軟窒化処理材におけるショットピーニング効果に関する研究*

衛 藤 洋 仁^{*1}, 松 井 勝 幸^{*1}, 安 藤 柱^{*2}

Study on Shot Peening Effect of Nitrocarburized Material

Hirohito ETO^{*3}, Katsuyuki MATSUI and Kotoji ANDO^{*3} ISUZU MOTORS LTD.,

3-25-1 Tono-machi, kawasaki-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 210-8524 Japan

The authors investigated the refined surface characteristics and fatigue strength of Nitrocarburized (N) materials treated by Electro-polishing (EP), Double Shot Peening (DSP) and Stress Double Shot Peening (SDSP). The results obtained are summarized as follows: (1) Increased hardness with the diffusion layer between the surface and depth of 400 μm by DSP. (2) Remarkably high compressive residual stresses by DSP: Surface residual stress = -701 MPa, Maximum compressive residual stress = -733 MPa. (3) On the loading condition of stress ratio (R) = 0, the fatigue limits of DSP and SDSP materials were 33% and 58% higher than that of N material, respectively. However, on the condition of $R = -1$, these were 28% and 39% higher than that of N material, respectively. (4) Same fatigue limit of both DSP and EP+DSP materials. (5) On the condition of $R = 0$, the fatigue limit becomes high according to the larger compressive residual stress. However, on the condition of $R = -1$, the above relation is not necessarily valid to yield of the material by the compressive loading stress.

Key Words: Fatigue, Yield Stress, Hardness, Residual Stress, Shot Peening, Nitrocarburizing

1. 緒 言

自動車部品では、地球環境および省エネルギーの観点から、疲労強度向上による小形軽量化が強く求められている。そこで、著者らは、自動車部品の疲労強度向上を図るために、疲労破壊過程を七段階に分けて、各段階における疲労破壊促進因子と抵抗因子とを詳細に調査・検討した。その結果、浸炭歯車や自動車用ばねのように応力比(R)が正の応力条件で使用される機械部品では、次の方法が疲労強度向上にとり有用であるとの結論を得た^{(1)~(4)}。(A)材料の硬さ(HV)を可能な限り大きくする。(B)可能な限り大きくて深い圧縮残留応力を導入する。(C)使用材料の結晶粒を可能な限り小さくする。事実、この方針をギヤやばねに適用することにより、疲労強度を経済的に40~89%向上させることができた^{(1)~(11)}。この内、大きくて深い圧縮残留応力を経済的に導入する方法としては、ショットピーニング(以下ピーニングと略す)があり、多くの

有用な研究が実施されている⁽¹²⁾。ところで、材料に大きくて深い圧縮残留応力を導入するためには、次の二つの条件が必要である。(1)材料の降伏応力を大きくする。なぜならば、降伏応力以上の圧縮残留応力を導入することは、不可能に近いからである。(2)材料がある程度以上硬くなると、ピーニング強度が不足して、導入できる最大圧縮残留応力が飽和する。この問題を克服するためには、引張応力^{(1)(3)~(5)(7)(9)~(11)}や温度⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾を利用して材料の変形抵抗を下げた状態でピーニングを実施するのが有効である。その具体的方法として、反射応力ピーニング⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、残留オーステナイトの変態と二段ピーニングの組合せ⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁶⁾、あるいは温間応力二段ピーニング⁽⁴⁾⁽⁵⁾を提案し、それを各種自動車部品に応用してきた。

一方、上記(1)の対応策としては、各種の表面改質方法が提案されている⁽¹³⁾。軟窒化処理はその内の一例であり、多くの分野で使用されている。この方法では、著しい耐摩耗性の向上、熱処理変形が極めて小さく、かつ、細かい油孔を含めた部品全体を硬化することが可能である。そのために、歯車やクランク軸等の複雑形状部品でも使用されている。しかし、それらの部品では、局所的には耐摩耗性が減少しても良いが疲労強度(例えば応力集中部の)を一段と向上させたいとの

* 原稿受付 2003年2月18日。

^{*1} 正員、いすゞ自動車(株)車両研究実験部(☎210-8524 川崎市川崎区殿町3-25-1)。^{*2} 正員、横浜国立大学工学部(☎240-0067 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)。

E-mail: hirohito_etou@notes.isuzu.co.jp

ニーズもある。その場合に、局所的にピーニングを実施することが考えられる。ピーニングの有利な点としては、大きくて深い圧縮残留応力を導入できることであるが、この場合の欠点としては、軟窒化化合物層のはく離等が上げられる。しかし、軟窒化材にピーニングを施すことが疲労強度上有利であるか否かは解明されていない。

そこで、軟窒化処理した切欠付試験片に二段ピーニング^{(1)(5)~(11)}あるいは応力二段ピーニング^{(5)(7)(9)~(11)}を施し、軟窒化表面に形成された軟窒化化合物層の状態、硬さ分布、残留応力分布および疲労強度について調査し、ピーニングの効果を検討した。その結果、疲労強度を大幅に向上できることが判明したのでその結果を報告する。

2. 実験方法

供試材は、JIS 機械構造用炭素鋼 S 50 C であり、その化学成分を表 1 に示した。この丸棒を、40×100×8 mm の板材に熱間鍛造後、850°C 加熱→水焼入れ→600°C 焼戻しの処理を施した。その後、図 1 の試験片形状に機械加工してから軟窒化処理を施した。試験片には、先端半径 1.5 mm、深さ 1.5 mm の切欠きが付与されている。図 2 に軟窒化条件を示した。軟窒化処理した試験片の特性は次のごとくである：軟窒化の影響を受けない内部硬さは約 230 HV、旧オーステナイト結晶粒度は JIS No. 8 (平均粒径 20 μ m)、軟窒化拡

散層深さは約 0.8 mm、軟窒化化合物層厚さ [図 3(a) の白い部分] は約 20 μ m、さらに軟窒化化合物層硬さは約 700 HV である。

また、試験片の応力集中係数 (α) を FEM 解析にて求めたところ、 $R=0$ と $R=-1$ 試験片の α は、それぞれ $\alpha=1.33$ と $\alpha=1.23$ であった。

上記試験片に、エアノズル式の二段ピーニング (以下、DSP と略す) と応力二段ピーニング (以下、SDSP と略す) を施した。また、DSP 前に切欠底を約 20 μ m 電解研磨し、軟窒化化合物層を除去した試験片も作成し、その後 DSP (以下、E-Polishing+DSP と略す) を施した。図 3(a) のごとき軟窒化化合物層を除去した目的は、工数を節約して、この化合物層を残したままピーニング処理した場合と、除去後にピーニング処理した場合の疲労強度を比較するためである。

二段ピーニングおよび応力二段ピーニングにおける一段めのピーニング (以下、PSP と略す) には、 $\phi 0.7$ mm、700 HV、二段めのピーニング (以下、SSP と略す) には、 $\phi 0.08$ mm、700 HV のスチールショットを用いた。それぞれのアークハイトは、PSP=0.3 mm (C) と SSP=0.35 mm (N) であった。応力二段ピーニング時の予応力は、 $R=0$ 試験片では四点曲げにより、また、 $R=-1$ 試験片では引張りにより付与した。この予応力は、応力集中を考慮した切欠底の値であり、ともに 800 MPa とした。

これらの試験片を用いて、断面の組織観察、硬さ分布測定、残留応力分布測定および曲げ疲労試験を実施した。組織観察および硬さ測定は、切欠底を試験片の幅方向に切断し、光学顕微鏡とビッカース硬さ計を用いて実施した。残留応力測定には微少部 X 線測定装置を用い、切欠きからやや離れた平滑部で長手方向に評価した。その測定条件の詳細は以下のとおりである：研磨はウインドウ方法でマスキングしてから所定の深さまで電解研磨、X 線は Cr-K α 線、入射 X 線ビーム径は $\phi 2.0$ mm、応力評価方法は $2\theta-\sin^2\psi$ 法 ($\psi: 0, 10, 20, 30$ および 40°)⁽¹⁴⁾。疲労試験は (株) 東京

Table 1 Chemical composition of used material (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.50	0.20	0.78	0.016	0.026	<0.01	0.06	0.06	<0.01

Fig.1 Shape of test piece

Fig.2 Nitrocarburizing conditions

衝機製平面曲げ疲労試験機を用いて、応力比が $R=0$ と $R=-1$ の条件で合計 8 条件実施した。なお、疲労限は 10^7 回とした。

3. 実験結果

3.1 組織観察 図 3 に各種試験片の組織写真を示す。図 3(a) は、ピーニングを施していない試験片

(a) Unpeened test piece

(b) DSP test piece

(c) E-Polishing+DSP test piece

Fig. 3 Micro structure of each test piece

(以後軟窒化材と呼ぶ)であり、表面に厚さ約 $20\ \mu\text{m}$ の軟窒化化合物層(矢印の白い部分)が形成されている。図 3(b) は、軟窒化材に二段ピーニング(DSP)を施した試験片であり、矢印で示した部分には、ピーニングではなく離した軟窒化化合物層が表面近傍(表面～約 $25\ \mu\text{m}$ 深さ)に巻き込まれている。このような軟窒化化合物層の巻き込みがかなり多く観察されたが、これが疲労強度に大きく影響するか否かを調査することは、本研究の目的の一つである。これに対して、図 3(c) の E-Polishing+DSP 試験片では、電解研磨で軟窒化化合物層を取り除いてから二段ピーニングを実施したために、当然ながら軟窒化化合物層の巻き込みは観察されなかった。

3.2 硬さ分布 図 4 に試験片表面近傍の硬さ分布を示す。軟窒化材の軟窒化化合物層直下部での硬さ(HV)は約 320 であり、表面からの軟窒化拡散層深さは約 $800\ \mu\text{m}$ となっている。二段ピーニングにより表面の硬さは 317 HV から 383 HV へと上昇しており、加工硬化層の深さは約 $400\ \mu\text{m}$ となっていた。また、軟窒化化合物層を除去後にピーニングを施した場合とそうでない場合とでは、硬さ分布に相違が認められなかった。

3.3 残留応力分布 切欠底での残留応力測定を試みたが、測定部が平面でないことと傾斜角 ϕ が大きく設定できないことにより精度良く測定することができなかった。そこで、無応力下でピーニングを実施した場合の残留応力分布は、切欠底と平滑部では等しいものと仮定し、平滑部での残留応力分布を測定した。図 5 に切欠きからやや離れた平滑部で得られた残留応力分布を示す。二段ピーニングによる残留応力分布は、定型的な特性を示している^{(5)~(9)(11)}。すなわち、表面部から約 $180\ \mu\text{m}$ 離れた部分に形成された一段めピーニング(PSP)によるピーク応力と、ごく表面部の二段めピーニング(SSP)によるピーク応力の二山形とな

Fig. 4 Hardness distribution

っている。それぞれのピークにおける最大圧縮残留応力値は、第一段めによるのが -640 MPaであり、第二段めによるのが -730 MPaである。また、圧縮残留応力は約 $400\text{ }\mu\text{m}$ の深い位置まで導入されていた。残留応力の場合も、硬さ分布と同様に、軟窒化化合物層を除去後にピーニングを施した場合とそうでない場合とでは、相違が認められなかった。

3.4 疲労試験結果 図6と図7に、それぞれ $R=0$ と $R=-1$ の条件で得られ $S-N$ 線図を示す。 $R=0$ 条件での疲労限は、それぞれ、軟窒化(Unpeened)では ± 300 MPa、二段ピーニング(DSP)材では ± 400 MPa、E-Polishing+DSPでは ± 400 MPaおよび応力二段ピーニングでは ± 475 MPaであった。また、 $R=-1$ 条件の疲労限は同様に ± 450 MPa、 ± 575 MPa、 ± 575 MPaおよび ± 625 MPaであった。なお、この応力は切欠部の断面形状から求めた公称応力である、すなわち応力集中の影響は無視されている。

$R=0$ と $R=-1$ の両条件ともに、軟窒化化合物層を巻き込んだ試験片(DSP)とそうでない試験片(E-Polishing+DSP)の疲労限は同じであった。この原因については後の4章で検討する。また、軟窒化試験片に二段ピーニングまたはE-Polishing+DSPを実施することによる疲労限の向上率は $R=0$ 条件で33%、 $R=-1$ 条件では28%であり、 $R=0$ の場合の

Fig. 5 Residual stress distribution

Fig. 6 S-N diagram ($R=0$)

ほうがわずかに向上率が高い値を示している。これに対して、応力二段ピーニングを実施した場合では、 $R=0$ 条件での向上率が58%であるのに対して、 $R=-1$ の条件では疲労限の向上率がわずか39%であり、応力比が大きな影響を及ぼしていることがわかる。なお、これについても後の4章で考察する。

3.5 破面観察 図8に破面のマクロ写真とSEM像を示す。マクロ写真では、応力集中部の疲労破壊に特徴的なラチェットマークが多く観察される。これは、破壊起点が多数あり、切欠底の幅全体で多くのき裂が同時発生・成長したことを示している。逆にいうならば、局所的な材料欠陥などで寿命が決定されていない信頼度が高い疲労試験であったといえる。また、図8(b)や(d)のごときSEM像より、疲労き裂の起点は表面であり、図3(b)に示すよう軟窒化化合物層の巻き込みを起点とした例は見当たらないことがわかる。

4. 考 察

4.1 軟窒化化合物層巻き込みの影響 Stage Iのき裂発生・進展を抑制するためには、結晶粒の微細化と高降伏応力化が重要である⁽¹⁾。また、Stage IIのき裂は、モードIの応力拡大係数(K)の変動幅で進展する。したがって、大きい圧縮残留応力を導入することにより、Stage IIのき裂進展を阻止できる。その場合には、Stage Iのき裂は停留き裂となり、疲労強度は向上する⁽¹⁾。

本実験では、応力比によらず、軟窒化化合物層を巻き込んだ試験片とそうでない試験片の疲労限は同じであり、軟窒化化合物層の巻き込みが疲労限に影響を及ぼしていないといえる。これは以下のような理由によるものと考えられる。

(1) 軟窒化化合物層巻き込み部の深さは最大で $25\text{ }\mu\text{m}$ 程度あった。これに対して、疲労過程のStage

Fig. 7 S-N diagram ($R=-1$)

I き裂の長さは1~3結晶粒であるとされている⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。したがって、Stage I き裂の最大長さは20~60 μm である。このことから、軟窒化化合物層巻き込みの深さは、Stage I き裂の長さと同程度あるいはそれ以下であるといえる。

(2) 軟窒化化合物層巻き込み部が応力集中源となり形成された Stage I き裂や、その巻き込みがない部分に発生した Stage I き裂の、Stage II き裂への遷移条件は圧縮残留応力の大きさに影響される。

(3) 以上のことより、軟窒化化合物層巻き込み試験片とそうでない試験片の圧縮残留応力が等しいならば、両試験片の疲労限は等しくなると結論される。

4.2 応力比の影響 著者らは、応力比(R)が正の部品では、可能な限り大きくて深い圧縮残留応力の導入をするのが好ましいが、 R が負の場合には、外力による圧縮応力と圧縮残留応力の和が降伏応力を越えることによる(以下、圧縮降伏と略す)残留応力減少の問題があり、適切な残留応力設計が必要と考えている^{(1)~(4)}。

応力比(R)=-1の各試験片の応力比(R)=0に対する疲労限は、Unpeened, DSP, E-Polishing+DSP およびSDSP おおの1.5倍, 1.44倍, 1.44倍および1.32倍であった。これは $R=-1$ の平均応力は零、 $R=0$ は振幅応力に相当する平均応力であるため、修正グッドマン線図などに代表される疲労限に及ぼす平均応力の影響⁽¹⁷⁾によるものである。また、圧縮残留応力が大きいものほど向上率が小さくなっている。これは、 $R=-1$ 条件にて圧縮降伏が発生し圧縮残留応力が大きいものほどその影響が大きかったためと推察される。そこで、今回の試験結果について圧縮降伏の検討を行った。なお、この検討は以下のような仮定に基づいて行った。①試験片の引張強度(σ_B)=HV $\times$ 3.27(係数)、②降伏比(σ_y/σ_B)=0.8、③引張降伏強度は圧縮降伏強度に等しく、繰返し硬化や軟化はない、④切欠底の圧縮残留応力は平滑部の圧縮残留応力に等しい、⑤ピーニングなし試験片の切欠底表面残留応力=-200 MPa、⑥二段ピーニング材の切欠底表面残留応力=-700 MPa、⑦応力二段ピーニング材の切欠

(a) Macro, Unpeened, $R=-1(\pm 495 \text{ MPa})$

(b) SEM, Unpeened, $R=-1(\pm 495 \text{ MPa})$

(c) Macro, DSP, $R=-1(\pm 599 \text{ MPa})$

(d) SEM, DSP, $R=-1(\pm 599 \text{ MPa})$

Fig. 8 Macro and SEM photographs of fracture surface

Fig. 9 Relation between residual stress and testing stress

底残留応力 $=-700$ MPa (DSP の σ_r) -800 MPa (予応力) $\div 2$ 。応力ピーニングにおいては、付与した応力の 50 $\sim$ 70%^{(7)(9)~(11)} がピーニングによる圧縮残留応力の増大に寄与することが知られている。しかし、試験片形状によりなぜその寄与率が変化するのかについては不明の点が多い。特に、応力集中の影響に関しては全く未解明である。そこで、本論文においては、仮定⑦のごとく低めの寄与率を仮定した。

次に、各試験条件の疲労限における振幅応力 (σ_a)、最大応力 (σ_{max})、最小応力 (σ_{min})、平均応力 (σ_{mean}) を求め、それぞれに圧縮残留応力 (σ_r) を加算し検証した。図 9 に示す残留応力と試験応力との関係より、圧縮降伏が発生する残留応力は、 $R=-1$ 条件では -400 MPa 以下、 $R=0$ 条件では -1000 MPa 以下である。また、図 10 に示す応力集中および残留応力を考慮した耐久限度線図(修正グッドマン)より、残留応力が小さく(ピーニングによる圧縮残留応力が大きく)なるに従い平均応力が小さくなり圧縮降伏が発生することになる。特に $R=-1$ 条件の場合には、大きな圧縮降伏が発生し平均応力と疲労限の比例関係は成立しなくなる。なお、今回の検討にあたり、切欠表面の残留応力および試験応力は二軸応力であるが、次の理由から、単軸応力として比較した。①切欠底のショットピーニングによる残留応力の状態(二軸方向の実測値)が不明である。②切欠底の試験応力を確認したところ、二軸応力と単軸応力の差は 7% 程度であった。③圧縮残留応力と圧縮降伏の関係の概略的な検討である。以上から明らかなように、 R が負の場合には、圧縮降伏により圧縮残留応力が減少するために、二軸応力場での詳細な圧縮降伏の検討を行った上で、最適残留応力の設計方法を確立することは今後の課題であるといえる。

Fig. 10 Fatigue limit diagram

5. 結 言

調質処理した S 50 C 鋼から切欠付試験片を製作し、それに二段ピーニングあるいは応力二段ピーニングを施し、その特性を系統的に調査した結果、以下の結論を得た。

(1) 軟窒化による硬化層(拡散層)の厚さは、軟窒化化合物層を含めて約 800 μ m であった。

(2) ショットピーニング(以下ピーニング)による加工硬化層は約 400 μ m であった。

(3) 二段ピーニングにより導入された表面圧縮残留応力は -701 MPa、最大圧縮残留応力は -733 MPa であり、相当大きな圧縮残留応力が導入されていた。

(4) 疲労限の向上率は、応力比(R) $=0$ の条件では二段ピーニングで 33%、応力二段ピーニングで 58% である。しかし、応力比(R) $=-1$ の条件では、二段ピーニングで 28%、応力二段ピーニングで 39% であった。

(5) 軟窒化化合物層を巻き込んだ二段ピーニング材と、それがない電解研磨後二段ピーニング材の疲労限は同じであった。このことから、大きな圧縮残留応力が導入されていれば、軟窒化化合物層の巻き込みは疲労限に影響を及ぼさないと結論し、その原因について考察した。

(6) 応力比(R) $=0$ の条件では、大きい圧縮残留応力を導入するにつれて疲労限が向上した。しかし、応力比(R) $=-1$ の条件では、外力で圧縮時に降伏が発生して、残留応力が減少するために必ずしもこのような関係が成立しない。

ショットピーニングの実施にあたり多大なご協力をいただいた日神金属(株)の神社長、および有限要素法解析を実施していただいた横浜国立大学工学部の高橋講師に深く感謝する。

文 献

- (1) 石上英征・松井勝幸・丹下彰・安藤柱, 圧力技術, **38**-4 (2000), 205-215.
- (2) 松井勝幸, 横浜国立大学学位論文, (2000-3).
- (3) 石上英征, 横浜国立大学学位論文, (2001-3).
- (4) 丹下彰, 横浜国立大学学位論文, (2001-3).
- (5) Tange, A. and Ando, K., *Mater. Sci. Technol.*, **18** (2002), 642-648.
- (6) 松井勝幸・衛藤洋仁・雪竹克也・三阪佳孝・安藤柱, 機論, **66**-650, A (2000), 1878-1885.
- (7) 衛藤洋仁・松井勝幸・安藤柱・神泰行, 機論, **69**-680, A (2003), 733-740.
- (8) 松井勝幸・衛藤洋仁・川岸一博・三阪佳孝・安藤柱, 機論, **65**-637, A (1999), 1942-1947.
- (9) 石上英征・松井勝幸・神泰行・安藤柱, 機論, **66**-648, A (2000), 1547-1554.
- (10) 岡由秀樹・丹下彰・安藤柱, ばね論文集, **46** (2001), 27-31.
- (11) Ishigami, H., Matsui, K., Jin, Y. and Ando, K., *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, **23** (2000), 959-963.
- (12) 例えば, ショットピーニング技術協会編, ショットピーニングの方法と効果, (1997), 172, 日刊工業新聞社.
- (13) 例えば, 岡本正三, 鉄鋼材料, (1971), 409, コロナ社.
- (14) 例えば, 日本材料学会編, X線材料強度学, (1973), 522, 養賢堂.
- (15) Nakai, Y., Fukuhara, S. and Ohnishi, K., *Int. J. Fatigue*, **19**-1 (1997), 223-236.
- (16) 越智保雄・佐々木茂美・平沢泰治, 材料, **31**-345 (1982), 559-565.
- (17) 例えば, 日本材料学会編, 疲労設計便覧, (1995), 82-90, 養賢堂.