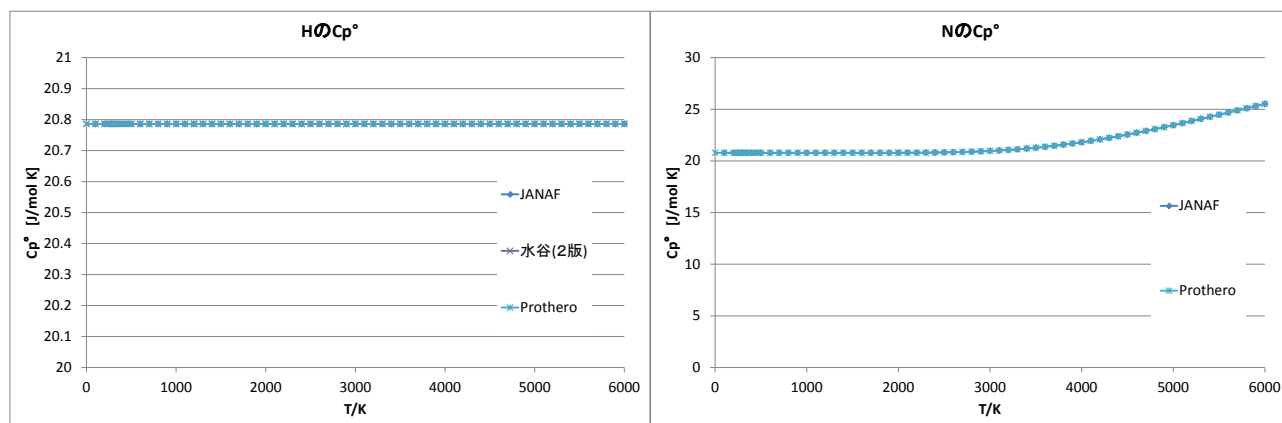


図 19,20 水素原子,窒素原子の理想気体分定圧熱容量の比較

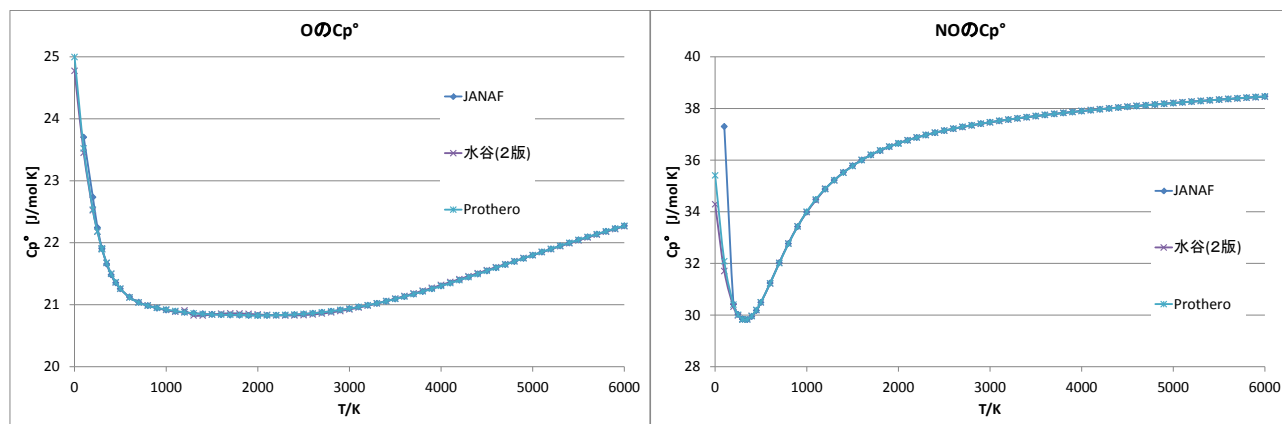


図 21,22 酸素原子,一酸化窒素の理想気体分定圧熱容量の比較

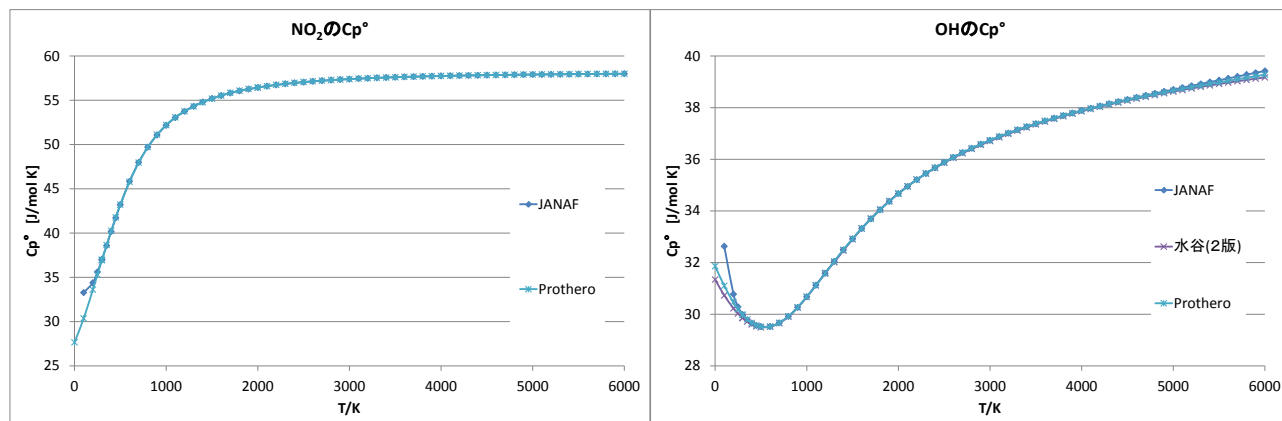


図 23,24 二酸化窒素,水酸基の理想気体分定圧熱容量の比較

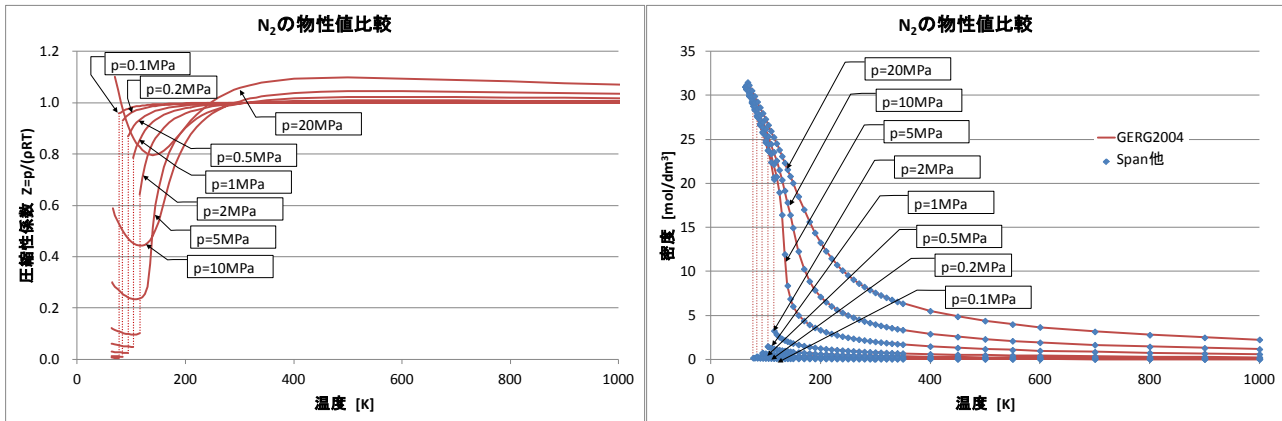


図 25,26 窒素の実在熱物性(圧縮因子および密度)の比較

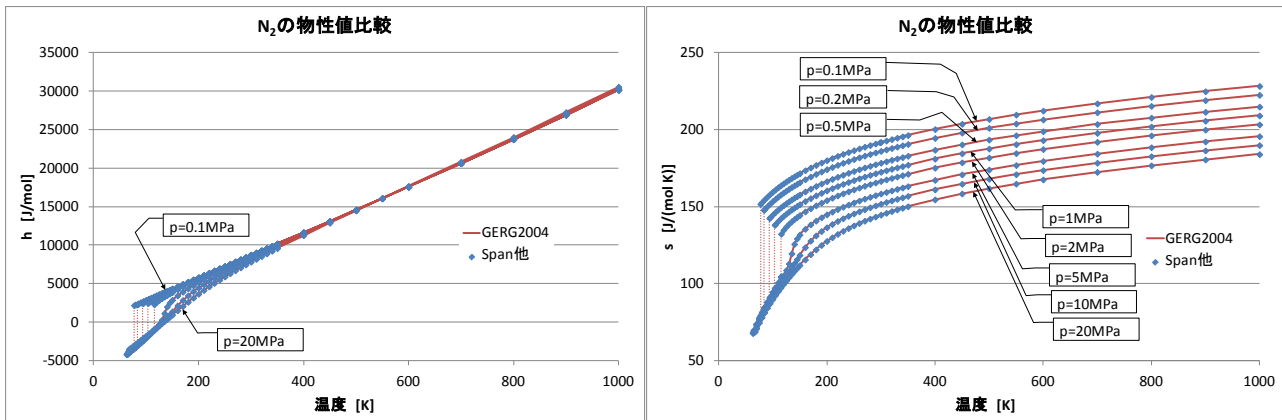


図 27,28 窒素の実在熱物性(エンタルピーおよびエントロピー)の比較

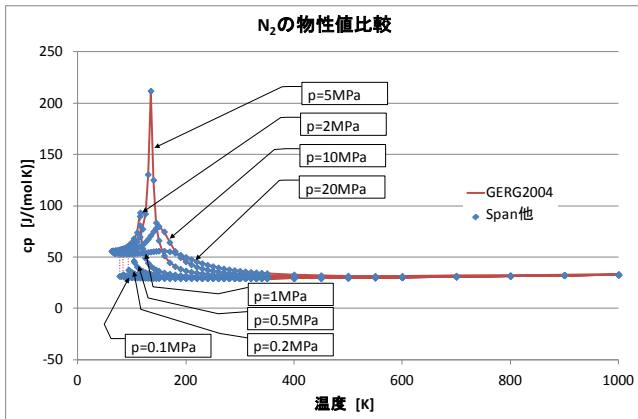


図 29 窒素の実在熱物性(定圧熱容量)の比較

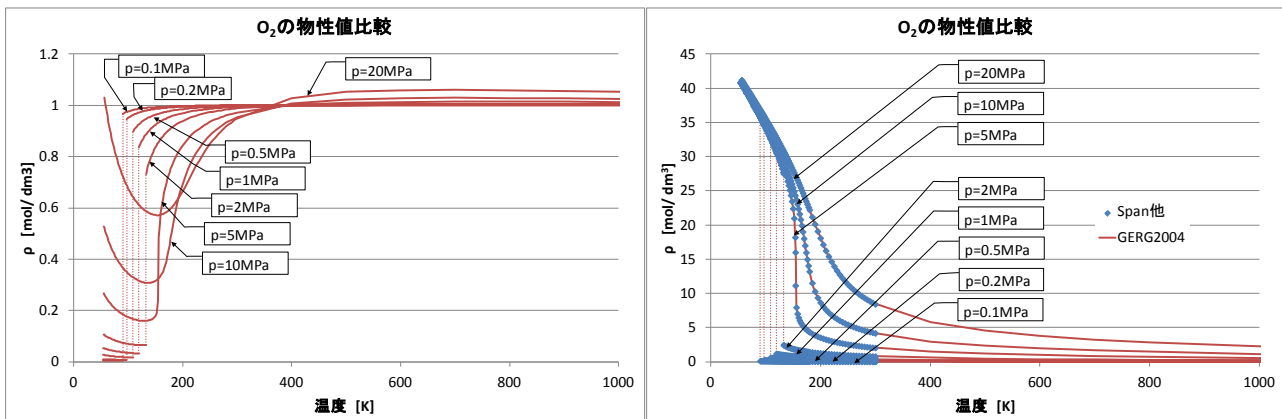


図 30,31 酸素の実在熱物性(圧縮因子および密度)の比較

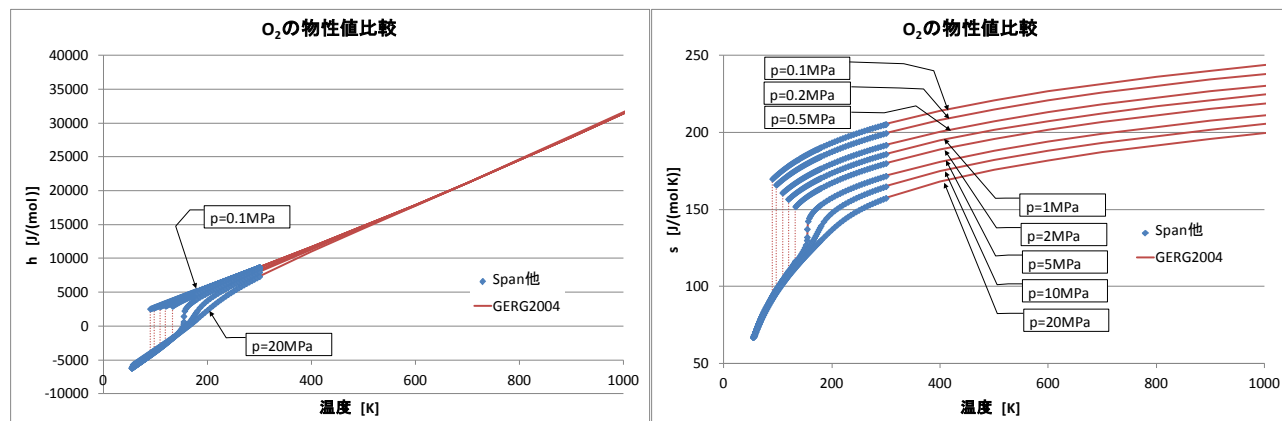


図 32,33 酸素の実在熱物性(エンタルピーおよびエントロピー)の比較

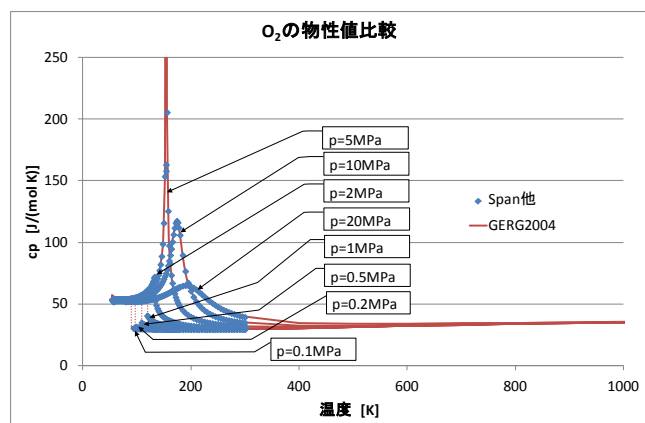


図 34 酸素の実在熱物性(定圧熱容量)の比較

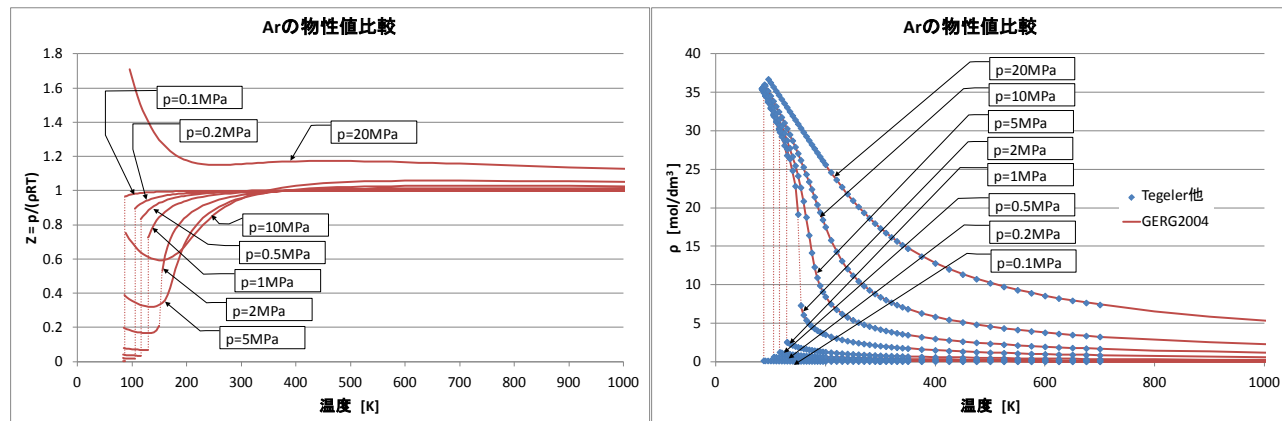


図 35,36 アルゴンの実在熱物性(圧縮因子および密度)の比較

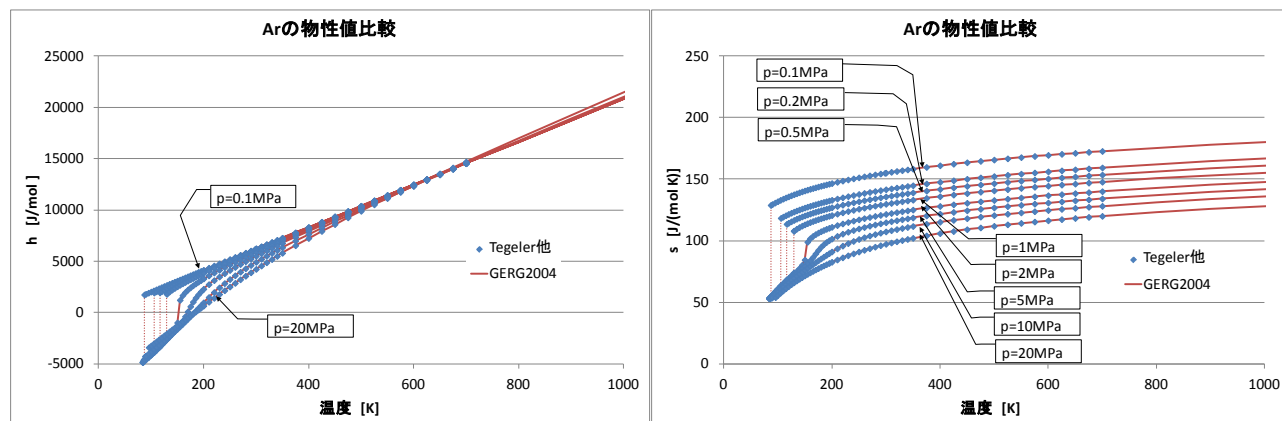


図 37,38 アルゴンの実在熱物性(エンタルピーおよびエントロピー)の比較

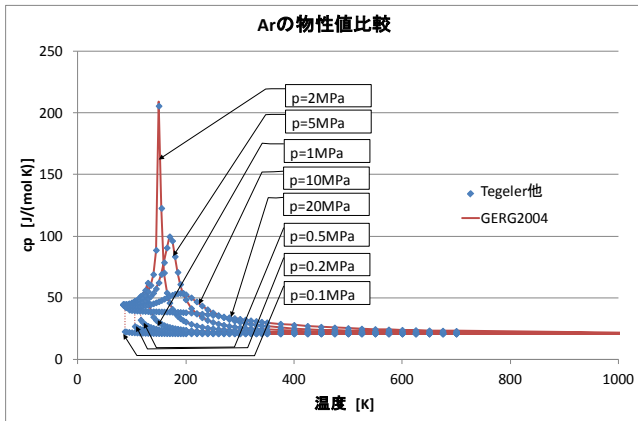


図 39 アルゴンの実在熱物性(定圧熱容量)の比較

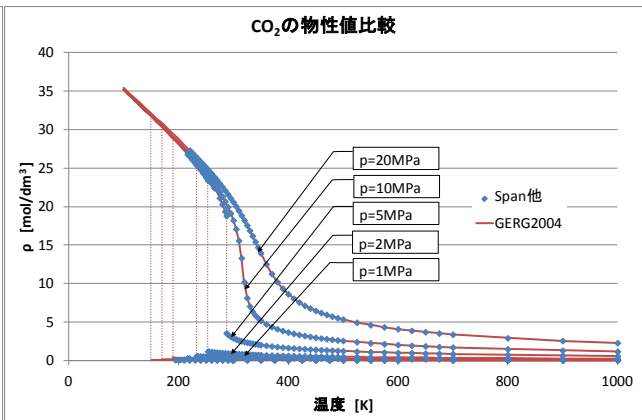
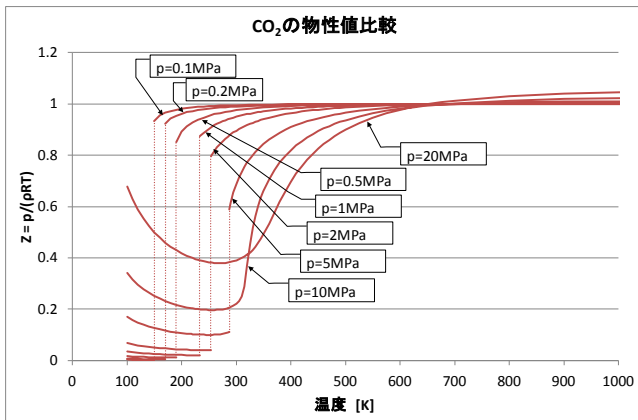


図 40,41 二酸化炭素の実在熱物性(圧縮因子および密度)の比較

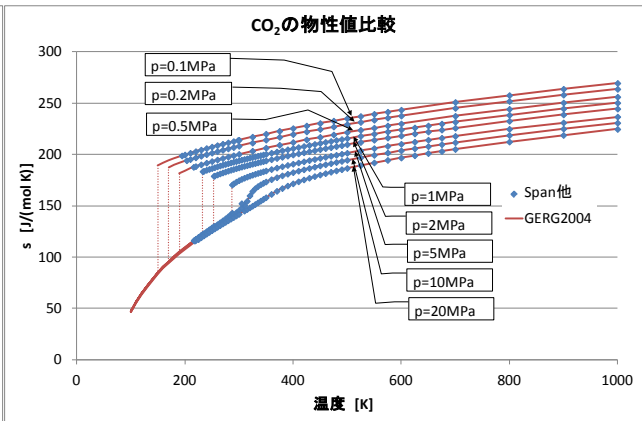
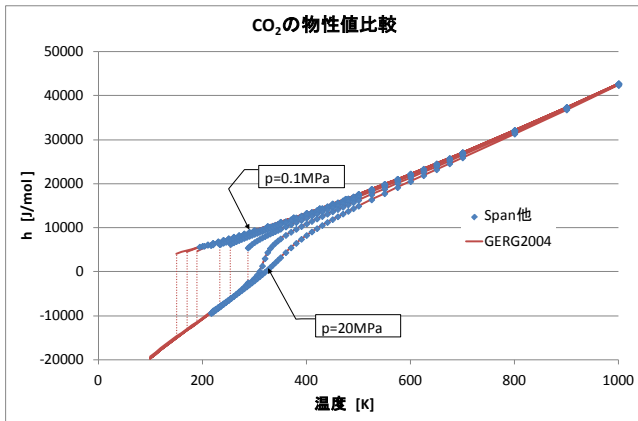


図 42,43 二酸化炭素の実在熱物性(エンタルピーおよびエントロピー)の比較

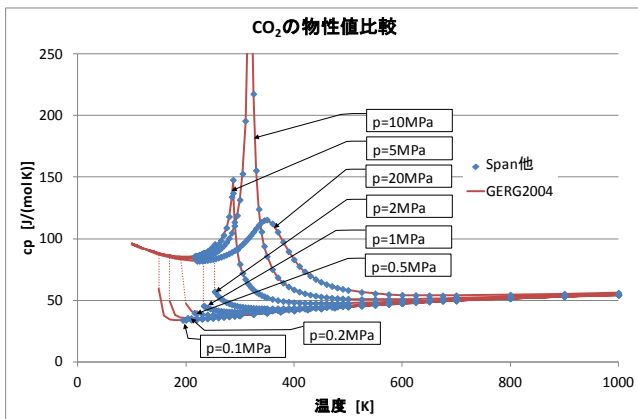


図 44 二酸化炭素の実在熱物性(定圧熱容量)の比較

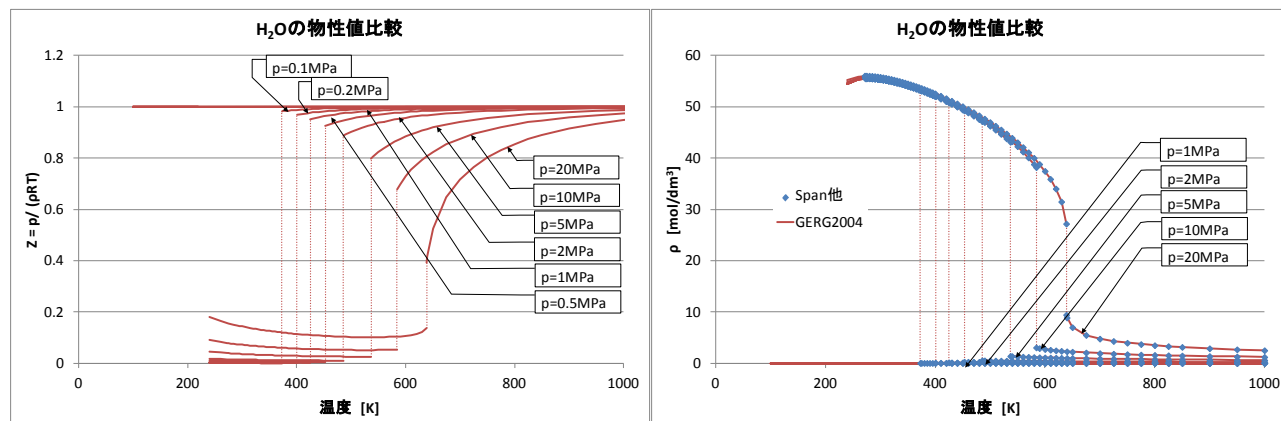


図 45,46 水の実在熱物性(圧縮因子および密度)の比較

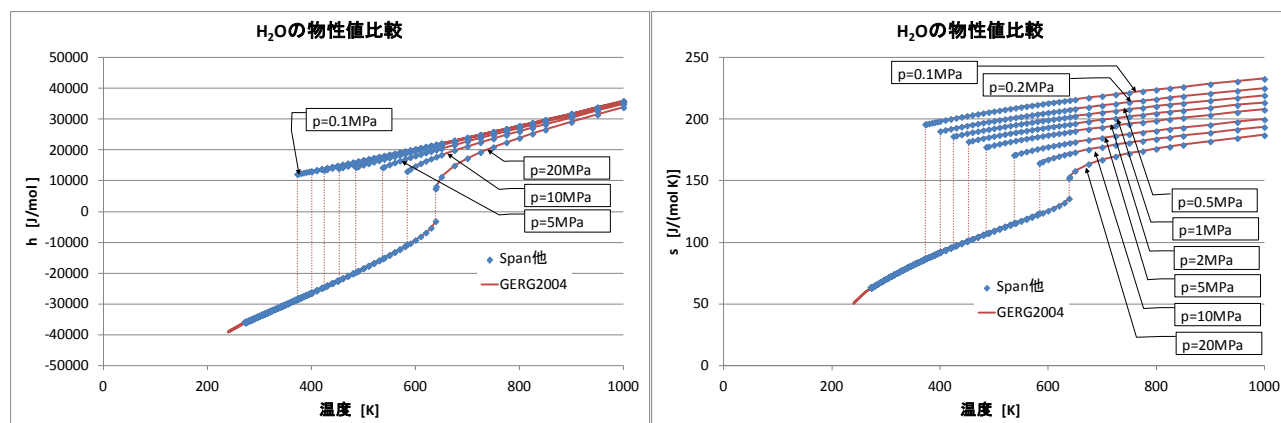


図 47,48 水の実在熱物性(エンタルピーおよびエントロピー)の比較

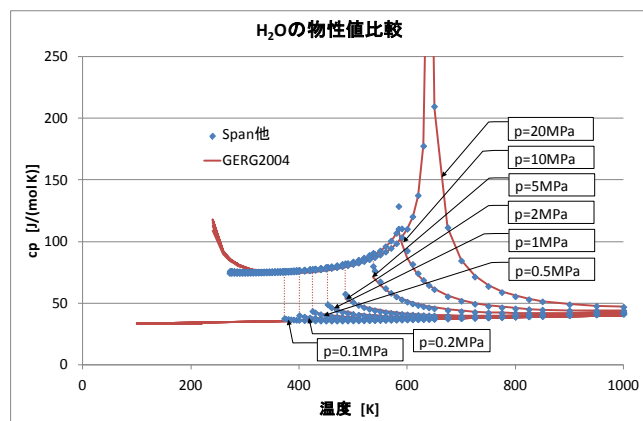


図 49 水の実在熱物性(定圧熱容量)の比較

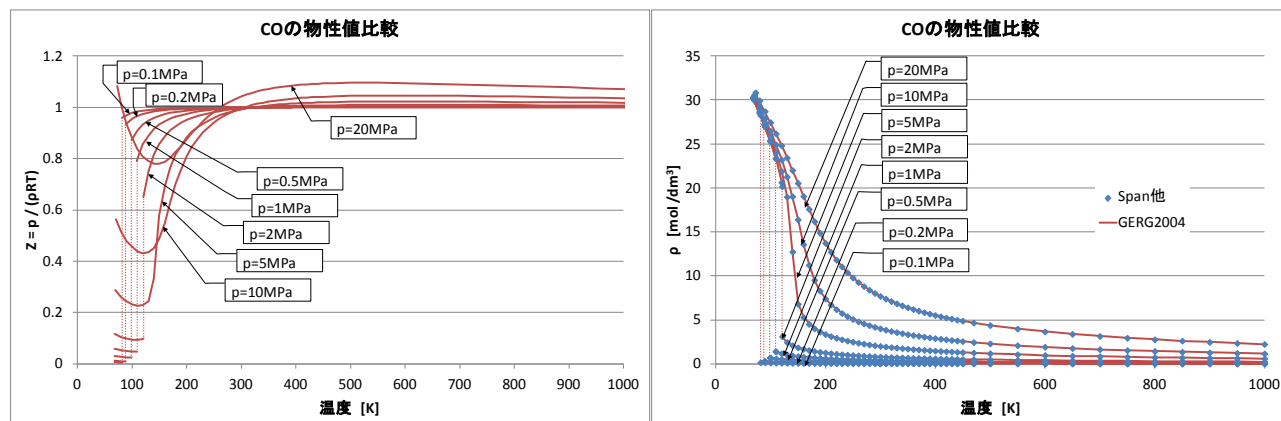


図 50,51 一酸化炭素の実在熱物性(圧縮因子および密度)の比較

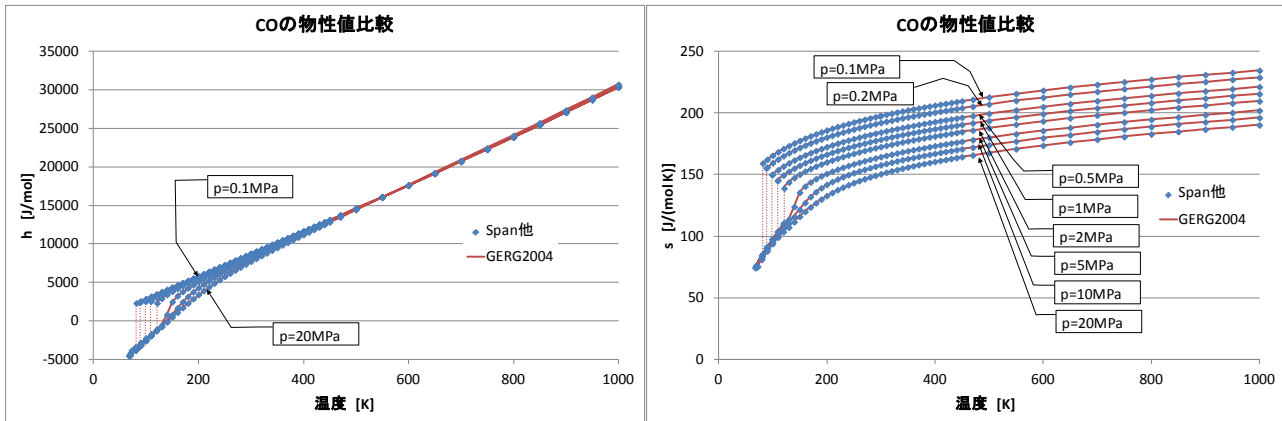


図 52,53 一酸化炭素の実在熱物性(エンタルピーおよびエントロピー)の比較

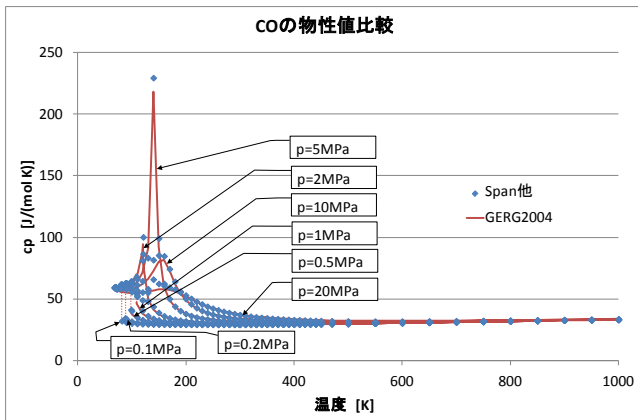


図 54 一酸化炭素の実在熱物性(定圧熱容量)の比較

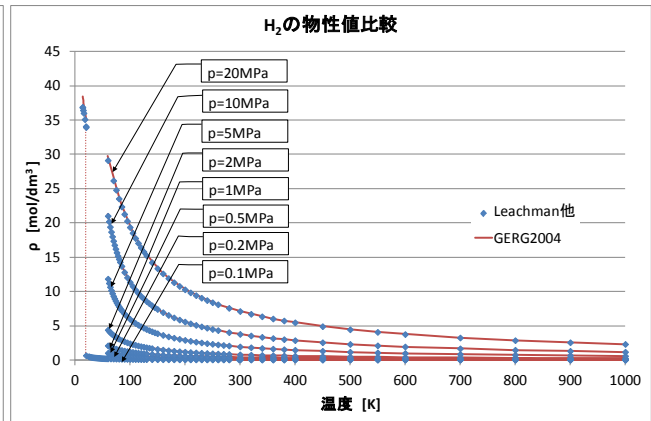
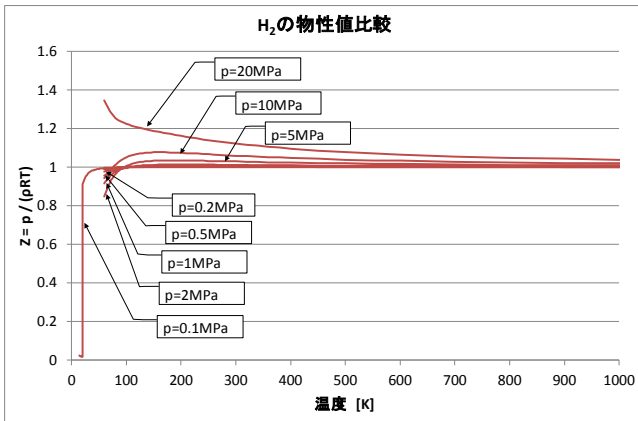


図 55,56 水素の実在熱物性(圧縮因子および密度)の比較

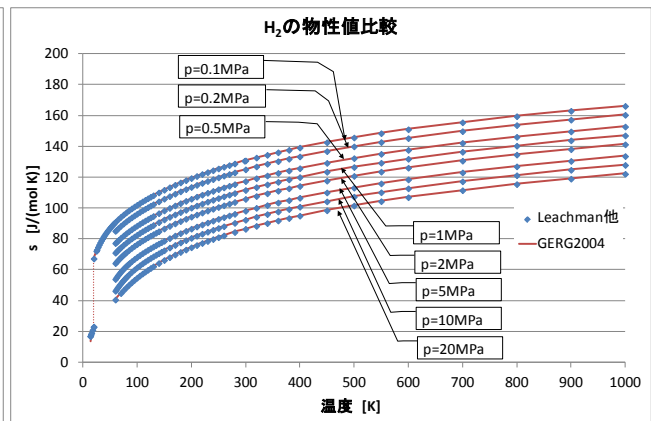
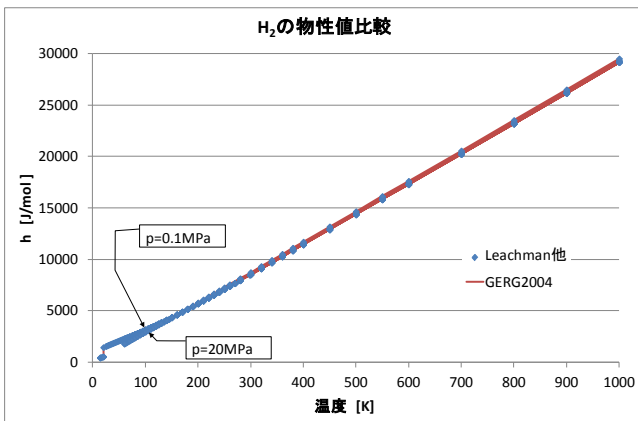


図 57,58 水素の実在熱物性(エンタルピーおよびエントロピー)の比較



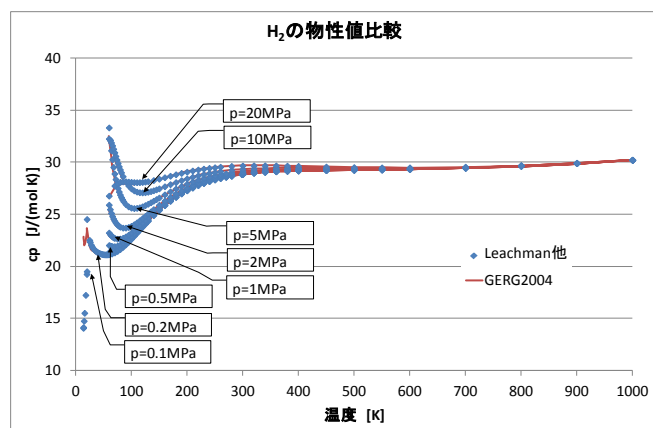


図 59 水素の実在熱物性(定圧熱容量)の比較

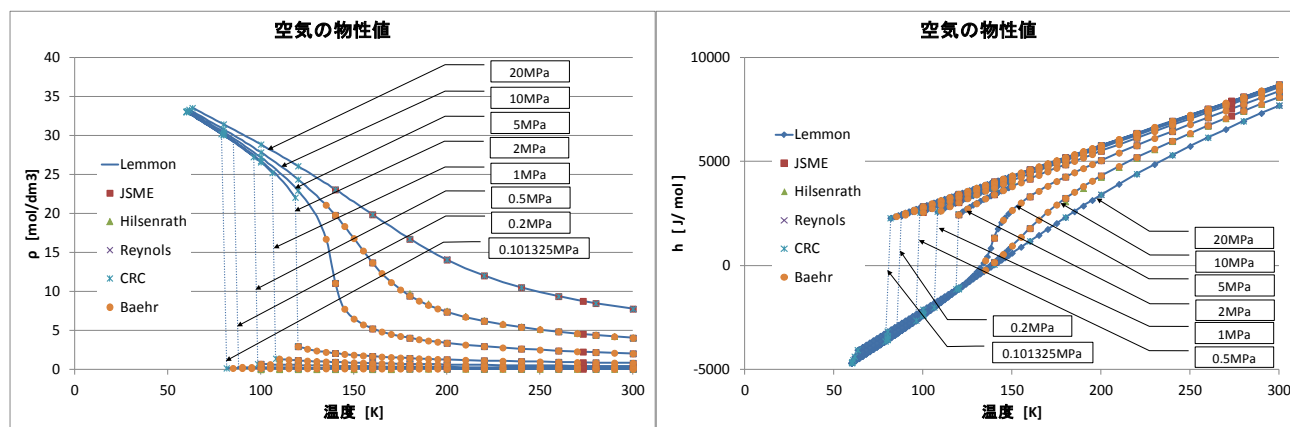


図 60,61 空気の実在熱物性(密度およびエンタルピー)の比較

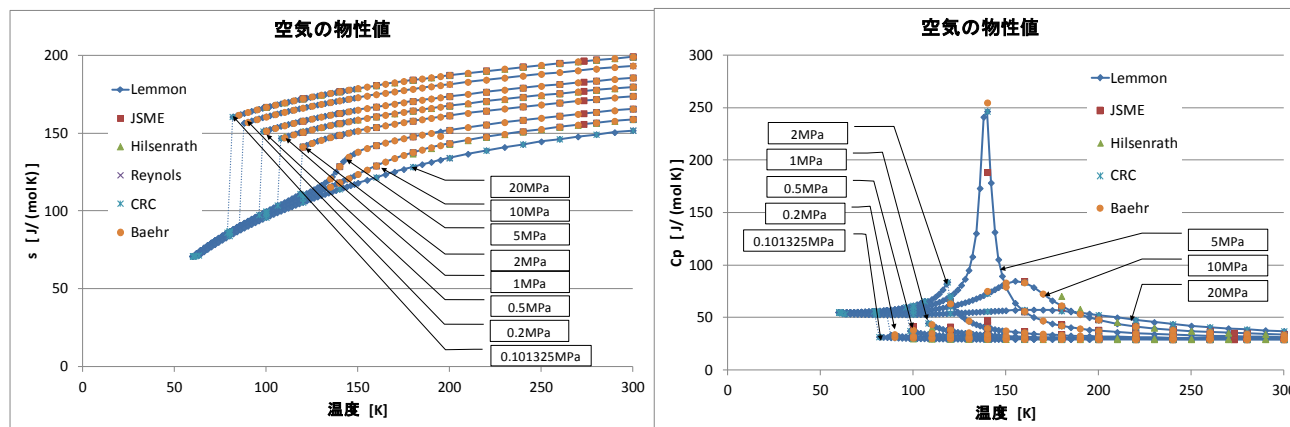


図 62,63 空気の実在熱物性(エントロピーおよび定圧熱容量)の比較

