液滴衝撃エロージョンに及ぼす液滴径の影響*

服部 修次^{*1}, 中村 隆太^{*2}, 林 崗^{*2}

Effect of Droplet Diameter on Liquid Impingement Erosion

Shuji HATTORI^{*1}, Ryuta NAKAMURA and Gang LIN^{*1}Graduate School of Engineering, University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

In the steam piping system containing liquid droplets, the pipe wall is damaged by droplet impingement. One of the most important parameter affecting erosion is droplet diameter. It was reported the volume loss per droplet increases with 3.67th power of droplet diameter. But, conventional research, intended droplet diameter or nozzle diameter is 0.81~5.0mm. In this study, rotating disk method and high pressure impingement test method with fan-shape spray nozzle were used to carry out the experiments with small droplets on pure aluminum and low carbon steel S15C specimens. The effect of diameter was expressed as a parameter of volume loss per droplet. The volume loss per droplet increases with 4.67th power of droplet diameter.

Key Words: Liquid Droplet, Erosion, Nozzle, Jet

1. 緒 言

液滴衝撃エロージョンに関する初期の研究は、低圧蒸気タービンのブレードや雨中を航行する航空機の窓材料等を対象に行われた⁽¹⁾。液滴衝撃エロージョンに影響する因子としては、流速、衝突角度、液滴径などが挙げられる。液滴径やジェット径の大きさに関する研究は、Brandenburger と de Haller によって系統的な試験が行われ、ジェット径が増加するにつれてエロージョン速度が著しく増加することが報告されている⁽²⁾。しかし、Heymann と Arcella は、この結果を合理化エロージョン速度 (エロージョン速度/衝突水の流量) で整理すると液滴径依存性がほとんど認められないと報告している⁽²⁾。一方 Hancox と Brunton⁽³⁾は、0.4mm から 2.0mm までのジェット径を用いて PMMA(ポリメチルメタクリレート)のき裂発生までの衝突繰返し数との関係を検討したところ、き裂発生までの衝突繰返し数はジェット径に反比例することを報告している。また、Baker ら⁽⁴⁾は、種々の大きさの液滴径を用いて 12Cr 鋼のエロージョン試験を行い、920 μm と 1050 μm の液滴を用いたときの合理化エロージョン速度はほとんど変わらないが、液滴径が小さくなると合理化エロージョン速度が低下することを報告している。これは、液滴が小さくなると衝突時間が短くなること、液膜の影響が大きくなること、損傷を受ける領域が狭くなることが原因⁽²⁾であるとされている。Hoff⁽⁵⁾や Brunton ら⁽²⁾もまた、液滴径が 1mm 以上では合理化エロージョン速度は変わらないとしているが、液滴径が小さくなると合理化エロージョン速度は低下するとしている。Heymann⁽⁶⁾は、Baker の実験結果⁽⁴⁾を利用して、各種の液滴径で実験を行った合理化エロージョン速度と流速の関係を検討し、流速 V (ft/s) の代わりに液滴径 D (μm) で $V-(10000/\sqrt{D})$ を用いると合理化エロージョン速度が統一的に整理できるとしているが、 $V-(10000/\sqrt{D})$ の物理的意味については明らかにしていない。さらに、Heymann^{(1), (7)}は、ASTM G73 の研究室間試験として 10 研究機関での共通試験を企画し、流速、液滴径等をパラメータとして合理化エロージョン速度の予測式を求めたところ、エロージョン速度は液滴径の 0.67 乗に比例することを報告している。

近年、原子力設備の高経年化対策として配管減肉が大きな問題となっている⁽⁸⁾。蒸気と液滴が混在するような配管系

* 原稿受付 2011 年 6 月 3 日

^{*1} 正員, フェロー, 福井大学大学院工学研究科 (〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1)^{*2} 福井大学大学院工学研究科

E-mail: hattori@u-fukui.ac.jp

では、小開度の弁やオリフィス、凝縮器などによって蒸気とともに液滴が加速されることがある。この液滴が配管壁面に衝突すると、局所的に大きな衝撃力が発生し、配管表面の酸化膜や母材がエロージョンされる。著者の一人ら⁹⁾は、配管用材料の液体衝撃エロージョンの流速依存性について検討し、その結果について既に報告している。液滴径依存性については、配管材料にも Heymann による共通試験に基づく 0.67 乗則⁷⁾が使用できそうであるが、Heymann の共通試験で行っている液滴径やノズル径は 810 μm から 5000 μm である。また Baker⁴⁾らは、12Cr 鋼について液滴径 350 μm から 1050 μm の範囲でエロージョン試験を行っている。しかし、これらの液滴径のオーダーは液滴衝撃による配管減肉で問題となる数 μm ~ 100 μm ^{(10)~(12)} に比べて一桁近く大きい液滴径を使用しているため、Heymann の予測式を配管減肉の液滴依存性に使用できるかどうかを検討する必要がある。

本研究では、配管減肉の評価手法を確立する一環として、ASTM G73—03⁷⁾に規定されている回転円板法と、ASTM G134—95⁽¹³⁾に規定されているキャビテーション噴流法の試験槽と市販の扇形ノズルを用いた高圧法による液滴衝撃エロージョン試験を行ってエロージョン速度に及ぼす液滴径の影響について検討した。

2. 試験材料

本研究では、次節に示すように ASTM (アメリカ材料試験協会) G73⁷⁾に基づいて試作した回転円板式試験装置と、ASTM G134⁽¹³⁾に基づく試験槽と高圧装置を用いて市販の扇形ノズルによりエロージョン試験を行った。回転円板法に用いた試験材料の化学成分と機械的性質を、表 1 及び表 2 に示す。試験材料は市販の純度 99.5% の純アルミニウム A1050 と低炭素鋼 S15C である。一方、高圧法に用いた試験材料は、純アルミニウム A1050 であり、化学成分と硬さを表 3、表 4 に示す。

3. 試験結果

3・1 回転円板法による結果

液滴衝撃エロージョンに及ぼす液滴径の影響を調べるために、ASTM G73-04 に基づく回転円板装置を製作した。図 1 は、回転円板装置の正面と上面から写真撮影したものである。回転円板の直径は 300mm で、毎分 1 万回転までの運転が可能であり、したがって円板の周上では 157m/s までの衝突速度の試験ができる。回転円板には 2 箇所の試験片取付け部があり、2 つの試験片を固定できる。1 つの試験片は試験用、他の試験片は回転バランス調整用のダミー試験片である。

Table 1 Chemical composition of test materials for rotating disk method (mass %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe	Ti	V	Al
A1050	-	0.07	-	-	-	0.02	-	-	0.35	0.03	0.01	Bal
S15C	0.16	0.21	0.45	0.01	0.016	0.02	0.02	0.02	Bal	-	-	-

Table 2 Mechanical properties of test materials for rotating disk method

Material	Density kg/m ³	Tensile strength MPa	Vickers hardness HV0.2
A1050	2.70×10 ³	95	37
S15C	7.81×10 ³	441	133

Table 3 Chemical composition of test materials for high pressure method (mass %)

Material	Si	V	Cu	Al	Fe	Ti
Al	0.06	0.01	0.01	Bal	0.12	0.01

Table 4 Vickers hardness of test material for high pressure method

Material	HV0.2
Al	34.5

Fig. 1 ASTM G 73 rotating liquid impingement test apparatus

Fig. 2 Dimension of test specimen

Table 5 Nozzle parameter

Nozzle type	Nozzle diameter mm	Spraying angle	Droplet diameter μm	Gauge Pressure MPa
Jet nozzle 99	1.7	-	-	0.1
Spray nozzle 005	0.6	55°	270	0.14
Spray nozzle 030	1.5	70°	410	0.14

Fig. 3 Mass loss-time curve of aluminum by jet impingement

図 2 は、本研究で用いた試験片の形状で、試験部は左端から 18mm の距離の部分である。高速度で回転して大きい遠心力が発生するので、遠心力を軽減するために試験部の厚さを薄くした。試験片はエメリー紙で研磨した後、バフ仕上げして実験に使用した。両装置によって生じた試験片のエロージョンは、アセトン中で超音波洗浄後に感度 0.01mg の精密天秤で質量を測定して評価した。

回転円板試験では、液滴径の大きさを変えるために株式会社いけうち製の 3 種類のノズルを用いた。表 5 は、使用したノズルの内径、噴角、液滴径、噴霧圧力を示したものでカタログデータより引用したものである。ジェットノズルは直進ノズルであり、スプレーノズルは噴角が 55° と 70° の円錐ノズルである。ノズル径はそれぞれ 1.7mm, 0.6mm, 1.5mm であり、スプレーノズルの噴角は、55° 及び 70° である。液滴径はスプレーノズルに対してそれぞれ 270 μm と 410 μm であり、ザウター平均粒径である。なお、試験液は水道水を用いたが、液温は制御しなかった。

Fig.4 Photographs of aluminum by jet impingement test

Fig.5 Mass loss-time curve of S15C by jet impingement

図3は、ジェットノズルを用い110m/s (7000rpm), 78.5m/s (5000rpm), 50m/s (3183rpm)で試験した純アルミニウム試験片の質量減少曲線である。試験の時間間隔は、110m/sでは3分間、その他の流速では10分間である。110m/sの質量減少曲線は、10分後に30mgの質量減少を示す。78.5m/sの質量減少量は、試験時間間隔が長いために明瞭な潜伏期が得られなかったが、よりゆっくりと増加して10分後から30分後まで質量減少速度は減少し、30分後に16mgを示す。50m/sでの質量減少曲線はさらにゆっくりと増加し、30分後でも5mg以下である。図4は、試験片のエロージョンの状態を写真撮影したものである。エロージョンは試験片の先端から8mmの位置に発生し、110m/sの場合は5mmの幅で損傷している。流速が78.5m/s, 50m/sになると損傷の幅はそれぞれ3mm, 2mmに減少する。

図5は、S15C試験片の質量減少曲線である。110m/sと78.5m/sは1時間、50m/sは5時間の時間間隔で測定を行った。S15Cの110m/sでの実験で累積質量減少量が30mgに達するのは約2.5時間であり、図3に示す純アルミニウムでは約10分間であるので、15倍の時間を要している。110m/sの質量減少は、2時間から急速に増加する。減少速度は、4時間後には、わずかに減少する。78.5m/sの質量減少速度は2時間から増加しはじめ、3時間後から減少し、7時間後に約70mgの質量減少を示す。衝撃速度50m/sでは質量減少量はわずかで、15時間で0.5mgであった。

ASTM G 73⁷⁾と同様に、次式で定義される合理化損傷速度 Re を求めた。

$$Re = \frac{\text{単位時間当たりの損傷体積 } Q_e}{\text{単位時間当たりの衝突液体の体積 } Q_i} = \frac{Q_e}{\Omega \times b} \quad (1)$$

Fig.6 Comparison of Re by jet impingement with Heymann's research data

Fig.7 Mass loss-time curve of aluminum by droplet impingement

Q_e : $\frac{\text{質量減少速度}}{\text{密度}}$, 体積エロージョン速度, m^3 / s

Ω : 試験片の回転速度, rev / s

b : $\frac{\pi}{4}d^2s$

d : 円筒形ジェット直径 (1.7mm)

s : 試験片幅, 6mm

純アルミニウムの密度 : $2.70 \text{ mg} / \text{mm}^3$

図 6 は、本研究の純アルミニウムと S15C の Re と流速の関係を示したものである。図中には Heymann によって報告されているアルミニウム 1100-8 と軟鋼の結果(白ぬき印)も示す。本研究の A1050 と Heymann のアルミニウム 1100-8 及び、本研究の S15C と Heymann の軟鋼の Re は、同一流速ではほぼ同様の値を取り、本研究の結果は妥当であることが分かる。

図 7 は、スプレーノズル 005 及び 030 を用いて 110m/s で純アルミニウムのエロージョン試験を行ったときの質量減

Fig.8 Photographs of droplet impingement test

Fig.9 Test chamber schematic view of high pressure method

Fig.10 Dimension of test specimen

少量曲線で、ジェットノズルの結果は図3の110m/sの結果を再記したものである。ノズル030の質量減少量は、4時間から増加し、6時間で約30mgを示す。スプレーノズルを用いることにより純アルミニウム試験片でも明瞭な潜伏期が存在することがわかる。液滴径の小さなノズル005では液滴径の大きなノズル030よりも長い潜伏期（最大速度期の傾きを延長して、横軸と交わるまでの時間）が観察できる。

図8は、液滴衝撃試験で0.14MPa(110m/s)、14時間試験後の純アルミニウム試験片の損傷面を示したものである。試験片の6mm×18mmの範囲でエロージョンが発生している。図4と比較して、ジェットノズルではエロージョンが試験片の限られた範囲で発生するが、スプレーノズルによるエロージョンは、試験片の全断面で発生する。

3・2 高圧法による結果

回転円板法の試験で使用したノズルからの液滴径は270 μ mおよび410 μ mであり、配管材料に適用するにはより小さい液滴径での液滴衝撃試験を行う必要がある。また液滴衝撃によるエロージョンは、配管等の静止壁面上で発生する場合が多いので、遠心力の作用する回転円板法よりも液滴が静止物体に高速で衝突する試験法が適切であると考えられる。

試験装置には、図9に示すASTM G134-95に規定されているキャビテーション噴流の試験水槽を使用した。ノズル上流における圧力が10～20MPaの高圧水をチャンバー内に噴出し、液滴がノズル出口から距離30mm離れた試験片に衝突した後、排水される。ノズルには、株式会社いけうち製 高圧均等扇形ノズル(1/8 MVNP2525S303)を使用した。液滴径のザウター平均は、同一ノズルを使用している新潟大学の藤沢研究室のデータを参考に、110m/sのとき66 μ mとした。本試験装置は、ノズル入口の圧力(上流圧)及び、ノズル出口の圧力(下流圧)の差により、水流の噴出直後の流速が求められる。高圧法ではノズル出口側の圧力を大気開放とし、上流圧を変化させて試験条件を設定した。なお、このときの流速は次式のようにベルヌイの式より算出した。

Fig.11 Mass loss-time curve of aluminum in high pressure method

Fig.12 Test specimen after experiment (10MPa, 2.5h)

$$V = \sqrt{\frac{2(p_u - p_d)}{\rho}} \quad (2)$$

p_u : 試験槽上流圧, MPa (絶対圧)

p_d : 試験槽下流圧, MPa (大気圧)

ρ : 水の密度, kg/m^3

試験液の温度は流入前の水槽内に配置した銅管に、冷却水を流して $35 \pm 2^\circ\text{C}$ となるように制御した。また試験片は、図 10 に示すディスク直径 12mm、厚さ 4mm の形状のものをエメリー紙で研磨した後、バフ仕上げたものを用いた。試験後の試験片は、所定時間毎にアセトン中で超音波洗浄した後、精密天秤（感度 0.01mg）で質量を測定した。

図 11 は各流速の液滴衝撃エロージョンによる純アルミニウムの質量減少量曲線である。流速が速くなるにつれて、エロージョンによる質量減少が大きくなる。また、すべての流速で明瞭な潜伏期間が観察でき、154m/s と 140m/s では 30 分間の潜伏期が、110m/s では 3 時間の潜伏期が現われる。それぞれの流速で潜伏期が終了した後、質量減少が著しく増加する最大速度期が観察できる。

図 12 は 110m/s で 2.5 時間試験を行った後の純アルミニウム試験片の状態である。液滴は、扇状にノズルから噴射され、設定されたスタンドオフ距離離れた試験片に衝突する。試験片のエロージョン範囲は中央部に直線状に発生し、その幅は約 3mm、深さは約 2mm である。

3・3 液滴 1 個当たりの体積減少量の評価

回転円板法および高圧法それぞれの実験結果より、液滴 1 個あたりの体積減少量と液滴径の関係を検討した。表 6 の単位時間当たりの質量減少量は、最大速度期の傾きから求めた。単位時間当たりの質量減少量を純アルミニウムの密度で除し、単位時間当たりの体積減少量を算出した。回転円板試験における単位時間当たり衝突する水の体積は、円板 1 回転で衝突する液滴の総体積に回転数を掛けたものである。スプレーノズルの場合円板 1 回転で衝突する液滴の総体積は、試験片の幅が 6mm であることからノズル内部を流れる長さ

6mm の円柱の体積に、円錐状に広がる噴霧の面積とそれを横切る試験片の移動面積の面積率を掛けたものである。ジェットの場合の液滴の総体積は、円板 1 回転で試験片が衝突する直径 1.7mm、高さ 6mm の円柱状の水流として考えた。このとき、ノズル 005、ノズル 030 の内径はそれぞれ 0.6mm、1.5mm である。

また、高圧法の単位時間当たり衝突する水の体積は、排水される水の実測値を用いた。 Re は合理化エロージョン速度であり、単位時間当たりの質量減少量を単位時間当たり衝突する水の体積で除したものである。液滴の直径から液滴

Table 6 Volume loss per unit droplet (A1050)

Nozzle type	Rotating test (ASTM G73)			High pressure (ASTM G134)
	Jet 99	Spray 030	Spray 005	Fanshape 2525
Impact velocity m/s	110			
Mass loss per unit time mg/s	6.75×10^{-2}	2.94×10^{-3}	1.03×10^{-3}	2.34×10^{-3}
Density of material mg/m^3	2.71×10^9			
Volume loss per unit time m^3/s	2.50×10^{-11}	1.08×10^{-12}	3.08×10^{-13}	8.63×10^{-13}
Volume of liquid impinging per unit time m^3/s	1.59×10^{-5}	6.14×10^{-7}	1.32×10^{-7}	4.98×10^{-5}
Re	1.17×10^5	1.77×10^6	2.88×10^6	1.74×10^8
Droplet diameter μm	2960	410	270	66
Droplet volume m^3	1.36×10^{-8}	3.61×10^{-11}	1.03×10^{-8}	1.53×10^{-13}
Impact number per unit time drops/s	1.17×10^2	1.70×10^4	1.28×10^4	3.26×10^8
Volume loss per each droplet m^3/drop	2.13×10^{-13}	6.38×10^{-17}	2.97×10^{-17}	2.64×10^{-21}

Fig.13 Relation between droplet diameter and volume loss per droplet (110m/s, A1050)

の体積を算出し、単位時間当たり衝突する水の体積を液滴1個の体積で除して、単位時間当たりの液滴衝突個数を算出した。単位時間当たりの体積減少量を単位時間当たりの液滴衝突個数で除し、液滴1個当たりの体積減少量を算出した。

円板1回転で衝突する液滴の個数は、単位時間当たりの液滴の衝突個数を円板の回転数で除して求められ、たとえば液滴径270 μm の場合、 $1.28\text{E}+04/116.7=110$ 個となる。これに液滴の投影面積を掛けた値 $\pi/4 \times 0.27^2 \times 110=6.3\text{mm}^2$ は、試験面の面積(6 $\times$ 18) mm^2 に比べ17分の1程度であるので、液滴があくまで均等に飛散していると仮定すると円盤17回転で試験面全体に液滴が1個衝突することになる。つまり、流速110m/sでは回転数116.7(=7000/60)rpsであるので、 $116.7/17=6.8$ より同一箇所に1秒間当りに6~7個程度の液滴が衝突していると推定できる。

表6を基に、液滴1個当たりの体積減少量と液滴径の関係を両対数紙上に示すと、図13のようになる。液滴径が66 μm から約3000 μm にわたって、液滴1個当たりの体積減少量がほぼ直線関係になることがわかる。また、近似線の勾配は4.67となる。図13上にBakerら⁴⁾の研究データも同時に表示した。Bakerらの実験は、流速182m/sであり、本研究の流速は110m/sであるので、Heymannの共通試験の研究より得られている流速依存性指数4.8⁷⁾を用いて、Bakerらの結果を図13上に表示できるように、次式のように計算によって流速110m/sに換算して実験値の補正を行

Fig.14 Relation between impact velocity and volume loss per droplet (A1050)

った。

$$\left(\frac{110}{182}\right)^{4.80} = \frac{1}{11.21} \quad (3)$$

また、Baker らの実験において使用材料 13Cr であり、本研究の使用材料はアルミニウムである。本研究の実験結果と Baker らの実験結果は約 10 倍の比があるが、この比は材料の違いによるものである。Baker らの実験は、液滴径が 350 μm 以上を対象にしており、今回は、より小さい液滴径を対象として、液滴依存性が得られたことになる。また、本研究の 4.67 乗と Baker らの 5.08 乗の液滴径依存性はほぼ同じであり、本研究の実験結果はほぼ妥当な結果であると言える。

Heymann は単位時間あたりの材料のエロージョン体積を単位時間あたりに衝突した液滴の総体積で割ったものを、合理化エロージョン速度として次式を提案している。

$$\log(\text{Re}) = 4.80 \log(V) - \log(\text{NER}) - 16.31 + 0.67 \log(d) + 0.57J - 0.22K - 0.34 \quad (4)$$

ここで、V は流速(m/s)、NER は材料のエロージョン抵抗値、d は液滴径(m)、J は液滴の場合 0、JET の場合 1 であり、K は噴流の当たる面が平らな場合 0 である。この式を液滴 1 個あたりの体積減少量 A に置き換えて考えると、

$$\log(A) = 4.80 \log(V) - \log(\text{NER}) - 16.31 + 3.67 \log(d) + 0.57J - 0.22K - 0.34 - 0.28 \quad (5)$$

となる。A は液滴径の 3.67 乗に比例する。従って、液滴径が小さな配管減肉においては、Heymann の求めた減肉予測式の液滴依存性がやや小さいことを示している。

図 14 は、アルミニウムの体積減少量を流速との関係で表したものである。図中の黒いそれぞれの点が流速 110m/s における実験値で、白抜きはそれ以外での流速における実験結果のプロット点である。このグラフの直線は、110m/s において図 13 の本研究で求めた各液滴径の直線上の点と等しく、勾配は Heymann のエロージョン速度の流速依存性に等しいとして描いたものである。図 11 の各流速の最大速度期の値はジェットや液滴径 66 μm の直線上にうまく位置していることがわかる。図中の直線を次式のように、流速 V(m/s)、材料のエロージョン抵抗値 NER(Al の場合 0.03)、液滴径依存性 d(m)で表示できる。

$$\log(A) = 4.80 \log(V) - \log(\text{NER}) + 4.67 \log(d) - 12.4 \quad (6)$$

4. 結 言

- (1) 本研究では、円板直径 300mm, 回転速度 10000rpm の回転円板装置を作成し、所定の性能を有していることを確認した。
- (2) 回転円板法と高圧法の実験結果より、液滴衝撃エロージョンに関する液滴 1 個当たりの体積減少量を求めた結果、液滴衝撃エロージョンの壊食予測を可能とした。
- (3) 回転円板法と高圧法の液滴 1 個当たりの体積減少量と液滴径の関係が両対数紙上にほぼ一直線上で表示できる。
- (4) 液滴 1 個当たりの体積減少量は、液滴径の 4.67 乗に比例する。

謝 辞

この研究の一部は、経済産業省原子力安全・保安院の高経年化対策強化基盤整備事業の一環として実施された。また、本研究で使用した扇形ノズルからの液滴径のザウター平均値は、新潟大学工学部 藤沢 延行 教授にご教示いただいた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Heymann, J.F., "Conclusions from The ASTM Interlaboratory Test Program with Liquid Impact Erosion Facilities", *Proceedings of 5th International Conference on Erosion by Solid and Liquid Impact*, (1979), pp.20.1-20.10.
- (2) Brunton, J. H., and Rochester, M. C., "Erosion of Solid Surfaces by the Impact of Liquid Drops", *Treatise on Materials Science and Technology*, Vol. 16,(1979), pp.185-248.
- (3) Hancox, N. L., and Brunton, J. H., "The erosion of Solids by the Repeated Impact of Liquid Drops", *The Physics of Impact and Deformation: Multiple Impact*, Vol. 260 A, pp.121-139.
- (4) Baker, D. W. C., Jolliffe, K. H., and Pearson, D., "The resistance of materials to impact erosion damage", *Philosophical Transactions Royal Society*, Vol. 260 A(1966), pp.193-203.
- (5) Hoff, G, Langbein, G, and Rieger, H., "Material Destruction Due to Liquid Impact", *ASTM STP408*, American Society for Testing and Materials, (1967), pp.42-69.
- (6) Heymann, F. J., "A Survey of Clues to the Relationship between Erosion Rate and Impact Parameters", *2nd Research Conference on Rain Erosion*, (1967), pp.1-58.
- (7) ASTM ed., *Annual Book of ASTM standards 2005*, Wear and Erosion; Metal corrosion, G73-04(2005), pp.280-297, ASTM.
- (8) 日本機械学会編, "発電用設備規格 配管減肉に関する規格, JSME CA1-2005", (2005), 日本機械学会, pp.47-70,
- (9) 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 Vol.76, No.722(2010), pp.179-186.
- (10) 電力中央研究所, "液滴エロージョンに関わる流動特性の解明(その 1)ー蒸気実験による液滴径の計測ー", L06008, (2007), pp.1-14.
- (11) 電力中央研究所, "液滴エロージョンに関わる流動特性の解明(その 2)ー流動評価技術の高度化ー", L07016, (2008), pp.1-11.
- (12) Morita, R. "Droplet Diameter Measurements for The Prediction of Liquid Droplet Impingement Erosion", *ICONE16*-48161, (2008), pp.1-7.
- (13) ASTM ed., *Annual Book of ASTM standards 2005*, Wear and Erosion; Metal corrosion, G134-95(2005), pp.576-588, ASTM.