

# 高速噴霧流による液滴衝撃エロージョンに関する研究 (減肉速度の評価と速度依存性)

Investigation on Liquid Droplet Impinging Erosion by High-Speed Spray  
(Evaluation of Erosion Rate and Its Velocity Dependency)

新潟大学	林 貫人	Kanto HAYASHI	Non-Member
新潟大学	濱 大地	Daichi HAMA	Non-Member
新潟大学	山縣 貴幸	Takayuki YAMAGATA	Member
新潟大学	高野 剛	Tsuyoshi TAKAMO	Non-Member
新潟大学	藤澤 延行	Nobuyuki FUJISAWA	Member

The erosion rate of aluminum material by liquid droplet impingement erosion is studied by using high speed spray. In order to propose an accurate prediction method, a new experimental data are obtained by using the spray erosion larger than the scale of specimen, which allows a constant erosion rate, while it is not for the previous method. The new experimental data shows that the erosion rate is proportional to the power of 7 of the droplet velocity, which results in a highly accurate prediction method for liquid droplet impingement erosion.

**Keywords:** Liquid droplet impingement erosion, high-speed spray, erosion rate, droplet parameter, velocity, droplet diameter, number of droplet

## 1. 緒言

原子力発電プラントの配管における配管減肉量の予測技術は、プラントの安全性の確保の上で重要な課題である。このような配管減肉の原因の一つとして、液滴衝撃エロージョンが挙げられるが、発生メカニズムや減肉速度の正確な予測法など不明の点が多く残されているのが現状である。

発電プラントの配管における液滴衝撃エロージョンは、実機配管（炭素鋼あるいはステンレス鋼）の内部を流れる高速の蒸気流（速度 100-200 m/s）が配管壁面に衝突する際に、飛翔する微小液滴の衝撃圧により、配管内部に減肉を引き起こす現象として知られている。過去の減肉発生事象を模擬した実験によると、予期される液滴径は数十  $\mu\text{m}$  程度である [1]。

液滴衝撃エロージョンに関する過去の実験では、回転アーム式の実験装置を用い、比較的大きな液滴（直径 1 mm 以上）を対象とした減肉実験 [2] が行われてきた。しかしながら、このような大きな液滴を対象とした液滴衝撃エロージョン実験結果から得られる減肉予測式には限界があり、ここで対象とする原子力発電プラントの配

管減肉に適用できるかどうか不明である。このため、最近になって、高速噴霧流を用いた液滴衝撃エロージョン実験 [3-6] が報告されている。高速噴霧流を用いた実験によると、得られる液滴の直径は、数十から数百  $\mu\text{m}$  程度と報告されており、先の回転アーム式実験装置で得られる液滴径より小さく、実験条件によっては実機で予期される液滴径（数十  $\mu\text{m}$ ）にも近づけることが可能である [6]。しかしながら、減肉特性の評価をするために必要な液滴パラメータ（液滴速度、液滴径、液滴度など）の高精度評価 [7] がなされている実験データはほとんどないのが現状である。

液滴パラメータの計測が行われた高速噴霧流による減肉実験 [6] では、高速噴霧を得るため扇形ノズルが使用された。この種のノズルから得られる噴霧流の厚さは比較的薄く数 mm 以下であり、過去の実験ではそれより十分大きな試験片が用いられてきた。このため、試験片に生じる減肉部位の断面形状は時間とともに変化し、また、作動流体によるクッション効果もあるため、減肉深さの時間変化は一定とはならない。この結果として、材料の減肉曲線の勾配として得られる減肉速度は、実験者ごとに大きなばらつきを示すことになり、現在のところ、減肉速度の速度依存性を示すべき乗数  $n$  は、 $n=3-7$  と実験結果ごとに大きくばらつくことが報告されている [2-6]。このことは、液滴衝撃エロージョン実験法自体が確立されていないことを示唆している。

本研究では、扇形ノズルの先端に円筒を取り付けるこ

とで、円形断面の高速噴霧流を作成し、試験片より十分大きな噴霧流による新たな液滴衝撃エロージョン実験法を示した。また、減肉実験と併せて液滴パラメータ（速度、径、数）の計測を行うことで、より高精度の減肉予測式の提案を行った結果を報告する。

## 2. 実験装置

Fig.1 は、本実験で用いた液滴衝撃エロージョン実験装置である。この装置は、高圧プランジャーポンプ（最大噴霧圧力 35 MPa、設計流量 10 l/min）、噴霧ノズル、試験部、タンク（直径 0.6 m、高さ 0.8 m）からなる。また、ポンプとノズルの間にはフィルタを設け、作動流体である水道水に含まれる塵粉を極力除去している。実験に使用したノズルは、最小口径 0.7 mm の楕円形ノズルであるが、ノズル先端に長さ 30 mm、穴径 3 mm の流路を取り付け、円筒形噴霧とした。なお、試験片には直径 5 mm のアルミニウム材料を用いた。

Fig.2 は、LDI を関係する液滴パラメータである液滴速度、液滴径、液滴数を計測するための実験装置である。ここに、液滴速度は PIV、液滴径はシャドウグラフ、そして液滴数はサンプリングプローブを用いて計測した。

液滴速度の計測に使用した PIV システムは、Nd:YAG パルスレーザー（光波長 532 nm、発光時間 5 ns、出力 50 mJ/pulse）、フレームストロリング機能を有する高速度 CMOS カメラ（1280×1024 pixels）、パルスジェネレータからなる。照明には、シリンドリカルレンズを用いて、ビーム状のレーザーライトシートにした。ただし、シート厚さは、1 mm 程度である。なお、本計測では、噴霧液滴の示す濃淡パターンの類似性に基づいてパターンの移動量を相互相関解析によって決定するため、トレーサ粒子は用いていない。ここに、計測対象領域は、噴流軸を含む 50mm×50mm である。

液滴径計測は、Fig.2 に示したように、レーザーとカメラをインライン配置し、平行光を用いたシャドウグラフ法で可視化した。ただし、撮影に用いた CCD カメラ（1008×1018 pixels、8 bit）に長焦点レンズを用いることで、噴霧軸を含む 3mm×3mm の領域の可視化画像を取得した。なお、被写界深度は 200 $\mu$ m である。さらに、得られた画像から液滴輪郭を画像解析によって抽出して、液滴径を算出した。

液滴数の計測に用いたサンプリングプローブは、内径 1.12 mm のステンレス製の円管である。液滴数  $n_m$  は、

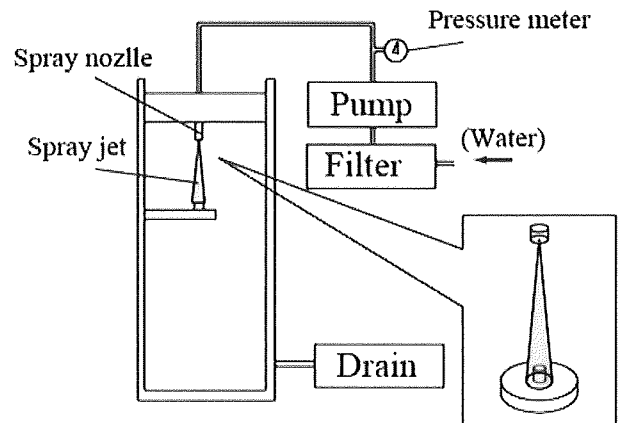


Fig.1 Experimental apparatus for liquid droplet impingement erosion

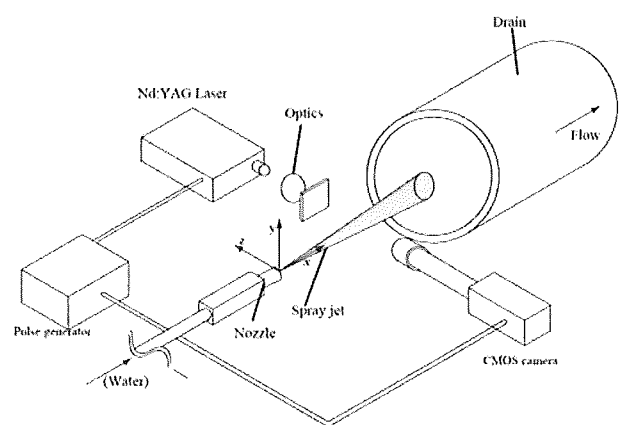


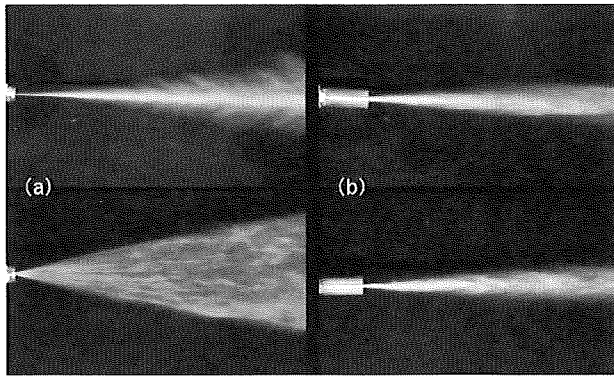
Fig.2 Optical system for droplet sizing and number measurement

単位時間単位面積当りの衝突液滴数であるが、これは採取した水の体積と実験時間を計測し、シャドウグラフ法で得られた平均液滴体積で除することで評価した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 噴霧ノズル

Fig.3 は、扇形ノズル(a)と円形ノズル(b)から噴射した噴霧の広がりパターンの直接撮影結果である。ただし、上段は垂直断面、下段は水平断面を示す。Fig.3 (a) の扇形ノズルの噴霧パターンによると、噴霧は垂直方向には 25 度の角度で大きく広がるが、水平方向にはほとんど広がらない。これに対し、円形ノズル (Fig.3 (b)) では、噴霧は水平、垂直のいずれの断面においてもほぼ同程度の広がりを示す。また、その広がり角度も扇形ノズルの場合より小さい。このため、高圧噴霧に適した扇形ノズルに円筒を用いるという、比較的簡単な手段で、噴霧の下流方向の発達を制御できることが分かった。



(a) Fan spray nozzle (b) Circular spray nozzle

Fig.3 Direct observation of spray jet

### 3.2 液滴パラメータの計測

Fig.4 (a) は、PIV によって計測した噴霧の最大速度とポンプ圧力の関係を示す。ただし、速度計測位置は、扇形ノズルではノズルから 80mm、円形ノズルではノズルから 150 mm 離れた位置である。実験結果によると、いずれのノズルにおいても、液滴速度はポンプ圧力の増加とともに、大きくなる。また、本実験の円形ノズルでは、扇形ノズルと同程度の噴霧速度を得るには、より大きなポンプ圧力が必要であることがわかる。これは、本実験の円形ノズルでは、扇形ノズルからの噴霧を整形するために、より大きな圧力損失がノズル部で発生するためである。

Fig.4 (b) は、シャドウグラフ法によって計測した体積メジアン液滴径  $d$  と噴霧速度  $V$  の関係を示す。実験結果によると、いずれのノズルにおいても、液滴速度が増加するにつれ、液滴径は減少する傾向にある。また、本実験の液滴速度範囲では液滴径は 70  $\mu\text{m}$  程度から 40  $\mu\text{m}$  程度まで減少することがわかる。ただし、扇形ノズルに比べ円形ノズルでは、液滴径の減少勾配は小さい。これは、円形ノズルからの噴霧流の拡散が小さいためであると考えられる。

Fig.4 (c) は、サンプリングプローブで計測した単位面積・単位時間あたりの液滴数  $n_m$  であるが、液滴数  $n_m$  は液滴速度  $V$  が増大するとともに増大する。この関係は、いずれのノズルの場合もほぼ同様であるが、円形ノズルの液滴数は扇形ノズルのそれより多少大きい傾向にある。

### 3.3 減肉特性

Fig.5 (a) は、扇形ノズルと円形ノズルを用いて実施した減肉実験結果であり、減肉体積  $E_r$  と実験時間  $t$  の関係で示した。ただし、扇形ノズルでは、ノズル下流 80 mm

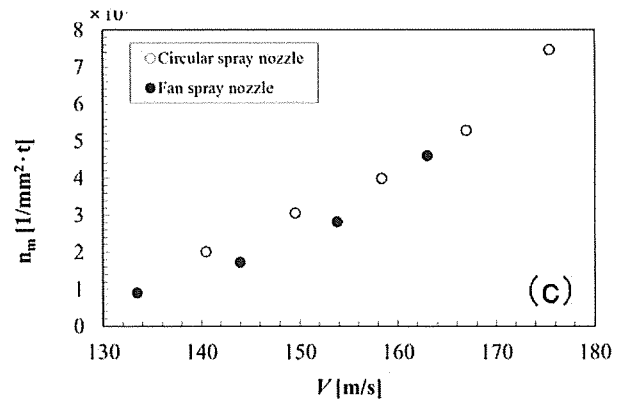
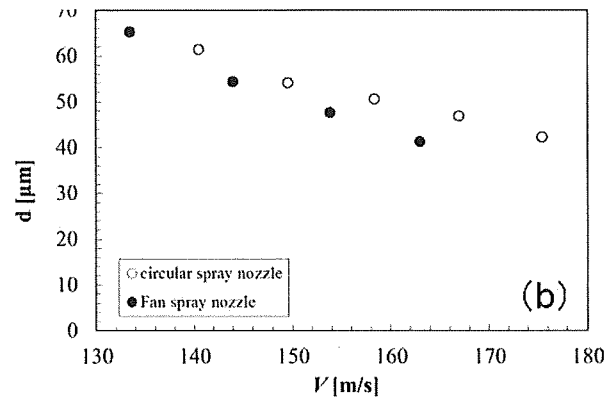
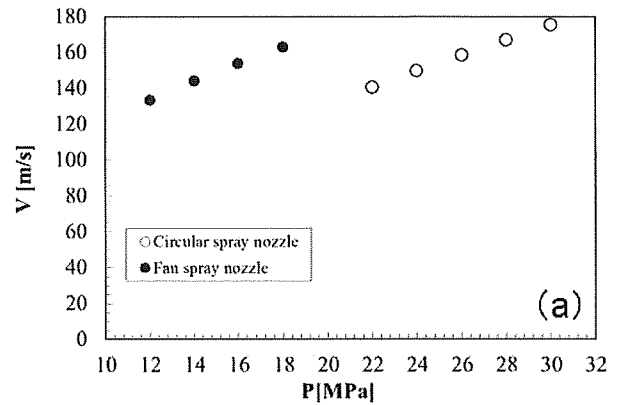


Fig.4 Characteristics of circular and fan sprays with pump pressure: (a) Droplet velocity, (b) Droplet diameter, (c) Number of impinging droplets

の位置に直径 40 mm の試験片を固定して行った実験結果である。また、円形ノズルでは、ノズル下流 150 mm の位置に直径 5 mm の試験片を固定して実験を行った。

扇形ノズルの実験結果によると、減肉曲線の勾配に相当する減肉速度は一定とはならない。これは、同種の実験方法を採用した場合、材料の減肉と経過時間の関係は、潜伏期間、加速期間、減速期間を通して、定常減肉期間に至るためである。この種の減肉曲線から減肉速度を求めるには、一般に、加速期間における最大減肉速度が減肉速度として用いられるが、その判断は実験者ごとに異

なるため統一的な減肉速度の評価は困難である。これに対し、円形ノズルを用いた場合には、減肉体積と経過時間の関係は、わずかな潜伏期間の直後から直線的に減肉が発生しており、一定の減肉速度が得られている。これは、扇形ノズル実験では減肉分布形状は時間とともに変化するが、円形ノズル実験では初期の試験片形状が定常状態に達するまでのわずかの経過時間を除くと、減肉面形状が時間変化の影響を受けないためである。以上のことから、本実験法の適用によって、従来の実験法より高精度で減肉速度を決定することが可能であることが分かった。

高速噴霧流では、液滴速度が増大すると液滴径が減少するが、従来の研究ではこのことを考慮していないことが多い。これを考慮するには、減肉速度の決定に際し、Fig.5 (a) の横軸の時間  $t$  に単位時間当たりの液滴体積  $q (= \pi/6 \cdot d^3 \cdot n_m)$  を乗じ、総液滴体積として評価する必要がある。Fig.5 (b) は、材料の減肉体積と単位面積当たりの総液滴体積の関係を示す。実験結果によると、減肉速度に相当する減肉曲線の勾配は、Fig.5 (a) の場合と比べ変化することがわかる。このことは、液滴体積の液滴速度依存性を考慮することで、減肉速度が変化することを示唆する。

液滴衝撃エロージョンによる減肉速度  $V_m$  は次式のように、液滴速度  $V$  のべき乗で表すことができる [8]。

$$V_m = c_1 d^3 n_m V^n \quad (1)$$

ただし、 $c_1, n$  は定数である。

Fig.6 は、液滴体積の液滴速度依存性を考慮しない場合 (Fig.5 (a)) と考慮した場合 (Fig.5 (b)) の減肉速度と液滴速度の関係を示す。なお、式(1) のべき乗数  $n$  は Fig.6 の勾配に相当する。実験結果によると、扇形ノズルの液滴体積の液滴速度依存性を考慮しない場合のべき乗数は  $n=7.7$  であるが、考慮した場合は  $n=6.4$  である。ただし、扇形ノズルを用いた実験では、減肉速度勾配は一定とはならないため、加速減肉期における最大減肉速度を用いた。一方、円形ノズルの場合には、液滴体積の液滴速度依存性を考慮しない場合の結果のべき乗数は  $n=8.2$  であるが、考慮した場合には、 $n=7.3$  となった。以上の結果によると、液滴体積の速度依存性を考慮することで、減肉速度の速度依存性は小さくなること、加速期間の最大減肉速度から得られるべき乗数は、やや小さいべき乗数を示すことが分かった。

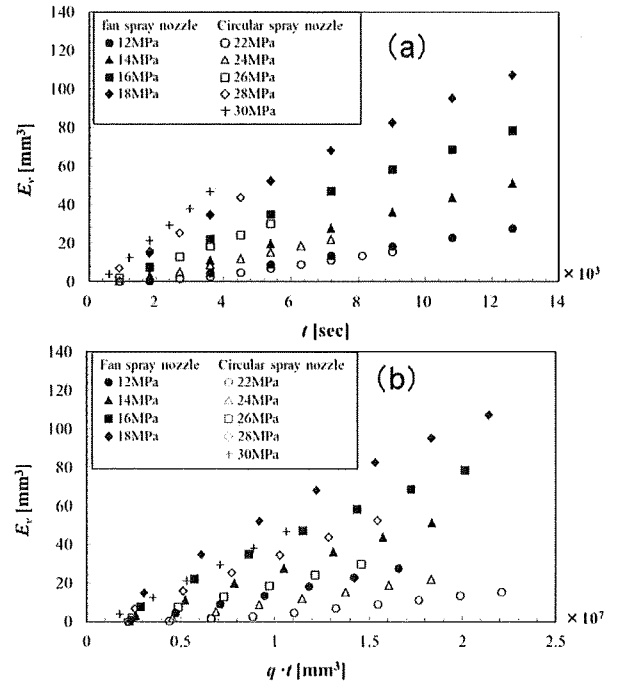


Fig.5 Variations of erosion volume

(a) Time, (b) Total impingement volume of droplets

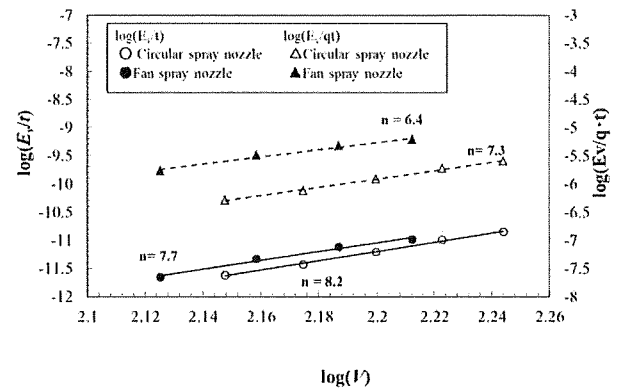


Fig.6 Logarithmic plot of erosion rate versus droplet

velocity

### 3.3 減肉モデルの提案

Sanchez の次元解析結果に基づくと、減肉速度  $V_m$  は以下のように書き表される [9]。

$$V_m = c_2 d^3 n_m V^n F_s F_r F_o \left( \frac{\rho c}{\varepsilon_c p c_s} \right)^{\frac{n}{2}} \quad (2)$$

ここに、 $c$ : 液体音速 [m/s]、 $\rho$ : 液滴密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $\varepsilon_c$ : 臨界ひずみ [-]、 $P$ : 材料硬さ[-]、 $c_s$ : 材料音速 [m/s]、 $\alpha$  は定数である。また、 $F_s$ : 液膜が衝撃圧に及ぼす影響、 $F_r$ : 液滴の繰り返し衝突に対する応答、 $F_o$ : 化学的減肉の影響で

あり、これらは Ikohagi et al.[10]によって新たに導入された係数である。

本実験結果によると、減肉速度の速度依存性を示すべき乗数は  $n=7$  である。さらに、減肉速度  $V_m$ 、液滴径  $d$ 、液滴数  $n_m$ 、液滴速度  $V$  および材料の物性である  $c$ 、 $\rho$ 、 $\varepsilon_c$ 、 $P$ 、 $c_s$  を式(2)に代入することで、 $c_2=3.66 \times 10^{-25}$  が得られる。一方、炭素鋼、ステンレス鋼の減肉実験結果 [11] を用いることで、炭素鋼では  $c_2=2.93 \times 10^{-23}$ 、ステンレス鋼では  $c_2=5.02 \times 10^{-23}$  が得られる。

#### 4. 結言

原子力発電プラントの実機配管で発生する液滴衝撃エロージョンの予測モデルの確立のため、高速噴霧流による液滴衝撃エロージョン実験法について考察した。また、アルミニウム材料を対象とした、扇形ノズルと円形ノズルを用いた実験を行い、減肉速度の速度依存性を示すべき乗数は 7 程度であることを明らかにした。また、それに基づく減肉速度の予測式を示した。

#### 参考文献

- [1] 森田良, “液滴衝撃エロージョンに関わる流動特性の解明, その 1, 蒸気実験による液滴径の計測,” 電力中央研究所研究報告, No. L06008 (2007).
- [2] F.J. Heymann, “Conclusions from the ASTM interlaboratory test program with liquid impact erosion facilities,” *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cambridge, 20,1-10 (1979)
- [3] T. Shinogaya, T. Shinohara, and M. Takemoto, “Erosion of metals in high speed mist flow evaluation of threshold velocity by acoustic emission system,” *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Cong. Metallic Corrosion*, India, 4047-4054 (1987)
- [4] 宮田寛和, 磯本良則, “液滴衝突エロージョン現象と実用材料の寿命予測, 第1報, 液滴の攻撃因子とエロージョン再現試験法の検討,” *Zairyo-to-Kankyo*, 57[3], 138-145 (2008)
- [5] 服部修次, 早川裕規, “炭素鋼, ステンレス鋼の液体衝撃エロージョンの流速依存性”, 日本機械学会論文集 A 編, 第 76 巻第 772 号 (2010)
- [6] 濱大地, 山縣貴幸, 高野剛, 藤澤延行, “液滴衝撃エロージョンに関する研究 (高速噴霧流による減肉特性の評価)”, 保全学, Vol. 10 No. 2 (2011)
- [7] N. Fujisawa, T. Yamagata, T. Takano, A. Ikarashi and Y. Kudo, “Optical measurement of spray-jet properties for the study of liquid-droplet impingement erosion,” *Proc. Int. Symp. Flow Visualization*, Daegu, Korea, 1D06 (2010)
- [8] L.E. Sanchez-Caldera, “Mechanism of corrosion-erosion in steam extraction lines of power stations”, Ph.D. thesis, Dep. Mech. Eng., Massachusetts Institute of Technology, (1984)
- [9] 井小萩利明, “東北クラスター第3回総括検討会資料”, 仙台, (2011-2)
- [10] T. Ikohagi, S. Ebara, N. Fujisawa, H. Hashizume, A. Iwabuchi, M. Satou, M. Uchidate, T. Yamagata, H. Yashiro, “Advanced wall thinning prediction of liquid droplet impingement erosion,” *Proc. Int. Symp. Ageing Management and Maintenance of Nuclear Power Plants*, Tokyo, 47-57 (2010)
- [11] D. Hama, A. Ikarashi, T. Yamagata, T. Takano and N. Fujisawa, “Experiments on Liquid Droplet Impinging Erosion,” *Proc. ASV11*, 2011, Niigata, paper 13-02.