

異物混入潤滑下の軸受寿命に及ぼす油膜厚さの影響

第2報：油膜厚さと圧こん形成の関係

Effect of Lubricant Film Thickness on Bearing Life under Contaminated Lubrication Part 2: Relationship between Film Thickness and Dent Formation

佐田 隆 T. SADA 三上 剛 T. MIKAMI

To date, lubricant film condition represented by film parameter has been almost disregarded in studies of debris-induced failure of rolling bearings. However, as described in Part 1, film condition is a principal factor in not only bearing life but also failure modes under severe contaminated lubrication. In the life tests described in Part 1, many dents were formed on the raceways and bearing life was reduced with increasing lubricant film thickness. These results indicate that the degree of denting affects bearing life, and the film condition is closely related to dent formation. In this paper, the relationship between film condition and dent formation is investigated, and the mechanism of difference in degree of denting with change in film thickness is discussed.

Key Words: rolling bearing, fatigue life, contamination, lubricant film thickness, debris dent

1. はじめに

第1報では、固形異物を含む潤滑油中で実施した玉軸受の寿命試験結果から、転動体と軌道間の油膜形成状態が異物混入潤滑下で使用される軸受の寿命や破損形態を支配する重要な因子であることを明らかにした¹⁾。

これまでに、直接観察やシミュレーションによってEHL接触部近傍の異物挙動を把握する研究が行われており、異物の性質、濃度や接触面の相対速度が圧こん形成度合いに及ぼす影響についていくつかの知見が得られている^{2)~8)}。しかしながら、これらの研究では、接触部の油膜形成状態が圧こんの形成に及ぼす影響については検討されていない。

本報では、第1報で述べた寿命試験において試験軸受内輪軌道面に形成された圧こんの面積率を測定することによって、油膜厚さと圧こん形成の関係を明らかにした結果を報告する。また、寿命試験中の圧こん面積率の変化を測定することによって、圧こんの形成過程を把握した結果についても示す。

2. 第1報の寿命試験結果

第1報で述べた寿命試験の結果を表1にまとめている。深溝玉軸受6206を試験軸受として2種類の試験を実施した。一つは同一種類の潤滑油中で荷重を変化させて実施した寿命試験(系列A)、もう一つは荷重と潤滑油粘度を組み合わせることによって荷重にかかわらず油膜厚さが一定となる条件で実施した寿命試験である(系列B)。いずれの試験も、異物として硬さ800HV、粒径100~150 μm の高速度工具鋼粉末を混入した油浴中で、内輪回転にて運転した。

表1 第1報の寿命試験結果¹⁾
Life test results discussed in Part 1

試験番号	荷重, N	潤滑油	中央油膜厚さ $h_c, \mu\text{m}$	L_{10} 寿命, h
A-1	686	VG68	0.227	386.85
A-2	3 430		0.153	49.10
A-3	6 860		0.107	7.97
B-2	3 430	VG220	0.239	14.24
B-3	6 860	VG320	0.219	4.64

図1に、寿命試験で得られた荷重と L_{10} 寿命の関係を示している。同じ粘度の潤滑油を用いて荷重を変化させ

た系列 A の試験では、荷重が低いほど荷重に対する寿命の変化が小さくなる傾向が認められたが、油膜厚さを一定にした系列 B では、荷重と寿命の関係が一定になった。また、荷重が同じ場合に、油膜厚さの大きい系列 B の方が系列 A より短寿命となった。

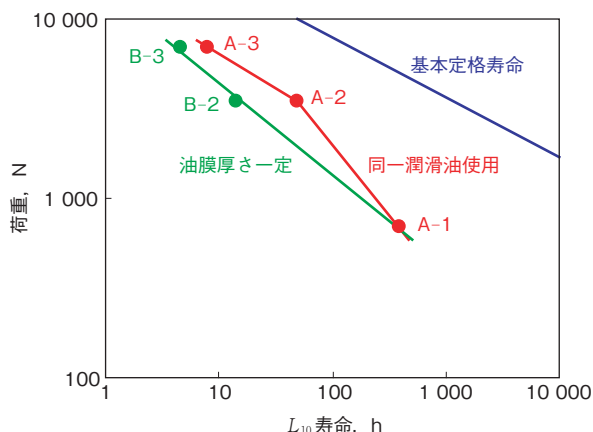


図1 異物混入油中における荷重と寿命の関係¹⁾

Relationship between load and bearing life in contaminated oil

なお、寿命試験後の内輪の観察結果から、基本定格寿命⁹⁾に対する寿命低下が著しい油膜厚さの大きい条件ほど、軌道面に数多くの圧こんが形成される傾向が認められた。このことは、圧こんの形成度合いが寿命に影響していること、ならびに油膜形成状態と圧こん形成度合いとの間に相関があることを示唆している。以下では、油膜形成の状態が圧こん形成に及ぼす影響を詳細に検討する。

3. 圧こん面積率の測定

まず、異物混入潤滑下における油膜形成状態と圧こん形成の関係を把握するため、第1報の寿命試験に用いた玉軸受内輪軌道面の圧こん面積率を測定した。

圧こん面積率は、光学顕微鏡によって観察した内輪軌道中央部の0.7mm×0.9mmの領域を対象として画像処理によって求めた。測定結果を表2に示している。荷重6860Nで運転されたA-3とB-3を比較すると、同じ荷重であっても圧こん面積率が明らかに異なっている。同様に、3430Nの荷重で運転されたA-2とB-2についても面積率は異なっている。一方、油膜厚さがほぼ同等であるA-1、B-2およびB-3を比べると、荷重や運転時間が大きく異なっているにもかかわらず面積率に明確な差が認められない。これらの結果から、圧こん形成の度合いは荷重にはほとんど無関係で

あり、油膜形成状態に強く依存していることがわかる。

図2に中央油膜厚さ h_c と圧こん面積率の関係を示している。図より、圧こん面積率が油膜厚さに比例する傾向が認められる。

表2 寿命試験後の圧こん面積率
Dent area density after life tests

試験番号	荷重, N	h_c , μm	運転時間, h	圧こん面積率, %
A-1	686	0.227	395.8	38.18
A-2	3430	0.153	48.9	21.08
A-3	6860	0.107	8.1	16.52
B-2	3430	0.239	15.4	41.41
B-3	6860	0.219	5.2	43.02

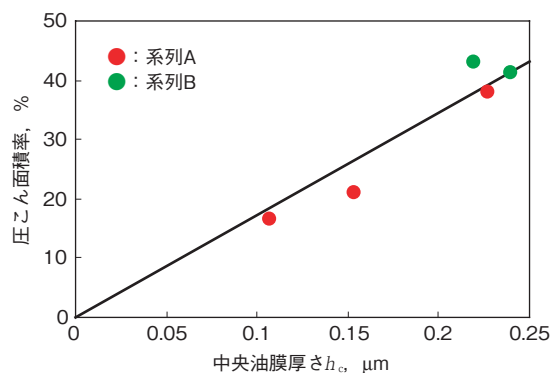


図2 油膜厚さと圧こん面積率の関係

Relationship between lubricant film thickness and dent area densities

Aiは潤滑油中の異物がころ軸受の寿命に及ぼす影響を予測するために、単一サイズの異物粒子によって単位面積内に形成される圧こんの数 ϑ を式(1)で仮定している¹⁰⁾。式中の h_m は油膜厚さ、 n_d は単位体積の潤滑油に含まれる異物の個数を表している。

$$\vartheta = h_m n_d \tag{1}$$

Aiは単位体積あたりの異物の個数 n_d (異物濃度に相当)と圧こん数 ϑ の関係の根拠として、潤滑油中の異物濃度と運転時間を変化させて接触面に形成される圧こんの数を測定したVilleらの実験結果⁶⁾を引用している。一方、式(1)に含まれているもう一つの関係、すなわち油膜厚さ h_m と圧こん数 ϑ の関係については、根拠となる実験結果が示されていない。

図2に示すように、第1報の寿命試験において軌道に形成された圧こんの面積率は油膜厚さにほぼ比例している。圧こん面積率と圧こん数は比例関係にあると考えられるため、図2の結果によって、油膜厚さと圧こん数に

関する A_i の仮説の妥当性が確認できた。

4. 寿命試験中の圧こん面積率の変化

次に、寿命試験中の圧こん形成過程を把握するために、第1報の同一潤滑油を用いた寿命試験（系列 A）と同一の条件で中断試験を実施し、運転時間の経過に伴う内輪軌道面の圧こん面積率の変化を測定した。

測定結果を図3に示している。図には A-1、A-2 および A-3 の各試験条件における面積率の変化をプロットしている。全ての試験条件で、1.5 時間以降は面積率がほとんど増加していないことから、本研究の寿命試験においては、軸受寿命に影響を及ぼす圧こんが運転開始から 1.5 時間までの間に形成されていることがわかる。

A-1 の条件において、運転開始から 1.5 時間経過した時点で試験軸受周辺から採取した異物の例を図4に示している。平坦な形に圧延された 200 μm 程度の異物も認められるが、大半の異物は細かく粉砕されている。

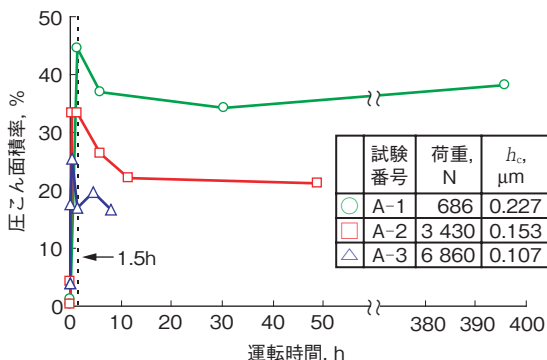


図3 寿命試験中の圧こん面積率の変化
Change in dents area density during life tests

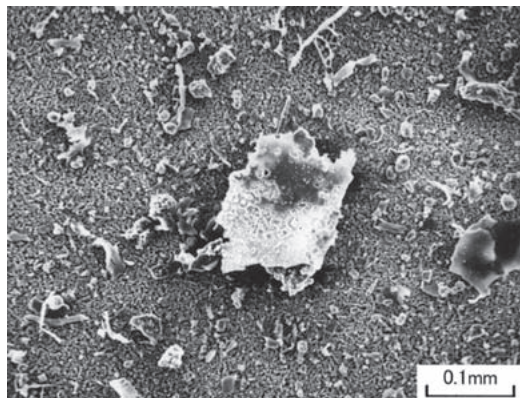


図4 1.5h 運転後の異物粒子 (A-1)
Debris particles after running for 1.5 h (A-1)

このように、1.5 時間経過した時点で試験軸受周辺に存在する異物は変形しているため新たな圧こんを形成する能力がなく、これ以降は圧こんがほとんど増加しない。

なお、図3において、A-1 と A-2 の条件で圧こん面積率が 1.5 時間以降に一旦減少しているが、これは運転開始後 1.5 時間までの間に形成された個々の圧こんが、その後の転がり接触の繰返しに伴って外観上小さくなること¹¹⁾に起因している。

5. 寿命試験中の異物濃度の変化

第1報で示した系列 A の寿命試験においては、荷重によって軸受温度が異なるため、試験機内の潤滑油粘度が変化する。この粘度変化が軸受近傍の異物挙動に及ぼす影響を確認するため、A-1 および A-3 と同じ条件で運転中の軸受近傍から潤滑油を採取し、異物の濃度を測定した。

異物濃度の測定は運転開始から 1.5 時間までの期間を対象として、所定の時間ごとに運転を打ち切り、図5に示す方法によって試験軸受近傍から潤滑油を吸引採取して実施した。採取した潤滑油を溶剤で希釈した後、フィルタでろ過し、異物を分離した。そして、採取した潤滑油の質量 m_o とその中に含まれている異物の質量 m_d から、異物濃度 c_d を次式により算出した。

$$c_d = (m_d / m_o) \times 100 (\%) \quad (2)$$

測定した異物濃度の変化を図6に示している。それぞれの試験条件、運転時間において各3回の測定を行った。試験条件にかかわらず運転初期には平均濃度（試験機に投入した異物の質量と潤滑油の質量から算出される濃度）に近い濃度で異物が軸受周辺に存在しているが、その後は徐々に沈殿し、1.5 時間経過時点では平均濃度の 1/3 から 1/5 に減少している。

軸受温度が大きく異なる二つの条件にて測定を行ったが、運転中の異物濃度の変化に明確な差は認められない。すなわち、軸受温度の相違による潤滑油粘度の変化は、試験軸受近傍の異物挙動にほとんど影響を及ぼしていない。この結果から、軸受周辺に存在する異物の量が同等であっても、軸受温度によって異なる油膜厚さに依存して圧こんの形成度合いが変化することが確認できた。

なお、図4に示すように接触部にかみ込まれた異物は薄片状に変形あるいは微細に粉砕され、圧こんを形成する能力を失う。そのため、異物の沈殿が生じない試験機

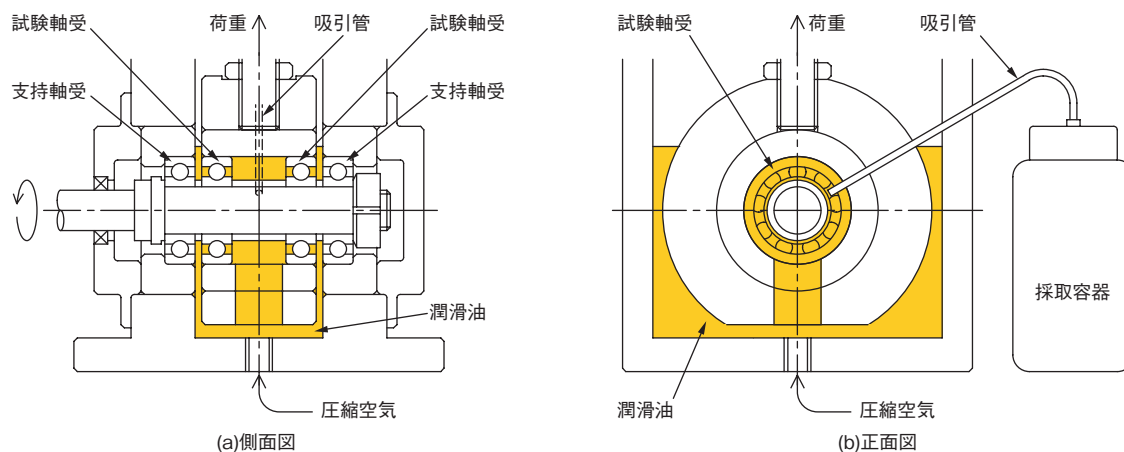


図5 潤滑油採取方法
Means of oil extraction

を用いて第1報と同様の寿命試験を実施した場合でも、圧こんの形成に有効な異物量は運転初期に減少するため、同様の結果になることが予想される。実際、潤滑油の封入量が少なく異物の沈殿がほとんど起こらない構造の試験機を用いて行われた Tanaka らの寿命試験の結果¹²⁾が、第1報で述べた系列 A の結果と同じ傾向であることから、異物の沈殿が生じない環境においても油膜厚さが軸受寿命に対して第1報の寿命試験と同様の影響を及ぼしていることがわかる。

倍である。そのため A-1 では、一定時間あたりに内輪と玉の接触部のある領域を通過する潤滑油の量が A-3 のほぼ2倍になる。一方、図6に示したように双方の条件で試験軸受周辺の異物濃度に差がないことから、A-1 の条件では A-3 の約2倍の異物が潤滑油とともに接触部に引き込まれた結果、およそ2倍の圧こんが軌道面に形成されたものと考えられる。

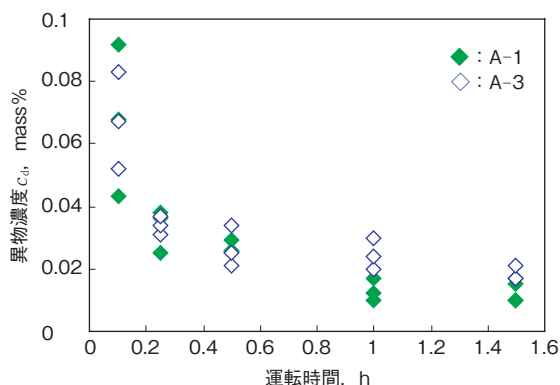


図6 試験軸受近傍の異物濃度の変化
Changes in debris concentration near test bearings

6. 考察

圧こん面積率および異物濃度の測定結果から、軸受周辺に存在する異物の量が同等であっても、油膜形成状態によって圧こんの度合いが変化することが確認できた。この原因として、油膜厚さが大きい場合には、接触部を通過する潤滑油の量が相対的に多いため、より多くの異物が接触領域に引き込まれることが推定される。

表2に示したように、A-1の油膜厚さはA-3の約2

7. おわりに

- 1) 異物混入油中の寿命試験過程で軌道面に形成された圧こんの面積率を測定した結果、圧こん形成の度合いは油膜厚さに強く依存しており、荷重にはほとんど無関係であることがわかった。
- 2) 軌道面に形成された圧こんの面積率と油膜厚さの関係を整理した結果、圧こん面積率が油膜厚さに比例して変化する傾向が認められた。この結果から、Aiが仮定した油膜厚さと圧こん数の関係式が妥当であることが確認された。
- 3) 運転開始後1.5時間経過した時点で、大半の異物は薄片状に変形あるいは微細に粉砕されているため、それ以降は新たな圧こんがほとんど形成されない。このことから、第1報で示した寿命試験のように運転開始時に異物が潤滑油に混入している環境においては、運転初期に形成される圧こんがその後の軸受寿命を支配していることがわかる。

参考文献

- 1) 佐田 隆・三上 剛：Koyo Engineering Journal, no. 167 (2005) 19.
- 2) G. T. Y. Wan & H. A. Spikes：Tribology Transactions, vol. 31, no. 1(1988)12.
- 3) R. S. Dwyer-Joyce, J. C. Hamer, R. S. Sayles & E. Ioannides：Proceedings of the 18th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1991(1992)57.
- 4) R. S. Dwyer-Joyce & J. Heymer：Proceedings of the 22nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1995(1996)135.
- 5) G. K. Nikas, R. S. Sayles & E. Ioannides：Journal of Engineering Tribology, vol. 212, no. J5(1998)333.
- 6) F. Ville & D. Nélias：Tribology Transactions, vol. 42, no. 1(1999) 231.
- 7) G. K. Nikas：Journal of Tribology, vol. 123, no. 1 (2001)83.
- 8) G. K. Nikas：Journal of Tribology, vol. 124, no. 3 (2002)461.
- 9) ISO 281(1990).
- 10) X. Ai：Journal of Engineering Tribology, vol. 215, no. J6(2001)563.
- 11) 佐田 隆・三上 剛・原田昌寛：トライボロジー会議予稿集(東京 2003-5)223.
- 12) H. Tanaka & N. Tsushima：Bearing Steel Technology, ASTM STP 1419, J. M. Beswick, Ed., ASTM(2002)213.

筆者



佐田 隆*
T. SADA



三上 剛*
T. MIKAMI

* 研究開発センター 材料技術研究部