

## DLC 膜のなじみ・焼付き挙動に及ぼす相手材表面粗さの影響

本田 知己\*

### Influence of surface roughness of counterpart material on running-in and seizure behavior of DLC film

Tomomi HONDA\*

(Received February 2, 2026)

Numerous studies have explored friction and wear characteristics of diamond-like carbon (DLC) films. While DLC films exhibit excellent properties, they are prone to seizure if the running-in process is not properly understood. However, the mechanism driving the transition from running-in to seizure remains unclear. This study, from the perspective of tribo-design, aimed to identify the key influencing factors and their roles in this process. The results showed that a low skewness (Rsk) and high kurtosis (Rku) of the counterpart material FC230 led to a shorter running-in distance and a lower friction coefficient. Furthermore, the seizure friction force and seizure load were higher under these conditions.

**Key Words** : Running-in, Seizure, Initial surface roughness, Skewness Rsk, Kurtosis Rku

#### 1. 緒言

自動車には、摩擦摩耗の巢と呼ばれるほど多くのしゅう動部が存在し、しゅう動部の摩擦損失低減においてトライボロジー技術が果たす役割は大きい。自動車の燃焼エネルギーの内訳において、摩擦損失割合は純出力に匹敵する割合を有している<sup>[1]</sup>。このことから、摩擦損失の低減は、自動車の燃費改善に大きく貢献すると期待されている。現在、電気自動車や燃料電池自動車が普及し始めているが、世界の自動車の各パワートレインの普及予測では 2050 年においても内燃機関を搭載した自動車が半数以上を占めると予測されている<sup>[2]</sup>。そのため、内燃機関の熱効率の改善や機械摩擦損失の低減による二酸化炭素の排出削減が喫緊の課題である。

機械のしゅう動部では、実働前に軽微な条件のもとで準備的に運転することで、潤滑性能向上により機械を円滑に作動させる予備運転が行われる<sup>[3,4]</sup>。

この予備運転を「なじみ運転」といい、なじみ運転によって機械が円滑に作動する現象を「なじみ」という。なじみには、しゅう動面において塑性変形や摩耗による表面粗さの変化による流体潤滑域の割合の増加で摩擦係数が低下する効果がある<sup>[5]</sup>。また、表面硬度の上昇や塑性指数の低下、酸化膜の形成によって、耐摩耗性、耐焼付き性を向上させる効果がある<sup>[6-9]</sup>。これまでに、なじみに関する研究成果が数多く報告されてきたが、未だに定量的な評価方法の確立には至っていない。これは、なじみが力学的因子(接触圧力、すべり速度等)、環境因子(温度、湿度等)、材料因子(硬さ、表面形状等)が相互に作用する複雑な現象であることによる。一方、自動車のしゅう動部では、更なる燃費改善を目的にエンジンオイルの低粘度化、エンジンの小型化が進められているが、油膜形成保持能力の低下やしゅう動部の面圧増加といった問題から焼付きの危険性が高まっている。これらの問題解決法として表面改質技術が重要な役割を果たしている。表面改質によりしゅう動部に必要とされる低摩擦性、耐摩耗性、耐焼付き性の向上が期待される。近年、様々な表面改質法の中で

\*機械・システム工学科

\* Department of Mechanical and System Engineering

も「表面テクスチャ」とコーティングに用いられる「ダイヤモンドライクカーボン(Diamond-Like Carbon : DLC)膜」が注目されている。

表面設計の観点から、テクスチャリングの効果に関して、八木ら<sup>[10]</sup>はマイクロピット面を用いた摩擦試験において、接触面圧が低い場合の摩擦係数は高く、接触面圧が高い場合の摩擦係数は低いことを示した。岡田ら<sup>[11]</sup>は、フェムト秒レーザ加工によってナノメートルオーダのテクスチャリングを施した試験片を用いて摩擦試験を行ない、フェムト秒レーザ加工におけるナノメートルオーダ溝の試験片では最大負荷容量性能が高く、流体潤滑域の拡大を確認した。宮島ら<sup>[12]</sup>は YAG レーザで表面に微細なディンプルをパターンニング加工した試験片を用いて、摩擦係数とディンプルの間隔・深さとの関係を調査し、ディンプル深さを変化させた場合、深さが浅いほどディンプルに溜まった潤滑油で油膜が形成されやすくなり、摩擦係数が低下したことを示した。一方、塩谷ら<sup>[13]</sup>は、テクスチャを施していない相手面表面粗さに着目し、表面粗さの増加が流体潤滑域での摩擦係数が部分接触によって増加するものの、動圧の発生でテクスチャを施していない場合に比べて摩擦係数が低下したことを示した。

材料の観点から、DLC 膜の効果に関して、森ら<sup>[14]</sup>は DLC-Si 膜を作製し、摩擦試験前後においてしゅう動面の平滑性を損なわないことで混合潤滑領域における流体潤滑の割合を維持し、表面に生成された Si-OH 基を吸着活性点として形成された吸着水が境界膜として機能したことで、DLC-Si 膜が低摩擦となったことを示した。著者ら<sup>[15]</sup>は、DLC 膜のなじみ挙動に及ぼす荷重・荷重速度の影響に注目し、荷重・荷重速度が速くなるとなじみ完了後の相手材ねずみ鉄の表面が粗く、油膜厚さの減少とともに固体接触が生じやすくなり、焼付き荷重が低下したことを示した。

しゅう動部の性能向上には、多種多様な加工方法の中から最適な手法を選択し、しゅう動部に必要な性能を発現できる表面改質技術の開発が重要となる。また、表面改質技術から得られる特性を発揮するには、なじみ技術が重要な役割をもつ。しかし、なじみ運転は混合潤滑下で行われなければならない、運転条件を誤ると焼付きに至る。このようになじみ初期から焼付きに至るまでのメカニズムを解明する必要があるが、それに関する研究が進んでいないの

が現状である。

本研究では、自動車エンジン部品のピストンリングのコーティング材として DLC 膜を、シリンダライナ材として FC230 ねずみ鉄を用いて DLC 膜のなじみ・焼付き挙動に及ぼす相手材 FC230 初期表面粗さの影響の解明を行ない、トライボデザイン（初期表面粗さ、油膜保持形状など）の観点から、DLC 膜のなじみから焼付きに至る過程に及ぼす影響因子を明らかにすることを試みた。

## 2. 実験装置および供試材料

### 2.1 実験装置

DLC 膜と FC230 の摩擦試験に用いた装置の概略を Fig. 1 に示す。摩擦試験は潤滑油中で回転するリング試験片に、プレート試験片を一定の荷重で負荷して摩擦させるリングオンプレート式摩擦摩耗試験機を用いた。潤滑油にはグループ II の無添加パラフィン系基油（動粘度  $14.8 \text{ mm}^2/\text{s}@60 \text{ }^\circ\text{C}$ ）を用いた。油温  $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  に保たれた潤滑油を流量  $300 \text{ ml}/\text{min}$  で循環させることにより、パーティクルカウンタを用いて摩耗粉の粒径と個数をオンライン計測した。

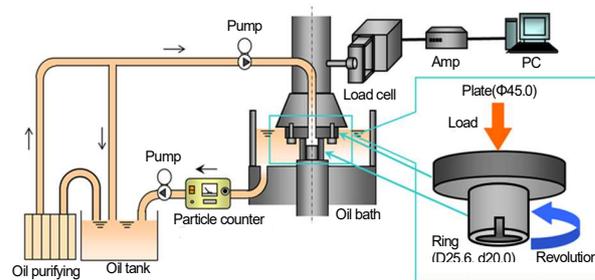


Fig. 1 Schematic of wear test apparatus

### 2.2 時系列試験方法および試験条件

本試験では、一定の荷重・荷重速度で荷重を増加させる方式を用いた。試験条件を Table 1 に、すべり距離に伴う摩擦係数と荷重の変化を Fig. 2 に示す。荷重を  $120 \text{ N}$  に負荷後、リング試験片をすべり速度  $2 \text{ m}/\text{s}$  で回転させ、荷重・荷重速度  $5 \text{ N}/\text{s}$  で  $800 \text{ N}$  まで負荷した。荷重が  $800 \text{ N}$  に達した後、すべり距離  $10000 \text{ m}$  まで一定の荷重で摩擦させた試験をなじみ試験、 $10000 \text{ m}$  以降再び荷重・荷重速度  $5 \text{ N}/\text{s}$  で焼付く直前まで荷重を増加させた試験を焼付き直前試験、焼付くまで荷重を増加させた試験を焼付き試験とした。

Table 1 Test condition

Load [N]	Until 10000 [m]	800
	After 10000 [m]	800 <
Sliding velocity [m/s]		2.0
Sliding distance [m]	Running-in	10000
	Just before seizure	10000 <
	seizure	
Condition		Lubrication
Oil temperature [°C]		60±2
Kinematic viscosity [mm²/s]		14.8
Flow rate [ml/min]		300

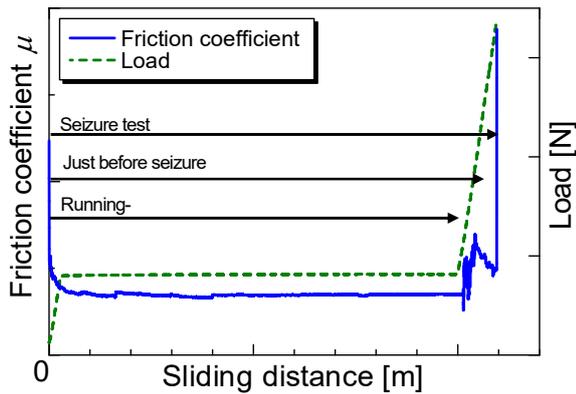


Fig. 2 Outline of time series test

2.3 供試材料

プレート試験片には高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 を基材としてプラズマ CVD 法で成膜した水素含有 DLC 膜を, リング試験片にはねずみ鋳鉄 FC230 を用いた. 試験片の材料特性を Table 2 に示す. 硬さ測定には, ビッカース硬さ計および超微小押し込み硬さ計を用いた. ビッカース硬さは7点のうち, 最大値と最小値を除いた5点の平均値とし, 超微小押し込み硬さ計は17点のうち, 最大値2点と最小値2点を除いた13点の平均値とした.

Table 2 Material properties

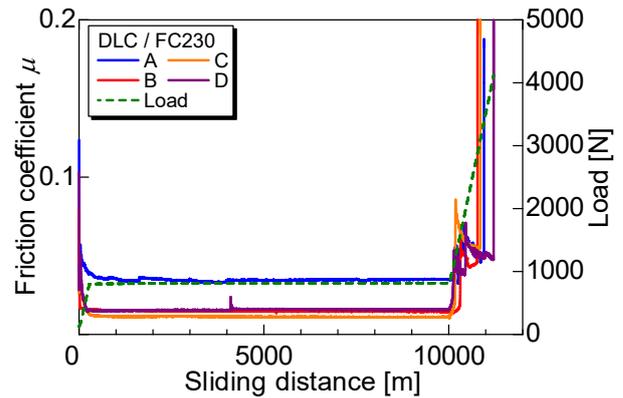
Material	DLC	FC230			
		A	B	C	D
Arithmetic mean roughness $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.015	0.010	0.105	0.215	0.265
Vickers hardness HV	-	246			
Indentation hardness [GPa]	26.0	-			

3. 焼付きまでの時系列摩擦試験

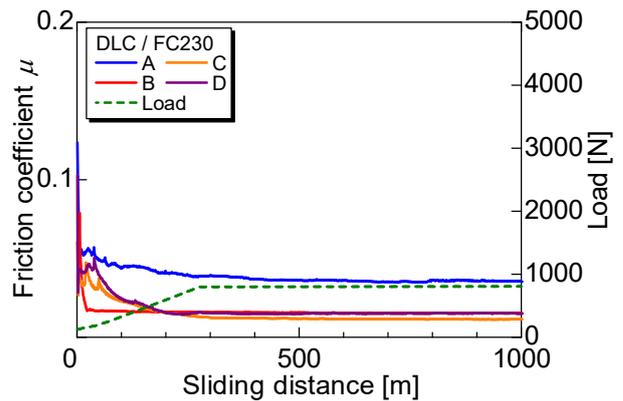
3.1 すべり距離に伴う摩擦係数の変化

焼付きに至るまでのすべり距離に伴う摩擦係数の変化を Fig. 3 に, なじみ・焼付き特性の結果を Table 3 に示す. Fig. 3 より, 相手材 FC230 の初期表面粗

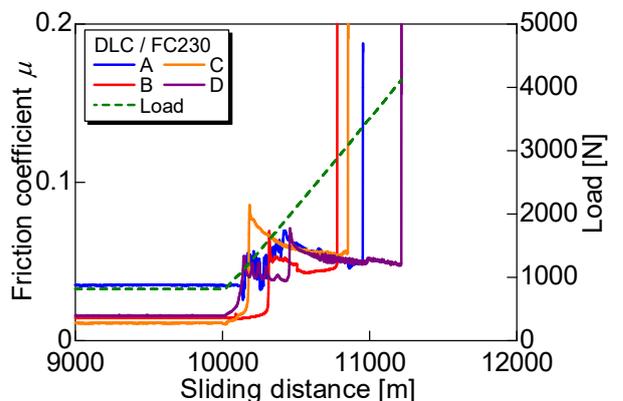
さの大きさに関わらず, なじみ初期の摩擦係数は高く, なじみ終了時まで A-C では摩擦係数が急激に低下した. D ではなじみ初期に摩擦係数が低下し, その後, 一時的に摩擦係数が上昇した. この要因は, なじみ過程においてリングオンプレート式摩擦摩耗試験機のオイルタンクの油面が低下したことで固体接触の割合が増加し, 摩擦係数が上昇したと考えら



(a) Sliding distance (until seizure)



(b) Sliding distance (0 - 1000 (m))



(c) Sliding distance (9000 - 12000 (m))

Fig. 3 Change in friction coefficient as a function of sliding distance

れる。また、なじみ終了後にはすべての組合せで摩擦係数が定常状態となった。すべり距離 10000 m 以降において、B,C では荷重再負荷後に摩擦係数が急激に上昇し、緩やかな低下を経て焼付きに至った。A では荷重再負荷直後に B,C と比べて長期的に摩擦係数が上昇した後、緩やかな低下を経て焼付きに至った。D では摩擦係数の上昇と低下を繰り返し、その後焼付きに至った。なじみ特性については、Table 3 より、なじみ距離および定常摩擦係数では D のときになじみ距離が最も短く、C のときに定常摩擦係数が最も低かった。焼付き特性については、焼付き摩擦力では約 20 N 前後で焼付き、D の条件のときに最も焼付き荷重が高かった。

Table 3 Results of wear test

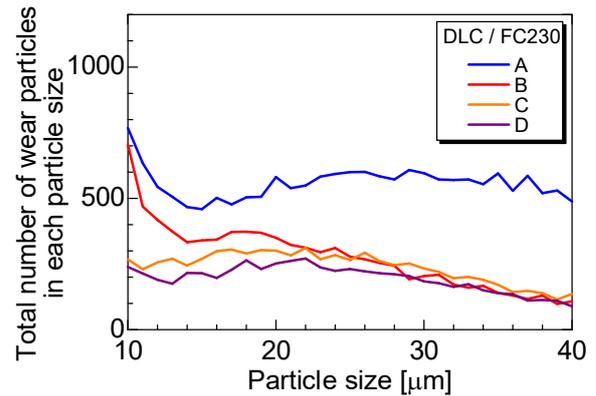
Types of FC230	A	B	C	D
Arithmetic mean roughness $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] (original surface)	0.010	0.105	0.215	0.265
Running-in distance [m]	781	721	695	652
Steady-state friction coefficient $\mu$	0.023	0.016	0.015	0.016
Seizure friction force [N]	20.3	16.6	20.0	23.0
Seizure load [N]	3365	2982	3142	4122

### 3.2 摩耗粉の粒径と個数の変化

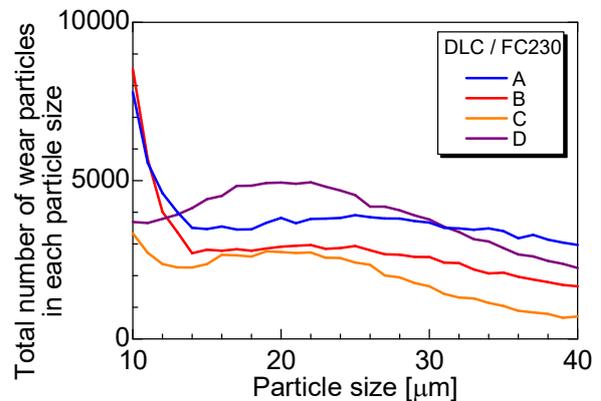
すべり距離(0 - 700 m, 0 - 10000 m, 10000 - 10700 m)に伴う摩耗粉の粒径と個数の関係を Fig. 4 に示す。すべり距離 0 ~ 700 (m) では、FC230 の初期表面粗さが大きくなるほど、摩耗粉の発生量が減少した。これは、FC230 の初期表面粗さが小さくなると、油量の確保と摩耗粉の捕捉ができなかったため摩耗粉が多く発生したことによる。D のように FC230 の初期表面粗さが大きいと、発生した摩耗粉の捕捉割合が増加したため摩耗粉の発生が低下したと考えられる。すべり距離 0 - 10000 m では、A と D で摩耗粉の個数が多く、B と C で摩耗粉の個数が少なかった。これより、初期表面粗さの大きさが、なじみ期間だけでなくなじみ終了後においても摩耗粉の発生に影響を及ぼすことがわかった。すべり距離 10000 - 10700 m では、B のときの摩耗粉の個数が最も多かった。一方、A と D において、すべり距離 0 - 700 m, 0 - 10000 m のときの摩耗粉の個数が多かったにも関わらず、すべり距離 10000 m 以降では B と比べて少なかった。

### 3.3 なじみ終了から焼付く直前における摩耗面の変化

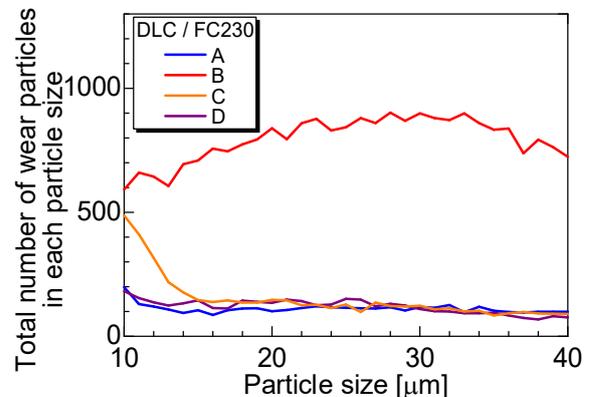
摩擦試験前後（なじみ試験、焼付き直前試験）の



(a) Sliding distance (0 - 700 m)



(b) Sliding distance (0 - 10000 m)



(c) Sliding distance (10000 - 10700 m)

Fig. 4 Relationship between particle size and total number

摩耗面および断面曲線を Fig. 5 に示す。DLC / FC230(A)において、DLC では試験前と比べて、なじみ試験後・焼付き直前試験後の摩耗面の一部に発生した条こんを除き、変化が見られなかった。FC230(A)ではなじみ試験後・焼付き直前試験後の摩耗面全体に条こんが見られた。DLC/FC230(B)において、DLC では焼付き直前試験後の摩耗面全体に条こんが見ら

れた。FC230(B)ではなじみ試験後・焼付き直前試験後の摩耗面全体に条こんが見られた。DLC/FC230(C)において、DLCではDLC/FC230(B)と同様に焼付き直前試験後の摩耗面全体に条こんが見られた。FC230(C)ではなじみ試験後・焼付き直前試験後の摩耗面に条こんが見られた。DLC/FC230(D)において、DLCではDLC/FC230(B), (C)と同様に焼付き直前試験後の摩耗面全体に条こんが見られた。FC230(D)ではなじみ試験後・焼付き直前試験後の摩耗面全体に条こんが見られた。これらのことから、

DLC/FC230(A)ではFC230(A)の摩耗面に凹部が形成されることでなじみが終了し、DLC/FC230(B, C, D)ではFC230(B, C, D)の凸部が平坦となることでなじみが終了することがわかった。

### 3.4 表面性状パラメータによる整理

種々の表面性状パラメータの中から、ゆがみ度  $R_{sk}$  およびとがり度  $R_{ku}$  を用いて表面形状を表すことを試みた。凹部の割合を示す  $R_{sk}$  と平面の割合を示す  $R_{ku}$  を組み合わせ、FC230の摩擦試験前および

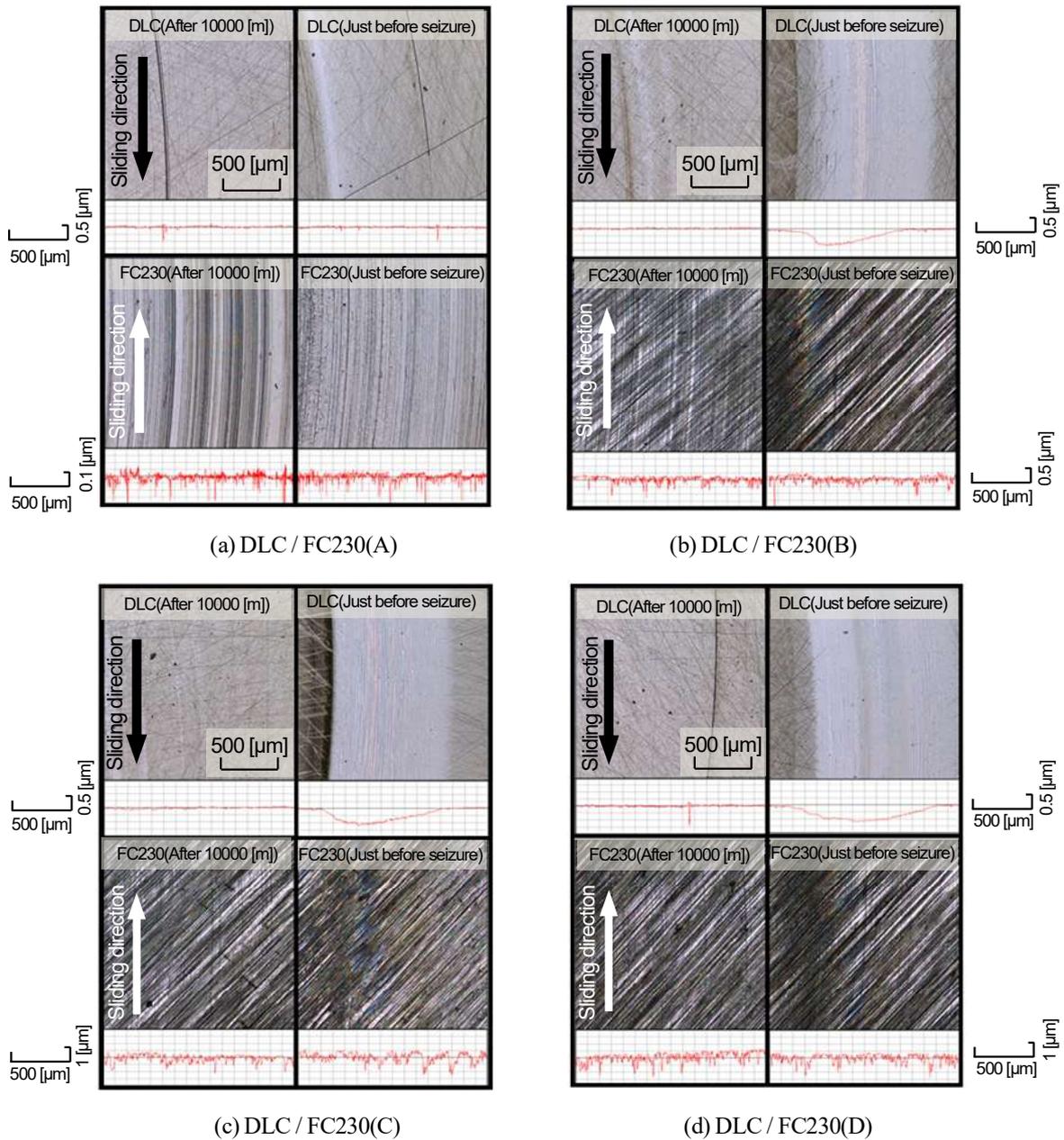


Fig. 5 Wear surface (DLC / FC230)

焼付き直前試験後の  $R_{sk}$  と  $R_{ku}$  の変化を Fig. 6 に示す。  $R_{sk}$  が大きいとき、凹部の割合が小さくなり、  $R_{ku}$  が大きいとき、平坦部の割合が大きくなることを示す。摩擦試験前では、A のとき  $R_{sk}$  が最も大きく、  $R_{ku}$  が最も小さかった。これより、A の形状は凹部および平坦部の割合が小さかったため、なじみ距離が長く、定常摩擦係数が高かったと考えられる。一方、焼付き直前試験では、D のとき  $R_{sk}$  が最も小さく、  $R_{ku}$  が大きかった。これより、D の形状は凹部および平坦部の割合が大きかったため、油量の確保と摩耗粉の捕捉に適した形状が焼付き摩擦力および焼付き荷重が高くなったと考えられる。

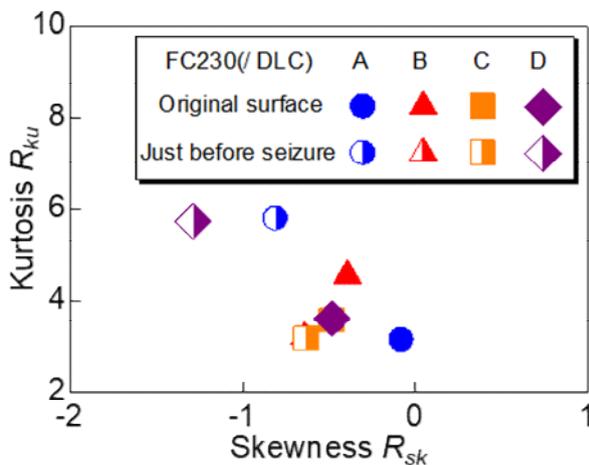


Fig. 6 Results of  $R_{sk}$  and  $R_{ku}$

### 3.5 DLC 膜のなじみ・焼付き特性に及ぼす FC230 表面粗さの影響

DLC/FC230(A)において、他の組合せの条件と比べて、なじみ距離が長く、定常摩擦係数が高かった。この要因は、摩擦試験前の FC230(A)では他の条件と比べて凹部および平坦部の割合が小さかったため、油膜の形成と油量の確保が難しく、固体接触の増加によって摩耗粉が多く発生したことで、なじみ距離が長く、定常摩擦係数が高くなったと考えられる。一方、DLC/FC230(D)では焼付き摩擦力と焼付き荷重が最も高かった。この要因は、FC230(D)では他の条件と比べて、焼付き直前の摩耗面において凹部および平坦部の割合が大きく、油膜の形成や油量の確保に適した形状を維持したためであると考えられる。これらより、初期表面粗さが DLC 膜のなじみや摩擦特性に大きな影響を及ぼし、良好になじみが終了した摩耗面では凹部および平坦部の割合が大きくなって耐焼付き性の向上に繋がることがわかった。

一方、良好になじみが終了しなかった摩耗面では凹部および平坦部の割合が小さくなって耐焼付き性の低下に繋がることがわかった。

## 4. 結 言

DLC 膜のなじみ・焼付き挙動に及ぼす相手材 FC230 ねずみ鉄の表面粗さの影響について調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 初期表面粗さが大きくなると、なじみ距離が短くなった。
- (2) 摩擦試験前の FC230 の凹部および平坦部の割合が大きいとき早期になじみが終了し、定常摩擦係数が低くなった。
- (3) なじみが良好に終了した場合、焼付き摩擦力・焼付き荷重が高くなった。

## 謝 辞

本研究における測定の多くは福井大学大学院生の山本侑汰氏により実施された。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- [1] Holmberg, K., Anderson, P., Erdemir, A.: Global energy consumption due to friction in passenger cars, *Tribology International*, 47, (2012), 221-234.
- [2] IEA: Energy Technology Perspectives 2012.
- [3] 佐藤博紀, 他3名: 摩擦係数の変動パターンによるなじみ過程の評価, *潤滑*, 31-2, 102-109 (1986).
- [4] 平野富士夫: 金属のなじみ過程, *潤滑*, 30-5, 377-384 (1985).
- [5] MCKEE, S. A.: The effect of Running In on Journal-Bearing Performance, *Mechanical Engineering*, 49, 12, 1335-1340 (1927).
- [6] GREENWOOD, J. A., TRIPP, J. A.: The Contact Of Two Nominally Flat Rough Surfaces, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 185, 625 (1970-71).
- [7] 山本雄二: 焼付きと表面粗さ, *潤滑*, 23-10, 709-714 (1978).
- [8] YAMAMOTO, Y.: On Scuffing Conditions Under Rolling / Sliding Contact Part 1 In the case of annealed 0.45 % carbon steel, *Bulletin of the JSME*,

- 25-199, 103-109 (1982).
- [9] 山本雄二, 橋本正明 : 焼付きに及ぼすなじみ過程の影響(第1報)-なじみにおける表面の変化とその効果-, 潤滑, 27-9, 697-702 (1982).
- [10] Kazuyuki, Y. , three others : Improvement of Lubrication Performance by Micro Pit Surfaces, Tribology Online, 3-5, 285-288 (2008).
- [11] 岡田一真, 他3名 : ナノテクスチャリングによる潤滑下摩擦の低減, 日本機械学会講演論文集, 114-1, 11 (2011).
- [12] 宮島敏郎, 他3名 : パターニング表面の摩擦特性に及ぼすディンプル間隔と深さの影響, 日本機械学会第10回基礎潤滑設計部門講演会講演論文集, 10-10, 133 (2010).
- [13] 塩谷平之助, 松岡敬, 平山朋子 : ナノテクスチャリング特性に及ぼす表面粗さの影響に関する研究, 日本機械学会年次大会講演論文集, 12-1, (2012).
- [14] 森広行, 他4名 : 無添加鈦油中におけるDLC-Si膜の低摩擦機構, トライボロジスト, 54-1, 40-47 (2009).
- [15] 本田知己, 他5名 : DLC膜とFC230ねずみ鋳鉄の組合せにおけるなじみ挙動に及ぼす荷重負荷速度の影響, トライボロジスト, 61-9, 636-643 (2016).