砥石作業面トポグラフィのオン・ザ・マシン計測に関する研究 (第2報)*

—— ドレッシング条件による砥粒切れ刃の変化 ——

垣野義昭** 松原 厚** 山路伊和夫*** 松田健嗣†
中川平三郎†† 廣垣俊樹†† 喜田義宏†††

A Study on Measuring Surface Topography of Grinding Wheel on the Machine (2nd Report)

— Cutting Edges under Various Dressing Conditions —

Yoshiaki KAKINO, Atsushi MATUBARA, Iwao YAMAJI, Kenji MATSUDA
Heisaburo NAKAGAWA, Toshiki HIROGAKI and Yoshihiro KITA

The aim of this study is to estimate the cutting edges on a grinding wheel surface under various dressing conditions. Therefore, the surface topography of the grinding wheel in the entire periphery is measured in three dimensions using a laser stylus unit on the machine table. At a present report, we investigated positions, numbers and profiles of the cutting edges on the grinding wheel from measurement results under various dressing conditions. As results, it is clear that there are few cutting edges on the outer periphery (depth 3 μm from the maximum height of the cutting edge) of the grinding wheel. In particular, the lead of wheel dressing has influence on the surface of this area. As the dressing leads decrease, the number and the vertical angles of the cutting edges increase.

Key words : grinding wheel, laser stylus, measuring on the machine, surface topography, grinding, grinding center, dressing

1. 結 論

グラインディングセンタ (GC) を用いることにより、三次元形状の研削が可能となってきた。一方、そのためには比較的小径の砥石を用いてのクリープフィード研削が必要になり、通常の研削盤による加工と異なる点が存在する。

そこで著者らは、グラインディングセンタ (GC) を用いて、研削加工についての知識が少ない作業員でも、高精度、高能率な研削加工が行えるようにするために研削加工支援システム GSX (Grinding Support system X) の開発を進めてきた。GSX においては、個々の砥石に標準ドレッシングを設定しているため、仕上げ面粗さは主に砥石の粒度で制御している。したがって良好な仕上げ面を得るためには、ATC による砥石交換が原則となっている。一方、多くの種類の砥石を所有する場合、砥石の管理が煩雑になる。また ATC 交換により、砥石の振れが発生するなどの問題を内在している。そこで、研削作業の内容によっては、砥石を交換せずに、ドレッシング条件を変更して研削加工を行う必要が生じている。しかしこの場合、砥石作業面トポグラフィと仕上げ面粗さの関係が十分には明確化されていないため、ドレッシング条件、加工条件などの因子を変えた場合の仕上げ面粗さの予想が難しく、データベース拡張のためには膨大な実験を繰り返す必要があった。以上の問題を解決するための基礎技術として、三次元的な砥石作業面トポグラフィの測定を行い、これら因子と仕上げ面粗さとの関係を定量化することが必要となった。

現在までに、砥石作業面トポグラフィを触針式で測定した報告²⁾³⁾はなされている。しかしながら、触針が急な谷部や微小な

谷部に入らないため、それらの形状を十分評価できないこと。さらに、本研究の目的である、砥石作業面トポグラフィと研削加工後の仕上げ面粗さの関係の解明のためには、砥石周方向に非常に広範囲に測定する必要があり、触針式では触針の摩耗による誤差が懸念されるなどの問題点があった。

そこで前報⁴⁾では、新しく開発されたレーザスタイラスヘッドを高精度な MMC (Machining & Measuring Center) のテーブル上に設置したオン・ザ・マシン計測システムを開発し、砥石が MMC の主軸に取り付けられた状態での砥石作業面トポグラフィの三次元計測を非接触で可能にした。本システムにより、無負荷時のランアウトの情報も含め、円周上の全周で砥石作業面トポグラフィの三次元測定が可能となり、さらに砥石の摩耗を定量的評価した例も示した。本報では、砥石のドレッシング条件を変化させた場合の砥石作業面トポグラフィの違いを解析し、特に研削加工において重要と考えられる、砥粒切れ刃の分布、形状について調べた。

2. 計測原理および装置

2.1 オン・ザ・マシン計測システムの概要

前報⁴⁾において砥石作業面形状の測定のために開発したオン・ザ・マシン計測システムの構成図を図 1 に示す。レーザスタイラス測定ユニットは再取り付け時の位置再現性が高い取り付けジグを介して MMC のテーブル上 (本機の主要諸元は表 1) に設定されている。これは、測定ユニットが研削加工時などにクーラントなどの飛散する悪環境にさらされるのを防ぐため、測定時以外は取り外すためである。砥石は工具ホルダを介して C s 軸 (C 軸制御を主軸スピンドルで行うので C s 軸と称する) によって極低速で回転する。このとき、砥石円周方向の位置は C s 軸エンコーダからのパルス信号を、砥石表面の凹凸は測定ユニットのリニアスケールからのパルス信号を同時にパーソナルコンピュータのパルスカウンタに取り込むことで取得するシステムである。また、本システムの測定の再現性は 0.8 μm である。さらに、本

* 原稿受付 平成 9 年 7 月 2 日

** 正 会 員 京都大学工学部 (京都市左京区吉田本町)

*** 京都大学工学部

+ 川崎製鉄 (株) (倉敷市水島川崎通り)

++ 正 会 員 滋賀県立大学工学部 (彦根市八坂町 2500)

+++ 正 会 員 大阪工業大学 (大阪市旭区大宮 5-16-1)

Fig.1 MMC system

Fig.2 Focusing principle of laser stylus

測定ユニットの光学系にはCCDカメラも搭載されているため、測定状態をCRT画面上で確認しながら測定が可能である。

2.2 レーザスタイラスの測定原理

本研究で用いたレーザスタイラスは、焦点ずれを検出する方法としてナイフエッジ法を用いている。原理の概略図を図2に示す。レーザ光を対物レンズで集光し、測定対象物に当てる。その反射光の対物レンズからの光路を図2のようにナイフエッジで半分カットする。測定対象物表面が焦点距離に位置した場合、図中のセンサA、Bに均等にレーザ光が検出される。すなわち図2において $A-B=0$ となる。その位置をリニアスケールで取得することで測定対象物表面の位置を測定している。

2.3 測定砥石

グラインディングセンタを導入する目的は研削加工の自動化・無人化である。したがって、砥石は長寿命でドレッシングおよびツルニングの容易なビトリファイドボンドのCBNホイールが主に使用されている。よって、本研究においても砥石は図3に示されるビトリファイドボンドのCBNホイールを測定対象とした。本ホイールの平均砥粒径は $100\mu\text{m}$ である。また、本報のホイールの測定範囲は前報と同様に軸方向に幅 1mm とし、測定間隔は $10\times 10\mu\text{m}$ の格子で行った。

2.4 ホイールのドレッシング条件および研削条件

図4は今回使用したダイヤモンドロータリドレッサである。ドレッシングは本ドレッサの軸心を 4.5° 傾けて行った。

Fig.3 Grinding wheel

Table 1 Specification of MMC

Basic structure	Double housing grinding center
Stroke X/Y/Z	$800\times 500\times 450\text{mm}$
Maximum spindle speed	10000rpm
Spindle power	7.5kW
Spindle diameter / bearing	$\phi 70\text{mm}$ / Ceramic ball bearing
Spindle taper	BT40
Control axis	X, Y, Z, Cs
Type of control	Closed loop
Scale (X, Y, Z)	$0.1\mu\text{m}$ linear scale
(Cs)	0.001° encoder
Coolant	$0-20\text{ l/min}$

Fig.4 Rotary wheel dresser

Table 2 Dressing conditions of grinding wheel

CBN wheel speed	5000 rpm
Diamond wheel	SD40Q75MW7
Rotary wheel speed	8553 rpm
Peripheral speed ratio	7.1 (Up cut)
Depth of cut	$2\mu\text{m}$
Dressing lead	0.04 mm/rev , 0.005 mm/rev (Standard) (Fine)

4.5° 傾けているのは、本ドレッサでストレート型の砥石とカップ型の砥石のドレッシングを可能とするためである。表2はホイールのドレッシング条件である。表中の標準とはGSXにおける条件であり、細目は今回特にドレッシングリードを細かく設定した条件である。また、表3は研削加工条件であり、被削材はダイス鋼（SKD11・硬さHRC63）とした。研削条件はGSXにおける標準的な加工条件である。またCBNホイールを使用した場合、ドレッシング直後は研削現象が大きく変化するため、捨て研削を行い安定した状態を初期状態として、本報の評価対象とした。図5(a),(b)は同一ホイールに対し、標準および細目ドレッシング後、研削加工した加工面のSEM写真である。標準ドレッシングの場合の仕上げ面粗さは $R_y=5.0\mu\text{m}$ 、細目ドレッシングの場合は $R_y=3.2\mu\text{m}$ であり、また図5から明らかにドレッシング条件の違いにより仕上げ面粗さが異なっていることが分かる。

Table 3 Grinding conditions

Spindle speed	8000 rpm
Peripheral wheel speed	301.6 m/min
Grinding direction	Up cut
Coolant	20 l/min
Depth of cut	10 μm
Feed rate	200 mm/min

(a) Standard dressing (b) Fine dressing

Fig.5 SEM photograph of ground surface

3. 測定結果および考察

3.1 ドレッシング条件と砥粒形状

図6(a)(b)は標準および細目ドレッシングのホイール作業面の最外周付近の砥粒刃先の鳥瞰図である。表示範囲はホイール周方向および軸方向に1.0mmである。図中の赤色部は外周に向かって高い部分である。図より標準ドレッシングに比べ細目ドレッシングでは、赤色部（ホイール作業面の再外周付近）の表面積が多いことが分かる。さらに、赤色で示された部分の形状を詳細に観察すると、山の先端が比較的平坦な形状をしていることも分かる。以上より、標準ドレッシングに比べ細目ドレッシングで最外周付近に多くの切れ刃が存在し、その山の部分の形状はより平坦になっていることが分かる。

図7(a)(b)はホイール周方向9mm（ほぼ全周の1/4周分）の最外周付近の等高線表示（最外周付近から深さ10 μmおよび20 μm）である。図よりホイール周方向に広範囲に見ると、切れ刃位置は偏って（ある位置に集中して）存在しており、切れ刃間隔にはかなりのばらつきがあることが分かる。さらに本図からも、標準ドレッシングに比べ細目ドレッシングは最外周付近の切れ刃数が多いことが分かる。しかしながら、図よりホイールの極表面付近に存在する砥粒の切れ刃は非常に少なく、例えば1.0mm×9.0mmの各範囲内において人間が目視で数えられる程度に過ぎないことが分かる。この結果は本報のような小径ホイールを用いた研削加工においては、加工に参与する砥粒の切れ刃の数が極めて少ないことを示している。すなわち小径ホイールを用いる場合、加工に有効に作用する切れ刃の数が少ないため、良好な仕上げ面粗さを得るためには、通常の研削に比べかなり粒径の細かいホイールを必要とすることが本結果より推察される。

3.2 ドレッシング条件と砥粒切れ刃の深さ方向の分布

前節でドレッシング条件によりホイール作業面の最外周付近の砥粒の切れ刃状態が異なることが判明した。そこで本節では、切れ刃位置の最外周付近での深さ方向の分布状態を調べた。ここで切れ刃位置は測定された切れ刃の最も高い位置（最外周に近い位置）と定義した。図8に切れ刃位置の定義の模式図を示す。一方、図7の結果に示されているように最外周付近に限れば、切れ刃と考えられる突出部は極く少数であるので、以下の手法で切れ刃位置を調べた。

(a) Standard dressing

(b) Fine dressing

Fig.6 Bird's eye view of surface of grinding wheel

本測定では急な斜面などでレーザ光が反射せず、センサーに感知されない場合は測定不能点として、その位置の高さは前後の測定点から内挿値を代入している。しかしながら、もう一方で測定不能点ではないが、明らかに異常なピーク値を認識する場合が発生した（例えば図6(b)の軸方向0.65mm、円周方向0.15mm付近で異常に細長く高い値を示している部分など1.0mm×1.0mm四方で数カ所存在）。その主な原因はボンドのビトリファイド部でのレーザ光の乱反射により、実際には谷部の斜面と考えられる位置を突出したピーク値として誤認識するものである。本センサーは、図2に示したように、センサーAおよびBの減算値ゼロの場所をフォーカス位置として認識する。ただし、誤認識を避けるためセンサーAおよびBの加算値がしきい値以上の場合としている。しかしながら、本測定のように比較的反射率の悪い材料を測定する場合、しきい値を低く設定する必要がある。そのため、乱反射が顕著なビトリファイド部でまれに誤認識するものである。そこでこれらのピーク値を切れ刃としてカウントしないために、抽出方法は次の手順で行った。コンピュータの画面上のカラー等高線表示から切れ刃部付近を判断し、その位置にカーソルを合わせ、その付近の測定データの中から高さの最大値および位置を読み出した。また、各作業時にはC Dカメラの画像の観察による砥粒の確認も行った。

Fig.7 Contour map of grinding wheel

Fig.8 Definition of cutting edges

Fig.10 Wheel diameter and number of cutting edges

Fig.9 Distribution of cutting edges along depth of grinding wheel

図9は本手法で抽出された切れ刃の最外周から各深さ間に存在する単位面積当たりの数である。図より、ホイール最外周の極表面付近（今回の場合 $3\mu\text{m}$ 以内）では、細目ドレッシングは標準ドレッシングに対して3倍以上の切れ刃が存在していることが分かる。しかしながらそれ以上深い位置では、その差は小さいことが分かる。すなわち、ドレッシング時のリードを細かく設定（切込みは $2\mu\text{m}$ で一定）すると、特にホイール最外周付近の砥粒刃先の切れ刃の数が增大することが示された。

図10は本測定結果を基に、最外周から各深さまでにホイール作業面円周上の全周（軸方向単位幅）に存在する切れ刃数と砥石径の関係を算出したものである。算出法は、最外周を決定する最

Fig. 11 Definition of vertical angle of cutting edges

Fig. 12 Frequency of vertical angle of cutting edges

も高い切れ刃が1個存在すると考えられるため切片を1として、本測定結果より直線の傾きを計算した例である。図より標準ドレッシングの場合に着目すると、例えばφ12mm程度の小径砥石では、深さ3μm付近に存在する切れ刃は全周でも10個程度となることが分かる。この結果より、同径の複数切れ刃のエンドミルなどの切削工具で切削加工する場合と比べて、有効に作用する切れ刃数は大差ない状態にあることが分かる。ここで、砥石径と切れ刃数の関係に着目すると、さらに砥石が小径化（例えばφ6mmなど）すると、砥石作業面にはほんの数個の切れ刃しか存在しないことが分かる。すなわち、特に小径砥石を用いた研削は、通常の大径砥石を用いた場合に比べ、良好な仕上げ面粗さが得にくいことが分かる。

3.3 ドレッシング条件と砥粒切れ刃形状

前節で砥粒切れ刃の位置を定義した。そこで本節では、それらの形状について調べる。研削加工後の仕上げ面は砥粒刃先の最も高い部分が干渉して形成されている。すなわち、仕上げ面生成に与える要因としての最も高い部分の包絡線（軸方向断面）の形状が重要と考えられる。そこで本報では、本ホイールの平均砥粒径が100μmであることより、切れ刃位置近傍の100μm程度の範囲の断面を重ね書きし、その包絡線を評価対象にした。図11は切れ刃付近の包絡線（軸方向断面）の一例である。切れ刃形状は図中右側の概略図に示されるように、三角形近似した頂角で定義する。特に本報の例では2.4章で記述したように、研削加工後の仕上げ面粗さは3~5μm程度を対象としており、当然その付

近までの刃先深さが重要と考えられる。そこで図11中に示されるように、切れ刃先端から深さ5μm（図中X）の位置での包絡線の幅（図中y）を求め、そのXとyより頂角θを求めた。

図12は頂角θの相対度数分布である。図より、標準ドレッシングの場合、頂角は170°付近から存在し、140°付近に多く分布していることが分かる。一方細目ドレッシングの場合、170~160°付近に極めて多く分布していることが分かる。すなわち、ドレッシング時のリードを細かく設定すると、生成される砥粒切れ刃形状は平坦になることが示された。

以上の結果より標準ドレッシングに比べ、細目ドレッシングを施すと、ホイール極表面付近（本例では3μm程度）に存在する切れ刃数が増大し、さらに生成された切れ刃形状の頂角も大きくなることにより、研削加工後の表面粗さに著しい違いが生じていることが判明した。

今後は、切れ刃状態と仕上げ面粗さとの関係を定量化する予定である。

4. 結 論

レーザスタイラスをMMCに搭載したオン・ザ・マシン計測システムにより砥石作業面トポグラフィを計測し、考察した結果をまとめると次のようになる。

- (1) ホイール作業面の最外周の極近傍付近に存在する砥粒の切れ刃数は非常に少ない。そのため、小径ホイールを用いて研削加工を行う場合、良好な仕上げ面粗さを得るためには、通常の大径のホイールに比べ、粒度を大きく設定する必要があることが示された。
- (2) ドレッシング条件の違い（リードを変化させた場合）による切れ刃数の変化は最外周の極近傍で著しい。すなわち、リードを細かく設定すると、最外周付近の切れ刃数が増大する。
- (3) 標準ドレッシングでは切れ刃形状の先端角は140°付近に多く存在し、細目ドレッシングでは160°以上に非常に多く分布している。すなわち、リードを細かく設定すると、切れ刃の先端角は著しく増大する。

最後に、本研究に多大なご協力を頂いた、（株）日本デジテックの方々へ深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Y. Kakino, A. Matsubara, Y. Kita, H. Nakagawa, H. Otsubo and S. Tozawa : Development of Grinding Support System GSX for Grinding Center, Advancement of Intelligent Production, (1994) 455.
- 2) 松井正己, 田牧純一 : 三次元粗さ測定器による砥石表面トポグラフィの測定, 精密工学会誌, 54, 5 (1988) 871.
- 3) L. Blunt, and S. Ebdon : The Application of Three-dimensional Surface Measurement Techniques to Characterizing Grinding Wheel Topography, Mech. Tools Manuf., 36, 11 (1996) 1207.
- 4) 垣野義昭, 松原 厚, 山路伊和夫, 松田健嗣, 中川平三郎, 廣垣俊樹, 喜田義宏 : 砥石作業面トポグラフィのオン・ザ・マシン計測に関する研究（第1報）—レーザスタイラスを用いた計測システムの開発—, 精密工学会誌, 63, 2 (1997) 228.