

# 泡沫接触式冷却器の基礎研究

宮 下 尚

## Fundamental Study of Froth Contact coolers

Hisashi MIYASHITA

The froth contact cooler is a kind of evaporative cooler, which is one of the apparatuses to meet the shortage of cooling water.

Functionally the froth contact cooler is an application of bubble columns to a cooler, that is, its tube-bundle is dipped froth layer of cooling water.

This study is to obtain the data to be used in designing froth contact cooler, using heater instead of tube-bundle, and the heat transfer coefficient between froth layer and wall of heater, and mass transfer coefficient between air and froth layer were obtained experimentally and correlated; and furthermore compared with the other paper.

### 1. 緒 言

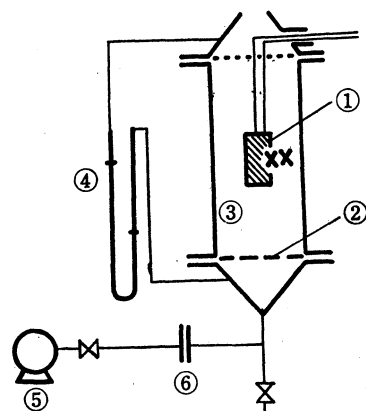
泡沫接触式冷却器は気泡塔を冷却器として適用したものであり、蒸発冷却器<sup>4)</sup>の一種である、すなわち気泡の中に水が蒸発し、そのときの潜熱と空気への顕熱の移動により被冷却流体（プロセス流体）を冷却するものである。

気泡塔に関する既往の文献<sup>1)2)5)6)</sup>によると気泡と接触する壁側の伝熱係数は気泡のない静止液と外壁との伝熱係数にくらべて6~10倍に増加することがわかっている。従来から多くの冷却水を使用する水冷式の冷却器が使用されているが、最近の用水事情の悪化からその対策として本冷却器が考えられたもので、使用水の量は若干の飛沫同伴と蒸発水量だけである。多孔板を通して液中に気泡が形成される気泡塔内の伝熱に関する研究については、Fair ら<sup>1)</sup>、Kolbel ら<sup>2)</sup>、および吉留ら<sup>6)</sup>の報告があるが、それらはいずれも空気流量の小さいところについて検討をおこなっている。筆者はそれらと比較しながら冷却器に適するような空気流量の大きい、いわゆる気泡の攪乱した状態（泡沫層という）の範囲を実験的に測定した。

### 2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を図一1に示す。円筒の底面に空気分散用の多孔板をおき、ブローアより空気を送入しながら多孔板上に水を満すと泡沫層が形成される。そ

の中に発熱体（円筒形ヒーター）が塔内に垂直に設置されている。空気流量はマノメーターにより、泡沫層、発熱体表面の温度は熱電対によりそれぞれ測定した。空気の入口、出口の湿度はアスマン湿計度により測定した。



①発熱体 ②多孔板 ③泡沫層  
④圧損測定用マノメーター ⑤ブローア  
⑥空気流量測定用オリフィス

図一1 実験装置の概略図

多孔板は表-1 に示すような6 種のものについて実験を行なった。

実験条件は表-2 に示す。

表-1 Dimensions of perforated plates

Plate No.	d [m]	N [-]	r [-]
1	$3 \times 10^{-3}$	6	$5.09 \times 10^{-3}$
2	$3 \times 10^{-3}$	9	$7.64 \times 10^{-3}$
3	$3 \times 10^{-3}$	12	$1.18 \times 10^{-2}$
4	$5 \times 10^{-3}$	3	$7.07 \times 10^{-3}$
5	$5 \times 10^{-3}$	9	$2.12 \times 10^{-2}$
6	$6 \times 10^{-3}$	12	$2.38 \times 10^{-2}$

表-2 Experimental conditions

Reg	: $5.5 \times 10^2 \sim 4.5 \times 10^3$
Rep	: $1.8 \times 10^2 \sim 8.9 \times 10^3$
$u_s$	: 7.55 $\sim$ 62.5
G	: 2.9 $\sim$ 24.0
Z	: 0.215 $\sim$ 0.42
Q	: 110 $\sim$ 300
$t_r$	: 30 $\sim$ 50

### 3. 実験結果

#### 3.1 泡沫層内温度分布

泡沫層温度は層内に挿入された熱電対により測定した。熱電対は下部より上昇してくる気泡によって多少は空気の影響をうけるかもしれないが、つねに水によって濡らされているから水相の温度を示しているものと考えられる。泡沫層高さのところで1 個の熱電対を水平にトラバースさせることによって水平方向の温度分布を、垂直にトラバースさせることにより垂直方向の温度分布を測定した。

図-2, 3 にそれぞれの温度分布の一例を示す。図より明らかなようにいずれも層内は完全に近い混合が行なわれているものと考えられる。

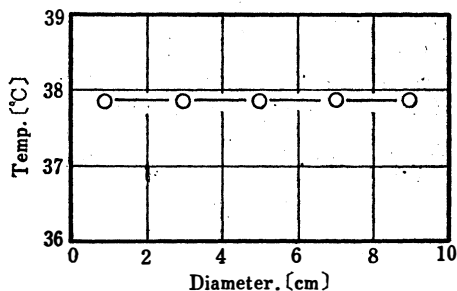


図-2 泡沫層内水平方向温度分布一例

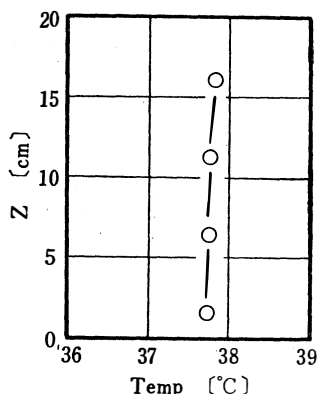


図-3 泡沫層内垂直方向温度分布の一例

#### 3.2 伝熱係数

発熱体表面と泡沫層内との間の伝熱係数は次式により算出した。

$$Q = h_w A (t_s - t_r) \quad (1)$$

(1) 式の伝熱量  $Q$  は電気的に測定し

$$Q = 0.86 I \cdot V \quad (2)$$

より求めた。伝熱係数  $h_w$  は空塔速度  $u_s$  を変化させて各多孔板別にプロットすると図-4 のようになる。

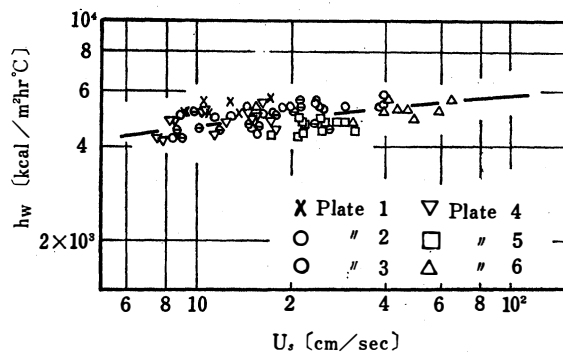


図-4 泡沫層内伝熱係数

図より  $h_w$  は多孔板の種類には無関係でほとんど一定であるが、表-2 の実験範囲の  $u_s$  の小さいところではやや小さく、 $u_s$  が大きくなるにつれてごく徐々に増加している。

筆者はさきに短形の泡沫接触式冷却器を製作し  $h_w$  を求めた。<sup>3)</sup>  $u_s$  が  $40 \sim 400$  [cm/sec] の範囲で  $6000$  [Kcal/m<sup>2</sup> hr °C] という一定値の伝熱係数を得ている。一方  $u_s$  の小さいところ ( $u_s < 8$  [cm/sec]) では気泡塔の伝熱を扱った既往の文献がみられ、著者によって多少の差異があるが、一般的に気泡が単独で相互の干渉なしに上昇している範囲の  $h_w$  は  $u_s$  の  $1/3 \sim 1/2$  乗に比例して増大し、徐々に気泡の攪乳がはげしくなると  $h_w$  対  $u_s$  曲線の勾配が水平になってくる。

本実験の結果をも含め図示すると図-5 のようにな

り一連の相関が得られる。

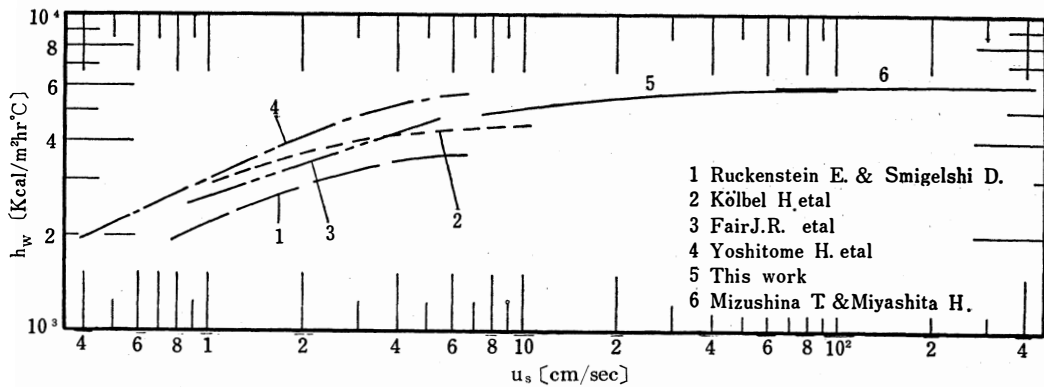


図-5 気泡塔の伝熱係数との比較

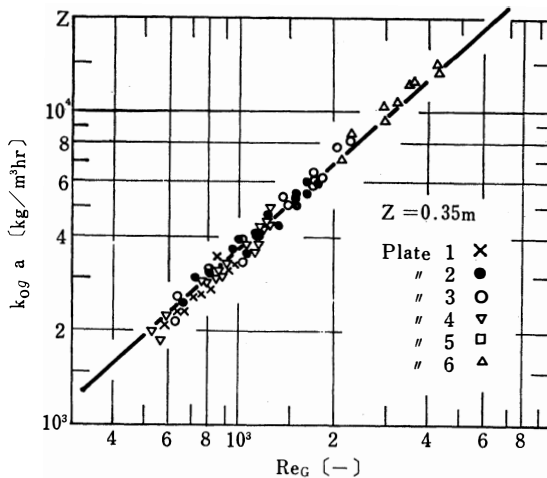


図-6 泡沫層内の物質移動容量係数 ( $Z=0.35m$ )

### 3. 3 物質移動の総括容量係数

空気の入口、出口のエンタルピーと泡沫層温度  $t_f$  における飽和エンタルピー  $i_f$  との対数平均エンタルピー差を用いて次式により算出した。

$$Q = k_{og} a S Z (\Delta i)_{l.m.} \quad (3)$$

$$(\Delta i)_{l.m.} = \frac{i_1 - i_2}{\ln \frac{i_f - i_1}{i_f - i_2}}$$

泡沫層高さ  $Z$  を一定として  $k_{og} a$  を  $Re_G$  でプロットすることとなり、 $Re_G$  の 0.9 乗に比例することが分る。つぎに泡沫層高さの影響を調べるため泡沫層高さ別にプロットすると図-7 のようになり、それぞれについて差異が生じ、これを一体の直線にまとめ整理すると  $k_{og} a$  は  $Z$  の 0.635 乗に逆比例し、次式のようにまとめることができる。

$$k_{og} a = 4.0 (Re_G)^{0.9} (Z)^{-0.635} \quad (4)$$

## 4. 結 言

伝熱係数については空塔速度が 7.55~62.5 [cm/sec] のところを求め、一般に空塔速度の小さい範囲  $u_s < 20$  [cm/sec] の気泡塔の伝熱実験と比較した。また実験装置が異なるが筆者がさきに求めた空塔速度 40~400 [cm/sec] の範囲の伝熱係数とも比較して、すべてを一本の連続した曲線で表わすことができた。装置設計のときには伝熱係数の大きい方が望ましい訳であるが、むやみに  $u_s$  を大きくすると圧力損失が大きくなり不利となる。したがって伝熱係数  $h_w$  が空塔速度  $u_s$  に無関係になる曲り角の  $u_s$  (10 [cm/sec]) をとるようにすれば有利であろうと思われる。物質移動については容量係数の形で表わし(4)式を得た。装置

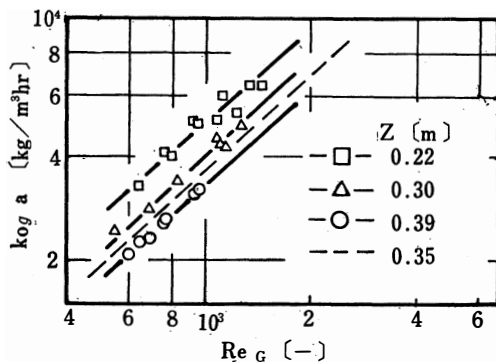


図-7  $k_{og} a$  の  $Z$  による影響

設計に際し、経済的に考慮する上に圧力損失が問題になってくるが文献に述べられていると同様の結果を得たので省略する。

#### 使用記号

a : 気・液界面の有効接触面積	$[m^2/m]$
b : 多孔板の塔径	$[m]$
G : 空気流量	$[kg/hr]$
$h_w$ : 発熱体表面泡沫層間伝熱係数	$[kcal/m^2 \cdot h \cdot r^\circ C]$
$i_f$ : 泡沫層温度 $t_f$ における飽和エンタルピー	$[kcal/kg\text{-dryair}]$
$i_1, i_2$ : 入口, 出口の空気のエンタルピー	$[kcal/kg\text{-dryair}]$
I : 電 流	$[Ampere]$
$k_{oga}$ : 物質移動総括容量係数	$[kg/m^3 hr]$
N : 多孔板穴数	$[-]$
Q : 伝熱量	$[kcal/hr]$
r : 多孔板の開口面積比	$[-]$
Re <sub>G</sub> : 空塔基準のレイノルズ数	$[-]$
Re <sub>P</sub> : 多孔板の孔径基準のレイノルズ数	$[-]$
$t_f$ : 泡沫層温度	$[^\circ C]$
$t_s$ : 発熱体表面温度	$[^\circ C]$
$u_s$ : 空気の空塔速度	$[cm/sec]$
V : 電圧	$[volt]$
Z : 泡沫層高さ	$[m]$

#### 参考文献

1. Fair, J.R., Lambright, A.J. and Andersen, J.W. : I.E.C. : Process Design and Development 133 (1962)
2. Kolbel, H, Siemes, W. Mass, R. and Mülle, K. : chem Ing, Techn, 30400 (1958)
3. 水科篤郎, 宮下尚 : 化学工学 32 987 (1968)
4. 水科, 伊藤, 宮下 : 化学工学 31 469 (1967)
5. Ruckenstein, E. and Smigelsi, O. : Trans Instn chem Eng, 43 T343 (1965)
6. 吉留ら : 化学工学 2919 (1965)  
(化学工学・北陸大会 昭和44年11月講演)