

---

## 第4章

---

# 自動変速機用転がり軸受の転動疲労強度に及ぼす 潤滑油添加剤の影響と効果

---

### 4.1 緒言

現在，自動車用のギヤ油や自動変速機油（以下 ATF）は省燃費を目的に低粘度化が図られている．一般には低粘度化することにより，歯車や軸受に対するピッチング寿命は低下する傾向にあるため，配合する添加剤や基油を最適化することでピッチング寿命の低下を防止している<sup>1)</sup>．しかしながら，省資源の観点より，変速機の小型化や長寿命化が求められ，さらなるピッチング寿命の向上も期待されている<sup>2)</sup>．特に自動車用自動変速機の場合，高負荷条件下での，歯車に対するピッチング寿命の低下のみならず，多段化が進んだことで，遊星歯車のピニオンギヤやサンギヤの回転速度は高速となり，そこに使用する歯車や軸受の疲労寿命の低下が懸念されている．自動変速機の場合，内部には20個を超える軸受が使用され，その8割はニードルベアリングである<sup>3)</sup>．ニードルベアリングはその機構から，ラジアルニードルベアリングとスラストニードルベアリングに分けられる．ラジアルニードルベアリングの転走面はほぼ転がりと考えられる．一方スラストニードルベアリングの場合はニードルの軸方向に作動すべり分布が生じ，転がりに加えすべりを考える必要がある．同じニードルベアリングでもラジアルとスラストではその転がり・すべり特性が異なるため，ピッチング寿命に対する添加剤の影響も異なると考えられる．そこで，本章ではまずラジアルニードルベアリングのピッチング寿命に関し検討した．ラジアルニードルベアリングのピッチング寿命に関してはエッジ面圧と損傷発生限界の関係を解析したものが報告されている<sup>4,5)</sup>．またピッチング寿命に対する添加剤の影響は，四円筒試験を用いリン系添加剤や硫黄系添加剤に関して吸着力や被膜の組成や硬さからピッチング寿命に与える影響が考察され，ピッチング寿命に及ぼすメカニズムが報告されている<sup>6,7)</sup>．しかしながら，実用のニードルベアリングのピッチング寿命に与える添加剤の影響を検討した例は見

出せなかった．そこで，まず市販のラジアルニードルベアリングを用い，鉱油にリン系耐摩耗剤，硫黄系極圧剤，カルシウム系清浄剤をそれぞれ単体および組み合わせて配合し，ピッチング寿命を評価した<sup>8)</sup>．次にスラストニードルベアリングを用い，同様な潤滑油添加剤のピッチング寿命に及ぼす影響を評価した<sup>9)</sup>．さらに，ピッチング寿命試験でニードルベアリングの転走面に生成した境界潤滑膜の成分，厚さ，硬さ，相手面の粗さをナノメートルオーダで分析し，ピッチング寿命との関係を考察した．加えてラジアルニードルベアリングとスラストニードルベアリングに対する潤滑油添加剤の影響の差を考察した．

## 4.2 ラジアルニードルベアリングのピッチング寿命に及ぼす潤滑油添加剤の影響

### 4.2.1 実験方法

#### (1) ラジアルニードルベアリングピッチング寿命試験

各種の軸受疲労寿命試験を参考に<sup>10)</sup>，ラジアルニードルベアリングを用いたピッチング寿命試験機を製作し用いた．ラジアルニードルベアリング疲労試験機の試験部分を模式的に示した図と試験軸受片の写真を Fig.4-1 に示した．駆動軸上に試験軸受としてラジアルニードルベアリングを取り付け，軸受の外輪を保持する治具に所定の負荷をかけ，油温管理された油浴中でモータにより回転させる．軸受転走面に発生するピッチングにより，試験油のピッチング寿命を評価する．試験条件は Table 4-1 に示した．ピッチング寿命は振動が急に増加するまでの時間とし，試験後に軸受を切断し，ピッチングが外輪上部転走面に発生していることを確認した．負荷運転はゼロ荷重から所定の 4000N まで 60 s かけて上昇させ，以降損傷発生まで連続して運転した．

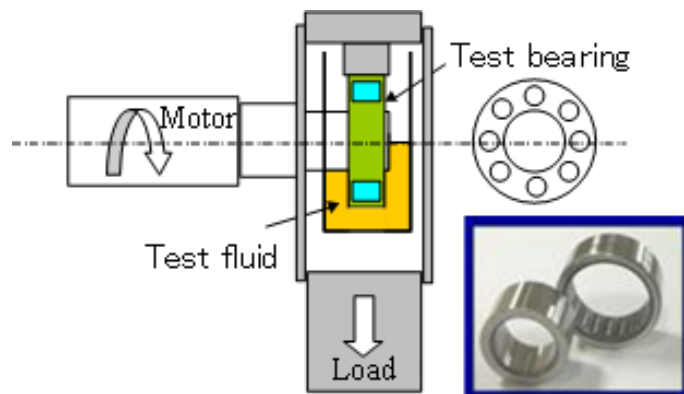


Fig.4-1 Main part of radial needle bearing fatigue life tester

Fig.4-1 ラジアルニードルベアリング疲労試験機主要部分

Table 4-1 Fatigue life test condition

Table 4-1 疲労寿命試験条件

Tester	Radial needle bearing fatigue life tester	
Bearing	Inner race	Drive: 17mm dia., 10.2mm width
	Outer race	Driven: 20mm dia., 10mm width
	Needle	No. of needle 20
	Needle size	1.6mm dia., 6.8mm width
	Material	Bearing steel (SUJ2)
	Cage	Pressed steel
	Radial clearance	0.02mm
Lubrication	500ml	120 °C
Test condition	Drive roller	2000rpm
Running in	0~4000N	60s
Test	4000N	

## (2) 試験油

試験油の組成を Table 4-2 に示した．基油には水素化分解精製を行ったパラフィン系鉱油を用い，添加剤を 1 種類配合した単品配合油と添加剤を 2 種類組み合わせて配合した組合配合油 3 種の計 6 種類とした．使用した基油の性状および配合したトリクレジルホスフェート（TCP），二硫化ジベンジル（DBDS），過塩基性カルシウムスルホネート（OBCS）の構造および性状を Fig.4-2 に示した．TCP を 0.3mass% 配合すると試験油の P 量は 0.025mass%，DBDS を 0.2mass% 配合すると試験油の S 量は 0.05mass%，OBCS を 1.0mass% 配合すると Ca 量は 0.15mass% となる．これら，試験油に対する添加剤の配合量は実際の ATF および CVT 油に配合されている添加剤量を参考にした．また，本研究で使用した試験油の動粘度は添加剤量が少ないためほとんど同一である．よって本研究においてはピッチング寿命に及ぼす微小な粘度の差の影響は無視できると考え検討から除外した．なお Ca+P+S 油はスラストニードルベアリングのピッチング寿命評価のみ実施した．

Table 4-2 Chemical components of test oil

Table 4-2 試験油の化学組成

Sample oil code	mass%						
	P	S	Ca	P+S	Ca+S	Ca+P	Ca+P+S
Mineral oil 150N	99.7	99.8	99.0	99.5	98.8	98.7	98.5
Tricresyl phosphate	0.3			0.3		0.3	0.3
Dibenzyl disulfide		0.2		0.2	0.2		0.2
Overbased calcium sulfonate			1.0		1.0	1.0	1.0

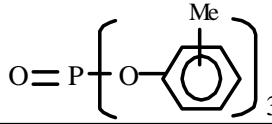
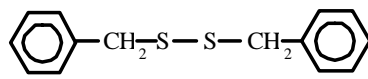
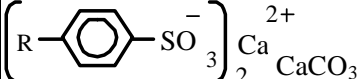
<b>Base oil</b> Hydro cracked mineral oil Viscosity at 100 °C, 5.3mm <sup>2</sup> /s S: 3ppm, N: <5ppm,	<b>Tri-cresyl phosphate</b> 
<b>Dibenzyl disulfide</b> 	<b>Overbased calcium sulfonate</b> 

Fig.4-2 The properties of base oil and chemical structures of additives

Fig.4-2 .基油の性状と添加剤の化学構造

### (3) 転走面の分析

ピッチング発生条件の転走面接触圧力の計算と、ピッチング寿命試験後の外輪転走面に発生したピッチングの状態を観察した。観察は光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡 (SEM) と X 線マイクロアナライザ (EPMA) , および X 線光電子分光 (XPS) を用いて表面および表面近傍の状態を分析した。各試験油でのピッチング寿命試験後の軸受は切断して表面分析用試験片とした。切り出された試験片はヘキサンによる洗浄を行い付着した油分、ごみなどを洗い流し、素早く乾燥させたものを用いた。EPMA 組成分析および元素分布強度の分析は 15keV, 5×10<sup>-8</sup>A で測定し、XPS 分析は 10kV, 10mA, MgK α 線で測定した。

## 4.2.2 ピッチング寿命試験結果

### (1) 軸受ピッチング寿命

各添加剤のラジアルニードルベアリング疲労試験機によるピッチング寿命の結果を示す。単品配合油のピッチング寿命を Fig.4-3 に、組合せ配合油のピッチング寿命を Fig.4-4 に示した。試験は各試験油について 5 回実施しピッチングが発生するまでの時間をワイブル確率紙に整理して示した。ワイブル確率紙上で、累積損傷率が 50%となるピッチング寿命 ( $L_{50}$ ) を比較したものを Fig.4-5 に示した。

ラジアルニードルベアリングのこの条件では添加剤の配合により、基油に比較しピッチング寿命が低下することが分かった。最も低下するのは S 油で基油の約 60%となった。また添加剤配合油で最も長い寿命を示したものは P+S 油で基油とほぼ同等であった。この事は、ギヤ油等において添加剤を配合することで基油に比較しピッチング寿命が短くなる傾向にあるとの報告に合致する<sup>11,12)</sup>。

添加剤配合油同士で比較すると、配合添加剤ごとにピッチング寿命に傾向が見られた。組合せ配合油である Ca+P 油, Ca+S 油の寿命に注目すると、それぞれの単品配合油の寿命の中間を示していることが分かった。ただし P+S 油についてはこの傾向がなく、P および S 単品配合油の寿命を上回る相乗効果が有り、添加剤配合油の中で最も長寿命を示した。

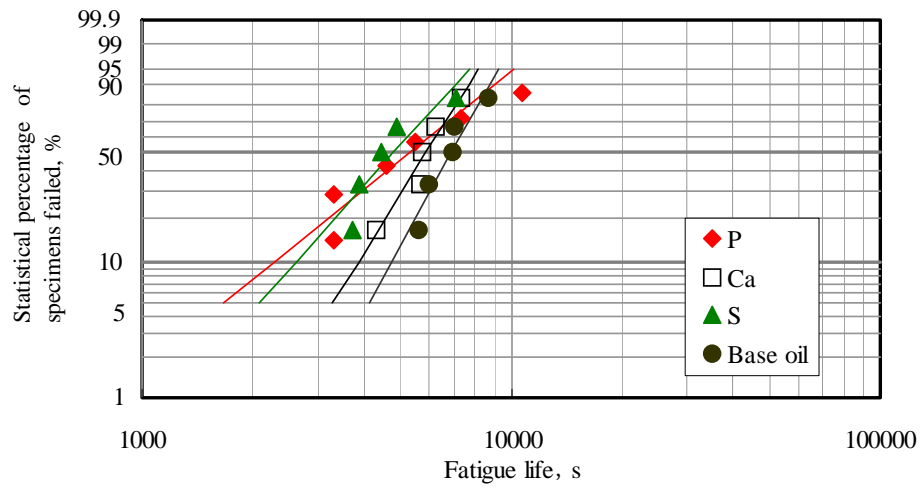


Fig.4-3 Pitting test results of single additive oil

Fig.4-3 単品添加剤配合油のピッチング試験結果

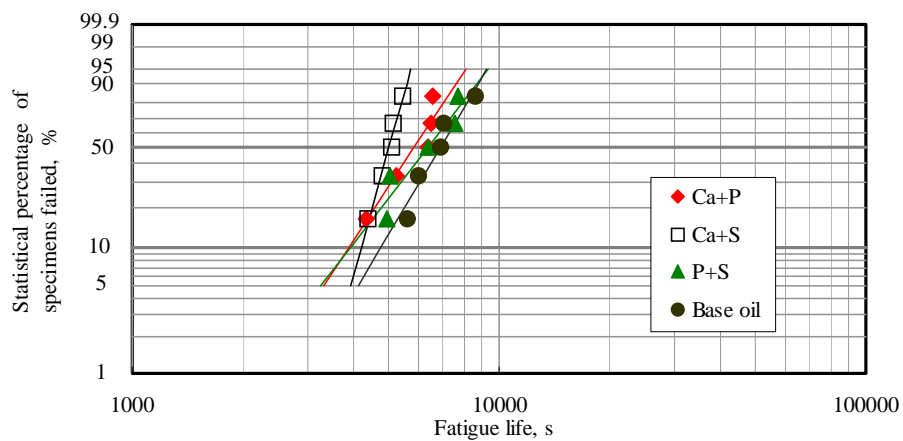


Fig.4-4 Pitting test results of combined additives oil

Fig.4-4 複合添加剤配合油のピッチング試験結果

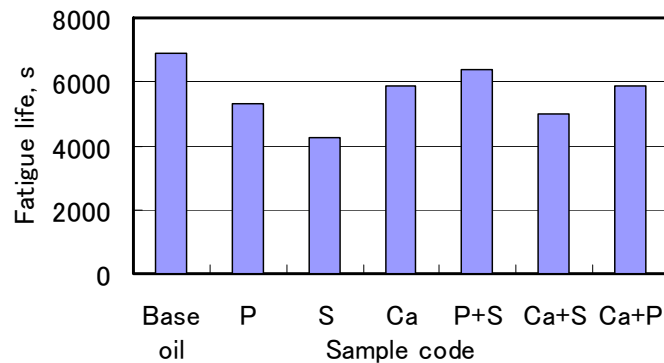


Fig.4-5 Results of pitting test with  $L_{50}$  Life

Fig.4-5  $L_{50}$  ピッチング寿命試験結果

## (2) 試験後の軸受の転走面の観察

ピッチング寿命試験終了後の軸受を切断し内部を観察した。試験機の評価部分が片持ちであるため、外輪転走面には一方に片寄った片当たり疲労によるはく離が認められた。その位置は試験時最大荷重が負荷されている部分で、はく離状態を Fig.4-6 に示した。

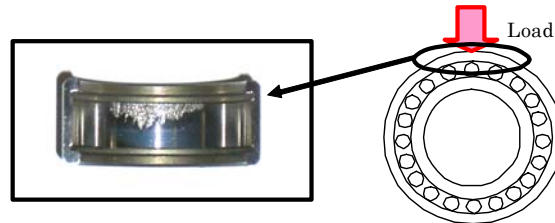


Fig.4-6 Optical photographs on outer race tested with oil P

Fig.4-6 P 油試験後の外輪写真

## 4.2.3 転走面の分析

### (1) ピッチング発生条件の接触圧力の計算

実測形状をもとに接触圧力の計算を行い、ころと外輪転走面の接触圧力計算結果を Fig.4-7 に示した。計算条件は、片当たりを考慮しない条件で実施した。軌道逃げなしの場合は端面に端部接触圧力が発生しないが、実際に荷重をかけた場合はたわみが発生し軌道逃げが発生する。このため、軌道逃げを考慮した場合はころ中央部に比較し約 2 割高い端部接触圧力が発生していることが分かった。実際の損傷も片当たりと外輪転走面端部の端部接触圧力が重なっている部分でピッチング損傷が発生している。ピッチング損傷は端部接触圧力と片当たりによるものと判断された。また、実測値より計算した動定格荷重  $C$  は 5.65kN, 評価荷重  $P$  は 4.0kN,  $P/C$  は 0.71 であり、非常に厳しい評価条件であることが確認された。このような厳しい条件においても、配合される添加剤により、ピッチング寿命が

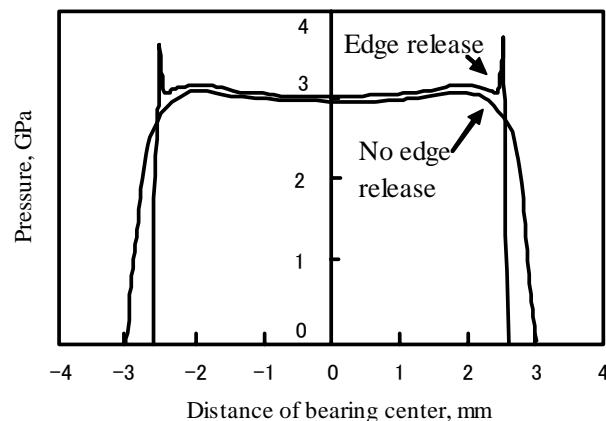


Fig.4-7 Result of calculating contact pressure

Fig.4-7 接触圧力の計算結果

異なることから、摩擦面に生成される境界潤滑膜の特性がピッチング寿命に影響を与えていると考え、膜厚、硬さ、摩擦特性などを因子として境界潤滑膜の特性について解析実験を行い、ピッチング寿命との関係を検討した。

## (2) 境界潤滑膜厚とピッチング寿命の関係

境界潤滑膜厚とピッチング寿命の関係について検討した。各添加剤でピッチングの発生しない、2000 s で試験を停止し、ピッチング発生前の軸受の外輪転走面を XPS で分析した。分析箇所は試験中に最大荷重が負荷され、その後損傷の発生する外輪上部の端部とした。またピッチングが発生した後の試験片の外輪転走面上端部の損傷発生近傍の XPS 分析を行い、境界潤滑膜の厚さおよびその化学成分の分析を行った。分析結果をまとめて Fig.4-8 に示した。それぞれ、形成される境界潤滑膜の成分は配合される添加剤に起因するものとなり、各元素の結合エネルギーの同定から、試験油 Ca では酸化カルシウム (CaO) の被膜が、試験油 P ではリン酸鉄 ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ ) の被膜が、試験油 S では硫化鉄 (FeS)、硫酸鉄 ( $\text{FeSO}_4$ ) の被膜が、試験油 P+S ではリン酸鉄、硫化鉄、硫酸鉄が観察された。

膜厚は試験油 Ca、P では 100nm 以上の厚い膜であったが試験油 S は 20nm と薄い膜であった。試験油 P+S の膜厚は 50nm であり、膜厚、組成とも P、S 単体配合油の中間的性質をもっていた。ピッチング発生時点での膜厚は発生前に比較し増加した。組成については全ての試料で変化が見られなかった。膜厚とピッチング寿命 ( $L_{50}$ ) との関係を図 4-9 に示した。ピッチングが発生する前の 2000 s 時点およびピッチング発生時の膜の厚みがピッチング寿命の長短に直接関係していることは無かった。ピッチング寿命の長短には境界潤滑膜の化学特性や物性が関係していると考えられた。

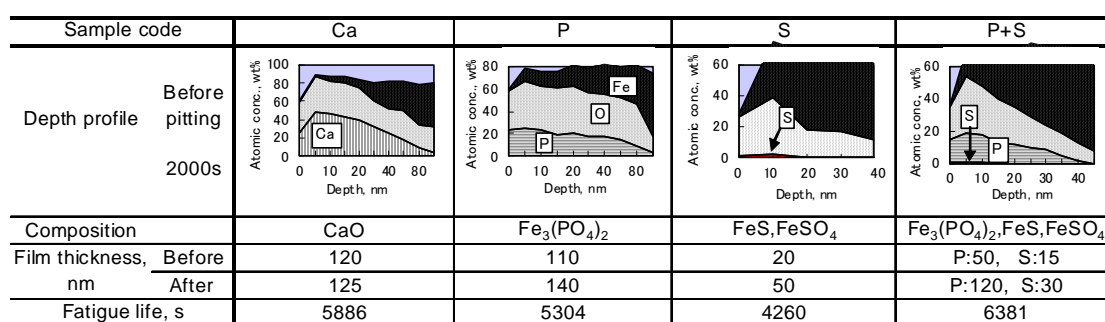


Fig.4-8 Structure of tribofilm on outer race

Fig.4-8 外輪の境界潤滑膜の構造

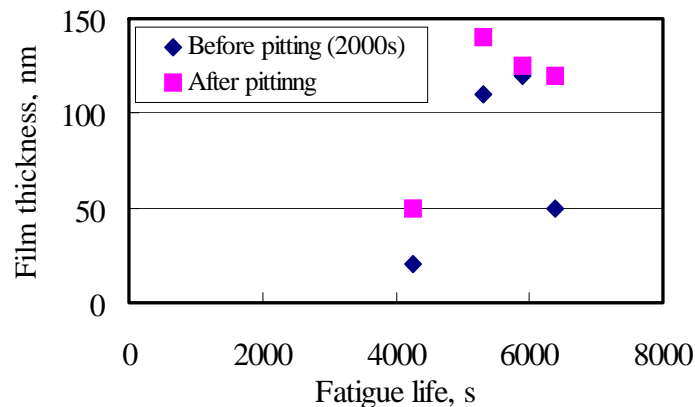


Fig.4-9 Relation between fatigue life and film thickness

Fig.4-9 疲労寿命と膜厚の関係

### (3) 境界潤滑膜の元素分布および表面形状

ピッチング発生前（2000 s）の外輪転走面の SEM 写真と EPMA で分析した元素分布の結果を Fig.4-10 に示した。試験前の外輪転走面には軸受加工時についたと思われる切削痕が確認できた。SEM 写真から試験開始より 2000 s 後には、切削痕は殆ど見られなくなっており、基油で最も平滑化が進行していることが分かった。これは、ニードルとの転がりの摩擦によって切削痕の凸部がならされたためと考える。また元素の分布に注目すると Ca, P は表面の溝周辺に沿って被膜が生成していることが分かった。溝部分には被膜の生成が見られないことから、接触圧力の高い初期表面の凸部が摩耗でならされていく過程でトライボ化学反応により被膜が生成したと考えられる。

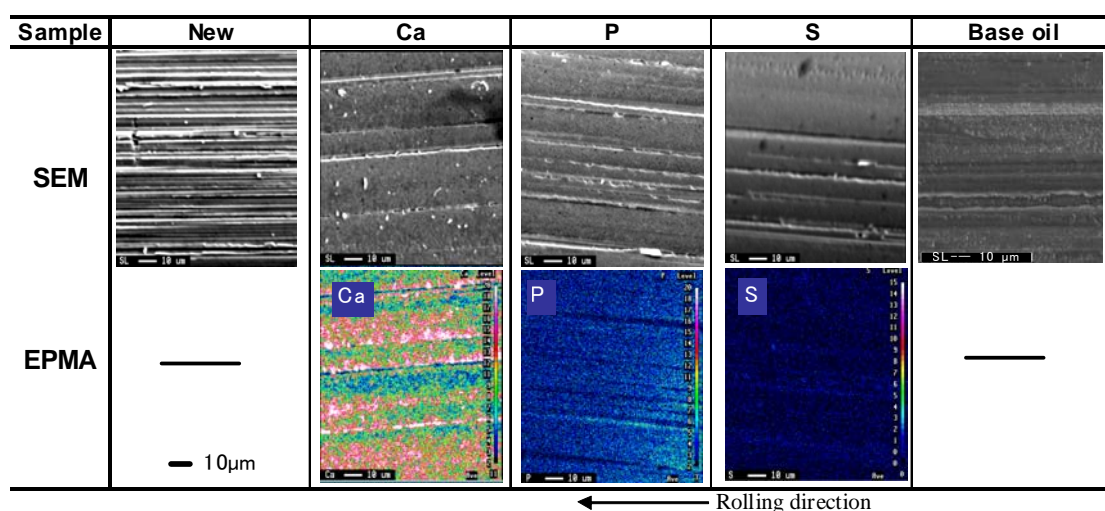


Fig.4-10 EPMA analysis result of bearing (2000s) before fatigue damage

Fig.4-10 ピッチング損傷前（2000 s）のベアリングの EPMA 分析結果



境界潤滑膜の状態をさらに細かく観察するため、高倍率で撮影した SEM 写真と表面形状を Fig.4-11 に示した。ここではピッチング損傷前（2000 s）の S 油および P+S 油の画像を示す。ラジアルニードルベアリング疲労試験では S 油が最もピッチング寿命が短く、P+S 油が最も寿命が長い試料である。S 油と P+S 油を比較すると、寿命の短い S 油での表面に転がり方向と垂直な凹凸（しわ）が見られ、寿命の長い P+S 油では滑らかな表面であることが分かる。これは同じ摩擦時間でも添加剤により摩擦面の表面形状に対する影響が異なり、摩擦面に形成される形状の違いがピッチング寿命の長短に関係していると考えられた。特に境界潤滑膜を通じて表面に発生するしわが早期のピッチングにつながる可能性が示唆された。

そこで試験油 S 油で生じたピッチングを観察し疲労試験中に見られる摩擦面のしわとピッチングの関係を検討した。SEM-3D 法を用い軸受外輪のはく離部分の断面を測定し、形状を Fig.4-12 に示した。深さ数 $\mu\text{m}$  から 10 $\mu\text{m}$  程度のはく離が起きていることが分かる。境界

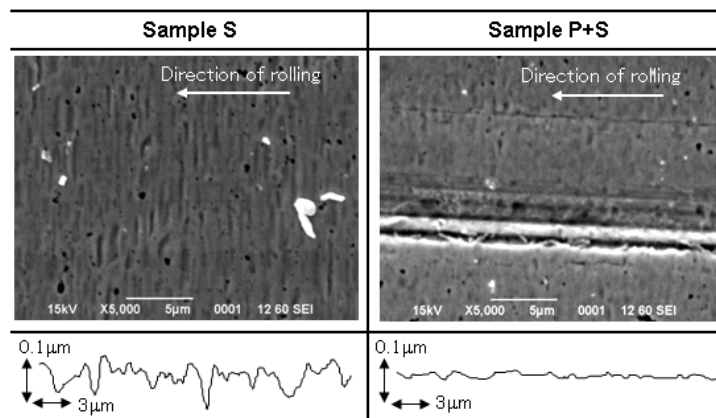


Fig.4-11 SEM photograph of sample S and P+S

Fig.4-11 S 油と P+S 油の SEM 写真

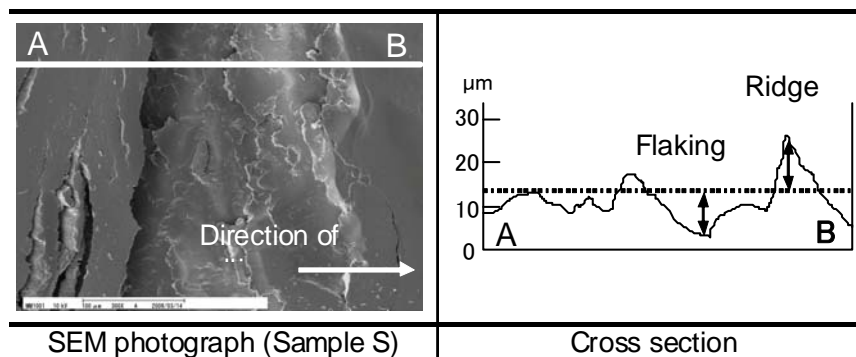


Fig.4-12 SEM photograph and section profile in flaking off part

Fig.4-12 SEM 写真とはく離部分の断面形状

潤滑膜の厚さは最大 100nm 程度であるので、はく離は境界潤滑膜の厚さに対し十分深い位置に達している。はく離部周辺の表面にはひび割れが走っていることから、母材表面近傍で発生したき裂が成長してはく離に至ったと考えられる。

#### (4) 境界潤滑膜の硬さとピッチング寿命の関係

前節よりはく離損傷は境界潤滑膜より内部の母材側に起こっていると考えられるが、添加剤により寿命が異なり、損傷箇所にははく離前に境界潤滑膜が形成していることが分かった。そこで、境界潤滑膜の硬さがピッチング寿命の長短に影響していると考え、Fig.4-8 で詳細に分析した 4 種の境界潤滑膜について境界潤滑膜のみの硬さをナノインデントで測定した。測定条件は 押込み荷重 100 $\mu$ N, 押込み深さ 20nm, ピッチング発生前 2000s 時の軸受外輪部の 6 点を測定し平均を算出した。得られた境界潤滑膜の硬さとピッチング寿命との関係を Fig.4-13 に示した。Figure 4-13 より境界潤滑膜の硬さとピッチング寿命には関係が認められ、柔らかい被膜ほどピッチング寿命が長い傾向にあった。最も長いピッチング寿命を示した P+S 油が最も柔らかく、最も硬い S 油に比較し約 65%の硬さであった。

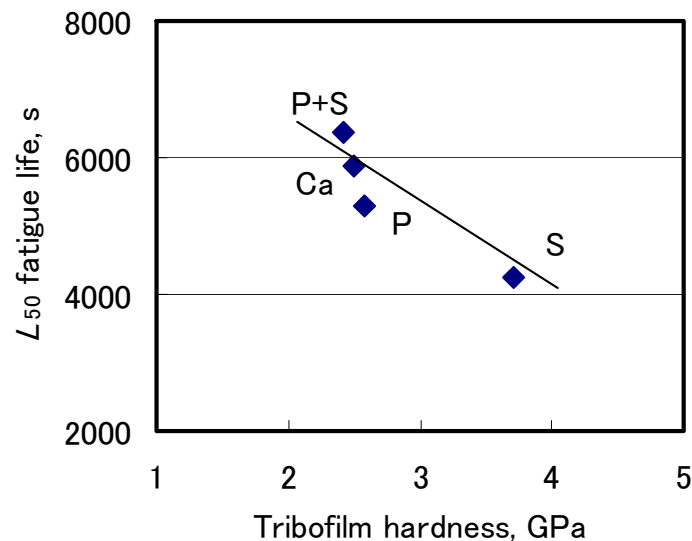


Fig.4-13 Relation between fatigue life and hardness of tribofilm

Fig.4-13 疲労寿命と境界潤滑膜の硬さの関係

#### 4.2.4 考察

これまでの検討から境界潤滑膜がピッチング寿命に与える影響として以下の考察を行った。まず、添加剤により形成された膜のせん断強さの影響について述べる。

(1) 境界潤滑膜はせん断を受けて母材に対する応力の蓄積を緩和している。

XPS 分析によると境界潤滑膜は内部に向かうほど金属母材に近い組成となっている。ま

たピッチング発生前後の膜厚の比較ではピッチング発生後の膜厚が厚くなっていることから、摩擦初期に形成された境界潤滑膜は摩擦により成長し、膜厚を徐々に増大させていく。膜厚が増大する過程では、境界潤滑膜は最表面で摩擦による破壊と再生を繰り返しながら、自身を積層させ成長していく。このようにして形成された境界潤滑膜は、柔らかい膜ほど接線力を緩和するため、境界潤滑膜内部および金属母材における応力の蓄積が抑えられる。S油のような硬い膜を形成するものは転走面に摩擦方向に垂直な塑性変形と見られるしわが発生している。この塑性変形が飽和した時、摩擦方向にき裂が発生すると考えられ、柔らかい膜は母材に対する応力の蓄積を緩和しき裂の発生を抑え寿命を相対的に向上させると考える。

(2) 摩耗しやすい境界潤滑膜はピッチング損傷の発生を起こしにくい。

Figure 4-10 の SEM 観察からも分かるように比較的初期に摩耗が進行し転走面が平滑化していることが分かる。摩耗は応力の蓄積した表面を削り取るため、疲労の起点となるき裂の発生を抑える。添加剤による境界潤滑膜の形成が無い基油は摩耗が進行するため応力の蓄積が起こりにくいため長寿命を示した。また添加剤により境界潤滑膜が形成される場合は境界潤滑膜による応力の緩和がピッチング寿命の長短に影響する。このため、初期摩耗が多く早く平滑化が進み、かつ母材表面に、柔らかい境界潤滑膜を形成するものが長寿命となる。

#### 4.2.5 ラジアルニードルベアリングのピッチング寿命のまとめ

ラジアルニードルベアリングを用いたピッチング寿命試験により添加剤によるピッチング寿命の差を確認した。

- (1) ラジアルニードルベアリングのピッチング寿命は基油で最も長く添加剤配合油で短くなる。その差は最も短い S 油で基油の約 60% となり長い P+S 油で基油とほぼ同等となる。
- (2) ピッチング損傷は片当たりと端部接触圧力が発生している外輪転走面端部で表面起点のピッチングが発生する。
- (3) 添加剤配合油では転送面に 20~150nm の界潤滑膜が形成され、その膜の硬さが疲労寿命の長短に影響する。ピッチング寿命が長いものは相対的に境界潤滑膜が柔らかかった。
- (4) リンと硫黄添加剤を組み合わせる処方すると、相乗効果により長寿命を示し、生成した境界潤滑膜は最も硬い S 油に比較し 65% の硬さを示した。
- (5) 添加剤により、生成した境界潤滑膜は硬さが異なるため、接触によって生じる接線力の緩和作用が異なる。このため、疲労の起点となるき裂が発生する金属母材への応力の蓄積度合いに差が生じるため、ピッチング寿命に長短が発生する。このことが添加剤によるピッチング寿命の長短の発生原因となる。

### 4.3 スラストニードルベアリングのピッチング寿命に及ぼす潤滑油添加剤の影響

#### 4.3.1 実験方法

##### (1) スラストニードルベアリングピッチング寿命試験

スラストニードルベアリングを用いたピッチング寿命試験機を製作し用いた。スラストニードルベアリング疲労試験機の試験部分の模式図と試験軸受の写真を Fig.4-14 に示した。駆動軸上に試験軸受としてスラストニードルベアリングを取り付け、軸受の下部スラストレースを保持する治具に所定の負荷をかけ、油温管理された油浴中で上部レースをモータにより回転させる。ニードルベアリングの転走面に発生するピッチングにより、試験油のピッチング寿命を評価する。試験条件を Table 4-4 に示す。ピッチング寿命は試験機振動が急増するまでの主軸積算回転数とし、試験後に軸受を分解し、ピッチングがニードルベアリング転走面に発生していることを確認した。負荷運転はゼロ荷重から所定の 5880N まで 20s で負荷し、以降損傷発生まで連続して運転した。

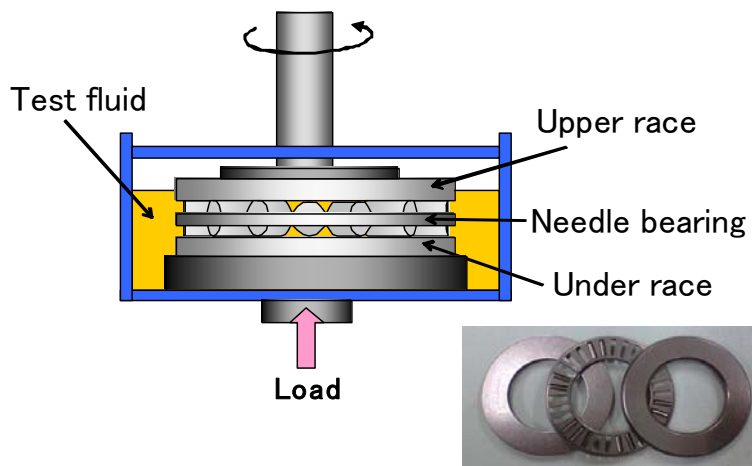


Fig.4-14 Main part of thrust needle bearing fatigue life tester and test bearing

Fig.4-14 スラストニードルベアリングの主要部分と試験軸受

##### (2) 試験油

試験油はラジアルニードルベアリング試験と同一の Fig.4-2 に示した添加剤を用い、Table 4-2 に示した添加剤配合で実施した。本研究で使用した試験油はほぼ同一の動粘度であるためスラストニードルベアリング試験においても、ピッチング寿命に及ぼす粘度の差の影響は無視できると考え、検討から除外した。

Table 4-4 Fatigue life test condition

Table 4-4 疲労寿命試験条件

Tester	Thrust needle bearing fatigue life tester	
Bearing	Upper race	Drive:39mm outer dia., 28 mm inner dia.
	Under race	Driven:40mm ourter dia., 26.5 mm inner dia.
	Needle	No. of needle 12
	Needle size	2.0 mm dia., 5.0 mm width
	Material	Bearing steel (SUJ2)
	Cage	Pressed steel
	Radial clearance	0.02mm
Lubrication	150ml	120 °C
Test condition	Drive roller	1000rpm
Running in	0~5880N	20s
Test load	5880N	

### (3) 転走面の分析

スラストニードルベアリングの摩擦条件の検討と、ピッチング寿命試験後のスラストニードルベアリング転走面に発生したピッチングの状態を観察した。観察は光学顕微鏡，走査型電子顕微鏡 (SEM) と X 線マイクロアナライザ (EPMA)，および X 線光電子分光 (XPS) を用いて表面および表面近傍の元素分布や摩擦面生成物の状態を分析した。さらにフォーカスイオンビーム付き透過電子顕微鏡 (FIB-TEM) を用いてイオンビームで転送面を深さ方向に切り出し，その断面に生成した境界潤滑膜を直接観察した。また，ラジアルニードルベアリング試験の時と同様にナノインデントを用い境界潤滑膜のみの硬さを測定した。さらに原子間力顕微鏡 (AFM) を用い試験後の転走面の微細な表面粗さを測定した。試験片の洗浄および分析条件はラジアルニードルベアリングでの試験時と同様とした。

## 4.3.2 ピッチング寿命試験結果

### (1) 軸受ピッチング寿命

各添加剤のスラストニードルベアリング疲労試験機によるピッチング寿命の結果を示す。添加剤単品配合油のピッチング寿命を Fig.4-15 に，組合せ配合油のピッチング寿命を Fig.4-16 に示した。試験結果は各試験油についてピッチングが発生するまでの主軸積算回転数をワイブル確率紙に整理して示した。ワイブル確率紙上で，累積損傷率が 50%となるピッチング寿命 ( $L_{50}$ ) を比較したものを Fig.4-17 に示した。

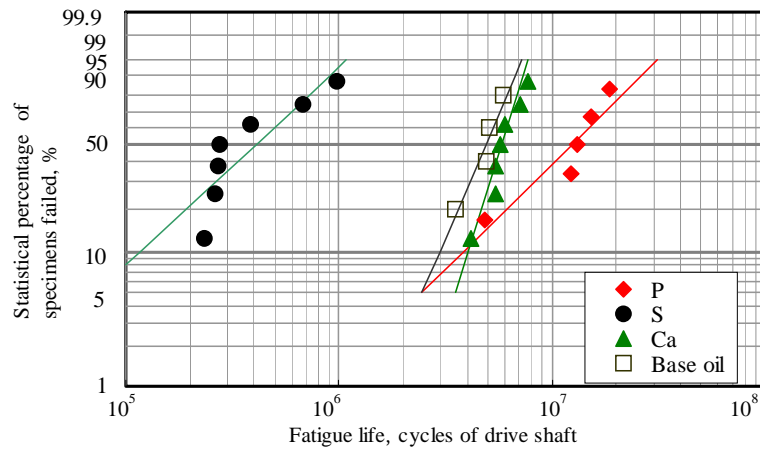


Fig.4-15 Pitting test results of single additive oil

Fig.4-15 単品添加剤配合油のピッチング試験結果

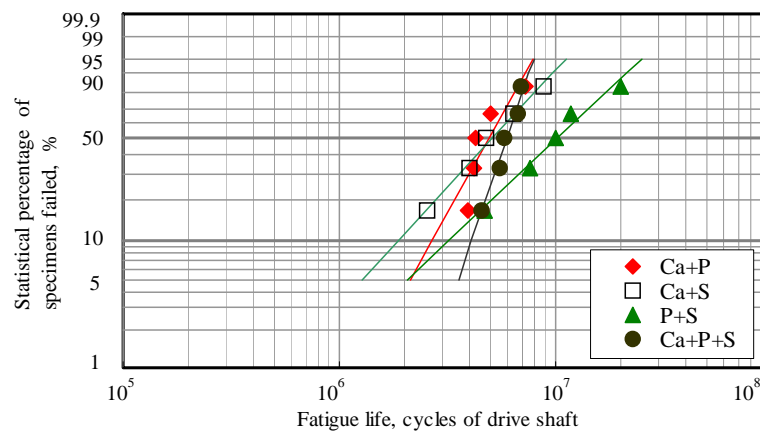


Fig.4-16 Pitting test results of combined additive oil

Fig.4-16 複合添加剤配合油のピッチング試験結果

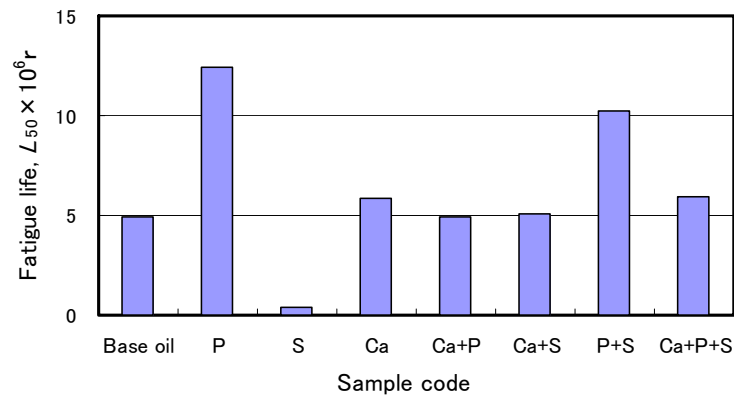


Fig.4-17 Results of pitting test with  $L_{50}$  Life

Fig.4-17  $L_{50}$  ピッチング寿命試験結果

P 油, S 油, Ca 油の試験結果を基油の結果と Fig.4-15 および Fig.4-17 の  $L_{50}$  で比較すると, P 油の主軸積算回転数は  $12.3 \times 10^6$  で基油に比較して著しく長く, Ca 油は  $5.6 \times 10^6$  で基油同等, S 油は  $0.45 \times 10^6$  と基油に比較して著しく短い寿命を示した. このように添加剤により疲労寿命に大きな差があることが分かった.

添加剤を組み合わせた場合を Fig.4-16 および Fig.4-17 で比較すると, 組合せ配合油は Ca+P 油が Ca 油より若干ピッチング寿命が短くなったものの, その他はそれぞれの単品配合油の中間の寿命を示した. Ca+P 油, Ca+S 油, Ca+P+S 油は相対的に配合量の多い Ca 油のピッチング寿命に近い値を示した. P+S 油は相対的に配合量が少ないにもかかわらず P 油に近い長寿命を示した. このように混合した場合は単独添加剤の中間の値を示し, その値は混合した添加剤のどちらか一方の特性が顕著に現れていることが分かった.

## (2) 試験後の軸受の転走面の観察

試験後のスラストニードルベアリングの観察を行った. 外観を Fig.4-18 に示す. ピッチング損傷は 2, 3 個の例外を除き全ての油種でニードルベアリングに発生した. 各油種でピッチングの発生箇所は異なる傾向が見られた. 基油ではニードルベアリング外周部に, P 油では外周部に, S 油は内周部に, Ca 油は中央から外周部にかけて, 組み合わせ油では中央部ないしは外周部にピッチングが見られた. このように, 各油種とも中央より外周部にピッチングがみられたものの, S 油のみ 1 個を除き内周部にピッチングが発生した. 光学顕微鏡で観察した代表的な写真を Fig.4-19 に示した. ピッチングは, 損傷の一端がシャープに剥がれているのに対し, もう一端はいびつであることから, 表面起点のピッチングの特徴を有していた. ピッチングの全てないしほとんどが, 表面起点であると考えられた.

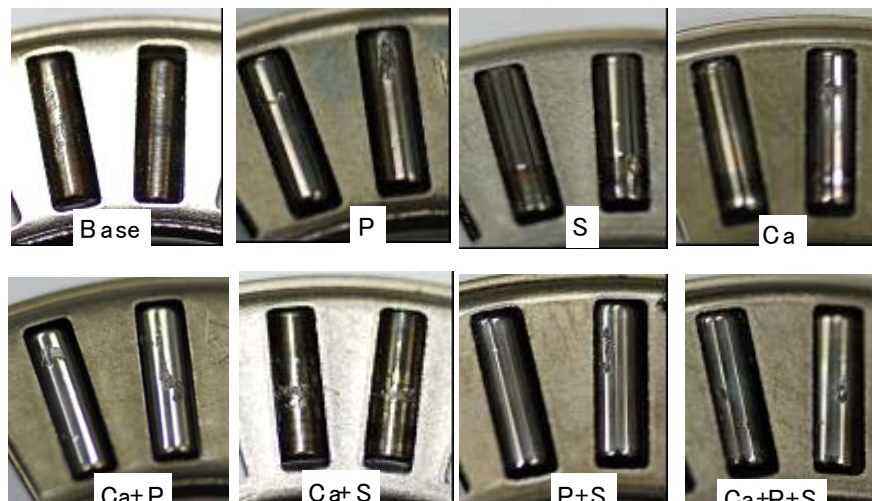


Fig.4-18 Optical photographs on needle tested with oils

Fig.4-18 試験後のニードルベアリングの光学写真





Fig.4-19 Optical photographs on needle tested with oil P, S and Ca

Fig.4-19 P 油, S 油, Ca 油での試験後のニードルベアリング

### 4.3.3 転走面の分析

#### (1) ニードルベアリングの摩擦条件

接触圧力は円筒と平面の弾性接触として計算した結果、最大ヘルツ接触圧力は 1.79GPa であった。

スラストニードルベアリングの場合、ニードルベアリングは自転するとともに軸受の中心軸の回りを公転するため上部レースと下部レースの軌道面ではスピン運動が発生する。文献を参考に<sup>13)</sup>、接触点における転がり速度を Fig.4-20 に示した。上側の上部レースが右に $+\omega$ で回転すると軌道面はニードルの外側端面を前進させ、内側端面を遅らせるため図に示すような速度分布となり、ニードルに対して右回りのモーメントが作用することとなる。このモーメントはニードルと下側の下部レースとの摩擦条件が上側と同じであれば、その接触部に発生する同じ大きさで反対方向の摩擦モーメントで釣り合うこととなる。ニードルにかかる接触圧力は場所により差は無いと考えられることから、摩擦条件的にはしゅう

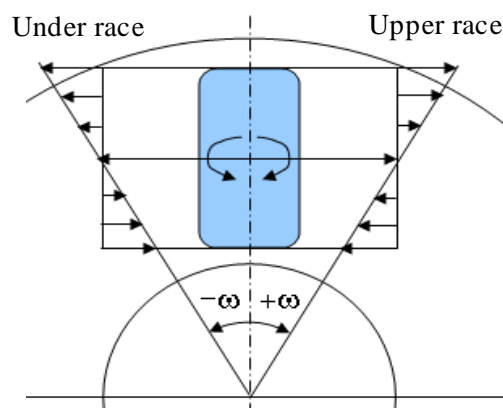


Fig.4-20 Circumference speed of thrust needle bearing

Fig.4-20 スラストニードルベアリングの転がり速度



動距離が長くなる、中心部より外側にピッチングが発生するものと考えられる。実際、殆どの油種では、ニードルベアリング中央部より外側でピッチングが発生している。ただしS油はニードルベアリングの中央部より内側にピッチングが発生している。その原因はS油のみ、上部レースと下部レースに対する摩擦条件が異なっているためと考えられる。そこで、転動面に形成された境界潤滑膜の解析を行い、ピッチング寿命との関係を検討した。

## (2) 境界潤滑膜の化学組成と膜厚

4.3.2 (2) 項で実施した光学顕微鏡による全ニードルベアリングの転走面の観察の中から、各試験油で摩耗や表面状態が最も代表的なものを代表軸受として選別した。さらに、その代表軸受の転走面の元素分布と元素量をSEMとEPMAで測定した。元素分布が一様であり、反応している添加剤元素の量が最も平均的なニードルベアリングを分析試験片とした。この試験片に対し、XPSを用い転走面の表面およびイオンスパッタリングによる深さ方向の解析を行い、境界潤滑膜の組成の同定とその検出深さを測定した。

XPSの測定結果をTable 4-5に示した。S油、P油、P+S油は40～50nmと相対的に薄い境界潤滑膜が生成していた。Ca+P油およびCa+P+S油の境界潤滑膜は厚く130nm以上であった。Ca油、Ca+S油は80～130nmと相対的に厚い膜が生成していた。Ca系添加剤(OBCS)を含むと生成する境界潤滑膜が厚くなることが分かったが、膜厚は各添加剤元素の配合濃度差ほどの差はなかった。

Table 4-5 Properties of tribofilm by XPS  
Table 4-5 XPSによる境界潤滑膜の分析結果

Sample oil code	P	S	Ca	P+S	Ca+S	Ca+P	Ca+P+S
Chemical species	FePO <sub>4</sub>	FeS	CaO	FePO <sub>4</sub>	CaO	CaO	CaO
	Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>			Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>		FePO <sub>4</sub>	FePO <sub>4</sub>
nm	40	40	80	50	130	Over130	Over130

境界潤滑膜の組成については、Ca油、P油、S油はそれぞれ、酸化カルシウム、リン酸鉄、硫化鉄が生成していた。Ca+S油では酸化カルシウムが、P+S油ではリン酸鉄がそれぞれ生成していた。硫化鉄が検出されなかったのは、S系添加剤の反応性がCa系添加剤やP系添加剤よりも低く、この試験条件では、ほとんど反応しなかったためと考えられる。この事は3章のFZG歯車疲労試験において高接触圧力(約2.8GPa)条件でのみ、境界潤滑膜中にS化合物が検出されたこと<sup>14)</sup>と合致する。また、Ca+P油、Ca+P+S油の場合は、酸化カルシウムとリン酸鉄が、またはリン系化合物が混在しているものと推定された。

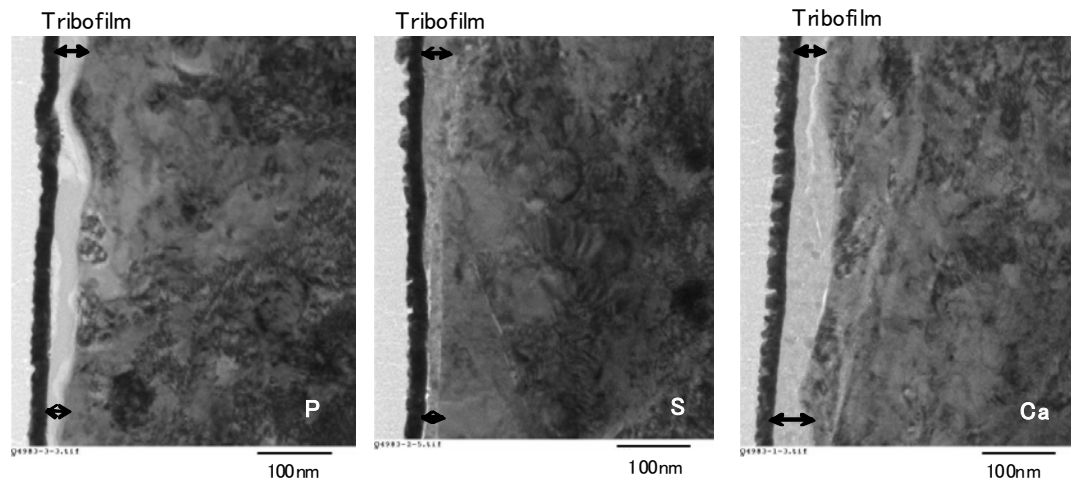


Fig.4-21 Cross-sectional FIB-TEM micrographs of the tribofilms

Fig.4-21 FIB-TEM による境界潤滑膜の断面写真

XPS 測定結果を補完するため、FIB-TEM による境界潤滑膜の直接観察を行った。測定は P 油、S 油、Ca 油のニードルベアリングに関して行った。ニードルベアリング断面の測定画像を Fig.4-21 に示した。左部分に見える約 10nm の黒い部分は切断時に表面を保護する金蒸着膜であり、その右の白い部分が境界潤滑膜である。さらに最右部は母材であり、これら各部分はエネルギー分散型蛍光 X 線 (EDS) を用いた元素分析によりその部分の構成元素を確認した。境界潤滑膜の部分からはそれぞれの添加剤成分が検出された。

TEM から測定した膜厚は、P 油が 20～50nm、S 油が 20～50nm、Ca 油が 20～80nm となった。TEM と XPS の測定結果に大きな相違がないことや、XPS の測定範囲 (直径 1mm) が TEM の測定範囲 ( $2 \times 2 \mu\text{m}$ ) よりかなり大きく、より平均化して見ることができると考え XPS の測定結果を膜厚とした。

ピッチング寿命と境界潤滑膜の厚さの関係を Fig.4-22 に示した。最もピッチング寿命の長 P 油と最もピッチング寿命の短い S 油がともに 40nm の膜厚が観察されたことから、ピッチング寿命と膜厚には特定の相関は見られなかった。ピッチング試験時にそれぞれの添加剤により数～100nm を越える境界潤滑膜が形成されていることが確認されたが、本試験条件では膜厚の大小がピッチング寿命に大きな影響を与える因子ではなかった。

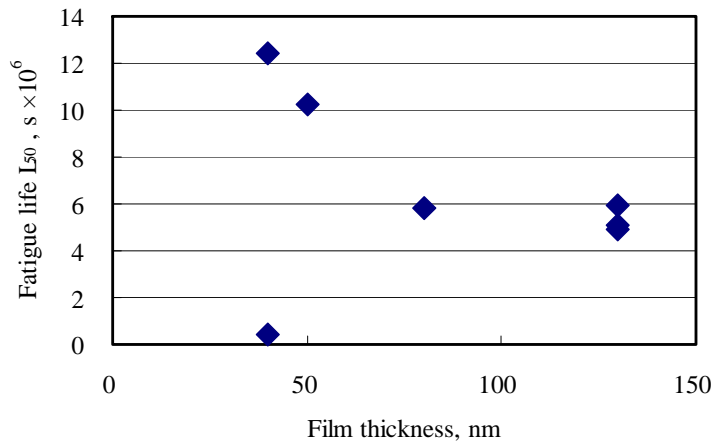


Fig.4-22 Relation between fatigue life and film thickness

Fig.4-22 膜厚と疲労寿命の関係

### (3) 境界潤滑膜の硬さ

添加剤により寿命が異なり，ピッチング試験時には境界潤滑膜が形成していることが分かった．そこで，境界潤滑膜の硬さがピッチング寿命の長短に影響していると考え，境界潤滑膜の硬さを，ナノインデントを用いて測定した．ナノインデントはナノオーダーで試料表面の硬さを測定することが可能であり，今回は，膜のみの硬さを測定するため押し込み深さを約 20nm に設定して 100 $\mu$ N の荷重で測定した．測定はダイヤモンド製バーコピ

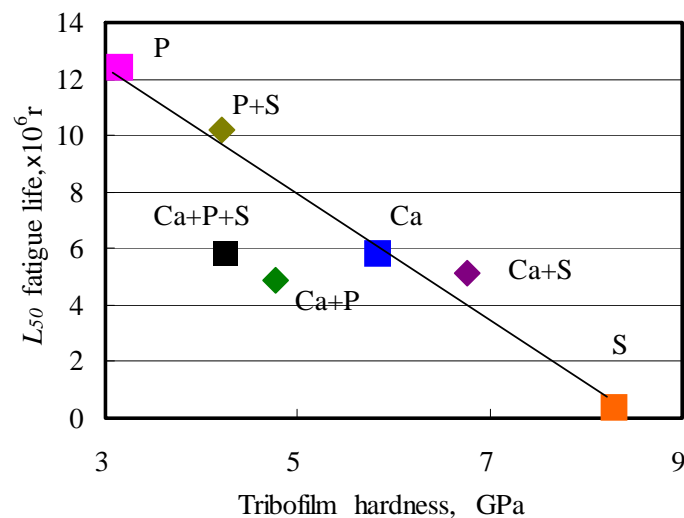


Fig.4-23 Relation between fatigue life and hardness of tribofilm

Fig.4-23 境界潤滑膜の硬さと疲労寿命の関係

ッチ圧子をニードルベアリング表面に押し込み、その深さから試料の硬さを算出した。

ニードルベアリング表面の 6 点を測定し平均を算出し、得られた境界潤滑膜の硬さとピッチング寿命との関係を Fig.4-23 に示した。図のように境界潤滑膜の硬さとピッチング寿命には関係が認められ、ピッチング寿命が長いものは境界潤滑膜が柔らかい傾向にあった。この結果は 4.2 項のラジアルニードルベアリングのピッチング寿命と境界潤滑膜の硬さの関係を示した Fig.4-13 と同様であった。

#### 4.3.4 考察

ピッチング寿命の長いものは、境界潤滑膜が柔らかい傾向にあったが Ca+P 油、Ca+P+S 油の 2 点は近似線から離れた左下になっており、さらに何らかの特性が影響し境界潤滑膜が柔らかいにもかかわらず相対的に寿命が短くなったものと考えた。

そこで、ニードルベアリングと接する下部レースの境界潤滑膜の表面形状を原子間力顕微鏡 (AFM) で測定した。AFM はカンチレバーと呼ばれる部位の先端にあるプローブという細い針で試料表面をなぞる事により、その表面形状をナノメートルオーダで測定する装置である。下部レースの表面形状を AFM で測定した代表的な画像を Fig.4-24 に示した。測定範囲は 100 $\mu$ m 四方で、測定部位は転走痕の中心付近である。各試験油により、境界潤滑膜の表面状態が異なることがわかる。そこで、それぞれの面のナノメートルオーダの凹凸を算術平均粗さ ( $R_a$ ) で測定した結果を Fig.4-25 に示した。大きな摩耗痕などが見られない 5 面の測定結果を平均した数値である。図に示すように Ca 系添加剤を含むものが粗くなる傾向が見られ、Ca+P+S 油、Ca+P 油では特に表面が粗い結果が得られた。

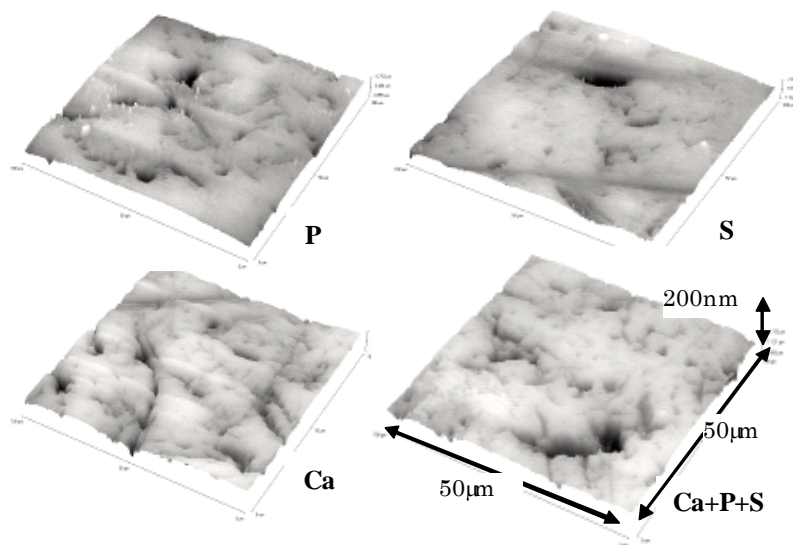


Fig.4-24 AFM images of surface of under race

Fig.4-24 下部レース表面の AFM イメージ

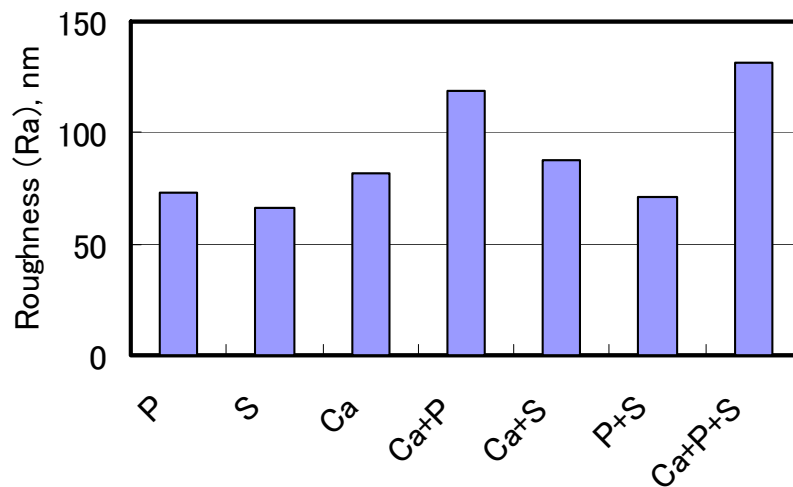


Fig.4-25 Roughness of tribofilm by AFM

Fig.4-25 AFM による境界潤滑膜の粗さ

さらに、転走面での摩耗がピッチング寿命の長短に影響すると考え、ピッチング寿命試験後の油中の鉄イオン濃度を測定した。各試験油からは数~100ppmの鉄イオンが検出され、各試験油の試験時間で割り、単位時間当たりの鉄イオン量で比較した。その結果 S 油が他の油種に比較し摩耗量が5~500倍多いことがわかった。

そこで、境界潤滑膜の硬さと膜表面の凹凸に摩耗特性を加えた指標とピッチング寿命の関係を検討した。その結果、Fig.4-26に示すように、[境界潤滑膜の硬さ×表面粗さ ( $Ra$ ) × (摩耗量)<sup>1/3</sup>] がピッチング寿命  $L_{50}$  の指標となった。摩耗量の1/3乗は摩耗長さと考えられることから、ナノメートルオーダーの膜は硬さが硬いほど、表面の粗さが粗いほど、割れやすくピッチングの起点となるき裂が発生しやすくなり、さらに摩耗の多いものは安定した境界潤滑膜が形成されず、境界潤滑膜による応力の緩和作用が十分作用せず早期にピッチングが発生したものと考えた。スラストニードルベアリングの場合、ラジアルニードルベアリングのように転がり摩擦だけでなく作動すべりの影響を考える必要があるため、作動すべりの潤滑状態に対して顕著な影響を与える相手面の粗さと摩耗をピッチング寿命の指標に加味する必要があるものと考えた。このようなことから、スラストニードルベアリングのピッチング寿命の長短を決める評価因子は転走面の境界潤滑膜の表面状態を示す指標、[境界潤滑膜硬さ×表面粗さ ( $Ra$ ) × (摩耗量)<sup>1/3</sup>] であることがわかった。

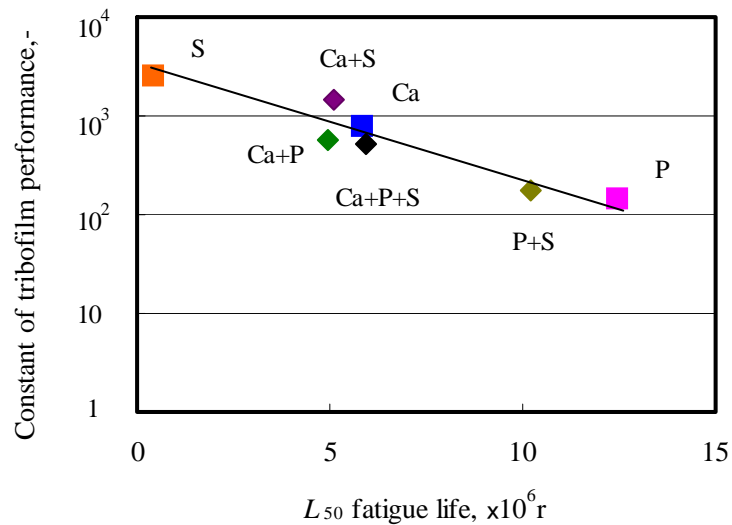


Fig.4-26 Relation between fatigue life and tribofilm performance

Fig.4-26 境界潤滑膜の特性と疲労寿命の関係

#### 4.3.5 スラストニードルベアリングのピッチング寿命のまとめ

スラストニードルベアリングを用いたピッチング寿命試験により添加剤によるピッチング寿命の差を確認した。

- (1) スラストニードルベアリングのピッチング寿命は基油を基準とすると P 油が最も長く約 2.5 倍, P+S 油で 2 倍の寿命を示した. S 油は極端に短く基油の 1 割であった.
- (2) スラストニードルベアリングのピッチング損傷は転がりに加え軸方向の作動すべりが加わるため, ニードルベアリングの中心より外側のしゅう動距離の長くなる部分に表面起点のピッチングが発生する. ただし S 油は例外的にニードルベアリングの中心より内側にピッチングが発生した.
- (3) 添加剤配合油では転走面に 40~150nm 程度の境界潤滑膜が形成され, 境界潤滑膜の厚さはピッチング寿命に大きな影響を与えず, その膜の硬さがピッチング寿命の長短に影響する. ピッチング寿命が長いものは相対的に境界潤滑膜が柔らかい傾向にあったが傾向線から外れるものもあった.
- (4) リンおよびリンと硫黄添加剤を組み合わせると, 長寿命を示し, 生成した境界潤滑膜は最も硬い S 油に比較し 40~50%の硬さを示した.
- (5) さらに境界潤滑膜のナノメートルオーダの微細な表面形状, および摩耗特性がピッチング寿命の長短に影響を与え, スラストニードルベアリングのピッチング寿命の長短は, [境界潤滑膜の硬さ  $\times$  表面粗さ ( $Ra$ )  $\times$  (摩耗量)<sup>1/3</sup>] を指標として表せた. 表

面が硬いほど、表面が粗いほど、摩耗が多いほどピッチング寿命が相対的に短くなる傾向が見られた。

- (5) 添加剤により、生成した境界潤滑膜は硬さが異なるため、接触によって生じる接線力の緩和作用が異なる。このため、疲労の起点となるき裂が発生する金属母材への歪の蓄積度合いに差が生じ、さらに境界潤滑膜の表面が平滑であれば歪の蓄積も相対的に少なくなり、境界潤滑膜の損傷頻度も低下し、結果として摩耗量も少なくなる。このことが添加剤によるピッチング寿命の長短の発生原因となる。
- (6) 以上のことから、疲労寿命を長くするには、より軟らかく、平滑な表面を有し、摩耗の進行を防止する境界潤滑膜を生成する添加剤の選定が有効と考えられた。

#### 4.4 結論

自動変速機用転がり軸受の転動疲労強度に及ぼす潤滑油添加剤を、実用に供されるラジアルニードルベアリングとスラストニードルベアリングを用いて検討した。検討添加剤はリン系耐摩耗剤（TCP）、硫黄系極圧剤（DBDS）、カルシウム系清浄剤（OBCS）で単体および組み合わせ油についてピッチング試験を実施し以下のことがわかった。

- (1) これら添加剤はニードルベアリングの転走面に 20～150nm の境界潤滑膜を生成し、その境界潤滑膜の特性がピッチング寿命の長短に影響を与えている。
- (2) ラジアルニードルベアリングの転走面はほぼ転がりと考えられ、ピッチング発生場所も端面接触圧力と片当たりの影響のする外輪の上部外側端部である。
- (3) スラストニードルベアリングの場合はニードルの軸方向に作動すべり分布が生じ、転がりに加えすべりを考慮する必要があり、ピッチング発生場所も大多数はニードルベアリングの中心部より外側のしゅう動距離の長くなる部分であった。
- (4) 添加剤のピッチング寿命の長短に対する影響度合いはラジアルニードルベアリングでは2倍程度であるのに対し、スラストニードルベアリングでは30倍となる。
- (5) ピッチング寿命の長い添加剤で形成される境界潤滑膜は柔らかい傾向にあり、ラジアルおよびスラストニードルベアリングとも同様の傾向で、添加剤の種類ではリン系添加剤と硫黄系添加剤を組合せたものが長寿命を示した。
- (6) スラストニードルベアリングは転がりに加え、作動すべりが加わるため境界潤滑膜の硬さに加え、すべり摩擦で影響を受けやすい表面の粗さや摩耗といった因子を加味す

る必要がある。スラストニードルベアリングのピッチング寿命の評価因子として[境界潤滑膜の硬さ×表面粗さ ( $Ra$ ) × (摩耗量)<sup>1/3</sup>]を抽出した。ピッチング寿命の長い添加剤で形成された境界潤滑膜は柔らかく、平滑で、摩耗が少なくこの値が小さい。

- (7) 自動変速機用転がり軸受の転動疲労強度を向上するためには、リン系添加剤に硫黄系添加剤を組み合わせた添加剤を用い、境界潤滑膜を柔らかく、かつナノメートルオーダーでの粗さを平滑にし、摩耗を防止するものが有効である。

#### 第4章参考文献

- 1) Kurihara & O.Kurosawa: Design and Performance of Low-Viscosity ATF, SAE Tech Pap. SAE-2007-01-3974 (2007).
- 2) H.Fujita, Y.Takakura & T.Ikeda: Study of Low Viscosity ATF with Extending Gear Fatigue Life, SAE Tech Pap. SAE-2007-01-1976 (2007).
- 3) エンジンルームで活躍するベアリング, 自動車工学, 鉄道日本社, 9, pp.44-50, (2006).
- 4) 東崎康嘉・松本 将・野田高司・平野隆久: 片当たりするニードル軸受の転がり疲れ強さ (1 報), トライボロジスト, 45, 9, pp.697-702, (2000).
- 5) 松本 将・東崎康嘉・野田高司・平野隆久: 片当たりするニードル軸受の転がり疲れ強さ (2 報), トライボロジスト, 45, 9, pp.703-707, (2000).
- 6) 白濱真一・宮島 誠・岡村敦夫: 転がり疲れに及ぼすリン系添加剤の影響, トライボロジスト, 46, 7, pp.564-570, (2001).
- 7) 白濱真一・中村純一: 転がり疲れに及ぼす硫黄系添加剤の影響, トライボロジスト, 46, 7, pp.571-577, (2001).
- 8) 市橋俊彦・横溝真人・松本 将: ラジアルニードルベアリングのピッチング寿命に及ぼす潤滑油添加剤の影響, トライボロジスト, 54, 6, pp.412-418, (2009).
- 9) 市橋俊彦・藤田 裕・米川貴史・松本 将: スラストニードルベアリングのピッチング寿命に及ぼす潤滑油添加剤の影響, トライボロジスト, 55, 2, pp.128-135, (2010).
- 10) 日本トライボロジー学会編 トライボロジーハンドブック, 養賢堂, pp.398, (2001).
- 11) H. P. Nixon : Effects of Extreme Pressure Additives in Lubricants on Bearing Fatigue Life, Iron and Steel Engineer, pp.21-26, December (1998).



- 12) 山田寿夫・武居正彦・田本芳隆：歯面の摩耗およびピッチングに及ぼす潤滑油の影響，トライボロジスト, 43, 4, pp.317-324, (1998).
- 13) J.Brandleim, L.Hasbargen, P.Eschmann & K.Weigand 編著，吉武立雄訳：ころがり軸受実用ハンドブックー設計の基礎から使いかたまでー，工業調査会，pp.95, (1996).
- 14) 市橋俊彦・高倉 豊・松本 将：FZG 歯車試験でのピッチング寿命に及ぼす自動変速機用潤滑油添加剤と試験条件の影響，トライボロジスト, 54, 4, pp.293-299, (2009).