

高温インパクトフレッティング試験による 配管減肉現象の評価

Evaluation of pipe wall thinning phenomenon by the high temperature impact fretting testing

岩手大学	佐藤 善紀	Yoshiki SATO	Student-member
岩手大学	岩渕 明	Akira IWABUCHI	Member
岩手大学	内館 道正	Michimasa UCHIDATE	
岩手大学	八代 仁	Hitoshi YASHIRO	

In this paper, to study the wear properties of the pipe materials for the nuclear power stations, a high temperature impact fretting testing was carried out. Employing two piezo actuators, impact fretting test rig can generate impact fretting under various impact loads, fretting amplitudes and frequencies. It also enables us to control water temperature, dissolved oxygen and water pressure. AISI type 304 stainless steel, which is used as a pipe material in nuclear power stations, was used as specimens. Alumina balls were used as the counter materials. We studied the effects of impact frequency and temperature on wear of the steel disks. Results of experiments have shown that wear was strongly affected by the chemical factors. Especially, water temperature and frequency were significant in the analysis of the wear depth. The wear depth increases with decreasing impact frequency under same number of cycles. And the growth of oxide conforms to parabolic oxidation law. Therefore, we suggest a need for considering the effect of chemical factors for the prediction of the pipe wall thinning phenomenon by liquid droplet impingement.

Keywords: Pipe wall thinning, Liquid droplet impingement, Corrosion, Wear, Stainless steel, Nuclear reactor

1. 緒言

現在、国内では原子力発電所における装置の安全性、信頼性に対する関心が高まっている。また、世界的にエネルギー需要は増加していることから、原子力発電所の適切な維持管理と同時に、稼働時に起こる事故などの対策について検討することは工学的に重要な課題である。発電プラントの二冷却系配管等では、高速液滴の衝突によるエロージョン（LDI, Liquid Droplet Impingement erosion）が原因となる減肉現象が生じている。これまでこのLDIについて、数値シミュレーションによる解析や、ウォータージェットを用いた実験等が行われてきた[1]。しかし、ウォータージェット試験等では一定の箇所に $10^5 \sim 10^7 \text{ Hz} \cdot \text{mm}^2$ と非常に高い衝突頻度で液滴が衝突しており、液滴衝突による酸化皮膜の破壊、露出した新生面の酸化の繰り返しによる減肉といった化学的な減肉プロセスについて検討することが難しかった。配管内に液膜が生じている場合や、衝突頻度が低く減肉がマイルドに進行していく場合、酸化や腐食の影響は無視できないと考

えられ、配管減肉予測の高精度化を目指すうえで、それらの影響について検討する必要がある。よって本研究では配管材料に対し、高温純水中でインパクトフレッティング試験を行い、酸化皮膜の破壊と新生面の再酸化による減肉プロセスについて検討を行った（Fig. 1）。インパクトフレッティング試験では、二軸方向の微小振動（振幅 $100\mu\text{m}$ 以下）を制御し、試験片を相対的にFig. 1の右上の図のように動作させている。試験片には動的な荷重を加えることが可能であり、さらに試験片同士は摩擦した後一度離れるために、露出した新生面は確実に酸化されると考えられる。

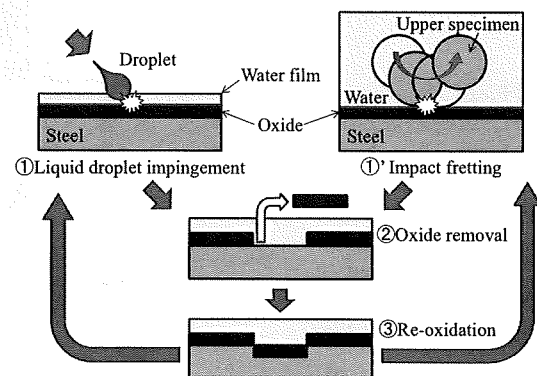


Fig. 1 Schematic diagram of the thinning process of the oxide removal and reformation

連絡先: 佐藤善紀、〒020-8551 岩手県盛岡市上田
4-3-5、岩手大学工学部
E-mail: t5711003@iwate-u.ac.jp

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究で開発した装置の概略図を Fig. 2 に示す。純水 (<math><1.5\mu\text{S}/\text{cm}</math>) が充填されたオートクレーブ容器 (⑤) 内において、各摺動軸 (X 方向、Z 方向) を振動させ、Z 方向軸端に取り付けられた上部試験片 (⑥) と X 軸上部に取り付けられた下部試験片 (⑦) にインパクトフレットングを発生させる。各軸の駆動にはピエゾアクチュエータ (①と④、最大振幅約 130 μm 、予荷重 800N、最大荷重 2kN) を用い、Z 方向の振動を X 方向の 2 倍の振動数となるように調和させている。よって、上部試験片は下部試験片が 1 往復する間に 2 回衝突する。X 方向の接線力と Z 方向の荷重は、軸に取り付けられたひずみゲージを貼ったロードセル (②、③) により測定する。さらに、渦電流式変位計 (⑨) より X 方向の軸端の変動距離を測定し、ピエゾアクチュエータの変位は内蔵されたひずみゲージにより測定する。オートクレーブは SUS316L 製の円筒型で、最高使用温度 130 $^{\circ}\text{C}$ 、最高使用圧力 2MPa、容量は約 2L である。インパクト荷重 1.5~7N、各方向振動数 0~30Hz、振幅 0~70 μm であり、この装置はインパクトフレットングだけでなく、インパクトのみ、フレットングのみの実験も可能である。

2.2 試験片

本研究で使用する上部試験片は、様々な環境において安定で耐摩耗性に優れるアルミナボール (直径 6.4mm, HV:1800, Al_2O_3 :99.5%) を用いた。下部試験片には配管材料である SUS304 のディスク (直径 11.5mm, 厚さ 2.7mm, HV:300) を用い、その表面はバフ研磨により鏡面仕上げとした。

2.3 実験条件

本研究では酸化皮膜の剥離と成長の繰り返しによる配管減肉の進行をモデルとしている。表面の酸化などの化学的な要因について検討するため、水温、溶存酸素、衝突頻度等について、Table 1 のような条件で実験を行い、原子炉配管環境における SUS304 鋼の減肉特性を検討する。

3. 実験結果

3.1 衝突頻度と水温の影響

下部試験片および上部試験片に生じた摩耗痕を、走査型電子顕微鏡 (SEM)、電子プローブマイクロアナライザ (EPMA)、触針式 3 次元粗さ計などを用いて観察、分析、測定した。原子炉配管における減肉では摩耗深さが重要となるため、これを用いて検討する。

実験により得られた最大摩耗深さと衝突頻度についてまとめたプロットを Fig. 3 に示す。これを見ると、衝突頻度が高くなるほど最大摩耗深さは減少する傾向が見られ、摩耗特性は衝突頻度に依存しているのがわかる。これは、衝突頻度が小さいほど酸化皮膜の生成時間が長くなり、

Table 1 Experimental conditions for the detailed examination of the chemical affects

Water pressure, MPa	0.5
Impact load, N	3
Water temperature, $^{\circ}\text{C}$	30, 80, 130
Amplitude (in X direction), μm	50
Impact frequency (in Z direction), Hz	1, 2, 4, 10, (14), 20
Dissolved oxygen, ppm	0.01
Number of cycles	50,000
Number of experiments	2

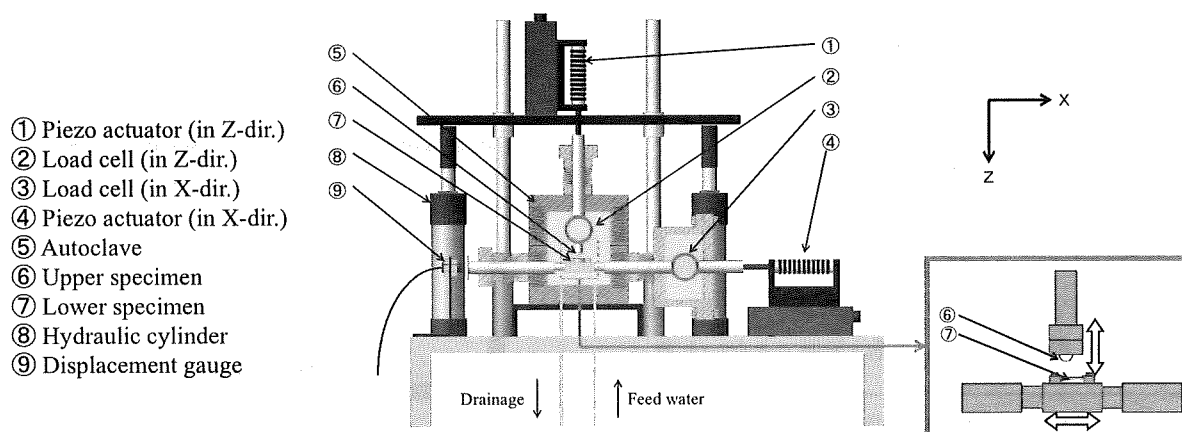


Fig. 2 Schematic diagram of the impact fretting test rig

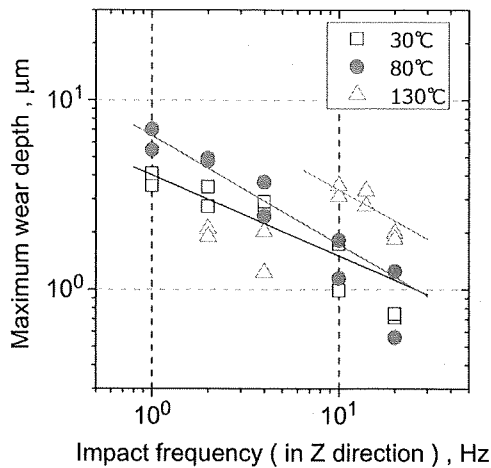


Fig. 3 Relationship between impact frequency and maximum wear depth of the steel disks after 50,000 cycles (DO: 0.01ppm)

形成される酸化皮膜は厚くなる。そこにフレッティングの機械的作用であるすくい (scrape) 作用が働き、1 サイクルあたりに剥離される酸化皮膜の厚さは増大する。これが繰り返されることから、衝突頻度の差が摩耗深さに影響したと考えられる。10~20Hz では 130°C 水中での摩耗深さが最大をとっており、化学反応速度の増大からこのような結果につながったと考えられる。しかし 4Hz 以下においては水温 30、80°C では摩耗深さは振動数の減少とともに増加したが、水温 130°C では、摩耗深さは増加しない傾向が見られた。これは 130°C の高温水中において酸化速度が増加したことや、振動数が低下することにより十分な酸化時間が得られ、酸化皮膜の性状が変化し、表面から除去されにくい状態になったと推測される。次に、摩耗痕のトレース及び SEM 像の例を Fig. 4 に示す。30°C における摩耗痕では摩耗痕表面が滑らかであり、堆積した酸化物等も観察されなかった。しかし 80°C の場合、摩耗痕上には剥がれかけたような皮膜が観察され、これらは EPMA により Cr の酸化物であることがわかった。そして 130°C では摩耗痕上に黒色に写る皮膜が密着しているのがわかる。これも EPMA により、Cr の酸化物であることがわかった。よって水温が 130°C では、酸化皮膜が摩耗痕上に密着し剥離されにくく、摩耗を低減したと推測される。純水中で生じる酸化反応として、以下のようものが考えられる。まず新生面が露出した際、新生面表面では以下のような金属イオンが生成される。

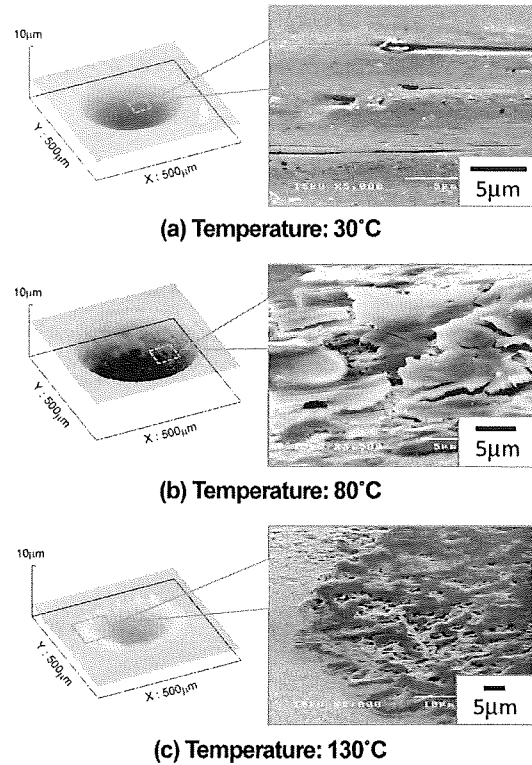
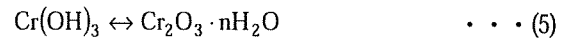
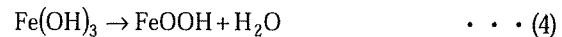


Fig. 4 Wear scar profiles and SEM images of worn steel surfaces (Impact frequency: 2Hz)

それと同時に放出された電子によりカソード反応が生じ、水酸イオンが生成される。



この水酸イオンと金属イオンが反応することで水酸化物が生成され、摩耗痕上や周囲に以下の酸化物が沈殿する。



このとき、電気化学列より Cr が優先的に酸化されるため、最表面に密着し、摩耗痕表面の Cr 濃度の上昇につながったと考えられる。酸化水和物の n は水温によって変化し、一般に高温になれば縮合が生じ、n の値は小さくなる。n の値が小さくなれば、酸化皮膜の密度は増加し、密着性が高まると考えられる。

3.2 化学的影響を考慮した減肉速度式の検討

前節の実験結果から、減肉速度について検討する。最大摩耗深さを減肉深さ m とし、減肉深さ m が機械的減肉深さ m_m と化学的減肉深さ m_c によるものとすれば、

$$m = m_m + m_c \quad \dots (6)$$

と表すことができる。機械的減肉深さ m_m は、衝突頻度を f 、時間を t 、衝突一回あたりの減肉深さを a とすれば、

$$m_m = aft \quad \dots (7)$$

で表され、減肉深さは衝突回数に依存する。次に化学的減肉深さ m_c は、化学反応速度定数を k とすれば、

$$m_c = kf^{1-\alpha}t \quad \dots (8)$$

と表すことができる。ここで、金属の酸化則[2]は化学反応速度定数を k 、酸化膜厚さを d 、頻度因子を A 、活性化エネルギーを E 、気体定数を R 、絶対温度を T とすると、

$$d^n = k \times \tau = A \times \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \times f^{-1} \quad \dots (9)$$

と表される。 k は化学反応の温度依存性を示すアレニウスの式で表される[2]。式(8)の指数 α は式(9)の指数 n の逆数に対応し、 α の値は金属の酸化則に左右される。例として保護性を有する酸化皮膜が生じる場合、酸化は放物線則に従い一般に $\alpha=0.50$ となるが、皮膜の密度や外部からの損傷の有無に左右される[3]。これらにより、配管減肉深さ m は以下の式で表される。

$$m = aft + A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) f^{1-\alpha} t \quad \dots (10)$$

ここで、実験結果と金属の酸化則の関係について検討するため、Fig. 3の実験結果から近似曲線をプロットし、 α を求める。本実験では機械的減肉と化学的減肉が同時に生じているため、ここでは機械的減肉深さがとり得る範囲から検討する。まず、サイクル数が一定であるため、本研究における機械的減肉深さ m_m は一定となる。そして式(6)のように減肉が生じているとすれば、本実験においては " $0 < m_m < \text{実験結果の最小値}$ " となる。ここで、実験結果の最小値は 30°C、20Hz における摩耗深さの平均値 (0.73 μm) とした。そして、30~130°C の実験結果に対し、機械的減肉量が 0 μm の場合と 0.73 μm の場合で近似曲線をプロットし、 α の値を求めたところ、 α の範囲は $0.42 < \alpha < 0.72$ となった。これは 0.50 を含む $0 < \alpha < 1$ の範囲内であり、インパクトフレティング試験における減肉は、放物線則に従った酸化と酸化皮膜の機械的剥離の繰り返しにより進行したことを示唆している。次に、実験結果から式(10)に従った減肉率のプロットを Fig. 5 に示す。

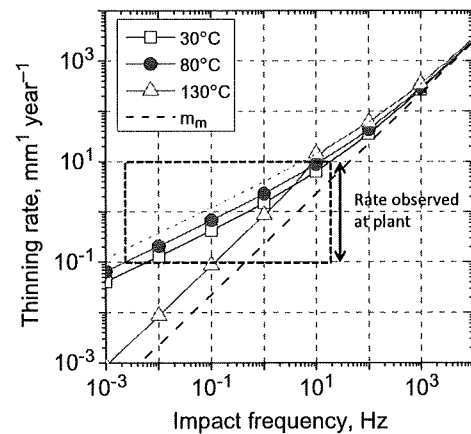


Fig. 5 Thinning rate curves of stainless steel obtained by impact fretting testing

これによれば、衝突頻度の減少に伴い減肉率は減少するものの、化学的影響を考慮しない場合 (m_m の直線) に比べ、減少しにくいことがわかる。さらに、実機において生じうる減肉速度 (0.1~10mm/年) において m_m の直線と各曲線で差が見られ、化学的作用が影響していることがわかる。よって、酸化や腐食を考慮した減肉予測が必要であると推測される。

4. 結言

原子炉配管材料の配管減肉特性における化学的作用を検討するため、高温純水中においてインパクトフレティング試験を行った。その結果、SUS304 ディスクの摩耗は水温及び衝突頻度に依存しており、金属の酸化則に関係づけられることがわかった。配管減肉特性を検討するうえで、化学的作用を考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] T. Ikohagi et al., "Advanced Wall Thinning Prediction of Liquid Droplet Impingement Erosion", *International Symposium on the Aging Management & Maintenance of Nuclear Power Plants*, 2010, pp.47-57.
- [2] H.H. ユーリック, "腐食反応とその制御(第2版)", 産業図書株式会社, 1976, pp.172-176.
- [3] 世利修美, "金属材料の腐食と防食の基礎", 成山堂書店, 2006, pp.15-20.

謝辞

本研究は、経済産業省原子力安全・保安院「高経年化対策強化基盤整備事業」の一環で行われた。

(平成 24 年 6 月 18 日)