

超音波加工によって金属加工面に形成された加工変質層の厚さの評価

森田 陽亮*¹⁾

Evaluation of Thickness of the Work-Affected Layer on Metal Machined Surfaces Formed by Ultrasonic-Assisted Machining

MORITA Yosuke*¹⁾

工具に超音波振動を付与した超音波加工を利用し、切削加工の段階で圧縮残留応力を付与できることがこれまでの研究でわかっている。残留応力は切削加工によって形成される加工変質層と密接な関係があるため、加工変質層の厚さを調べることで残留応力が付与された深さを推定することができる。そこで本研究では、超音波加工によって形成された加工変質層の厚さを評価するため、イオンミリング装置と走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた加工変質層の組織観察およびナノインデントを用いた硬さ測定を行った。さらにショットピーニングを行った試料についても同様に評価し結果を比較したところ、超音波加工によって形成された加工変質層の厚さおよび硬さはショットピーニングと同等であることがわかった。

1. 緒言

金属材料の加工において、切削加工は広く行われている機械加工方法の1つである。加工物の良、不良を評価する際には寸法精度や粗さに注目されるが、近年では加工面の残留応力もまた重要視されている。加工における機械的、熱的要因により加工面には何らかの残留応力が生じるが、切削加工においては加工面が引張残留応力状態となることが多い¹⁾。引張残留応力は亀裂発生および進展を促すため、破壊の原因となる恐れがあることから、切削加工後に圧縮残留応力の付与や加工硬化層の形成といった表面改質を目的としてショットピーニング等の処理が行われることがある。

一方、工具に軸方向の超音波振動を付与した状態で金属材料に溝加工を行うと、振動を付与しない慣用加工の場合と比べて大きな圧縮残留応力が付与されることをこれまでの研究で報告した^{2),3)}。この結果は超音波加工によって切削加工の段階でショットピーニングと同様の表面改質ができる可能性を示唆している。しかしながら、X線回折を利用した残留応力測定法では鉄系材料に対するX線の侵入深さが表面近傍に限定されており、残留応力が付与されている深さについては定量的に評価できていない。残留応力は形成される加工変質層と密接な関係があるため、加工変質層の厚さから残留応力が付与された深さを推定できる可能性がある。

そこで本研究では、超音波加工によって金属加工面に形成された加工変質層の厚さを定量的に評価することを目的として、断面の組織観察および硬さ測定を行った。被削材として析出硬化系ステンレス鋼 15-5PH を用意し、超音波

加工および慣用加工をそれぞれ実施した上でイオンミリング装置⁴⁾と SEM を用いた組織観察、ナノインデント⁵⁾を用いた硬さ測定を行った。また、比較のためにショットピーニングを施した試料を用意し、同様の組織観察と硬さ測定を実施して結果を比較した。

2. 実験方法

2.1 被削材と加工条件

本研究で使用する被削材として、近年航空機産業において需要が拡大している析出硬化系ステンレス鋼 15-5PH を用意した。加工実験は5軸マシニングセンタベースの超音波加工機 (DMG 森精機株式会社製, ULTRASONIC 20 linear) を用いて行った。工具は半径 3 mm の 2 枚刃超硬ボールエンドミル (日進工具株式会社製, MSB230SF) を使用した。工具に超音波振動を付与した時の振動振幅および周波数はレーザドップラ振動計 (ポリテックジャパン株式会社製, NLV-2500) を使用して無負荷状態で測定し、全振幅は約 7 $\mu\text{m-p}$ 、周波数は約 30500 Hz という結果を得た。ボールエンドミルの先端部分は回転速度が極めて遅く加工面が荒れるので避けるべきである一方で、加工面に対して工具の傾斜角度を大きくするにつれて超音波振動により付与される圧縮残留応力の値は小さくなる³⁾。そこで加工時の傾斜角度は 15°とし、被削材を回転させながら工具を少しずつ半径方向に送ることで端面加工を行った。加工時の模式図を図 1 に、加工条件の詳細を表 1 に示す。

*¹⁾ デジタル技術支援科 (当時: 機械・電気・材料グループ)

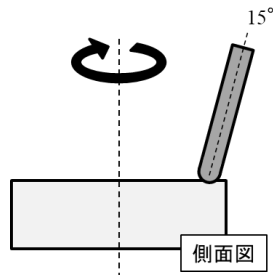


図 1 加工時の工具と被削材の模式図

表 1 加工条件

主軸回転数	3200 min ⁻¹
送り速度	270 mm/min
切込量	0.3 mm
切削油	水溶性
超音波振動振幅	7 μm-p-p
周波数	30500 Hz

2.2 加工面の残留応力測定

端面加工を行った各試料およびショットピーニングを行った試料に対して、微小部 X 線応力測定装置（株式会社リガク製、AutoMATE II）を用いて残留応力測定を行った。測定は試料の回転中心と円周部を避けるため半径方向の中央付近で行い、半径方向に対しては並傾法で、それに垂直な方向（接線方向）に対しては側傾法でそれぞれ測定した。測定条件の詳細を表 2 に示す。

表 2 残留応力測定条件

特性X線	Cr-Kα 線
フィルター	バナジウム
測定手法	sin ² ψ法
コリメータ径	直径4 mm
測定格子面	α-Fe(211)
管電圧	40 kV
管電流	40 mA

2.3 イオンミリング装置と SEM を用いた組織観察

イオンミリング装置（株式会社日立ハイテク製、IM4000）は試料に Ar イオンビームを照射してエッチング加工する装置である。図 2 のように傾斜して回転させた試料表面にイオンビームを照射することで材料の組織や結晶方位によるミリングレートの違いを反映した凹凸を形成することができる⁴⁾。

超音波加工、慣用加工、ショットピーニングを行った試料それぞれについて、試料断面を#1500 までのサンドペーパーを用いた手研磨およびバフ研磨で鏡面に仕上げ、その後イオンミリング装置で処理を行った。処理後の試料をイオンミリング装置から取り出して直ちに SEM（株式会社日立ハイテク製、SU3500）に導入し、反射電子像による組織観察を行った。イオンミリング装置による処理条件を

表 3 に示す。

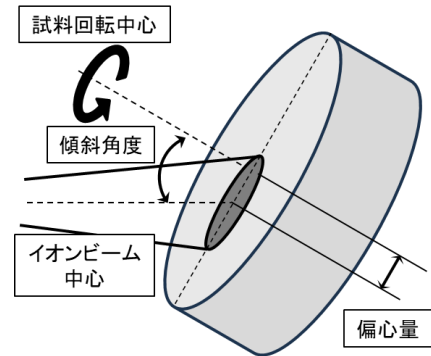


図 2 イオンミリング加工の模式図

表 3 イオンミリング加工条件

試料回転速度	25 min ⁻¹
傾斜角度	30°
偏心量	3 mm
加速電圧	5 kV
加工時間	60 min

2.4 ナノインデントを用いた硬さ測定

超音波加工、慣用加工、ショットピーニングを行った試料それぞれについて、試料断面を 2.3 と同様の手順で鏡面に仕上げ、ナノインデント（株式会社エリオニクス製、ENT2100）による硬さ測定を行った。押し込み荷重は 5 mN として、加工表面から深さ方向の硬さ分布を 2 μm 間隔で測定した。

3. 結果と考察

3.1 加工面の残留応力の測定結果

超音波加工、慣用加工およびショットピーニングを行った加工面の残留応力測定結果を図 3 に示す。図 3 より、超音波加工、慣用加工を行った加工面の圧縮残留応力の値それぞれ 700 MPa、400 MPa であり、超音波加工の方がより大きな圧縮残留応力が付与されていることがわかる。また、ショットピーニングを行った試料では約 700 MPa の圧縮残留応力が付与されており、超音波加工と同等の値であった。なお、いずれの試料においても半径方向と接線方向では測定結果に大きな差はなかった。

ここで、図 3 に示された残留応力の値は試料表面から X 線が侵入した深さまでの平均値であることに注意する必要がある。試料に対する X 線の侵入深さ x は以下の式で計算できる。

$$x = \frac{4.61}{2\mu} * \sin \frac{2\theta}{2} \quad 2\theta: \text{回折角}, \mu: \text{線吸収係数}$$

線吸収係数 μ は試料の材質と X 線の波長によって決まり、Cr K α 線を用いて α -Fe(211)面で測定する場合、上式から X 線侵入深さ x は約 26 μm となる。このことから、図 3 に示された残留応力の値は表面から深さ 26 μm までの残留応力の平均値であり、加工変質層が 26 μm より厚い場合は加工変質層中の残留応力を評価できている。しかし、加工変質層が 26 μm より薄い場合は加工変質層と無垢な層の残留応力の平均値を評価していることになる。

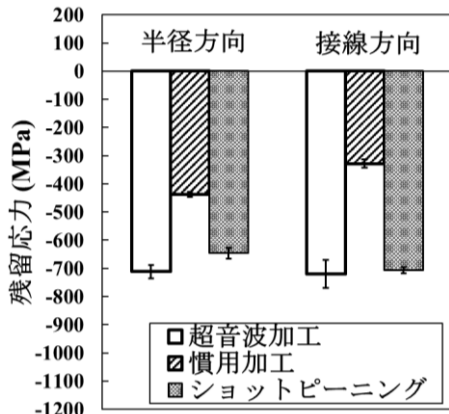


図 3 各試料の残留応力測定結果

3.2 イオンミリング装置と SEM を用いた組織観察結果

超音波加工、慣用加工およびショットピーニングを行った加工面に対してイオンミリング装置で処理した反射電子像をそれぞれ図 4、図 5、図 6 に示す。これらの図を見るといずれの加工面においても微細な凹凸が試料表面に形成され、金属組織がはっきりと観察できていることがわかる。またいずれの試料においてもその加工表面近傍では結晶が微細化しており、加工変質層が形成されていることが確認できる。各試料における加工変質層の厚さを測ると、超音波加工を行った試料では約 17 μm 、慣用加工を行った試料では約 7 μm 、ショットピーニングを行った試料では約 15 μm であった。この結果から、超音波加工によって慣用加工より厚い加工変質層を形成できることがわかった。また、超音波加工によって形成される加工変質層の厚さはショットピーニングと同等であることがわかった。

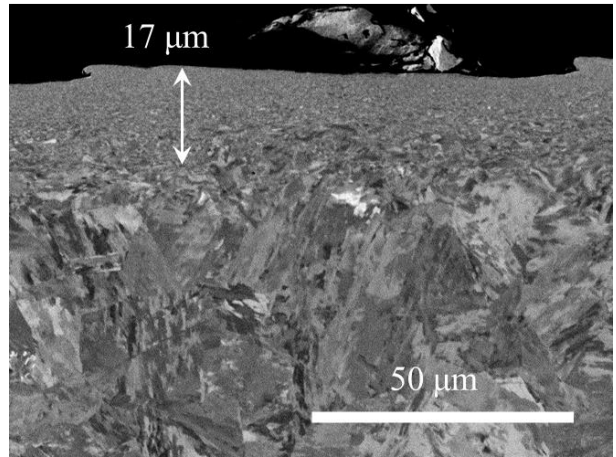


図 4 超音波加工面の反射電子像

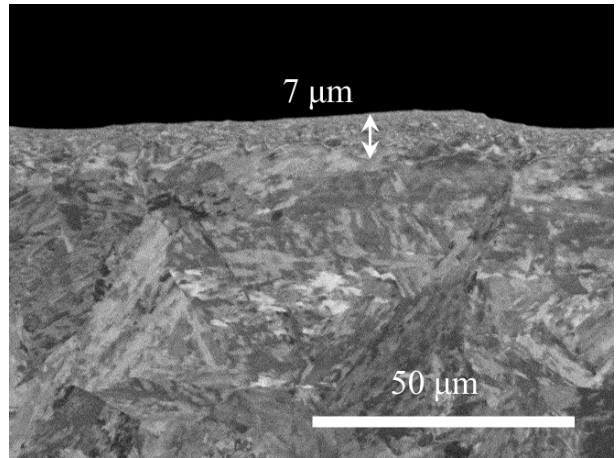


図 5 慣用加工面の反射電子像

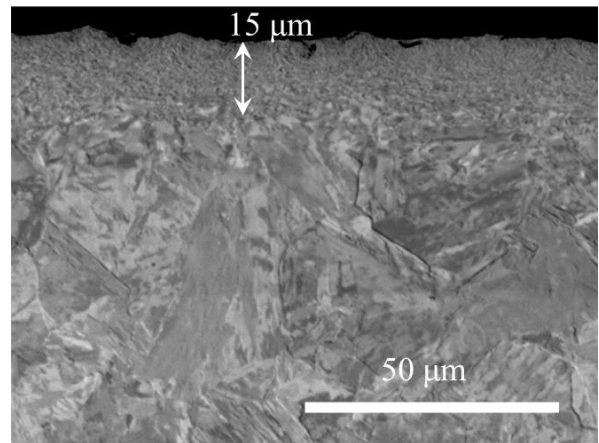


図 6 ショットピーニング加工面の反射電子像

3.3 ナノインデントを用いた硬さ測定結果

超音波加工、慣用加工およびショットピーニングを行った加工面断面における表面から深さ方向への硬さ分布測定結果を図 7 に示す。この図から、慣用加工を行った試料の最表面付近のインデンテーション硬さ H_{IT} が約 6000 N/mm^2 であるのに対して、超音波加工およびショットピーニングを行った試料では最表面付近のインデンテーション硬さ H_{IT} が約 9000 N/mm^2 となっていることがわかる。

さらに深さ方向の分布から、超音波加工およびショットピーニングを行った試料では深さ約 15 μm までの領域で硬さが増しており、以降の深さでは一定の値となっている。このことから超音波加工およびショットピーニングを行った試料では表面から深さ 15 μm 程度まで加工硬化が生じている。この結果は 3.2 で確認した組織観察結果とよく一致しており、超音波加工およびショットピーニングの加工変質層は加工硬化によるものであるといえる。

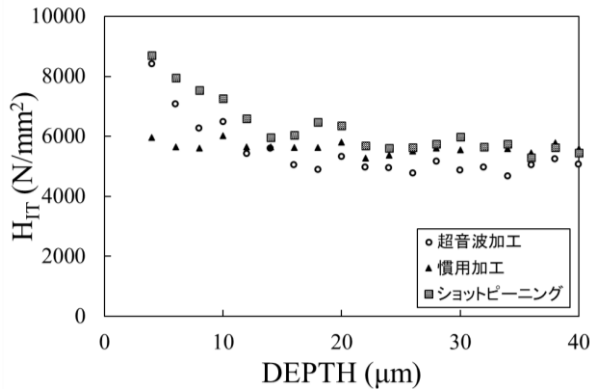


図 7 各試料のインデンテーション硬さ測定結果

4. 結言

航空機分野において用いられている析出硬化系ステンレス鋼 15-5PH を被削材として超音波加工、慣用加工で行った試料およびショットピーニングを行った試料を用意し、加工面の残留応力測定、イオンミリング装置と SEM を用いた断面の組織観察、ナノインデントを用いた断面の硬さ分布測定を行った。各試料におけるそれぞれの測定結果を比較することで、超音波加工が加工面に与える影響について評価した。その主な結果は、次のとおりである。

- (1) 表面近傍の残留応力を測定した結果、15-5PH に対して超音波加工を行うと慣用加工より大きな圧縮残留応力を加工面に付与することができた。その値はショットピーニングを行った試料と同等であった。
- (2) イオンミリング装置と SEM を用いた加工断面の組織観察を行うと、いずれの試料においても表面に加工変質層による微細結晶領域が確認できた。その厚さは超音波加工で約 17 μm 、慣用加工で約 7 μm 、ショットピーニングで約 15 μm であった。
- (3) ナノインデントを用いた加工断面の硬さ分布測定から、超音波加工およびショットピーニングを行った試料では慣用加工と比べて表面の硬さが増していることがわかった。また深さ方向の分布から硬さが増している層の厚さは約 15 μm であることがわかった。

以上の結果から、金属材料に超音波加工を行うことで、

慣用加工と比べて厚い加工硬化層が形成できることがわかった。その厚さはショットピーニングを行った試料と比較すると同等であり、また残留応力や硬さの測定結果においても超音波加工とショットピーニングでは非常に良く似た結果が得られた。このことは超音波加工によって、ショットピーニングと同様の表面改質効果が期待でき、工程レス化につながる可能性がある。超音波加工面の耐久性の評価や摩擦摩耗特性の評価については今後の検討課題としたい。

謝辞

本研究の加工実験の実施にあたり使用した超音波加工機 ULTRASONIC 20 linear は、DMG 森精機株式会社と奈良県との包括協定の一環として締結された使用貸借契約に基づき、貸与されたものです。ご協力を賜りました DMG 森精機株式会社の森雅彦 代表取締役社長をはじめ、関係部署の皆様にご感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村田一夫, 山口勝己, 足立和俊, 本田素郎, 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.15, p.27-36 (2001)
- 2) 森田陽亮, 奈良県産業振興総合センター研究報告, No.48, p.1-5 (2022).
- 3) 森田陽亮, 奈良県産業振興総合センター研究報告, No.49, p.1-4 (2023).
- 4) 金子朝子, 高須久幸, 表面技術, Vol.66, No.12, p.581-585 (2015).
- 5) 田中幸美, 計測と制御, Vol.58, No.4, p.298-305 (2019).