NC 旋盤におけるテーパ旋削面あらさ*

竹内則行** 浦上嘉信*** 岡本定次† 安味貞正† 土井雅博†

A Study on the Surface Roughness in Taper Turning with Numerically Controlled Lathe

Noriyuki TAKEUCHI, Yoshinobu URAGAMI, Sadaji OKAMOTO,
Sadamasu AMMI, Masahiro DOI

Surface roughness in turning is decided by controllable factors as the tool geometry and feed, uncontrollable phenomena as the presence of built-up edge, variation of relative position on tool-work and change of tool shape. On the other hand, in case of surface roughness in numerically controlled turning, the movement of tool which is driven by pulse motor becomes one of the important factors. This paper describes the analysis and experiments of surface roughness in optional taper turning by NC lathe with respect to the controllable factors. The results are that the theoretical area of surface roughness R is shown as follows;

$$\frac{f_a^2}{8r} \leq R \leq r + \frac{1}{2} \left\{ b_{\max} - f_a \sqrt{\frac{4r^2}{f_a^2 + b_{\max}^2} - 1} \right\}.$$

The experimental results approximately agree with the theoretical area of surface roughness.

1. は じ め に

旋削面のあらさは理論的には工具形状および送りの確定因子により幾何学的に求めることができる。しかし実際のあらさは、このほかに構成刃先の発生、工具の送り量と切込み量の変動、被削材の変形および工具刃先形状の変化等の不確定因子によって変動することはよく知られている^{1)~3)}。一方、NC 旋盤によって任意のテーパや曲線の旋削を行う場合には以上の因子のほかに発生パルスによって駆動される工具の階段状の動きが加わる。つまり工具は1パルス当たりの定格の出力単位でステップ状に移動するために厳密には指令通りの輪郭を切削し得ない。このときの指令値との誤差量が切削面あらさに影響を及ぼすものと考えられる。他方、発生パルス周期による刃物台系の共振とあらさとの関係についてはすでに発表されている⁴⁾。

本研究では NC 旋盤による任意のテーパ旋削に関して前述の確定因子による長手方向最大高さあらさの理論解析を行い、その結果と実際に得られた旋削面最大高さあらさを比較検討し、NC 旋盤における旋削面あらさを予測しようとするものである。

2. 解 析 方 法

NC 旋盤による旋削面あらさを解析するにあたり、次のような前提条件を考える。

- (1) 通常の旋削面あらさの理論値を考える場合と同様に構成刃先や工具-被削材間の相対位置に影響を及ぼす不確定因子のない状態において幾何学的円弧をもつ工具刃先形状が旋削面に転写されるものとする。
- (2) 工具刃先の中心は代数演算方式により算出されたパルス補間通りに移動するものとする。
- (3) 工具は常に等速で移動するものとする。

以上のような条件のもとに、いま任意のテーパ角度 A を代数演算方式でパルス補間すると、予定の工具指令線に近似するように工具中心の通路が決まる。その状態をモデル的に図1に示す。ここで指令線に平行な送り f_a とテーパで指令した送り f との間には、 x 軸方向の送りを f_x および z 軸方向の送りを f_z とすれば、次のような関係がある。

$$f = f_x + f_z = f_a \sin A + f_a \cos A$$

$$\therefore f_a = \frac{f}{\sin A + \cos A} \quad (1)$$

まず工具中心が O_1 の位置にある場合に主軸1回転後には指令した送り f に応じて x 軸および z 軸方向のパルス分配により各軸のパルスモータが駆動され、工具中心は O_2 の位置に来る。この時に O_1 点では工具指令線と

* 原稿受付 昭和49年11月15日。昭和49年度精機学会春季大会学術講演会(昭和49年4月7日)にて発表。

** 正 会 員 日産産業(株)(横浜市金沢区堀口120)

*** 荏原インフィルコ(株)(東京都大田区羽田旭町11-1)

† 正 会 員 武蔵工業大学(東京都世田谷区玉堤1-28-1)

R : 旋削面あらさ, r : 工具刃先半径, A : テーパー角度 (工具指令線が Z 軸となす角度), f_a : 指令線に平行な送り, b : 主軸 1 回転当たりの工具中心の相対的誤差量

図 1 NC 旋削における切削面モデル

b_1 の誤差を, また O_2 点では b_2 の誤差をそれぞれ生じる。したがって主軸 1 回転につき O_1 と O_2 との間には相対的に $b = |b_1| + |b_2|$ の差を生じることになる。この結果, 旋削面は図 1 の $\widehat{P_1 P P_2}$ に示す状態となり, b の値が旋削面あらさ R に影響を及ぼすことがわかる。ただし工具中心が O_1 より O_2 にいたる間の実際の旋削面上には図のような平面的凹凸がそのまま残るのではなく, らせん状の経路上に転写されるものである。この相対的な誤差量 b は次式のように表すことができる。

$$0 \leq b \leq C_X \cos A + C_Z \sin A \quad (2)$$

C_X, C_Z : それぞれ X 軸および Z 軸方向の最小設定単位で, $C_X = C_Z/2$ とし, 切削方向により正負の値をとるが本報ではその絶対値を考える。 A : テーパー角度で $0 < A < \pi/2$ の範囲とし, 後に述べるように $A = 45^\circ$ および $\tan A = 1/2n$ ($n=1, 2, \dots$) の場合については例外とする。図 2 に各テーパー角度における補間の状態をモデル的に示す。ここで $A = 45^\circ$ の場合には図 2 (c) に示すように常に Z 軸方向に 1 パルスと X 軸方向に 2 パルスの組合せで補間する。そこで最大の誤差は工具中心が O_1 の位置から主軸 1 回転後に O_2 の位置へ移動した場合で $b_{\max} = C_Z \sin A = 2C_X \cos A$ となる。また最小の誤差は主軸 1 回転後に O_2' に移った場合で $b_{\min} = 0$ となる。そこで $A = 45^\circ$ の場合には b のとりうる範囲は次式のようになる。

$$0 \leq b \leq C_Z \sin A = 2C_X \cos A = 0.707C_Z = 1.414C_X \quad (3)$$

また $\tan A = 1/2$ の場合には図 2 (d) に示すように Z 軸方向に 1 パルスおよび X 軸方向に 1 パルスの組合せで補間する。そこで一般に $\tan A = 1/2n$ ($n=1, 2, \dots$) の場合には b のとりうる範囲は次式のようになる。

$$0 \leq b \leq C_X \cos A = nC_Z \sin A \quad (4)$$

以上のことから図 1 に示すように工具中心が O_1 点から主軸 1 回転後に O_2 点に移り, 理想的に工具刃先のプロ

(a) $A = 15^\circ$ (b) $A = 75^\circ$ (c) $A = 45^\circ$ (d) $\tan A = 1/2$ ($A = 26.5^\circ$)

図 2 各テーパー角度における補間モデル

図 3 不確定領域における切削面あらさモデル

フィルが切削面に転写された場合には面のあらさ R は 2 円弧 P_1, P_2 の交点 P から次のように求めることができる。

$$R = r + \frac{1}{2} \left\{ b - f_a \sqrt{\frac{4r^2}{f_a^2 + b^2} - 1} \right\} \quad (5)$$

ただし r は工具刃先半径である。

式 (5) において $b = b_{\max}$ のときには $R = R_{\max}$ となり, $b = 0$ の時には $R = R_{\min}$ となる。この場合に f_a が $f_a \leq 2r \sin \gamma$ (γ : 前切れ刃角) の条件を満足すれば $R_{\min} = f_a^2 / 8r$ となる。ただし式 (5) はすべての f_a に対して成立するものではない。すなわち図 3 に示すように $b_{\max}$ で 2 円の交点の X 座標が主軸 1 回転後の中心 O_2' のそれと等しい ($f_a = |Z_2|$) の場合の f_a を $f_{a \text{ cri}}$ とすれば, $f_a \leq f_{a \text{ cri}}$ の範囲では b の値のいかんによっては R の値は主軸 1

A = 15°

図4 理論あらさ範囲

回転後の円弧との交点ではなく、2回転目、3回転目または n 回転目の円弧との交点 $P_2, P_3, \dots, P_n$ によって決まる場合が生じる。例えば P_3 によって R が決まる場合を考えると ($f_a < f_{a\text{cri}}$, O_1 に対して O_2 は $-X$ 軸方向に最大の誤差 b_{max} の位置にあるものとする), O_1 に対して O_3 は $0 \leq b \leq b_{\text{max}}$ の範囲にある。いま $b=0$ の場合には中心は O_{31} , 交点は P_{31} となり, $R_{31} = (2f_a)^2/8r = 4R_{\text{min}}$ となる。また b の値によっては O_1, O_2 および O_3 による円弧が一点で交わる場合がある。この場合には中心は O_{32} , 交点は P_{32} となり, R_{32} は式 (5) に b_{max} を代入した値となる。また b の値がそれ以上の場合, 例えば中心が O_{33} で交点が P_{33} の場合には R はすべて O_2 による円弧と O_1 の円弧によって決まる。結局, 第3番目の円弧によって決まる R の範囲は b の値によって次のようになる。

$$4R_{\text{min}} \leq R \leq r + \frac{1}{2} \left\{ b_{\text{max}} - f_a \sqrt{\frac{4r^2}{f_a^2 - b_{\text{max}}^2} - 1} \right\} \quad (6)$$

同様に第 n 番目の円弧と第1番目の円弧によって決まるあらさの最大値は式 (6) の右辺となり, 最小値は $(n-1) \cdot R_{\text{min}}$ となる。しかし n が高次の場合には f_a が小さくなって b の値に近づくことになり, 指令線に平行な送り f_a と実際の送り f とに相違が生じ無視できなくなるために式 (2) が成立しなくなる。また前述のように f_a および b の変化のために R_{max} を一義的に求めることが難しくなる。そこで本研究では R_{max} については $f_a < f_{a\text{cri}}$ の範囲を不確定領域, また $f_a \geq f_{a\text{cri}}$ の範囲を確定領域として, 後者の場合について解析を行った。

以上のようにして求めた旋削面あらさの R_{min} と R_{max} から, 各指令送りについてあらさのとりうる範囲が求まる。その範囲は次のようになる。

$$\frac{f_a^2}{8r} \leq R \leq r + \frac{1}{2} \left\{ b_{\text{max}} - f_a \sqrt{\frac{4r^2}{f_a^2 - b_{\text{max}}^2} - 1} \right\} \quad (7)$$

図5 被削材形状寸法

表1 被削材, 炭素鋼 (S 45 C) の化学成分および機械的性質

化学成分 (%)	C	Si	Mn	P	S
	0.44	0.36	0.62	0.019	0.011
降伏点	35.2 kg/mm ²				
引張強さ	64.5 kg/mm ²				
伸び	25.3%				
かたさ	176 HB				

表2 切削条件

使用機械	NC 装置: FANUC 240 パルスモータ: EPM 110 旋盤: ANC 25
最小設定単位 (mm)	$C_X = 0.005$, $C_Z = 0.01$
使用工具	超硬合金 P 10 種 (0, 6, 6, 0, 32, 0, 1)
被削材	機械構造用炭素鋼 S 45 C
切込み t (mm)	0.2
切削速度 V (m/min)	314 以下
テーパ角度 A (deg)	15, 45, 75
指令送り f (mm/rev)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6

これを理論あらさ範囲とよぶ。一例として図4に $A = 15^\circ$, $r = 1.0$ mm, $C_X = 5 \mu\text{m/pulse}$, $C_Z = 10 \mu\text{m/pulse}$ の条件における理論あらさの範囲を示す。この場合には $f_{a\text{cri}} = 0.15$ mm/rev, $b_{\text{max}} = 7.4 \mu\text{m}$ となる。この条件では $f = 0.15 \sim 0.60$ mm/rev で理論あらさの範囲は $6.6 \sim 4.0 \mu\text{m}$ となる。このように NC 旋盤による旋削において, 旋削面あらさが送り, 刃先半径およびパルス駆動による刃先中心の誤差量によって幾何学的に求められるとすれば, 任意の角度のテーパ切削における面のあらさを予測できるはずである。そこでこの理論あらさの範囲と実際のあらさとの関係を実験によって求め検討を加える。

3. 実験方法

実験に使用した旋盤は池貝鉄工製数値制御旋盤 ANC 25 型, NC 装置は富士通 FANUC 240 型である。図5に示す形状の被削材 (炭素鋼 S 45 C) のチャックワークを行った。被削材の諸性質を表1に示す。また切削条件を表2に示す。この場合に切削速度はテーパ切削であるために直径が一定でなく変化するが, 被削材外周端では切削速度は 314 m/min となり, 外周端から切削面上を軸心方向へあらさを測定することによって (測定長さ 8 mm) 構成刃先の影響は無視できるものと考えられる。工具には超硬合金 P 10 種スローアウェイチップを用いた。工具刃先半径のあらさに及ぼす影響が大きいため

図6 切削面あらさ

図7 切削面あらさ

図8 切削面あらさ

に、実験前にすべての刃先半径を計測し、半径のばらつきが $1\mu\text{m}$ 以内のものを使用した。切削は同一条件でそれぞれ4回行って、毎回チップを新しいものと交換した。またチップの前切れ刃角 γ は $\gamma=32^\circ$ であるので、本実験条件ではいずれも $f_a \leq 2r \sin \gamma$ を満足する。切削後、触針式表面形状測定機によって旋削面のプロファイルを求め最大高さあらさを測定した。

4. 実験結果

前節で求めた理論あらさ範囲と測定値とを各テーパ角度別にそれぞれ図6～図8に示す。 $A=15^\circ$ の場合には理論あらさ範囲からの測定値のずれは最高 $1.5\mu\text{m}$ でほぼ理論あらさ内におさまっている。また測定点は $R_{\max}$ 側に多くなっている。 $A=45^\circ$ の場合には理論あらさ範囲からのずれは約 $1\mu\text{m}$ であり、この場合にもほぼ理論あらさ内にあると考えられる。 $A=75^\circ$ の場合には最高 $3.5\mu\text{m}$ のずれがあり、全体として測定点は $R_{\min}$ 側に多くなっている。またそれぞれのテーパ角度および指令送りにおける測定値のばらつきの範囲はほぼ $4\sim 6\mu\text{m}$ であり、その範囲は理論あらさ範囲の値とほぼ等しいことがわかる。次に $A=0^\circ$ つまり Z 軸のみの駆動によって切削を行った場合には、理論的にはあらさは $R=f_a^2/8r$ となるはずであるが、図9に示すように理論値に対して最高 $5\mu\text{m}$ のずれを生じている。この場合には $f_a=f$ となるわけであるから、1パルス当たりの刃物台移動量の精度が高ければ通常の旋削と同じく切削系としての不確定因子の影響によって理論値との差を生じたものと考え

図9 切削面あらさ

られる。そこで前記テーパ切削を行った結果に見られた測定値のばらつきは $A=0^\circ$ の場合のばらつきの値に近いことから不確定因子による影響と考えることができる。

ここでNC旋盤による旋削面あらさに影響を及ぼす因子を系統的に挙げると図10のようになる。このうちNC旋盤特有の因子としては、パルス分配の精度、EPM（電気パルスモータ）の精度およびボールスクリュウの精度があり、それらから生ずる送り量 f 、テーパ角度 A およ

図10 旋削面あらさ因子

び1パルス当たりの移動量 C_x, C_z の誤差が f_a または b_{max} に影響を及ぼす。実験結果において理論あらさ範囲外に測定値がばらつく原因にはこれらの因子も作用しているものと考えられる。そこでこれら種々の因子について検討を加える。まず発生するパルスを各テーパ角度ごとに検出観察した結果、旋削面あらさに影響を及ぼすようなパルス分配における問題点は無く、代数演算どおりのパルスを発生していることがわかった。

次にEPMの回転精度およびボールスクリーウの回転精度について本実験ではそれぞれを単独には検査しなかったが、それらの総合精度として工具台の単位移動量の測定を行った。すなわち、操作盤上の手動送りハンドルによって発生させたパルスによる1パルスごとの工具台の移動量、テーブ指令による無負荷運転時の工具台の移動量および表2に示した条件で切削を行った場合の工具台の移動量のそれぞれについて電気マイクロメータおよび差動変圧器を用いて測定した。まず手動による移動量測定の結果、パルスモータの励磁相に関連すると考えられる現象が観察された。すなわちパルスモータの回転により2相励磁から3相励磁に移る時にはZ軸方向では15~17 μm , X軸方向では6~7 μm , また3相から2相に移る時にはZ軸方向で3~5 μm , X軸方向で3~4 μm の移動量がそれぞれ測定された。両軸方向とも2相→3相→2相の2パルス分の移動量はいずれも最小設定単位の2倍の値となっている。ここでこのような現象を「送りむら」とよぶことにする。この送りむらは指令テーブによって連続的に工具台を移動させた場合にも常に観察され、切削を行った場合にもその送りむらの量は同じで

図11 工具台挙動 (Z軸方向)

あった。一例として無負荷連続移動時のZ軸方向への工具台の挙動を動電型振動計および差動トランスによって検出記録し図11に示す。(a)は主軸の回転のみにより生ずる振動のうち工具台でZ軸方向の成分として検出したもの、つまり工具台をパルス指令によって駆動していない時の状態を、また(b)では指令により工具台を駆動した時のZ軸方向の工具台の挙動をそれぞれ示したものである。図の縦軸方向の振幅は数値として校正を行っていないが、記録時の縦方向倍率は(a),(b)ともに同一であるので比較することができる。この条件の場合のパルスの発生周期は9.5msであり、(b)の大きい山の周期のほぼ1/2となっている。つまり山と山の間にもう1パル

図12 切削面プロフィール

ス分の移動があるはずであるが、その値が小さいために主軸回転による振動と混同して明らかでない様子を示している。(c)にこの場合の移動量を示す。4 μm : 16 μm の送りむらの様子が認められる。このような送りむらの原因については今後究明する予定であるが、パルスモータの回転むら、ボールスクリーウのたわみまたはベッド-工具台間のスティックスリップ等の影響が考えられる。この送りむらのある場合には式(5)中の b の値が大きくなり、実際のあらさは理論値よりも大きくなる。一例として、例えば Z 軸方向に17:3、 X 軸方向に7:3の送りむらがあった場合には $b_{\max}$ の値は両軸が定格で移動した場合の $b_{\max}$ に比べて $A=15^\circ$ では3.8 μm、 $A=45^\circ$ では3.1 μm、 $A=75^\circ$ では6.5 μmの増加となり、その時のあらさは理論値に比べてそれぞれ2.0 μm、1.6 μm および5.5 μmの増加となる。

以上にNC特有の旋削面あらさに影響を及ぼす因子について述べた。他方、不確定因子の一つとして切りくずの加工物への巻きつきの影響がある。この切りくず処理の問題はNC工作機械にとって常に問題となっている。切りくずの形態および巻きつき状態は切削条件および被削材または工具の形状によって変化するものである。本実験の場合には $A=75^\circ$ の場合に切りくずの巻きつきが多く観察され、測定値にも影響を及ぼした。一例として切りくずの巻きついた場合と巻きつかなかった場合の切削面プロフィールを図12に示す。巻きついた場合にはあ

らさの山の部分が切りくずとの擦過によって鈍化した状態になっていることがわかる。この影響により、図8に示したあらさの測定値にも明らかなように $A=75^\circ$ の場合には理論あらさ範囲より測定値が低い値となっている場合が多い。その低下した値は山の鈍化した値とほぼ等しく、3~4 μmである。

5. む す び

NC 旋盤による任意の角度のテーパ切削に関して 確定因子による旋削面あらさの理論解析および切削実験を行い、次のことが明らかになった。

- (1) 理論解析によって旋削面最大高さあらさの範囲を次式のように示すことができる。

$$\frac{f_a^2}{8r} \leq R \leq r + \frac{1}{2} \left\{ b_{\max} - f_a \sqrt{\frac{4r^2}{f_a^2 + b_{\max}^2} - 1} \right\}$$

- (2) 実際に切削を行った結果、本実験条件では旋削面あらさはほぼこの理論あらさ範囲内に入る。このことから任意の角度のテーパ切削に関して確定因子による最大高さあらさをほぼ予測することができる。
- (3) 実際の旋削面あらさには理論あらさ範囲外の不確定因子による値が入るが、その原因として工具台の送りむらと切りくずの巻きつきがあげられる。

終わりに本研究を進めるにあたり適切な助言をいただいた富士通ファナック(株)七田弘道氏、池貝鉄工(株)長谷川修氏、また実験にあたり協力いただいた武蔵工業大学牛村保治氏、卒業生の川端厚一、小松崎薫両君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 例えば、竹山秀彦、大野幸彦、宮坂金佳：旋削仕上面あらさに関する研究(第一報)、精密機械、31, 3 (1965) 250.
- 2) 伊藤 鎮、福田理一、金 吉雄：旋削面あらさの構成に関する一考察、精密機械、34, 5 (1968) 335.
- 3) 精密工作便覧、精機学会(1972) 41.
- 4) 小原三也、佐藤晃平、中村常郎：NC 旋盤の振動解析、昭和48年度精機学会秋季大会学術講演会前刷(1973).