

腐食環境下におけるリーン二相ステンレス鋼の  
インパクトフレットング摩耗に関する研究

Study on impact fretting wear of lean duplex stainless steel under corrosive environment

佐賀大・理工（正）\*佐藤 善紀    佐賀大・理工（院）淵上 隆道  
Yoshiki Sato\*, Ryudo Fuchikami\*  
\*Saga University

1. 緒言

近年の Ni および Mo 価格の高騰に伴い、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、インパクトフレット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および衝撃荷重の影響について調査する。

2. 実験方法

インパクトフレット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、インパクトフレットングを発生させる。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。

$$V_f = \frac{K \int i dt}{\rho}$$

…(1)

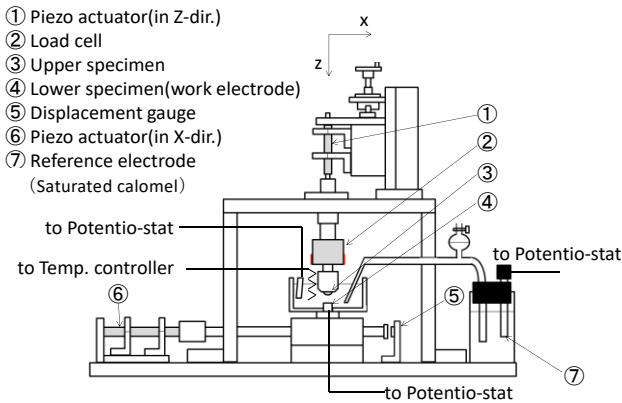


Table 1 Experimental conditions for impact fretting wear test

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

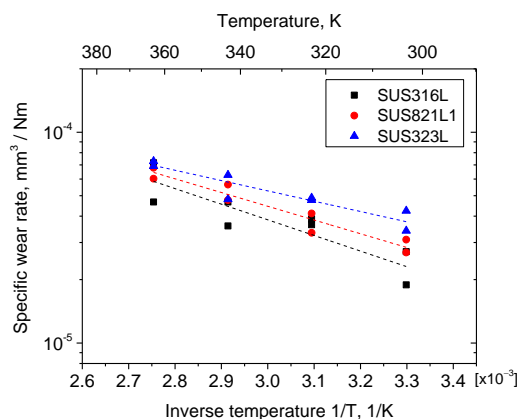
Table 2 Chemical composition and hardness of each steel (Mass %)

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

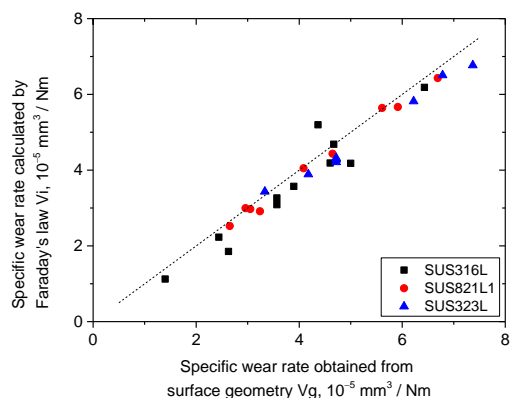
### 3. 実験結果及び考察

比摩耗量のアレニウスプロットを **Fig. 2** に示す. どの材料においても温度とともに比摩耗量は増大傾向にあり, 活性化エネルギーは 9~16kJ/mol を示した. また **Fig. 3** より, (1) 式の  $V_f$  から得られた比摩耗量と形状測定により得られた  $V_g$  による比摩耗量との間には強い相関が確認できる. これはインパクトフレッティングによって不動態膜が破壊され, アノード電流の発生を伴う腐食作用が本研究のインパクトフレッティング摩耗において支配的であることを示唆しており, 過去の研究<sup>(1)</sup>と傾向は一致する.

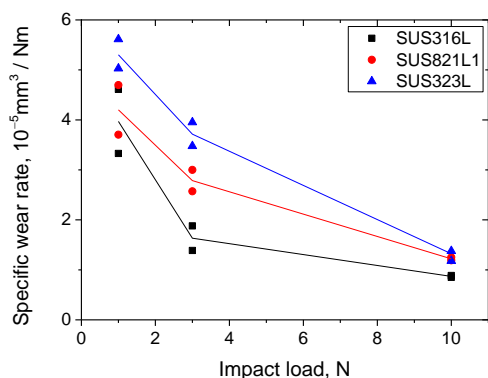
次にインパクトフレッティング摩耗における荷重の影響について調査した結果を **Fig. 4** に示す. 荷重の増加とともにいずれの材料においても比摩耗量は減少する傾向にあり, 10N で全ての材料で比摩耗量が  $1.0 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  程度を示した. このことから, 比較的荷重が小さい 1N においても摩耗面における不動態膜の破壊の影響が顕著であると考えられる. **Fig. 5** は試験中に発生した平均アノード電流を摩耗痕の投影面積により除して得られた電流密度であり, これは接触領域における腐食生成物の除去効率に大きく左右されると考えられる. ここで SUS323L, SUS821L1 は 1N では SUS316L と同等の値を示し, 3N から 10N にかけては SUS316L よりも 20~40%程度高い値を示した. **Fig. 4** からリーニ二相ステンレス鋼の 2 つは比較的高い値で推移しており, 摩耗面において SUS316L よりも激しい腐食が生じていることが考えられる.



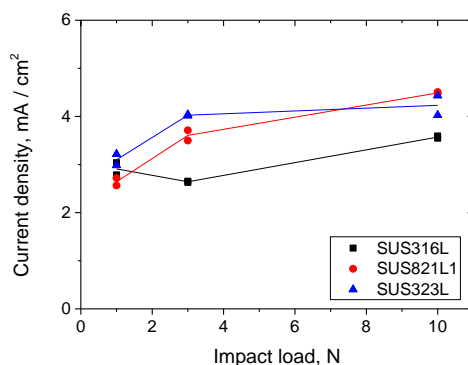
**Fig. 2** Effect of temperature on specific wear rate of each steel under impact fretting at potential 0mV<sub>SCE</sub> in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution



**Fig. 3** Relationship between wear volume calculated by Faraday's law  $V_f$  and obtained from surface geometry  $V_g$



**Fig. 4** Effect of impact load on specific wear rate of each steel under impact fretting at temperature 30°C in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution



**Fig. 5** Effect of impact load on current density of each steel under impact fretting at temperature 30°C in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution

### 4. 結言

本研究では腐食環境におけるリーニ二相ステンレス鋼 SUS323L, SUS821L1 及びオーステナイト鋼 SUS316L のインパクトフレッティング摩耗に及ぼす電気化学的影響について調査, 検討した. その結果, 本研究のインパクトフレッティング摩耗はどの材料でも電気化学的影響による摩耗が支配的であった. また 3N 以上の荷重において, リーニ二相ステンレス鋼の 2 つは SUS316L と比較して高い値を示した.

### 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.