

ショットピーニングしたS50C、SS400の疲労強度

大藪 優・高津 正昭*

Fatigue Strength on S50C and SS400 produced Shot Peening

Masaru OHYABU・Masaaki TAKATSU

1. はじめに

機械構造物の強度は、構成するそれぞれの部材の強度に大きく支配される。部材の強度を高めるには、焼入れ焼戻し、浸炭、窒化、研削、ラップ、圧延、転造、鍛造など熱処理、表面精密、塑性などの各加工法が知られているが、ここ10年ほど前からショットピーニング加工法が、航空機関係、自動車関係でその有効性が大きく認められるようになってきた。

ショットピーニングとは、部材表面（現在では金属木材も可）に球形のショット粒（金属あるいは非金属）を一定の圧力と時間で精射速度120m/s以上の投射をし打つ付けることによって、表面層に一定の痕（こんと読みディンプルメントである）を発生させることである。これをショットピーニング加工法と呼び、もたらされるショットピーニング効果には、(1)圧縮残留応力

による疲労強度の向上 (2)超高速の噴射速度によるマルテンサイト変態 (3)粒界封鎖による応力腐食割れの抑制などがある。図1にショットピーニング効果の模式図を示す。

超高速のショットの打ち付けにより部材の表面温度は上昇し、炭素鋼のFe-C系平衡状態図のA₃変態点を越え、ショットの鍛練が次々と瞬時に繰り返されて微細化した緻密な高度の高いじん性に富んだ組織が得られる。これが(2)の効果であり、その結果(1)の効果にも結び付くのである。

現在、被加工材の高強度化と多様化が進むと共に、上記3つの効果のほかに耐摩耗性トライボロジー、潤滑性、伝熱効率、制振・騒音減少、ピーンホーミングなどそれぞれの向上の研究が行われるようになってきた⁽¹⁾。

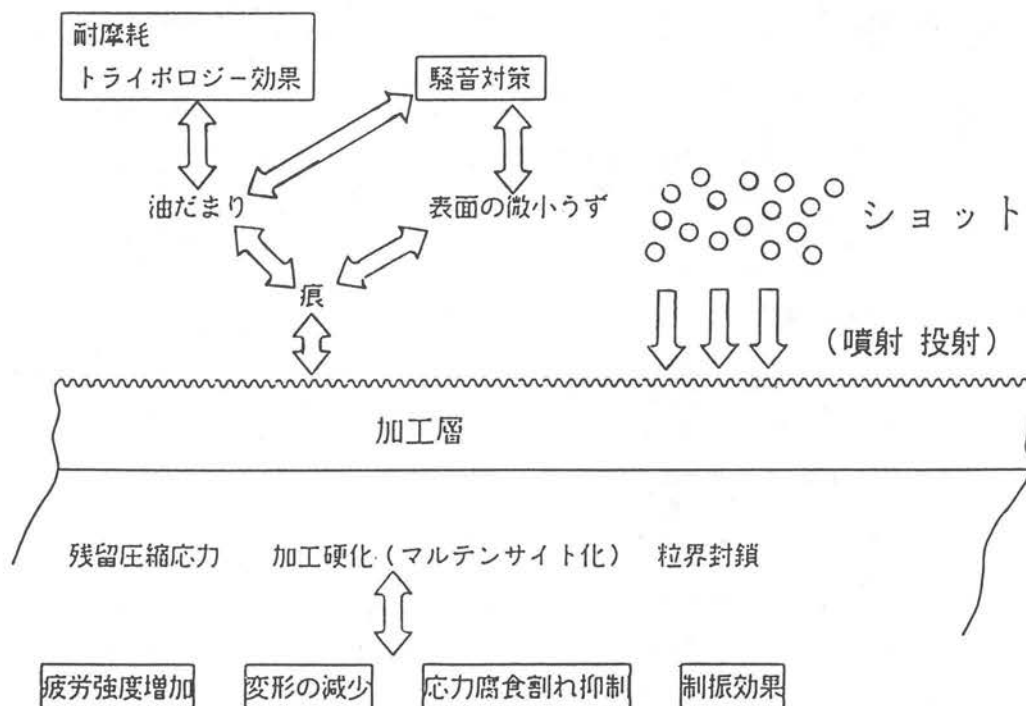


図1 ショットピーニング効果の模式図

*(株)高和自動車 (H7/4~)

2. 目 的

使用部材の高強度化には、耐疲労性とじ性を得る目的として例えば高周波焼入れがある。これはコイルの電磁誘導によって部材表面のA₁変態点以上の高温を得るために、多大な電力エネルギーを必要とする。ショットピーニングは、高周波焼入れとほぼ同等の強度が得られ、装置・加工費においてより経済的なメリットを持っている。

ショットピーニング方法に必要な基本的条件は、(1)ショット加速装置 (2)ショット材(投射材)の種類 (3)加工条件である。それぞれを表1⁽²⁾、表2⁽³⁾、表3⁽⁴⁾に示す。これらを模式的にまとめたのが図2⁽⁵⁾である。これらの条件より、(1)では空気式の乾式直圧式、(2)

表3 ショットピーニング加工条件

加 工 条 件	
投射条件	投射方式、投射時間(又は カバレッジ)、 投射速度、投射量、投射密度、投射角、 加工温度、応力状態、回数 ^(*)
ショット	材質、密度、硬さ、粒度、粒度分布
被加工材	材質、機械的性質、寸法形状、加工履歴

(*)：一つの被加工材を粒度の異なるショットで別々に加工する方法で、2段ピーニング、多段ピーニングなどがある。

表1 ショット加速装置の特長および主要性能

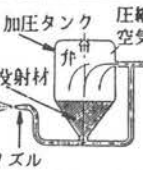
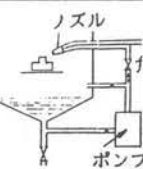
名称 型式	噴射・投射機構 の概略図	特 長	主 要 性 能			ピーニング又は ブラスト対象品
			投射量	投射速度	インテンシティ	
空気式 加速装置	乾式 吸入式 	・操作：容易 ・投射材粒径：小 ・投射の方向性：良好 ・投射分布：円形・小	～15 kg/min/本	～60 m/s	0.05N～ 0.60N 0.05A～ 0.50A	金型・工具類 小物部品 非鉄部品 小物ばね 小ねじ プラスチック成形品
	直圧式 	・操作：容易 ・投射材粒径：小～中 ・投射の方向性：良好 ・投射分布：円形・小	～30 kg/min/本 (必要動力 :3.7kW)	～150 m/s	0.05N～ 0.60N 0.10A～ 0.60A 0.10C～ 0.30C	金型・工具類 自動車部品 航空機部品 機械部品 ピーニング ピーニング
	湿式 	・投射材粒径：小～中 ・投射の方向性：良好 ・投射分布：円形・中 ・粉塵：無	～10 kg/min/本	～60 m/s	0.05N～ 0.25N	自動車部品 金型 シリンダライ 加工部品 油焼入品

表2 ショット材の種類

ショット	金属	鉄	鋼	高炭素
				低炭素
		鋳鉄	高炭素	
			ステンレス	
		非鉄	白鉄	
	亜鉛			
	アルミニウム			
	非金属	ガラス	銅	
			ソーダライム	
		セラミック	ジルコニア	
			アルミナ	
			シリコン	
		樹脂	カーバイド	
熱可塑性 (カット ワイヤ)			ポリエステル	
			ナイロン	
		ポリカーボ ネイト		

では鋳鉄(白鉄材)、(3)では投射方式、圧力、時間、速度である。ショットの選択は、被加工材の硬度よりも少し高いレベルの投射材にする。加工材にショットピーニングする前に、SAE J442(1979)規格の試験方法により、アルメンストリップ(SAE1070・JIS G 4801のばね鋼材SUP3に相当)のAストリップ材(t=1.30mm)を保持具にセットし、決めた投射圧力で実際にショットピーニングを行う。その結果、Aストリップ材はわん曲する。その最大高さ値すなわちアークハイト値(測定は専用デジタル式ゲージを使用)と投射時間を変えて行った結果の曲線、すなわちインテンシティ線図より飽和するアークハイト値を求める。加工物への投射時間を決める計算式にこれを代入し正式な投射時間を決定する。投射圧力、時間、速度が大きく

なり過ぎると、オーバーピーニング現象が現れ十分なピーニングが得られない。

歯車、軸、キーなどの機械構造用部材として用いられるS50C、そして容器、H型鋼、溶接構造物などの一般構造材として用いられるSS400について、ショットピーニングを施しその疲労強度を研究した環境は以

外と少ない。

このような観点から、この研究は構造用炭素鋼S50Cおよび一般圧延鋼材SS400について、材質の相違における疲労強度の基礎的データを得るために行ったものである。

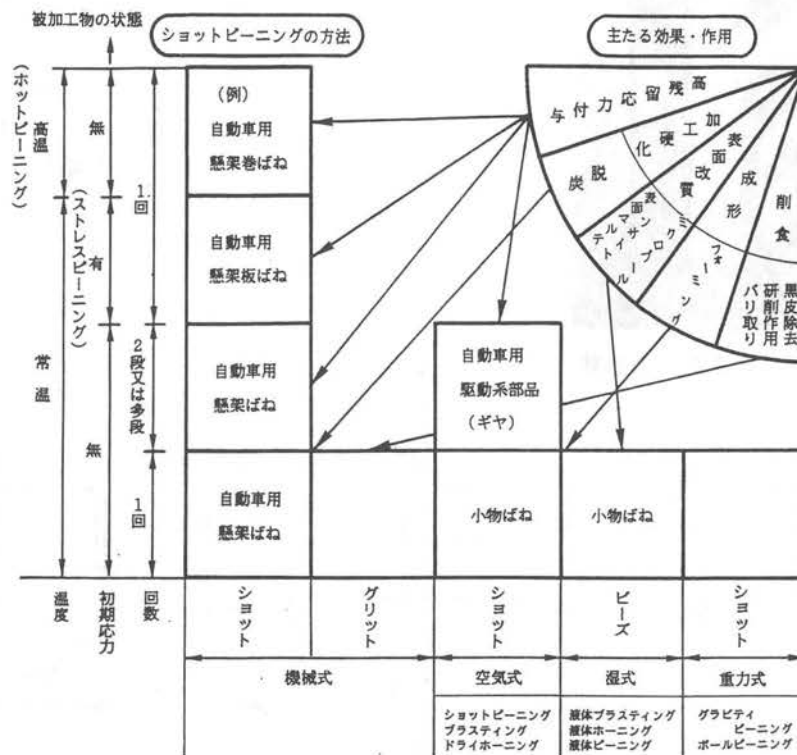


図2 ショットピーニング周辺の環境

3. 実験方法

3-1. 実験装置

ピーニングには、(株)不二製作所ニューマブラスターFDQ-4STを使用し(図3)、疲労試験はS50Cについては、(株)島津製作所製・電気油圧式万能材料試験機サーボパルサーEA-20を、SS400については、同社機の曲げ・ねじり疲労試験機TB-10Bで行った。ピーニング表面と破面のマクロフラクトグラフィ解析には、(株)オリンパス光学製の実体顕微鏡SO-2および金属顕微鏡モデルVANOX-BHタイプを、破面のミクロフラクトグラフィ解析には(株)日本電子製の走査型電子顕微鏡JSM-T300を使用した。また、ピーニング表面粗さ(最大高さ R_{max})測定は、(株)ミットヨ製のミットヨサーフテスト201で行い、その硬度測定には(株)アカシ製のロックウェル硬度計ARK-4(Cスケール)を用いた。

3-2. 試験片の製作

ショット材には試験片材質より铸铁 $\phi 0.6$ とし、ショットの投射圧力は、 $4.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ および $2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ の二種類とした。S50Cについては図4を21本、SS400については図5を30枚を準備した。ムク材としてそれぞれ7本、10枚を残し、二種類のピーニングに各7本ずつと各10枚ずつを割り当て、 $4.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ の方をA材、 $2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ の方をB材とした。

ショットピーニングの実際を図6および図7に示す。

3-3. ショットピーニング条件の決定

A材とB材の投射圧力でアルメンストリップ材のインテンシティ線図を作り、飽和アークハイト値 A_c と考えられる秒数 T を決定する。例えばS50CのA材条件で得られたインテンシティ線図を図8に示す。これより $A_c=0.37\text{mm}$ に対する T は15secと決める。このデー

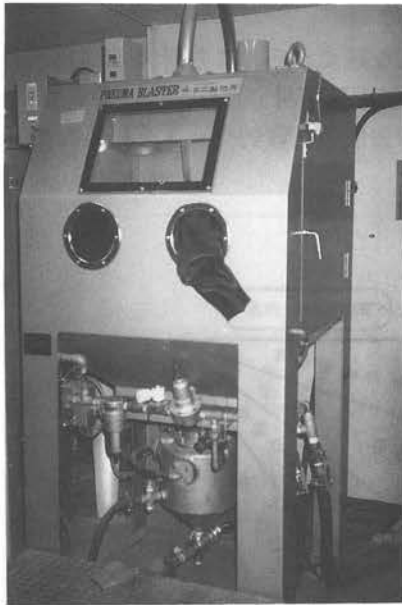


図3 ニューマブラスターの外観

タを次式に代入しショットの投射時間 t を決定するのである。

$$T^{1)} \times \frac{1381^{2)}}{1444^{3)}} \times 200\%^{4)} \times \frac{1^{5)}}{0.5} = t \text{ sec}$$

ただし、1) 飽和アークハイト値に対する秒数

2) ピーニングを行う試験片の表面積 mm^2 (図3のスマッシング部・試験片によって変わる)

3) アルメントストリップの表面積 mm^2

4) ピーニングを十分に行う見込み量%

5) 4) に対する確率 (丸棒試験片の場合で、板材試験片の場合は削除)

この結果、 $t=60\text{sec}$ と決まった。各試験片のショットピーニング条件を表4および表5に示す。

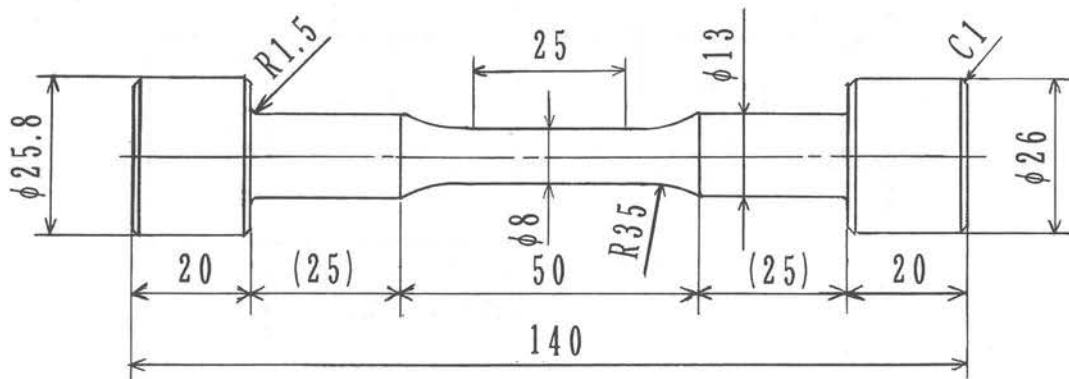


図4 S50Cの試験片

表4 S50Cのショットピーニング条件

S50C	A材 (7本)	B材 (7本)
投射時間 (秒)	60	40
投射圧力 (kgf/mm^2)	4.6	2.0
テーブル回転数 (rpm)	20	
ショット材	鋳鉄 $\phi 0.6$	
ノズル直径	$\phi 5$	
ノズルからの投射距離 (mm)	150	

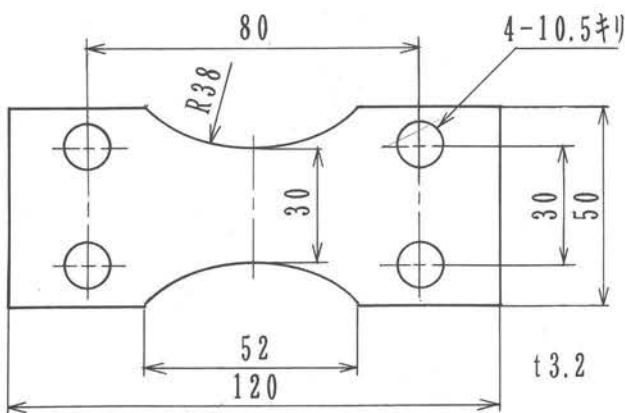


図5 SS400の試験片

表5 SS400のショットピーニング条件

SS400	A材 (10枚)	B材 (10枚)
投射時間 (秒)	166	115
投射圧力 (kgf/mm^2)	4.6	2.0
ショット材	鋳鉄 $\phi 0.6$	
ノズル直径	$\phi 5$	
ノズルからの投射距離 (mm)	150	

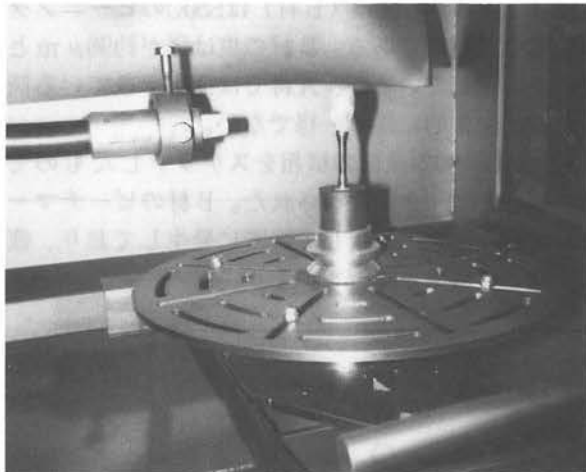


図6 S50Cショットピーニングの実際

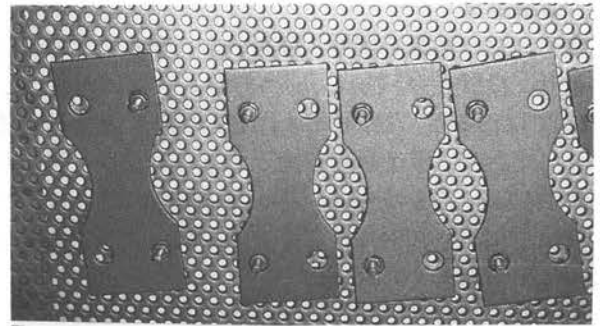


図7 SS400ショットピーニングの実際

インテンシティ測定表

測定日	1994年12月5日	
測定者	高津 室 岡	
装置	PNEUMA BLASTER	MODEL FDQ-4ST
ノズル	φ 5	mm
投射距離	120	mm
投射圧力	4.6	kg/cm ²
ショットサイズ	T S P 0.6	
テストストリップ	A	

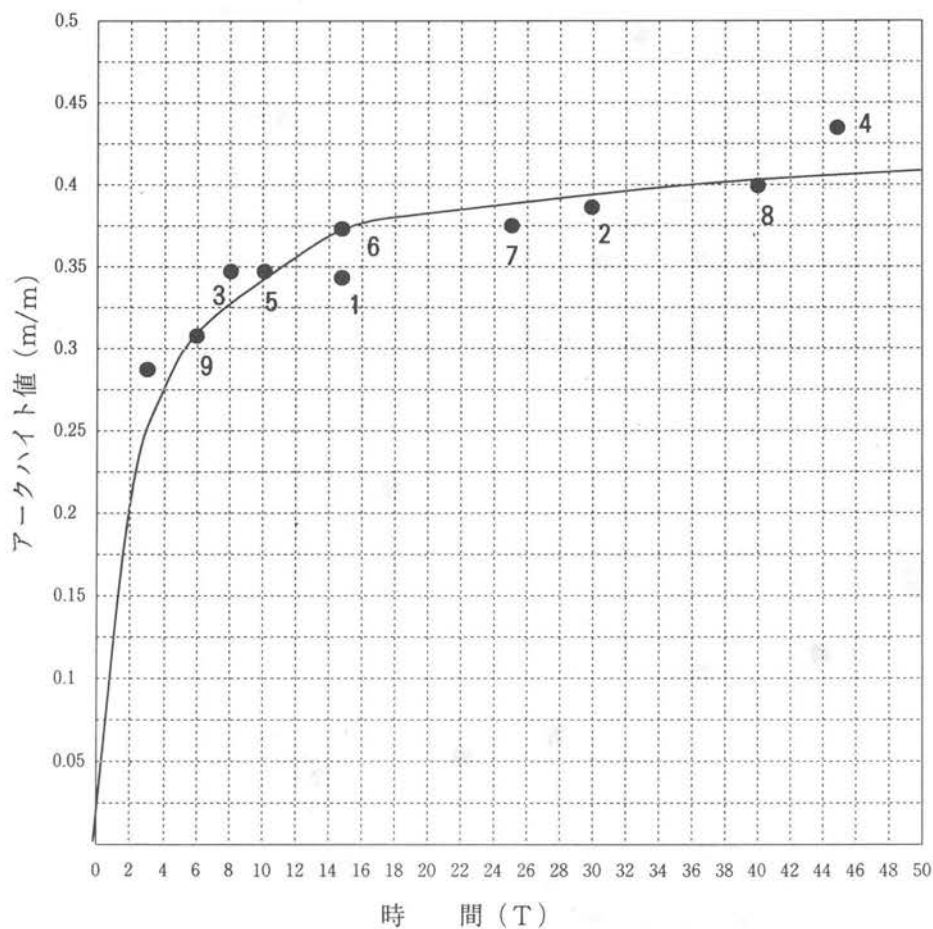


図8 インテンシティ線図（投射圧力4.6kgf/cm²の場合）

4. 実験結果

疲労試験の結果を図9、図11および表6に示す。これより、投射圧力 $2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ の方がムク材に対して、S50Cでは19.5%、SS400では12.8%の疲労限度増加率になっており、疲労強度の向上がみられた。一方、投射圧力 $4.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ の方は、それぞれ3.90%と2.56%でそれほど向上しておらず、オーバーピーニング効果となっていると考えられる。

図11 (A材) と図12 (B材) はS50Cのピーニング表面の顕微鏡写真である。B材の痕は径が約 $90\mu\text{m}$ と一様に平均化しているが、A材では痕ができている箇所もあるが全体的に荒く一様でない。

図13はSS400の破面の様相をスケッチしたものであり、ビーチマークが観察された。B材のビーチマークはムク材、A材に比較して緻密に発生しており、疲労強度向上の理由となっている。

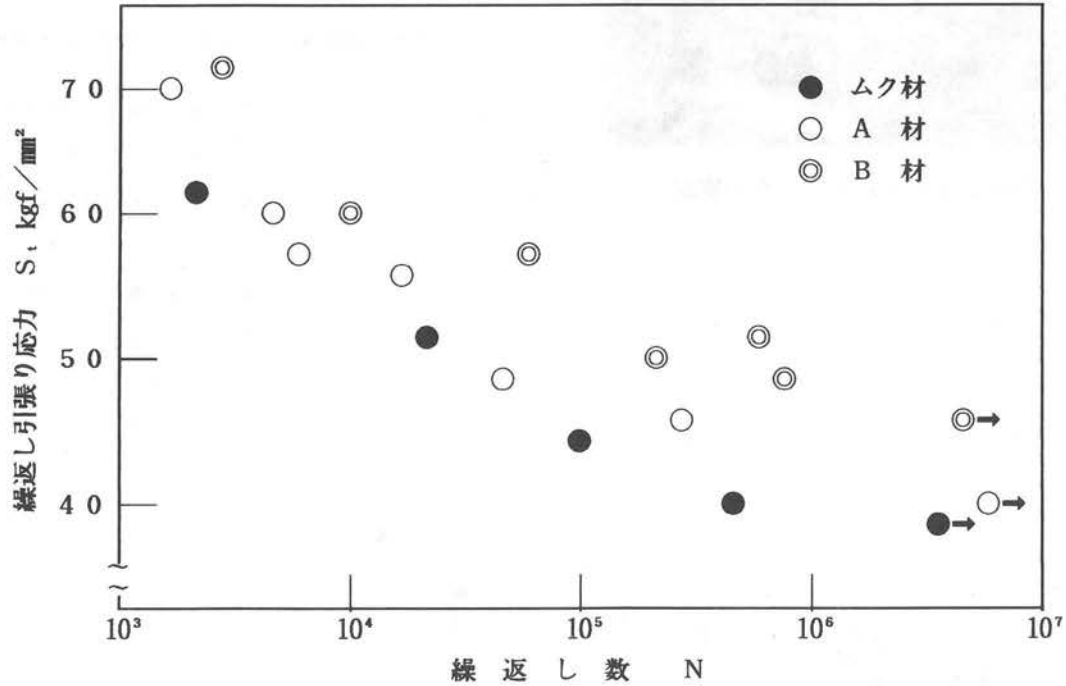


図9 S50CのS-N線図

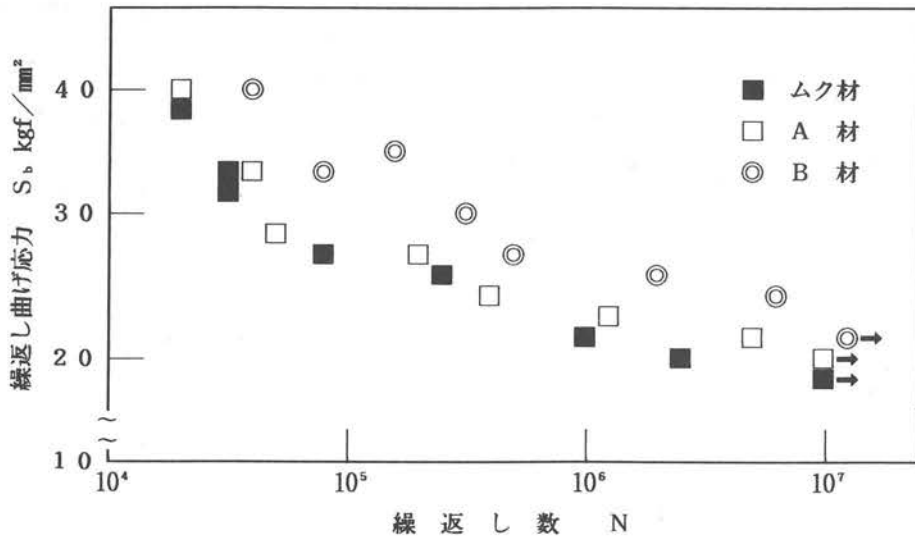


図10 SS400のS-N線図

表6 各材のデータ比較

	ムク材	A 材	B 材
N=10 ⁷ 回付近における疲労限度 σ_w kgf/mm ²	* ¹ 38.5	40.0	46.0
	* ² 19.5	20.0	22.0
ムク材に対する σ_w の増減率%	* ¹	3.90	19.5
	* ²	2.56	12.8
表面粗さ R_{max} μm	* ² 9.4	52.8	41.6
ロックウェル硬度 HRC	* ² 15.0	18.0	19.0

*1 : S50C *2 : SS400

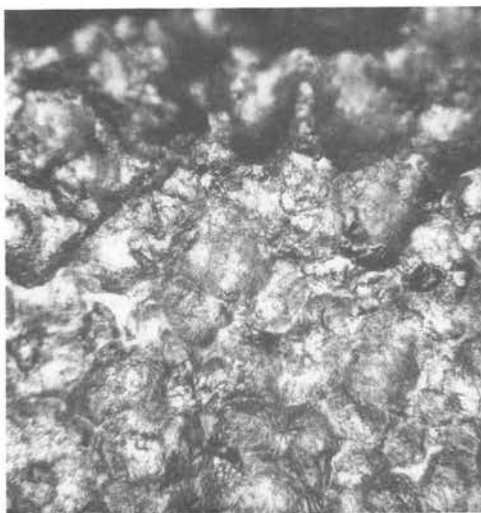


図11 S50CA材のピーニング表面×110

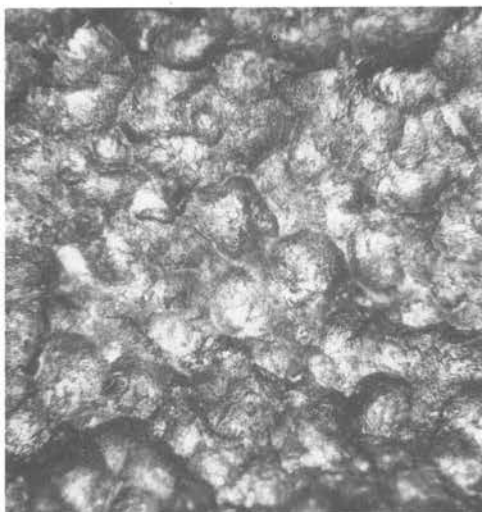
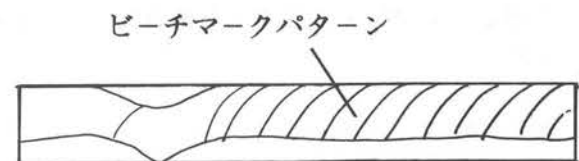


図12 S50CB材のピーニング表面×110



ムク材



A 材



B 材

図13 SS400破面の様相

5. あとがき

今回はページ数の関係上、疲労試験を中心にマクロ的観察までの報告となった。投射圧力 $2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ の方がS50CとSS400の両材とも疲労強度が向上がみられた理由として、破面の様相をミクロ的な立場よりサーチしていくことが必要である。すなわち、破面に疲労を示すストライエーションパターンがどのように形成されているかを、ミスロフラクトグラフィの詳細な解析によって解明される。さらに、材料表面からのピーニング層の入り具合は、疲労強度に大きく影響する。これは圧縮残留応力の効果を促し、疲労強度の向上につながる。圧縮残留応力はX線回折試験法によって具体的なデータを収集することができる。

このような観点に立って、次報では疲労強度向上の理由を考察と結言を含めて報告する。

ショットピーニング加工に全面的なご協力および貴重なご助言を載いた(株)不二製作所の菅沢好一氏、室岡隆氏、斉藤博氏に心より厚くお礼申し上げます。表面粗さ測定では(株)ミットヨの佐藤誠氏に深く感謝致します。

6. 参考文献

- (1) ショットピーニング技術協会SP評価委員会アンケート集計結果(1996)
 - (2) ショットピーニング技術JSSP7-1 P18 (1995)
 - (3) ショットピーニング技術JSSP6-1 P18 (1994)
 - (4) ショットピーニング技術JSSP7-1 P28 (1995)
 - (5) ショットピーニング技術JSSP7-1 P34 (1995)
- (受理年月日 1996年9月31日)