

## リーン二相ステンレス鋼のインパクトフレッティング摩耗に及ぼす温度の影響

Effect of temperature on impact fretting wear of lean duplex stainless steels

佐賀大・理工（正）\*佐藤 善紀 佐賀大・理工（正）張 波

Yoshiki Sato\* and Bo Zhang\*

\*Saga University

### 1. 緒言

近年の Ni および Mo 値格の高騰に伴い、汎用二相ステンレス鋼や高合金ステンレス鋼に代わる選択肢として、左記の含有量が大幅に低減されたリーン二相ステンレス鋼が開発された。これらはオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 や SUS316L と同等の機械的特性および耐食性を有するとされ、油田掘削設備や海洋構造物での利用が検討されている。

しかし上述のような腐食環境下において摩擦摩耗が生じるような機械要素では激しい摩耗を引き起こすことがある。これはシビアな環境下で用いられる材料の適切な寿命評価を下すうえで重要な現象であり、腐食環境での摩耗特性を調べることは喫緊の課題である。本研究では、インパクトフレッティング試験装置に電気化学的手法を用い、リーン二相ステンレス鋼 SUS323L、SUS821L1 および比較材として SUS316L の摩耗に及ぼす温度の影響について調査する。

### 2. 実験方法

インパクトフレッティング試験装置の概略図を Fig. 1 に示す。上部試験片を垂直 (Z 方向)、下部試験片を水平 (X 方向) に正弦波で振動させ、インパクトフレッティングを発生させる。Z 方向の振動を X 方向の 2 倍の振動数に設定し、下部試験片が 1 往復する間に上部試験片を 2 回衝突させる。

下部試験片は腐食溶液で満たされた容器に設置され、下部試験片を作用極としてポテンショスタットに接続される。参照電極には飽和カロメル電極 (Saturated Calomel Electrode, SCE)，対極には 30mm×30mm×t0.2mm の白金板を用いた。上部試験片に φ 6.4mm の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ボール (Ra:0.1μm, HV1800)，下部試験片にはバフ研磨で仕上げた φ 10mm×3mm のステンレス鋼のディスク (Ra:0.01–0.02μm) とした。腐食溶液に 0.1mol/L Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液を用い、試験の前処理として 10 分間のカソード処理の後、所定の電位に設定後 2 時間程度待機させ、表面の電流を安定させてから試験を行った。試験条件を Table 1、用いた材料の化学組成および硬さを Table 2 に示す。本稿の電位は各材料が不動態域にあり、かつカソード処理後、解放電位にて数時間経過し十分に安定した状態の電位付近である 0mV<sub>SCE</sub> とした。また、試験後の摩耗痕は共焦点型レーザー顕微鏡により観察及び測定された。摩耗の評価については、左記顕微鏡の形状測定から得られた基準面より下部の体積 V<sub>g</sub>、および試験中に測定された電流 i について以下のファラデー則に従い算出した体積 V<sub>f</sub> とした。ここで K は電気化学当量、t は時間、ρ は密度である。

$$V_f = \frac{K \int idt}{\rho} \quad \cdots(1)$$

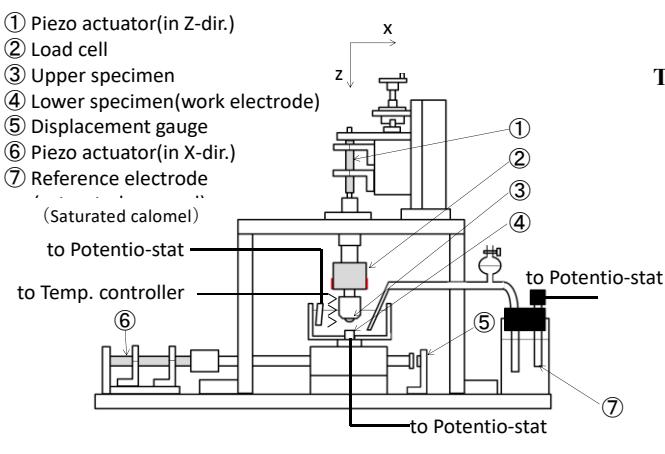


Table 1 Experimental conditions for impact fretting wear test

Impact load, N	3
Amplitude in X direction, μm	25
Frequency in X direction, Hz	40
Frequency in Z direction, Hz	80
Test time, s	5,000
Number of cycles	200,000
Water temperature, °C	30, 50, 70, 90
Solution	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> aq. 0.1mol/L
Potential, mV (vs. SCE)	0
Electric conductivity, μS/cm (at 25 °C)	15000~16000
pH	7.0 (NH <sub>3</sub> aq. added)

Fig. 1 Schematic diagram of impact-fretting test rig

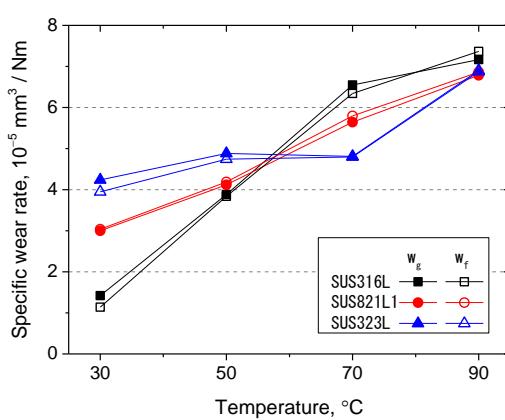
Table 2 Chemical composition and hardness of each steel (Mass %)

Material	C	Mn	P	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Fe	HV
SUS316L	0.03	1.57	0.04	0.69	12.5	17.0	2.54	–	–	Bal.	181
SUS821L1	0.03	2.85	0.04	0.39	2.20	21.1	0.67	1.28	0.17	Bal.	248
SUS323L	0.03	0.61	0.03	0.29	3.50	23.7	0.73	0.37	0.12	Bal.	343

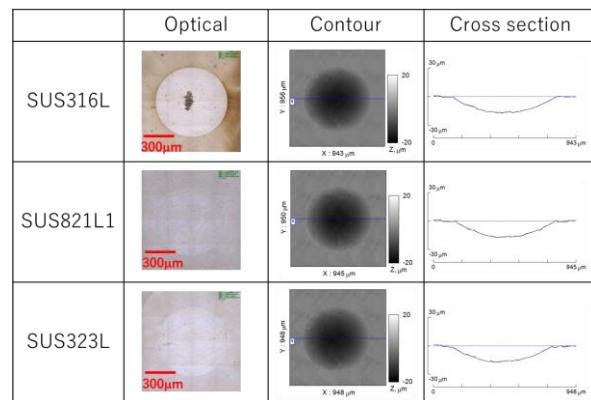
### 3. 実験結果及び考察

**Figure 2** に各材料の比摩耗量  $w_g$  および  $w_f$ , **Fig. 3** に各材料の電流  $i$  の推移を示す。 **Figure 2** の塗りつぶしのプロット  $w_g$  は  $V_g$ , 白抜きの  $w_f$  は  $V_f$  を基に算出しており、これら  $w_g$ ,  $w_f$  はほぼ一致した。ここで、 $w_f$  は損傷面の腐食の発生に起因するアノード電流 (**Fig. 3**) を基に算出されたものである。よって金属新生面の露出とその腐食の繰り返し、すなわち腐食生成物の除去による摩耗が支配的であると考えられる。これは過去の研究<sup>(1)</sup>と同様の傾向である。またリーン二相鋼は温度とともに比摩耗量が増加した。比較材 SUS316L についても温度とともに急激な増加が確認され、摩耗に及ぼす温度の影響が特に大きいことがわかる。また **Fig. 3** よりいずれの材料も試験開始 (0s) から電流が立ち上がり、その後 10~20 μA 前後で推移したのち、終了と同時に 0 付近まで急速に低下した。この推移する電流の大きさは比摩耗量と同様に温度とともに増大する傾向にある。また摩耗痕表面は **Fig. 4** のようになめらかな性状を示し、EDS 分析では有意な変化は確認されていない。

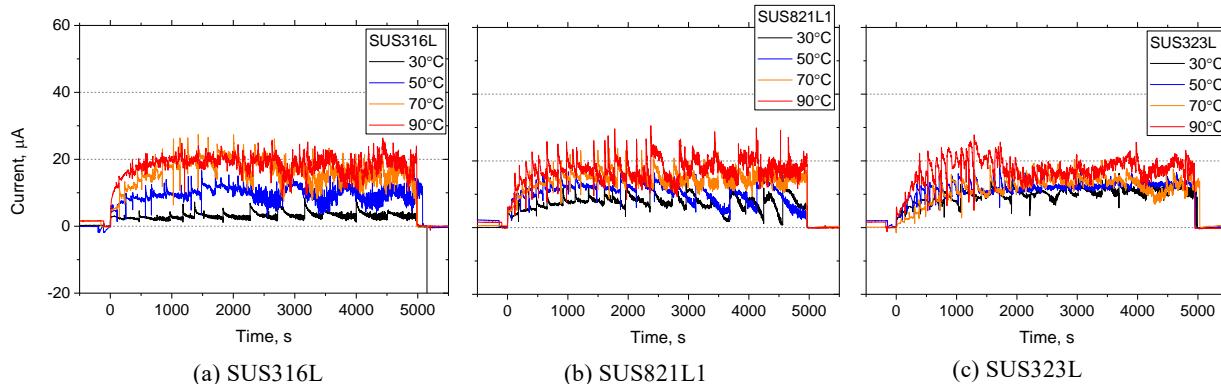
インパクトフレッティング試験では、試験片同士が接触と非接触の状態を交互に繰り返す。特に非接触状態では材料の損傷面が溶液に確実に接触するため、その腐食が促進される<sup>(1)</sup>。この非接触状態は本稿の条件では各サイクルで 6ms 前後と非常に短く、摩耗面は初期酸化の状態が繰り返し維持された状態であったと考えられる。また  $w_g$  および  $w_f$  がほぼ一致したことから、摩耗は不動態挙動に大きく依存することは明らかである。この不動態に影響すると知られる Cr の濃度が比較的高いリーン二相鋼は、SUS316L よりも不動態への移行が早く、温度に対する腐食量つまり摩耗の増加が比較的緩やかであったと考えられる。



**Fig. 2** Effect of temperature on specific wear rate of each steel under impact fretting



**Fig. 4** Worn surface of each steel after test at temperature 90°C in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution



**Fig. 3** Current behavior of each steel under impact fretting at potential 0mV SCE in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution

### 4. 結言

本研究では Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中のリーン二相系ステンレス鋼 SUS323L および SUS821L1 のインパクトフレッティング摩耗に及ぼす温度の影響について、電気化学的手法を用いて調査した。その結果、リーン二相系ステンレス鋼は 30~90°C で比摩耗量が温度とともに増加した。また比較材 SUS316L は上記材料と比較して急激な増加が確認された。

### 文献

- (1) 佐藤・張, 機械学会論文集, 88, 906 (2022).

### 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 23K03646 の助成を受けたものです。