超音波加工が金属加工面の残留応力と粗さに与える影響

森田 陽亮*1)

Effects for Residual Stress and Roughness of Metal Machined surface Caused by Ultrasonic-Assisted Machining

MORITA Yosuke^{*1)}

金属材料の切削加工を行うと、通常は切削方向に弱い引張残留応力が生じることが一般的に知られている. 引張残留応力状態では疲労強度の低下につながるため、安全性の観点から高強度が要求される部品に対して は、切削加工後にショットピーニングなどの高い圧縮残留応力を付与する工程を追加することがある.しか し、ショットピーニング工程の追加は加工面の粗さの悪化につながる場合がある.そこで本研究では、炭素 鋼(S45C)および析出硬化型ステンレス鋼(15-5PH)を被削材として、切削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しつつ粗さの悪化を抑える方法を確立することを 目的として実験を行った.加工面の残留応力と算術平均粗さ Ra について評価し、超音波振動の有無が加工面 に与える影響について検討した.その結果、いずれの被削材でも超音波加工を行うことで切削方向に対して 慣用加工より 300 MPa~400 MPa 大きな圧縮残留応力を付与することができた.一方、算術平均粗さ Ra につ いては超音波加工を行った方が 60 %~70 %増加したが、加工面をさらに鏡面ショット研磨加工することで、 圧縮残留応力を維持しつつ粗さの改善が可能であることがわかった.

1. 緒言

金属材料の加工において、切削加工は最も多く行われて いる機械加工方法の1つである.一般に機械加工では加工 物の寸法精度や粗さなどに注目されるが、近年ではそれら に加えて加工面の残留応力が重要視されている.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、強度の低下につながる. そのため高強度や 高寿命が要求される部品に対しては引張残留応力を除去し, 圧縮残留応力を付与することが求められ、そのための手法 の1つとしてショットピーニングが後工程で追加されるこ とがある.ショットピーニングは無数の球状粒子で叩くこ とにより加工面の硬さが増すとともに圧縮残留応力を付与 でき,これにより耐摩耗性向上,疲労強度向上などが期待 できるが、一方で無数の衝突痕によって粗さが悪化してし まう.また、ショットピーニングは大きな設備を要するこ とが多く、コストの増加にもつながる.このため、切削加 工の段階で圧縮残留応力を付与しつつ加工面性状の悪化を 抑えられる技術が求められる.

一方,切削工具に超音波振動を付与した超音波加工を利用することで加工面に圧縮残留応力を付与できることが知られているが^{2),3)},超音波振動を利用した金属材料のフラ

*1) 機械・電気・材料グループ

イス加工面における残留応力および粗さについて評価した 例は少ない.特に粗さに関しては,超音波加工の方が超音 波を付与しない加工(慣用加工)よりも粗さの値が小さく なるという報告がある一方で²⁾,工具の超音波振動が加工 面に転写される場合があることが報告されており^{4,5)},そ れによる粗さの悪化が懸念される.

そこで本研究では、金属材料を切削加工する段階で圧縮 残留応力を付与しつつ粗さの悪化を抑える方法を確立する ことを目的として、超音波加工を利用した加工実験を行っ た.被削材として炭素鋼(S45C)と析出硬化系ステンレス 鋼(15-5PH)を用意し、スクエアエンドミルを用いた溝加 工を超音波加工および慣用加工にて実施した.それぞれの 加工面を残留応力と算術平均粗さ Ra の観点から評価し、 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,一般的な炭素鋼(S45C) と析出硬化系ステンレス鋼(15-5 PH)の2種類を用意した. 近年,航空機産業において需要が拡大している15-5 PH は 耐腐食性能や耐疲労特性に優れている.この15-5 PH は航 空機産業以外ではなじみの少ない金属材料であるが,その 加工特性について検討することは,航空機部品をはじめと する様々な製品の加工を行うにあたり有用な情報となる.

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.この超音波加工機は、専用の工具ホルダ内に誘 導コイルとピエゾ素子が埋め込まれており、また主軸端面 に固定された誘導コイルが存在する.超音波加工を行う際 は主軸端面のコイルに高周波電圧を印加してホルダ内のコ イルに誘導電流を発生させることでピエゾ素子を刺激し、 工具軸方向の物理的振動に変換することで超音波振動を発 生させている.超音波振動の発生メカニズムについて模式 的に示したものを図1に示す.なお、超音波振動を利用し ない場合は一般的な HSK-E32 規格のホルダを使用するこ とが可能である.



工具は直径 6 mm の 2 枚刃超硬スクエアエンドミル(目 進工具株式会社製, MXH230)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 9 µmp-p,周波 数は約 30600 Hz という結果を得た.図1に示したとおり超 音波振動方向は工具軸方向であるため,工具底面が加工面 に与える影響が大きくなることが予想される.このことか ら,超音波加工および慣用加工で被削材上面に溝加工を行 い,それぞれの加工面に対して評価を行った.加工条件の 詳細を表1に示す.

表 1 加工条件	
切削速度	120.6 m/min
主軸回転数	6400 min ⁻¹
送り速度	170 mm/min
切込量	0.3 mm
切削油	水溶性
超音波振動振幅	9 μmp-p
周波数	30600 Hz

2.2 加工面の残留応力測定と粗さ測定

溝加工を行った各加工面に対して, 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.測定は工具パスの中心付近で行い,工具送 り方向に対しては並傾法で,それに垂直な方向(切削方向) に対しては側傾法でそれぞれ実施した.測定条件の詳細を 表2に,測定箇所の模式図を図2に示す.



また,各加工面に対して触針式の粗さ測定機(AMETEK 社製,Form Talysurf Series 2)を用いて粗さ測定を行った. 測定は基準長さ 0.8 mm,評価長さ 4 mm で行い,工具送り 方向の算術平均粗さ Ra の値を測定した.

3. 結果と考察

3.1 加工面の残留応力の測定結果

S45C, 15-5PH に対して超音波加工および慣用加工を行った加工面の残留応力測定結果について,工具送り方向の 測定結果を図3に,切削方向の測定結果を図4に示す.図 3,図4から,各被削材および各測定方向のすべてにおいて 超音波加工の方が慣用加工より大きな圧縮残留応力を付与 できていることがわかる.超音波加工面と慣用加工面の残 留応力の差を見ると,S45C における工具送り方向では約 170 MPa,切削方向では約380 MPaであり,15-5 PH におい ては工具送り方向,切削方向ともに約360 MPa であった. 加工面における残留応力の発生要因は非常に複雑であるが, 特に材料除去に伴うせん断力,工具底面から加工面への押 し付け力,摩擦熱による熱応力,熱や加工力による金属組 織の相変態応力が主要な要因であると報告されている¹⁾. 今回の実験では工具が軸方向に超音波振動していることか ら,工具底面が加工面を叩く作用がはたらき,下方向への 押し付け力が慣用加工よりも増加したことからより大きな 圧縮残留応力を付与できたと考えられる.また工具送り方 向と切削方向を比較すると,工具送り方向の方がより大き な圧縮残留応力が付与されている.これは,工具送り方向 では押し込み力による影響が大きい一方で,切削方向では 押し込み力による引張残留応力も生成されて相殺されるた めであると報告されている^{1),3,6}.

> 200 100 S45C 15-5PH 0 (MPa) -100-200 残留応力 -300 -400 -500 -600 □超音波加工 -700 ◎慣用加工 -800 工具送り方向の残留応力測定結果 図 3 200 100 S45C 15-5PH 0 残留心力 (MPa) -200 -300 -300 -500 -600 □超音波加工 -700 ☑慣用加工 -800 切削方向の残留応力測定結果 図 4

3.2 加工面の粗さの測定結果

S45C, 15-5 PH に対して超音波加工および慣用加工を行った加工面の算術平均粗さ Ra の測定結果を図 5 に示す. 図 5 から S45C, 15-5 PH ともに超音波加工を行った方が慣 用加工より粗さが悪化しており, Ra の値が S45C では約 63 %, 15-5 PH では約 75 %増加していることがわかる.こ の原因について調べるため,電子顕微鏡を用いて各加工面 の中心付近を観察した結果を図 6 に示す.図 6 から,慣用 加工では切削方向に沿って刃先の軌跡が残っており,超音 波加工ではそれに加えて工具送り方向に沿った痕跡が残っ ていることがわかる.超音波加工面に見られる工具送り方 向に沿った痕跡の間隔を画像から読み取ると約60µmであ った.一方,超音波振動の1周期の間に刃先が進む距離を 加工条件から算出すると,約66µmであり,画像から読み 取った値とよく一致する.このことから,超音波加工の画 像に残された痕跡は工具刃先の超音波振動を転写したもの であると推測され、この痕跡が追加されたことによって慣 用加工より Ra の値が増加したと考えられる.



3.3 加工面への鏡面ショット研磨加工の適用

ショットピーニングが加工面に与える影響は使用するシ ョットの球径や硬度,投射速度,カバレージ等,多くのパ ラメータに依存するが,加工面に1000 MPa 以上の圧縮残 留応力を与える一方で,算術平均粗さ Ra は1µm を超える 場合が多い^{7,8}. 今回の実験結果から,超音波加工によっ て付与できる圧縮残留応力はショットピーニングより小さ いが,加工面の粗さに関しては超音波加工の方がショット ピーニングより優位性があるといえる.しかしながら,超 音波加工面は慣用加工面より粗さが悪化しているため,こ れを改善することを目的として,本実験の加工面に対して さらに鏡面ショット研磨加工を適用した.

鏡面ショット研磨加工とは、ゴム等の弾性体にダイヤモンド砥粒を練り込んだ研磨剤を、加工物表面に滑らせながら吹き付ける研磨加工法である^{9~11)}.投射物が弾性体であるので加工面を傷つけることなく研磨でき、また複雑な3次元形状に対しても適用可能という利点がある.そこで、超音波加工によって付与した圧縮残留応力を損なうことなく粗さが改善することを期待して、S45Cおよび15-5PHの超音波加工面,慣用加工面に対して、精密鏡面研磨機(日本スピードショア株式会社製,YT-100)を用いて、コンベヤスピード70%,吐出時間90 secの条件で鏡面ショット研磨加工を行った.なお、研磨剤には粒度#3000相当のダイヤモンド粒子を使用した.その後、各加工面に対して同様に残留応力測定と粗さ測定を行った.

鏡面ショット研磨加工後の加工面の残留応力測定結果に ついて、工具送り方向の測定結果を図7に、切削方向の測 定結果を図8に示す.図3、図4と比較すると、超音波加 工によって付与された圧縮残留応力が損なわれずそのまま 維持されていることがわかる.また慣用加工に関しては鏡 面ショット研磨加工によってわずかに圧縮残留応力が増加 している.

次に算術平均粗さ Ra の測定結果を図 9 に示す. 図 5 と 比べると,S45C は 70 %以上,15-5 PH は 60 %以上の大き な改善効果が得られていることがわかる.なお過去の実験 から,鏡面ショット研磨加工を実施する前の粗さが Ra 2 µm を超えている場合,同じ条件で鏡面ショット研磨加工を行 っても 10 %程度の改善効果しか得られないことがわかっ ている¹²⁾.今回の結果で大きな粗さの改善効果を得られた のは,超音波加工面における粗さが Ra 1 µm 以下に抑えら れていたためであると考えられる.



図7 鏡面ショット研磨加工後の工具送り方向の 残留応力測定結果



4. 結言

一般的な炭素鋼(S45C)と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 (15-5 PH)をそれぞれ超 音波加工および慣用加工で溝加工を行い,加工面の残留応 力と粗さを比較することで,超音波加工が加工面に与える 影響について検討した.その主な結果は,次のとおりであ る.

- (1) S45C に対して,超音波加工によって慣用加工より大き な圧縮残留応力を付与することができ,その差は工具 送り方向に対しては約170 MPa,切削方向に対しては約 380 MPa であった.
- (2) 15-5 PH に対して, 超音波加工によって慣用加工より大 きな圧縮残留応力を付与することができ, その差は工 具送り方向, 切削方向ともに約 360 MPa であった.
- (3) S45C に対して超音波加工および慣用加工を行った加工 面の算術平均粗さ Ra の値はそれぞれ約 0.7 μm,約 0.4 μm であった.
- (4) 15-5PH に対して超音波加工および慣用加工を行った加 工面の算術平均粗さ Ra の値はそれぞれ約 0.5 µm,約

0.3 μm であった.

- (5) 鏡面ショット研磨加工を行った時の各加工面の残留応 力について,超音波加工面の残留応力は鏡面ショット 研磨加工を行う前の値を維持しており,慣用加工面の 残留応力は鏡面ショット研磨加工によりわずかに圧縮 側に推移することがわかった.
- (6) 鏡面ショット研磨加工を行った時の各加工面の粗さに ついて,鏡面ショット研磨加工を行う前と比較すると, 算術平均粗さ Raの値が S45C は 70 %以上, 15-5 PH は 60 %以上改善しており,大きな改善効果を得られるこ 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、 切削加工の段階で圧縮残留応力を付与しつつ粗さを Ra 1 µm 以下に抑えることができた. さらに、粗さについては慣 用加工と比較すると悪化しているが、その後に鏡面ショッ ト研磨加工を行うことで圧縮残留応力を維持しつつ粗さを 大きく改善できることがわかった.

5. 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 皆様に感謝の意を表します.

本研究において鏡面ショット研磨加 工に使用した精密鏡面研磨機は,公益財 団法人 JKA の機械振興補助事業により 導入・設置したものである.



参考文献

- 村田一夫,山口勝己,足立和俊,本田索郎,大阪府立産 業技術総合研究所報告,No.15, pp. 27-36 (2001)
- 2) 鬼鞍宏猷,神田敏和,大西修,佐島隆生,日本機械学会, Vol.75, No.757, pp. 2394-2398 (2009).
- 3) 水谷秀行, 渡邉幸一, 砥粒加工学会, Vol.64, No.11, pp.569-573 (2020).
- 嶋田慶太,平井拓弥,水谷正義,厨川常元,砥粒加工学 会,Vol.62, No. 1, pp. 39-44 (2018).
- 5) 新井亮一,水嵜英明,新井達也,丸山拓己,長野県工業 技術総合センター研究報告, No.14, pp. 38-41 (2019).
- 6) 水谷秀行, 若林三記夫, 日本機械学会, Vol.72, No.715, pp. 929-933 (2006).
- 7) 小川一義, 浅野高司, 日本材料学会, Vol.48, No.12, pp. 1360-1366 (1999).
- 8) 原田泰典, 佐伯優斗, 田中秀星, 砥粒加工学会, Vol.61, No.6, pp. 326-330 (2017).
- 9) 波田野英十, 機械技術, Vol.52, No.12, pp. 39-43 (2004).
- 10) 山下健治, 機械技術, Vol.58, No.13, pp. 34-36 (2010).
- 高井一輝, Mohd Nizar, 上村正雄, 福本昌宏, 砥粒加工 学会誌, Vol.57, No.4, pp. 253-258 (2013).
- 森田陽亮,三木靖浩,杉山友明,杉原雅彦,奈良県産業 振興総合センター研究報告, No. 47, pp.5-10(2021).