遠心力式二段ショットピーニングを施した浸炭鋼の 表面特性と疲労限度*

松井勝幸**, 山田明徳***, 伊禮忠雄****, 神 泰行*****

Surface Characteristics and Bending Fatigue Limit of Carburized Steel treated by Double Shot Peening using Centrifugal Force type equipments

Katsuyuki MATSUI, Yoshitomi YAMADA, Tadao IREI and Yasuyuki JIN

The surface refining method is a useful technique to improve the mechanical properties such as the fatigue strength of automobile parts. Double Shot Peening (DSP) method, especially its advanced technique of using extensively small shots (less than $\phi 100\mu\text{m}$) at the secondary peening, can increase hardness and compressive residual stress under the surface of the parts. Although the air direct pressure type Shot Peening (ADP-SP) equipments are used as this method, if DSP becomes possible with the centrifugal force type Shot Peening (CF-SP) equipments, the application of DSP to the big size parts such as Ring Gear for commercial vehicle will be expanded. Therefore, an experiment using two kinds of DSP specimens treated by CF-SP and ADP-SP equipments was conducted, and their surface characteristics and bending fatigue strength were evaluated. As the result, it was found that the surface characteristics and bending fatigue limit of the DSP specimen treated by CF-SP equipments and the ADP-SP equipments are almost the same.

Key Words: Peening, Fatigue, Carburizing, Hardness, Residual Stress, Steel

1. 緒 言

商用車(トラック・バス)においては、2015年度から世界初の重量車燃費基準(トップランナー基準)が施行される。低燃費化の手法として、車両の軽量化があげられるが、商用車の低燃費化と積載量のアップを両立させるためには、単なる軽量化ではなく、往復や回転運動部品の慣性質量の低減が効果的と考えられている。このため、エンジンの小排気量化やトランスミッションなどのダウンサイジングが進められている。したがって、これらの構成部品の大幅な疲労強度向上をはからなければならない。部品の大幅な疲労強度向上手法として、二段めに $100\mu\text{m}$ 以下のファインショットを用いる二段ショットピーニング(DSP)があり、このピーニング装置には空気直圧式が用いられているが¹⁾、遠心力式でも可能になれば、商用車用Ring Gearのような大きな部品への適用範囲が拡大する。

ところで、空気直圧式が適用できるショット粒径は $10\mu\text{m}$ 以上で、遠心力式のそれは $100\mu\text{m}$ 以上とされており²⁾、 $\phi 100\mu\text{m}$ 以下のファインショットの遠心力式への適

用は難しいと考えられる。また、空気直圧式のショット投射速度は最高 150m/s に達するが、遠心力式の投射速度は 100m/s 以下といわれている³⁾。このように、空気直圧式と遠心力式とは異なる。

そこで、まず、遠心力式DSPの条件設定の基礎実験を行った。次に、基礎実験で得られた結果をもとに、遠心力式DSPを施した曲げ疲労試験片を製作し、空気直圧式DSPの表面特性と曲げ疲労強度を比較した。ここでは、この結果について概説する。

2. 実験方法

2.1 供試材と表面改質方法

供試材には、JIS機械構造用合金鋼鋼材SCM822Hを用いた。その主な化学成分をTable 1に示す。この鋼材をFig.1

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

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.22	0.27	0.74	0.014	0.010	0.17	0.06	1.09	0.36

原稿受付日 2013年10月23日

* 日本ばね学会2013年度春季講演会

** 元いすゞ自動車株式会社 (ISUZU MOTORS LTD.)

*** いすゞ自動車株式会社 車両審査実験部 (ISUZU MOTORS LTD.)

**** DOWAサーモエンジニアリング株式会社 熱処理加工部 太田工場 (DOWA THERMOENGINEERING CO.,LTD.)

***** 日神金属株式会社 取締役社長 (NISSIN KINZOKU CO.,LTD.)

に示す形状に機械加工した。Fig.1のa)は基礎実験用試験片、b)は形状係数(応力集中係数： α)=1.56の曲げ疲労試験片である。これらの試験片にFig.2に示す浸炭焼入焼戻し(GC)処理を施した。

その後、a)の基礎実験用試験片にTable 2に示す条件で遠心力式ヘビーショットピーニング(HSP)を行った。使用したショットは粒径0.7mm、硬さ700HVの鋳鋼ショットである。記号CH-70、CH-80及びCH-90のショット投射速度は、それぞれ70、80及び90m/sの3水準で、カバレッジは300%以上とした。ここで、投射速度は、便宜上インペラの周速とした。また、比較のため、同じ試験片に空気直圧式でショットピーニング(SP)を施した。この試験片の記号はAir-H、また、SPを施さない試験片の記号はNonとした。

遠心力式ファインショットピーニング(FSP)の条件をTable 3に示す。ショット仕様は、粒径 ϕ 0.08mm、硬さ700HVの鋳鋼ショットである。投射速度は、60、70、80および90m/sの4水準とし、それぞれの試験片の記号はCF-60、CF-70、CF-80及びCF-90である。なお、HSPとFSPのカバレッジは、いずれも300%以上とした。

次に、基礎実験で得られた結果をもとに、Fig.1のb)に示した曲げ疲労試験片に遠心力式DSPを施した。この試験片のショットピーニング範囲は40mmとした。

2.2 表面特性の評価方法

試験片の硬さ分布と残留応力(σ_r)分布を深さ方向に測定した。硬さ試験にはピッカース硬さ試験機を用いて、試験力2.942Nで測定した。また、 σ_r の測定には微小部X線測定装置を用いた。X線による σ_r 測定条件は、特性X線：Cr-K α 線、入射X線ビーム径：0.5mm、 σ_r の算出： 2θ - $\sin^2\psi$ 法とした。なお、基礎実験用試験片の回折角測定方向は並傾法、曲げ疲労試験片のそれは側傾法で行った。

Fig. 1 Shape of specimens (unit : mm).

Fig. 2 Pattern of carburizing, quenching and tempering.

Table 2 Basic experimental conditions of Heavy Shot Peening.

Item	CH70	CH80	CH90	Air-H	Non
Used equipment	Centrifugal force type			Air type	Unpeened
Shot dia.	ϕ 0.7mm				
Shot hardness	700HV				
Shot velocity or air pressure	70m/s	80m/s	90m/s	392kPa	
Coverage	$\geq 300\%$				

Table 3 Basic experimental conditions of Fine Shot Peening.

Item	CF60	CF70	CF80	CF90	Air-F
Used equipment	Centrifugal force type				Air type
Shot dia.	ϕ 0.08mm				
Shot hardness	700HV				
Shot velocity or air pressure	60m/s	70m/s	80m/s	90m/s	196kPa
Coverage	$\geq 300\%$

Fig. 3 Residual stress distribution of each HSP specimen.

Fig. 4 σ_{rmax} and $d_{\sigma_{rmax}}$ vs. shot velocity at HSP using centrifugal force (CF) type equipment.

2.3 曲げ疲労試験方法

小野式回転曲げ疲労試験機を用いて、曲げ疲労試験を行った。周波数は50Hz、負荷応力振幅は切欠き底の公称応力に形状係数(応力集中係数: a)=1.56を乗じた値とした。また、曲げ疲労限度は 10^7 回の繰返し応力に耐えた応力振幅の最大値とした。

3. 実験結果と考察

3.1 遠心力式HSPとFSPの残留応力分布

Fig.3に各HSP試験片の残留応力分布を示す。DSPの残留応力分布は、1段めと2段めの残留応力分布の重ね合せで形成される。したがって、1段めと2段めの残留応力分布を円滑に繋ぎ合わせるには、1段めの最大圧縮残留応力(σ_{rmax})と σ_{rmax} 導入深さ($d_{\sigma_{rmax}}$)が特に重要である。空気直圧式の試験片Air-Hの σ_{rmax} は $74\mu m$ に導入されており、その値は1349MPaであった。これに対して、遠心力式で投射速度70m/sの試験片CH-70、80m/sの試験片CH-80及び90m/sの試験片CH-90の σ_{rmax} は、それぞれ1322MPa、1345MPaおよび1354MPaであった。また、CH-70、CH-80及びCH-90

Fig. 5 Residual stress distribution of each FSP specimen.

の $d_{\sigma_{rmax}}$ は、それぞれ $66\mu m$ 、 $73\mu m$ 及び $80\mu m$ であった。遠心力式で投射速度70~90m/s間で大きな差異がなく、かつ、空気直圧式と大きな差は認められなかった。

Fig.4に遠心力式HSPにおける投射速度と σ_{rmax} 及び投射速度と $d_{\sigma_{rmax}}$ との関係を示す。投射速度が早くなると、当然 σ_{rmax} が大きくなり、 $d_{\sigma_{rmax}}$ は深くなる傾向が窺える。

空気直圧式の投射速度は100m/sまたはそれ以上とされている。空気直圧式より投射速度が遅いと考えられている遠心力式HSPで、空気直圧式HSPと同等の残留応力分布が得られた要因は次のように推察される。

- (1) 空気直圧式では空気で被処理品が冷却される。一方、遠心力式では密閉された空間でのSPのため、空気直圧式のように被処理品が冷却されない。
- (2) 上記のため、SP中の被処理品の表面近傍の温度は空気直圧式より遠心力式のほうが高いと考えられる。表面近傍の温度が高くなると、表面近傍の降伏応力が低下するので、空気直圧式より遠心力式のほうが降伏しやすい。
- (3) このため、空気直圧式より投射速度が遅いと考えられる遠心力式でも、空気直圧式と同等の残留応力分布が得られる。

Fig.5に各FSP試験片の残留応力分布を示す。FSPでは表面の圧縮残留応力(σ_{rs})も重要なので、評価した。空気直圧式の試験片Air-Fの σ_{rs} は1332MPa、 σ_{rmax} は1524MPaおよび $d_{\sigma_{rmax}}$ は $9\mu m$ であった。遠心力式の投射速度60m/sの試験片CF-60の σ_{rmax} は表面に発生し、その値は1399MPaとなっていた。遠心力式の投射速度70m/sの試験片CF-70、80m/sの試験片CF-80および90m/sの試験片CF-90の σ_{rs} は、それぞれ1289MPa、1264MPa及び1181MPaであった。また、これらの試験片の $d_{\sigma_{rmax}}$ は、それぞれ $5\mu m$ 、 $9\mu m$ および $10\mu m$ 、 σ_{rmax} は、それぞれ1491MPa、1496MPaおよび1530MPaであった。特徴的なのは、Air-Fの圧縮残留応力300MPaの導入深さは $63\mu m$ 深さに対して、遠心力式のそれは約30~44 μm 深さと浅いということである。

Fig. 6 σ_{rs} , σ_{rmax} and $d\sigma_{rmax}$ vs. shot velocity at FSP using CF type equipment.

Fig. 7 Hardness distribution of each bending fatigue specimen.

Fig.6に遠心力式FSPにおける投射速度と σ_{rs} 、投射速度と σ_{rmax} 及び投射速度と $d\sigma_{rmax}$ との関係を示す。投射速度が早くなると、① σ_{rs} は小さくなるが σ_{rmax} は大きくなる、② $d\sigma_{rmax}$ は深くなる、傾向を示した。また、遠心力式のCF-80とCF-90の σ_{rmax} と $d\sigma_{rmax}$ は、空気直圧式のAir-Fのそれらとほとんど同じ値を示していることがわかる。

3.2 遠心力式DSPの表面特性

遠心力式HSPとFSPの投射速度は、インペラの高速回転による装置の早期劣化を考慮して、いずれも80m/sとし、Fig.1(b)に示した曲げ疲労試験片にDSPを施した。

Fig.7に各曲げ疲労試験片の硬さ分布を示す。図中のCDは遠心力式DSP、Air-Dは空気直圧式DSPの硬さ分布である。疲労破壊過程のStage Iのき裂発生段階で特に重要な表面直下(0.03mm深さ)の硬さは、CD=892HV、Air-D=888HVで、ほとんど同じ硬さであった。また、深さ方向の硬さ分布も同等である。

Fig.8に各曲げ疲労試験片の残留応力分布を示す。測定方向は、曲げ疲労強度上重要な軸方向とした。Air-Dの σ_{rs} は1249MPa、CDのそれは1311MPaとなっていた。圧縮残留応

Fig. 8 Residual stress distribution of each bending fatigue specimen.

Fig. 9 K_r value of each bending fatigue specimen.

力のピークは、いずれも2つあり、表面に近いほうはFSPの、これより奥のほうはHSPのピークである。FSPの圧縮残留応力のピークの深さは、CD=7 μ m、Air-D=16 μ mであった。これらの深さの圧縮残留応力は、それぞれCD=1451MPa、Air-D=1448MPaで、ほとんど同じ値を示した。HSPのピークの深さは、CD=59 μ m、Air-D=65 μ mであった。また、これらの深さの圧縮残留応力は、CD=1315MPa、Air-D=1388MPaで、Air-Dのほうが高く、かつ、これより深い位置でも、Air-Dの圧縮残留応力のほうが高くなっていた。

圧縮残留応力は、疲労き裂進展の抵抗因子となる。両者のピークの圧縮残留応力はほとんど同じであるが、深い位置の圧縮残留応力はAir-Dのほうが高くなっている。この差が疲労強度に及ぼす影響を評価するため、き裂形状を半円と仮定して、API579⁴⁾の四次式で表される残留応力場における表面き裂の応力拡大係数を求める方法を用いて、半円底のき裂最深部の K_r 値を計算した。Fig.9に K_r 値の計算結果を示す。ショットピーニングで導入された残留応力は圧縮残留応力であるので、計算される K_r は当然負の値となる。CDの K_r の絶対値のピーク値は16.3MPa $\cdot$ m^{1/2}となった。

Fig. 10 S-N diagram of bending fatigue test.

Fig. 11 σ_w vs $\sigma_y + \sigma_{rmax}$.

これに対して、Air-Dのそれは $17.1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ を示し、CDのその1.05倍であった。また、Air-Dのピーク以降の K_r 値もCDのそれより大きくなっている。これから、CDの曲げ疲労強度よりAir-Dのそのほうが高くなると推察される。

3.3 曲げ疲労限度

Fig.10に各試験片の曲げ疲労のS-N線図を示す。縦軸は公称曲げ応力に $\alpha=1.56$ を乗じた値である。CDの曲げ疲労限度(σ_w)は $\pm 1482\text{MPa}$ 、Air-Dのそれは $\pm 1560\text{MPa}$ であり、CDの σ_w に対するAir-Dのそれは1.05倍であった。また、 $5 \times 10^4 \sim 4 \times 10^6$ 回の疲労強度も、Air-Dのほうが $\pm 50\text{MPa}$ 程度高い値を示した。CDの σ_w よりAir-Dのそのほうが高いのは、Air-Dの K_r の最大値や積分値がCDのそれより大きい効果によると推察される。

3.4 曲げ疲労限度の妥当性の検証

応力集中する部品の曲げ疲労破壊起点は表面であり、高い σ_w を得るには、①表面直下の硬さの向上と②表面近傍への大きな圧縮残留応力の導入が最善と考えられている⁵⁾。そして、 σ_w は式(1)に示す表面直下の硬さから計算した降

Fig. 12 Application example of DSP using centrifugal force type equipment.

伏応力(σ_y)と表面近傍の σ_{rmax} との和に比例することが報告されている⁶⁾。

$$\sigma_y = \frac{HV}{3} \times 9.80665 \times \text{降伏比}(0.95) \\ = 3.105 \times HV (\text{単位: MPa}) \quad (1)$$

Fig.11に $\sigma_y + \sigma_{rmax}$ と σ_w との関係を示す。図中の□Nonはピーニングなしの試験片、■C-OSPは遠心力式普通ショットピーニング試験片及び△C-OSP+Air-FSPはC-OSP試験片に空気直圧式FSPを施した試験片を示し、Non、C-OSP及びC-OSP+Air-FSPの σ_w は、それぞれ $\pm 831\text{MPa}$ 、 $\pm 1265\text{MPa}$ 及び $\pm 1464\text{MPa}$ である⁶⁾。また、図中の破線は合計5つの試験片で得られた直線であり、この関係式を式(2)に示す。

$$\sigma_w = 0.3605(\sigma_y + \sigma_{rmax}) \quad (2)$$

今回の遠心力式DSPの σ_w は、C-OSP+Air-FSP以上の値を示しているため、十分なポテンシャルを有するといえる。

3.5 適用部品例

遠心力式DSPを適用した部品例として、商用車のトランスミッション用Shaftやファイナルドライブ用Ring Gearなどがある。Fig.12に示すように、Ring GearとPinionをセットでショットピーニングを施している。遠心力式装置でのピーニング処理時間は、空気直圧式のその1/5~1/10程度に短縮できる。遠心力式DSPによりファイナルドライブのダウンサイジングが実現できた。

4. 結 言

遠心力式DSPの条件設定の基礎実験を行った。この結果をもとに、遠心力式DSPを施した曲げ疲労試験片を製作し、空気直圧式DSPの表面特性と曲げ疲労強度を比較した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 遠心力式DSPの表面直下(0.03mm深さ)の硬さは892HV、空気直圧式DSPのそれは888HVで、ほとんど同じ硬さを示した。
- (2) 遠心力式DSPと空気直圧式DSPの最大圧縮残留応力は、それぞれ1451MPaと1448MPaであり、ほとんど同じ値を示した。しかし、内部の圧縮残留応力は、空気直圧式DSPのほうが高くなっていた。
- (3) き裂形状を半円と仮定して、半円底のき裂最深部における残留応力の応力拡大係数(K_r)を計算した。遠心力式DSPの K_r の絶対値の最大は $16.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、空気直圧式DSPのそれは $17.1\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ で空気直圧式DSPのそのほうが $0.8\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 大きな値を示した。

また、 K_t の積分値も空気直圧式DSPのほうが大きいようである。

- (4)遠心力式DSPの曲げ疲労限度(σ_w)は公称応力で $\pm 950\text{MPa}$ 、空気直圧式DSPのそれは $\pm 1000\text{MPa}$ で、遠心力DSPの σ_w は空気直圧式DSPのそれより若干低かったが、十分なポテンシャルを有するといえる。

参考文献

- 1) 松井勝幸・安藤 柱, 二段ショットピーニングによる歯車の曲げ疲労強度向上, JSAE Symposium, No.15-06 (2006), 1-5.
- 2) (財)機械システム振興協会, 高速粒子衝突を利用した革新部材創製に関する調査研究報告書 (2005), 12.
- 3) ショットピーニング技術協会, 金属疲労とショットピーニング, 66-67.
- 4) API579, Recommended Practice for Fitness for Service and Continued Operation of Equipment, C2.2 (2000).
- 5) 安藤 柱, 金属, 75-10 (2005), 6-9.
- 6) 松井 勝幸, 浸炭鋼の曲げ疲労限度に対するショットピーニングの効果, ショットピーニング技術, 第25巻第1号 (2013), 2-10.