滴群からの熱および物質移動に関する相互干渉についての基礎的実験

三浦 邦夫*・三浦 隆利
大谷 茂盛

東北大学工学部 化学工学科

緒 言

噴霧乾燥を例にとると、乾燥塔内においては噴霧液滴群が比較的密集した状態で熱風と接触し、蒸発乾燥が進行している。従来単一液滴からの移動現象に関する研究は相当数多くなされているが^{1,2,4)}、上述のような実際の現象に近い液滴群からの熱および物質移動に関して化学工学的見地から考察された報文は少ない。液滴群からの移動現象は液滴同志の相互作用、すなわち(1)付近に存在する滴によって流れの状態が複雑に変化すること、(2)上流側の液滴からの蒸発により下流側の液滴の乾燥条件が変わることなどが考えられ、これらが熱および物質移動に影響をもたらすことが推測される。

本報では主として上記の(1)に関して従来の装置³⁾を改良し、ガラス球と水滴を直列、並列および千鳥型などに懸垂配置し、水滴からの蒸発実験を行い、ガラス球と水滴との表面間距離およびガラス球の大きさなどによって熱および物質移動係数にどのような影響があるかを測定し、単一滴の場合と比較、検討した。さらに直列配置の場合ガラス球の代わりに水滴を懸垂し下流の水滴の乾燥条件の変化もあわせて検討した。

1. 滴の配置状態

液滴とガラス球との懸垂状態を Figs. 1(A), (B), (C) に示した。Fig. 1(A) の直列配置の場合は空気流に対して上流側にガラス球●を懸垂し、その直上に水滴○を懸垂した。Fig. 1(B) の並列配置は水滴と同一平面上に直径がほぼ等しい2個のガラス球を懸垂した。Fig. 1(C) の千鳥型配置は直径がほぼ等しい2個のガラス球を上流側に水平に並べその間隔の中点上に水滴を懸垂した。

2. 実験装置および測定方法

2・1 測定部

実験装置のフローシートは前報³⁾ とほぼ同じである。

測定部の詳細を Fig. 2 に示した。アクリル製の円筒①に溝②を有する柱を取り付け、液滴およびガラス球を Figs. 2(A), (B), (C) に示すような配置状態のスライド式の凸型支持棒③に懸垂しこれらの支持棒を溝②にさし込み蒸発実験を開始する。アクリル製円筒①の周囲はパーミキュライトで保温し測定部における空気温度の低

下を防いだ。液滴の蒸発現象を観察するためにこの円筒の一部にガラス平板④を2枚平行に挿入しここから液滴を観察した。

Fig. 2(A) の直列配置の場合の凸型支持棒③には、直径約 200 $\mu\phi$ のガラス細線⑤を2本水平に支持し、この先にガラス球をつけ、一方には 40 $\mu\phi$ のコンスタンタン線⑥を斜めに取り付けその先端に液滴○を懸垂した。液滴とガラス球との表面間距離 b を変える場合にはガラス細線⑤を凸型支持棒③に改めて別の位置に取り付けた。また Figs. 2(B), (C) のようにガラス球同志の間隔も変化させたい場合にはガラス細線⑤にガラス球●を付け直した。

2・2 空気温度などの測定

Fig. 2(D) の支持棒は4本の 80 $\mu\phi$ 銅-コンスタンタン熱電対⑦を滴の懸垂される範囲内に配置し、これを溝②に挿入し、測定部の空気温度分布を測定するためのものである。一般に液滴を懸垂する 3 cm 位の区間で高さ方向の温度変動は $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内とみなせた。液滴温度の測定は前報³⁾ と同様な方法で行った。直列配置の場合液滴はガラス球の下流にあるため滴前方よどみ点付近における空気速度が小になり液滴温度が若干上昇することも考えられるが、これを無視して単一液滴の測定結果から得た液滴温度をもってガラス球下流の液滴温度とした。空気速度は円筒内平均速度で代表させ、空気湿度は送風機からバイパスに空気を送り、そこで 80 $\mu\phi$ 銅-コン

Fig. 1 Diagrammatic representation of the assemblies of spheres

* 高砂熱学工業(株)

Fig. 2 Details of test section

Fig. 3 Change of droplet weight with time

タンタン熱電対により乾湿球温度を測定して求めた。

2・3 蒸発速度などの測定

上述したように実測した空気速度 u_a 、液滴温度 t_w 、空気温度 t_a などから計算される単一滴の $(2+0.625 \times Re^{1/2} Pr^{1/3})$ の値²⁾を Nu_0 とし、後述する方法によって求めた蒸発速度から干涉滴の Nu 数を算出し、これを Nu_0 で除し Nu/Nu_0 の値より液滴群の相互干涉効果を考察した。

液滴の蒸発速度は次のようにして求めた。Fig. 2④の観察窓から蒸発過程における液滴をカメラとストロボとを同調させて写真撮影した。その結果を桐柴ら⁷⁾が行ったようにスライドにより投影拡大し、対角線方向の液滴直径を測定しその算術平均を液滴直径とした。この写真撮影から求めた滴径の経時変化からその重量変化を算出し、それを2次式で近似した。重量変化の測定値および近似式の一例をFig. 3に示した。データのばらつきは少なくほぼ満足できこのデータから単位表面積あたりの蒸発速度 $(-dW/d\theta \cdot A)$ を求めた。なお、この際懸垂糸からの伝導伝熱³⁾ および周囲壁からの輻射伝熱の影響を考慮に入れて熱および物質移動係数を算出した。

Table 1 Experimental ranges

Material	Distilled water	Glass bead
Temperature of air [°C]	65~95	
Velocity of air [m/sec]	0.6~1.9	
Configurations	Series and parallel types	Zig-zag type
Diameter of water droplet d_p [mm]	0.9~2.15	1.14~2.32
Diameter of glass bead d_g [mm]	1.23~4.23	2.14~5.76
Distance between glass bead surface and water droplet surface b [mm]	0.79~11.41	0.44~6.16
Distance between two glass bead surfaces in zig-zag type B [mm]	—	0 ~1.66
Reynolds number	30~210	

2・4 実験範囲

実験は Table 1 に示すような測定範囲で行った。

3. 滴が直列に配置された場合

3・1 熱および物質移動係数

Fig. 1 (A) のようにガラス球と液滴とが直列に配置された場合の蒸発実験の結果を Nu/Nu_0 と b/d_g の関係で、 d_p/d_g をパラメータとして Fig. 4 に示した。

ガラス球と液滴との両者の表面間距離 b とガラス球径 d_g との比 b/d_g が 1.5~2 より小さい場合には、 d_p/d_g によって Nu/Nu_0 の値が異なり d_p/d_g が大きくなるほど Nu/Nu_0 は増加している。つまり液滴径がガラス球径に比べて大きいほど、液滴がガラス球による後流の中に存在していることによる影響が少ないと思われる。一方 $b/d_g > 2$ になると Nu/Nu_0 の値は漸時に 1 に近くなり、また d_p/d_g による Nu/Nu_0 に対する影響はそれほど明瞭な差はみられなかった。結局 $b/d_g < 2$ の場合には液滴がガラス球の後流の中に入っているために、その滴の Nu 数は干涉がない場合の Nu 数より小さい値を示し、 b が大きくなるほど Nu 数は増加する。そして $b/d_g > 2$ になるとガラス球の後流は液滴前方でほぼ回復し干涉滴

Fig. 4 Relationship between Nu/Nu_0 and b/d_g (series type)

Fig. 5 Relationship between Nu/Nu_0 and $(b/d_g)^{1/4} \cdot (d_p/d_g)^{1/6}$

の Nu 数は干渉がない場合の Nu 数の値に近づくものと考えられる。この傾向は Mullin 氏³⁾のものとも同様の傾向を示している。

次に Fig. 4 の縦軸および横軸を対数にとり、その図から Nu/Nu_0 と d_p/d_g との関係求めた。その結果 $b/d_g < 2$ の場合には、 $Nu/Nu_0 \propto (b/d_g)^{1/4} \cdot (d_p/d_g)^{1/6}$ という関係を得た。すなわち b/d_g の方が d_p/d_g よりも後流中の移動速度 Nu/Nu_0 に影響を与えるものと考えられる。

Fig. 5 に Nu/Nu_0 と $(d_p/d_g)^{1/6} \cdot (b/d_g)^{1/4}$ との関係を示した。図中●印は上流においてあったガラス球の代わりに水滴を懸垂した場合で、この水滴の蒸発による空気湿度の変化が下流の液滴の蒸発にどのような影響を与えるかを空気流の速度減衰(後流)の影響をも合わせて測定したものである。この場合にも円筒内平均速度を空気の代表速度とし、単一液滴の温度測定から求めた温度を液滴温度として Nu_0 を算出し比較の基準にしている。

また図中実線はガラス球と水滴とを直列に配置した場合の測定値○印から最小2乗法によって得た直線であり、データのばらつきは±15%程度である。この図からわかるように水滴と水滴とを連ねた場合の Nu 数(●

Fig. 6 Relationship between Sh/Sh_0 and $(b/d_g)^{1/4} \cdot (d_p/d_g)^{1/6}$

Fig. 7 Relationship between Nu/Nu_0 and $(b/d_g)^{1/8}$

印)の方が、ガラス球と水滴とを連ねた場合の Nu 数(○印)よりも幾分低い値を示している。これは上流にある液滴の蒸発蒸気により下流の液滴の周辺の空気湿度が大きくなったこと、および上流の液滴の蒸発により空気湿度が低下したことなどのためと考えられる。しかしこの影響は本実験条件の範囲では上流に存在する滴の後流による影響ほど大きいとは思われない。

以上熱移動のみに着目して整理してきたが、物質移動についても同じように Sh/Sh_0 に対して $(b/d_g)^{1/4} \cdot (d_p/d_g)^{1/6}$ により相関すると、熱移動の場合と同じ実験式が得られ、熱と物質移動とが相似であることがわかった。その結果を Fig. 6 に示した。

一方 $9 > b/d_g > 2$ の場合には、ガラス球の後流が空気流の混合により液滴の前面で回復し d_p/d_g による影響を受けないと思われるので、 b/d_g による変化のみを考慮し Nu/Nu_0 と b/d_g とを両対数にとり、それらの関係を求めその結果を Fig. 7 に示した(○印)。実線は最小2乗法を使って求めた直線であり、相当のパラッキはあるがほぼ1本の直線で相関され、 $Nu/Nu_0 \propto (b/d_g)^{1/8}$ という

Fig. 8 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 9 Photograph of wake

Fig. 10 Relationship between L/d_p and Re

ことがわかった。なお●印は前述と同じく水滴と水滴とを連ねた場合の Nu/Nu_0 値を示したものである。

3・2 後流域における流動状態による考察

本節では速度の減衰した後流域の模様を写真撮影し、その領域における流れ状態が球相互間の移動現象にどのような影響を与えるかの定性的知見を得るために、Fig. 8 に示す実験装置により検討した。

Fig. 8 において、細い糸にカメラ③と鉄球⑤とをプーリー②を介して連結し、モーター①を回転させカメラと鉄球とを等速度で一緒に運動させる。④の水槽中にはアルミ粉末が浮遊させてある。側壁のスリット⑥から光を当て、アルミ粉末による乱反射を利用して写真をとった例が Fig. 9 である。浮遊しているアルミ粉末の軌跡の長さにより、後流中での速度は主流速度より小さいことがわかり、このことが下流における滴の Nu/Nu_0 を 1 より小さくしている主因と思われる。

球表面から後流端までの長さ L と鉄球直径 d_g との比 L/d_g と Re 数との関係を Fig. 10 に示した。図中実線は種子田⁶⁾によって測定された実験線である。種子田の実験は Re 数が 24~200 の範囲で行われ、 Re 数が約 100 までは後流の大きさ L は Re 数によって直線的に増加

Fig. 11 Schematic representation of air flow pattern (series type)

Fig. 12 Relationship between u_w/u_m and b/d_g

しており、それ以上の Re 数では Re 数によらないと述べている。本実験は Re 数がさらに大きい範囲で行ったものであり、データにバラツキはあるがほぼ後流の長さが Re 数によらないことを示した。さらに鉄球を 2 個直列に連ねた場合 ($b/d_g < 2$) の後流の模様を Figs. 11(a), (b) に模式的に示した。 d_p が d_g に比べて小さい場合は Fig. 11(a) に示したように下流球が速度の減衰した後流中にその全体が入ってしまい、前述の気流中での Nu/Nu_0 が比較的小さい値を示す理由が定性的にうなずける。 d_p が大きくなると Fig. 11(b) に示すように後流中に浸る領域が小さくなり、上流球後流の影響を受ける度合いが少なくなる。

さて上述の水中における定性的な実験と並行して以下に述べる気流中での実験を同時に試み、後流域における流動状態の影響を検討した。Fig. 12 は直径 17 mm のガラス球を内径 106 mm の風洞中に懸垂しガラス球表面からの距離 b を変化させ、熱線風速計によって球の後流の軸方向の速度分布を測定した結果である。図中 u_w は上流側にあるガラス球によって生ずる後流のうち、ガラス球径 d_g によって投影される断面内の平均速度であり、一方 u_m はオリフィスによって計量された風洞内平均速度で、これらの比 u_w/u_m と b/d_g との関係を示した。

このガラス球の下流に同じ直径の滴を直列に配置した場合を仮想して、下流の滴からの移動速度を求めてみた。この計算条件には前述の測定値を用いて Pr 数を求め Re

Fig. 13 Relationship between Nu_{cal}/Nu_0 and $(b/d_g)^{1/4}$ ($d_p=d_g$)

Fig. 14 Relationship between Nu_{cal} and $(b/d_g)^{1/8}$ ($d_p=d_g$)

数の代表速度としては Fig. 12 の u_w を用い、Ranz と Marshall の式⁷⁾ によって Nu 数を算出した (Nu_{cal})。ついで u_m により代表させた Re 数から求まる Nu_0 より Nu_{cal}/Nu_0 の比を算出した。この Nu_{cal}/Nu_0 と b/d_g との関係は $b/d_g < 2$ の場合には Fig. 13 に、 $b/d_g > 2$ の場合には Fig. 14 にそれぞれ示した。なお図中実線は Fig. 5 および Fig. 7 の実験式をそれぞれ示したもので図中の計算点をよく相関している。結局このように上流側に存在する滴の後流によって生じる速度減衰の程度を考慮して速度を補正してやれば、熱および物質移動速度がある程度推定可能なことがわかる。

4. 滴が並列および千鳥型に配置された場合

4・1 並列配置の場合

Fig. 1 (B) のようにガラス球と液滴とを並列に配置した場合の蒸発実験の結果を、 Nu/Nu_0 (○印) と b との関係で Fig. 15 に示した。 b は滴と両側のガラス球との間隔の算術平均値である。滴間隔に無関係にほぼ $Nu/Nu_0 = 1$ であった。結局 1 列の並列配置の場合は滴周囲をよぎる空気速度に多少の増加があったとしても、本実験範囲内では単一液滴の場合と同様の条件で蒸発が進行していると考えられる。なお図中 ● 印は前述と同様 Sh/Sh_0 の値を示している。

Fig. 15 Relationship between Nu/Nu_0 and b (parallel type)

Fig. 16 Relationship between Nu/Nu_0 and d_p/B (zig-zag type)

4・2 千鳥型配置の場合

Fig. 1 (C) のようにガラス球と液滴とを千鳥型に配置した場合の蒸発実験結果を Fig. 16 に示した。上流側に並列におかれたガラス球同志の間隔を B とした。この実験は b/d_g が 0.2 から 1.61 の範囲ですべて 2 以下について行っている。その結果 b/d_g によらず d_p/B によって Nu/Nu_0 が変化し、 $d_p/B < 2$ 、つまりガラス球同志の間隔が液滴径の 1/2 以上になるとガラス球による流れの影響を受けず、 Nu/Nu_0 はほぼ 1 を示した。一方 $d_p/B > 4$ の場合にもほぼ一定値を示し $Nu/Nu_0 \approx 0.57$ であった。両者の中間の範囲 $2 < d_p/B < 4$ の場合には、測定値にバラツキはあるがそれらの遷移的な状態を示した。なお ● 印で示すように Sh/Sh_0 に対しても同様の結果が得られた。

結 言

滴群からの移動現象に関して、滴同志の相互作用が熱および物質移動係数にどのような影響があるかを基礎的に検討するため、比較的簡単な配列状態にある滴群からの移動速度を測定し、単一滴の場合の値と比較・検討した。その結果、 $30 < Re < 210$ の範囲で次のような実験式を得た。

(1) 直列配置の場合

$$b/d_g \leq 2 \quad Nu/Nu_0 (\text{or } Sh/Sh_0) = 0.71(b/d_g)^{1/4} \times (d_p/d_g)^{1/6} + 0.07$$

$$b/d_g > 2 \quad Nu/Nu_0 \text{ (or } Sh/Sh_0) = 0.42(b/d_g)^{1/8} + 0.41$$

(2) 並列配置の場合

$$Nu/Nu_0 \text{ (or } Sh/Sh_0) \approx 1$$

(3) 千鳥型配置の場合

$$d_p/B < 2 \quad Nu/Nu_0 \text{ (or } Sh/Sh_0) \approx 1$$

$$d_p/B > 4 \quad Nu/Nu_0 \text{ (or } Sh/Sh_0) \approx 0.57$$

なお噴霧乾燥における一般的な操作条件は本実験範囲と相当異なる場合も多く、本結果がそのまま実際の噴霧乾燥に適用できるか否かは今後の検討を要すると思われる。

Nomenclature

A	= surface area of droplet	[cm ²]
B	= distance between two glass bead surfaces in zig-zag type	[mm]
b	= distance between glass bead surface and water droplet surface	[mm]
d_g	= diameter of glass bead or iron ball	[mm]
d_p	= diameter of water droplet	[mm]
L	= length of wake	[mm]
Nu	= Nusselt number	[—]
Nu_{cal}	= calculated value of Nusselt number	[—]

Pr	= Prandtl number	[—]
Re	= Reynolds number	[—]
Sh	= Sherwood number	[—]
t_a	= temperature of air	[°C]
u_m	= mean air velocity in wind tunnel	[m/sec]
u_w	= mean air velocity in wake	[m/sec]
W	= weight of droplet	[mg]
θ	= time	[sec]

Literature cited

- 1) Frössling, N.: *Gerlands Beiter. Geophys.*, **52**, 170 (1938)
- 2) Miura, K., I. Ouchi, K. Atarashiya and S. Ohtani: *Kagaku Kōgaku*, **35**, 643 (1971)
- 3) Mullin, J.W. and C.R. Treleaven: *Proceeding of the Symposium on the Interaction between Fluids and Particles* (London), p. 203 (1962)
- 4) Ranz, W.E. and W.R. Marshall, Jr.: *Chem. Eng. Progr.*, **48**, 141, 174 (1952)
- 5) Sano, Y. and S. Nishikawa: *Kakaku Kōgaku*, **28**, 275 (1964)
- 6) Taneda, S.: *Rep. Res. Inst. Appl. Mech.*, **4**, 99 (1956)
- 7) Toei, R., M. Okazaki, K. Kubota, K. Ohashi, K. Kataoka and K. Mizuta: *Kagaku Kōgaku*, **30**, 43 (1966)

(1974年6月20日受理；化学工学協会新潟大会（新潟，1973年7月）にて発表）

Effect of Surrounding Glass Beads on Heat and Mass Transfer from a Water Droplet

Kunio Miura*, Takatoshi Miura and Shigemori Ohtani

Dept. of Chem. Eng., Tohoku Univ., Sendai

Although the effect of surrounding droplets on heat and mass transfer from a droplet is essentially important for the design of spray dryers, few experimental or theoretical studies have been made. To study this problem, heat and mass flux from a water droplet placed in the following three arrays were measured. They were then compared with those measured without surrounding glass beads. (1) A droplet was placed downstream at various distances from a glass bead along the flow (series type). (2) A droplet was placed at the center between two glass beads across the flow (parallel type). (3) A droplet was placed downstream of two glass beads (zig-zag type).

Mass flux was determined from the change of droplet diameter by using a photographic technique, and heat flux was considered to be equal to the amount of latent heat transfer.

Heat and mass transfer coefficient, namely Nu and Sh , obtained in the above three arrays were compared with Nu_0 and Sh_0 determined without the surrounding glass beads. As a result, the ratio of Nu/Nu_0 in series type was found to be a function of b/d_g and d_p/d_g , where b , d_g , and d_p are respectively the distance between surfaces of a droplet and glass bead, the diameter of a glass bead, and the diameter of water droplet. On the other hand, in parallel type, Nu and Sh were not affected by the presence of glass beads. In the zig-zag type, they were also not affected when the ratio of droplet diameter to distance between surfaces of two glass beads was smaller than 2. However, when this ratio exceeded 4, the value of Nu/Nu_0 took a constant value of 0.57.

* Takasago Thermal Eng. Co., Ltd.