

## 新しい高温長寿命軸受鋼( STJ2 )の開発

田中 広政\* 藤井 幸生\* 前田 喜久男\*

## Development of High Temperature, Long Life Bearing Steel (STJ2)

By Hiromasa TANAKA, Yukio FUJII, Kikuo MAEDA

The development of long life rolling bearings under severe conditions is a fundamental and important technology to save industrial energy. Approximately 10 years ago, NTN developed a long life bearing steel (NTJ2) which can be used up to 150°C. The high heat resistance and long life of this steel were due to the purity of the steel and silicon (Si) alloying. More improvement, however, is still required to increase operation temperatures, considering future demand. The mechanical properties of the rolling element, especially rolling contact fatigue life, were further improved by optimizing the alloying elements of the Si alloyed bearing steel. The optimum chemical composition was determined by considering both mechanical properties and manufacturing properties. This new steel, named STJ2, is the standard material for LH (Long life for High temperature use) bearings. LH bearings have long life and dimensional stability up to 250°C. They also have a high resistance to surface damage under starved lubrication. These excellent mechanical properties are based on STJ2's metallurgical characteristics, such as high temperature hardness and microstructural stability against the high cyclic stresses due to rolling contact.

## 1. はじめに

近年、実用軸受の使用条件はますます多様化、過酷化しており、特に自動車や産業機械関係では軽量、低燃費、高効率といった点から、軸受はより高温、高速、高荷重、低粘度油潤滑で使用されるようになってきた。このような厳しい使用環境では、従来の高炭素クロム鋼製の軸受が高温雰囲気中に保持されることになり、常温で示していた硬さや強度は低下する。また、高温保持による軸受の寸法変化を避けるために、通常は焼戻温度を高めた軸受を用いるが、焼戻温度が高い分、軸受の硬さや強度は低下する。このように高温用途のような厳しい使用条件では、鋼の清浄度を高めて非金属介在物を減らすだけでは軸受の長寿命化が期待できず、鋼自体の耐熱性を高めることが必要になる。これまでの高温用軸受材料としてはM50やT1などに代表されるように、Cr、Mo、WおよびVを添加したMo系あるいはW系の高速度鋼が使用されてきた。しかしな

がら、これらの材料は高合金鋼のため価格が高く、特殊用途に限られて用いられている。また、初析の炭化物が大きいことより、常温では必ずしも長寿命を示さない。

NTNではおよそ10年前に、高清浄度鋼に1%程度のSiを添加し、焼戻軟化抵抗を高めた準高温用長寿命軸受材料NTJ2を開発した<sup>1), 2)</sup>。NTJ2製軸受は常温から150℃までの準高温用軸受であり、軸受使用条件の苛酷化に対応するためには、さらに使用可能温度を高めることが望まれる。このような背景の下、常温から250℃までの広い温度範囲で長寿命を示すSTJ2を新たに開発した。STJ2は高い耐熱性を有する鋼であるが、従来的高温用軸受用鋼のような高合金鋼ではなく、特殊用途に限らず、幅広い産業分野で汎用的に用いられる新しい軸受用鋼であると考えられる。本稿ではこの高温長寿命軸受鋼STJ2の諸特性について述べる。

\*軸受技術研究所

## 2. STJ2の化学成分

鋼の転動疲労寿命に影響を及ぼす合金元素として、Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V等があるが、この中でもSiの添加は転動寿命を向上させる<sup>3)</sup>ことが以前から知られていた。Si添加によって、鋼の焼戻軟化抵抗性が高まり、高温硬度が高くなるのが寿命に対して好影響を及ぼしているからである。高Si軸受鋼の特性については、準高温用長寿命材NTJ2の開発時に紹介している<sup>2)</sup>が、STJ2材ではNTJ2をベースに、さらに合金成分の最適化を図った。

高Si軸受用鋼の高温での転動疲労寿命に及ぼす合金

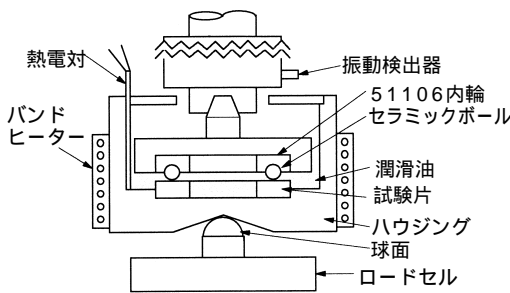


図1 スラスト型高温寿命試験機  
Thrust type rolling contact fatigue test rig for high temperature condition

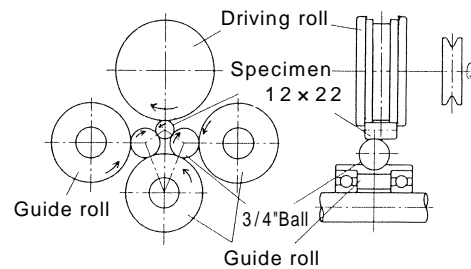


図3 点接触型転動疲労寿命試験機  
12 point contact type rolling contact fatigue test rig

表1 200 高温寿命試験の試験条件  
Test condition of rolling contact fatigue life at 200°C

試験機	NTNスラスト型高温寿命試験機
試験片	47 x 29 x t7 平板
相手ボール	6.35 セラミックボール
油温	200
接触応力	$P_{max} = 5.5 \text{ GPa}$
潤滑油	エーテル系合成油
油膜パラメータ	0.85

表2 点接触型転動疲労寿命試験の条件  
Test condition of point contact fatigue

試験機	NTN点接触型寿命試験機
試験片	12 x l 22 円筒
相手ボール	3/4" 鋼球 2個
接触応力	$P_{max} = 5.88 \text{ GPa}$
負荷速度	46240 cpm
潤滑	タービン油 VG68

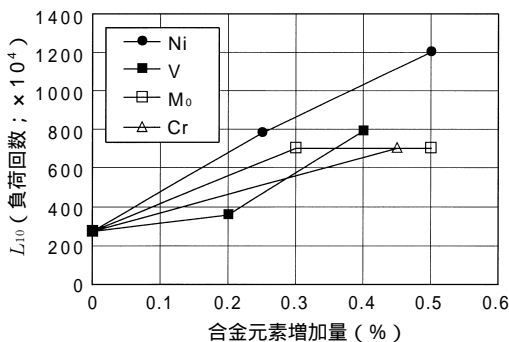


図2 高Si軸受用鋼に及ぼす合金元素の影響  
(200 高温寿命)  
Influence of alloying element on rolling contact fatigue life of Si alloyed steel (at 200°C)

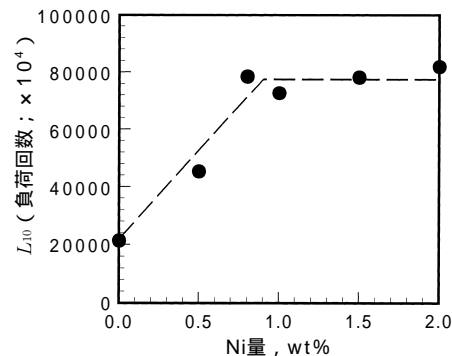


図4 高Si鋼のNi量と転動疲労寿命  
Relation between Ni alloying content and rolling contact fatigue life of Si alloyed steel

SiおよびNiはおもにマトリックス(地金)に固溶し、これを強化する合金元素であるが、鋼の中に点在する炭化物も強化に寄与するものである。高速度鋼のような高合金鋼に含まれる大きな炭化物は転動疲労によるきれつ発生源となるが、適度な大きさの炭化物を鋼の中に適量含ませれば、粒子分散強化が図れると考えられる。したがって炭化物を積極的に析出させるために鋼中のC量を高め、図5に示すミクロ組織とした。

以上述べた転動疲労寿命に及ぼす合金元素の調査結果に加え、冷間加工性、焼入硬度特性などの製造性、および素材コストを鑑み、STJ2の最適な化学成分を決定した。

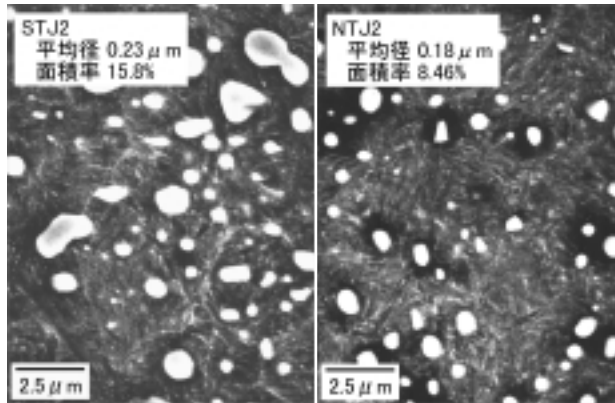


図5 ミクロ組織 (STJ2とNTJ2の未溶解炭化物の析出状況)  
Microstructures of developed bearing steel (comparison of particle size and amount of undissolved carbides)

### 3. STJ2の諸特性

以下にSTJ2を250 までの高温で使用できるように高温焼戻を施した試験片,軸受での試験結果を示す。

#### 3.1 転動疲労寿命

##### 3.1.1 常温での転動疲労寿命

試験片の転動疲労寿命は、図3に示す点接触型寿命試験機を用いて、表2に示す条件により評価した。試験時の油温は約90 である。試験片にはく離が生じるまでの総負荷回数を寿命とし、個々のデータをワイブル分布にして $L_{10}$ を算出した。得られた結果を図6に示すが、STJ2の寿命は軸受鋼SUJ2(標準焼戻)の10倍以上、1%Si鋼の約4倍と非常に優れている。

軸受での寿命評価は、図7の試験機を用い、表3に示す条件で行なった。試験軸受は自動調心ころ軸受22208である。軸受の軌道輪もしくはころにはく離が生じるまでの運転時間を寿命とし、データのワイブル分布から $L_{10}$ を算出した。得られた結果を図8に示

すが、軌道輪および転動体の材質がSTJ2である軸受の寿命は、現行の標準軸受(材質:SUJ2)標準焼戻品との比較で3.5倍の長寿命であった。

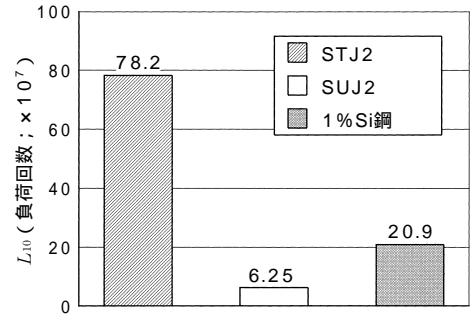


図6 試験片の寿命試験結果  
Life test results of 12 point contact type specimen

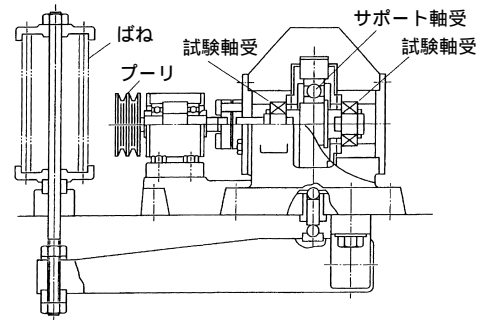


図7 NTN軸受寿命試験機  
NTN rolling contact fatigue test rig

表3 軸受寿命試験の条件  
Test condition of spherical roller bearing

試験機	NTN軸受寿命試験機
試験軸受	22208
試験荷重	$P/C=0.5$
回転速度	2000rpm
潤滑	タービン油 VG56
計算寿命	84h

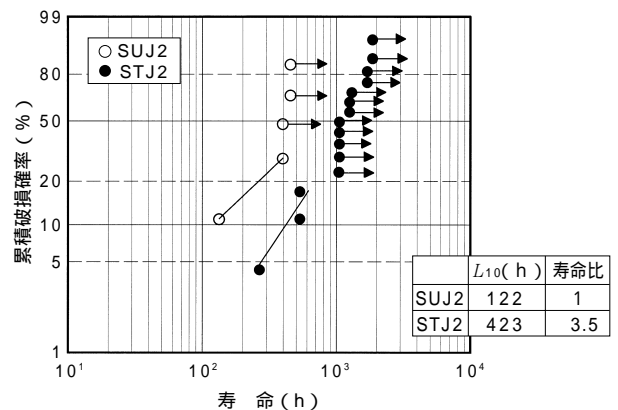


図8 自動調心ころ軸受の寿命試験結果  
Rolling contact fatigue life test results of spherical roller bearings

3.1.2 高温での転動疲労寿命

図1に示すスラスト型高温寿命試験機を用い、表1に示す条件にて各種軸受用鋼の転動疲労寿命を調べた。寿命は平板試験片にはく離が生じるまでの運転時間で評価した。図9に示すように、STJ2の200℃高温寿命は、SUJ2(200℃で使用できる焼戻仕様品)と比較して、30倍以上の寿命であり、従来から高温用途に用いられているM50材の4.7倍、さらには1%Si鋼の約11倍と、常温での寿命と同様に、高温においても格段に長寿命であった。なお、1%Si鋼にCrお

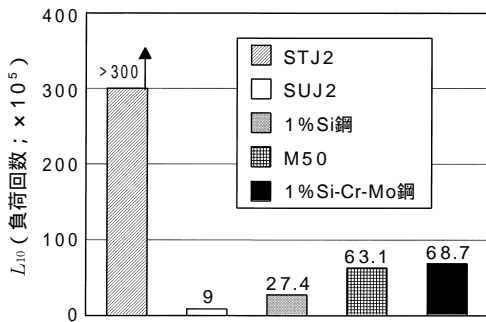


図9 各種軸受用鋼の200℃高温寿命試験結果  
Rolling contact fatigue life test results under 200°C test condition

よびMoを添加した鋼はM50と同等以上の寿命を示したが、STJ2の1/4以下の寿命であり、Si-Cr-Mo系の合金成分よりもSi-Cr-Ni系の合金成分の方が優れている。

玉軸受6206を用い、200℃での高温寿命を評価した。高温寿命試験は図10に示した試験機の主要部分を恒温槽の中に入れたものである。試験結果を図11に示すが、STJ2製玉軸受の高温寿命は、SUJ2製軸受の約15倍、1%Si鋼の約5倍であり、STJ2は高温で格段の長寿命を示した。

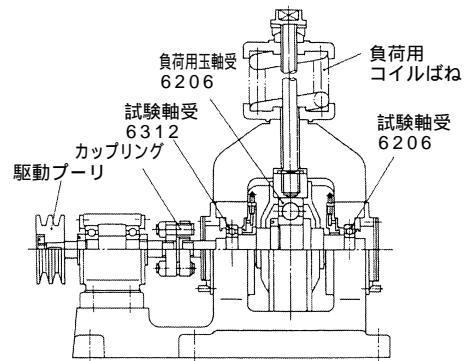
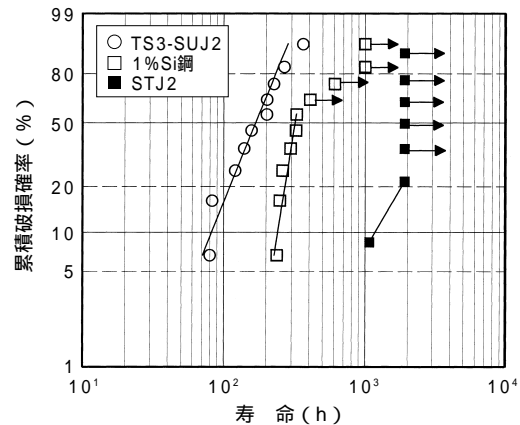


図10 NTN軸受寿命試験機  
NTN rolling contact fatigue test rig

表4 軸受高温寿命試験条件  
Test condition of rolling bearing under high temperature

試験機	NTN高温軸受寿命試験機
試験軸受	6206
試験荷重	6.9kN (ラジアル方向)
回転速度	2000rpm
潤滑	VG100 エーテル油
雰囲気温度	200
計算寿命*	191h

\*注：材料、使用条件等の寿命補正係数は考慮せず



	L <sub>10</sub> (h)	寿命比
TS3-SUJ2**	81	1.0
1%Si鋼	246	3.0
STJ2	1206	14.9

\*\*注：200℃までの使用に適した寸法安定化処理を施した軸受

図11 200℃での寿命試験結果(玉軸受6206)  
Rolling contact fatigue test results of ball bearings (6206) at 200°C

### 3.2 耐表面損傷性(ピーリング特性, スミアリング特性)

低粘度油を使用する場合や, 潤滑油の油温が高まり, 粘度が低下する場合, 軸受軌道面に油膜が形成されにくくなり, 金属接触が生じやすくなる。このような使用条件ではピーリングと呼ばれる表面損傷(微小なはく離と表面きれつが密集した損傷)が生じることがある。また, 接触面の相対すべり率が高いときなど, 金属接触による発熱で局部的に凝着が発生し, スミアリングと呼ばれる損傷が発生することもある。これらの表面損傷に関して, 図12に示す2円筒試験機を用いて評価を行なった。

耐ピーリング特性を, 表5に示す条件で評価した。駆動側の円筒試験片は研磨仕上げ加工を, 従動側の円筒試験片は超仕上げ加工を施して, 試験に供した。耐ピーリング特性は従動側円筒試験片に発生したピーリングの面積率で評価を行なった。図13に示すように,

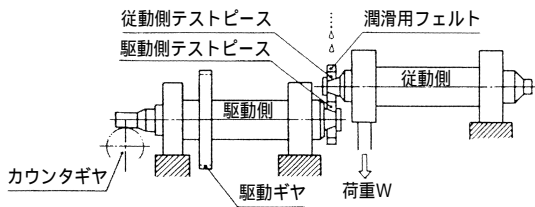


図12 2円筒試験機  
Ring-to-ring type test rig

表5 ピーリング試験の条件  
Peeling test condition

試験機	NTN2円筒試験機
接触応力	$P_{max} = 2.3 \text{ GPa}$
回転速度	2000rpm
潤滑	タービン油 VG46
評価基準	ピーリング発生面積率

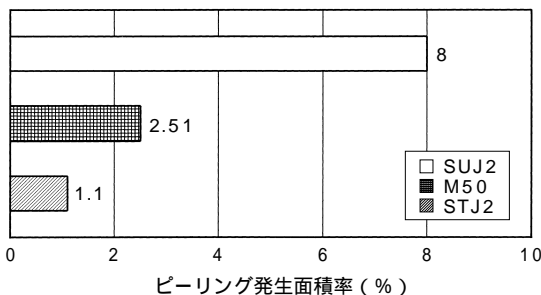


図13 ピーリング試験結果  
Peeling grade of tested specimen

STJ2のピーリング発生率はSUJ2の約1/7であり, 表面損傷に対しても優れた特性を有している。

耐スミアリング特性は, 接触する2円筒の転がり接触部に相対すべりを与えるため, 片側の円筒の回転速度を増して, スミアリング発生までの相対回転速度で評価した。試験条件を表6に, 結果を図14に示す。STJ2はスミアリング発生までの相対回転速度(すべり速度)が, SUJ2のそれよりも1.4倍大きく, スミアリング特性も優れていた。

表6 スミアリング試験の条件  
Smearing test condition

試験機	NTN2円筒試験機
接触応力	$P_{max} = 2.1 \text{ GPa}$
回転速度	固定側 200rpm 従動側 200rpmから100rpmづつ増速
潤滑	タービン油 VG46
評価基準	スミアリング発生時の相対回転速度

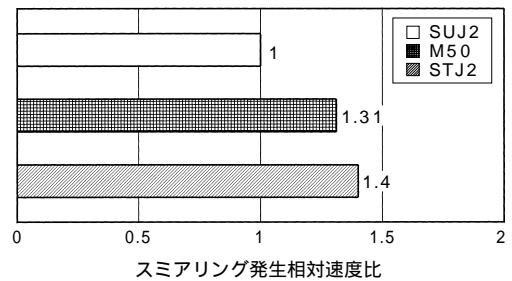


図14 スミアリング試験結果  
Relative speed at smearing initiation

### 3.3 STJ2製軸受の寸法安定性

転がり軸受の軌道輪や転動体は, 高い圧縮荷重に耐えることや摩耗が少ないことが求められているが, 転がり軸受は精密な機械要素であり, 高い寸法安定性も求められている。ここで云う寸法変化は, 熱膨張による寸法変化ではなく, 軸受を高温の雰囲気中に長時間保持したときに生じる永久変形のことであり, 鋼の焼入れ時に生成した残留オーステナイトの高温保持による組織変化に起因する寸法の変化である。

図15に250 の高温保持による寸法変化の調査結果を示すが, STJ2の寸法変化率はSUJ2の高温焼戻品とほぼ同じであり, 軸受機能に影響しないレベルである。

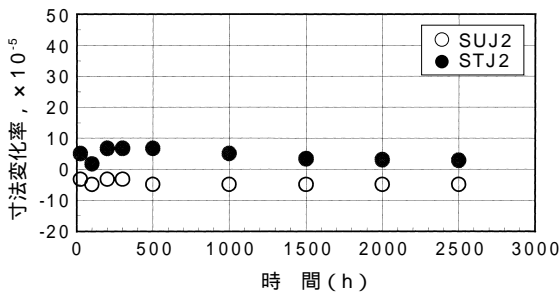


図15 250 高温保持したときの経年寸法変化  
Dimensional change due to holding at 250°C

### 3.4 STJ2の強度

外径60×内径45×幅15のリング試験片を作製し、リングの圧壊強度を調べた。また、JIS3号シャルピー衝撃試験片（Uノッチ）による衝撃強度および破壊靱性（ $K_{Ic}$ ）値を調べた。表7に示すように、どの特性値もSUJ2の値とほぼ同等であり、割れ強度に関して実用上の問題はないことを確かめた。

表7 各種強度試験結果  
Fracture strength of developed steel

鋼種区分	リング静的圧壊強度 (kN)	シャルピー衝撃値 J/cm <sup>2</sup>	破壊靱性値 MPa m
STJ2	45.0	7.83	15.2
SUJ2	45.0	5.54	15.0

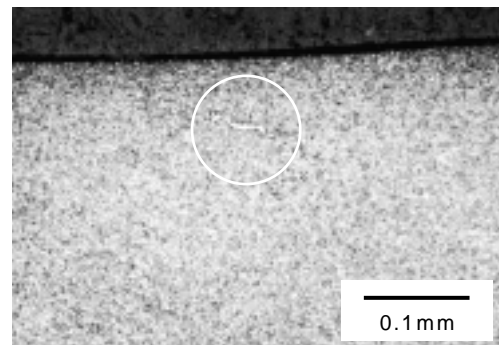
## 4. 考察

高圧下で使用された転がり軸受は、大きなせん断応力の繰り返しにより接触部表層にミクロ組織変化を生じる<sup>4)</sup>ことがよく知られている。図16に200 の高温寿命試験を行なった後のミクロ組織変化の状況を示す。観察は玉の転がり方向に対する直角断面で行なった。SUJ2の場合、接触応力 $P_{max} = 5.5\text{GPa}$ の条件で $5 \times 10^6$ 回の負荷を受けると、図16 (b)のように明瞭な白色の組織変化が発生した。この組織変化部は微小なきれつを伴っており、やがてはく離に至るものである。長寿命化のためにはこの組織変化の発生を遅らせる必要がある。一方、STJ2では図16 (a)に示すように、 $10 \times 10^6$ 回の負荷を受けた後も組織変化は非常に軽微であり、Si, Niの合金元素添加によるミクロ組織の安定性が示されている。

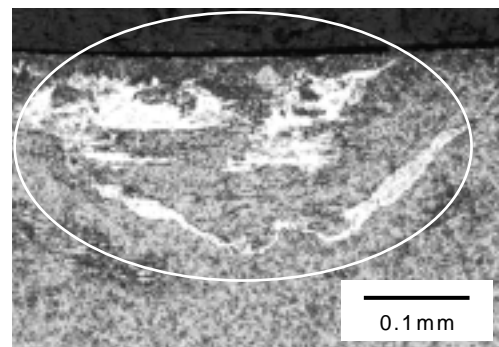
また、各種軸受用鋼の転動による負荷回数と組織変化との関係を調べた結果を図17に示す。転動疲労試験は接触応力 $P_{max} = 5.88\text{GPa}$ 、油温約90 の条件

で行なった。Siを添加した1%Si - Cr - Mo鋼、1%Si鋼およびSTJ2は、いずれも白色組織変化の発生がSUJ2に比べて遅いことがわかる。組織変化後のきれつ発生に関しては、1%Si鋼にCr - Moを添加した鋼よりも、Ni添加のSTJ2の方が優れていることがわかる。このようにSTJ2が長寿命である要因としては、転動疲労による組織変化が生じにくく、組織変化後もきれつが発生しにくいことが挙げられる。

軸受周囲の雰囲気が高温である場合以外でも、転がり軸受が大きな荷重を受けながら高速で回転するときには、軸受自体の発熱が大きい。このため軸受の長寿命化には高温でも硬さが低下しない特性が要求される。



(a) STJ2 (負荷回数 $10 \times 10^6$ 回)



(b) SUJ2 (負荷回数 $5 \times 10^6$ 回)

図16 高温転動疲労寿命試験後のミクロ組織変化  
Microstructural alterations due to rolling contact under high temperature

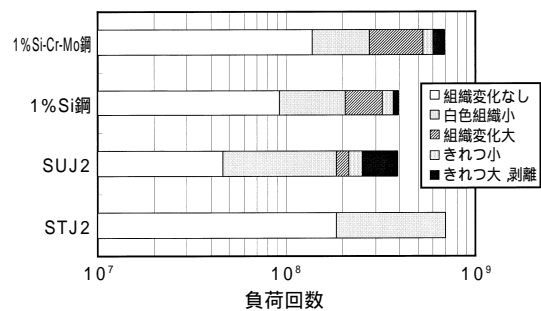


図17 転動による負荷回数とミクロ組織変化の関係  
Relation between number of loading cycles and microstructural alterations

図18に300℃におけるSTJ2の高温硬度を示す。SUJ2のそれよりもピッカース硬度で80程度高く、1%Si鋼よりも40程度高い。STJ2はSUJ2や1%Si鋼よりもCを多く含み、炭化物の析出量が多く、さらにはNiが添加されている。このようなミクロ組織や化学成分の違いが高温硬度の違いとなっており、高面圧下での寿命や高温寿命を著しく向上させていると考えられる。

図19にSTJ2と1%Si鋼の変形抵抗のFEM解析結果を示す。図5でも示したように炭化物が大きく、また数も多いSTJ2の方が1%Si鋼より圧痕深さが浅くなる結果が得られた。これは炭化物による変形抵抗の向上(粒子分散強化)によるものと理解されるが、この炭化物による強化は、鋼の素地の降伏強度が小さくなるほど効果が表れやすいことも示されている。

なお、従来の高温軸受用鋼であるM50やT1では、大きくて硬い炭化物が局部的に析出しており、高面圧条件では逆に巨大炭化物が応力集中源となって短寿命になる。一方STJ2の場合には、炭化物は微細に分散しているため、上述したように鋼の変形抵抗が高まる

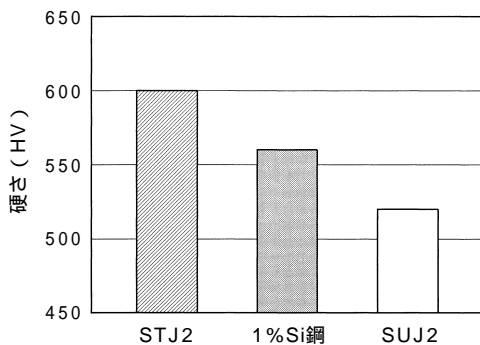


図18 300℃高温硬度の比較  
Micro hardness of developed steel at 300°C

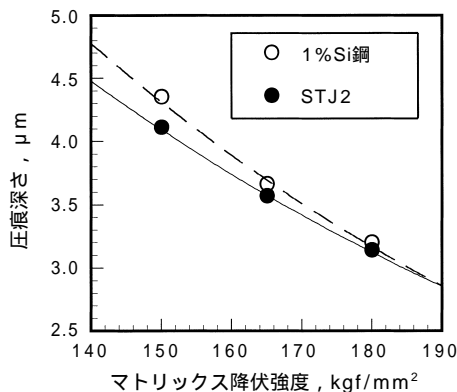


図19 変形抵抗のFEM解析結果  
Analysis of deformation property by finite element method

ことに寄与するものの、転動疲労によるき裂発生源にはなっていない。

以上、STJ2の転動疲労寿命が長いことを裏付ける要因について述べたが、これらの要因は、ピーリングやスミアリングといった表面損傷に対する抵抗性が高まることによる理由でもある。ピーリングは表面突起同志の転動疲労現象であり、ピーリングからはく離に至ることもある。軸受鋼や浸炭鋼に浸炭窒化処理を施して表層部の焼戻軟化抵抗性を向上させ、耐ピーリング特性<sup>5)</sup>やピーリングからはく離に至るときの寿命を向上させた<sup>6)</sup>報告例があるが、STJ2のように高温に保持されても鋼の硬さが低下しにくいということは、ピーリングに対する抵抗性が高いことを意味する。また、スミアリングは金属接触による発熱で、部分的な凝着を伴うものであるが、耐スミアリング性に対しても高い耐熱性を有する鋼が有利である。

## 5. まとめ

軸受性能に及ぼす化学成分の最適化を図ることにより、従来から用いられてきた軸受鋼の合金元素量を大幅に変えること無く、高い耐熱性を有する高温長寿命軸受鋼STJ2を開発することができた。NTNでは、この新軸受用鋼STJ2材を、高温環境下での長寿命化要求が強い自動調心ころ軸受の材料として標準採用した。常温から250℃の高温域まで幅広い条件で長寿命を示す本材料製軸受はLH (Long life for High temperature use) シリーズ軸受と命名され、鉄鋼設備や製紙機械用に使われ始めた。今後は、自動車関連用軸受や工作機械用軸受など、さらなる用途拡大が予想される。この転がり軸受の長寿命化技術が、あらゆる機械の小型化、メンテナンスフリー化に役立ち、省エネルギー化および環境保護に繋がるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 中島碩一, 前田喜久男: NTN TECHNICAL REVIEW, 59 (1991)19
- 2) 前田喜久男, 中島碩一: NTN TECHNICAL REVIEW, 63 (1996)83
- 3) 山本俊郎, 脇門恵洋: 鉄と鋼, 57 (1971)1514
- 4) 室 博, 対馬全之: ペアリングエンジニア, 18 (1969)2321
- 5) 中島碩一, 前田喜久男, 柏村博: NTN TECHNICAL REVIEW, 63 (1996)13
- 6) 田中広政, 伊藤冬木, 赤松良信, 前田喜久男, 中島碩一: トライボロジー会議予稿集 (東京 1999-5) 2091