

# 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

Evaluation of Liquid Droplets Impact Erosion in downstream areas of an orifice caused by supersonic two-phase flow

東北大工学研究科  
東北大工学研究科  
東北大工学研究科  
東北放射線科学センター

阿部 祐子 Yuko ABE  
結城 和久 Kazuhisa YUKI  
橋爪 秀利 Hidetoshi HASHIZUME  
戸田 三朗 Saburo TODA

Student Member  
Member

This work addresses LDI (Liquid Droplet Impingement) accompanied with pipe wall thinning in nuclear and thermal power plants. In order to clarify the factors that affect the wall thinning, the structure of supersonic two-phase flow after an orifice is visualized with a digital video camera. The visualization experiment proves that the droplets impinges the pipe wall shortly after the orifice and that the amount of water droplets that passes through the orifice is the important parameter.

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

## 1. 緒言

近年、原子力発電プラントや火力発電プラントにおいて、配管減肉が問題視されている。配管減肉は、配管系に存在する様々な配管要素によって流れが急激に変化することによって発生する場合が多く、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。更に、蒸気流や湿り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域壁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。また、オリフィスの下流側に 90 度ベンドを有する配管系においては、エルボ部分に局所的な減肉が発生し、貫通穴が形成されることもある。高温の蒸気や放射性の気体を扱う配管では、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。

このことを受け、本研究では高速の気液二相流が通過する複雑配管内を可視化実験により観測することを狙いとする。対象とする配管系は、図 1 に示すようなオリフィス下流側に 90 度ベンドを有する連続配管要素であり、実際に、オリフィスの直下域に

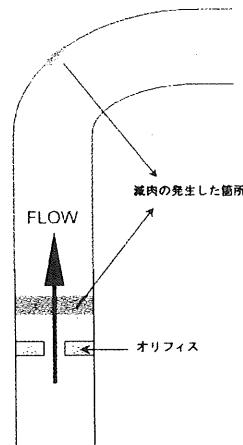


Fig.1 減肉の起きた配管 概略図

帯状の著しい減肉、更にオリフィス下流に位置する 90 度ベンドの背側に貫通穴を伴う楕円状の著しい減肉が確認されている。損傷箇所の表面観察から、これらの減肉は LDI によるものと判明しているが、その発生条件は未だ明らかでない。従って本研究では、シミュレーション実験を通して、最終的にオリフィス下流域にて発生する複雑流動場による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・方法

### 2. 1 パラメータの検討

プラント配管系などに見られる管オリフィス周辺のLDIの研究は、その流動パラメータの多さからLDIが発生する流動条件が明示されていないのが現状である。従って先ずLDIにおいて支配的となる幾つかの因子について検討する。まず、影響因子として「主管流(蒸気流)に関するもの」「液滴に関するもの」「幾何学的要素に関するもの」の3つに分けて考えると、以下のパラメータが重要であることがわかる。

#### ① 主管流(蒸気流)に関するパラメータ:

流速(圧縮性流体特有の流動特性)、温度、蒸気の溼り度、など。

#### ② 液滴に関するパラメータ:

液滴の流量、液滴の分散状態、液滴の粒子径(ミクロ的要因)、など。

#### ③ 幾何学的要素に関するパラメータ:

オリフィスの開口面積比、オリフィス開口部周辺の幾何形状、エルボの曲率、など。

## 2. 2 実験装置

以上の検討を受け、本研究では高速空気流に液滴を混入する実験システムを構築し、LDIに影響する支配因子について明らかにする。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。

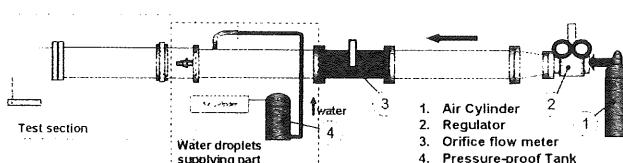


Fig.2 装置概略図

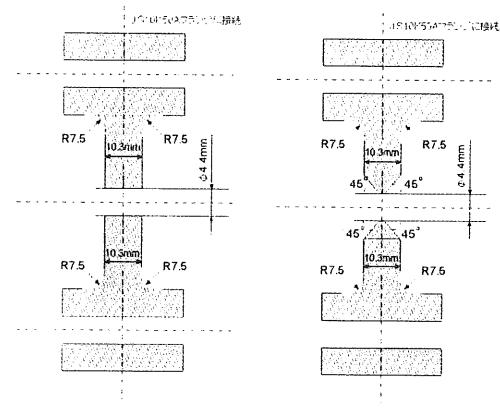
**主流供給部** 圧縮空気ボンベによって、主流として空気を供給する。主流の流速は入口圧力を調節することによって操作し、0-1MPaの範囲で調節することができる(この際の流速範囲は、オリフィスの開口径によって変わるために後述する)。主流部の内径は54.9mmであり、SUSで製作されている。

**液滴供給部** 水の入った耐圧タンクを加圧し、主流中

に水を噴出させる。水は液滴の出口部分に取り付けられたノズルによってミスト状にされる。その平均粒径は45μm、主流に供給される水の流量はおよそ15mL/minである。

**試験部** 試験部は内部を可視化できるようにアクリル管で製作されている。オリフィス上流側の円管として、長さの異なる2種類を用意してノズル-オリフィス間の距離を変化させ(30cm、100cm)、液滴の分散状態を変化させた。一方、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が設置されている。その下流部は大気開放とされている。

試験部に設置されるオリフィスには、開口面積比0.006を有するオリフィスを使用する。更に、テーパの有無による2種類のオリフィスを準備した(Fig.3参照)。



(a) テーパなし (b) テーパつき  
Fig.3 オリフィス断面図

## 2. 3 観測方法

本研究で用いた可視化機器は「シュリーレン」および「デジタルルビデオカメラ」である。シュリーレン装置では、流動場の微量な密度差を検出することができ、液滴を投入しない状態での高速流れの特徴を把握することを目的としている。また、デジタルルビデオカメラによる撮影では、液滴挙動および全体として2相流れがどのような特性を示すか、また今後、流動場をクローズアップするための観察領域を絞ることを目的とする。

主流の入口圧力の範囲は0.1-1.0MPaとする。また、液滴の加圧タンクの入力圧力は装置の耐圧の制限上、

0.1-0.6MPa である。本実験では、主流と液滴タンクとの差圧を 0.1MPa で固定して液滴を供給する。

### 3. 結果および考察

#### 3. 1 流速範囲

まず、オリフィスを用いた際の流速値について Table 1 に示す。時間の経過とともに配管内の温度が減少するため補正が必要であるが、オリフィス部では音速を超える流れ場が形成される。

Table 1 入口圧力に対する流速の範囲

Input Pressure [MPa]	Mainstream Velocity [m/s]	Temparature [° ]
0.1	4.3	22
0.2	5.1	21.8
0.3	5.8	21.6
0.4	6.6	21.3
0.5	7.1	20.8
0.6	7.6	20.4
0.7	8.1	19.8
0.8	8.8	19.4
0.9	9.5	18.7
1	9.8	17.9

#### 3. 2 衝突点位置の評価

Fig.4 は、テーパつきオリフィスを用いて液滴を可視化した際の画像である。

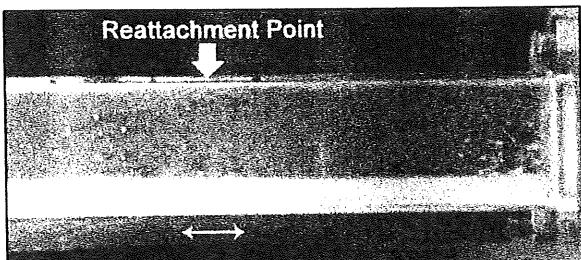


Fig 4 衝突点位置

液滴を主流中に混入させると、オリフィス下流域の壁面に、下流方向に向かって流れる液滴と上流方向に向かって流れる液滴とが相対して存在する点が見られる。この点は、オリフィスによって形成された高速流れに液滴が追従し、下流側で壁面に衝突している衝突点である。衝突点は 0.3D ほどの幅を持っている。上流側に向かって流れる液滴は、オリフィス直下に形成される循環渦の影響を受けている。液滴を噴出し続けると、この循環領域内に液体が停滞するが、再び循環渦に巻き込まれ下流方向に輸送される。衝突点位置を衝突幅の中心部分と定義し、テ

ーパつきオリフィス、テーパなしオリフィスとそれぞれ観測した結果を Fig.5 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。

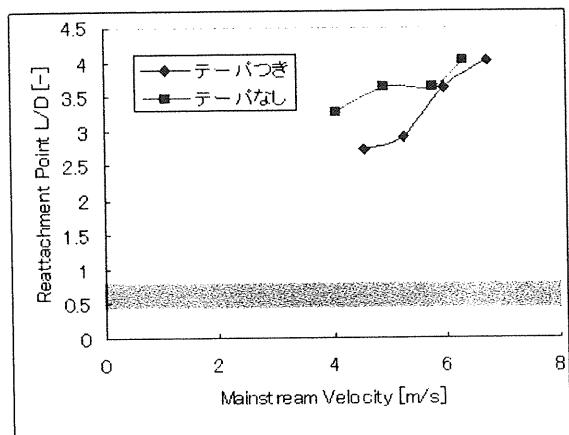


Fig 5 液滴の衝突点位置

Fig.5 中の帯状に着色した部分は、モデルとした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。実機における減肉要因として、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ではなく、循環領域内で渦に巻き込まれて不規則な挙動を示す液滴によるものではないかとも考えられるが、オリフィス上流の液滴の分散状態を変化させると、衝突点が現在より上流側に変移する可能性があり今後の検討課題である。

#### 3. 3 空気単相流れの評価

Fig.6 にシュリーレン写真を用いて撮影した空気単相流れの画像を示す。

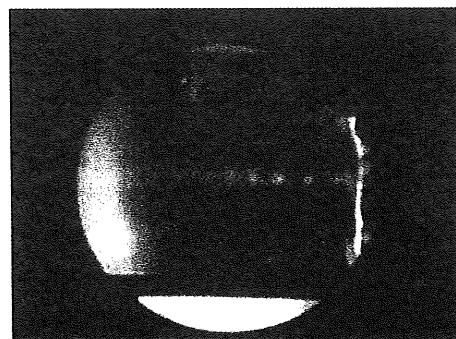


Fig 6 空気単相流れ

本撮影では、テーパつきオリフィスを用い、入口圧

力 0.5MPa、主流流速 7.2m/s のときの画像である。流れは右から左に向かっており、オリフィスより下流側 0-1.6D の範囲が撮影されている。画面右側の白い縦線がオリフィスの出口である。画面の中央付近に白く写る箇所は周囲に対して密度差が大きい部分であり、流れ方向に分裂したいくつかのこの密度の固まりは衝撃波である。この衝撃波が発生している長さを、テーパつきオリフィス、テーパなしオリフィスのそれぞれについて測定し記録した。結果を Fig.7、Fig.8 に示す。

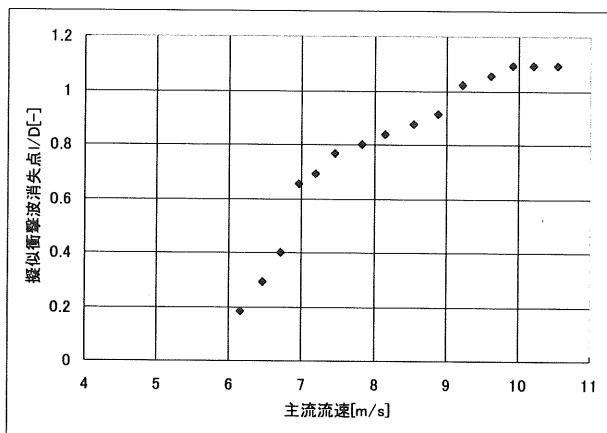


Fig.7 衝撃波消失点(テーパつき)

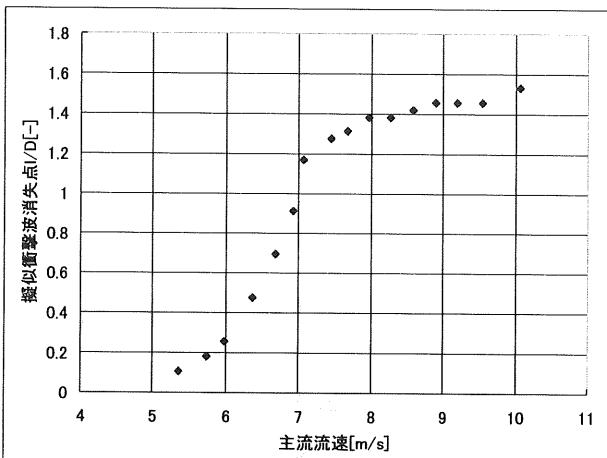


Fig.8 衝撃波消失点(テーパなし)

二つのグラフに共通する点は、主流流速がある程度を越えると、主流流速の変化に対する衝撃波の発生領域長さの変化割合が減少するということである。テーパつきオリフィスの場合は 9.2m/s 付近、テーパ

なしオリフィスの場合は 8.0m/s 付近が境界である。テーパなしオリフィスのほうが遅い流速から衝撃波が観測され始めていることから、テーパなしオリフィスのほうが流れの変化が現れやすい、と考えられる。しかしながら、一般にこのような空気単相場に液滴を投入した場合、衝撃波との干渉によって液滴は分裂し更に微細化されるため、減肉を発生させる主要な条件として液滴の投入条件が重要であることは明らかである。すなわち実機条件では、オリフィスを通過する液量は衝撃波との干渉が問題とならないほど多く、前節同様、液滴投入条件をパラメータとして実験が今後重要なとなる。

#### 4. 結言

以上の実験より、以下の事柄が判明した。

- オリフィス下流側に壁面への衝突点が確認された。この際、衝突点は約 0.3D 程度の幅を持っている。また、オリフィスの開口部テーパが施してある場合は、施していない場合よりも上流側に衝突する。ただし、これらの衝突点は流速を上げると差が小さくなる傾向にある。
- モデルとして取り上げた配管の減肉部分と比較してみると、衝突点は減肉発生箇所より下流であることが判明した。
- 空気単相流れにおいて、衝撃波と思われる密度差が観測された。衝撃波群の長さは、主流の流速が増すごとに下流方向に増大するが、ある程度の速度を越えると増加が収束する傾向にある。また、テーパなしオリフィスのほうが低速の状態で変化が起きやすい。

ここまで的研究では、オリフィス直下域壁面に衝突する液滴ジェットを確認することはできたものの、下流側ベンドに衝突するジェットを確認するにはいたらなかった。考えられる要因としては、オリフィスの開口径が小さいため、オリフィス周辺における流れのせん断力および衝撃波の影響により、液滴が微細化されすぎてジェット状にならなかつたことが考えられる。そのため、今後の研究においては実機と同じ大きさの開口部面積を持つオリフィスを使用し、更に投入液滴条件をパラメータとして LDI の原因となる流れの挙動を探る必要がある。