気液二相噴流の変形挙動に関する実験的検討*

Experimental Investigation of the Deformation of Gas-Liquid Two-Phase Jet

孫 国 富**
SUN Guofu詹 翼**
ZHAN Yi小 林 拓 司**
KOBAYASHI Takuji大 川 富 雄**
OKAWA Tomio入 倉 基 樹***
IRIKURA Motoki

Abstract When a gas-liquid two-phase jet is discharged from a nozzle, its surface is fairly smooth for a certain distance from the nozzle exit. Then, deformation develops to cause jet breakup eventually. The deformation length that is defined as the length required for the jet deformation to develop is of industrial importance since significant splashing occurs when deformed jet impinges on a solid surface. The present work investigated the deformation length experimentally using air and water as the test fluids. The flow direction was vertical downward, and annular liquid film was formed at the nozzle exit. It was shown that the deformation develops faster with an increase in the gas flow rate. The measured deformation lengths were about 28.5 times the liquid film thickness estimated at the nozzle exit and no noticeable influence of the Weber number was found.

Keywords: Gas-liquid two-phase jet, Deformation length, Splashing, Characteristic length

1. 緒 言

1.1 研究背景

化学プラントでは、Fig. 1 に示すように、気液二相噴流を容器の内壁に衝突させることで、簡易的に気液分離を行う場合がある。Fig. 1(a)に示すように、気液混合体は配管を通して気液分離器の内部に設置された円筒容器に送られ、その側面に設けられた複数の円形孔から噴出する。その後、Fig. 1(b)の断面図に示すように、気液分離器の内壁に衝突して、液体は壁面に沿って重力により流下、気体は気液分離器の上部に設置された気体配管より流出して、気液分離を完了する。ただし、気液二相噴流が内壁に衝突する際に、様々なサイズの液滴が飛散（スプラッシュ）する可能性がある[1]。このとき、生成液滴のサイズが十分に大きければ、重力により落下して容器の下部に形成されるプール内に取り込まれると期待できるが、小

さい場合には、気流中に取り込まれて、上部の気体配管から流出（キャリーオーバー）する恐れがある。この結果、気液分離効率が低下し、後続の設備に悪影響を与える。したがって、化学プラントの性能劣化を防止する上で、二相噴流が固体壁に衝突したときに生成される液滴の総量と径分布を正確に予測する技術が必要である。

1.2 文献調査

1.2.1 液单相噴流に関する先行研究

液单相噴流に関する知見は、二相噴流の挙動を検討するためのベースとなる。Kim ら[2]は、ノズルより鉛直下向きに流出する液单相噴流が水平固体面と衝突する場合を対象に、液体流量と衝突距離（ノズルと水平固体面の距離）が飛散率に及ぼす影響を調べている。この結果、衝突距離が噴流の分裂長さ（噴流が分裂を開始するまでに要する長さ）よりも長く、分裂した噴流として固体面

* 2020.10.20 受付

** 電気通信大学情報理工学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

TEL: (042)443-5597 E-mail: sunguofu@eel.mi.uec.ac.jp

*** 千代田化工建設株式会社

に衝突する場合、未分裂の場合よりも飛散率（噴流の流量に対する飛散液滴量の割合）が著しく大きくなることを報告している。

(a) Side view

(b) Cross-sectional view at A-A in Fig. 1(a)

Fig. 1 Schematic diagram of gas-liquid separator used in chemical plants.

これは、噴流の分裂によって生じた一次液滴が、固体面上に形成された液膜に衝突する際に、激しい液滴飛散が起こるためと解釈できる。したがって、噴流衝突時の液滴飛散現象について考える場合、分裂長さに関する知見はきわめて重要である。

液単相噴流の分裂挙動については、Rayleigh による先駆的な理論解析[3]の後、液流量が分裂長さに及ぼす影響[4]や、Plateau-Rayleigh 不安定波長と分裂後の液滴サイズの関係[5]等が調べられている。近年、Zhan ら[6–8]は、鉛直下向きに流出する液単相噴流が水平固体面に衝突する場合を対象に、分裂長さを精密に定義することで、液体の流量や物性値が飛散率に及ぼす影響を良好に相関できることを示している。Fig. 2 に、Zhan らの考え方を模式的に示す[6]。ノズルを流出した後

に噴流が最初に分裂を生じる位置は、時間的に変動する。このため、最初に分裂を生じる位置の時間的な最小値を最小分裂長 L_1 と定義する。 L_1 の

Fig. 2 Definitions of the breakup lengths for single-phase liquid jet utilized by Zhan et al. [6].

Photo 1 Splashing during liquid jet impingement at the three fall heights shown in Fig. 2 [8].

下流では、噴流がさらに分裂を継続して、一次液滴の通過頻度 f が徐々に増加するが、ある距離に達すると、分裂が完了して、 f が一定値 f_{max} となる。この位置を最大分裂長さ L_2 と定義する。

Zhan らは、飛散率は f に比例するため、ノズルからの距離 L が、 $L < L_1$ では液滴飛散は無視できるが、 $L_1 < L < L_2$ では漸的に増加し、 $L > L_2$ では一定になると仮定した。Fig. 2 中に示す3つの位置における液滴飛散状況を Photo 1(a)~(c)に各々示す。Zhan らが指摘するように、液噴流の分裂の進展とともに、液滴飛散が激しくなる様子が

確認できる[8]。

1.2.2 二相噴流に関する先行研究

気液二相噴流に関する知見は、液単相噴流と比較してきわめて少ない。このため、Zhan ら[9]は、二相噴流の場合でも、単相噴の場合と同様に、 $L < L_1$ であれば液滴飛散は少ないと仮定して、二相噴流を対象に L_1 の計測を実施した。この結果、二相噴流の場合の L_1 は、ノズル出口で評価される液膜厚さと概ね比例関係にあることを見出し、 L_1 に関する相関式を提案している。

1.3 本研究の目的

Photo 2 に、Zhan ら[9]が、気液二相噴流の分裂長さ L_b が時間的に変化する様子を観察した結果の一例を示す。単相噴流の場合、Photo 1(a)に示したように、分裂前における噴流の変化はきわめて小さい。一方、Photo 2 より、気液二相噴流の場合には、分裂開始前から噴流の大規模な変形が生じることがわかる。噴流の変形部分が固体壁上に形成された液膜に衝突すると、噴流の分裂によって生成した一次液滴が衝突する場合と類似した状況となり、この結果、顕著な液滴飛散を生じ得

Photo 2 Transient of the instantaneous breakup length L_b for the gas-liquid two-phase jet [9].

ると考えられる。このため、Zhan ら[9]の仮定とは異なり、 $L < L_1$ であっても無視できない程度の液滴飛散が生じる可能性がある。

Fig. 1 に示す気液分離器でキャリーオーバーを生じないためには、気液二相噴流が固体壁に衝突した場合に、顕著なスプラッシュを生じない条件を特定することがまず重要である。このため、本研究では、気液二相噴流の変形と液滴飛散量の関係を実験的に調べる。さらに、顕著な液滴飛散を起こすような大規模変形を生じるのに要する距離を調べ、無次元相関式として取り纏める。

2. 実験方法

2.1 流動状況の観察

実験装置の構成を Fig. 3(a)に示す。液体と気体は、各々ポンプとコンプレッサーを用いて混合器に送られ、その下部に設けられた円形ノズルより鉛直下向きに噴出する。混合器の構造を Fig. 3(b)に示す。混合器は、内径 41 mm、長さ 350 mm の円筒形で、その上部より気体が流入する。一方、液体は、混合器の中部側面に設けた直径 3 mm の 24 個の円形孔より流入する。気液混合体は、混合器下部の円形端面の中央に設けられた直径 20 mm 長さ 30 mm の円形ノズルから噴出する。Fig. 3(a)に示すように、気液混合体は、気液混合器の下部に設置した矩形の貯水タンク内に流下し、気体は重力によって大気中に分離、液体はポンプにより循環される。

噴流の流動状況観察は、高速度カメラを用いて行った。この際、空間解像度は 500 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、撮影速度は 2000 fps、シャッター速度は 0.1 ms とした。液温は矩形容器内で計測精度 ± 0.5 K の K 型熱電対により、気体流量と液体流量は、各々計測精度 ± 5 L/min の面積式流量計と計測精度 ± 0.5 L/h のタービン式流量計を用いて計測した。

次に、二相噴流が固体面と衝突する際の液滴飛散状況を観察する場合には、矩形タンクの直上に一辺が 200 mm のステンレス製正方形板を衝突板として配置した。衝突距離の調整は、Fig. 3(a)に模式的に示すように、気液混合器を上下に移動することにより行った。本実験では、液滴の飛散状況を詳細に観察するため、空間解像度を 160 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ とした。

実験条件は、試験流体には室温 (20 $^{\circ}\text{C}$) の水と空気を用了。化学プラントの気液分離器におけ

る典型的な流動条件を参考にして、ノズル部における液体の体積流束 J_l は $0.27 \sim 0.75 \text{ m/s}$ 、気体の体積流束 J_g は $2.65 \sim 10.61 \text{ m/s}$ の範囲で設定した。

なお、Fig. 3(b)に示す気液混合器の構造及び J_g が J_l よりも数倍程度以上大きいことから、ノズルの出口では、環状流もしくはこれに近いフローパターンが形成されると予想される。

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.

2.2 飛散率計測

液滴飛散率の計測方法を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a), (b) に示すように、一辺が 118 mm のステンレス製の正方形枠にビニール袋をかぶせて液滴捕

(a) Arrangement of droplet collecting device

(b) Location and dimension of the collecting device

(c) Collecting angle

Fig. 4 Measurement method of the splash rate.

集器とし、衝突板の中心から 90 mm の位置に配置した。Fig. 4(b) に示すように、衝突板と液滴捕集器の間には 20 mm のギャップを設けた。この構成により、衝突板上に形成される液膜は貯水タンクに流下し、液滴捕集器の枠内に飛来する液滴はビニール袋内に捕集される。捕集時間は、気液の流量条件に応じて $15 \sim 30$ 秒とし、液滴捕集量

は実験前後の液滴捕集器の重量差より算出した。重量計の計測誤差より、液滴捕集量の計測誤差は $\pm 5\%$ 以内と見積もられた。

本手法では、液滴捕集器が噴流や衝突板上に形成される液膜と干渉しないこと、飛散液滴を確実に捕集できることが求められる。このため、液滴捕集器のサイズと設置位置は、高速度カメラを用いた噴流、液膜、飛散液滴の挙動の観察結果に基づいて決定した。Fig. 4(c) は、正方形枠と衝突板の位置関係を示す上面図である。捕集角度は 66° であるため、実験装置の構造より軸対称性を仮定して、液滴捕集量に $360/66=5.45$ を乗じて全液滴飛散量とした。また、液滴飛散率 Sp^* を、単位時間当たりの液滴飛散量 Q_{splash} の液体流量 Q_l に対する比として、次式により定義した。

$$Sp^* = \frac{Q_{splash}}{Q_l} \quad (1)$$

Photo 3 Snapshots of gas-liquid two-phase jet at several flow rate conditions (discharge nozzle is seen at the top of each photo).

3. 実験結果

3.1 気液二相噴流の変形と液滴飛散の関係

Photo 3 に、3 通りの気液流量条件で撮影した二相噴流の様子を示す。各写真の上端にノズルが見える。ノズルから流出した直後、噴流の変形は

顕著ではない。しかし、ノズルからの距離が増加するにつれて徐々に変形の程度が激しくなり、最終的に分裂して多数の液滴あるいは液塊を生じている。

Photo 4 は、Photo 3(b)の条件で衝突板を設置して、液滴飛散の様子を観察した結果である。衝突距離 L が十分短い場合には、Photo 4(a)に示すように液滴飛散は無視できる程度であるが、 L が増加して噴流の変形が激しくなると、Photo 4(b)に示すように、噴流の分裂が生じる以前であっても、顕著な液滴飛散が生じることが確認された。本観察結果に基づき、液滴飛散を開始するときの L を変形開始長さ L_d と定義する。

Photo 4 Effect of the fall height on the production of secondary droplets during gas-liquid two-phase jet impingement ($J_f = 0.66$ m/s, $J_g = 2.65$ m/s).

Fig. 5 Three sections of two-phase jet.

以上の考察より、気液二相噴流は、Fig. 5 に示す 3 つの部分に分けられる。 $0 < L < L_d$ の第一部分では、噴流の変形の程度は小さく、固体面に衝突しても液滴の飛散は無視できる程度である。 $L_d < L < L_1$ の第二部分では、噴流の変形が激しくなり、変形部分が固体面に衝突すると、その衝撃によって顕著な液滴飛散が生じる。 $L > L_1$ の第三部分では、噴流が液滴及び液塊に分裂するため、これらが固体と衝突するときに、多量の液滴飛散を生じる。化学プラントの気液分離器では、二相噴流が固体壁に衝突する際に液滴飛散が生じないことが望ましい。したがって、実質的な液滴飛散開始位置である変形開始長さ L_d は、気液分離器の設計を行う上で重要な物理量と言える。

3.2 気液二相噴流の変形率

二相噴流が固体面と衝突するとき、噴流の変形が十分に激しくなると、液滴飛散を開始する。これより、 L_d は噴流の変形の程度から測定できると考えられる。本研究では、単位時間当たりの噴流幅の変化割合により変形の程度を表せると仮定して、瞬時の変形率 f_{def} を次式で定義する。

$$f_{def}(t, L) = \frac{W(t, L) - W(t - \Delta t, L)}{W(t, L) \Delta t} \quad (2)$$

(a) W at $t - \Delta t$ (b) W at t
Photo 5 Measurement of the jet width W .

ここで、 $W(t, L)$ と $W(t - \Delta t, L)$ は、Photo 5 に示すように、同じ位置の高速度カメラを用いた撮影で近接する 2 時刻における噴流の幅を表す。 Δt の値は、ノズル直径 D を全体積流束 $J_l + J_g$ で除して得られる時間スケールの程度で、12~20 ms の範囲とした。 f_{def} は L の関数だが、時間的にも変化し、噴流の変形が最も激しいときに液滴飛散も最も激しくなると考えられる。このため、 f_{def} の時間に関する最大値を各位置における気液二相噴流の変形率 F_{def} とした。

代表的な実験条件で計測された F_{def} と Sp^* の関

係を Fig. 6 に示す。今後、気液の流量条件や物性値等の条件を拡大して実験を行うことで、より汎用性の高い f_{def} の定義式を導く必要があるが、本実験の範囲では、噴流の変形率 F_{def} が $80s^{-1}$ 程度を超過すると、液滴飛散を開始している。すなわち、気液二相噴流が固体壁に衝突したときに、液滴飛散を生じるか否かは、噴流の変形率から判断することが可能と考えられる。

Fig. 6 Relationship between the jet deformation factor F_{def} and the splash rate Sp^* .

3.3 変形開始長さの相関

Zhan ら[9]は、Fig. 5 に示す最小分裂長さ L_1 が、ノズル出口における環状液膜の厚さ δ と比例関係にあることを示した。このより、 L_d と δ の間にも、何らかの相関関係があると考えられる。まず、ノズルの直径を D とすれば、ノズル出口で液相と気相の平均速度 U_l, U_g は次の関係を満足する。

$$4\delta(D - \delta)U_l = D^2 J_l \quad (3)$$

$$(D - 2\delta)^2 U_g = D^2 J_g \quad (4)$$

Okawa ら[10]が環状流中の液滴流量比に関する相関式を導いた場合と同様に、液膜の内表面に作用する界面せん断力と液膜の外表面に作用する壁面せん断力が釣り合うとすれば次式を得る。

$$(D - 2\delta)f_i \rho_g (U_g - U_l)^2 = D f_w \rho_l U_l^2 \quad (5)$$

ここで、 f_i は液膜内面の界面摩擦係数、 f_w は壁面摩擦係数、 ρ_g と ρ_l は各々気体と液体の密度である。 f_i と f_w は次に示す Wallis の式[11]により評価する。

$$f_i = 0.005 \left(1 + 300 \frac{\delta}{D} \right) \quad (6)$$

$$f_w = \max \left[\frac{16}{Re}, 0.005 \right] \quad (7)$$

ここで、式(7)中の Reynolds 数は $Re = \rho_l U_l D / \mu_l$ で定義される。また、 μ_l は液相の粘性係数である。式(3)～(7)を用いて繰り返し計算を行うことにより、ノズル出口における液膜厚さ δ を計算できる。

本実験で得られた δ と L_d の関係を Fig. 7 に示す。ここで、 δ は式(3)～(7)による計算値であり、 L_d は $F_{def} = 80 \text{ s}^{-1}$ となる位置を画像解析により求めた。本図より、 L_1 と同様に、 L_d も δ と概ね比例関係にあり、次式で相関できることがわかる。

$$L_d = 28.5\delta \quad (8)$$

ここで、Zhan ら[9]は、 L_1 が δ の 59 倍程度と報告していることから、上式より、 L_d は L_1 の半分程度であることがわかる。

Fig. 7 Dependence of the deformation length L_d on the liquid film thickness at the nozzle δ .

次に、 L_d と δ が概ね比例関係にあることから、 δ は L_d のスケールリングパラメーターとして適当と言える。一方、単相噴流の場合には、Photo 1 に示すように、分裂前の噴流の変形は顕著ではない。これより、気液二相噴流の変形は、主に環状液膜の内部を流れる気流のせん断力によって引き起こされていると考えられる。以上の考察に基づき、無次元変形開始長さを L_d / δ で定義し、次式で定義される Weber 数との関係を調べた。

$$We = \frac{\rho_g (U_g - U_l)^2 \delta}{\sigma} \quad (9)$$

ここで、 σ は表面張力を表す。 L_d / δ と We の関係を Fig. 8 に示す。今後、流体の物性値、特に液体の表面張力の影響を調査する必要があると考えられるが、Fig. 8 によれば、 We の影響は明確には認められない。したがって、本実験条件の範囲では、気液二相噴流の変形開始長さに関する相関式として、式(8)が推奨される。

Fig. 8 Dependence of the dimensionless deformation length L_d / δ on the Weber number We .

4. 結 言

気液二相噴流が固体面に衝突する際に発生する飛散液滴の総量と径分布を予測することを最終目的として、本研究では、主に気液二相噴流の変形開始長さについて実験的に検討した。得られた結論を以下に示す。

- 気液二相噴流は、分裂を生じる前から激しく変形する。変形部分が固体面上に形成された液膜に衝突すると、噴流の分裂により形成された一次液滴が衝突する場合と類似の状況となり、顕著な液滴飛散を引き起こす。
- 顕著な液滴飛散を生じるときの二相噴流の変形の程度を表す尺度として、単位時間当たりの噴流幅の変化率が使用できる可能性を示した。
- 顕著な液滴飛散を生じる程度まで二相噴流が変形するのに要するノズルからの距離（変形開始長さ）は、最小分裂長さと同様に、ノズ

ル部における環状液膜の厚さと比例関係にあることを示した。なお、変形開始長さは最小分裂長さの半分程度で、Weber 数に対する依存性は、明確には認められなかった。

本研究では、気液の流量を系統的に変更して実験データを収集したが、ノズルの径と長さ、流体の物性値、気液の混合形態等は一定とした。このため、今後、これらの物理量の影響、特に液相の表面張力の影響を調査することが重要と考えられる。また、噴流の流出方向を鉛直下向きとしたが、実機では水平に近い角度で噴射される。このため、噴射角度の影響解明も今後の検討課題である。

Nomenclature

J	: superficial velocity	[m/s]
L_1	: minimum breakup length	[m]
L_d	: deformation length	[m]
W	: jet width	[m]
f_{def}	: deformation factor	[s ⁻¹]
F_{def}	: maximum value of f_{def}	[s ⁻¹]
Q	: mass flow rate	[kg/s]
Sp^*	: splash rate	[–]
U	: velocity at nozzle	[m/s]
We	: Weber number	[–]

Greek letters

δ	: liquid film thickness	[m]
ρ	: density	[kg/m ³]

Subscripts

d	: deformation
g	: gas phase
l	: liquid phase
<i>splash</i>	: splashed droplets

参考文献

- [1] Okawa, T., Shiraishi, T. and Mori, T., Production of Secondary Drops during the Single Water Drop Impact onto a Plane Water Surface, *Experiments in Fluids*, Vol. 41, 965-974 (2006).
- [2] Kim, Y., Amagaya, K., Ogiwara, G. and Arai, M., Wall Impingement Phenomena of a Liquid Jet (in Japanese), *ILASS-Japan* Vol. 9(26), 10-17 (2000).
- [3] Rayleigh, L., On the Instability of Jets, *Proceedings of the London Mathematical Society*, Vol. s1-10(1), 4-13 (1878).
- [4] Lin, S. P. and Reitz, R. D., Drop and Spray Formation from a Liquid Jet, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, 85-105 (1998).
- [5] Cheong, B. S. and Howes, T., Capillary Jet Instability under the Influence of Gravity, *Chemical Engineering Science* Vol. 59, 2145-2157 (2004).
- [6] Zhan, Y., Oya, N., Enoki, K., Okawa, T., Aoyagi, M. and Takata, T., Droplet Generation during Liquid Jet Impingement onto a Horizontal Plate, *Exp. Therm Fluid Sci.*, Vol. 98, 86-94 (2018).
- [7] Zhan, Y., Kuwata, Y., Maruyama, K., Okawa, T., Enoki, K., Aoyagi, M. and Takata, T., Effect of Surface Tension and Viscosity on Liquid Jet Breakup, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 112, 109953 (2020).
- [8] Zhan, Y., Kuwata, Y., Okawa, T., Aoyagi, M. and Takata, T., Experimental Study on Secondary Droplets Produced during Liquid Jet Impingement onto a Horizon Solid Surface, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 120, 110249 (2021).
- [9] Zhan, Y., Sun G., Okawa, T. and Irikura, M., A Study on Droplet Carryover in Gas-Liquid Separator (Experimental Investigation on the Minimum Breakup Length of Two-Phase Fluid Jet), *Japanese Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34(1), 75-81 (2020).
- [10] Okawa, T., Kitahara, T., Yoshida, K., Matsumoto, T. and Kataoka, I., New Entrainment Rate Correlation in Annular Two-Phase Flow Applicable to Wide Range of Flow Condition, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, 87-98 (2002).
- [11] Wallis, G. B., Phenomena of Liquid Transfer in Two-Phase Dispersed Annular Flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 11, 783-785 (1968).