

# 軸受関連基礎要素技術シリーズ(1) 材料・熱処理による軸受の長寿命化について

星野照男

## Basic Technology Series of Bearings (1) Life Improvement with Newly Developed Materials and Heat-treatment

T. HOSHINO

Outlines of Koyo new technologies on materials and heat-treatment to improve bearing life are introduced. Particularly, how to choose the material and heat-treatment method most suitable for longer bearing life to prevent flaking under such condition as in clean or contaminated lubricant, and at high temperature, is shown. Bearings Koyo developed for various applications with these new technologies showed excellent performance.

**Key Words:** high cleanliness, contaminant, strength, heat treatment, medium-heat-resistant

### 1. はじめに

軸受の軌動輪および転動体は、局部的に数GPaに及ぶ高い接触応力が負荷されるため高応力に対する十分な強度を有すること、転がり疲れ強さが大きいこと、衝撃荷重に対するじん性が大きいこと、経年変形が少ないことなどが要求される。

これらの要求に対応するには、適切な材料の選定と最適の熱処理を行うことで、硬さなどの必要な品質を確保することが必要である。このため、汎用の軸受鋼SUJ2の品質向上や熱処理方法、条件の改良、浸炭用鋼の適用などを行ってきた。

しかし、軸受寿命をさらに大幅に向上させるには、材料や熱処理技術の最適化と高度化が必要かつ、重要である。

本報では、軸受の長寿命化のために取り組んできた材料・熱処理に関する技術開発の概要および最近の技術動向について紹介する。

### 2. 軸受の長寿命化と材料・熱処理に対する要求特性

軸受は使用環境や条件によって種々の損傷形態を示す。代表的な損傷とその進行過程およびこれらの損傷防止のための材料・熱処理に対する要求特性を表1に示す。

また、表1に示す損傷形態の内でも特に重要と考えられる清浄あるいは、摩耗粉等の異物が混入した潤滑剤中でのはく離、軸受の使用温度が高い場合のはく離を対象に軸受寿命向上の考え方と対応策を図1に示す。

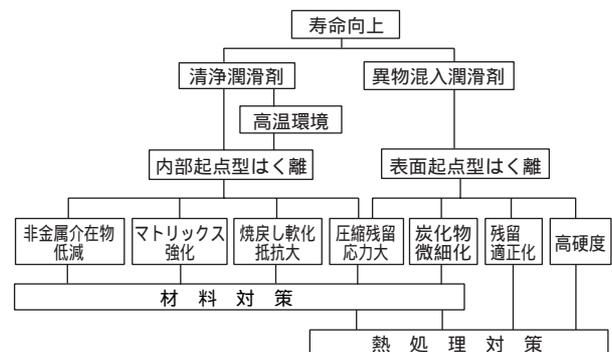


図1 寿命向上の考え方と対応策

Life improvement and countermeasure by material and heat treatment

### 3. 清浄な潤滑剤中での寿命向上技術

#### 3.1 材料の高清浄度化

潤滑剤が清浄な場合、軸受は転走面直下の最大せん断応力位置付近の非金属介在物などの材料欠陥に応力が集中してき裂を生じる内部起点型はく離を起すことが多いとされている。この場合は、酸化物系介在物(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>など)やTi系介在物

表1 軸受の損傷形態と材料・熱処理での必要特性  
Failure of bearings and required characteristics for material and heat treatment

損傷の形態	損傷の進展過程	必要特性
清浄潤滑剤中ではく離	介在物 組織不均一 炭化物 材料疲労 マトリックス疲労 き裂の起点 き裂発生 - き裂進展 - はく離	・材料清浄度向上 ・組織の均一性 ・微細な炭化物 ・高い降伏点 ・硬さの確保
異物混入潤滑剤中ではく離	異物かみ込みによる塑性変形 - 応力集中 - 表面き裂発生 - き裂進展 - はく離	・高硬度 ・適正な残留オーステナイト
摩耗	潤滑不良による金属接触 汚れ油中での使用 摩耗(凝着摩耗・アブレシブ摩耗)	・高硬度 ・炭化物量の増大 ・適正合金成分
経年変形	残留オーステナイトの変態による寸法膨張	・残留オーステナイト低減
音響寿命	表面性状(非金属介在物, 粗さ等)の影響による音響悪化	・清浄度向上
高温使用時のはく離	高温使用で硬さ低下に伴う材料疲労 - 寿命低下	・炭化物比率の増大 ・適正合金成分 ・焼もどし抵抗性向上

(TiN)が寿命を低下させる有害な介在物であることが知られている。そのため、軸受寿命を向上するには非金属介在物を減少させることが有効であり、中でも鋼中の酸素量やTi量を低減することが有効となる。高炭素クロム軸受鋼SUJ2の場合で、鋼中の酸素量と非金属介在物が寿命に及ぼす影響は図2のとおりであり、酸素量および介在物の減

少とともに寿命が向上していることがわかる。

このため、炉外精錬や真空脱ガス工程の導入および製鋼条件の改善などを行うことにより非金属介在物や酸素などの不純物成分を減少させて材料の清浄度を向上させ、それに伴って転がり寿命も向上してきた。SUJ2の清浄度と転がり寿命の推移を図3に示す。

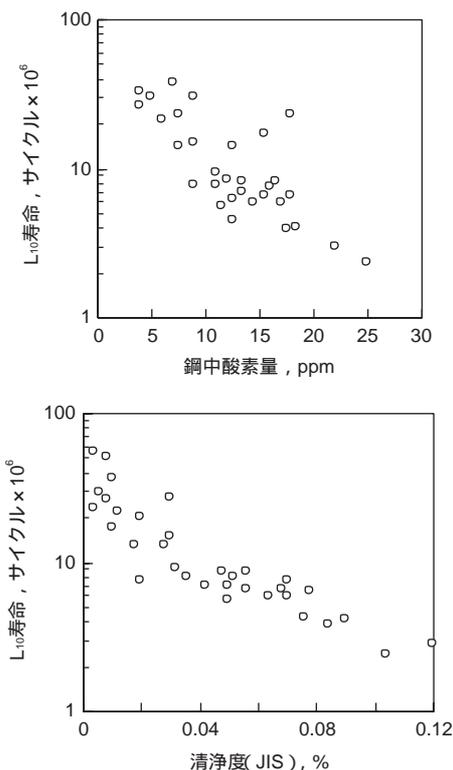


図2 鋼中酸素量、清浄度の軸受寿命への影響

Influence of oxygen content and steel cleanliness on bearing life

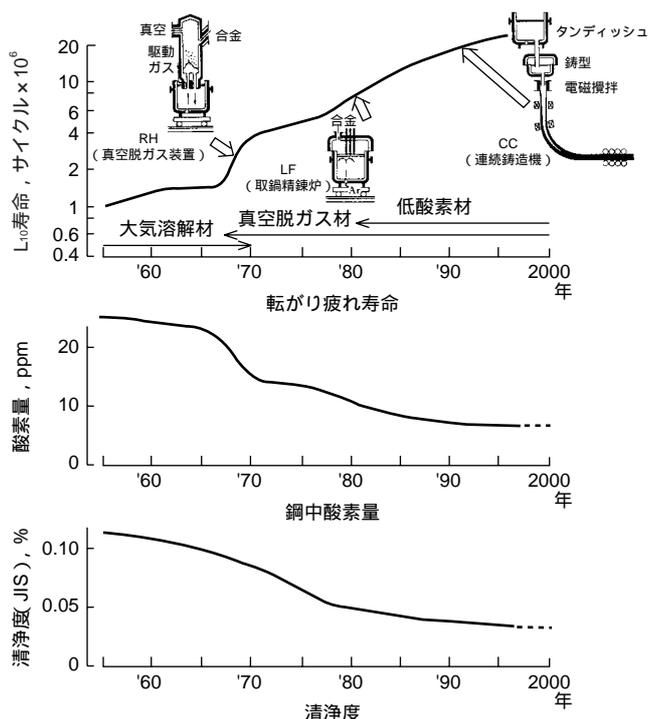


図3 軸受鋼SUJ2の清浄度と転がり疲れ寿命の推移

Trends of steel cleanliness and fatigue life on SUJ2

また、原材料の厳選と製造工程の最適化や条件管理などの改善を推し進めて鋼中の酸素量と非金属介在物を大幅に低減した高纯净度軸受鋼(HRS)を開発<sup>1)</sup>した。

この高纯净度鋼軸受の寿命は図4に示すように標準軸受の約3倍で、VAR材やESR材などの特殊溶解材と同等であることが確認されている。

なお、最近では非金属介在物の新しい評価方法として極値統計法<sup>2)</sup>が検討されており、極値統計による介在物の予測最大径と転がり寿命の間により相関があるとの報告<sup>3)</sup>も発表されている。

この極値統計法による評価も取り入れ、これまで以上に非金属介在物の減少や微細化できるよう製鋼工程や条件の改善が進められている。

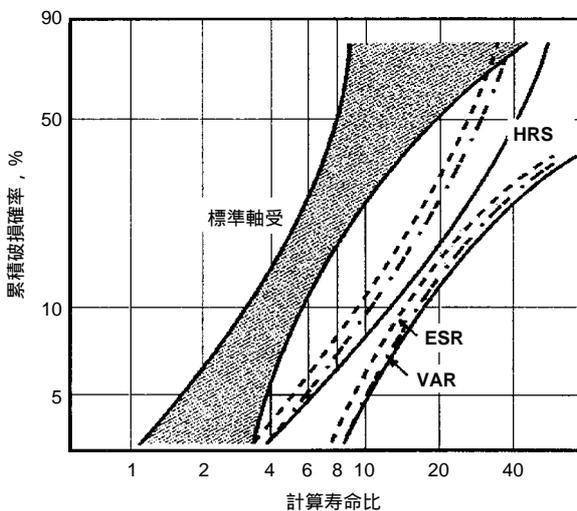


図4 高纯净度鋼軸受の転がり寿命  
Fatigue life of high refining steel

### 3.2 材料マトリックスの高強度化

清浄な潤滑剤中における内部起点型はく離の一つとして、最大せん断応力が作用する領域でのマトリックス疲労に起因するはく離がある。この場合は、マトリックス疲労部で組織変化を引起し、その後にき裂を発生してはく離に至るため、前項に示した介在物の低減や微細化では寿命向上にはつながらない。

そこで、合金成分の最適化でマトリックス強度を向上させた材料を開発した。開発材である高強度軸受鋼(GT鋼)<sup>4)</sup>は、SUJ2をベースにSiとNiを複合添加したもので、疲労強度の向上と組織変化の遅延化の達成で実用化に成功することができた。

GT鋼の強度と寿命は図5、6に示すとおりで、標準鋼SUJ2の6倍以上の長寿命を得ている。

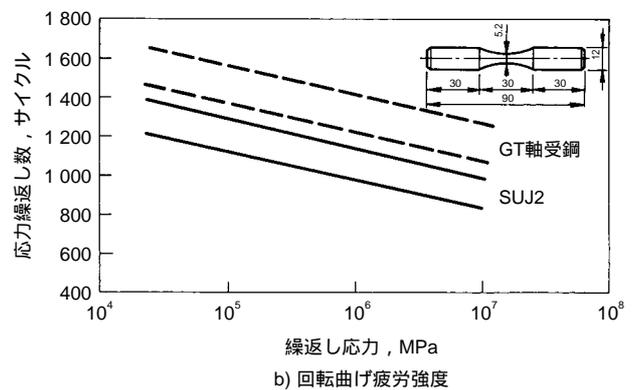
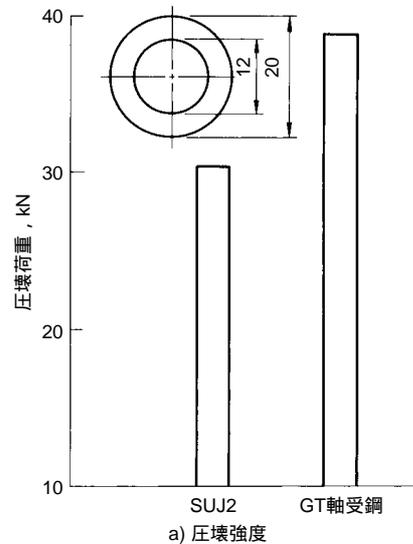


図5 高強度軸受鋼とSUJ2の強度比較

Comparison of strength between GT steel and SUJ2

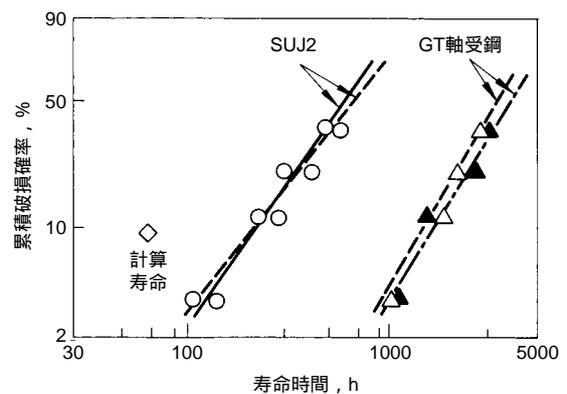


図6 高強度鋼軸受とSUJ2鋼軸受の清浄潤滑剤中寿命試験結果

Life test results of bearings with GT steel and SUJ2 in a clean lubricant

## 4. 異物が混入した潤滑剤中での寿命向上技術

### 4.1 異物による寿命低下のメカニズムと対応策

軸受の転走面に摩耗粉等の硬い異物が混入すると計算寿命の1/5から1/10程度のごく短時間

ではなく離ることがある．そのはく離のメカニズムを検討するために市場から回収した軸受の転走面を詳細に解析した結果，転走面のアブレシブ摩耗による表層はく離，圧痕を起点にしたやや深いはく離およびそれらが複合されたはく離に分類されることがわかった．その様子を表わしたものが図7である．

	表層はく離	混合はく離	圧痕起点はく離
外観			
メカニズム	小さな硬い粒子による摩耗	小さな硬い粒子による摩耗と大きな硬い粒子による塑性変形	外力または大きな硬い粒子による塑性変形

図7 異物混入潤滑剤中でのはく離メカニズム  
Flaking mechanism in contaminated lubricants

この分野の長寿命化は軸受各社ともに重要な課題として取組まれており，幾つかの発表事例がある<sup>5),6)</sup>．その内容を見ると，浸炭窒化を共通技術として適用しているようであり，炭化物(または炭窒化物)の析出や多量にオーステナイトを残留させるなどして異物の影響を軽減することを狙っているところもあるようである．

しかし，異物による軸受のはく離メカニズムと寿命向上方策について基礎的な試験と検証を行った結果，表面硬度を高くすることで転走面の耐摩耗性を向上すること，異物による圧痕が付きにくくすることが最も有効であることを見出した．次に，残留オーステナイトを一定の範囲内に制御して異物によって形成される圧痕縁の盛り部加工硬化を抑えることが寿命ばらつきを少なくするために有効であることもわかった．次項で示す耐異物軸受は，これらの基礎的な研究成果を基に開発したものである．

#### 4.2 耐異物軸受の開発

##### 1) S H軸受

SUJ2のような軸受鋼は，オーステナイト化温度に加熱保持した後，油中に急冷して硬化する全体焼入れで使用されるのが通常である．しかし，この熱処理方法では異物に強い軸受にするのは非常に困難であるため，特殊熱処理により表面を高硬度とし，適正量のオーステナイトを残留させたS H軸受<sup>7)</sup>を開発した．

S H軸受の異物混入潤滑剤中での寿命は図8に示すとおり標準軸受より長寿命であり，異物濃度が高いほど効果も大きいことが確認された．

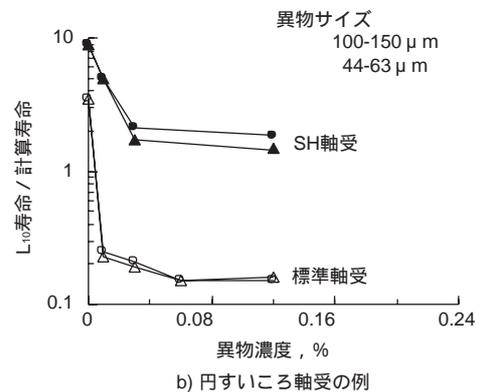
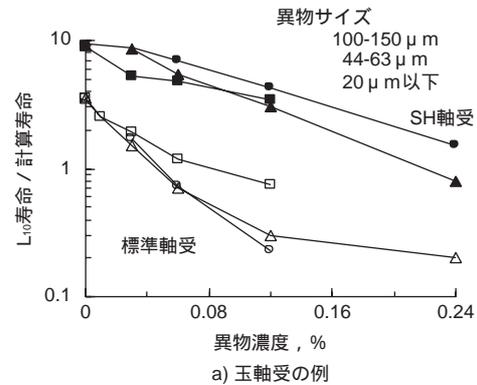


図8 軸受寿命に及ぼす異物の影響  
Influence of contaminants on bearing life

##### 2) K E軸受

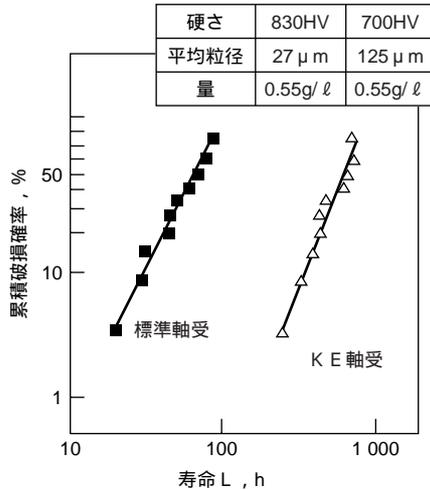
肌焼鋼を用いて，表面を高硬度とし，かつ適正量の残留オーステナイトを共存させることで長寿命化を図る浸炭熱処理技術を開発した．この相反する特性を実現したのがK E熱処理である．K E軸受<sup>8)</sup>は図9に示すとおり，異物混入潤滑剤中で標準軸受の10倍以上の寿命を有している．

なお，現在はより一層の長寿命を達成するために，同様の考えに基づいた新たな浸炭技術の開発に取り組んでいるので，詳細は別の機会に紹介したい．

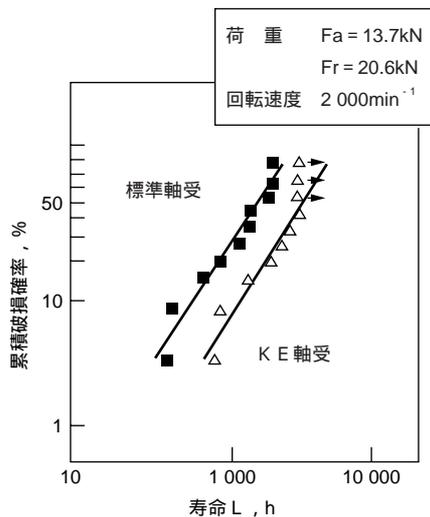
#### 5. 使用温度が高い場合の寿命向上技術

軸受は使用温度が高いと硬さが低下し，図10に示すように硬さ低下とともに寿命が低下する．また，同様に，寸法や精度に狂いを生じるためにすきまが詰まったり，軸と内輪との間でクリープを生じるなどの不具合を生じる場合もある．

そのため，250℃を越えるような高温で使用される軸受では，焼戻し硬さが高く高温硬さも高い



1) 異物混入潤滑油中の試験結果



2) 清浄油中の試験結果

図9 KE軸受の寿命

Fatigue life of KOYO EXTRA-LIFE bearing

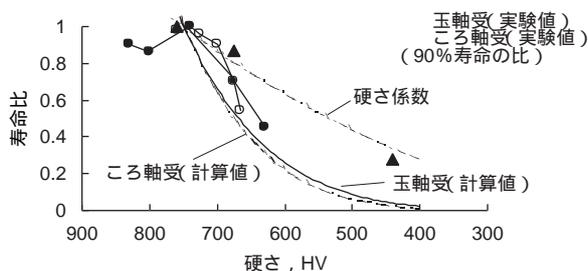


図10 硬さと寿命の関係

Relationship between hardness and bearing life

M50やSKH4などの耐熱用高合金鋼を使用するのが一般的である。

しかし、これらの耐熱用高合金鋼は非常に高価なため、200 程度までの準高温域で使用できる安価な材料の開発を行った。

なお、硬さ低下による寿命低下がそれほど問題にならない場合は、寸法膨張によるすきま詰まり

やクリープで焼付きを起してロックするなどの不具合を未然に防止するためにSUJ2を用いて耐熱処理を行っている。

準高温用として新たに開発したKUJ7<sup>9)</sup>は、SUJ2をベースとしてSiとMoを添加することで焼戻し軟化抵抗性を高め、組織変化も起しにくくした材料である。

KUJ7の焼戻し軟化抵抗性を図11に、150、180 での寿命試験結果を図12に示す。

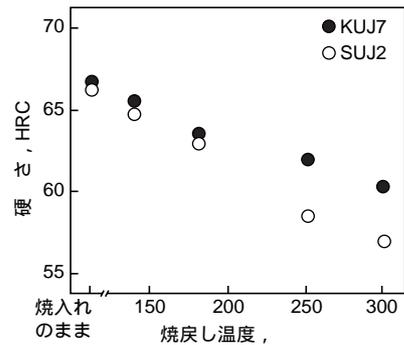
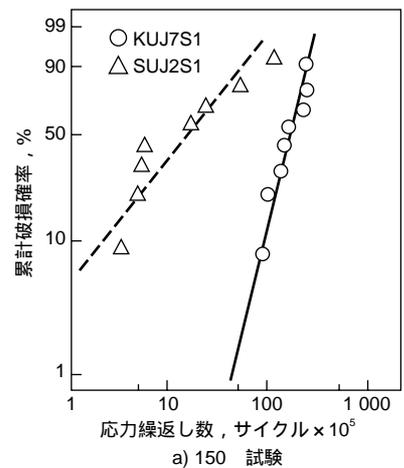
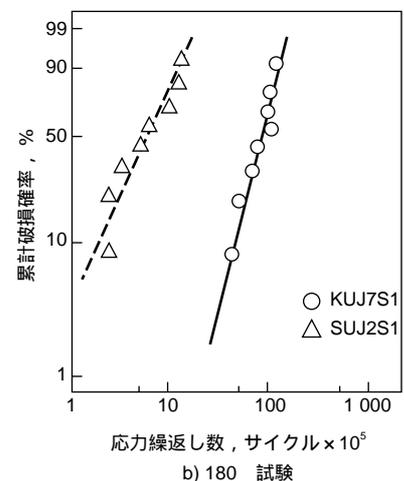


図11 焼戻し温度と硬さの関係

Relationship between tempering temperature and hardness



a) 150 試験



b) 180 試験

図12 転がり寿命試験結果

Results of rolling fatigue life test

表2 長寿命軸受の特長と用途  
Characteristics and application of KOYO long life bearings

長寿命軸受	特長と効果	寿命(標準軸受比)		用途例
		清浄潤滑剤中	異物混入潤滑剤中	
高 cleanliness 鋼軸受 (HRS)	・非金属介在物の低減 ・特殊溶解材に匹敵	3倍以上	同等	・自動車用全般
高強度鋼軸受 (GTS)	・合金成分適正化によりマトリクス強度を向上	6倍以上	2倍以上	・高荷重用途
SH軸受	・表面高硬度 ・耐摩耗性向上	2倍以上	3倍以上	・デファレンシャルギアボックス, トランスミッションなどの異物混入潤滑剤中での使用
KE軸受	・表面高硬度 ・残留オーステナイト量を適正化	2倍以上	10倍以上	
準高温用鋼軸受 (KUJ7)	・焼戻し軟化抵抗性を向上	7倍以上 (150 時)	2倍以上	・連続鋳造機 ・ターボチャージャ

6. おわりに

本報では、軸受の長寿命化のために行われてきた材料・熱処理面での技術開発の動向と開発した長寿命軸受の概要を紹介した。これらの長寿命軸受の特長と用途を表2にまとめたので、適切な用途で採用頂ければ幸いである。

なお、軸受の長寿命化は、今後とも継続して取り組んで行かねばならない永遠の課題と考えるが、より小さく、より経済的な軸受とするための開発も同時に行って産業界の期待に応えていくことも重要である。

したがって、今後は、これまで以上に長寿命化・高信頼性化と安価化の2極分化が進むことを念頭に置いた技術開発が肝要である。そのためには、新しい材料の開発はもちろんのこと、従来からある比較的安価な材料の活用も検討対象に入れて、種々の熱処理や表面改質技術を開発し、これらを工夫して組み合わせることで新たな性能や機能を引出すようなことも必要と考えられる。

参考文献

- 1) 森原源治, 藤田良樹, 藤本芳樹: KOYO Engineering Journal, no. 128 (1985) 20.
- 2) 村上敬宜: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響(1993) 養賢堂.
- 3) 関 猛, 江口 純, 室賀 啓, 西川友章, 木村龍巳: CAMP-ISIJ 7(1994) 1750.
- 4) 柴田正道, 李 漢瑛: KOYO Engineering Journal, no. 141 (1992) 26.
- 5) 村上保夫, 三田村宣晶, 古村恭三郎: NSK

Technical Journal, no. 652 (1992) 9.

- 6) 前田喜久男, 中島碩一, 柏村 博: NTN TECHNICAL REVIEW, no. 65 (1996) 17.
- 7) Teruo Hoshino, Masao Goto: SAE Technical Paper Series 891771 (1989) 169.
- 8) 戸田一寿, 三上 剛: KOYO Engineering Journal, no. 143 (1993) 15.
- 9) 太田敦彦: KOYO Engineering Journal, no. 151 (1997) 6.

筆 者



星野照男\*  
T. HOSHINO

\* 総合技術研究所 基礎技術研究所  
軸受研究部