

ボトルクーラの冷却特性

Cooling Characteristics of Bottle Cooler

沢田 稔*
Minoru Sawada

要 旨

近年、ビールや清涼飲料などの冷却販売の需要が増加し、それにともない販売容器として冷蔵用ショーケースが種々発売され、実用に供されている。しかし使用場所、用途などによっては冷却能力が不足するので、冷却速度のより早い冷却専用のボトルクーラが必要になる。筆者はこのボトルクーラとして要求される冷却特性をとりあげ、理論解析と実験によって各方式の特長と傾向を示し、さらに実際の供試機を用いて行なった冷却効果の一例について述べた。

1. 緒 言

ビールや清涼飲料などの冷却販売において、販売回転率の高いところでは、冷却速度のすぐれたボトルクーラを必要とする。本稿ではまずボトルの冷却特性の理論的考察を行ない、冷却効果の実験により各方式の特長と傾向をは握し、さらに供試機の試験結果を参考としてあげたものであり、今後この種ボトルクーラの製品化の有効な資料となるものである。

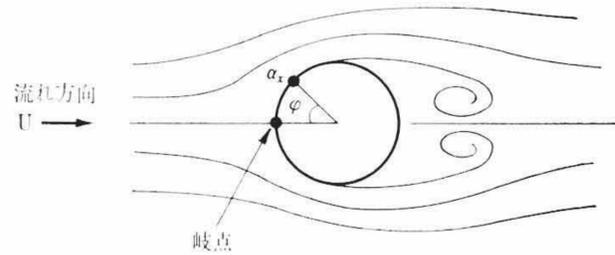


図1

2. ボトルクーラの概要

わが国では近年食生活水準の向上につれ、ボトル飲料の製造と販売の業界に対する需要の増加とサービス面での必要から、今日では小売店舗でもボトル類の冷却販売が不可欠となっている。現在一般に販売されている冷蔵ショーケースは冷却したボトルの冷却状態維持と、展示販売が目的であって、販売回転率の高いところでは、あとから補充した未冷却ボトルが冷却されないうちに、取り出さねばならなくなり冷却販売ができなくなる。本稿では冷却専用のボトルクーラをとりあげたが、このような冷却専用のボトルクーラは、今後あらゆる観点から検討にあたいするものである。

3. ボトルの冷却原理

ボトルが冷却される場合の理論的考察として、熱移動の形態からふん囲気による熱伝導、自然対流、強制対流および接触による熱伝導の4態をとりあげ、ボトル内外の熱伝達特性を考察してみる。また特性解析に当り、下記の仮定を行なう。

- (1) ボトル内外の熱移動は定常状態にあるものとする。
- (2) ボトルのふん囲気温度は一定とし、内部液分では対流は生ぜず熱伝導のみとする。
- (3) ボトル形状は直円筒形とする。

3.1 ふん囲気による熱伝導

ボトルの壁を通して熱が半径方向のみに伝わる場合、円筒単位長さの半径 r の円筒面を通過して単位時間に流れる熱量は

$$-\lambda_1 2\pi r \frac{d\theta}{dr} \dots\dots\dots (1)$$

また $r+dr$ の半径の円筒面を通過して単位時間に流れる熱量は

$$-\lambda_1 2\pi \left\{ r \frac{d\theta}{dr} + \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\theta}{dr} \right) dr \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(1)式と(2)式における熱の出入りは、ひとしいと考えられるから

$$\frac{d^2\theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\theta}{dr} = 0$$

これを積分して全伝達熱量 Q を求めれば

* 日立製作所栃木工場

$$Q = \frac{2\pi r^2 L (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{r_2}{\lambda_1} \log \frac{r_2}{r_1}} \dots\dots\dots (3)$$

(3)式より熱通過率 K は

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{r_2}{\lambda_1} \log \frac{r_2}{r_1}} \dots\dots\dots (4)$$

- ここに、 r_2 : ボトルの外半径 (m)
- r_1 : ボトルの内半径 (m)
- L : ボトルの高さ (m)
- θ : ボトル外の流体の温度 (°C)
- λ_1 : ボトルの熱伝導率 (kcal/m·h·°C)
- λ_2 : 流体の熱伝導率 (kcal/m·h·°C)
- α_1 : ボトル内面の熱伝達率 (kcal/m²·h·°C)
- α_2 : ボトル外面の熱伝達率 (kcal/m²·h·°C)
- t_1 : ボトル内面温度 (°C)
- t_2 : ボトル外面温度 (°C)

3.2 自然対流

ふん囲気の対流による影響を考慮した場合、自然対流については、ボトルを垂直においた状態では近似的に垂直平板と同様にみなされ Ostrach⁽³⁾ の計算から次の無次元数を用いてあらわされる。

$$Nu = f(Pr) Gr^{1/4} \dots\dots\dots (5)$$

またボトルを水平においた状態では、Hermann⁽²⁾ の理論計算から空気に対して、平均熱伝達率 α はつぎのようになる。

$$\alpha = 0.372 \frac{\lambda_2}{d} Gr^{1/4} \dots\dots\dots (6)$$

- ここに、 Nu : ヌセルト数
- Gr : グラスホフ数
- Pr : プラントル数 = σ
- d : ボトルの外径 (m)

3.3 強制対流

ボトルの周囲を図1のように流体がある速度をもって流れている状態では、流れ方向に対してボトル前部に速度が0となる点、すな

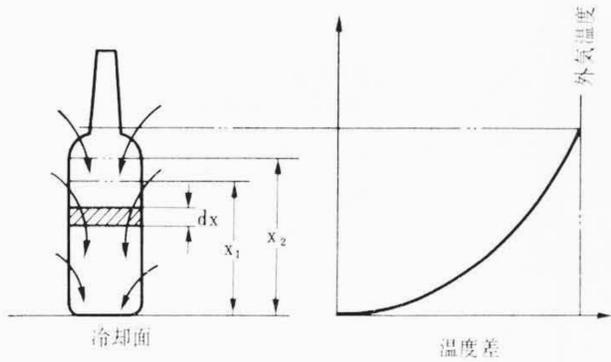


図 2

わち岐点を生ずる。またボトル表面に沿って流れる流体の速度は岐点付近では岐点からの距離に比例する。ボトル表面の岐点からの距離を x 、その流速を U_0 、局部的熱伝達率を α_x 、流体の動粘性係数を ν とすると、強制対流伝熱に関する無次元数はつぎのようにあらわされる。

$$Nu_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda_2}, \quad Re_x = \frac{U_0 x}{\nu} \dots \dots \dots (7)$$

Falkner⁽¹⁾ の層流境界層の理論計算によれば、この両者の関係はつぎのようになる。

$$\frac{Nu_x}{\sqrt{Re_x}} = 0.57 \sigma^{0.4} \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 Re : レイノルズ数
この場合の熱伝達率は

$$\alpha = 0.57 \sigma^{0.4} \cdot \frac{\lambda_2}{d} \sqrt{\frac{Ud}{\nu}} \dots \dots \dots (9)$$

3.4 接 触 冷 却

ボトルの底面で冷却面と接触していると、ボトル内部では熱伝導により下方から順次上方へ冷却されてゆく。冷却され比重が大となった液分は下に滞留するので内部で対流循環はない。しかし比重の最高点(水では4℃)以下に冷却し続けると、底面の液分が逆に比重が小さくなり、上下液分の逆転現象を生じ温度分布は良好になる。

実際にはボトル底面接触部以外は空気にさらされているので、この部分からの侵入熱の影響を考慮しなければならない。まず図2で微小部分 dx を通ってはいる熱量は(10)式であらわされる⁽⁴⁾。

$$2\pi r dx K \cdot T \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 T : 液分の温度 (℃)
また x_1 点と x_2 点との間の移動熱量はつぎの平衡式であらわされる。

$$2\pi r K T dx = \lambda_1 A \left(\frac{dT}{dx_1} - \frac{dT}{dx_2} \right)$$

ここに、 A : ボトル内部液分の径方向相当断面積 (m²)
上式は微分方程式としてつぎのようにあらわされる。

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{2\pi r K}{\lambda_1 A} T \quad \text{または} \quad \frac{d^2 T}{dx^2} = C^2 T$$

上式を解けば

$$T = \frac{T_0 e^{cx}}{Q e^{2ch}} + \frac{T_0 e^{-cx}}{1 + e^{-2ch}} \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 T_0 : 接触冷却面の温度 (℃)
 h : ボトル内部の水位 (m)
 Q : ボトル全体の熱容量 (kcal)

4. 冷却効果の実験

ボトルの冷却に関する理論的考察では仮定が多く含まれている。また実際面でボトルを冷却する場合は配列方法、冷却媒体の種類やその流動方向、流速などの影響は理論面からはなかなかとりあげに

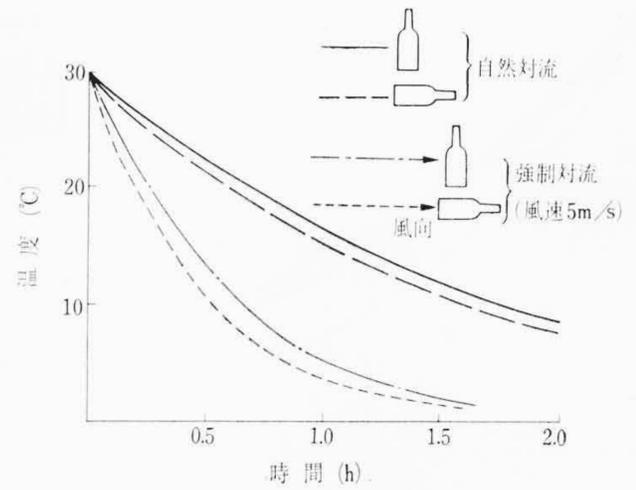


図 3 通風方向による冷却効果 (ボトル 1 本)

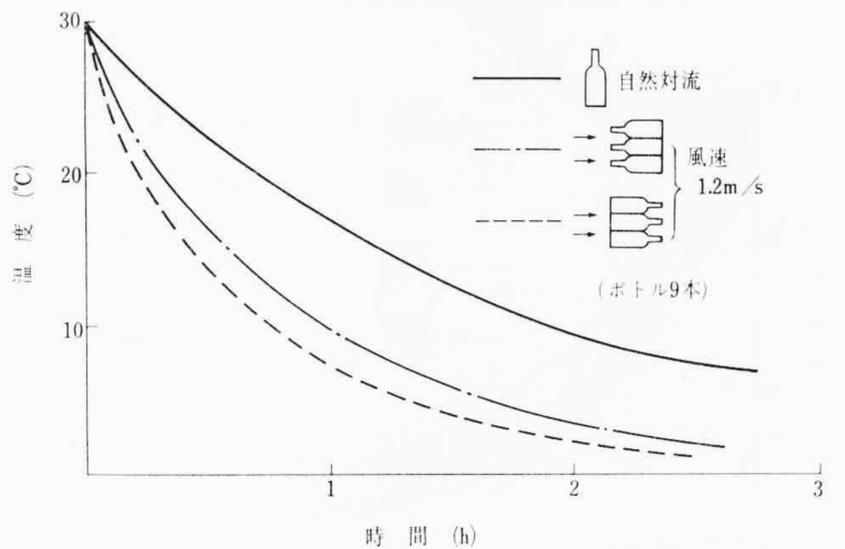


図 4 ボトル上下方向より通風冷却効果 (空冷式)

く。したがってこれら条件を加えた場合の冷却効果について、基礎的実験を行なってみた。

4.1 冷却媒体が空気の場合

4.1.1 実験方法と実験条件

供試ボトルにはビール大瓶を用い、負荷として内部にあらかじめ外気温度より 30℃ 高い温水を入れ、送風機を有する通風ダクト内部にボトルを置き、各条件での冷却効果を測定した。風量の調節にはダクト途中にフィルタを用いた。また実験条件としては、つぎの各項目について行なった。

- (1) 通風の有無(自然対流と強制対流との比較)
- (2) 風 速
- (3) ボトルの供試本数(単独および 9 本、16 本)
- (4) ボトルの置き方(垂直および水平位置)
- (5) ボトルに対する通風方向(通風方向に対してボトルの口、底面および側面をそれぞれ向けた場合)
- (6) ボトルの配列状態(千鳥状に密着させた場合、格子状に密着させた場合および間隔あけた場合)

4.1.2 実験結果

上記の各条件を加味した実験の結果を図3以下に示す。図中の温度はボトル内水温に関して外気温度との差を示したものであり、ボトル内水温の絶対値はそれぞれの値に外気温度を加えたものになる。

4.2 冷却媒体が水の場合

4.2.1 実験方法と実験条件

供試ボトルを水槽内におき、一方より水を流し他方からオーバーフローさせる流水系統を形成し、条件としては静水中に放置した場合(自然対流に相当)と、流速を変化させボトルの側面から流水をあてた場合(強制対流に相当)について時間の経過に対するボトル内水温を測定した。ボトル内水温の測定は水槽入口水温より

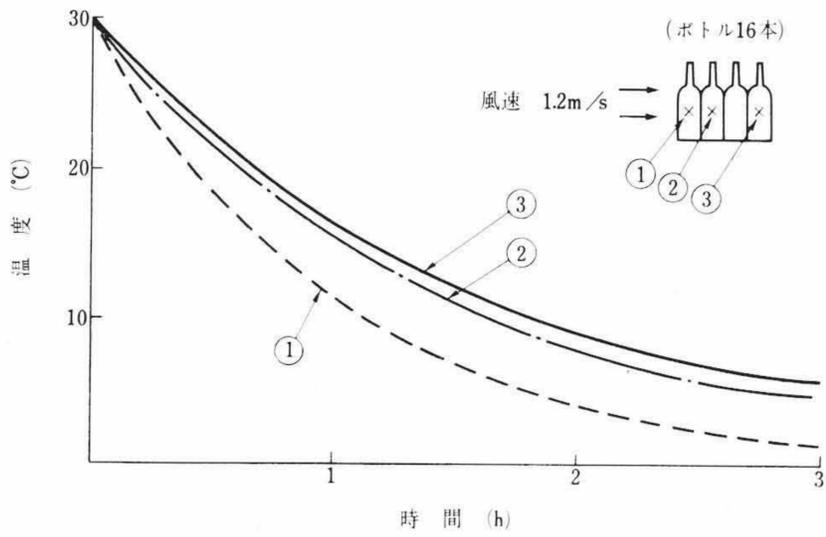


図5 ボトル側面より通風冷却効果 (空冷式)

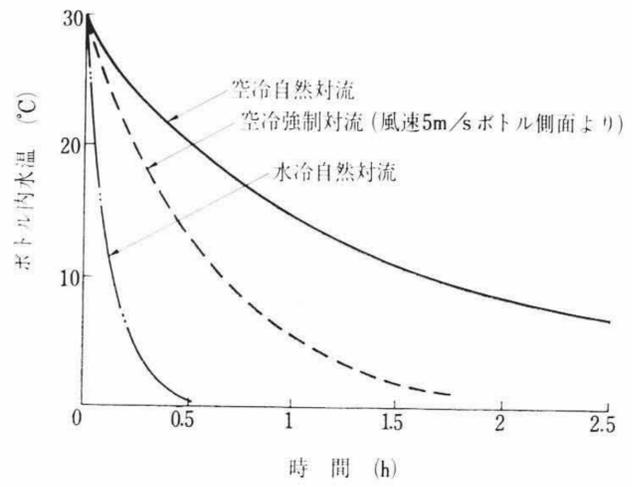


図7 水冷と空冷との冷却効果比較

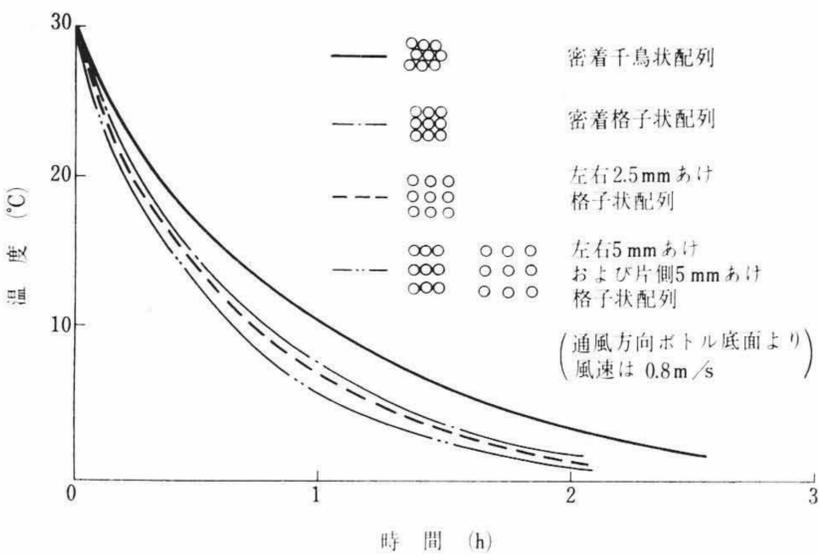


図6 ボトルの配列・間隔による冷却効果 (空冷式)

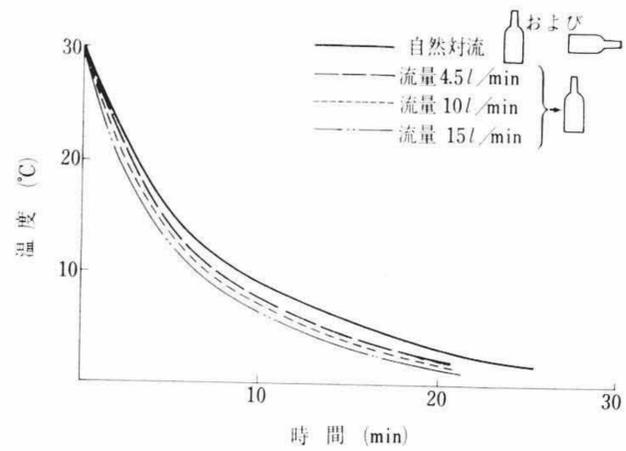


図8 流量変化による冷却効果 (水冷式)

30°C 高い温水を入れて行なった。

4.2.2 実験結果

水冷式の実験結果を図7,8に示す。なお図7には空冷式との比較のため、ボトル1本ときの自然空冷および強制空冷方式の結果をもあわせて記載した。

4.3 接触冷却

4.3.1 実験方法とその結果

内部水温 30°C のビール大瓶底面を表面温度 -15°C の冷却板上におき、ボトル内水温の分布を測定した。その結果は図9に示すとおりである。図中には前に求めた理論値(11)式もあわせて記載した。これによれば両者の間には若干の相違はあるが、これは理論値ではボトル内部の対流はないものとしたが、実際には若干の対流現象があり、そのため熱伝導率が理論値より大きくなっているためと思われる。

4.4 実験結果と理論値との比較

4.4.1 自然対流(一例としてボトルを水平におき空冷式の場合)

熱伝達率に関する理論値は(6)式に各数値を代入して 16.5 (kcal/m²・h・°C) が得られる。これを(4)式の α_2 として全体の熱通過率を求めれば、理論熱通過率は $K_{th}=15.2$ (kcal/m²・h・°C) となる。

実験値は図3よりボトル内水温 30°C から 10°C まで冷却に要する時間が 1.6 時間であり、ボトル円筒部高さを 0.2 m、ボトルの全伝熱面積を 0.049 m²、ボトル1本の重量(内部の水を含む)を 1.2 kg とすれば、この冷却推移状態における単位時間当りの冷却熱量は、 $Q=15$ (kcal/h) となり、熱伝達基礎式 $K=Q/F \cdot \Delta\theta$ から実験熱通過率は $K_{ex}=15.5$ (kcal/m²・h・°C) となる。この結果、熱通過率に関して理論値と実験値とはよく合致する。

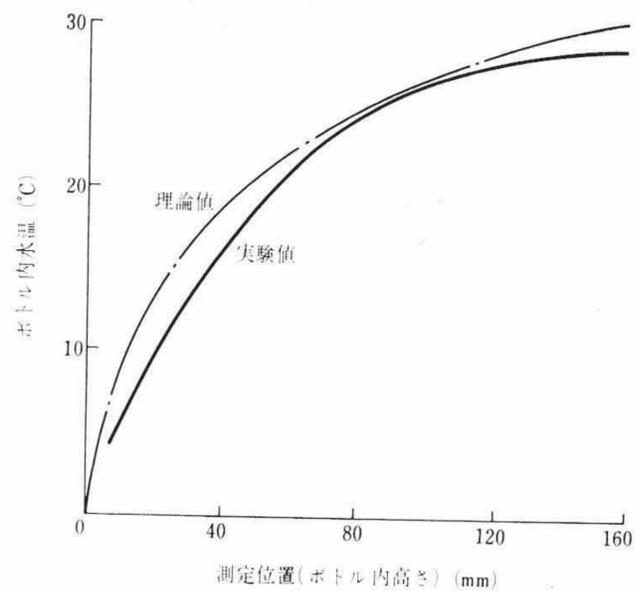


図9 接触式ボトル内部水温分布

4.4.2 強制対流(一例として水冷式の場合)

理論値は(9)式より

$$\alpha_{th} = 609 \sqrt{\frac{U}{0.078}}$$

ボトルに対する水の流速を 0.95 m/s (流量 10 l/min に相当する) とすれば、 $\alpha_{th}=2,120$ となり前項同様これを(4)式に代入して全体熱通過率を求めれば

$$K_{th}=155 \text{ (kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C)}$$

実験値は図8より単位時間当りの冷却熱量は 180 (kcal/h) であり、これより熱通過率を求めれば

$$K_{ex}=184 \text{ (kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C)}$$

ここで求めた理論値と実験値は若干差があるが、これは強制対流では流体が水であるとボトルの表面に非定常的に渦流が発生し、この影響で熱通過率が理論値よりも良くなるためと思われる。

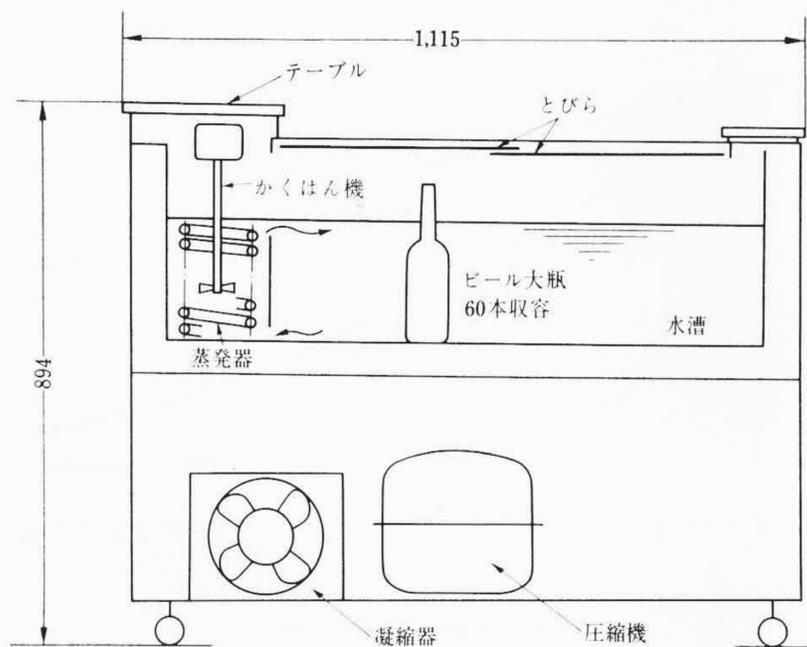


図10 水冷かくはん式構造概略図

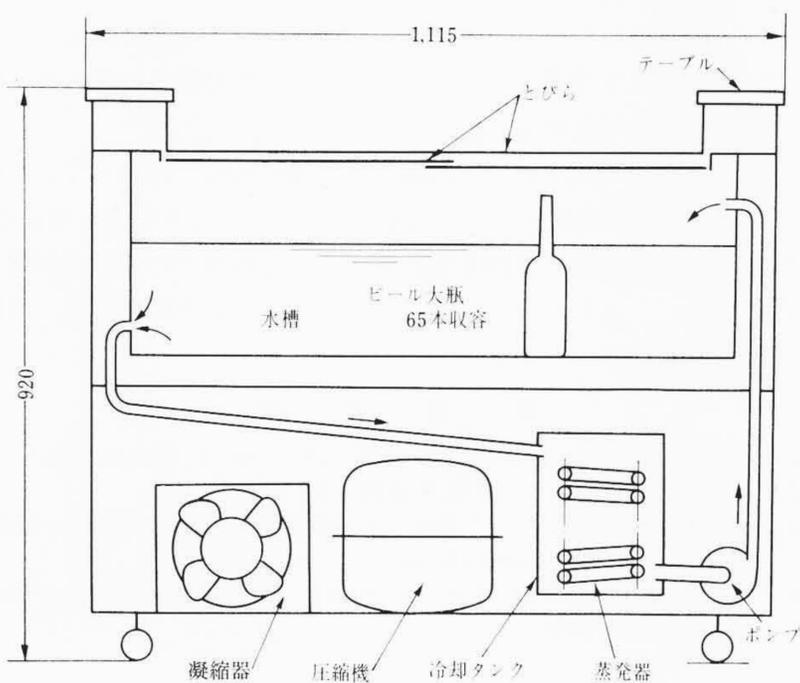


図11 水冷循環式構造概略図

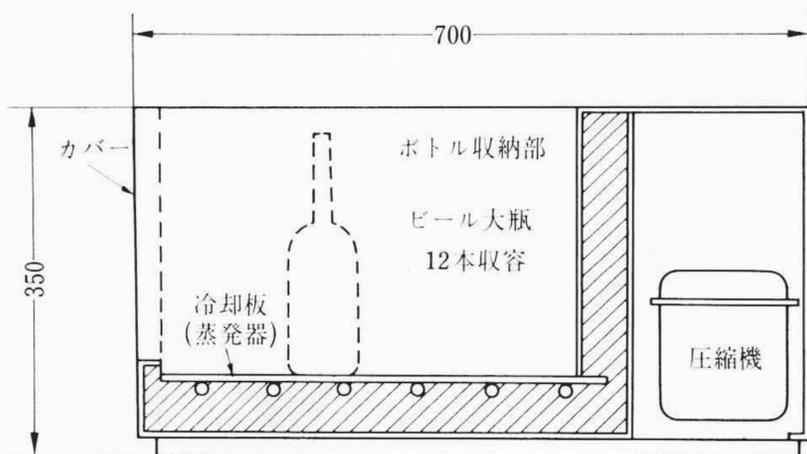


図12 接触冷却式構造概略図

5. 供試機による冷却能力試験

以上の理論解析および基礎実験によって、各冷却方式の場合のボトルに対する冷却特性が、いかなる傾向特長を有するものであるかがわかった。つぎに供試機によって実際にボトルを冷却した場合の冷却性能についての一例として、水冷式および接触冷却式ボトルクーラをとりあげ、それらの試験条件と試験結果を述べる。

5.1 ボトルの所要冷却温度およびふん囲気温度

飲料の種類、季節や個人の嗜好などによって所要冷却温度は異なるが、飲用者に快感を与え、その飲料の持つ風味を損じない範囲内でなければならない。本稿では飲料の対象に特にビールをとりあ

げ、以下所要冷却温度を10℃とする。また使用上のふん囲気温度は夏期の外気温度相当と考えて、30℃とする。

5.2 試験条件

ボトルクーラの製品としての冷却能力は、つぎのような試験条件によりあらわされる。

5.2.1 実負荷冷却能力試験

収納可能本数のボトルを入れ、ふん囲気、水槽内水温およびボトル内飲料が30℃に飽和した状態より冷却し、ボトル内部が所定温度に冷却されるまでの経過を測定する。

5.2.2 実負荷半数入換冷却能力試験

ボトルクーラは販売容器として使用するため、所要冷却温度に冷却されたボトルを需要に応じて十分取り出しうる能力を有することが必要となる。ボトルの取出し回数と、取出し量は環境条件、季節、飲料の種類や店舗の規模などによって異なるが、実用条件にもっとも近く、普遍性のある試験方法として、本試験がある。これは、前項の実負荷冷却能力試験で所定冷却温度に到達後、収納ボトルの半数を取り出し、そのあとに30℃の未冷却のボトルを入れ換えて、これより測定開始し、入れ換えたボトル内部の平均液温が再び所定冷却温度に到達するまでの時間を測定する。

5.3 供試機の概略構造、機能

試験を行なった各供試機の簡単な原理、構造を図10～12に示すとおりである。それらの機能の概略についてつぎに述べる。

5.3.1 水冷循環式ボトルクーラ

本機は水槽、冷却タンク(内部に蒸発器をもつ)、および循環用ポンプを配管で接続し、冷却水を強制循環させてボトルを冷却する。

5.3.2 水冷かくはん式ボトルクーラ

循環式に対して、水槽内部に蒸発器およびかくはん機をおき、水槽内で冷却水をかくはんするほかは、循環式とほぼ同様である。

5.3.3 接触冷却式ボトルクーラ

ボトル底面を蒸発器の伝熱面に直接接触させ、熱伝導によりボトルを冷却するものであり、ボトル収納部の上方はボトルの取り出しが簡単にできるよう、普通開放状態になっている。

5.4 試験結果

図13と図14に試験結果を示す。水冷循環式では収納位置による高低温度差がほとんどないほかは、冷却能力特性がかくはん式とほぼ同様であるため、循環式の試験結果は省略した。

また試験条件を下記のように定めた。

- (1) 外気温度は30℃、ボトル内冷却所定温度は10℃である。
- (2) 使用電源はすべて、単相100V、50 c/sである。
- (3) 水冷式では水槽内水位を190 mm(ボトルの肩の高さに相当する)にとった。
- (4) 水冷循環式の循環水量は約9 l/minとした。

5.5 試験結果の考察

水冷式は冷却速度が早く、温度分布も良好であり、また実負荷冷却能力に対し、半数入換冷却能力が目だってすぐれている。しかしボトルを一段積みしかできないため、1本当りの占有床面積が大きくなり、水槽内の水の交換や、保守整備が煩雑であることと、水槽や冷却タンクなどの材料のさび止めのため制約をうけ、製品として原価高になるなどの欠点がある。また水を扱うので衛生面での注意が特に必要である。

接触冷却式は冷却速度がおそく、収納位置による温度差は少ないが、ボトル1本の高低位置による温度差が非常に大きい。またボトル底面を必ず冷却面に接触させねばならないため、ボトルの収納効率は悪い。手軽ではあるが、実用上の冷却特性は前者に比較すれば劣っている。

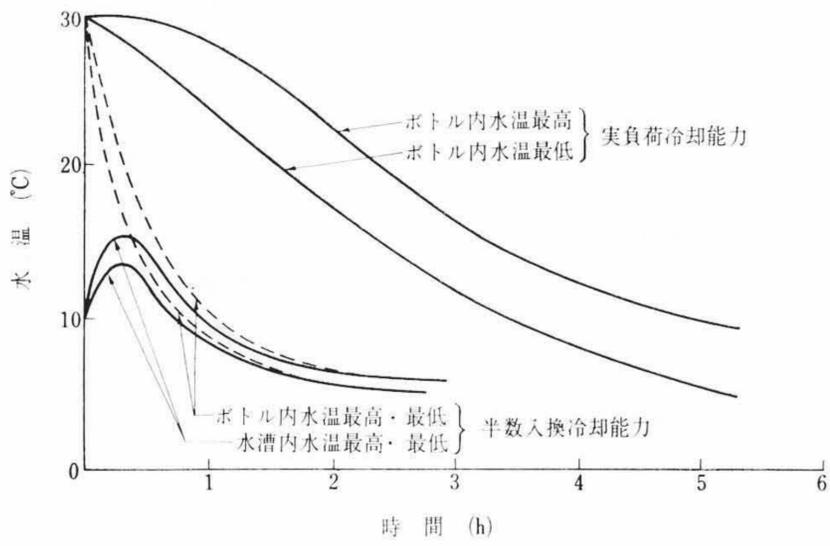


図13 水冷かくはん式冷却能力

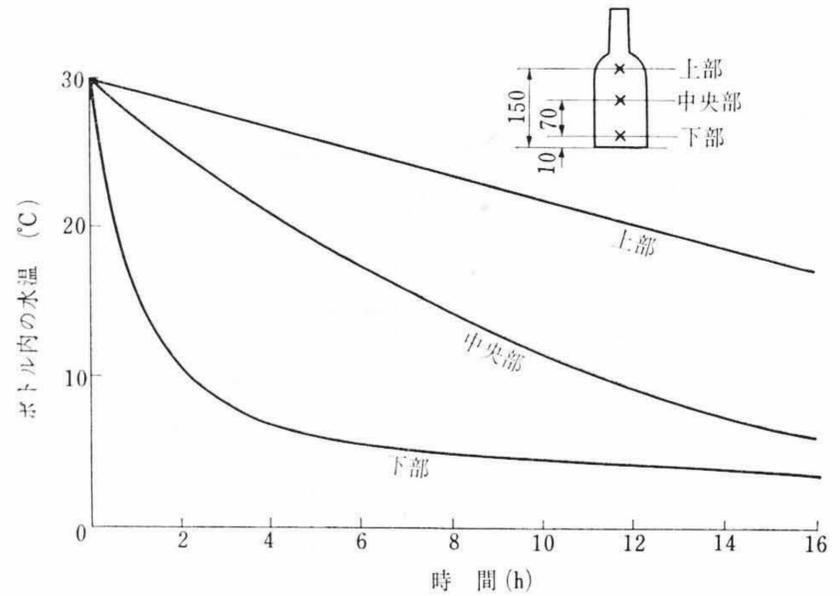


図14 接触冷却式冷却能力

6. 結 言

以上ボトルクーラの冷却特性に関して諸条件による影響につき、伝熱理論およびその基礎実験をおこない、総合的な考察を加えた結果を要約すればつぎのようになる。

- (1) ボトルに対する冷却効果を各方式について実験的に調査した結果は、理論値とおおむね一致した。
- (2) ボトルの冷却方式として、水冷式、強制空冷式ならびに接触冷却式をとりあげ実験したが、冷却速度および冷却温度分布の点で水冷式がもっともすぐれていることを示した。
- (3) 空冷式は強制空冷方式をとることで、著しく冷却特性は良くなる。またボトルの底面より風をあてた場合が、もっとも冷却効果がすぐれ、ボトルの側面から通風した場合は前面のボトルのみ冷却効果が顕著で、下流のものは自然対流条件と大差がない。
- (4) ボトルの配列は強制空冷方式に関する限り、実験によって冷却効果および収納効率の両面から考えて、密着格子状配

列が最良である。

- (5) 冷却媒体の流速の冷却特性への影響は、実験の範囲では水冷式は空冷式にくらべて少なく、自然対流と比較しても顕著な差はなかった。
- (6) 接触冷却式はボトル内部の熱伝導のみに、たよっているので、冷却速度とボトル内温度分布は、もっとも劣っている。

以上で今後製品設計製作上留意すべき冷却特性上の問題点が明らかになった。これらのデータが、ボトルクーラの今後の開発、発展の一助となれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 藤本, 佐藤: 伝熱学概論 146~167 (昭31 共立出版社)
- (2) 日本機械学会: 伝熱工学資料 (昭37)
- (3) Gröber (坪内訳): "Die Grundgesetze der Wärmeübertragung" 284~290 (昭38)
- (4) Komadera: The Art of Bottle Cooling: Modern Ref. 622~626 (1964)

訂 正

本誌 Vol. 47 No. 12 (昭和40年12月号) 1頁から6頁まで掲載いたしました論文「格子またはリンクの順位選択における内部ふくそう率」に下記のような誤りがありました。

謹んでお詫びいたしますとともに訂正申し上げます。

記

- 1頁目: 2. パッキングと順位選択 11行目 12行目
 誤: 格子 PS1 の入線に生じた呼は、一次格子 PS1, 三次格子 TS1 とともにあきリンクをもっているにもかかわらず、三次格子 TS1 の出線には.....
 正: 格子 PS0 の入線に生じた呼は、一次格子 PS0, 三次格子 TS2 とともにリンクをもっているにもかかわらず、三次格子 TS2 の出線には.....
- 2頁目: 第3図中
 誤: 話中区間 正: 話中区間
- 4頁目: 第6図, 第7図, 第8図中
 誤: 計算値 (Bernoulli)

$$\{a^{l_1} + (1-a^{l_1})b^{2l_2}\}^M$$

- 正: 計算値 (Bernoulli)
 単リンク形式..... $\{a^{l_1} + (1-a^{l_1})b^{l_2}\}^M$
 2重リンク形式, 4重リンク形式.....

$$\{a^{l_1} + (1-a^{l_1})b^{2l_2}\}^M$$

- 5頁目: 第10図中
 誤: $\{a^2(1-a^2)b^2\}^4$
 正: $\{a^2 + (1-a^2)b^2\}^4$

- 6頁目: 第14図において
 誤: $\binom{8}{p} b^p (1-b)^{8-p}$ 正: $\binom{8}{p} b^p (1-b)^{8-p}$
- 誤: $\frac{B^p}{P!}$ 正: $\frac{Bp}{P!}$
- 誤: $\frac{1}{1+B+\frac{B^2}{2!}+\dots+\frac{B^8}{8!}}$ 正: $\frac{1}{1+B+\frac{B^2}{2!}+\dots+\frac{B^8}{8!}}$