

ショットピーニングによって発生する表面層の実体 Realities of surface layer produced by shot peening

間野 日出男^{※1}、井村 徹^{※2}、近田 和明^{※3}、近藤 覚^{※1}、
H. Mano, T. Imura, K. Konda and S. Kondou

Abstract

Surface layer produced by shot peening was analyzed by using XRD, SEM, FE-SEM. The structure of the surface layer is found to be the deformed layer composed with nanocrystalline phase.

1. はじめに

窒化処理を行わないばねにショットピーニングを行う場合、ショットピーニング条件によっては、ばね表面の一部に母相よりも硬い加工変質相が発生することが知られている。一般にショットピーニングによる加工変質相は硬さが高く、腐食に強いことからマルテンサイト相であると考えられてきた。しかし、その詳細は明らかにされていない。そこで、本研究では、加工変質相の構造と性質を詳しく調査することにした。

2. 実験方法

2-1 加工変質相の調査

供試材には弁ばね用Si-Crオイルテンパー線SWOSC-Vを使用した。化学成分は表1に示し、供試ばねのばね諸元は表2に示す。供試ばねは低温焼鈍・座面研削工程まで同一ロットで作製し、異なる条件のショットピーニングを行った。その製造工程を図1に示す。また、ショットピーニング条件を表3に示す。上記のようにして作製したばねの表面粗さを測定すると共に、切断して埋め込み、光学顕微鏡観察、SEM、FE-SEM観察、硬さ測定を行った。

2-2 疲労試験

ショットピーニング条件の異なる、ばねA、Bを、225℃で低温焼なましした後、星形ばね疲労試験機にて疲労試験を行った。疲労試験の試験条件を表4に示す。星形ばね疲労試験は、圧縮コイルばねの性能確認に用いられる疲労試験方法であり、ばねの実使用状態に近い状態で疲労試験をすることができる利点がある。

3. 結果と考察

3-1 加工変質相の調査

ショットピーニング後のばねA表層部の断面組織写真を図2に示す。ナイタルでエッチングした組織を観察した。同様にばねBの組織写真を図3に示す。光

表1 供試材の化学成分 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
0.57	1.43	0.7	0.02	0.01	0.01	0.68

表2 ばね諸元

線径(mm)	φ3.2
コイル外径(mm)	φ23.2
有効巻数(巻)	4.0
自由高さ(mm)	47
ばね定数(N/mm)	32
巻方向	右

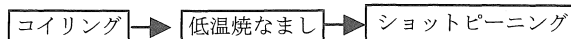


図1 供試ばねの製造工程

表3 ショットピーニング条件

ばね	投射材	投射速度	投射時間
A	φ0.8mm (700HV)	73m/s	120min
B	φ0.6mm (600HV)		30min

表4 疲労試験条件

試験機	星形ばね疲れ試験機
振幅速度	1800 cpm
試験回数	1×10 ⁴ 回
サンプル数	各応力段階8個
試験応力状態	片振り
応力振幅 τ _a	510、560MPa
平均応力 τ _m	600MPa

学顕微鏡写真(写真(a)と(d))で、ばねA、Bを比較すると、内部の組織に違いは見られないが、ばねAの表層部には厚さ2~3μmの白色に見える加工変質相が観察される。光学顕微鏡下で白色に見えるのは腐食に強いためであると思われる。写真(b)と(c)のFE-SEM像に、このばねAに見られる表層部分の組織を拡大表示した。写真(b)上方に位置するばねAの表面から2~3μmの厚さをもつ微細な組織が加工変質相である。また、加工変質相よりも内側では、結晶

※1 (株)東郷製作所

※2 愛知工業大学 総合技術研究所

※3 愛知工業大学 機械工学科

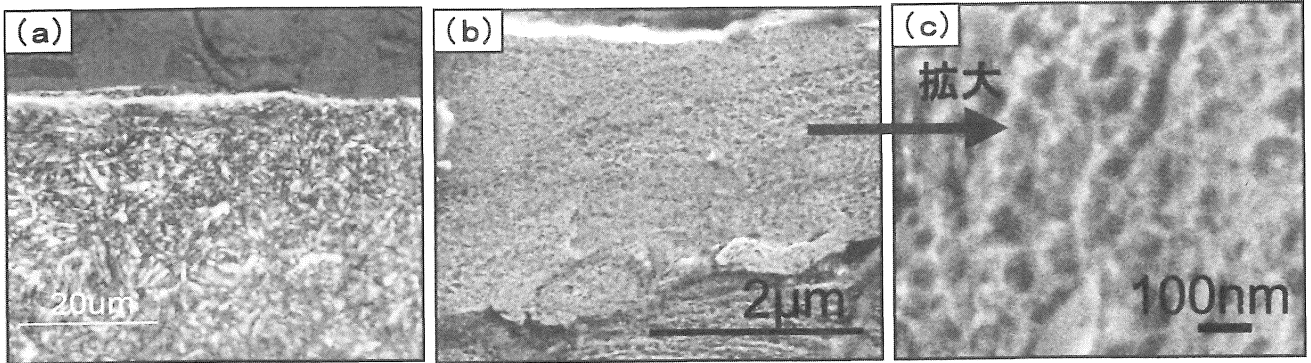


図2 ばねAの断面組織写真 (a) 光学顕微鏡像, (b) FE-SEM像, (c) 加工変質相部分の拡大 (FE-SEM像)

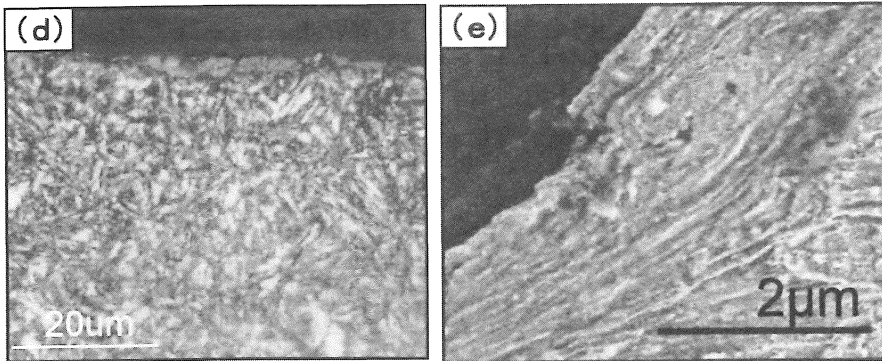


図3 ばねBの断面組織写真 (d) 光学顕微鏡像, (e) FE-SEM像

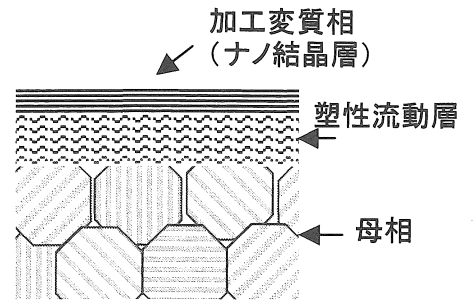


図4 ショットピーニング後の表層

粒が潰れて鍛造組織のような塑性流動層となっている。塑性流動層の厚さは、5 μm程度で母相と連続した組織であるが、加工変質相は塑性流動層と不連続な組織であるように見える。この微細組織を拡大して観察すると、それは(写真(c))、母相の焼戻しマルテンサイト相とも塑性流動層とも全く異なる、粒径100nm前後のナノ結晶組織であることがわかった。ばねB(写真(e))では塑性流動層が認められるものの、微細結晶組織は観察されなかった。ショットピーニングによる加工度が小さいためであると思われる。ばねAの表層の組織の様子を図4の模式図に示す。表面から、微細な加工変質相、塑性流動層、母相(焼戻しマルテンサイト相)の3層からなる複合組織になっていることを図示している。

以上から、エッチング組織の光学顕微鏡観察で白色に見える加工変質相は、ショットピーニングによる塑性流動層のさらに表層側に発生するナノ結晶組織であることがわかった。表層部分は、ショットピーニングによる加工発熱や強加工に曝される領域であり、また、投射中に投射材などから他元素成分が導入されることも考えられる。そのため、熱変態マルテンサイトや加工誘起マルテンサイト、化合物相からなる組織である可能性がある。そこで、表層部分の低角X線回折曲線を図5に、X線残留応力測定結果を図6に示す。図5の低角X線回折結果からは、表層に結晶粒がナノメートルサイズである加工変質相を持つばねAと、加工変質相のないばねBに大きな違いは認められない。化合物相のピークも見られないことから、ばねA表層に見られる加工変質相は、ショットピーニング中に混入した成分との化合物や酸化物ではないことがわかった。また、Feの(110)、(211)ピークでは、ばねAとばねBの半価幅に違いが見られ、ばねAの半価幅が広がっている。ばねAの結晶粒が微細であるためと思われる。図6の残留応力測定結果においても、

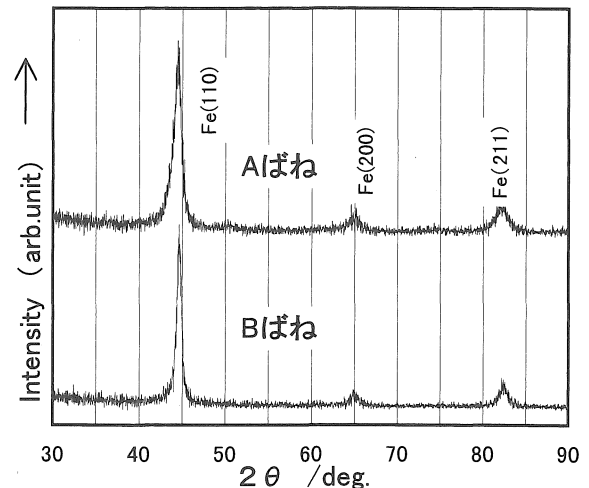


図5 低角X線回折曲線

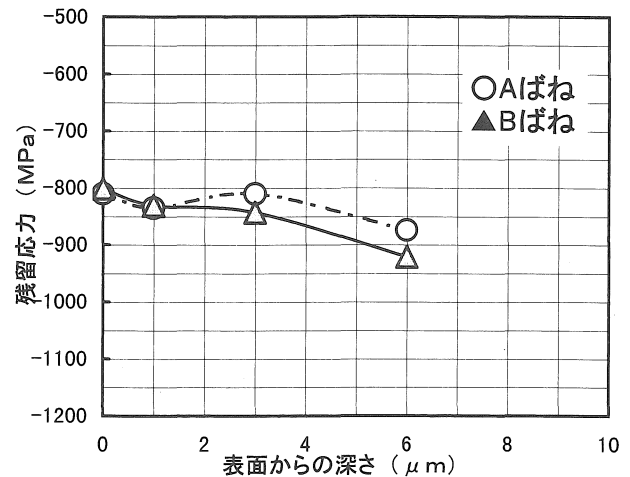


図6 残留応力測定結果

ばねA、Bの測定値に違いは認められない。加工変質相がマルテンサイト組織であるならば、マルテンサイト変態に伴う体積膨張により圧縮の残留応力が付加されるはずである。しかし、ばねAの残留応力値に変化は認められず、従って、加工変質相はマルテンサイト相ではないと考えられる。

次に、加工変質相の硬さを測定した。母相の硬さが620HVであるのに対し、加工変質相は1020HVという大きな値を示した。これは母相に対して60%以上の硬さの増加であり、加工硬化による硬さの増加量を超えるものである。これは、加工変質相が母相組織とは全く異なる組織であるためと思われる。図7に加工変質相についての圧痕の様子を示す。写真では表面だけでなく、加工変質相が内部にも発生した場所で圧痕を落としている。この写真からは、ビッカースの圧痕は、四隅が明確でありクラックも見られない。加工変質相は硬いが、必ずしも脆性的な性質を持つ組織ではないことがわかった。

加工変質相が発生したばねAは、ショットピーニングの投射材粒径、投射材硬さがばねBに比べて大きい。そのため、ばね表面部分の塑性変形量が大きいと考えられる。強加工による結晶粒の微細化は、MA（メカニカル・アロイング）プロセスで報告されている¹⁻⁴⁾現象である。大歪塑性変形を繰り返し材料に与える方法であることが、MAプロセスはショットピーニングと共通する。そのため、ショットピーニングによっても強加工による結晶粒微細化が起こったと考えられる。すなわち、ショットピーニングの強加工によって導入された高密度の転位が小傾角粒界を形成し、それがサブバウンダリーとなることによりナノ結晶が生ずると考えられる。

3-2 疲労試験

前記した調査から、ショットピーニングによる加工変質相は硬く、脆性的な組織ではないことがわかった。このことから、加工変質相を発生させたばねAの疲労強度は向上するはずである。そこで、ばねA、Bの疲労試験を行った。結果を図8に示す。まず、加工変質相を持たないばねBは、応力振幅560MPaで 4×10^6 回付近、応力振幅510MPaでは 7×10^6 回付近で比較的まとまって折損している。ばねBの折損破面を調査すると、いずれも線軸と直交方向の表面ファ

セットを起点としており、折損形態は1種類だけであった。それに対して、加工変質相に覆われたばねAの疲労強度の分布は、大きく分けて2つに分かれている。この2つは、 5×10^5 回で早期に折損しているサンプルと、 1×10^7 回近くまで耐久しているサンプルの2種類である。このうち、 1×10^7 回直前で折損したばねの折損破面は、ばねBと同じく表面ファセットを起点としていた。しかし、早期折損したばねでは、ばねの表面荒れを起点としている。早期折損したばねの起点部の様子を図9に示す。表面の窪みを起点として破壊が進行している。ばねAは、ショットピーニングの条件が強いため、表面荒れが大きいことが早期折損の原因になるものと考えられる。表5にばねA、Bの表面粗さ測定結果を示す。ばねAは、ばねBに比べ著しく表面粗さが高いことがわかる。しかし、 1×10^7 回まで耐久したばねの表面粗さも、早期折損したばねと同様に荒れていた。また、ばねAの折損原因は、表面の荒れと表面ファセットの2種類のみであった。このことから、ばね表面の加工変質相は、疲労強度低下の原因とはなっていないと考えられる。さらに、早期折損を免れたばねAは、加工変質相がないばねBよりも疲労強度が高いことから、ナノ結

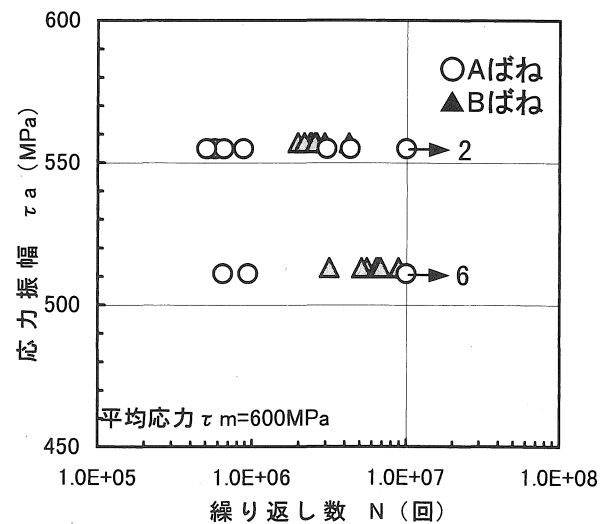


図8 疲労試験結果

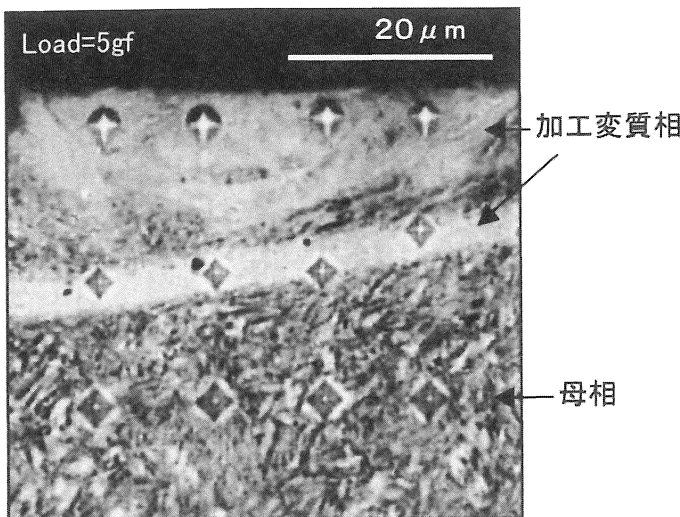


図7 加工変質相に落とした圧痕の様子

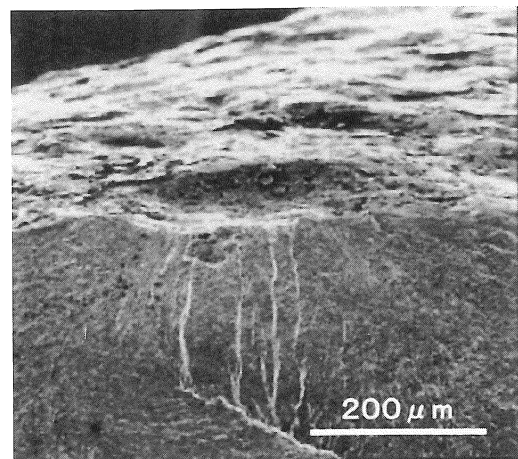


図9 早期折損したばねの破面の様子

晶からなる加工変質相そのものは疲労強度を向上させる効果があると考えられる。

表 5 ばねA、Bの表面粗さ (μm)

ばね	Rmax	Rz
A	26.1	17.9
B	10.2	7.9

※Rmax : 最大表面粗さ

Rz : 10点平均粗さ

参考文献

- 1) 飛鷹 秀幸、木村 勇次 高木 節雄:鉄と鋼、85、52 (1999)
- 2) G.Langford:Metall.Trans. 8、861、(1977)
- 3) M.Umemoto、Z.G.Liu、Y.Xu and K.Tsuchiya: Materials Science Forum、386-388、323-328(2002)
- 4) H.Nakayama、K.Tsuchiya、Z.G.Liu、M.Umemoto:Material Transactions、42、9(2001)、1987-1993

(受理 平成 15 年 4 月 30 日)

4. 結論

ショットピーニングによって発生する加工変質相を詳細に調査した結果以下の結論を得た。

- (1) ショットピーニングにより発生する加工変質相は、結晶粒径100nm程度のナノ結晶からなり、その硬さは母相の1.6倍に達する。
- (2) ナノ結晶からなる加工変質相は、これまで考えられていたマルテンサイト相ではないナノ結晶相であることが判明した。
- (3) ナノ結晶からなるこの加工変質相は、疲労強度を向上させる効果があることがわかった。

5. 謝辞

本研究にあたり、愛知工業大学工学部 高木 誠 助教授、名古屋大学工学部 松室 昭二 助教授にご協力を頂きました。ここに心よりお礼申し上げます。