

# 庫内温度一定冷蔵庫の理論解析

## Analysis of Refrigerator Maintaining Constant Interior Temperature

阿部 順常\* 山本 磐夫\*  
Yoritsune Abe Iwao Yamamoto

### 要 旨

従来の家庭用冷蔵庫は温度調節器の目盛を一定にして置くと、庫内温度が夏は高く、冬は低くなる傾向があり、使用者は季節に応じて温度調節の目盛を操作しなければならなかった。そこで使用者の手間を省き、夏冬に関係なく常に庫内温度が一定となる冷蔵庫を得る目的で、従来蒸発器に取り付けてあった温度調節器の感熱管を庫内に取り付け、また断続運転による庫内温度の変動幅を狭くする目的で感熱管に小容量のヒータを付設し、このヒータに圧縮機が停止中のみ通電するようにした構造の冷蔵庫を開発した。本論文は上記構造の冷蔵庫の冷却性能を理論的に解析したものである。

### 1. 緒 言

従来の冷蔵庫は温度調節器の感熱管を蒸発器表面に取り付け、蒸発器の温度を感知して圧縮機の運転を制御するいわゆる蒸発器温度感知の冷蔵庫であった。このような冷蔵庫では蒸発器温度は一定となるが、外気温度が低いときには庫内温度は低くなり、外気温度が高いときには庫内温度は高くなるという特性を有している。そこで温度調節器の感熱管を庫内に取り付け、直接庫内温度を感知して制御するいわゆる庫内温度感知冷蔵庫とすると、外気温度の変化に対して平均庫内温度は一定となるが、温度調節器の作動幅自体に数度の温度差があるため、それがそのまま庫内温度の変動幅となり、庫内温度の変動が従来の冷蔵庫の変動よりも大きくなる欠陥がある。この欠陥を改良するために庫内温度調節器の感熱管にヒータを付設し、庫内温度調節器がオフしたとき、すなわち圧縮機が停止したときのみヒータを通電する方式を採用すると庫内温度感知方式でも庫内温度の変動が狭く、しかも外気温度の変化に対して一定の庫内温度となる冷蔵庫(図1)を得ることができる。本論文は上記の方式を採用した場合にヒータ容量、放熱特性、熱容量、温度調節器の作

動値などをどのように決めたらよいかを理論的に解析したものである。

### 2. 冷蔵庫の断続性能について

冷蔵庫の庫内温度は30°Cで連続運転を行なうと-6°C程度まで冷却され、このままでは庫内に貯蔵されている食品は凍結する。これを防止するため従来は蒸発器に温度調節器を取り付けて圧縮機の運転停止を行なっていた。しかるにこの方式では温度調節器を一定にセットしておくで蒸発器温度は一定なのであるが、図2のように庫内温度が外気温度により変化してしまう欠点を有している<sup>(1)</sup>。

温度調節器を庫内に設置すればこれらの欠点を取り除くことができるのであるが、単に庫内に置いたのでは図3のように運転停止による庫内温度の変動幅が大きくなり、このことは食品保存上好ましくないこの方式はこれまで採用されていなかった。

しかるに温度調節器の感熱管に小容量(1W以下)のヒータを取り付け、これを圧縮機が停止中のみ通電するようにすれば感熱管温度は図4のように変化する。すなわち感熱管の作動温度を庫内温度よりやや高い温度に設定しておく、圧縮機が停止中はヒータの通電により感熱管は強制的に加熱されて短時間でオン作動し、圧縮機が運転中はヒータに通電されないで感熱管は庫内温度まで冷却されようとして短時間(作動値を庫内温度よりもやや高く設定してい

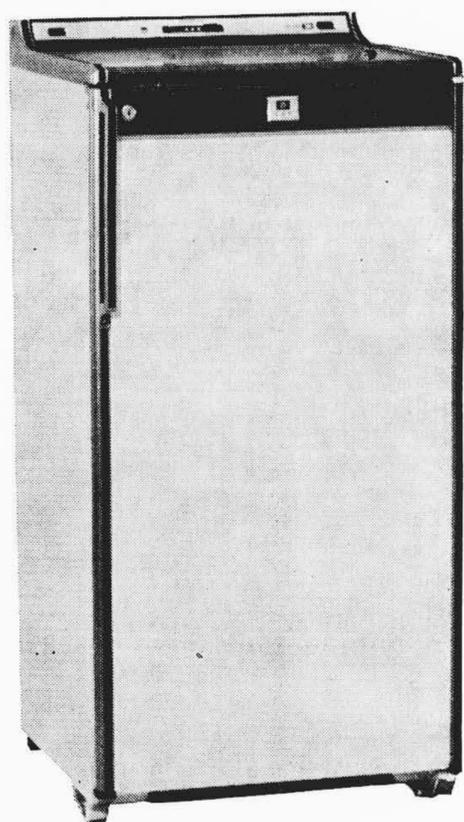


図1 庫内温度一定冷蔵庫の外観

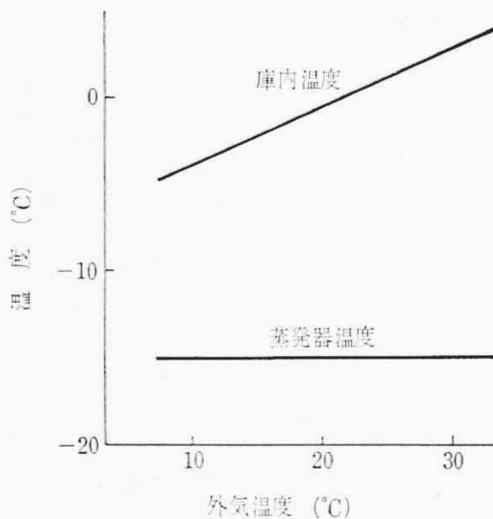


図2 外気温度と庫内温度の関係

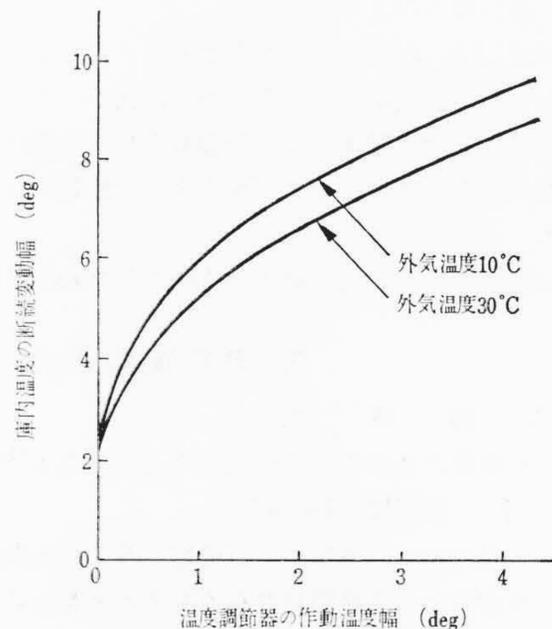


図3 温度調節器の作動温度幅と庫内温度の断続変動幅の関係

\* 日立製作所栃木工場

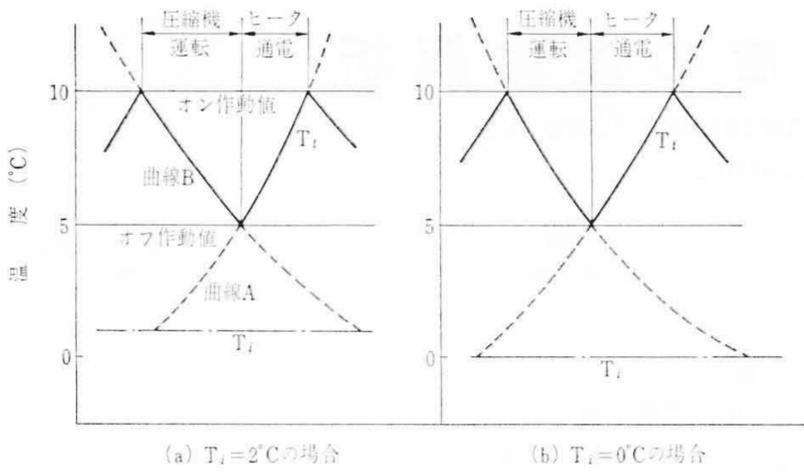


図4 庫内温度  $T_i$  に対する感熱管温度  $T_t$  の加熱冷却変化と運転率の関係

るため)でオフ作動し、ひん繁にオン、オフを繰り返すようになり、庫内温度の断続による変動幅を小さくすることができる。

しかしこの方法を用いると再び庫内温度は外気温度の変化により常に一定とは限らなくなる。

(1) たとえば外気温度が  $30^\circ\text{C}$  のとき図4(a)の状態では冷蔵庫が断続運転されているとすると、感熱管温度  $T_t$  は庫内温度  $T_i$  に対してヒータが通電中は曲線Aのように温度上昇し、ヒータが通電されていないときは曲線Bのように冷却されている。この現象は温度調節器の作動値と庫内温度が決まれば常に一定の形をとり外気温度に関係しない。ところが外気温度が低くなると図4(a)の状態では圧縮機の運転が多すぎて庫内は冷えすぎの状態となり、図4(b)のように庫内温度  $T_i$  は低下してしまう。庫内温度が低下すればこれと温度調節器の作動値との関係も変動し、圧縮機の運転も少なくなり、以上両者の関係が平衡したところで冷蔵庫の運転が行なわれる。すなわち感熱管ヒータを使用した方式では外気温度の変動に応じて庫内温度を若干変化させ、それによって圧縮機の運転率を制御しているので、それ自身では庫内温度を一定にすることはできない。

(2) 冷蔵庫は蒸発器の冷却力と箱の断熱材を通過してくる熱量が平衡したところで運転されるが、箱の断熱材を熱が通過してくる時の温度分布状態を述べると庫内温度と庫内の壁の温度では庫内温度のほうが若干低い。しかもその差は外気温度と庫内温度の差が大きいほうが大きいので庫内の壁に温度調節器の感熱管を取り付けて、ここが一定になるようにすれば庫内温度は外気温度が高いほうがより低くなる。

以上(1)、(2)の作用を組合せることにより、外気温度の変化に対して庫内温度は一定となったり、上がったたり下がったりする。以下断続における図4のような温度変化を計算により求め、外気温度と庫内温度の関係、および庫内温度の断続による変動幅を明らかにする。

以上のようにした冷蔵庫の主要電気配線図は図5のようである。

### 3. 熱平衡関係式

#### (1) 関係式

冷蔵庫の各部の熱平衡は次のようになる<sup>(2)</sup>。

##### (i) 蒸発器の熱平衡

庫内および外気から蒸発器へ浸入する熱量は冷凍サイクルの冷凍能力と蒸発器自身を冷却する熱量との和と熱平衡し、(1)式のように表わされる。

$$K_1(T_i - T_e) + K_3(T_0 - T_e) = Q + C_e \frac{dt_e}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

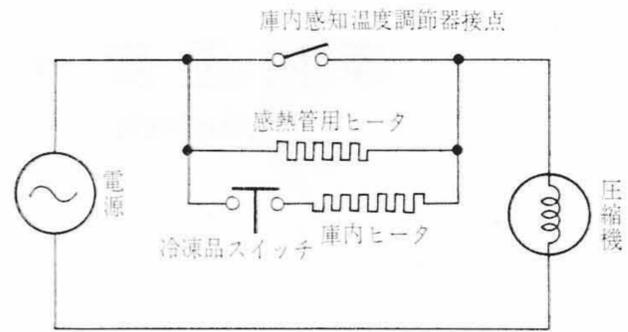


図5 主要配線図

##### (ii) 庫内ヒータの熱平衡

外気、庫内ヒータから庫内へ浸入する熱量と感熱管から感熱管の周囲へ放熱する熱量との和は蒸発器から庫内へ流れる冷却熱量と庫内自身を冷却する熱量との和と熱平衡し、(2)式のように表わされる。

$$K_2(T_0 - T_i) + K_h(T_h - T_i) + K_t(T_t - T_i) = K_1(T_i - T_e) + C_i \frac{dT_i}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

##### (iii) 庫内ヒータの熱平衡

庫内ヒータの入力は庫内ヒータから庫内および外気へ放熱する熱量と、庫内ヒータ自身を加熱する熱量との和と熱平衡し、(3)式のように表わされる。

$$W_h = K_h(T_h - T_i) + K_h'(T_h - T_0) + C_h \frac{dT_h}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

##### (iv) 感熱管の熱平衡

感熱管ヒータの入力は感熱管から感熱管の周囲へ放熱する熱量と感熱管自身を加熱する熱量と熱平衡し、(4)式のように表わされる。

$$W_t = K_t(T_t - T_i) + C_t \frac{dT_t}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

以上の(1)~(4)式における  $Q$ ,  $W_h$ ,  $W_t$  は次のとおりである。圧縮機運転中は

$$\begin{cases} Q = Q_e \\ W_h = 0 \\ W_t = 0 \end{cases}$$

圧縮機停止中は

$$\begin{cases} Q = 0 \\ W_h = W_{h1} \\ W_t = W_{t1} \end{cases}$$

また感熱管周囲の温度は近似的に次の式で表わされる。

$$T_t' = T_i + P_t'(T_0 - T_i) \dots\dots\dots (5)$$

ここに

$$P_t' = \frac{P_t}{1 + \frac{\alpha_i d_a}{\lambda} \cdot \frac{\alpha_i}{\alpha_0}}$$

庫内ヒータの熱貫流係数は次の式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} K_h &= \frac{S_h}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_i}{\lambda}} \\ K_h' &= \frac{S_h}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{d_0}{\lambda}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

さらに  $Q_e$  は(7)式を用いて計算される値である。

$$\begin{aligned}
 G_r &= \frac{V_a}{V} \cdot \eta \\
 \eta &= A - (B + C \cdot P_s) \frac{P_d}{P_s} \\
 Q_c &= G_r (i_3 - i_4) \\
 Q_c &= K_c (T_c - T_0) \\
 Q_e &= G_r (i_6 - i_5) \\
 P_s &= f_1 (T_c + 273.16) \text{ 冷媒によって決まる関数} \\
 P_d &= f_2 (T_c + 273.16) \text{ 冷媒によって決まる関数} \\
 i_4 = i_5 &= f_2 (T_c) \text{ 冷媒によって決まる関数} \\
 V &= f_3 (T_s + 273.16, P_s) \text{ 冷媒によって決まる関数}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

なお、断続性能計算における記号の名称は表1のとおりである。

(2) 計算方法

(i) 初期条件として  $T_e, T_h, T_t$  の値を任意に与え、次式により  $Q, W_h, W_t$  の値を判断する。

(イ)  $T_t \leq T_{off}$  のとき

$$Q=0, W_h=W_{h1}, W_t=W_{t1}$$

(ロ)  $T_t \geq T_{on}$  のとき

$$Q=Q_e, W_h=0, W_t=0$$

(ハ)  $T_{off} < T_t < T_{on}$  のとき

前時点の状態 ((イ) または (ロ)) を継続する。ただし  $T_{on}, T_{off}$  は温度調節器のオン、オフ作動値である。

(ii)  $Q=Q_e$  の場合は上記  $T_t, T_e$  を用いて (7) 式より  $Q_e$  を求める。

(iii) (1)~(4) 式より Runge-Kutta 法により次の時点の  $T_e, T_i, T_h, T_t$  を求める。計算した結果図6のように、各外気温度における蒸発器温度、庫内温度の断続変動状態などが一目でわかる図が得られた。

4. 各構成要素の諸値が冷蔵庫の断続性能に及ぼす影響

前章の結果から蒸発器平均温度、庫内平均温度、庫内断続変動幅を外気温度の関数として整理すると図7のようになる。図7より次のことがわかる。

(1) 庫内ヒータ容量の影響

庫内ヒータを大きくすると蒸発器温度は急速に低下する。一方庫内温度はわずかずつ上昇する傾向がある。

(2) 感熱管の諸量の影響

(i) 感熱管のヒータ容量  $W_{t1}$  の変化

感熱管ヒータ容量を大きくすると庫内温度が冬季に低く夏季に高い冷蔵庫となる。逆にヒータ容量を小さくすると冬季に高く、夏季に低い冷蔵庫となる。すなわち夏季も冬季も一定の庫内温度とするには適当な感熱管ヒータ容量を選ぶ必要がある。またヒータ容量を大きくすると全体的に庫内温度、蒸発器温度ともに低目に調整されるようになり、庫内温度の断続変動幅が狭くなる。

(ii) 感熱管の放熱係数の変化

感熱管の熱発散を良くして放熱係数を大きくすると庫内温度は冬季に高く、夏季に低くなる。またこの場合庫内温度はだんだん高目に調整されるが、庫内温度の断続変動幅には大きな影響を与えない。

(iii) 感熱管の熱容量の変化

感熱管の熱容量を小さくすると庫内平均温度はあまり影響を受けず、庫内温度の断続変動幅のみ狭くなる。

(3) 温度調節器の作動値の影響

(i) 温度調節器の作動平均値の変化

表1 断続性能計算における記号の名称

記号	名称	単位
$K_1$	蒸発器と庫内間の熱貫流係数	kcal/h°C
$K_2$	庫内側の箱の熱漏えい係数	kcal/h°C
$K_3$	蒸発器側の箱の熱漏えい係数	kcal/h°C
$K_c$	凝縮器の放熱係数	kcal/h°C
$K_t$	感熱管の放熱係数	kcal/h°C
$K_h$	庫内ヒータと庫内間の熱貫流係数	kcal/h°C
$K_h'$	庫内ヒータと外気間の熱貫流係数	kcal/h°C
$C_e$	蒸発器部分の熱容量	kcal/°C
$C_i$	庫内部分の熱容量	kcal/°C
$C_h$	庫内ヒータ部分の熱容量	kcal/°C
$C_t$	感熱管部分の熱容量	kcal/°C
$T_{on}$	温度調節器のオン作動値	°C
$T_{off}$	温度調節器のオフ作動値	°C
$W_{h1}$	庫内ヒータの容量	kcal/h
$W_{t1}$	感熱管ヒータの容量	kcal/h
$S_h$	庫内ヒータの放熱面積	m <sup>2</sup>
$V_a$	圧縮機の理論押除量	m <sup>3</sup> /h
A, B, C	圧縮機によって決まる常数	
$\alpha_1$	内箱表面の熱伝達率	kcal/m <sup>2</sup> h°C
$\alpha_0$	外箱表面の熱伝達率	kcal/m <sup>2</sup> h°C
$\lambda$	断熱材の熱伝導率	kcal/mh°C
$d_i$	庫内ヒータと内箱間の断熱材の厚さ	m
$d_0$	庫内ヒータと外箱間の断熱材の厚さ	m
$d_a$	内箱と外箱間の断熱材の厚さ	m
$T_i$	庫内温度	°C
$T_e$	蒸発器温度	°C
$T_o$	外気温度	°C
$T_h$	庫内ヒータ温度	°C
$T_t$	感熱管温度	°C
$T_t'$	感熱管周囲の温度	°C
$T_c$	凝縮器温度	°C
$Q_e$	冷凍サイクルの冷凍能力	kcal/h
$Q_c$	凝縮器の放熱すべき熱量	kcal/h
$Q$	ある時点での冷凍サイクルの冷凍能力	kcal/h
$G_r$	冷媒循環量	kg/h
$v$	吸込ガス冷媒の比体積	m <sup>3</sup> /kg
$\eta$	圧縮機の容積効率	
$W_h$	ある時点での庫内ヒータの入力	kcal/h
$W_t$	ある時点での感熱管ヒータの入力	kcal/h
$P_t$	影響度係数 (内壁温度の影響度)	
$P_t'$	外気温度の感熱管周囲温度に対する影響度	
$P_s$	圧縮機の吸込圧力	kg/cm <sup>2</sup>
$P_d$	圧縮機の吐出圧力	kg/cm <sup>2</sup>
$i_4$	凝縮器出口の冷媒のエンタルピ	kcal/kg
$i_5$	蒸発器入口の冷媒のエンタルピ	kcal/kg

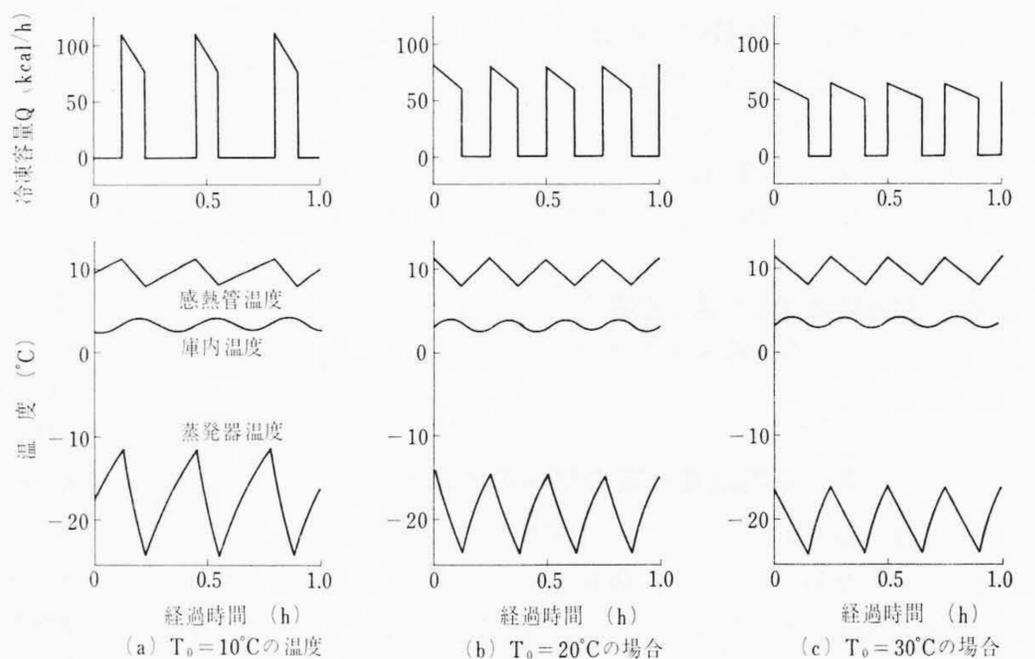


図6 断続性能の計算結果 ( $T_0$ : 外気温度)

オン作動値とオフ作動値の幅を一定にしたまま、平均作動値を上下させると庫内平均温度が作動値のずれ分だけ上下するが、庫内温度の断続変動幅には大きな変化はない。

(ii) 温度調節器の作動幅の変化

作動平均値は同じにしてオン、オフの幅を変えると、庫内平

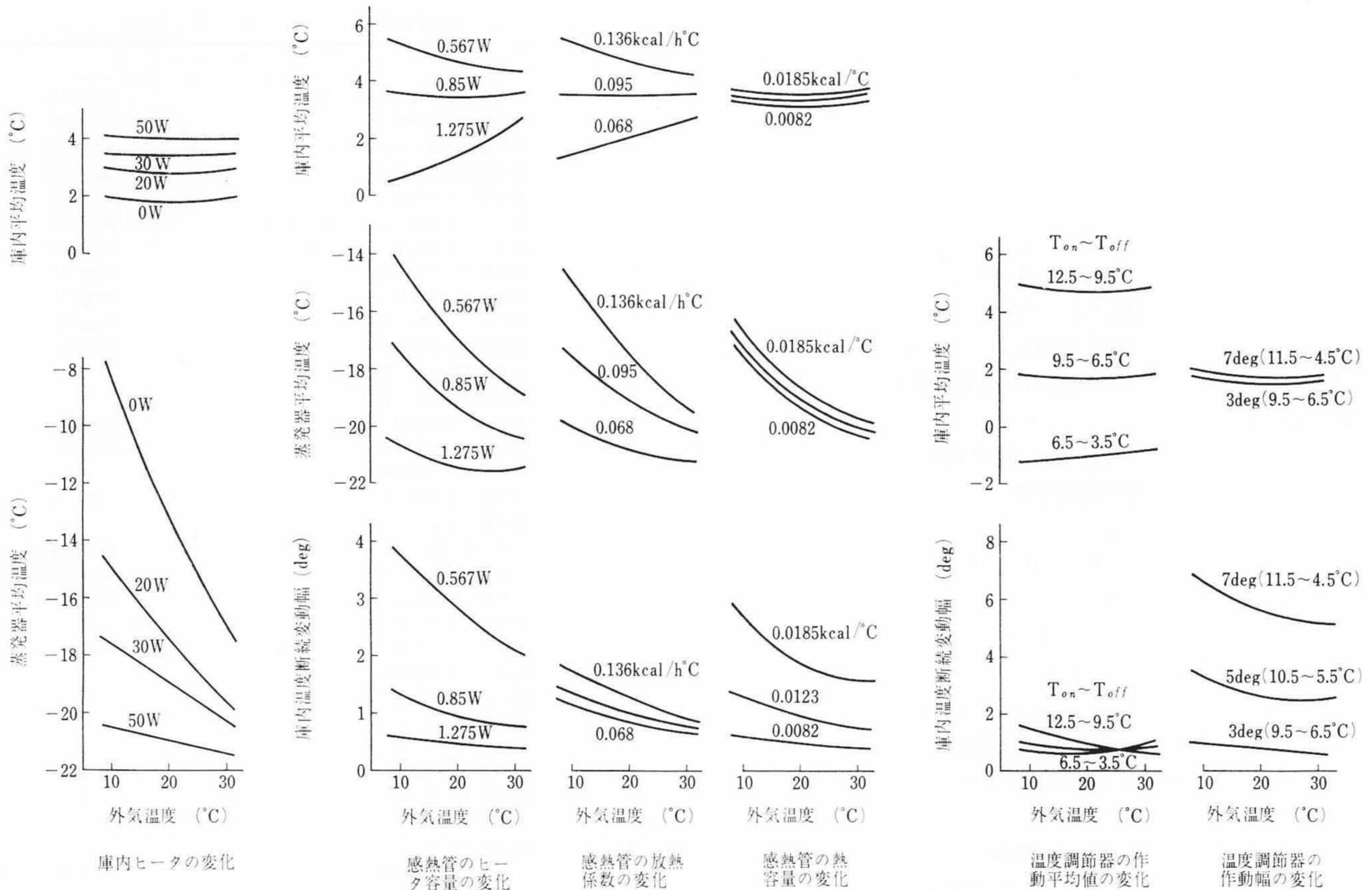


図7 各構成要素の諸値の冷蔵庫の断続性能に及ぼす影響

均温度はほとんど変化せず、庫内温度の断続変動幅が大きく変化する。特に作動幅が5degを越すと庫内温度幅も4deg以上となるので、温度調節器の作動幅を5deg以下にする必要がある。

(4) 庫内あるいは蒸発器内にある食品の影響

計算の結果、平均庫内温度、蒸発器温度には影響がなく、庫内温度の断続変動幅のみ狭くなり、食品の無い状態に比べて良好な性能となる。

(5) 電源の影響

(i) 周波数の変化

電源周波数が50Hzと60Hzの比較では60Hzのほうが庫内温度がやや低目(0.3~0.4deg)に調整される。庫内温度の断続変動幅はほぼ同じである。

(ii) 電圧の変動

電源電圧を±10%変動させても庫内温度は±1deg程度しか変動しない。

(6) 量産時のばらつきの影響

量産における各冷蔵庫間の庫内温度のばらつきは約±1deg程度である。

5. 庫内温度一定冷蔵庫の試験結果

以上の計算結果をもとにして庫内温度一定冷蔵庫を製作し、その性能を試験したが、その結果は図8の×印で示すとおりであった。計算結果は図8の実線のごとくで、外気温度が変化しても庫内温度が常に一定であり計算値どおりの優秀な冷蔵庫が得られた。

6. 結 言

外気温度変化に対して常に庫内温度が一定となる冷蔵庫として、庫内温度調節器の感熱管を庫内に設置し、これに小容量のヒータを付設し圧縮機の停止時のみこれに通電するようにした構造を採用し、この冷蔵庫の冷却性能の理論解析を行なった。その結果を要約

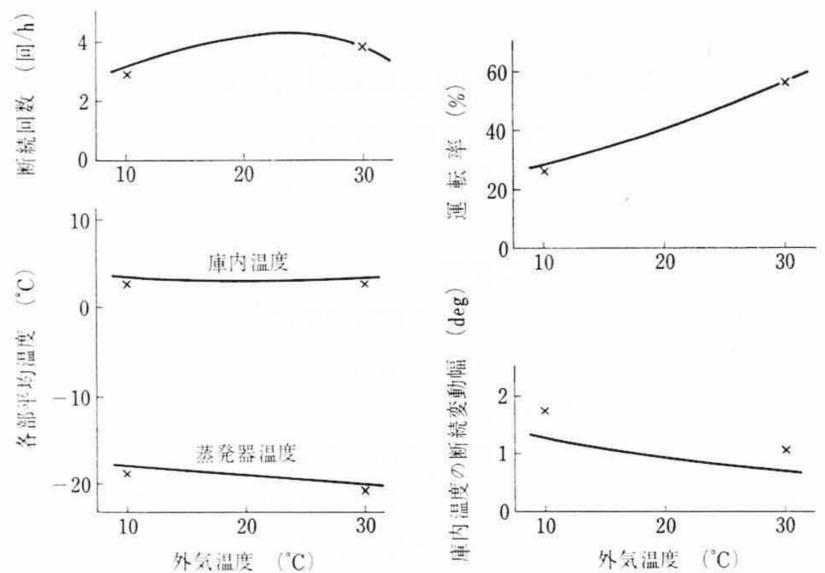


図8 庫内温度一定冷蔵庫の試験結果

すると、

- (1) 各部品の特値から本方式の冷蔵庫の断続性能を計算する方式を確立した。
- (2) 庫内の外気温度特性や断続変動幅は温度調節器の熱容量、放熱特性ならびに感熱管ヒータの入力、熱容量が複雑に組み合わせられて決まるので、外気温度変化にかかわらず庫内温度を常に一定にするためにはこれらの要素を適正に組合せることが必要である。すなわち断続変動幅の少ない、外気温度による変動のない冷蔵庫を得るためには温度調節器の熱容量を小さくし、放熱特性を大きくしてヒータの容量をそれに見合うものに決めなければならないことがわかった。
- (3) 以上の結果をもとにして庫内温度一定冷蔵庫を製作し、試験した結果、計算値どおりの優秀な冷蔵庫が得られた。

参 考 文 献

(1) 鈴木, 藤沼: 日立評論 48, 951 (昭41-8)  
 (2) 藤橋, 藤沼, 石川: 日立評論 49, 740 (昭42-7)