

(論文)

長寿命軸受鋼の開発

土井健司*・折橋英行*・松島義武*・安木真一*・福崎良雄**・中島慎一***

*鉄鋼カンパニー・神戸製鉄所・条鋼技術部 **鉄鋼カンパニー・神戸製鉄所・製鉄製鋼部 ***鉄鋼カンパニー・加古川製鉄所・製鋼部

Development of Long Fatigue-life Steel for Bearings

Kenji Doi・Hideyuki Orihashi・Yoshitake Matsushima・Shinichi Yasuki・Yoshio Fukuzaki・Shinichi Nakajima

In clean lubricating oil without any dust, inclusions in steel shorten the fatigue life of bearings. It is important to reduce such inclusions. An ultra clean steel was developed by Kobe Steel. Acid dissolution test results correlated well with those of rolling fatigue life tests. In lubricating oil with the dust, the surface was dented by the dust and the dented surface leads to a shortened fatigue life of bearings. A long fatigue life was obtained through the use of the new carburizing steel.

まえがき = 近年、エンジンの高出力化や部品の小型軽量化の動きにともない、軸受の長寿命化が望まれている。軸受の寿命は内・外輪とボールなどの転動体が接触している転動面に、剥離が生じるまでの時間によって評価される。転がり疲労寿命は使用される鋼材の材質や加工方法のみでなく、潤滑条件に大きく左右される。金属摩耗粉などの異物をほとんど含まないクリーンな潤滑環境下での転がり疲労による剥離の起点の多くは介在物であり、長寿命化のためには、鋼の清浄化による酸化物系や窒化物系介在物の低減が有効である。清浄鋼化が進むと、従来の JIS 法や ASTM 法などの介在物評価法では転動疲労寿命との相関関係が低くなるため、新たな介在物評価法の確立が課題となっている。

本稿では、当社が開発した超清浄軸受鋼の製造技術と新たな介在物評価方法について検討した結果を述べる。

いっぽう、自動車の変速機に使用されているような軸受では、摩耗粉などの異物が混入した潤滑油中での転がり疲労寿命の向上が望まれている。異物が潤滑油中に混入すると、異物は転動面に押し付けられ、疲労剥離の起点となる圧痕を形成する。これに対しては、異物環境下での破壊を防ぐために開発した新鋼種と表面硬化処理方法について述べる。

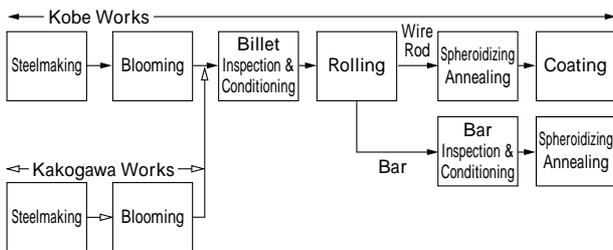
1. 超清浄軸受鋼の製造技術と介在物評価技術の開発

1.1 高炭素クロム軸受超清浄鋼の製造プロセス

当社高炭素クロム軸受鋼（以下 SUJ2 とする）は神戸および加古川両製鉄所で溶製～鑄造～分塊圧延され、圧延は神戸製鉄所でおこなっている。全体製造プロセスを第 1 図に示す。超清浄鋼も通常材と同様な工程で製造されるが、転動疲労寿命に悪影響を与える大型酸化物系介在物およびチタン系介在物（窒化物）の混入を最小限にするために、以下に述べる点について通常工程よりも厳しく管理した高純度処理をおこなっている。神戸製鉄所と加古川製鉄所の製鋼プロセスを第 2 図と第 3 図に示す。

1.2 酸化物系介在物の低減

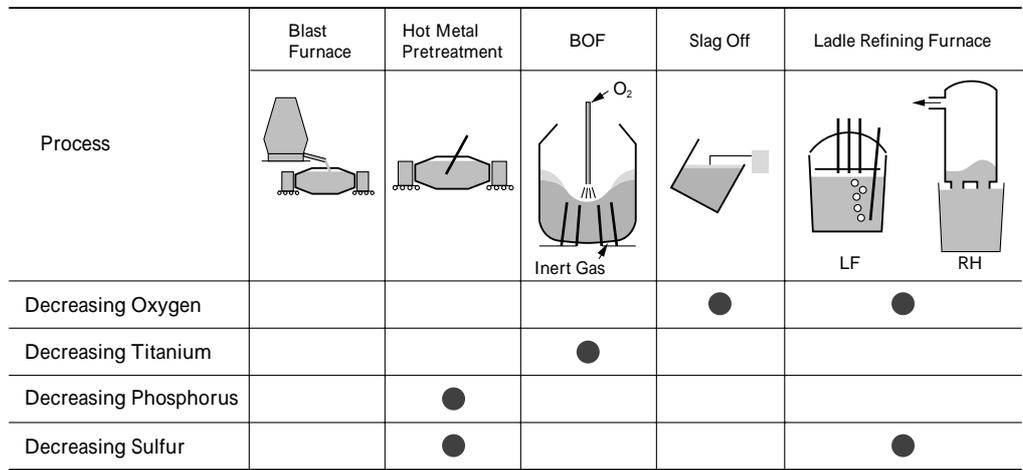
溶鉄予備処理工程で十分に脱リン・脱硫された溶鉄は転炉において脱炭される。転炉スラグは酸性性であり、酸化物系介在物の低減のために、スラグカットをおこな



第 1 図 高炭素クロム軸受鋼の製造プロセス
Fig. 1 Manufacturing process of steel for bearing

| | Blast Furnace | Hot Metal Pretreatment Furnace | BOF | Slag Off | Ladle Refining Furnace |
|-----------------------|---------------|--------------------------------|-----|----------|------------------------|
| Process | | | | | |
| Decreasing Oxygen | | | | ● | ● |
| Decreasing Titanium | | | ● | | |
| Decreasing Phosphorus | | ● | | | |
| Decreasing Sulfur | | ● | | | ● |

第 2 図 神戸製鉄所の製鋼プロセス
Fig. 2 Steelmaking process at Kobe Works



第3図 加古川製鉄所の製鋼プロセス
Fig. 3 Steelmaking process at Kakogawa Works

い、酸化物系介在物ができるだけ取鍋に流入しないようにしている。その後の取鍋精練（加熱，脱ガス）および連続鋳造工程においても大気による再酸化を防止するために不活性ガスによるシールを通常材よりも強化している。取鍋精練では適度なスラグをもちいて十分な攪拌をすることにより酸化物系介在物（おもに Al_2O_3 リッチなもの）を溶鋼より浮上分離させている。さらに連続鋳造工程においてはタンディッシュヒータを採用し、溶鋼中の介在物の浮上分離を促進させている。

1.3 チタン系介在物の低減

チタン（以下 Ti）系介在物の低減のためには、鋼中の Ti 含有量を極力少なくすることが重要である。溶鋼中への混入源は成分調整に使用される合金鉄，とくにフェロクロムに含有されている Ti である。通常、フェロクロムは取鍋精練工程で溶鋼中に添加されるが、この段階では溶鋼中の酸素レベルが低いため、Ti を酸化物として除去するのは困難である。当社では溶鋼中酸素レベルが高い転炉での脱炭精練時にフェロクロムを溶解することにより、Ti を酸化物 (TiO_2) として転炉スラグに吸収除去し、溶鋼中の Ti 量を平均 7ppm 程度まで低減している。

1.4 転動疲労寿命の評価結果

高純度処理により製造した SUJ2 の転動疲労寿命を評価した。供試材の化学成分組成を第1表に示す。神戸製鉄所にて製造している通常材 A, B を比較評価材とした。供試材は 65mm の丸棒に熱間圧延後、各種調査の試験片を採取した。

第2表に示す条件で転動疲労試験をおこなった。試験結果を第4図に示す。通常材と比較して高純度処理材は L_{10} 寿命（総試験片のうち10%の試験片が破損したときの応力繰返し回数）が 80×10^6 回以上となり数倍の寿命向上が認められた。

1.5 転動疲労寿命と介在物評価法の相関調査

1.5.1 介在物評価法の検討

鋼中酸素量が 10ppm 以下の超純鋼になると鋼中酸素量や従来の JIS 法や ASTM 法などによる介在物評価方法では転動疲労特性との相関が低くなるといわれている¹⁾。このため超純鋼の介在物評価方法として電子ビーム溶解法，極値統計法などの報告がおこなわれている²⁾³⁾。当社では、酸溶解法をもちいて転動疲労寿命と

第1表 供試材の化学成分組成

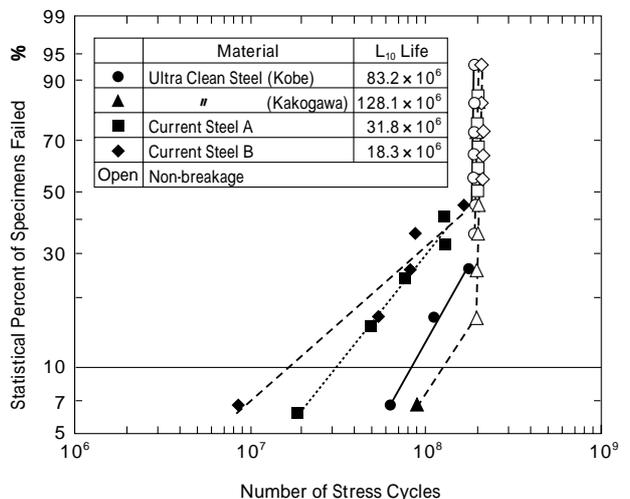
Table 1 Chemical compositions of materials

| Material | Chemical Compositions mass% | | | | | | ppm | |
|------------------------------|-----------------------------|------|------|-------|-------|------|----------------|----|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | O _T | Ti |
| Ultra Clean Steel (Kobe) | 1.00 | 0.25 | 0.37 | 0.014 | 0.005 | 1.44 | 4 | 7 |
| Ultra Clean Steel (Kakogawa) | 1.00 | 0.25 | 0.33 | 0.023 | 0.004 | 1.50 | 5 | 9 |
| Current Steel A | 1.00 | 0.28 | 0.39 | 0.014 | 0.006 | 1.55 | 7 | 9 |
| Current Steel B | 1.00 | 0.23 | 0.34 | 0.009 | 0.006 | 1.46 | 9 | 9 |

第2表 試験条件（スラスト型転動疲労試験）

Table 2 Conditions of rolling fatigue test (thrust disk specimen)

| | | |
|-------------|-----|-----------------|
| Load | N | 3 920 |
| Max. Stress | MPa | 5 230 |
| Speed | rpm | 1 000 |
| Lubricant | | Spindle Oil #60 |



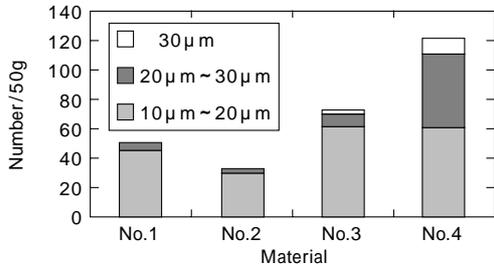
第4図 転動疲労寿命試験結果

Fig. 4 Result of rolling fatigue life test

の相関を調査した。酸溶解法は供試材 50g を溶解して介在物を抽出分離する。観察面厚さを $10 \mu m$ と想定すると、総観察面積は約 60 万 mm^2 になり、従来の検鏡法と比較して非常に広範囲の評価が可能である。また回転曲げ疲労試験を実施し疲労破面に現れた介在物組成を調査した。

1.5.2 酸溶解法による介在物評価結果

転動疲労寿命試験でもちいた酸素量 9ppm 以下の各供試材を使用して、酸溶解をおこなった。酸溶解法は供試材を 80 の温硝酸で溶解するが、 Al_2O_3 リッチな介在



| | Material | The Maximum Size of Inclusion |
|---|------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Ultra Clean Steel (Kobe) | 23µm |
| 2 | Ultra Clean Steel (Kakogawa) | 27µm |
| 3 | Current Steel A | 50µm |
| 4 | Current Steel B | 52µm |

第5図 酸溶解法による介在物評価結果

Fig. 5 Results of inclusion distribution by acid dissolution method

物は酸に溶解せず残さとして抽出される。抽出された粒径10µm以上の介在物の粒径および個数をEPMAにて測定した結果を第5図に示す。高潔度処理材は通常材にくらべて、介在物個数が少なく、最大介在物粒径は小さい。酸溶解法による評価では、酸素量9ppm以下の清浄鋼において、通常材と高潔度処理材の清浄度に差が認められた。

1.5.3 考察

1) 転動疲労寿命と酸溶解法による介在物評価結果の関係

第6図、第7図に酸溶解法評価による介在物個数および最大介在物粒径と転動疲労寿命 (L_{10} 寿命) の関係を示す。ともに相関がみられたがとくに介在物個数とは良い相関が認められた。酸溶解法ではスラグの巻き込みと思われる比較的CaO含有率の高い介在物の抽出はできないので、このような組成の介在物を含有する鋼については正確な清浄度評価ができなかった。

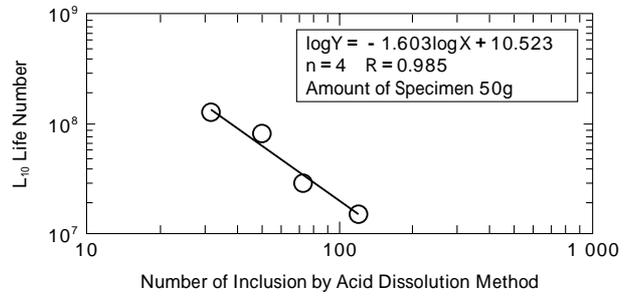
しかし以下に述べる回転曲げ疲労試験での介在物組成調査では、供試材中にこのような介在物が認められず、いずれも Al_2O_3 リッチ組成にコントロールされた介在物であった。このため精度よく介在物個数が評価でき、転動疲労寿命と良い相関がみられたと考えられる。転動疲労破壊の発生率は、試験片でもっとも試験応力のかかる場所に、ある粒径以上の介在物が存在する確率で決定されることを考えると、総介在物個数および粒径分布の両方を考慮して転動疲労寿命との関係性を評価していくことが重要であると思われる。

2) 最大介在物粒径の推定

供試材の軸芯を含む縦断面より試験片を採取し、検鏡法で介在物の粒径を測定し、村上らの方法⁴⁾をもちい極値統計により、最大介在物粒径を予測した。基準視野面積を300mm²とし、20視野(6000mm²)を測定した。第8図に予測結果を示す。酸溶解法に対応する60万mm²中に存在する最大介在物粒径は高潔度材が24.0µmと32.9µm、通常材が32.0µmと31.6µmであった。酸溶解法での結果は高潔度材が23µmと27µm、通常材が50µmと52µmであり、高潔度材については近い値であるが、通常材では予測結果と差がみられた。

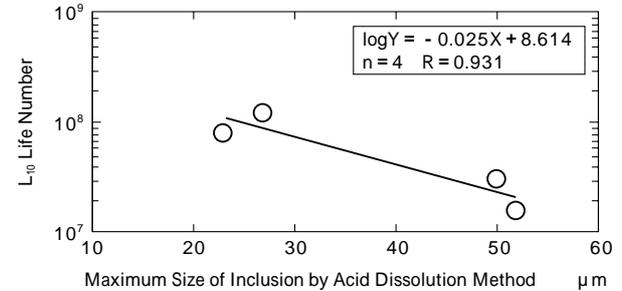
1.6 回転曲げ疲労試験結果

小野式回転曲げ試験をおこない疲労限度と破面に現れ



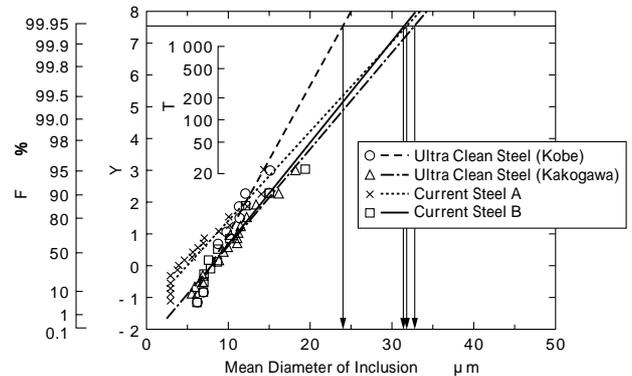
第6図 L_{10} 寿命と酸溶解による介在物個数の関係

Fig. 6 The relationship between L_{10} fatigue life and number of inclusion by acid dissolution method



第7図 L_{10} 寿命と酸溶解による最大介在物粒径の関係

Fig. 7 The relationship between L_{10} fatigue life and maximum size of inclusion by acid dissolution method



第8図 極値統計法による最大介在物粒径の推定

Fig. 8 Estimation of the maximum size of inclusion by statistics distribution of extreme values

第3表 回転曲げ疲労試験結果

Table 3 Results of rotating bending fatigue test

| Material | w_b MPa | Frequency of Ti Inclusions on Fractured Surface % |
|------------------------------|-----------|---|
| Ultra Clean Steel (Kobe) | 1 226 | 60 |
| Ultra Clean Steel (Kakogawa) | 1 206 | 50 |
| Current Steel A | 1 157 | 30 |
| Current Steel B | 1 118 | 0 |

た介在物の組成を調査した。なお介在物の分析はEPMAにておこなった。第3表に疲労限度と破面に現れた全介在物数に占めるTi系介在物の比率を示す。通常材よりも高潔度処理材の疲労限度 w_b は約10%増加している。また通常材の破面に現れた介在物組成は Al_2O_3 リッチな $MgO-Al_2O_3$ や $CaO-Al_2O_3$ などが多いが、高潔度処理材になると Al_2O_3 リッチなもの以外にTi系介在物で破断する比率が高くなっている。

酸溶解での介在物評価では高潔度処理により製造された鋼は通常材と比較して Al_2O_3 リッチな介在物の粒径が小さくなっていた。このため比較的小型のチタン系介在物でも破断の起点になる確率が高くなったと推定され

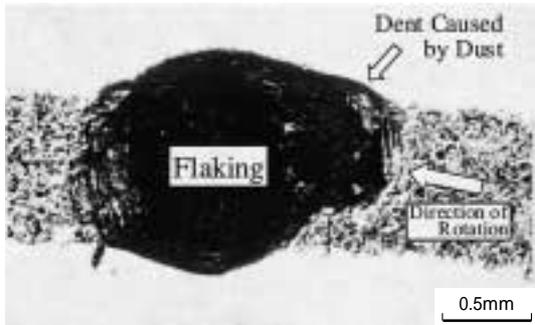
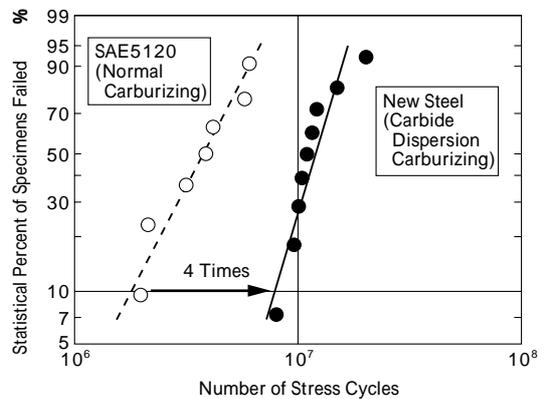


写真1 異物環境下での破壊形態

Photo 1 Fatigue fractured surface under debris contaminated lubrication

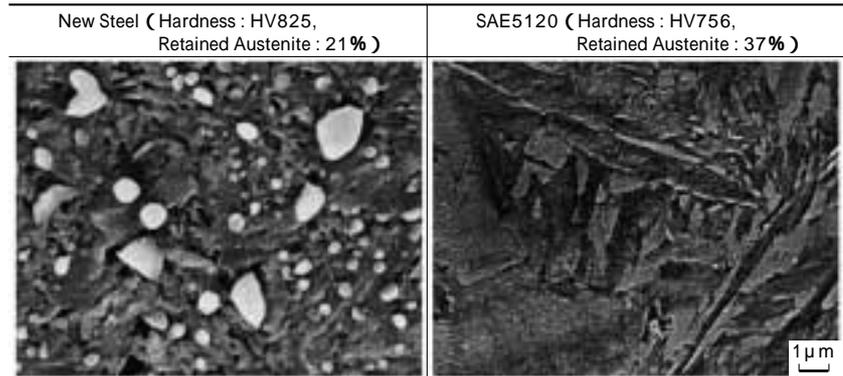


第9図 疲労試験結果

Fig. 9 Fatigue test under debris contaminated lubrication

写真2 SEM像(開発鋼:高濃度浸炭, SAE5120:通常浸炭)

Photo 2 SEM image (New steel: Carbide dispersion carburizing, SAE5120: Normal carburizing)



る。つまり大型酸化物系介在物が減少した高 cleanliness 処理材において今後さらに疲労寿命向上を図るためには、Ti 系介在物も極力少なくすることが望ましいことを示唆している。

2. 異物環境下での長寿命軸受鋼の開発

自動車のデファレンシャルやトランスミッションなどで使用されている軸受には写真1に示すような摩耗粉などの異物が混入し、表面に異物が押し付けられてきた圧痕が剥離の起点になる。この結果、大幅に転動疲労寿命が低下する。したがって異物環境下で転動疲労寿命を向上するためには清浄油中で使用する場合とは異なった対策が必要になる⁵⁾。

圧痕ができる環境下で転動疲労寿命を延ばすために以下の手段が考えられる。

圧痕生成に対する抵抗力向上

生成した圧痕での応力集中の緩和

圧痕から発生したき裂伸展の抑制

は硬さ向上、 σ_c は残留オーステナイト分率の増大によりえられる。しかし、残留オーステナイト分率を増すとマルテンサイト分率が下がり、硬さが低下する。SUJ2では、通常、残留オーステナイト分率が10%以下であるのに対し、20~30%の残留オーステナイト分率をもった軸受用肌焼鋼を開発した。ただし肌焼鋼でSUJ2と同様にHV800以上の高い硬さをえるには、炭化物の多量析出による硬さ向上が必要になる。

そこで微細な炭化物を多数析出させるため、SAE5120の成分をベースにSi, Crを増量添加した鋼をもちい、高濃度浸炭処理を実施した。炭化物の析出状況を写真2に示す。3 μ m以下の微細な炭化物が多数析出して残留オーステナイト分率が20%以上と多いにもかかわらずHV800以上の高い硬さになっている。

異物環境下でおこなったスラスト式転動疲労試験結果を第9図に示す。SAE5120の通常浸炭材にくらべ、 L_{10} 寿命が4倍に大幅に向上した。このように、高濃度浸炭処理の適用を前提として、浸炭表層部に微細炭化部が多数析出し、残留オーステナイト量も最適化可能な鋼材の開発により、異物環境下での長寿命が達成できた。

むすび = 軸受が使用される潤滑環境は、クリーンなものから異物を含むものまで多様である。当社は、それぞれの潤滑環境下で長寿命化を達成できる超清浄鋼および高濃度浸炭用肌焼鋼を開発した。今後、軸受の長寿命化が必要とされるユーザーニーズに対応していきたい。

参考文献

- 1) 阿部 力ほか: NSK Technical Journal, No.65(1992), p.1.
- 2) 塗 嘉夫ほか: 鉄と鋼, 第75年(1989), p.1897.
- 3) 奈良井弘ほか: 材料とプロセス, Vol.4, No.4(1991), p.1178.
- 4) 村上敬宜: 金属疲労微小欠陥と介在物の影響(1993), p.233, 養賢堂.
- 5) 戸田一寿ほか: トライボロジスト, Vol.43, No.6(1998), p.522.