

# 切削とダイレスフォーミングを複合した 新しい逐次加工技術の開発

日本工業大学 基幹工学部 機械工学科  
教授 二ノ宮 進一  
(平成 28 年度 一般研究開発助成 AF-2016013)

キーワード：切削加工，変形加工，逐次加工，複合加工機，ダイレスフォーミング

## 1. 研究の目的と背景

工作機械は、マシニングセンタ機能と旋盤機能を持つ複合加工機が一般的となり、さらに、研削機能やレーザ加工機能など、「除去加工」+「除去加工」の複合化は多くの取り組み例がある<sup>1)</sup>。また、アディティブ・マニュファクチャリング (AM) 等の「付加加工」を搭載した工作機械が市販されている。しかし、「除去加工」と「変形加工」の複合例は少ない<sup>2)</sup>。近年の切削加工用工作機械の複合化について、加工法による分類として整理したものを図 1 に示す。本研究は、この新しい複合加工技術の開発に関する基礎的研究である。

切削加工は、工具軌跡を指示することで工作物を任意の形状に成形できる。塑性加工は、工作物に弾性限度以上の外力を加えて形状を変化させて目的の形状に成形する方法であり、鍛造、金属プレス、圧延加工、押出加工、絞り加工など種々の方法がある。著者は、この切削による除去加工と塑性加工(変形加工)を複合させて逐次行うことで、これまで不可能であった形状を有する部品加工が実現できると考えた。

本研究では、除去加工だけでは難しい形状の加工を実現するため、「除去加工」と「変形加工」を複合化させ、これを逐次行う技術を提案した。まずは基礎実験として、切削と曲げ、あるいは切削と張出し成形の複合化を試み、任意形状の成形に向けて基本的な加工特性を調査した。次に応用展開として、旋削による六角穴加工と六角穴逐次張り出し成形の複合の可能性を検討した。

## 2. 切削・変形複合逐次加工の概要

切削機械で変形加工を実現するためには、素材の変形強度よりも工作機械剛性の方が十分に大きい必要がある。提案する「切削・変形複合逐次加工」は、被加工材を切削除去して肉厚を薄くした箇所を変形加工させる新しい加工法である。本加工法で成形可能な形状モデルの例を図 2 に示す。変形加工後の被加工材は、切削工具が干渉するような形状にすることも可能である。また、素材寸法よりも外側に張り出す形状に加工することもできる。

加工機には、旋盤や、フライス盤、5軸複合加工機等が利用できる。当然ではあるが、これらの機械は各種の切削加工を施すことが可能である。変形加工の成形軌跡に、切削で利用する工具送り軌跡を用いる。また、伸びフランジ

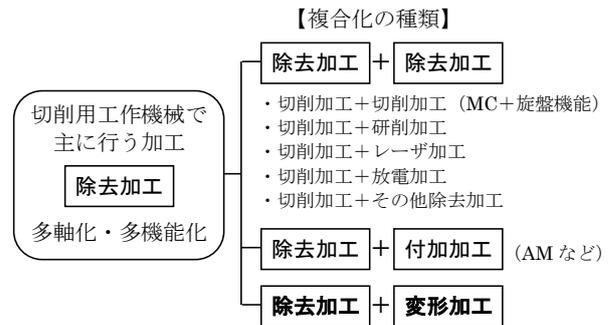


図 1 切削用工作機械の複合化 (加工法による分類)

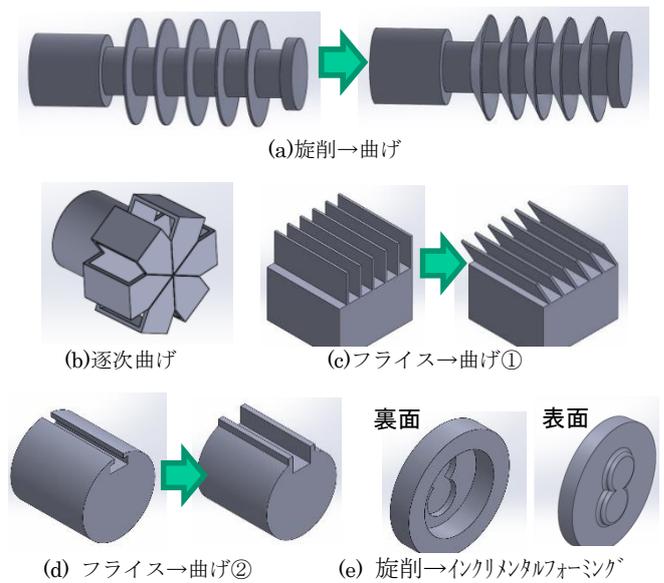


図 2 切削・変形加工の例 (3D モデル)

加工 (パーリング加工) やインクリメンタルフォーミングを採用することで、加工形状の自由度は高くなる<sup>3,4)</sup>。

## 3. 切削・変形の連続逐次加工実験

### 3.1 旋削と曲げ・絞り変形の逐次加工

回転曲げやヘラ絞りを応用した逐次加工の例(外周旋削→曲げ・絞り)を図 3 に示す。まず、曲げ対象部を切削バイトで所望の肉厚に外周旋削し、その後、半球工具(またはラジラス工具)によって薄肉部を母材との境界部で変形させる。この際、半球工具に押付けられた薄肉部は、応力集中により母材との境界部で曲げ変形が作用する。材料肉厚が大きく剛性の高い部位が板抑えの役割を持つ。この工

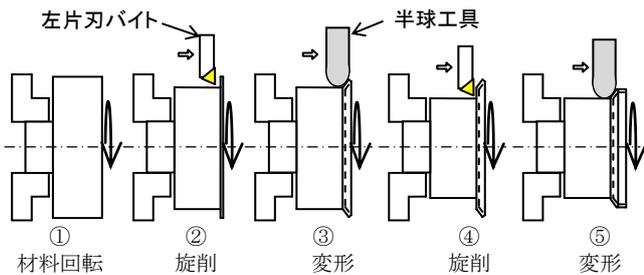


図3 旋盤による外周旋削→曲げの逐次加工の工程例

表1 切削・曲げ逐次加工の基本実験条件

使用機械	【旋削】汎用旋盤(LR-55A) テクノワシノ 【フライス加工】汎用フライス盤 OKK
被加工材	アルミ合金 A5056: 外径 $\phi 80\text{mm}$
切削条件	【旋削】CVD 片刃バイト, $N=550\text{rpm}$ , $f=0.05\text{mm/rev}$ . 【フライス加工】 $\phi 13\text{mm}$ フラットエンドミル $\phi 12\text{mm}$ ラジアスエンドミル, コーナーR1.0mm
曲げ・張出し条件	超硬製半球工具 A1: $\phi 12\text{mm}$ , 工具回転無し, $N=83\text{rpm}$ , $f=0.05\text{mm/rev}$ , 水溶性切削油

程を繰り返すことによって任意の形状に成形できる. 表1に本研究で用いた基本的な実験条件を示す.

汎用旋盤を用いて, アルミ円筒材の外周を突っ切りバイトで溝加工を施して, 高さ10mm, 厚さ1mmのフランジを形成した後に, このフランジの側面から, 先端を研磨した $\phi 12\text{mm}$ の超硬半球工具(図4(a))で曲げ変形させた. 外周溝旋削を1工程とし, 曲げ変形を1工程として連続で4連のフランジ加工を行った後の被加工材サンプルの外観を図4(b)に示す. 変形加工により, 切削工具が容易に入り込めないようなフランジ軸形状に成形することができた. 次に, 素材の端部の1壁のみに対して, 深さ5mm毎で外周旋削し, その都度曲げ変形を行う工程を4回繰り返した逐次加工結果を図4(c)に示す. 被加工材は, 曲げ変形によって元の素材寸法から工具送り方向に突き出した. 今回は, 変形工具の軌跡を軸方向に直線5mmと固定したため, この加工条件では, フランジ部は段付に広がる形状になった. 変形加工時の変形工具軌跡を逐次NC制御することで, 後工程の変形の影響によって前工程で変形した箇所が戻ることを抑制できるため, ダイレスフォーミングの可能性が示唆された.

なお, 切削後の材料幅(1mm)は, 半球工具と接触した箇所は変形後にいずれも約0.9mmに薄くなった.

工作機械への影響を調査するため, 切削で残す材料幅を変更し, SR6mm工具で変形させる際の実際の加工抵抗を測定した(図5). 切削深さを10mmとし, 半球工具先端部を溝部から1mm離して変形加工しているため, 半球工具と変形対象壁との加工開始時の接触箇所は, 溝底部から高さ7mmの位置からになる. 材料幅1mmの曲げ加工時において工具送り方向の最大加工抵抗は約600Nで, ワーク回転方向の最大加工抵抗は約1/7であった. 材料幅0.5mmにすることで, 加工抵抗はいずれの方向も大幅に減少している. このように曲げの断面係数は, 板厚の2乗で

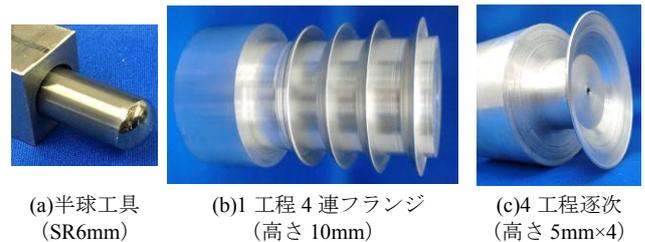


図4 外周旋削・曲げの例(切削残し幅=板厚1mm)

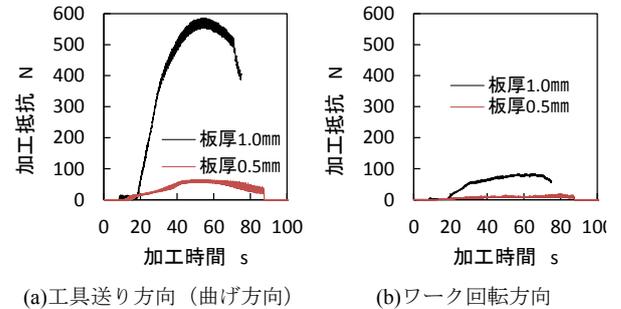


図5 SR6mm工具による変形加工時の加工抵抗

(材料高さ=切削深さ: 10mm)



図6 旋削・曲げの逐次加工の例(幅1mm, 高さ5mm $\times$ 4)

影響し, 変形荷重を付与する箇所によってモーメントも変化するため, 機械剛性を考慮した切削残し厚さおよび切り残し高さを決定する必要がある. 今回使用した工作機械では, 問題のない範囲であった.

また, 切削時にR付き工具を採用して, 被加工溝コーナー部に適度なRを設けることで, 変形時に材料破断が生じ難くなることを確認した.

内周を旋削して, 連続で逐次4回成形した結果を図6(a)に示す. 変形部は外径側に拡張されたが, この変形条件では複数回実施しても薄肉部が大きく広がらずバーリング加工のようになった. また, 被加工材に予め切欠きを設けた場合, 複雑な形状に変形した(図6(b)).

また, 予めワークに切欠きを設けて切削し, 残った各薄肉部の回転方向側の一部を先行して変形させ, その後回転変形を行うことで, 変形後の曲げ部同士の干渉を回避したプロペラ形状が加工できることを確認した(図6(c)).

### 3.2 フライス削りと曲げの逐次加工

フライス盤を用いて,  $\phi 12\text{mm}$  ラジアスエンドミルでアルミブロックの上面に深さ10mmの複数の溝切削加工を行い, 切削で残される材料幅を変更した各壁面に対して, 半球工具を直線送りして曲げ加工を行った(図7(a)). 材

料幅が 0.5mm では、母材の境界部で直線的に容易に曲げ変形できた。材料幅 2mm でも直線的な変形は可能であったが、半球工具が接触する時の加工負荷が大きくなった。材料幅 1mm では、半球工具の回転方向によらず、縮みフランジのような曲面になって変形した。

次に、フライス盤を用いて、板厚 10mm のアルミ材に  $\phi 4$ mm の貫通穴をあけ、各下穴の裏表両側から  $\phi 12.4$ mm でザグリ加工し、その後、半球工具によって穴仕上げ加工のような変形を施し、リフレクタのような形状加工を試みた。中央に残る壁の厚みは 1mm とした。SR6mm の半球工具を回転させながらグリスを塗布して押し込むことで、工具と接触する平底部は鏡面を呈する凹面に加工できることを確認した (図 7(b))。

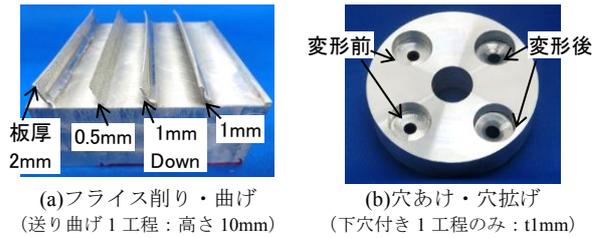


図 7 フライス削り・曲げの例 (壁幅 0.5~2mm)

### 3.3 旋削と張出し成形の逐次加工

アルミ材 ( $\phi 80$ mm) を中ぐりバイトで内径  $\phi 50$ mm に端面旋削し、変形箇所の肉厚を 1.5mm にした。その後、回転中心から 10mm の位置に半球工具を押し当て、張出し成形させた。表 1 の変形条件で、設定変形高さを 5mm とし、変形時に切削油の有無で比較した。いずれも材料中央部が押し出されて変形し、凸状になった (図 8)。工具との接触面は、切削油ありでむしろの無い面性状になった。変形加工時のバニシング効果が得られていると考えられる。変形加工時の工具送り方向の加工抵抗は、いずれも最大 1kN 程度であり、切削油を付与することによって、安定した変形加工が行われていることがわかった。

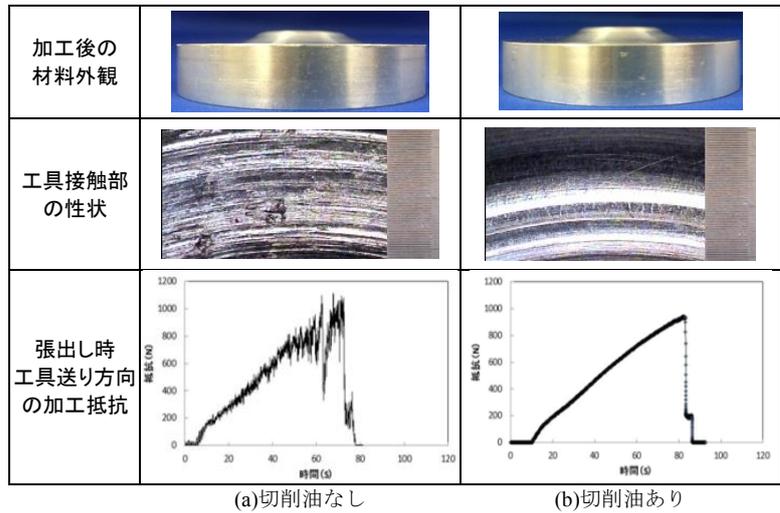
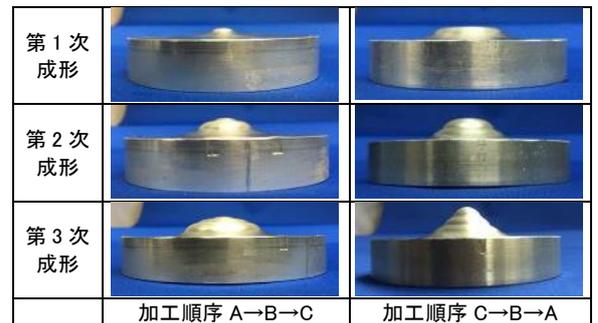
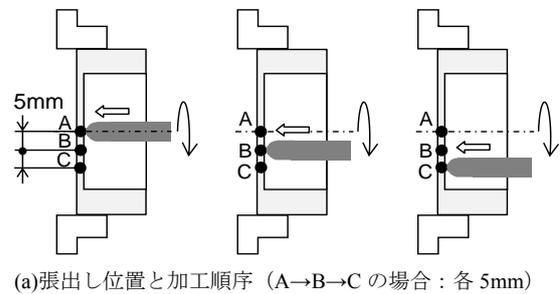


図 8 張出し成形結果と加工時の抵抗 (切削油の有無)  
(AL5054: $\phi 80$ mm, 内径  $\phi 50$ mm, 肉厚 1.5mm, 設定張出し高さ 5mm)

本技術は、張出し成形のみを逐次で行える。そこで、半球工具の押し込み位置を 3ヶ所に分け、順次、変形加工した (図 9)。変形高さは半球工具が接触した A~C の位置からインクリメンタルで 5mm とし、第 1 次から第 3 次の被加工材の中心から外側 (A→B→C) の順と、外側から中心 (C→B→A) の順と比較した。実験の結果、両者の形状は異なり、A→B→C 順では材料は外周に低く広がり、最大変形高さは約 10mm となった。C→B→A 順では、鋭角に突出し、最大変形高さは 14.2mm となった。加工箇所および順序を上手く選択することで、さまざまな形状に張出し加工できることを示した。



(b) 張出し順序を変更した被加工材の外観

図 9 切削・張出し逐次加工における張出し位置の影響

さらに、被加工材端面  $\phi 50$ mm の位置で、溝部底面の肉厚が 1mm になるように中ぐり加工した後、半球工具で溝部を 5mm 変形させた (図 10)。この場合は、材料中央部が突出してこないように材料裏側から心押し治具で押さえている。材料の回転軌跡に沿ったリング状の張出し成形ができることを確認した。半球工具と干渉した面は、工具 R 形状が転写され凹状になり、また、加工面はバニシング作用により良好であった。このように切削軌跡に対応した

変形軌跡を設定することで、任意の形状にインクリメンタルフォーミングを行える可能性を見出した。

### 3.4 旋削による六角穴あけと六角形状の張出し逐次加工

アルミ材の中心部に旋削で  $\phi 6.2$ mm で止まり穴をあけ、

穴底部の肉厚を 1.5mm 残した。その穴に対して、**図 11(a)**に示すブリグッティ社製の六角穴ブローチツール(G8-E-6)を用いて、旋盤で六角穴ブローチ加工を施した。このブローチツールのホルダーは、旋盤主軸による材料の回転運動を利用して、刃具端面を微小傾斜させて偏心させ、六角の各コーナー部が順次ローテーションしながら押し込まれることによって、回転しながら六角穴を形成させる加工法である (**図 11(b)**)。その後、そのまま同一ブローチ工具を変形工具として、穴底部を送り方向に押し出し、六角形状の張出し成形を試みた。この張出し成形時も、刃具のコーナー部によって、六角穴底部のコーナーが順次押し出されるため、小さな力で張出し成形が可能となることを明らかにした。

#### 4. まとめ

本研究では、切削・変形複合逐次加工を提案し、旋削やフライス削りを応用した数種類の基礎実験の結果、従来では不可能な形状の加工が実現できる可能性があることを示した。切削時のコーナーR付与の効果や、変形時の潤滑油の効果についても明らかにした。変形後の被加工面は、バニシング作用によって良好な加工面を得ることもわかった。

また、旋削による六角穴あけと六角形状の張出し逐次加工では、回転運動を利用して順次六角コーナー部をブローチ加工し、その後に同一工具で材料底部を張出し成形させることに成功した。微小変形する箇所を随時変更しながら加工することによって、少ない力で張出し成形ができる可能性を示した。

今後は、材料強度と工作機械の主軸剛性との関係などを解析等によって明らかにするとともに、NC加工機を用いた変形軌跡制御および変形用工具の最適化について検討していく予定である。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の助成金で実施した。研究成果は、国際工作機械技術者会議 (IMEC2018)、欧州国際会議および国内学会にて発表させていただいた。天田財団には、心より感謝申し上げます。

#### 参考文献

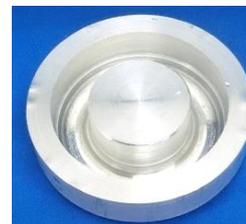
- 1) 例えば、Website of Yamazaki Mazak Co., <https://www.mazak.com/>
- 2) ニノ宮進一：切削加工機械-マシニングセンタ系，特集 JIMTOF2014 にみる新技術，機械と工具，Vol.5, No.1 (2015) pp.10-15.
- 3) 平松信也，森田 昇，山田 茂，高野 登，大山達雄：インクリメンタルフォーミングによるマイクロ張出し成形，第一報：ピラミッド形状の張出し特性，砥粒加工学会誌，Vol.48 No.11 (2004) pp.635-640.



(a)半球工具にて張出し成形中の様子



(b)成形後の材料表面

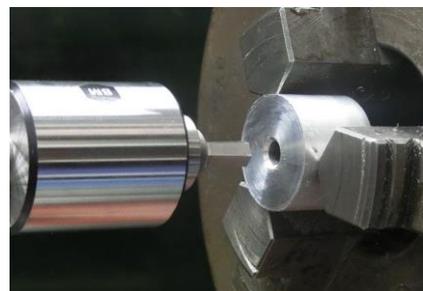


(c)成形後の材料裏面

図 10 中グリ旋削・張出し成形の例 (幅 1mm, 溝深さ 5mm)



(a)六角穴ブローチツール(G8-E-6)



(b)旋盤による六角穴加工の状況



(c)成形後の材料表面



(d)成形後の材料裏面

図 11 六角穴ブローチ加工・六角形状張出し成形の例 (AL5054:φ80mm, 六角穴対辺距離 6mm, 肉厚 1.5mm, 設定張出し高さ 1.2mm)

- 4) 帯川 利之，関根 務，伯谷 知美，沼尻 省吾：マイクロインクリメンタルフォーミングによる薄膜のダイレス 3D 造形，生産研究，Vol.61 No.6 (2009) pp.1001-1005.