

難削材仕上げ加工用 スミボロンバインドレス工具

SUMIBORON BINDERLESS Tools for Finishing Difficult-to-Cut Materials

植田 暁彦*
Akihiko Ueda

渡部 直樹
Naoki Watanobe

石田 雄
Yuu Ishida

阿部 真知子
Machiko Abe

東 泰助
Taisuke Higashi

久木野 暁
Satoru Kukino

立方晶窒化ホウ素焼結体（CBN）は、ダイヤモンドに次ぐ硬度と鉄との親和性の低さを特長とするcBNを利用した工具材料であり、主に自動車産業での焼入鋼、鋳鉄や焼結合金の高速仕上げ加工で用いられる。航空機や金型産業などでも使用されているが、製品の軽量化、高出力化のため難削材の使用が増加する傾向にある。また加工精度の向上など高付加価値化が課題となっており、CBN工具に対する長寿命化や高精度化の要望が強くなっている。スミボロンバインドレスは、ナノ～サブミクロンサイズのcBN粒子が直接強固に結合した、従来CBN材種で用いる結合材を一切含まない焼結体である。従来CBN材種より硬度あるいは熱伝導率が高く、航空機、金型や医療産業などで用いられるコバルトクロム合金、チタン合金、ニッケル基耐熱合金等の難削材加工における高能率化、長寿命化を実現する。

SUMIBORON BINDERLESS is a polycrystalline cubic boron nitride (CBN) that directly binds nanometer- or sub-micron-level cBN particles without binder materials (Binderless CBN: BL-CBN). BL-CBN is harder or has better thermal conductivity than conventional CBN. Therefore, it offers higher efficiency and longer tool life in the machining of difficult-to-cut materials, such as cobalt-chromium alloys, titanium alloys, nickel-based heat-resistant alloys, and hardened steel, used in the aircraft, mold, and medical industries.

キーワード：切削工具、超高压、コバルトクロム合金、チタン合金、ニッケル基耐熱合金

1. 緒 言

切削加工は、自動車、航空機、電機をはじめとする幅広い分野での部品加工に用いられており、高速、高能率、高精度に加工するという各産業界からの要求に応じてきた。近年では、自動車分野での燃費向上や電動化推進、半導体・エレクトロニクス分野では無線通信網の高速・大容量に伴う実装の高密度化、といった技術動向を背景として、加工システムでは多品種変量生産やIoTなどのデジタル化が、切削工具には被削材の軽量・高強度化、マルチマテリアル化による難削化への対応が求められている。切削工具材料の開発の変遷を図1に示す。

1923年にドイツで開発されたWC-Co系超硬合金は、高能率加工が可能であり汎用性にも優れていることから現在でも切削工具の主力材料である。一方、顧客の更なる高速・高精度加工の要望に応える形で、1970年代に入りダイヤモンド焼結体（Polycrystalline Diamond: PCD）や立方晶窒化ホウ素焼結体（Polycrystalline Cubic Boron Nitride: CBN）を用いた工具が市販されるようになった。超硬合金やCBNについては、これらを基材としてTiN、CrNやTiAlN等のセラミックスをコーティングすることで、高い加工能率を実現している。工業的にはPCDやCBNは、超高压技術により5～6GPaの圧力で製造される。当社は、更なる超々高压技術を追求め、2000年代に最大20GPaが

発生できる量産技術を確立⁽¹⁾、難削化にも適応し得る革新的な硬質材料として、バインドレスのナノ多結晶ダイヤモンド（BL-PCD）、及びナノ多結晶CBN（BL-CBN）を実用

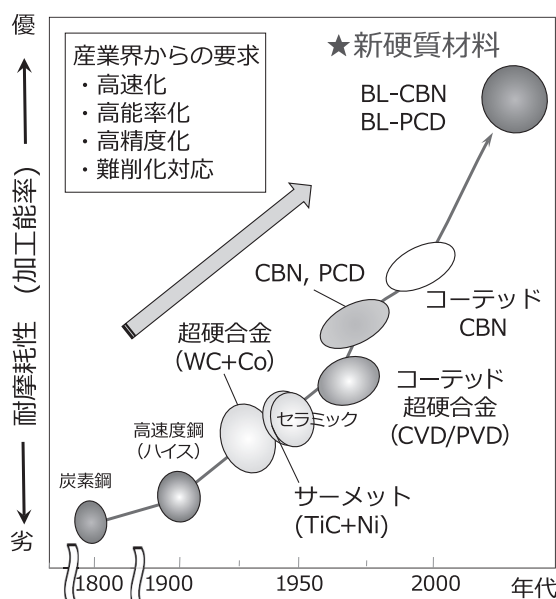


図1 切削工具材料の開発の変遷

化した。本稿では、近年の切削工具へのニーズに対応したBL-CBNを用いたスミボロンバインダレス工具による連続加工と断続加工について解説する。

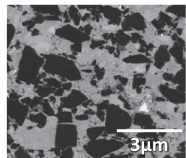
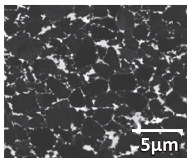
2. スミボロンバインダレス

2-1 スミボロン

スミボロンは、立方晶窒化ホウ素 (cubic Boron Nitride: cBN) の粒子を金属やセラミックスなど結合材 (バインダ) となる粉末と混合した後、高温・高圧で焼結したCBNである。cBNを含む焼結体はCBNと表記する。

cBNは天然には存在せず、人工的に合成される。ダイヤモンドに次ぐ硬度を有し、鉄族元素 (Fe, Ni, Co) 等との反応性が低いため、主に鉄系難削材の切削で使用する。表1にCBNの代表例と特性を示す。焼入鋼など切削温度が上昇し熱的摩耗が支配的となる用途では、cBNより鉄族元素との反応性が低いセラミックスを機能的に分散した結合材を用いた低cBN含有率材種が耐摩耗性に優れる。金属を結合材に用いるとcBN含有率の高い高硬度な焼結体が得られ、機械的摩耗が支配的な鋳鉄や焼結合金の切削で用いられる。

表1 CBNの代表例と特性

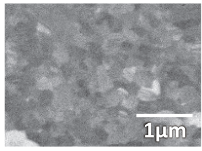
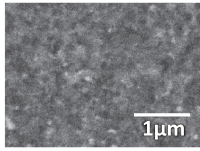
CBN	低cBN含有率材種	高cBN含有率材種
焼結体組織		
cBN含有率 (vol%)	60	85
cBN粒径 (μm)	1~2	1~3
結合材 (バインダ)	TiN(セラミックス)	WC-Co(金属)
焼結条件	約5GPa、1,500°C	
ビッカース硬さ (GPa)	35	39
熱伝導率 (W/m·K)	60	100
主な用途	焼入鋼	鋳鉄、焼結合金

2-2 BL-CBN (バインダレスCBN)

BL-CBNは常圧相である六方晶窒化ホウ素 (hBN) などを原料として、10GPa以上かつ2,000°C以上の圧力・温度条件でcBNに直接変換すると同時に、粒子同士を強固に結合させた焼結体である^{(2),(3)}。金属あるいはセラミックスのような結合材を一切含まず、高cBN含有率材種の究極の形態である。スミボロンバインダレスの名称で切削工具に適用して製品化しており、特性を表2に示す。

BL-CBNの粒径は、原料のhBNや焼結時の圧力・温度条件により制御可能である。粒径約350nmの超微粒BL-CBN (NCB100) は、硬度、熱伝導率共に従来CBNと比べて高

表2 スミボロンバインダレスの特性

CBN	超微粒BL-CBN (NCB100)	超々微粒BL-CBN (IX002)
焼結体組織		
cBN含有率 (vol%)	100	100
cBN粒径 (nm)	200~500	40~60
ビッカース硬さ (GPa)	~54	~54
熱伝導率 (W/m·K)	~200	~80

い。NCB100は、高速加工、高精度加工、長寿命化を狙う刃先交換式ISOインサートや、耐熱合金、あるいはAdditive Manufacturing造形材などの難削材を高速で加工できるラジアスエンドミルに適用している。粒径約50nmの超々微粒BL-CBN (IX002) は、NCB100と比べてcBN結晶粒界を多く含むため熱伝導率は従来のCBN程度であるが、刃立ち性に優れており切削時の刃先温度が上がりにくい焼入鋼金型の鏡面加工用小径エンドミルに適用している。両材種とも、切削での寿命の主要因が機械的摩耗の場合、長寿命化が期待できる。これらのスミボロンバインダレス工具の外観を写真1に示す。

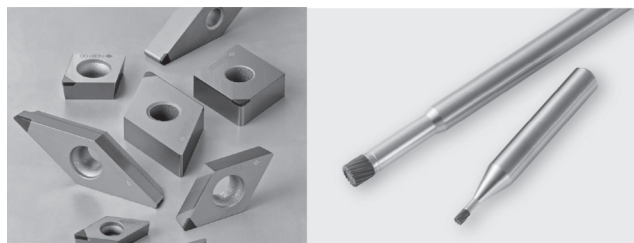


写真1 スミボロンバインダレス工具

3. 連続加工

超微粒BL-CBNのNCB100は高い熱伝導率を有することから、難削材と言われるコバルトクロム合金やチタン合金といった、切削温度が上昇して摩耗が進展しやすい耐熱合金のターニング^{*1}で有効である。ここでは、コバルトクロム合金とチタン合金の評価結果を示す。

3-1 コバルトクロム合金 (Co-Cr)

コバルトクロム合金は航空機エンジン部品に用いられるが、医療用途でも利用されており、人工関節の仕上げ加工を想定した評価を行った。結果を図2に示す。

超硬合金では境界摩耗が大きく発達するのに対し、高

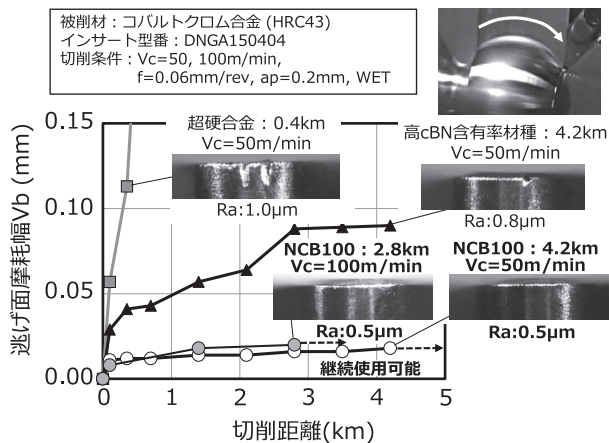


図2 コバルトクロム合金のターニング結果

と軽微で50km以上の切削も可能である。このときの仕上げ面はNCB100が最も優れており、ほぼ理論通りの面粗度 $Rz = 1.5\mu\text{m}$ であった。原因検証のため、通常のクーラント条件で、2色放射温度計により刃先温度を測定した報告があり⁽⁴⁾、評価装置の概要を図4に示す。

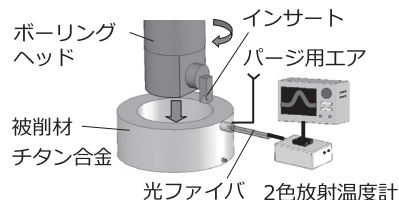


図4 刃先温度評価体系（ボーリング）

cBN含有率材種では軽減され、NCB100では解消された。NCB100は、切削速度 $Vc = 50\text{m/min}$ において4.2km切削後の逃げ面摩耗量 Vb は0.02mm未満であった。また、 $Vc = 100\text{m/min}$ の高速条件でも2.8kmまでであるが、同様に推移した。加工品位については、面粗さ Ra が $0.5\mu\text{m}$ で外観も優れており、仕上げ加工への適用が可能である。

3-2 チタン合金 (Ti-6Al-4V)

チタン合金は航空機のエンジン部品などで使用されている。超硬合金製の工具を用いて $Vc = 100\text{m/min}$ 未満の低速で加工するのが一般的であるが、近年では、刃先冷却の手段として高圧クーラントが利用されていることから、適用してNCB100インサートの冷却効果を評価した。比較には、超硬合金と高cBN含有率材種を用いた。また、高圧クーラントの圧力は7MPaとした。図3に結果を示す。切削速度 $Vc = 200\text{m/min}$ における摩耗は、超硬合金が急速に進行するのに対し、高cBN含有率材種では抑制されており、NCB100では16km切削後の最大逃げ面摩耗幅は0.06mm

湿式のボーリング*2において、被削材にあけた小孔に挿入した光ファイバの前方を切れ刃が通過する際に逃げ面から輻射される赤外線を受光して温度を測定した。赤外線を吸収するクーラントの小孔への侵入を防ぐために、測定中はエアパージを行っている。図5に示す通り、NCB100の工具逃げ面温度は高cBN含有率材種に対して約50℃程度低い温度であると確認できた。高圧クーラント下ではより冷却効果が強くなり摩耗が低減したと推測する。

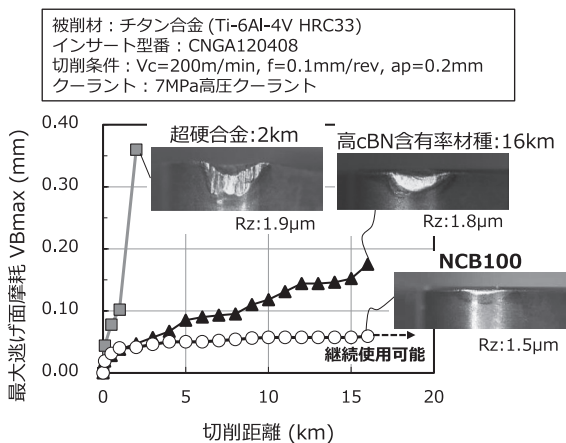


図3 NCB100によるチタン合金の高速ターニング結果

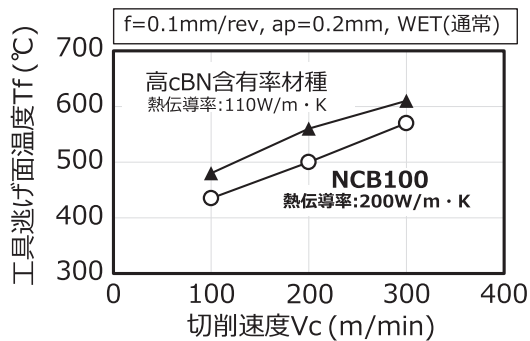


図5 チタン合金ターニングにおける刃先温度

3-3 切りくず処理性向上の検討

高精度仕上げ切削では、切りくず処理の問題が顕著になる場合がある。切りくずが伸びてワークに傷が付く可能性や、加工設備に絡まり停止することもあり得る。超硬合金インサートは、金型での型押し成形で製造するため、切りくずを分断して効率的に処理する3次元形状のチップブレイカ形成は容易である。一方、CBNインサートは成形での製造は困難で形状付与が難しく、研削によるブレイカ形成が主

流である。NCB100でのターニングでも切りくず処理性向上は重要な検討要素と考え、レーザ加工での3次元形状のチップブレイカ形成と評価を行った。

(1) 3次元形状チップブレイカの形成

レーザによる加工は、光のエネルギーが吸収された加工面近傍が局所的に高温となり熔融し蒸発することで起こる。ところが、cBNの波長800nmから200nmまでの透過率測定結果は図6に示す通り⁽⁵⁾、吸収端が200nm以下であるため、基本波1,064nmや第二高調波532nmのレーザでも加工は困難である。ピコ秒やフェムト秒といった極短パルスレーザによる高強度光では、波長透過材料においても非線形光学効果による多光子吸収が起こり、光子が直接、被加工材料の原子間結合に作用し、結合が切断され原子が除去される（アブレーション）。極短パルスレーザを応用して写真2に示す狙い通りのブレイカ形状を有するNCB100インサートを開発した。

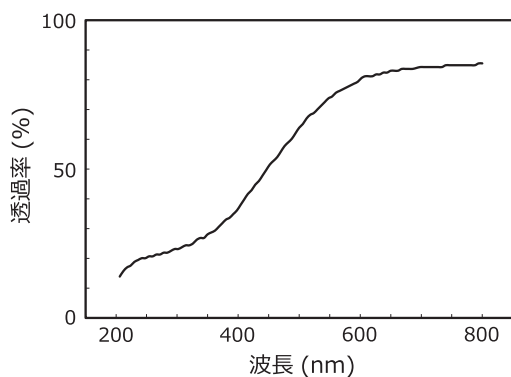


図6 cBNの透過率測定結果

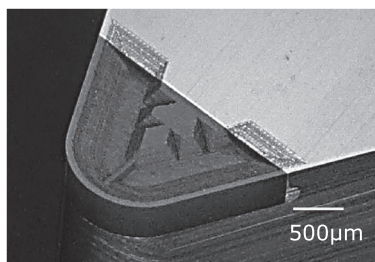


写真2 3次元形状ブレイカを形成したNCB100インサート

(2) 切りくず処理性能

チタン合金を安定的に切削するには、切削温度の低減に加えて、効率的に切りくずを処理することが重要である。そこでNCB100インサートに形成した3次元形状のチップブレイカを評価した。結果を表3に示す。刃先稜線部にサイズ0.01mmのRホーニングを付与したインサートにおい

て、研ぎ付け型と3次元形状型のチップブレイカによる切りくず形状の違いを調査した。研ぎ付け型の場合、らせん状で連続した形状であったのに対し、3次元形状型の場合は細かく分断されており、有効性を確認した。

表3 NCB100インサートに形成したチップブレイカの評価

切れ刃形状	切りくず形状	
	f=0.15mm/rev ap=0.3mm	f=0.20mm/rev ap=0.5mm
Rホーニング 研ぎ付け型		
Rホーニング 3次元形状型		

3-4 ニッケル基耐熱合金

ニッケル基耐熱合金で代表的なインコネルは、チタン合金と同様に航空機エンジンの部品用材料であるが、特に高い耐熱性を有しており高温になるタービンブレードなどに用いられる。NCB100の熱伝導率特性により長寿命化が期待されたが、高cBN含有率材種と同様に短寿命であった。刃先温度低減による摩耗抑制効果がcBN含有率100%による反応摩耗増大で相殺されることによると考える。一方、低cBN含有率材種は、結合材が反応性の低いセラミックスであり摩耗進展しにくいこと、及び切削熱で被削材が軟化することにより切削できることから適用が可能である。

4. 断続加工

従来CBNに対して熱伝導率が高いNCB100では、刃先温度上昇が抑制され加工の高速化や工具寿命の延長が期待できることを、先の評価で示した。切れ刃を回転させて切削するミリング^{*3}工具は、切削時の加熱と空転時の冷却が繰り返されるため刃先温度は上がりにくい。従って、チタン合金の切削よりも刃先温度が上昇しやすく、工具の損耗が大きい傾向にあるニッケル基耐熱合金や焼入鋼でもミリングできる可能性がある。そこで、NCB100によるインコネル718と焼入鋼のミリングへの適用可能性を検討した。

4-1 ニッケル基耐熱合金

ニッケル基耐熱合金を用いた航空機エンジン部品のタービンは、従来、ブレードとディスクを別々に加工したのち

に接合する製造方法が主流であったが、信頼性向上のために、接合部をなくして一体としたブリスク^{※4}を削りだす手法が採用されつつある。ニッケル基耐熱合金は切削温度が上昇しやすいことから、従来の超合金製エンドミルでは切削速度を上げることができず、特に仕上げ加工時間の短縮が課題である。そこで、NCB100による仕上げ加工の高速化を検討した。NCB100を用いたエンドミルは、円柱状のNCB100素材を超合金製シャンクに接合し、超合金製エンドミルと同様の45°のねじれ溝を形成することで試作した。ブリスク加工を模擬し、5軸加工機を用いて超合金製エンドミルで粗加工を行ったのち、NCB100製と超合金製エンドミルでそれぞれ仕上げ加工を行い、両者を比較評価した。結果のV-T線図を図7に示す。

超合金製エンドミルではVc = 100m/min前後の加工速度が上限であるが、Vc = 700m/minでNCB100は超合金比30倍以上の耐摩耗性であり、高速加工条件の適用が可能と考える。切削面の断面観察結果例を表4に示す。

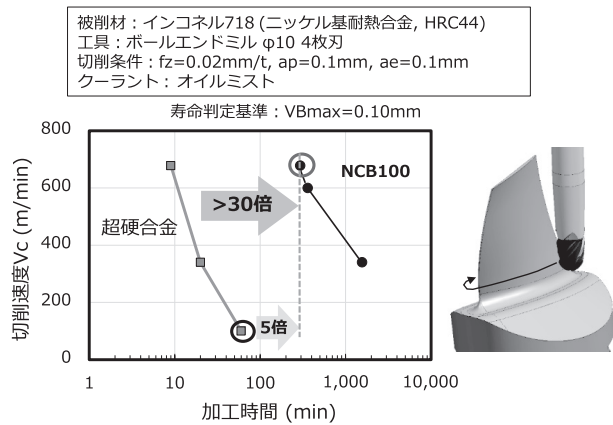


図7 インコネル718のエンドミル加工におけるV-T線図

表4 インコネル718ミリング後の仕上げ面断面

切削条件：fz=0.02mm/t, ap=0.1mm, ae=0.1mm, オイルミスト

工具材質	加工初期	摩耗発達後 (Vbmax=60μm)
超合金 Vc=60m/min		
NCB100 Vc=600m/min		

超合金では、加工初期から比較的厚い塑性流動層 Severe distorted layerが形成され、摩耗発達後には約3.0μmに達した。NCB100の場合、高速にもかかわらず摩耗発達後でも約0.5μmと薄いことが判った。熱伝導率が高いことに加えて、図8に示すNCB100の優れた高温硬度により切削中も鋭利な切れ刃を維持し、刃先温度が抑えられたことによると推定する。

切削温度に関して考察するために、図9に示す概略の評価装置で乾式での基礎評価を行った報告があり⁽⁶⁾、図4におけるインコネル718のボーリングでの測定結果と併せて、切削速度と工具逃げ面温度の関係を図10に示す。

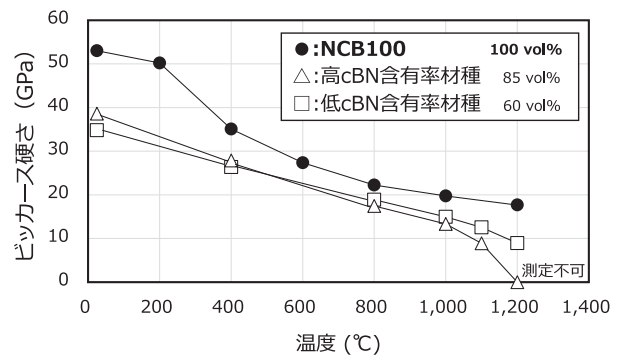


図8 各種CBNの高温硬度

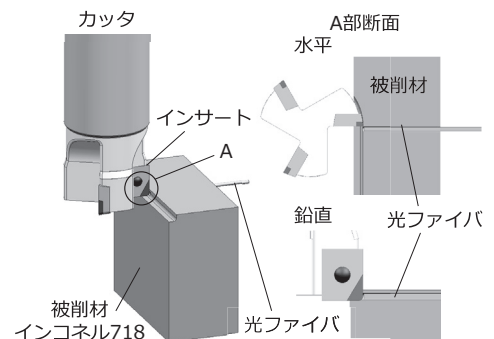


図9 刃先温度評価体系 (ミリング)

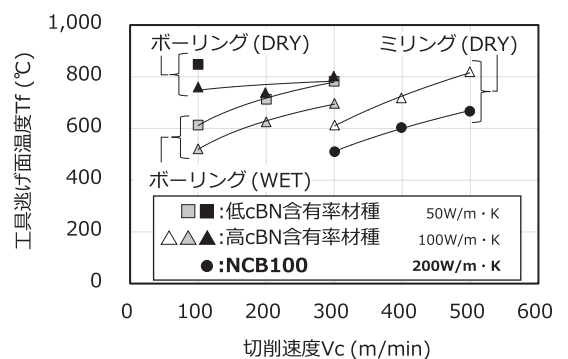


図10 切削速度と工具逃げ面温度

切削速度 $V_c = 300\text{m/min}$ において刃先温度はボーリングの方が高かった。一方ミリングでは、 $V_c = 500\text{m/min}$ において、高cBN含有率材種の約 820°C に対してNCB100は約 670°C で、刃先の顕著な摩耗進展は見られなかった。セラミックス製の工具では、切削熱で被削材を軟化させて粗加工するのに対して、NCB100は高硬度でシャープな刃先による高精度加工が可能であり、インコネル718を含む耐熱合金の高速ミリングによる仕上げ加工に適している。

4-2 焼入鋼

超々微粒BL-CBNのIX002は、NCB100と比べてcBN結晶粒界が多いため熱伝導率が低く、高速加工には適さないが、優れた刃立ち性による高品質な鏡面加工が期待できる。そこで、刃先温度が上がりにくい焼入鋼金型の小径エンドミル加工への適用を検討した。結果を図11に示す。高cBN含有率材種では刃先に大きな凹凸が見られ、NCB100ではこの凹凸は小さくなるが、逃げ面摩耗に筋が見られた。これらと比較してIX002は逃げ面摩耗が滑らかで摩耗量は最

も少なかった。

そこで、図12に示すIX002を用いた高能率加工用の超多刃ラジアスエンドミルと鏡面加工用のボールエンドミルを開発して、LED金型を模した焼入鋼を加工した⁽⁷⁾。

前者は刃径2mmの8枚刃を用いてテーブル送り速度 $V_f = 4,000\text{mm/min}$ の高能率条件で加工して、面粗さ $Ra0.1\mu\text{m}$ が得られた。後者は刃径1mmの1枚刃による加工で、 $Ra0.025\mu\text{m}$ の鏡面が得られた。超々微粒BL-CBNの滑らかな刃先によるものと考えており、熱伝導率の低さは問題にならず優れた仕上げ面を得ることができる。

5. 結 言

スミボロンバインダレス工具として、超微粒BL-CBNであるNCB100を用いた刃先交換式ISOインサートや耐熱合金など難削材加工用のエンドミル、あるいは、超々微粒BL-CBNを用いた焼入鋼金型加工用小径エンドミルを開発した。従来CBN材種と比べて高硬度、あるいは高熱伝導率の特長を有し、難削材加工の高能率化や長寿命化、焼入鋼金型の鏡面加工などが実現可能である。今後もこのような特色のある新しい切削工具の開発を進めて、各産業分野の発展に貢献する所存である。

被削材：焼入鋼 (ELMAX, HRC62)
 工具：CBNエンドミル $\Phi 1.0$ 1枚刃
 切削条件： $n=40,000\text{rpm}$, $V_f=100\text{mm/min}$,
 $a_p=0.005\text{mm}$, $a_e=0.005\text{mm}$
 クーラント：オイルミスト

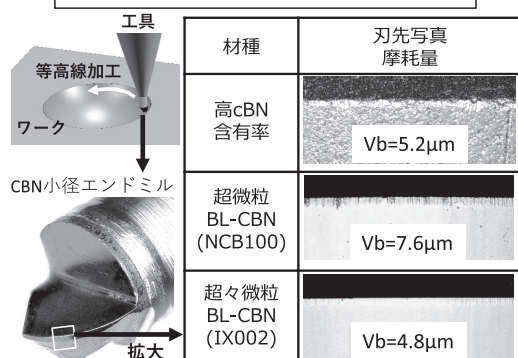


図11 小径エンドミル加工における刃先観察結果

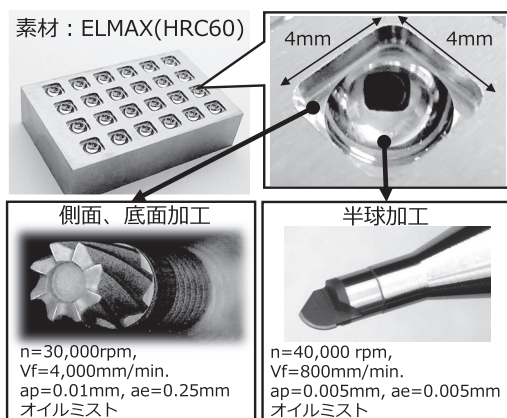


図12 スミボロンバインダレスエンドミルによる金型加工例

用語集

※1 ターニング

旋盤を用いた旋削加工であり、回転する被削材に刃物をあてて移動させることで望みの形状寸法に加工する方法。

※2 ボーリング

既に空いている丸穴を広げる、あるいは穴の品位を向上させる加工で、フライス盤等を用いる。

※3 ミリング

回転する刃物をあてた被削材を移動させることで望みの形状寸法に加工する方法であり、フライス盤やマシニングセンタを用いる。転削加工ともいう。

※4 ブリスク

航空機用ジェットエンジンなどターボ機械のローターディスクとブレード一体化した部品。

- ・スミボロン及びSUMIBORONは住友電気工業(株)の登録商標です。
- ・インコネル (INCONEL) は、米国 Huntington Alloys Corporation の登録商標です。

参 考 文 献 -----

- (1) 角谷均、入船徹男、「高硬度ナノ多結晶ダイヤモンドの微細構造と機械特性」、SEIテクニカルレビュー第172号、pp.82-88 (2008年1月)
- (2) M.Akaishi, T.Satoh, M.Ishii, T.Taniguchi, and S.Yamaoka, Synthesis of translucent sintered cubic boron nitride, Journal of Materials Science Letters, no.12, pp.1883-1885 (1993)
- (3) 原田高志、久木野暁、「バインダレスcBN焼結体の切削性能」、NEW DIAMOND、vol.35、no.2、pp.9-13 (2019)
- (4) A. M. N. A. Kamaruddin, A. Hosokawa, T. Ueda and T. Furumoto, Cutting Characteristics of Binderless Diamond Tools in High-Speed Turning of Ti-6Al-4V, Int. J. of Automation Technology, vol.10, no.3, pp.411-419 (2016)
- (5) 出川順司、辻一夫、矢津修示、「cBN単結晶の特性」、ダイヤモンドシンポジウム講演プログラム (第2回)、ニューダイヤモンドフォーラム、1420、pp.39-40 (1986)
- (6) 鈴木健士朗、細川晃、長嶋拓海、小谷野智広、古本達明、橋本洋平、「超硬質工具による耐熱合金の高速エンドミル加工」、日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集、No.19-306(2019)
- (7) 原田高志、岡村克己、久木野暁、「CBNおよびダイヤモンド切削工具」、精密工学会誌、vol.86、no.11、pp.844-847 (2020)

執 筆 者 -----

植田 暁彦* : 住友電工ハードメタル(株) グループ長



渡部 直樹 : 住友電工ハードメタル(株) 主査



石田 雄 : 住友電工ハードメタル(株) 主査



阿部真知子 : 住友電工ハードメタル(株) 主査



東 泰助 : 住友電工ハードメタル(株) 主査



久木野 暁 : 住友電工ハードメタル(株) 取締役
部長



*主執筆者