

報 文

軸状工具のたわみ補正制御に関する研究

—補正式および卓上NCフライス盤による実験—

川内職業訓練短期大学校 下土橋 渡

Study on Compensation Control for Elastic Deflection of Axial Tool

— Numerical Equation for Compensation and Experiments

with Bench Milling Machine—

Wataru Shimotsuchibashi

要 約 セラミックスや超硬合金などの硬い材料を細い軸状工具で側面加工する場合、工具のたわみのため加工精度が害される可能性がある。そのため、1回当りの切込み量を大きく取れないばかりか、寸法精度を確保するため寸法測定と加工の試行錯誤を何回か繰り返しながら仕上げなければならないといった問題が生じる場合がある。本研究は、側面加工における目標切込み量とそれを達成するために設定すべき工具主軸位置との関係を工具の剛性を示す工具剛性係数、研削抵抗の大きさを示す研削抵抗係数（切削の場合は、切削抵抗係数）および目標切込み量の3つのパラメータで記述するたわみ補正式を提案する。本報ではまず、たわみ補正式とその有効性を確認するために卓上NCフライス盤を用いて行った実験結果について報告する。つづいて、提案した補正方式の実用性を高めるため工具剛性係数と研削抵抗係数の代わりにインプロセス計測で得られた工具たわみの実測値を用いる方法への拡張について述べ、レーザ変位計を用いて行った実験結果を報告する。

1 はじめに

加工の高精度化・精密化が時代の趨勢になっているが、軸状の工具で材料を側面加工する場合、工具のたわみすなわち反切込み方向への工具の逃げのため加工精度が害される可能性がある。特に、内面研削盤や治具研削盤で細いマッチ棒のような軸付き砥石を用いてセラミックスや超硬合金等の硬い材料を精密加工する際などにこのことが問題になる。^{1) 2)} 例えば、セラミックスの焼成品の内周面仕上研削を直径 3mm前後のダイヤモンド電着砥石を用いて行う場合などには、工具のたわみのため1回当りの切込み量を大きく取れないばかりか、寸法精度を確保するため寸法測定と加

工の試行錯誤を何回か繰り返しながら仕上げなければならないといった問題が生じる可能性がある。本研究は、側面加工における目標切込み量とそれを達成するために設定すべき工具主軸位置との関係を工具の剛性を示す工具剛性係数、研削抵抗の大きさを示す研削抵抗係数（切削の場合は、切削抵抗係数）および目標切込み量の3つのパラメータで記述するたわみ補正式を提案し、それによる軸状工具のたわみ補正制御システムを確立しようとするものである。

本報ではまず、提案したたわみ補正式とその有効性を確認するために卓上NCフライス盤を用いて行った実験結果について報告する。工具剛性係数は使用する工具に依存し、研削抵抗係数は被削材の材質、加工条件および工具の切れ味や寿命など多くの因子に依存す

る。つづいて、補正式の実用性を高めるため工具剛性係数と研削抵抗係数の代わりにインプロセス計測で得られた工具たわみの実測値を用いる方法への拡張について述べ、レーザ変位計を用いて行った実験結果を報告する。

II たわみ補正式

軸状工具を用いた側面加工において、工具主軸を図1に示すように S_1 の位置に設定して加工する場合、工具が反切込み方向へたわむため切込み量 t は主軸位置設定量 S_1 より工具のたわみ量 δ だけ小さくなる。工具は工具の送り方向にもたわむが、本報では工具の送り方向に垂直な方向すなわち切込み方向における工具のたわみ（以下、単に工具のたわみとよぶ）について取り扱う。工具のたわみ δ は、研削抵抗（あるいは切削抵抗）の切込み方向分力、すなわち背分力（以下、単に研削抵抗とよぶ） P に対して直線的に変化する。そこで、研削抵抗 P と工具のたわみ δ との関係を示す曲線を工具剛性曲線と名づけ、その傾きを k とし工具剛性係数とよぶことにする。すなわち、

$$P = k \delta \tag{1}$$

あるいは、

$$\delta = \frac{P}{k} \tag{2}$$

一方、研削抵抗 P も近似的に切込み量 t に比例すると考え、 P と t の関係を次式で表す。すなわち、

$$P = m t \tag{3}$$

上式を研削抵抗曲線と名づけ、その傾き m を研削抵抗係数とよぶことにする。式(3)を式(2)に代入すれば、工具のたわみ δ を切込み量 t と係数 k および m で表すことができる。すなわち、

$$\delta = \frac{m t}{k}$$

ゆえに、たわみ補正式として目標切込み量 t を達成するために必要な主軸位置設定量 S_1 を与える式が次のように求まる。

$$\begin{aligned} S_1 &= t + \delta \\ &= \left(1 + \frac{m}{k}\right) t \end{aligned} \tag{4}$$

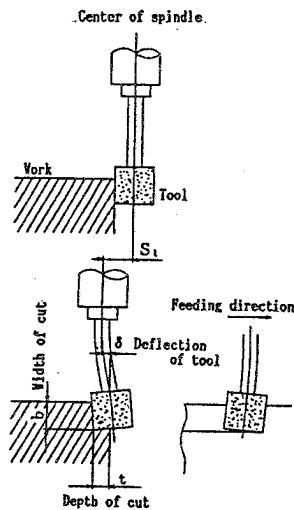


図1 工具のたわみと切り込み量の関係を説明する図

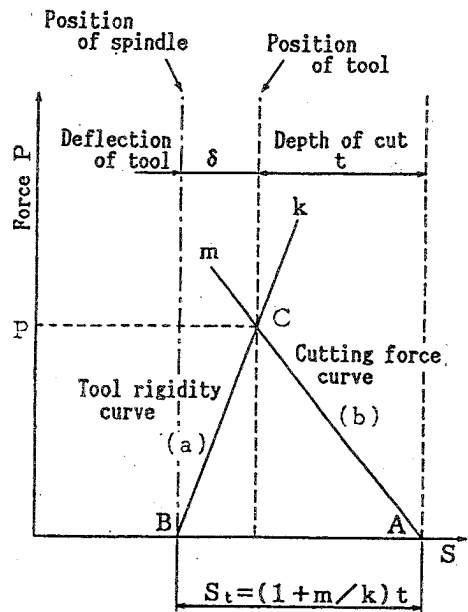


図2 工具のたわみ補正制御原理図

以上の関係を図解すると図2のように示すことができる。図2の横軸は工具あるいは工具主軸の位置を示し、縦軸は研削抵抗の大きさを示す。曲線(a)が工具剛性曲線を、曲線(b)が研削抵抗曲線を示す。B点が工具主軸の設定位置であり、曲線(a)は研削抵抗が大きくなるほど工具のたわみ δ が大きくなり、工具の位置は図の右方向へ移動しB点より遠ざかることを示している。A点は切込み量が0の位置、すなわち工具がワークの基準側面とクリアランス0でタッチしている状態(図1の上方の図)にある位置を示す。曲線(b)はA点から左方向に行くほど切込み量 l が大きくなり、それとともに研削抵抗が大きくなることを示している。研削状態は曲線(a)と曲線(b)の交点Cで示される。図2は、工具の剛性、研削抵抗および工具主軸設定位置と工具のたわみ量あるいは実質の切込み量との関係を考察するのに有用である。

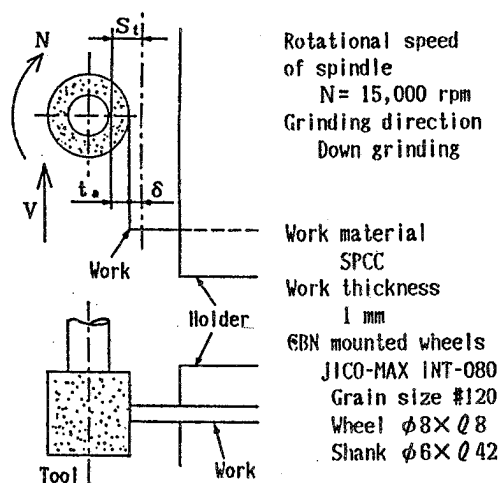


図3 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験

III 実験

提案したたわみ補正式の有効性を確認するため、卓上NCフライス盤を用いて、CBN軸付き砥石によるSPCC薄板の研削実験とマスター超硬バーによるアルミニウムの切削実験を行った。実験には、(株)オリムピック製の3軸制御卓上NCフライス盤 HT610 1 (設定単位 $5 \mu\text{m}$)を用いた。

1 工具剛性係数 k と研削抵抗係数 m の測定

まず、工具の剛性(卓上NCフライス盤のフレームおよびアームの剛性を含む)について、工具先端(研削点)を荷重変換器を介してワイヤーで引っ張り、そのときの工具の先端における変位量をデジタルゲージで読み取って工具剛性曲線を求めた。荷重変換器には共和電業製のLUB-50Kを、デジタルゲージには(株)小野測器製のリニアゲージセンサGS-33 2(測定単位 $1 \mu\text{m}$)を用いた。一方、小径工具の研削抵抗は、その値が小さいため荷重計による直接測定が困難である。そこで、つぎの手順により間接的に求めた。すなわち、図3に示すように、フライス盤に切込み量の指令値(主軸位置制御量) S_s を与えて側面

加工し、そのときの実際の切込み量 t_s を工具顕微鏡で測定する。指令値 S_s と実測値 t_s との差が工具のたわみ量 δ であるから、先に求めて置いた工具剛性曲線を用いて S_s と t_s の差から切込み量 t_s に対する研削抵抗を逆算する。以上のようにして求めたSPCC薄板の研削実験(図3)の工具剛性曲線と研削抵抗曲線を図4および図5に示す。

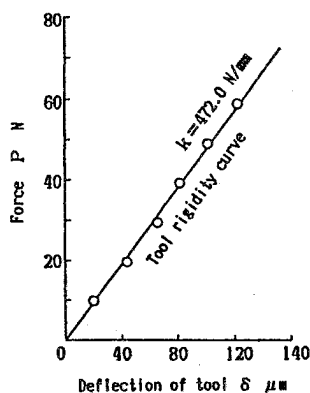


図4 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験における工具剛性係数 k

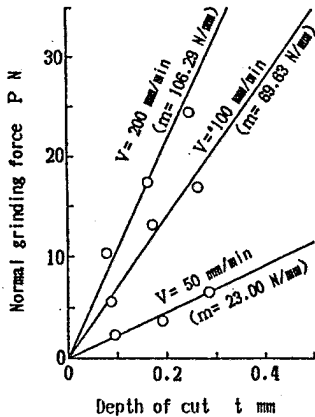


図5 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験における研削抵抗係数m

2 たわみ補正実験

表1は、たわみ補正なしで行ったSPCC薄板の研削実験の結果である。表1で、 t は切込み量の日標値であり、 t_a は工具顕微鏡で実測した値であるが、両者の間にはかなりの差がある。表2は、図4および図5に示す工具剛性係数 k と研削抵抗係数 m の値を用いて式(4)から日標切込み量 t を達成するための主軸位置制御量 S_t を計算したものである。表1と表2より、工具たわみが小さい場合は補正なしの実験で測定された加工誤差とほぼ同等の値を切込み量の日標値に加え、その位置に主軸を制御すれば良いが、工具たわみが大きい場合には測定された加工誤差以上に主軸位置を追い込んだ補正が必要であることがわかる。表3は、表2の値にしたがって主軸位置を制御して研削した結果である。切込み量の日標値 t と実測値 t_a との差は5 μ m以内であり、式(4)を用いたたわみ補正が有効であることがわかる。送り速度が $V=200$ mm/minのときの日標切込み量 t と実際の切込み量 t_a との比較を図6に示す。

表1 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験結果(たわみ補正制御なしの場合)

Target depth t mm	Actual depth of cut t_a mm		
	$V=50$	$V=100$	$V=200$
0.1	0.095	0.088	0.078
0.2	0.192	0.172	0.163
0.3	0.286	0.264	0.248

V : Feed rate (mm/min)

つぎに、マスター超硬バーによるアルミニウム(材質 A1050P)の切削実験における工具剛性係数と切削抵抗係数の値および実験結果を図7、図8に示す。実験は、米国メタルリムーバル社のマスター超硬バーCBIB001(カッタ径 $\phi 6.4$ ×長さ13 mm、シャンク径

表2 S_t の計算値

Target depth t mm	$S_t = (1 + m/k)t$		
	$V=50$	$V=100$	$V=200$
0.1	0.105	0.115	0.125
0.2	0.210	0.230	0.245
0.3	0.315	0.345	0.370

V : Feed rate (mm/min)

表3 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験結果(たわみ補正制御を行った場合)

Target depth t mm	Actual depth of cut t_a mm		
	$V=50$	$V=100$	$V=200$
0.1	0.101	0.102	0.103
0.2	0.201	0.204	0.205
0.3	0.302	0.303	0.305

V : Feed rate (mm/min)

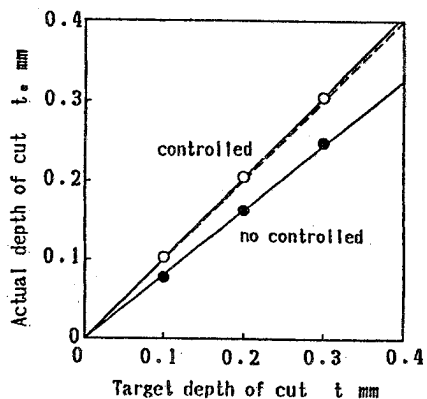


図6 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験における日標切込み量と実切込み量の比較(送り速度 $V=200$ mm/min)

φ3.0×長さ 30 mm) を用い、主軸回転数 $N=7,500$ rpm、送り速度 $V=100$ mm/min、切削幅 $b=1.5$ mm の条件で行った。図8に示すように、たわみ補正を行うことにより加工精度の改善が図られることがわかる。

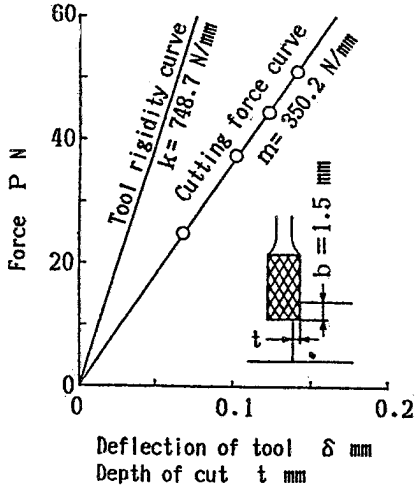


図7 マスター超硬バーを用いたアルミニウムの切削実験における工具剛性係数 k と切削抵抗係数 m

IV 工具たわみのインプロセス計測を導入した補正式

式(4)のたわみ補正式の実用においては、使用する工具および加工条件の各々に対して工具剛性係数 k および研削抵抗係数 m の値がわかっている必要はない。特に、研削抵抗係数 m については被削材の材質、加工条件および工具の切れ味や寿命など多くの因子に依存するため、 m の値を前項で述べた手順により逐一求めるのは実用的でない。加工中の工具たわみを計測できれば、式(4)中の m/k の項を工具たわみの実測値で置き換えることができる。図9において、工具の主軸を S_0 の位置に設定して加工を行ったときの工具のたわみの測定値を δ_1 とすれば研削抵抗係数 m は、

$$m = \frac{P_i}{t_i} = \frac{K \delta_1}{S_0 - \delta_1} \quad (5)$$

式(5)を式(4)に代入すれば、たわみ補正式はつぎのように表される。

$$S_T = \left(1 + \frac{\delta_1}{S_T - \delta_1}\right) t \quad (6)$$

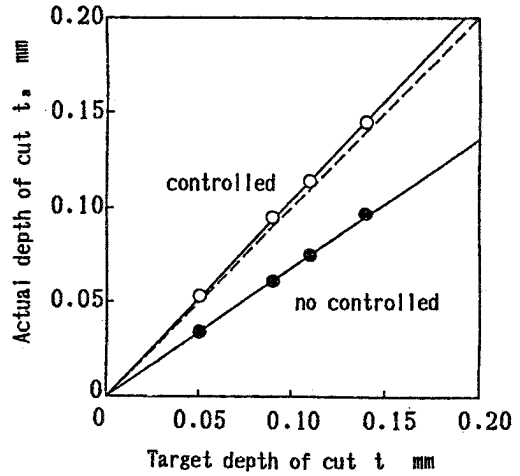


図8 マスター超硬バーを用いたアルミニウムの切削実験における目標切込み量と実切込み量の比較

すなわち、工具剛性係数 k および研削抵抗係数 m を求める代わりに、予備加工を行い、 S_0 に対する工具たわみ δ_1 を測定しておけば本加工において目標切込み量 t を達成するために設定すべき主軸位置 S_1 の値を上式より決定できる。

変位計としてレーザ変位計を用いて、式(6)に基づいたたわみ補正実験を行った。実験はCBN軸付き砥石によるSPPC薄板の研削で行った。レーザ変位計には(株)キーエンス製のLC-2220 (測定範囲±3 mm、作動距離30mm、分解能0.2 μm)を用いた。レーザ変位計をフライス盤に取り付けた様子を図10に示す。表4、表5および図11に加工条件ならびに実験結果を示す。まず工具の主軸を S_0 の位置に設定し予備研削を行い、その時の工具のたわみ δ_1 を測定した。つぎに、目標切込み量 t に対する主軸位置制御量 S_1 を式(6)に基づいて算出し加工を行った。表4、表5の t_a が切込み量の実測値であり、切込み量の目標値 t との差は3 μm以内である。レーザ変位計によ

る工具たわみのインプロセス計測を導入した方式が有効であることがわかる。

表4 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験の実験条件と結果
(送り速度 $V=75\text{mm}/\text{min}$)

Preparatory grinding		Compensation control experiment			
Setting position of spindle S_{t1} mm	Measured tool deflection δ_1 mm	Target depth t mm	Calculated value of S_t S_t mm	Actual depth t_a mm	Grinding error $ t_a - t $ mm
0.1	0.004	0.1	0.105	0.101	0.001
0.2	0.007	0.2	0.205	0.203	0.003
0.3	0.014	0.3	0.315	0.298	0.002

表5 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験の実験条件と結果
(送り速度 $V=150\text{mm}/\text{min}$)

Preparatory grinding		Compensation control experiment			
Setting position of spindle S_{t1} mm	Measured tool deflection δ_1 mm	Target depth t mm	Calculated value of S_t S_t mm	Actual depth t_a mm	Grinding error $ t_a - t $ mm
0.15	0.019	0.15	0.170	0.153	0.003
0.25	0.031	0.25	0.285	0.252	0.002

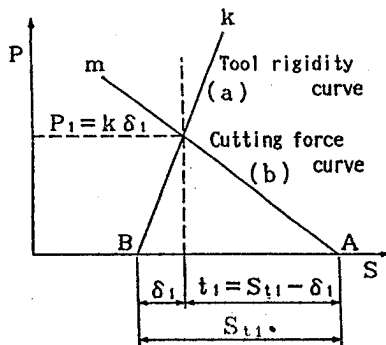


図9 工具たわみの実測値を用いた研削抵抗係数 m の決定原理

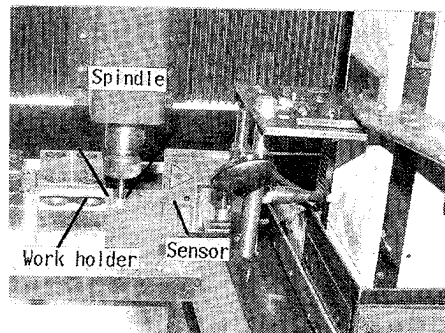


図10 卓上NCフライス盤に取付けられたレーザ変位計

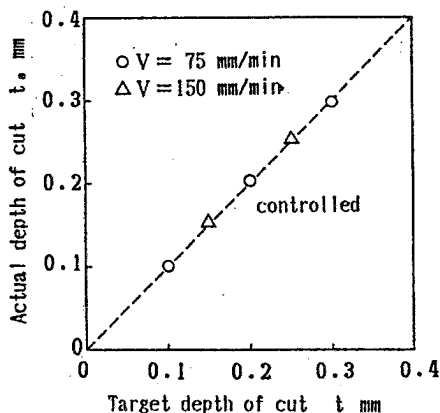


図11 CBN軸付き砥石を用いたSPCC薄板の研削実験における目標切込み量と実切込み量の比較（レーザ変位計を導入した場合）

参考文献

- 1) 岸本明雄：難削材の内面研削における砥石選択、機械と工具、1987、10、57。
- 2) 松岡甫篁：新しい穴加工技術、工業調査会、(1987)、109。

V むすび

- 1) 側面加工における目標切込み量 t とそれを達成するために設定すべき工具主軸位置 S_z との関係を工具剛性係数 k 、研削抵抗係数（切削の場合、切削抵抗係数） m および目標切込み量 t の3つのパラメータで記述する工具たわみ補正式を提案した。NC卓上フライス盤を用いたSPCC薄板の研削実験およびアルミニウムの切削実験を行い、提案した工具たわみ補正式の有効性を確認した。
- 2) 補正式の実用性を高めるため、工具剛性係数 k と研削抵抗係数 m の代わりにインプロセス計測で得られた工具たわみの実測値を用いる方法への補正式の拡張を図った。レーザ変位計を用いた実験を行い、その有効性を確認した。

本研究は、平成元年度の指定研究の助成を受けている。関係各位に感謝の意を表す。