単結晶 CBN 工具による鉄系材料の精密切削*

西 口 隆** 梶 田 正 美**

Precision Cutting of Ferrous Metals with Single Crystal CBN Cutting Tools

Takashi NISHIGUCHI and Masami MASUDA

Mirror-like cutting of ferrous metals with CBN cutting tools is discussed experimentally in this paper. For the purpose of the mirror-like cutting, single crystal CBN cutting tools are developed. The wearing test of the single crystal CBN is carried out to ascertain the optimum crystallographic orientation of flank surface. The wear resistance in $\langle 211 \rangle$ direction on (111) plane is the largest, so the (111) plane is chosen as the flank surface for single crystal CBN tools, and $\langle 211 \rangle$ direction on (111) plane as the cutting direction on the flank surface. The polished flank surface roughness of $0.005\text{--}0.008\text{ }\mu\text{mR}_{\text{max}}$ can be obtained using fine diamond grinding wheel whose working surface roughness is kept within $1\text{ }\mu\text{mR}_{\text{max}}$. Using this single crystal CBN cutting tool, machined surface roughness of less than $0.05\text{ }\mu\text{mR}_{\text{max}}$ has been achieved for hardened stainless steel (HRC 52). Although the tool lives in single crystal CBN tools have not been sufficient (about 200 m cutting length), the use of the new tools expected in a drastic reduction of the polishing time for the hardened stainless steel mold dies.

Key words: CBN cutting tool, single crystal CBN, ferrous metals, hardened stainless steel, mirror-cutting, cutting tool life

1. 結 言

近年、各種成形金型、しゅう動部品などを対象とした高硬度鉄系材料の鏡面加工の要求が高まっている。一方、アルミニウム、銅などの非鉄金属材料はダイヤモンド切削工具を用いて $0.01\text{--}0.02\text{ }\mu\text{m}$ の切削面粗さを得ることが可能¹⁾であるが、鉄系材料をダイヤモンド工具を用いて切削加工した場合、通常の雰囲気中ではダイヤモンドと鉄が化学的に反応し、切削工具が異常摩耗する²⁾ため鏡面切削が不可能である。したがって、鉄系材料をダイヤモンド工具を用いて鏡面切削するには、Casstevens³⁾が炭素飽和雰囲気中で HRC 57 の鉄系材料を切削して $0.173\text{ }\mu\text{mR}_{\text{max}}$ の切削面粗さを得ているように、特殊な雰囲気が必要と考えられる。しかし、このような特殊雰囲気中での切削加工は実用的ではない。

そのため現状では高硬度鉄系材料を研削加工した後、研磨仕上げを行っているが、研削時に生じたスクラッチの除去や面粗さの向上のために、研磨に長時間を要している。鉄系材料の鏡面切削が可能になれば、各種

成形型、しゅう動部品などに対し、大幅な研磨時間の短縮、加工能率の向上が期待できる。

このような観点から、本研究では CBN(立方晶窒化ほう素)切削工具を用いて、鉄系材料を通常雰囲気中で鏡面切削することを目的としている。

鉄系材料の CBN 工具による切削は数多く報告されている⁴⁾⁵⁾が、鏡面切削を目的とした研究はほとんど行われていない。

筆者らもこれまでに多結晶焼結 CBN 工具を用いてクロム合金ステンレス工具鋼の焼入材 (HRC 52) の鏡面切削の実験を行い、以下の結果を得ている⁶⁾⁷⁾。

- (1) 切削面粗さと工具前逃げ面の面粗さの間に強い相関があり、工具前逃げ面を可能な限り高精度に研磨仕上することが、不可欠である。
- (2) 前逃げ面の面粗さを $0.03\text{ }\mu\text{mR}_{\text{max}}$ に仕上げることで、 $0.08\text{ }\mu\text{mR}_{\text{max}}$ の切削面粗さが得られる。

しかし、上述の多結晶焼結 CBN 工具では、切削面粗さ $0.1\text{ }\mu\text{mR}_{\text{max}}$ が確保できる工具寿命は切削距離にして 200 m 程度と短く、 1000 mm^2 程度までの狭い切削面に対してしか適用できない。この理由は、工具刃先チップ内のセラミックスバインダの耐摩耗性が低いため、これを改善するには、切れ刃稜にバインダが

* 原稿受付 昭和 62 年 3 月 28 日、昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会 (昭和 61 年 3 月 28 日) にて発表

** 正 会 員 (株)日立製作所 (横浜市戸塚区吉田町 292)

Fig. 1 Morphology of single crystal CBN

露出しない工具が望ましいと考えられる。そこで筆者らは、バインダのない単結晶 CBN を用いるならば耐摩耗性が高く、しかもより鋭利な切れ刃が得られる可能性があることに着目し、単結晶 CBN 工具の試作を行っている。

前報⁷⁾では、鉄系材切削における切削面粗さ向上を目的として、多結晶焼結 CBN 工具の改善策とともに、単結晶 CBN 工具の技術課題を挙げている。ここでは、単結晶 CBN 工具を実用化する上での結晶の耐摩耗性や切れ刃研磨法などの上記技術課題に対する実験検討結果について述べ、鉄系材鏡面切削への適用の可能性について論ずる。

2. 単結晶 CBN 工具の開発

2.1 単結晶 CBN の耐摩耗性

切れ刃後にバインダのない単結晶 CBN 工具を得るためには、可能な限り大径の単結晶 CBN 粒を入手する必要があるが、現在入手可能な結晶粒の直径は 0.4 mm 程度である。図 1 に単結晶 CBN の晶癖を示す⁸⁾。これらの晶癖のほとんどの面は (111) 面であり、へき開面は単結晶ダイヤモンドの (111) 面に対して (110) 面である。この単結晶 CBN は、ダイヤモンドと同様に立方晶であるために、各結晶面によって機械的性質が異なること、また同一結晶面においても、摩耗しやすい方向と摩耗しにくい方向があることが推測される。しかし、単結晶 CBN は大径のものが入手困難なため、その摩耗特性に関する報告はなく、高い耐摩耗性が要求される工具前逃げ面とするべき結晶面が決定できない。そこで工具前逃げ面に適した結晶面とその面内での切削方向を把握するために、単結晶 CBN の摩耗実験を行った。実験方法は通常のダイヤモンドバイト研磨機を用い、この鋳鉄製研磨定盤に $\phi 1 \mu\text{m}$ のダイヤモンドパウダを埋め込み、研磨速度 30 m/s、研磨荷重 0.6 N で単結晶 CBN を研磨し、30 s ごとの研磨量の推移を把握した。この結果を図 2 に示す。なお研磨試

Fig. 2 Influence of crystallographic orientation on wear rate of single crystal CBN

Fig. 3 Newly designed single crystal CBN tool

料としては図 1 (b) に示す形状の単結晶 CBN を用い、結晶方位は顕微鏡を用いた形状観察により決定している。同図より、実験条件の範囲内では (111) 面の $\langle 211 \rangle$ 方向が単位時間あたりの摩耗量が最も小さいことが分かる。

ところで、ダイヤモンド工具を用いた軟質金属の鏡面切削では、切れ刃後退量が数 μm で工具寿命に達することから、CBN 工具で鉄系材を鏡面切削するとき許容される切れ刃後退量も 10 μm 以下と推測される。そこで上述の摩耗量が最小となる結晶方位を前逃げ面の切削方向に採用することにした。

実際の単結晶 CBN 工具には、図 3 (a) に示すように直径 1 mm のチタンシャンクに平均直径 0.2~0.25 mm の単結晶 CBN を銀ろう付けした素材を用いている。シャンク材質としてチタンを用いた理由は、単結晶 CBN 粒を銀ろう付けしやすいためである。図 3 (a) の素材作製にあたっては、前逃げ面の結晶方位が耐摩耗性の高い (111) 面の $\langle 211 \rangle$ 方向になるように、シャンクの軸心と (111) 面をほぼ直交させた状態で銀ろう付けしている。この素材のシャンクと単結晶 CBN を同時に研磨して、図 3 (b) に示すような単結晶 CBN 工具を得ている。

次にこの単結晶 CBN の研磨実験結果について述べる。

2.2 単結晶 CBN の研磨特性

通常のダイヤモンドバイトの研磨と同様に、ダイヤ

Fig. 4 Influence of surface roughness of cast iron wheel on surface roughness of polished single crystal CBN

モンドパウダを埋め込んだ鋳鉄製研磨定盤を用いて、図3(a)に示す単結晶CBN工具素材の研磨を行った。研磨条件は、前述した単結晶CBNの摩耗実験と同様に、 $\phi 1\mu\text{m}$ ダイヤモンドパウダを用い、研磨速度30 m/s、研磨荷重0.6 Nである。ダイヤモンドパウダを埋め込んだ研磨定盤の面粗さは、小坂研究所製触針式表面粗さ計（測定精度0.02 μm ）により測定し、研磨された単結晶CBNの面粗さはRank Taylor Hobson社製タリスステップ（測定精度0.001 μm ）を用いて測定し、いずれも5か所の平均値により示した。切れ刃稜を鋭利にして、良好な切削面粗さを得るためには、工具前逃げ面の面粗さを高精度に研磨することが必要である⁷⁾。このため単結晶CBNの研磨面粗さに最も大きな影響を及ぼすと考えられる鋳鉄製研磨定盤の面粗さを変えて、両者の相関について実験した。この結果を図4に示す。同図より、鋳鉄製研磨定盤の面粗さを1 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 以下に抑えても、単結晶CBNの研磨面粗さは0.3~0.9 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ と大きくなり、0.1 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 以下にできないことが分かる。これに対しダイヤモンドバイトを面粗さ1 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ の鋳鉄製研磨定盤を用いて全く同一の条件で研磨した場合、0.01 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 以下の研磨面粗さを得ることができる。両者の研磨面粗さの相違はCBNおよびダイヤモンドと鋳鉄間の研磨点での界面現象が異なるためと思われる。すなわち、CBNの場合にはメカニカルな研磨であるのに対し、ダイヤモンドでは鋳鉄との間に化学反応も加わったメカノケミカルポリッシュ作用により研磨面粗さが改善されるものと推測される。

Fig. 5 Influence of surface roughness of diamond grinding wheel on surface roughness of polished single crystal CBN

また、単結晶CBNの研磨面の顕微鏡観察によれば、微小へき開によって研磨面粗さが損なわれていることが分かったので、単結晶CBNに対し研磨面粗さを向上させるには、砥粒保持力が弾性に富んだ硬度の低い研磨工具が適していると考え、レジンボンドダイヤモンド砥石(#6000)を用いて単結晶CBNの研磨実験を行った。この結果を図5に示す。同図より、表面粗さ1 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 以下のレジンボンドダイヤモンド砥石を用いて単結晶CBNを研磨すると、0.01 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ 以下の研磨面粗さが得られることが分かる。

2.3 単結晶CBN切削工具

以上の単結晶CBNの研磨実験の結果をもとに図3(a)に示す工具素材を実際に研磨し、単結晶CBN切削工具を製作した。

レジンボンドダイヤモンド砥石の表面写真と断面曲線、及びこの砥石を用いて研磨した単結晶CBN工具の切れ刃稜写真と前逃げ面の断面曲線を表1に示す。同表より、前逃げ面の面粗さ0.005~0.008 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ で、非常に鋭利な切れ刃稜の単結晶CBN工具が得られていることが分かる。また、この単結晶CBN工具の切れ刃稜と前逃げ面の面粗さを多結晶焼結CBN工具及びダイヤモンド切削工具の切れ刃稜と共に表2に示す。単結晶CBN工具の切れ刃稜は多結晶焼結CBN工具に比較して鋭利であり、ダイヤモンド切削工具の切れ刃稜と同等の鋭利さを有している。また、前逃げ面の面粗さもダイヤモンド工具と同等に良好である。

以上のようにして試作した単結晶CBN工具の写真を刃先部の拡大写真とあわせて図6に示す。直径1 mm、全長5 mmの非常に小さなものである。写真に

Table 1 Diamond grinding wheel and single crystal CBN tool ground with the wheel

	Surface Photograph	Surface Profile
Diamond Grinding Wheel
Single Crystal CBN Tool

Table 2 Comparison of CBN and diamond tools

Cutting Tool	Micro Photograph of cutting edge	Flank Surface Profile
CBN Compact
Single Crystal CBN
Single Crystal Diamond

Fig. 6 Single crystal CBN tool

示した工具の単結晶 CBN は入手した中では最大のものであるが、それでも切れ刃稜長さはわずかに 0.4 mm と短い。この単結晶 CBN 工具を用いて切削実験を行う場合には、すくい面がほぼ水平になるように、シャンク軸心を 19.5° 傾けて固定する工具ホルダを用いている。

ところで、上記の研磨条件で単結晶 CBN 工具を試作する際、チタンシャンクに銀ろう付けした単結晶 CBN のうちの一部だけが良好に研磨でき、切削実験に供することができた。図 7 は、不良の単結晶 CBN を研磨した場合の工具すくい面の典型例であるが、結

晶中に内在する欠陥や既存のクラック等のために刃こぼれを生じ、鋭利な切れ刃稜が得られていないことが分かる。このように良好な研磨ができない単結晶 CBN が多く、切削工具として使用できる単結晶 CBN は全数の 10% 以下であった。なお、図 2, 5, 6 に示した単結晶 CBN の摩耗特性、研磨特性に関する実験では、顕微鏡を用いてクラックのない単結晶 CBN を選別し使用している。

上述した良好な単結晶 CBN 工具を用いて、実際の

Fig. 7 Rake face of damaged single crystal CBN tool

Table 3 Cutting conditions

Workpiece	Hardened stainless steel (SUS 420) Hardness ; HRC 52, ϕ 20
Tool	Single crystal CBN, $R=0.5$ Rake angle ; 2° , Relief angle ; 3°
Cutting depth	$3 \mu\text{m}$
Feed rate	$5 \mu\text{m/rev}$
Cutting speed	65 m/min
Cutting fluid	Mineral oil
Measuring equipment for machined surface	Tallystep for surface profile Nomarsky microscope for photograph

Fig. 8 Prototype precision lathe for experiments

Table 4 Machined surfaces with single crystal CBN tool and single crystal diamond tool

	Workpiece	Tool	Cutting Conditions	Surface Photograph	Surface Profile
(a)	Al-Mg Alloy	Single Crystal Diamond $R=3$	$v=700\text{m/min}$ $d=10 \mu\text{m}$ $f=30 \mu\text{m/rev}$
(b)	Hardened Stainless Steel	Single Crystal CBN	Table 3

切削実験を行った結果について次に述べる。

3. 単結晶 CBN 工具による切削実験

3.1 実験方法

切削条件は、特に断らない限り表 3 に示す通りである。被削材は多結晶焼結 CBN 工具を用いた実験⁶⁾と同様に、クロム合金ステンレス工具鋼 (HRC 52) を用いている。また実験に用いた旋盤は、図 8 に示すプロトタイプの正面旋盤⁹⁾である。主軸にはエアベアリング (Professional Instruments 社製, 10 B 型) を使用し、工具送りテーブルのヨーイング誤差は工具送り 100 mm に対して $0.025 \mu\text{m}$ 以下におさえている。また、切削液は揮発性に富んだ白灯油をミスト状にして切削点に供給した。なお被削材は、多結晶焼結 CBN 工具を用いて $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}R_{\text{max}}$ の切削面粗さにあらかじめ同一機上で前加工した後、切削実験を行っている。切削面粗さはタリステップを用いて測定し、5 か所の平均値にて評価した。

3.2 実験結果

表 4 (b) に、単結晶 CBN 工具で切削したクロム合

金ステンレス工具鋼の切削面の写真と断面曲線を示

Fig. 9 Machined surfaces of hardened stainless steel

Table 5 Flank wear of single crystal CBN

Work-Piece	FC20	S45C	Hardened Stainless Steel
Flank Wear

cutting length:200m f=10μm/rev

す。同表より、明りょうな工具送りマークが観察されること、また切削面表面のむしれがほとんど認められないことが分かり、工具形状の転写性の良い切削が行われていると言える。断面曲線から切削面粗さは $0.05 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ である。またこの切削面を、表 4 (a) に示すダイヤモンド工具（曲率半径 3 mm の R バイト）による Al-Mg 合金の切削面と比較すると同等の面粗さであることが分かる。切削後のクロム合金ステンレス工具鋼のサンプルの写真を図 9 に示す。外周から内周に向かって同一切削条件で端面切削したものであるが、(a) では全面が鏡面であるのに対し、(b) では内周側で曇っている。このように工具寿命は一定しないが、単結晶 CBN 工具の寿命は意外に短く、切削面粗さ $0.1 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ を確保できる工具寿命は、切削距離にして数十 m から約 200 m であった。

それでは、長い工具寿命が得られる被削材質があるのではないかと考え、FC 20 と S 45 C に対しても同様の切削実験を行った。その結果、両者ともクロム合金ステンレス工具鋼と同様に切削面粗さは $0.05 \sim 0.06 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ であったが、工具摩耗が著しく、切削面粗さが急速に悪化していった。表 5 は、切削距離 200 m 時の工具前逃げ面の摩耗状態を示す。同表から明らかに、 V_B は $15 \sim 20 \mu\text{m}$ にも達し、被削材質にかかわらず前逃げ面摩耗の大きいことが分かる。単結晶 CBN 工具の長寿命化が今後の課題である。

以上のように、工具寿命が極めて短いが、切削面積が 1000 mm^2 以下の小さい成型型などへの適用は十分可能である。従来、研削されたクロム合金ステンレス工具鋼を長時間かけて研磨仕上していたが、このような研削・研磨工程を単結晶 CBN 工具を用いた鏡面切削工程に替えることにより、加工時間の大幅な低減が可能である。

4. 結 言

鉄系材料を通常雰囲気中で鏡面切削することを目的

として、単結晶 CBN 工具の試作を行い、クロム合金ステンレス工具鋼の鏡面切削実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 単結晶 CBN の摩耗特性実験の結果から、最も耐摩耗性の高い (111) 面の $\langle 211 \rangle$ 方向を切削方向にとった単結晶 CBN 工具を試作した。
- (2) 前逃げ面をレジンボンドダイヤモンド砥石を用いて $0.005 \sim 0.008 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ の面粗さに研磨された単結晶 CBN 工具を用いて、高硬度クロム合金ステンレス工具鋼を切削し、切削面粗さ $0.05 \mu\text{mR}_{\text{max}}$ を得ることができた。
- (3) 単結晶 CBN 工具の寿命は極めて短いが、約 1000 mm^2 以下の切削面の小さな被削材には十分に適用可能である。

参 考 文 献

- 1) 小林 昭：超精密ダイヤモンド切削技術，日本機械学会誌，**85**，760 (1982) 241.
- 2) M. P. Hitchier and J. Wilks: Factors Affecting Chemical Wear during Machining, *Wear*, **93**, (1984) 63.
- 3) J.M. Casstevens: Diamond Turning of Steel in Carbon-saturated Atmospheres, *Prec. Engg.*, **5**, 1, (1983) 9.
- 4) N. Narutaki and Y. Yamane: Tool Wear and Cutting Temperature of CBN Tools in Machining of Hardened Steels, *Ann. CIRP*, **28**, 1, (1979) 23.
- 5) G. Chrysosolouris: Turning of Hardened Steels Using CBN Tools, *J. Appl. Metalworking*, **2**, 2, (1982) 100.
- 6) 西口 隆，榊田正美，能戸幸一：スローアウェイバイトによる鉄系材料の精密切削，昭和 58 年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1983) 523.
- 7) 榊田正美，西口 隆：CBN 工具による鋼の精密切削，精密工学会誌，**52**，12 (1986) 2024.
- 8) ダイヤモンド工業協会編：ダイヤモンド工具マニュアル，工業調査会 (1979) 32.
- 9) S. Takasu, M. Masuda and T. Nishiguchi: Influence of Steady Vibration with Small Amplitude upon Surface Roughness in Diamond Machining, *Ann. CIRP*, **34**, 1, (1985) 463.