

ショットピーニング処理と特殊時効処理によるマルエージング鋼の疲労強度改善

都城工業高等専門学校 機械工学科

教授 永野 茂憲

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015019)

キーワード：疲労，ショットピーニング処理，マルエージング鋼，相対湿度，内部破壊

1. 諸言

機器の使用における環境負荷を低減するためには、軽量化が可能な高強度鋼の使用が有効である。そこで、使用されるのがマルエージング鋼である。

マルエージング鋼は実用鋼中最も高い静強度とじん性を有する材料であるが、高価なため使用範囲は必ずしも多くはない。すなわち、航空機やロケット、人工衛星等の宇宙開発用機器、身近には自動車の無段変速機の金属ベルト等、過酷な環境下において使用される機械用部材として用いられている。しかし、一般的に鋼を高強度化すると切欠き感度が高くなり、高い静強度にみあう疲労強度が得られない。また、高強度鋼の場合、長寿命域では内部の介在物等を起点とした内部破壊が生じる。さらに、湿度にも敏感であり、通常マイルドな環境とされる大気中でも湿度の影響を受け、疲労強度が低下する。このような問題に対するメカニズムの解明や疲労強度改善法に関して従来から多くの研究が行われてきた¹⁾²⁾。

これまで、18%Ni マルエージング鋼の疲労特性及び疲労強度改善法について検討した結果、疲労強度改善にはショットピーニング処理、組織調整として逆変態オーステナイトの生成が有効であることが報告されている²⁾。

しかし、ショットピーニング処理後のマルエージング鋼の湿度と時効組織の影響に関しては不明な点が多く、特に二段時効について調べた研究はほとんどない。そのため、二段時効が疲労強度にどのような影響を及ぼしているかについては不明である。

そこで本研究では、18%Ni マルエージング鋼を対象として内部破壊を生じさせるためショットピーニング処理を行い、回転曲げ疲労における疲労強度に及ぼすショットピーニングにより生じた表層組織の影響と、高応力域で生じる表面破壊と低応力域で生じる内部破壊の詳細について検討した。

2. 供試材料及び実験方法

2-1 供試材料

本実験で用いた材料は市販の 350 級 18%Ni マルエージング鋼（直径 13mm の丸棒）である。その化学成分を表 1 に示す。

表 1 化学成分 (mass.%)

Grade	C	Si	Mn	Ni	Mo	Co	Ti	Al	Fe
350G	0.001	0.01	0.01	17.89	4.27	12.36	1.3	0.08	Bal.

表 2 熱処理条件と機械的性質

Alloy	Aging condition	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	ϕ (%)	HV
SA-U	753K-11ks	2194	2230	53.8	665
SA-P	753K-159ks	2300	2370	54	705
DA-P	753K-150ks+673K-400ks	2420	2549	51	785

本実験では、時効処理（一段時効と二段時効）を行い、それぞれの中から亜時効材と完全時効材を選んだ。表 2 に本実験に用いた材料の熱処理条件を示す。なお、以下では各材を、ビッカース硬さと時効条件(SA:一段時効, DA:二段時効, U:亜時効, P:完全時効)を考慮して、表 2 に示しているように表す。

その後、ショットピーニング処理を施し、その材料で疲労試験を行った。表 3 には、そのショットピーニング条件を示す。ショット材は普通鋼球の ϕ 0.3mm 粒 (HV900) を用い、ガバレージ 300%、投射方式は空気式 (0.3MPa) を用いた。図 1 に今回用いた疲労試験片の形状を示す。

2-2 実験方法

SP 材における表層面の硬さ及び残留応力の分布は、微小ビッカース硬度計及び X 線応力測定装置を用いて行った。また、表面粗さは触針式粗さ計で測定した。

本実験に用いた疲労試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機（容量 15N・m、繰返し速度約 50Hz）である。湿度条件（相対湿度 RH）は、25%（乾燥条件 L）及び 85%（高湿度条件 H）で、精度は $\pm 5\%$ である。この湿度条件を選んだのは両湿度とも日常的に生じうることで、多くの材料で疲労強度は湿度が 60~70%を境に大きく変化する

表 3 ショットピーニング条件

Blasting Equipment		Air Type	
Shot	Size(mm)	Material	Hardness
	ϕ 0.3	Steel	HV=900
Blasting		ϕ 0.3mm	
	Almen Intensity	0.23mm A	
	Time(sec)	6	
	Distance(mm)	180	
	Pressure(MPa)	0.3	
	Coverage(%)	300	

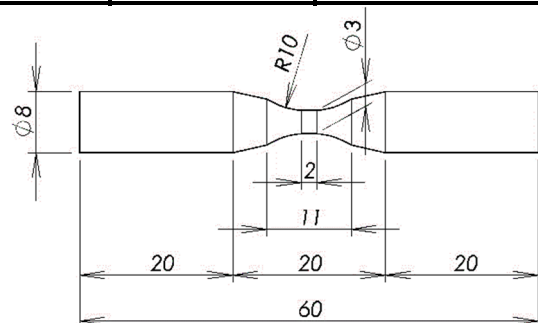


図 1 試験片の形状及び寸法

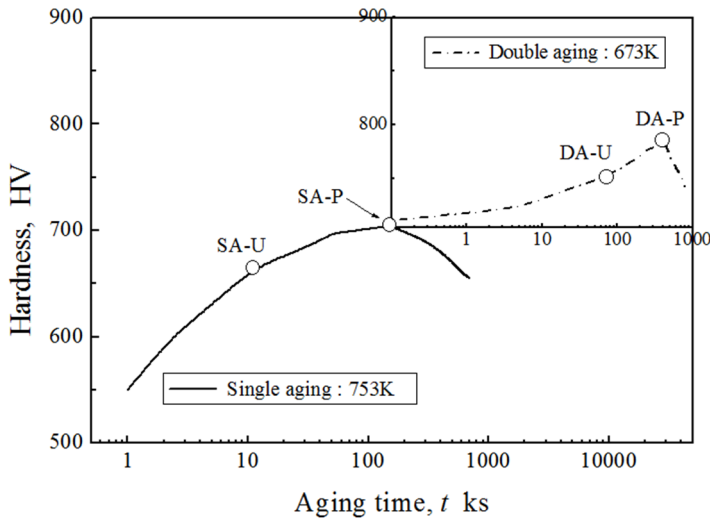


図2 時効硬化曲線

ることを考慮したためであり湿度 25%は低湿度環境、湿度 85%は高湿度環境を代表できると判断したからである^{3),4)}。また、高強度鋼の場合、長寿命域における疲労特性が重要視されているが、本研究では 10^8 を打ち切りとし、非破断であった試験片の限界応力とした。

3. 実験結果及び考察

3・1 硬さ分布及び残留応力分布

図2に本実験で適用した時効条件による時効硬化曲線を示す。ここでは、一般に採用される時効温度である 753K で一段目の時効を行い、最高硬度を示した状態から、それより低い温度の 673K でさらに加熱する。つまり二段時効を行った。このような時効を行うと硬さはさらに増加している。以下では、一段、二段時効のそれぞれで、最高硬さを示すピーク時効（完全時効）、及び、亜時効を選び、静的な機械的性質と疲労特性を調べた。これらの条件を時効曲線中に○で示した。以後、時効処理条件として、一段時効を SA、二段時効を DA と記し、さらに時効状態として亜時効、ピーク時効をそれぞれ U、P で表記する（例：一段、亜時効材を SA-U 材）。また、湿度条件として、高湿度を H、低湿度を L で表記する（例：一段、ピーク時効材、低湿度を SAP-L 材）。

図3に各種ショットピーニング材の硬さ分布測定結果を示す。図より、硬さは DA-P、SA-P、SA-U の順で硬く、被加工材の硬い方が高い値を示していることがわかる。また、表面から 200 μ m までショットピーニング効果による硬度上昇が見られた。

図4に各材のショットピーニング処理による残留応力分布測定結果を示す。すべての材料で圧縮の残留応力が生じ、その最大値は SA-U、SA-P、DA-P の順に高く、ショット粒の硬さと被加工材の硬さの差が大きいほど高いことがわかる。いずれも 850~1000MPa と高い値となった。このように、同じショットピーニング条件でも最大値に違いが生じたのは、ショットピーニング処理により生じる局所的な塑性変形領域が、強度の低い材料ほど大きくなるためであると考えられる。一般に圧縮残留応力の付与は、表面からのき裂進展の抑制と疲労強度の向上に有効とされている。

3・2 S-N 曲線

図5に相対湿度を 25%と 85%に調整した DA-P 材の S-N 曲線を示す。高応力時での時間強度を比較すると、高湿度条件の方が時間強度は大きくなっている。しかし、その他の部分では両条件ともほぼ同程度の時間強度となっている。SA-U 材、SA-P 材も同様の結果が得られた。

各 S-N 曲線より、高湿度による疲労強度の低下はほとんど見られないため、ショットピーニング処理は湿度の影響を抑制できることがわかる。

図6にショットピーニング処理をした DA-P 材とショットピーニング処理をしていない電解研磨のみの DA-P 材の S-N 曲線を示す。いずれも低湿度条件である。時間強度を比較すると、ショットピーニング処理した DA-P 材の方がかなり大きいことがわかる。これは、ショットピーニング処理による疲労強度の上昇であるといえる。

各 S-N 曲線において、斜線は介在物を起点とした内部破壊が確認できた試験片を示しているが、それについては 3・3 節以降で述べる。

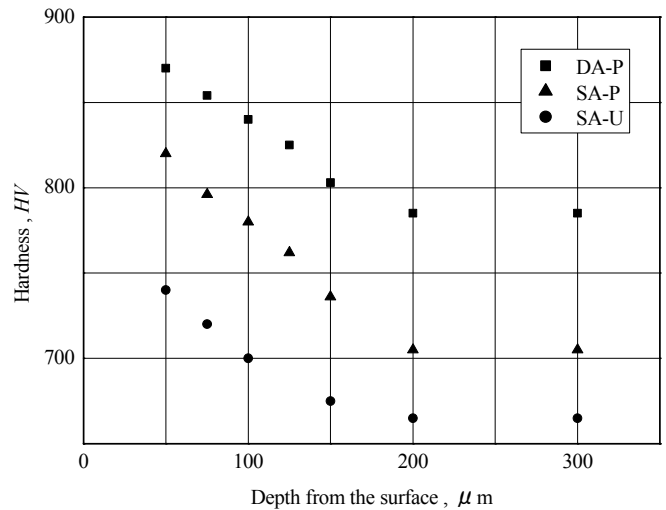


図3 硬さ分布

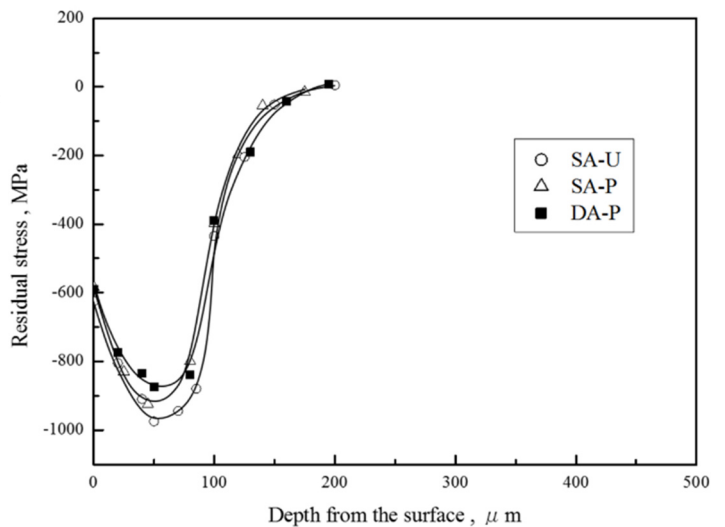


図4 残留応力分布

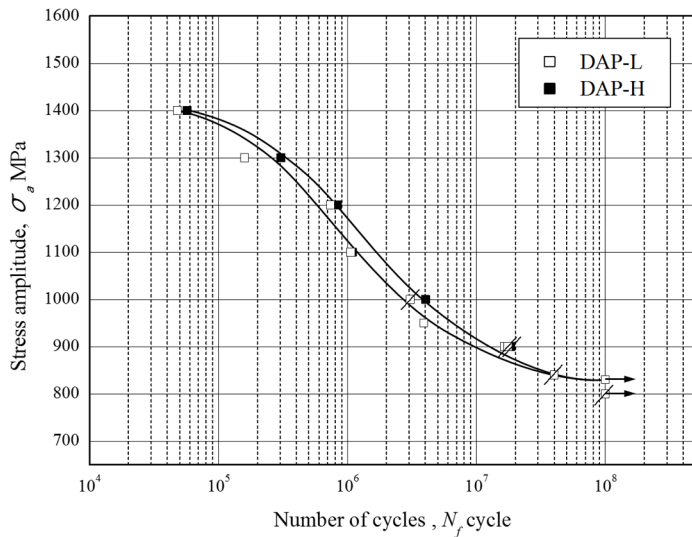
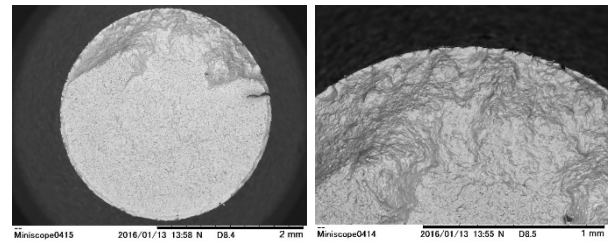
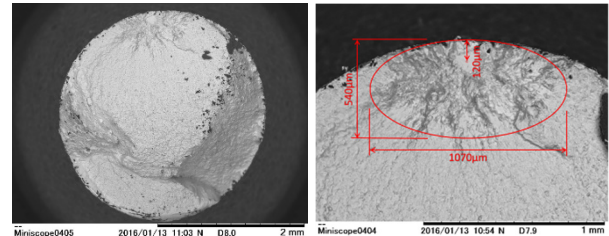


図5 S-N 曲線 (DA-P)

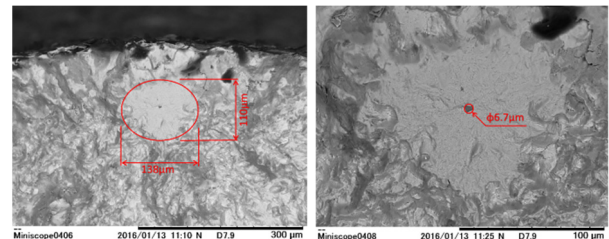


(a) RH85%, $\sigma_a=1400\text{MPa}$, $N_f=5.70 \times 10^4$



(b) RH25%, $\sigma_a=840\text{MPa}$, $N_f=4.00 \times 10^7$

図7 破面写真 (DA-P)



内部破壊領域ではその影響はほとんどないと考えられるため、今回のような結果になったと考えられる。また、今回のショットピーニング条件は、本実験範囲のマルエージング鋼の硬さにおいては、最適なショットピーニング条件であったといえる。

本鋼の内部破壊において、複雑で境界線が不明瞭なフィッシュアイ形状が見られたが、内部破壊の原因は同様であると考えられるため、本鋼の内部破壊で見られる破面もフィッシュアイと呼ぶ。その大きさは図8中に示すように定義し、図7のように破面の凹凸を目安に外挿した楕円形として求め、母材内部の介在物は円形として求めた。また、一部の破面には、フィッシュアイ内部のき裂発起点周辺に平坦部が見られた。これをファセットと呼ぶ。

3・4 き裂起点深さ

図8に内部破壊の起点となった介在物または組織欠陥の深さ d_{inc} と疲労寿命 N_f の関係を示す。破壊起点は疲労寿命や時効条件、湿度条件にほぼ無関係に $100\sim 250\mu\text{m}$ の範囲に大きくばらついており、平均的には $150\mu\text{m}$ である。この範囲はショットピーニング処理によって付与された圧縮残留応力がほぼ0となる深さであるため、残留応力の影響を受けることなく粒界割れや組織欠陥、介在物等を起点とした内部き裂が生じ、成長したと考えられる。

3・5 応力拡大係数

図9に内部破壊の起点となった介在物または組織欠陥が占める面積、ファセット及びフィッシュアイのそれぞれの面積から求めた応力拡大係数 K_{inc} 、 K_a および K_a' と

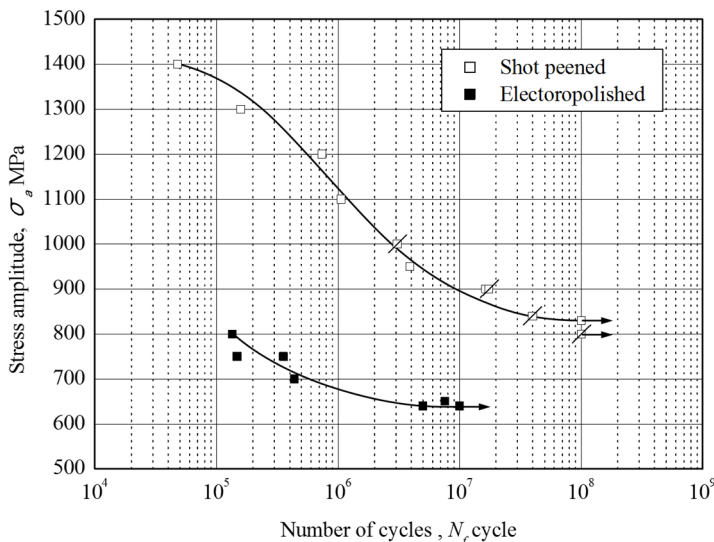


図6 S-N 曲線 (SP 材, EP 材)

各 S-N 曲線より、各応力の時間強度を比較すると、二段時効材の完全時効材の方が時間強度は大きくなっている。また、湿度条件による各時効組織の疲労強度を比較すると、ほとんどの組織において高湿度条件の方が低湿度条件より疲労強度が向上している。この傾向は、一般的な傾向と矛盾している。この傾向を考察するために破面観察を行った。

3・3 破面観察

図7に DA-P 材の湿度の異なる高応力域と低応力域の代表的な破面写真を示す。1400MPa 時の高応力下では表面破壊形態で破壊しており、その他のほぼすべての寿命領域において内部破壊形態で破壊していることが確認できた。しかし、湿度の違いによる破壊の傾向に大きな差は見られなかった。また、長寿命域においては介在物を起点とした内部破壊が確認できた。

SA-U 材、SA-P 材の破面でも同様の傾向が確認されたが、SA-U 材では長寿命域における介在物を起点とした内部破壊は確認できなかった。

内部破壊では、母材内部の介在物や組織欠陥を起点にしていたが、その多くは介在物起点であった。以上の破面観察より、大気湿度の影響は、表面破壊領域で大きく、

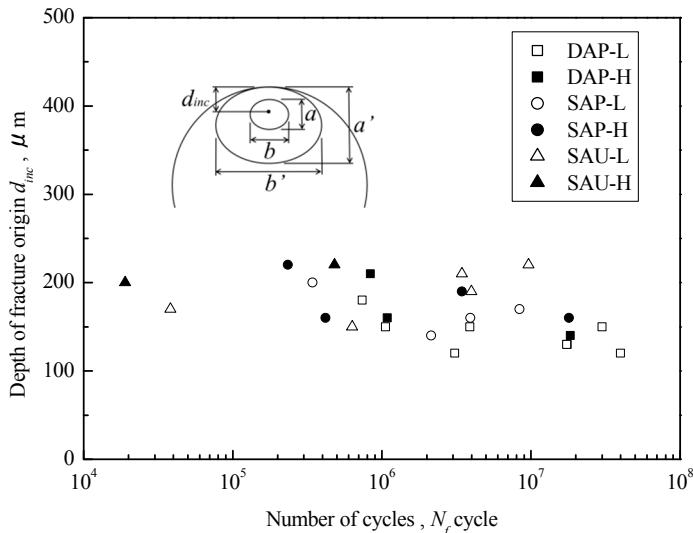


図8 介在物または組織欠陥の深さ d_{inc} と疲労寿命 N_f の関係

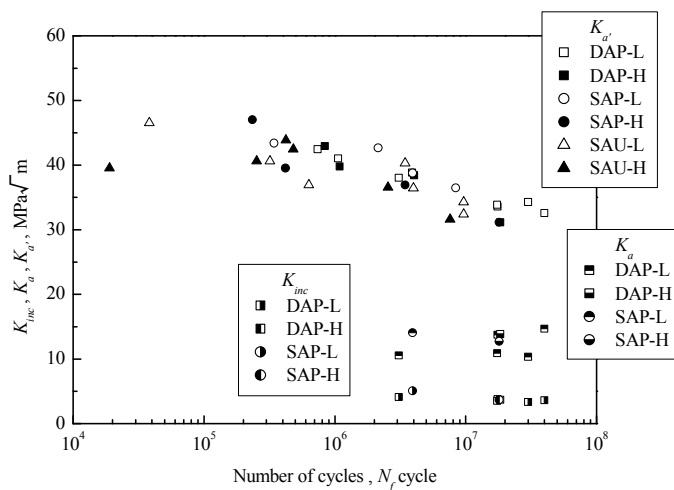


図9 応力拡大係数 K_{inc} , K_a 及び $K_{a'}$ と疲労寿命 N_f の関係

疲労寿命 N_f の関係を示す。計算には村上の式 ($K = 0.5\sigma_a\sqrt{\pi\sqrt{area}}$) を用いており、 K_a , $K_{a'}$ で使用する面積の値は a 及び a' を代表長さとした円形として求めている。 K_{inc} と K_a のいずれも疲労寿命や時効条件、湿度条件にほとんど影響を受けることなく一定の値をとっている ($K_{inc} \div 4$, $K_a \div 13$)。一方、 $K_{a'}$ は長寿命になるにつれて減少する傾向が見られるが、平均的には約 $38\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、時効条件や湿度条件による影響は見られない。

4. 考察

高湿度環境において、試験片表面で腐食溶解が起こればき裂発生は早くなると共に、腐食に伴い発生した水素（拡散性水素）が材料内部へ拡散し、水素脆化等によって疲労強度は低下することが考えられる。また、ショットピーニング処理を行えば、試験片表面には高密度の転位が存在することになり、腐食、さらに水素拡散は促進されることが考えられる。それにも拘わらず、ショットピーニング材で疲労強度や破壊挙動に湿度の影響は認められなかった。このことについて検討していく。

まず、ショットピーニング材において疲労強度や内部破壊の特徴に湿度の影響が認められなかった理由として、高湿度中で生じる強度低下の主因となっているアノード溶解と水素の拡散のいずれも試験片表面に限られ

るだけでなく、内部き裂の伝ば過程でも水素がほとんど影響しないことが推測される。また、ショットピーニング材の場合、表面破壊域から内部破壊域へ明確に遷移せず、表面き裂と内部き裂が独立に発生し、伝ばする混合破壊域がある。この場合、平滑材で観察されるような、表面き裂が高湿度中で伝ばする際に水素脆化が生じこれがき裂伝ばを加速させることになる。しかし、ショットピーニング材の場合、試験片表面層部分に圧縮残留応力が存在するため、水素脆化が抑制されたことも高湿度中で疲労強度低下が抑制された一因であると考えられる。このことはショットピーニング材のフィッシュアイ表面層側の破面に湿度による違いが見られないことから支持される。

次に、本鋼のフィッシュアイ形状について検討する。マルエージング鋼の疲労破面に関するこれまでの研究によると、き裂伝ばの下限界 K_{th} 近傍ではラス割れが観察され、その後は旧オーステナイト粒界割れが混在することになる。さらに K が大きくなると、旧オーステナイト粒界割れは消失し、ラス割れ、そしてストライエーション破面に変化することが報告されている⁹⁾。また、このような破面の特徴やき裂伝ば速度は時効の影響をほとんど受けないことも明らかにされている。さらにき裂伝ばに及ぼす時効の影響についても、二段時効⁶⁾や逆変態オーステナイトが生成される過時効状態⁷⁾でき裂伝ばの初期段階で伝ばの抑制効果が見られるが、その後はほとんど影響を受けないことを見出している。また、湿度の影響についても、高湿度中では水素脆化が生じ、き裂伝ばは加速されるもののそれは初期伝ばに限られること、そしてその場合も二段時効⁶⁾や逆変態オーステナイトの生成⁸⁾で高湿度の影響を抑制できることも報告されている。

以上は大気に触れる表面き裂の場合であるが、それを参照して本鋼の内部破壊のフィッシュアイ形状の複雑な理由について検討する。

ショットピーニング材では、介在物や組織欠陥を起点にしたき裂はラス割れで伝ばした後、旧オーステナイト粒界割れが混在し、その後ラス割れの平坦な破面となっており、このような内部破壊における破面の特徴には湿度の影響を確認できなかった。このことから、内部破壊の場合も表面破壊の場合と同様の破壊機構であると考えられる。このような内部破壊した破面の特徴に湿度の影響は見られなかった。このようにマルエージング鋼の破面は全体として、ラス割れが多く平坦である中で旧オーステナイトの粒界割れが生じる領域は、表面破壊でも内部破壊でも山の尾根が放射状に広がる特徴を有し、破壊の単位を反映してその破面は粗く、複雑である。一般に内部破壊におけるフィッシュアイ境界は、内部き裂が表面き裂に遷移する時の領域に相当するものと考えられている。このことと、本鋼におけるフィッシュアイ境界は旧オーステナイト粒界割れからラス割れに変化する領域と重なっていることがフィッシュアイの形状が複雑になった理由であると考えられる。

5. 結論

時効条件を変えたマルエージング鋼にショットピーニング処理を施し、湿度 25% と 85% 中で回転曲げ疲労試験を行い、疲労強度に及ぼすショットピーニング及び時効組織と湿度の影響を調べた。主な結果をまとめると以下ようになる。

(1) ショットピーニング処理により、疲労強度は大幅に

上昇した。

- (2) 一般に疲労強度は高湿度により低下するが、ショットピーニング処理を行えば、疲労強度の低下を抑制できた。
- (3) ショットピーニング材の疲労強度には、時効組織と湿度の影響は認められなかった。
- (4) 今回のショットピーニング条件は、本実験範囲のマルエージング鋼の硬さにおいては、最適なショットピーニング条件であったといえる。
- (5) ショットピーニング材の破壊形態は、高応力を除きほぼすべての応力下で内部破壊を生じた。
- (6) 内部破壊による破面の特徴には、時効条件や湿度条件による違いはほとんど見られなかった。

謝辞

本研究を行うにあたり、公益財団法人天田財団により一般研究開発助成（AF-2015019）を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上敬宜, 阿部雅二郎, 清田高德, “マルエージング鋼の疲労強度に及ぼす微小欠陥と介在物の影響”, 日本機械学会文集 A 編, Vol.53, No.492(1987), pp.1482-1491.
- 2) 皮籠石紀雄, 永野茂憲, 森山三千彦, 大園義久, 浦考博, “マルエージング鋼の疲労強度に及ぼす湿度の影響”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.704(2005), pp600-606.
- 3) Haftirman, S. Hattori and T. Okada, “Fatigue strength of aluminum alloys in high-humidity environment”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, A, Vol.62, No.597, pp.1140-1145 (1996).
- 4) N. Kawagoishi, T. Fukudome, K. Kariya, Q.Chen and M. Goto, “Fatigue strength of age-hardened &extruded Al alloy under high humidity (rotating bending and ultrasonic loading)”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, A, Vol.76, No.772 (2010), pp1651-1658.
- 5) 野末章, 野瀬哲郎, 大久保忠恒, 18%Ni マルエージング鋼の Kth 近傍におけるラス境界割れ挙動, 日本金属学会誌, Vol.50, No.12(1986), pp.1041-1048.
- 6) 皮籠石紀雄, 林光介, 永野茂憲, 中村祐三, 森山三千彦, 前田義和, マルエージング鋼の疲労強度に及ぼす時効条件と湿度の影響, 材料 Vol.61, No.9(2012), pp.787-794.
- 7) 森山三千彦, 永野茂憲, 皮籠石紀雄, 高木節雄, ショットピーニングしたマルエージング鋼の疲労強度に及ぼす逆変態オーステナイトの影響, 材料 Vol.50, No.10(2001), pp.1126-1132.
- 8) 永野茂憲, 皮籠石紀雄, 森山三千彦, マルエージング鋼の疲労き裂の発生及び伝ばに及ぼす逆変態オーステナイトの影響, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.69, No.679(2003), pp.633-639.