cBN ビトリファイドホイールの研削性能に及ぼす 組織均一化の影響*

—クラスタ研削試験に基づく砥粒切れ刃の挙動解析—

市田良夫** 梶野 仁*** 佐藤隆之介** 森本喜隆** 佐藤政和****

Effects of Uniformity in Structure on Grinding Performance of Vitrified cBN Wheels
—Analysis of Cutting Edge Behavior Based on Cluster Overcut Fly Grinding Test—

Yoshio ICHIDA, Hitoshi KAJINO, Ryunosuke SATO, Yoshitaka MORIMOTO and Masakazu SATO

This paper deals with the influence of uniformity in structure on the grinding performance of vitrified cBN wheels. In this report, in order to clarify the effect of the uniformity in structure on the behavior of cutting edges during grinding, cluster overcut fly grinding tests are conducted with two types of cBN cluster wheel made by a conventional manufacturing method and by the newly developed manufacturing method referred to as “coating method”. The former is denoted by “conventional cluster wheel”, while the latter is denoted by “uniform cluster wheel” because it has more uniform structure than that of the conventional cluster wheel. The average radial grain cutting edge wear in grinding with the uniform cluster wheel is smaller than that in using conventional cluster wheel. Moreover, the variation in the radial wear of individual grain cutting edge when using uniform cluster wheel is smaller than that in using conventional cluster wheel, because the fracture and/or releasing of cBN grains that take place locally on the wheel working surface are suppressed by making the wheel structure uniform.

Key word: vitrified cBN wheel, structure, uniformity, grinding performance, cluster overcut fly grinding test, grain cutting edge wear

1. 緒 言

近年、超高速研削盤やグラインディングセンタ等の研削加工システムの進化に伴い、cBN ホイールにもさらなる高性能化が要求されている¹⁾²⁾。これまで、cBN ホイールの研削性能に関連する研究が種々報告されているが³⁾、cBN ホイールの内部組織に関連する研究についてはほとんど行われていないのが現状である⁴⁾⁵⁾。砥粒—ポンド—気孔からなるホイール組織の最適化を図ることによってビトリファイド cBN ホイールのさらなる高性能化が達成できると考える。著者らは、このようなホイール組織の最適化に関する研究の一環として、まず、組織の均一化を図るために有効なホイール製造法「コーティング法」を提案した⁶⁾。この方法では、砥粒表面がポンド素材により均一に被覆された状態にある配合物を用いてホイール焼成を行うため、従来の方法よりも均一な組織をもつ cBN ホイールを作製することが可能である。また、この方法で作製した cBN ホイールが、従来のホイールに比べて摩耗が少なく、仕上面粗さの安定性に優れるなど高い研削性能を有することを明らかにしている⁶⁾。

本研究は、このようなホイール組織の均一化がどのようにして研削性能改善をもたらすのか、その本質的なメカニズムを明らかにすることを目的としている。そこで、実研削ホイールによる研削では捉えることが難しい砥粒切れ刃挙動の実態を把握するため、cBN ホイールから切り出した砥石小片 (cBN クラスタと呼ぶ) を研削工具として用いて行うクラスタ研削試験^{7)~9)}を試み、cBN ホイ

ールの摩耗過程における砥粒切れ刃の形状や分布の変化等の切れ刃挙動に及ぼすホイール組織の均一性の影響について検討する。

2. cBN クラスタを用いた研削試験法

2.1 クラスタ研削試験

図1にクラスタ研削試験の概要を示す。まず、同図 (a) の模式図に示すように、cBN ホイールから切り出した cBN クラスタをホルダにポンドで固定する。次に、これを同図 (b) に示すアルミニウム合金製円盤の外周に取り付け、この円盤 (cBN クラスタホイールと呼ぶ) を周速度 v_{sc} で回転させながら切込み a_c と送り v_{sc} を与えることによって、平滑に研磨した工作物表面に多数の独立した平行な研削溝を生成する。

単粒研削試験法が砥粒自身の研削性能を評価するために用いられるのに対して、クラスタ研削試験ではホイールの5因子 (砥粒、粒度、結合度、組織、ポンド) の影響を含む研削性能を評価することが可能である⁹⁾。また、クラスタ研削試験では、ホイール作用面全体の摩耗特性とともに、個々の砥粒切れ刃の摩耗特性を評価することもできる。

2.2 cBN クラスタホイールの作製

供試ホイールとして、従来の一般的な製造法により作製した cBN ホイールと「コーティング法」⁶⁾により作製した cBN ホイールを用いた。いずれのホイールも、砥粒として粒度 120/140 番の ABN200 (エレメントシックス社製) を使用し、砥粒の体積分率 $V_g = 50\%$ (集中度 200)、気孔の体積分率 $V_p = 30\%$ 、ポンドの体積分率 $V_b = 20\%$ とした。従来法およびコーティング法で作製した cBN クラスタ (ホイール) をおのおの従来 cBN クラスタ (ホイール) および均一 cBN クラ

* 原稿受付 平成 18 年 1 月 12 日

** 正 会 員 宇都宮大学工学部 (栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

*** 正 会 員 三井金属鉱業(株) (埼玉県上尾市原市 1333-2)

**** 正 会 員 三井研削砥石(株) (埼玉県入間市狭山ヶ原 11-10)

Fig.1 Experimental setup for cluster over fly grinding test

タ(ホイール)と呼ぶことにする。

これらのcBNホイールにおける組織の均一性については、既報⁶⁾で詳述しているので、ここでは簡単な説明に留める。代表的な組織観察結果の一例を図2に示す。従来ホイールでは、気孔が密集している部分や逆に気孔がほとんどない部分が混在しており、気孔が一様に分散していない。また気孔の大きさや砥粒の分布にもばらつきがみられる。これに対して、均一ホイールでは、気孔の大きさと分布および砥粒の配置とともに従来ホイールに比べてばらつきが少なく、より均一な組織となっているのが把握される。

さて、クラスタ研削試験において、個々の砥粒切れ刃の摩耗特性を評価するためには、個々の砥粒切れ刃が互いに干渉せずにおのおの独立した研削溝を形成することが必要である。このためには、クラスタの円周方向の長さ(クラスタ長さ) l_{sc} を連続切れ刃間隔 λ より短くしなければならない。いま通常の研削ホイールを用いた研削において、ホイール作用面上の単位面積あたりの有効砥粒切れ刃数(有効砥粒切れ刃密度)を C_d 、連続切れ刃間隔を λ 、切れ刃により生成される研削溝の平均幅を b' とすると、これらの間には一般に次の関係があることが知られている⁹⁾¹⁰⁾。

$$\lambda b' C_d = 1 \quad (1)$$

ここで、精密研削を対象として最大砥粒切込み深さ g_{max} を $1.25 \mu\text{m}$ とすると、研削溝幅 b' は経験的に平均砥粒切込み深さ $g_{max}/2$ のおおよそ25倍程度になると考えられている⁹⁾。一方、ホイール作用面上に分布する切れ刃のうち有効に作用するのはホイール最外面から半径方向に数 μm までの深さにある切れ刃とみられる¹¹⁾ので、後述するホイール作用面のSEM観察結果より、有効切れ刃密度 C_d は $0.5 \sim 3 \text{ mm}^{-2}$

(a) Conventional cBN wheel

(b) Uniform cBN wheel

Fig.2 Cross sectional structures of conventional and uniform cBN wheels (G: cBN grain, B: Bond, P: Pore)

と推定される。以上より、連続切れ刃間隔 λ は式(1)より次のように見積もられる。

$$\lambda = \frac{1}{b' C_d} = 128 \sim 21 \text{ mm} \gg l_{sc} \quad (2)$$

クラスタ長さ l_{sc} は短いほどよいが、加工のしやすさを考慮して 3 mm とした。これは上記の連続切れ刃間隔よりも十分短いので、個々の砥粒切れ刃がおのおの独立した研削溝を形成するようになると考えられる。なお、クラスタ幅 w_c は 5 mm とし、クラスタ作用面の面積を $l_{sc} \times w_c = 15 \text{ mm}^2$ とした。

2.3 研削条件と砥粒切れ刃摩耗の評価法

図1(b)に示すクラスタ研削試験において、個々の砥粒切れ刃の最大切込み深さ g_{maxc} は次式で表される¹⁰⁾。

$$g_{maxc} = 2\lambda \frac{v_{wc}}{v_{sc}} \sqrt{\frac{a_c}{d_{sc}}} \quad (3)$$

ここで、 λ は連続切れ刃間隔、 v_{wc} は工作物送り速度、 v_{sc} はホイール周速度、 a_c はクラスタホイール切込み深さ、 d_{sc} はクラスタホイール直径である。式(3)から工作物送り速度 v_{wc} を導き、それに研削条件として、 $a_c = 15 \mu\text{m}$ 、 $g_{maxc} = 1.25 \mu\text{m}$ 、 $v_{sc} = 33 \text{ m/s}$ 、 $d_{sc} = 206 \text{ mm}$ 、 $\lambda = \pi d_{sc}$ を代入すると、次のようになる。

$$v_{wc} = \frac{v_{sc} g_{mc}}{2\pi d_{sc}} \sqrt{\frac{d_{sc}}{a_c}} = 0.0037 \text{ m/s} \quad (4)$$

これより、工作物送り速度 v_{wc} を 3.7 mm/s とした。

工作物として、高速度鋼 SKH51 (焼入れ・焼戻し硬さ: HRC65)を使用した。 R_z で $0.1 \mu\text{m}$ 以下の粗さをもつ鏡面に研磨した面積 $150 \times 60 \text{ mm}^2$ の工作物表面の長手方向に、多数

Table 1 Grinding conditions

Grinding method	Overcut fly grinding, Up-cut
cBN cluster wheel	cBN120O200V(Conventional cluster) cBN120O200V (Uniform cluster)
Wheel diameter	d_{sc} 206 mm
Cluster length	l_{sc} 3 mm
Cluster width	w_{sc} 5 mm
Peripheral wheel speed	v_{sc} 33 m/s
Work speed	v_{wc} 0.0037 m/s
Wheel depth of cut	a_c 15 μ m
Maximum grain depth of cut	g_{maxc} 1.25 μ m
Grinding fluid	Soluble type (JIS-W-2-2) 2% dilution
Workpiece	High speed steel (SKH51) Hardness: HRC65 Dimensions: 150 $\times$ 60 $\times$ 10 ^{h} mm

Fig.3 Method of measuring radial grain wear

の研削溝からなる幅 5 mm (=クラスタ幅) の研削トラックを 5 mm の間隔において順次平行に生成する。1 本の研削トラックで研削距離 L_{wc} は 150 mm となり、本実験では 12 本の研削トラック (累積研削距離 $L_{wc}=1800$ mm) を加工した。実験条件をまとめて表 1 に示す。なお、cBN クラスタホイールはいずれも、単石ダイヤモンドドレッサを用いて、ホイール周速度 33 m/s、ドレッサリード 0.1 mm/rev、ドレッサ切込み 2.5 μ m $\times$ 4 回、湿式の条件でドレッシングを行い、実験に供した。

また、研削距離 $L_{wc}=600$ mm ごとにクラスタ工具を取り外し、クラスタ作用面をマルチプローブ SEM (ESA-4000) により観察し、砥粒切れ刃の形態および分布を評価した。さらに、工作物表面に形成された研削溝の研削方向と直角方向のプロファイルを累積研削距離 150 mm ごとに触針式粗さ計により測定し、図 3 の模式図に示すように、研削の進行に伴うプロファイルの変化 (研削前後のプロファイルの重ね合わせにより得られる波形の変化) から、個々の砥粒切れ刃の半径方向の摩耗 (砥粒切れ刃半径摩耗) ΔR_{ci} を測定し、その平均値を平均砥粒切れ刃半径摩耗 ΔR_c として求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 ホイール摩耗に及ぼす組織均一化の影響

従来クラスタホイールと均一クラスタホイールを用いた研削により生成された研削溝のプロファイルの記録例を図 4 に示す。横軸はトラック幅方向距離であり、幅 5 mm の間に多数の研削溝が生成されている。これらの研削溝はクラスタ作用面上の

Fig.4 Changes of profile curves in cross section of grooves ground by cBN cluster wheels

(a) Conventional cBN cluster wheel

(b) Uniform cBN cluster wheel

Fig.5 Changes of radial grain wear and its standard deviation with increasing grinding length L_{wc}

個々の砥粒切れ刃によって相互に干渉のない状態で生成されているとみられるので、研削溝の数 n はそのクラスタホイール作用面に存在する有効砥粒切れ刃の数に等しいと考えられる。これより切れ刃密度 C_d は次のように表される。

$$C_d = \frac{n}{l_{sc} \times w_c} = 0.0667n \text{ mm}^{-2} \quad (5)$$

ただし、研削溝数は研削中の砥粒切れ刃の破碎や脱落により研削の進行に伴い徐々に減少する。図 4 の場合、従来 cBN クラスタでは、研削開始時に 25 本あった溝が $L_{wc}=1800$ mm の研削後には 20 本となった。一方、均一 cBN クラスタでは、

研削初期に 28 本であったものが $L_w=1800$ mm の研削後には 24 本に減少した。これらの結果から、切れ刃密度は(5)式より次のようになる。

従来クラスタホイールの切れ刃密度 $C_d = 1.67 \sim 1.33 \text{ mm}^{-2}$

均一クラスタホイールの切れ刃密度 $C_d = 1.87 \sim 1.60 \text{ mm}^{-2}$

実験開始から終了までの全研削過程を通して、均一クラスタホイールの切れ刃密度は常に従来クラスタホイールの場合より高い値を維持している。このような結果は組織の均一化によりもたらされるものと考えられ、後述するクラスタ作用面の 3 次元観察によりさらに詳しく検討する。なお、これらの切れ刃密度の値は前述した切れ刃密度 $C_d = 0.5 \sim 3 \text{ mm}^{-2}$ の範囲内にあることがわかる。

次に、研削溝のプロファイルの変化より個々の砥粒切れ刃の半径方向摩耗 ΔR_{c_i} を測定し、その平均砥粒切れ刃半径摩耗 ΔR_c を求めた。これらを累積研削距離 L_w に対して示すと図 5 のようになる。図中白丸は個々の砥粒切れ刃の摩耗 ΔR_{c_i} を、黒丸は平均砥粒切れ刃半径摩耗 ΔR_c を、さらに点線はその標準偏差を表している。均一クラスタホイールの平均砥粒切れ刃半径摩耗 ΔR_c は従来クラスタホイールの場合の約 2/3 で、均一クラスタホイールが従来クラスタホイールに比べて耐摩耗性に優れていることがわかる。同時に、均一クラスタホイールの標準偏差が従来クラスタホイールの場合のほぼ半分であることから、組織を均一化することによって個々の砥粒切れ刃の摩耗のばらつきが抑制されるようになることが把握される。

クラスタ研削試験は小さな砥石片を研削工具として用いて行う一種の加速研削試験である。そこで、クラスタ研削試験と通常の研削ホイールで行う研削試験との相関を考えてみる。ただし、クラスタ幅と同じ 5 mm 幅の通常ホイールで平面研削する場合とし、クラスタ研削試験と同じ最大砥粒切込み深さ $g_{max}=1.25 \text{ } \mu\text{m}$ となるように工作物送り速度 v_w を与えるものとする。ここで、平均砥粒切込み深さ ($g_{max}/2$) と平均研削溝幅 b' との比 $b' / (g_{max}/2)$ を r とすると、最大砥粒切込み深さ g_{max} は次式で表される⁹⁾¹⁰⁾。

$$g_{max} = \left(\frac{4}{r C_d} \frac{v_w}{v_s} \sqrt{\frac{a}{d_s}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

ここで、 r は図 4 の研削溝プロファイルより $r = 20 \sim 30$ と測定される。また、ホイール切込み深さ $a = 15 \text{ } \mu\text{m}$ 、ホイール周速度 $v_s = 33 \text{ m/s}$ 、ホイール直径 $d_s = 206 \text{ mm}$ 、切れ刃密度 $C_d = 1.6 \text{ mm}^{-2}$ (両ホイールの平均値) とする。(6)式から v_w を導き、これらの数値を代入すると以下ようになる。

$$v_w = v_s r C_d \left(\frac{g_{max}}{2} \right)^2 \sqrt{\frac{d_s}{a}} = 0.048 \sim 0.073 \text{ m/s} \quad (7)$$

すなわち、本研究でのクラスタ試験は、通常ホイールを用いて、上述の条件のもとで工作物速度 $v_w = 48 \sim 73 \text{ mm/s}$ ($2.9 \sim 4.4 \text{ m/min}$) として平面研削を行う場合に相当する。

また、クラスタ研削距離 L_w と通常ホイールの研削距離 L_{wc} の比が、単純にクラスタ長さ L_{sc} と通常ホイールの円周の比に等しいとすると、

$$\frac{L_w}{L_{wc}} = \frac{\pi d_s}{L_{sc}} \quad (8)$$

の関係がある。ここで、 $d_s = 206 \text{ mm}$ を代入すると、

$$L_w = \frac{3.14 \times 206 \text{ mm}}{3 \text{ mm}} L_{wc} = 215.6 L_{wc} \quad (9)$$

Fig.6 Relationship between radial wheel wear ΔR and grinding length L_w in grinding with corresponding complete wheel ($d_s = 206 \text{ mm}$, $a = 15 \text{ } \mu\text{m}$, $v_s = 33 \text{ m/s}$, $C_d = 1.6 \text{ mm}^{-2}$, $r = 25$, $g_{max} = 1.25 \text{ } \mu\text{m}$, $v_w = 2.9 \sim 4.4 \text{ m/min}$)

となり、クラスタ試験は 215.6 倍の加速試験であることがわかる。例えば、クラスタ試験での研削距離 $L_w=1800 \text{ mm}$ は、通常ホイールでの研削距離 $L_{wc}=388 \text{ m}$ に相当する。M. C. Shaw らは、このような対応する研削距離におけるクラスタホイールの平均砥粒切れ刃半径摩耗 ΔR_c と通常ホイールでのホイール半径摩耗 ΔR とがよく一致することを明らかにしている⁷⁾⁹⁾。そこでここでも同様に、 ΔR_c が ΔR に相当すると考え、これらの値を(7)式より変換した研削距離 L_w に対して示すと図 6 のようになる。この結果は、既報で報告した通常ホイールによる研削実験の結果とほぼ同様の傾向を示している⁹⁾。

3.2 砥粒切れ刃の摩耗形態に及ぼす組織均一化の影響

従来クラスタホイールを用いた研削過程におけるホイール作用面の SEM 観察例を図 7(a) に示す。ホイールの回転方向は SEM 像上で下から上である。ドレッシング直後の作用面には A や B 部のように気孔が多くみられる部分と C や D 部のようにボンドが多くて気孔が少ない部分が混在している。気孔の多い部分では、研削の初期に砥粒 a や b のように破砕や脱落が生じやすい。また砥粒 a の破砕後、それに隣接する砥粒 d や c が $L_w = 600 \sim 1200 \text{ mm}$ の間で脱落している。さらに、 $L_w = 1200 \sim 1800 \text{ mm}$ の間で砥粒 e が欠落している。このようにボンドが少なく気孔が多い部分では、一つの砥粒の破砕や脱落がその周辺の砥粒の破砕や脱落を誘発し、局所的な摩耗を生じさせ、これはやがてホイール作用面全体の摩耗へと発展するものと考えられる。気孔の多い部分では、例えば、砥粒 b や c のように、砥粒の地肌が一部表面に現れている場合が多くみられ、ボンドによる砥粒保持力が低い状態にあることがわかる。同時に、砥粒間隔が広いため有効切れ刃間隔が大きくなって切れ刃への負荷が大きくなり、この結果砥粒の脱落や破砕が生じやすい状態にあるものと考えられる。なお、このような脱落や破砕と並行して、砥粒 f や g の例のように、切れ刃先端付近では摩滅や微小な破砕が生じているのが確認される。一方、C や D 部のようなボンドが多くて気孔が少ない部分では、目づまりの発生がみられる。このような気孔の少ない部分では、ボンド表面と工作物表面が接触しやすいので切れ刃が工作物表面に慣入しにくく、また切りくずが流出しにくくなるので目づまりが生じやすくなるものと考えられる。

図 7(b) は、均一クラスタホイールを用いた場合の作用面

Fig.7 Sequential SEM images of wheel working surface with increasing grinding length L_{wc} (R: Releasing, L: Loading, F: Fracture, MF: Micro fracture)

の観察例である。 $L_{wc}=0\sim600$ mmの研削初期では、ボンド部の摩耗や破砕により気孔が開いたり、砥粒が表面に突出するようになる状況が把握される。従来ホイールの場合と同様に、気孔の多い部分では砥粒aのような初期破砕する砥粒が一部みられるが、従来ホイールほど頻繁には生じていない。また一部目づまりもみられるが、その後の研削過程で消滅している。 $L_{wc}=600\sim1200$ mmの間では砥粒b, c, dなどの先端に微少破砕や摩滅摩耗がみられ、また砥粒eやhのような脱落する砥粒も一部みられる。さらに、 $L_{wc}=1200\sim1800$ mmの間では砥粒b, c, fのような破砕・脱落する砥粒とともに、gのような微小破砕する砥粒もみられる。このように、従来ホイールの場合と同様、摩滅摩耗、破砕および脱落が並行して生じるが、従来ホイールに比べて破砕の規模が小さく、脱落の割合も少ないことが確認される。また、局所的な目づまりの発生も従来ホイールの場合より

少ない傾向にある。

従来ホイールに比べて、均一ホイールでは、砥粒切れ刃が均一に分布しているため、個々の切れ刃への負荷がより均一に分散しやすい。このため、一部の砥粒切れ刃に大きな負荷がかかって局所的な破砕や脱落が起きることが少ないと考えられる。すなわち、個々の砥粒切れ刃の摩耗が均一に進行する。前述した砥粒半径摩耗 ΔR_{ci} のばらつきが、従来ホイールよりも均一ホイールにおいて少なくなるのは、おもにこのような組織の均一化によってもたらされる砥粒切れ刃摩耗の均一化によるものであることが確かめられた。

3.3 砥粒切れ刃分布に及ぼす組織均一化の影響

以上のように、研削の進行とともに砥粒切れ刃が摩耗し、ホイール作用面の形態が漸次変化する。この実態を定量的に把握するため、図7(a)および(b)の一部を3次元像で捉えてみた。その代表的な例を図8に示す。同図(a)は図7(a)のP部を、同図(b)は図7(b)のQ部をおのおの示している。ただし、観察視野の中で最も高い切れ刃先端を原点とし、これよりホイール半径方向に深さ $30\mu\text{m}$ までの範囲を表示している。図中の砥粒記号は図7と対応しているので、これらの図を対比してみると砥粒の破砕や脱落等による切れ刃の形状および分布の変化を把握することができる。いずれの場合も、研削の進行とともに砥粒切れ刃が減少しているのが明らかに捉えられる。

そこで、これらの3次元データを用いてホイール作用面の切れ刃密度を求め、研削進行に伴う砥粒切れ刃分布の推移を評価した。クラスタホイールの最外周面からの深さ z までの範囲に存在する砥粒切れ刃数を測定し、 z に対する累積切れ刃密度(静的) C_s として示すと図9のようになる。従来クラスタおよび均一クラスタホイールともに、切れ刃密度は研削距離の増加とともに漸次減少している

が、均一ホイールの切れ刃密度は研削過程を通して常に従来ホイールの場合より高く、切れ刃がより密に分布していることがわかる。すなわち、均一ホイールはドレッシング直後から研削過程を通して従来ホイールよりも高い切れ刃密度を維持する能力を備えていることを示している。

このように、組織の均一化を図ることによって、研削中個々の砥粒切れ刃に作用する負荷が均一に分散ようになるので、個々の切れ刃の摩耗が均一に生じるようになり、この結果研削過程を通して高い切れ刃密度を維持するようになることが確かめられた。実ホイールを用いた研削において、組織の均一化が研削過程での仕上面粗さの増大率を抑制し、ホイール寿命を延長する効果があることを示したが⁹⁾、このことはおもに、このような組織の均一化によりもたらされる作用面上の砥粒切れ刃の高密度化とその維持能力の向上に起因するものと考えられる。

Fig.8 Change in 3-dimensional profile of wheel working surface with increasing grinding length L_{wc}

4. 結 言

cBN ホイールの研削性能に及ぼす組織の均一化の影響を明らかにする目的で、cBN クラスタ研削試験を試み、cBN 砥粒切れ刃の摩耗、およびそれに伴う切れ刃の分布や形状の変化などの切れ刃挙動に及ぼす組織均一化の影響について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 均一クラスタホイールによる研削では、従来クラスタホイールを用いた場合に比べて、砥粒切れ刃の半径摩耗 ΔR_{ci} のばらつきがほぼ 1/2 に減少し、同時に平均砥粒切れ刃半径摩耗 ΔR_c が約 2/3 に減少する。これより、ホイール組織の均一化は作用面上の個々の切れ刃の摩耗のばらつきを抑制するとともに、作用面全体の摩耗を軽減する効果があることが確かめられた。
- (2) ホイール作用面上で、気孔が多すぎる部分では砥粒の破碎や脱落が生じやすく、気孔の少なすぎる部分では目づまりが発生しやすい。ホイール組織の均一化は、このような局所的な摩耗や目づまりの発生を抑制する効果をもたらす。
- (3) ホイール組織の均一化は、ホイール作用面上の砥粒切れ刃の高密度化をもたらし、同時に研削過程を通して高い切れ刃密度を維持する能力を向上させる。

参 考 文 献

- 1) J. Webster and M. Tricard: Innovation in Abrasive Products for Precision Grinding, *Annals of the CIRP*, **53**, 2 (2004) 597.

Fig.9 Change of cumulative cutting edge density distribution with increasing grinding length L_{wc}

- 2) D. J. Stephenson, T. Jin and J. Corbett: High Efficiency Deep Grinding of a Low Alloy Steel with Plated cBN Wheels, *Annals of the CIRP*, **51**, 2 (2002) 241.
- 3) V. Varghese, C. Guo, S. Malkin and G. Xiao: Energy Partition for Grinding of Nodular Cast Iron with Vitrified CBN Wheels, *Mach. Sci. Technol.*, **4**, 2 (2000) 197.
- 4) M. P. Hichiner and S. B. McSpadden: Evaluation of factors Controlling CBN Abrasive Selection for Vitrified Bonded Wheels, *Annals of the CIRP*, **54**, 1 (2005) 277.
- 5) Y. Ichida and K. Kishi: The development of Nanocrystalline cBN for Enhanced Superalloy Grinding Performance, *ASME J. of Manuf. Sci. and Eng.*, **119**, 1(1997) 110.
- 6) 梶野 仁, 市田良夫, 佐藤隆之介, 木南宏隆, 星野和友, 佐藤政和: 組織の均一化に基づく高性能ビトリファイド cBN ホイールの開発研究, *精密工学会誌*, **70**, 1 (2004) 149.
- 7) K. V. Kumar and M. C. Shaw: A New Method of Characterizing Grinding, *Annals of the CIRP*, **28**, 1 (1979) 205.
- 8) K. Kishi and Y. Ichida: Electron Microfractography of Cutting Edges of Borazon CBN Abrasives, *Proc. of the 20th Japan Congress Materials Research*, (1977) 142.
- 9) M. C. Shaw: *Principles of Abrasive Processing*, Oxford University Press, (1996) 96.
- 10) S. Malkin: *Grinding Technology -Theory and Application of Machining with Abrasives-*, Ellis Horwood Ltd and John Wiley & Sons, (1989) 61.
- 11) 中山一雄, M.C.Shaw: 研削仕上面のあらさ, *日本機械学会論文集* **37**, 293 (1971) 178.