

ウォータージェットを利用した表面改質法(第2報)

疲労特性に及ぼす衝突粒子の材種および粒子径の影響

松葉 朗, 宗廣修興^{*1}, 兼広二郎, 竹保義博, 山本 健, 岡田芳雄

Surface Modification Method Using Waterjet II

Effects of Material and Diameter of Bombarding Particle on Fatigue Properties

MATSUBA Akira, MUNEHICO Shuko^{*1}, KANEHIRO Jiro, TAKEYASU Yoshihiro,
YAMAMOTO Ken and OKADA Yoshio

An experimental study was conducted to examine effects of abrasive waterjet (AWJ) peening on fatigue properties in mechanical/structural materials. Using both glass beads and alumina particles with the average diameter of about 50 μm and spherical SiO_2 particle with that of about 20 μm , annealed 0.45% carbon steel specimens were bombarded with these particles and high speed water droplets by an abrasive waterjet machine. From the fatigue testing results using the peened or untreated specimens, it is shown that the fatigue strength of the carbon steel can be increased by AWJ peening. In addition, the paper discusses the effects of both the material and the diameter of the bombarding particle on the residual stress, the surface roughness and the fatigue strength.

機械構造用材料の疲労特性に及ぼすアブレシブ・ウォータージェット(AWJ)表面改質処理の効果に関して実験的検討を行った。平均粒径が約50 μm のアルミナとガラスビーズ、および約20 μm の球形シリカ粒子を、それぞれウォータージェット加工機によりS45C焼なまし材の表面に高速で噴射した。表面改質材および未処理材の疲労試験結果から、本表面改質処理によってS45C材の疲労強度が向上できることを示す。さらに、処理後の残留応力、表面粗さおよび疲労強度に及ぼす衝突粒子の材種および粒径の影響について検討する。

キーワード：ウォータージェット、表面改質、疲労強度、アブレシブ、粒子径、残留応力、表面粗さ

1. 緒 言

機械構造用材料の疲労特性を改善する表面改質法として、現在ではショットピーニングが最も広く使用されている。ショットピーニングは固体粒子の衝突により材料表面に圧縮残留応力と加工硬化層を生成し、疲労強度の向上を図る加工法であるが、その一方で処理後には表面粗さが増加し、これが疲労き裂の発生を早める負の要因となることが知られている¹⁾。そこで、衝突粒子の投射手段として、高速・高圧力で噴射が可能なアブレシブ・ウォータージェットを用いれば、高い投射速度が得られるために粒径の小さい粒子を使用でき、肌荒れの少ない表面改質の実現が期待できる。

ウォータージェットを利用した表面改質法に関する検討として、高圧水流のみを用いる方法²⁾⁻⁵⁾や、水流噴出においてキャビテーションを生成し、その崩壊時の衝撃力を利用するキャビテーションピーニングなどが報告さ

れている⁶⁾⁻¹⁰⁾。しかし、アブレシブを衝突粒子として用いた報告例は少なく¹¹⁾、特に、実際の疲労特性に及ぼす影響についてはほとんど明らかにされていないのが現状である。

著者らは前報¹²⁾において、平均粒径50 μm のアルミナおよび45 μm のガラスビーズを用いて、S45C板材の表面にアブレシブ・ウォータージェット(AWJ)処理を行い、表面上に圧縮残留応力と加工硬化層を生成できることを明らかにした。本報では、まず、前報¹²⁾と同じ2種類の粒子を用いてS45C丸棒材に表面改質処理を行い、その疲労試験結果を比較した。さらに、ガラスビーズとほぼ同種で平均粒径20 μm の微小な球形シリカ粒子を用いた同様の実験を行い、残留応力、表面粗さおよび疲労強度に及ぼす粒子径の影響についても検討した。

2. 実験方法

2.1 試験片

供試材には炭素鋼 S45C 材を使用した。その化学成分

および機械的性質を表1に示す。まず、疲労試験片は、1123K-1h保持の完全焼なましを行い、図1(a)に示す形状に機械加工した後、加工変質層を取り除くため、試験片中央部の表面層を電解研磨により30 μ m程度除去した。

さらに、図1(b)に示す板厚2mmの板状試験片も製作した。1123K-1h保持の完全焼なましおよび機械加工後に873K-1hの低温焼なましを行い、加工による残留応力を除去した。

2.2 アブレシブ

衝突粒子として用いるアブレシブには、前報¹²⁾と同じ平均粒径が50 μ mのアルミナと45 μ mのガラスビーズに加えて、ガラスビーズと同種の粒子として平均粒径20 μ mの球形シリカを用いた。それらのSEM観察写真を写真1に示す。写真1(a)のアルミナは微細なグリッド粒子による造形粒子であるが、写真1(b)のガラスビーズおよび写真1(c)球形シリカはいずれも単一の球形粒子となっている。

2.3 表面改質方法および処理条件

ウォータージェット加工機には、インジェクションタ

表1 供試材の化学成分および機械的性質

C	Si	Mn	P	S
0.47	0.22	0.78	0.011	0.008
Yield stress σ_y MPa		Tensile strength σ_B MPa		Elongation δ %
373		611		31

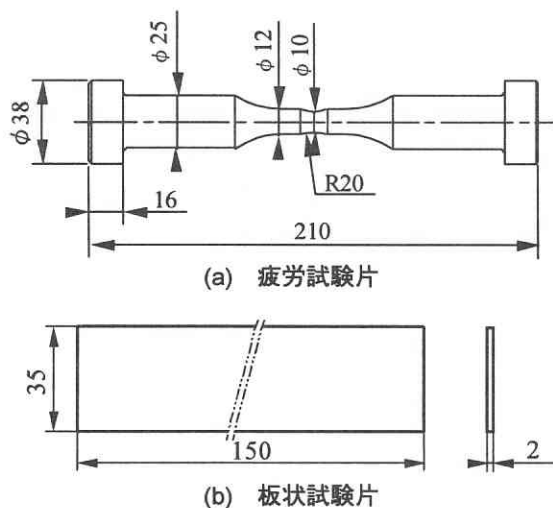


図1 試験片の形状寸法

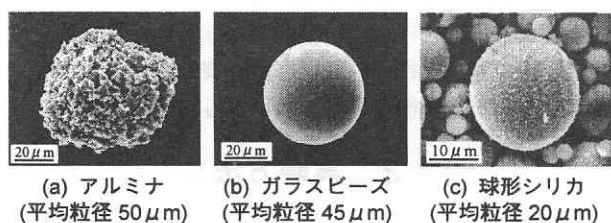


写真1 アブレシブのSEM観察

イブのスギノマシン製C2015NN-AB、AJP35025Sを使用した。ウォーターノズル径およびアブレシブノズル径はそれぞれ0.25mm、1.2mmである。微小な粒子を均一かつ安定に噴射するために、図2のようにアブレシブを水に質量比10%の濃度で混合・攪拌してスラリーを作製し、高圧水噴射に伴う負圧によりスラリーを吸引・加速してアブレシブノズルより噴出した。

疲労試験片への表面改質処理は、写真2に示すように丸棒状の試験片をロータリーテーブルにより回転させながら、ノズルを軸方向に移動させて行った。噴射圧力は200MPa、スタンドオフ（ワークディスタンス）は100mmとし、ロータリーテーブルの回転速度は9.5rpm、ノズルの軸方向トラバース（送り）速度は19mm/minにそれぞれ設定した。これにより、実際の円周方向のトラバース速度は300mm/min、一回転あたりのノズルの移動距離は2mmである。

また、板状試験片に対しては、球形シリカ粒子を用いて試験片幅方向に1パスのみの処理を行った。ガラスビーズおよびアルミナを使用した前報¹²⁾と同様に噴射圧力を50、100、200、300MPa、トラバース速度を100、300、500、700、1000、1500mm/minにそれぞれ変えて行い、スタンドオフは100mmに設定した。

2.4 疲労試験

疲労試験には電気油圧式疲労試験機（島津製EHF-UG100kN）を使用し、軸方向の引張圧縮繰返し荷重を、応力比 $R=-1$ 、繰返し速度20Hz、正弦波形一定の条件下で与えた。

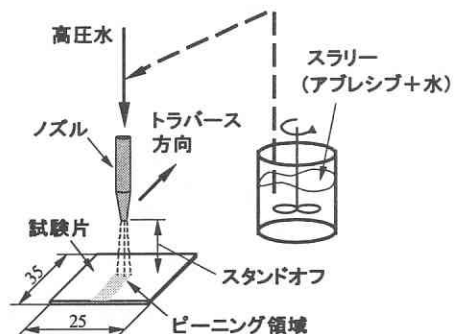


図2 ウォータージェットを用いた表面改質法の概要

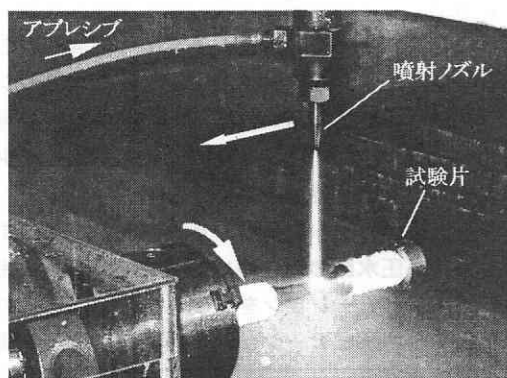


写真2 疲労試験片への表面改質処理

2.5 残留応力の測定

X線応力測定装置(理学電機製 MSF-3M 型)を使用し、側傾法によりピーニング面上の残留応力を測定した。X線条件は、Cr-K α 回折線、照射面積 $2.0 \times 2.0 \text{ mm}^2$ 、X線応力定数 -318.2 MPa/deg とし、半価幅法による回折強度曲線のピーク位置決定法を採用した。

3. 実験結果および考察

3.1 粒子材種の影響に関する検討

3.1.1 疲労試験片上の残留応力および表面粗さ

平均粒径が約 $50 \mu\text{m}$ の衝突粒子を用いて表面改質処理(AWJ ピーニング)を行った疲労試験片において、中央部の円周4箇所での表面上の残留応力を測定した。その平均値を表2に示す。これより、ガラスビーズを噴射した試験片の方がアルミナの場合よりも大きな圧縮残留応力を生じており、また、その値は表1に示した降伏応力よりもわずかに大きいことがわかる。さらに、アブレシブを使用せず高圧水流のみで実施した試験片においても、ガラスビーズの三分の一程度の圧縮残留応力が生じている。なお、これらの測定値は丸棒材で得られた結果ではあるが、前報¹²⁾で示した板材試験片での測定結果とほぼ等しい値となっており、試験片形状や噴射経路が異なる両者の測定値が等しいことは興味深い結果である。

つぎに、各疲労試験片における表面粗さの測定結果を表3に示す。ガラスビーズを用いた試験片が最も表面粗さが増加しており、加工能力が大きいことを示唆している。しかし、その値は、一般の切削加工面 ($R_a < 6.3 \mu\text{m}$)、や研削加工面 ($R_a < 1.6 \mu\text{m}$) と比較して大きくないことがわかる。

3.1.2 S-N 曲線

図3に、各試験片における S-N 曲線を比較して示す。これより、比較的応力振幅値が高い有限寿命域では表面改質の影響はほとんど生じていないが、応力振幅値の低下に伴い徐々にその効果は現れ、疲労限が増加している

表2 疲労試験片表面上の残留応力(粒径約 $50 \mu\text{m}$)

アブレシブ	残留応力 (MPa)
ガラスビーズ	-390
アルミナ	-252
アブレシブなし	-130

表3 疲労試験片における表面粗さ(粒径約 $50 \mu\text{m}$)

アブレシブ	$R_a (\mu\text{m})$	$R_y (\mu\text{m})$
ガラスビーズ	1.22	9.92
アルミナ	0.30	3.16
アブレシブなし	0.23	2.12
未処理材	0.23	2.23

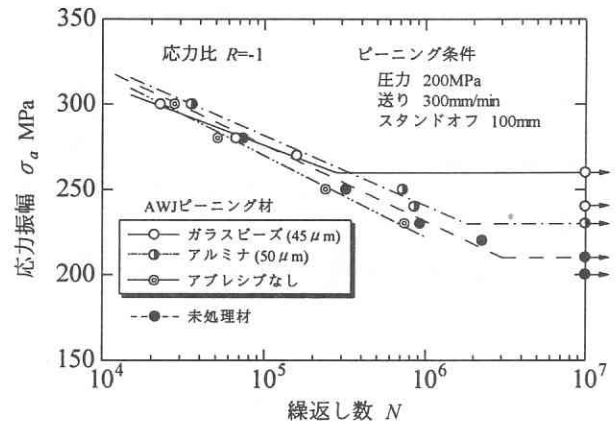


図3 S-N 曲線(粒径約 $50 \mu\text{m}$)

ことがわかる。疲労限と試験片表面上の圧縮残留応力には明確な相関があり、圧縮残留応力が最大であったガラスビーズ処理材の疲労限が最も大きく、未処理材の値と比較して約25%向上している。なお、アブレシブを用いない試験片では、圧縮残留応力が生じているものの、低応力振幅領域においても時間強度が減少しており、表面改質効果は得られない結果となった。これより、衝突粒子を用いたアブレシブ・ウォータージェットによってS45C材の疲労強度を改善できること、また、その効果は粒子材種に依存することがわかった。

3.2 粒子径の影響に関する検討

3.2.1 板材試験片上の残留応力、硬さおよび表面粗さ

ガラスビーズとほぼ同種で大きさが小さい平均粒径 $20 \mu\text{m}$ の球形シリカ粒子を用いて、その表面改質効果を既に報告した $45 \mu\text{m}$ 粒子(ガラスビーズ)による結果¹²⁾と比較する。まず、S45C 板状試験片を用いた実験結果から、表面上の残留応力と噴射圧力の関係を図4に示す。なお、図中の $45 \mu\text{m}$ 粒子による結果は前報¹²⁾より再掲したものである。これより、残留応力の噴射圧力依存性は $20 \mu\text{m}$ 粒子においても同様に見られ、 $45 \mu\text{m}$ 処理材よりもわずかに小さいものの、大きな圧縮残留応力が発生していることがわかる。また、図5に示した残留応力とトラバース速度との関係においても、両粒径ともにほぼ同様な傾向を示している。

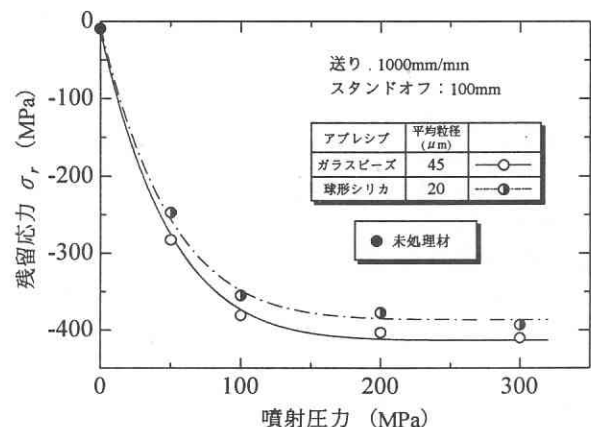


図4 残留応力と噴射圧力の関係(粒径の影響)

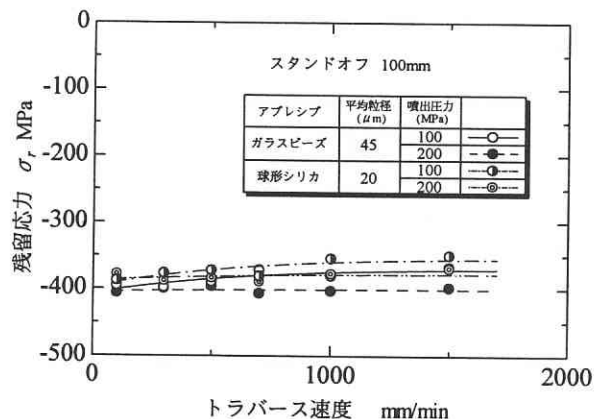


図5 残留応力とトラバース速度の関係 (粒径の影響)

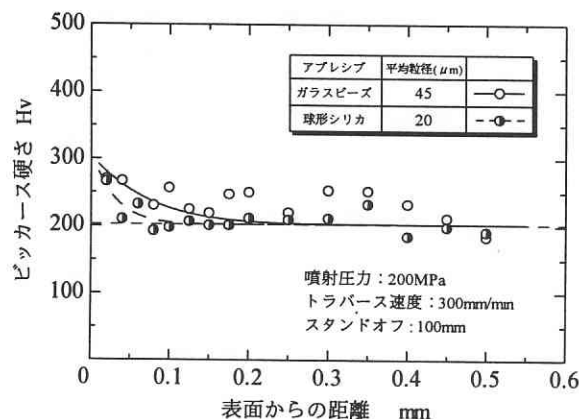


図6 断面上の硬さ分布 (粒径の影響)

つぎに、表面改質処理を行った板状試験片断面の硬さ分布を図6に示す。処理条件は、噴射圧力 200MPa、トラバース速度 300mm/min、スタンドオフ 100mm である。これより、今回行った 20μm 粒子を用いた場合も 45μm 粒子同様に試験片表面部の硬さが増加している。表面近傍の硬度値において両者の間に大きな差はないが、粒径の影響は硬化層深さに現れており、45μm 粒子の硬化層深さは約 0.2mm であるのに対して 20μm 粒子では 0.1mm 程度と小さいことがわかる。

板状試験片で測定した表面粗さ結果を図7に示す。これより、いずれの噴射圧力においても 20μm 処理材の方が表面粗さが小さく、微小な衝突粒子の使用によって、表面粗さの増加を抑制できることがわかる。

さらに、20μm 粒子を噴射した試験片表面を SEM により観察した結果、粒子の衝突によって生じる梨地模様が処理領域において均等に形成されており、本方法によって 20μm 程度の微小粒子を均一かつ安定に噴射できることを確認している。

3.2.2 疲労強度特性に及ぼす粒子径の影響

20μm 粒子を噴射した丸棒疲労試験片の S-N 曲線を、図3に示した 45μm 粒子の結果と比較して図8に示す。これより、20μm 粒子を用いた場合においても疲労限が増加しており、未処理材と比較して約 20%程度向上していることがわかる。その値を 45μm 粒子による試験片と

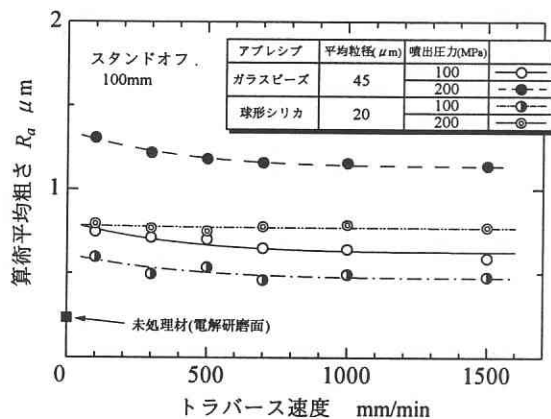


図7 表面粗さとトラバース速度の関係 (粒径の影響)

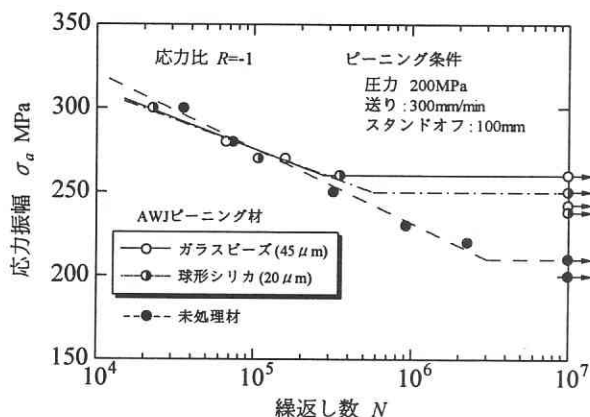


図8 S-N 曲線 (粒径の影響)

比較すると 10MPa 程度小さいが、これは表面改質により生じる圧縮残留応力の生成深さに関係していると考えられる。今回は板厚方向への残留応力分布は測定していないが、図6の硬さ分布と同様に、小さい 20μm 粒子を用いた場合の圧縮残留応力の生成深さは、45μm 粒子のそれと比べて小さいと予想される。これにより、試験片表面に発生した疲労き裂の内部への伝ばおよび停留挙動において、両試験片で差が生じる結果になったものと考えられる。

なお、両疲労試験片の表面粗さは 45μm 粒子で $R_a 1.22 \mu m$ 、20μm 粒子で $R_a 0.77 \mu m$ であった。

4. 結 言

平均粒径が約 50μm のガラスビーズとアルミナ、および平均粒径 20μm の球形シリカを衝突粒子としたアプレシブ・ウォータージェット表面改質処理を、S45C 焼なまし材に対して行い、その疲労特性に及ぼす粒子材種および粒径の影響について検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) 粒径が約 50μm の結果において、衝突粒子の使用により S45C 材の疲労限は増加し、単一球形粒子のガラスビーズの場合で約 25%向上した。
- 2) 粒径 20μm の球形シリカ粒子を用いた場合でもガラスビーズと同様の表面改質効果が得られ、処理後の表面

粗さ R_a が $0.77\mu\text{m}$ と滑らかでありながら、疲労限を約20%向上できることがわかった。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、親切かつ有益な助言と討論をいただいた岡山大学工学部・鳥居太始之教授、実験上の援助をいただいた生産技術アカデミー・田邊栄司氏に深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 例えば, ショットピーニング技術協会編: ショットピーニングの方法と効果, pp. 39-41 (1997).
- 2) H. K. Tonshoff and A. Mohlfeld: Int. J. Mach. Tools Manufact., 38, 5-6, 469-476 (1998).
- 3) S. R. Daniewicz and S. D. Cummings: Trans. ASME, J. Eng. Mat. Technol., 121, 3, 336-340 (1999).
- 4) B. M. Colosimo, M. Monno and Q. Semeraro: Int. J. Mat. Product Technol., 15, 1/2, 10-19 (2000).
- 5) M. Ramulu et al.: Trans. ASME, J. Press. Vessel Technol., 124, 1, 118-123 (2002).
- 6) 榎本邦夫, ほか5名: 材料, 45, 7, 734-739 (1996).
- 7) 平野克彦, 榎本邦夫, 林英策, 黒沢孝一: 材料, 45, 7, 740-745 (1996).
- 8) 祖山均, 朴貞道, 坂真澄, 阿部博之: 材料, 47, 8, 808-812 (1998).
- 9) H. Soyama, K. Saito and M. Saka: Trans. ASME, J. Eng. Mat. Technol., 124, 2, 135-139 (2002).
- 10) D. Odhiambo and H. Soyama: Int. J. Fatigue, 25, 1217-1222 (2003).
- 11) D. Arola, M. L. McCain, S. Kunaporn and M. Ramulu: Wear, 249, 10-11, 943-950 (2002).
- 12) 松葉 朗, ほか5名: 広島県立東部工業技術センター研究報告, 16, 35-38 (2003).