

論文題目

「DLC をコーティングしたジャーナルと軸受の  
摩擦低減と耐焼付き性の向上に関する研究」

東京都市大学大学院 工学研究科

機械工学専攻 1791102

荻原 秀実

## 目次

第1章 緒言.....	3
1.1 研究背景.....	3
1.1.1 今後の内燃機関に対する要求性能 .....	3
1.1.2 摩擦低減に関する従来手法とその懸案 .....	7
1.1.3 EHL(Elastohydrodynamic -Lubrication：弾性流体潤滑)領域の摩擦低減研究 ...	10
1.2 研究目的 .....	14
1.3 論文の構成 .....	16
第2章 軸受試験装置の構成と特徴および試験条件.....	17
2.1 装置全体構成.....	17
2.1.1 加振機諸元 .....	18
2.1.2 インバーターモータ主要諸元.....	19
2.1.3 潤滑油温調制御装置主要諸元.....	19
2.2 計測システム.....	20
2.3 チルティング機構 .....	21
2.4 チルティング機構の有効性.....	23
2.5 摩擦測定条件, 焼付き試験条件 .....	24
2.6 試験軸.....	25
2.7 軸受 .....	26
2.8 潤滑油.....	28
2.9 まとめ.....	29
第3章 DLC 膜種の選定.....	30
3.1 DLC .....	30
3.2 ブロックオンリング摩擦摩耗試験.....	33
3.2.1 試験条件.....	33
3.2.2 試験結果.....	36
3.2.3 試験前後のしゅう動表面粗さと断面曲線.....	37
3.3 軸受試験機による焼付き試験 .....	43
3.3.1 試験条件概要 .....	43
3.3.2 試験結果および試験前後のしゅう動表面粗さと断面曲線 .....	46
3.4 まとめ.....	52
第4章 DLC ジャーナルの摩擦特性および焼付き特性 .....	53
4.1 摩擦特性と焼付き特性 .....	53
4.1.1 試験条件概要 .....	53
4.1.2 試験結果.....	53
4.1.3 試験後のしゅう動表面粗さと断面曲線 .....	56
4.2 潤滑油添加剤の影響.....	59

4.2.1 EDX 分析結果 .....	59
4.2.2 EPMA-WDX 分析結果 .....	62
4.3 潤滑油粘度の影響 .....	65
4.4 トルクスパイクの解析 .....	68
4.4.1 トルクスパイク現象と焼付き特性 .....	68
4.4.2. アコースティックエミッション(AE)法の概要 .....	75
4.4.3 AE 計測条件と AE 計測部概要 .....	78
4.4.4 トルクスパイクの AE 解析 .....	79
4.4.5 スズ溶着率解析結果 .....	84
4.5 実走焼付き軸受と軸受試験機焼付き軸受の比較 .....	85
4.6 低回転・低負荷領域の摩擦特性 .....	88
4.7 近似実測損失削減率を用いた, 実際のエンジンでの燃費効果 .....	89
4.8 まとめ .....	90
第 5 章 DLC の低摩擦・高耐焼付き性のメカニズムと新たなジャーナル, 軸受仕様の提案 .....	92
5.1 DLC の低摩擦・高耐焼付き性のメカニズム .....	92
5.2 DLC の低摩擦発現の一因 .....	104
5.3 新たなジャーナル, 軸受仕様の提案まとめ .....	104
5.4 まとめ .....	
第 6 章 結言 .....	105
参考文献 .....	108

## 第1章 緒言

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 今後の内燃機関に対する要求性能

1990年代後半からの世界的な動向として、温室効果ガス削減に関する1997年の京都議定書[1]に始まり、2015年の国連気候変動枠組条約締結国際会議(COP)でパリ協定[2]が合意され、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の削減への取り組みが世界的に加速している。また近年世界的にすべての企業はESG(Environment Social Governance:環境, 社会, ガバナンス:非財務状況による企業評価指標)[3], SDGs(Sustainable Development Goals:持続可能な開発目標, これに基いた企業戦略)[4]の観点からも、より一層環境保全, 持続可能な社会の構築に貢献していく必要に迫られつつある。

これに伴い自動車製造メーカー各社は、内燃機関のゼロエミッション化や迫り来る内燃機関のみの搭載車の製造と販売の禁止[5]に伴うBEV(Battery Electric Vehicle), HEV(Hybrid Electric Vehicle), PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)化が喫緊の課題となっており、給電においても再生可能エネルギーの利用促進が検討されている。しかし途上国においてはコストやインフラ整備等の観点から、これらの流れに対し早急には対応出来ず、更に途上国の人口の予測は2025年には67億人、2050年には78億人とされ、2050年の世界人口の予測の91億人に対してその占める割合が大半となる[6]。このため、図1-1に示すように、IEA(International Energy Agency:国際エネルギー機関)はETP2015(Energy Technology Perspective:エネルギー技術の展望)において、2040年まではHEVやPHEVも含めた内燃機関搭載車の製造が増える予測しており[7]。また図1-2に示すように、各国・地域の燃費規制値(乗用車)も年々強化の方向であり[8]、自動車製造メーカーは燃費向上技術への取り組みが必須となっている[5]。

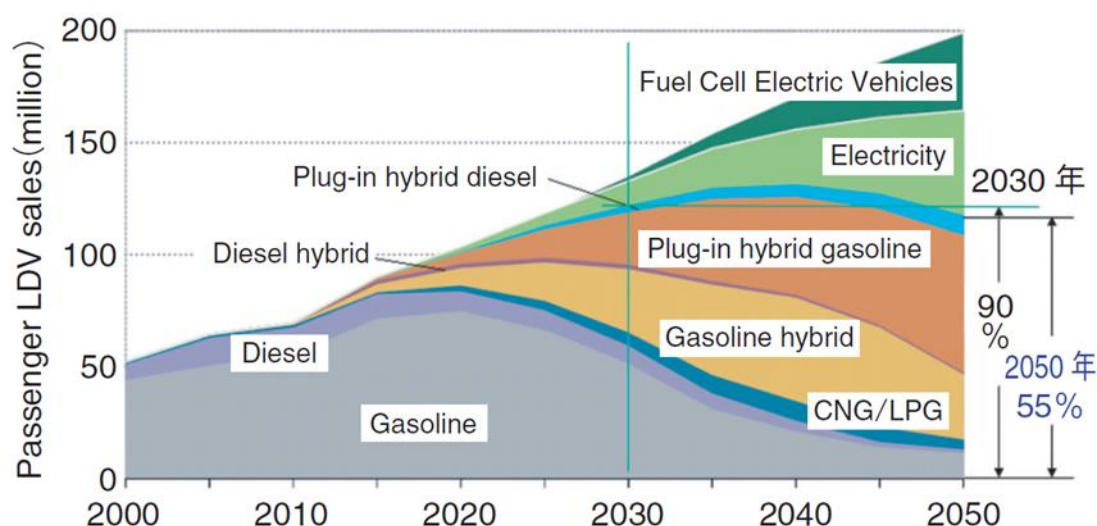


図 1-1 IEA ETP(Energy technology perspective)2015



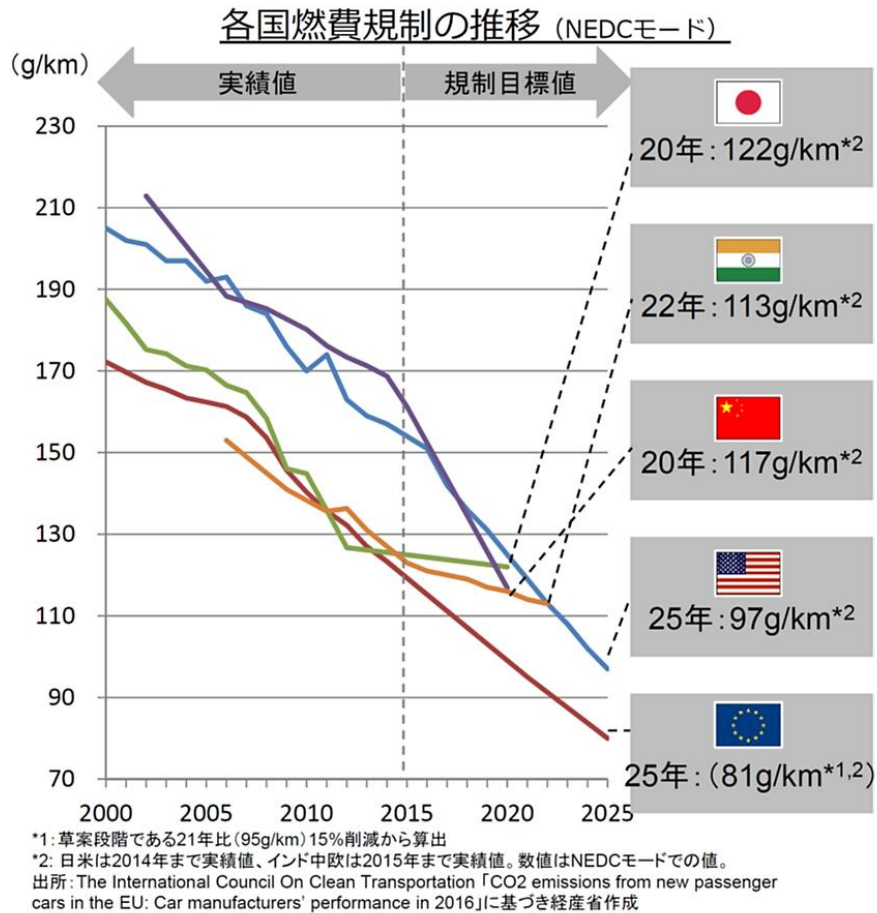


図 1-2 経済産業省・自動車新時代戦略会議(第1回)資料

また NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)の 2021 年度「NEDO 先導研究プログラム/新技術先導研究プログラム」に係る公募研究開発課題のひとつである I-D1「将来の燃料の脱炭素化の導入を見据えた内燃機関高効率化の更なる追及に向けた要素技術開発」[9] では、エンジンを搭載した電動化車両(HEV や PHEV)では、(1)エンジンの始動、停止回数が多くなり、エンジン効率向上のための摩擦損失の低減研究、(2)排出ガス温度が低下して後処理装置の触媒を活性状態に昇温するエネルギー(燃料)消費が増加するが、モーター・インバーター等の電動化部品の搭載に伴ってエンジンルーム内のスペースが減少するため、エンジンや排気後処理デバイスのコンパクト化の研究、がスタートしている。

このように、①エンジンフリクション低減に関する革新的技術開発、②エンジン排出ガス後処理装置のコンパクト化に関する技術開発、③エンジン熱効率改善部品のコンパクト化と摩擦損失低減研究は、従来の技術開発のみでは解決が困難な課題とされ、材料領域などの基礎研究が必要とされている。

HEV のエンジンを例に取れば、始動時から低速においては大きなトルクを発生するモータが使われるために、エンジンの常用回転数は中速域となる(図 1-3)[10]。このため、エンジン稼働部品の多くが良好な潤滑条件下でしゅう動することが予想される。その中でも、図 1-4 に示すように中速域でエンジンの中で摩擦損失の比率が最も高いクランク系しゅう動部品(ジャーナル軸受を含む)[11]の摩擦低減は非常に重要となる。すべり軸受は図 1-5 のように潤滑状態に応じ様々な工業分野の機械要素部品として用いられる[12]ため、本研究の摩擦低減技術は他分野への応用展開が期待できる。

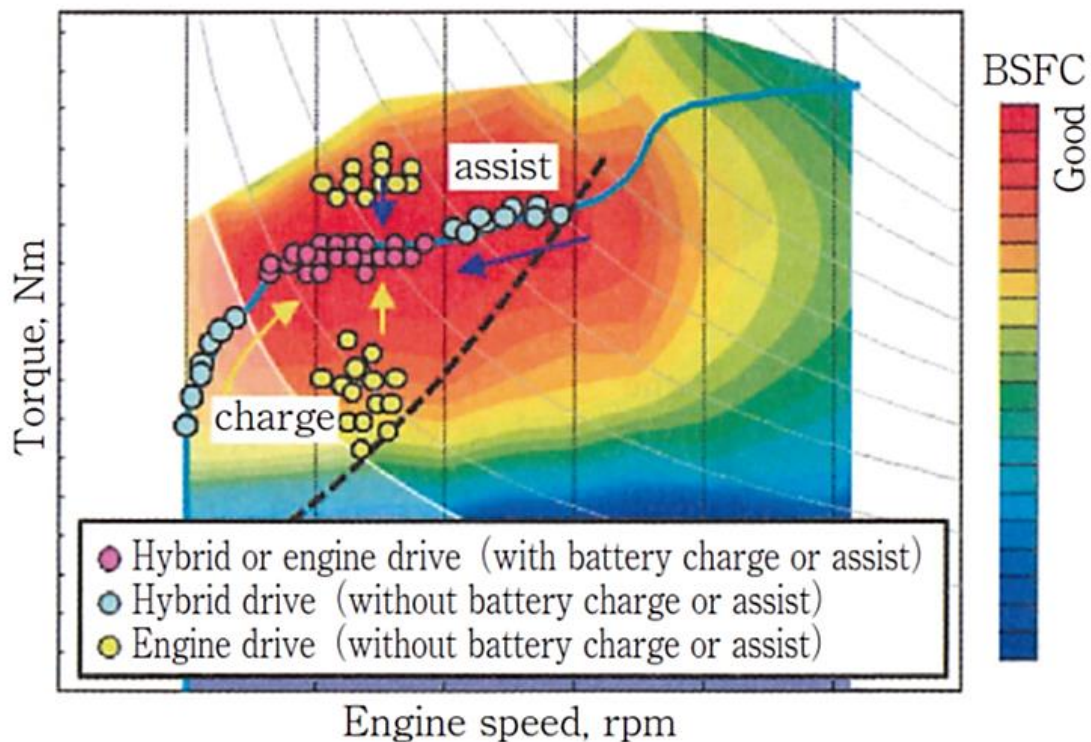


図 1-3 ハイブリッド車のエンジン動作点

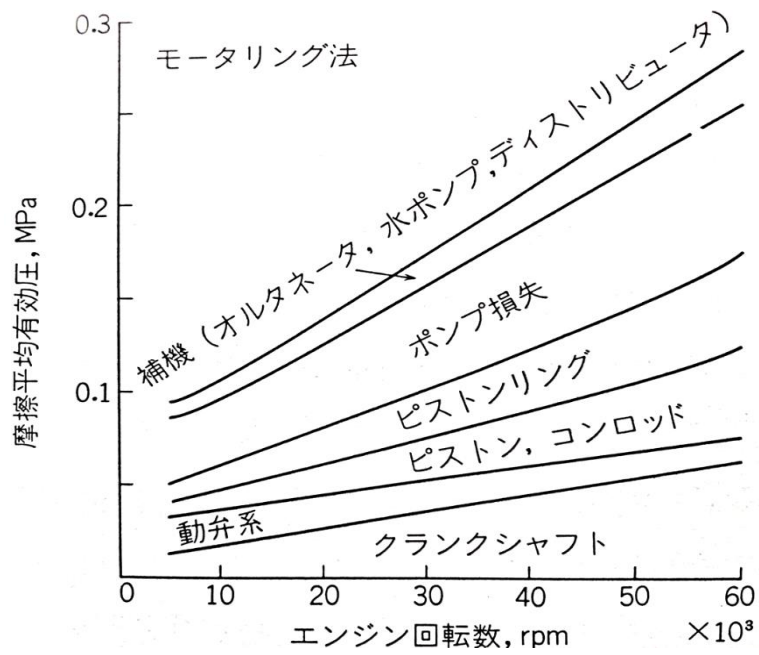


図 1-4 エンジンの機械損失

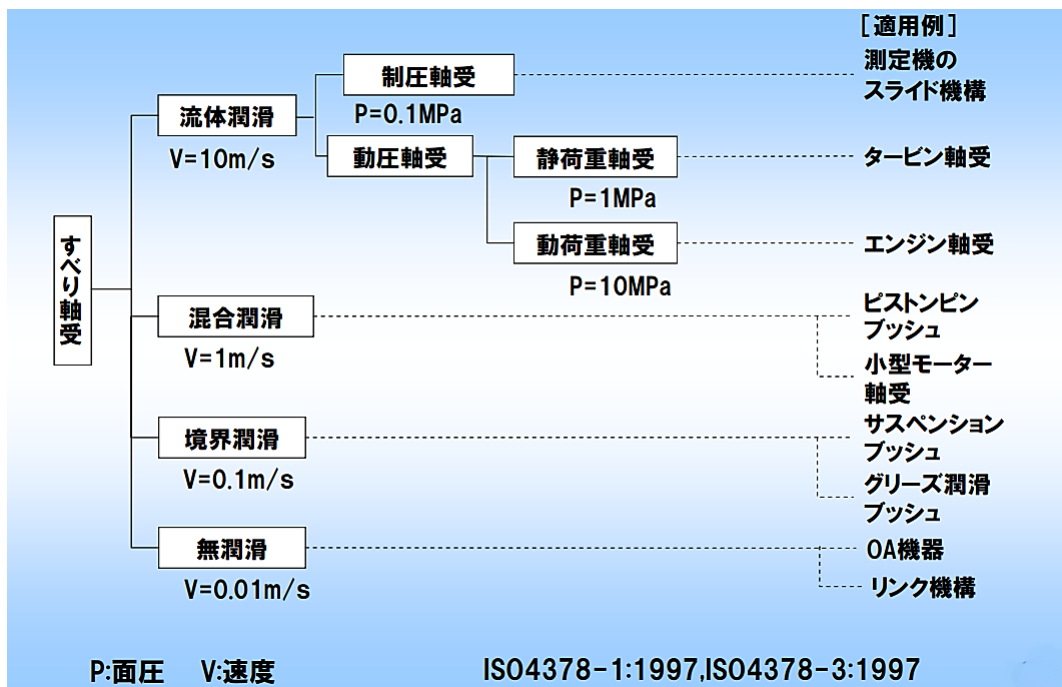


図 1-5 すべり軸受の潤滑タイプと適用

### 1.1.2 摩擦低減に関する従来手法とその課題

近年、エンジンしゅう動各部の摩擦低減や摩耗抑制に関しては、潤滑条件が厳しい境界・混合潤滑が支配的である。以下は主要なエンジン要素部品において、本研究で取り上げる硬質系炭素膜の一種である DLC(Diamond-Like Carbon)は以下の部位に応用された例があり、以下に部位名とそれらに関連する参考文献の例を示す。また、エンジンのみならず(5)や(6)の車体構造部への適用例もある。

- (1)主運動系・・・ピストンリング[13], [14], ピストンピン[15], [16]
- (2)動弁系・・・ロッカーアーム[17], [18], バルブリフタ[19]
- (3)駆動系・・・ドライブシャフト[20], トランスミッションギア[21]
- (4)エンジン燃料系・・・ガソリン直噴用燃料ポンプリフタ[22]
- (5)サスペンション系・・・ボールジョイント[23]
- (6)二輪フロントフォークインナーチューブ[24]

このような DLC コーティングの採用事例の DLC 膜種とコーティングの目的を表 1-1 に示す。膜種として示した ta-C や a-C:H, a-C:H:W, a-C:H:Si の詳細については 3 章で述べる。

表 1-1 DLC の採用例

対象		部品	膜種	要求性能
エンジン系	主運動系	ピストンリング	ta-C	低摩擦
			a-C:H:W	耐焼付き性, 低摩擦
		ピストンピン	a-C:H	低摩擦
	動弁系	ロッカーアーム	a-C:H:Si	耐摩耗性, 低摩擦
		バルブリフタ	ta-C	低摩擦
			a-C:H	耐摩耗性, 低摩擦
	燃料系	ガソリン直噴用燃料ポンプリフタ	ta-C	耐摩耗性, 低摩擦
駆動系		ドライブシャフト	a-C:H:W	耐焼付き性
		トランスミッションギア	a-C:H	低摩擦
サスペンション系		ボールジョイント	a-C:H	低摩擦, 乗り心地
		二輪フロントフォークインナーチューブ	a-C	低摩擦, 路面追従性

図 1-6 は乗用車エンジンの主な摩擦低減の方策と背反事象で、潤滑条件が比較的良好な混合から流体潤滑域が支配的なクランクシャフト軸・軸受(クランクジャーナル)では、軸受幅低減、クランク軸径低減、鏡面クランク軸(面粗度の向上)、オーバーレイ(軸受材料)の改良が挙げられる。すべり軸受に関しては Al-Sn-Si を軸受ライニング材料とする鉛フリー軸受に MoS<sub>2</sub> 層を表面に形成した低摩擦化[28]、オーバーレイ材料の改良[29][30]、マイクログループ等のすべり面の形状(表面ポーリング形状)による摩擦低減や耐摩耗・焼付き性の向上 [31][32][33][34]、オイル溝の軸受両端部への設置による潤滑油のサイドリーク量の低減による摩擦低減技術[31]の例がある。

エンジン潤滑油としては低粘度化や摩擦調整剤といった添加剤の採用などによる低摩擦化の手法が添加剤単独およびその組合せで採用、若しくは検討されている[35]。しかし、図 1-6 のように潤滑油においては添加剤の他には潤滑油の低粘度化しか見当たらず、この手法は排反事象として油膜厚さの減少に伴う境界潤滑域の拡大によるかじり、焼付きの危険性増大の懸念がある[36]。

また、図 1-7 に示すコンロッド軸受の最大面圧の近年の推移に関しては(熊田[37])、1985 年は平均値で 30MPa であったが、2015 年には 60MPa にまでほぼ直線的に増加しており、ターボチャージャー付きのエンジンなど機種によっては 90~100MPa に達するとされている[37]。このことから、クランクメインジャーナルや主軸受においては高面圧対応が必須である。したがって、この状況を打開できる新たなしゅう動材料や表面改質技術の登場が待たれている。

このほか、2012 年度の NEDO 研究として、すべり軸受表面に DLC を適用させて、軸受と軸表面の直接接触摩擦を低減、かつ耐久性を維持できる軸受の開発が行われた。これによると、耐焼付き性 50%向上、摩擦係数 25%低減を確認し、耐疲労性及び耐摩耗性が従来材に比べて同等以上であることを確認し、また、摩擦損失半減となる DLC 軸受の実機確認を実施して耐久性維持を確認したとの報告もある[38]。

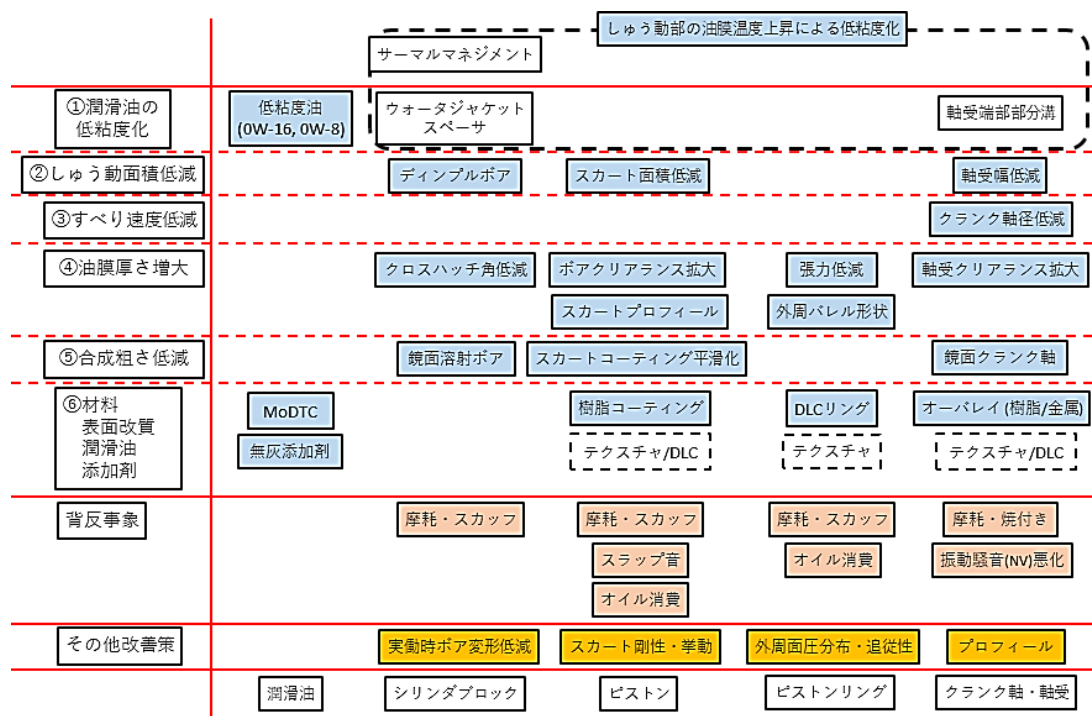


図 1-6 乗用車エンジンの主な摩擦低減の方策と排反事象 (ピストン系・クランク系)

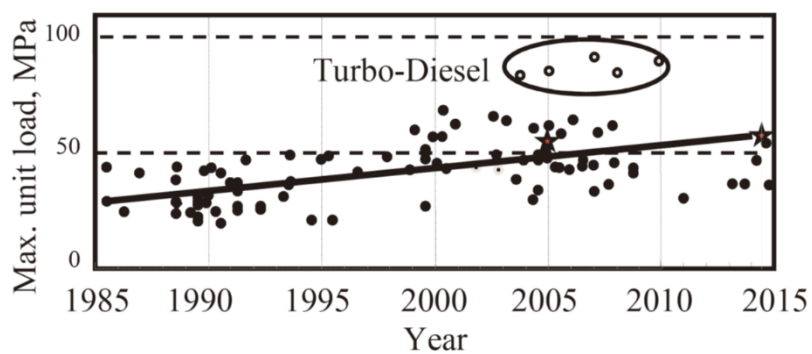


図 1-7 コンロッド軸受にかかる最大面圧の推移

### 1. 1. 3 EHL(Elastohydrodynamic -Lubrication：弾性流体潤滑)領域の摩擦低減研究

EHL とは Elastohydrodynamic-Lubrication の略で、弾性流体潤滑と訳されるが、相対する二面間の圧力が高く、二面の弾性変形の影響が潤滑状態に影響を与える流体潤滑状態であるが、上記 1.1.2 に示した課題解決に向けた新たな取り組みとして Bobach, Björling や Bobzin 等の DLC による EHL 領域における摩擦低減の研究がある[39]～[44]。研究対象は内燃機関のクランクシャフトジャーナル部で、DLC はジャーナル部 (鋼製)とすべり軸受の両方に DLC 形成を行っている。すべり軸受は乗用車用ではアルミニウム合金や銅合金が一般的に用いられるが、この研究では鋼製軸受(軸受直径 55 mm, しゅう動幅 20mm と 16mm の 2 種)とし、DLC の膜種は ZrC(炭化ジルコニウム)を添加した a-C:H/ZrC と a-C:H/ncZrC (nc:nanocomposite)の 2 種類の a-C:H DLC を成膜している。クランクシャフト側は a-C:H/ZrC のみである。図 1-8 に DLC 成膜後のクランクシャフトと軸受幅の異なる 2 組のすべり軸受の写真を示す。これより、クランクシャフト側は DLC コーティングがメインジャーナルのみで、ピンジャーナルには成膜されていないことが分かる。また軸受はアッパー側、ロワー側の両方にコーティングされているのが確認できる。表 1-2 は試験に用いた内燃機関の主要諸元で、排気量 1800cc, 直列 4 気筒のエンジンに組込んでエンジンテストベンチにてモータリングフリクションを測定している。エンジンオイルは、市販の 5W-30 粘度のものを扱い、油温、水温ともに、35℃および、90℃にて試験を行っている。

その結果、コーティング無しのクランクジャーナル部の仕様に対し、DLC コート有りの場合は、EHL 領域における 1.4%の摩擦損失低減が得られたと報告され、また、図 1-9 および図 1-10 に示すように、油温、水温 90℃の場合に比べ、35℃の時の方が FMEP(Friction Mean Effective Pressure；摩擦損失平均有効圧力)の低減割合が大きい結果となっている。また、DLC コート軸受、ジャーナルを用いた場合の実車での燃費効果は、NEDC(New European Driving Cycle：新欧州ドライビングサイクル)モードを用いた燃費シミュレーション[45]結果、実走燃費換算で 0.4%の向上とされている。

しかし、これらの結果は、軸受しゅう動幅を実機の 20mm から 16.5mm に 17.5%削減したものを扱い、図 1-11 に示すように軸受形状やオイルクリアランスが比較に用いたスタンダード形状と大きく異なるため、DLC 膜自体の摩擦低減効果(寄与度)が不明である。また、軸受合金は異物埋収性の機能を保持する必要があるため、DLC のような硬質膜のコーティングはこの機能を損なうこと、加えて軸受合金は比較的軟質であり、硬質膜を精度よく、かつ高い密着性能を持続的に持たせることが困難なことが分かっている。加えてクランクジャーナル部の仕様変更は焼付きを誘発する可能性があり、摩擦低減との背反になり得るが、この研究ではこの点の示唆がないことは懸念点となる。



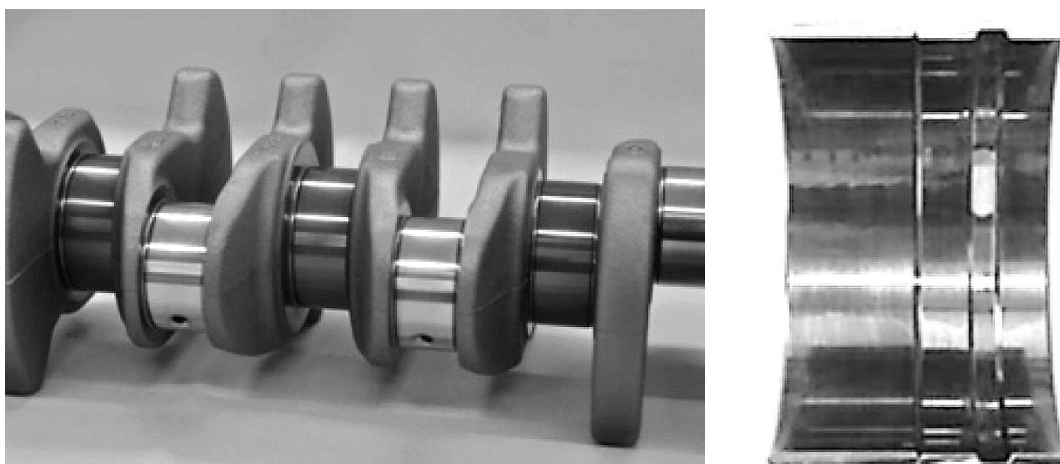


図 1-8 DLC コーティングクランクシャフト(左)とベアリング(右)

表 1-2 供試エンジン主要諸元

Type	4-cylinder in-line, gasoline duct injection
Cylinder bore	85 mm
Capacity	1,800 cm <sup>3</sup> (1.8 l)
Compression ratio	8.5:1
Nominal power	135 kW at 5,500 rpm
Maximum torque	250 Nm at 2,800 rpm



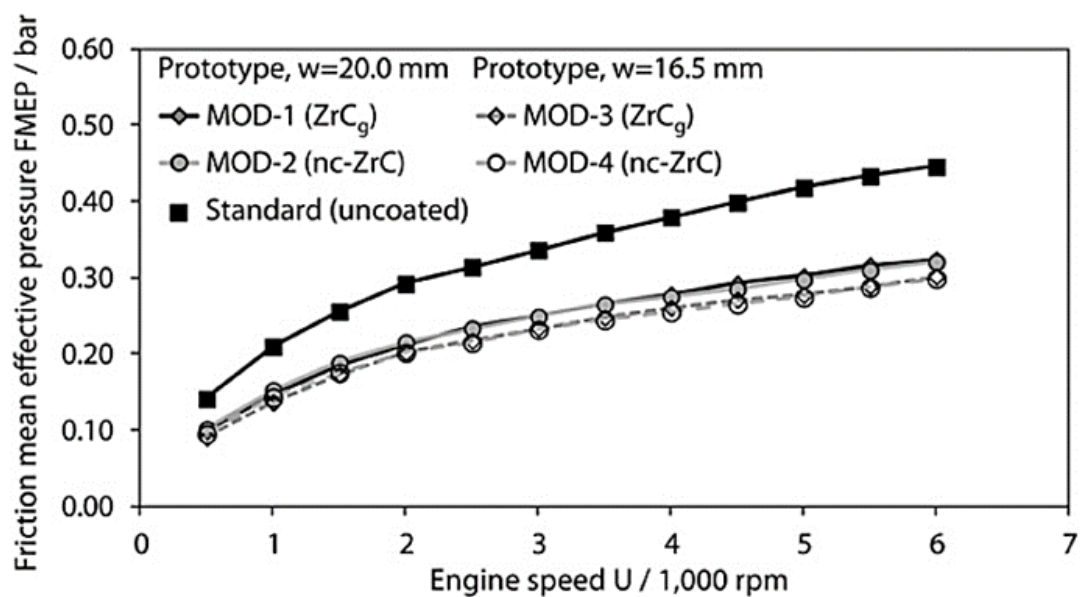


図 1-9 鋼軸受と DLC コートジャーナルの油水温 35°Cでの FMEP 特性

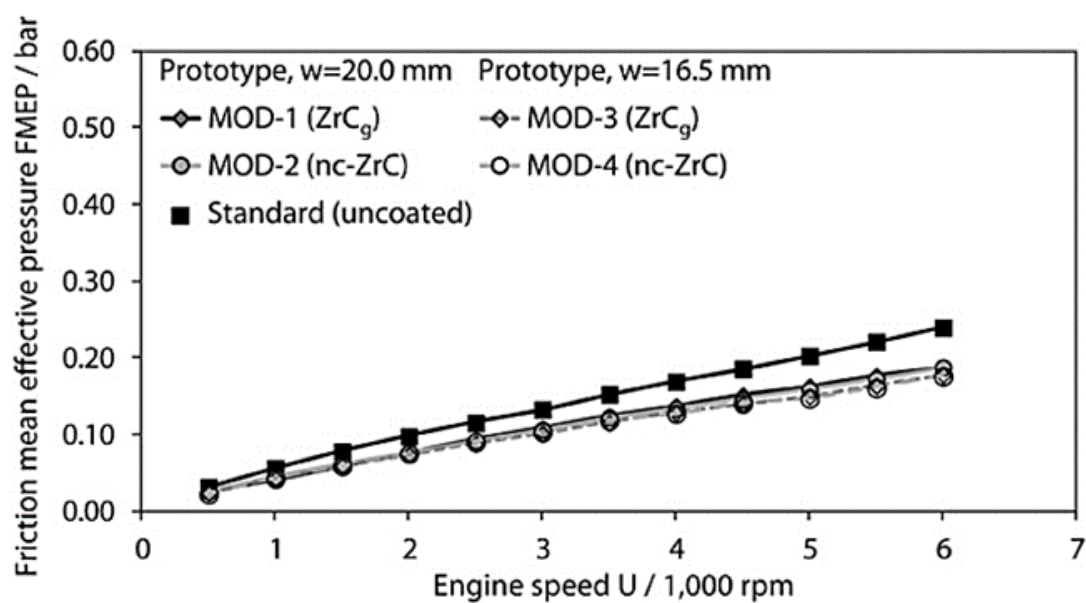


図 1-10 鋼軸受と DLC コートジャーナルの油水温 90°Cでの FMEP 特性

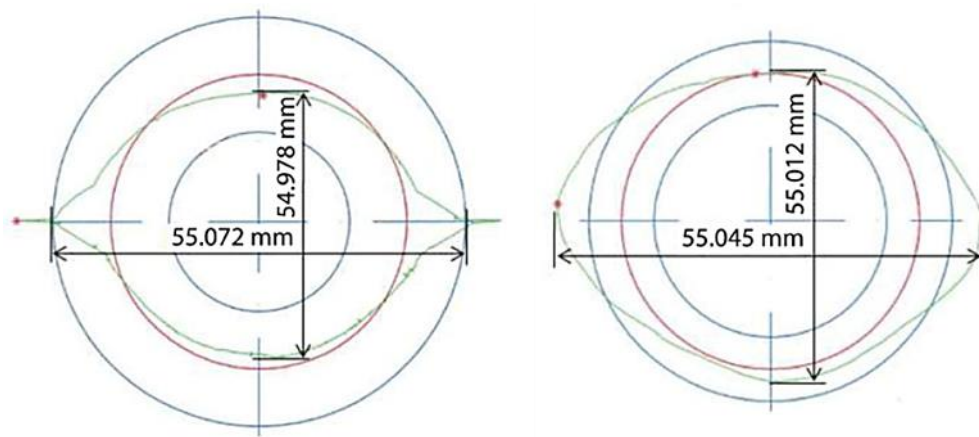


図 1-11 標準軸受と試作軸受の組付け後の形状比較 (室温)

## 1.2 研究目的

1.1.2 に示した世の中の動向や、研究背景の文中で下線を付した、“エンジンを搭載した電動化車両(xEV)では、エンジンの始動、停止回数が多くなり、エンジンフリクション低減に関しては、従来の技術開発のみでは解決困難な課題であり、革新的技術開発が求められる技術テーマ”，であるとされている。

また、上記したパワープラント系部位への DLC 適用既存技術においては、そのほとんどが境界潤滑領域における摩擦低減や摩耗低減を図ったものである。

これに対し、本研究の目的は、従来、潤滑油の剪断抵抗が支配的であり、潤滑油の低粘度化しか現実的手法のなかった流体潤滑域の摩擦低減を、DLC を用い低摩擦化を実現すると共に、高耐焼付き性を両立するという、革新的技術開発を完遂することである。

図 1-12 のストライベック曲線イメージ図に、従来 DLC 適用技術と本研究技術の位置づけを示した。

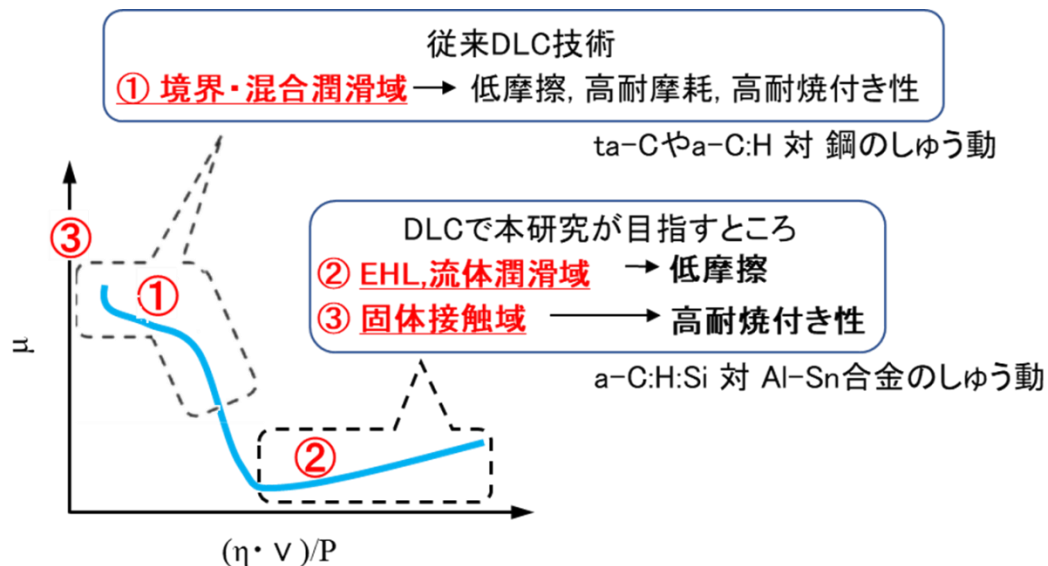


図 1-12 ストライベック曲線で表す従来 DLC 技術と本 DLC 研究の位置付け

この、流体潤滑域における DLC による低摩擦化と、高耐焼付き性の両立の実現のために、従来の試験片を用いる単体しゅう動試験とは異なり、実部品を使い、実際のエンジンクランク系しゅう動部位の運転条件、しゅう動環境を再現できる軸受試験機を用い、図 1-13 に示すように研究を展開した。その主な展開内容を以下に示す。

- (1) 軸受試験機試験の妥当性検証  
実走実機焼付き軸受と軸受試験機焼付き試験において焼付いた軸受の双方を検証し、軸受試験機試験の妥当性検証。
- (2) 最適 DLC 膜種選定  
ジャーナルに最適な DLC 膜種をブロックオンリング摩擦摩耗試験、および、軸受試験機焼付き試験による選定。
- (3) 高回転・高負荷時における EHL 領域の摩擦特性、および焼付き特性の検証  
軸受試験機による DLC コーティングの摩擦特性、耐焼付き特性の検証。
- (4) 低回転・低負荷時における流体潤滑領域の摩擦特性の検証  
実車常用運転条件と同等の、軸受試験機における低回転低負荷条件での DLC コートジャーナルの流体潤滑時摩擦特性の検証
- (5) AE(Acoustic Emission)解析、しゅう動面粗さ解析、しゅう動面元素分析  
特定の周波数ピークの発現から摩耗形態が明確となる AE 波解析法の実施。  
しゅう動前後の表面粗さ比較検証。しゅう動面の元素分析による焼付き解析。

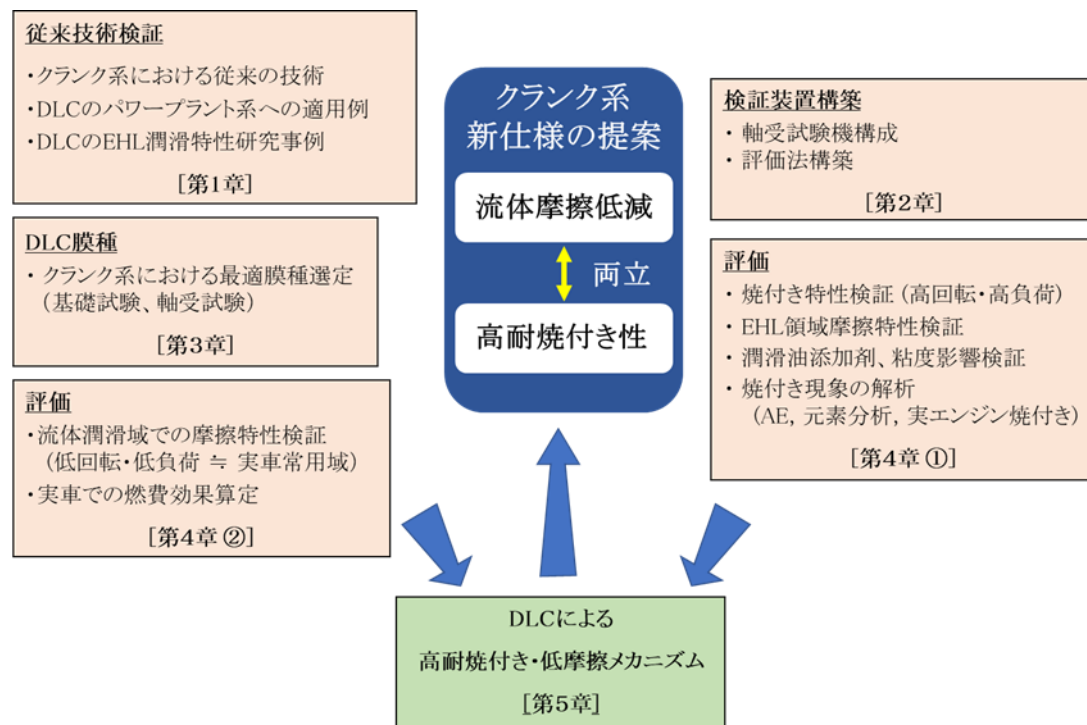


図 1-13 本研究の概要

さらには、1.1.1で説明したように、今後の自動車会社の主流となる HEV 車のエンジンにおいては、始動時から低速においては大きなトルクを発生するモータが使われるために、エンジンの常用回転数は中速域となるので、エンジン稼働部品の多くが良好な潤滑条件下でしゅう動することが予想される。その中でも、中速域でエンジンの中で摩擦損失の比率が最も高いクランク系しゅう動部品の摩擦低減が非常に重要となる。本研究の究極の目的は、自動車エンジン・クランクジャーナルの焼付き特性の改善および摩擦低減だけではなく、本研究成果が流体潤滑～混合潤滑下で稼働する種々の機械しゅう動部品に広く応用され、世界規模でのエネルギー損失の低減への貢献にある。

### 1.3 論文の構成

第1章では、世界情勢に対し内燃機関が置かれている現在の状況、今後の動向予測、および現在の研究動向について検討し、本研究で取組むクランク軸と軸受の摩擦特性、焼付き特性改善の必要性について述べる。

第2章では、ジャーナルと軸受の摩擦特性、焼付き特性を計測するため本研究で用いた軸受試験装置の構成と特徴、および試験条件について述べる。

第3章では、ブロックオンリング試験、および軸受試験機試験によるジャーナルに対する最適 DLC 膜種の選定について述べる。

第4章では、選定した DLC でコーティングしたジャーナルを用いた摩擦特性、焼付き特性について述べる。また摩擦特性、焼付き特性に対する潤滑油粘度、潤滑油添加剤の影響、限界面圧について述べる。さらに、焼付きの兆候を示すトルクスパイク現象、および低回転、低荷重域の摩擦特性、実機焼付き軸受との比較について述べる。また、鋼製ジャーナル、および DLC ジャーナルの摩擦特性、焼付き特性に対する軸受しゅう動面形状の影響について述べる。

第5章では、本研究により明らかとなった DLC コートジャーナルの低摩擦特性、高耐焼付き特性のメカニズムについて言及し、得られた知見から、新たなジャーナル、軸受仕様の提案について述べる。

第6章では、本研究で得られた結論について述べる。

## 第2章 軸受試験装置の構成と特徴および試験条件

### 2.1 装置全体構成

本研究では、実部品を用いジャーナルと軸受の摩擦特性試験が行える ISO の国際標準試験機として認定された軸受試験装置を用いた。図 2-1 に装置全体構成を記す。

本軸受試験装置は 1 つのジャーナルと、それと対をなす一組のすべり軸受で試験部を構成する。ジャーナル部を有する試験軸は図 2-2 に示すように、両端を支持軸受と称する、ジャーナルを挟み左右 2 つずつ、計 4 つの転がり軸受で支持している。

一方、一組の半割すべり軸受は実機コネクティングロッドに対し、変形を抑制する高剛性のコネクティングロッド(以下、治具コネクティングロッド)に取付けられている。

試験軸は AC モータで回転し、モータと試験軸の間に取付けられているトルクメータにより試験中の軸トルクを測定する。

高剛性コネクティングロッドは油圧加振機構によりすべり軸受を介し、ジャーナルに荷重を段階的に付加し、負荷した荷重はロードセルにより測定する。実機の場合ジャーナルに負荷される荷重は動荷重であるが、実機に対し、より厳しい条件で評価するために静荷重とした。

また試験中に設定値を超える軸トルクの急上昇を検知した際、トルクメータと試験軸の間に設置してあるトルクリミッタによりモータと試験軸を瞬時に切離し、装置の損傷を防止するとともに、急上昇した時点の負荷荷重を焼付き荷重とした。尚、試験機の負荷荷重上限は 99kN である。

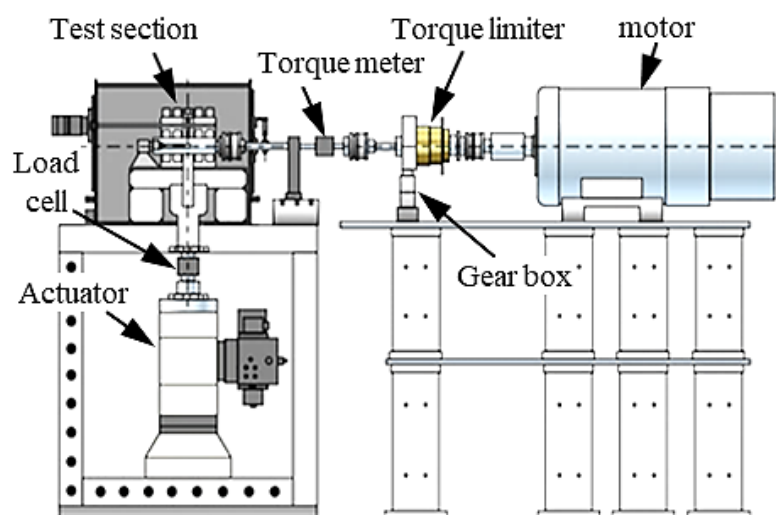


図 2-1 軸受試験装置概略

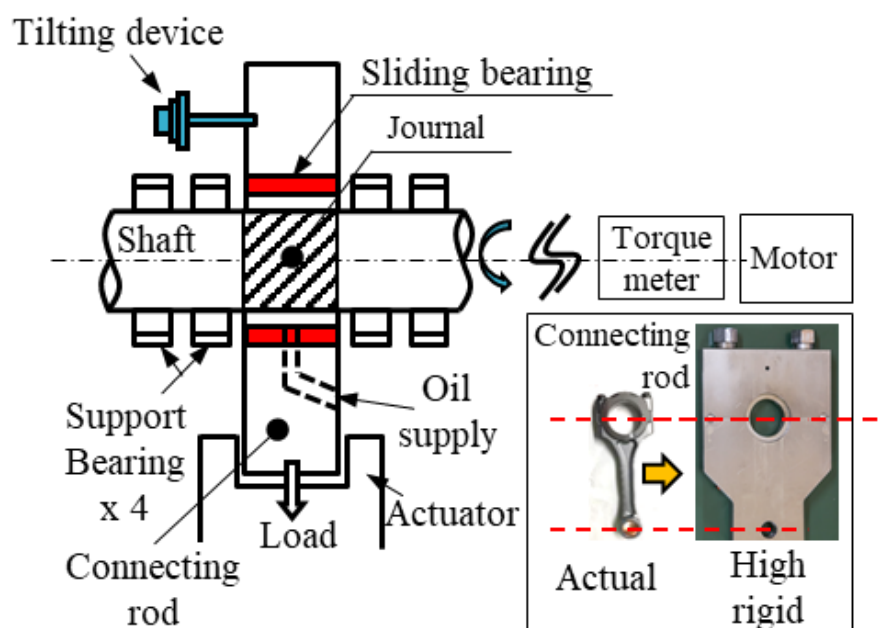


図 2-2 試験部断面および高剛性コネクティングロッド

### 2.1.1 加振機諸元

本試験装置に搭載されている加振機は、最大加振周波数 300Hz、最大加振力 $\pm 100\text{kN}$ を負荷することが可能であり、波形は正弦波、矩形波、三角波及び静荷重も含む任意設定の波形を出力することが可能である。また、インバータモータとの同期運転も可能である。図 2-3 に加振機主要諸元を示す。



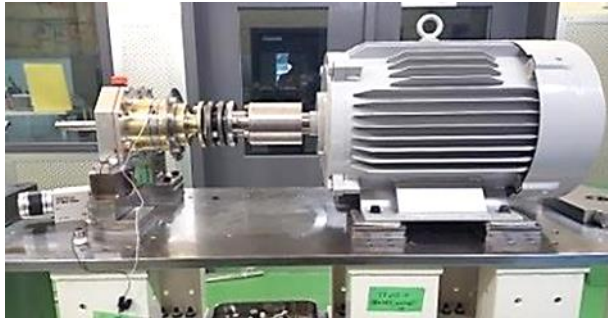
加振機主要諸元	
最大加振力	$\pm 100\text{kN}$
最大変位	$\pm 10\text{mm}$
最大速度	$0.5\text{m/s}$
最大加速度	$500\text{m/s}^2$
周波数範囲	300Hz
油圧装置	
電動機	55kW 4P
定格流量	139 L/min
定格圧力	20.5MPa

図 2-3 加振機主要諸元



### 2.1.2 インバーターモータ主要諸元

本試験装置に搭載されているインバーターモータは、インバーター定格容量 22kW、最高回転数 2520rpm である。任意の回転数をギアボックスにて増速し、最高 12600rpm の回転を軸に伝えることが可能である。図 2-4 にインバーターモータの主要諸元を示す。



インバーターモータ主要諸元	
定格容量	22kW
回転数 (モーター本体)	～2520rpm
回転数 (増速後)	～12600rpm
ギア比	1:5
回転方向	CW/ CCW

図 2-4 インバーターモータ主要諸元

### 2.1.3 潤滑油温調制御装置主要諸元

本試験装置の潤滑油温調制御装置は、試験部への潤滑油供給と、支持軸受部(図 2-2)への供給の独立 2 系統とした。図 2-5 に油温調制御装置の主要諸元を示す。

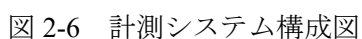


供給経路	独立2系統 試験部/支持部	
試験部	供給油圧	～1MPa
	供給油量	～6L/min
支持部	供給油圧	0.2MPa
	供給油量	20L/min
制御温度範囲		40～150℃

図 2-5 油温調制御装置主要諸元



図 2-6 に試験機系統図を示す。アクチュエータ、およびモータ、油温調装置の制御は全て制御盤にて行う。各種センサから得られるデータはデータロガー(Keyence : NR600)に集約され計測用 PC に保存される。また計測した AE(アコースティック・エミッション)波は専用データロガー(HBM:Gen3i)に保存される。



### 2.3 チルティング機構

軸受試験装置では、ジャーナル負荷荷重の増加に伴いジャーナルクリアランス分、すべり軸受が取付けてある治具コネクティングロッドが傾き、すべり軸受がジャーナルに片当たりする場合がある。このため治具コネクティングロッドはチルティング機構と称するジャーナルと軸受の平行度を調整する装置を有する(図 2-7)。

このチルティング機構を用い、図 2-8 に示す、軸受背面幅方向両端部に設置した熱電対により軸受背面温度を測定し、背面温度差がほぼ 0℃になるように、試験中常にジャーナルと軸受の平行度合いを制御する。これにより図 2-7 の①に示すようにジャーナルと軸受を平行に保ち流体潤滑状態での評価が可能となり、また②のようにジャーナルと軸受を任意の角度で接触させることで境界・混合潤滑状態での評価も行える。

このような潤滑状態の管理方法は町田等によって提唱され、両方の軸受背面温度を均一に保つことで軸と軸受が平行当りすることが報告されている[46]。

尚、背面温度測定に用いた  $\phi 1\text{mm}$  の K 型シース熱電対の測温誤差は 0.1℃未満になるものを選別し、ばねの張力を利用し軸受背面に一定の張力で押し付け用いている。

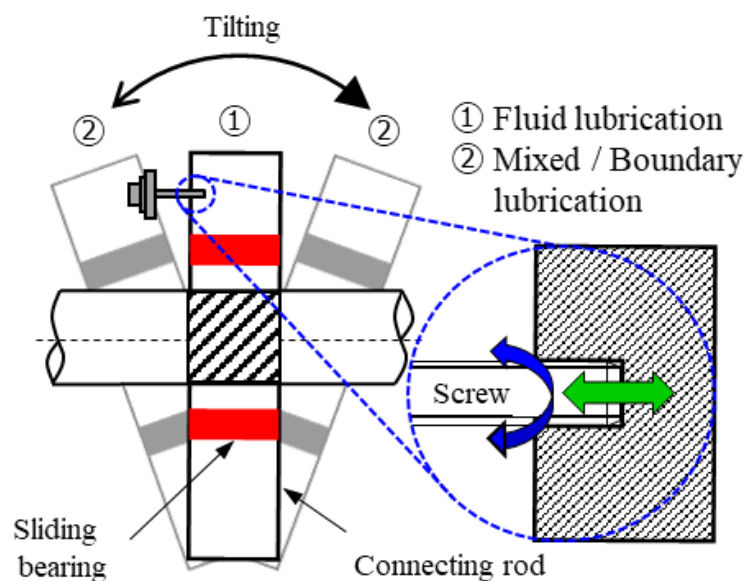


図 2-7 チルティング操作による高剛性コネクティングロッドの動作

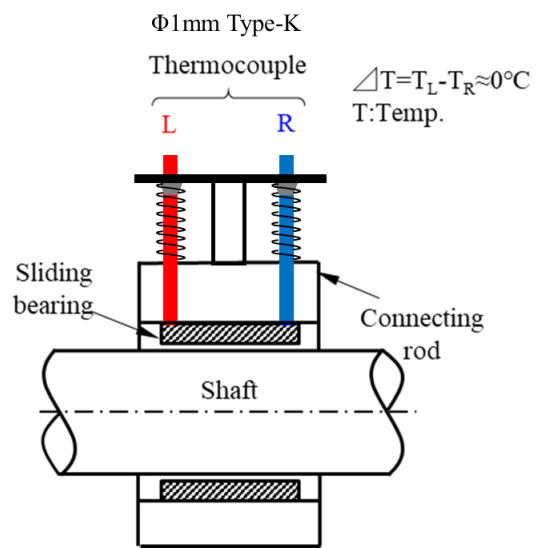


图 2-8 轴受背面温度测定位置

## 2.4 チルティング機構の有効性

図 2-9 にチルティング機構の有用性を示す。試験開始約 20 秒後にジャーナル負荷荷重を 3kN 増したところ、軸受背面温度に差が生じた。このため直ちにチルティング機構により治具コネクティングロッドの姿勢制御を実施し、背面温度差をほぼ 0°C に収束させた。

更に試験開始から約 150 秒後に負荷荷重を 3kN 増加すると再度背面温度差が生じたため、治具コネクティングロッドの姿勢を制御し、背面温度差をほぼ 0°C にした。

このように試験中は常に治具コネクティングロッドの姿勢制御を繰り返すことで流体潤滑状態を維持可能であり、チルティング機構の有用性を確認した。

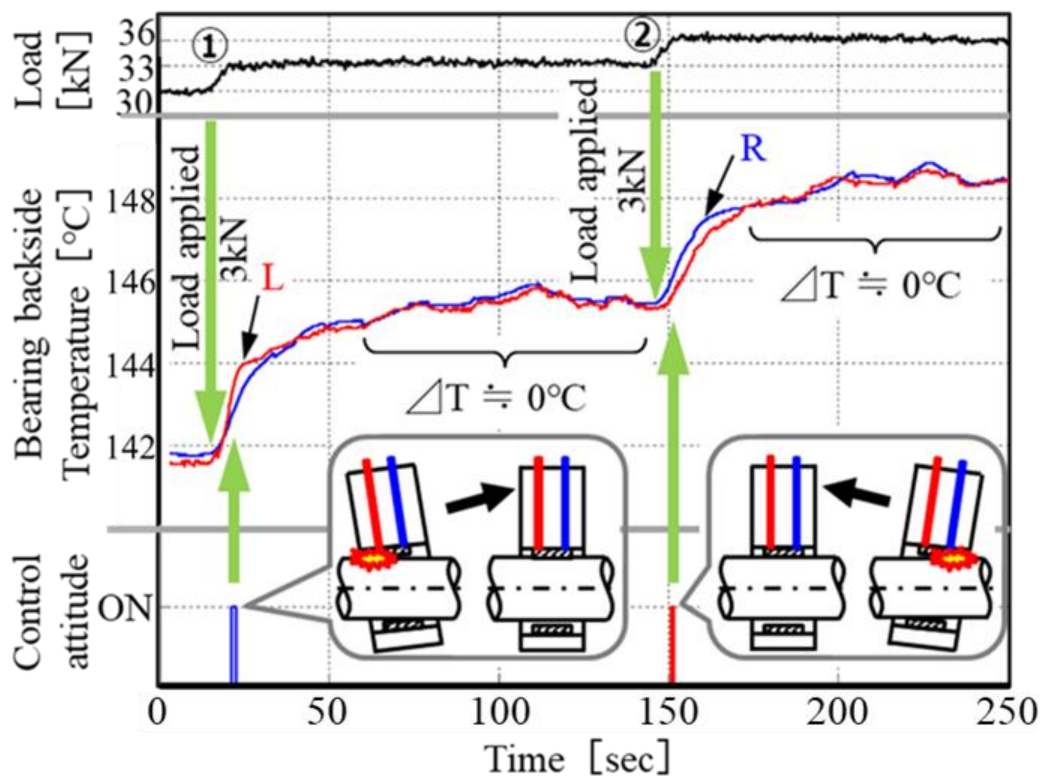


図 2-9 チルティング機構による軸受背面温度制御性

## 2.5 摩擦測定条件, 焼付き試験条件

図 2-10 に軸受試験装置の焼付き試験モードを示す。軸回転数、負荷荷重ともにステップアップモードを採用した。この試験モードにおいては、Phase-1 をジャーナルと軸受のなじみ運転モードとし、このモードを終了した後、Phase-2 として軸回転数を、モデルとした 4 気筒ガソリンエンジンの最高出力発生回転数である 5200rpm に保ち、ジャーナル負荷荷重を焼付きと判断する軸トルクの急上昇が発生するまで 3kN 毎でステップアップさせる。同時に焼付くまでのジャーナル負荷荷重毎の平均軸トルクを計測する。

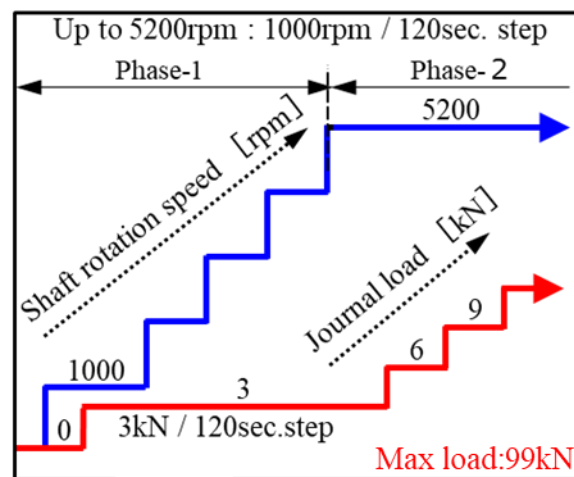


図 2-10 慣らし運転モードおよび試験モード

## 2.6 試験軸

軸受試験機に用いる試験軸は、モデルとした実機と同じ  $\phi 48\text{mm}$  のクランクシャフトメインジャーナルを一つ有する。また、材質は SCM420H 鋼製とし、ジャーナル表面粗さは  $Ra0.06\mu\text{m}$  である。尚、試験軸の真円度、円筒度は  $2\mu\text{m}$  以内とした。図 2-11 に試験軸例を示す。また表 2-1 に試験軸ジャーナル部の主要諸元を記す。

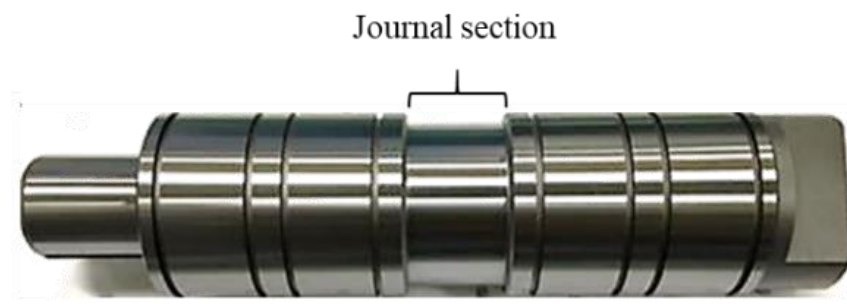


図 2-11 試験軸とそのジャーナル部

表 2-1 ジャーナル部主要諸元

Journal	
Material / Diameter	SCM420H / $\phi 48\text{mm}$
Surface roughness	$Ra0.06\mu\text{m}$

## 2.7 軸受

試験に用いるジャーナルのしゅう動相手である、半割すべり軸受の例を図 2-12 に示す。ライニング材はアルミニウム合金であり、軸受周方向の旋削加工による螺旋状の筋目である条痕に関しては、

- ① しゅう動面幅 17mm で研磨によりしゅう動面を平滑化した Polish 仕様
- ② しゅう動面幅 11.4mm 且つ①の条痕ピッチ、高さを小さくした Streak 仕様
- ③ しゅう動面幅 17mm で条痕を形成した汎用仕様(4.2.2 にのみ使用)

この 3 種とした。この 3 種の軸受の仕様を表 2-2 に示す。また図 2-13 に、②の軸受の代表的な条痕形状と条痕ピッチ、深さの実測データを、図 2-14 に、③の軸受の代表的な条痕形状と条痕ピッチ、深さの実測データを示す。またジャーナルとのクリアランスは治具コネクティングロッド組付け状態での直径クリアランスを  $51\mu\text{m}$  とした。



図 2-12 半割すべり軸受例

表 2-2 軸受主要諸元

Condition	Bearing	
	Width	Surface
①	17mm	Polish
		Ra0.06 $\mu$ m / Rz0.5 $\mu$ m
②	11.4mm	Streak A
		Ra0.15 $\mu$ m / Rz1.1 $\mu$ m
③	17mm	Streak B
		Ra0.62 $\mu$ m / Rz2.9 $\mu$ m

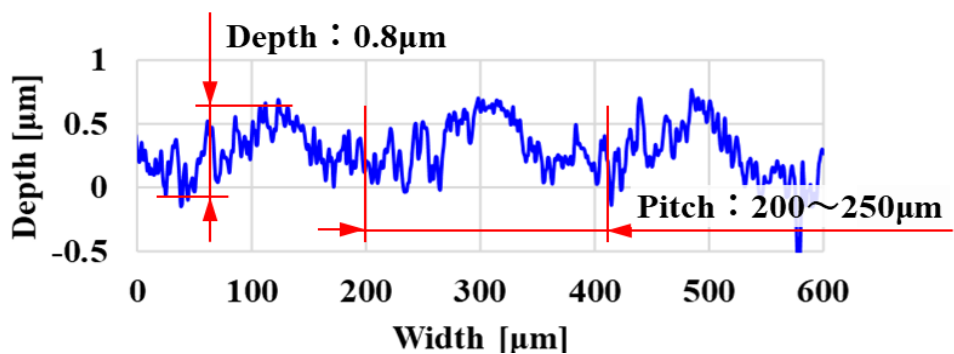


図 2-13 表 2-2 ②に示す軸受の条痕形状, 条痕ピッチ, 深さ実測例

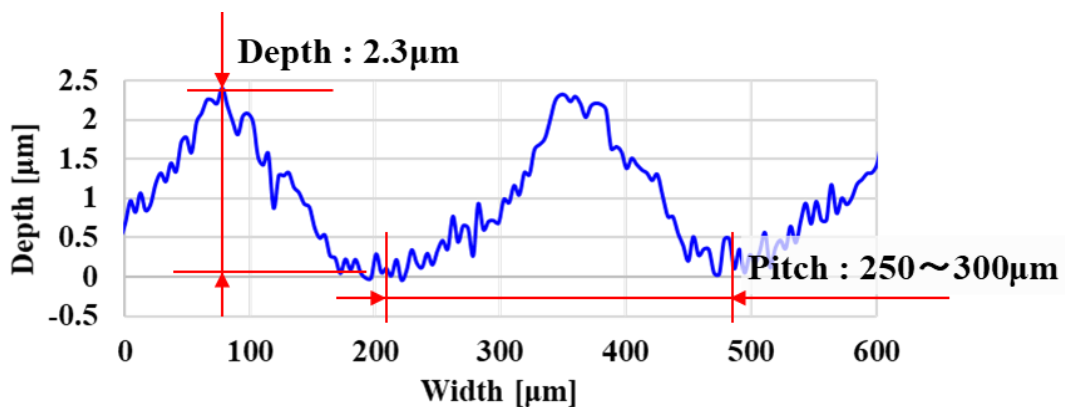


図 2-14 表 2-2 ③に示す軸受の条痕形状, 条痕ピッチ, 深さ実測例



## 2.8 潤滑油

潤滑油には SAE(Society of Automotive Engineer；米国自動車技術者協会)粘度グレード 0W-20 で、摩擦調整剤である MoDTC(Molybdenum Dithiocarbamate)および、極圧剤の ZnDTP(Zinc Dialkyldithiophosphate)が添加されている市販のエンジンオイルを用い、比較的高油温の 110℃で試験を行った。この市販オイルに添加されている金属元素は表 2-3 のとおりである[47]。

これに対し低粘度潤滑油による DLC の摩擦特性、および焼付き特性を検証するため、表 2-4 に示す MoDTC が添加されていない粘度グレード 0W-8 の試作油を用いた。

また、0W-20 オイルの動粘度は、油温 40℃で 37.25mm<sup>2</sup>/s °C, 100℃で 8.31mm<sup>2</sup>/s °C, 110℃で 6.98mm<sup>2</sup>/s °C, 0 W-8 オイルは、40℃で 20.60mm<sup>2</sup>/s °C, 100℃で 4.70mm<sup>2</sup>/s °C, 110℃で 3.97mm<sup>2</sup>/s °Cの測定結果を得ている。

表 2-3 試験に用いた市販 0W-20 粘度オイルの金属元素添加量

Metal elements	Contents [mass ppm]
Si	7
B	69
P	459
Zn	498
Ca	846
Mg	498
Mo	53

表 2-4 試験用いた 0W-8 粘度試作油主要諸元

Engine oil	Fully formulated
SAE viscosity classification*	0W-8
Viscosity index improver	○
Antiwear additive	○
Metallic detergent	○
Ashless dispersant	○
Antioxidant	○
Friction modifier (MoDTC)	W/O MoDTC
Anti-foaming agent	○

\*Society of Automotive Engineers

## 2.9 まとめ

実部品を用い、実機運転状態を再現できる軸受試験機の構造と特徴について述べ、また試験条件を設定した。この中で得られた知見について以下に述べる。

軸受試験機はジャーナルと軸受の平行度を調整可能なチルティング機構を有し、軸受幅方向両端部における軸受背面温度の差温が  $0^{\circ}\text{C}$  になるように調整する事で、試験中常にジャーナルと軸受けの平行状態を維持可能な事を確認した。また試験条件、ジャーナル仕様、軸受仕様を設定し、試験に用いる潤滑油仕様について述べた。

### 第3章 DLC 膜種の選定

#### 3.1 DLC

DLC(Diamond-Like Carbon)は炭素を主成分とした非晶質の硬質薄膜であり、ダイヤモンド構造( $sp^3$  混成軌道)とグラファイト構造( $sp^2$  混成軌道)の両方を有する. DLC 中のこの組成比率によって膜の特性がダイヤモンド傾向かグラファイト傾向か左右される.

図 3-1 に大竹らによって分類された  $sp^3/sp^2$ /水素三元相図[48]を示す. DLC はその組成により HV 硬度約 2000 以上, かつ, 摩擦係数約 0.1 の摩擦特性が特徴である. また代表的な成膜法として, 以下の 2 種の成膜法がある. それぞれの成膜法を図 3-2, 図 3-3 に示す.

① PVD (Plasma Vapor Deposition : 物理蒸着法)

水素を含有しない, ta-C (tetrahedral amorphous Carbon),  
a-C (amorphous Carbon) が成膜可能

② CVD (Chemical Vapor Deposition : 化学蒸着法)

水素を含有する, a-C:H (Hydrogenated amorphous Carbon),  
ta-C:H (Hydrogenated tetrahedral amorphous Carbon) が成膜可能

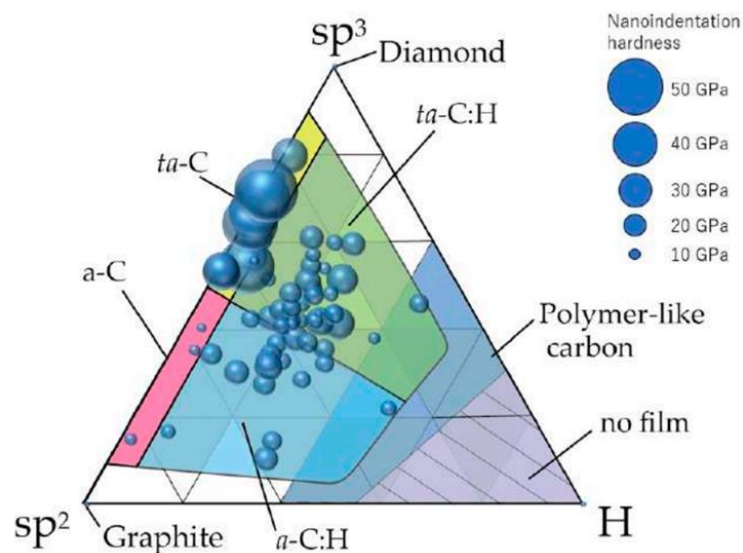


図 3-1  $sp^3 / sp^2$  / 水素三元相図 [48]

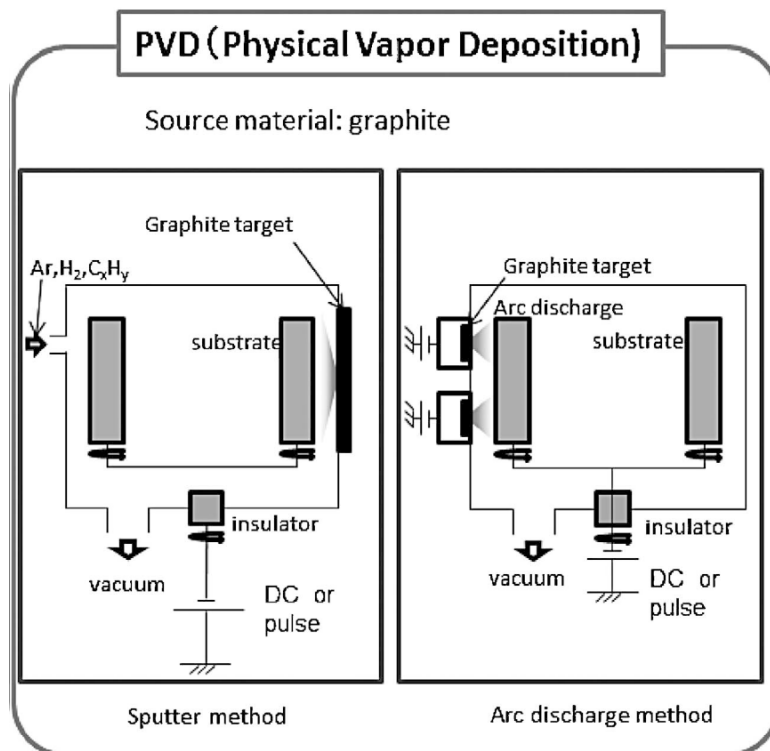


图 3-2 PVD 成膜法 [49]

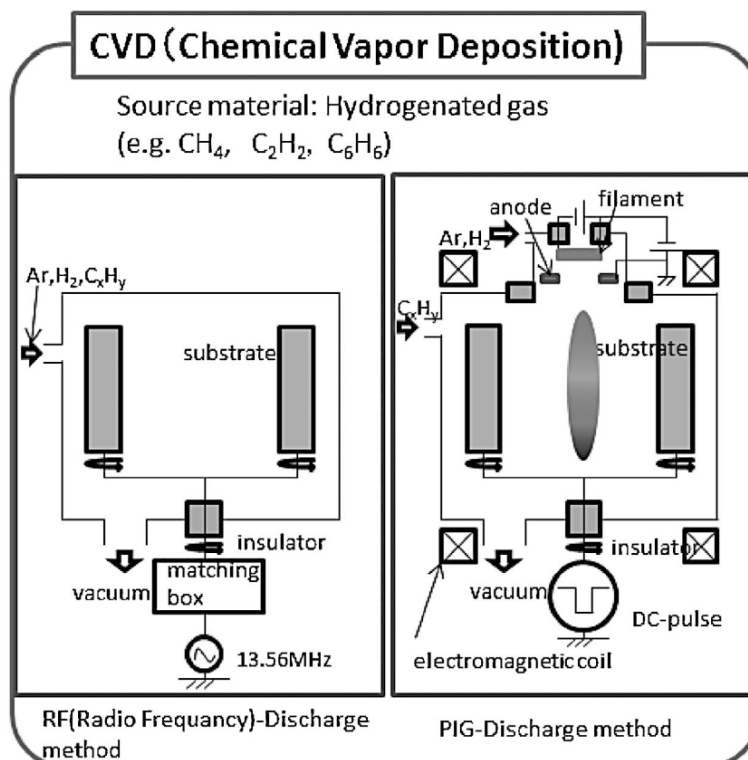


图 3-3 CVD 成膜法 [49]

PVD は固体ターゲットを利用し、アーク放電によりグラファイトをイオン化、成膜する事から、ドロップレットと称する膜表面に微細な硬質の突起が多数形成される。このドロップレットの発生はアーク放電時に数～数十 mm 以上のグラファイトの塊が飛散し、一部が膜中に取り込まれて成長することによる。ドロップレットは使用される状況によってはしゅう動状態に悪影響を及ぼすことが報告されており[50]、適材適所な膜種を選定することが重要である。ドロップレットへの対策としては発生を抑制する成膜法[51][52]の開発が進められているほか、成膜後の研磨により除去する方法があるが、完全に除去し切ることは困難である。

一方で CVD では、 $C_2H_2$ (アセチレン)などのガスを用いることからドロップレットは原理的に発生せず、基材面形状、面粗度に準じた膜が形成される。さらには特性を改善するために種々の金属元素を添加した DLC が開発されている[53]～[56]。

本試験では実機の汎用アルミニウム合金製軸受に対し、最適な DLC 膜種を選定を行い、試験軸のジャーナル部に成膜を行った。

### 3.2 ブロックオンリング摩擦摩耗試験

#### 3.2.1 試験条件

ジャーナルへの DLC コーティングにおける最適な DLC 膜種選定のため、BURKER U MT Tribolab を用い、ブロックオンリング摩擦摩耗試験を行った。試験に用いたブロックとリングの概要を図 3-4 に、試験機概要を図 3-5 に示す。またブロックとリングの主要諸元、および試験条件を表 3-1 に示す。

試験には 6.35 x 15.75mm の試験面を有する、面粗度  $Ra0.02\mu m$  の SUJ2 製ブロック、およびしゅう動面幅 8.76mm の  $\phi 35mm$  で、面粗度  $Ra0.05\mu m$  の SUJ2 リングを用いた。潤滑油には 2. 8 項で述べた 0W-20 の市販エンジンオイルを用い、油温  $80^{\circ}C$  で試験を行った。負荷荷重は 32N(面圧 100MPa)一定、リング回転数は 0~5000rpm まで連続的に上昇させ摩擦係数を取得する。

この試験条件にて a-C:H DLC、および ta-C DLC を成膜したブロックの摩擦特性を比較した。しかし a-C:H 膜は、本研究で扱うエンジン用潤滑油に、摩擦調整剤として含まれる MoDTC との組合せにおいて低摩擦が得られる一方、摩耗が顕著に増加することが報告されている[57]。これは、MoDTC は DLC と相互作用することで分解し、 $MoS_2$ (Molybdenum disulfide：二硫化モリブデン)、および  $MoO_3$ (Molybdenum trioxide：三酸化モリブデン)を生成するが、 $MoO_3$ の鋭いエッジ結晶構造により DLC コーティングが破壊されるためとされている。その対策として TMS[Tetramethylsilane,  $Si(CH_3)_4$ ]を用いた Si(シリコン)含有 a-C:H:Si 膜は MoDTC 含有潤滑油環境下においても顕著な摩耗を発生せず、低摩擦が得られたと報告されている[58]。これを考慮し、用いる a-C:H 膜はシリコンを含有する a-C:H:Si 膜とした。この a-C:H:Si DLC はプラズマ CVD で成膜し、水素含有量約 20at%、シリコン含有量約 1.8at%、膜厚は約  $1\mu m$ (カロテスト結果)である(表 3-2)。ta-C は PVD により膜厚約  $1\mu m$ [TEM(Transmission Electron Microscope：透過型電子顕微鏡)断面観察結果]で成膜し、実質的に水素およびシリコンを含有しない(表 3-3)。

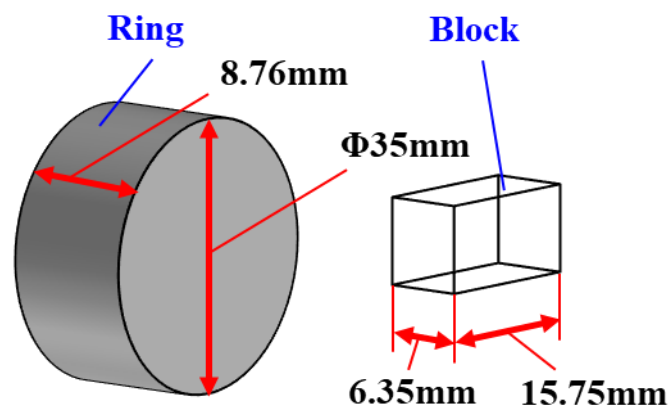


図 3-4 ブロックオンリング試験用ブロックとリング

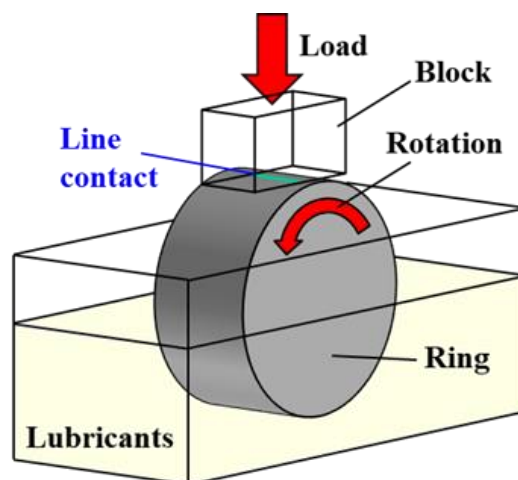


図 3-5 ブロックオンリング試験機(概略)

表 3-1 ブロックとリングの主要諸元と試験条件

	Block	Ring
Size	6.35 x 15.75mm	Φ35mm (Outer diameter), 8.76mm (width)
Material	SUJ2	SUJ2
Coating	Non-coating,	
	a-C:H:Si, ta-C	
Surface Roughness	Ra0.05μm (Non-coat)	Ra0.05μm
Test condition		
Lubricants	0W-20	
Oil temperature	80°C	
Rotation speed	0~5000 rpm	
Load	32 N (Specific load 100MPa)	

表 3-2 a-C:H:Si DLC 主要諸元

Process / Type	P-CVD / a-C:H:Si
Hydrogen content	$\div 20\text{at}\%$
Silicon content	$\div 1.8\text{at}\%$
Film thickness	$\div 1\mu\text{m}$

表 3-3 ta-C DLC 主要諸元

Process / Type	PVD / ta-C
Hydrogen content	—
Silicon content	—
Film thickness	$\div 1\mu\text{m}$



### 3.2.2 試験結果

リング回転数に対する摩擦係数の特性のグラフを図 3-6 に示す。摩擦係数は ta-C コートが一番低く、次に a-C:H:Si コートで、未コートの SUJ2 ままのブロックは全回転域で摩擦係数が一番高かった。

ta-C, a-C:H:Si とともにリング回転数約 1000rpm までは部分的に差異はあるものの、ほぼ同等の特性を示した。約 1000rpm から 4000rpm までは a-C:H:Si は 2000rpm をピークになだらかな山形を示し、この結果 ta-C より摩擦係数が低い傾向を示すが、4000rpm 以降は ta-C とほぼ同等の摩擦係数であった。

この山形を示す摩擦係数の特性は鋼ジャーナルにも若干現れており、ピークは 3000rpm となっているように見える。しかし両者がこの山形の特性を示す詳細は不明であり、今後の課題としたい。

次に Grubin の線接触状態の EHL 油膜厚さ計算式[59]に基づき油膜厚さ比を算出した。その結果、およそ 800rpm から上の回転数領域において、油膜厚さ比は 3 よりも大きい値であった。油膜厚さ比は算出された最小油膜厚さ  $h_{\min}$  およびしゅう動する 2 物体の合成表面粗さより算出され、その値が 3 よりも大きい場合に流体潤滑域と考えられる。図 3-6 に算出した油膜厚さ比 3 よりも大きい領域を記した。

また、これらより DLC による流体潤滑領域での摩擦低減効果を確認した結果、図 3-6 から流体潤滑領域と考えられるのは ta-C と a-C:H:Si の摩擦係数特性がラップしている 4000rpm 以降と考えられるが、油膜厚さ比計算結果からは 800rpm 以降であった。この差異については今後の研究課題としたい。

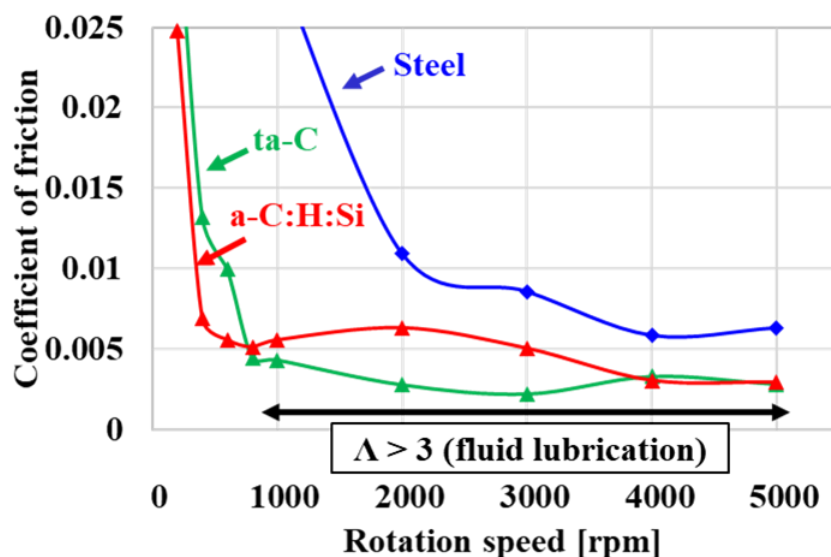


図 3-6 ブロックオンリング試験における、未コート, ta-C コート, a-C:H:Si コート  
ブロックにおけるリング回転数に対する摩擦係数特性

### 3. 2. 3 試験前後のしゅう動表面粗さと断面曲線

試験前後の各ブロックとリングの面粗度測定結果を表 3-4, および表 3-5 に示す。試験前のリングの面粗度は  $Ra0.038\mu m$ ,  $Rz0.437\mu m$  であり, ブロックの面粗度は未コート SUJ2 ままは  $Ra0.013\mu m$ ,  $Rz0.173\mu m$  で, a-C:H:Si コートブロックは  $Ra0.016\mu m$ ,  $Ra0.187\mu m$ , また ta-C コートブロックは  $Ra0.016\mu m$ ,  $Rz0.209\mu m$  であった。

この 3 種のブロックの Ra 値はほぼ同等であるが, Rz に関しては ta-C を成膜したブロックはドロップレットが存在するため  $0.209\mu m$  と他の 2 つのブロックの Rz より若干大きかった。

試験後のブロックの面粗度は, 未コートが  $Ra0.024\mu m$ ,  $Rz0.429\mu m$ , a-C:H:Si コートが  $Ra0.029\mu m$ ,  $Rz0.210\mu m$ , ta-C コートが  $Ra0.017\mu m$ ,  $Rz0.246\mu m$  であった。

また, 試験後のリングの面粗度に関しては, しゅう動相手が未コートブロックの場合,  $Ra0.028\mu m$ ,  $Rz0.339\mu m$ , a-C:H:Si コートの場合,  $Ra0.022\mu m$ ,  $Rz0.181\mu m$ , ta-C コートの場合は  $Ra0.030\mu m$ ,  $Rz0.338\mu m$  であった。

ta-C コートブロックの場合, 試験前の Ra が  $0.209\mu m$  と他の 2 つのブロックの Ra 値より若干大きい, 試験後のブロックの Ra, Rz 共に一番小さかった。この理由としては, 未コートや a-C:H:Si コートに対し約 60GPa と膜硬度が高いため, および DLC のラッピング効果[60]と推察する。

これに対し ta-C コートブロックのしゅう動相手のリングの試験後の面粗度 Ra は  $0.030\mu m$  と, 未コートおよび a-C:H:Si コートブロックと組合わせたリングの面粗度より大きかった。この理由は ta-C コートのドロップレットにより摩耗したものと考えられる。

a-C:H:Si コートブロックのしゅう動相手のリングの試験後の面粗度は最も小さかった。その理由はやはり DLC のラッピング効果と考える[60]。

以上の試験前後のブロックとリングの断面曲線を図 3-7 から図 3-16 に示す。

図 3-5 に示す未コート SUJ2 ブロックの試験後の断面曲線は, ta-C コート, a-C:H:Si コートブロックの試験後のそれに対し, 微小な突起が多く存在し, 表 3-4 に示すように Rz 値が大きいたことが認められる。一方, a-C:H:Si コートブロックは試験前の Ra, Rz 値が未コート SUJ2 ブロックとほぼ同等であったにも拘らず, 試験後の Ra, Rz 値は未コートブロックより小さくなっていることが断面曲線からも認められる(図 3-11)。しかしブロックしゅう動部両端部寄り 2 カ所におよそ  $0.3\mu m$  の凹部が認められる(図 3-11)が, 図 3-15 に示すしゅう動相手の試験後のリングの粗さ曲線にはこのような凹部を形成するような粗さは認められず, この理由は不明である。

これらに対し, ta-C コートブロックは試験前の Ra, Rz 値が他の 2 つのブロックに対し一番大きかった(表 3-4)にも拘らず, 試験後の Rz 値が一番小さくなっており, これは図 3-9 から認められる。しかし, 図 3-16 に示すしゅう動相手のリングの試験後の面粗度は, a-C:H:Si コートブロックのしゅう動相手の試験後のリング面粗度より大きく, これドロップレットの存在と, ta-C の約 60MPa という高硬度によるものと推察する。

既述のとおり摩擦係数は a-C:H:Si に対し ta-C の方が低かった。

a-C:H:Si DLC は Si(シリコン)を含有しており、これに対し ta-C DLC はシリコンを含有しておらず、熱伝導率は  $20\text{W/m} \cdot \text{K}$ [61]で、シリコンの  $83.7\text{W/m} \cdot \text{K}$ [62]より熱伝導率が小さく、またブロックオンリング試験は線接触しゅう動であることなどから、ta-C は a-C:H:Si に対し、真実接触部で発生した熱がブロック試験片へ伝達されにくく、油温が上昇し、実粘度が低くなったことが理由として考えられる。

以上、ブロックオンリング試験結果から、DLC 膜種としては ta-C が最も摩擦低減効果は大きいと考えられる。次の第3章にて、ta-C と a-C:H:Si コートジャーナルに対し、軸受試験機を用い摩擦特性、焼付き特性を検証し最終判断を行った。

表 3-4 試験前後のブロック粗さ

Before test

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rpk [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]
Steel	0.013	0.173	0.030	0.020
a-C:H:Si	0.016	0.187	0.025	0.023
ta-C	0.016	0.209	0.027	0.022



After test

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rpk [ $\mu\text{m}$ ]
Steel	0.024	0.429	0.0649
a-C:H:Si	0.029	0.31	0.0385
ta-C	0.017	0.246	0.0336

表 3-5 試験前後のリング粗さ

Before test

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rpk [ $\mu\text{m}$ ]	Rq [ $\mu\text{m}$ ]
Ring	0.038	0.437	0.0397	0.056



After test

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rpk [ $\mu\text{m}$ ]
Ring (Steel block test)	0.028	0.339	0.0384
Ring (a-C:H:Si block test)	0.022	0.181	0.0257
Ring (ta-C block test)	0.03	0.338	0.0196

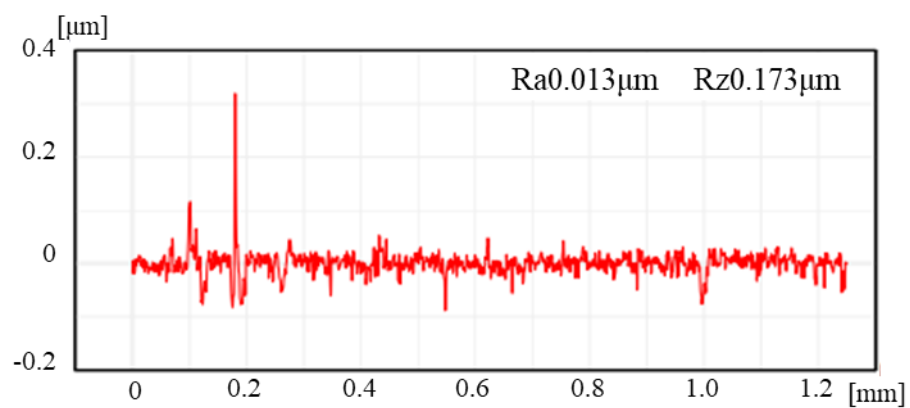


図 3-7 試験前未コート SUJ2 ブロック粗さ測定結果

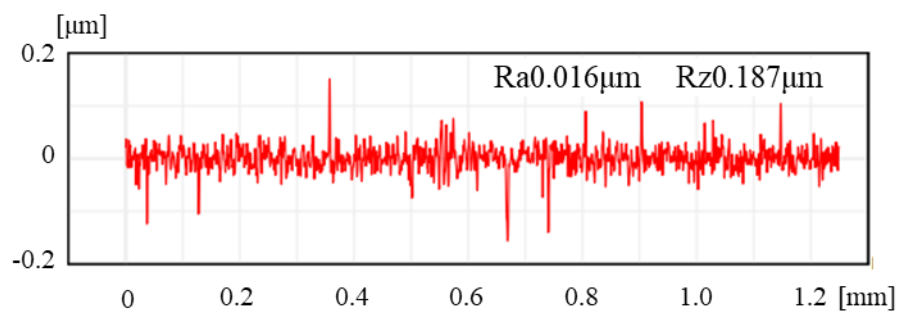


図 3-8 試験前 a-C:H:Si コートブロック粗さ測定結果

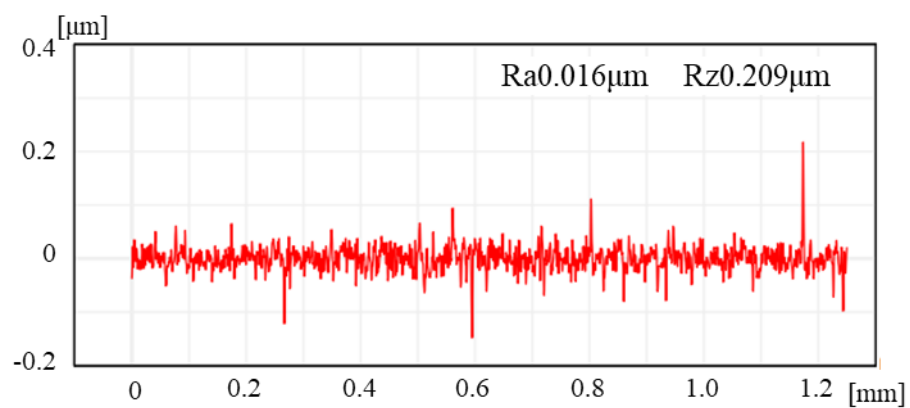


図 3-9 試験前 ta-C コートブロック粗さ測定結果

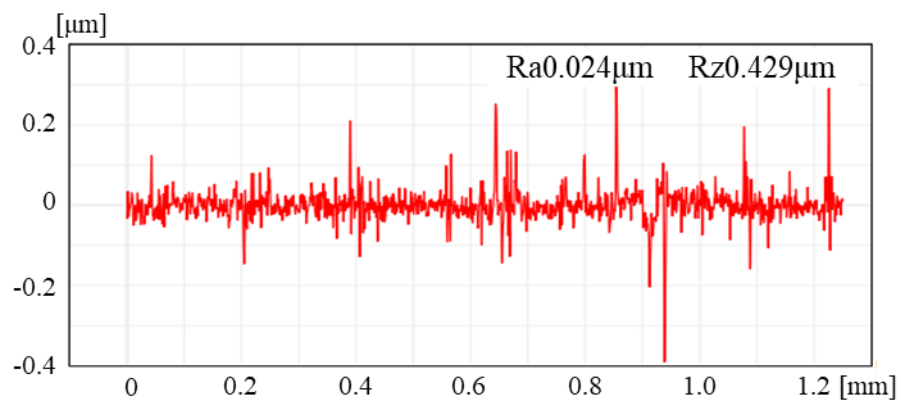


図 3-10 試験後未コート SUJ2 ブロック粗さ測定結果

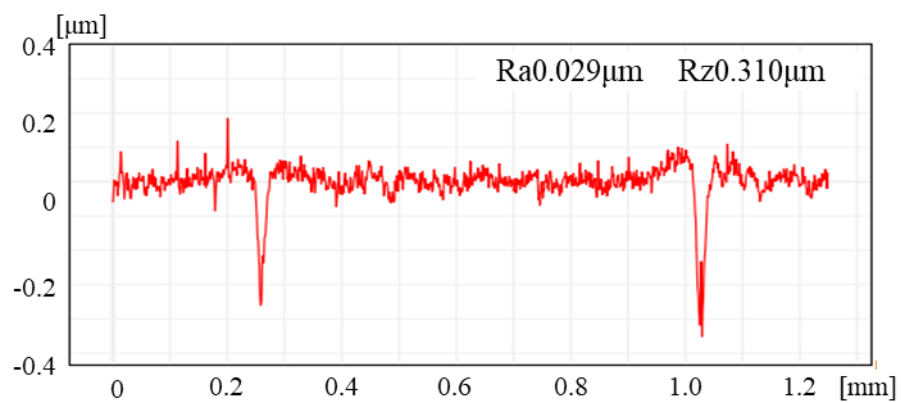


図 3-11 試験後 a-C:H:Si コートブロック粗さ測定結果

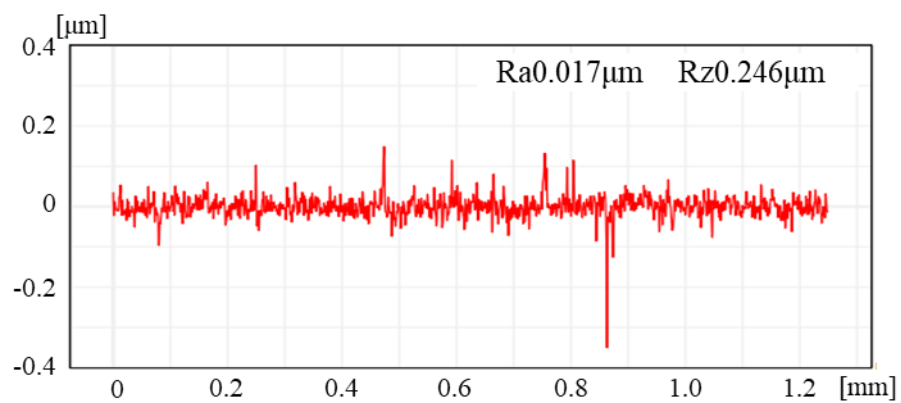


図 3-12 試験後 ta-C コートブロック粗さ測定結果

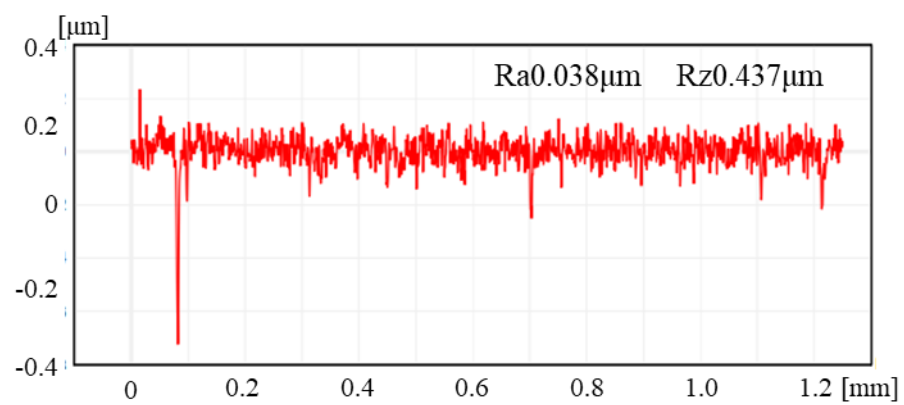


図 3-13 試験前リング粗さ測定結果

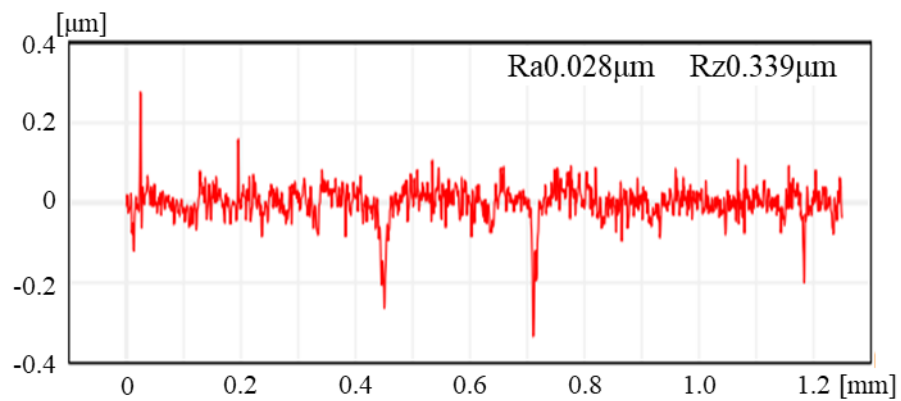


図 3-14 試験後リング粗さ測定結果 (ブロック；未コート SUJ2)

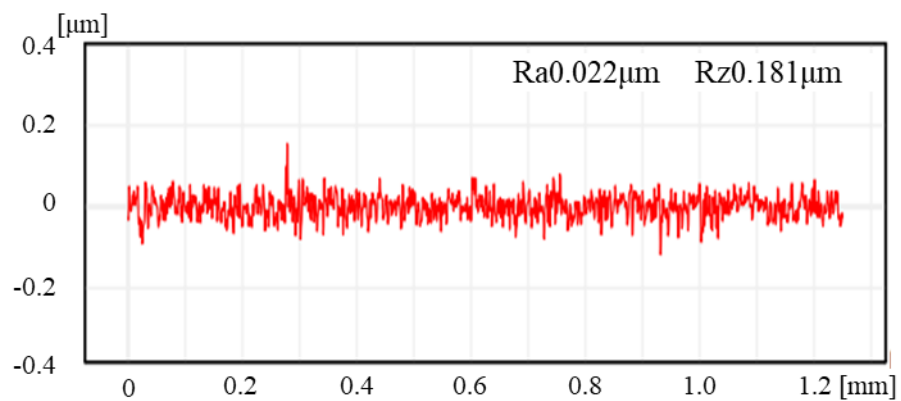


図 3-15 試験後リング粗さ測定結果 (ブロック；a-C:H:Si コート)

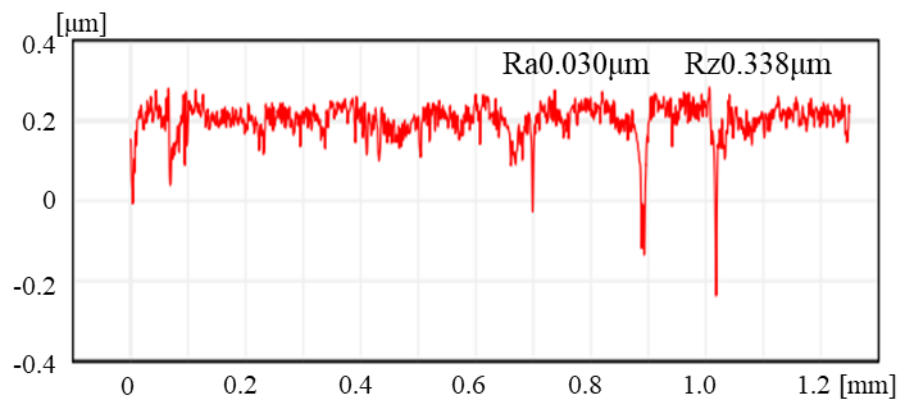


図 3-16 試験後リング粗さ測定結果 (ブロック；ta-C コート)

### 3.3 軸受試験機による焼付き試験

#### 3.3.1 試験条件概要

ブロックオンリング試験結果を受け、DLC 膜種選定のために軸受試験機を用い、ブロックオンリング試験において摩擦係数が一番低かった ta-C を成膜した試験軸ジャーナル(図 3-17 左画像)、および、a-C:H:Si を成膜したジャーナル(図 3-17 右画像)を用意した。

ta-C は TEM による断面観察結果、膜厚約  $1\mu\text{m}$  であった。図 3-18 に成膜前、図 3-19 に成膜後のジャーナルの断面形状測定結果を示す。その結果、成膜後はドロップレットの存在が認められた。

a-C:H:Si はカロテスト結果、膜厚約  $1\mu\text{m}$  であり、図 3-20 に成膜後のジャーナルの断面形状測定結果を示す。a-C:H:Si は製法原理的にドロップレットの発生はなく、ta-C に比べ平滑な面となっている。

軸受は表 2-2 の①に示す平滑なしゅう動面を有する、しゅう動幅 17mm のものを、潤滑油には、表 2-4 に示す 0W-8(w/o MoDTC)の試作油を用い、油温  $110^{\circ}\text{C}$  とした。

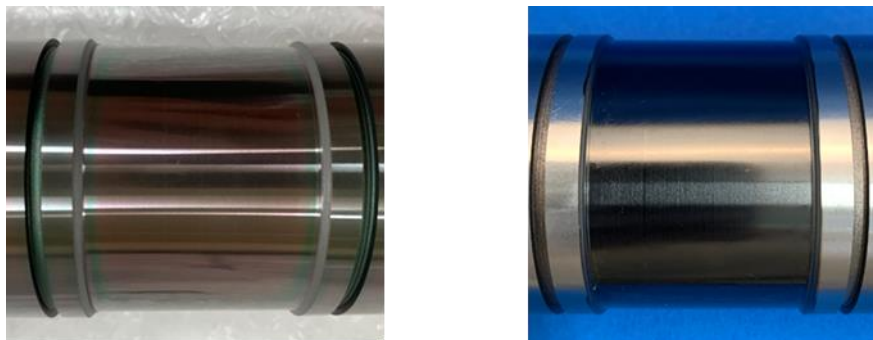


図 3-17 ta-C(左画像) および a-C:H:Si コートジャーナル(右画像)の外観



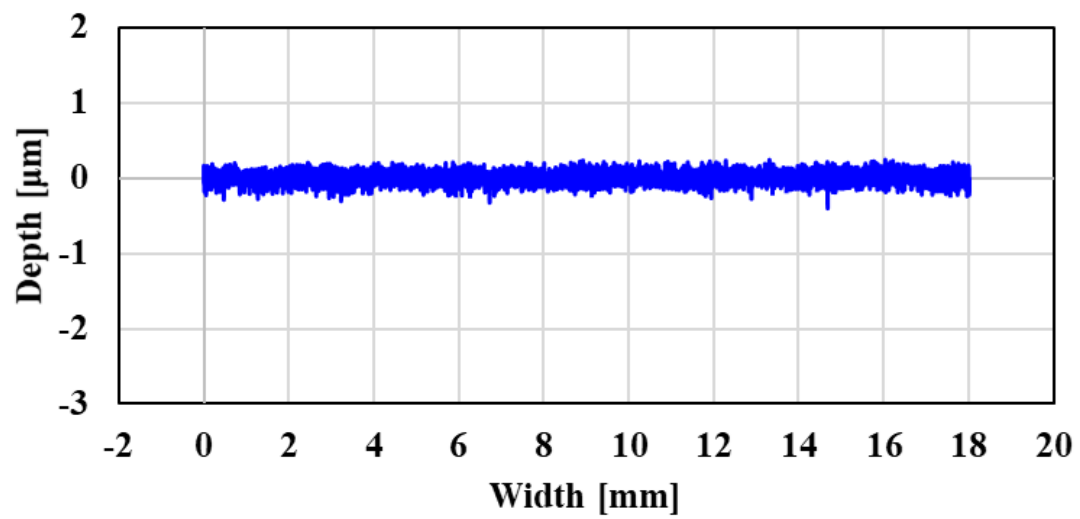


図 3-18 成膜前ジャーナルの断面形状

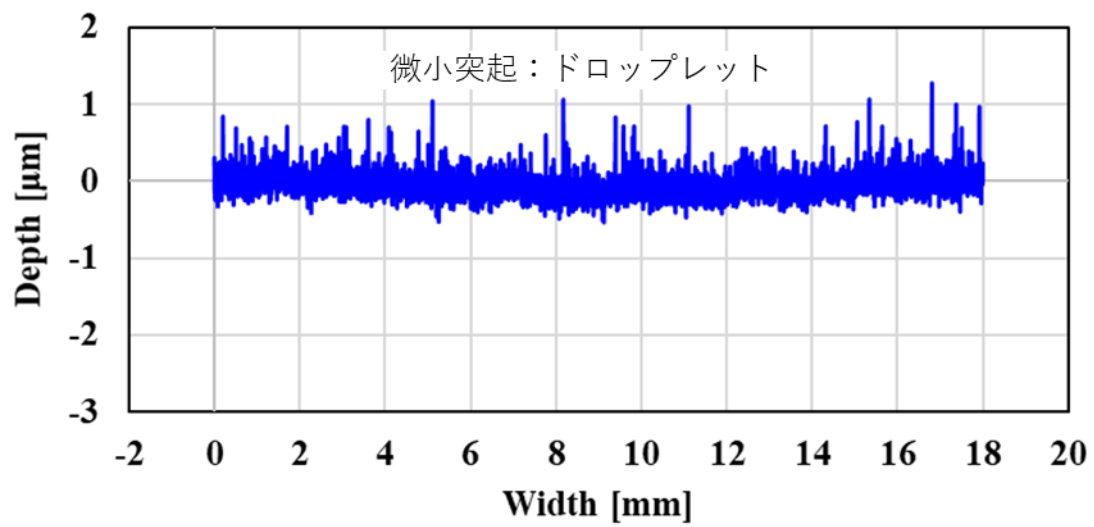


図 3-19 ta-C 成膜後のジャーナルの断面形状

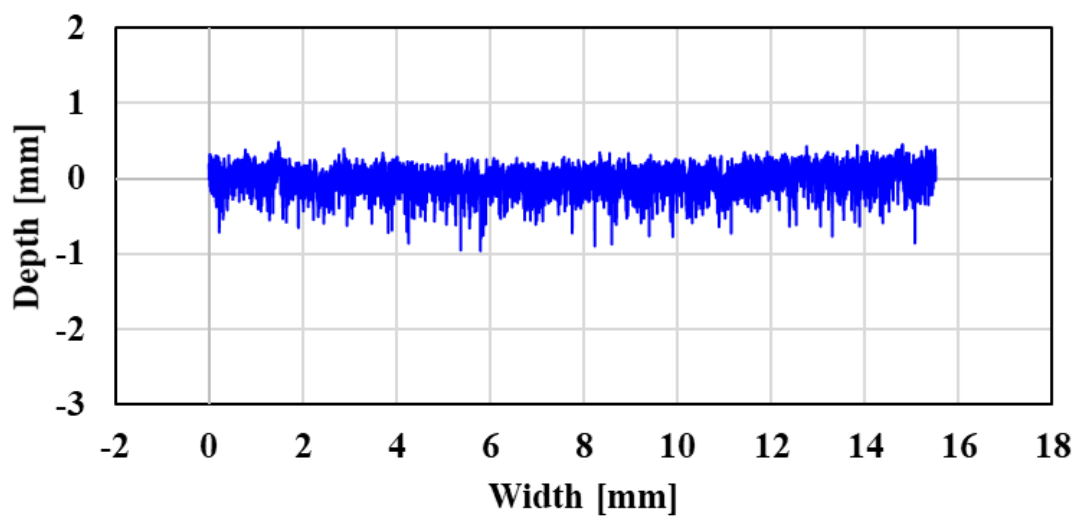


図 3-20 a-C:H:Si 成膜後のジャーナルの断面形状

### 3.3.2 試験結果および試験前後のしゅう動表面粗さと断面曲線

3.3.1 に示した ta-C ジャーナルと、a-C:H:Si ジャーナルの両者に対し、図 2-5 に示す条件の焼付き試験を実施した。その結果を図 3-21 に示す。尚、計算面圧はジャーナル荷重を軸受しゅう動面の投影面積で除して求めた(図 3-22)。

試験の結果、ta-C コートジャーナルは 60kN(面圧 74MPa)で焼付きが発生した。これに対し、a-C:H:Si コートジャーナルは装置限界負荷荷重 99kN(面圧 121MPa)においても焼付きの発生はなかった。

試験前後のジャーナルの面粗度(表 3-6)を比較すると、試験前の a-C:H:Si ジャーナルの面粗度は  $Ra0.099\mu m$ ,  $Rz0.773\mu m$  であり、ta-C ジャーナルは  $Ra0.064\mu m$ ,  $Rz0.769\mu m$  であった。試験後の a-C:H:Si ジャーナルの面粗度は  $Ra0.095\mu m$ ,  $Rz0.667\mu m$  であり、ta-C ジャーナルは  $Ra0.065\mu m$ ,  $Rz0.703\mu m$  と、両者とも Ra, Rz とともに試験前とほぼ同等であった。しかし ta-C ジャーナルは、Rpk 値が大きく、これはドロップレットによると思われる。

軸受に関しては、試験前の a-C:H:Si ジャーナルのしゅう動相手の軸受は  $Ra0.067\mu m$ ,  $Rz0.387\mu m$ , ta-C ジャーナルのしゅう動相手の軸受は  $Ra0.063\mu m$ ,  $Rz0.486\mu m$  であった。試験後の a-C:H:Si ジャーナルの軸受は  $Ra0.069\mu m$ ,  $Rz0.605\mu m$  と、試験前に対しほぼ同等であったが、ta-C ジャーナルの軸受は焼付いたため  $Ra0.239\mu m$ ,  $Rz2.163\mu m$  と大きくなっていた。

次に図 3-23、図 3-24 に試験後の ta-C コートジャーナル、および a-C:H:Si コートジャーナルの断面形状を、図 3-25、図 3-26 に試験前の ta-C コートジャーナル、および a-C:H:Si コートジャーナルのしゅう動相手である軸受の断面形状を、図 3-27、図 3-28 に、図 3-25、図 3-26 に対応する試験後の軸受断面形状を示す。

図 3-23 より、試験後の ta-C コートジャーナルには試験前に確認されたドロップレット(図 3-19)の残存が確認された。また図 3-24 と図 3-20 を比較すると、a-C:H:Si コートジャーナルでは試験前後に目立った断面形状の変化は確認されなかった。

図 3-27 に示す試験後の、ta-C コートジャーナルのしゅう動相手の軸受の断面形状は、焼付きの発生により、試験前の図 3-25 に比べしゅう動幅全域で大きく荒れている。また図 3-28 に示すように、試験後の a-C:H:Si コートジャーナルのしゅう動相手の軸受の断面形状には、図 3-27 に示した ta-C コートジャーナル使用時のような面荒れは見られなかった。

上記の通り、ブロックオンリング試験では a-C:H:Si に対し ta-C の方が低摩擦であったのに対し、軸受試験機による試験結果は逆となった。

これは、ブロックオンリング試験では、ブロック、リング共に材質が SUJ2 であり、DLC コートしたブロックの相手材の表面硬さが HRC50 程度と硬いため、ta-C では、図 3-9 に示す ta-C コーティング特有のドロップレット由来の鋭利な凸部が摩擦初期に摩擦減して突起が小さくなるのに対して、軸受試験機試験の場合、実部品を用いるため、軸受しゅう動面は硬さが低いアルミニウム合金であり、ta-C のドロップレットの鋭利な凸部(図 3-19)により、図 3-27 に示すように軸受しゅう動面に深い摩耗痕を形成するととも

に、全体の摩耗量も増大したことが一因と考えられる。この深い摩耗痕の形成時に、アルミニウム合金中に分布する軟質のスズがしゅう動面に掘り起こされ、表面に露出したスズが摩擦により素早く溶融したものと類推される。

一方、a-C:H:Siにおいては、炭化水素系のガスを原料とするために、図 3-20 に示すように成膜後のジャーナルには、ドロップレット由来の鋭利な凸部が形成されず、よって、図 3-28 に示すしゅう動相手の軸受の試験後の断面形状には面荒れがほぼなく、これは DLC のラッピング効果によると思われる[60]。

先に述べた通り、ブロックオンリング試験では a-C:H:Si に対し ta-C の方が低摩擦であったが、軸受試験機による試験結果は逆となった。この結果は試験後のしゅう動面の粗さの違いの他にも、DLC 種の違いによる熱伝導度の違いやスズとの凝着性、溶着性の違い等の影響も考えられるが、これらの影響については今後の課題としたい。

軸受試験機では先に述べたように実部品を用いた試験であり、試験条件も実機運転状態を再現した試験であることから、本研究においては表 3.-2 に示す主要諸元の a-C:H:Si DLC (以下 DLC と記す)を選定した。

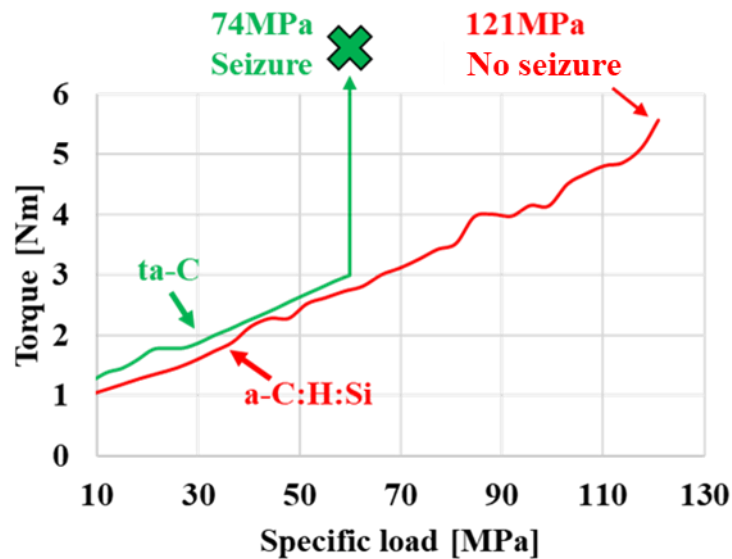


図 3-21 ta-C および a-C:H:Si ジャーナルの軸トルク特性

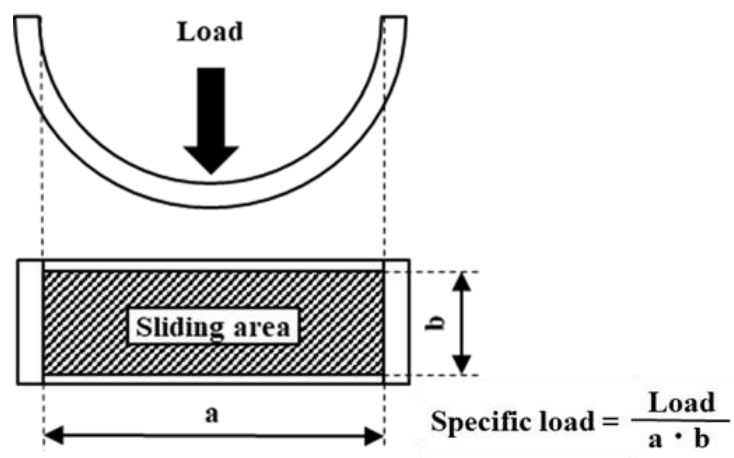


図 3-22 面圧計算法

表 3-6 試験前後のジャーナル(左)と軸受(右)面粗度

Before test

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rpk [ $\mu\text{m}$ ]
a-C:H:Si	0.099	0.733	0.071
ta-C	0.064	0.769	0.22



After test

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rpk [ $\mu\text{m}$ ]
a-C:H:Si	0.095	0.667	0.073
ta-C	0.065	0.703	0.199

Before test

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rpk [ $\mu\text{m}$ ]
a-C:H:Si	0.067	0.387	0.069
ta-C	0.063	0.486	0.098



After test

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rpk [ $\mu\text{m}$ ]
a-C:H:Si	0.069	0.605	0.136
ta-C	0.293	2.163	0.843

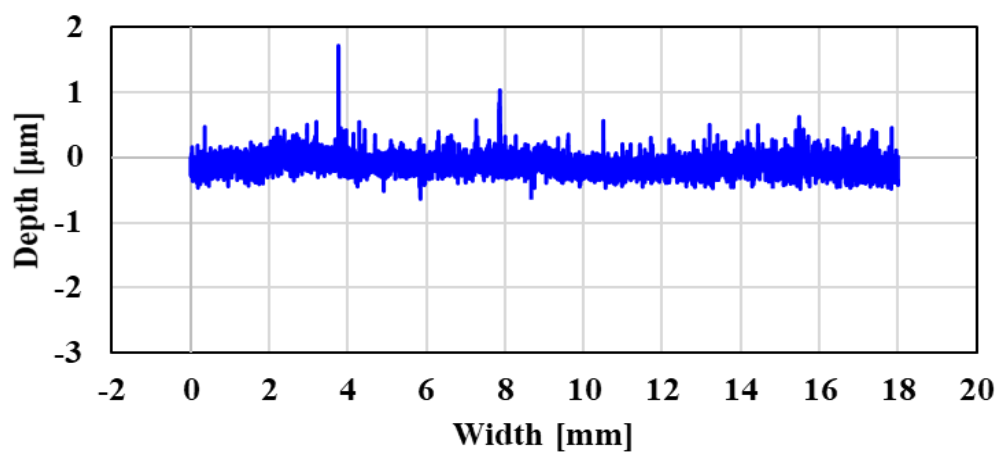


図 3-23 試験後の ta-C コートジャーナルの断面形状

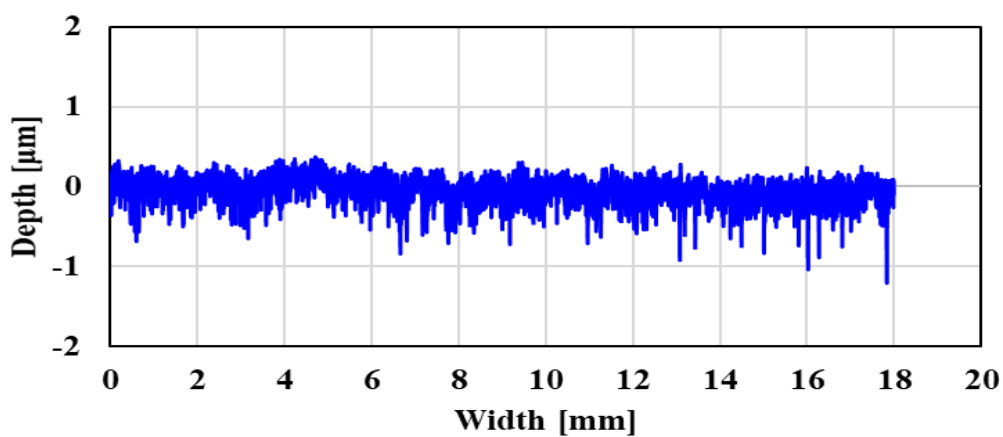


図 3-24 試験後の a-C:H:Si コートジャーナルの断面形状

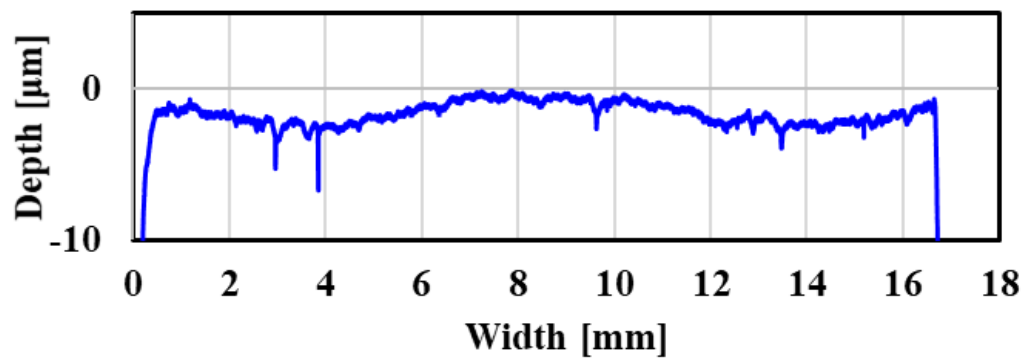


図 3-25 試験前の軸受断面形状(ジャーナル：ta-C)

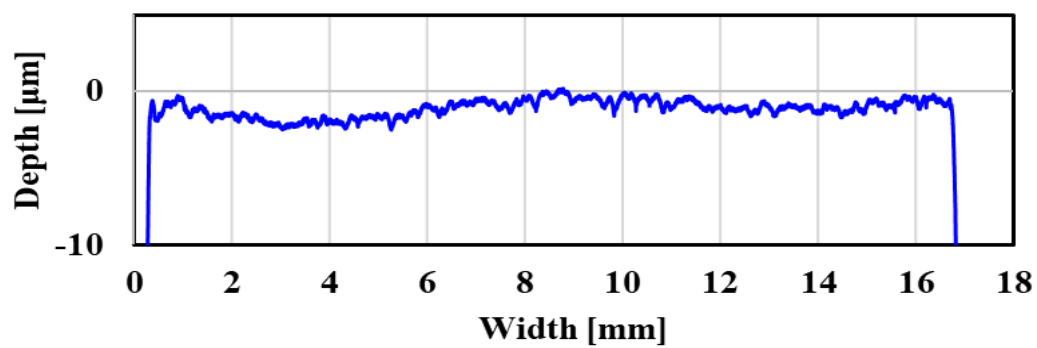


図 3-26 試験前の軸受断面形状(ジャーナル：a-C:H:Si)

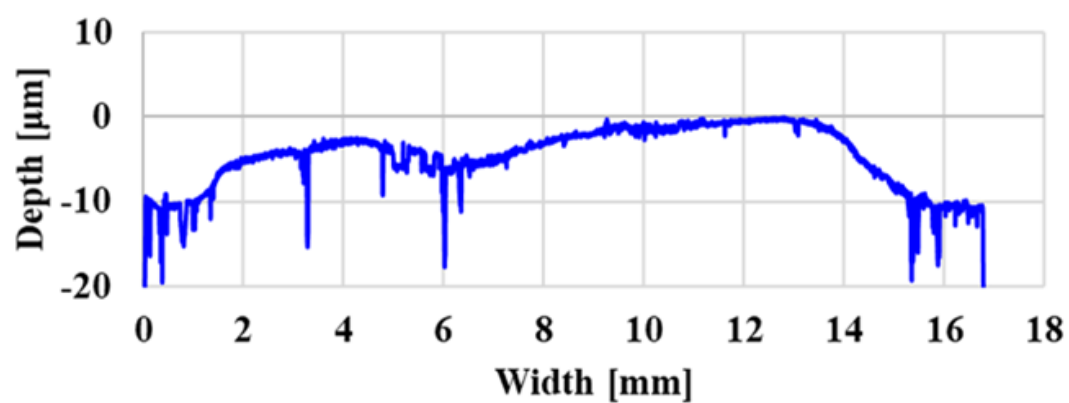


図 3-27 試験後の軸受断面形状(ジャーナル：ta-C)

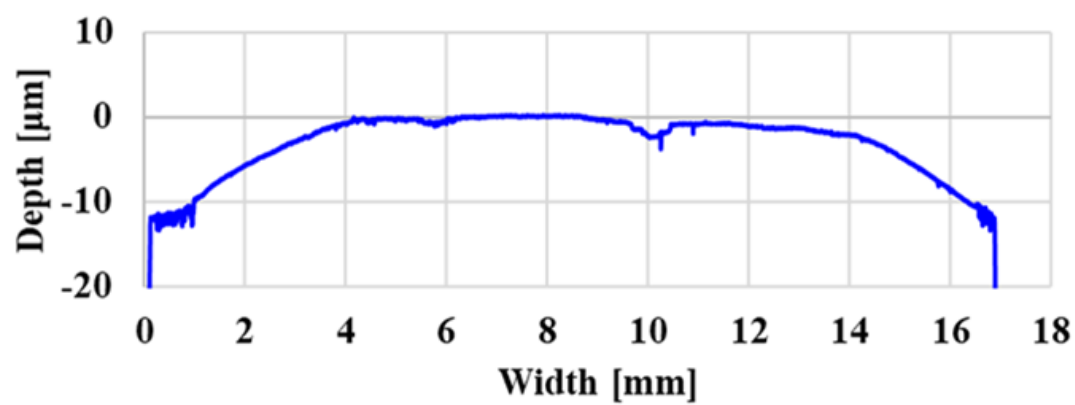


図 3-28 試験後の軸受断面形状(ジャーナル：a-C:H:Si)



### 3.4 まとめ

試験片を用いる単体しゅう動試験と、実部品を用いる軸受しゅう動試験機試験の結果から、ジャーナルコーティングに最適な DLC として、a-C:H:Si DLC を選定し、試験軸ジャーナル部には、この a-C:H:Si DLC をコーティングする。

## 第4章 DLC ジャーナルの摩擦特性および焼付き特性

### 4.1 摩擦特性と焼付き特性

#### 4.1.1 試験条件概要

第3章において軸受試験装置限界の負荷荷重である 99kN(面圧 121MPa)まで負荷しても焼付きが発生せず、焼付き限界荷重が明確とならなかったが、その原因解析として、試験前後の面粗度、元素分析等も含め SCM420H 鋼製ジャーナル(以下鋼ジャーナル)と a-C:H:Si DLC コートジャーナル(以下 DLC ジャーナル)の焼付き試験を軸受試験機にて実施した。尚、軸受は表 2-2 の①に示す平滑なしゅう動面を有する、しゅう動幅 17mm のものを、潤滑油には、2.8 項で述べた 0W-20(w/t MoDTC)の市販エンジンオイルを用い、油温 110℃で試験を行った。

#### 4.1.2 試験結果

図 4-1 に示すように鋼ジャーナルは負荷荷重 93kN(面圧 114MPa)で焼付きが発生した。また、焼付きが発生するまでの間に荷重 39kN(面圧 48MPa)と、60kN(面圧 74MPa)において、スパイク状の軸トルクの急上昇現象(以下、トルクスパイク)を 2 回確認した。このトルクスパイク現象の詳細解析については 4.4.4 項で述べる。

一方 DLC コートジャーナルの場合は負荷荷重限界の 99kN(面圧 121MPa)においても焼付きの発生はなく、トルクスパイクの発生も確認されなかった(図 4-2)。

また、図 4-3 に、エンジンの主要しゅう動部のストライベックカーブ[63]を示すが、この図からジャーナルと軸受の主な稼働領域はストライベックカーブの主に流体潤滑領域から EHL 領域とされている。よって、このストライベックカーブを参考として、図 4-4 に示す今回の鋼および DLC ジャーナルの試験結果による潤滑特性を見ると、軸回転数は 5200rpm 一定としたため、負荷荷重を低荷重領域から増加させて行った結果、摩擦係数は漸減した後、ほぼ一定の値を示す。このことから、荷重増加に伴い潤滑状態は流体潤滑から EHL 領域へと移行しているものと考えられる(図 4-4 ②)。

また、未コートの鋼ジャーナルでは計算面圧 100MPa を超える高面圧領域では摩擦係数が徐々に上がり始め、DLC ジャーナルの摩擦係数との差が大きくなった(図 4-4 ③)。これはおよそ 100MPa から混合潤滑領域に入り固体接触が増加したためと考えられる。その後、面圧 114MPa で摩擦係数が急激に上昇し焼付きが発生した。これはさらに固体接触の割合が増加した結果、焼付きに至ったものと考えられる。

これに対し DLC ジャーナルでは、100MPa 以降の領域においても摩擦係数の上昇はなく、むしろ下がる傾向であった。DLC ジャーナルでは、鋼に比べ、アルミニウムと親和性が低い特性を有している[64]ため、低摩擦を維持して焼付きには至らなかったものと考えられる。

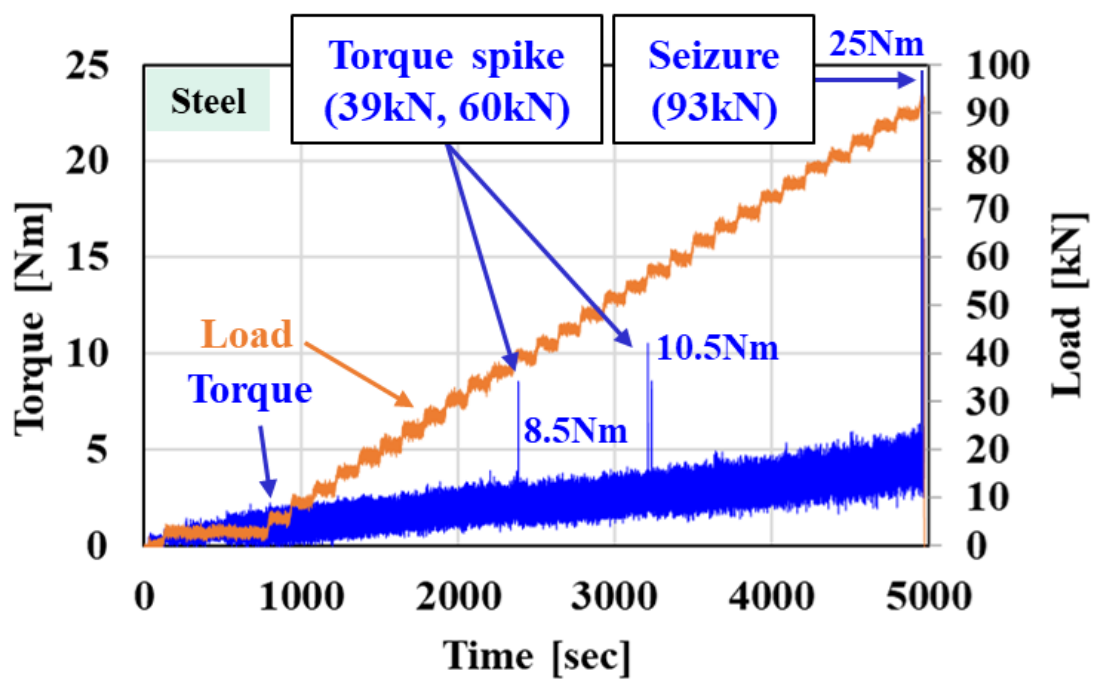


図 4-1 トルクスパイクの発現(ジャーナル：鋼)

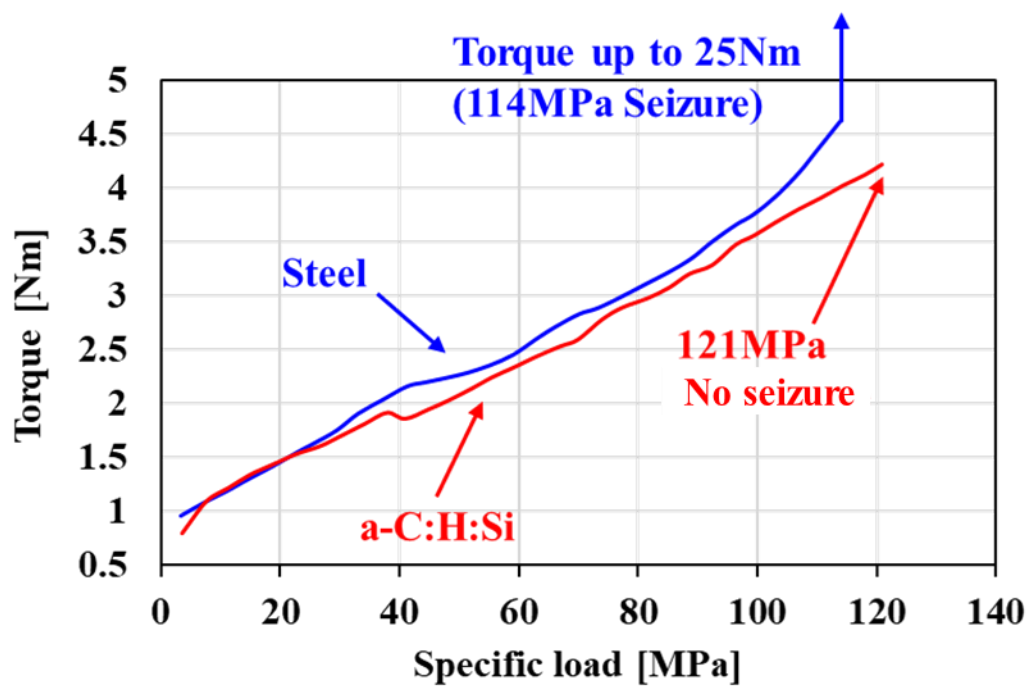


図 4-2 鋼および DLC ジャーナルの焼付き特性

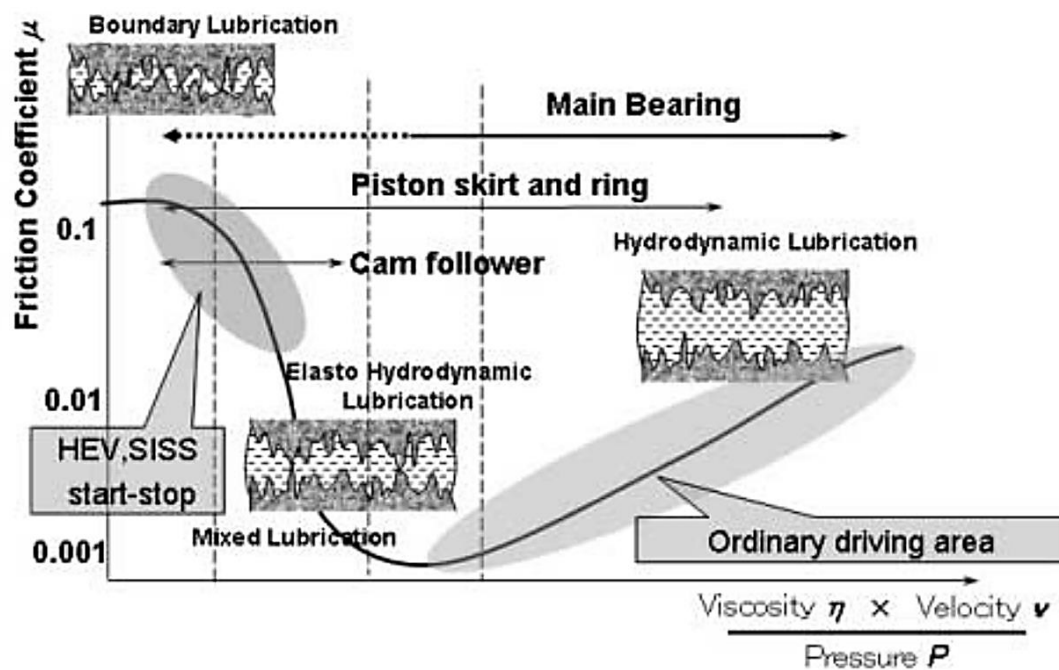


図 4-3 エンジン主要しゅう動部のストライベックカーブ

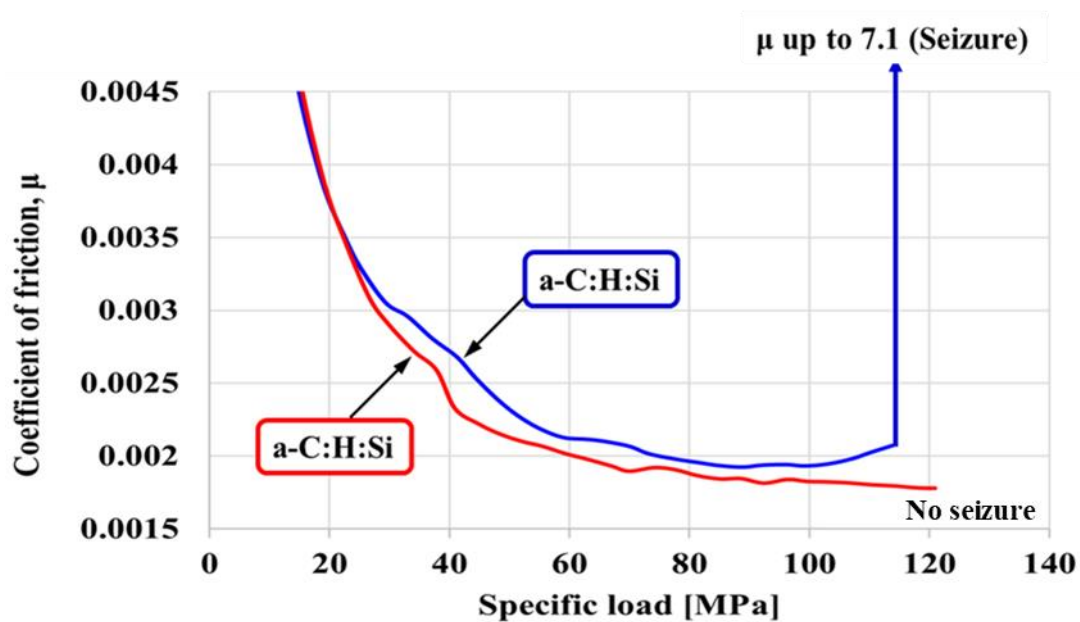


図 4-4 鋼および DLC ジャーナルの面圧に対する摩擦係数特性

#### 4.1.3 試験後のしゅう動表面粗さと断面曲線

鋼と DLC ジャーナルの焼付き特性の違いを考察するため、鋼と DLC ジャーナル、および、そのしゅう動相手の軸受のしゅう動面の状況を比較した。試験後のジャーナルと軸受の外観写真を図 4-5 および図 4-6 に、また図 4-7, 4-8 に試験前後のジャーナルと軸受の面粗度測定結果を示す。

図 4-7 に示すように、鋼ジャーナルの場合は焼付きが発生したため軸受には摩耗動痕が確認され、ジャーナル、軸受共に試験前の面粗度に対し、試験後の面粗度は大きな値となった。特に軸受に関しては大幅に悪化した。

これに対し DLC ジャーナルの場合、焼付きの発生はなく、ジャーナル、軸受共に試験後の面粗度は試験前の面粗度に対し小さくなった(図 4-8)。これは DLC のラッピング効果[60]と推察される。

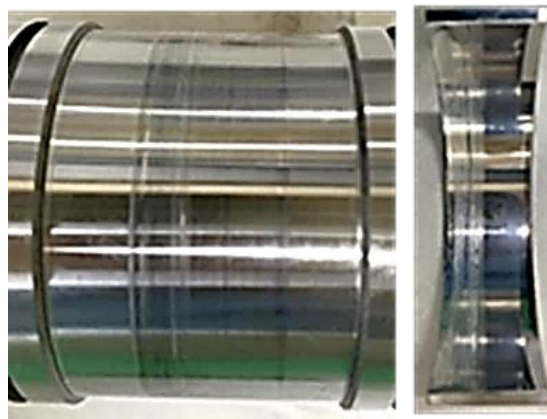


図 4-5 試験後の鋼ジャーナルと軸受



図 4-6 試験後の DLC ジャーナルと軸受

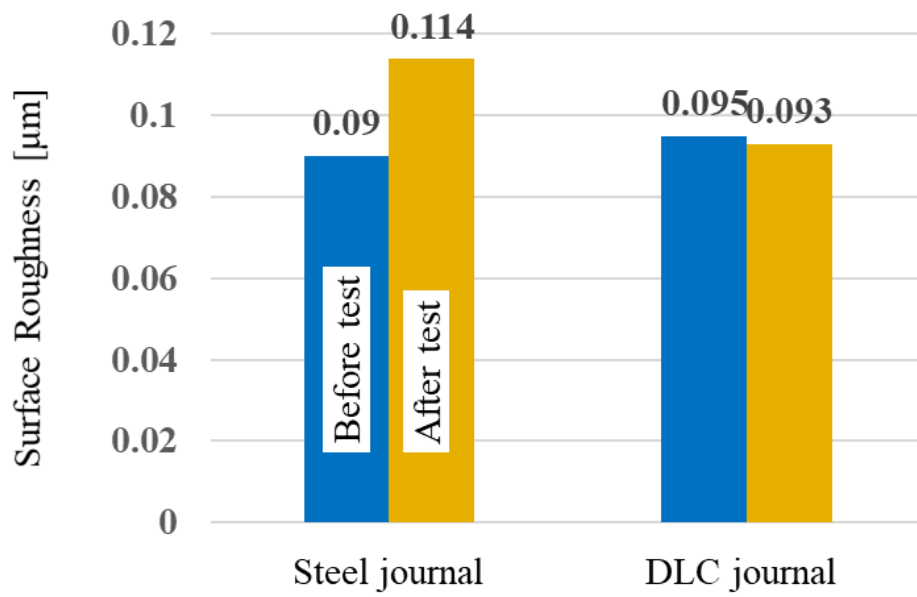


図 4-7 試験前後のジャーナル面粗度 Ra

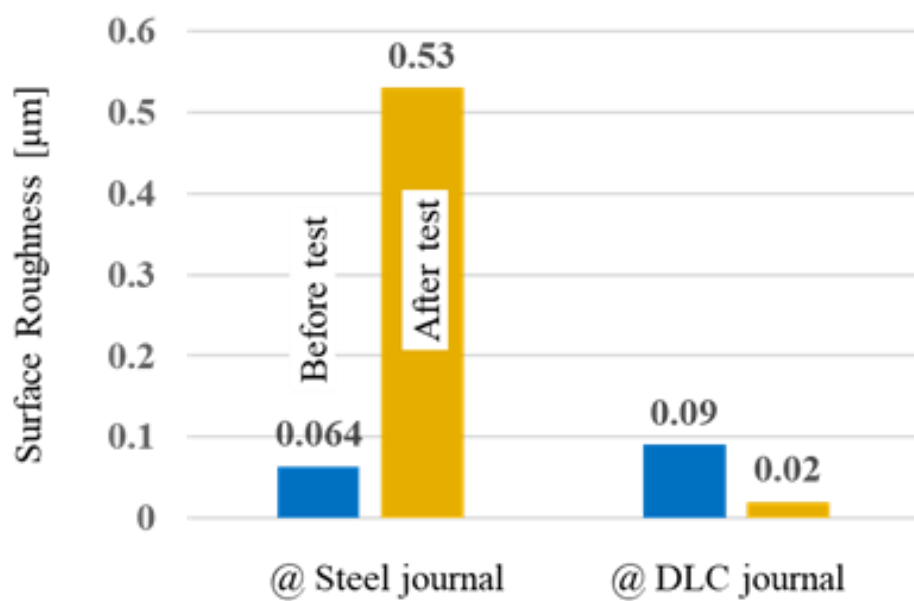


図 4-8 試験前後の軸受面粗度 Ra

次に、図 4-7, 4-8 に示す試験前後のジャーナル、軸受表面粗さ測定結果を受け、軸受の試験後の摩耗状況を断面曲線から観察した。

図 4-9 に示すように鋼ジャーナルのしゅう動相手の軸受は焼付きが発生したため、部分的におよそ 20 $\mu\text{m}$  の摩耗が確認された。

また、図 4-10 に示すように、DLC ジャーナルの場合の軸受は、幅方向端部に摩耗が認められたが、表面粗さ Ra は図 4-8 に示したように試験前より小さな値となっている。これはやはり DLC のラッピング効果[60]と考える。このように DLC ジャーナルのしゅう動相手の軸受は、試験後の面粗度が試験前より向上し、これが低摩擦化の一因となっていると考える。

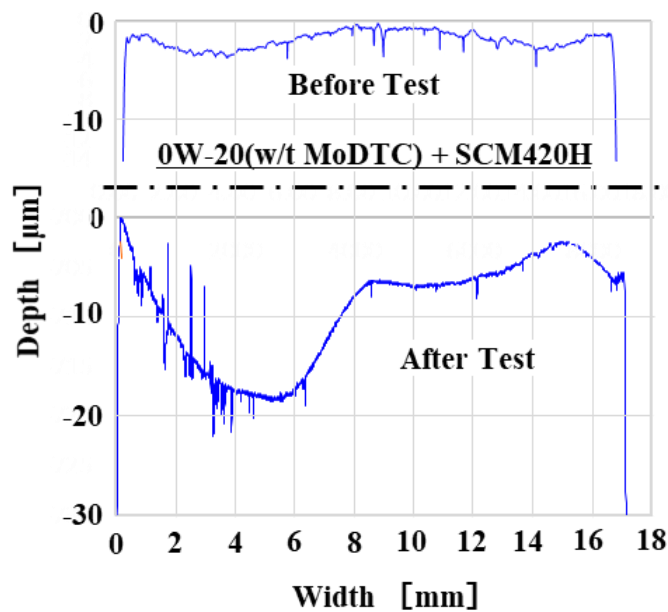


図 4-9 試験前後の軸受断面曲線 (ジャーナル：鋼)

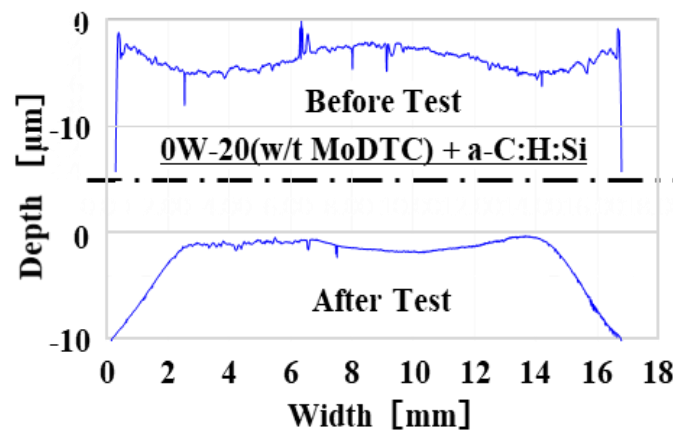


図 4-10 試験前後の軸受の断面曲線 (ジャーナル：DLC)

## 4.2 潤滑油添加剤の影響

### 4.2.1 EDX 分析結果

潤滑油添加剤の影響を調べるため、試験後のジャーナルしゅう動面を、SEM(Scanning Electron Microscope：走査電子顕微鏡)に関しては、日本電子製 JSM-7800F PrimeNitE にて、EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy：エネルギー分散型 X 線分光法)に関しては、オックスフォード・インスツルメンツ製 AZtecEnergy を用い、観察倍率 500 倍で EDX 分析を行った。図 4-11 に試験後の鋼ジャーナル表面の二次電子像および反射電子像を示す。また図 4-12 に EDX カラーマッピング結果を示す。尚、潤滑油添加剤の影響を調べるための試験は、鋼製ジャーナルと、DLC コートジャーナルの焼付き試験を軸受試験機にて、軸受は表 2-2 の①に示す平滑なしゅう動面を有する、しゅう動幅 17mm のものを、潤滑油には、2-8 項で述べた 0W-20(w/t MoDTC)の市販エンジンオイルを用い、油温 110℃で行った。

未コートの鋼ジャーナルのしゅう動部には相手軸受材料のアルミニウム(Al)、スズ(Sn)の移着が観察された。本試験では軸受背面の温度を測定し、焼付き発生時の温度は約 181℃であったが、実際のしゅう動表面温度はこれ以上に高温になっていたと考えられる。その結果、アルミニウム合金中の低融点金属成分であるスズが高面圧下において摩擦発熱による界面温度上昇[65]により熔融温度以上に上昇し、ジャーナル表面に移着したものと考える。

また、エンジン潤滑油に添加されている摩擦調整剤の MoDTC 由来の添加剤反応を示す Mo(モリブデン)は明確には観察されなかった。

一方、DLC ジャーナルでは、軸受背面温度は最高 171℃であった。図 4-13 に示すように、しゅう動方向にごく一部 DLC の剥離が観察されたが、周辺にクラックが広がっている様子は認められないことから進展性はないと思われる。図 4-14 に示す試験後の DLC ジャーナル表面の EDX カラーマッピング結果から、DLC 剥離部には基材鋼製元素の Fe(鉄)元素が認められるが、DLC 膜上には炭素(C)以外の元素の明確な存在は観察されなかった。また鋼ジャーナルと同様にモリブデンは明確には観察されなかった。これらのことから、図 4-2、および図 4-4 に示す DLC の低摩擦特性は潤滑油添加剤によるものではなく、DLC が有する低摩擦特性によるものであると考えられる。尚、添加剤反応について、4.2.2 項で WDX 詳細分析を行ったため後述する。



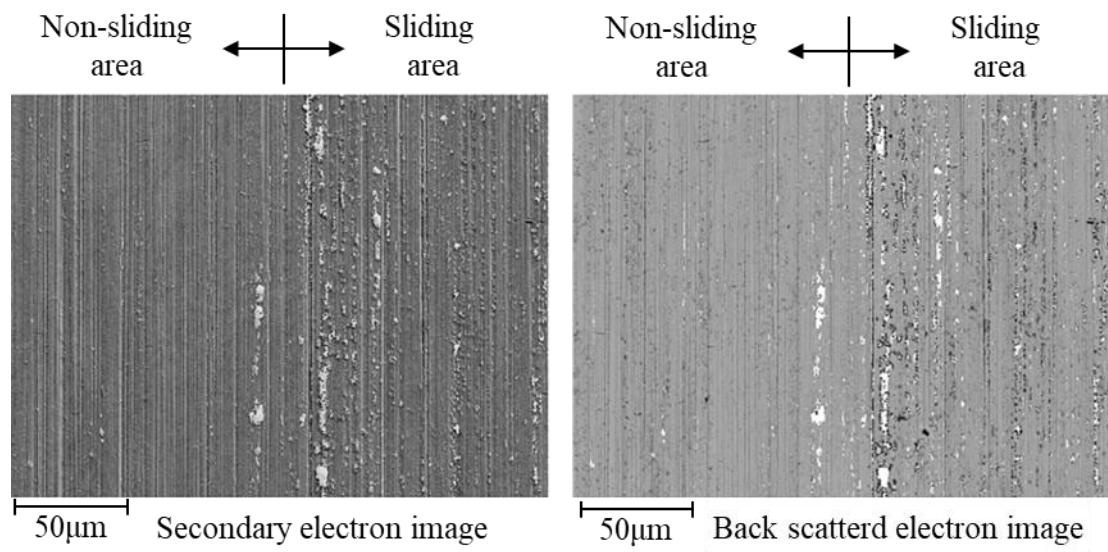


図 4-11 試験後の鋼ジャーナル表面の二次電子像および反射電子像

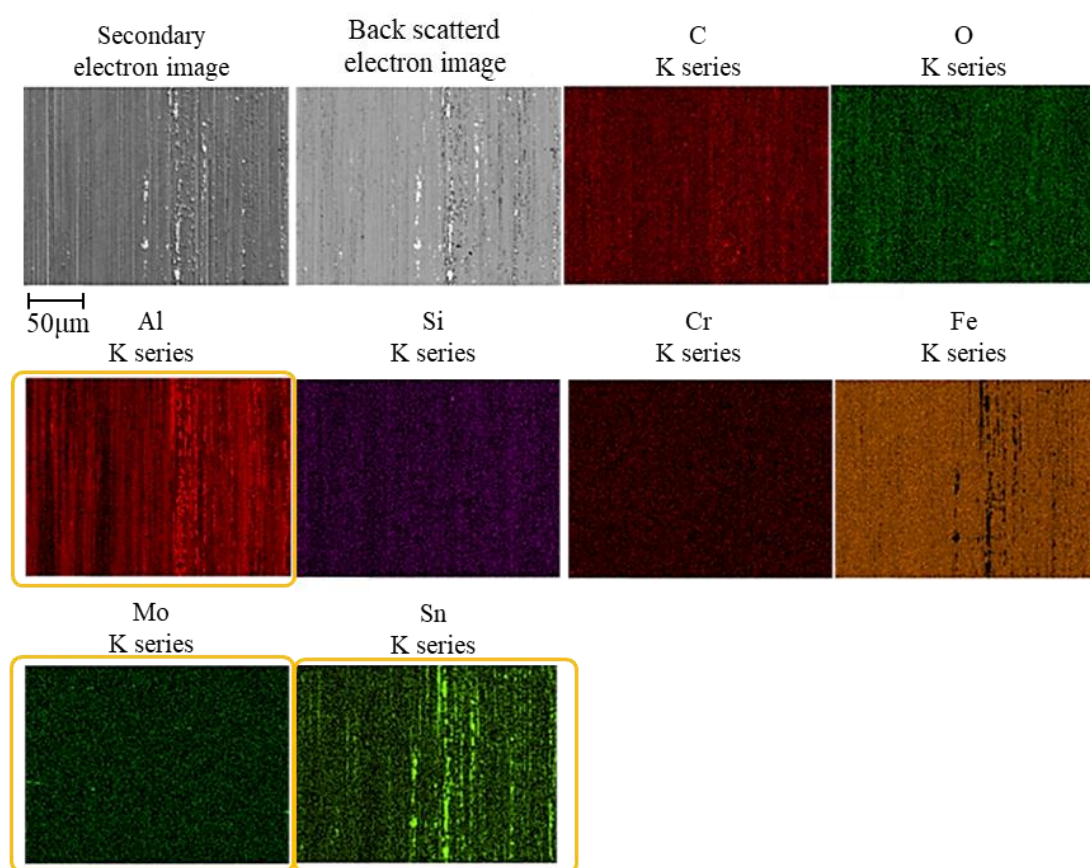


図 4-12 試験後の鋼ジャーナル表面の EDX カラーマッピング結果

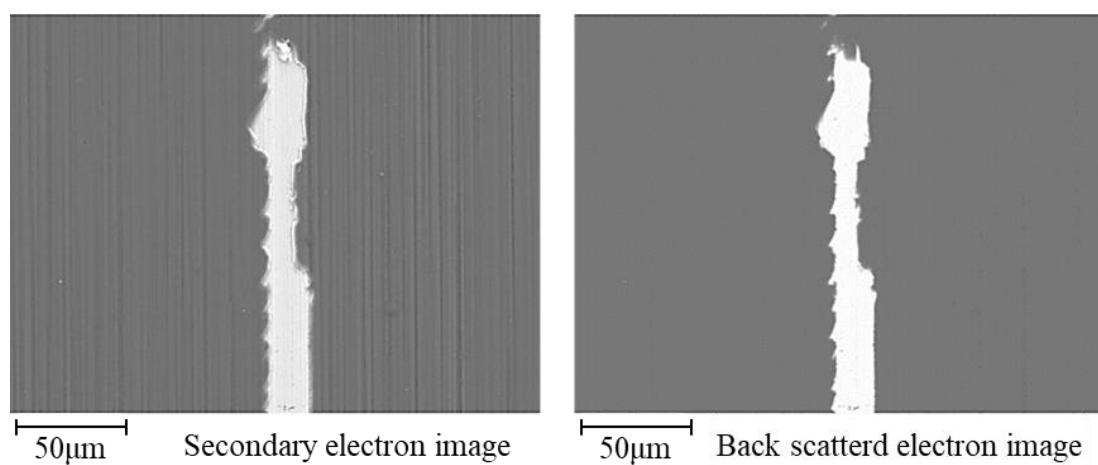


図 4-13 試験後の DLC ジャーナル表面の二次電子像および反射電子像

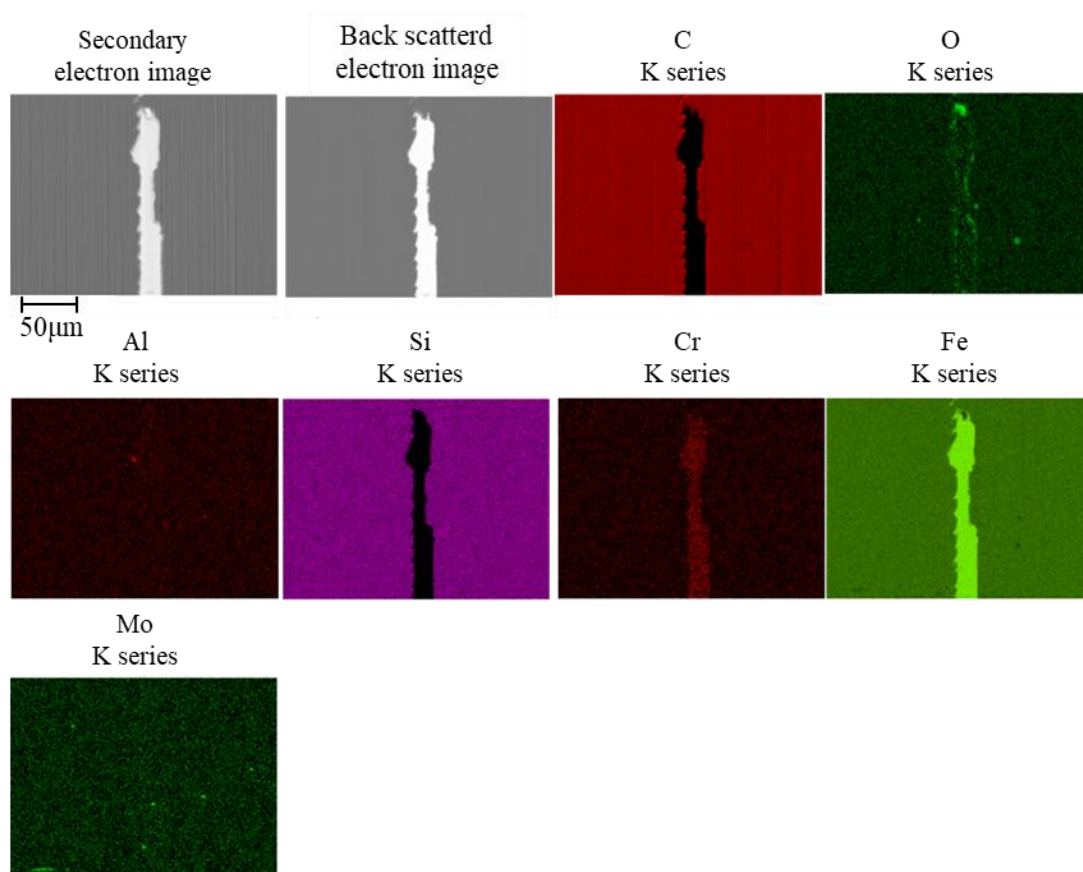


図 4-14 試験後の DLC ジャーナル表面の EDX カラーマッピング結果

#### 4. 2. 2 EPMA-WDX 分析結果

次に、潤滑油添加剤の影響を更に詳細に解析するため、別試験において、今迄の試験に用いていた表 2-2 ②に示すしゅう動面が平滑な軸受に比べ添加剤反応が起こりやすいと考えられる、表 2-2 ③に示す、汎用の条痕付き軸受を用い、2-8 項で述べた 0W-20(w/t MoDTC)の市販エンジンオイルを用い、油温 110℃で焼付き試験を実施し、試験後のジャーナル面を WDX(Wavelength-dispersive X-ray Spectrometer：波長分散形 X 線検出機)を用いた EPMA(Electron Probe Micro Analyzer：電子線マイクロアナライザ)により元素分析を行い、MoDTC、ZnDTP の反応を確認した。

この結果、図 4-15 に試験後の鋼ジャーナルの EPMA-WDX 元素分析結果を、図 4-16 に試験後の DLC ジャーナルの分析結果を示す。図 4-15 および 4-16 に示すとおり、MoDTC や ZnDTP が反応した場合に検出される元素の Mo(モリブデン)、S(硫黄)、や Zn(亜鉛)、また P(リン)は、鋼製ジャーナル、および DLC ジャーナルのいずれのしゅう動面からも明確には検出されなかった。よって MoDTC や ZnDTP の反応は明確にはなかったものと推察され、これらの添加剤による摩擦特性、焼付き特性への影響もなかったと考えられる。

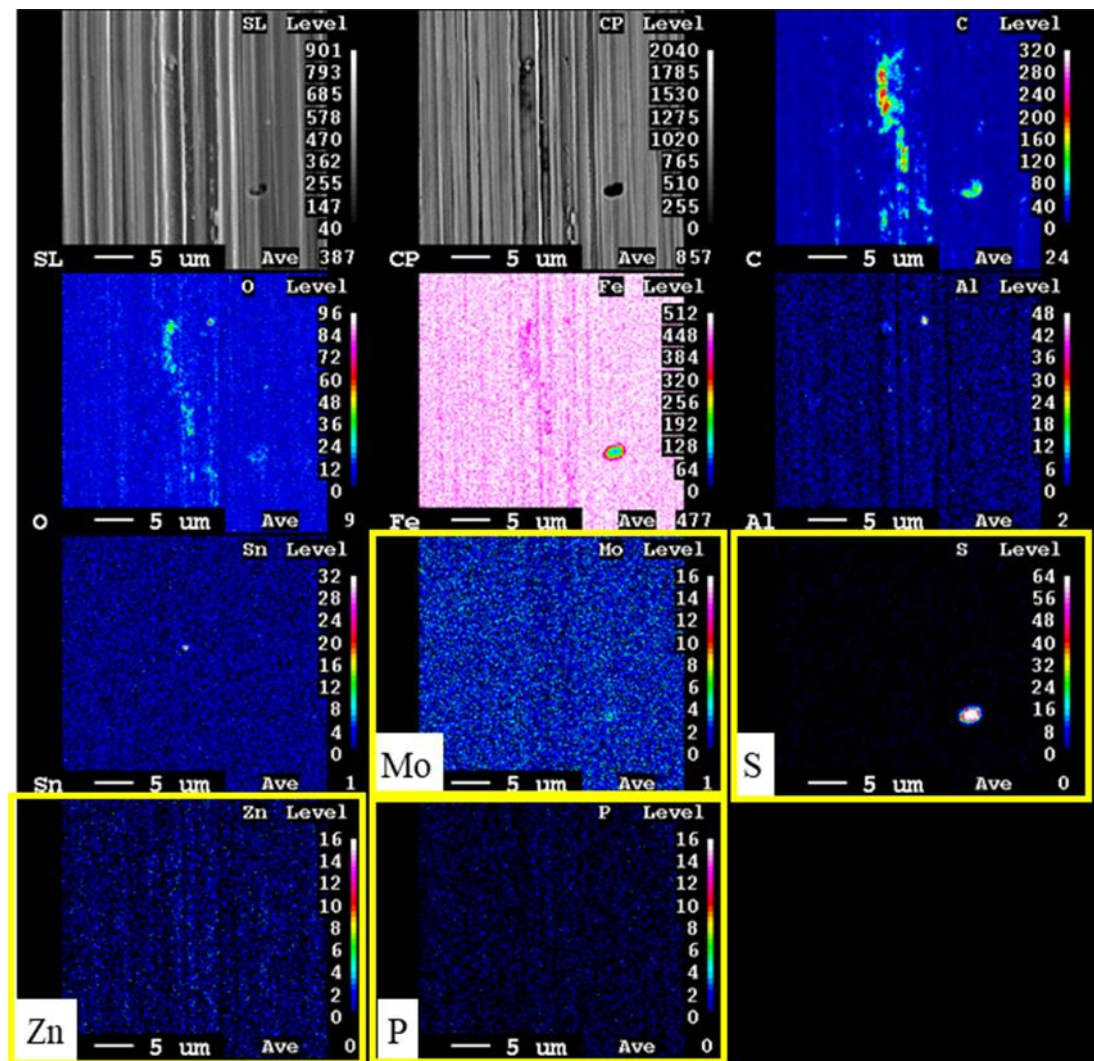


図 4-15 試験後の鋼ジャーナルの EPMA-WDX 元素分析結果



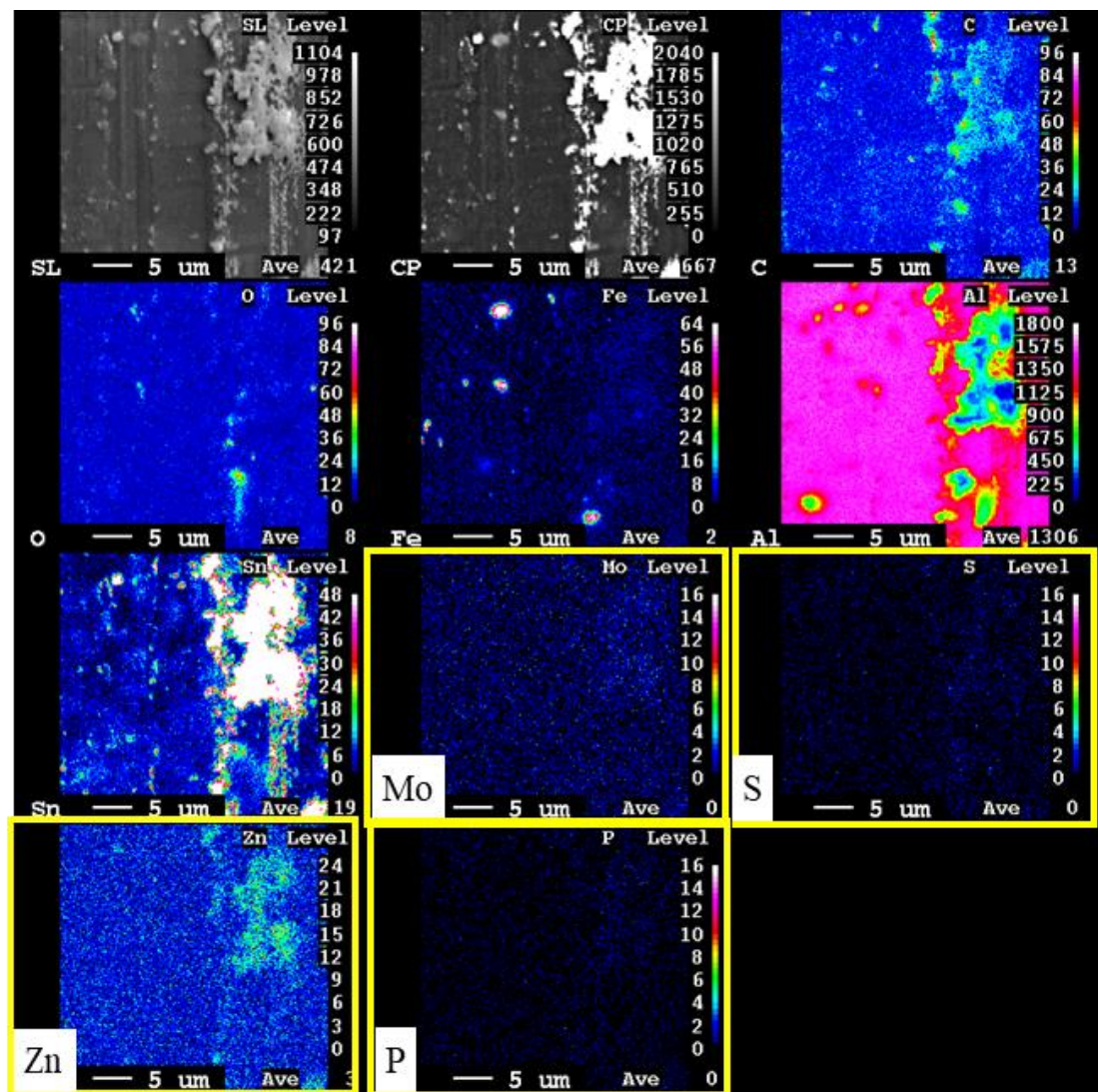


図 4-16 試験後の DLC ジャーナルの EPMA-WDX 元素分析結果

### 4.3 潤滑油粘度の影響

近年、エンジンの摩擦損失低減のため、潤滑油の低粘度化が進んで来ている。潤滑油の低粘度化は流体潤滑域においては摩擦低減が期待されるが、反面、1. 1. 2 項で述べたように、境界、混合潤滑域においては、かじりや焼付きの危険性増大の懸念がある。よって表 2-3, 2-4 に示す SAE 粘度グレード 0W-8 と 0W-20 の潤滑油、および軸受は表 2-2 に示す①に示すしゅう動面が平滑な仕様のものを用い、比較的高油温の 110°Cで鋼ジャーナルと DLC ジャーナルの焼付き試験を実施した。この結果を図 4-17 から図 4-20 に示す。

図 4-17 に示す鋼ジャーナルの場合、0W-8 粘度油では面圧 44MPa で焼付きが発生した。焼付きが発生するまでは 0W-20 粘度油に対して軸トルクが若干低い傾向を示した。これに対し 0W-20 粘度油においては 114MPa で焼付きが発生した。

一方、図 4-18 に示した両者の摩擦係数特性においては、0W-8 粘度油では焼付きが発生するまでは摩擦係数は 0W-20 粘度油に対し低い傾向を示し、粘度低下により焼付き面圧は 61%低下した。

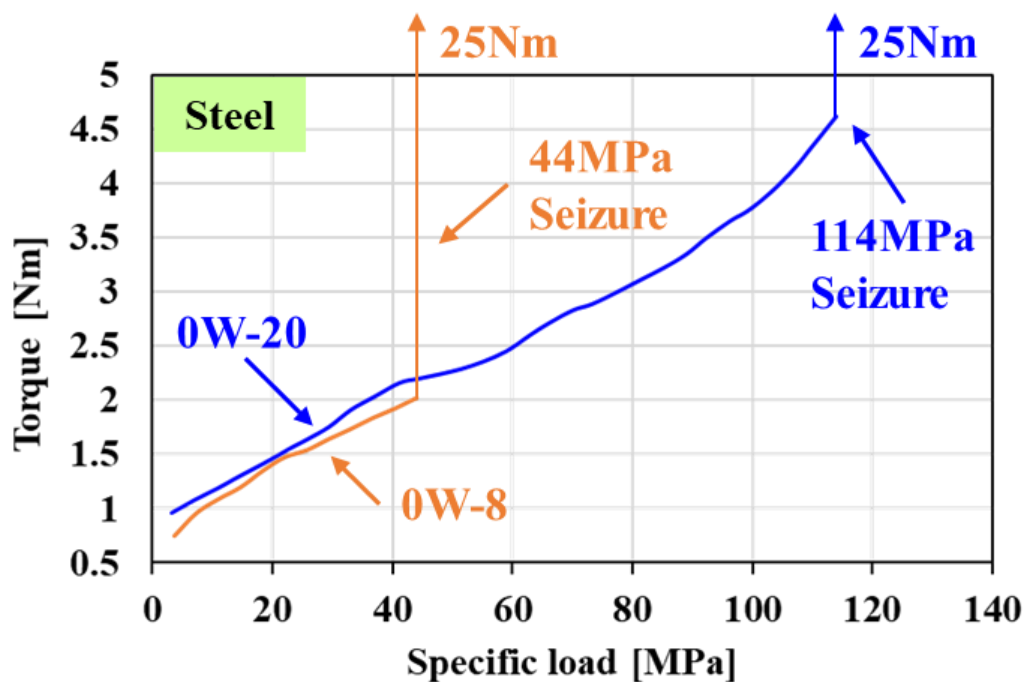


図 4-17 0W-8, 0W-20 粘度油のトルク特性(ジャーナル：鋼)

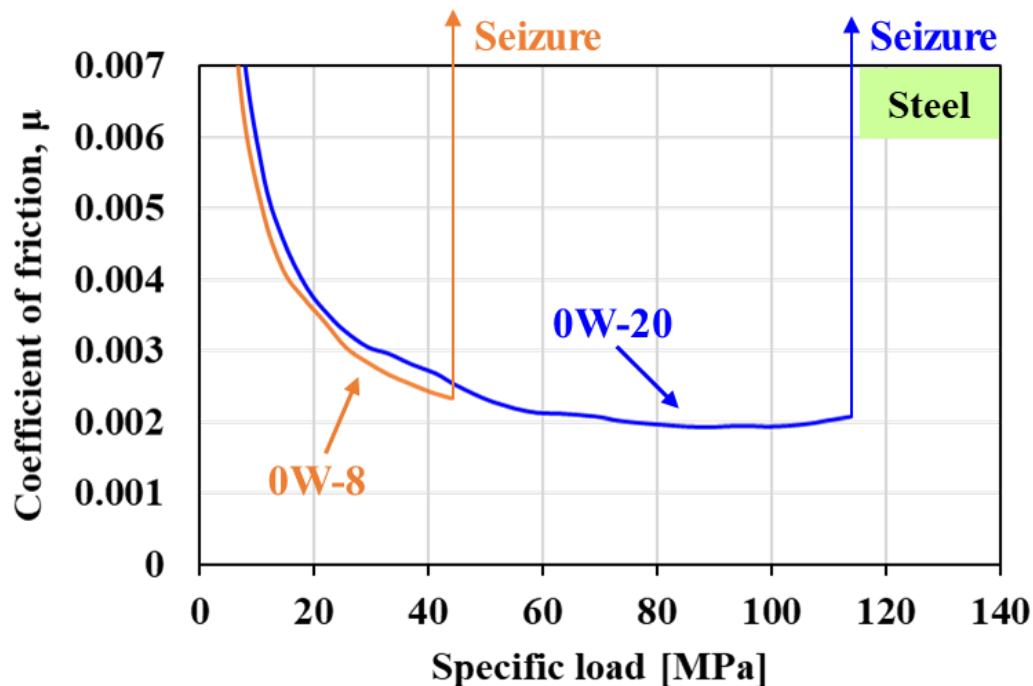


図 4-18 0W-8, 0W-20 粘度油の摩擦係数特性(ジャーナル：鋼)

次に DLC コートジャーナルにて焼付き試験を行った(図 4-19). この結果, 面圧およそ 40MPa までは 0W-8 粘度油では 0W-20 粘度油に対し軸トルクが低かったが, およそ 40MPa 以降は 0W-20 粘度油の方が大きな差をもって低かった. しかし, 両者とも装置限界の負荷荷重 99kN, 面圧 121MPa においても焼付きの発生はなかった.

図 4-20 に示す摩擦係数特性においては, およそ 40MPa までの面圧領域では 0W-20 粘度油に対し 0W-8 の低粘度油の場合は摩擦係数が低い傾向がみられた. 一方, 面圧 40MPa を超える領域においては 0 W-8 粘度油は 0W-20 粘度油に対し摩擦係数が高くなり, また不安定となった.

以上の結果から, 軸回転数は図 2-10 に示すように 5200rpm 一定としたため, 面圧およそ 40MPa までは 0W-8, 0W-20 粘度油共に流体潤滑領域(図 4-20 ①)と考えられる.

また, 図 4-20 に示した通り, 摩擦係数が漸近する 40MPa から 100MPa にかけては EHL 領域(図 4-20 ②)であると考えられる.

0W-8 粘度油においては, 100MPa を越えてから摩擦係数が上昇し始めたのは, 固体接触割合が増加し始め混合潤滑領域(図 4-20 ③)に入ったためであると考えられる. これに対し 0W-20 粘度油の場合は, 100MPa 以降も摩擦係数は減少する傾向を示すことから, EHL 領域が維持されていると考えられる.

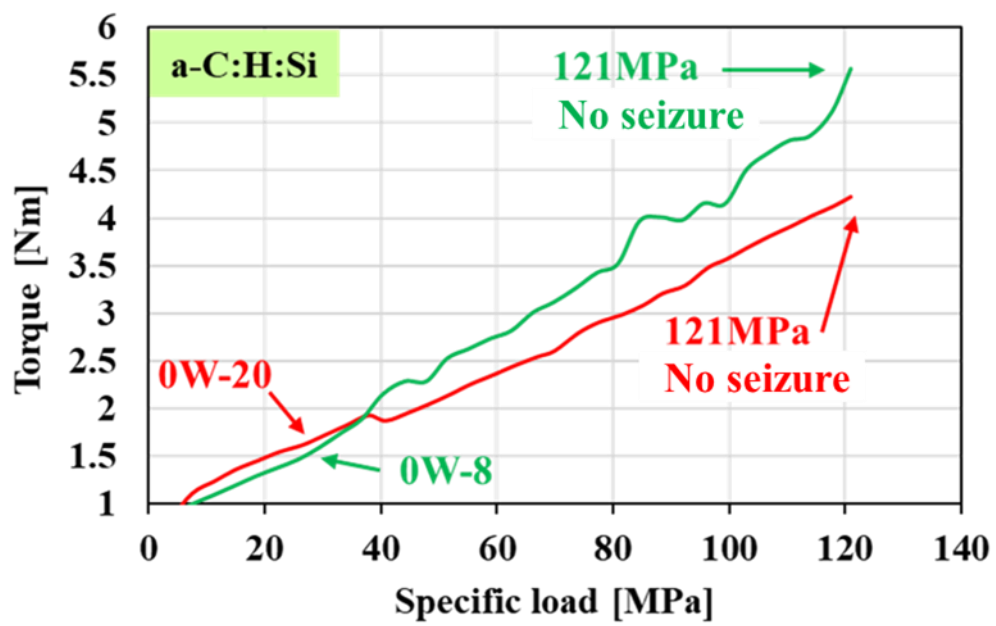


図 4-19 0W-8, 0W-20 粘度油の軸トルク特性(ジャーナル：DLC)

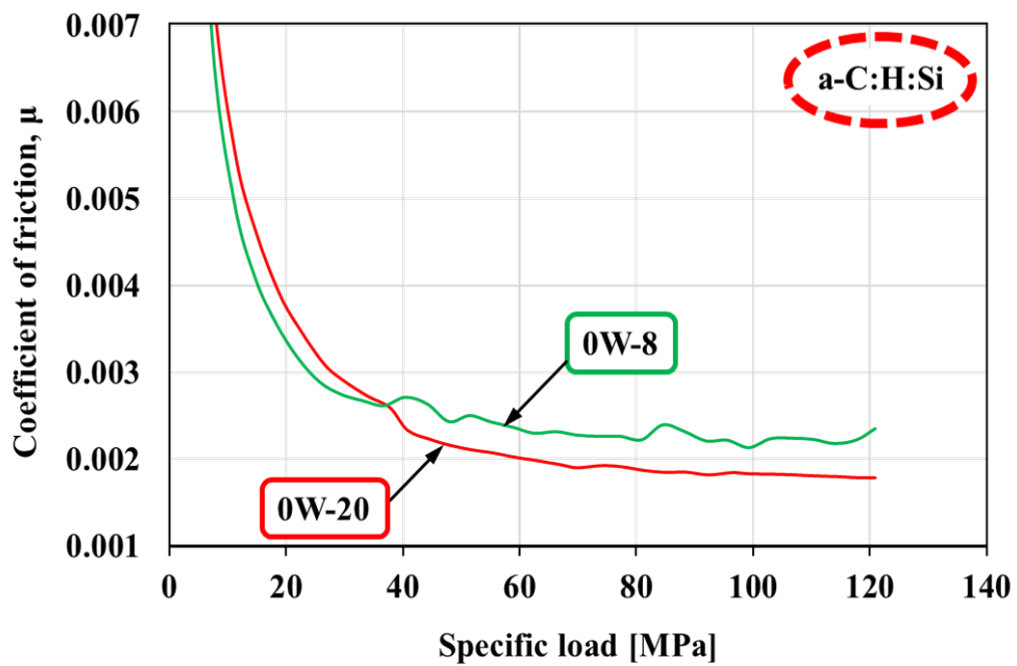


図 4-20 0W-8, 0W-20 粘度油の摩擦係数特性(ジャーナル：DLC)



#### 4.4 トルクスパイクの解析

##### 4.4.1 トルクスパイク現象と焼付き特性

しゅう動部幅 17mm の軸受仕様(表 2-2 ①)では DLC ジャーナルの焼付き限界値は明確にならなかった。そこで面圧増加のために、しゅう動部の幅を 11.4mm へと 33%削減した表 2-2 ②に示す軸受を製作した。この軸受を用い、潤滑油には、2.8 項で述べた 0W-20(w/t MoDTC)の市販エンジンオイルを使用し、油温 110℃で、鋼製ジャーナルと DLC ジャーナルの摩擦特性、焼付き特性を取得した。

図 4-21 にジャーナル面圧に対する軸トルク特性を、また、図 4-22 にジャーナル面圧に対する摩擦係数特性を示す。

鋼ジャーナルでは面圧 64MPa(荷重 35kN)からトルク曲線および、摩擦係数が上下に変動し不安定となり、面圧 159MPa(荷重 87kN)で焼付きが発生した。

また、図 4-21 のトルク曲線は軸トルクの移動平均値であるが、図 4-23 に示すように、軸トルクの瞬時データを書き加えた結果、ジャーナルの場合、焼付きが発生するまでの間、24kN(面圧 44MPa)、42kN(77MPa)、69kN(126MPa)でそれぞれトルクスパイクが発生していることが判明した。

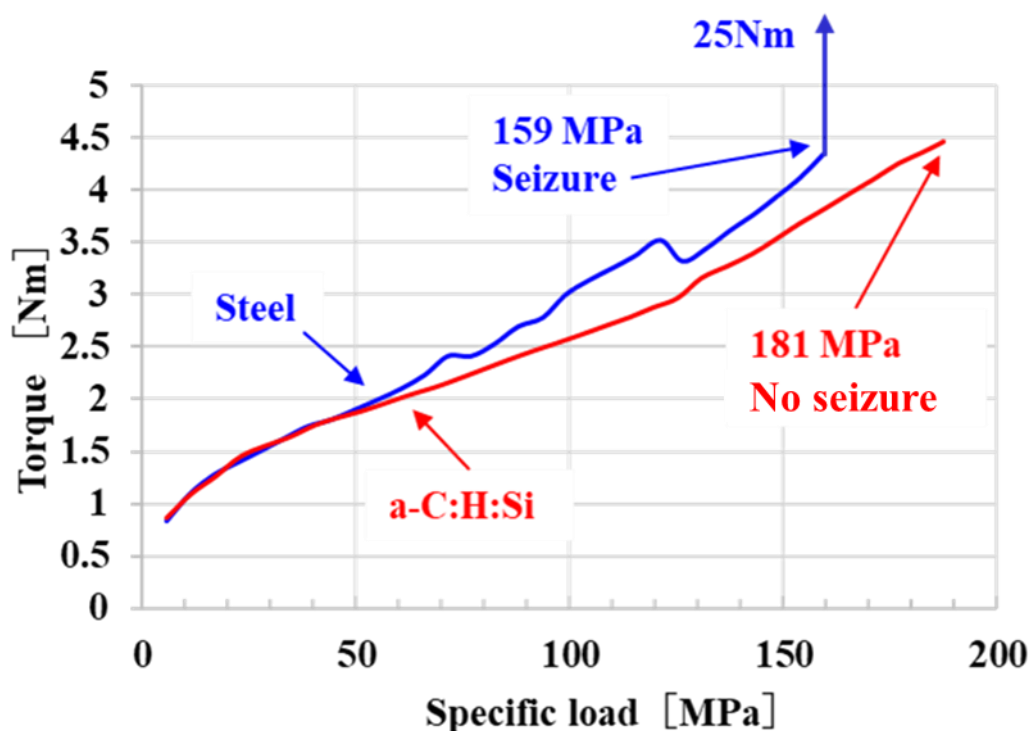


図 4-21 鋼および DLC ジャーナルにおける面圧に対する軸トルク特性

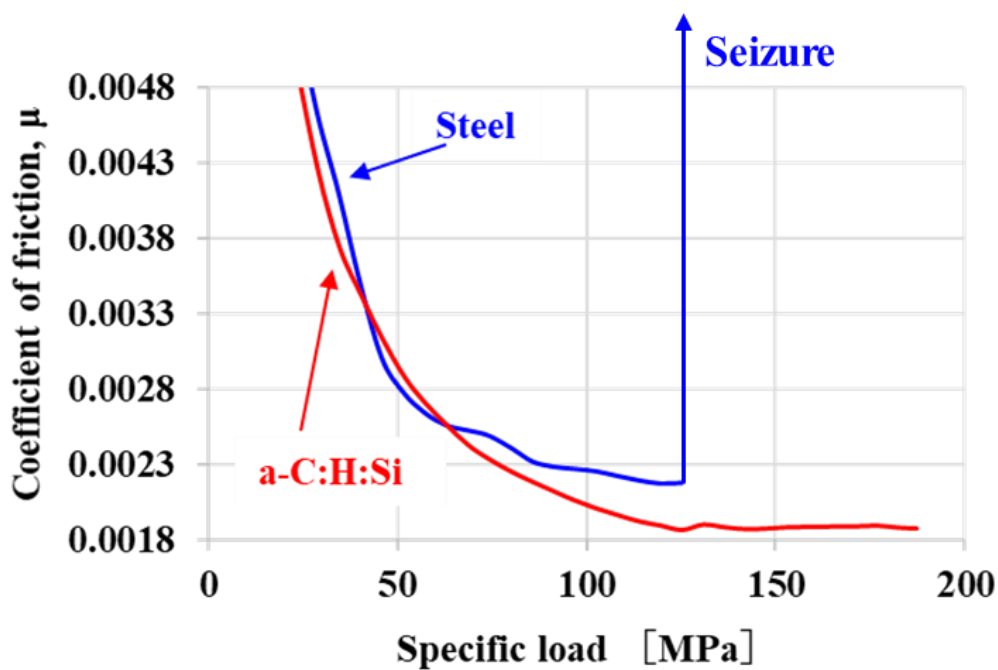


図 4-22 鋼および DLC ジャーナルにおける面圧に対する摩擦係数特性

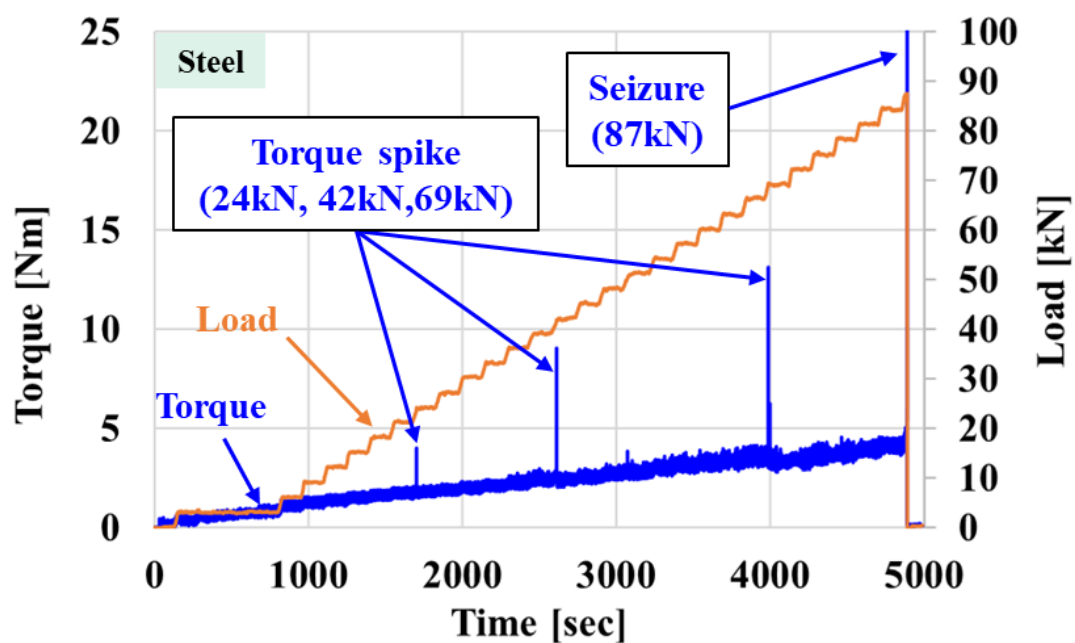


図 4-23 鋼ジャーナルにおけるトルクスパイクの発生

一方、図 4-24 に示すように DLC ジャーナルでは、負荷荷重の増加と共にトルクはほぼ直線的に増加して行き、鋼ジャーナルのような不安定性は見られず、装置限界の負荷荷重 99kN、面圧 181MPa においても、焼付きの発生はなかった。また、トルクスパイクの発生も一度も確認されなかった。

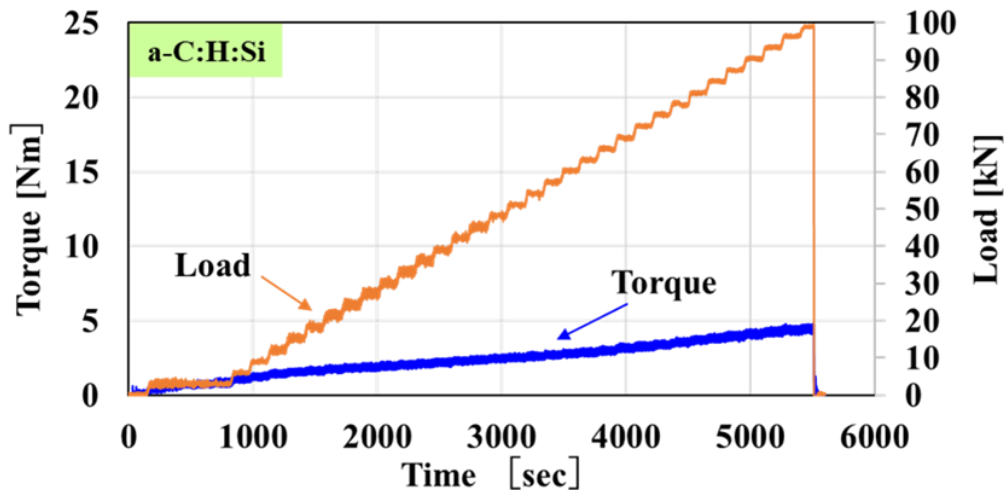


図 4-24 DLC コートジャーナルにおける荷重、トルク特性

次に、トルクスパイクの発生が確認された未コートの鋼ジャーナルの場合において、横軸を試験経過時間として、トルクスパイクと軸受背面温度の関係を図 4-25 に示した。この図を見ると、トルクスパイク発生時の約 0.3 秒後に軸受背面温度が上昇し始め、約 1.6 秒後に上昇のピークを迎え、その温度上昇は約 4°C であった。その後、背面温度は約 4 秒経過後にスパイク発生前の温度となったが、これ以降さらに徐々に若干下降を続けた。スパイク発生と同時に背面温度が上昇していないのは、軸受背面で測温していることによるタイムラグと考える。

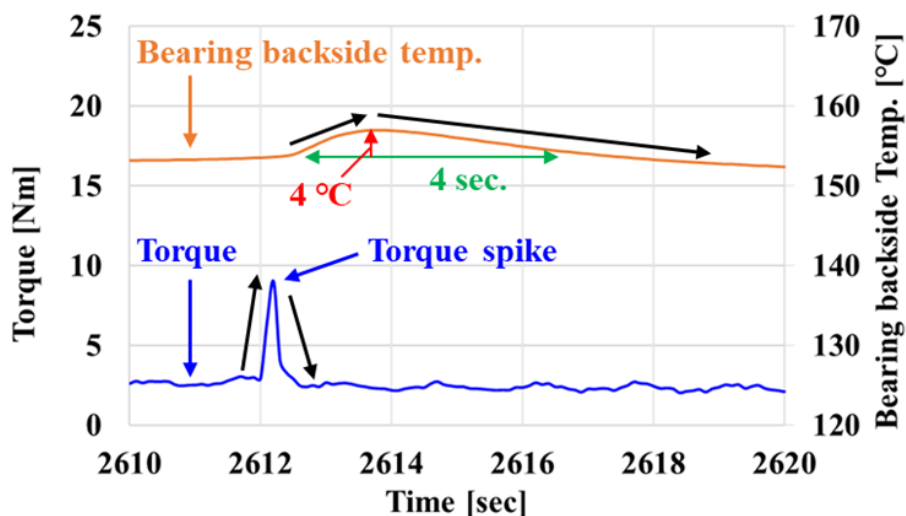


図 4-25 トルクスパイクと軸受背面温度特性

また、トルクスパイク発生に起因すると思われる背面温度上昇が4°C程度であったが、トルクのスパイク的上昇下降を考えると、実際は瞬間的にかなり昇温していたものと推察する。

次に図 4-26 に試験中の潤滑油流量変化を示す。これを見ると DLC ジャーナルの場合、面圧の増加と共に流量は直線的に増加して行くのに対し、鋼ジャーナルの場合、面圧 38MPa(荷重 21kN)あたりから流量が一旦増加し(図 4-26 ①), 71MPa(39kN)で流量が低下した後(図 4-26 ②), 38MPa(21kN)から流量が増加した時より急激に流量が増加し(図 4-26 ③), その後流量は不安定に微増して行き(図 4-26 ④), 121MPa(66kN)から 137MPa(75kN)手前まで急激に流量増加(図 4-26 ⑤)となった。

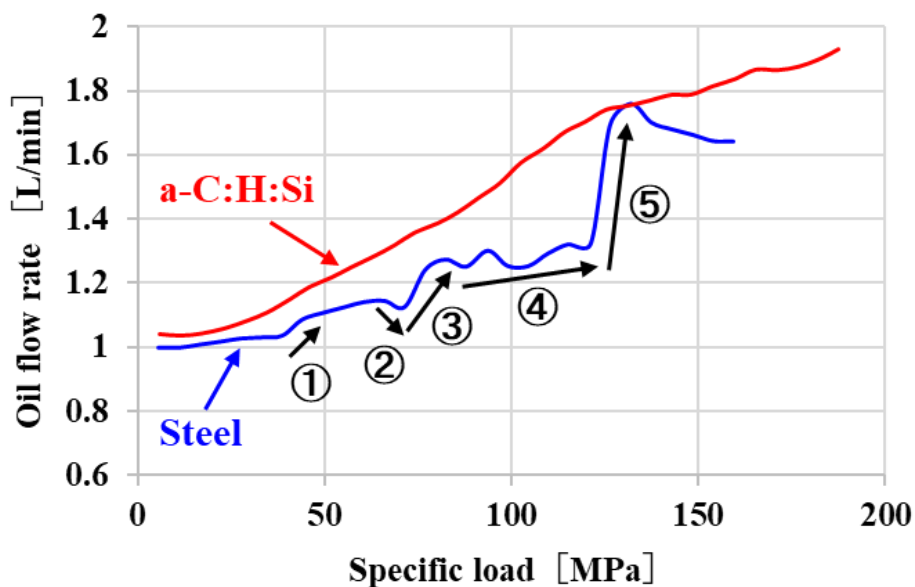


図 4-26 鋼および DLC ジャーナルにおける面圧に対する潤滑油流量特性

この原因を探るために、図 4-27 に示すように、別の焼付き試験で 1 回目のトルクスパイク発生直後に試験を停止した軸受の断面形状を測定した。この結果、軸受の片側の端部が大きく摩耗していることが判明した。

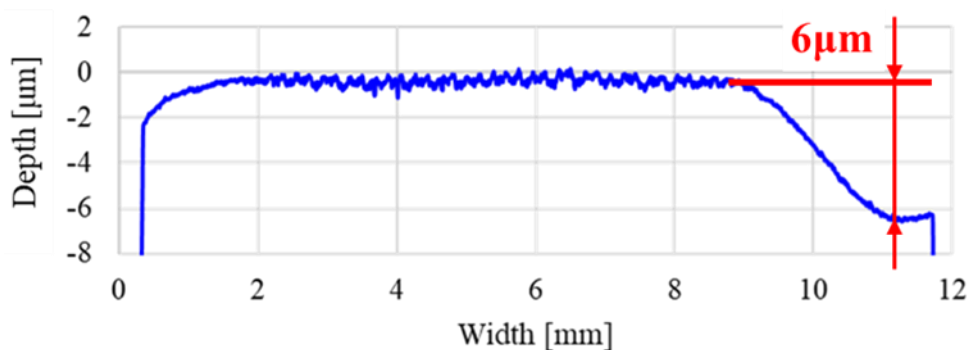


図 4-27 1 回目のトルクスパイクで止めた軸受の断面曲線

以上のことから、流量増加は軸受端部の大きな摩耗による潤滑油のサイドリーク量の増加と推察する。

次に、図 4-28 に 1 回目のトルクスパイクが発生した時点で試験を停止したジャーナルしゅう動面の SEM-EDX による元素分析結果を示す。分析はしゅう動部と未しゅう動部の両域が観察できるように観察範囲を設定した。

その結果、軸受構成材料のアルミニウムがしゅう動方向に沿い筋状に分布している状況が確認された。これは固体接触によるトルクスパイク発生時の摩擦発熱に伴う界面温度上昇[65]により軸受のアルミニウムが溶融し移着したものである。ジャーナルの未しゅう動部にはそのような部分は明確には確認できなかった。

次にスズを観察すると、やはりしゅう動した箇所にはスズが移着したと考えられる部分が確認できる。しかしアルミニウムの場合と同じく、未しゅう動部にはこのような箇所は明確には確認できなかった。

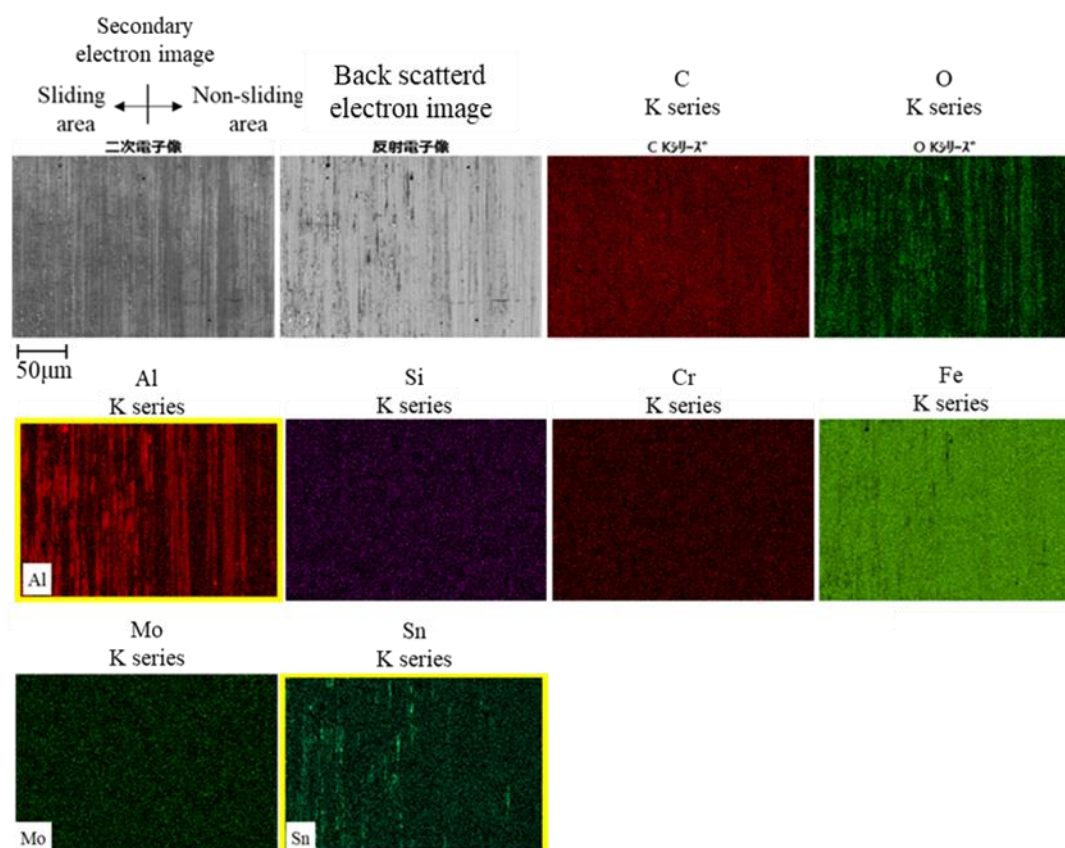


図 4-28 SEM-EDX による 1 回目のトルクスパイク発生時の  
ジャーナルしゅう動面元素分析結果

次に、ジャーナルのしゅう動相手の軸受面を分析した結果を図 4-29 に示す。その結果、シリコンは粒状に観察され溶融-溶出は認められないが、これに対し、スズは溶融-溶出と思われる形態で観察された。アルミニウムは、スズの溶融-溶出箇所には認められないことから、スズの溶融-溶出量は表 4-1 に示すように多いと思われ、半定量分析の結果 13mass%であった。

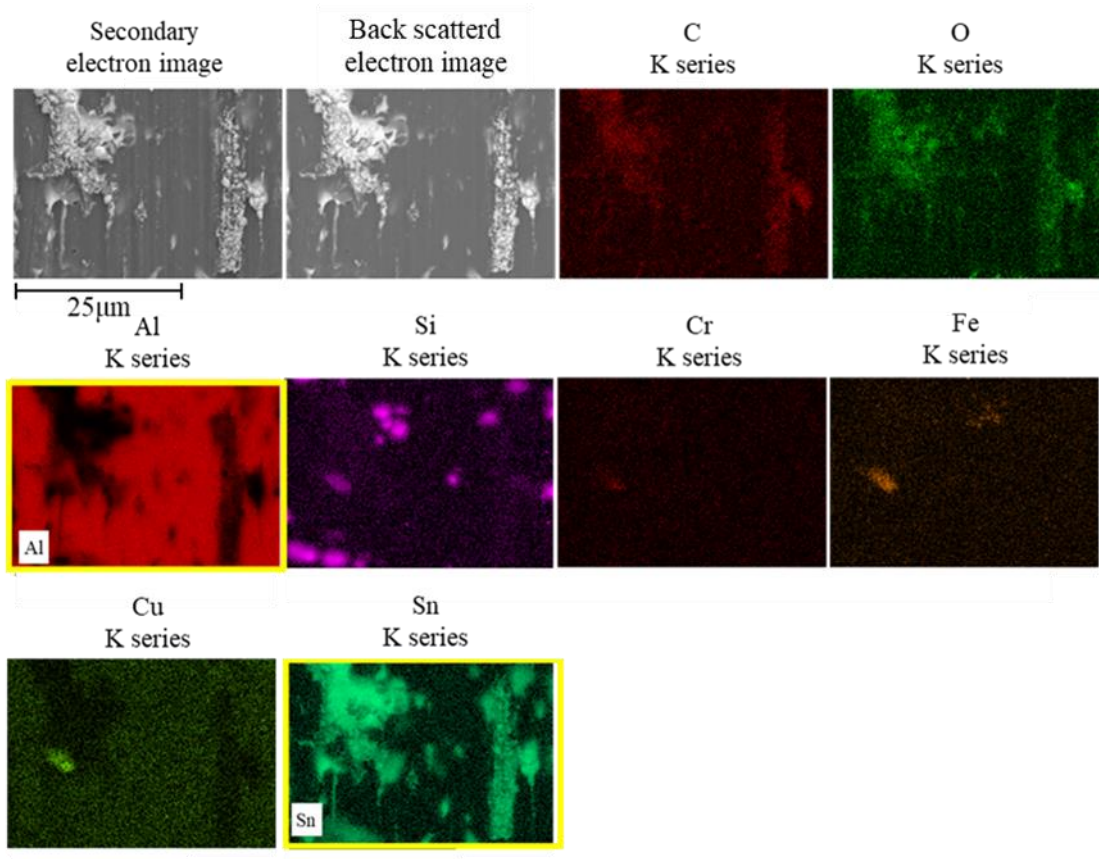


図 4-29 SEM-EDX による 1 回目のトルクスパイク発生時の軸受しゅう動面の  
元素分析結果

表 4-1 1 回目のトルクスパイク発生時の軸受しゅう動面の半定量分析結果

元素	質量%	質量% $\sigma$
C	4.69	0.05
O	1.76	0.02
Al	77.65	0.05
Si	1.24	0.01
Cr	0.13	0.01
Fe	0.16	0.01
Cu	1.24	0.01
Sn	13.13	0.03
トータル	100.00	

以上の事から、一回のトルクスパイクの発生に伴い、しゅう動部ではアルミニウムとスズの溶融が起り、ジャーナルへ移着する事が明らかとなった。

DLC ジャーナルの場合、図 4-24 に示すように全域において一度もトルクスパイクの発生がなく、摩擦係数は荷重約 69kN(面圧 126MPa)以降はほぼ一定の値を示すことから、約 69kN 以降は EHL へ移行したと考える。また装置限界の負荷荷重 99kN(面圧 181MPa)でも焼付の発生はなく、潤滑油流量の不安定な挙動もなかった。この結果、図 4-20 に示すように、DLC ジャーナルは鋼ジャーナルに対し流体潤滑と考えられる領域で最大約 5%、EHL と考えられる領域で最大約 16%の摩擦低減が得られた。

DLC ジャーナルの焼付き荷重に関しては既述のとおり軸受しゅう動幅を 17mm から 1.4mm に 33%削減した軸受においても限界値が確認できなかった。

しかし、鋼ジャーナルの場合、上述の通り、1 回目のトルクスパイク発生時に既に焼付き時と同様の現象が起こっていることが判明したため、現状においても、DLC ジャーナルは鋼ジャーナルに対し、76%以上の耐焼付き性向上を有すると考えられる。これは、DLC は鋼に比べ、アルミニウムに対する親和性が低い特性[64]を有しているため、低摩擦を維持し焼付きには至らなかったためと考える。



#### 4.4.2. アコースティックエミッション(AE)法の概要

トルクスパイク現象, およびジャーナルと軸受間の摩耗現象を, アコースティックエミッション(以下, AE)法により解析するために, 次に AE 法の概要を記す.

AE とは物体が変形・破壊する際に, それまでに蓄えられたひずみエネルギーが解放され, その一部が弾性波として放出される現象である[66].

図 4-30 に示すように, さまざまな AE 発生源があり, 発生源からの AE 波を周波数解析することで発生している摩耗現象の同定が可能である(図 4-31)[66].

主な診断・評価法の摩擦・摩耗の異常現象に対する検出能力をまとめた表 4-2 から, 様々なトライボロジー現象に対し AE 法は優れた検出能力を持つことが分かる. これは, AE 法が変形・破壊部から直接伝播する AE 波を検出することに由来するとされる.[67]

AE センサによる AE 波の計測原理には圧電効果を利用し, 微小な歪みを検出するために変換能力の高い圧電セラミックスが使用される[66]. また図 2-6 に示す系統図の通り, AE 信号は微小であるためにプリアンプを使用し信号を増幅した後に, ディスクリミネータによりフィルタ処理をし, 記録機器へと入力する. この時 AE センサからプリアンプまでの部分でノイズが乗ると, ノイズも含んだ状態でプリアンプにて信号の増幅が行われ, 不明瞭な計測結果となる. 以上のことから AE 計測においては測定対象物と AE センサ間の絶縁確保が必須である. また AE センサから記録機器までを共通電位とすることも, AE 計測には欠かせない.

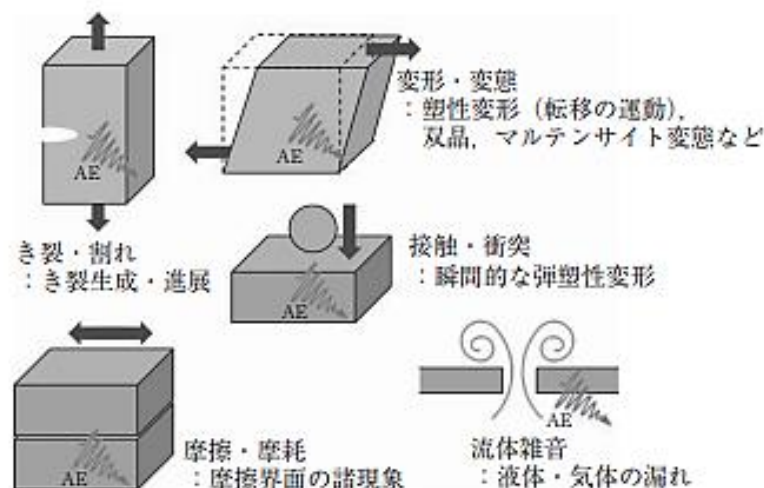


図 4 さまざまな AE 発生源

図 4-30 さまざまな AE 発生源 [66]



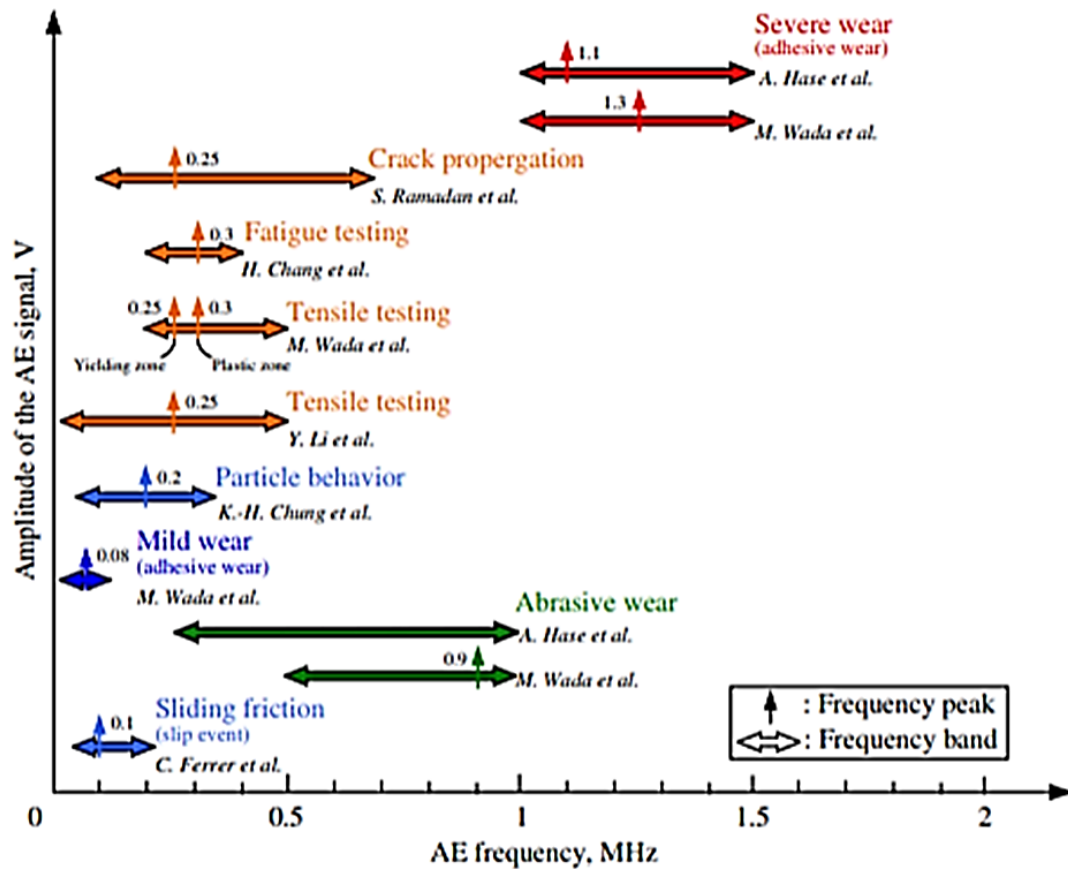


図 4-31 変形と破壊を伴う現象の AE 周波数スペクトルの相関マップ [68]

表 4-2 各検出方法の摩擦・摩耗異常現象に対する検出能力 [68]

(検出感度 ○：大，△：小，×：検出困難)

異常現象 \ 検出方法	AE (振動)	温度	電気抵抗	摩耗粒子
摩耗	○	△	○	○
フレーキング	○	×	×	○
スミアリング	○	△	○	○
焼付き	○	○	○	△
割れ	○	×	×	△
圧こん	○	×	×	×
電食	○	△	○	○
さび	△	×	△	○
保持機破損	△	×	×	△

AE 計測は日本国内において長谷を筆頭に研究が進められており、クランクジャーナルとすべり軸受の他、しゅう動する二物体間の摩耗現象把握に役立てられている。そのほか、In-situ 観察と AE 法の組み合わせによる摩耗発生メカニズムに関する研究や、材料の違いによる影響など、多岐にわたり研究が行われている[69]～[80]。

その中で特に、図 4-32 に示すように、すべり軸受においては、焼付き発生時の AE 計測により、焼付きの過程における AE 周波数の変化が過去の研究で捉えられている[81]。またこの時、各 AE 周波数が発生する現象についても同時に解明され、特に 1.1～1.3MHz 付近に発生するピークについては、凝着摩耗に起因するものとされている。

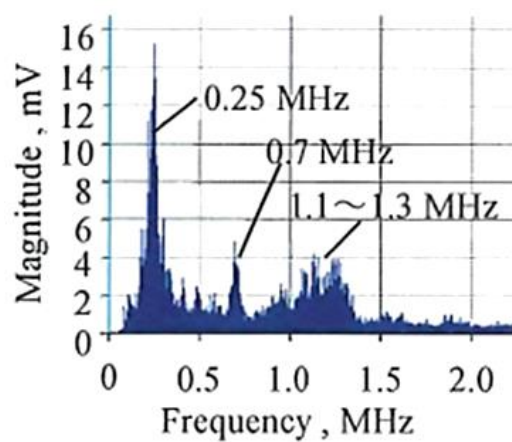


図 4-32 焼付き過程中の AE 信号 [81]

#### 4.4.3 AE 計測条件と AE 計測部概要

軸受試験機での焼付き試験における AE 計測条件を表 4-3 に示す.

ハイパスフィルターは 100kHz としノイズを抑制している. またサンプル周波数は 5MHz とし高分解能を確保している.

表 4-3 AE 計測条件

<b>AE high-pass filter</b>	<b>100kHz</b>
<b>AE low-pass filter</b>	<b>Through</b>
<b>Sampling rate</b>	<b>5MHz</b>

次に図 4-33 に軸受試験機における AE 計測部概要を示す. AE センサは治具コネクティングロッド上部に設置し, セラミック製のプレートを用いてセンサ受波面の絶縁を確保した.

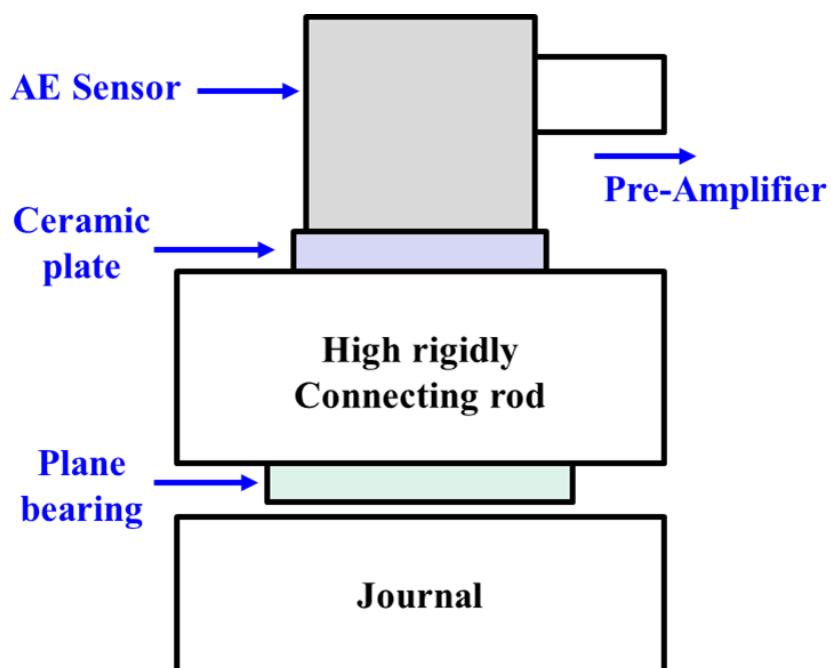


図 4-33 AE 計測部概要

#### 4.4.4 トルクスパイクのAE解析

4.1.2, および, 4.4.1 項におけるトルクスパイク現象の確認を受け, トルクスパイクのAE波形の解析を行った.

図4-34にトルクスパイク発生時のAE波の周波数解析結果を, 図4-35に焼付き発生時のAE波を示す. また, トルクスパイク発生以前のAE波を図4-36に示し, ジャーナル荷重99kN(面圧181MPa)時のDLCジャーナルにおけるAE波を図4-37に示す.

この4つのAE波を観察した結果, トルクスパイク発生時, および焼付き発生時にはアブレシブ摩耗を示す0.6MHz付近および, 凝着摩耗を示す1.4MHz付近にピークが現れている.

これに対し, 図4-36に示す, トルクスパイク発生以前の領域のAE波, および図4-37に示す, 焼付きの発生がなかったDLCジャーナルの荷重99kN負荷時点のAE波には, アブレシブ摩耗を表す0.6MHz付近にはピークが確認されたものの, 凝着摩耗を表す1.4MHz付近にピークは全く確認されなかった.

以上の結果, および4.4.1で述べた, 焼付き発生時のジャーナルへのスズ, アルミニウムの移着, ならびに, トルクスパイク発生に伴う軸受背面温度の上昇, 潤滑油流量の急激な増大, また軸受の大きな損傷を併せて考慮すると, たった一回のトルクスパイクの発生で軸受は焼付き時と同様の凝着摩耗を引き起こしていることが分かった.

尚, ジャーナル付加荷重は3kN/2min. の割合で増加させるが(図2-10), トルクスパイクは, 荷重が3kN上がったと同時に発生してはならず, 装置特有現象ではないことを確認している.

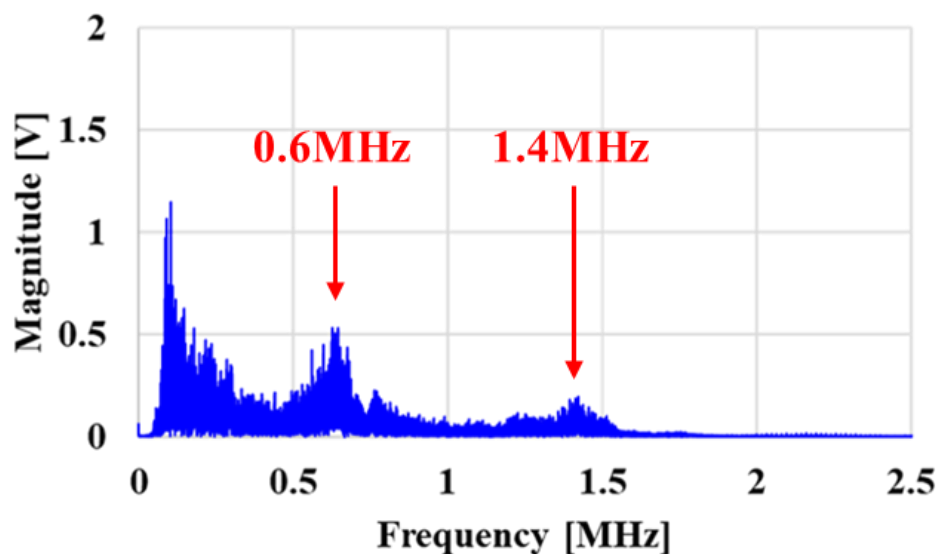


図4-34 トルクスパイク発生時のAE波形 (ジャーナル: 鋼)

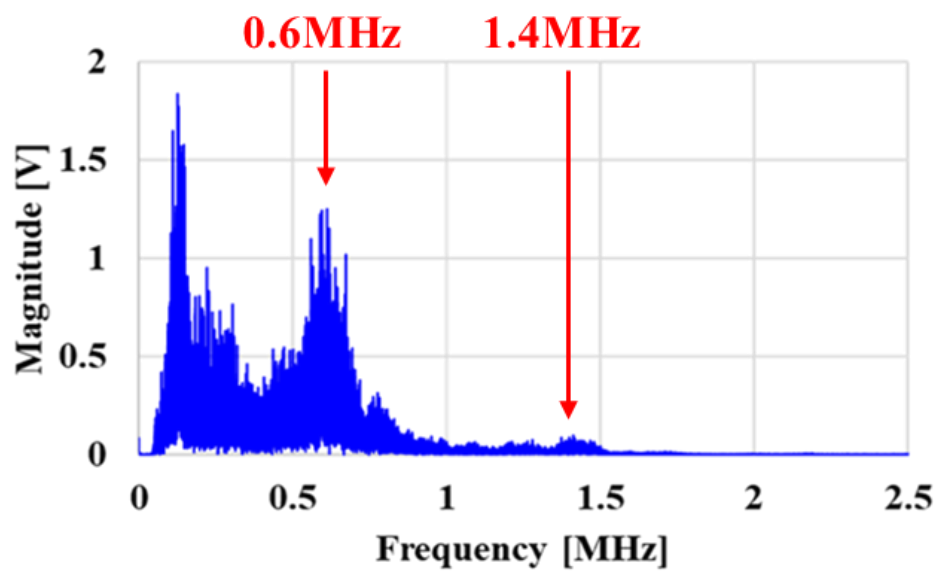


図 4-35 焼付き発生時の AE 波形 (ジャーナル：鋼)

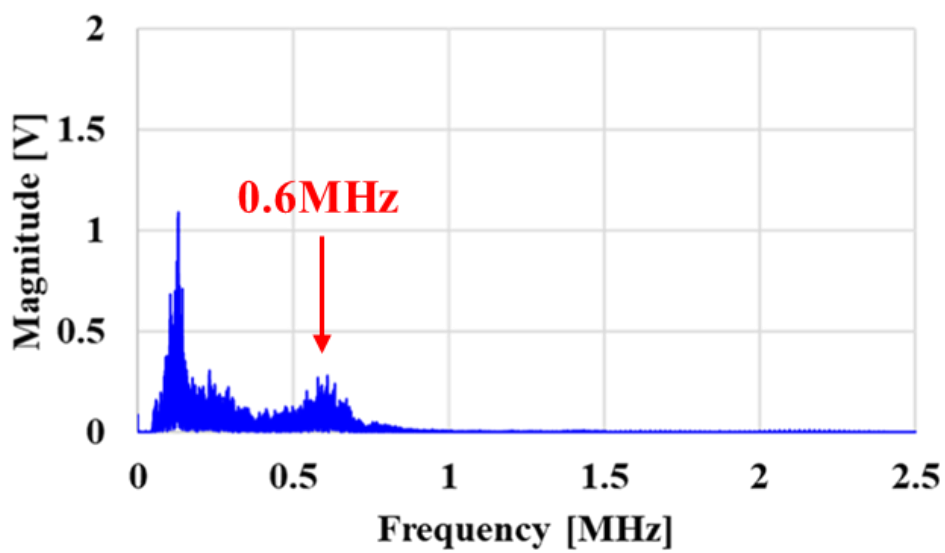


図 4-36 トルクスパイク発生以前の AE 波形

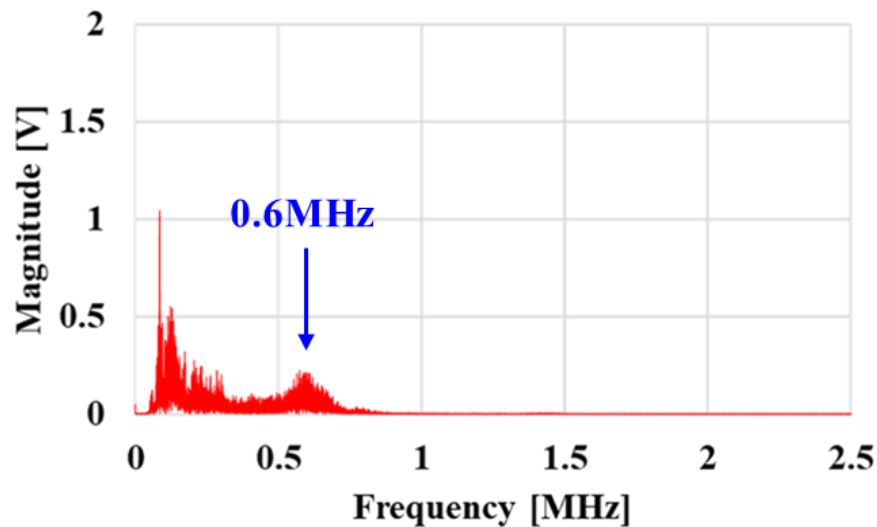


図 4-37 荷重 99kN 負荷時の DLC ジャーナルの AE 波形

次に、トルクスパイク特性とは異なるが、AE と摩擦係数の関係において興味深い現象を見出したので、概要を述べる。

AE 波形とトルク特性の関係について検証した結果を図 4-38 および 4-39 に示す。図 4-38 は鋼ジャーナル AE 波形であり、図 4-39 は DLC ジャーナルの AE 波形である。両者を比較すると、鋼ジャーナルの場合、図 4-38 中に記載した通り、AE 波の出力が $\pm 2$  V から $\pm 2 \sim 4$  V に大きくなっている領域が存在する。これに対し DLC ジャーナルの場合は、同じ面圧領域において、AE 波の出力が $\pm 2$  V から $\pm 0.5$  V に、ボトルネック形状的に極端に小さくなっている。

DLC ジャーナルにおける図 4-39 中、①の AE 波の出力が小さくなっている領域は、図 4-40 中の①の、鋼ジャーナルとの摩擦係数の差が一番大きい領域である。AE 波は物質の破壊や変形に伴う弾性波であることから、この摩擦係数の差が一番大きい領域において、DLC ジャーナルの場合、ジャーナル、軸受の変形が小さい、また固体接触が大きく抑制されていることが考えられる。

この結果は、トルクスパイク現象とは異なるが、非常に興味深い現象であり、今後継続して研究を行っていく予定である。

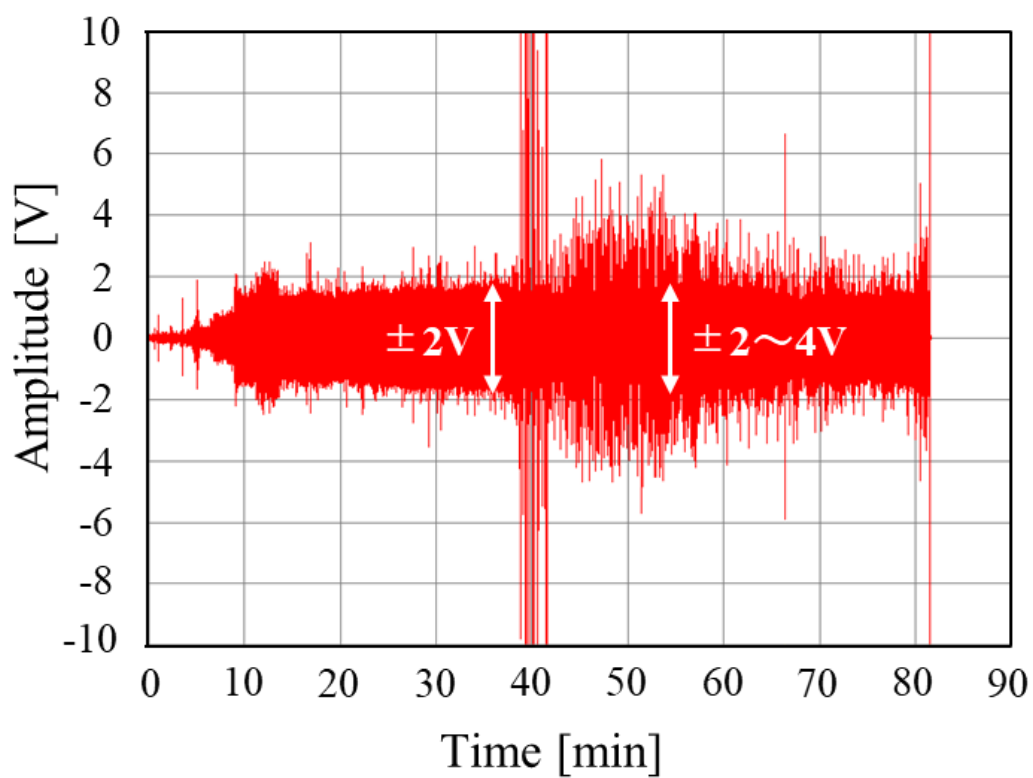


図 4-38 鋼ジャーナルの AE 波形

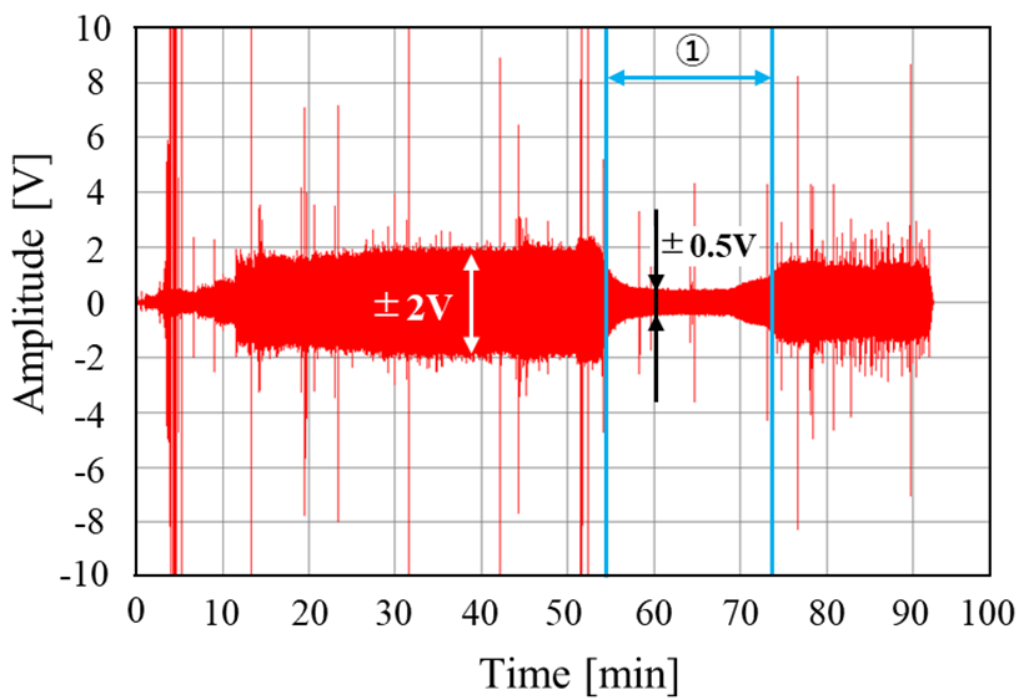


図 4-39 DLC ジャーナルの AE 波形

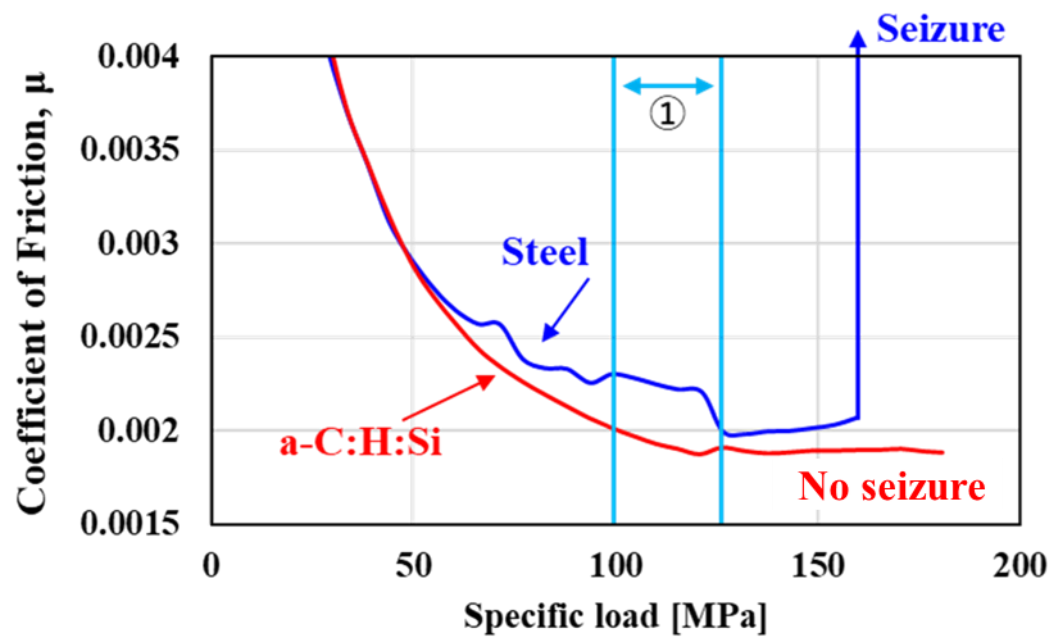


図 4-40 鋼および DLC ジャーナルの面圧に対する摩擦係数特性



#### 4.4.5 スズ溶着率解析結果

4.4.1 に示す焼付き試験後の軸しゅう動面の元素分析結果、軸受構成元素の一つのスズの溶着が確認された。また鋼ジャーナルにおける焼付き試験ではトルクスパイク現象が確認された。このため、焼付き現象とトルクスパイク、およびスズの移着は関係性があると考えられる。

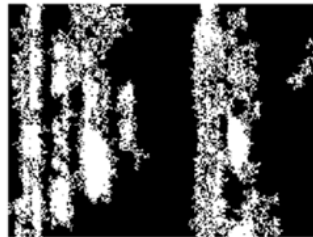
そこで、焼付き試験を3回実施し、試験中、トルクスパイク1回目、3回目、4回目でそれぞれ試験を停止し、それぞれの軸しゅう動面の EPMA 元素分析を行い、軸受構成元素であるスズの移着割合を同一面積にて観察し、さらにその結果を二値化画像処理を用いることで、移着したスズの面積率を求めた。

その結果を図 4-41 に示す。1 回目、3 回目、4 回目のトルクスパイクにおいて、溶着面積率は、それぞれ 30.2%、36.2%、48.3%と増加していくことが分かる。

以上の結果からトルクスパイクが発生する度にジャーナルへの軸受構成元素のスズの移着が増加し、その結果、軸受の凝着摩耗も増加し、最終的に完全焼付きに至るものと考ええる。

白色部=溶着部

27kN  
first torque spike



溶着面積率

30.2%

69kN  
third torque spike



36.2%

87kN  
forth torque spike  
(Seizure)



48.3%

計測範囲：40 x 30μm

図 4-41 トルクスパイク発生回数によるスズ溶着面積率の変化

#### 4.5 実走焼付き軸受と軸受試験機焼付き軸受の比較

軸受試験機による焼付き試験の妥当性の検証として、実機実走行中に焼付いた軸受との軸受しゅう動面の元素分析比較を行った。

図 4-42 に実走行中にエンジントラブルからオイル供給が停止したために、過酷条件下で焼付いたアルミニウム合金製ピン軸受の外観を示す。軸受は激しく損傷しているが、比較的損傷の軽微な部分を SEM-EDX で元素分析を行った。その結果を図 4-43 に示す。

また軸受試験機での焼付き試験において焼付きの発生した鋼ジャーナルと組合わせたアルミニウム合金製の軸受の分析結果を図 4-44 に示す。

マッピング像を比較すると、両者からシリコンの析出物と、半溶融-溶出したと思われるスズが検出された。このことから両者の焼付き形態は同様傾向であり、軸受試験機における焼付き試験は実際のエンジンよりも高い面圧の過酷条件下の試験であり、そのような条件下では同様なことが生じると判断される。



図 4-42 実機実走で焼付いた軸受の外観

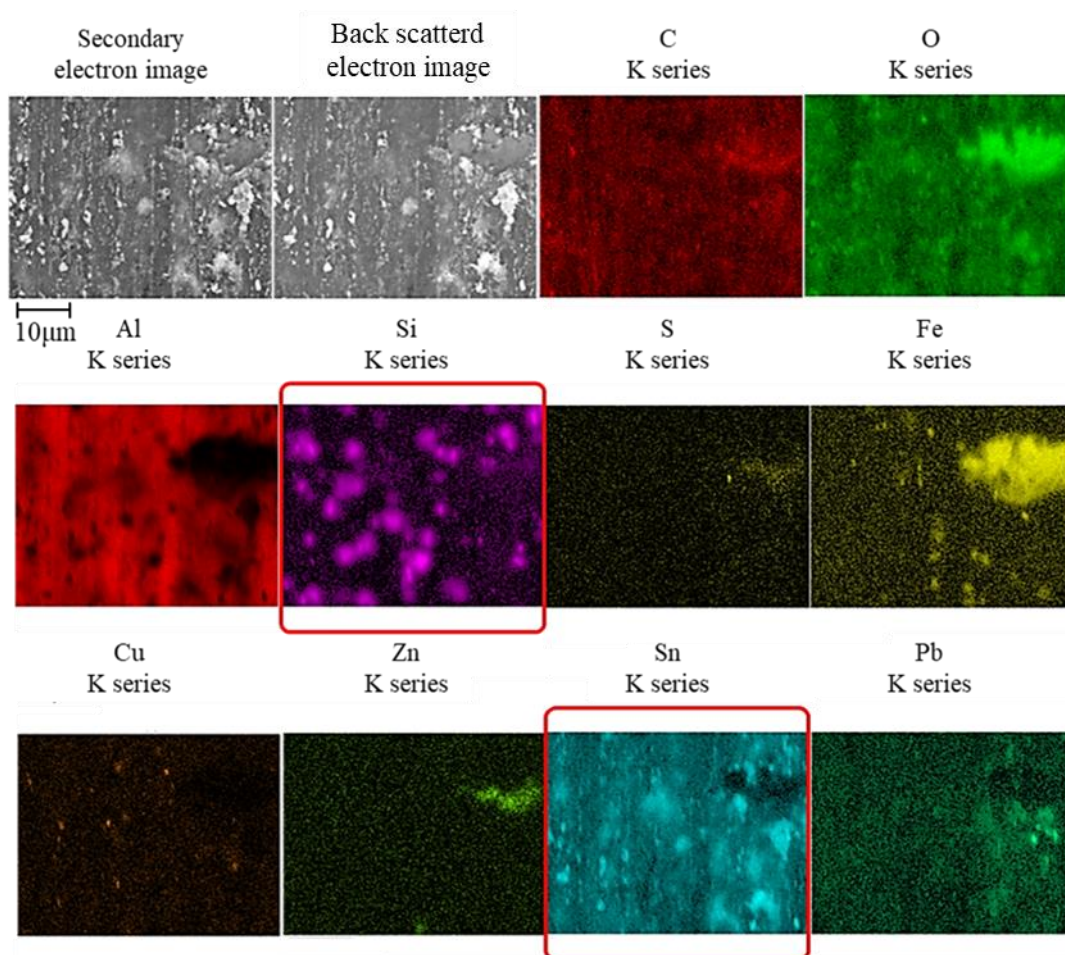


図 4-43 実走で焼付いた軸受の EDX 分析結果

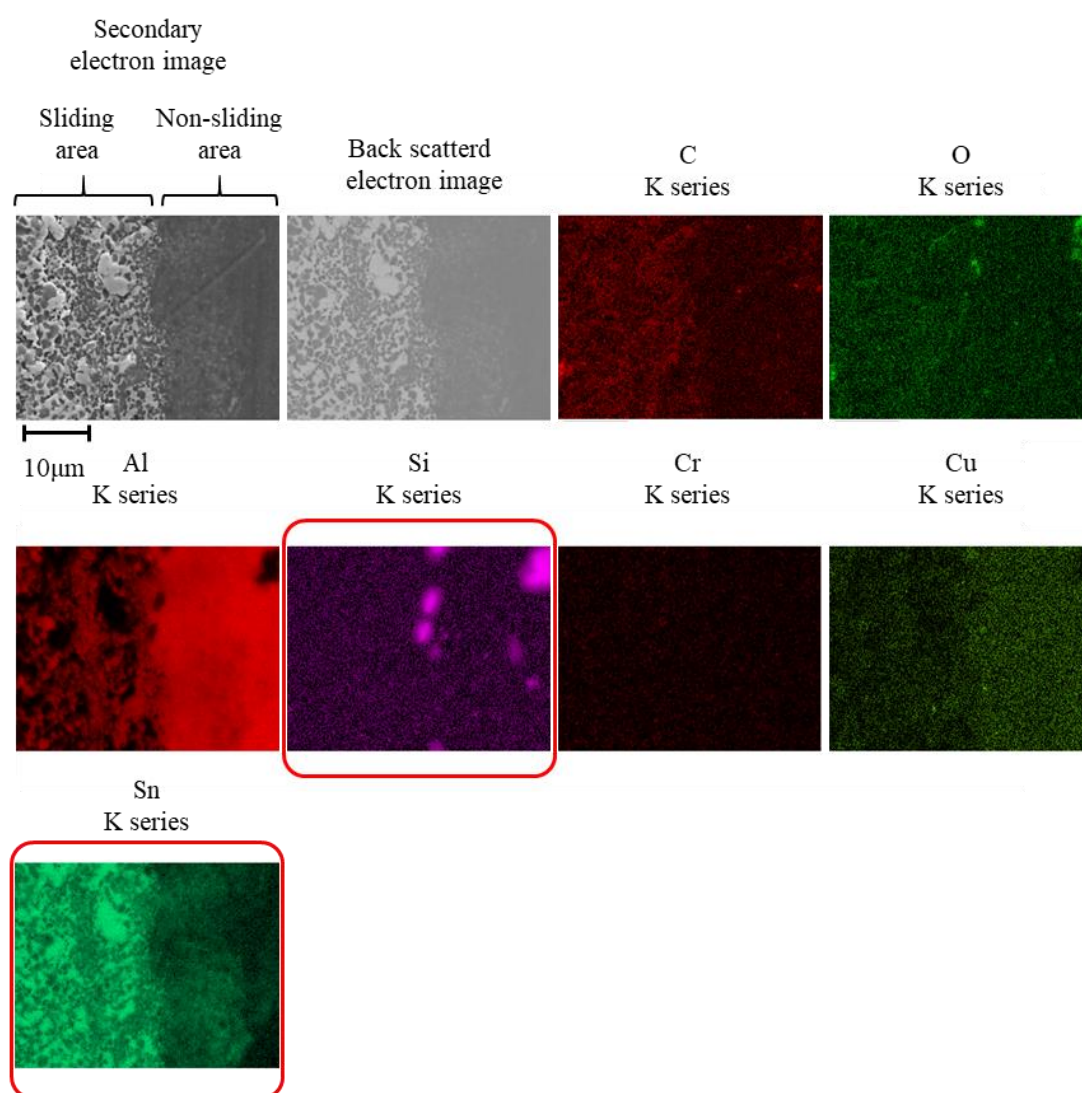


図 4-44 軸受試験機焼付き試験で焼付いた軸受の EDX 分析結果

#### 4.6 低回転・低負荷領域の摩擦特性

ここまで示した焼付き試験では、軸回転数は 5200rpm 一定であり、ジャーナル負荷荷重を段階的に増加させて行くモードであったが、低回転・低負荷領域における DLC ジャーナルの摩擦低減効果を確認した。

試験方法は軸回転数を 2500rpm 一定とし、ジャーナル負荷荷重を 4kN(面圧 3.7MPa), 7kN(8.6MPa), 9kN(11MPa), 12kN(14.7MPa)の 4 条件とした。潤滑油には 0W-20(w/t MoD TC)を用い、軸受は表 2-2 に示す①の軸受で、油温 80℃にて、鋼ジャーナルとの軸トルク特性、摩擦係数特性の比較を行った。その結果を図 4-45 に示す。

その結果、両ジャーナル仕様とも面圧増加に対して摩擦係数は右下がりであり、ボトムを迎えていない事から、この試験条件では流体潤滑状態と考えられ、DLC ジャーナルにおいて、この領域で最大約 14%の摩擦係数の低減効果を確認した〔別途、支持軸受の摩擦トルクを計測し、その分(0.2Nm)を差し引いた〕。

潤滑油の剪断抵抗が支配的な流体潤滑状態で DLC ジャーナルで摩擦が下がった原因は不明であるが、壁面スリップ[82]に由来するものではないかと推察する。これは今後の研究課題としたい。

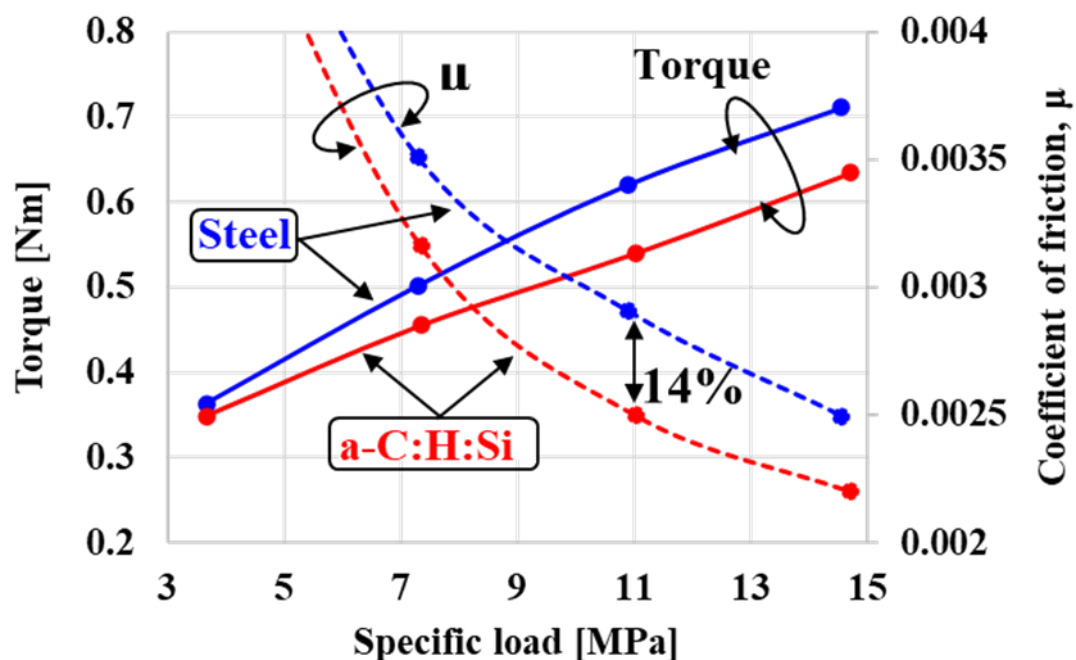


図 4-45 DLC ジャーナルにおける低回転・低負荷領域の摩擦特性



#### 4.7 近似実測損失削減率を用いた、実際のエンジンでの燃費効果

図 4-46 に示す、実用燃費モードでのエンジン動作点頻度例を示す[83]. この動作点頻度を考慮し、4.6 節において、軸回転 2500rpm, ジャーナル荷重 4~14kN という負荷条件で DLC ジャーナルの摩擦低減効果を確認した結果、最大で約 14%の摩擦損失低減が確認された. よって、表 4-4 に示す、“動力伝達各要素の定地走行負担割合, 登坂時負担増加率, 近似実走行寄与率, 2020 年車損失削減率および損失削減方法” [84], から、近似実走行寄与率としては最大 1.5%以上の向上が見込まれる.

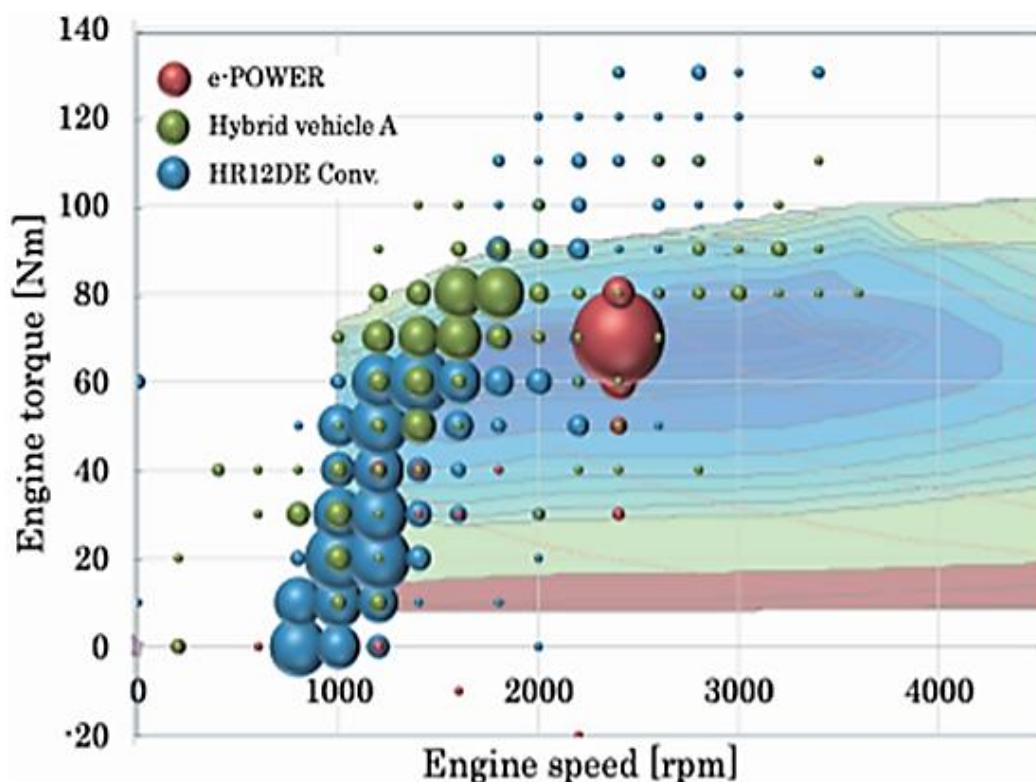


図 4-46 実用燃費モードでのエンジン動作点頻度(例) [83]

表 4-4 動力伝達各要素の定地走行負担割合， 登坂時負担増加率， 近似実走行  
寄与率， 2020 年車損失削減率および損失削減方法（抜粋）

コンポーネント	要素	定地走行 負担割合， %	5 % 傾斜登坂 負担増加率， %	近似実走行 寄与率， %	2020 年車 損失削減率， %	損失削減方法
エンジン	オイルポンプ	2.4	86	4.7	17	オイル低粘度化
	クランクベアリング	2.6	96	5.3	50	幅狭化， テクスチャ， 表面処理， 低粘度化
	ピストン	2.8	180	7.2	71	低面積， リング張力低減， 表面性状
	バルブ	0.8	180	2.0	75	表面性状， 転がり化， シール改善
	チェーン・ベルト	2.4	180	6.2	50	ガイド材料改善， チェーンリンク平滑化， 幅狭化
	ポンピングロス	7.0	-7	9.9	29	排気再循環， ミラーサイクル
	ウォーターポンプ	2.0	87	4.0	25	シール改善， 電動化

#### 4.8 まとめ

実部品を用いる軸受試験機にて DLC の摩擦特性， 焼付き特性について検証した。  
また， 潤滑油添加剤， 粘度の影響を検証した。 更に， 焼付き特性の検証時に確認されたトルクスパイク現象について， AE 法を用い解析を行った。 また， 実機実走焼付き軸受と軸受試験機焼付き軸受を比較し軸受試験機による焼付き試験の妥当性を検証し， 低回転・低負荷領域における摩擦特性を検証し， 実用燃費効果を算出し， これらから以下の知見を得た。

- (1) DLC ジャーナルにより流体潤滑域における摩擦低減が得られ， 181MPa の高面圧下においても焼付きの発生がなく， 低摩擦と高耐焼付き性の両立を確認した。
- (2) 潤滑油添加剤である MoDTC， ZnDTP の影響については， 鋼製ジャーナル， および DLC ジャーナルのいずれのしゅう動面からも明確には検出されなかった。 よって MoDTC や ZnDTP の反応は明確にはなかったものと推察され， これらの添加剤による摩擦特性， 焼付き特性への影響もなかったと考えられる。
- (3) 潤滑油粘度の影響に関しては， 鋼ジャーナルの場合は面圧 40MPa 程度の領域までは 0W-8 粘度油は 0W-20 粘度油に対し， 摩擦係数が低い傾向を示したが， その直後の面圧 44MPa にて焼付きが発生した。 これに対し 0W-20 粘度油の場合は面圧 114MPa で焼き付が発生した。  
DLC ジャーナルの場合は， 0W-8， 0W-20 粘度油， いずれの場合も装置限界の負荷荷重 99kN， 面圧 121MPa においても焼付きの発生がなかった。

また、面圧 40MPa 程度までは 0W-8 粘度油の場合の方が摩擦係数が低かったが、その差は顕著ではなく、それ以降の EHL と考えられる面圧領域においては、0W-20 粘度油の場合の方が最大 16%低摩擦であった。

- (4) スパイク状の軸トルクの急上昇現象であるトルクスパイクに関しては、鋼ジャーナルとアルミニウム合金軸受の組合せでは、一回のトルクスパイクの発生で、アルミニウム、スズの凝着摩耗が起り、焼付き時と同様の現象が起こっている事が分かった。  
一方、DLC ジャーナルとアルミニウム合金軸受の組合せにおいては、トルクスパイクが発生しないことが分かった。
- (5) 軸受試験機における焼付き試験の妥当性に関し、実機実走焼付き軸受と、軸受試験機における焼付き試験で焼付いた軸受のしゅう動面の元素分析を行い比較した結果、両者の焼付き形態は同様傾向であり、軸受試験機における焼付き試験は実際のエンジンよりも高い面圧の過酷条件下の試験であり、このような条件下では軸受試験機では、実機と同様な現象が生じると判断できた。
- (6) 実車常用域の運転条件での DLC ジャーナルによる摩擦低減効果を確認するために、軸受試験機にて低回転・低負荷で摩擦特性を検証した結果、流体潤滑と考えられる領域において、鋼ジャーナルに対し最大 14%の摩擦係数の低減を確認した。この摩擦係数低減効果のメカニズムは不明であるが、DLC による潤滑油の壁面スリップ[82]と推察する。
- (7) DLC コートジャーナルを実際のエンジンに投入した場合の実用燃費効果に関して、近似実測損失削減率を用い、DLC ジャーナルの低回転・低負荷時の摩擦低減割合から算出した結果、5.3%の向上が見込まれることが分かった。



## 第5章 DLCの低摩擦・高耐焼付き性のメカニズムと新たなジャーナル、軸受仕様の提案

### 5.1 DLCの低摩擦・高耐焼付き性のメカニズム

今回の研究の結果、鋼ジャーナルと汎用のアルミニウム合金製しゅう動面を有する軸受との組合せでは、試験回転数はモデルとした実機の最高出力発生回転数の5200rpmで行った結果、1回目のトルクスパイクは、テスト毎におよそ面圧50MPa以下という面圧領域で発生した。4.4.4で述べたように、この一回のトルクスパイクの発生で、

#### 1、軸受構成元素であるスズの溶融-溶出(図5-1)

図5-1に示すSEM像とスズ元素のマッピング像から、スズはしゅう動方向に沿って粒状に付着していることが分かる。

この事から既に、アルミニウム合金軸受の低融点成分であるスズの一部分が、優先的に溶融し、スズの粒子と共にしゅう動表面に広がる。

#### 2、ジャーナル面へのスズとアルミニウムの移着(図5-2)、

上記の一部溶融したスズと共に、しゅう動相手の未コート鋼ジャーナルのしゅう動面にしゅう動方向に沿って帯状に、また一部粒状に移着している。

これと同時に、鋼ジャーナルのしゅう動面にはアルミニウムがしゅう動方向に沿って移着している様子が見られる。

スズの溶融と同時に、しゅう動表面が粗くなることで、摩擦係数の上昇と、しゅう動面の局部温度の上昇に伴い、アルミニウムも軟化する。これにより、鋼ジャーナルのしゅう動面にアルミニウムが移着する。

#### 3、軸受の激しい凝着摩耗の発生(図5-3)

上記の移着に伴って、軸受、ジャーナルのしゅう動表面の表面粗さの悪化が加速し、摩擦係数の上昇、局部温度の上昇が起り、材料強度の弱いアルミニウム合金軸受の大きな摩耗が起る。

#### 4、背面温度の上昇(図5-4, 5-5, 5-7)、

図5-4に示すように、各々のトルクスパイク発生時の直後に軸受背面温度の上昇が見られることが分かった。次に1回目のトルクスパイク発生時の各軸を拡大した図5-5から、トルクスパイク発生約0.3秒後に軸受背面温度が上昇し始め、約1.6秒後に上昇のピークを迎え、背面温度はベースラインの133℃から137℃に4℃上昇した。その後、約4秒経過後にスパイク発生前の温度となったが、これ以降さらに徐々に若干下降を続けた。スパイク発生と同時に背面温度が上昇していないのは、軸受背面で測温していることによるタイムラグと考える。

更には、図5-7に示すように、トルクスパイク発生以前に背面温度に2山の小さな

なピークが観察される．よく見ると，背面温度の1山目の前にトルクが若干上がっている様子が見られる．

5, 潤滑油流量の増大(図 5-6)

トルクスパイクと潤滑油流量の関係を示した図 5-6 から，トルクスパイク発生直後から油量が増加しはじめ，トルクスパイク発生以前の流量に対し，0.05 L/min. 増加した後安定する．

6, 背面温度の低下(図 5-7)

図 5-7 に示すように，トルクスパイクの発生とほぼ同時に軸受背面温度の低下が見られる．その後，元の延長線上に戻るが，1750ms 程度まで温度勾配が若干上がっているのは，荷重増加行程中のためである．

7, 摩擦係数の低下(図 5-8)

図 5-8 に示すように，トルクスパイク発生毎に，トルクと摩擦係数の上昇下降が見られ，また，ベースラインの摩擦係数の低下が見られるが，漸減後，ほぼ一定となる．しかしながらトルク自体は2回目のトルクスパイク以降，振れ幅が大きくなっている．

以上の一連の現象から，1回目のトルクスパイク発生時に既に焼付き時と同様の現象が起こっている事が分かった．よって，焼付き現象を考える上で，複数のトルクスパイクを考慮する事が重要である．

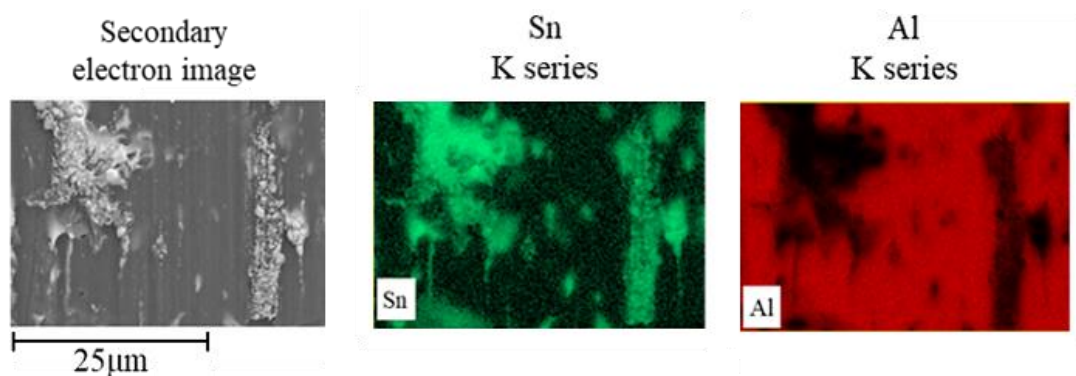


図 5-1 トルクスパイク発生に伴うアルミニウム合金軸受からのスズの溶融-溶出  
EDX 分析結果(図 4-29 より抜粋)

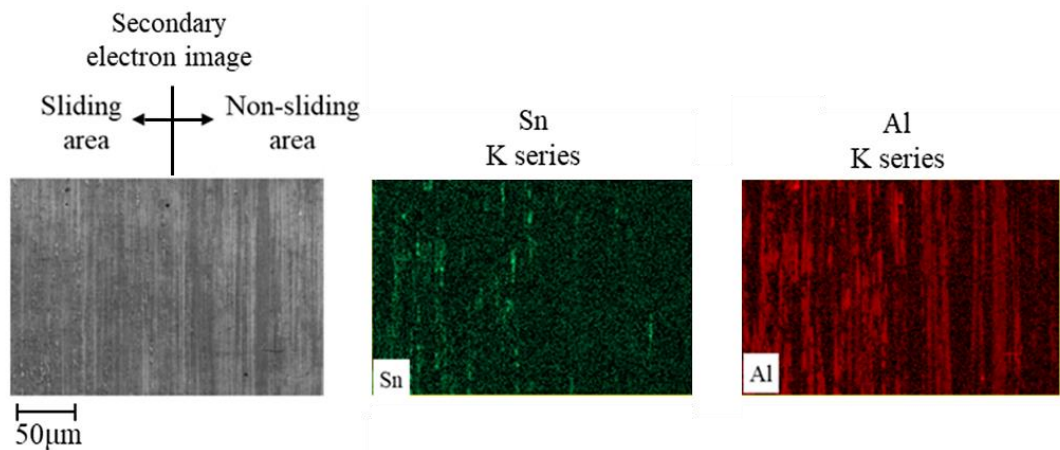


図 5-2 トルクスパイク発生に伴う鋼ジャーナルへのスズ、アルミニウムの移着  
EDX 分析結果(図 4-28 より抜粋)

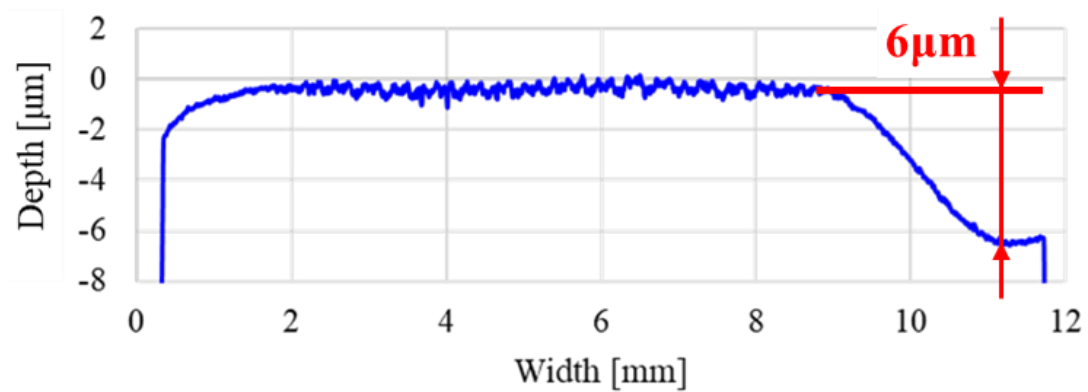


図 5-3 トルクスパイクの発生に伴うアルミニウム合金軸受の凝着摩耗

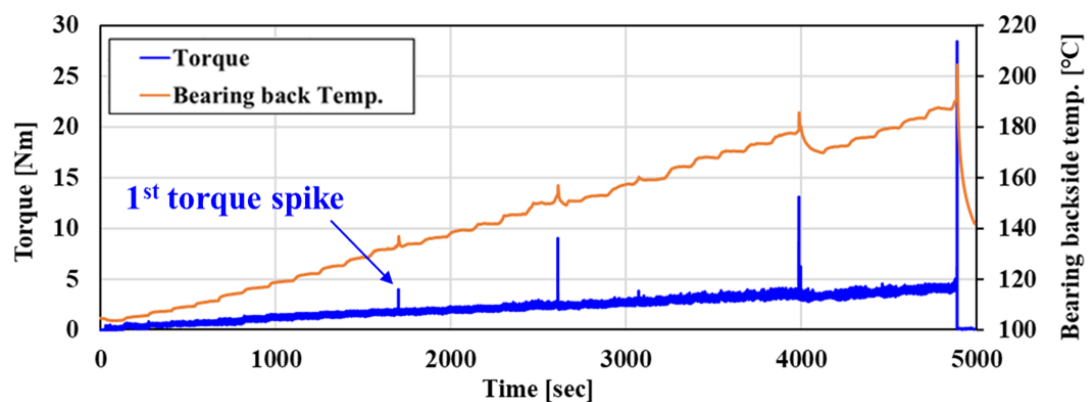


図 5-4 トルクスパイクの発生に伴う軸受背面温度のスパイク的上昇

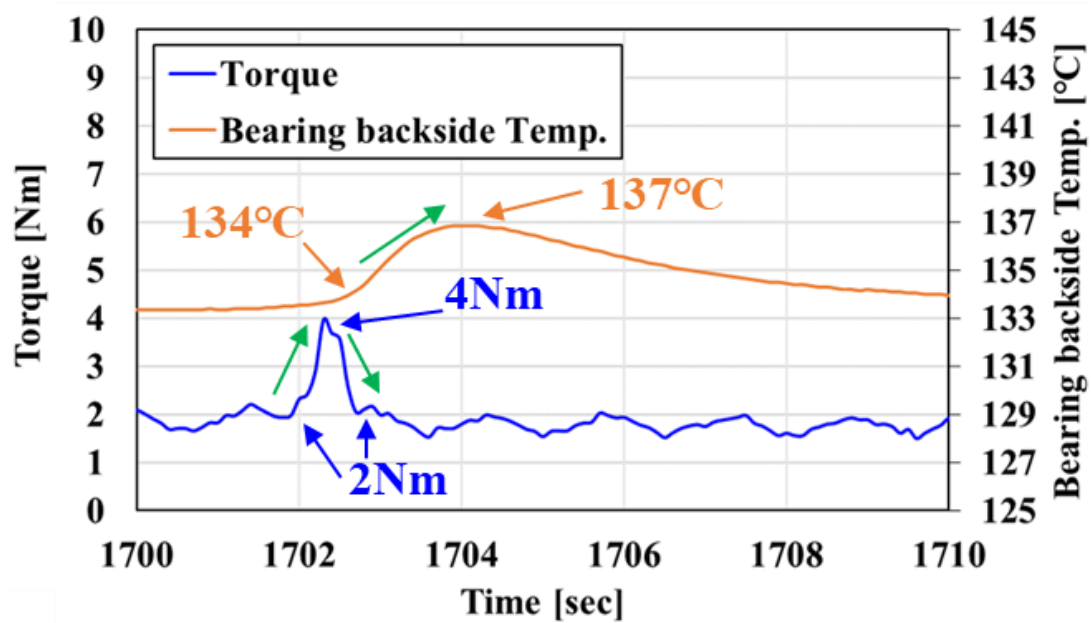


図 5-5 トルクスパイクの発生に伴う軸受背面温度のスパイク的上昇の詳細

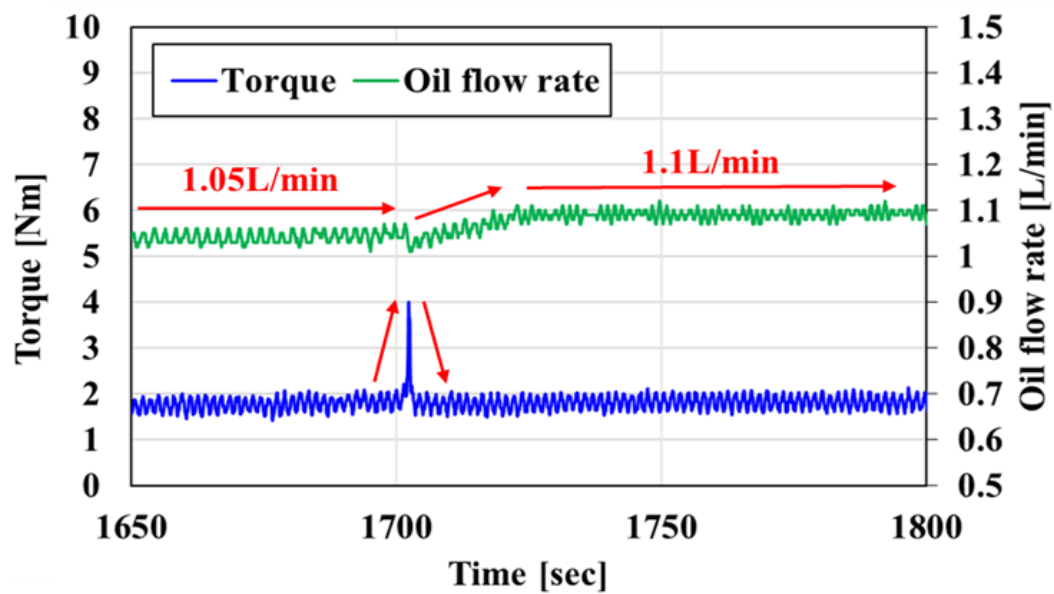


図 5-6 トルクスパイクの発生に伴う潤滑油流量の増大

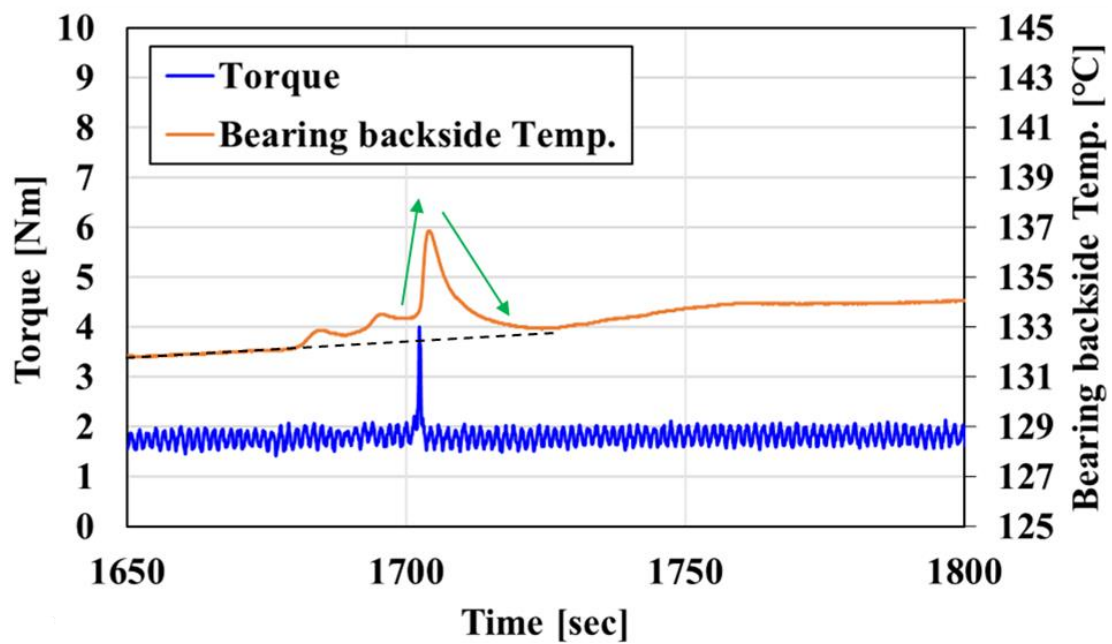


図 5-7 トルクスパイク発生に伴う軸受背面温度の上昇と下降

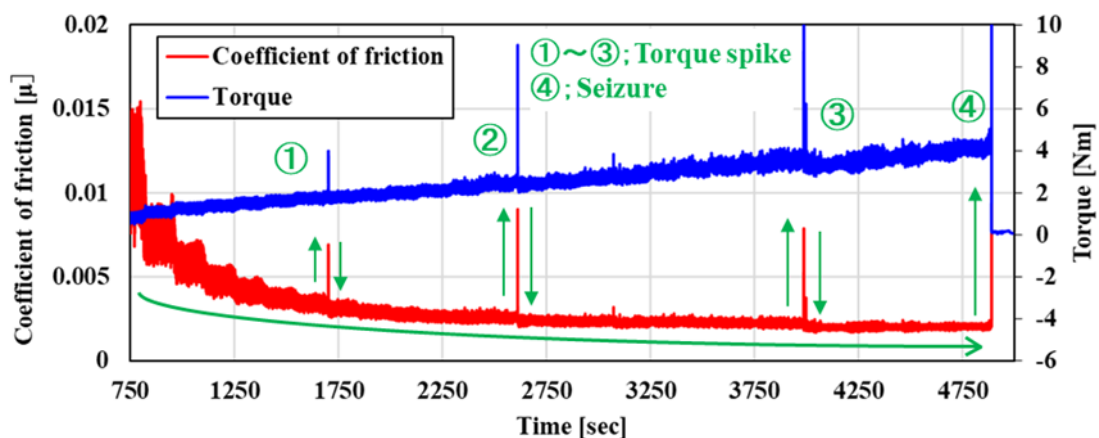


図 5-8 トルクスパイク発生に伴う摩擦係数の減少

一方、図 5-9 に示すように DLC コートジャーナルと、汎用のアルミニウム合金製軸受との組合せにおいては、トルクスパイクの発生は全くなく、装置負荷荷重限界時の面圧の 181MPa でも焼付きの発生はなかった。

また図 5-10 に示すように軸受しゅう動面の EDX 元素分析の結果からは、軸受構成元素の一つのスズが半溶融状態で観察された。

これに対し、図 5-11 に示す、試験後の DLC ジャーナルのしゅう動面の EDX 分析結果では、しゅう動相手の軸受材料のアルミニウムやスズ、シリコンは検出されなかった。

また、潤滑油添加剤の一つである清浄分散剤のカルシウムスルフォネートのカルシウムが、酸素と共に同じ場所から検出されており、これは潤滑油が高温に曝され、反応した後の残渣がジャーナルしゅう動面に付着したのと考えられる。鋼ジャーナルの場合のスズやアルミニウムの移着はしゅう動方向に観察された(図 5-1, 5-2)が、この洗浄分散剤、および、軸受のしゅう動面の観察で確認された、スズの移着(図 5-10)はしゅう動方向に影響されずに、全方向に付着していることから、軸回転停止後に起こったものと考えられる。このことから、しゅう動部の温度が、かなり高温になっていたことが推察される。

以上の結果から、軸受からは一部スズの溶融が観察されたものの、DLC ジャーナル側からはスズやアルミニウムの検出はなかったため、DLC ジャーナルの焼付き限界は、更なる高面圧領域にあるものと考えられる。

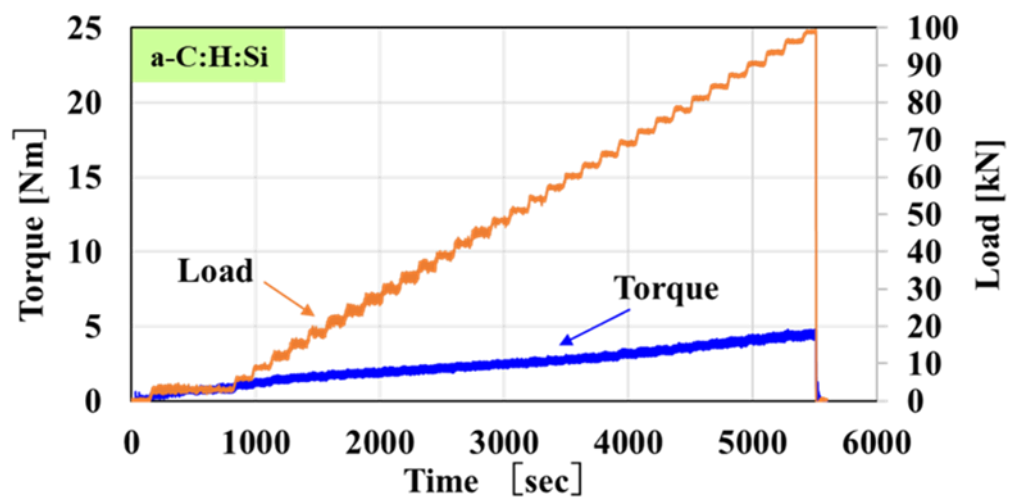


図 5-9 DLC コートジャーナルにおける荷重，トルク特性(図 4-24 に同じ)

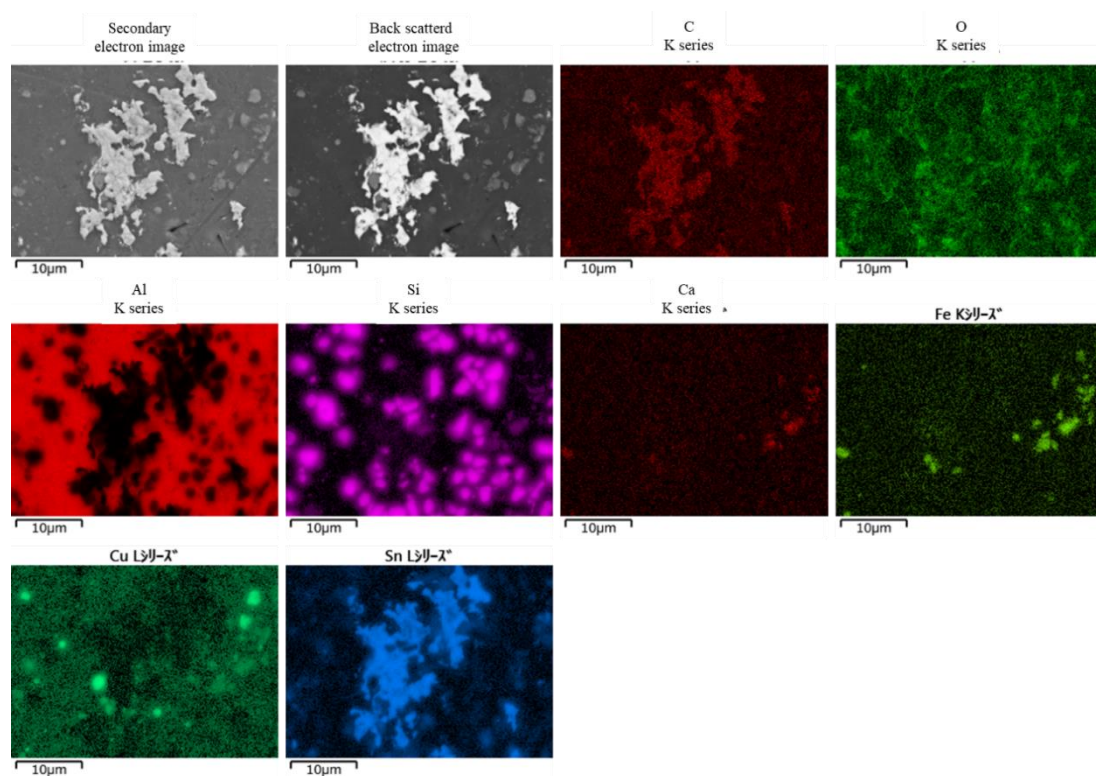


図 5-10 面圧 181MPa で試験終了後の軸受 EDX 元素分析結果(ジャーナル：DLC)



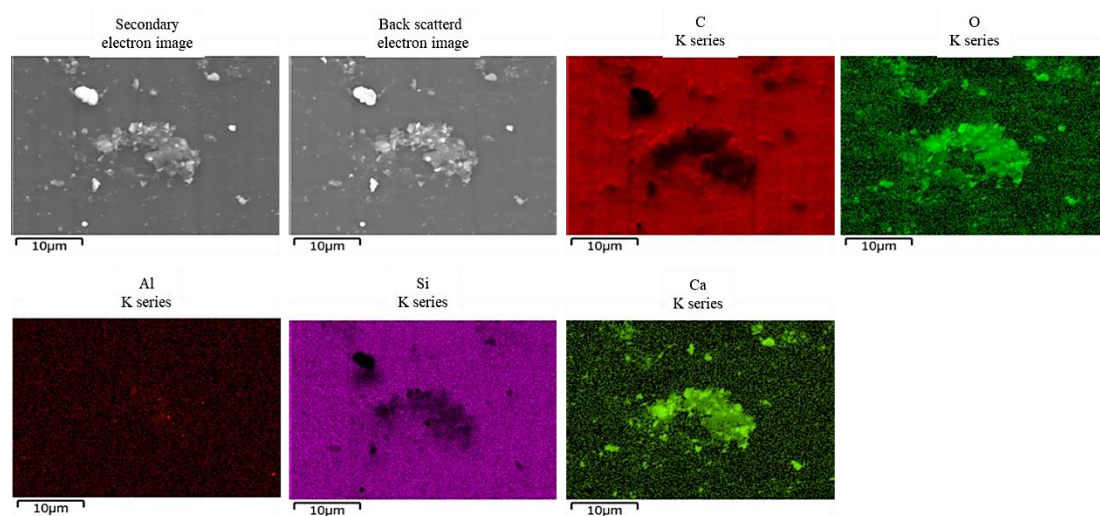
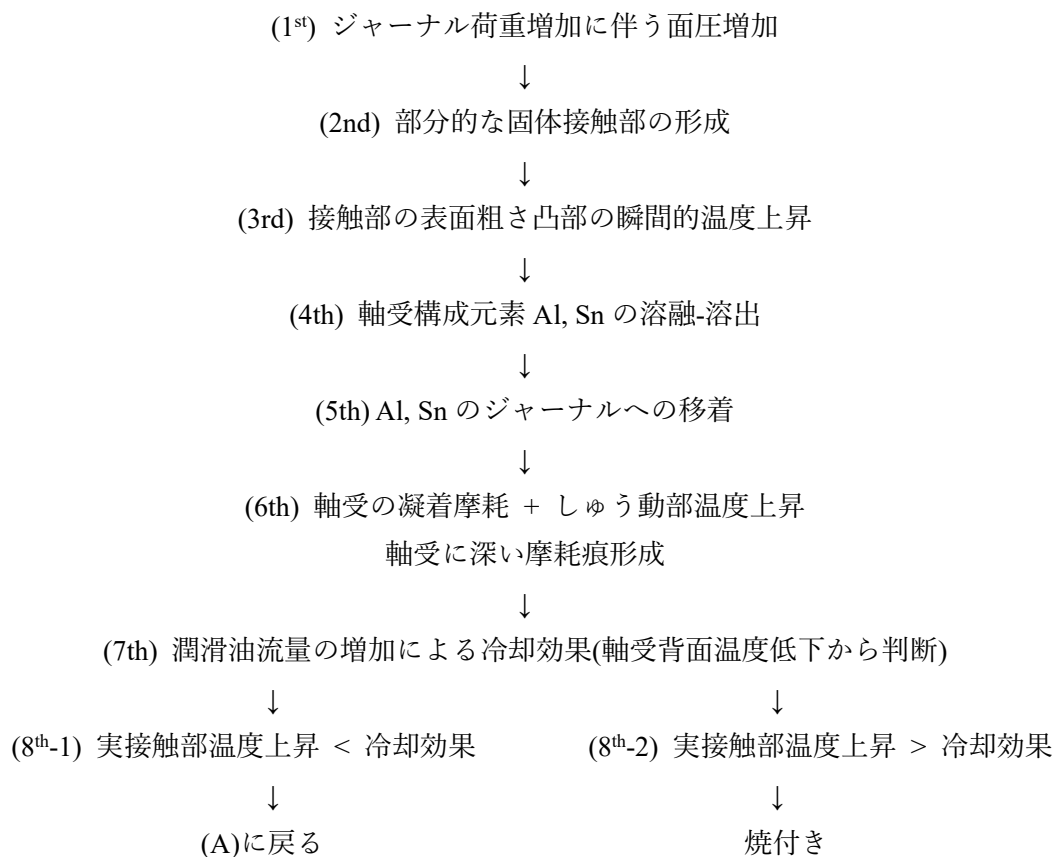


図 5-11 面圧 181MPa で試験終了後の DLC ジャーナル EDX 元素分析結果



以上のことから、4.4.1に記したように、DLC コーティングジャーナルは、未コート  
の鋼ジャーナルに比べて 76%以上の耐焼付き性を有することが分かった。

これらの観察事象をまとめ、鋼ジャーナルとアルミニウム合金製軸受の組合せにお  
ける焼付きのメカニズムを次のように構築した。



DLC の場合、DLC とアルミニウムの親和性が低い[64]ことから、アルミニウム、スズの移着が起らず、よって焼付きにくいと考える。

一方、図 5-12 に示したように、軸回転数 2500rpm、負荷荷重約 4~15kN の流体潤滑と考えられる領域において、DLC コートジャーナルは、鋼ジャーナルに対し、最大約 14%の摩擦係数の低減を確認した。この流体潤滑域における DLC による摩擦低減効果に関しては、現状メカニズムは不明であるが、DLC による潤滑油の壁面スリップ[82]による見掛け上の剪断抵抗の低減によるものではないかと推察し、今後の課題としたい。

また図 5-13 に示すとおり、焼付き試験モードの軸回転数 5200rpm 一定で、荷重を増加させていく試験においては、鋼ジャーナルと DLC ジャーナルの摩擦係数に差が生じ始める面圧およそ 20MPa 以降は EHL 領域と考えられ、この領域において、DLC ジャーナルは鋼ジャーナルに対し最大で約 16%の摩擦係数の低減を確認した。これは DLC の場

合トルクスパイクが発生しないため、軸受の凝着摩耗、軸受構成元素のジャーナルへの移着が発現しない事による固体接触の回避が原因と推察する。

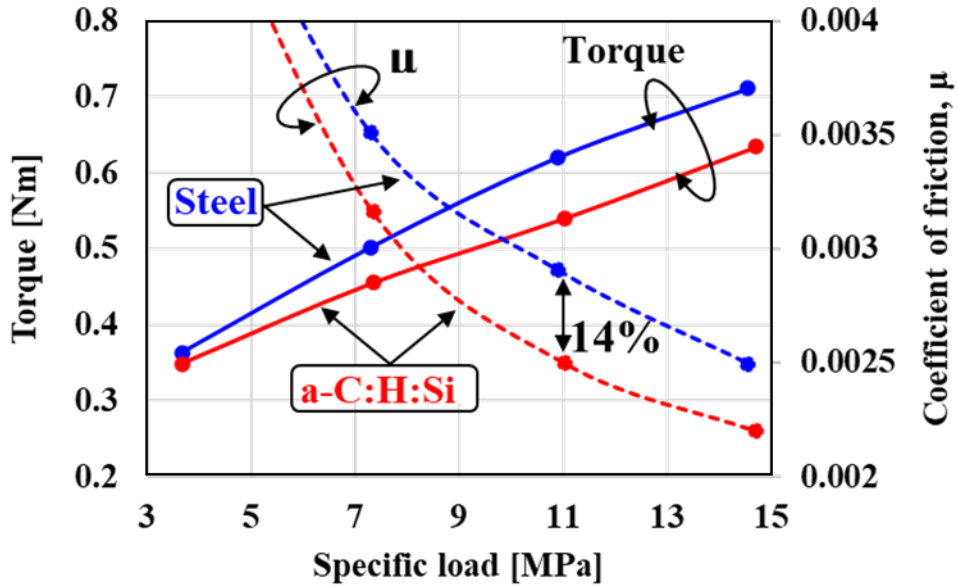


図 5-12 DLC ジャーナルにおける低回転・低負荷域の摩擦特性(図 4-45 に同じ)

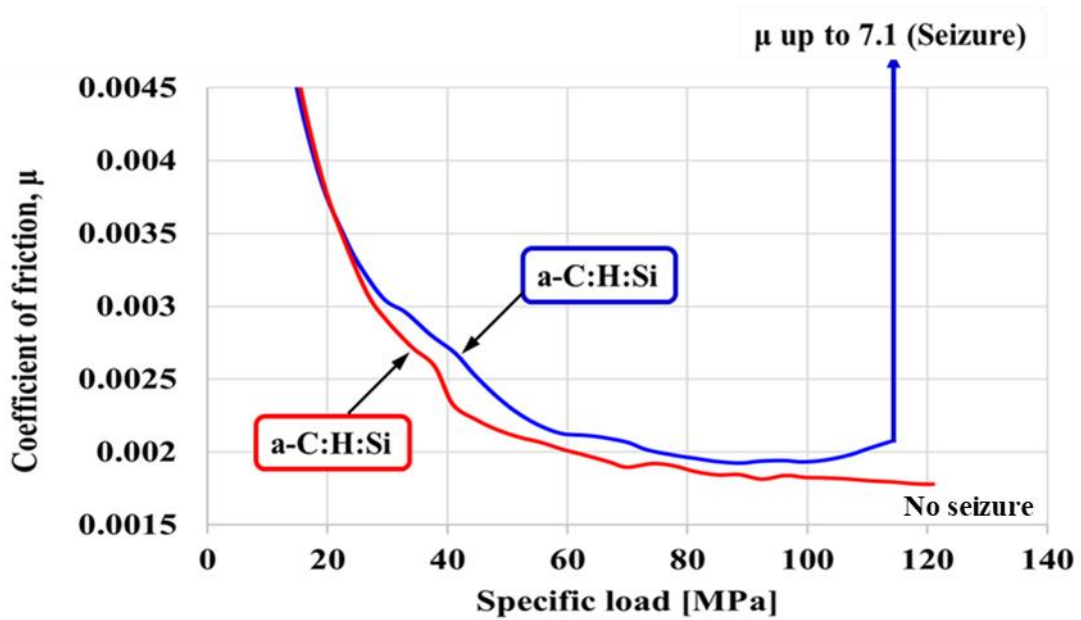


図 5-13 鋼および DLC ジャーナルの面圧に対する摩擦係数特性(図 4-4 に同じ)

DLC の低摩擦に関しては、森らは、無添加鉱油中における DLC-Si 膜の摩擦特性を、Si 含有量、水素含有量を、それぞれ Si:4at% / H:30at%, Si:12at% / H:32at%, Si:17at% / H:29at% と振り、ブロックオンリング試験により摩擦特性を取得している。その結果、摩擦係数は鋼材(SUS440C)の 0.12 に対し、Si を含有しない DLC 膜が 0.08, これに対し Si 添加 DLC は、約 0.03 と低い値を示し、Si 添加 DLC の低摩擦の発現は、しゅう動面の平滑性を損なわないことから、混合潤滑域における流体潤滑割合を維持したこと、および、油中に含まれる 18ppm の水分と膜中の Si が反応し、表面に Si-OH 基が生成され、この Si-OH 基を吸着活性点として形成されたごく薄い(膜厚 3.5nm 未満)吸着水膜が境界膜として機能したことによるものとしている [85]。

これに対し、本研究では、既述の通り、実部品を用いた実機同等のしゅう動条件下における a-C:H:Si DLC 膜の摩擦特性であり、潤滑油添加剤の MoDTC や、ZnDTP の反応も見られず、また低摩擦を発現したのは流体域と考えられることから、吸着水膜が境界膜として機能し低摩擦を発現する上記のメカニズムとは異なるメカニズムが低摩擦発現に寄与していると考えられる。

## 5.2 DLC の低摩擦発現の一因

M. Kalin 等の研究 [86] によれば, 表 5-1 に示すように, 付着に影響が大きい  $\gamma^p$  極性成分 (Owens-Wendt-Rabel-Kaelbe 理論による) の値が, a-C:H:Si の場合, 表 5-2 に示す汎用の PTFE (polytetrafluoroethylene : 四フッ化エチレン) に近い一桁数値となっていることから, また, 本研究における a-C:H:Si においても, 付着に影響を及ぼす水素結合成分 (北崎-畑理論による) が一桁数値の結果が得られている(表 5-2)ことから, DLC は流体潤滑時の摩擦低減効果に一助ある事が期待されると考える。

表 5-1 Steel(SUJ2), ta-C, Si-DLC(a-C:H:Si), a-C:H の表面自由エネルギーと接触角特性  
(Owens-Wendt-Rabel-Kaelbe 理論)

Solids	Surface energy			Water
	$\gamma$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma^D$ (mJ/m <sup>2</sup> )	$\gamma^P$ (mJ/m <sup>2</sup> )	Contact angle (°)
Steel	43.42	31.17	12.25	66.2
ta-C	48.58	32.10	16.48	58.5
Si-DLC	40.47	31.96	8.51	72.7
a-C:H	36.29	31.98	4.31	82.4

※ steel : SUJ2 (DIN 規格 100Cr6)

※ ta-C 膜厚 : 1.2 $\mu$ m

※ Si-DLC : a-C:H:Si (H 含有量 30 at%, Si 含有量 5~10 %, 膜厚 1.5  $\mu$ m)

表 5-2 本研究における a-C:H:Si および PTFE (汎用)の表面自由エネルギー(北崎-畑理論), および, 接触角特性

Contents	Contact angle, deg.	Surface free tension, mJ/m <sup>2</sup>			
		d	p	h	Total
a-C:H:Si	71.4	33.4	10.2	4.2	47.8
PTFE (Products on the market)	106	15.3	3.1	0.3	18.7

d: Dispersion force component p: Polar component h: Hydrogen bonding component

### 5.3 新たなジャーナル，軸受仕様の提案

5.1 で構築した焼付きメカニズムから，DLC により，アルミニウムやスズの移着を抑制出来れば耐焼付き性の向上が得られることが判明した．そこで，潤滑油の低粘度化の必要性が低く，摩擦調整剤 MoDTC による摩耗加速の影響も受けずに，低摩擦と高耐焼付き性の両立を実現する新たなジャーナル，軸受仕様として次の仕様の提案する．

ジャーナル ・ ・ ・ 膜厚 1 $\mu$ m の a-C:H:Si DLC コーティング仕様

軸受 ・ ・ ・ 汎用アルミニウム合金ライニング仕様

従来からの汎用アルミニウム合金製ライニングを有する軸受であれば安価であり，コストメリットも高いと考える．

### 5.4 まとめ

焼付き試験結果，および試験前後の表面粗さ解析計測，試験後の断面形状観察，表面元素分析，AE 波の周波数解析を行った結果，以下の知見を得た．

- (1) 焼付き現象のメカニズムを構築した．
- (2) 低摩擦と高耐焼付き性を両立する新たなジャーナル・軸受仕様を提案した．

## 第6章 結言

本研究においては、今後重要度が増すエンジンの低摩擦化技術に関し、エンジンクランク系の低摩擦化と高耐焼付き性を両立する DLC コーティングジャーナルの摩擦特性、焼付き特性について検証した。その結果から、新たなエンジンの低摩擦化技術として、a-C:H:Si DLC コーティングジャーナルを提案し、以下の知見を得た。

- (1) メインジャーナルに a-C:H:Si DLC をコーティングし、汎用のアルミニウム合金製すべり軸受、および汎用の 0W-20 粘度の潤滑油と組合せ、流体潤滑領域において約 14 %、EHL 領域で約 16 %の摩擦係数の低減と、面圧 181MPa 以上の高耐焼付き性の向上が得られる事が分かった。

これは、緒言で述べたように、従来の DLC コーティングは主に境界潤滑領域の摩擦低減、摩耗低減手法として用いられてきたのに対し、それとは異なり、EHL 領域における摩擦低減を、油膜厚さの減少による、かじりや、焼付きの懸念を抱える潤滑油の低粘度化に頼らずに達成したことから、その意義は大きいと考える。

また、図 1-7 に示す、年々要求値が高まる軸受の限界面圧の上昇に対し、181MPa 以上という高耐焼付き面圧を達成できたことから、細軸化、および狭幅軸受化の実現の可能性を見出し、よって、エンジンのコンパクト化、重量軽減、ひいては CO<sub>2</sub> の削減に大きく貢献できる技術と考える。

- (2) 鋼製ジャーナルとアルミニウム合金製ライニングを有する軸受においては焼付きに至るまでの間に複数回のトルクスパイクと称するスパイク状のトルクの急激な上昇現象が現れる。しかし、a-C:H:Si DLC コーティングジャーナルとアルミニウム合金軸受の場合、このトルクスパイクは発生せず、面圧 181MPa においても焼付きの発生がないことが分かった。

このことから、軸受は、表面コーティングやテクスチャリングを施さず、汎用のアルミニウム合金ライニングのままでよく、コスト増を伴わずに高耐面圧が得られ、その意義は大きいと考える。

- (3) トルクスパイクの発生に伴い、軸受構成元素のアルミニウムとスズが軸側に移着することが分かった。また a-C:H:Si DLC コーティングジャーナルにおいては、これらの元素の移着が起らないことが分かった。これは DLC とアルミニウム合金の低親和性によるものと考えられる。この結果、高耐焼付き性が得られることが分かった。

この現象が発現せずに高耐焼付き性が得られる a-C:H:Si DLC とアルミニウム合金の組合せは、エンジンクランク系だけでなく、他の分野のしゅう動部を有する機械にも幅広く適用の可能性を示すもので、適用が拡大すれば、CO<sub>2</sub> 削減へ大きく貢献すると考えられ、本研究に意義は大きい。

- (4) トルクスパイク現象の AE 波の周波数解析結果、トルクスパイクの発生に伴い、凝着摩耗を示す周波数にピークが現れることが判明したが、このことから(3)に記した軸受構成元素のアルミニウムとスズのジャーナルへの移着現象は軸受けの凝着摩耗によるものであることが分かった。a-C:H:Si DLC コーティングにおいてはこのピークが出現しないことが分かった。

この軸受の凝着摩耗は、たった 1 回のトルクスパイク発生で起こり、1 回目のトルクスパイク発生時に既に焼付き時と同様の現象が起こっている事が分かった。焼付き現象を考える上で、複数のトルクスパイクを考慮する事が重要であり、これらを元に、焼付きメカニズムの解明や、新たな軸受寿命判定法の創出につながる事が期待される。

- (5) 汎用の 0W-20 粘度の潤滑油と低粘度の 0W-8 粘度油を比較した結果、流体潤滑域と考えられる領域においては低粘度油の方が若干低摩擦を呈すが、その差は顕著ではなく、EHL と考えられる領域においては 0W-20 粘度油の方が最大約 16%低摩擦であることが分かった。これも DLC とアルミニウム合金の低親和性によるもので、その結果 EHL 領域が拡大し、更に高耐焼付き性が得られたものとする。

この EHL 領域における摩擦低減効果が、低粘度油より大きかったことは、低粘度化が抱える、油膜厚さの減少による、かじりや、焼付きの懸念が払拭出来き、信頼性向上という観点からも、その意義は大きいと考える。

- (6) 潤滑油添加剤の摩擦調整剤 MoDTC、並びに極圧剤の ZnDTP の反応に関して、WD X を用いた EPMA による高精度な元素分析の結果、試験後の鋼ジャーナル、DLC ジャーナルのいずれのしゅう動面からも、添加剤反応に伴う Mo, Zn, P, S の元素は明確には検出されず、添加剤反応は明確には確認できなかった。

この結果は、エンジン最高出力回転数、かつ潤滑油 110°C というシビアな環境での結果であり、よって、クランク系では MoDTC による DLC の分解が発現し難いことを意味し、その結果、クランク系に DLC が問題なく適用できることを示したものであり、その意義は大きいと考える。

- (7) 本軸受け試験法において、現行のクランク軸・軸受の材料組合せの焼付きメカニズムの究明に非常に有効であることが明らかになった。特に面圧増加時において、複数のトルクスパイクが現れ、1 回目のトルクスパイクは面圧およそ 50MPa 以下で生じ、その時既に軸受材料のスズの溶融と、それに基づく軸受の摩耗が起っていることを見出した。この面圧は実車常用域の面圧より高めであり、今後エンジンのコンパクト化や低粘度オイルによる、しゅう動条件の過酷下において、同じような摩耗を生じることが示唆されている。

- (8) 低回転、低荷重の流体潤滑と考えられる領域において、a-C:H:Si コートジャーナルで、約 14%の摩擦損失低減効果が得られたが、この値から近似実測損失削減率を用い、実際のエンジンでの実用燃費効果を求めた結果、およそ 1.5%以上の向上が見込まれることが分かった。

よって、181MPa 以上という高耐焼付き面圧から、軸受しゅう動幅削減を適用し、その結果エンジンのコンパクト化、重量削減も見込め、実車燃費効果は更なる向上が得られ、CO<sub>2</sub>削減に大いに貢献できるものとする。



## 参考文献

- [1] 環境省資料, 気候変動枠組条約第 6 回締約国会議(COP6)について; 京都議定書 <https://www.env.go.jp/earth/cop6/3-2.html>
- [2] 外務省資料, 2020 年以降の枠組み: パリ協定  
[https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w\\_000119.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000119.html)
- [3] 経済産業省ホームページ, ESG  
[https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_environment/globSn\\_warming/esg\\_investment.html](https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/globSn_warming/esg_investment.html)
- [4] 外務省資料, JAPAN SDGs Action Platform  
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html>
- [5] 経産省資料「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」- 内燃機関搭載車の製造販売の禁止- p28. [https://www.meti.go.jp/shingikai/kempatsushin/shinene\\_sangyo/pdf/017\\_s03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/kempatsushin/shinene_sangyo/pdf/017_s03_00.pdf)
- [6] 途上国総人口  
[https://www.jica.go.jp/jica-ri/IFIC\\_and\\_JBICI-Studies/jica-ri/publication/archives/jica/field/pdf/200607\\_soc\\_01.pdf](https://www.jica.go.jp/jica-ri/IFIC_and_JBICI-Studies/jica-ri/publication/archives/jica/field/pdf/200607_soc_01.pdf)
- [7] IEA  
IEA/ETP-Energy technology perspective 2015 [https://elering. ee/sites/default/files/public/tarkvork-konv/2015.10.15\\_SG\\_Conference\\_-\\_Jean-Francois\\_Gagne.pdf#search=%27IEA%2FETPEnergy+technology+perspective.%2C+2015%27](https://elering. ee/sites/default/files/public/tarkvork-konv/2015.10.15_SG_Conference_-_Jean-Francois_Gagne.pdf#search=%27IEA%2FETPEnergy+technology+perspective.%2C+2015%27)
- [8] 経済産業省・自動車新時代戦略会議(第 1 回)資料 001\_01\_00. pdf (meti. go. jp)
- [9] [https://www.nedo.go.jp/koubo/CA2\\_100294.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/CA2_100294.html)
- [10] 自動車技術ハンドブック 設計(EV・ハイブリッド)編, 自動車技術会 (2016) 237.
- [11] 中島康夫, 他, “新・自動車用ガソリンエンジン”, 山海堂, p57.
- [12] 山本隆司, 岡本裕, 吉田均, “すべり軸受における規格の役割と重要性” 経済産業省委託事業「平成 17 年度基準認証研究開発事業(標準化に関する研修・教育プログラムの開発)」[https://www.jsa.or.jp/datas/media/10000/md\\_2554.pdf](https://www.jsa.or.jp/datas/media/10000/md_2554.pdf)
- [13] Higuchi, T et al. , ”Development of Hydrogen Free DLC Coating for Poston Ring. ” JSAE Proceedings, 154-11, 20115707.
- [14] 樋口毅, 他, “ピストンリングへの水素フリーDLC 膜の適用開発”, 自技会講演会前刷集, 20115707 (2011).
- [15] R. Morgenstren et al., “Reduced Friction Losses and Wear by DLC Coating of Piston Pins” Proceeding of the ASME ICES2008, Chicago, 1650 (2008).
- [16] Shoichiro Usui, et al. , “Effect of Diamond-Like Carbon Coating on Anti-Scuffing Characteristics of Piston Pins”, SAE 2019-01-0184.
- [17] 岡本高光, 他, “LEXUS LFA 用 1LR-GUE エンジンの開発”, TOYOTA Technical Review, 57, 2 (2011) 67.

- [18] 伊藤直彰, 他, “カムシャフト, ロッカーアーム DLC コーティングの開発”  
Honda R&D Technical Review, F1 Special (2009), 250-252.
- [19] 馬淵豊, “DLC 膜の自動車部品への適用”, トライボロジスト, 58, 8, (2013) 567-565
- [20] 赤坂裕三, 他, “新可変動弁 (VVEL) システムの潤滑解析技術”, 自技会講演会前刷集, 20095436 (2009).
- [21] 小西康一, 他, “F1-Honda 製ギヤの開発”, Honda R&D technical Review (2009) 118.
- [22] Treutler, C. P. O., “Industrial Use of Plasma-Deposited Coatings for Components of Automotive Fuel Injection Systems” Surface & Coatings Technology, 200, 5-6, 2005, 1969-1975.
- [23] K. Komori, et al., “Friction Behavior of Diamond-like Carbon Coated Ball Joint: Approach to Improving Vehicle Handling and Ride-comfort” SAE Paper, 201512 10, No. 2015-01-1507, 1.
- [24] S. Hara, et al., “Development of the DLC Film for Front fork’s Inner Tube”, SAE 2007-32-83.
- [25] 馬淵豊, “Diamond Like Carbon 膜の研究開発と部品適用に関する動向”, 日本 マリンエンジニアリング学会誌, 55, 1, (2020) 11-17.
- [26] 馬淵豊, “DLC 膜の自動車部品への適用”, トライボロジスト, 58, 8, (2013) 567-565.
- [27] M. Kano, “Diamond-Like Carbon Coating Applied to Automotive Engine components”, Tribology Online, 9, 3, (2014) 135-142.
- [28] Y. Kagohara, et al., “Basic Characteristics of Lead-free Aluminum Alloy Bearings with Low Friction Property of Adhered Molybdenum Disulfide”, SAE No. 2007-01-1570.
- [29] 小早川, 辻, 川上, 他, “自動車エンジン用樹脂オーバーレイ軸受材料の研究”, 2013 年度研究発表会前刷集, 自動車技術会中部支部 (2013) 45-50.
- [30] 神谷, 千年, 出崎, “エンジン軸受用低フリクション樹脂コーティングの開発”, 12-14, 「ディーゼルエンジンのさらなる高効率化を目指すコンポーネントの革新」前刷集, 自動車技術会 (2015) 28-33.
- [31] 難波唯志, 加藤慎一, “自動車エンジン用すべり軸受の低燃費技術と今後の展望”, トライボロジスト, 65, 6, (2020). 370-375.
- [32] 熊田喜生, 橋爪克幸, 木村好次, “円周方向にマイクログлубをもつすべり軸受の特性”, トライボロジスト, 43, 6, (1998), 456-4.
- [33] 熊田喜生, 橋爪克幸, 木村好次, “マイクログлубすべり軸受特性の研究 (第二報)—焼付き特性, 軸受温度について—”, トライボロジー会議予稿集, 1994, 金沢, 秋, (1994), 290.
- [34] 加藤善一郎, “自動車エンジン用マイクログлуб軸受の溝寸法の最適化”,

- 自動車技術会論文集, Vol. 51, No. 6, (2020).
- [35] 山本賢二, “省エネルギー潤滑油に用いられる摩擦調整剤の技術動向” トライボロジスト, Vol. 65, (2020), 8, 478-484.
  - [36] 村木一雄, “乗用車用エンジンのトライボロジー的課題” トライボロジスト Vol. 62. (2017) 12. 740-747.
  - [37] 熊田喜生, “自動車エンジン用滑り軸受の進展と将来展望”, トライボロジスト Vol. 61, (2016), 11, 61, 763~770.
  - [38] 大同メタル工業(株), 名古屋大学, 日産自動車(株), “内燃機関軸受へのダイヤモンドライクカーボン材料適用の研究開発”, NEDO 省エネルギー技術フォーラム 2013.
  - [39] L. Bobach, et al., “Reduction in EHL Friction by a DLC Coating”, Tribology Letters, 2015, 60, 17.
  - [40] M. Björling, et al., “On the effect of DLC coating on full film EHL friction“, World Tribology Congress 2013, Torino, Italy, September 8 –13, (2013).
  - [41] K. Bobzin, T. Brögelmann, et al., “Influence of wetting and thermophysical properties of diamond-like carbon coatings on the frictional behavior in automobile gearboxes under elastohydrodynamic lubrication”, 284, pp. 290-301, (2015).
  - [42] K. Bobzin and T. Brögelmann, “Minimizing Frictional Losses in Crankshaft Bearings of Automobile Powertrain by Diamond-like Carbon Coatings under Elastohydrodynamic Lubrication”, Surface & Coatings Technology, 290, pp. 100-109 (2016).
  - [43] K. Bobzin, et al., “A contribution to the thermal effects of DLC coatings on fluid friction in EHL contacts”, Lubrication Science, pp. 285-299 (2018;30).
  - [44] Andreas Schwarz, et al., “DLC-coated spur gears – part I:friction reduction”, Industrial Lubrication and Tribology, <https://www.emerald.com/insight/0036-8792.htm>
  - [45] J. Beulshausen, J. Geiger, S. Pischinger, B. -R. Höhn, “Energieeffizienter Antriebsstrang durch Reibungsminimierung”, ATZ – Automob. Z. 115 (10) (2013) 828–835.
  - [46] K. Machida, et al., “Proposal of New Bearing Simulation Rig Tester for High Efficiency Engine Bearing Development, ” Honda R&D Technical Review, 18-2, (2006) 131-139.
  - [47] 大久保光, “各種市販エンジンオイル潤滑下における DLC 膜のトライボロジー特性”, 日本機械学会論文集, Vol. 18, No. 838, 2016.
  - [48] Naoto Ohtake, “Properties and Classification of Diamond-Like Carbon Films”, Materials 2021, 14, 315.
  - [49] 三宅浩二, “ダイヤモンド・ライク・カーボン(DLC)膜とその応用展開”, Journal of the Vacuum Society of Japan, 60, 11 (2017) 428-436.
  - [50] Y. Mabuchi, et al., "Wear Analysis of Hydrogen-free Diamond-like Carbon Coatings under a Lubricated Condition", Wear, 2980299 (2013) 48-56.

- [51] 滝川浩史, “ フィルタードアークイオンプレーティングによるドロップレットフリー高品位 DLC 成膜技術”, 表面技術, 58, 10 (2007) 572-577.
- [52] 滝川浩史, “フィルタードアーク蒸着により DLC を創る”, Japan Plasma Fusion Res. , 92, 6 (2016) 266-471.
- [53] M. Goto, et al., “Formation Processes of Metal – Rich Tribofilm on the Counterface During Sliding Against Metal/Diamondlike-Carbon Nanocomposite Coatings”, tribology Online, 10, 5, 2015, 306-313.
- [54] M. Kalin, et al., "The effect of doping elements and oil additives on the tribological performance of boundary-lubricated DLC/DLC contacts " Tribology Letters, 17, 4, (2004) 679-688.
- [55] B. Kleinsorge, et al., "Bonding regimes of nitrogen in amorphous carbon " Diamond and Related Materials, 9, (2000) 643–648.
- [56] L. Swiatek, et al. , "Multi-doped diamond like-carbon coatings (DLC-Si/Ag) for biomedical applications fabricated using the modified chemical vapour deposition method" Diamond & Related Materials, 67 (2016) 54-62.
- [57] T. Shinyoshi, et al. , “Wear Analysis of DLC Coating in Oil Containing Mo-DTC”, SAE Technical Paper, 2007-01-1969, 2007.
- [58] 小森健太郎, “エンジン潤滑油環境下における水素化 DLC 膜の摩擦化学反応と摩擦摩耗メカニズムの研究”, 名古屋大学, 平成 29(2017)年度 博士学位論文
- [59] R. M. Terrill, “On Grubin's formula in elastohydrodynamic lubrication theory”, Wear, 92, 1(1983)67.
- [60] Y. Long, ts al., “Superlubricity of glycerol by self-sustained chemical polishing”, Scientific reports 9 (1), 1-13.
- [61] 寺山暢之, “PIG プラズマ CVD 法による DLC コーティング技術”, J. Plasma Fusion Res, Vol. 87, No. 8 (2011) 548-555.
- [62] 各種物質の性質. 金属(固体)の性質, <https://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01020.htm>
- [63] Y. Miyauchi, et al., “A Wear Prediction Calculation of Bearing and Correlation Using Thin Layer Activation Technique, ” Mazda Technical Review, 26, 2008, 147-152.
- [64] T. Yokota, et al., “Frictional properties of diamond-like carbon coated tool in dry intermittent machining of aluminum alloy 5052”, Precision Engineering, 38, 2014, 365-370.
- [65] Ni, X, Cheng, HS. “Seizure failure of copper-lead with overlay and aluminum-tin connecting rod bearings”, Tribology Transaction 1996; 39: 194–200.
- [66] 長谷亜蘭, “アコースティックエミッション計測の基礎”, 精密工学会誌, 78, 10 (2012) 856.
- [67] A. Hase, et al. , “Correlation between features of acoustic emission signals and

- mchanical wear mechanism”, *Wear*, 292-293(2012), 144-150.
- [68] 長谷, “AE 法による摩擦・摩耗現象の認識と評価”, *潤滑経済*, 4, (2009), 33-39.
  - [69] 長谷亜蘭 “摩耗メカニズムの研究事例と動向”, *表面技術*, 65, 12(2014) 556-561.
  - [70] A. Hase, et al. , “Wear elements generated in the elementary process of wear” *Tribology International*, 42 (2009) 1684-1690.
  - [71] T. SASADA, S NOROSE, “The Formation and Growth of Wear Particles through Mutual Material Transfer”, in T. SAKURAI (Ed. ), *Proc. JSLE-ASLE Int. Lubrication Conf.* , 1975, Elsevier, Amsterdam, (1976), 82.
  - [72] A. HASE, H. MISHINA, “Study on the Elementary Process of Adhesive Wear : Influence Factors for the Generation of Wear Elements and the Formation of Transfer Particles”, *Proc. of the International Tribology ASIATrib Congress 2010, Perth*, (2010), 39.
  - [73] 長谷, 和田, 広田, “凝着摩耗における移着現象と AE 信号の相関”, *トライボロジスト*, 50, 11, (2005), 808-815.
  - [74] A. Hase, et al., “Acoustic Emission Signals and Wear Phenomena on Severe-Mild Wear Transition”, *Tribology Online*, 3, 4, (2009), 333-344.
  - [75] 長谷, 和田, 三科, “アブレシブ摩耗現象と AE 信号の相関”, *トライボロジスト*, 51, 10, (2006), 752.
  - [76] 三上雅生, “簡易型 AE 法によるすべり軸受診断システムの開発”, *INSS JOURNAL*, 19 (2012) NT-16, 216-220.
  - [77] A. Hase, et al., “Fundamental Study on early detection of seizure in journal bearing by using acoustic emission technique” *Wear*, 346-347, (2016), 132-139.
  - [78] A. Hase, et al., “Scanning electron microscope observation study for identification of wear mechanism using acoustic emission technique” *Tribology International*, 72, (2014), 51-57.
  - [79] H Mishina, et al., “Generation of wear elements and origin of tribomagnetization phenomenon” *Wear*, 269, (2010), 491-497.
  - [80] A. P. Merkle, et al. , “Liquid-like tribology of gold studied by in situ TEM” *Wear*, 265, (2008), 1864-1869.
  - [81] 福井豪, 他, “エンジン用すべり軸受の焼付きプロセスにおける AE 信号変化”, *トライボロジー会議 2017, 秋, 高松, 予稿集*, A35 (2017).
  - [82] 平山朋子, “固液界面とトライボロジー” *ながれ*, 35, (2016), 297-300.
  - [83] 木村誠, 他, “新世代ハイブリッドパワートレイン “e-Power” の開発”, *NISSAN TECHNICAL REVIEW*, 80, 3 (2017) 6-14.
  - [84] 中村隆, “トライボロジー技術”の進展による自動車の省エネ”, *トライボロジスト*, 61, 2, (2016), 65-70.
  - [85] 森広行, 他, “無添加鉱油中における DLC-Si 膜の低摩擦機構”, *トライボロジス*

ト, 54, 1, (2009), 40-47.

- [86] M. Kalin, M. Polajnar, “The wetting of steel, DLC coatings, ceramics and polymers with oils and water : The importance and correlations of surface energy, surface tension, contact angle and spreading”, *Applied Surface Science*, 293, (2014), 97–108.

## 謝辞

2017 年度に博士後期課程への入学を許可して頂き、2021 年度での卒業に至るまでの 4 年半の長きに渡り本研究のご指導を頂きました三原雄司教授に心より深く感謝致します。本研究を進め学位論文として纏めるに至るまで三原教授には微に入り細に入り様々な観点からご指導を頂きました。特に企業では十分に学び得なかった研究課題に対する多分野からの取り組み方に関しては深くご指導を頂きました。

思い返せば 2019 年の台風による多摩川の氾濫に伴う大学構内の水没、また新型コロナウイルスの蔓延に伴う大学の閉鎖等で、通算約 1 年半の間、思うように研究を進める事が出来ず、そのような状況においても三原教授には粘り強くご指導を頂いたおかげで研究を断念することなく学位論文に纏める事が出来ました。今後は三原教授の元で学ばせて頂いた貴重な研究、経験を様々な分野で生かせることと思います。

本学位論文をまとめるにあたり、適切なご指導ご助言を賜りました東京都市大学の三田修三教授、及川昌訓講師、ならびに加納眞特別研究員に深く感謝致します。

実験や実験結果の解析などに関して共に進めて頂いた、元研究員の松江弘晴氏、山内眞行研究員、修士 1 年 岩田拓実君に深く感謝致します。また、尾鷲道康研究員、岩崎秀之研究員には貴重なご助言を頂きました。ならびに本研究の初期段階の進めでは既に本研究室の OB になられた方々にもご助力頂き感謝致します。

研究活動を進める上では三原教授の秘書の諸橋吏子氏、また東京都市大学の内燃機関工学の皆さまに深く感謝の意を表します。

最後に博士後期課程で研究を行うことを快諾下さった株式会社不二 WPC 下平英二取締役社長、社員の方々、ならびに私の家族に心より深く感謝致します。