Quiby (羽根長さ 10~20 mm に就て行つたもの) に依て行はれた実験値と略一致してゐる。

第 38 図 轉向角と速度係数との関係

4. 総 括

以上の結果を要約すると次の如くである。

(i) 羽根列方向に於ては、入口全圧は殆ど一様である。従て入口風速と入口静圧との分布は互に反対の傾向を示す。入口静圧は背面衝突流入及び無衝突流入の時は正であり、背面衝突流入の時に、その値は大きい。又腹面衝突流入に於ては負である。一般に羽根前端に於て高く、その傾向は背面衝突流入の時に最も著しい。出口全圧は背面側に低く、腹面側に高い。而も出口静圧は殆ど一様で大気圧に近く、僅かに羽根後端附近で高いだけである。従て出口風速も一般に全圧と同

様の分布をなし、羽根角が大きくなるに従て腹面側の層流部分を増す。

(ii) 羽根長さ方向に於ては、静圧は入口並に出口共に一様である。入口風速は殆ど一様で両壁附近が稍低い。出口風速は一般に両壁附近で高く、この傾向は腹面衝突流入及び無衝突流入の時、殊に羽根角の小さい時に著しい。轉向角が小さい時には中央部も稍高速になる。

(iii) 背面衝突流入及び無衝突流入に於ては、入口静圧が出口静圧よりも高く、その差は背面衝突流入の時に大である。腹面衝突流入では出口静圧が入口静圧よりも高い。而してこれらの傾向は風速と共に著しくなる。

風速に関しては、無衝突流入及び腹面衝突流入の時に、入口風速が出口風速よりも高く、その差は腹面衝突流入の時に大である。背面衝突流入では出口風速が入口風速よりも高い。これらの傾向も風速と共に著しくなる。

(iv) 速度係数は一般に少し背面衝突流入する時の方が良好であつて、羽根角が大きくなると衝突に依る影響は余り現はれない。但し、これは静止状態に於ての結果であつて背面に衝突すれば、実際の場合には回轉方向と逆の分力を生ずるから良くない。

(v) 速度係数は本実験の範囲では、理論速度或はレイノルズ数に依て殆ど影響されない。30° 羽根以上では僅かにレイノルズ数従て理論速度の増加と共に大となる。

(vi) 速度係数は轉向角の小となるにつれて良好となり、轉向角が大きい所に於てその傾向は著しい。

(昭和 18 年 10 月 11 日 受付)

プロパンの蒸気表と蒸気線図⁽¹⁾

(昭和 18 年 9 月 18 日 関西支部第 133 回講演會に於て講演)

正員 菅 原 菅 雄⁽²⁾ 准員 安 藤 善 司⁽³⁾

1. 緒 言

最近化学工業の發展に伴ひ、益々低温度の利用が盛になつて来た。従てこれに適する冷媒の発見並にその諸性質の研究が要望されてゐる。-50°C 前後の低温發生の冷媒としては既にアンモニア、プロパン、炭酸ガス等が挙げられてゐるが(第 1 表参照)、著者はこの内、プロパンの熱力学的性質を明らかにするため主として Walter W. Deschner, George G. Brown⁽⁴⁾の実験結果を基礎とし、不足せる部分を現在迄にその他の諸文献に發表された実験値によつて補足して、これと熱力学の法則とから、プロパンの特性式その他必要な計算式を誘導し、更に実用に便利な数値表並に図表を作成した。

第 1 表

名 称	分 子 式	沸 点 °C
ア ン モ ニ ア	NH ₃	-33.4
炭 酸 ガ ス	CO ₂	-78.48
亜 硫 酸 ガ ス	SO ₂	-10.0
ク ロ ル ・ メ チ ル	CH ₃ Cl	-24.0
メ チ レ ン ・ ク ロ ラ イ ド	CH ₂ Cl ₂	+40.18
フ レ オ ン F-12	CF ₂ Cl ₂	-30.0
プ ロ パ ン	C ₃ H ₈	-44.5

2. 臨 界 値

臨界値としては Deschner 及び Brown の実験値をとつ

(1) Tables and Diagram for Propane.

(2) Sugao SUGAWARA, Member. The Kyōto Imperial University. 京都帝國大学。

(3) Zendi ANDO, Associate Member. The Student of the Kyōto Imperial University. 京都帝國大学々生。

(4) Industrial and Engineering Chemistry, 32, (1940), 836.

た。これを Sage 等⁽⁵⁾及び Beattie⁽⁶⁾ 等の値と比較したのが第2表である。

第2表 臨 界 値

	Deschner 等 (1940)	Sage 等 (1934)	Beattie 等 (1937)
比重量 kg/m ³	224.0	232.3	225.9
圧 力 kg/cm ²	43.5	45.27	43.4
温 度 °C	96.85	100.1	96.81

3. 飽和蒸汽の圧力と温度との関係

Deschner-Brown の実験値は +28.77°C から +96.85°C (臨界温度) までである。+30°C 以下の実験値としては種々あるが、International Critical Tables の値を用いた。それは求める実験式の形として

$$\log_{10} p_s / p_c = a(T_c - T) / T$$

を仮定したが、この式から a を計算して $a-T$ 線図を作ると第1図の如く、この International Critical Tables から求めた a の値が他の実験値に比して比較的好く、Deschner-Brown の実験値から求めた a の値と同一の曲線上にのるからである。但し上の式に於て、 T は絶対温度、 p_s はその温度に対する飽和圧力を示し、 T_c, p_c は臨界点に対する夫々の

第 1 図

第 2 図

(5) Sage, Schaafsma, Lacey, Industrial and Engineering Chemistry, 26, (1934), 1218. (6) Beattie, Kay, Kamminsky, J. Am. Chem. Soc., 59, (1937), 1589.

値で、第2表に示すものである。

さて第1図に於て、これらの諸点の平均値を表はす曲線を引き a の式を求めると、

$$a = (1006.61 - 2.637T) / (380 - T)$$

となる。そこでこの関係を最初の式に入れると次の式が得られる。但し p_s の単位は kg/m² である。

$$\log_{10} p_s = 5.63849 - (1006.61 / T - 2.637) \times (370 - T) / (380 - T) \quad (1)$$

(1) 式による計算値と実験値との比較を第2図に示す。

但し、第2図に於て $\Delta p = \{(\text{計算値}) - (\text{実験値})\} / (\text{計算値})$ である。

(1) 式の適用範囲は -150°C から臨界点 (+96.85°C) 迄である。第2図を見ると、-100°C 以下に於ては、実験値と計算値との差が相當大であるが、このあたりに於ては第1図に示すやうに、実験値そのものに相當な差異があるので(1)式はこの範囲にも適用し得るもの考へた。

4. 蒸汽の特性式 (状態式)

過熱蒸汽の温度、圧力、比体積の關係に就ては Deschner-Brown の実験値の外に Sage 等⁽⁵⁾のものがある。前者は圧力 1 atm 乃至 140 atm、温度 30°C 乃至 336°C に亘り後者は温度 130°F から 220°F 迄、圧力は 25 lb/in² から 3000 lb/in² までである。著者は Deschner, Brown の実験値を基礎にしてその状態式を決定した。

状態式としては、熱力学上では Van der Waals 式又はそれと同様臨界点を含む形の式が望ましいのであるが、これは簡単な式では表はし得ない。そこで状態式として次の形のものを採用した。

$$v = RT / p - A \quad (2)$$

茲に、 p は圧力 kg/m²、 v は比体積 m³/kg、 R はガス定数、 T は絶対温度 °K である。但しこの式は臨界点附近には適用されないから、臨界点附近の数値は後述の如く図式的に求めた。

R としては、 $R = 19.3456 \text{ kg-m}^2/\text{K} \cdot \text{kg}$ を採用した。この値はプロパンの分子式 C_3H_8 より計算した R の値とは少し差がある。それは Deschner-Brown が実験に用いたプロパンの試料は化学的に純粋ではなく、純度 98.27% にして見かけの分子量は 43.826、ガス定数は $R = 1.8724 \text{ cm}^3 \cdot \text{atm}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$ であつたからである。

諸、乾飽和蒸汽の比体積の実験値としては Deschner-Brown のものは温度 +30°C から 96.85°C (臨界温度) 迄ある。30°C 以下の実験値としては Dana 等⁽⁷⁾のものを採用した。而して後者に於ては、圧力を(1)式から求めてそれに依て計算すると(2)式の A は第3図の●印に示す様に負になるものがあるが、Dana 等の與へる飽和圧力を用ひて計算すると第3図の●印に示されてゐるやうに、Deschner-Brown の実験値から計算した A の値と比較的好く同一の曲線につて都合がよい。従てこれ等の A の値と、過熱蒸汽

(7) Dana, Jenkins, Burdick, Timm, Refrigerating Eng., 12, (1928), 387.

[昭和19年2月]

の実験値から計算した Δ の値との両方を考へて Δ の式を決定すると次の如くなる。

$$\Delta = 0.137/(T/100)^{2.4} + 5.803 \times 10^{-10} p^3/(T/100)^{18} - 8.113 \times 10^{-17} p^{2.2}/(T/100)^{0.4} \dots (3)$$

この式は乾飽和蒸気に就ては第3図に示されるやうな曲線になる。

従て (2) 式は

$$v = 19.3456T/p - 0.137/(T/100)^{2.4} - 5.803 \times 10^{-10} p^3/(T/100)^{18} + 8.113 \times 10^{-17} p^{2.2}/(T/100)^{0.4} \dots (2)_a$$

となり、こゝに所要の状態式が得られる。

比体積の実験値と (2)_a 式に依る計算値とを比較すると、乾飽和蒸気に就ては第4図に示す如くなり、過熱蒸気に就ては第5図に示す如くなる。但し、第4図、第5図に於て $\Delta v = \{(\text{計算値}) - (\text{実験値})\}/(\text{計算値})$ である。第4図に於て (2)_a 式に依る計算値と Dana 等の実験値との間に相当大

第 3 図

第 4 図

第 5 図 (a)

第 5 図 (b)

第 5 図 (c)

な差のあるのは當然である。併し Deschner-Brown の実験値との間にも 30°C 附近では相当大きな差がある。その理由は次の如くである。Deschner-Brown の過熱蒸気の実験値は温度 +30°C、圧力 10.95 kg/cm² の比体積が 0.04247 m³/kg である。然るに +30°C のときの飽和蒸気の圧力は (1) 式から計算すると 11.08 kg/cm² であつて、Deschner-Brown の與へる値は 11.139 kg/cm² である。故に何れにしても +30°C の飽和蒸気の比体積は 0.04247 m³/kg より小でなくてはならぬ。然るに同氏等の飽和蒸気の実験では、+30°C の飽和蒸気の比体積は 0.05000 m³/kg と與へられてゐる。これはおそらく蒸気が過熱状態にあつたものと考へられる。第4図はこれと計算値とを比較したのであるので、大きな差を生じたのであらう。

(2)_a 式の適用範囲は温度 -60°C 以下はこれに関する実験値が無いので比較検討する事が出来ないが、乾飽和蒸気線に沿つては温度 -150°C から +75°C 迄適用し得るものとする。(2)_a 式に依て計算した値を第4表第6行に示した。+75°C 以上 (# 印より下) は $v-t$ 線図を作つて、図式的に求めたものである。

5. 飽和液の比重量

冷凍機の凝縮器や蒸発器の設計には飽和液の比重量を知つておく事が必要である。又 Clapeyron 式に依て間接に蒸発

熱を求める際にも必要である。これに就ての実験は割合に多くあり、こゝでは Deschner-Brown⁽⁸⁾、Dana 等⁽⁹⁾、及び Landolt-Börnstein⁽⁸⁾ の総合的な値の 3 種を利用したが、第 6 図に見る如く、温度 -60°C から $+96.85^{\circ}\text{C}$ に至る比較的廣範囲に亙り同一曲線上に乗るので、この曲線を -150°C 迄延長して -150°C から $+96.85^{\circ}\text{C}$ 迄 5°C とびに比重量 γ' の値を求めて、これを第 4 表第 7 行に示した。但し臨界点における値は第 2 節に述べた通りである。

6. 圧縮液の比重量

圧縮液に関する実験結果は Deschner-Brown 以外には殆どない。Deschner-Brown の実験は温度 $+30^{\circ}\text{C}$ 、 $+45^{\circ}\text{C}$ 、 $+75^{\circ}\text{C}$ 、 $+93^{\circ}\text{C}$ の 4 種に対し、圧力は 20 kg/cm^2 から 150 kg/cm^2 の範囲で行はれてゐる。著者はこの実験を基礎として、圧力 10 kg/cm^2 から 150 kg/cm^2 の範囲で 5 kg/cm^2 とびに、温度 $+10^{\circ}\text{C}$ から $+95^{\circ}\text{C}$ の範囲で 10°C とびに圧縮液の比重量を図式的に求めた。これを第 3 表に示した。

第 3 表 圧縮液の比重の量 kg/m^3

温 度 $t^{\circ}\text{C}$	圧 力 kg/cm^2									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
+10	518.9	520.2	521.5	522.7	524.0	..	..	..	..	..
+20	502.4	503.9	505.4	506.9	508.4	509.9	511.3	512.6	513.8	515.0
+30	..	487.3	488.6	489.9	491.6	493.9	494.9	496.4	497.9	499.5
+40	..	..	470.7	472.5	474.3	476.0	477.8	479.7	481.5	483.4
+50	..	..	..	453.3	455.3	457.2	459.9	462.3	464.4	466.2
+60	..	..	..	..	434.0	436.9	440.2	443.3	446.2	448.8
+70	..	..	..	..	..	412.6	417.5	421.9	425.7	429.2
+80	..	..	..	..	..	379.0	386.6	393.6	439.8	405.4
+90	..	..	..	..	..	..	338.5	354.4	367.2	375.7
+95	..	..	..	..	..	..	..	325.0	345.0	356.3

温 度 $t^{\circ}\text{C}$	圧 力 kg/cm^2									
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
+10	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
+20	516.2	517.4	518.4	519.4	520.4	521.5	522.6	523.6	524.4	..
+30	501.0	502.3	503.6	504.7	505.8	506.8	508.0	509.2	510.5	511.8
+40	485.0	486.5	487.9	489.3	490.7	491.9	493.4	494.9	496.4	497.9
+50	468.0	469.8	471.8	473.7	475.5	477.2	478.8	480.4	482.0	483.6
+60	451.1	453.4	455.6	457.7	459.8	461.8	463.7	465.5	467.2	468.8
+70	432.5	435.6	438.4	441.0	443.4	445.5	447.6	449.6	451.6	453.4
+80	410.4	414.8	418.8	422.5	425.4	428.1	430.7	433.2	435.6	437.6
+90	383.4	389.1	394.5	399.4	403.8	407.8	411.4	414.6	417.5	420.2
+95	366.2	374.2	380.7	385.5	391.0	397.0	401.2	404.8	408.0	411.0

温 度 $t^{\circ}\text{C}$	圧 力 kg/cm^2									
	110	115	120	125	130	135	140	145	150	
+10	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
+20	..	..	..	..	..	..	..	..	..	
+30	513.0	514.1	515.1	516.1	517.1	518.2	519.2	520.1	521.0	
+40	499.5	500.6	501.7	502.8	504.0	505.4	506.5	507.7	508.8	
+50	485.1	486.6	488.0	489.3	490.5	491.7	492.9	494.1	495.3	
+60	470.4	472.0	473.5	474.8	476.0	477.2	478.3	479.4	480.4	
+70	455.1	456.6	458.1	459.4	460.7	461.9	463.0	464.0	465.0	
+80	439.4	441.2	442.9	444.5	445.9	447.1	448.2	449.2	450.1	
+90	422.7	425.0	427.0	428.8	430.3	431.6	432.8	433.9	435.0	
+95	413.9	416.5	418.7	420.7	422.5	424.0	425.3	426.4	427.5	

(8) Physikalische-Chemische Tafeln.

第 4 表 飽 和 蒸 気 表

温度		飽和圧力 P_s kg/cm ²	$\frac{dp_s}{dT}$ kg/m ² ・°K	比 体 積		比 重		エンタルピー		蒸 発 熱 r kcal/kg	エ ン ト ロ ピ	
t °C	T °K			液 体 v' l/kg	蒸 汽 v'' m ³ /kg	液 体 γ kg/m ³	蒸 汽 γ'' kg/m ³	液 体 i' kcal/kg	蒸 汽 i'' kcal/kg		液 体 s' kcal/kg・°K	蒸 汽 s'' kcal/kg・°K
-150	123.2	0.000 209 2	0.311 1	1 139.20	691.6	0.000 877 8	49.2	151.5	102.3	0.747 7	1.578 1	0.830 4
-145	128.2	0.000 427 3	0.586 7	580.34	687.2	0.001 723	50.3	152.5	102.2	0.756 6	1.553 8	0.797 2
-140	133.2	0.000 827 4	1.052	311.37	682.7	0.003 212	51.4	153.6	102.2	0.764 8	1.532 1	0.767 3
-135	138.2	0.001 528	1.805	174.90	678.1	0.005 718	52.5	154.7	102.2	0.772 7	1.512 2	0.739 5
-130	143.2	0.002 700	2.972	102.51	673.3	0.009 755	53.6	155.8	102.2	0.780 6	1.494 3	0.713 7
-125	148.2	0.004 597	4.724	62.314	668.5	0.016 05	54.7	156.9	102.2	0.788 3	1.477 9	0.689 6
-120	153.2	0.007 410	7.090	39.948	663.5	0.025 03	56.0	158.1	102.1	0.796 4	1.462 8	0.666 4
-115	158.2	0.012 04	10.86	25.374	658.1	0.039 41	57.3	159.3	102.0	0.804 7	1.449 5	0.644 8
-110	163.2	0.018 64	15.84	16.896	653.7	0.059 19	58.6	160.5	101.9	0.813 4	1.437 2	0.623 8
-105	168.2	0.028 12	22.44	11.533	648.7	0.086 71	59.9	161.7	101.8	0.820 7	1.425 9	0.605 2
-100	173.2	0.041 42	31.16	8.053	643.8	0.124 2	61.2	162.9	101.7	0.828 4	1.415 6	0.587 2
-95	178.2	0.059 70	42.42	5.740	638.6	0.174 2	62.5	164.1	101.6	0.836 1	1.406 2	0.570 1
-90	183.2	0.084 35	56.59	4.170	633.5	0.239 8	63.9	165.3	101.4	0.844 1	1.397 6	0.553 5
-85	188.2	0.117 0	74.56	3.082	628.5	0.324 5	65.3	166.5	101.2	0.852 0	1.389 7	0.537 7
-80	193.2	0.159 6	99.35	2.314	623.4	0.432 1	66.8	167.8	101.0	0.859 7	1.382 5	0.522 8
-75	198.2	0.214 3	123.2	1.763	618.4	0.567 2	68.4	169.1	100.7	0.867 8	1.375 9	0.508 1
-70	203.2	0.283 5	156.6	1.361	613.0	0.734 8	70.1	170.4	100.3	0.876 5	1.370 1	0.493 6
-65	208.2	0.370 3	192.8	1.064	607.4	0.939 8	71.8	171.7	99.9	0.884 5	1.364 3	0.479 8
-60	213.2	0.477 6	237.0	0.841 5	601.8	1.188	73.7	173.1	99.4	0.893 1	1.359 3	0.466 2
-55	218.2	0.608 7	288.6	0.672 3	596.3	1.487	75.6	174.5	98.9	0.901 4	1.354 7	0.453 3
-50	223.2	0.766 2	347.2	0.543 5	590.7	1.840	77.7	175.9	98.2	0.910 5	1.350 5	0.440 0
-45	228.2	0.957 8	415.2	0.441 0	585.0	2.268	79.6	177.1	97.5	0.919 1	1.346 4	0.427 3
-40	233.2	1.184	490.3	0.363 3	579.1	2.753	81.6	178.3	96.7	0.928 2	1.342 9	0.414 7
-35	238.2	1.451	577.3	0.300 2	573.1	3.331	83.6	179.6	96.0	0.936 7	1.339 7	0.403 0
-30	243.2	1.763	672.6	0.249 7	567.3	4.005	85.6	180.8	95.2	0.946 2	1.337 6	0.391 4
-25	248.2	2.126	779.2	0.201 0	561.3	4.975	87.9	182.1	94.2	0.954 4	1.339 9	0.379 5
-20	253.2	2.544	893.1	0.177 3	555.2	5.640	90.1	183.3	93.2	0.963 2	1.331 3	0.368 1
-15	258.2	3.024	1 024	0.150 5	549.2	6.645	92.4	184.5	92.1	0.972 2	1.328 9	0.356 7
-10	263.2	3.568	1 163	0.128 7	542.8	7.770	94.8	185.8	91.0	0.981 0	1.326 7	0.345 7
-5	268.2	4.189	1 315	0.110 2	536.3	9.074	97.4	186.9	89.5	0.990 5	1.324 2	0.333 7
0	273.2	4.891	1 480	0.094 90	529.8	10.54	100.0	188.1	88.1	1.000 0	1.322 5	0.322 5
+5	278.2	5.670	1 654	0.082 11	523.1	12.18	102.7	189.2	86.5	1.009 8	1.320 7	0.310 9
+10	283.2	6.559	1 848	0.071 30	516.0	14.03	105.4	190.2	84.8	1.019 3	1.318 7	0.299 4
+15	288.2	7.516	2 045	0.062 07	508.8	16.11	108.2	191.2	83.0	1.028 9	1.316 9	0.288 0
+20	293.2	8.591	2 260	0.054 25	501.5	18.43	111.1	192.2	81.1	1.038 7	1.315 3	0.276 6
+25	298.2	9.766	2 485	0.047 50	493.8	21.05	114.1	193.1	79.0	1.048 5	1.313 4	0.264 9
+30	303.2	11.08	2 725	0.041 73	486.1	23.96	117.1	193.9	76.8	1.058 6	1.311 9	0.253 3
+35	308.2	12.50	2 977	0.036 70	478.1	27.25	120.3	194.7	74.4	1.068 8	1.310 2	0.241 4
+40	313.2	14.05	3 241	0.032 41	470.3	30.85	123.5	195.5	72.0	1.078 7	1.308 6	0.229 9
+45	318.2	15.75	3 522	0.028 55	462.0	35.03	126.9	196.2	69.3	1.088 7	1.306 5	0.217 8
+50	323.2	17.58	3 812	0.025 24	452.9	39.62	130.2	196.7	66.5	1.098 8	1.304 6	0.205 8
+55	328.2	19.56	4 118	0.022 35	443.2	44.74	133.5	197.1	63.6	1.109 4	1.303 2	0.193 8
+60	333.2	21.70	4 439	0.019 72	432.8	50.70	137.2	197.5	60.3	1.119 9	1.300 9	0.181 0
+65	338.2	24.01	4 774	0.017 45	421.7	57.31	140.9	197.9	57.0	1.130 1	1.298 7	0.168 6
+70	343.2	26.48	5 124	0.015 58	408.0	64.18	144.3	198.2	53.9	1.140 2	1.297 3	0.157 1
+75	348.2	29.14	5 504	0.013 77	392.3	72.62	148.5	198.5	50.0	1.152 0	1.295 6	0.143 6
+80	353.2	31.72	5 859	0.012 02	376.0	83.20	153.0	198.4	45.4	1.163 3	1.291 8	0.128 5
+85	358.2	35.06	6 363	0.010 20	356.2	98.00	158.1	197.6	39.5	1.176 5	1.286 8	0.110 3
+90	363.2	38.38	6 940	0.008 475	332.0	118.0	164.0	196.2	32.2	1.191 8	1.280 5	0.088 66
+95	368.2	42.05	7 833	0.006 329	293.0	158.0	172.5	192.2	19.7	1.213 0	1.265 5	0.053 50
+96.85	370.05	43.50	8 371	0.004 464	224.0	224.0	183.2	183.2	0	1.242 2	1.242 2	0

第 6 図

7. 蒸 発 熱

蒸発熱に就ては Dana 等⁽⁷⁾ のものがある。これは計算に依り求めたもので実験としては殆どない。

さて蒸発熱 r は Clapeyron 式

$$r = AT(v'' - v') dp_s / dT \quad \dots\dots\dots (4)$$

に依り間接に求める事が出来る。式中 r の単位は kcal/kg, v'' は乾飽和蒸汽の比体積, v' は飽和液の比体積で単位は共に m^3/kg , T は絶対温度 $^\circ\text{K}$, A は仕事の熱當量で $1/427 \text{ kcal/kg} \cdot \text{m}$ であり, dp_s/dT は式 (1) より次の如く求める事が出来る。即ち

$$dp_s/dT = 2.3026 p_s \{ 1.00661(380 - T)(370 - T)/T^2 + 10 \times (1.00661/T - 2.637) \} / (380 - T)^2 \quad \dots\dots (5)$$

但し p_s の単位は kg/m^2 であり, dp_s/dT の単位は $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$ である。式 (5) に依て温度 -150°C から $+96.85^\circ\text{C}$ まで 5°C とびに計算すると第 4 表第 4 行の如くなる。これと既に求めた同表中の v'', v' の値を用ひ、式 (4) に依て r の値を計算すると、同表第 11 行の値が得られる。

8. 過熱蒸汽の定圧比熱

定圧、定積両比熱やそれ等の比並に断熱変化の指数等に関してはこゝでは述べない。こゝではエンタルピ及びエントロピの式を誘導するに必要な程度に止める。

熱力学の基本式によれば

$$(\partial c_p / \partial p)_T = -AT(\partial^2 v / \partial T^2)_p$$

$$\therefore c_p = c_{p0} - AT \int_{T=\text{定}} (\partial^2 v / \partial T^2)_p dp$$

上式と特性式 (2)_a から

$$c_p = c_{p0} + 0.2618 \times 10^{-4} p / (T/100)^{3.4} + 1.162 \times 10^{-12} p^4 / (T/100)^{19} - 3.325 \times 10^{-22} p^{3.2} / (T/100)^{1.4} \quad \dots\dots\dots (6)$$

を得る。上式の c_{p0} は $p=0$ に対する c_p であつて、これに関する文献は殆どない。併し式 (6) によつて c_p を計算するには c_{p0} の値を是非とも知らねばならない。そこで間接の方法であるが c_{p0} の値は c_p の実験値から求めることとし、著者は Thacker-Folkins-Miller⁽¹¹⁾ のものを採用した。これ

(11) Thacker, Folkins, Miller, Industrial and Engineering Chemistry, 33, (1941), 584.

は最も廣範囲に互り、正確で且最も新しいからである。

今、この値と式 (6) とから c_{p0} を計算すると、これは温度の 1 次式として表はし得ることが分る。即ち

$$c_{p0} = 0.08206 + 0.09935(T/100)$$

これを式 (6) に入れると

$$c_p = 0.08206 + 0.09935(T/100) + 0.2618 \times 10^{-4} p / (T/100)^{3.4} + 1.162 \times 10^{-12} p^4 / (T/100)^{19} - 3.325 \times 10^{-22} p^{3.2} / (T/100)^{1.4} \quad \dots\dots\dots (6)_a$$

となる。この式の適用範囲は式 (2)_a と同一である。

9. エ ン タ ル ピ

エンタルピ i と定圧比熱 c_p との間には次の関係がある。

$$(\partial i / \partial T)_p = c_p$$

$$\therefore i = \int_{p=\text{定}} c_p dT + K_1$$

本式と前節で求めた (6)_a 式とから

$$i = K_1 + 0.08206T + 4.9675(T/100)^2 - 10.908 \times 10^{-4} p / (T/100)^{2.4} - 6.4556 \times 10^{-12} p^4 / (T/100)^{18} + 8.3125 \times 10^{-20} p^{3.2} / (T/100)^{0.4} \quad \dots\dots\dots (7)$$

を得る。但し i の単位は kcal/kg である。

今式中の K_1 を他の冷媒と同様、 0°C における飽和液のエンタルピが 100 kcal/kg になる様に決める。而して 0°C における蒸発熱は既に求めた如く、 88.07 kcal/kg であるから、 0°C における乾飽和蒸汽のエンタルピが $100 + 88.07 = 188.07$ になる様に決めればよい。この条件から K_1 を求めると $K_1 = 133.87$ となる。従て

$$i = 133.87 + 0.08206T + 4.9675(T/100)^2 - 10.908 \times 10^{-4} p / (T/100)^{2.4} - 6.4556 \times 10^{-12} p^4 / (T/100)^{18} + 8.3125 \times 10^{-20} p^{3.2} / (T/100)^{0.4} \quad \dots\dots\dots (7)_a$$

となる。本式によつて過熱蒸汽の任意の状態におけるエンタルピを求める事が出来る。

次に乾飽和蒸汽のエンタルピであるが、これは過熱蒸汽の特別な場合として求める事が出来る。但しその範囲は -150°C から $+75^\circ\text{C}$ までである。第 4 表第 10 行 (#印より上) に斯くして求めた i'' の値を示した。

飽和液のエンタルピは

$$i' = i'' - r \quad \dots\dots\dots (8)$$

によつて簡単に求め得るから、上記の範囲に於て既知の i'' , r の値を用ひて計算すると第 4 表第 9 行の如くなる。

最後に $+75^\circ\text{C}$ から $+96.85^\circ\text{C}$ (臨界温度) 迄の i'' , i' の値であるが、これは既に述べた如くこの範囲では式 (2)_a が成立しないので上式によつて求める事は出来ないが、 $t-i$ 線図で図式的に求める事が出来る。即ち先づ $+75^\circ\text{C}$ 迄の乾飽和蒸汽線並に飽和液線及び乾度 0.5 なる線を求めて置き、この内乾度 0.5 なる線を $t=t_c=96.85^\circ\text{C}$ なる線の方へ適當に延長してその両側に既知の r の値の半分を取ると、各温度に対する i'' , i' の値が求められる。この場合、勿論かくして求めた点が、夫々前に求め置いた乾飽和蒸汽線及び飽和液線の夫々の延長と思はれる線の上に乗る様にすべきである。この様な方法によつて求めた i'' , i' の値が夫々第 4 表第 10 行及び第 9 行 (#印より下) に示されてゐる。

[昭和 19 年 2 月]

10. エントロピー

熱力学の基本的関係から

$$s = \int c_{p0} T dT - A \int \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp + K_2$$

これに特性式 (2)_a と先に求めた c_{p0} の式とを組合はせる

$$\begin{aligned} s = & K_2 + 0.18895 \log_{10} T + 0.09935 (T/100) \\ & - 0.10432 \log_{10} p - 0.0770 \times 10^{-4} p / (T/100)^{3.4} \\ & - 6.115 \times 10^{-14} p^4 / (T/100)^{19} + 2.375 \times 10^{-22} p^3 / (T/100)^{1.4} \end{aligned}$$

を得る。但し s の単位は kcal/kg $\cdot$ K である。

式中の常数 K_2 はエンタルピーにおけると同様 0°C の飽和液のエントロピーを 1.0000 kcal/kg $\cdot$ K、従て 0°C の乾飽和蒸気のエントロピーが 1.0000 + 88.07/273.2 = 1.3225 kcal/kg $\cdot$ K となる様にして決める事が出来る。この様にして決めるときは、 $K_2 = 1.09405$ となる。従て

$$\begin{aligned} s = & 1.09405 + 0.18895 \log_{10} T + 0.09935 (T/100) \\ & - 0.10432 \log_{10} p - 0.0770 \times 10^{-4} p / (T/100)^{3.4} \\ & - 6.115 \times 10^{-14} p^4 / (T/100)^{19} + 2.375 \times 10^{-22} p^3 / (T/100)^{1.4} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。本式に依て過熱蒸気の任意の状態におけるエントロピーを計算する事が出来る。

次に乾飽和蒸気のエントロピーは、エンタルピーにおけると同様過熱蒸気の特別な場合として求めることが出来る。但しこの範囲は -150°C 乃至 +75°C である。かくして求めた s'' の値を第 4 表第 13 行 (#印より上) に示した。

飽和液のエントロピー s' は

$$s' = s'' - r/T \quad \dots\dots\dots (10)$$

により簡単に求め得るから、上記の範囲に於て既知の s'' , r の値を用いて計算すると第 4 表第 12 行 (#印より上) の如くなる。

最後に +75°C から +96.85°C (臨界温度) までの s'' , s' であるが、これは既に述べた如くこの範囲で式 (2)_a が成立しないので式によつて求めることは出来ないが、同範囲のエントルピーを求める際に $t-i$ 線図上で行つたと同様の要領で、これを $t-s$ 線図上で求めることが出来る。この方法により求めた s'' , s' の値を第 4 表第 13 行及び第 12 行 (#印より下) に示した。

11. 蒸気表及び蒸気線図

第 4 表は既述の諸式や方法で求めた飽和蒸気並に液の性質を示すものである。-150°C から +96.85°C (臨界温度) の範囲で 5°C の間隔で與へられてゐる。

又第 7 図は同様上に述べた式や方法で作成した圧力エンタルピー線図で、飽和及び過熱の両範囲に互に冷凍機設計に必要な諸性質が図示されてゐる。

12. 結 言

以上に依て低温冷媒として必要なプロパンの熱力学的性質を明らかにし得たと同時に、冷凍機設計に際し必要な数値表並に線図を作成することが出来た。

(昭和 18 年 10 月 11 日受付)

第 7 図

第 10 卷 第 38 号 (第 2 部)]