J. Fac. Appl. Biol. Sci.,
Hiroshima Univ. (1994), **33**: 133～142

水，水蒸気および空気の簡便な温度関係物性式の設定に関する研究

久保田　清・羽倉　義雄

広島大学生物生産学部，東広島市 724

1994年9月21日　受付

要　旨　水，水蒸気および空気の密度，粘度，比熱，熱伝導度などの値が各種食品製造プロセス設計において必要となる。これらの値は，食品製造プロセスにおいて温度で変わる。これらの値を表，図，各種の経験式から得なければならない。既報の経験式などの中から有用となる関係式を選ぶことが必要となる。

本研究では，線形最小二乗法を用いて，パーソナル計算機に便利な関係式の設定について検討を行った。得られた関係式は，水，空気などの任意の温度における各種物性値の概算利用に有用になると考えられる。

キーワード：線形最小二乗法，物性値

緒　　言

各種食品のクッキング，乾燥，沪過など食品を各種変換処理する装置，プロセスを設計し，制御化を進めていくためには，密度，粘度など物性値を含んだ設計，操作関係式を設定していくことが必要となる。食品の各種物性値は，温度，濃度などで変わる。これらの値は，表，図，各種の経験式から求めなければならない。表，図からの読みとりは，内挿計算，目盛の読みとり誤差を伴なう。また，オンライン計算を行う場合には適さない。最近，パーソナル計算機が安価になり性能が向上してきており，実験データの解析，装置設計，操作計算，オンライン制御などに利用されるようになってきており，簡便な関係式を設定しておくとよい。既報の経験式の中から有用となる関係式の選定が，また，経験式が得られていないときには，どのような関係式を設定したらよいかが問題となる。

本研究では，水，水蒸気および空気の密度，粘度などの物性値に対する簡便な温度関係式の設定を例として，パーソナル計算機に便利な関係式の設定について検討を行った。既報（久保田，1982）の線形最小二乗法の BASIC サブルーチンが利用できる関係式を列挙して検討を行った。

既報の各種物性値

水の密度 ρ_w〔kg/m^3〕，粘度 μ_w〔Pa·s〕，比熱 Cp_w〔J/(kg·K)〕，熱伝導度 k_w〔W/(m·K)〕，蒸気圧 P_w〔Pa〕，蒸発潜熱 λ_w〔J/kg〕，水銀の密度 ρ_m，空気の密度 ρ_a，粘度 μ_a，比熱 Cp_a，熱伝導度 k_a，水蒸気の密度 ρ_s，粘度 μ_s，比熱 Cp_s，熱伝導度 k_s の既報の値（Lange, 1967, 頼実，1975）と温度との関係を Table 1, 2 に SI 単位に換算して示す。Lange (1967) の便覧の値が，その後の各種便覧に引用されてきているので採用した。便覧にないものは，実験書（頼実，1975）に示されている値を採用した。表示されている桁が小さく段差がみらる。後述する推算式（佐藤，1954）により求められた値ではないかと考えられる。Lange (1967) には，水の μ_w, ρ_w に対して次に示す温度関係式が示されている。

$$\mu_w = 0.1/[2.1482\{(T-281.585)+[8078.4+(T-281.585)^2]^{0.5}\}-120] \quad (1)$$

$$\log_{10}(P_w/1.33322\times10^2) = A - B/[(T-273.15)+C] \quad (2)$$

Table 1 Physical properties of water and mercury

$T-273.15$	$\rho_w \times 10^{-2}$	$\mu_w \times 10^3$	$Cp_w \times 10^{-3}$	$k_w \times 10$	$P_w \times 10^{-2}$	$\lambda_w \times 10^{-6}$	$\rho_m \times 10^{-4}$
0	9.9987	1.7921	4.2176	5.602	6.105	2.493	1.3596
10	9.9973	1.3077	4.1921	5.795	12.28	2.470	1.3571
20	9.9823	1.0050	4.1818	5.970	23.38	2.447	1.3546
30	9.9568	0.8007	4.1784	6.134	42.43	2.425	1.3522
40	9.9225	0.6560	4.1785	6.276	73.76	2.402	1.3497
50	9.8807	0.5494	4.1806	6.406	123.3	2.379	1.3473
60	9.8324	0.4688	4.1843	6.519	199.2	2.356	1.3448
70	9.7781	0.4061	4.1895	6.615	311.6	2.333	1.3424
80	9.7183	0.3565	4.1963	6.699	473.4	2.307	1.3400
90	9.6534	0.3165	4.2050	6.762	701.0	2.284	1.3376
100	9.5838	0.2838	4.2159	6.812	1013.3	2.257	1.3352

where, T〔K〕; ρ_w〔kg/m^3〕, μ_w〔Pa·s〕, Cp_w〔J/(kg·K)〕, P_w〔Pa〕, λ_w〔J/kg〕, ρ_m〔kg/m^3〕: from LANGE (1967), k_w〔W/(m·K)〕: from YORIZANE (1975), w: water, m: mercury

ただし，A=8.10765；7.96681

B=1750.286；1668.21

C=235.0；228.0

(0〜60°C；60〜150°C)

既報の温度関係式には，電卓計算に便利な t〔°C〕を用いて示されているものが多いが，本研究では，後述する多項式の中の2乗，4乗の項で t が 0°C 以下になる場合に問題を生じるので $T=t+273.15$〔K〕を用いて示す。また，物性値が CGS 単位で得られるように関係式の係数が示されているものが多いが，本研究では，SI 単位で得られるように換算して示す。

気体に対しては，次に示す温度関係式がよく利用されてきている。

$$\rho=(M\times10^{-3}/2.241383\times10^{-2})(273.15/T)=12.1867M/T \qquad (3)$$

$$\mu=2.89865\times10^{-10}(M^3\cdot Pc^4/Tc)^{1/6}\{(T/Tc)^{3/2}/[(T/Tc)+0.8]\} \qquad (4)$$

$$Cp=A+B\cdot T+C\cdot T^2 \qquad (5)$$

$$k=\mu[Cp+1.0376\times10^4/M] \qquad (6)$$

ただし，M=28.97；18.016

Tc=132.5；647.4

$Pc=3.77\times10^6$；2.212×10^7

$A=9.0554\times10^2$；1.6851×10^3

$B=3.018\times10^{-1}$；5.334×10^{-1}

Table 2 Physical properties of air

$T-273.15$	ρ_a	$\mu_a \times 10^5$	$Cp_a \times 10^{-3}$	$k_a \times 10^2$
0	1.2931	1.73	1.004	2.41
20	1.2046	1.82	1.004	2.57
40	1.1274	1.91	1.008	2.72
60	1.0596	2.01	1.008	2.87
80	0.9995	2.10	1.008	3.02
100	0.9458	2.19	1.013	3.16
120	0.8976	2.28	1.013	3.31
140	0.8541	2.35	1.017	3.45
160	0.8147	2.43	1.017	3.59
180	0.7787	2.51	1.021	3.72
200	0.7457	2.59	1.025	3.86

where, ρ_a: from LANGE (1967), μ_a, Cp_a, k_a: from YORIZANE (1975), a: air

Table 3 Physical properties from Eqs. (1) and (2)

$T-273.15$	$\mu_{we} \times 10^3$	$P_{we} \times 10^{-2}$
0	1.7919	6.0887
10	1.3077	12.261
20	1.0049	23.371
30	0.8007	42.433
40	0.6560	73.769
50	0.5494	123.37
60	0.4687	199.24
70	0.4060	311.67
80	0.3564	473.64
90	0.3165	701.08
100	0.2838	1013.2

Where, we: water (from equation)

Table 4 Physical properties from Eqs. (3)～(6)

$T-273.15$	ρ_{ae}	$\mu_{ae}\times10^5$	$Cp_{ae}\times10^{-3}$	$k_{ae}\times10^2$	ρ_{se}	$\mu_{se}\times10^5$	$Cp_{se}\times10^{-3}$	$k_{se}\times10^2$
0	1.2925	1.7313	0.9830	2.3220	0.8038	0.7393	1.8357	1.7829
20	1.2043	1.8285	0.9883	2.4620	0.7490	0.8017	1.8471	1.9425
40	1.1274	1.9224	0.9935	2.5985	0.7011	0.8638	1.8586	2.1030
60	1.0597	2.0134	0.9987	2.7320	0.6590	0.9256	1.8701	2.2641
80	0.9997	2.1017	1.0039	2.8626	0.6217	0.9870	1.8817	2.4257
100	0.9461	2.1875	1.0089	2.9905	0.5884	1.0480	1.8933	2.5877
120	0.8980	2.2709	1.0140	3.1159	0.5585	1.1085	1.9050	2.7500
140	0.8545	2.3521	1.0189	3.2390	0.5314	1.1685	1.9167	2.9125
160	0.8151	2.4313	1.0238	3.3600	0.5069	1.2279	1.9285	3.0753
180	0.7791	2.5085	1.0287	3.4790	0.4845	1.2869	1.9403	3.2381
200	0.7462	2.5840	1.0335	3.5961	0.4640	1.3453	1.9522	3.4011

where, ae: air (from equation), se: steam (from equation)

$C=-6.629\times10^{-5}$; 6.572×10^{-5}

（空気；水蒸気）

ここで，式(3)は，理想気体に対して用いられるボイル・シャルルの式である。M は分子量，Tc, Pc は臨界温度，臨界圧力である。式(1)～(6)を用いて得られる値を Table 3, 4 に添字 e をつけて示す。

液体に対しては，密度，比熱，熱伝導度に対してべき乗多項式が，また，粘度に対しては ANDRADE の式，蒸気圧に対しては式(2)でも示した ANTOINE の式といわれる次に示す対数関係の式が用いられてきている（佐藤，1954)。

$$\mu=A\cdot\exp[B/T] \tag{7}$$

$$\log(P)=A-B/(T+C) \tag{8}$$

佐藤（1954）には，水の蒸発潜熱 λ_w に対して次式が示されている。温度変化が僅かであるのに複雑な関係式で示されている原因がわからない。

$$\lambda_w=(4.184\times10^3)[68.596+0.8162[(T-273.15)/100]^{1.15}-(1.375\times10^{-3})[(T-273.15)/100]^{6.5}-(2.0\times10^{-17})[(T-273.15)/100]^{30}](647.35-T)^{0.365} \tag{9}$$

Table 1～4 に示した各種物性値の温度との関係を Fig. 1 および2に示す。

簡便な温度関係物性式

前述した各種物性値の簡便な温度関係物性式として，既報の経験式，各種の多項式，分数式，対数関係の式が候補として考えられる。本研究では，簡単な BASIC プログラムの作成を始めたばかりの者にも理解して応用して頂けるように，既報（久保田，1982）の線形最小二乗法の BASIC サブルーチンが利用できる関係式を列挙して検討する。

$$y=A\cdot x+B \tag{10}$$

$$y=A\cdot x^2+B\cdot x+C \tag{11}$$

$$y=A\cdot x^3+B\cdot x^2+C\cdot x+D \tag{12}$$

$$y=A\cdot x^4+B\cdot x^3+C\cdot x^2+D\cdot x+E \tag{13}$$

$$y=A\cdot x^2+B\cdot x+C\cdot x^{0.5}+D \tag{14}$$

$$y=A\cdot x^2+B\cdot x+C/x+D \tag{15}$$

$$y=A\cdot x^2+B\cdot x+C\cdot x^{0.5}+D/x+E \tag{16}$$

$$y=A\cdot x^2+B\cdot x+C/x+D/x^2+E \tag{17}$$

$$y=(A\cdot x+B)/(x+C) \tag{18}$$

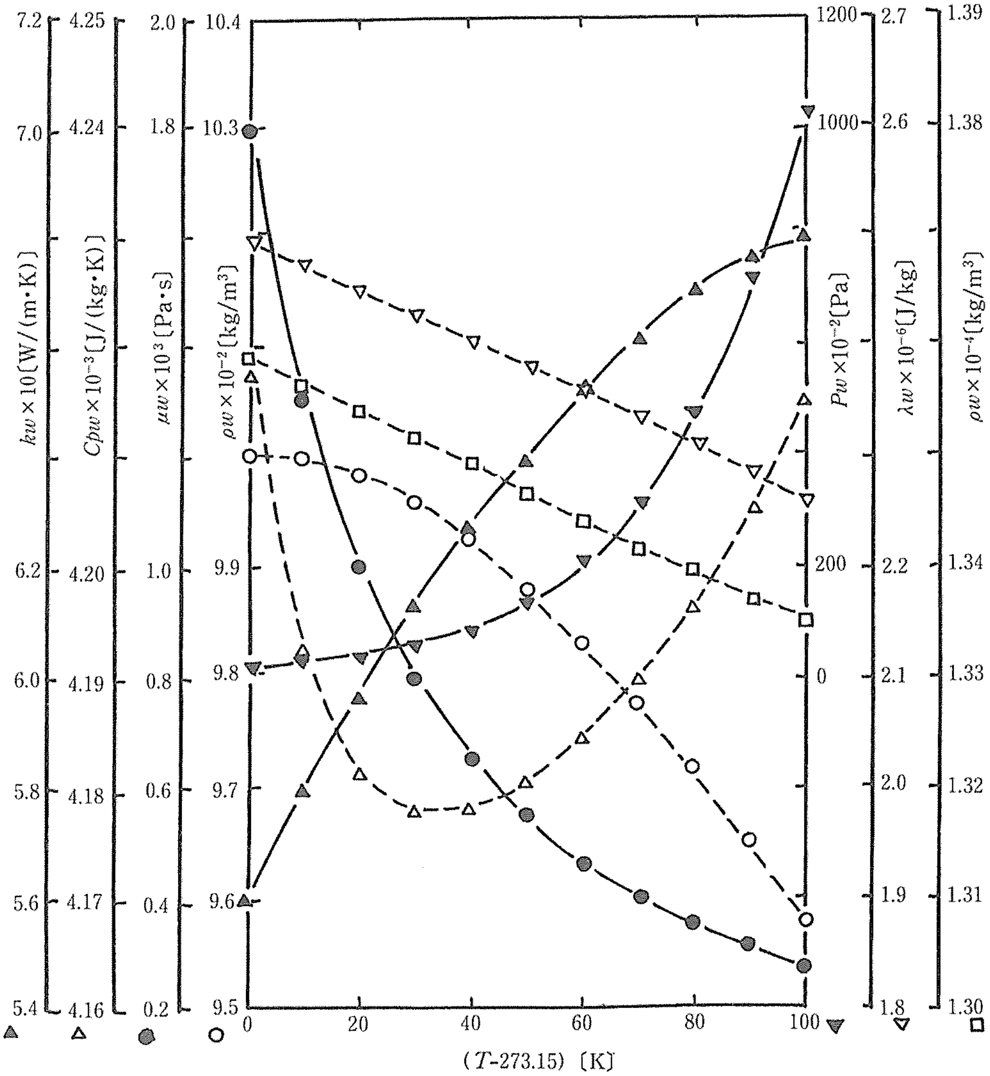

Fig. 1 Pysical properties of water and mercury from Table 1.

$$y=(A\cdot x+B)/(x^2+C\cdot x+D) \tag{19}$$
$$y=(A\cdot x^2+B\cdot x+C)/(x+D) \tag{20}$$
$$y=(A\cdot x^2+B\cdot x+C)/(x^2+D\cdot x+E) \tag{21}$$
$$y=A\cdot B^x \tag{22}$$
$$y=A\cdot B^{1/x} \tag{23}$$
$$y=A\cdot x^B \tag{24}$$
$$y=A\cdot B^x\cdot x^C \tag{25}$$
$$y=A\cdot B^{1/x}\cdot x^C \tag{26}$$
$$y=A\cdot B^x\cdot C^{1/x} \tag{27}$$
$$y=\exp[(A\cdot x+B)/(x+C)] \tag{28}$$
$$y=\exp[(A\cdot x^2+B\cdot x+C)/(x+D)] \tag{29}$$

ここで，上記の式(23)，(28)は，前述の式(7)，(8)に相当する。式(18)～(21)は，右辺の分母を払って線形

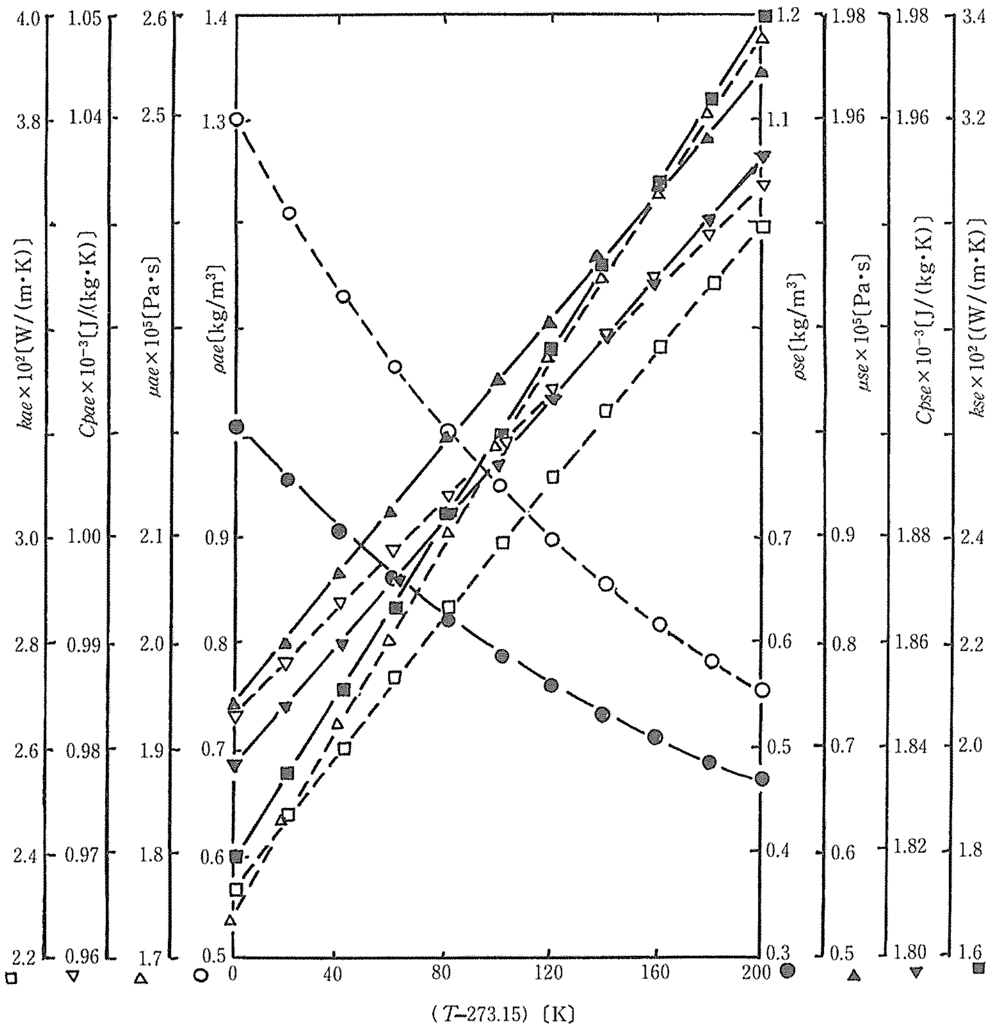

Fig. 2　Physical properties of air and steam from Table 3.

化でき，また，式(22)～(29)は，両辺の対数をとって線形化でき，線形最小二乗法を用いてパラメータ A, B などを求めることができる関係式である。y を物性値，x を温度 T〔K〕とする。物性値は，Table 1～4 に示すようにべき乗を乗じた値として計算する。

温度関係物性式の設定

Table 1～4 に示す物性値を用いて式(10)～(29)から有用な関係式の選定をする。その前に，パーソナル計算機でパラメータ計算を行うと，有効桁を超える演算から生じる誤差の発生で起こる限界があるのではないかと考えられ有効性の有無の検討を行う。$A=1$, $B=2$, $C=3$, $D=4$, $E=5$ として，$x=1$, 2～10 の値に対する y の値を10点求めて検討する。式(10)～(29)に対して得られたパラメータの値を Table 5 に示す。使用したのは，NEC 製 PC-9801, DX 2 で，N88 BASIC による結果である。

Table 5 の結果によると，パラメータが5ケの式(13)，(16)，(17)，(21)は好ましくない結果になっている。また，パラメータ4ケの式の中で式(19)と式(29)は好ましくない結果になっている。これらの式を除いた関係式を用いて温度関係物性式の選定を行う。

Table 5 Calculated parameters
Date: y from x=1, 2～10 used A=1, B=2, C=3, D=4, E=5

Equation	A	B	C	D	E
10	1.0000	2.0000	—	—	—
11	1.0000	2.0000	3.0000	—	—
12	1.0000	1.9996	3.0015	3.9984	—
13	1.0030	1.9324	3.5130	2.5317	6.2074
14	1.0005	1.9878	3.0306	3.9803	—
15	0.9999	2.0005	3.0009	3.9987	—
16	0.9985	2.0607	2.7827	3.9252	5.2321
17	0.9988	2.0289	3.4874	3.7002	4.7842
18	1.0001	2.0044	3.0057	—	—
19	0.9992	2.0791	3.0659	4.1418	—
20	0.9998	1.9939	2.9954	3.9907	—
21	1.0100	1.3373	−0.5598	3.5772	−1.6133
22	1.0000	2.0000	—	—	—
23	1.0013	1.9961	—	—	—
24	1.0000	2.0000	—	—	—
25	1.0000	2.0000	3.0000	—	—
26	1.0000	2.0000	3.0000	—	—
27	1.0000	2.0000	3.0000	—	—
28	1.0000	2.0012	3.0017	—	—
29	0.7113	−5.6104	−4.0278	−8.5158	—

Table 6 Standard deviation for water and mercury

Equation	$\rho_w \times 10^{-2}$	$\mu_w \times 10^{3}$	$Cp_w \times 10^{-3}$	$k_w \times 10$	$P_w \times 10^{-2}$	$\lambda_w \times 10^{-6}$	$\rho_m \times 10^{-4}$
10	3.18E−2	1.83E−1	1.33E−2	7.03E−2	1.42E+2	1.63E−3	5.07E−5
11	3.75E−3	6.50E−2	4.24E−3	1.19E−3	3.84E+1	7.56E−4	2.06E−5
12	4.06E−3	5.78E−2	4.61E−3	3.11E−3	2.43E+1	7.70E−4	2.99E−5
14	3.26E−3	6.72E−2	4.73E−3	1.20E−3	3.87E+1	8.25E−4	5.08E−5
15	1.33E−3	3.46E−2	2.55E−3	4.28E−3	3.23E+1	5.99E−4	2.06E−4
18	1.14E−2	8.40E−3	3.12E−2	1.62E−2	4.22E+1	7.36E−4	1.65E−4
20	4.37E−3	1.63E−3	2.80E−2	7.94E−3	5.84E+1	7.52E−4	2.53E−5
22	3.26E−2	1.02E−1	1.33E−2	8.08E−2	9.10E+1	2.57E−3	4.21E−5
23	4.42E−2	8.51E−1	1.36E−2	6.34	4.16E+2	8.92E−2	6.45E−4
24	3.85E−2	7.66E−2	1.35E−2	6.43E−2	4.16E+2	5.71E−3	3.10E−4
25	8.65E−3	8.53E−1	1.53E−2	7.39E−2	4.16E+2	9.54E−4	1.98E−4
26	9.85	8.53E−1	2.27	6.34	4.16E+2	2.38	4.58E−4
27	9.85	8.53E−1	3.19E−1	6.34	4.16E+2	9.68E−4	2.15E−5
28	1.76E−2	3.66E−3	2.74E−2	1.23E−2	5.46E−1	8.03E−4	5.70E−4

where, Data: Table 1

各物性値，各関係式に対する次に示す標準偏差 σ〔−〕の値を求めた結果を，Table 6～8 比較して示す。

$$\sigma = [\Sigma (y_{obs} - y_{cal})^2 / n]^{0.5} \qquad (30)$$

ここで，y_{obs}，y_{cal} は，Table 1～4 に示すべき乗を乗じた物性値の与えた値とその計算結果である。n は，データ数10である。

Table 7 Standard deviations for air

Equation	ρ_a	$\mu_a\times10^5$	$Cp_a\times10^{-3}$	$k_a\times10^2$	ρ_{ae}	$\mu_{ae}\times10^5$	$Cp_{ae}\times10^{-3}$	$k_{ae}\times10^2$
10	2.63E−2	1.16E−2	1.43E−3	3.39E−2	2.61E−2	1.06E−2	2.44E−4	1.10E−2
11	3.88E−3	4.35E−3	1.49E−3	2.76E−2	3.83E−3	6.76E−4	2.80E−5	6.59E−4
12	7.53E−4	4.33E−3	1.06E−3	2.68E−2	7.55E−4	4.45E−4	3.33E−5	3.26E−4
14	4.80E−3	4.70E−3	1.11E−3	2.82E−2	4.81E−3	1.21E−4	1.14E−4	1.40E−4
15	3.27E−5	4.23E−3	1.07E−3	2.70E−2	3.61E−5	6.76E−5	5.13E−5	1.81E−4
18	2.93E−3	4.46E−3	1.34E−3	3.11E−2	1.43E−4	2.79E−4	9.63E−5	1.81E−2
20	3.36E−3	5.85E−2	8.98E−3	2.00E−2	7.15E−4	1.26E−4	7.17E−5	2.37E−2
22	1.38E−2	2.67E−2	1.42E−3	4.09E−2	1.37E−2	2.57E−2	3.55E−4	3.59E−2
23	5.39E−1	2.19	2.16E−3	3.19	5.38E−1	2.19	2.09E−3	3.01
24	9.90E−5	6.94E−3	1.77E−3	5.97E−3	4.37E−5	5.05E−3	8.70E−4	4.93E−3
25	4.33E−4	4.53E−3	1.11E−3	2.60E−3	4.22E−4	6.80E−4	5.59E−5	9.79E−4
26	2.99E−4	4.58E−3	1.15E−3	2.55E−3	2.99E−4	2.64E−4	7.51E−5	7.61E−4
27	2.35E−1	2.19	1.12E−3	3.19	2.33E−1	2.19	5.66E−5	3.01
28	3.35E−4	4.36E−3	3.88E−3	2.55E−3	3.20E−4	5.70E−4	2.84E−5	1.03E−3

where, Data: Table 2 and 4

Table 8 Standard deviation for steam

Equation	ρ_{se}	$\mu_{se}\times10^5$	$Cp_{se}\times10^{-3}$	$k_{se}\times10^2$
10	1.63E−2	2.01E−3	2.24E−4	1.55E−3
11	2.41E−3	1.39E−4	1.71E−5	3.35E−4
12	4.81E−4	7.90E−5	2.63E−4	1.34E−4
14	3.18E−3	5.39E−4	1.25E−4	1.16E−3
15	3.70E−5	8.79E−5	3.31E−5	1.43E−4
18	5.72E−1	1.58E−4	2.02E−5	3.39E−4
20	6.77E−4	4.03E−3	1.50E−5	3.93E−4
22	8.52E−3	1.84E−2	1.21E−4	4.56E−2
23	3.34E−1	1.06	5.54E−3	2.64
24	3.36E−5	3.39E−3	2.72E−3	5.41E−3
25	2.67E−4	5.33E−4	7.58E−5	1.31E−3
26	1.88E−4	1.06	3.25E−4	8.84E−4
27	1.44E−1	1.06	4.07E−5	2.64
28	2.14E−4	2.87E−4	2.64E−3	1.08E−3

where, Data: Table 4

Table 6 から，ρ_w, Cp_w, λ_w に対して式(15)が，μ_w に対して式(20)が，P_w に対して式(28)，また，k_w, ρ_m に対して式(11)が有用となる。μ_w に対して，ANDRADE の式に対応している式(23)よりも式(20)の方が良いという結果になっているのは興味深い結果である。P_w に対しては，ANTOINE の式に対応している式(28)が良いという結果になっている。パラメータの数を4ケとする多項式にする場合，よく用いられる3次式(12)よりも本報で提案した式(15)の方が有用である結果になっているのが興味深い結果である。次数を大きくしないで項を増していく方が，有効桁を超える演算にならなく良い結果になるためと考えられる。また，k_w, ρ_m に対して，式(11)の方が，パラメータを多くした式(15)よりも良い結果になっているのも興味深い結果である。パラメータを必要最小限以上に多くしていくと有効桁を超える演算になっていって良くない結果になるためと考えられる。

Table 6〜8 に得られた結果を参照して，温度関係物性式を選定した結果と，得られたパラメータの値を Table 9 に示す。BASIC プログラム作成例と，式(15)：$\rho_w\times10^{-2}$, 式(20)：$\mu_w\times10^3$, 式(28)：$P_w\times10^{-2}$ に対する計算結果例を Fig. 3 に示す。

結　　言

多項式としてよく用いられる3次式(12)において，最高次数を下げてパラメータの数を同じにして表わし

Table 9 Calculated parameters

Equation	y	A	B	C	D
15	$\rho_w \times 10^{-2}$	-1.92373×10^{-6}	-1.39993×10^{-2}	−1126.95	18.0939
20	$\mu_w \times 10^{3}$	1.12071×10^{-3}	−0.939377	232.22	−240.153
15	$Cp_w \times 10^{-3}$	-1.38999×10^{-5}	1.81697×10^{-2}	932.196	−3.12623
11	$k_w \times 10$	-7.88163×10^{-5}	6.30378×10^{-2}	−5.73503	—
15	$\lambda_w \times 10^{-6}$	-4.78089×10^{-6}	1.76522×10^{-3}	104.216	1.9855
28	$P_w \times 10^{-2}$	18.9444	−4749.37	−38.0592	—
11	$\rho_m \times 10^{-4}$	5.17975×10^{-8}	-2.77391×10^{-4}	1.4315	
15	ρ_{ae}	6.79282×10^{-8}	-7.39213×10^{-5}	349.954	0.0263893
15	$\mu_{ae} \times 10^{5}$	-1.77704×10^{-6}	5.13743×10^{-3}	−58.3504	0.674224
11	$Cp_{ae} \times 10^{-3}$	-6.82253×10^{-8}	3.03414×10^{-4}	0.905208	—
15	$k_{ae} \times 10^{2}$	-1.63466×10^{-6}	7.03566×10^{-3}	−71.5919	0.784483
15	ρ_{se}	-4.55980×10^{-8}	5.04868×10^{-5}	221.724	−0.0183023
15	$\mu_{se} \times 10^{5}$	-9.10724×10^{-7}	3.83580×10^{-3}	16.3911	−0.300451
11	$Cp_{se} \times 10^{-3}$	5.98313×10^{-8}	5.37853×10^{-4}	1.68429	—
15	$k_{se} \times 10^{2}$	-4.82443×10^{-7}	8.78780×10^{-3}	43.7949	−0.741627

where, Data: Table 1～4, x: T〔K〕

た本報で提案した式(15)が有用である結果を得た。電卓でも利用が容易な項で表わした多項式である。ANDRADE の式に対応している式(23)よりも式(20)の方が有用である結果を得た。パラメータの数が5ケの式は良くない結果が得られた。式(15)よりもパラメータの数を少なくした2次式(11)の方が良くなる場合があったことから，パラメータの数を多くしても良くならないこともあることがわかった。次数を大きくするとかパラメータの数を多くすると，線形最小二乗法を用いたパラメータの計算において，パーソナル計算機の有効桁を超える演算が行われるのではないかと考えられる。適当な関係式が得られないときには，温度範囲を狭くして2次式(11)などを複数用いていく方がよいと考えられる。

謝辞　広島県食品工業技術振興財団のご支援に深謝します。

使用記号

A, B, C, D, E：パラメータ
M　：分子量
T　：温度〔K〕
x, y：式の変数
ρ　：密度〔kg/m^3〕
Cp　：比熱〔J/(kg·K)〕
P　：蒸気圧〔Pa〕
Tc　：臨界温度〔K〕
λ　：蒸発潜熱〔J/kg〕
σ　：標準偏差〔−〕
k　：熱伝導度〔W/(m·K)〕
Pc　：臨界圧力〔Pa〕
t　：温度〔°C〕
μ　：粘度〔Pa·s〕

添字

a, m, s, w：空気，水銀，水蒸気，水
e：式(1)～(6)からの計算値

引用文献

久保田清，1982，マイコン利用と基本 BASIC プログラム作成の要点，III．食品工業，25(24)73-77.
LANGE, N. A., 1967, Handbook of Chemistry, 10th Ed., Handbook Publishers Inc.
佐藤一雄，1954，物性定数推算法，丸善.
頼実正弘編，1975，化学工学実験法，培風館.

```
10 REM CALCURATIONS  USED SENSAS BY KUBOTA
20 DIM Y(100),X(5,100),A(5),YC(100),D(100)
30 DIM T(5,6),XS(5,100),YS(100)
40 READ DYN$,N: PRINT "DYN$,N="; DYN$,N
45 IF N<=0 THEN 9999
50 FOR I=1 TO N: READ XS(1,I),YS(I): NEXT I
51 FOR I=1 TO N: XS(1,I)=XS(1,I)+273.15: NEXT I
55 PRINT "XS(1,I),YS(I)="
60 FOR I=1 TO N STEP 2: IP=I+1
65 PRINT XS(1,I),YS(I),XS(1,IP),YS(IP): NEXT I
70 INPUT "CALCURATION Y OR N"; YN$
75 IF YN$="Y" THEN 80 ELSE 40
80 LPRINT: LPRINT "DYN$,N="; DYN$,N
85 LPRINT "XS(1,I),YS(I)="
90 FOR I=1 TO N STEP 2: IP=I+1
95 LPRINT XS(1,I),YS(I),XS(1,IP),YS(IP): NEXT I
100 PRINT "Y=A1*X^2+A2*X+A3/X+A4"
110 INPUT "CALCULATION Y OR N"; YN$
120 IF YN$="Y" THEN 130 ELSE 200
130 L=4: LPRINT "Y=A1*X^2+A2*X+A3/X+A4"
140 FOR I=1 TO N: X(4,I)=1: X(3,I)=1/XS(1,I)
150 X(2,I)=XS(1,I): X(1,I)=XS(1,I)^2
160 Y(I)=YS(I): NEXT I
170 GOSUB 5000
180 GOSUB 5200
200 PRINT "Y=E^((A1*X+A2)/(X+A3))"
210 INPUT "CALCULATION Y OR N"; YN$
220 IF YN$="Y" THEN 230 ELSE 300
230 L=3: LPRINT "Y=E^((A1*X+A2)/(X+A3))"
240 FOR I=1 TO N: X(1,I)=1/XS(1,I)
250 X(2,I)=LOG(YS(I))/XS(1,I): X(3,I)=1
260 Y(I)=LOG(YS(I)): NEXT I
270 GOSUB 5000
280 GOSUB 5200
290 A1=A(3): A(3)=-A(2)
291 A(2)=A(1): A(1)=A1: SD=0
292 FOR I=1 TO N
293 YC(I)=(A(1)*XS(1,I)+A(2))/(XS(1,I)+A(3))
294 YC(I)=2.71828^YC(I)
295 D(I)=YS(I)-YC(I): SD=SD+D(I)^2: NEXT I
296 SD=SQR(SD/N)
297 GOSUB 5200
300 PRINT "Y=(A1*X^2+A2*X+A3)/(X+A4)"
310 INPUT "CALCULATION Y OR N"; YN$
320 IF YN$="Y" THEN 330 ELSE 40
330 L=4: LPRINT "Y=(A1*X^2+A2*X+A3)/(X+A4)"
340 FOR I=1 TO N: X(1,I)=XS(1,I)^2
350 X(2,I)=XS(1,I): X(3,I)=YS(I)*XS(1,I)
360 X(4,I)=1: Y(I)=YS(I): NEXT I
370 GOSUB 5000
380 GOSUB 5200
390 A4=-1/A(3): A(1)=A4*A(1): A(2)=A4*A(2)
391 A(3)=A4*A(4): A(4)=A4: SD=0
392 FOR I=1 TO N
393 YC(I)=A(1)*XS(1,I)^2+A(2)*XS(1,I)+A(3)
394 YC(I)=YC(I)/(XS(1,I)+A(4))
395 D(I)=YS(I)-YC(I): SD=SD+D(I)^2: NEXT I
396 SD=SQR(SD/N)
397 GOSUB 5200
399 GOTO 40
5000 REM SUBROUTINE SENSAS BY KUBOTA
5010 REM Y(N),X(L,N),A(L),YC(N),D(N),T(L,L+1)
5020 LP=L+1: LM=L-1
5030 FOR I=1 TO L: FOR J=1 TO LP: T(I,J)=0: NEXT J
5040 FOR K=1 TO N: FOR J=1 TO L
5050 T(I,J)=T(I,J)+X(I,K)*X(J,K): NEXT J
5060 T(I,LP)=T(I,LP)+X(I,K)*Y(K): NEXT K,I
5070 FOR I=1 TO LM: IP=I+1
5080 FOR J=IP TO L: FOR K=J TO LP
5090 T(J,K)=T(J,K)-(T(I,J)*T(I,K))/T(I,I)
5100 NEXT K,J,I
5110 FOR I=1 TO L: J=L+1-I: K=J: AT=0
5120 IF L<=K THEN 5140
5130 KP=K+1: AT=AT+A(KP)*T(J,KP): K=KP: GOTO 5120
5140 A(J)=(T(J,LP)-AT)/T(J,J): NEXT I
5150 FOR I=1 TO N: YC(I)=0: FOR J=1 TO L
5160 YC(I)=YC(I)+A(J)*X(J,I): NEXT J,I
5170 SD=0: FOR I=1 TO N: D(I)=Y(I)-YC(I)
5180 SD=SD+D(I)^2: NEXT I: SD=SQR(SD/N): RETURN
5200 PRINT "A(L)="
5210 FOR J=1 TO L: PRINT A(J): NEXT J
5220 PRINT "SD="; SD
5230 INPUT "LPRINT Y OR N"; YN$
5240 IF YN$="Y" THEN 5250 ELSE 5310
5250 LPRINT "A(L)="
5260 FOR J=1 TO L: LPRINT A(J): NEXT J
5270 LPRINT "SD="; SD
5280 LPRINT "YC(N),D(N)="
5290 FOR I=1 TO N STEP 2: IP=I+1
5300 LPRINT YC(I),D(I),YC(IP),D(IP): NEXT I
5310 RETURN
9000 DATA WATERDN, 11
9010 DATA 0,9.9987, 10,9.9973, 20,9.9823, 30,9.9568
9020 DATA 40,9.9225, 50,9.8807, 60,9.8324, 70,9.7781
9030 DATA 80,9.7183, 90,9.6534, 100,9.5838
9040 DATA WATERVS, 11
9050 DATA 0,1.7921, 10,1.3077, 20,1.0050, 30,0.8007
9060 DATA 40,0.6560, 50,0.5494, 60,0.4688, 70,0.4061
9070 DATA 80,0.3565, 90,0.3165, 100,0.2838
9160 DATA WATERPV, 11
9170 DATA 0,6.1050, 10,12.280, 20,23.380, 30,42.430
9180 DATA 40,73.760, 50,123.30, 60,199.20, 70,311.60
9190 DATA 80,473.40, 90,701.00, 100,1013.3
9900 DATA DT00, 0
9999 END
```

```
DYN$,N=WATERDN                  11
XS(1,I),YS(I)=
 273.15         9.9987          283.15          9.9973
 293.15         9.9823          303.15          9.9568
 313.15         9.9225          323.15          9.8807
 333.15         9.8324          343.15          9.7781
 353.15         9.7183          363.15          9.6534
 373.15         9.5838          0               0
Y=A1*X^2+A2*X+A3/X+A4
A(L)=
-1.92373E-06
-.0139993
-1126.95
 18.0939
SD= .0013282
YC(N),D(N)=
 10.0007        -2.00081E-03    9.99572          1.58405E-03
 9.9804          1.89495E-03    9.96576          1.04809E-03
 9.92262        -1.15395E-04    9.88175         -1.04713E-03
 9.83381        -1.40858E-03    9.77938         -1.28365E-03
 9.71899        -6.92368E-04    9.65309          3.07083E-04
 9.5821          1.69945E-03    0                0

DYN$,N=WATERVS                  11
XS(1,I),YS(I)=
 273.15         1.7921          283.15          1.3077
 293.15         1.005           303.15          .8007
 313.15         .656            323.15          .5494
 333.15         .4688           343.15          .4061
 353.15         .3565           363.15          .3165
 373.15         .2838           0               0
Y=(A1*X^2+A2*X+A3)/(X+A4)
A(L)=
 1.12071E-03
-.939377
 232.22
-240.153
SD= 1.62995E-03
YC(N),D(N)=
 1.79548        -3.38387E-03    1.30443          3.27218E-03
 1.00291         2.08509E-03    .800681          1.89543E-05
 .656928        -9.28402E-04    .550516         -1.11574E-03
 .469397        -5.9709E-04     .406207         -1.07288E-04
 .356186         3.14116E-04    .316121          3.78877E-04
 .283765         3.5435E-05     0                0

DYN$,N=WATERPV                  11
XS(1,I),YS(I)=
 273.15         6.105           283.15          12.28
 293.15         23.38           303.15          42.43
 313.15         73.76           323.15          123.3
 333.15         199.2           343.15          311.6
 353.15         473.4           363.15          701
 373.15         1013.3          0               0
Y=E^((A1*X+A2)/(X+A3))
A(L)=
 18.9444
-4749.37
-38.0592
SD= .545862
YC(N),D(N)=
 6.10458         4.24385E-04    12.2826         -2.56634E-03
 23.3947        -.0146656       42.4455         -.0155334
 73.746          .0139923       123.258          .0421524
 198.963         .237259        311.241          .359283
 473.245         .155396        701.261         -.261108
 1015.03        -1.73132        0                0
```

Fig. 3 BASIC program and calculated results.

Convenient Equations of Physical Properties regarding Temperature of Water, Steam and Air

Kiyoshi KUBOTA and Yoshio HAGURA

Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University
Higashi-Hiroshima 724 Japan

The values of density, viscosity, specific heat, thermal conductivity etc. of water, steam and air are necessary for designing various food processing. The values vary with the temperature during food processing. These values must be obtained from the tables, figures and various empirical equations. We must select a useful equation from the reported equations.

In this study, we sutudied the convenient equations for personal computer by using the linear least square method. The equations obtained will be useful to rough estimate of various physical propertis regarding temperature of water, steam and air etc.

Key words: linear least square method, physical property