

## 減圧下における垂直上昇管内の単一蒸気スラグの挙動\*

藤田 尚 毅\*<sup>1</sup>, 伊藤 光 博\*<sup>2</sup>  
釜 范 満\*<sup>3</sup>, 永倉 喜一郎\*<sup>4</sup>

## The Behaviour of a Steam Slug in Upward Water Flow in an Isothermal Vertical Pipe at a Reduced Pressure

Naotake FUJITA, Mitsuhiro ITOH,  
Mitsuru KAMAYACHI, and Kiichirou NAGAKURA

We investigated the behaviour of a steam slug which was rising in an isothermal vertical pipe at a reduced pressure. When the water temperature around the steam slug was higher than the saturated temperature, the slug grew upon rising in the pipe. The temperature difference between the steam slug and the surrounding water was increased, when water velocity in the pipe was increased or a static pressure to the system was decreased. The increase in velocity of the leading edge of a rising steam slug was caused by the slug growth. But the trailing edge velocity of a steam slug was equal to that of an air slug without growth in water. As the water temperature around the tip of the steam slug was locally higher than the mean flow temperature, it was regarded that the liquid vaporization, which caused the slug growth, occurred at the front face of the slug.

**Key Words:** Two Phase Flow, Slug Flow, Flashing Flow, Slug Growth, Slug Velocity, Slug Temperature Profile, Experiments

## 1. 緒 言

著者らは以前に蒸気・水系の二相流において基礎的な知見を得ることを目的に、流動に伴う圧力損失の無視できるような低流量域において、垂直管内を上昇する単一蒸気スラグの挙動について観察を行った<sup>(1)</sup>。その結果、蒸気スラグの生長は周囲流体の過熱度に大きく影響されることがわかった。この過熱度は周囲から過熱されてできるほかに、飽和水が上昇する際の水頭圧の減少や、流動抵抗に伴う圧力損失による飽和温度の低下のために、非平衡温度差が増加するという形でも起きる。その結果熱水の顕熱が蒸発熱として使われ蒸発が促進されスラグが生長する。また自由水面にかかる静水圧が変化すると、同じスラグの上昇速度であっても流れ方向の圧力こう配が変化するためにスラグの生長量に影響を与えらる。

単一スラグについて流動方向に体積増加を伴うような研究としては、深野らの研究<sup>(2)(3)</sup>がある。これらは減

圧下における空気-水の模擬流動系を用いて気体スラグの急成長について検討したものであるが、一成分系の蒸発によるスラグ生長の挙動については報告例がないようである。

そこで本研究ではこのようなスラグの生長への影響を調べるために、飽和温度近くで流れている断熱された管内上向き流れにおいて、管内液流量を変化させ、また系全体にかかる静水圧を大気圧よりも低いほうに変化させてその中に発生させたスラグの観察を行ったので、その結果について報告する。

## 2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略を示す。供試管は内径27 mm、厚さ4 mm、長さ1.5 mのパイレックスガラス管を用いた。さらにこの外側に保温およびスラグ通過観察時のガラス管レンズ効果除去のために断面が100×120 mmのステンレス製く形管を設けた二重構造とした。この保温管の前後面には照明および現象撮影のための観察窓を設けた。上部タンクは蒸気泡が発生しても水面の高さが変化しないように十分な開口面積を取ってある。下部タンクには給水予熱用に1 kWのシーヒータを2個組み込んである。予熱された水は供試管用および保温管用のポンプにより各管に供給され

\* 昭和63年3月12日 東北支部第23期総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年4月25日。

\*<sup>1</sup> 正員、岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田4-3-5)。

\*<sup>2</sup> 正員、岩手大学工学部。

\*<sup>3</sup> 正員、石川島播磨重工業(株) (〒100 東京都千代田区大手町2-2-1)。

\*<sup>4</sup> 正員、一関工業高等専門学校 (〒021 一関市萩荘)。

る。途中にそれぞれ 1.5 kW の加熱用ヒータが設けてあり、供試管および保温管に等しい温度に加熱された水を供給した。供試管入口部には加熱パイプ内で発生した小気泡を除くために小室と蒸気抜きを設けてある。管内流速は上向きで歯車ポンプの回転数を変えることにより変化させ、自由水面にかかる静圧はナッシュ真空ポンプにて引いた。各管を上昇した水は上部タンク内で合流し、ここで気水分離され下降管を通過して下部タンクに戻る。各管加熱用ヒータの供給電力を調節し、供試管内の温度が上昇して飽和温度付近になると小気泡の発生が始まり、間欠的にスラグが発生するようになる。ここで加熱量を一定に保ち単一蒸気スラグの生長を観察した。

### 3. 実験結果および考察

本実験で対象とした蒸気スラグは、他のスラグまたは気泡の干渉を受けず、また加熱部では蒸気の突発的発生による気液の振動を伴わない準静的な上昇をする単一蒸気スラグである。

16 mm 高速度カメラ (100 FPS) により上昇しているスラグの生長の様子を撮影した一例を図 2 に示す。管内下方で発生した蒸気泡が上昇していくに連れて大きく生長していく様子が観察される。ここで圧力  $P_t$  は上部タンク内の自由水面にかかる静圧である。この場合管内液体の平均上昇速度  $U_m$  は約 10 mm/s なので、気泡の上昇速度は液体の上昇速度よりもはるかに大きいことがわかる。このスラグ先行のための気液の交替は、スラグ周囲の液膜で行われている。スラグ上

昇に伴う水頭圧減少による単純な気体膨張は約 3% 程度と計算されるのでここでのスラグの生長はほとんど水の蒸発によるものであるとみなすことができる。

図 3 には、撮影した 16 mm フィルムからスラグ先端および後端位置の時間的变化を測定した例である。プロットは初期長さの異なる 2 種類のスラグに対して示してある。この場合スラグ後端位置の基準は、観測窓の関係から上部タンク自由液面から深さ 900 mm の所にとってある。またスラグ先端位置は、後端位置と同時に測る位置からスラグの初期長さを差し引いて示してある。したがって同時刻における先端位置と後端位置の差は、その時刻におけるスラグ長さの生長量を意味する。またこの図からスラグ後端は初期長さには関係なくほぼ一定の速度で上昇していることがわかる。

図 4 にスラグが管内を上昇していくに連れて生長する度合を、2 種類の圧力、液平均流速に対して示す。図の縦軸は測定基準点を自由液面下 720 mm として、この点をスラグ後端が通過したときのスラグ長さを  $L_0$ 、基準点からスラグ後端が  $X$  mm 上昇したときの長さを  $L_x$  とし、管内径  $D$  で無次元化してある。実線は各圧力・流量状態に対して平均的な値を示したものであるが、圧力・流速が同じ場合、初期長さ  $L_0$  が変化してもほぼ同じ割合で実線のまわりに振動しながら生長している。そして静圧が小さいほど、流速が大きいほど気泡の生長率が大きくなっている。図 2 の気泡形状を見ると先端が丸まったり尖ったりして先端の曲率変動しながら上昇しており、これが気泡先端速度の振動

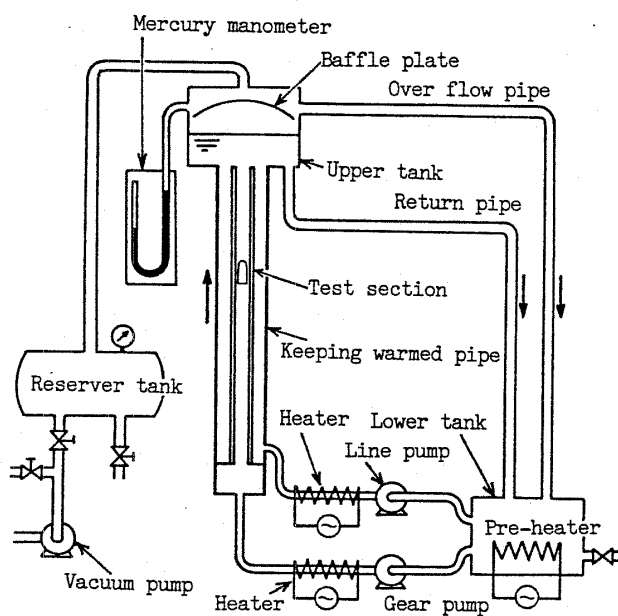
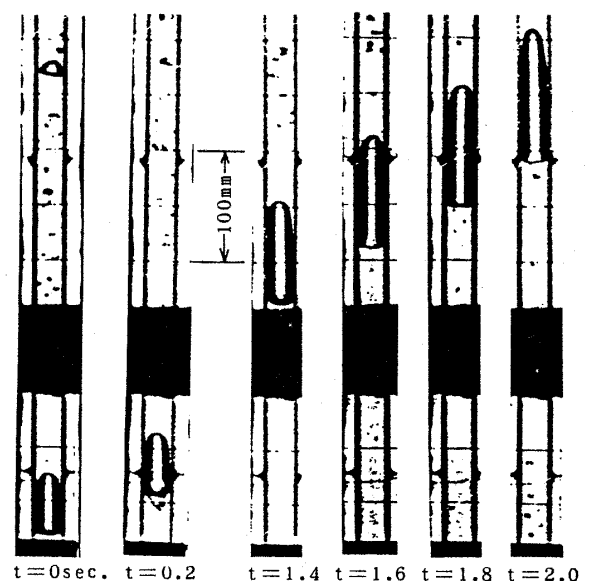


図 1 実験装置概略



( $P_t = 91.8$  kPa,  $U_m = 10.3$  mm/s)

図 2 管内を生長しながら上昇する蒸気スラグ例

の原因になっている。

次に管内平均流速と静圧変化がスラグの上昇速度に及ぼす影響について図5に示す。図3からもわかるようにスラグ後端速度は一定であるが先端速度は非定常性を有するので、ここでは上部タンク自由水面から深さ720 mmの位置から深さ520 mmまでの観察区間で区間平均速度を用いた。Nicklin<sup>(4)</sup>は水・空気スラグ流でのスラグ生長がない場合の上昇速度  $U_s$  に対し次式を与えた。

$$U_s = K \cdot U_m + 0.35 \sqrt{gD} \dots\dots\dots (1)$$

ここで右辺第2項は Dumitrescu<sup>(5)</sup>による垂直速度を表し、 $K$ はスラグ前方の流体の速度分布に依存する係数である。本実験では  $K=1.79$ を採用し、図中太い実線で示した。この実線とスラグ後端速度  $U_{s2}$ はよく一致しており圧力条件の違いによる影響はなく、液平均流速  $U_m$ のみに依存している。したがってスラグの生

長の違いはスラグ先端速度  $U_{s1}$ の変化となって現れている。スラグの生長に及ぼす効果は、平均流速が小さいほうでは影響が小さく、流速が増加するに連れて流動抵抗が増すために速度の二乗に比例して増加する傾向を示す。また系にかかる静圧の減少は、直接スラグの水頭圧減少に関与するので直線的増加となっている。

次にスラグの生長は非平衡温度差による過熱水の蒸発によるものであることを見るために、スラグの通過に伴う主流温度の変動を測定した。その一例を図6に示す。温度の測定は、直径0.1 mmの銅・コンスタンタン熱電対を管内に水平に張って管中心で行った。図の下側実線が測定点をスラグが通過したことを示すマーカであり、上の実線が温度変化を表す。ここではスラグ内温度はその点の圧力における飽和温度であり、スラグが上昇するに連れてその温度も低下していく様子が観察される。またスラグ前方の主流温度は蒸気温

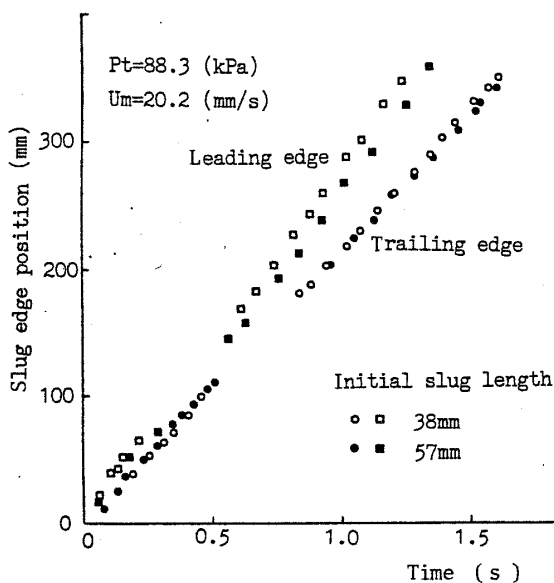


図3 スラグ先端および後端位置の経時変化

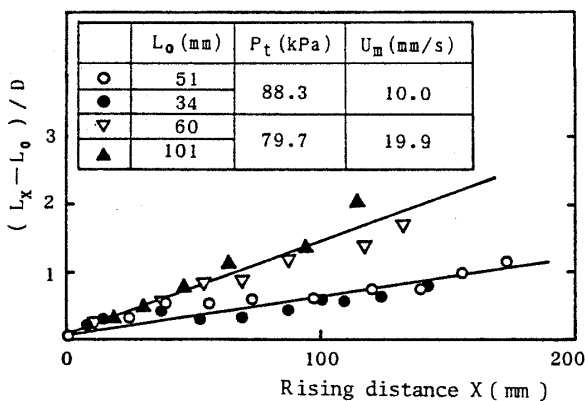


図4 蒸気スラグの生長率

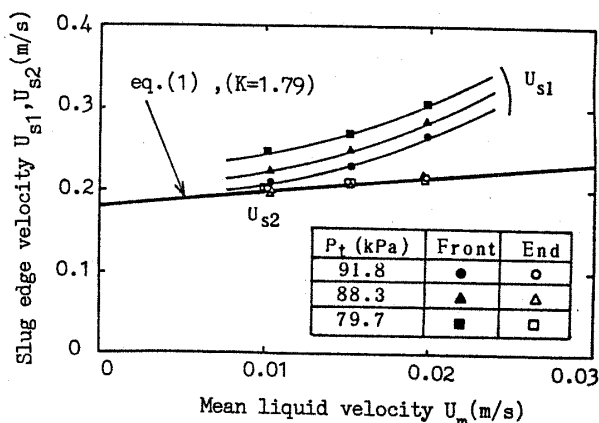


図5 スラグ先端および後端上昇速度

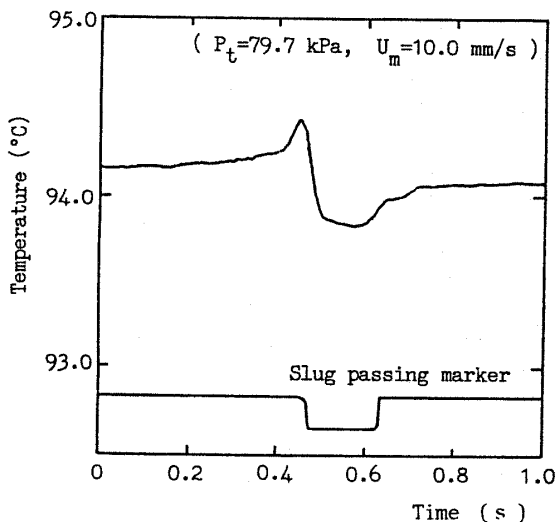


図6 蒸気スラグ通過前後の温度変化

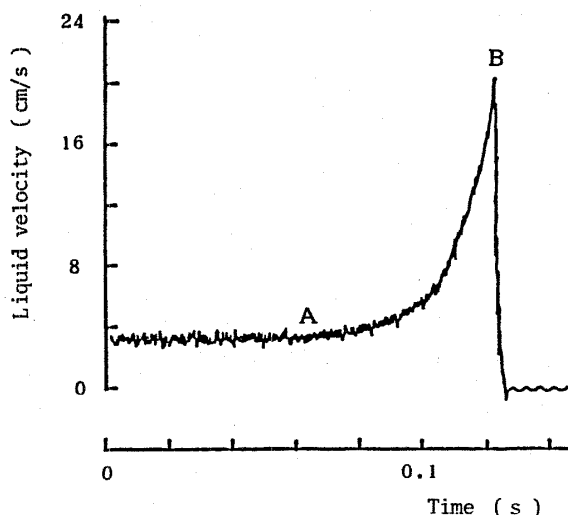


図7 蒸気スラグの上昇に伴う液体速度変化  
(LDV 周波数トラッカー出力波形)

度よりも約  $0.3^{\circ}\text{C}$  高くなっている。ここでは特に先端部付近には主流よりも高い過熱度を有する熱水が存在しているのが観察される。スラグ先端淀み点付近では液体の蒸発による温度境界層が形成され、また後端では蒸発により温度の低下した液体がスラグ周囲の液膜を通してその後端へ回り込むために前方の液温度より低くなり、その後液体の上昇に伴い主流温度に回復する傾向が現れている。

図7はスラグの上昇に伴うスラグ前方の速度変化の状況を管中心においてLDVを用いて測定したものである。スラグ前方では管中心の液体主流速度を示しスラグが近づくとつれてA点付近から速度が増加し、B点でスラグ先端の速度と一致している。その後は測定

光がスラグにさえぎられるために信号が途絶えている。このことから管下方で高い飽和温度にあったスラグ直前の液体はスラグと一緒に上昇していることがわかりスラグ先端に主流温度よりも高い温度の液体が存在する理由が説明される。したがってスラグ生長の原因となっている液体の蒸発は主として高い加熱度を有する液体が存在するスラグ前半部で起きているとみなせる。

#### 4. 結 言

断熱された垂直管内を上昇する単一蒸気スラグにおいてその生長する度合は、系に加わる静水圧力が低いほど、また管内流速が大きいほど増加する。スラグの生長に与える影響は、静水圧については直線的であり流速については速度の二乗に比例する傾向を示す。スラグの上昇速度については後端は2成分の場合のスラグ流の速度で表すことができ、スラグの生長はスラグ先端速度増加となって現れる。

また、上昇するスラグ先端部付近には特に過熱度の大きい液体が存在し、スラグ生長の原因となっている液体の蒸発は主としてスラグ前半部で起きているとみなせる。

#### 文 献

- (1) 藤田・ほか4名, 機論, 52-481, B (昭61), 3278.
- (2) 深野・世古口・松村, 機論, 45-398, B (昭54), 1502.
- (3) 深野・ほか3名, 機論, 46-412, B (昭55), 2412.
- (4) Nicklin, D. J., ほか2名, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 40-2 (1962), 61.
- (5) Dumitrescu, D. T., *Z. AMM*, 23-3 (1943), 139.