

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 29 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820021

研究課題名(和文) 傾斜プラネタリ加工による次世代ボディパネル用複合素材穴あけ加工装置の開発

研究課題名(英文) Development of Inclined Planetary Milling System for CFRP body panel drilling of next generation automobiles

研究代表者

田中 秀岳 (Tanaka, Hidetake)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10422651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：傾斜プラネタリ加工とは、CFRPやチタン合金などの難削材に対して効果的に穴あけを行う加工である。工具の自転運動に加え、主軸を傾斜させることで偏心軸回りの公転運動を行い、2つの運動を組み合わせることで穴あけ加工を行う。

本研究ではまず、傾斜プラネタリ加工の幾何学的な切削モデルを構築し、切削工具の運動が加工穴表面に与える影響について考察した。次に、切削を多く担う切れ刃の位置をシミュレーションするプログラムを作成した。CFRP及びチタン合金を対象とした試作機を製作し、その試作機を用いて加工実験を行うことで傾斜プラネタリ加工の切削性を評価した結果、バリおよび剥離の無い良好な穴あけが可能となった。

研究成果の概要(英文)：axes of cutting tool rotation axis and revolution axis. In the case of the inclined planetary motion milling, eccentric of the cutting tool rotation axis is realized by inclination of a few degrees from the revolution axis. Therefore, the movement of eccentric mechanism can be reduced by comparison with the orbital drilling because inclined angle is smaller than eccentricity of the cutting tool tip. As a result, eccentric mechanism can be downsized and inertial vibration is reduced. In the study, a geometrical cutting model of inclined planetary motion milling was set up. The theoretical surface roughness of the inside of drilled holes and cutting volume percentages on the cutting edge by use of two types cutting tool geometry were calculated based on the model. And cutting experiments using the new prototype for CFRP were carried out in order to evaluate the effect on machinability with change of cutting point atmosphere.

研究分野：加工・計測・機能性評価

キーワード：CFRP チタン合金 穴あけ加工 オービタル加工 傾斜プラネタリ加工 バリ 層間剥離

### 1. 研究開始当初の背景

近年、航空機の軽量化のための構造材として CFRP やチタン合金といった材料が注目を集めている。これらの材料は軽量で強度が高いという特性を持つが、難削材であるという問題を抱えている。

航空機の製作過程では、組立て現場において直接穴あけを行うことができる可搬型の加工機が必要とされている。このような状況に対する有効な穴あけ加工として、様々な加工方法が考案 1) ~ 7) されているが、実際の機体製造現場では、主にハーフインチ径以上の穿孔においてオービタル加工の普及 8) ~ 10) が進んでいる。しかし、オービタル加工は底刃中心部の押し込み作用が避けられない、公転による振動が抑制できないといった問題が挙げられる。

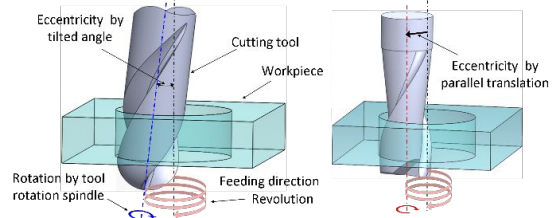
### 2. 研究の目的

ボール盤やマシニングセンタを用いた従来の穴あけ加工の場合、ドリルが工具中心軸回りに回転しながら加工穴の軸方向に送られることにより切削加工を行う。それに対して、オービタル加工の場合、エンドミル状の工具が従来の穴あけ加工と同様に工具中心軸回りの回転である自転運動をすることに加え、工具中心軸に平行な偏心軸回りの回転である公転運動をしながら、穴の軸方向に送られる。工具径と加工穴径が同寸のドリル加工に対して、オービタル加工では加工穴径が工具径よりも大きくなる。そのため、工具及び加工面は断続接触となり、従来のドリル加工と比較し、細かい切り屑となる。したがって、切り屑の排出性が向上し、効果的に除去できるため、切り屑のからみによる加工穴内面及び工具への損傷を軽減でき、高品質な穴あけが可能となる。しかし、オービタル加工は、切削速度 0 点からの接触による切削抵抗の増大という問題がある。通常オービタル加工にはエンドミル状の工具が用いられるが、通常、エンドミルの底刃中心部は切削速度が 0 となり、加工が行えない部分となる。しかし、切削原理上この部分から被削材に接触することになってしまい、切削抵抗が増大する恐れがある。これを避けるためには特殊な切れ刃形状を持った専用工具が必要となる。また、オービタル加工機には自転軸を平行に偏心させる機構が搭載されている。加工を行う際には、自転軸を偏心させた状態で公転させ、機構が一方に偏った状態で公転運動することになるため、慣性による振動が抑制できないという問題がある。

### 3. 研究の方法

傾斜プラネタリ加工は、オービタル加工と同様に工具の自転運動に加え、偏心軸回りの公転運動を組み合わせた加工であるが、工具を偏心させる方法が異なる。オービタル加工の場合、工具の自転軸は、公転軸に対して平行に偏心するため、工具及び自転ユニットが同等に偏心する。しかし、傾斜プラネタリ加工では、工具に傾斜を付けることにより、

工具先端から偏心させる。偏心した工具は、自転及び公転運動を行う歳差運動をしながら、穴の軸方向に送られることで穴あけ加工を行う。オービタル加工のように自転ユニットを同等に移動させる必要はなくなる。したがって、偏心機構の移動量も小さくて済み、機構の小型化が可能となる。さらに、偏心時の機構の偏りも少なくなるため、公転による振動を軽減できる。



(a) 傾斜プラネタリ加工 (b) オービタル加工

図 1. 傾斜プラネタリ加工とオービタル加工の違い

オービタル加工では、図 1(b) のように、工具回転中心である切削速度 0 の部分からの接触が避けられない構造であるが、傾斜プラネタリ加工では、図 1(a) のように底刃中心部を避けて、切れ刃の部分から被削材に接触し切削することができる。したがって、底刃中心部による押し込み作用がなくなり、切削力の軽減が可能である。さらに、専用工具が必要なくボールエンドミル等の汎用工具でも良好な切削が期待できる。

### 4. 研究成果

傾斜プラネタリ加工を実現するスピンドルの偏心機構として、多重円筒構造の機構を考案した。その構造モデルを図 3 に示す。本機構は工具自転用スピンドル、内部円筒、外部円筒から構成されている。内部円筒は外部円筒に対して傾いた状態で挿入されており、さらに自転用スピンドルが外部円筒と平行になる角度で内部円筒に挿入されている。偏心前の状態では、自転用スピンドルの中心軸と外部円筒の中心軸は一致している(図 2 左)。この状態から内部円筒を回転させ、外部円筒と内部円筒との位相角をずらすことで自転用スピンドルに傾斜がつき、工具先端が偏心する(図 2 右)。外部円筒と内部円筒の位相角を変化させ、任意の偏心量で内部円筒と外部円筒とを固定し、外部円筒ごと回転させることで、公転運動を行う。

考案した傾斜プラネタリ加工スピンドルの偏心機構は原理的にオービタル加工スピンドルよりアンバランス量が小さいため、公転運動による振動を低減できる。先行研究において製作したオービタル加工スピンドル及び傾斜プラネタリ加工スピンドルの 3 次元 CAD モデルを用いて簡易加速度シミュレーションを行った。図 3 に示すように、傾斜プラネタリ加工における方向の加速度は、オービタル加工に比べほとんど無視できる値であることが確認できた。

偏心機構及び加速度シミュレーション結果を基に各設計値を決定し、図 4 に示すよ

うな構造の試作機を製作した。試作機は多重円筒構造となっており、スピンドルユニットと内部円筒の間、外部円筒とケースの間にそれぞれラジアルベアリングが入っている。また、ケースの上部に公転用のモータが搭載されており、外部円筒をタイミングベルトで駆動する。偏心機構自体にはアクチュエータは付いておらず、手動で内部円筒と外部円筒の位相をずらし、任意の位置で固定することで偏心させることができる。CFRP は切削に伴い細かい切り粉が発生し、機器内に侵入することが問題となる。そこで、スピンドルが公転することにも考慮し、前面に蛇腹状のカバーを取り付けた。また、工具自転スピンドルは冷却用及びパージ用エアが常時内部から外に放出され切り粉が侵入しにくい構造となっている。

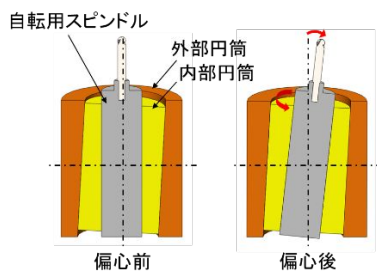


図2 偏心機構

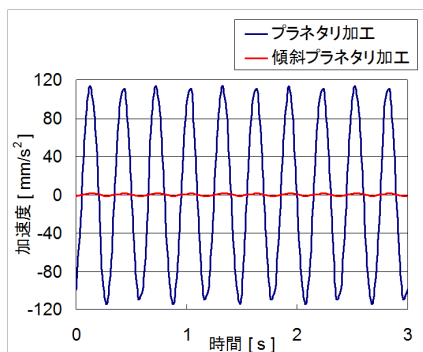


図3 公転による振動の違い

表1 試作機の仕様

最大工具自転回転数	60,000
最大公転回転数	600
工具自転スピンドル出力	1,200 W
公転スピンドル出力	200 W
最大偏心量	4 mm
最大穴あけ深さ	40 mm
乾燥重量	7.5 kg

#### 試作機の仕様

試作した傾斜プラネタリ加工スピンドルユニットの主な仕様を表1に示す。ケースにアルミニウム合金を使用し、軽量化した。実際の加工時には1軸ステージ上に本試作機を固定し、軸方向送りを行う。

工具形状は、傾斜プラネタリ加工の幾何学的な運動軌跡は工具軸の傾斜により偏芯を得るため、先端切れ刃の形状がボールである方が望ましい。

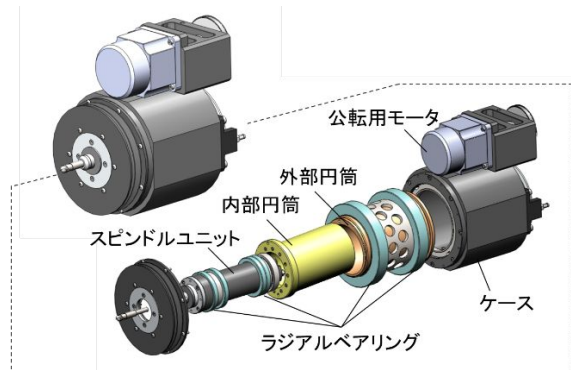


図4 試作機の構造

#### 加工実験

##### 実験条件

製作した試作機を用いて加工試験を行い、先行研究で製作したオービタル加工機の結果と比較した。装置の構成を図5に示す。被削材をジグに固定し、試作機を1軸アクチュエータによって移動させることで穴あけ加工を行った。工具自転回転数、公転回転数及び送り速度はそれぞれ独立して設定できるようになっている。試験条件を表2に示す。工具は傾斜、オービタル共に2枚刃の超硬ボールエンドミルを使用した。被削材はPAN系クロス材のCFRPを使用した。結果は本研究室で製作したオービタル加工機を使用して得られた先行研究の実験結果と比較した。また、傾斜プラネタリ加工では、偏心量を変えると、工具の傾斜角度が変化し、被削材に接触する切れ刃の位置が変化する。そこで、偏心量を1mm, 2mmと変化させたときの加工穴への影響を検証した。

試験結果の評価方法として、加工穴内壁の真円度、表面粗さを測定した。真円度の測定位置は加工穴端部(切削開始点側)から1.5mm, 2.5mm, 3.5mmの3点とした。表面粗さは加工穴円筒状表面の加工穴軸方向に円周を4等分する位置で4ラインを測定した。

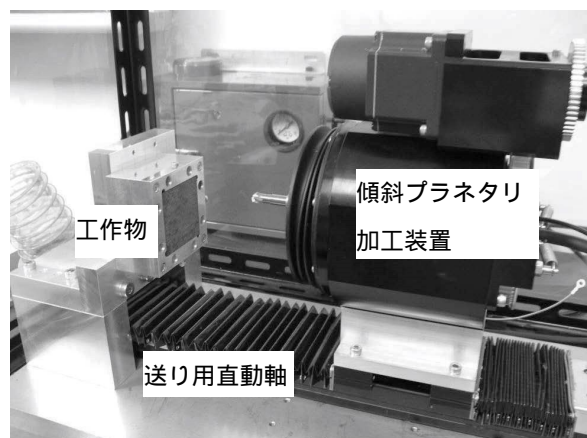


図5 実験時の構成

#### 実験結果

加工を行った工作物の外観を図6に示す。図6(a)の傾斜プラネタリ加工では目立ったバリや層間剥離も見られず、良好な結果を得た。一方、図6(b)のオービタル加工では出口側に若干のバリが認められた。

表2 実験条件

工具	ボールエンドミル
切れ刃数	2
工具径	8 mm
工具自転回転数	20,000 min
公転回転数	250 min
送り速度	60 mm/min
偏心量	1, 2 mm
工作物	PAN系 CFRP(クロス材)
工作物厚さ	5 mm

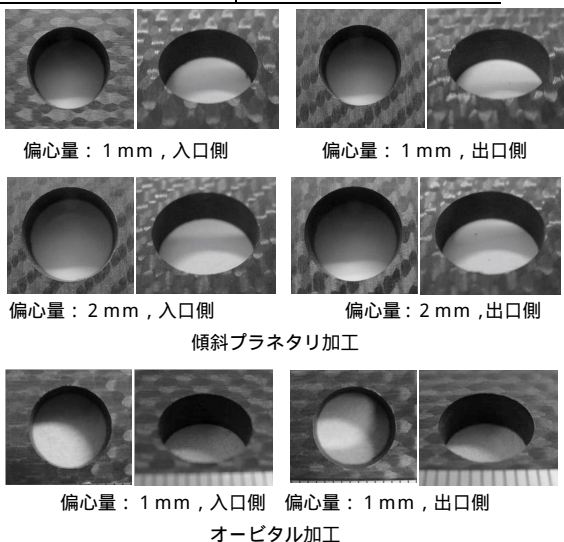


図6 加工後の工作物の外観  
表3 表面粗さ及び真円度の測定結果

	傾斜 : 1mm	傾斜 : 2mm	オービタル : 1mm
Ra mm	0.826	1.009	1.070
Rz mm	7.798	8.606	17.07
真円度 mm	6.225	8.359	6.055

加工穴内壁の表面粗さ及び真円度を測定した結果を表3に示す。算術平均表面粗さ及び最大高さ粗さにおいて、傾斜プラネタリ加工がオービタル加工に比べ良好な結果が得られた。真円度においては、偏心量1mmの条件下ではほぼ同等の結果となった。製作した傾斜プラネタリ加工スピンドルを用いた穴あけ加工では、偏心量を増加させると表面粗

さ及び真円度は共に低下する傾向となった。これは、原理的に偏心量が増加すると回転振れ、公転運動による振動が増加するためである。

切削力の測定

切削動力計（日本キスラー（株）、9256C1）を用いて傾斜プラネタリ加工時の切削力を測定し、オービタル加工との比較を行った。工作物を固定するジグを切削動力計に固定し、加工時の切削力を測定した。

偏心量は1mmのみとし、加工条件は真円度及び表面粗さ測定時の実験と同様とした。図7に示す切削力の測定結果より、オービタル加工と比較し傾斜プラネタリ加工は平均スラスト力が軽減されている。また、平均ラジアル力もオービタル加工と同等の値を示した。

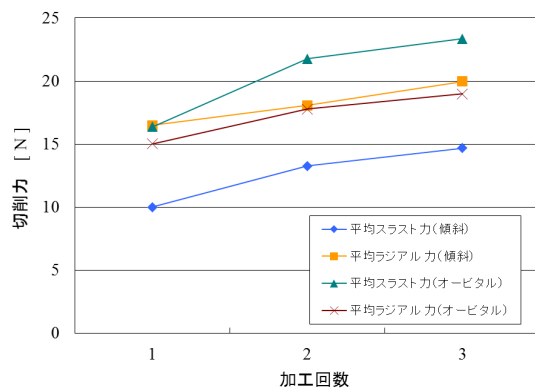


図7 切削力測定結果

高強度CFRPの加工

航空機材料に近い強度を持つ熱硬化性CFRPの穴あけ実験を行った。ファイバーはPAN系4種及びピッチ系1種とし、PAN系材料は単方向繊維材料とクロス織り繊維材料である。実験条件を表4に示す。工具形状は汎用のボールエンドミルとした。

(1) 目視による加工穴の観察結果

加工穴の観察のみでは、決定的な優劣を見出すことはできない。しかし、図8に示すように、UDT800材において顕著なバリの発生が確認できる。



図8 加工後の工作物の外観(CFRP)

(2) 表面粗さ及び真円度

表面粗さ及び真円度を測定した結果を表6に示す。繊維の比強度の高いUTD800やUDピッチにおいて悪化が目立つ結果となった。UD材よりもクロス材の方が良好な傾向を示

した。  
チタン合金の加工

表5に示す加工条件で傾斜プラネタリ加工装置を用いてチタン合金の穴あけ加工実験を行った。CFRPではドライで加工を行ったが、チタン合金ではドライの場合、工具刃先に溶融した工作物が凝着し穿孔不能であったため、MQLを併用した。表7に加工穴の測定結果を示す。図9に加工穴の外観を示すように、バリ等の無い良好な穴あけが行えた。

表4 実験条件

工具	ボールエンドミル
工具径	6 [ mm ]
切削方向	Up cut
工具自転回転数	28,000 [ min <sup>-1</sup> ]
公転回転数	250 [ min <sup>-1</sup> ]
送り速度	60 [ mm/min ]
切れ刃数	2 flutes
偏心量	2 [ mm ]
実験回数	4
潤滑	ドライ

表5 実験条件

工具	ボールエンドミル
工具径	10 [ mm ]
切削方向	Down cut
工具自転回転数	3,000 [ min <sup>-1</sup> ]
公転回転数	50 [ min <sup>-1</sup> ]
送り速度	5 [ mm/min ]
切れ刃数	4 flutes
偏心量	2 [ mm ]
実験回数	2
潤滑	MQL

表6 表面粗さ及び真円度の測定結果

	表面粗さ Ra [μm]	最大高さ粗さ Rz [μm]	真円度 [μm]
3K クロス	0.65	6.91	3.51
12K クロス	0.66	7.23	4.83
UD ピッチ	1.20	21.2	5.43
UDT700	0.43	4.12	1.83
UDT800	1.04	19.3	4.87

表7 表面粗さ及び真円度の測定結果

表面粗さ Ra [μm]	最大高さ粗さ Rz [μm]	真円度 [μm]
0.5	4.5	7.6



(a)入口 (b)出口側

図9 加工後の工作物の外観(チタン合金)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

- Hidetake TANAKA and Toma YOSHITA,  
“Machinability Evaluation of Inclined Planetary Motion Milling System for Difficult-to-cut Materials”, Key Engineering Materials, Vol. 656(2015) p. 320-327
- 田中秀岳, 太田和樹, 武田広貴, 滝澤亮, 柳和久: 炭素繊維強化プラスチックを対象としたプラネタリ機構による穴あけ加工に関する研究(第2報)-傾斜プラネタリ加工用スピンドルの開発- 精密工学会誌, Vol. 80 (2014) No. 3 p. 297-301
- 田中秀岳, 清水和也, 小幡慎司, 滝澤亮, 柳和久: 炭素繊維強化プラスチックを対象としたプラネタリ機構による穴あけ加工に関する研究(第1報)-工具形状の影響とCFRPの切削特性- 精密工学会誌, Vol. 79 (2013) No. 8 p.761-765.

[学会発表](計6件)

- Hidetake Tanaka and Toma Yoshita,  
“Machinability Evaluation of Inclined Planetary Motion Milling System for Difficult-to-cut Materials”, Proc. of Int. Conf. on Machining, Materials and Mechanical Technologies 2014, Taipei,

- Taiwan, (2014)
2. Hidetake TANAKA, Koki TAKEDA and Kazuki OTA, "Machinability of CFRP by Inclined Planetary Milling", Proc of 3rd Int. Sym. On Engineering, Energy and Environment, Bangkok, Thailand (2013) 344-349
  3. Kazuki OTHA, Hidetake TANAKA, Ryo TAKIZAWA and Kazuhisa YANAGI, "Development of Tilted Planetary Drilling System", Proc of 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Zurich, Switzerland, (2012), 710 – 711
  4. 佐井峰史, 田中秀岳, 柳和久, " 傾斜プラネタリ加工装置を用いたチタン合金の穴あけに関する研究 ", 精密工学会 2014 年度秋季大会
  5. 太田和樹, 田中秀岳, 柳和久, " 傾斜プラネタリ加工装置の開発 ", 精密工学会 2012 年度秋季大会
  6. 清水和也, 田中秀岳, 柳和久, " 難作材を対象としたプラネタリドリリング用工具の運動解析及び摩耗観察 ", 精密工学会 2012 年度春季大会

〔図書〕(計2件)

1. 田中秀岳 他, 大河出版, ツールエンジニア, 2015, No.1, 一部
2. 田中秀岳, 株式会社エヌ・ティー・エス, 適用拡大する CFRP の成形・加工・リサイクル技術最前線, 一部

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 穴あけ加工装置

発明者: 田中秀岳

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2011-164309

出願年月日: 平成 23 年 7 月 27 日

特許査定通知日: 平成 27 年 9 月 25 日

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長岡技術科学大学 工学部 機械系 助教 田中秀岳 (TANAKA Hidetake)

研究者番号: 10422651