

冷凍サイクル計算プログラムソフト (自然冷媒) 操作説明書

日本冷凍空調学会 冷媒技術分科会

目次

1 . はじめに	P2
2 . プログラムの実行	P2
3 . 各シートの使い方	P3
3.1) 「飽和表」シート	P3
3.2) 「基本サイクル」シート	P4
3.3) 「EPR」シート	P6
3.4) 「二段」シート	P8
3.5) 「 $p - h$ 線図」シート	P10
3.6) 「 $T - s$ 線図」シート	P11
3.7) 「検算飽和」シート	P12
3.8) 「検算過熱」シート	P13
4 . 計算上の注意	P14
5 . 折込関数 (計算精度ほか)	P14
6 . 使用上の注意	P15
原著文献	P15
付録 折込関数の応用ほか	
A1 . 圧力基準飽和蒸気表	P16
A2 . 二段圧縮一段膨張冷凍サイクル	P18
A3 . 折込関数 (Function) 一覧	P27

1. はじめに

このプログラムソフトは、一段圧縮、二段圧縮、蒸発圧力調整弁の冷凍サイクル計算ができます（ただし二酸化炭素は一段圧縮のみ掲載）。冷媒の状態式は Excel の関数として組み込まれています。各関数を使えば、ユーザが独自の冷凍サイクル・シミュレーションなどを Excel 上に作ることができます。付録は自作ソフトを作る際の参考用です。

本プログラムソフト扱う冷媒は表 1 に示す自然冷媒です。状態式は本学会が推奨するものに基づきます。HC 冷媒は Miyamoto and Watanabe の状態式^{1,2,3}によります。この式は ASHRAE Handbook⁶にも採用され、 $p-h$ 線図、飽和表などが掲載されています。アンモニアは本学会冷媒蒸気表委員会、SI 化小委員会⁷が採択した Baehr and Tillner-Roth の状態式⁴によります。二酸化炭素は Span and Wanger の状態式⁵によります。この式は ASHRAE Handbook⁸にも採用されています。

本ソフトは Microsoft 社の Excel 上で作動します。従って、計算環境として Excel がインストールされたパソコンが必要です。Excel のバージョンは Excel97 以上を推奨します。

表 1 冷凍サイクル計算プログラムソフトの冷媒（自然冷媒）

No	ファイル名	種類	分子式	使用例ほか	原著
1	R 290(プロパン).xls	HC	CH ₃ CH ₂ CH ₃	冷凍冷蔵	文献 ¹
2	R 600(ブタン).xls	HC	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	冷凍冷蔵	文献 ²
3	R 600a(イソブタン).xls	HC	(CH ₃) ₂ CHCH ₃	冷凍冷蔵	文献 ³
4	R 717(アンモニア).xls	無機物	NH ₃	冷凍冷蔵	文献 ⁴
5	R 744(二酸化炭素).xls	無機物	CO ₂		文献 ⁵

2. プログラムの実行

計算したい冷媒のファイルをダブルクリックすると Excel が起動し、下記ダイアログが表示されます。ここでは「マクロを有効にする」をクリックします。配布されている CD 上のファイルはウイルスに汚染されていないことを確認済みです。

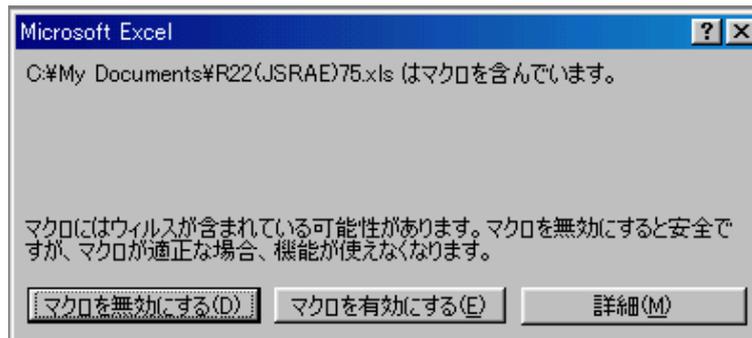


図 1 . マクロを有効にするダイアログ

「マクロを無効にする」をクリックすると、以前の計算結果が表示されるのみで、新しい計算はできません。

なお、上記のダイアログが出ず直ちに Excel が立上る場合があります。これは、使っている Excel のセキュリティレベルが高(H)に設定されている場合です。本ソフトはレベル高(H)に対応していないので、その時は [ツール] [マクロ] [セキュリティ]の順にクリックして レベル中(M)を選択してください。レベル低(L)は勧められません。

3. 各シートの使い方

Excel が立上ると、表 2 に示すシートが表示されます。

表 2 プログラムに含まれるシート一覧

シート名	シートの機能	詳細説明
「飽和表」	温度基準・飽和蒸気表	3.1)
「基本サイクル」	一段圧縮冷凍サイクルの計算（含：ポリトロブ圧縮）	3.2)
「EPR」	蒸発圧力調整弁付きの理論冷凍サイクル計算	3.3)
「二段」	二段圧縮一段膨張の理論冷凍サイクル計算	3.4)
「p-h 線図」	「二段」「EPR」「基本サイクル」のデータを書込みできます	3.5)
「T-s 線図」	「二段」「EPR」「基本サイクル」のデータを書込みできます	3.6)
「検算飽和」	飽和蒸気域の計算誤差を示すシート	3.7)
「検算過熱」	過熱蒸気域の計算誤差を示すシート	3.8)

注) 計算では各部圧力損失は無視します。なお、理論冷凍サイクルは等エントロピー圧縮です。

3.1) 「飽和表」シート

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'R290 (Propane) 熱力学的性質 (飽和表)'. The data is organized as follows:

温度	飽和圧力	比容積		比エンタルピー		比エントロピー	
折込関数	$P_{sat}(T)$	$v_{f, sat}(T)$	$v_{g, sat}(T)$	$h_{f, sat}(T)$	$h_{g, sat}(T)$	$s_{f, sat}(T)$	$s_{g, sat}(T)$
T	MPa	m ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg-K	kJ/kg-K
-70	0.00434	0.0008304	1.5523	26.6	492.7	0.2247	2.5567
-69	0.00591	0.0008350	1.4659	41.7	493.5	0.2192	2.5519
-68	0.00778	0.0008392	1.3929	43.2	494.7	0.2148	2.5467
-67	0.00999	0.0008431	1.3205	45.3	495.9	0.2100	2.5419
-66	0.01268	0.0008460	1.2527	47.5	497.1	0.2054	2.5371
-65	0.01585	0.0008470	1.1881	49.6	498.3	0.2017	2.5329
-64	0.01951	0.0008460	1.1264	51.6	499.5	0.2070	2.5279
-63	0.02368	0.0008430	1.0710	53.9	500.0	0.2073	2.5234
-62	0.02837	0.0008380	1.0218	56.3	500.8	0.2079	2.5191
-61	0.03358	0.0008300	0.9708	59.3	502.2	0.2077	2.5149
-60	0.03931	0.0008190	0.9240	60.4	504.4	0.2075	2.5106
-59	0.04556	0.0008050	0.8800	62.4	506.6	0.2071	2.5069
-58	0.05232	0.0007880	0.8388	64.3	508.9	0.2066	2.5029
-57	0.05960	0.0007690	0.7993	67.0	509.0	0.2063	2.4989
-56	0.06740	0.0007480	0.7624	69.2	509.2	0.2064	2.4947
-55	0.07571	0.0007250	0.7275	71.3	510.4	0.2064	2.4908
-54	0.08453	0.0007000	0.6945	73.5	511.5	0.2064	2.4872
-53	0.09386	0.0006730	0.6634	75.7	512.5	0.2064	2.4839
-52	0.10370	0.0006450	0.6338	77.9	514.0	0.2064	2.4800
-51	0.11405	0.0006160	0.6060	80.1	515.2	0.2063	2.4768
-50	0.12490	0.0005860	0.5797	82.4	516.4	0.2062	2.4731
-49	0.13625	0.0005550	0.5540	84.6	517.5	0.2061	2.4699
-48	0.14810	0.0005230	0.5290	86.8	518.0	0.2060	2.4669
-47	0.16045	0.0004900	0.5048	89.0	519.0	0.2059	2.4634
-46	0.17330	0.0004560	0.4812	91.3	520.2	0.2058	2.4600
-45	0.18665	0.0004210	0.4570	93.5	522.4	0.2057	2.4572
-44	0.20050	0.0003850	0.4338	95.7	523.5	0.2056	2.4542
-43	0.21485	0.0003480	0.4108	98.0	524.9	0.2055	2.4513
-42	0.22970	0.0003100	0.3882	100.2	526.0	0.2054	2.4484
-41	0.24505	0.0002710	0.3660	102.5	527.1	0.2053	2.4459
-40	0.26090	0.0002310	0.3440	104.7	528.3	0.2052	2.4429

図 2 「飽和表」シート (R290 の例)

この表は温度基準で、1 きざみで計算したものです。各セルには計算に使用した折込関数
がそのまま残っており、適宜応用することができます。例えばもっと細かい温度きざみや、圧
力基準の飽和表などに応用可能です。ただし、変更内容を間違えると元の設定に戻らなくなる
ので、注意して行ってください。なお、元の設定に戻らなくなった場合には、配布されている
CD から再度インストールし直せば復帰可能です。

折込関数の行にも関数名を記入してあります。関数の詳細は 5 章を参照してください。

3.2) 「基本サイクル」シート

(一段圧縮冷凍サイクル)

項目	単位	値1	値2	値3	値4
凝縮温度	Tc °C	50.0	50.0	45.0	50.0
蒸発温度	Te °C	-21.0	-20.0	-17.4	7.0
過冷却	Uc °C	20.0	20.0	5.0	10.0
過熱度	Sh °C	5.0	5.0	5.0	5.0
圧縮機吐出圧力	T2 °C	100.0			
圧縮機吐出圧力	Pd MPa (abs)	1.7134	1.7134	1.5344	1.7134
圧縮機吸込圧力	Ps MPa (abs)	0.2358	0.2445	0.2679	0.5844
吸込温度	T1 °C	-16.0	-15.0	-12.4	12.0
比エンタルピー	h1 kJ/kg	558.82	560.02	563.09	591.55
比エンタルピー	s1 kJ/kg-K	2.4325	2.4308	2.4265	2.3974
比体積	v1 m³/kg	0.18255	0.18510	0.17076	0.06103
吐出温度	T2 °C	63.6	63.4	57.5	58.6
比エンタルピー	h2 kJ/kg	654.82	654.24	647.40	643.10
比エンタルピー	s2 kJ/kg-K	2.4325	2.4308	2.4265	2.3974
比体積	v2 m³/kg	0.02874	0.02869	0.03206	0.02775
蒸管温度	T8 °C	30.0	45.0	43.0	40.0
比エンタルピー	h8 kJ/kg	279.26	322.37	316.55	307.62
冷凍効果	ahc kJ/kg	279.55	237.65	246.54	283.93
圧縮仕事	ahc kJ/kg	96.00	94.22	64.32	51.55
凝縮熱量	ahc kJ/kg	375.55	331.87	330.86	335.48
成績係数	COP %	291.2%	252.2%	292.4%	550.8%

図3 「基本サイクル」シート (R290の例)

このシートを使って、一段圧縮の冷凍サイクルを計算できます。右図に各点の番号を示します。1は圧縮機吸込み、2は圧縮機吐出し、3は膨張弁入口、4は蒸発器入口です。

シートの黄色ハッチング部分に数値を入力してください。列ごとに、圧縮機吐出圧力～成績係数までの項目を計算します。

E列データは「 $p-h$ 線図」、「 $T-s$ 線図」のシートに赤い線で書込まれます。二酸化炭素についてはF列のデータも「線図」と連動します。それ以外の列は「線図」と連動しません。

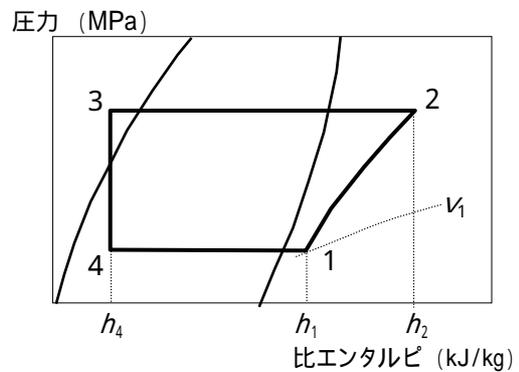


図4 一段圧縮 冷凍サイクル

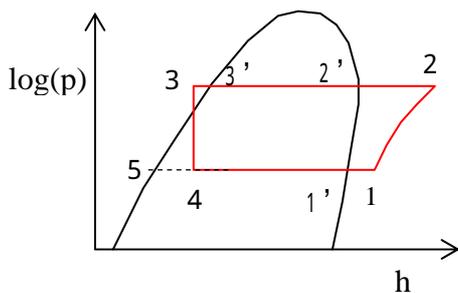


図5 $p-h$ 線図

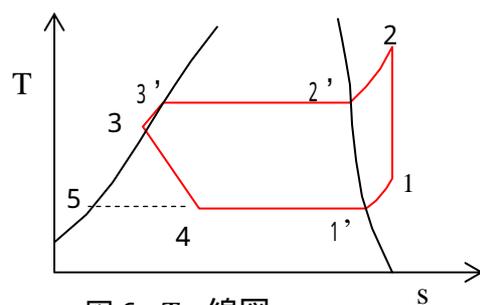


図6 $T-s$ 線図

「基本サイクル」シート 8 行目の圧縮機吐出温度の入力では、実際の圧縮機と理論冷凍サイクルとを区別できません。実際の圧縮機で計算したい場合は、実機の圧縮機吐出し温度を [E8] セルに入力してください。すると、ポリトロップ圧縮 ($pv^n = \text{一定}$) による計算を行います。理論冷凍サイクルで計算する場合は、[E8] セルを空白にしてください。こちらは、等エントロピー圧縮の計算を行います。

なお、理論圧縮・実際圧縮共に、サイクル各部の圧力損失は無いものとしています。

冷凍サイクルを描いていない $p - h$ 線図が必要な場合は、E 列の凝縮温度、蒸発温度 (E4、E5 セル) を消去します。ただし、「基本サイクル」シートの他に、「EPR」「二段」シートでも線図に書込んでいるので、そちらのデータも同様に消去する必要があります。

データを消去したとき、いくつかのセルに #VALUE が表示される場合がありますが、プログラムの動作に問題はありません。再びデータをインプットすれば正常に計算します。

「基本サイクル」シートの形は冷媒によって変えてあります。二酸化炭素については圧力を入力します。それ以外の冷媒では温度基準で入力します。

「基本サイクル」シートは計算式が埋めこんであり、誤操作によって式を壊してしまわないように保護をかけてあります。従って、黄色ハッチング部分以外には書込みができません。Excel 上級者ならば、保護を外し独自の冷凍サイクルなどに応用展開が可能です。ただし、元に戻らなくなる恐れがあるので、初級者は保護を外さないことをお勧めします。

補足) シート保護の外し方

追記や修正などをする場合は、下記方法でシート保護を外してから行ってください。

- 1) 「ツール」 「保護」 「シート保護の解除」の順にクリックします。すると、シート保護が解除されます。解除パスワードは省略しており不要です。
- 2) 修正が完了したら、再度シート保護をかけておく事を推奨します。

「ツール」 「保護」 「シートの保護」の順にクリックすると保護がかかります。そのとき図 7 のダイアログが出ます。必要ならばパスワードを設定してください。設定したパスワードは保護の解除時に必要になるので、覚えておく必要があります。

ダイアログの保護対象は全てチェックを付けたままを推奨します。

なお、同様の方法でブックの保護もかけられますが、動作が不安定になる場合がありますのでお勧めしません。

(ブックとは各シートを含む Excel ファイル全体を意味します)

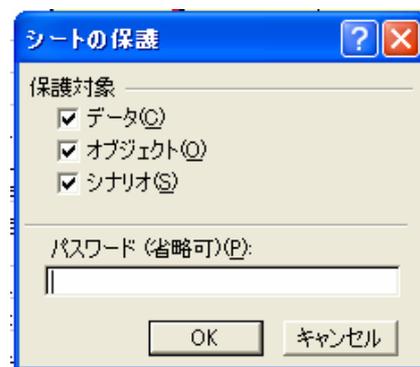


図 7 シート保護のダイアログ

3.3) 「EPR」シート (蒸発圧力調整弁(EPR)を用いたサイクル)
 (注) 二酸化炭素にはこのシートはありません。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	R 290 (プロパン) 蒸発圧力調整弁の理論冷凍サイクル										
2	この表の数値が緑色で書込まれます。 凝縮温度、蒸発温度を消去すれば、緑色への書き込みは消えます。										
3											
4	入力	凝縮温度	To	℃	50.0	50.0					
5		蒸発温度(蒸発器Ⅰ)	Ta	℃	0.0	0.0					
6		蒸発温度(蒸発器Ⅱ)熱温	Ta	℃	-30.0	-30.0					
7		過冷却	Uo	℃	5.0	5.0					
8		過熱度(蒸発器Ⅰ, 蒸発熱は点?)	Sh	℃	10.0	5.0					
9		過熱度(蒸発器Ⅱ, 蒸発熱は点?)	Sh	℃	5.0	10.0					
10		冷媒流量比(蒸発器Ⅰ/全体)				0.6	0.4	蒸発器Ⅰだけのサイクルは、 冷媒流量比=1とします。			
11		圧縮機吐出圧力	Pd	MPa (abs)		1.7133	1.7134				
12		蒸発圧力(蒸発器Ⅰ)	Ph	MPa (abs)		0.4746	0.4746				
13		蒸発圧力(蒸発器Ⅱ)	Ps	MPa (abs)		0.1677	0.1678				
14	凝	吐出温度	T1	℃	-8.1	-12.9					
15		比エンタルピー	H1	kJ/kg	574.37	566.74					
16		比エントロピー	S1	kJ/kg-K	2.5531	2.5240					
17	込	比体積	v1	m³/kg	0.28606	0.28006					
18		吐出温度	T2	℃	81.8	77.3					
19		比エンタルピー	H2	kJ/kg	696.51	686.25					
20	吐	比エントロピー	S2	kJ/kg-K	2.8531	2.5240					
21		比体積	v2	m³/kg	0.03204	0.03126					
22		液管温度	T3	℃	45.0	45.0					
23	管	比エンタルピー	H3	kJ/kg	322.37	322.37					
24		蒸発器Ⅰ出口温度	T5	℃	10.0	5.0					
25	蒸	出口比エンタルピー	H5	kJ/kg	592.46	583.58					
26		EPR 出口温度	T6	℃	3.2	-2.3					
27	器	蒸発器Ⅱ出口温度	T8	℃	-25.0	-20.0					
28		出口比エンタルピー	H8	kJ/kg	547.94	555.89					
29	性	冷凍効果(蒸発器Ⅰ)	qH1	kJ/kg	270.09	261.21					
30		冷凍効果(蒸発器Ⅱ)	qH2	kJ/kg	277.85	294.48					
31		冷凍効果(全体)	qHe	kJ/kg	273.19	281.17					
32	能	圧縮仕事	qH	kJ/kg	122.13	119.51					
33		凝縮熱量	qHh	kJ/kg	374.14	363.88					
34	成績係数	COP	%		223.7%	235.3%					

図8 「EPR」シート (R 290 の例)

図9に示す2つの蒸発器を持ち、そのどちらか又は両方に蒸発圧力調整弁が設置されている冷凍サイクルを計算できます。計算できるのは理論冷凍サイクルです。(等エントロピー圧縮で圧力損失は無視)

黄色ハッチング部にデータを入力してください。蒸発温度や蒸発器出口の過熱度は蒸発器ごとに入力が必要です。EPRの設定圧力に相当する温度を蒸発温度のセルに入力してください。二酸化炭素では、蒸発温度のかわりに蒸発圧力を入力します。なお、EVAP を EPR 側とすることを推奨します。

両方の蒸発器共に EPR 付とする場合は、同じ様に設定する蒸発温度を入力してください。次に、2つの蒸発器に流れる冷媒流量比を入力します。EVAP 側流量 / 全体流量を流量比としており、流量比 = 1 とすると EVAP の無い蒸発器 だけの EPR サイクルになります。計算した EPR サイクルは $p-h$ 線図、 $T-s$ 線図に緑色の線で書込まれます。書込まれる

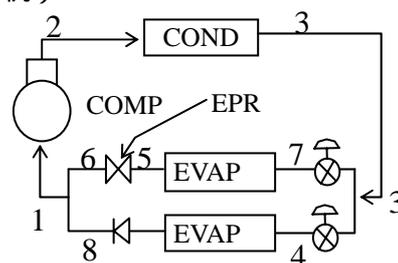


図9 EPR 冷凍サイクル

のはE列データだけです。書込んだサイクルは下図の形をしています。図9と図10～11は記号を合わせてあるので各点の対応状況を確認してください。

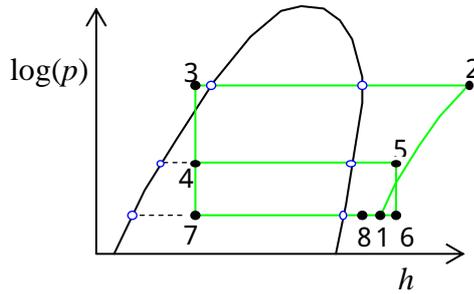


図 10 p - h 線図

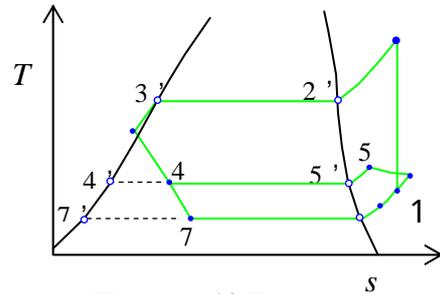


図 11 T - s 線図

各状態点を表3に示します。ダッシュ付きの番号は直近の飽和線上の点を意味します。

表 3 EPR (蒸発圧力調整弁) 冷凍サイクルの状態点

点	状態点	点	状態点
1	圧縮機吸込み (点8、点6の混合)	5	EVAP 出口、EPR 入口
2	圧縮機吐出し	6	EPR 出口
3	膨張弁入口	7	EVAP 入口
4	EVAP 入口	8	EVAP 出口

冷凍サイクルを描いていない線図が必要な場合は、E列の凝縮温度、蒸発温度 (E4、E5セル) を消去してください。二酸化炭素についてはF列も消去してください。同様に、「基本サイクル」「二段」シートのデータも消去する必要があります。その際に、いくつかのセルに#VALUE が表示される場合がありますが、プログラムの動作に問題はありません。再びデータを書込めば正常に計算します。

「EPR」シートにも計算式が埋めこんであり、誤操作によって式を壊してしまわないように保護をかけてあります。従って、黄色ハッチング部分以外に書込みはできません。Excel 上級者ならば、保護を外し独自の冷凍サイクルなどに応用展開が可能です。ただし、元に戻らなくなる恐れがあるので、初級者は保護を外さないことを推奨します。

入力する際の注意事項は3.2)項と同じですので、そちらも参照してください。

3.4)「二段」シート

(二段圧縮一段膨張 理論冷凍サイクル)

注)二酸化炭素にはこのシートはありません。

Microsoft Excel - R290(プロパン).xls							
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール(T) データ(D) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)							
N10							
A	B	C	D	E	F	G	H
1	R 290 (プロパン)	二段圧縮一段膨張 理論冷凍サイクルの計算					
2		飽和温度を消去すれば、線図への書込みは消えます。 *tm を書込まない時は、中間段に計算値を使います。					
3							
4	① 入力項目	中間冷却器CF' (0~100%)		70%			
5	tk 高压段飽和温度℃	40.0	凝縮器出口液過冷却度	K	5		
6	tm 中間段飽和温度℃	10.0	高压段圧縮機吸込過熱度	K	7		
7	to 低压段飽和温度℃	-20.0	低压段圧縮機吸込過熱度	K	10		
8							
9	② 計算結果	飽和温度	圧力	温度	比体積	比エンタルピー	比エントロピー
10		℃	MPa	℃	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
11	1 低压段圧縮機吸込	-20.0	0.244	-10.0	0.1906	568.11	2.4618
12	2 低压段圧縮機吐出	10.0	0.637	25.5	0.0787	614.54	2.4618
13	3 高压段圧縮機吸込	10.0	0.637	17.0	0.0753	598.65	2.4078
14	4 高压段圧縮機吐出	40.0	1.370	49.5	0.0354	635.75	2.4078
15	5 凝縮器出口	40.0	1.370	35.0	0.002102	293.38	
16	7 主膨張弁入口	40.0	1.370	11.3	0.001943	229.14	
17							
18	③	(高段流量/低段流量)	Rmin	Rmax	R計算結果		
19	計算結果	R 冷媒流量比	1.052	1.353	1.263		
20	まとめ	kJ/kg	高压段動力	低圧段動力	合計動力	冷凍効果	COP
21		Δh 比エンタルピー差	37.1	46.4	93.3	339.0	3.634
22							

図 12 「二段」シート (R 290 の例)

図 5 に示す、二段圧縮一段膨張の冷凍サイクルを計算できます。中間冷却器および膨張弁を 2 つ持ち、同一冷媒がサイクル内を循環するサイクルです。なお計算できるのは理論冷凍サイクルです(等エントロピー圧縮で圧力損失は無視)。

他の入力シートと同様に、黄色ハッチング部に入力します。

中間冷却器 CF' (コンタクトファクター) 等については、付録 A 2 章を参照してください。計算方法を説明してあります。

計算した二段圧縮冷凍サイクルは $p-h$ 線図、 $T-s$ 線図に青い線で書込まれます。ただし、書き込まれるのは E 列データだけです。書込んだサイクルは図 14、図 15 の形をしています。両図は、図 13 と記号を合わせてあるので、各点の対応を確認してください。

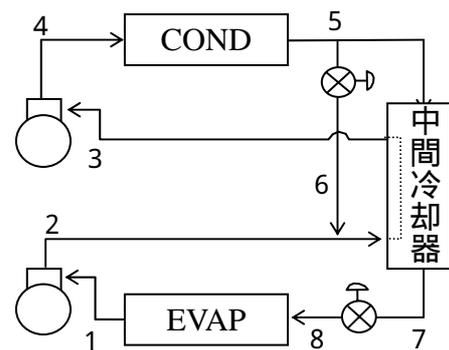


図 13 二段圧縮一段膨張冷凍サイクル

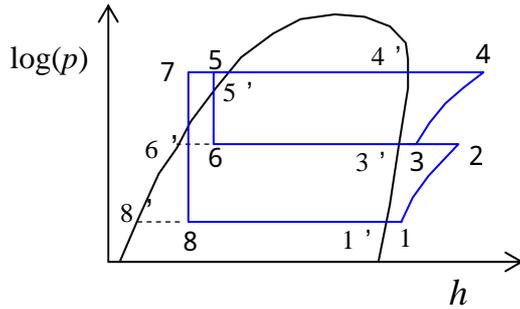


図 14 $p-h$ 線図

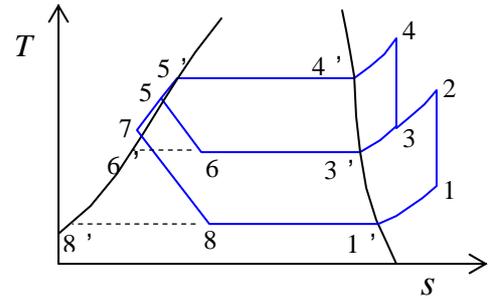


図 15 $T-s$ 線図

各状態点を表 4 に示します。ダッシュ付きの番号は直近の飽和線上の点を意味します。

表 4 二段圧縮一段膨張冷凍サイクルの状態点

点	状態点	点	状態点
1	低段圧縮機吸込み	5	高段用膨張弁入口
2	低段圧縮機吐出し	6	中間冷却器液側入口
3	高段圧縮機吸込み (点 2、点 6 の混合)	7	低段用膨張弁入口
4	高段圧縮機吐出し	8	蒸発器入口

冷凍サイクルを描いていない線図が必要な場合は、[C5] [C6] [C7]セルのデータを消去してください。同様に、「基本サイクル」「EPR」シート of データも消去する必要があります。その際に、いくつかのセルに #VALUE が表示される場合がありますが、プログラムの動作に問題はありません。再びデータを書込めば正常に計算します。

「二段」シートにも計算式が埋めこんであり、誤操作によって式を壊してしまわないように保護をかけてあります。従って、黄色ハッチング部分以外に書込みはできません。Excel 上級者ならば、保護を外し独自の冷凍サイクルなどに応用展開が可能です。ただし、元に戻らなくなる恐れがあるので、初級者は保護を外さないことを推奨します。

入力する際の注意事項は 3.2)項 3.3)項と同じですので、そちらも参照してください。

3.5) 「 $p - h$ 線図」シート

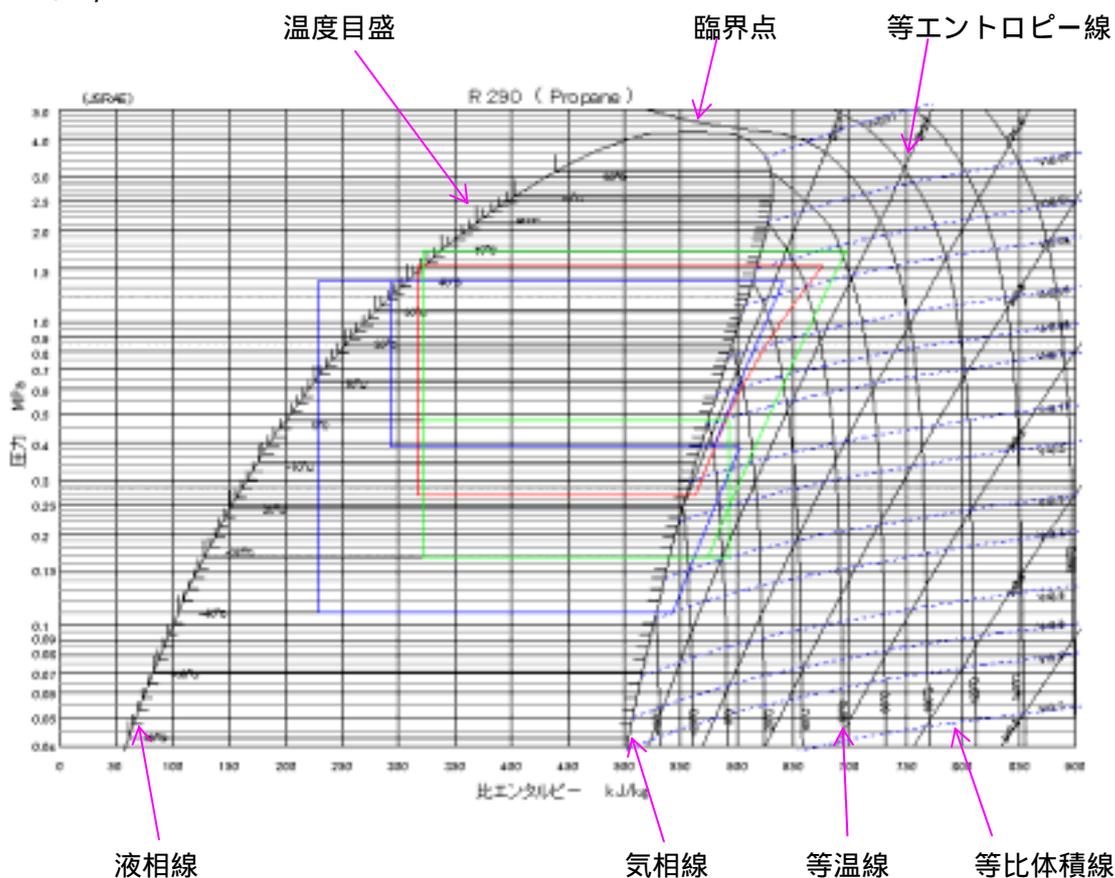


図 16 「 $p - h$ 線図」シート (R 290 の例)

$p - h$ 線図は縦軸を圧力（対数目盛）、横軸を比エンタルピーとする線図です。気相線、液相線上に温度を2 刻みで目盛ってあります。なお、本プログラムソフトでは圧縮液域の等温度線や二相域の等乾き度線は省略しています。

上記 $p - h$ 線図には、各シートの入力データに基づく冷凍サイクルが表示されています。赤い線は「基本サイクル」シートデータによる一段圧縮冷凍サイクル、緑の線は「EPR」シートデータによる蒸発圧力調整弁の理論冷凍サイクル、青い線は「二段」シートデータによる二段圧縮一段膨張の理論冷凍サイクルを示します。

冷凍サイクルの線の消し方は、3.2)～3.4)の説明を参照してください。

Ctrl と **g** のボタンを同時に押すと、保存・出力用の線図をイメージデータとして作成することができます。イメージデータにはプログラムが付きませんので、ファイルを小さくできます。また、詳細情報は添付されませんので、情報を保護することができます。

なお、「 $p - h$ 線図」シートも誤操作予防のために保護をかけてあります。Excel 上級者ならば、保護を外して独自の $p - h$ 線図を作成することも可能です。

3.6)「 $T-s$ 線図」シート

例として、R290の $T-s$ 線図を示します。

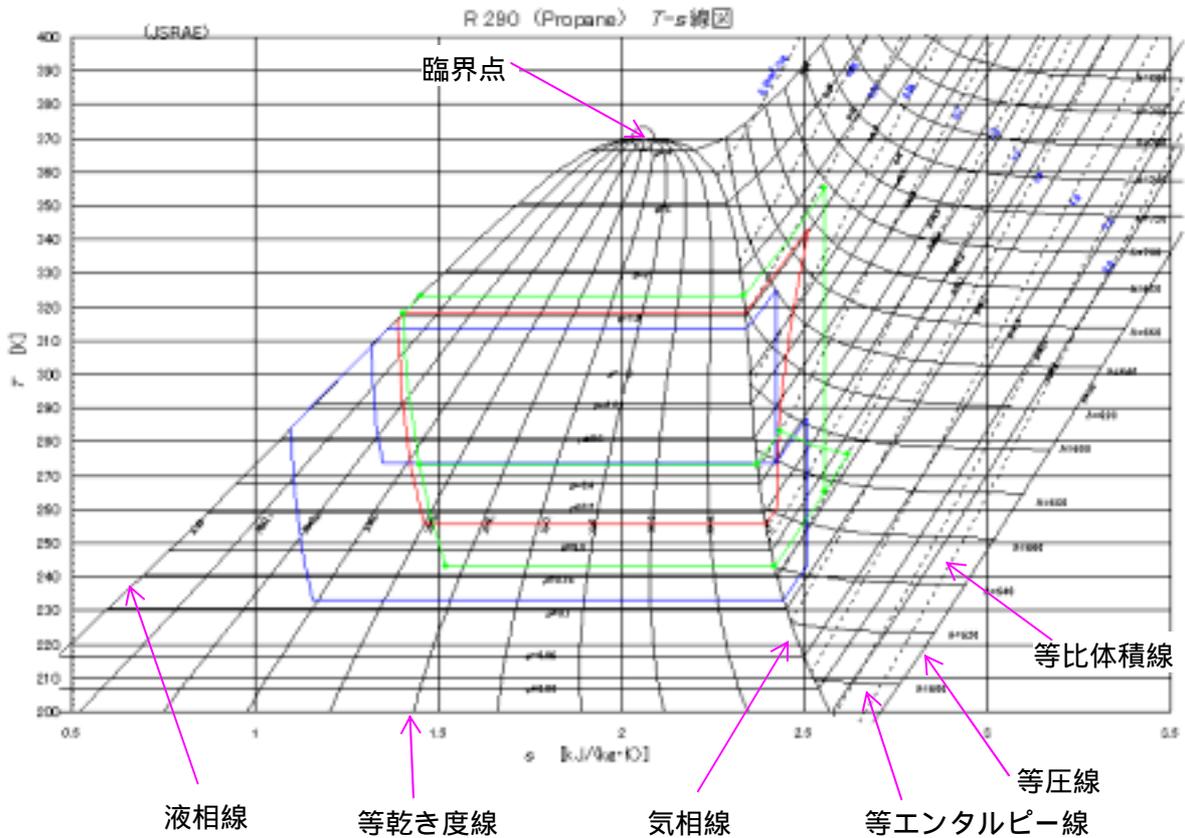


図 17 「 $T-s$ 線図」シート (R290の例)

$T-s$ 線図は縦軸を温度(絶対温度)、横軸を比エントロピーとする線図です。等圧線、等エンタルピー線、等比体積線などが書込まれています。この線図ではカルノーサイクルが長方形になります。種々冷凍サイクルを書込んだときに、長方形に近いものほど高効率になります。

上記 $T-s$ 線図には、各シートの入力データに基づく冷凍サイクルが示されています。赤い線は「基本サイクル」シートデータによる一段圧縮冷凍サイクル、緑の線は「EPR」シートデータによる蒸発圧力調整弁の理論冷凍サイクル、青い線は「二段」シートデータによる二段圧縮一段膨張の理論冷凍サイクルを示します。

冷凍サイクルの線の消し方は、3.2)~3.4)の説明を参照してください。

[Ctrl] と **[g]** のボタンを同時に押すと、保存・出力用の線図をイメージデータとして作ることができます。イメージデータにはプログラムが付きませんので、ファイルを小さくできます。また、詳細情報は添付されませんので、情報を保護することができます。

なお、「 $T-s$ 線図」シートも誤操作予防のために保護をかけてあります。Excel 上級者ならば、保護を外して独自の $T-s$ 線図を作ることも可能です。

3.7) 「検算飽和」シート (飽和蒸気域の計算誤差を示すシート)

例として、R 290 の「検算飽和」シートを示します。

このシートは飽和蒸気域での本ソフトの計算誤差を示しており、原著または原データに記載された数値と本プログラムソフトの計算値とを対比して誤差を計算しています。表中、原データの列は原著または原データに記載された数値で、本ソフトの列は本プログラムソフトの計算値です。差の列は誤差を示しており、 $[\text{本ソフト計算値}] / [\text{原著または原データ}] - 1$ を%で表示しています。

本シートに示された範囲で、誤差はほとんど 0.00%以下と小さいことが確認できています。ただし、原データの有効桁数が小さい場合などでは、四捨五入のために誤差の%値が大きくなっていますので、その領域のデータは丸め誤差があることに注意してください。

また下表にて、飽和蒸気の比体積 v^g にて -150 の場合などでは誤差が少し大きくなっていますが、その理由は分かっていません。このような場合には、本ソフトの計算値はシートに示された誤差を含むとして取扱ってください。

R 290 (プロパン) 冷凍サイクル計算ソフトの計算精度 (飽和表)																			
原著: 宮本, 彦部: Thermodynamic Property Model for Fluid-Phase Propane, International Journal of Thermophysics, Vol.21, No.5, P.1045-1072																			
原データ: ASHRAE Fundamentals, P.2045, 2005																			
	原データ	本ソフト	差	原データ	本ソフト	差	原データ	本ソフト	差	原データ	本ソフト	差	原データ	本ソフト	差	原データ	本ソフト	差	
	t_s	P	P_{sT}	ρ^l	$1/VIT$	ρ^g	v^l	VPT	h^l	HT	h^g	HPT	ρ^g	SIT					
	℃	kPa	kPa	%	kg/m ³	kg/m ³	%	m ³ /kg	m ³ /kg	%	kJ/kg	kJ/kg	%	kJ/kg	kJ/kg	%	kJ/kg	%	
9	-190	0.01	0.01	-46.2%	894.9	664.9	0.00%	4325.600	4312.999	-0.29%	-123.35	-123.35	0.00%	402.21	402.21	0.00%	-0.6870	-0.6870	0.00%
10	-140	0.03	0.03	-34.0%	894.8	664.8	-0.01%	867.090	866.246	-0.96%	-33.70	-100.70	0.00%	412.56	412.56	0.00%	-0.5336	-0.5336	-0.01%
11	-130	0.12	0.12	0.19%	874.7	674.7	-0.01%	224.320	224.443	0.05%	-83.92	-83.92	0.00%	423.23	423.23	0.00%	-0.2903	-0.2903	0.01%
12	-120	0.41	0.41	-0.54%	864.5	664.5	0.01%	71.058	71.058	0.00%	-64.00	-64.00	-0.01%	434.19	434.19	0.00%	-0.2558	-0.2558	-0.01%
13	-110	1.16	1.16	-0.02%	854.4	654.4	0.00%	26.489	26.489	0.00%	-43.90	-43.90	-0.01%	445.42	445.42	0.00%	-0.1287	-0.1287	-0.04%
14	-100	2.89	2.89	-0.07%	844.3	644.3	0.01%	11.273	11.273	0.00%	-23.59	-23.59	0.00%	456.90	456.90	0.00%	-0.0079	-0.0079	-0.27%
15	-90	6.42	6.42	0.07%	833.8	633.8	0.00%	5.3479	5.3479	0.00%	-3.04	-3.04	0.14%	468.57	468.57	0.00%	0.1074	0.1074	0.04%
16	-80	13.01	13.01	-0.01%	823.3	623.3	0.00%	2.7790	2.7790	0.00%	1.73	1.73	0.00%	480.40	480.40	0.00%	0.2181	0.2181	-0.01%
17	-70	24.34	24.34	0.00%	812.6	612.6	0.00%	1.5523	1.5523	0.00%	38.92	38.92	0.01%	492.35	492.35	0.00%	0.2247	0.2247	0.00%
18	-60	42.81	42.81	-0.01%	801.7	601.7	0.00%	0.9240	0.9240	0.00%	60.43	60.43	0.01%	504.36	504.36	0.00%	0.4279	0.4279	0.00%
19	-50	70.46	70.46	0.00%	790.5	590.5	0.00%	0.5797	0.5797	0.00%	82.36	82.36	-0.01%	516.37	516.37	0.00%	0.5282	0.5282	0.00%
20	-42.09	101.32	101.32	0.00%	781.4	581.4	0.01%	0.4137	0.4137	0.00%	100.02	100.02	0.00%	528.85	528.85	0.00%	0.6058	0.6058	-0.01%
21	-40	111.01	111.01	0.00%	779.0	579.0	0.00%	0.3800	0.3800	0.00%	104.74	104.74	0.00%	528.34	528.34	0.00%	0.6260	0.6260	0.00%
22	-38	120.95	120.95	0.00%	776.7	576.7	-0.01%	0.3509	0.3509	0.00%	109.28	109.28	0.00%	530.73	530.73	0.00%	0.6453	0.6453	0.00%
23	-36	131.55	131.55	0.00%	774.3	574.3	0.00%	0.3244	0.3244	0.00%	113.83	113.83	0.00%	533.11	533.11	0.00%	0.6645	0.6645	0.01%
24	-34	142.87	142.87	0.00%	771.9	571.9	0.01%	0.3004	0.3004	0.00%	118.41	118.41	0.00%	535.48	535.48	0.00%	0.6837	0.6837	0.00%
25	-32	154.92	154.92	0.00%	769.6	569.6	-0.01%	0.2785	0.2785	0.00%	123.01	123.01	0.00%	537.85	537.85	0.00%	0.7028	0.7028	-0.01%
26	-30	167.74	167.74	0.00%	767.1	567.1	0.01%	0.2586	0.2586	0.00%	127.64	127.64	0.00%	540.22	540.22	0.00%	0.7219	0.7219	-0.01%
27	-28	181.36	181.36	0.00%	764.7	564.7	0.00%	0.2404	0.2404	0.00%	132.28	132.28	0.00%	542.58	542.58	0.00%	0.7407	0.7407	0.00%
28	-26	195.81	195.81	0.00%	762.3	562.3	0.00%	0.2237	0.2237	0.00%	136.95	136.95	0.00%	544.93	544.93	0.00%	0.7596	0.7596	-0.01%

図 18 「検算飽和」シート (R 290 の例)

3.8)「検算過熱」シート

(過熱蒸気域の計算誤差を示すシート)

注)HC 冷媒(R 290、R 600、R 600a)にはこのシートはありません。

例として、R 717の「検算過熱」シートを示します。

このシートは加熱蒸気域での本ソフトの計算誤差を示しており、原著または原データに記載された数値と本プログラムソフトの計算値とを対比して誤差を計算しています。表中、原データの列は原著または原データに記載された数値で、本ソフトの列は本プログラムソフトの計算値です。差の列は誤差を示しており、[本ソフト計算値]/[原著または原データ]-1 を%で表示しています。

本シートに示された範囲で、誤差はほとんど0.00%程度と小さいことが確認できています。ただし、原データの有効桁数が小さい場合などでは、四捨五入のために誤差の%値が大きくなっていますので、その領域のデータは丸め誤差があることに注意してください。

また下表のように、誤差が±0.03%程度になっている場合がありますが、その理由は分かっていません。ほとんどは丸め誤差であると思われるが、このような場合には本ソフトの計算値はシートに示された誤差を含むとして取扱ってください。

R 717(アンモニア) 冷凍サイクル計算ソフトの計算精度 (圧縮液過熱ガス)									
原著: Baehr, Tillner-Roth Thermodynamic Properties of Environmentally Acceptable Refrigerants, ISBN 3-51- 原著 P.51									
圧力	0.020	MPa							
飽和	-61.37	°C							
	密度			比エンタルピー			比エントロピー		
t	原著	本ソフト	本/原-1	原著	本ソフト	本/原-1	原著	本ソフト	本/原-1
飽和液	715.2	715.17	0.00%	-73.94	-73.95	0.02%	-0.1317	-0.1318	0.05%
飽和蒸気	0.1953	0.1953	-0.02%	1371.3	1371.28	0.00%	6.6924	6.6924	0.00%
°C	kg/m ³	kg/m ³	%	kJ/kg	kJ/kg	%	kJ/(kg·K)	kJ/(kg·K)	%
-75	730.10	730.1	0.00%	-131.96	-131.96	0.00%	-0.4148	-0.4148	0.01%
-70	724.72	724.7	0.00%	-110.80	-110.80	0.00%	-0.3094	-0.3094	0.00%
-65	719.23	719.2	0.00%	-89.51	-89.51	0.00%	-0.2058	-0.2058	0.02%
-60	0.1940	0.1940	-0.02%	1374.2	1374.2	0.00%	6.7060	6.7060	0.00%
-55	0.1893	0.1893	0.01%	1384.7	1384.7	0.00%	6.7549	6.7549	0.00%
-50	0.1849	0.1849	0.01%	1395.2	1395.2	0.00%	6.8025	6.8025	0.00%
-45	0.1807	0.1807	0.02%	1405.7	1405.7	0.00%	6.8488	6.8488	0.00%
-40	0.1767	0.1767	0.03%	1416.1	1416.1	0.00%	6.8939	6.8939	0.00%
-35	0.1729	0.1729	0.02%	1426.5	1426.5	0.00%	6.9381	6.9381	0.00%
-30	0.1693	0.1693	0.00%	1436.9	1436.9	0.00%	6.9812	6.9812	0.00%
-25	0.1658	0.1658	0.01%	1447.2	1447.2	0.00%	7.0234	7.0234	0.00%
-20	0.1625	0.1625	-0.01%	1457.6	1457.6	0.00%	7.0648	7.0648	0.00%
-15	0.1593	0.1593	-0.01%	1468.0	1468.0	0.00%	7.1054	7.1054	0.00%
-10	0.1562	0.1562	0.01%	1478.4	1478.4	0.00%	7.1452	7.1452	0.00%
-5	0.1533	0.1533	-0.03%	1488.8	1488.8	0.00%	7.1843	7.1843	0.00%
0	0.1504	0.1504	0.01%	1499.2	1499.2	0.60%	7.2229	7.2229	0.00%
5	0.1477	0.1477	-0.01%	1509.6	1509.6	0.00%	7.2606	7.2606	0.00%
10	0.1450	0.1450	0.03%	1520.0	1520.0	0.00%	7.2978	7.2978	0.00%
15	0.1425	0.1425	0.00%	1530.5	1530.5	0.00%	7.3345	7.3345	0.00%

図 19 「検算過熱」シート (R 717 の例)

4．計算上の注意

このプログラムソフトでは、ニュートン法などの逐次近似法を多く用いています。

逐次近似法は求める解を挟むある範囲内で計算を繰返すので、場合によって式の適用範囲を超えて計算してしまう場合があります。従って、臨界点の近くや低温の領域などでは計算できない場合があります。線図に示された範囲や飽和蒸気表に示された範囲は、計算できた結果を表示したものです。なるべくこの範囲で計算してください。ただし、臨界点付近の領域では表示されている範囲内であっても計算できない等の例外があります。

臨界点のどの位近くまで計算できるかは冷媒によって異なります。これはプログラムの動作を軽くする目的で、使用しているアルゴリズム毎に計算できない範囲が異なるためです。計算できない場合は、プログラムは強制的に中断されます。したがって、臨界点近くの領域の熱力学性質を検討する場合は、原著文献を参照してください。

計算結果が無限大になってしまう場合は、Excel が計算を中断します。この場合、該当セルに #VALUE が表示されます (Excel での中断なので、図 20 の警告は出ません)。入力したデータに誤りがあったのが原因です。適切なデータを再入力すれば正常な状態に戻ります。

計算が収束しない場合は、Excel が延々と計算を続けるのを避けるために、プログラムが自分で計算を中断します。この場合は図 20 の警告表示が出ます。OK をクリックすると、以前の状態に戻ります。計算できない領域のデータを入力したことなどが主な原因です。適切なデータを再入力すれば正常な状態に戻ります。



図 20 警告ダイアログ

5．折込関数 (計算精度ほか)

折込関数は、「飽和表」シートに組み込まれた関数以外にもありますので、以下に紹介します。これらは Excel の関数と同じように使えます。ただし、その冷媒のプログラム (Excel ではブックと言う) に各関数は付属しており、当該ブック内のシートで使えますが、他の Excel ファイル (ブック) では動作しません。

冷媒が違えば同じ名前の関数でも、状態方程式も定数値も違うので、計算結果は同じにはなりません。従って、関数はブック内のみで使えるようになっています。

プログラムの計算結果と原著文献に掲載された値とを対比した表を、各冷媒の「検算飽和」、「検算過熱」シートに表示してあります。計算精度や計算可能範囲の確認に使ってください。付録の折込関数 (Function) 一覧 (P27) も参照ください。

表5) 自然冷媒 (R 290、R 600、R 600a、R 717、R 744、)

求める状態量		関数名 (単位)	変数
飽和 状態	飽和圧力	PsT(T) (MPa)	T=温度 (K)
	飽和温度	TsP(P) (K)	P=圧力 (MPa)
蒸気 (気相)	圧力	PVT(V,T) (MPa)	V=比体積 (m ³ /kg) T=温度 (K)
	比体積	VPT(P,T) (m ³ /kg)	P=圧力 (MPa) T=温度 (K)
	比エンタルピー -	HVT(V,T) (kJ/kg)	V=比体積 (m ³ /kg) T=温度 (K)
	比エントロピー -	SVT(V,T) (kJ/(kg·K))	
	温度	TPS(P,S) (K)	P=圧力 (MPa) S=比エントロピー (kJ/(kg·K))
飽和 液体 (液相)	比エンタルピー -	HfT(T) (kJ/kg)	T=飽和液の温度 (K)
	比エントロピー -	SfT(T) (kJ/(kg·K))	
	比体積	VfT(T) (m ³ /kg)	
圧縮 液体 (液相)	比エンタルピー -	HfPT(P,T) (kJ/kg)	P=圧力 (MPa) T=温度 (K)
	比エントロピー -	SfPT(P,T) (kJ/(kg·K))	
	比体積	VfPT(P,T) (m ³ /kg)	

6. 使用上の注意

このプログラムソフトを使用することによって、ユーザが受ける可能性がある全ての損害等について、配布元、開発者は賠償請求の責を免れるものとします。

このプログラムは日本冷凍空調学会 冷媒技術分科会が、作成、監修、検査、承認したものです (開発担当 冷媒技術分科会 宇田川義紘)。

平成17年4月 日 配布元 社団法人日本冷凍空調学会

文献

- 1 H.Miyamoto, K.Watanabe: Thermodynamic Property Model or Fluid-Phase Propane, International Journal of Thermophysics, Vol.21, No.5, pp.1045-1072, 2000
- 2 H.Miyamoto, K.Watanabe: Thermodynamic Property Model or Fluid-Phase n-Butane, International Journal of Thermophysics, Vol.22, No.2, pp.459-475, 2001
- 3 H.Miyamoto, K.Watanabe: Thermodynamic Property Model or Fluid-Phase Isobutane, International Journal of Thermophysics, Vol.23, No.2, pp.477-499, 2002
- 4 H.D.Baehr, R.Tillner-Roth: Thermodynamic Properties of Environmentally Acceptable Refrigerants, ISBN 3-540-58693-8, Springer-Verg, 1995
- 5 R.Span, W.Wanger: A New Equation of State for Carbon Dioxide, J.Phys.Che.Ref.Data, 1996
- 6 ASHRAE Handbook, Fundamentals, pp.20.44-20.49, 2005
- 7 小口幸成, 高石吉登, 東之弘, 矢田直之, 並木孝行: 冷凍, Vol.71, No.826, pp.826-, 1996-8
- 8 ASHRAE Handbook, Fundamentals, pp.20.38-, 2005

(付録) 折込関数の応用

本文5章で説明した折込関数を使って、専用のデータ処理などを行うことができます。その例として、圧力基準飽和表と二段圧縮理論冷凍サイクルのプログラム作成例を示します。二段圧縮は本体に織り込み済みですが、ここで説明する方法で作ったものです。

Excel の操作方法についてはある程度知っているものとして、細かい説明は省略します。不明な点は Excel のヘルプを見てください。なお、データ処理を追加していくと、ファイルが重くなり計算時間が長くなります。パソコンの性能との兼ね合いでデータ処理する量を決めてください。

A1 . 圧力基準飽和表

新しいシートに圧力基準の飽和表を作る例を説明します。

A1.1 新しいシートを挿入

まず新しいシートを挿入してください。[挿入] [ワークシート]の順にクリックすれば新しいシート Sheet1 ができます。このシートに表のタイトルや項目などを書き込んでください。シートのタブ名も必要により変更してください。

次に、A 列に計算したい圧力の値を適宜書き込んでください。サンプルでは 0.1 から 1.5MPa まで 0.1MPa きざみで書き込みましたが、使い方に従って自由に決めてください。書込んだサンプルを下図に示します。赤い字や線は説明用ですので書込み不要です。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	R 290	(Propene)	熱力学的性質 (圧力基準・飽和表)						
2									
3	圧力	飽和温度	比体積		比エンタルピー		比エントロピー		
4		$T_s(P)$	$v'(P,T)$	$v''(P,T)$	$h'(P,T)$	$h''(P,T)$	$s'(P,T)$	$s''(P,T)$	
5	p	t	v'	v''	h'	h''	s'	s''	
6	MPa	℃	m ³ /g	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	kJ/(kg·K)	
7	0.10								
8	0.20								
9	0.30								
10	0.40								
11	0.50								
12	0.60								
13	0.70								
14	0.80								
15	0.90								
16	1.00								
17	1.10								
18	1.20								
19	1.30								
20	1.40								
21	1.50								

A 1.2 各セルへ関数書き込み

まず B7 のセルに `=TsP(A7)-273.15` と書き込み Enter してください。瞬時に計算して `-42.4` と表示されます。以下同様に各セルにそれぞれの関数を書き込みます。

計算精度は原著文献に従ってください。R 290 はおおむね有効数字 5 桁で表示されていますが、サンプルは 4 桁にしました。計算精度は原著文献に従うことを推奨しますが、文献が手元がない場合等には有効数字 5 桁以下にしてください。

どの関数も絶対温度で作ってあるので、273.15 のセルシウス度()への温度換算は必ず行ってください。

B7	<code>=TsP(A7)-273.15</code>	飽和温度
C7	<code>=VfT(B7+273.15)</code>	飽和液体の比体積
D7	<code>=VPT(A7,B7+273.15)</code>	飽和蒸気の比体積
E7	<code>=HfT(B7+273.15)</code>	飽和液体の比エンタルピー
F7	<code>=HVT(D7,B7+273.15)</code>	飽和蒸気の比エンタルピー
G7	<code>=SfT(B7+273.15)</code>	飽和液体の比エントロピー
H7	<code>=SVT(D7,B7+273.15)</code>	飽和蒸気の比エントロピー

これで B7 から H7 まで一通り計算がおわりました。この B7~H7 のセルを他のセルにコピーすれば飽和表が完成します。出来たサンプルを下図に示します。罫線など適宜追加して読みやすいようにしてください。

R 290 (Propane)		熱力学的性質 (圧力基準・飽和表)						
圧力	飽和温度	比体積		比エンタルピー		比エントロピー		
p	$T_s(P)$	v^l	v^g	h^l	h^g	s^l	s^g	
MPa	℃	m ³ /g	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)	kJ/(kg·K)	
0.10	-42.4	0.001719	0.41879	99.35	525.49	0.6029	2.4495	
0.20	-25.4	0.001781	0.21930	138.26	545.59	0.7648	2.4092	
0.30	-14.2	0.001827	0.14963	165.06	558.68	0.8699	2.3898	
0.40	-5.5	0.001865	0.11375	186.33	568.57	0.9500	2.3780	
0.50	1.7	0.001900	0.09175	204.34	576.57	1.0156	2.3699	
0.60	7.9	0.001932	0.07682	220.16	583.28	1.0719	2.3639	
0.70	13.4	0.001962	0.06600	234.40	589.07	1.1214	2.3592	
0.80	18.3	0.001990	0.05778	247.43	594.14	1.1658	2.3554	
0.90	22.8	0.002018	0.05131	259.52	598.63	1.2063	2.3521	
1.00	26.9	0.002045	0.04608	270.84	602.64	1.2436	2.3493	
1.10	30.8	0.002071	0.04175	281.51	606.25	1.2782	2.3467	
1.20	34.4	0.002097	0.03812	291.65	609.50	1.3107	2.3443	
1.30	37.8	0.002123	0.03502	301.32	612.45	1.3413	2.3420	
1.40	41.0	0.002149	0.03233	310.60	615.11	1.3703	2.3398	
1.50	44.0	0.002174	0.02999	319.52	617.53	1.3979	2.3376	

A2 . 二段圧縮の理論冷凍サイクル

本プログラムソフトで取扱うことができる二段圧縮の理論冷凍サイクルを図1、図2に示します。中間冷却器を用いる一段膨張サイクルで、各膨張弁が各圧縮機吸込状態での過熱度を制御しています。

計算シートの黄色ハッチングされたセルにデータを入力すれば、自動的にこの二段圧縮理論冷凍サイクルを計算し、 $p-h$ 線図上に冷凍サイクルを描きます。

冷凍サイクルとしての線図が不要な場合は、圧力 (P_k 、 P_m 、 P_o) の入力データを消去してください。その際、いくつかのセルに #VALUE と表示されますが、動作上に問題はありません(3.2項 参照)。

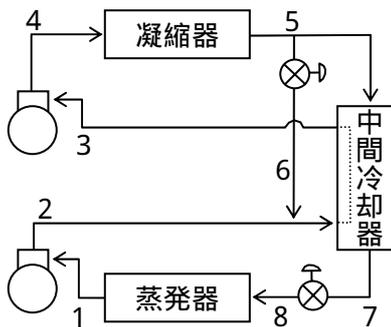


図1 冷凍サイクル

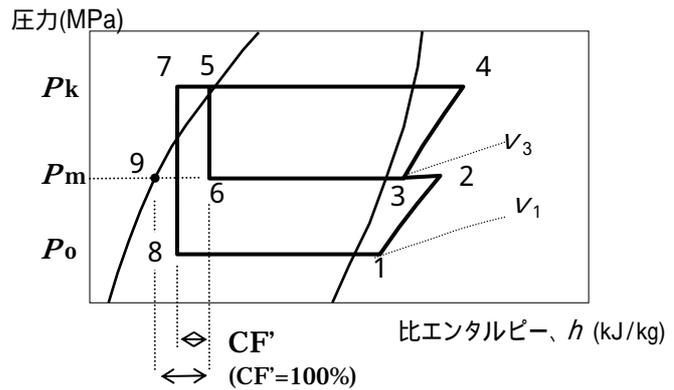


図2 $p-h$ 線図

プログラムを使う場合、コンタクトファクター、 CF' の意味と使い方が必要ですので以下に説明します。

h_7 を求める式は、二段圧縮一段膨張に特有な以下の式です。

$$h_7 = h_2 - R \times (h_3 - h_6)$$

ここで、 R は冷媒流量比(高段流量/低段流量)です。

Ref. 冷凍空調技術冷凍編、p.51、日本冷凍空調学会、東京、(H12-7-31)

二段圧縮の計算には、この式の他に中間冷却器の性能が必要です。ここでは中間冷却器の性能に次の CF' を使っています。

$$CF' = 1 - (t_7 - t_m) / (t_5 - t_m) \quad t_m \text{ は中間圧力 } P_m \text{ に対応する飽和温度です。}$$

$CF' = 0\%$ は熱交換器無し、 $CF' = 100\%$ は熱交換が100%(完全に)実現する場合があります。但し CF' は t_m を用いて求めているので、厳密なコンタクトファクターではありません。厳密な CF 値との関係は実機で確認が必要です。

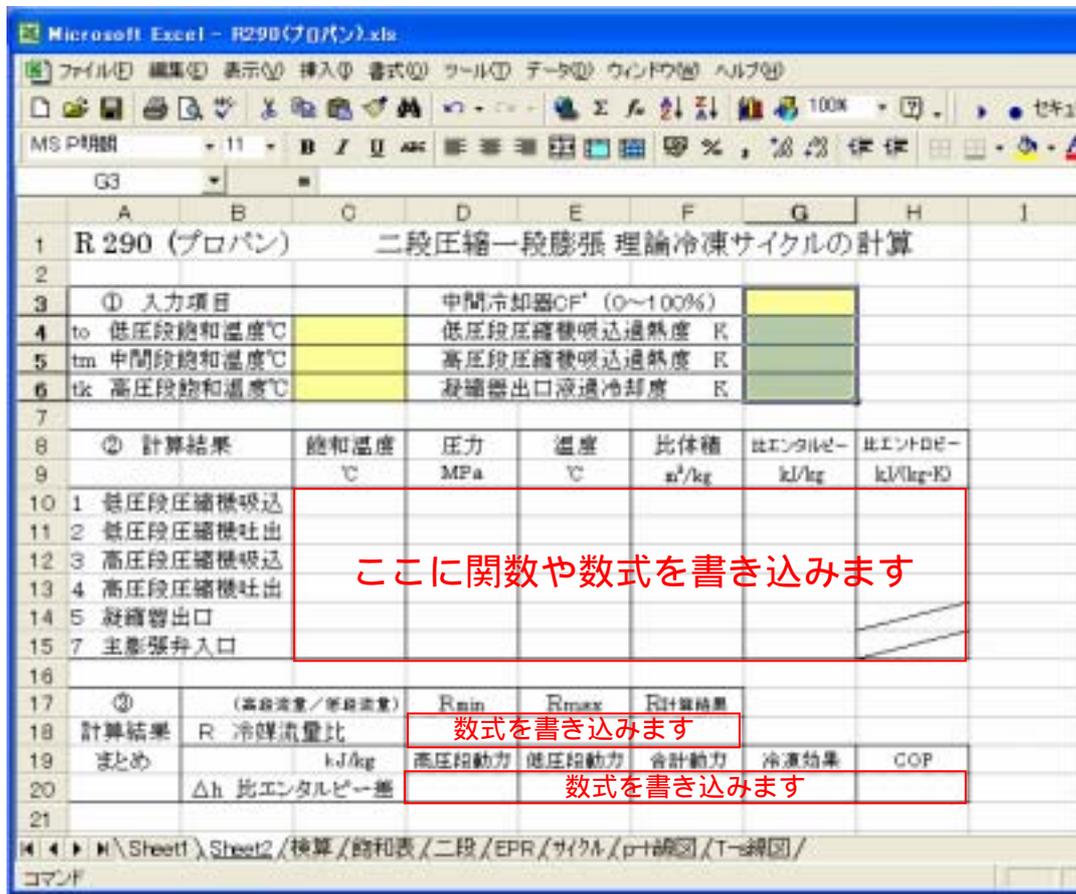
流量比 R には適用範囲があります。最大は $R_{max} = (h_2 - h_9) / (h_3 - h_5)$ であり、 $t_7 = t_m$ の時、すなわち $CF' = 100\%$ で起ります。最小は $R_{min} = (h_2 - h_5) / (h_3 - h_5)$ であり、高段の圧縮機吸込み状態での過熱度が液の直接冷却のみで制御される時、すなわち $t_7 = t_5$ の時、 $CF' = 0\%$ で起ります。 CF' はこの R_{max} と R_{min} との間でどの辺りかを示すものです。

図2にて、 CF は点7が点5から左にどれだけ進むかを示しています。 CF は最大でも100%(点9の上)です。 CF' 入力値は50~90%程が適当です。実機と照合してください。

以下に、二段圧縮の計算プログラムの作り方を説明します。

A 2.1 新しいシートを挿入

新しいシートに下図のように文字および罫線を書いてください。赤枠部分には後で計算式を書きます。データ入力セルには黄色ハッチングをします。入力可能はこのセルだけです。



A 2.2 関数と数式の書込み

各セルに書き込む数式は下表の通りです。青の式は該当するセルのコピーでも作れます。

	A	B	C	D	E	F	G	H
8		計算結果	圧力 MPa	飽和温度	温度	比体積 m ³ /kg	比エンタルピー kJ/kg	比エンタルピー kJ/(kg·K)
9								
10	1	低压段圧縮機吸込	=C4	=TsP(C10) - 273.15	=D10+G6	=VPT(C10, E10+273.15)	=HVT(F10, E10+273.15)	=SVT(F10, E10+273.15)
11	2	低压段圧縮機吐出	=C5	=TsP(C11) - 273.15	=TPS(C11, H11) - 273.15	=VPT(C11, E11+273.15)	=HVT(F11, E11+273.15)	=H10
12	3	高压段圧縮機吸込	=C5	=TsP(C12) - 273.15	=D12+G5	=VPT(C12, E12+273.15)	=HVT(F12, E12+273.15)	=SVT(F12, E12+273.15)
13	4	高压段圧縮機吐出	=C6	=TsP(C13) - 273.15	=TPS(C13, H13) - 273.15	=VPT(C13, E13+273.15)	=HVT(F13, E13+273.15)	=H13
14	5	凝縮器出口	=C6	=TsP(C14) - 273.15	=D14 - G5	=VfT(E14 +273.15)	=HfPT(E14 +273.15)	
15	7	主膨張弁入口	=C6	=TsP(C15) - 273.15	=TfH(H15) - 273.15	=VfPT(C15, E15+273.15)	=G11 - F18* (G12 - G14)	

E11セルおよびE13セルでは、比エントロピーから圧縮機吐出状態での温度を求めています。
 E15セルの $T_{FH}(H)$ はあまり使わないので、本文5章折込関数の項では紹介していませんが、
 液体の比エンタルピーから飽和液体温度を求める関数です(付録A3章を参照してください)。
 G15セルは二段圧縮一段膨張の場合に固有の数式です。

計算結果まとめの各セルには、次の式を書き込んでください。

		D	E	F	
17		R_{min}	R_{max}	R 計算結果	
18	冷媒流量比	$= (G11 - G14) / (G12 - G14)$	$= (G11 - HPT(C12, D12 + 273.15)) / (G12 - G14)$	$= D18 + G3 * (E18 - D18)$	

		D	E	F	G	H
19	kJ/kg	高压段動力	低压段動力	合計動力	冷凍効果	COP
20	比エンタルピー差	$= G13 - G12$	$= G11 - G10$	$= F18 * D20 + F20$	$= G10 - G17$	$= G20 / F20$

A2.3 冷凍サイクル計算の完成形

見やすくするために、罫線を書き加えてあります。有効数字は3～4桁にしましたが、これで実用上十分と思います。必要ならばもう1桁加えてください。

Microsoft Excel - R290(プロパン)サイクル.xls							
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) 挿入(I) 書式(O) ツール(T) データ(D) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)							
Century 11 100%							
J5 =							
A	B	C	D	E	F	G	H
1	R 290 (プロパン) 二段圧縮一段膨張 理論冷凍サイクルの計算						
3	① 入力項目		中間冷却器CF' (0~100%)			70%	
4	t ₀ 低压段飽和温度℃	-40.0	低压段圧縮機吸込過熱度 K			10	
5	t _m 中間段飽和温度℃		高压段圧縮機吸込過熱度 K			7	
6	t _h 高压段飽和温度℃	40.0	凝縮器出口液過冷却度 K			5	
8	② 計算結果	飽和温度	圧力	温度	比体積	比エンタルピー	比エントロピー
9		℃	MPa	℃	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/(kg·K)
10	1 低压段圧縮機吸込	-40.0	0.111	-30.0	0.3986	543.2	2.505
11	2 低压段圧縮機吐出	-6.3	0.390	14.0	0.1285	602.6	2.505
12	3 高压段圧縮機吸込	-6.3	0.390	0.7	0.1208	579.7	2.424
13	4 高压段圧縮機吐出	40.0	1.370	51.8	0.0359	640.9	2.424
14	5 凝縮器出口	40.0	1.370	35.0	0.002102	293.4	
15	7 主膨張弁入口	40.0	1.370	11.1	0.001943	228.7	
17	③	(高段流量/低段流量)	R _{min}	R _{max}	R計算結果		
18	計算結果	R 冷媒流量比	1.080	1.403	1.306		
19	まとめ	kJ/kg	高压段動力	低压段動力	合計動力	冷凍効果	COP
20		Δh 比エンタルピー差	61.1	59.4	139.2	314.5	2.258

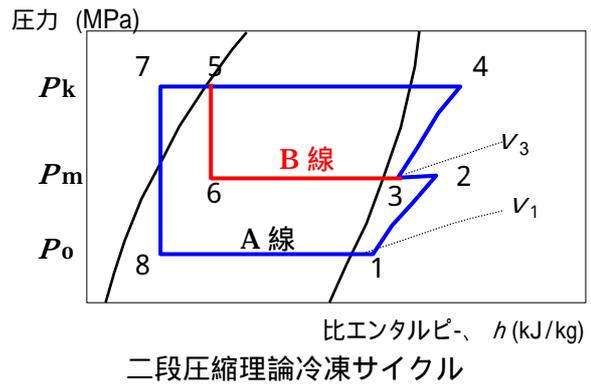
(参考) このシートは R 290 のものですが、他の冷媒でも同様です。

なお、数式や文字が記入されたセルを保護するには、入力セル(黄色)のロックを外してから、シートの保護をかけます。詳細は Excel のヘルプを参照ください。

A 2.4 $p - h$ 線図への書き込み準備

二段圧縮の理論サイクルを、右図の外殻の線(A線)と高圧段側の膨張蒸発(B線)とに分割して記入します。一筆書きもできます。興味があれば試してみてください。

このサンプルでは、圧縮行程は直線です。等エントロピー線の曲線にするには計算する点数を追加します。プログラムに折込んだ二段圧縮は点数を追加してあり、線図への書き込みデータも別シートで作っています。



圧力軸(縦軸)の対数は自然対数(ExcelでLN、VBAでLOG)です。

まず、冷凍サイクル各線のデータ準備から始めます。Sheet2に下図のようにデータ表を追加してください。各セルに文字および数式を書いてデータ表を作ります。

参照先をクリックして数式を書けば簡単です。赤い矢印はその時の参照先を示しています。示したのはA線(外殻の線)の参照です。他は倣ってください。

セルに数式が入力されると直ちに計算が行われ、そのセルに計算結果が表示されます。

計算結果	飽和温度 ℃	圧力 MPa	温度 ℃	比体積 m ³ /kg	比エンタルピー kJ/kg	比エントロピー kJ/(kg·K)
1 低圧段圧縮機吸込	-40.0	0.111	-30.0	0.3986	543.2	2.505
2 低圧段圧縮機吐出	-6.3	0.390	14.0	0.1285	602.6	2.505
3 高圧段圧縮機吸込	-6.3	0.390	0.7	0.1268	579.7	2.424
4 高圧段圧縮機吐出	40.0	1.370	51.8	0.0359	640.9	2.424
5 凝縮器出口	40.0	1.370	35.0	0.002102	293.4	
7 主膨張弁入口	40.0	1.370	11.1	0.001943	228.7	

計算結果	(高圧流量/低圧流量)	Rmin	Rmax	R計算結果	冷凍効果	COP
R 冷媒流量比		1.080	1.403	1.306		
まとめ	kJ/kg	高圧段動力	低圧段動力	合計動力	冷凍効果	COP
Δh 比エンタルピー差		51.1	59.4	139.2	314.5	2.258

A線	点1	点2	点3	点4	点7	点8	点1
比エンタルピー	=G10	=G11	=G12	=G13	=G15	=G15	=G10
ln(圧力)	=LN(D10)	=LN(D11)	=LN(D12)	=LN(D13)	=LN(D15)	=LN(D10)	=LN(D10)
B線	点5	点6	点3				
比エンタルピー	=G14	=G14	=G12				
ln(圧力)	=LN(D15)	=LN(D11)	=LN(D12)				

A 2.5 $p - h$ 線図への書込み (A 線)

準備が終ったので、これから $p - h$ 線図上に理論冷凍サイクルを書き込みます。Excel の図形描画のテクニックを多く使いますので、慣れていない方は注意して進めてください。

まず、シートを「線図」に切替えてください。「線図」に一段圧縮のサイクルが書かれていたら消してください。後で消しても OK です。消し方は本文 3.2) 項を見てください。

2 番目にシートの保護を外します。[ツール(T)] [保護(P)] [シート保護の解除(P)] の順にクリックすれば、保護は解除されます。

3 番目に元のデータを呼び出します。線図のどこかをクリックして図を選択します。図の 4 辺にハンドル が付けば選択されています。そのまま [グラフ(C)] [元のデータ(S)] の順にクリックすれば、元のデータのダイアログが現れます (次項で説明)。

2.5.1 「元のデータ」ダイアログ (A 線のデータ入力と X の値の入力準備)

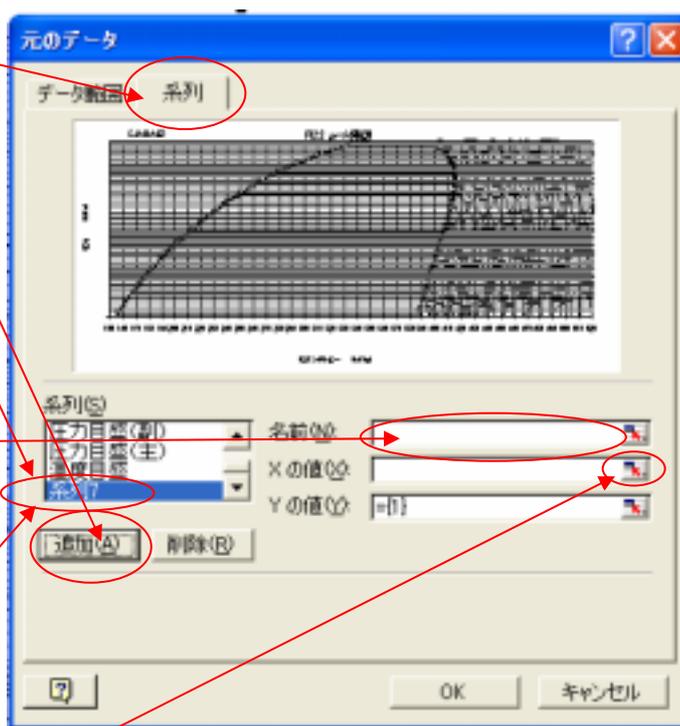
このダイアログでは、 $p - h$ 線図の比エンタルピー軸 (横軸) が「X の値」、圧力軸 (縦軸) が「Y の値」と表現されています。以下の順序で操作してください。

1) タブ「系列」をクリックします。

2) 「追加(A)」をクリックします。すると、系列 7 が追加されます。但し、系列の番号が 7 までであるかどうかは状況によります。

3) 系列 7 のままでは不便なので、「名前(N)」のボックスをクリックして、A 線と記入します。系列 7 の名前も A 線 に変わります。

4) 「X の値(X)」の右端のマークをクリックしてください。ダイアログが下図のように小さくなり、シートの切替えやデータ入力ができるようになります。



A2.5.2 Xの値（比エンタルピー）の入力

Sheet2 に切替え、B24 から H24 までドラッグすると X の値が入力できます。

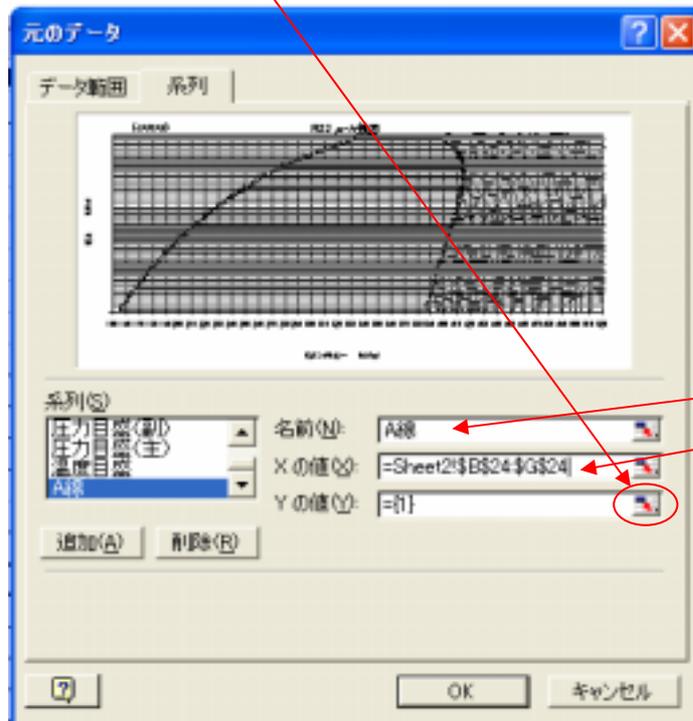
下図は X が入力された後の状態を表示しています。小さくなったダイアログが、入力する位置に重なってしまったときは、ダイアログを適宜動かしてください。

16								
17	①	(高圧流量/低圧流量)	Rmin	Rmax	R計算結果			
18	計算結果	R 冷媒流量比	1.080	1.403	1.306			
19	まとめ	kJ/kg	高圧段動力	低圧段動力	合計動力	冷房結果	COP	
20		Δh 比エンタルピー						
21								
22								
23	A線	点1	点2	点3	点4	点7	点8	点1
24	比エンタルピー	543.2	602.6	579.7	640.9	228.7	228.7	543.2
25	ln(圧力)	-2.1981	-0.9418	-0.9418	0.3145	0.3145	-2.1981	-2.1981
26	B線	点5	点6	点3				
27	比エンタルピー	293.4	293.4	579.7				
28	ln(圧力)	0.3145	-0.9418	-0.9418				

A2.5.3 Yの値の入力準備

前項 (A2.5.2) のダイアログにて、右端のマークをクリックすると、基本ダイアログ (下図) に戻ります。

「Yの値(Y)」右端のマークをクリックしてください。ダイアログは一番下の図のように小さくなり、シートの切替えが可能になります。



前の操作の結果を確認できます。

A線

Xの値が入っているセル



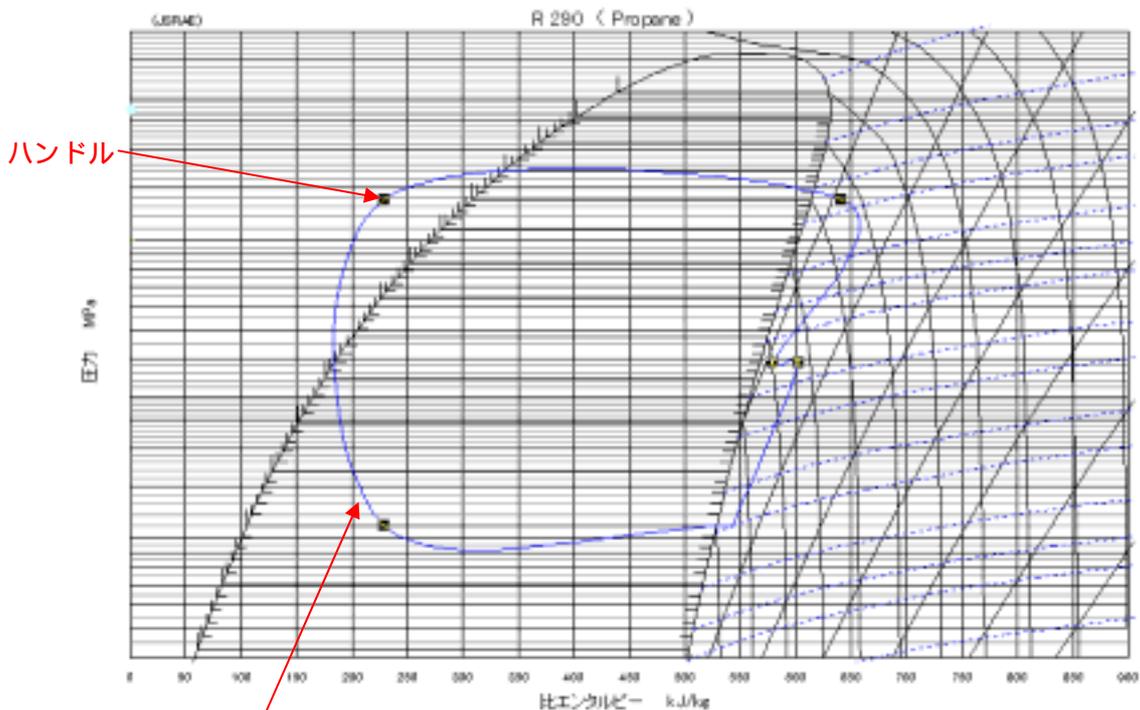
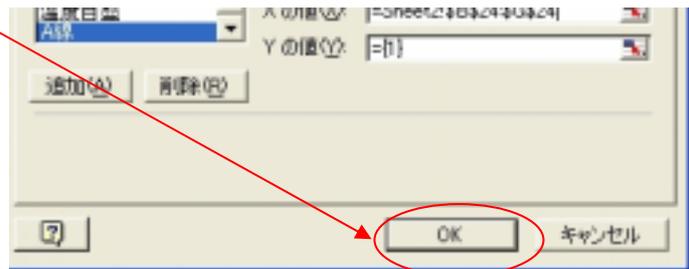
A2.5.4 Yの値 (LOG (圧力)) の入力

Sheet2 に切替えて、B25 から H25 までドラッグすると Y の値が入力されます。

ここでは背景 (Sheet2 のこと) 込みで説明しています。この右端のマークをクリックすると、「元のデータ」のダイアログに戻ります。

16								
17	⑧	(高圧流量/低圧流量)	Rmin	Rmax	RI+算結果			
18	計算結果	R 冷媒流量比	1.080	1.403	1.306			
19	まとめ	kJ/kg	高圧線					
20		Δh 比エンタルピー差						
21								
22								
23	A線	点1	点2	点3	点4	点7	点8	点1
24	比エンタルピー	543.2	602.6	579.7	640.9	228.7	228.7	543.2
25	ln(圧力)	-2.1981	-0.9418	-0.9418	0.3145	0.3145	-2.1981	-2.1981
26	B線	点5	点6	点3				
27	比エンタルピー	293.4	293.4	579.7				
28	ln(圧力)	0.3145	-0.9418	-0.9418				

最後に **OK** をクリックすると、「線図」シートに戻ります。シートには理論冷凍サイクルが書かれています。但し、その図は下図の様に歪んでいる場合があります。



この線は理論冷凍サイクルです。ただし、歪んだ曲線になっており修正が必要です。修正するために線上をクリックします。(詳細は次項で)

A2.5.5 A線（外郭線）の書式設定

歪んでいる A 線の上をクリックして線を選択します。きちんとクリックしないと他の線が選択されるので注意してください。選択された線上に表示されるハンドルを確認して、目的の線か否かを確認してください。なお、線が非表示の場合もあります。その時はハンドルだけが頼りです。

そこで、[書式(O)] [選択したデータの系列(E)]の順にクリックすると、次のダイアログが出ます。以下、順々に操作してください。

1) [パターン] を選ぶ。

2) 色(C)は自動から、青に変える（又は好みの色）

3) 太さ(W)は更に太めに变える（又は好みに）

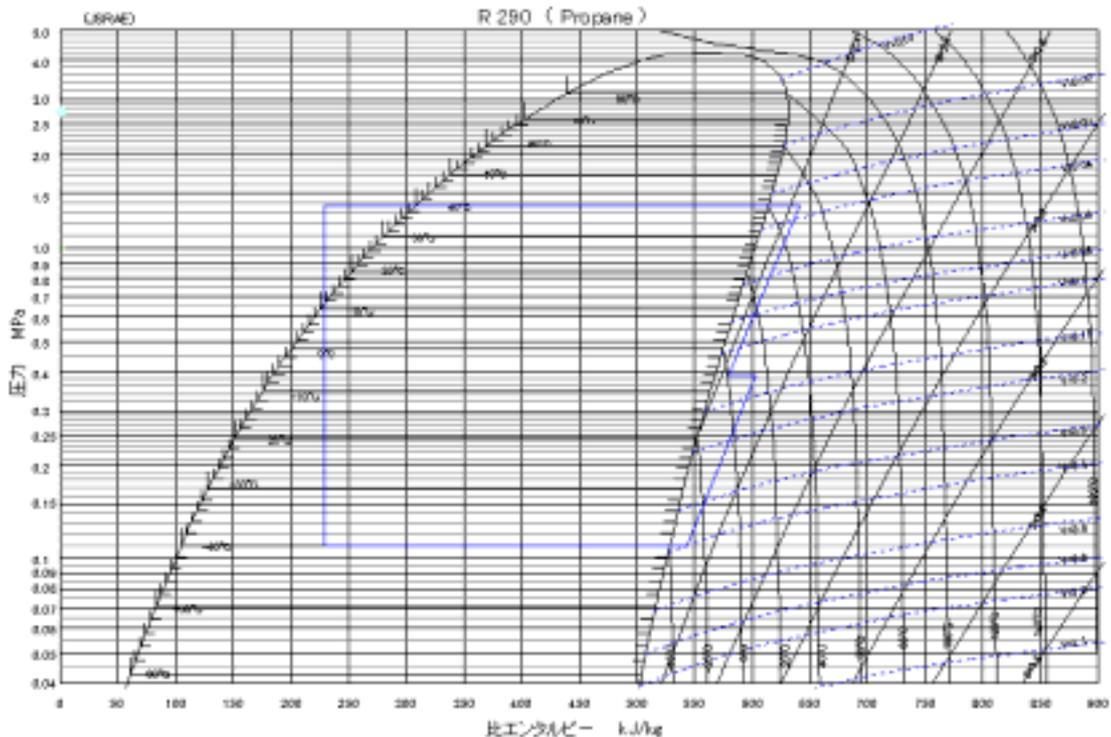
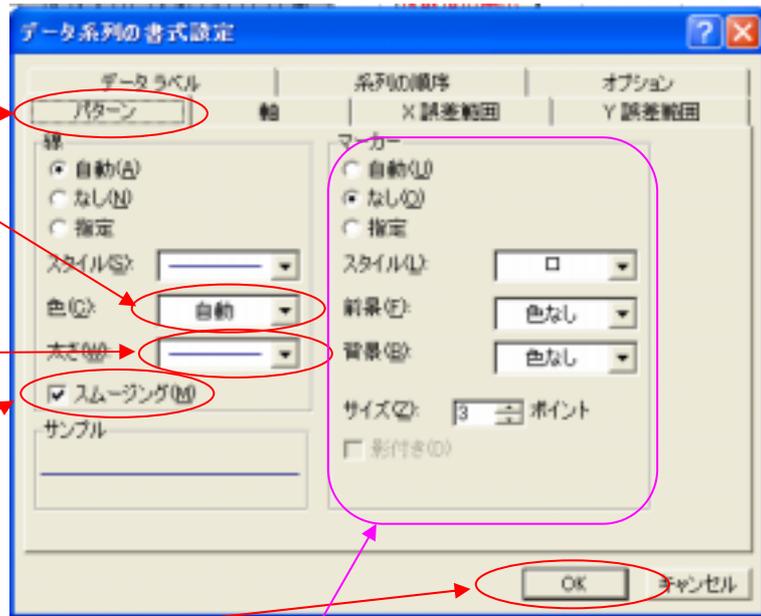
4) スムージング(M)のチェックは外す。

歪んだ曲線になった原因はこのチェックが有りのためです。

5) OK をクリックすれば

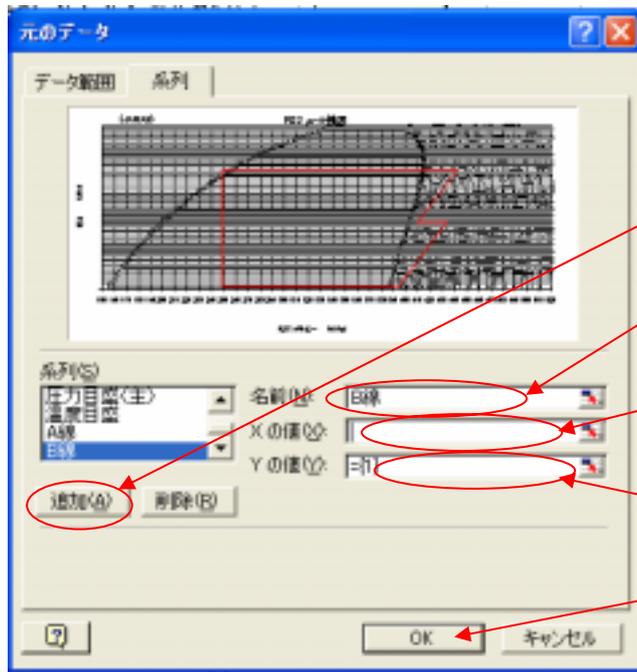
ダイアログが消えて完成です。完成した A 線（外郭線）を下図に示します。

6) サイクル上の各点に記号をつけたければ、マーカーの各項目で行います(説明は略します)。

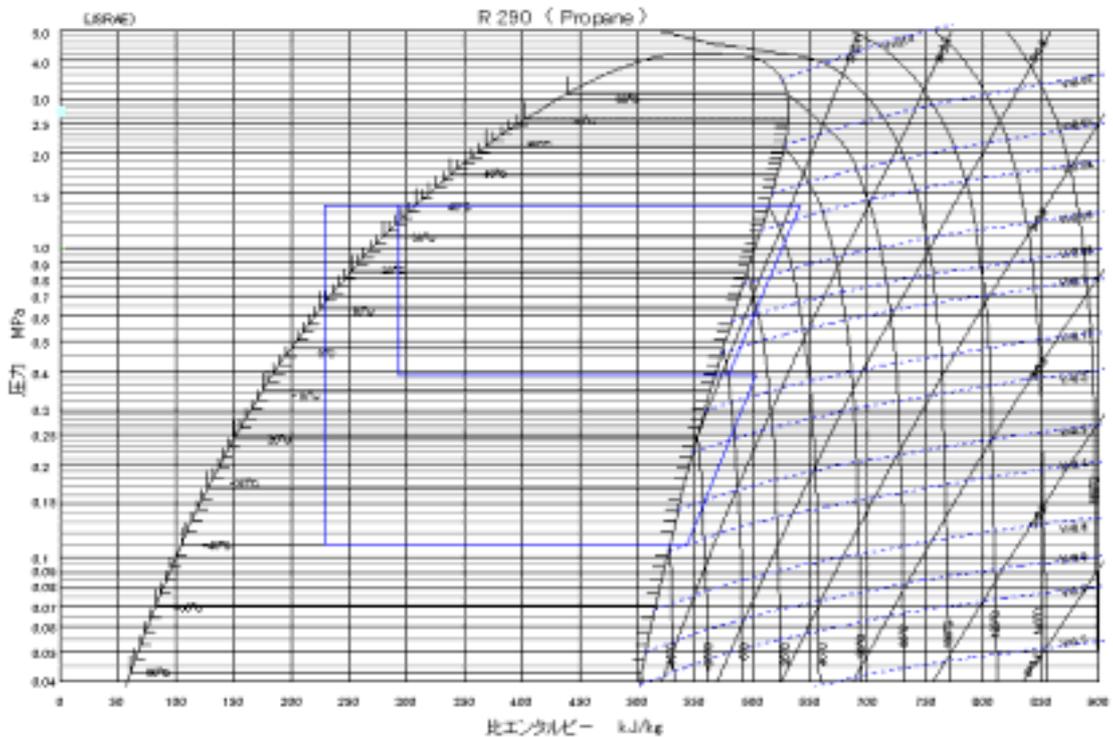


A 2.6 $p - h$ 線図への書込み (高圧段側の膨張・蒸発：B線)

B線の書き方は、A線(外郭線)と同様です。ここでは操作のエッセンスと、結果の $p - h$ 線図を説明します。詳細はA2.5の説明を見てください。



- 1) 「元のデータ」を呼び出す。
(5項 参照)
- 2) 「追加(A)」をクリックする。
- 3) B線 と書き込む
(左図はこの状態)
- 4) Sheet2のセル B27 から D27
を入力する。
- 5) Sheet2のセル B28 から D28
を入力する。
- 6) OK すれば線ができる。
- 7) 書式設定で線の形を整える。



A 2.7 二段圧縮冷凍サイクルのまとめ

以上で二段圧縮の計算とその $p - h$ 線図への書込みが完成します。上記方法を応用すれば種々の用途にも使えると思います。独自の冷凍サイクル開発などに応用してください。

A3 . 折込関数 (Function) 一覧

Function 一覧表 (3)

	R 744	R 717	R 290	R 600	R 600a		
	CO ₂	NH ₃	プロパン	ブタン	イソブタン		
tc	30.9782	132.36	96.675	151.975	134.667	臨界点	原著文献に示された定数値
Tc K	304.1282	405.51	369.825	425.125	407.817		
pc MPa	7.3773	11.36114	4.24709	3.796	3.640		
ρc kg/m ³	467.60	224.50	218.5	227.84	224.36		
vc m ³ /kg	0.0021386	0.0044543	0.0045767	0.0043890	0.0044571		
hc kJ/kg	-174.53	1120.5	558.8	694.9	636.4		
sc kJ/kg·K	-1.3054	3.5571	2.0619	2.3652	2.2327		
Tt K	216.592	195.5	85.48	134.87	113.56		
Pt MPa	0.51795	0.00609					
t" kg/m ³	13.7614	0.0641					
S1	PsT(T)	PsT(T)	PsT(T)	PsT(T)	PsT(T)	}	この関数は、飽和ガスの計算用です。(気相線上)
S2	TsP(P)	TsP(P)	TsP(P)	TsP(P)	TsP(P)		
S3	TsV(V)	TsV(V)	TsV(V)	TsV(V)	TsV(V)		
S4 -1	TsH1(H)	TsH1(H)	TsH1(H)	TsH1(H)	TsH1(H)		
S4 -2	TsH2(H)	TsH2(H)	TsH2(H)	TsH2(H)	TsH2(H)		
S4 境界 hs max	-24.5	49.2	73	136	119.1		
S5 -1	TsS(S)	TsS(S)	TsS(S)	TsS(S)	TsS(S)	}	気相線上のエンタルピ、エントロピから飽和温度を求めます。 TsHには、低温(TsH1)と高温(TsH2)の2種類があります。
S5 -2							
S5 -3							
G1	PVT(V,T)	PVT(V,T)	PVT(V,T)	PVT(V,T)	PVT(V,T)	}	ガス側の計算用です。
G2	TPV(P,V)	TPV(P,V)	TPV(P,V)	TPV(P,V)	TPV(P,V)		
G3	VPT(P,T)	VPT(P,T)	VPT(P,T)	VPT(P,T)	VPT(P,T)		
G4	HPT(V,T)	HPT(V,T)	HPT(V,T)	HPT(V,T)	HPT(V,T)		
G5	TPH(P,H)	TPH(P,H)	TPH(P,H)	TPH(P,H)	TPH(P,H)		
G6	PHT(H,T)	PHT(H,T)	PHT(H,T)	PHT(H,T)	PHT(H,T)		
G7	SPT(V,T)	SPT(V,T)	SPT(V,T)	SPT(V,T)	SPT(V,T)		
G8	TPS(P,S)	TPS(P,S)	TPS(P,S)	TPS(P,S)	TPS(P,S)		
G9							
L1	VfT(T)	VfT(T)	VfT(T)	VfT(T)	VfT(T)	}	飽和液の計算用です。
L2	HfT(T)	HfT(T)	HfT(T)	HfT(T)	HfT(T)		
L3	SfT(T)	SfT(T)	SfT(T)	SfT(T)	SfT(T)		
L4							
L5	TfH(H)	TfH(H)	TfH(H)	TfH(H)	TfH(H)		
L1 -1	VfPT(P,T)	VfPT(P,T)	VfPT(P,T)	VfPT(P,T)	VfPT(P,T)	}	圧縮液(過冷却液)の計算用。 超臨界のガス側にも使えます。 (但し境界は自ら確認ください。)
L2 -1	HfPT(P,T)	HfPT(P,T)	HfPT(P,T)	HfPT(P,T)	HfPT(P,T)		
L3 -1	SfPT(P,T)	SfPT(P,T)	SfPT(P,T)	SfPT(P,T)	SfPT(P,T)		
L5 -1	TfPH(P,H)	TfPH(P,H)	TfPH(P,H)	TfPH(P,H)	TfPH(P,H)		

