

平成21年 6月26日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560152
 研究課題名（和文） 転がり軸受や表面被覆と潤滑剤の活用による超低摩擦ディーゼル機関
 トライボロジー技術
 研究課題名（英文） Ultra low friction tribotechnology for diesel engines by the
 application of roller bearings, surface coatings and lubricants
 研究代表者
 副島 光洋（SOEJIMA MITSUHIRO）
 九州産業大学・工学部・教授
 研究者番号：40037990

研究成果の概要：

実働ディーゼル機関，OHV や OHC の各種動弁機構試験装置などを用い，低粘度 Low-SAPS 環境対策や個体潤滑剤配合のエンジン油が機関の全摩擦損失，動弁系カム・フォロワ機構のローラ支持軸受などの要素や各部の摩擦損失，そのすす混入汚損がカム・フォロワの摩擦摩耗に及ぼす影響を調べ，超低摩擦ディーゼル機関トライボロジー技術のための転がり軸受や表面被覆と潤滑剤の活用に関する研究開発のポイントを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：ディーゼル機関，トライボロジー，摩擦摩耗，すべり軸受，転がり軸受，エンジン油，コーティング，Low-SAPS オイル

1. 研究開始当初の背景

(1) 温暖化防止・二酸化炭素排出量削減のために，ディーゼル機関の燃費改善をもたらすトライボロジー技術の開発が必要である。

(2) 近年のトライボロジー技術の進歩に合わせ，従来のエンジン設計の概念を根底から覆す着想で，機関のメカロスが現状の半分以下の超低摩擦の新技术を検討すべきである。

(3) エンジン・トライボロジー技術の特徴

は，(a)すべり軸受主体，(b)オイル潤滑，(c)高温・高速・高面圧（変動荷重）であり，(i)要素部品の小形・軽量化，(ii)オイルの低粘度化，(iii)酸化劣化防止・耐摩耗・摩擦低減のための各種添加剤配合，(iv)オイル消費量低減が要求される。さらに，(v)消費オイルが原因の排気ガス後処理装置すなわち DPF 硫酸灰分目詰まりや NOx 還元触媒りん被毒を防ぐために，オイル中の金属清浄分散剤や ZnDTP

摩耗防止剤ならびに基油硫黄分を削減した環境適応の低灰分・低リン・低硫黄 (Low-SAPS) オイルへの転換が進められている。

(4) 研究の学術的な背景とくに関連研究の動向や成果との関連性は、以下の通りである。

① クランク軸やカム軸を転がり軸受で支える例は少なく、気筒数の少ない小形機関にみられる程度である。理由は、すべり軸受の方が吸振性に富み小形・軽量で組込み容易な半割構造になり、転がり軸受には疲労損傷が発生するためである。しかし、転がり軸受の進歩すなわち許容負荷と疲労寿命の向上により、小形・軽量化や半割構造も視野における状況となった今、油の低粘度化メカロス低減対策の進行を阻むすべり接触要素の転がり軸受化の可能性を調べ、その性能と信頼性を確認することの価値は大きい。

② 一方、コーティング面のトライボロジー特性の研究から、CVD、PVD など種々の表面改質技術の進歩に後押しされ、多くの成果が生まれている。ピストンリングやバルブ・リフターを対象とした摩擦低減・摩耗防止のための TiN / CrN, MoS₂, DLC などのコーティングの評価結果はたいへん有用である。

③ さらに、エンジン油添加剤の ZnDTP や MoDTC のカム・フォロワ摩擦低減・摩耗防止の効果とその酸化劣化やすす混入汚損の影響を調べた研究実績に踏まえ、開発途中の Low-SAPS エンジン油などを対象に、軸受試験機、実働ディーゼル機関や各種動弁機構モデル試験機を用いて摩擦摩耗特性を調べ、その有用性を明らかにする必要がある。

④ とくに、PTFE などのナノ・パーティクル固体潤滑剤に着目した研究や SAE0W20 クラスの高粘度指数・合成油の境界潤滑特性を指摘する研究から、ディーゼル機関・低摩擦化エンジン油設計のコンセプトとして、粘度とくに HTHS 粘度の低減による粘性摩擦低減と固体潤滑性の付与による境界接触せん断抵抗低減の両立があり、それを支える表面加工やコーティングの技術が鍵となる。本研究は、その実現性を多角的かつ総合的に検討するものであり、その成果と効果は大である。

2. 研究の目的

(1) そこで、[1]クランク軸やカム軸の転がり軸受支持への変更によるメカロス低減、[2]低粘度オイルによる粘性摩擦の低減、[3]要素

部品コーティングによる境界摩擦・摩耗の低減、[4]ナノ・パーティクル固体潤滑剤配合による摩擦摩耗の低減、[5] Low-SAPS オイルの摩擦摩耗特性など、高性能・高信頼性エンジン・トライボロジー技術を検討する。

(2) 研究の目標は、以下の通りである。

① 実働エンジン等価な変動荷重、回転速度、オイル温度の試験条件を与える試験機を用い、すべり軸受仕様と転がり軸受仕様の軸駆動トルクを比べ、摩擦低減のための設計条件(種類、形状、給油量など)を明らかにする。

② 実働ディーゼル機関の全摩擦損失測定で、シリンダやリングの DLC 等のコーティングおよび低粘度 Low-SAPS エンジン油の摩擦低減効果を調べ、コーティングやエンジン油選定の条件を明らかにする。

③ 軸受試験機やディーゼル機関を用い、ナノ・パーティクル固体潤滑剤調合オイルの摩擦低減効果を調べ、エンジン油(油種、給油量)や固体潤滑剤の条件を明らかにする。

④ 試験結果を総合し、性能・信頼性向上に有効な要素部品とオイルの設計条件を検討し、超低摩擦ディーゼル機関を構想する。

⑤ 研究推進のために、先進的な要素部品加工・表面処理・オイル精製等の技術情報の収集と精査が不可欠であり、国内外の大学等の研究者の助言や協力を得る必要がある。

(3) 学術的な価値、独創的な点、予測される結果と研究の意義は、以下の通りである。

① 転がり軸受でクランク軸やカム軸を支え、その長所すなわち低粘度オイル潤滑で摩擦が小さい特性を活かして、軸受系や動弁系と共にピストン系の往復動すべり接触部の粘性摩擦を低減できることに着目した研究であり、他に類例はなく、独創性に富む。

② ディーゼル機関の摩擦摩耗低減・トライボロジー技術により前項(i)~(v)などの課題が克服されつつある。しかし今日、Low-SAPS 油など環境対策オイルへの転換が重なり、メカロス低減との両立が厳しい状況にある。また、動弁系カム・フォロワの転がり接触方式への変更も加速している。メカロスは主にオイルの粘性摩擦に起因しており、低粘度化は避けられないので、油膜厚さの減小に伴う境界摩擦の増大を抑える技術すなわち表面改質やオイル添加剤で境界潤滑性を高め接触せん断抵抗を小さくする技術が必要である。

③ 研究の結果や意義として、軸受試験機に

よる測定や実働エンジン全摩擦損失の測定から、転がり軸受の摩擦低減効果と設計条件、要素部品コーティングと Low-SAPS エンジン油の摩擦低減効果と選定条件、低粘度オイル固体潤滑剤配合の効果などが明らかになり、ディーゼル機関の超低摩擦化と性能・信頼性向上のための設計指針を検討し、かつトライボロジー技術の新しい展開をもたらす。

3. 研究の方法

(1) クランク軸やカム軸の転がり軸受支持による軸受系の低摩擦化、ピストン系の低粘度オイル潤滑や動弁系の転がり接触方式による低摩擦化などの超低摩擦ディーゼル機関トライボロジー技術および環境適応エンジン油の信頼性などの研究を推進する。

① 動弁系摩擦試験機でカム軸駆動トルクを測り、軸部支持の転がり接触化による摩擦低減効果を調べ、最適な設計条件（軸受の種類、材質、形状、給油量など）を調べる。

② 転がり軸受、エンジン油の粘度等級や Low-SAPS 環境対策について、国内外の大学やメーカーの研究者の助言や協力を受ける。

(2) 要素部品コーティングによる摩擦摩耗低減の効果とりわけ固体潤滑性や耐摩耗性を高める表面処理やエンジン油の条件を調べ、メカロス低減効果と実用性を検討する。

① 実働ディーゼル機関の全摩擦損失を測定し、シリンダ、ピストンやリングのコーティング（DLC 等カーボン類、二硫化モリブデンやクロム／チタン化合物など）の効果、その条件（種類、形態、膜厚など）、Low-SAPS エンジン油との相性などを明らかにする。

② 表面コーティングの摩擦低減効果と耐摩耗や耐疲労の信頼性に関する実験データの照会など、国内外の大学（英国 UCLAN など）や企業の研究者の助言や協力を受ける。

(3) 動弁要素の摩擦摩耗低減策を検討する。

カム・フォロワ摩擦摩耗試験機や動弁機構・摩擦測定試験機を用い、無灰系添加剤配合の Low-SAPS 油、超低硫黄油、Bio-No-Tox 油およびそれらのすす混入油が動弁系の摩擦や摩耗に及ぼす影響を調べる実験を行う。

(4) ナノ・パーティクル固体潤滑剤配合エンジン油の摩擦摩耗低減の効果を調べる。

環境対策・低粘度エンジン油に固体潤滑剤（PTFE, MoS₂, グラファイトなど）を配合したオイルについて、各動弁要素試験機で摩

擦摩耗の低減効果を調べ、かつディーゼル機関で全摩擦損失低減への寄与を調べる。

(5) 研究の成果をまとめ、得られる学術的な知見ならびに技術的な知見を公表する。

① 上述の評価結果を総合して、ディーゼル機関の性能と信頼性の向上に有効な要素部品ならびにエンジン油の設計条件を検討し、超低摩擦ディーゼル機関の実用設計へ進む

② 国内外の大学、研究所やメーカーを訪問し討議の上、本研究の成果の活用を勧める。また国内外の学会で、研究の成果を発表する。

4. 研究成果

上記の目的や方法に従い高性能・高信頼性エンジン・トライボロジー技術を研究した結果、以下のような成果が得られた。

(1) 設計製作した OHC 動弁機構装置でカム軸駆動トルクを測定し要素の転がり接触化による摩擦低減効果とりわけ軸受の種類や給油量の影響を調べる試験を準備できた。

また、図 1 に示す実働ディーゼル機関で測定した全摩擦損失のように、エンジン油の低粘度マルチグレード化の摩擦損失低減の効果は大きい。その効果は機関負荷率、回転速度、冷却水温度などの運転条件で異なり、低負荷・低回転速度の運転時により大きくなる。

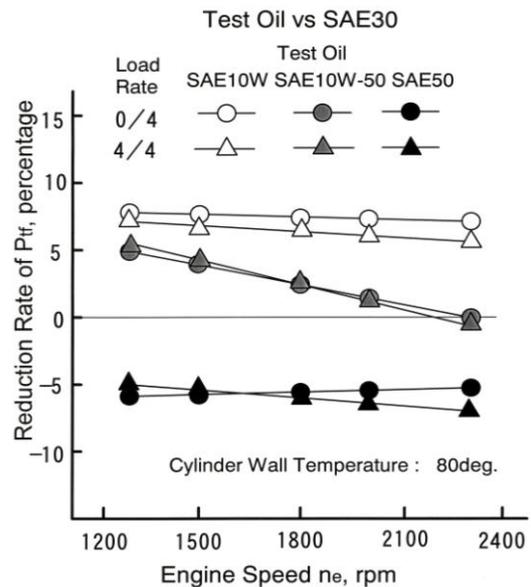


図 1 オイル低粘度化の摩擦損失低減効果

さらに図 2 のように、エンジン油の粘度等級を SAE10W-30 から SAE5W-30 へ低粘度化し、添加剤配合を CD 級から DH 級へ低灰分・

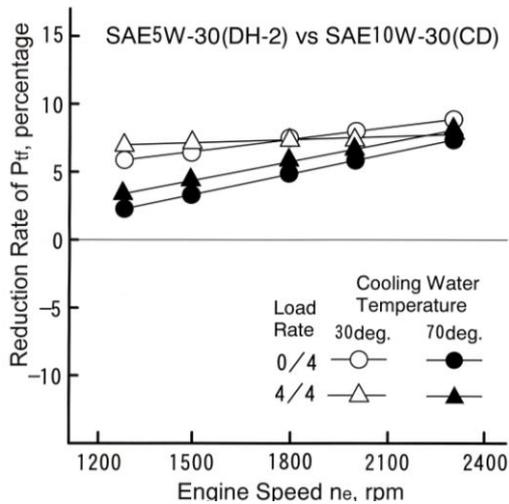


図2 Low-SAPS 対策オイルの場合

低りん・低硫黄化すなわち Low-SAPS 対策を施すことにより、低粘度マルチグレード油の全摩擦損失低減の効果は一段と大きくなる。

(2) 図3のような実物大の OHV カム/ローラ・タペット動弁機構摩擦試験機を用い、カム・ローラ表面をショットピーニング加工した複合カム軸を対象に、カム・ローラ間の接触荷重と摩擦力を測定し、ローラ部を図4のすべり軸受かニードル軸受で支持する場合、かつオイルを表1の Low-SAPS 対策油の DH-2 級、ZnDTP 代替添加剤の ZP 配合あるいは

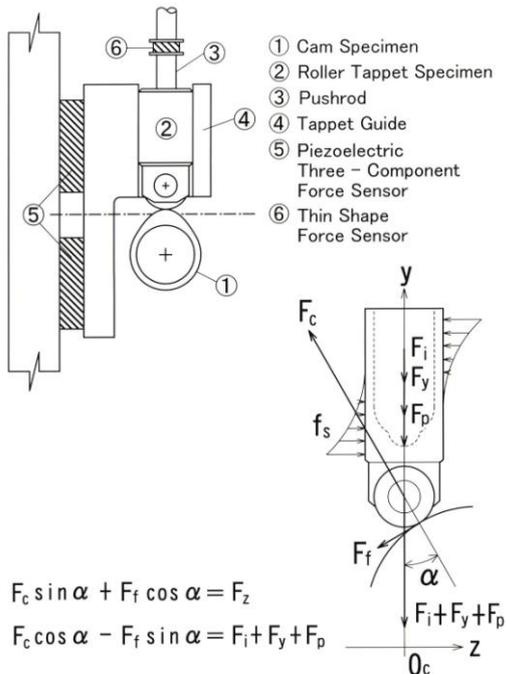


図3 OHV 動弁機構摩擦測定の方法

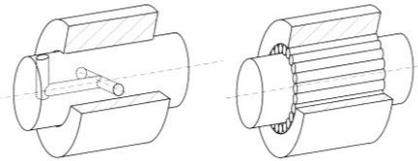


図4 ローラ支持軸受の構造

表1 各種 Low-SAPS 対策テスト油

Test Oil	SAE 10W-30 CD	SAE 5W-20 DH-2	SAE 5W-20 ZP	SAE 5W-20 ULSEO
Density at 15deg (g/cm ³)	-	0.85	-	0.84
Kinematic Viscosity (mm ² /s)	40deg	65.42	44.49	41.27
	100deg	9.955	8.128	7.837
Viscosity Index	-	158	161	177
HTHS Viscosity (mPas) 150deg	-	2.73	-	2.8
Total Acid Number (mgKOH/g)	3.55	2.60	1.6	1.68
Total Base Number (mgKOH/g)	HCl	11.6	5.70	2.88
	HClO ₄	12.5	7.50	-
Metal Content (ppm)	B	-	83	200
	Ca	4650	2200	2000
	Mg	-	-	-
	Zn	1620	1300	800
	P	1480	1000	500
	Mo	-	120	600
	S	-	4300	1600

ZnDTP 無配合の超低硫黄 ULSEO 仕様の SAE 5W-20 低粘度マルチグレード油にする場合について、それぞれが動弁機構各部の摩擦損失に及ぼす影響、すなわちカム・ローラ接触による摩擦損失、それ以外の動弁機構部の駆動に伴う摩擦損失は、図5の例のようになり、すべり軸受でローラを支持する場合はニードル軸受で支持する場合より摩擦損失は小さい。Low-SAPS 対策の DH-2 級、ZP 配合あるいは ULSEO のオイルを低粘度化する場合、それ以外の動弁機構要素部の摩擦による損失は少し大きくなる。DH-2 級よりも含

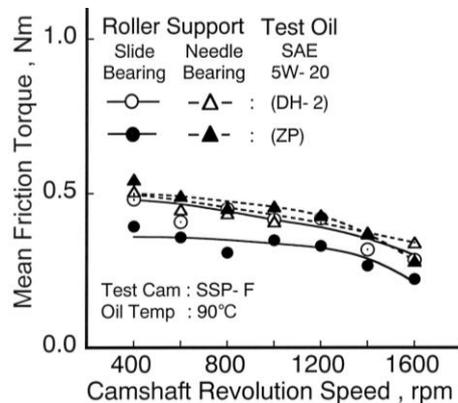


図5 カム・ローラ摩擦損失の測定例

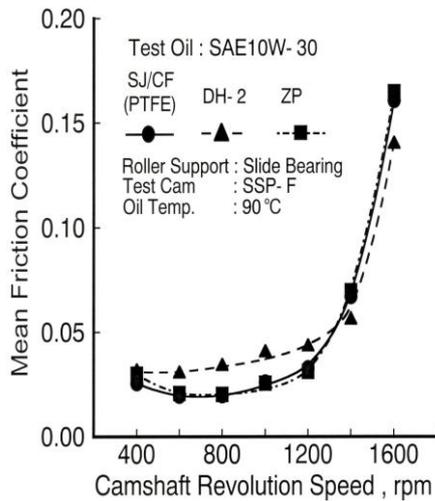


図6 PTFEの摩擦低減効力

有硫黄分の少ないZP配合やULSEOのエンジン油の方が摩擦損失低減の効力は大きい。さらに図6のように、固体潤滑剤PTFE投与エンジン油の場合、その添加量による変化はわずかであるが、ZP配合などと同じような摩擦損失低減効力がある。ただし、実働ディーゼル機関全摩擦損失に対する低減の効果は僅かである。

(3) カム/スリッパ・フォロワ試験機で調べたLow-SAPS対策SAE5W-30エンジン油の性状やそのすす混入汚損がカム・フォロワ摩擦摩耗に及ぼす影響として、表2のように、カーボンブラックを混合していない場合、摩擦係数や摩耗率は、Low-SAPS対策油により変化し、超低硫黄仕様のULSEO、ZP配合、DH-2級の順に小さくなり、DH-2級が最も低い摩擦で最も優れた耐摩耗性を示す。

またカーボンブラックを1%mass混合した場合、摩擦係数はカーボンブラックを混合しない場合より小さくなり、ULSEO油、ZP油、DH-2油の順により多く小さくなる。しかし、摩耗率は全てで大きくなり、ZP油、ULSEO油、DH-2油の順により多く大きくなり、ZP油の耐摩耗性は損なわれないが、DH-2油の耐摩耗性が著しく低くなる。ZP油にカーボンブラックを2~3%mass混合した場合、摩耗率は若干大きくなり、摩擦は一段と小さくなる。

表2 Low-SAPS油のすす混入と摩擦摩耗

Test Oil	SAE5W-30 (DH-2)	SAE5W-30 (ULSEO)	SAE5W-30 (ZP)				
Carbon Black (%mass)	0	1	0	1	0	1	
Mean Friction Coefficient	0.033	0.025	0.052	0.042	0.043	0.042	
Wear Rate μm / hr	Cam	0.030	0.195	0.244	0.116	0.059	0.135
	Follower	0.035	0.244	0.064	0.226	0.035	0.023

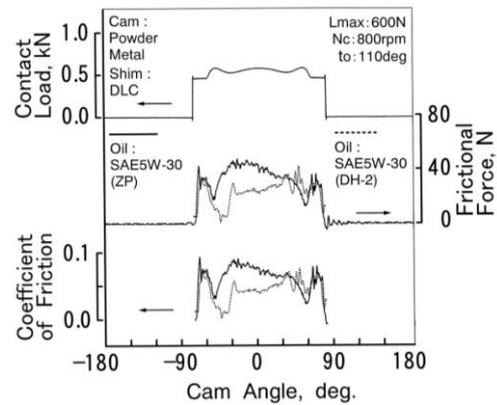
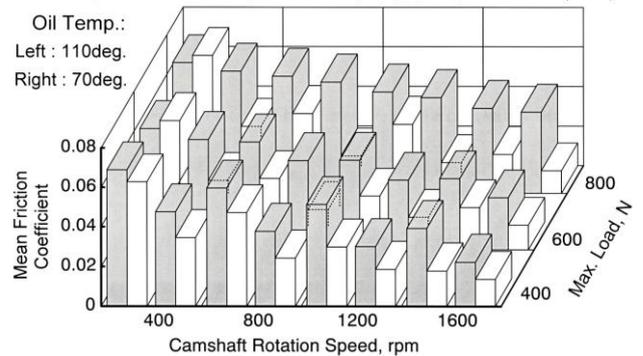


図7 摩擦波形の変化

[Shim Type, Oil] ■ Grind, SAE5W-30 (ZP), □ DLC, SAE5W-30 (DH-2)



Shim Type : [Test Oil] Left : SAE5W-30 (ZP), Right : SAE5W-30 (DH-2) DLC

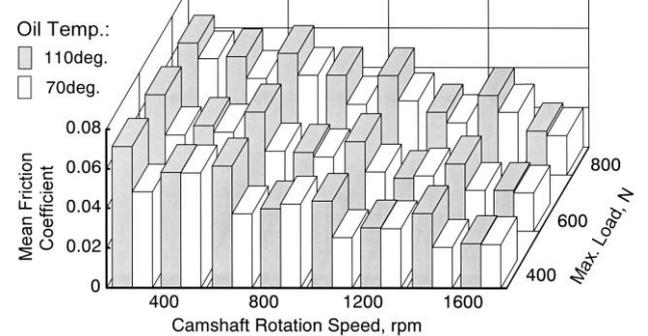


図8 表面処理や油性状と摩擦の関係

(4) エンジン要素部品の表面処理による摩擦摩耗低減の効果とりわけDLCなどのコーティング、被覆の形態、膜厚などの影響や適合オイルの選定条件を調べる試験を始めた。動弁系カム・フォロワ表面の仕上げと処理

の技術および低粘度 Low-SAPS エンジン油の適用が摩擦摩耗に及ぼす影響として、図 7 や図 8 のように、カム・フォロワ接触の平均摩擦係数は、接触荷重、カム軸回転速度およびオイル温度の影響を受けて変化し、その接触状態が混合潤滑の状態にある摩擦特性を示す。また平均摩擦係数は、フォロワ表面の仕上げや処理の条件の影響を受けて変化する。さらに平均摩擦係数は、Low-SAPS オイルの性状の影響を受けて変化する。したがって、これらの幾つかの設計因子の摩擦低減効果を詳しく調べ、その大小比較などから有効な摩擦低減策を検討しなければならない。

(5) 総括的に、超低摩擦ディーゼル機関トライボロジー技術として、転がり軸受や表面被覆と潤滑剤の活用は有効であり、関連技術の更なる向上の必要性が明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- ① 副島光洋，松下祐樹，坂口慎吾：カム・ローラフォロワ動弁機構の摩擦損失に及ぼすローラ支持軸受やエンジン油性状の影響，自動車技術会論文集，40 巻，3 号，Paper No.20085684，pp.1-6，2009 年，査読有
- ② 副島光洋，松下祐樹，坂口慎吾：Low-SAPS エンジン油の動弁系カム・フォロワ摩擦摩耗に及ぼす影響，九州産業大学工学会・工学部研究報告，第 45 号，pp.5-12，2008 年，査読無
- ③ 副島光洋，浜武俊朗，北原辰巳：Study on Reduction of Frictional Power Loss for Diesel Engine, Proceedings of the 2nd LUBMAT, Paper No.H23 025, pp.1-10, 2008 年，査読有
- ④ 浜武俊朗，副島光洋，北原辰巳：An Analytical Study on the Mixed Lubrication of Piston Ring Pack in a Reciprocating Engine, Proceedings of the 2nd LUBMAT, Paper No.G2 079, pp.1-10, 2008 年，査読有
- ⑤ 副島光洋，松下祐樹，坂口慎吾：ディーゼル機関全摩擦損失の低減に関する研究，九州産業大学工学会・工学部研究報告，第 44 号，pp.15-22，2007 年，査読無
- ⑥ 副島光洋，Edward H. Smith, Ian Sherrington, 和栗雄太郎：A Review of Solutions for the

Mechanism of Oil Consumption in Internal Combustion Engines, Proceedings of 2007 JSAE/SAE International Fuels and Lubricants Meeting, JSAE 20077160, SAE 2007-01-1973, pp.1610-1617, 2007 年，査読有

- ⑦ 副島光洋，和栗雄太郎，浜武俊朗：Studies on Tribology of Valve Trains and Engine Oils in Diesel Engines, Proceedings of 25th CIMAC, Paper No.220, pp.1-14, 2007 年，査読有

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① 坂口慎吾，松下祐樹，副島光洋，丹治 亨，小川永司，小野田元伸：エンジン油性状と表面処理によるカム・フォロワ摩擦低減，自動車技術会・秋季学術講演会，2009 年 10 月 7-9 日，仙台・国際会議場
- ② 副島光洋，坂口慎吾：動弁系カム・フォロワに関するトライボロジー技術の研究開発について，日本機械学会 2009 年度 年次大会，2009 年 9 月 14-16 日，岩手大学
- ③ 松下祐樹，坂口慎吾，副島光洋，丹治 亨，小川永司，小野田元伸：Reduction of Friction between Cam and Follower by Surface Finishing and Coating, The 4th World Tribology Congress, 2009 年 9 月 6-11 日，京都・国際会議場
- ④ 松下祐樹，坂口慎吾，副島光洋，Karl Winnard, Ian Sherrington, Edward H. Smith：Friction and Wear Characteristics of Low-SAPS Oils in Concentrated Sliding Contacts, The 4th World Tribology Congress, 2009 年 9 月 6-11 日，京都・国際会議場
- ⑤ 副島光洋，松下祐樹，坂口慎吾：カム・ローラフォロワ動弁機構の摩擦損失に関する研究（ローラ支持軸受やエンジン油性状の影響），日本機械学会 2008 年度 年次大会，2008 年 8 月 6 日，横浜国立大学
- ⑥ 副島光洋，松下祐樹：Low-SAPS エンジン油の動弁系カム・フォロワ摩擦摩耗に及ぼす影響，日本機械学会 2007 年度 年次大会，2007 年 9 月 12 日，関西大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

副島 光洋 (SOEJIMA MITSUHIRO)
九州産業大学・工学部・教授
研究者番号：40037990