

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 ——

佐 藤 智 明*・小 口 幸 成*

Study on the Reduction of the Computing Time of Thermodynamic
Equation of State for Industrial Use
—— Calculation of the Equation of State of Water and Steam for
Industrial Use with the Aid of a Personal Computer ——

Tomoaki SATO and Kosei OGUCHI

Abstract

A personal computer is now widespread for technical and industrial calculations, and the reduction of the computing time is desired. Especially, the international formulation of water and steam for industrial use, so-called IFC-67, is internationally used for the guarantee calculations, and so this formulation should be used in whole calculations such as cycle calculations, performance testing, power plant and equipment designs, on-line calculations etc. For this reason, a programing method for short computing time and simple equations are expected.

In the present study, the programing method is discussed for the reduction of computing time with the use of a 16 bit personal computer NEC-PC 9801 VX and fortran 77, and is examined successfully for the short calculations with respect to the correlation equation of the saturation pressure and to equations of state in the compressed water region and the superheated steam region.

1. ま え が き

電子計算機は様々な分野で使用されるようになった。パーソナルコンピュータの普及によって大型計算機からパーソナルコンピュータへと電子計算機の利用形体が大きく変わりつつあり、その需要はますます増え、ハード、ソフトのメモリーの増大等も含めると、作業全体に占める計算機利用の割合は増大する一方である。そのため産業分野においては、計算機利用に関するコストが、無視できないものとなってきた。毎日膨大な量の計算を行わせる企業にとって、計算機利用時間の短縮によって、かなりのコストが削減できる。そ

のため、技術計算に使用される様々な式を、極力計算機にとって時間のかからない形にかえて使用することが、各分野において要求され、工夫されてきている。

熱力学の分野においても、伝熱解析や熱物性値計算などにおいて一度に多量の計算を行わせる企業の開発部門などでは、これらのことが無視できなくなってきた。そして、少しでも計算時間の短い形の式を要求している。よって本研究では、熱力学状態式の中でも最も重要な水の実用国際状態式¹⁾を例にとり、計算機上で時間のかからない式の形、時間のかからないプログラム方法などについて考察した。水の実用状態式は、発電設備のあらゆる計算に使用され発電設備の保証を与える式として国際的に統一された基礎式である。その利用は見積りのサイクル熱計算、蒸気タービン、ボイラー等の個々の設計、プラントの制御を行う ON-

平成2年9月28日受理

* 機械工学科

LINE 計算にいたるまですべてに及んでいる。

2. 使用するコンピュータおよび言語について

今日使用されているコンピュータは、スーパーコンピュータからパーソナルコンピュータまで、利用環境、使用目的の違いによって、そのハード、ソフトの両面において実に様々な種類のものが使用されており、その性能もまちまちである。CPU だけについて考えても計算処理時間やその特性は異なり、また使用する高級言語の種類やその商品の違いもそれらに大きな影響を

与えると思われる。しかしこれらすべての機種についてその特性を調べる事は困難であるので、最も普及している 16 ビットのパーソナルコンピュータのうち、NEC-PC9801VX2 について CPU をインテル社製 80286 (以下 286 と略す) を単独で使用了場合、80286 に数値演算プロセッサ 80287 を付けた (以下 287 と略す) 場合、NEC 製 V30 (以下 V30 と略す) を単独で使用了場合の 3 つの場合について比較検討を行った。また言語は、Fortran77 としコンパイラは ProFortran-77 (ライフボード社) を使用した。

時間計測については ProFortran-77 が提供してい

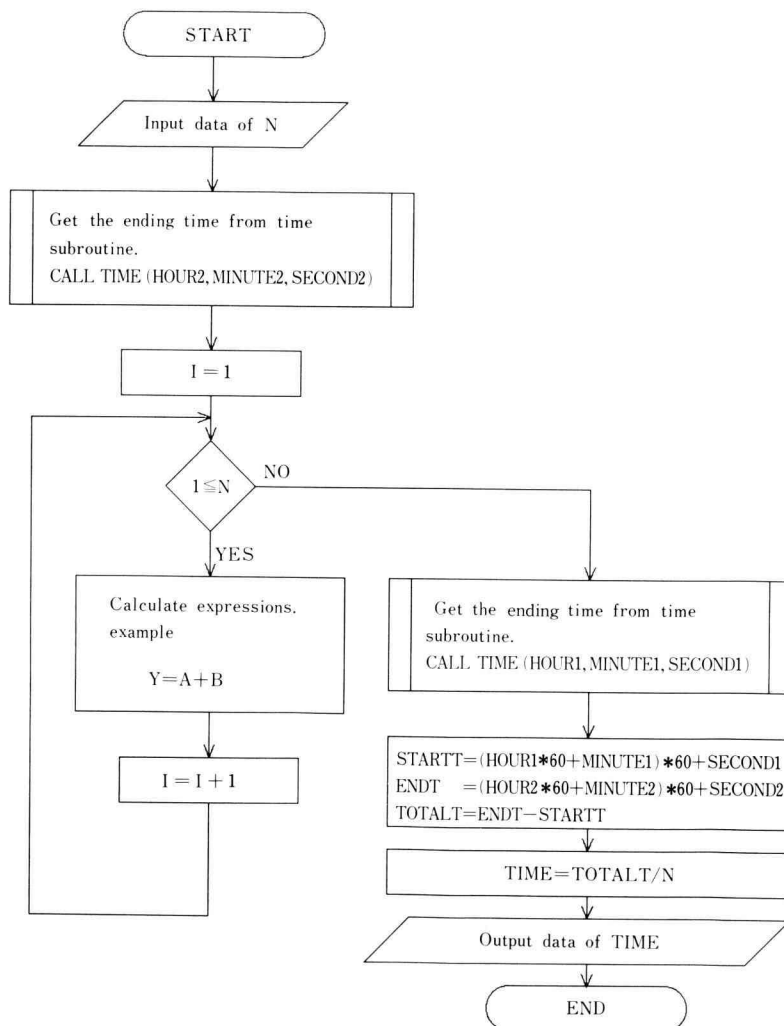


Fig. 1. Flow Chart of Computing Time Calculation

Table 1. Comparison of the Computing Time for the Different form of Equation by Single Precision

No	Form of Equation	CPU		
		V30	80286	80286+ 80287
1	$Y=3.141592$	1.00	1.00	1.00
2	$Y=X$	2.92	3.00	2.29
3	$Y=X+1$	6.85	7.57	3.43
4	$Y=X+1.0$	6.92	7.57	3.43
5	$Y=X*1$	6.00	6.71	3.71
6	$Y=X*1.0$	6.00	6.71	3.71
7	$Y=X/1$	5.69	6.14	4.43
8	$Y=X/1.0$	5.69	6.14	4.43
9	$Y=1/A$	5.77	6.29	4.29
10	$Y=1.0/A$	5.69	6.14	4.29
11	$Y=A*(-1)$	19.15	21.14	16.71
12	$Y=A+X$	6.62	7.29	3.43
13	$Y=A-X$	6.77	7.57	3.71
14	$Y=1.0/(A+X)$	10.08	11.71	5.71
15	$Y=1.0/(A-X)$	10.38	11.86	5.86
16	$Y=A*X$	6.00	6.71	3.71
17	$Y=A/X$	6.31	7.29	4.43
18	$Y=A+B*X$	9.62	11.14	4.71
19	$Y=A-B*X$	9.77	11.00	4.86
20	$Y=A*X**2$	11.00	12.43	4.86
21	$Y=A*X*X$	9.46	10.71	4.86
22	$Y=A*(X*X)$	9.46	10.57	4.86
23	$Y=A*X**2.0$	168.15	187.57	38.00
24	$Y=Y+AII(L+1)*X**L \quad [L=0 \rightarrow 4]$	132.69	146.29	84.57
25	$Y=A0+A1*X**1+A2*X**2+A3*X**3+A4*X**4$	78.31	87.43	30.00
26	$Y=A0+X*(A1+X*(A2+X*(A3+X*(A4))))$	31.69	36.57	11.71
27	$Y=A0+X*(A1+X*(A2+X*(A3+X*(A4+X*(A5))))$	38.31	44.29	14.57
28	$Y=A0+X*(A1+X*(A2+X*(A3+X*(A4+X*(A5+X*(A6))))$	45.38	52.57	17.00
29	$Y=A0+X*(A1+X*(A2+X*(A3+X*(A4+X*(A5+X*(A6+X*(A7))))$	52.46	60.86	19.29
30	$Y=\sin(X)$	78.62	88.00	28.43
31	$Y=\cos(X)$	86.15	97.14	27.00
32	$Y=\tan(X)$	76.77	85.71	22.43
33	$Y=\sin(X)/\cos(X)$	164.85	187.57	55.71
34	$Y=\tan(A*X)$	80.23	89.86	23.71
35	$Y=\sin(A*X)$	81.77	92.00	29.57
36	$Y=\cos(A*X)$	89.46	100.57	28.29
37	$Y=\log(X)$	78.46	89.14	13.71
38	$Y=\log(A*X)$	81.92	92.57	14.86
39	$Y=\log(A)+\log(X)$	117.00	130.43	18.00
40	$Y=\log(A/X)$	77.15	88.00	17.00
41	$Y=\log(A)-\log(X)$	117.00	130.57	18.43
42	$Y=X**A \quad [A=0.5]$	162.69	184.29	39.14
43	$Y=X**0.5$	163.92	185.29	39.00
44	$Y=X**(1.0/2.0)$	163.92	185.43	39.00
45	$Y=\sqrt{X}$	5.15	5.86	6.14
46	$Y=\exp(X)$	78.15	87.57	19.43
47	$Y=2.718281828459045*X$	159.38	178.43	37.71

Table 2. Comparison of the Computing Time for the Different Form of Equation by Double Precision

No	Form of Equation	CPU		
		V30	800286	80286+ 80287
1	$Y=3.141592$	1.00	1.00	1.00
2	$Y=X$	1.00	0.93	0.90
3	$Y=X+1$	2.77	2.73	1.30
4	$Y=X+1.0$	2.81	2.73	1.30
5	$Y=X*1$	3.50	3.53	1.40
6	$Y=X*1.0$	3.50	3.53	1.40
7	$Y=X/1$	4.12	4.13	1.70
8	$Y=X/1.0$	4.12	4.13	1.70
9	$Y=1/A$	4.12	4.13	1.60
10	$Y=1.0/A$	4.12	4.13	1.60
11	$Y=A*(-1)$	7.77	8.00	6.00
12	$Y=A+X$	2.77	2.73	1.40
13	$Y=A-X$	2.85	2.80	1.40
14	$Y=1.0/(A+X)$	5.73	5.80	2.20
15	$Y=1.0/(A-X)$	5.77	5.80	2.20
16	$Y=A*X$	3.50	3.53	1.40
17	$Y=A/X$	3.96	4.07	1.70
18	$Y=A+B*X$	5.62	5.60	1.80
19	$Y=A-B*X$	5.69	5.60	1.90
20	$Y=A*X**2$	6.54	6.60	2.10
21	$Y=A*X*X$	6.00	6.07	2.10
22	$Y=A*(X*X)$	6.00	6.13	2.10
23	$Y=A*X**2.0$	121.65	123.30	13.60
24	$Y=Y+AII(L+A)*X**L$	57.35	58.00	31.30
25	$Y=A0+A1*X**1+A2*X**2+A3*X**3+A4*X**4$	40.73	41.47	11.80
26	$Y=A0+X*(A1+X*(A2+X*(A3+X*(A4+X*(A5))))$	19.15	19.40	5.10
27	$Y=A0+X*(A1+X*(A2+X*(A3+X*(A4+X*(A5+X*(A6))))))$	22.38	22.87	6.30
28	$Y=A0+X*(A1+X*(A2+X*(A3+X*(A4+X*(A5+X*(A6+X*(A7))))))$	26.58	27.20	7.40
29	$Y=A0+X*(A1+X*(A2+X*(A3+X*(A4+X*(A5+X*(A6+X*(A7))))))$	30.85	31.53	8.40
30	$Y=\sin(X)$	63.96	64.27	10.00
31	$Y=\cos(X)$	67.73	67.33	9.60
32	$Y=\tan(X)$	91.50	91.80	7.80
33	$Y=\sin(X)/\cos(X)$	134.62	134.07	19.60
34	$Y=\tan(A*X)$	94.04	94.20	8.30
35	$Y=\sin(A*X)$	66.46	66.67	10.40
36	$Y=\cos(A*X)$	70.08	69.93	10.00
37	$Y=\log(X)$	63.12	62.47	4.90
38	$Y=\log(A*X)$	65.62	65.13	5.30
39	$Y=\log(A)+\log(X)$	89.73	89.20	6.40
40	$Y=\log(A/X)$	64.23	63.80	6.10
41	$Y=\log(A)-\log(X)$	89.73	89.20	6.50
42	$Y=X**A \quad [A=0.5]$	119.15	118.16	13.90
43	$Y=X**0.5$	118.38	117.80	13.10
44	$Y=X**(1.0/2.0)$	118.35	117.80	13.10
45	$Y=\sqrt{X}$	7.96	8.00	2.20
46	$Y=\exp(X)$	52.73	53.47	6.90
47	$Y=2.718281828459045**X$	119.54	118.80	13.40

るタイムサブルーチンを用いた。すなわち、内に計測対象となる式を含んだループ部分を前後から挟み込み形でタイムサブルーチンと呼び、ループに突入した時間と出た時間を計測し、予め計測しておいた同じ回数の、式を含まない空ループの時間をその値から差し引き、更にその時のループ回数で除することによって、内部の計算によるループ1回当たりの純粋な時間を算出した。このフローチャートを Fig. 1 に示した。

また、クロック周波数はすべて 10 MHz を使用した。

3. 各 CPU による各計算要素の比較

Table 1 および Table 2 は、コンピュータに計算させるときの基本的な四則演算および組み込み関数などを計算要素として、CPU 別に計算させたときの実行時間を単精度計算と倍精度計算に分けて表示したものである。

単精度と倍精度の宣言については IMPLICIT 命令を使い変数名の最初の一字 (A-G, O-Z) の暗黙の型宣言によって行った。また計算時間の比較の方法として、各 CPU について $Y=3.141592$ の置き換え演算に要した時間 (この時間を変数に数値を代入する時の処理時間と考えた) を 1.00 としたときの比で表した。CPU が 286+287 の場合は、浮動小数点演算、三角関数、指数、対数関数の演算などにその高速性が顕著に現れている。また CPU286+287 を使用した場合はいずれの演算においても他の CPU に比較して計算時間の比が小さいことがわかる。この性能は倍精度計算になると

一層はっきり現れている。特に Table 2 の No. 2-No. 13 までの基本的な四則演算では、No. 1 に対する比が 2.0 を下まわっている。このことから実際の計算過程において数値演算プロセッサ 287 の使用による計算時間への影響が大きいことが予想される。たとえば、次の計算例について、286 単独使用の場合と 287 を使用した場合の比較を行った。

$$\left. \begin{aligned} X &= A+B \\ Y &= X+X \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$Y = (A+B) + (A+B) \quad (2)$$

上式 (1) のように式 (2) を 2 つの式に分解して計算した場合と、式 (2) をそのままの形で計算した場合について計算時間の比較結果を Table 3 に示した。

倍精度計算で 286 を単独で使用した場合の計算処理時間は次のように考えられる。式 (1) は、Table 2 の No. 12 の「 $Y=A+X$ 」の計算を 2 回行うものと考えると、「 $Y=A+B$ 」に要する No. 1 の代入処理に対する時間比が 2.73 であるから全体の所要時間はこの 2 倍の 5.46 (No. 1 に対する比)。式 (2) は、「 $A+B$ 」と「 $Y=$ 」の 2 つの要素に分けて考えると、「 $A+B$ 」の加算部分だけに要する時間を、「 $Y=A+B$ 」に要する時間から「 $Y=$ 」の部分すなわち代入計算に要する時間を引いたものと考えたと Table 2 の No. 12 から No. 1 を引いたものと考えられるので 1.73。ここで式 (2) 全体を 1 組の加算代入部つまり「 $Y=A+B$ 」と 2 つの加算部「 $A+B$ 」の組み合わせとして考えると、式 (2) 全体の所要時間は 6.19 (No. 1 に対する比) となる。同

Table 3. Comparison of the Computing Time with Respect to the Combination of Equation

Combination of Equation	80286 (CPU)		80286+80287 (CPU)	
$X=A+B$ $Y=X+X$	Estimation $X=A+B \quad Y=X+X$ $\downarrow \quad \quad \downarrow$ $2.73 \quad + \quad 2.73 = 5.46$		Estimation $X=A+B \quad Y=X+X$ $\downarrow \quad \quad \downarrow$ $1.40 \quad + \quad 1.40 = 2.80$	
	Result	5.10	Result	2.90
$Y=A+B+A+B$	Estimation $Y=X+X \quad A+B \rightarrow 2.73-1.00=1.73$ $\downarrow \quad \quad \downarrow$ $2.73 \quad + 1.73 \times 2 = 6.19$		Estimation $Y=X+X \quad A+B \rightarrow 1.40-1.00=0.40$ $\downarrow \quad \quad \downarrow$ $1.40 \quad + 0.40 \times 2 = 2.20$	
	Result	6.73	Result	2.50

様に 287 を使用した場合について求めると式 (1) については 2.80, 式 (2) については 2.20 となる。これより, CPU286 を単独で使用的場合には式 (1) の方が式 (2) より所要時間が短く, また 286+287 で使用的場合には反対に式 (1) より式 (2) の方が所要時間が短くなる。実際にこの 2 式について計測した結果も同様の結果となった。このことは使用している CPU が 286 のみなのか 286+287 なのかでその状況によって計算時間の短い式の形が変わってくる可能性を示している。しかしこの差異は, 実測の結果, 式 (1) と式 (2) の

場合のように, 1 つの式の中に「 $A+B$ 」のような同じ形の式が 2 回使われている場合のみであり, 同じ形の式が 3 回以上になると, 286 単独使用, 286+287 使用の両方の場合において, 式を 2 つ以上に分けて計算した方が計算時間が短いという結果となった。

Table 1, Table 2 の No. 24 から No. 26 まではともに

$$Y = \sum_{n=1}^4 A_n X^{n-1} \quad (3)$$

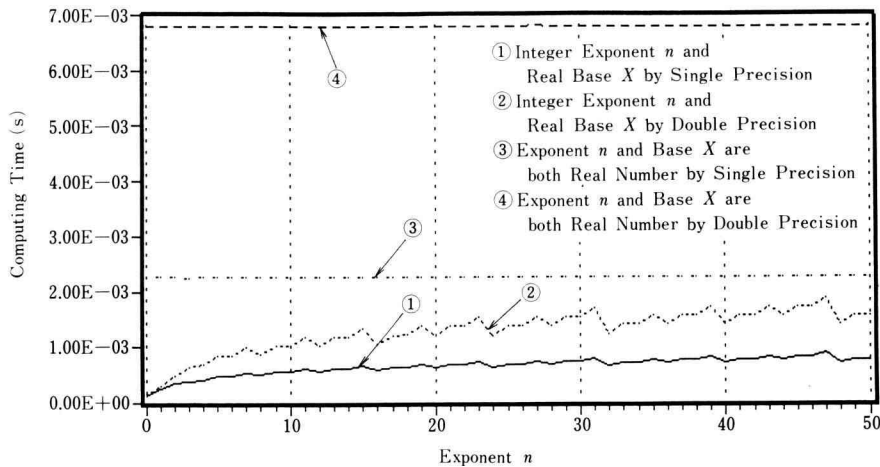


Fig. 2. Comparison between the Computing Times of X^n with the use of the Integer or Real Exponent n (CPU 286)

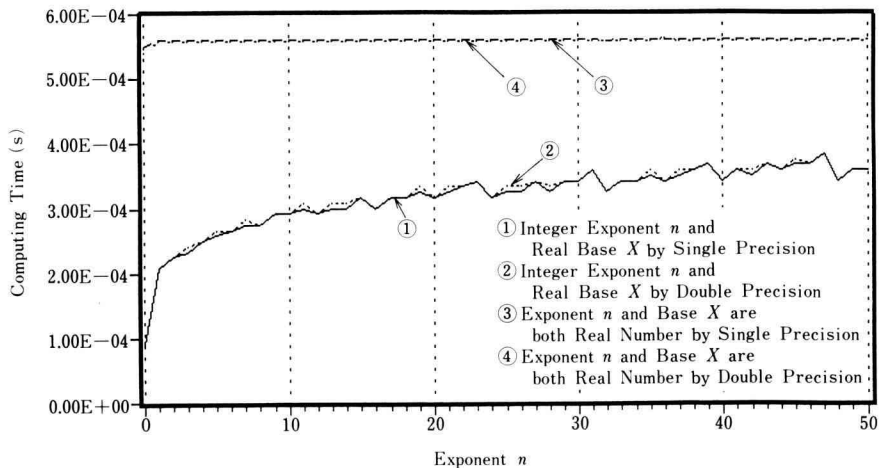


Fig. 3. Comparison between the Computing Times of X^n with the use of the Integer or Real Exponent n (CPU 286+287)

の計算を行ったもので、No. 24はDO-LOOPと配列を使って行った場合、No. 25は式を5項に展開した場合およびNo. 26は展開した式をカッコでくくった場合である。この結果から、配列を使ってループを回すよりも、展開してカッコでくくった形の方が計算時間が短いことがわかる。

4. 累乗の計算時間の比較

熱力学の状態式などでは累乗の計算時間が式全体に

しめる割合が大きい。そこで次式の関係についてCPU286単独使用とCPU286+287使用との場合の比較を行った。

$$Y = X ** A \text{ (実数乗)} \quad (4)$$

$$Y = X ** I \text{ (整数乗)} \quad (5)$$

$$Y = X * X * X \cdots * X \quad (6)$$

上述の各場合について指数を増加させていったときの指数と計算時間の比較をFig. 2からFig. 9に示した。Fig. 2およびFig. 3から式(4)のように指数が実

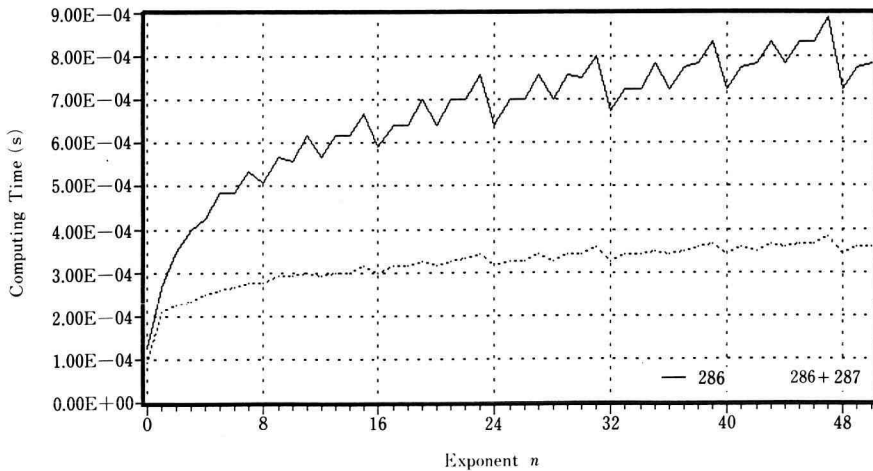


Fig. 4. Comparison between the Computing Times of CPU286 and CPU286+287 for the Integer Exponent n and Real Base X by Single Precision

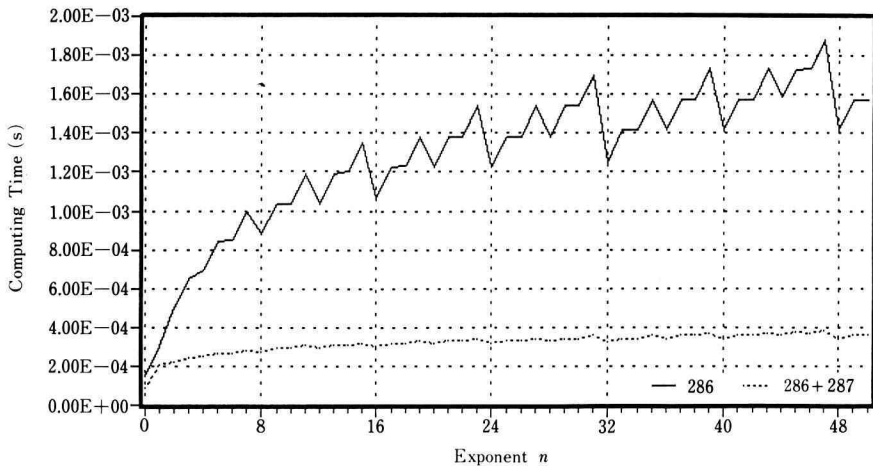


Fig. 5. Comparison between the Computing Times of CPU286 and CPU286+287 for the Integer Exponent n and Real Base X by Double Precision

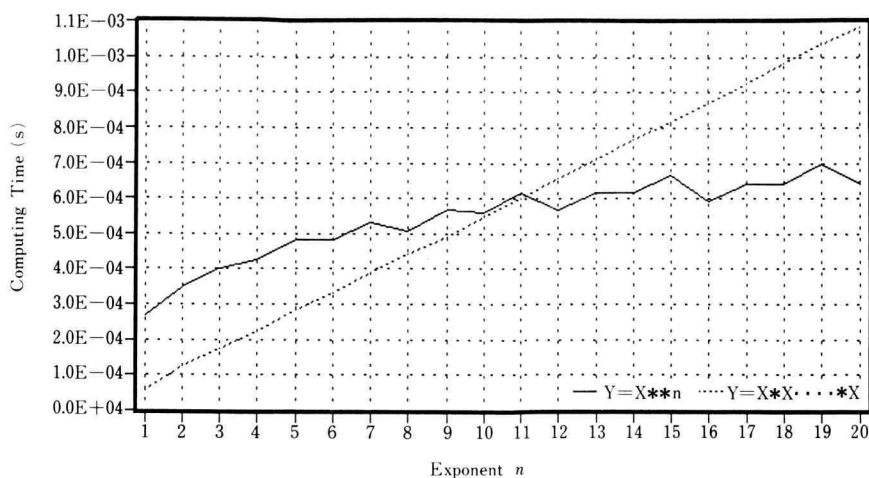


Fig. 6. Comparison between the Computing Times of $X^{**}n$ and $X * X * X * X$ (CPU286 and Single Precision)

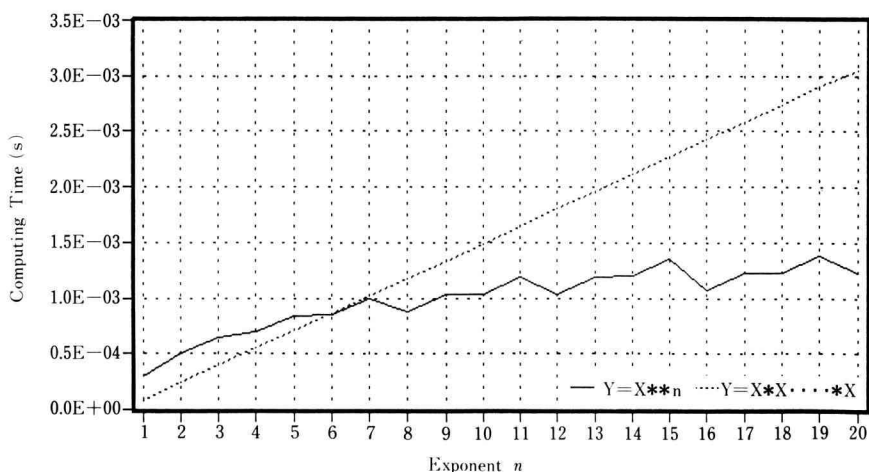


Fig. 7. Comparison between the Computing Times of $X^{**}n$ and $X * X * X * X$ (CPU286 and Double Precision)

数の場合、計算時間はその指数値の大小に関係なく一定であることがわかる。Fig. 4 および Fig. 5 から、指数が整数の場合、指数が増えるごとに、8 を 1 周期としてある一定の凹凸形を保ちながら計算時間が増えていく。たとえば CPU が 286 単独の場合では指数が 31 と 32 を比較すると 31 乗の方が 32 乗よりも約 15% も長く時間がかかることになる。しかし CPU が 286+287 ではこの傾向は顕著には現れない Fig. 6 から Fig. 9 までは式 (5) と式 (6) の比較結果を示した。これらの図が示すようにはじめは式 (6) の方が式 (5) よりも計

算速度が早い、ある指数を境にその計算速度が逆転している。また、その指数値もそれぞれ CPU の相違、倍精度と単精度の違いによって異なっている。CPU286 単独使用の場合、底が単精度実数の場合は指数の値が 11 と 12 の間で、底が倍精度実数の場合は指数の値が 5 と 6 の間で計算速度の逆転が見られる。また CPU を 286+287 で使用した場合、式 (5) と式 (6) の計算速度の逆転は、底が単精度実数の場合は指数が 15 と 16 の間で、また底が倍精度実数の場合は指数が 13 と 14 の間で起こっている。

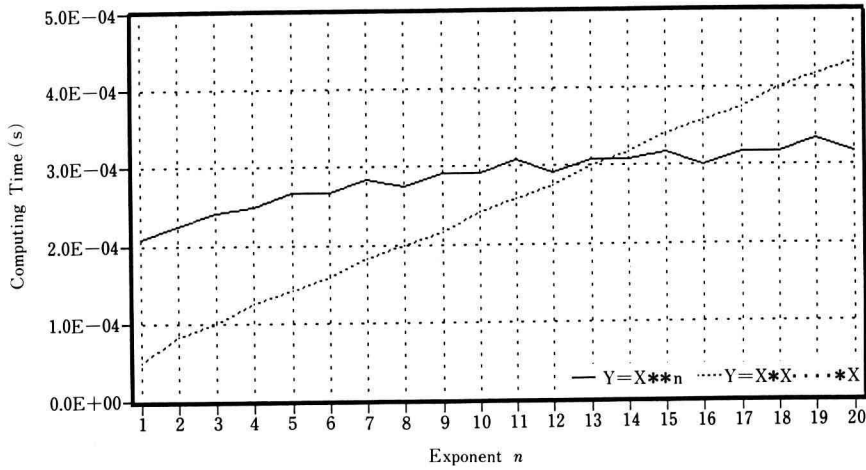


Fig. 8. Comparison between the Computing Times of $X^{**}n$ and $X*X*X*X$ (CPU286+287 and Single Precision)

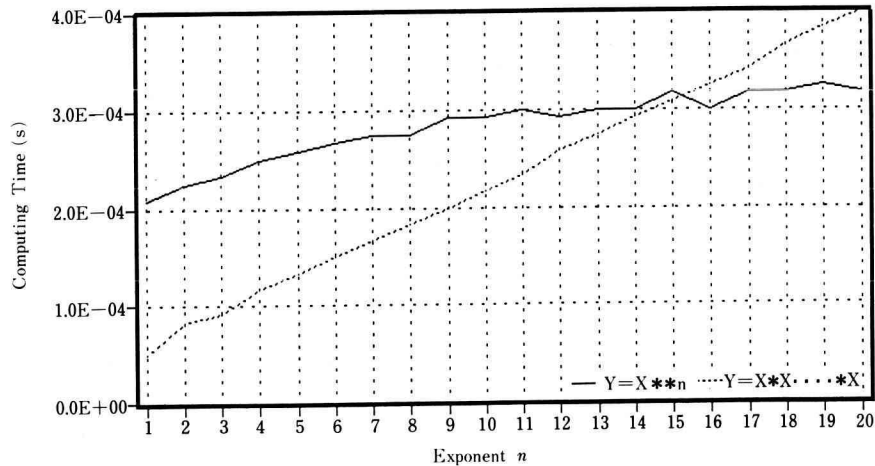


Fig. 9. Comparison between the Computing Times of $X^{**}n$ and $X*X*X*X$ (CPU286+287 and Double Precision)

5. 熱力学状態式への応用

上述の結果を考慮して実際に計算時間のかからない熱力学状態式について検討した。

5.1 水の飽和蒸気圧式

水の飽和蒸気圧式について、実用国際状態式 (IFC-67)¹⁾, Saul らの式²⁾ および小口らの式³⁾ について計算時間が短くなるプログラムの組み方を考察した。ここで Table 4 から Table 15 に示した時間はループ 1 回

あたりの時間である。また、指数関数 (EXP), については、単精度計算では組み込み関数 (EXP), 倍精度計算では組み込み関数 (DEXP) を使用した。

5.1.1 実用国際状態式¹⁾:

実用国際状態式の飽和蒸気圧式は次式である¹⁾。

$$\beta_K(\theta) = \exp \left[\frac{1}{\theta} \cdot \frac{\sum_{v=1}^5 k_v (1-\theta)^v}{1 + k_6 (1-\theta) + k_7 (1-\theta)^2} - \frac{1-\theta}{k_8 (1-\theta)^2 + k_9} \right] \quad (7)$$

ここで

$$\left[\begin{array}{l} \beta_K = \frac{P_s}{P_{c1}} = \frac{P_s(\text{MPa})}{22.12} \\ \theta = \frac{T}{T_{c1}} = \frac{T(\text{K})}{647.3} \end{array} \right.$$

$k_1 \dots k_7$ は定数である。

上式の実行結果を Table 4 に示した。

5.1.2 Saul らの式²⁾：

Saul らの飽和蒸気圧式は次式である²⁾。

$$\frac{P}{P_c} = \exp \left[\frac{T_c}{T} (a_1(1-\theta) + a_2(1-\theta)^{1.5} + a_3(1-\theta)^3 + a_4(1-\theta)^{3.5} + a_5(1-\theta)^4 + a_6(1-\theta)^{7.5}) \right] \quad (8)$$

ここで

$$P_c = 22.064 \text{ MPa}$$

$$\theta = \frac{T}{T_c} = \frac{T(\text{K})}{647.14}$$

$a_1 \sim a_6$ は定数である。

上式の実行結果を Table 5 に示した。

5.1.3 小口らの飽和蒸気圧式³⁾：

小口らの飽和蒸気圧式は次式である³⁾。

$$(P_s)_r = \exp \left[\frac{1-T_r}{T_r} \cdot \frac{1}{1+d_6(1-T_r)+d_7(1-T_r)^{2.0}} \cdot \{d_0+d_1(1-T_r)^{0.5}+d_2(1-T_r)+d_3(1-T_r)^{1.5}+d_4(1-T_r)^{2.0}+d_5(1-T_r)^{2.5}\} \right] \quad (9)$$

ここで

$$T_r = \frac{T(\text{K})}{647.14}$$

$d_0 \sim d_7$ は定数である。

上式の実行結果を Table 6 と Table 7 に示した。

5.1.4 飽和蒸気圧式に関する考察：

Table 6 と Table 7 に小口らの飽和蒸気圧式について 2 例のプログラムを検討し、それぞれ Example 1 と

Table 4. Vapor Pressure Equation of IFC-67¹⁾

Method of Calculation	Vapor Pressure Equation ¹⁾	
	$Q1=1-Q$ $Q2=Q1*Q1$ $BKQ=EXP((Q1*(K1+Q1*(K2+Q1*(K3+Q1*(K4+Q1*K5)))))/(Q*(1+K6*Q1+K7*Q2))-Q1/(K8*Q2+K9))$	
Computing Time	80286 Single Precision	$2.60 \times 10^{-3} \text{ s}$
	80286 Double Precision	$6.82 \times 10^{-3} \text{ s}$
	80287 Single Precision	$7.30 \times 10^{-4} \text{ s}$
	80287 Double Precision	$8.60 \times 10^{-4} \text{ s}$

Table 5. Vapor Pressure Equation by Saul *et al.*²⁾

Method of Calculation	Vapor Pressure Equation ²⁾	
	$Q1=1-Q$ $QS=\text{SQRT}(Q1)$ $BKQ=EXP(Q1*(A1+QS*(A2+QS*Q1*(A3+QS*(A4+QS*(A5+A6*Q1*Q1*Q1*QS)))))/Q)$	
Computing Time	80286 Single Precision	$2.32 \times 10^{-3} \text{ s}$
	80286 Double Precision	$6.26 \times 10^{-3} \text{ s}$
	80287 Single Precision	$7.00 \times 10^{-4} \text{ s}$
	80287 Double Precision	$7.60 \times 10^{-4} \text{ s}$

Table 6. Vapor Pressure Equation by Oguchi *et al.*³⁾ (Example 1)

Method of Calculation	Vapor Pressure Equation ³⁾ (Example 1)	
	$Q1=1-Q$ $QS=\text{SQRT}(Q1)$ $BKQ=\text{EXP}(Q1/Q * (D0+D1 * QS+Q1 * (D2+D3 * QS+Q1 * (D4+D5 * QS))))/(1+Q1 * (D6+D7 * Q1)))$	
Computing Time	80286 Single Precision	2.50×10^{-3} s
	80286 Double Precision	6.50×10^{-3} s
	80287 Single Precision	7.40×10^{-4} s
	80287 Double Precision	7.80×10^{-4} s

Table 7. Vapor Pressure Equation by Oguchi *et al.*³⁾ (Example 2)

Method of Calculation	Vapor Pressure Equation ³⁾ (Example 2)	
	$Q1=1-Q$ $QS=\text{SQRT}(Q1)$ $BKQ=\text{EXP}(Q1/Q * (D0+QS * (D1+QS * (D2+QS * (D3+QS * (D4+D5 * QS)))))))/(1+Q1 * (D6+D7 * Q1)))$	
Computing Time	80286 Single Precision	2.44×10^{-3} s
	80286 Double Precision	6.42×10^{-3} s
	80287 Single Precision	7.40×10^{-4} s
	80287 Double Precision	8.00×10^{-4} s

Example 2 に示したが、CPU が 286 単独の場合と 286+287 の場合で優位性が多少逆転する。これは CPU が 286 単独の場合倍精度計算では、Example 1 の方が Example 2 より早い³⁾が CPU が、286+287 の場合倍精度計算ではその逆の結果になっている。これは CPU が 286+287 の場合、その性能上四則演算および浮動小数点演算に優れた高速性を示す反面、論理演算の処理時間は 286 単独と同等であることから、カッコが多少多く論理演算の多い Example 2 の形よりも Example 1 のほうが処理時間が短くなる結果と考えられる。

5.2 水の圧縮水域の状態式

飽和蒸気圧の式と同様に、水の圧縮水域における状態式について、実用国際状態式¹⁾、小口³⁾らの式について計算処理時間の短いプログラムの組み方を考察した。

5.2.1 実用国際状態式¹⁾:

水の圧縮水域の実用国際状態式は次式である¹⁾。

$$\begin{aligned}
 x_1 = & A_{11}a_5Z^{-5} + [A_{12} + A_{13}\theta + A_{14}\theta^2 + \\
 & + A_{15}(a_6 - \theta)^{10} + A_{16}(a_7 + \theta^{17})^{-1}] \\
 & - (a_8 + \theta^{11})^{-1}(A_{17} + 2A_{18}\beta + 3A_{19}\beta^2) \\
 & - A_{20}\theta^{18}(a_9 + \theta^2)[-3(a_{10} + \beta)^{-4} + a_{11}] \\
 & + 3A_{21}(a_{12} - \theta)\beta^2 + 4A_{22}\theta^{-20}\beta^3
 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで

$$x = \frac{v}{v_{c1}} = \frac{v(\text{m}^3/\text{kg})}{3.17 \times 10^{-3}}$$

$$Z = Y + (a_3 Y^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta)^{\frac{1}{2}}$$

$$Y = 1 - a_1 \theta^2 - a_2 \theta^{-6}$$

$$\theta = \frac{T}{T_c} = \frac{T(\text{K})}{647.3}$$

$$\beta = \frac{P}{P_{c1}} = \frac{P(\text{MPa})}{22.12}$$

$A_{11} \sim a_{12}$ は定数である。

上式の実行結果を3例について検討し Table 8, Table 9 および Table 10 に示した。

5.2.2 小口らの式³⁾:

小口らの圧縮水域の状態式は次式である³⁾。

$$V_r = \sum_{i=1}^{33} A_i T_r^{n_i} e^{m_i P_r} + A_{34} e^{(n_{34} T_r - m_{34} P_r)} \quad (11)$$

$$V_r = \frac{V}{V_c} = \frac{V}{\frac{1}{\rho_c}} = 0.322 \times V$$

$$T_r = \frac{T(K)}{647.14}$$

Table 8. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Compressed Water Region (Example 1)

Method of Calculation	Equation of State ¹⁾ in Compressed Water Region (Example 1)	
	$Q2 = Q * Q$ $Q4 = Q2 * Q2$ $Q8 = Q4 * Q4$ $Q10 = Q8 * Q2$ $Q18 = Q10 * Q8$ $Y = 1 - SA1 * Q2 - SA2 / (Q2 * Q4)$ $Z = Y + \text{SQRT}(SA3 * Y * Y - 2.0 * SA4 * Q + 2.0 * SA5 * \text{BET})$ $X1 = A11 * SA5 * Z * * (-2.941176471E-01) + (A12 + Q * (A13 + A14 * Q) + A15 * (SA6 - Q) * * 10 + A16 / (SA7 + Q18 * Q)) - (A17 + \text{BET} * (2 * A18 + 3 * A19 * \text{BET})) / (SA8 + Q10 * Q) - A20 * Q18 * (SA9 + Q2) * (-3.0 / (SA10 + \text{BET}) * * 4 + SA11) + \text{BET} * \text{BET} * (3.0 * A21 * (SA12 - Q) + 4.0 * A22 * \text{BET} / (Q10 * Q10))$	
Computing Time	80286 Single Precision	7.80×10^{-3} s
	80286 Double Precision	1.88×10^{-2} s
	80287 Single Precision	2.50×10^{-3} s
	80287 Double Precision	2.80×10^{-3} s

Table 9. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Compressed Water Region (Example 2)

Method of Calculation	Equation of State ¹⁾ in Compressed Water Region (Example 2)	
	$Q22 = Q * Q$ $Q4 = Q2 * Q2$ $Q8 = Q4 * Q4$ $Q10 = Q8 * Q2$ $Q18 = Q10 * Q8$ $SA6Q = SA6 - Q$ $SA10B = SA10 + \text{BET}$ $Y = 1 - SA1 * Q2 - SA2 / (Q2 * Q4)$ $Z = Y + \text{SQRT}(SA3 * Y * Y - 2.0 * SA4 * Q + 2.0 * SA5 * \text{BET})$ $X1 = A11 * SA5 * Z * * (-2.941176471E-01) + (A12 + Q * (A13 + A14 * Q) + A15 * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA5Q + A16 / (SA7 + Q18 * Q)) - (A17 + \text{BET} * (2 * A18 + 3 * A19 * \text{BET})) / (SA8 + Q10 * Q) - A20 * Q18 * (SA9 + Q2) * (-3.0 / (SA10B * SA10B * SA10B * SA10B) + SA11) + \text{BET} * \text{BET} * (3.0 * A21 * (SA12 - Q) + 4.0 * A22 * \text{BET} / (Q10 * Q10))$	
Computing Time	80286 Single Precision	7.60×10^{-3} s
	80286 Double Precision	1.90×10^{-3} s
	80287 Single Precision	2.40×10^{-3} s
	80287 Double Precision	2.70×10^{-3} s

Table 10. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Compressed Water Region (Example 3)

Method of Calculation	Equation of State ¹⁾ in Compressed Water Region (Example 3)	
	$Q2=Q*Q$ $Q4=Q2*Q2$ $Q8=Q4*Q4$ $Q10=Q8*Q2$ $Q18=Q10*Q8$ $SA6Q=SA6-Q$ $SA6Q2=SA6Q*SA6Q$ $SA6Q4=SA6Q2*SA6Q2$ $SA10B=SA10+BET$ $SA10B2=SA10B*SA10B$ $Y=1-SA1*Q2-SA2/(Q2*Q4)$ $Z=Y+SQRT(SA3*Y*Y-2.0*SA4*Q+2.0*SA5*BET)$ $X1=A11*SA5*Z*(-2.941176471E-01)+(A12+Q*(A13+A14*Q)+A15*SA6Q4*SA6Q4*SA6Q2+A16/(SA7+Q18*Q))-(A17+BET*(2*A18+3*A19*BET))/(SA8+Q10*Q)-A20*Q18*(SA9+Q2)*(-3.0/(SA10B2*SA10B2)+SA11)+BET*BET*(3.0*A21*(SA12-Q)+4.0*A22*BET/(Q10*Q10))$	
Computing Time	80286 Single Precision	7.40×10^{-3} s
	80286 Double Precision	1.84×10^{-2} s
	80287 Single Precision	2.40×10^{-3} s
	80287 Double Precision	2.70×10^{-3} s

Table 11. Equation of State by Oguchi *et al.*³⁾ in Compressed Water Region

Method of Calculation	Equation of State ³⁾ in Compressed Water Region	
	$TR2=TR*TR$ $TR3=TR2*TR$ $TR4=TR2*TR2$ $X2=A5+(A4+(A3+(A2+A1/TR4)/TR4)/TR)/TR+TR4*(A6+TR4*(A7+TR4*(A8+TR4*(A9+TR4*(A10+TR4*A11))))+(A12/TR2+A13+TR2*(A14+TR2*(A15+TR2*(A16+TR2*(A17+TR2*(A18+TR2*(A19+TR2*A20)))))*EXP(-0.05516*PR)+(A21+TR2*(A22+TR2*(A23+TR2*(A24+TR2*(A25+TR2*(A26+TR2*(A27+TR2*(A28+TR2*A29)))))*EXP(-0.375088*PR)+(TR4*TR4*TR4*TR4*TR4*TR4*TR4*TR2)*(A30+TR3*(A31+TR4*TR*(A32+TR4*TR3*A33))*EXP(-2.2064*PR)+A34*EXP(126.1923*TR+9.48752*PR)$	
Computing Time	80286 Single Precision	—
	80286 Double Precision	2.84×10^{-2} s
	80287 Single Precision	2.70×10^{-3} s
	80287 Double Precision	3.10×10^{-3} s

$$P_r = \frac{P}{P_c} = \frac{P(\text{MPa})}{22.064}$$

$$\left. \begin{array}{l} A_i \ (i=1 \sim 34) \\ n_i \ (i=1 \sim 34) \\ m_i \ (i=1 \sim 34) \end{array} \right\} \text{は定数}$$

上式の実行結果を Table 11 に示した。

5.2.3 圧縮水域の式に関する考察：

Table 8 と Table 9 に CPU の違いによる処理速度の逆転の例を示した。Table 8 の Example 1 に使用した (SA6-Q) * * 10 および (SA10+BET) の項について、Table 9 の Example 2 ではそれぞれ SA6Q=SA6-Q および SA10B=SA10+BET と置いて積の形に展開した。その結果、CPU286 単独の倍精度計算の場合を除いて Example 2 の方が若干速くなっている。この原因は、Fig. 7 の結果が示すように、CPU286 単独で倍精度計算では指数が 5 以上になると指数演算の方が積演

算よりも速くなるのに対して、Fig. 6, Fig. 8 および Fig. 9 の場合には指数が 10 の状態では、まだ積演算の方が速いためと考えられる。さらに Table 10 の Example 3 においては、Example 2 の上述の項について積を 4 乗ごとに別に計算させる事によって、すべての条件下で Example 1 の場合よりも速くなった。また Table 11 の小口らの式は組み込み関数 EXP が 4 個含まれているため、CPU286+287 の場合の他の式との時間比に比べて、CPU286 単独の場合のそれは遅くなっている。

5.3 水の過熱蒸気域の状態式¹⁾

水の過熱蒸気域における状態式について、実用状態式¹⁾ および小口らの式³⁾ について計算処理時間の短いプログラムの組み方を考察した。

5.2.1 実用国際状態式¹⁾

過熱蒸気域における実用国際状態式は次式

Table 12. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Superheated Steam Region

Method of Calculation	Equation of State ¹⁾ in Superheated Steam Region	
	$\begin{aligned} X &= \text{EXP}(SB * (1 - Q)) \\ X3 &= X * X * X \\ X4 &= X3 * X \\ X6 &= X3 * X3 \\ X7 &= X3 * X4 \\ X10 &= X7 * X3 \\ X14 &= X7 * X7 \\ X13 &= X10 * X3 \\ X27 &= X14 * X13 \\ BET2 &= BET * BET \\ BETM4 &= 1.0 / BET2 / BET2 \\ BETM5 &= BETM4 / BET \\ BETLL &= BET / (L0 + Q * (L1 + L2 * Q)) \\ BETLL2 &= BETLL * BETLL \\ BETLL4 &= BETLL2 * BETLL2 \\ BETLL6 &= BETLL4 * BETLL2 \\ VR &= I1 * Q / BET - (X * 2.0 * BET * B23 + X * (2.0 * BET * B22 + X * (B12 + X7 * (3.0 * BET2 * B32 + X3 * (B11 + X * BET * (4.0 * BET2 * B42 + X4 * (2.0 * B21 + BET * 3.0 * B31 + BET * X6 * (5.0 * BET * B53 + X * (4.0 * B41 + 5.0 * X3 * BET * (B52 + X4 * B51)))))))))) - (X10 * X * 4.0 * (B61 * X + B62) / (BETM4 + SB61 * X14) * * 2 + X3 * (6.0 * (B81 * X10 + B82) / (BETM5 / BET + (SB81 * X27 + SB82) * X27) * * 2 / BET + X4 * 5.0 * (B71 * X6 + B72) / (BETM5 + SB71 * X13 * X6) * * 2) / BET) * BETM5) + 11.0 * BETLL6 * BETLL4 * (B90 + X * (B91 + X * (B92 + X * (B93 + X * (B94 + X * (B95 + X * B96))))))) \end{aligned}$	
Computing Time	80286 Single Precision	1.00×10^{-2} s
	80286 Double Precision	2.20×10^{-2} s
	80287 Single Precision	4.70×10^{-3} s
	80287 Double Precision	5.00×10^{-3} s

である¹⁾。

$$\begin{aligned} \chi_2 = I_1 \frac{\theta}{\beta} - \sum_{\mu=1}^5 \mu \beta^{\mu-1} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{z(\mu,\nu)} \\ - \sum_{\mu=6}^8 \frac{(\mu-2)\beta^{1-\mu} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{z(\mu,\nu)}}{[\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu\lambda} X^{x(\mu,\lambda)}]^2} \\ + 11 \left(\frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{\nu=0}^6 B_{\mu\nu} X^2 \end{aligned} \quad (12)$$

ここで

$$X = \exp \{b(1-\theta)\}$$

$$\beta = \frac{P}{P_{c1}} = \frac{P(\text{MPa})}{22.12}$$

$$\theta = \frac{T}{T_c} = \frac{T(\text{K})}{647.3}$$

$B_{\mu\nu}$, $b_{\mu\lambda}$, $Z(\mu\nu)$, $x(\mu,\lambda)$, b は定数である。

上式の実行結果を Table 12 に示した。

5.3.2 小口らの状態式³⁾：

小口らの過熱蒸気域における状態式は次式である³⁾。

$$v_r = \frac{T_r}{(Z_c P_r)} + \sum_{i=1}^{38} b_i P_r^{m_i} / T_r^{n_i} \quad (13)$$

ここで

Table 13. Equation of State by Oguchi *et al.*³⁾ in Superheated Steam Region (Example 1)

Method of Calculation	Equation of State ³⁾ in Superheated Steam Region (Example 1)	
	E=0.0 DO 119 J=1, 38 TRT=TR ** NA(J) E1=B(J) * PR ** MA(J)/TR ** NA(J) E=E1+E 119 CONTINUE VR=TR/(ZC * PR)+E	
Computing Time	80286 Single Precision	2.80×10^{-1} s
	80286 Double Precision	7.80×10^{-1} s
	80287 Single Precision	6.40×10^{-2} s
	80287 Double Precision	6.60×10^{-2} s

Table 14. Equation of State by Oguchi *et al.*³⁾ in Superheated Steam Region (Example 2)

Method of Calculation	Equation of State ³⁾ in Superheated Steam Region (Example 2)	
	ZC=PC*VC/(R*TC) E1=(B1/TR+B2/TR**2+B3/TR**3+B4/TR**4+B5/TR**5)+(B6/TR**5+B7/TR**6+B8/TR**7+B9/TR**8+B10/TR**9+B11/TR**10)*PR+(B12/TR**20+B13/TR**26+B14/TR**27+B15/TR**30+B16/TR**33+B17/TR**35+B18/TR**37+B19/TR**40)*PR**5+(B20/TR**18+B21/TR**41+B22/TR**42+B23/TR**43+B24/TR**48+B25/TR**52+B26/TR**60)*PR**8+(B27/TR**25+B28/TR**68+B29/TR**69+B30/TR**70+B31/TR**115)*PR**14+(B31/TR**115+B33/TR**133+B34/TR**162+B35/TR**167+B36/TR**177+B37/TR**190+B38/TR**200)*PR**27 VR=TR/(ZC*PR)+E1	
Computing Time	80286 Single Precision	3.30×10^{-2} s
	80286 Double Precision	6.95×10^{-2} s
	80287 Single Precision	1.35×10^{-2} s
	80287 Double Precision	1.42×10^{-2} s

Table 15. Equation of State by Oguchi *et al.*³⁾ in Superheated Steam Region (Example 3)

Methon of Calculation	Equation of State ³⁾ in Superheated Steam Region (Example 3)	
	TR2=TR*TR TR3=TR2*TR TR4=TR3*TR TR5=TR4*TR TR10=TR5*TR5 TR13=TR10*TR3 TR18=TR13*TR5 TR23=TR13*TR10 TR25=TR23*TR2 TR45=TR25*TR10*TR10 PR3=PR*PR*PR PR4=PR3*PR PR9=PR3*PR3*PR3 VR=TR/(ZC*PR)+((B1+(B2+(B3+(B4+B5/TR)/)/TR)/TR)/TR)+PR*((B6+B7+(B8+B9+(B10+B11/TR)/TR)/TR)/TR)+PR4*((B20+(B21+(B22+(B23+(B24+(B25+B26/(TR5*TR3))/TR4)/TR5)/TR)/TR)/TR23)*PR3+((B12+(B13+(B14+(B15+(B16+(B17+(B18+B19/TR3)/TR2)/TR2)/TR3)/TR3)/TR)/(TR5*TR))+PR9*((B27+(B28+(B29+(B30+B31/TR45)/TR)/TR)/(TR25*TR18)))+(B32+(B33+(B34+(B35+(B36+(B37+B38/TR10/TR13)/TR10)/TR5)/(TR25*TR4))/TR18)/PR9*TR4/(TR45*TR45))/TR5)/TR2)/TR13)/TR4)/TR	
Computing Time	80286 Single Precision	7.00×10^{-3} s
	80286 Double Precision	1.75×10^{-2} s
	80287 Single Precision	4.60×10^{-3} s
	80287 Double Precision	4.90×10^{-3} s

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{T(K)}{647.14}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c} = \frac{P(\text{MPa})}{22.064}$$

$$Z_c = \frac{P_c V_c}{RT_c}$$

bi, mi, ni は定数とする。

上式の実行結果を3例について検討し、Table 13, Table 14 および Table 15 に示した。

5.3.3 過熱蒸気域の式に関する考察:

Table 13 については、式を配列とループを使って項を加算していったプログラムで、Table 14 および Table 15 と比較すると圧倒的に時間がかかる事がわかる。また Table 14 が単に和式を展開した形であるのに対し Table 15 のようにさらに同類項をまとめ、指数の大きな部分を指数の小さいものに分解して計算した形の方がさらに短い計算時間で処理できることがわかる。

6. 結 論

コンピュータを使用する場合、計算時間の短い計算式の作成およびプログラム作成にあたっては、数値演算プロセッサの有無や計算精度など同じ CPU, 同じ言語であっても、その使用条件によって多少変わってくる。本研究では 16 ビットのパーソナルコンピュータ NEC-PC9801VX によって水の飽和蒸気圧式、圧縮水域における状態式および過熱蒸気域における状態式についてそれぞれ具体的に比較検討し、その最も処理時間の短い形を考察した。

この結果、飽和蒸気圧の相関式においては Saul らの式の Example 2 が最も計算時間が短い。圧縮水域の状態式では実用国際状態式の Example 3 が最も計算時間が短い。過熱蒸気域の状態式では、小口らの式³⁾の Example 3 が最も計算時間が短い。

文 献

- 1) 日本機械学会, 蒸気表, (1980), 106
- 2) A. Saul and W. Wagner, J. Phys. Chem. Ref. Data, 16 (4), 893 (1987)
- 3) K. Oguchi, J. Kijima, Y. Takaishi, H. Kishima and I. Tanishita, "New Formulation of Thermodynamic Properties of Water and Steam for Industrial Use Based on the International Skeleton Tables (1985)", Submitted to the 1990 IAPWS Meeting, 16-21 September, 1990 Buenos Aires, Argentina