ハイブリッドピーニングによるジュラルミンの疲労亀裂進展抑制の実証

國分 朋之^{*1}, 祖山 均^{*2}

Suppression of fatigue crack propagation of duralumin by hybrid peening

Tomoyuki KOKUBUN^{*1} and Hitoshi SOYAMA^{*2}^{*1, *2} Department of Finemechanics, Tohoku University
6-6-01 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Received: 25 March 2018; Revised: 8 May 2018; Accepted: 21 June 2018

Abstract

Peening is one of the mechanical surface modification techniques, which is used to improve the fatigue strength by the introduction of the compressive residual stress into the surface of specimen. Several peening techniques, such as shot peening, cavitation peening and laser peening have been proposed and demonstrated the improvement of fatigue strength. Mechanical properties on surface modification layer vary with the techniques because of the difference of mechanism of impacts and strain rate. Therefore, it is possible to improve the fatigue strength further by hybrid peening, which is a combination of different peening techniques, due to controlling the mechanical properties on surface modification layer. In this paper, in order to demonstrate the suppression of fatigue crack propagation by hybrid peening combining shot peening and cavitation peening or cavitation peening and laser peening, the fatigue crack propagation in duralumin treated by hybrid peening was investigated, and the crack propagation behavior of the specimen treated by hybrid peening and single peening method was compared. The relationship between the fatigue crack propagation and the mechanical properties was also evaluated. It was revealed that hybrid peening (former process: laser peening, latter process: cavitation peening and former process: cavitation peening, latter process: shot peening) was more effective to suppress the fatigue crack propagation than single peening method and the number of cycle to failure of the specimen treated by hybrid peening was the largest. The new indicator $f(\sigma_R', HV', Rz', \beta) = \sigma_R' \cdot HV' \cdot \beta / Rz$ combined with four factors i.e. compressive residual stress σ_R , Vickers hardness HV , full-width at half maximum β and maximum height roughness Rz showed the effect of suppression of fatigue crack propagation by peening.

Keywords : Fatigue, Crack propagation, Surface improvement, Surface roughness, Residual stress, Hardness

1. 緒 言

機械的表面改質法の一つであるピーニングは、衝撃力によって金属材料に局所的な塑性変形を付与して圧縮残留応力の導入および加工硬化に伴う降伏応力の増大をもたらす、疲労強度を向上させる技術である(ショットピーニング技術協会, 2004)。近年、衝撃力の導入方法の異なる様々なピーニング手法が提案されているが、衝撃力の発生機構が異なるために、表面粗さやひずみ速度などが違い、表面改質層の機械的特性はその手法ごとに異なる。そこで、複数の手法を組み合わせたハイブリッドピーニング処理を施して、表面の機械的特性を制御すれば、単一のピーニング手法で処理するよりもさらに疲労強度を向上できる可能性がある。

ピーニングによる疲労強度向上には、上述した圧縮残留応力の導入と加工硬化が大きく寄与している。疲労破壊は亀裂発生、亀裂進展、最終破壊の三段階に大きく分けられるが、ピーニングは亀裂発生および進展段階において効果的である。航空機の設計では損傷許容設計(上山, 1977)が取り入れられているので(城野, 菅田, 1990)、本報では疲労亀裂進展抑制に注目した。疲労亀裂進展は、引張応力が負荷されたときに生じる塑性すべりによる亀裂の開口・鈍化と圧縮応力が負荷されたときに生じる亀裂の再鋭化の繰返しによって引き起こされる。圧縮残

留応力は、亀裂を閉口させる作用があるため(Lados et al., 2007), 亀裂進展を抑制して疲労強度を向上させる。また、ビッカース硬さは疲労限度と比例関係を示し(西島, 1980), 加工硬化に伴う降伏応力の増大は亀裂先端の塑性域寸法を減少させ、塑性すべりを低減させて亀裂進展を抑制できること(高桑他, 2014)が報告されており、ピーニング処理による加工硬化も疲労特性の改善に寄与する。しかしながら、ピーニング処理により表面粗さの増大や微小亀裂の発生など疲労強度を低下させる因子も同時に変化する(Cammet, 2007)。したがって、ピーニング処理に加え、複数の処理を組み合わせることで表面の機械的特性を制御すれば、さらなる疲労強度の向上が期待できる。Vielmaらは、ショットピーニング処理材に対して電解研磨や機械研磨を行い、表面から $40\text{ }\mu\text{m}$ 程度除去すれば、表面粗さが低下するので疲労強度が向上すると報告している(Vielma et al., 2014)。また、特性の異なるピーニング手法を組み合わせることで疲労強度を向上させた例として、ダブルショットピーニングやハイブリッドピーニングが挙げられる。ダブルショットピーニングとは、粒径が $0.6\sim 1.0\text{ mm}$ 程度のショットを用いる通常のショットピーニング処理(SP)後に、粒径が 0.1 mm 以下のショットを用いる微粒子ショットピーニング処理(FSP)を施す手法である(松井他, 1999)。ショットピーニングにおいて、ショットの粒径は圧縮残留応力のピーク位置に影響を及ぼし、粒径が大きいほどより深くまで圧縮残留応力を導入できる(渡邊他, 1995)。この特性を生かし、SPによって深くまで圧縮残留応力を導入した後、FSPによって表面近傍により高い圧縮残留応力を導入するとともに表面粗さを低減させて、さらなる疲労特性の改善が図られている。次に、ハイブリッドピーニングとは、異なる複数のピーニング手法を同じ被加工材に対して施す手法である。Takakuwaらは、ステンレス鋼に対して、ショットピーニングとキャビテーションピーニングを組み合わせたハイブリッドピーニング処理を行えば、それぞれ個々のピーニングによって導入される残留応力分布が異なるために、ハイブリッドピーニングにより圧縮残留応力の深さ方向における積分値である圧縮残留応力導入面積が増大し、それぞれ単一の手法でピーニング処理するよりも疲労特性が改善することを報告している(Takakuwa et al., 2013a)。このようにして、特性の異なるピーニング手法を組み合わせれば、表面の機械的特性を改善でき、さらなる疲労特性を向上できる可能性がある。

本報では、ショットピーニングとキャビテーションピーニングおよびキャビテーションピーニングとレーザピーニングを組み合わせたハイブリッドピーニングの亀裂進展抑制効果の実証を目的とし、ハイブリッドピーニングを施したジュラルミン A2017-T3 に対して平面曲げ式疲労亀裂進展試験を行い、疲労亀裂進展挙動を評価した。さらに、ピーニングにより導入された表面改質層の機械的特性として、残留応力、ビッカース硬さ、表面粗さ、半幅幅を測定し、それらが亀裂進展挙動に及ぼす影響について考察した。

2. 実験装置および方法

2・1 平面曲げ式疲労亀裂進展試験

本報では、荷重制御型平面曲げ式疲労試験機を用いて、疲労亀裂進展試験を行った(高桑他, 2014)。試験機の概略図を図 1、平面曲げ疲労試験片の形状および寸法を図 2 に示す。供試材には、ジュラルミン JIS A2017-T3 を用

Fig. 1 Schematic illustration of the load-controlled plate bending fatigue tester.

Fig. 2 Geometry and dimensions of the specimen for plate bending test.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of specimen for fatigue bending test.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.58	0.53	3.8	0.46	0.58	0.01	0.09	0.02	Re
Tensile strength [MPa]			Yield stress [MPa]			Elongation [%]		
410			258			21.7		

いた. 表 1 には, 平面曲げ疲労試験片の化学組成および機械的特性を示す. 試験片中央部には, 応力集中部形成のため, 前報(國分, 祖山, 2017)と同様に, フライス盤を用い, ボール半径 0.25 mm のボールエンドミルによって長さ 2 mm, 幅 0.5 mm, 深さ 0.25 mm の切欠きを導入した. なお, ピーニング処理材については, 表面改質層を一様にし, ピーニングによる切欠きの変形を防ぐために, ピーニング後に切欠きを導入した. また, 反りによる影響を低減させるため, 試験片の両側に対してピーニング処理を施した. 疲労試験は負荷応力 $\sigma_a = 200$ MPa, 応力比 $R = -1$, 繰返し周波数 $f = 5$ Hz という条件で行い, 負荷応力 σ_a は曲げモーメント M , 試験片幅 W , 試験片厚さ t から式(1)により算出した.

$$\sigma_a = \frac{6M}{Wt^2} \quad (1)$$

亀裂長さは一定回数ごとに試験機を停止させ, 光学顕微鏡を用いて倍率 500 倍で観察して計測し, 亀裂長さは切欠きを含めた亀裂先端から亀裂先端までの距離とした. なお, 亀裂を鮮明に観察するため, 試験片は切欠きの導入後に黒く塗装した.

2・2 ピーニング方法および処理条件

ハイブリッドピーニング(HP)は, ショットピーニング(SP)とキャビテーションピーニング(CP)の組み合わせ(SP→CP, CP→SP), および CP とレーザピーニング(LP)の組み合わせ(CP→LP, LP→CP)で行った. なお, HP 処理における処理工程の順序の影響を調べるため, 順序を入れ替えた 2 種類の試験片をそれぞれ用意した. ピーニング強度は片面をピーニングした板厚 5 mm のジュラルミン平板の曲率 κ で評価し, SP は $\kappa = 0.6 \text{ m}^{-1}$ となる処理条件で, CP と LP は $\kappa = 0.4 \text{ m}^{-1}$ となる処理条件で, ピーニングを施した.

SP は, 水噴流加速式循環型ショットピーニング装置を用いて行った. 装置の概略図を図 3(a), ヘッド部の概略図を図 3(b)にそれぞれ示す. 水噴流をプランジャポンプで 12 MPa まで加圧し, チャンバ内に投入したショットを加速させた. 試験片表面に衝突したショットはチャンバ内の水流により上昇し, 再加速されるような構造とした. 水噴流を噴射するノズル部は直径 20 mm の円盤材にピッチ円半径が 16 mm となるように直径 0.58 mm の噴射孔を 3 つ設けた. また, ショットには JIS SUS440C 製の直径 3.2 mm の球を用い, 既報を参考にして(上野, 祖山, 2014), ショット数は 500 個, ノズルと試験片の距離であるスタンドオフ距離 s_s は 50 mm とした. 単位時間

Fig. 3 Schematic illustration of the shot peening apparatus.

あたりの処理時間 t_p は、モータによりピーニングヘッドの走査速度を変化させて制御し、 $\kappa = 0.6 \text{ m}^{-1}$ となるように $t_p = 1.1 \text{ s/mm}$ とした。

CP は水で満たされた水槽内に高速で水を噴射させて発生するキャビテーション噴流を用いて行った。装置の概略図を図 4(a)、ノズルの形状および寸法を図 4(b)に示す。ノズル形状は既報を参考にして最適化した(Soyama, 2011)。また、加工能力の向上を目的とし、キャビテータとガイドパイプを取り付けた(Soyama, 2014)。出口部円筒径 D_N を 16 mm、出口部円筒長さ L を 16 mm、ノズルスロート部直径 d を 2 mm、キャビテータ直径 d_c を 3 mm、ガイドパイプ直径 D_p を 44 mm、ガイドパイプ長さ L_p を 46 mm とした。また、試験片とノズル上流側各部との距離をスタンドオフ距離 s_c として 262 mm に設定し、噴射圧は 30 MPa とした。単位長さあたりの処理時間 t_p はノズルの走査速度 v と走査回数 n より式(2)で定義した。

$$t_p = \frac{n}{v} \quad (2)$$

t_p は、 $\kappa = 0.4 \text{ m}^{-1}$ となるように $t_p = 1 \text{ s/mm}$ とした。

LP は水で満たされた水槽内に設置した試験片に対してレーザを直接照射して行った。レーザピーニング装置の概略図を図 5 に示す。レーザには、パルス幅 5 ns、波長 532 nm、ビーム直径 6 mm、最大繰返し周波数 10 Hz、最大定格出力 0.2 J の Nd:YAG レーザを用いた。水槽の破損を防ぐため、凹レンズで一度拡散した後、2 枚の凸レンズ(焦点距離 100 mm)を用いて集光し、試験片にレーザを照射した。また、最終段の凸レンズと試験片との距離をスタンドオフ距離 s_l として、102 mm と設定した。試験片は三軸移動可能なステージに固定し、試験片長手方向に走査して処理した。ステージ移動速度と移動量によって照射密度 N_p を変更し、ピーニング強度を制御した。 N_p は、 $\kappa = 0.4, 0.8 \text{ m}^{-1}$ となるように、それぞれレーザ出力 0.1 J で $N_p = 49 \text{ pulse/mm}^2$ 、レーザ出力 0.2 J で $N_p = 196 \text{ pulse/mm}^2$ とした。なお、一般的に LP はレーザアブレーションに伴う衝撃波のみによってピーニング処理が施されていると考えられているが、本装置ではレーザ照射部に発生する気泡が崩壊時に生じる衝撃力は、アブレーションによる衝撃力よりも大きいことが確認されている(Soyama, 2017a)。

2・3 表面改質層の機械的特性の評価

ピーニングにより導入された表面改質層の機械的特性が疲労亀裂進展挙動に及ぼす影響を明らかにするため、残留応力、ビッカース硬さ、表面粗さの測定を行った。なお、これらの測定は前報(國分, 祖山, 2017)と同様に、厚さ 5 mm のジュラルミン平板を各種条件でピーニング処理した試験片で測定を行った。表 2 には、ジュラルミン平板の化学組成および機械的特性を示す。

残留応力は X 線回折法の一種である $\cos\alpha$ 法により測定した。X 線はクロム管球の $K\alpha$ 線を使用し、管電圧 30

Fig. 4 Schematic illustration of the cavitation peening apparatus.

Fig. 5 Schematic illustration of the laser peening apparatus.

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of duralumin plate.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.58	0.26	3.99	0.70	0.64	0.02	0.04	0.03	Re
Tensile strength [MPa]			Yield stress [MPa]			Elongation [%]		
375			320			21		

kV, 管電流 1 mA とした. 無ひずみ時の回折角 2θ には Al(3 1 1) 面からの回折角 139.5 deg. を用い, 応力定数 K は -103.408 GPa とした. 亀裂は深さ方向にも進展するため, 残留応力が亀裂進展挙動に及ぼす影響を評価するには, 深さ方向の残留応力も測定する必要がある. そこで, 電解研磨により表面除去を行い, その都度残留応力測定をして, 残留応力分布を得た. なお, 単一ピーニングの場合の残留応力分布と比較するために, 前報(國分, 祖山, 2017)と同様に, 疲労試験前の試験片の残留応力を計測し, 電解研磨による応力の再分配は考慮していない. そして, 得られた残留応力分布において, 圧縮残留応力の深さ方向における積分値を圧縮残留応力導入面積 S_l とし, 三次元亀裂に影響を及ぼす残留応力の指標とした. また, X 線回折で得られる半価幅 β を結晶粒径の指標とした.

ビッカース硬さ HV の測定には, 微小硬度計を用いた. 最大押し込み荷重は 200 gf (1.961 N), 試験時間は 15 s とした. 測定は試験片表面で 7 回行い, 最大値と最小値を除いた 5 点の平均値を求めた.

表面粗さの測定には, レーザ顕微鏡を用いた. 対物レンズの倍率は 100 倍とし, 測定ピッチは $0.08 \mu\text{m}$ とした. 測定は $1 \times 1 \text{ mm}$ の範囲で 3 回行い, その平均値を求めた. また, 表面粗さの指標は, 最大高さ粗さ R_z を用いた.

3. 実験結果および考察

3・1 疲労亀裂進展挙動

図 6 には, 疲労回数 N と亀裂長さ $2a$ の関係を示す. なお, 単一ピーニング処理材(SP0.6, CP0.4, LP0.4)および単一ピーニングが亀裂進展挙動に及ぼす影響を調査した既報において(國分, 祖山, 2017), 破断回数が最大となったレーザ出力 0.2 J で曲率 $\kappa = 0.6 \text{ m}^{-1}$ となるように LP 処理した試験片である LP0.6(0.2 J)処理材の結果も併せて示す. 図 6 より, LP0.6(0.2 J)処理材よりも HP 処理材(LP0.4→CP0.4, CP0.4→SP0.6; ここで数値は κ を示す)のほうが亀裂進展が抑制され, 破断回数 N_f がさらに増大することがわかる. 単一ピーニング手法よりも高い効果が確認された 2 つの処理材(LP0.4→CP0.4, CP0.4→SP0.6)については再現性の確認のため, 同じ条件で二度実験を行い, 破断回数は LP0.4→CP0.4 処理材, CP0.4→SP0.6 処理材で 107533 ± 83 , 112331 ± 14596 となり, 未処理材に対してそれぞれ約 5.02 倍, 5.24 倍となっており, 単一ピーニングの LP0.6(0.2 J)処理材に対してそれぞれ約 1.12 倍, 1.17 倍であった.

図 7 には, 疲労回数を破断回数で除した値 N/N_f と亀裂進展速度 da/dN の関係を, 図 8 にはハイブリッドピーニング処理材の疲労試験片の切欠き周辺の様相を示す. 図 7 より, N_f が大となった LP0.4→CP0.4 処理材と CP0.4→

Fig. 6 Fatigue crack propagation on specimens treated by shot peening, cavitation peening, laser peening and hybrid peening. Hybrid peening (CP0.4→SP0.6, LP0.4→CP0.4) is more effective to suppress the fatigue crack propagation than single peening methods.

Fig. 7 Fatigue crack rate in duralumin plate treated by hybrid peening. In the case of the specimen treated by hybrid peening (LP0.4→CP0.4), the crack growth rate monotonically increases with normalized number of cycle.

Fig. 8 Surface of the specimen for plate bending test around the notch treated by hybrid peening. It is found that secondary cracks occur in the dimple induced by peening except LP0.4→CP0.4 specimen. In LP0.4→CP0.4 specimen, the surface roughness was small due to application of cavitation peening to the work hardened surface by laser peening.

SP0.6 処理材のほうが CP0.4→LP0.4 処理材と SP0.6→CP0.4 処理材よりも亀裂進展速度は小となり、その差は亀裂進展初期段階で顕著である。また、図 8 から LP0.4→CP0.4 処理材を除いて、その他の HP 処理材では二次亀裂の発生が確認される。二次亀裂の発生は亀裂進展挙動を不安定にし、破断回数を低減させる原因となる(國分, 祖山, 2017)。図 8(c)から二次亀裂の発生が確認された CP0.4→SP0.6 処理材では、 $N/N_f=0.6$ 程度まで亀裂進展速度は緩やかに減少し、その後急速に増大するような不安定な亀裂進展挙動を示す。このように二次亀裂の影響が現れているにもかかわらず、CP0.4→SP0.6 処理材の N_f は単一ピーニング手法よりも増大する結果となった。主亀裂と二次亀裂のように複数の亀裂が同一平面上に存在する場合、単独で亀裂進展するときと比べて、それぞれの亀裂進展は遅れることが報告されている(Hui and Wu, 2017)。したがって、二次亀裂の存在により主亀裂の進展は抑制され、かつ主亀裂と二次亀裂の位置関係などにより、主亀裂と二次亀裂の連結までに多くの疲労回数を要するとき、破断回数も増大すると考えられる。このようにして、二次亀裂の存在により破断回数が増大することもあり得ると考えられる。

3・2 疲労亀裂進展挙動に及ぼす影響の考察

図 9 には、SP 処理材、CP 処理材および SP と CP を組み合わせた HP 処理材における表面からの試験片深さ z と残留応力 σ の関係を示す。図 9(a)から、最表面の残留応力 σ_{sur} は CP0.4, SP0.6 処理材でそれぞれ $\sigma_{sur} = -214 \pm 11$, -275 ± 28 MPa となり、表面には CP0.4 処理材の方が SP0.6 処理材より大きな圧縮残留応力が導入されている。HP 処理材では、SP0.6→CP0.4, CP0.4→SP0.6 処理材でそれぞれ $\sigma_{sur} = -241 \pm 10$, -219 ± 11 MPa となり、CP0.4→SP0.6 処理材の方が σ_{sur} は大となることから、HP 処理において表面近傍の残留応力は後工程のピーニング手法の影響を強く受けると考えられる。続いて、図 9(b)より圧縮残留応力の導入深さ z_c に着目すると、SP0.6 処理材は $z_c = 0.8$ mm 程度となるのに対して、CP0.4→SP0.6 処理材、SP0.6→CP0.4 処理材ともに $z_c = 1.4$ mm 程度となり、SP0.6 処理材より圧縮残留応力をより深くまで導入できる。

図 10 には、CP 処理材、LP 処理材および CP と LP を組み合わせた HP 処理材の残留応力分布を示す。図 10(a)より、CP0.4 処理材では σ_{sur} が CP0.4, LP0.4 処理材ではそれぞれ $\sigma_{sur} = -214 \pm 11$, -2 ± 8 MPa となり、LP 処理材で

Fig. 9 Depth profile of the residual stress in duralumin plate treated by shot peening, cavitation peening and hybrid peening. Hybrid peening can introduce compressive residual stress deeper than shot peening.

Fig. 10 Distribution of the residual stress in depth on specimen treated by cavitation peening, laser peening and hybrid peening. Cavitation peening introduce larger compressive residual stress at surface than laser peening. The residual stress at surface of the specimen treated by hybrid peening depends on the latter peening technique.

はレーザアブレーションの影響を受けるため、最表面に圧縮残留応力は導入されていない。HP 処理では、LP0.4 $\rightarrow$ CP0.4, CP0.4 $\rightarrow$ LP0.4 処理材でそれぞれ $\sigma_{sur} = -177 \pm 14$, -5 ± 16 MPa となり、HP 処理材の最表面の残留応力は後工程のピーニング手法の影響が顕著に現れた。一方、LP0.4 $\rightarrow$ CP0.4, CP0.4 $\rightarrow$ LP0.4 処理材では、それぞれ $z_c = 1.1$, 1.5 mm 程度となり、CP0.4 $\rightarrow$ LP0.4 処理材では CP0.4, LP0.4 処理材より深くまで圧縮残留応力が導入される。

図 11 には、各種ピーニング処理材の圧縮残留応力 σ_R および圧縮残留応力導入面積 S_σ を示す。 σ_R はレーザアブレーションの影響を受ける LP 処理材および CP0.4 $\rightarrow$ LP0.4 処理材では、表面近傍 (50 μ m 以内) に存在するピーク値とし、それ以外は最表面の圧縮残留応力の値とした。 LP0.4 $\rightarrow$ CP0.4 処理材と CP0.4 $\rightarrow$ LP0.4 処理材では、それぞれ $\sigma_R = 238 \pm 17$ と 271 ± 15 MPa となり、LP0.4 処理材と CP0.4 処理材ではそれぞれ 222 ± 14 , 214 ± 11 MPa であるため、HP 処理により σ_R の値は増大する。一方、SP0.6 $\rightarrow$ CP0.4, CP0.4 $\rightarrow$ SP0.6 処理材では $\sigma_R = 241 \pm 10$, 219 ± 11 MPa

Fig. 11 Compressive residual stress σ_R and area of compressive residual stress in depth S_σ of the specimen treated by shot peening, cavitation peening, laser peening and hybrid peening. The σ_R and S_σ was not improved by hybrid peening, compared to single peening methods.

となった。SP0.6 処理材では $\sigma_R = 275 \pm 28$ MPa であるため、HP 処理により σ_R の値は低減したといえる。また、 S_σ は CP0.4 処理材において $S_\sigma = 247 \pm 55$ MPa·mm となるのに対して、LP0.4→CP0.4, CP0.4→LP0.4, SP0.6→CP0.4, CP0.4→SP0.6 処理材ではそれぞれ $S_\sigma = 174 \pm 41, 218 \pm 53, 247 \pm 18, 217 \pm 18$ MPa·mm となり、HP 処理によって CP0.4 処理材の S_σ よりも増大しない。よって、 σ_R, S_σ ともに HP 処理による大きな向上は見られなかった。

図 12 には、各種ピーニング処理材のビッカース硬さ HV および最大高さ粗さ R_z を示す。 HV は、SP0.6 処理材と CP0.4 処理材において、それぞれ $HV = 167 \pm 5, 154 \pm 3$ であるのに対して、SP0.6→CP0.4, CP0.4→SP0.6 処理材では $HV = 138 \pm 11, 147 \pm 9$ となる。一方で、 HV は CP0.4, LP0.4 処理材において $HV = 154 \pm 3, 171 \pm 10$ であるのに対して、LP0.4→CP0.4, CP0.4→LP0.4 処理材では $HV = 325 \pm 33, 207 \pm 19$ となり、HP 処理によって HV は大きく

Fig. 12 Vickers hardness HV and surface roughness R_z of the specimen treated by shot peening, cavitation peening, laser peening and hybrid peening. In the case of LP0.4→CP0.4 specimen, HV is largest and R_z is lower than CP0.4 specimen.

増大した。 R_z は HP 処理順序の影響を強く受け、LP0.4→CP0.4, CP0.4→LP0.4, SP0.6→CP0.4, CP0.4→SP0.6 処理材ではそれぞれ $R_z = 21.9 \pm 1.5, 50.2 \pm 9.9, 44.8 \pm 4.9, 32.1 \pm 2.2 \mu\text{m}$ となる。 LP0.4→CP0.4 処理材では、LP 処理により加工硬化した面に対して、CP 処理を施すことで導入される塑性変形ピットの大きさは小さくなり、 R_z は小さな値を示したと考えられる。 また、CP0.4→SP0.6 処理材では CP 処理に導入された塑性変形ピットを SP 処理により表面が平均化されていき、 R_z が低減したと考えられる。

図 13 には、疲労特性の指標とする試験片の破断回数 N_f と (a) 圧縮残留応力面積 S_σ および (b) ピーニングによる疲労特性向上効果の指標となる $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ の関係を示す。 なお、既報(國分, 祖山, 2017)で得られた単一ピーニング手法における結果も併せて示す。 図 13(a) より、 N_f と S_σ の相関係数 R は 0.10 となるため、有意な相関関係は得られず、 S_σ を指標とした場合には疲労特性向上効果を表現できない。 S_σ は三次元亀裂に及ぼす圧縮残留応力の影響を評価する指標となり、Takakuwa らはステンレス鋼に対して亀裂進展試験を行った結果、試験片の破断回数と S_σ はピーニング手法に依存せず、高い相関を示すことを報告しているが(Takakuwa et al., 2013a)、これは本報の結果とは一致しない。 既報のステンレス鋼 SUS316L では亀裂長さと亀裂深さが一定の関係を保ったまま、亀裂進展することが報告されており(高桑他, 2014)、深さ方向の圧縮残留応力が有効に作用すると考えられるが、本報のジュラルミンにおいては、表面に発生した二次亀裂が主亀裂と連結して不安定に亀裂進展するため、表面における粗さなどの影響が支配的となり、内部の圧縮残留応力が亀裂進展に及ぼす影響は小さかったと考えられる。 このため、 S_σ が大となった CP 処理材や CP0.4→LP0.4 処理材では、二次亀裂の影響により N_f が小となり、相関係数は小さな値を示したと考えられる。 そこで、ピーニングで変化する複数の機械的特性を考慮した指標として $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ を式(3)で定義した。 なお、 $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ は、亀裂進展試験における試験片の破断回数と有意な相関を示し、ピーニング手法に依存せず、ピーニングによるジュラルミンの疲労特性向上効果を評価できることが明らかとなっている(國分, 祖山, 2017)。

$$f(\sigma_R', HV', R_z', \beta') = \frac{\sigma_R' \cdot HV' \cdot \beta'}{R_z'} \quad (3)$$

ここで、 β' は半価幅であり、 $\sigma_R', HV', R_z', \beta'$ はそれぞれ未処理材の値で除し、正規化した値である。 CP や LP で機械加工した試験片を処理した場合、圧縮残留応力や硬さが増大しながら半価幅が低減する場合があるので(Soyama and Yamada, 2008 ; Soyama, 2017b)、本報では HV' と β' は独立変数とした。 なお、 β' は結晶粒径の逆数に比例し(Warren, 1969)、また疲労強度は結晶粒径の平方根の逆数に比例するため(長瀬他, 1989)、結果として β' が大と

Fig. 13 Relationship between number of cycle to failure N_f and mechanical properties; (a) area of compressive residual stress in depth S_σ , (b) indicator $f(\sigma_R', HV', \beta', R_z') = \sigma_R' \cdot HV' \cdot \beta' / R_z'$. The N_f has a weak correlative relation with the S_σ , whose correlation coefficient R is 0.10. However, N_f has a correlative relation with a indicator $f(\sigma_R', HV', \beta', R_z')$ which is combined with σ_R', HV' , full-width at half maximum β' and maximum height roughness R_z' , whose R is 0.65

なれば疲労強度も大となると考えられる。また、ビッカース硬さの増大には、降伏応力向上および圧縮残留応力が関わっているため(Takakuwa et al., 2013b), 疲労強度の正の相関を持つと考えられる σ_R, HV, β は分子とし、疲労強度の負の相関を持つと考えられる R_z は分母とした。本報において、 $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ と N_f の相関係数は0.65で、データ点は14点であるため、無相関である確率は約1.2%となり、有意な相関を示すといえる。したがって、 $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ が大となるように、複数のピーニング手法を組み合わせるHP処理を行い、表面の機械的特性を制御すれば、単一のピーニング手法よりも高いピーニング効果が得られるといえる。

しかし、CP0.4→SP0.6処理材では、 N_f はLP0.4→CP0.4処理材と同等であるにも関わらず、 $f(\sigma_R', HV', \beta', R_z')$ の値はLP0.4→CP0.4処理材よりも小さくなり、大きく傾向を外れる結果となった。前述したように、CP0.4→SP0.6処理材では二次亀裂の存在が確認され、破断回数が増加したのは二次亀裂の発生による見かけ上の亀裂進展抑制効果の影響と考えられる。この二次亀裂の発生に伴う見かけ上の亀裂進展抑制は不安定な亀裂進展挙動を示し、短い亀裂長さから急速に破断に至るため、実用上望ましくない。そこで、二次亀裂の影響が発現するピーニング処理材の結果は除いた方がよいと考えられるため、 R_z が一定値より大となるときに二次亀裂の影響が発現すると仮定してデータ整理を行った。本研究において、二次亀裂の影響が発現する R_z の臨界値は $R_z=30\mu\text{m}$ とした。また、 $R_z<30\mu\text{m}$ となるピーニング処理材では二次亀裂の影響は発現しないと考えられるので、ピーニングによる疲労亀裂進展抑制効果の指標から R_z を除いた新たな指標 $g(\sigma_R', HV', \beta')$ を式(4)で定義する。

$$g(\sigma_R', HV', \beta') = \sigma_R' \cdot HV' \cdot \beta' \quad (4)$$

$R_z<30\mu\text{m}$ となったピーニング処理材における $g(\sigma_R', HV', \beta')$ と試験片の破断回数 N_f の関係を図14に示す。なお、 $R_z<30\mu\text{m}$ となったピーニング処理材は、SP0.2, SP0.6, SP0.8, CP0.2処理材およびLP処理材である。 $g(\sigma_R', HV', \beta')$ と N_f の相関係数は0.76となり、データ点が11点であるため、無相関である確率は0.67%となり、有意な相関を示した。また、二次亀裂の影響が R_z の値に比例して破断回数を低下させる因子となると仮定した指標 $f(\sigma_R', HV', \beta', R_z')$ を全てのピーニング処理材の結果に対して適用したとき、無相関である確率は1.2%であるため、 $R_z<30\mu\text{m}$ となるピーニング処理材の結果に対して指標 $g(\sigma_R', HV', \beta')$ を適用したほうが無相関である確率は低くなり、より高精度に評価できるといえる。したがって、本報の結果より、 $R_z<30\mu\text{m}$ となる条件で $g(\sigma_R', HV', \beta')$ の値が大となるようにHP処理を施せば、二次亀裂の影響を受けることなく、より高い疲労亀裂進展抑制効果が得られるといえる。

Fig. 14 Relationship between number of cycle to failure N_f and , the indicator $g(\sigma_R', HV', \beta') = \sigma_R' \cdot HV' \cdot \beta'$ for the specimen with $R_z < 30\mu\text{m}$. the indicator $g(\sigma_R', HV', \beta')$ could evaluate more accurately than the indicator $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ for all of the specimens, because it was not affected by secondary cracks.

4. 結 言

本報では、ショットピーニングとキャビテーションピーニング、およびキャビテーションピーニングとレーザーピーニングを組み合わせたハイブリッドピーニングによるジュラルミンの疲労亀裂進展抑制効果の実証を目的とし、ハイブリッドピーニングを施したジュラルミン A2017-T3 に対して、荷重制御型平面曲げ式疲労試験機を用いて疲労亀裂進展試験を行い、亀裂進展挙動を評価した。また、表面改質層の機械的特性として、残留応力、ビッカース硬さ、表面粗さ、半価幅を測定し、それらが亀裂進展挙動に及ぼす影響について考察した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 前工程：レーザーピーニング、後工程：キャビテーションピーニングおよび前工程：キャビテーションピーニング、後工程：ショットピーニングとしたハイブリッドピーニングをジュラルミンに施した場合、それぞれの単一ピーニングで処理した場合よりも試験片の破断回数は増大する。
- (2) レーザーピーニングにより加工硬化した表面にキャビテーションピーニングを施した場合、表面粗さを大きく増大させることなく、ピーニングを施すことができるため、前工程：レーザーピーニング、後工程：キャビテーションピーニングとしたハイブリッドピーニング処理材では二次亀裂は発生し難い。
- (3) 試験片の破断回数 N_f と圧縮残留応力 σ_R 、ビッカース硬さ HV 、最大高さ粗さ R_z 、半価幅 β の影響を考慮した指標 $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ の相関係数は 0.76 でデータ点は 18 点であるため、無相関である確率は 1.8 % となり、有意な相関を示す。よって、 $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ が大となるようにハイブリッドピーニングを施せば、より高い効果が得られる。
- (4) 二次亀裂は、主亀裂の進展を抑制させる作用があり、結果として二次亀裂により破断回数が増大することがある。
- (5) 二次亀裂の影響は最大高さ粗さ R_z が 30 μm を超えたときに発現すると仮定し、 $R_z < 30 \mu\text{m}$ となる試験片の結果に対して、指標 $g(\sigma_R', HV', \beta') = \sigma_R' \cdot HV' \cdot \beta'$ を適用し、試験片の破断回数との相関性を評価すると、無相関である確率は 0.67 % となり、全点に対して $f(\sigma_R', HV', R_z', \beta')$ を用いるより高精度に評価できる。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 17H03138 によったことを記す。また、残留応力測定のために、ポータブル型 X 線残留応力測定装置 μ -X360 を提供していただいたパルステック工業㈱に謝意を表す。

文 献

- 安藤清, 平田隆明, 飯田國廣, 複数表面欠陥からの疲労き裂伝播寿命評価 第2報: 並列配置複数き裂問題, 日本造船学会論文集, Vol. 1983, No. 153 (1983), pp.352-363.
- Camett, J., Shot peening coverage – the real deal, The Shot Peener, Vol. 21, No. 3 (2007), pp.8-14.
- Hui, J.J. and Wu, S.J., A new driving force parameter for fatigue growth of multiple cracks, International Journal of Fatigue, Vol. 96 (2017), pp. 10-16.
- 城野政弘, 菅田淳, アルミニウム合金の疲労き裂進展抵抗, 軽金属, Vol. 40, No. 7 (1990), pp. 543-553.
- 上山忠夫, 航空機構造の疲れ設計の現状, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 25, No. 276 (1977), pp. 1-9.
- 國分朋之, 祖山均, 種々のピーニングを施した表面改質層における疲労亀裂進展挙動の評価, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 853 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00190.
- Lados, D.A., Apelian, D. and Donald, J.K., Fracture mechanics analysis for residual stress and crack closure corrections, International Journal of Fatigue, Vol. 29, No. 4 (2007), pp.687-694.
- 松井勝幸, 衛藤洋仁, 川寄一博, 三阪佳孝, 安藤柱, ダブルショットピーニングによる輪郭高周波焼入歯車の疲労強度向上, 日本機械学会論文集A編, Vol. 65, No. 637 (1999), pp.1942-1947.
- 長瀬康男, 泉沢正郎, 山本順一, 疲労限度の結晶粒径依存性に及ぼす予ひずみの影響, 日本機械学会論文集A編, Vol. 55, No. 514 (1989), pp.1247-1254.
- 西島敏, 疲労試験データの統計的整理, 材料, Vol. 29, No. 316 (1980), pp.24-29.
- 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 (2004), 現代工学社.
- Soyama, H. and Yamada, N., Relieving micro-strain by introducing macro-strain in a polycrystalline metal surface by cavitation

- shotless peening, *Materials Letters*, Vol. 62, No. 20 (2008), pp. 3564-3566.
- Soyama, H., Enhancing the aggressive intensity of a cavitating jet by means of the nozzle outlet geometry, *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 133, No. 10 (2011), 101301-1-11.
- Soyama, H., Enhancing the aggressive intensity of a cavitating jet by introducing a cavitator and a guide pipe, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 9, No. 1 (2014), DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0001.
- Soyama, H., Key factors and applications of cavitation peening, *International Journal of Peening Science and Technology*, Vol. 1 (2017a), pp. 3-60.
- Soyama, H., Introduction of compressive residual stress into alloy steel by cavitation peening using laser cavitation, *Proceedings of 13th International Conference on Shot Peening* (2017b), pp. 414-417.
- Takakuwa, O., Yamamiya, K. and Soyama, H., An indicator for the suppression of fatigue crack growth by hybrid peening, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 7, No. 3 (2013a), pp.357-371.
- Takakuwa, O., Kawaragi, Y. and Soyama, H., Estimation of the yield stress of stainless steel from the Vickers hardness taking account of the residual stress, *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, Vol. 3 (2013b), pp. 262-268.
- 高桑脩, 左奈田一将, 祖山均, 荷重制御型平面曲げ式疲労試験機による表面改質層における疲労亀裂進展挙動の定量的評価, *日本機械学会論文集*, Vol. 80, No. 810 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0022.
- 上野祐幸, 祖山均, 水噴流加速式循環型ショットピーニングによる孔付きジュラルミン板の疲労強度向上, *日本機械学会東北支部第 50 期秋季講演論文集* (2014), pp.1-2.
- Vielma, A.T., Llaneza, V. and Belzunce, F.J., Effect of coverage and double peening treatments on fatigue life of a quenched tempered structural steel, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 249 (2014), pp.75-83.
- Warren, B.E., X-ray diffraction, Addison-Wesley Publishing Company (1969).
- 渡邊吉弘, 長谷川典彦, 松村義和, ショットピーニングによる残留応力分布のシミュレーション, *材料*, Vol. 44, No. 496 (1995), pp.110-115.

References

- Ando, K., Hirata, T. and Iida, K., An evaluation technique for fatigue life of multiple surface cracks part 2 : a program multiple parallel surface cracks, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 1983, No. 153 (1983), pp.352-363 (in Japanese).
- Camett, J., Shot peening coverage – the real deal, *The Shot Peener*, Vol. 21, No. 3 (2007), pp.8-14.
- Hui, J.J. and Wu, S.J., A new driving force parameter for fatigue growth of multiple cracks, *International Journal of Fatigue*, Vol. 96 (2017), pp. 10-16.
- Jono, M. and Sugeta, A., Fatigue crack growth resistance in aluminum alloys, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol. 40, No. 7 (1990), pp. 543-553.
- Kamiyama, T., Review of Design practices on fatigue of aircraft structure, *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 25, No. 276 (1977), pp. 1-9.
- Kokubun, T. and Soyama, H., Evaluation of fatigue crack propagation in surface modification layer of duralumin treated by various peening, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 83, No. 853 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00190.
- Lados, D.A., Apelian, D. and Donald, J.K., Fracture mechanics analysis for residual stress and crack closure corrections, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, No. 4 (2007), pp.687-694.
- Matsui, K., Eto, H., Kawasaki, K., Misaka, Y. and Ando, K., Improvement of fatigue strength of gears hardened by contour induction using double shot peening, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 65, No. 637 (1999), pp.1942-1947 (in Japanese).
- Nagase, Y., Izumisawa, M. and Yamamoto, J., Effect of prestrain on the dependence of fatigue limit on grain size (rotating bending on pure iron), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 55, No. 514 (1989), pp.1247-1254 (in Japanese).
- Nishijima, S., Statical analysis of fatigue test data, *Journal of the Society of Materials Science*, Vol. 29, No. 316 (1980), pp.24-29 (in Japanese).
- Society of Shot Peening Technology Japan, *Fatigue of Metals and Shot Peening* (2004), Gendai Kougaku-sya (in Japanese).
- Soyama, H. and Yamada, N., Relieving micro-strain by introducing macro-strain in a polycrystalline metal surface by cavitation shotless peening, *Materials Letters*, Vol. 62, No. 20 (2008), pp. 3564-3566.

- Soyama, H., Enhancing the aggressive intensity of a cavitating jet by means of the nozzle outlet geometry, Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 133, No. 10 (2011), 101301-1-11.
- Soyama, H., Enhancing the aggressive intensity of a cavitating jet by introducing a cavitator and a guide pipe, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 9, No. 1 (2014), DOI: 10.1299/jfst.2014jfst0001.
- Soyama, H., Key factors and applications of cavitation peening, International Journal of Peening Science and Technology, Vol. 1 (2017a), pp. 3-60.
- Soyama, H., Introduction of compressive residual stress into alloy steel by cavitation peening using laser cavitation, Proceedings of 13th International Conference on Shot Peening (2017b), pp. 414-417.
- Takakuwa, O., Yamamiya, K. and Soyama, H., An indicator for the suppression of fatigue crack growth by hybrid peening, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 7, No. 3 (2013a), pp.357-371.
- Takakuwa, O., Kwaragi, Y. and Soyama, H., Estimation of the yield stress of stainless steel from the Vickers hardness taking account of the residual stress, Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, Vol. 3 (2013b), pp. 262-268.
- Takakuwa, O., Sanada, K. and Soyama, H., Evaluation of fatigue crack propagation in surface modification layer by a load-controlled plate bending fatigue tester, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol. 80, No. 810 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0022.
- Ueno, Y. and Soyama, H., Improvement of fatigue strength of duralumin plates with an open hole by re-circulating shot peening method using a water jet, Proceeding of Fall Meeting, Tohoku Branch, JSME (2014), pp.1-2 (in Japanese).
- Vielma, A.T., Llaneza, V. and Belzunce, F.J., Effect of coverage and double peening treatments on fatigue life of a quenched tempered structural steel, Surface and Coatings Technology, Vol. 249 (2014), pp.75-83.
- Warren, B.E., X-ray diffraction, Addison-Wesley Publishing Company (1969).
- Watanabe, Y., Hasegawa, N. and Matsumura, Y., Simulation of residual stress distribution on shot peening, Journal of The Society of Materials Science, Vol. 44, No. 496 (1995), pp.110-115 (in Japanese).