

博士論文

鋼球の寿命特性に及ぼす  
熱処理と残留応力の影響に関する研究

2015年7月

阿野 亮介

岡山大学大学院  
自然科学研究科

## 第 1 章 緒論

近年、転がり軸受は私たちの暮らしと産業を支える重要な機械要素の一つであり、建設機械や工作機械などの産業機械から、身近なものでは自動車や様々な家電製品に組み込まれている。転がり軸受の基本構造は、内輪と外輪、その 2 つに挟まれた転動体、そして転動体の位置を定める保持器、これら 4 つの要素から成り、いたってシンプルな構造となっている。このシンプルな構造で機械の回転運動に発生する摩擦を減らすのが根本的な働きであるが、転がり軸受はその働きにより、機械が働く効率を高め、摩耗を減らし、また焼付きを防ぐというような、機械にとって根源的な貢献をし、私たちの暮らしと産業を省エネルギーおよび省資源といった形で支えている。

転がり軸受の起源として、その原理は紀元前 8 世紀のエジプトにおいてピラミッド作りに利用されており、また、基本構造はレオナルド・ダ・ヴィンチが 15 世紀に考案したとされている<sup>1)</sup>。このような非常に古い起源を持ちながら、転がり軸受は 18 世紀以降の産業革命、そして 20 世紀の自動車産業の急速な拡大を期に、画期的な技術の進歩を遂げる必要不可欠であったと考えられ、転がり疲労に関する様々な研究が行なわれてきている。

転がり軸受の転がり疲労に関する研究としては、1963 年に G.Lundberg, A.Palmgren らが提唱した直交せん断応力説<sup>2,3)</sup>が基本概念としてよく知られており、この説は Hertz<sup>4)</sup> の弾性接触応力下において、転がり接触表面下に転がり面と平行な直交せん断応力が生じ、そのせん断応力の繰返しによって、疲労き裂が発生し、最終的にフレーキングに至るとされるもので、現在の転がり軸受の寿命計算式の基礎となっている。また、転がり接触表面下に非金属介在物が存在すると、応力集中による疲労き裂の発生、さらに組織変化を伴う強度劣化により疲労き裂の伝播が容易となり、転がり疲労寿命特性が著しく低下してしまう<sup>5,6)</sup>。そのため、転がり軸受に使用される材料に関する研究についても、品質と信頼性向上に向けた様々な研究が行なわれてきている<sup>7~10)</sup>。

転がり軸受に使用される材料はその使用環境によって様々であるが、最も広く使用される材料は JIS-G4805 で高炭素クロム軸受鋼として規定され、中でも SUJ2 は代表的な鋼種である。高炭素クロム軸受鋼は、厳しい負荷に耐える高い

硬度と強度に加え優れた転がり疲労強度を持つことが要求され、ずぶ焼で容易に高い硬さが得られるとともに、球状化焼鈍により冷間鍛造性および被削性を向上させた材料として高度な製造プロセスが確立されている<sup>11)</sup>。

以上の通り、転がり軸受は使用される材料ならびに転がり疲労に関する様々な研究が行なわれてきているが、深溝玉軸受において回転中にラジアル荷重のみが作用する場合、転がり軸受内には非負荷領域が存在し、その領域において転動体としての転がり軸受用鋼球（以降、鋼球と称す）は自転軸が変化する可能性が高い。そのため、内外輪と鋼球の繰返し応力を受ける体積増加を考えた場合、鋼球の転がり疲労寿命は内外輪と比較して長くなると考えられている<sup>12)</sup>。しかし、近年転がり軸受の使用環境はますます多様化・過酷化しており、特に自動車や産業機械用途においては小型化・高出力化に伴い、鋼球は高負荷な環境下で使用され、鋼球の信頼性向上は重要な課題である。

鋼球の信頼性向上に対し、新しい材料（SUJ2をベースに焼戻軟化抵抗性の向上とマトリックスの強度向上のためSiとMoを添加した新材料SBS1の開発、ならびにその材料の転がり疲労に関する諸特性を明らかにした研究<sup>13, 14)</sup>も行なわれてきたが、価格の問題から一般的に流通させるのが難しく実用には至っていない。

また、転がり軸受はJIS-B1511に総則として関連する様々な規格が規定されているが、使用されている転動体によって玉軸受ところ軸受に大別される。転がり軸受の中でも玉軸受の特徴は、玉と軌道輪が点で接触することから、摩擦が小さいという機械的性質と、静粛性に優れるという使用中の性能を有する反面、接触面積が小さいために荷重許容量は小さくなる。玉軸受（深溝玉軸受）は前述の特徴を有しており、高速回転で使用される代表的な用途としては工作機械があり、また身近な家電製品としてはエアコンのファンモータに使用され、その鋼球には信頼性と音響特性が要求される。

鋼球の音響特性に関しては、高精度（限りなく真球に近い）であることは無論、製造工程内およびそれ以降の搬送や転がり軸受への組込時における圧痕の発生を抑えることも肝要であり、そのために鋼球の製造工程にはピーニング処理が含まれ、鋼球内部へ残留応力を予め付与し耐圧痕性を上げる必要がある。しかし、鋼球内部への過大な残留応力の形成は、内部起点型の損傷に対し転が

り疲労寿命を短くし、信頼性を下げることが懸念されている。鋼球の信頼性と音響特性を両立することは相反する面もあるが、鋼球に対し信頼性を損なわない適度な残留応力の付加，すなわち，最適な残留応力分布形態といったところまで詳細な研究が行なわれていないのが現状である。

本研究は転がり軸受のより高い信頼性を追及したもので，これまであまり報告されてこなかった玉軸受に使用される鋼球に着目し，様々な熱処理特性および残留応力分布を有する鋼球を製作し，それらの転がり疲労寿命特性を曾田式変動荷重寿命試験機で比較検討した。その結果から，鋼球の転がり疲労寿命特性に対する最適な熱処理条件の指針を示し，硬さ，圧砕強度，半価幅，残留オーステナイト量，残留炭化物面積率，旧オーステナイト結晶粒径といった様々な諸因子の影響を調査することで立証した。また，鋼球の転がり疲労寿命特性に対する最適な残留応力分布形態についても言及し，さらに，転がり疲労過程における残留応力の経時変化を接線方向と半径方向について詳細に観察し，鋼球のはく離のメカニズムについて考察した。

第 2 章では，一般的な清浄度評価方法である JIS 点算法では優劣がつかない近年の高清浄度な鋼球用線材に対し，極値統計法による評価がより高清浄度な鋼球用線材を選定するのに有効な手法であることを示し，本報に使用する素材を厳選した。また，鋼球の製造工程内でピーニング処理による接線方向の圧縮残留応力の形成は，鋼球の耐圧痕性を向上させ，軸受の音響特性にとって有効かつ必要不可欠な処理であることを示した。

第 3 章では，鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす熱処理特性の影響を検証するために，熱処理工程における焼入温度および焼戻温度を種々変更して製作した合計 9 種類の試験鋼球の転がり疲労寿命評価を変動荷重試験機で実施した。さらに，転がり疲労寿命評価結果を試験鋼球の熱処理条件および熱処理特性<硬さ，圧砕値，残留炭化物面積率，旧オーステナイト（以降， $\gamma$  と称す）結晶粒，残留  $\gamma$  量，半価幅>の双方から考察し，鋼球の高信頼性に対する最適な熱処理条件を検討した。

第 4 章では，鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす残留応力の影響を検証するために，ピーニング工程における処理条件を種々変更して製作した合計 6 種類の試験鋼球の転がり疲労寿命評価を変動荷重試験機で実施した．試験鋼球には様々な接線方向の圧縮残留応力分布を付与し，残留応力の測定は試験鋼球の表面を電解研磨で少しずつ除去しながら行なったため，表面除去による残留応力再分布の影響を解析したうえで，接線方向の圧縮残留応力が鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす影響について明らかにし，鋼球の信頼性に対する最適な残留応力分布形態の指針を示した．

第 5 章では，様々な残留応力分布形態を有する試験鋼球について，変動荷重試験条件下における内部残留応力の経時変化を，半径方向の引張残留応力も含めて詳細に観察し，はく離起点深さの測定結果と合わせて，鋼球がはく離に至るメカニズムについて検討した．

第 6 章は総括とした．

## 第 2 章 鋼球用材料の清浄度および鋼球の耐圧痕性

### 2-1 緒言

転がり軸受用の材料は，日本工業規格（JIS-G4805）に規定される高炭素クロム軸受鋼鋼材が主に使用されている．高炭素クロム軸受鋼鋼材は，転がり軸受の疲労強度が，鋼中に含まれる非金属介在物に大きく依存することが明らか<sup>15)</sup>、<sup>16)</sup> となって以来，著しい清浄度の改良<sup>17)</sup> が行なわれてきた．

鋼中に含まれる非金属介在物の評価方法は現在まで数多く提案されており，鋼球用材料においては ASTM 法や JIS 点算法が一般的である．しかし，これらの一般的な非金属介在物の評価方法は，極めて清浄な鋼の清浄度の差を評価する方法としては適当ではなく，極めて清浄な鋼の清浄度評価には極値統計法による評価が提案<sup>18)</sup> されている．

本研究は鋼球のより高い信頼性を追及するために，鋼球の熱処理特性および残留応力が転がり疲労寿命に及ぼす影響を詳細に検証するものであり，その検証過程においては鋼の清浄度の影響が出ないように，使用する材料は極値統計法による清浄度評価を行ない，高清浄度な材料を選定する必要があった．

そのため，本章では，実際に鋼球用材料に使用されている線材の清浄度を，極値統計法を用いて複数サンプル評価し，本研究に使用する材料としてより高清浄度な線材を選定することを一つの目的とした．

また，本章では，一般的な鋼球の製造工程内で実施されるピーニング処理の必要性を示すことをもう一つの目的とした．ピーニング処理には，ショットピーニング<sup>19)</sup> といった粒子を加工物表面に衝突させる方式も存在するが，鋼球のピーニング処理は所定の容器内に鋼球を投入し，容器内の鋼球を攪拌することで鋼球同士を衝突させる方式が一般的である．このような鋼球のピーニング処理方式であれば，ショットピーニングでは使用する粒子を必要とせず，また，処理時間を調整することで鋼球の球面全体を均一に硬化させることが可能である．

鋼球のピーニング処理の目的は製造工程内，それ以降の搬送や転がり軸受への組込み時における圧痕の発生を抑え，転がり軸受の音響特性を悪化させないように，鋼球内部に接線方向の圧縮残留応力を形成させることにより，その目

的が達成され，転がり軸受の製造上必要不可欠な処理となっている．

転がり接触を受ける前の鋼球内部に形成されたピーニング処理による接線方向の圧縮残留応力が大きいと，鋼球の転がり疲労寿命を短くする<sup>20)</sup>ことが知られているが，本研究ではピーニング処理による接線方向の圧縮残留応力の大きさだけでなく，ピーニング処理前後の研磨量によって変化する接線方向の圧縮残留応力分布状態および半径方向の引張残留応力を含めて，詳細な探求を行なった（詳細は第4，5章で述べるが，本章では先ず，鋼球へのピーニング処理の必要性を，ピーニング有無の鋼球を試作し，それぞれの耐圧痕性および軸受の音響特性の観点から検証を行なった）．

## 2-2 試験方法

### 2-2-1 鋼球用材料の極値統計法による清浄度評価

極値分布はある基本分布関数に従うデータから一定の数のデータの集合を取り出したとき、各集合の最大値や最小値に従う分布である。基本分布が正規分布や指数分布であってもその極値分布は基本分布とは異なった分布となり、この分布の解析が極値統計と言われている。極値分布のなかで、正規分布、指数分布、対数分布のように、裾野が指数的に減少すると見なせる分布関数を基本分布関数に持つものは2重指数分布とされる。自然界に存在する多くの分布には指数分布、正規分布、対数分布に従うものも多く、2重指数分布は広く利用されている。鋼中に含まれる非金属介在物の分布は指数分布に近い事が予想されているが、まだ明確ではない。しかし、その極値分布が2重指数分布に従うならば、極値統計を用いてその最大値を予測することが可能とされている<sup>21)</sup>。

本報における極値統計法による清浄度評価条件を表 2-1 に示す。極値統計法による清浄度評価は、1 視野の検査基準面積（以降、 $S_0$  と称す）中に含まれる最大の非金属介在物の面積（以降、 $area$  と称す）を測定し、その結果から $\sqrt{area}$ を算出するが、この作業を $S_0$ が重複しないように検査視野数  $j$  ( $j$  は 1, 2, 3, … のように視野数による) に対して行い、得られた $\sqrt{area_j}$ の各結果を統計的に解析し、予測を行なう面積（以降、 $S$  と称す）中に含まれる非金属介在物の大きさ（以降、 $\sqrt{area\ max}$  と称す）を導き出す方法であり、極めて高清浄度な鋼の清浄度評価に対し有効とされている<sup>18)</sup>。

表 2-1 極値統計法による清浄度評価条件

検査基準面積 ( $S_0$ )	100mm <sup>2</sup>
検査視野数 ( $j$ )	30 視野 ( $j=1, 2, 3, \dots, 30$ )
予測を行なう面積 ( $S$ )	30,000mm <sup>2</sup>
再帰期間 ( $T$ )	301
基準化変数 ( $y$ )	5.7



作業としては先ず，単一溶番から成る鋼球用材料（製品であり，本報においては直径Φ6.5mmの線材）を3種類用意した．用意した線材サンプルA，B，Cの化学成分およびJIS点算法で評価した清浄度を，表2-2および表2-3に示す．いずれの線材サンプルも，化学成分と清浄度は規格（JIS-G4805）を満足しており，鋼の清浄度と相関がある<sup>22)</sup>とされる鋼中酸素量は5～6ppmと低水準の鋼球用材料であった．

表 2-2 供試材の化学成分 単位 wt%

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	O	Ti
A	1.00	0.22	0.31	0.017	0.006	0.06	1.42	0.02	0.09	0.0005	0.0017
B	1.02	0.22	0.28	0.007	0.003	0.07	1.38	0.02	0.08	0.0006	0.0012
C	0.99	0.22	0.27	0.012	0.006	0.07	1.41	0.03	0.08	0.0006	0.0014
JIS 規格	0.95 ～	0.15 ～	0.50	0.025	0.025	0.25	1.30 ～	0.08	0.20	受渡当事者 間との協定	
G4805	1.10	0.35	以下	以下	以下	以下	1.60	以下	以下	による	

表 2-3 JIS 点算法で評価した供試材の清浄度 単位%

	A系	B系	C系	B系+C系	A系+B系+C系
A	0.017	0.000	0.000	0.000	0.017
B	0.019	0.000	0.000	0.000	0.019
C	0.029	0.000	0.000	0.000	0.029
JIS 規格 G4805	0.15 以下	—	—	0.05 以下	0.18 以下
備考	A系・・・主に硫化物およびけい酸塩 B系・・・主に粒状酸化物が不連続に並んだもの C系・・・主に粒状酸化物				

各線材サンプルを切断し，試験片を 30 個ずつ切り出した（各試験片は  $S_0$  が  $100\text{mm}^2$  を確保出来る長さで切断）．各試験片は，線材の圧延方向に平行な中心線を通る面で半分に割り，硬度を上げるための焼入が行なわれた後，バフ研磨で鏡面に仕上げられた．

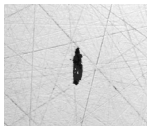
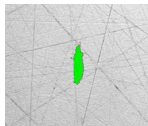
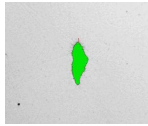
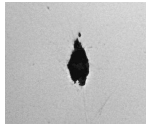
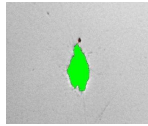

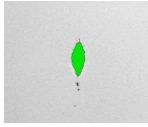
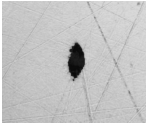
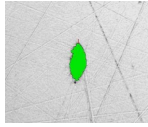
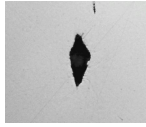
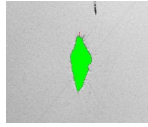
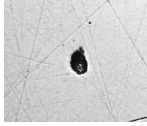
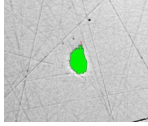

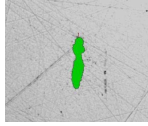

鏡面に仕上げられた  $S_0$  中に含まれる最大の非金属介在物は，図 2-1 に示す Leica 製 Steel Expert（鋼介在物自動解析システム）を用いて抽出し，画像処理ソフトで  $\sqrt{\text{area}_j}$  を算出した．なお，転がり軸受の疲労寿命に影響を及ぼす非金属介在物の種類は主に酸化物系とされており<sup>22)</sup>，抽出する非金属介在物は酸化物系とした．



図 2-1 鋼介在物自動解析システム

表 2-4 に，サンプル A について非金属介在物を抽出した代表例を示す．検査視野数 ( $j$ ) は 30 視野で， $\text{area}$  の昇順に並べている ( $j=1$  が抽出された最小の面積を持つ非金属介在物で， $j=30$  が抽出された最大の面積を持つ非金属介在物)．

表 2-4 非金属介在物の抽出例（サンプル A）

j	外観	area 抽出	j	外観	area 抽出	j	外観	area 抽出
1			11			21		
2			12			22		
3			13			23		
4			14			24		
5			15			25		
6			16			26		
7			17			27		
8			18			28		
9			19			29		
10			20			30		
							スケール	 20μm























































































































































# 目次

第 1 章	緒論	1
第 2 章	鋼球用材料の清浄度および鋼球の耐圧痕性	5
2-1	緒言	5
2-2	試験方法	7
2-2-1	鋼球用材料の極値統計法による清浄度評価	7
2-2-2	鋼球の耐圧痕性評価	11
2-3	試験結果	12
2-3-1	鋼球用材料の極値統計法による清浄度評価結果	12
2-3-2	鋼球の耐圧痕性評価結果	13
2-4	考察	14
2-4-1	鋼球用材料の清浄度について	14
2-4-2	鋼球へのピーニング処理の必要性	15
2-5	結言	17
第 3 章	鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす熱処理特性の影響	18
3-1	緒言	18
3-2	試験方法	20
3-2-1	試験鋼球の製作	20
3-2-2	転がり疲労寿命試験	21
3-3	試験結果	23
3-3-1	試験鋼球の熱処理特性	23
3-3-2	試験鋼球の転がり疲労寿命試験結果	33
3-4	考察	35
3-5	結言	38
第 4 章	鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす残留応力の影響	39
4-1	緒言	39
4-2	試験方法	40

4-2-1	試験鋼球の製作	40
4-2-2	鋼球の X 線回折測定	41
4-3	試験結果	43
4-3-1	試験鋼球の X 線回折測定結果	43
4-3-2	残留応力と硬さおよび圧碎値の関係	45
4-3-3	試験鋼球の転がり疲労寿命試験結果	48
4-4	考察	48
4-5	結言	50
第 5 章	鋼球の転がり寿命過程における経時変化観察	52
5-1	緒言	52
5-2	試験方法	53
5-2-1	転がり寿命過程の経時変化観察	53
5-2-2	転がり寿命試験における鋼球はく離起点深さ	54
5-3	試験結果	55
5-3-1	転がり寿命過程における残留応力の変化	55
5-3-2	転がり寿命過程における半価幅の変化	63
5-3-3	転がり寿命過程における残留 $\gamma$ 量の変化	66
5-3-4	転がり寿命試験におけるはく離起点深さの測定結果	69
5-4	考察	71
5-5	結言	74
第 6 章	総括	75

参考文献

謝辞