

湿度線図における物性に対する 簡便な関係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30日 受付

要 旨 食品の乾燥など食品製造プロセス設計において, 空気中に含まれる水蒸気量と湿り空気の比熱, 熱伝導度など各種物性値が必要となる。これらの値を湿度線図と各種の経験式から得なければならない。

本研究では, 湿度線図から得られる値を, パーソナル計算機に便利な関係式で表わす方法について検討を行った。得られた関係式は, 乾湿球温度による測定値を用いて, 線図を用いないで各種物性値を概算する場合などに有用になると考えられる。

キーワード: 湿度線図, 物性値

緒 言

各種食品の乾燥装置, プロセスなどを設計し, 制御化を進めていくためには, 空気中に含まれる水蒸気量, 空気と水蒸気の混合体となる湿り空気の比熱, 熱伝導度など各種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。これらの値を湿度線図と各種経験式から求めなければならない。湿度線図からの読みとりは, オンライン計算を行う場合には適さない。前報(久保田ほか, 1994)において, 空気, 水蒸気などの各種物性値を例として, パーソナル計算機に有用となる簡便な温度関係物性式の設定に関する研究を行った。本研究では, 前報の結果を利用するなどして, 湿度線図から得られる値を, パーソナル計算機に便利な関係式で表わす方法について検討を行った。

既報の各種物性値

水の蒸気圧 P_w [Pa], 蒸発潜熱 λ_w [J/kg], 空気と水蒸気の密度 ρ_a, ρ_s [kg/m³], 粘度 μ_a, μ_s [Pa·s], 比熱 Cp_a, Cp_s [J/(kg·K)], 熱伝導度 k_a, k_s [W/(m·K)] の既報の値と温度との関係については, 前報(久保田ほか, 1994)に示し, 温度関係物性式の設定を行った。線形最小二乗法の BASIC サブルーチンが利用できる関係式の中から次式を選んだ。

$$y = A \cdot x^2 + B \cdot x + C \quad (1)$$

$$y = A \cdot x^2 + B \cdot x + C/x + D \quad (2)$$

$$y = \exp[(A \cdot x + B)/(x + C)] \quad (3)$$

λ_w, P_w に対しては $t=0\sim 100^\circ\text{C}$, その他に対しては $t=0\sim 200^\circ\text{C}$ に対して, x を $T=t+273.15$ [K] としてパラメータ A, B, C, D の値を求めた。 Cp_a, Cp_s に対しては式(1), P_w に対しては式(3), その他に対しては式(2)となった。パラメータの値は前報で表示している。本報では後述するプログラム例の中で示す。

湿り空気は, 空気と水蒸気の混合体である。各種物性値を求めるための関係式が複雑になるなどするため湿度線図が利用されてきている。パーソナル計算機に対しては, 線図を簡便な関係式で表わしておくのがよい。

湿り空気を扱う場合に必要となる物性値とそれらの間の関係式を以下に示す。空気, 水蒸気モル分率: $y_a,$

y_s [-]; 空気, 水蒸気, 湿り空気分子量: M_a, M_s, M_t ; 乾, 湿球温度, 露点: T_d, T_w, T_a [K]; T_d, T_w, T_a に対応する飽和湿度: H_d, H_w, H_a [kg-H₂O/kg-D. A.]; 空気, 水蒸気分圧, 飽和水蒸気圧, 全圧: P_a, P_s, P_w, P_t [Pa]; 絶対湿度 (湿度), 飽和湿度, モル絶対湿度, 比較湿度 (飽和度), 関係湿度 (相対湿度): H, H_s [kg-H₂O/kg-D. A.], H_m [mol-H₂O/mol-D. A.], H_p, Hr [%] として関係式を表す。

$$y_a = (1/M_a) / [(1/M_a) + (H/M_s)] \quad (4)$$

$$y_s = (H/M_s) / [(1/M_a) + (H/M_s)] \quad (5)$$

$$M_t = (1+H) / [(1/M_a) + (H/M_s)] \quad (6)$$

$$P_t = P_a + P_s \quad (7)$$

$$H = (M_s/M_a) [P_s / (P_t - P_s)] \quad (8)$$

$$H_m = P_s / (P_t - P_s) \quad (9)$$

$$H_s = (M_s/M_a) [P_w / (P_t - P_w)] \quad (10)$$

$$Hp = (H/H_s) \times 100 \quad (11)$$

$$Hr = (P_s/P_w) \times 100 \quad (12)$$

$$H_w - H_d = [(h/k_H) / \lambda_w] (T_d - T_w) \quad (13)$$

ここで, h [W/(m²·K)], k_H [kg-D. A./(m²·s)], λ_w [J/kg-H₂O] は, 境膜伝熱係数, 境膜物質移動係数, 蒸発潜熱である。湿度線図には, H_s 対 T の右上りの曲線が示され, それから乾湿球温度線 ($T_d - T_w - H$ 線) が20本程度右下りに引かれているものがある。乾湿球温度線は, 式(13)の関係において, h/k_H が約 0.26 kcal/(kg-D. A.·°C) = 1.08784 × 10³ J/(kg-D. A.·K) になるとして示されている (大竹ほか, 1970)。乾湿球温度計を用いて T_d と T_w とを測定すると, H_a, H_d, H_w, H_s などを求めることができる。

湿り空気の乾燥空気を基準とした比熱 Cp_t [J/(kg-D. A.·K)], 比容 V_t [m³/kg-D. A.], エンタルピー (0°C を基準) E_t [J/kg-D. A.] は次式で得られる。

$$Cp_t = Cp_a + Cp_s \cdot H \quad (14)$$

$$V_t = 22.41383 [(1/M_a) + (H/M_s)] (T/273.15) \quad (15)$$

$$E_t = (Cp_t)_{av} (T - 273.15) + \lambda_w \cdot H \quad (16)$$

乾湿球温度計の湿球球部は少量の水が多量の空気に接しているが, 逆に, 一定温度 T_w [K] の多量の水に一定量の空気が接している場合を考えることができる。温度 T_d [K], 湿度 H_a [kg-H₂O/kg-D. A.] の空気が低温度の水に断熱下で接触すると, 冷却して湿度が増加して断熱飽和温度 T_w [K], 湿度 H_w [kg-H₂O/kg-D. A.] になる。次の関係式が得られる。

$$H_w - H_a = [(Cp_t)_{av} / \lambda_w] (T_d - T_w) \quad (17)$$

上記の関係が湿度線図に H_s 対 T の曲線から断熱冷却線として20本程度右下りに引かれている。 T_d と H_a を与えて, T_w, H_d, H_w, T_a などを求めることができる。乾湿球温度線が示されない線図 (大竹ほか, 1970) では, これに断熱冷却線がほぼ一致することから代用される。両者が描かれている湿度線図 (久保田, 1978) もある。

湿り空気の密度 ρ_t [kg/m³] は, 次式で得られる。

$$\rho_t = (M_t / 22.41383) (273.15 / T) \quad (18)$$

空気, 水蒸気の密度 ρ_a, ρ_s [kg/m³] は, 前述の式(2)を用いるよりも式(18)に M_a, M_s を入れて計算する方がよいが, 後述するプログラム例では前報 (久保田ほか, 1994) で得られた式(2)を示す。

湿り空気の粘度 μ_t [Pa·s], 熱伝導度 k_t [W/(m·K)] は, 次に示す WILKE の式, EUCKEN の式で得られる。

$$\mu_t = \mu_a / [1 + (1/y_a)y_s \cdot \phi_{as}] + \mu_s / [1 + (1/y_s)y_a \cdot \phi_{sa}] \quad (19)$$

ただし, $\phi_{ij} = [1 + (\mu_j/\mu_i)^{0.5} (M_i/M_j)^{0.25}]^2 / \{ (4/2^{0.5}) [1 + (M_j/M_i)^{0.5}] \}$

$$k_t = \mu_t [Cp_t + 1.0376 \times 10^4 / M_t] \quad (20)$$

空気, 水蒸気の熱伝導度 k_a, k_s [W/(m·K)] は, 前述の式(2)を用いるよりも式(20)に μ_a, Cp_a, M_a などを代入して計算する方がよいが, 後述するプログラム例では前報で得られた式(2)を示す。

簡便な湿り空気物性式の設定

前述した各種物性式を用いて、空気、水蒸気、湿り空気の各種物性値を求めるための簡便な BASIC プログラムを作成する。乾湿球温度計から T_d , T_w [K] を測定して H_a [kg-H₂O/kg-D. A.] などを求めるための式(13)を用いる計算も合わせてプログラムを作成する。

T_d [K], H_a [kg-H₂O/kg-D. A.] を与えて、 T_w [K] などを求めるための式(17)を用いる計算と、 E_t を求める式(16)を用いる計算とが問題となる。 $(Cp)_w$ を算術平均値で与えて計算するのが好ましくなく複雑となる。湿度線図(大竹ほか, 1970)に両者に関する線図が描かれている。本報では、前者に関する線図を簡便な関係式で与える方法について検討する。後者に関する線図を関係式で与える方法は、同様な方法で対応できるため省略する。

第1段の検討として、 H_s [kg-H₂O/kg-D. A.] と T [K] との関係を示す曲線(大竹ほか, 1970)を簡便な関係式で表わす方法について検討する。前報(久保田ほか, 1994)で示した線形最小二乗法の BASIC サブルーチンが利用できる各種関係式の適用の可否を検討した。その結果、前述した式(3)を用いるのが良いという結果になった。Table 1 に結果を示す。

$$H_s = \exp[(37.8593T - 1.39903 \times 10^4) / (T + 394.9)] \quad (21)$$

ただし、 $T = 273.15 \sim 333.15$ K

前報で示した P_w [Pa] と T [K] との関係式から P_w を求め、式(10)から H_s を求めることも可能である。

第2段の検討として、 H_s と T との関係を示す曲線から20本程度右下りで描かれている断熱冷却線(大竹ほか, 1970)を簡便な関係式で表わす方法について検討する。各 H_s の値に対応して得られる関係式のパラメータの値が変わってくるため、得られるパラメータの値を H_s の関数にして表わすことにする。断熱冷却線に対して、前述の式(1), (2), 次に示す式(22)などの適用の可否を検討した。

$$y = A \cdot x + B \quad (22)$$

式(22)に対して得られたパラメータの値は H_s の関数で表わせたが、式(1), (2)などで得られたパラメータの値は関数で表わせない変動を示した。これらの関係式における標準偏差の値に大差がなく、式(22)を用いるのが良いという結果になった。また、パラメータの値を H_s で表わす関係式に対しても式(22)を用いるのが良いという結果になった。Table 2 に結果を示す。

$$H = A_x \cdot T + B_x \quad (23)$$

ただし、 $A_x = -1.19757 \times 10^{-5} H_s - 3.56383 \times 10^{-4}$

Table 1 Calculated results by Eq. (21)

$T - 273.15$	H_s	$(H_s)_{cal}$
0	0.0043	0.0042
10	0.0079	0.0080
20	0.0148	0.0150
25	0.0202	0.0203
30	0.0279	0.0273
35	0.0369	0.0367
40	0.0488	0.0491
45	0.0650	0.0653
50	0.0862	0.0867
55	0.1150	0.1145
60	0.1510	0.1508

where, H_s : Data from Humidity chart (OTAKE *et al.*, 1970), $(H_s)_{cal}$: Calculated results by Eq. (21)

Table 2 Calculated parameters of Eqs. (23) and (24)

H_s	$-A_x \times 10^4$	$B_x \times 10$	$(-A_x \times 10^4)_{cal}$	$(B_x \times 10)_{cal}$
0.1528	5.4774	3.3540	5.3937	3.3411
0.1206	4.9461	2.8339	5.0081	2.8569
0.0960	4.7159	2.4953	4.7135	2.4870
0.0752	4.3186	2.1375	4.4644	2.1742
0.0614	4.3894	2.0070	4.2991	1.9667
0.0481	4.1537	1.7822	4.1399	1.7668
0.0381	4.0889	1.6450	4.0201	1.6164
0.0283	3.7122	1.4165	3.9027	1.4690
0.0252	3.7488	1.3832	3.8656	1.4224
0.0212	3.9810	1.4003	3.8177	1.3623
0.0158	3.8459	1.2890	3.7530	1.2811

where, $-A_x \times 10^4, B_x \times 10$: Calculated parameters of Eq. (23) used Data from Humidity chart (OTAKE *et al.*, 1970), $(-A_x \times 10^4)_{cal}, (B_x \times 10)_{cal}$: Calculated results by Eq. (24)

```

10 REM CALCULATION OF HUMIDITY CHART BY PREVIOUS METHOD
15 MA=29.97: MS=18.016: MAS=28.97/18.016: MSA=18.016/28.97
20 READ MTS,DTs: LPRINT: LPRINT "MTS,DTs="; MTS,DTs
25 IF DTs="TDTW" THEN 35
30 IF DTs="TDHA" THEN 50 ELSE 65
35 READ TD,TW: FD=TD+273.15: TW=TW+273.15
40 LPRINT "TD,TW="; TD,TW: GOTO 100
50 READ TD,HA: TD=TD+273.15: LPRINT "TD,HA="; TD,HA
60 TW=TD-.1: HAS=HA: GOTO 100
65 IF DTs="TSHA" THEN 70 ELSE 9999
70 READ TW,HA: TW=TW+273.15: LPRINT "TW,HA="; TW,HA
80 TD=TW+.1: HAS=HA
100 T=TD: GOSUB 1000: HD=H: T=T: GOSUB 1000: HW=H
110 IF MTS="ADCL" THEN 125
115 IF MTS="TDWH" THEN 120 ELSE 9999
120 T=T: GOSUB 2000: GOSUB 1400: GOTO 130
125 T=TD: GOSUB 1200: HA=H
130 H=HA: GOSUB 1100: TA=T
140 IF DTs="TDTW" THEN 160 ELSE 170
160 LPRINT "HD,HW="; HD,HW: LPRINT "HA,TA="; HA,TA
160 GOTO 300
170 IF DTs="TDHA" THEN 180 ELSE 220
180 IF HAS>HA THEN 200
190 TW=TW-.1: GOTO 100
200 LPRINT "TW,HD,HW="; TW,HD,HW
210 LPRINT "HA,TA="; HA,TA: GOTO 300
220 IF DTs="TSHA" THEN 230 ELSE 9999
230 IF HAS>HA THEN 250
240 TD=TD-.1: GOTO 100
250 LPRINT "TD,HD,HW="; TD,HD,HW
260 LPRINT "HA,TA="; HA,TA: GOTO 300
300 T=TD: GOSUB 2000: GOSUB 2100: GOSUB 2200
310 GOSUB 2300: GOSUB 2400: GOSUB 2500: GOSUB 2600
320 GOSUB 2700: GOSUB 2800: GOSUB 2900: GOSUB 1510
330 GOSUB 1520: GOSUB 1530: GOSUB 1540: GOSUB 1550
340 GOSUB 1600: GOSUB 1700: GOSUB 1800: GOSUB 1900
350 GOSUB 1950: GOSUB 1960
400 LPRINT "LH,PW,PS="; LH,PW,PS
410 LPRINT "HM,HS,HP,HR="; LPRINT HM,HS,HP,HR
420 LPRINT "FA,FS="; FA,FS
430 LPRINT "MA,MS,MT="; MA,MS,MT
440 LPRINT "DNA,DNS,DNT,VT="; LPRINT DNA,DNS,DNT,VT
450 LPRINT "SHA,SHS,SHT="; SHA,SHS,SHT
460 LPRINT "VSA,VSS,VST="; VSA,VSS,VST
470 LPRINT "KTA,KTS,KTT="; KTA,KTS,KTT
480 GOTO 20
1000 H=2.71828*((37.8593*T-13990.3)/(T+394.9)): RETURN
1100 T=(394.9*LOG(H)+13990.3)/(37.8593-LOG(H)): RETURN
1200 AX=(-11.9757*HW+.356383)/10^4
1210 BX=1.50363*HW+.104351: H=AX*T+BX: RETURN
1400 HA=HW-(1097.84/LH)*(TD-TW): RETURN
1500 HA=MSA*PS/(1.01525*10^5-PS): RETURN
1510 PS=1.01325*10^5*HA/(HA+MSA): RETURN
1520 HM=PS/(1.01352*10^5-PS): RETURN
1530 HS=MSA*PW/(1.01325*10^5-PW): RETURN
1540 HP=(HA/HS)*100: RETURN
1550 HR=(PS/PW)*100: RETURN
1600 SHT=SHA+SHS*HA: RETURN
1700 VT=22.4138*(1/MA+HA/MS)*(T/273.15): RETURN
1800 FF=1/MA+HA/MS: MT=(1+HA)/FF: RETURN
1900 FF=1/MA+HA/MS: FA=(1/MA)/FF: FS=(HA/MS)/FF
1901 FAS=(1+(VSA/VSS)^.5*MSA^.25)^2
1902 FAS=FAS/((4/2^.5)*(1+MAS)^.5)
1903 FSA=(1+(VSS/VSA)^.5*MAS^.25)^2
1904 FSA=FSA/((4/2^.5)*(1+MSA)^.5)
1905 VST=VSA/(1+FSA/FAS)+VSS/(1+FA/FSA/FS): RETURN
1950 DNT=(MT/22.4138)*(273.15/T): RETURN
1960 KTT=VST*(SHT+1.0376*10^4/MT): RETURN
2000 LH=-4.78089*T^2+1765.22*T+1.04216*10^8/T
2010 LH=LH+1.9855*10^6: RETURN
2100 PW=(18.9444*T-4749.37)/(T-38.0592)
2110 PW=(2.7183*PW)*100: RETURN
2200 DNA=6.73282*T^2/10^8-7.39213*T/10^5
2210 DNA=DNA+349.954/T+.0263893: RETURN
2300 DNS=-4.5598*T^2/10^8+6.04868*T/10^5
2310 DNS=DNS+221.724/T-.0183023: RETURN
2400 VSA=-1.77704*T^2/10^11+5.13743*T/10^8
2410 VSA=VSA-58.3504/(T*10^5)+.674224/10^5: RETURN
2600 VSS=-9.10724*T^2/10^12+3.8358*T/10^8
2610 VSS=VSS-15.3911/(T*10^5)-.300451/10^5: RETURN
2600 SHA=-6.82255*T^2/10^8+.303414*T+905.208: RETURN
2700 SHS=5.98313*T^2/10^5+.537853*T+1684.29: RETURN
2800 KTA=-1.63466*T^2/10^6+.703556*T/10^5
2810 KTA=KTA-.715919/T+.84483E-03: RETURN
2900 KTS=-4.82443*T^2/10^9+.87878*T/10^5
2910 KTS=KTS-.437949/T-.741627E-03: RETURN
9010 DATA ADCL, TDHA, 80,0,1086
9030 DATA TDWH, TDW, 80,55.9
9990 DATA EMD, END
9999 END

MTS,DTs=ADCL TDHA
TD,HA= 353.15 .1086
TW,HD,HW= 329.049 .436395 .120367
HA,TA= .108575 327.186
LH,PW,PS= 2.30774E+06 47327.5 15061
HM,HS,HP,HR= .174536 .545068 19.9196 31.8228
FA,FS= .847014 .152986
MA,MS,MT= 29.97 18.016 28.1412
DNA,DNS,DNT,VT= .999706 .621687 .971112 1.14155
SHA,SHS,SHT= 1003.85 1861.69 1208.61
VSA,VSS,VST= 2.10166E-05 9.86996E-06 1.90863E-05
KTA,KTS,KTT= .0286253 .0242563 .0300965

MTS,DTs=TDWH TDW
TD,TW= 353.15 329.05
HD,HW= .436395 .120376
HA,TA= .109239 327.305
LH,PW,PS= 2.30774E+06 47327.6 15145.6
HM,HS,HP,HR= .17569 .545068 20.0513 32.0016
FA,FS= .846159 .153841
MA,MS,MT= 29.97 18.016 28.131
DNA,DNS,DNT,VT= .999706 .621687 .970759 1.14271
SHA,SHS,SHT= 1003.85 1861.69 1208.61
VSA,VSS,VST= 2.10166E-05 9.86996E-06 1.90767E-05
KTA,KTS,KTT= .0286253 .0242563 .0301082

MTS,DTs=END END
    
```

Fig. 1. BASIC program and calculated results.

$$B_x = 1.50363H_s + 0.104351 \quad (24)$$

$$H_s = 0.0158 \sim 0.1528 \text{ kg-H}_2\text{O/kg-D. A.}$$

$$T = 293.15 \sim 373.15 \text{ K}$$

T_d [K], H_a [kg-H₂O/kg-D. A.] を与えて, T_w [K] などを求めるための式(21), (23)を用いる計算も合わせてプログラムを作成する。 T_w を求める計算は, 試行錯誤計算となる。 $T_w = T_d - 0.1$ を仮定して, 式(21)において $T = T_w$ として $H_w (= H_s)$ を求め, 式(23)において $T = T_d$ として $H_a = H$ を求める。 $H_a \leq H_a$ (測定値)になるまで, $T_w = T_w - 0.1$ とする反復計画を行って T_w を求める。以上の計算を行うプログラム作成例を Fig. 1 に示す。物性値に用いている変数記号は, 使用記号のところで後述している。

プログラム例のデータ例で示す文字記号 MT\$ に与えている TDWH は式(13)を用いた乾湿球温度線の計算を, ADCL は, 式(21), (23)を用いた断熱冷却線の計算を行うデータであることを示す。また, 文字記号 DT\$ に与えている TDTW は, T_d と T_w とを与えて H_a などを, TDHA は, T_d と H_a とを与えて

Table 3 Calculated results by Eqs. (21), (22) and (24)

t_d	$(t_d)_{\text{cal}}$	t_w	$(t_w)_{\text{cal}}$	H_a	$(H_a)_{\text{cal}}$
100.0	102.7	60.2	60.0	0.1310	0.1324
100.0	99.4	55.9	55.9	0.0989	0.0986
100.0	99.3	39.9	40.0	0.0232	0.0229
80.0	82.3	60.2	60.0	0.1420	0.1432
80.0	80.0	55.9	55.9	0.1086	0.1086
80.0	79.3	39.9	40.0	0.0315	0.0312
60.0	58.8	39.9	40.0	0.0400	0.0395
60.0	60.3	28.6	28.5	0.0133	0.0134
60.0	61.9	25.0	24.3	0.0073	0.0080
40.0	40.3	28.6	28.5	0.0210	0.0211
40.0	40.1	25.0	24.9	0.0156	0.0156
40.0	46.1	21.0	18.7	0.0084	0.0107

where, t_d, t_w, H_a : Data from Humidity chart (OTAKE *et al.*, 1970), $(t_d)_{\text{cal}}$: Calculated results by Eq. (21), (22) and (24) used t_w and H_a , $(t_w)_{\text{cal}}$: same used t_d and H_a , $(H_a)_{\text{cal}}$: same used t_d and t_w

Table 4 Calculated results by Eq. (13)

t_d	$(t_d)_{\text{cal}}$	t_w	$(t_w)_{\text{cal}}$	H_a	$(H_a)_{\text{cal}}$
100.0	106.6	60.2	59.8	0.1310	0.1340
100.0	102.6	55.9	55.7	0.0989	0.1001
100.0	96.4	39.9	40.4	0.0232	0.0216
80.0	82.8	60.2	60.0	0.1420	0.1433
80.0	81.6	55.9	55.8	0.1086	0.1093
80.0	78.1	39.9	40.1	0.0315	0.0306
60.0	59.3	39.9	40.0	0.0400	0.0397
60.0	55.1	28.6	29.7	0.0133	0.0111
60.0	54.1	25.0	26.5	0.0073	0.0046
40.0	37.9	28.6	29.0	0.0210	0.0200
40.0	35.5	25.0	26.2	0.0156	0.0136
40.0	37.9	21.0	21.6	0.0084	0.0074

where, t_d, t_w, H_a : Data respected Table 3, $(t_d)_{\text{cal}}$: Calculated results by Eq. (13) used t_w and H_a , $(t_w)_{\text{cal}}$: same used t_d and H_a , $(H_a)_{\text{cal}}$: same used t_d and t_w

T_w などを, TWHA は, T_w と H_a とを与えて T_d などを求めるデータであることを示す。 $t[^\circ\text{C}]$ で読み込み, $T=t+273.15[\text{K}]$ として計算を行っている。Table 3, 4 に ADCL, TDWH に関する計算結果の一例を示す。Table 3 の結果によると, 使用した湿度線図のデータ範囲の内側境界付近で精度が良くない結果になっている。特に断熱冷却線の傾きが小さくなる低湿度側で好ましくないことがわかる。これは BASIC プログラム作成の初心者にも利用しやすいように設定している式(21), (23)に理論的な意味がないためと考えられる。式(17)において, T を小刻みに変えて Cp_t の値を求めていく計算をするプログラム作成をすると良くなると考えられる。Table 4 の結果は, 断熱冷却線から得られるデータを用いた計算結果である。乾湿球温度線に対応する式(13)による結果を, 断熱冷却線による結果と比較できる。乾湿球温度線による結果が, T_w と T_d との差が大きいところで, 高湿度では, T_d, H_a の計算値が大きく, T_w の計算値が小さくなり, 低湿度では逆になっている。これは, 乾湿球温度線と断熱冷却線とを合わせて示している湿度線図(久保田, 1978)でみられる傾向と一致している。

結 言

湿度線図に示される複雑な断熱冷却線に対応する簡便な関係式を設定する方法について検討した。乾湿球温度線の関係式などと合わせて, 湿り空気の種類物性値を求めることができるパーソナル計算機に便利な BASIC プログラムの作成を行った。湿度線図を用いなくて, 湿り空気の種類物性値を概算利用することができる。また, 湿度線図にある断熱冷却線に関係式にした手法は, エンタルピー線図に関係式にするのに役立つものと考えられる。

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 : パラメータ	Cp : 比熱 $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
Cp_t : 湿り空気の比熱 $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{D. A.}\cdot\text{K})]$	E_t : 湿り空気のエンタルピー $[\text{J}/\text{kg}\cdot\text{D. A.}]$
H : 湿度 (絶対湿度) $[\text{kg}\cdot\text{H}_2\text{O}/\text{kg}\cdot\text{D. A.}]$	H_a, H_d, H_w : T_a, T_d, T_w に対応する H
H_m : モル絶対湿度 $[\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}/\text{mol}\cdot\text{D. A.}]$	Hp, Hr : 比較湿度, 関係湿度 $[\%]$
H_s : 飽和湿度 $[\text{kg}\cdot\text{H}_2\text{O}/\text{kg}\cdot\text{D. A.}]$	h : 境界伝熱係数 $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$
k : 熱伝導度 $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	k_H : 境界物質移動係数 $[\text{kg}\cdot\text{D. A.}/(\text{m}^2\cdot\text{s})]$
M : 分子量	P, T, t : 圧力 $[\text{Pa}]$, 温度 $[\text{K}]$, $[^\circ\text{C}]$
T_a, T_d, T_w : 露点, 乾球, 湿球温度 $[\text{K}]$	V_t : 湿り空気の比容 $[\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{D. A.}]$
x, y : 関係式の変数	y : モル分率 $[-]$
λ : 蒸発潜熱 $[\text{J}/\text{kg}]$	μ : 粘度 $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
ρ : 密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$	

添字

a, d, s, t, w : 空気 (T では露点), 乾球, 水蒸気 (H では飽和),
空気+水蒸気, 水 (P では飽和, T では湿球)

プログラム例における使用記号

SHA, SHS, SHT : Cp_a, Cp_s, Cp_t	HA, HD, HW : $H_a, H_d, H_w (H_s)$
HM, HP, HR, HS : H_m, Hp, Hr, H_s	KTA, KTS, KTT : k_a, k_s, k_t
MA, MS, MT : M_a, M_s, M_t	PS, PW : P_s, P_w
TA, TD, TW : T_a, T_d, T_w	VT, FA, FS, LH : V_t, y_a, y_s, λ_w
VSA, VSS, VST : μ_a, μ_s, μ_t	DNA, DNS, DNT : ρ_a, ρ_s, ρ_t

引用文献

- 久保田清, 1978, 食品科学便覧 (編集委員会編), 525-529頁, 共立出版.
- 久保田清, 1994, 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. 広島大学生物生産学部紀要, 33, 133-142.
- 大竹伝雄ほか, 1970, 文部省化学工学, コロナ社.

Convenient Equations of Physical Properties regarding Humidity Chart

Kiyoshi KUBOTA and Yoshio HAGURA

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

The values of various physical properties such as specific heat, thermal conductivity of humid air are necessary for designing various food processing. The values vary with the temperature and humidity, and must be obtained from the humidity chart and the various empirical equations. We must select a useful equation from the humidity chart and reported equations.

In this study, we studied the convenient equations of physical properties regarding humidity chart for personal computer. The equations obtained will be useful to rough estimate of various physical properties of humid air from the dry- and wet-bulb temperature data etc.

Key words: physical property, humidity chart