ロボットによるアルミニウム合金押出材の高速溝加工

清水 和紀* ・松岡 信一**
山崎 申之*** ・沖 善成***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 48, No. 12 (1998), pp. 603-607

High-speed cutting for extruded aluminum alloys using robot

Kazunori SHIMIZU*, Shin-ichi MATSUOKA**
Nobuyuki YAMAZAKI*** and Yoshinari OKI***

This study is described the cutting method using an articulated robot that is the new machining for extruded aluminum alloys. The characteristics of this method are using the small diameter of endmill which aims to reduce the cutting force in order to compensate completely the low stiffness of articulated robot, and using the high-speed spindle to improve the machining efficiency. The behavior of super high-speed rotational cutting for extruded aluminum alloys is still unclear. In this paper, the basic cutting experiments and the structural analysis were done. It was proved the high frequency vibration proper to high-speed cutting had a close relation to the stiffness (natural frequency) of machine tools and workpieces, and great affected the cutting force and the cutting surface. The articulated robot was low stiffness, so there was few effect on the high frequency vibration in cutting, and the cutting force decreased 50~70% in comparison with the fluting machine. Consequently, it was understood the cutting method using an articulated robot was effective for the improvement of high-speed cutting.

(Received November 7, 1997)

Keywords: high-speed cutting, robot, aluminum alloy, cutting force, natural Frequency

1. 緒 言

多関節ロボットは、生産工程の自動化、省人化に多大な貢献が期待できる産業機械である。溶接、搬送工程には早くから導入され、優れた実績を収めている。近年では特に、研削、バリ取りなどの機械加工分野への適用研究^{1)~5)}が盛んに行われている。しかし、切削加工への多関節ロボットの適用例は比較的少ない。これは、多関節ロボット自体の剛性の低さによるものであり、加工時に大きな切削力を受けた場合、多関節ロボットが変形し、加工精度が著しく低下してしまうためである。従来までの多関節ロボットを用いた切削加工に関する研究^{6)~9)}では、加工速度を低下させた条件や、比較的切削力が小さく被削性に優れたプラスチックの切削加工に適用したもの、さらに種々のロボット動作補正制御やロボット動作の制限によって、加工精度の向上を目指した内容の報告が主たるものであった。

アルミニウム合金押出材はサッシ等の建材として広く使用されているが、所要の形状を得るため、切削加工が多く施されている。その加工形態としては、エンドミルを用いた薄肉材の溝切削によって、材料の不要部分を所定の形状に切取る作業が主たるものである。この溝切削は一般の機械加工と比較すると軽切削であり、厳密な加工精度は要求されない。

本研究は、自由度の高い多関節ロボットを利用したアルミニウム合金押出材の切削加工法について検討するものである。ここでは多関節ロボットの剛性不足を補完するため、小径エンドミルを使用して加工時の切削力を極力抑制することとした。さらに、100,000 r/min⁻¹を超える超高速主軸を採用することで、加工速度の高速化を目指すものである。本報ではまず、基礎的な切削実験を行い、加工機械や被削材のたわみを測定し、固有振動数などの動的特性を調べた。また、軟質材であるアルミニウム合金の切削加工時に発生する切りくず付着に着目した加工面品位の解明を行うことを目的とした。

2. 実験方法

2.1 溝切削加工機による切削

本加工法は、切削工具の小径化と主軸の超高速回転によって、多関節ロボットによるアルミニウム合金押出材の切削加工を実現するものである。ここでは、工具の超高速回転域における切削挙動を把握するため、加工時に発生する切削力と加工面品位に着目し、予備的な切削実験を行った。Fig. 1に実験装置の概略を示す。使用した加工機は、試作の溝切削加工機である。

* 富山県立大学大学院工学研究科 (〒939-0398 富山県射水郡小杉町黒河5180)。Graduate Student, Toyama Prefectural University (5180. Kurokawa, Kosugi-machi, Imizu-gun, Toyama 939-0398)。

** 富山県立大学工学部 (射水郡)。Faculty of Engineering, Toyama Prefectural University (Imizu-gun, Toyama)。

*** 三協アルミニウム工業(株) (高岡市)。Sankyo Aluminium Industry Co., Ltd. (Takaoka-shi, Toyama)。

Fig. 1 Schematic view of the fluting machine.

Fig. 2 Schematic view of the robot for cutting machine.

2.2 多関節ロボットによる切削

多関節ロボットは、モータ、減速機によって各関節が支持された片持り構造を成すため、一般の工作機械に比べ低剛性である。したがって、多関節ロボットを切削加工に適用した場合、従来の高剛性な工作機械による切削加工状況とはまったく異なった挙動が発生する可能性がある。ここでは、多関節ロボットによる切削加工の際に得られる切削挙動について、切削力、加工面品位の点から前節の溝切削加工機による実験結果と比較、検討を行った。Fig. 2 に装置の概略を示す。使用したロボットは7軸垂直多関節ロボット（三菱重工業社製、PA-10）である。

2.3 切削条件

Table 1 に切削条件を示す。ボルト締結（M8-15 mm, 2本）によりテーブル上に固定された被削材の一面に、1工程で長さ150 mmの工具直径に等しい通し溝加工を施した。したがって、切込み深さは、被削材肉厚よりも大きく設定した（肉厚+2 mm）。切削工具は、SKH56を母材とし、切れ刃にTiNコーティングが施された1枚刃エンドミル（全長45 mm, 直径3.0 mm, 刃長10 mm, すくい角22°, ねじれ角30°, シャンク径5 mm）を使用した。また、3分力センサ（キスラー社製、9068-5011A）を加工機の主軸支持部に固定し、各方向における切削力を測定した。また、多関節ロボットの切削性能の許容範囲を検証するため、工具突出長さ（ l ）の短縮化（ $l=30$ mm から $l=20$ mm）、および被削材を薄肉化（2.0 mm から 1.0 mm）した条件についても同様な実験を行った。

Table 1 Cutting conditions

Workpiece size (mm) (A6063S-T5)	L200×W100×H50, thickness=2 L200×W50×H50, thickness=2 L200×W70×H25, thickness=1
Workpiece hardness (HV)	69
Spindle (Ceramic ball bearing type)	IBAG; HF42 S-120 (Max. 140,000rmin ⁻¹ , Power: 0.2 kW)
Spindle speeds (rmin ⁻¹)	60,000, 100,000
Cutting fluid	Dry
Feed speed (mm/min)	100~1,600

2.4 各加工機および被削材の構造からの検討

加工機および被削材の持つ構造特性（①静剛性、②構造動特性）が、切削力や加工面品位に及ぼす影響を検討した¹⁰⁾。解析対象とした加工機は、Fig. 1 および Fig. 2 に示した溝切削加工機および多関節ロボットである。静剛性試験としては、各加工機主軸支持部に対し、ばねばかりを用いて一定荷重を加え、発生した変形量を電気マイクロメータ、ダイヤルゲージを用いて測定した。構造動特性試験は、各加工機の固有振動数を測定するものであり、周期的な外力が加わった際の共振周波数を測定した。ハンマによるインパルス力の印加により被削材、加工機に発生した減衰波形を加速度センサにて検出し、これをFFTアナライザ（横河電機社製、3655E, 3659-20A）で解析した。また、切削加工時に被削材に発生した強制振動の波形解析についても検討した。切削条件は、Table 1 と同様である。なお、本解析では工具回転周期との関連性の有無を検討するため、切削加工中の実際の工具回転数を測定した。切削工具を把持するチャックに存在する二つの凹凸部が回転して発生した変位を渦電流式変位センサ（キーエンス社製、EX305-201）により検出した。

3. 実験結果および考察

3.1 溝切削加工機による切削加工

試作した溝切削加工機を使用し、予備的な切削実験を行った。ここでは、工具回転数と被削材形状を変化させた際の切削実験結果を示す。

Fig. 3(a), (b)は、被削材幅が100 mmのものについて工具回転数をそれぞれ60,000 rmin⁻¹, 100,000 rmin⁻¹に設定した際の切削力の測定結果を示す。ここで縦軸は切削力（ F ）、横軸は1刃当たりの送り量（ f ）を表す。同図(a), (b)より、工具回転数60,000 rmin⁻¹の場合、1刃当たりの送り量は0.0067 mm/tにて、100,000 rmin⁻¹の場合は0.006 mm/tにてそれぞれ過負荷によって主軸回転が停止し（“×Stop”）、切削不可能となった。切削力は、1刃当たりの送り量の増加とともに比例的に増大する傾向を示している。X, Y, Zの各方向における切削分力をみると、X方向切削分力（送り分力）に比べてY, Z方向切削分力（背分力、垂直分力）が大

Fig. 3 Relation between cutting force and feed rate in the fluting machine.

(a) 60,000 rmin^{-1} , $L200 \times W100$, $t=2$, (b) 100,000 rmin^{-1} , $L200 \times W100$, $t=2$, (c) 100,000 rmin^{-1} , $L200 \times W50$, $t=2$

きい値を示した。また、工具回転数の増加に対して送り分力には大きい変化がみられない。しかし、背分力、垂直分力は、工具回転数の低下によって増大傾向を示した。これは、1刃当たりの送り量が極めて小さい条件で、高速回転による切削温度の上昇が被削材のせん断抵抗を減少させることによるものと考えられる。同図(c)は同図(b)の条件で被切削面の幅を100 mmから50 mmに縮小した切削力の測定結果で、この場合、1刃当たりの送り量0.007 mm/tにて、過負荷によって主軸回転が停止し、切削不可能となった。同図(c)と同図(b)を比較すると、送り分力の差異は少ないが、背分力、垂直分力は被切削面の小さい方が2割程度増大した。これは、被削材の幅が50 mmと小さくなることで切削面のたわみ量が約8分の1に減少し、設定切込み量に近い加工が行われたことによるものと考えられる。

本切削加工は、1刃当たりの送り量が非常に少ない超高速回転による通し溝加工のため、極めて微細な切りくずが生成する。切りくずはその多くが遠心力によって工具進行方向とは逆の方向に飛散するが、切削送り速度が低い場合、回転する工具の周辺に浮遊する切りくずも観察された。Fig. 4は、切削加工面の金属顕微鏡による観察の一例を示す。同図より、工具回転数100,000 rmin^{-1} の場合、アップカット面には切りくずの付着現象が観察された。この現象はすべての送り速度の場合にみられるが、特に低速送り領域ほど顕著に発生した。一方、工具回転数を60,000 rmin^{-1} に低下させた場合、および被削材幅を50 mmと縮小した切削加工面においては、切りくずの付着現象は観察されなかった。また、試験的に被削材肉厚を2.0 mmとして工具径を3 mmから5 mmに大きくした場合や、工具径を3 mmとして被削材肉厚を2.0 mmから1.0 mmに薄肉化した場合においても、本現象は観察されなかった。

3.2 多関節ロボットによる切削加工

3.2.1 送り速度と切削力の関係

工具回転数100,000 rmin^{-1} 、被削材形状長さ200 mm×幅100 mm、被削材肉厚2.0 mmの場合における切削力をFig. 5に示す。同図より、本実験では1刃当たりの送り量0.011 mm/tにおいて過負荷に伴う主軸の回転停止が発生した。こ

Fig. 4 Example of machined surface in fluting machine (100,000 rmin^{-1} , $L200 \times W100$, $t=2$, $F=100 \text{ mm/min}$).

Fig. 5 Relation between cutting force and feed rate in the robot cutting machine (100,000 rmin^{-1} , $L200 \times W100 \times H50$, $t=2$, $l=30$).

Fig. 6 Relation between cutting force and feed rate in the robot cutting machine (100,000 rmin^{-1} , $L200 \times W70 \times H25$, $t=1$, $l=20$).

れは同一加工条件下における溝切削加工機の実験結果である1刃当たりの送り量の限界値0.006 mm/tと比較して、約80%の向上が見られた。また、切削力の測定値はこれまでと同様、比例的な増加傾向を示しているが、各切削分力は50～70%低下した。この要因としては、多関節ロボットと溝切削加工機の持つ剛性差による影響が考えられる。つまり、剛性の低い多関節ロボットの固有振動数は必然的に低いため、工具の100,000 rmin^{-1} の超高速回転域において発生する高周波のびびり振動とは共振現象を生じることは少なく、切削力の測定値にはほとんど影響しないものと考えられる。これに対し、高剛性で固有振動数の高い溝切削加工機は、高周波のびびり振動と共振現象を起こす可能性が高く、切削力の増幅を引き起こしたものと推測される。

また、多関節ロボットによる切削送り速度の許容値の検証を行うため、被削材肉厚を2.0 mmから1.0 mmへ薄肉化し、さらに、工具突出長さを30 mmから20 mmへ短縮化して同

Fig. 7 Example of machined surface in robot cutting machine.

(a) $100,000 \text{ rmin}^{-1}$, $L200 \times W100 \times H50$, $t=2$, $l=30$, $F=1,000 \text{ mm/min}$, (b) $100,000 \text{ rmin}^{-1}$, $L200 \times W70 \times H25$, $t=1$, $l=20$, $F=1,000 \text{ mm/min}$

Fig. 8 Relation between load and displacement for the fluting machine.

Fig. 9 Relation between load and displacement for the robot (PA-10).

様な加工実験を行った。その結果、1刃当たりの送り量 0.016 mm/t 、すなわち切削送り速度 $1,600 \text{ mm/min}$ にて主軸過負荷が発生し、切削不可能となった。その際の切削力の測定結果を Fig. 6 に示す。同図より、各切削分力の測定値は、Fig. 5 で示した測定結果と比較しても大きな低下が見られず、ほぼ同様な傾向が得られた。1刃当たりの切削体積が減少したにもかかわらず、このような結果が得られた要因としては、被削材の薄肉化および工具突出長さの短縮化によって、切削加工中に発生するびり振動や多関節ロボットの振れが抑制され、安定した正常切削加工が行われたためと言える。

Table 2 Static stiffness of each machine tools

Machine tool	X ($\mu\text{m/N}$)	Y ($\mu\text{m/N}$)	Z ($\mu\text{m/N}$)
Fluting machine	0.13	0.08	0.09
Robot (PA-10)	83.65	20.35	68.76

Table 3 Natural frequency of workpieces and machine tools

Objects of measurement	Natural frequency (Hz)
Workpiece ($L200 \times W100 \times H50$)	1250, 1925, 2600
Workpiece ($L200 \times W50 \times H50$)	2625, 4050, 6450
Fluting machine	1350, 3350, 6700
Robot (PA-10)	25, 140, 230

3.2.2 加工面品位

多関節ロボットによる切削実験で得られた切削加工面の一例を Fig. 7 に示す。同図(a)より、被削材肉厚が 2.0 mm では、Fig. 4 にて観察された切りくずの付着現象がまったくなく、切削加工面には大きなうねり（最大 1.0 mm 程度）が観察された。この原因としては、多関節ロボットの主軸支持部の剛性による影響が大きく関わっていると考えられる。また、同図(b)より、被削材肉厚が 1.0 mm でも同様に、切りくずの付着現象は観察されなかった。さらに、切削加工面にはうねりも観察されず、滑らかで直線的な加工面が得られた。

3.3 構造解析結果

溝切削加工機および多関節ロボットの主軸支持部における静剛性試験の結果を Fig. 8 および Fig. 9 にそれぞれ示す。同図より、各方向ともに荷重の増大に伴い、変形量が比例的に増大した。また、Table 2 に直線の傾きから算出された各方向の静剛性を示す。同表より、溝切削加工機の場合、経験的な見地からも切削力による主軸支持部の振れ（変位）は無視できる範囲であると推測される。反面、多関節ロボットは溝切削加工機と比較して700分の1程度の剛性比であり、極めて低剛性と言える。本試験より、多関節ロボットによる切削加工では、切削力により主軸支持部に大きな振れが発生し、加工精度の低下を生じることが定量的にも確認された。

Fig. 10 Example of vibration wave and thrust force in fluting ($100,000 \text{ rmin}^{-1}$, $F=300 \text{ mm/min}$).

各加工機および被削材の動的特性を調べるため、インパルス加振による固有振動数を測定した。その結果は、Table 3に示すとおりで、多関節ロボットの固有振動数は静剛性と同様、溝切削加工機と比較して極端に低く、また、工具の超高速回転域における回転周波数 ($100,000 \text{ rmin}^{-1}$ の場合、 $1,667 \text{ Hz}$) から大きく分離している。剛性の低い多関節ロボットの固有振動数は、本加工法における工具の高速回転切削加工に特有の高周波振動とは一致せず、共振現象を誘起しない。つまり、多関節ロボットは、構造的な特性から切削力の測定値に及ぼす影響は少ないと考えられる。

通常、溝切削加工では、主に主軸回転による強制振動、および断続切削による強制振動が発生する。主軸回転による強制振動数は、毎秒の主軸回転数で与えられ、工具回転数が $100,000 \text{ rmin}^{-1}$ の場合、 $1,667 \text{ Hz}$ となる。この数値は、Table 3中の固有振動数と一致するものがないが、工具回転数を $80,000 \text{ rmin}^{-1}$ に低下させると強制振動数は $1,333 \text{ Hz}$ となり、溝切削加工機主軸支持部の固有振動数である $1,350 \text{ Hz}$ に近似するはずである。Fig. 10は、工具回転数が $100,000 \text{ rmin}^{-1}$ の場合の工具回転周期と背分力 F_y を示す。同図より、断続切削による強制振動と、工具1回転中のアップカットとダウンカットによる周期的波形がほぼ同期しているのが観測される。本振動解析の結果より、工具回転数を $100,000 \text{ rmin}^{-1}$ として切削加工を行った場合、共振に伴う切削力の増幅を誘起し正確な切削力を測定できなくなったのは、このときの強制振動数 $1,667 \text{ Hz}$ の2倍、 $3,334 \text{ Hz}$ が、Table 3にて示した溝切削加工機主軸支持部の固有振動数 $3,350 \text{ Hz}$ に

ほぼ一致することによるものであることが確認された。

4. 結 言

本報では、工具の超高速回転域におけるアルミニウム合金押出材の切削挙動を把握するため、基礎的な切削実験、および簡単な構造解析を行った。切削実験では、特に切削力と加工面品位に着目し、多関節ロボットによる切削加工時の特性について検討した。また、構造解析では、切削加工時に発生しやすいびり振動と加工機および被削材の剛性との関連性について検討した。その結果、以下に示す結論が得られた。

(1) 本実験における同一加工条件下では、多関節ロボットを使用した場合、高剛性な溝切削加工機と比較すると、切削力で50~70%の低下、および限界切削送り速度で約80%の向上が得られた。これは、機械剛性の低い本加工法に特有の現象である。

(2) 工具の超高速回転域における切削加工では、加工時の強制振動と被削材の持つ剛性（固有振動）が相互に干渉し、切削力の、特に背分力と垂直分力に多大な影響を及ぼすことがわかった。

(3) 工具回転数 $100,000 \text{ rmin}^{-1}$ において、溝切削加工機主軸支持部の固有振動数 ($3,350 \text{ Hz}$) と、断続切削加工時の強制振動数 ($3,334 \text{ Hz}$) が近似することより、切削力の測定値は増大し不安定となる。反面、剛性の低い多関節ロボットは固有振動数が低いため（基本周波数で 25 Hz ）、超高速回転加工法に特有の高周波振動と大きく離れていることより、切削力の測定値にはほとんど影響しない。

参 考 文 献

- 1) 国枝正典, 中川威雄, 樋口俊郎: 精密工学会誌, 54 (1988), 125.
- 2) 山根八州男, 尹 栄生, 岡本裕幸, 山田勝紀, 米沢 洋, 鳴瀧則彦: 精密工学会誌, 55 (1989), 1787.
- 3) Y. Takeuchi, N. Asakawa and Dongfang GE: JSME International Journal (C), 36 (1993), 556.
- 4) M. Jinno, F. Ozaki, K. Tatsuno, M. Takahashi, M. Kanda, Y. Tanada and S. Nagataki: IEEE International Conference on Robotics and Automation, (1995), 1455.
- 5) 斉藤之男, 橋口 亮, 清水 功: 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演論文集, Vol. B, (1996), 865.
- 6) 白瀬敬一, 平尾政利, 安井武司: 日本機械学会論文集 C 編, 60 (1994), 1070.
- 7) 白瀬敬一, 水原延幸, 平尾政利, 安井武司: 日本機械学会論文集 C 編, 60 (1994), 1077.
- 8) 白瀬敬一, 田辺直久, 平尾政利, 安井武司: 日本機械学会論文集 C 編, 61 (1995), 259.
- 9) 山根八州男, 尹 栄生, 三宅正幸, 鳴瀧則彦: 精密工学会誌, 57 (1991), 1387.
- 10) 星鐵太郎: 機械加工の振動解析, 工業調査会, (1990), 121.