ぬれにくい回転水平円管外面における水滴の挙動*

陳 東 克 彦*¹, 細 川 力*²
細 川 故 延*², 小 松 源 一*²

The Behavior of a Water Drop on a Rotating Horizontal Tube

Katuhiko JINDO, Tutomu HOSOKAWA,
Yoshiobu HOSOKAWA, and Gen'iti KOMATU

This study has been undertaken to clarify the motion of condensate drops on a rotating horizontal tube under dropwise condensation. It is difficult to clarify the behavior of condensate drops on a condensing surface, because of their constantly changing weight and shape. Therefore, in air, the behavior of a water drop with a constant weight on a rotating dry tube was investigated using a video-tape recorder. Moreover, the velocity and the location of a falling drop on a rotating tube were calculated. The effect of the rotating speed on the behavior of a water drop was clarified.

Key Words: Phase Change, Dropwise Condensation, Rotating Horizontal Tube, Water Drop, Drop Behavior

1. 緒 言

滴状凝縮における凝縮水の挙動はその熱伝達に大きな影響を及ぼす。したがって、著者らは既報⁽¹⁾⁽²⁾で静止水平円管を対象として、凝縮水の挙動と熱伝達の関係を紹介している。それらの成果より、凝縮伝熱円管を回転させることによって凝縮水の伝熱面掃除効果による伝熱促進が予測される。

回転による遠心力が凝縮熱伝達に及ぼす影響について、膜状凝縮に関してはいくつかの論文⁽³⁾⁽⁴⁾が報告されているが、滴状凝縮に関しては報告は極めて少ない。棚沢ら⁽⁵⁾は液滴の離脱径に及ぼす遠心力の影響について実験的に検討している。また、中田ら⁽⁶⁾は伝熱面に作用する遠心力の大きさと方向の両方を変化させて、その熱伝達に及ぼす影響について考察している。しかし、それらはいずれも比較的狭い伝熱面を対象としている。

著者らは比較的広い伝熱面をもつ回転水平円管外面を対象として滴状凝縮熱伝達の研究を進めているが、

実際の凝縮器内における回転水平円管外面の凝縮滴の挙動を解明することは極めて困難である。そのため、凝縮滴の挙動と熱伝達を求めるに先立ち、大気中におけるぬれにくい回転水平円管外面の質量既知の水滴の挙動として、特に滴の転落速度、落下位置、付着時間、滴に作用する分離力などについて検討する。

2. 実験装置と方法

図1は実験装置の概略を示す。試験円管には外径 $D = 20.1, 62.3, 101.6$ mm のぬれにくい表面をもつテフロン製円管を用い、定常回転する試験円管外面の上端部に添加用ガラス管より慎重に滴下した既知質量 M の水滴の転落・落下現象を、管軸方向に設置したビデオカメラによって撮影し、時間経過に対する滴の前端および後端の転落位置を画像解析した。また、滴挙動に影響を及ぼす水滴とテフロン面間の接触角 θ_c を静止滴について求め、 $\theta_c = 83.9^\circ$ であった。

3. 実験結果と考察

3-1 滴の転落状況 図2は(a)静止円管、(b)回転円管それぞれの外面における時間経過 t に対する転落滴の挙動の一例を示す。 N は円管回転数を表し、円管外面における滴位置は円管上端部を原点とする傾

* 昭和63年3月18日 関西支部第63期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年9月3日。

*¹ 学生員、姫路工業大学大学院 (〒671-22 姫路市書写2167)。

*² 正員、姫路工業大学。

斜角 α で表す。静止、回転いずれの場合にも、滴は離脱後円管外面を転落し、 $\alpha \approx 120^\circ$ 付近で円管より落下するが、回転の場合は静止の場合と比べて離脱から落下までの円管外面への付着時間が明らかに短く、転落速度が大きいたことがわかる。回転数、滴質量によって、落下せず円管外面で停止、あるいは円管とともに回転を続ける滴も見られる。

観察より、滴の転落速度、停止および落下位置、付着時間、滴に作用する分離力などによって回転円管外面の滴挙動を表すことができる。したがって、それらの項目について回転数、管径、および滴質量を変えて測定した結果を以下に示す。

3.2 滴の転落速度 管径 $D=62.3$ mm, 滴質量 $M=0.044$ gr で一定としたときの、フルード数 Fr の変化に対する転落滴の絶対速度 U と傾斜角 α の関係を図 3 に示す。ここで、フルード数は $Fr=D\omega^2/2g$ (ω : 回転角速度, g : 重力加速度) より求めた。また、 U は、離脱直後の比較的低い U については α で約 5° 転落する間の平均速度より、最高速度付近の比較的高い U については 0.03 秒の転落時間経過に対する平均速度より求めた。図 3 より、 Fr 数の変化に対して U は 3 種類の異なる分布状態を示すことがわかる。 $Fr \leq 0.081$ の場合、滴は $\alpha \approx 120^\circ$ 付近で最高速度を示した後 $\alpha \approx 240^\circ$ 付近で円管外面に停止する。 $Fr=0.160$ の場合、 $\alpha \approx 270^\circ$ 付近で最低速度となるが円管外面に停

止せず、その後再び U は増加しそれまでと同様の速度分布を繰返す。 $Fr \geq 0.290$ の場合、 $\alpha \approx 120^\circ$ 付近で最高速度を示した後、円管から落下する。

以上の結果は回転数 N を変化した場合であるが、次に N を一定とした場合の速度分布に及ぼす D および M の影響について検討する。図 4 は $N=67.68$ rpm で一定とした場合の速度分布を示す。 D あるいは M が大きくなるに従って、滴は円管外面から落下しやすく、その最高速度も大きくなる。しかし、 D あるいは M を変化した場合の速度分布も、 N を変化した場合の速度分布と同様に 3 種類に分類できる。

図 3、図 4 より、転落滴は 3 種類の速度分布を示すことがわかった。そこで、円管外面より落下しない滴について、転落滴の速度分布を計算によって求め、その速度分布に及ぼす N の影響を検討する。傾斜面上の転落滴に関する運動方程式として次式が報告されている⁽⁷⁾。

$$M \frac{dU}{dt} = Mg \sin \alpha - \sigma \int_0^b (\cos \theta_R - \cos \theta_A) db - R \quad \dots\dots\dots (1)$$

図 1 実験装置

図 2 滴挙動の一例

図 3 速度分布 (Fr 数変化)

図 4 速度分布 (D および M 変化)

ここで、 g は重力加速度、 σ は表面張力、 b は滴の接触面直径、 θ_A は滴の前進接触角、 θ_R は滴の後退接触角、 R は粘性による摩擦抵抗力をそれぞれ表す。式(1)を回転円管外面の転落滴に適用することによって、 U に関する次式を得る。

$$U = \left(\frac{B}{A} + \frac{\pi DN}{60} \right) \exp(-At) - \frac{B}{A} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

$$A = \frac{k_1 f(\theta_m)_1}{M^{2/3} \rho^{1/3}} \left\{ \sigma k_2 \frac{\Delta \theta_{co}}{U_{RC}} + \frac{\pi^2}{8} k_1^3 f(\theta_m)_1 \mu \right\} \dots \dots \dots (3)$$

$$B = -g \sin \alpha + \frac{k_1 f(\theta_m)_1}{M^{2/3} \rho^{1/3}} \left[\sigma k_2 \theta_o - \frac{\pi DN}{60} \left\{ \sigma k_2 \frac{\Delta \theta_{co}}{U_{RC}} + \frac{\pi^2}{8} k_1^3 f(\theta_m)_1 \mu \right\} \right] \dots \dots \dots (4)$$

ρ は密度、 k_1, k_2 は定数、 $\Delta \theta_{co} = \theta_c - \theta_o$ 、 $\theta = \cos \theta_R - \cos \theta_A$ 、 θ_o は転落直前の θ 、 U_{RC} は試験面に対する相対速度で表す無尾限界速度、 μ は粘性係数、 $f(\theta_m)_1 = 2 \sin \theta_m / \{1 - \cos \theta_m\} (2 + \cos \theta_m)^{1/3}$ をそれぞれ表す。以下の計算は、文献⁽⁷⁾と同様に $\sigma = 0.0739 \text{ N/m}$ 、 $\theta_o = 0.305$ 、 $\theta_c = 1.4$ 、 $k_1 = 1.0$ 、 $k_2 = 0.666$ 、 $\rho = 958 \text{ kg/m}^3$ 、 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 、 $\theta_m = 90^\circ$ を用いた。式(2)より、 $D = 62.3 \text{ mm}$ 、 $M = 0.044 \text{ gr}$ の場合について各回転数における U を計算より求め、その結果を図5に示す。図より、 N が大きいほど U は大きな値を示し、より大きな角度で停止する。その速度分布は図3に示した実験値と定性的に一致する。なお、図5の計算は文献⁽⁷⁾より $U_{RC} = 58 \text{ cm/s}$ として行った。しかし、表面の性質によって異なる値を示し滴挙動に大きな影響を及ぼす U_{RC} は、その測定が困難であり、実験・理論の両面において説明されていない。そこで、 U_{RC} を変えた場合の U の計算値を図6に示す。図より、 U_{RC} の値によって速度分布の形状は異なる。 U_{RC} の増加に従って U の最大値は大きくなり、停止位置は小さな角度となる。図中プロットは実験値を表し、 $U_{RC} = 15 \text{ cm/s}$ とした場合の計算値と比較的よく一致している。

3.3 落下位置 次に、円管からの落下滴についてその落下位置を検討する。図7は滴の落下位置 d_c と Fr 数の関係を示す。 M にかかわらず、 Fr 数が大きくなるに従ってより小さな角度で滴は円管外面より落下する。また、 $Fr > 1$ での d_c の値は $Fr < 1$ までの傾向と異なり、 Fr 数の増加に対して急激に d_c の値は小さくなる。 M が大きくなるに従って各 Fr 数における d_c の値は小さくなり、滴は円管外面から落下しやすくなる。 M が小さい場合には落下せず円管外面上に停止する滴も見られ、その停止位置 d_s を□印で図

中に示した。なお、実験値は5回の測定の平均値を示し、同時に最大値と最小値を示しており、実験値のばらつきは比較的小さいと言える。

3.4 付着時間 図8は滴の離脱から落下までの円管への付着時間 T と Fr 数の関係を示す。 Fr 数が大きくなるに従って T は短くなり、特に Fr 数が比較的小さな範囲では Fr 数の増加に対する T の減少の割合が大きいことがわかる。なお、図7と同様に実験値は5回の測定の平均値を示し、同時に最大値と最

図5 速度分布 (計算結果)

図6 速度分布 (計算値と実験値の比較)

図7 落下位置

図 8 付着時間

小値も示している。

3・5 滴に作用する分離力 円管表面の転落滴に作用する管半径方向の分離力 F を遠心力と重力の分力の和で表し、次式より求める。

$$F = Mg \left\{ \cos(180^\circ - \alpha) + \frac{2U^2}{gD} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)より Fr 数の変化に対する F の値を求め、 F と α の関係を図 9 に示す。円管外面から落下しない滴については、 F の最大値は Fr 数にかかわらず約 0.5 mN で一定値を示している。また落下する滴については、0.5 mN を越えた F の値で円管外面より落下し、その F の値は Fr 数が大きくなるにしたがって大きくなるようである。

以上の結果と考察は、主として $D=62.3$ mm の場合について行われたが、 $D=20.1, 101.6$ mm の場合もほぼ同様の結果が得られた。

4. 結 言

大気中でぬれにくい回転水平円管外面における質量既知の水滴の挙動を観察することによって、本実験範囲で以下のことがわかった。

(1) 転落滴の絶対速度 U は、 Fr 数の変化に対して概略 3 種類の異なる分布を示す。また、 U の計算値

図 9 分離力

は $U_{RC}=15$ cm/s の場合に実験値と良く一致する。

(2) 滴が円管外面から落下する場合、 Fr 数が大きくなるに従って滴はより小さな角度で円管より落下し、落下までの付着時間はより短くなる。

(3) 滴が円管外面より落下しない場合、滴に作用する分離力 F の最大値は Fr 数によらず 0.4~0.5 mN でほぼ一定値を示す。

以上の結論は、回転水平円管外面の滴状凝縮熱伝達における凝縮滴の挙動を説明する際の基礎的資料となる。

終わりに、本研究の端緒を開いていただいた河合彊元姫路工業大学教授に深謝の意を表す。また、実験を行うにあたりご協力いただいた山崎裕司君に謝意を表す。

文 献

- (1) 細川・ほか 3 名, 機論, 49-447, B (昭 58), 2478.
- (2) 細川・ほか 3 名, 機論, 51-472, B (昭 60), 4055.
- (3) Singer, R. M. and Preckshot, G. W., *Proc. Heat Transf. Fluid Mech. Inst.*, 14 (1963), 205.
- (4) Sparrow, E. M. and Gregg, J. L., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Ser. C, 81 (1959), 113.
- (5) 棚沢・ほか 3 名, 機論, 42-361, (昭 51), 2846.
- (6) 中田・ほか 2 名, 第 22 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (昭 50-5), 317.
- (7) 河合, 機論, 32-233, (昭 41), 107.