

冷凍機油潤滑下におけるベアリング疲労への各種添加剤の影響に関する研究

A Study on the Effects of Various Additives on Bearing Fatigue under Lubrication in Refrigeration Oil

出光興産（正）*中島 聰 （非）海東 亘 （非）前園 拓紀

So Nakajima*, Wataru Kaito**, Hiroki Maezono**

*Lubricants Research Laboratory, Idemitsu Kosan Co., Ltd. **Lubricants Department II, Idemitsu Kosan Co., Ltd.

1. 緒言

地球温暖化防止に対する意識の高まりから、世界的に電動車が普及してきている。車に搭載されるカーエアコンは従来冷房専用であったが、エンジンを搭載しない電動車ではエンジン排熱による暖房ができなくなるため、冷暖房兼用が可能なカーエアコンの普及拡大が見込まれる。カーエアコンの冷暖房兼用化によって、温度上昇や稼働時間長期化につながり、圧縮機構部のしゅう動環境はより過酷になる。カーエアコンの圧縮機部では冷凍機油と冷媒が混合した状態で各種ベアリング等が潤滑されているが、しゅう動環境の過酷化によりベアリング疲労寿命延長のニーズがより高まると予想される。疲労寿命に影響を及ぼす冷凍機油の要素としては主に添加剤と基油の2つが挙げられる。自動車用ATFを例に挙げると、リン系耐摩耗剤配合によってベアリング疲労寿命が短くなる傾向が知られており、配合する添加剤や基油の最適化が必要である^{1),2)}。本報では冷凍機油・冷媒の混合潤滑下におけるリン系耐摩耗剤の疲労寿命への影響を把握するため、タイプの異なるリン系耐摩耗剤を配合し、冷凍機油・冷媒混合下でのスラストコロベアリング疲労寿命を評価した。また、疲労試験におけるベアリング金属表面に生成した被膜と粗さを分析し、疲労寿命との関係を考察した。

2. 実験方法

2.1.供試油と供試冷媒

供試油は冷凍機油で一般的に使用されるポリアルキレンギリコールに耐摩耗剤を配合していないPAG-1、リン酸エステル系の耐摩耗剤を配合したPAG-2および亜リン酸エステル系の耐摩耗剤を配合したPAG-3を用いた。なおすべてのサンプルに酸化防止剤を配合した。

(Table 1)。冷媒にはカーエアコンで一般的に使用されるR1234yf: $\text{CH}_2=\text{CF}-\text{CF}_3$ を用いた。

Table 1 Properties of the refrigeration oil

	Oil	PAG-1	PAG-2	PAG-3
Kinematic Viscosity, mm ² /s	40°C	45.85	46.26	45.61
	100°C	9.74	9.92	9.69
Viscosity, mPa · s @110°C	In 0.5MPaG R1234yf	5.0	5.0	5.0
Viscosity index	206	208	207	
Density@15°C, g/cm ³	0.998	1.002	0.997	
Additives	Anti-oxidant	Include	Include	Include
	Anti-wear(Phosphate)	None	Include	None
	Anti-wear(Phosphite)	None	None	Include

2.2 疲労寿命評価方法

評価に用いた密閉型疲労試験機の概略図およびベアリング/レースをFig.1に示す³⁾。本試験機は摺動部が密閉されており、冷媒存在下でスラストコロベアリングの疲労寿命評価が可能である。試験条件をTable 2に示す。疲労寿命の検出は加速度センサーを用いた。同一条件で6回評価し、Weibullプロットを作成、疲労寿命を比較した。

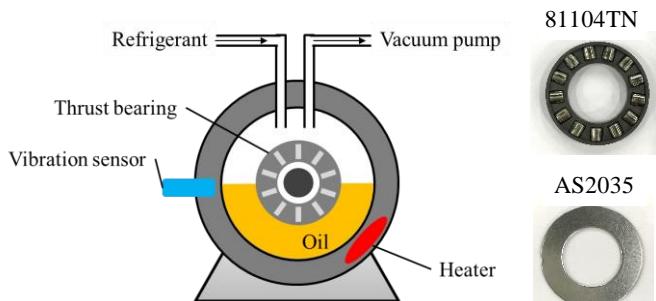


Fig.1 Schematic illustration of hermetic-type fatigue tester, bearing/ 81104TN and race/ AS2035

Table 2 Test conditions

Rotational speed	1500rpm (2.16m/s)
Load	7900N
Hertz pressure	1.5GPa
Temperature	110°C
Refrigerants(0.5MPaG)	R1234yf
Oil volume	50mL
The number of test	n=6
Fatigue detection	Vibration sensor
Evaluation	Weibull plots/ L ₁₀ , L ₅₀

2.3 ベアリング表面の分析

疲労寿命試験後のベアリング損傷の状態と形状の計測には光学顕微鏡、電子線マイクロアナライザ(EPMA)、および接触式粗さ計を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 リン系耐摩耗剤の疲労寿命への影響

PAG-1, PAG-2, PAG-3の疲労寿命測定結果をFig.2に示す。リン系耐摩耗剤を含まないPAG-1の疲労寿命は $L_{10}: 12.3\text{h}$, $L_{50}: 36.4\text{h}$ となった。リン酸エステル系の耐摩耗剤を含むPAG-2の疲労寿命は $L_{10}: 5.1\text{h}$, $L_{50}: 22.7\text{h}$ となり、自動車用ATFと同様に、冷凍機油・冷媒混合下においてもリン系耐摩耗剤の配合による寿命低下が確認された。一方で、亜リン酸エステル系の耐摩耗剤を配合したPAG-3においては $L_{10}: 31.6\text{h}$, $L_{50}: 81.1\text{h}$ とPAG-1より長い疲労寿命を示した。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。

3.2 ベアリング表面の観察と考察

1) 光学顕微鏡による観察

試験後のレース及びベアリングコロの光学顕微鏡観察を行った。外観をFig.3に示す。疲労損傷はレースとコロの両方に確認された。また、サンプル損傷はうろこ状であり、表面起点のフレーリングと推察された。損傷個所は中心部より内側あるいは外側に発生する傾向であり、中心から離れるほどすべりが大きくなることに起因すると考えられる。

2) EPMAによるリン分布の分析

今回試験油に配合したリン系耐摩耗剤の影響を考察するため、試験後ベアリングの表面リン分布を電子線マイクロアナライザ（EMPA）にて観察した。結果をFig.4に示す。リン系耐摩耗剤を含まないPAG-1ではリン分が検出されなかつたのに対し、リン系耐摩耗剤を含むPAG-2, PAG-3ではリンの分布がレース、コロの両方に確認された。長い疲労寿命を示したPAG-3において特にリンの分布が強く見られ、鉄表面でのリン被膜の生成が疲労寿命に関連していると推察された。

3) 試験後レースの表面粗さ計測

各試験油において試験後レースを1つ選定し、転がり摺動方向の粗さ Rq を計測した。4回計測した平均とばらつきの結果をFig.5に示す。新品と比較して試験後のレースでは粗さが増加傾向であったが、疲労寿命が長いPAG-3では顕著な粗さの増加は見られなかった。ベアリングに繰り返し応力が加わると、疲労の起点となる亀裂が発生し最終的に疲労に至るが、PAG-3では金属表面と亜リン酸エステルの反応が進行し、PAG-1と比較して金属表面が平滑化されることで亀裂発生が抑制され、疲労寿命を延長している可能性が示唆された。

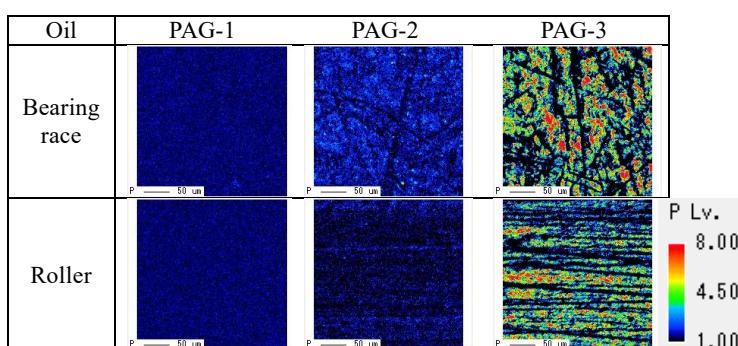


Fig.4 Phosphorus analysis of bearing surface by EPMA

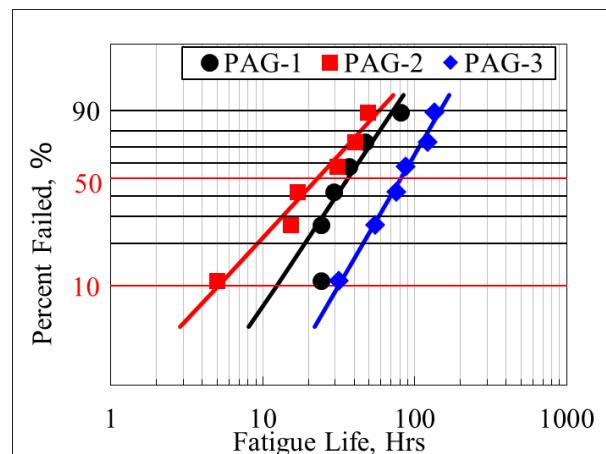


Fig.2 Weibull plots for PAGs

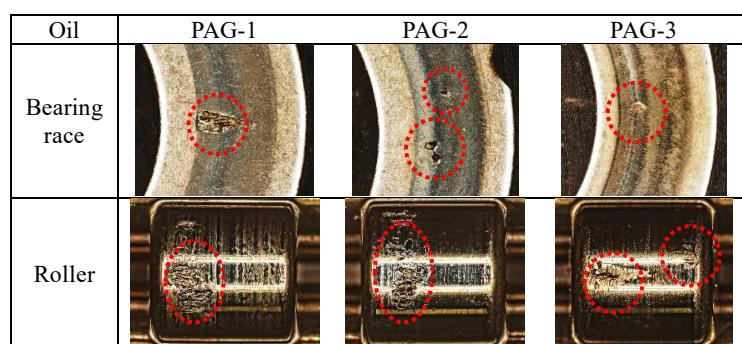


Fig.3 Optical photographs of each bearing tested with PAGs

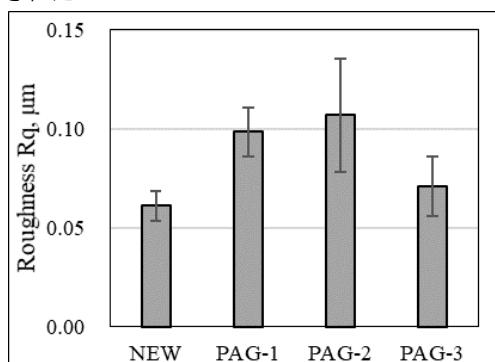


Fig.5 Roughness of each race tested with PAGs

4. 結言

冷凍機油・冷媒混合潤滑下において、リン酸エステル系耐摩耗剤を配合すると疲労寿命が短くなった。一方で亜リン酸エステルを配合すると長寿命化の傾向が見られ、適切な添加剤配合をすることでベアリング表面を平滑化し、疲労寿命を延長できる可能性を見出した。

文献

- 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ティ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, 412, (2009)
- 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).
- 中島聰, 冷凍機油と冷媒混合下の疲労寿命に関する考察, トライボロジー会議 2020 秋予稿集(2020)