



入門講座

鉄鋼の日本工業規格—4

高炭素クロム軸受鋼 (SUJ)

High Carbon Chromium Bearing Steels (SUJ)

藤松威史

Takeshi Fujimatsu

山陽特殊製鋼(株)

研究・開発センター

軸受・構造用鋼グループ

主任研究員

1 はじめに

SUJ種の軸受鋼は日本規格協会発行のJISハンドブックにおいて特殊用途鋼に分類され、JIS G 4805の「高炭素クロム軸受鋼鋼材」として規格化されている。同規格の制定は1950年に遡り、工具鋼やばね鋼と並び半世紀を越える歴史を刻んでいる。その基本成分系は、1900年代初頭に欧州で登場し、その後一世紀以上にわたって大きな変更はなく、その設計思想の先見性に驚かされる。

軸受は、回転運動や往復運動をする軸などの要素部品を支持し、その回転運動を円滑にして伝達損失を抑える役割を担っている。部品寿命を飛躍的に延長させることから、家電や自動車といった身近な製品をはじめ、産業機械、航空、宇宙分野に及ぶ広範な用途で使用されている。軸受は、すべり軸受（メタル軸受）と転がり軸受に大別され、後者の転がり軸受に対して軸受鋼（SUJ種）が適用されている。我が国では世界規模の軸受メーカー各社によって玉軸受、ころ軸受、円錐ころ軸受、ニードル軸受などの多種多様、大小さまざまな転がり軸受が生産されている。転がり軸受は対となるリング状部品（軌道輪、レース、内・外輪等の呼称があり、本稿では軌道輪で統一する）の間に転動体（前述の玉、ころ、ニードル等）、および転動体を一定の間隔に配置して転動体同士の接触を防ぐための保持器を挟んだ基本構成になっている。また、潤滑性向上ならびに軌道輪と転動体の金属接触を抑えるためグリースや油が用いられる。また、転動体が単列で組み込まれた一般形状の他、複列で組み込まれたものもある。これらの構成は軸受に加わる荷重の大きさや方向を考慮して決定されている。軸受を回転軸と支持側部品（固定軸）の間に導入すると、軸の回転により非回転側の固定軸との間で生じる相対回転を軸受の軌道輪と転動体との転がり運動に置き換えて小さい摩擦抵抗で回転するので、起動時および回転時と

も動力損失を最小限に抑えられる¹⁾。

一方で、転動体と軌道輪との微小接触部分が荷重を分担する構造的特徴から、軌道輪には数GPaに達する高い面圧（ヘルツ応力）が加わる。したがって軸受鋼には高面圧に繰返し耐えうるだけの高い信頼性が必要となる。以下、本稿では軸受鋼（SUJ）の規格概要、軸受鋼のミクロ組織の特徴、軸受鋼の機能向上の変遷、および軸受鋼の転がり疲れに関する研究事例について紹介する。

2 軸受鋼 (SUJ) の規格概要

2014年度版のJISハンドブックによればJIS G 4805「高炭素クロム軸受鋼鋼材」にはSUJ2、SUJ3、SUJ4、SUJ5の4鋼種が示されている。なお、SUJ2やSUJ3の規格制定（1950年）に遅れて、SUJ4やSUJ5が1970年から規格化されている。

表1にSUJ2～SUJ5の化学成分を示す。なかでもSUJ2は生産比率が最も多く、その基本成分は1%Cと1.5%前後のCrの含有が基調になる。世界的にも100Cr6鋼（DIN規格）や52100鋼（SAE、ASTM規格）といったSUJ2と成分が類似した鋼種が広く使用されている。SUJ3～SUJ5は、SUJ2に比べて焼入性向上元素のSi、Mn、Moが適宜増量添加されており、比較的大きな部品に対して適用される。特に大形の軸受用途に対してはSUJ5を選定したり、さらにSUJ種以外で焼入性の高いNi-Mo系はだ焼鋼（SNCM815など）を浸炭して用いることも多い。焼入性とはJISでは「鋼材を焼入硬化させた場合の焼きの入りやすさ、すなわち焼きの入る深さと硬さの分布を支配する性能」と定義されている。図1²⁾にSUJ1～SUJ5種のJIS G 0561の一端焼入方法に基づくジョミニ試験後の焼入端からの距離と硬さの関係（ジョミニカーブ）を示す。SUJ1（現行JIS規格からは削除）、SUJ2、SUJ4、SUJ3、およびSUJ5の順にジョミニカーブの変曲点

表1 化学成分 (単位：mass%、JIS G 4805 より抜粋)

種類の記号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SUJ2	0.95～1.10	0.15～0.35	0.50 以下	0.025 以下	0.025 以下	1.30～1.60	—
SUJ3	0.95～1.10	0.40～0.70	0.90～1.15	0.025 以下	0.025 以下	0.90～1.20	—
SUJ4	0.95～1.10	0.15～0.35	0.50 以下	0.025 以下	0.025 以下	1.30～1.60	0.10～0.25
SUJ5	0.95～1.10	0.40～0.70	0.90～1.15	0.025 以下	0.025 以下	0.90～1.20	0.10～0.25

※不純物としての Ni 及び Cu は、それぞれ 0.25%を超えてはならない。ただし、線材の Cu は、0.20%以下とする。不純物として SUJ2 及び SUJ3 の Mo は、0.08%を超えてはならない。

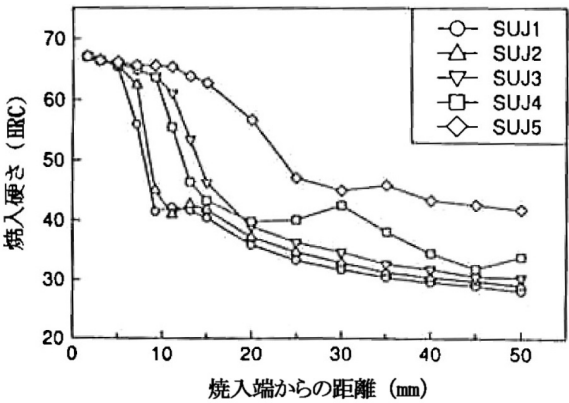


図1 SUJ1～SUJ5のジョミニカーブ²⁾

が焼入端から離れており、これは同一条件焼入れにおいて深くまで高い硬さが得られること、すなわち焼入性が高いことを表す。

続いて製造方法について触れる。JISでは「鋼材は、溶鋼に真空脱ガス処理を行ったキルド鋼又は受渡当事者間で協定した方法によるキルド鋼から製造する」と規定される。キルド鋼（強脱酸鋼）から製造するとの記述は他のJIS規格鋼材にも見受けられるが、真空脱ガス処理を行うとの記述は軸受鋼にのみ見られる。これは後述するように鋼材の真空脱ガス処理による鋼中酸素量低減と軸受鋼の性能向上とが連動してきたことと無縁ではないであろう。また、熱処理に関し、「鋼材は通常、球状化焼なましを行う。ただし、注文者の指定によって、球状化焼なましを省略することができる。」との記述がある。前半の記述は、軸受鋼から部品を製造する工程において球状化焼なましの実施が欠かせないことに起因する。後半で省略することができるのは、需要家で部品を製造する過程において熱間ローリングや熱間鍛造を利用すると球状化焼なまし組織がいったんキャンセルされてしまうためであり、この場合は需要家において球状化焼なましが行われる。

軸受鋼の非金属介在物についても規定がある。非金属介在物とは、鋼を溶解して製造する工程で不可避免的に生成混入する非金属性の微小異物であり、軸受の主な破損要因の一つとされる。したがって、これらは鋼中に存在しないことが望ましいが、現代の精錬技術で完全に除去することは不可能

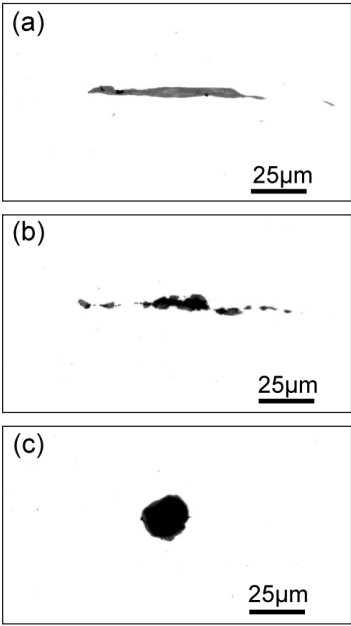


図2 非金属介在物の光学顕微鏡写真（エッチングなし）(a) 硫化物（グループA）、(b) 酸化物（グループB）、(c) 酸化物（グループDS相当）、分類方法は表2に準じる

である。JIS G 4805には軸受鋼の非金属介在物の試験方法として、「・・・特に指定のない限り、JIS G 0555の附属書1による。」との記述がある。附属書1「点算法による非金属介在物の顕微鏡試験方法」に記載の方法は、光学顕微鏡の接眼レンズに規定の格子線をもつガラス板を挿入して、被検面を検鏡し、格子点と所定観察視野内の介在物とが重なった交点の数によって清浄度を評価する方法である。JIS G 4805にはこの方法による清浄度の規格値のみが記載されている。同方法は大量に介在物を含有する鋼に対しては有効であるが、清浄度を高めて介在物数を低減した昨今の軸受鋼では清浄度の差異を判定するのに十分な方法ではなくなりつつある。

図2は軸受鋼中の非金属介在物の観察例である。軸受鋼には例示した延伸性あるいは非延伸性の介在物が頻度や大きさの差こそあれ包含されている。非金属介在物（硫化物や酸化物等）は、母相である軸受鋼とは異なる物性値（硬さ、ヤング率、剛性率など）を有しており、負荷応力に対して応力集中源としての作用をもたらし、転がり疲れ寿命に影響を及ぼす

と考えられる。

現在、JIS G 0555の「鋼の非金属介在物の顕微鏡試験方法」では、より詳細な介在物検査法の一つであるISO 4967:1998 (Steel—Determination of content of nonmetallic inclusions—Micrographic method using standard diagrams)を翻訳し、その技術内容を変更することなく作成した規格内容が主に用いられている。それによれば、非金属介在物は図2に例示した形態を含むグループA、B、C、D、およびDSの5群に大別される(表2)。なお、ISO 4967:1998と類似した試験方法としてASTM E45-13 (Standard test methods for determining the inclusion content of steel)があり、通称ASTM法として国内でも良く利用されている。この方法ではDSの区分は特に設けていない。

以上に挙げた方法は、鋼材の供給者、および需要家の双方にとって鋼材の品質評価手段として一定の効力を有する。しかしながら、この評価をもって鋼材の疲労強度を予測することはできないのが現状である。近年、大体積の鋼材の清浄度を評価するために統計的手法を利用した介在物径予測方法³⁾や、超音波探傷法を利用した評価方法^{4,5)}が検討されている。その有用性は大きい認められるが、現在のところJISの規格化には至っていない。

3 軸受鋼のマイクロ組織の特徴

軸受鋼はその使用に際して特有の熱処理が施されており、その熱処理に応じた軸受鋼のマイクロ組織に注目して解説する。軸受鋼は素材としての棒鋼や鋼管、あるいは熱間鍛造品に対して球状化焼なまし処理を行って硬さを十分に低減することで、その後の部品加工時の切削や冷間加工が容易になる。その後、焼入れと低温焼戻しを施して60HRC (一般に軸受に必要な硬さは58HRC以上)を超える高硬度と球状炭化物がマルテンサイト中に分散したマイクロ組織にすることで所望の転がり疲れ特性や耐摩耗性が備わる。

図3はSUJ2の圧延材のマイクロ組織である。1%C-1.5%Crをベース組成とする過共析鋼であるのでパーライト組織が主体になる。これに適切な球状化焼なましを加えると、図4⁶⁾のように炭化物が球状化し、かつ均一に分散したマイクロ組織が得られる。球状化焼なましの加熱方法は一般的に最高点温度780~810℃程度まで加熱保持後(SUJ3、SUJ5では760~790℃程度)、650℃程度まで徐冷する方法が採られる。この際、最高点温度が低すぎると熱間加工後のパーライトが残存し、高すぎても徐冷中にパーライトが析出していずれも球状

表2 非金属介在物の形態による分類 (JIS G 0555より抜粋*)

グループ A (硫化物系)	一般的に端が丸く、高延伸性で、アスペクト比(長さ/厚さ)が広い範囲をとる灰色の個別の粒子
グループ B (アルミナ系)	多数の変形しないで、角があり、低アスペクト比(一般的に3未満)をとる黒か青みがかった変形方向に整列した(3以上の)粒子群
グループ C (シリケート系)	一般的に端が鋭く、高延伸性で、アスペクト比は広い範囲(一般的に3以上)をとり、黒か濃い灰色の個別の粒子
グループ D (粒状酸化物系)	変形しないで、角張っているか又は円形の低アスペクト比(一般的に3未満)をとる黒又は青みがかったランダムに分布する粒子
グループ DS (個別粒状介在物系)	円形又は円形に近く、直径が13μm以上の単独の粒子

※この介在物分類はJIS G 0555の附属書1に規定される分類方法とは異なる

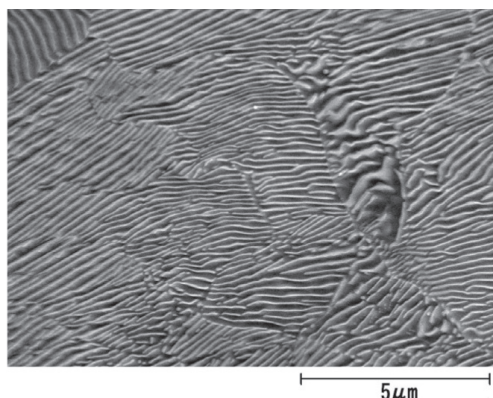


図3 SUJ2圧延材のSEM観察写真(ナイトール腐食)

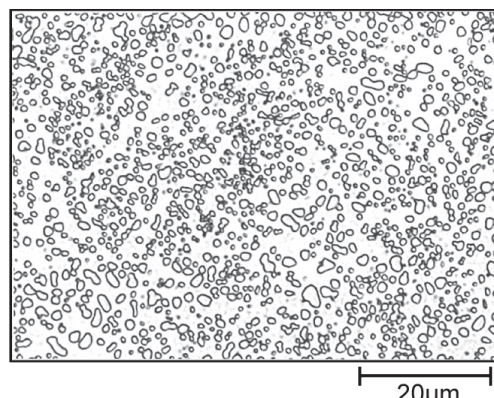


図4 SUJ2の球状化焼なまし組織の光学顕微鏡写真(ピクラール腐食)⁶⁾

化組織不良となる。炭化物を球状化するのは、良好な被削性、および冷間加工性を確保することだけが目的ではない。球状化することで焼入加熱保持中の炭化物の急速溶解が抑制され、マトリクス中に炭素が過剰に溶け込むことを防ぐ。なお、1.5%程度のCr含有は、焼入性への寄与以外に球状化焼なましの炭化物を微細かつ安定にして焼入作業を容易にする意味合いがある。

続いて焼入れにおける軸受鋼のマイクロ組織について紹介する。図5はSUJ2のジョミニー試験後の試験片における焼入端から5、7、9および11mmにおけるマイクロ組織の観察結果である。焼入端から5mmの位置は良好な焼入れ組織である。マトリクスの微細組織構造はピクラー腐食では明瞭ではないがマルテンサイト組織が主体であり、それ以外に球状炭化物、および10%程度の残留オーステナイトを含んでいる。炭化物径は球状化焼なましに比べて微細であり、これは焼入保持中に炭化物の一部がマトリクス中に固溶するためである。なお、軸受鋼のマトリクスの固溶炭素量は0.5%前後程度が寿命に最適とされている^{7,8)}。7mm位置では黒く腐食された部分が見られ、9mmではさらに顕著になる。これらは不完全焼入れによるベイナイト組織である。11mmでは全体的に黒く腐食され、もはや正常なSUJ2の焼入組織とはかけ離れた不完全焼入れ組織を呈する。つまりSUJ2は焼入性がそれほど高くないのであり、焼入作業には注意が必要である。目安として、丸棒中心部で60HRCの硬さが得られる最大直径はSUJ2で25mm、SUJ3で51mm、SUJ4で43mm、SUJ5で89mmである⁹⁾。なお、標準的な熱処理としてSUJ2では800～840℃ (SUJ3、SUJ5は790～830℃) で加熱保持後、油中あるいは水中への焼入れ⁹⁾、および狙い硬さに応じた120～200℃で1～2h程度の焼戻しを行う。

図6¹⁰⁾はSUJ2について、温度 T (単位: K) と時間 t (単位: h) から $T \cdot (35 + \log t)$ に従って計算される焼入れパラメータ P と焼入れ硬さ、残留オーステナイト量の関係を示している。一見すると比較的広いパラメータ範囲で同様の硬さが得られている。しかし、残留オーステナイト量に注目するとパ

ラメータ値の増大とともに単調に増加していることが分かる。これは主にマトリクスへの炭素の固溶が多くなるためであり、先に述べた適正なマトリクス炭素量からの逸脱を意味する。通常、対象部品を炉加熱する場合には高温・短時間の熱処理より低温・長時間の熱処理の方が推奨される。

4 軸受鋼の機能向上の変遷

一般に、鋼の諸特性はその化学成分によって大きく変化し、機能向上を迫られれば鋼種の再選定・新鋼種設計が手段の一つになる。ところが、軸受鋼は一世紀以上の長きにわたりその基本成分を大きく変えていない。それでは軸受鋼の性能も変化していないのだろうか。経験上、国内外の成分がほぼ同様の高炭素クロム軸受鋼であっても、転がり疲れ特性に差が見られることがある。それは製鋼メーカー各社の操業条件や所有設備の違いによって、鋼の製造過程で不可避免的に含有される非金属介在物、とりわけ酸化物系介在物について、その大きさや頻度といった鋼中での存在状態に差があることに一

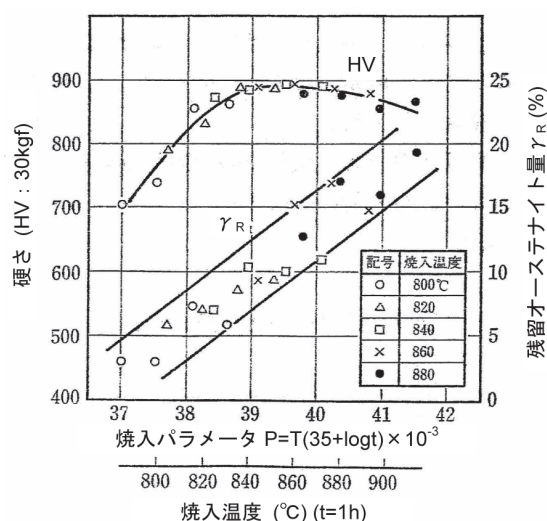


図6 焼入れパラメータと焼入れ硬さ、残留オーステナイト量の関係¹⁰⁾

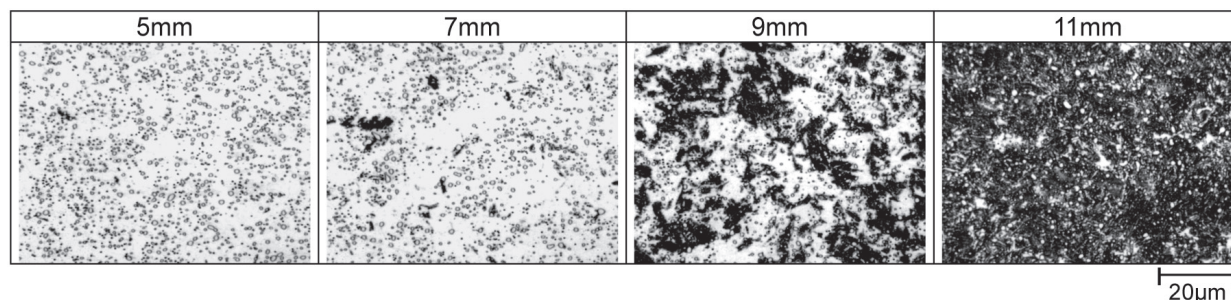


図5 SUJ2のジョミニー焼入試験片の焼入端から5、7、9、および11mmにおけるマイクロ組織の光学顕微鏡写真 (ピクラー腐食、試験は焼ならし、球状化焼なまし後に845℃加熱焼入れにて実施)

因がある。軸受鋼の性能向上は精錬や casting といった製造技術の発展と密接に関わり、今日、飛躍的な性能向上を果たしている。以下に連続 casting における軸受鋼の製造工程として当社の概略工程を例示し、その工程について簡単な説明を加える。

電気炉 (EF) 溶解 → 取鍋 (LF) 精錬 → RH 脱ガス → 連続 casting (CC)

上記工程において、当社ではまず電気炉 (Electric Furnace (EF)) を用いてスクラップなどの主原料を溶解している。そして、溶解した鋼は汚染防止のため偏心炉底出鋼 (Eccentric Bottom Tapping (EBT)) により取鍋に移される。次の取鍋 (Ladle Furnace (LF)) 精錬工程では脱硫と酸化物系介在物の除去、および成分調整を行い、さらに RH 脱ガス工程では溶鋼を真空槽中へ引き込んで還流させ、水素や酸素といったガス成分を除去している。その後、清浄に保たれた溶鋼を外気と遮断した状態で大断面垂直型の連続 casting (Continuous Casting (CC)) 設備に casting 込む。この casting 込み方式は casting 中にも介在物の浮上除去が促進されるため、高純度鋼の製造に適する。得られた純度の高い軸受鋼 casting 片は、均熱拡散処理 (ソーキング) や圧延・鍛造加工を経て棒鋼、鋼管、あるいは熱間鍛造品等に加工される。その後、球状化焼なまし・切削・冷間加工・焼入焼戻しにより適切な炭化物分散と必要硬さを得て、仕上げ加工ののち軸受製品に加工される。軸受鋼の性能向上の歴史は酸化物系介在物の低減、すなわち酸素含有量の低減の歴史と見事に重なる。図7¹¹⁾は過去数十年の酸素量低減の推移を示し、脱ガスと汚染防止に注力した製造技術の洗練によって、今日では5ppm程度まで低減することも可能になった。さらに図8¹¹⁾は軸受鋼中の酸素含有量と転がり疲れ寿命 (L_{10} 寿命：ここでは同一ロットの試験片を同じ条件で試験した場合に、そのうちの90%の試験片はく離するこ

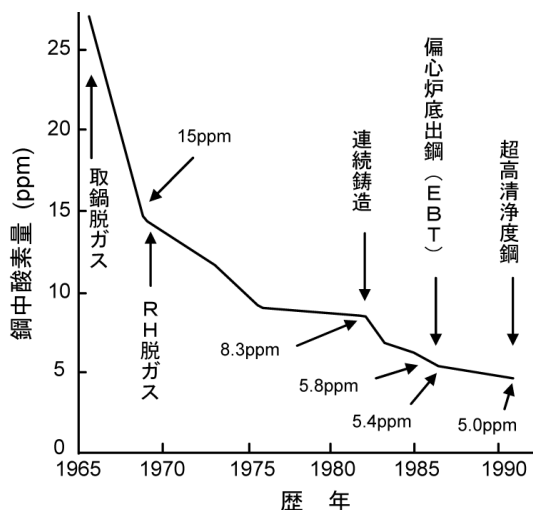


図7 軸受鋼の酸素含有量の推移¹¹⁾

となく回転するサイクル数を指す) の関係を示し、脱ガス工程の導入以前に比べて寿命は数十倍に達している。

5 軸受鋼の転がり疲れに関する研究事例

軸受の破損形態には内部起点型と表面起点型がある。前者には非金属介在物起点型と白色組織変化型¹²⁻¹⁴⁾が存在し、後者には異物圧痕型と金属接触型がある¹²⁾。白色組織変化型や表面起点型については、その破損対策としてSUJ種以外の鋼が適用される場合があるため本稿では説明を省略した。一般に理想潤滑条件下で使用される軸受の主要な破損形態は内部起点型とされる。図9に模式的に示すように、軌道輪には転動体との弾性接触部直下から少し内部に入った所に高いせん断応力が作用する¹⁵⁾。このせん断応力の繰返し負荷のもと、応力作用深さ付近に非金属介在物が存在すると、その周囲に応力集中が起こり、やがてクラックが発生し、その後の伝ば

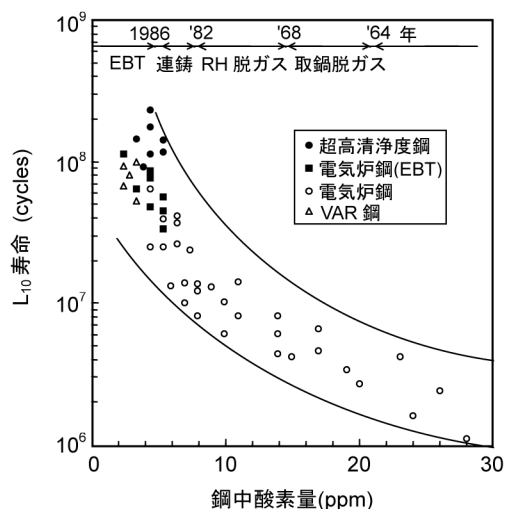


図8 軸受鋼の酸素含有量と転がり疲れ寿命¹¹⁾

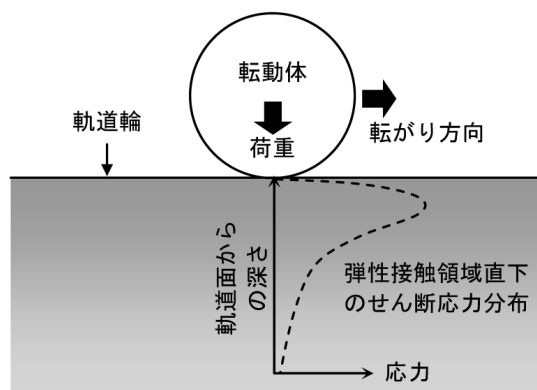


図9 転がり疲れにおいて作用するせん断応力の概念図

により軌道面に到達することではなく離が生じるとの考え方が根強い。

非金属介在物に起因するはく離対策として、軸受鋼の酸素含有量低減、すなわち酸化物総量の低減は最も有効な対策の一つであった。この点からも上記の転がり疲れメカニズムは

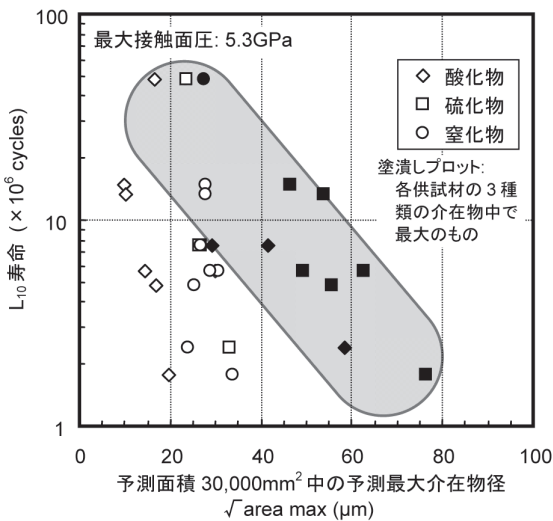


図10 予測最大介在物径と L_{10} 寿命の関係¹⁶⁾

概ね正しいと考えられる。しかし、酸素量が数ppmレベルにまで低減可能となった昨今においても軸受寿命にはばらつきがあることが分かってきた。図10¹⁶⁾は長尾らによる実験結果である。横軸は、10種類の供試材 (SUJ2) のそれぞれについて基準観察面積 (ここでは100mm²) 中の各種最大介在物径のデータを複数取得し、それを元に極値統計法を用いて算出した予測面積30,000mm²中の最大介在物径 ($\sqrt{\text{area max}}$) である。さらに各種介在物の予測最大介在物径の中でさらに最大のものは塗り潰しのプロットで示される。予測最大介在物径が大きいほど L_{10} 寿命が低下する傾向が認められており、介在物種類によらず最大の非金属介在物の大きさが転がり疲れの影響要因であることが読み取れる。しかし、そのプロットのばらつきの幅は寿命にして10倍程度の差があり、軸受寿命と介在物大きさとの一義的な関係を得るには未だ至っていない。

筆者らは、せん断応力起因と考えられているき裂発生メカニズムを確認する目的で、人工的に多数の空洞を内在させたSUJ2相当成分材のスラスト型転がり疲れ試験を行っている¹⁷⁾。転がり疲れのごく初期の 5×10^4 サイクルで試験を中断後、き裂を伴う空洞を多数観察し、その転動面に対する深さとき裂角度の状況から、き裂発生に対してせん断応力ではな

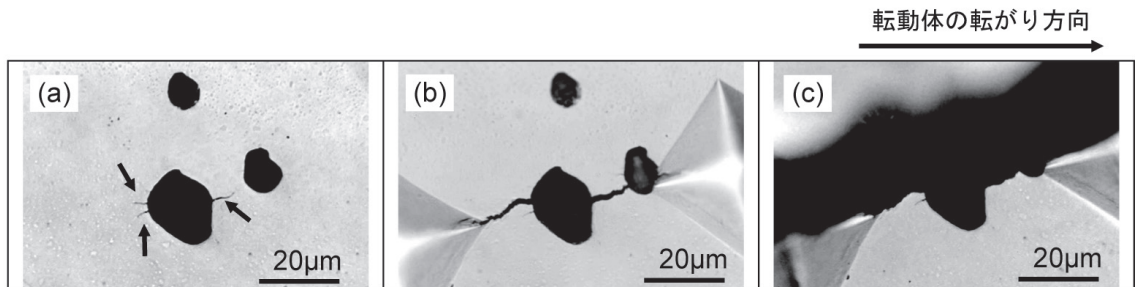


図11 最大接触面圧3.95GPaのスラスト型転がり疲れ試験 (5×10^4 サイクルで中断) で軌道下80 μm の位置に存在する空洞周囲に発生したき裂 (観察面は軌道の接線方向断面)、およびその観察のための試料調製¹⁷⁾
(a) き裂 (矢印で図示)、(b) 圧痕付与によるき裂の強制進展、(c) 強制破断後

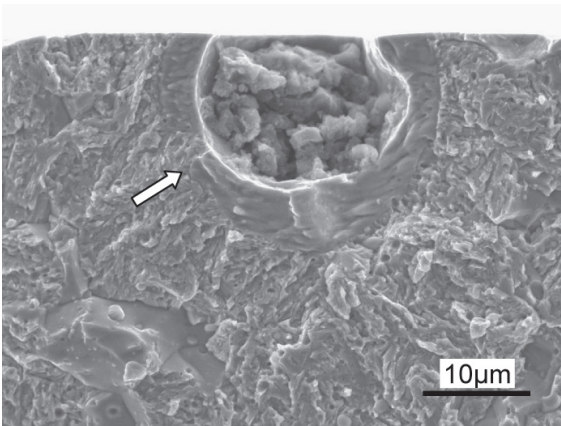


図12 空洞周囲のき裂面のSEM観察結果¹⁷⁾

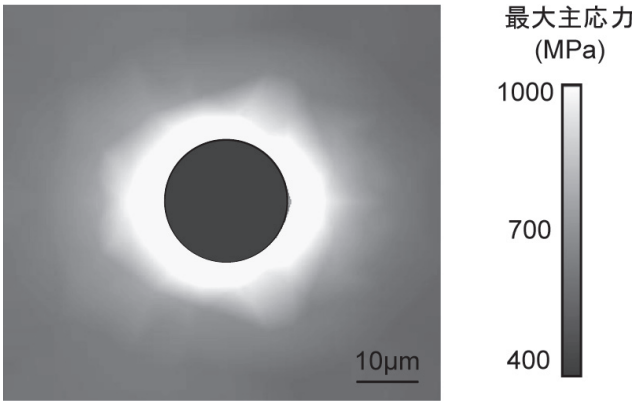


図13 3次元CAE解析による空洞周囲の最大主応力分布¹⁸⁾

く主応力 (引張) が関与する可能性を見出している。図11¹⁷⁾は 5×10^4 サイクル中断後に見られた空洞周囲の微小き裂の断面観察結果とき裂面観察のための試料調製状況を示し、また図12¹⁷⁾はそのき裂面観察の結果である。断面観察 (図11) では矢印のように空洞周囲に転動方向に対して浅い角度を有する微小き裂 (主応力起因と推定) が見られる。き裂面観察 (図12) では空洞周囲を概ね同心円状にとり囲むようにき裂が観察される。このようなき裂発生状況は3次元CAEモデルで計算した空洞周囲の最大主応力 (図13¹⁸⁾、転動面に対して平行面内での引張成分を表示) の状態と良い一致を見ている。この事例はあくまで人為的に鋼中に導入した空洞に関する結果であるが、実際の非金属介在物と母相との界面状態が転がり疲れに及ぼす影響についての有用な示唆を与えている。

一般に軸受寿命は膨大な実験データを背景に負荷荷重と軸受形状や転動体種別 (玉、ころ) を主に考慮した式が提唱され、軸受の型番選定の重要指針となっているが、非金属介在物の大きさは寿命式には反映されていない。転がり疲れにおける非金属介在物の悪影響については疑う余地は無いものの、依然として疲労試験の寿命ばらつきの原因には不明な点が多い。非金属介在物周囲のき裂の発生・伝ばのメカニズムを改めて問い直すことで、軸受鋼のさらなる性能向上につながるブレークスルーの余地があると期待している。

6 おわりに

入門講座執筆にあたり、内容は初歩的なものに留めており、物足りなさを感じる点も多いと思われるので、興味を持たれた折には一部紹介した文献等を頼っていただければ幸甚である。近年、地球規模での環境保全や資源維持のためCO₂排出量削減や省資源、省エネルギー化が生産・消費活動において避けて通れない課題になっている。軸受鋼を含む鉄鋼材料全般は製品廃却後の資源循環サイクルが確立しやすく、資源有効利用に資する素材である。それ以外に鉄鋼製品の目指すべき方向の一つとして小型・軽量化への寄与がある。軸受は、回転要素の支持部品としてその能力を如何なく発揮しているが、軸受をより小型化できれば回転要素と支持部をさらに接近させることができるため周辺部品の小型軽量化への波及作

用が大いに期待できる。軸受鋼は、誕生当初からその化学成分こそ大きく変化していないもののその性能は比べ物にならないほど進歩してきた。今後も長寿命化や信頼性向上の市場ニーズに応える鋼材のさらなるブラッシュアップが望まれる。

参考文献

- 1) 高田浩年, 相原了: 転がり軸受の寿命と信頼性, 日刊工業新聞社, (2005)
- 2) 坪田一一: Sanyo Technical Report, 5 (1998), 105.
- 3) 村上敬宜: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, (1993)
- 4) 加藤恵之, 佐藤海広, 平岡和彦, 塗嘉夫: Sanyo Technical Report, 8 (2001), 59.
- 5) Y. Unigame, K. Hiraoka, I. Takasu and Y. Kato: Journal of ASTM International, 3, 5 (2006), Paper ID JAI14030.
- 6) 木下斎: 特殊鋼, 51 (2002) 1, 44.
- 7) 矢島悦次郎, 宮崎亨, 杉山敏彦, 寺島博夫: 日本金属学会誌, 36 (1972) 7, 711.
- 8) 門間改三, 丸田良平, 山本俊郎, 脇門恵洋: 日本金属学会誌, 32 (1968) 12, 1193.
- 9) 特殊鋼ガイド第4編—熱処理, 特殊鋼倶楽部, (1994), 98.
- 10) 小林一博: 熱処理, 22 (1982) 1, 35.
- 11) 瀬戸浩蔵: 軸受用鋼, 日本鉄鋼協会, (1999), 37.
- 12) 平岡和彦: 第188回・189回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (2006), 117.
- 13) 平岡和彦: CAMP-ISIJ, 20 (2007), 424.
- 14) 平岡和彦: Sanyo Technical Report, 15 (2008), 43.
- 15) 転がり軸受工学編集委員会編: 転がり軸受工学, 養賢堂, (1975), 169.
- 16) 長尾実佐樹, 平岡和彦, 雲丹亀泰和: Sanyo Technical Report, 12 (2005), 38.
- 17) 藤松威史, 平岡和彦, 山本厚之: 鉄と鋼, 94 (2008), 13.
- 18) 山陽特殊製鋼株式会社社内資料, (2011)

(2015年1月29日受付)