

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（第2報）

～ボールエンドミルを用いた傾斜加工面の評価～

森田 陽亮^{*1)}

Effects for Residual Stress and Roughness of Metal Machined Surface

Caused by Ultrasonic-Assisted Machining (2nd Report)

～Evaluation of Tilted Machined Surface Using Ball-Endmill～

MORITA Yosuke^{*1)}

近年、5軸加工機を用いた同時5軸加工が主流になりつつあり、金型などの多くの自由曲面を持った形状はボールエンドミルを用いて加工されている。加工面を評価する際には寸法精度や粗さが指標となることが多いが、それらに加えて残留応力もまた強度や寿命における重要な指標となる。そこで本報では析出硬化型ステンレス鋼（15-5PH）を被削材として、ボールエンドミル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、超音波加工を行うことで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た。また工具と加工面の傾斜角度が大きくなるにつれて付与できる圧縮残留応力の値が小さくなることがわかった。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大きな値となり、その原因は工具刃先の超音波振動が加工面に転写されることで縞模様形状が形成されたため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。近年では従来の平行3軸を制御した3軸加工だけでなく、回転2軸を加えた5軸加工機を用いた、5軸制御加工についても広く実施されている。5軸加工機を使用する利点としては、回転軸を利用して加工面を割り出すことでワークのチャッキングの手間が減少する、加工形状によっては適切な角度から工具を接近させることで工具の突き出し量を短くしてびびり振動の抑制ができる、同時5軸加工によって3軸加工では不可能な複雑形状の加工ができる等が挙げられる。特に同時5軸加工では自由曲面を加工する場合が多く、そのため使用する工具にはボールエンドミルを選ぶことが一般的である。ボールエンドミルを用いた同時5軸加工に関しては黎明期から多くの研究がなされている¹⁾²⁾。

加工物の良、不良を評価する際には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³⁾。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る。前報では工具に超音波振動を付与できる超音波加工機を使用して、スクエアエンドミルに工具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報告した⁴⁾。この結果はスクエアエンドミルを使用する3軸加工に対して適応可能であるが、前述の通り複雑形状の加工にはボールエンドミルを用いた同時5軸加工が必要になる場合が多い。

そこで本研究では、超音波加工を利用した圧縮残留応力の付与効果を同時5軸加工に応用することを想定し、ボールエンドミルを用いて切削加工の段階で金属材料に圧縮残留応力を付与することを目的として加工実験を行った。被削材として析出硬化系ステンレス鋼（15-5PH）を用意し、ボールエンドミルを用いた溝加工実験を超音波加工および慣用加工にて実施した。同時5軸加工の際は工具が加工面に対してさまざまな姿勢になることを考慮し、実験では加工面に対する工具の傾斜角度を変えて加工を行い、それぞれの加工面を残留応力と算術平均粗さ Ra の観点から比較した。

*1) 機械・電気・材料グループ

2. 実験方法

2.1 被削材と加工条件

本研究で使用される被削材として、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3mm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。同時5軸加工の際は工具を加工面に対して傾斜させて切削速度が速くなる箇所での加工が多いため，図1のように工具を加工面に対して0°，30°，45°，60°傾斜させて加工実験を行った。加工条件の詳細を表1に示す。

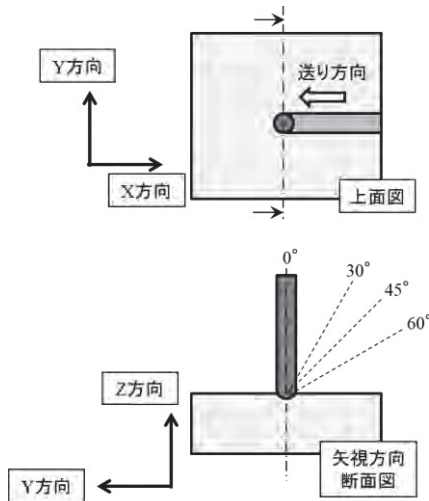


図1 溝加工時の工具と被削材の模式図

表1 加工条件

主軸回転数	4800 min ⁻¹
送り速度	540 mm/min
切込量	0.3 mm
切削油	水溶性
超音波振動振幅	7 $\mu\text{m-p}$
周波数	30500 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，測定箇所を模式図を図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。

表2 残留応力測定条件

特性X線	Cr-K α 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1 mm
測定格子面	Fe(211)
管電圧	40 kV
管電流	40 mA

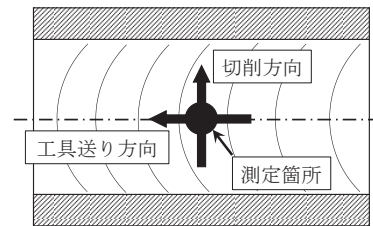


図2 測定箇所の模式図

3. 結果と考察

3.1 加工面の残留応力の測定結果

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，各傾斜角度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。また超音波加工における傾斜角度と残留応力との関係を見ると，工具送り方向，切削方向ともに傾斜角度が大きくなるにつれて付与される圧縮残留応力の値が小さくなっていることが分かる。加工面における残留応力の主な発生要因として，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などが挙げられる³⁾。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，傾斜角度が大きくなるにつれて加工面の法線方向の振動成分が小さくなり，工具底面が加工面を叩く作用が弱くなったと考えられる。ボールエンドミルの先端部分は周速が極めて遅く，加工面のむしれ等によって面粗度の悪化や工具寿命の低下につながるので実際の加工では避けることが多い。このことから，ボールエンドミルを使用した超音波加工を利用して加工面に圧縮残留応力を付与する場合は，加工面に対して工具を傾斜させつつも傾斜角度は出来るだけ小さくすることが望ましいと考えられる。

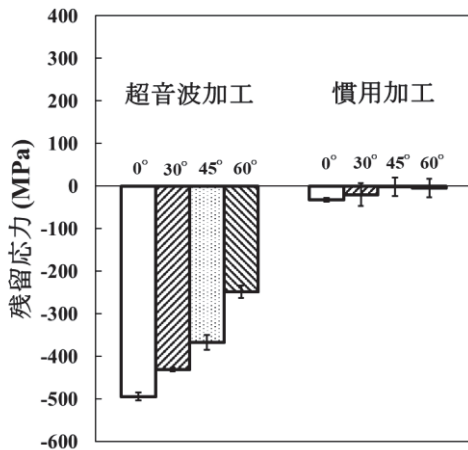


図 3 工具送り方向の残留応力測定結果

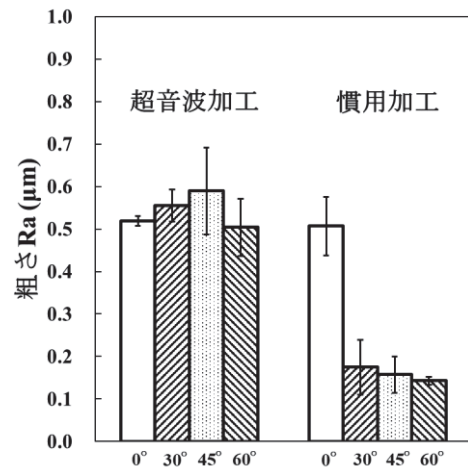


図 5 加工面の粗さ測定結果

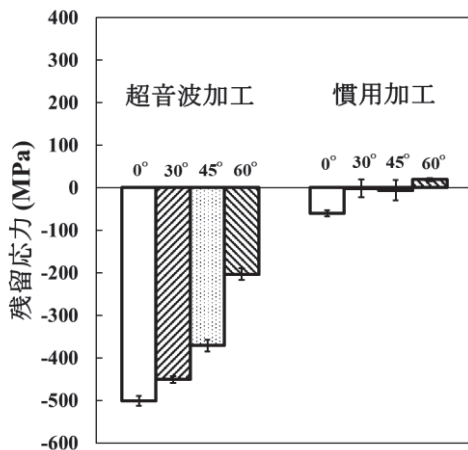


図 4 切削方向の残留応力測定結果

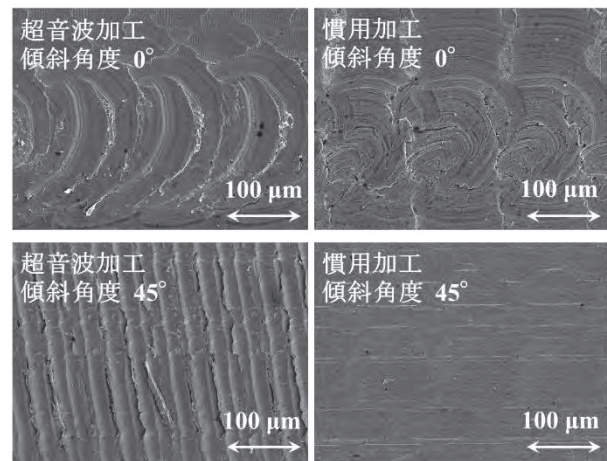


図 6 加工面の電子顕微鏡像

3.2 加工面の粗さの測定結果

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 の測定結果を図 5 に示す。この図を見ると慣用加工を行った加工面では傾斜角度が 0° の場合のみ Ra の値が 0.5 μm となっており、それ以外の傾斜角度での値よりも大きくなっている。前述の通り傾斜角度が 0° の場合は周速が極めて遅いボールエンドミルの先端部分を用いて加工したことが原因で粗さが悪化していると推測される。一方、超音波加工を行った場合は傾斜角度によらず Ra の値が 0.5~0.6 μm となっている。前報ではスクエアエンドミルを用いた実験において、工具の超音波振動が加工面に転写され、慣用加工面よりも超音波加工面の方が Ra の値が大きくなることを報告した⁴⁾。今回の実験においても同様の現象が起きていると推測され、確認のために電子顕微鏡を用いて各加工面の中心付近を観察した。観察結果のうち、傾斜角度 0° と 45° のものを図 6 に示す。まず慣用加工面の観察結果を見ると、傾斜角度 0° の画像では回転中

心であるボールエンドミルの先端部周辺での加工が原因と思われる渦巻状の痕跡が確認できた。この痕跡によって粗さの値が大きくなったと推測される。また傾斜角度 45° の画像では工具の回転中心から離れた点で接触することで切削方向が統一されており、滑らかな加工面となっている。一方、超音波加工面の観察結果を見ると、傾斜角度 0° の画像では慣用加工と同様の痕跡が見られるが、傾斜角度 45° の画像では等間隔の縞模様が形成されていることが分かる。ここで、主軸回転数を $N \text{ min}^{-1}$ 、工具半径を $R \text{ mm}$ 、超音波振動周波数を $f \text{ Hz}$ 、傾斜角度を θ として、超音波振動 1 周期あたりの工具刃先の移動量 $L \text{ μm}$ を次式により求めた。

$$L = \frac{N}{60} \times 2\pi R \sin\theta \times \frac{1000}{f}$$

本実験における加工条件を上式に当てはめると、傾斜角度 45° における L の値は約 35 μm となり、図 6 で見られた縞模様の間隔とよく一致する。このことから、この縞模様は工具刃先の超音波振動が加工面に転写されたものであり、

超音波加工面の粗さの値が慣用加工面に比べて大きくなったのはこの縞模様が形成されたためであることが分かる。なお、傾斜角度 30°, 60°の場合でも同様の観察結果が得られた。

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、ボール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で行った。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) 15-5PH に対して、ボールエンドミルを用い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。
 - (2) 超音波加工を行った場合、工具の傾斜角度によって付与される圧縮残留応力の値が変化し、傾斜角度が小さくなるにつれて大きな圧縮残留応力が付与された。
 - (3) 超音波加工を行った加工面の算術平均粗さ R_a の値はいずれの傾斜角度においても約 $0.5 \mu\text{m}$ であった。一方慣用加工を行った加工面の算術平均粗さ R_a の値は傾斜角度が 0° の場合は約 $0.5 \mu\text{m}$ で、傾斜角度が 30° , 45° , 60° の場合は約 $0.2 \mu\text{m}$ であった。
 - (4) 加工面を電子顕微鏡で観察すると、傾斜角度が 0° の場合は超音波加工面と慣用加工面のいずれにおいてもボールエンドミルの先端部分による渦巻状の痕跡が確認された。それに対して工具を傾斜させた場合、慣用加工面では平滑な面が見られた一方で、超音波加工面では工具刃先の超音波振動を転写した縞模様が確認された。
- 以上の結果から、ボールエンドミルを用いた傾斜面加工を行った場合でも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することができた。また、その場合は加工面に対してボールエンドミルを傾斜させつつも傾斜角度はできるだけ小さくすることが望ましいことがわかった。このことは同時 5 軸加工に対して超音波振動を、残留応力付与の目的で応用する余地があることを示唆している。今後は同時 5 軸加工 においても超音波加工が与える影響について検討を進めていく。

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、関係部署の皆様へ感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山田誠, 田中文基, 近藤司, 岸浪建史, 精密工学会誌, Vol73, No. 5, pp.563-567 (2007)
- 2) 是田規之, 江川康夫, 黒田文基, 渡部健, 伊井良治, 精密工学会誌, Vol59, No. 9, pp.1537-1542 (1993)
- 3) 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)
- 4) 森田陽亮 奈良県産業振興総合センター研究報告, No.48, pp.1-5 (2022).