# (12回連載 ショートレクチャー〉 若手技術者のための研削工学 (第9回)研削仕上面粗さ

奥山繁樹(防衛大名誉教授)

# 1. はじめに

研削仕上面粗さは、砥石の種類、ドレッシング条件、 加工条件、研削盤の性能などによって大きく変化する. 仕上面粗さの理論については、過去に多くの研究者が チャレンジしているが、本稿では粗さの創成機構に関 する基礎的な考え方を学んでいただくために、小野の 理論[機械加工学の基礎(コロナ社)参照]を踏まえつ つ検討を進めることにしたい.

なお、例によって研削加工は複雑・難解であることから、仕上面粗さの実験式について考えることから始め、 仕上面粗さの理論の概要および粗さのコントロールに ついて順次検討する.

# 2. 仕上面粗さの実験式

研削仕上面粗さには多くの因子が複雑に影響する ので,研削条件と粗さの関係を実験式で表わす試みが なされている. Salje らは,仕上面粗さ R は各種パラメー タの指数関数の形で表わせるものとして,次式を提案し ている.

$$R = kt^a V^{-b} v^c s^d B_s^{-e} \tag{1}$$

表1は、各研究者が求めた上式の指数値をまとめた ものである.いずれにしても、切込み深さt、工作物速度 v、トラバース送りsの増加は粗さを増大させ、砥石周速 度V、砥石幅Bsの増加は粗さを減少させると言える.

### 3. 仕上面粗さの理論

研削仕上面の砥石軸方向の垂直断面形状(断面曲線)は、砥石表面上に分布する多数の切れ刃によって 工作物が次々と切削除去され、切り残された部分のプ ロファイルに他ならない.つまり仕上面粗さには、切れ 刃の先端形状とその分布および作用状態が影響する. ここではまず、ごく簡単な切れ刃モデルをもとに仕上面

表1 研削仕上面粗さの実験式(1)の指数値

研究者	а	b	С	d	е
Salje	0.18	1.0	0.18	0.47	0.47
渡辺	0.25	0.5	0.5	0.38	0.38
Werner	0.26	0.51	0.51	-	-
Masslow	0.4	-	0.6	0.45	-



図1 切れ刃の高さと配列が一様である理想的な 砥石による粗さの創成

粗さの創成機構を幾何学的に検討する.

## 3.1 砥粒切れ刃の高さと配列が一様である場合

いま,切れ刃先端の直径が  $d_0$  である砥粒が,砥石 の最外周に同じ突き出し高さで格子状に並んでいる 理想的な場合について考える. 図 1 に示すように,砥 粒切れ刃が平均切れ刃間隔o,連続切れ刃間隔a で 並んでいる直径 D の砥石で平面研削する場合,工作 物表面には図 2 のように,連続した二つの切れ刃によ って高さ h の山が創成される. 一般の平面研削では V $\gg v$  であるから,砥粒切れ刃の運動軌跡を円弧と仮定 すると,hは次式で近似できる.

$$h \coloneqq \frac{1}{4} \left(\frac{v}{V}\right)^2 \frac{a^2}{D} \tag{2}$$

一方,切削条痕を砥石軸方向に眺めると,一個の切 れ刃によって高さh',幅bの切削痕が残される.h'≪bと すると,h'は次式で近似できる.



図2 砥粒切れ刃による切削条痕モデル

$$h' \doteq \frac{1}{4} \frac{b^2}{d_0} \tag{3}$$

したがって、切れ刃高さが均一で d<sub>0</sub>および a, b が一定 である砥石による仕上面の最大高さ粗さ R<sub>2</sub>は次式で与 えられる.

$$R_{z} = h + h' = \frac{1}{4} \left(\frac{v}{V}\right)^{2} \frac{a^{2}}{D} + \frac{1}{4} \frac{b^{2}}{d_{0}}$$
(4)

砥石軸方向の幅 $\omega$ の間に $n_0$ 本の切削条痕が通過する場合,一個の砥粒の切削幅 $b = \omega/n_0$ となる.この時,連続切れ刃間隔 $a = n_0 \omega$ であるから,式(4)は次のようになる.

$$R_{z} = \frac{1}{4} \left(\frac{v}{V}\right)^{2} \frac{\left(n_{0}\omega\right)^{2}}{D} + \frac{1}{4d_{0}} \left(\frac{\omega}{n_{0}}\right)^{2}$$
(5)

上式は、ごく単純なモデルに基づいた解析結果であ るが、R<sub>z</sub>を小さくするには工作物速度 v, 平均切れ刃間 隔 ωを小さくし、砥石周速度 V, 砥石直径 D, 砥粒先端 の直径 d<sub>0</sub>を大きくする必要があることを示している.各 変数の影響は、先の実験式(1)の傾向と矛盾しないも のの、vとVの指数値は大きく異なっている.実際には、 砥粒切れ刃の分布は不規則であるため、研削仕上面 の粗さは式(5)による計算値よりもはるかに大きくなる.

### 3.2 砥粒切れ刃の立体的分布を考慮した場合

図3に示すように、砥石表面上の切れ刃分布や高さの不揃いは仕上面粗さに直接影響する.したがって、 粗さの創成機構を考える場合には、切れ刃の立体的分 布を考慮する必要がある.

図 4 は, 砥粒切れ刃の位置と切削高さとの関係を示 したもので, 点 O は砥石軸,  $\overline{AX}$  は理想的な仕上面の レベルである. いま, 仕上面と紙面に垂直な工作物上 の任意断面 DC(以下, これを基準断面と呼ぶ)を通過 する切れ刃 G の砥石内部における位置を, 極座標 ( $\rho$ ,  $\theta$ )で表す. ここで,  $\rho$ は砥石中心 O からの距離(半 径),  $\theta$  は点Oを極としOBを原線とする角度である. た だし, 砥石表面上の点 B が点 A に砥石周速度 V で移



図3 切れ刃高さにばらつきがある場合の 研削方向の仕上面粗さ



図4 砥粒切れ刃の切削高さ

動する間に, 断面 DC は OA の位置まで, 工作物速度 v で移動するものとする. この場合, 次式の関係が成り 立つ.

$$\frac{\rho \phi}{v} = \frac{D \left(\theta - \phi\right)}{2V} \tag{6}$$

切込み深さに比べ、砥石径は十分大きいから、 $\rho=D/2$ とおくと、 $\phi$ は次式で与えられる.

$$\phi = \left(\frac{v}{V+v}\right)\theta\tag{7}$$

また,図4に示した幾何学的関係および式(6),式(7)より, $弧 \rho \phi$ は次式で近似できる.

$$\rho\phi = \rho\theta\left(\frac{v}{V+v}\right) \doteq \sqrt{2\rho\left\{h - \left(\frac{D}{2} - \rho\right)\right\}}$$
(8)

したがって  $V \gg v$  であることを考慮すれば, 任意の砥 粒  $G(\rho, \theta)$ の基準断面 (DC 断面)における切削高さ hは次式で与えられる.

$$h \stackrel{\text{\tiny therefore}}{=} \frac{D}{2} - \rho + \frac{D}{4} \left(\frac{v}{V}\right)^2 \theta^2 \tag{9}$$

(※ここまでは、単純な幾何学である.以下に小野の理論 を要約して述べるが、その内容を完全にフォローするのは 難しいので、読者諸兄には同氏の考え方を理解するよう 努めて頂きたい)

さて、この基準断面における仕上面の創成プロセス について考える. 図5 はその様子を示したもので、ハッ チングを施した部分が最終的な仕上面の断面曲線を 表し,破線は一定の頂角 2γを有する円錐形切れ刃群 による切削痕を示している.

本図において、刃先 P による切削痕は、刃先 Q による切削痕(GQJ)に完全に包含され、最終的な仕上面には影響しない.このように、切削時間の前後を問わず、 ① ある切削痕を完全に包含し、② 切削高さの差が最小であるような切削痕を持つ切れ刃を、元の切れ刃の後続切れ刃と呼ぶことにする.さて図 5 において、点 Q を通る NMを底辺とし、点 P を頂点とする三角形の中には、後続切れ刃 Q 以外の切削痕は存在しない.つまり、三角形 PNM の切削に関与する砥石体積内には1 個の切れ刃だけが存在したと言える.

図6の右側に, 頂角2γの切れ刃群で切削した仕上 面の断面曲線を示す.式(9)は任意の切れ刃Gの切削 による谷底深さhを表していることから,逆に,任意の高 さhの谷底(切削痕)は,式(9)で与えられる等切削高さ 曲線(図6の左側に示す,高さhを通る曲線)上に存在 した切れ刃によって削られたものと言える.

さて谷底 P が, 仕上面プロファイル中に残っていると いうことは, h よりも低い谷底を切削除去する他の切れ 刃が存在しなかったためである. つまり図 6 の右側に示 すように谷底 P を頂点とし, 頂角  $2\gamma$  の三角形 PNM の 部分を通過すべき砥石内部の体積 u には, 切れ刃は 1 個も存在しなかったことになる. この体積 u は, 砥石最 下点 B における断面形状が三角形 PNM に等しい砥石 内部の三日月状部分(図 7 の左図の灰色部分)の体積 である. 砥石半径を R とおくと, u は次式で与えられる.

$$u = 2 \int_{0}^{n} R\theta_{x} \times 2\tan\gamma (h-x) dx \tag{10}$$

ここに、 $\theta_x$  は基準断面における高さxの切削に関与す る等切削高さ曲線が、砥石外周を切る点までの角度で あって、 $\theta_x = (v/V)\sqrt{2x/R}$ で与えられるので、これを上 式に代入すると、次式が得られる.

$$u = \frac{16}{15} \frac{\tan \gamma}{G} h^{\frac{5}{2}}$$
(11)

ここで G は、加工条件によって決まるパラメータであり、  $G = (v/V)\sqrt{1/2R}$  で表される.いま、切れ刃の立体的平 均間隔をvとすれば、砥石単位体積中には  $1/v^3$ の切 れ刃が存在するから、上式は次のようになる.

$$\frac{u}{v^3} = \frac{16}{15} \frac{\tan \gamma}{G v^3} h^{\frac{5}{2}}$$
(12)

上式は、仕上面プロファイルの中に谷底高さ h の切



図7 研削に関与する砥石内部の体積

削痕が存在するための条件となるもので,図 6 の場合 には,右辺の値がたまたまゼロであったことを意味して いる.そこで,仕上面中の一番高い h を最大谷底高さ H,とすれば,これより高い谷底は存在しないから,式 (12)の右辺の値は限りなく1に近づき,次式が得られる.

$$\frac{16}{15}\frac{\tan\gamma}{Gv^3}H_v^{\frac{5}{2}} = 1$$
(13)

上式に, 先の $G = (v/V) \sqrt{1/2R}$ を代入すると次式が得られる.

$$H_{\nu} = \left(\frac{15}{16}\right)^{\frac{2}{5}} \nu^{\frac{6}{5}} (\cot \gamma)^{\frac{2}{5}} G^{\frac{2}{5}}$$
$$= 0.975 \nu^{1.2} (\cot \gamma)^{0.4} \left\{\frac{\nu}{V} \sqrt{\frac{1}{2R}}\right\}^{0.4}$$
(14)

小野らによれば、仕上面の最大高さ粗さ $R_z > H_v$ の間 には、 $R_z = 1.4H_v$ の関係があるとされている.したがって、 仕上面粗さはGの 0.4 乗に比例し、砥石の立体的切れ 刃間隔vが小さく、切れ刃頂角  $2\gamma$ が大きいほど小さく なると言える.なお、上式も式(5)と同様、切込み深さ tに無関係となっている.

図8は、一般砥粒砥石(WA46L)を用いて焼入れ鋼 を研削したときの最大高さ粗さ *R*<sub>z</sub>, 十点平均粗さ *R*<sub>zJIS</sub> および算術平均粗さ *R*<sub>a</sub>を測定し、パラメータ *G* につい





### 4. 仕上面粗さのコントロール

一般砥粒砥石の場合, 鋭利な 単石ダイヤモンドドレッサに大き な切り込みと送りを与えてドレッシ ングすると, 砥石の表面にねじ山 状の凹凸が形成されることがある. これは, 旋削加工における粗さの 創成プロセスと同じである. ねじ 山状凹凸が形成された砥石で研 削すると, その形状が仕上面に

転写され,粗さが大きくなるので注意を要する.

通常の研削条件においては,式(14)に示す砥石と 工作物の幾何学的作動条件を操作することで,粗さを ある程度コントロールできる.しかし,さらに良い仕上面 を得ようとしても式(15)に示した限界があるから,切れ 刃の立体的平均間隔vを努めて小さく,かつ切れ刃頂 角 2y を大きくすることが重要になる.

ドレッシング切込みと送りを非常に小さくすると,切れ 刃密度は大(vが小)となり,しかも 2v も 180°に近づく ので,鏡面仕上げができるようになる.また,ごく微粒の 軟質砥石を選ぶ(作用砥粒数を極端に大きくする)のも 効果的である.ただし,いずれの場合も研削焼けが生 じやすく,加工能率が低下するので注意を要する.

### 5. おわりに

本誌 58 巻1月号の特集で「工作物の除去機構への 疑問を温めつつ歩んだ途」と題した記事を執筆した.そ の中で,切れ刃分布のランダム性を前提とした粗さ理 論に対する疑問を述べている.細部は省くが,砥粒切 れ刃は研削の初期段階でその先端が容易に摩耗する が,その過程で加工仕事の負担を分散しようとする自 然の力が働くかのように,先行切れ刃と後続切れ刃の 高さばかりでなく,摩耗面のうねり形状まで似てくる,つ まりランダム性が急速に失われることを指摘している.ま た,弾性的・塑性的に上滑りする切れ刃も多く,実際の 面粗さも切りくず厚さも理論値より大きくなる.

つまり本稿で紹介した式は、これを鵜呑みにすること はできない.しかし、所望の粗さを得るために砥石と工 作物の幾何学的作動条件や、砥石の表面状態をどの ようにすべきかの指針には十分なり得る.

次回は、「びびり振動の原因とその抑制法」について 考えることにする.

て整理したものである. いずれの粗さ値も G が増えると 大きくなるが, そのベキ指数は 0.4~0.5 となっており, 式(14)の指数値とほぼ一致している.

# 3.3 極限粗さ

式(14)において、v=0とおくと研削パラメータG=0となり、 $H_v \Rightarrow 0$ になるはずであるが、実際にはある値以下にはならない、その理由は、つぎのとおりである.

図 7 に示した三日月状部分の体積 u は, G が小さく なると次第に砥石の全周に広がり, G=0 になると砥石 外周のリング (その断面は, 高さ  $H_v$ , 底辺  $2H_v \times \tan \gamma$  の 三角形である)の体積になって, さらに増加することは ない. このため Gを極端に小さくしても, 粗さはある値以 下にならない. これが小野の極限粗さ(正しくは, 極限・ 最大谷底高さ) $H_v^*$ であり, 次式で与えられる.

$$H_{v}^{*} = \sqrt{\frac{\nu^{3} \cot \gamma}{2\pi R}}$$
(15)

例えば, 平面あるいは円筒プランジ研削において, 同一箇所を何度スパークアウト研削しても, 最大谷底高 さは H<sub>v</sub>\*より小さくなることはない. 式(14) が成立するた めのパラメータ G の範囲は次のとおりである.

$$G \ge G_{\rm c} = \frac{1.17\sqrt{H_{\nu}^{*}}}{\pi R} \tag{16}$$

図9は、Gを小さくしたときの $H_v/H_v^*$ の変化を示した もので、G≧G<sub>c</sub>の範囲では粗さは式(14)で与えられ、G <G<sub>c</sub>では $H_v$ の減少速度が低下し、G=0において $H_v$ = $H_v^*$ となる.この極限粗さを確かめたい場合には、工作 物の送りを止めた状態で、砥石をわずかに切り込めば 得られる.