

振動疲労強度におけるショットピーニングによる表面塑性加工の効果の検討

岡山大学 大学院自然科学研究科
助教 坂本 惇司

(平成 29 年度 奨励研究助成 B (萌芽的研究) AF-2017042)

キーワード：ショットピーニング，振動疲労強度，圧縮残留応力

1. 研究の目的と背景

自動車，航空機等の輸送機器に代表されるように，振動を受ける実機械において，その振動の大きさ，方向，周波数等はランダムである場合が多い¹⁾．複数の方向に負荷が加わる多軸負荷の場合，一方向の同一荷重の単軸負荷に比べて，大幅に低下することがあることが知られている．そのため，それらの機械の長期信頼性を確保するためには，振動の大きさ，方向，周波数がランダムである多軸ランダム振動を受ける材料の疲労強度評価を適切に行う必要がある，その疲労強度向上も望まれる．しかし，多軸ランダム振動を受ける材料の疲労強度に関する研究は行われているもの^{2), 3)}の不明な点が多く，さらに，振動疲労強度を向上させる方法についても不明な点が多い．

そこで，本研究では，多軸ランダム振動下の材料の疲労強度とその振動下の疲労強度におけるショットピーニングの効果を検討することを目的とし，ショットピーニング処理をしていない試験片とショットピーニング処理をした試験片を用いて振動試験を行い，3 軸ひずみゲージを用いて試験片に負荷されるひずみを測定し，振動疲労時の応力場とそれに及ぼすショットピーニングの影響を考察した．

2. 実験方法

2.1 材料

材料は，市販のアルミニウム合金 A5056 押出棒材を用いた．表 1 および表 2 に，その化学成分と機械的性質をそれぞれ示す．図 1 に，試験片の形状および寸法を示す．試験片は，破壊起点が多軸状態となるよう，Y 字型の試験片の中央部に貫通穴を導入した．また，Y 字の先端に重りを装着できるようにねじ穴を設けた．

2.2 ショットピーニング処理

ショットピーニング処理は，新東工業株式会社製の重力吸引式エアブラスト装置 My BLAST MY-24 を用いて行った．投射材として直径 0.2 mm のスチールを用いて，投射圧力 0.6 MPa で，投射時間はカバレッジ 300~400%となるようにショットピーニング処理を行った．ショットピーニング処理を行っていない試験片をショットピーニング未処理材，ショットピーニング処理を行った試験片をショットピーニング処理材と呼ぶ．図 2 に，ショットピーニング未処理材とショットピーニング処理材の様子を示す．図 2 に示すように，ショットピーニング処理は，試験片で応力が集中する中央部のみに，360 度全ての方向から行った．

その際に，中央部以外に投射材が当たらないように，マスキングテープで他の部分を覆った．また，図 2 より，ショットピーニング処理により，表面に微小な凹凸ができたため，表面の光沢が無くなっていることが分かる．本研究では，それらの 2 種類の試験片を用いて試験を行った．

表 1 アルミニウム合金 A5056 の化学成分

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.05	0.12	0.01	0.06	4.5	0.06	0.01	Bal.

表 2 アルミニウム合金 A5056 の機械的性質

0.2%耐力	引張り強さ	伸び
120 MPa	250 MPa	41%

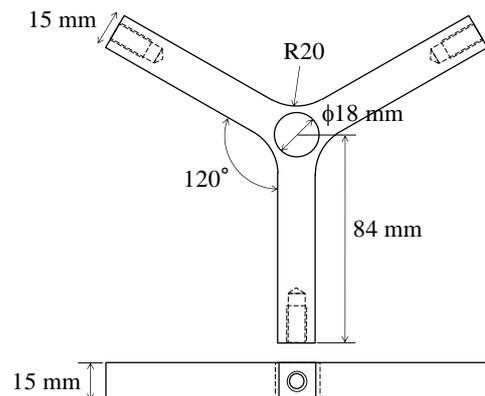


図 1 試験片の形状および寸法



図 2 ショットピーニング未処理材とショットピーニング処理材

2・3 振動試験

振動試験は、Qualmark社のTyphoon2.5を用いて行った。振動試験は、25℃の窒素環境中で、振動台を10~5000 Hzのランダムな周波数で、x, y, z軸の3方向とそれらの各回転軸の計6軸の振動をランダムに発生させて行った。試験条件は、重力加速度10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 G_{rms} の7条件でそれぞれ2分間の振動試験を行い、各重力加速度によるショットピーニングの有無による応力場の違いを測定した。また、ショットピーニング処理により導入された残留応力の緩和を調べるために、70 G_{rms} の条件で60分間の振動試験を行い、ショットピーニングの有無による応力場の変化を測定した。図3に、振動試験装置内の振動台に試験片を設置した状態を示す。図3に示すように、ひずみゲージは3軸方向のひずみが測定可能な3軸ひずみゲージを用いてY字試験片の上面において、x方向およびx方向から±45°方向のひずみを測定した。本研究で試験片に負荷されたひずみは、ほぼ弾性範囲内であったため、ヤング率70 GPa、ポアソン比0.3として、ひずみから応力を算出した。

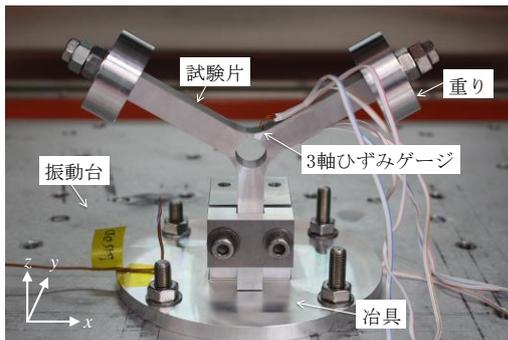


図3 振動台に設置した重りを付けた試験片

3. 結果および考察

図4に、ショットピーニング未処理材の重力加速度70 G_{rms} 時の0.1秒間における3方向のひずみの変化を示す。0度方向のひずみが一番大きく、-45度と45度方向のひずみはほぼ同程度であることが分かる。また、3方向のひずみはほぼ同位相であることが分かる。この3方向のひずみを基に、主応力と主応力方向を算出した。

図5に、ショットピーニング未処理材の重力加速度70 G_{rms} 時の0.1秒間における最大主応力と最小主応力の変化と主応力方向の変化を示す。最大主応力と最小主応力のピーク値が一定でないことが分かる。また、最大主応力が最大となる時、主応力方向はほぼ0度であり、最小主応力が最小となる時、主応力方向はほぼ±90度である。このことから、本試験片の測定箇所においては、0度方向である長手方向に引張圧縮の荷重が繰り返し負荷されていることが分かる。また、0.1秒間の間に、最大主応力と最小主応力ともおよそ40回のピークが確認されるため、その負荷周波数はおよそ400 Hzである。

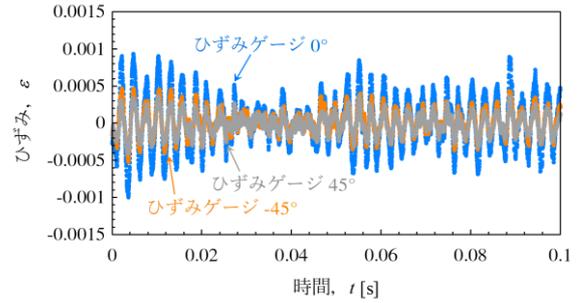


図4 ショットピーニング未処理材の重力加速度70 G_{rms} 時の0.1秒間における3方向のひずみの変化

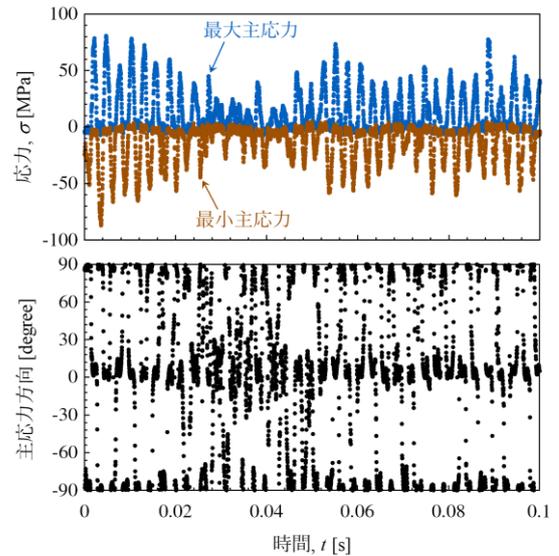


図5 ショットピーニング未処理材の重力加速度70 G_{rms} 時の0.1秒間における主応力と主応力方向の変化

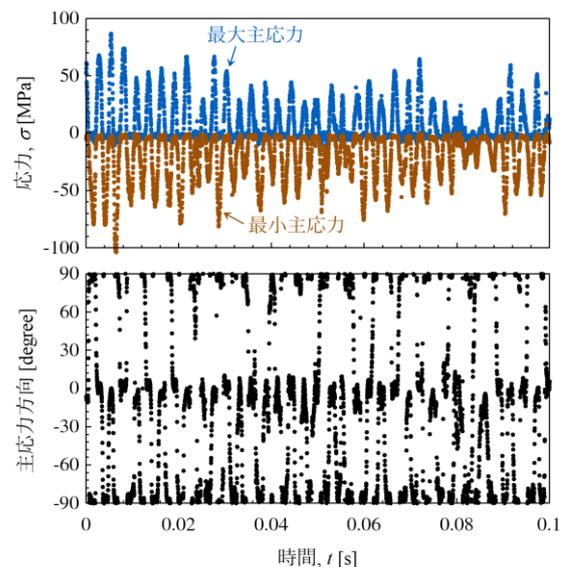


図6 ショットピーニング処理材の重力加速度70 G_{rms} 時の0.1秒間における主応力と主応力方向の変化

図6に、ショットピーニング処理材の重力加速度 $70 G_{rms}$ 時の 0.1 秒間における最大主応力と最小主応力の変化と主応力の変化を示す。ショットピーニング処理材において、最大主応力が最大となるときの、主応力方向はほぼ 0 度であり、最小主応力が最小となるときの、主応力方向はほぼ ± 90 度である。また、負荷周波数は、0.1 秒間の間に、最大主応力と最小主応力ともにおよそ 40 回のピークが確認され

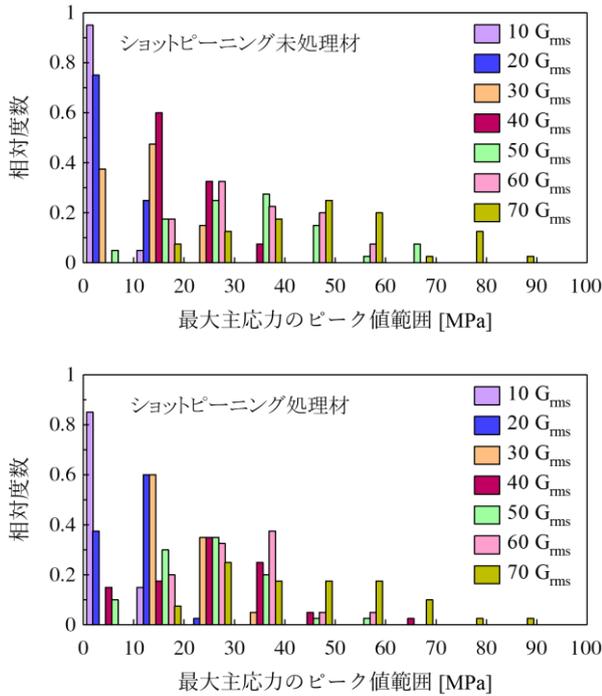


図7 ショットピーニング未処理材およびショットピーニング処理材の各重力加速度負荷時の 0.1 秒間における 40 回の最大主応力のピーク値の分布

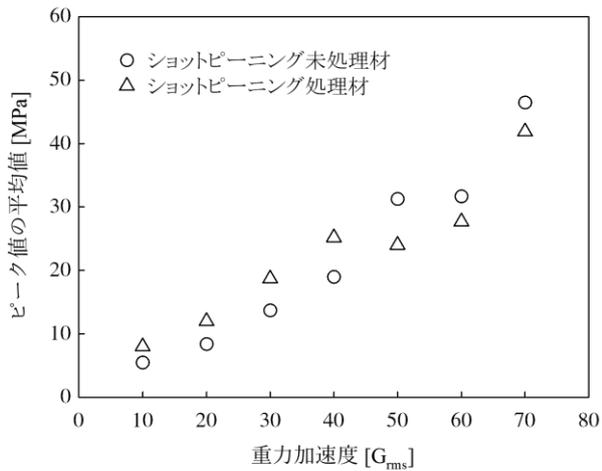


図8 ショットピーニング未処理材およびショットピーニング処理材における 0.1 秒間における最大主応力のピーク値の平均値と重力加速度の関係

るため、その負荷周波数はおよそ 400 Hz である。したがって、ショットピーニング処理材の主応力の方向と負荷周波数は、ショットピーニング未処理材と同等であり、その点に関してはショットピーニングによる影響は見られなかった。

図7に、ショットピーニング未処理材およびショットピーニング処理材の各重力加速度負荷時の 0.1 秒間における 40 回の最大主応力のピーク値の分布を示す。ショットピーニング未処理材とショットピーニング処理材で同様の傾向が見られ、最大主応力のピーク値は分布を持ち、重力加速度が大きくなるにつれて、最大主応力のピーク値の分布は広がり、最大主応力のピーク値の最頻値は大きくなる。グラフの横軸のスケールの関係上、低重力加速度時の最大主応力のピーク値の分布はグラフに表れていないが、分布の形は各重力加速度で同様の形であった。

図8に、ショットピーニング未処理材およびショットピーニング処理材の最大主応力のピーク値の平均値と重力加速度の関係を示す。両者ともに、重力加速度が増加するにつれて、最大主応力の平均値もほぼ増加しているが、重力加速度が増加するにも関わらず、最大主応力の平均値が増加しない箇所（ショットピーニング未処理材における $50 G_{rms}$ と $60 G_{rms}$ 、ショットピーニング処理材における $40 G_{rms}$ と $50 G_{rms}$ ）が見られる。重り部分に加わる荷重は、重力加速度に比例して増加するため、一方向の振動モードであれば、理論的には重力加速度と最大主応力のピーク値の平均値の関係は比例関係になると考えられる。したがって、重力加速度が増加するにも関わらず、最大主応力の平均値が増加しない理由としては、わずかに主応力方向が変化することが考えられる。

図9に、 $70 G_{rms}$ で1時間の振動試験を行ったショットピーニング処理材の最大主応力のピーク値の平均値の時間変化を示す。プロットの値は、各時間帯の 2 秒間 (800 個) の平均値である。図8の重力加速度 $70 G_{rms}$ 時の値と異な

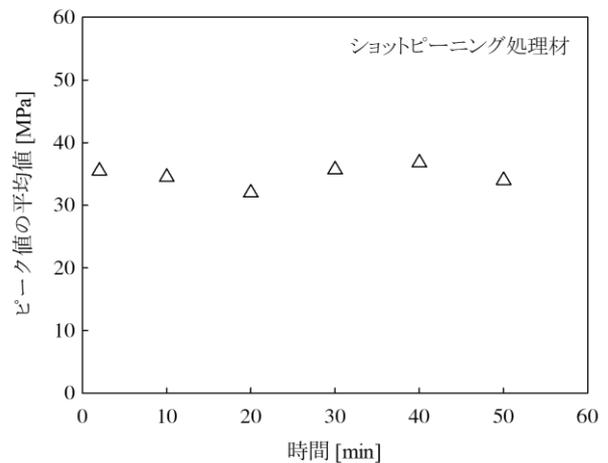


図9 ショットピーニング処理材における最大主応力のピーク値の平均値の時間変化

るのは、データを算出した試験片と平均値を算出するために使用したデータ数が異なるためである。ショットピーニング処理材において、振動を受けることによって、残留応力が緩和され応力が増加すると考えていたが、70 G_{rms} で1時間の試験を行った場合でも応力の変化が見られなかった。今回の振動条件はほぼ弾性範囲の負荷であり、その範囲においては、残留応力の緩和はほぼしないと考えられる。

4. 結言

本研究では、アルミニウム合金 A5056 を対象として、ショットピーニング未処理材とショットピーニング処理材の2種類の試験片を用いて多軸ランダム振動試験を行った。3軸ひずみゲージを用いたひずみの測定を行い、応力場およびそれに及ぼすショットピーニングの影響を考察した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 主応力の方向は、重力加速度によらず、ほぼ一方向であり、そのピークの周波数はおよそ 400 Hz であった。主応力の大きさは、一定ではなく分布をもつ。大まかな傾向としては、主応力の大きさの平均値と重力加速度はほぼ比例するが、重力加速度が増加するにも関わらず、最大主応力の平均値が増加しない箇所が見られた。この理由としては、わずかに主応力方向が変化することが考えられる。

- (2) ショットピーニング処理材の振動試験中において、70 G_{rms} で1時間の試験を行った場合でも応力の変化が見られなかった。したがって、弾性範囲の負荷を受けても、残留応力の緩和はほぼしないと考えられる。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 29 年度奨励研究助成 B (萌芽的研究) AF-2017042 の支援を受けて実施しました。心より深く感謝いたします。振動試験の実施においては横浜国立大学リスク共生社会創造センターの HALT 研究コンソーシアムに、ショットピーニングの実施においては兵庫県立大学の原田泰典教授にご支援いただきました。心より深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 藤田真治・小山雄史：CAE 活用による車載用機構部品の試作レス開発，富士通テン技報，33-1 (2016)，45-50.
- 2) D. Gregory et al.: Comparison of the response of a simple structure to single axis and multiple axis random vibration inputs, Proc. 79th Shock and Vibration, (2008).
- 3) J. Sakamoto, T. Shibutani: Analysis of fatigue damage of aluminum alloy under multiaxial random vibration, Procedia Structural Integrity, 13 (2018), 529-534.