短い細管ノズルから流出する高温水の二相流動特性*

(第2報, 蒸発を伴う二相噴流の流動特性)

浜田 広次^{*1}, 高橋 実^{*2}
井上 晃^{*3}, 有富 正憲^{*4}Two-Phase Flow Characteristics of Hot Water Discharged
from a Thin Nozzle

(2nd Report, Flow Characteristics of Self-Evaporating Two-Phase Free Jet)

Hirotsugu HAMADA, Minoru TAKAHASHI^{*5},
Akira INOUE and Masanori ARITOMI^{*5} Reseach Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan

The flow characteristics of an air-water two-phase jet and an evaporating steam-water two-phase jet were investigated experimentally. The air-water two-phase jet has larger radius and denser droplets region near its center with the water-air flow ratio, and has similarity in velocity distributions. The evaporating steam-water two-phase jet has four types of flow patterns depending on the quality at the nozzle exit. The jet radiuses are larger and the axial decreasing rates of dynamic pressure in the center of jet are smaller in order of air single-phase jet, air-water two-phase jet, and steam-water two-phase jet.

Key Words: Jet, Velocity Distribution, Pressure Distribution, Flow Measurements, Two-Phase Flow, Evaporation, Critical Flow, Dynamic Pressure, Impact Tube, Isokinetic Probe

1. 結 言

軽水炉の冷却材喪失事故(LOCA)時や空調・冷凍機の気化器等においては, 微小な間隙から高温高压の流体が低圧部へ流出し, 自己蒸発を伴う気液二相噴流が生じる. 特に LOCA 時の安全性を評価するためには, 流出流量, 噴出時の反力の隣接する構造物への影響, 放射性物質の拡散等が重要となる.

単相噴流の流動に関する研究はこれまでに多く行なわれ^{(1),(2)}, 二相噴流に関しても固体粒子や液滴を含む二相噴流などの流動に関する研究が報告⁽³⁾されている. しかし, その多くは微細機構や燃焼, 噴流による除熱, あるいは乱流機構を研究対象としている. ノズルから流出した高温水の自己蒸発を伴う気液二相噴流に関しては, 微粒化機構⁽⁴⁾や蒸発現象⁽⁵⁾が調べられているが, 二相噴流の流動特性は詳細に研究されていない. 自己蒸発を伴う気液二相噴流の流動はノズル内の相変化によるノズル出口の流動状態と密接な関係があると推定される. そのため, 第1報⁽⁶⁾では, ノズル内で沸騰二相流となり外部へ放出する場合の噴出流量と噴出時の反力の関係を明らかにした.

本研究では, はじめに短い細管ノズルから噴出する

蒸発を伴わない空気-水二相噴流について動圧分布と液滴流量分布の特性を空気単相噴流との比較のもとに実験的に明らかにする. この結果を短い細管ノズルから高温水を噴出する場合と比較することで, 自己蒸発を伴う蒸気-水二相噴流の流動状態および動圧分布特性を, ノズル内の気液二相臨界流現象と関係づけて明らかにする.

2. 主な記号

C_m : 単相噴流速度分布の定数
 D : 細管ノズルの直径 m
 G : 質量流束 kg/m^2
 j : 液滴体積流束 m/s
 L : 細管ノズルの流路長さ m
 N : 熱力学的非平衡パラメータ
 r : 噴流の径方向座標 m
 R : 噴流の半径 m
 P : 圧力 MPa
 P_t : 噴出圧力 MPa
 P_∞ : 大気圧力 MPa
 Q : 噴出流量 m^3/s
 T : 温度 $^\circ\text{C}$
 T_t : 噴出温度 $^\circ\text{C}$
 v : 比容積 m^3/kg
 V : 流速 m/s
 V_l : 液滴密度を表すパラメータ $= Q_l/Z^2$
 x : クオリティ

* 原稿受付 2003 年 5 月 1 日.

^{*1} 核燃料サイクル開発機構大洗工学センター(〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002).^{*2} 正員, 東京工業大学原子炉工学研究所(〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1).^{*3} 正員, フェロー, 東京工業大学名誉教授.^{*4} 正員, フェロー, 東京工業大学原子炉工学研究所.

E-mail: mtakahas@nr.titech.ac.jp

x_E : 熱力学的平衡クオリティ
 z : 噴流の軸方向座標 m
 Z : ノズル出口からの鉛直距離 m
 α : ボイド率
 ρ : 密度 kg/m^3

添字

g : 気体
 l : 液体

3. 実験方法

3・1 実験装置 空気-水二相噴流実験では、図1に示す実験装置を用いて、放出タンクからの水と圧縮機からの空気を混合噴出ノズル (Contactor) からテスト部内へ噴出させた。蒸気-水二相噴流実験では、図2に示す実験装置を用いて、給水タンク内の純水をポンプで循環しながら、加熱ヒータで 100°C 付近まで昇温し、その後放出タンクへ送り、放出タンク内でさらに設定温度・圧力まで昇温・昇圧して、微小口径円管のノズルからテスト部内へ高温水を噴出させた。

空気-水混合噴出ノズルおよび高温水噴出ノズルの

形状を図3に示す。空気-水混合噴出ノズルは、内径 1.69mm のステンレス鋼製内管と内径 3.6mm の黄銅製外管からなる二重管構造である。高温水噴出ノズルは黄銅製であり、そのノズル内径 D と流路長さ L を表1に示す。

Fig. 3 Configurations of air-water contactor and nozzles

テスト部は図4に示す矩形容器 (幅・奥行き 620 mm 、高さ $1,300\text{ mm}$) で、その内部に噴流内動圧分布測定用動圧管 (impact tube) または液滴流量分布測定用プローブ (isokinetic probe) を取り付けるための2次元トラバース装置を有している。トラバース装置は、 0.05 mm の精度で水平および垂直方向に各々約 $500, 1,000\text{ mm}$ 移動できる。座標原点はノズル出口断面中央とし、鉛直下方向に Z 座標、噴流の径方向に r 座標を設定する。

Fig. 4 Test section

3・2 動圧の測定 噴流内の動圧は、ピトー管の原理^{(7)~(10)}に基づき直径 2.11 mm のステンレスパイプ

Fig. 1 Experimental apparatus for air-water two-phase jet

Fig. 2 Experimental apparatus for steam-water two-phase jet

製インパクトチューブを使用して測定した。動圧管はトラバース装置に固定し、静圧管は噴流の影響を受けない十分離れた位置で、水頭差から生じる誤差は相殺されるように動圧管と静圧管の鉛直方向位置が同じになるように設置した。インパクトチューブから得られる差圧は、フルスケールが 2kPa, 30kPa, 100kPa のリアクタンス型差圧変換器を動圧の大きさに応じて切り替えて測定した。

3・3 液滴流量の測定 噴流内の液滴流量の測定には、図5に示すように動圧管と静圧管からなる isokinetic プローブ⁽¹¹⁾を用いた。噴流内の静圧はほぼ大気圧に等しいことが確認されたため、静圧管は噴流の影響を受けないように噴流の外側に設置した。isokinetic プローブ先端は上流に向けられ、テスト部内静圧とプローブ先端の静圧を等しくすることによりプローブ先端から流入する液滴と気体を主流と等速度でプローブ内に吸引させ、測定点における液滴の体積流量を測定した。測定操作としては、動圧管と静圧管はU字型マノメータで接続し、動圧管先端が噴流内で気体や液滴のインパクトを受けると、動圧管の圧力は上昇してマノメータの液位に変化が生じるため、アスピレータからの吸引によりこの圧力上昇分を減じて、液位差を零にして、一定時間の捕集液滴量から液滴流量を求めた。このようにして得られた噴流断面上の液滴流量分布の積分値は、液体流量と 10%以下の誤差で一致した。

Fig. 5 Measurement system of volumetric flow rate

3・4 実験条件 実験条件を表1に示す。空気-水二相流の噴出ではノズル入口温度を室温とし、空気流量を大気圧換算で最大 $6.65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 、水流量を最大 $2.25 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ まで変化させた。高温水の噴出では、ノズル入口温度を最高 160°C 、噴出圧力を最大 1.0 MPa まで変化させた。

Table 1 Test conditions

Air-water two-phase flow	
Water flow rate (m^3/s)	$1.35 \sim 22.5 \times 10^{-6}$
Air flow rate (m^3/s)	$2.15 \sim 665 \times 10^{-6}$
Temperature ($^\circ\text{C}$)	Room temperature
Size of D (mm)	3.6
Nozzle L (mm)	40
L/D	11.1
Steam-water two-phase flow	
Temperature ($^\circ\text{C}$)	18 ~ 160
Pressure (MPa)	0.2 ~ 1.0
Size of D (mm)	1.0 ~ 2.1
Nozzle L (mm)	1.4 ~ 39.3
L/D	1.4 ~ 31.4

4. 実験結果および考察

4・1 空気-水二相噴流

(1) 動圧分布 空気-水二相噴流との比較のために行なった空気単相噴流内の動圧の実験結果を図6に示す。横軸は半径 r をノズル出口からの鉛直距離 Z で無次元化し、縦軸は動圧を噴流中心軸上の動圧で無次元化している。動圧分布は、ノズル出口からの無次元鉛直距離 Z/D と噴出流量 Q_e に依存せず、式(1)に示す Reichardt の Gauss 曲線近似式⁽¹²⁾とほぼ相似形になる。

$$V/V_0 = \exp(-\eta^2) \quad (1)$$

ここで

$$\eta = r / \sqrt{2C_m z} \quad (2)$$

Fig. 6 Distribution of dynamic pressure in air jet

次に、空気-水二相噴流の動圧分布の実験結果を図7に示す。空気-水二相噴流の動圧分布は、図中の実線で示す空気単相噴流に比べ半径方向の広がりが大きく緩やかな勾配をもつ。これは、空気単相噴流中に液滴が混合して空気と液滴の二相噴流になる過程で、液滴により乱流が促進され半径方向の運動量拡散が促進されたことによるものと考えられる。図7(a)に示すように空気と水の流量比 Q_1/Q_e が小さいか、図7(b)に示すようにノズル出口からの無次元距離 Z/D が大きいほど、空気単相噴流の分布形に近づいており、これは乱流促進効果が減少したためと推定される。なお、流量比が十分大きい、無次元距離が十分小さいと、

 (a) Effect of Q_1/Q_g

 (b) Effect of Z/D

Fig. 7 Distribution of dynamic pressure in air-water jet

液滴が中心部 (測定位置 $r/z=0$ 近傍) に集まりやすく液滴分布が非均質的になることから、前述の傾向とは異なる分布形になるものと推定される。またこの実験条件では、ノズル出口近傍のレイノルズ数はおよそ 15,000 である。液滴径は測定していないが、仮に液滴径を $10\sim 100\ \mu\text{m}$ とすると、液滴まわりのレイノルズ数は $40\sim 400$ 、ストークス数は $0.53\sim 53$ と見積られる。ただし、ノズルに最も近い Z/D 位置での流速を距離の 2 乗分の 1 で単純に換算すると、ストークス数は 1 以下と見積られ、下流側では液滴の追従性は良くなるものと推定される。

動圧は半径方向の平均液滴密度に依存すると考えられ、平均液滴密度はノズル出口からの鉛直距離 Z の 2 乗に逆比例し、水流量 Q_1 に比例すると考えられる。そこで、 $V_1 = Q_1/Z^2$ をパラメータとした動圧分布の実験結果を図 8 に示す。 V_1 が小さくなり液滴密度が減少するほど動圧分布は鋭い勾配をもち、空気単相噴流の分布形に近づいていることがわかる。

図 9 に示すように、空気と水の流量比 Q_1/Q_g を 0.0396 から増加させると動圧分布の軸対称性が失われ、さらに 0.104 まで増加させると環状にピークが存在する分布形に移行する。これはノズル内で環状流となり、

噴出後液膜が液滴となって径方向に飛散したためと考えられる。

 Fig. 8 Distribution of dynamic pressure in air-water jet
(Effect of V_1)

 Fig. 9 Distribution of dynamic pressure in air-water jet
in case of large Q_1/Q_g

(2) 液滴流量分布 空気-水二相噴流において動圧管先端の開口断面を流れる液滴体積流速 j を中心軸上の値 $j_{r=0}$ で無次元化した実験結果を図 10 に示す。図 10(a) で空気と水の流量比 Q_1/Q_g が大きいほど中心軸付近で鋭い勾配となり、外周部で緩やかな勾配になる傾向があり、動圧分布と反対の傾向にある。図 10(b) でノズル出口からの無次元鉛直距離 Z/D が大きくなるほど液滴流量分布の勾配が若干鋭くなり、これは動圧分布と同様の傾向にある。これはノズル近傍での液滴の慣性効果の影響が現れたためと推定される。

(3) 流速およびボイド率分布 以上の実験結果を用いて、空気-水二相噴流内の流速 V とボイド率 α を推定するため、次の仮定をおく。①動圧 P は空気と液滴の動圧の和 $P = \alpha \rho_g V_g^2 + (1-\alpha) \rho_l V_l^2$ に等しい。②空気と液滴は等速度 $V = V_g = V_l$ である。ここで、 ρ_g と ρ_l はそれぞれ空気と液滴の密度、 V_g と V_l はそれぞれ空気と液滴の速度である。また、液滴質量流速 G はボイド率 α と液滴速度 V_l により $G = (1-\alpha) \rho_l V_l$ と表される。

(a) Effect of Q_1/Q_2 (b) Effect of Z/D

Fig. 10 Distribution of volumetric flow rate in air-water jet

以上の仮定のもとに得られた空気と液滴の速度分布の結果を図 11 に示す。速度は噴流中心軸上の流速で無次元化してある。空気と水の流量比 Q_1/Q_2 をパラメータとした図 11(a) では、流量比が小さいほど速度分布は空気単相の鋭い勾配の分布形に近づいている。また、ノズル出口からの鉛直無次元距離 Z/D をパラメータとした図 11(b) では、 $Z/D=25$ の結果を除くと、空気-水二相噴流の速度分布は空気単相噴流と同様に Z/D によらず相似になることがわかる。

ボイド率分布の結果を図 12 に示す。空気と水の流量比 Q_1/Q_2 をパラメータとした図 12(a) では、流量比が大きいほど噴流中心部のボイド率が小さく、流量比が小さいほどボイド率分布は平坦になる。無次元距離 Z/D をパラメータとした図 12(b) では、ノズル近傍を除けば、噴流中心部でボイド率が小さいが、 Z/D が大きい下流ほどボイド率分布は平坦になる。

4・2 蒸気-水二相噴流

(1) 流動状態 ノズル内で高温水が流れ方向の圧力低下により蒸気-水二相流となるか、あるいは高温水のままノズルから噴出される場合について、蒸気-水二相噴流の流動状態の写真とその模式図を図 13 に示す。流動状態は次の 4 つに分類できる。タイプ 1 は相変化しない高温水が噴出し下流で液滴に分散する状態、タイプ 2 はノズル出口近傍で一部相変化が生じ

(a) Effect of Q_1/Q_2 (b) Effect of Z/D

Fig. 11 Velocity distribution in air-water jet

(a) Effect of Q_1/Q_2 (b) Effect of Z/D

Fig. 12 Distribution of void fraction in air-water jet

Fig. 13 Flow patterns in steam-water jet

るが、中部は高温水のまま下流で液滴に分散する状態、タイプ3は蒸気と液滴がほぼ均質に分布している状態、タイプ4は環状に液滴密度が大きくなる状態である。

タイプ1～4の流動様式の機構を考察するため、第1報⁶⁾で評価した二相臨界流の噴出流量の実験および計算結果を図14に引用した。本実験体系の場合、ノズルの長さが短いことからノズル内で高温水は非平衡状態にあると考えられる。そこでノズル出口オリティ x_f と臨界圧から求められる出口平衡オリティ x_E により与えられる熱力学的非平衡パラメータ $N=x_f/x_E$ を導入して、噴出圧力と質量流束の相関を求めている。

 Fig. 14 Effect of P_i/P_∞ on mass flux in discharged two-phase jet in case of pressure decrease

また、細管ノズルの流路長さ L とノズル直径 D の比 L/D をパラメータとして、噴出圧力を高圧から低圧へ変化した場合の質量流束の実験結果と計算結果⁶⁾と比較した。

高圧時の質量流束の実験結果は水単相噴流の質量流束に近く、このときの噴出形態はタイプ1～2のように液体噴流に近い状態にあった。噴出圧力を下げるに従い、実験の質量流束は減少し、計算で求めた非平衡度 N の大きい曲線のほうへ移行する。このときの噴流形態はタイプ3～4の状態にあった。

また、ノズル直径 D を 1.4mm、液温を 424K とした実験によりノズル形状 L/D の影響を調べた。その結果、 L/D が 2～4 でタイプ1の液体噴流に近い状態であるが、 L/D が 5～8 でタイプ2からタイプ3へと噴流形態が変化し、 L/D が 14 以上になるとタイプ4の噴流形態に移行する様子が観察された。

このように、ノズルの入口条件(温度・圧力)およびノズル形状 L/D は、二相臨界流量および噴流の流動様式に顕著な影響を及ぼしている。これは、ノズル細管部での壁面状態(粗さ)など気泡発泡点密度およびそこでの二相流動状態と密接に関連づけられるものと考えられる。

噴出流量の評価結果より、噴流の流動状態がタイプ1からタイプ4に移行するにつれて実験におけるノズル出口オリティ x_f は増加してくる。そこで、図15に示すノズル内の流動様式から図16の噴流タイプの形成を、後で示す動圧分布(図17～19)の挙動と併せて考察すると、ノズル出口で図15のA-A'断面のように単相流状態であればタイプ1の噴流状態が形成され、B-B'断面のように壁面近傍で相変化が開始していればタイプ2、C-C'断面のように気泡が成長した均質流状態であればタイプ3、D-D'断面のようにボイド率大きいスラグ流状態であればタイプ4の流動状態になると考えられる。自己蒸発を伴う

蒸気-水二相噴流の場合には、液滴による乱流促進効果と慣性効果に加えて、蒸発により半径方向および軸方向に運動量が増加し、噴流の半径方向への拡大と液滴の外側への分散が生じたと考えられる。

Fig. 15 Model of two-phase flow through a nozzle

Fig. 16 Models of two-phase free jet related to flow in nozzle

(2) 動圧分布 高温水を噴出した場合の動圧分布の実験結果を図 17~19 に示す。横軸は噴流内で動圧が零あるいは十分小さいと見なせる半径 R で測定位置の半径 r を無次元化し、縦軸は動圧を噴流中心軸上の値で無次元化したものである。ここで半径 R の測定結果を図 20 に示す。図 17 に示すタイプ 2 の動圧分布は、ノズル出口に近い位置 ($z \leq 50\text{mm}$) で鋭い勾配をもつが、ノズル出口から離れた $z \geq 100\text{mm}$ では緩やかな勾配になる。図 18 に示すタイプ 3 の動圧分布

Fig. 17 Distribution of dynamic pressure for type 2

は位置 z によらず相似となる。図 19 に示すタイプ 4 の動圧分布では、噴流の外側の $r/R \approx 0.6$ 付近に動圧のピークが存在する。

図 20 には、動圧分布から求めた無次元噴流幅 $2R/D$ の軸方向変化を示す。空気単相噴流に比べて空気-水二相噴流、蒸気-水二相噴流では無次元噴流幅は大きくなる。

噴流中心軸上の動圧の流れ方向の変化を図 21 に示す。空気単相噴流の動圧は理論値に近い $(Z/D)^{-2.06}$ に比例して減衰し、空気-水二相噴流の動圧は $(Z/D)^{-1.86}$ に

Fig. 18 Distribution of dynamic pressure for type 3

Fig. 19 Distribution of dynamic pressure for type 4

Fig. 20 Comparison of jet width

比例しており若干緩やかに減衰し、蒸気-水二相噴流の動圧は $(Z/D)^{-1.502}$ に比例しておりさらに緩やかに減衰する。

(a) Air single-phase jet and air-water two-phase jet

(b) Steam-water two-phase jet

Fig. 21 Distribution of dynamic pressure at center of jet

5. 結 言

短い細管ノズルから噴出する空気-液体二相噴流と自己蒸発を伴う蒸気-液体二相噴流の流動特性を実験的に明らかにし、次の結論が得られた。

- (1) 動圧分布から得られる空気-水二相噴流の半径方向広がり、噴流内の水流量に比例しノズルからの距離の2乗に反比例するとした半径方向

の平均液滴密度に依存し、平均液滴密度が大きいほど広がりが大きくなる。

- (2) 空気-水二相噴流において液滴は中心部に集まる傾向にあり、ノズル出口に近く、空気に対する水の流量比が大きいほどその傾向は顕著となる。
- (3) 空気と液滴のスリップ比1を仮定して求めた空気-水二相噴流内の速度分布は、空気と水の流量比に依存しノズルからの距離に対する依存性は小さく、概ね相似形となる。
- (4) 自己蒸発を伴う蒸気-水二相噴流の流動状態は4つのタイプに分類され、それぞれノズル内二相流動様式およびノズル出口オリティと関係づけることができる。
- (5) 自己蒸発を伴う蒸気-水二相噴流の動圧分布は上記の4つの流動タイプに特徴的な特性を有している。
- (6) 空気単相噴流、空気-水二相噴流、蒸気-水二相噴流の順に、動圧分布から求めた噴流幅が大きくなり、中心軸上の動圧の下流方向減衰は小さくなる。

文 献

- (1) Bradbury, L.J.S., J. Fluid Mech., 23, (1967), 31-64.
- (2) Rajaratnam, N. 原著・野村安正訳, 噴流, (1981), 森北出版.
- (3) Abramovich, J. Heat Mass Trans., 14(1971), 1039-1045.
- (4) 須磨誓・小泉睦男, 機論, 43-376, 第2部(1977), 4608-4617.
- (5) 宮武修・ほか3名, 機論, 45-400, B(1979), 1883-1889.
- (6) 浜田広次・ほか3名, 機論, 69-677, B(2003), 10-17.
- (7) 眞島正市・磯部孝, 計測法概論(下巻), (1951), コロナ社.
- (8) 川田裕朗・ほか2名, 流量計測ハンドブック, (1979), 日刊工業.
- (9) 日野太郎・ほか3名, 計測技術, (1981), 朝倉書店.
- (10) 日本機械学会, 流体計測法, (1985).
- (11) Ginoux, J.J., A von Karman Inst. Book, (1978), MacGraw-Hill.
- (12) Schlichting, H., Boundary-Layer Theory, (1968), McGraw-Hill.