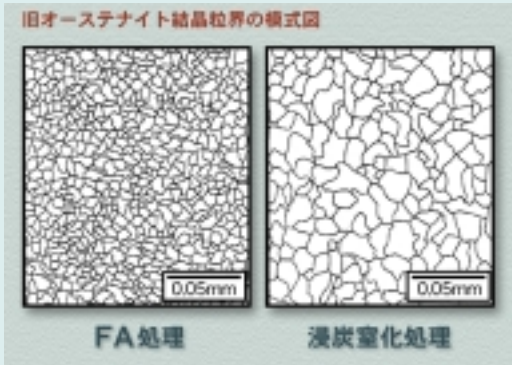


## 結晶粒の微細化による軸受鋼の長寿命化 Improving Rolling Contact Fatigue Life of Bearing Steels Through Grain Refinement



大木 力\* Chikara OOKI  
前田喜久男\* Kikuo MAEDA  
中島 碩一\* Hirokazu NAKASHIMA

軸受の使用環境はますます苛酷化となり、一層の長寿命化が求められている。本文では軸受鋼の転動疲労寿命を従来の5倍以上に長寿命化した結晶微細化技術について報告する。

It is well known that yield strength can be improved by reducing the ferritic grain size (i.e. Hall-Petch's Law) and that through a reduction in the ferritic grain size an increase in a steel's fatigue life is observed. However, the specific effect of grain refinement on rolling contact fatigue life has not been thoroughly investigated. The primary obstacle in researching hardened steels (which possess a martensitic structure) has been the difficulty in obtaining small, uniform grain sizes. Recently, some new methods for the grain refinement of hardened steels have been discovered. One such method is called "Ausforming", which induces a large deformation at temperatures over Ac1. Unfortunately, this remarkable method is as yet unavailable for practical manufacturing. Keeping this in mind, we set out to develop a specialized heat-treatment process. The main objective was to obtain a grain refined martensitic structure within JIS-SUJ2 (SAE52100 equivalent) bearing steel, produced by a standard manufacturing process, while at the same time minimizing productivity loss. Thus far, we have succeeded in creating a prior austenite grain size of approximately 5  $\mu$ m in diameter (half that of the conventional grain size). It is believed that the packet or block size of the martensite decreases proportionally with that of the prior austenite grain size. As a result, during RCF testing, the grain refined SUJ2 material demonstrated a fatigue life that was twice as long as carbonitridized steel under both clean and debris-contaminated conditions. In addition, the grain refined SUJ2 material was superior in fracture strength and aged dimensional stability. Therefore, it can be concluded that the grain refinement of existing bearing steels could prove to be very useful in greatly extending fatigue life.

### 1. まえがき

鋼は多結晶体であり、旧オーステナイト結晶粒界やマルテンサイト、フェライト等の結晶粒界が存在する。これら結晶粒の大きさがマクロ的な特性に及ぼす影響については、今まで数多くの研究がなされてきた。例えば、結晶粒が細かいほど材料の降伏強度が上昇するというHall-Petchの法則や、疲労強度は結晶の微細化に伴って向上するという報告<sup>1)</sup>がある。このような鋼の特性変化は、一般的に結晶粒微細化強化と呼ばれている。

一方、結晶粒微細化強化が軸受の転動疲労寿命に及ぼす影響については、これまであまり研究されていない。これは、焼入された軸受用鋼の結晶粒は、既に相当細かいこと、また、細か過ぎる結晶粒は鋼の焼入性を阻害することの他、現行以上の微細化にはオースフォーミングや、Grangeの方法<sup>2)</sup>のような特別な処理が必要であると考えられているためである。本研究では、熱処理工程の工夫による軸受鋼の結晶粒微細化強化を行い、転動疲労寿命の長寿命化を試みたので報告する。

\*総合技術研究所 基礎技術研究部

## 2. 結晶粒微細化について

一般的に、結晶粒の大きさは焼入時の加熱温度に大きく依存する<sup>3)</sup>ので、オーステナイト変態点以上の温度で、かつ、なるべく低い温度で加熱すれば、より細かい組織の得られることが予測される。しかし、軸受材質として十分な硬度を有するためには、一定量以上の炭素をマルテンサイト中に固溶させる必要があり、この固溶量は加熱温度が高いほど多くなる。したがって、焼入時の加熱温度は、炭素の固溶量、結晶粒の細かさの両者を考慮した上で決定しなければならず、従来は焼入加熱温度を大きく下げることができなかった。

そこで本研究では、焼入工程を2回に分けることにより、炭素の固溶量を確保しつつ、加熱温度の低温化を行って、結晶粒の微細化を図った。すなわち、1次焼入時においてマルテンサイト中に十分な炭素を固溶させつつ、鋼のAc1変態点を下げる目的で窒化処理を施し、その後、2次焼入工程の加熱保持温度を低温化させて、微細な結晶粒を得るという方法である。

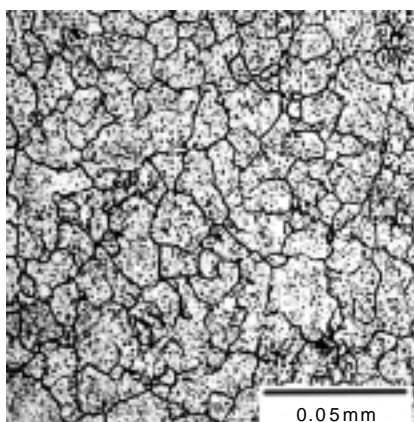
この結晶粒微細化方法に基づいて熱処理条件を最適化した結果、JIS-SUJ2において、旧オーステナイト結晶粒界を平均粒径で5 $\mu$ m以下にし、かつ、焼戻(180 $\times$ 2h)後硬度でHV700以上を確保する条件を見出した。この特別な熱処理工程によって得られる、微細化された窒化層を持つ材質を、以下ではFA処理品と称することにする。普通焼入品、浸炭窒化処理品、及び、FA処理品の旧オーステナイト結晶粒界を写真1に示す。FA処理品は、他の1/2以下の結晶粒径になっている。

## 3. 点接触転動疲労寿命試験

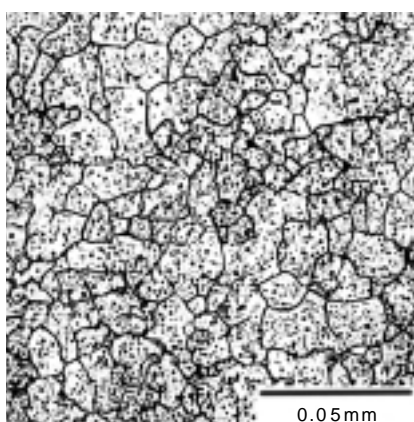
基本的な転動疲労特性を調査するため、12 $\times$ L22の円筒試験片を用いて、清浄油潤滑下での転動疲労寿命を評価した。供試材はSUJ2材で、鋼の清浄度が普通のもの、劣るものの2水準にて評価を行った。NTN製介在物定量装置<sup>4)</sup>を用いた非金属介在物量の評価結果を図1に示す。図1中のType IはA系介在物及びTiNを表し、Type IIはTiNを除くB、C系介在物を表すが、清浄度の劣る材料はType I、Type II共に多くなっている。



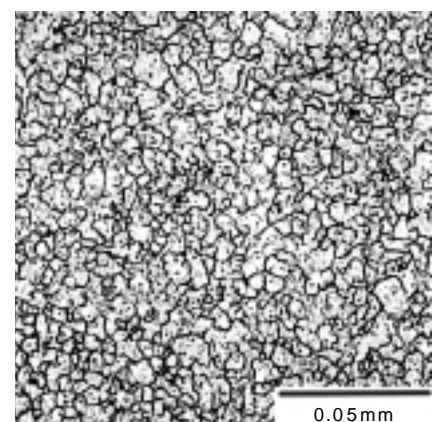
図1 介在物分布図  
Size distributions of non-metallic inclusions  
(Measurement area:1000mm<sup>2</sup>)



普通焼入品



浸炭窒化処理品



FA処理品

写真1 旧オーステナイト結晶粒界  
The prior austenite grain boundaries

試験機の概略図を図2に示し、試験条件を表1に示す。

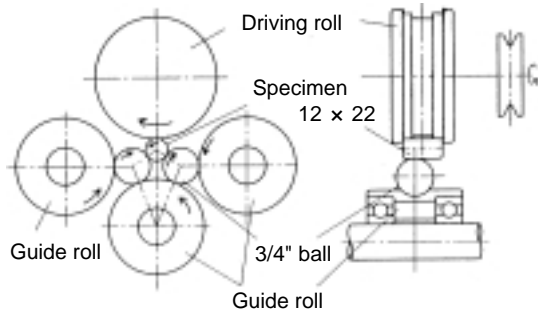


図2 点接触転動疲労試験機概略図  
12 point contact type rolling contact fatigue test rig

表1 試験条件  
Test condition of point contact fatigue test

試験片	12 x L22円筒試験片
相手鋼球	3/4" (19.05mm)
最大接触面圧 (GPa)	5.88
負荷速度 (cpm)	46240
潤滑	タービンVG68強制潤滑給油

点接触転動疲労試験の結果を表2に示す。清浄度が普通である鋼に着目すると、普通焼入品に比較して浸炭窒化処理品の  $L_{10}$  寿命は3.1倍であるが、FA処理品は5.4倍になっており、結晶粒微細化による長寿命化が認められた。また、清浄度の劣る鋼におけるFA処理品は、浸炭窒化処理品の3.5倍もの長寿命化が認められ、剥離の起点となる非金属介在物の多い材料ほど、結晶粒微細化の好影響はより顕著になると考えられる。なお、清浄度の劣る鋼の普通焼入品は、転動初期に表面きれつを伴う早期剥離を起こしたため、寿命を算出することができなかった。

表2 点接触転動疲労寿命試験の結果  
Test results of point contact fatigue test

清浄度	熱処理	N数	端面硬度 (HRC)	$L_{10}$ 寿命 (回)	$L_{50}$ 寿命 (回)	$L_{10}$ 寿命比
普通	普通焼入品	14	62.4	$8017 \times 10^4$	$18648 \times 10^4$	1
	浸炭窒化処理品	7	63.0	24656	33974	3.1
	FA処理品	6	61.6	43244	69031	5.4
劣る	普通焼入品	4	62.5	- <sup>1)</sup>	-	-
	浸炭窒化処理品	10	63.6	9018	21653	1.1
	FA処理品	10	60.5	30327	55040	3.8

1) 全数、早期に剥離を起こしたため、算出不可能であった。

#### 4. 異物混入潤滑条件下での寿命試験

製鋼技術の進歩により鋼の清浄度向上が図られた結果、清浄潤滑、かつ、適切な使用条件下では、転動疲労によって生じる内部起点型剥離は、ほとんど発生しなくなってきている<sup>5)</sup>。

一方軸受の使用環境は、近年、より過酷になっており、特に自動車用途では硬質異物の混入が避けられず、異物によって形成される圧痕を起点とした剥離が、主な軸受の破損形態になっている。このような用途に対しての結晶粒微細化強化の効果を評価した。

今回は、比較的大きい異物混入潤滑条件下において、玉軸受6206、及び、テーパ軸受30206の寿命試験にて評価した。

##### 4.1 玉軸受6206の異物混入潤滑条件下での転動寿命試験

供試軸受は、SUJ2より製作した普通焼入品、浸炭窒化処理品、FA処理品の玉軸受6206である。各軸受の主な材質特性を表3に示す。FA処理品の残留オーステナイト量は、浸炭窒化処理品と普通焼入品の中間の値である。

表3 玉軸受6206の材質特性(0.05mm深さ位置にて)  
Metallurgical properties of ball bearing 6206  
(0.05mm depth from surface)

熱処理	旧オーステナイト粒界平均結晶粒径(μm)	HV硬さ	残留応力 (MPa)	残留オーステナイト量(%)
普通焼入品	10.5	746	+15	7.1
浸炭窒化処理品	9.4	752	-110	25.5
FA処理品	4.4	733	-122	18.9

試験機の略図を図3に示し、試験条件を表4に示す。

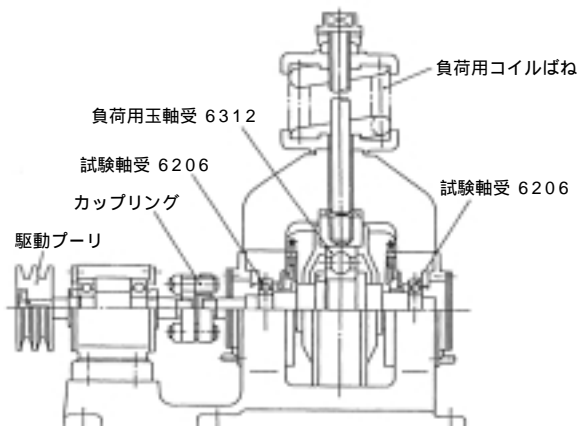


図3 玉軸受転動疲労試験機の略図  
NTN rolling contact fatigue test rig for ball bearing

表4 玉軸受6206における異物混入潤滑下の試験条件  
Test condition of 6206 ball bearing under contaminated lubrication

荷重 $F_t$ (kN)	6.86
最大接触面圧 (GPa)	3.2
回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )	3000 (内輪回転)
潤滑	タービン56 油浴給油, 油量約30ml
異物量	0.4g/L
異物の種類	ガスアトマイズ粉: 粒径100~180 $\mu\text{m}$ , 硬さ HV800程度

寿命試験結果を表5に示す。FA処理品の $L_{10}$ 寿命は、普通焼入品の3.7倍、浸炭窒化処理品の2.1倍という長寿命となった。圧痕起点型剥離のように局所的な応力集中によって発生する損傷形態においても、結晶粒の微細化は好影響をもたらすことが分かった。

従来より、異物混入潤滑下での寿命は、残留オーステナイト量が多く、かつ、高硬度なほど有利であると報告されている<sup>6)</sup>が、表3に示したように、FA処理品は、残留オーステナイト量が浸炭窒化処理品より少ないにも関わらず、長寿命となった。結晶粒微細化強化は、残留オーステナイト量の減少に伴って生じる寿命低下を補う以上の効果があると考えられる。

表5 玉軸受6206における異物混入潤滑条件下の転動寿命試験結果  
RCF-life test results of 6206 under contaminated lubrication

熱処理	N数	$L_{10}$ 寿命 (h)	$L_{50}$ 寿命 (h)	$L_{10}$ 寿命比 (普通焼入品を1.0とする)
普通焼入品	4	13.1	19.4	1.0
浸炭窒化処理品	7	23.0	45.5	1.8
FA処理品	7	48.0	87.2	3.7

#### 4.2 テーパー軸受30206の異物混入潤滑条件下での寿命試験

供試軸受は、SUJ2から製作した普通焼入品、浸炭窒化処理品、FA処理品のテーパー軸受30206である。各軸受の主な材質特性を表6に示す。前述した玉軸受6206と同様に、FA処理品の残留オーステナイト量は、普通焼入品以上、浸炭窒化処理品以下の量である。

表6 テーパー軸受30206の材質特性(0.05mm深さ位置にて)  
Metallurgical properties of 30206 tapered roller bearing (0.05mm depth from surface)

熱処理	旧オーステナイト粒界平均結晶粒径( $\mu\text{m}$ )	HV硬さ	残留応力 (MPa)	残留オーステナイト量 (%)
普通焼入品	11.8	792	+10	6.0
浸炭窒化処理品	12.2	763	-140	32.4
FA処理品	5.2	748	-118	23.3

試験機の略図を図4に示し、試験条件を表7に示す。

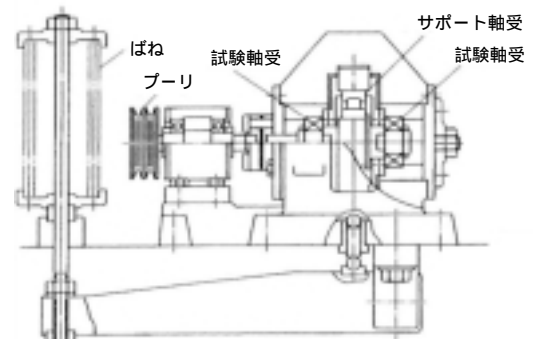


図4 30206テーパー軸受転動疲労試験機の略図  
NTN rolling contact fatigue test rig for tapered roller bearing

表7 テーパー軸受30206における異物混入潤滑下の寿命試験条件  
Test condition of 30206 tapered roller bearing under contaminated lubrication

荷重 (kN)	$F_t$	17.64
	$F_a$	1.5
最大接触面圧 (GPa)	2.5	
回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )	2000 (内輪回転)	
潤滑	タービン56 油浴給油, 油量約30ml	
異物量	1.0g/L	
異物の種類	ガスアトマイズ粉: 50 $\mu\text{m}$ 以下(90 wt%), 100~180 $\mu\text{m}$ (10 wt%) 硬さ HV800程度	

寿命試験結果を表8に示す。FA処理品の寿命は、普通焼入品の4.1倍、浸炭窒化処理品の2.0倍の長寿命を有しており、結晶粒微細化強化の影響が顕著な結果となった。

表8 異物混入潤滑寿命の試験結果

The RCF-life test results of 30206 tapered roller bearing under contaminated lubrication

熱処理	N数	L <sub>10</sub> 寿命 (h)	L <sub>50</sub> 寿命 (h)	L <sub>10</sub> 寿命比 (普通焼入品を1.0とする)
普通焼入品	6	101.2	117.3	1.0
浸炭窒化処理品	6	211.6	284.5	2.1
FA処理品	6	415.6	464.3	4.1

### 5. 経年寸法変化

軸受を高温下で長時間使用する場合、組織構造の変化から、軸受の寸法変化が発生するが、これは主に、残留オーステナイトのマルテンサイトへの変態膨張によって生じるものである。したがって、残留オーステナイト量の多い軸受材質ほど経年寸法変化量は増大し、高温での使用が困難となってくる。FA処理品の残留オーステナイト量は、浸炭窒化処理品よりは少ない傾向にあるので、経年寸法変化率の小さいことが予想される。

玉軸受6206の外輪を100℃、120℃でそれぞれ2500h保持してその寸法変化量(膨張量)を比較した結果を表9に示す。FA処理品は従来の浸炭窒化処理品よりも経年寸法変化率が明らかに減少しており、特に100℃保持の場合においては、普通焼入品の1.3倍程度に抑制されている。使用環境が更に苛酷化していく今後において、経年寸法変化率が少ないというFA処理品の特長は、より重要なものになると考えられる。

表9 経年寸法変化量(2500h保持後)  
Dimensional change after 2500h-soak

熱処理	残留量(%)	経年寸法変化量 <sup>1)</sup>	
		保持温度: 100	保持温度: 120
普通焼入品	7.0	1.0	1.0
浸炭窒化処理品	27.7	1.8	2.5
FA処理品	20.5	1.3	1.6

1) 普通焼入品に対する比

### 6. 強度特性

外径 60×内径 45×幅15のリング試験片を製作し、リングの静的破壊応力を調べた。

また、JIS3号シャルピー衝撃試験片(Uノッチ)による衝撃強度も調査した。表10に示すように、浸炭窒化処理品の静的破壊応力やシャルピー衝撃強度は、普通焼入品より低下している。しかし、FA処理品は浸炭窒化層を有しているにも関わらず、普通焼入品とほぼ同程度まで強度が回復した。

表10 強度試験結果  
Test results of fracture strength

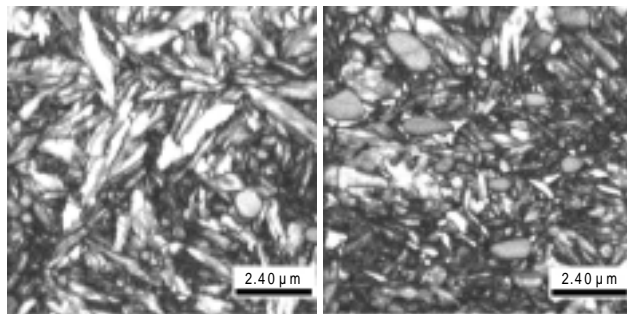
熱処理	静的破壊応力(MPa)	シャルピー衝撃強(J/cm <sup>2</sup> )
普通焼入品	2770	6.70
浸炭窒化処理品	2330	5.33
FA処理品	2840	6.65

### 7. 考察

第3、4章で述べたように、FA処理品の転動疲労寿命は、従来の浸炭窒化処理品よりも向上する。この理由としては、微細な結晶粒によって転動疲労現象の進行が遅延されることが考えられる。

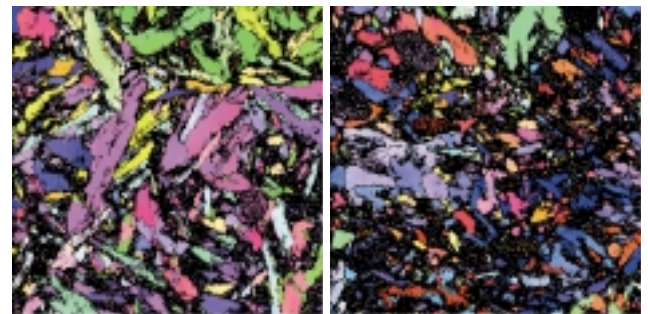
図1に示した様に、FA処理品の旧オーステナイト結晶粒径は従来品の1/2以下になるが、1つの旧オーステナイト結晶粒の中には、幾つかのマルテンサイト結晶粒が形成されており、この粒界が、寿命や強度に大きな影響を及ぼしていると考えられる。そこで、FE-SEM/EBSP測定装置<sup>7)</sup>により結晶方位差分布像を求め、浸炭窒化処理品とFA処理品のマルテンサイト結晶粒径の違いを算出した。

FE-SEM/EBSPによるイメージ画像を写真2に、結晶方位差分布像を写真3に示す。浸炭窒化処理品に比べ、FA処理品のマルテンサイト結晶粒は明らかに細かくなっている。結晶方位差が10°以内の領域を同一の結晶と見なし、それと同面積になる円の直径を粒径として換算した場合、浸炭窒化処理品は平均0.66μm、FA処理品は平均0.49μmであった。微細化処理による長寿命化は、マルテンサイトの結晶粒も一緒に細かくなったために引き起こされた現象であると考えられる。



浸炭窒化処理品

FA処理品

写真2 FE-SEM/EBSP測定装置によるイメージ画像  
Image of FE-SEM/EBSP

浸炭窒化処理品

FA処理品



ミラー指数



ミラー指数

写真3 FE-SEM/EBSP測定装置による結晶方位差分布像  
Distribution of crystal orientations by FE-SEM/EBSP

## 8. まとめ

軸受鋼に浸炭窒化後2次焼入れを施すことにより、鋼の旧オーステナイト結晶粒径を従来の1/2に微細化することに成功した。各種試験により、この微細結晶材は以下の特性を持つことが明らかとなった。

- 1) 転動疲労寿命は潤滑条件に関わらず、浸炭窒化品の約2倍となる。
- 2) 経年寸法変化は浸炭窒化処理品の70%以下となる。
- 3) 浸炭窒化により低下した静的強度や衝撃強度が回復する。

当社では本微細結晶化技術を一部の用途向けに提供を始めた。軸受の使用環境が厳しくなるにつれ、本技術が求められる用途はますます広がっていくものと思われる。

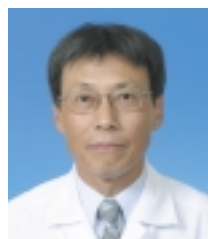
### 参考文献

- 1) 田中啓介ら："鉄鋼材料の疲労破壊の機構と力学", 鉄と鋼, 79巻, 8号(1993), 908
- 2) 横田智之ら："0.3%-9%Ni鋼の逆変態 粒径に及ぼす大ひずみ温間加工の影響", 鉄と鋼, 86巻, 7号(2000), 479
- 3) 日本金属学会：金属便覧, 丸善株式会社(2000)122.
- 4) 村上裕志, NTN TECHNICAL REVIEW No.68(2000), 58
- 5) 前田喜久男ら, NTN TECHNICAL REVIEW No.65(1996), 17
- 6) 村上保夫："ごみ入り潤滑下での長寿命・TF化技術", 機械設計, 39巻, 13号(1995), 33
- 7) 鈴木清一："EBSP法の基本原理と最近のナノビーム化の利点", まてりあ, 40巻, 7号(2001), 612

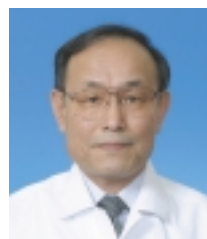
### 執筆者近影



大木 力

総合技術研究所  
基礎技術研究部

前田喜久男

総合技術研究所  
基礎技術研究部

中島 碩一

総合技術研究所  
基礎技術研究部