

超高速二相流によりオリフィス下流域に発生するエロージョン現象の解明(2)

Analysis (2) of Liquid Droplets Impact Erosion at the orifice downstream area caused by supersonic two-phase flow

東北大学工学部	梅原 真弘	Masahiro UMEHARA
東北大学工学部	阿部 祐子	Yuko ABE
東北大学工学部	結城 和久	Kazuhisa YUKI
東北大学工学部	橋爪 秀利	Hidetoshi HASHIZUME Member
東北放射線科学センター	戸田 三朗	Saburo TODA
東北電力	河上 晃	Akira KAWAKAMI
東北電力	秋葉 真司	Shinji AKIBA

Pipe wall thinning is one of the most important technical problems in nuclear power plants. For example, the wall thinning occurs by two-phase flow at both the orifice downstream and the first elbow located downstream after the orifice. In this study, a visualization experiment was conducted in order to clarify the detailed mechanism of the wall thinning by erosion (LDI is expected) in the piping system consisting of an orifice, a straight pipe and an elbow. In the experiment a strong pressure at the down stream elbow was observed when a droplet jet was formed at the orifice. This showed that the impingement of the droplet jet was considered to cause the LDI erosion at the elbow. On the other hand strong shear flow was observed from our experiment at the downstream immediately after the orifice, where occurrence of the wall thinning was reported in the actual system. This result strongly indicates that the wall thinning in the downstream pipe of the orifice is not caused by the LDI erosion but by the FAC.

Keywords: Liquid Droplets Impingement (LDI), Flow Accelerated Corrosion (FAC), Orifice, Two-Phase Flow, Erosion, Wall Thinning

1. 緒言

近年、原子力発電プラントにおいて、配管の減肉が問題視されている。配管の減肉は、配管系に存在する様々な要素によって流れに変化が起きることによって発生する。本研究にてクローズアップする管オリフィスは、そのような配管減肉をもたらす要素のひとつである。蒸気流や湿度の高い空気といった二相流を扱う配管では、この管オリフィスの直下流域壁面や下流側第一エルボ背面にしばしば液滴衝撃エロージョン(Liquid Droplet Impingement : LDI)によるものと思われる減肉が発生することが知られている。高温の蒸気や放射性の気体を扱う配管においては、このような損傷が深刻な問題に発展する恐れも懸念される。

実際、東北電力女川原子力発電所 2 号機において、オリフィスの下流域 $0.5D$ [D =配管径]に幅 $0.2D$ 程度の著しい減肉、およびオリフィスより $13D$ 程度下流に位置する 90 度エルボの背側に貫通穴を伴う楕円状の著しい減肉が確認された。概略図を Fig.1 に示す。

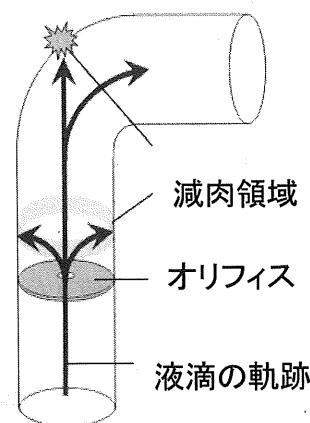


Fig.1 減肉の起きた配管 概略図

このことを受け、実際に損傷の発生した配管をモデルとした $1/3$ スケールオリフィス配管縮小模型を設計・製作し、可視化による観測実験を行って現象を模擬する条件を探ることを行った。

本研究では、オリフィス下流域にて発生する複雑流

動現象による複合的な減肉現象のメカニズムを解明し、現行プラントにおける損傷ポテンシャルを低減させることを目的とする。

2. 実験装置および方法

2. 1 実験装置の概略

本研究では空気流に水の霧状液滴を混入することで蒸気流を模擬する。試験に用いる装置の概略図を Fig.2 に示す。装置は、主流供給部・液滴供給部・試験部の3パートからなる。

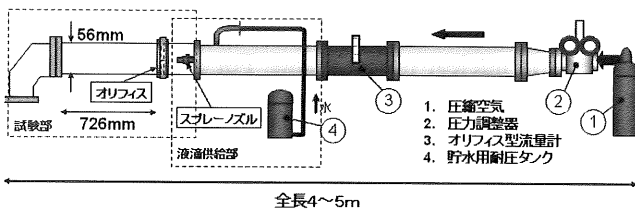


Fig.2 装置概略図

主流供給部では圧縮空気ポンベによって、主流として空気を供給する。主流の流速は入口圧力を調節することによって操作し、0-1MPa の範囲で調節することができる。主流部円管は内径 54.9mm の SUS 製である。

液滴供給部では水の入った耐圧タンクを加圧し、気流中に水の霧状液滴を混入する。SUS 管部は外径 21.7 mm で、水は液滴の出口部分に取り付けられたノズルによって霧状にされる。主流と差圧 0.1MPa 以上で液滴噴霧が可能である。液滴の加圧タンクの最高入力圧力は 1.0MPa で、本実験においては、主流と液滴タンクとの差圧は 0.1-0.4MPa とした。

試験部は内部を可視化できるようにアクリル管やガラス管を用いた。どちらの管を使うかは可視化装置により決まる。試験部に設置するオリフィスには、実機の配管と同じ開口部直径を持つ開口面積比 0.049 を有するオリフィスを用いることにした。Fig.3 に断面図を示す。オリフィス上流側の円管は、長さ 20cm と 90cm の2種類を用意し、交換が可能である。オリフィス下流の直管部は一辺 56mm の正方形断面を持った矩形管であり、長さは

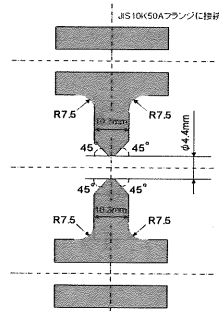


Fig.3 オリフィス断面図

726mm である。さらにその下流には、一辺 56mm の正方形断面を持つエルボ部分を設置している。エルボ下流において、流れは大気開放となっている。

2. 2 実験方法

本研究ではシュリーレン装置およびデジタルビデオカメラを用いオリフィス上流及び下流の可視化を行った。シュリーレン装置による観測の際は、ガラス製試験部を、デジタルビデオカメラによる観測の際は、アクリル製試験部を用いた。シュリーレン装置により圧縮性高速流れ中に存在する微量な密度差を検出し、デジタルビデオカメラにより気流中の液滴挙動の概要を把握し、全体として流れがどのような傾向を示すか、また今後流れの要素をクローズアップするにあたって観察点を絞ることを目的とする。

また感圧シートによる壁面での圧力分布の測定、超音波探傷器によるオリフィス直後での壁面に沿う液膜厚さの測定を行い、減肉の要因となる圧力、壁面せん断応力の定量的評価を試みる。

3. 結果および考察

3. 1 液滴衝突点位置の評価

液滴を主流中に混入させると、オリフィス下流域では、気流中液滴が再付着点で壁面に付着し液膜を形成する。この液膜は再循環領域では上流側に、それより下流では下流側に流動する。オリフィス直下流域壁面を観測し衝突点を記録した結果を Fig.4 に示す。横軸は主流流速、縦軸は衝突点のオリフィスからの距離である。

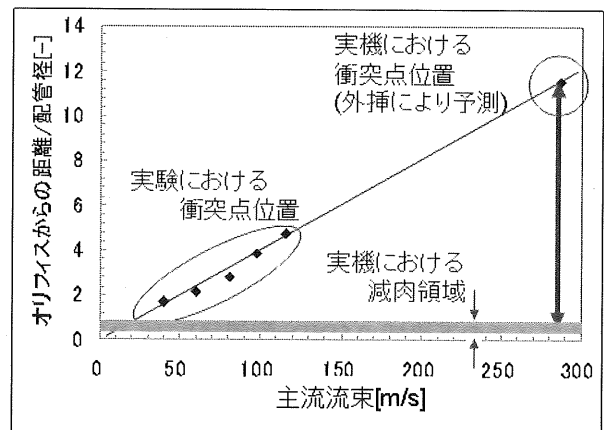


Fig.4 衝突点位置

Fig.4 中の帯状に着色した部分は、実機の配管の損傷部分である。実験によって得られた衝突点位置と比較すると、はるか上流側に位置していることが分かる。ここで考えられる可能性は、モデルとした配管に発生したオリフィス直下の減肉は、オリフィスを通過してきた液滴が直接壁面に衝突することによるもの(LDI)ではなく、液膜によるせん断力の発生(FAC)によるものではないかということである。

3. 2 二相流が壁面に与える影響

Fig.5 に高速気液二相流によりジェットが存在している状態(ノズルとオリフィスの距離 20cm、主流管と貯水タンクの差圧 0.2MPa、液滴の噴量 62.9mL/min)でオリフィス直下流域壁面における圧力分布を感圧シートで測定したものを示す。

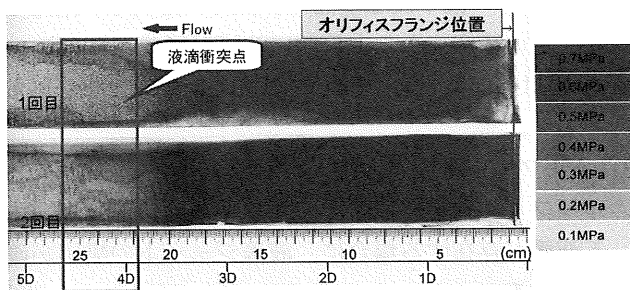


Fig.5 オリフィス直下流域壁面における壁面圧力分布

Fig.5 から液滴の衝突点では比較的圧力が低いことがわかる。圧力が最も高い部分は膜状となった液体がオリフィス開口部から噴出するジェット流に再び巻き込まれ始める領域である。このことから、オリフィス直下流域壁面での減肉は LDI エロージョンによるものではなく FAC の可能性が極めて高いと言える。FAC の発生には壁面におけるせん断応力が大きな影響を及ぼすため、液膜の速度および厚さから壁面せん断力を求める。

本研究において液膜速度を測定するにあたり適当な流量計を用意することができなかった。そこで、本研究では液滴を管内に混入させた状態にてシュリーレンシステムを用いて液膜の可視化を行い、波面の速度から液膜速度を求めるものとした。ジェットが存在している状態(ノズルとオリフィスの距離 20cm、主流管と貯水タンクの差圧 0.2MPa、液滴の噴量 62.9mL/min)の場合、液膜速度は 0.175m/s と算出された。

超音波探傷器を用いてジェットが存在している状態(ノズルとオリフィスの距離 20cm、主流管と貯水タンクの差圧 0.2MPa、液滴の噴量 62.9mL/min)で複数点の液膜厚さを測定し、平均した結果、液膜厚さ h (-)を表す式として以下の近似式が得られた。

$$h = 0.6682 \ln(x) + 0.6362 \quad (1)$$

ここで x はオリフィスからの距離を無次元化した値である。今回循環渦に巻き込まれなかった液滴が滞留する箇所は液膜流の境界付近に位置していると考えられるため、近似式から除外した。

配管内の流れをクエット流れと仮定すると壁面せん断応力は以下の式で表される。

$$\tau = \mu \frac{U}{h} \quad (2)$$

(2)式に(1)式を代入して、横軸にオリフィスからの距離、縦軸に壁面せん断応力を表したグラフを Fig.6 に示す。

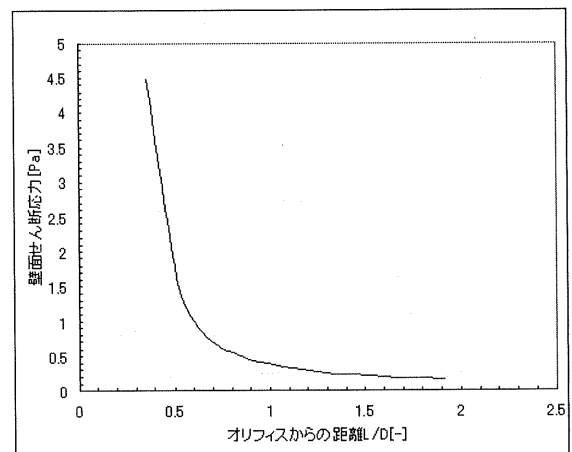


Fig.6 オリフィス直下流域壁面における壁面せん断応力

Fig.6 から液膜厚さが薄くなる上流側では急激に壁面せん断応力が増加することがわかる。また FAC によって壁面を磨耗させるのに必要な壁面せん断応力は数 Pa のオーダーと言われている。このことからオリフィス直下流域壁面における減肉は LDI によるものではなく FAC によるものであると言える。

3. 3 オリフィスへの二相流の流入状態

ノズルとオリフィスの距離が 20cm と 90cm ではオリ

フィス近傍における二相流の流入状態が異なる。ノズル-オリフィス間距離が 20cm のとき、主流管と貯水タンクとの差圧が 0.1~0.4MPa の噴流すべてでエルボに衝突する液滴ジェットが確認された。このとき、オリフィス上流側ではスプレーノズルより噴霧した液滴が一様に分散し、壁面に付着せずに直接オリフィス背面へ衝突した後、開口部に流入する。ノズル-オリフィス間距離が 90cm のとき、主流管と貯水タンクとの差圧が 0.1、0.2MPa の噴流では連続的な液滴ジェットは観測されなかった。主流管と貯水タンクとの差圧が 0.3、0.4MPa の噴流では連続的な液滴ジェットが観測された。主流管と貯水タンクとの差圧が 0.3、0.4MPa のとき、ジェットが出始めるまでに数秒の時間を要した。このことから液滴が噴霧されてからオリフィス開口部に流入するまでの間に、オリフィス上流側に液滴が溜まっていることがわかる。

主流管と貯水タンクとの差圧が 0.1、0.2MPa の噴流で連続的な液滴ジェットが発生しないことをあわせて考えると、オリフィス上流側に液滴が滞留してオリフィスに流入する場合は、多くの液滴が溜まらないとジェットが発生しないことが言える。すなわち、高流量下では多量の液体の存在がジェットを発生させると考えられる。

3. 4 オリフィス下流側エルボ部の圧力分布

オリフィス下流側エルボ部の圧力分布を感圧シートによって測定した結果を Fig.7 に示す。条件は入口圧力 0.3MPa、主流管と貯水タンクの差圧 0.2MPa、オリフィスから下流側エルボまでの距離は 15cm である。この条件はジェット流が確認できる液滴噴出である。

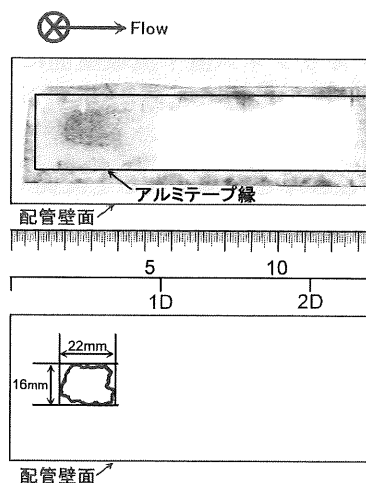


Fig.7 エルボ部での圧力分布

Fig.7 より周囲に比べ力が強くかかった点が確認された。この点はエルボ上流部の直管部の管中心軸上に位置しているため、オリフィスから噴出した液滴ジェットの衝突点と考えられる。ここで感圧シートにおいて比較的圧力が高くなっている箇所を縁取ると、衝突点のほうがわずかに大きいがほぼ同程度の大きさであることがわかる。すなわち、オリフィスからわずかに広がった状態で壁面に衝突していると考えられる。

一方、ジェット流が存在しない条件で同じ実験を行っても、エルボ部に比較的高い圧力は見られなかったことからジェット流による LDI エロージョンの可能性が高いと言える。

4. 結言

以上の実験より、以下の事柄が判明した。

- 1) オリフィス直下流域壁面に、液滴の衝突点を確認され、その衝突点より上流側に液膜が形成される。
- 2) 液膜は壁面に対し、部分的に強いせん断力をもたらす。
- 3) オリフィス開口部に流入する液適量が多く、かつ、オリフィス背後を伝ってオリフィス開口部に進入する液滴が存在する場合に、液滴ジェットの噴出が確認される。
- 4) ジェットが下流側のエルボ背側に衝突する場合、その衝突点はオリフィスの開口部とほぼ同程度の大きさとなる。

以上のことから、流路内に管オリフィスを有する配管系の減肉現象の原因としては、

- ・オリフィス直下流域壁面に発生する減肉現象は、液滴の直接衝突よりも循環領域に形成される液膜が原因となり FAC を起こしている可能性が高い。
- ・オリフィスに流入する液体が多量な場合、下流側にジェット噴流が高流速で噴出し、LDI によってエルボ部分に著しい減肉をもたらす可能性が高い。

以上の二点を挙げるができる。

謝辞

本研究は東北電力の委託を受けて東北放射線科学センターと共同で研究を行っているものである。ここに記して謝辞の意を表す。