

バレル工具加工における切削力の調査（第2報）

Investigation of cutting force in barrel tool machining (2nd Report)

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 小林翼 安齋弘樹
電子・機械技術部 機械・加工科 小野裕道

アルミ合金切削加工時におけるバレル工具の各加工条件が、切削力及び表面粗さへ及ぼす影響について調べた。バレル工具の形状が特殊であるため、工具の接触位置による工具たわみ量の増加、加工面を形成する曲率半径の変化による影響が大きいことが分かった。5軸特有の工具姿勢を設定する加工条件が、切削力及び表面粗さへ最も影響を及ぼすことを確認した。アルミ合金の切削ではほぼ理論どおりの輪郭形状が生成されることを確認した。さらに最適化した条件でボールエンドミルと加工時間の比較を行い、約4倍の効率で加工できることを確認した。

Key words: 5軸加工、バレル工具、加工条件、切削力、表面粗さ、アルミ合金

1. 緒言

近年、工作機械の高精度化及び制御ソフトの高性能化が進み、今までとは異なる特殊な工具形状を使用した複雑形状の加工方法が開発されている。そのような新しい工具形状の一つとして、曲面形状を有する加工において、ボールエンドミルに比べ効率良く加工できるバレル工具が注目されている。バレル工具は、切れ刃が工具径を超える大きな円弧形状をしていることから、従来のボールエンドミルと比較して切削面積が大きく、1ピッチの移動量を大きく（広く）設定できる特徴を持ち、加工時間の短縮が期待されている。反面、切削面積が大きいことから、工具に加わる切削力も大きくなり、びびり振動が発生しやすい特徴がある。さらにバレル工具の加工事例が少なく、加工条件と加工面品質や、切削力の関係性について明らかになっていないため、テストカットを繰り返す必要があり加工条件の選定に時間を要している。

そこで本研究では、バレル工具に加わる切削力を測定することで、加工面へ及ぼす影響を明らかにし、びびり振動等が発生しない加工条件を求めた。

さらに、求めた加工条件を基に、ボールエンドミルとの加工時間の比較を行った。

2. 実験

2. 1. 切削力及び表面粗さの評価

アルミ合金を対象に、工具メーカーが示している加工条件を基準とし、切込み量、回転数、チルト角及びリード角について、それぞれの条件を変更し、切削力、加工表面への影響を比較評価した。使用した加工機はヤマザキマザック（株）製のハイブリッド複合加工機（VARIAXIS j-600/5x AM）、切削対象としてアルミ合金（A5052）を選定した。工具は（株）タンガロイ製のバレル工具（VB0100L15.0R850-5S06）を使用した。工具

外観を図1に、工具諸元を表1に、基準とした加工条件を表2に示す。



図1 工具外観

表1 工具諸元

刃 数	工 具 径	先端半径	バレル半径	テーパ角度	有効刃長
[枚]	[mm]	[mm]	[mm]	[deg]	[mm]
5	10	4	85	27.3	15

表2 基準加工条件

径 方 向	軸 方 向	回 転 数	1 刃 送 り	チルト角	リード角
切 込 み	切 込 み	[rpm]	[mm/t]	[deg]	[deg]
[mm]	[mm]				
0.10	2.0	6,400	0.05	13.64	0

比較した加工条件については表3のとおり。

表3 比較加工条件

表3-1 切込み量

No.	径方向切込み [mm]
1	0.10
2	0.12
3	0.14
4	0.16
5	0.18
6	0.20
7	0.22
8	0.24

表3-2 回転数

No.	回転数 [rpm]
1	6,400
2	8,000
3	9,500
4	11,000
5	12,000

表 3-3 チルト角

No.	チルト角 [deg]
1	9.3
2	10.4
3	11.4
4	12.5
5	13.6
6	14.8
7	15.9
8	16.9
9	18.1

表 3-4 リード角

No.	リード角 [deg]
1	-40
2	-30
3	-20
4	-10
5	0
6	10
7	20
8	30
9	40

切削力の測定には、キスラー（株）製の切削動力計（9139AA）を用い、動力計上にバイスを介して被削材を固定し加工実験を行った。各機器の設置状況は図2のとおり。

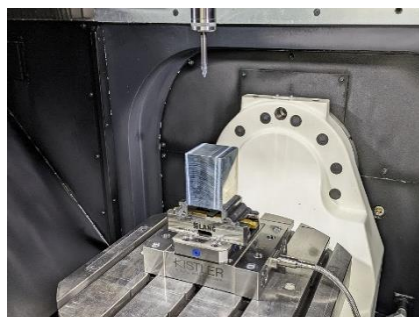


図 2 設置状況

加工は図2、奥から手前方向に行った。加工パスは図3のとおり。

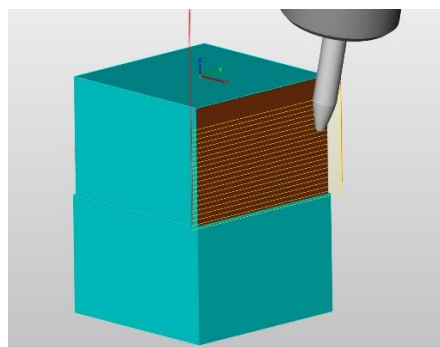


図 3 加工パス

加工後の表面粗さの評価には、（株）ミットヨ製の表面粗さ・輪郭形状測定機（SV-C4500L8）を使用した。

2. 2. 球面加工の表面粗さの評価

平面への加工結果を基に、チルト角変更における影響をさらに調べるため、曲面形状の切削を想定した1/8球形状の加工実験を行い、表面形状の比較を行っ

た。表2の加工条件を基準に、チルト角のみ変更した13.6 [deg] と18.1 [deg] の2条件行い、ピック送り方向に輪郭形状を測定した。加工した形状を図4に示す。

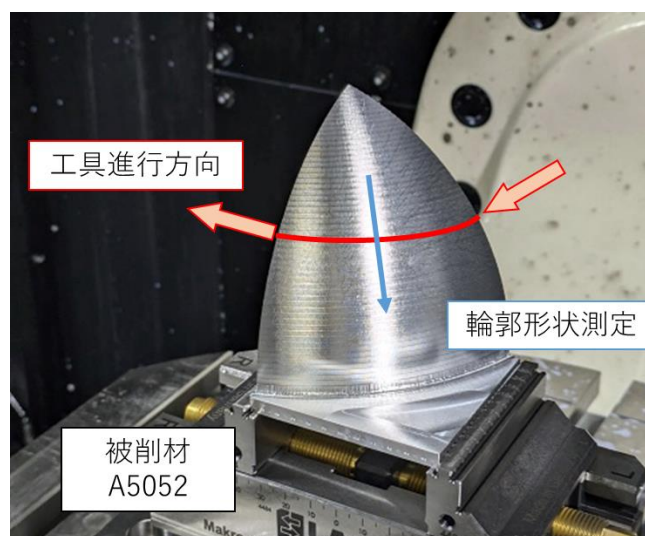


図 4 加工サンプル及び加工パス

2. 3. 加工時間比較のための実験条件

加工時間の比較のため、バレル工具とボールエンドミルを用いて、同じ形状の加工パスを生成しCAM上の加工時間比較を行った。加工するサンプル形状は図4のとおり、比較は傾斜部（図内オレンジ部分）の中仕上げ及び仕上げ加工時間を対象に行った。使用想定した工具について表4に、加工条件については表5、表6に示す。また、バレル工具については、加工面を評価するため、実際に加工を行った。

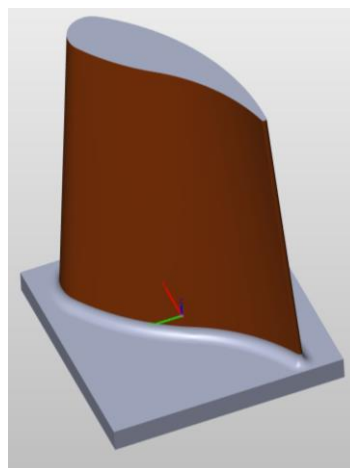


図 4 加工サンプル

表4 使用工具

ボールエンドミル		
	メーカー	タンガロイ
	型番	VBE100L07.0-BGA02S06
	工具径[mm]	10
	刃数[枚]	4
バレル工具		
	メーカー	タンガロイ
	型番	VB0100L15.0R850-5S06
	工具径[mm]	10
	刃数[枚]	5

表5 加工条件（中仕上げ）

	径方向 切込み [mm]	軸方向 切込み [mm]	回転数 [rpm]	送り [mm/min]	チルト角 [deg]
ボール	0.4	1.2	6,400	1,600	13.64
バレル	0.4	5.0	6,400	1,600	13.64

表6 加工条件（仕上げ）

	径方向 切込み [mm]	軸方向 切込み [mm]	回転数 [rpm]	送り [mm/min]	チルト角 [deg]
ボール	0.1	0.5	6,400	1,600	13.64
バレル	0.1	2.0	6,400	1,600	13.64

3. 結果・考察

3. 1. 切削力及び表面粗さの評価

3. 1. 1. 径方向切込み量

それぞれの加工条件を比較するため、測定された切削力について、積算値の計算を行い（式1）、工具送り方向に表面粗さの測定を行った。結果を図5に示す。

$$\text{切削力} : F = \sqrt{Fx^2 + Fy^2 + Fz^2} \cdots (\text{式1})$$

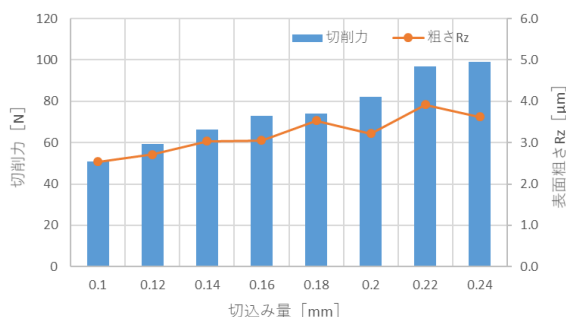
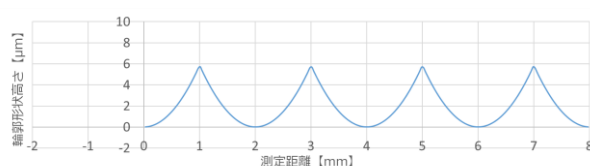
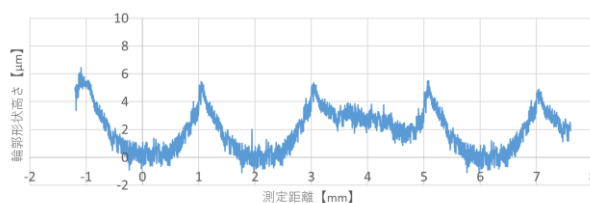


図5 切削力及び表面粗さ（径方向切込み量比較）

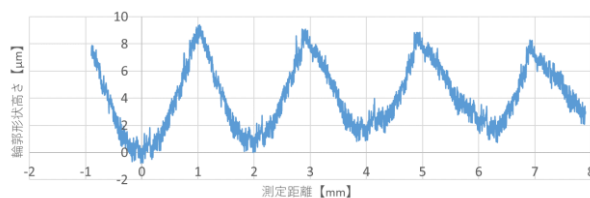
切込み量の増加に伴い、切削力が増え、表面粗さも悪化しており、一般的なエンドミルと同様に比例関係が確認できた。また、理論粗さ（カスプ高さ）に関係するピック送り方向の輪郭形状についても測定を行った。図6に理論形状と実測した輪郭形状を示す。今回の加工条件では理論上の最大高さ（Pz）は5.8[μm]であるが、径方向切込み0.10[mm]で5.3[μm]、径方向切込み0.24[mm]で8.9[μm]であり、ほぼ理論通りの形状になることが確認できた。以上の結果から、工具メーカー推奨の切込み量0.1[mm]を超えても、加工面にびりり等の発生が見られなかったため、アルミ合金の切削においては、中仕上げ等の切込み量が多い条件でも使用できることが分かった。



(a) 理論上の輪郭形状



(b) 径方向切込み0.10[mm]



(c) 径方向切込み0.24[mm]

図6 ピック送り方向の輪郭形状（切込み量比較）

3. 1. 2. 工具回転速度

工具回転数についても同様に、切削力の積算値及び表面粗さの測定を行った。結果を図7に示す。

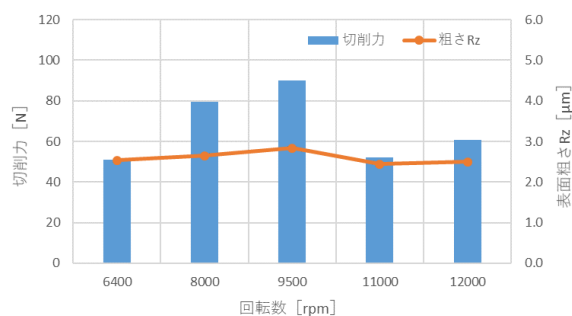


図7 切削力及び表面粗さ（工具回転数比較）

回転数の増加による、表面粗さへの影響は確認できなかった。しかし切削力では8,000[rpm]、9,500[rpm]にて増加した。工具及び被削材の固有振動を調査した結果、回転による加振周波数が固有振動数の倍数と一致したため、加工条件に由来する強制振動の発生により、工具が振れ切削力が増加したと考えられる。ただし、今回の実験では切削力の増加量が少なかったため、びびり等の加工表面への影響が表れなかったと考えられる。回転数の違いにおいても同様にピック送り方向の輪郭形状についても測定を行った結果を図8に示す。最大高さ (Pz) は、回転数 12,000[rpm]で7.7[μm]となり、こちらもほぼ理論通りの形状となることが確認できた。

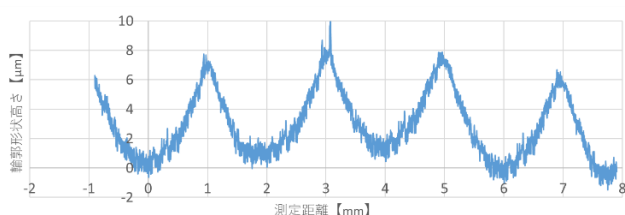


図8 ピック送り方向の輪郭形状 (回転数 12,000 [rpm])

3. 1. 3. チルト角

切削力の積算値及び表面粗さの測定結果を図9に示す。

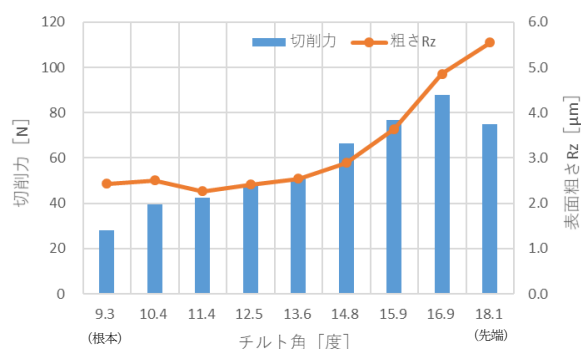


図9 切削力及び表面粗さ (チルト角比較)

チルト角の増加 (工具先端で切削) に伴い、切削力の積算値及び表面粗さの増加がみられた。チルト角の減少 (工具根本で切削) では、切削力の減少はみられたが、表面粗さに変化はなかった。

一般的に工具がたわむと寸法精度や表面粗さが悪化することが知られており、バレル工具の先端付近で切削力及び表面粗さが増加したのは、工具の接触位置の違いによるたわみ量の差によるものと考えられる。そこで、一般的なエンドミルのたわみ量の計算式 (式2) を基に、同じ切削力が加わったと仮定し、工具根本、工具中央及び工具先端それぞれのたわみ量を算出した結果を表7に示す。

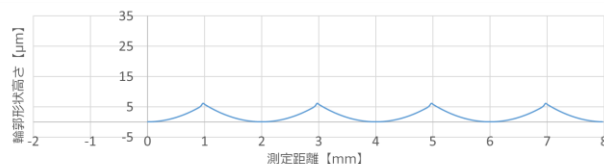
$$\text{たわみ量} : \delta = \frac{64 \times F \times L^3}{3 \times \pi \times D^4 \times E} \cdots (\text{式} 2)$$

δ : たわみ量 [mm]、 F : 切削力 [N]、 L : 工具突出し量 [mm]、 D : 工具径 [mm]、 E : ヤング率 [N/mm²]

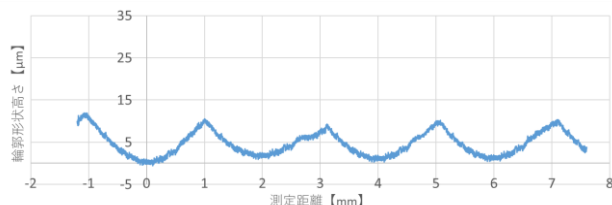
表7 たわみ量の算出

	切削力 [N]	突出し量 [mm]	工具径 [mm]	ヤング率 [GPa]	たわみ量 [μm]
工具根本	30	37.7	9.5	600	2.2
工具中央	30	44.1	6.9	600	12.8
工具先端	30	49.6	3.8	600	198.6

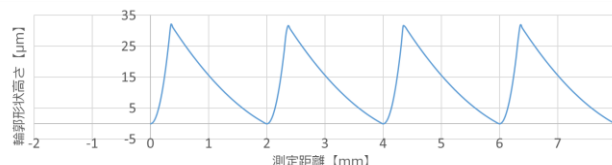
工具のたわみ量を比較すると、工具中央 (バレル円弧中央) で加工した場合と比較して、根本では約0.17倍、先端では約15.5倍のたわみ量の差がある。この結果から、チルト角による接触位置の変化で工具突出し量が増加し、工具径が減少することにより、たわみ量の増加が起き、切削力及び加工表面へ影響が出たと考えられる。また、ピック送り方向の輪郭形状を測定した結果を図10に示す。最大高さ (Pz) は、チルト角 16.9 [deg] で7.7[μm]、チルト角 18.1 [deg] で2.2 [mm] となった。



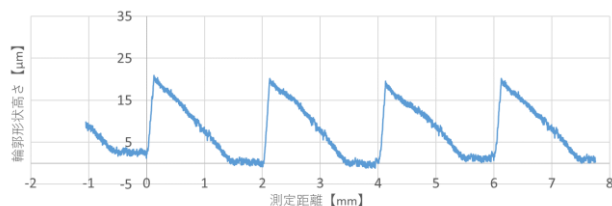
(a) チルト角 16.9 [deg] の理論上の輪郭形状



(b) チルト角 16.9 [deg] の輪郭形状



(c) チルト角 18.1 [deg] の理論上の輪郭形状



(d) チルト角 18.1 [deg] の輪郭形状

図10 ピック送り方向の輪郭形状 (チルト角比較)

バレル円弧の中央となる 13.6[度]の時は理論粗さと同値となる 6.3[μm]だったが、工具の先端円弧での加工となる 18.1[度]では理論形状の時点で最大高さが大きく増加することが分かった。工具のたわみによる振れに加え、加工面を形成する工具形状の要素として、バレル円弧のみから、バレル円弧と先端円弧になるため、加工面の最大高さが悪化することが分かった。

以上の結果から、チルト角については、切削範囲に曲率が異なる円弧が含まれない角度範囲で使うことが重要であると分かった。

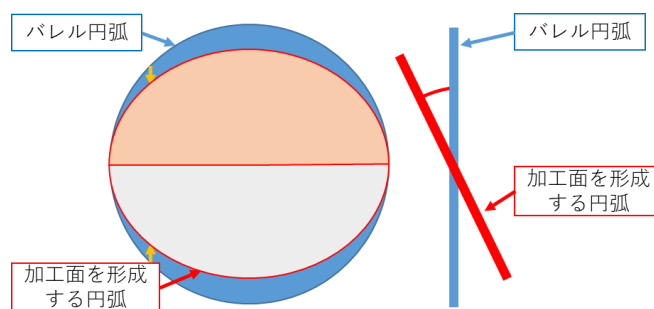


図 1 3 曲率半径の変化

3. 1. 4. リード角

切削力の積算値及び表面粗さの測定結果を図 1 1 に示す。

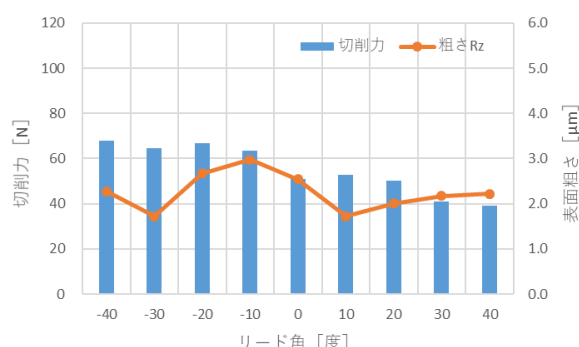


図 1 1 切削力及び表面粗さ（リード角比較）

リード角を増加（工具根本側を先行）させると、切削力の積算値に減少が見られた。

また、前項チルト角と同様に切削方向に対して直角方向の輪郭形状についても評価を行った。結果を図 12 に示す。

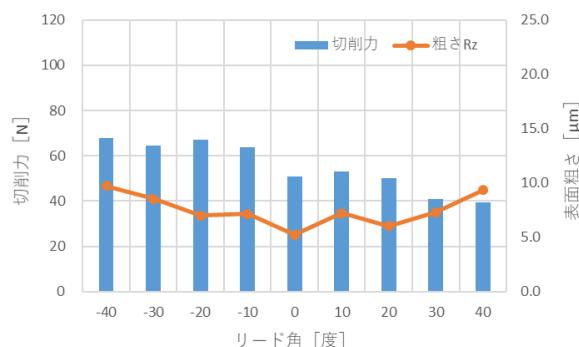


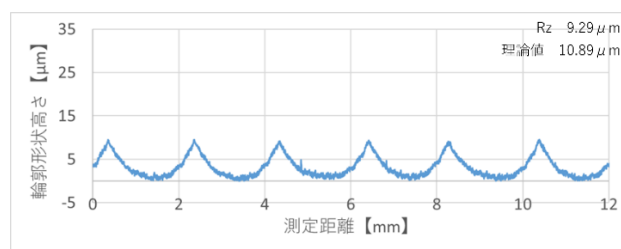
図 1 2 切削力及び輪郭形状最大高さ（リード角比較）

リード角の正負方向に係らず、角度の増加に伴い、理論粗さが増加することが確認できた。リード角が開くことにより、図 1 3 に示すように、加工面を形成する曲率半径が送り方向から見て、楕円状に変化しバレル円弧より小さくなるためと考えられる。

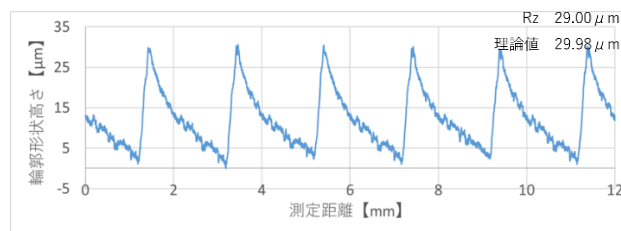
よって、リード角を設定する場合は、理論粗さ（カフス高さ）の増加を踏まえた、軸方向切込み（加工ピッチ）を設定する必要があることが分かった。

3. 2. 球面加工の表面粗さの評価

平面への加工結果を基に、チルト角変更における影響をさらに調べるため加工した 1/8 球のピック送り方向の輪郭形状を測定し、理論上の最大高さ（Pz）と比較した結果を図 1 4 に示す。（曲面形状の曲率 100R は形状から除して表示）



(a) チルト角 13.6 [deg] の輪郭形状



(b) チルト角 18.1 [deg] の輪郭形状

図 1 4 ピック送り方向の輪郭形状（曲面チルト角比較）

理論上の最大高さとも一致し、曲面形状を対象にした場合でも、平面形状を加工した場合と同様に、理論通りの面が形成されていることを確認した。

以上の結果より工具の形状および加工条件から切削結果の形状を予測することが、バレル工具を使用する上で重要であることがわかった。

3. 3. 加工時間比較

前項にて分かったバレル工具の特性を基に、アルミ合金製の加工部品を想定したサンプルによる、バレル工具及びボールエンドミルの壁面部加工時間の比較を行った。CAM 上の加工時間の結果を表 7 に、実際にバレル工具を使用して加工した結果を図 1 5 に示す。

表 7 加工時間の比較

	中仕上げ加工	仕上げ加工	合計
ボールエンドミル	59 分 00 秒	48 分 38 秒	1 時間 47 分 38 秒
バレル工具	13 分 33 秒	10 分 56 秒	24 分 29 秒



図 1 5 加工結果

加工時間は中仕上げ及び仕上げ加工時間の合計で、ボールエンドミルに対して、約 23%短縮され、約 4 倍の加工効率であることが確認できた。また、バレル工具加工表面についてもびびり振動等が発生していないことが確認できた。

4. 結言

アルミ合金製部品の中仕上げと仕上げ加工にバレル工具を使用した際、加工条件が切削力及び加工面粗さに及ぼす影響について調査し、以下の結果を得た。

- ・切込み量と主軸回転数を変えると、一般的なエンドミルと同じ傾向¹⁾を示した。
- ・アルミ合金に対しては、工具推奨の切込み量を超えても問題なく加工できたため、切削量の多い中仕上げの条件でも使用できた。
- ・チルト角を調整し先端円弧等の曲率が異なる部分が含まれる部分で切削すると、理論形状の時点で表面粗さが悪化し、理論どおりの特徴を持った形状が生成された。
- ・リード角を増加（工具根本側を先行）させると切削

力が低減されるが、角度が増加するほど、理論粗さ増加する。

以上の結果より、工具形状、切削条件から切削面の輪郭形状をしっかりと予測し、コントロールすることがバレル工具を使用していく上で重要であることが分かった。また、製品の製造を想定して、アルミ合金製部品の中仕上げと仕上げ加工にバレル工具を使用することで、約 4 倍の効率で加工できることがわかった。

謝辞

本研究において、ご指導や研究資料のご提供等、多大なるご協力を賜りました東京農工大学の笹原弘之教授及び日本大学の齋藤明徳教授に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) TECHNICAL DATA エンドミル 19.09 改訂版.
オーエスジー株式会社. p.17-38.
- 2) 五月女英平. バレル工具による高効率仕上げ加工技術の開発. 栃木県産業技術センター研究報告, No.17, 2020, p.1-6.
- 3) 五月女英平. バレル工具の傾斜角度が仕上げ面粗さと工具寿命に及ぼす影響. 栃木県産業技術センター研究報告, No.18, 2021, p.19-23.