

パーソナルコンピュータによる熱物性値 プログラム・パッケージの開発

(第2報, 冷媒: R11, R12, R13, R14, R21, R22, R23, R113,
R114, R500, R502, RC318)

茂地 徹*・川江 信治*
山田 昭*

Microcomputer Program Packages for Thermophysical Properties
(2nd Report, Refrigerants: R11, R12, R13, R14, R21, R22, R23, R113,
R114, R500, R502, RC318)

by

Tohru SHIGECHI*, Nobuji KAWAE* and Takashi YAMADA*

A program package for refrigerants has been developed in the same manner as that in the previous report. The program package 'PROREF', written in BASIC language(N88 DISK-BASIC(86) on PC-9801 E system by NEC corporation), involves twelve halogenated hydrocarbon refrigerants(R11, R12, R13, R14, R21, R22, R23, R113, R114, R500, R502, RC318) as substances and provides nineteen different functions of the thermodynamic properties. All of the thermophysical properties for these refrigerants are calculated from the equations given by Downing.

In this report, the structure and specification of the program package 'PROREF' are to be described, together with the results of a performance test and an example.

1. はじめに

前報¹⁾で、水に対する熱物性値プログラム・パッケージ 'PROWAT' と空気を含む13種類の理想気体に対するプログラム・パッケージ 'PROGAS' を、パーソナルコンピュータ上で開発した。

本報では、冷凍機の冷凍サイクル計算などで必要不可欠である冷媒の熱物性値(本報告のバージョンでは熱力学的平衡性質のみ)に対して、前報と同じパーソナルコンピュータおよび手法を用いてプログラム・パッケージ 'PROREF' を開発したので、その構造、仕様、性能および使用例について報告する。なお、プログラム・パッケージ 'PROREF' に含まれる冷媒は、12種類のフロン系冷媒: R11, R12, R13, R14, R21,

R22, R23, R113, R114, R500, R502, RC318, であり、これらの冷媒の熱物性値はすべて、Downing²⁾の文献に与えられている諸式より計算している。

2. 冷媒熱物性値の計算方法

プログラム・パッケージ PROREF に含まれる熱物性値はすべて、Downing²⁾の文献に与えられている諸式を使って、次のように計算している。

- (1) 飽和温度 (TS)あるいは飽和圧力 (PS):文献2)の式(2)。なお、式(2)で圧力(P)を与えて飽和温度(TS)を逆計算する場合には、ニュートン法を使用している。
- (2) 飽和液の比体積(VF):文献2)の式(1)。

昭和61年4月30日受理

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

- (3) 飽和蒸気の比体積 (VG): 文献2) の式 (2) と式 (3).
- (4) 飽和蒸気の比エンタルピ (HG): 文献2) の式 (2) と式 (6).
- (5) 蒸発潜熱 (HFG): 文献2) の式 (5).
- (6) 飽和液の比エンタルピ (HF): 飽和蒸気の比エンタルピと蒸発潜熱の差として計算.
- (7) 飽和蒸気の比エントロピ (SG): 文献2) の式 (2) と式 (7).
- (8) 飽和液の比エントロピ (SF): (飽和蒸気の比エントロピ) - {(蒸発潜熱) / (飽和温度)} として計算.
- (9) 状態式: 文献2) の式 (3).

なお、液体の比エンタルピと比エントロピの基準状態は次のように定めた.

基準状態: R14を除く11種類の冷媒 (R11, R12, R13, R21, R22, R23, R113, R114, R500, R502, RC318) に対して, 273.15 K (0°C) で比エンタルピが200 kJ/kg, 比エントロピが1.0 kJ/(kg·K).
R14に対して, 173.15 K (-100°C) で, 比エンタルピが200 kJ/kg, 比エントロピが1.0 kJ/(kg·K).

3. プログラム・パッケージの構造と仕様

3.1 言語など

プログラムはすべて、インタプリタ方式の BASIC 言語 (日本電気(株)製 NEC PC-9801Eの N₈₈ DISK-BASIC(86³⁾) で記述されている。プログラムは、なるべく標準的な BASIC の命令と関数を使って作成しているが、計算精度やプログラムの修正・変更などの点を考慮して

- (i) 最大7文字までの変数名
- (ii) サブルーチン内での式の倍精度演算
- (iii) サブルーチン名としてラベル名の使用の拡張された機能を使用している。

3.2 構造

12種類のフロン系冷媒に対して1個のプログラム・パッケージ 'PROREF' を作成した。PROREF に含まれる12種類の冷媒の一般的性質を Table 1 に示す。プログラム・パッケージ 'PROREF' は、行番号9000で始まり、ラベル名として先頭に *SUB の4文字を付した、多くのサブルーチンプログラムの集合体である。PROREF で呼び出すことができる熱物性値サブルーチンはラベル名で参照されるが、その命名のしかたは前報の水の場合のプログラム・パッケージ PROWAT と同じ方法である。Table 2 に PROREF で呼ぶことができる熱物性値サブルーチンおよびその入力と出力

Refrigerant	Molecular Formula	Molecular Weight	Gas Constant [J/(kg·K)]	Critical Temperature [K]	Critical Pressure [MPa]
R11	CCl ₃ F	137.368	60.5224	471.15	4.4092
R12	CCl ₂ F ₂	120.914	68.7481	385.17	4.1155
R13	CClF ₃	104.459	79.5902	302.00	3.8700
R14	CF ₄	88.005	94.4700	227.50	3.7449
R21	CHCl ₂ F	102.923	80.7849	451.61	5.1325
R22	CHClF ₂	86.469	96.1469	369.17	4.9769
R23	CHF ₃	70.014	118.7484	299.07	4.8357
R113	C ₂ Cl ₃ F ₃	187.376	44.3786	487.22	3.1945
R114	(CClF ₂) ₂	170.922	48.6404	418.86	3.2625
R500	CCl ₂ F ₂ / CH ₃ CHF ₂	99.3	83.7135	378.66	4.4267
R502	CHClF ₂ / CF ₃ CF ₂ Cl	111.6	74.4744	355.31	4.0748
RC318	C ₄ F ₈	200.031	41.5629	388.48	2.7827

Table 1 Properties of Refrigerants

を示す。Table 3 に、12種類の冷媒を識別するための文字型変数 SUBREF\$ の値を示す。冷媒の種類を変更する場合には、その都度、変数 SUBREF\$ にTable 3 に示す値を代入すればよい。個々の熱物性値サブルーチンの単位系はすべて、SI である。

なお、サブルーチン内での計算はすべて倍精度で行い、使用しているすべての作業用変数名には先頭に Y を付している。また、サブルーチン内では配列は全く使用していない。

Table 2 Thermophysical Property Functions for Twelve Refrigerants
Input : Temperature as SUBT [K]

Subroutine	Function	Output
*SUBPST	Saturation pressure	SUBPS [MPa]
*SUBVFT	Specific volume of saturated liquid	SUBVFT [m ³ / kg]
*SUBVGT	Specific volume of saturated vapor	SUBVGT [m ³ / kg]
*SUBHFT	Enthalpy of saturated liquid	SUBHFT [kJ / kg]
*SUBHGT	Enthalpy of saturated vapor	SUBHGT [kJ / kg]
*SUBHFGT	Latent heat of vapor	SUBHFGT [kJ / kg]
*SUBSFT	Entropy of saturated liquid	SUBSFT [kJ / (kg·K)]
*SUBHFGT	Entropy of saturated vapor	SUBSGT [kJ / (kg·K)]

Input : Pressure as SUBP [MPa]

Subroutine	Function	Output
*SUBTSP	Saturation temperature	SUBTS [K]
*SUBVFP	Specific volume of saturated liquid	SUBVFP [m ³ / kg]
*SUBVGP	Specific volume of saturated vapor	SUBVGP [m ³ / kg]
*SUBHFP	Enthalpy of saturated liquid	SUBHFP [kJ / kg]
*SUBHGP	Enthalpy of saturated vapor	SUBHGP [kJ / kg]
*SUBHFGP	Latent heat of vapor	SUBHFGP [kJ / kg]
*SUBSFP	Entropy of saturated liquid	SUBSFP [kJ / (kg·K)]
*SUBSGP	Entropy of saturated vapor	SUBSGP [kJ / (kg·K)]

Input : Temperature & Pressure as SUBT [K] SUBP [MPa]

Subroutine	Function	Output
*SUBVPT	Specific volume of superheated vapor	SUBVPT [m ³ / kg]
*SUBHPT	Enthalpy of superheated vapor	SUBHPT [kJ / kg]
*SUBSPT	Entropy of superheated vapor	SUBSPT [kJ / (kg·K)]

Refrigerant	Value of SUBGAS\$
R11	R11
R12	R12
R13	R13
R14	R14
R21	R21
R22	R22
R23	R23
R113	R113
R114	R114
R500	R500
R502	R502
RC318	RC318

Table 3 Value of SUBGAS\$ for Refrigerants

3.3 呼び方

プログラム・パッケージ PROREF はサブルーチン形式を採用しているため、PROREF を使って目的の冷媒の熱物性値を得るためには、別にメインプログラムを準備する必要がある。ここでは、PROREF を使用する際に必要な、BASIC のメインプログラム中での手続きのみを示す(メインプログラムの記述方法は、次章の使用例で後述する)。

(例1) 300Kにおける冷媒R11の飽和圧力 $PST[M Pa]$ を求める。

```
SUBREF$="R11": SUBT=300 :
GOSUB *SUBPST : PST = SUBPST
```

結果は、 $PST = 0.1126$ となる。

(例2) 0.1MPa, 400Kの冷媒R11の比体積 $VPT[m^3/kg]$ を求める。

```
SUBREF$="R11": SUBP = 0.1 : SUBT
= 400 : GOSUB *SUBVPT : VPT
= SUBVPT
```

結果は、 $VPT = 0.2389$ となる。

3.4 異常終了処理

利用者のサブルーチンの呼び方が不適切な場合、以下のような異常終了処理が行われる。

(1) 物質名不適合

エラーメッセージ: <BAD NAME OF THE SUBSTANCE>

(2) 気液平衡線上の熱物性値 (PS, TS, VF, VG, HF, HG, HFG, SF, SG) に対して、入力が臨界

点を越えた場合

エラーメッセージ: <OUT OF RANGE>

(3) 演算中のオーバーフロー

エラーメッセージ: <OVER FLOW>

Table 4 CPU Time(PROREF)

For T=273.15 [K], P=0.3 [MPa]

Subroutine	CPU TIME [sec]			
	R11, R12, R13, R14, R22, R114, R500, R502, RC318	R21	R23	R113
*SUBTSP	2.25- 2.77	1.81	1.61	2.27
*SUBPST	0.69- 0.77	0.60	0.64	0.59
*SUBVFT	0.84- 0.94	0.20	0.88	0.19
*SUBVFP	3.13- 3.61	2.01	2.49	2.46
*SUBVGT	4.68- 6.70	1.69	7.01	1.66
*SUBVGP	6.95- 7.80	3.16	6.52	3.59
*SUBVPT	4.76- 5.20	1.35	4.09	1.33
*SUBCVPT	5.54- 5.96	1.55	4.86	1.53
*SUBHFT	11.90-15.80	4.30	16.4	4.20
*SUBHFP	16.40-18.10	7.20	15.4	8.10
*SUBHGT	5.86- 7.74	2.08	8.14	2.07
*SUBHGP	8.16- 9.02	3.56	7.64	4.01
*SUBHPT	5.92- 6.29	1.75	5.23	1.74
*SUBSFT	12.10-16.0	4.40	16.6	4.40
*SUBSFP	16.50-17.9	7.40	15.6	8.20
*SUBSGT	6.04- 7.91	2.21	8.29	2.21
*SUBSGP	8.20- 9.10	3.60	7.70	4.10
*SUBSPT	6.04- 6.43	1.87	5.40	1.87
*SUBHFGT	6.12- 8.10	2.26	8.30	2.22
*SUBHFGP	8.33- 9.11	3.70	7.80	4.10

3.5 性能テスト

個々の熱物性値サブルーチンに対して、BASIC の TIME\$ 関数を使って測定した計算時間の一例を Table 4 に示す。冷媒 R21, R23 および R113 は、熱物性値計算式が他の物質と一部異なるため区別して示している。計算式が複雑であるために、1 個のサブルーチンを呼び出すのにかなりの時間(約1秒から20秒程度)を要することが分かる。とくに、ニュートン法で逆計算が必要な場合(*SUBTSP, *SUBHGP, *SUBSGP, *SUBHFGP など)や、他のいくつかのサブルーチンを呼び出して計算するような場合(*SUBHFT, *SUBHFP, *SUBSFT, *SUBSFP)には、長時間を要する。

4. プログラム・パッケージの使用例

[例題] Fig. 1 (a)に示す冷凍サイクルで、凝縮温度

```

[Main Program]
1000 '*****
1010 '      EXERCISE
1020 '*****
1030 WIDTH 80,25 : DEFDBL S, Y, Z:DEFINT N:NNN= 1
1040 TIME$="00:00:00"
1050 RESTORE 1080
1060 FOR N=1 TO NNN
1070 READ SUBREF$
1080 DATA R11, R12, R21, R22
1090 NEXT N
1100 ZTC=273.15#+30# : ZTE=273.15#-15#
1110 ZT1=ZTE:ZT4=ZTE:ZT3=ZTC
1120 SUBT=ZT3 : GOSUB *SUBHFT:ZH3=SUBHFT
1130 SUBT=ZT1 : GOSUB *SUBHGT:ZH1=SUBHGT
1140 SUBT=ZT1 : GOSUB *SUBSGT:ZS1=SUBSGT
1150 ZH4=ZH3
1160 SUBT=ZTC:GOSUB *SUBPST:ZPC=SUBPS
1170 SUBT=ZTE:GOSUB *SUBPST:ZPE=SUBPS
1180 ZP1=ZPE:ZP4=ZPE:ZP2=ZPC:ZP3=ZPC
1190 SUBP=ZPC:SUBS=ZS1 : GOSUB *SUBTPS:ZT2=SUBTPS
1200 SUBP=ZPC:SUBT=ZT2 : GOSUB *SUBHPT:ZH2=SUBHPT
1210 ZL=ZH2-ZH1 : ZQ=ZH1-ZH4 : ZE=ZQ/ZL:TI$=TIME$
1220 LPRINT " -- TIME =";TI$;" --"
1230 LPRINT " Iterations =";NZZ
1240 LPRINT " Refrigerant =";SUBREF$
1250 LPRINT " P1    =";USING"      #.### (MPa) ";ZP1
1260 LPRINT " P2    =";USING"      #.### (MPa) ";ZP2
1270 LPRINT " P3    =";USING"      #.### (MPa) ";ZP3
1280 LPRINT " P4    =";USING"      #.### (MPa) ";ZP4
1290 LPRINT " T1    =";USING"    ###.# (K)   ";ZT1
1300 LPRINT " T2    =";USING"    ###.# (K)   ";ZT2
1310 LPRINT " T3    =";USING"    ###.# (K)   ";ZT3
1320 LPRINT " T4    =";USING"    ###.# (K)   ";ZT4
1330 LPRINT " H1    =";USING"    ###.# (kJ/kg) ";ZH1
1340 LPRINT " H2    =";USING"    ###.# (kJ/kg) ";ZH2
1350 LPRINT " H3    =";USING"    ###.# (kJ/kg) ";ZH3
1360 LPRINT " H4    =";USING"    ###.# (kJ/kg) ";ZH4
1370 LPRINT " 1     =";USING"    ###.## (kJ/kg) ";ZL
1380 LPRINT " q     =";USING"    ###.## (kJ/kg) ";ZQ
1390 LPRINT " e     =";USING"      #.### ";ZE
1400 LPRINT CHR$(12) ; 'next printer's page
1410 IF NNN=4 THEN END ELSE NNN=NNN+1 : GOTO 1040
1420 '*****
1430 *SUBTPS
1440 '*****
1450 ZPZ=SUBP:ZSZ=SUBS:ZTT=0#
1460 SUBP=ZPZ:GOSUB *SUBTSP:ZTZ=SUBTS
1470 ZTZ=ZTZ+ZTT
1480 SUBP=ZPZ:SUBT=ZTZ:GOSUB *SUBSPT:ZSS=SUBSPT
1490 IF(ZSS-ZSZ)>0# THEN 1520
1500 ZTT=5#
1510 GOTO 1470
1520 ZXA=ZTZ-5# : ZXB=ZTZ:ZEPS=.0001#
1530 SUBP=ZPZ:SUBT=ZXA:GOSUB *SUBSPT:ZFA=SUBSPT-ZSZ
1540 ZXD=ABS(ZXA-ZXB):NZZ=0
1550 ZXD=ZXD*.5# : IF ZXD/ZXA<=ZEPS THEN ZX=(ZXA+ZXB)*.5# : GOTO 1610
1560 NZZ=NZZ+1
1570 ZXM=(ZXA+ZXB)*.5#
1580 SUBP=ZPZ:SUBT=ZXM:GOSUB *SUBSPT:ZFM=SUBSPT-ZSZ
1590 IF(ZFA*ZFM)<=0# THEN ZXB=ZXM ELSE ZXA=ZXM:ZFA=ZFM
1600 GOTO 1550
1610 SUBTPS=ZX:RETURN

```

Fig. 1 (b) Main Program for Example

を 30°C 、蒸発温度を -15°C とする。この場合、点1, 2, 3および4の圧力, 温度, 比エンタルピを求めよ。また, それらを用いて圧縮仕事 l , 冷凍効果 q および成績係数 ϵ を求めよ。ただし, 冷媒として, R11, R12, R21, R22を用いるものとする。

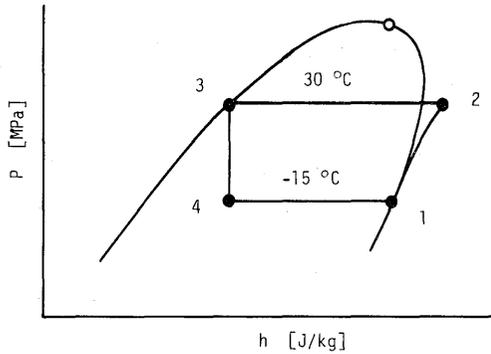


Fig. 1 (a) P-h Diagram for Example

(解答)

本例題を PROREF を使って解く。BASIC で作成したメインプログラム (それに続くべきサブルーチン・パッケージ PROREF のソースリストは紙幅の都合で省略) の一例とその実行結果 (冷媒 R11 の場合) を, それぞれ Fig. 1 (b) と 1 (c) に示す。メインプロ

[Output for R11]

```
-- TIME = 00:01:50 --
Iterations = 7
Refrigerant = R11
P1 = 0.0203 (MPa)
P2 = 0.1254 (MPa)
P3 = 0.1254 (MPa)
P4 = 0.0203 (MPa)
T1 = 258.2 (K)
T2 = 317.0 (K)
T3 = 303.2 (K)
T4 = 258.2 (K)
H1 = 381.3 (kJ/kg)
H2 = 412.2 (kJ/kg)
H3 = 225.9 (kJ/kg)
H4 = 225.9 (kJ/kg)
l = 30.90 (kJ/kg)
q = 155.37 (kJ/kg)
ε = 5.029
```

Fig. 1 (c) Output for the Main Program

グラム中で, 本例題を解くために必要な手続きは行番号1050から1210までの17行とサブルーチン *SUBTPS (行番号1420から1610) であり, その実行時間は1分50秒であった。なお, サブルーチン *SUBTPS は, 本例題を解くために特に作成したもので, 過熱蒸気の圧力と比エントロピから温度を二分法により計算するためのものである。

5. むすび

12種類のフロン系冷媒に対してインタプリタ方式 BASIC 言語によるサブルーチン形式の熱物性値プログラム・パッケージ PROREF を開発し, 本報告で, それらの構造, 仕様, 性能および使用例を示した。今回のバージョンでは, インタプリタ方式 BASIC を採用しているため計算時間が多少長くなっている。計算時間をさらに短くするためには, 今後, MS-DOS などの OS 上で走るコンパイラ方式 BASIC や FORTRAN などのより高速な言語を採用する必要がある。なお, 紙幅の都合でプログラム・パッケージのソースリストは省略した。

最後に, 日頃, 御指導を賜わる九州大学の伊藤猛宏教授に感謝の意を表します。また, 本研究を卒業研究として, 計算式のチェックとプログラム作成を行った本学部卒業生の松尾俊史君と吉田敬一郎君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 茂地 徹, 川江信治, 山田 昭; パーソナルコンピュータによる熱物性値プログラム・パッケージの開発 (水および空気を含む13種類の理想気体), 長崎大学工学部研究報告, 15, 25 (昭60), 1.
- 2) R. C. Downing ; Refrigerants Equations, ASHRAE Trans., 80, 2 (1974), 158.
- 3) 日本電気株式会社; PC-9801E マニュアル.