

圧力 100MPa までの圧縮水域状態式の作成

清水隆晴¹ ・ 小口幸成² ・ 並木孝行²

1 大学院工学研究科機械工学専攻

2 機械工学科

Correlation of the Equation of State for Compressed Water in the Range of Pressure up to 100MPa

Takaharu SHIMIZU¹⁾, Kosei OGUCHI²⁾, Takayuki NAMIKI²⁾

Abstract

The International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) is now providing for the revision of the 1967 IFC Formulation for Industrial Use (IFC-67). In the present study, the candidate equation of state for industrial use was correlated based on the new IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. The equation of state for compressed water is effective in the range of pressure up to 100 MPa and temperature up to 623.15 K. The computing time of the correlated equation is about twice as fast as the IFC-67. This equation is the canonical function of Gibbs energy, and then thermodynamic properties for ordinary water substance, such as specific volume, specific entropy, specific enthalpy, isobaric heat capacity, isochoric heat capacity and speed of sound, were easily obtained with the use of the derivative functions from this equation.

Key Words: Equation of State, Compressed Water, Gibbs Function

1. はじめに

1967年に制定された水および水蒸気の実用国際状態式(IFC-67)⁽¹⁾は、現在、国際水・蒸気性質協会(IAPWS)において以下の問題点に鑑み改訂作業が行われている。

- (1) IFC-67は、制定以来約30年が経ち、最新の実測値に合わない領域があること。
- (2) 1985年に新たな国際骨組蒸気表(IST-85)⁽²⁾がIAPWSにより制定されていること。
- (3) IFC-67は、4つの部分領域に分けられているが、その境界線上で矛盾があること。
- (4) 実用上重要な熱力学的性質である音速が、考慮されていないので計算できないこと。
- (5) IFC-67の関数形は、複雑で改良の余地があり、計算速度の改善の要求があること。
- (6) 1990年に改訂された国際温度目盛⁽³⁾(ITS-90)に対応していないこと。
- (7) 1995年にすでに改訂された新研究用国際状態式⁽⁴⁾との関連づけの必要性があること。

本研究では、これらの問題点を解消した状態式を作成し、国際式として提案することを目的とした。一般に状態式は、密度・温度を独立変数としたヘルムホルツ

ツ型状態式で表すが、熱物性値の実用計算においては圧力・温度から熱物性値を計算する方が便利である。また、ヘルムホルツ型状態式を使って、圧力と温度から他の熱物性値を計算するには繰り返し計算などにより計算するため計算処理が遅く、計算コスト等の面で問題がある。IFC-67は、圧力100MPa、温度273.15~1073.15Kの領域を圧縮水域(Region1)、過熱蒸気域(Region2)、臨界域(Region3)、圧縮水域と臨界域の中間領域(Region4)の各部分領域に分けられ、そのうちRegion1とRegion2の2つの部分領域においては、圧力・温度を独立変数としたギブス型状態式として表されている。

本研究では、このうちRegion1である圧縮水域(圧力100MPaまで、温度623.15Kまで)についてギブス型状態式を作成した。また、関数形についても簡略化し、計算速度に配慮した関数形で作成した。

2. 記号および単位

本稿で用いる記号および単位をつぎのように定める。

P : 圧力, MPa

T : 絶対温度, K

ρ : 密度, kg/dm^3
 v : 比体積, dm^3/kg
 g : 自由エネルギー (ギブズ関数), kJ/kg
 h : 比エンタルピー, kJ/kg
 s : 比エントロピー, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 C_p : 定圧比熱, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 C_v : 定容比熱, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
 w : 音速, m/s
 $\text{Dev. } v$: 比体積の相対偏差, %
 $\text{Dev. } h$: 比エンタルピーの相対偏差, %
 $\text{Dev. } C_p$: 定圧比熱の相対偏差, %
 $\text{Dev. } w$: 音速の相対偏差, %

3. 新実用国際状態式の作成条件

3. 1 領域の分け方

図1は、新実用国際状態式 (略称 NIF) の各部分領域である。IAPWS では、新実用状態式の成立範囲として IFC-67 の範囲に Region 5 として圧力 10 MPa まで温度 2273.15 K までの高温域が追加されている。

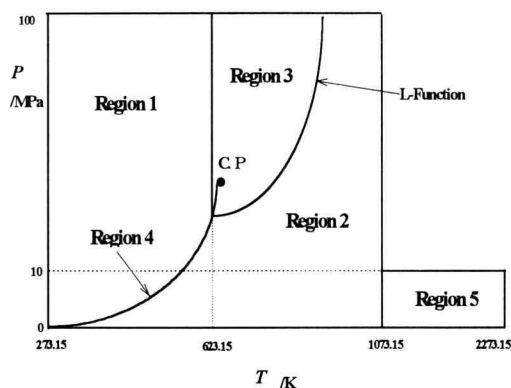


Fig.1 Subregions of NIF for ordinary water substance.

3. 2 基礎データおよび精度

IAPWS では、NIF の基礎データとして、IST-85⁽²⁾、新研究用国際状態式⁽⁴⁾、信頼できる実測値⁽⁵⁾のいずれかとしている。また、NIF の精度は、比体積と比エンタルピーおよび飽和蒸気圧は、IST-85 に示される公差内で基礎データに一致すること、定圧比熱および音速の誤差は、新研究用国際状態式の値に対し、0.5~1 % を目標としている。また、各部分領域間の境界での整合性はプラグ値⁽⁶⁾以内とされている。プラグ値は、IFC-67 作成の際、1965 年の国際フォーミュレーション委員会において定められた推奨値である。表1にプラグ値を示す。

Table 1 Prague values	
$\Delta v / v$	$\pm 0.05 \%$
Δh	$\pm 0.2 \text{ kJ}/\text{kg}$
Δs	$\pm 0.0002 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$\Delta C_p / C_p$	$\pm 1 \%$

3. 3 計算速度の向上と対象関数

計算速度は、対象とする関数の使用頻度で荷重平均し、IFC-67 に対し 3 倍速くする。表2に計算時間の向上の対象関数とその使用頻度を示す。

Table 2 Relative frequency after conversion to 100 %⁽⁶⁾

Region 1 [%]		Region 2 [%]		Region 4 [%]	
$v(P,T)$	2.9	$v(P,T)$	6.1	$T(P)$	30.7
$h(P,T)$	9.7	$h(P,T)$	12.1	$P(T)$	8.0
$s(P,T)$	0.0	$s(P,T)$	1.4	$h'(P)$	4.5
$T(P,h)$	3.5	$v(P,h)$	3.1	$h''(P)$	
$h(P,s)$	1.2	$T(P,h)$	8.5		
		$s(P,h)$	1.7		
		$h(P,s)$	4.9		
		$T(P,s)$	1.7		

また、計算速度の比較は、後述の NIFBENCH と呼ばれる比較計算プログラムにより行うとされており、NIFBENCH のテスト環境は、言語は FORTRAN 77, OS が MS-DOS, CPU は 486DX, 33MHz, コンパイラは、MS-FORTRAN Ver.5.1 (マイクロソフト社) とされている。

4. 基礎データ

Pruss ら⁽⁴⁾による新研究用国際状態式 (略称 NSF) は、最新の实測値に基づいて作成されているが、密度と温度を独立変数としているため実用上の使用に向いていない。本研究では、基礎データとして NSF からの計算値を使用し、温度と圧力を独立変数とした状態式を作成した。

5. 関数形

独立変数および従属変数は、IST-85⁽²⁾に示された各臨界定数を用いた換算量により作成した。表3に各値を示す。また、表4には、各換算状態量を示す。

Table 3 Critical values of IST-85

	Symbol	Values
Critical Pressure	P_c	22.064 MPa
Critical Temperature	T_c	647.096 K
Critical Density	ρ_c	0.322 kg/dm^3
Critical Specific Volume	v_c	$v_c = 1 / \rho_c$

Table 4 Reduced thermodynamic properties

Pressure	$\beta = P / P_c$
Temperature	$\theta = T / T_c$
Gibbs Energy	$\zeta = g / (P_c \cdot v_c)$
Specific Volume	$\chi = v / v_c$
Specific Enthalpy	$\varepsilon = h / (P_c \cdot v_c)$
Specific Entropy	$\sigma = s / (P_c \cdot v_c / T_c)$
Isobaric Heat Capacity	$\phi = C_p / (P_c \cdot v_c / T_c)$
Isochoric Heat Capacity	$\gamma = C_v / (P_c \cdot v_c / T_c)$
Speed of Sound	$\eta = w / (1000 P_c \cdot v_c)^{1/2}$

また、本研究で作成した状態式は、熱力学の一般関係式に基づき、ギブス関数の式を微分することにより他の物性値を求めることができるカノニカル関数である。

6. 状態式の作成

図2は、圧縮水域から湿り蒸気域への等温線を示している。

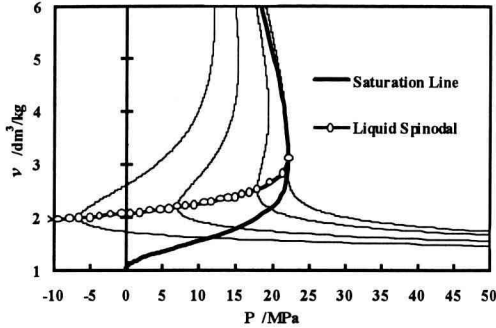


Fig.2 Specific volumes curve on diagram

本研究では、この P - v 線図より、まず $v(P, T)$ の式を相関した。圧縮水域において等温線は図2のような変化を示している。等温線に沿って湿り蒸気域へ徐々に圧力を減圧させるとサブクール領域に入り、湿り蒸気域では図2のような変化を見せる。この圧力最小値は、水のスピノーダル⁷⁾と呼ばれる現象である。スピノーダル現象は液側と蒸気側で2つの極値で示され臨界点では一致する。この極値から各等温線を相関すれば、等温線の変化、特に飽和蒸気圧曲線付近の変化を相関しやすいと考え、スピノーダルの液側の極値を液側の適用限界として相関した。この極値 P_{spn} は、理論的には2次曲線であると考えられているが、本研究では式(1)に示す、4次式として作成した。

$$\alpha = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + a_4\theta^4 \quad (1)$$

ここで、 $\alpha = P_{spn} / P_c$

Table 5 Constants of Eq.(1)

$a_0 = -0.1988535326 \times 10^3$	$a_3 = 0.1209493396 \times 10^4$
$a_1 = 0.8718156971 \times 10^3$	$a_4 = -0.3644515587 \times 10^3$
$a_2 = -0.1517004651 \times 10^4$	

各等温線の比体積と圧力の変化は、図2より、1/3乗が適当かと思われるが、計算速度を考慮し1/4乗とした。これはFORTRANのプログラムでは、1/3乗よりも組み込み関数SQRTを2回用いた1/4乗の方が速い計算が可能なのである^(8,9)。さらに圧力と温度の連続項を補正項として加え、 $v(P, T)$ を相関した。

$v(P, T)$ の式から熱力学の一般関形式を用い、比エンタルピーおよび比エントロピーを求め、両物性値に必要な定数項を水の三重点 (圧力 0.000611657 MPa, 温度 273.16 K) を基準とした値に一致させて決定した。さらにこれらの各物性値からギブス関数の形に整理し

た。式(2)にギブスの自由エネルギー (ギブス関数) の式を示し、表6にその係数を示す。また、 α には、式(1)を代入する。

$$\zeta = \sum_{n=0}^3 A_n \beta^n + A_4 (\beta - \alpha)^{5/4} \quad (2)$$

ただし、

$$A_0 = \sum_{i=0}^4 [a_{0,i} \theta^i] + \sum_{i=1}^7 [a_{0,(i+4)} \theta^{2i+3}]$$

$$A_1 = a_{1,0} \theta^2 + a_{1,1} \theta^4 + a_{1,2} \theta^7 + a_{1,3} \theta^9 + a_{1,4} \theta^{11} + a_{1,5} \theta^{13}$$

$$A_2 = a_{2,0} + a_{2,1} \theta^2 + a_{2,2} \theta^3 + \sum_{i=1}^7 [a_{2,(i+2)} \theta^{2i+2}]$$

$$A_3 = a_{3,0} \theta + a_{3,1} \theta^2 + a_{3,2} \theta^4 + a_{3,3} \theta^6$$

$$A_4 = a_{4,0} + a_{4,1} \theta + \sum_{i=1}^8 [a_{4,(i+1)} \theta^{2i}]$$

Table 6 Constants of Eq.(2)

$a_{0,0} = -0.497312823744006 \times 10^3$	$a_{0,1} = 0.599275127910756 \times 10^4$
$a_{0,2} = -0.3185431683 \times 10^5$	$a_{0,3} = 0.9556387173 \times 10^5$
$a_{0,4} = -0.1666722177 \times 10^6$	$a_{0,5} = 0.1443998775 \times 10^6$
$a_{0,6} = -0.9068374610 \times 10^5$	$a_{0,7} = 0.8197498274 \times 10^5$
$a_{0,8} = -0.6301538269 \times 10^5$	$a_{0,9} = 0.3472853853 \times 10^5$
$a_{0,10} = -0.1175661480 \times 10^5$	$a_{0,11} = 0.1807578764 \times 10^4$
$a_{1,0} = 0.4111547419 \times 10^0$	$a_{1,1} = -0.1115819190 \times 10^2$
$a_{1,2} = 0.1877362857 \times 10^2$	$a_{1,3} = -0.5404293477 \times 10^1$
$a_{1,4} = -0.1477361608 \times 10^2$	$a_{1,5} = 0.9237814660 \times 10^1$
$a_{2,0} = -0.4567843221 \times 10^{-1}$	$a_{2,1} = 0.2185746675 \times 10^1$
$a_{2,2} = -0.1010940619 \times 10^2$	$a_{2,3} = 0.1623203970 \times 10^2$
$a_{2,4} = -0.2282142939 \times 10^2$	$a_{2,5} = 0.3524012506 \times 10^2$
$a_{2,6} = -0.4110573322 \times 10^2$	$a_{2,7} = 0.3301996299 \times 10^2$
$a_{2,8} = -0.1623903942 \times 10^2$	$a_{2,9} = 0.3653819769 \times 10^1$
$a_{3,0} = 0.8651662340 \times 10^{-3}$	$a_{3,1} = -0.2454851854 \times 10^{-2}$
$a_{3,2} = 0.3629035890 \times 10^{-2}$	$a_{3,3} = -0.2242223015 \times 10^{-2}$
$a_{4,0} = 0.8006588552 \times 10^0$	$a_{4,1} = -0.5697282948 \times 10^1$
$a_{4,2} = 0.1310803225 \times 10^2$	$a_{4,3} = -0.3942848848 \times 10^2$
$a_{4,4} = 0.1207183274 \times 10^3$	$a_{4,5} = -0.2468877425 \times 10^3$
$a_{4,6} = 0.3232037486 \times 10^3$	$a_{4,7} = -0.2693481338 \times 10^3$
$a_{4,8} = 0.1339028660 \times 10^3$	$a_{4,9} = -0.3062176670 \times 10^2$

7. 各種熱物性値

7. 1 比体積

比体積は、熱力学の一般関係式に基づき、式(2)を圧力で一回微分した次式(3)の形で表せる。

$$\chi = \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \beta} \right)_\theta \quad (3)$$

式(2)を代入して、次式が求められる。

$$\chi = A_1 + 2A_2\beta + 3A_3\beta^2 + \frac{5}{4}A_5(\beta - \alpha)^{1/4} \quad (4)$$

図3は、IST-85⁽²⁾の格子点における式(4)からの比体積偏差図である。○はNSF⁽⁴⁾の値、 \pm は公差を示す。式(4)の精度は、図3に示すように、圧縮水域においてIST-85の全格子点の370点についてIST-85に示される公差内でNSFの値に一致する。

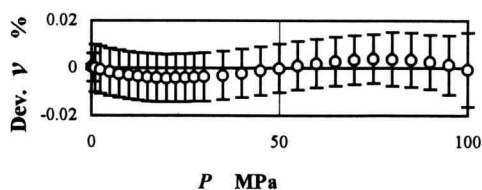
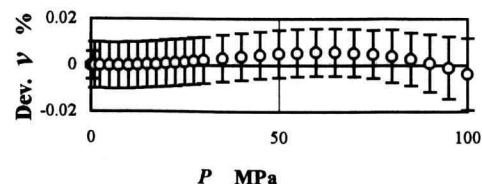
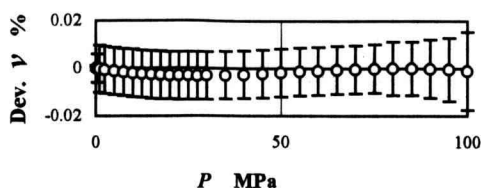
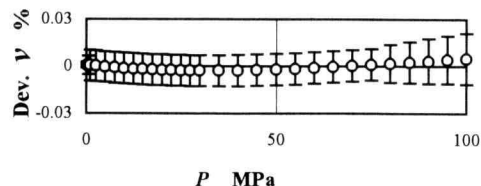
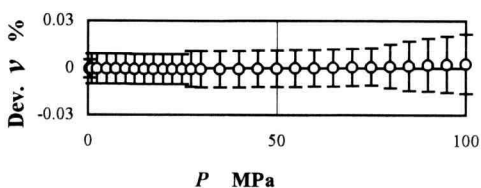
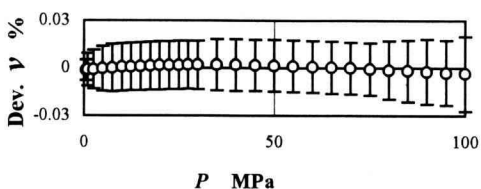
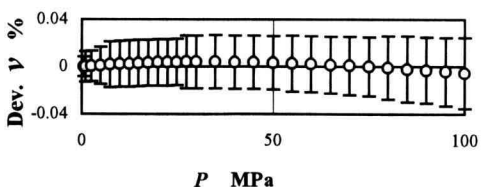
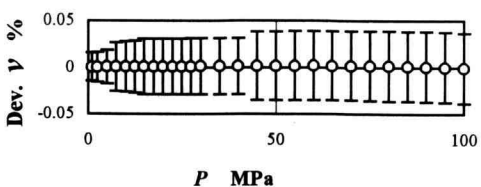
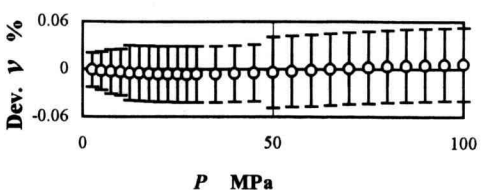
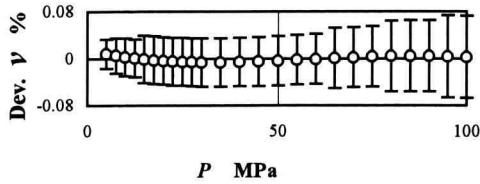
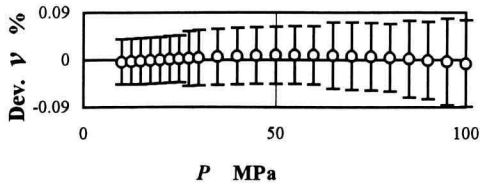
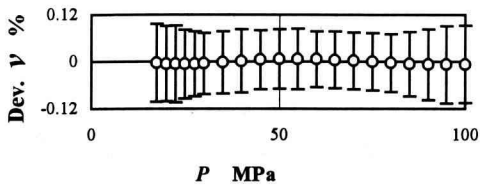
(a) $T=273.15$ K(b) $T=298.15$ K(c) $T=323.15$ K(d) $T=348.15$ K(e) $T=373.15$ K(f) $T=398.15$ K(g) $T=423.15$ K(h) $T=448.15$ K(i) $T=473.15$ K

Fig.3 Deviation of specific volume on NSF from Eq.(4)

Fig.3 (Continued 1)

(j) $T=523.15$ K

 (k) $T=573.15$ K

 (l) $T=623.15$ K


(m) Saturation Line

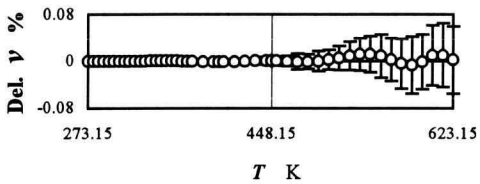


Fig.3 (Continued 2)

7. 2 比エントロピ

比エントロピは、ギブス関数を温度の一回微分の負数である次式の形で表される。

$$\sigma = - \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \theta} \right)_{\beta} \quad (5)$$

式(2)を代入して、次式が求められる。

$$\sigma = - \sum_{n=0}^3 [A'_n \cdot \beta^n] - A'_4 (\beta - \alpha)^{5/4} + (5/4) \cdot A'_4 \cdot \alpha' \cdot (\beta - \alpha)^{1/4} \quad (6)$$

ただし、

$$A'_n = (dA_n/d\theta) \\ \alpha' = (d\alpha/d\theta)$$

式(6)の比エントロピは、NSF の値に対し、約 0.0002 kJ/(kg·K) 以内で一致している。IAPWS では、比エントロピの精度に関しては言及されていない。

7. 3 比エンタルピ

比エンタルピは、次式に示す形で示される。

$$\varepsilon = \zeta + \theta \sigma \quad (7)$$

式(2)と式(6)を代入して、次式が求められる。

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^3 [(A_n - \theta \cdot A'_n) \beta^n] + (A_4 - \theta \cdot A'_4) (\beta - \alpha)^{5/4} + (5/4) \cdot \theta \cdot A'_4 \cdot \alpha' \cdot (\beta - \alpha)^{1/4} \quad (8)$$

図4は、IST-85 の格子点における式(8)からの比エンタルピ偏差図である。○は NSF の値、 \pm は公差を示す。式(7)の精度は、図4に示すように全域で IST-85 の公差内で NSF の値と一致する。

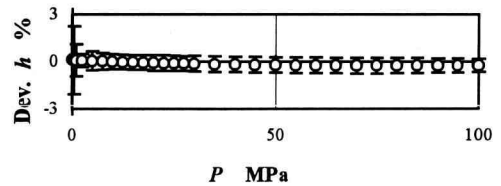
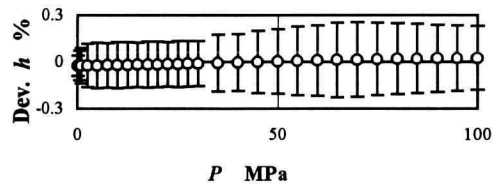
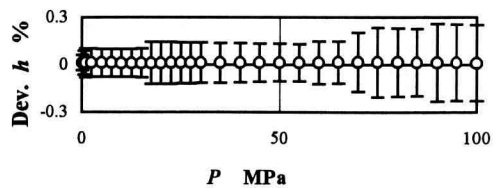
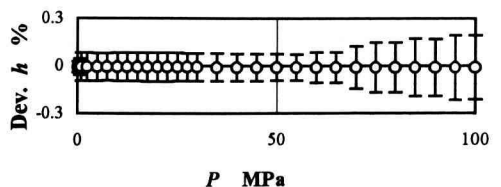
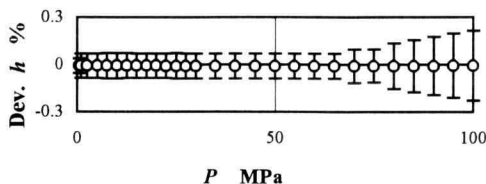
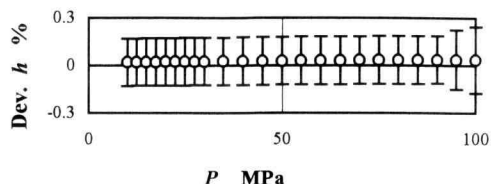
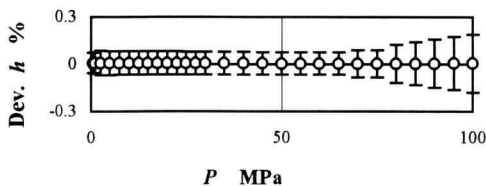
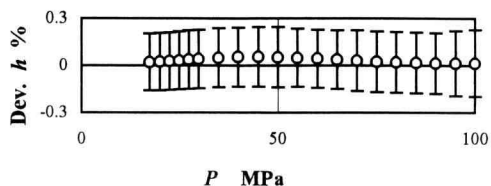
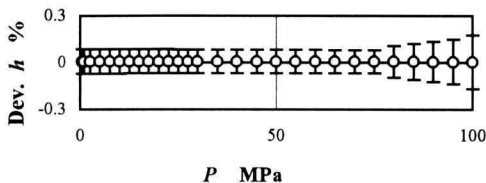
 (a) $T=273.15$ K

 (b) $T=298.15$ K

 (c) $T=323.15$ K

 (d) $T=348.15$ K


Fig.4 Deviation of specific enthalpy on NSF from Eq.(8)

(e) $T=373.15$ K(k) $T=573.15$ K(f) $T=398.15$ K(l) $T=623.15$ K(g) $T=423.15$ K

(m) Saturation Line

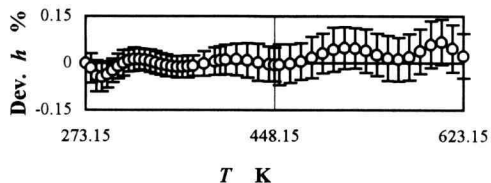
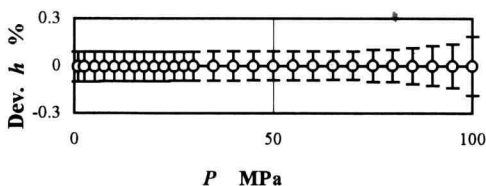
(h) $T=448.15$ K

Fig.4 (Continued 2)

7. 4 定圧比熱

定圧比熱は、熱力学の一般関係式を用いて、次式の形で表せる。

$$\phi = -\theta \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial \theta^2} \right)_\beta \quad (9)$$

式(9)中の ζ の θ の2回微分形は、式(2)を代入して以下の式ようになる。

$$\left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial \theta^2} \right)_\beta = \sum_{n=0}^3 [A_n'' \cdot \beta^n] + A_4'' (\beta - \alpha)^{5/4} - (5/2) \cdot A_4' \cdot \alpha' - (5/4) \cdot A_4 \cdot \alpha'' \cdot (\beta - \alpha)^{1/4} + (5/16) \cdot \alpha' \cdot (\beta - \alpha)^{-3/4}$$

ただし、

$$A_n'' = (d^2 A_n / d\theta^2) \\ \alpha'' = (d^2 \alpha / d\theta^2)$$

図5は、定圧比熱の偏差図である。実線は、NSFの定圧比熱の値を示している。式(9)の精度は、図5で示すように、NSFの値に1%以内で一致する。

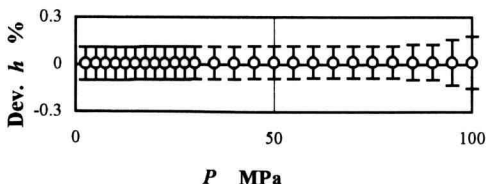
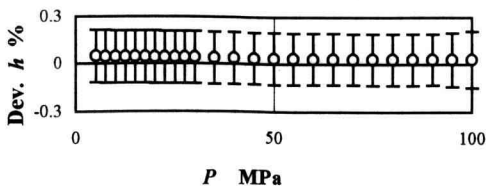
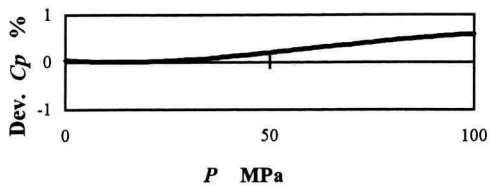
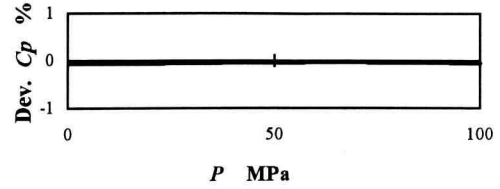
(i) $T=473.15$ K(j) $T=523.15$ K

Fig.4 (Continued 1)

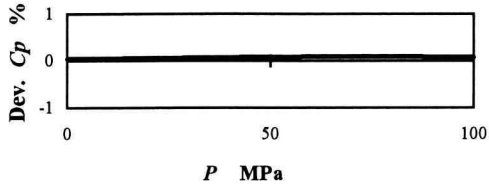
(a) $T=273.15$ K



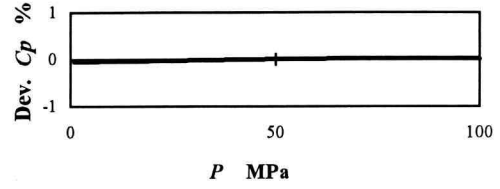
(g) $T=423.15$ K



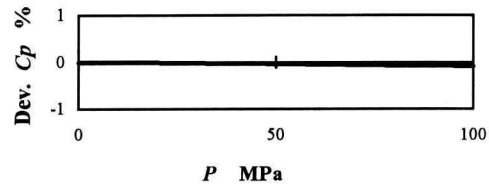
(b) $T=298.15$ K



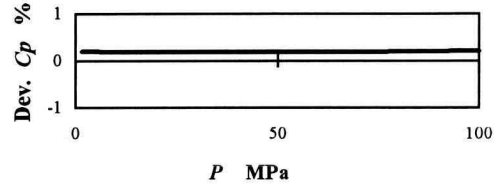
(h) $T=448.15$ K



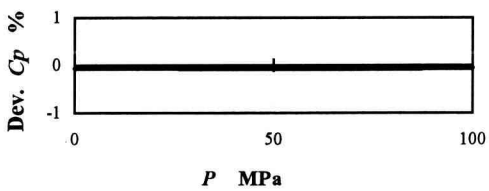
(c) $T=323.15$ K



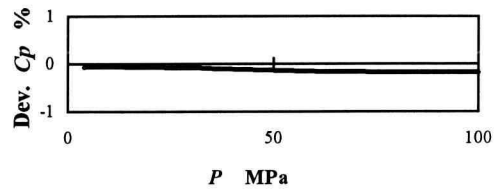
(i) $T=473.15$ K



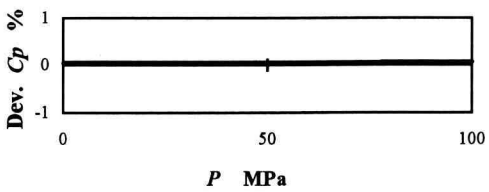
(d) $T=348.15$ K



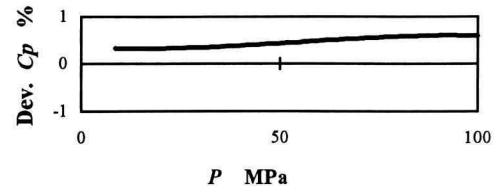
(j) $T=523.15$ K



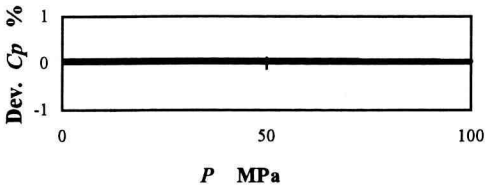
(e) $T=373.15$ K



(k) $T=573.15$ K



(f) $T=398.15$ K



(l) $T=623.15$ K

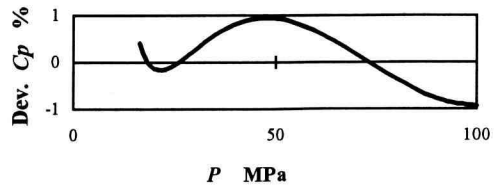


Fig.5 Deviation of isobaric heat capacity of NSF from Eq.(9)

Fig.5 (Continued 1)

(m) Saturation Line

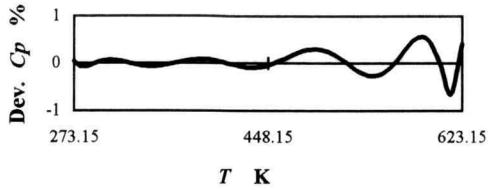


Fig.5 (Continued 2)

7. 5 定容比熱

以下に示す ζ の微分形をそれぞれ X, Y とする.

$$X = \left(\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \beta} \right) \right)_\rho$$

$$Y = \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial \beta^2} \right)_\rho$$

定容比熱は, X, Y を用いて次式で示される形で表される.

$$\gamma = \phi + \theta [X/Y] \quad (10)$$

ただし, X, Y は, 式(2)を代入して,

$$X = \sum_{n=1}^3 [n \cdot A_n' \cdot \beta^{n-1}] + (5/4) \cdot A_4' \cdot (\beta - \alpha)^{5/4} - (5/16) \cdot A_4 \cdot \alpha' \cdot (\beta - \alpha)^{-3/4}$$

$$Y = \sum_{n=0}^3 [n(n-1) \cdot A_n \cdot \beta^{n-2}] + (5/16) \cdot A_4 \cdot (\beta - \alpha)^{-3/4}$$

また, ϕ は式(9)より求める.

式(11)の定容比熱は, NSF の値に対し, 約 2.5%以内で一致する. 定圧比熱に対して精度が劣るが, 音速の値が後述のとおり目標の精度内であるので条件は満たしている.

7. 6 音速

音速は, 次式に示す形で表される.

$$\eta = \left[\frac{\phi}{\gamma} \left(-\frac{\chi^2}{Y} \right) \right]^{1/2} \quad (11)$$

なお, 比体積 χ は式(4)より, 定圧比熱 ϕ は式(9)より, 定容比熱 γ は式(10)より求められる.

図6は, NSFの音速の値の式(12)からの偏差で, 実線がNSFの音速の値を示している. 式(11)の精度は, 圧縮水域全域においてNSFの値に1%以内で一致する.

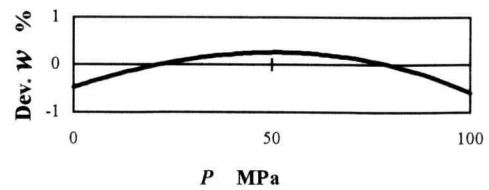
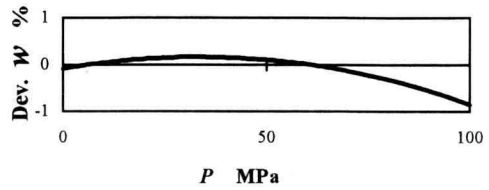
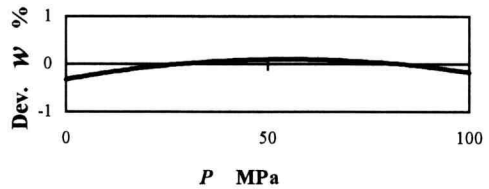
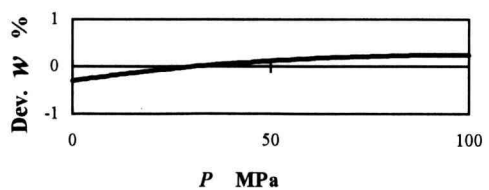
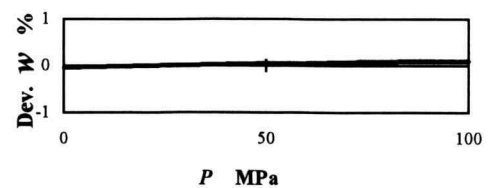
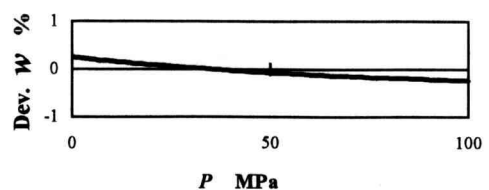
(a) $T=273.15$ K(b) $T=298.15$ K(c) $T=323.15$ K(d) $T=348.15$ K(e) $T=373.15$ K(f) $T=398.15$ K

Fig.6 Deviation of speed of sound of NSF from Eq.(11)

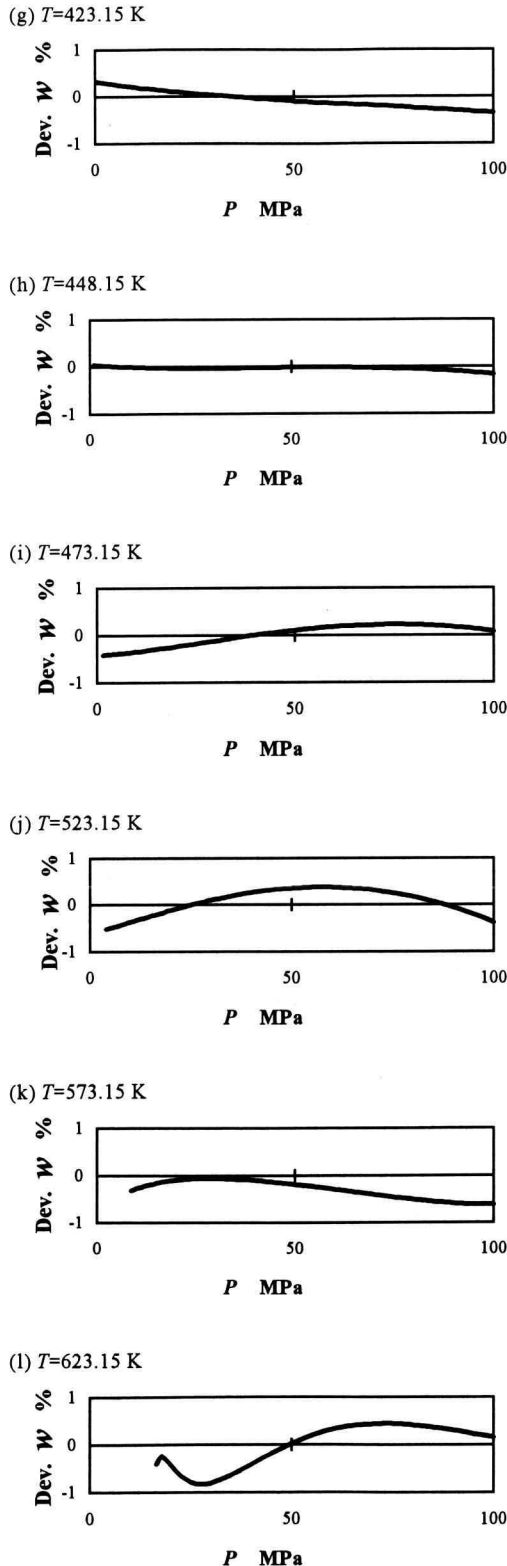


Fig.6 (Continued 1)

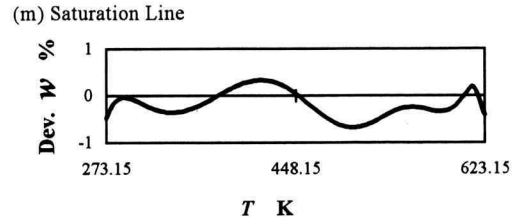


Fig.6 (Continued 2)

8. 計算速度

8. 1 計算速度比較プログラムについて

近年の高性能パーソナルコンピュータの普及により、従来大型計算機を使用してきた複雑な科学技術計算等は、使い勝手の良さからパーソナルコンピュータにより計算されるようになった。熱力学分野においても、ボイラの設計、蒸気プラントのサイクル計算、制御等、一度に多量の計算を行う場合、計算コスト等の問題から計算速度の速い状態式への要求がある。IAPWS では、現行の IFC-67⁽¹⁾の改訂作業において計算速度の短縮を重要な課題としている。そこで IAPWS では、提案される新実用状態式(NIF)と IFC-67 との計算速度の比較プログラムの NIFBENCH を提案している。

図 7 に NIFBENCH の測定手順を図式化した。NIFBENCH は、NIF と IFC-67 の計算時間を 1/100 秒単位で測定し、その比較を $(\text{NIF}/\text{IFC-67}) \times 100\%$ の形式で評価するプログラムである。IFC-67 の関数副プログラムは、ASME 発行の蒸気表に添付されているフロッピーディスクに入力されているものを使用している。また、表 7 に圧縮水域について NIFBENCH が測定可能な関数形とそのテストループ数、入力データ数および圧縮水域全体を 100%とした関数形の使用頻度を示す。

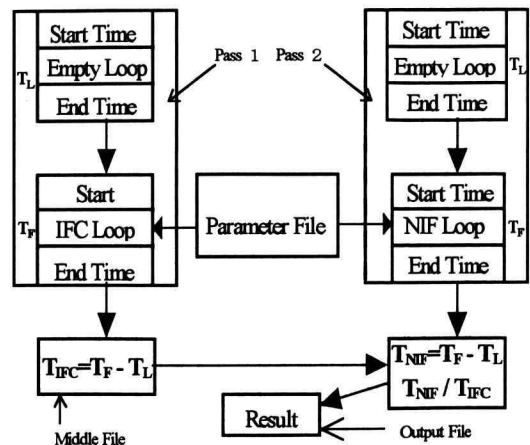


Fig.7 The measurement order of NIFBENCH

Table 7 The measurement function of Region 1

Function forms	Loop / Data	Frequency[%]
$v(P,T)$	900 / 257	16.8
$h(P,T)$	900 / 257	56.1
$s(P,T)$	900 / 257	0.0
$T(P,h)$	200 / 257	20.2
$h(P,s)$	200 / 257	6.9

8. 2 計算速度の測定

IAPWS では、計算時間の短縮のために順関数である $v(P,T)$, $h(P,T)$ 等のほかに逆関数の $T(P,h)$, $h(P,s)$ 等の作成も進められている⁽⁶⁾。従来繰り返し計算等で計算する式であるので逆関数の式を作成することにより計算時間の短縮がはかれる。しかし、本研究では順関数のみ作成したため逆関数に関しては測定を行わなかった。

本研究以前に、佐藤ら^(8,9)によりパーソナルコンピュータによる計算時間の比較に関して報告がなされており、それに習いそれぞれの関数副プログラムを作成した。それぞれの関数副プログラムについて指定のファイル名に置き換えた後、コンパイルした。測定は、10 回行い、平均値を結果とした。

図 8 は、IFC-67 と本研究で作成した圧縮水域の状態式との計算時間の比較図である。棒グラフの縦座標は計算速度、横座標は表 7 の使用頻度を表しており、図中の 72.9% が測定した順関数の頻度である。残りの 27.1% は、逆関数の頻度であるため省略した。

使用したパーソナルコンピュータの CPU は 486DX2, 66MHz である。また、コンパイラは、MS-FORTRAN Ver.5.1 を使用した。

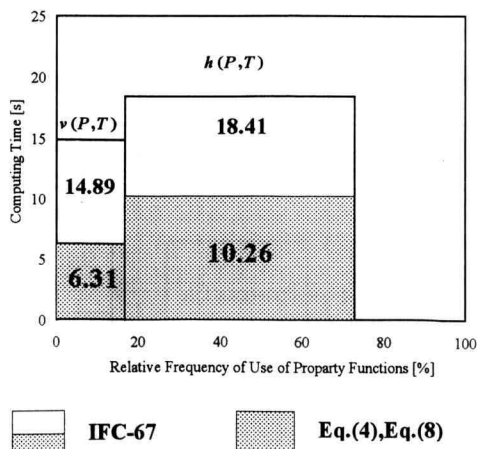


Fig. 8 Comparison of computing times for region 1

9. まとめ

圧力 100 MPa までの圧縮水域の状態式を、比体積および比エンタルピは IST-85 に示された公差内で、定圧比熱および音速は 1% 以内でそれぞれ新研究用国際状態式の値に一致する精度で作成した。また、計算速度は比体積、比エンタルピの式を合わせた比較で約 2 倍速い式を作成した。逆関数 $T(P,h)$, $h(P,s)$ を組み合わせることにより 3 倍以上の計算速度になると考えられる。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 1980 年 SI 日本機械学会蒸気表, p. 106-124, 日本機械学会.
- (2) IAPWS Release on the Skeleton Tables 1985 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance, Submitted to the IAPWS, Orlando, USA, (1994).
- (3) Thomas, H. P., The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), Metrologia, Vol. 27, (1990), p. 3.
- (4) Pruss, A. and Wagner, W., A New Equation of State for Water as a Candidate for the New Scientific Formulation of IAPWS, Submitted to the IAPWS, Orlando, USA, (1994).
- (5) Sato, H., Watanabe, K., Sengers, J. M. H. L., Gallagher, J. S., Hill, P. G., Straub, J. and Wagner, W., Sixteen Thousand Evaluated Experimental Thermodynamic Property Data for Water and Steam, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 20, No. 5, (1991), p. 1023.
- (6) Wagner, W. and Rukes, B., Concept and Status of Development of The New Industrial Formulation of IAPWS, Submitted to the IAPWS, Paris, France, (1995).
- (7) Sato, H., Singularity of Liquid Water Data Analysis and Modeling, Fluid Phase Equil., Vol. 79, (1981), p. 89.
- (8) 佐藤智明, 小口幸成, 熱力学状態式の実用利用のための計算時間短縮に関する研究 (パーソナルコンピュータによる水の実用状態式計算について), 神奈川工科大学研究報告, B-15, (1991), p. 25.
- (9) 佐藤智明, 小口幸成, 熱力学状態式の実用利用のための計算時間短縮に関する研究 (第 2 報, コンパイラ比較と水の実用国際状態式計算への影響), 神奈川工科大学研究報告, B-17, (1993), p. 13.