

# 自動車用ポータブル電子冷蔵庫

Portable Thermoelectric Refrigerator for Use in Automobiles

細田 泰生 佐藤 彰也 松居 潔史\*  
Yasuo Hosoda Akiya Satô Kiyoshi Matsui

## 内 容 梗 概

電子冷凍応用製品は恒温槽、スポットクーラなどの理化学用製品にはすでに実用化されているが、熱電素子材料が高価であるため家庭用製品においては圧縮式冷凍機と競合できないといわれている。

筆者らは家庭用製品の実用化を図るために原価に占める割合の最も大きい熱電素子の小形化、および熱電素子の使用量と性能に最も関係のある熱交換器の検討を行ない、安価な電子冷却器を開発した。

これを乗用車内で使用する内容積 10l のポータブル形冷蔵庫に適用して、電子冷凍の小形、軽量で可動部分がないなどの特長を十分に生かした新しいデザインにまとめ、また価格的にも圧縮機使用のものと同等の製品を開発することができた。

## 1. 緒 言

電子冷凍は *p* 形, *n* 形の二種類の熱電素子を第 1 図に示すように銅やアルミニウムなどの金属電極で  $\pi$  形に接続し、そこに直流電流を流すと一方の電極側で吸熱現象を生じ、ほかの電極側で発熱現象を生ずるペルチエ効果を用いたものである。

電子冷凍の特長は

- (1) 機械的な運動部分がなく、したがって振動や騒音を発生しない。
- (2) 冷媒配管の必要がなく、構造が簡単で小形にできる。
- (3) 冷凍容量あるいは加熱容量は熱電素子の対数(ついで)を変えただけでよく、また同一装置でも電流の大きさを変えるだけで連続的に変えられる。
- (4) 圧縮式冷凍方式では小容量の装置を作ろうとすると冷凍容量あたりのコストが高くなるが、電子冷凍ではそのようなことがないので小容量装置には特に有利である。
- (5) 冷却加熱が電流方向の切換だけで済むので、冷凍機と電熱器を併用しなくともよい。
- (6) 傾斜や振動があるところでも性能が変わらない。

これらの特長をもちながら今日まで理化学装置などの特殊な応用範囲以外に製品化されなかったのは、

- (1) 熱電素子材料の性能が十分でなく、圧縮式冷凍機に比べて効率が低い。
- (2) 熱電材料が高価である。
- (3) 熱電素子対の機械的強度が低く熱ひずみなどにより破損しやすく、寿命が短い。

などの理由によるものであった。

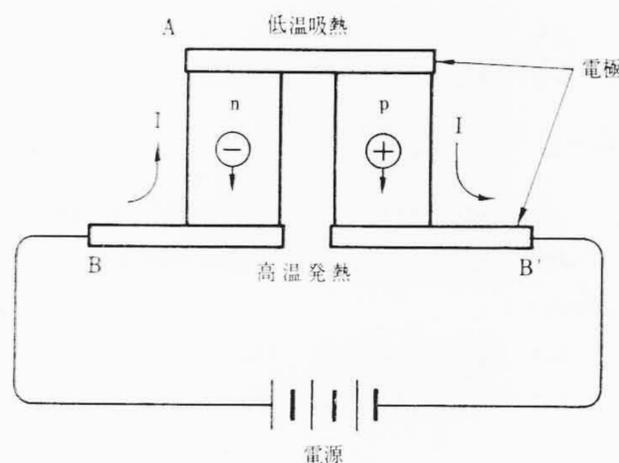
これらの欠点のうち (1) はいまだ解決されていない問題であるが、(2) は熱電材料ならびに熱電素子対の製造方法の合理化により、また (3) は熱電素子部の構造の改良により解決されつつある。

自動車用ポータブル冷蔵庫として要求されるおもな条件としては

- (1) 小形軽量でしかも内容積が十分あること。
- (2) 操作、取扱いが簡単であること。
- (3) 電源が直流でしかも消費電力が小さいこと。

などがある。これを圧縮機冷凍方式で考えると冷凍容量に比例して装置を小形にすることは困難であり、また電源が直流であるために特別のインバータが必要である。これに対し電子冷凍方式は小形製品に適しているうえに直流電源をそのまま使用できるので、自動車用には電子冷凍を利用したほうが有利である。

\* 日立製作所栃木工場



第 1 図 電子冷凍の原理図

これらのことを考慮して開発したポータブル電子冷蔵庫は内容積 10l で、主として乗用車内で自動車のバッテリーを電源にし、シガレットライター用コンセントを介して運転するものである。

その外観はスーツケースタイプであり、放熱器は自然空冷形で騒音はまったくない。このようにポータブル電子冷蔵庫で自然空冷を採用したものはほかにその例をみないものである。

## 2. 熱電素子の理論的検討

### 2.1 理論式

熱電素子対は *p* 形半導体と *n* 形半導体を銅あるいはアルミニウムなどの金属板でできた電極で第 1 図のように  $\pi$  形に接続してつくる。

いま図に示す方向に電流を流すと A の電極は低温になって吸熱し、B, B' の電極は高温になって放熱する。このように電流を流したとき吸熱あるいは発熱する現象をペルチエ効果と呼ぶ。

ペルチエ効果によって生ずる吸熱量  $Q_{pc}$ 、および発熱量  $Q_{ph}$  は (1), (2) 式で表わされる。

$$Q_{pc} = \pi_c I = \alpha_{pn} T_c I = (\alpha_p - \alpha_n) T_c I \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_{ph} = \pi_h I = \alpha_{pn} T_h I = (\alpha_p - \alpha_n) T_h I \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $Q_{pc}$ : ペルチエ効果による吸熱量 (W)

$Q_{ph}$ : ペルチエ効果による発熱量 (W)

$\pi$ : ペルチエ定数 (V)

$I$ : 電 流 (A)

$\alpha$ : 熱起電力 (V/deg)

$p, n$ : *p* 形素子, *n* 形素子を表わす添字

$T$ : 素子と電極の接点の絶対温度 (°K)

$c, h$ : 低温接点, 高温接点の添字

電流を流すとこのペルチエ効果によって生ずる吸熱量のほかに熱

電素子内部に発生するジュール熱がある。ジュール熱は冷凍効果を減少し、放熱量を増やす。また熱電素子両端に生じた温度差によって発熱側から吸熱側に向かって流れる伝導熱がある。これらを合わせて実際に利用できる冷凍容量ならびに発熱量を求めると次のようになる。

$$Q_c = \alpha_{pn} T_c I - \frac{1}{2} RI^2 - L \Delta t \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_h = \alpha_{pn} T_h I + \frac{1}{2} RI^2 - L \Delta t \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $Q_c$ ： 実際の冷凍容量 (W)  
 $Q_h$ ： 実際の発熱量 (W)  
 $R$ ： 熱電素子対の抵抗 ( $\Omega$ )

$$R = \sum \frac{\rho_p l_p}{a_p} + \sum \frac{\rho_n l_n}{a_n}$$

ここで、 $a$ ： 各素子の断面積 ( $\text{cm}^2$ )  
 $l$ ： 各素子の長さ (cm)  
 $\rho$ ： 各素子材料の比抵抗 ( $\Omega\text{-cm}$ )  
 $L$ ： 熱電素子対の熱伝導係数 (W/deg)

$$L = \sum \frac{\kappa_p a_p}{l_p} + \sum \frac{\kappa_n a_n}{l_n}$$

ここで、 $\kappa$ ： 各素子材料の熱伝導率 (W/cm $\cdot$ deg)  
 $\Delta t$ ： 高温側接点と低温側接点の温度差 (deg)  
 $\Delta t = t_h - t_c$   
 ここで、 $t_h$ ： 高温接点の温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $t_c$ ： 低温接点の温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

いま

$$\chi = \frac{IR}{\alpha T_c} \dots\dots\dots (5)$$

$$\theta = \frac{(\alpha T_c)^2}{2RL} \dots\dots\dots (6)$$

$$\gamma = \frac{T_h}{T_c} \dots\dots\dots (7)$$

とすると(3),(4)式は次のように書き換えられる。

$$Q_c = L\theta \left( -\frac{\Delta t}{\theta} + 2\chi - \chi^2 \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_h = L\theta \left( -\frac{\Delta t}{\theta} + 2\gamma\chi + \chi^2 \right) \dots\dots\dots (9)$$

(8)式において両接点間の温度差 $\Delta t$ は $Q_c=0, \chi=1$ のとき最大となり、そのときの温度差 $\Delta t_{\max}$ は(10)式で表わされる。

$$\Delta t_{\max} = \theta \dots\dots\dots (10)$$

すなわち最大温度差は $\theta$ と等しくなる。この $\theta$ を特性温度という。一般に熱電材料の良さは材料固有の値である $\alpha, R, L$ を用いた(11)式で示される $Z$ で表わされる。

$$Z = \frac{\alpha^2}{RL} \dots\dots\dots (11)$$

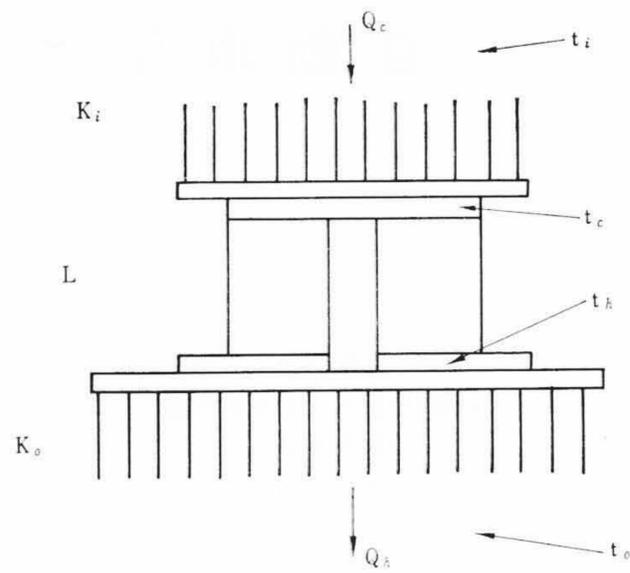
この $Z$ を性能指数 (Figure of merit) と呼んでいる。したがって特性温度(最大温度差)は次のように表わされる。

$$\theta = \Delta t_{\max} = \frac{Z T_c^2}{2} \dots\dots\dots (12)$$

(11)式の $Z$ を $p, n$ 素子おのこの固有値を用いて表わすと(13)式のようになる。

$$Z = \frac{\alpha^2}{RL} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left( \frac{\rho_p l_p}{a_p} + \frac{\rho_n l_n}{a_n} \right) \left( \frac{\kappa_p a_p}{l_p} + \frac{\kappa_n a_n}{l_n} \right)} \dots\dots (13)$$

この $Z$ の値を最大にする条件は分子は一定であるから分母を最小にするための条件で、すなわち(14)式の関係にあるとき $Z$ は最大と



第2図 電子冷却器の基本図

なる。

$$\frac{a_p l_n}{a_n l_p} = \sqrt{\frac{\rho_p \kappa_n}{\rho_n \kappa_p}} \dots\dots\dots (14)$$

このときの $Z$ の値は(15)式のようになる。

$$Z_{\max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{(\sqrt{\rho_p \kappa_p} + \sqrt{\rho_n \kappa_n})^2} \dots\dots\dots (15)$$

一般には $p$ 形素子と $n$ 形素子の長さ $l$ は等しいので熱電素子設計するには(16)式の関係になるように寸法をきめる。

$$\left. \begin{aligned} l_p &= l_n \\ \frac{a_p}{a_n} &= \sqrt{\frac{\rho_p \kappa_n}{\rho_n \kappa_p}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

実際に熱電素子対を組み立て、電子冷蔵庫など電子冷凍応用製品を作るときには第2図に示すように吸熱側および放熱側に熱交換器を取り付ける。

これらの熱交換器の熱方程式は(17),(18)式のようになる。

$$Q_c = K_i (t_i - t_c) \dots\dots\dots (17)$$

$$Q_h = K_o (t_h - t_o) \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 $K_i$ ： 吸熱側熱交換器の熱貫流係数 (W/cm $^2$ deg)  
 $K_o$ ： 放熱側熱交換器の熱貫流係数 (W/cm $^2$ deg)  
 $t_i$ ： 冷蔵庫庫内温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $t_o$ ： 周囲外気温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

(8),(9),(17)および(18)式より $Q_h, t_c, t_h$ を消去すると冷凍容量は(19)式のようになる。

$$Q_c = \frac{\theta \left[ -\chi^2 \left( 1 + \frac{2L}{K_o} \right) + 2\chi \left\{ 1 - \frac{L}{K_o} (\gamma - 1) \right\} \right] - (t_o - t_i)}{\frac{1}{L} + \frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_o}} \dots\dots\dots (19)$$

入力熱電素子対内部に発生するジュール熱と熱電素子に発生する熱起電力に打ち勝って電流を流すに必要な電力の和であるから、

$$\begin{aligned} P &= RI^2 + I\alpha(t_h - t_c) \\ &= 2L\theta \{ \chi^2 + (\gamma - 1)\chi \} \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

ここで、 $P$ ： 入力 (W)

また成績係数は

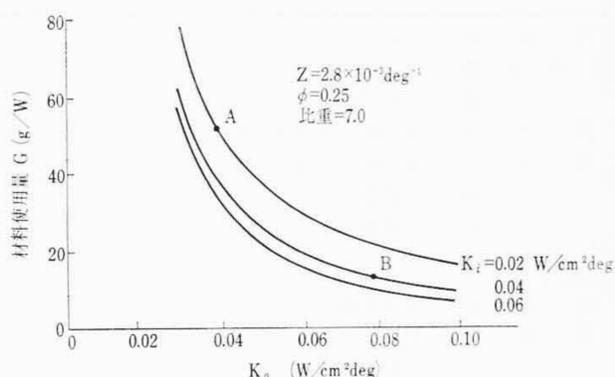
$$\phi = \frac{Q_c}{P} = \frac{Q_c}{2L\theta \{ \chi^2 + (\gamma - 1)\chi \}} \dots\dots\dots (21)$$

高温側熱交換器より放熱される熱量は

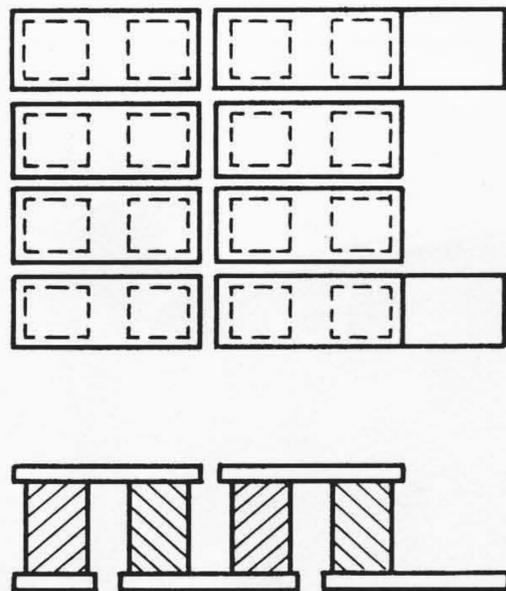
$$Q_h = Q_c + P \dots\dots\dots (22)$$

### 2.2 熱交換器の性能と熱電材料使用量

総合性能に最も影響を及ぼすのは熱電素子の性能 $Z$ であるが、これはこの数年間めざましい進歩がないことより明らかなように簡単



第3図 熱貫流係数と材料使用量



第4図 熱電素子ブロックの一般的構造

に性能を向上させることはできない。次いで総合性能に影響するのは(19)式より明らかなように熱交換器の性能  $K_0, K_i$  の値である。すなわち熱交換器の性能が良くなると冷凍容量の増加、あるいは成績係数の向上をもたらす。

実際には熱電素子材料が高価であるところから電子冷蔵庫を設計するときには熱電冷却器の冷凍容量、入力を設定し、熱電材料の使用量が最小になる条件を見いだすことが重要である。

(19)式より熱電材料ならびに熱交換器  $K_i, K_0$  が一定の場合は冷凍容量  $Q_c$  は熱伝導係数  $L$  によって決まる。このことは熱電素子寸法仕様の設計の適否によっても冷却器の性能が左右されることを示すものである。

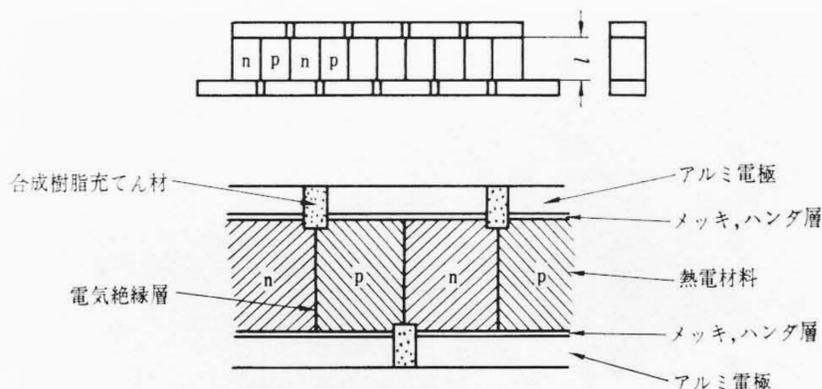
第3図は熱電素子対の平均性能指数  $Z_m$  が  $2.8 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$  で電子冷蔵庫の庫内外温度差  $t_0 - t_i = 25 \text{ deg}$ 、成績係数  $\phi = 0.25$  のときの最適設計条件における熱電素子材料使用量の関係を示したものである。図より熱交換器の性能が  $K_i = 0.02, K_0 = 0.04$  のときの冷凍容量  $1 \text{ W}$  あたりの熱電材料使用量はA点で示され、約  $51 \text{ g}$  であるが、これを  $K_i = 0.04, K_0 = 0.08$  と性能を2倍に向上させることによって材料使用量はB点の約  $13.5 \text{ g}$  となり、A点の1/4に減らすことができる。とくに高温側熱交換器の性能が及ぼす影響が大である。

このような理由により従来発表されている電子冷凍応用製品では高温側熱交換器を強制空冷式あるいは水冷式にして熱貫流係数を大きくしているが、これでは運動部分がないという電子冷凍の特長を完全に生かした設計とはいえない。

ポータブル電子冷蔵庫を設計するにあたって、後記するように自然空冷形の熱交換器を採用することにした。

### 3. 熱電素子ブロックの構造

一般の熱電素子ブロックの構造は第4図のとおりで、各素子間に



第5図 日立熱電素子ブロックの構造

空間を設けて適対数をまとめているが、日立の熱電素子ブロックの形状は第5図に示すように  $p, n$  素子を厚さ  $10 \sim 20 \mu$  の電気絶縁層を介して接着して適対数にまとめ、その上下両端にニッケルメッキしたアルミ電極をハンダ付けしている。一般の熱電素子ブロックの電極には銅を使用しているが、銅は拡散速度が大きく、銅が熱電素子半導体に浸入すると半導体の物性が変わり、熱電素子の性能が低下する恐れがある。ニッケルにはこのような心配はない。

また一般構造のものでは電極と熱電素子のハンダ付部が露出しているため吸湿による腐食の心配があるため素子周囲を密封する必要がある。また素子対の空間の熱ロスが大きく、素子周囲の密封材の熱伝導ロスと合わせて性能指数  $Z$  に及ぼす影響は  $10 \sim 20\%$  にも達する。これでは熱電素子の性能が  $Z = 2.8 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$  のものでも実際に使用する状態では  $Z = 2.2 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$  まで低下する。

これに対して第5図の構造は素子間を密着することによって機械的強度が大きくなるとともに吸湿ならびに熱ロスを最小にすることができる。

### 4. 電子冷蔵庫の構造

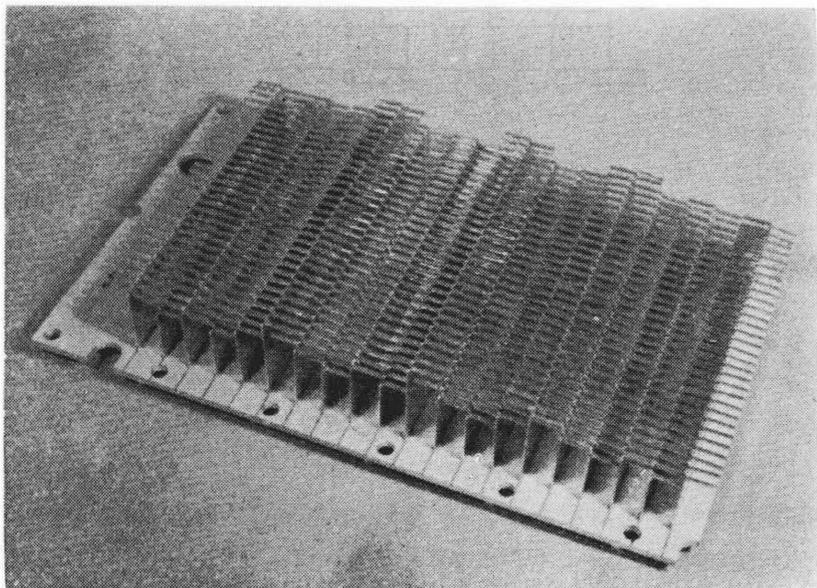
自動車用の冷蔵庫は家庭用の冷蔵庫のように食品を数日貯蔵するというよりも外出あるいは買出しの際に一時的に食品を保管するという用途に使われるものなので、ポータブルであるということが最も重要なことである。よって設計に当たっては次の点に留意した。

- (1) 自動車のバッテリーおよび発電機を電源として、おもに自動車内で使用する。また AC アダプタを用いれば家庭の  $100 \text{ V}$  電源でも使用できるようにする。
- (2) 内容積を  $10 \text{ l}$  とし外形寸法は持運びやすく、かつ乗用車の車内の場所をとらない寸法であること。
- (3) 軽量であること。
- (4) 冷却能力は周囲温度  $30^\circ \text{C}$  において庫内温度が  $5^\circ \text{C}$  になること。
- (5) 消費電力は自動車に搭載されているバッテリーの容量を考慮し、前照灯の約  $1/2$  である  $40 \text{ W}$  とする。
- (6) 長時間駐車するときのように冷蔵庫の運転を停止することがあるので、運転停止したとき食品の温度上昇が少ない構造であること。これには冷却器関係を上部に置き熱伝導を防ぐようにすること。
- (7) ポータブルであるため振動、衝撃を受けるが、これらに十分耐える構造であること。

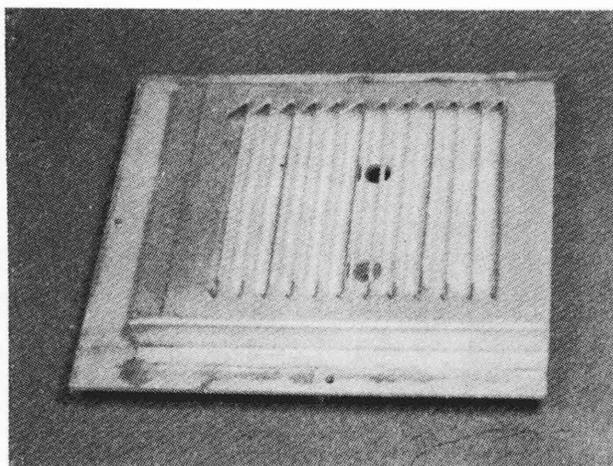
#### 4.1 熱交換器

2.2項で詳記したように熱交換器の性能は重大な意味をもつものである。とくに自然空冷形の熱交換器を使用するとき、その熱貫流係数が小さいので影響する割合が大きい。

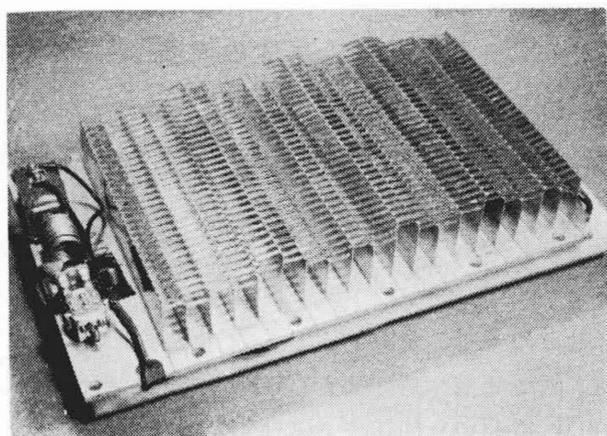
外気側熱交換器は後記するように水平に置いて使用するが、自然空冷形の熱交換器を水平にして使用すると熱貫流係数が低下し性能



第6図 外気側熱交換器



第7図 庫内側熱交換器



第8図 冷却ユニット

が悪くなる。この性能低下を少なくするために第6図に示すように従来のプレートフィンタイプ熱交換器を改良した。このフィンプレートフィンの先端を歯形に折曲げてワイヤフィンを形成し、このワイヤフィンを2段になるように構成した。また庫内側熱交換器の構造は第7図に示すとおりであり、冷板を2重に構成している。

#### 4.2 冷却ユニット

理論計算の結果、電源電圧12V、入力40Wで最高性能を得るためには熱電子対数が240対で、全熱伝導係数 $L$ が0.243 W/degになるように熱電素子を設計するのが最もよいことがわかった。これらの熱電素子対を2組のブロックに分け、これを第6,7図に示した熱交換器の間にはさみ、その周囲に硬質ポリウレタンフォームを注入発泡して、良好な断熱性をうるとともに機械的強度の増強ならびに耐湿性を向上させた。

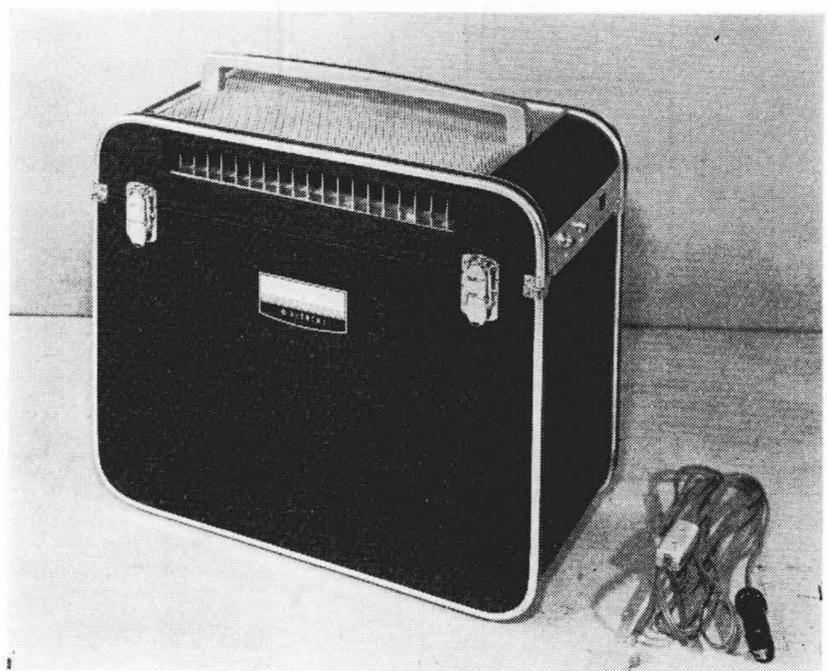
これに各電気部品を取付けて第8図に示したような一体の冷却ユニットにまとめた。

#### 4.3 電子冷蔵庫の仕様

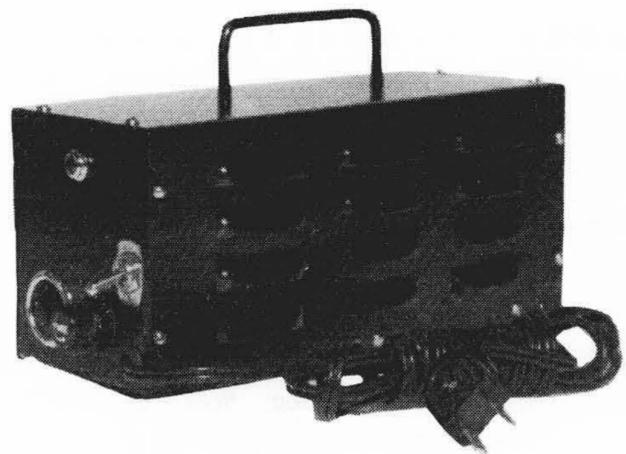
仕様は第1表に示すとおりである。キャビネットはスーツケース

第1表 電子冷蔵庫の仕様

キャビネット	総内容積	11 l
	有効内容積	10 l
	重量	8.3 kg
	外形寸法	幅 448×高 418×奥行 238 mm
	内形寸法	幅 360×高 215×奥行 150 mm
断熱材	箱	高級塩化ビニールレザー仕上げ・スーツケースタイプ
	箱	高級塩化ビニール成形品
冷却装置	冷却方法	電子冷凍・自然空冷式熱電素子2組, 240対
	使用電源	直流 12 V
	入力電力	40 W
	電流	3.3 A
	庫内温度	周囲温度 30°C にて 5°C
付属品	自動車専用電源コード (中間スイッチ付)	
	通電表示ランプ	
	凍結防止自動温度調節器	



第9図 自動車用ポータブル電子冷蔵庫



第10図 ACアダプタ

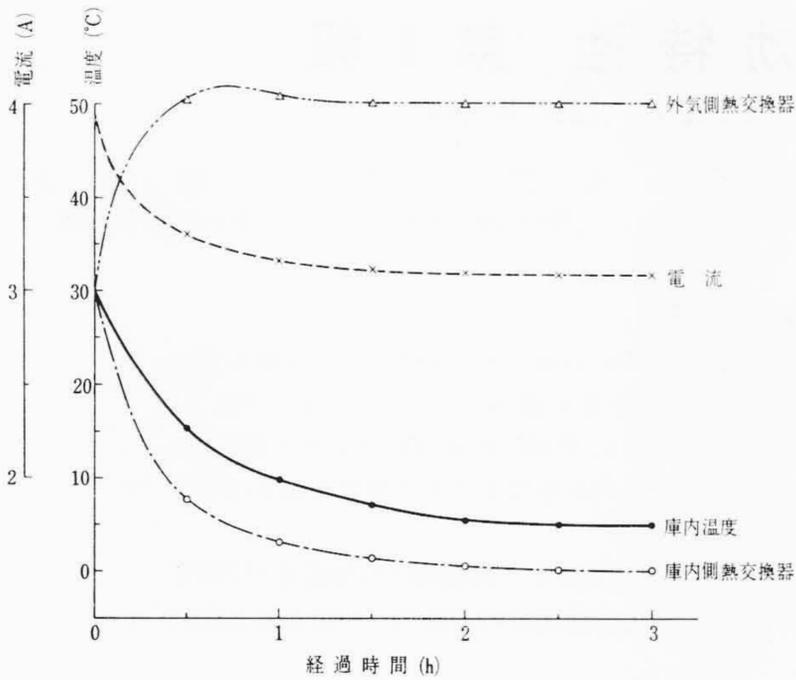
タイプで、冷却ユニットは上部のふたの内部に納め、冷蔵庫の床面積を小さくして持運びやすく、しかも自動車内で使いやすい寸法にした。第9図はその外観写真である。

また本冷蔵庫を家庭や旅館などで一般家庭用の交流電源で使用するには100Vの交流電源を12Vの直流電源にかえる第10図に示すようなACアダプタを使用すればよい。

### 5. 電子冷蔵庫の性能

#### 5.1 冷却性能

冷蔵庫内に負荷を入れない状態で、室温30°Cの恒温室にて電圧12Vで運転を行ない、運転を開始してからの経過時間に対する各部の温度および電流を測定した結果は第11図に示すとおりである。



第11図 冷却性能試験 (周囲温度 30°C)

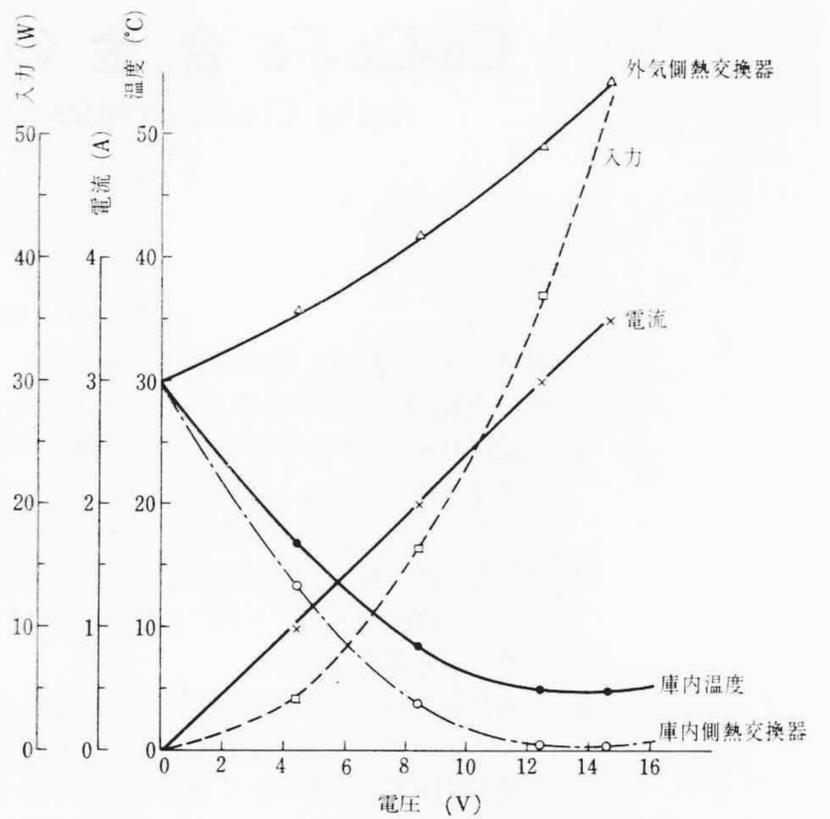
これより本冷蔵庫は運転開始後1時間で庫内温度は10°Cになり、約2時間で安定状態に達し、このときの庫内温度は5°Cである。

5.2 対電圧特性

自動車内で使用するとき走行中の電源電圧は10~15Vに変動する。第12図は電子冷蔵庫の対電圧特性試験結果を示したものである。これによると庫内温度は10Vのとき6.5°C、15Vのとき5°Cであり、電圧変動による庫内温度の変化はほとんどない。

6. 結 言

これまで電子冷凍応用製品は圧縮機式応用製品と比較すると高価であり、競合できないといわれている。しかし自動車用の冷蔵庫の場合にはポータブルであるということより小形になり、熱電素子の使用量も少なくすることができる。さらに直流電源が直接に得られるため整流器が不要になることなどの理由により電子冷凍を利用するほうが有利である。このようにして開発した自動車用ポータブル電子冷蔵庫を要約すると次のとおりである。



第12図 対電圧特性試験 (周囲温度 30°C)

- (1) 本電子冷蔵庫はポータブル冷蔵庫としておもに自動車のバッテリーおよび発電機を電源にし、シガレットライター用のコンセントまたはそのほか付属のコンセントを介して運転される。また別途製作した整流器を付属させて家庭の交流100V電源で使用することもできる。
- (2) 冷蔵庫の構造は上ぶた内に熱電素子、熱交換器および電気部品などの冷却装置のすべてをおさめたもので、外観はスーツケースタイプで、ポータブル冷蔵庫としての特長を備えている。
- (3) 熱交換器は自然空冷式で、振動、騒音はまったくない。
- (4) 周囲温度30°Cのとき庫内温度は5°Cである。また電圧変動による庫内温度の変化はほとんどない。
- (5) 入力は40Wで、自動車の前照灯の約1/2である。