鉛直管内上昇気液二相流における液膜厚さに与える
円筒形障害物長さの影響*富永 彰^{*1}, 深野 徹^{*2}, 川上 靖^{*3}Effects of the Length of a Ring-Type Obstacle on Liquid Film Thickness
in Upward Gas-Liquid Two-Phase Flow within a Vertical TubeAkira TOMINAGA^{*4}, Tohru FUKANO and Yasushi KAWAKAMI^{**} Department of Mechanical Engineering, Ube National College of Technology,
2-14-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8555 Japan

A ring-type obstacle, which simulated a spacer in Light Water Reactor or a flow obstruction supporting heat exchanger tube, was set in an upward air-water two-phase flow within a vertical tube to investigate the effects of the obstacle on liquid film thickness in relation to the drypatch generation. We measured the axial distributions of time varying liquid film thickness near the obstacle in the range of the superficial water velocity of 0.06-1.6 m/s and the superficial air velocity of 0.5-36 m/s and discussed the effects of the length of the obstacle on the liquid film thickness. The results are summarized as follows: (1) The minimum film thickness and the mean film thickness near the obstacle become thinner as the length of the obstacle becomes shorter. (2) The length of the obstacle has stronger effects on both the minimum and the mean film thickness near the obstacle as the superficial water velocity becomes lower. (3) The generation of drypatch is possible under the flow conditions examined in the present experiment if heat is applied.

Key Words: Multi-Phase Flow, Nuclear Reactor, Pipe Flow, Air-Water Two-Phase Flow, Vertical Tube, Spacer, Liquid Film Thickness, Length of Obstacle

1. 緒 言

現在, 全世界で化石燃料が大量に消費され, 二酸化炭素などによる地球の温暖化の問題が生じているが, 世界のエネルギー需要は今なお増加している。したがって二酸化炭素を排出しない原子力発電の必要性は当面減ずることはなく, 原子炉の安全性を十分確保する一方, 経済的な原子炉の開発を進める必要がある。例えば, 沸騰水形原子炉(BWR)の熱設計は燃料棒支持用スパーサ近傍での熱除去によって制約を受けているといわれており⁽¹⁾, そこで管のバーンアウトなどの諸問題を引き起こすことが懸念されるので研究報告もあるが^{(2)~(4)}, 未知の点も多い。このときの炉心における流れは環状噴霧流であると考えられている。

一方, 加圧水形原子炉(PWR)の燃料集合体内でも異常な過渡変化時などにはその中での流れが気液二相流となり, そこでの限界熱流束や膜沸騰熱伝達に燃料棒の支持格子(以下支持格子とスパーサを含めてス

ーサという)が関与することが指摘されている⁽⁵⁾。この場合もスパーサが気液二相流に影響を及ぼすことによると推察されるが, その詳細は明らかではない。その場合の流動様式はスラグ流および気泡流である。

スパーサ近傍でのドライアウト発生条件を明らかにするために, 川上ら⁽⁶⁾は, 垂直円管内の上昇気液二相流中に障害物を設置した実験的研究を行っている。しかしその研究では, 瞬間的に形成される最小液膜厚さだけが議論されている。

そこで著者らはドライアウトに至る物理的現象の解明を意図して, 前報⁽⁷⁾で, BWRの実機で採用されている形状に近い流れ方向長さが30 mmの円筒形流動障害物が液膜に与える影響の基本的性質を調査した。本報では, 流動障害物の流れ方向長さが液膜に与える影響として, 障害物領域内を含む障害物近傍の液膜厚さなどを種々の流動様式(スラグ流・フロス流・環状流)を含む広範囲の流動条件下で測定し, 最小膜厚, 平均膜厚, 薄膜継続時間および薄膜発生頻度について検討した結果を述べる。なお本実験は常温常圧下でなされたものであるため, 軽水炉の実機のような高温高圧下の場合にその結果をそのまま適用できるかどうかはさらに検討する必要がある。

* 原稿受付 2002年4月19日。

^{*1} 正員, 宇部工業高等専門学校(〒755-8555 宇部市常盤台2-14-1)。^{*2} 正員, フェロー, 九州大学大学院工学研究院機械科学部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)。^{*3} 正員, 宇部工業高等専門学校名誉教授。

E-mail: tominaga@ube-k.ac.jp

2. おもな記号

 $D_{\max}$: 最大薄膜継続時間 s F : 薄膜発生頻度 s^{-1} L : 障害物長さ mm j_G, j_L : 見掛けの空気および水の流速 m/s t_F : 液膜厚さ mm t_h : しきい値 mm β : 障害物挿入断面の開口比

添字

m: 平均値

min: 最小値

3. 実験装置および方法

本実験に用いた供試管は既報⁽⁷⁾と同様であり、内径 26.0 mm、長さ約 9.7 m の円管で鉛直に設置されており、目視観察可能な透明アクリル樹脂製である。空気は圧縮機から、水はポンプを介してタンクからともに浮子式流量計(ここで測定範囲が異なる三つのフルスケール精度 $\pm 3\%$ の流量計を用いて空気流量測定)を経て気水混合部へ至り、気液二相流となり供試管内を上昇する。これらの流体は約 5.2 m の助走区間を通過した後、測定部を通り供試管出口端に設置した気水分離器に至る。ここで空気は大気へ放出され、水は捕集法(指示精度 $\pm 1\%$)で流量を測定された後、再びタンクに戻される。

障害物を取付けた測定部の講細を図 1(a)に示す。測定部には、時々刻々の断面平均の液膜厚さ(以下では膜厚という)を再現性よく測定できる定電流法によるプローブ⁽⁸⁾が、軸方向に 8 個(以下ではこれらを P1~P8 のように略記する)設置されており、障害物近傍の時々刻々変化する液体ホールドアップの管軸方向分布を同時に測定できる。このとき定電流印加電極間距離は 0.89 m である。

また図 1(b)はプローブと障害物の詳細を示す。一つの膜厚プローブは、電極間距離が 6 mm であり供試管の内面と同一面(電極と管内面との段差は 5 μm 以下)になるように埋設された一対の環状の測定電極(厚さ 1.0 mm の銅板)から成っている。各プローブで測定される管断面平均液体ホールドアップ η のデータを周波数 1 kHz で 120 s 同時にサンプリングし、それらの η から次式を用いて瞬時の液膜厚さ t_F を算定した。

$$t_F = R \{1 - (1 - \eta)^{0.5}\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 R は管内半径であり、 t_F は管周全体にわたる平均値である。障害物領域内での t_F は、障害物すきま側の液体ホールドアップ(液膜が主流路側にも存在

(a) Test section

(b) Probe and obstacle

Fig. 1 Test section, probe and obstacle

する場合に主流路側の液体ホールドアップも含む)によって決まる。ここで、障害物すきまとは供試管内壁と障害物のすきま、主流路とは円筒形障害物の管中心側の空間を意味する。

使用した障害物は、内径が 14.5 mm の円筒で、その管軸方向長さ L は 15, 30, 60 mm の 3 種類であり、 $L=30$ mm の障害物を標準とする⁽⁷⁾。各障害物は、その下端から上側に 25~30 mm の範囲で厚さ 0.5 mm、流れ方向長さ 5.0 mm の 4 枚の支持板で 90° おきに供試管とほぼ同心に管に固定されており、障害物すきまは平均として 0.75 mm である。3 種類の障害物とともにその下端が P3 の位置から 7.5 mm 上(下流)に位置するように設置されている。しかし、3 種類の障害物の長さが異なるので、その上端と膜厚測定点との位置関係が異なることを指摘しておく。また、標準の障害物の寸法は BWR のスペーサ寸法を参考にして決

定したが、障害物の影響を大きくするため肉厚を厚くした。その開口比 β は実際の場合より小さく、0.42 である。

4. 流動様式と実験条件

図2は障害物がない場合の流動様式線図で、図中の○印は実験点を示す。実験範囲は見掛けの水流速 $j_L = 0.06 \sim 1.6 \text{ m/s}$ 、見掛けの空気流速 $j_G = 0.5 \sim 36 \text{ m/s}$ である。流動様式は目視観察、ビデオ映像および定電流膜厚プローブの時系列電圧信号から総合的に判別した。図2中の実線はスラグ流域とフロス流域の境界を表す。 j_G が 8 m/s 近傍の斜線の領域はフロス流から環状流への遷移領域である。また参考のために、Taitel ら⁽⁹⁾ による境界線を一点鎖線で示す。ここで S はスラグ流、C はチャーン流、A は環状流を示す。チャーン流は本実験でのフロス流とほぼ同じ流動様式と考えられ、以下これをフロス流と呼ぶ。本実験結果を理解するうえで液膜が瞬時でも逆流するかどうかが重要である。破線と矢印でその逆流が観察される領域を示す。

5. 実験結果および考察

前報⁽⁷⁾ で障害物近傍での薄膜化機構として以下のことが明らかとなった。

(1) スラグ流領域での薄膜化は、大気泡が障害物を通過するときの液膜の逆流による急速な薄膜化現象、すなわちドレーニジ⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾ によって障害物の上流側で生じる。

(2) フロス流と環状流の遷移域での薄膜化は、液膜の瞬間的な逆流と気体の障害物すきまへの流入がほぼ同時に発生することによって障害物直上流または障害物領域内で生じる。

(3) 液膜の逆流がない環状流領域での薄膜化は、

障害物のブロックにより加速された気体が障害物すきまに連続的に流入することによって障害物領域内または障害物直下流で発生する。

以下では、これらのことを考慮し検討する。

5.1 最小膜厚と障害物長さの関係 気液二相流では、一般に管周方向に平均した液膜厚さであっても時々刻々変化する。したがって膜厚特性量として最大、平均および最小などの膜厚を定義することができる。この節では、障害物が膜厚に及ぼす影響の中で管のバーンアウトなど機器の熱的安全性に直接的に関係する最小膜厚 t_{Fmin} についてまず述べる。ここで、確率的な現象を考慮して、最小膜厚 t_{Fmin} を液膜厚さの累積度数分布で累積度数が1%の膜厚で定義した⁽⁷⁾⁽¹¹⁾。

図3(a)~(c)に障害物付近の流れ方向の最小膜厚分布を $j_L = 0.06 \text{ m/s}$ 一定で、それぞれ異なる j_G の場合を例として示す。横軸の番号は膜厚プローブの位置 (P1~P8) を示す。図3中下部の水平な3本の実線は、長さが異なる障害物の長さ、およびその設置位置と各プローブの位置との関係を示している。また図3中上部の水平な破線は、障害物すきまの大きさ (0.75 mm) を表している。P6~P8でのデータは、障害物長さによって障害物との位置関係が異なる。

図3(a)は $j_G = 0.5 \text{ m/s}$ のスラグ流領域の t_{Fmin} である。障害物上流 (P1~P3) では (○印と比較して) 障害物によって最小膜厚 t_{Fmin} は明らかに減少し、障害物長さ L が短いほど小さい。障害物上流で薄膜化が進むのは気体スラグが障害物を通過するときである⁽⁴⁾⁽⁷⁾ が、このとき障害物の上端面は気体スラグまわりの液膜の流下を妨げる役目を果たす。

一方、障害物内の t_{Fmin} は、いずれの障害物長さの場合もすきまの大きさとほぼ同じ値をとり、障害物すきま内が水でほぼ満たされていることがわかる。すきまに充滿した水は、大気泡通過の間はすきま内を充滿して流下し、 L が長いほど保有水量が多いので障害物上流側への水の供給量が多くなって、P1~P3での t_{Fmin} は厚くなると考えられる。

障害物下流側では液膜の逆流時を含めて障害物上端面に水が滞留しやすく、液膜の上昇時にもそれが継続して L の大小によらず障害物がない場合より厚くなる。

図3(b)は、液相の流量が少ないときのフロス流から環状流への遷移域の結果である。この場合、液膜の逆流は障害物上流側 10 cm 程度に達するという特徴がある⁽⁷⁾。障害物内では、 t_{Fmin} は障害物すきまよりかなり薄くなり、すきま内はもはや水で満たされていない。障害物内とその直上流での t_{Fmin} は、若干ではあ

Fig. 2 Experimental flow conditions and flow patterns

Fig. 3 Minimum film thickness ($j_L = 0.06$ m/s) Fig. 4 Mean film thickness ($j_L = 0.06$ m/s, $j_G = 8$ m/s)

るが、障害物長さが短いほど小さい。

図3(b)に対応する平均膜厚 t_{Fm} の分布を図4に示す。平均膜厚 t_{Fm} はサンプリングした液膜厚さの算術平均値⁽⁷⁾⁽¹¹⁾である。この流動条件下では、障害物上流側での t_{Fm} は、障害物がない場合とほぼ同じ値をとり、それが障害物すきまの大きさと同程度(0.8~0.9 mm)である。 t_{Fm} は、すきま内ではすきまより薄くなるが、最小膜厚 t_{Fmin} より約1オーダー大きく、 L が短いほど小さな値(0.2~0.4 mm)をとる。これは、気体がすきま内へ容易に流入でき、そのときに生じる瞬間的なドレーニジによって薄膜化することによって考えられる⁽⁷⁾。

障害物下流側ではスラグ流の場合と同様に水が滞留しがちであるが、気流による液体の同伴も強く、ここでの t_{Fm} と障害物がない場合のそれとの差は小さい。

図3(c)は、気流がすきまにも連続的に流入する環状流域の t_{Fmin} であり、液膜の逆流はない。この場合、障害物上流 P1, P2 近辺では t_{Fmin} は L によらず障害

物がない場合の値とほぼ同じで、障害物の影響が及んでいない。しかし障害物直上流の P3 では障害物のせき止めによる気流の圧力上昇のために、 t_{Fmin} は障害物がある場合のほうが局所的に厚くなっている。

障害物内の P4, P5 では t_{Fmin} は障害物長さ L が短いほど薄い。これは、 L が短いほど障害物すきままでの流動抵抗が小さく、すきまに流入する気流の流量が増加し、それによって気液界面せん断応力が増大するので水が下流へ流動しやすいためと考えられる。

次に膜厚測定の代表点として障害物上流側では P3, 障害物内では P4, 障害物下流側では $L = 15$ mm の障害物に対して P6, $L = 30$ mm に対して P7, $L = 60$ mm に対して P8 を選定し、 t_{Fmin} に与える j_G と j_L の影響を検討した。図5(a)~(c)中の矢印を付した縦の実線と一点鎖線はそれぞれ $j_L = 0.06$ m/s と 0.8 m/s において液膜の逆流が観察される j_G の境界値を示す。

図5(a)に障害物の下端から 7.5 mm 上流断面の P3 での t_{Fmin} を示す。液膜の逆流が見られる $j_L \leq 0.8$ m/s と逆流がない $j_L = 1.6$ m/s では j_G に対する傾向がまったく異なる。

$j_L \leq 0.8$ m/s では、液膜の逆流が観察される場合、障害物長さ L の影響が大きく、 L が短いほど t_{Fmin} は薄く、薄膜化が著しい j_G の範囲は広い。このことは L が短いほどドレーニジが激しい⁽⁶⁾ ことを示している。 t_{Fmin} は極小値をとった後 j_G の増加とともに厚くなり、かつ L に依存しなくなり、液膜の逆流の有無の境界で極大値をとる。その極大点より j_G が大きい領域では、せき止め効果により障害物がある場合の t_{Fmin} はそれがいない場合より大きくなる。また、この領域で

Fig. 5 Minimum film thickness ($j_L=0.06, 0.8, 1.6$ m/s)

は L が t_{Fmin} に及ぼす影響は小さい。

一方、 $j_L=1.6$ m/s では液膜の逆流がない(図2参照)ことが特徴的であるが、 j_g の全領域で障害物があるときの t_{Fmin} はほぼ一つの線上にのり、 L の影響は小さい。

図5(b)は障害物領域内のP4での最小膜厚 t_{Fmin} を示す。 $j_L \leq 0.8$ m/s の場合、 $j_g \leq 1$ m/s のスラグ流域で L や j_L によらず、常時障害物すきまは水でほぼ満たされている。 j_g が3 m/sを超えると t_{Fmin} は急激に小さくなり、 L が短いほど t_{Fmin} は明らかに薄い。この傾向は $j_L=1.6$ m/s の場合も同様である。すなわち障害物長さ L が短いほど気体がすきまへ流入しやすく、それによって薄膜化が促進されている⁽⁷⁾。

図5(c)に示すように $j_L \leq 0.8$ m/s の場合、障害物の下流側での t_{Fmin} に与える L の影響は、P3やP4の断面に比べて小さく、 j_g が2~6 m/sの t_{Fmin} が増大する一部の範囲を除き、 t_{Fmin} は j_g に対してほぼ単調に減少する。

一方、液膜の逆流がない $j_L=1.6$ m/s では、 j_g が1~6 m/s の範囲で障害物長さ L の影響が見られ、 L が短いほうが t_{Fmin} は若干薄い。その L の違いによる t_{Fmin} の差は、P4でのそれと同程度かむしろ大きい。

5.2 平均膜厚 t_{Fm} と障害物長さとの関係 前述した t_{Fmin} が瞬間的な物理量で、バーンアウトの発生に関係する量であるのに対し、この節で検討する t_{Fm} は全測定時間における流動様相の変化を含んだ平均的

な物理量であることを初めに指摘しておく。

図6(a)~(c)に平均膜厚 t_{Fm} を図5と同様な形式で示す。P3での t_{Fm} を示した図6(a)には参考のため内径25 mm、 $j_L=0.066$ m/sで障害物がない場合の触針法による結果(★印)⁽¹²⁾も併記している。これらは本報の測定値(○印)より若干大きい、ほぼ一致しているといえる。 $j_L=0.06$ m/sの場合、 $j_g=1\sim 8$ m/sでは t_{Fm} は障害物が存在すると薄く、 L が短いほど薄い傾向がある。これは L が短いほどドレーニジによる薄膜化が激しく最小膜厚 t_{Fmin} が小さくなる影響が残っているためである。 $j_g \geq 8$ m/sでは L の影響は見られず、障害物によるせき止め効果のため t_{Fm} は障害物があるほうが大きい。

次に $j_L \geq 0.8$ m/s の場合、障害物があると t_{Fm} は厚くなるが、一部の範囲を除き、 t_{Fm} は j_g に対して単調に減少し、 j_L が大きいほど L の影響は小さくなる。

図6(b)に障害物内のP4での t_{Fm} を示す。P4では j_L の大小によらず j_g の全範囲で障害物があると t_{Fm} が顕著に減少する。これは障害物のブロックageにより流れが加速されるためである⁽⁷⁾。また、 j_L の値によらず j_g の高速域まで L が短いほど t_{Fm} が薄い傾向がある。その影響の度合いは j_L が小さいほど大きい。

また気液混合体の平均絶対速度 $(j_g + j_L)/\beta$ を横軸にとって図6(b)をプロットし直した結果を図7に示す。障害物の有無による大幅な差はなくなるが、障害物がある場合の t_{Fm} は障害物がない場合より若干小さ

Fig. 6 Mean film thickness ($j_L = 0.06, 0.8, 1.6$ m/s) Fig. 7 Mean film thickness vs. $(j_G + j_L)/\beta$ (P4)

くなる。このことは障害物の t_{Fm} に与える影響がプロセージによる加速効果のみではないことを示している。

図6(c)に障害物の下流側での平均膜厚 t_{Fm} を示す。この場合、 L および j_L の影響は全体として小さい。しかし、液体流量が大きい $j_L = 0.8$ m/s や 1.6 m/s では、P3, P4 に比べ L の影響がやや大きい。また $j_G > 1$ m/s の広い範囲で障害物の存在により、その下流側で t_{Fm} の減少が顕著になることが注目される

(5・4 節参照)。定電流法による液膜厚さにはエントレインメントは含まれないことを考慮すると、これは、(1)障害物の後流がそのまま残っていること、(2)障害物がエントレインメントの発生役目をしていることなどによるといえる。エントレインメント流量が多いと考えられる j_G が大きい領域でも、障害物下流側の膜厚は、障害物がない場合の値よりつねに小さく、障害物がエントレインメントを捕そくし、その下流側へ液膜として流す役割を果たしている徴候は見られない。逆に、障害物はエントレインメント発生に寄与しているといえる。ただし、これは開口比 β が 0.42 と小さい本報の場合の結果であることを考慮する必要がある。BWR の実機のように β がもう少し大の場合にも、同様のことがいえるかどうかは今後検討の必要がある。

障害物下流側での t_{Fm} は、 $j_L \geq 0.8$ m/s のとき j_G の広い範囲で $L = 30$ mm の場合に最大となり、P3, P4 での t_{Fm} の傾向と異なり L に対して系統的な結果となっていない。また $L = 15, 30$ mm および 60 mm の場合、障害物上端から下流側の膜厚測定点までの距離 d_D は、それぞれ 25, 32.5 mm および 27.5 mm と異なっている。これらのことから、 L の影響より d_D の差による影響のほうが大きいといえる。したがって以下では、下流側の議論をする場合、 $L = 30$ mm の測定値を省略する。

5・3 最大薄膜継続時間と薄膜発生頻度 一般に加熱壁面上の液膜が薄くなると、熱抵抗が小さくなり

Fig. 8 Maximum duration time of thin film and its occurrence frequency

熱伝達が良くなる反面、その蒸発によってドライパッチが発生し伝熱管がバーンアウトに至りやすくなるという熱的な二面性がある。特に薄膜の持続時間は、バーンアウトの発生を決定する重要な量である。以下にこのことを検討する。ここで液膜厚さが、あるしきい値 t_h 以下の値を継続してとる時間の最大値を最大薄膜継続時間 $D_{\max}$ 、液膜厚さがしきい値以下になる 1 s あたりの度数を薄膜発生頻度 $F^{(7)}$ と定義する。

5.3.1 最大薄膜継続時間 $D_{\max}$ 図 8(a), (b) は、例としてそれぞれ液膜の逆流がある $j_L=0.06 \text{ m/s}$ と逆流がない $j_L=1.6 \text{ m/s}$ のときの障害物近傍(P3, P4 および P6, P8)での $D_{\max}$ を j_g に対して示した結果で、パラメータは障害物長さ L である。図 8 中のしきい値 t_h は、 $D_{\max}$ が各測定点で有意な大きくなる程度の値として定めた。両図から、どの膜厚プローブ位置でも $D_{\max}$ は j_L によらず L が短いほど大きい傾向があり、薄膜状態になりやすいことがわかる。

図 8(a)の $j_L=0.06 \text{ m/s}$ の場合、P3 と P4 での $D_{\max}$ は極大値を持つ分布を示し、 $t_h=0.12 \text{ mm}$ 以下の薄膜が実現する j_g の範囲は L が短いほど広いことに見られるように、液膜の逆流がある $j_g < 13 \text{ m/s}$ の条件下では前述した液膜厚さと同様に $D_{\max}$ は L に強く依存する。

一方、液膜の逆流がない $j_g > 15 \text{ m/s}$ では、せき止め効果のため P3 では図 5 に示したように $t_{F\min}$ は t_h より大となり、P4 での $D_{\max}$ は j_g によらずほぼ同程度 (0.12~0.22 s) で障害物長さ L の影響は小さい。また障害物の下流側では $D_{\max} \approx 0 \text{ s}$ である。

一方、図 8(b)の $j_L=1.6 \text{ m/s}$ の場合、液膜の逆流がないため $D_{\max}$ は測定点によらず j_g に対してほぼ単調に増加し、障害物内の P4 で最も大きく、次に障害物下流側、障害物直上流の P3 の順になる。

Fig. 9 Change of film thickness with time

5.3.2 薄膜発生頻度 F 図 8(a)の場合と同条件下 ($j_L=0.06 \text{ m/s}$, $t_h=0.12 \text{ mm}$) の薄膜発生頻度 F を図 8(c) に示す。 F は大略 L が短いほど大きいこと、P3 での F は P3 や P4 での $D_{\max}$ の傾向とほぼ同様に $j_g=5 \sim 8 \text{ m/s}$ で極大値をとり、その極大値は 2 回/s 程度であること、一方 P4 での F は $D_{\max}$ と異なり、 $j_g < 20 \text{ m/s}$ の範囲で j_g に対してほぼ単調に増加し、 j_g がそれ以上では 11~17 回/s 程度の値をとり、すきま内で最も薄膜状態になりやすいことがわかる。

これに対して、障害物下流では液膜厚さが、 $t_h=0.12 \text{ mm}$ 以下になる回数は極めて少ない。このことについては 5.4 節で検討する。

5.4 障害物上・下流での液膜厚さの時間的变化 $L=15 \text{ mm}$ の場合の障害物上流側 P3 と下流側 P6 での液膜厚さの時間的变化を図 9 に例示する。図 9 の縦

軸は膜厚 t_f の無次元量で、 $T_{\max}$ はそれぞれの実験条件下での全膜厚データの最大値である。これらの結果から障害物上流の膜厚の変化は障害物を通過した後、振幅が小さくなるなど膜厚が平均化されることがわかる。特に、図 9(d)の液体流量が大きい場合、 j_c が大きくなると、P3 での膜厚に比べ P6(P7 も同様、図省略)での膜厚は極端に小となり、液膜速度が速くなっているであろうことを考えても、液体のかなりの部分がエントレインメントになっていることが推察され、5・2 節での図 6(c)に関する考察が裏付けられる。

以上のことから薄膜継続時間や薄膜発生頻度が前述のような傾向になることが理解できる。

5・5 ドライアウト熱流束 q との関係 5・3 節で述べたしきい値 t_h の膜厚の液膜が管壁で加熱され、そのすべてが $D_{\max}$ の間に蒸発してしまうのに要する熱流束をドライアウト熱流束 q と定義し、次式で算出する。

$$q = \rho_L \cdot h_{FG} \cdot (t_h / D_{\max}) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 ρ_L は液体の密度、 h_{FG} は蒸発熱、圧力は 7 MPa(BWR)、液膜は飽和温度であると仮定する。

例として図 8(a), (b)でそれぞれ $D_{\max}$ が最大となる二つの実験点について検討する。その 1 として $L=15$ mm, $j_L=0.06$ m/s, $j_c=7.8$ m/s, $t_h=0.12$ mm の場合、障害物内の P4 での $D_{\max}$ は 0.827 s であるから $q=162$ kW/m² となる。この値は Lahey らの実験での熱流束 710~2130 kW/m²(13) よりかなり小さな値であり、容易に加熱壁がドライアウトする可能性がある。その 2 として $L=15$ mm, $j_L=1.6$ m/s, $j_c=13.6$ m/s, $t_h=0.4$ mm の場合、P4 での $D_{\max}$ は 0.204 s であり、 $q=2.19$ MW/m² となる。この値を 15 MPa(PWR)の場合に換算すると、 q は BWR の場合の 0.54 倍であり、 $q=1.18$ MW/m² となる。堀らの実験での熱流束は 1.12 MW/m² であり(14)、 $t_h=0.4$ mm とした条件下ではあるが、それと同程度の値となる。

以上のことは、加熱条件下ではドライアウトの発生と液膜の再生が繰返され(4)、薄膜継続時間が 1 回でも長くなるとバーンアウトに至る可能性があることを意味する。その可能性は障害物長さが短いほど大きい。

6. 結 論

鉛直円管内上昇気液二相流に与える円筒形流動障害物の影響について液膜がドライアウトする可能性の有無に着目して主として最小水膜厚さを広い流動条件下で実験的に調査した。本報では長さの異なる 3 種類の

障害物を用いて、その長さの影響を検討した。おもな結果は以下のとおりである。

(1) 本実験条件では、 j_L が大または j_c が大の場合、一般に、障害物は、障害物直上流ではせき止め効果により液膜厚さを厚くし、障害物領域内ではそのブロックによる加速効果によりそれを薄くする。一方、その下流では、 j_L が大の場合、 $j_c > 1$ m/s の広い範囲で障害物による加速効果が残ることのほか、障害物がエントレインメント発生装置となり膜厚は薄くなる。

(2) 本実験範囲では、全体的に障害物長さが短いほど、最小膜厚および平均膜厚は、薄くなる傾向がある。また、これらの膜厚に及ぼす障害物長さの影響は、概して、見掛けの水流速が小さいほど大きくなる。

(3) ドレーニジによる薄膜化に与える障害物長さ L の影響は大きい。また、気流が障害物すきまに流入することによる薄膜化に与える L の影響は明らかにあるが、ドレーニジによるそれより小さい。

(4) 最大薄膜継続時間 $D_{\max}$ の最大値と薄膜発生頻度 F は、いずれも障害物長さが短いほど大きい。 $j_L=1.6$ m/s の場合、 $D_{\max}$ は j_c に対してほぼ単調に増加する。以上のことは測定点によらない。

(5) 加熱条件下の実験であれば、本報で述べた程度の薄い水膜が加熱されると、蒸発によりドライアウトし、ドライアウトの発生と水膜の再生が繰返される可能性があることを示した。

文 献

- (1) 山本泰・師岡慎一・光武徹・横堀誠一・木村次郎, 日本原子力学会誌, 38-4 (1996), 315-323.
- (2) 深野徹・後藤昭和・鶴崎勇太郎・師岡慎一, 機論, 61-587, B (1995), 2597-2604.
- (3) 深野徹・江頭竜・内藤宏治, 機論, 64-626, B (1998), 3399-3406.
- (4) 深野徹・ほか 4 名, 機論, 66-650, B (2000), 2704-2711.
- (5) 堀慶一・中村喜久夫・川西康平, 混相流シンポジウム '98 講演論文集, (1998), 247-248.
- (6) 川上靖・ほか 3 名, 機論, 45-396, B (1979), 1188-1195.
- (7) 富永彰・深野徹・川上靖, 混相流, 15-4 (2001), 409-422.
- (8) Fukano, T., Nucl. Eng. Des., 184 (1998), 363-377.
- (9) Taitel, Y., Bornea, D. and Dukler, A. E., AIChE J., 26-3 (1980), 345-354.
- (10) 深野徹・ほか 3 名, 機論, 45-396, B (1979), 1196-1203.
- (11) 深野徹・ほか 5 名, 機論, 45-390, B (1979), 172-179.
- (12) 世古口言彦・ほか 4 名, 機論, 39-317 (1973), 313-323.
- (13) Lahey, R. T., Jr., Shiralkar, B. S. and Radcliffe, D. W., Trans. ASME, J. Heat Transf., 93-2 (1971), 197-209.
- (14) 堀慶一・秋山美映・西岡弘雅・杉山維一・宮崎慶次, 混相流シンポジウム '97 講演論文集, (1997), 21-22.