研 究

切削速度の切削に及ぼす影響

—切削における表面仕上について—

正会員 竹 山 秀 彦*

Speed Effect on Machining

—Study on Roughness of Machined Surface—

Hidehiko TAKEYAMA

All of the major factors of surface roughness can be attributed to one or combinations of four elements, such as (1) feed marks, (2) worn cutting edge, (3) built-up-edge, (4) rigidity of machine tools. The feed marks are the result of feed and tool nose radius combining to form the gross variations in a generated surface. They say that in the case of rather large feeds the experimental relationship $H_m = f^2/8R$ agrees with actual surface roughness, where H_m , f and R are the maximum height of machined surface, feed and nose radius respectively. However the relationship does not necessarily hold in a wide combination of feeds and nose radius. In fact, according to the tests, it was proved to be rather inconsistent or unreasonable in some cases.

With regard to the worn cutting edge, it affects the roughness considerably in the case of form cutting. Assuming that the cutting edge is free from built-up-edge, the irregularities on the machined surface are the printed patterns of the cutting edge.

The third factor, built-up-edge is the most serious, because more or less it is found almost on every machined surface and it is not so easy to control practically.

Rigidity of machine tools is also an important factor through chatter marks, but it is the problem of machine or tool system, so that it is not treated with in this report. This report treats with mainly the two factors of feed marks, and built-up-edge. Concerning the feed-marks, theoretical formulas of the average surface roughness H_{avg} were derived through geometrical computations* of feeds, nose radius, end cutting edge angles and side cutting edge angles. According to the comparison between the theoretical formulas and the experimental results, they hold very well in the case of the metals free from built-up-edge, but a considerable deviation could be found for such metals as steels producing heavy built-up-edge. The next step was to examine the speed effect upon built-up-edge or surface roughness which is considered to be the most effective to suppress built-up-edge.

I. 緒 言

切削面粗さを左右する因子としては次の四つがある。

(1)送りマーク (2)工具刃先の磨耗 (3)構成刃先 (4)工作機械の剛性の如何。さて第一の送りマークは送りと工具刃先の R との複合された形で出て来るものである。ところで割合に送りの大きい場合には切削面の粗さの最大に関しては $H_m = \frac{f^2}{8R}$ なる実験式が割合によくあてはまるということである。こゝに f は送り、 R は刃先 R である。しかし此の関係は f と R の組合せの広い範囲で当てはまる

というわけではない。第二の刃先磨耗に関しては特に縊形削りにおいてその影響が大きい。若し構成刃先が無いと仮定すれば刃先の形の不規則さはそのまま切削面に印されるのである。しかし一般には此の影響は送りマーク及び構成刃先のそれに比べるとずっと小さいものである。第三の構成刃先の影響は非常に重大である。というのは構成刃先は多かれ少なかれ全ての金属において見られ、非常に屢々出くわす問題であると同時に又それを最小に抑えることは仲々容易でないからである。第四の機械の剛性もビビリ等と関連して重要であるがこれは直接

* 機械試験所

工作機に関係したことなのでこゝでは一応除外し、此の報告では主として送りマークと構成刃先に関連して述べることにする。送りマークに関しては、刃形を構成刃先も磨耗もない理想的なものとして幾何学的計算から平均表面粗さ H_{avg} の理論式を送り及刃先 R の各組合せに対して求め、それと実験結果との比較を行った。其の結果、構成刃先の少い被削材に対しては両者はよく合うが構成刃先の著しい被削材には非常な相違を生じることを知った。そこでその構成刃先を少く抑える最も有力な方法である切削速度の上昇によつてどの程度表面仕上が改善されるかを知るために切削速度と仕上面粗さとの関係についてしらべた。

II. 切削表面粗さの式

(i) $R \geq f/2$, $R' \geq f/2$ の場合。但しこゝに R は工具刃先 R , f は送り, R' はプロフィロメータスキッドの半徑である。

此の場合の表面断面のプロファイルを模形的にかくと図1のようになる。図中 a は送りマークに直角な面上における表面プロファイルで、 b はプロフィロメータスキッドの運動のプロファイルである。

さて a は次式によつて表わせる。

$$x^2 + (y - R)^2 = R^2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

然しプロフィロメータの針の運動のプロファイルは正確に上式に従わない。何となれば針を支えているスキッド自身が送りマークに従つて或程度の変位をするからである。従つて実際メーターに出て来る平均粗さを表わす式としては、そのスキッドと針との相対変偏を考えねばならない。換言すればスキッドの変偏に対する補正をしてやらなければならない。さてそのスキッドの変偏は次式によつて表わされる。

$$(x - f/2)^2 + (y + R')^2 = R'^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

従つてスキッドと針との相対変偏は(1)と(2)の代数和として表わされる。

プロフィロメーターによる読みは表面プロファイルの平均高さと同値といふから此の報告では全てプロファイルの平均高さをもつて議論することとする。さてプロファイル a の平均高さはその定義より次式から求める。

$$H_{avg} = \frac{2}{f} \int_0^{f/2} \{ R - \sqrt{R^2 - x^2} \} + \sqrt{R'^2 - (x - f/2)^2} \quad \dots\dots\dots$$

$$- R \} dx$$

$$= R - \frac{1}{2} \sqrt{R^2 - \frac{f^2}{4}} - \frac{R^2}{f} \sin^{-1} \frac{f}{2R} - R' + \frac{1}{2} \sqrt{R'^2 - \frac{f^2}{4}} + \frac{R'^2}{f} \sin^{-1} \frac{f}{2R'} \quad \dots\dots\dots (3)$$

今、

$$\left. \begin{aligned} R &= fp \\ R' - \frac{1}{2} \sqrt{R'^2 - \frac{f^2}{4}} - \frac{R'^2}{f} \sin^{-1} \frac{f}{2R'} &\equiv S \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおけば(3)は、

$$\begin{aligned} H_{avg} &= f \left[p - \frac{1}{2} \sqrt{p^2 - \frac{1}{4}} - p^2 \sin^{-1} \frac{1}{2p} \right] + S \\ &= f \times F(p) + S \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

但し F は函数形を表わす。

若しスキッドが試片面の基準平面に沿つて動く様に工夫されたプロフィロメーターであるならば、

$$H_{avg} = f \left[p - \frac{1}{2} \sqrt{p^2 - \frac{1}{4}} - p^2 \sin^{-1} \frac{1}{2p} \right] \quad \dots\dots\dots (5')$$

となり平均粗さは、刃先 R と送りの比が一定ならば送りに比例することになる。

(ii) 前切刃角を考慮に入れなければならない場合。

但し $x_2 \geq x_1$, $R \sin$

$\delta \leq y_2$ と考える。

こゝに $[x_1, y_1]$ 及

$[x_2, y_2]$ は夫々 E

及 B の座標で δ は

横切刃角である。

図2において、

プロファイル a 及

b は夫々次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} x^2 + y^2 &= R^2 \\ (x - f)^2 + y^2 &= R'^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

次に前切刃角によつて印される直線は、

$$y = -x \tan \theta - c$$

こゝに θ は前切刃角, c は常数である。さて上述の直線は a の切線でなければならないという条件から上式は、

$$y = -x \tan \theta + R \sec \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

さてこれらの関係から座標 $E(x_1, y_1)$ 及 $B(x_2, y_2)$ を求めると夫々(8)及(9)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= R \sin \theta \\ y_1 &= R \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= \cos^2 \theta (f + R \tan \theta \sec \theta - \tan \theta \sqrt{2Rf \csc \theta - f^2}) \\ y_2 &= \sin^2 \theta (R \cot \theta \csc \theta - f \cot \theta + \sqrt{2fR \csc \theta - f^2}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

さて平均粗さを求めるために面積 $AEBCDFA$ を求め

図 2

III. 実験結果との対比

Ⅱにおいて求められた諸式がどの程度実際に合うか、又Ⅰにおいて述べた、現在最もよく用いられている粗さの実験式 $H_m = \frac{f^2}{8R}$ 及びこれを平均粗さに直した式 $H_{avg} = \frac{f^2}{3.5 \times 8R}$ と比較してどちらが実際に近いかという比較検討を試みた。但し上式の単位はインチである。さて本実験における条件は、

工具材：高速度鋼

工具刃形：[0, 28, 6, 6, 6, 15, Var.]

被削材：0.45% C 鋼，ステンレス，チタン合金

図 4

図 5

A, B, C 及 D

工具取付角：直角

切込み：0.050 インチ

切削速度：約 50 f. p. m.

切削剤：乾燥

図 4 及 5 は夫々刃先 $R^{1/32}$ 及 $3/64$ のとき、送りによつて表面粗さが如何に変化するかを上に挙げた各種金属についてしらべたものである。勿論粗さは送りマークに対し直角で、用いた測定器はアボットのプロファイロメーターで、読みは平均値をとつた。

更に同時に従来の粗さの式 $H_m = \frac{f^2}{8R}$ (インチ単位)

を平均粗さに直した式 $H_{avg} = \frac{f^2}{8R/3.5}$ より計算された曲線をも示してある。但し 3.5 は形状係数である。

これらのデータよりわかる事は、先ず第一に、従来の粗さ実験式より計算された値は送りの大きい場合は殆んどの被削材に対して実際値よりはるかに大きく出て来る。もともと此の式は構成刃先のない理想状態において求められたにもかかわらず計算値が実際値よりずっと高く出る場合があるということは矛盾であるといわざるを得ない。更に p の小さい場合は図 4 でもわかる様に曲線の性質が実際と大分異なる。

之に反し筆者によつて導かれた理論式は全ての実際値曲線の下にあり、チタン D の様に構成刃先を殆んど生じない場合の曲線と非常に近いことは本式が正しいことを示している。唯構成刃先の著しい炭素鋼の如きものは非常に隔りがある。しかし実際の仕上面は此の理論曲線より絶対に下方に来得ないことは勿論で、両者間の隔りは、その仕上面を改善しうる最大限度を示すものである。さて此の両者間の隔りの原因は前述の様に構成刃先であることは確かで、これを最小に抑える最も有力な手段は矢張り切削速度を上げることである。

IV. 切削速度と仕上面

構成刃先附着の機構については未だはつきりしたことはわかっていないが、所謂圧着現象と加工硬化の複合された結果であると考えるのが一応尤もらしく思われる。それで切削速度が上つて温度も上昇して来ると熔着という現象が起つて来るが、この熔着によつて附着した金属はその剪断強さも弱いために刃先に積み重ねられる以前に取去られて構成刃先の形を作り難い。更に又切削速度が上昇して来ると、金属附着の第一過程たる金属の流れのために十分な時間がないために、圧着及熔着の何れもが出来難くなると考えられる。此の間の事情を模形的に示したのが図 6 で、横軸は切削速度、縦軸は工具上の附

着面積をとつてある。
図中①は圧着領域、②は熔着領域、③は全附着面積を表わしている。即ち低速においては圧着が起こり、Aなる再結晶温度に達すると熔着が始まる。そして更に速度が増してBに至ると附着の全てが熔着によるというわけであり、と同時に構成刃先は消失すると考えられる。

図 6

本テストにおいては炭素鋼、ステンレス及チタン合金について切削速度による表面粗さの影響についてしらべた。なお用いた工具材はカーバイトでその形は(-7, -7, 7, 7, 15, 15, $\frac{3}{64}$ ") であり、送り は 0.010ipr, 切込みは 0.050" で全て乾燥切削である。

図 7

図 7 a は炭素鋼に対するもので、送りマークに直角方向と平行方向を二様に測定してある。何れの方角に於いても切削速度 300f. p. m. 云いかえると約 100m/min で仕上面粗さは最大値の三分の一以下によく、その後は落付く。又非常に低速側では却つて仕上面はよく、切削速度約 100f. p. m. で最大となる。低速側で何故に構成刃先が少なくなるかという事は難しい問題であるが、金属附着の第一過程たる金属の流れには或る程度の温度上昇が必要であると考えられることより、低速切削の場合には切削が剪断型となり構成刃先が出来難いからであろう。

図 7 a の 400 f. p. m. における送りマークに直角方向の粗さ 105 マイクロインチという値は、図 4 からわかる様に、その理論値に非常に近いことが知れる。

図 7 b はステンレスに対するものであるが、炭素鋼に比べれば仕上面の速度による影響はずつと少ない。しかしその傾向は同じであるといえよう。

図 7 c はチタン B 及同 D の送りマークに平行方向の粗

さと切削速度との関係であるが何れも切削速度による相違は余りない。これは元々構成刃先の出来難い金属だからである。

構成刃先の非常に著しい金属では送りマークに直角方向と平行方向の粗さの速度による傾向は平行しているが、構成刃先の少ない金属においてはそれらは必ずしも平行しない。しかし粗さの切削速度による影響を云々する場合には、送りマークに平行方向の粗さを論ずるのが至当であろう。

V 結 論

- (1) 構成刃先のない理想状態における平均粗さを表す理論式を各種の場合について誘導し、それと各種被削材の実験値と比較した。その結果、構成刃先を生じ難いチタン合金の様な場合にはその実際値は理論値に非常に近いが、鋼の様に構成刃先の甚しいものでは理論値と実際値は非常に隔つてゐる。

- (2) 理論値と実際値との隔りはその仕上面の改善しうる最大限度を示すものである。
- (3) 従来の粗さ実験式は広い範囲で筆者の理論式より可成り大きい値を与え、又殆んどの被削材に対してその実際値より大なる値を与えた。これは明らかに矛盾であつてその適用には注意を要する。これに反し筆者の理論式は首尾一貫していると考えられる。
- (4) 仕上面粗さと切削速度との関係についてしるべ、鋼の場合においては切削速度 400f. p. m. でその粗さは理論値に非常に近くなる。この実験により、送りマーク以外による粗さの改善は切削速度を上げて構成刃先を抑えることが最も有効であるという事がわかつた。(1955, 1月18日受付)

参 考 文 献

1. Applied Machinability, 1953, University of Michigan.
2. Metal Cutting Principle, M.C. Shaw, M.I. T., 1952, PP 11—17