

医療用純チタンの疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響

Effect of Shot-peening on Fatigue strength of Pure Titanium for Medical

辻 俊哉* 小林 祐次* 水野 悠太*
Toshiya Tsuji Yuji Kobayashi Yuta Mizuno

久森 紀之**
Noriyuki Hisamori

Ti-6Al-4V is widely applied in medical and aerospace industry due to high corrosion resistance and high specific strength. However, process and material costs of Ti-6Al-4V is high. There is pure titanium for medical industry which is low process and material cost. However, case study for medical implant of this material is few due to low strength. Therefore, we applied the shot peening to pure titanium as enhancement method in order to be widely applied for medical implant and investigated the fatigue strength of it. As a result, shot peened pure titanium was obtained higher fatigue strength than Ti-6Al-4V.

KEY WORDS: Medical implant, Shot peening, Pure titanium, Fatigue strength

1. はじめに

Ti-6Al-4Vは比強度が高く、耐食性にも優れるため、航空宇宙用部材や医療用部材のみならず、スポーツ用品などにも幅広く使われる材料である。また、Ti-6Al-4Vへのショットピーニングの適用は航空機業界を中心に行われ、多くの研究者がショットピーニングされたTi-6Al-4Vの疲労強度の研究を行っている¹⁾⁻³⁾。しかしながら、Ti-6Al-4Vは材料コストが高く、難加工材のために加工コストが高いことが知られている⁴⁾。

一方、純チタンは静的強度が低いので活用される事例は少ない。しかし、Ti-6Al-4Vと比較して加工性が良く、材料コストも低く、また耐食性も優れているため、純チタンがショットピーニングによりTi-6Al-4Vの疲労強度と同等以上の強度が得られた場合、純チタンの適用範囲が広がる可能性がある。

本研究では、医療用純チタンに対し、各種ショットピーニングを行い、各ショットピーニング条件が医療用純チタンの疲労強度に与える影響を調査するため、平板曲げ疲労試験を行うことに

より、純チタンの疲労強度向上に有効なショットピーニング作用を把握した。

2. 実験方法

2.1 供試材及び試験片形状

本研究では、供試材として工業用純チタン2種（以下、純チタン）及びTi-6Al-4V ELI（以下、Ti-6Al-4V）を用いた。各材料の化学成分をTable1 (a)、(b)に示す。また、本試験で用いた試験片形状をFig. 1に示す。

Table 1 (a) Chemical component of pure titanium. (wt.%)

N	C	H	Fe	O	Ti
0.03	0.08	0.013	0.25	0.2	Bal

Table 1 (b) Chemical component of Ti-6Al-4V. (wt.%)

Al	V	O	Fe	C	N	Y	Ti
6.14	4.06	0.17	0.15	0.01	<0.01	<0.01	Bal

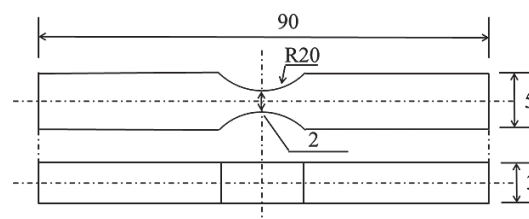


Fig. 1 Shapes and dimension of test piece. (Unit:mm)

*サーフェステックカンパニー 開発グループ
**上智大学 理工学部 機能創造理工学科 教授

2.2 ショットピーニング条件

本研究では、ショットピーニング加工は純チタンのみに行い、Ti-6Al-4Vはそれらとの疲労強度の差を把握する比較材として用いた。

純チタンに施したショットピーニング条件をTable 2に示す。本ショットピーニング条件では、各種ショットピーニング加工条件のピーニング強度を示すインテンシティを変化させるために、投射材粒径、投射材種類、エア圧を変化させた。

Table 2 Shot peening conditions.

Symbol	NP	SUS 150B	SBM44T (0.2MPa)	SBM44T (0.5MPa)	SBM 100T
Diameter (μm)	-	150	70		100
Vickers hardness (HV)	-	300	450		
Air pressure (MPa)	-	0.2	0.2	0.5	0.2
Intensity (mmN)	-	0.046	0.060	0.102	0.080
Coverage (%)	-	>100			

2.3 試験方法

本研究では、各種試験片の材質を評価するために、表面粗さ測定、硬さ分布測定、残留応力分布測定を行った。

表面粗さ測定は、ミットヨ製接触式粗さ測定器を使用した。測定規格はJIS B 0601-2001とし、粗さパラメータは、算術平均粗さRaと最大高さ粗さRzを測定した。

硬さ分布は、試験片をファインカッターで切断し、冷間樹脂埋めした後に鏡面研磨を行ったものを硬さ分布測定用試験片とした。硬さ測定は、島津製作所製ビッカース硬さ計を用い、測定を行った。

残留応力測定は、リガク製X線応力測定装置を用い、測定を行った。

疲労試験は、東京衡機製PBF-30Cを用い、平面曲げ疲労試験を行った。試験速度は600cpm、

応力比はR=-1で行った。試験打ち切り回数は、従来の疲労限度の繰り返し数とされる 1.0×10^7 回とした。

疲労試験により破断された試験片は走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察を行い、疲労破壊起点を特定した。

3. 実験結果

3.1 表面粗さ測定結果

Fig. 2に各種試験片の表面粗さ測定結果を示す。結果からショットピーニングを施した試験片は、未ショットピーニング材のNPよりも表面粗さが増加する傾向となった。ショットピーニング条件の傾向としては、Fig. 3のインテンシティと最大高さ粗さRzの関係のグラフが示すように、インテンシティの増加に伴い、表面粗さが大幅に増加する傾向となった。

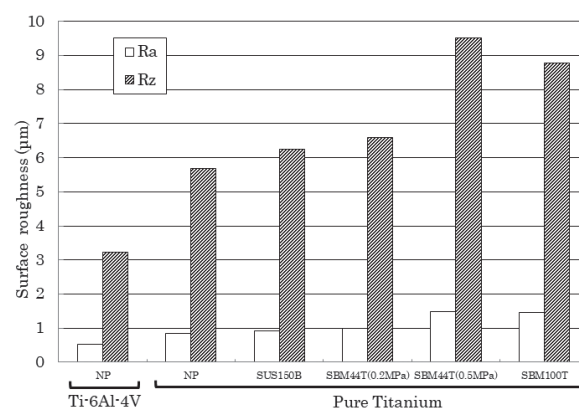


Fig. 2 Surface roughness.

3.2 硬さ分布測定結果

Fig. 3に各種試験片の硬さ分布測定結果を示す。結果からショットピーニングにより、250HVを超える表面硬さが得られた。また、ショットピーニングの硬化層深さはすべての条件で200μm程度であった。特に、粒径0.07mmの投射材をエア圧0.5MPaで噴射したSBM44T (0.5MPa) が最も高い表面硬さ346HVが得られた。この値は純チタンの約2.0倍の硬さとなっている。ショットピーニング条件の傾向として、投射材粒径が小さいほど、表面硬さが増加する傾向となった。

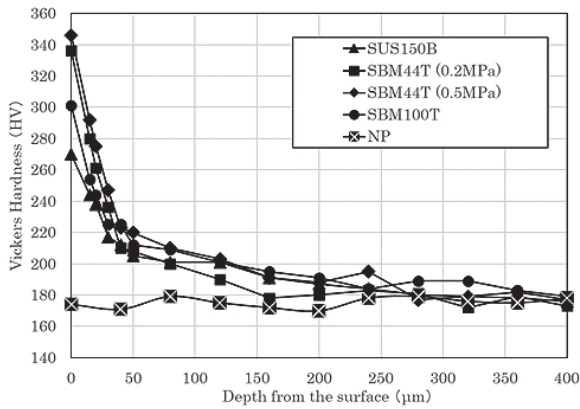


Fig. 3 Hardness distribution of Pure titanium.

3. 3 残留応力分布測定結果

Fig. 4 に各種試験片の残留応力分布測定結果を示す。結果から、全てのショットピーニングで表面残留応力が -300MPa を超える結果となった。粒径 0.07mm の投射材をエア圧 0.5MPa で噴射したSBM44T (0.5MPa) は表面残留応力 -400MPa を超える結果となった。ショットピーニングによる圧縮残留応力付与深さは最大 $100\ \mu\text{m}$ 程度となった。付与深さの傾向としては、インテンシティの増加とともに付与深さが深くなる傾向となった。

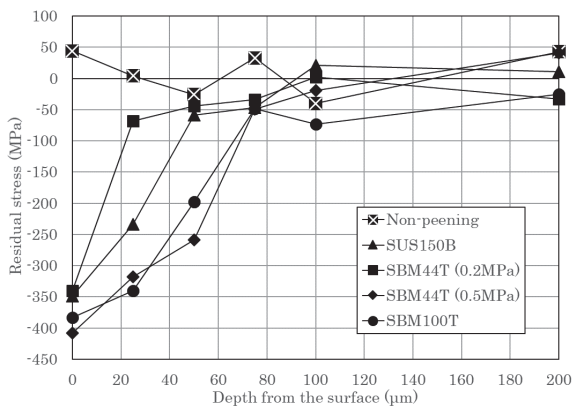


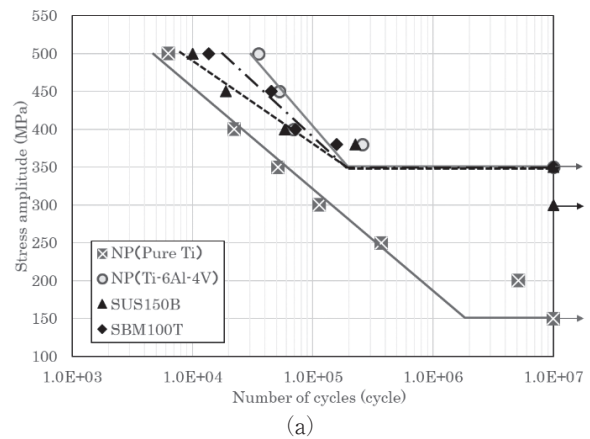
Fig. 4 Residual stress distribution of Pure titanium.

3. 4 疲労試験結果

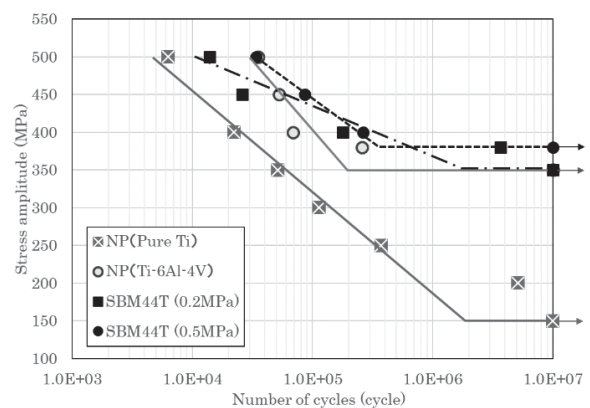
Fig. 5 (a)、(b) に各種試験片の疲労試験結果を示す。未ショットピーニングのTi-6Al-4Vは、同様の純チタンの疲労強度よりも約2.3倍高い結果となり、各応力振幅下においても疲労寿命は長くなる傾向となった。

ショットピーニングを行った全ての純チタン試験片は、未ショットピーニングの純チタンより高い疲労強度及び長い疲労寿命となった。特に粒径 0.07mm の投射材をエア圧 0.5MPa で噴射したSBM44T (0.5MPa) は、未ショットピーニングの純チタンよりも約2.7倍向上した。

また、ショットピーニング試験片において、SBM44T (0.5MPa) は、未ショットピーニングのTi-6Al-4Vより高い疲労強度となった。このことからショットピーニングにより、少なくとも純チタンの疲労強度はTi-6Al-4Vよりも高強度化可能であることがわかった。



(a)



(b)

Fig. 5 Fatigue test results.

Fig. 6 に負荷応力振幅 $\sigma_a=400\text{MPa}$ 下で破断した疲労試験片の破面観察結果を示す。結果から、全ての破断疲労試験片は表面起点型破壊となっていた。また、破壊起点は全ての試験片において試験片角部周辺から発生していた。

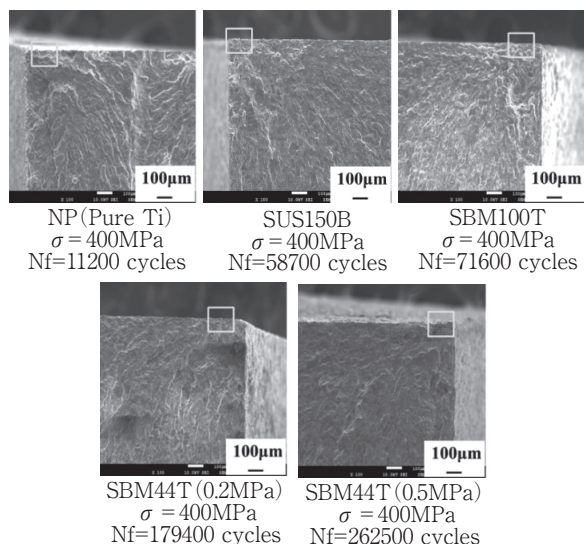


Fig. 6 Observation results of fracture surface of each specimens.

4. 考察

本研究結果から、純チタンの疲労強度向上として有効なショットピーニング作用について考察を行う。

Fig. 7 に各種試験片の表面粗さと疲労強度の関係を示す。一般的に表面粗さの増加は疲労強度低下原因とされている^{5) 6)}が、本研究においては、表面粗さの増加による疲労強度低下の傾向はなかった。これはショットピーニングの圧縮残留応力付与によるき裂進展抑制効果が考えられる。また、純チタンは一般的に切欠きに鈍感とされており^{7) 8)}、表面粗さの増加を伴う切欠き効果の影響が少なかったことも原因と考えられる。

Fig. 8 に各種試験片の表面硬さと疲労強度の関係を示す。結果から、表面硬さの増加により疲労強度が向上する傾向となっている。これは表面硬さの向上がき裂発生を抑制する効果があり、この効果が本研究では疲労強度向上に寄与したことが考えられる。

Fig. 9 に各種試験片の最大圧縮残留応力と疲労強度の関係を示す。結果から、最大圧縮残留応力の増加により疲労強度が増加する傾向となっている。これは圧縮残留応力がき裂進展を抑制する効果があり^{9) 10)}、この効果が寄与したことが考えられる。

以上、これらの結果からショットピーニングによる純チタンの疲労強度向上には、表面硬さ向上と圧縮残留応力付与が有効であった。表面粗さの悪化に関しては、純チタンの切欠き感受性の低さと上記の効果が重畳して、疲労強度に大きな影響を及ぼさなかったことが考えられる。

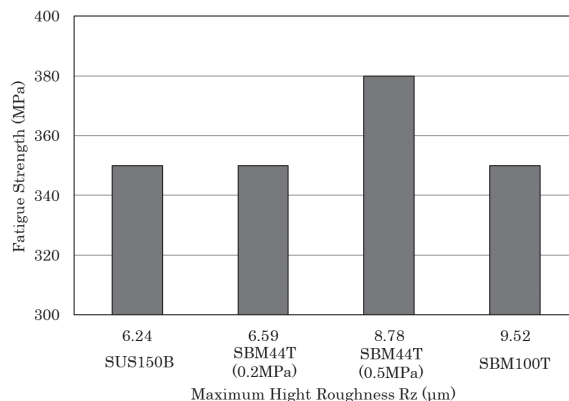


Fig. 7 Relationship between surface roughness and fatigue strength.

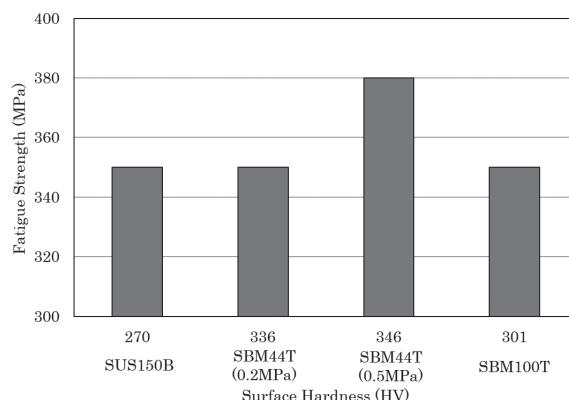


Fig. 8 Relationship between surface hardness and fatigue strength.

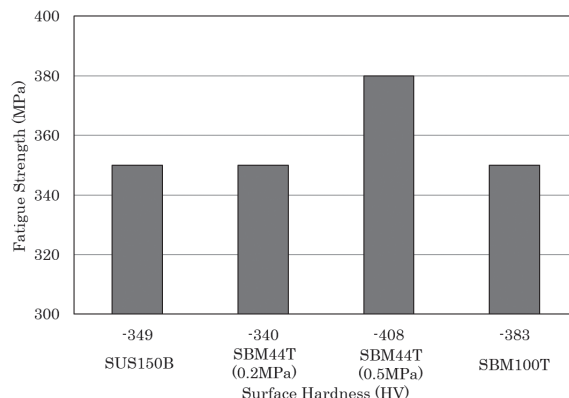


Fig. 9 Relationship between Maximum compressive residual stress and fatigue strength.

5. 結言

- (1) 純チタンにショットピーニングを行うことにより、表面硬さが未ショットピーニング材より約2.0倍向上した。
- (2) 純チタンにショットピーニングを行うことにより、疲労強度が未ショットピーニング材より約2.5倍向上した。またTi-6Al-4Vと同等以上の疲労強度となった。
- (3) 純チタンのショットピーニングによる疲労強度向上要因は、表面硬さ向上と圧縮残留応力付与であり、表面粗さの影響は本加工条件内では傾向が見られなかった。

参考文献

- 1) 加藤 容三, 高藤 新三郎, 桐山 真紀: 材料 vol.48 (1996), No.1, pp.43-47
- 2) 政木 清孝, 與那國 優希, 久森 紀之, 須賀 祐一郎, 小林 祐次, 後和 大輔: 材料 vol.65 (2016), No.9, pp.679-686
- 3) 政木 清孝, 亀島 洋平, 久森 紀之, 佐野 雄二, 秋田 貢一, 菖蒲 敬久: 材料 vol.62 (2013), No.5, pp.297-304
- 4) 藤井 秀樹, 前田 尚志: 新日鉄技報 vol.396 (2013), pp.16-22
- 5) 村上 敬宜, 高橋 宏治, 山下 晃生: 日本機械学会A編 vol.63 (1997), No.612, pp.1612-1619
- 6) 村上 敬宜, 堤 一也, 藤嶋 正博: 日本機械学会A編 vol.62 (1996), No.597, pp.1124-1131
- 7) 高尾 健一, 西谷 弘信: 日本機械学会A編 vol.50 (1984), No.453, pp.1049-1053
- 8) 高尾 健一, 高橋 弘信: 材料 vol.36 (1986), No.409, pp.1060-1064
- 9) 丹下 彰, 阿久津 忠良, 高村 典利: ばね論文集 vol.36 (1991), pp.47-53
- 10) 三林 雅彦, 宮田 隆司, 相原 秀雄: 日本機械学会A編 vol.61 (1984), No.586, pp.1172-1178