



砥粒切削方向が研削面粗さに及ぼす影響について*

—非軸対称非球面研削に関する研究—

吉原 信人** 閻 紀 旺*** 厨 川 常 元***

Effect of Grain Cutting Direction for Ground Surface Roughness
—Study on Nonaxisymmetric Aspherical Grinding—

Nobuhito YOSHIHARA, Jiawang YAN and Tsunemoto KURIYAGAWA

Surfaces of optical parts are required to be smooth. Therefore, polishing is carried out. The period of polishing process depends on the roughness of ground surface. To shorten the period of polishing process, the roughness of ground surface must be smooth. In this paper, to clarify the optimum grinding condition, maximum height roughness of traverse ground surface is analyzed theoretically utilizing the statistical grinding theory. From the view point of relationship between the grain cutting direction and workpiece feed direction, the grinding condition is classified into parallel grinding and cross grinding. And it is found that the parallel grinding has an advantage in rough grinding, and the cross grinding is suited to finish grinding.

Key words: parallel grinding, cross grinding, grain cutting direction, statistical grinding theory

1. 緒 言

ガラスレンズ等の光学部品あるいはその金型は研削により成形された後、研磨により仕上げ加工される。しかし研磨工程では砥石と比較して柔らかいパッドが工具として用いられるため、高い形状精度を保つことは困難である。したがって研削面の粗さをなるべく小さくし、研磨量を小さく抑える必要がある。また研磨量の抑制は形状精度の悪化防止だけではなく、コスト、加工時間、環境負荷の低減などの効果が期待される。

これまでブランチ研削における研削条件と研削面粗さの関係に関しては理論的な解析が多くなされてきた^{1)~5)}。しかし光学部品を非軸対称非球面形状に研削するときにはトラバース研削が用いられている。また同じトラバース研削でも、砥石送り方向と砥粒切削方向が平行である場合(以下、パラレル研削法と呼ぶ)と、垂直である場合(以下、クロス研削法と呼ぶ)の2通りのトラバース研削法が存在する。そこで本研究では砥粒切削方向と砥石送り方向の関係がトラバース研削面の最大高さ粗さに及ぼす影響について解析する。

2. 統計的研削理論

統計的研削理論¹⁾の考え方をを用いてトラバース研削面の最大高さ粗さを解析する。まず平面研削における砥石と工作物の相対関係を図1に示す。ここでOは砥石の回転軸、Dは砥石直径、 Δ は砥石半径切込量、AXは工作物の理想的な仕上がり面である。研削方向に垂直な工作物断面を任意に定め、これを基準断面とする。つぎに、この基準断面がOAの位置にきた瞬間をとらえ、砥石の円周方向に角度 θ (半時計方向を正)、砥石の最外周面から δ の位置にある砥粒切れ刃の座標を (θ, δ) と表す。切れ刃 (θ, δ) はある時間経過後基準断面を切削する。そのときの切削高さHは次式のように求められる⁶⁾。

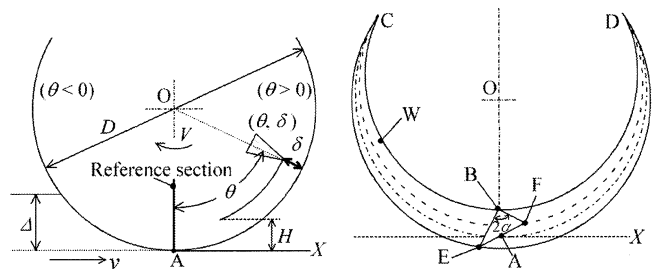


Fig. 1 Grinding model

Fig. 2 Cutting curve

$$H = \delta + \frac{D}{4} \left(\frac{v}{V} \right)^2 \theta^2 \quad (1)$$

ここでVは砥石周速、vはテーブル送り速度である。Hを一定としたとき、 (θ, δ) が描く曲線を、高さHの等高切削曲線と名付ける。図2の曲線CBDが等高切削曲線である。

ここで砥粒切れ刃の形状を、砥石半径方向に一致した軸を持つ先端角 2α の円すい形状であるとする。この場合、円すいの母面においても切削が行われる。したがって等高切削曲線CBDを頂とする2つの面CBDE, CBDF上に存在する砥粒も、基準断面を高さHで切削する。この2つの面CBDE, CBDFおよび砥石外周面に囲まれる立体をWとする。この立体Wの体積が大きいほど、その内部に砥粒が存在する確率が高くなる。この場合、最大高さ粗さがHよりも小さくなる。いま、最大高さ粗さを H_m とし、それに対応する立体の体積を W_m とすると、 W_m はその内部に切れ刃が存在しないようにとりうる立体の上限となる。この体積 W_m は幾何学的に求めることができ、D, H_m , α , V, vの関数として与えられる。

また砥粒切れ刃1個が占める体積を W_0 とすると、 W_0 と立体Wの体積 W_m の間には次式に示す関係が知られている⁷⁾。

$$W_m(D, H_m, \alpha, V, v) = nW_0 \quad (2)$$

ここでnはランダム係数と呼ばれる係数である。ランダム係数は砥石の種類によらず、平均3.3であることがわかっている⁸⁾。

* 原稿受付 平成21年8月21日
** 正 会 員 岩手大学大学院 (岩手県盛岡市上田 4-3-5)
*** 正 会 員 東北大学大学院 (仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)

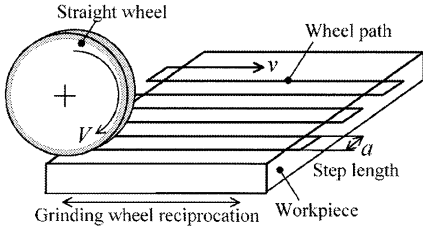


Fig. 3 Parallel grinding

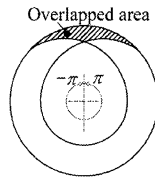


Fig. 4 Overlapped area

式(2)の中で不明な値は最大高さ粗さ H_m のみである。他は研削条件によって決まる値、あるいは定数である。したがって立体 W の体積 W_m を幾何学的に求めることにより、最大高さ粗さ H_m を計算することができる。以降、立体の体積の導出法について検討する。

3. パラレル研削面の粗さと研削条件の関係

3.1 理論解析

まず、テーブル送り方向と砥粒切削方向が平行であるパラレル研削法に関して検討する。用いる研削モデルを図3に示す。周速 V で回転する幅 b の平砥石が送り速度 v で工作物を研削する。そして砥石がストローク端点に到達すると、ステップ送り量 a が与えられ反対方向に送られる。ここで砥石の幅 b はステップ送り量 a よりも大きいものとする。このように研削を行うとき、それぞれのストロークにおいて、図2に示したような立体が形成される。したがって隣り合うストローク上の立体が互いに干渉する場合についても検討する必要がある。さらに図4に示すように立体の全長が砥石外周よりも長くなり、立体内において干渉が発生する場合がある。干渉した部分は立体の体積に影響しない。これら2種類の干渉に関して考慮し、立体の体積を計算する必要がある。

干渉を考慮し場合分けを行うにあたり、立体を図5のように示す。同図において (θ, δ) は直交座標系上に示されている。図2中の点Aに相当する位置を原点とし、砥石回転軸方向に k 軸を設ける。この座標系において、立体 W は砥石外周により構成される面が水平になるように広げられた形となる。立体が占める領域の中で k 軸の最大値を k_{max} 、 θ 軸の最大値を θ_{max} とする。まず $\theta=0$ において δ - k 平面と平行に立体を切断する。切断面を図6に示す。同図からも明らかのように、 k_{max} は次式のように表わされる。

$$k_{max} = H_m \tan \alpha \quad (3)$$

$\theta=0$ かつ $0 \leq k \leq k_{max}$ の範囲内における高さ H_{mk} は次式で表される。

$$H_{mk} = -\frac{1}{\tan \alpha} k + H_m \quad (4)$$

式(4)の H_{mk} を式(1)の H に代入することにより、立体の表面を次式のように表わすことができる。

$$\delta = H_m - \frac{k}{\tan \alpha} - \frac{D}{4} \left(\frac{v}{V} \right)^4 \theta^2 \quad (5)$$

θ が最大値をとるのは k と δ が 0 のときである。したがって θ_{max} は次式で表される。

$$\theta_{max} = \frac{2V}{v} \sqrt{\frac{H_m}{D}} \quad (6)$$

以下、干渉の状態を場合分けし、それぞれのケースに関して立体の体積を求める。

3.1.1 ケース1

立体の長さが砥石外周よりも短く、隣り合う立体が干渉していない場合を考える。この条件を図7および次式に表す。

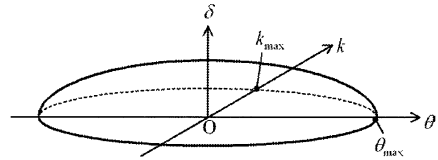


Fig. 5 Sample of three-dimensional space

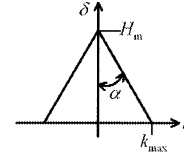


Fig. 6 Cross section of figure 5 at $\theta=0$

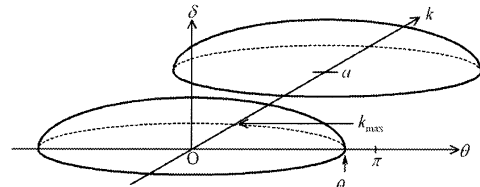


Fig. 7 Model of case 1

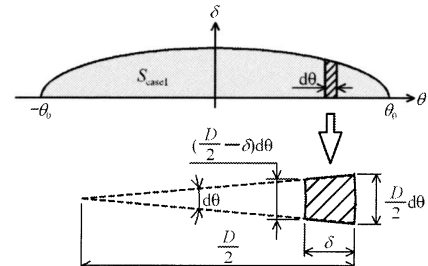


Fig. 8 Cross section of figure 7 at optional k ($0 < k < k_{max}$)

$$\begin{cases} k_{max} < a/2 \\ \theta_{max} < \pi \end{cases} \quad (7)$$

$0 \leq k \leq k_{max}$ の範囲内において任意の座標 k で δ - θ 平面と平行に立体を切断する。切断面を図8に示す。同図中に示した角度 θ_0 は δ が 0 になるときの θ であり、式(5)を用いて次式のように求められる。

$$\theta_0 = \frac{2V}{v} \sqrt{\frac{1}{D} \left(H_m - \frac{k}{\tan \alpha} \right)} \quad (8)$$

この θ_0 を用いて、図8中に示した切断面の面積 S_{case1} を表わすと次式のようになる。

$$S_{case1} = \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \frac{1}{2} \left(\frac{D}{2} d\theta + \left(\frac{D}{2} - \delta \right) d\theta \right) \delta \quad (9)$$

式(5)と式(8)を式(9)に代入することにより、 S_{case1} を算出することができる。さらに算出された S_{case1} を k に関して 0 から k_{max} まで積分することにより、立体の体積の二分の一が算出される。また幅 b の平砥石をステップ送り量 a で送るので、立体は b/a 個存在することになる。したがってケース1の立体総体積 W_{case1} は以下のように求められる。

$$\begin{aligned} W_{case1} &= \frac{b}{a} \times 2 \int_0^{k_{max}} S_{case1} dk \\ &= \frac{16Vb}{15va} D^{0.5} H_m^{2.5} \tan \alpha - \frac{64Vb}{105va} D^{-0.5} H_m^{3.5} \tan \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

同式を式(2)の W_m 部分に代入することにより最大高さ粗さ H_m を算出することができる。

3.1.2 ケース2

次に立体の全長が砥石外周よりも長く、隣り合う立体が干渉し

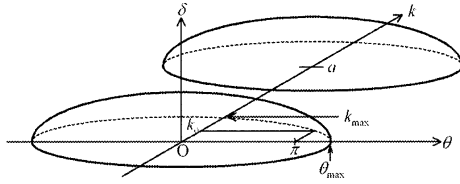


Fig. 9 Model of case 2

ていない状態に関して検討する. 同条件を図9および次式に示す.

$$\begin{cases} k_{\max} < a/2 \\ \theta_{\max} > \pi \end{cases} \quad (11)$$

同図中の k_0 は $\delta=0$, $\theta=\pi$ のときの k 軸座標値である. 式(5)より k_0 は次式のように求められる.

$$k_0 = \left\{ H_m - \frac{\pi^2}{4} D \left(\frac{v}{V} \right)^2 \right\} \tan \alpha \quad (12)$$

k 軸座標値が k_0 よりも小さい部分の体積と大きい部分の体積をそれぞれ求める.

$0 \leq k \leq k_0$ の範囲内では立体の長さが砥石外周の長さよりも長い. 図4で示したように, 砥石外周の長さを越えた部分は体積に影響しないため, 考慮する必要がない. したがって $0 \leq k \leq k_0$ 範囲内の任意の k における切断面の面積 S_{case2_1} は以下の式で求められる.

$$S_{\text{case2}_1} = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} \left(\frac{D}{2} d\theta + \left(\frac{D}{2} - \delta \right) d\theta \right) \delta \quad (13)$$

さらに同式を k に関して 0 から k_0 まで積分することにより, 立体の体積のうち $0 \leq k \leq k_0$ の範囲内に存在する体積 W_{case2_1} が求められる.

$$W_{\text{case2}_1} = \int_0^{k_0} S_{\text{case2}_1} dk \quad (14)$$

$k_0 < k \leq k_{\max}$ の範囲内において, 立体の長さは砥石外周の長さよりも短い. すなわちケース1と同様の条件である. したがって立体の切断面の面積は式(9)から求めることができる. 立体の $k_0 < k \leq k_{\max}$ の範囲内における体積 W_{case2_2} は式(9)中の S_{case1} を用いて次式のように求められる.

$$W_{\text{case2}_2} = \int_{k_0}^{k_{\max}} S_{\text{case1}} dk \quad (15)$$

立体1個の体積は W_{case2_1} と W_{case2_2} の和の2倍である. 立体は b/a 個存在するので, ケース2の立体総体積 W_{case2} は次式のように表される.

$$\begin{aligned} W_{\text{case2}} &= \frac{b}{a} \times 2(W_{\text{case2}_1} + W_{\text{case2}_2}) \\ &= \frac{b}{a} \left[\left\{ -\frac{\pi^3}{6} \left(\frac{v}{V} \right)^2 - \frac{\pi^5}{40} \left(\frac{v}{V} \right)^4 \right\} H_m D^2 \tan \alpha \right. \\ &\quad + \left. \left\{ \pi + \frac{\pi^3}{6} \left(\frac{v}{V} \right)^2 \right\} H_m^2 D \tan \alpha - \frac{2}{3} \pi H_m^3 \tan \alpha \right. \\ &\quad \left. + \frac{\pi^5}{80} \left(\frac{v}{V} \right)^4 D^3 \tan \alpha + \frac{\pi^7}{672} \left(\frac{v}{V} \right)^6 D^3 \tan \alpha \right] \end{aligned} \quad (16)$$

同式を式(2)の W_m 部分に代入することにより, ケース2の条件下での最大高さ粗さ H_m を算出することができる.

3.1.3 ケース3

次に隣り合う立体が干渉しており, その干渉している部分の長さが砥石外周よりも長い場合について検討する. 同条件を図

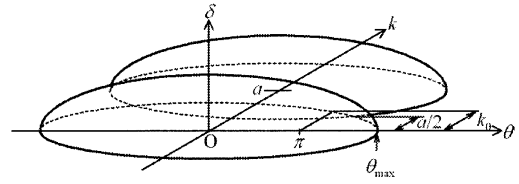


Fig. 10 Model of case 3

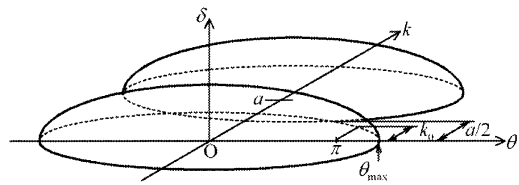


Fig. 11 Model of case 4

10および次式に示す.

$$\begin{cases} k_0 > a/2 \\ \theta_{\max} > \pi \end{cases} \quad (17)$$

同条件では常に立体の長さが砥石外周の長さよりも長い. したがって切断面の面積は式(12)から求められる S_{case2_1} と等しい. また, 隣り合う立体が干渉している場合, k 軸座標が $-a/2$ から $a/2$ の範囲にある立体が (b/a) 個並ぶことにより立体全体を構成している. したがってケース3の立体総体積 W_{case3} は次式から求めることができる.

$$\begin{aligned} W_{\text{case3}} &= \frac{b}{a} \times 2 \int_0^{a/2} S_{\text{case2}_1} dk \\ &= \frac{b}{a} \left[\left\{ -\frac{\pi^3}{12} \left(\frac{v}{V} \right)^2 D^2 - \frac{\pi^5}{80} \left(\frac{v}{V} \right)^4 D^2 + \pi D H_m \right. \right. \\ &\quad + \left. \frac{\pi^3}{6} \left(\frac{v}{V} \right)^2 H_m D - \frac{\pi}{8} \left(\frac{v}{V} \right)^2 H_m \right\} a + \left\{ -\frac{\pi}{4} D \tan^{-1} \alpha \right. \\ &\quad - \left. \frac{\pi^3}{24} D \left(\frac{v}{V} \right)^2 \tan^{-1} \alpha + \frac{\pi}{16} \left(\frac{v}{V} \right)^2 H_m \tan^{-1} \alpha \right\} a^2 \\ &\quad \left. - \frac{\pi}{96} \left(\frac{v}{V} \right)^2 a^3 \tan^{-2} \alpha \right] \end{aligned} \quad (18)$$

同式を式(2)の W_m 部分に代入することにより, ケース3の条件下での最大高さ粗さ H_m を算出することができる.

3.1.4 ケース4

次に隣り合う立体が干渉しており, その干渉している部分が砥石外周の長さよりも短い場合を考える. ここで立体の長さは砥石外周の長さよりも長いものとする. 同条件を図11および次式に示す.

$$\begin{cases} k_0 < a/2 \\ \theta_{\max} > \pi \end{cases} \quad (19)$$

この場合, ケース2と同様に, k 軸座標値が k_0 よりも小さい部分の体積と大きい部分の体積にわけて考える必要がある.

$0 \leq k \leq k_0$ の範囲内では, ケース2の同範囲内と同じ状態であり, その体積 W_{case4_1} は W_{case2_1} と等しい.

$$W_{\text{case4}_1} = W_{\text{case2}_1} \quad (20)$$

$k_0 < k \leq a/2$ の範囲内では, 立体の切断面の面積はケース1の式(9)と同様である. これを k_0 から $a/2$ の範囲で積分することにより, この部分の体積 W_{case4_2} を求める.

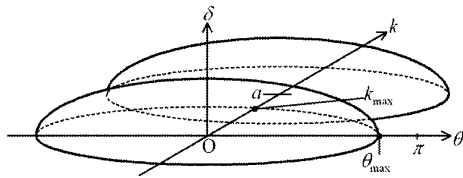


Fig. 12 Model of case5

Table. 1 Calculation conditions

W_0	0.0005mm ³
n	3.3
Wheel revolution speed	2000rpm
Step feed length	0.05~0.25mm
Table feed rate	100~400mm/min
Width of wheel	5mm
Wheel diameter	250mm

$$W_{case4_2} = \int_{k_0}^{a/2} S_{case1} dk \quad (21)$$

立体1個の体積は W_{case4_1} と W_{case4_2} の和の2倍である。同様の立体は b/a 個存在するので、ケース4の立体総体積 W_{case4} は次式のように表される。

$$\begin{aligned} W_{case4} &= \frac{b}{a} \times 2(W_{case4_1} + W_{case4_2}) \\ &= \frac{b}{a} D^3 \left[\left\{ -\frac{\pi^3}{6} \left(\frac{v}{V}\right)^2 - \frac{\pi^5}{40} \left(\frac{v}{V}\right)^4 \right\} \frac{H_m}{D} \right. \\ &\quad + \left\{ \pi + \frac{\pi^3}{6} \left(\frac{v}{V}\right)^2 \right\} \frac{H_m^2}{D^2} - \frac{2\pi}{3} \frac{H_m^3}{D^3} \\ &\quad + \left. \frac{\pi^5}{80} \left(\frac{v}{V}\right)^4 + \frac{\pi^7}{672} \left(\frac{v}{V}\right)^6 \right] \tan \alpha \\ &\quad - \frac{16}{15} \frac{b}{a} \frac{V}{v} D^{0.5} \left(H_m - \frac{a}{2 \tan \alpha} \right)^{2.5} \tan \alpha \\ &\quad + \frac{64}{105} \frac{b}{a} \frac{V}{v} D^{-0.5} \left(H_m - \frac{a}{2 \tan \alpha} \right)^{3.5} \tan \alpha \end{aligned} \quad (22)$$

同式を式(2)の W_m 部分に代入することにより、ケース4の条件下での最大高さ粗さ H_m を算出することができる。

3.1.5 ケース5

次に立体の長さが砥石外周よりも短く、隣り合う立体が干渉している場合を考える。同条件を図12および次式に示す。

$$\begin{cases} k_{max} > a/2 \\ \theta_{max} > \pi \end{cases} \quad (23)$$

この場合、 $0 \leq k \leq a/2$ の範囲内における立体の切断面の面積はケース1における式(9)と同様である。したがってケース5の立体総体積 W_{case5} は次式のように表される。

$$\begin{aligned} W_{case5} &= \frac{b}{a} \times 2 \int_0^{a/2} S_{case1} dk \\ &= \frac{16}{15} \frac{b}{a} \frac{V}{v} \tan \alpha \left\{ D^{0.5} H_m^{2.5} - \frac{4}{7} D^{-0.5} H_m^{3.5} \right. \\ &\quad - D^{-0.5} \left(H_m - \frac{a}{2 \tan \alpha} \right)^{2.5} \\ &\quad + \left. \frac{4}{7} D^{-0.5} \left(H_m - \frac{a}{2 \tan \alpha} \right)^{3.5} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

同式を式(2)の W_m 部分に代入することにより、ケース5の条件下での最大高さ粗さ H_m を算出することができる。

3.2 最大高さ粗さの計算

前節で得られた結果を基に、平行研削における研削条件

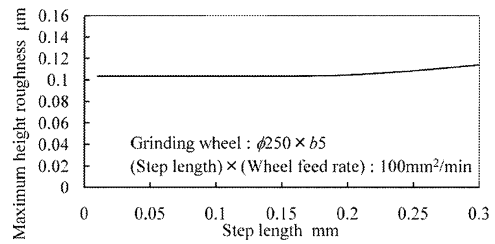


Fig. 13 Calculated result

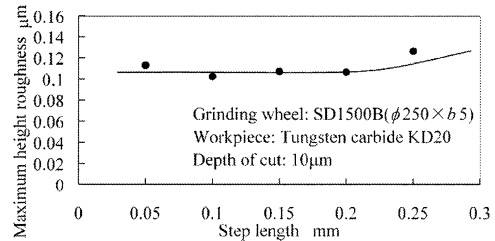


Fig. 14 Experiment result

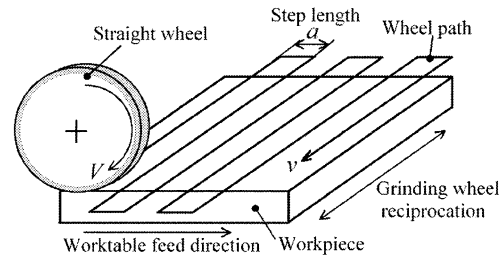


Fig. 15 Cross grinding

と最大高さ粗さの関係調べる。計算の条件を表1に示す。工作物送り速度 v とステップ送り量 a の積を研削能率と定義し、常に $100\text{mm}^2/\text{min}$ となるようにした。計算により得られた最大高さ粗さの結果を図13に示す。ステップ送り量の減少とともに最大高さ粗さが小さくなり、本条件では約 0.15mm 以下で一定となることがわかる。同様の条件で研削実験を行った結果を図14に示す。実験結果は計算結果と同様になり、ステップ送り量の減少とともに最大高さ粗さは小さくなり、ほぼ一定値になった。

4. クロス研削面の粗さと研削条件の関係

次にテーブル送り方向と砥粒切削方向が垂直であるクロス研削法について検討する。クロス研削のモデルを図15に示す。平行研削の場合と同様に、速度 v で往復運動する工作物を周速 V で回転する幅 b の平砥石が研削する。そしてストローク端点においてステップ送り量 a が与えられ、再び反対方向へ送られる。ただし、工作物送り方向は砥石軸方向とする。クロス研削の場合についても立体の干渉を考慮し、場合分けを行う必要がある。

4.1 ケース1

クロス研削では基準断面は図1中 OA の位置に固定された状態となる。すなわち、常に $\theta=0$ の状態で切削がなされる。したがって式(5)よりクロス研削における立体の表面は次式のように表される。

$$\delta = -\frac{1}{\tan \alpha} k + H_m \quad (24)$$

砥石は砥石軸方向に送られるので、立体はらせん状に形成される。このらせん形状が一回転する間に砥石が送られる距離 $\pi Dv/V$ が立体の幅 $2H_m \tan \alpha$ よりも大きい場合について検討する。この条件を図16および次式に示す。

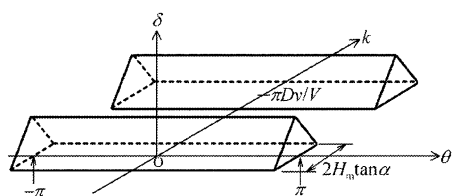


Fig. 16 Model of case 1

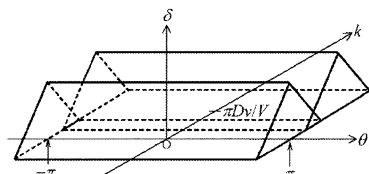


Fig. 17 Model of case 2

$$2H_m \tan \alpha < \pi Dv/V \quad (25)$$

本来、立体は連続的にらせん形状になるが、1回転あたりに送られる距離が十分に小さいので、図16に示したようにθ軸に平行な立体の集合として考える。

0 ≤ k ≤ k_max 範囲内において任意の座標 k で δθ 平面と平行に立体を切断する。この切断面の面積はパラレル研削におけるケース2の 0 ≤ k ≤ k_0 範囲内における断面積と同様に次式から求めることができる。

$$S_{\text{cross_case1}} = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} \left(\frac{D}{2} d\theta + \left(\frac{D}{2} - \delta \right) d\theta \right) \delta \quad (26)$$

同式に式(14)内の δ を代入し、k に関して -k_max から k_max まで積分することにより立体1個の体積を求めることができる。さらに立体は幅 b の砥石上に πDv/V 間隔で存在しているので、全部で bV/πDv 個が存在することになる。したがって立体の総体積 W_cross_case1 は次式から求められる。

$$W_{\text{cross_case1}} = \frac{bV}{\pi Dv} \int_{-k_{\text{max}}}^{k_{\text{max}}} S_{\text{cross_case1}} dk \quad (27)$$

$$= b \frac{V}{v} H_m^2 \left(1 - \frac{2H_m}{3D} \right) \tan \alpha$$

同式を式(2)の W_m 部分に代入することにより、クロス研削のケース1条件下での最大高さ粗さ H_m を算出することができる。

4.2 ケース2

次にらせん形状が1回転する間に砥石が送られる距離が立体の幅よりも小さい場合について検討する。この場合、立体の内部に干渉が発生する。この条件を図17および次式に示す。

$$2H_m \tan \alpha > \pi Dv/V \quad (28)$$

切断面の面積は S_cross_case1 と同じである。この切断面を k に関して -πDv/2V から πDv/2V まで積分し、立体の個数 bV/πDv を掛けることにより、立体の総体積 W_cross_case2 が得られる。

$$W_{\text{cross_case2}} = \frac{bV}{\pi Dv} \int_{-\pi Dv/2V}^{\pi Dv/2V} S_{\text{cross_case1}} dk \quad (29)$$

$$= \pi b H_m (D - H_m)$$

$$- \frac{\pi^2 b D v}{4V \tan \alpha} (D - 2H_m) - \frac{\pi^3 b D^2 v^2}{12V^2 \tan^2 \alpha}$$

同式を式(2)の W_m 部分に代入することにより、クロス研削のケース2条件下での最大高さ粗さ H_m を算出することができる。

5. パラレル研削とクロス研削の比較

パラレル研削とクロス研削における研削面の最大高さ粗さを

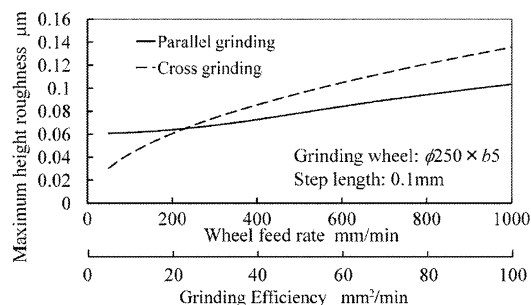


Fig. 18 Calculated result comparing parallel grinding and cross grinding

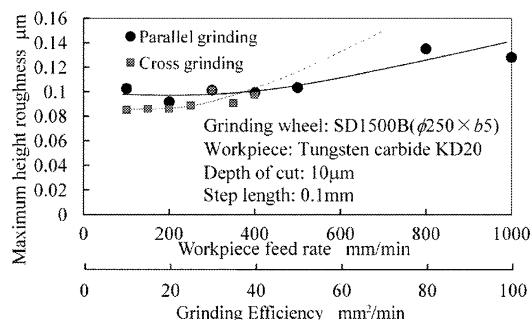


Fig. 19 Experiment result

それぞれ計算した。ここでステップ送り量を 0.1mm に固定し、砥石送り速度のみを変化させた。他の条件は表1と同様である。結果を図18に示す。同図より砥石送り速度が大きいとき、最大高さ粗さはパラレル研削の方が小さくなるのがわかる。また砥石送り速度が小さいときはクロス研削の方が最大高さ粗さを小さくすることができる。研削実験の結果である図19においても同様の傾向が見られる。したがって砥石送り速度が大きく、研削能率が高い場合はパラレル研削が適しており、逆に研削能率が低い場合はクロス研削が適している。

6. 結 言

本研究では、砥粒切削方向と最大高さ粗さの関係について、統計的研削理論を用いて検討した。本研究で得られた結論を要約すると以下のようになる。

- (1) パラレル研削法において研削能率を一定にした場合、ステップ送り量の減少とともに最大高さ粗さが小さくなり、一定値に収束する。
- (2) 研削能率が高い条件ではパラレル研削法の方が滑らかな研削面が得られる。研削能率が低い条件においてはクロス研削法の方が滑らかな研削面が得られる。

参 考 文 献

- 1) 松井正己, 庄司克雄: 統計的手法による研削機構の考察(第1報) —砥粒切削長さについて—, 精密機械, 36,2(1970)115.
- 2) 松井正己, 庄司克雄: 研削仕上げ面粗さに関する一考察, 機械の研究, 19,10(1967)1341.
- 3) 小野浩二: 研削仕上げの研究—仕上げ面のあらさについて—, 日本機械学会論文集, 18,74(1952)21.
- 4) 織岡貞次郎: 研削加工面あらさ, 精密機械, 27,6(1961)143.
- 5) 松井正己: 研削に関する研究(第1報)—研削仕上げ面の粗さについて—, 精密機械, 17,7(1951)217.
- 6) 小野浩二: 研削仕上げ, 槇書店, (1962)71.
- 7) 松井正己, 庄司克雄: 研削砥石の有効切れ刃に関する研究, 精密機械, 34,11(1968)743.
- 8) S. Matsui and K. Syoji: On the Maximum Height Roughness of Ground Surface, Technology Reports, Tohoku Univ., 38,2(1973)615.