

水素環境下におけるステンレス鋼および低合金鋼に対する
超高分子量ポリエチレンの摩擦摩耗挙動

Friction and Wear Behavior of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Against Stainless Steel
and Low-Alloy Steels in Gaseous Hydrogen

KHI（正）*岡田 竜太郎 KHI（非）奥村 健太郎

九大・工（正）澤江 義則 九大・工（正）森田 健敬 九大・工（正）新盛 弘法

Ryutaro Okada*, Kentaro Okumura*, Yoshinori Sawae**, Takehiro Morita**, Hironori Shinmori**

*Kawasaki Heavy Industries, Ltd., **Kyushu University

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けた動きが活発化しており、幅広い分野で水素関連製品の開発が加速している。水素ステーション向け水素圧縮機では、高圧水素ガスを封止するしゅう動シールが摩耗や変形による損傷を受け早期にシール機能を喪失するため、長寿命化が課題となっている。長寿命化には耐摩耗性の向上が有効だが、水素環境下におけるトライボロジー現象には不明な点が多く、データ拡充や現象理解が求められる。また、水素関連機器に使用される鋼材は水素適合性を有する材料に限られるために、トライボロジー研究においてもオーステナイト系ステンレス鋼を樹脂のしゅう動相手材とした報告が多くを占めている。水素利活用の普及拡大に向けては、経済性・汎用性の高い金属材料を選択して機器コストを低減しながら、水素環境で使用するしゅう動部材の信頼性向上に資する摩耗メカニズムを探求し、科学的知見に基づいた合理的な材料選択指針の構築が求められる。

本研究では、シール材料として一般的に用いられる超高分子量ポリエチレン(Ultra-High Molecular Weight Polyethylene: UHMWPE)に注目し、水素および窒素環境下におけるしゅう動試験を通して、試験雰囲気や金属材料成分(SUS316L, SCM435, SNCM439)が摩擦摩耗挙動に及ぼす影響を調査し、金属表面への転移膜形成に対する水素の効果を評価した。

2. 試験方法

実験にはフッ素系樹脂を添加した UHMWPE を用いて、直径 6 mm、長さ 15 mm のピン試験片を作製し、外径 56 mm、厚さ 3 mm のディスク試験片を相手面とした。ディスク試験片の材料は SUS316L, SCM435, SNCM439 を使用した。しゅう動試験機はピン・オン・ディスク型トライボ試験機を環境制御用チャンバ内に設置した高度雰囲気制御摩擦試験機¹⁾を使用した。水素中の試験は残存水分量を 5ppm 以下とした高純度水素雰囲気で行っており、Fe や Ni の酸化物は還元される環境である。しゅう動試験条件および試験片の比摩耗量を Table 1、使用したディスク試験片の成分を Table 2 に示す。Table 1 で比摩耗量が負の値になっている箇所は重量が増加したことを示す。

Table 1 Experimental condition and specific wear rate

Disk	Atmosphere	Temperature	Gas pressure	Contact pressure	Sliding speed	Sliding distance	Specific wear rate	
							Pin	Disk
-	-	°C	MPa	MPa	m/s	m	$\times 10^{-8}$ mm ³ /Nm	$\times 10^{-8}$ mm ³ /Nm
SUS316L	N ₂	80	0.1	1.8	0.5	18000	67.4	-0.42
	H ₂						62.3	-1.26
SCM435	N ₂						33.3	-0.33
	H ₂						60.8	2.14
SNCM439	N ₂					27000	8.5	0.94
	H ₂						16.5	1.67

Table 2 Chemical composition of disk specimen

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SUS316L	0.019	0.49	1.38	0.036	0.024		12.08	17.13	2.02
SCM435	0.35	0.25	0.81	0.011	0.016		0.03	1.13	0.16
SNCM439	0.40	0.26	0.74	0.015	0.015	0.01	1.64	0.73	0.16

3. 結果および考察

3.1 摩擦摩耗試験結果

Figure 1 に各金属材料を相手材とした UHMWPE のしゅう動試験における摩擦係数の経時変化を示す。いずれの金属材料においても最終的には水素中の方が窒素中に比べて摩擦係数は小さい結果となり、摩擦係数が逆転するまでのし

しゅう動距離は SUS316L が最も長く、次いで SCM435, SNCM439 の順に短かった。SUS316L を使用した試験では、窒素中よりも水素中の方がピン試験片の比摩耗量が小さく、ディスク試験片は水素中の方が移着物の増加により重量増大する傾向であった。一方で低合金鋼の SCM435 および SNCM439 では、水素中の方がピン試験片およびディスク試験片ともに比摩耗量が大きい結果となった。また、3 材質の中で SNCM439 が最も摩耗量が小さい結果となった。

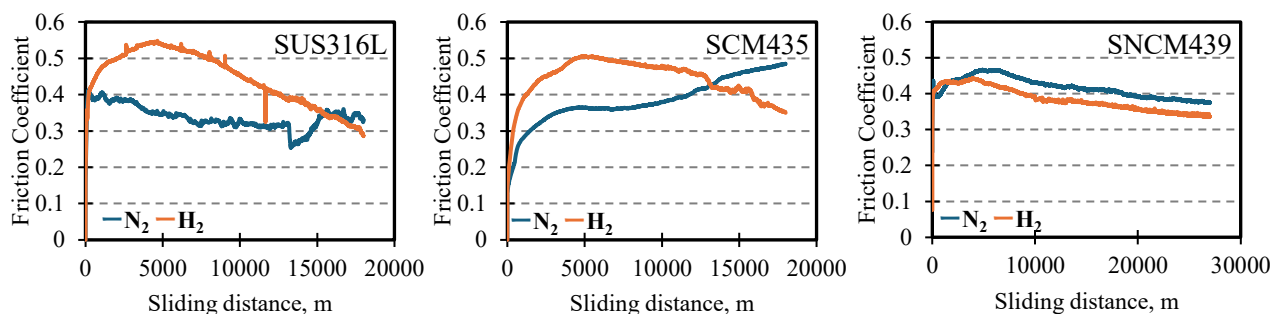


Fig. 1 Friction coefficient

3.2 表面観察・分析

しゅう動試験後のディスク表面に形成された転移膜を定量的に評価するため、セマンティックセグメンテーション用の Deep Learning モデルである U-Net を用いて、撮影した SEM 画像から転移膜の領域を抽出することを試みた。対象領域は 1 mm×6 mm とした。Figure 2 より、SUS316L は窒素中および水素中ともに転移膜を広範囲に形成している。SCM435 は窒素中の転移膜形成は限定的であるものの、水素中では形成が促進された。SNCM439 は窒素中でも転移膜がしゅう動方向に沿って形成しており、SCM435 と同様に水素中で転移膜の形成が促進される様相を示した。得られたしゅう動面における転移膜の面積率に対して、しゅう動試験の最終 1000 m の平均摩擦係数をプロットすると、転移膜の面積率が高いほど摩擦係数が低い傾向が認められた。また、ディスク表面に対してラマン分光分析によるマッピングを実施したところ、窒素中と比較して水素中では転移膜が形成される領域が広く、この転移膜は非晶質カーボンであることが認められた。また、転移膜の前縁や近傍には UHMWPE が認められることから、転移膜の形成過程は、ディスクの加工溝などの表面に付着した UHMWPE 摩耗粉が摩擦によって引き延ばされ分解し、非晶質カーボンの薄膜として金属表面に付着、残存することで形成されたと推察された。

以上の結果より、転移膜の形成挙動は合金成分の影響を受け、特に Ni は転移膜形成を促進することが示唆された。また、還元雰囲気である水素中において非晶質カーボンからなる転移膜の形成が促進されたことから、金属表面の酸化膜還元反応で生じた金属新生面の触媒作用により UHMWPE の分解が進行したと考えられた。一方で、低合金鋼においては水素中で転移膜形成が促進され摩擦が低下するものの、UHMWPE の比摩耗量は増大したため、水素中で摩擦を増大させる要因の検討が必要である。

4. 結言

UHMWPE の転移膜の形成挙動は試験雰囲気および合金成分の影響を受けて、金属酸化膜の還元反応による活性な金属新生面の露出や合金中の Ni 成分は転移膜形成を促進する効果が示唆された。

文献

- 1) Y.Sawae et al.: Friction and wear of PTFE composites with different filler in high purity hydrogen gas, Tribology International, 157(2021), 106884.

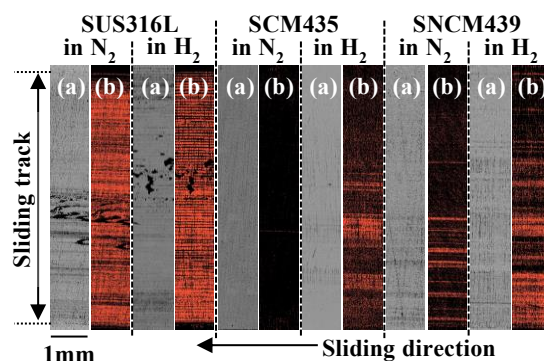


Fig. 2 (a)SEM image, (b) Transfer film image

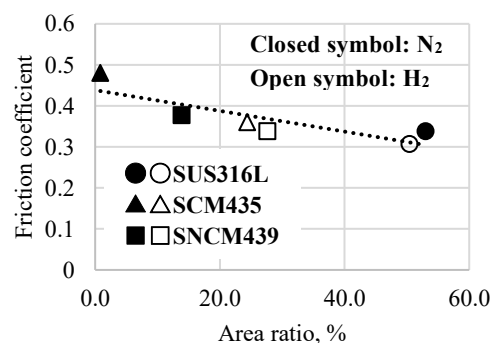


Fig. 3 Correlation between CoF and area fraction of transfer film on the sliding track

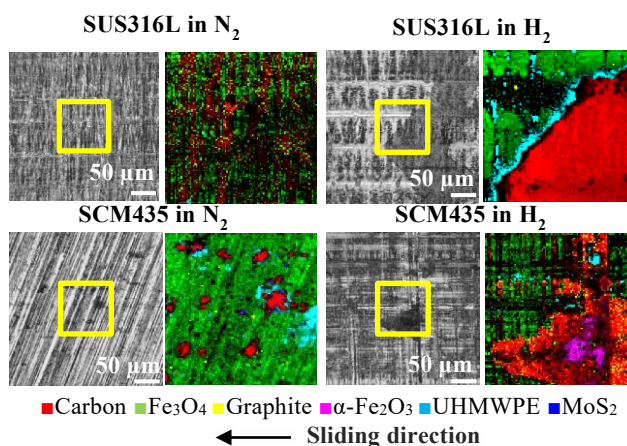


Fig. 4 Raman mapping obtained from sliding track on disk specimen