

トランスミッション用軸受の寿命におよぼす 油中異物および軸受材料の影響

Influence of Contaminated Oil and Bearing Materials on Bearing Life in Automotive Transmission

水 野 孝 樹*	天 野 政 樹*	大 森 生 雄*
Kohki Mizuno	Masaki Amano	Ikuo Ohmori
松 原 敏 彦*	中 田 雅 之*	服 部 弘 基*
Toshihiko Matsubara	Masayuki Nakada	Kohki Hattori

要 旨

トランスミッション用軸受の小型軽量化を達成するために、実機トランスミッション潤滑環境下をシミュレーションしたテスト手法を確立し、ボールベアリングとテーパーローラベアリングに関して、定格寿命に対する油中異物の軸受寿命実力の把握と、さらには長寿命化を盛り込んだ軸受材料および熱処理の影響を明らかにした。

- (1) トランスミッション潤滑環境下をシミュレーションした油中異物環境下における軸受寿命は定格寿命から求めた計算寿命の約 50% になる。
- (2) 高炭素クロム軸受鋼系のボールベアリングに関しては、材料の高合金化・熱処理による炭化物の多量分散により、2 倍以上の寿命向上が図られる。
- (3) テーパーローラベアリングに関しては、同様に材料・熱処理技術の組合せにより、4 倍以上の寿命向上が図られる。

ABSTRACT

Corresponding to the demand for lightweight and compact bearings on the transmission of passenger cars, a bearing life test method was established for simulating conditions under which the actual transmission is lubricated. The test results show that the bearing life is about 50 % of the nominal figure, when bearing are used in those conditions. This test method was used in verifying the followings:

- (1) The ball bearings made with high carbon-chromium bearing steels, when its chemical compositions are replaced with the higher alloyed ones and when it is subjected to heat treatments to further disperse carbide, achieves twice as long life.
- (2) The taper roller bearings, when made with a similar combination of materials and heat treatments, achieves 4 times as long life.

1. ま え が き

近年の自動車トランスミッション (T/M と略す) の小型化・軽量化・多段化等の要求に対し、材料置換による軽量化および歯車材等の高強度化が検討されており、さらにそれに伴い支持軸受 (以下 Brg. と略す) の長寿命化・小型化も強く望まれている。

しかし現在使用されている Brg. に関して、実際の T/M 潤滑環境下における寿命は明確にされておらず、Brg. メーカーから提示されている定格寿命を用いた計算寿命から Brg. サイズが設定されている。

また、Brg. の長寿命化に関しては、1970 年代から鋼の高清浄度化が著しく進歩しており⁽¹⁾、特に内部疲労亀裂の起点となる酸化物系の非金属介在物の低減化に関しては製鋼メーカーによる真空脱ガス処理・炉外精錬を行うことにより鋼中酸素量を 10ppm 以下に低減できるようになり⁽²⁾、Brg. 材料の長寿命化が図られてきている。しかし、実際の T/M においては、油中のゴミ等による摩耗損傷や圧痕起点剥離が発生し寿命に至る現象が起きており、通常の内部起点剥離とは現象が異なっている。

そこで、実機 T/M 潤滑環境下での Brg. 寿命実力を明

* 栃木研究所

確化するために、T/M潤滑環境下をシミュレーションしたテスト手法を検討・確立し、油中異物の影響および長寿命化を図るための材料・熱処理技術の方向性の検討を行った。

2. トランスミッション 潤滑環境下における支持軸受損傷

2.1. 支持軸受損傷メカニズム

実機T/MにおけるBrg. 損傷は、前述したように油中のゴミによる表面損傷を起点とした表面起点型剥離である。Fig. 1 に実機T/Mでの損傷外観、Fig. 2 に清浄潤滑環境下と異物潤滑環境下における損傷モデルを示す。この様に清浄潤滑環境下においては、接触下の最大剪断応力発生深さに存在する非金属介在物等の材料欠陥を起点として剥離する内部起点型剥離に対し、異物潤滑環境下においては、ゴミ等の噛み込みによる圧痕の縁に応力集

中が生じ、その部分からクラックが発生して剥離にいたる表面起点型剥離である。

2.2. 実機トランスミッション潤滑環境下における 支持軸受の長寿命化手法

現在、各Brg. メーカーにおいてこの異物潤滑環境下における、表面起点型剥離に関する対策手法の検討が行われてきており、Table 1 に基本的な考え方を示す。

一般的に、構造的な対策としてはフィルタ／シール構造としBrg. 内へのゴミ侵入を防止し、表面起点型から内部起点型疲労パターンへ変化させて長寿命化を図るものがあり⁽³⁾、材料的な対策としては表面圧痕の縁に発生する応力集中の緩和を図るため、表層の残留オーステナイト量を適正にコントロールする手法が検討されている。

一方、Brg. サイズの設定は(1)式に示す基本定格寿命と市場での使われ方を考慮して設定されている。



Fig. 1 Appearance of Bearing damage

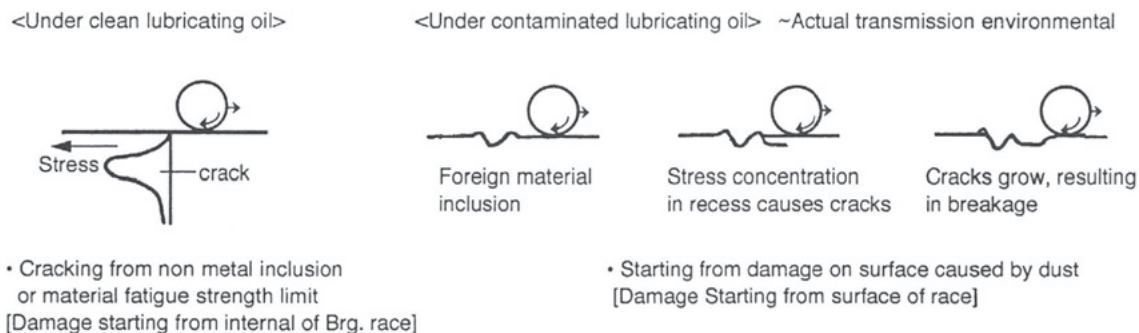


Fig. 2 Bearing damage model

Table 1 Long life improvement on Bearing

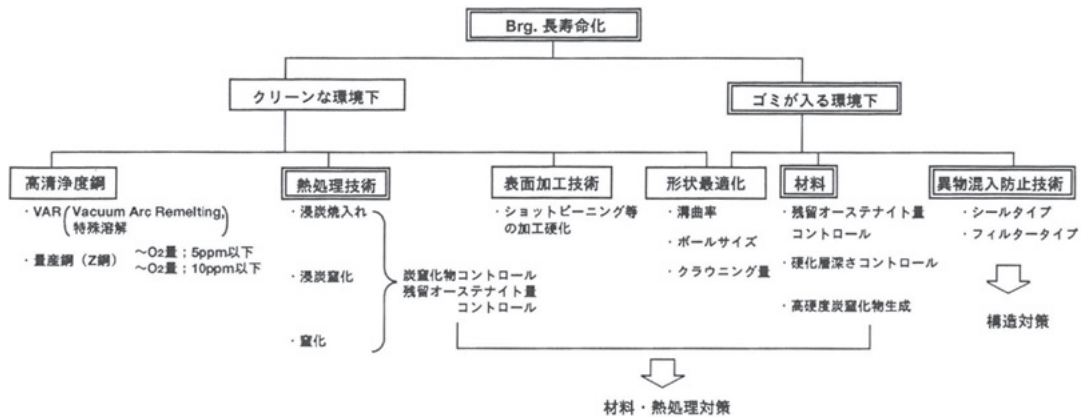


Table 2 Bearing size

	Ball Brg.	Taper roller Brg.
Specific size (DxdxW)		

Table 3 Bearing test condition

- Ball Brg.
176N・m, 3500rpm
(Fr=5155 N, Fa=0 N)
- Taper roller Brg.
216N・m, 2844rpm
(Fr=5508 N, Fa=3910 N)

$$L_{10h} = (C/P)^P 10^6 / 60N \quad (1)$$

L_{10h} : 基本定格寿命 (Hr, 信頼度 90%)

C : 基本定格荷重

P : 動等価荷重

N : 回転数 (rpm)

P : 寿命係数

$$\left(\begin{array}{ll} \text{玉軸受} & : p = 3 \\ \text{ころ軸受} & : p = 10/3 \end{array} \right)$$

ただし、この基本定格寿命は清浄潤滑環境下での通常の軸受材料を使用した Brg. 寿命保証値であり、実機 T/M 内のゴミの影響や材料的な改善を実施した場合、この基本定格寿命にある寿命係数を考慮してやる必要があ

る。よって本検討では、各長寿命化手法において、基本定格寿命に対してどの程度の寿命係数を考慮してやれば良いのかを明確にする。

3. 軸受寿命評価方法と供試軸受

3.1. 試験方法

実機 T/M 潤滑環境下をシミュレーションするために Fig. 3 に示すような、トルク循環式耐久装置を製作した。二軸構造で、両端を Brg. で支持し、その Brg. 間のヘリカルギヤの反力により、Brg. にラジアル荷重とスラスト荷重を与える装置である。オイルの攪拌は Brg. 横のギヤに

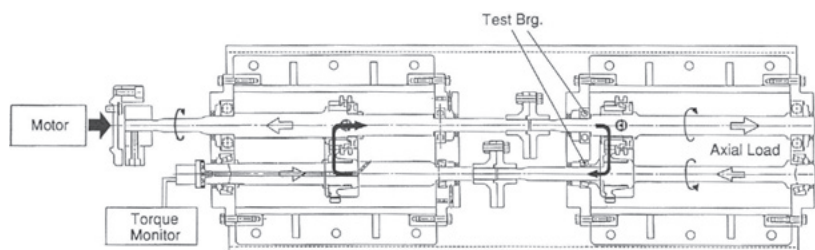


Fig. 3 Appearance of Bearing tester

より行った。

供試 Brg. サイズを Table 2 に示す。テストは Table 3 に示す荷重条件で行い、ボール Brg. はラジアル荷重 (Fr) のみ、テーパーローラ Brg. はラジアル荷重とアキシシャル荷重 (Fa) の入力を行った。

上記テスト方法により、Brg. 取付け部におけるシャフトのたわみ角、荷重の負荷方法、オイルの潤滑条件等、実機 T/M 潤滑環境下をシミュレーション可能とした。

3.2. 基本定格寿命の算出

上記試験方法および供試 Brg. サイズより、基本定格寿命 (L_{10h} 寿命) を算出した。

$$\text{ボール Brg. ; } L_{10h} = (C/P)^3 10^6 / 60N = 63.9\text{Hr}$$

テーパーローラ Brg.

$$; L_{10h} = (C/P)^{10/3} 60N = 110.1\text{Hr}$$

3.3. トランスミッションオイル中のゴミ量

走行距離 8000km~10 万 km の実車 T/M からオイルを回収しゴミ量を調査した。その結果、ゴミ量は 0.15~0.48 g/l であり、走行距離による相関性は認められなかった。ゴミの種類としては鉄粉がほとんどであり微量の Cu, Zn が検出された。Table 4 にゴミ粒径の比率を示す。ゴミの大きさは、ほとんどが 50 μm 以下であり、さらにその大半が 15 μm 以下である。

3.4. 供試軸受の成分組成および熱処理品質

(1)ボール Brg.

今回、寿命試験に使用した供試ボール Brg. の成分組成

Table 4 Amount of dust and size of dustin contaminated oil

size(μm)	5~15	15~25	25~50	50~
ratio (wt%)	55	24	20	1

および熱処理品質を Table 5 に示す。ベースは一般の標準 Brg. であり、材料としては高炭素クロム鋼を使用して、焼入・焼戻しを施したものである。ボール Brg. A, B および C は、ベースに対して長寿命化を図ったものである。A はインナとアウトの材料を高シリコン・高マンガン化した SUJ3 相当材を使用し、残留オーステナイトを若干多めにコントロールしたものである。B はインナのみ浸炭窒化を施し表層の炭化物を若干大きめに多量分散させている。C はインナ、アウトおよびボールの全てに対して、材料の高合金化と浸炭窒化を施し、やや大きめで高硬度な炭化物を析出させ残留オーステナイトも高めにコントロールしている。

(2)テーパーローラ Brg.

Table 6 に供試テーパーローラ Brg. の成分組成および熱処理品質を示す。標準 Brg. としては浸炭用鋼 (SCR420) 系と高炭素クロム鋼 (SUJ2) 系の 2 種類が市場流通しており、それぞれをベース 1, ベース 2 とした。D, E, F および G はこれら標準 Brg. に対して、それぞれ長寿命化を図った Brg. である。D と E は浸炭用鋼系で材料成分の高炭素化を図り、D は長時間浸炭により硬化層を深めにコントロールしたもの、E は浸炭窒化により窒素の固溶強化と残留オーステナイトの多量コントロー

Table 5 Chemical composition and heat treatment quality of tested Ball bearings

Mark	Part	Symbol	Chemical Composition (wt.%)										Heat Treatment	Hardness			Carbide Condition	Retained Austenite
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	O		Surface HvV	Internal HvV	Depth (HvV650)		
Base	IN	SUJ2	.95	.24	.38	.014	.004	.07	.07	1.33	.02	9PPM	H. T.	740	740	—	max. 1μm	9.4%
	OUT													750	750	—		
	BALL													770	770	—		
A	IN	SUJ3	.99	.62	1.09	.016	.008	.06	.09	1.13	.07	9PPM	H.T. High Temper	770	740	—	max. 1μm	17.8%
	OUT																	
	BALL		Same as STD. (SUJ2)															
B	IN												Carburizing-Nitriding	780	730	—	max. 2.5μm	25.5%
	OUT																	
	BALL	Same as STD. (SUJ2)																
C	IN	High-Si,Cr,Mo	.99	.94	.29	.007	.003	.07	.08	2.96	.38	14PPM	Carburizing-Nitriding High-Temper	795	765	—	max. 4.0μm	26.7%
	OUT																	
	BALL																	

Table 6 Chemical composition and heat treatment quality of tested taper roller bearings

Marks	Parts	Steel	Chemical Composition (wt.%)										Heat Treatment	Hardness			Carbide Condition	Retained Austenite
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	O		Surface HvV	Internal HvV	Depth (HvV650)		
Base 1	IN	SCR 420	.20	.21	.79	.018	.029	.11	.07	1.00	.02	-	Carburizing	730	490	0.60	-	23%
	OUT													710	520	0.50		
	ROLLER													750	430	0.45		
Base 2	IN	SUJ2	.95	.23	.38	.015	.006	.09	.06	1.37	.01	8PPM	H.T.	730	730	-	max. 1 μ m	9.4%
	OUT													745	745	-		
	ROLLER													760	760	-		
D	IN	SCR 440	.40	.19	.78	.008	.009	.04	.05	1.14	.02	-	Long-Carburizing	715	580	0.75	-	26.6%
	OUT													740	590	0.95		
	ROLLER													755	580	1.20		
E	IN	SCR 430	.29	.25	.79	.016	.007	.08	.06	1.12	.02	-	Carburizing-Nitriding	730	525	0.78	-	26.0%
	OUT													750	520	0.75		
	ROLLER													790	470	1.03		
F	IN	SUJ2	1.03	.25	.34	.011	.004	.05	.05	1.47	.02	8PPM	Carburizing-Nitriding	800	685	-	max. 2.5 μ m	25.5%
	OUT												H.T.	710	710	-		
	ROLLER												Carburizing-Nitriding	775	700	-		
G	IN	SNCM 220 Modify	0.20	0.22	1.30	.009	.019	.24	.30	.59	.18	-	Carburizing 2-Quenching	750	490	0.75	max. 1 μ m	26.9%
	OUT													755	490	0.75		
	ROLLER													775	425	1.00		

を図ったものである。Fはインナとローラのみ高炭素クロム鋼に浸炭窒化を施し、炭化物の多量分散と残留オーステナイトの多量コントロールを図っている。Gは浸炭用鋼系材料の高合金化により材料疲労強度の強化を図り、さらに2回焼入れを行い炭化物の微細分散析出と残留オーステナイト量のコントロールを図っている。

4. 試験結果

4.1. 軸受寿命におよぼす油中異物の影響

ボール Brg. のベースを使用し、新油下と油中異物環境下における Brg. 寿命の比較試験を行った。油中異物環境は Table 4 に示す実機回収油を用いた。Fig. 4 に試験結果を示す。

新油下における L_{10h} 寿命は、ほぼ計算寿命 L_{10h} と同等レベルにあるのに対し、油中異物環境における L_{10h} 寿命は計算寿命 L_{10h} の約 50% レベルにある。損傷部位は、新油および油中異物環境下ともインナからの剥離損傷であった。

この様に実機 T/M 潤滑環境下をシミュレーションした場合、通常の Brg. 定格寿命に対し、油中異物の影響と

しては 50% 寿命低下を考慮する必要がある。計算寿命を同等にするためには、清浄潤滑環境下を長く維持し、ゴミが Brg. 内に侵入しないようなフィルタ／シール構造にする必要がある。

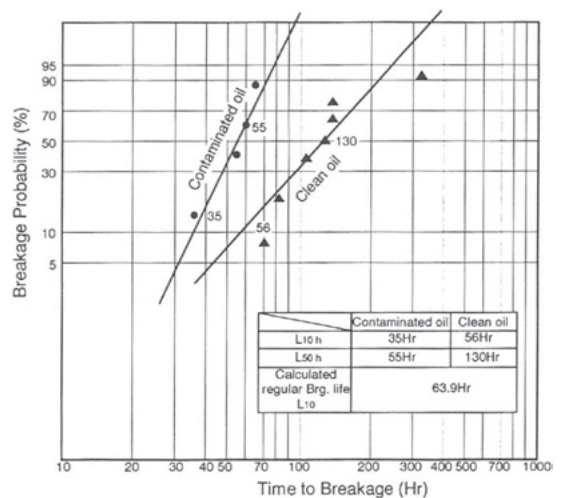


Fig. 4 Base Ball Brg. life under clean oil condition and contaminated oil condition

4.2. ボール Brg. 寿命におよぼす材料・熱処理の影響

油中異物環境下において、Table 5 に示す各長寿命化を図ったボール Brg. A, B および C についてベースと比較試験を行った、結果を Fig. 5～7 に示す。

ボール Brg. A は、ベースに対して約 2 倍寿命向上が図られており、計算寿命 L_{10h} とほぼ同等レベルである。剥離損傷部位はインナとボールとほぼ半数程度でインナの寿命とボールの寿命がバランスされた状態であると考えられる。

ボール Brg. B は、ベースに対して L_{50h} 寿命で約 1.5 倍、 L_{10h} 寿命では約 1.1 倍とさほど長寿命化が図られず、バラツキも大きいという結果になった。これは剥離損傷部位がベースはインナであったのに対し、全てボールから剥離しており、インナの高強度化によりボールへの攻撃性が強くなったためと思われる。

ボール Brg. C は、ベースに対して L_{50h} 寿命で約 2.4 倍と大幅な長寿命化が図られているが、 L_{10h} 寿命では約 1.4 倍とバラツキが大きいという結果となった。ボール Brg. C はボールにも長寿命化が図られているため剥離損傷部位は全てインナからであった。またバラツキが大きかった原因としては、炭化物粒径が max. $4.0\mu\text{m}$ とやや大きめであり、かつ高硬度な炭化物であるため、クラック起点になりやすかったと考える。

以上、ボール Brg. の結果について整理すると

- ① インナ寿命をボール寿命と同等レベルまで長寿命化させることにより、ベース Brg. に対し約 2 倍寿命向上が

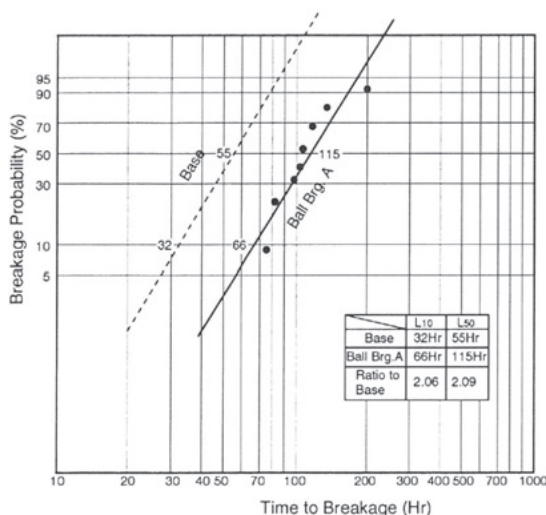


Fig. 5 Comparison between Ball Brg. A life and Base Brg life

図られ、油中異物環境下における寿命が実機 T/M 潤滑環境下では計算寿命 L_{10h} と同等レベルになる。

- ② さらにインナの長寿命化手法としては、残留オーステナイトの多量化が効果的であるが、炭化物の大型化・高硬度化はボール強度とのバランスがあり過度に長寿命化を図ると寿命バラツキの原因となる。
- ③ また、インナと同様にボールの長寿命化を図ることによりさらに効果があり、材料の最適合金設計と熱処理による残留オーステナイトコントロールと炭化物の微細化分散により、今後更に 2 倍以上の長寿命化の可能性がある。

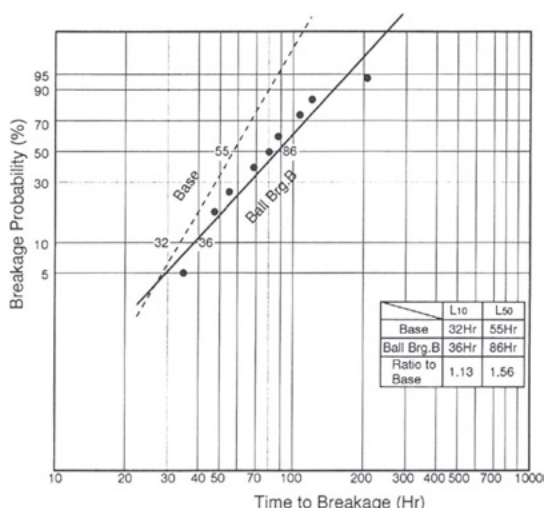


Fig. 6 Comparison between Ball Brg. B life and Base Brg life

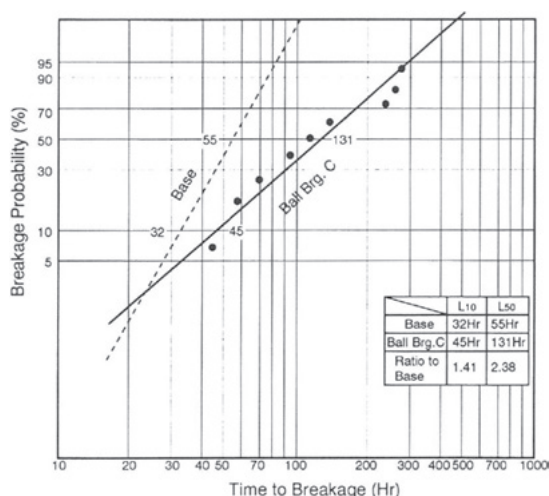


Fig. 7 Comparison between Ball Brg. C life and Base Brg life

4.3. テーパーローラ Brg. 寿命におよぼす

材料・熱処理の影響

テーパーローラ Brg. の標準 Brg. として、市場流通している浸炭用鋼系のベース 1、高炭素クロム鋼系のベース 2 について試験した結果を Fig. 8 および 9 に示す。ベース 1 および 2 とも L_{50h} 寿命は同等であり、 L_{10h} 寿命もベース 1 の方が若干バラツキが大きいため低いほぼ同等レベルである。テーパーローラ Brg. の油中異物下における寿命は、計算寿命 L_{10h} に対してはボール Brg. と同様、約 50% レベルである。損傷部位はインナからの剥離損傷である。

Table 6 に示す各長寿命化を図ったテーパーローラ

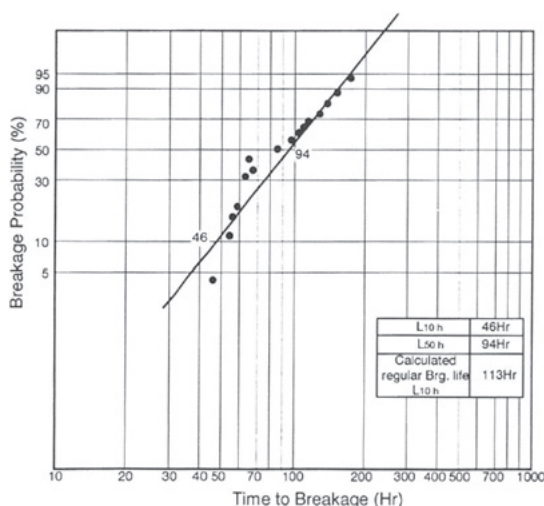


Fig. 8 Taper roller Brg. Base1 Brg. life under contaminated oil condition

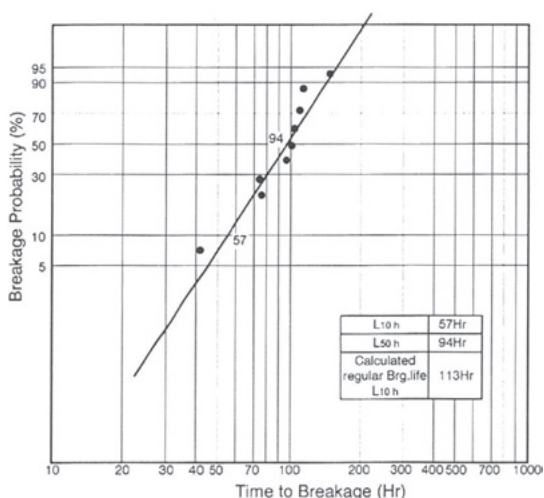


Fig. 9 Taper roller Brg. Base2 Brg. life under contaminated oil condition

Brg. D, E, F および G についてベース 1 および 2 と比較試験した結果を Fig. 10~13 に示す。

テーパーローラ Brg. D はベース 1 に対して、1.3 倍程度ではあるが長寿命化が図られている。

テーパーローラ Brg. E はベース 1 に対して、 L_{10h} 寿命にて約 2 倍の寿命向上が図られている。

テーパーローラ Brg. F はベース 2 に対して、 L_{50h} 寿命、 L_{10h} 寿命とも約 3 倍以上の長寿命化が図られている。

テーパーローラ Brg. G は最も長寿命化が図られており、ベース 1 に対して、 L_{10h} 寿命にて約 4 倍以上の長寿命化が図られている。

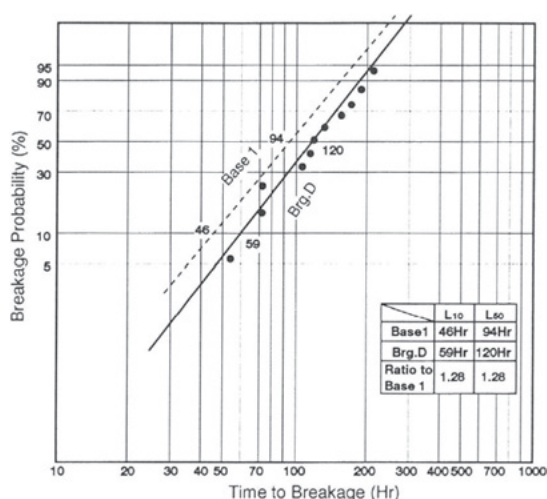


Fig. 10 Comparison between Taper roller Brg. D life and Base life

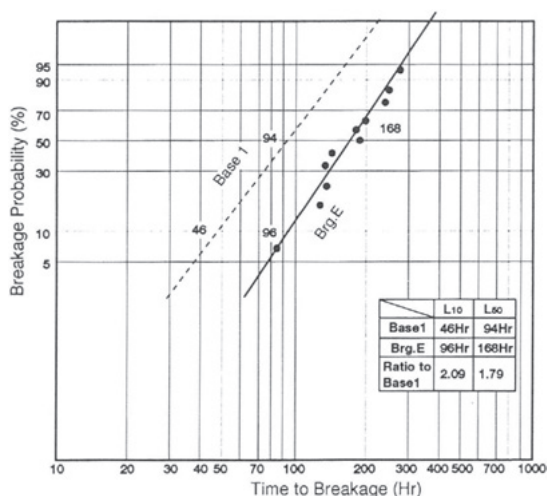


Fig. 11 Comparison between Taper roller Brg. E life and Base1 life

以上、テーパローラ Brg. の結果について整理すると

- ① ベース Brg. として市場流通しているテーパローラ Brg. として浸炭用鋼 (SCR420) 系と高炭素クロム鋼 (SUJ2) 系があるが、実機 T/M 潤滑環境下では、ほぼ同等寿命であり、その実力はボール Brg. と同様に計算寿命 L_{10h} に対して約 50% レベルである。
- ② 浸炭用鋼系の高寿命化処理としては、硬化層を深くする手法ではさほど寿命向上は図られず、浸炭窒化による窒素の固溶強化と残留オーステナイトの多量コントロールの組合せにより約 2 倍以上の長寿命化が可能である。

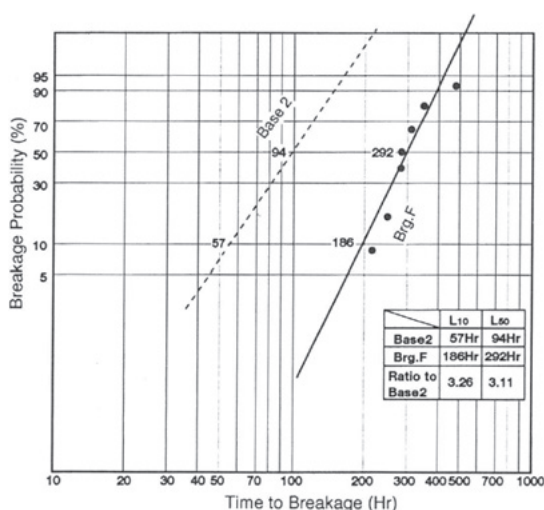


Fig. 12 Comparison between Taper roller Brg. F life and Base2 life

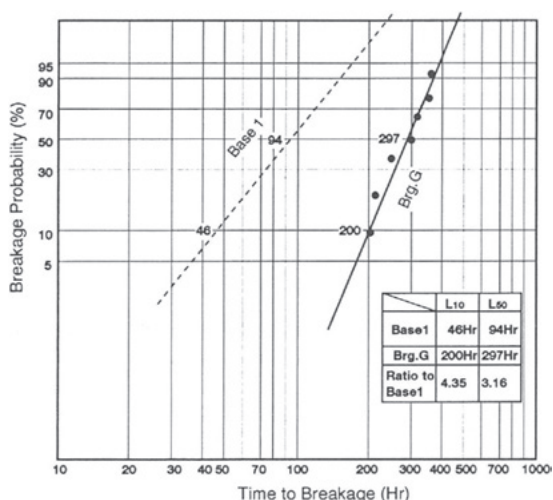


Fig. 13 Comparison between Taper roller Brg. G life and Base1 life

- ③ さらに浸炭用鋼系の高寿命化としては、材料成分による高強度化と浸炭後の 2 回焼入れによる微細炭化物の析出により、約 4 倍以上の長寿命化が可能である。
- ④ 高炭素クロム鋼系の長寿命化としては、浸炭窒化による炭化物の多量分散と残留オーステナイトの多量コントロールにより、約 3 倍以上の長寿命化が可能である。またこれは、ボール Brg. と同様、インナのみ長寿命化では効果がないことが推測され、ローラも含めた長寿命化により効果が表れたと考えられる。

5. トランスミッション用支持軸受の小型化の可能性

Brg. 寿命の長寿命化が図られた場合の効果予測として、Brg. の小型化を検討した。

現行の T/M に使用されているボール Brg. とテーパローラ Brg. について、ボール Brg. 寿命が 2 倍、テーパローラ Brg. 寿命が 4 倍に長寿命化された場合、Brg. メーカー所有の規格サイズの中で最小 Brg. を検討すると Fig. 14 に示すように小型化が可能となる。

ボール Brg. は、外径で - 6 mm、幅で - 2 mm の小型化、テーパローラ Brg. は外径で - 7 mm、幅で - 4.25 mm の小型化が可能となる。

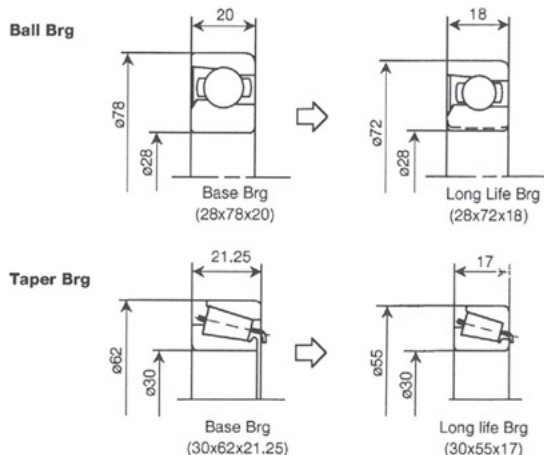


Fig. 14 Appearance of compact long life Bearings

6. まとめ

T/M用 Brg. の小型軽量化を達成するために、実機 T/M潤滑環境下をシミュレーションしたトルク循環式耐久装置を用い、ボール Brg. とテーパーローラ Brg. に関して Brg. 寿命におよぼす油中異物と材料・熱処理の影響を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 実機 T/M の油中異物の影響としては、ボール Brg., テーパーローラ Brg. とともに定格寿命から求めた計算寿命 L_{10h} に対して、約 50% の寿命に低下する。清浄な新油下においてはほぼ計算寿命 L_{10h} と同等である。
- (2) 一般的に高炭素クロム鋼 (SUJ2) 系が使用されるボール Brg. は、通常最弱部はインナでありインナの長寿命化が効果ある。ただし、インナの長寿命化を過度に行うとボールへ破損部位が移行し、寿命バラツキが大きくなる傾向にある。

長寿命化手法としては

- ① 材料の高合金化による残留オーステナイトの多量コントロール
- ② 浸炭窒化等の熱処理による炭化物の多量分散・高硬度化
- ③ ①と②手法の組合せ

がある。インナのみの強化としては①の手法がボール寿命とのバランスが図られ、約 2 倍の寿命向上が図られる。②、③については、インナへの強化と同様にボールに対しても行う必要があり、その結果、③の手法については 2 倍以上の寿命向上が図れる可能性がある。

- (3) テーパーローラ Brg. に関しては、標準 Brg. として浸炭鋼系と高炭素クロム鋼系の 2 種類が市場流通して

いるが、寿命としてはほぼ同等である。

長寿命化手法としては、ボール Brg. と同様、インナとローラの長寿命化を行う必要があり、

- ① 浸炭用鋼系では浸炭窒化により L_{10h} 寿命を約 2 倍に、さらには成分組成による高強度化と炭化物の微細析出により約 4 倍以上の寿命向上が図れる。
- ② 高炭素クロム鋼系では浸炭窒化により、約 3 倍以上の寿命向上が図れる。
- (4) 以上の材料・熱処理による長寿命化効果として、Brg. の小型化が可能になる。具体的には、ボール Brg. は約 2 倍、テーパーローラ Brg. は約 4 倍寿命向上が図られることになり、ボール Brg. は外径で - 6 mm, 幅で - 2 mm の小型化、テーパーローラ Brg. は外径で - 7 mm, 幅で - 4.25 mm の小型化を可能とし、今後 T/M の小型軽量化に大いに寄与することが期待される。

謝 辞

終わりに、本研究において御協力を頂いた NTN (株)、日本精工(株)、光洋精工(株)、(株)不二越、および THE TIMKEN COMPANY をはじめ、所内外の関係の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 対馬全之、日本金属学会会報、23, 1, (1984) 50
- (2) 小沢ら、電気製鋼、55, 2, (1984) 93
- (3) 田中ら、SAE Paper, 830520, (1983)

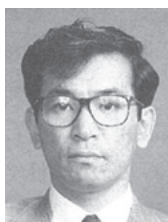
■ 著 者 ■



水 野 孝 樹



天 野 政 樹



大 森 生 雄



松 原 敏 彦



中 田 雅 之



服 部 弘 基