

ナノ多結晶ダイヤモンド工具 「スミダイヤモンドレスボールエンドミル NPDB型」による超硬合金直彫り加工

Sumidia® Binderless Ball-Nose Endmills “NPDB” for Direct Milling of Cemented Carbide

島田 浩之*
Hiroyuki Shimada

矢野 和也
Kazuya Yano

金田 泰幸
Yasuyuki Kanada

近年、電子機器等の小型・高精度化に伴い、高精度な製品形状を維持できる超硬合金製金型の直彫り加工の需要が高まっている。しかし、耐欠損性、耐摩耗性、刃立ち性を兼ね備えた切削工具は未だない。これらニーズに応えるため、最近、スミダイヤモンドレスNPD10が開発された。NPD10は、粒径が数十nmの微細なダイヤモンド粒子を超高圧高温下で結合材なしで強固に直接結合した組織を持つ。機械的特性として単結晶ダイヤモンドよりも硬度が高く、異方性がなく、刃立ち性に優れる。これより、NPD10を切削工具へ適用した超硬直彫り用ボールエンドミルNPDB型を開発した。

There has been a growing demand for cutting tools that can be used for the direct milling of cemented carbide materials to create high precision mold parts at low costs. However, conventional tools are insufficient in chipping resistance, wear resistance, and edge sharpness. To address these challenges, the authors have developed “Sumidia® Binderless NPD10,” a nano-polycrystalline diamond that has extremely high hardness and strength with no anisotropic mechanical properties. Adopting the NPD10 diamond to the edge, the authors have created milling tools Sumidia® Binderless ball-nose endmills “NPDB.” These endmills exhibit excellent cutting performance in the direct milling of cemented carbide.

キーワード：single crystalline diamond、polycrystalline diamond、cemented carbide、direct milling

1. 緒言

近年、電子機器等部品の小型化・高精度化に伴い、金型を高精度で長期間維持できるように、金型の高硬度化が進展している。鋼系であれば、HRC60を越えるような高硬度材を微細加工する必要があり、さらに今後の光学系部品、鍛造金型の高精度・低コスト化には超硬合金製金型の需要が高まっており、超硬合金を直彫りできる工具が望まれている。現状、超硬合金の加工ではPCD（焼結ダイヤモンド）、電着砥石、ダイヤモンドコート等の工具が用いられているが耐欠損性、耐摩耗性、刃立ち性を兼ね備えた工具材料は未だない。また、いずれの工具も鏡面を得ることは困難なため、より高精度な金型では仕上げの磨き工程が入るのが一般的である。しかし、磨きを行うことで寸法の崩れが発生しやすく、磨きレスでの高精度鏡面直彫り加工の実現が必要である。

このような硬度の高い被削材を高効率かつ高精度・高品位に加工するニーズに応えるため、最近、スミダイヤモンドレスNPD10が開発された。NPD10は、結合材を含まないバインダレスPCDで、ナノ多結晶ダイヤモンド(NPD)とも呼ばれている⁽¹⁾。NPD10は非常に硬度が高く製作するのが容易ではないが、特殊加工によりボールエンドミルNPDB型を製作することが可能となった(写真1)。本工具は、超硬合金等の高硬度材料の加工に優れた特性を

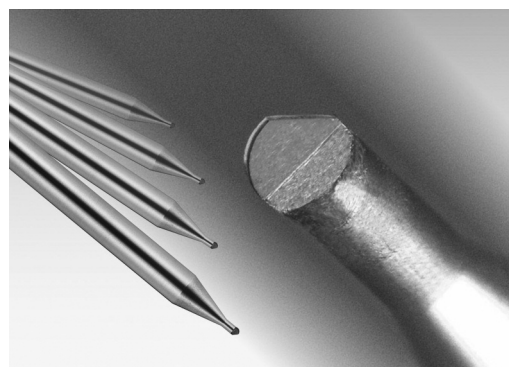


写真1 スミダイヤモンドレスボールエンドミルNPDB型

有している。本稿ではスミダイヤモンドレスNPD10の材料特性とNPDB型での超硬合金の鏡面加工事例を紹介する。

2. スミダイヤモンドレスNPD10の特性

スミダイヤモンドレスNPD10は、グラファイトを発生物質として超高圧・高温下（15GPa以上、2,200℃以上）で直接ダイヤモンドに変換と同時に、粒子同士を強固

に結合させたダイヤモンド単相の焼結体である⁽¹⁾。

図1はスミダイヤバイダレスNPD10の組織写真である⁽¹⁾。比較のため、従来PCDの組織写真も示す。ただし、従来PCDの組織写真は、組織を見やすくするために結合材であるCoをエッチングにより除去している。NPD10の組織はTEM像、従来PCDの組織はSEM像である。従来のPCDが1-10 μ mのダイヤモンド粒子をCoを介在物として焼結させているのに対して、NPD10は結合材を一切含まず平均粒径30-50nmの極めて微細なダイヤモンド粒子を直接結合させた画期的な新素材である。色がまだらに見えるのは、各々の粒子がダイヤモンド単結晶でそれぞれが異なる方向を向いているためである。

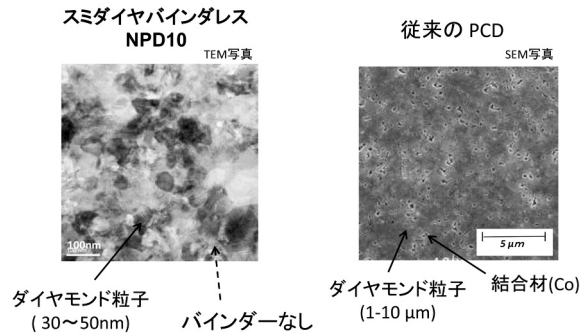


図1 スミダイヤバイダレスNPD10と従来PCDの組織比較

このような画期的な材料であるNPD10を切削工具として適用すると、次のような特性が得られる。

- ① 単結晶ダイヤモンドよりも硬度が高く（図2）、より高硬度な材料を長時間高精度に加工することが可能である。
- ② 単結晶ダイヤモンドのような異方性がなく、結晶方位に起因する偏摩耗が発生しないため、高い形状精度が長時間維持できる。
- ③ 多結晶体であるため、単結晶のような劈開性を示さず、高い耐欠損性が得られる。

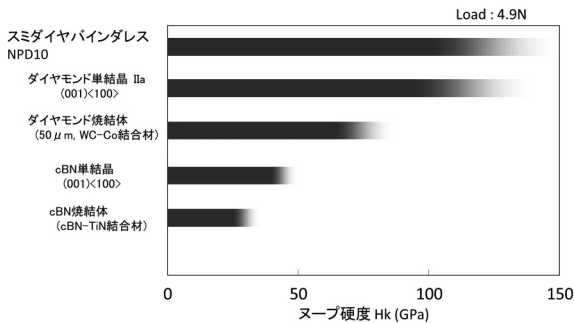


図2 各種硬質材料の硬度比較

- ④ ナノサイズの超微粒子ダイヤモンドの多結晶焼結体なので、従来PCDと比較して刃立性に優れ、良好な加工面粗さが得られる。

3. NPD10による超硬合金の旋削加工

図3は各種ダイヤモンド工具で超硬合金を旋削加工した際の、逃げ面摩耗の推移を示している^{(1),(2)}。評価した工具は、スミダイヤバイダレスNPD10、従来の微粒系PCD（粒径5 μ m）、粗粒系PCD（粒径30~50 μ m）、単結晶ダイヤモンド（合成Ib型）の4種類で、加工評価条件はVc=20m/min, ap=0.05mm, f=0.1mm/rev.湿式で旋削加工を行った。

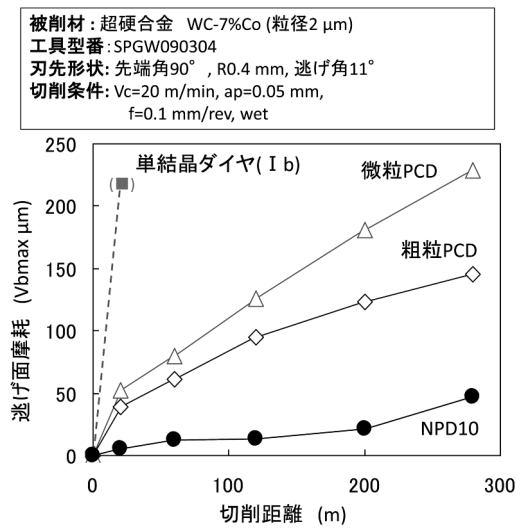


図3 各種ダイヤモンド材料による超硬合金加工比較

単結晶ダイヤモンドは耐摩耗性と刃立ち性に優れるが、劈開性により、このような高送り条件では食いついた瞬間に欠損してしまう。一般的には超硬合金の加工では粗粒系PCDの方が耐摩耗性は良好である。しかし、粒度が粗いため工具切れ刃部の凹凸が、ワークに転写されることで加工面粗さが悪くなるという欠点がある。一方、刃立ち性に優れる微粒のPCDは細かな粒子脱落により摩耗が進行し、耐摩耗性に劣る。このように一般的なダイヤモンド系材料では、刃立ち性、耐摩耗性、耐欠損性を併せ持つことは非常に困難であった。

一方、NPD10は単結晶では欠損してしまう条件でも加工が可能で、粗粒系のPCDと比較しても圧倒的に良好な耐摩耗性を示している。また、NPD10はナノサイズのダイヤモンドを直接接合しているため、粒界強度が強く、高い刃立ち性も維持できる。すなわち、NPD10は高い耐摩耗

性、耐欠損性、刃立ち性を併せ持った材料である。

4. NPDB型による超合金のエンドミル加工

次にスミダイヤバイングレス ボールエンドミルNPDB型による加工事例を紹介する。

旋削加工用工具は形状が単純なため、時間をかければ、研磨加工で工具を製作することは可能である。しかし、エンドミルのような形状を研磨で加工することは困難で、一般的なPCDの微細加工用エンドミルでも放電加工で成形加工される場合が多い。NPD10は導電性がなく、放電加工もできないが、今回、特殊な加工方法を開発することで、エンドミル形状の製作が可能となった。また、高精度な金型を加工するにはより高精度な工具が必要であり、NPDB型は1枚刃設計を採用することで、R形状精度を高精度に仕上げている。これより、NPDB型にて超合金加工への基礎評価、適用の可能性を探索した。

金型用超硬素材はその用途に応じて様々なものが製品化されている(表1)が、今回は高靱性・高硬度を両立した素材で、金型パンチおよび精密金型用素材として幅広く使用されている超々微粒、超微粒超硬材種AF1、A1を被削材として使用した。

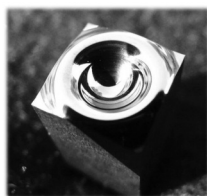
図4はNPDB型のR0.5(型番NPDB1050-020)ボールエンドミルで超合金の高品位加工を行った事例である。被削材に用いた超合金は、超々微粒超合金AF1である。電着砥石で粗加工を行った後、3D形状の鏡面品位を

表1 金型材用超合金の特性

特性	分類			
	超々微粒合金		微粒合金	
材種	AF1	A1	KH03	KH05
粒径(μm)	0.5	0.7	1.0	1.0
Co量(wt%)	12.0	13.0	10.0	13.0
抗折力(GPa)	4.4	3.2	3.3	3.5
硬度(HRA)	92.5	91.4	91.4	90.4
硬度(HV(GPa))	17.3	15.6	15.2	13.6
用途	金型/パンチ 素材	金型/パンチ 素材	金型ダイ 素材	金型ダイ 素材

各材種の特性比較	
耐折損性 ↑	AF1 > KH05 > A1 > KH03
耐摩耗性 →	A1 > KH03 > KH05 > AF1

高品位加工



超合金(92.5HRA)

被削材 : 超合金 住友電工製AF1(超々微粒合金)
 仕上げ工具 : スミダイヤバイングレスNPDB型 R0.5ボールエンドミル
 仕上げ加工時間 : 5時間49分
 仕上げ条件 : n=40,000min⁻¹, Vf=120mm/min
 仕上げ代=0.003mm, オイルミスト, 加工距離=74mm
 面粗さ : Ra0.008μm

図4 NPDB型による超合金の高品位加工事例

追求すべく、仕上げ加工の切削条件は、主軸回転40,000回転、Vf=120mm/min、仕上げ代3μmと設定し、オイルミストでの湿式加工を行った。加工時間は6時間弱を要したが、面品位はシングルナノであるRa=8nmの鏡面を得ることができた。

図5は実際の加工への適用を考慮し、図4の事例と同じNPDB1050-020ボールエンドミルを用い、超微粒超合金A1へ送り速度を上げた高能率加工を行った事例である。粗加工の後、仕上げ加工の切削条件は主軸回転40,000回転、Vf=800mm/min、仕上げ代5μmで設定し、油での湿式加工とした。仕上げ加工時間38分、切削距離29mでRa15nmの面品位を得ることができ、工具摩耗も殆どなく良好で、超合金への直彫り加工が可能となった。

NPD10を用いたボールエンドミルNPDB型での加工では、電着砥石等で粗加工ののち、中仕上げ、仕上げ加工をNPDB型で行うことが現実的である。

高能率加工



超合金(91.4HRA)

被削材 : 超合金 住友電工製A1(超微粒合金)
 仕上げ工具 : スミダイヤバイングレスNPDB型 R0.5ボールエンドミル
 仕上げ加工時間 : 38分
 仕上げ条件 : n=40,000min⁻¹, Vf=800mm/min
 仕上げ代=0.005mm, wet, 加工距離=29.3m
 面粗さ : Ra0.015μm

図5 NPDB型による超合金の高能率加工事例

図6はNPDB型R0.5ボールエンドミルの基礎評価として、超合金AF1へ主軸回転数を6万、4万、2万回転と変化させた場合の面品位の推移を示した事例である。粗加工の後、仕上げ加工の切削条件は各主軸回転数でf=0.01mm/t、仕上げ代5μm、オイルミストとした。半球形状を加工し切削距離234mで、面粗さRaの主軸回転数による差は見受けられない。しかし、光沢に関しては、定量的に評価するのは難しいが、高回転の方が光沢がある。

図7は上記評価での切削距離200mにおける工具摩耗のSEM写真を示しており、切削条件は主軸回転40,000回転、Vf=400mm/min、仕上げ代5μm、切削油剤Mist(油性)。200m切削後も工具摩耗量Vb=0.006mmと高耐摩耗性を示している。NPDB型の工具寿命は、製品に要求される面品位や形状精度によって変わるため言及することはできないが、事例としてはAF1相当の超合金の半球面加工で、切削条件n=40,000回転、Vf=400mm/min、仕上

基礎評価

被削材 : 超硬合金 住友電工製AF1(超々微粒合金)
 仕上げ工具 : スミダイヤバインドレスNPDB型 R0.5ボールエンドミル
 仕上げ加工距離: 234m (切削距離23.4mノ形状)
 仕上げ条件 : n=60,000min⁻¹、Vf600mm/min
 n=40,000min⁻¹、Vf400mm/min
 n=20,000min⁻¹、Vf200mm/min
 仕上げ代=0.005mm、Mist

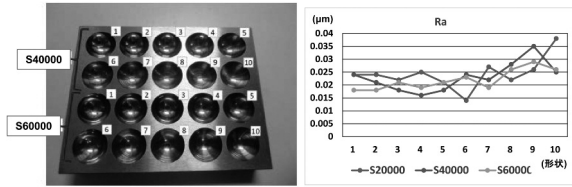


図6 NPDB型による超硬合金の基礎評価事例

被削材 : 超硬合金 住友電工製AF1(超々微粒合金)
 仕上げ工具 : スミダイヤバインドレスNPDB型 R0.5ボールエンドミル
 仕上げ条件 : n=40,000min⁻¹、Vf400mm/min
 仕上げ代=0.005mm、加工距離=200m
 切削油剤 : MIST(油性)

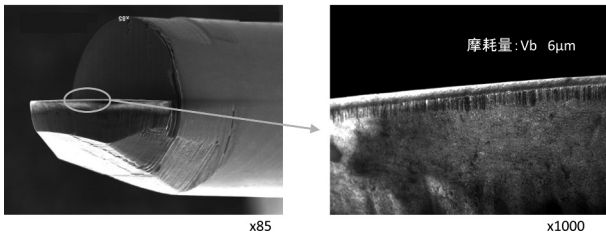


図7 SEMでの工具摩耗観察 (L = 200m)

げ代5 μ m、切削油剤Mist(油性)、面品位Ra50nmレベルの加工にて、切削距離300m以上切削可能であるところまで確認できている。

図8はNPDB型ボールエンドミルで超硬合金AF1を切削加工した際の高速ビデオの静止画と回収した切りくずを

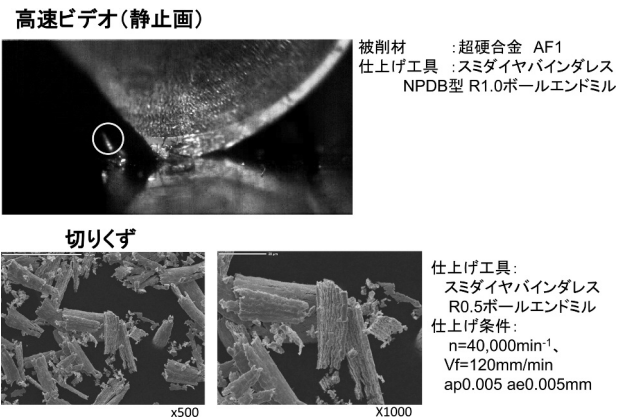


図8 切りくず観察 (SEM, 高速ビデオ)

SEM観察した写真である。

切削条件は主軸回転40,000回転、Vf=120mm/min、仕上げ代5 μ m。当初、硬脆材である超硬合金への微小切り込み時の切りくずは、研削同様に脆性モードで粉状になると推察していたが、観察の結果、扇形のせん断切りくずが生成されている。これより、NPDB型ボールエンドミルでの超硬直彫り加工では、延性モードの切削加工が行われていることがわかった。

5. 結 言

スミダイヤバインドレスNPDB10は、耐摩耗性、耐欠損性、刃立ち性に優れた画期的な工具材料で、超硬合金のような高硬度材の加工だけでなく、セラミックス等の硬脆材料の加工にも高い可能性を有している。NPDB10は単結晶ダイヤモンドよりも硬く、ダイヤモンド砥石で工具形状を加工すると加工時間が長くなる。今回、特殊加工技術にてエンドミル等の工具形状に形成することで、鍛造型、精密プレス・モールド型、光学系部品や半導体部品の部品型等の加工工具としての適用が可能となった。今後、本工具の製品化に続き、スミダイヤバインドレスNPDB10を用いた各種工具の製品化を進めるとともに、基礎評価による加工条件の最適化を進め、ユーザーにて使いやすい工具、メリットのある工具を開発していく所存である。

用語集

※1 PCD

Polycrystalline Diamond : 焼結ダイヤモンド。Co等のバインダーや焼結助剤を含む多結晶ダイヤモンド。

※2 単結晶ダイヤモンド

どの部分を取り出しても、その結晶の方位が一定であるダイヤモンドを単結晶ダイヤモンドと呼び、多結晶ダイヤモンドの対義語である。単結晶ダイヤモンドは、劈開性や結晶方位による機械特性の異方性があり、ある方向には強いが、違う方向には弱い。

※3 超硬合金

炭化タングステンと結合剤であるコバルトとを混合して焼結した高硬度材料。

参 考 文 献 -----

- (1) 角谷均、SEIテクニカルレビュー第180号(2012) 12
 - (2) 原野 他、SEIテクニカルレビュー第177号(2010) 107
 - (3) 村上、機械技術6月号(2012) 日刊工業新聞社
 - (4) 島田、型技術6月号(2013) 日刊工業新聞社
 - (5) 島田、先端加工技術N0.92(2014)
 - (6) 若林、機械と工具3月号(2014)
-

執 筆 者 -----

島田 浩之* : 住友電工ハードメタル(株)
超高压マテリアル開発部



矢野 和也 : 住友電工ハードメタル(株)
超高压マテリアル開発部



金田 泰幸 : 住友電工ハードメタル(株)
超高压マテリアル開発部 次長



*主執筆者