

画像解析による砥石作業面の評価 (第2報) *

—研削過程における砥石作業面変化の追跡測定—

細川 晃** 安井平司*** 永江昌義† 佐藤 郁††

Characterization of the Grinding Wheel Surface by Means of Image Processing (2nd Report)
—Tracking Measurement of Surface Topography of Grinding Wheel in Grinding Process—

Akira HOSOKAWA, Heiji YASUI, Masayoshi NAGAE and Kaoru SATO

This study deals with the post-process measurement of the grinding wheel topography by means of a newly improved image processing system. In this system, grinding wheel is driven by the high-power electric servomotor with a built-in rotary encoder so that both grinding operation and consecutive measurement of the individual abrasive grains by the accurate wheel positioning are possible. The contraction/expansion process is useful for the separation of adjacent grains. The dark field microscopy is effective in order to extract monochromatic CBN grains from the lustrous metal bond. This system is applicable to the practical grinding operation with resinoid and metal bonded superabrasive wheels with a good degree of accuracy and efficiency. In grinding normally sintered silicon nitride with the resinoid-bonded diamond wheel at a given grinding condition, this system reveals that cutting-edge ratio decreases rapidly due to the micro-fracture of grain tips at the transient stage just after truing/dressing, and it increases slightly with the promotion of attritious wear under the successive steady state. This phenomena are explained by the fact that abrasive grains are damaged during truing/dressing operation.

Key words: image processing, grinding wheel topography, diamond wheel, CBN wheel, abrasive grain, wear-flat area, grain density, cutting-edge ratio

1. 結 言

砥石作業面上の砥粒切れ刃の形状や分布状態、すなわち砥石表面トポグラフィの測定は、形直し・目直し作業の良否や砥石寿命の判定はもとより、研削機構の解析においても極めて重要な作業である。このため、これまで多くの研究者によって測定が行われているが、測定の煩雑さ、測定時間の長さ、あるいは微粒砥石への適用性などに問題があり、実際の研削作業への適用に関しては不十分であった。

このような背景の下、著者らは前報で研削盤の砥石ヘッドに装着した顕微鏡によって砥石作業面を撮影し、その映像に種々の画像処理を行うことによって砥石作業面上の砥粒および切れ刃の表面分布をポストプロセスで測定・評価できる手法を構築した¹⁾。そして、レジンボンドダイヤモンド砥石を測定対象としてその有効性を明らかにした。しかし、研削時と測定時で砥石の駆動モータを切り換えるなどの作業効率の問題、密接した複数の砥粒を1つの砥粒として認識してしまうなどの画像処理精度上の問題、および CBN 砥粒やメタルボンドなど異なった仕様の砥石に対する有効性など、実際の研削作業へ適用する上で幾つかの問題が残されたままであった。

そこで本研究では、前報で構築した砥石作業面評価システムに改良を加えて測定時間の短縮と画像処理精度の向上を図るとともに、鉄系難削材料の研削に対して多用されるメタルボンド CBN 砥石への適用性について検討を加えた。さらに、本システムの高精度砥石位置決め機構を利用して、ファインセラミックスおよびダイス鋼の湿式研削における砥石作業面性状の変化

を追跡測定し、本手法の有効性についても検討している。

2. 画像処理システム

2.1 画像計測システムの構成

画像計測システムの構成を図1に示す。研削盤砥石ヘッドに装着した光学顕微鏡で砥石作業面を観測し、CCD カメラを介してその映像をデジタル画像としてパーソナルコンピュータのフレームメモリに取り込む。画像データは、横 640 画素、縦 400 画素、1 画素あたり R, G, B (赤, 緑, 青) それぞれ 8 ビットの濃度階調を持つフルカラー画像であり、色彩情報を利用した画像解析を行うことができる。本システムは顕微鏡の対物レンズを交換することによって容易に微粒砥石 (粒度数千メッシュ) にも適用できることから、目づまりや砥粒の脱落など砥石作業面が変化しやすいこれら微粒砥石による超精密研削などに対してより有効に機能するものと考えられる。

2.2 砥石駆動コントロールシステム

前報¹⁾では砥石駆動用モータの回転軸にサーボモータを接続

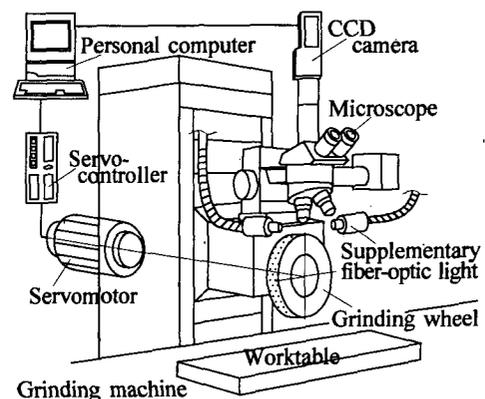


Fig.1 Grinding machine with image processing system

* 原稿受付 平成 11 年 1 月 11 日

** 正 会 員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)

*** 正 会 員 熊本大学工学部 (熊本市黒髪 2-39-1)

† 学生会員 熊本大学大学院 (現, 川重工事(株); 野田市二ツ塚 118)

†† 正 会 員 九州松下電器(株) (福岡市博多区美野島 4-1-62)

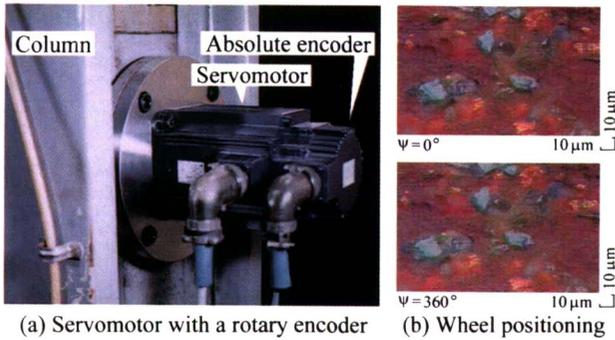


Fig.2 Circumferential wheel positioning by a directly connected electric servomotor with a rotary encoder

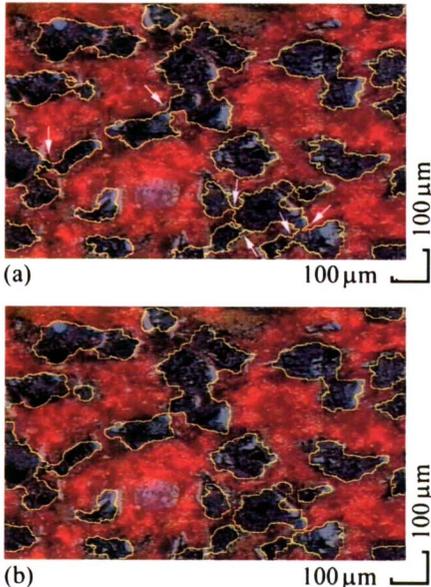


Fig.3 Effect of contraction/expansion processes on the separation of adjacent abrasive grains for resinoid-bonded CBN wheel

して砥石の位置決めを行っていたが、本システムでは高出力の絶対値エンコーダ内蔵型サーボモータ（定格出力：3kW，最高回転数：4000rpm，エンコーダパルス数：32768/回転）を砥石主軸に直結している。これによって、研削時における砥石の高速回転および砥石作業面測定時における回転速度制御・位置決めのをすべてをパーソナルコンピュータからの指令によって制御することが可能になり、測定能率が大幅に改善された。従来、研削主軸のような加工精度に直結する部分には、振動級数V5~V15程度のサーボモータの適用は困難と考えられていたが、主軸系の動バランスの高精度化によって、後述する研削実験においてもびりなどのない正常な研削が実現できている。

図2(a)，(b)はそれぞれ研削盤コラムに取り付けたサーボモータの外観およびサーボモータに360°の回転指令を与えた時の砥石表面(SD800N50B)の顕微鏡写真である。同図(b)より1μm程度の位置決め精度を有していることがわかる。

2.3 砥石作業面評価パラメータ

前報と同様、本システムで算出できる砥石作業面性状の評価パラメータは以下の4つである。

- (1) 砥粒密度 $G = n_g/A$, 個/mm²
- (2) 切れ刃密度 $C = n_c/A$, 個/mm²
- (3) 切れ刃面積率 $\eta = \sum S_i/A$, %
- (4) 連続切れ刃間隔 λ , mm

ここに n_g , n_c はそれぞれ測定面積 A 内の砥粒数および切れ刃

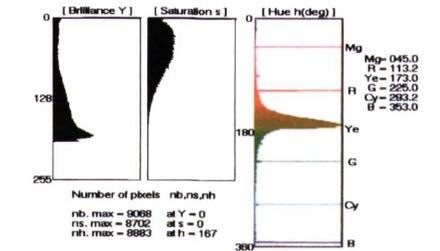
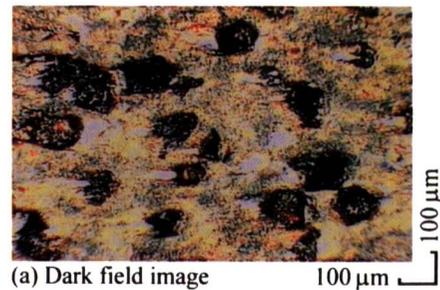


Fig.4 Original dark field image of the metal-bonded CBN wheel for grain extraction, and its histograms of perceptual attributes of color

数、 $\sum S_i$ は切れ刃摩耗面積の総和である。これらの測定パラメータによって砥粒切れ刃の脱落、欠損および摩減摩耗などを定量的に評価することができる。

3. 画像処理

3.1 隣接砥粒の分離処理

前報では、粒度#140のレジンボンドダイヤモンド砥石に対し、画像のもつ色彩情報を解析（砥粒の抽出は色相 h ，切れ刃摩耗面の抽出は輝度 Y と色相 h の両色彩ヒストグラムにしきい値処理を施す）して砥石表面画像から砥粒および切れ刃摩耗面を抜き出した。その際、密着した砥粒は分離できない場合があったが、切削砥粒としての有効性を考慮した場合に1個の砥粒として処理しても問題ないと判断した。しかし、後述する粒度#120のCBN砥石については数個以上にわたって密着している場合もみられ、その誤差が無視できないと考えられる。

そこで今回、砥粒の抽出処理において、しきい値処理後の2値画像に対し収縮・膨張処理を行い砥粒の分離を行った。ここで、収縮とは与えられた連結成分の境界点を除去して1層分小さくする処理であり、膨張は逆に1層分太らせる処理である²⁾。

図3はその結果(CBNC120N75B)であり、(a)が従来の方法、(b)が収縮・膨張処理を行ったものである。図(a)の矢印で示した密着箇所が分離され、砥粒密度がより正確に計測されることがわかる。なお、本来、分離に要する収縮・膨張の回数は各密着部分で異なるが、本処理による分離の効果や処理後の連結成分の形状変化などを考慮して今回はすべて3回とした。

不要物体の除去などその他の画像処理の詳細については、基本的に前報¹⁾と同じなので本報では省略する。

3.2 メタルボンドCBN砥石(CBN120Q100M)への適用

本節では、レジンボンド砥石とともに最も使用頻度が高く、主として鉄系難削材の研削加工において重要なメタルボンドCBN砥石への適用について検討する。レジンボンド砥石と同様、砥粒と切れ刃摩耗面の抽出は個別に行っている。

3.2.1 砥粒抽出処理

レジンボンドダイヤモンド砥石と異なり、CBN砥粒が無彩色であることやメタルボンドが光沢面であることから、ここで

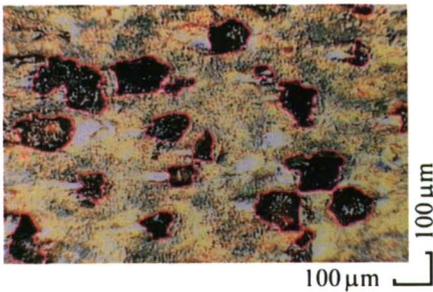


Fig.5 Outlines of extracted abrasive grains superimposed on the original picture image of metal-bonded CBN wheel

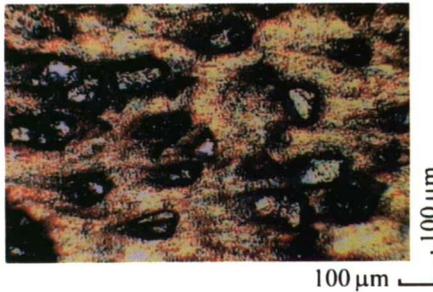


Fig.6 Original bright field image of metal-bonded CBN wheel for wear-flat extraction

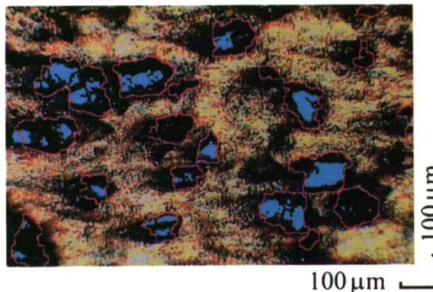


Fig.7 Extracted wear-flats superimposed on the original picture image of metal-bonded CBN wheel; also drawn the outlines of extracted abrasive grains in Fig.5

は、暗視野照明によって金属であるボンド部分を明るく砥粒部分を暗くなるように撮影条件を決定した。図4(a)は砥粒抽出用原画像、同図(b)はそれを平滑化処理した後の色彩ヒストグラムであるが、レジンボンドダイヤモンド砥石のように色相あるいは彩度に砥粒を示すピークはみられない。そこで、輝度ヒストグラムからしきい値 $0 \leq Y \leq 65$ によって砥粒を抽出した。

図5は砥粒抽出の結果の一例を示したもので、図4の原画像に抽出された砥粒の輪郭線を重ねて表示している。図にみるように、砥粒は精度よく抽出されていることがわかる。

3.2.2 切れ刃摩耗面抽出処理

切れ刃摩耗面の抽出では、図1に示す主光源による落射照明のみを用いることによって、切れ刃摩耗面からの正反射光を強調し、輝度ヒストグラムにしきい値処理を施して抽出を行った。

図6が切れ刃摩耗面抽出用の原画像、それを処理した結果が図7である。実線が前節で抽出した砥粒の輪郭、シアン部分が摩耗面で、図6の画像に重ねて表示している。図にみるように、摩耗面は比較的正確に抽出されていることがわかる。

以上のように、画像の性質が大きく異なるメタルボンドCBN砥石に対してもレジンボンド砥石と同様十分な精度で砥粒および

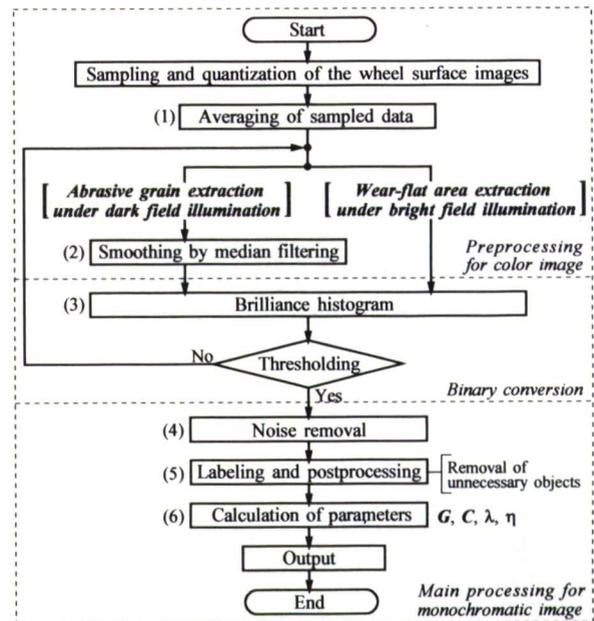


Fig.8 Flowchart of image processing for metal-bonded CBN wheel

Table 1 Photographing conditions

Grinding wheel	CBN120Q100M	SDC140N75B	CBNC120N75B	
Microscope	Nikon OPTIPHOT XF-UNR			
Objective lens	5 ×			
Depth of a focus μm	56			
Viewing area μm ²	1100 ^h × 800 ^v (640 × 400 pixels)			
Extracting object	Grain	Wear-flat	Grain	Wear-flat
Lighting method	dark filed	bright field	bright field	bright field
Principal vertical light	○	○	○	○
Supplementary fiber-optic light	×	×	○	×

Table 2 Experimental conditions

Grinding wheel	SDC140N75B	CBNC120N75B
Workpiece	Si ₃ N ₄ (HV1600)	SKD11 (HV800)
Wheel speed v_s m/s	25	
Work speed v_w m/min	5, 10	
Depth of cut a μm	10, 20	
Grinding fluid	Water-based soluble (W2-1-1, 1:50)	

- Truing (SD100Q7M)
 $v_w=2$ m/min, $a_t=2$ μm, $s_t=20$ μm/rev, Soluble (1:50 in water)
- Dressing (WA600H7V & Loose abrasives of #600-mesh)
 $v_w=2$ m/min, $a_d=50$ μm, Soluble (1:5 in water)

び切れ刃摩耗面を抽出でき、本手法の有効性・汎用性が確認された。ここで、個々の画像処理手法の詳細は省略するが、基本的にはレジンボンド砥石の場合と同様¹⁾；(1)入力画像の平均化⇒(2)メディアンフィルタによる平滑化⇒(3)しきい値処理による2値化⇒(4)孤立雑音の除去⇒(5)ラベリングによる連結成分の生成と不要物体の除去⇒(6)砥石作業面評価パラメータの算出；からなる一連の処理を行っている。

図8に画像処理プログラムのフローチャートを、また、表1にレジンボンド砥石を含めた主たる撮影条件を示す。

4. 研削過程における砥石作業面の変化

4.1 実験方法および実験条件

本手法を用いて研削作業にともなう砥石作業面の変化を測定した。前報と同様、測定位置は砥石幅 ($b=10$ mm) の中央部で、砥石周方向に 30° ずつ 12 か所とし、1 か所につき周方向に連

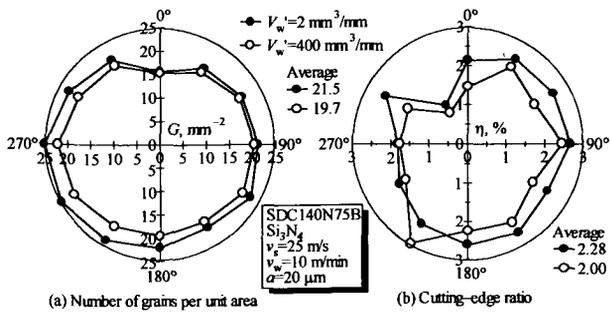


Fig.9 Change in grain density and cutting-edge ratio of resinoid-bonded diamond wheel at $v_w=10$ m/s and $a=20$ μ m

続した4画面(≈4.4×8mm)をサンプリングして1つの画像として処理している。研削実験は定切込み湿式ブランジ研削方式で行い、工作物には常圧焼結窒化けい素 Si_3N_4 (SSN)および焼入れたダイス鋼 SKD11を用いた。表2に研削条件および形直し・目直し条件を示す。

なお、本報では砥粒の摩耗形態の観測に主眼をおいており、加工機構や仕上面形態と砥石作業面性状との関係については特に検討することはしていないので、実験結果については主として切れ刃面積率 η と砥粒密度 G の両測定値で評価している。

4.2 レジンボンドダイヤモンド砥石

図9(a),(b)はそれぞれ比較的重い条件($v_w=10$ m/min, $a=20$ μ m)で研削した場合の砥粒密度 G および切れ刃面積率 η の変化を砥石周方向の各位置 ψ について円グラフ状に示したもので、単位幅研削量 $V_w=2$ mm³/mm(形直し・目直し後、数パス研削した状態)と400mm³/mmの結果である。図にみるように、 G は研削前後ともその平均値が20個/mm²程度とあまり変化がなく、また、分布形状もほぼそのまま維持していることから、砥粒の脱落はほとんどなかったと言える。一方、 η は研削前後で約2.3%から2.0%にやや減少している。これらの結果から判断すると、砥粒切れ刃は摩滅摩耗によって定常的に損耗するのではなく、切れ刃先端の微小破壊や局所的な欠損が生じたと考えられる。ただし、その程度は小さく、 $V_w=400$ mm³/mm程度の研削では作業面は大きく変化しなかったと判断できる。

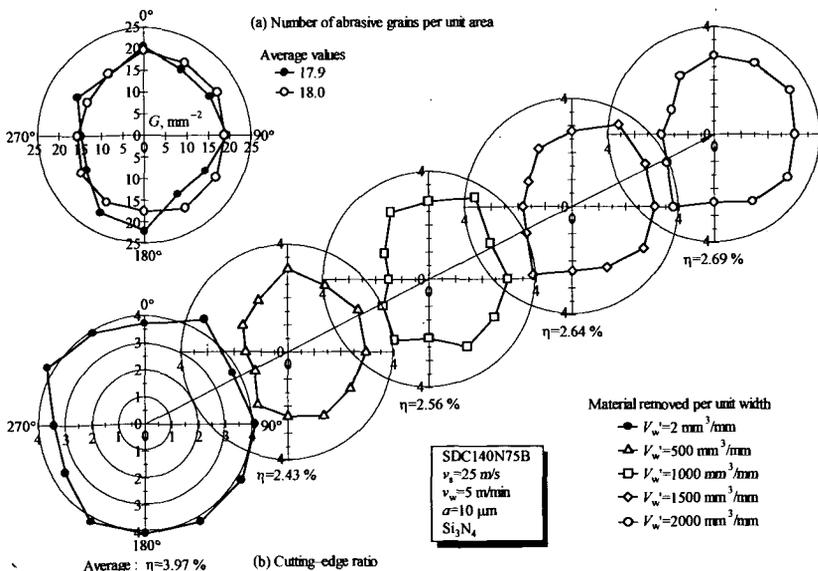


Fig.10 Change in grinding wheel surface with grinding

図10はより軽い研削条件($v_w=5$ m/min, $a=10$ μ m)の下での実験結果で、単位幅研削量 $V_w=2000$ mm³/mmまでの変化を示している。同図(a)から、この場合も砥粒密度 G にあまり変化はなく、砥粒の脱落はほとんど生じていない。これに対し、図(b)をみると切れ刃面積率 η は $V_w=2\sim 500$ mm³/mmの段階で約4.0%から2.4%に急激に減少するとともに、その分布形状も変化しているのがわかる。しかしながら、 $V_w=500$ mm³/mm以降は η の大きさや分布形状はあまり変化していない。このように、砥石作業面の変化形態は形直し・目直し直後の研削初期の段階とその後の定常研削状態では大きく異なることがわかる。

図11は図10に示した切れ刃面積率の推移を研削抵抗とともに単位幅研削量との関係でまとめたものである。図より、研削初期($V_w=2\sim 500$ mm³/mm)に η が急激に減少し、その後徐々に増加していることがよくわかる。このことから、まず、形直し・目直し時にダメージを受けた砥粒切れ刃の先端が微小破壊し(過渡状態)、その後、主として摩滅摩耗が進行する(定常状態)ものと考えられる。ただし、 $V_w=500$ mm³/mm以降の η の増加量(2.43/2.56/2.64/2.69%)から判断して、定常研削状態における砥粒摩耗の進行は本実験条件では極めて小さいと言える。そして、上述したような砥石作業面の変化に応じて研削抵抗も変化している様子がみとれる。このような研削初期の砥石作業面の不安定性は在来砥石では指摘されていたが³⁾、より硬質のダイヤモンド砥石でも同様の現象が確認された。

ところで、図9と図10の結果を比較すると、後者の軽い研削条件の方が η すなわち砥石作業面の変化が大きくなっている。これは、砥石の初期状態が両者で異なっていたためと思われる。すなわち、 $V_w=2$ mm³/mm(形直し・目直し直後)において、前者では砥粒密度 $G\approx 20\sim 21$ 個/mm², $\eta\approx 2.3\%$ なのに対し、後者では $G\approx 18$ 個/mm², $\eta\approx 4.0\%$ となっており、前者に比べて形直しによる切れ刃の平坦化が大きく、幾つかの砥粒の脱落も推察される。本研究では研削前にダイヤモンドブロックツールによって砥粒先端の高さをそろえているが(表2参照)、この過程で砥粒に少なからずダメージを与えたものと考えられる。

以上の結果をまとめると、研削開始初期の過渡状態における砥石作業面の変化は主として形直し・目直し状態に左右され、

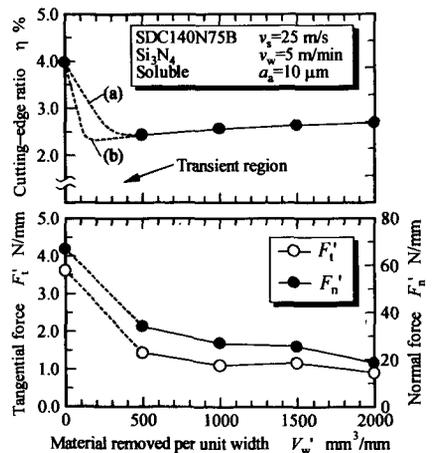


Fig.11 Variation of cutting-edge ratio and grinding forces with material removed per unit width

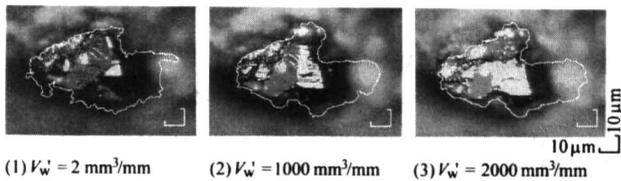


Fig.12 Change in morphology of a certain diamond grain with grinding

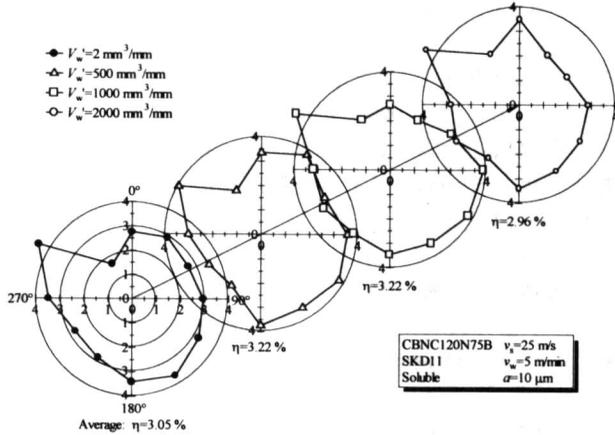


Fig.13 Change in cutting-edge ratio of resinoid-bonded CBN wheel with grinding of hardened die steel SKD11

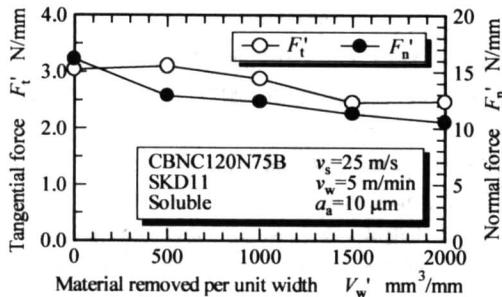


Fig.14 Variation of grinding forces with material removed per unit width

その後の定常状態は加工条件に影響を受けるものと考えられる。なお、現段階ではどの時点から定常状態に移行するのか明らかでないため、図11において $V_w=2\sim 500\text{mm}^3/\text{mm}$ 間は破線(a)および(b)で示している。

図12は初期摩耗面が比較的小さい(形直し時におけるダメージが小さい)特定の砥粒を追跡観測した結果であり、実線が抽出処理された砥粒の輪郭、実線の中の白色の部分が抽出された摩耗面を示している。図より、顕著な微細破壊や局部欠損もなく、砥粒先端の摩滅摩耗領域が大きくなっている様子がよくわかる。以上のことから、形直し・目直し時に砥粒が破る負荷の程度によってその後の砥粒の摩耗形態が大きく影響されることがわかる。なお、個々の砥粒切れ刃の微視的变化過程、特に過渡領域(図11参照)における挙動は別報で報告する予定である。

4.3 レジンボンド CBN 砥石

図13は焼入れしたダイス鋼を図10と同じ加工条件で研削した場合の切れ刃面積率 η の変化を示した図である。図にみるように、単位幅研削量 $V_w=2000\text{mm}^3/\text{mm}$ までの研削に対して η は 3.05/3.22/3.22/2.96% とあまり変化しておらず、また、その砥石周方向の分布も初期状態をおおむね維持しながら推移しているのがわかる。図は省略するが、砥粒密度 G も 16.0~15.7 個/ mm^3 とほとんど変化はなかった。砥石作業面の観測結果も含めて以

上の結果を検討すると、個々の砥粒では局所的な微小破壊がみられるものの、基本的には砥粒先端の摩滅摩耗が緩やかに進行する変化形態になっているものと考えられる。このことは、単位幅研削量 V_w と研削抵抗の関係を示した図14でも確認できる。

ところで、図13、図14では、図11でみられたような急激な η や F_t , F_n の低下、すなわち明確な過渡領域は観測されていない。このことから、この場合、形直し・目直しによって砥粒がそれほどダメージを受けていないことが推察される。CBN 砥石の場合、ダイヤモンドブロックツールで比較的容易に形直しができ、ダイヤモンド砥石に比べ形直しの回数(ツールのパス数)がかなり少ないことが一因であろう。このように、砥粒の損傷の定量的な評価は砥材に応じて行う必要があり、本手法による砥粒切れ刃のより厳密な評価とともに今後の課題である。

以上の結果より、本測定システムは研削過程における砥石作業面および個々の砥粒切れ刃の変化を、実用的なレベルで追跡測定が可能と言える。

5. 結 言

画像処理手法を用いた砥石作業面評価システムに改良を加えて測定の高効率化・高精度化・汎用化を図るとともに、研削過程における砥石作業面性状の変化を測定し、以下の結果を得た。

- (1) 絶対値エンコーダ内蔵型高出力サーボモータを砥石主軸に直結することによって、研削時における砥石の駆動および砥石作業面測定時における回転速度制御・位置決めをすべてをパーソナルコンピュータからの指令によって実現でき、より高効率・高精度な測定が可能になる。
- (2) 砥粒抽出処理において、しきい値処理後の2値化画像に収縮・膨張処理を行うことによって密接した複数砥粒を精度よく分離することができ、画像処理精度が向上する。
- (3) メタルボンド CBN 砥石の場合、CBN 砥粒が無彩色でかつボンド部が金属光沢面であることから、砥粒の抽出は暗視野照明によって暗くした砥粒を輝度情報によって抜き出す方法が有効である。一方、切れ刃摩耗面はレジンボンド砥石と同様、落射照明によって摩耗面からの正反射光を強調して輝度情報によって抽出する方法が有効である。
- (4) 本手法によって、レジンボンドダイヤモンド砥石による常圧焼結 Si_3N_4 の研削過程、すなわち、形直し・目直し直後の研削初期に切れ刃面積率がおおよそ 4.0% から 2.4% に急激に減少し、その後 2.7% 程度まで徐々に増加するような砥石作業面の変化過程を追跡してとらえることができた。このことから、研削初期の過渡的段階では切れ刃先端の微小破壊や局部的な欠損が生じ、その後の定常研削時では主として摩滅摩耗が進行することが推察される。

最後に、砥石および研削液のご提供を頂いたノリタケダイヤモンド(株)ならびにユシロ化学工業(株)の各社に謝意を表します。また、サーボモータのご提供と砥石駆動装置の構築にご助言・ご協力を頂いた(株)安川電機に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 細川 晃, 安井平司, 鐘尾幸久, 佐藤 郁: 画像解析による砥石作業面の評価(第1報)—砥粒および切れ刃摩耗面分布のポストプロセス測定, 精密工学会誌, 62, 9 (1996) 1297.
- 2) 例えば, 田村秀行監修: コンピュータ画像処理入門, 総研出版, 東京, (1985) 76.
- 3) 安井平司, 津和秀夫: 砥石作業面性状の定量化に関する研究(第1報)—切れ刃分布, 精密機械, 40, 8 (1974) 639.