入門講座
身近な鉄-2

# 「転がり軸受」と「軸受鋼」ーその発展と最近の動向

加藤恵之 山陽特殊製鋼(株) 技術研究所 主席研究員
Yoshiyuki Kato

"Rolling Bearings" and "Ball and Rolling Bearing Steels"－Technical Progress and Recent Trends

## 1 はじめに

軸受は大別するとすべり軸受(ベアリングメタル)と転がり軸受(ボールまたはローラーベアリング)に区分できる。慣用的に前者がメタル、後者がベアリングとして語句の後半だけが略称されて使われている。

転がり軸受の構造(図1)は長い歴史の中で基本的に変わっていない。しかしながらその時代の産業の進歩に対応し性能は大きく変わってきており、自動車などの交通機関、電化製品、その他機械部品の駆動力伝達の回転部分を支える重要な機械要素として最先端技術の開拓に大きく貢献してきた。

本報では、素材としての軸受鋼の歴史、新しくISO規格との整合が試みられた改訂JIS G4805(1999)高炭素クロム軸受鋼と鋼種分類、製鋼技術と加工技術の進歩、最近の軸受鋼の技術動向等について概説する。

## 2 軸受および軸受鋼の歴史

転がり軸受、および軸受鋼の歴史を語る上で、ユルゲンスマイヤー著「転がり軸受」[2]は転がり軸受の技術史をかざる名著であるといっても過言ではない。この著書の歴史の部分を紹介して近代軸受の歴史の参考としたい。

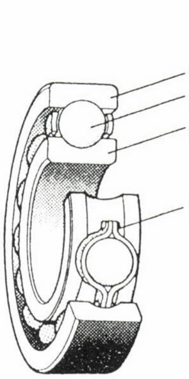


図1 転がり軸受の構造例[1]

この著書「転がり軸受」は1937年(昭和12年)にドイツで出版されたものであるが、歴史の部分が岡本純三教授(元千葉大学工学部)により翻訳され「ベアリング」誌に1974年(8回)、1996年(16回)の二度にわたり掲載された[2]。それまでの特許カタログ等を中心に「転がり軸受の歴史」が解説されている。軸受の構造の発達、設計と応用など、初期の軸受の発達に関する優れた歴史書である。

また最近では、1979年にダウソン著「トライボロジーの歴史」(History of Tribology、Longman、London)が発行され、軸受と最も関係の深いトライボロジーについて古代(考古学的解析)から現代に至るまでの歴史が専門的かつ体系的にまとめられている。第3版の抄訳が1997年に発行されている[3]。ぜひ一読をお勧めしたい。

### 2.1 紀元前数千年にさかのぼる「転がり軸受」の歴史

軸受の歴史は紀元前4000年といわれ、太古の時代から「ころ軸受」の原理を利用して重量物の運搬に利用された。大英博物館(ロンドン)には古代メソポタミアのチグリス・ユーフラテス川流域にあった旧アッシリア帝国の首都、ニネベ(現在のイラク北部)で1853年に発見された大レリーフ(浮彫り)の展示室がある。ここには紀元前8世紀頃のもので人頭の牡牛巨像を運搬しているそりの下に丸太をならべ、転がり運動を利用して引いているレリーフが展示されている(図2)[3]。

また、同じ図に車輪のついた二輪車が人に引かれている図が描かれている。ころを使わない滑りそりはさらに古く、紀元前18世紀にエジプトで巨像を運ぶそりを描いたものがある。ここには摩擦をへらす潤滑のための水か油のような液体をそりの下に注ぐ役目の人が描かれているものがあり今日の滑り軸受のルーツが見られる。紀元前330年頃

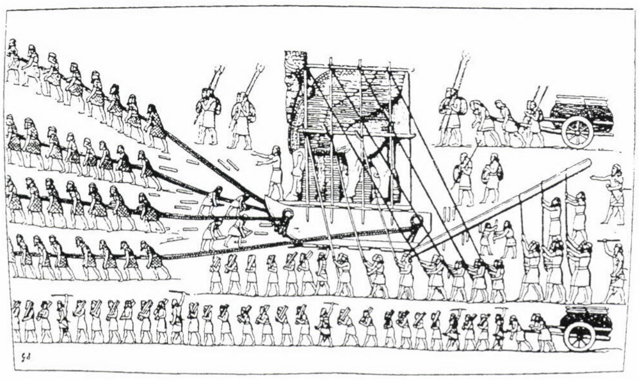

図2　ニネベの大レリーフ

にはギリシャで発明されたころ軸受を使った城壁破壊装置がある。

近世にはいって1500年頃の現代軸受の元祖と言われるレオナルド・ダ・ビンチの摩擦に関する最初の研究がある。彼は画家、建築家として有名である。また、当時水車を利用した産業において機械製作における効率のよい機構作り、単に固体間の摩擦だけでなく特に流体や、空気についても摩擦が重要なことを考察していた。これはすでに現在のベアリングの原理の域に到達したもので、これを機に転がり軸受(玉軸受、ころ軸受)を利用した装置が実用化されていった。1556年アグリコラ(Agricola、ドイツ)のつるべの巻き上げ装置、1588年ラメーリ(Ramelli、イタリア)の水車を使ったポンプ装置用案内ローラーがある。

17世紀は産業革命に向かって鉱工業における揚水、紡績、粉砕など強力な機械式動力の要求が高まった。1710年にはライプニッツ(Leipniz、数学者、ドイツ)の「滑り摩擦」、「転がり摩擦」の問題から機械学への発展などがある。1781年にはクーロンの摩擦の実験装置が作られている。また1869年スリレイ(J. Suriray、フランス)が自転車に玉軸受を使って特許を得ている。

転がり軸受は、ネジ、歯車とともに三大機械要素といわれるほど重要な機械部品であり、19世紀末から20世紀初頭に道路またはレール上を走る車両に使う軸受を中心に発展を遂げた。18世紀後半に産業革命がおこり機械工業は発展の緒についたが、本格的発展を見るのは欧米のガソリン自動車の普及と時を同じくした19世紀末から20世紀はじめにかけてである。

### 2.2　軸受鋼の歴史(ストライベックの研究から約100年、国際共通規格へ)

19世紀には玉軸受やころ軸受はすでに重要な役割を果たしていたが、軸受の負荷容量や作動機構についての知識は、はなはだ貧弱であった。当時はそれぞれの用途ごとに玉の大きさと軌道輪の強度を決めていた。1901年にベアリングの負荷容量と寿命に関するストライベック(R. Stribeck、ドイツ科学技術中央研究所)の研究があり、DWF社(Deutche Waffen-und Munitionsfabrik、Berlinドイツ武器弾薬会社)の委託を受けて、さまざまな速度における玉および軸受完成品に対する許容荷重の確認テストが行われた。玉と軌道輪の強度について、「できるだけ有害成分の少ない0.8-1.0%Cの炭素鋼が適当であり、また合金鋼を使うのも効果がある。玉に大きな応力がかからないように注意しながら十分に焼きを入れること、その上に玉が非常に均質で十分な強度を持っていることが必要である」と述べている[2)]。1911年のDWF社宛ての報告書の中に当時使われた材料の化学成分が記載されている(表１)。適切な材料を探すために多くの試験が行われ、クロム鋼が選ばれた。

すでにこの時代から今日世界中で使われているものとほぼ同じ鋼種が使われていたことがわかる。今日の軸受鋼の代表的な化学成分は1%C-1.5%Crを含む鋼種(SUJ2相当)であるが、1905年にFichtel & Sachs社(シュワインフルト、ドイツ)で最初に適用されていた。

後にFichtel & Sachs社の軸受部門はSKF社に接収されたが、数年後スウェーデンにおいてCr含有量が1.5%まで増

表1　1903－1908年のドイツにおいて使用された軸受鋼[2,4)]と最近の高炭素クロム軸受鋼の化学成分の比較

(mass%)

| | DWF 1903 | DWF 1905 | F&S 1905 | DWF 1907 | EWF 1907 | DWF 1908 | DWF 1908 | ISO 規格 DIS683-17 100Cr6 | JIS 規格 G4805 SUJ2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C | 0.81 | 0.98 | 1.08 | 0.89 | 1.02 | 0.99 | 0.80 | 0.93-1.05 | 0.95-1.10 |
| Si | 0.20 | 0.33 | 0.28 | 0.30 | 0.37 | 0.30 | 0.40 | 0.15-0.35 | 0.15-0.35 |
| Mn | 0.34 | 0.36 | 0.37 | 0.37 | 0.30 | ― | ― | 0.25-0.45 | 0.50 以下 |
| Cu | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | ― | ― | 0.35 以下 | 0.25 以下 |
| Cr | 1.10 | 1.06 | 1.58 | 1.04 | 1.01 | 1.00 | 1.00 | 1.35-1.60 | 1.30-1.60 |
| Ni | 0.04 | ― | ― | 0.04 | 0.04 | ― | ― | ― | 0.25 以下 |
| P | 0.016 | 0.023 | 0.015 | 0.019 | 0.018 | 0.017 | 0.017 | 0.025 以下 | 0.025 以下 |
| S | 0.014 | 0.019 | 0.021 | 0.012 | 0.014 | 0.008 | 0.013 | 0.015 以下 | 0.025 以下 |

DWF = Duetche Waffen- und Munitionsfabrik. Berlin(ドイツ兵器弾薬会社)
F&S = Fichtel & Sachs AG. Schweinfurt


25

加され、リング用の標準鋼として取り入れられた(SKF3)。1930年代の中頃には大型ベアリング向けにはSKF3はその焼入性の低さが指摘されている[4]。SKF3は相当鋼種としてSUJ2、SAE52100、DIN100Cr6等が世界共通規格で使われるようになった。SKF3(SUJ2)は高硬度、高い疲労強度、耐摩耗性、寸法安定性、さらにコスト的にみても軸受用鋼として最適の鋼種である。

## 3 軸受鋼規格の整合化と鋼種の分類

### 3.1 改訂JIS G4805(1999)

JISとISO規格の整合化作業は日本鉄鋼連盟の協力のもとで日本工業標準調査会において行われ、JISが改定された(官報公示：平成11.1.20)。今回の改正では工業技術院の国際整合化3ヶ年計画に沿って、軸受鋼についてJISと対応するISO規格との整合化の調査、検討が行われた。

JIS G4805(1999)の高炭素クロム軸受鋼鋼材解説[5]によれば、「今回のISO規格との整合化に当って、1995年1月に日本も批准したWTO/TBT(世界貿易機関／通商への技術障壁)の要求事項を踏まえて、極力JISをISO規格に一致させることであったが、国内の市場に混乱を生じせしめることは避けなければならず、慎重に検討･審議を行った結果、対応する(Heat-treated steels, alloy steels, and free cutting steels－Part 17：Ball and roller bearing steels)の本体部分を翻訳してそのまま付属書として添付することにした。」としている。

JISとISOで規格体系が異なるとともに、適用鋼種もJISとISOとでは大幅に異なっていた。ISOはJISに規定していない幅広い鋼種を含んでおり、今後の軸受用途用規格拡充に効果が期待できるとされている。付属書規定によりISO/DIS683-17規格品はJISマーク表示が可能となった。表2にJIS規格とISO規格に含まれる鋼種分類の対比を示す。

### 3.2 軸受鋼の特徴と鋼種分類

転がり軸受用の材料は、軸受機能を満足するために、一般的に硬さが高いこと、耐摩耗性が大きいこと、疲れ強さが大きいことなどが要求される。さらに、近年では高温、腐食といった特殊環境下でも機能を十分満足する材料が求められている。それらの材料特性を得るために、製鋼メーカー、軸受メーカーが一体となって材料開発・改良を進めてきており、その進歩には目を見張るものがある。ISOの鋼種分類によれば軸受鋼は次のように区分される[6-9]。

表2　JIS規格とISO規格に含まれる軸受鋼鋼種分類の対比

| 高炭素クロム軸受鋼<br>JIS G 4805 | Ball and roller bearing steels<br>ISO/DIS 683-17 |
|---|---|
| ・高炭素クロム鋼 (SUJ1, SUJ2, SUJ3, SUJ4, SUJ5) ←→ | ・ずぶ焼入鋼(高炭素クロム鋼) |
| (軸受鋼として右記に対応するJIS鋼種は旧規格にはなかったが、付属書により新しくJISの一部として規定された。) ← | ・肌焼鋼 (低炭素-Cr, Cr-Mo, Cr-Mo-Ni) |
| | ・高周波焼入鋼 (中炭素および中炭素-Cr-Mo) |
| | ・ステンレス鋼 |
| | ・高温用鋼 (高Cr-高Mo-V-W鋼) |

#### 3.2.1 ずぶ焼入(完全焼入)軸受鋼

この鋼種分類はSUJ2を主体とした高炭素クロム軸受鋼としてもっともポピュラーに使われている。最近ではSUJ2、SUJ3をベースにCr、Mo、Ni、Siなどを添加し、特殊な熱処理と組み合わせて、焼戻軟化抵抗性、機械強度・靭性の向上を図り、異物環境下での長寿命化を狙った鋼種も開発されている[10]。

#### 3.2.2 肌焼軸受鋼

衝撃荷重のかかる機械の軸受には浸炭軸受鋼が使われる。浸炭とは鋼の表面から炭素を浸透させるもので表面は硬く、内部は柔らかいため良好な疲労強度・耐摩耗性を持つと同時に高い耐割れ性・耐衝撃性を持った鋼種である。さらに冷間加工性に優れているため旋削の省略ができる。熱処理コストの問題が解決すればさらに使用量は増大するであろう。主として製鉄機械用、建設機械用、自動車用などに使われている。(S15CK、SCr420、SCM420、SNCM220、SNCM420、SNCM815など)

#### 3.2.3 高周波焼入れ軸受鋼

自動車のハブユニット軸受に代表されるように周辺部品を取り込んだ軸受のユニット化が進んでいる。外輪はハブを取り込み、内輪は車軸を取り込んだものである。ハブユニットは国内ではS53C-S55C材が多く使用されており、外内輪の軌道部を高周波焼入れして硬さを確保している。

#### 3.2.4 ステンレス軸受鋼

耐食性を必要とする軸受、真空用軸受、高温での耐食性の必要な軸受、低温で結露によりさびが発生するような環境で使用される軸受にはステンレス鋼が使用される[10]。

**・マルテンサイト系ステンレス軸受鋼**

硬さが必要な場合SUS440Cが使用される。

最近では0.7C-13Crの軸受鋼がミニチュア軸受用に使われている。巨大な一次炭化物が少ないために音響性、加工性が向上するというメリットがある。

**・非磁性ステンレス軸受鋼**

非磁性であることが要求される軸受、より耐食性を重視する軸受にはオーステナイト系のSUS304やSUS316が使用される。熱処理によって硬化はしないので硬さが低

く耐久性、強度は低い。

**・その他**

強度も耐食性も必要な場合は析出硬化型ステンレス鋼のSUS630が使われる。

### 3.2.5　高温軸受鋼

ガスタービン、ジェットエンジンなどはもとより最近では自動車、鉄道車両のように高速化、密閉化により転がり軸受の使用環境は厳しくなっている。高温中で使用される軸受はその場合でもその使用温度で十分な硬さを有し、寸法安定性があり、また耐久性がなければならない。150－200℃以上の温度で使用される場合には、高温軸受用材料としてステンレス鋼系ではSUS440C、ハイス鋼系ではM50(Cr-Mo-V系)やSKH4(W系高速度鋼)が使われる。

## 4　軸受鋼製造技術の進歩……「ここまで来た軸受鋼、軸受寿命の改善は大いなる材料の革新」

転がり軸受への要求性能は「滑らかに回転すること」であるが、更に転がり軸受を使用する機械の要求性能によりさまざまな付帯条件が加算される。要求性能は、長寿命、高速回転性、耐衝撃性、高荷重下での負荷容量、耐異物性、回転精度、そして耐高温特性などである。要求特性は単独の場合もあるが複数の要求の場合もある。転がり軸受は外輪、内輪、転動体(ころ、ボール)、保持器の四つの部品で構成されており、潤滑剤が使われている。また転動体の種類によって「玉軸受」、「ころ軸受」に分れ、荷重の負荷方向により「ラジアル軸受」、「スラスト軸受」に大別される。使用する軸受の形式と構造、特徴を理解し、機械の機能、軸受への荷重(大きさと方向)、回転速度、軸受温度、雰囲気など、これらに適合した軸受を選択することが早期故障を未然に防ぐ最良の方法であるといわれている[11]。

### 4.1　製鋼技術の進歩

一般的な軸受鋼製造工程を表3に示す。軸受の長寿命化は、製鋼技術の進歩による鋼の清浄度向上に負うところが大きい。各工程で不純物を取り除くためにそれぞれ工夫がなされている。とくに、鋼中酸素量は大気溶解材から真空取鍋脱ガス材、さらにRH脱ガス材と連続鋳造法の組合わせといった設備の進歩とともに低減し、長寿命化に最も効果があった。

連続鋳造工程は当初より酸素量の低減効果、コストメリットがあり、さらに電磁撹拌、凝固末期圧下方法の改良などにより、著しく品質の改善が行われてきた。現在、酸

表3　一般的な製造工程と得られる製品の特徴

| 製造工程 | 適用技術 | 品質特性 |
| --- | --- | --- |
| 電気炉<br>ＬＦ炉外精錬 | ・底吹き攪拌<br>・偏心炉底出鋼<br>・スラグ組成制御<br>・低酸素操業<br>・長時間脱ガス処理 | ・高清浄度操業<br>・介在物形態制御、微細分散 |
| RH脱ガス<br>連続鋳造 | ・完全断気鋳造<br>・電磁攪拌、鋳片凝固末期圧下 | ・大型介在物低減<br>・中心偏析軽減 |
| 分塊圧延<br>鋼片検査 | ・全領域超音波探傷<br>・表面きず探傷<br>・精密圧延<br>・制御圧延<br>・球状化焼なまし | ・有害きずの低減<br>・高寸法精度<br>・高冷間鍛造性<br>・制御圧延による軟質化 |
| 棒鋼圧延／線材圧延<br>(焼なまし)／二次加工 | ・外観、寸法、表面きず、および中心欠陥評価 | ・有害な表面欠陥は皆無 |
| 製品検査<br>内質試験<br>出荷 | ・結晶粒度、脱炭検査<br>・酸素量、介在物粒径調査<br>・転がり疲労寿命試験 | |

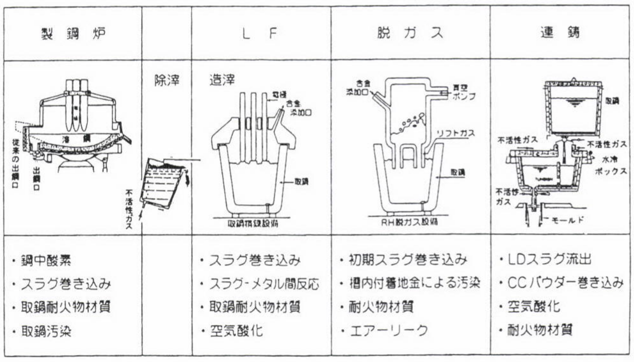


図3　製造プロセスと介在物の起源[13]

素含有量では4－5ppm前後の軸受鋼が量産されている。

軸受鋼の疲れ寿命は昭39年当時(非脱ガス材)の30倍以上に達している。しかし、このような極低酸素、高清浄鋼でも疲れ寿命にばらつきがあり、長寿命と信頼性を保証するには従来の清浄度の評価では定量的な評価に欠けていた。そこで画像解析法、エレクトロンビーム溶解法により酸化物系の介在物の定量的評価を行い、さらに統計的評価を加えて介在物の粒径分布を求めた。この方法により信頼性が向上し、酸化物系介在物の粒径分布の改善と大きな介在物の除去が必要なことが明らかになった[12]。そこでこの評価法に基づき、極低酸素領域において介在物の組成、形態を制御して均一に分散させるとともに大型の介在物をなくす製鋼技術の開発が進められた(図3)。このプロセスは代表


27

的な特殊鋼の量産プロセスで、電気炉－LF(炉外精錬)－RH脱ガス－連続鋳造を通して行われ、スラグ組成、脱酸時期などのLF精錬、RH脱ガスおよびタンディシューモールド間の徹底した汚染、再酸化の防止により総合的に高清浄鋼製造技術が達成された[13)]。

### 4.2 加工技術の進歩

#### 4.2.1 塑性加工

軸受は外輪、内輪、転動体、保持器で構成され、これらの素材はほとんどの場合、塑性加工と機械加工で作られる。どのようなプロセスで作られるかは軸受メーカーにおける経済性、生産能力から決定される。外輪、内輪などの軸受リングは主に鍛造、リングローリングおよび切削加工の組み合わせでプロセスが構成される。図4に代表的な素形材リングの製造プロセスを示す。軸受鋼では加工性、熱処理前条件としての必要性から球状化焼なましをする。棒鋼あるいは鋼管の状態で焼なまししたものを出発点とするか、リングにした後で焼なましするかに大別される。代表的な方式としてナットの生産機として開発された多段ホーマーが軸受リング製造に適用され、高速、無人化で高生産性を得ている。一方、取り代の削減による旋削ラインの生産能率の向上をねらった冷間リングローリング加工法がある。両加工法が軸受リングの製造プロセスに広く採用されている[14)]。

#### 4.2.2 切削加工は単軸盤から多軸自動盤へ

鋼材(棒鋼あるいは鋼管)からリングを削り出す加工法が一般的に行われている。従来の単軸機を用いて手動で数工程を経て加工していたのに対し、6軸または8軸の多軸自動盤が導入され、センター穴あけ、面取り、内径側ドリル加工、そして最終突っ切りまでの6ないし8工程を自動で終了する。これによれば鋼材が自動供給され、それぞれの鋼材のセット位置の外側に同心円上に配置された工具が同時に特定の加工だけを行う。一つの加工が終わると、所定の角度だけ回転し次の加工に移る。このように自動化が進み、最新の工具材料の進歩によりさらなる高速加工が実現し、より高い生産性が得られるようになった[14)]。

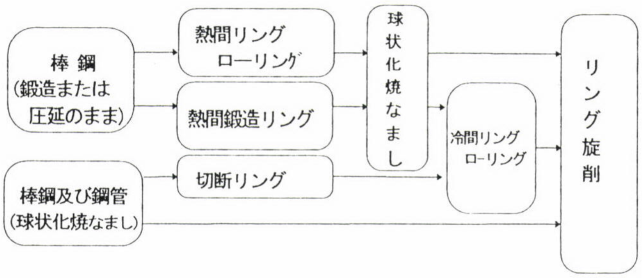


図4 代表的な素形材リングの製造プロセス

#### 4.2.3 熱処理

軸受鋼は高い硬さに焼入れ後、組織の安定性と靭性を与えるため焼戻しが行われる。最近の軸受の使用条件の過酷化(高速、高温、高負荷荷重、及び異物混入潤滑下)に伴い、独自の化学成分を有し、熱処理条件を改善し、さらに寿命延長化をねらった浸炭窒化が適用されるようになっている[15−18)]。これにより鋼の清浄化に加え特殊元素添加、熱処理条件の改善などにより非脱ガス鋼に比べ寿命が100倍以上の長寿命軸受鋼が生まれている。

#### 4.2.4 研削・仕上げと鋼球製造技術

研削は加工技術としては大きく変わっていないが、技術的精度の要求、需要増加に対して加工設備の高剛性化、振動低減、回転精度向上、耐摩耗工具の適用などにより、高精度化、高能率化が進んでおり、また真円度も大幅に向上している。

一方、鋼球の製造についても真空脱ガス処理により鋼中の不純物を大幅に低減させたことで疲労寿命が著しく向上した。

鋼球は寸法と耐久性が要求されるため軸受鋼が用いられる。鋼球の大きさは通常0.5mmから最大4インチ(101.4mm)程度である。軸受の振動が騒音の原因になるため、乗用車、家電製品などに使用される転がり軸受には、厳しい振動と音響特性が要求されてきた。とくにコンピューターのハードディスク、ビデオテープレコーダーなどには高速化、高精度化が要求されている。ハードディスク(組み込まれる鋼球の直径は2mm)を始めとする、OA機器やAV機器の小型化、高機能化は今後も進み、鋼球の小径化が進むと考えられる。鋼球に要求される特性は幾何学的な直径不同(二点接触、真球度、ロット間の相互差、表面粗さ、ウエビネスなどの形状精度と、疲労寿命、音響寿命、寸法安定性など)の特性向上である[19)]。

## 5 軸受鋼の最近の動向

### 5.1 軸受業界をとり巻く環境

軸受とりわけ転がり軸受は、早い時代(1949年ISO/TC4)から標準的なシリーズの型番についてその形状、主要寸法、精度などが国際的に標準化され(日本では1965年)、世界中のどの地域、どのメーカーで製造されたものでも基本的に互換性を持っている。したがって生産体制は国際的な規模で行われる基盤が出来上がっている。日本の多くのベアリ

表4 ユーザーニーズと軸受用鋼の開発動向

| ユーザーニーズ | | | 具体的な開発動向 |
|---|---|---|---|
| 機能性改善 | ・高清浄化（寿命向上、信頼性向上） | 製鉄用大型ベアリング | 酸化物系介在物低減<br>寿命と関係する介在物評価 |
| | ・特殊環境下の長寿命 | 異物混入潤滑下（潤滑中の鉄粉混入） | 残留オーステナイトの制御 |
| | | 準高温（100–200°C）使用温度上昇（密閉環境） | Si, Mo の添加、特殊熱処理（焼戻し軟化抵抵性）、寸法変化防止 |
| | ・耐食性、耐候性 | マルテンサイト系のステンレス鋼 | 低C–低Cr化による一次炭化物の微細化、高N化 |
| | ・静粛性（低騒音、低振動） | OA, AV, FA 分野の小径ベアリング | 超精密鋼球化<br>振動、ウエビネス特性改善 |
| | ・航空、宇宙用 | 高温用軸受用鋼 | 浸炭鋼化 |
| コスト低減 | ・工程簡略化<br>高周波焼入れ<br>浸炭時間短縮 | ハブユニットベアリング<br>直動軸受 | 中炭素ボロン鋼化<br>浸炭鋼の肌焼き<br>→中炭素鋼化 |
| | ・低グレード化 | 低コスト軸受鋼 | 合金元素低減<br>加工性改善 |

ングメーカーは早くから(1970年代)北米を初めとして、ヨーロッパ、南米、アジアなど世界各地に生産拠点を移し始めた。最近はアジア地域への生産移転(1990年代)が本格化している。現地における需要の増大、企業としてのグローバル化など……現地調達の傾向はますます進むものと見られている。

### 5.2 ユーザーニーズと動向

ユーザーニーズは表4に示すように大きく分けて、機能性向上とコストダウンが求められている。

## 6 おわりに

軸受用鋼の多様化はさらなる高機能化やコストダウンニーズに基づき進行している。ここ数年は従来の規格鋼からの化学成分の見直し、さらに浸炭窒化を含む特殊熱処理が行われてきた。今後の方向として、今回ISO規格を取り込んだJISの改訂とともに鋼種の拡大が行われていくと考えられるが、素材供給から最終製品までトータルで合理化でき、国際競争力強化という面からベアリングメーカーと軸受用鋼メーカーが今まで以上に連携をした開発体制が必要である。

**参考文献**


1）ベアリングの取り扱いと故障対策，日本プラントメンテンス協会，(1995)，10.

2）W. Jürgensmeyer：Die Walzlager, Julius Springer, Berlin, (1937). 岡本純三訳：ベアリング(16回連載)，39 (1996)，376，40 (1997)，436.

3）D. Dowson：History of Tribology, Longman, London, (1979)，37.「トライボロジーの歴史」編集委員会抄訳：トライボロジーの歴史，工業調査会，(1997)，21.

4）F. Hengerer：The history of SKF3, Ball Bearing Journal, 231 (1987)，2.

5）日本工業規格 G4805 高炭素クロム軸受鋼鋼材解説，日本規格協会，(1999)，25.

6）角田和雄：摩擦の世界，岩波新書，(1994)，134.

7）小野　繁：ころがり軸受の応用設計，大河出版，(1990)，23.

8）J. Brandlein, P. Eschmann, L. Hasbargen, K. Weigand：Die Walzlagerpraxis, (1995). 吉武立雄訳，岡本純三監修：ころがり軸受実用ハンドブック(第3版)，(1996)，39.

9）曽田範宗：軸受，岩波全書，(1976)，92.

10）ベアリング，ベアリング編集委員会，38 (1995)，30.

11）岡本純三，角田和雄：トライボロジー叢書4転がり軸受―その特性と実用設計―，幸書房，(1981)，22.

12）奈良井弘，阿部　力，古村恭三郎，西森　博，小林一博，坪田一一：材料とプロセス，5 (1992)，1959.

13）加藤恵之：山陽特殊製鋼技報，2 (1995)，15.

14）澤井弘幸：特殊鋼，47 (1998)，22.

15）村上保夫，三田村宣晶，古村恭三郎：NSK Technical Journal，652 (1992)，9.

16）三田村宣晶，関野和男，村上保夫：NSK Technical Journal，658 (1994)，11.

17）前田喜久男，中島碩一：NTN TECHNICAL REVIEW，63 (1994)，83.

18）前田喜久男，中島碩一，柏村　博：NTN TECHNICAL REVIEW，65 (1996)，17.

19）ベアリング，ベアリング編集委員会，37 (1994)，348.


(1999年7月29日受付)



29