

二段圧縮冷凍サイクルの成績係数について

林 桂

Remark on Coefficient of Performance
for Two-Stage-Compression Refrigerating Cycle

By

Katsura HAYASHI

Clearly, calculation of refrigeration capacity of two-stage-compression refrigerating cycle is basis on determination of the intermediate pressure p_m .

The fomular of determinining the pressure hitherto in used is expressed as

$$p_m = \sqrt{p_c \cdot p_e} \dots\dots\dots (1)$$

where p_c is the condensing pressure,

p_e is the evapating pressure.

Because induction of Eq. (1) is based on the two unfeasible and even fatal hypotheses, this is only one of experiential formula rather than theoretical.

Over against this, the author's paper gives as

$$T_m = \sqrt{T_c \cdot T_e} \dots\dots\dots (2)$$

where T_m is the saturated temperatur corresponded to the intermediate pressure in °K,

T_c is the saturated temperature corresponded to the condensing pressure in °K,

T_e is the saturated temperature corresponded to the evaporating pressure in °K.

In this paper, for the purpose of comparison with these equations, coefficients of performance for perfect cooling two-stage-compression and two-stage-expansion refrigerating cycle are calculated closely.

As the result, apparently, Eq. (2) gives the intermediate pressure corresponded with the maximum value of coefficient of perfotmance. From the theoretical and the calculative viewpoints, therefore, the author thinks that it should use Eq. (2) to decide on the intermediatate pressure.

*水産大学校研究業績 第573号 1968年8月10日 受理
Contribution from the Shimonoseki University of Fisheries, No. 573.
Received Aug. 10, 1968.

1. ま え が き

二段圧縮——機械的往復動式——冷凍サイクルにおいて最良の成績係数を得るには、一般に $p_m = \sqrt{p_c \cdot p_e}$ (ここに、 p_c :凝縮圧力[at abs]; p_e :蒸発圧力[at abs]) によって求められる圧力を中間圧力として、高・低圧段に二分して圧縮すればよいとされているが、この式の導入には致命的ときえ思われる非現実的な二つの仮定に立脚している。

これに対して、筆者は先に、別な見地より考察して、最良の成績係数は $T_m = \sqrt{T_c \cdot T_e}$ (ここに、 T_c :凝縮温度[°K]; T_e :蒸発温度[°K]) から得られる温度に対応する飽和圧力を中間圧力として、高・低圧段に二分して圧縮すればよいことを発表した¹⁾。

よって、これら二式による中間圧力のどちらが最良の成績係数を与えるか、また二式のどちらでもなければ、いかなる中間圧力で二分した場合に成績係数が最大になるかを計算によって求めた。

完全冷却二段圧縮二段膨脹サイクルのみについて考察し、圧縮効率および冷凍効率はともに100%とした。

2. 計 算 方 法

計算の対象としては、現在二段圧縮冷凍装置の冷媒としてよく使用されているR-12、R-22およびR-717(NH₃)をとった。また、凝縮温度および蒸発温度も実用性を考慮して、前者は30°C、35°Cおよび40°Cとし、後者は-50°C、-60°Cおよび-70°C C (R-717は-40°C、-50°Cおよび-60°C)とした。また膨脹弁入口冷媒液温は各凝縮温度より5度の過冷とした。

中間圧力としては、計算上の便宜より温度表示とし、0°より-35°Cまで5度おきに設定し、必要に応じてさらにこまかく設定した。

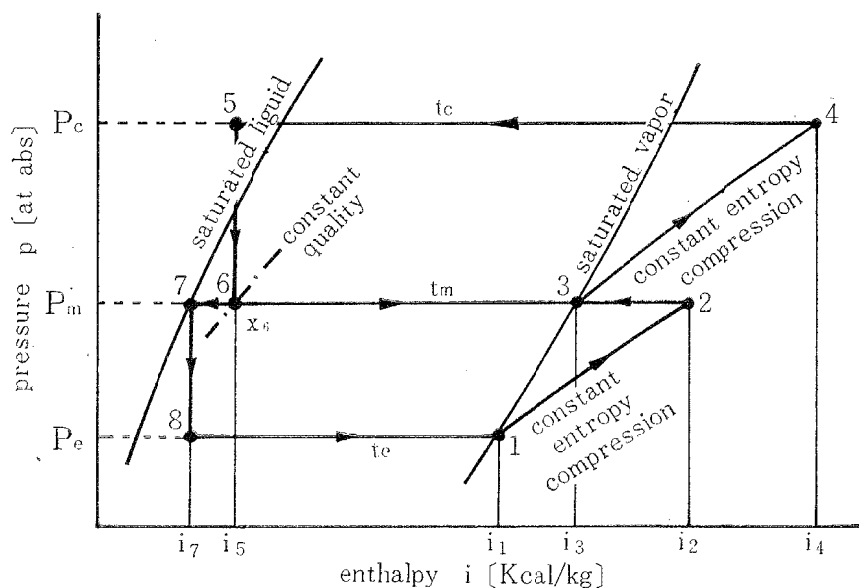


Fig. 1. p-i diagram for two-stage compression and two-stage-expansion and complete intercooled cycle.

二段圧縮冷凍サイクルの成績係数について

精密な計算は普通の $p-i$ 線図では不可能なので、すべての状態量はそれぞれの計算式で求めた。この際、参考にした各冷媒の蒸気表の数値もこの計算式に準拠したものでなければ無意味なので、式の選択には注意した。

図 1 のサイクル図において、成績係数 ε は次のように表わされる。

高圧段循環冷媒量を 1 [kg] とし、低圧段循環冷媒量を g [kg] とすれば

$$\varepsilon = \frac{g(i_1 - i_7)}{g(i_2 - i_1) + (i_4 - i_3)} \dots\dots\dots (1)$$

点 6 における冷媒の湿り度は

$$1 - x_6 = 1 - \frac{i_6 - i_7}{i_3 - i_7} = \frac{i_3 - i_6}{i_3 - i_7} \dots\dots\dots (2)$$

ここに x_6 : 点 6 における冷媒の乾き度

低圧段圧縮終点の過熱蒸気(点 2)を分離器におけるフラッシュ蒸気の蒸発熱のみによって、点 3 の乾き飽和蒸気にまで冷却するとすれば、フラッシュ量を g' [kg] とすれば、下記のような熱収支の式が得られる。

$$g'(i_3 - i_7) = g(i_2 - i_3) \dots\dots\dots (3)$$

また、低圧段循環冷媒量 g は

$$g = (1 - x_6) - g' \dots\dots\dots (4)$$

となるので、式 (1) ~ (4) から、成績係数を各点のエンタルピ i [kcal/kg] のみで表わすことができる。

ここにおいて、一番問題になるのは、過熱蒸気域における点 2 および点 3 のエンタルピの値の算定である。そのためには、点 2 および点 3 における温度を求めなければならない。例えば、点 2 における温度 t_2 を求めるには、ある蒸発温度における乾き飽和蒸気のエンタルピ s'' を求め、圧縮は可逆断熱圧縮であるとして、 $s = f(t_2, p)$ の式から、 t_2 を求めるのである。ここに p は適当にえらんだ中間圧力である。点 3 における温度 t_3 もまったく同様にして求める。

3. 計 算 式

2. に述べた条件を満足するような式を各種文献より検討して、次のように決定した。

1) R-12²⁾

$$\log_{10} p_s = 35.6457 - \frac{1816.5}{T} - 10.859 \log_{10} T + 0.007175 T$$

$$i = 108.97 + 0.0736 T + 0.0001195 T^2 - p \left(\frac{0.01119}{T} - 0.0000114 \right) \text{ [kcal/kg]}$$

$$s = 0.82997 + 0.169470 \log_{10} T + 0.000239 T - 0.0378095 \log_{10} p - 0.005597 \frac{p}{T^2} \text{ [kcal/kg}^\circ\text{K]}$$

飽和液のエンタルピ i' は³⁾

$$i = 100.00 + 0.2203 t + 0.000285 t^2 + 0.00000144 t^3 \text{ [kcal/kg]}$$

ここに、 p_s : 飽和圧力 [kg/m²]

p : 圧力 [kg/m²]

T : 絶対温度 = $t + 273.1$ [°K]

t : 温度 [°C]

2) R-22

$$\log_{10} p_s = 11.0479 - \frac{1318.07}{T} - 7.6462 \times 10^{-3} T + 7.68 \times 10^{-6} T^2$$

$$i = 124.73 + 0.0536 T + 1.57 (T/100)^2 - \frac{6.172 \cdot 10^{-4} p}{(T/100)^{2.5}} - \frac{2.108 \cdot 10^{-7} p^2}{(T/100)^8} \quad [\text{kcal/kg}]$$

$$s = 1.0468 + 0.1234 \log_{10} T + 0.031 (T/100) - 0.0529 \log_{10} p - \frac{4.409 \cdot 10^6 p}{(T/100)^{3.5}} - \frac{1.874 \times 10^{-9} p^2}{(T/100)^9} \quad [\text{kcal/kg}^\circ\text{K}]$$

飽和液のエンタルピ i' は⁵⁾

$$i' = 100 + 0.2819 t + 0.000392 t^2$$

ここに p_s : 飽和圧力 $[\text{kg/m}^2]$
 p : 圧力 $[\text{kg/m}^2]$
 T : 絶対温度 = $t + 273.2$ $[\text{°K}]$
 t : 温度 $[\text{°C}]$

3) R-717⁶⁾

$$\log_{10} p_s = 31.39021 - \frac{1914.96}{T} - 8.4598 \log_{10} T + 2.3931 \cdot 10^{-3} T + 2.9552 \cdot 10^{-6} T^2$$

$$i = 212.32 + 0.2688 T + 0.0002843 T^2 + 42.24 \log_{10} T - \left[\frac{7.02}{10^6} + \frac{3.185 \cdot 10^{-3}}{(T/100)^3} + \frac{1.686}{(T/100)^{11}} \right] p \quad [\text{kcal/kg}]$$

$$s = 1.7769 + 0.61893 \log_{10} T + 0.0005685 T - \frac{18.343}{T} - 0.26848 \log_{10} p - \left[\frac{2.3888 \cdot 10^{-5}}{(T/100)^4} + \frac{1.5457 \cdot 10^{-2}}{(T/100)^{12}} \right] p \quad [\text{kcal/kg}^\circ\text{K}]$$

$$r = 32.938 \sqrt{t_c - t} - 0.5890 (t_c - t) \quad [\text{kcal/kg}]$$

飽和液のエンタルピ i' は

$$i' = i'' - r \quad [\text{kcal/kg}]$$

ここに p_s : 飽和圧力 $[\text{kg/m}^2]$
 p : 圧力 $[\text{kg/m}^2]$
 T : 絶対温度 = $t + 273.2$ $[\text{°K}]$
 t : 温度 $[\text{°C}]$
 r : 蒸発熱 $[\text{kcal/kg}]$
 i'' : 乾き飽和蒸気のエンタルピ $[\text{kcal/kg}]$,

上式の $i = f(p, t)$ に $p = p_s$, すなわち, t に対応する飽和圧力 p_s $[\text{kg/m}^2]$ を代入して求めたもの。

4. 計算結果

図2から図4まではR-717, 図5から図7まではR-12, 図8から図10まではR-22について, 成績係数 ε を縦軸, 中間温度 t_m を横軸にとり, 凝縮温度 t_c をパラメータとして, 各蒸発温度 t_e 別に表わした。

二段圧縮冷凍サイクルの成績係数について

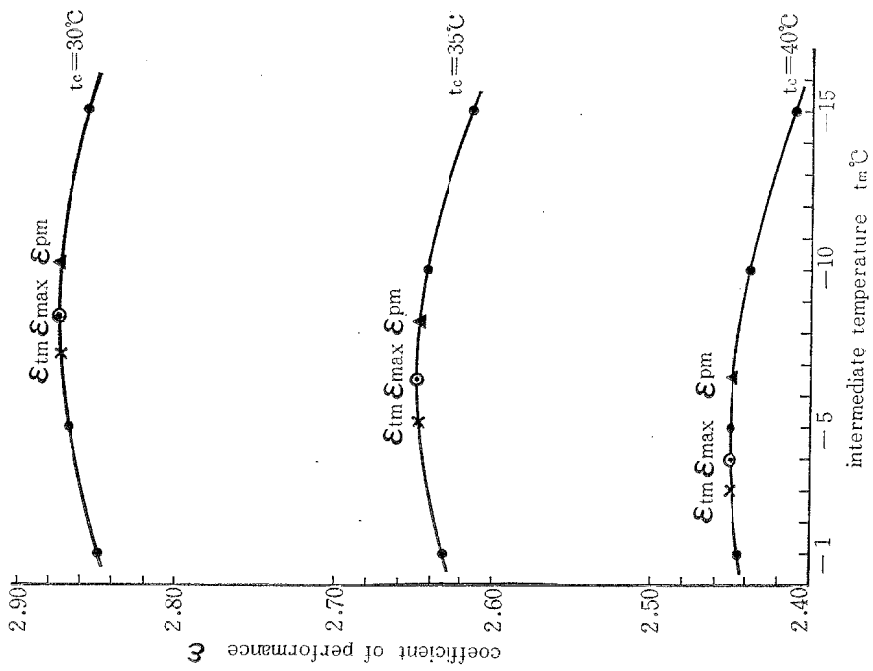


Fig. 2. ϵ - t_m diagram for R-717 at evaporating temperature $t_e = -40^\circ\text{C}$.

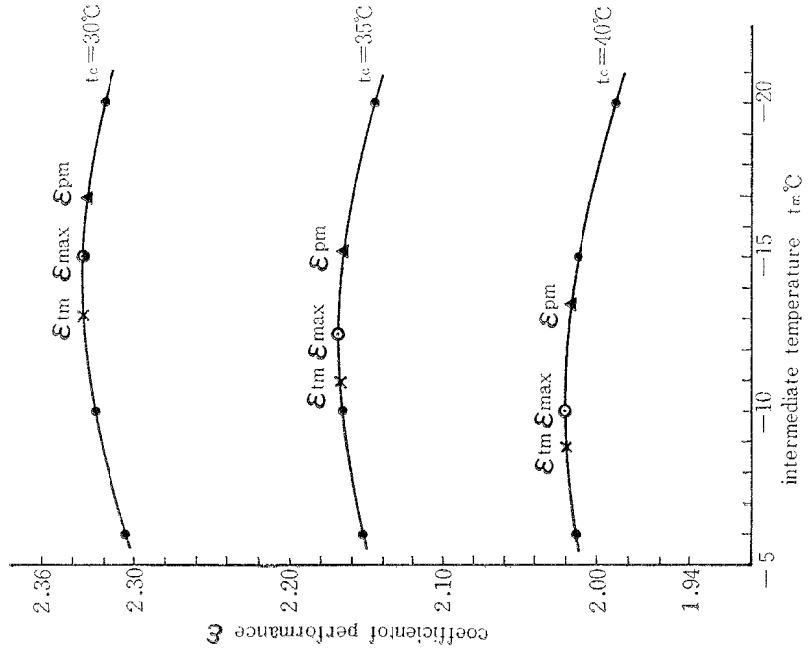


Fig. 3. ϵ - t_m diagram for R-717 at evaporating temperature $t_e = -50^\circ\text{C}$.

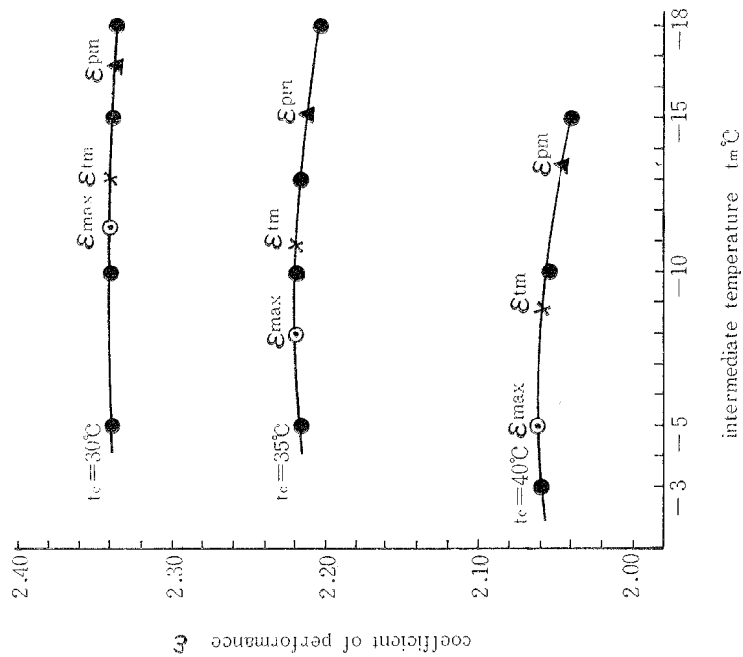


Fig. 5. ϵ - t_m diagram for R-12 at evaporating temperature $t_e = -50^\circ\text{C}$

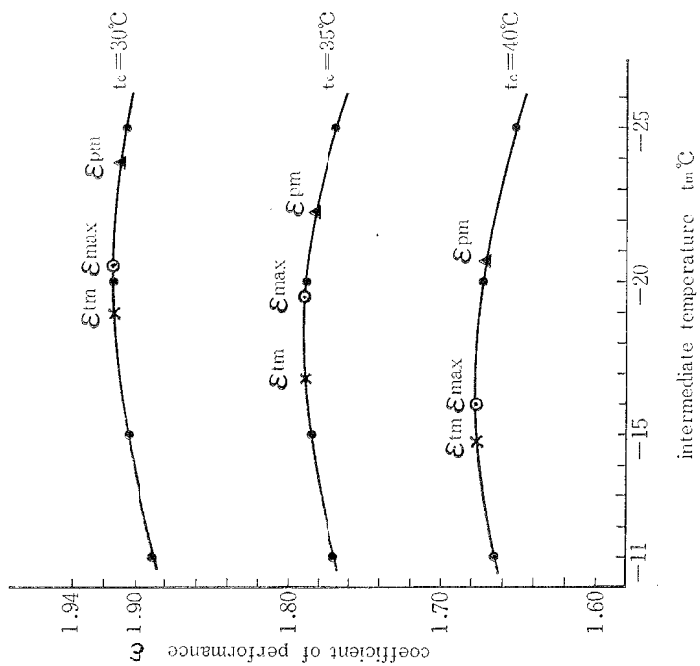


Fig. 4. ϵ - t_m diagram for R-717 at evaporating temperature $t_e = -60^\circ\text{C}$

二段圧縮冷凍サイクルの成績係数について

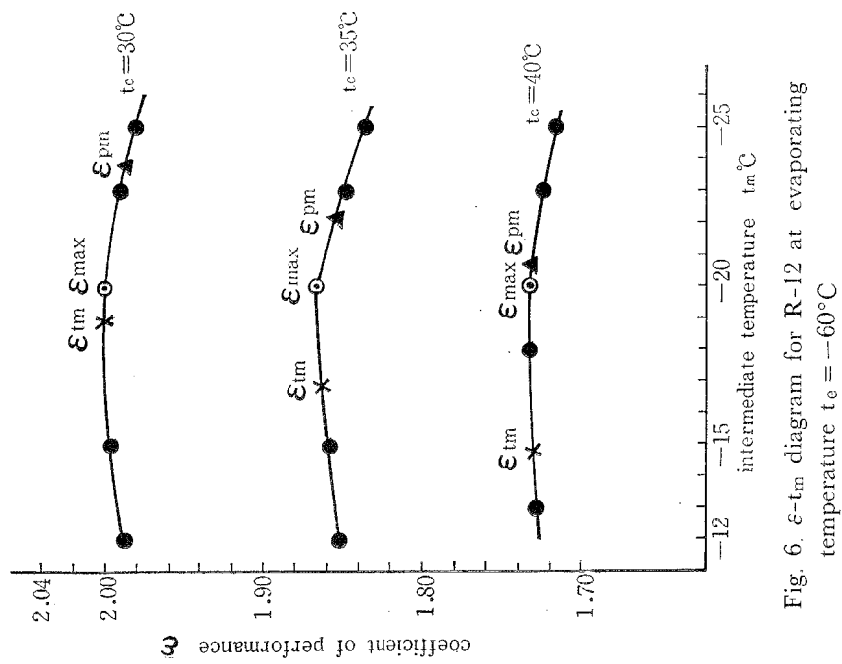


Fig. 6. ϵ - t_m diagram for R-12 at evaporating temperature $t_e = -60^\circ\text{C}$

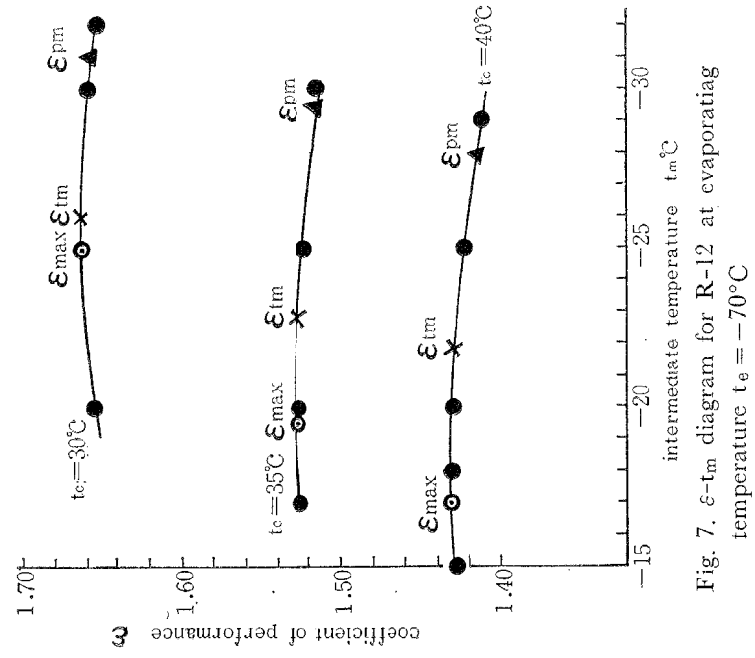


Fig. 7. ϵ - t_m diagram for R-12 at evaporating temperature $t_e = -70^\circ\text{C}$

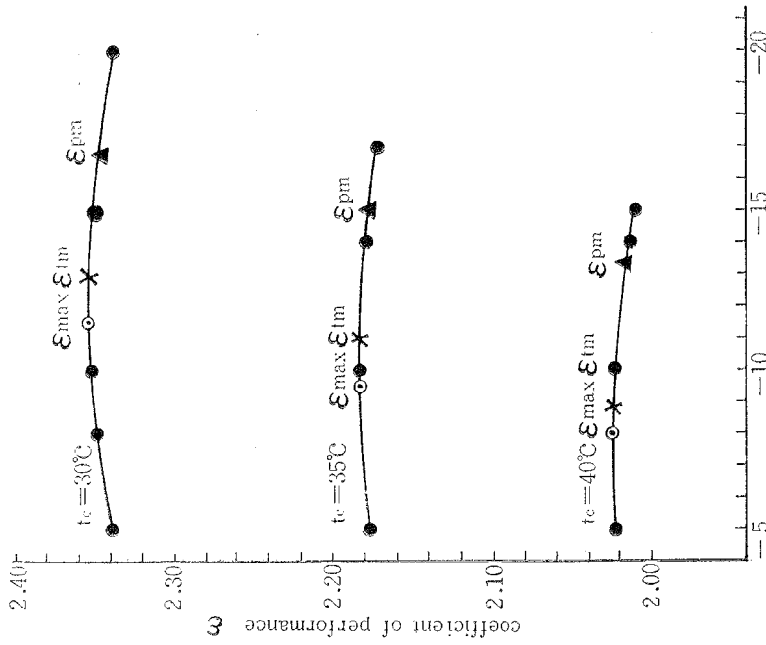


Fig. 8. ϵ - t_m diagram for R-22 at evaporating temperature $t_e = -50^\circ\text{C}$

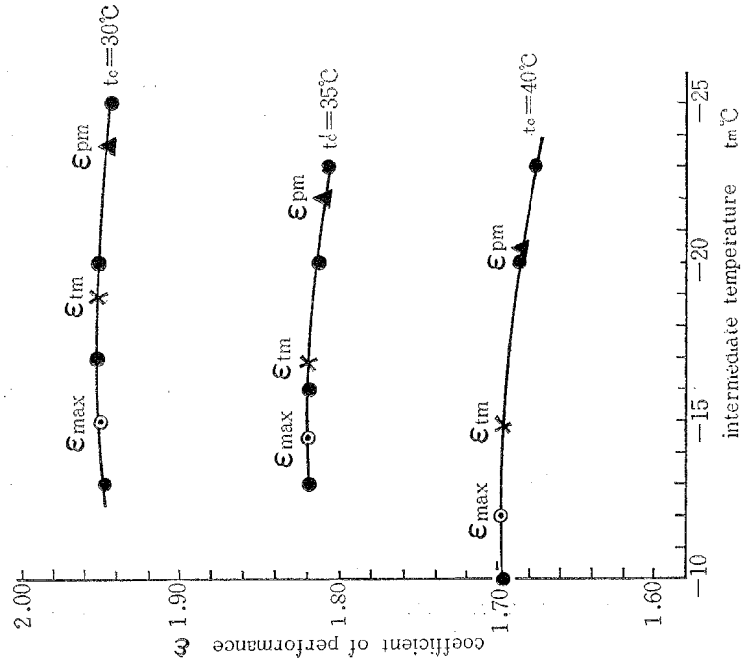


Fig. 9. ϵ - t_m diagram for R-22 at evaporating temperature $t_e = -60^\circ\text{C}$

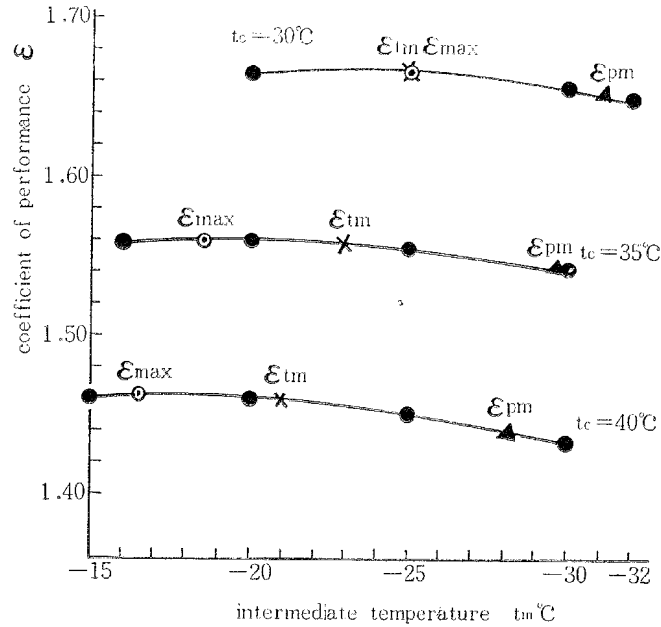


Fig. 10. ϵ - t_m diagram for R-22 at evaporating temperature $t_e = -70^\circ\text{C}$

図中の ϵ_{max} は最大の成績係数を, ϵ_{tm} は $T_m = \sqrt{T_c \cdot T_e}$ で求められた中間温度 t_m における成績係数を, ϵ_{pm} は $p_m = \sqrt{p_c \cdot p_e}$ で求められた圧力に対応する飽和温度を中間温度 t_{pm} とした場合に求められた成績係数である。

また, 表はこれらの値を整理したものである。

5. 考 察

図および表からわかるように, R-12 の $t_c = 35^\circ\text{C}$ および $t_c = 40^\circ\text{C}$ で $t_e = -60^\circ\text{C}$ を除いた場合, ϵ_{max} を与える温度 t_{max} に t_m の方が t_{pm} より常に近い。すなわち, $T_m = \sqrt{T_m \cdot T_e}$ の方が $p_m = \sqrt{p_c \cdot p_e}$ より, 理論的にもまた計算面でも優れているといっても差支えない。ただ, 上記の事柄については, 図6において, ϵ_{max} を与える温度がすべて -20°C を示しており, また $t_c = 35^\circ\text{C}$ における ϵ - t_m 曲線が異常な屈曲を表わし, また表から $t_c = 35^\circ\text{C}$ の場合, t_{max} は -8.0°C と -18.5°C の間に, $t_c = 40^\circ\text{C}$ の場合は t_{max} は -5.0°C と -16.5°C の間にあるのが妥当ではないかと思われる。もし, そうなれば, この場合も t_m の方が t_{max} に近づくとと思われる。この原因として, 計算時に, -20°C の飽和圧力の値が準拠した蒸気表の値と, 他の飽和圧力の場合より誤差が約 1.2% 大きいことと, 飽和蒸気曲線が大体この近くで変曲点らしきもの表わしているためではないかと思われる。この事については今後, さらに考察を進めたい。

二段圧縮冷凍サイクルの中間点として T_m を採用する際, 冷媒のいかに問わず, 凝縮温度および蒸発温度で決定するという考え方に, 個性的でない, すなわち, 冷媒の特性を考慮しなくてよいだろうか危惧念をいだくかも知れないが, 特性を考慮したかに思える P_m も, それを飽和温度に換算すれば, 表に示すように, 各冷媒についてほとんど等しいのである。ただ, 冷凍装置には圧力計が取り付けられているので簡便と

二段圧縮冷凍サイクルの成績係数について

思われるが、これもマークを付けておけばよいことである。

あらゆる面で合理的な $T_m = \sqrt{T_c \cdot T_e}$ による中間点を採用すべきであると思う。しかし、このような精密計算を行なったので、1.5% 前後の差が求められたのであって、一般の $p-i$ 線図では、 ε_{max} , ε_{Tm} および ε_{pm} の各値はほとんど一致している。

最後に、本計算について、本校機関学科中川教官に多大の御協力をたまわったことを深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 林・長谷川：本報告自然科学篇第5号（昭和37年4月）15.
- 2) R. Planck-G. Seger, 1939: Z. ges. Kälte Vol. 46 S. 41.
- 3) 日本冷凍協会：冷凍空調便覧, 1963, 109.
- 4) 菅原・小野：機械学会論文集, 14巻46号（昭和23年）, 147.
- 5) 菅原・小野, 1963, 111
- 6) Kuprianoff, J, 1930: Z. ges. Kälteindustrie, Bd 37 S.1.
Planck, R., 1956: Handbuch der Kältetechnik, Bd. 2., 4.
Bäckström, m.,-Emblík, 1964: Kältetechnik