研削過程のシミュレーションに関する研究 (第2報)*

—砥石の砥粒切れ刃分布特性—

酒井保男** 柳下福蔵*** 古川勇二†

Study on the Simulation of Grinding Process (2nd Report)
— Distribution of Cutting Edges on a Grinding Wheel Surface —

Yasuo SAKAI, Hukuzo YAGISHITA and Yuji FURUKAWA

It is known that the distribution of cutting edges on a grinding wheel surface affects much on such properties as finished surface roughness and induced grinding force, etc. In order to estimate this distribution, it was simulated the grinding process so as to match the simulated surface roughness to the actual results obtained by plunge cut test where a carbon plate was selected as the test piece material so that the grinding force may become negligible. It is expected, therefore, that the other grinding characteristics as an elastic deflection of wheel bonds and the machine structure did not affect on the surface roughness. The method was applied to both aluminum oxide grain and CBN wheels after truing and operation and could show its availability.

Key words: distribution of cutting edges, grinding wheel, grinding simulation, grinding wheel surface, grinding

1. 結 言

砥石外周部における砥石半径方向の砥粒切れ刃の高さの分布(以下、切れ刃分布)は研削仕上げ面粗さや研削力に影響を与えるものとして重要であることは一般に知られている^{1)~5)}。

特に近年に至り超砥粒砥石が多用され、かつ研削が先端技術の精密加工法として重要な役割を担うようになってから、改めて切れ刃分布に関する議論が高まってきた^{6)~9)}。

しかし、たとえば普通砥石や CBN ホイールなど砥石の種類、ツルーイング、ドレッシングなどの処理、あるいは研削によって切れ刃分布がどのように変化しているかなどについて、実際に現場で評価を行うための数値となると、定量的なことはほとんど明らかにされていない。

これはこれまでの研究で行われている触針法や転写法による静的な砥石表面の直接計測では実加工下での仕上げ面に対応した切れ刃分布にならないことによると考える。

この点を改善するために本研究では前報で開発したシミュレーション技法を用い、入力した仮想の切れ刃分布より、得られた仮想の研削仕上げ面粗さの分布と被測定砥石にて試験研削した実仕上げ面粗さ分布とが一致する条件から切れ刃分布を同定する方法を採用した。

この場合、切れ刃分布以外の加工因子が研削仕上げ面に及ぼす影響を極力除くために試験片はほとんど研削力のかからないカーボンプレートとして、これを機上に固定し砥石外周切れ刃形状を転写するようプランジ研削した。

この方法は砥石の幅方向の面粗さの測定値から砥石の円周方向の切れ刃分布を求めるのであるから、基本的に円周方向と幅方向の切れ刃分布は同一であることが条件であり、例えば砥石にドレスマークとかプランジ研削による筋目が付く場合は適用

できず、強いて計算した場合は誤差により切れ刃分布の数値は実際よりも大きくなる。

またシミュレーション条件をできるだけ確定的なものにするために、砥石表面状態は目づまりの発生や1個の砥粒に複数の切れ刃分布が存在する場合は対象外とした。

以上述べたように、この方法はシミュレーションを介しているため、求めた切れ刃分布は厳密ではないが、精度的には実用し得る数値と考える。次に本研究による切れ刃分布の求め方と測定した幾つかの例について述べる。

2. 切れ刃分布の測定法

2.1 切れ刃分布を求めるための研削シミュレーション

試験研削により得られた研削面粗さから切れ刃分布を求めるには両者の関係が明らかでなければならない。従来、切れ刃分布を仮定して研削仕上げ面粗さを求める理論式は導かれているが^{1)~4)}、この式を使って逆に切れ刃分布を求めることはできない。本報では前述のように前報で開発したシミュレーションを用いて切れ刃分布を予測することにした。

シミュレーションについては、切れ刃分布を求めるために変更した箇所を中心にその概要を述べる。

図1はシミュレーションの状況を示す基準断面である。 f_g は1個の砥粒が砥石中に占める平均容積に等しい体積を有する正

Fig. 1 Schematic showing working model

* 原稿受付 平成7年1月20日

** 正会員 酒井技術士事務所(沼津市大岡 1959-8)

*** 正会員 沼津工業高等専門学校(沼津市大岡 3600)

† 正会員 東京都立大学工学部(八王子市南大沢 1-1)

立方体の稜と同じ長さである。

基準断面の底辺 x 軸は砥石外周の研削作業面に一致し、その直角方向 y 軸は砥石の半径方向の内部を表す。

砥粒が砥石空間内に均等に存在するものとするれば基準断面内には1個の砥粒が描けるはずである。砥粒切れ刃は頂角 2ϕ の円すいとし、その頂点の座標を x 方向には一様乱数にて x_0 、また y 方向には切れ刃分布が正規分布するものとして標準偏差値 σ_c の正規乱数にて y_0 を決める。なお、この頂点を通る x 軸への垂線を中心線とし、頂点から両側に角度 ϕ でとった2本の直線が切れ刃モデルである。なお、 ϕ は前報同様 80° とした。

このようにして基準断面にはランダムな切れ刃モデルのほか、 y 軸に砥粒切込み深さ D_g をとったワークモデルも描く。

切れ刃およびワークモデルの表現は x 軸上、長さ f_g を m 分割し、離散値 $(y_c)_i$ 、 y_i にて示す。

切れ刃による切削は、ワークモデル y_i から切れ刃モデル $(y_c)_i$ と重なった部分を除去したものを新たなワーク形状と定義し、この演算を $i=0$ から m まで、またこれを更に砥石外周の切れ刃数 Q 個の切れ刃モデルについて実行する。なお、 Q は次式により算出される。

$$Q = \frac{\pi D_s}{A_w} \quad (1)$$

ただし、 D_s は砥石の直径 (mm)、 A_w は平均砥粒間隔 (mm) である。

試験研削では切れ刃が変化せず正確に切れ刃による条痕が残るよう試験片の材質をカーボンとしているので、研削抵抗が小さく、したがってシミュレーションでは法線研削力による変位はゼロとした。すなわち、試験研削は正確を期すため前報に述べた砥粒の弾性支持や切れ刃の上すべり現象は皆無とした。

本報では基準長さ f_g の分割数 $m=500$ としているので、前報のシミュレーションに比べ仕上げ面粗さの精度は5倍高い。

シミュレーションは、まず砥石切込み深さの初期値 $a=250$ を与え、以降、切込みはゼロとするが、研削系の剛性を ∞ としているので切残しは発生せずシミュレーションは砥石1回転で終了する。

シミュレーションは一般に使用される範囲の砥石として、その直径や粒度および砥粒率（超砥粒砥石では集中度）から砥石外周切れ刃数 Q は 1000, 2000, 3000, ..., 16000 について、また切れ刃分布 σ_c は 0.05, 0.5, 1, 2, 5, 7, 10, 12, 15, 20, ..., 50 の各種について行った。

一方、試験研削では試験片の面粗さ波形高さの離散値 y_i の母集団が正規分布するものとして、その標準偏差 σ_r を求めた。

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{y}$ は $y_i (i=1 \sim m)$ の平均値である。図2は研削仕上げ面粗さの波形と条痕深さの確率分布の例である。

以上のシミュレーションは、切れ刃分布がランダムなためモンテカルロ法としているので必然的に出力は一定せず、ばらつきを伴う。そのため、シミュレーションは7回実施し、その平均値を得られた結果とした。

2.2 研削試験片の面粗さと砥石の切れ刃分布との関係

図3は面粗さの分布の σ_r (以下、面粗さ、切れ刃ともに「分布の σ 」は波形の離散値の母集団が正規分布するものとして、

Fig. 2 Sample of roughness wave of grinding surface and its distribution

Fig. 3 Relationship between σ_r and Q_r (Simulation)

Fig. 4 Relationship between Q_r and σ_c by various Q (Simulation) (その標準偏差を表す) に対する面粗さ波形の谷数 Q_r である。

図で明らかなように Q_r は切れ刃分布の σ_c に関係なく次の回帰線上にのる。

$$Q_r = \frac{1}{C_0 + C_1 \sigma_r + C_2 \sigma_r^2 + C_3 \sigma_r^3} \quad (3)$$

なお、定数はそれぞれ、 $C_0 = 3.215 \times 10^{-3}$ 、 $C_1 = 0.0297$ 、 $C_2 = -2.03 \times 10^{-3}$ 、 $C_3 = 2.465 \times 10^{-4}$ であった。

ここで、 i 番目の粗さ波形の高さ y_i はその前のピーク値からのピッチを p_i とすると、 $y_i = y_{i-1} \pm p_i \cot \phi$ であり、 y_i から求められる面粗さ分布の σ_r と p_i から算出される面粗さ波形の谷数 Q_r とは一義的な関係にあることが分かる。なお、面粗さと波形ピッチの関係については松井の研究がある¹⁰⁾。

次に図4は面粗さの谷数 Q_r に対する切れ刃分布 σ_c で、砥石外周切れ刃数 Q ごとにプロットしたものである。両者の関係は次の回帰式にて示される。

$$\sigma_c = \exp(B_0 - B_1 Q_r + B_2 \cdot 10^{-3} Q_r^2 - B_3 \cdot 10^{-6} Q_r^3) \quad (4)$$

$$\{B\} = \frac{Q_0}{[A]\{Q_0\}} \quad (5)$$

ただし、

$$\{B\} = \begin{Bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{Bmatrix} \quad \{Q_0\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ Q_0 \\ Q_0^2 \\ Q_0^3 \end{Bmatrix} \quad Q_0 = \frac{Q}{1000}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 0.0244 & 0.211 & -1.093 \cdot 10^{-4} & -6.022 \cdot 10^{-5} \\ -0.210 & 6.762 & 0.239 & -9.909 \cdot 10^{-3} \\ -0.0765 & 0.677 & 0.0351 & -1.452 \cdot 10^{-3} \\ -0.0402 & 0.202 & 7.769 \cdot 10^{-3} & 3.532 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}$$

図5は式(3)～(5)より砥石切れ刃数 Q ごとに面粗さ σ_r に対する切れ刃分布 σ_c を求めた結果を示す。切れ刃分布の概略値はこの図より求めることができるが、正確には以上の算式を整理した図6のフローチャートの計算手順により求めることができる。

ここに述べた切れ刃分布 σ_c の算式は前述のとおり、一般に使用される砥石を対象とし、かつできるだけシミュレーション結果の点群に近似の回帰曲線になるよう、砥石切れ刃数 Q を 1000～16000 としているので、この範囲を越える 1000 以下、または 16000 以上の場合は改めてシミュレーションを行い、算式を導く必要がある。

2.3 研削試験と計算処理

平面研削盤のテーブル上にカーボンプレートの研削試験片を設置し、テーブルを停止したまま砥石に切込みを与えプランジ研削を行う。この場合、切込み深さ 2 mm を砥石切込み速度 1 mm/min で研削したあと約 10 s のスパークアウトを行った。

図7(a)は平面研削試験の状況で、(b)は円筒研削の場合を示す。試験片の条痕は表面粗さ計で波形を計測し、その標準偏差 σ_r を式(2)により計算する。この場合、測定長さは前述のシミュレーションに合わせるため、切れ刃モデルの基準長さ f_g とする。

シミュレーションは基準断面の一辺の長さ f_g を分割数 m と等しい 500 として切れ刃分布の σ_c や面粗さの σ_r を計算しているので、入出力値は無次元化の必要がある。すなわち、mm 単位の砥石の砥粒間隔を A_w とし、粗さを μm 単位とすれば、無次元化するには、 $K = 1/(2A_w)$ (μm^{-1}) の係数を掛け、また出力の切れ刃分布の σ_c を μm 単位にするには計算値を K で割るなどの処理が必要である。表1は次章にて述べる測定例の砥石について、それぞれの砥石直径 D_s (mm)、砥粒間隔 A_w 、砥石外周上の切れ刃総数 Q および無次元化係数 K である。

3. 切れ刃分布の測定例

測定は砥石をツルーイング、ドレッシングあるいは研削後の各種の表面状態について実施した。

ツルーイングはダイヤモンドツルア SD40Q75MW6 により行い、またドレッシングはホワイトストーンスティックを砥石作業面に押し付けて行うものと、筆者らの一人が研究しているブラストドレッシング法¹¹⁾によるものを行った。

これらの砥石でカーボンプレートをプランジ研削した後、触

Fig. 5 Relationship between σ_r and σ_c (Calculation)

Fig. 6 Flow chart shows calculative procedure for standard deviation σ_c of cutting edge distribution on grinding wheel surface

Fig. 7 Method of grinding test

Table 1 Sample data showing grit distance in wheel, number of grits on wheel surface and coefficient for non-dimensional insert in next chapter

Grinding wheel	Diameter D_s mm	Grit dist. A_w mm	Number of grits Q	Coefficient $K \mu\text{m}^{-1}$
WA 60 KV	347	0.2385	4570	2.096
CBN 80 M 200 V	150	0.2301	2048	2.173
CBN 120M100 V	150	0.1666	2828	3.001
CBN140 L 100 V	300	0.1206	7812	4.146
SD 270 R 100 V	300	0.0672	13817	7.331

Fig. 8 Sample of roughness waves and its distribution on test grinding surface that shows the wheel condition

針式粗さ計により表面粗さの波形を測定し、その度数分布とこの母集団が正規分布するものとして標準偏差を求め、これを粗さ分布の σ_r とした。

図2に示した表面粗さは研削後のものであるが、この場合の粗さ波形の度数分布は比較的、正規分布に近い。

ツルーイング後は表面粗さ波形の所々に深いクレータが認められるものがあり、その場合の粗さ波形の度数分布は図8(a)に示すように不規則になる。また、このようなクレータがないときはその度数分布は正規分布に近い。

ホワイトストーンによるドレッシングでは面粗さの度数分布は図8(b)に示すとおり多くはひずんだ形状になる。

ブラストドレッシングの例を図8(c)に示す。この場合の面粗さの度数分布は概して正規分布に近い形状をなす。

3.1 平面研削試験

外径150 mm、幅10 mmのCBN120M100Vホイール(集中度100)による試験を図9(a)に、また高集中度CBN80M200Vホイール(集中度200)による試験を図9(b)に示す。

研削は精密平面研削盤にて行い、工作物は寸法100×100×50 mmの炭素工具鋼SK3(HRC 55~58)とした。

図の横軸は実験の順序を示し、縦軸は測定した切れ刃分布 σ_c を表す。図の●印はツルーイング後、■はホワイトストーンによるドレッシング後、▲はブラストドレッシング後を表し、×は一定の研削後の砥石について試験したものである。なお、破線は次のシーケンスに移行したことを、また実線は研削したことを示す。

ツルーイングやホワイトストーンをかけた砥石で切れ刃分布 σ_c が異常に高いものを除けば、例外もあるがツルーイング後あるいはドレッシング後は σ_c は低下し、研削後は大きくなる経過を繰り返している。すなわち、ツルーイングにより得られた良好な切れ刃分布が研削により劣化していく様子が伺える。

研削後、切れ刃分布 σ_c が小さくなっているものが散見されるが、これは研削により砥石外周上の切れ刃が修整されたためと推測される。

ブラストドレッシングでは切れ刃分布 σ_c が小さいものが多く見られるが、これはツルーイング後、ボンドテールあるいは疑似的な切れ刃が除去されたためではないかと考える。

ホイール CBN120M100V と CBN80M200V とでは後者の切れ刃分布 σ_c は前者に比べ減少している。これは同じ程度の研削に対し高集中度のホイールは切れ刃分布が劣化しにくいと推測している。

Fig. 9 Test results on CBN wheel by surface grinding

Fig. 10 Test results on WA, CBN and SD wheel by cylindrical grinding

3.2 円筒研削試験

図10(a)は万能研削盤を用い、単石ダイヤモンドによるツルーイング後、鋼材S50C(HRC 58)を砥石WA60KVにより研削した前後において切れ刃分布 σ_c を測定した記録である。

プランジ研削とトラバース研削を実施したが、後者の方が切れ刃分布 σ_c が小さく、またいずれも研削後の σ_c はツルーイング後より小さくなっている。これは適度な研削により砥石の切れ刃が修整されたためと思われる。

図10(b)はホイール CBN140L100Vにより炭素工具鋼SK3(HRC 55~58)をトラバース研削した試験である。

研削前にはツルーイングとブラストドレッシングを行った。測定結果はブラストドレッシング後は切れ刃分布 σ_c が大幅に低減している。また、研削後 σ_c が大きくなっているのは過度な研削のため砥石が劣化していることを示している。

図10(c) はダイヤモンドホイール SD270R100V にてアルミナ系セラミックスを、わずかな切込みをかけた研削によりホイール外周を修整した例で、 σ_c が著しく小さくなり切れ刃分布が改善されたことを示している。

4. 考 察

図11 は本研究により測定した切れ刃分布 σ_c と静的な測定であるが、文献¹²⁾ による推定値とを比較したものである。いずれも砥粒間隔の計算値 A_w を横軸にとり両者の切れ刃分布 σ_c を縦軸にプロットした。

測定値は砥石の表面処理や研削後のものについて前章の数値を記入したのであるが、その内、特に異常のあるものは除き、代表的なものだけとした。また、文献のデータではその中から切れ刃分布が正規分布するものを選び、分布範囲が 5σ と仮定して 1σ を標準偏差 σ_c とした。

この図からは本研究の測定値は文献のものと比較して、ほぼ同等の数値と思われるが、ツルーイング後、ブラストドレッシング後、あるいは研削後によって、またその程度によって大きくばらつくことが明らかである。

シミュレーションでは切れ刃モデルの頂角の $1/2$, ϕ は 80° としたが、これを 65° から 85° まで 5° とびに変化させ研削仕上げ面粗さ σ_r をシミュレーションにより求めてみると、図12(a) のように ϕ が大きいほど σ_r が小さく、それも切れ刃分布 σ_c が大きいほど ϕ の影響が大きいことが分かった。したがって、シミュレーションでは ϕ は実際に近い値にする必要がある。

図12(b) は切れ刃モデルの先端に平坦部を設け、切れ刃先端の頂点からの垂線の長さ Δh をゼロから 8 まで 2 とびに変化させ、シミュレーションにより求めた研削仕上げ面粗さ σ_r である。この図から切れ刃先端の摩耗量 Δh にはあまり影響がないことが判明した。なお、前述のシミュレーションでは Δh はゼロにした。

5. 結 言

本報で述べた砥石外周の切れ刃分布の求め方を要約すると次のとおりである。

- (1) シミュレーションにより切れ刃分布と研削仕上げ面粗さ分布の関係を求め、回帰分析により面粗さ分布より切れ刃分布を求める算式を導いた。
- (2) 被測定砥石によりカーボンプレートの試験片をプランジ研削して得られた仕上げ面粗さの分布と砥石外周の砥粒切れ刃数の計算値をこの算式に代入して切れ刃分布を求めた。なお、この方法の特徴は次のとおりである。
- (1) 実加工下での研削仕上げ面に対応した切れ刃分布であり、実際に近い値が推定できる。
- (2) シミュレーションを介しているため求めた切れ刃分布は厳密ではないが、精度的には実用し得る数値と考える。
- (3) 研削作業中、砥石を外すことなく、別段取りで設置したテストピースを試験研削することにより簡便に砥石の切れ刃分布特性を測定、評価することができる。

本研究の一部は平成6年度文部省科学研究費補助金の助成によって行われ、また実験にあたり沼津工業高専、柿島 寛技官にご協力頂いたことを記し謝意を表します。

Fig. 11 Measured data and other's reports concerning S.D. of cutting edges distribution on grinding wheel surface

Fig. 12 Difference in various cutting edge models of simulation

参 考 文 献

- 1) 織岡貞次郎：確率論を応用した研削仕上げ面創成の理論，日本機械学会誌，63，499 (1960) 1185.
- 2) 小野浩二：研削仕上，槓書店，(1962) 68.
- 3) 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.
- 4) M.Hasegawa and T.Tukizoe: The Generating Mechanism of Surface Roughness by Random Cutting Edges, J.Mech.Eng.Sci., 20, 4 (1978) 197.
- 5) 酒井保男，柳下福蔵，古川勇二：研削過程のシミュレーションに関する研究(第1報)ーシミュレーションの構成と手順ー，精密工学会誌，60，3 (1994) 370.
- 6) 周 立波，庄司克雄，厨川常元：ダイヤモンドホイールにおける砥粒切れ刃の分布，砥粒加工学会誌，36，1 (1992) 35.
- 7) 佐藤英明，土井雅博，永山晶久，木塚慶次：研削液中の切りくずがファインセラミックスの研削仕上げ面に及ぼす影響，砥粒加工学会誌，38，4 (1994) 199.
- 8) 吉田嘉太郎：硬脆材料の精密加工（とくに精密研削加工について），セラミックス加工研究会，45 回資料，6.2.4 (1994) 1.
- 9) 田村利夫：切れ刃先端を研磨仕上げしたメタルボンドダイヤモンド砥石のツルーイング技術，セラミックス加工研究会，47 回資料 6.7.19 (1994) 24.
- 10) 松井正己，田牧純一，長谷川 隆：研削仕上面粗さのピッチに関する研究，精密機械，42，12 (1976) 1197.
- 11) 柳下福蔵：液体ホーニングによる超砥粒砥石のドレッシング法の開発，平成5年度文部省科学研究費補助金，研究成果報告書，1994.3.
- 12) 精密工学会編：研削工学，オーム社，(1987) 51.