

垂直管内蒸気-水系単一上昇スラグの挙動に関する実験*

藤田尚毅**, 村上甚弥**, 釜范 満***
渡部照継†, 永倉喜一郎††An Experimental Study on a Steam-Water Single Slug in an
Adiabatic Vertical Pipeby Naotake FUJITA, Jinya MURAKAMI, Mitsuru KAMAYACHI,
Terutsugu WATANABE, and Kiichirou NAGAKURA

Concerning the Complicated peculiarity of flashing flow, the paucity of reports relating to its flow peculiarity, except for bubble flow and annular flow, prompted us to investigate it. In this paper we describe an experimental study of the behavior analysis of a steam-water single slug in an adiabatic vertical pipe. We measured slug growth rates, liquid temperatures and steam temperatures in the slug, etc. We experimentally clarified the relationship between slug growth rates and the degree of superheat, steam temperature in the slug and saturation pressure. Furthermore, we have made measurements of velocity profiles of liquids at the nose of the slug by the use of LDV.

Key Words: Two Phase Flow, Slug Flow, Flashing Flow, Slug Growth, Slug Velocity Experimental Study

1. 緒 言

気相と液相の共存する流れ, すなわち気液二相流は日常よく見られる現象である。特に, 沸騰や凝縮を伴う二相流は, 工学的に多くの動力プラント, 化学プラントあるいは空調・冷凍装置に関係し, ボイラ, 沸騰水形原子炉, 各種の蒸発器等における主要過程である。

近年, 開発や研究がさかんに行われている地熱エネルギープラントにおいても, 地熱坑井中の流れにこのような蒸気と熱水が混合して流れる一成分二相流が存在する。これは流動に伴う圧力降下のために飽和水が自己蒸発して, しだいに蒸気流量を増してゆき, このため流体の比体積は受熱しないにもかかわらず著しく大きくなり, 同時に流動抵抗が急激に増大してゆく。このような流動はフラッシュ流と呼ばれ, その流動特性を解明しておくことが工学上重要である。

フラッシュ蒸発を伴う流動に関しては, 多数の実験

を中心とした研究が集中的に行われてきたが, このような研究は主に管内流量が比較的大きい気泡流や環状流に限られてきた。垂直管の場合については, これまで地熱坑井内のフラッシュ流に関する研究⁽¹⁾や管出口での蒸気クオリティおよびフラッシュによる温度降下を求めたもの⁽²⁾などがあるが, いずれもフラッシュ流の複雑, かつ特異な性質を指摘するとともにフラッシュ発生位置等の予測の困難さについて言及している。

またフラッシュ蒸発等に関連した基礎研究として静止過熱水中の気泡生長に関する研究が理論, 実験の両面から詳細に行われている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

しかし, 低流量域のスラグ流に関しては, 空気-水系のような二成分二相流における特性は広い範囲について報告されているが⁽⁶⁾, 一成分二相流の場合は強い非定常性のある状態についての研究⁽⁷⁾など部分的領域の解明がなされているものの, 他の領域と比べて研究例が非常に少ない。

そこで本研究では, 垂直上向き一成分スラグ流の最も基本的状態である液体スラグ部に小気泡を含まない単一蒸気スラグについての挙動を実験的に調べた。

垂直断熱管内で低流速かつ上向きに流れている過熱水中へ蒸気を注入することにより単一蒸気スラグを生じさせ, スラグの形成と成長過程についての基本的な

* 昭和61年6月21日 東北支部秋田地方講演会において講演, 原稿受付 昭和60年12月20日。

** 正員, 岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田4-3-5)。

*** 学生員, 岩手大学大学院。

† 准員, 東北電力 (〒980 仙台市一番町3-7-1)。

†† 正員, 一関高等工業専門学校 (〒021 一関市萩荘)。

諸量（スラグ成長量，液体温度，スラグ内部温度など）を測定し，スラグ内部蒸気温度とスラグ内部圧力の関係を調べるとともに，過熱度とスラグ成長量の関係を実験的に示した。

また，レーザ・ドップラ流速計（LDV）を用いてスラグ先端部における液体の軸方向速度分布を測定し一様流中に点わき出しを考えた場合の半無限回転体先端部での速度分布や形状と比較した。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置概略を示す。水はギヤポンプ⑦により矢印の方向に循環する。供試管①は，内径 27 mm，肉厚 4 mm のパイレックスガラス管で構成されており，全長 2.4 m である。ガラス管外周には直径 0.1 mm のニクロム線を約 6 mm 間隔で巻きつけ，保温ヒータ②とした。このヒータは上下に 4 分割されており独立に加熱調整ができる。加熱部⑥は内径 12.7 mm，長さ約 4 m の銅管で，その回りを電気的に絶縁し鉄クロムリボン線を巻き付けてヒータとした。加熱部を通過した熱水の一部は供試管と蒸気発生部④へ，残りはリターンパイプ⑧を通過して中間タンク⑨へ戻される。供試管内液体温度は，供試管中心で流れの方向 6 箇所を設置した直径 0.1 mm の銅-コンスタンタン熱電対で測定した。供試管内液体流量および温度を各バルブ開度やヒータの調整によってスラグ成長に関する所定の条件に設定した後，蒸気発生部で発生させた蒸気を

供試管下部に混入し単一スラグを発生させた。発生したスラグの上昇に伴う成長過程を高速度カメラ⑫で撮影するとともに，スラグ先端部における局所液体速度変化を自由水面から 870 mm の位置に測定点を設定した LDV⑬で測定した。

供試管上部に達した蒸気スラグはコンデンサ⑪を備えた大気圧開放の上部タンク⑩で気水分離された後，水はオーバフローパイプを下降して中間タンク⑨に戻る。上部タンク内にはシースヒータを備えておりタンク内温度を常に飽和温度に保つようにした。液流量は三方コックの切り換えにより，体積法で測定した。

実験における流量範囲は $2.8 \sim 15.2 \times 10^{-3} \text{ (kg/s)}$ であり水は系内における空気泡の発生を押さえるためにあらかじめ十分に脱気した水道水を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 スラグ内部蒸気温度およびスラグの成長

本実験の管内平均流速は 5~28 mm/s の範囲で行ったので管摩擦圧力損失は非常に小さくなり，フラッシュ蒸発を誘起させる圧力降下は，スラグの上昇に伴う水頭圧の減少のみであるとみなすことができる。自由水面下 H に先端があるスラグ内圧力 P_g は，大気圧を P_a ，水の密度を ρ ，重力の加速を g とし，表面張力による内圧上昇は十分小さいものとする

$$P_g = P_a + \rho g H \dots\dots\dots (1)$$

スラグ内では圧力は一様とみなせる⁽⁹⁾ので，温度も圧力 P_g における飽和温度となる。図2には，自由水面下 0.78 m (C点) の点をスラグ後端が通過したときの蒸気温度と気泡の長さとの関係を示した。ここで，図縦軸の t_g はスラグ内蒸気温度， t_a は圧力 P_a における飽和温度である。長さ L のスラグ後端が測温点(C)を通過する時の圧力は

$$P_g = P_a + \rho g (0.78 - L) \dots\dots\dots (2)$$

となるが，この圧力に相当する，飽和温度を実線で示

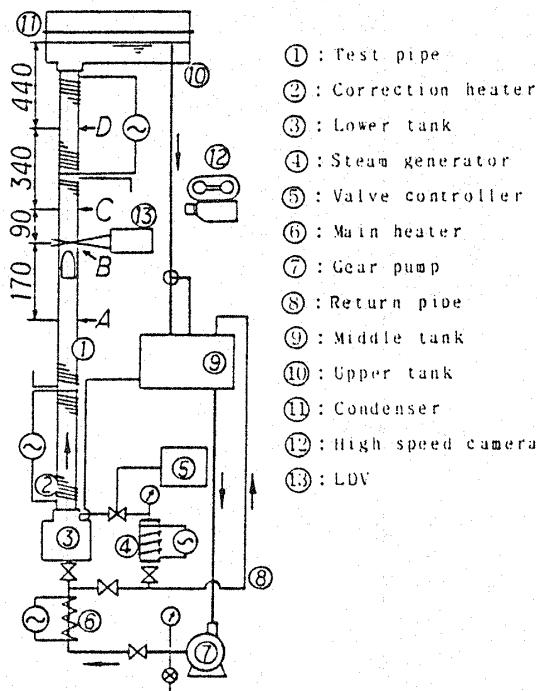


図1 実験装置概略

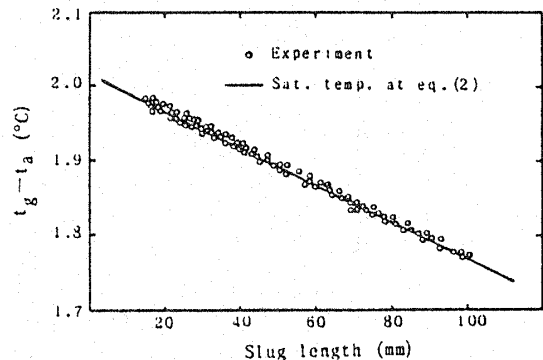


図2 スラグ後端が定点を通過する時の長さ温度

した ($t_a=100^\circ\text{C}$). 垂直管下方に注入された単一蒸気スラグは、水の温度がその点の飽和温度よりも高いときに成長しながら上昇していく。

図3は、スラグの成長に与える過熱度の影響を調べたものである。自由水面から1.04 m (A点)の位置にスラグの先端がある時の長さを L_A , 同0.44 m (D点)の位置での長さを L_D としてA点からD点まで上昇した時のスラグ長さの変化を測定した。過熱度 ΔT には、C点における液体温度 t_l とスラグ蒸気温度 t_g との差をとった。

液流量の違いによる成長率の差はあまりなく液体の過熱度により大きく影響されることがわかる。スラグが上昇する時の水頭圧減少による単純な膨張は、この場合、4%程度と計算されるので、スラグの成長はほとんど非平衡温度差による相変化によるものであるとみなせる。

3.2 スラグ先端部形状 スラグ先端形状については、ガラス管の屈折による形状のゆがみも考慮して写真撮影から実測した。図4に求めたスラグのプロフィールを示す。管中心スラグ先端部を原点とし、スラグの長さ方向に z , 半径方向に r をとり管内半径 R で無次元化してある。

$$z/R = \eta, r/R = \xi \quad \dots\dots\dots (3)$$

別に、一様流中にわき出しを重ね合せた場合に軸対称の半無限物体が得られる。この流線は、流線上の任意の点Pからわき出し点Sまでの距離を r_c , PSと中心軸とのなす角を θ , 半無限物体半径を a とすると

$$r_c = (a/2) \operatorname{cosec}(\theta/2) \quad \dots\dots\dots (4)$$

であることが知られている⁽¹⁰⁾。

(4) 式を図4に適用するために R で無次元化する。

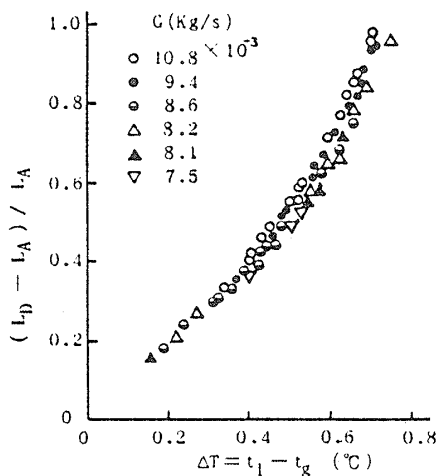


図3 液体の過熱度とスラグの成長率

$$r_c/R = \zeta, a/2R = \sigma \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\zeta = \sigma \operatorname{cosec}(\theta/2) \quad \dots\dots\dots (6)$$

直交座標にするために

$$\eta = (\zeta \cos \theta + \sigma) \gamma, \xi = \zeta \sin \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

を用いる。ここで σ および γ は実際の気泡形状から求められ $2\sigma=0.88, \gamma=0.75$ が得られた。式(6)は1本の曲線であり式(7)を用いて図4に実線で示した。

一方、Dumiteriscuら⁽⁹⁾は空気-水系スラグ流の研究で、スラグの先端形状に対して次の2式を与えており、 $\eta=0.5$ の点で2本をつなぎ合わせて表した。

$$\eta = \rho(\sqrt{1 - (\xi/\rho)^2} - 1) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\eta = 0.5\lambda^2 / (1 - \xi^2) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで ρ, λ は実験的に求められており

$$\rho = 0.75, \lambda = 0.496 \quad \dots\dots\dots (10)$$

式(8), (9)を図4に合わせて破線で示した。半無限体モデルから引用した式(6)は、 $\eta < 0.5$ で式(8)と一致しており、 $\eta > 0.5$ で式(9)よりわずかに大きくなっているが、Dumiteriscuらが示した実験結果のほうとはよく一致した。液流量の小さい所でのスラグ形状は一成分の場合と二成分二相流の場合には差がないといえる。

3.3 スラグ先端部速度 スラグ先端より前方の液体速度をレーザドップラ流速計(LDV)を用いて前方散乱プリンジモード方式で測定を行った。速度測定位置は自由水面下0.87 m (B点)の所で、トラバース装置にて管半径方向に移動可能である。

図5に、B点断面でのスラグ前方の軸方向速度変化を示す。 U_l は流体の局所速度、 U_g はスラグ先端直前の上昇速度である。測定可能範囲は、レーザビーム交差点と、スラグ先端の曲率の関係からスラグ先端から約0.1 mm前方の所までであった。また液体の過熱度は 0.4°C 以下で行った。スラグが成長しながら上昇していく時、スラグ下端速度は液体の過熱度に依存せずに常に一定であり⁽⁷⁾、スラグの先端速度だけが変化する。図3から過熱度 0.4°C でA~Dを上昇する間にス

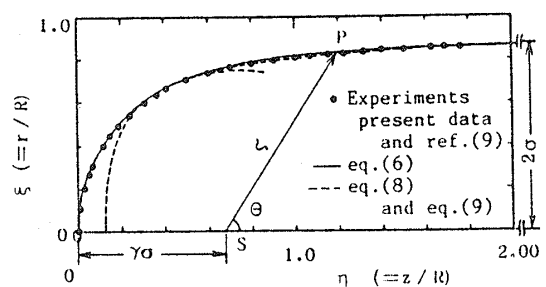


図4 蒸気スラグのプロフィール ($G=10^{-2}$ kg/s)

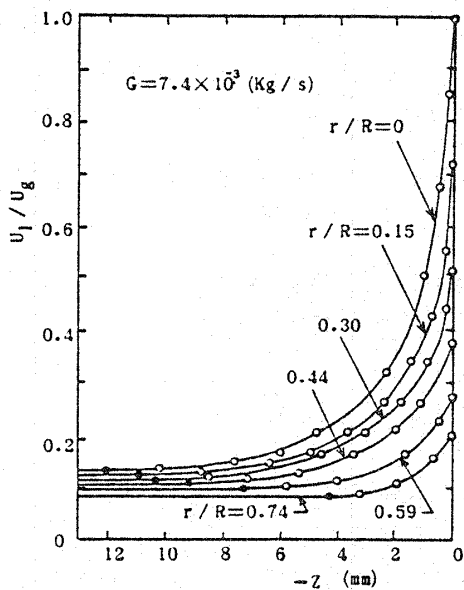


図5 スラグ前方の軸方向液体速度変化

ラグの長さは約40%増加することがわかるが、この時スラグ先端の速度は後端の速度よりも約5%大きくなる。

このことを考慮に入れて Zuber らが提唱している蒸気-水系スラグの上昇速度 U_g に関する実験式⁽¹¹⁾と比較すると、 $\pm 1.2\%$ で本実験結果と一致していた。スラグがB点に接近する時の速度の時間的変化を測定したが、準定常の流れとみなし、図の横軸にはスラグ先端までの距離に直して表した。スラグの十分前方では単相管内流の層流に相当する速度分布をしており、スラグ近傍になるにつれて急激に速度増加し、スラグに接する所で一致する。管中心 ($r/R=0$) では、スラグ前方約12 mmの所から速度変化が始まっていることがわかる。管軸方向の速度変化が始まっているとみなせる個所を●印で図に示した。この点を見ると速度変化領域が一定の形を有していることがわかる。図6は、LDVで測定したスラグ前方における軸方向速度変動領域の形状と、式(6)により表わされるスラグ先端形状との比較を示している。両形状は管内平均流量に無関係によく一致している。したがってこの図から速度変動領域の軸方向厚さは $r/R < 0.75$ で一定であるといえる。

4. 結 論

垂直管内上向き流れにおいて、特に低流量時の自己蒸発を伴う単一蒸気スラグ流の挙動を実験的に調べて

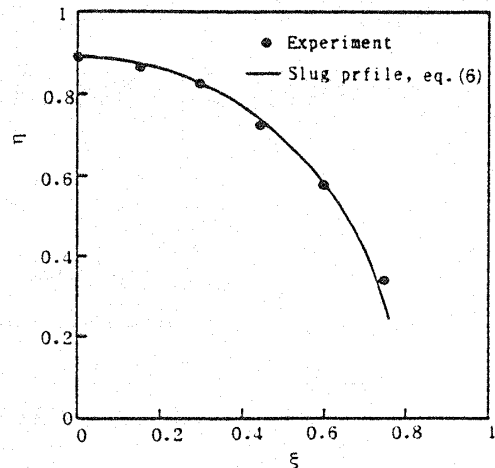


図6 スラグ前方における速度変動領域

以下の結果を得た。

(1) 管内流摩擦損失が無視できるような低流量域においては、蒸気スラグ内温度は、スラグ先端での水頭圧に相当する飽和温度になっている。

(2) スラグの成長率は、過熱度に依存し、過熱度の増加につれて放物線的に増加する。

(3) スラグ先端部形状は、一様流中に点わき出しを考えた時の流線と相似であり、式(6)に示すような一つの式で表すことができる。

(4) スラグ先端における管軸方向速度変動領域の形状は、管壁付近を除いてスラグ先端形状と一致する。

最後に本実験の遂行に際し、岩手大学技官 伊藤光博氏のご助力を得たことを明記し、ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 世古口・ほか2名, 地熱, No. 14, (昭43), 44.
- (2) Dickson, S., ほか1名, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 184 (1969~70), Pt 3c.
- (3) Darby, R., *Chem. Eng. Sci.*, 19-1 (1964), 39.
- (4) Kosky, P. G., *Chem. Eng. Sci.*, 23-7 (1968), 695.
- (5) 宮武・田中, 機論, 48-426, B (昭57), 355.
- (6) Nicklin, D. J., ほか2名, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 40 (1962), 61.
- (7) 深野・ほか2名, 機論, 45-398, B (昭54), 1502.
- (8) 赤川・ほか2名, 機論, 36-289 (昭45), 1535.
- (9) Dumiterescu, D. T., *Z. Angew. Math. Mech.*, 23-3 (1943), 139.
- (10) 今井, 流体力学 (前編), (昭48), 158, 裳華房.
- (11) 植田, 気液二相流, (昭56), 57, 養賢堂.