落下液滴上への非混合直接接触凝縮に関する研究*

中 島 宏^{*1}, 棚 沢 一 郎^{*2}

Direct Contact Condensation of the Vapor of an Immiscible and Insoluble Substance on Falling Liquid Droplets

Hiroshi NAKAJIMA and Ichiro TANASAWA

Direct contact condensation of Freon R 113 vapor at atmospheric pressure on the surface of falling drops of chilled water was investigated experimentally. Water and R 113 were immiscible and insoluble, the condensed phase forming a separate layer on the water droplets. The dependence of the rate of condensation on the initial subcooling (11-38 K) was measured with high accuracy at different falling distances. The results were compared with those obtained for condensation on solid particles, which made clear the importance of the effects of deformation of condensate film and the circulatory flow inside the drops.

Key Words: Heat Transfer, Condensation, Direct Contact Heat Transfer, Immiscible Substance, Circulatory Flow

1. は じ め に

落下中の低温の液滴上に、これと混じり合わない他物質の蒸気が直接接触凝縮する際には、同一物質の場合とは異なり、液滴の挙動に特異な現象が認められることが張ら⁽¹⁾により報告されている。この現象は、両物質の表面・界面エネルギー、液滴内部の流動、液滴自身の変形振動および凝縮液膜の厚さの分布などに関連し、熱伝達率を向上させる効果があると考えられる。

本研究では、張ら⁽¹⁾による実験結果の不十分な点を補い、新たな知見を得るために、張らと同じく低温分散相として水滴を、高温連続相に水とほとんど溶け合わないフロン R 113 の蒸気を用い、大気圧下での測定を行った。また、液滴内の流動や変形の効果を確認するため、分散相として熱伝導率の異なる 2 種の固体球、すなわちガラス球と黄銅球を使用した実験をあわせて行い、その実験結果を、液滴内の流動と変形振動を無視し、凝縮液膜の厚さを一様とし、その熱抵抗のみを考慮した Jacobs ら⁽²⁾の熱伝導数値解と比較した。

2. 実験装置および実験方法

図 1 に実験装置の概略を示す。テスト部本体①はベークライト製で、断面は 200 mm×200 mm の正方形、高さは 700 mm であり、4 側面にガラス窓を設けた。ボイラ②で発生した R 113 蒸気は、テスト部の底部より本体内部に導入した。水滴をつくるには、本体上方の水だめ③よりの水を、微量流量調整バルブを介して内径 0.7 mm、外径 1 mm のステンレス鋼管製ノズル⑦に導き、一定の生成頻度 ($N=0.1 \text{ s}^{-1}$) で落下させた。初期水滴温度は、ノズル本体周囲に恒温槽⑥からの水を循環させて一定値に調節し、ノズル直下約 0.5 mm の位置に上向きに置いた銅-コンスタンタン熱電対によって測定した。この熱電対は水滴排除用の小形容器内に設置されており、液滴質量の測定時には容器とともに移動できるようにした。

落下前の水滴と R 113 蒸気とが接触し凝縮が起こるのを防ぐため、ノズル周囲にガラス製のカバー④を設け、その内部に窒素ガスを導入した。窒素ガスと R 113 蒸気との界面は、レーザシャドウグラフ法により可視化し、カバー先端より 3 mm の位置にあることを確認した。ガラス球および黄銅球を使用する実験では、内壁に銅-コンスタンタン熱電対を埋め込んだシャット

* 昭和 63 年 10 月 19 日 第 65 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 3 月 14 日。

^{*1} 正員、東京大学大学院。

^{*2} 正員、東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木 7-22-1)。

付き中空円筒をノズルの位置に設置し、水滴の場合と同様に恒温槽からの水によって初期温度設定を行った。

ノズルで生成した初期水滴の質量は初期温度によってきまる一定値をとり、18.3~18.6 mg (相当滴径 3.27~3.29 mm)であった。また、ガラス球および黄銅球はそれぞれ直径 3.22 mm および 3.19 mm のものを使用した。凝縮量を求めるには、図 2 に示す捕集器により単一滴を密閉捕集し、電子てんびんを使用して質量を測定する方法をとった。張ら⁽¹⁾は、何個かの落下液滴を捕集器にため、その混合平均温度を測ることによって凝縮量を求めているが、この方法では捕集器内での凝縮のために、正確な混合平均温度が得られない可能性が高い。本方法では、凝縮した R 113 の体積と初期水滴の体積との比が 0.1 前後の所で、10 %程度の精度で凝縮量を求めることができる。以下に測定の手順を示す。

あらかじめ保温器内で、捕集器の温度を R 113 の飽和温度 (47.6°C) より高めの約 50°C に加熱し、内部に最初に満たされている R 113 蒸気の質量を測定しておく。次にダミーの捕集器を設置して、遅延装置と連動したストロボ光により落下液滴を確認しつつ測定位置に応じたソレノイドの動作タイミングを決めておく。次に質量測定用の捕集器に交換し、単一滴を捕集し、

分解能 0.1 mg の精密電子てんびん (ザルトリウス 1702 形) を用いて質量を測定する。なお、捕集器の出し入れは本体底部より行ったが、その設置から窒素ガス-R 113 蒸気界面の安定、滴の捕集までに約 20 min を要した。また、ストロボフラッシュの発光、すなわちソレノイドの動作から捕集器の密閉に要した時間は、高速度写真撮影 (2000 こま/s) によって測定したが、7 ms であり、この間に液滴が捕集器底部に衝突せぬよう留意した。液滴の、窒素ガス-R 113 蒸気界面突入後の落下距離を時間に換算するための落下速度は、遅延装置およびストロボフラッシュを 5.25 ms の時間間隔で二段発光させることによる二重露出写真撮影によって測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 液滴の落下速度 図 3 に、空気中および R 113 蒸気中を移動する水滴の落下速度を、ノズル先端からの距離に対して示す。比較のため、真空中の自由落下曲線もあわせて示した。窒素ガス-R 113 蒸気界面の位置は、ノズル先端から 43 mm である。空気中を落下する水滴の速度は、真空中の自由落下よりわずかに

図 2 液滴捕集器

図 1 実験装置

図 3 水滴の落下速度

に小さい程度である。それに対して、凝縮を伴いつつ R 113 蒸気中を落下する液滴では、過冷度 ΔT が大きいほど、すなわち距離を一定とした場合の凝縮量が大きいほど大きな抗力を受け、落下速度は小さくなる。この傾向は、R 113 蒸気突入後の距離が増加するほど明らかになる。

3・2 水滴-R113 蒸気系 図 4 に、水滴-R 113 蒸気系における凝縮液の体積 ΔV と初期水滴の体積 V_i との比の凝縮距離（窒素ガス-R 113 蒸気界面からの距離）に対する変化を、水滴の過冷度 ΔT をパラメータとして示す。水滴下端が界面に接した位置を距離および時間の原点とした。図 4 中、 $(\Delta V/V_i)_{\text{sat}}$ は各 ΔT に対する理論飽和値を示す。また、破線および実線は Jacobs ら⁽²⁾ のモデルに基づく計算値である。実験値は $\Delta T=11\sim 38^\circ\text{C}$ の範囲でほぼ 10°C ごとに 4 種類の場合について、計算値は最大および最小の過冷度についてのみ示した。実測の範囲が限られているのは、落下距離の小さな領域では実験装置の構造上測定不能であることに、落下距離の大きな領域では液滴の落下軌跡が鉛直方向よりはずれるために捕集不能であることによる。凝縮量の増加率、すなわち測定値の上昇度は、少なくとも距離 150~200 mm までは計算値を大きく上回り、高い熱伝達率が実現されていることがわかる。この原因の一つとして、R 113 蒸気内突入初期には液滴内部の流動と変形振動との相乗効果で滴内のかくはん混合が活発化され、凝縮率を増大させるが、水滴表面に R 113 の凝縮液が蓄積するにつれ、滴内の流動が抑制されるということが考えられる。なお $\Delta T=11^\circ\text{C}$ の場合に、R 113 蒸気突入初期に凝縮量の絶対値が計算値を下回る傾向については、不凝縮ガス、すなわち

窒素ガスを巻き込んでいる可能性が考えられる。 $\Delta T=38^\circ\text{C}$ の場合には、さらに距離の大きな領域で凝縮量の増加率が計算値に近づくことが予想されるが、本実験では測定できなかった。

図 5 に、落下液滴の代表的な形状の変化を示す。空气中を落下する水滴（上欄左端）の場合には、鉛直方向に若干の伸縮振動が観測されるが、ほぼ球に近い形を保つ。一方、凝縮滴の形状は ΔT および界面からの距離 H によりさまざまであるが、 ΔT によらず $H=70\sim 80\text{ mm}$ までは軸対称形に近く、その先ではきわめて複雑なものとなる。なお、滴の変形振動はこの後も観測された。

3・3 固体球-R113 蒸気系 表 1 に使用したガラスおよび黄銅の主要な熱物性値を水と比較して示す。水およびガラスは熱伝導率、温度伝導率ともにほぼ同じオーダーであり、黄銅ではともに 2 けた高い。

図 6 に、ガラス球-R 113 蒸気系の実験結果および計算結果を $\Delta T=38^\circ\text{C}$ および $\Delta T=20^\circ\text{C}$ の場合について示す。なお、比較のため図 3 に示した水滴-R 113 蒸気系の実験結果をあわせて示した。ただし界面からの距離は、落下速度の測定結果に基づいて補正してある。測定値は、凝縮率、絶対値ともに Jacobs ら⁽²⁾ のモデルにきわめて近い値を示している。ただし、 $\Delta T=38^\circ\text{C}$ の場合に距離の大きな領域で測定値のほうが若

表 1 主要熱物性値の比較 (20°C)

	Water	Glass	Brass
ρ kg/m ³	998	2590	8560
c kJ/kgK	4.18	0.75	0.39
λ W/mK	0.60	0.74	99
α m ² /s	1.44×10^{-7}	3.81×10^{-7}	2.97×10^{-5}

図 4 水滴-R 113 蒸気系の実験結果

図 5 R 113 蒸気中を落下する水滴

図6 ガラス球-R113 蒸気系の実験結果

図7 黄銅球-R113 蒸気系の実験結果

干高めの傾向を示すのは、後に述べる凝縮液膜のかたよりによるものと考えられる。いずれにしても、凝縮初期の体積増加率は、水滴-R113 蒸気系の場合のほうが高く、液滴内部の流動の効果が著しいことが推測される。また、ガラス球および次に述べる黄銅球の場合には、落下軌跡の鉛直方向からのずれは本実験の範囲内では認められなかった。

図7に、黄銅球-R113 蒸気系の実験結果および計算結果を示す。過冷度はガラス球の場合と同じ38°Cおよび20°Cであり、水滴-R113 蒸気系の実験結果も距離を補正後併記した。この場合には、凝縮量の増加率はJacobsら⁽²⁾のモデルよりも若干高い傾向を示している。特に、 $\Delta T=38^\circ\text{C}$ の場合にこの傾向が顕著であり、距離の増加とともに凝縮量の絶対値にも有意の差が認められるようになる。このことは、図8に示す黄銅球上のプロフィールから次のように推定される。すなわち、距離の小さな領域($H=44\text{ mm}$)では凝縮液の厚さは一様で全体としてほぼ完全な球形を保っているが、下方の領域($H=248\text{ mm}$)では球の上半分のみが比較的厚いR113の液膜に覆われている。したがって、凝縮熱伝達を支配するのは、膜厚がきわめて薄いと思われる下半分の部分となるが、黄銅の熱伝導率が大きいので、一様な膜厚を仮定したJacobsら⁽²⁾のモデルより高い熱伝達率となっているものと考えられる。

$H=248\text{ mm}$ におけるレイノルズ数は約5000であり、厚い液膜の存在位置と流れのはく離位置との間に

図8 R113 蒸気中を落下する黄銅球と凝縮液膜

なんらかの関係があると推測されるが、詳しい検討は行っていない。なお、黄銅球の場合にも、その高い熱伝導率にもかかわらず、凝縮量の絶対値は水滴の場合を下回った。これはやはり液滴内部の流動の有無によるものと思われる。

4. 結 論

(1) 水滴-R113 蒸気系では、凝縮初期に高い熱伝達率が得られ、その後熱伝導支配に近くなる。この高い熱伝達率は、液滴内部の流動および滴自身の変形振動の相乗効果によるものと考えられる。

(2) 固体球-R113 蒸気系では、球自身の熱伝導率の大小による差異が認められるが、凝縮速度は熱伝導モデルにより近く、R113の凝縮液膜の熱抵抗が支配的であると考えられる。

文 献

- (1) 張, 棚沢, 西尾, 機論, 48-436, B (昭57), 2565.
- (2) Jacobs, H. R., and Cook, D. S., *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.*, 2 (1978), 389.