

cBN ホイールの作用面制御と高能率鏡面研削

宇都宮大学大学院工学研究科 市田良夫

1. はじめに

鏡面の創成を目的とした仕上げ研削では一般に、ミクロンサイズの微細な砥粒が広く用いられている¹⁾²⁾。このような微細な砥粒による研削では、多数の微小切れ刃による極微細な単位での除去作用が行われるため高品位の鏡面を創成することが可能であるが、反面能率が低いことやホイール寿命が短いなどの問題を抱えているのが現状である。その解決策の一つとして、精密なドレッシングを行った粗粒の研削ホイールを用いることによって鏡面研削の高能率化・長寿命化を図る試みがなされている³⁾⁻⁵⁾。しかし、高品位化と高能率化を同時に実現していくためには解決すべき多くの課題が残されているのが実状である。著者らは、粗粒のcBNホイールを微粒のダイヤモンドドレッシングを用いて微小送り、微小切込みの条件下でドレッシングを行うマイクロドレッシング法を提案し、その鏡面研削への効果について検討してきた⁶⁾⁷⁾。

本講では、このマイクロドレッシングを用いてcBNホイール作用面を制御する方法について述べるとともに、鏡面仕上げへの応用とその高能率化の可能性について検討した結果について報告する。

2. マイクロドレッシングによるホイール作用面の制御法

本研究で提案するマイクロドレッシング法の手順を図1に示す。まず、粒度#40のロータリダイヤモンドドレッサ(SD40Q75M)による予備ドレッシングを行い、その後主軸に取付けた粒度#1200の微粒ダイヤモンドドレッサ(SD1200J100M)により微小切込み、微小送りの条件下でマイクロドレッシングを行う。予備ドレッシングは、マイクロドレッシングをより単純な操作で、かつ安定して行えるようにするための前処理工程で、ホイール外周の振れを減少させ、同時に砥粒先端の高さをより均一に揃えることを目的としている。一方、マイクロドレッシングは、作用面上に並ぶ個々の砥粒の先端をわずかに除去し、予備ドレッシングで修正できなかったホイールの微小な振れおよび砥粒先端の不揃いをなくし、同時に砥粒の先端を平坦化する、つまり平坦な切れ刃を形成することを目的に行う。

ドレッシング中、ドレッサ作用面上のダイヤモンド砥粒切れ刃は、図2に示すように、cBN砥粒に対して角度 θ で進入する。ダイヤモンドドレッサの周速度 v_d とcBNホイールの周速度 v_s の比を速度比 $S_r = v_d/v_s$ とすると、進入角 θ は幾何学的に、 $\cos \theta = (1 - S_r A)/(1 + S_r^2 - 2 S_r A)^{1/2}$ で与えられる⁷⁾⁸⁾。ただし、 $A = 2[(d_s + d_d)/2 - a_d]^2 - (d_s/2)^2 - (d_d/2)^2 / (d_s d_d)$ 、 d_s :

cBNホイールの直径、 d_d : ダイヤモンドドレッサの直径、 v : 相対速度、 a_d : ドレッサ切込みである。本研究では、多くの基礎実験結果を踏まえて、予備ドレッシングでは S_r を 0.1 ($=0.057^\circ$) とし、さらにマイクロドレッシングでは S_r を 0.01 ($=0.007^\circ$) と小さく設定した。すなわち、マイ

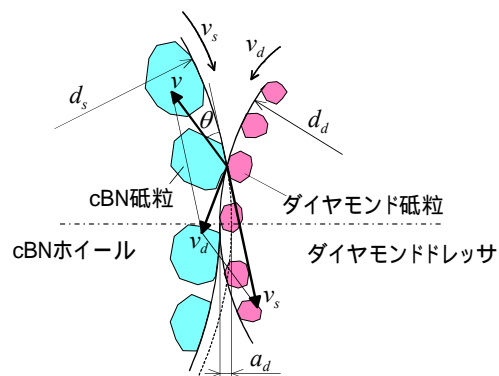


図2 ドレッシングにおけるダイヤモンド砥粒切れ刃の作用

表1 ドレッシング条件

cBN ホイール	cBN120O200V ($\phi 305 \times t16$ mm)
ホイール周速度	v_s 60 m/s
クーラント	ソリュブルタイプ 2% 液
予備ドレッシング ドレッサ	SD40Q75M($\phi 100 \times t1$ mm)
ドレッサ周速度	v_d 6 m/s
速度比	S_r 0.1
送り速度	f_d 0.05 mm/rev
ドレッサ切込み	a_d 2 μ m \times 2 回 (半径切込み)
マイクロドレッシング ドレッサ	SD1200J100M ($\phi 80 \times t3$ mm)
ドレッサ周速度	v_d 0.6 m/s
速度比	S_r 0.01
送り速度	f_d 0.05 mm/rev
ドレッサ切込み	a_d 2 μ m \times 1 回 (半径切込み)

表2 研削実験条件

研削方法	円筒プランジ研削 上向き研削
研削ホイール	cBN120O200 V 形状: $\phi 305 \times t16$ mm
ホイール周速度	v_s 60 m/s
工作物速度	v_w 0.25 m/s (63.66 rpm)
プランジ速度	v_p 0.53 ~ 3.18 μ m/s
ホイール切込み	a 0.5 ~ 3 μ m/rev
研削除去率	Z' 0.125 ~ 0.75 mm ³ /mm ² ·s
研削時間	60 s (スパークアウト: 12 s)
研削液	ソリュブルタイプ 2% 液
工作物	軸受鋼 SUJ2 (硬さ: HRC61) 形状: $\phi 80 \times t5$ mm

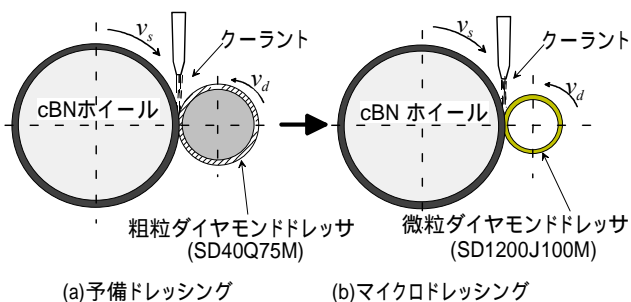


図1 マイクロドレッシングの原理

クロドレッシングでは, はほとんど0であるから, ドレッサ上のダイヤモンド切れ刃がほぼcBNホイールに対してその接線方向に作用することになる. 本実験で用いたcBNホイールとドレッサの仕様, およびドッシング条件をまとめて表1に示す. なお, 予備およびマイクロドレッシングともに, ドレッサの接触開始位置をAE信号により検出後, 静電容量型変位センサを用いて設定切込み a_d を与えた.

さらに, ドレッシングにより調整したcBNホイールの研削性能を評価するため, 表2に示す条件下で, 円筒プランジ研削方式による研削実験を行った. 工作物として, おもに軸受鋼SUJ2 (焼き入れ・焼戻し処理材, 硬さ61HRC) を用いた.

3. マイクロドレッシングによる切れ刃形成機構

cBNホイールと同一形状を有するアルミニウム製円盤の外周部にcBNホイールから切出したcBNクラスタ(作用面の面積: $10 \times 10 \text{ mm}$)を固定し, この円盤を砥石軸に取り付けて回転させてその作用面のドレッシングを行い, ドレッシング後の作用面および切れ刃の形態をマルチプローブSEMにより観察した. 結果の代表的な一例を図3に示す. 同図(a)は予備ドレッシング後の作用面の観察例で, 通常のドレッシングに比べてかなり平坦な切れ刃が形成されているのがわかる. 同図(b)は図(a)の作用面をさらにマイクロドレッシングを行い観察した結果である. 両図の比較から, 予備ドレッシング後の砥粒先端部がマイクロドレッシングによりわずかに除去され, 作用面が全体的にさらに平坦化されている状況が観察される. 特に, マイクロドレッシングにより砥粒先端の平坦面の面積が増加し, 同時に砥粒先端の高さの不揃いが低減している状況が把握される. このような3次元データを用いて, 予備ドレッシング後およびマイクロドレッシング後のホイール作用面上

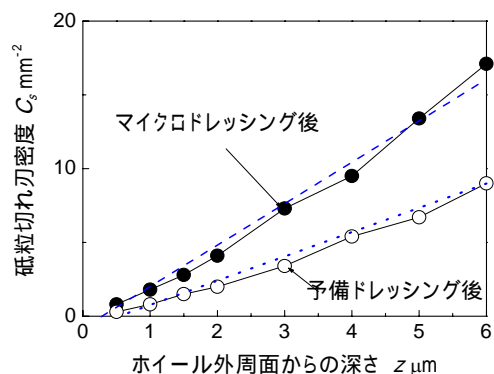
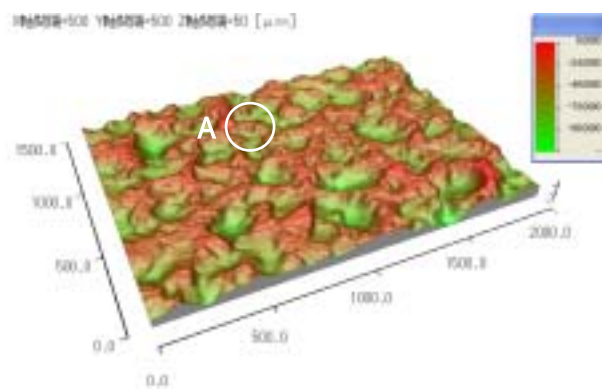


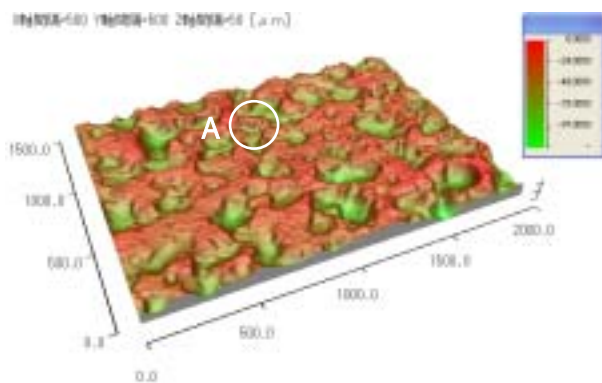
図4 予備およびマイクロドレッシング後のホイール作用面の砥粒切れ刃分布

の砥粒切れ刃分布を求めた. 代表的な結果を図4に示す. これは, 任意に選んだ $1500 \times 2000 \mu\text{m}^2$ の視野10箇所以上で測定した結果の平均値をホイール外周面からの深さ z に対してプロットしたものである. マイクロドレッシングを行うことによって切れ刃密度が予備ドレッシング後のほぼ2倍に増加し, 同時にホイール最外周近傍に存在していた極少数の突出した切れ刃が除去されているのが把握される.

次に, 図3中の代表的な砥粒Aをさらに高倍率で観察した結果を図5に示す. 砥粒切れ刃先端がマイクロドレッシングによりわずかに除去され, 予備ドレッシング後よりもさらに平滑な表面へと変化している. また, 予備ドレッシング後 $0.8 \mu\text{m} \sim 1.2 \mu\text{m}$ あった切れ刃先端面の凹凸はマイクロドレッシング後 $0.5 \mu\text{m}$ 以下に減少している.

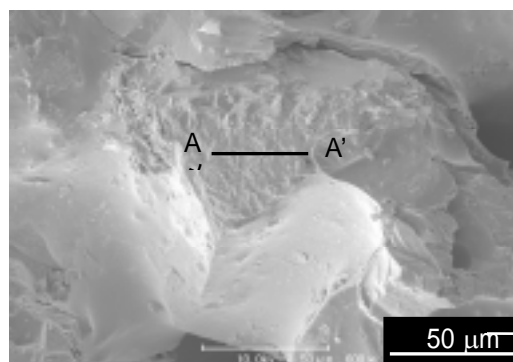


(a) 予備ドレッシング後の作用面

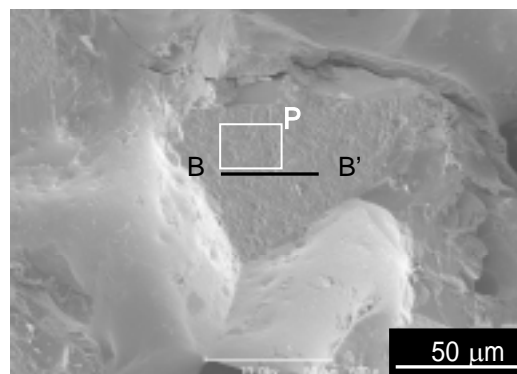


(b) マイクロドレッシング後の作用面

図3 マイクロドレッシングによるホイール作用面の変化

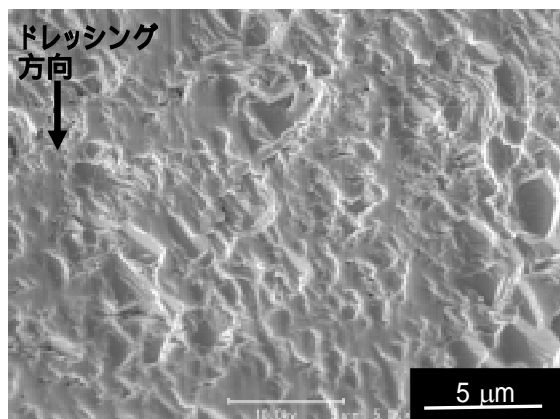


(a) 予備ドレッシング後

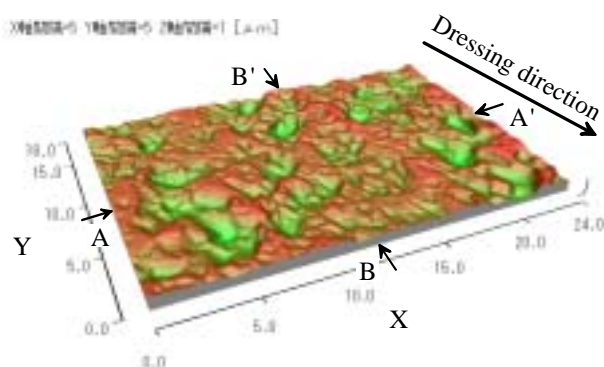


(b) マイクロドレッシング後

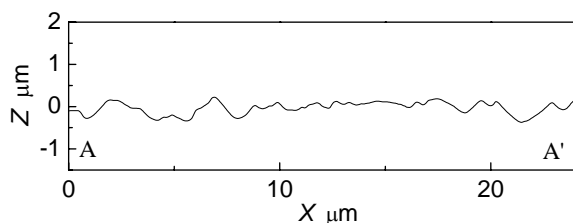
図5 マイクロドレッシングによる砥粒切れ刃先端の変化(図3の砥粒A)



(a) 図 5 P 部の高倍率 SEM 像



(b) (a)の3次元像



(c) AA'断面プロファイル

図 6 切れ刃先端面 (図 5 P 部) の高倍率観察

マイクロドレッシング後の平坦部 (P 部) をさらに高倍率で観察すると図 6(a) のようになる。切れ刃表面には平滑な部分と無数の微小な窪みが混在しているのが確認される。平滑な部分はドレッサ表面上のダイヤモンド砥粒切れ刃の擦過によりおもに延性的に変形, もしくは除去されて形成されたものと考えられる。一方, 無数の微小な窪みは, その表面にへき開段などの脆性破面の形態がよくみられることから, 切

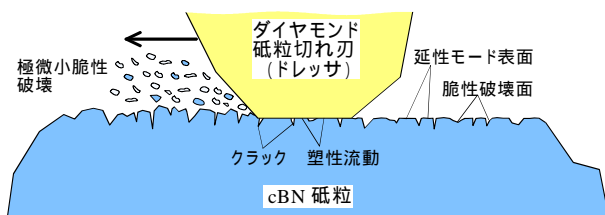


図 7 マイクロドレッシングによる切れ刃の形成機構

れ刃の極表面層部の微小脆性破壊によって起こる表面マイクロチップングと考えられる。図 7(a) の 3 次元像と断面プロファイルの例を図 6(b) と (c) に各々示す。表面マイクロチップングは, 深さが 0.5 μm 以下の微細な凹凸を形成していることがわかる。

以上のような砥粒切れ刃の形態に関する多くの観察結果を基に, 微粒ダイヤモンドドレッサによる cBN 砥粒切れ刃の形成メカニズムを模式的に示すと図 7 のようになると考えられる。すなわち, ダイヤモンド砥粒切れ刃は cBN 砥粒切れ刃の表面層を極微小破壊によりわずかに除去しながら, 同時に逃げ面の擦過による塑性流動, すなわち押しならし作用により平滑部を形成するものと考えられる。

4. 仕上面生成に及ぼすマイクロドレッシングの影響

図 8 は, 予備ドレッシングのみを行ったホイールと予備ドレッシング後さらにマイクロドレッシングを行ったホイールを用いて得られた仕上面の粗さを比較したものである。予備ドレッシング後約 0.55 μm Rz であった粗さが, マイクロドレッシングを行うことにより約 0.3 μm Rz に減少するのがわかる。一方, 研削抵抗は, 図 9 に示すように, 予備ドレッシングのみを行ったホイールによる場合よりも予備ドレッシング後さらにマイクロドレッシングを行ったホイールを用いた場合の方が大きくなる。これはおもに, マイクロドレッシングにより砥粒先端が平坦化し, 同時に切れ刃密度が増加したことによりもたらされるものである。

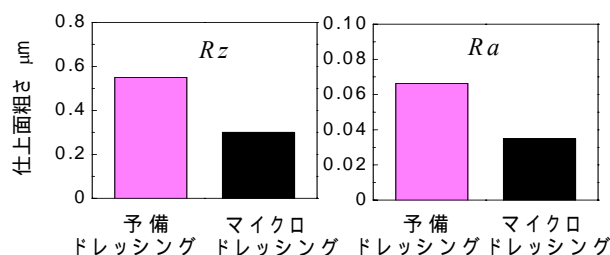


図 8 予備ドレッシングおよびマイクロドレッシング後のホイールにより得られた仕上面粗さの比較 (ホイール切込み $a = 1 \mu\text{m}/\text{rev}$, 他は表 2 と同一条件)

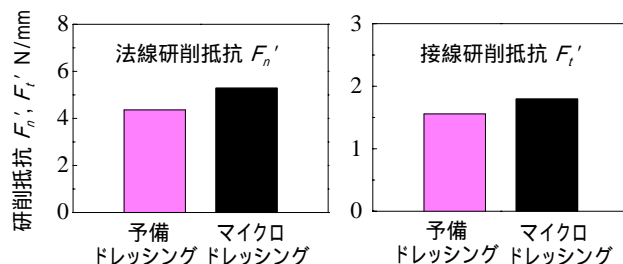


図 9 予備ドレッシングおよびマイクロドレッシング後のホイールを用いて研削したときの研削抵抗の比較 (図 8 と同一条件)

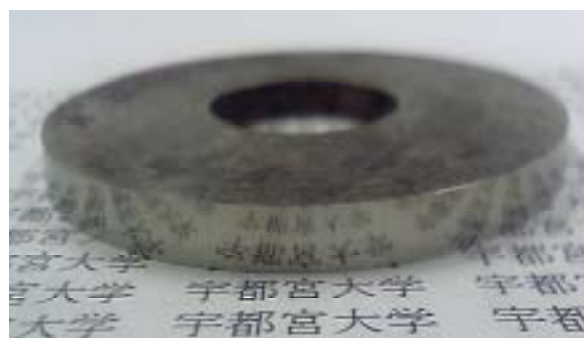


図 10 仕上面の鏡面状態 (図 8 と同一条件)

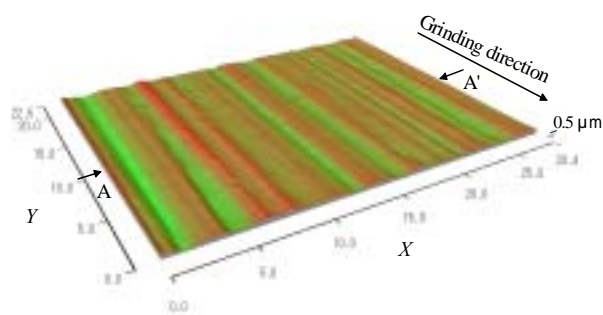


図 11 仕上面の SEM 像 (図 8 と同一条件)

図 10 はマイクロドレッシング後のホイールを用いて得られた代表的な仕上面の観察例で, 光沢のある鏡面が得られているのがわかる。この仕上面の SEM 観察例を図 11 に示す。0.28 μm ~ 0.3 μm Rz のスクラッチのない平滑な仕上面が得られている。

仕上面の断面組織を観察した結果, 組織の変化はほとんどみられず, また加工層の硬さも母材硬さとほとんど変化していないことが確認された。さらに, 表面品位を評価するため, 加工層の残留応力を X 線応力測定装置 (理学電機, PSCP) を用いて測定した。研削方向に測定した結果の代表的な例を図 12 に示す。表層から約 20 μm の深さまでに大きな圧縮応力が生じている。表面の応力は 500 MPa に達しているが, これはおもに平坦化した切れ刃によるバニシ作用により生じるものと考えられる。

5. 鏡面研削の高能率化

仕上面粗さに及ぼすホイール切込みの影響を図 13 に示す。切込みが 2 $\mu\text{m}/\text{rev}$ を超えると抵抗が急増しはじめ, 同時に粗さも増大するようになる。前述したように, 砥粒切れ刃の表面には 0.5 μm 以下の微細な凹凸が存在するが, 切れ刃の先端形状は全体として平坦であり, このため研削抵抗は砥粒切込み深さの変化に影響されやすく, その結果ホイール切込みがある値を超えると急増するようになるものと考えられる。また, この抵抗の増加は, 切れ刃先端の微細な凹凸が仕上面に転写されるときに盛り上がり (サイドフロー) を生じやすく, その結果仕上面粗さを大きくする働きをしているものと思われる。図 13 に示すように, 単位時間・単位研削幅当たりの除去量, つまり研削除去率 Z' で表すと, 0.3 μm Rz 以下の仕上面を得ることができる境界の除去率が約 0.5 $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ であることを意味している。粒度 # 1000 ~ 3000 の微粒ホイールを用いて鏡面研削を行う場合¹²⁾, 研削除去率 Z' は通常 0.05 $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ 以下であるから, 図 13 の結果は, それより一桁以上高い能率で鏡面創成が可能であることを示している。

さらに, 新しい cBN 砥粒の適用や加工条件の最適化を図ることにより高能率化の可能性を見いだすことができる⁹⁾。

6. おわりに

粗粒のビトリファイド cBN ホイールを微粒のダイヤモンドドレッシングを用いて微小切込み・微小送りの条件下でドレッシングを行うマイクロドレッシング法を提案し, そのドレッシングのメカニズムについて追究するとともに, 仕上面生成に及ぼすマイクロドレッシングの効果について検討した。得られた結果を要約すると, 以下になる。

- (1) マイクロドレッシングにより, 平滑な延性モード面と深さ 0.5 μm 以下の微小な表面マイクロチップングから構成された平坦な切れ刃が形成される。
- (2) マイクロドレッシングによる平坦な切れ刃の形成は, 主にドレッシング作用面上の微粒ダイヤモンド切れ刃による cBN 砥粒先端の極微

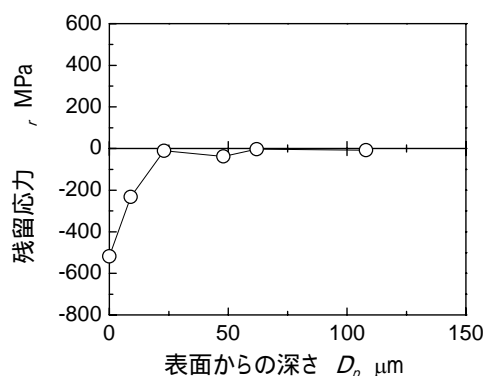


図 12 加工表面層の残留応力分布 (図 8 と同一条件)

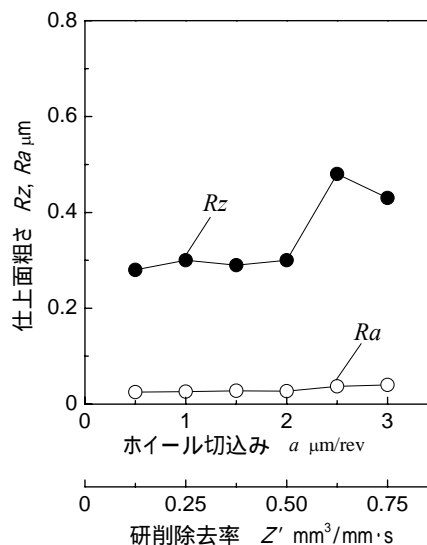


図 13 仕上面粗さに及ぼすホイール切込みの影響 (ホイール切込み a を除き表 2 と同一条件)

小脆性破壊, および切れ刃逃げ面による cBN 砥粒表層部の塑性流動作用に基づいて行われる。

- (3) マイクロドレッシングにより調整された粒度 # 120 の粗粒 cBN ビトリファイドホイールを用いることによって, Rz で 0.3 μm 以下の粗さと加工層表面部に高い圧縮残留応力を有する鏡面を, 0.5 $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ の研削除去率で創成することが可能である。

参考文献

- 1) Y. Ichida, K. Kishi and H. Sato: Nanotopography of Ultraprecise Ground Surface of Fine Ceramics using Atomic Force Microscope, Annals of the CIRP, 42, 1(1993) 647.
- 2) 和嶋, 庄司, 厨川, 森, 鈴木: 極微粒ダイヤモンドホイールによる高速度鋼の円筒鏡面研削, 砥粒加工学会誌, 43, 7 (1999) 327.
- 3) 山倉, 田村, 樹田: メタルボンド砥石を用いたぜい性材料の延性モード研削, 精密工学会誌, 61, 1 (1995) 147.
- 4) 鈴木, 阿部, 難波: メタルボンドダイヤモンド砥石によるガラスセラミックスの延性研削, 精密工学会誌, 63, 4 (1997) 535.
- 5) X. Kang, J. Tamaki, A. Kubo: Effect of Cutting Edge Truncation on Ductile-Regime Grinding of Hard and Brittle Materials, Int. J. Manufacturing Technology and Management, 8, 1/2, 51, 5 (2006) 183.
- 6) 市田, 上野, 森本, 佐藤, 清水: cBN ホイールのマイクロドレッシングに関する研究, 50, 4 (2006) 211.
- 7) 市田, 佐藤, アクバリ: cBN ビトリファイドホイールのマイクロドレッシングによる切れ刃形成機構, 53, 4 (2009) 236.
- 8) 趙, 庄司, 厨川, 周: レジンボンド cBN ホイールのツルイーグングに関する研究, 日本機械学会論文集, C, 62, 601 (1996) 3725.
- 9) Y. Ichida et al.: High-Efficiency Mirror Grinding using Ultrafine-Crystalline cBN Grains, Proc. of euspen Int. Conf., Zurich, 1 (2008) 68.