

レーザーピーニングによるアルミニウム合金 A2024-T4 の疲労強度向上 (残留応力緩和の考慮)

東京都市大学 ○秋田貢一, 大谷眞一
東京都市大学[院] 大石将之, 竹田和也
(株)東芝 佐野雄二, 斎藤利之

Improvement of Fatigue Strength on Aluminum Alloy A2024-T4 by Laser Peening (Consideration of residual stress relaxation)

Koichi AKITA, Shin-ichi OHYA, Masayuki OHISHI, Kazuya TAKEDA
Yuji SANNO, Toshiyuki SAITO

1 緒言

近年, ショット材を使用しないピーニング技術であるレーザーピーニング(Laser Peening, 以下 LP)が注目されている。LP は水中で材料にパルスレーザーを照射することで, 材料表面に圧縮残留応力を付与する表面改質技術であり, 国内では原子炉内構造物の応力腐食割れ対策として実用化されている。一般的に圧縮残留応力を付与することによって, 疲労強度が向上することは知られており, 初期残留応力を考慮した疲労寿命予測が行われている。しかし残留応力は機械的負荷により緩和する可能性があり, 疲労寿命に及ぼす残留応力の効果を検討する際にはこの緩和を考慮する必要がある。LP 施工材の疲労過程における残留応力変化は1サイクル目における緩和量が支配的であり, それ以降の緩和は極僅かであることが明らかになっている。¹⁾そこで本研究では1サイクル負荷後の表面残留応力を考慮し, 疲労特性改善に及ぼすLP施工材の圧縮残留応力効果を検討した。

2 実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材には, 熱処理型合金の超ジュラルミン A2024-T4を使用した。試験片形状を Fig. 1 に示す。なお LP は Fig. 1 斜線部の円周上全面を螺旋状に施工した。施工条件はパルスエネルギーを 100mJ, 照射スポット径を 0.7mm とし, 照射密度を 9, 18, 27, 36pulse/mm² (A, B, C, D) と変化させた。またパルスエネルギーを 50mJ, 照射スポット径を 0.7mm とし, 照射密度を 18pulse/mm² とした条件 (E)を加えた。

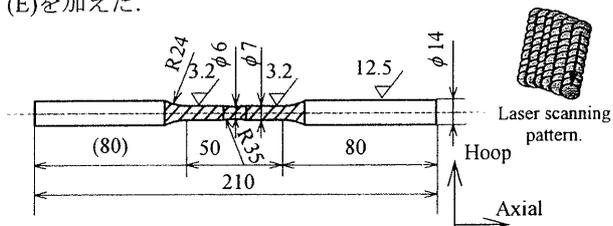


Fig. 1 Shape and dimensions of fatigue specimen on A2024-T4.

2.2 X線応力測定

残留応力は X 線回折法の $\sin^2\psi$ 法によって測定を行った。測定点は Fig. 1 に示す試験片の中央表面で, 測定し

た応力は軸方向であり, 角度揺動を行った。残留応力測定精度は $2\theta - \sin^2\psi$ 線図から算出した応力値の 68.3%信頼区間で評価し, 図中にエラーバーで示した。

2.3 疲労試験および静的引張試験

疲労試験は島津製作所製電気油圧式疲労試験機 SERVOPULSER EHF-EB50kN-10L を用い, 繰返し周波数 20Hz で室温, 大気中にて行った。また静的引張試験においても同試験機を用い, 室温, 大気中にて実施した。所定の引張応力まで負荷したのち除荷して, 試験機から試験片を外して残留応力測定をした。これを繰返すことで残留応力変化挙動を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 LP 施工材の疲労強度

Fig.2 に未施工材と LP 施工材の S-N 線図を示す。負荷方向は軸方向とし, 応力比 $R (\sigma_{\min}/\sigma_{\max})=0.1$ とした。いずれの施工条件においても, 疲労強度が向上したことが確認できた。また例えば A 条件と他の施工条件を比較すると, 100 倍以上疲労寿命が延伸し, 施工条件のパラメータを変化させることで疲労特性が大幅に向上することを確認した。

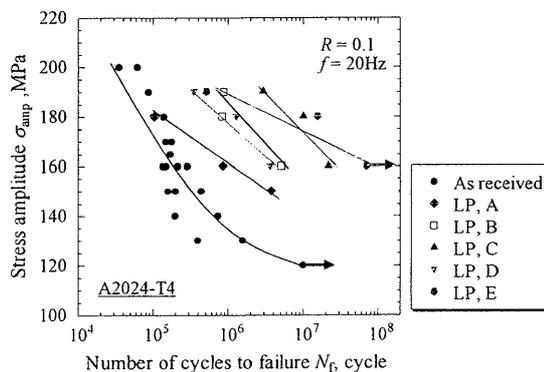


Fig. 2 S-N diagram of several conditions of laser irradiation on A2024-T4.

3.2 疲労特性に及ぼす LP 効果

3.2.1 1サイクル負荷後の表面残留応力の推定

LP 施工材の 1 サイクル負荷後の初期残留応力からの緩和量は静的引張負荷の結果から推定できることが明らかになっている。¹⁾そこで 1 サイクル負荷後の表面残

留応力に着目するため、静的引張負荷における残留応力変化を測定した。Fig. 3 に表面残留応力 σ_r と引張負荷応力 σ_{ap} の関係を示す。この関係を用いて疲労負荷における最大応力に対応した引張応力負荷後の表面残留応力から、1 サイクル負荷後の残留応力の推定を行った。

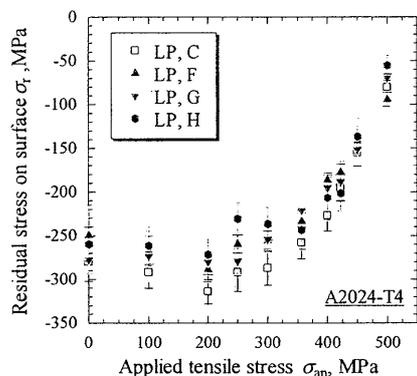


Fig. 3 Changes of surface residual in static tensile loading on laser-peened sample.

3.2.2 疲労負荷における平均応力効果

圧縮残留応力には疲労負荷における平均応力を下げるとの同等の効果があることが知られている。そこで未施工材にて $R=0.1$ の負荷条件を基準に平均応力を 100MPa および 150MPa 下げ、疲労試験を行った。Fig. 4 に疲労試験結果を示す。平均応力を下げることにより疲労強度が向上することを確認した。50MPa および 200MPa の曲線は、推定結果である。また平均応力を下げた結果および推定から、それぞれの疲労負荷ごとに $R=0.1$ に対して、どの程度応力振幅低減量 $\Delta\sigma_{amp}$ があつたかを、Fig. 4 から読み取った。例えば $\sigma_{amp}=180\text{MPa}$ の条件においては、平均応力を 150MPa 下げると、 $R=0.1$ で同等の疲労寿命を示す際の応力振幅は約 145MPa となり、すなわち 150MPa の圧縮残留応力は応力振幅を 35MPa 下げる効果を持つことになる。

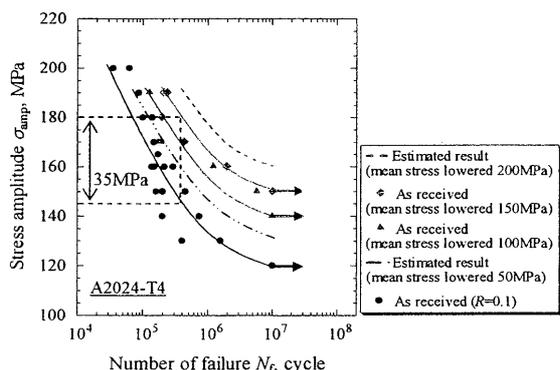


Fig. 4 Effect of mean stress in fatigue loading.

3.2.3 疲労特性改善に及ぼす残留応力効果

前項までの結果を用いて、疲労負荷における LP 施工材の圧縮残留応力効果の補正を S-N 線図(Fig. 2)上で試みた。まず 3.2.1 項の結果より 1 サイクル負荷後の表面残留応力を行う。LP 施工材で実施した疲労負荷における最大応力 $\sigma_{max, actual}$ と対応した引張応力 σ_{ap} を負荷後の残留応力をグラフから読み取り、初期残留応力からの緩和量を算出する。算出した残留応力を σ_r^* とする。次に 3.2.2 項の結果を用いて、推定

した残留応力分、平均応力を下げる効果があるとし、どの程度応力振幅低減量があつたのかを見積もる。最後に LP 施工材のプロットを応力振幅低減量分下げる。この補正後のプロット($\sigma_{amp, correction}$ と名付ける)は、残留応力の効果を除去したことになる。補正結果を Fig. 5 に示す。補正を行うことで、未施工材の結果とほぼ重なり合う結果となった。

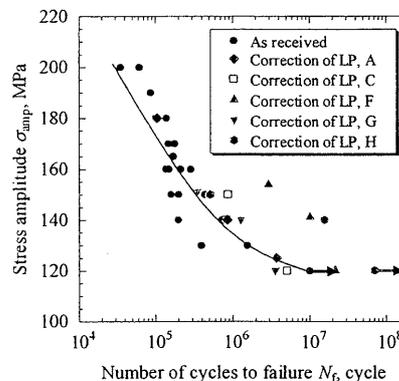


Fig. 5 S-N diagram of laser peened samples after correction of residual stress effect.

この結果から、疲労負荷 1 回負荷後の表面残留応力による応力振幅低減量を平均応力効果として見積もれば、LP 施工材の疲労強度が予測できることになる。そこで Fig. 4 結果を用いて、X 軸に平均応力効果つまり 1 サイクル負荷後の表面残留応力 σ_r^* 、Y 軸に応力振幅低減量 $\Delta\sigma_{amp}$ を取る(Fig. 6)。近似曲線を引くと $\Delta\sigma_{amp} = -0.22\sigma_r^*$ となる。これを考慮すると、LP 施工材の疲労寿命推定式は以下ようになる。

$$\sigma_{amp, correction} = \sigma_{amp, actual} + 0.22\sigma_r^* \quad (1)$$

この補正後の応力振幅における未施工材の疲労寿命から、LP 施工材の応力振幅における疲労寿命が予想できるということである(ただし $R=0.1$)。

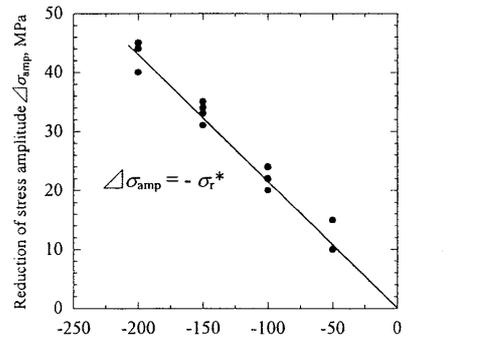


Fig. 6 Residual stress effect on fatigue stress.

4 結言

1 サイクル負荷後の表面残留応力を考慮し、疲労特性改善に及ぼす LP 施工材の圧縮残留応力効果を検討した。その結果、疲労特性が改善した要因は、圧縮残留応力の影響が支配的であることが明らかとなった。また 1 サイクル負荷後の表面残留応力による応力振幅低減量を平均応力効果として見積もることで、LP 施工材の疲労寿命を予測できることを示した。

5 参考文献

- 1) 堺崇弘, 秋田貢一, 大谷眞一, 佐野雄二, 斎藤利之, 材料, Vol57, No. 7, pp. 648-653(2008).