研究論文

cBN エンドミル工具による鉄系材料の鏡面加工（第 2 報）

平石　誠[*]　宮口　孝司[**]　宮口　弘明[***]　石川　淳[****]　斎藤　博[*]

Mirror-like Milling of Hardened Steel with CBN Ball Endmill

HIRAISHI Makoto[*], MIYAGUCHI Takashi[**], MIYAGUCHI Hiroaki[***], ISHIKAWA Atsushi[****] and SAITO Hiroshi[*]

抄　録

焼入鋼の鏡面加工に cBN（立方晶窒化ホウ素）ボールエンドミルによる三次元曲面を適用することを目的として工具の切れ刃にスカイフ盤研磨を施した。潤滑条件を検討した結果，切削油を用いた加工では工具逃げ面に凝着摩耗を生じたが，ドライ加工では凝着が抑制され，切削面粗さは小さくなった。直径 1mm の小径ディンプルの加工では，形状偏差および切削面粗さは市販ボールエンドミルを用いた場合と比較して大幅に改善された。

1.　緒　　言

成形用金型では，焼入鋼の表面を鏡面に仕上げる必要がある。現在は熟練者の手作業により研磨仕上げを行っているが，作業に長時間を要するうえ，精密微細金型では加工面の精度低下も懸念されることから，仕上げ研磨工程の削減を目的として直彫り鏡面加工技術の確立が望まれている。

cBNはダイヤモンドに次ぐ硬さを有しており，cBN工具により焼入鋼を高能率に切削することが可能である[1) 2)]。特にバインダレスcBN工具は，機械的特性を低下させるバインダを含まないことから，1000℃の高温においても1.5GPaを超える抗折強度を示し[3)]，また，化学的に安定した特性を持っている。このため，鋭利な切れ刃を形成しても充分に使用に耐え得ることが指摘されている[4)]。

前報[5)] では，切れ刃をスカイフ盤研磨した工具を用いることにより，焼入鋼の切削面におけるバリの発生が抑制され，表面粗さが改善されることを報告した。本報では，スカイフ盤研磨工具を用いて平面加工した場合の潤滑条件が切削面粗さにおよぼす影響について調べ，得られた加工条件をもとに三次元微細形状加工を行った結果について報告する。

*　　研究開発センター
**　　県央技術支援センター
***　　上越技術支援センター
****　　下越技術支援センター

2.　実験方法

2.1　切削工具および被削材

使用した工具は工具半径 R0.5mm のバインダレス cBN 製一枚刃ボールエンドミルである。一般にボールエンドミルの回転中心では切削速度が 0 になり正常な切削が行われない。そこで切れ刃先端に回転中心から 20μm の逃がしを設けた（図 1）。逃げ面およびすくい面にはスカイフ盤研磨を施した。切れ刃部の SEM により観察したのが図 2

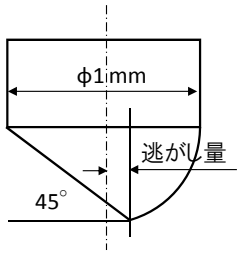


図 1　工具形状

表 1　加工条件

	平面加工	三次元加工 （小径ディンプル加工）
主軸回転数	50,000 min^{-1}	
送り速度	150 ㎜/min	150 ㎜/min（スパイラル）
ピックフィード(Pf)	3μm（ダウンカット）	3μm（ダウンカット）
軸方向切込み	3μm	
主軸角度（θ）	加工面法線に対し 0°，20°	ディンプル中心軸に対し 0°
潤滑条件	白灯油，ドライ	ドライ
切削距離	～30m（主軸中心の移動距離）	――――

である。図には比較のためにスカイフ盤研磨を施していない工具も示す。スカイフ盤研磨により逃げ面，すくい面ともに平滑になり，切れ刃稜線が鋭利に仕上げられている。

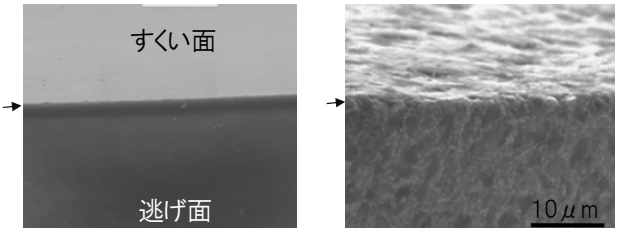
図 3 は切れ刃の輪郭形状の測定結果である。逃げ面の切れ刃稜線近傍を稜線と平行な方向に測定した。縦軸は最適化された真円に対する形状偏差であり，横軸の測定範囲は回転中心から約 45°の範囲に相当する。スカイフ盤研磨を施した工具の切れ刃輪郭の形状偏差は P-V 値 0.25μm, 表面粗さは最大高さ Rz0.08μm である。なお，同研磨を施していない工具の場合，形状偏差 1.41μm，表面粗さ Rz0.70μm であった。

被削材には焼入鋼（日立金属(株)HPM38，硬さ：HRC52）を用いた。被削面には事前に研削加工を施し，Rz1.0μm に仕上げた。

加工機にはエアスピンドルを搭載した超精密加工機（ファナック(株)ROBONANO α-0iA）を使用した。

加工実験は，まず平面加工における潤滑条件の検討を表 1 の条件で行った。主軸回転数と送り速度から，一刃あたりの送り量は 3μm となる。以下の三次元ディンプル加工で使われる切れ刃の位置を考慮し，主軸角度（以下，θ）を設定した。また，切削距離は主軸中心の移動距離とし，ディンプル約 100 個分の加工距離に相当する 30m まで実験を行った。

次に，図 4 に示す平底面を持つ φ1mm の小径ディンプルの加工を行った。別工具による粗加工



使用工具（スカイフ研磨）　（比較）未研磨工具

図 2　作製した工具の切れ刃の状態

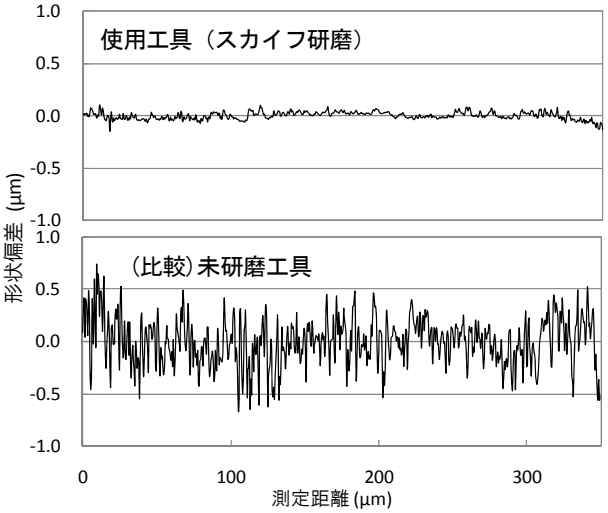


図 3　切れ刃の輪郭形状

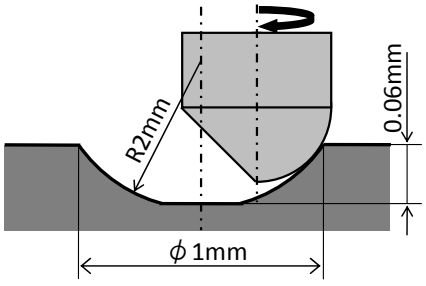


図 4　小径ディンプル

後，スカイフ研磨工具を用いて仕上げ加工を行った。主軸角度はディンプルの中心軸に対して 0°とし，ツールパプルの中心から外周に向けて半径が 3μm ずつ大きくなるスパイラル状とした。また，比較のため市販 cBN ボールエンドミル工具による仕上げも行った。同工具の切れ刃輪郭の形状偏差は±1.0μm である。

切削面の表面粗さは非接触三次元測定機（三鷹光機(株)NH-3SP，高さ方向分解能：0.001μm）を用いて最大高さ Rz（カットオフ：80μm，測定長：480μm）を測定した。測定方向はピックフィード（以下，Pf と記す）方向とした。

3. 実験結果と考察

3.1 主軸角度 0° における切削面

焼入鋼の切削における潤滑条件を検討するため，スカイフ研磨工具を用いて切削油使用下およびドライでの加工実験を行った。

図 5 に主軸角度が 0°のときの各潤滑条件における切削距離と切削面粗さの関係を示す。

切削油を使用した場合は，切削距離の増加とともに切削面の粗さは大きくなり，20m 付近では Rz0.29μm に達した。目視では図の A 領域において顕著な曇りが認められた。

ドライ条件では，切削距離 15m まで Rz0.1μm 以下となり，目視では回折にともなう発色のない鏡面が得られた。切削距離が 15m を超えると（同図 B 領域）表面粗さは急激に増加し，切削面には肉眼でもわかる傷が送り方向と平行に発生した。

表 2 は切削距離が 3m と 30m のときの切削面の状態である。

切削油を使用した場合，切削距離が短いときはトロコイド曲線状の切削痕が認められた。切削痕の幅は不安定である（図(a)）。切削距離が長くなるに従い切削痕の幅が大きくなり，図(b)のように多くのバリが観察される面になった。

ドライ条件の場合，3～15m では細く安定した切削痕により平滑な面が形成されていた（図(c)）。切削距離が 15m を超えると明瞭な切削痕が断続的に発生し始め，30m では表の図(d)に見られるよ

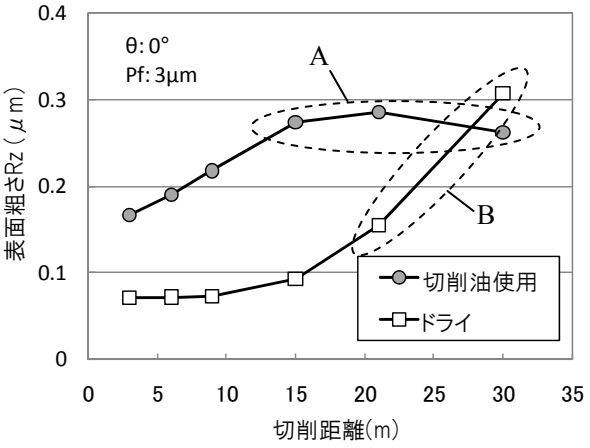
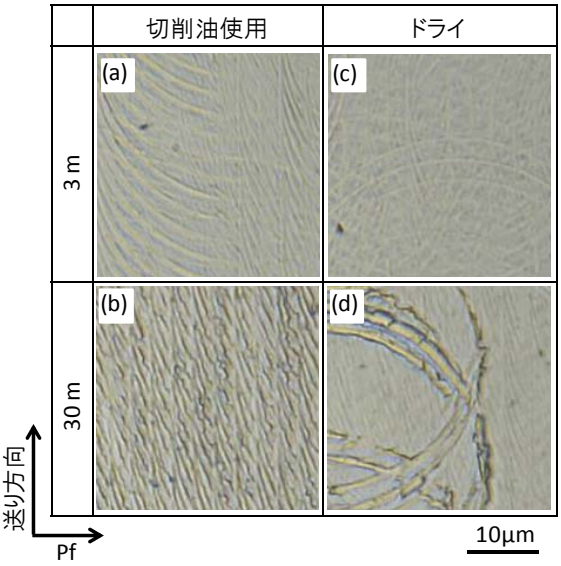


図 5 切削距離と切削面粗さの関係（θ：0°）

表 2 切削油を使用した場合とドライ加工での切削面の比較（θ：0°，Pf：3μm）



うな連続的で深い切削痕に発達した。図 5 において切削距離が長くなると急激に表面粗さが大きくなったのはこの深い切削痕の発達のためである。

表3にこのときの工具の逃げ面の状態をSEM観察した結果を示す。

切削油を使用した場合，逃げ面には一部切れ刃を覆い隠すほどの厚い付着物が観察された（図(a)，矢印の個所）。X 線マイクロアナライザー（EDX）による分析の結果，被削材の主成分である Fe および Cr が検出されたことから，被削材の凝着であると考えられる。

切削距離 30m では凝着幅が拡大している（図(b)）。同図の四角い囲い部分を拡大し，元素分布

を測定したのが図(c)である。切れ刃稜線近傍にはFeの分布がなく工具のcBN母材が露出しており，また，クラックも観察される。このことから，切削油を使用した場合には，凝着層の形成と凝着層が工具の材料とともに剥離することを繰り返し，凝着摩耗を生じたものと考えられる。そして，加工時には凝着による構成刃先によって切削がなされるために切れ味が低下し，表2の図(a)に見られるような不安定な摩耗痕および図(b)のようなバリを生じたものと思われる。

構成刃先の形成過程についてはさらに検討を要するが，切削油の使用により工具逃げ面に熱亀裂を生ずることに起因する，すなわち，熱亀裂を生じた箇所に被削材が噛み込まれ，これを起点として逃げ面への凝着を生じ，構成刃先の形成に至ったものと考えている。また，凝着面積の拡大は摩擦熱による温度上昇を生じ，さらに凝着を促進していることも推測される。

一方，ドライ条件においてはアブレシブ摩耗を主体とした摩耗形態となった（表3図(d)，(e)）。切削距離の増加とともに摩耗幅は拡大したが，図(e)に矢印で示した一部の個所を除き，上記のような厚い凝着は発生しなかった。すなわち，切削は工具の切れ刃によってなされていると考えられる。図6は採取した切り粉を観察したものである。工具が切り込みを開始したカールの部分の厚さは0.3μm 程度と観測され，鋭利な切れ刃による切削が行われたことが推察される。

ただし，ドライ加工においても切削距離が長くなると部分的に凝着が発生する。表 3 中の図(e)における四角い囲い部分を拡大したのが図(f)である。矢印の個所にある直径2μm程度の凝着塊は摩耗により生じた凹部に切り粉が堆積したものと推察され，表2の図(d)に見られた深い切削痕はこのような凝着塊により形成されたものであると考えられる。

以上のように，ドライ条件においては工具逃げ面の凝着が抑制される。これによって，工具摩耗が抑制され，また，鋭利な切れ刃による安定した切削が可能になったと考えられる。

表 3　切削油を使用した場合とドライ加工での工具逃げ面の比較（θ：0°，Pf：3μm）

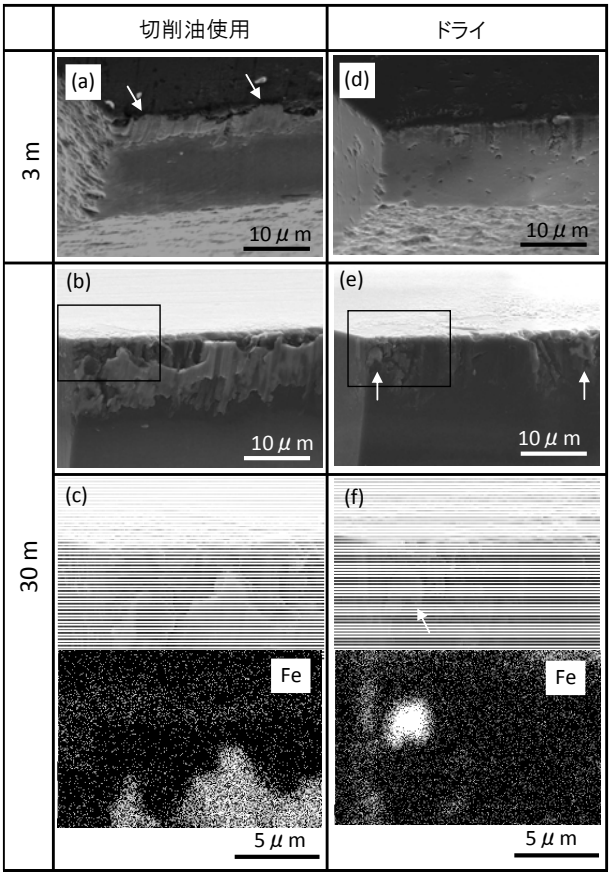


図 6　ドライ加工時に排出された切り粉

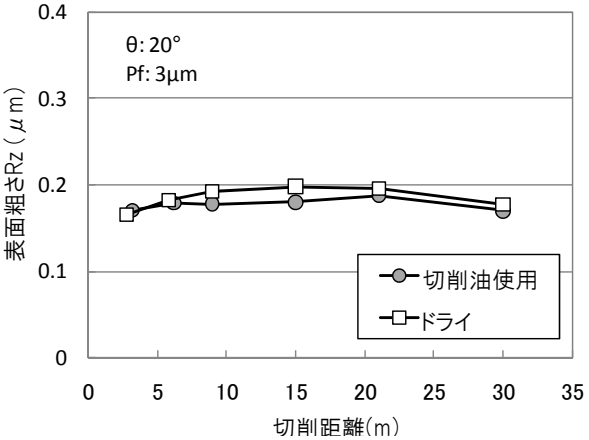


図 7　切削距離と切削面粗さの関係（θ=20°）

表 4　切削油を使用した場合とドライ加工での切削面の比較
（θ：20°，Pf：3μm，切削距離：30m）

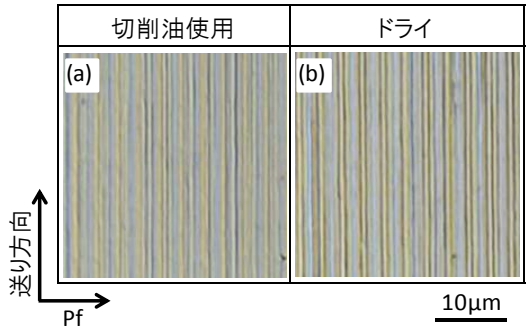
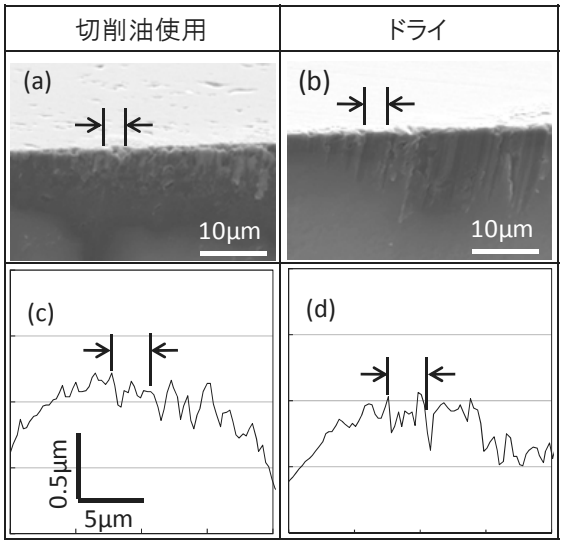


表 5　切削油を使用した場合とドライ加工での工具逃げ面の比較
（θ：20°，Pf：3μm，切削距離：30m）



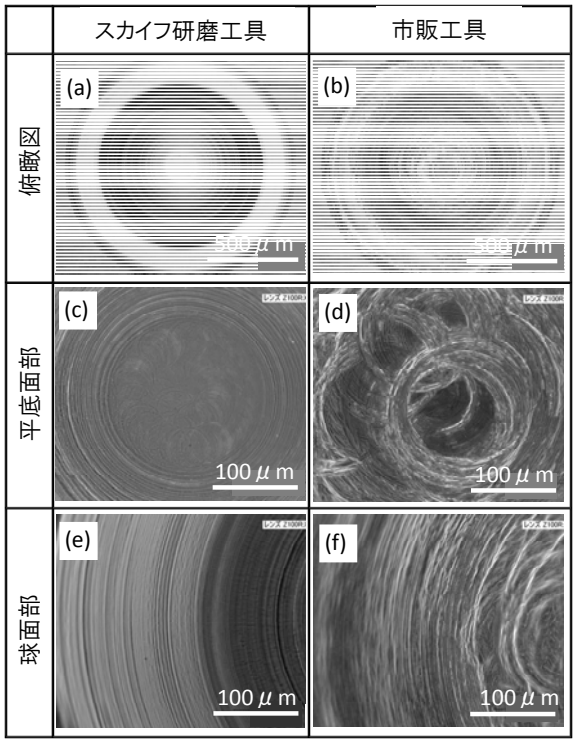
3.2　主軸を傾斜させたときの切削面

主軸角度を 20°傾斜させた場合について同様の検討を行った。図 7 に切削油使用下およびドライ条件での切削距離と切削面粗さの関係を示す。潤滑条件による差異は少なく，切削距離 3m から 30m にわたって Rz0.17～0.2μm で表面粗さがほぼ一定した切削面が得られた。

切削距離が 30m のときの切削面の状態を表 4 に示すが，潤滑条件による差異は認められない。

表 5(a)，(b)は切削距離 30m を加工した後の工具の逃げ面を SEM 観察したものである。主軸角度 0°のときと同様に，切削油を使用した場合には凝着摩耗を生じ，ドライ条件ではアブレシブ摩耗を主体とした摩耗を生じた。なお，Pf＝3μm であることから，切削面の形成に寄与するのは図中に示した幅 3μm の部分である。図でこれより右の領域では切り取り厚さが厚くなり，また，一刃あたりの切削距離が長くなるため，摩耗の進行が早く摩耗幅が大きくなっている。

表 6　加工した小径ディンプル



逃げ面の切れ刃近傍の断面曲線を測定した結果を表 5(c)，(d)に示す。図のほぼ中央に示した 3μm の領域が切削面の形成に寄与した部分である。同部には両潤滑条件ともに同等の大きさの凹凸が形成されており，切削面にはこれらの凹凸が転写されたものと考えられる。

3.3　三次元加工

以上の検討結果から，ドライ条件において小径ディンプルの三次元加工を行った。

スカイフ研磨工具と市販工具を用いて加工したディンプルを表 6 に示す。図(a)において中心の小さな円が平底面部，その周囲の黒く見えるリングが球面部である。スカイフ研磨工具によるディンプルではそれらが明確に区別できる。平底面部の表面粗さは，市販工具の Rz1.5μm に対し，スカイフ研磨工具では Rz0.10μm となり，平滑な面が得

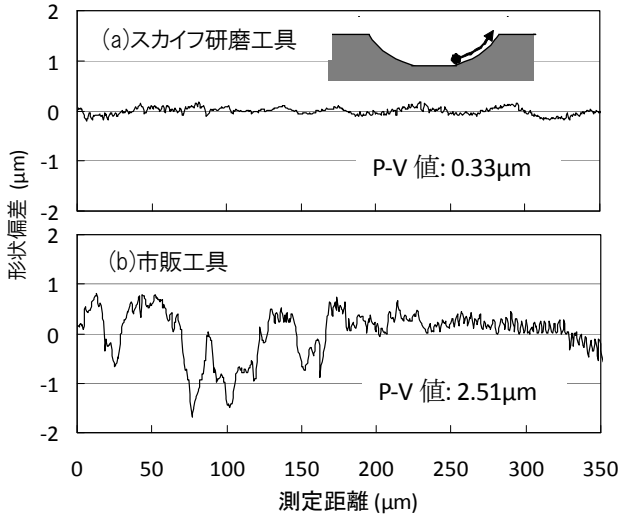


図 8　球面部の形状測定結果

(a)スカイフ研磨工具　　(b)市販工具

図 9　ディンプル表面の反射像の観察

られた。

球面部の経線の形状測定結果を図 8 に示す。縦軸は最適化された真円に対する形状偏差である。スカイフ研磨工具を用いた場合には形状偏差 0.33μm の精度の高い球面が形成されていることがわかる。これは図 3 に示したように，スカイフ研磨工具の切れ刃輪郭の形状偏差が小さいためと考えることができる。また，曲線は下に凸の円弧状のうねり成分と粗さ成分からなっている。うねりは切れ刃稜線上の凹凸が工具の円弧移動にともなって形成したものと思われる。形状偏差測定部の表面粗さは（このときカットオフは 250μm とした）Rz0.15μm であり，主軸を傾斜させたときと同等の鏡面が得られた。

図 9 は「Niigata」という文字の反射像を観察したものである。凹面鏡になっているため，像は反転している。上述のように球面部にはうねりがあるため像に振れが出ているものの，球面部が鏡面に仕上げられていることがわかる。

4. 結　　言

切れ刃にスカイフ盤研磨を施したバインダレス cBN 製ボールエンドミルを用いて焼入鋼の鏡面加工を行い，切削時の潤滑条件の影響，三次元微細形状加工への応用について検討した。

得られた結果を以下にまとめる。

(1) 工具逃げ面の摩耗形態は，切削油を用いた場合は凝着摩耗が発生し，ドライ加工においてはアブレッシブ摩耗となった。

(2) ドライ加工により切れ刃の凝着が抑制されて工具の切れ刃による切削が行われる。

(3) スカイフ盤研磨を施すことにより工具逃げ面の表面粗さと輪郭精度が向上し，その結果，切削面粗さは改善される。

(4) スカイフ研磨工具を用いて小径ディンプルをドライ加工した。形状偏差と表面粗さは市販工具に比して大幅に向上し，三次元形状の鏡面加工が可能であることを確認した。

本研究は平成 19～21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業において実施されたものであることを記し，ここに謝意を表す。

参考文献

1) 嶽岡悦雄，斎藤博，相田収平，宮口弘明，宮口孝司，石川淳，岩部洋育，“高硬度材の高速エンドミル加工に関する研究 cBN 工具による切削特性について”，日本機械学会関西支部定時総会講演会講演論文集，71，1996，p69.

2) 安斎正博，高橋一郎，“cBN ボールエンドミルによる焼入れ鋼の高速ミーリング”，砥粒加工学会誌，47，1，2003，p16.

3) 角谷均，上坂伸哉，“高純度 cBN 多結晶体の微細構造と特性”，粉体および粉末冶金，49，4，2002，p327.

4) 新谷一博，“cBN 工具の開発とその動向”，機械と工具，49，6，2005，p20.

5) 平石誠ほか，“cBN エンドミル工具による鉄系材料の鏡面加工”, 工業技術研究報告書, No.38, 2009，p26.