

(論文)

アルミ合金の高速エンドミル加工技術

High-speed End Milling of Aluminum Alloys



赤澤浩一*
Koichi Akazawa



尾崎勝彦*(工博)
Dr. Katsuhiko Ozaki

Recently, high-speed cutting for aluminum alloys has been applied in automobile and aircraft industries. In this paper, the relationship between cutting speed and the adhesion of aluminum alloy on the rake face and the adhesion generation mechanism were examined. A new method of inhibiting tool chatter and tool axial run-out, which disturb high speed end milling, was developed. Cutting experiments showed that this new method greatly improved cutting performance.

まえがき = アルミ合金の切削加工では、切削速度を大きくすることにより、切削抵抗、仕上げ面粗さが減少し、被削性が向上すると一般に言われている¹⁾。そのため、航空機産業、自動車産業および樹脂金型産業などにおいて、アルミ合金の高速切削加工が着実に実用化され始めている。しかし、種々のアルミ合金種や切削加工モードにおいて高速化を実現するには、高速切削のメカニズムの解明がまだ不十分である。例えば旋削加工などでは、加工面品質を左右する工具への被削材の凝着現象が十分に検討されていない。また、エンドミル加工の高速切削化においては、びびり振動や工具の回転振れ抑制などが課題となる場合があり、安定した実用化の妨げになっている。

そこで本研究では、高速切削のメカニズム解明のため、切削抵抗や仕上げ面粗さに大きな影響を及ぼす工具凝着物と切削温度との関係について検討した。また、エンドミル加工の高速化の主な課題であるびびり振動と工具の回転振れ低減手法を開発したので報告する。

1. 工具凝着物生成における切削温度の影響

1.1 実験方法

実験では、切削速度と被削性の関係を明らかにするため、NC 旋盤（オークマ(株)製 LS-30N）により外周長手旋削加工を行った。被削材としては、構造部材として多用されているアルミ合金 A5052-H112 材を使用した。工具には、超硬 K 種（住友電工(株)製 G10E, SNMN120408）を用いた。また、切削油は用いず、乾式切削にて加工を行った。被削性の評価項目として、切削抵抗、仕上げ面粗さ、凝着物高さおよび刃先近傍の切削温度を測定した。切削抵抗の測定は、圧電型動力計（日本キスラー(株)製 TYPE9263）を用い、仕上げ面粗さと凝着物高さは接触式表面粗さ計により測定を行った。また、刃先近傍の切

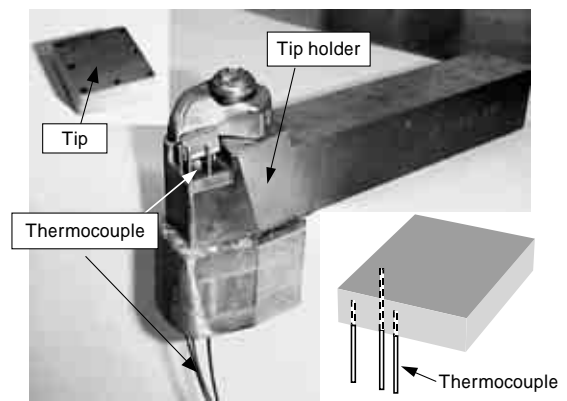


写真 1 切削温度測定用工具

Photo 1 Cutting tool for cutting temperature measuring

表 1 旋削加工条件

Table 1 Cutting conditions of turning

Cutting speed	100, 300, 400, 500, 600, 800 m/min
Depth of cut	1.0 mm
Feed rate	0.1 mm/rev

削温度の測定は、写真 1 に示すように、超硬チップに放電加工によりすくい面裏側から穴をあけ、熱電対を挿入した特殊チップを使用した。なお、刃先温度については、熱電対により測定した工具内部温度から 3 次元熱伝導解析により算出した。切削条件を表 1 に示すが、切削速度を 100 から 800m/min まで変化させて、被削性の変化を評価した。

1.2 外周旋削実験結果

旋削加工後の各切削速度における工具すくい面の写真を写真 2 に示す。また、各切削速度における凝着物高さの測定結果を図 1 に示す。写真 2 から、切削速度が増加するにしたがい、工具すくい面への被削材の凝着量が減少していることがわかる。凝着物高さに関しても、切削

*技術開発本部 材料研究所

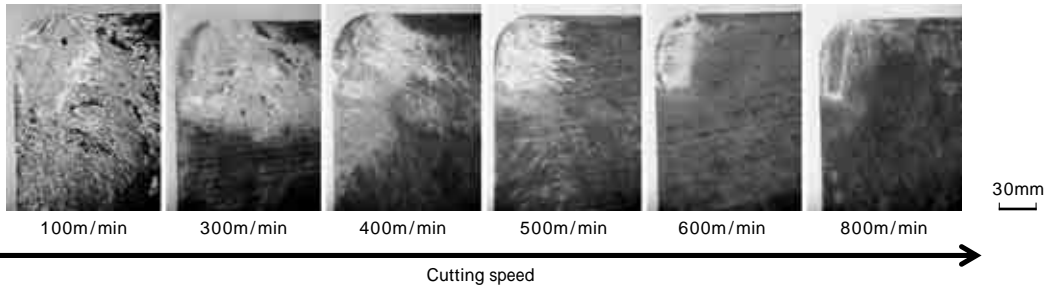


写真2 工具すくい面の変化
Photo 2 Changes of rake face

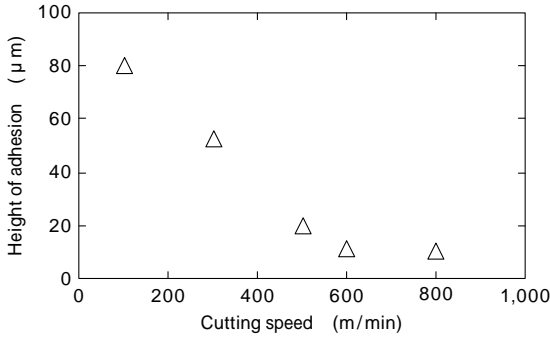


図1 切削速度と凝着高さの関係

Fig. 1 Relationship between cutting speed and height of adhesion

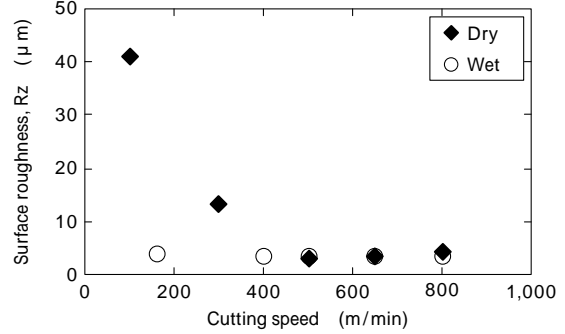


図2 切削速度と仕上げ面粗さの関係

Fig. 2 Relationship between cutting speed and surface roughness

速度の増加により減少し、切削速度が500m/min以上になると20μm以下の薄膜状の凝着となっている。

次に、切削速度と仕上げ面粗さの関係を図2に示す。図2より、切削速度が大きくなるにしたがって、仕上げ面粗さは減少する。そして、切削速度が500m/minを超えるとほぼ一定となり、湿式加工と同等な仕上げ面粗さとなった。すくい面上の凝着物高さとして仕上げ面粗さは、切削速度の変化に対し同様の変化を示すことがわかる。つまり、切削速度の増加により凝着物高さが減少するために、仕上げ面のむしれや凝着物の脱落による加工面不良の発生が抑制され、その結果、仕上げ面粗さが減少したものと考えられる。この傾向は、図3に示す切削抵抗の測定値も同様であり、切削速度500m/min以上において、凝着物の減少により工具すくい面における工具と被削材との摩擦抵抗が急激に減少するため、切削抵抗が減少したと考えられる²⁾。

1.3 考察

切削速度の増加による凝着高さ減少の要因の一つとして、切削速度と相関の高い切削温度の影響が考えられる。そこで、切削速度と切削温度との関係を明らかにするため、熱電対により測定した超硬工具内部の局所的な温度変化から、3次元熱伝導解析により工具刃先部の切削温度を算出した。解析では、超硬チップ形状の3次元モデル(密度:14,600kg/m³,熱伝達率:15.1W/m・,比熱:917J/kg・)において切削点への入熱量を変化させて温度分布の解析を行い、温度測定点における測定値と解析値が一致するように入熱量を最適化した。

最適化した入熱量で解析した工具刃先部の切削温度と測定した工具内部の温度を図4に示す。図4から、切削温度は切削速度300m/minまでは上昇し、300m/min以上になると一旦下降傾向を示し、600m/min以上で再び

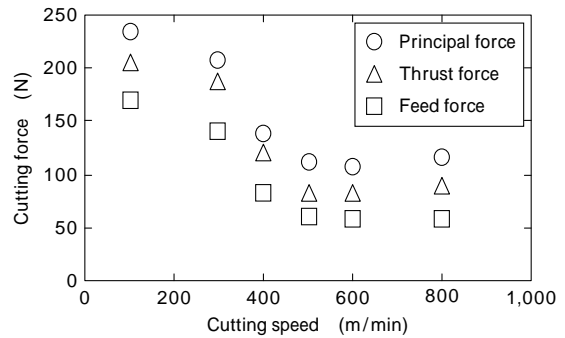


図3 切削速度と切削抵抗の関係

Fig. 3 Relationship between cutting speed and cutting force

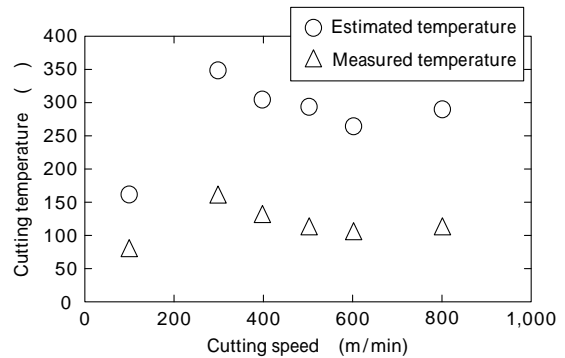


図4 切削速度と切削温度の関係

Fig. 4 Relationship between cutting speed and cutting temperature

上昇し始めていることがわかる。通常、切削速度が高くなると発熱量が増大し、その結果工具刃先の温度は上昇することが知られている。しかし、図4のようにアルミ合金の高速切削領域で切削温度が低下した原因としては、この速度域において工具すくい面の凝着物高さが著しく減少したため(写真2)、これに伴いすくい面に作用する摩擦抵抗が図3のように低下したためであると推測できる。

切削速度の増加に伴い、凝着量および仕上げ面粗さが低減した要因を検討するためには、温度変化による被削材料の材質の変化について明らかにすることが重要であると思われる。そこで、高温圧縮試験を実施し、各温度での降伏応力値を測定した。圧縮試験は、(株)島津製作所製オートグラフを用いた。サンプルは円筒形状（直径9mm、高さ12mm）とし、金型を温度制御しながら実施した。

圧縮試験結果として、試験温度と室温における降伏応力値で各試験温度で測定された応力値を割ることにより求めた規格化降伏応力値の関係を、図5に示す。室温から温度が高くなるにしたがって規格化応力値は減少傾向を示す。特に、200から300までの間で急激に減少し、300以上では比較的緩やかな減少カーブを描いていることがわかる。ここで、図4の切削実験により測定した値から算出した各切削速度における刃先近傍の切削温度と材料強度の関係を考えると、切削速度300m/min付近で最も強度が小さくなることになる。しかし、図4に示す切削温度は凝着物がすくい面上に生成された後の温度であるため、凝着物の影響を受けていることになる。つまり、凝着物生成のメカニズムを検討するためには、凝着物が生成される前の温度を明らかにすることが重要であると考えられる。

そこで、2次元温度連成変形シミュレーションによる切削過程の数値計算を行い、アルミ合金材の切削加工における切削速度と切削温度の関係を求めた。ここでは、切削シミュレーションソフトADVANTEDGEを用いた。なお、本シミュレーションでは凝着機構については考慮していないため、凝着の発生がない場合の切削温度を解析することが可能となる。図6に切削速度と刃先温度の

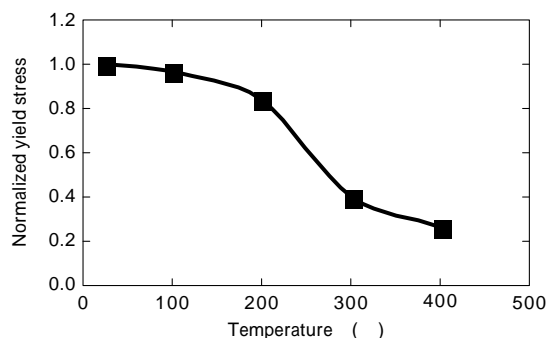


図5 切削速度と標準化した降伏応力の関係

Fig. 5 Relationship between temperature and normalized yield stress

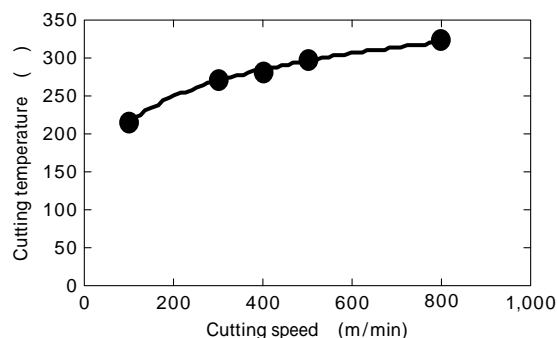


図6 切削速度と切削温度（解析値）の関係

Fig. 6 Relationship between cutting speed and analytical cutting temperature

関係を示す。図6から、切削温度は切削速度の増加とともに上昇することがわかる。ここで、凝着の生成状態が大きく変化する切削速度300から600m/minにおける切削温度を見てみると、切削速度300m/minで約270、600m/minで約300となっている。この温度域は図5に示す材料強度の急激な減少温度領域とほぼ一致することがわかる。つまり、切削速度300から600m/minの速度領域において、被削材強度が著しく低下する。このため、切削速度が500m/min程度を超えた速度領域では、凝着物はすくい面上で堆積、成長することができず、薄膜状の凝着形態となることが考えられる。以上より、本アルミ合金の切削加工では、切削速度が500m/min以上の高速切削を行うことにより、粗さの小さい良好な仕上げ面を得ることができるものと考えられる。

2. 高速エンドミル加工

2.1 実験方法

本加工実験では、大型の横型マシニングセンタに、直径60mm、突出し長さ500mm、刃数6枚の長尺エンドミル工具を装着し、側面高速加工により実施した。

2.2 びびり振動の抑制

大型部材などの側面加工に使用されるエンドミルは、一般的なものと比較して突出し量が増える。突出し量が増える工具は相対的に剛性が低くなるため、加工中にびびり振動の発生が起りやすくなる。びびり振動が発生した場合には、工具回転数を低く設定したり、切込み量および送り速度を小さくすることにより加工負荷を低減させ、振動を抑制することが一般的に行われている。ただし、こうした回避策は加工効率向上の大きな阻害要因となるため、加工効率を上げてびびり振動を抑制できる加工条件の選定が重要となる。そこで本研究では、理論的手法によりびびり振動を抑制した高効率加工条件があることを明らかにする。

切削加工では図7に示すように、工具の自由振動により被削材と工具が相対的に振動しながら加工を行っているため、周期的に切り厚さが変化する。前加工面と現加工面の位相差により切り厚変動の振幅が増大すると加工振動が増大し、次回転時にさらに大きな切り厚変動となる。図8(a)に示すように、この切り厚

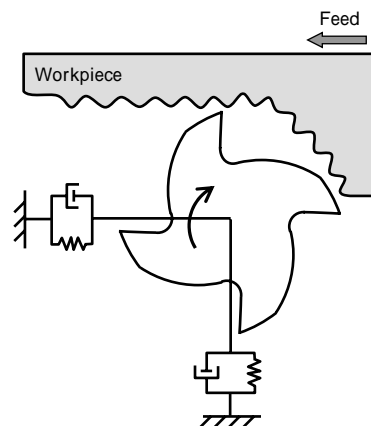


図7 動的なエンドミル加工プロセスの模式図

Fig. 7 Schematic illustration of dynamic milling process

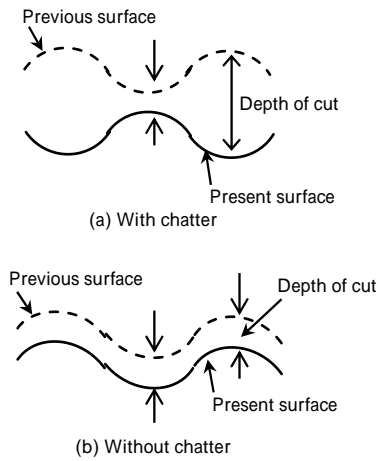


図8 びびり振動発生原理
Fig. 8 Mechanism of chatter generation

表2 エンドミルのモーダルパラメータ
Table 2 Modal parameter of endmill

	x axis	y axis
Natural frequency	179 Hz	182 Hz
Damping ratio	0.0288	0.0223
Stiffness	2.0×10^6 N/m	1.8×10^6 N/m

さの振幅が一定値を超えると振動が発散し、自励びびり振動となる。したがって、図8(b)のように工具の自由振動と回転周期が一致すれば、切削厚さの変動はなくなり、びびり振動の発生は抑制されることになる³⁾。このように、工具振動と回転周期を同期させるためには、工具の振動特性を測定する必要がある。

そこで、直径60mm、突出し長さ500mmの長尺エンドミル工具を加工機に取付け、主軸-工具系の振動特性の測定を行った。振動特性の測定は、一般的によく行われるように、工具先端付近に加速度ピックアップを取付け、インパクトハンマで加振することにより実施した。測定値より伝達関数を算出し、半値幅法によりモーダルパラメータを求めた結果を表2に示す。この主軸-工具系の振動特性に対し切削力モデルにより予測される切削抵抗値を外力として、自励振動の伝達関数を計算すると、伝達関数の特性方程式がゼロとなる場合、自励振動の発生限界となる。外力の周波数、つまり工具の回転数を変化させて、各回転数ごとに自励振動発生限界切込み量を算出し、工具回転数と限界切込み量の関係求めた。計算結果を図9に示す。図中では、曲線が振動発散の限界値を示しており、曲線より上の領域でびびり振動が発生することを表している。縦軸にはエンドミルの径方向切込み量、すなわち加工量に相関する加工条件パラメータをとっており、主軸回転数の変化により限界加工量が増減していることがわかる。ここで注目されるのは、主軸回転数を5,000rpm以上にすると、びびり振動の発生は抑制されることであり、これは工具の自由振動周期よりも工具回転周期が短くなったためである。つまり、今回対象とした長尺エンドミル工具においては、主軸回転数を5,000rpm以上にすることにより、びびり振動の発生を抑制できるほか、前章までに述べたように、仕上げ面性状に関しても高速切削は有利となる。

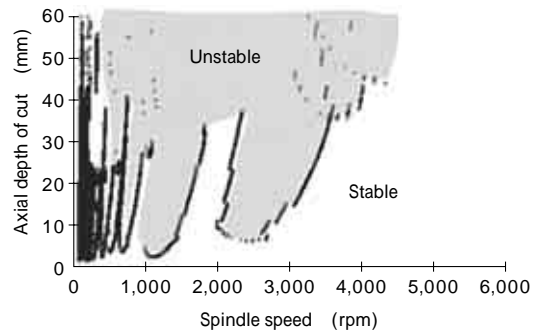


図9 びびり振動の発生限界予測結果
Fig. 9 Simulated stability lobes

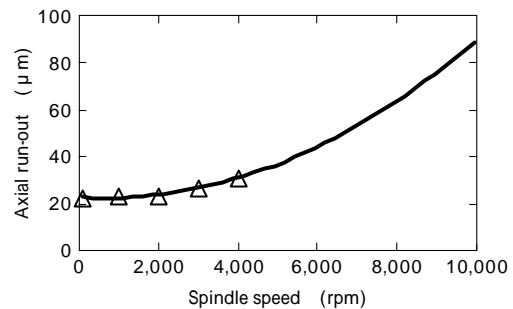


図10 主軸回転数と回転振れの関係
Fig.10 Relationship between spindle speed and axial run-out

2.3 回転振れの低減

長尺エンドミル工具において主軸回転数を高速化することは、加工効率だけでなく、仕上げ面性状の向上およびびびり振動の発生抑制に関しても効果が期待できる。しかし、突出し量の大きい長尺工具を高速回転させると、工具の回転振れが発生し、びびり振動よりも周波数の低い加工振動が発生する。回転振れによる加工振動が発生する結果、仕上げ面に振動痕が残り、面粗さは大きくなる。このような工具の回転振れは、工具のバランス不良により発生するものと考えられる。そこで、各工具メーカーやツーリングメーカーでは、工具やホルダの形状精度を向上させ振れ低減を行っている。しかし、数 μm オーダまで振れ低減が実現できているのは長さ100mm程度の汎用エンドミルであり、突出し長さが500mmを超えるような長尺エンドミルでは実現できていない。

本エンドミル工具において各主軸回転数における工具先端付近の振れ振幅の測定結果を、図10に示す。実験では、非接触変位計と工具の接触を避けるため、主軸回転数4,000rpmを上限として測定を行い、4,000rpm以上の振れについては、近似曲線による推定値で表している。図10から、主軸回転数の増加に伴い工具の振れは大きくなり、主軸回転数6,000rpm以上においては40 μm 以上と非常に大きい値となっていることがわかる。このように大きな振れを発生させる長尺エンドミル加工において高速回転時の振れを低減させるためには、工具を加工機に取付けた状態で、動バランスを調整することが有効であると考えられる。しかし、従来から研削加工機などの動バランス調整においては、軸受などの非回転部分の振動を加速度計で測定することにより行われており、突出し量の長い工具の根元部の振動値による動バランス調整では、高精度かつ能率的に調整することは困難であ

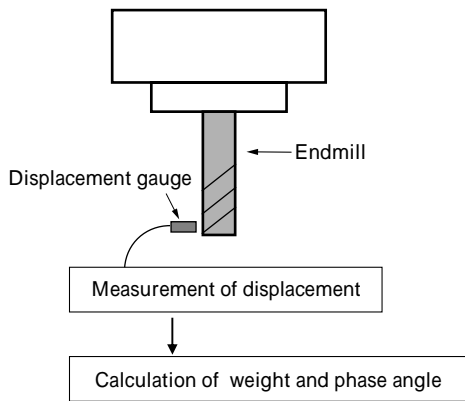


図11 動バランス調整方法
Fig.11 Method for weight balance adjusting

る。そこで、本研究では図11に示すように、非接触変位計により直接工具先端部付近の振れを測定し、振れの振幅が十分に小さくなるようにウェイトを付加することにより、動バランスを調整する手法を考案した。本手法で使用する工具は、可能な限り工具先端付近において動バランス調整を行えるようにするため、図12に示すように、工具切刃に近い部位にウェイト脱着用のねじ穴を円周方向に多数加工した⁴⁾。なお本研究では、バランス調整において高精度かつ能率的に調整が行えるようにするため、工具の形状、回転数および振れの振幅からウェイトの重量と取付け位相角を算出する調整作業支援ソフトを開発した。

次に、本手法の有効性を検証するため、本手法を用いて動バランスを調整し、各主軸回転数における回転振れの振幅を測定した。測定結果を図13に示す。図からわかるように、動バランス調整により主軸回転数の増加に伴う振れの増大が完全に抑制されている。さらに、バランス調整工具では、主軸回転数8,000rpmと超高速回転時においても、バランス未調整工具の低速回転時の振れと同等以下にまで低減させることができた。

次に、動バランスを調整した工具により加工試験を行った。本実験では、エンドミル工具による側面の仕上げ加工を高速切削条件において実施した。加工試験の結果、これまで実施不可能とされていた長尺工具における高速・高効率加工条件においても良好な仕上げ面を加工することができた。

むすび = 最後に本研究の結果をまとめる。

- 1) アルミ合金加工において、切削速度と凝着物の生成および仕上げ面粗さの関係を調査した結果、切削速度500m/min以上の高速切削領域において、凝着物

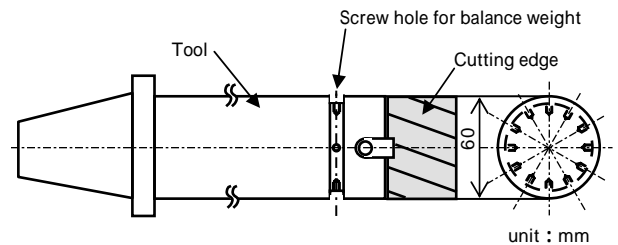


図12 開発工具の概要図
Fig.12 Schematic illustration of experimental tool

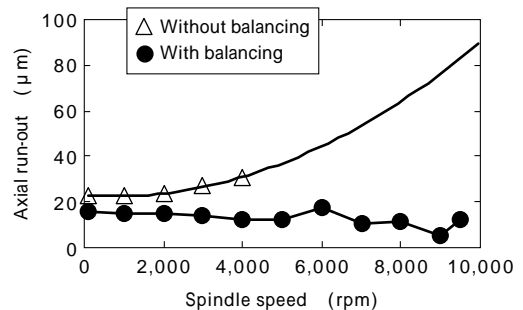


図13 動バランス調整後の主軸回転数と回転振れの関係
Fig.13 Relationship between spindle speed and axial run-out after dynamic balance adjustment

の生成量が減少し、その結果仕上げ面粗さが大幅に小さくなることを明らかにした。また、凝着量の減少は切削温度による被削材強度の低下と密接な関係があることを明らかにした。

- 2) 長尺エンドミル加工において、主軸回転数の高速回転領域でびびり振動の発生を抑制することが可能な、安定切削条件が存在することを理論的に明らかにした。
- 3) 長尺エンドミル工具の高速回転化の障害要因である工具の回転振れを低減する動バランス調整方法および動バランス調整用工具を開発した。本手法により工具の動バランス調整を行うことによって、突出し長さ500mm以上のエンドミルにおいても高速切削条件で加工することが可能となることを明らかにした。

参考文献

- 1) 山田茂ほか：軽金属，Vol.43, No.4 (1993) p.206.
- 2) 赤澤浩一ほか：アルミ合金切削における工具凝着物におよぼす切削速度の影響，精密工学会2001年度春期大会講演論文集，(2001)
- 3) Y. Altintas et al. : A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills, Annals of the CIRP, Vol.45, No.1 (1996) p.59.
- 4) 公開特許：2005-118929.