圧縮残留応力生成工具による加工表面層の残留応力制御*

瀬川俊明** 笹原弘之*** 石川達郎† 村瀬寛恭† 堤 正臣***

Control of the Residual Stress within a Machined Surface using a Tool for Compressive Residual Stress Generation

Toshiaki SEGAWA, Hiroyuki SASAHARA, Tatsuro ISHIKAWA, Hiroyuki MURASE and Masaomi TSUTSUMI

The purpose of this study is to control the residual stress within a machined surface layer of aluminum alloy by a newly developed cutter. The developed cutter has cutting edges for material removal and a projection pin for a burnishing-like process. The effect of the machining conditions such as cross feed width, pin protruding length and feed rate on the residual stress within the machined surface layer was investigated. As a result, all kinds of cutting conditions conducted in this study can generate sufficient compressive residual stress within the machined surface. It was shown that the generated residual stress is most sensitive to the cross feed width. As the cross feed width becomes small, the compressive residual stress increases. It was also shown that the pin protruding length has the possibility to control the residual stress level, but its effect is smaller than that by the cross feed width. On the other hand, it was shown that the feed rate doesn't affect the residual stress state. In addition to the compressive residual stress, as the surface hardness within the machined surface layer also increases largely, it is expected that the fatigue strength and the resistance to stress corrosion cracking of the machined parts will be improved by using this tool.

Key words: cutting, compressive residual stress, work hardening, burnishing, cutting tool

1. 緒 言

航空機部品などの高い疲労強度及び耐応力腐食割れ性が要求される切削加工部品には、加工後の加工表面にショットピーニングが行われる場合が多い。これは切削加工によって加工表面層に生成される引張り残留応力を圧縮残留応力に変えることで切削加工部品の疲労強度及び耐応力腐食割れ性を向上させるためである。ショットピーニングは加工条件を変更することで加工表面層に安定的に圧縮残留応力を生成できる非常に有効な加工方法ではあるが、切削加工後の2次加工となるなどのデメリットもある。

そこで著者らは切削加工と同時に加工表面層に大きい圧縮残留応力を生成できる工具の開発を行ってきた^{2,3)}。開発した工具は回転中心に切れ刃より微小に突き出したピンを有しており、このピンが回転しながら送り運動することにより切削加工表面を押しならし、塑性変形させることで加工表面層に大きい圧縮残留応力を生成させる。前報²⁾では、開発工具の基本特性として、切削加工と同時に加工表面層に確実に大きい圧縮残留応力が生成できること、加工硬化によって加工表面近傍の硬度を母材硬度に対して130%以上硬化できること、それらと同時に加工表面の粗さが通常の切削加工部品と大差ない良好な状態で実現できることなどについて報告した。しかしながら、前報の開発工具に対する評価は単一の加工条件によるものであり、本工具を実加工に適用するためには、加工条件とその際に加工表面層に生成される残留応力との関係を明らかにする必要がある。

そこで本研究では加工条件と加工表面層に生成される残留応力の関係について調べ、本工具により加工表面層に生成される残留応力の制御性について検討した。実験では、開発工具を用いて、ピクフィード幅、ピン突き出し量及び送り速度を変化させた場合の残

留応力及び加工表面層の状態を調べた。その結果、ピクフィード幅及びピン突き出し量を変化させることで加工表面層に生成される残留応力を制御できる可能性があることが分かった。本報告ではこれらの実験結果について報告する。

2. 残留応力の制御可能性とその要因

図1に前報²⁾で報告した圧縮残留応力生成工具を示す。この工具は市販の直径6mm、長さ70mm、3枚刃のエンドミルを改造して製作しており、底刃中心部に切削加工面を押しならすためのピンを有する。このピンは超硬合金製で、先端はR 3mmの球面となっている。なお、切れ刃部、ピンともにコーティングは行っていない。ピンは切れ刃から0.1mm突き出した状態で工具側面に設けた六角穴付きねじで固定される。

開発工具は切削と同時に底刃中心部にあるピンが回転と送りによって加工表面を押しならす。押しならされた加工表面は元の状態より伸ばされる。伸ばされた加工表面には、その下層から元の状態に戻そうとする力が作用するが、この力が圧縮残留応力となって加工表面層に残る。また、ピンが押しならしながら通過する両側面に盛り上がりが生じる場合には、外周切れ刃がこれを切削することで平滑性を維持できることも本開発工具の特徴である。

図2に本実験における圧縮残留応力生成工具の加工状態を示す。同図(a)はピクフィード幅を変化させた場合、(b)はピンの突き出し量を変化させた場合、そして(c)は送り速度を変化させた場合の

Fig. 1 Photographs of developed tool

* 原稿受付 平成 16 年 8 月 27 日

** 正 会 員 日本飛行機(株)(東京農工大学大学院)
(現, ジャイトコ(株); 富士市今泉 700-1)

*** 正 会 員 東京農工大学大学院 (小金井市中町 2-24-16)

† 学生会員 東京農工大学大学院

Fig. 2 Schematic of the deformation on the surface

Fig. 3 Experimental set up

加工状態をそれぞれ示す。それぞれの加工条件によって加工表面の押しならし状態が変化し、これに依存した残留応力が生成できると考えた。

図2(a)に示すように、ピックフィード幅が小さい場合には、ピンが加工表面を押しならすピッチが小となって加工表面の粗さとなる山が低くなるとともに、1パスで押しならす変形量は小さいが押しならす回数が増加することになる。これに対してピックフィード幅が大きい場合には、押しならす間隔が広がり加工表面の粗さとなる山は高くなるとともに、1パスで押しならす変形量は大きいが押しならす回数は減少する。また、ピン突き出し量の変化は、同図(b)に示すように加工表面層を軸方向に押しならす量を変化させる。さらに、同図(c)に示すように送り速度の変化は、単位時間当たりに押しならす量を変化させるが、最終的な加工表面全体の押しならし量は変化しない。以上のような加工条件の変化と加工表面に生成される残留応力の関係を調べた。

2.1 実験方法

実験材料には前報³⁾と同じく航空機用材料として多用されているアルミニウム合金7075-T651を使用した。本材料は亜鉛を多く含有している亜鉛系のアルミニウム合金で、引張り強度が570MPaと非常に高い。-T651は調質状態であり、溶体化処理後1.5%以上3%以下の永久ひずみを与える引張り加工によって残留応力を低減し、さらに人工時効硬化処理を行っていることを表す。したがって、実験材料は焼鈍状態の材料でない。このため、加工実験前でも素材自体が若干の残留応力を有することは不可避であるが、提案する工具により「加工後の表面層に生成される残留応力」には、ほとんど影

Table 1 Cutting conditions

Spindle speed	min ⁻¹	10000
Number of cutting edges		3
Feed rate	mm/min	1500, 3000, 9000
Axial depth of cut	mm	0.3
Cross feed width	mm	0.3, 0.9, 1.5
Pin protruding length	mm	0.05, 0.075, 0.1
Cutting fluid		Non-water-soluble type
Workpiece material		A7075-T651

Table 2 Measurement conditions of X-ray diffraction method

Measurement method		$\sin^2 \psi$
Target		Cr-K α
Collimator	mm	ϕ 2
Tube voltage	kV	40
Tube current	mA	30
Peak 2 θ	$^\circ$	139
Young's modulus	MPa	68890
Poisson's ratio		0.345
Stress constant	MPa	-167.117

響が無いことを予備的に確認した。なお、調質された材料を実験に使用するための形状に加工する際には、切削による残留応力の生成が最小になるよう考慮し、面加工時の軸方向切り込み量を0.03mm以下として加工を行った。

実験材料の固定状態及び加工方法を図3に示す。実験材料のサイズは長さ150mm、幅90mm、厚さ6mmで、4個のクランプを用いてテーブル状の治具に固定した。加工方法は基本的にエンドミルによる平面加工に準じたものである。素材の圧延方向に垂直な方向のピックフィード加工とし、実験材料の中心部分を同一方向に8~30パス、計約15mmの幅で加工した。なお、工具は加工面に対して常に垂直な状態で加工した。加工には主軸に5倍速の増速スピンドルを装着した3軸NCフライスを使用した。加工条件は表1に示すとおりであり、全ての加工において切削油剤を使用した。

加工表面層に生成された残留応力はPSPC微小部X線応力測定装置により測定した。表2に測定条件を示す。なお、コリメータ径を ϕ 2mmとし、加工表面の平均的な応力を測定した。測定位置は圧縮残留応力生成工具による加工範囲の中心部分とし、測定方向は送り方向とこれに垂直なピックフィード方向の2方向とした。深さ方向の分布を測定するための表面除去は、残留応力への影響を最小にするため、 ϕ 8mmのウィンドウを用いたウィンドウ法による電解研磨を行い、0.05mmのピッチで深さ0.5mmまで測定を行った。

2.2 加工条件と加工表面に生成される残留応力

図4に以下のように加工条件を変化させた場合の加工表面の残留応力を示す。同図(a)はピックフィード幅を、(b)はピン突き出し量を、(c)は送り速度をそれぞれ変化させた場合である。なお、変化した条件以外の加工条件は主軸回転数 10000min⁻¹、ピックフィード幅 0.3mm、ピン突き出し量 0.1mm、送り速度 3000mm/min をそれぞれ基準条件として設定した。なお、ピン突き出し量を変化させる実験については、開発工具を使用せず、予め切削加工した面にピン単体を設定量だけ押し下し押しならす実験を行った。したがってこの場合、ピン通過後の両脇に過大な盛り上がりが生じてもその部分の切削は行われていない。

図4に示すとおり、いずれの加工条件においても、加工表面には通常の切削では得られない高い圧縮残留応力が生成されていることがわかる。このように高い圧縮残留応力が生成できたのは、ピンによって加工表面層が押しならされた結果、その押しならされた加工表面層の下層から、加工表面を元の状態に戻そうとする力が作用するためと考えられる。

また、いずれの場合も生成された残留応力はピックフィード方向

Fig.4 Residual stress on the machined surface

Fig.5 Profile of the residual stress within the machined surface layer

で高い値を示している。その理由は、ピンの通過により材料がピンの左右に押しのけられるが、ピンはピックフィード分だけずれた位置を再び通過するため、材料がピックフィード方向に伸ばされる量がフィード方向よりも大きくなるためと考えられる。そのように考えると、同図(a)のようにピックフィード幅が小さいほど表面の圧縮残留応力は大きくなる事も理解しやすいように思われる。

一方、同図(b),(c)のようにピン突き出し量や送り速度を変化させても、加工表面の残留応力はあまり変化が無いことが分かる。このことについては、さらに残留応力の深さ方向分布と硬さの分布も含めて以下に検討する。

2.3 加工条件と残留応力の深さ方向分布

図5にピックフィード幅、ピン突き出し量及び送り速度を変化させた場合の加工表面層の残留応力分布を示す。同図(a)はピックフィード幅を変化させた場合の残留応力分布であるが、前述した加工表面だけでなく内部の残留応力分布もピックフィード幅により大きく異なっていることがわかる。ピックフィード幅を0.9mm, 1.5mmとした場合、圧縮残留応力のピーク位置は加工表面から0.025mm程度と極めて浅く、その下層では急激に引張り残留応力方向に移行する。また生成される圧縮残留応力もピックフィード幅0.3mmの場合と比較すると非常に低い値となっている。

一方、ピックフィード幅が最も小さい0.3mmの場合、圧縮残留応力のピーク位置は表面から0.1mm程度と他の条件と比較して深い位置にあり、かつその値も500MPa以上と非常に大きい値となっている。以上のように、ピックフィード幅による残留応力分布の変化は大きく、ピックフィード幅が大きくなる場合には生成される圧

縮残留応力は小さくなるとともに、ピークの位置が加工表面に近い極めて浅い位置になることが分かる。

同図(b)にピン突き出し量を変化させた場合の結果を示す。加工表面の残留応力にはあまり影響が見られなかったが、深さ方向の残留応力分布には、わずかながら次のような影響が見られる。ピン突き出し量が増加するのにしたがって、表面からのピークの位置が深くなり、生成される圧縮残留応力も大きくなる傾向にある。ピン突き出し量が小さい0.05mmの場合には、圧縮残留応力のピークが加工表面から0.05mm程度の位置にあり、その値は520MPa程度である。これに対して、ピン突き出し量が0.075mm及び0.1mmの場合には圧縮残留応力のピークが加工表面から0.075mm程度の位置にあり、その値も600MPaに近い値となっている。したがって、ピン突き出し量を変化させることで、加工表面層に生成される残留応力のピーク値とその深さをわずかではあるが変化させることが分かる。

同図(c)に送り速度を変化させた場合の残留応力分布を示す。圧縮残留応力のピークが送り方向、ピックフィード方向ともに加工表面から0.08mm程度の深さにあり、それより下層になるにしたがって緩やかに引張り残留応力方向に移行している。また、送り速度が変化しても残留応力の変化はほとんど見られず、異なった送り速度でも残留応力の分布状態はほぼ同じ形態となっている。これは、送り速度を変化させると一刃当たりの切削量は変化するものの、圧縮残留応力生成の主要因であるピンの通過に関しては、押しならしていく速度が変化しても加工表面における押しならし量及び加工後の加工表面の伸びがほとんど変化しないためであると考えられる。

Fig.6 Machining force components

Fig.7 Distribution of Vickers microhardness on the section of machined surface layer

2.4 加工条件と加工力

加工工具にとって加工力は性能の指標の一つでもあり、同時に加工力の大小と生成される残留応力との関連についても明らかにする必要があります。そこで、各条件における加工力を測定した。

図6に結果を示す。図中に示すX, Y, Zはそれぞれ送り方向加工力、ピックフィード方向加工力、軸方向加工力を表す。全ての加工条件において軸方向加工力が最も高い値を示しているのは本工具の特徴であるが、これ以外の方向における加工力は軸方向加工力と比較して非常に小さい値となっている。

同図(b)に示すピン突き出し量を変化させた場合の加工力が最も変化が大きい。当然ではあるが、軸方向加工力はピン突き出し量の増加とともに増加している。また、軸方向加工力と同様に送り方向加工力及びピックフィード方向加工力もピン突き出し量の増加とともに増加している。

同図(a), (c)はピックフィード幅及び送り速度を変化させた場合の加工力である。ピックフィード幅及び送り速度を変化させても加工力に大きな変化は見られない。ピックフィード幅が大となれば押しならす量も大きくなるため、加工力も大きくなると予想したが、大きな変化は見られない。これは、ピックフィード幅が小さい場合には、先行するピンの通過により加工硬化した加工表面を押しならすために加工力は大きめの値となり、ピックフィード幅が大きい場合には加工硬化量が小さい部分を押しならすために加工力は小さめとなると定性的には考えられる。加工硬化状態と加工量のバランスにより加工力があまり変化しないという結果が得られたと考えられる。

同図(c)に示す送り速度の変化に対する加工力の変化の要因としては、一刃当たりの切削量の変化およびピンによる塑性変形のひずみ速度の変化が考えられるが、送り速度が1500mm/min から9000mm/min に増加した場合でも加工力の増加は20N程度であり、変化としては非常に小さい。

2.5 表面の加工硬化

図7に加工後の加工表面層のマイクロビッカース硬さ分布を示す。設定した全ての加工条件において加工表面層に母材硬度を上回る硬化層が形成されていることが分かる。硬度が最も高い値となっているのは加工表面であり、その硬度は210~240HVとなっている。また、硬化層が形成されている深さはいずれも0.2mm程度である。今回の実験条件では、条件の違いによる加工硬化への差は見られなかった。

本工具では、ピンが回転しながら加工表面層を押しならす点が一般的なバニング工具^{4,7)}との違いであるが、予備的にピンを回転させない状態での加工表面の加工硬化状態と比較したところ、加工表面近傍では回転有りの場合の方が10~20HV程度高く、逆に加工表面から0.2mm程度の深さでは回転無しの場合の方が10HV程度高く、ピンの回転の有無により明確な違いがあることが分かっている。したがって、本報告で示した条件の範囲では、加工硬化量に対してはピンの回転に依存する部分が大きく、ピックフィードやピン突き出し量など他の条件の影響が相対的に小さくなっている可能性も考えられる。詳細については、今後の課題として有限要素法などの解析的な手法により、ピンによる表面層の変形状態と生成する残留応力の関係を調べる必要があると考えている。

2.6 加工表面の状態

図8に各加工条件で加工した場合の加工表面の状態を示す。同図(a)はピックフィード幅を変化させた場合の加工表面である。ピックフィード幅が小さい0.3mmの場合には、1パスごとにピックフィード幅でピンによって押しならされた痕が加工表面全面に見られる。これに対して、ピックフィード幅がより大きい0.9mm及び1.5mmの場合には、押しならし痕と切れ刃によって切削された部分が交互に見られる。これはピックフィード幅の増加によってピンが一度に押しならす溝形状の断面積が大となり、横方向に押し出されて盛り上がった部分を切れ刃が切削し

ているためである。同図(a)には切れ刃によって切削された部分及び押しならされた部分を矢印で示す。圧縮残留応力が生成された加工表面が切削によって部分的に除去される場合には、いわゆる削食と同様に加工表面の圧縮残留応力が平均的に低下すると考えられる。それによりピックフィード幅が大の場合には、図5(a)に示したように加工表面の圧縮残留応力が低下すると考えられる。

同図(b)にピン突き出し量を変化させた場合の加工表面を示す。既述のように、この場合のみ開発工具は使用せず、予め切削加工した面にピン単体を設定量だけ押下し、押しならしている。この加工面は同図(a)、(c)と比べて、押しならし痕が明確であり、かつ小さな傷が少ない滑らかな面となっている。これは、切れ刃とピンを両備する開発工具の場合、切削によって生成された切りくずがピンと加工物の間に入り込んでしまうことがあるが、ピン単体で押しならす場合には切りくずが存在しないので、滑らかな面が創成されていると考えられる。

同図(c)に送り速度を変化させた場合の加工面を示す。通常のエンドミルの場合、送り速度が大きくなると、対応してカッターマークは大きい幅で生成することになるが、本工具では加工表面はピンによる押しならし面となるため、送り速度が変化しても加工表面に明確な差は見られないことがわかる。

2.7 加工条件選定についての考察

以上の結果より、本報告の実験条件の範囲では、切削加工自体の加工能率は下がるものの、ピックフィード幅を小さくし、ピンによる加工表面の押しならしを密にすれば加工表面はより伸ばされ、生成される圧縮残留応力は増加することがわかった。また、圧縮残留応力を確保しつつ能率を高くするためには、ピックフィード幅を大とするより送り速度を大きくする方が好ましい事がわかった。その場合でも、加工面の幾何学的状態はほとんど変化しない事も本工具の特徴であると言える。

ピン突き出し量に関しては、わずか0.05mm程度のピン突き出し量でも、倍の突き出し量0.1mmの場合と大差のない圧縮残留応力が生成されることが分かった。この場合、両者において軸方向加工力は約3倍の差があることを考えると、0.05mm程度の付き出し量とするのが剛性のない製品などへの適用も含め実用的と考えられる。

また、切りくずがピンと加工物の間に入り込むことで、加工面の粗さを低下させていることが分かったので、切りくず排出性の優れた切れ刃形状とすることや切削油剤により切りくず除去を効果的に行うことも必要である。

3. 結 言

本報告では、残留応力生成工具による圧縮残留応力の制御性について検討した。その結果以下のような点が明らかになった。

- (1) ピックフィード幅を変化させることで加工表面の押しならし量及び伸びを変化させ、加工表面層に生成される残留応力を制御できる可能性を示した。ピックフィード幅を小とする方が表面および最大となる圧縮残留応力は増加する。

Fig.8 Photomicrographs of machined surface

- (2) ピン突き出し量0.05mmから0.1mmの範囲では、突き出し量を小とすれば加工力は低減するが、加工表面層に生成される圧縮残留応力には大きな差が生じない。ただし、突き出し量が小となるとわずかではあるが圧縮残留応力のピーク値は減少し、その位置は表面に近くなる傾向があることが分かった。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) (15760075)、財団法人実吉奨学会の援助により進めた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 例えば、ショットピーニング技術協会：ショットピーニングの方法と効果，日刊工業新聞社，(1997)。
- 2) 瀬川俊明，笹原弘之，石川達郎，堤正臣：圧縮残留応力生成工具の開発とその基本特性，2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2004) 605。
- 3) 瀬川俊明，笹原弘之，石川達郎，堤正臣：圧縮残留応力生成工具の開発とその基本特性，精密工学会誌，70, 6, (2004) 853。
- 4) F. Klocke, J. Liermann: Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38, 5-6, (1998) 419。
- 5) S. S. G. Lee, S. C. Tam, and N. H. Loh: Ball burnishing of 316L stainless steel, Journal of Materials Processing Technology, 37, Issues 1-4, February, (1993) 241。
- 6) Paul S. Prevey, Michael J. Shepard, Paul R. Smith: The Effect of Low Plasticity Burnishing (LPB) on the HCF Performance and Fod Resistance of TI-6Al-4V, 6th National Turbine Engine High Cycle Fatigue (HCF) Conference, Jacksonville, FL, March 5-8, (2001)。
- 7) M.H. El-Axir: An Investigation into Roller Burnishing, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, (2000) 1603。