SUP10 ばね鋼の諸特性に及ぼす FPB 処理の影響*

南部 紘一郎^{*1}, 松坂 佳祐^{*2}, 江上 登^{*3}Influence of Fine Particle Bombarding
on Various Characteristics of SUP10Koichiro NANBU^{*4}, Keisuke MATSUZAKA and Noboru EGAMI^{*4} Department of Mechanical Engineering, Meijo University,
1-501 Shiogamaguchi, Tenpaku-ku, Nagoya-shi, Aichi, 468-8502 Japan

The FPB (Fine Particle Bombarding) process attracts attention as a new surface-preparation technique. The influence of surface modification by the FPB process on various characteristics of SUP10 was investigated. The surface roughness of FPB treatment materials decreased more than shot peening treatment materials. As a result of comparing the shot time of FPB process, it proved that surface roughness increased as the shot time became long. On every projection conditions of FPB process, the hardness near the surface rose higher than the shot-peening. Hardness was the maximum at the time of shot time 20 seconds, and residual stress was the maximum at the time of 5 seconds. The maximum compressive residual stress was a value equivalent to a shot-peening process. The fatigue strength of the FPB material rose than shot-peening material by low surface roughness and high surface hardness. These results showed that a FPB process was effective in the improvement in fatigue strength of spring steel.

Key Words: SUP10, Fatigue Strength, Shot Peening, Fine Particle Bombarding, EBSD

1. 緒 言

近年, 地球環境問題への取り組み, あるいは省エネルギーの観点から自動車の燃費向上のために, 自動車用部品の軽量化が求められている。そのために, 自動車部品の一つである懸架ばねは, 軽量化のために疲労強度の向上が必要不可欠である。疲労強度向上には, 材料を高硬度にする必要があるが, 高硬度の材料では一般に切欠き感受性が増大するため, 表面に存在する微小欠陥が疲労強度低下の要因となることが指摘されている⁽¹⁾⁽²⁾。

現在, 微小欠陥による疲労強度低下を抑制する目的で, ショットピーニング(以下 SP と呼ぶ)を施すことが多い^{(3)~(5)}。SP は粒径 0.5~数 mm 程度の投射材を加工材に投射し, 主に表面近傍の硬度上昇と圧縮残留応力の付与によって疲労強度を向上させる方法である。しかしながら, SP を施すことによって表面は梨

地状となり, 表面粗さが増大する。ばねのような表面で応力が最大となる部材では, 表面粗さも疲労強度に影響を及ぼす要因となる⁽⁶⁾。

そこで著者らは, 近年活発に研究が進められている微粒子衝突処理(以下 FPB と呼ぶ)に着目した。FPB は粒径 0.04~0.2 mm 程度の投射材を使用し, SP と同様の効果を得るとともに, 表面粗さが SP 処理よりも格段に小さくできる処理方法である^{(7)~(9)}。また, 投射速度は投射材の種類によってもことなるが, 最大で 200 m/s 程度の高速となり⁽¹⁰⁾, かつ表面に層状の微細結晶粒組織が形成されるとの報告もある⁽¹¹⁾。したがって, FPB を施すことにより, SP よりもさらに疲労強度を向上させることができると考えられる。

また, ばね鋼に対して FPB を施して疲労挙動を検討した報告はほとんど見あたらない。

以上の観点から, 本研究では SUP10 ばね鋼に対し, 種々の条件で FPB を行い, 疲労強度向上について検討するとともに, SP 材との比較検討を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材として, SUP10 ばね鋼材を用いた。その化学成分を表 1 に示す。また, 試験片の形状・寸法を図 1 に示す。試験片は素

* 原稿受付 2010 年 1 月 5 日。

^{*1} 正員, 名城大学大学院理工学研究科機械工学専攻(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501)。^{*2} 学生員, 名城大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻。^{*3} 正員, 永年会員, 名城大学工学部。

E-mail: m0853502@ccmailg.meijo-u.ac.jp

Table 1 Chemical compositions [mass%]

C	Si	Mn	Ni	V	Cu
0.5	0.25	0.84	0.02	0.17	0.01

Table 2 Shot conditions

Bombarding device	Direct pressure peening device
Air pressure	0.6MPa
Diameter of nozzle	3mm
Shot material	FHS100 μ m (FPB)
	FHS500 μ m (SP)
Bombarding time	5,20sec

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen (in mm)

材を熱処理後(焼入れ; 1123 K, 20 min 保持後油冷, 焼戻し; 773 K, 1 h 保持後水冷)機械加工によって所定の形状に加工した。その後エメリー研磨を($\sim$ 800)行った後に 773 K, 1 h の真空焼鈍を行った。真空焼鈍後の硬さは 405 HV であった。

2.2 投射条件 表 2 に, 本研究で行った FPB および SP の条件を示す。投射方式は直圧式を採用した。投射材は FPB 用として粒径 100 μ m の FHS(ハイス)材を使用し, 投射距離は 50 mm とした。また, SP 用には粒径 500 μ m の FHS 材を使用し, 投射距離は 100 mm とした。SP の投射時間は 20 sec のみとし, FPB は 5 および 20 sec の 2 種類とした。投射圧は投射材に関わらず 0.6 MPa とした。なお, 予備実験として投射材に FHS の 100 μ m を使用し, 投射時間を 5~240 sec と変化させた場合の硬さおよび残留応力で良好な値が得られた 5 および 20 sec を本研究の評価対象とした。

2.3 硬さおよび残留応力測定 硬さ測定はマイクロビッカース硬さ測定機を使用した。測定荷重は 0.01 N とし, 断面深さ方向の硬さ分布を測定した。微小領域でのばらつきが考えられるため, 同一深さにおいて 5 点測定を行い, その平均値を測定値とした。

残留応力測定は X 線回折装置を使用し, 表 3 に示す条件で行った。なお, 深さ方向の残留応力測定は電解研磨による表面除去法を採用した。

2.4 疲労試験 疲労試験は電気油圧式サーボ疲

Table 3 X-ray diffraction measurement conditions

Voltage(KV)	30
Current(mA)	30
Method	Parallel beam method
Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane (hkl)	211
Diffraction angle (deg)	156.4
Ψ angle(deg)	0,9,18,27,36,45
Stress constant (MPa/deg)	-319
Peak determination	Half value breadth

Fig. 2 Surface roughness

労試験機を用い, 4 点曲げ疲労試験を行った。負荷条件は, 応力比 $R=0.1$, 繰返し速度 20 Hz, 応力波形は正弦波とし, 室温, 大気中とした。疲労限度は, 1×10^7 回の繰返しで破断しない最大の応力とした。組織観察および試験片の破面観察には, 走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 表面粗さ 表面粗さ測定は, 触針式の表面粗さ測定機を用い, JIS B 0601:2001 に従って行った。図 2 にその結果を示す。図示のごとく, FPB, SP 処理を施すことによって, 10 点平均粗さ (R_a), 最大粗さ (R_z) とともに未処理材(以下 Non-treated と呼ぶ)よりも大きくなった。SP 材(以下 SP 20 と呼ぶ)の場合は, R_a が 3.8 μ m, R_z が 23.2 μ m であるのに対し, FPB では 5 sec 投射材(以下 FPB5 と呼ぶ)の R_a および R_z が 0.79, 5.73 μ m と, 20 sec 投射材(以下 FPB20 と呼ぶ)の R_a および R_z が 1.0, 6.3 μ m となり, SP 20 よりも著しく低い値を示した。また, FPB 材と比較すると投射時間が長くなるにつれて増加する傾向を示した。FPB が SP よりも R_a , R_z とともに低い値とな

った理由としては、投射材が $100\ \mu\text{m}$ と小さいことがあげられる。また、FPB に注目すると投射時間が長くなると表面粗さは増加するが、FPB の場合、表面近傍における粒子衝突後の極瞬間的な温度が $1\ 000\ \text{K}$ 近くまで上昇する可能性があるとの報告⁽¹⁰⁾ があることから、表面近傍の温度が上昇し、材料表面が変形しやすくなったことも要因のひとつであると考えられる。

3・2 組織観察結果 FPB 処理の場合、表面近傍に層状加工組織が形成されることがある⁽¹¹⁾。そこで本研究で対象とした投射条件においても層状加工組織が形成されると考え、その有無について検討した。その結果を図 3 に示す。図中の矢印で示すごとく、表面近傍に層状加工組織が形成されている。この層状加工組織は局所的に形成されており、その深さは $5\sim 30\ \mu\text{m}$ 程度であった。層状加工組織が形成されるプロセスは、図 4 に示すように、FPB の初期段階で表面近傍

には凹凸が形成され、投射時間の経過とともに凸部が折り畳まれるように繰返し加工をうけたことによるものと考えられる⁽¹²⁾。

次に、結晶粒サイズを検討するために EBSD 法⁽¹³⁾ により表面近傍の結晶方位測定を行った。その結果を図 5 に示す。図中 (a) は Non-treated の結晶方位解析結果である。図から、母材の結晶粒は $2\sim 10\ \mu\text{m}$ 程度である。(b) は FPB20 の表面から $10\ \mu\text{m}$ の深さにおけるものである。図示のごとく、結晶粒が押しつぶされたような横長の形状になっており、その大きさは

Fig. 3 Layered structure (FPB20)

Fig. 4 Form process of layered structure

(a) Non-treated

(b) FHS100-20

(c) Layered structure

Fig. 5 IPF map of the near surface

300~1 000 nm 程度と、母材の 3~50% 程度の結晶粒に微細化していることが確認された。

次に、(c) に示す層状加工組織近傍では、全体的に強加工部分に生ずるノイズにより確認は難しいが、ノイズの生じていない層状加工組織近傍の結晶粒は 300 nm 程度であり、(b) よりも微細化している。このような組織の微細化は、上述した層状加工組織の形成過程からも明らかなように、強加工によるものと考えられる。また、層状加工組織部は、凸部が繰返し折りたたまれることによって、高ひずみが生じているため、ノイズが発生したと考えられ、今後さらに検討を進めたいと考えている。

3.3 マイクロビッカース硬さ分布 断面硬さの測定結果を図 6 に示す。図中の破線は Non-treated の硬さ (405 HV) を示している。図示のごとく、表面から 0.005 mm の深さでは FPB20 が最も高く、約 760 HV であった。この値は Non-treated と比較して 87% 程度上昇している。また、同じ深さに点する層状加工組織では硬さが 1 273 HV と Non-treated よりも約 3 倍の値となった。前述した EBSD 測定では層状加工組織部の正確な観察ができなかったが、硬度が著しく高くなっていることから、表面近傍よりもさらに微細な結晶粒が形成されているものと推察される。すなわち、Miyahara ら⁽¹¹⁾ は硬さが材の 3 倍程度の部分では結晶粒がナノ化していると指摘していることから高硬さの部分ではナノ結晶の存在が考えられる。なお、表面近傍の層状加工組織、層状加工組織以外の組織における硬さは、FPB5 が 680 HV (● 印)、460 HV (○ 印) と FPB20 (□ 印) よりも低い結果を示したが、層状加工組織部以外の硬さ (○) は SP20 (△ 印) と同程度であり、層状加工組織部 (●) では SP20 (▲

印) よりも高い結果となった。

以上のことから、短い投射時間でも FPB の方が SP と同等以上の硬度を付与できることが明らかとなった。また、FPB の方が母材に衝突する速度が速いため、投射材が衝突した瞬間の表面近傍では変形時のひずみ速度が SP よりも高速になると考えられる。そのため、加工硬化が顕著になり高硬度になったと考えられる。

3.4 ひずみ速度と投射速度、投射粒径の関係

FPB 材の表面近傍硬さが上昇した理由として、前述のようにひずみ速度の影響が考えられる。そこで、ひずみ速度に及ぼす投射速度、投射粒径の影響について検討を行った。

ひずみ速度は、Hertz の接触理論より導き出された球の衝突時における弾性接触時間 t_e の計算式⁽¹⁴⁾ から求めた。

$$t_e = \frac{2.94}{V} \left(\frac{5}{4} \frac{m V^2}{n} \right)^{2/5} \quad (1)$$

$$\left\{ n = \frac{4\sqrt{r}}{3\pi(k_1 + k_2)} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}, \quad k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \right. \quad (3)$$

弾性域内では Hooke の法則が成立するため、ひずみ速度は次式で表すことができる。

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dT} = \frac{\epsilon_e}{t_e} = \left(\frac{\sigma_{st}}{E_1} \right) \quad (4)$$

ここで、

V : 投射速度 m/s

m : 投射材質量 kg

r : 粒子半径 m

E_1 : 母材のヤング率 Pa

E_2 : 投射材のヤング率 Pa

ν_1 : 母材のポアソン比

ν_2 : 投射材のポアソン比

σ_{st} : 静的降伏応力 Pa

(1), (4) 式を用いて、粒子速度を 0~200 m/s まで 10 m/s 刻みで変化させた場合のひずみ速度を理論計算により求めた。さらに、投射粒径を 100~800 μm まで 50 μm 刻みで変化させた場合についても検討した。

なお、投射材の物性値は、密度 $\rho_0 = 8\,000 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率 $E_2 = 207 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_2 = 0.28$ とした。母材の物性値は静的降伏応力 $\sigma_{st} = 1\,156 \text{ MPa}$ 、ヤング率 $E_1 = 207 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_1 = 0.3$ を用いた。

図 7 にひずみ速度と投射速度、投射粒径の関係を示す。横軸の目盛りは、 $d = \text{const}$ における粒子速度を

Fig. 6 Hardness distribution

Fig. 7 Effect of particle velocity and particle diameter on strain rate

下に、 $V=\text{const}$ における粒径を上にした。図示のごとく、粒径が小さいほど、また、粒子速度が大きいほど、ひずみ速度は増大する傾向を示した。このように粒径の小さなFPBのSPよりも、投射材の衝突に伴う変形時のひずみ速度が速くなるため、表面近傍の加工硬化が顕著になり高硬度になることが考えられる。

3・5 表面から深さ方向の残留応力分布 残留応力測定結果を図8に示す。図示のごとく、FPB20では -530 MPa の最大圧縮残留応力が表面に発生し、表面からほぼ $75\text{ }\mu\text{m}$ の深さで圧縮から引張りに移行する傾向(クロッシングポイント⁽¹⁵⁾)を示した。これに対してFPB5は -590 MPa であり、表面から $10\text{ }\mu\text{m}$ と若干内部に発生し、クロッシングポイントは表面から $140\text{ }\mu\text{m}$ 近傍であった。SPの圧縮残留応力は -620 MPa 程度とFPBよりも高く、クロッシングポイントもFPBよりも内部であった。

また、圧縮残留応力の最大値がFPB20では表面、FPB5では表面から $10\text{ }\mu\text{m}$ の深さに発生するのに対し、SP20では $180\text{ }\mu\text{m}$ の深さに達している。この傾向はFPB、SPともに一般的な傾向である。

このようにFPB、SPで最大圧縮残留応力の発生する深さが異なる理由として、SPの方が投射材の運動エネルギーが大きいことが考えられる。

3・6 S-N 曲線 対象とした試験片の疲労試験結果を図9に示す。図から、Non-treatedの疲労限度は 288 MPa で、全て表面からの破壊であった。これに対してFPB5およびFPB20の疲労限度は 455

Fig. 8 Residual stress distribution

Fig. 9 S-N curve

MPa , 439 MPa となり Non-treatedよりもそれぞれ 58% 、 52% 高値を示した。両者を比較すると、FPB5の方が 4% 程度上昇した。時間強度についても同様の傾向を示した。これは、FPB20の方がFPB5よりも最大圧縮残留応力が高いためであると考えられる。

層状加工組織部の硬さがFPB20よりも低いFPB5の疲労強度がわずかに高値を示したが、層状加工組織が疲労強度に及ぼす影響は、層状加工組織が局所的に形成されているのでこの様な場合にはそれほど影響しないものと考えられる。なお、現在層状加工組織の均一形成について研究を進めているので、別途、報告する予定である。

一方、SP20の疲労限度は 410 MPa となり、Non-treatedよりも 42% 高値を示したが、FPB5および

(a) FHS100-500 (1200 MPa)

(b) FHS100-20 (1200 MPa)

(c) FHS500-20 (1200 MPa)

Fig. 10 Fracture surface after fatigue testing

FPB20 材よりも低値であった。SP20 の表面近傍の硬さは FPB5 とほぼ同等であり、圧縮残留応力も FPB 材よりも大きい。疲労強度が低いことについては、主に表面粗さの影響が大きいものと考えられる。

以上の結果から、ばね鋼の疲労強度向上には表面粗さの小さい FPB 処理が SP 処理よりも有効であると考えられる。

3・7 破面観察 試験片破断面の SEM 観察結果を図 10 に示す。図示のように、すべての試験片の破壊は表面起点型破壊であった。また、き裂発生起点は試験片表面の粗さが最も大きい部分と考えられる。こ

の結果から、本研究における疲労試験では、表面粗さが疲労強度に大きく影響を及ぼしていると考えられる。

4. 結 言

本研究では SUP10 ばね鋼の疲労強度に及ぼす FPB 処理の影響を検討するとともに、従来の SP 処理との比較検討を行った。結果を要約すると以下のようになる。

(1) 表面粗さは投射時間に関わらず、FPB 処理の方が SP 処理よりも著しく減少する。FPB, SP に関わらず層状加工組織が形成される。

(2) 投射時間に関わらず、FPB は SP よりも表面近傍の硬さが上昇し、FPB20 の層状加工組織では 1273 HV と母材の約 3 倍の硬さとなった。

(3) 残留応力は FPB5 で内部に最大圧縮残留応力が生じ、FPB20 よりも高い値を示した。

(4) 疲労試験の結果、FPB 処理材は投射時間に関わらず、SP 材よりも高い疲労限度を示し、すべて表面起点型破断であった。

以上のことから SP 処理よりも表面粗さの小さい FPB 処理の方がばね鋼の疲労強度向上に極めて有効であることが考えられる。

文 献

- (1) Abe, T. and Kanazawa, K., Effects of non-metallic inclusions on uniaxial and reversed torsion fatigue properties of spring steels, *Transactions of JSS*, No. 39 (1994), pp. 17-26.
- (2) Murakami, Y., *Effect of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*, (1993), Yokendo.
- (3) Takahasi, K., Amano, T. and Miyamoto, T., Improvement of fatigue strength by shot peening for spring steel specimens containing an artificial surface defect, *Transactions of JSS*, No. 52 (2007), pp. 9-13.
- (4) Takahasi, K., Tange, A. and Ando, K., Fatigue property of shot-peened spring steel with an artificial pit, *Transactions of JSS*, No. 53 (2008), pp. 1-12.
- (5) Wakita, M., Kuno, T., Hasegawa, T., Saruki, K. and Tanaka, K., Effect of shot peening on torsional fatigue strength of high strength spring steel in air and corrosive environments, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 57, No. 8 (2008), pp. 800-807.
- (6) Society of Shot Peening Technology of Japan, (2004), Gendaikogakusha.
- (7) Kagaya, C., Development Trends and technical outlooks of fine particle peening (FPB), *Journal of the Society of Precision Engineering*, No. 72 (2006), pp. 1067-1070.
- (8) Egami, N., Improvement of Fatigue properties by FPB treatment, *Journal of the Society of Precision Engineering*, No. 72 (2006), pp. 1071-1074.
- (9) Ko, H., Itoga, H., Kagaya, C., Hasegawa, T., Tokaji, K. and Nakajima, M., Fatigue Behavior of High Carbon

- Chromium Steel Bombarded with Fine Particles, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 68, No. 667 (2002), pp. 484-490.
- (10) Maeda, H., Egami, N., Kagaya, C., Inoue, N., Take-shita, H. and Ito, K., Analysis of particle velocity and temperature distribution of struck surface in fine particle peening, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 67, No. 660 (2001), pp. 2700-2706.
- (11) Miyahara, T., Egami, N., Kimachi, H., Miyasaka, Y. and Hatta, K., Effect of fine particle bombarding treatment conditons on surface origination of material, *Heat Treatment of Materials Solid State Phenomena*, Vol. 118 (2006), pp. 215-220, Trans tech publications.
- (12) Takagi, S. and Kumagaya, M., Formation of Nano-crystalline Structure by Fine Particle Bombarding, *Journal of the Society of Precision Engineering*, No. 72 (2006), pp. 1079-1082.
- (13) Kimura, H., Wang, Y., Akiniwa, Y. and Tanaka, K., Misorientation analysis of plastic deformation of austenitic stainless steel by EBSD and X-Ray diffraction methods, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 71, No. 712 (2005), pp. 1722-1728.
- (14) Research Committee for Optimizing a Shot-Peening Process, *Transactions of JSS*, No. 47 (2002), pp. 43-61.
- (15) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, (1970), pp. 420-421, McGraw-Hill Book.