

令和 2 年 7 月 5 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03160

研究課題名（和文）航空機構造用母材の大口径深穴加工に対するオービタルドリル切削の実用化

研究課題名（英文）Orbital drilling of large diameter deep holes in aircraft parts

研究代表者

松村 隆（Matsumura, Takashi）

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：20199855

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,300,000円

研究成果の概要（和文）：炭素繊維強化プラスチックとチタン合金の重積材に対する大口径の穿孔作業を対象とし、オービタル加工の切削特性を検討した。エネルギー解析法によってオービタル加工の切削力を精度よく予測できることを示した。オービタル加工にバレル工具を適用することで、仕上げ面粗さが改善され、穴内面の硬度が高くなる。大口径の穿孔では荒工程と仕上げ工程に分割することで、切りくずの排出性が改善され、工具損傷が抑えられる。また、真円度、円筒度、同軸度に関しては10 μm以下の高精度加工が可能となる。さらに、バレル工具を使用した場合に300 MPa以上の高い圧縮の残留応力が維持でき、疲労強度の向上が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機の中央翼の大口径の穴加工は、従来、ドリルによる下穴加工を繰り返していたが、オービタル加工によって工具を交換せずに所定の直径の穴加工が可能であることが期待されている。しかし、切削時の大きな負荷や切りくず処理、精度、仕上げ面粗さ、残留応力の観点で、実用化に対して課題が挙げられていた。この研究では、オービタル加工の切削現象を実験および切削シミュレーションによって検討し、適用工具の見直しと工程分割により、安定した切削作業が可能となった。これにより、航空機の製造工程の生産時間とコストが改善され、経済的な効果が得られることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study discusses the cutting process in orbital drilling of CFRP/Ti alloy stacks. The cutting force is predicted in a force model based on the minimum cutting energy. The hardness inside of the machined hole increases with improvement of the surface finish in orbital drilling using barrel tools. The orbital drilling operation should be divided into roughing and finishing processes in drilling of large diameter holes in terms of machining stability. The tool damage is controlled with improvement of the chip evacuation. Regarding the machining accuracy, the holes are drilled with roundness, cylindricity and coaxiality of less than 10 μm; and finished with compressive residual stresses of larger than 300 MPa in orbital drilling with the barrel tools. The orbital drilling in the finishing process is effective in fatigue life in terms of residual stress and hardness.

研究分野：切削・研削加工

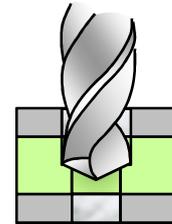
キーワード：機械工作・生産工学 切削加工 シミュレーション 炭素繊維強化プラスチック チタン合金 オービタル加工

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

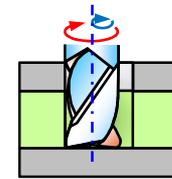
### 1. 研究開始当初の背景

近年、航空機の機体の構造用母材として炭素繊維強化プラスチック(CFRP)やチタン合金の使用率が高くなっている。航空機の主翼や胴体部品の製造においては、エンドミルやドリルによる切削加工が多く、CFRP やチタン合金の高エネルギーで高品位な切削加工技術が求められている。この中でも中央部翼の部品の製造では、CFRP とチタン合金を重ねた重積材に対する大口径深穴の穿孔作業に切削時間を要しているため、航空機の製造現場では難加工作業の一つとして、その改善に対する優先順位は極めて高い。

大口径の穴加工は、通常、Fig. 1(a)のように小径のドリルによる下穴加工を繰り返し、指定直径で仕上げられていた。これに対して、近年では Fig. 1(b)のようにエンドミルをオービタル(ヘリカル)運動させて穿孔することが可能となっている。これはエンドミルの自転と公転を組合せて、加工したい穴径に沿って螺旋状に工具を送る方法である。この加工法では、工程数が減って生産性が向上し、工具費も削減できるが、深穴加工ではエンドミルの突出しが長くなるため、工具がたわみやすく形状精度が低下する。また、接合部の疲労強度の観点から、ボルト締結部の穴内面の表層部に高い圧縮の残留応力を発生させることが要求されているが、オービタル加工で仕上げられた穴内周面の残留応力は、従来のドリル加工のそれより小さい。以上の問題により、中央翼の部品加工では、効果的なオービタル切削技術の開発が課題となっている。



(a) Drilling with pilot hole



(b) Orbital drilling  
Fig. 1 Drilling of large diameter hole

### 2. 研究の目的

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)とチタン合金の重積材の大口径深穴加工を対象とし、穴の加工精度と組立時のねじ締結における疲労強度の向上させるために、工具形状と切削工程について検討し、実用的なオービタル切削の指針を明らかにする。

### 3. 研究の方法

- (1) オービタルドリル切削に対する切削力シミュレーションを開発する。
- (2) チタン合金の穴内面に対して、高品位で高い圧縮の残留応力を生成する工具形状を検討する。
- (3) 加工工程および工具経路を検討して仕上げ面と加工精度を評価し、適用可能な工程を示す。

### 4. 研究成果

#### 4.1 切削シミュレーションの概要

エネルギー解析法によるエンドミルの切削力シミュレーション<sup>[1]</sup>では、Fig. 2 のように三次元の切りくず生成過程を切削速度と切りくず流出速度を含む断面における二次元切削モデルの集積として考える。エンドミルやドリルの切れ刃を微小分割し、それぞれの分割領域の傾斜切削を切削速度と切りくず流出速度を含む面内の二次元切削モデルの重ね合わせと考える。切りくず流出方向は切削エネルギーが最小となる方向に決定

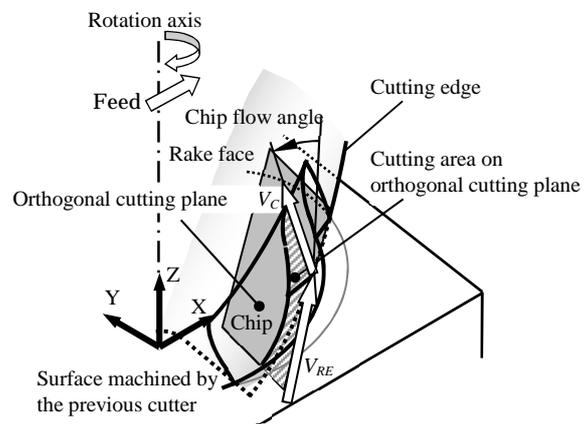


Fig. 2 Chip flow model

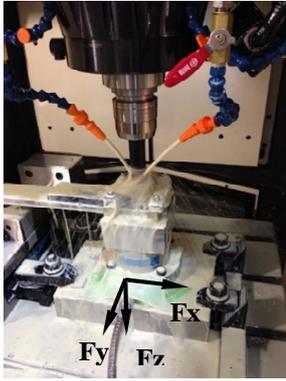


Fig. 3 Cutting test



Fig. 4 Orbital tool

Material	Thickness
CFRP	12.4 mm
Ti alloy (Ti6Al4V)	10.3 mm
Pilot hole	None
Tool materials	Cemented carbide
Tool diameter	25 mm
Spindle speed	600 rpm
Orbital revolution	10 rpm
Axial feed	25 mm/min
Lubrication	Water soluble

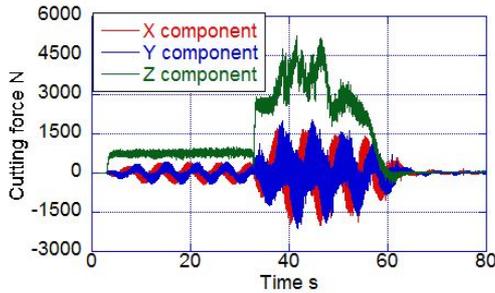


Fig. 5 Cutting force in clockwise rotation

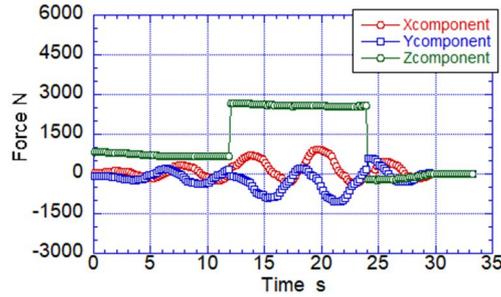


Fig. 6 Cutting force simulation

され、このモデルに基づいて切削三分力を予測する。

#### 4.2 オービタル加工における切削力

Fig. 3 のように板厚 10 mm のチタン合金(Ti6Al4V)に板厚 12.4 mm の炭素繊維強化プラスチックを重積し、Fig. 4 の直径 25 mm のオービタル加工用エンドミルによって、Table 1 の切削条件で軸方向に 1 回の送りで直径 37 mm の穴を空け、切削力を測定した。Fig. 5 は工具中心を時計回り回転させた時の切削力の測定値であり、Fig. 6 は切削力のシミュレーションである。これらは Fig. 3 に示す座標系に対して、工具が受ける力で示している。Fig. 5 では、チタン合金層の切削開始後に工具が欠損したため、スラストが高くなっている。Fig. 6 では解析時間を短縮させるため、チタン合金と炭素繊維強化プラスチックの板厚を 10 mm とし、工具 1 回転ごとに切削力を計算している。切削力成分は Fig. 5 とほぼ同様であり、シミュレーションの妥当性が確認できる。

#### 4.3 オービタル切削における工具形状の検討

オービタル切削に対する工具形状設計を視野に入れ、仕上げ面粗さと穴内面の硬さの観点から、Fig. 7 のように側刃に大きな曲率を有するバレル型工具を適用した。この工具は、材料側面を高いピックフィードで送っても、大きな曲率によってカブス高さが小さく、良好な仕上げ面が得られることが特徴である。また、大きな曲率によって仕上げ面近傍の切削厚さが小さくなり、表層部の塑性変形により穴内面の硬さを向上することが期待できる。

板厚 6 mm の炭素繊維強化プラスチックを板厚 4 mm のチタン合金に重積させ、Table 2 の切削条件でオービタル切削を実施した。Fig. 9 は Basic タイプのバレル工具の切削力であり、時計回りと反時計回りでは大きな違いはない。なお、切れ刃がチタン合金に侵入するとき、大きなスラストが観測される。重積材の境界部では、上層と下層の切りくず生成と流出方向が異なり、それらが干渉しているためである。Fig. 10 は、Fig. 9(a)に対する切削力のシミュレーションであ



(a) Basic (b) Offset

Fig. 7 Barrel tools

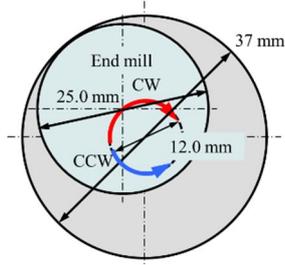
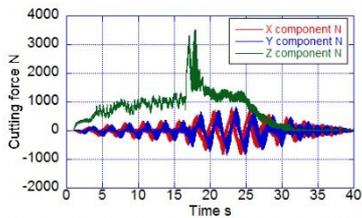


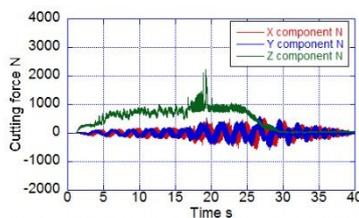
Fig. 8 Orbital drilling configuration

Table 2 Cutting parameters

<b>Spindle speed</b>	3600 rpm
<b>Cutting speed</b>	282.6 m/min
<b>Feed rate in rotation</b>	24 rpm; 0.084mm/tooth; 905 mm/min
<b>Feed rate in depth</b>	1 mm/rotation; 0.002 mm/tooth; 24 mm/min
<b>Radius in orbital path</b>	6 mm



(a) Clockwise



(b) Counterclockwise

Fig. 9 Cutting forces

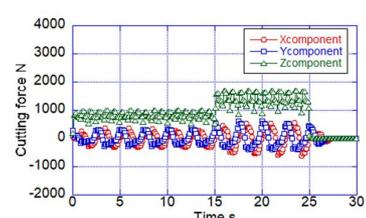
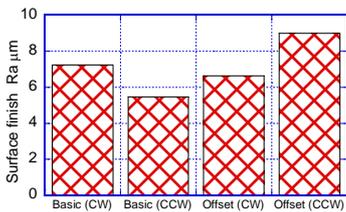
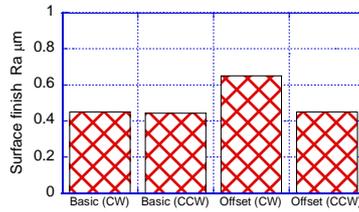


Fig. 10 Cutting force simulation



(a) CFRP



(b) Ti alloy

Fig. 11 Surface finishes of barrel tool

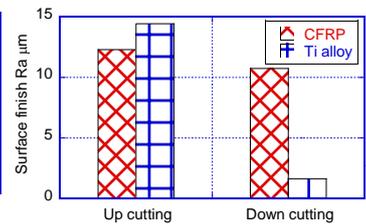


Fig. 12 Surface finishes of orbital tool

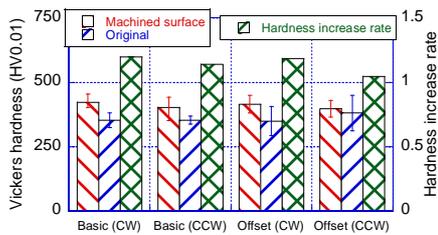
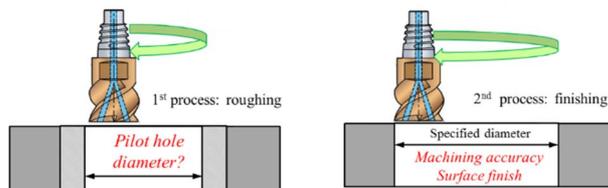


Fig. 13 Hardness changes



(a) 1<sup>st</sup> process: roughing (b) 2<sup>nd</sup> process: finishing  
Fig. 14 Cutting process of orbital drilling

る。同図より、各切削分力ともシミュレーションが測定値と一致していることから、シミュレーションの妥当性が確認できる。

Fig. 11 は炭素繊維強化プラスチックとチタン合金の仕上げ面粗さである。炭素繊維強化プラスチックでは Ra5 ~ 9 μm 程度で、チタン合金では Ra0.4 ~ 0.7 μm の仕上げ面粗さである。Fig. 12 は Fig. 4 のオービタル工具で切削した仕上げ面である。両者を比較すると、バレル工具の方が炭素繊維強化プラスチックについては若干良い仕上げ面が得られている。一方、チタン合金については 1 μm 以下となっていることから、バレル工具の適用によって、仕上げ面粗さが大幅に改善されている。Fig. 13 は穴内面の硬度をビッカース硬度試験によって測定したものである。加工後の穴内面の硬度が上昇するが、時計回りのオービタル切削の方が硬度の増加率は高い。

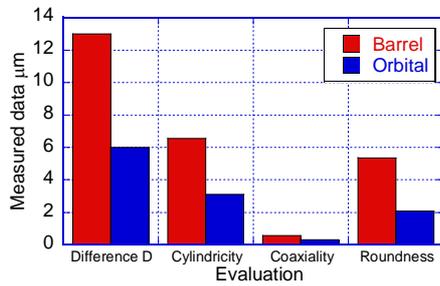


Fig. 15 Machining accuracies

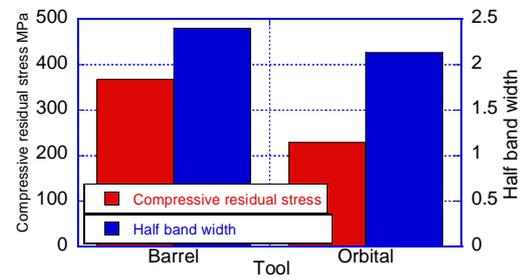


Fig. 16 Residual stresses

#### 4.4 高精度なオービタル切削に対する工程設計

オービタル加工では工具中心軸の軌道を制御することで、所定の直径を穿孔できる利点を生かし、Fig. 14 のように第一工程を荒加工としてオービタル運動で下穴を穿孔し、第二工程で穴側面を所定の寸法で仕上げるように工程を分割した。

ここでは、オービタル加工用エンドミルとパレル工具に対して、チタン合金の切削における加工精度と残留応力を評価した。Fig. 15 は深さ方向に対する直径差、円筒度、同軸度、真円度について整理し比較したものである。

Fig. 16 は穴内面の円周方向の圧縮の残留応力と半価幅を示したものである。半価幅は表層部の結晶粒径と相関性があり、半価幅が大きいほど表層部の結晶が微細粒化していることを示している。パレル工具の圧縮の残留応力は、オービタル加工用エンドミルのそれより 100 MPa ほど大きくなり、表層部の微細粒化も進んでいる。

以上の比較によれば、加工精度の観点からはオービタル加工用エンドミルが良いが、穴内周面の残留応力の観点ではパレル工具の方が優位である。いずれにしても、本研究で実施したオービタル加工の荒工程と仕上げ工程の工程分割は、安定した切削と高精度な加工を実現するために不可欠なものと思われる。

#### 4.5 結論

炭素繊維強化プラスチックとチタン合金の重積材に対する大口径の穿孔作業を対象とし、オービタル切削による切削特性を実験および切削シミュレーションによって検討した。

- (1) 切削シミュレーションに関して、三次元の切りくず生成過程を切削速度と切りくず流出速度を含む面内の二次元切削の重ね合わせとして考え、切削エネルギーが最小となる方向に切りくずが流れるものとして切りくず生成モデルを作り、オービタル加工の切削力を予測できる。
- (2) パレル工具によるオービタル切削では、チタン合金の仕上げ面粗さに対して顕著な効果がある。穴内面の表層部の硬度も上昇するため、疲労強度の観点からパレル工具が穴の仕上げに対して良い効果が得られる。
- (3) オービタル切削を下穴加工のための荒加工と仕上げ加工の2工程に分割することで、加工誤差 10 μm レベルの高精度な加工が可能である。また、パレル工具の切削では穴内周部の圧縮の残留応力が高い。

#### 引用文献

- [1] Matsumura, T. and Usui, E., "Predictive Cutting Force Model in Complex-shaped End Milling Based on Minimum Cutting Energy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 50, No. 5 (2010) pp.458-466.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tamura Shoichi, Matsumura Takashi	4. 巻 1896(090010)
2. 論文標題 Cutting force simulation in milling with multi-edges cutter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 pp.090010-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1063/1.5008117">https://doi.org/10.1063/1.5008117</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Nobuhiro SHIMIZU, Shoichi TAMURA, Takashi MATSUMURA
2. 発表標題 Cutting Process in Helical Milling of Aluminum alloy
3. 学会等名 Proceedings of The 17th International Conference on Precision Engineering（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----