

垂直管型蒸発冷却器に関する研究

宮下 尚
野田 豊

Study on Vertical Type Evaporative Coolers

Hisashi MIYASHITA

Yutaka NODA

The transfer coefficients in vertical type evaporative coolers, that is, heat transfer coefficients for process fluid flowing in double tubes: h_f , heat transfer coefficients for falling film of cooling water: h_w , mass transfer coefficients between falling film of cooling water and air flowing upwards: k_{og} were measured and the experimental equations for them were obtained.

The object of this study is for the design of vertical type evaporative coolers .

1 緒 言

最近、工業用水の需要が増加し、それに伴い冷却水不足への対策が急務の問題とされてきた。それに対しては、空気を冷媒とする方法、冷水塔などで水を冷却して循環使用する方法、蒸発冷却その他による方法が考えられる。

本研究でとりあげた蒸発冷却とは、水の蒸発潜熱を利用して管内流体を冷却する冷却法であり、この蒸発冷却の原理にもとづく冷却器を蒸発冷却器と呼んでいる。

蒸発冷却器の冷却機構は高温のプロセス流体を流した垂直冷却器管表面を水が濡壁状に流下する際、同時

に送入された空気により持ち去られる潜熱と顕熱の移動によりプロセス流体を冷却する。

蒸発冷却器内の伝熱機構は図-1に示すように3種の流体が伝熱に関与し、プロセス流体-冷却管外壁、冷却管内壁-冷却水、冷却水-気液界面、気液界面-空気間の4個の移動係数が考えられるが、装置設計の観点より後者の2個の移動係数は冷却水-空気間の総括容量係数としてまとめた。

本研究では、これらの熱および物質移動係数を実験的に求め、装置設計に対する基礎式を与えた。

2 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を図-2に示す。装置本体は黄銅管を用い二重管とした。それぞれの管は表-1に示す。

表-1 装置の内管・外管寸法

	外径 [mm]	内径 [mm]	塔高 [m]
外 管	76	72	1.8
内 管	40	38	1.8

プロセス流体（本実験では水を用いた）は恒温槽からポンプにより塔底に送られ、管内を上昇して塔頂より出て、再び恒温槽にもどる。冷却水はタンクからポンプで塔頂に送られ内管の内壁を濡壁状に流下してタンクにもどされる。空気は送風機により塔底より送入され、冷却水と向流接触しながら上昇し塔頂より出る

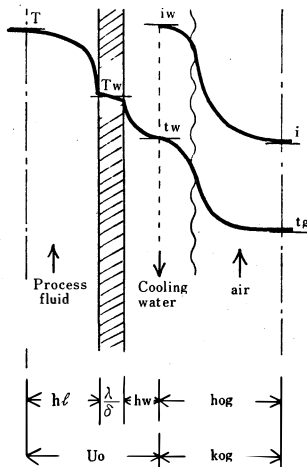
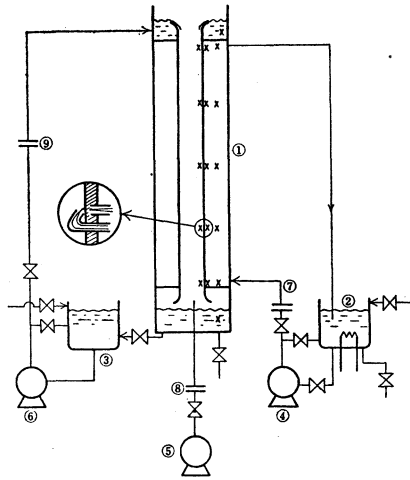


図-1 蒸発冷却器内の伝熱機構



①装置本体 ②プロセス流体恒温槽 ③冷却水タンク ④プロセス流体ポンプ ⑤送風機 ⑥冷却水ポンプ ⑦プロセス流体流量計 ⑧空気流量計 ⑨冷却水流量計 ×印: 温度測定点

図一 実験装置概略図

装置本体および管路はフェルトで断熱した。プロセス流体、冷却水の流量はオリフイスメーターで測定し、空気流量はピトー管とゲッチングン微圧計を用いて測定した。温度の測定においては、プロセス流体温度、冷却水温度、冷却管温度は図一2の×印地点に設置された17個のC-C熱電対で測定し、送風機の吸込口および塔頂の空気出口では乾湿球温度計を用いて、空気の入口、出口における温度、湿度を測定した。なお、これらの測定はすべて定常状態において行なった。

実験条件を表一2に示す。

表一2 Experimental conditions

Re_1	: $2 \times 10^3 \sim 9 \times 10^3$
Re_w	: $6 \times 10^2 \sim 7 \times 10^3$
Re_g	: $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$
Γ	: $3 \times 10^2 \sim 3 \times 10^3$
i_1	: 6 ~ 17
i_2	: 30 ~ 50
T_1	: 47 ~ 54
T_2	: 38 ~ 51
t_w	: 38 ~ 50

3 実験結果

3-1 プロセス流体の冷却管外側伝熱係数; h_2

h_2 は次式によって与えられる。

$$Q_t = LC(T_1 - T_2) = h_2 A_o (\Delta T)_{lm}$$

ただし

$$(\Delta T)_{lm} = \frac{(T_1 - T_{w1}) - (T_2 - T_{w2})}{\ln \frac{T_1 - T_{w1}}{T_2 - T_{w2}}}$$

管内を乱流で流れる流体から管壁への伝熱係数についてはMcAdams²⁾によって次式が提出されている。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2)$$

また、二重管の環状路を乱流で流れる流体から内管壁への伝熱係数についても水科³⁾らによって次式が提出されている。

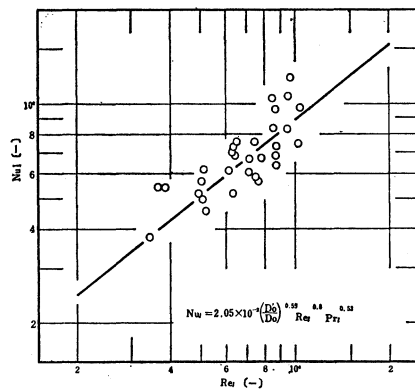
$$Nu = 0.0142 \left(\frac{D_o'}{D_o} \right)^{0.53} Re^{0.8} Pr^{0.53} \quad (3)$$

ただし、 $0.7 < Pr < 5$

(2), (3)式は共にRe数の0.8乗に比例しているので、これらの式に基づいて h_1 を相関し実験式を求めると次式が得られた。

$$Nu_t = 0.0205 \left(\frac{D_o'}{D_o} \right)^{0.53} Re^{0.8} Pr^{0.53} \quad (4)$$

(4)式は(3)式と比較すると図一3のように40%程度高



図一3 プロセス流体側(環状部)伝熱係数

い値を示した。

3-2 管壁-冷却水膜間伝熱係数, h_w

h_w と同じように Q_t を用いて h_w を求める式が与えられる。

$$Q_t = h_w A_i (T_w - t_w) \quad (5)$$

推進力としては、温度差が小さいので対数平均温度差をとることができず、それぞれの平均の差 ($T_w - t_w$)を用いた。

水が垂直管の内壁を膜状に自然流下し、空気流と接触する場合の管壁-水間の伝熱係数を求める相関式は得られていないのが現状である。

McAdams³⁾は空気流がない場合について次式を与えている。

$$h_w = 512 \Gamma^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$2100 < \frac{4\Gamma}{\mu} < 51000$$

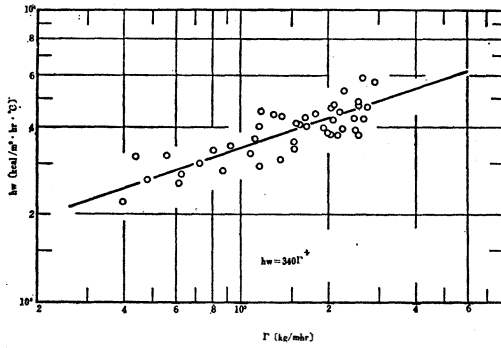


図-4 冷却水測伝熱係数

本実験により求めた h_w の値を Γ に対してプロットすると図-4のようになり、温度測定などの困難さから $\pm 30\%$ の誤差で次式を得た。

$$h_w = 340\Gamma^{1/3} \quad (7)$$

この式は(6)式に比べて約30%低い値であるが、本実験では冷却水と向流接触するため空気が上昇するときの抵抗で液膜を厚くし、管壁-冷却水間の温度差を大きくすることによるものと考えられる。

3-3 冷却水膜-空気流間総括物質移動係数; k_{og}

図-1に示したように冷却水-空気流間には総括物質移動係数 k_{og} と総括熱移動係数 h_{og} の二つが考えられるが、一般に水-空気系に対してはLewis⁵⁾の法則が成立し、また水平管型蒸発冷却器の研究^{1) 9)}においてもLewisの法則が近似的に成立することがわかっている。したがって冷却水-空気流間の物質移動はエンタルピー-推進力を用いて次式により求められる。

$$Q = G(i_2 - i_1) = k_{og} A_i (d_i)_{tm} \quad (8)$$

ただし

$$(d_i)_{tm} = \frac{(i_w - i_1) - (i_w - i_2)}{\ln \frac{i_w - i_1}{i_w - i_2}}$$

ここで i_w は i_w における飽和水蒸気のエンタルピーである。また、物質移動面積は正確には冷却水膜と空気界面の面積をとるべきであるが、近似的に A_i を用いた。

Cilliland⁹⁾らは濡壁塔の壁にそって流れる流体の、乱流で流れる空気流中への蒸発実験より次式を得ている。

$$Sh = 0.023 Re_g^{0.83} Sc_g^{0.44} \quad (9)$$

Kofesjian⁷⁾らは水の空気流中への蒸発に関する既往の実験結果に液流速の影響を考慮した次の実験式を提出している。

$$Sh = 0.0065 Re_g^{0.83} Re_w^{0.15} \quad (10)$$

本実験より求めた k_{og} を Re_g と相関させると、図-

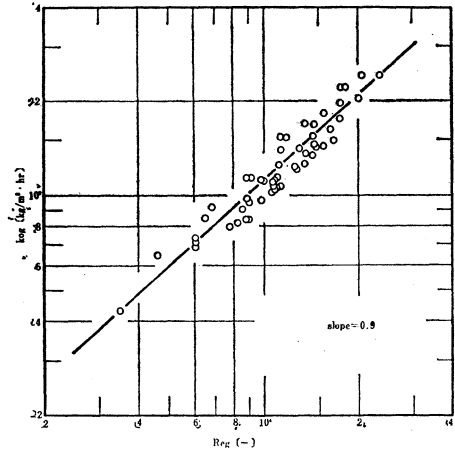


図-5 冷却水から空気への物質移動係数

(Re_w 一定)

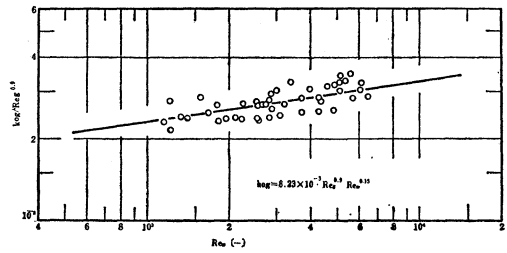


図-6 物質移動係数の冷却水流量による影響

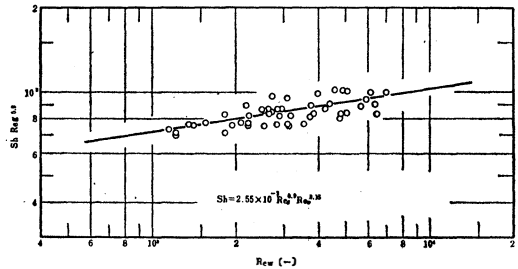


図-7 物質移動係数の無次元相関

5のように勾配0.9を得た。次に冷却水流量の影響を調べるために $k_{og}/Re_g^{0.9}$ を Re_w と相関させると図-6のように勾配0.15を得て、これらをまとめると次式が得られた。

$$k_{og} = 0.00823 Re_g^{0.9} Re_w^{0.15} \quad (11)$$

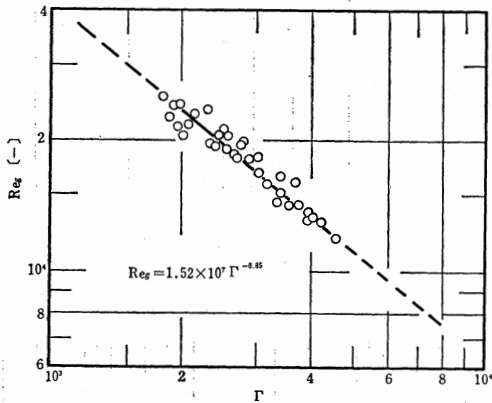
全変数を無次元数で統一するため k_{og} を Sh 数で表わすと図-7のようになり、次式を得た。

$$Sh = 0.00255 Re_g^{0.9} Re_w^{0.15} \quad (12)$$

3-4 溢沓点(Flooding Point)の測定

塔頂より降下する冷却水と向流に下部より空気を送入する場合、空気流量を増加していくと、ある点以上

の空気流量では空気は泡沫状となり降下液を吹き上げ排出空気中に飛沫同伴を起こすようになる。しだいに冷却水が降下しなくなり向流操作が不可能になる。したがって、実際の場合には、Flooding Point以下で操作しなければならない。Flooding Point (溢沓点)の結果を冷却水流量と空気流量の関数である Γ と Re_g を相

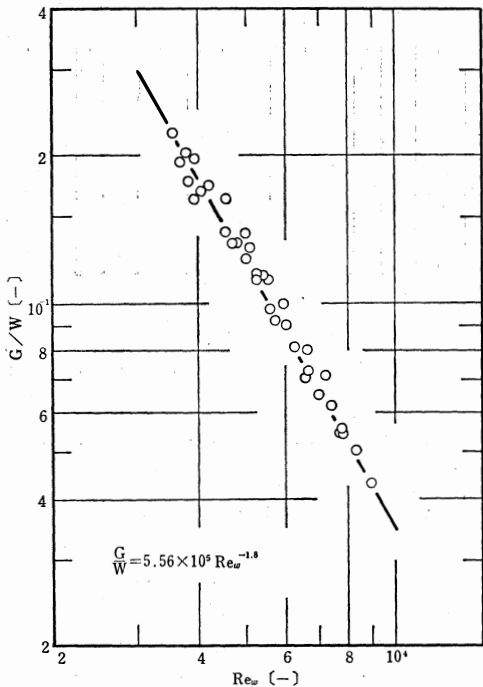


図一八 溢沓点の実験値 (Re_g 対 Γ 相関)

関させると、図一八のようになり、 $1800 < \Gamma < 4500$ においては次式を得た。

$$Re_g = 1.52 \times 10^7 \Gamma^{-0.85} \quad (13)$$

また、亀井⁸⁾らは滯壁塔における溢沓時のガス流量、



図一九 溢沓点の実験値 (G/W 対 Re_w の相関)

液流量、ガスおよび液の物理的性質および塔径の間の関係について次式を提出している。

$$\frac{G}{W} = 198 Re_w^{-1.225} \left(\frac{\sigma g_c}{D^2 \rho_w g} \right)^{-0.23} \left(\frac{\mu_g}{\mu_w} \right)^{0.71} \left(\frac{\rho_g}{\rho_w} \right)^{0.13} \left(\frac{D^2 \rho_w^2 g}{\mu_w^2} \right)^{0.231} \quad (14)$$

これに基づいて G/W 対 Re_w をプロットすると、図一九となり次式を得た。

$$G/W = 5.56 \times 10^5 Re_w^{-1.8} \quad (15)$$

ただし、本実験は冷却水温度 48°C 、空気温度 25°C 付近で行なった。

4 結 語

蒸発冷却器内における熱および物質移動に関する各移動係数の実験式を求め、既往のものと比較検討した。すなわち、

1. プロセス流体の冷却管外側伝熱係数: h_r を与える実験式 $E_q(4)$ を得、これは水科³⁾らの提出している実験式 $E_q(3)$ より 40% 高い値を示した。

2. 管壁—冷却水膜間伝熱係数; h_w は $E_q(7)$ で与えられこれは $McAdams$ ⁴⁾ の提出している $E_q(6)$ に比べて 30% 低い値を示した。

3. 冷却水膜—空気流間総括物質移動係数; kog を求める実験式 $E_q(12)$ を得た。

4. 溢沓点については実験式 $E_q(13)$ および実験式 $E_q(15)$ を得た。

使用記号

A : 伝熱面積	[m^2]
C : 比熱	[$\text{Kcal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$]
D : 拡散係数	[m^2/hr]
De : 相当直径	[m]
Di : 冷却管内径	[m]
Do : 冷却管外径	[m]
D_o : 外管内径	[m]
G : 空気流量	[kg/hr]
h : 伝熱係数	[$\text{kcal}/m^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$]
h_{og} : 空気側伝熱係数	[$\text{kcal}/m^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$]
i : エンタルピー	[kcal/kg]
i_w : 温度 t_w における空気の飽和エンタルピー	[kcal/kg]
kog : 空気側物質移動係数	[$\text{kg}/m^2 \cdot \text{hr}$]
L : プロセス流体流量	[kg/hr]
Q : 全伝熱量	[kcal/hr]
T : プロセス流体温度	[$^\circ\text{C}$]
T_w : 冷却管壁温度	[$^\circ\text{C}$]
t_w : 冷却水温度	[$^\circ\text{C}$]

U_o : 総括伝熱係数	[kcal/m ² · hr · °C]
W : 冷却水流量	[kg/hr]
μ : 粘度	[kg/m · hr]
ρ : 密度	[kg/m ³]
λ : 熱伝導度	[kcal/m · hr · °C]
σ : 表面張力	[dyn/cm]
Γ : 単位長さあたりの冷却水流量	[kg/m · hr]
Re_l : $\frac{DeL/A}{\mu_l}$	[-]
Re_w : $\frac{4\Gamma}{\mu_w}$	[-]
Re_g : $\frac{4G}{\pi Di\mu_g}$	[-]
Nu_l : $\frac{h_l \cdot D_e}{\lambda_l}$	[-]
Pr_l : $\frac{C_l \cdot \mu_l}{\rho_l}$	[-]
Sh : $\frac{k_{og} \cdot D_i}{\rho_g D}$	[-]

添 字

1 : 塔底

2 : 塔頂

g : 空気

l : プロセス流体

w : 冷却水

参 考 文 献

- (1) 水科篤郎, 伊藤龍象, 宮下尚: 化学工学 31, 496 (1967).
- (2) McAdams, W. H.: Heat Transmission, 3rd, 219, Mc-Graw-Hill, co. New York (1954).
- (3) 水科篤郎, 原幸次郎, 及能哲男: 化学機械 16, 338, (1952)
- (4) McAdams, W. H. T. B. Drew G. S. Bays, Jr.: Trans. ASME, 62, 627 (1940).
- (5) Lewis, W. K.: Mech. Eng. 44, 445 (1922).
- (6) Gilliland, E. R., T. K. Sherwood: Ind. Eng. Chem., 26, 516 (1934)
- (7) Kafesjian, R., C. A. Plank, E. R. Gerhard: A. I. Ch. E. J., 7, 463 (1961).
- (8) 亀井三郎, 大石純他: 化学工学 18, 364 (1954).
- (9) Mizushima T., R. Ito, H. Miyashita: International Chem. Eng. 8, 31 532 (1968).

(化学工学・北陸大会にて一部講演 昭和44年11月)