研削面プロフィール創成シミュレーションから 考察した砥石面トポグラフィの具備条件*

中島利勝** 吉川満雄*** 塚本真也** 竹原健一†

Some Requisite Conditions of Wheel Surface Topography Based on Simulation of Ground Surface Profile Generation

Toshikatsu NAKAJIMA, Mitsuo YOSHIKAWA, Shinya TSUKAMOTO and Ken'ichi TAKEHARA

The purpose of this study is to analyze the requisite conditions of grinding wheel topography for improving surface finish. In this report, a wide variety of wheel surface topography is examined with the previously developed simulation in which measured distribution of mounting spring constant, dimensional position and shape of abrasive grains are considered. The simulation makes clear that the necessity of wheel surface topography for the fine ground surface profile are to have the extremely small spring constant of grain mounting in a very top surface and its higher average and variation in the inner position from the wheel surface. In addition, to true up the grain edge position and to make a pointed edge of grains flat are necessary. The knowledge obtained from these analysis may be an important guideline in manufacturing, dressing and truing a grinding wheel.

Key words: grinding, surface generation, spring constant of abrasive grain mounting, ground surface profile, wheel surface topography, simulation

1. 緒 言

研削加工表面のシミュレーションに関しては、佐川・松田¹⁾、酒井・柳下・古川^{2), 3)}、あるいは松井・田牧⁴⁾⁻⁶⁾の砥石作用面上の砥粒分布密度のモデル化による先駆的な研究が報告されている。しかし、実研削面におけるプロフィール創成機構をさらに詳密に解明するためには、実測した個々の砥粒の先端形状とその支持剛性を用いてシミュレーションを実施する必要がある。

そこでまず前報⁷⁾において、砥石作用面上で実測した砥石面トポグラフィ、すなわち各砥粒の分布形態、形状ならびに支持剛性を定量的に把握したもとの、研削面プロフィールを精度よく再現するシミュレーション手法を開発した。実際に砥石面トポグラフィ条件を広範囲に変化させて実験によってその良否を検証することは難しいので、本報告では前報⁷⁾で開発したシミュレーション手法を用いて、高品質な研削面プロフィールを創成するための砥石面トポグラフィの具備条件を検証し、合わせて本シミュレーションの妥当性を確認する。以上の解析により得られる知見は、砥石製作上あるいはドレッシング・ツルーイングにおいて重要な指針となるものと考えられる。

2. 砥石面トポグラフィの具備条件決定法

図1は、前報⁷⁾で構築した研削面プロフィール創成シミュレーションを基本として、砥石面トポグラフィの具備条件を解明するためのシミュレーション法の開発手順を示す。砥石作用面上の各砥粒の分布・形状を基にして実測値を精度よく再現した砥粒支持剛性分布⁷⁾(1)と実測した砥粒分布・形状(2)のデータを使用して、砥粒の干渉順位ならびに砥粒と工作物の弾性変

Fig.1 Simulation of requirements of wheel surface topography

* 原稿受付 平成10年12月4日

** 正会員 岡山大学工学部 (岡山市津島中3-1-1)

*** 正会員 岡山県工業技術センター (岡山市芳賀5301)

† 正会員 岡山大学大学院 (現, JR四国, 高松市浜ノ町1-10)

Table 1 Comparing condition

Grinding wheel	WA80L7V ($\phi 370 \times 50 \text{ mm}$)	
Dressing condition	Dressing depth	$\Delta_d = 1 \mu\text{m} \times 12 \text{ pass}$
	Feed rate	$S_d = 0.01 \text{ mm/rev. of G.W.}$
Grinding condition	Wheel speed	$V_s = 30 \text{ m/s}$
	Speed ratio	$K_v = 0.01$
	Setting depth of wheel	$\Delta = 0.16 \mu\text{m/rev. of W.P.}$
	Workpiece	S45C ($\phi 90 \times 7.8 \text{ mm}$)

位および盛上がりを考慮した上で、シミュレーションにより研削面プロファイル(3)を創成している。(1)の砥粒支持剛性 $\bar{k}_s$ の分布では、有効砥粒高さ h_c の範囲内では砥粒の存在限界であるUpper limitとLower limitの間に存在し、砥石表面における支持剛性 $\bar{k}_s$ は低く、砥石内部に入るにしたがって剛性の高い砥粒と低い砥粒が混在する特異な分布形態⁸⁾を再現した。(2)の砥粒分布・形状は、加工後の砥石面で測定したトポグラフィデータに対して、研削方向G.D.と反対方向を Y_s 、砥石幅方向を X_s と定義し、 Y_s 方向からの一つの砥粒の包絡線データから砥粒先端位置と砥粒形状を決定している。これらの入力値に対して、各砥粒の干渉断面積と研削背分力の関係から生成される溝の深さや盛上りの量を算出し、最終的に研削面プロファイルや工作物表面粗さを出力した⁷⁾。(4)ではこのシミュレーション手法を用いて、砥粒支持剛性 $\bar{k}_s$ や砥粒の分布密度や形状などの入力条件を単独で変化させ、その影響を明らかにする。そして最終的に(5)では、良好な研削面プロファイルを創成するために必要な砥石作用面の条件を検討している。

表1にこのとき使用した主な加工条件を示す。

3. シミュレーションによる粗さの創成機構の検討

3.1 砥粒支持剛性分布の影響

図2(a)は、シミュレーションに用いる各砥粒が、すべて等しい支持剛性を持つと仮定したときの有効砥粒高さ h_c に対する砥粒支持剛性 $\bar{k}_s$ の分布を示す。さらに前報⁷⁾において本シミュレーションで使用した砥石最外周で非常に小さく、砥石内部へ入るにしたがって平均値と変化幅が増大する砥粒の特異な支持剛性分布形態(記号:Ⓢ)と比較するために、図中にその分布形態の各有効砥粒高さ h_c における平均値を曲線で表した。砥石深さ方向に分布する砥粒の支持剛性がすべて等しいとする仮定法は、従来より一般的に使用されてきた手法²⁾であり、 $\bar{k}_s=2.0 \text{ N}/\mu\text{m}$ は、電着砥石やメタルボンド砥石のような砥粒の保持力が強く脱落が少ない砥石、 $\bar{k}_s=0.05 \text{ N}/\mu\text{m}$ は、ゴム砥石のように砥粒が剛性の低い弾性体に保持される砥石をそれぞれ想定している。

図2(b)は、砥粒支持剛性の分布を図2(a)のように仮定したシミュレーションを実施し、工作物表面粗さ R_{p-v} 、 R_a と実研削深さ $\bar{\Delta}'$ に及ぼす影響を調べた。さらに図2(c)は、 $\bar{k}_s=2.0$ と $0.05 \text{ N}/\mu\text{m}$ のときのシミュレーション結果の研削面プロファイルを示す。図からゴム砥石のような支持剛性の低い砥粒ほど、寸法生成能力は低くなるけれども小さい凹凸の除去により粗さは向上するという特性を再現できた。ただし大きな凹凸は残留するので、Ⓢの粗さ $R_{p-v}=0.61 \mu\text{m}$ を上回することはできず、一様な砥粒支持剛性分布では良好な粗さを得ることができないことがわかる。これは砥粒先端高さの不均一が工作物表面に転写されるためだ

Fig.2 Surface roughness generated by uniform-stiffness grains

と考えられる。またこのことは、前報⁷⁾で明らかにした砥粒支持剛性の特異な分布形態が工作物表面粗さを決定する要因の一つであることを裏付けている。

次に、前述の砥粒の特異な支持剛性分布が工作物表面粗さに及ぼす影響を詳細に確認する。図3(a)に示すように、支持剛性分布を以下の式で一義的に近似することによりシミュレーションを行った。

$$\bar{k}_s = (10 - h_c)^n / 7^n \times (1.25 - 0.03) + 0.03 \quad (3.0 \leq h_c \leq 10.0) \quad (1)$$

$$\bar{k}_s = 1.25 \quad (0 \leq h_c < 3.0) \quad (2)$$

式(2)に関して前報⁷⁾においては、 $0 \leq h_c \leq 10.0$ の平均値として $\bar{k}_s=1.0$ と定義したけれども、本報では $0 \leq h_c < 3.0$ における平均値として $\bar{k}_s=1.25$ を採用している。また標準の砥粒支持剛性分布Ⓢに一番近いのは $n=4$ である。これは既報⁸⁾で述べたよ

Fig.3 Surface roughness generated by index-distributed-stiffness grains

うに、ドレッシング直後の砥粒支持剛性 $\bar{k}_s$ の分布は $n=1$ に近似でき、その中で有効砥粒高さ h_c と支持剛性 $\bar{k}_s$ が共に大きな値を持つ砥粒は、工作物との干渉量が增大し最大研削背分力が増加するために脱落するか、支持剛性を低下させるか、あるいは砥石内部へ移動するなどして、支持剛性 $\bar{k}_s$ の分布が力学的に調整されて $n=4$ の状態に近づく。したがって、 n が $1 \sim 4$ に変化することにより、研削量の増加に伴う支持剛性分布の変化をシミュレーション上で再現できると考えた。

図 3(b) は、砥粒支持剛性 $\bar{k}_s$ の分布を図 3(a) のように仮定したシミュレーションを実施し、工作物表面粗さ R_{p-v} 、 R_a に及ぼす影響を示す。さらに図 3(c) は、 $n=1, 4$ と ⑤ のときのシミュレーション結果の研削面プロファイルである。図から研削の進行にともない砥粒支持剛性 $\bar{k}_s$ の分布が力学的に調整されて、研削抵抗により砥粒と工作物の干渉領域では狭い範囲内にすべて

Fig.4 Surface roughness generated by grains with uniform distribution

の砥粒が変位し、干渉状態での砥粒先端高さが均一に近づく⁸⁾ ために工作物表面粗さが向上することが理解できる。

3.2 砥粒分布の影響

次に、砥粒の分布密度の影響、つまり砥粒先端位置の分布の影響を明らかにする。図 4(a) は、従来のシミュレーションで仮定されてきた⁶⁾ ように、砥粒の分布密度 D_c が工作物と干渉する有効砥粒高さ h_c の範囲内で均一であると仮定したときの分布である。図 4(b) は、図 4(a) の仮定の下で図 3(a) ⑤ の支持剛性分布を保ったままシミュレーションを行い、砥粒の分布密度が工作物表面粗さに及ぼす影響を示す。図から砥粒密度が高いほど、つまり工作物と干渉する砥粒数が多いほど、工作物表面粗さはよくなっているけれども、 $D_c \geq 1.18 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-3}$ の範囲では大きくは向上していない。さらに、図中の最大値の $D_c = 5.9 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-3}$ においても⑤の $R_{p-v} = 0.61 \mu\text{m}$ を上回することはできなかった。つまり分布密度を必要以上に大きくしても、深さ方向に均一な分布形態では良好な工作物表面粗さは得られないことがわかる。以上のことから、分布密度 D_c があまり小さ過ぎると砥粒 1 個が 1 回の干渉で研削する量は増加し、結果として工作物表面粗さを悪化させているものと予測できる。また D_c を必要以上に大きくしたときは⑤の曲線と比較すると、有効砥粒高さが $0 \leq h_c \leq 2$ 、あるいは $3 \leq h_c \leq 5$ の範囲における砥粒数が増加する。このことは図 3(a) の砥粒支持剛性 $\bar{k}_s$ の分布を考慮に入れると、上記の範囲で $\bar{k}_s$ の大きい砥粒が増加するために工作物表面粗さがあまりよくならないものと考えられる。つまり砥粒支持剛性が図 3(a) の⑤のように特異な分布形態を有するときには、砥粒密度 D_c もそれに相応して変化しなけ

Fig.5 Surface roughness generated by grains with various distribution

れば工作物表面粗さは向上しないことがわかる。

そこで砥石作用面上に存在する砥粒の総個数を共通にして砥粒の先端位置の分布状態だけを变化させたときの工作物表面粗さに及ぼす影響を考える。図 5(a)は、作用する砥粒数を 1mm^2 当たり 11.8 個に固定して、砥粒先端位置の分布を以下に示すように想定した。

- ①：深さ方向に均一な分布（図 4(a)に同じ）
- ②：有効砥粒深さ h_c が $10\mu\text{m}$ の三角形分布
- ③：有効砥粒深さ h_c が $5\mu\text{m}$ の三角形分布
- ④：すべての砥粒先端高さが $1\mu\text{m}$ の幅以内にある分布

図 5(b)は、図 5(a)のそれぞれの分布状態の下でシミュレーションを行い、工作物表面粗さや砥粒 1 個に掛かる平均研削背分力 $\bar{p}$ の変化を示したものである。図からすべての砥粒先端位置を均一にした④の粗さが最も良好であり、図 3 の⑤の粗さをも上回っている。また、そのときの研削背分力 $\bar{p}$ も最小となっており、この分布形態が精密研削における理想的な分布といえる。測定した普通砥石では研削に関与する砥粒分布の深さが非常に幅広いにもかかわらず、自己調整された砥粒支持剛性⁸⁾によって切削時に変位するために、実際に創成される溝はそれよりも浅くなる。しかし、その調整機能にも限界があり、理想的には干渉する砥粒先端の位置を精度よく調整しなければより精度の高い研削加工は実現しないことがわかる。

3.3 砥粒形状の影響

工作物表面粗さの創成には、干渉する砥粒の形状により当然影響を受ける。そこで、砥粒形状の違いによる工作物表面粗さ

Fig.6 Surface roughness generated by grains with various forms

への影響を確認するために、図 6(a)に示す 4 種類の砥粒形状を想定した。以下にその内容について示す。

- ①：先端角 120° の三角形形状
- ②：実測砥粒の中で最も摩耗の少ない砥粒形状
- ③：実測砥粒の中で最も摩耗の進行している砥粒形状
- ④：先端幅 $50\mu\text{m}$ 、半頂角 60° の台形形状

さらに砥石作用面を実測した砥粒形状を用いた場合を記号⑤とする。

図 6(b)に、⑤の砥粒の高さ分布と支持剛性分布を保ったまま、図 6(a)の①～④に示したモデルの 1 つをそれぞれ適用して、シミュレーションを行ったときの工作物表面粗さを比較している。さらに図 6(c)は、⑤と③、④のシミュレーション結果に対する研削面プロフィールを示す。④の幾何学的に与えた台形形状により創成された工作物表面が最も良好な粗さを示しているの

Fig.7 Surface roughness generated by grains with trapezoid forms

④が理想的な砥粒形状と考えられる。このことは、ダイヤモンド砥石でファインセラミックスを加工する場合について実験的にも確認されている⁹⁾。ただし図6(c)からもわかるように、④においては直線で仮定した平らな砥粒先端が工作物表面に転写されるために細かい凹凸は明らかに減少しているけれども、大きな凹凸は除去できていない。また、⑤と③の間で工作物表面粗さにおいて大きな差が生じていないのは、工作物表面は摩耗した砥粒によりその粗さの特性が決定され、細く鋭い砥粒は粗さの創成にはあまり関与していないためと思われる。

次に、図6で得られた結果をもとにさらに理想的な砥粒形状を特定する。図7は、台形状の先端幅 b と半頂角 ψ を変化させて、工作物表面粗さ R_a と砥粒1個に掛かる平均研削背分力 $\bar{p}$ の変化を調べたものである。基本的には先端幅 b が大きくなるほど工作物表面粗さは向上している。半頂角 ψ に関しては、 $b \geq 40 \mu\text{m}$ の範囲では ψ の変化による工作物表面粗さに対する影響はほとんどない。したがって、ツルーイングあるいはドレッシングにより砥粒先端の形状をできる限り平たんな形状に生成できれば、現状の工作物表面粗さを改善できるものと考えられる。ここで、本シミュレーションでは砥粒の包絡形状で工作物の表面粗さを創成させているため、研削方向における砥粒すくい面や逃げ面の形状についての影響は解析できない。したがって、砥石の回転方向に直行するように配置されたナイフエッジ状の砥粒が分布するような砥石、あるいは横川・古川が提案しているような棒状ダイヤモンドを埋め込んだ砥石¹⁰⁾などが、工作物表面粗さを大きく向上させるための理想的砥石面トポグラフィの具備条件となるものと考えられる。ただし、そのときには研削抵抗が急増することが予測できるので、砥粒分布を低密度方向へ再調整する必要がある。

4. 結 論

研削面プロファイル創成シミュレーションを用いて高品質な研削面プロファイルを創成するための砥石面トポグラフィの具備条件を提示した。本論文で得られた主要な結論は以下のとおりである。

(1) 砥石作用面上の各砥粒の支持剛性 $\bar{k}_s$ の分布が砥石の深さ方向に対して一様であると仮定すると、ゴム砥石のように砥粒支持剛性の非常に小さな砥石では工作物の表面粗

さを良好に加工でき、メタル砥石のように砥粒支持剛性が高い砥石では、砥粒先端高さの不均一が工作物表面に転写されやすいために工作物表面粗さが改善されにくい。

(2) 砥石作用面の砥粒の分布密度 D_c が有効砥粒高さ h_c の範囲内で均一であると仮定すると、 D_c が高いほど工作物表面粗さは向上する。ただし、実砥石のように砥石最外周付近では低密度で砥石内部に入るほど高密度になり、ピークを取った後急速に減少する砥粒分布形態の方が良好な工作物表面粗さが得られる。

(3) 実研削において工作物との干渉量が增大し研削背分力が増加するために、有効砥粒高さ h_c と支持剛性 $\bar{k}_s$ が共に大きな値を持つ砥粒は脱落するか、支持剛性を低下させるか、あるいは砥石内部に移動するなどして、砥粒の支持剛性分布と分布密度 D_c が自己調整されることを確認した。

(4) ツルーイング、ドレッシングにより砥石作用面上のすべての砥粒の先端位置を均一にできれば、結論(2)よりもさらに工作物表面粗さを良好にできる砥粒分布形態となる。

(5) 実測砥粒の中で最も摩耗の激しい砥粒の形状を適用してシミュレーションを実行すると、実砥石の測定結果をそのまま使用したものと粗さがほぼ同じであることから、工作物表面は摩耗した砥粒によりその粗さの特性が決定され、細く鋭い砥粒は粗さの創成にはあまり関与していないと考えられる。

(6) 工作物表面粗さをより向上させるために必要な砥石面トポグラフィの条件は、一般砥石の場合、砥石最外周で砥粒支持剛性が非常に小さくて砥石内部に入るにしたがつて平均値と変化幅が増大する分布形態を持ち、かつ研削に關与する砥粒の先端が平らでその位置を砥石深さ方向の非常に狭い範囲に集中させることである。さらに砥石の回転方向に直行するように配置されたナイフエッジ状の砥粒が分布するような砥石が、工作物表面粗さを大きく向上させるための理想的砥石面トポグラフィの具備条件と考えられる。ただし、このときには研削抵抗が急増することが予測できるので、砥粒密度を適度に低下させる必要がある。

参 考 文 献

- 1) 佐川克雄, 松田次郎: 窒化珪素研削加工面の実験とシミュレーションによる検討, 機械の研究, **46**, 7 (1994) 757.
- 2) 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) —シミュレーションの構成と手順, 精密工学会誌, **60**, 3 (1994) 367.
- 3) 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2報) —砥石の砥粒切れ刃分布特性, 精密工学会誌, **61**, 10 (1995) 1443.
- 4) 松井正己, 中川哲郎: 研削仕上面あらさに関する一考察, 精密機械, **41**, 6 (1975) 572.
- 5) 松井正己, 田牧純一, 長谷川 隆: 研削仕上面あらさのピッチに関する研究, 精密機械, **42**, 12 (1976) 1197.
- 6) 松井正己, 田牧純一: 研削機構に及ぼす砥粒—工作物の弾塑性的挙動の影響, 精密機械, **46**, 2 (1980) 177.
- 7) 中島利勝, 吉川満雄, 塚本真也, 竹原健一: 砥粒支持剛性と砥粒分布・形状の実測値を用いた研削面プロファイルの創成シミュレーション, 精密工学会誌, **64**, 7 (1998) 1072.
- 8) 中島利勝, 塚本真也, 吉川満雄, 竹原健一, 横溝精一: ビトリファイド砥石における砥粒支持剛性の分布と砥粒変位形態に関する研究, 精密工学会誌, **60**, 10 (1994) 1490.
- 9) 中島利勝, 宇野義幸, 藤原貴典, 池尻篤則: 部分安定化ジルコニアの研削加工の研究, 精密工学会誌, **53**, 3 (1987) 449.
- 10) 横川宗彦, 古川勇二: 単結晶角柱ダイヤモンドドレッシング性能, 精密工学会誌, **60**, 6 (1994) 803.