

# ショットピーニングの加工条件と表面性状の関係

## Relation between shot peening processing conditions and surface texture

技術開発部 工業材料科 佐藤浩樹 工藤弘行  
プロジェクト研究科 三瓶義之 小野裕道  
応募企業 株式会社ニッチュー

ショットピーニングによる工具寿命延長のメカニズムを検証し、適した条件を探索した。実際の工具と同じ素材を用いて、ショットピーニング条件を変えてサンプルを作製し、刃先の観察、形状測定、表面の残留応力測定、断面組織観察、硬さ測定を実施した。

その結果、ショットピーニングによって放電加工での加工変質層が除去され、新たに緻密な層が形成されていることが確認された。また、刃先形状が丸められていることも確認された。これにより工具の寿命が延長されているものと考えられる。

Key words: ショットピーニング ショットプラスト 工具鋼

### 1. 緒言

課題を申請した株式会社ニッチューでは、ブラスト加工用の研掃材(投射材)を販売しており、その中でカットワイヤーと呼ばれる種類の研掃材も扱っている。

このカットワイヤーは鋼線を切断して製造されるがその切断工具は短時間で刃こぼれを起こし、その度に取り外し・再研磨・組付けが必要になるため、工具寿命の延長が望まれている。

そこで、同社が切断工具の刃先にショットピーニングを行い工具寿命が延びる効果が出る際の切断刃の状況を観察し資料をまとめた。

本研究では、このメカニズムを解明するため、条件を変えてショットピーニングしたサンプルを作製し、電子顕微鏡観察、寸法測定、残留応力測定、金属組織観察、硬さ測定を実施した。また、その結果から、工具寿命延長のための推奨条件の探索を行った。

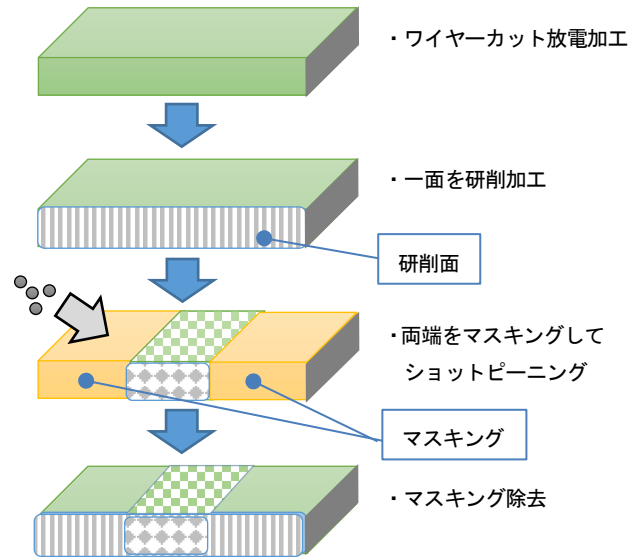


図1 作製工程

### 2. 実験と結果

本研究では、切断工具を模したサンプルを作製し、以下の項目について測定した。

1. サンプル刃先の電子顕微鏡観察
2. 刃先の加工量と曲率半径の測定
3. サンプル表面の残留応力測定
4. サンプル断面の組織観察
5. サンプル断面の硬さ測定

#### 2. 1. 切断工具を模したサンプルの作製

切断工具そのものを分析等に供することは難しいため、工具と同じ材料を同じ工程で加工した模擬刃先を作製し、実験に用いた。模擬刃先の作製工程を図1に示す。

この模擬刃先に、投射時間及び投射圧力を変えてショットピーニングを行いサンプルとしたを作製した。ショットピーニングは模擬刃先の放電加工面、研削面の両方に粒子が当たるように投射した。実施したショットピーニング処理条件を表1に示す。

表1 ショットピーニング処理条件

| サンプル名 | 投射圧力[MPa] | 投射時間[sec.] |
|-------|-----------|------------|
| R1    | 0.4       | 10         |
| R2    |           | 20         |
| R3    |           | 30         |
| R4    |           | 60         |
| L1    | 0.5       | 10         |
| L2    |           | 20         |
| L3    |           | 30         |

## 2. 2. サンプル刃先の電子顕微鏡 (SEM) 観察

### 2. 2. 1. 刃先形状の観察

サンプルの刃先について走査型電子顕微鏡(日立ハイテクノロジーズ製 S-3700N)により観察した。サンプル R2 および R4 を放電+研削面方向から観察した SEM 画像を図 2 に示す。

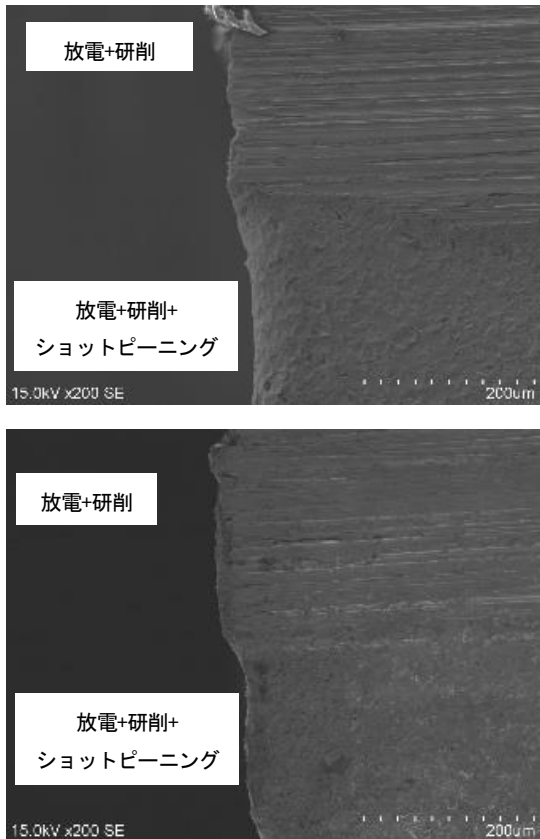


図 2 ショットピーニングによる刃先の加工量  
(上: サンプル R2, 下: サンプル R4)

図 2 より、ショットピーニングにより表面が加工されて段差が生じていることがわかる。この段差を本報告では加工量と呼ぶ。サンプル R2 と R4 の比較から、投射時間が長くなるにつれて加工量が大きくなっていることがわかった。

### 2. 2. 2. 放電加工面の加工変質層の観察

放電加工された面の表面にはいわゆる「白層」と呼ばれる加工変質層が形成される。この白層は脆く、マイクロクラックが存在するため、刃先に存在すると工具寿命に悪影響がある<sup>1)2)</sup>。

そこで、ショットピーニング投射前の模擬刃先の断面試料を作製し、白層を観察した。断面試料はイオンミリング装置(日立ハイテクノロジーズ社製 IM400Plus)を用い、断面加工モードで加速電圧 6[kV]、加工時間 30[min.] の条件で作製した。作製した断面の電子顕微鏡画像を図 3 に示す。

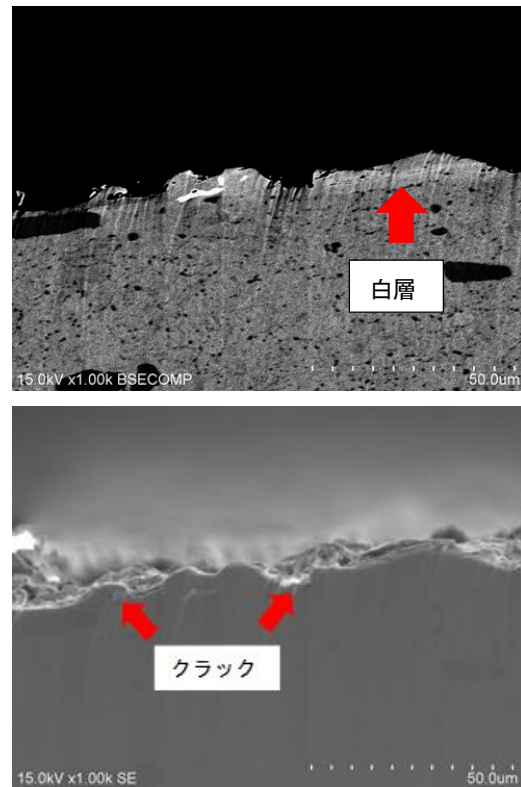


図 3 放電加工部断面の SEM 画像  
(上: 反射電子像, 下: 二次電子像)

図 3 (上) の反射電子像より、放電加工直後の表面には厚さ 5~10[ $\mu\text{m}$ ]の加工変質層である白層が確認された。また、図 3 (下) の二次電子像より、表面近傍には微細なクラックが確認された。

### 2. 3. 刃先の加工量と曲率半径の測定

研削加工により刃先に生じる「カエリ」は切れ味や刃先寿命に悪影響を与えるため除去し、刃先にある程度の刃先の曲率半径を持たせることが望ましい。

そこでサンプルの刃先の形状を表面粗さ・輪郭形状統合測定機(東京精密社製 SURFCOM 3000A)で測定した。ショットピーニングの処理部と未処理部の段差を加工量とした。また、研削加工面と放電面の断面形状を測定し、刃先の曲率半径を算出した。ショットピーニングの投射時間に対する加工量の変化を図 4 に、刃先の曲率半径の変化を図 5 に示す。

図 4 より、放電加工面の方が研削加工面よりも加工量が大きく、投射時間が長いほど加工量が大きいことが分かった。しかし、投射圧力 0.4[MPa]と 0.5[MPa]では加工量に大差がなかった。また放電加工面の加工量は 15[ $\mu\text{m}$ ]程度と図 3 で観測された白層の厚みより大きいことから、白層は除去されているものと考えられる。

図 5 より、ショットピーニングによる刃先の曲率半径は投射時間に応じて大きくなっていることが分かった。

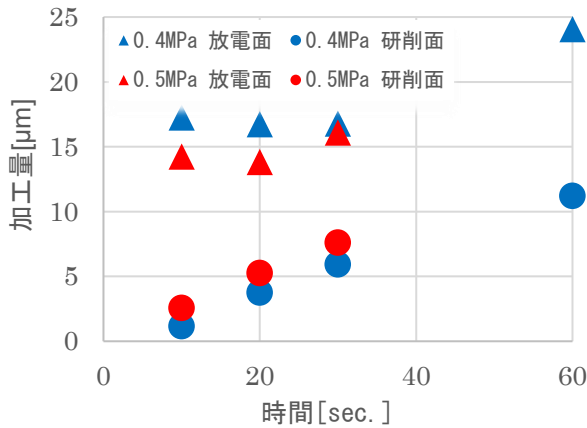


図4 投射時間に対する加工量

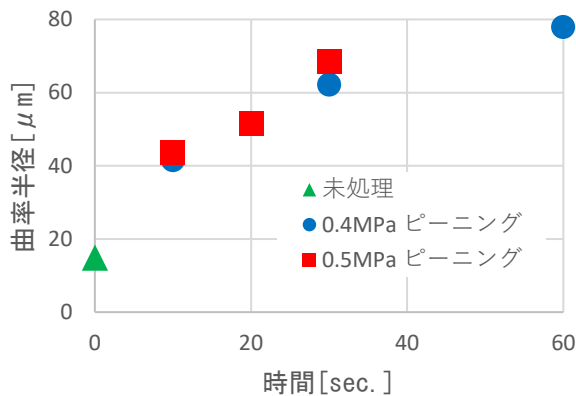


図5 投射時間に対する刃先の曲率半径

## 2. 4. サンプル表面の残留応力測定

一般に放電加工後の表面は加工時の熔融・凝固に伴い引張応力が残留している。表面の残留応力が引張の場合には疲労寿命が短くなり、寿命延長のためには表面に圧縮応力が残留していることが望ましい<sup>3)</sup>。そこで、加工条件の異なる表面の残留応力およびショットピーニング時間による残留応力の変化を、X線応力測定器(リガク社製 AutoMATE)により測定した。

図6に加工手法ごとの残留応力、図7にショットピーニング投射時間と残留応力について示す。

図6より、放電加工後の表面では、残留応力は正の値となり、引張応力が残留していた。また、研削加工及びショットピーニング後の表面では、残留応力は負の値となり、圧縮応力が残留していた。圧縮応力の程度は研削加工面よりもショットピーニング面のほうが大きかった。

図7より、残留応力の値は投射圧力を高めてもかわらず、また投射時間を20[sec.]より長くしても変わらなかった。

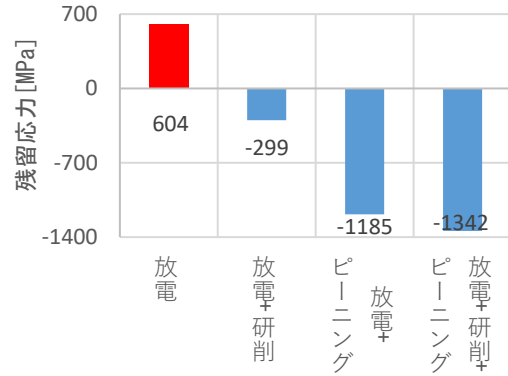


図6 加工手法ごとの残留応力  
(ピーニング条件 0.4 [MPa], 10 [sec.] )

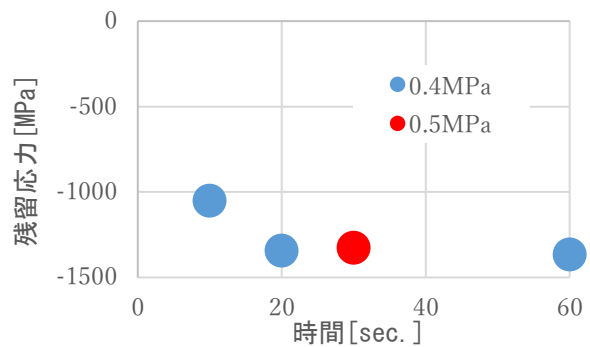


図7 ショットピーニング投射時間と残留応力  
(測定箇所 放電+ピーニング面)

## 2. 5. サンプル断面の組織観察

サンプル刃先の断面を研磨し、10%ナイタールによるエッチングを行い、金属顕微鏡(オリンパス社製 GX71F)により金属組織を観察した。図8にショットピーニングの投射前後での金属組織を示す。

図8より、投射前の試料では、放電加工面には白層が存在するが、研削加工面(図8上面)は除去されていた。投射後の試料では右側、上側の表面共に厚さ5[μm]程の薄い層が形成されていた。研削により白層が除去された研削加工面にも母材と異なる層が存在することから、この層はショットピーニングによる加工変質層と考えられる。

## 2. 6. サンプル断面の硬さ測定

放電加工及びその後の加工による材料表面付近の硬さへの影響を調べるため、サンプルの表面近傍の硬さ測定を行った。

サンプルR2の刃先の断面を研磨し、マイクロビッカース硬度計(島津製作所製 HMV-2ADW)により硬さを測定した。測定位置は放電加工面と研削加工面及びそれらのショットピーニング面の表面近傍から、深さ方向に50[μm]の間隔をあけて計5か所測定した。硬さ測定結果を表2に示す。

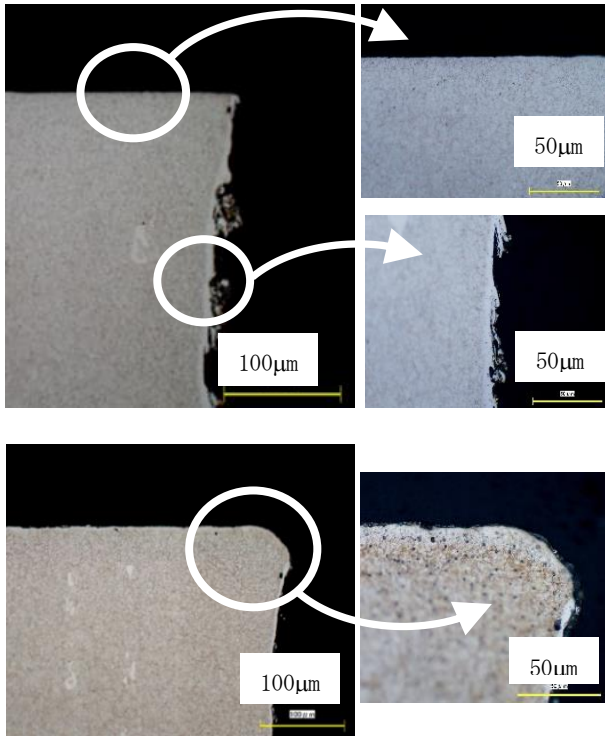


図8 ショットピーニング投射前後の金属組織  
(上：投射前，下：投射後)

表2 硬さ測定結果

| 測定位置  | 硬さ [Hv]     |       |             |          |             |          |
|-------|-------------|-------|-------------|----------|-------------|----------|
|       | R2(ピーニングなし) |       | R2(ピーニングあり) |          | R4(ピーニングあり) |          |
|       | 放電          | 放電+研削 | 放電+SP       | 放電+研削+SP | 放電+SP       | 放電+研削+SP |
| No. 1 | 1106        | 809   | 787         | 648      | 855         | 664      |
| No. 2 | 776         | 798   | 776         | 809      | 798         | 798      |
| No. 3 | 798         | 832   | 792         | 798      | 820         | 809      |
| No. 4 | 787         | 776   | 809         | 832      | 933         | 798      |
| No. 5 | 787         | 787   | 776         | 798      | 856         | 809      |
| 中央    | 766         |       | 776         |          | 756         |          |

SP: ショットピーニング

表2より、放電加工面、研削面、ショットピーニング面いずれも母材の硬さと大差がみられなかった。このことから組織変化の影響は最表面のみと考えられる。サンプル R2 の測定位置 No. 1 において、1106[Hv] という他と大きく異なる硬さを示したが、これは組織中に分散している高硬度の炭化物に圧子が当たったためと考えられる。

### 3. 考察

実験の結果から、ショットピーニングでは粒子の衝

突により表面の白層の除去、圧縮応力の付与、刃先の丸めが同時に行われていることが分かった。断面の組織観察から、白層の除去後に新たにショットピーニングによる加工変質層が生成されていることが分かった。これらの寿命短縮要素の排除により切断工具の寿命が延びたと考えられる。また、投射時間でコントロールできる刃先の丸めについては、その丸めの程度により更なる寿命延長をはかれる可能性がある。

### 4. 結言

本研究は模擬刃先に条件を変えてショットピーニングを行ったサンプルを作製し、電子顕微鏡観察、寸法測定、残留応力測定、金属組織観察、硬さ測定により比較し、次の知見を得た。

- ・ワイヤ放電加工により、表面には白層が形成されており、その厚さは5~10[μm]である。
  - ・放電加工の白層は、引張の応力が残留している。
  - ・放電加工の白層は研削加工やショットピーニングにより除去することができる。
  - ・ショットピーニングには白層の除去作用、圧縮の残留応力を付与する効果がある。
  - ・ショットピーニングによる除去量は投射時間が長くなるほど大きくなるが、本実験の範囲内では投射圧力には影響されない。
  - ・ショットピーニングによる圧縮の残留応力の大きさは20[sec.]以上の投射、あるいは投射圧力の上昇では変わらない。
  - ・ショットピーニングにより、表面には放電加工によるものとは別の加工変質層が形成される。
  - ・本研究の条件の範囲ではショットピーニングによる金属組織の変化は表面約5[μm]にとどまり、それより深い領域では組織及び硬さの変化は見られない。
- 以上の結果から切断工具の寿命延長は、放電加工時の白層除去と圧縮の残留応力の付与、刃先の丸めが同時に起きたためと推察された。圧縮の残留応力はショットピーニングの投射時間に応じ増加するが、切断工具の材質では20[sec.]以上投射しても増加は見られなかった。

### 参考文献

- 1) 六碓賢亮, 鈴木賢亮, 河合栄一郎, 鉄鋼材料の放電加工面における変質層. 金属学会誌, 1963, vol. 27, no. 6, p. 283-288.
- 2) 増井清徳, 曾根匠. 放電加工面の性状と高品位化, 精密工学会誌, 1991, vol. 57, no. 6, p. 945-948.
- 3) 高橋宏治, 他. き裂状表面欠陥を有する高強度鋼のショットピーニングによる疲労限度向上と表面欠陥の無害化. 材料, 2009, vol. 58, no. 12, p. 1030-1036.