



特集記事・7

地球環境に貢献する鉄鋼製品

## 転がり軸受け材料 Rolling Bearing Steel

三田村宣晶  
Nobuaki Mitamura

日本精工(株) 総合研究開発センター  
基盤技術研究所材料研究室 室長

### 1 はじめに

自動車をはじめとする摩擦摺動部が存在する機械においては、必ず摩擦によるエネルギー損失が起こる。個々では大きな損失量とはならないが、種々の機械の摩擦によるエネルギー損失を合計すると膨大な量となり、最終的には昨今叫ばれている石油などのエネルギー源の枯渇問題等にも大きな影響を与える。従って余分な摩擦損失を低減することは地球環境に大きく貢献する。

転がり軸受けは、その摩擦によるエネルギー損失をできるだけ少なくするために回転運動を有する機械に使用されている機械部品である。回転部と非回転部の間に転がり運動をする転動体を介することにより両者の間に発生する摩擦を極力抑えるために用いられている。

転がり軸受けを用いることにより、摩擦摺動部での摩擦低減は非常に効果が得られる。しかしながら転がり軸受けは基本的に回転部と非回転部の間の摩擦を低減するために、両者の接点において点接触や線接触（厳密には面接触）といった非常に小さい部分で接する機構となっている。従って接触部では、非常に小さい部分で大きな荷重を支えることとなり、さらに転動体が回転することにより軌道輪各部では、負荷、無負荷が繰り返し起こることとなり、結果的に軸受け内部は非常に大きな繰り返し応力を受けることとなる。この大きな繰り返し応力に耐えられなくなった場合、疲労現象として図1に示すような表面の一部が剥がれた「はくり」といった不具合が生じる。このはくり現象が生じると音、振動、発熱が著しくなり、当初の摩擦損失エネルギーの低減を達成できなくなるばかりか最終的には、割れ破損まで至り周辺機械に損害を与えることになる。従って転がり軸受けではこのはくりが生じた時点で軸受との継続使用は不能と考えられ、はくりが生じるまでの時間が一般的に「寿命」と呼ばれる。

軸受けの寿命は、機械を構成する他の部品及び機械全体の

寿命よりも長いことが要求され、そのために高い疲労強度を有する材料が望まれ、通常、焼入れ・焼き戻しが施された高炭素クロム軸受け鋼等が使用される。この高炭素マルテンサイト鋼を使用することにより軸受けはその要求される機能を満足してきた。しかしながら、昨今の機械の高速化などによる使用条件の苛酷化及びエネルギー消失低減を目的とした機械の軽量化、小型化などを受けて転がり軸受けを取り巻く環境は厳しくなっており、従来の軸受け材料では、要求寿命を満足できないケースが生じてきている。

そこで、このような苛酷状況においても要求寿命を満足するような転がり軸受け鉄鋼材料の長寿命化の研究が盛んに行われてきた。今回、その研究の一例を紹介する。

### 2 はくり形態の分類化

転がり軸受けの寿命、すなわちはくり現象に関する研究は、G. LundbergとA. Palmgrenに代表されるように20世紀前半から行われてきた<sup>1)</sup>。当初の考え方は、軸受けの寿命は、軸受け転動面直下に働く高いせん断応力によってほぼ支配されるといった考え方であり、通常破損事象を考える上での加

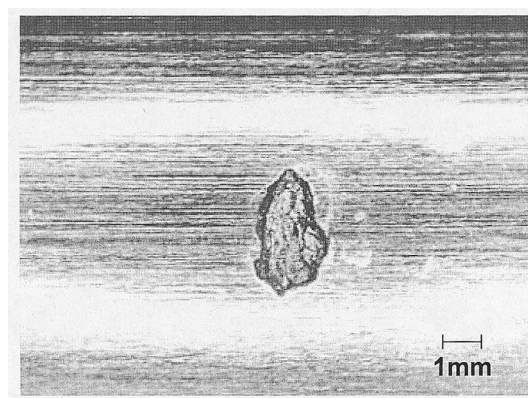


図1 転がり軸受けに生じたはくり

わる応力と材料強度の関係のうち、材料強度はほぼ一定で、加わる応力を主体に寿命は考えられてきた<sup>1)</sup>。しかしながら、研究が進むにつれて転がり軸受けのはくり破損形態は、単一なものではなく、荷重因子以外の使用条件によっても大きく影響を受けることが明らかになってきた。また破損形態によって大きく寿命特性が異なることがわかってきた。同時にそれぞれの破損形態においては異なった材料因子が寿命に影響を与えることがわかってきた。

破損形態に一番大きく影響を与える使用条件として潤滑条件が挙げられる。通常転がり軸受けは稼動中の軌道輪と転動体の間の金属接触を防ぐために両者の間に潤滑膜が介在するように潤滑油やグリースなどの潤滑剤が使用される。この潤滑剤による油膜形成が不十分であると軌道輪と転動体間で金属接触が生じ、それによって不具合が発生する。

金属接触をすることでまず考えられる不具合としては摩耗及び焼付きであるが、転がり疲労現象であるはくりにおいてはこの油膜形成状態は寿命に大きく影響を及ぼす。図2に油膜形成状態を示す油膜パラメーター、 $\Lambda$ （相対粗さと油膜厚さの比、数字が大きいほど粗さに対して油膜厚さが大きいことを意味し、すなわち金属接触が起こりにくいことを意味する）と転がり疲労寿命の関係を示すが、油膜形成が不十分であると寿命が著しく低下している<sup>2)</sup>。

この寿命低下は、従来の荷重因子主体の考え方では説明することはできず、この現象を整理する目的で破損形態の違いという考え方が導入されてきた。油膜形成が十分あり、長寿命の傾向を示す破損形態は、前述したせん断応力分布において最大値近傍の深さから破損に至るため「内部起点型はくり」と称される。一方、油膜形成が不十分で短寿命の傾向を示す破損形態は、その破損が金属接触等による表面欠陥から破損に至るため「表面起点型はくり」と称されている<sup>3)</sup>。また油膜形成不十分による金属接触以外にも潤滑油が異物などが混

入して汚染された場合、この異物の噛み込みによって図3に示すように転動面表面に圧痕が形成される。このような圧痕が形成されるとはくり破損はこの圧痕を起点発生し、この場合も「表面起点型はくり」に分類される。

さらに最近では、上記2つの破損形態である、「内部起点型はくり」、「表面起点型はくり」以外に、図4に示すような特有の金属組織変化を伴う破損形態が報告されている<sup>4)</sup>。この破損形態は、前述の起点の位置による破損形態の分類からいうと内部起点型に属する。しかしながら、特有の組織変化が見られることや寿命が通常の内部起点型に比べて極めて短いことから、上記2つの破損形態とは別に分類されることが多い。

このように転がり軸受けにおけるはくり形態は単一ではないことがわかってきている。これらそれぞれの各破損形態に対して寿命に影響を与える材料因子は異なっており、それぞれの破損形態に対する長寿命化を狙った材料の研究が行われている。以下に各破損形態における長寿命化材料の研究例を紹介する。なお本報では、前述した金属組織変化を伴う破損形態を「組織変化型」と称する。

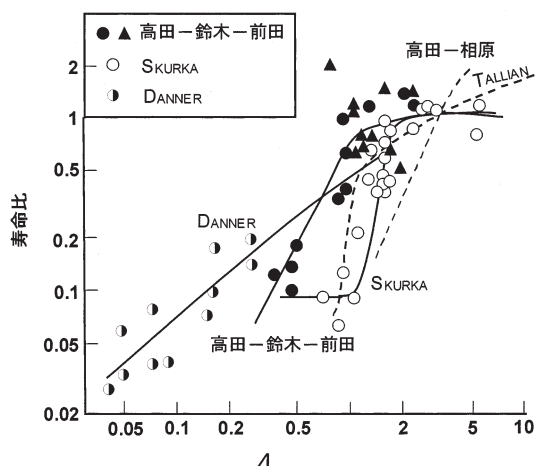


図2 ころ軸受の油膜パラメーターとフレーキング寿命との実験的關係<sup>2)</sup>

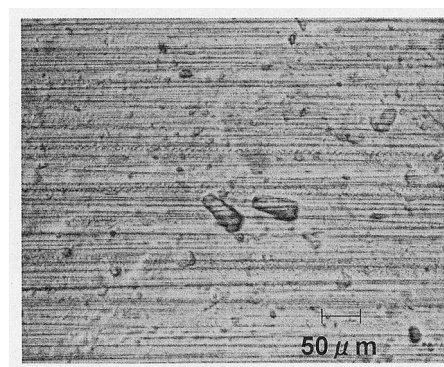


図3 軸受け転走部見られる圧痕

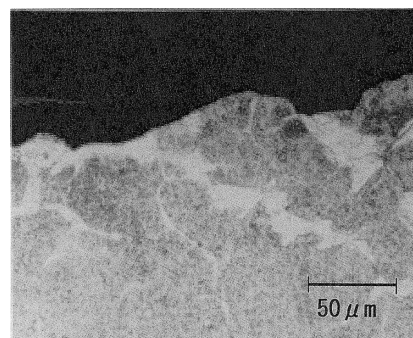


図4 破損部に見られる組織変化  
なお、腐食は5%ピクラールにて行っている。



## 3 各破損形態に対する材料による長寿命化

### 3.1 内部起点型はくりに対する長寿命化

内部起点型はくりは、極めて良好な潤滑条件（転動体と軌道輪に形成される油膜形成が十分でなおかつ潤滑剤の清浄度が良好である場合）で起こる破損形態であり、前述した他の破損形態よりも長寿命の傾向を示す。この破損の起点位置は、せん断応力分布における最大せん断応力位置であり、すなわち寿命は軸受けに加わる荷重に大きく影響を受ける。しかしながら、この破損形態を示す寿命試験結果は、寿命値が大きくばらつき、これは、荷重因子以外に寿命を大きく左右させる因子があることを意味している。

この寿命を大きく左右させている因子が、材料内部の非金属介在物であり、この破損形態は最大せん断応力近傍の介在物を起点としているが報告されている。このことは、逆に言えば応力が高い場合においても起点となる非金属介在物がせん断応力域に存在しなければ、寿命は大きく向上することを意味している。この起点となる欠陥を低減するという手法は、材料の合金元素量を変更して材料自体の疲労強度を向上させるよりもはるかに効果的であるため、この破損形態の長寿命化には、通常鋼の清浄度向上といった手法が使われる。

#### 3.1.1 鋼中酸素量の低減

これら非金属介在物の中で、最も寿命に有害なものはアルミナ等の酸化物系介在物<sup>5)</sup>であり、この酸化物系介在物を少なくする目的で鋼中酸素量を低減する製鋼技術が開発されてきた。その結果、近年、著しい低酸素量の軸受け鋼の量産が可能となり、この破損形態に対する長寿命化に大きく貢献している。図5に軸受け鋼の鋼中酸素量の推移と各年代の材料の寿命試験結果を示すが、鋼中酸素量の低減により著しい寿命延長効果が認められる。

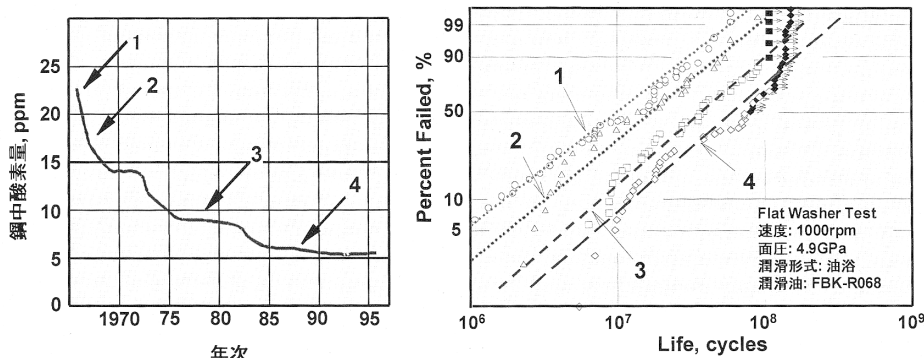


図5 軸受け鋼の鋼中酸素量の推移と各年代の材料の寿命試験結果

#### 3.1.2 介在物分布による清浄度管理

製鋼技術の進歩による鋼中酸素量の低減によって内部起点型はくりの寿命特性は近年、大幅に改善された。しかしながら、軸受けを取り巻く環境は、小型化の要求により、更なる長寿命化が求められている。一方鋼中酸素量の低減は、現状では10ppm以下となっており、更なる低減は量産レベルでは非常に困難である。またこの極低レベルの酸素領域では、図6に示すように鋼中酸素量と寿命に明確な相関関係を見出すのは難しく、酸素量低減による効果もあまり期待できない。このことは極低レベルの酸素量域では、酸素量が寿命特性を表す指標として使えないことを意味している。

そこで、酸素量と置き換わる指標として介在物の分布から寿命に対する材料の優劣を判断する評価法が報告されている<sup>6)</sup>。例えば図7に、画像解析技術を利用してある面積中の介在物の分布を測定し、その材料の寿命試験を行った結果を示す。両者は鋼中酸素量は同じであるが、寿命特性に大きく差が認められる。軸受けの寿命の優劣を述べる場合、寿命試験結果をワイブル分布で整理され、破損率10%の寿命値で判断される。これは軸受けが実際に使われる場合、寿命は、平均寿命の長短ではなく、どれだけ短寿命のものが出現するか、あるいはその短寿命の出現率がどの程度あるかが問題になるからである。

この破損形態の場合、短寿命となる原因は、せん断応力域

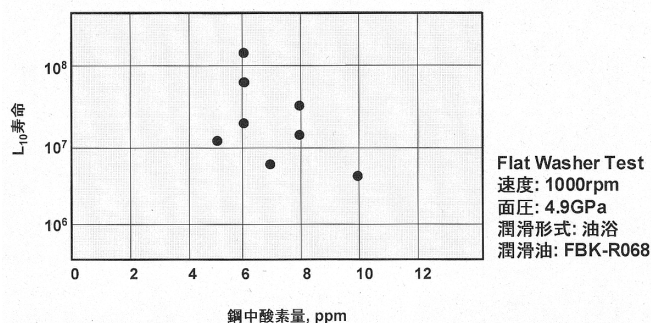


図6 低酸素材（10ppm以下）における鋼中酸素量と寿命の関係

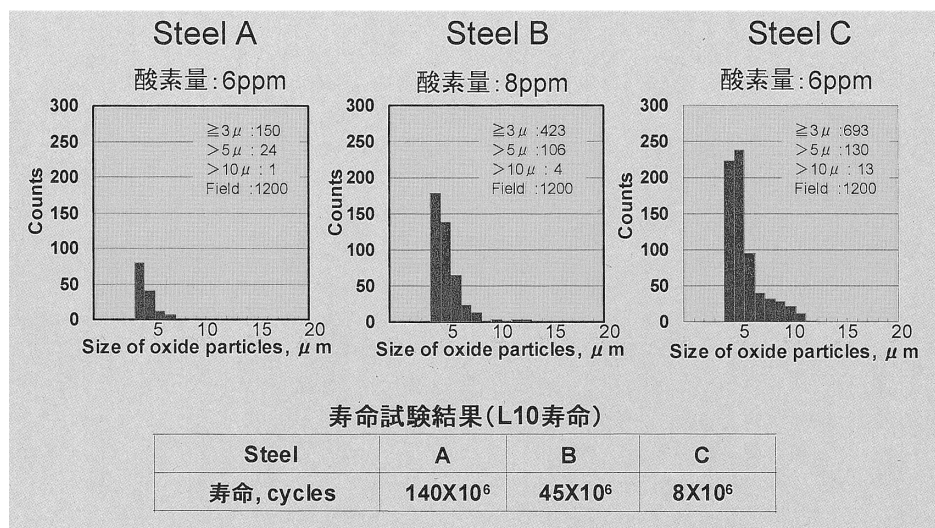


図7 介在物の分布と寿命の関係

に大型の介在物が存在した場合である。したがって介在物の大きさの分布、すなわちどのくらい大型の介在物が存在するかを把握することで寿命が整理することができる。この介在物の大きさに対する評価法において前述した画像解析による方法とは別に実用上有効な方法として、極値統計法を用い単位面積あたりの最大介在物径を推定する方法が知られている<sup>7)</sup>。これら、新しい清浄度評価法によって寿命特性を向上させる更なる鋼の改善が行われている。

### 3.2 表面起点型はくりに対する長寿命化

前述したように、潤滑油の油膜形成が不十分であったり、潤滑油の清浄度が劣悪の場合に発生するはくり形態である。一般的にこの破損形態の場合、金属接触や圧痕によって生じる表面の応力集中が内部起点型のせん断応力域における介在物周りの応力集中よりも大きいものとなり、従って内部起点型はくりよりも短寿命となる。

この破損形態による短寿命に対する最も有効な方法は、潤滑条件の改善である。油膜を十分確保できるような粘度の高い潤滑油を使用することやシール等により潤滑油への異物の侵入を防ぐことにより疲労形態を長寿命傾向である内部起点型はくりへ移行させ、長寿命化が図れる。しかしながら粘度の高い潤滑油を使うことは、油の攪拌抵抗を上昇させることにつながり、トルクの増大の原因となる。また軸受けが低速で使用される場合は、油の粘度を高くしても基本的に十分な油膜形成は難しい。またシールによる異物侵入防止も構造的にシールを付けることが困難な使用用途がある。こういった場合、本破損形態に対する材料強度を上げて長寿命化を行う方法が取られている。

#### 3.2.1 表面欠陥における応力集中の緩和

この破損形態の場合、起点となるものは、金属接触や混入異物の噛み込みによって生じる圧痕などの表面欠陥である。この場合、欠陥は外的要因によって発生するものであり、内部起点型はくりの場合の介在物のように材料自体の改善によって欠陥を少なくすることは困難である。従って材料の改善によっていかに欠陥を無害化、すなわち欠陥に生じる応力集中をいかに抑えるかが長寿命化のポイントとなる。以下にその研究例を紹介する。

表面欠陥による応力集中は欠陥形状において欠陥の大きさと欠陥縁の曲率によって決定され、欠陥の大きさが大きいほど、欠陥縁の曲率が小さいほど応力集中が増大する<sup>8)</sup>。従って、これら2つの因子を変化させる材料因子が寿命に大きく影響を与えと考えられる。

まず欠陥の大きさを変化させる材料因子としては、硬さが挙げられる。異物噛み込みによる圧痕を考えれば、硬さが高いほうが圧痕径を小さくすることができる。しかしながら現在、軸受け材料として使われている軸受け鋼は1%炭素のマルテンサイト鋼であり、その硬さはHRCで60~64程度であり、マルテンサイト系鋼としては、ほぼ最高の硬さを有するものである。これ以上の硬さを得るには高合金化して析出物によって硬さを上げる方法もあるが、コスト面、製造面から言って現実的ではない。また表面皮膜によって表面の硬さを上げる方法も考えられるが、転がり軸受けの場合、前述したように非常に高い接触面圧が発生するため、稼動中に皮膜が脱落することが懸念される。従って硬さを上げて欠陥の大きさを小さくし、応力集中を緩和する方法は現実的には難しい。

一方、欠陥縁の曲率に関しては、残留オーステナイト量を変化させることなどにより比較的容易にその大きさを変える



ことができる<sup>9)</sup>。図8<sup>10)</sup>に、潤滑油中に異物を定量混入した寿命試験結果を示す。破損形態は全て圧痕を起点とした表面起点型はくりであり、残留オーステナイト量を増加させることにより寿命を延長することができる。残留オーステナイト量は熱処理における焼入れ温度を変更したり、オーステナイト生成元素量を少量変更するなど比較的容易に変えることが可能であり、現実的な長寿命化の一手法として使われている。

### 3.2.2 材料疲労強度向上

その他、この破損形態に対する長寿命化の方法としては、合金元素を適量添加や熱処理において浸炭窒化などを施して固溶強化させ、材料自体の疲労強度を向上する研究が行われている<sup>9)</sup>。

### 3.3 組織変化型はくりに対する長寿命化

昨今、歯車等のトルク伝達効率を上げるためにトラクション係数を改良した潤滑油が使われるケースが増えている。このような特殊な潤滑剤が使われる場合、内部起点型はくり、表面起点型はくりの破損形態では寿命が整理できない破損形態が報告されている。特徴として破損近傍には、図4で示す特有の組織が出現しており、寿命は前述した2つの寿命形態に比べよりも短い傾向を示す。また、この破損形態は、高速化などにより軸受け内部の軌道輪と転動体の相対すべりが大きい場合にもよく見られる。本破損形態は、前述した2つの破損形態に対して着目されてからまだ日が浅いということも

あり、まだまだ不明な点が多いが、他の疲労形態と大きく異なる点は、高い繰返し応力を受けた痕跡がないことである。

転がり軸受けは、高い繰返し応力を受けると軸受け材料の金属組織が変化することが知られている。これはX線回折法を使つての残留オーステナイト量、マルテンサイトの半価幅、残留応力分布を測定することにより測定することができる<sup>11)</sup>。前述した内部起点型はくり、表面起点型はくりの場合はそれぞれのはくり起点位置近傍では、上記金属組織状態が元の使用される前の状態に比べ、大きく変化しており、高い繰返し応力を受けた痕跡が認められる。一方、この組織変化型はくりの場合は、起点と思われる特有の組織近辺には、特にX線回折による組織状態の変化は認められず、調査範囲をはくり全体に広げても高繰返し応力が加わった痕跡は認められない。このことは、このはくり形態の場合、前述した内部、表面起点型はくりとは異なり、単に欠陥近傍の応力集中だけで整理できないことを意味している。

はくり破損においても通常の破壊現象と同じく、破損の原因は基本的に加わる応力と材料強度の相対的なもので決まる。この破損形態の場合、高応力の痕跡が認められないことから材料強度の低下が主要因となり発生したものと考えられる。強度低下の原因としては、転がり軸受けの場合、高面圧である接触域に介在する潤滑剤が挙げられる。その潤滑剤が大きなせん断力を受けることにより水素が発生し、その水素が鋼中に侵入して強度を低下させるといった報告がされている。実際に本破損形態を示す軸受けを調査したところ図9に示すように通常の使用条件で稼働された場合に比べて水素量が多い結果が報告がされている<sup>12)</sup>。

本破損形態における長寿命化技術としては、水素の発生を抑えることを目的とした潤滑剤の研究、水素侵入を防ぐ目的の皮膜処理する方法などが報告されている<sup>12, 13)</sup>。しかしながら、潤滑剤は、他の部品との関係もあり軸受け用だけに選択することができない場合や高面圧が加わることで、皮膜が脱落する場合などがあり、上記対策で十分とは言えず、材料面からの研究も行われている。

#### 3.3.1 Cr量増加による長寿命化

本破損形態に対して材料面から研究を行ったものに、Cr量に着目した研究が報告されている<sup>14)</sup>。鋼中のCr量を増やすことにより本破損形態の寿命が図10に示すように改善効果がみられ、その理由としてはCr量を増やすことにより水素の拡散速度が小さくなったことによるものとされている。

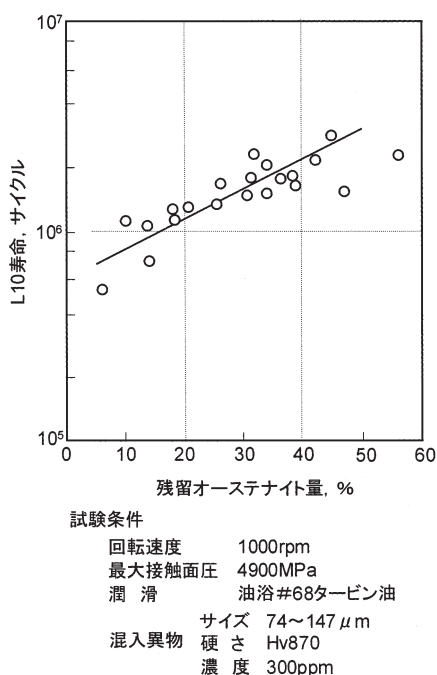


図8 残留オーステナイト量と表面起点型はくり寿命の関係<sup>10)</sup>

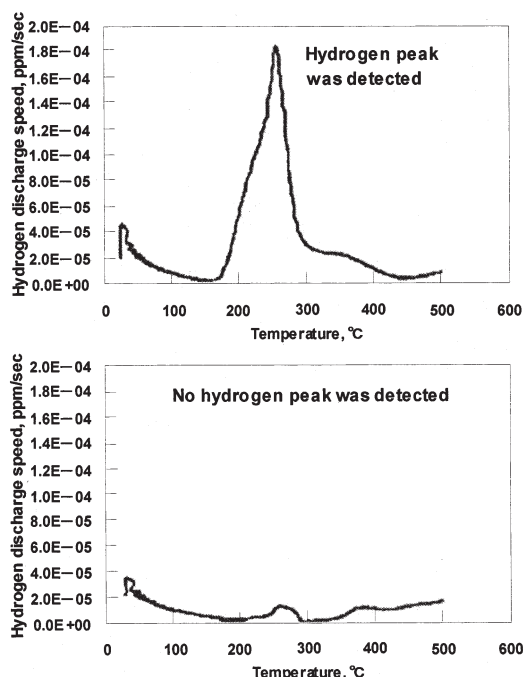
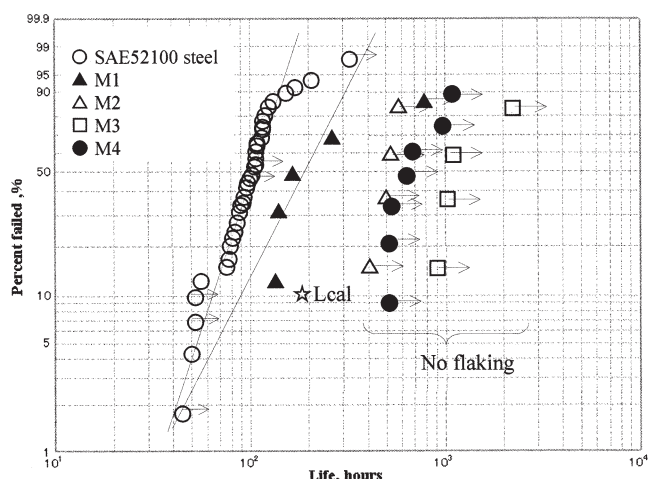


図9 組織変化型はくり(上図)と通常はくり(内部起点型はくり、下図)の軸受け材料中の水素量<sup>12)</sup>



| material No. | C    | Si  | Mn  | Cr  | Mo  | V   | N    |
|--------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| M1           | 0.69 | 1.0 | 0.3 | 3.0 | -   | -   | -    |
| M2           | 0.40 | 0.3 | 1.0 | 5.0 | -   | -   | -    |
| M3           | 0.80 | 0.9 | 0.4 | 8   | 1.9 | 0.5 | -    |
| M4           | 0.45 | 0.3 | 0.3 | 13  | -   | -   | 0.14 |

図10 組織変化型寿命に及ぼす合金元素の影響<sup>14)</sup>

## 4 まとめ

転がり軸受けは摩擦摺動部が存在する機械においてエネルギー損失を低減するために不可欠な機械部品である。その使用方は、高い繰返し応力を受けるといった厳しい環境下で、半永久的に破損がなく稼動することが宿命付けされている。

またその破損形態は単一ではなく、使用条件によって異なり、高速化などの厳しい条件になると従来考えられていた破損形態とは異なった形態の破損が発生する。これらそれぞれの破損形態に対する長寿命の技術が必要である。

これら厳しい使命に対して、今まで、製鋼技術の著しい進歩など材料技術による対策が大きな効果を上げてきた。しかしながら今後、機械の高速化、コンパクト化などが更に進む世の中の流れにおいて、転がり軸受けは使用条件的にますます厳しい環境に置かれることが予想され、更なる材料による長寿命化技術が必要になってくるものと思われる。

## 参考文献

- 1) G. Lundberg and A. Palmgren : Dynamic Capacity of Rolling Bearings IVA handler 196, Stockholm, (1947)
- 2) 高田浩年：潤滑, 27 (1982) 2, 107.
- 3) 高田浩年, 相原了：転がり軸受の寿命と信頼性, 日刊工業新聞社, (2005)
- 4) NSK Technical Journal, 日本精工(株)編, 656 (1993), 1.
- 5) 松本洋一, 村上保夫, 古村恭三郎：日本潤滑学会第33期春期研究発表会予稿集, (1989), 213.
- 6) K. Furumura, T. Abe and Y. Murakami : ASTM STP1327, (1998), 249.
- 7) 村上敬宜：微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, (1993)
- 8) Y.P. Chiu and J.Y. Liu : Trans. Of ASTM, 92 (1970), 258.
- 9) K. Furumura, T. Abe and Y. Murakami : ASTM STP1327, (1998), 293.
- 10) NSK Technical Journal, 日本精工(株)編, 656 (1993), 15.
- 11) NSK Technical Journal, 日本精工(株)編, 643 (1982), 1.
- 12) K. Iso, A. Yokouchi and H. Takemura : SAE Technical Paper, 2005-01-1868, (2005), 1.
- 13) 木野伸郎, 山本建, 尾谷敬造, 内山典子：日本機械学会論文集A, 70 (2004) 696, 1072.
- 14) S. Tanaka, N. Mitamura and Y. Murakami : Proceedings for the 2004 Global Powertrain Congress, 32 (2004), 6.

(2006年9月21日受付)