

熱力学状態式の実用計算のための 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

佐藤 智明*・小口 幸成*

Study on the Reduction of the Computing Time of Thermodynamic
Equation of State for Industrial Use
Second Report : Comparison of Fortran Compiler and Effect of Compiler on the
Calculation of International Formulation for Industrial Use

Tomoaki SATO and Kosei OGUCHI

Abstract

For designing the power plants, the international formulation¹⁾ for industrial use has to be used for the property calculation of water and steam internationally. However, the computing time of this formulation is quite a lot in the whole cycle calculation, and also a personal computer is widely used for such kind of design calculation. Therefore, the special programming method for the reduction of computing time is expected to be developed.

In the present study, the computing time has been compared between the compilers of Pro-Fortran and MS-Fortran concerning the fundamental arithmetic functions with the use of a 32 bit personal computer NEC-9801NS/T, as shown in Table 1 and 2. Based on these comparisons, the computing time has been reduced to 50% of normal calculation, as shown in Table 3 to 12 and in Fig. 1 and 2.

1. ま え が き

コンピュータの性能も向上し、従来、大型の計算機を使用した複雑な科学技術計算も、使い勝手のよさからパーソナルコンピュータで計算されるようになってきた。しかし同時に毎日膨大な量の計算を行う企業では時間的コストの面で、より計算時間の短い計算システムが要求され、またリアルタイムで行われる制御分野でのフィードバック計算等、計算処理速度がその製品の精度や性能を大きく左右することも多い。熱工学の分野においても、熱サイクル計算、蒸気タービン、ボ

イラー等の設計開発において、あるいは発電プラント等の制御システムなどの分野において、伝熱解析、熱物性計算等を含んだシステム計算にパーソナルコンピュータを使用する機会が増えた。そのため、これらの計算に要する計算処理速度が無視できなくなっている。よって、前報では、水の実用国際状態式(IFC-67)¹⁾を例にとり、16ビットのパーソナルコンピュータで計算時間短縮方法を考察したが、本報では32ビットパーソナルコンピュータを用いてその考察を深めた。

本報では始めに最もよく使われる基本的な演算式について計算速度の比較を示し、次にその結果をふまえて水の実用国際状態式¹⁾の中から水の飽和蒸気圧の温度と圧力の関係、圧縮水域の状態式および過熱蒸気域の状態式について計算時間の短いプログラム方法を検

1992年9月28日受理

* 機械工学科

討した。

2. コンピュータおよび使用言語

コンピュータは、NEC9801NS/T(CPUはインテル社製 i80386SL と数値演算プロセッサ i80387SX, クロック周波数 20 MHz) を使用し、コンパイラは ProFortran (プロスペロ社) と MSFortran (マイクロソフト社) を使用して計算時間の比較を行った。計算時間の計測には各コンパイラに用意されているタイマーサブルーチンを使用した。計算時間の計測方法は、対象とする計算式をループにより整数回計算した所要時間から計算式の無い空ループを同じ回数ループさせた所要時間を引くことによって求めた。また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) を暗黙の型宣言することによって行った。

3. 基本的な演算式の計算時間の比較

コンピュータで計算するときに基本となる四則演算および組み込み関数について、MSFortran と ProFortran を使い、単精度と倍精度の場合について計算時間比較を行い、それぞれ Table 1 および 2 に示した。表

中に計算時間比較の方法として 2 例を示した。すなわちその 1 例は、各計算を 10^8 回ループさせたときの絶対時間と、もう 1 例は、 $Y=X+a$ の計算時間に対する各計算の相対計算時間比である。

Table 1 および 2 を比較すると、2 つのコンパイラ間に、以下に示す特徴があることが明らかとなった。絶対時間比較では、全体的に MSFortran による計算速度が早い。整数乗計算と指数関数計算は ProFortran による方が早い。また相対時間比較では、ProFortran では簡単な四則演算に対して、指数関数や三角関数などの組み込み関数の計算所要時間が 7, 8 倍なのに対し、MSFortran では 20~25 倍となる。また両コンパイラとも指数計算 $Y=X**N$ (N は 3 以上の整数変数) に比べて $Y=X**2$ 計算が明らかに速い。本研究ではこのことに着目し、 $X**2$ の計算を組み合わせさせて計算させることにより高次の累乗計算を行い計算時間を短縮させることを考察した。すなわち X^N 計算に関して $X^2, X^4, X^8, \dots, X^{64}$ といった 2 の累乗計算を $(X**2)**2**2\dots$ のようにプログラムした時と、 $X**N$, あるいは $X*X*X*\dots$ とプログラムした時の計算時間比較を、それぞれ単精度、倍精度、また ProFortran, MSFortran について Fig. 1 から 4 に図示した。同様に 3 の累乗についての比較も同図に示した。この結果、ProFortran では整数定数の指数計算の

Table 1. Comparisons of the Computing Times for the Different Form of Equation (Loops=100,000,000, ProFortran, NEC9801NS/T, 80386SL+80387SX, 20 MHz)

Precision	Single		Double	
	Absolute Time (μ s)	Relative Time	Absolute Time (μ s)	Relative Time
Type of Equation				
$Y=X+a$	13.51	1.00	15.83	1.00
$Y=X * a$	14.06	1.04	16.00	1.01
$Y=X/a$	14.86	1.10	17.29	1.09
$Y=\text{SQRT}(X)$	28.14	2.08	28.88	1.82
$Y=X ** 2$	13.46	1.00	14.64	0.92
$Y=\text{LOG}(x)$	32.53	2.41	32.93	2.08
$Y=\text{LOG}_{10}(x)$	32.25	2.39	33.31	2.10
$Y=\text{EXP}(X)$	81.96	6.07	82.27	5.20
$Y=X ** \text{REAL}$	115.43	8.54	116.99	7.39
$Y=X ** \text{INT}$	83.41	6.17	81.96	5.18
$Y=\text{SIN}(x)$	117.58	8.70	119.24	7.53
$Y=\text{COS}(X)$	127.67	9.45	130.48	8.24
$Y=\text{TAN}(X)$	107.67	7.97	110.91	7.01
$Y=X$	8.67	0.64	10.35	0.65

Table 2. Comparisons of the Computing Times for the Different Form of Equation (Loops=100,000,000, MSFortran, NEC9801NS/T, 80386SL+80387SX, 20 MHz)

Precision	Single		Double		
	Type of Equation	Absolute Time (μ s)	Relative Time	Absolute Time (μ s)	Relative Time
	Y=X+a	3.80	1.00	5.80	1.00
	Y=X * a	4.00	1.05	5.70	0.98
	Y=X/a	7.00	1.84	8.60	1.48
	Y=SQRT(X)	23.10	6.05	25.10	4.33
	Y=X ** 2	4.00	1.05	5.60	0.96
	Y=LOG(x)	28.80	7.58	29.90	5.16
	Y=LOG ₁₀ (x)	29.60	7.79	30.80	5.31
	Y=EXP(X)	96.60	25.42	98.80	17.03
	Y=X ** REAL	104.00	27.37	99.00	17.07
	Y=X ** INT	104.00	27.37	98.80	17.03
	Y=SIN(X)	71.70	18.87	73.00	12.59
	Y=COS(X)	74.10	19.50	75.60	13.03
	Y=TAN(X)	92.60	24.37	83.30	14.36
	Y=X	1.10	0.29	2.60	0.45

場合、3乗までと4乗以上との間に計算所要時間の大きな相違が見られ、2乗および3乗について計算の高速化をはかるように工夫されたソフトウェアであることが分かる。したがって2の累乗、3の累乗については(X ** 2) ** 2...や(X ** 3) ** 3...と記述して計算した方が計算時間が短い。一方MSFortranにおいては計算所要時間は2乗までと3乗の間にソフトウェアによる相違があり、2の累乗計算にのみ(X **

2) ** 2...の記述が有効である。

4. 熱力学状態式への応用

熱力学状態量の計算では水および水蒸気の熱力学性質を求める実用国際状態式¹⁾による計算が最も長時間を要するものである。よって本研究では、前述の結果を考慮して、飽和温度と圧力の関係式、圧縮水域の状

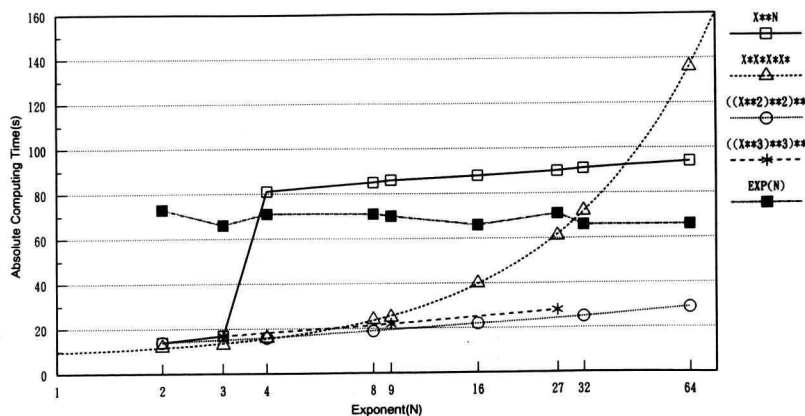


Fig. 1. Comparisons between the Computing Times of X^N (by Single Precision) (ProFortran, 386SL+387SX, 20MHz, Loops=1,000,000)

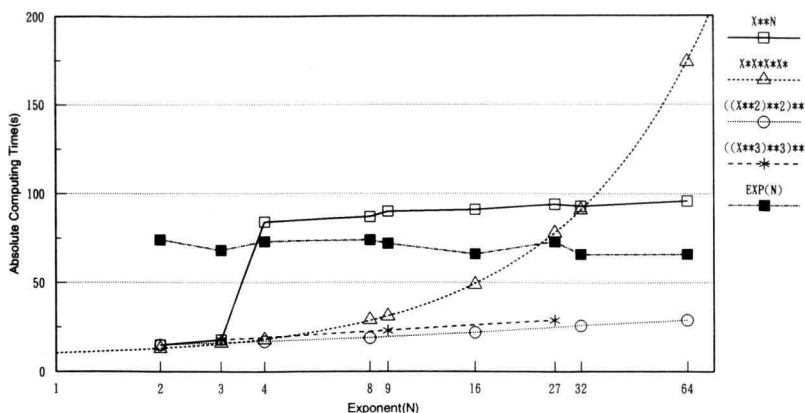


Fig. 2. Comparisons between the Computing Times of X^N (by Double Precision) (ProFortran, 386SL+387SX, 20MHz, Loops=1,000,000)

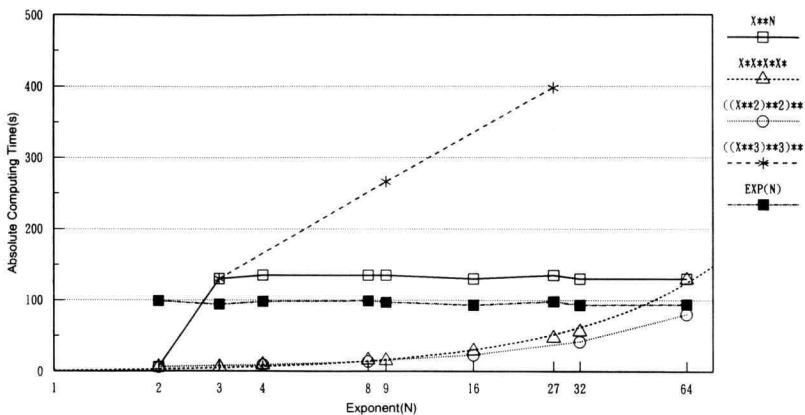


Fig. 3. Comparisons between the Computing Times of X^N (by Single Precision) (MSFortran, 386SL+387SX, 20MHz, Loops=1,000,000)

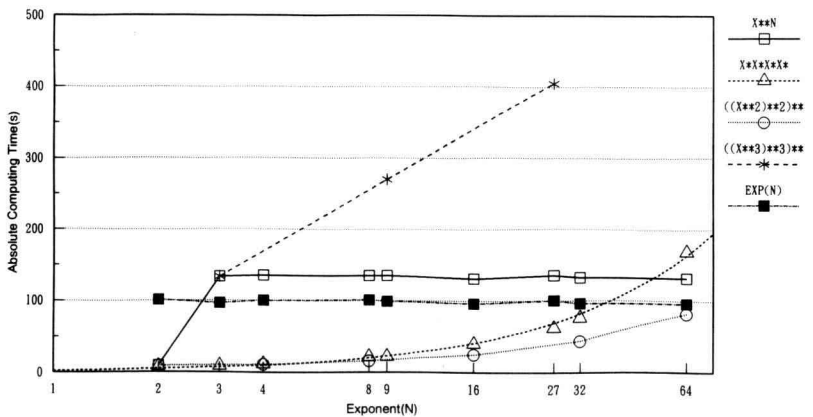


Fig. 4. Comparisons between the Computing Times of X^N (by Double Precision) (MSFortran, 386SL+387SX, 20MHz, Loops=1,000,000)

Table 3. Vapor Pressure Equation of IFC-67¹⁾, No. 1 (Loops=100,000)

Calculation Method	Vapor Pressure Equation, No. 1	
	$Q = TQ/647.30E+00$ $Q1 = ONE - Q$ $BKQ = EXP((Q1 * K1 + Q1 * * 2 * K2 + Q1 * * 3 * K3 + Q1 * * 4 * K4 + Q1 * * 5 * K5) / (Q * (ONE + K6 * Q1 + K7 * Q1 * * 2))) - Q1 / (K8 * Q1 * * 2 + K9)$	
Computing Time	ProFortran Single	32 (s)
	ProFortran Double	34 (s)
	MSFortran Single	55 (s)
	MSFortran Double	57 (s)

Table 4. Vapor Pressure Equation of IFC-67¹⁾, No. 2 (Loops=100,000)

Calculation Method	Vapor Pressure Equation, No. 2	
	$Q = TQ/647.30E+00$ $Q1 = ONE - Q$ $BKQ = EXP((Q1 * K1 + Q1 * Q1 * K2 + Q1 * Q1 * Q1 * K3 + (Q1 * Q1) * * 2 * K4 + (Q1 * Q1) * * 2 * Q1 * K5) / (Q * (ONE + K6 * Q1 + K7 * Q1 * Q1))) - Q1 / (K8 * Q1 * Q1 + K9)$	
Computing Time	ProFortran Single	18 (s)
	ProFortran Double	20 (s)
	MSFortran Single	17 (s)
	MSFortran Double	18 (s)

Table 5. Vapor Pressure Equation IFC-67¹⁾, No. 3 (Loops=100,000)

Calculation Method	Vapor Pressure Equation, No. 3	
	$Q = TQ/647.30E+00$ $Q1 = ONE - Q$ $BKQ = EXP(((Q1 * K1 + Q1 * (K2 + Q1 * (K3 + Q1 * (K4 + Q1 * K5)))))) / (Q * (ONE + K6 * Q1 + K7 * Q1 * (Q1))) - Q1 / (K8 * Q1 * Q1 * + K9)$	
Computing Time	Profortran Single	15 (s)
	ProFortran Double	18 (s)
	MSFortran Single	15 (s)
	MSFortran Double	17 (s)

態式および過熱蒸気域の状態式についてそれぞれプログラム記述形式を検討した。それらの記述方式と計算時間の関係を、Table 3～13 に示した。またこれらのプログラム方式について、ProFortran と MSFortran、

単精度計算と倍精度計算の相互比較を Fig. 5, 6 および 7 に示した。Table 3～13 中の時間は 10^5 回 Loop 計算させた時の絶対時間 (s) である。

Table 6. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Compressed Water Region, No. 1 (Loops=100,000)

Calculation Method	Equation of State in Compressed Water Region, No. 1	
	$Y=1-SA1 * Q * Q-SA2/(Q ** 6)$ $Z=Y+SQRT (SA3 * Y * Y-2. 0E+00 * SA4 * Q+2. 0E+00 * SA5 * BET)$ $X1=A11 * SA5 * Z * * (-2.941176471E-01)+(A12+Q *(A13+A14 * Q)+A15 * (SA6-Q) * * 10+A16/(SA7+Q * * 19))-(A17+BET *(2.0E+00 * A18+3.0E+00 * A19 * BET))/(SA8+Q * * 11)-A20 * Q * * 18 *(SA9+Q * Q) * (-3.0E+00/(SA10+BET) * * 4+SA11)+BET * BET *(3.0E+00 * A21 *(SA12-Q)+4. 0E+00 * A22 * BET/(Q * * 20))$	
Computing Time	ProFortran Single	86 (s)
	ProFortran Double	92 (s)
	MSFortran Single	126 (s)
	MSFortran Double	129 (s)

Table 7. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Compressed Water Region, No. 2 (Loops=100,000)

Calculation Method	Equation of State in Compressed Water Region, No. 2	
	$Y=1-SA1 * Q * Q-SA2/((Q * Q) ** 2 * Q * Q)$ $Z=Y+SQRT (SA3 * Y * Y-2.0E+00 * SA4 * Q+2. 0E+00 * SA5 * BET)$ $X1=A11 * SA5 * Z * * (-2.941176471E-01)+(A12+Q *(A13+A14 * Q)+A15 * (((SA6-Q) ** 2) ** 2) ** 2 *(SA6-Q) ** 2+A16/(SA7+(((Q * Q) ** 2) ** 2) ** 2 * Q * Q * Q))-(A17+BET *(2.0E+00 * A18+3.0E+00 * A19 * BET))/(SA8+((Q * Q) ** 2) ** 2 * Q * Q * Q)-A20 * (((Q * Q) ** 2) ** 2) ** 2 * Q * Q *(SA9+Q * Q) * (-3.0E+00/(SA10+BET) * * 4+SA11)+BET * BET *(3. 0E+00 * A21 *(SA12-Q)+4.0E+00 * A22 * BET/(((Q * Q) ** 2) ** 2) ** 2 * (Q * Q) ** 2))$	
Computing Time	ProFortran Single	54 (a)
	ProFortran Double	60 (s)
	MSFortran Single	59 (s)
	MSFortran Double	65 (s)

3.1 水の飽和温度と圧力の関係式に関する検討
 実用国際状態式¹⁾の水の飽和温度と圧力の関係式
 (水の飽和蒸気圧の相関式)について計算処理時間の短
 いプログラムの組み方を検討した。

3.1.1 水の飽和蒸気圧の相関式
 実用国際状態式¹⁾の水の飽和蒸気圧の相関式は次の
 とおりである。

$$\beta_k(\theta) = \exp \left[\frac{1}{\theta} \cdot \frac{\sum_{\nu=1}^5 k(1-\theta)^\nu}{1+k_6(1-\theta)+k_7(1-\theta)^2} - \frac{1-\theta}{k_8(1-\theta)^2+k_9} \right]$$

ここで

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

$$\theta = \frac{T}{T_{c1}} = \frac{T(\text{K})}{647.3}$$

k_1 から k_9 は定数¹⁾である。

上式の記述形式 No. 1~3 について, Table 3, 4 およ

Table 8. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Compressed Water Region, No. 3 (Loops=100,000)

Calculation Method	Equation of State in Compressed Water Region, No. 3	
	$Q2=Q * Q$ $Q4=Q2 * Q2$ $Q8=Q4 * Q4$ $Q10=Q8 * Q2$ $Q18=Q10 * Q8$ $SA6Q=SA6-Q$ $SA10B=SA10+BET$ $Y=1-SA1 * Q2-SA2/(Q2 * Q4)$ $Z=Y+SQRT(SA3 * Y * Y-2.0E+00 * SA4 * Q+2.0E+00 * SA5 * BET)$ $X1=A11 * SA5 * Z * * (-2.941176471E-01)+(A12+Q * (A13+A14 * Q)+A15 * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA6Q * SA5Q+A16/(SA7+Q18 * Q))-(A17+BET * (2.0E+00 * A18+3.0E+00 * A19 * BET))/((SA8+Q10 * Q)-A20 * Q18 * (SA9+Q2)) * (-3.0E+00/(SA10B * SA10B * SA10B * SA10B)+SA11)+BET * BET * (3.0E+00 * A21 * (SA12-Q)+4.0E+00 * A22 * BET/(Q10 * Q10))$	
Computing Time	ProFortran Single	46 (s)
	ProFortran Double	52 (s)
	MSFortran Single	35 (s)
	MSFortran Double	41 (s)

Table 9. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Compressed Water Region, No. 4 (Loops=100,000)

Calculation Method	Equation of State in Compressed Water Region, No. 4	
	$Q2=Q * Q$ $Q4=Q2 * Q2$ $Q8=Q4 * Q4$ $Q10=Q8 * Q2$ $Q18=Q10 * Q8$ $SA6Q=SA6-Q$ $SA10B=SA10+BET$ $Y=1-SA1 * Q2-SA2/(Q2 * Q4)$ $Z=Y+SQRT(SA3 * Y * Y-2.0E+00 * SA4 * Q+2.0E+00 * SA5 * BET)$ $X1=A11 * SA5 * Z * * (-2.941176471E-01)+(A12+Q * (A13+A14 * Q)+A15 * ((SA6Q * SA6Q) * * 2) * * 2 * SA6Q * SA5Q+A16/(SA7+Q18 * Q))-(A17+BET * (2.0E+00 * A18+3.0E+00 * A19 * BET))/(SA8+Q10 * Q)-A20 * Q18 * (SA9+Q2)) * (-3.0E+00/(SA10B * SA10B * SA10B * SA10B)+SA11)+BET * BET * (3.0E+00 * A21 * (SA12-Q)+4.0E+00 * A22 * BET/(Q10 * Q10))$	
Computing Time	ProFortran Single	45 (s)
	ProFortran Double	51 (s)
	MSFortran Single	35 (s)
	MSFortran Double	42 (s)

Table 10. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Superheated Steam Region, No. 1 (Loops=100,000)

	Equation of State in Superheated Steam Region, No. 1	
	$X = \text{EXP}(SB * (1 - Q))$ $\text{BET2} = \text{BET} * \text{BET}$ $\text{BETM4} = 1.0\text{E}+00 / \text{BET2} / \text{BET2}$ $\text{BETM5} = \text{BETM4} / \text{BET}$ $\text{BETLL} = \text{BET} / (L0 + Q * (L1 + L2 * Q))$ $\text{BETLL2} = \text{BETLL} * \text{BETLL}$ $\text{BETLL4} = \text{BETLL2} * \text{BETLL2}$ $\text{BETLL6} = \text{BETLL4} * \text{BETLL2}$ $\text{VR} = I1 * Q / \text{BET} - (X * (2.0\text{E}+00 * \text{BET} * \text{B23} + X * (2.0\text{E}+00 * \text{BET} * \text{B22} + X * (\text{B12} + X * * 7 * (3.0\text{E}+00 * \text{BET2} * \text{B32} + X * * 3 * (\text{B11} + X * \text{BET} * (4.0\text{E}+00 * \text{BET2} * \text{B42} + X * * 4 * (2.0\text{E}+00 * \text{B21} + \text{BET} * (3.0\text{E}+00 * \text{B31} + \text{BET} * X * * 6 * (5.0\text{E}+00 * \text{BET} * \text{B53} + X * (4.0\text{E}+00 * \text{B41} + 5.0\text{E}+00 * X * * 3 * \text{BET} * (\text{B52} + X * * 4 * \text{B51)))))))))) - (X * * 10 * X * (4.0\text{E}+00 * (\text{B61} * X + \text{B62})) / (\text{BETM4} + \text{SB61} * X * * 14) * * 2 + X * * 3 * (6.0\text{E}+00 * (\text{B81} * X * * 10 + \text{B82})) / (\text{BETM5} / \text{BET} + (\text{SB81} * X * * 27 + \text{SB82}) * X * * 27) * * 2 / \text{BET} + X * * 4 * 5.0\text{E}+00 * (\text{B71} * X * * 6 + \text{B72})) / (\text{BETM5} + \text{SB71} * X * * 13 * X * * 6) * * 2) / \text{BET}) * \text{BETM5}) + 11.0\text{E}+00 * \text{DETLL6} * \text{BETLL4} * (\text{B90} + X * (\text{B91} + X * (\text{B92} + X * (\text{B93} + X * (\text{B94} + X * (\text{B95} + X * \text{B96}))))))$	
Computing Time	ProFortran Single	229 (s)
	ProFortran Double	236 (s)
	MSFortran Single	230 (s)
	MSFortran Double	238 (s)

Table 11. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Superheated Steam Region, No. 2 (Loops=100,000)

	Equation of State in Superheated Steam Region, No. 2	
	$X = \text{EXP}(SB * (1 - Q))$ $\text{BET2} = \text{BET} * \text{BET}$ $\text{BETM4} = 1.0\text{E}+00 / \text{BET2} / \text{BET2}$ $\text{BETM5} = \text{BETM4} / \text{BET}$ $\text{BETLL} = \text{BET} / (L0 + Q * (L1 + L2 * Q))$ $\text{VR} = I1 * Q / \text{BET} - (X * (2.0\text{E}+00 * \text{BET} * \text{B23} + X * (2.0\text{E}+00 * \text{BET} * \text{B22} + X * (\text{B12} + X * (3.0\text{E}+00 * \text{BET2} * \text{B32} + X * X * X * (\text{B11} + X * \text{BET} * (4.0\text{E}+00 * \text{BET2} * \text{B42} + ((X * X) * * 2) * (2.0\text{E}+00 * \text{B21} + \text{BET} * (3.0\text{E}+00 * \text{B31} + \text{BET} * ((X * X) * * 2) * X * X * (5.0\text{E}+00 * \text{BET} * \text{B53} + X * (4.0\text{E}+00 * \text{B41} + 5.0\text{E}+00 * X * X * X * \text{BET} * (\text{B52} + ((X * X) * * 2) * \text{B51)))))))))) - (((X * X) * * 2) * * 2) * X * X * X * (4.0\text{E}+00 * (\text{B61} * X + \text{B62})) / (\text{BETM4} + \text{SB61} * (((X * X) * * 2) * * 2) * * 2) / (X * X)) * * 2 + X * X * X * (6.0\text{E}+00 * (\text{B81} * (((X * X) * * 2) * * 2) * X * X + \text{B82})) / (\text{BETM5} / \text{BET} + (\text{SB81} * (((X * X) * * 2) * * 2) * * 2) * * 2) * * 2 / ((X * X) * * 2 * X) + \text{SB82}) * (((X * X) * * 2) * * 2) * * 2) / ((X * X) * * 2) * X)) * * 2 / \text{BET} + ((X * X) * * 2) * 5.0\text{E}+00 * (\text{B71} * ((X * X) * * 2) * X * X + \text{B72})) / (\text{BETM5} + \text{SB71} * (((X * X) * * 2) * * 2) * * 2) * X * X * X * * 2) / \text{BET}) * \text{BETM5}) + 11.0\text{E}+00 * (((\text{BETLL} * \text{BETLL}) * * 2) * * 2) * \text{BETLL} * \text{BETLL} * (\text{B90} + X * (\text{B91} + X * (\text{B92} + X * (\text{B93} + X * (\text{B94} + X * (\text{B95} + X * \text{B96}))))))$	
Computing Time	ProFortran Single	169 (s)
	ProFortran Double	180 (s)
	MSFortran Single	69 (s)
	MSFortran Double	80 (s)

Table 12. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Superheated Steam Region, No. 3 (Loops=100,000)

Calculation Method	Equation of State in Superheated Steam Region, No. 3	
	X=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=1.0E+00/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 * (2.0E+00 * BET * B23+X * (2.0E+00 * BET * B22+X * (B12+X7 * (3.0E+00 * BET2 * B32+X3 * (B11+X * BET * (4.0E+00 * BET2 * B42+X4 * (2.0E+00 * B21+BET * (3.0E+00 * B31+BET * X6 * (5.0E+00 * BET * B53+X * (4.0E+00 * B41+5.0E+00 * X3 * BET * (B52+X4 * B51)))))))))) - (X10 * X * (4.0E+00 * (B61 * X+B62)/(BETM4+SB61 * X14) * * 2+X3 * (6.0E+00 * (B81 * X10+B82)/(BETM5/BET+(SB81 * X27+SB82) * X27) * * 2/BET+X4 * 5.0E+00 * (B71 * X6+B72)/(BETM5+SB71 * X13 * X6) * * 2)/BET) * BETM5)+11.0E+00 * BETLL6 * BETLL4 * (B90+X * (B91+X * (B92+X * (B93+X * (B94+X * (B95+X * B96))))))		
Computing Time	ProFortran Single	112 (s)
	ProFortran Double	123 (s)
	MSFortran Single	45 (s)
	MSFortran Double	56 (s)

び5に示し、その計算時間比較を Fig. 5 に示した。

3.1.2 水の飽和蒸気圧の相関式に関する考察

No. 1は Table 3 に示すように各累乗の項を整数指数によって独立に累乗計算を行わせている。No. 2は Table 4 に示すように各累乗の項を独立に (X * * 2) * * 2の形で記述している。また Table 5 に示すように、No. 3は各累乗の項を同類項でまとめることにより、各累乗計算をできるだけ X * X の形で計算できるように工夫している。この結果、No. 1より No. 2と No. 3が ProFortranでは約50%, MSFortranでは約70%速くなることが分かる。これにより式の記述の工夫によって、かなりの計算時間短縮が可能である。

3.2 圧縮水域の状態式に関する検討

実用国際状態式¹⁾の圧縮水域における状態式について計算処理時間の短いプログラムの組み方を検討した。

3.2.1 水の圧縮水域の状態式

実用国際状態式¹⁾の圧縮水域の状態式は次のとおりである。

Table 13. Equation of State of IFC-67¹⁾ in Superheated Steam Region, No. 4 (Loops=100,000)

Equation of State Superheated Steam Region, No. 4	
Calculation Method	$X = \text{EXP}(SB * (1 - Q))$
	$X3 = X * X * X$
	$X4 = X3 * X$
	$X6 = X3 * X3$
	$X7 = X3 * X4$
	$X10 = X7 * X3$
	$X14 = X7 * X7$
	$X13 = X10 * X3$
	$X27 = X14 * X13$
	$BET2 = BET * BET$
Computing Time	$BETM4 = 1.0E+00 / BET2 / BET2$
	$BETM5 = BETM4 / BET$
	$BETLL = BET / (L0 + Q * (L1 + L2 * Q))$
	$VR = I1 * Q / BET - (X * (2.0E+00 * BET * B23 + X * (2.0E+00 * BET * B22 + X * (B12 + X7 * (3.0E+00 * BET2 * B32 + X3 * (B11 + X * BET * (4.0E+00 * BET2 * B42 + X4 * (2.0E+00 * B21 + BET * (3.0E+00 * B31 + BET * X6 * (5.0E+00 * BET * B53 + X * (4.0E+00 * B41 + 5.0E+00 * X3 * BET * (B52 + X4 * B51)))))))))) - (X10 * X * (4.0E+00 * (B61 * X + B62)) / (BETM4 + SB61 * X14)) * * 2 + X3 * (6.0E+00 * (B81 * X10 + B82)) / (BETM5 / BET + (SB81 * X27 + SB82) * X27) * * 2 / BET + X4 * 5.0E+00 * (B71 * X6 + B72)) / (BETM5 + SB71 * X13 * X6) * * 2) / BET) * BETM5) + 11.0E+00 * ((BETLL * BETLL) * * 2) * * 2 * BETLL * BETLL * (B90 + X * (B91 + X * (B92 + X * (B93 + X * (B94 + X * (B95 + X * B96))))))$
ProFortran Single	110 (s)
ProFortran Double	120 (s)
MSFortran Single	46 (s)
MSFortran Double	56 (s)

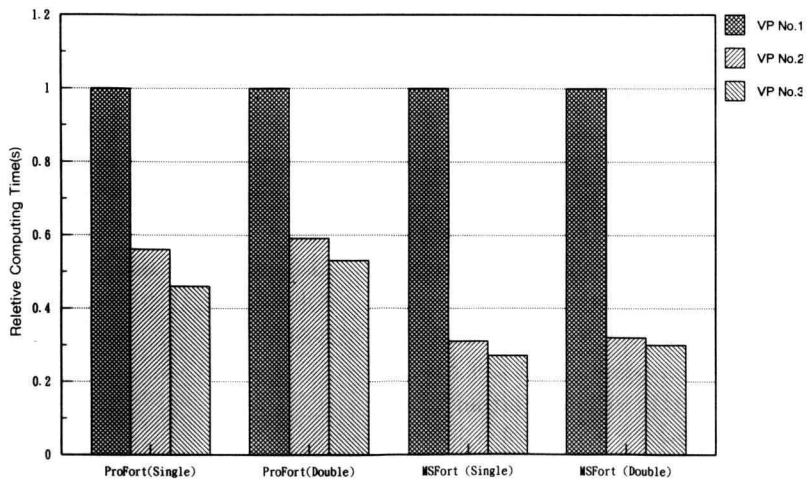


Fig. 5. Comparisons of the Relative Computing Times of Vapor Pressure Equation (Loops=1,000,000)

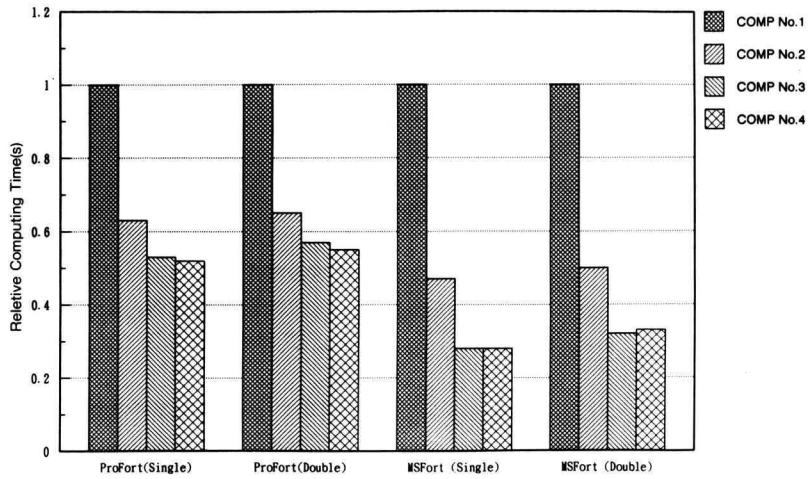


Fig. 6. Comparisons of the Relative Computing Times of Compressed Water Equation (Loops=1,000,000)

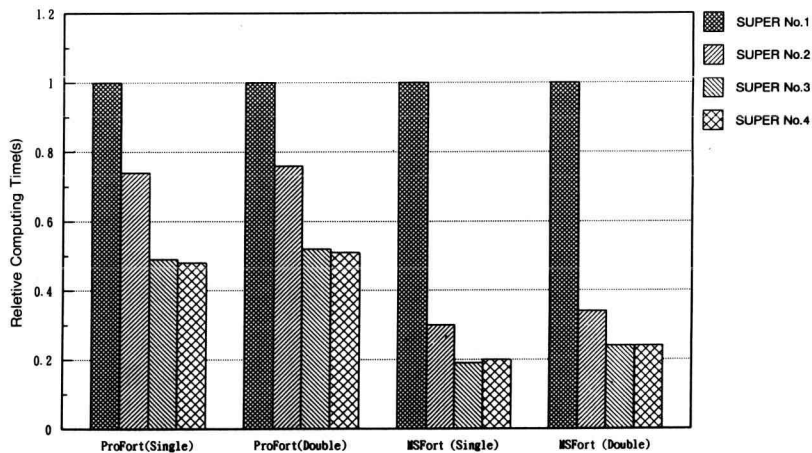


Fig. 7. Comparisons of the Relative Computing Times of Superheated Steam Equation (Loops=1,000,000)

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

ここで

$$\begin{aligned}
 x_1 = \frac{v}{v_{c1}} = \frac{v(\text{m}^3/\text{kg})}{3.17 \times 10^{-3}} \\
 Z = Y + (a_3 Y^2 - 2a_4 \theta + 2a_5 \beta)^{1/2} \\
 Y = 1 - a_1 \theta^2 - a_2 \theta^{-6} \\
 \theta = \frac{T}{T_c} = \frac{T(\text{K})}{647.3} \\
 \beta = \frac{P}{P_{c1}} = \frac{P(\text{MPa})}{22.12}
 \end{aligned}$$

$A_{11} \sim A_{22}$, $a_6 \sim a_{12}$ は定数である。

上式の記述形式 No. 1~4 について、Table 6, 7, 8 お

よび9に示し、その計算時間比較をFig. 6に示した。

3.2.2 圧縮水域の状態式に関する考察

圧縮水域の状態式については、水の飽和蒸気圧の相関式で確認された各累乗の項を同類項でまとめることにより、計算時間を短くする方法を用いた上で、同類項でまとめられない項について、No.1はTable 6に示すようにその累乗の項を整数指数によって独立に累乗させて、No.2ではTable 7に示すようにその余った累乗について2の累乗で計算できるところまでを $(X ** 2) ** 2 \cdot \cdot$ の形で記述することによって計算時間を速くしている。更にNo.3ではTable 8に示すように余った累乗の項を別の式として独立に計算させ、低次の累乗式で計算された値を高次の累乗式で使用するにより、各累乗計算は $X * X$ の形で計算されるように工夫した。No.4はTable 9に示すようにNo.2とNo.3の複合型と言えるものでNo.3の形式で記述できない部分をNo.2の形式で記述したものである。この結果Fig. 6にも示したようにProFortranではNo.4の複合型が最も速いが、MSFortranでは逆にNo.3の方が若干速い。これらNo.3とNo.4はともにNo.1に対してProFortranでは約50%、MSFortranでは約75%の計算時間の短縮となっている。しかしNo.3とNo.4の2つについてはどちらの差も非常に小さいので、ほとんど優劣はないと言える。

3.3 過熱蒸気域の状態式に関する検討

実用国際状態式¹⁾の過熱蒸気域における状態式について計算処理時間の短いプログラムの組み方を検討した。

3.3.1 過熱蒸気域の状態式

実用国際状態式¹⁾の過熱蒸気域の状態式は次のとおりである。

$$\begin{aligned} x_2 = & I_1 \frac{\theta}{\beta} - \sum_{\mu=1}^5 \mu \beta^{\mu-1} \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{z(\mu,\nu)} \\ & - \sum_{\mu=6}^8 \frac{(\mu-2)\beta \sum_{\nu=1}^{n(\mu)} B_{\mu\nu} X^{z(\mu,\nu)}}{[\beta^{2-\mu} + \sum_{\lambda=1}^{l(\mu)} b_{\mu\lambda} X^{x(\mu,\lambda)}]^2} \\ & + 11 \left(\frac{\beta}{\beta_L} \right)^{10} \sum_{\nu=0}^6 B_{\mu\nu} X^2 \end{aligned}$$

ここで

$$X_2 = \frac{v}{v_{c1}} = \frac{v(\text{m}^3/\text{kg})}{3.17 \times 10^{-3}}$$

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

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

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

$$B_{\mu\nu}, b_{\mu\nu}, z(\mu, \nu), x(\mu, \nu), b$$

は定数である。

上式の記述形式No.1~4についてTable 10, 11, 12および13に示し、その計算時間比較をFig. 7に示した。

3.3.2 過熱蒸気域の状態式に関する考察

圧縮水域の状態式と同様に、同類項でまとめられない項について、No.1はTable 10に示すようにその累乗の項を整数指数によって独立に累乗させて、No.2ではTable 11に示すようにその余った累乗について2の累乗で計算できるところまでを $(X ** 2) ** 2 \cdot \cdot$ の形で記述した。No.3ではTable 12に示すように、余った累乗の項を別の式に独立させて計算させ、No.4はTable 13に示すように、No.2とNo.3の複合型である。この結果圧縮水域の状態式と同様に、Fig. 7からも分かるようにNo.3とNo.4はともにNo.1に対してProFortranでは約50%、MSFortranでは約80%の計算時間の短縮となっている。またProFortranではNo.4の複合型が最も速いが、MSFortranでは逆にNo.3の方が若干速い。

4. 結 論

本研究では、実用国際状態式¹⁾計算に際し、32bitのパーソナルコンピュータ NEC-9801NS/Tによる計算時間最短のプログラム記述方法について検討した。その結果、高次の多項式については同類項を極力まとめた上で、余った累乗の項を別の式に独立させて $X * X$ の形で計算されるようにするか、また2の累乗の $(X ** 2) ** 2$ の形でまとめることによって、大幅な計算時間の短縮が行えることが判明した。またこの2つの方法を適当に組み合わせることによって更に計算時間を短縮させることが可能であるが、使用するコンパイラの性能によってその結果が多少変わることも判明した。以上により、プログラミングの記述方法によってある程度の計算時間の短縮が可能であることが証明された。

文 献

- 1) 日本機械学会編, 1980SI 日本機械学会蒸気表, (1981).