

軸受鋼の歩み 技術小史

瀬戸 浩蔵*

Progress of Bearing Steel

Kozo Seto

Synopsis : Almost a century has passed since high carbon chromium bearing steel was born in Europe, and it is more than half a century since Sanyo Special Steel Co. started to produce it. While it comprises simple chemical compositions with 1%C-1.5%Cr, it requires more stringent quality than any other specialty steels to defy the severe service conditions of bearings. Japan has held a leading position in bearing steel industry in terms of quality as well as production volume, and the technology for bearing steel is approaching a perfect stage. Here, the progress of bearing steel in Japan is described through the involvement of Sanyo in bearing steel development.

Key words : bearing steel; history of bearing steel; oxygen content; rolling contact fatigue life; continuous casting; specification; bearing steel tube.

高炭素クロム軸受鋼が欧州で生まれてから一世紀近くになり、当社が生産を始めてからでも半世紀余を経ている。1%C-1.5%Crという単純な組成を持つ鋼であるが、ベアリングの過酷な使用条件から特殊鋼の中でも最も厳しい品質が求められる。その品質においても生産量においても、わが国の軸受鋼は世界の頂点に立っており今や完成の域に達してきた。こゝに当社と軸受鋼の関わりを主体に、わが国における軸受鋼の歩みを記録にとどめてみた。

1. 軸受鋼の萌芽期（戦前の軸受鋼）

近代ベアリング産業の誕生は1890年代に溯る。わが国では欧米に20年遅れて1916(大正5)年に興り、これに用いる高炭素クロム軸受鋼の生産は大正8年に始まった。輸入主体の時期を経て、第二次大戦を迎えて国産化の時代に入る。しかし、その品質は化学成分を模倣したにすぎず、ベアリングに必要な品質特性を十分理解していなかった。わが国軸受鋼の芽生えの時期である。

1・1 ベアリングの誕生

ベアリングが実用化したのは、1889(明治22)年に米国ニューデパーチュア社が、次いでハイアット、ティムケンおよび英国ホフマン等の各社が、19世紀末までに相次いで設立されてからである。20世紀に入って1903(明治36)年に米国フォード自動車が発立されてモータリゼーションが興り、さらには1914(大正3)年に第一次世界大戦が勃発して機械工業の重要性が認識されてから世界のベアリング産業は飛躍的な発展を遂げた。わが国にベアリングを初めて紹介したのは、1910(明治43)年に見本を持ち込んだスウェーデンSKF社(1907年設立)である¹⁾。わが国産業の芽生え

とともにも第一次大戦中から徐々にベアリングの輸入が始まり、1939(昭和14)年に勃発した第二次世界大戦まで輸入主体の時代が続く。

一方わが国におけるベアリングの生産は、第一次大戦中の大正4(1915)年に海軍の要請に応じた日本精工が国産第一号を完成したのが嚆矢である²⁾。その後、東洋ベアリング、天辻鋼球、光洋精工、椿本鋼球および不二越鋼材等の各社が相次いで生産を開始した。各社は第二次大戦を控えての国策と、自動車国産化の流れ(昭和9年日産自動車改組設立、昭和12年トヨタ自動車設立)に沿ってそれぞれ業容を拡大して、現在のわが国ベアリング業界の基礎ができた。

1・2 軸受鋼の誕生

ベアリングに焼入鋼が用いられたのは1879(明治12)年が最初という³⁾。この頃から欧州で各種合金鋼の開発が始まっているので、19世紀末までには高炭素クロム鋼が生まれていたであろう。20世紀に入った1901年に高炭素鋼とともに高炭素クロム鋼の使用が、1904年には1%C-1または1.6%Crという現在の組成が記録に残っている³⁾。したがって、一世紀近くにわたって軸受鋼はその組成を変えることなく今日に至ったことになる。

一方わが国では、日本精工が大正4年ベアリングの試作に際して、英国から輸入した高炭素鋼(現SK3相当)を用いている。当時のわが国には、他に焼入れのできる鋼が無かったとめという。同社はこの鋼の焼入れ過敏性に悩まされ、国産の低クロム鋼でも試作してみたが物にならなかったと記されている。その後大正8(1919)年にSKFのベアリングを分析してみて1%C-1.5%Crを知り、日本特殊鋼が試作を始めてようやくわが国にも高炭素クロム軸受鋼が誕

* 山陽特殊製鋼(株)顧問

生した³⁾。したがって、わが国の軸受鋼は欧米より20年遅れて70年余の歴史を持っていることになる。

1・3 軸受鋼の国産化

昭和の時代に入っても、軸受鋼はもっぱら輸入材が用いられていた。ところが昭和6年の満洲事変を契機として、海軍がベアリングの輸入を禁ずるにいたって俄かに国産化が強く求められた。この時流のもと、昭和10年頃から日本特殊鋼に続いて、当社をはじめ安来製鋼、大同製鋼、日本砂鉄、昭和特殊製鋼および高周波重工等の各社が相次いで生産を開始した。日本精工の記録⁴⁾では、年間の軸受鋼発注量が昭和7年219トン、昭和9年376トンであったのが昭和11年には1,550トンに急増している。ベアリングの国産化が急速に進んだ事が伺えるが、表1のとおりこの年でもなお輸入鋼材が80%を占めている。

表1 日本精工軸受鋼発注量 (昭和11年)

			(トン/年)
輸入材	棒鋼	1,051	S K F 製
	鋼線	196	
	小計	1,247	
国産材	棒鋼	300	日本特殊鋼製
	鋼線	5	
	小計	305	

昭和12(1937)年日華事変の勃発とともに、国内自給を目指す軍事経済統制が強力に敷かれ、当社と軸受鋼を結びつける画期的な決定があった。昭和14年に公布された「軸受工業指導要領」の中に、軸受鋼は山陽製鋼と日本砂鉄に集中生産させ、その目標量は表2の通りと明記されたのであ

表2 軸受鋼生産目標量 (昭和14年指導要領)

	(トン/年度)	
	昭和16年度	昭和18年度
山陽製鋼	10,000	15,000
日本砂鉄	15,000	15,000
日本精工	3,000	3,000
合計	28,000	33,000

表3 第二次生産目標量 (昭和17年指導要領)

	(トン/年度)		
	昭和17年度	昭和18年度	生産実績(17年度)
山陽製鋼	20,180	20,180	6,881
日本砂鉄	14,000	23,000	4,448
不二越鋼材	1,680	3,500	2,516
川崎重工	3,200	4,250	28
日本高周波	5,000	5,000	542
大同製鋼	4,000	4,000	2,531
日本特殊鋼	240	240	659
特殊製鋼	360	360	1,149
日本精工	3,000	3,000	350
住友金属	1,500	5,000	-
日本鋼管	-	-	252
昭和特殊鋼	-	-	674
日立金属	-	-	646
その他	-	-	140
合計	53,160	68,530	20,816

る。一方、軸受鋼材の輸入は国際情勢の緊迫化にともなうて、昭和15年の6,437トンから、昭和16年に885トン、さらに昭和17年には115トンに激減した。このため「指導要領」の生産目標量は表3のように改定されて多くの特殊鋼会社が名前を連ねるようになったが、戦況の悪化とともに生産実績は目標量を遥かに下回っていた。(表中に日本精工とあるのは、同社が昭和16年に川崎工場を建設して軸受鋼の生産を興したものであり、昭和19年には当社も半額出資して日ノ出製鋼として分離独立したが終戦とともに解散している。)⁵⁾

昭和8(1933)年に山陽製鋼(昭和34年現社名に改称)として創業した当社は、直後の昭和10年に3トン電気炉と2トンハンマーにより高炭素クロム軸受鋼の試作を始めている。当時、他の特殊鋼会社が高品質を要求されるわりには廉価な軸受鋼を好まなかったのに対し、当社だけは着実に生産を伸ばして、表4のとおり昭和14年には生産量の内40%を軸受鋼が占め、昭和17年にはその割合が実に95%に達している。政府に提出した概況報告書⁶⁾の中に「甚ダシク技術難ナル規格ヲモツ軸受材ノ要求頗ル緊急ナレバ、不絶力カル品種ノ生産ノタメニハ相当ナル犠牲ヲ顧リミズ解決ニ全カヲ集中シ、以テ国策遂行ノ一端ヲ果シタク、且之ニヨリ弊社自身モ亦相当ナル技術ノ向上ヲ要ルモノナレバ一石二鳥ナリ」との記述がある。当社の一貫した信念が当時すでに表現されていて興味深い。

表4 当社の軸受鋼年間生産量と社内生産比率

	(トン/年)		
	普通鋼	特殊鋼	軸受鋼
昭和9年	1,340	339	-
昭和13年	1,021	2,113	?
昭和14年	-	3,730	40%
昭和15年	-	4,950	60%
昭和16年	115	7,096	80%
昭和17年	?	?	95%

鋼球用の線材は厳格な品質が要求されるため、国産化がいつそう遅れた。昭和10年頃に神戸製鋼が試作したが量産するにいたらず、このため先述の昭和14年の「指導要領」の中で、日鉄戸畑に「コノ生産ニ関スル研究ヲ行ワセ、研究完成後二同社ヲ以ツテ製造ニ当タラセル予定トスル」と指示している。しかし、昭和16年の目標量2,000トンに対して、同社の実績は378トンにすぎなかった。輸入の途絶とともに昭和17年になって当社をはじめ大同製鋼、不二越鋼材および高周波重工等の10社が新たに指定工場に加えられており当時の緊迫ぶりを偲ばせる。

1・4 萌芽期の軸受鋼品質

昭和初年の軸受鋼は、アメリカとイギリスからも輸入されていたが、スウェーデンのSKF材が最も品質が優れ量も圧倒していた。その品質は木炭銑を酸性平炉で溶製するからとされて一種の聖域の感すらあった。国産材の品質はSKF材に遠く及ばず、マクロ組織と顕微鏡組織が劣り、特

に圧壊値が著しく低かった⁷⁾。こゝからわが国の軸受鋼の品質改善の永い歩みが始まる。当初は輸入材を使い馴れ実践的な知識を持つベアリング業界の主導で進められたようである。例えば、昭和16年の東洋ベアリングとの技術委員会⁸⁾で「①材質の改善著しきなるも、なお地キズあるもの圧壊荷重の不足せるものあり、更に材質向上を求む。②鍛圧比4～6では過小なり、設備改善を求む。③焼鈍前にノルマライズの要あり、設備改善を求む。④焼入れ後の落下試験において、スラグあるもの、破面の粗なるもの少なからず。」等と指摘されている。当時の品質水準を彷彿とさせるが、この頃は6トン電気炉から150kg程度の鋼塊を上注鑄込みしていた時代なので、たゞ化学成分を合わせていたゞけなのだろう。

わが国の規格に高炭素クロム鋼が最初に登場したのは、昭和3年の陸軍、次いで昭和4年の海軍規格である。化学成分の他に前者は引張強さが、後者には圧壊値も規定されている。軸受鋼として独立した規格になったのは昭和12年の陸海軍航空材料規格イ501鋼とイ502鋼であるが、表5のとおりやはり機械的性質の規定がある。その後、昭和16年の臨JES軸受鋼SCr14Aで引張強さが削除され、昭和18年の海軍規格特イ501鋼で初めてマクロ組織、非金属介在物と顕微鏡組織が標準写真で示されるとゞもに地キズが許容値で定められた。表6のように、今では考えられないような値であるが、この規格は以後の軸受鋼の規格変遷の母体となった意義のあるものといえる。

表5 陸海軍航空材料規格 (昭和12年)

種類	記号	(%)				
		C	Si	Mn	P	S
高炭素	イ501					1.2
高クロム鋼		0.95	0.35	0.60	0.030	以下
高炭素	イ502	1.15	以下	以下	以下	0.5
低クロム鋼						以下

記号	鍛造比	焼鈍さ HB	引張試験			衝撃値 kg・m/cm ²	焼戻さ HRC	圧壊値 kg
			引張強さ kg/mm ²	伸び %	絞り %			
イ501	4	200	70	20以上	30以上	—	63	4,000
イ502	以上	以下	以下	25以上	—	4	55	以上

表6 昭和18年海軍航空本部仮規格 (地キズ許容数)

種類	記号	0.4～3mm				地キズ数	判定
		0.9mm	1.9mm	2.9mm	以上		
特殊高炭素	特	20	15	10	5	5以下	優
高クロム鋼	イ501	以下	以下	以下	以下	10以下	良
						15以下	可
						20以上	不可

2. 軸受鋼の揺籃期 (戦後の軸受鋼)

戦後壊滅状態であったわが国産業は、朝鮮戦争を契機として立ち直る。軸受鋼も次第に量産体制を整え、国産化が定着した。鋼管、鍛造リング等と素形材も多様化した

その品質はまだSKF材に及ばなかった。やがて、真空脱ガスの導入によって、世界最高の品質と量を誇る発展期に向けての揺籃の時期である。

2・1 戦後の軸受鋼生産の再開

昭和20(1945)年敗戦とゞもにわが国産業は壊滅状態に陥った。ベアリング産業は昭和22年頃から徐々に生産を再開し始めたが、軸受鋼は需要が少ないのに加えて戦時品が氾濫したゞめいつそう遅れた。ところが昭和25(1950)年朝鮮戦争の勃発により事情は一変した。ベアリング産業は特需景気によって活況を呈し、軸受鋼の需要もまた一挙に加速した。戦争末期に年産5万トンであった軸受鋼の生産は、戦後その10分の1に落ち込み、朝鮮戦争によって一挙に2万トン台に回復したのである。これを契機に、産業構造が高度化したわが国経済は成長過程に入り、好不況を繰り返しながら昭和30年代のなかばには高度成長を遂げる。この間、設備投資の増大、耐久消費財の需要増、さらにはモータリゼーションの到来によって、ベアリングとゞもに軸受鋼もまた大量生産の時代に入った。

当社は戦後間もない昭和21年2月に生産を再開したが、昭和25年頃まで軸受鋼の生産は月25トン程度にとゞまっていた。ところが朝鮮戦争とゞもに第二次大戦中最も実績のあった当社に注文が殺到した。これを受けて昭和26年から再び軸受鋼を主体生産とする方向に歩みだしたのである。生産量の推移でみると、表7の通り昭和29年には生産量の55%を軸受鋼が占めるまでに回復している。これに自信を得た当社は、軸受鋼の独占的生産を目指して昭和34年以降数次の合理化を行った。15トン4基・30トン3基・60トン1基の電気炉、2基の熱間押出プレス、連続焼準焼鈍炉、分塊大型圧延機、連続中小型圧延機ならびに1,500トン鍛造プレス等々の新鋭設備を次々と導入して次第に量産体制を整えていった。

表7 当社の軸受鋼生産量の推移

期間	(トン/年)			備考
	全特殊鋼	内軸受鋼		
昭和25年下期	3,407	301	8.8%	朝鮮動乱前
昭和28年上期	9,149	3,999	43.7%	“ 中
昭和29年上期	7,096	3,894	54.9%	“ 後

2・2 軸受鋼管の生産開始

中径ベアリングの内外輪は当初棒鋼から削り出されていた。この場合、歩留が30%程度にすぎないため原価の40%を材料費が占め、また旋削工程に労務費の50%が費されていた。このため諸外国では早くから鋼管からの旋削が行われており、わが国でも昭和10年にはSKFから約50トンの軸受鋼管を輸入している。国産化の動き⁹⁾は早くからあり昭和16年に日曹製鋼、昭和17年に尼崎製鋼と日本鋼管、戦後になって昭和23年に扶桑金属が、さらには昭和27年に日本特殊鋼管があいついで試作しているがいずれも量産に至らなかった。このため朝鮮戦争の特需を受けて、昭和27年に

は再びSKFから250トンの輸入をしている。その後ベアリング業界から強い要請を受けた住友金属が、昭和29年にクランプレスで100トン程度の生産をしたのがわが国の軸受鋼管量産化の最初である。

しかし、ベアリング産業も未だ成熟の域に達せず、また旋削機械の代替を要するために軸受鋼管の需要は多品種少ロットであった。このため、昭和27(1952)年フランスで開発されたユージンセジュールネ式熱間押出法が、最適の製管法として俄かに脚光をあびたのである。これを導入した神戸製鋼が昭和33年に試作を行い、昭和34年からは住友金属が量産化を進めた(2年後中止)。当社は昭和34年から生産を開始して今日に至り、昭和37年から八幡製鉄光が生産を始めて(昭和48年中止)、遂にわが国の軸受鋼管の量産化が軌道に乗った。

当社は、昭和19年にガスポンペメーカーの大和金属工業と提携して軸受鋼管を試作した記録¹⁰⁾があり、当時から鋼管に強い関心を持っていた証として興味深い。産業の拡大にもなって、昭和30年に通産省から軸受鋼の鋼管化に関する指導が出たのを契機に、当社も押出法を導入する方針を固めた。昭和31年に技術契約を結び、昭和34年から生産を開始した。2,000トン押出プレスの他に、前後設備として30トン電気炉、1,500トン鍛造プレス、連続焼準焼鈍炉等の膨大な投資であったが、この成功が当社の近代化の礎となったのである。量産が軌道に乗り需要が高まるとともに小径管が望まれたため、昭和37年には1,250トン押出プレスを増設して軸受鋼管の量産体制を整えた。

ベアリングの素形材には、古くから型打鍛造リングや自由鍛造リング、圧延リング等も使われていた。昭和24年にスイスでハテバー熱間高速鍛造機が開発され、昭和36年に日本特殊鋼がこれを用いた軸受鋼鍛造リングの試作を始めている。鋼管とともに素形材の今日のバリエーションがこの時期に芽生えたといえる。

2・3 揺籃期の軸受鋼品質

戦後の軸受鋼は品質の向上が急務であった。SKF製に比べてベアリングの耐久性が劣るのは鋼材の圧壊値が低いからとされ、まず原料の選択とマクロ組織および顕微鏡組織の改善が求められた。マクロ組織では鍛圧比が重視されたが、量産化の流れとも相まって鋼塊は次第に大形化して自然に解決した。昭和20年代は250kg程度の鋼塊であったのが、昭和35年に分塊大型圧延機の設置により1.5トンとなり、昭和39年には60トン電気炉の設置により2トン鋼塊に順次拡大している。

戦後最初に研究の重点が置かれたのは、顕微鏡組織であり、球状化熱処理技術であった¹¹⁾。石炭焚きのバッチ炉からやがて重油焚きとなり、炉前に熱鋼を払って焼ならしを行うようになったが、所詮バッチ炉のため炉内温度分布が悪くて、微細均一な球状炭化物組織を得るに至らなかった。昭和34年にドイツから月産700トンの連続焼準焼鈍炉を導入したことによりこの問題は一挙に解決した。鋼管の変形

と脱炭を防止するためには連続炉しかないとして導入したものであるが、長手方向に複雑な熱履歴を受けて果たして均一な組織が得られるものか疑問の中、熱処理曲線の研究を重ねてようやく均一な顕微鏡組織を得ることができた。やがて生産性向上のため焼準と焼鈍を分離した連続炉となり、炉容も順次拡大して現在は月産10,000トンの炉も稼働するようになっていく。かくして、マクロ組織と顕微鏡組織の改善がこの時期に果されたのである。

戦後の軸受鋼の規格は、昭和22(1947)年にJES金属4805が制定されて、SUJ(Steel Use 軸受)の記号が初めて現れ1種と2種が設けられている。昭和25年改定のJISG4805でSUJ3が追加されているが、これらの規格はまだ化学成分の他、球材用に引張強さが、輪材用に圧壊値が規定されているにすぎない。これに先立ち、昭和24年頃からベアリング業界はマクロ組織と顕微鏡組織の標準写真の他に、地キズと非金属介在物の許容限度を定めた各社独自の受入検査基準を定めだしており、昭和26年にはベアリング協会として統一した「軸受鋼検査仕様書」を設けている。その内容は当時としては極めて厳しいもので、各社の受入検査時の不良率は10%にも及んだという。この仕様書の品質向上に果たした役割は大きく、その後改定を加えながら約20年間にわたって軸受鋼メーカーに品質指針を与え続けた。JISでは昭和28(1953)年の改定で機械試験が外され、参考値ではあるが初めて非金属介在物が数値化されている。表8のとおり、その値は現在と比べべくもないが、以後の軸受鋼の品質発展のためには見逃せない事柄である。

表8 JISG4805非金属介在物、地キズ参考値

改定	非 金 属 介 在 物					地キズ許容数
	種別	清浄度	平均厚	最大長		
1953	球用材	A	1	4 μ m	70 μ m	0.1~0.4mm:20ヶ 0.5~0.9mm:4ヶ
		B	2	4 μ m	-	
	輪用材	A	1.5	5 μ m	100 μ m	1.0~1.9mm:1ヶ
		B	2.5	5 μ m	-	
1961	A		: 0.17%以下		0.5~1.0mm:6ヶ 1.0~2.0mm:1.5ヶ 2.0~4.0mm:1.0ヶ	
	A+B		: 0.17%以下			
	A+B+C		: 0.30%以下			

昭和30年代に入ってベアリングの最も重要な性能は転動疲労寿命にあるとされ、早期寿命試験機が開発されるとともに寿命に及ぼす要因の研究が行われだした。製鋼精錬と造塊技術が進歩して、地キズと非金属介在物は次第に減少して清浄度は向上したが、転動疲労寿命はなおSKF材より劣っていた。疲労試験片の調査によって疲労剥離の起点が酸化物系介在物にあることが判明する一方、昭和35年頃に真空溶解した軸受鋼の疲労寿命が著しく高いことが明らかにされた¹²⁾。軸受鋼の低酸素化への幕開けである。

当社には、昭和24年の上杉(現相談役)の「軸受鋼の冶金的見地」を嚆矢として、九百数十点におよぶ軸受鋼に関する研究報告が残っている。これによると、昭和20年代は造塊法と地キズ、熱処理と圧壊値に関する研究が主流を占

めており、地キズは戦後早い時期に上注から下注造塊に移行して著しく改善されている。昭和30年代前半は外国材の調査を盛んに行くとともに、下注造塊時の被覆剤、連続炉による熱処理、致命的欠陥を誘発する水素の研究等々が数多くみられる。昭和30年代後半は寿命に及ぼす酸化物系介在物の影響、脱ガスの効果、顕微鏡組織と被削性等の研究が行われている。当時の品質改善の動向を示しているが、当社ばかりでなく学会でも軸受鋼が花形テーマになっていた。わが国軸受鋼の品質の基礎が培われた揺籃の時期であり、やがて脱ガス処理の導入によってようやく世界の品質水準と相並ぶに至って次の発展期に向かうのである。

3. 軸受鋼の発展期(脱ガス処理の開始)

脱ガス処理により世界水準の品質に達したわが国軸受鋼は、さらなる低酸素化を追い続け、やがて真空溶解鋼に匹敵する極低酸素鋼を実現した。ベアリングの転動疲労寿命も非脱ガス鋼の数十倍に達して、遂に世界水準を凌駕するに至った。この間わが国産業は、昭和40年代前半に目覚ましい発展を遂げ、軸受鋼の生産量もまた世界最高の地位を得た発展の時期である。

3.1 軸受鋼生産の拡大

昭和40(1965)年の不況を経て間もなく、わが国経済は5年間にわたる長期の好況を迎える。設備投資、個人消費と輸出の伸びによって高度成長を遂げ、昭和43年にはアメリカに次ぐ経済大国となった。しかし、昭和46年の円レート10%切上げ、昭和48年の変動相場制移行と第一次オイルショックによって再び不況に見舞われる。昭和50年代に入って第二次オイルショックを経た後、好不況を繰り返す低成長期に入った。この間、ベアリングの生産量が昭和45年に昭和41年比実に2.7倍に伸長したのを受けて、軸受鋼も図

1のとおり急成長を遂げた後、好不況の影響を受けながらも着実に伸びている。ちなみに年産60万トン(自由圏生産量)のほゞ40%にあたり単一国の生産量としては世界最大である¹³⁾。各社別生産量の推移は表9のとおりで、大同製鋼と愛知製鋼の進出、日本特殊鋼と特殊製鋼の大同製鋼への合併、高炉メーカーの進出と中止等の様子が読み取れる。昭和50年頃は当社の他、大同特殊鋼、高周波鋼業、不二越鋼材と愛知製鋼の5社のみでの生産となっており、やがて高炉メーカーが再び進出するまでの最も安定した時期であった。この間、特殊鋼各社は活発な設備投資を行っており、当社でも電気炉の炉容を30→60→90→150トンへと順次拡大するとともに、迅速溶解法UHP操業を開発して、図2のごとく生産性を飛躍的に向上させた¹³⁾。

表9 各社軸受鋼の年度毎生産量の推移

	昭和31年	昭和45年	昭和50年	昭和55年	昭和60年	平成2年
山陽製鋼	14.3	200.3	228.1	343.6	280.4	243.4
不二越鋼材	9.6	40.2	36.1	43.6	43.1	37.7
日本高周波	9.1	66.0	75.9	119.8	106.7	119.8
日本特殊鋼	4.7	6.2	(大同と合併)	—	—	—
住友金属	1.6	1.1	(S46中止)	(S59再開)	10.0	54.9
特殊製鋼	1.4	2.9	(大同と合併)	—	—	—
大同製鋼	—	66.0	88.8	105.5	118.1	154.5
愛知製鋼	—	20.3	14.3	28.1	50.9	61.6
八幡・富士	—	13.5	(S48中止)	—	(H2再開)	1.2
三菱製鋼	—	0.4	—	—	—	—
神戸製鋼	—	0.4	(S46中止)	—	(S63再開)	13.3
日新製鋼	—	0.1	0.1	2.1	4.8	4.5
川崎製鉄	—	—	(S53開始)	4.3	5.2	15.9
日本鋼管	—	—	—	—	(S63開始)	5.8
合計	43.2	417.4	443.8	647.0	619.3	712.9

出所：鉄鋼連年次統計(昭和31年当時社名)

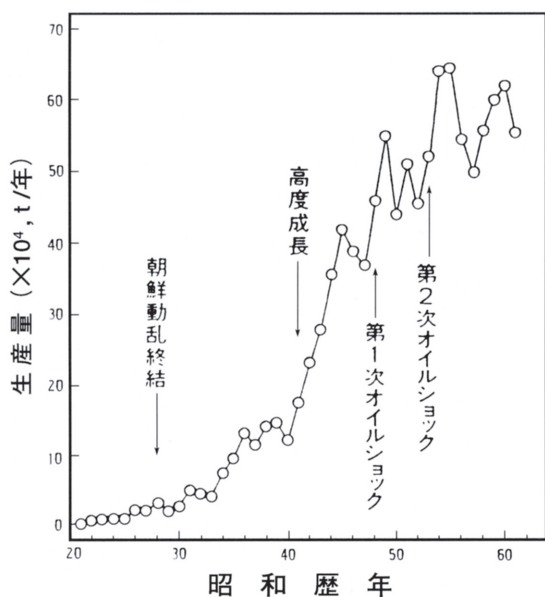


図1 軸受鋼熱間圧延鋼材生産量の推移

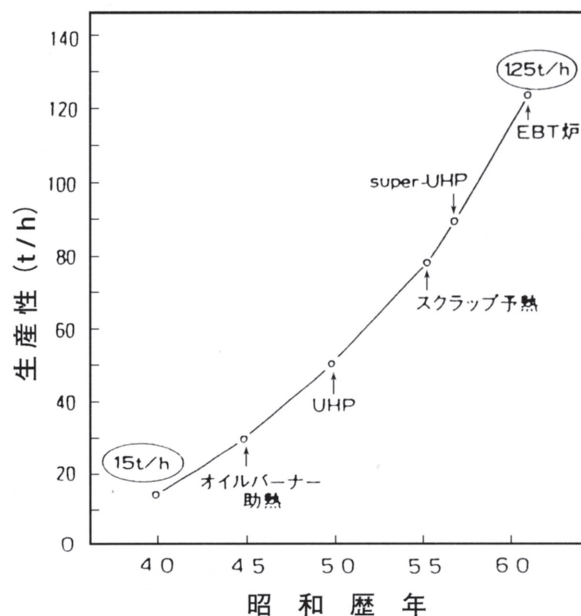


図2 電気炉の生産性の推移

ベアリングの素形材は、棒材から鋼管と鍛造リングへの移行がこの時期に進んでいる。鋼管は熱間押出管が定着していたが、ベアリング産業の拡大とともに大口ロット化が進んで大量の供給を求められたのを受けて、当社は昭和45年

にアッセルミルを導入して軸受鋼管の量産体制を整えた。他社の生産中止もあって、昭和48年以降60年まで当社一社のみが軸受鋼管の生産を続けていた。鋼管の他、大径用にリングローリング機が導入され、当社も昭和35年に魚橋工場を設立している（昭和40年閉鎖）。一方、中小径用には鍛造リングが定着していたが、昭和46年に熱間多段鍛造機が開発され、内外輪が分離成形されるようになって急速に普及した。これら素形材は次第に高い寸法精度が求められたので、鋼管は昭和40年代後半からコールドビルガーマイルによる冷間加工の比率が高まり、鍛造リングも昭和50年代に入ってからCRF（Cold Roll Forming）が開発されて今日の素形材の体制が整ったのである。当社は、ネットシェイプ化の動きへの対応とすべての素形材を供給することを目的に、昭和62年にサントク加工を設立して鋼管のリング切断に、また平成2年にはOSテックを設立して鍛造リングの分野に進出した。

3・2 発展期の軸受鋼品質

溶鋼の脱ガス処理は昭和20年代に欧州で開発され、昭和30年代にはわが国にも導入されている。当社は、鋼中の酸素含有量を下げ、有害な氧化物系介在物を工業規模で低減するため、昭和39(1964)年60トン炉に取鍋脱ガス設備を導入した。脱ガス処理によって軸受鋼の酸素量は一挙に半減するとともに、転動疲労寿命が倍加する画期的な成果を得て、ようやくSKF材の品質に並ぶに至ったのである。この結果をふまえて昭和41年から全量脱ガス鋼に移行するとともに、昭和43年には30トン炉にもRH式脱ガス設備を導入した。脱ガス処理の実施は軸受鋼にとって重要な転機であり、昭和45年からJISに必須条件として取り入れられている唯一の鋼種であることからその重要性が伺い知れる。なお、このJISの改定の際に大型ベアリング用の軸受鋼として、Moを添加したSUJ4と5が追加されている。

一方、昭和39(1964)年に開通した東海道新幹線が、軸受鋼のさらなる品質向上への動機づけとなった。車軸ベアリングを高度に保証する方法として、せん断応力が集中する表面直下に隠れて存在する介在物を検出するため、研磨面を磁気探傷と超音波探傷をする手段が用いられたのである。脱ガス処理をしただけではこの厳しい試験方法に応える品質が得られず、昭和42年には最も信頼性を必要とするコ口用材に真空溶解が指定されるに至った。これを契機に脱ガス操業技術の改善によっていっそうの低酸素化を目指すとともに、外的要因から混入する介在物を低減する努力が始まった。取鍋脱ガス方式ではスラグからの汚染が避けられず、昭和53年には60トン炉もRH方式に置換した上で操業技術の向上と槽内汚染の防止に努めた。また、造塊時の再酸化を防止するために取鍋下から鋳型内まで予め窒素雰囲気中に置換して大気を遮断すること、鋳型内容鋼上面を酸化防止剤で覆うこと、溶損の少ない煉瓦材質、湯道内容鋼流を整流にする鋳型配列等数多くの研究を重ねた。図3にみるごとく鋼中の酸素量は年を経るごとに下がり、昭和

48年には鋼中の酸素量は遂に10ppm以下に到達した。酸素の低下とともに転動疲労寿命は著しく伸びて、図4のとおり非脱ガス鋼の数十倍に達して¹³⁾¹⁴⁾遂に世界水準を凌駕するに至ったのである。当社では、当初の脱ガス鋼をMG鋼（磁気探傷検査を保証した鋼）、10ppm以下の鋼をMGH鋼（磁気探傷検査を高度に保証した鋼）、やがて連铸によって5ppmまで下げた鋼をMGZ鋼（磁気探傷検査を最高に保証した鋼）と呼んで区分していた。

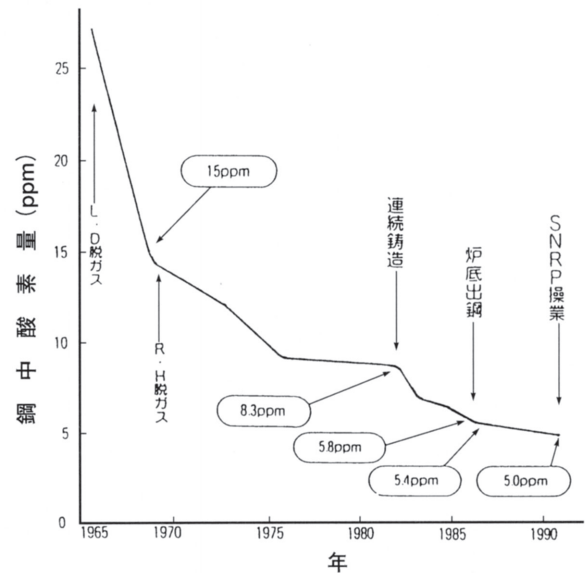


図3 軸受鋼の酸素含有量の推移

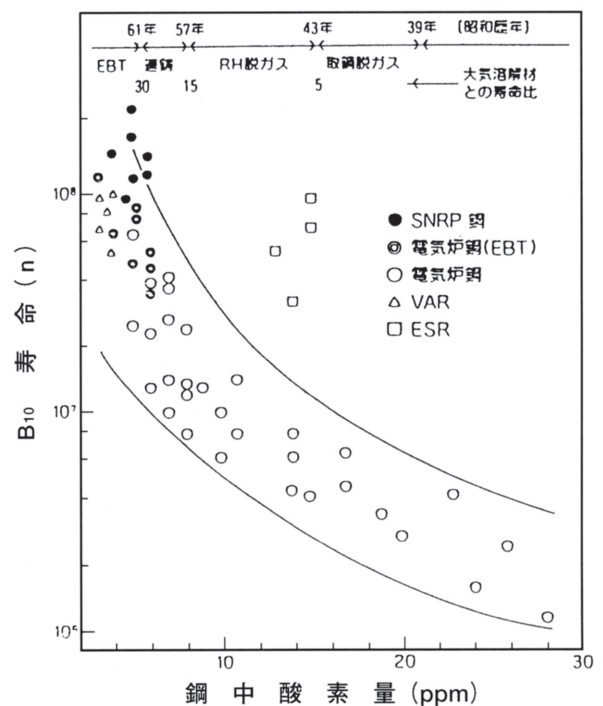


図4 軸受鋼中の酸素含有量と転動疲労寿命の関係

4. 軸受鋼の完成期（現在まで）

連続鋳造の導入によって酸素含有量は5 ppmに定着するとともに、下注造塊によるバラツキを解消して軸受鋼の品質は完成期を迎えた。一方、わが国経済は急速な円高によって産業構造が一変した。一世紀の歴史を持つ高炭素クロム軸受鋼にも変化の兆しが見えだしている。

4・1 連続鋳造の導入

鋼の連続鋳造は、脱ガスと同じく昭和20年代に開発されて、昭和30年代にはわが国にも導入されている。当社は、昭和32年から調査を始めて欧米各社の連铸片を入手するとともに、昭和36(1961)年に日本特殊鋼、大同製鋼および三菱製鋼と共同してドイツからライセンスを取得の上、北日本特殊鋼八戸にピレット連铸機を設置したが、結局十分な品質が得られずに終わった経緯がある。その後、脱ガスと炉外精錬の技術が進歩するとともにブルーム連铸機が開発されるに及んで、昭和50年代に入ってから再び連続鋳造の検討を始めた。まず介在物の分布と中心偏析ならびに内部割れを確認するため、昭和54年に新日鉄八幡に垂直曲げ型ブルーム連铸機による軸受鋼の試作を依頼している。その調査結果を踏まえ、昭和57年に垂直型3ストランド大断面ブルーム連铸機と150トン電気炉、RH脱ガス設備、LF精錬炉、連続ソーキング炉、分塊圧延機およびPSW鋼片圧延機からなる一連の最新設備¹⁵⁾を建設したのである。完全垂直型を選んだ理由は、軸受鋼の連铸に際して内部割れを嫌い、また介在物と偏析を真中心に集めてベアリング加工時の除去を狙ったものであった。この視点は成功を収め、現在では軸受鋼の95%が連铸化されている。

軸受鋼の連铸化は急速に進んだが、JISに容認されたのはかなり後である。また、溶解炉は長年にわたり電気炉であったのが、脱ガスと炉外精錬の発達によって変化をもたらした。規格の変遷でみると、昭和12年の軸受鋼が初めて規定された航空材料規格は「るつぼ炉または電気炉により製造した鋼塊から」とあり、昭和16年の臨JESで「電気炉または平炉による鋼塊から」に変わっている。実際は電気炉により生産され続けていたが、昭和60年頃からの転炉による高炉メーカーの進出によって、平成2年のJISで「真空脱ガスしたキルド鋼から」に改定された。溶解炉の制約がなくなり、転炉とともに連続鋳造もまた公認されたことになる。当社は、これに遥か遡る昭和38年頃に小型溶鋳炉とカルドー転炉によって、転炉製軸受鋼を製造する計画を持っていたことがある。

4・2 軸受鋼品質の完成と今後

軸受鋼の酸素含有量は、脱ガスとその周辺技術の進歩によって8 ppm程度になっていたが、連続鋳造によりさらに下げることができた。下注造塊に比べて断気鋳造が容易なこと、耐火物との接触が少なく汚染を最小限にできるためである。しかし、現在の5 ppmの値を得るまでには周辺技術の研究を重ねている。まず、昭和57年連铸機を設置す

るにあたり、タンディッシュでの介在物の浮上分離をはかるため水模型実験を繰り返してその形状を決め、水冷方式によって変形を防ぎ完全密閉して大気の侵入を防ぐとともに、溶損の少ない耐火物を使用して溶鋼の汚染を少なくした。また、脱ガスと炉外精錬技術の改善に加えて、昭和61年に電気炉を偏心炉底出鋼（EBT）方式に改造した。スラグの出炉を防ぎLF炉の還元精錬を容易にして、より安定した高纯净度鋼を得るためである。これらの結果による連铸材と鋼塊材の酸素含有量の比較を図5に、EBT改造前後の酸素量と非金属介在物の比較を表10に示した¹³⁾。かくして真空溶解鋼に匹敵する5 ppmの極低酸素鋼が量産できるようになったのである。この流れに追随して、今や世界の軸受鋼がシングルppmの時代になっている。

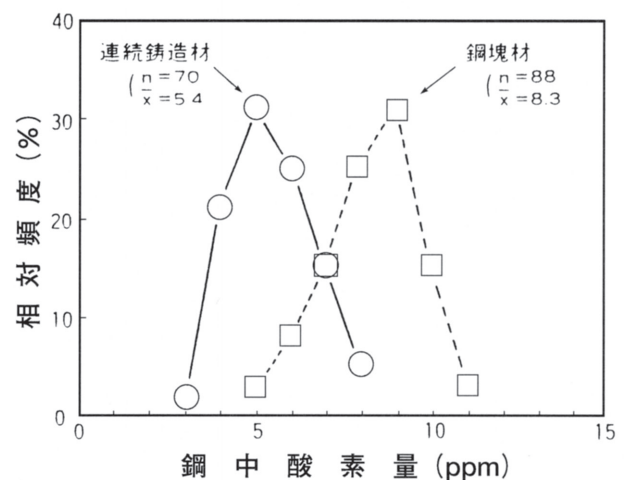


図5 連続鋳造材と鋼塊材との酸素含有量の比較

表10 出鋼方式による酸素含有量と非金属介在物評価

	平均 酸素量 ppm	酸化物系介在物 (ASTM-A8)					
		B		C		D	
		T	H	T	H	T	H
傾動樋式出鋼 T S T	5.8	0.72	0	0	0	0.98	0.37
偏心炉底出鋼 E B T	5.4	0.17	0	0	0	0.90	0.04

平成の世代に入って、さらなる高信頼性軸受鋼の研究が始まった。極低酸素鋼の中でも非金属介在物の組成、形態と分布を制御した超高纯净度鋼である。当社は、平成4年に精錬と連铸技術を集大成した操業法SNRP (Sanyo New Refining Process) を確立するとともに、日本精工と共同して介在物の最大形状を保証したEP鋼 (Extremely Purified Steel) を開発した¹⁶⁾。この鋼は、完成された軸受鋼といってもよいであろう。

なお、線材への連铸材の適用はボールの極に現れる中心偏析を懸念して遅れていた。鋳込温度、速度の制御と鋳型内及び凝固末期の電磁攪拌技術が進歩したのに加え、鋳片に軽圧下を加える技術の開発によって、平成2年頃から順次適用されている。

一方、わが国の産業構造の変化にともない、今後は高信頼性が必要な超高清浄度の高炭素クロム軸受鋼と、一般用途向けに低価格を指向した中炭素低クロム軸受用鋼に二極分化が進んで行くものと思われる。また社会環境の高度化にともない、耐食性、耐熱性等の特殊機能を付与した軸受用鋼も増えてくるであろう¹⁷⁾。20世紀に質、量ともに前進を続けてきた高炭素クロム軸受鋼の世界にようやく転機が訪れた。21世紀の軸受鋼を見守り続けたいものである。

5. むすび

一世紀にわたる高炭素クロム軸受鋼の歩みを概括してみた。わが国の軸受鋼の歴史は当社の歴史であり、また当社の歴史は軸受鋼の歴史でもある。過去が霧散していく中、また軸受鋼が変貌しようとしている中でこの記録が参考として残れば幸いである。

本稿をまとめるにあたり、各社の周年史を参考にするとともに、前半の部分において日本精工50年史（昭和42年）と、山陽特殊製鋼30年史（昭和39年）から多くの引用をさせていたことを付記してお礼申し上げます。

文 献

- 1) 日本精工50年史（1967），p.29
- 2) 日本精工60年史（1977），p.13
- 3) 日本精工50年史（1967），p.373
- 4) 同上，p.114
- 5) 山陽特殊製鋼30年史（1964），p.102
- 6) 同上，p.124
- 7) 例えば，上杉年一：鉄と鋼，64（1978），p.1311
- 8) 山陽特殊製鋼30年史（1964），p.118
- 9) 日本精工50年史（1967），p.384
- 10) 山陽特殊製鋼30年史（1964），p.106
- 11) 例えば，瀬戸浩蔵：鉄と鋼，46（1960），p.976
- 12) 例えば，R.F. Johnson, J.F. Sewell; Journal of the Iron and Steel Institute, 196（1960），p.414
- 13) 上杉年一：鉄と鋼，74（1988），p.1889
- 14) 山陽特殊製鋼：私信（1992）
- 15) 上杉年一：鉄と鋼，71（1985），p.1631
- 16) 西森 博，増田 孜，川上 潔，古村恭三郎，橋爪一弘：日本金属学会会報，32（1993），p.141
- 17) 例えば，佐藤紀男：特殊鋼，43（1994）1，p.35

〈別表〉高炭素クロム軸受鋼に関する略年表

		内 外 情 勢	わ が 国 の 軸 受 鋼
1900 (明治33)	萌	1889 (M 5) ベアリング産業の誕生 (米国New Dep社創立)	
		1901 (M34) 高炭素クロム軸受鋼の誕生	
		1903 (M36) モータリゼーション興る (米フォード社創立)	
		1904 (M37) 1% C-1.5% Cr組成の初記録あり	
		1907 (M40) スウェーデンSKF社創立 (ベアリング世界に普及)	
		1910	1910 (M43) SKFのベアリング見本が初渡来
		1914 (T 3) 第一次大戦勃発 (機械産業の発展)	
		1915 (T 4) 日本精工が国産ベアリング第一号を完成	
		1919 (T 8) 日本特殊鋼が1% C-1.5% Cr鋼を試作 (第二次大戦まで軸受鋼の輸入が続く)	
		1920 (大正9)	芽
1930 (昭和5)	期	1931 (S 6) 満洲事変勃発 (軍事体制・国産化の推進)	
		1933 (S 8) 山陽製鋼の創立 (S34山陽特殊製鋼に改称)	
		1934 (S 9) 日産自動車創立 (わが国モータリゼーション興る)	
		1935 (S 10) 当社他が軸受鋼の本格的国産化を開始	
		1937 (S 12) 軸受鋼の独立規格を陸海軍が制定	
1940		1937 (S 12) 日華事変勃発	1937 (S 12) 軸受鋼の独立規格を陸海軍が制定
		1939 (S 14) 第二次大戦勃発 (輸入の途絶)	1939 (S 14) 当社他軸受鋼専門工場に指定 (軸受工業指導要領)
		1941 (S 16) 太平洋戦争勃発	
		1943 (S 18) 海軍が初めてマクロ・ミクロ・介在物を規定	
1950 、 1960	揺 籃 期	1945 (S 20) 終戦 (産業の崩壊)	
		1947 (S 22) JESにSUJ1, 2を制定 (軸受鋼生産を再開)	
		1949 (S 24) スイスでハテパー鍛造機を開発	1947 (S 22) JESにSUJ1, 2を制定 (軸受鋼生産を再開)
		1949 (S 24) JISにSUJ3を追加 (軸受鋼量産化の開始)	
		1950 (S 25) 朝鮮戦争勃発 (特需景気・産業の復興)	1949 (S 24) JISにSUJ3を追加 (軸受鋼量産化の開始)
		1950 (S 25) 日本ベアリング協会が仕様書を制定	
1952 (S 27) フランスで熱間押出法を開発	1950 (S 25) 日本ベアリング協会が仕様書を制定		
1952 (S 27) JISに介在物を初めて規定			
1954 (S 29) 住友金属が軸受鋼管を量産化	1952 (S 27) JISに介在物を初めて規定		
1956 (S 31) 神武景気 (産業の回復・拡大)	1954 (S 29) 住友金属が軸受鋼管を量産化		
1959 (S 34) 岩戸景気	1956 (S 31) 神武景気 (産業の回復・拡大)		
1959 (S 34) 当社と住友金属が押出鋼管の量産を開始	1959 (S 34) 岩戸景気		
1961 (S 36) 日本特殊鋼がハテパーリングの生産を開始	1959 (S 34) 当社と住友金属が押出鋼管の量産を開始		
1970 展 期	発	1964 (S 39) 新幹線が開通 (高信頼性軸受鋼への展開)	1947 (S 22) JESにSUJ1, 2を制定 (軸受鋼生産を再開)
		1964 (S 39) 取鍋脱ガス処理を開始	
		1968 (S 43) 自由圏第二位の経済大国に (高度成長)	1964 (S 39) 取鍋脱ガス処理を開始
		1968 (S 43) RH脱ガス処理を開始 (MG鋼)	
		1970 (S 45) アッセルミルによる鋼管の量産を開始	1968 (S 43) RH脱ガス処理を開始 (MG鋼)
1970 (S 45) アッセルミルによる鋼管の量産を開始 “() JISに脱ガスを規定、SUJ4, 5を追加	1970 (S 45) アッセルミルによる鋼管の量産を開始 “() JISに脱ガスを規定、SUJ4, 5を追加		
1980		1971 (S 46) 円レート切上, 熱間多段鍛造機を開発	
		1973 (S 48) 円変動相場制移行, 第一次オイルショックの発生	1973 (S 48) 酸素含有量10ppm以下に到達 (MGH鋼)
		1977 (S 52) CRF機を開発, 第二次オイルショックの発生	
1990 (平成2)	完 成 期		1982 (S 57) 連続鋳造を開始
			1985 (S 60) 転炉による軸受鋼の生産が始まる
			1986 (S 61) EBTを開始, 酸素含有量5ppmに到達 (MGZ鋼)
		1990 (H 2) JISに転炉と連続鋳造を容認	
		1992 (H 4) SNRPとEP鋼を開発	
		1993 (H 5) バブル景気の崩壊, 円独歩高	