

# 転がり軸受の潤滑について

## - 光洋精工創立80周年記念特別講演\*\*より -



ボ・ヤコブソン  
Prof. Bo Jacobson\*

### Tribology of Ball Bearings

Special presentation on the tribology of rolling bearings was carried out at Koyo Seiko R&D center for celebrating the 80th anniversary of Koyo Seiko Co., LTD.

The technology for the measurement of EHL oil film thickness, the numerical simulation of point contact, the effects of surface roughness, the mechanism of running-in, the effects of contamination and grease lubrication were expressed in detail.

**Key Words:** rolling bearing, lubrication, EHL, roughness, oil film, contact pressure, grease

## 1. はじめに

今日、私は玉軸受の潤滑について講演したい。転がり軸受の潤滑とその方法、我々はどのような種類の油膜厚さの知見を得ているか、我々はどのようにしてそれらを計算してきたかをお話しし、そして、どのようにそれらを測定できるのかについても触れたい。

## 2. EHL油膜厚さの測定

1965年から、我々は光干渉法を用いて油膜厚さの測定を実施していた。そして、Koyoの研究室でも同じ装置を持っていることを知った。サファイアガラスと鋼球を接触させた場合、油膜はその厚さが屈折率と光学的油膜厚さの積が赤い光の波長に一致すると赤く見え、青い光の波長に一致すると青く見える。このことから、油膜厚さのカラーマップが作成できる。最小油膜厚さは $0.2\ \mu\text{m}$ 、中央油膜厚さは $0.4\ \mu\text{m}$ の一例を紹介する。ちなみに、髪の毛の太さは約 $50\ \mu\text{m}$ である。転がり軸受の設計における油膜厚さを得るためには、我々は髪の毛を長手方向に250分割しなければならない。

## 3. EHL油膜厚さの理論解析

油膜厚さはこのように薄いため、これを観察するには非常になめらかな表面や非常に清浄な潤滑

油が必要である。我々は30年前に玉軸受の油膜厚さを計算することができた。図1は世界で最初の玉軸受での油膜厚さの計算結果で、私自身の博士論文からの引用である。当時は、線接触に対しては計算可能であったが点接触に対しては不可能であった。

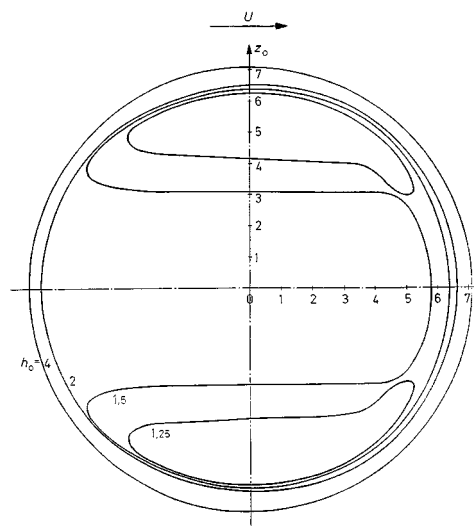


図1 玉軸受におけるEHL油膜厚さの数値解析結果  
Numerical result of EHL oil film thickness of ball bearing

## 4. マイクロEHL

もしこの油膜厚さと我々が製造する製品の表面粗さの大きさをと比較すると、ほとんどの場合、表面粗さは油膜厚さよりも大きい。このため、初

\* スウェーデン ルンド工科大学 機械要素分野 教授 工学博士  
1997年トライボロジーゴールドメダル受賞

\*\* 2000年10月25日光洋精工技術本館で開催

期において転がり軸受では金属接触が発生しているが、転がり接触により次第に表面のなじみが起り、表面状態が変化してくる。このことは、新品の転がり軸受のすべての軌道輪において、最小油膜厚さは0に等しいことを意味する。

図2(a)は玉軸受軌道輪の代表的な表面粗さの形状である。もし、このような表面を平滑な表面に対して押しつける場合、接触圧力はHertz理論から得られるものようにはならず、図2(b)のように接触圧力は非常に大きなピークを持ったものになる。潤滑油は表面を持ち上げることで、この圧力変動を減少させる。接触圧力の大きさは表面粗さの傾きに影響される。この粗さの傾きが局所的な圧力分布、したがって、表面下でのせん断応力を決定する。

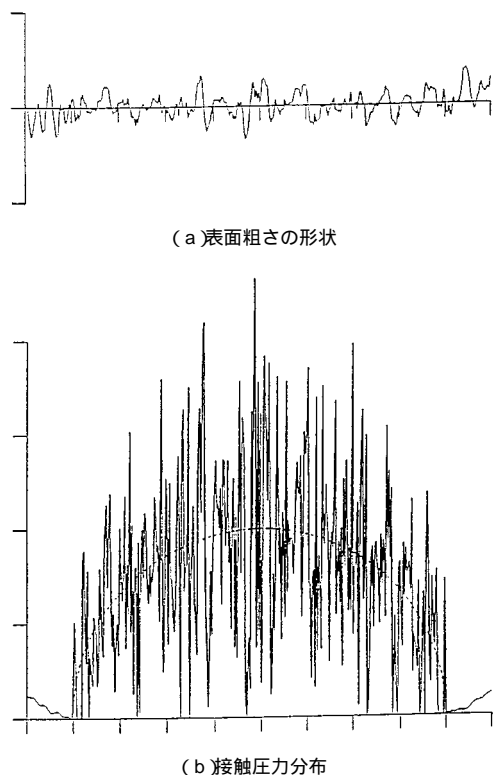


図2 表面粗さと接触圧力

Surface roughness profile and contact pressure distribution

## 5. なじみ過程の分析

表面粗さのピークの波長，すなわち，接触圧力のピークの間隔は油膜の形成に影響する。波長が小さくなると粗さのピークは油膜を貫通しやすくなり油膜を破壊する。その結果，油膜厚さが小さくなる。

これはすべての表面粗さが摩耗して，新生表面が形成されることを意味する。接触表面が滑らかになるためには，潤滑油が清浄である必要がある。1リットルの潤滑油中に大きさ5 $\mu\text{m}$ 以上の異物がおよそ100万個入っている。

そのため異物を取り除く必要がある。転がり軸受製品の表面はできるだけ滑らかである必要がある。そして，表面粗さや硬さもできるだけ同じである必要がある。もし，そうであれば，面同士が互いに摩耗し滑らかになる。しかし，もし，硬さの異なる金属同士が接触すると，表面のなじみは永遠に起きない。柔らかい表面の方が削られてしまうからである。金属同士の表面が接触したり相対的に転がりたりすることはよくある。もし，硬さが異なるならば，表面は決してなじむことがない。清浄な系の中では，硬い表面の方が柔らかい表面を削る。汚染された系の中では，異物が両方の表面を破壊する。何れの場合も表面は破壊される。

鋼球は軌道面に比べて滑らかにしやすい。このため多くのメーカーは鋼球を非常に滑らかに仕上げている。しかし，粗さの異なる表面の組み合わせはあまり好ましくない。鋼球の表面粗さを良くする代わりに，軌道の表面を良くした方が好ましいのである。もし，表面同士がなじまないと摩耗が発生する。

なじみ運転は表面を滑らかにする。しかし，異物は表面を破壊しなじみを妨げる。表面の破壊の程度は系の中にある異物の数に依存する。先ほど述べた髪の毛は直径が約50 $\mu\text{m}$ である。もし，1 $\mu\text{m}$ という厚さの油膜があり，髪の毛を油膜の中に隠そうとすると，これは，直径50 $\mu\text{m}$ の石を1mの油膜の中に隠そうとすることと同じなのである。

## 6. 異物混入の影響

### 6.1 寿命への影響例

油の中に異物があると軸受は正常に働かない。図3は内輪の軌道面を示したものである。この内輪は異物油中で30分間運転した円筒ころ軸受から取り出したものである。表面に面積率で8%の圧痕が認められた。ここで使用した異物の大きさは40 $\mu\text{m}$ 以下で，ギアボックス内の摩耗粉である。摩耗粉はギアから軸受に入り，この圧痕を生じさせた。この内輪を使い，ころ，外輪および保持器を各々新品に換えて耐久試験を行った結果，軸受の寿命は圧痕のない軸受にくらべ1/10まで低下した。

この損傷した軸受の表面状態は，接触部での応力分布を見れば簡単に理解できる。図4はころと軌道との接触部での内部応力分布図である。色の変化は応力の変化を表している。接触面における最大応力はそれぞれ図に示されている。ここで示す応力分布を用いて計算した軸受の寿命は実験で得られた寿命に非常に近いものであった。

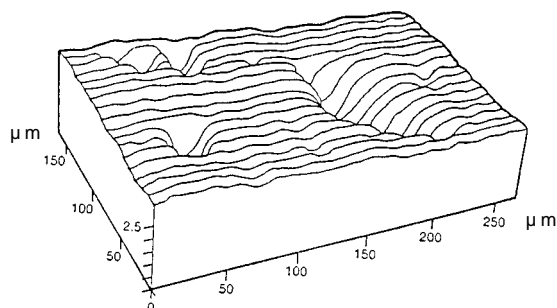


図3 軸受の内輪軌道面に生じた圧痕  
Dents on inner ring surface of rolling bearing

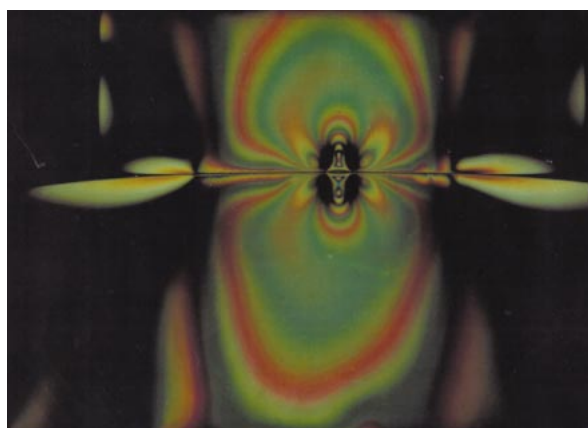


図4 内部応力分布(異物なし)  
Subsurface stress distribution (without contaminant)

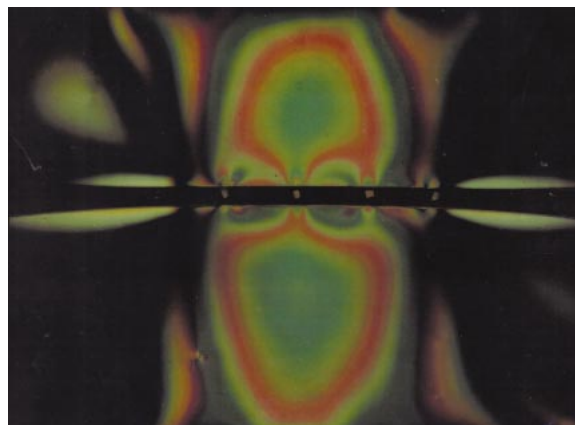


図5 内部応力分布(異物あり)  
Subsurface stress distribution (with contaminants)

### 6.3 異物の硬さの影響

粒子の挙動は材質に大きく依存する。もし、粒子が軟鋼や黄銅のような金属なら、図6に示すようにパンケーキのように押しつぶされるであろう。粒子が硬くなるほどより小さくて深い圧痕が生じる。セラミックの粒子は塑性変形しない。どの程度の大きさで粒子が破壊するかはその材料の破壊靱性で決まる。研磨砥石粒のような靱性のあるセラミック材料は鋼の中に埋まり込む。潤滑系にこのような種類の粒子を入れると、転がり破壊されずに軌道表面に大きな圧痕を作る。

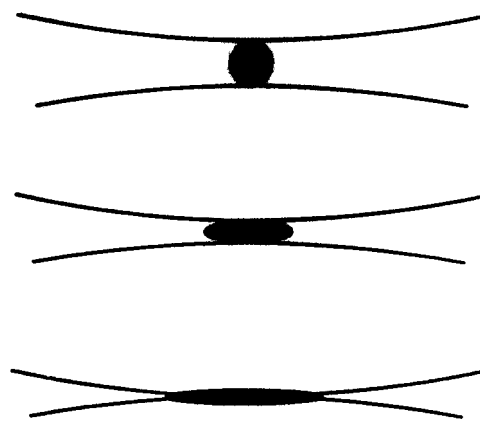


図6 粒子の押しつぶしと変形  
Sketch of particle squashing and extrusion mechanism

### 6.2 異物の大きさの影響

清浄な潤滑系に油膜厚さに相当する大きさ  $0.5 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$  の異物を入れた場合の接触部での内部応力分布を図5に示す。それぞれの粒子は高い応力集中を引き起こしている。このため、軸受は二つの場所のいずれかで損傷に至る。すなわち、表面下の最大せん断応力発生位置が表面のどちらかである。どこで損傷するかは何個の異物を油の中に入れるかによる。もし、数多くの小さな粒子が存在すれば摩耗が起り、表面は消失して転動体の形状が変わる。

小さな粒子の代わりに大きな粒子を使うと、表面の転がり作用によって大きな粒子は捕らえられて圧痕をつくる。そして、軸受が転がる限り、圧痕のそれぞれの側に非常に高い応力集中が発生する。この場合、圧痕が深いので再びなじませることはできない。このため、我々は異物粒子による損傷のメカニズムを理解しておく必要がある。

### 6.4 異物の大きさ、硬さの複合効果

図7は800Hvの鋼製表面の間に1個の粒子を挟んで互いに押し付け、圧痕が発生するか否かの限界を示したものである。この場合、油膜厚さは  $0.4 \mu\text{m}$  である。粒子硬さが800Hvでは  $2 \mu\text{m}$  の大きさで圧痕が発生する。一方、130Hvの保持器用の軟鋼では圧痕をつくるには約  $15 \mu\text{m}$  程度の大きさの粒子が必要である。

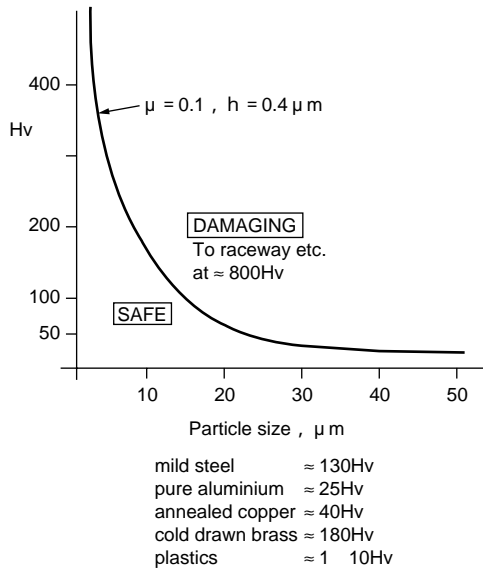


図7 圧痕形成の条件  
Criterion of indentation

6.5 異物が引き起こす軸受の損傷

軸受を損傷するには二つの方法がある．一つは転動体が汚染粒子の上を転がって軌道面に圧痕をつけ高い応力集中を引き起こして短寿命にすることである．もう一つは先程述べた摩耗である．

図8に摩耗重量とグリース中の汚染粒子濃度、すべり距離との関係を示す．図8(a)に示すように粒子材質すなわち酸化シリコン、通常の砂、ある種の砥石材料に関係なく、摩耗重量と粒子濃度の間には直線関係が得られた．ただ、この直線の傾きは材質により異なり、砂の場合は傾きが小さく、砥石材料では大きい．また、図8(b)は摩耗重量がすべり距離に比例することを示す．例えば、自動調心ころ軸受において、接触部での運動学的なすべりはこの位置に依存するので、純転がりの点ではごく少ない摩耗となる．もし、すべりがあるならば純転がり点近傍でも摩耗が起る．

以上のことから、粒子によるくぼみに起因する損傷は2つのタイプに限定される．一つは疲労損傷で他方は摩耗損傷である．疲労損傷は実際的には汚染粒子の硬さによって決定される．軸受を壊すのには、たった一つの大きな豆状の粒子で充分である．

もし1 000個の大きな粒子が潤滑系にあって、そのうち500個を取り去っても、疲労損傷には違いが見られない．しかし、摩耗損傷においてはそれと逆になって、粒子の半分を取り除けば摩耗率は半分になる．

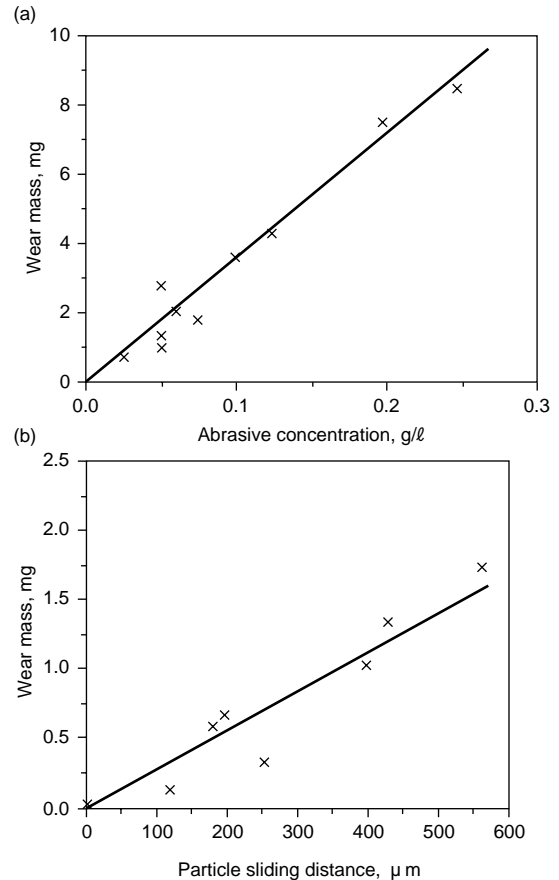


図8 摩耗量とグリース中の汚染粒子濃度、滑り距離の関係  
Wear mass for cotaminated grease (ball on disk results)

7. グリース潤滑

さてこれから、グリース潤滑について述べる．約8年前私はヨーロッパでトライボロジー研究プログラムを始めようと活動を開始し、これまでの5年間にヨーロッパの23カ国で約100のプロジェクトを運営してきた．プロジェクトの一つがグリース潤滑である．

油とグリースで油膜形成の状況を観察すると、グリース潤滑における“親指の法則”を導く．“親指の法則”：もし接触部に潤滑剤がなければそこには潤滑膜が形成しない．だから、潤滑剤が正しい位置にあるか確認しなければならない．

例えば、グリースの潤滑性能は低温では高温に比べて悪くなる．- 30、- 40 では通常のグリースでのグリース潤滑は不可能である．

また、道路の水溜まりの上を通る自転車によりズボンに水をはねかけられたり、水がある道路上を大きなトラックが通った跡には乾いた二本の線ができ、そのトラックの後に大きな水煙ができるのを見たことがあるだろう．このようなことは、玉軸受の中でも起っている．もし早いスピードで運転すればするほど、より多くの油を空気中に飛

散させる。このことは、なぜグリース潤滑が回転速度に敏感であるかの理由の一つである。

そういうわけで、我々は転がり作用の中に油の流動という考えを取入れる必要が出てくる。この油の流動は表面張力と表面エネルギーに強く依存する。

インペリアルカレッジのカン博士はヨーロッパのプロジェクトでグリース潤滑での油膜厚さを測定し、転がり速度の関数としてきわめて容易にスタベーションになることを見出した。転がりを開始したときには通常のハムロックらの計算式に従った油膜が形成するが、高速になると油膜厚さは減少した。これはグリースの硬さが原因である。もし、油膜厚さが約40nmに低下するまで同じグリースを接触部へ移動させないならば、グリースは押し退けられてそして戻ってこなければならない。この挙動はどんな種類の増ちょう剤系を用いるか、どんな種類の分子を油に入れるかに依存しているが、その理由は分子は実際には高分子化して表面に付着するからである。

私はアメリカのNASAでSODAのメンバーとして働いていた時に同様の実験を行った。結果は同じで、転がり軌道表面上にたった一度の転がりで20nmの高分子層が形成された。

カン博士らによりさらなる実験が行われ、彼らはLiOH, LiX, Diurea, Triureaの4種類の異なる増ちょう剤を用いてサファイヤ円板の測定装置で回転数に対するグリース油膜厚さの変化を観察した。25 度ではLiOX, LiX, Diureaグリースでは1000回転の間に200nmから10nmへと膜厚は連続的に減少した。同じ実験を60 度で行うと、Tetraureaグリースは200から約130nmに減少したが、これは先の実験と同じ傾向であった。LiOH, LiXでは最初に減少し、600回転以上では初期の油膜厚さの値にまで回復した。一方Diureaグリースは連続的に減少した。また実験を80 度で行った場合は、4種類のグリースは100回転まで影響されなかった。ただし膜厚は200nmの代わりに約90nmであった。Tetraurea, Diurea, そしてほかのすべてのグリースもいつも一定の油膜厚さを保った。

これらの結果は、油膜厚さを決めるのは油の粘度ではないことを示すものである。

## 8. おわりに

転がり軸受の潤滑について油膜厚さが重要な役割を演じている。なじみや摩耗、異物混入、グリース潤滑などが油膜厚さと深く関係していることが理解頂けたと思う。

< 補足 >

本稿は、2000年10月25日に光洋精工株式会社の創立80周年記念特別講演として、スウェーデンLund工科大学のBo Jacobson 教授にご講演を頂いた内容の要点を先生のご快諾を得てまとめたものである。

ご講演頂いたBo Jacobson 教授はトライボロジー界のノーベル賞と言われているトライボロジーゴールドメダルの受賞者としても世界的に広く知られている。

今回のご講演の内容は軸受の潤滑理論に関するものであり、近代トライボロジー界の創世紀における取り組み内容から、最先端の結果までも含んでいる。当社が創立以来、懸命に取り組んできた軸受関連の技術に密接に関連したご講演内容であり、興味は尽きない。

光洋精工株式会社の創立80周年に際し、ご講演を頂いたBo Jacobson教授にここであらためて心から感謝の意を表したい。

(総合技術研究所)