

4 サイクルガソリンエンジンのコンロッド軸受 焼き付きに関する潤滑性の考察

Experimental Analysis of Connecting Rod bearing Seizures in 4-cycle Gasoline Engines.

丸 谷 武 志* 長 島 隆* 山 本 浩 貴*
Takeshi Maruya Takashi Nagashima Hiroki Yamamoto
奥 山 高 弘*
Takahiro Okuyama

要 旨

エンジンの高出力、高回転化に伴う問題点の一つとして、コネクティングロッド (以下コンロッドとする) 軸受をとりあげ、エンジン試験にて耐焼き付き性評価を実施した。その結果、メタル焼き付きに対する諸因子の中で影響が大きいのは、メタル周辺部で発生する熱量であり、これは、PV 値 (P: 面圧と V: 周速の積)、軸面粗度及びオイル粘性で整理できることが、エンジン試験にて確認できた。

そしてこの解析結果からエンジンメタル焼き付きメカニズムを次のように推定した。

まず、エンジンの高速化、爆発圧力の増加によって PV 値が高くなり、クランクピン周辺部の発熱量が増加する。次にメタル冷却が追いつかなくなることから、油膜形成が困難となり、焼き付きに至る。

このようなエンジンメタル焼き付きメカニズムをテストによって立証することができ、軸面粗度及びオイル粘性の限界点を推測することができるようになった。

ABSTRACT

Among problems with high-power and high-revolution engines, the connecting rod bearing was singled out and tested in the engine for its seizure resistance performance. The test results analysis showed that of the factors contributing to the metal seizure, the leading cause was the heat generated around the metal. As evidenced by the consequent engine testing, this could be broken down into the applied pressure and engine speed (PV value), rod surface roughness and oil viscosity.

That in turn led to theorizing the mechanism of engine metal seizure as follows:

The ever increasing speed and combustion pressure of the engine inevitably causes the PV value to rise, increasing the heat generated around the crank pin. That will make cooling the metal difficult, obstruct oil film formation, and thus result in seizure.

Thal theory was verified by subsequent testing, and it enabled estimation of limits on connecting rod surface roughness and oil viscosity.

1. ま え が き

最近の自動車用ガソリンエンジンは高圧縮比・希薄燃焼などによる熱効率の改善や、ローラーリフタ・低粘度油などによるフリクション低減等の省燃費化技術が進んでおり、同時にエンジン材料のアルミ化やボアピッチの見直しと言った軽量、コンパクト化の傾向が進んでいる。

このようなエンジン技術動向より、高回転・高出力化によるコンロッド軸受負荷容量の増加、コンパクト化によるコンロッド軸受幅の減少、また省燃費油 (5W-30、その他) 使用による軸受油膜形成能力の低下等、エンジンの耐久信頼性の面でコンロッド軸受焼き付きに対し厳しい状況となっている。

* 栃木研究所

従来より、軸受焼き付きについては経験的に次のようなことが一般に言われている。

1. 回転を上げると焼き付き易い
2. 軸面粗度が粗いと焼き付き易い
3. 油温が高い程、低粘度程焼き付き易い
4. メタルクリアランスが狭いと焼き付き易い

これらの現象は以下の様に考えることができる。

エンジンの高速・高負荷時において、軸受部の仕事量が増大し、発生熱量が増加するため、油温が上昇して油膜が薄くなる。そのため、潤滑形態は、流体潤滑域から境界潤滑域へ移行して、金属接触を引き起こし、ついには焼き付きに至ると考えられる。

本稿では、コンロッド軸受の耐久性及び焼き付きにいたるメカニズムを推定するために、実機エンジン試験を実施し、高速・高負荷時でのコンロッド軸受摩耗及び焼き付きに対し、影響度の大きいと思われるファクターとしてPV値・クランクピン面粗度・オイル粘性・メタルクリアランスをとりあげその影響を調べてみた。

その結果、コンロッド軸受焼き付きメカニズムをテストによって立証することができ、軸面粗度及びオイル粘性の限界点を推測することができることが解ったので報告する。

2. 実 験

2.1. 実験装置

(1) 供試エンジン及び運転条件

表1に本実験に用いたエンジン諸元を示す。

供試エンジンは1488ccから1958ccの3種類で、全て直列4気筒である。表2に運転条件を示す。

表1 エンジン主要諸元

エンジンNo.	A	B	C
エンジン型式	L-4	L-4	L-4
排気量 (cc)	1488	1590	1958
ボア×ストローク (mm)	74×87	75×90	81×95
弁機構	SOHC3V	DOHC4V	DOHC4V
クランクピン径 (mm)	42	45	48
クランクシャフト径 (mm)	50	55	55
マーク	△	○	□

供試軸受：ケルメット、オーバーレイ成分 (Pb-Cu-Sn)

表2 エンジン運転条件

エンジン回転数 rpm	5500~8500
負 荷	Full throttle
試験時間 H r	20
試験温度 °C	120~150
水 温 °C	85~95

エンジン回転数はメタル部にもっとも過酷と考えられる5500rpmから8500rpmの高速条件を設定し、負荷はスロットル全開で実施した。耐久試験時間は20時間とした。

また油温はメインギャラリ部で測定し、クランクピン面粗度は最大粗さ (R_{max})、メタルクリアランスは直径隙間で表現した。

2.2. 供試油

本実験に使用した供試油の性状を表3に示す。供試油は市販エンジンオイル2種類 (粘度グレードSAE5W-30、10W-30:API SF) 及び試作エンジンオイル1種類 (SAE5W-20:SF相当) の合計3種類のオイルを使用した。

3. 実験結果と考察

3.1. 実験結果

(1) オイル粘性の考え方

エンジン各摺動部ではせん断力が働いており、

表3 供試油代表性状

項 目	供試油	5W-20	5W-30	10W-30
	API SF	API SF	API SF	API SF
粘 度 @ 40°C	40.0	52.0	66.5	
mm ² /S @ 100°C	7.6	9.6	10.7	
@ 150°C	3.4	4.3	4.5	
粘度指数	163	174	151	
CCS 粘度 @ -20°C	—	—	32	
Pa · s @ -25°C	30	33	—	
HT/HS 粘度 @ 150°C	2.3	2.6	3.1	
mPa · s				
TAV mgKOH/g	1.4	1.4	1.9	
TBN mgKOH/g	6.4	6.5	6.0	

特に高速で回転する軸受部は 10^6sec^{-1} オーダーのせん断率である (図1)¹⁾。

例えば、100℃の動粘度が $12 \text{mm}^2/\text{s}(\text{cst})$ の 10W-30 マルチグレード油は、エンジン各摺動部で、マルチグレード油に含まれている粘度指数向上剤が切断され、 $6.7 \text{mm}^2/\text{s}(\text{cst})$ まで粘度が低下する。このように、実際に摺動部で潤滑しているオイルの粘度は、せん断率を考慮した高温高せん断粘度 (HTHSRV: High Temperature High Shear Rate Viscosity) を用いると実用に近いオイル粘度を表すことができると言える。

今回のエンジン実験では 10^6sec^{-1} オーダーのせん断率がコンロッド軸受に加わってくると考えられ、使用したオイルはHTHSRVで整理することにした。

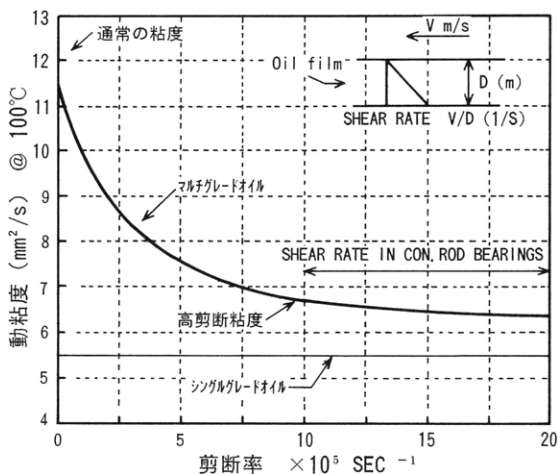


図1 オイル粘性の考え方

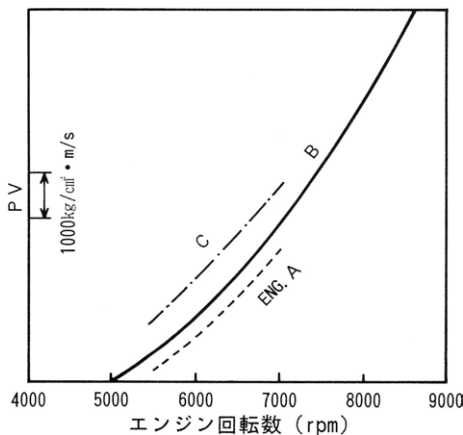


図2 エンジン回転数とPV値の関係

(2) エンジン回転とPV値

図2に今回使用した3種類のエンジンの回転数とPV値(計算値)の関係を示す。エンジン回転数が増える程、クランクピンの周速は速くなり、慣性荷重の増加と相まってコンロッド軸受部のPV値が高くなるのがわかる。

このように、回転上昇に伴いPV値は増加し、高回転になる程、コンロッド軸受は厳しい環境にさらされる。

(3) PV値とコンロッド軸受摩耗量

エンジンBを用いて耐久試験を実施し、PV値とコンロッド軸受摩耗量で整理した結果を、図3に示す。回転数が増加することによって、すべり速度及び面圧が増加しPV値が増えていく。このことによって軸受摩耗量が増え、PV値が $6500 \text{kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{m/s}$ 付近を超えた段階で焼き付きが発生し

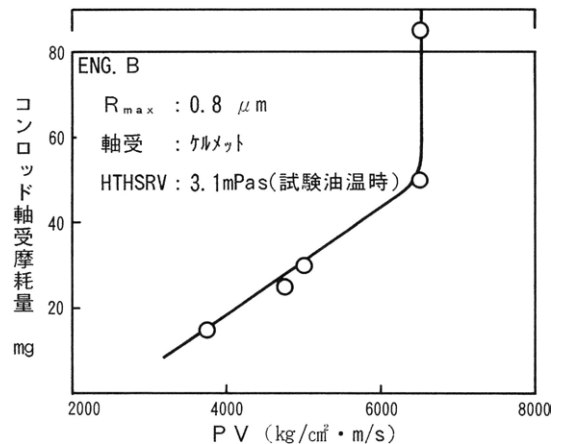


図3 PV値とコンロッド軸受摩耗量

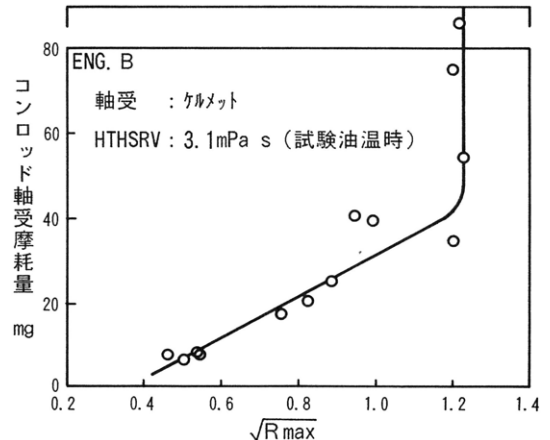


図4 クランクピン面粗度と軸受摩耗量

ている。

この結果より、高荷重・高回転状態では、金属接触が生じ、コンロッド軸受摩耗量の増加、さらには焼き付きに至ることが実機にて確認できた。

(4) クランクピン面粗度とコンロッド軸受摩耗量

図4にはエンジンBを用い、クランクピン面粗度を変化させた場合の実験結果を示した。

横軸を $\sqrt{R_{\max}}$ で整理すると、コンロッド軸受摩耗量との間に良い相関が得られた。面粗度が小さくなると軸受とクランクピン間で良い潤滑状態が保たれ、軸受摩耗量が少なくなることがわかる。逆に面粗度が大きくなれば、軸受摩耗量が増大しある点で急激に立ち上がり、摩耗量無限大、即ち焼き付き限界値が見られるのがわかる。この限界値は $\sqrt{R_{\max}} = 1.2 \mu\text{m}$ であった。このように軸受の焼き付きに関しては軸表面の仕上げ精度が大きく影響することがわかる。

(5) クランクピン面粗度とPV値

3種類のエンジンを用いてクランクピンの面粗度を変化させ、PV値との関連を耐久試験を行い確認した。この結果を図5に示す。

面粗度 $\sqrt{R_{\max}}$ とPV値の間には図5のような関係があり、軸受焼き付きゾーンを表すことが出来る。この図より面粗度が大きくなると焼き付

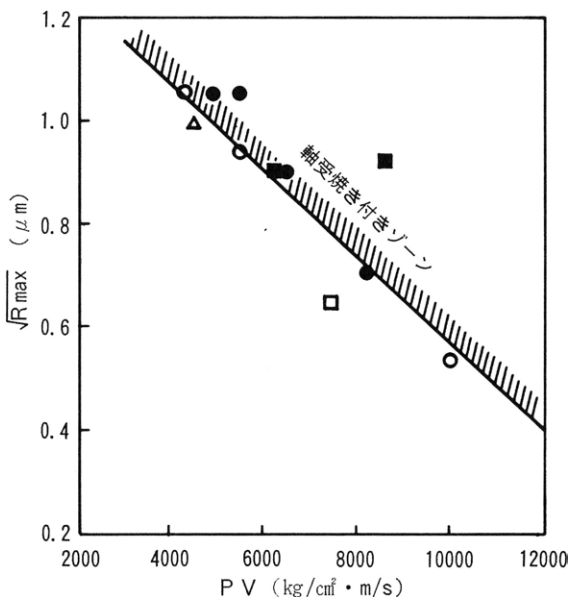


図5 PV値とクランクピン面粗度

き限界のPV値は下がり、高回転域のエンジン信頼性が制限される等の目安を得ることが可能である。

(6) オイル粘性とコンロッド軸受摩耗量

図6には3種類のエンジンによってテストした。オイル粘性とコンロッド軸受摩耗量の関係を示した。供試エンジンによって軸受摩耗量に若干の差が出ているが、これはPV値の差によるものである。いずれのエンジンも粘度が低くなる(高油温)と軸受摩耗量はHTHSRVの $1/\sqrt{\mu}$ に比例することがわかる。

軸受の基本特性を見るには、軸受幅方向に無限に長い場合を考え、二次元の扱いをすると判りやすい。コンロッド軸受の最小油膜厚さをレイノルズ方程式より導くと、最小油膜厚さ h は次式で表され²⁾、最小油膜厚さは $\sqrt{\mu}$ に比例することがわかる。

$$h = B \sqrt{\frac{\mu UL}{W}} C_w$$

h : 最小油膜厚さ (m)
 B : 軸受幅 (m)
 μ : 油の粘度 ($\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$)
 U : すべり速度 (m/s)
 L : 軸受長さ (m)
 W : 軸受荷重 (kg)
 C_w : 軸受定数 (無次元数)

コンロッド軸受の場合、この最小油膜厚さが小さくなると金属間接触が多くなり摩耗増加となる。

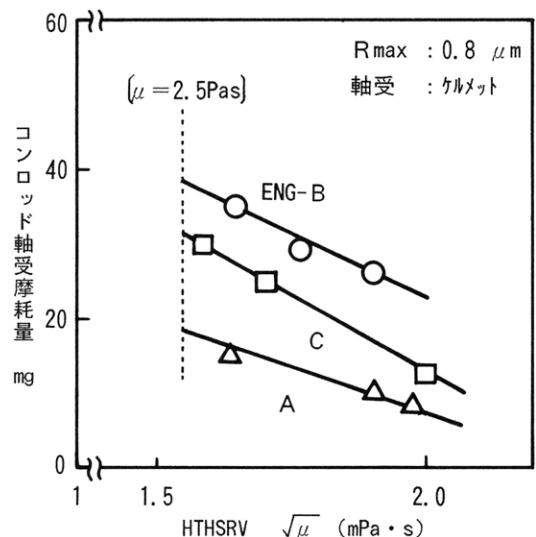


図6 オイル粘性とコンロッド軸受摩耗量

すなわち、境界潤滑においては、軸受摩耗量は最小油膜厚さに関係し、オイル粘性 $1/\sqrt{\mu}$ に比例する。

また、この図から考えると現状の市販エンジンでは、HTHSTV が $2.5\text{MPa}\cdot\text{s}$ (cP) 以上あると軸受摩耗量は許容値レベルであり、軸受焼き付き性に対しては問題ないと思われる。

(7) メタルクリアランスとコンロッド軸受摩耗量

図7にはエンジンBを用いてメタルクリアランスを変えた場合の試験結果を示す。

この図より、メタルクリアランスが小さい程、軸受摩耗量が増え、焼き付き易い傾向になることが判った。これはクリアランス減少によってオイル通路が狭くなり油量が低下したことによる冷却不足が原因である。

ただし、メタルクリアランスが大きすぎると軸振れの問題が発生するので、最適クリアランスを設定する必要がある。

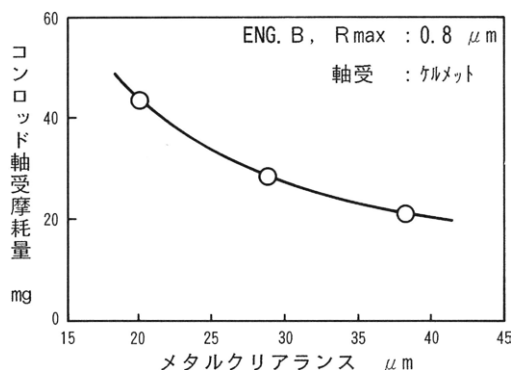


図7 メタルクリアランスとコンロッド軸受摩耗量の関係

4. コンロッド軸受焼き付きに関する要因解析

これまでの種類の実験結果を基に、コンロッド軸受の焼き付きに関する考察を行った。従来の経験的な例と、個々の実験結果から、コンロッド軸受焼き付きに対して考えられる要因をまとめた結果を図8に示す。

また図に示す各因子より軸受焼き付きメカニズムは以下のように考えられる。

軸受での摩擦力によって発生する仕事量として、実用上PV値が用いられている。このPV値は温度上昇値の概算値に比例する。発生する摩擦熱Qはfを摩擦係数として次式で表される。

$$Q = f \cdot PV \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{m/s}$$

従って、すべり面単位面積当たりのQは次式になる。

$$Q/A = f \cdot PV \text{ kg/cm} \cdot \text{s} \quad A: \text{軸面積}$$

これをすべり面から外気への熱伝達率 $\alpha \text{ kg/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ で割れば、温度上昇 $\Delta\theta$ が求められる。

$$\Delta\theta = f \cdot PV / \alpha ^\circ\text{C}$$

ここで、f、 α は条件によって変化する程度が少ないため f/α を一定とみなすことができる。従って $\Delta\theta$ はPVに比例することになり、温度上昇はPV値によって表わされることがわかる。また、クランクピン面粗度が粗く、油の粘度が低い場合は金属接触の機会が増し、摩擦係数fは大きくなり温度は上昇する。また、メタルクリアランスの減少によってもオイル供給量の低下から放熱量が低下し、軸受部温度は上昇する。

コンロッド軸受摩耗量は上記各因子により発生する金属接触の割合で決まる。

焼き付きは、軸受周辺部温度が軸受材料の融点

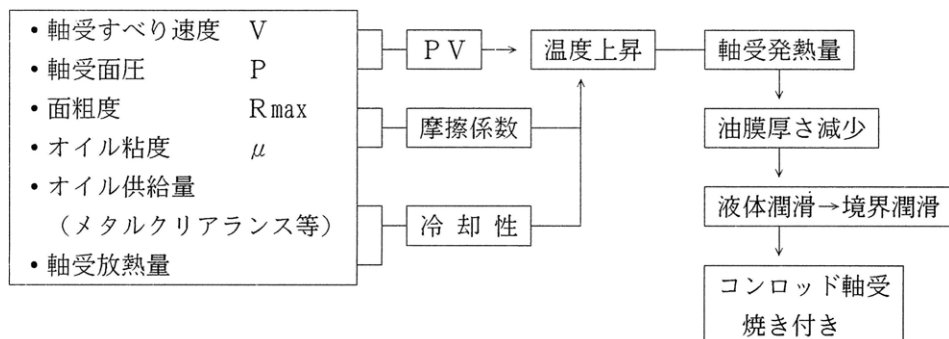


図8 コンロッド軸受焼き付きに関する要因解析

温度を超えた時に、金属表層軟化から発生する。

この考え方を基に、これまでの実験結果を整理したのが図9である。すなわち、コンロッド軸受摩耗量は

$$PV \sqrt{R_{\max}} / \sqrt{\mu}$$

に比例して増大し、ある点で過大摩耗(焼き付き)

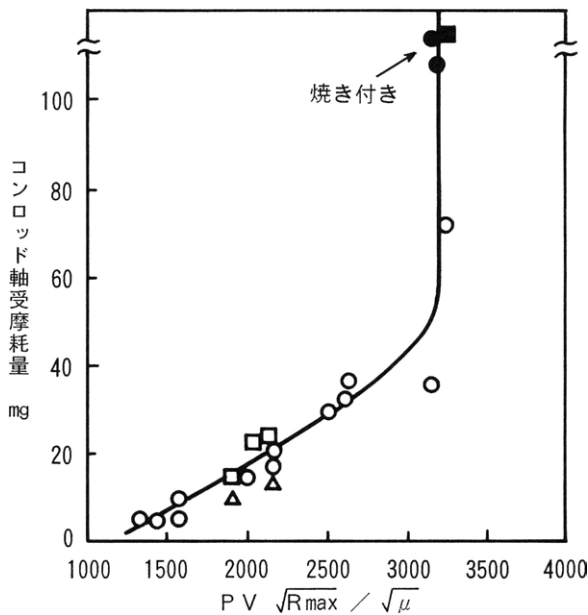


図9 コンロッド軸受磨耗量と
 $PV \sqrt{R_{\max}} / \sqrt{\mu}$ の関係

の限界値が存在する。また、この限界値は軸受の放熱性及び軸受への給油量(冷却性)で異なるものと考えられる。

5. 結 論

- (1) コンロッド軸受け焼き付きに対する諸因子の中で影響が大きいのは、PV値・クランクピン面粗度及びオイル粘性であることをエンジン試験にて確認した。
- (2) クランクピン面粗度が小さい程、軸受耐焼き付きに対しては良好であった。
- (3) 市販エンジンを考えるとHTHSRVが2.5MPa・s以上であれば、軸受け焼き付き性に対し問題無いことが判った。
- (4) コンロッド周辺部の摩擦熱は

$$Q = f \cdot PV$$

で表すことができ、軸受け摩耗量は

$$PV \sqrt{R_{\max}} / \sqrt{\mu}$$

に比例することが判った。

6. 参考文献

- (1) SCIENTIFIC PUBLICATIONS (G. B) LTD MOTOR OILS AND ENGINE LUBRICATION
- (2) 青木弘:有限幅軸受理論、潤滑、第3巻6号、1958

■ 著 者 ■



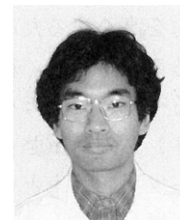
丸 谷 武 志



長 島 隆



山 本 浩 貴



奥 山 高 弘