

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

# 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

## 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．

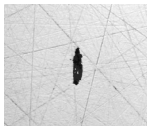
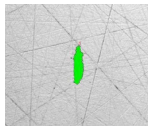

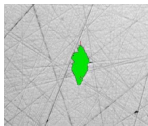
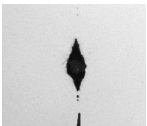
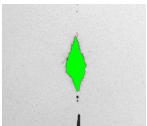
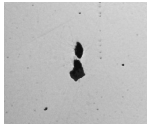
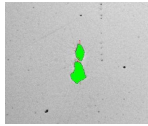
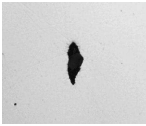
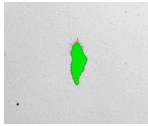
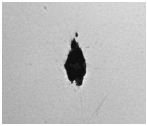
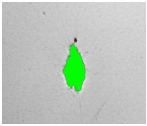

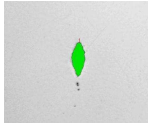
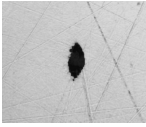
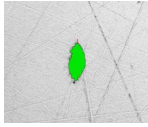
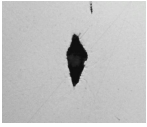
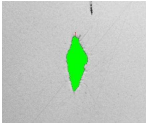
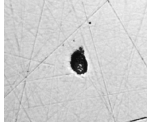
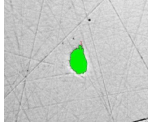

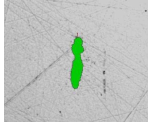
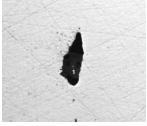
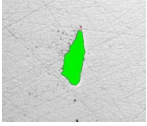
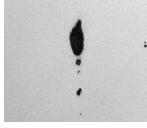
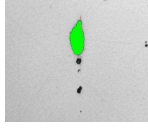

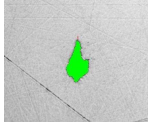
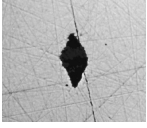
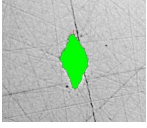
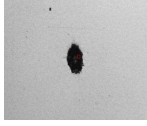
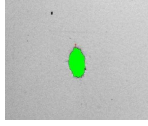
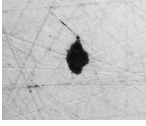
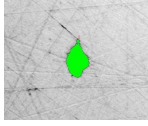
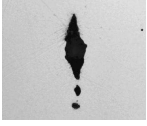
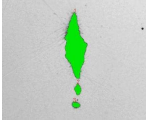
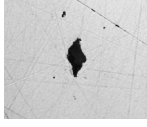
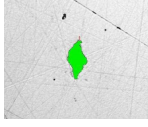
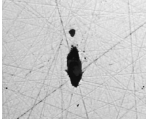
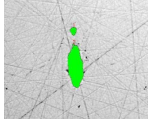
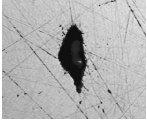
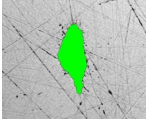
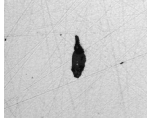
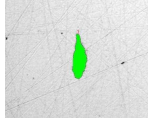
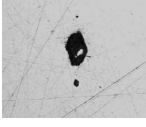
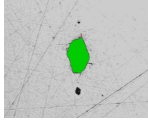


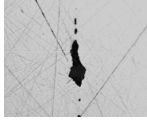
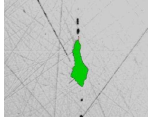

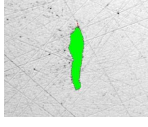
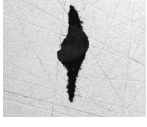

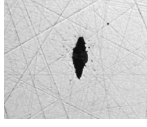
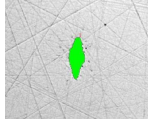
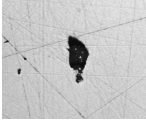
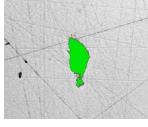
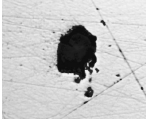
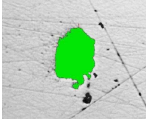

鏡面に仕上げられた  $S_0$  中に含まれる最大の非金属介在物は，図 2-1 に示す Leica 製 Steel Expert（鋼介在物自動解析システム）を用いて抽出し，画像処理ソフトで  $\sqrt{\text{area}_j}$  を算出した．なお，転がり軸受の疲労寿命に影響を及ぼす非金属介在物の種類は主に酸化物系とされており<sup>22)</sup>，抽出する非金属介在物は酸化物系とした．



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

## 2-2-2 鋼球の耐圧痕性評価

一般的な鋼球の製造工程<sup>23)</sup>を図 2-2 に示す。まず製鋼メーカーより納入される線材を所定の長さのピースに切断し、次に 1 対の半球体球座を用いて冷間で球体に圧縮成型される (a)。この時点では、球座同士のすきま部分にバリと呼ばれる余肉部が残っているが、次工程のバリ取り工程で除去される (b)。その後、熱処理（焼入および焼戻）を施し鋼球に適度な強度を与える (c)。適度な強度が与えられると、複数の研磨工程を経て完成球として仕上げられる (d)。なお、鋼球は (c) の熱処理以降の製造工程内において様々な手法を用いてピーニング処理が施される。



図 2-2 一般的な鋼球の製造工程

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工程である。ピーニング処理の目的は、鋼球の製造工程内、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るものであり、鋼球内部に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。

ピーニング処理の必要性を確認するために、ピーニングを施した鋼球（サンプル A）と施していない鋼球（サンプル B）を図 2-2 に示す製造工程で製作し、それぞれに種々の面圧で負荷を加えた際、その接触部に形成された圧痕の深さを測定した。表 2-5 にサンプル A およびサンプル B の詳細を示す。また、図 2-3 に、サンプル A およびサンプル B に種々の面圧を負荷する際の耐圧痕性評価方法概略図を示す。耐圧痕性評価は、2 個の鋼球を角度  $120^\circ$  の上下 2 個の円すい座に両円すい軸が一致するように挟んだ後、荷重を負荷し、鋼球同士の接触部に形成される圧痕の深さを干渉計で測定した。

表 2-5 サンプル A およびサンプル B の詳細

	サンプル A	サンプル B
熱処理条件	同条件	
ピーニング処理	有り	無し
	第一研磨工程の後	
表面硬さ HRC (n=3 球平均)	64.5	63.4

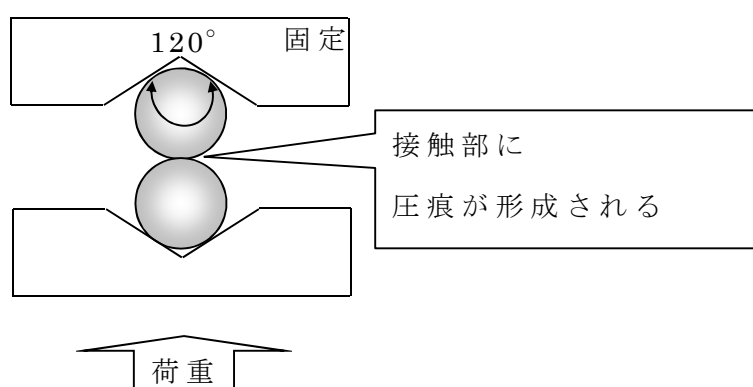


図 2-3 耐圧痕性評価方法概略

## 2-3 試験結果

### 2-3-1 鋼球用材料の極値統計法による清浄度評価結果

表 2-2 に示した供試材サンプル A, B, C の極値統計法による清浄度評価結果を図 2-4 および表 2-6 に示す。鋼球用線材として使用されている 3 種類の軸受鋼を評価した結果、 $\sqrt{\text{area max}}$  は 16~26 $\mu\text{m}$  の範囲で、最も評価結果が良かったのはサンプル A の 16 $\mu\text{m}$  という結果であった。緒言に示した通り、これまで清浄度の改良が行なわれてきた軸受鋼であるが、中には超高清浄度軸受鋼という位置付けで開発が行なわれているものもある<sup>24)</sup>。その中で、従来の軸受鋼の  $\sqrt{\text{area max}}$  はおおよそ 20~35 $\mu\text{m}$  という知見もあるが、本研究において評価した 3 種類の鋼球用材料はいずれも超高清浄度な水準にあることが分かり、本論文に使用する供試材にはサンプル A を選定することとした。

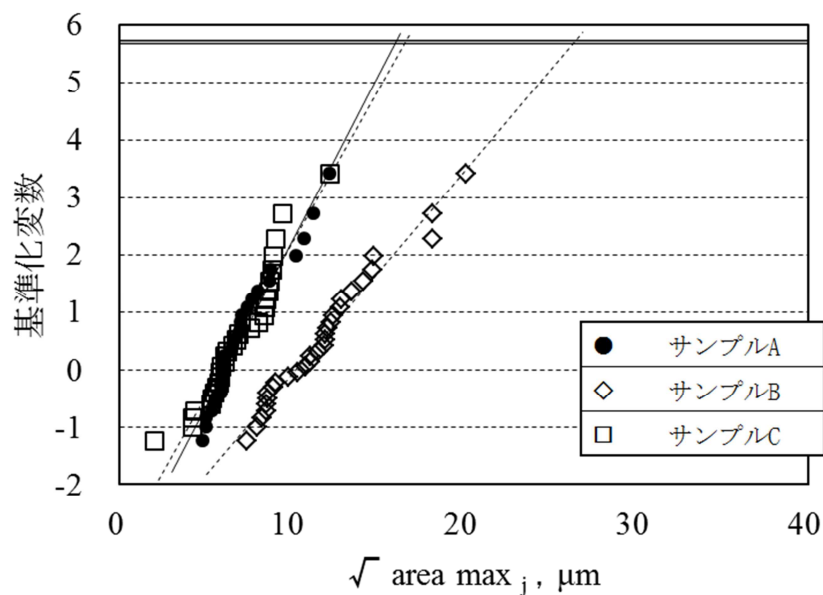


図 2-4 極値統計法による清浄度評価結果

表 2-6 各供試材の予測サイズ

供試材	$\sqrt{\text{area max}}, \mu\text{m}$ (30,000mm <sup>2</sup> 中に含まれる非金属介在物の予測サイズ)
サンプル A	16
サンプル B	26
サンプル C	17

### 2-3-2 鋼球の耐圧痕性評価結果

鋼球の耐圧痕性評価結果を図 2-5 に示す。種々の面圧を鋼球表面に与えた際、形成される圧痕の深さは、ピーニング有無によって顕著な差があり、ピーニング処理を施したサンプルの方がいずれの面圧においても浅い結果となった。



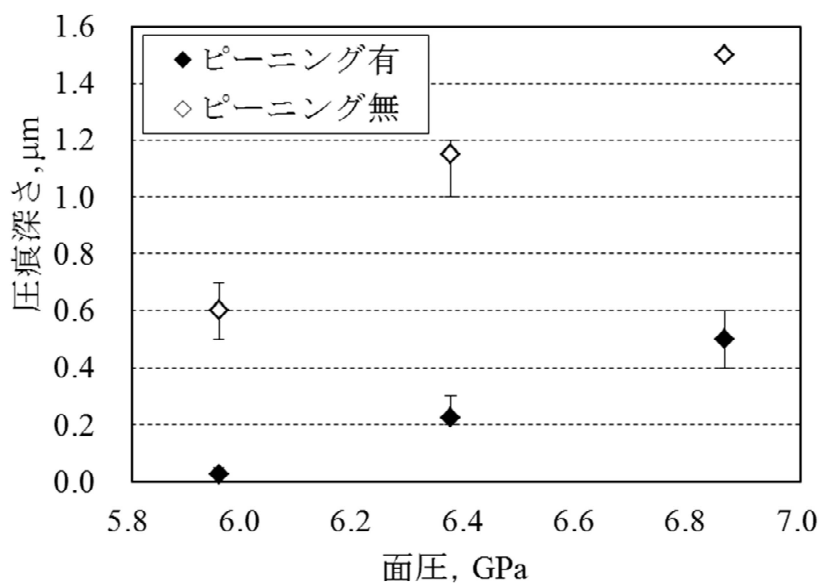


図 2-5 耐圧痕性評価結果

## 2-4 考察

### 2-4-1 鋼球用材料の清浄度について

鋼球用素材として実際に使用されている線材サンプル（A，B，C）の清浄度を，一般的な評価方法である JIS 点算法，および高清浄度な鋼材の評価に有効とされる極値統計法，これら 2 つの手法を用いて比較した。

JIS 点算法による評価結果では，いずれの線材サンプルも A 系 + B 系 + C 系の総合評価は JIS 規格を満足しているが，転がり軸受の疲労寿命に影響を及ぼす非金属介在物とされる酸化物系（B 系 + C 系）は，評価結果が 0（ゼロ）という結果であった。

一方，極値統計法による評価結果では，線材サンプル（A，B，C）で優劣が出ており，サンプル A，サンプル C，サンプル B の順に清浄度が優れている事が分かった。

本試験では，近年の清浄度が向上されてきた鋼球に使用される JIS-SUJ2 線材の清浄度を，JIS 点算法と極値統計法の 2 種類の手法を用いて比較検討した。その結果，JIS 点算法では優劣がつかない清浄度であっても，極値統計法で詳細に清浄度を調べる事で優劣が判明する事が分かり，極値統計法による清浄度評価は有効であるといえる。

## 2-4-2 鋼球へのピーニング処理の必要性

図 2-5 に示した通り，鋼球へピーニング処理を施す事で，種々の面圧を鋼球表面に与えた際，接触部に形成される圧痕深さに対しピーニング処理による圧縮残留応力の形成は有効である事が分かった．そこで，実際に図 2-5 に示した圧痕が鋼球表面に存在する場合，転がり軸受の音響特性がどう変化するかを検証した．なお，転がり軸受の音響特性については，正常な内外輪および鋼球からなる軸受の音響特性を基準とし，鋼球のみを圧痕が存在するものに入れ替えた場合との比（キズ音基準波形比）で評価した．

図 2-6 に種々の面圧とキズ音の関係を示す．いずれの面圧に対しても，ピーニング有の方がキズ音基準波形比は低くなった．

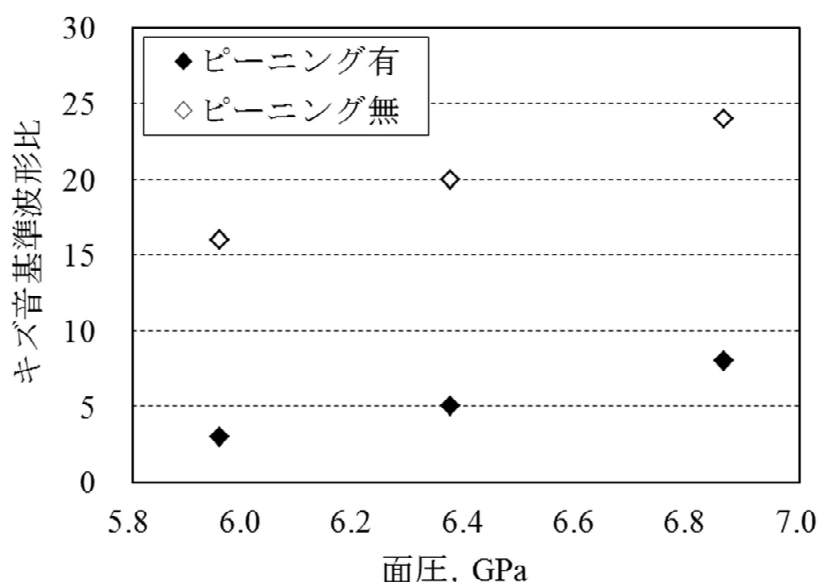


図 2-6 キズ音評価結果

図 2-7 に圧痕深さとキズ音基準波形比の関係を示す．ピーニング有とピーニング無のいずれも，鋼球表面に形成される圧痕が深くなると，キズ音基準波形比は大きくなった．しかし，例えば，圧痕深さ  $0.5\mu\text{m}$  付近のキズ音基準波形比を比較してみると，ピーニング有はキズ音波形比が約 7 倍に対し，ピーニング無はキズ音波形比が約 15 倍と，双方には大きな乖離が見られた．ピーニング有無のいずれも圧痕深さに比例して，キズ音基準波形比は大きくなり，図 2-7 に示す近似曲線の勾配も近いが，圧痕深さが直接キズ音基準波形比に影響していない事が分かった．

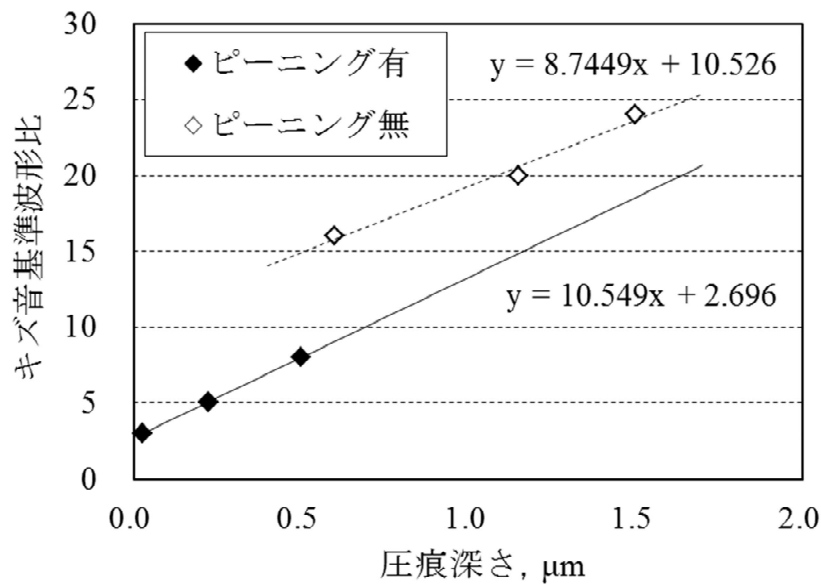


図 2-7 圧痕深さとキズ音の関係



図 2-8 圧痕写真（左上に油の干渉縞に歪）

図 2-8 に図 2-3 に示したような鋼球同士の接触部に形成される圧痕の写真を示す。圧痕は大きさ（直径）に対し、深さが非常に浅く、実際に肉眼で観察するのは困難であり、図 2-8 に示す通り、鋼球表面に油を塗布した場合、油の干渉縞が若干歪む程度のものである。本試験では光干渉計を用いて、圧痕深さを測定したが、図 2-7 に示した通り、圧痕深さはキズ音基準波形比に直接影響しておらず、今回は測定が困難であり検証には至らなかったが、圧痕周辺部の全

体的な鋼球の体積変化といったパラメーターが軸受の音響特性に影響を及ぼす事が示唆された。

本章における鋼球のピーニング処理の必要性という観点では、ピーニングを処理する事は、鋼球取扱い時の衝突といった現象に対し、圧痕の形成を抑えるのに有効であり、その結果、軸受の音響特性の劣化を抑える事が分かった。

## 2-5 結言

鋼球用素材として使用されている線材の清浄度を、JIS 点算法と極値統計法の2種類の方法で評価した。また、鋼球の製造上、必要不可欠とされるピーニング処理の必要性を、鋼球の耐圧痕性および軸受の音響特性を評価することで検証した。主な結果は以下の通りである。

- (1) JIS 点算法では優劣がつかないような、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は、より高清浄度な鋼球用線材を選定するのに有効であった。
- (2) 鋼球の製造工程におけるピーニング処理は、鋼球の耐圧痕性を向上させ、軸受の音響特性に対して有効な処理であった。

## 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

### 3-1 緒言

転がり疲労による破損形態は，内部起点型と表面起点型の 2 種類に大別される．前者は，転がり接触面下で転がりにより生じる動的せん断応力  $\tau_0$ （表面に対し平行）が最大となる深さ  $Z_0$ ，または接触により生じる最大せん断応力  $\tau_{st}$ （表面に対し  $45^\circ$  傾斜）が最大となる深さ  $Z_{st}$  に比較的一致するか，もしくはそれらの間の深さを起点にき裂が伝播して最終的にはく離に至る<sup>25)</sup>と言われている．後者は，転がり接触面下に硬質異物が存在し，それを踏み付けることで淵に盛り上がりを持った圧痕が形成され，転がり接触の際に圧痕淵へ応力が集中することで，表面を起点にき裂が伝播して最終的にはく離に至る<sup>26)</sup>と考えられている．表面起点型のはく離は，使用環境（異物混入），潤滑状態といった外的な要因が影響すると考えられるが，本来の転がり疲労寿命は内部起点型のはく離であり，材料の清浄度，熱処理特性といった内的な要因が主に影響してくる．

日本工業規格 JIS-B1501 に規定されている転がり軸受用鋼球は，形状特性として，等級別に直径不同，真球度，表面粗さ，ロットの直径相互差が規定されており，また，強度特性としては硬さが規定されている．鋼球の硬さは製造時の熱処理工程（焼入および焼戻）で調整されるが，工程能力の観点から JIS 規格に規定されている HRC62～66 の中央付近 HRC64 に調整されるのが一般的である．

鋼球の焼入工程では，所定数量をレトルト炉内へ投入し，レトルトを揺動・回転させる事で，炉内の鋼球を均一に  $A_{cm}$  変態点以上の温度に加熱（組織をフェライト  $\alpha$  から  $\gamma$  へ変態），その後，所定の均熱保持をとり，その間に  $\gamma$  結晶格子内に C（炭素）を固溶させてから，油槽に取り出し急冷することで高炭素なマルテンサイト組織が得られる．焼入工程の均熱温度および時間で，成長する  $\gamma$  結晶粒の大きさと C（炭素）の固溶量が変わり，油槽における冷却速度によっても得られる組織が変わってくる．また，鋼球の焼戻工程は，焼入で得られた高硬度なマルテンサイト組織を，所定の温度に加熱保持することで，高炭素なマルテンサイト結晶格子内の C（炭素）を析出させ，低炭素マルテンサイト

と  $\epsilon$  炭化物の組織とすることで、硬さは下がるが適度な靱性を鋼球に与える。

以上が鋼球の熱処理工程の詳細であるが、焼入工程および焼戻工程の温度や保持時間を種々変化させることで、C（炭素）の固溶量や  $\gamma$  結晶粒の大きさが変わり、鋼球の転がり疲労寿命に影響する熱処理特性は JIS に規定されている硬さだけでは指標としては不十分と考える。転がり軸受の転がり疲労寿命に対する最適な熱処理特性という研究は行なわれているが<sup>27)</sup>、鋼球に関しては報告例が少ないのが現状である。

本章では、同一素材（線材）から成る熱処理前の鋼球を様々な熱処理条件（焼入温度と焼戻温度を種々変更し、処理重量および焼入時の均熱保持時間、焼戻時の均熱保持時間等の条件は統一）で処理し、様々な熱処理特性をもった鋼球の転がり疲労寿命評価を行ない、鋼球にとって最適な熱処理特性および熱処理条件に対する指針を検討した。

## 3-2 試験方法

### 3-2-1 試験鋼球の製作

試験鋼球には、転がり疲労寿命に及ぼす清浄度（非金属介在物）の影響を抑える目的で、2-3-1項に示した高清浄度な材料（JIS-SUJ2線材サンプルA）を使用した。また、試験鋼球は、2-2-2項に示した工程編成（成型→バリ取り→熱処理→研磨・ラッピング）で、本章の目的である鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす熱処理特性の影響のみを検証するために、ピーニング工程を除き鋼球内部へ圧縮残留応力を付加せず試作した。

表 3-1 試験鋼球の熱処理条件

サンプル	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
焼入温度, K	1103			1133			1163		
焼入保持時間, min	60								
焼戻温度, K	403	433	463	403	433	463	403	433	463
焼戻保持時間, min	90								
焼入油	光輝焼入油（タイコ株式会社製 DSQ281）								
焼入油温度, K	323K								
処理個数	350個								

表 3-1 に試作した合計 9 種類の試験鋼球の熱処理条件を示す。Sample(a)～(c), (d)～(f), (g)～(i)はそれぞれ焼入温度を 1103K, 1133K, 1163K とし、それぞれの焼入温度に対して焼戻温度を Sample(a), (d), (g)は 403K, Sample(b), (e), (h)は 433K, Sample(c), (f), (i)は 463K とした。このように熱処理条件を変更することで、たとえば Sample(a), (b), (c)を比較することで焼入温度 1103K の同条件において焼戻温度の影響を 403K, 433K, 463K で検証でき、また、Sample(a), (d), (g)で比較することで焼戻温度 403K の同条件において焼入温度の影響を 1103K, 1133K, 1163K で検証出来る。

なお、試験鋼球のサイズは直径 9.525mm である。

### 3-2-2 転がり疲労寿命試験

各試験鋼球の転がり疲労寿命試験は、図 3-1 に示す曾田式変動荷重寿命試験機（以降、変動荷重試験機と称す）を用い、表 3-2 に示す条件で行なった。本変動荷重試験機の条件は、そのメカニズムは必ずしも明らかではないが、鋼球を優先的にはく離させることができるため評価試験機に用いた。本研究は鋼球に着目しており、後のワイブル分布図はすべて鋼球の寿命についてプロットしている。

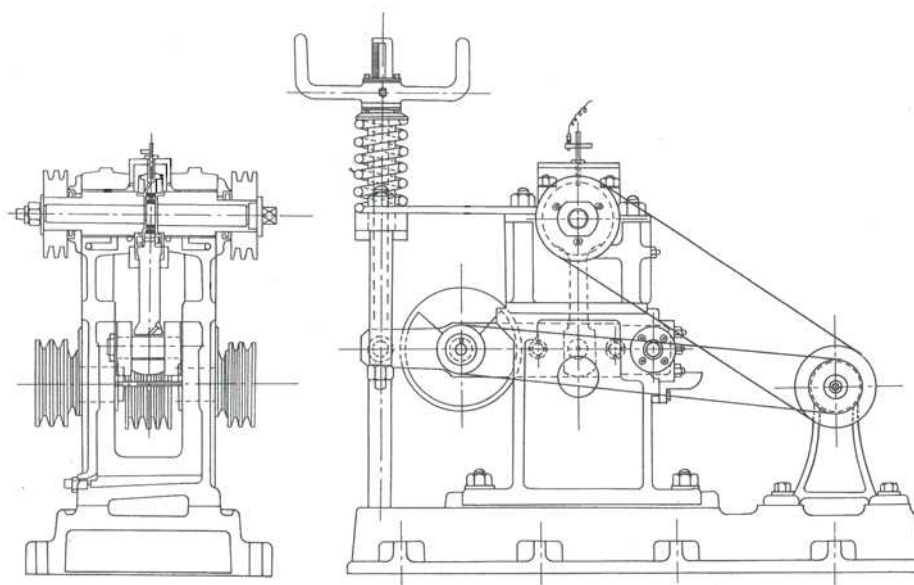


図 3-1 曾田式変動荷重寿命試験機

表 3-2 転がり疲労寿命試験条件

試験軸受	6206 (9.525mm 鋼球 9 個組み)
主軸回転速度, rpm	2000
試験荷重, kN	11.8±7.8 (4~19.6 変動)
潤滑油 (強制潤滑)	スピンドル油 (ISO-VG8)
潤滑油温度, K	313±10

図 3-2 に、試験軸受に負荷された荷重波形を示す。荷重波形は、試験軸受を保持するロッドハウジングに動歪計を組み込み、オシロスコープを用いて実際に試験軸受に負荷された荷重を測定したものである。主軸は 2000rpm の速度で回転するため、主軸 1 回転で 1 周期 (0.03sec.) の荷重変動となる。



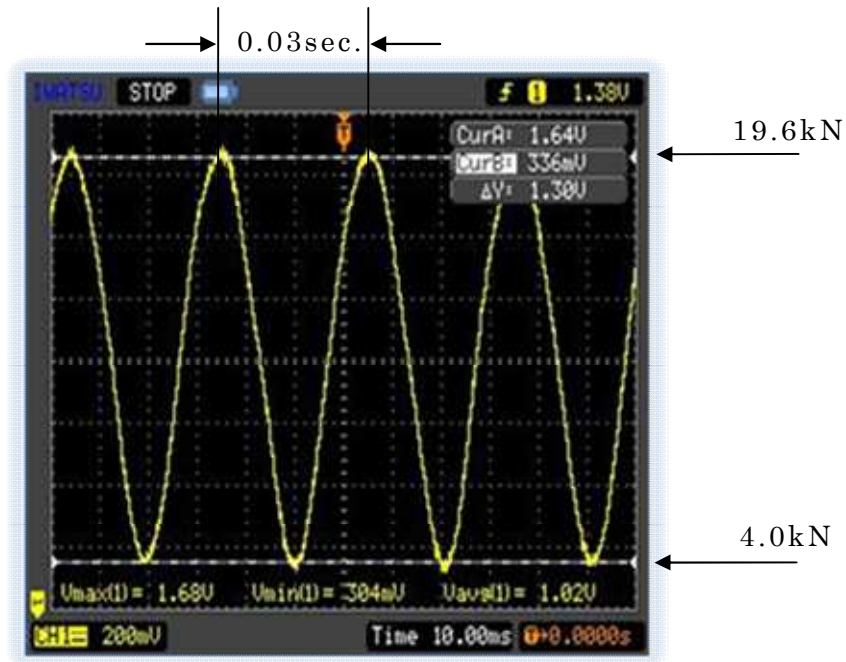


図 3-2 荷重波形（オシロスコープによる測定）

図 3-2 が示すように，荷重が変動するため Hertz の接触理論<sup>4)</sup> に基づく転がり接触楕円，および G. Lundberg と A. Palmgren の寿命理論に用いられる転がり接触下の各せん断応力やそれらが最大となる深さも常に変化している．変動荷重はバネによる一定荷重 11.8kN を，主軸回転に同調するアンバランスホイールで最小 4.0kN から最大 19.6kN に変動させているが，変動荷重試験機の接触応力とせん断応力およびそれらが最大となる深さを，4.0kN，11.8kN，19.6kN の荷重に対して計算した結果を表 3-3 に示す．

表 3-3 変動荷重試験機の諸条件

荷重 ， kN	接触楕円		平均 接触応力 $P_{mean}$ ， GPa	最大 接触応力 $P_{max}$ ， GPa	直交せん断 応力が最大 となる深さ， $Z_0$ ， $\mu\text{m}$	最大せん断 応力が最大 となる深さ， $Z_{st}$ ， $\mu\text{m}$
	長径 a ， mm	短径 b ， mm				
4.0	2.03	0.18	1.9	2.8	91	141
11.8	2.93	0.26	2.7	4.0	131	203
19.6	3.48	0.31	3.2	4.8	156	241

### 3-3 試験結果

#### 3-3-1 試験鋼球の熱処理特性

##### 硬さと圧砕値

表 3-1 に示した様々な熱処理条件で処理された試験鋼球の硬さと圧砕値を、図 3-3 に示す。硬さは完成球の球面を、直接ロックウェル C スケールで測定し、JIS-B1501 に規定されている転がり軸受鋼球の付属書 JA に従い平面値に補正した。また、圧砕値の測定方法は、図 2-3 に示した方法で鋼球が圧砕に至る荷重を読み取ったものである。

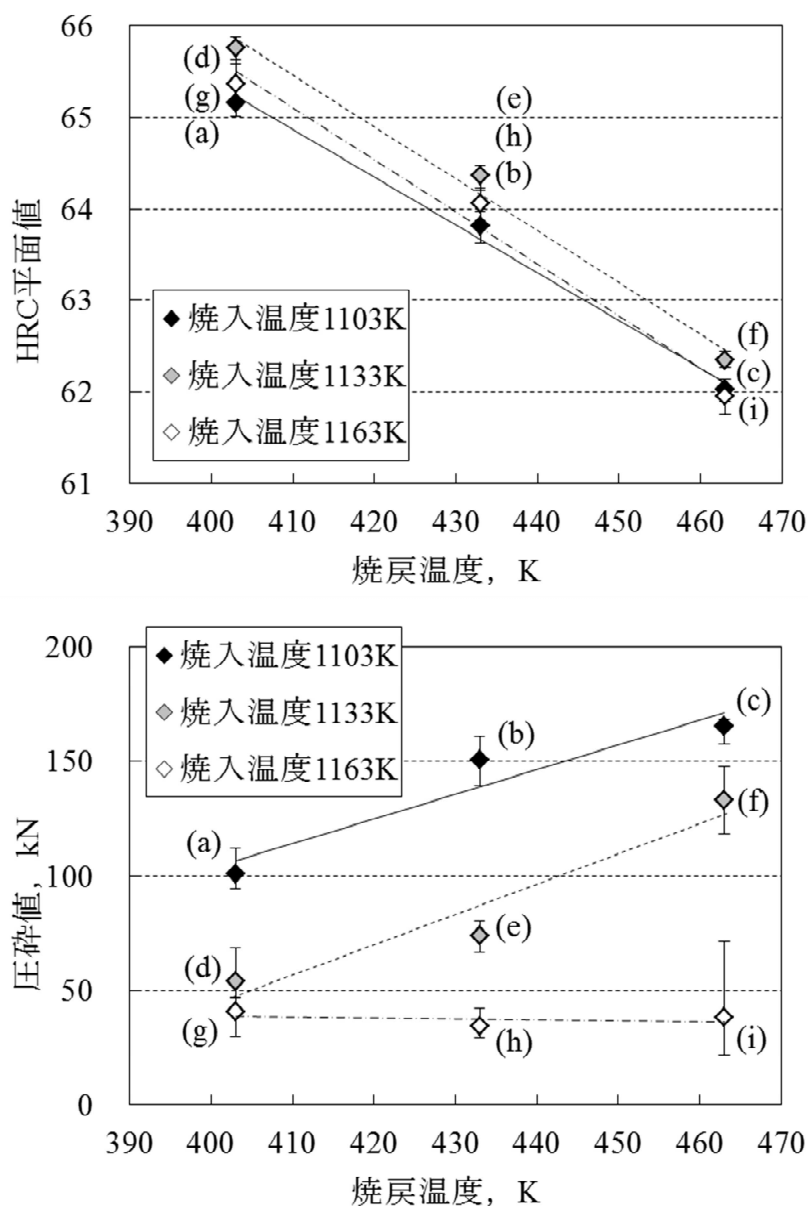


図 3-3 各試験鋼球の硬さと圧砕値

試験鋼球の硬さは焼戻温度の上昇と共に、いずれの焼入温度に対しても概ね同等の傾きで低下していたが、焼入温度 1133K の Sample(d)～(f)がいずれの焼戻温度に対しても高い硬度を示した。また、試験鋼球の圧砕値は、低い硬度を示していた Sample(a)～(c)が最も高かった。焼戻しは韌性を上げる熱処理<sup>28)</sup>とされており、鋼球の硬さが低いほど圧砕値は高くなる傾向を示したが、最も硬度が高かった Sample(d)～(f)の圧砕値が最も低い結果ではなかった。圧砕値が最も低い Sample(g)～(i)は焼入温度が高く、後に図 3-6 に示す旧  $\gamma$  結晶粒の粗大化が圧砕値に影響を及ぼしたと考える。

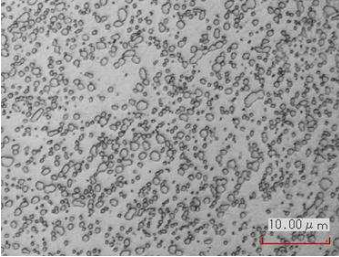
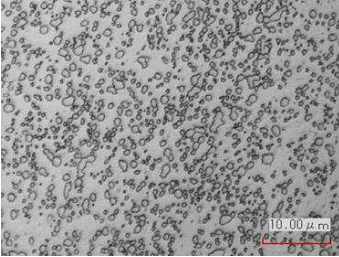
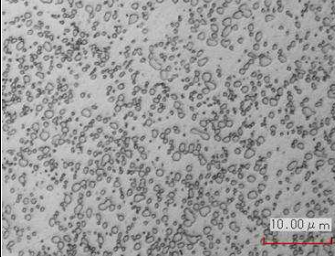
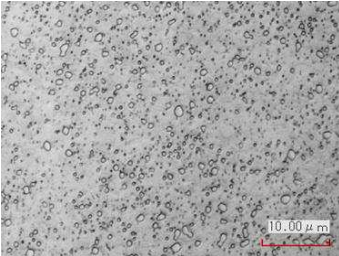
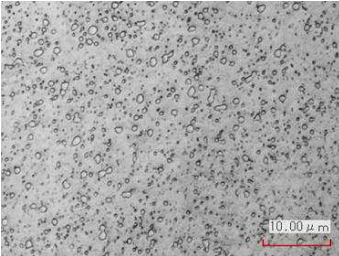
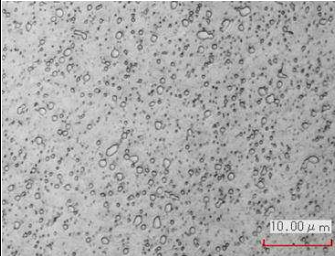
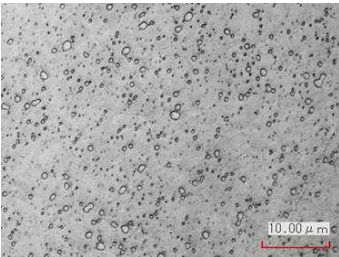
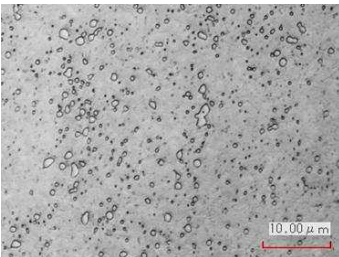
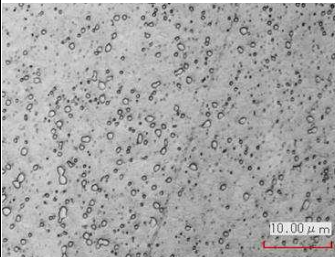
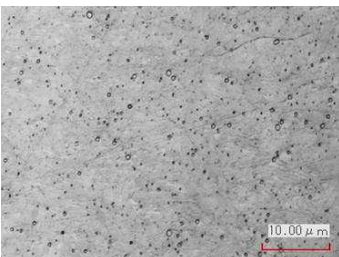
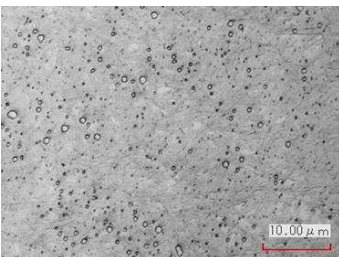
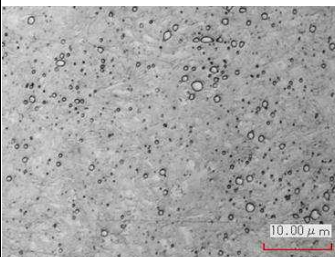
#### マイクロ組織

各試験鋼球のマイクロ組織観察は、残留炭化物と旧  $\gamma$  結晶粒の粒子解析を行なった。表 3-1 に示した熱処理条件において、残留炭化物と旧  $\gamma$  結晶粒は焼入温度にのみ影響するため、粒子解析は Sample(a)～(c)、Sample(d)～(f)、Sample(g)～(i)のそれぞれの代表として Sample(a)、Sample(d)、Sample(g)について実施した。なお、観察位置は以下の方法で統一した。

- ・試験鋼球をマクロ腐食し、素材（線材）の圧延方向を現出した。
- ・素材の中心線を通る断面で鋼球を切断し鏡面に研磨した。
- ・素材の中心線に対し 45° 傾いた方向で、鋼球表面から中心方向に深さ 150 $\mu$ m の箇所を観察位置とした。

表 3-4 にレーザー顕微鏡で撮影したマイクロ組織写真を示す。熱処理前の線材は白い粒状の炭化物が均一に分散した球状化組織となっており、熱処理後にはパーライトといった層状組織は認められずマルテンサイト組織が得られていた。焼入温度が高いほど炭化物の溶け込みが多い様子が分かるが、一部が残留炭化物として残っていた。

表 3-4 ミクロ組織（レーザー顕微鏡撮影）

	視野 1	視野 2	視野 3
熱処理前			
Sample(a) 焼入温度 1103K			
Sample(d) 焼入温度 1133K			
Sample(g) 焼入温度 1163K			

残留炭化物の粒子解析は、先ず走査型電子顕微鏡（以降、SEMと称す）を使用し高倍率な組織写真を撮影した。次に、得られたSEM画像から粒子解析ソフトを用いて残留炭化物の情報を抽出し、残留炭化物の個数、平均粒径、面積率を解析した。図3-4に粒子解析ソフトの抽出例、および表3-5にSEMで撮影したミクロ組織写真を示す。

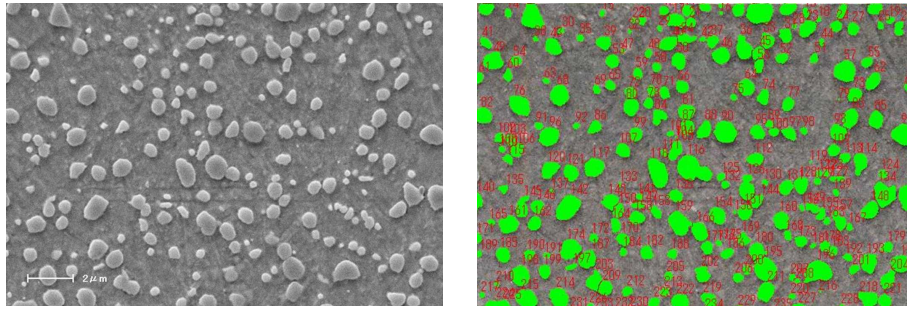


図 3-4 残留炭化物の粒子解析ソフトによる抽出例

表 3-5 ミクロ組織 (SEM 撮影)

	視野 1	視野 2	視野 3
熱処理前			
Sample(a) 焼入温度 1103K			
Sample(d) 焼入温度 1133K			
Sample(g) 焼入温度 1163K			
		スケール	—— 4μm

図 3-4 では、画像解析ソフトの 2 値化処理により、個々の残留炭化物を視野内で認識出来ている様子が分かり、画像の淵にかかっている残留炭化物については粒子解析の対象外とした。表 3-5 では、焼入温度が上がると、マルテンサイトの晶癖<sup>29)</sup>が区別しやすく観察された。

(残留炭化物粒子解析)

図 3-5 に、表 3-5 に示した各試験鋼球の SEM 画像について残留炭化物の粒子解析（個数、平均粒径、面積率）を実施した結果を示す、なお、表 3-5 に示した画像は代表例であり、粒子解析は各試験鋼球いずれも 9 視野（1 視野  $273\mu\text{m}^2$ 、総面積  $2,457\mu\text{m}^2$ ）とした。

残留炭化物の個数は、Sample(a)、Sample(d)、Sample(g)の順に焼入温度が高くなると減少し、炭化物が固溶している様子が分かった。しかし、Sample(a)は熱処理前と個数が同等であり、一方、平均粒径と面積率はいずれも減少していることから、個数は減少せずに各々の炭化物が小さくなり、炭化物の溶け込みとしては不十分であることを示唆していた。

残留炭化物の平均粒径を見ると、Sample(a)、Sample(g)、Sample(d)の順に大きくなっており、Sample(d)の焼入温度 1133K に極大値を持つ結果であった。Sample(a)は残留炭化物の個数が熱処理前と同等であったので、完全に固溶せずに非常に小さい残留炭化物が存在したため平均粒径が最小を示し、Sample(g)と Sample(d)は、Sample(a)の平均粒径を下げたような非常に小さい残留炭化物が完全に溶け込み、一旦、平均粒径が大きくなった後に焼入温度の上昇に伴い平均粒径が下がっているものと考察した。

残留炭化物の面積率を見ると、いずれも熱処理前から小さくなっており、焼入時に炭化物が固溶していることが確認された。残留炭化物の面積率は、Sample(a)、Sample(d)、Sample(g)の順に焼入温度が高くなると減少していたが、Sample(g)は視野によっては、残留炭化物の面積率がほぼ 0（ゼロ）%に近く、過剰に溶け込んでいることが示唆された。

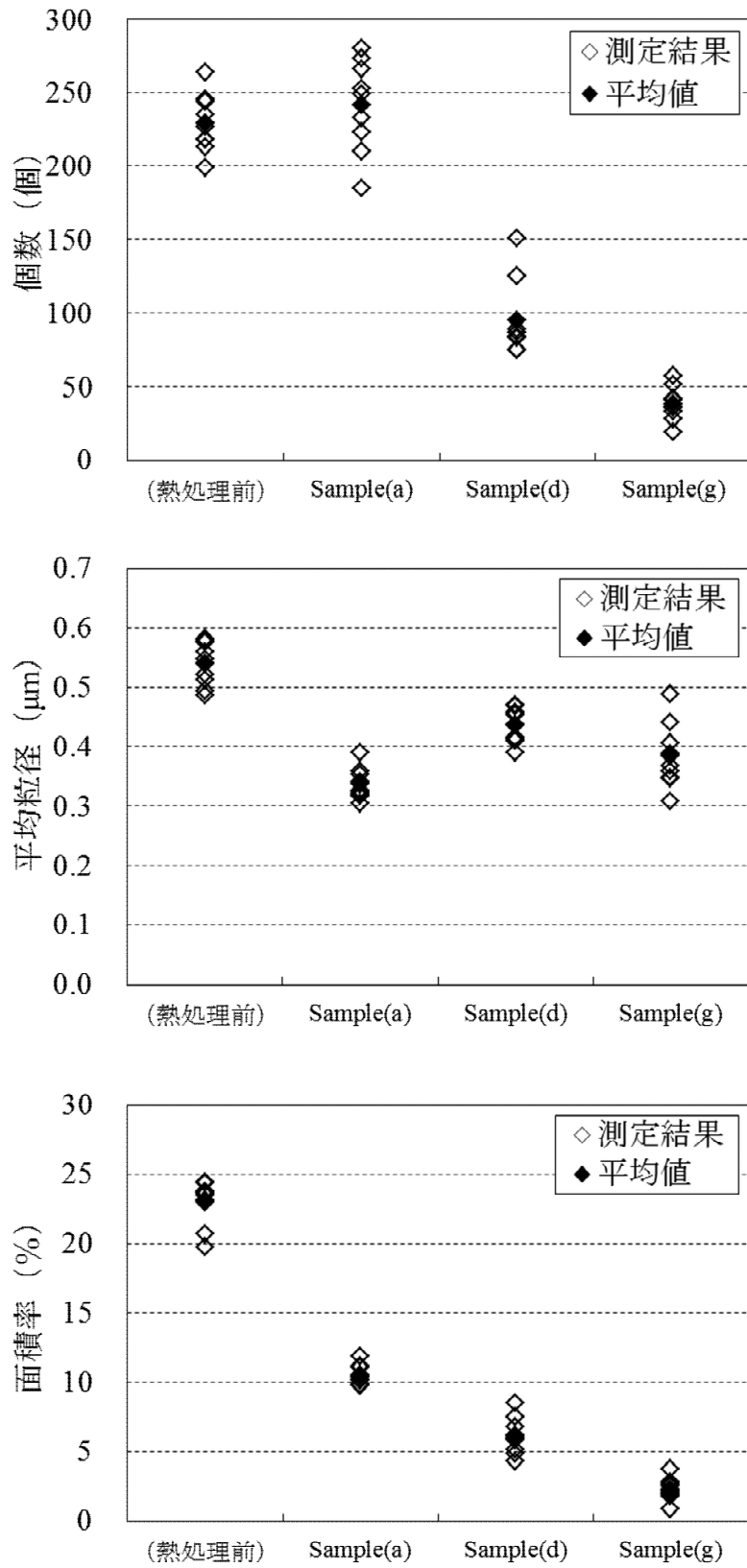
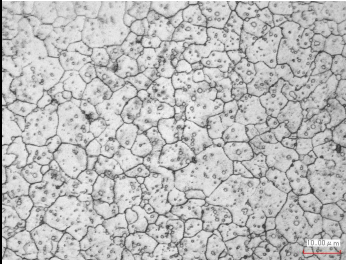
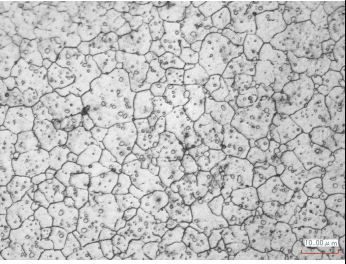
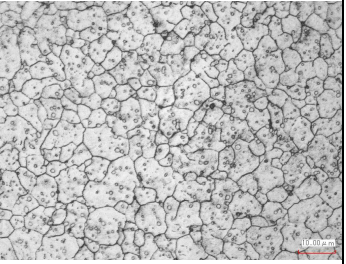
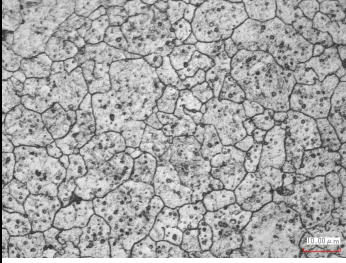
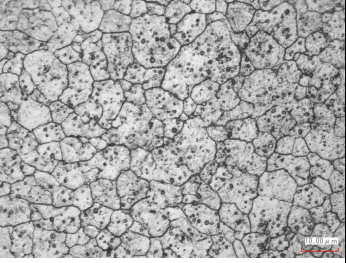
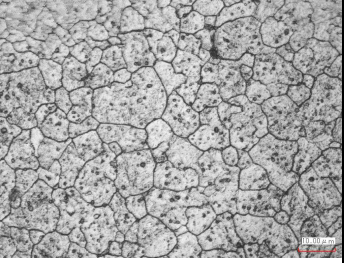
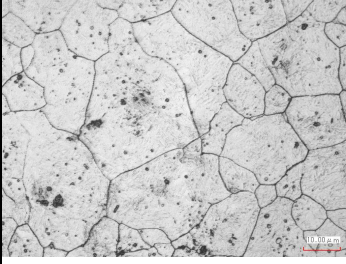
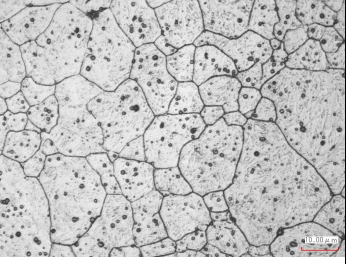
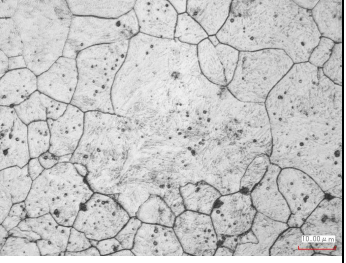


図 3-5 残留炭化物の粒子解析結果（個数，平均粒径，面積率）

表 3-6 に各試験鋼球の旧  $\gamma$  結晶粒をレーザー顕微鏡で撮影した写真を示し、また、図 3-6 に JIS-G0551 で測定した旧  $\gamma$  結晶粒の粒子解析の結果を示す。なお、旧  $\gamma$  結晶粒の粒子解析も残留炭化物と同様に 9 視野（1 視野  $3,757\mu\text{m}^2$ 、総面積  $33,813\mu\text{m}^2$ ）とした。

表 3-6 を見ると、Sample(a)と Sample(d)の旧  $\gamma$  結晶粒径に顕著な差はなかったが、Sample(g)は急激に旧  $\gamma$  結晶粒径が成長している様子が分かった。図 3-6 を見ると、Sample(g)の旧  $\gamma$  結晶粒径は Sample(a)および Sample(d)と比較して、粗大化およびバラツキが大きいことが分かった。

表 3-6 旧  $\gamma$  結晶粒（レーザー顕微鏡撮影）

	視野 1	視野 2	視野 3
Sample(a) 焼入温度 1103K			
Sample(d) 焼入温度 1133K			
Sample(g) 焼入温度 1163K			
		スケール	—— 20 $\mu\text{m}$



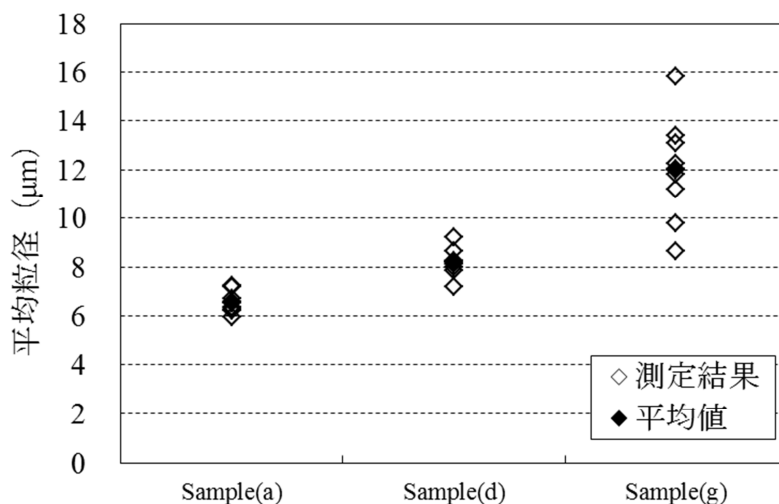


図 3-6 旧  $\gamma$  結晶粒の粒子解析結果

**X 線回折特性（半価幅：FWHM— Full Width at Half Maximum, 残留  $\gamma$  量）**

各試験鋼球の X 線回折特性（半価幅と残留  $\gamma$  量）を測定した。図 3-7 および図 3-8 に半価幅分布および残留  $\gamma$  量分布の測定結果を示す。なお、X 線回折測定 of 諸条件は後に 4-2-2 項に示す。半価幅は疲労解析に用いられる<sup>30)</sup> 特性であり、高いほど疲労度が低い状態を示す。残留  $\gamma$  量は熱処理後に残留した  $\gamma$  組織であり、主に寸法の経年変化の要因となる組織である。いずれの特性も N=2 球ずつ測定した。

図 3-7 の半価幅分布は、焼戻温度が上がると半価幅が下がっており、鋼球が疲労を受けたのと等しい状態になっていた。なお、最表面 (0 $\mu\text{m}$ ) から深さ 25  $\mu\text{m}$  にかけて僅かに下がっているのは熱処理後の研磨・ラッピングによるひずみ誘起変態によるものである。

図 3-8 の残留  $\gamma$  量分布を見ると、焼入温度が 1103K の Sample(a)~(c)は、他の試験鋼球に対し低かったが焼戻温度による差は顕著ではなかった。一方、焼入温度が 1163K, 焼戻温度が 403K の Sample(g)は他の試験鋼球に対し最も高く、また、Sample(g)の場合を除いて Sample(d)~(i)は同等の残留  $\gamma$  量であり、焼戻温度による差も顕著ではなかった。残留  $\gamma$  量が焼戻により分解される温度は 453K 以上<sup>28)</sup> とされており、表 3-1 に示した焼戻条件においては分解の差が顕著ではなかった。

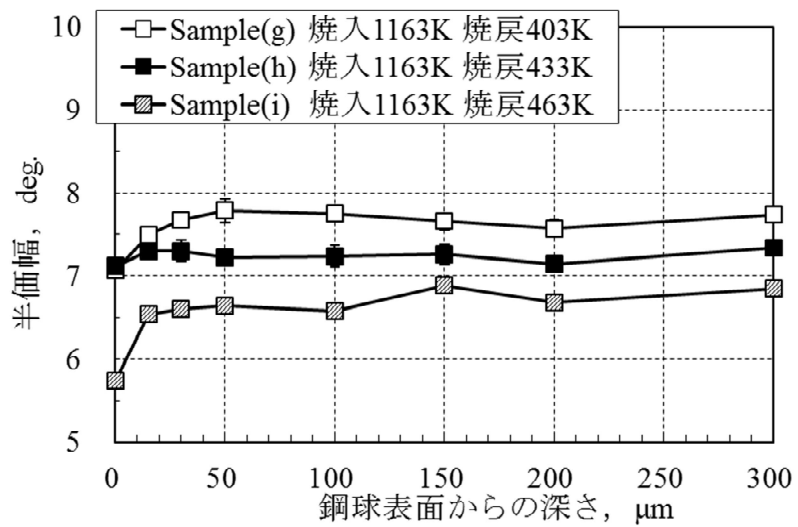
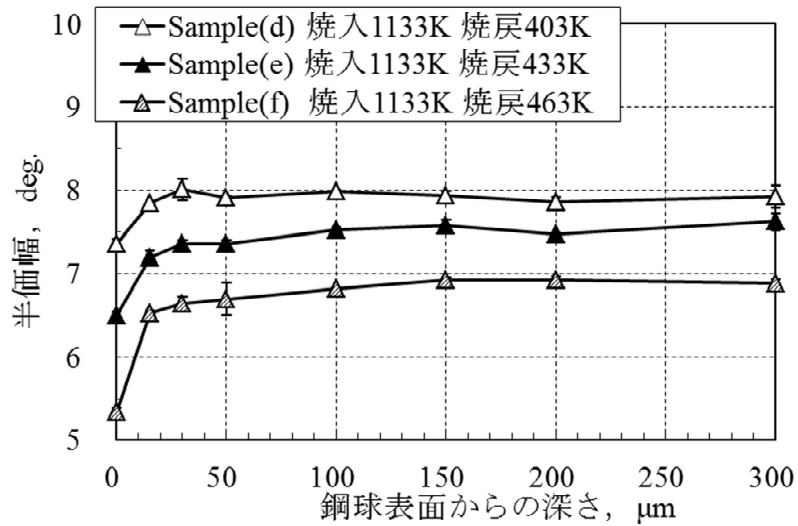
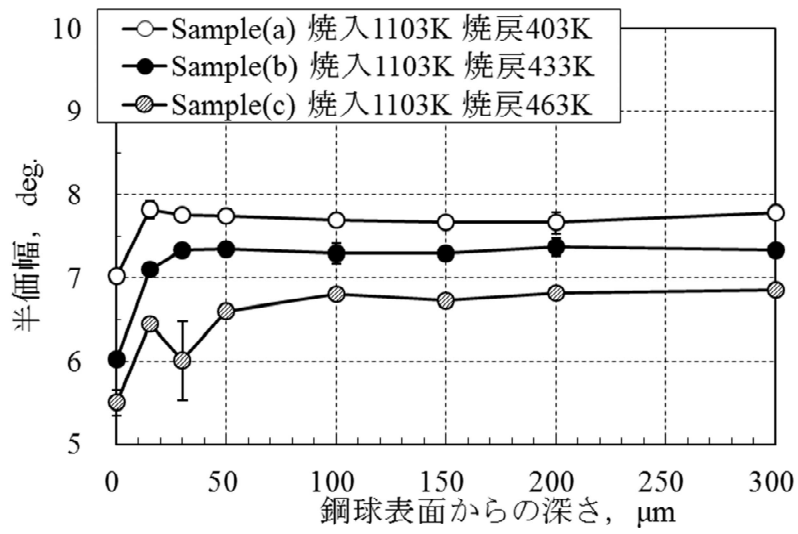


図 3-7 試験鋼球の半価幅分布

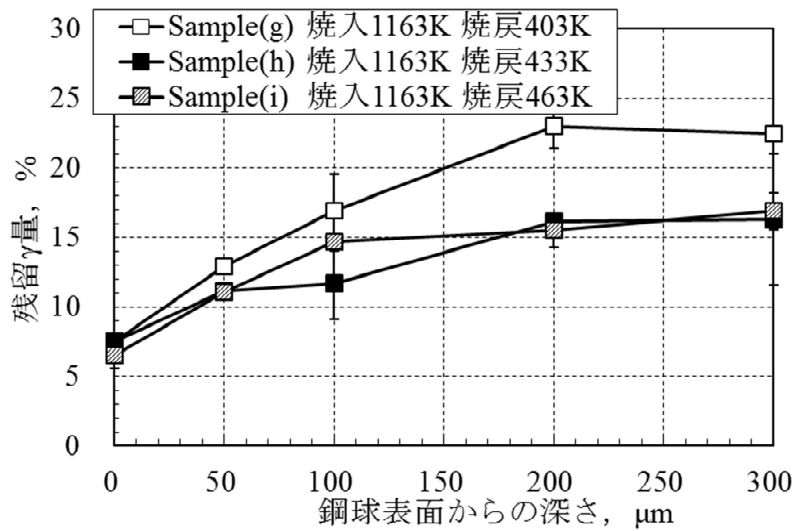
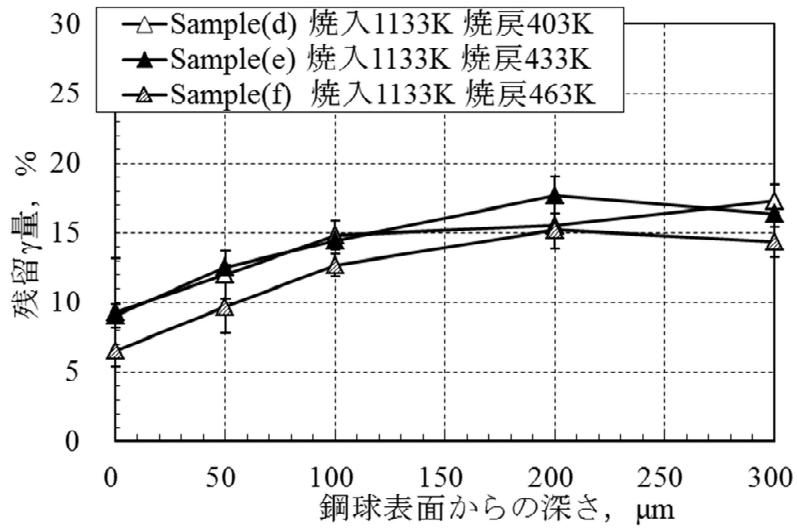
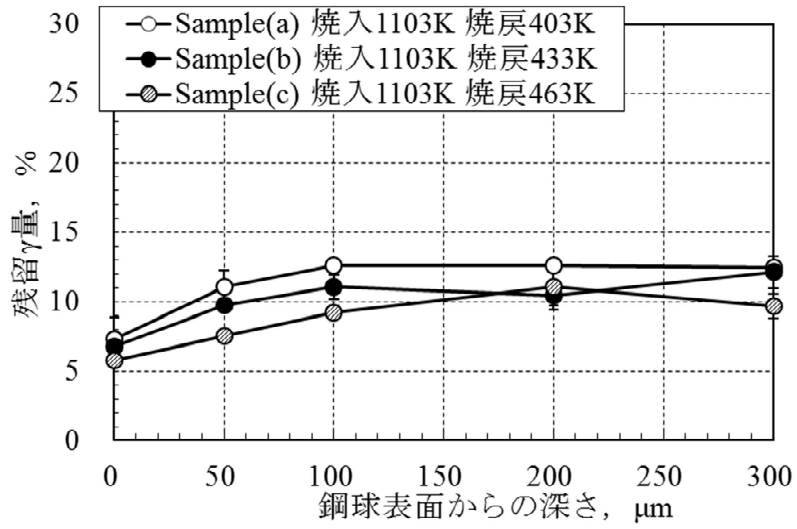


図 3-8 試験鋼球の残留  $\gamma$  量分布

### 3-3-2 試験鋼球の転がり疲労寿命試験結果

表 3-1 に示した試験鋼球 Sample(a)～(i)の転がり疲労寿命試験を，3-2-2 項に示した変動荷重試験機で評価した．図 3-9 に，転がり疲労寿命試験結果（ワイブル分布図）を示す．なお，図 3-9 は内外輪のはく離ではなく，すべて鋼球のはく離をプロットしている．鋼球がはく離する前に内外輪がはく離した場合には，内外輪のみを交換して試験を継続した．また，試験時間が 1000h に至った時点で打切りとした．

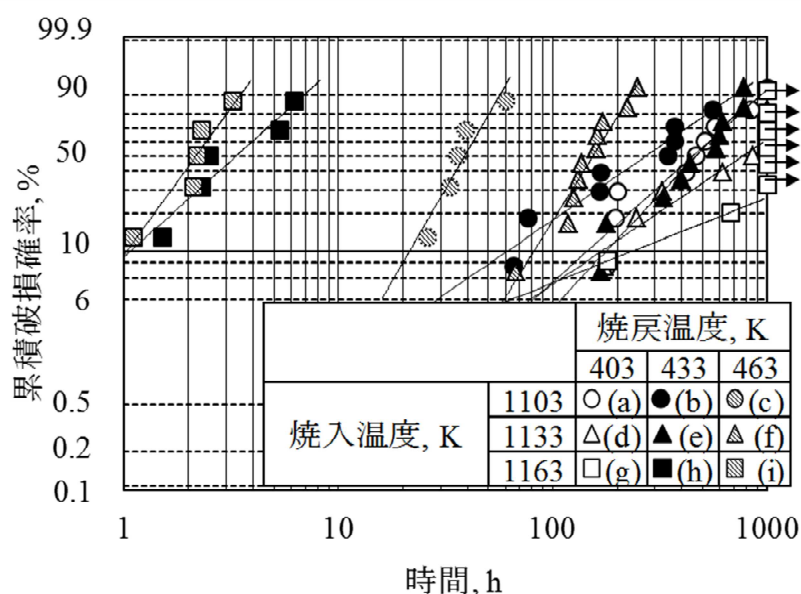
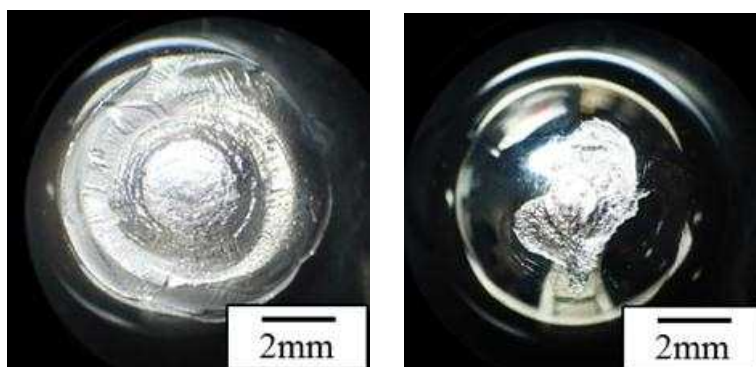


図 3-9 Sample(a)～(i)の転がり疲労寿命試験結果

図 3-9 を見ると，高純度な素材であっても熱処理条件によって，鋼球の寿命特性が大きく変わり，熱処理条件ならびに熱処理特性は鋼球の転がり疲労寿命に対し影響度が大きいことが分かった．特に高温焼入の Sample(h)，(i)は極端に短寿命な結果となった．

図 3-10 に転がり疲労寿命試験による鋼球はく離外観（代表例）を示す．Sample(a)～(g)の鋼球はく離は図 3-10 の左図に示したような外観であった．本転がり疲労寿命試験における潤滑状態はほぼ完全な EHL 状態<sup>31)</sup>であり，図 3-10 の左図に示した鋼球はく離は，鋼球内部を起点としてき裂が発生し，繰返し応力によりき裂が進展した後にはく離に至った典型的な転がり疲労損傷の様相を呈していた．

一方， Sample(h)， (i)の鋼球はく離は図 3-10 の右図に示したような， 前述の Sample(a)～(g)の典型的な内部起点の転がり疲労損傷とは様相が異なる外観であり， 図 3-9 においても Sample(h)， (i)は極端に短寿命な結果であった．



左： Sample(e)

右： Sample(i)

図 3-10 転がり疲労寿命試験による鋼球はく離外観（代表例）

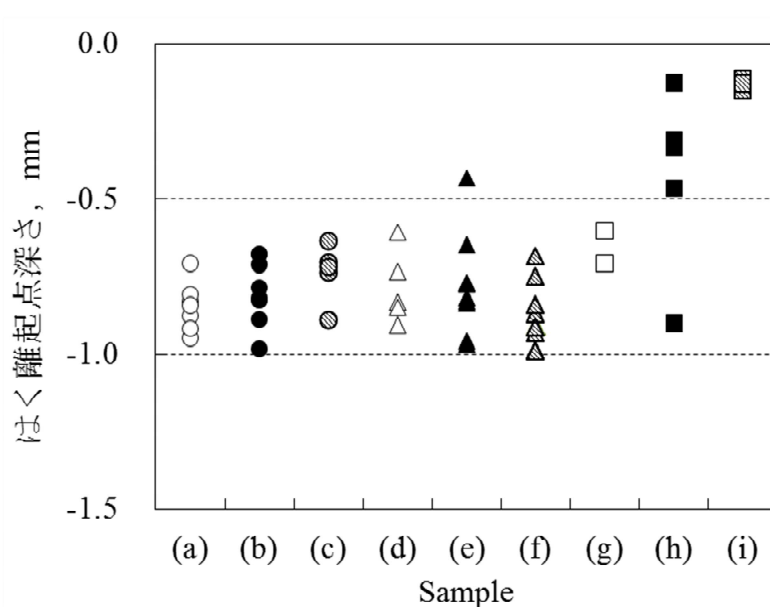


図 3-11 Sample(a)～(i)のはく離起点深さ

図 3-11 に Sample(a)～(i)の鋼球はく離起点深さを示す．また， 図 3-12 に Sample(a)～(i)の鋼球はく離起点深さとはく離時間の関係を示す．

図 3-11 を見ると， Sample(a)～(g)の鋼球はく離起点深さはおよそ 0.5～1.0mm の範囲内に収まり， 各 Sample で差はなかった．しかし， Sample(h)と Sample(i)だけは大半が 0.5mm 以下という浅い結果であり， 図 3-12 を見ると，

はく離時間が短いとはく離起点深さが浅い傾向が見られた。なお、鋼球のはく離起点深さの測定については後に 5-2-2 項に示す。

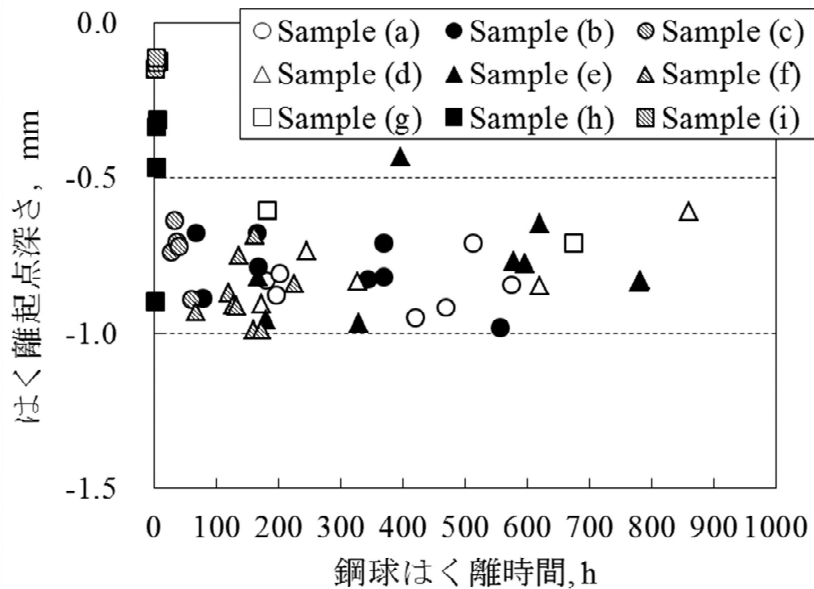


図 3-12 Sample(a)～(i)の鋼球はく離起点深さとはく離時間の関係

### 3-4 考察

図 3-13 に図 3-9 の  $L_{10}$  寿命を熱処理条件別にまとめた。図 3-13 を見ると、試験鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす熱処理条件の影響が大きいことが分かり、いずれの焼入温度に対しても焼戻温度が低いほど試験鋼球の転がり疲労寿命特性は良くなる傾向にあった。一方、焼入温度について 1103K の Sample(a)～(c)と 1133K の Sample(d)～(f)を比較すると、焼入温度が高い 1133K の Sample(d)～(f)の方が試験鋼球の転がり疲労寿命は良い結果を示していた。しかし、最も焼入温度が高い 1163K の Sample(g)～(i)については焼戻温度が高くなると、試験鋼球の転がり疲労寿命が極端に短くなっており、焼入温度には適正な温度があることが分かった。

図 3-14 に、図 3-7 (半価幅分布) および図 3-8 (残留  $\gamma$  量分布) の X 線回折測定結果における各試験鋼球表面下 100 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$ , および 300 $\mu\text{m}$  の平均値を熱処理条件別にプロットした。また、図 3-15 には、図 3-5 (残留炭化物の粒子解析) および図 3-6 (旧  $\gamma$  結晶粒の粒子解析) のマイクロ組織観察結果を、熱処理条件別にプロットした。

図 3-14 の半価幅を見ると，焼入温度 1133K の Sample(d)～(f)が最も高くなっており，図 3-3 の硬さと相関が見られた．また，図 3-14 の残留  $\gamma$  量は，焼入温度が上がると増加していたが，軟らかい組織である残留  $\gamma$  量は Sample(a)～(i) で約 10～20%であり，試験鋼球の硬さに及ぼす影響は小さかった．

次に，図 3-15 では，焼入温度が上がると残留炭化物の面積率は減少しており，固溶強化されているが，その一方，旧  $\gamma$  結晶粒の平均粒径は粗大化していた．

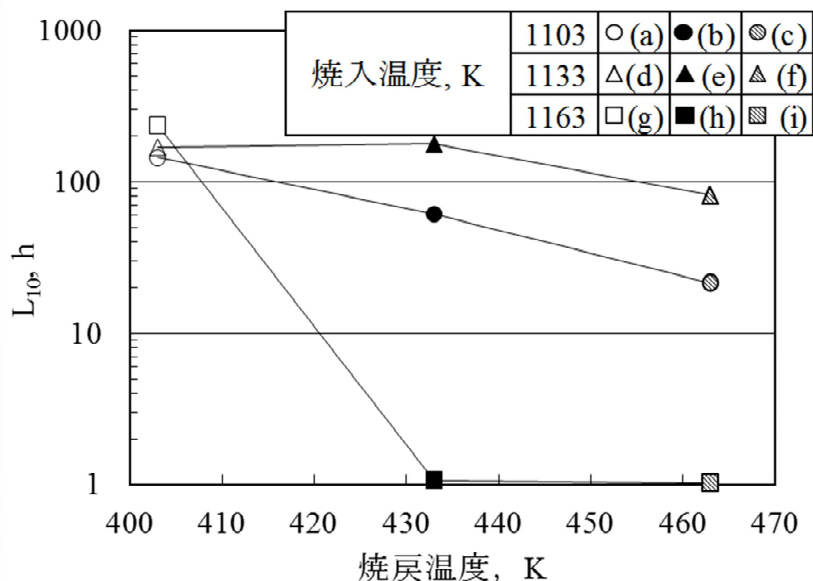


図 3-13 Sample(a)～(i)の  $L_{10}$  寿命（熱処理条件別）

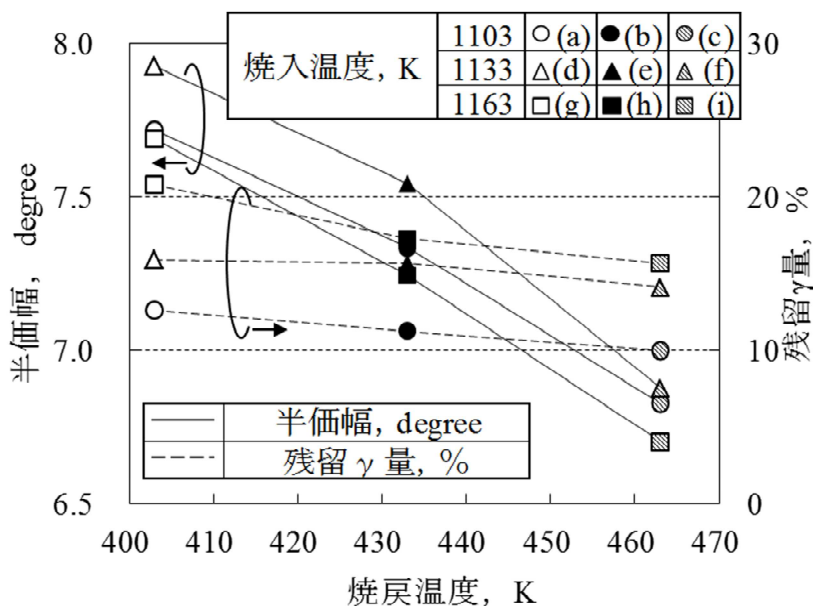


図 3-14 各試験鋼球の X 線回折測定結果（熱処理条件別）

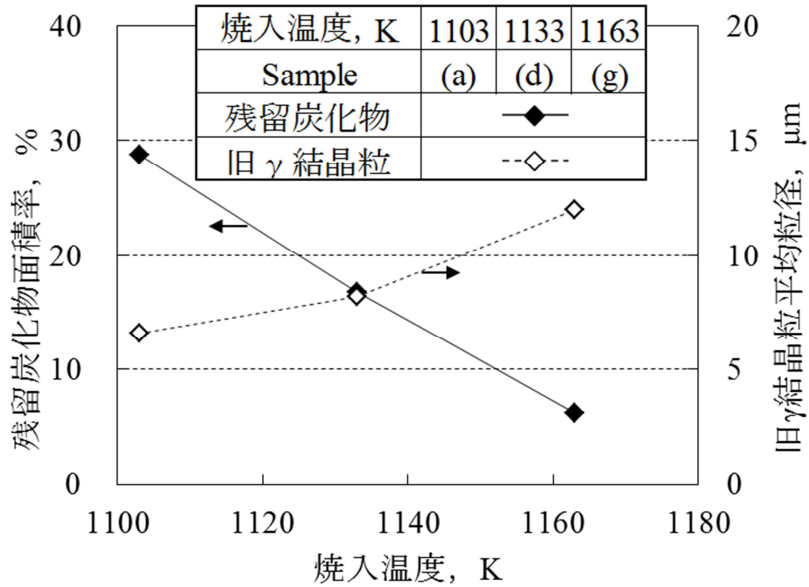


図 3-15 各試験鋼球のマイクロ組織－粒子解析結果（熱処理条件別）

以上より、熱処理特性が鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす影響について考察すると、熱処理特性の中で代表的な鋼球の硬さは熱処理条件（焼入温度、焼戻温度）で容易に調整できるが、鋼球の硬さだけで転がり疲労寿命を考察することはできない。図 3-3 において鋼球の硬さが HRC64 程度の Sample(b), Sample(e), Sample(h) について、図 3-13 に示した  $L_{10}$  寿命を比較すると 100 倍以上の差があり、硬さのみで評価できないことは明らかである。

鋼球の転がり疲労寿命は、残留炭化物の面積率が指標となるマトリックスへのカーボン固溶量、旧  $\gamma$  結晶粒の平均粒径、半価幅といった熱処理特性も大きく影響していることが分かった。

これらの熱処理特性を考慮し、焼入温度に関して述べると、図 3-15 において焼入温度が 1133K の Sample(d)（Sample(e), Sample(f)も等価）は適度なカーボン固溶量と旧  $\gamma$  結晶粒の成長の度合いが最も良いバランスであり、結果的に図 3-3 および図 3-14 に示したように最も高い硬さおよび半価幅を有していた。その結果、図 3-13 に示したように鋼球の転がり疲労寿命も良好な結果が得られた。

また、焼戻温度に関して述べると、図 3-13 において Sample(d), Sample(e), Sample(f)を比較すると、焼戻温度が低いほど鋼球の転がり疲労寿命は長い傾向にあったが、焼戻温度を下げすぎると一般的に研削割れの懸念が出てくる<sup>32)</sup>ため過度に焼戻温度を下げることは注意が必要である。



### 3-5 結言

様々な熱処理特性を持たせた試験鋼球を製作し，転がり疲労寿命に及ぼす影響について清浄環境下で検証した．主な結果は以下の通りであり，鋼球の転がり疲労寿命に影響を及ぼす因子，ならびに最適な熱処理条件の指針を明らかにした．

- (1) 鋼球の転がり疲労寿命は熱処理特性に影響され，同程度の硬さであっても，カーボン固溶量および旧  $\gamma$  結晶粒の平均粒径により大きく異なった．
- (2) 鋼球の転がり疲労寿命に適した熱処理条件としては，旧  $\gamma$  結晶粒径を粗大化させずに適度にカーボンを固溶させる焼入温度の設定，また，半価幅が下がりすぎない焼戻温度の設定が肝要であった．

## 第4章 鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす残留応力の影響

### 4-1 緒言

鋼球は玉軸受に組み込まれ、市場において最終的に（鋼球単体ではなく）玉軸受に対して静寂性および信頼性といった様々な特性が要求されるが、鋼球単体に対しても、静寂性および信頼性に対し様々な品質特性が管理されている。鋼球の静寂性に対し指標となる品質特性は、主として寸法精度（直径不同，真球度，相互差）と表面粗さであり，一方，信頼性については主として素材の清浄度と鋼球の熱処理特性である。しかし，第2章で検証した鋼球にとって必要不可欠なピーニング処理時に形成される，鋼球内部の接線方向の圧縮残留応力も転がり疲労寿命に影響を及ぼす<sup>20)</sup>と知られている。

鋼球および内外輪といった転動要素の表面および内部には，製造段階の熱処理や機械加工により，必ず幾らかの残留応力が生じている。鋼球の場合，一般的な製造工程として，冷間鍛造，バリ取り，熱処理，ピーニング，研磨（ラッピング）の工程を経て完成するが，鋼球の残留応力は，主に耐圧痕性向上のためにピーニング工程で意図的に鋼球内部に接線方向の圧縮残留応力が付与されている。熱処理工程でも残留応力が形成され，また，完成球の最表面にも研磨（ラッピング）工程において極表層の狭い領域に残留応力を生じているが，ピーニング処理によるものに比べると比較的小さい。

また，実際に軸受として使用される際の転がり接触によっても，第5章に示すように繰返し応力の蓄積により最大せん断応力 $\tau_{45^\circ}$ が最大となる深さ $Z_{st}$ に圧縮残留応力の極大値が現れる。圧縮残留応力と転がり疲労寿命の関係については，圧縮残留応力は転がり接触において接触面の表面下に発生するせん断応力の値を小さくするため，転がり疲労寿命を増大させる<sup>33)</sup>場合もあり，現在のところ，圧縮残留応力は転がり疲労寿命に好影響を与え，引張残留応力は悪影響を与えるといえるものの，鋼球に対しては明白な結論が得られていないのが現状である。

本章では，種々の条件でピーニング処理を実施し，様々な接線方向の残留応力分布を与えた鋼球の転がり疲労寿命を変動荷重試験機で評価し，接線方向の残留応力が鋼球の転がり寿命に及ぼす影響について検討した。

## 4-2 試験方法

### 4-2-1 試験鋼球の製作

試験鋼球の素材は、第3章と同様に高純度な線材サンプル A を使用した。また、試験鋼球の工程編成は、2-2-2 項に示した成型→バリ取り→熱処理→研磨・ラッピングとし、ピーニング工程を研磨工程の前後に追加した。

図 4-1 に、本章の試験鋼球にピーニング処理を施した設備の概略図を示す。ドラム（Drum）と呼ばれる容器内に試験鋼球を投入し、容器自体が回転することで試験鋼球が攪拌され、更に容器内に設置されたインペラ（Impeller）と呼ばれる羽根車が容器とは逆回転することで試験鋼球同士の衝突速度を上げることができる。つまり、ドラムおよびインペラの回転速度、ならびに処理される時間を変更することで、様々な残留応力を試験鋼球に付加することが可能である。

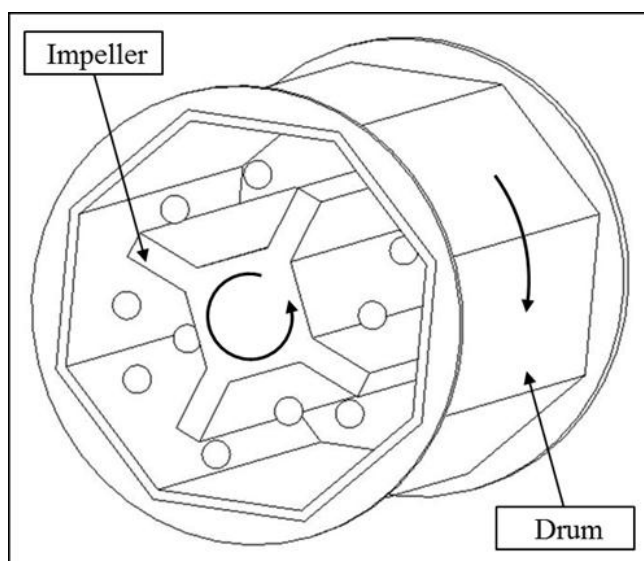


図 4-1 ピーニング処理設備の概略図

ピーニング工程では、処理が施される工程途中の鋼球に対し、内部（表面下）に極大値を持つ接線方向の圧縮残留応力を付加することができる。つまり、ピーニング処理工程を研磨前後に設定することで、ピーニング処理前後の研磨量を変更され、完成時の試験鋼球の残留応力分布状態を調整することができる。

表 4-1 に、試験鋼球の熱処理条件およびピーニング条件を示す。熱処理条件

は、第 3 章に示した Sample(e)と同条件で統一し、ピーニング条件を種々変更することで試験鋼球の残留応力分布状態を調整した。

表 4-1 試験鋼球の熱処理条件とピーニング処理条件

サンプル	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)
熱処理条件	第 3 章 Sample(e)と同条件に統一					
ドラム回転数, rpm	60					
インペラ回転数, rpm	200	300	500	200	300	500
ピーニング処理時間, min	90	120	120	90	120	120
ピーニング工程	研磨工程後			研磨工程前		

#### 4-2-2 鋼球の X 線回折測定

鋼球の X 線回折測定は図 4-2 に示す微小部 X 線応力測定装置（株式会社リガク製）を用いた。表 4-2 に X 線回折測定の諸条件を示す。

鋼球最表面から中心方向の内部にかけての残留応力分布を測定するための手法として、先ず鋼球最表面の残留応力を測定し、次に任意の測定箇所まで電解研磨を行い、再度残留応力を測定することを繰り返した。図 4-3 に電解研磨装置の概略図を示す。電解研磨装置全体を電解液（りん酸 100cc, 無水クロム酸 50g, ゼラチン 2g, シュウ酸 2g）に浸からせ、鋼球（陽極）と装置（陰極）の間に 12V の電圧をかけて電解研磨を行なった。



図 4-2 微小部 X 線応力測定装置

表 4-2 X線回折測定 of 諸条件

回折 X 線	CrK $\alpha$
管電圧, kV	40
管電流, mA	30
コリメータ, mm	$\Phi$ 1.0
ピークサーチ	半幅中点法
$\phi$	0°, 15°, 30°, 45°
測定法	並傾法
検出・計数部	PSPC リニアカウンタ

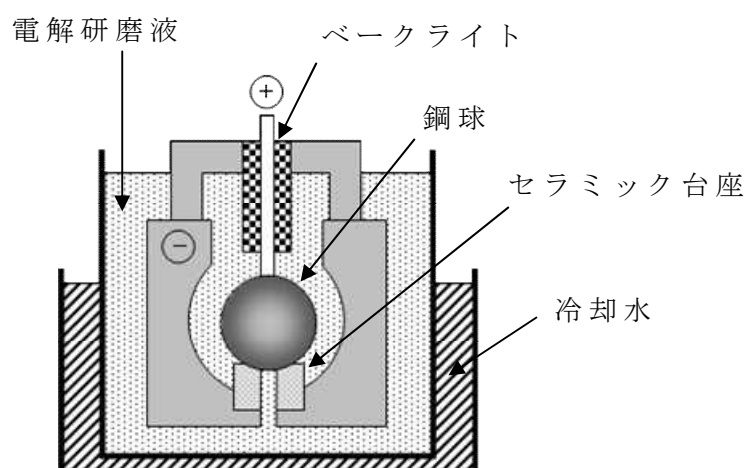


図 4-3 電解研磨装置の概略図

前述の手法により、鋼球内部の任意の深さについて残留応力を測定することが出来るが、電解研磨で鋼球表面を除去した後に再分布した接線方向の残留応力（以降、 $\sigma_t$ と称す）を測定することとなるため、式(1)および式(2)を用いて補正を行なった<sup>34)</sup>。

式(1)により半径方向の残留応力（以降、 $\sigma_r$ と称す）を算出し、式(2)により再分布する前の接線方向の残留応力（以降、 $\sigma_t'$ と称す）を算出した。

なお、ここで、 $r_0$  は鋼球の中心から任意の深さ（測定箇所）までの距離、 $a$  は鋼球の中心から完成球表面までの距離（本報では鋼球の半径 4.7625mm）である。

$$\sigma_r = \frac{2}{r_0} \int_{r_0}^a \sigma_t dr \quad (1)$$

$$\sigma_t' = \sigma_t + \frac{2}{r_0} \int_{r_0}^a \sigma_t dr \quad (2)$$

### 4-3 試験結果

#### 4-3-1 試験鋼球の X 線回折測定結果

表 4-1 に示した各試験鋼球の  $\sigma_t'$  分布,  $\sigma_r$  分布, および半価幅 (*FWHM*: Full Width at Half Maximum) 分布の測定結果を, 図 4-4, 図 4-5, および図 4-6 にそれぞれ示す.

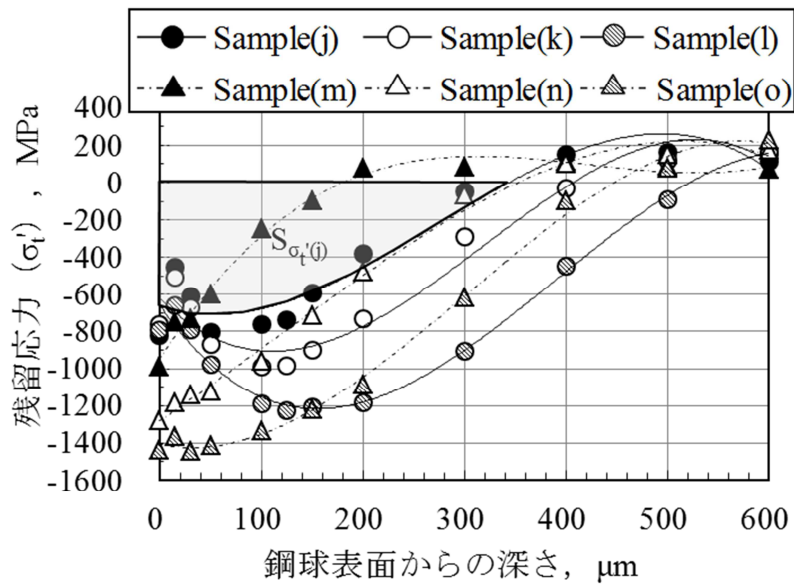


図 4-4 Sample(j)~(o)の残留応力 ( $\sigma_t'$ ) 分布

図 4-4 を見ると, Sample(j)~(o)は同一の熱処理条件の下, 様々な残留応力の値 (大きさ) と分布状態に調整することが出来た.

Sample(j)~(o)のドラム回転数は 60rpm に統一し, インペラ回転数および処理時間を種々変更することで, ピーニング処理時に形成される  $\sigma_t'$  の値 (大きさ)

を Sample(j), (m) < Sample(k), (n) < Sample(l), (o) の順に大きくなるように調整できた。また, Sample(j) と (m), Sample(k) と (n), および Sample(l) と (o) はそれぞれ同一のピーニング処理条件であるが, ピーニング処理前後の研磨量を変更することで  $\sigma_t'$  のピーク位置を, Sample(j), (k), (l) に対して Sample(m), (n), (o) の方が完成時の試験鋼球の表面に近い位置になるように調整できた。

図 4-4 の図中に示した  $S\sigma_t'(j)$  は, Sample(j) に対する  $S\sigma$  であり, Sample(j) の  $\sigma_t'$  分布の近似曲線と残留応力  $\sigma_t'=0$  (ゼロ) の縦軸が囲む面積とし,  $\sigma_t'$  が付加された領域を示している。なお, 各試験鋼球の  $S\sigma_t'$  は  $S\sigma_t'(j)$  との比とする。

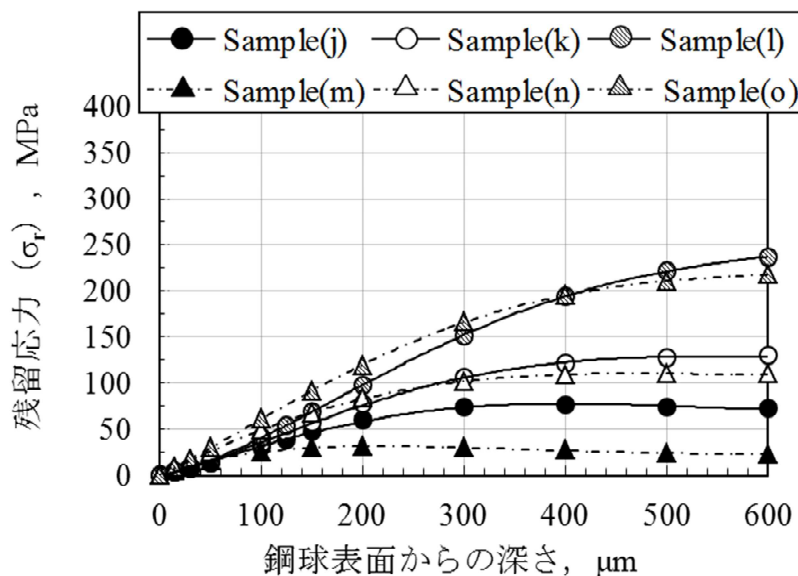


図 4-5 Sample(j)~(o)の残留応力 ( $\sigma_r$ ) 分布

図 4-5 を見ると, Sample(j)~(o) は様々な  $\sigma_r$  分布を持っているが, 4-2-2 項に示した式(1)のとおり  $\sigma_r$  は  $\sigma_t$  の積分に依存するため,  $S\sigma_t'$  が大きいほど鋼球内部の  $\sigma_r$  が引張側へ大きくなるものであり,  $\sigma_t'$  と同様に Sample(j), (m) < Sample(k), (n) < Sample(l), (o) の順に  $\sigma_r$  が大きくなっていった。

$\sigma_t'$  と  $\sigma_r$  は 4-2-2 項に示した関係にあり,  $\sigma_r$  も鋼球の転がり疲労寿命に影響を及ぼすと考えられるが, 本章では  $\sigma_t'$  に着目し間接的に  $\sigma_r$  の影響を考察とした。尚,  $\sigma_r$  が鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす影響については, 第 5 章で詳細に考察する。

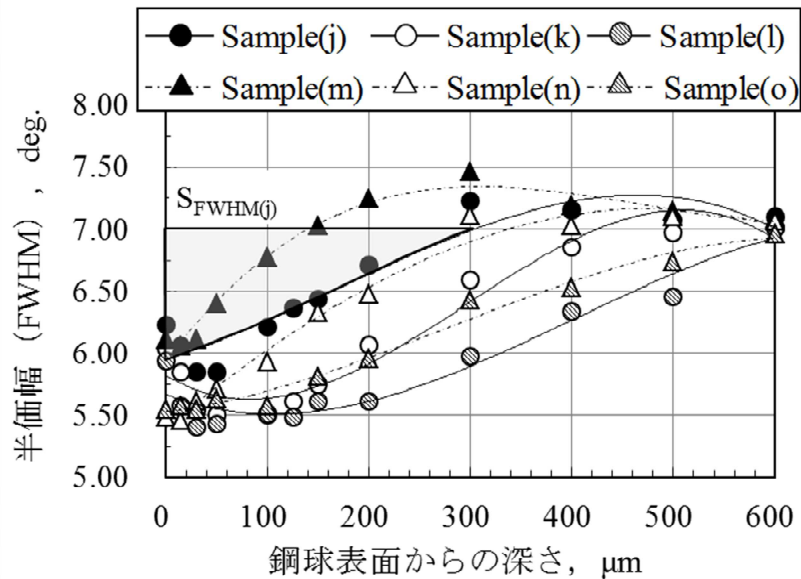


図 4-6 Sample(j)～(o)の半価幅 ( $FWHM$ ) 分布

Sample(j)～(o)は第 3 章の Sample(e)と同じ熱処理条件（焼入温度 1133K，焼戻温度 433K）で処理され，熱処理工程以降に様々な条件でピーニング処理を施された．つまり，Sample(j)～(o)のピーニング処理前の半価幅は，第 3 章の図 3-7 における Sample(e)と等しく，おおよそ 7.5deg. であった．

図 4-6 を見ると，Sample(j)～(o)のいずれも  $S\sigma_t'$ に等しい領域で Sample(e)よりも半価幅が低くなっていた．ピーニング処理時に鋼球同士が衝突すると，鋼球内部には  $\sigma_t'$ が形成されたが，同時に半価幅が下がっていることが分かった．なお，図 4-6 の図中に示した  $S_{FWHM(j)}$ は，Sample(j)に対する  $S_{FWHM}$ であり，Sample(j)の半価幅分布の近似曲線と半価幅=7.00deg. の縦軸が囲む面積とし，ピーニング処理による半価幅の減少領域を示している．なお，各試験鋼球の  $S_{FWHM}$  は  $S_{FWHM(j)}$ との比とする．

#### 4-3-2 残留応力と硬さおよび圧碎値の関係

Sample(j)～(o)の HRC 硬さおよび HV 硬さを図 4-7 および図 4-8 にそれぞれ示す．また，Sample(j)～(o)の圧碎値 (3-3-1 項参照)を図 4-9 に示す．なお，Sample(j)～(o)と同一熱処理条件である第 3 章の Sample(e)を図 4-7～4-9 にそれぞれ示す．

図 4-7 を見ると，Sample(j)～(o)のいずれも同一熱処理条件である Sample(e)



に比べ、ピーニング処理による  $\sigma_t'$  の形成に伴い HRC 硬さが高くなっていったが、 $\sigma_t'$  のピーク位置を鋼球内部に調整した Sample(j)~(l)の方が、 $\sigma_t'$  のピーク位置を鋼球表面に近い位置に調整した Sample(m)~(o)よりも高くなっていった。

一方、図 4-8 を見ると、図 4-7 と同様に Sample(j)~(o)のいずれも HV 硬さの上昇が確認されたが、 $\sigma_t'$  のピーク位置を鋼球内部に調整した Sample(j)~(l)の方が、 $\sigma_t'$  のピーク位置を鋼球表面に近い位置に調整した Sample(m)~(o)よりも低くなっており、HRC 硬さとは異なる結果を示した。

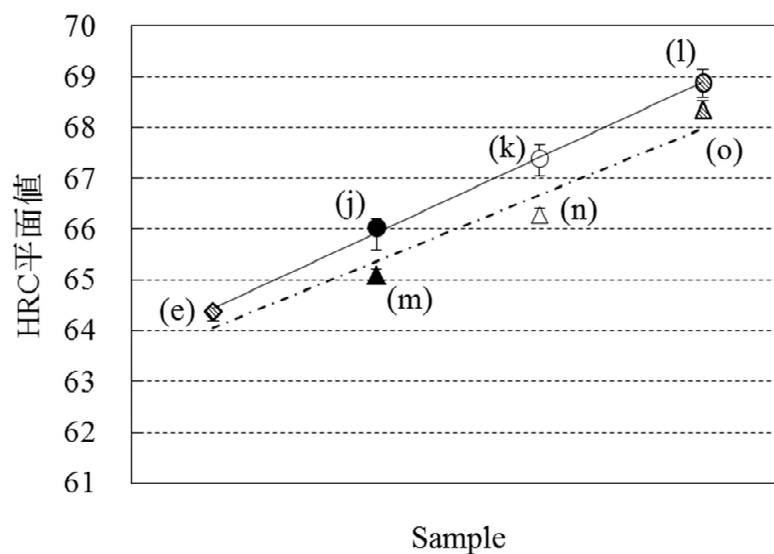


図 4-7 Sample(j)~(o)の HRC 硬さ

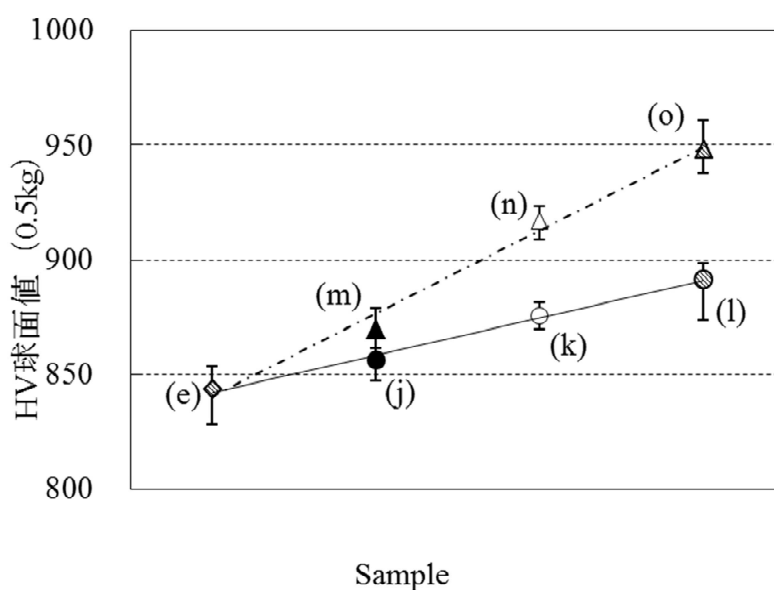


図 4-8 Sample(j)~(o)の HV 硬さ (測定荷重 0.5kg)

Sample(j)～(l)は Sample(m)～(o)に対し、HRC 硬さは高いが、逆に HV 硬さは低いという逆転の結果であったが、図 4-4 を見ると、Sample(m)～(o)は  $\sigma_t'$  のピーク位置が鋼球表面付近に調整されており、測定荷重が低い HV 硬さは鋼球表面付近の  $\sigma_t'$  の影響を受けていた。一方、Sample(j)～(l)は  $\sigma_t'$  のピーク位置が鋼球内部に調整されており、測定荷重が高い HRC 硬さは鋼球内部の  $\sigma_t'$  の影響を受けていた。

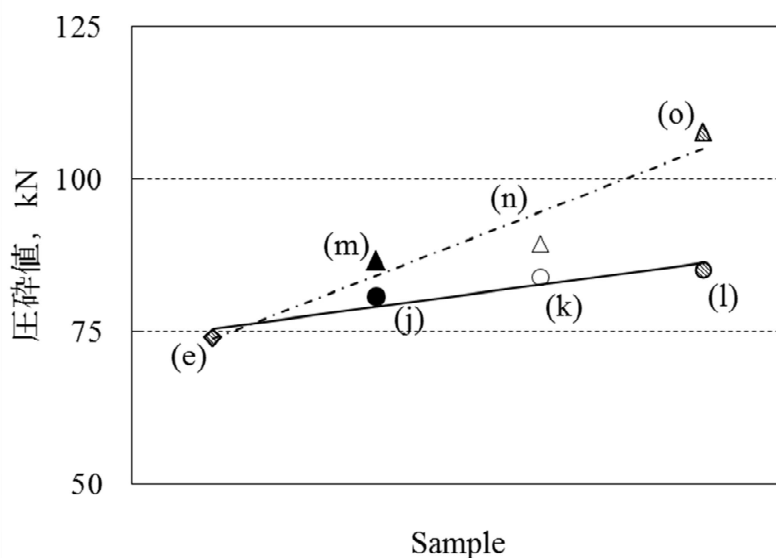


図 4-9 Sample(j)～(o)の圧砕値

図 4-9 を見ると、Sample(j)～(o)の圧砕値は同一熱処理条件でピーニング処理を施していない Sample(e)よりも高くなっていた。鋼球の圧砕試験においては、第 2 章の図 2-3 に示した概略で鋼球に荷重が掛かり、鋼球は塑性変形し最終的に 2 球の接触部である鋼球表面を起点として圧砕に至る。Sample(j)～(o)は、鋼球表層部にピーニング処理による  $\sigma_t'$  が形成されており、鋼球が圧砕に至るのを  $\sigma_t'$  が抑制したため Sample(e)よりも圧砕値が高くなったと考察した。特に Sample(o)は鋼球表面から深さ 100 $\mu\text{m}$  にわたり、 $\sigma_t'$  は -1400MPa と他の Sample よりも圧縮側に高く、圧砕値も最も高い値を示した。

### 4-3-3 試験鋼球の転がり疲労寿命試験結果

表 4-1 に示した試験鋼球 Sample(j)～(o)の転がり疲労寿命試験を，3-2-2 項に示した変動荷重試験機を用いて評価した．図 4-10 に，転がり疲労寿命試験結果（ワイブル分布図）を示す．内外輪がはく離した場合の処置や，打切り時間は 3-3-2 項と同じとした．

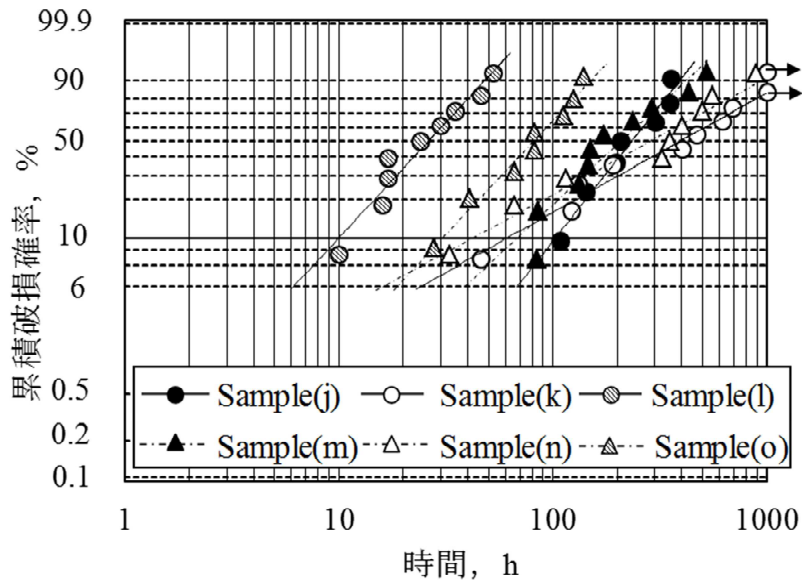


図 4-10 Sample(j)～(o)の転がり疲労寿命試験結果

図 4-10 を見ると，高 cleanliness な素材および同一熱処理条件であっても，ピーニング処理で形成される  $\sigma_t'$  の分布状態により，鋼球の寿命特性が大きく変わった．特に鋼球内部に最も過大な  $\sigma_t'$  を形成させた Sample(l) が極端に短寿命な結果となった．

### 4-4 考察

図 4-10 の  $L_{10}$  寿命を図 4-11 にまとめた．図 4-11 の横軸は 4-3-1 項に示した各試験鋼球の  $S\sigma_t'$  ( $\sigma_t'$  の付加領域) である．

図 4-11 を見ると， $\sigma_t'$  の極大値を Sample(j)～(l) は鋼球内部に，Sample(m)～(o) は鋼球表面付近に調整したが，ピーニング処理による  $S\sigma_t'$  ( $\sigma_t'$  の付加領域) が大きいほど，各試験鋼球の転がり疲労寿命は短くなる傾向にあった．また，

Sample(j)～(o)は同一素材，同一熱処理条件にもかかわらず，Sample(l)が最も短寿命という結果が示すとおり，試験鋼球内部に $\sigma_t'$ の極大値がある場合の方がより寿命が低下する結果であった。

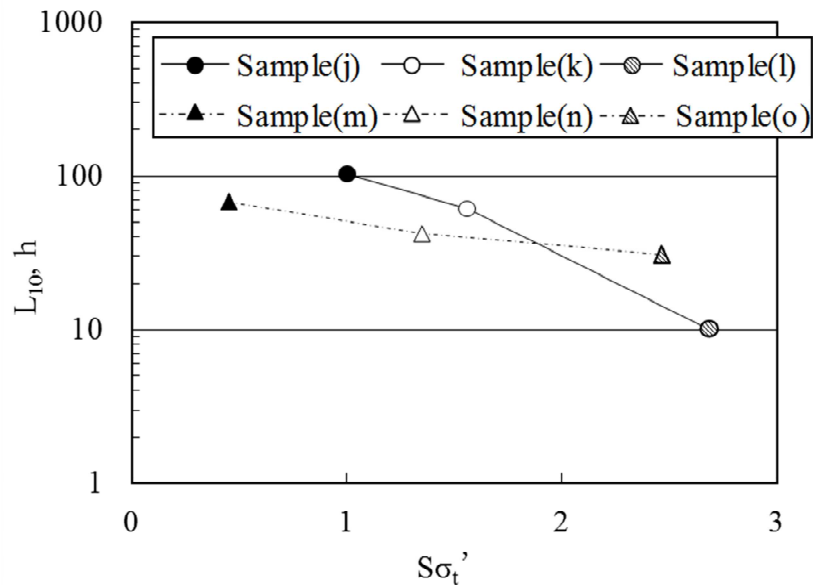


図 4-11 Sample(j)～(o)の  $L_{10}$  寿命と  $S\sigma_t'$  の関係

図 4-12 に Sample(j)～(o)の  $S_{FWHM}$  (4-3-1 項 図 4-6 参照) と  $S\sigma_t'$  (4-3-1 項 図 4-4 参照) の関係を示す。

図 4-12 を見ると， $\sigma_t'$  の付加領域  $S\sigma_t'$  と半価幅の減少領域  $S_{FWHM}$  には正の相関が確認された。転がり疲労により半価幅が下がるという特性は良く知られている<sup>30)</sup> が，ピーニング処理により鋼球内部に  $\sigma_t'$  が形成されると同時に半価幅も下がることで，結果的に鋼球が転がり疲労を受けることと等価な状態になっていた。

図 4-11 において，最も短寿命であった Sample(l)については，図 4-12 において  $S\sigma_t'$  と  $S_{FWHM}$  が最も大きな値を示しており，試験鋼球として完成した時点（転がり疲労を受ける前）で，既に最も転がり疲労を受けた状態と等価であった。

また，第 3 章の図 3-13 では Sample(j)～(o)と素材および熱処理条件が同一でピーニング処理を施していない Sample(e)の  $L_{10}$  寿命がおおよそ 180 時間であるのに対し，図 4-11 における Sample(j)～(o)の  $L_{10}$  寿命はいずれも 180 時間以下であることから，ピーニング処理による  $\sigma_t'$  の形成は鋼球の転がり疲労寿命を短

くする影響が主であると考察した。

そして、 $S\sigma_i'$ と  $S_{FWHM}$  はピーニング処理前後の研磨量によって変化するため、2-4-2 項に示した圧痕の抑制を主とするピーニング処理の目的を達成し、かつ鋼球の転がり疲労寿命への影響を考慮すると、Sample(m)~(o)のような残留応力分布状態の方が適していると考察した。

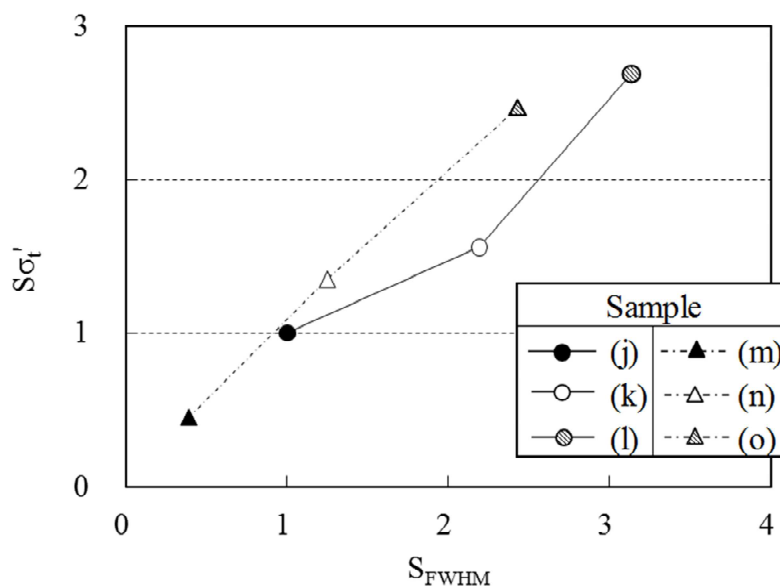


図 4-12 Sample(j)~(o)の  $S_{FWHM}$  と  $S\sigma_i'$  の関係

#### 4-5 結言

高纯净度な同一素材を用いて、鋼球の転がり疲労寿命にとって最適な熱処理条件で処理した後、鋼球の製造上必要不可欠なピーニング処理の条件を種々変更し、様々な接線方向の圧縮残留応力の水準ならびに分布状態を持たせて試験鋼球を試作した。それらの試験鋼球の転がり疲労寿命試験を実施し、ピーニングによる接線方向の圧縮残留応力の形成が鋼球の転がり疲労寿命に及ぼす影響について清浄環境下で検証した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 鋼球の転がり疲労寿命は接線方向の圧縮残留応力の付加領域の大きさに影響され、その領域が大きいほど半価幅が下がり、転がり疲労寿命は短い傾向にあった。

なお，本章では鋼球内部の半径方向の引張残留応力の状態を定量的に反映していない．しかし，鋼球表面近傍の接線方向の圧縮残留応力と釣り合うように，鋼球内部では半径方向の引張残留応力が発生しており，鋼球表面近傍の接線方向の圧縮残留応力が大きければ鋼球内部の半径方向の引張残留応力が大きいと考えられる．鋼球内部のはく離損傷にはこの半径方向の引張残留応力の影響を無視できないが，本章では，鋼球表面近傍の接線方向の圧縮残留応力が転がり疲労寿命に与える影響を見ることで，間接的に鋼球内部の半径方向の引張残留応力の影響を考慮している．

次章にて，鋼球破損形態や転がり疲労過程中の残留応力変化を詳細に観察し，半径方向の引張残留応力の影響についても検討する．

## 第 5 章 鋼球の転がり寿命過程における経時変化観察

### 5-1 緒言

前章までに、様々な熱処理特性および残留応力分布を与えた鋼球の転がり疲労寿命を変動荷重試験機で評価し、最適な熱処理条件に対する指針、また、転がり疲労を受ける前（以降、初期と称す）にピーニング処理によって形成された鋼球内部の圧縮残留応力（接線方向）付加領域が大きいほど短寿命であることを明らかにした。

圧縮残留応力（接線方向）が疲労寿命に対して有効とされる事例もあるが、例えば、表面に圧縮残留応力（接線方向）を付加した丸棒の曲げ疲労試験において、丸棒の表面を起点にき裂が発生し、半径方向にき裂が進展した後に破断に至るような事例である<sup>35)</sup>。この事例では、圧縮残留応力（接線方向）が、曲げ疲労による丸棒表面の引張応力（接線方向）に対し、起点の発生およびき裂の進展を抑止する方向に作用していると考えられる。

しかし、清浄な潤滑条件下における鋼球の疲労破損形態は起点が内部であり、き裂も鋼球の接線方向と概ね平行に進展していくため、鋼球の転がり疲労過程において、初期の圧縮残留応力（接線方向）は違った作用になると考えられた。

実際、本章 5-3-4 項に示す通り、様々な残留応力分布を持たせた鋼球のはく離起点深さ（おおよそ 0.5~1.0mm）は、初期の圧縮残留応力（接線方向）付加領域（深いものでも 0.5mm 以下）、および変動荷重試験条件による最大せん断応力が最大となる位置（0.24mm,  $Z_{st}$ ）よりも深く、初期の圧縮残留応力（接線方向）は鋼球のはく離起点に直接影響を及ぼしていなかった。そのため、鋼球の接線方向だけではなく、半径方向の残留応力についても、鋼球の転がり疲労寿命へ及ぼす影響を検証する必要があると考えた。

そこで本章では、様々な残留応力分布を持たせた鋼球の変動荷重試験条件下における経時的な変化について、X 線回折測定を用いて詳細に観察し、鋼球がはく離に至るまでの過程を考察した。

## 5-2 試験方法

### 5-2-1 転がり寿命過程の経時変化観察

転がり寿命試験過程の経時変化を観察する供試体，および転がり疲労寿命試験機には，第4章に示した様々な残留応力分布，半価幅分布，残留 $\gamma$ 量分布を持つ6種類の鋼球 Sample(j)～(o)，および3-2-2項に示した変動荷重試験機を用いた。

Sample(j)～(o)は表4-1に示した通り，焼入温度1133K，焼戻温度433Kの同一熱処理条件で処理された熱処理完了球を，様々なピーニング条件で処理し，完成球に仕上げた。そのため，Sample(j)～(o)はピーニング処理前の熱処理特性（半価幅分布および残留 $\gamma$ 量分布）は同等であったが，熱処理後に様々な条件でピーニング処理を実施されたため，様々な残留応力分布が形成され，残留応力形成に伴い半価幅および残留 $\gamma$ 量が減少し，結果的に様々な残留応力分布，半価幅分布，残留 $\gamma$ 量分布を持つ供試体となった。ピーニング処理時の残留応力形成に伴い，半価幅と残留 $\gamma$ 量が減少したのはひずみ誘起変態によるものである。

表 5-1 転がり寿命過程の経時変化観察試料明細

Sample	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)
試験時間, h	0 (初期)					
	5					
	—		20	—		
	50		—	50		
	358	1000	53	523	887	140

表5-1に転がり寿命過程の経時変化観察試料の明細を示す。初期（試験前）の各分布状態からの経時変化を観察するために，転がり疲労寿命試験開始後5時間（5h），20時間もしくは50時間（20 or 50h）で途中停止し，X線回折測定を行なった。X線回折測定の諸条件は4-2-2項に示した通りである。また，Sample(j)～(o)のワイブル分布図（図4-10）において最も寿命時間が長かった軸



受に組み込まれていた鋼球のうち、未はく離の鋼球もそれぞれ X 線回折測定を行なった。なお、Sample(1)に関しては最も寿命時間が長かった軸受が 53 時間であったため、転がり疲労寿命試験開始後 50 時間ではなく 20 時間を設定した。

### 5-2-2 転がり寿命試験における鋼球はく離起点深さ

Sample(j)～(o)について、転がり疲労寿命試験における鋼球のはく離起点深さを測定した。図 5-1 に代表的な鋼球のはく離断面プロファイルを示す。図 5-1 における実線は接触式の形状測定器で実際に鋼球のはく離断面プロファイルを測定した結果である。図 5-1 を見ると、鋼球円周の約 1/4 程度にまで至る比較的大きなはく離が生じており、はく離起点が鋼球の内部で、き裂は鋼球接線方向と概ね平行に進展している様子が観察された。

なお、転がり疲労寿命試験における鋼球はく離外観は、図 3-10 に示した Sample(e)のような外観が典型的であり、様相が魚の目玉にも似ていることからフィッシュアイの通称を持つ。目玉の中心がはく離の起点であり、その起点を中心に転がり疲労によるき裂の伝播が同心円状に確認され、このき裂の伝播もビーチマークの通称を持つ。

転がり疲労寿命試験におけるはく離起点深さの測定は、図 5-1 の白矢印部を分解能 1/1000mm のマイクロメーターで挟み込むようにして測定した。

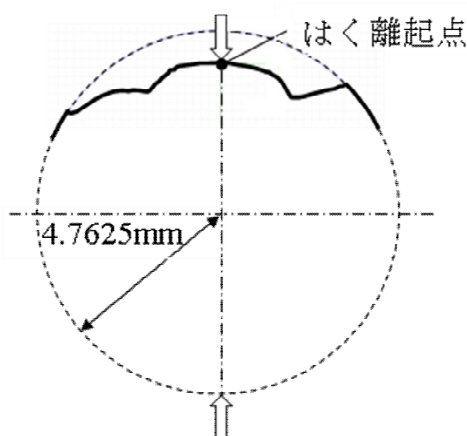


図 5-1 転がり疲労寿命試験における鋼球はく離断面プロファイル

## 5-3 試験結果

### 5-3-1 転がり寿命過程における残留応力の変化

図 5-2～5-13 に、Sample(j)～(o)の転がり寿命過程における内部残留応力変化をそれぞれ示す。図 5-2～5-7 は  $\sigma_t'$  の変化を示し、図 5-8～5-13 は  $\sigma_r$  の変化をそれぞれ示している。

図 5-2～5-7 の  $\sigma_t'$  の変化を見ると、初期には様々な  $\sigma_t'$  を有する Sample(j)～(o) であったが、いずれも転がり寿命過程において  $\sigma_t'$  が大きく変化していた。 $\sigma_t'$  の変化で Sample(j)～(o) に共通していたのは、転がり接触面下の最大せん断応力が最大となる位置  $Z_{st}$  ( $240\mu\text{m}$ ) と概ね一致する、鋼球表面からの深さが  $300\sim 400\mu\text{m}$  付近に、転がり接触による圧縮残留応力の極大値が形成され、逆に、初期に存在した圧縮残留応力の極大値は引張側へ緩和されるという変化であった。そして、図 5-3 に示した Sample(k) の試験最長品 (1000 hours) と、図 5-4 に示した Sample(l) の試験最長品 (53 hours) について  $\sigma_t'$  を比較すると、転がり寿命過程において深さ  $300\sim 400\mu\text{m}$  付近に形成された転がり接触による圧縮残留応力の極大値はいずれの場合も同程度の約  $-600\text{MPa}$  であり、転がり寿命試験時間による差は認められず、転がり寿命過程中の  $\sigma_t'$  の変化は比較的早い段階で飽和していた。

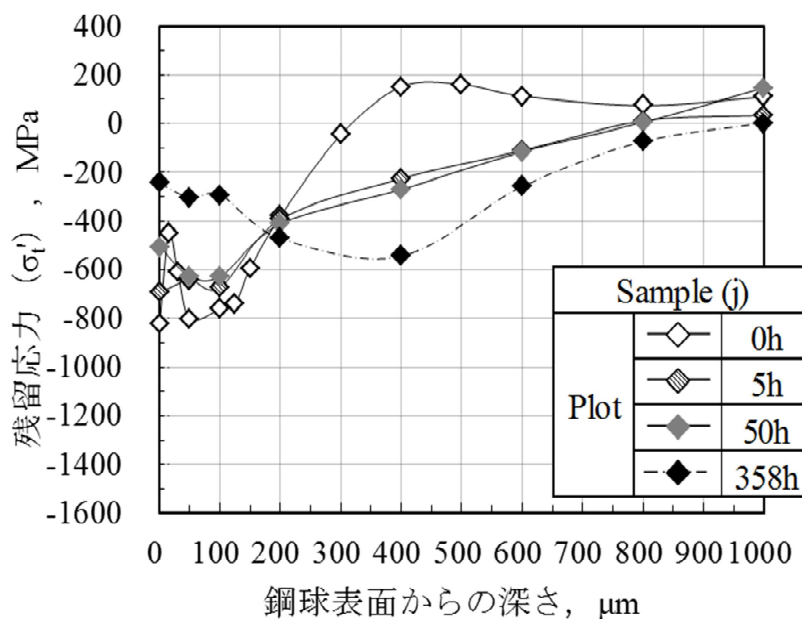


図 5-2 Sample(j) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_t'$ ) の変化

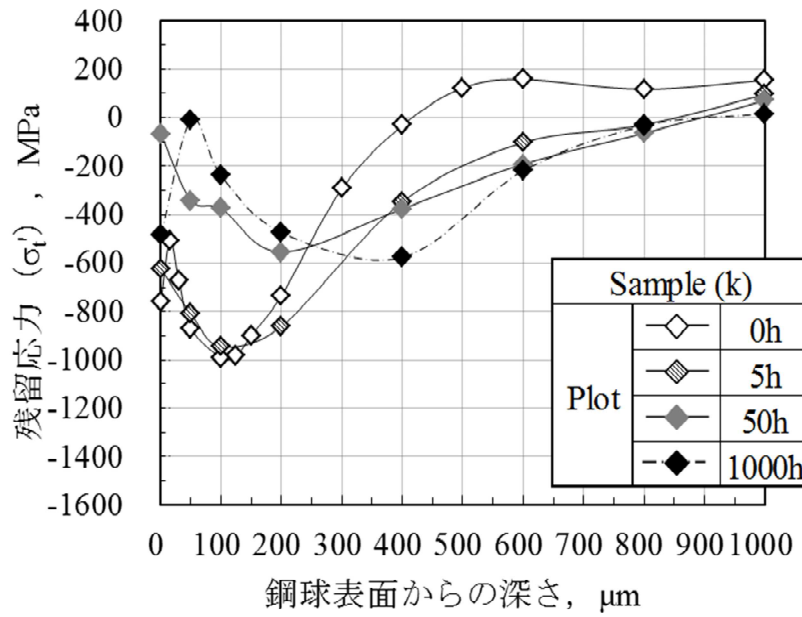


図 5-3 Sample(k) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r$ ) の変化

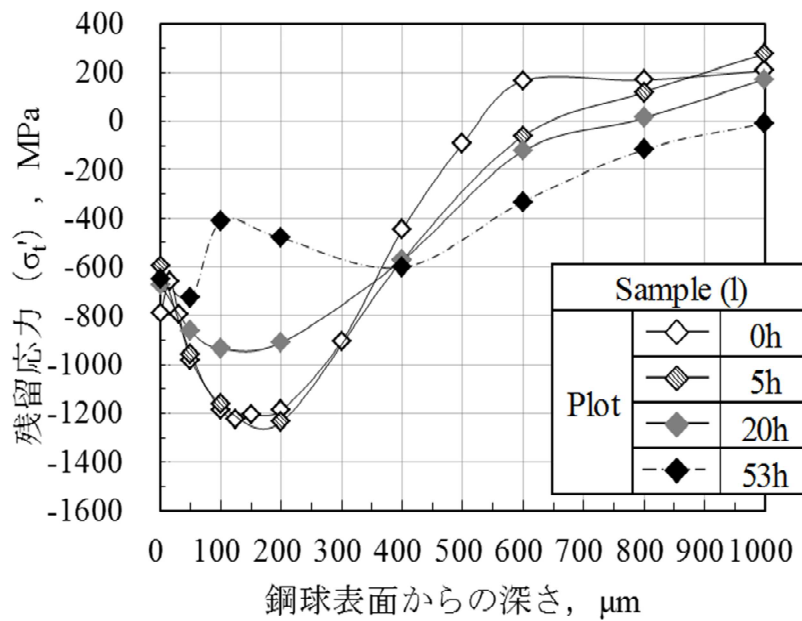


図 5-4 Sample(l) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r$ ) の変化

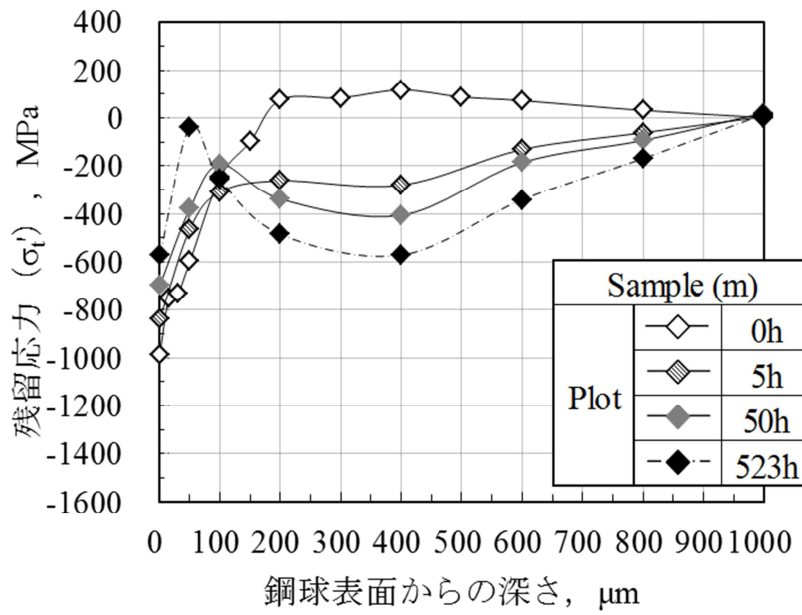


図 5-5 Sample(m) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r'$ ) の変化

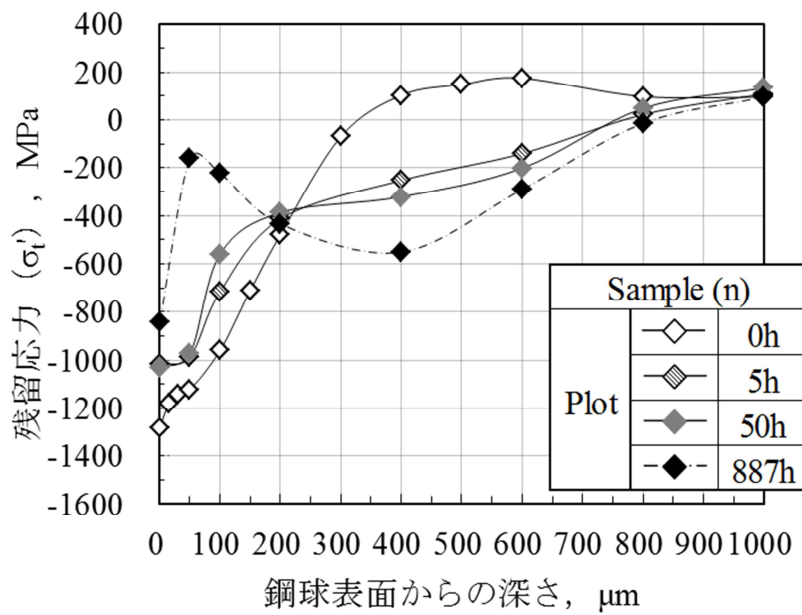


図 5-6 Sample(n) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r'$ ) の変化

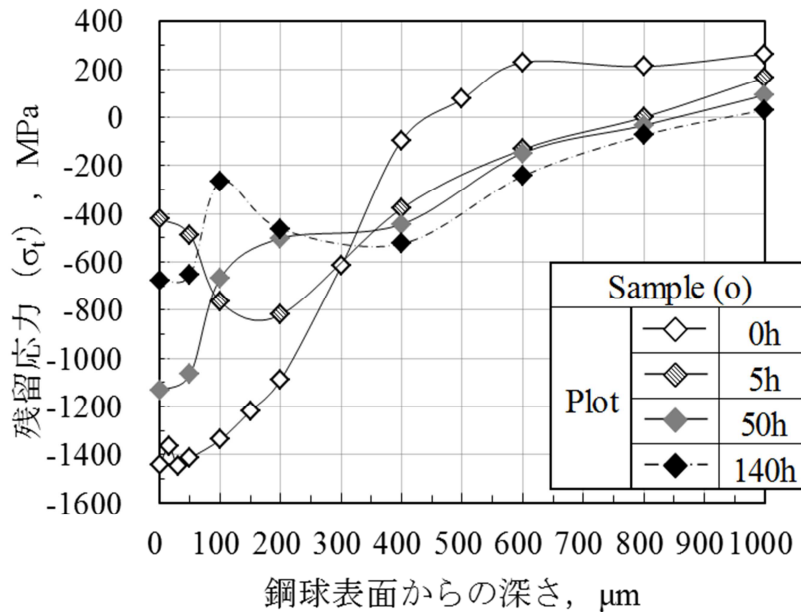


図 5-7 Sample(o) 転がり寿命過程における残留応力 (σ<sub>t</sub>') の変化

一方，図 5-8～5-13 の  $\sigma_r$  の変化を見ると，図 5-2～5-7 の  $\sigma_t'$  と同様に転がり寿命過程において大きく変化していた。転がり接触による  $\sigma_t'$  の形成と，初期（試験前）に存在した  $\sigma_t'$  の引張側への緩和により， $\sigma_r$  の変化は複雑であったが，特に着目したのは，初期（試験前）には  $\sigma_r$  が鋼球内部にわたり全体的に低かった Sample(j)，(m)でも，図 5-8，5-11 のように転がり寿命過程に深い位置で  $\sigma_r$  が増大した変化であった。

以下に，図 5-8～5-13 の  $\sigma_r$  の変化を，図 5-2～5-7 の  $\sigma_t'$  の変化と合わせて，それぞれ詳細に考察する。

Sample(j)，(m) の初期（試験前）の  $\sigma_r$  を Sample(k)，(l)，(n)，(o) と比較すると，表面から深さ 1000 $\mu\text{m}$  にわたり +100MPa 以下と全体的に低かったが，転がり寿命過程において特に深いところで大きくなっていたのが特徴的であった。Sample(j)，(m) は Sample(k)，(l)，(n)，(o) よりもピーニング強度を抑えたため，初期（試験前）では  $\sigma_t'$  の形成領域が小さかったが，転がり寿命過程において  $Z_{st}$  付近を中心に転がり接触による  $\sigma_t'$  が形成された分だけ，特に深いところで  $\sigma_r$  が大きく変化していた。

Sample(k) および (n) は初期（試験前）の  $\sigma_t'$  の形成領域を，それぞれ Sample(j)，

(l)および Sample(m), (o)の間になるように調整したものである。Sample(k), (n)の転がり寿命過程における $\sigma_r$ の変化は、表面からの深さ1000 $\mu\text{m}$ でSample(j), (m)と同様の特徴を示しながらも、表面から深さ500~600 $\mu\text{m}$ の領域では初期(試験前)よりも $\sigma_r$ が顕著に小さくなっていた。Sample(k), (n)の表面から深さ500~600 $\mu\text{m}$ の領域において $\sigma_r$ が小さくなった変化は、転がり寿命過程において、初期(試験前)に形成されていた $\sigma_t'$ の圧縮側の極大値の深さよりも深い位置に、転がり接触による $\sigma_t'$ の圧縮側の極大値が形成されたことで、初期(試験前)に形成されていた $\sigma_t'$ の圧縮側の極大値が引張側へ緩和したためである。なお、Sample(j), (m)も表面から深さ500~600 $\mu\text{m}$ で同様の変化が生じていたが、初期(0 hours)の $\sigma_t'$ の形成領域が小さいためにSample(k), (n)のように顕著ではなかった。

Sample(l), (o)は初期(試験前)の $\sigma_t'$ の形成領域が大きくなるように調整した。このため、初期(試験前)の $\sigma_r$ はSample(j), (k), (m), (n)よりも全体的に高かった。特にSample(l)は転がり寿命過程において、 $Z_{st}$ 付近の転がり接触による $\sigma_t'$ の形成、および初期(試験前)の $\sigma_t'$ の圧縮側の極大値の緩和は、Sample(j), (k), (m)~(o)と同様に生じていたが、転がり疲労寿命試験が5hに至った時点で鋼球表面からの深さ1000 $\mu\text{m}$ における $\sigma_r$ は+300MPaを越えていた。

Sample(l)は、Sample(j)~(o)の中で最も短寿命であり、また表5-1に示したとおり、最も転がり疲労寿命試験時間が長いものでも53hであった。Sample(l)は初期(試験前)の $\sigma_t'$ の形成領域が大きく、転がり寿命過程においては比較的早い段階でSample(j), (k), (m)~(o)と同様に $Z_{st}$ 付近に転がり接触による $\sigma_t'$ が形成され、初期(試験前)の $\sigma_t'$ の圧縮側の極大値の緩和は形成領域が大きかった分だけSample(j), (k), (m)~(o)よりも小さく、結果、Sample(l)の鋼球内部には大きな $\sigma_r$ が転がり寿命過程の早い段階で発生し、転がり疲労寿命が最も短くなったと考えられる。

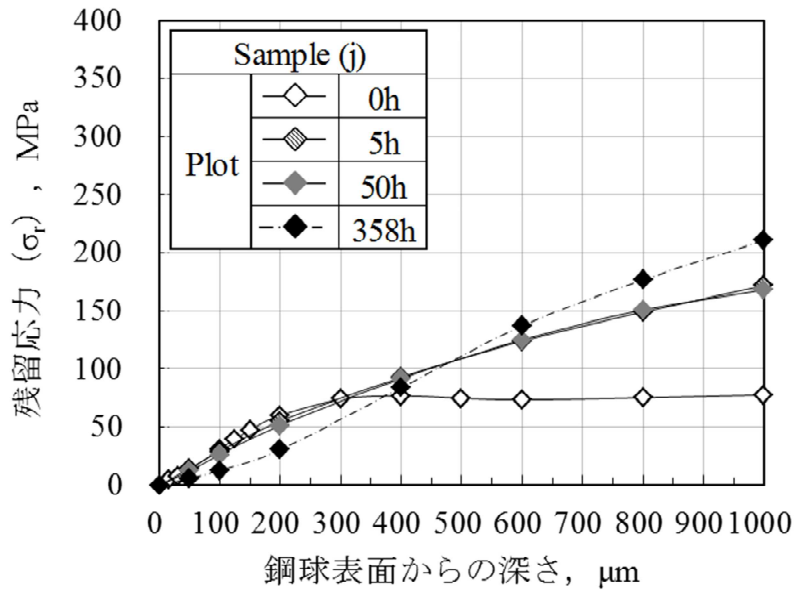


図 5-8 Sample(j) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r$ ) の変化

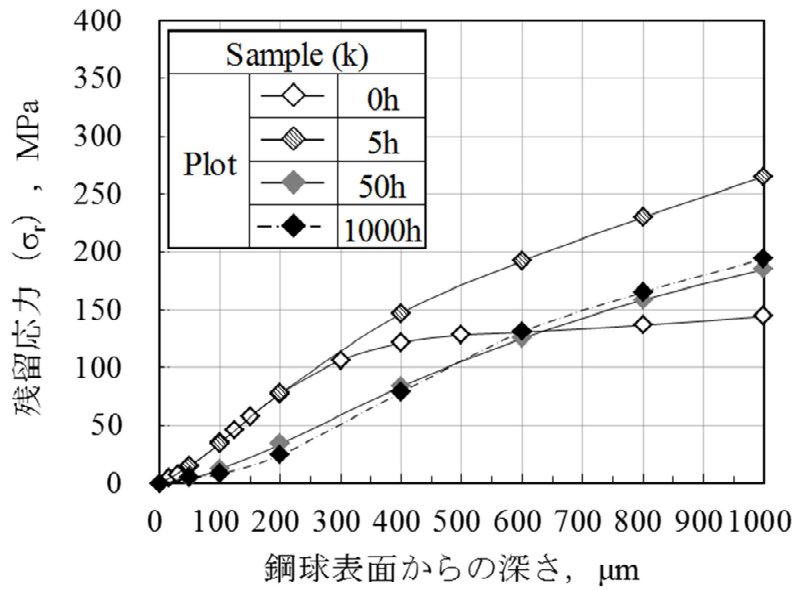


図 5-9 Sample(k) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r$ ) の変化

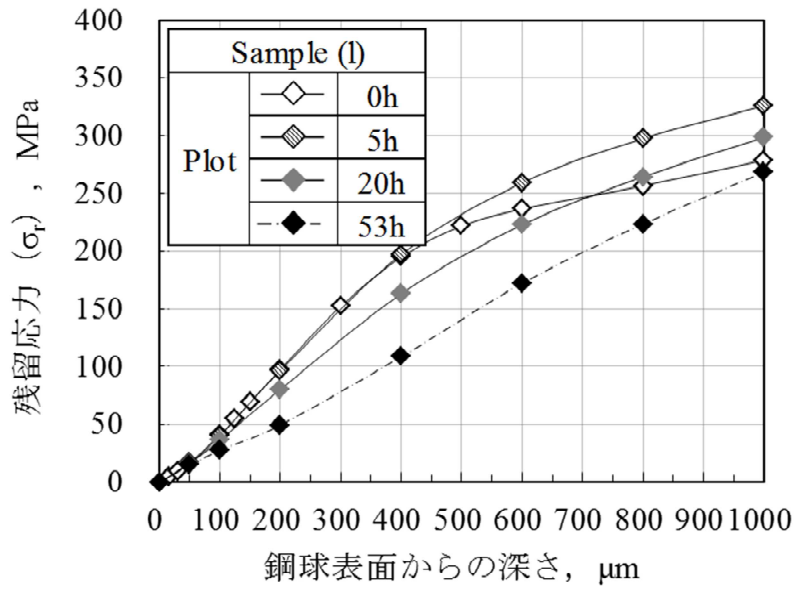


図 5-10 Sample(l) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r$ ) 変化

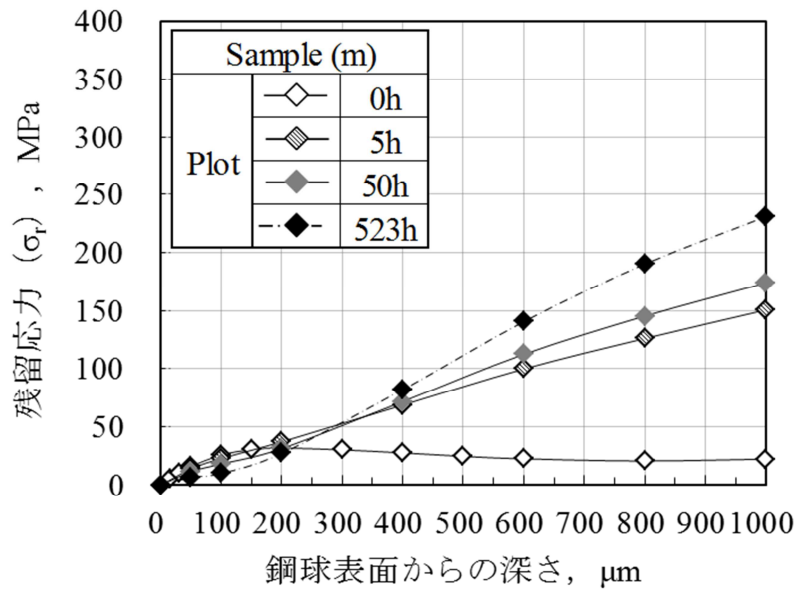


図 5-11 Sample(m) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r$ ) の変化



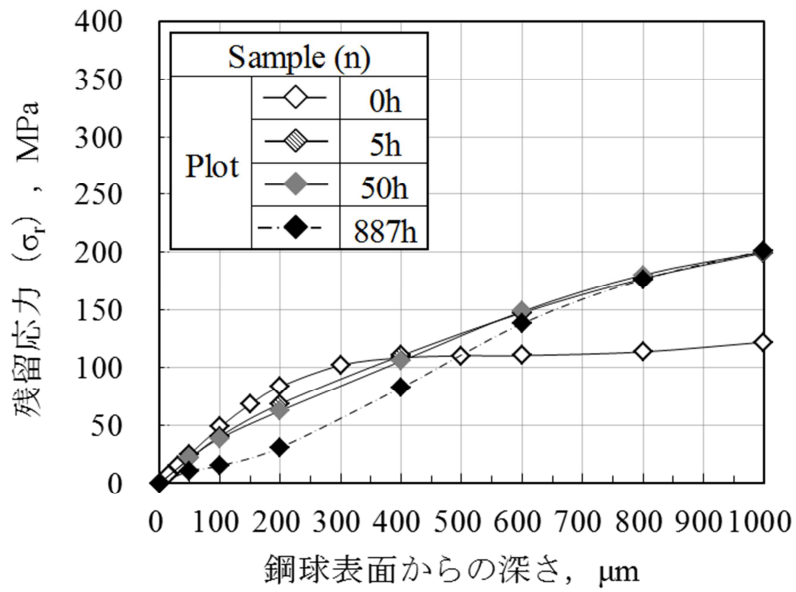


図 5-12 Sample(n) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r$ ) の変化

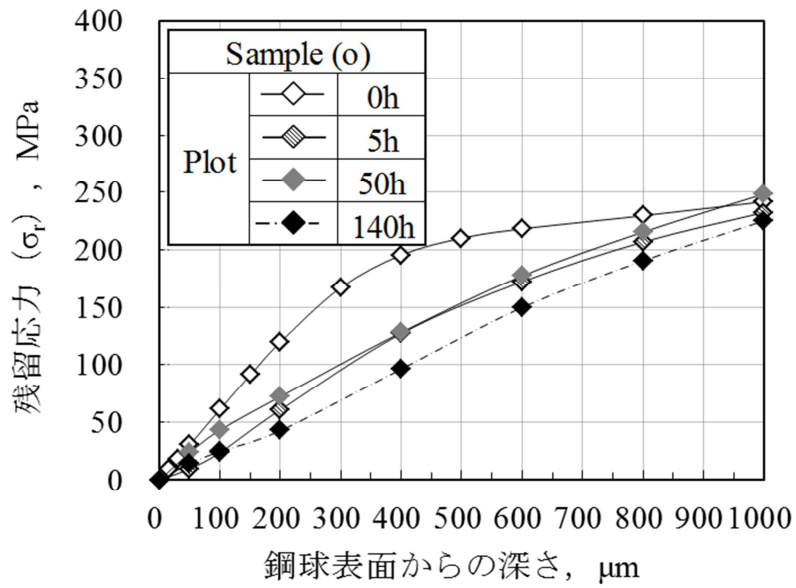


図 5-13 Sample(o) 転がり寿命過程における残留応力 ( $\sigma_r$ ) の変化

### 5-3-2 転がり寿命過程における半価幅の変化

図 5-14～5-19 に、Sample(j)～(o)の転がり寿命過程における半価幅の変化をそれぞれ示す。

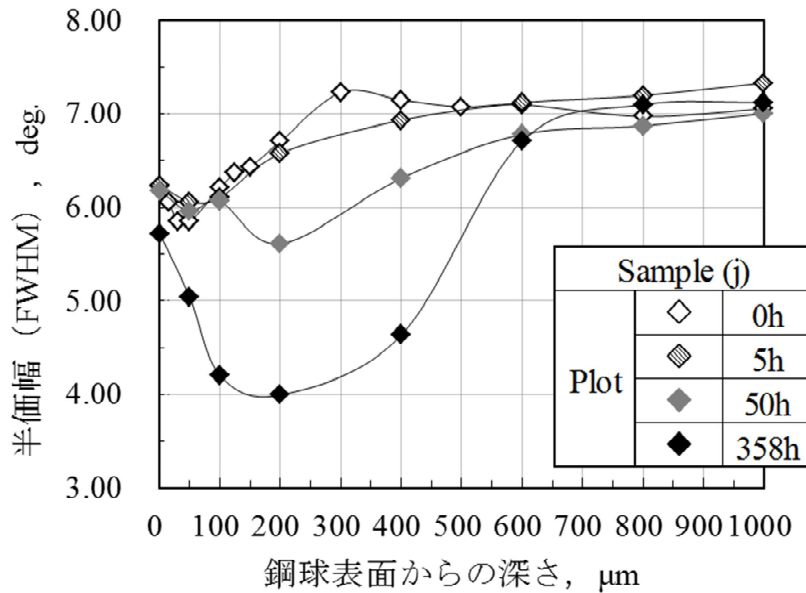


図 5-14 Sample(j) 転がり寿命過程における半価幅 (FWHM) の変化

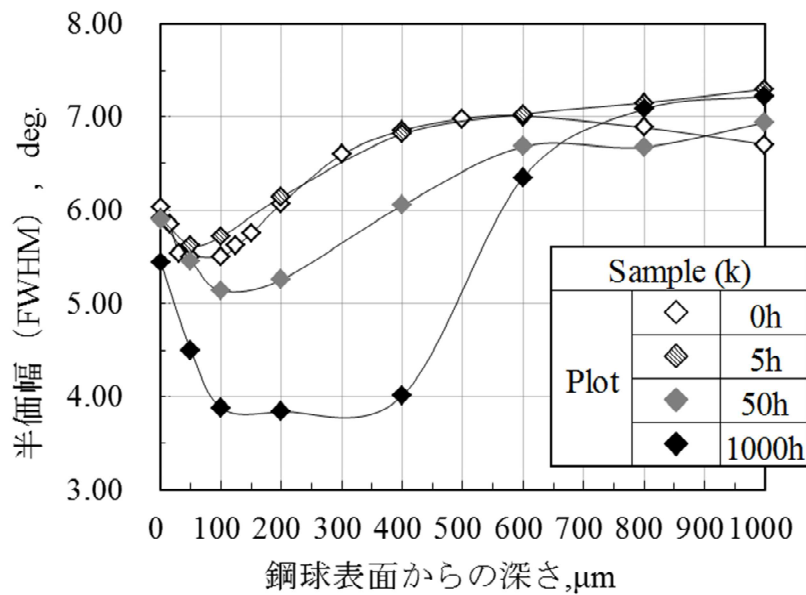


図 5-15 Sample(k) 転がり寿命過程における半価幅 (FWHM) の変化

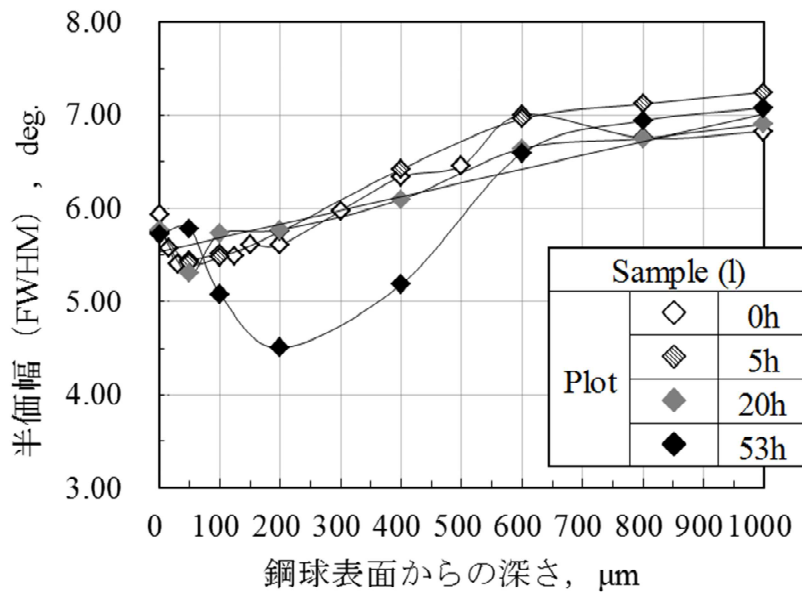


図 5-16 Sample(l) 転がり寿命過程における半価幅 (FWHM) の変化

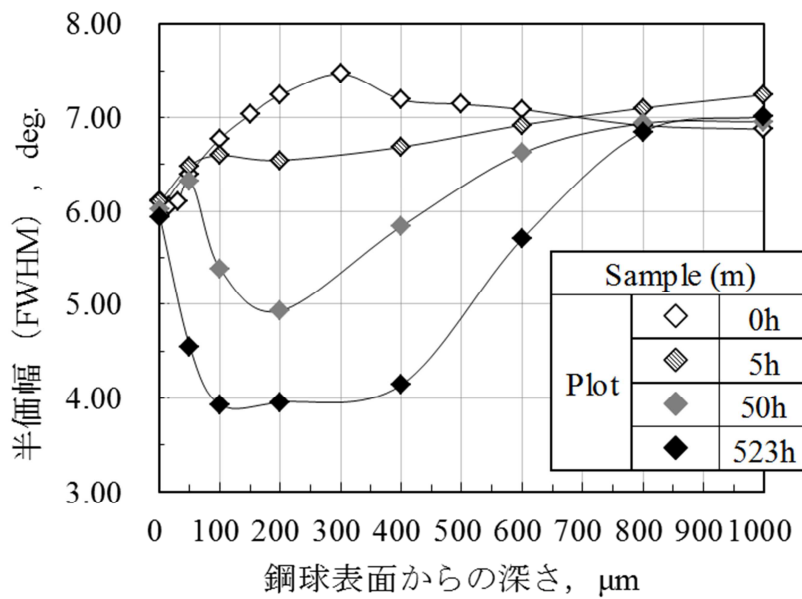


図 5-17 Sample(m) 転がり寿命過程における半価幅 (FWHM) の変化

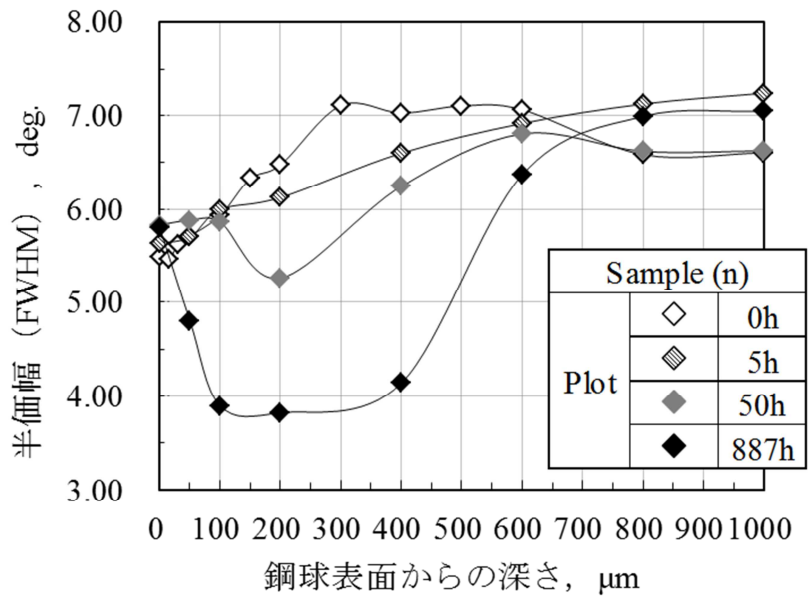


図 5-18 Sample(n) 転がり寿命過程における半価幅 (FWHM) の変化

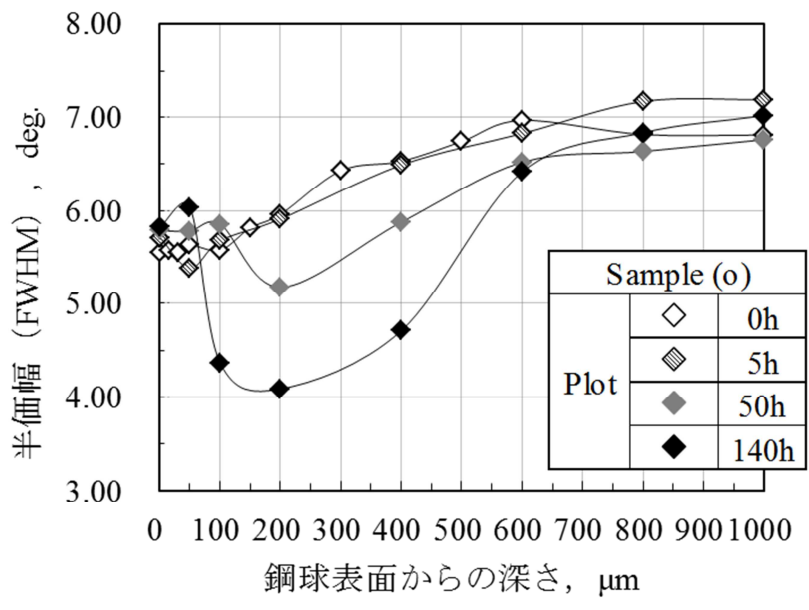


図 5-19 Sample(o) 転がり寿命過程における半価幅 (FWHM) の変化

図 5-14~5-19 を見ると、転がり寿命過程において Sample(j)~(o) の半価幅は、 $Z_{st}$  (鋼球表面からの深さ  $240\mu\text{m}$ ) の位置を中心とした鋼球表面からの深さ  $100\sim 400\mu\text{m}$  範囲で、初期 (試験前) 状態から下がっていく様子が観察された。し

かし, 半価幅が下がる変化については, 図 5-15, 5-17, 5-18 に示した Sample(k), (m), (n)の試験最長品の転がり寿命時間がそれぞれ 1000h, 523h, 887h であったのに対し, 鋼球表面からの深さ 100~400 $\mu\text{m}$  の範囲では半価幅が約 4.00deg. に下がったところで変化が止まっていた. 図 5-14 に示した Sample(j)の試験最長品の転がり寿命時間は 358h で, 鋼球表面からの深さ 200 $\mu\text{m}$  の半価幅は Sample(k), (m), (n)と同様に約 4.00deg. まで下がっていたが, 深さ 100 および 400 $\mu\text{m}$  の半価幅は約 4.00deg. まで下がっておらず変化の途中であった. 図 5-16 に示した Sample(l)の試験最長品の転がり寿命時間は 53h であったが, 鋼球表面からの深さ 100 および 400 $\mu\text{m}$  の半価幅は約 5.00deg. の水準にあった.

半価幅の減少は疲労度合いを示す<sup>30)</sup>とされているが, 上記の通り, 転がり寿命時間の経過と共に半価幅が下がることが確認された. しかし, 半価幅の減少は飽和し, また, 半価幅の減少が飽和に至らなくても鋼球ははく離に至り, 半価幅の減少のみで鋼球の転がり疲労はく離は考察出来ないことが分かった.

### 5-3-3 転がり寿命過程における残留 $\gamma$ 量の変化

図 5-20~5-25 に, Sample(j)~(o)の転がり寿命過程における残留 $\gamma$ 量の変化についてそれぞれ示す.

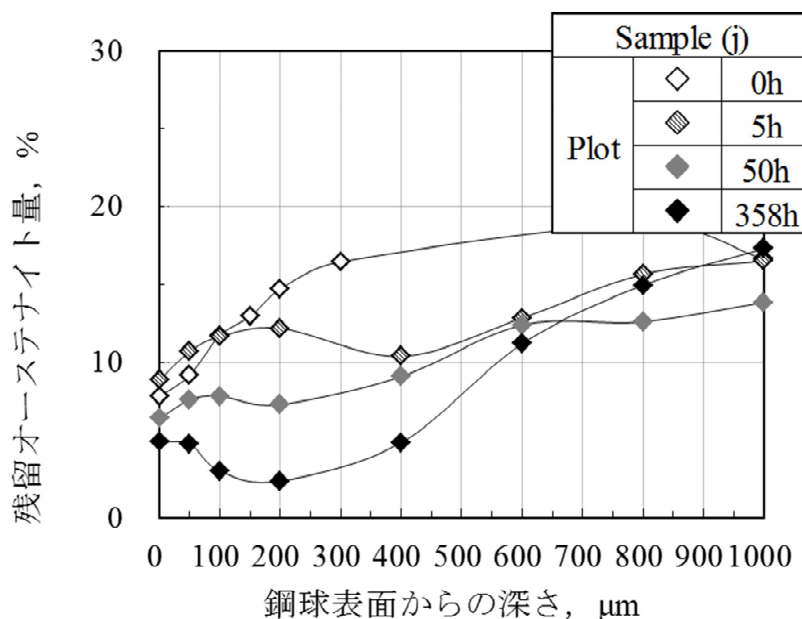


図 5-20 Sample(j) 転がり寿命過程における残留 $\gamma$ 量の変化

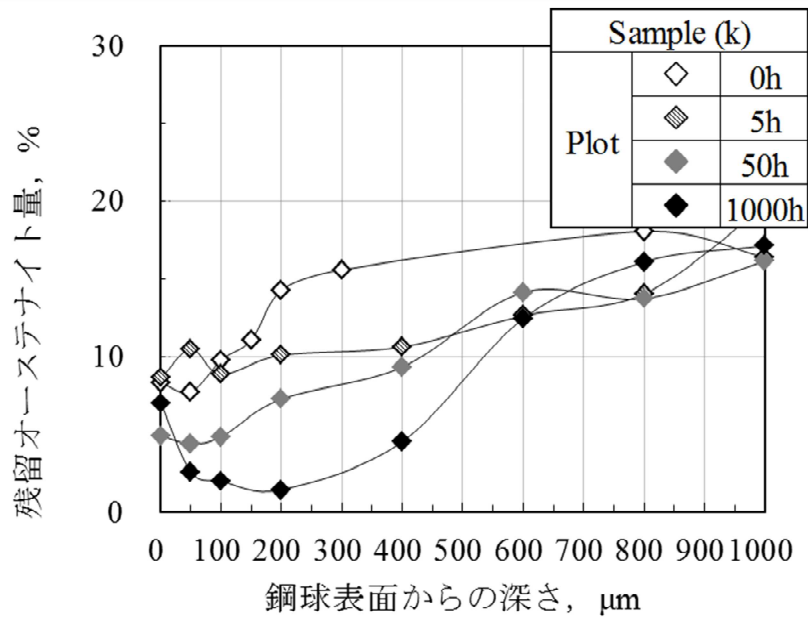


図 5-21 Sample(k) 転がり寿命過程における残留  $\gamma$  量の変化

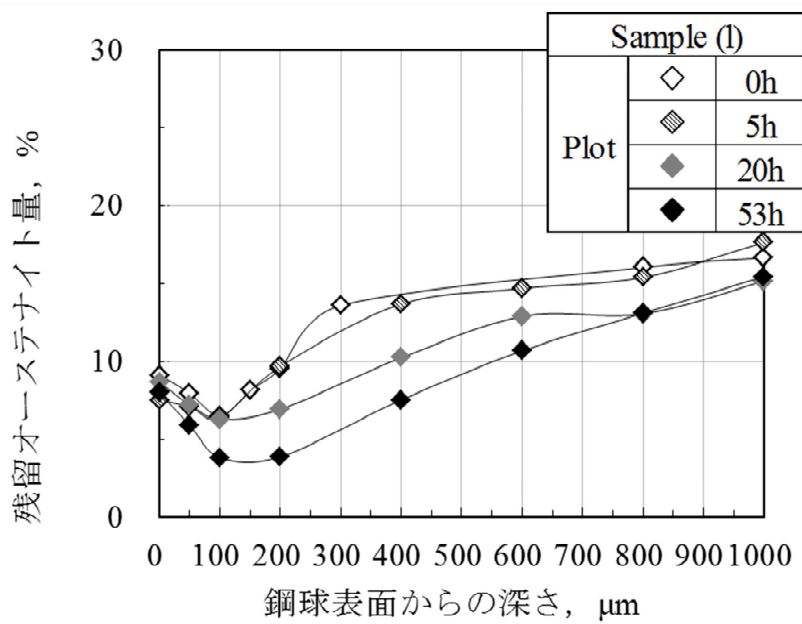


図 5-22 Sample(l) 転がり寿命過程における残留  $\gamma$  量の変化

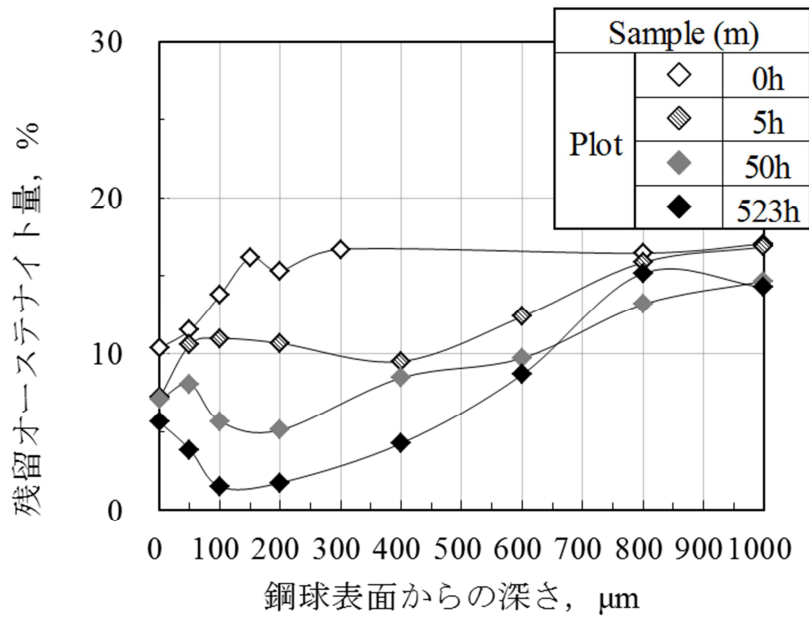


図 5-23 Sample(m) 転がり寿命過程における残留 $\gamma$ 量の変化

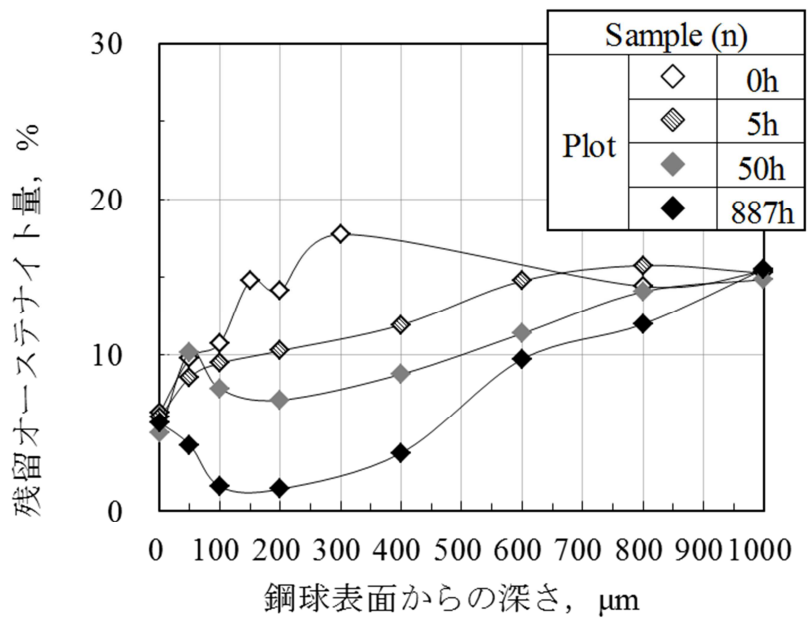


図 5-24 Sample(n) 転がり寿命過程における残留 $\gamma$ 量の変化

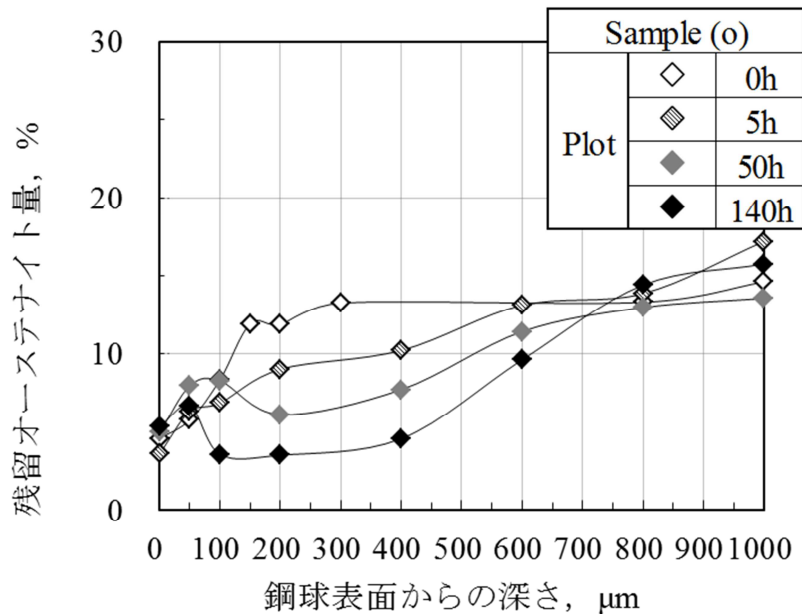


図 5-25 Sample(o) 転がり寿命過程における残留  $\gamma$  量の変化

図 5-20～5-25 を見ると，転がり寿命試験の経過とともに Sample(j)～(o)の残留  $\gamma$  量は，半価幅と同様に鋼球表面からの深さ 100～400 $\mu\text{m}$  において，転がり接触による減少が観察された。

#### 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

図 5-26 および図 5-27 に，5-2-2 項に示した方法で測定した Sample(j)～(o)のはく離起点深さを示す。図 5-26 は横軸に Sample(j)～(o)，縦軸に鋼球のはく離起点深さを示しており，一方，図 5-28 は横軸に転がり寿命試験における鋼球はく離時間，縦軸に鋼球のはく離起点深さを示している。

図 5-26 を見ると，Sample(j)～(o)のはく離起点深さは，おおよそ 0.5～1.0mm であるが，Sample(j), Sample(k), Sample(l)および Sample(m), Sample(n), Sample(o)の順に，鋼球のはく離起点深さは浅くなる傾向にあり，Sample(l)が 6 種類の中で最も浅かった。図 5-27 を見ると，特に Sample(l)は転がり寿命時間が短く，はく離起点深さが浅いことが顕著である。また，本転がり寿命試験における  $Z_{st}$  (0.24mm) と，鋼球のはく離起点深さは必ずしも一致せず， $Z_{st}$  よりも深い位置にはく離起点が発生していた。



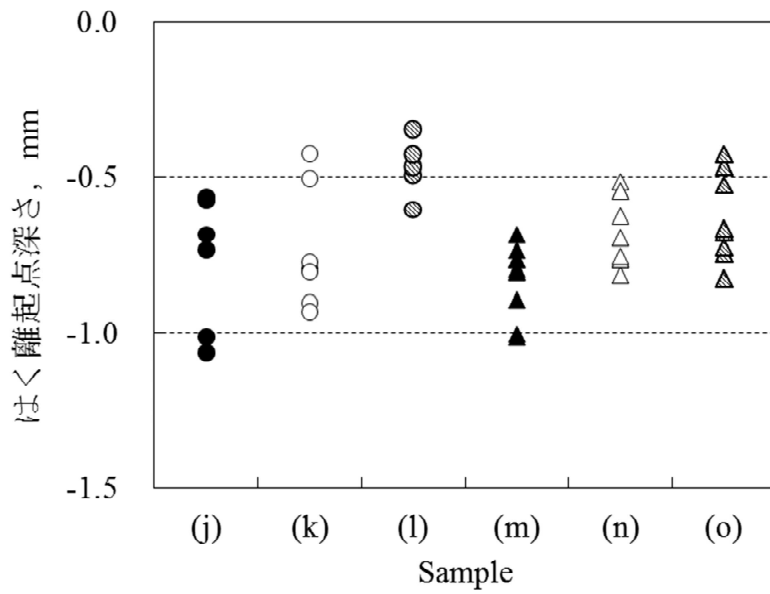


図 5-26 Sample(j)～(o)のはく離起点深さ

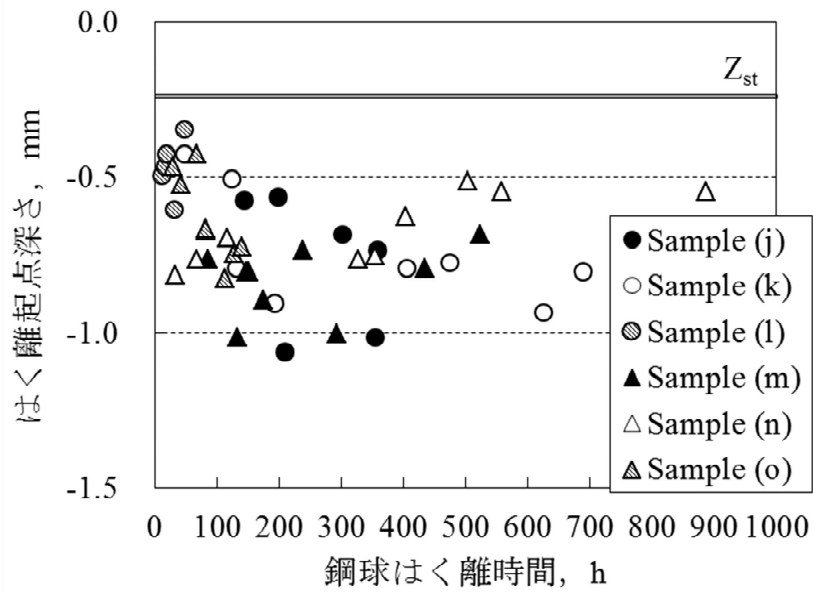


図 5-27 Sample(j)～(o)の鋼球はく離起点深さとはく離時間の関係

## 5-4 考察

図 5-28 は、横軸に転がり疲労寿命試験の時間（以降、運転時間と称す）、縦軸に転がり接触により形成された  $\sigma_t'$  の代表値として、図 5-2～5-7 における Sample(j)～(o) の表面からの深さ 400 $\mu\text{m}$  の  $\sigma_t'$  をプロットした。

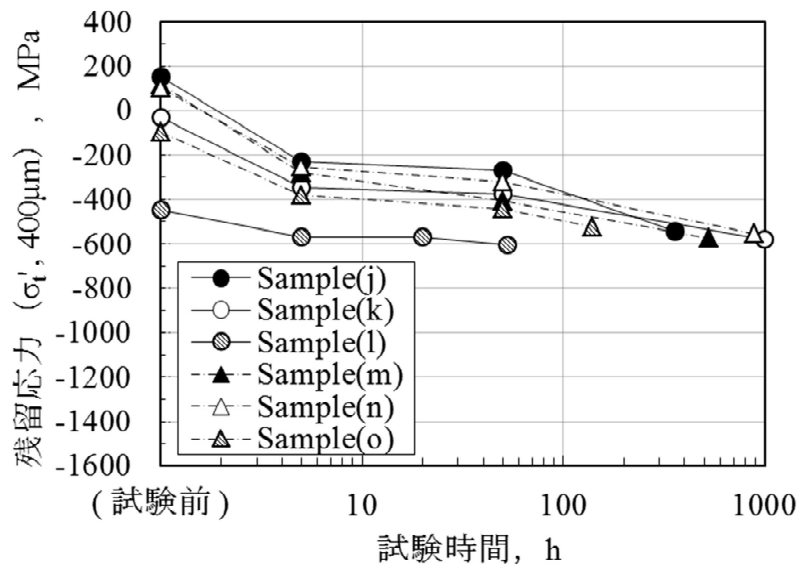


図 5-28 転がり寿命試験による深さ 400 $\mu\text{m}$  の残留応力 ( $\sigma_t'$ ) 経時変化

図 5-28 を見ると、初期（試験前）における表面からの深さ 400 $\mu\text{m}$  という深い位置では、Sample(l) の場合を除いて  $\sigma_t'$  は  $\pm 0\text{MPa}$  付近にあり、ピーニング処理の影響がほとんど認められない。Sample(l) はピーニング処理により鋼球内部に形成される  $\sigma_t'$  を、より深く、かつ圧縮側に大きくなるように調整していたもので、初期（試験前）においても約  $-400\text{MPa}$  の  $\sigma_t'$  が形成されていた。

Sample(j)～(o) の初期（試験前）から運転時間 5 時間までの  $\sigma_t'$  の変化を見ると、Sample(l) の場合を除いて  $\sigma_t'$  は圧縮側に約  $-280 \sim -400\text{MPa}$  増大していた。一方、Sample(l) は初期（試験前）の段階で  $\sigma_t'$  が約  $-400\text{MPa}$  と圧縮側に大きかったため、5 時間の運転では  $\sigma_t'$  の圧縮側への増大は約  $-120\text{MPa}$  で、変化が小さかった。

運転時間 5 時間を越え、運転時間 50 時間に至るまでは、Sample(j)～(o) のいずれも  $\sigma_t'$  に大きな変化はなかった。Sample(l) の場合を除いて運転時間 100 時間を超えてから  $\sigma_t'$  は約  $-600\text{MPa}$  へ徐々に増大していった。Sample(l) は運転時間

5 時間から運転時間 50 時間の段階で  $\sigma_t'$  は約  $-600\text{MPa}$  に増大しており，表 5-1 に示した通り試験最長品は 53 時間だったので， $\sigma_t'$  が約  $-600\text{MPa}$  に増大した時点で鋼球の大半がはく離に至ったということである。

以上をまとめると，転がり寿命過程における  $\sigma_t'$  の変化は，初期（試験前）の状態は様々であっても，転がり接触を受けることで  $Z_{st}$  付近に初期（試験前）の  $\sigma_t'$  に積算されるように転がり接触による  $\sigma_t'$  が比較的早い時間で形成され，その後，運転時間が経過するにつれ  $\sigma_t'$  の変化は緩やかに飽和していったといえる。

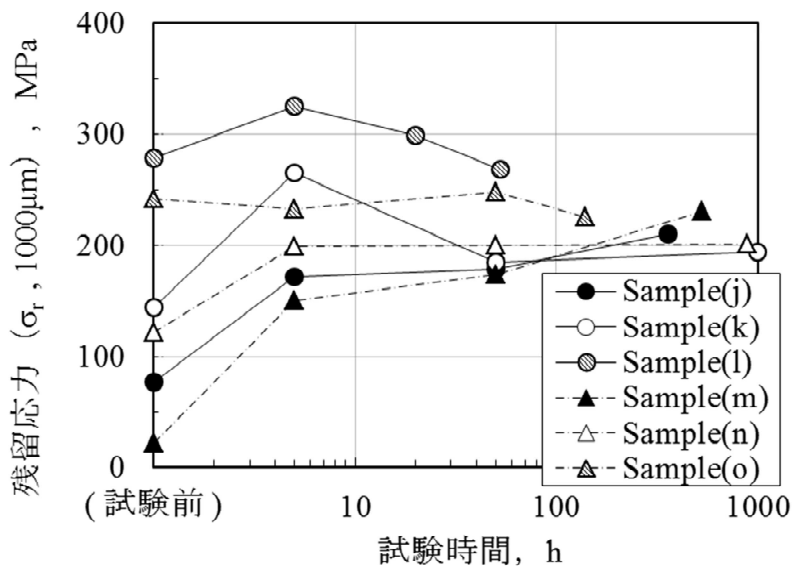


図 5-29 転がり寿命試験による深さ  $1000\mu\text{m}$  の残留応力 ( $\sigma_r$ ) 経時変化

図 5-29 は，横軸に運転時間，縦軸に  $\sigma_t'$  の変化に依存する図 5-8～5-13 の深さ  $1000\mu\text{m}$  における  $\sigma_r$  の測定結果をプロットした。

図 5-29 を見ると，Sample(j)，(k)，(m)，(n) は，初期（試験前）から運転時間 5 時間に至るまでに，転がり接触による  $\sigma_t'$  の形成により  $\sigma_r$  が引張側へ大きく変化しているが，その後，初期（試験前）に存在した  $\sigma_t'$  の緩和の影響も受けながら変化が緩やかとなり，最終的に  $\sigma_r$  は  $+200\text{MPa}$  付近の値となった。

一方，初期（試験前）の状態で既に  $\sigma_r$  が  $+200\text{MPa}$  を越える高い水準にあった Sample(l) と (o) では，運転時間の経過と共に，転がり接触による  $\sigma_t'$  の形成，および初期（試験前）に形成されていた  $\sigma_t'$  の緩和の影響を受けながらも，終始

$\sigma_r$  は +200MPa を越える高い水準にあった。また、最も短寿命であった Sample(l) は、運転時間 5 時間を越え、運転時間 20 時間に至るまでに転がり接触による  $\sigma_i'$  の形成により  $\sigma_r$  が +300MPa を越える場合もあり、その後、初期（試験前）の  $\sigma_i'$  が緩和することにより、 $\sigma_r$  の値は小さくなるものの、Sample(j)~(o)の中で  $\sigma_r$  の値は最も高く、この状態で転がり接触を受け続けていたことが分かる。

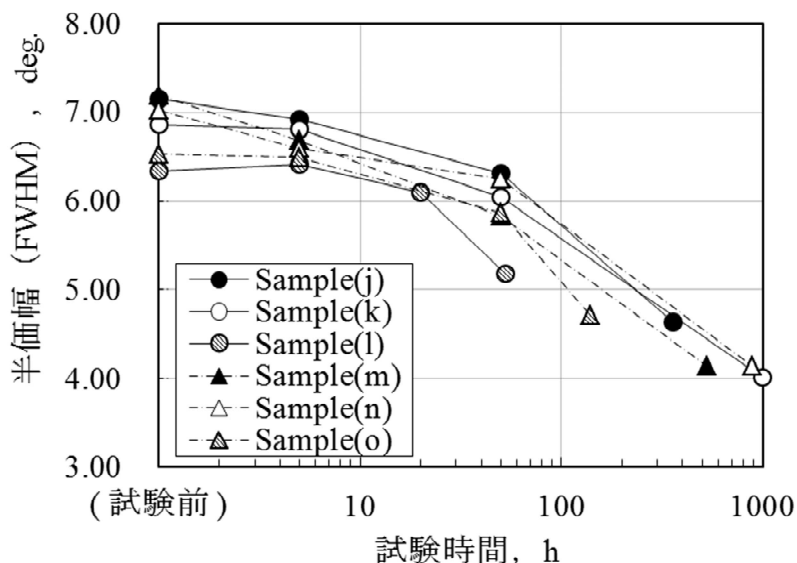


図 5-30 転がり寿命試験による深さ 400 $\mu$ m の半価幅 (FWHM) 経時変化

図 5-30 は、横軸に運転時間、縦軸に図 5-14~5-19 における Sample(j)~(o)の表面からの深さ 400 $\mu$ m の半価幅をプロットした。深さ 400 $\mu$ m は 5-3-1 項に示したとおり、転がり接触による  $\sigma_i'$  (圧縮側の極大値) が形成された箇所である。

図 5-30 を見ると、Sample(l), (o)は初期（試験前）の段階から Sample(j), (k), (m), (n)と比較して低い水準にあったが、ピーニング処理により鋼球内部に  $\sigma_i'$  が形成されると同時に半価幅が下がることで、結果的に鋼球が転がり疲労を受けることと等価な状態になっていたためである。運転時間の経過と共に、Sample(j)~(o)は半価幅が下がっているが、終始 Sample(l), (o)は半価幅が低い水準にあった。

表 5-2 に、図 4-10 における Sample(j)~(o)の鋼球はく離時間の範囲と、Sample(j)~(o)の鋼球はく離時間の範囲に相当する図 5-30 の半価幅を示す。Sample(l), (o)は Sample(j), (k), (m), (n)と比較して、半価幅が高い水準で鋼球

がはく離に至っていることが分かった。

表 5-2 Sample(j)～(o)の鋼球はく離時間に相当する図 5-30 の半価幅

	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)
鋼球はく離時間, h (1000h のみ試験中止)	108	46	10	84	33	28
	～	～	～	～	～	～
上記の鋼球はく離時間 に相当する図 5-30 の 半価幅, deg.	358	1000	53	523	887	140
	4.6	4.0	5.2	4.1	4.1	4.7
	～	～	～	～	～	～
	5.7	6.1	6.3	5.5	6.3	6.1

## 5-5 結言

様々な残留応力分布, 半価幅分布, 残留 $\gamma$ 量分布を持つ鋼球について, 高負荷な転がり寿命過程における経時変化を観察した. 主な結果は以下の通りである.

- (1) 鋼球の内部残留応力は初期状態から大幅に変化し, はく離に至った.
- (2) 鋼球の内部残留応力の変化は, 転がり接触による最大せん断応力が最大となる位置に鋼球接線方向の圧縮残留応力が形成され, また, その変化に伴い初期状態に存在した鋼球接線方向の圧縮残留応力が緩和した. そして, これらの鋼球接線方向の内部残留応力の変化に伴い, 鋼球の深い位置では鋼球半径方向の引張残留応力が初期状態から大幅に大きくなった.
- (3) 鋼球のはく離起点深さは, 内部残留応力の変化の内, 鋼球接線方向の圧縮残留応力が変化した領域よりも深く, 鋼球接線方向の圧縮残留応力の変化に依存する鋼球半径方向の引張残留応力が変化した領域と一致した.

## 第 6 章 総括

本研究は、転がり軸受－深溝玉軸受の信頼性向上を追求したもので、転動体としての構成部品である転がり軸受－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の転がり疲労寿命を変動荷重寿命試験機で評価し、最適な熱処理条件および残留応力分布形態に対する指針を示した。また、転がり疲労過程における残留応力の経時変化を観察し、鋼球がはく離に至るまでのメカニズムについて検証した。

本研究の各章をまとめると、以下のようになる。

第 2 章では、転がり疲労寿命に影響を及ぼす要因の一つである清浄度（鋼中の非金属介在物）の評価方法に関し、近年、著しい清浄度の向上を遂げ、一般的な清浄度の評価方法である JIS 点算法では優劣が付かないような鋼球用線材に対しては、極値統計法による清浄度の評価が有効である事を示した。さらに、鋼球用線材の清浄度を極値統計法により 3 種類評価し、本研究における目的（鋼球の熱処理特性および残留応力分布が転がり疲労寿命へ及ぼす影響を検証）が清浄度の影響で阻害されないよう、より高清浄度な鋼球用線材を選定した。また、鋼球の製造工程には耐圧痕性の向上を目的として、ピーニング処理により鋼球内部へ接線方向の圧縮残留応力を形成させることが、転がり軸受－深溝玉軸受の音響特性に対し必要不可欠であることを示した。

第 3 章では、高清浄度な同一溶番の鋼球用線材を素材とし、耐圧痕性の向上を目的とした接線方向の圧縮残留応力を形成させずに、様々な熱処理条件（焼入温度 1103, 1133, 1163K と焼戻温度 403, 433, 463K の組合せ）で合計 9 種類の熱処理特性のみが異なる鋼球を製作し、それらの転がり疲労寿命を変動荷重寿命試験機で評価した。その結果、鋼球の転がり疲労寿命が熱処理特性によって非常に大きな影響を受ける事が分かった。鋼球の代表的な熱処理特性として挙げられるロックウェル硬さは、日本工業規格 JIS-B1501 において HRC62～66 と規定されているが、本研究ではその中央値にあたる HRC64 の水準（HRC64

±0.5) にあっても  $L_{10}$  寿命には 100 倍以上の差が見られ、鋼球の信頼性はロクウェル硬さだけでなく、旧  $\gamma$  結晶粒径、カーボン固溶量、半価幅といった熱処理特性も影響する事を明らかにした。なお、鋼球の転がり疲労寿命に対し適した熱処理条件は、旧  $\gamma$  結晶粒径を粗大化させずに適度なカーボンを固溶させる焼入温度の設定、ならびに半価幅を下げすぎない焼戻温度の設定が肝要という指標を示した。

第 4 章では、高纯净度な同一溶番の鋼球用線材を素材とし、第 3 章に示した鋼球の転がり疲労寿命にとって最適な熱処理条件(本報では、焼入温度 1133K、焼戻温度 433K)で処理した後、ピーニング処理条件を種々変更することで様々な残留応力分布を有する鋼球を合計 6 種類製作した。それらの転がり疲労寿命を変動荷重寿命試験機で評価した結果、ピーニング処理により付加される接線方向の圧縮残留応力は、転がり疲労寿命を短くする影響が主であり、付加領域が大きいほど影響度が大きくなる事を示した。さらに、ピーニング処理による接線方向の圧縮残留応力の付加領域と、半価幅の減少領域には正の相関があることを示し、鋼球へのピーニング処理は、接線方向の圧縮残留応力を付加すると同時に半価幅を下げている、すなわち疲労を進行させているのと等価な状態になっていることが、転がり疲労寿命を短くする一つの要因と考察した。

第 5 章では、様々な残留応力分布を有する鋼球について、転がり疲労過程における残留応力経時変化の観察と、転がり疲労によるはく離起点深さの測定を行い、鋼球はく離のメカニズムについて探求した。鋼球はその疲労過程において内部残留応力が、初期状態から大幅に変化してからはく離に至ることが分かり、その変化は、転がり接触による最大せん断応力が最大となる位置への接線方向圧縮残留応力の形成、およびそれに伴う初期状態の接線方向の圧縮残留応力緩和、同時に、これら接線方向の圧縮残留応力の変化に伴う半径方向の引張残留応力の深い位置での増加、と複雑な変化が観察された。また、転がり疲労によるはく離起点深さは、これらの内部残留応力変化の内、接線方向の圧縮残留応力が変化した領域よりも深く、半径方向の引張残留応力が変化した深い位置と概ね一致し、初期状態の接線方向の圧縮残留応力の形成領域が大きいほど

はく離起点深さが浅いことを明らかとした．鋼球の初期状態において接線方向の圧縮残留応力の付加領域が過剰に大きい場合，転がり接触による最大せん断応力が最大となる位置へ接線方向の圧縮残留応力が形成され，半径方向の引張残留応力がより浅い位置においても大きくなり，その結果，半径方向の引張残留応力が鋼球内部にき裂を発生，進展させて，より短時間で鋼球はく離に至るというメカニズムを解明した．



## 参考文献

- 1) 吉武立雄：軸受基礎のきそ，日刊工業新聞社(2006)10.
- 2) G.Lundberg and A.Palmgren：Dynamic Capacity of Rolling Bearings, Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series, 1, 3(1947).
- 3) G.Lundberg and A.Palmgren：Dynamic Capacity of Rolling Bearings, Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series, 2, 4(1952).
- 4) H.R.Hertz：Gesammelte Werke, 1, 155(1895)194.
- 5) J.L.O'brien and A.H.King：Electron Microscopy of Stress-Induced Structural Alterations Near Inclusions in Bearing Steels, Transactions of the ASME, Ser.D, Journal of Basic Engineering, 88, (1966)568.
- 6) W.E.Littmann and R.L.Widner：Propagation of Contact Fatigue From Surface and Subsurface Origins, Transactions of the ASME, Ser.D, Journal of Basic Engineering, 88, (1966)624.
- 7) 三田村宣晶・関野和雄・村上保夫：高温長寿命軸受の開発，NSK Technical Journal, 658 (1994) 11.
- 8) 三田村宣晶・村上保夫：新軸受用鋼 NSJ2 の開発，NSK Technical Journal, 666 (1998) 34.
- 9) 木澤克彦・後藤将夫：材料清浄度評価による転がり疲れ寿命の推定，Koyo Engineering Journal, 163 (2003) 36.
- 10) 太田敦彦：準高温用軸受鋼の開発，Koyo Engineering Journal, 155 (1997) 6.
- 11) 土井健司・折橋英行・松島義武・安木真一・福崎良雄・中島慎一：長寿命軸受鋼の開発，神戸製鋼技報，50, 1 (2000) 49.
- 12) 武村浩道：材料強度の確率モデル (36) 第4章 機械要素・実機の破壊と確率モデル，機械の研究，51, 8 (1999) 875.
- 13) 大崎浩志・阿野亮介・吉田彰・藤井正浩・岩崎克浩：Si および Mo を添加した新軸受鋼製球の転がり疲労特性，トライボロジスト，51, 9 (2006) 652.
- 14) 大崎浩志・阿野亮介・大上祐司・藤井正浩・吉田彰：Si および Mo を添加した新軸受鋼の準高温下の転がり疲労特性，トライボロジスト，52, 5 (2007) 373.

- 15) 赤松良信：転がり疲労寿命の延命法 材料や設計による改良，メンテナンス，237（2003）46.
- 16) 長塩正紀・英崇夫：鋼球の内部欠陥評価方法の開発，トライボロジスト，55，5（2010）341.
- 17) 田中洋臣：軸受保全特集 転がり疲れ寿命と長寿命化技術，紙パルプの技術，62，4（2012）4.
- 18) 村上敬宜・鳥山寿之：JIS 点算法の問題点と極値統計法による介在物評価とその応用，鉄と鋼，79，12（1993）76.
- 19) 小林祐次・辻俊哉・石倉亮平・井上圭介：ショットピーニング特性に及ぼす機械的性質と残留オーステナイトの影響，ばね論文集，57（2012）9.
- 20) 柴田正道・吉田彰・相原了・似内昭夫・対馬全之：転がり疲れに及ぼす各種要因の影響，トライボロジスト，39，8（1994）698.
- 21) 村上敬宜：金属疲労 微小欠陥と介在物の影響，養賢堂（1993）233.
- 22) 坪田一：軸受用鋼の最近の技術・市場動向，月刊トライボロジ，118（1997）36.
- 23) 中雄一・阿野亮介：転がり軸受用鋼球の生産・材料技術，トライボロジスト，56，5（2011）289.
- 24) 西森博・増田孜・川上潔・古村恭三郎・橋爪一弘：超高清浄度軸受鋼（EP 鋼）の開発，日本金属学会会報，32，6（1993）441.
- 25) 曾田範宗：軸受，岩波全書（1986）149.
- 26) 星野照男：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，KOYO Engineering Journal，159（2001）107.
- 27) 石原孝夫：ボールベアリングと残留オーステナイト，金属材料，15，3（1975）34.
- 28) 村上陽太郎・亀井清・山根壽己・長村光造：金属材料学，朝倉書店（1994）15.
- 29) 西山善次：マルテンサイト変態基礎編，丸善株式会社（1971）5.
- 30) 小熊規泰：軸受の残存疲労寿命予測 第 1 報 X 線回折法の適用，KOYO Engineering Journal，161（2002）26.
- 31) D.Dowson and G.R.Higginson：Elasto-Hydrodynamic Lubrication，Pergamon

Press (1977).

- 32) 白井十四雄：熱処理技術シリーズ⑦ 機械部品の熱処理 (I)，日刊工業新聞社 (1970) 123.
- 33) 曾田範宗：軸受，岩波全書 (1986) 175.
- 34) 土肥修・鵜飼隆好：X線による侵入深さを考慮した球の残留応力測定理論，日本機械学会論文集，47，414 (1981) 191.
- 35) 小熊規泰・關杉直矢・二村優・小竹康浩：力学的に残留応力を付与した軸受鋼の回転曲げ疲労特性に関する研究，日本機械学会年次大会講演論文集 (CD-ROM)，2012，(2012).

## 謝辞

本研究を遂行し本論文をまとめるにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました岡山大学大学院自然科学研究科 藤井 正浩 教授に心より感謝申し上げます。また、本論文を審査いただいた岡山大学大学院自然科学研究科 岡田 晃 教授，岡安 光博 教授，木之下 博 准教授，ならびに中国職業能力開発大学校 塚本 眞也 校長に深く感謝申し上げます。

本研究の遂行にあたり、株式会社天辻鋼球製作所 代表取締役会長 小森 勉 氏，代表取締役社長 杉本 美則 氏，代表取締役専務 兼 技術開発本部長 井通 隆正 氏，実験にご協力を賜った技術開発部の諸氏に深甚なる謝意を表します。

また、本研究の端緒を与えられました株式会社天辻鋼球製作所 相談役 山中 憲一 氏に心より感謝申し上げます。

本研究は産学連携により、玉軸受の転がり疲労寿命の向上に少しでも貢献できることを願って取組んだものであり、多くの方々に様々な形でご協力，ご支援戴きました。ここに改めて関係の皆様へ感謝の意を表します。