液滴衝撃エロージョンに及ぼす衝突角度の影響*

服部 修次^{*1}, 角一 将也^{*2}

Effect of Impact Angle on Liquid Droplet Impingement Erosion

Shuji HATTORI^{*1} and Masaya KAKUICHI^{*1}Graduate School of Engineering, University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

In steam piping system containing liquid droplets, pipe wall is sometimes damaged by droplet impingement. One of the most important parameters affecting erosion is impact angle. No research has been conducted for the impact angle dependence on erosion for pipe steels. In this study, jet nozzle was used for the high pressure impingement tests of S15C, SUS304 and STPA24, and spray nozzle for the tests of pure aluminum. The MaxDER (Maximum Depth of Erosion Rate) for these three steels was expressed as $\sin^n \theta$ and the exponent is 1.2 - 2.5 irrespective of type of steels. Jet nozzle tests with 90° specimen showed that liquid droplet impingement was weakened possibly due to the liquid film formation. Spray nozzle tests revealed that the erosion can be estimated safely in terms of $V=V_0 \sin \theta$.

Key Words: Liquid Droplet, Erosion, Impact Angle, Jet Nozzle, Spray Nozzle

1. 結 言

液滴衝撃エロージョンは、発電プラントの配管で問題になっている減肉現象の一つで、液体の漏洩に繋がる重要な問題である^①。液滴衝撃エロージョンの主だった発生箇所としては、エルボ下流部の外側・T字管などの流れの方向が変化する部分、オリフィスや弁直後の配管、ドレイン系配管などの凝縮水と蒸気が混在する箇所などが挙げられる。液滴衝撃エロージョンは破損の状況から見ると、口径の小さい貫通孔による蒸気または凝縮水のリークなどの軽微な損傷で留まっており、大惨事につながる可能性は少ないとしても、発電所を安定的・継続的に運転させる観点から、液滴衝撃エロージョンを詳細に評価することは大変重要である。

液滴衝撃エロージョンに関する初期の研究は、雨中を航行する航空機の窓材料や低圧蒸気タービンのブレード等を対象に行われた^②。液滴衝撃エロージョンに影響する因子としては、流速、液滴径、衝突角度などが挙げられる。液滴径の影響については、その結果を報告^③している。液滴衝撃エロージョンに及ぼす衝突角度の影響に関する研究では、Fyall ら^④がアクリル樹脂を用いてエロージョン試験を行い、エロージョンの発生では流速の垂直成分が重要であると報告している。Busch ら^⑤は、6 種類のプラスチックやセラミックスを用いてエロージョン試験を行い、試験面の法線方向と液滴の入射方向のなす角を α とすると、エロージョン発生に対する限界流速は $V_0 / \cos \alpha$ により表示できることを報告している。Hoff ら^⑥は、液滴衝撃エロージョンに関する種々の研究を調査し、流速の垂直成分のみが液滴衝撃エロージョンに影響するとしている。Baker ら^⑦は、12Cr 鋼を用いてエロージョン試験を行い、質量減少速度が $(V \sin \theta - V_c)^n / \sin \theta$ (V_c : 限界流速, θ : 試験面と液滴の入射方向のなす角) に依存することを報告している。また、Hoff らは、平均壊食深さ速度 MDPR が $(V \sin \theta - V_c)^n / \sin^2 \theta$ で表示できることを報告^⑧し、その後 Hammitt ら^⑨は、ロケット滑走試験によるバイオセラムプラスチックのデータを用いて、 $MDPR = K(V \sin \theta - V_c)^n / \sin^x \theta$ において n と x の統計解析をし、 x を 1 から 2.5 まで変化させても誤差はそれほど変化しないので簡単のために $x=1$ とするのが適切であると報告している。Schmitt ら^⑩は、プラスチック、セラミックス、ガラス、金属、複合材料の合計 21 種類の材料についてマッハ 1.5 から 4.0 の液滴衝撃エロージョン試験を行い、MDPR が $K(V \sin \theta)^n / \sin \theta$ で表示できるとし

* 原稿受付 2012 年 1 月 13 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

て、各種材料について n と K の値を得ている。また Schmitt ら⁽¹⁰⁾ は、3 種類のセラミックスと 8 種類のプラスチック複合材料を用いて 1700m/s でエロージョン試験を行い、MDPR がマッハ 5 以上では $KV^n \sin^2 \theta$ で表示できるとして各種材料の n と K の値を得ている。一方、Gorham ら⁽¹¹⁾ は、積層複合材料の剥離損傷では衝突角度の関係は単純ではなく流速に依存して θ が 60° から 80° でピークが現れるとしている。また最近、Ahmad⁽¹²⁾ らは、4 種類のステンレス鋼と 1 種類のチタン合金を用いてエロージョン試験を行ってエロージョンの材料依存性を詳細に検討しているが、衝突角度依存性については 13Cr 鋼のみを用いて試験を行っているだけで、衝突角度 90° でエロージョン速度が最大となる従来と同様の傾向を与えているのみである。

このように、液滴衝撃エロージョンの衝突角度依存性の研究は、航空機の窓材料や低圧タービン翼の損傷が主な研究対象となっていたために、ガラス、セラミックス、強化プラスチック、13Cr 鋼等の研究が主で、配管材料の炭素鋼やオーステナイト系ステンレス鋼の研究はほとんど行われていない。また、損傷量としては、質量減少速度や MDPR (平均壊食速度) で評価しており、配管減肉で問題となる最大深さの変化を取扱っている研究は報告されていない。

本研究では、ジェットノズルを用いて S15C, SUS304, STPA24 の液滴衝撃エロージョンに及ぼす衝突角度の影響に関する材料依存性を検討するとともに、スプレーノズルを用いて純アルミニウムの衝突角度の影響について検討した。

2. 試験方法及び供試材料

2・1 実験装置

液滴衝撃エロージョン試験装置には、ASTM G134-95⁽¹³⁾ に基づくキャビテーション噴流試験装置を使用した。ノズルは図 1 に示すジェットノズル (スギノマシン製 Water Nozzle Size $\phi 0.40\text{mm}$) とスプレーノズル (いけうち製高圧均等扇形ノズル 1/8MVNP2525S303) を用いた。図 2 に試験水槽の概略図を示す。試験液には水道水を用い、水温が $25 \pm 2^\circ\text{C}$ となるように制御した。水流の噴出直後の流速 V は、ノズル入り口の圧力 (上流圧) 及び、ノズル出口の圧力 (大気圧) の差により、式 (1) を用いて設定した。

$$V = \sqrt{\frac{2(p_u - p_d)}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 p_u は上流圧、 p_d は水槽中の静圧 (大気圧 0.1MPa) で、 ρ は水の密度である。上流圧は 10.0~16.3MPa の範囲で変化させた。また、純アルミニウム Al を用いて予備試験を行い、スタンドオフ距離 (ノズル出口から試験面までの距離) を、ジェットノズルではエロージョン量がスタンドオフ距離によらずほぼ一定⁽¹⁴⁾ のため、実験のしやすい 15mm、スプレーノズルでは最もエロージョンが発生する 30mm に設定した。

ジェットノズル試験では、試験片材料に S15C, SUS304, STPA24 を用い、上流圧を 16.3MPa に設定して流速 180m/s で実験を行った。所定の試験時間毎に試験片の質量、表面形状を測定し、試験時間に対し最大エロージョン深さ (MaxDE) をプロット、これより単位時間当りの最大エロージョン深さ速度 (MaxDER) を求めた。スプレーノズル試験では、エロージョンの発生しやすい Al を用いて、上流圧を 10MPa (流速 140m/s) に設定して衝突角度の影響について検討した。

Fig.1 Jet nozzle and spray nozzle

Fig.2 Test chamber schematic view of high pressure method

2・2 供試材料

本試験に用いた試験材料は、炭素鋼配管 STPG370 相当材料の S15C、ステンレス鋼配管相当材料の SUS304、配管用合金鋼の STPA24 及び純アルミニウム Al であり、表 1 に化学成分を示す。S15C は、電気マッフル炉（ADVANTEC 製 FUL220FA）を用いて、910℃で 10 分間保持後空冷の熱処理を施した。SUS304 及び STPA24 は受け入れのままであり、熱処理は行っていない。表 2 に試験材料の物理的性質及び機械的性質を示す。試験片は、図 3 に示すディスク直径 12mm の形状のものを、試験面が 90°、60°、45°、30° になるように加工し、表面研磨して鏡面状にしたものを用いた。実験結果は、所定時間毎に試験片を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、非接触表面形状測定システム（KEYENCE 製 LT-8010、分解能 0.1 μm、測定間隔 4 μm、最大測定深さ 500 μm）により試験片の表面形状を計測して整理した。

3. 試験結果及び考察

3・1 ジェットノズルを用いたエロージョン試験結果

図 4 は流速 160m/s におけるスギノマシン製ジェットノズル（φ0.4）からの液体の挙動を、高速度ビデオ（Photron 製 FASTCAM SA1.1）を用いて撮影速度 60000 fps、シャッター速度 1/1000000 s で撮影したものである。ジェットノズルでは、ノズル先端から噴出される液体は円柱状にならず、球状の液滴が数珠繋ぎ状に噴出されているのが観察される。ジェットノズルからの液滴径は、ノズル径にほぼ等しい約 0.4mm である。

Table1 Chemical composition of test materials

Material	(mass%)												
	C	Si	Mn	V	P	S	Cu	Ni	Mo	Cr	Al	Fe	Ti
S15C	0.16	0.21	0.45	-	0.01	0.016	0.01	0.02	-	0.05	-	Bal	-
SUS304	0.06	0.2	1.67	-	0.034	0.027	-	8.0	-	18.73	-	Bal	-
STPA24	0.12	0.35	0.47	0.002	0.012	0.004	0.02	0.02	0.93	2.12	0.002	Bal	0.001
Al	-	0.06	-	0.01	-	-	0.01	-	-	-	Bal	0.12	0.01

Table 2 Mechanical properties of test materials

Material	Density kg/m ³	Tensile strength MPa	Vickers hardness HV0.2
S15C	7.81×10 ³	441	145
SUS304	7.93×10 ³	694	171
STPA24	7.72×10 ³	630	216
Al	2.71×10 ³	95	38

Fig.3 Test specimen

Fig.4 High speed camera photograph (Flow velocity 160 m/s)

図5はS15Cの衝突角度 90° 、 60° 、 45° 、 30° の質量減少曲線である。図6は、図5に示す質量減少量を試験材料の密度で除して求めた体積減少量と試験時間の関係を示したものである。いずれの曲線も体積減少量がほぼ0である潜伏期を経て、減少量が急増後直線的に増加する最大速度期に至る。潜伏期は液滴衝撃の繰り返し作用によって材料が塑性変形しているが、材料の脱落は生じていない段階である。特に衝突角度 90° の場合、体積減少量は1時間の潜伏期の後、最大速度期となり、3時間後に約 0.1mm^3 に達する。衝突角度 60° 、 45° の場合も、衝突角度 90° の場合と同様に、体積減少量は潜伏期を経た後、短時間で急激に増加する。衝突角度 30° の場合、体積減少量は4時間の潜伏期の後、最大速度期となり、15時間後に約 0.1mm^3 に達する。衝突角度 30° では、他の衝突角度の場合より単位時間当たりの体積減少量が小さく、衝突角度 90° と同等の体積減少量に至るまでに約5倍の時間を要する。SUS304及びSTPA24の結果については紙面の都合上省略する。

S15C, SUS304, STPA24の体積減少曲線から、各衝突角度の最大速度期における体積減少速度をそれぞれ読み取り、衝突角度と体積減少速度の関係で表したものが図7である。それぞれの材料において、衝突角度と体積減少速度の関係は $\sin^n \theta$ (θ : 衝突角度) で表され、指数 n はS15C, SUS304, STPA24に対してそれぞれ2.7, 3.0, 1.6となり、ほぼ同程度の値をとる。どの材料においても、衝突角度が小さいとき体積減少速度は小さく、衝突角度が 90° に近づくにつれて体積減少速度は急激に増加し、衝突角度 90° で体積減少速度は最大となる。

Fig.5 Mass loss-time curves of S15C (Jet nozzle, 180m/s)

Fig.6 Volume loss-time curves of S15C (Jet nozzle, 180m/s)

Fig.7 Relation between impact angle and volume loss rate (Jet nozzle, 180m/s)

質量減少量は試験片全体からの脱落量を測定しているので、エロージョンによる質量減少量以外に試験片全体の腐食の影響も含まれている恐れがある。また配管減肉では、減肉の平均値よりも減肉の最大深さが重要となるので、液滴衝突部の最大深さで評価する方がより適切であると考えられる。

試験後の試験片のエロージョン深さを、表面形状測定器で測定した例を図8に示す。赤色の部分が試験面の基準面であり、青色が濃くなるほどエロージョンによる損傷深さが大きいことを表している。青色部の最大深さを MaxDE と定義した。

図9はS15Cの衝突角度 90° 、 60° 、 45° 、 30° のMaxDE曲線である。衝突角度 90° の場合、MaxDEは1時間の潜伏期を経過後に最大速度期となり急激に増加し、2時間後MaxDEは約 $180\mu\text{m}$ に達する。衝突角度 60° 、 45° の場合も、衝突角度 90° の場合と同様に、MaxDEは短時間で急激に増加する。衝突角度 30° の場合、MaxDEは5時間の潜伏期の後、最大速度期となりゆるやかに増加し、15時間後MaxDEは約 $200\mu\text{m}$ に達する。衝突角度 30° では、他の衝突角度の場合より単位時間当たりのMaxDEの変化量が小さく、衝突角度 90° と同等のMaxDEに至るまでに約5倍の時間を要する。

図10はSUS304のMaxDE曲線である。S15Cの場合と同様に、衝突角度 90° 、 60° 、 45° ではMaxDEは潜伏期を経た後急激に増加するが、衝突角度 30° ではゆるやかに増加する。すべての衝突角度においてS15Cの場合よりMaxDEが小さい。またS15Cが時間の経過とともにMaxDEが増加するのに対し、SUS304では時間の経過とともにMaxDEの変化は小さくなり、上に凸の曲線となっている。これは、SUS304の加工硬化性が大きいためであると考えられる。

図11はSTPA24のMaxDE曲線である。STPA24の場合も、S15Cの場合と同様に、明瞭な潜伏期及び最大速度期が現れ、時間の経過とともにMaxDEは増加する。また、S15Cに比べて潜伏期の長さには及ばず衝突角度の影響が明瞭に現れている。

Fig.8 Definition of MaxDE

Fig.9 MaxDE-time curves of S15C (Jet nozzle, 180m/s)

Fig.10 MaxDE-time curves of SUS304 (Jet nozzle, 180m/s)

Fig.11 MaxDE-time curves of STPA24 (Jet nozzle, 180m/s)

各材料の MaxDE 曲線から、各衝突角度の最大速度期における最大エロージョン速度 MaxDER (MaxDE の変化速度) をそれぞれ読み取り、衝突角度と MaxDER の関係に表したものが図 12 である。衝突角度と MaxDER の関係は $\sin^n \theta$ で表され、どの材料においても、衝突角度が小さいほど MaxDER は小さくなり、衝突角度が 90° に近づくにつれて MaxDER は急激に増加し、衝突角度 90° で MaxDER は最大となる。指数 n は S15C が 1.7, SUS304 が 1.2, STPA24 が 2.5 となり、ほぼ同程度の値をとる。また、指数 n は体積減少速度－衝突角度関係図 (図 7) の場合の 1.6~3.0 とほぼ同程度の値をとっている。

図 13 は S15C の衝突角度実験での流速の垂直成分 $V \sin \theta$ に対する MaxDER (青色線) と、衝突角度 90° の試験片を用いて流速を変化させて求めた流速に対する MaxDER (赤色線) を比較したものである。流速を変化させた時の MaxDER よりも、衝突角度を変化させた時の MaxDER の方が大きい。また、衝突角度が小さいために $V \sin \theta$ が小さい時両者は平行な値を取り、衝突角度が大きくなって $V \sin \theta$ が大きくなるにつれて MaxDER は同程度の値をとる。SUS304, STPA24 においても S15C の場合と同様の傾向を示すが、紙面の都合上省略する。

以上の結果から、試験面に衝突した液滴が、試験面上で水膜を生成し、エロージョンの進行を妨げていると考えられ、図 14 (a) に示すように、衝突角度が小さいとき、試験片表面の液膜は吹き飛ばされて水膜の保護作用がほとんどない状態でエロージョンが発生すると考えられる。一方衝突角度 90° では、図 14 (b) に示すように、試験片表面に厚い液膜が生じ、水膜の保護作用の下でエロージョンが進むので、低角度の試験結果から予測される MaxDER よりも小さくなったものと考えられる。

Fig.12 Relation between impact angle and MaxDER (Jet nozzle, 180m/s)

Fig.13 Relation between normal component of flow velocity $V \sin \theta$ and MaxDER

Fig.14 Effect of liquid film

3・2 スプレーノズルを用いたエロージョン試験結果

前節では、ジェットノズル（スギノマシン製 Water Nozzle size $\phi 0.40\text{mm}$ ）を用いたエロージョン試験では 90° の衝突角度で試験片中心部に液膜が生じてエロージョンが弱められることが考えられたので、本節では扇形スプレーノズル（いけうち製高圧均等扇形ノズル 1/8MVNP2525SS303）を使用してエロージョン試験を行った。スプレーノズルを使用すると液滴径が非常に小さいために、S15C の試験片ではエロージョンが進行しにくいと考えられたので、純アルミニウムの試験片を用いてエロージョン試験を行った。

図 15 は、高速度ビデオ（Photron 製 FASTCAM SA1.1）を用いて撮影速度 20000 fps、シャッター速度 $1/1000000\text{ s}$ でスプレーノズルからの液体の挙動を上方から撮影したものである。図の赤線に示すように、スプレーノズルの先端から高密度の液滴の領域が角度 25° で扇形に噴出されているのがわかる。

図 16 はスプレーノズルからの液体の挙動を撮影速度 60000 fps で側面から撮影したものである。液滴径のザウター平均値は、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よると、 110m/s のとき $66\mu\text{m}$ である。

図 17 は、スプレーノズルを用いて衝突角度 90° 、圧力 6.2MPa 、流速 110m/s で 2.5 時間実験を行ったアルミニウム試験片の状態である。試験片のエロージョン範囲は試験片中央部に直線状に発生し、幅約 3mm 、深さ約 2mm である。前節のように、エロージョンによる最大深さを計測しようとしたが、非接触表面形状測定システムの最大測定可能深さ以上に深くエロージョンが進行すること、点レーザであるためにエロージョン領域全体を測定するのにかなり長時間を要すること、試験片が純アルミニウムのためにエロージョン領域以外は減肉していないことから、実験結果は質量減少量で整理した。

図 18 は衝突角度 90° の Al 試験片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量が大きくなる。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 時間の潜伏期が現れる。それぞれの流速で潜伏期が終了した後、質量減少量が著しく増加する最大速度期が観察できる。

Fig.15 Top view of spray nozzle

Fig.16 High speed camera of spray nozzle (110m/s)

Fig.17 Test specimen after 2.5hour, 6.2MPa

Fig.18 Mass loss-time curves of aluminum (Spray nozzle, 90°)

図 19 は衝突角度 60° ，流速 140m/s で試験したときのアルミニウム試験片の質量減少量曲線である。(1) の試験は，試験面を上向きにしてエロージョン試験を行った結果であり，質量減少量は 3 時間まではゆるやかに増加し，これ以後比較的急勾配に増加して 5 時間後に 10mg に達する．一方，(2) の試験は試験面を下向きにしてエロージョン試験を行った結果であり，質量減少量は短い潜伏期の後，最大速度期で急激に増加し，2 時間後には 22mg に達する．このように試験片下向きの方が試験面上向きより質量減少量が約 9 倍大きいことが観察された．試験面上向きと試験面下向きで質量減少量が大きく異なるのは，試験面下向きの試験片では，試験面に衝突した液滴は液膜を作りにくいのにに対して，試験面上向きの試験片では，液滴が試験面に衝突後飛散するときに，重力により試験面上に液膜を作りやすく，液膜のクッション効果によりエロージョン速度が低下したためと考えられる．実験の再現性を検討するため，(1) 及び (2) と同条件で試験面上向き (3) 及び試験面下向き (4) の実験を行った．(3) の試験は，(1) の結果とほぼ同様のエロージョン傾向を示した．(4) の試験は，(2) よりも潜伏期間が長いが，同様のエロージョン傾向を示した．

図 20 は衝突角度 45° のアルミニウム試験片における様々な流速での質量減少量曲線である．衝突角度 60° の試験片の場合とは全く反対の結果となり，衝突角度 45° の試験片は下向きではほとんどエロージョンが発生しないが，上向きでは質量減少量が著しく増加する．これは試験槽の構造上，衝突角度 45° の試験面上に衝突した液滴が真上に飛散し，真上にある観察窓に垂直に衝突し，衝突した液滴が飛散して試験槽中で霧状になるために，ノズルから噴出される液滴がこの霧状の液滴と合体して大きな液滴となり，著しい損傷を与えたものと考えられる．このように，衝突角度 45° 試験面上向きの場合は非常に特殊な状態であったと考えられるため，試験面下向きの場合のみを検討した．

Fig.19 Mass loss-time curves of Al (Spray nozzle, 60°)

Fig.20 Mass loss-time curves of Al (Spray nozzle, 45°)

図21は衝突角度 60° のアルミニウム試験片を用いて、試験面を下向きにして実験を行った各流速の質量減少量曲線である。衝突角度 90° の場合と同様に、質量減少量は潜伏期間を経た後、最大速度期で著しく増加する。また、流速が速くなるにつれて質量減少量が大きくなる。

図22は、衝突角度 60° 、 45° の実験から単位時間当たりの質量減少量と流速の垂直成分 $V \sin \theta$ の関係、及び衝突角度 90° で流速を変化させた時の質量減少速度と流速の関係を示したものである。衝突角度 60° において、試験面下向きの結果は、衝突角度 90° における各流速での実験結果と質量減少速度がほぼ同じであり、試験面上向きの結果は、衝突角度 90° における各流速での実験結果より質量減少速度が小さくなることわかる。衝突角度 45° 試験面下向きでは、衝突角度 60° における試験面上向きの結果よりもさらに質量減少速度が小さくなる傾向を示している。衝突角度が小さくなるほど質量減少速度は小さくなり、質量減少速度は図22における斜線部の領域内におさまる。したがって、液滴が成長しない環境下では、衝突角度依存性は最も安全側の値として $V = V_0 \sin \theta$ (V_0 : 流速, θ : 衝突角度) で評価できることがわかる。

Fig.21 Mass loss-time curves of Al (Spray nozzle, 60°)

Fig.22 Relation between flow velocity $V \sin \theta$ and mass loss rate

4. 結 言

- (1) ジェットノズルを用いた液滴衝撃エロージョンのエロージョン深さ速度 (MaxDER) は、衝突角度によって大きく変化し、衝突角度が小さくなるにつれて減少する。いずれの材料も、MaxDER は $\sin^n \theta$ で整理され、 n は S15C, SUS304, STPA24 に対してそれぞれ 1.7, 1.2, 2.5 となり、ほぼ同程度の値をとる。
- (2) 高圧法のジェットノズルを用いた試験では、衝突角度が小さくなると、試験片表面の液膜は吹き飛ばされ、水膜の保護作用がほとんどない状態でエロージョンが起こるため、エロージョン速度が衝突角度 90° の低流速の結果に比べて大きくなる。逆に、衝突角度 90° では、試験片表面に厚い液膜が生じ、水膜の保護作用の下でエロージョンが進むと考えられる。
- (3) スプレーノズルによるエロージョンは、衝突角度依存性は最も安全側の値として $V=V_0 \sin \theta$ (V_0 : 流速, θ : 衝突角度) で評価できる。

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した。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) 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, p. 47.
- (2) Heymann, F. J., "Conclusions from the ASTM Interlaboratory Test Program with Liquid Impact Erosion Facilities", *Proc. 5th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact* (1979), pp. 20.1-20.10.
- (3) 服部修次, 中村隆太, 林崗, "液滴衝撃エロージョンに及ぼす液滴径の影響", 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 77, No. 782 (2011), pp. 202-211.
- (4) Fyall, A. A., King, R. B. and Strain, R. N. C., "Rain erosion aspects of aircraft and guided missiles", *Journal of Royal Aeronautic Society*, Vol. 66 (1962), pp. 447-453.
- (5) Busch, H., Hoff, G. and Langbein, G., "Rain Erosion Properties of Materials", *Philosophical Transactions. A*, Vol. 260, No. 1110 (1966), pp. 168-178.
- (6) Hoff, G., Langbein, G. and Rieger, H., "Material Destruction Due to Liquid Impact", *American Society for Testing and Materials, STP 408* (1967), pp. 42-69.
- (7) Baker, C. W. C., Jolliffe, K. H. and Pearson, D., "The Resistance of Materials to Impact Erosion Damage", *A Discussion on Deformation of Solids by the Impact of Liquids, Philosophical Transactions, Royal Society, Series A*, Vol. 260, No. 1110 (1966), pp. 193-203.
- (8) Hammit, G., Kling, Y. C., Mitchell, T. M. Jr., and Solomon, L. P., "A Statistically Verified Model for Correlating Volume Loss Due to Cavitation or Liquid Impingement", *American Society for Testing and Materials, STP 474* (1970), pp. 288-311.
- (9) Schmitt, G. F. Jr., "Erosion Rate-Velocity Dependence for Materials at Supersonic Speeds", *American Society for Testing and Materials, STP 474* (1970), pp. 323-349.
- (10) Schmitt, G. F. Jr., Reinecke, W. G. and Waldman, G. D., "Influence of Velocity, Impingement Angle, Heating, and Aerodynamic Shock Layers on Erosion of Materials at Velocities of 5500 ft/s (1700 m/s)", *American Society for Testing and Materials, STP 567* (1974), pp. 219-238.
- (11) Gorham, D. A., Matthewson, M. J. and Field, J. E., "Damage Mechanisms in Polymers and Composites Under High-Velocity Liquid Impact", *American Society for Testing and Materials, STP 664* (1979), pp. 320-339.
- (12) Ahmad, M., Casey, M., Surken, N., "Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials", *Wear*, Vol. 267 (2009), pp. 1605-1618.
- (13) ASTM ed., *Annual Book of ASTM standards 2005, Wear and Erosion; Metal corrosion, G134-95* (2005), pp. 576-588, ASTM International.
- (14) 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. 772 (2010), pp. 179 - 186.