

電子式膨張弁と温度式膨張弁による蒸発器冷媒制御の比較について

山路光徽, 野口英雄, 桐 博昭, 山下 徹, 半澤良一*

Comparison of An Electronic and Thermostatic Expansion Valves in Refrigerant Control of Evaporator

Mitsuyoshi YAMAJI, Hideo NOGUCHI, Hiroaki KIRI,
Toru YAMASHITA, and Ryouichi HANZAWA*

Use of an electronic control expansion valve (EEV) has become more and more popular, taking the place of a formerly used thermostatic expansion valve (TEV), in controlling evaporator superheat of the refrigeration system installed to fishing boats, including tuna purse seiners. Refrigeration efficiency was compared between EEV and TEV taking advantage of T/S Nagasaki-maru which has a refrigeration system equipped with both EEV and TEV to be used alternately. The efficiency of EEV being operated under the best combination of the control parameters found by us was compared with that of TEV. Repeated experiments revealed that by using EEV the cooling time before reaching the desired refrigeration temperature can be much shortened (4h-35m by TEV vs 3h-28m by EEV) and the state of operation becomes more stable. Thus, the result of our experiments shows that the efficiency of the refrigeration equipment with TEV can be economically improved by just changing TEV for EEV.

key words: 電子式自動膨張弁 electronic control expansion valve; 温度式自動膨張弁 thermostatic expansion valve; 過熱度 superheat; 比例ゲイン proportional gain; 制御周期 Control period

はじめに

近年漁船特に、マグロ船の冷凍装置の発展は、目覚ましいものがある。

こうした、冷凍装置の急速な改善の背景には、マグロの資源の減少に伴う漁場の遠隔化、航海の長期化があげられる。長期保蔵に伴う色艶、肉質の劣化による商品価値の大幅な下落に対処するため“赤い冷凍マグロを作ろう”運動が起り¹⁾、いまや超低温による急速凍結、超低温に依る一定温度保冷貯蔵 ($\pm 3^{\circ}\text{C}$)²⁾ が常識化し、冷凍装置の取扱者の意識も大きく変化して来た³⁾。

流通面においても、積み荷の一部を水揚げし、肉色の如何によって、一船買いする機構が主流となり⁴⁾、その時の値段の尺度に冷凍装置の超低温化の能力が取り上げられている。その結果無駄に動力を消費し、保管温度の低温化を価格操作に利用している⁵⁾ 傾向さえうかがえる。又凍結によるマグロ肉の褐色現象は、凍結速度が早い程、少ないと言われ⁶⁻⁷⁾、特に超低温凍結の保色効果については、 -40°C ~ -60°C へ急速に凍結する程効果が大きく、肉色保持上の貯蔵期間が長くなるとされている¹⁾。このようにマグロ類の鮮度保持には、い

かに急速に凍結させるかが重要である。

そこで本報では、長崎丸の急速凍結装置について、冷凍サイクルを構成する圧縮機、蒸発器、凝縮器等の容量を変更することなく、最近使用が広がりつつある電子式膨張弁を、従来から使用されている温度式膨張弁と並列に設置し、両方式による凍結に及ぼす時間的効果、並びに運転の安定性について比較検討したので報告する。

材料および方法

1. 冷凍装置と計測

実験に供した冷凍装置は、1987年建造の練習船長崎丸842GTの付属設備である。冷凍装置の基本的な冷凍サイクルは、4つの要素即ち圧縮機、凝縮器、蒸発器、及び減圧機構から構成され、実験装置の蒸発器はファン2台を左右に段差をつけて設置し、風を系統だてて流れる様にした5段の乾式直接膨張冷却管棚方式の急速凍結室である。本船の冷凍装置の主要目を Table 1 に、冷凍装置全般の各機器の配置及び冷媒系統図を Fig.1 に示す。

今まで乾式蒸発器への送液制御は、一般的には温度式膨張

*前川ハイテク電気株式会社 茨城県北相馬郡守谷町2035番地

Table 1. principal specifications of refrigeration equipment of T/S Nagasakimaru

Refrigerating Compressor	
Type	High speed multi cylinder 2 stage compressor. MYCOM-F62A MAYEKAWA MARINE ENG. CO.,LTD
Number of cylinder	2 cylinders in high stage. 4 cylinders low stage.
Diameter of cylinder	95 mm
Length of stroke	76 mm
Revolutions per minute	1200 rpm
Refrigeration capacity	3.5 RT(AT TC35 °C/TE60°C)
Brake horse power	15.6 BKW
Motor	30 KW
Manufacturer	MAYEKAWA MARINE ENG. CO.,LTD
Quick Freezer (Semi-air blast)	
Refrigeration capacity	1.2 ton /36 h
Effective measurement of tube rack	2400 L×1200 W×5 Stage
Cooling tube	(a) Tube rack: Aluminum (b) Wall: STPG-38 SCH40 32A (c) Ceiling: Aluminum fin coil
Fan	1.5 KW×2 stage
Volume	29m ³
Cooling temperature	-55 °C~ 0°C
Refrigerant	CHCLF ₂ -22
Fish Hold	
Cooling tube	(a) Ceiling: Aluminum coil (b) Floor, Wall: STPG-38 SCH-40 38A
Cooling temperature	-50°C
Volume	29 m ³
Working Space	
Cooling tube	(a) Ceiling: Aluminum coil (b) Floor, Wall: STPG-38 SCH-40 25A
Volume	38 m ³
Cooling temperature	-10°C

弁が主流であり⁹⁾, 蒸発器出口冷媒過熱度により機械的な比例制御を行っている。本船の装置に使用の温度式膨張弁は, DANFOSS 社製を使用し, その構造を Fig.2 に示した⁹⁾。膨張弁は上部感温筒を含むパワーエレメント 1, オリフィスアセンブリ 2, 及びバルブ本体 3, の主要部分で構成され, 2線接触式の感温筒は蒸発器の冷媒出口側に於ける温度変化に対して応答し, 蒸発器への負荷が大きく変化した時でも応答出来る構造となっている。オリフィスアセンブリ 2, の部分は交換可能型でありバルブの容量を変える必要が生じた場合には, 適合するオリフィスアセンブリに交換する事が出来る。

温度式膨張弁は蒸発器 (凍結室) の容量及使用条件により適合したものを選定する必要があり, 本船の凍結室用膨張弁の仕様は以下の条件において選定された。

Refrigerant	CHCLF ₂ (R-22)
Capacity of evaporator	11620 Kcal/h (15.6KW)
Temperature of evaporation	-60°C(0.38Kgf/abs)
Temperature of condensation	+35°C(13.8Kgf/abs)
Pressure drop by tube	0.5 Kgf/abs

凍結室温度は設計仕様では-55°Cであるが, 実際の冷却管内の蒸発温度は冷却管や冷却管の着霜等の熱伝達率を考慮に入

れそれ以下でなければならず, 蒸発温度-60°Cとした。膨張弁は単に蒸発器の容量のみで選定するのではなく, 使用蒸発温度と膨張弁前後の圧力差 ΔP により容量が異なる。 ΔP は凝縮圧力から蒸発圧力と膨張弁迄の配管の圧力降下を引いた値で, $\Delta P=13.8-0.38-0.5=12.92$ Kgf/abs となる。更に本船の装置は 2段圧縮機を使用し, 送液温度の過冷却度による補正係数を求め蒸発器容量に乗じた補正容量となる¹⁰⁾。又使用条件による MOP (Maximum Operating Pressure) 値以上の蒸発温度範囲では膨張弁が開閉作動せず, 起動時にかかる過負荷から圧縮機モーターを保護するようになっている。

以上の事より型式 TEX2 MOP20 蒸発温度範囲-60°C~-25°Cが選定された。

また本冷凍装置に電子式膨張弁を温度式膨張弁と並列に改造配管し, 設置した電子式膨張弁の位置を Fig.1 に□で囲んで示した。

計測器用温度記録計にはハイブリッドレコーダー横河電機株式会社製 HR-3200を使用し, 測温部にはシース熱電対 TMAを用いた。冷凍装置中の温度計測箇所は, 受液器出口冷媒液温度 (液冷却器入口), 液冷却器出口温度, 蒸発器冷却管冷媒液入口温度, 蒸発器冷却管出口冷媒ガス温度, 凍結

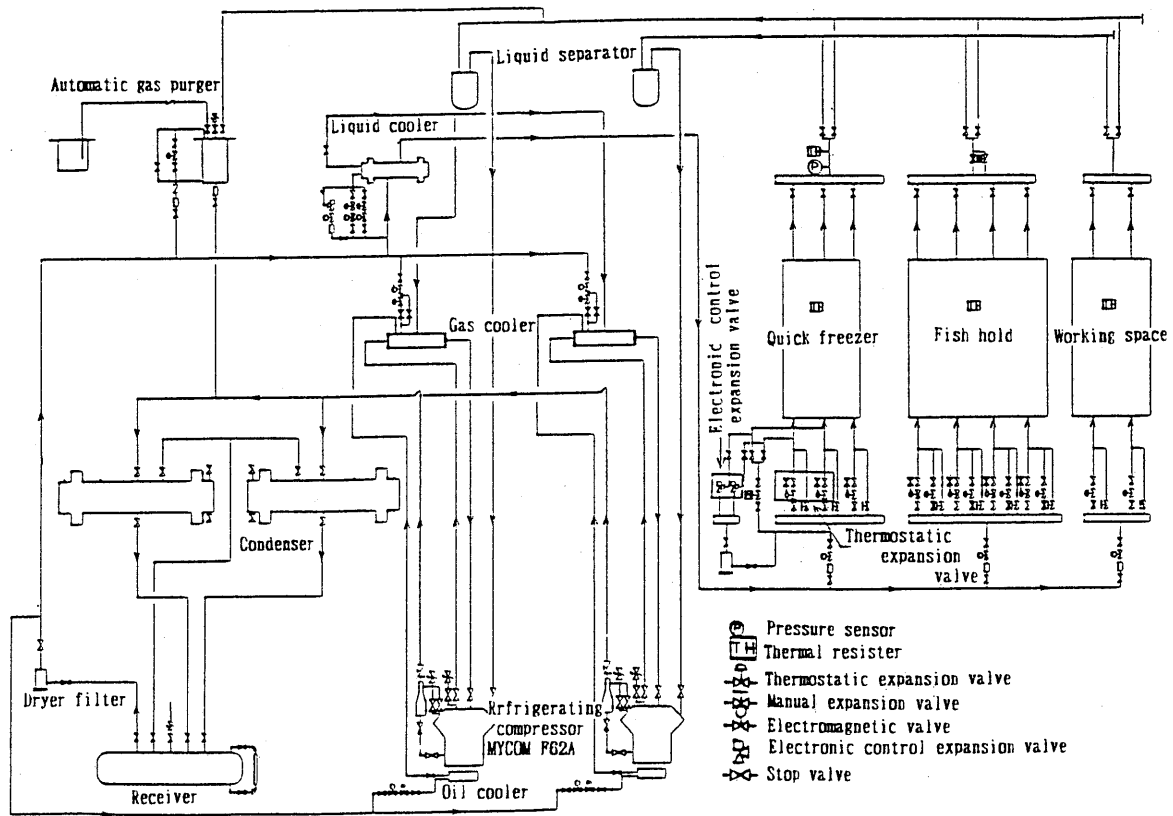


Fig.1. plan to show the Arrangement of refrigeration system in T/S Nagasaki maru, with arrows indicating flow of refrigerant.

室温度、凝縮器液温度、そして冷凍機運転上の安定性の指標の一つとして、圧縮機吸入ガス温度を、シーチ熱電対 TMA を測温センサーとして、温度記録計と接続し連続記録した。

船舶においては、海域が変わる事に依り、水温が定まらず、それに伴う吐出圧力、及び温度、凝縮器温度、受液器温度、また過冷却の為の液冷却器出口液温度等、温度に差異を生じ、最終的な比較の為の凍結室温度に影響を及ぼすので、特に水温及び機関室温に極端な差を生じない条件での計測に努めた。

そして電子式膨張弁による蒸発器加熱度制御系を Fig.3 に示した。電子式膨張弁での冷媒過熱度 (h) は蒸発器出口冷媒ガス温度 (Teo) と蒸発器入口冷媒液温度 (Tei) の差 ($h = Teo - Tei$) であり、電子式膨張弁によって設定値 S に制御される。制御アルゴリズムとしては、プロセス制御で広く用いられている PID 制御を使用し¹¹⁻¹²⁻¹³ 熱負荷が大きく変化しても過熱度が変わらないように (過熱度制御偏差を小さく

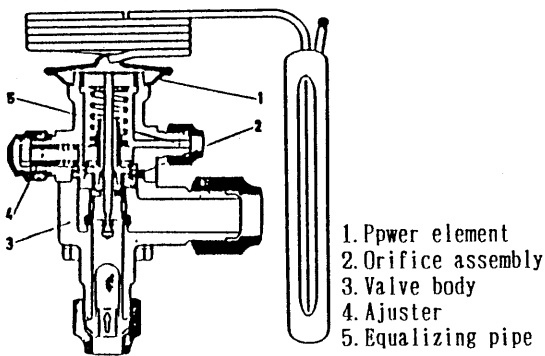


Fig.2. Construction of thermostatic expansion valve.

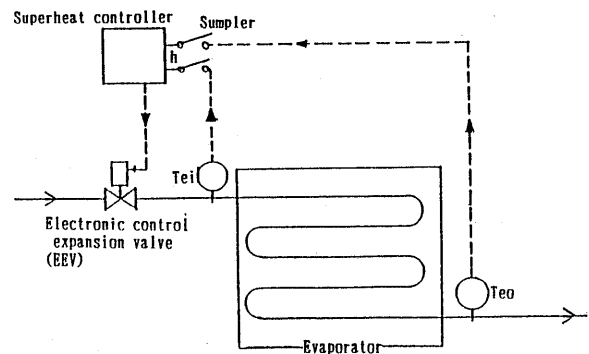


Fig.3. Evaporator superheat control system with electronic control expansion valve.

Tei: Temperature at inlet of evaporator cooler tube
Teo: Temperature at outlet of evaporator cooler tube

くする), また冷媒流量のフィードバック制御系を安定化しハンティングを防止させる。そして I (積分動作) と, D (微分動作) は内部演算処理で無視出来る程小さくした P (比例動作) 方式になっている。そしてスーパーヒート測定値と設定値を比較し, この偏差に対応したバルブ開度 (0~100%) を, 最大開度, 最小開度制限の演算をした後に on/off 信号として膨張弁を駆動する。これらの信号演算はスーパーヒートコントローラー内のマイクロコンピューターによって行われ, 冷凍サイクル全体の運転制御の一部として, サンプラーによって得られた信号を基に, 給液システムにより冷媒加熱度の制御が行われている。

電子式膨張弁では任意に開度設定が行えるので, その制御方法が重要であり, 装置の信頼性と運転効率を向上する為には, 適切な膨張弁制御方法を決定する事が要求される。この為電子式膨張弁を用いた冷媒流量制御の, 実用的な運転手法を確立しておく事が重要である¹⁴⁾。最初に電子式膨張弁を用いて凍結装置を運転し, 蒸発器の冷却管長, 管径, 曲がり等の抵抗, 及び凍結室の容積を考慮に入れた制御系のスーパーヒート設定値, 比例ゲイン, 制御周期の最適値を実験を繰り返して模索した。本船装置での電子式膨張弁の安定性が確立した後, 従来から使用の温度式膨張弁との冷却の所要時間, 及び安定性を比較した。

設置した電子式膨張弁の主な機能¹⁵⁾ を Table 2 に示した。その主な機能は以下のようになっている。

① h : スーパーヒート測定値

Tei, Teo, 用測温抵抗体入力 2 点の温度差がスーパーヒート測定値であり, 即ち高温側 (蒸発器出口冷媒ガス温度) から低温側 (蒸発器入口冷媒液温度) を引いた値がスーパーヒートの測定値である。

② S : スーパーヒート設定値

過熱度制御系に於いて, 系を満足する為のスーパーヒート測定値の目標とする値が設定値であり, スーパーヒート測定値が設定値と同じになるように膨張弁の開度を調節する。

③ O : バルブ開度

Fig.4 にバルブ開度と制御周期中のバルブの開いている時間の関係を示した。バルブ開度は制御周期 (秒) を 100% とした時, バルブが開いて (ON) している時間を% で表示した値である。Fig.5 には, バルブ開度 (%) とスーパーヒートの関係を示した。スーパーヒートの測定値と設定値が同じ時 (h=S) バルブ開度は 50% になり, スーパーヒートの測定値

$$\text{Valve opening (O) (\%)} = \frac{\text{Valve open time (sec)}}{\text{Control period (sec)}} \times 100$$

$$\text{Control period (t) (sec)} = \text{valve open time (sec)} + \text{valve closed time (sec)}$$

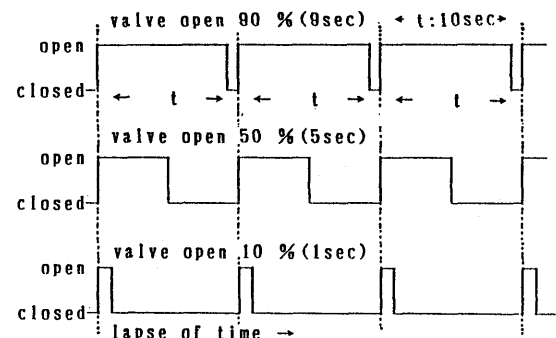


Fig.4. Schematic illustration of 'valve opening' which is the percentage of the time with the valve open in a control period.

Three stages of control period (t), 8, 10, 12sec were adopted in the present experiment, whereas the period can be adjusted up to 99sec.

が設定値より高い場合 (h>S) は, バルブ開度は 50% より大きくなり, 逆に低い時 (h<S) は 50% より小さくなる。

④ t : 制御周期

バルブが開いている時間 (秒) を決定する基となる時間であり, 制御周期 (秒) はバルブが開いている時間 (秒) とバルブが閉じている時間 (秒) を合わせた時間で表される。

⑤ P : 比例ゲイン

コントローラーの感度であり, スーパーヒート測定値が設定値と同じ時 (h=S) は P が大きい程バルブ開度は大きく変化作動する。

⑥ H, L : バルブ開度の最大及び最小値

バルブ開度の最大値は 100 (%) 迄, 最小値は 0 (%) 迄を自由設定でき自動運転モード時は H (%) と L (%) の間でバルブの開度を出力する。

以上はいずれもデジタル表示され, その内スーパーヒート測定値及びバルブ開度の変化量は 0.5 秒毎に表示が更新される。

2. 実験の方法

2.1 電子式膨張弁

蒸発器の過熱度制御系に於いて, Table.2 の制御パラメー

Table 2. Function of Electronic Control Expansion Valve

Function No.	Indicator contents	Unit	Indicator scope
h	Superheat measurement value	°C	-10~+60
S	Superheat setting value	°C	-10~+60
O	Valve opening	%	
P	Proportional gain		0.1~99.9
H	Highest opening value	%	5~100
L	Lowest opening value	%	5~10
t	Control period	Sec	0.1~99.9

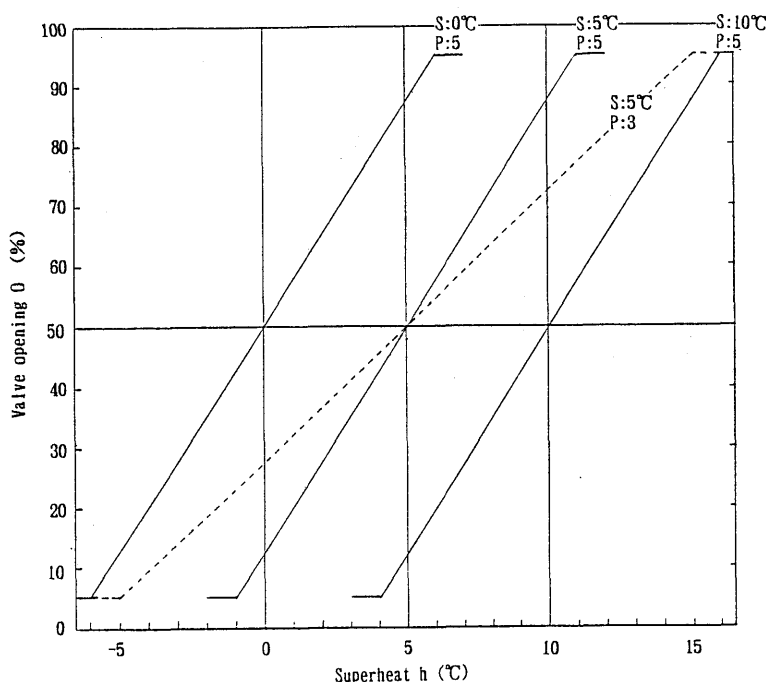


Fig.5. Theoretical lines showing the relationship between the superheat (h) and the expansion valve opening (O) at several combinations of settings of superheat (S) and proportional gain (P). Calculated by the formula : valve opening (O)%=(h-S)P × 1.5 + 50. After Mayekawa Marine Eng.Co., LTD instruction manual.

タ H, L, P, S, t が、冷媒の過熱度制御による冷却の所要時間及び運転の安定性に与える影響について、特に膨張弁前後の低圧部に注目し実験を行った。

まず電子式膨張弁の制御系に於いて、最大及び最小開度を 95%と 5%に設定し、制御パラメータの内の比例ゲイン、制御周期の、二つの設定値を P:5, t:12秒の一定に設定し、更にスーパーヒートの設定値を 0 °C, 5 °C, 10°Cの 3段階に設定変更し冷却実験を行った。その後一定とした二つのパラメータを P:3, t:10秒に変更して一定とし、スーパーヒート設定値を前回と同様 0 °C, 5 °C, 10°Cの 3段階で実験を行った。

P:5 に於けるスーパーヒート設定値を 0 °C, 5 °C, 10°Cに変更した時の各スーパーヒート測定値と、電子式膨張弁の開度の関係を前川製作所の式¹⁵⁾ (1)より求め Fig.5 に示した。

$$\text{Valve opening} = (h-S)P \times 1.5 + 50 \quad \dots\dots\dots(1)$$

又比較の為 S:5°Cの時、P:5 から P:3 に変更した時の関係を同時に点線で示した。Fig.5 ではスーパーヒート設定値を同じ 5°Cに設定した時、スーパーヒートの測定値が +10°Cを記録すれば、P:5 では電子式膨張弁の開度は 87.5 %であるのに対して、P:3 では 72.5 %であることを示している。

2. 2 温度式膨張弁

マグロの急速凍結室(蒸発器)では熱負荷が一定ではなく、常に蒸発器は非定常の運転状態にあるので、温度式膨張弁では運転の諸条件即ち熱負荷の変化に対する蒸発器の応答が問題となる。これらの非定常運転に対しは、装置の効率のみならず、その安全運転の為に蒸発器に流入する冷媒は常に

望ましい状態にある様に流量を制御しなければならない。急速凍結室用蒸発器と温度式膨張弁からなるフィードバック制御系の目的とするところは、蒸発器出口冷媒過熱度を、目標の冷媒流量に対して一定の関係に保つ事にある。温度式膨張弁の冷媒流量が変化したり、或いは蒸発器の熱負荷や蒸発圧力等の外乱が加えられたりすると、制御系は必ず上記の関係が乱れて過渡現象を生ずる。この際に制御系は目標変化や外乱が取り除かれた時に過渡現象も時間の経過と共に、再び元の状態に保たれて、蒸発器出口冷媒過熱度が安定に制御出来る系でなければならない。そこで急速凍結室用蒸発器と温度式膨張弁の結合系に於ける、冷却の所要時間と制御による安定性を実験的に調べた。

実験装置の概要は、電子式膨張弁での装置をそのまま使用し、減圧機構を電子式膨張弁から温度式膨張弁に切替えて行った。電子式膨張弁との対比の為に計測箇所は同一とした。又本船の装置の設計仕様は -55°Cであるが電子式膨張弁の実験と同様に 2 °C低く設定し、冷却に要する時間を計測する為の冷却開始室温を -15°C, 冷却終了後の室温を -57°Cとして実験を行った。

結果及び考察

1. 電子式膨張弁による実験

1. 1 設定値を P:5, t:12秒の一定に設定した実験

実験では凍結室(蒸発器)内を無負荷で室温を -15°Cの一定とし、冷却終了室温を本船の装置の設計仕様温度より更に 2 °C低い -57°Cに定め、完全自動運転で冷却を開始し 2

秒間隔記録のデジタル記録計が最終温度を表示する迄の冷却時間を連続記録計測した。

実験結果を Fig.6(A), (B), (C)に示した。Fig.6(A)の冷却実験では二つのパラメータを P:5, t:12秒に一定設定し、スーパーヒート設定値を10℃で実験したものである。図では冷却当初から冷却終了迄、蒸発器(凍結室)冷却管冷媒入口温度②及び、出口温度③の温度差 Δt のスーパーヒートが+のスーパーヒートを連続して最後まで示し、膨張弁からの冷媒の給液が不足している事を意味している。圧縮機吸入ガス温度⑤も比較的高く、圧縮機の持つ能力を十分に引き出せず能力の余剰が窺える。

Fig.6(B)では P, t, の設定値は前と同様に一定とし、スーパーヒートの設定値を5℃に変更して実験したものである。図から蒸発器(凍結室)冷却管冷媒入口温度②及び、出口温度③のスーパーヒートが、設定値を中心に+-を交互に繰り返しながら凍結室(蒸発器)温度が下がっている事が判る。しかし未だ+のスーパーヒートの領域が多いながらも、やや良好な膨張弁からの冷媒給液状態を示している。

Fig.6(C)でも P, t, の設定値は同一とし、スーパーヒートの設定値を0℃に変更して実験したものである。図から蒸発器(凍結室)冷却管冷媒入り口温度②、出口温度③のスーパーヒートが、設定値を中心に+-を交互に繰り返してはいるが、冷却終了温度近くでは-のスーパーヒートの繰り返し領域が多くなり、これ以上の冷却では未蒸発冷媒液が圧縮機に戻る事によるリキッドバック等の危険が予想される。

以上のことより設定値を P:5, t:12秒の一定とした時の各実験での冷却所要時間は、スーパーヒート設定値10℃の時は6時間52分を要し、5℃の時は5時間30分、0℃の時は5時間10分であった。

1. 2 設定値を P:3, t:10秒の一定に変更した実験

Fig.7(D), (E), (F)に設定値を P:3, t:10秒に変更して一定とし、前回同様スーパーヒート設定値を0℃, 5℃, 10℃の3段階に変更した各冷却実験を示した。

Fig.7(D)はスーパーヒート設定値を10℃で実験したものである。P:3, t:10秒に変更した事に依り極端に冷却所要時間が短くなり、圧縮機の持つ能力を十分に引き出せていることが判るが、蒸発器(凍結室)冷却管冷媒入口温度②出口温度③のスーパーヒートが冷却の当初から終了迄+の領域を示し、まだ膨張弁からの冷媒給液不足が窺える。

Fig.7(E)はスーパーヒートの設定値を5℃に変更した実験を示す。図からは蒸発器(凍結室)冷却管冷媒出入口③②のスーパーヒートが+-を交互に繰り返しながら凍結室温が下がる様子が判る。圧縮機の吸入ガス温度も約+3℃迄下がってきたが最後まで一定で安定し、圧縮機の持つ能力を安定した状態で十分に引き出している事が判る。

Fig.7(F)はスーパーヒート設定値を0℃に設定がえした記録で、冷却の前半はスーパーヒートが+-を繰り返しているが、それ以降は-のスーパーヒートが連続し、予定の冷却終了温度の直前に圧縮機吸入ガス温度が異常低下し、圧縮機へ

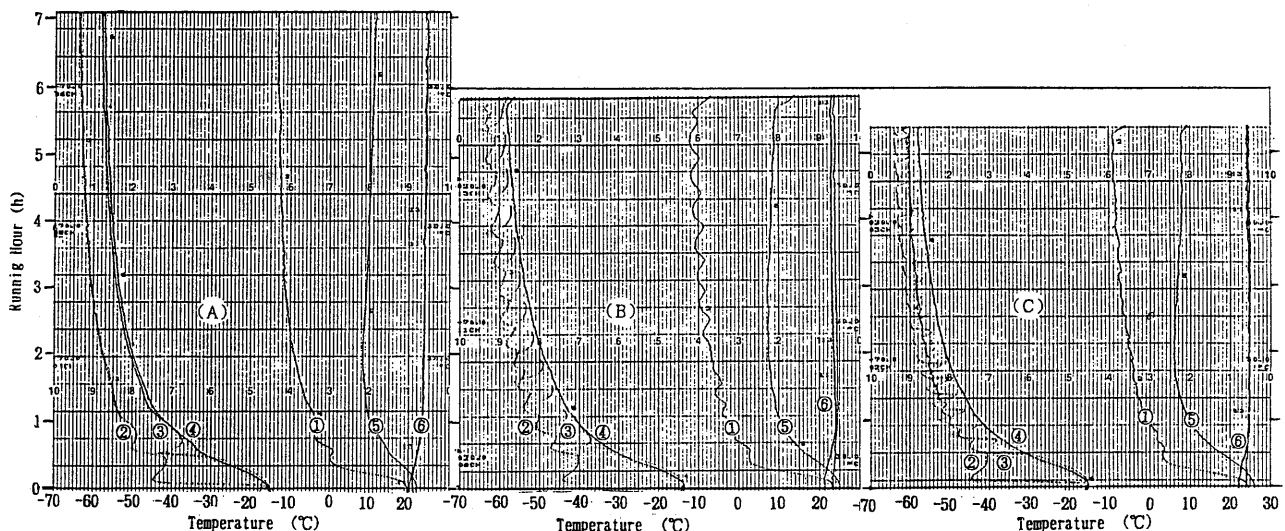


Fig.6. Temperature records with the lapse of running time at various parts of the freezing system when a proportional gain (P) and control period (t, sec) were fixed at 5 and 12, respectively. The experiments were carried out at three stages of the superheat setting (S, °C), 10(A) 5 (B), and 0 (C).

- ①Temperature at outlet of liquid cooler
 - ②Temperature at inlet of evaporator cooler tube
 - ③Temperature at outlet of evaporator cooler tube
 - ④Temperature of quick freezer
 - ⑤Suction gas temperature of compressor
 - ⑥Temperature at inlet of liquid cooler(Temperature at outlet of receiver)
- Additional line close to line ⑥ shows the temperature in the condenser.

の未蒸発冷媒液の戻りを示した。手動操作を加え運転を継続したが、再度リックドバックを起こし膨張弁よりの冷媒給液過多が判然とし、運転を継続する事が出来なくなった。

これらの実験より、設定値を P:3, t:10秒に一定とした時の冷却の所要時間は、スーパーヒート設定値10℃の時は3時間47分を要し、5℃の時は3時間28分であった。スーパーヒート設定値0℃の時は、10℃, 5℃の時よりも温度の下がり方が遅く、そのうえ -55℃以下の継続冷却では冷凍機の運転に安定さを欠き、このパラメータの組み合わせは不相当である事が判った。

1.3 設定値を S:5, t:8一定に変更しての実験

前回の実験で、設定値を P:3, t:10秒に変更した事により、冷却の所要時間が極端に短縮出来たが、冷却時間の短縮は比例ゲインを変更した事によるのか、制御周期を変更したからか判然としない為、今度はスーパーヒート設定値を5℃に、制御周期を、更に短い8秒に変更して一定とし、比例ゲイン3と5の場合ついて実験を行った。実験の結果を Fig.8(G), (J)に示した。Fig.8(G)では冷却所要時間の一番短かった Fig.7(E)より反対に17分間長くなり Fig.8(J)は更に57分間長く要する事となった。

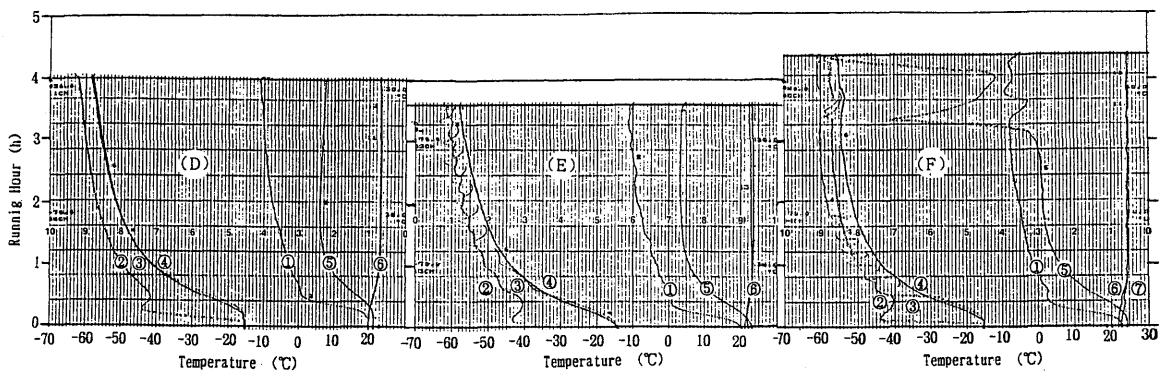


Fig.7. Temperature records with the lapse of running time at various parts of the freezing system when a proportional gain (P) and control period (t, sec) were fixed at 3 and 10, respectively. The experiments were carried out at three stages of the superheat setting (S, °C), 10(D) 5 (E), and 0 (F). ①~⑥the same as in Fig.6. Additional line close to line ⑥ shows the temperature in the condenser.

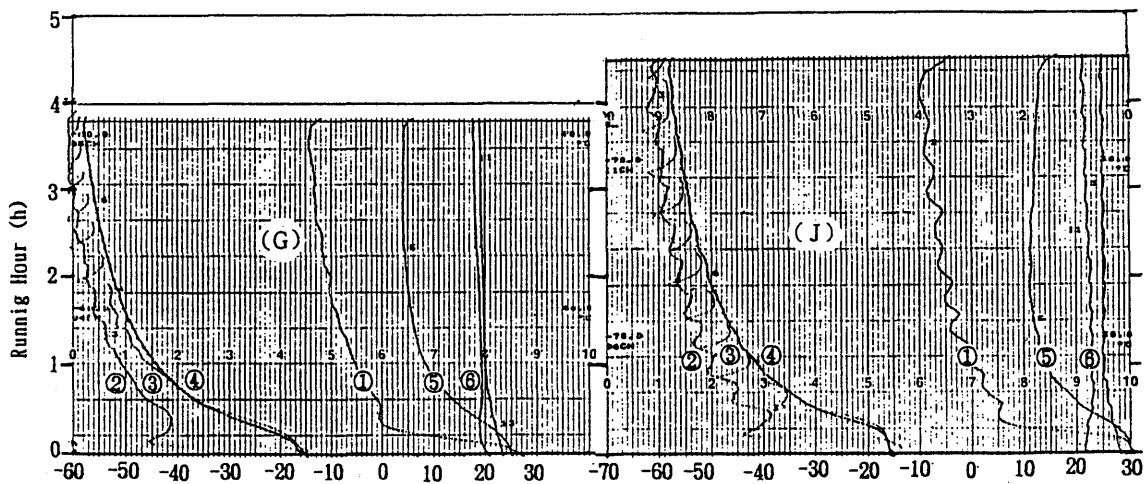


Fig.8. Temperature records with the lapse of running time at various parts of the freezing system when a superheat establish value (S, °C) and control period (t, sec) were fixed at 5 and 8, respectively. The experiments were carried out at two stages of the proportional gain (P), 3 (G), and 5 (J). ①~⑥the same as in Fig.6. Additional line close to line ⑥ shows the temperature in the condenser.

Fig.5 より, 比例ゲインを5から感度を下げ緩やかな制御の3に変更しても, スーパーヒート設定値を同じ5℃とした時は, 測定値が5℃を示せば1時間にバルブの開く時間は, どちらも30分間で冷媒給液量は同じである。しかし制御周期を12秒から10秒に変えることにより, 1時間にバルブの開閉する回数は300回に対し360回と60回も多くなる。同じ給液量でも給液波として冷却管の中に脈動を与える回数が多く, 冷却管内の給液波の伝播により凍結室からの熱伝達が良くなり, 凍結室温の下がり方が良くなったと考えられる。この事より制御周期が大きく影響している事が判った。

Fig.6, 7, 8 の制御パラメータの組み合わせで, 冷却所要時間が一番短いのは, Fig.7(E)の, 設定値がS:5℃, P:3, t:10秒の組み合わせである事が判った。

実験を通して冷却温度範囲が -15℃~-57℃までの冷却で冷却所要時間を短縮するには, 比例ゲインは, スーパーヒートの測定値により給液時間(量)を変えるが, 感度の鈍い緩やかな制御の比例ゲインの方が適当であった。

制御周期は, 比例ゲインによる給液時間(量)との関係から, 同じ給液量ならば回数の多い方が冷却の効果は大きく, 制御周期の変更による給液回数が大きく影響した。

スーパーヒート設定値も0℃を限界として+5℃迄が適当である事が判った。

マグロの操業時に, 連日豊漁が続くような時, 冷凍負荷に追われながら一定時間内で緩慢凍結をなるべく避け完全に近い凍結製品を作る為には, 電子式膨張弁に於いては, スーパー

ヒート設定値を下げ過ぎると, 圧縮機へのリキッドバックを引き起こす。その結果リキッドバック回避の為の処置時間, 及び処置している時間中の凍結室温の上昇, 処置後の膨張弁からの冷媒給液が定常流に至る迄の時間等は損失時間となり, マグロの中心温度を, 完全な製品の温度に近づける事の妨げとなる。これらのマグロは他の製品の信用を落とす事になると共に, 一定温度保冷貯蔵の為の舱内温度の上昇をも招く。リキッドバックは実験結果より電子式膨張弁では予期する事が出来る。又回避する事が可能であり, マグロの中心温度を少しでも速く下げる事の一助になる。

本船装置の蒸発器(凍結室)には, 最大開度 95%, 最小開度 5%, 比例ゲイン 3, 制御周期10秒, スーパーヒート設定値 5℃, が最適である事が判った。

2. 温度式膨張弁による実験

温度式膨張弁による冷却実験を Fig.9 の (K), (L)に示した。Fig.9(K)の実験では冷却の初期から約2時間は蒸発器出口冷媒ガス温度③が凍結室温④と同じ様に推移し過熱度の過大な期間が長く, 冷媒の供給不足をきたしている。膨張弁からの冷媒流量も膨張弁の調整値の最大量を送液している事が判る。しかしその後は冷却管内が冷媒で満たされ, 蒸発器出口冷媒ガス温度③が蒸発器入口冷媒液温度②より下がり過熱度が-となる。凍結室温度は, 過熱度が+に転ずる事なく-の状態が更に2時間続きながら降下している。このような状態を冷媒の寝込みと言¹⁵⁾い, (以下寝込みと言う)寝込み状態

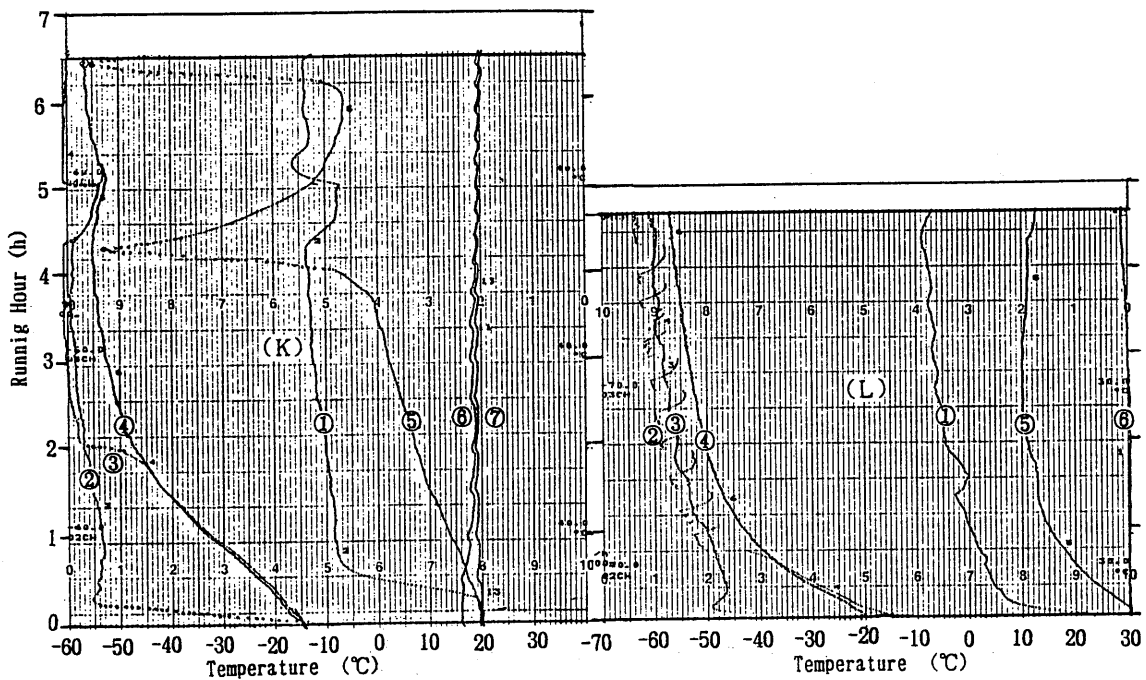


Fig.9. The thermally controlled freezing system.
①~⑥the same as in Fig.6.
Additional line close to line ⑥ shows the temperature in the condenser.

から凍結室の冷却終了温度直前に、膨張弁からの冷媒送液と過熱度のバランスが崩れ、未蒸発液が圧縮機に達し、吸入ガス温度の異常低下によるリキッドバックの現象を呈した。このような不安定状態は毎回の冷却で発生するとは限らず、種々の条件が重なり時として発生する。そこで未蒸発液を送液している膨張弁を経験値を加味して若干調整し、リキッドバック回避の改善を計り運転を継続した。その結果冷却の所要時間は6時間30分となった。

不安定状態を解消する為、更に適正な過熱度を模索して温度式膨張弁による冷却実験を繰り返し Fig.9(L)のような結果を得た。(L)では寝込みを起こす事なく、圧縮機の吸入ガス温度も+10℃前後で安定し、冷却の所要時間は4時間35分となった。

このように温度式膨張弁では、時として過熱度が一の状態が続く冷媒が寝込みを起こす。この期間は過熱度は一定し安定状態にあるかに思われるが、凍結室の冷却温度降下は緩慢である。本実験では負荷一定の定常運転であるが、このような冷媒の寝込み状態では、負荷に依る外乱があれば圧縮機への未蒸発冷媒液の戻りによるリキッドバックは避けられず危険な状態である。また温度式膨張弁では温度を下げる事を急ぐあまり、膨張弁の過熱度設定値を小さくし過ぎると(流量調整を大きくし過ぎると)蒸発器内の冷媒状態量が周期的に変動する自励振動的な、いわゆるハンティング現象が発生する事がある¹⁶⁾。即ち感温筒等機械的な遅れを伴う為、ハンティングが大きくなり、蒸発器出口冷媒過熱度が設定値を越えると冷媒流量は増加するが、一時的に蒸発器出口過熱度がより大きくなる。過熱度が設定値に近づく頃は冷媒流量は過熱度の大きい時のものであり、この為については蒸発器出口過熱度は設定値以下となり実験結果のように圧縮機への未蒸発冷媒液の戻りの危険と、装置の効率の低下等の不安定状態を招き逆効果となる。設定値が大き過ぎると安定はするが、実験での冷却の初期のような過熱度の過大な期間が長く続き冷却の所要時間は長くなる。

陸上等で冷却時間に余裕がある時は、さほど問題で無い事でも、洋上での操業で連日良質のマグロ製品を生産する目的のある冷却と、時として何日間も続く豊漁と言う過大負荷に追われながらの冷却で、装置の効率低下による冷却時間のロスは大なる事である。

これ迄の実験より温度式膨張弁による冷却では、マグロの保冷船のような防熱からの進入熱のみの、負荷が一定である定常運転の目的では有効であるが、急速凍結室のような冷却の、温度範囲が広く負荷変動の大きい目的には不利である。

一日の操業を終え急速凍結室へのマグロの入庫が完了し、熱負荷が大きく過熱度の大きな期間が長く続くと予想される時は追従が伴わない。従って経験値を加味し手動膨張弁を併用しながら冷媒不足を補い、負荷熱量が少なくなり過熱度が安定した頃、温度式膨張弁の自動運転に頼る。いずれにしても取扱者は、いかにしたらマグロの中心温度を早く下げることが出来るか、監視を怠る事は出来ない。

これらの事より温度式膨張弁の不安定の原因は熱負荷の変動が大きく冷却の温度範囲が広い事にあり、このような目的

には機械的比例ゲインと蒸発器の機械的な応答遅れを伴う温度式膨張弁では、十分な追従が出来ないことがある。また制御設定値の調整装置が無い為、適正過熱度の調整に時間を要する。

以上の結果より電子式膨張弁では、その蒸発器に合ったパラメータを選ぶ事により冷却の所要時間を短縮出来、又運転の安定性も向上する事が出来た。本船の凍結室の蒸発器には H:95% L:5% S:5℃ P:3 t:10秒が適当であり冷却の所要時間は3時間28分であった。従来迄使用の温度式膨張弁では、冷却の所要時間は4時間35分であった。また冷却運転の安定性も、不安定状態が毎回発生するとは限らないが、電子式膨張弁に比し安定性を欠き、その時の操作が煩雑で取扱者の習熟を必要とする。

要 約

本船の冷凍サイクルの減圧機構に、従来迄の温度式膨張弁を用いた場合と電子式膨張弁を用いた場合の蒸発器の冷媒加熱度制御系に於いて、制御対象である蒸発器からの応答特性の差異が冷却の所要時間及び装置の安定性に及ぼす影響について、次のような結果を得た。

- 1) 本船装置の蒸発器の応答特性と、付加した電子式膨張弁の制御パラメータとの関係は H:95%, L:5%, P:3, S:5℃, t:10秒が、冷却所要時間の短縮には最適であり圧縮機の持つ能力を十分に引き出せたと言える。
- 2) 温度式膨張弁による冷却実験での冷却所要時間は4時間35分であったのに比べ、電子式膨張弁では3時間28分であった。従来の温度式膨張弁によるマグロの製品作りには、実験結果でも冷却所要時間の差異が歴然としたように、判別はし難いものの品質の良し悪しの差が出るものと思われる。
- 3) 凍結室(蒸発器)に、生のマグロを繰り返し入れる作業に伴う、外気の進入外乱等、急激な負荷変動に対する冷凍装置の安定性は、電子式膨張弁では上記制御パラメータの組み合わせで、十分な信頼性を得るものである事が判り、温度式膨張弁では蒸発器の応答に十分な追従が出来ない事もあり、マグロの品質の向上を計るには取扱者の十分な習熟が必要である。
- 4) 本船の装置のような、温度範囲の広い制御を必要とする目的の凍結装置では、従来迄の温度式膨張弁は、感温筒等の膨張弁の機構により、冷媒の蒸発器内輸送遅れを伴い蒸発器の冷媒制御が満足し難い。電子式膨張弁では電気信号により全開から全閉を任意に開度設定が行えるので幅広い追従性、応答性及び遠隔制御が可能となる。今後は電子式膨張弁の利用価値の向上、普及は更に進展するものと考えられる。

以上の事より、本報の目的であった冷凍サイクルを構成する圧縮機、蒸発器、凝縮機などの構成機器の主要目を変更する事なく、減圧機構の膨張弁のみを、従来迄の温度式膨張弁から電子式膨張弁に換装することにより、圧縮機の持つ能力を十分に引き出す事が出来た。また冷却所要時間の短縮、及び蒸発器の冷媒流量制御に伴う装置の安定性の向上、更に高

信頼度が達成出来, 今まで経験を要するとされた冷凍機の運転取扱面でも簡便さを感じ, その結果省力化, 省人化につながる事が判った。又減圧機構の小さな膨張弁のみを取り替え, 別個にスーパーヒートコントローラーを据え付けるだけの小スペースと, 減圧機構取り替え費用も僅かである事より目的は達せられたと言える。

業界に於いても, その船の既存の冷凍装置の減圧機構のみを取り替える事により, 今まで以上に魚製品の品質の向上が計られ魚価にも反映出来ると思われる。

謝 辞

終わりに臨み, 本研究の長期に亘, 数次の実験に協力を頂いた長崎丸機関部の各位, および資料を快く提供して頂き助言を頂いた, (株)前川製作所 久慈武氏に謝意を表します。

引用文献

- 1) 田中和夫: 赤い冷凍まぐろを作ろう, 三崎船長航海士協会, 神奈川県三浦市, 「航跡」誌(139), (1968).
- 2) 田中和夫: マグロの冷蔵・冷凍技術 (東京水産大学第7回公開講座編集委員会編) マグロその生産から消費まで, 成山堂, 東京, PP.217-247, (1989).
- 3) 大森 徹: マグロと共に四半世紀, 成山堂, 東京, PP.229-242, (1993).
- 4) 中井 昭: マグロの消費と流通, (東京水産大学第7回公開講座編集委員会編) マグロその生産から消費まで, 成山堂, 東京, PP.248-276, (1989).
- 5) 田中和夫: 保管温度の低温化に伴う消費動力の増加, “冷凍水産物の流通技術” 食品冷凍技術普及講習会テキスト, 日本冷凍協会, 東京, PP.59-72, (1982).
- 6) 尾藤方通: 冷凍マグロ肉の肉食保持に関する研究, 東海水研報 (84), 27-89 (1975).
- 7) 田中和夫, 小嶋秩夫共著: 食品冷凍工学, 恒星社厚生閣, 東京, PP.264-384, (1991).
- 8) 樋口金次郎, 早野 誠: 温度膨張弁の動特性第1報解析的研究・第2報実験的研究, 日本冷凍協会誌 冷凍, 55, 859-874, (1980).
- 9) 冷凍用自動制御機器: 日本冷凍協会, 東京, PP.1-39, (1985).
- 10) 坂野和雄: 膨張弁 (温度式・電子式), 日本冷凍協会誌 冷凍, 70, 32-38, (1995).
- 11) 樋口金次郎: 電子膨張弁と電子制御, 日本冷凍協会誌 冷凍, 61, 223-230, (1986).
- 12) 安田 弘, 石羽根久平, 中山 進: 電子膨張弁による蒸発器加熱度制御, 日本冷凍協会論文集, 9, 147-156, (1992).
- 13) 半澤良一: 産業用電子式膨張弁の実施例, 日本冷凍協会誌 冷凍, 61, 270-273, (1986).
- 14) 安田 弘, 福島敏彦: 冷凍サイクル冷媒制御法の研究, 日本冷凍協会学術講演会講演論文集, 41-44, (1984).
- 15) 前川製作所レフトロ株式会社: スーパーヒートコントローラー取扱説明書, 前川製作所, 東京, (1992).
- 16) 樋口金次郎: 温度膨張弁-蒸発器の冷媒制御回路の安定性, 日本冷凍協会誌 冷凍, 59, 359-370, (1984).