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.%)

	Ν	(2	Н	Fe	()	Ti			
	0.03		08	0.013	0.25	0	.2	Bal			
Table 1 (b) Chemical component of Ti-6Al-4V. (wt.%)											
	Al	V	0	Fe	C	N	Y	Ti			
	614	4.06	0.17	7 0.15	0.01	< 0.01	< 0.01	Ral			



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。

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

Table 2 Shot peening conditions.

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、ミツ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 × 10⁷ 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。



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。



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 -400MP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 μ 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。





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。



Fig. 6 に負荷応力振幅σ_a=400MPa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 facture 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.

- 17 -

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

- 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
- 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