キャビテーションピーニングによる平滑および切欠き試験片の疲労限度向上と表面欠陥の無害化*

福田晋作**, 天野利彦***, 高橋宏治***, 松井勝幸**, 石上英征**, 安藤柱***

Increase in Fatigue Limit and Acceptable Size of Defect for Smooth and Notched Specimen by Cavitation Peening

Shinsaku FUKUDA, Toshihiko AMANO, Koji TAKAHASHI, Katsuyuki MATSUI,
Hideyuki ISHIGAMI and Kotoji ANDO

Surface defects, such as surface cracks and non-metallic inclusions, are decreased the fatigue strength of vehicle parts. However, the study on overcoming the surface defects by using surface refining methods is hardly reported.

The cavitation peening (CP) is a high possibility as a new surface refining method, which is a shot-less peening method and increases compressive residual stress. On studying the effects of the CP to the defects, an experiment using the two types of specimens with an artificial semi-circular slit, whose slit depth (a)=0.04, 0.075 and 0.10mm on the surface of specimens, was conducted and their refined surface characteristics and fatigue limits were evaluated. Consequently, it is concluded that by using CP, the acceptable defect size (slit depth: a) with the smooth and that with notched specimens can be estimated less than 0.04mm and 0.075 mm, respectively.

Key Words: Cavitation peening, Fatigue limit, Surface defect, Notched specimen, Carbon steel

1. 緒 言

環境保全と資源保護の観点から、自動車の低燃費化は重要課題の一つである。自動車の低燃費化の手法として、構成部品の軽量化があり、このためには構成部品のさらなる疲労限度の向上が必要となってきた。

疲労限度向上手法の一つに、高硬化が挙げられる。しかし、高硬化にともない、切欠き感受性が大きくなり、微小な材料欠陥があっても疲労強度が大幅に低下してしまう可能性がある。

もう一つの手法として、ショットピーニングによる大きな圧縮残留応力の導入がある。最近、ばね鋼において、微小な表面欠陥に対するショットピーニングの効果に関する研究がなされ、圧縮残留応力導入の効果が明らかにされている¹⁾。しかしながら、ショットピーニングは、ショット粒を製品に投射し、製品表面を塑性変形させて圧縮残留応力を付与する手法であるため、表面粗さが増加してしまう難

点がある。したがって、研磨仕上げした製品などへの採用が難しい。

表面粗さを増加させないで、圧縮残留応力を導入する方法として、ショット粒を使用しないキャビテーションピーニング（以下、CPと略記する）²⁾がある。この方法では、水流中に生じたキャビテーション気泡の収縮・膨張時に生じる衝撃波を利用し、製品表面に圧縮残留応力を付与できる。そのため、最近では多くの研究事例が報告されている^{3)~8)}。

本研究では、人工傷を設けたのちにCPを施した試験片の表面特性、曲げ疲労限度および無害化できる表面欠陥寸法の調査・解析を実施した。試験片は、中炭素鋼で硬さ500HVの平滑試験片と切欠き試験片の2種類の試験片を製作した。平滑試験片以外に切欠き試験片を用いた理由として、クランクシャフトなどの実部品の多くは、応力集中部位を有しているためである。ここで、これらの結果について、報告する。

原稿受付日 2008年5月15日

* 日本ばね学会2008年度春季講演会

** いすゞ自動車株式会社 (ISUZU MOTORS LIMITED)

*** 横浜国立大学 (Yokohama National University)

Table 1 Main chemical composition of S50C (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu
S50C	0.50	0.20	0.72	0.018	0.018	0.01

Fig. 1 Flowchart of manufacturing process for specimen.

Fig. 2 Shapes of specimens.

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は、JIS機械構造用炭素鋼鋼材S50Cとした。Table 1にその化学成分を示す。試験片の加工工程をFig. 1に示す。また、今回用いた平滑試験片と切欠き試験片の2種類の試験片をFig. 2に示す。まず、 $\phi 50\text{mm}$ の棒鋼を10mm厚さの板形状に熱間鍛造した後、機械加工を行った。次に高周波焼入れ・焼戻しにより試験片を500HVの硬さに調質した。その後、表面欠陥を想定した人工傷（以下、半円スリットとする）を平滑試験片は試験片中央部表面に、切欠き試験片は切欠き底表面に、放電加工により付与した。切欠き試験片の形状係数は、 $a=1.32$ である。半円スリットのアスペクト比は $a/c=1.0$ である。また、半円スリット幅は、概ね0.03mmである。導入した半円スリットの表面長さ $2c$ /深さ a （単位：mm）は、0.08/0.04、0.15/0.075および0.20/0.10の3種類である。以降、それぞれの試験片をS-0.04材、S-0.075材およびS-0.10材と略記する。

2.2 キャビテーションピーニング条件

CP処理は、気中CP法で行った⁹⁾。気中CPに用いたノズルの模式図をFig. 3に、CP条件をTable 2に示す。ノズルは二重構造となっており、中心から高压水を噴射し、その周りに低压水を噴射している。高压水を噴射するノズル径は0.8mm、圧力は30MPaとした。低压水を噴射するノズル径は20mm、圧力は0.21MPaとした。低压水のノズル先端から試験片表面までの距離は30mmとした。ノズル移動速度は1

Fig. 3 Shape of the CP nozzle.

Table 2 CP condition.

P _H	Nozzle diameter	$\phi 0.8\text{mm}$
	Pressure	30MPa
P _L	Nozzle diameter	$\phi 20\text{mm}$
	Pressure	0.21MPa
Standoff distance		30mm
Scanning speed		3.75mm/min, 1pass

Table 3 Surface roughness on smooth specimens.

	unpeened	CP
Ra	0.067 μm	0.097 μm
Rz	0.221 μm	0.361 μm

パス当り3.75mm/minとした。CP処理は、平滑試験片は両面に、切欠き試験片は切欠き側にのみ施した。なお、以下CP処理を施した試験片をCP材、CP処理を施していない試験片をピーニング未実施材とよぶ。

2.3 残留応力測定

試験片の残留応力測定には、微小部X線測定装置を用いた。測定条件は、特性X線：Cr-K α 線、入射X線ビーム径：1mm、残留応力値算出方法： $2\theta\text{-sin}^2\psi$ 法（入射角 $\psi=0, 10, 20, 30$ および 40° ）とした。平滑試験片の残留応力の測定部位と方向は試験片中央部を長手方向に、また切欠き試験片のそれは切欠き底を長手方向に測定した。内部の残留応力の測定は、試験片をウインドウ法でマスキングし、電解研磨で所定の深さまで研磨した後、行った。

2.4 疲労試験方法

疲労試験は、東京衡機製平面曲げ疲労試験機（型式：PBF-30C）を用いた。負荷条件は変位制御方式、応力比 $R=-1$ 、繰返し周波数20Hz、応力波形は正弦波である。また、疲労試験は、室温・大気中で行った。なお、疲労限度は 10^7 回まで耐えた繰返し応力振幅の最大値とした。

3. 実験結果と考察

3.1 表面粗さと半円スリット外観

CP前後の平滑試験片の表面粗さをTable 3に示す。表面粗

さは、JIS B0601 (1994) より、算術平均粗さ：Raおよび十点平均粗さ：Rzで示した。ピーニング未実施材の表面粗さ(Ra)は $0.067\mu\text{m}$ であった。それに対してCP材のそれは $0.097\mu\text{m}$ であり、両者の違いは約 $0.03\mu\text{m}$ であり、CP処理により表面粗さはほとんど変化していないと言える。

Fig. 4に平滑試験片CP材の半円スリットの外観を示す。CP材の半円スリットは潰れや変形が認められず、加工時の状態を保っていた。このようにCPを実施しても試験片の表面性状に変化は認められないことがわかる。切欠き試験片においても同様の変化を示した。

3.2 残留応力分布

各試験片の残留応力分布測定結果をFig. 5に示す。ピーニング未実施材の残留応力は、平滑試験片および切欠き試験

$$2c=0.150\text{mm}, a=0.075\text{mm}$$

Fig. 4 SEM image of slit after CP.

片ともにほぼ零であった。CP材では、表面が最大圧縮残留応力となる応力分布が得られた。平滑試験片の最表面の圧縮残留応力は $\sigma_s = -725\text{MPa}$ 、切欠き試験片のそれは $\sigma_s = -1036\text{MPa}$ であった。また、平滑試験片の残留応力が圧縮から引張に変わるクロッシングポイントは $d_0 = 0.05\text{mm}$ 、切欠き試験片のそれは $d_0 = 0.09\text{mm}$ であった。切欠き試験片の最大圧縮残留応力とクロッシングポイントは、平滑試験片のそれらに比べて大きな値を示した。同じCP条件において切欠き試験片の圧縮残留応力とクロッシングポイントが平滑試験片と比較して大きくなった原因として、切欠き形状の効果と推察される。

3.3 曲げ疲労強度

平滑試験片のCP材とピーニング未実施材のS-N線図をFig. 6に示す。また図中のアスタリスク(★)のついたマークは、半円スリット以外から折損した試験片を示す。Fig. 6(a)は

Fig. 5 Distributions of residual stress.

Fig. 6 S-N curves of smooth specimens.

Fig. 7 S-N curves of notched specimens.

Fig. 8 SEM images of fatigue fracture surface for smooth specimen after test.

無欠陥材，(b)はS-0.04材，(c)はS-0.075材および(d)はS-0.10材の結果を示す．S-0.04ピーニング未実施材の疲労限度は，無欠陥ピーニング未実施材のそれと比較して約10%低下していたが，CPを実施することでS-0.04 CP材の疲労限度は，無欠陥CP材のそれと比較して同等の値を示した．

切欠き試験片のCP材とピーニング未実施材のS-N線図をFig. 7に示す．また図中のアスタリスク(★)のついたマークは，前述と同様に半円スリット以外から折損した試験片を示す．切欠き試験片の応力振幅は，公称応力振幅に形状係数 $a=1.32$ 乗した値とした．Fig. 7-(a)は無欠陥材，(b)はS-0.04材，(c)はS-0.075材および(d)はS-0.10材の結果を示す．平滑試験片と同様に，S-0.04 CP材の疲労限度は，無欠陥CP材のそれと比較して同等の値を示した．

以上から，CPにより平滑試験片と切欠き試験片ともに疲労限度が向上し，かつS-0.04 CP材の疲労限度が無欠陥CP材のそれと同等であることが明らかとなった．

Fig. 8に，平滑試験片S-0.075材の疲労試験後の破面SEM写

Fig. 9 SEM image of fatigue fracture surface for notched specimen.

真を示す．図中の矢印は，疲労破壊の起点を示している．平滑試験片の半円スリットを付与した試験片の疲労破壊起点は，一部の試験片を除き，CPの有無によらず，すべて半円スリットであった．しかし，ピーニング未実施材では，半円スリットの表面を起点として折損しているのに対し，CP材では半円スリットの底および表面よりやや深い所を起点として折損していた．また，切欠き試験片CP材の疲労破壊起点は，平滑試験片のそれと異なっていた．Fig. 9に，切欠き試験片CP材の疲労試験後の半円スリット以外から折損した破面のSEM写真を示す．S-0.04材とS-0.075材のCP材においては半円スリット以外から折損した試験片が多く認められた．

3.4 疲労限度向上率

Fig. 10に，平滑試験片のピーニング未実施材に対するCP材の疲労限度向上率を示す．無欠陥CP材の疲労限度は，ピーニング未実施材のそれと比較して33%向上した．同様にS-0.04 CP材では43%，S-0.075 CP材では53%およびS-0.10材では32%向上した．

Fig. 11に，切欠き試験片のピーニング未実施材に対するCP材の疲労限度向上率を示す．無欠陥CP材の疲労限度は，

ピーニング未実施材のそれと比較して26%向上した。同様にS-0.04 CP材では48%, S-0.075 CP材では107%およびS-0.10 CP材では70%向上した。

半円スリットを導入した試験片の疲労限度向上率は、無欠陥材のそれに比べて大きな値を示した。これらの疲労限度向上は、CPにより試験片表面近傍に付与された圧縮残留応力の効果によると推察される。さらに切欠き試験片のS-0.075材とS-0.10材で認められた107%と70%もの疲労限度向上率は、圧縮残留応力付与以外にも試験片に作用する応力勾配が影響したと考えられる。

3.5 無害化できる表面欠陥寸法の検討

平面曲げ疲労試験における平滑試験片の負荷応力振幅と半円スリットの深さの関係をFig. 12に、切欠き試験片の同関係をFig. 13に示す。ソリッドマーク (▲, ◆) は破断した試験片を、オープンマーク (△, ◇) は疲労回数: 10^7 回においても破断しなかった試験片を示す。オープンマークの最大の応力振幅が疲労限度に相当する。図中のアスタリスク (★) のついたマークは、半円スリット以外から破断した試験片を示す。

Fig. 10 Increase ratio of fatigue limit for smooth specimen.

Fig. 11 Increase ratio of fatigue limit for notched specimen.

Fig. 12に示したように、平滑試験片のS-0.04 ピーニング未実施材の疲労限度は、無欠陥ピーニング未実施材のそれに対して10%低下していた。平滑試験片 S-0.04 CP材の疲労限度は、無欠陥CP材のそれに対してわずか5%程度の低下であり、CPにより、疲労限度の低下割合は小さくできた。S-0.075 CP材の疲労限度は、無欠陥CP材のそれと比較して34%と大幅に低下していた。

Fig. 13に示したように、切欠き試験片 S-0.04 CP材の疲労限度は、無欠陥CP材のそれと同等であった。S-0.075 CP材の疲労限度は、無欠陥CP材のそれと比較して約10%の低下が認められた。

本研究では欠陥の無害化に関する定義を以下のように定めた。

・表面処理を施した欠陥材の疲労限度が、同様の表面処理を施した無欠陥材の疲労限度の約5%以内にまで向上すること

上記の定義で考慮した場合、CPにより半円スリット (ア

Fig. 12 Relationships between stress amplitude and depth of slit for smooth specimen.

Fig. 13 Relationships between stress amplitude and depth of slit for notched specimen.

Fig. 14 SEM images of non-propagating crack of runouted specimens.

スペクト比： $a/c=1.0$)において平滑試験片でスリット深さ： 0.04mm ，切欠き試験片でスリット深さ： 0.075mm 近傍の欠陥の無害化が可能であると言える．同じ条件でCPを実施した場合，切欠き試験片は平滑試験片と比較してより大きな欠陥を無害化できることが確認できた．これは，同じ条件のCPであっても切欠き試験片の圧縮残留応力が，平滑試験片のそれよりも大きかったためと推察する．

3.6 停留き裂の観察

疲労試験後の疲労回数： 10^7 回においても折損しなかった各試験片の停留き裂の有無を観察した．停留き裂の有無を評価するため，試験片を $280^\circ\text{C}\times 1\text{hr}$ の条件で熱処理し，き裂面を加熱着色させた．その後，疲労限度より大きい応力振幅で強制的に破断させた．

このような方法で破断させた試験片に認められた停留き裂をFig. 14に示す．平滑試験片と切欠き試験片のピーニング未実施材に停留き裂は観察されなかった．また，平滑試験片と切欠き試験片のS-0.10 CP材においても停留き裂は観察されなかった．

Fig. 14 (a) と (b) に示したように，平滑試験片S-0.04 CP材と切欠き試験片S-0.075 CP材には半円スリット周囲に停留き裂が観察された．それぞれの停留き裂寸法は，停留き裂を半円とみなした場合，平滑試験片S-0.04 CP材で長軸： $2c=0.12\text{mm}$ ，短軸： $a=0.056\text{mm}$ ，切欠き試験片S-0.075 CP材で長軸： $2c=0.215\text{mm}$ ，短軸： $a=0.078\text{mm}$ であった．

Fig. 14 (c) は，平滑試験片S-0.04 CP材の破面であり，半円スリットを導入していない側の表面に複数の停留き裂(停留き裂寸法;長軸: $2c=0.12\text{mm}$ ，短軸: $a=0.044\text{mm}$)が観察された．これは，応力比が $R=-1$ であるため，半円スリットを導入していない側においても引張りの負荷応力を受け，き裂が発生し，成長していたものと推察される．切欠き試験片においては，半円スリット周辺以外の停留き裂は全て半円スリット導入側，すなわち切り欠き底においてのみ観察された．

これらの認められたき裂は，疲労回数： 10^7 回においても

前述した寸法より成長していなかったことから，CPにより付与された圧縮残留応力の影響により，停留し，その後進展しなかったと考えられる．停留き裂寸法よりも小さい表面欠陥であれば疲労限度を低下させない，すなわち無害化可能な欠陥寸法であると推察した場合，CPにより無害化可能なき裂深さは，平滑試験片で 0.056mm ，切欠き試験片で 0.078mm と推察される．

4. 結 言

き裂状の表面欠陥を有する鋼の疲労限度向上に対するキャビテーション（以下，CP）の効果を明らかにするために，炭素鋼S50Cを用いて平面曲げ疲労試験を実施した．また，平滑試験片と切欠き試験片のCPによる無害化可能な欠陥寸法について検討を行った．得られた結果は以下のように要約できる．

- (1) 平滑試験片と切欠き試験片にCPを施した場合，半円スリットを付与していない場合には，圧縮残留応力の効果により，ピーニング未実施品と比較して疲労限度がそれぞれ33%と26%向上した．
- (2) 半円スリット状の表面欠陥を付与した場合には，疲労限度低下率で考慮した場合，平滑試験片で深さ $a=0.040\text{mm}$ まで，切欠き試験片で深さ $a=0.075\text{mm}$ 近傍までCPにより無害化できた．同じCP処理の場合，無害化できる表面欠陥の寸法は，大きな圧縮残留応力を付与できた応力集中場の方が大きかった．
- (3) CP材では，平滑試験片と切欠き試験片ともに半円スリットから発生した停留き裂が観察された．平滑試験片は，半円スリットが付与されていない面の表面からも停留き裂が観察された．認められた停留き裂寸法は，平滑試験片で $2c/a=0.12/0.056\text{mm}$ ，切欠き試験片で $2c/a=0.215/0.078\text{mm}$ であった．

参考文献

- 1) 高橋文雄，丹下 彰，安藤 柱，小野芳樹，ばね論文集，51-9 (2006)
- 2) 祖山 均，まてりあ，45-9 (2006)，657-663
- 3) 松井勝幸，石上英征，福田晋作，安藤 柱，ショットピーニング技術，18-1 (2006)，1-7
- 4) Odhiambo D., Soyama H., International Journal of Fatigue, No.25, (2003)，1217-1222
- 5) 關 正憲，吉田 彰，祖山 均，ショットピーニング技術，18-2 (2006)，14-15
- 6) Ju, D. Y., Qin, M., Koubayashi T., Oba R., Surface Engineering, 22-3 (2006)，219-223
- 7) Han, B., Ju, D. Y., Jia, W. P., Applied Surface Science, No.253, (2007)，9342-9346
- 8) 白木尚人，永嶋 充，表面技術協会 第116回講演大会要旨集，18D-18, (2007)，203-204
- 9) 祖山 均，斎藤健一，日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集202, (2001)