

Ti-6Al-4V 合金の低周波振動切削を用いたドライ加工による 仕上げ面表面形状の予測

Prediction of Surface Shape in Low Frequency Vibration Cutting of Titanium Alloy Ti-6Al-4V under Dry Condition

精密工学専攻 44号 藤田 晴渡
Haruto Fujita

1. 緒言

チタン合金は酸化被膜による優れた耐食性と比強度が高いなどの機械的性質を持っているため、航空宇宙分野や海洋開発、自動車部品など幅広い分野で使用されている。また、生体適合性と骨適合性に優れていることから、人工関節や歯科用インプラントなどの生体材料に活用されている⁽¹⁾。このとき埋め込まれるチタン合金の表面形状は細胞の接着、伸展、配列、集族、分化に影響を与える。例えば細胞の伸展方向は、表面構造の配列に影響を受け、幅 1~10 μm 、深さ 0.5~1.5 μm 程度の溝ではタンパク質が溝に沿って伸展し、規則正しく配列する⁽²⁾。また、骨芽細胞は平滑面よりも粗面で多くのコーゲンの新生と石灰化を示す⁽³⁾ため、ミクロ的な表面粗さが細胞の接着性に影響する。さらに、マクロレベル(10 μm ~数 mm)では初期安定性や長期安定性に優れ、ミクロレベル(1~10 μm)は結合力を増加させ、細胞と同程度の 10 μm 程度の表面粗さが生体親和性に関して望ましいという報告⁽⁴⁾がある。これらより、大小幅のある表面形状が求められる。しかしながら、従来の切削加工では単調な表面形状のみしか得られない。

低周波振動切削とは、送り方向に振動する加工方法であり、切削中に工具の“空振り”時間を設けることで切りくずを細かく分断させて排出することができる。また、実質的な一回転一刃当たりの送りが各主軸位相角で異なる特徴を有している⁽⁵⁾。これにより、低周波振動切削の仕上げ面は波状のツールパスが連なった表面形状となり、ブラスト処理やエッチング工程を減らす可能性がある。しかし、表面形状に影響を及ぼす因子について議論した研究はあまり見受けられない。そこで本研究では低周波振動切削を用い、工具摩耗や塑性流動による盛り上がり等の観点から表面形状を予測する。また、環境負荷、洗浄コスト低減を目的としドライ切削とした。

2. 低周波振動切削

低周波振動切削(以下「LFV」と表記)とは、サーボ軸を送り方向に振動挙動させ、その振動が主軸回転と同期しながら切削する加工方法である。Fig.1は低周波振動による工具軌跡を模式的に示したものであるが、切削中に工具の“空振り”時間を設けることで切りくずを断続的に任意の長さで排出させることが可能である。工具が被削材と相対的に振動す

るため、仕上げ面の形状に影響すると考えられる。また、LFVには特有のパラメータが Q と D の二つある。 Q と D はそれぞれLFVの振動条件を決定するパラメータである。 Q は送り量 f に対する振動振幅の比である。振動振幅の幅はこの Q と送り量 f をかけたものとなる。 D は主軸一回転あたりの振動回数である。

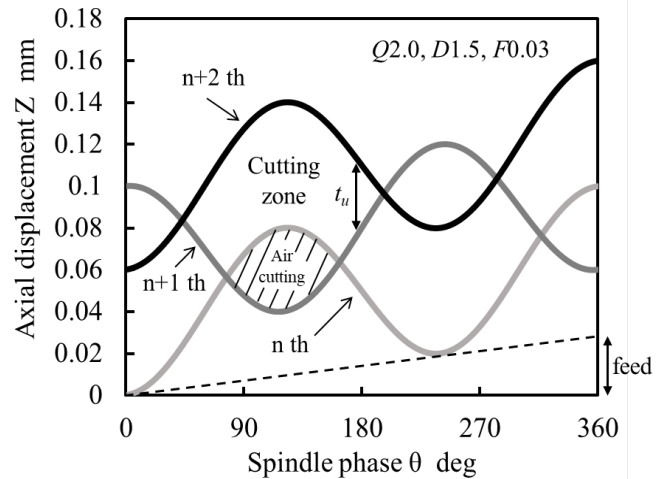


Fig.1 Schematic of Low Frequency Vibration cutting ($Q2.0, D1.5$)

3. 仕上げ面形状予測理論

3.1 仕上げ面への影響因子

仕上げ面として現れる送りマークの凹凸は理想的な切削状態においては切れ刃の形状と送り量のみから幾何学的に決められる形状と大きさをもつ。これによる粗さを理論仕上げ面粗さと呼ぶが、実測される仕上げ面粗さはこれより大きいのが通常である。すなわち通常の仕上げ面粗さは以下の五要素からなるものである⁽⁶⁾。

- 工具形状と送り、運動機構から幾何学的に求められる粗さ
 - 材料の盛り上がりなどから生ずる粗さ
 - 切れ刃の欠損、摩耗から生ずる粗さ
 - 構成刃先の生成、脱落にもなって生ずる粗さ
 - 切れ刃と工作物の相対位置が変動するために生ずる粗さ
- 今回はi~ivについて着目する。

3.2 仕上げ面形状の評価手法

仕上げ面の形状を予測する上で、ツールマークと呼ばれる

送り方向の凹凸と各位相の最大高さの差から生まれるツールマークが連なった切削方向の凹凸とツールマーク底の微細な凹凸に着目し、特に一つ一つのツールマークの形状について予測する。これを定量的に予測するために、Fig.2のように一つ一つのツールマークの実測値の幅を W_m 、最大高さを H_m とし、その予測値をそれぞれ W_p 、 H_p とする。

ここで W_p は前節の要素 i 、 H_p は要素 i から iv が影響すると考えられるため、各要素による幅と高さの増減をその要素の番号を下付き添字として定義し、粗さの予測式(1)、(2)を構築した。

$$W_p = W_i \quad (1)$$

$$H_p = H_i + H_{ii} + H_{iii} + H_{iv} \quad (2)$$

3.3 工具形状と工具軌跡から算出される理論粗さ

工具のノーズ半径 r_e と切削厚さ t_u から理論粗さ W_i 、 H_i は式(3)で表される⁽⁷⁾。

$$W_i = t_u, \quad H_i = r_e - \sqrt{r_e^2 - \frac{t_u^2}{4}} \quad (3)$$

ここで、LFV の工具軌跡を式(4)⁽⁸⁾⁽⁹⁾で近似し、式(5)~(7)のように LFV の切削厚さを算出する。また、空振り中に工具と被削材は擦過していないとする。

$$Z_n(t) = FSt - \frac{F}{2} \left(Q + \frac{1}{2D} \right) \cos[2\pi f_v t + (n-1)\pi] + \frac{F}{2} \left[Q + \frac{1}{2D} + 2(n-1) \right] \quad (4)$$

ただし、 t 、 F 、 S 、 f_v はそれぞれ時間、送り量、回転数、工具振動回数である。

$$t_u = Z_{n+2} - Z_n = 2F, \quad (Z_{n+1} - Z_n < 0) \quad (5)$$

$$t_u = Z_{n+2} - Z_{n+1} = -F \left(Q + \frac{1}{2D} \right) \cos(2\pi f_v t) + F,$$

$$(Z_{n+1} - Z_n \geq 0, Z_{n+2} - Z_{n+1} \geq 0) \quad (6)$$

$$t_u = 0, \quad (Z_{n+1} - Z_n < 0, Z_{n+2} - Z_{n+1} < 0) \quad (7)$$

Fig.3 に Z_{n+1} と Z_{n+2} の切削厚さの変化を重ね合わせたものを示す。振動によって切削厚さが 0 から最大 $2F$ に変化することと同位相内に2つの切削厚さが存在する場合があることがわかる。切削厚さ最大部のツールマークの最大高さは一定で最大値をとり、切削厚さが変化する部分はツールマークの幅、最大高さが変化すると考えられる。

3.4 塑性流れによる盛り上がり

切削における自由面の塑性流れによる盛り上がりは被削材の流動性と関係があるため、この盛り上がりによる粗さの増分 H_{ii} を式(8)~(10)⁽⁷⁾によって算出する。なお、 k_1 、 k_2 は被削材によって決まる係数である。

$$H_{ii} = k_1 \ln \Omega + k_2 \quad (8)$$

$$\Omega = \frac{E \cot \eta}{\sigma_c}, \quad \eta = \sin^{-1} \left(1 - \frac{d_c}{r_e} \right), \quad \sigma_c = \sigma_c' \left(\frac{t_u}{t_u'} \right)^{-m_c} \quad (9)$$

$$R_p = K_1 \ln t_u + K_2, \quad K_1 = m_c k_1 \quad (10)$$

ただし、 Ω 、 E 、 η 、 σ_c はそれぞれ流動因子、ヤング率、刃先の半円錐角、流動応力で、 σ_c' 、 t_u' は基準となる流動応力と切削厚さである。また、式(9)の η は切削幅がノーズ半径に比べ、

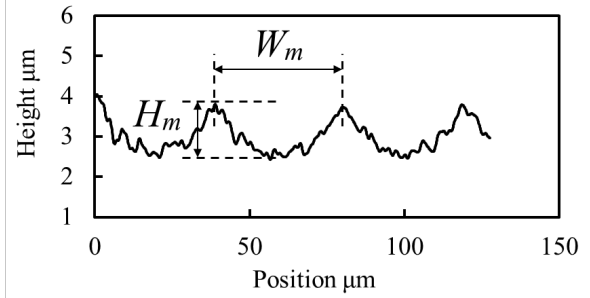


Fig.2 Measurement method for the tool mark on the finished surface

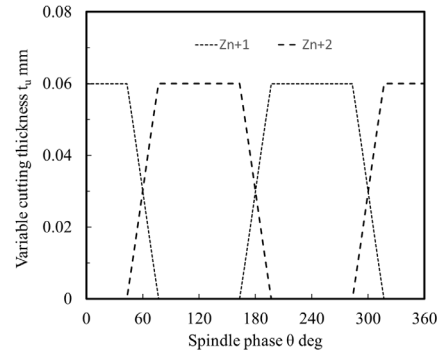


Fig.3 Variation of cutting thickness

十分に小さい場合の式であるため、今回は $\cot \eta = 1$ として計算する。

3.5 流動応力と切削モデル

3.4 節の塑性流れによる盛り上がり量を求めるために、せん断面の一次塑性領域 (primary shear zone, 以下 PSZ) の流動応力を Johnson-Cook model⁽¹⁰⁾を用いて次式より算出する。また、計算に必要なひずみ速度、切削温度は Oxley の切削モデル⁽¹¹⁾を用いて算出した。各定数を Table 1 に示す。

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (11)$$

Table 1 Johnson cook constants⁽¹²⁾

A	B	C	m	n	$\dot{\bar{\epsilon}}_0$	T_m [°C]
968	380	0.02	0.577	0.421	1	1604.85

3.6 工具摩耗と凝着物による影響

仕上げ面を創成する部分の工具摩耗による幾何学的な粗さの増減 H_{iii} を次式に示す⁽⁶⁾。

$$H_{iii} = (V_B' - V_B) \tan \gamma \quad (12)$$

ただし、 V_B' 、 V_B 、 γ はそれぞれ前逃げ面境界摩耗幅、ノーズ逃げ面平均摩耗幅、工具逃げ角である。境界摩耗幅が増大すると削り残しが生じて粗さが増すが、先端部の摩耗の進展や、刃先の一様な摩耗が生じると粗さは減少する。

ツールマークの谷部の微細な凹凸形状は工具切れ刃稜の凝着物が転写されると考えられる⁽¹³⁾。したがって、凝着物が高く成長すると H_{iv} が増加する。

3.7 D と切削方向の凹凸

主軸一回転あたりの振動回数 D は工具軌跡の周期性と関係があるため、マクロ的な仕上げ面形状に影響を及ぼすと考

えられる。Fig.4のように仕上げ面において、位相に対して切削厚さ最大の領域 A とそれ以下の範囲で切削厚さが変化する領域 B が存在すると考えられる。図内灰色網掛け部は切削部の一つを示し、青斜線は領域 A、赤横縞部は領域 B の切削部に相当する。この二つの領域ではツールマークの最大高さやその幅に差異が生じるため、その凹凸が連なることで切削方向に凹凸が創成され、送り方向に連なった山と谷として現れると考えられる。工具軌跡より、奇数回転目と偶数回転目でそれぞれ周期性があるため、この山と谷は $D2.5$ 、 $D4.5$ はそれぞれ 5、9 個の D の二倍個創成されると予測する。

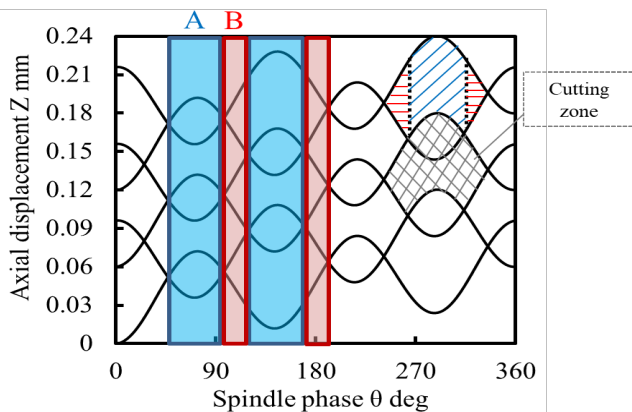


Fig.4 Each area with different spindle phase

4. 実験方法

被削材は、直径 30mm の Ti-6Al-4V の丸棒とし、低周波振動切削機 (シチズンマシナリー(株)製, VC03) を用いて慣用切削モード及び LFV (低周波振動切削) モードにて外周切削を行った。切削動力計 (Kistler 製, 9119AA2) を用いて切削抵抗を測定し、共焦点レーザ顕微鏡 (OLYMPUS 製, OLS-4100) を用いて仕上げ面と工具面上の凝着物を観察、計測し、真円度測定機 (Taylor Hobson 製, Talyrond 565LT) を用いて仕上げ面を立体的に観察した。また SEM (FEI 製, Quanta250) を用いて工具摩耗を観察、計測した。

切削条件を Table 2 に示す。なお、加工径が変わっても空振り時間を確保し効率良く切りくずを分断させるために、LFV の切削・振動条件を切りくずの長さを 20mm 程度になるように設定した。環境負荷低減と洗浄コスト削減の観点からドライ切削で行う。CC の送り量は 0.01 刻みで実験した。

5. 仕上げ面形状の予測と実験結果

5.1 断面プロファイル

Fig.5 のように送り方向に、仕上げ面の断面プロファイルを取得し、ツールマークの幅と高さを測定した。

Fig.6 に LFV の $Q2.0$ 、 $F0.01 \sim 0.03$ の切削厚さ最大部の仕上げ面の断面プロファイルを示す。送り量 F の増大に伴って高さが大きくなっているのがわかる。 $F0.01$ に比べ、 $F0.02$ 、 0.03 は明らかなツールマークが現れた。また、どの条件においても凝着物が転写されたと考えられるツールマーク底の数 μm の微細な凹凸が確認された。

Fig.7 に LFV の $Q2.0$ 、 $F0.02$ の切削厚さが最大部ではなくツールマークが複数創成された仕上げ面(3.7 節の領域 B)の

様相と断面プロファイルを示す。また、比較のために切削厚さ最大部(3.7 節の領域 A)の仕上げ面様相を並べて示す。同一の切削条件において、LFV では位相によって仕上げ面の断面プロファイルが異なることがわかった。

Table 2 Cutting conditions

	LFV	CC
Cutting tool	DCGT11T302R-F KW10 (Rake angle α 15°) (Relief angle γ 7°) (Nose radius r_e 0.2mm)	
Cutting speed V [m/min]	100	
Feed rate F [mm/rev]	0.01~0.03	0.01~0.06
Depth of cut d_c [mm]	1.0	
Amplitude/feed rate Q	1.0, 2.0	-
Vibration times/rev D	2.5, 3.5, 4.5	-
Lubrication	Dry	

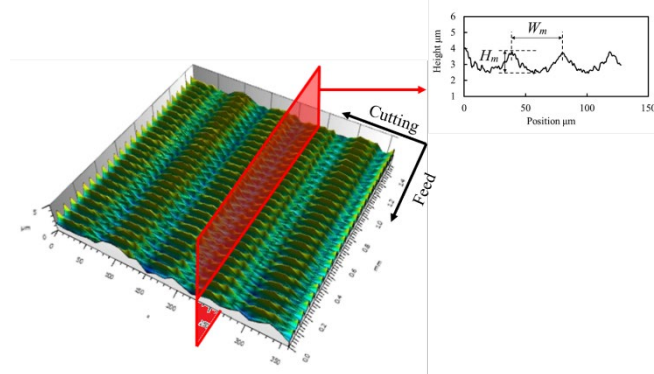


Fig.5 Fig.3.8 Measurement method of profile of machined surface

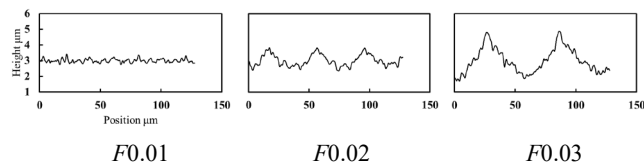


Fig.6 Profile of machined surface

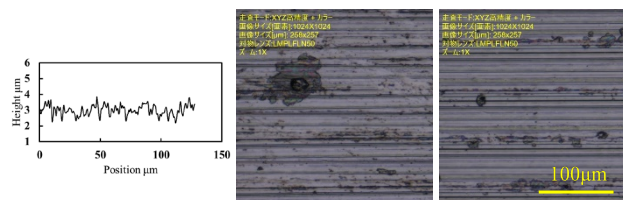


Fig.7 Difference in finished surface due to spindle phase change

5.2 ツールマークの幅 W と最大高さ H について

Fig.8 に LFV の $F0.03$ の切削厚さ、一刃一振動分の各予測要素、最大高さの予測値 H_p を示す。切削厚さ増加に伴って理論粗さ H_t が増加し、盛り上がり量は減少している。刃先が一樣に摩耗していたため、 H_{in} は負の値となった。また、低送り量では理論粗さに比べ、盛り上がりによる影響を受けやす

くなくなった。

Fig.9(a)~(c)にLFVの $F0.01 \sim 0.03$ のそれぞれ位相の変化に伴う W と H の予測値と実測値の変化を示す。ただし、 $F0.01$ のみツールマークを測定することが困難であったため、評価長さを $2F$ 以上として H のみ測定した。実測値は実線で、予測値のうち切削開始から被削材回転 $2n$ 周目を点線、 $2n+1$ 周目を破線で表している。 $F0.02$, 0.03 において W , H ともに予測値と実験値が概ね一致している。LFVはツールマークの幅と最大高さが周期的に変化することがわかる。

Fig.10に Q 別の前逃げ面境界摩耗幅とノーズ逃げ面平均摩耗幅、切削厚さ最大時の最大高さの予測値と実測値を示す。摩耗幅の差が大きい程、 H が増加するという傾向が一致している。値に差が生じたのは前切れ刃境界部による削り残しが小さいことや前切れ刃境界部のほか、ツールマークの底を創成するノーズ先端部の著しい摩耗が考えられる。

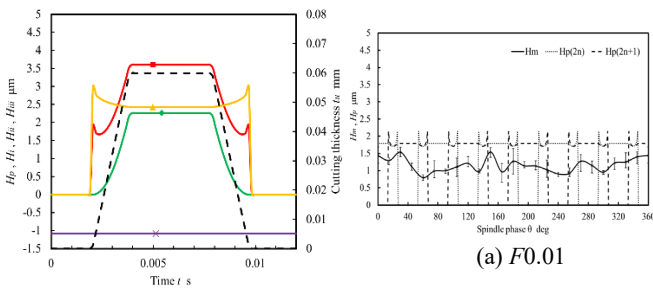
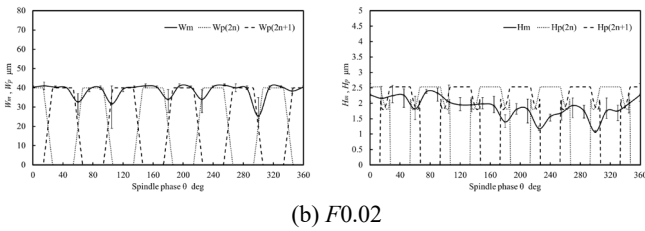
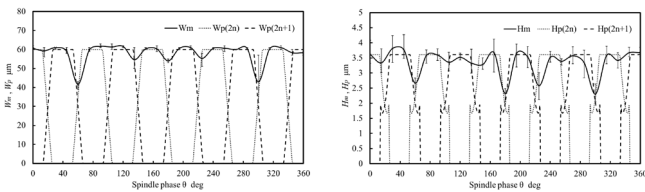


Fig.8 Each factor of prediction



(b) F0.02



(c) F0.03

Fig.9 Prediction of surface roughness using the developed model

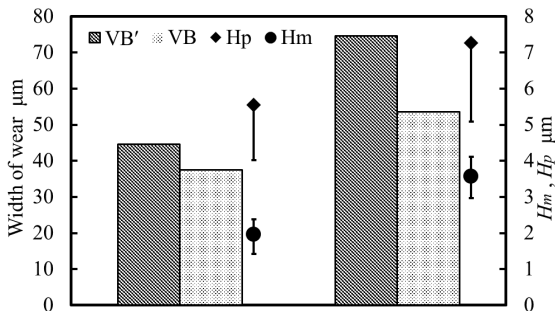
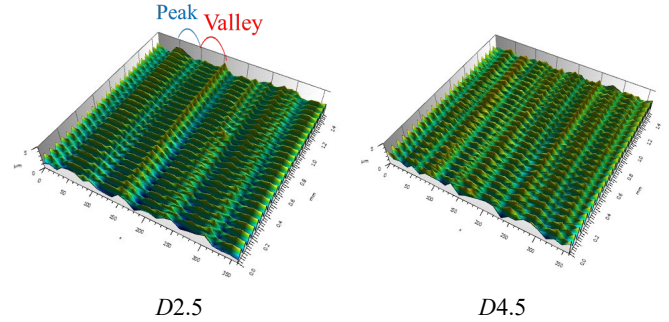


Fig.10 Width of wear and prediction of surface roughness by Q

4.2 表面テクスチャ

Fig.11にLFVの $F0.03$, $D2.5$ と 4.5 の各条件の表面テクスチャを示す。振動に伴う工具軌跡に沿った波状のツールパスが連なった表面形状が現れている。また、送り方向に山と谷が連なり、 $D2.5$ では5個、 $D4.5$ では9個それぞれ創成されている。これは山と谷の数が $2D$ 個創成されるという予測と一致する。LFVを用いることで、この山と谷、ツールマークとその底の微細な凹凸形状により大小幅のある表面形状が求められる生体材料として有効なものであると考えられる。



D2.5 D4.5

Fig.11 Machined Surface texture

5. 結言

- (1) LFVを用いた切削で仕上げ面に波状のツールパスが連なった表面形状を創成することができ、ツールパスの幅と最大高さを理論粗さ、盛り上がり、工具摩耗から表面形状を予測したところ、実測値と概ね一致した。
- (2) LFVの切削条件において $Q2.0$ と $Q1.0$ で、摩耗幅の差が大きい程、 H が増加するという傾向が一致している。
- (3) LFVを用いた切削でツールマーク底に凝着物が転写されたと考えられる微細な凹凸を確認した。
- (4) LFVの切削条件において $D2.5$ と $D4.5$ で仕上げ面に送り方向に連なった山と谷を創成し、これらの数が $2D$ 個であるという予測と一致した。

※「LFV」はシチズン時計株式会社の登録商標です。

参考文献

- 1)日本チタン協会編, 現場で生かす金属材料シリーズチタン, 工業調査会, (2007)p.25.,2)埜, 材料と生体組織との接合, 表面技術, **63**-12, (2012)p.733.,3)J. Y. Martin et al., J. Biomed. Mater. es, **29**-389, (1995),4)梅田ら, 顕微鏡, **47**-4, (2012) pp.223-227.,5)三宅ら, 2015年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文, (2015)p.421.,6)臼井, 切削・研削加工学 上, 共立出版, (1971),7)Y. Gao et al., International Journal of Mechanical Sciences, **111**-112 (2016) pp.88-100.,8)A. Miyake et al., Precision Engineering, **53**, (2018) pp.38-45.,9)Y. Gao et al., Int J Adv Manuf Technology, **86**, (2016) pp.2945-2959.,10)Gordon R. Johnson et al., Engineering Fracture Mechanics, **21**, 1 (1985) pp.31-48.,11)Y. Özel et al., Journal of Manufacturing Science and Engineering Copyright, **128**-1 (2006) pp.119-129.,12)D. Yameogo et al., The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2009) pp.333-347.,13)關谷ら, 生産加工・工作機械部門講演会, **11**, (2016)p.191.