HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | ナトリウム中に噴出する不活性ガス不足膨張衝突噴流の局所構造と対応するエロージョン試験法の開発 |
| Author(s) | 工藤, 秀行; 太田, 淳己; 杉山, 憲一郎 他 |
| Citation | 保全学, 11(4), 90-97 |
| Issue Date | 2013-01 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/52018 |
| Type | journal article |
| File Information | 90_hozen130.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学術論文

# ナトリウム中に噴出する不活性ガス不足膨張衝突噴流の局所構造と対応するエロージョン試験法の開発

Development of Erosion Test Methods on Underexpanded Inert-Gas Impinging Jets Injected in Liquid Sodium


| | | | |
|---|---|---|---|
| 北海道大学 | 工藤　秀行 | Hideyuki　KUDOH | Member |
| 北海道大学 | 太田　淳己 | Junki　OHTA | |
| 北海道大学名誉教授 | 杉山　憲一郎 | Ken-ichiro　SUGIYAMA | Member |
| 北海道大学 | 奈良林　直 | Tadashi　NARABAYASHI | Member |
| 原子力機構 | 大島　宏之 | Hiroyuki　OHSHIMA | |
| 原子力機構 | 栗原　成計 | Akikazu　KURIHARA | |


When a heat transfer tube wall in a steam generator of a sodium-cooled fast reactor fails, high-pressure steam leaks into low-pressure liquid sodium side. Then the high-temperature and highly corrosive reaction jet causes secondary failures of neighboring heat transfer tubes. The objective of the present study is to develop an experimental method to obtain data that is necessary to validate and improve a safety evaluation code on the sodium–water reaction. In the present paper, the methods of sodium–droplet erosion test at the position of the local structure in underexpanded inert-gas impinging jets using the visualization method, which was developed in our previous study, were reported. The erosion phenomena observed in the sodium–droplet entrained region, where intensive erosion is expected, were found to be discussed using the existing knowledge of liquid droplet impingement (LDI) obtained in water experiments.

**Keywords**: Erosion, Liquid-Sodium Droplet, Underexpanded Supersonic-Jet, Visualization, Liquid Droplet Impingement, Sodium-Cooled Fast Reactor, Steam Generator, Sodium–Water Reaction

## 1．緒言

ナトリウム冷却型高速炉（SFR）の蒸気発生器内では高圧の水または水蒸気（15 ~ 17 MPa）と低圧の液体ナトリウム（~ 0.2 MPa）が厚さ数 mm の伝熱管壁を介して熱交換を行っている．伝熱管に破損が生じた場合，伝熱管内部の水は減圧沸騰により蒸発し，水蒸気が周囲の液体ナトリウム中に超音速の不足膨張噴流となって噴出する．このとき，ナトリウムと水蒸気との発熱反応による高温や NaOH，$Na_2O$ などの高腐食性反応生成物を伴った混相噴流（反応ジェット）が形成される．隣接する伝熱管が反応ジェットの高温環境に曝されるとその材料強度は急速に低下し，ウェステージ（液体ナトリウム滴や腐食性反応生成物によるエロージョンとコロージョンの複合現象）によって伝熱管の二次破損や破損伝播に至る可能性がある．

ウェステージ現象を理解するには，第一ステップとして液体ナトリウム中に噴出する高圧ガスの噴流構造を把握する必要がある．次いで，そのエロージョン特性とコロージョン特性を独立に評価し，それぞれの物理化学プロセスを明らかにすることが重要である．

噴流構造の観点から，日本原子力研究開発機構では多次元混相流数値解析コードを開発し，ナトリウム - 水反応に対する安全評価手法の高度化を進めている[1-3]．この種のコード開発では，並行してモデルの妥当性検証及び高度化のための実験データの取得が必須である．しかしながら，気体中に噴出する不足膨張噴流についてはシュリーレン法による可視化観察など多くの研究が行われている[4]ものの，液体中に噴出する不足膨張噴流に関する研究は限られている．水中に噴出する非凝縮性ガスの不足膨張噴流については，Loth ら[5, 6]，Epstein ら[7],

連絡先:工藤秀行，〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目，北海道大学大学院工学院
E-mail: k.hide.16@eng.hokudai.ac.jp

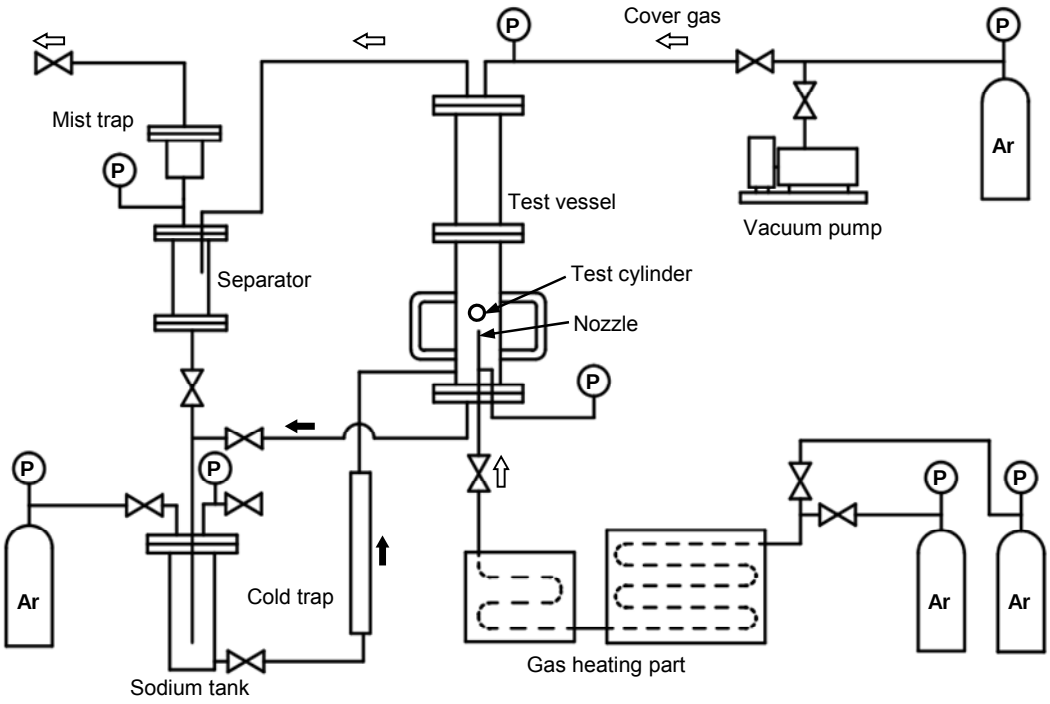


**Fig.1 Schematic of experimental apparatus.**

Someya ら[8]によって，それぞれ局所ボイド率分布，噴流中にエントレインされる液滴サイズおよびそのエントレインメント挙動等が報告されている．また，水中で平板に衝突する不足膨張噴流については，Bell らがボイド率分布やエントレインメント挙動などを計測している[9]．しかしながら，実機で用いられる液体ナトリウムの表面張力は水に比べて約 3 倍大きく，不足膨張噴流の気液界面でのエントレインメント挙動や液滴サイズに影響を与えることが考えられる．したがって，上記水実験データとの整合性を検討するためにも，ナトリウム中での不足膨張衝突噴流実験が必要である．

ウェステージ評価の第二ステップのうち腐食性反応生成物によるコロージョンについては，近年，実機現象で支配的であると推定される流れ加速型腐食（Flow Accelerate Corrosion：FAC）の観点から，減肉速度の定式化を目的として NaOH や $Na_2O$ を用いた高温噴射試験が行われている[10, 11]．一方でエロージョンについては，噴流到達距離やエントレインメント挙動など噴流構造への依存度が高いものの，上で述べた水実験においてもエロージョン特性にまで言及したものはなく，その詳細については必ずしもわかってはいないのが現状である．

そこで本研究では，液中気相噴流構造の把握およびエントレインされる液滴によるエロージョン特性の定量評価を最終目的とし，ナトリウム中に噴出する不活性ガスの不足膨張衝突噴流（化学反応を伴わない）の構造情報に基づいたエロージョン試験法を開発した．本手法では，先に構築された可視化試験法[12]によってナトリウム中で不足膨張衝突噴流の局所構造を可視化情報として取得し，その噴流構造に基づいて最もエロージョンが進行すると推定されるナトリウム液滴エントレインメント領域でのデータ取得など，目的に応じて任意の場所でエロージョンデータを取得することができる．また本報では，この過程での予備実験結果から，液体ナトリウム中衝突噴流によるエロージョンがナトリウム液滴による液滴衝突（Liquid Droplet Impingement: LDI）エロージョンであることを確認するとともに，第 1 次近似としてエロージョン速度と液滴流速との相関を検討した．

## ２．実験

### 2.1 実験装置

Fig. 1 に試験装置の系統図を示す．すべての構成要素はナトリウムと共存性の良いステンレス鋼製で，温度をナトリウムの融点以上に保つために，シースヒーターと断熱材で覆っている．実験にあたり，装置内部を真空ポンプにより吸引し, 99.999 %のアルゴンガスによってガス置換する．貯蔵タンク内で溶解されたナトリウムはガス圧

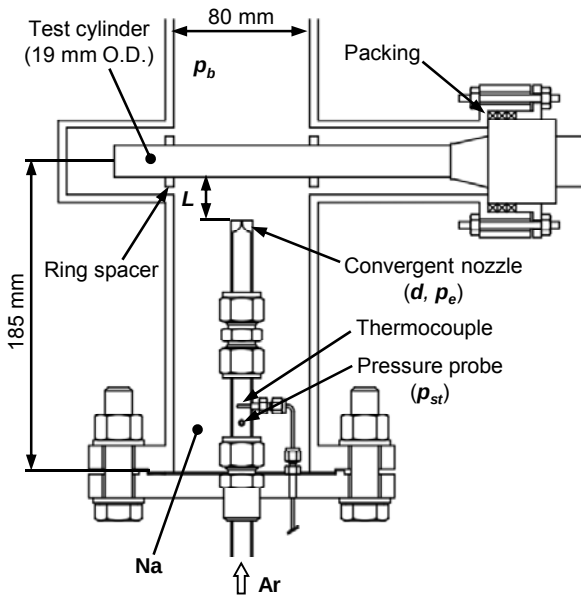


**Fig.2 Test section.**

によってコールドトラップを通って，高さ 3m の試験容器へチャージされる．チャージプロセスではナトリウム温度は 120℃ 以下に調整されており，液体ナトリウム中への酸素溶解度は 10 ppm 以下であると考えられる．試験容器内のナトリウム液位は容器壁面に取り付けた熱電対の温度変化を読み取ることで，容器底面から 540 mm の位置に調整する．噴出ガスにはアルゴンガスを用い，ガス加熱部を通って目標温度まで加熱されたのち，ノズルから液体ナトリウム中に噴出する．噴出後のアルゴンガスは気液分離機器とミストトラップを通って大気へと排出される．

Fig. 2 に試験部の詳細図を示す．試験容器は内径が 80 mm で，底面から 185 mm の位置に直径 19 mm の試験円筒が水平に挿入されている．試験円筒は後述する各試験の目的に応じて交換することができる．試験円筒の接続部はグラシールパッキンを用いてシールしているため，円周方向に回転可能な構造となっている．試験円筒の下方には収縮ノズルが設置されており，上向きに高純度アルゴンガスを噴出する．ガスノズル部は Swagelok 社製フィッティングによって接続されており，ノズル部を交換することでノズル径 $d$ とノズル上端 - 円筒下端間距離 $L$ を変更することができる．ガスノズル部の上流には静圧プローブと熱電対が流路内に設置されており，噴出ガスのよどみ圧力，よどみ温度を計測する．

試験時のガス噴出条件はノズル出口圧力 $p_e$ と背圧（ナトリウム側）$p_b$ の比である不足膨張率を用いて定義した．よどみ点圧力を $p_{st}$ とすると，等エントロピー流れの仮定より臨界圧力比は，

$$\frac{p^*}{p_{st}} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \tag{1}$$

となる．ここで $p^*$ は臨界圧力，$\gamma$ は比熱比である．本試験では流れがチョークしているため $p_e = p^*$ であるから，不足膨張率は，

$$\frac{p_e}{p_b} = \frac{p^*}{p_{st}}\frac{p_{st}}{p_b} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)}\frac{p_{st}}{p_b} \tag{2}$$

となる．噴出ガス温度はノズル出口において噴出先のナトリウム温度と同程度になるように調整する．

Donaldson らは空気中に噴出する空気の不足膨張噴流について，シュリーレン法による可視化観察を行い，不足膨張率によってその構造を分類している[4]．彼らによると，$1.1 < p_e/p_b < 2$ の範囲では斜め衝撃波を伴った弱い不足膨張噴流となり，$2 < p_e/p_b$ の範囲では垂直衝撃波（マッハディスク）を伴った強い不足膨張噴流が形成される．本報での噴出ガス条件は，Donaldson らの知見をもとに $p_e/p_b = 1.43$，3，4 の 3 パターンとする．

上述したように，本研究では可視化試験およびエロージョン試験を実施する．以下にそれぞれの試験方法について述べる．ただし，可視化試験については既報[12]にて用いた方法と同様であるため，ここでは概略を述べる．

## 2.2 可視化試験

既報において，パイレックス製のガラス管と内視鏡を用いることで，液体ナトリウム中の不活性ガス噴出挙動を直接観察する手法を開発した[12]. 本試験においてもパイレックス製のガラス管を試験円筒として液体ナトリウム中に設置し，その内部に内視鏡を挿入する．内視鏡は直角方向を観察することが可能で，内視鏡に接続した高速度カメラによって噴流がガラス管に衝突する様子を撮影する．パイレックス製ガラス管は低温のナトリウムに対して共存性がよいことから，試験温度は 120～140℃ に設定し，$p_e/p_b = 4$ として噴流挙動を詳細に観察する．

## 2.3 エロージョン試験

実機現象ではナトリウムと水の発熱反応によって，隣接管が高温環境（1000℃ 程度）に曝されることで材料強度が低下する．エロージョン特性が材料の硬さに依存することから，実機高温環境を意識した定量試験を行うためには，ターゲット材料としてはできるだけ硬さの低い

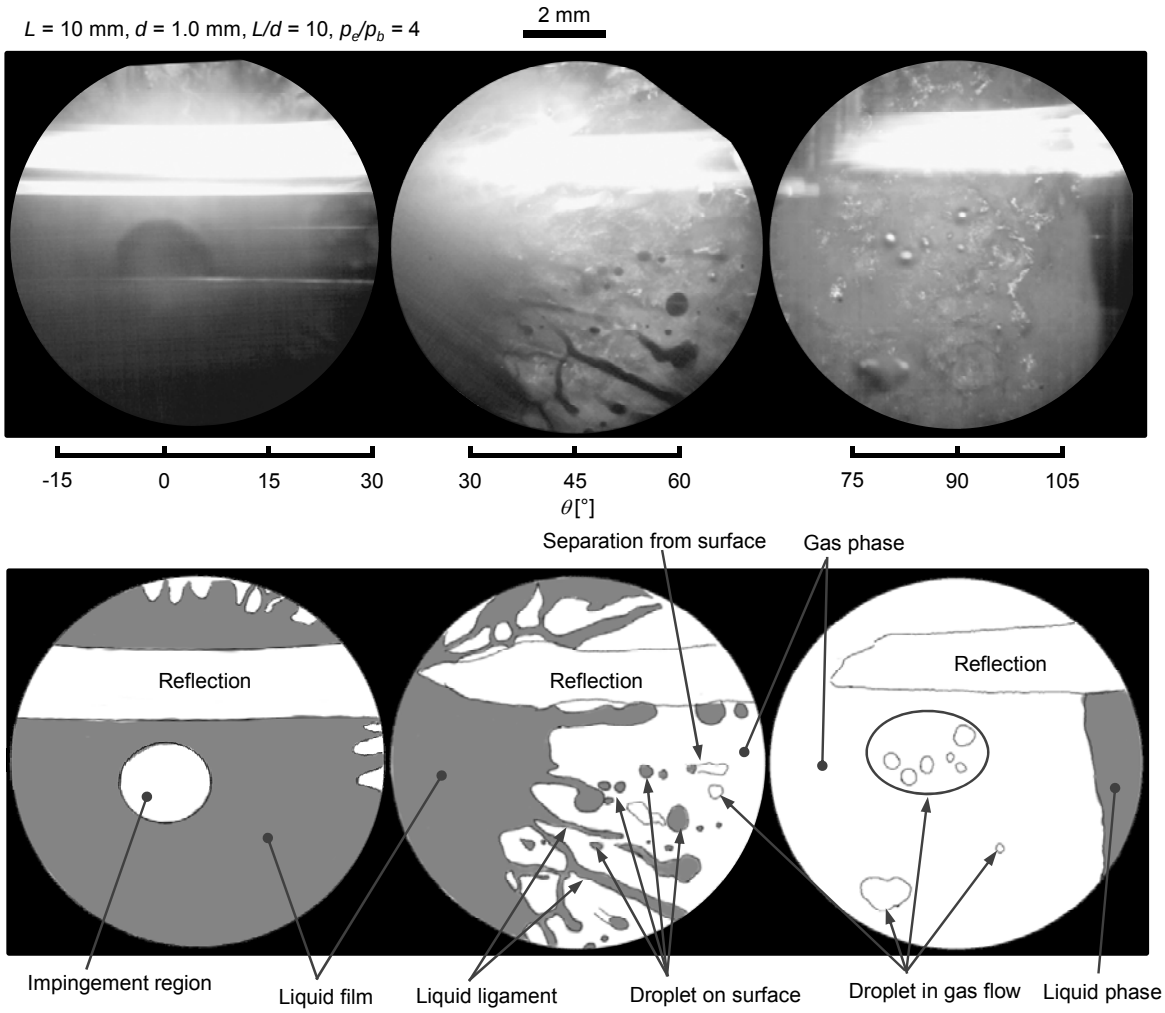


**Fig.3 Visualized images (*L* = 10 mm).**

ものを採用したほうがよい．一方で，液体ナトリウムに対する溶解度が低温・短時間では無視できる材料が望ましい．この点を勘案し，本試験では純粋アルミニウム（A1050）をターゲット材料とする．

アルミニウム試験片は大きさ 8 mm×20 mm，厚さ 0.3 mm とし，ステンレス鋼製の試験円筒の表面に 60° 間隔で計 6 枚を固定する．試験円筒を 60° 間隔で回転させ，各試験片に対する噴流の衝突時間を 20 分の整数倍で増加させることで効率的に試験データを取得する．この方式であれば，各試験片間で 20 分間のエロージョンによる体積減少量と試験片の形状変化を比較できる．エロージョンによる体積減少量と形状変化のデータはマイクロスコープ（VHX-2000，Keyence 社製）を用いた三次元計測によって取得する．エロージョン試験のナトリウム温度は 200℃ とする．

液体ナトリウムに対するターゲット材料の適用性を確認するために，材料のバックグラウンド計測用の試験片をナトリウムの流れの影響が少ないと推定される試験円筒取付部の根元付近に設置し，試験の前後で厚さとビッカース硬さを計測した．その結果，試験片厚さの変化は試験域およびバックグラウンド域の両方で認められなかった．また，バックグラウンド計測用試験片のビッカース硬さは試験前の 45.2 Hv から，約 8 時間の液体ナトリウム浸漬後には 39.8 Hv に変化した．噴流に直接曝された試験片 6 つの硬さの平均は 39.1 Hv（標準偏差 2.0 Hv）で，両者の差は 2 %以内であった．したがって，液体ナトリウム中でのエロージョン試験法の開発を目的とする本試験条件において，ターゲット材料として純粋アルミニウムを適用することは妥当と判断した．

## 3．結果と考察

### 3.1 可視化観察

Fig. 3 に $L = 10$ mm，$d = 1.0$ mm，$p_e/p_b = 4$ のときの可視

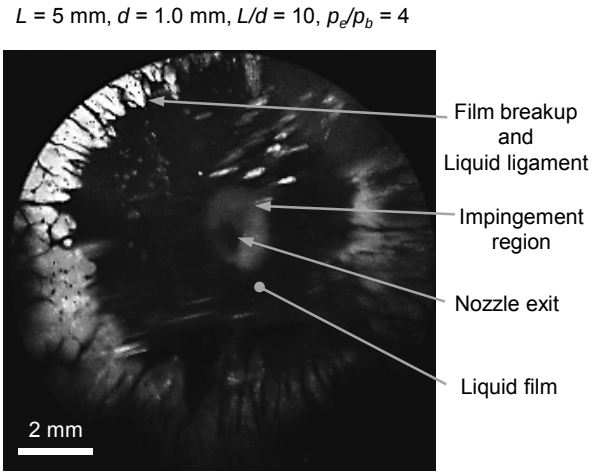


**Fig. 4 Visualized image (*L* = 5 mm).**

化画像を示す．図の下段には画像のスケッチを示している．画像の上部にある白く光った領域はガラス管内面に内視鏡の先端から出る光源が反射した領域である．ノズルと向き合う円筒前面の $\theta = 0°$ では画像中央に丸い噴流の衝突領域が確認できる．この領域は画像の濃淡が激しく変動することから，気液二相流が衝突しておりエロージョンが急激に進行する領域と推定できる．その周囲にはナトリウムの液膜流が形成されている．$\theta = 45°$ では円筒表面に形成された液膜が細い液糸に分離し，円筒表面に付着したまま液滴へと微粒化している．その後，液滴が $\theta = 60°$ 付近で円筒表面から剥離している．また，液膜流の奥には常に気相空間が形成されており，液滴などの背面に表面波を伴った気液界面を観察することができる．$\theta = 90°$ では画面上のほとんどの領域が気相で満たされており，その気相空間中を $\theta = 60°$ 付近で円筒表面から剥離した液滴が紙面奥側に向かって飛んでいく様子が観察される．また，$\theta = 90°$ 付近で気相空間中に時折試験容器の内壁が観察されており，ガラス管によって進行方向を曲げられたガス噴流が水平に近い方向に向かって広範囲に広がっていることが推察される．

Fig. 4 に $L = 5$ mm，$d = 1.0$ mm，$p_e/p_b = 4$ の時の，ガラス管前面（$\theta = 0°$ 付近）の可視化画像を示す．Fig. 3 の $L = 10$ mm の場合と同様に，ガラス管表面に沿った液膜流とその分裂挙動が確認できる．一方で，画像中央の噴流衝突領域にはノズル出口がはっきりと観察されることから，気単相から構成されるガス噴流のコア領域がガラス管表面に到達していることが確認できる．さらに，コア領域の周囲には Fig. 3 で観察された気液二相流の衝突領域がドーナツ状に形成されている．こうした結果から，液体ナトリウム中の不足膨張噴流は，ノズル孔近傍ではガス噴流のコア領域が形成されているが，その気液界面からナトリウムのエントレインメントが始まるため，コア領域は下流方向に縮小し，エントレインされたナトリウムと気相が混合する気液二相領域が拡大していくことがわかる．$p_e/p_b = 2$ の場合にも同様な噴出挙動が観察されており，可視化画像からは両者に大きな違いは見られなかった．

以上，可視化試験の観察結果から不足膨張噴流が衝突する円筒周りの流動様式をまとめると，液体ナトリウム中でのガス噴流は不足膨張によってノズル出口近傍で超音速の膨張領域を持ち，気相の連続相であるコア領域が形成される．膨張領域の終端から周囲ナトリウムのエントレインメントが始まり，気液二相流が形成される．円筒の前方よどみ点においては噴流衝突領域が存在し，その周囲には衝突後の液相が液膜となって流動する液膜流領域が存在する．液膜流の背後には気流の流路が形成されている．放射状に広がる液膜流はその乱れが発達することにより液糸，液滴へと分裂し，円筒表面から剥離する．剥離後の液相はこの気流の流路を通って接線方向へ放出されるが，流路を形成している気流部分はその浮力も加わって円筒の背面へ流動する．水中で行われた不足膨張衝突噴流に関する Bell らの実験においても同様なコア領域，気液二相流領域および液膜領域の存在が確認されている[9].

### 3.2 エロージョン試験結果と検討

本試験では，可視化による噴流の局所構造情報に基づき，$p_e/p_b = 1.43$，3，4 の条件で，$L = 10$ mm，$d = 1.0$ mm としてエロージョン試験を行った．Fig. 5 に $p_e/p_b = 4$ の条件で観察された，それぞれ 40，60，80，そして 100 分でのエロージョン形状を最深部からの高さプロファイルで示す．噴流衝突によってすり鉢状のエロージョン痕が形成されており，時間の経過に伴ってエロージョン領域の中央部分が浸食され，100 分(d)では試験片が貫通している．また，エロージョン領域の中に，多くの凹凸部が明瞭に残っていることがわかる．この凹凸部は LDI エロージョンまたは固体粒子衝突エロージョンの典型形状である．ナトリウムの融点 98℃ に対し，試験温度が 200℃ であることから，凝固による固体ナトリウム粒子が衝突していたとは考えられない．また，より低温の 140℃ で行われた Fig. 3 の可視化試験で噴流衝突領域の周囲に安定した液膜流が観察されたことからも，ガス噴流中にエン

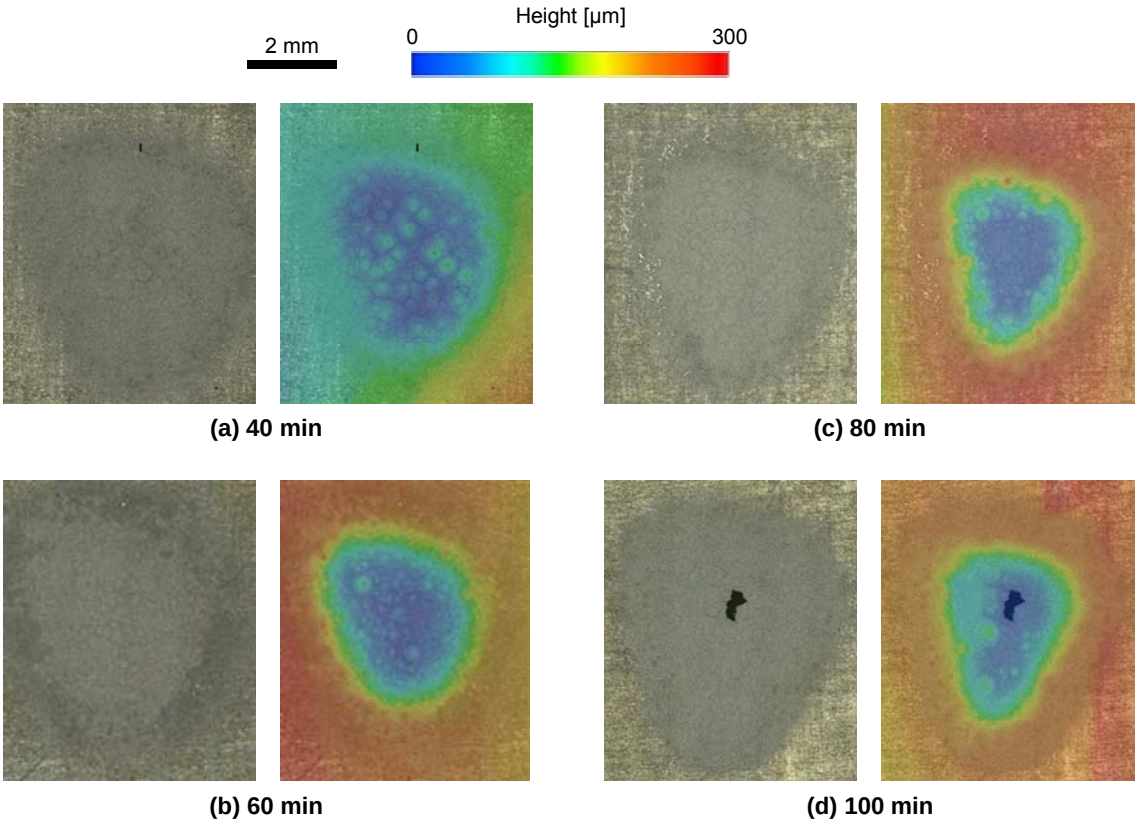


**Fig.5 Erosion shapes of A1050 specimens.**

トレインされたナトリウム液滴の衝突による LDI エロージョンであるということができる．さらに，エロージョン痕の大きさが Fig. 3 で観察された噴流衝突領域の大きさと対応していることから，衝突領域内部はエントレインされた液滴が激しく衝突しているということができる．

Fig. 6 に $L = 10$ mm，$d = 1.0$ mm，$p_e/p_b = 1.43$，3，4 の条件で得られたエロージョンによる体積減少量と試験時間との関係を示す．各時間での体積減少量は，ピクセル毎に計測された高さデータを積算して求めた．エロージョン速度が小さいと推定された $p_e/p_b = 1.43$ の条件では 60 分の整数倍で試験片に噴流を衝突させた．最初の 60 分および 20 分の試験片ではエロージョンは発生していない．また，$p_e/p_b = 3$ および 4 の条件では衝突時間 120 分の試験片の貫通部が大きいため，図にからは除外している．図から不足膨張率が大きいほど潜伏期間が短く，エロージョンによる体積減少量が大きいことが分かる．

次に，エロージョン速度と液滴流速の関連性を検討する．LDI エロージョンについては多くの研究が行われており，例えば Sanchez や Heymann の研究に代表されるように，単位時間または衝突流量あたりの体積減少量は液滴流速の 4～5 乗程度に比例する[13, 14]．ここでは単位時間当たりの体積減少量に着目し，エロージョン速度と液滴平均速度との関係が第 1 次近似の評価で従来知見と大きく矛盾しないことを検討してみる．なお，$p_e/p_b = 3$ および 4 のデータのエロージョン速度は，Fig. 6 のデータを最小二乗法により直線近似し，その傾きから求めた．また，$p_e/p_b$ = 1.43 では 120 分と 180 分のデータの傾きとした．ここではエントレインされる液滴の平均流速が Epstein らによって提案された膨張領域終端でのガス流速 $u_0$ に依存しているとする．関係する物理式を以下に示す[7]．

$$u_0 = \frac{G}{\rho_e} + \frac{p_e - p_b}{G} \tag{3}$$

$$G = C_D \left[ \gamma p_{st} \rho_{st} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{1/2} \tag{4}$$

$$p_e = p_{st} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{5}$$

$$\rho_e = \rho_{st} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \tag{6}$$

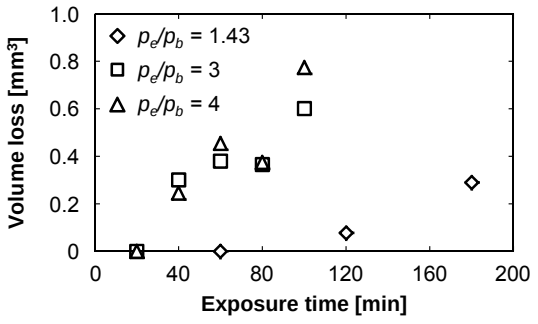


**Fig.6 Volume loss of specimens ($L$ = 10 mm, $d$ = 1.0 mm).**

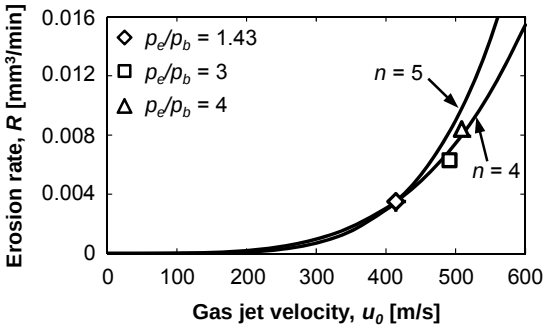


**Fig.7 Erosion rate versus gas jet velocity.**

ここで，$G$：質量流束，$\rho$：気相密度，$C_D$：ノズル流出係数である．添え字 $e$，$st$ はそれぞれノズル出口状態，よどみ点状態を示す．

Fig. 7 に以下の条件に基づくエロージョン速度 $R$ と膨張領域終端ガス流速 $u_0$ との関係を示す．本試験では試験片材料はすべて同一であり，ナトリウム浸漬による劣化についても試験片ごとのばらつきが小さいことから，エロージョンに影響する試験片材料側のパラメータは一定であるとする．また，液滴サイズや液滴の数密度（衝突頻度）などを規定する噴流構造は，$p_e/p_b$ = 2 と 4 の可視化試験から同一と見てよく，それより幾分異なる $p_e/p_b$ = 1.43 と 3 も同じ構造と推定できる．Epstein らが水を用いたガス噴流実験から得た液滴径評価式[7]では，数倍程度の不足膨張率の違いでは液滴径は同じとみなしてよい．また，衝突頻度を規定する発生液滴数も界面から質量の大きい液滴がエントレインされる機構を考えれば，数倍程度の不足膨張率の違いでは大きな差は生じないと推定できる．以上の考察から，ここでは第 1 次近似の評価を行うために，$p_e/p_b$ = 1.43，3，4 で液滴流速以外のパラメータが一定であると仮定し，$p_e/p_b$ = 1.43 の値を基準としてガス流速とエロージョン速度を以下のように関係付ける．

$$R = \left( \frac{u_0}{u_{0,1.43}} \right)^n R_{1.43} \tag{7}$$

Fig. 7 からわかるように，本試験データは，$n$ = 5 よりも $n$ = 4 と一致する特性を示している．このように，第 1 次近似の評価ではナトリウム液滴に関する LDI エロージョン速度のデータは従来知見と矛盾していない．すなわち，本実験結果の分析に基づき，ナトリウム液滴に関する LDI エロージョン現象も従来知見を活用して検討できる見通しを得た．

## 4． 結言

ナトリウム - 水反応のエロージョン特性を定量的に評価することを最終目的とし，液体ナトリウム中に設置された単一円筒に衝突する不活性ガスの不足膨張噴流（化学反応を伴わない）を対象に，可視化による噴流の局所構造情報に基づくエロージョン試験法を開発した．

1) 本手法では，可視化試験によって噴流構造を把握し，対応するエロージョン試験との組み合わせによって，液体ナトリウム中不足膨張衝突噴流のエロージョン特性を定量化することができる．
2) 液体ナトリウム中に噴出する不足膨張噴流は，噴流コア領域および周囲ナトリウムエントレインメント領域から構成される．また，噴流が衝突する円筒表面には噴流衝突領域の周囲に放射状の液膜流領域が形成されることを観察した．
3) このような噴流衝突領域には LDI エロージョンが発生し，第 1 次近似の評価でそのエロージョン速度は従来知見と矛盾していない．すなわち，ナトリウム液滴に関する LDI エロージョン現象も従来知見を活用して検討できる可能性がある．

今後は本試験法を用いて，既存の水試験データとの整合性も意識し，材料硬さや噴流衝突構造と距離，ノズル径，ノズル形状，液滴サイズや衝突頻度などの各種パラメータの影響について検討する予定である．

## 参考文献

[1] T. Takata, A. Yamaguchi: "Numerical approach to the safety evaluation of sodium-water reaction", J. Nucl. Sci. Tech., Vol.40, No.10, pp.708-718 (2003).

[2] T. Takata, A. Yamaguchi, A. Uchibori, et al.: "Computational methodology of sodium-water reaction

phenomenon in steam generator of sodium-cooled fast reactor", J. Nucl. Sci. Tech., Vol.46, No.6, pp.613-623 (2009).

[3] 内堀昭寛, 渡部晃, 大島宏之, "ナトリウム - 水反応および圧縮性混相流数値解析コードSERAPHIMの高度化（化学反応を伴う液体中気体噴流に対する再現性検証）", 機論 B, Vol.77, No.776, pp.974-977 (2011).

[4] C.D. Donaldson, R.S. Snedeker, "A study of free jet impingement. Part 1. Mean properties of free and impinging jets", J. Fluid Mech., Vol.45, No.2, pp.281-310 (1971).

[5] E. Loth, G.M. Feath: "Structure of underexpanded round air jets submerged in water", Int. J. Multiphase Flow, Vol.15, pp.589-603 (1989).

[6] E. Loth, G.M. Feath: "Structure of plane underexpanded air jets into water", AIChE Journal, Vol.36, No.6, pp.818-826 (1990).

[7] M. Epstein, H.K. Fauske, N. Yoshioka: "Establishment of analytical model for peak temperature within a sodium-water reaction jet, (II); mean droplet size in a submerged gas jet", J. Nucl. Sci. Tech., Vol.42, No.11, pp.961-969 (2005).

[8] S. Someya, M. Uchida, Y. Li, et al.: "Entrained droplets in underexpanded gas jet in water", J. Vis., Vol.14, pp.225-236 (2011).

[9] R. Bell, B.E. Boyce, J.G. Collier: "The structure of a submerged impinging gas jet", Journal of the British Nuclear Energy Society, Vol.11, pp.183-193 (1972).

[10] 栗原成計, 菊地晋, 梅田良太他, "高速炉蒸気発生器における伝熱管破損事象に関する研究 ; (6) 高温 NaOH 噴射基礎実験による減肉評価", 日本原子力学会「2011 年秋の大会」, 北九州国際会議場, 2011 年 9 月 19 日-22 日, P09 (2011). [CD-ROM]

[11] 栗原成計, 菊地晋, 梅田良太他, "高速炉蒸気発生器における伝熱管破損事象に関する研究 ; (12) 高温 NaOH 噴射基礎実験による減肉評価（第二報）", 日本原子力学会「2012 年春の年会」, 福井大学文京キャンパス, 2012 年 3 月 19 日-21 日, F18 (2012). [CD-ROM]

[12] H. Kudoh, K. Sugiyama, T. Narabayashi, et al.: "Visualization on the behavior of inert gas jets impinging on a single glass tube submerged in liquid sodium", J. Nucl. Sci. Tech., Vol.50, No.1, (2013), (掲載予定).

[13] L.E. Sanchez-Caldera: "The mechanism of corrosion-erosion in steam extraction lines of power stations", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts (1984).

[14] F.J. Heymann: "Toward quantitative prediction of liquid impact erosion", ASME STP474, pp.212-248 (1970).

（平成 24 年 10 月 9 日）