

ウォータージェットを利用した表面改質法(第1報)

表面改質特性に及ぼすアブレシブおよび加工条件の影響

松葉 朗, 宗廣修興, 小島田博夫^{*1}, 竹保義博, 岡田芳雄, 兼広二郎

Surface Modification Method Using Waterjet I

Effects of Abrasive and Process Parameter in Surface Modification Properties

MATSUBA Akira, MUNEHIRO Shuko, KOTORIDA Hiroo, TAKEYASU Yoshihiro,
OKADA Yoshio and KANEHIRO Jiro

In this study, effects of using abrasive on the surface modification properties in abrasive waterjet (AWJ) peening are discussed by comparison with waterjet (WJ) peening without abrasive. Annealed 0.45% carbon steel plates were subjected to both AWJ and WJ peening, where the abrasives were alumina and glass beads with almost the same diameter of 50 μ m. Compressive residual stress occurs on all the AWJ-peened surface with the larger value than the WJ-peened specimen treated with the same conditions, the value of which can be controlled by the process parameter of jet pressure and traverse speed. In addition, AWJ peening with glass beads is more effective for introducing the compressive residual stress and work hardening than that with alumina. Surface roughness also increases in the specimens AWJ-peened with glass beads, although the average roughness, R_a , obtained in this experiment was less than 1.3 μ m.

アブレシブ・ウォータージェット (AWJ) ピーニングの表面改質特性に及ぼすアブレシブの影響を, アブレシブを用いないウォータージェット (WJ) ピーニングとの比較によって検討した。粒径がほぼ等しい 50 μ m のアルミナとガラスビーズを用い, S45C 焼なまし材に対して AWJ および WJ ピーニングを行った。全ての AWJ 材において WJ 材よりも大きな圧縮残留応力が発生し, その値は噴射圧力とトラバース速度に依存することがわかった。また, ガラスビーズを用いた AWJ ピーニングでは, 圧縮残留応力の生成や表面硬化においてアルミナの場合よりも効果的であった。さらに, ガラスビーズを用いると表面粗さも増加するが, 今回得られた平均表面粗さ R_a は 1.3 μ m 以下であった。

キーワード: ウォータージェット, 表面改質, アブレシブ, ピーニング, 残留応力

1. 緒 言

ウォータージェット加工はアブレシブ(研磨剤)を混入した高圧水を細いノズルから噴出し, その衝撃力およびエロージョン特性によって材料の切断や除去を行う加工法である。現在, 主に切断やはつりなどに使用されているが, 被加工物に合わせてアブレシブの形状・材質および種々の加工条件を調整すれば, ショットピーニングと同様な表面改質効果が期待できる。すなわち, 研磨剤であるアブレシブを衝突粒子(ショット)として用い, ウォータージェットにより材料表面に噴射すれば, 表面部の硬化と圧縮残留応力の生成などによって, 被加工材の疲労強度を改善できると思われる。一方, このような固体粒子を用いたピーニングを行うと表面粗さが増加し, 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。そこで, 高速・高圧力のウォータージェッ

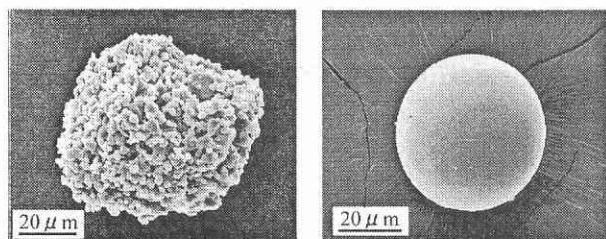
トを用いれば, 高い投射速度が得られるために粒径の小さい粒子を使用でき, 肌荒れの少ない表面改質が実現できると思われる。

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, 高圧水流のみによって表面改質を行う方法¹⁾⁴⁾や, 水中での水流噴出においてキャピ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ピテーションピーニングなどが報告されている⁵⁾⁸⁾。アブレシブを衝突粒子として用いれば, 高圧水流のみの場合に比べて表面改質効果の向上が期待できるが, その報告例は少なく⁹⁾, 特に, 実際の疲労特性に及ぼす影響については不明な点が多いのが現状である。

本研究では, アブレシブ・ウォータージェットを用いた表面改質法に関する研究の第一段階として, 炭素鋼 S45C 材を対象に, 残留応力, 硬さおよび表面粗さについてその効果を調べた。また, アブレシブを用いずに同条件で行った実験結果との比較によって, 表面改質効果に及ぼすアブレシブの影響についても検討した。

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



(a) アルミナ (b) ガラスビーズ

写真1 アブレシブのSEM観察

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。1123K-1h 保持の完全焼なましを行い、35×25mm、板厚2mmの板状に機械加工した後に、873K-1h 保持の低温焼なましを行って機械加工時の残留応力を除去した。最後に、両表面を電解研磨して実験に供した。

2.2 アブレシブ

アブレシブには、市販の平均粒径 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って形成された造形粒子であるが、写真1(b)のガラスビーズは単一の球形粒子であり、両者の構造は異なっていることがわかる。

2.3 ピーニング方法

ウォータージェット加工機には、インジェクションタイプのスギノマシン製 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 φ0.25mm, φ1.2mm である。アブレシブの供給法として、図1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。ピーニングは試験片長手方向に沿って1パスのみ行い、加工条件として、噴射圧力を 50, 100, 200, 300MPa, トラバース(送り)速度を 100, 300, 500, 700, 1000, 1500mm/min, スタンドオフ(ワークディスタンス)を 50, 100, 150mm にそれぞれ変えて行った。

2.4 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 2.0×2.0mm², X線

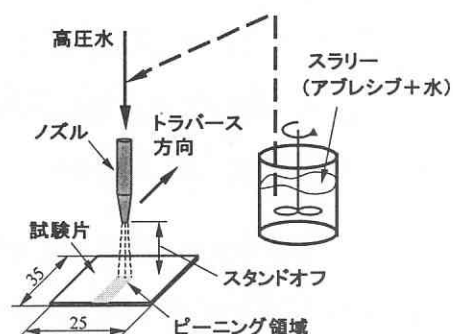


図1 ピーニング実験の概要

応力定数-318.2MPa/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。測定はピーニングを施した試験片中央部において行い、トラバース方向に対して平行および垂直の2方向の残留応力を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 ピーニング表面の残留応力

アブレシブにアルミナを用い、トラバース速度が 1000mm/min, スタンドオフが 50, 100, 150mm の各条件において、噴射圧力を種々変えてアブレシブ・ウォータージェットピーニング(以後 AWJ ピーニングと呼ぶ)を行い、残留応力と噴射圧力の関係を調べた。その結果を図2に示す。なお、図中にはトラバース方向と平行方向の残留応力を $(\sigma_r)_p$, 垂直方向のそれを $(\sigma_r)_n$ として区別している。全ての条件において、ピーニング面上では圧縮残留応力が生じ、トラバース方向に対して平行および垂直両方向の残留応力値はほぼ等しいことがわかる。圧縮残留応力は噴射圧力の増加に伴って増加しており、明確な圧力依存性を示している。ただし、圧力が 100MPa 以上では圧縮残留応力は比較的緩やかに増加することがわかる。また、スタンドオフ値が 150mm の圧縮残留応力値は 50mm や 100mm のそれとくらべて低いがその差は小さく、残留応力に及ぼすスタンドオフの影響は噴射圧力に比べて小さいと考えられる。

つぎに、図2中のスタンドオフ 100mm 条件下におけ

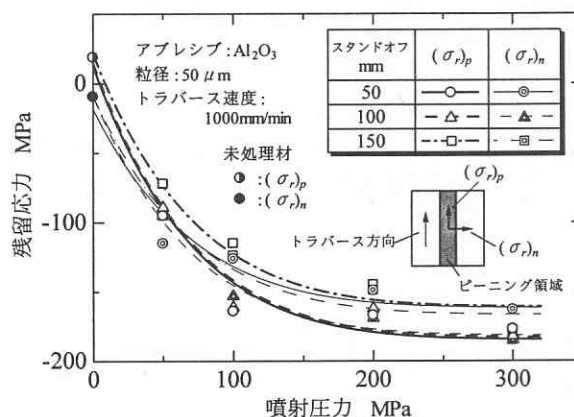


図2 ピーニング面上の残留応力と噴射圧力の関係
(アルミナを用いた場合)

るトラバース方向と垂直方向の残留応力値(σ_{rn})を、同条件下におけるガラスビーズを用いたAWJ材、およびアブレシブを使用せずに処理を行ったウォータージェットピーニング(以後、WJピーニングと呼ぶ)材の結果と比較して図3に示す。ガラスビーズを用いたAWJピーニング材における残留応力と噴射圧力の関係はアルミナと同様の傾向を示しているが、ガラスビーズを用いた方がアルミナよりも圧縮残留応力が大きく、高圧力条件下では、表1で示した降伏応力以上の大きな圧縮残留応力が生じている。一方、アブレシブを用いないWJピーニング材に生じる圧縮残留応力は極めて小さいことがわかる。

さらに、各AWJおよびWJ材において、噴射圧力を100および200MPaとし、トラバース速度を種々変化させた場合の残留応力測定結果を図4に示す。まず、アルミナAWJ材に注目すると、トラバース速度が小さいほど、すなわち、ピーニング処理時間が大きいほど残留応力値が増加しており、トラバース速度も噴射圧力と同様に圧縮残留応力に関係するパラメータであることがわかる。ただし、ガラスビーズの結果では、図中の全てのデータにおいて圧縮残留応力が降伏応力よりも大きいため、ト

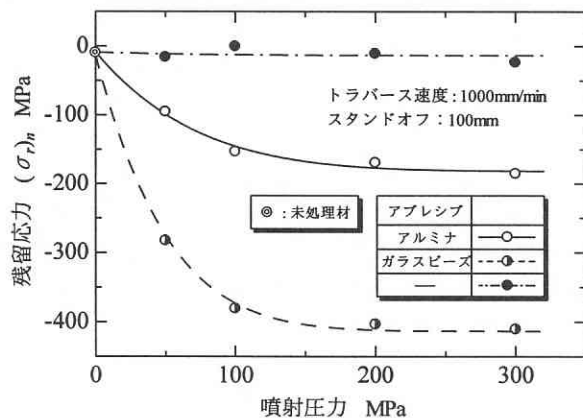


図3 ピーニング面上の残留応力と噴射圧力の関係に及ぼすアブレシブの影響

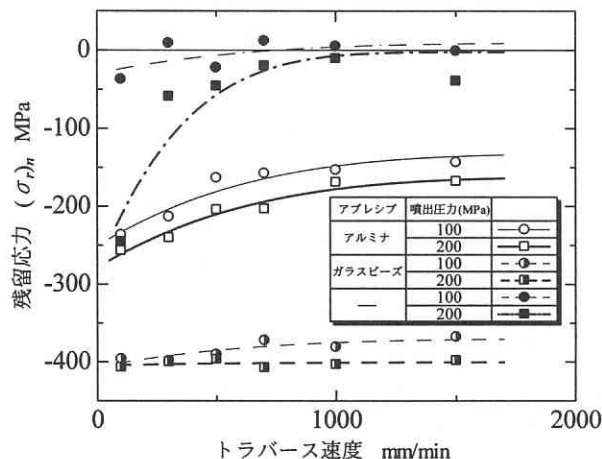


図4 ピーニング面上の残留応力とトラバース速度の関係

ラバース速度依存性は比較的小さい結果となった。さらに、WJ材においてもトラバース速度の影響は現れており、特に圧力の大きい200MPaの結果では、トラバース速度が最も小さい100mm/minにおいてアルミナAWJ材と同程度の圧縮残留応力が生じている。この結果は、高い加工条件であれば、アブレシブを用いずとも本供試材の表面改質が可能であることを示唆していると思われる。

3.2 硬さ分布

ピーニングを行った試験片をトラバース方向に垂直に切断し、断面の硬さ分布を調べた。その例として、噴射圧力200MPa、トラバース速度300mm/min、スタンドオフ100mmにおける、各試験片の結果を比較して図5に示す。これより、WJ材およびアルミナAWJ材では表面のごく近傍を除いて硬さの変化は小さい。一方、ガラスビーズAWJ材では、データにばらつきがあるものの表面から0.2mm程度まで硬度が上昇している。すなわち、今回の実験では、ガラスビーズを用いたAWJピーニングが最も深い硬化層を得られることがわかる。

3.3 ピーニング表面の観察

ピーニングを行った各試験片表面のSEM観察写真を、未処理材の結果と比較して写真2に示す。ここで、ピーニング条件はいずれの試験片も同一であり、噴射圧力200MPa、送り速度1000mm/min、スタンドオフ100mmである。写真2(b)のWJ材では、写真2(a)未処理材と比較してわずかに表面が壊食されているが表面上に大きな変化は見られない。一方、写真2(c)および(d)に示すアブレシブを用いたAWJ材では、処理の前後において表面状態が大きく異なっていることがわかる。また、アブレシブの材質によっても異なるこの結果には、写真1で示したアブレシブの構造が関係していると思われる。すなわち、アルミナ粒子は試料表面に衝突する際に破碎し、粒子全体を形成している小さいグリッド状粒子によって表面に微細な凹凸が形成され(写真2(c)), 巨視的には平坦になるが、単一球形粒子であるガラスビーズは比較的破碎しにくく、写真2(d)のようにショットピーニングに類似した表面が形成されたものと考えられる。

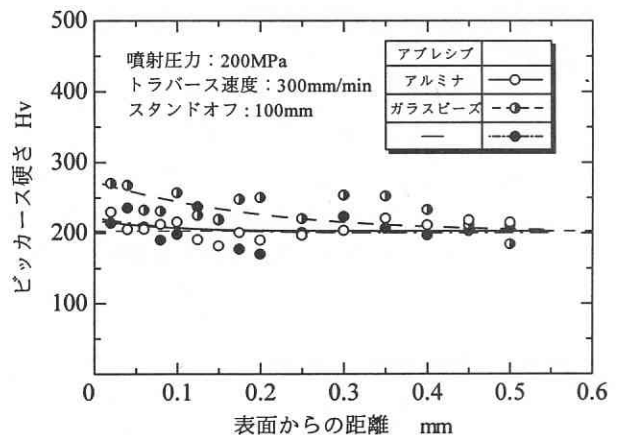


図5 ピーニング材断面の硬さ分布

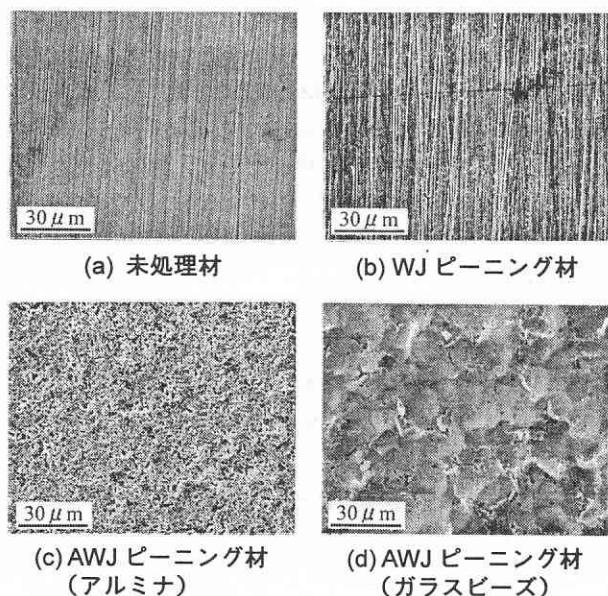


写真2 ピーニング表面のSEM観察

3.4 ピーニング面の表面粗さ

噴射圧力が100, 200MPa, スタンドオフ100mmにおいて、トラバース速度を種々変えて行った各試験片の平均表面粗さ R_a の測定結果を図6に示す。測定はピーニング領域中央をトラバース方向に沿って行った。これより、WJ材では未処理材の表面粗さに対してほとんど差がなく、また、アルミナAWJ材でも、高圧力・低トラバース速度の条件を除いて表面粗さの増加は比較的小さいことがわかる。一方、ガラスビーズを用いたAWJ材ではこれらに比べて表面粗さが増加しており、トラバース速度に比べて噴射圧力の影響がより大きいことがわかる。しかし、電解研磨面に対して行った今回の実験において得られた最大の平均表面粗さは、圧力200MPa条件下において $R_a=1.3\mu\text{m}$ であった。すなわち、これと同等以上の表面粗さを有する通常の一般機械加工仕上げ面に対して本方法を適用する場合には、表面粗さの低下は比較的小さいと予想され、3.1項で述べた圧縮残留応力の効果により、疲労強度の向上が期待できる。ただし、従来のショットピーニングとの相違点は現在明らかではなく、大きさが同等の粒子を用いたショットピーニングとの実験的な比較検討が今後必要と考えている。

4. 結 言

S45C焼なまし材に対してアブレシブ・ウォータージェットピーニングによる表面改質を行い、その効果に及ぼすアブレシブ材種および数種の加工条件の影響を、アブレシブを用いない場合との比較において検討した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) アブレシブを用いると、表面上の圧縮残留応力や表面硬度の増加がアブレシブを用いない場合に比べて大きく、さらに、これらはアブレシブとしてガラスビーズを用いた方が、アルミナの場合よりも大きいことがわ

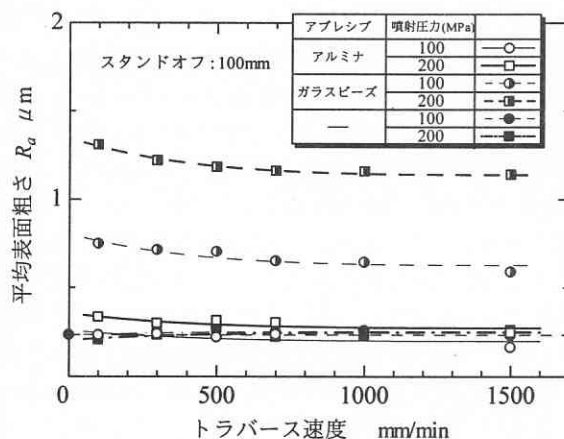


図6 ピーニング表面の平均表面粗さ

- かった。また、圧縮残留応力は、圧力の増加およびトラバース速度の減少とともに増加する傾向を示した。
- 2) アブレシブの使用により、ピーニング後の表面状態は処理前と比べて大きく変化し、さらに、それは用いるアブレシブの材種によっても異なることがわかった。
 - 3) 電解研磨後に行った各ピーニング材の平均表面粗さは、ガラスビーズを用いた場合において比較的大きく、その最大値は圧力200MPaにおいて $R_a=1.3\mu\text{m}$ であった。また、アルミナの場合およびアブレシブを用いない場合では、表面粗さの増加は小さいことがわかった。

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) H. K. Tonshoff and A. Mohlfeld: Int. J. Mach. Tools Manufact., 38, 5-6, 469-476 (1998).
- 2) S. R. Daniewicz and S. D. Cummings: Trans. ASME, J. Eng. Mat. Technol., 121, 3, 336-340 (1999).
- 3) B. M. Colosimo, M. Monno and Q. Semeraro: Int. J. Mat. Product Technol., 15, 1-2, 10-19 (2000).
- 4) M. Ramulu et al.: Trans. ASME, J. Press. Vessel Technol., 124, 1, 118-123 (2002).
- 5) 榎本邦夫, ほか5名: 材料, 45, 7, 734-739 (1996).
- 6) 平野克彦, 榎本邦夫, 林英策, 黒沢孝一: 材料, 45, 7, 740-745 (1996).
- 7) 祖山均, 朴貞道, 坂真澄, 阿部博之: 材料, 47, 8, 808-812 (1998).
- 8) H. Soyama, K. Saito and M. Saka: Trans. ASME, J. Eng. Mat. Technol., 124, 2, 135-139 (2002).
- 9) D. Arola, M. L. McCain, S. Kunaporn and M. Ramulu: Wear, 249, 10-11, 943-950 (2002).