### 研究論文

# 高圧クーラント供給を用いた高ニッケル合金切削における cBN 焼結体の工具摩耗

## 和田 任弘<sup>1</sup>\*, 森合 勇介<sup>2</sup>, 田中 宏明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>奈良工業高等専門学校機械工学科,〒 639-1080 大和郡山市矢田町 22. <sup>2</sup>(株)トクピ製作所,〒 581-0854 八尾市大竹 3-167. <sup>3</sup>大阪電気通信大学工学部電子機械工学科,〒 572-8530 寝屋川市初町 18-8.

# Tool Wear of Sintered Cubic Boron Nitride Compact in Cutting High-Nickel Alloy with High-Pressure Coolant Supplied

Tadahiro WADA<sup>1</sup>\*, Yusuke MORIGO<sup>2</sup> and Hiroaki TANAKA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. Mechanical Engineering, Nara National College of Technology, 22 Yata-cho, Yamatokoriyama 639-1080, Japan. <sup>2</sup> TOKUPI Corporation, 3-167 Otake Yao, 572-8530, Japan.

<sup>3</sup>Dept. Electro-Mechanical Engineering, Osaka Electro-Communication University, 18-8 Hatsu-cho Neyagawa 572-8530, Japan.

Received November 25, 2015; Revised February 1, 2016; Accepted February 2, 2016

#### ABSTRACT

The tool life in cutting high-nickel alloy is shorter than that in turning of carbon steel. In order to identify an effective tool material for the cutting of high-nickel alloy, the chip configurations, the tool wear and the surface roughness were experimentally investigated. The high-nickel alloy was turned with high-pressure coolant supplied. The results are as follows: (1) In turning with high-pressure coolant supplied, the effectiveness of chip breaking performance was improved. In this case, the chip length was shorter with the increase of the coolant pressure. (2) In the case of finish cutting high-nickel alloy, in the dry cutting large notch wear on the depth of the cut line was observed. In wet cutting with the cBN content of 50 % to 60 % under high cutting speed and high-pressure coolant supplied, it was possible to suppress the large notch wear. (3) In the high-pressure coolant cutting method of high-nickel alloy with a sintered cubic boron nitride compact tool, the cBN content of 60 % and the main element of the binder phase of  $Al_2O_3$ -Al was an effective tool material. (4) In the high-pressure coolant cutting method of high-nickel alloy with the cBN content of 60 % and the main element of the binder phase of  $Al_2O_3$ -Al was an effective tool material. (4) In the high-pressure coolant cutting method of high-nickel alloy with the cBN content of 60 % and the main element of the binder phase of  $Al_2O_3$ -Al was an effective tool material. (4) In the high-pressure coolant cutting method of high-nickel alloy with the cBN content of 60 % and the main element of the binder phase of Al\_2O\_3-Al was an effective tool material. (4) In the high-pressure coolant cutting method of high-nickel alloy with the cBN content of 60 % and the main element of the binder phase of  $Al_2O_3$ -Al was an effective tool material. (4) In the high-pressure coolant cutting method of high-nickel alloy with the cBN content of 60 % and the main element of the binder phase of  $Al_2O_3$ -Al was an effective tool material. (4) In the h

In conclusion, the tool life of the cBN content of 60 % and the main element of the binder phase of  $Al_2O_3$ -Al can be improved by increasing coolant pressure in turning high-nickel alloy with a sintered cubic boron nitride compact tool under high cutting speed.

### KEY WORDS

cutting, high-pressure coolant supplied, high-nickel alloy, machinability, sintered cubic boron nitride compact

1 緒 言

ガスタービンや航空機エンジンの部品に採用されている超 耐熱合金インコネル718 は難削材として知られている<sup>1)</sup>. 超 耐熱合金の被削性が悪い原因として,高温強度が大きい,加 工硬化が生じやすい,工具材料との親和性が大きい,熱伝 導率が低いなどが考えられている<sup>2)</sup>. 高ニッケル合金切削に おける工具摩耗を調べた研究は多く行われている<sup>3)</sup>. 従来か ら,熱伝導性の悪い被削材を切削する場合,切削速度を低く して,かつ熱伝導性の良好な工具材を使用することが,工具 寿命の延長に有効な方法であることは良く知られている.し かも,超硬合金によるインコネルの切削においは超硬合金 K種などを用いて切りくずを薄く生成させるような切削が好 ましいとされてきたが,工具寿命の点から高速度切削で加工 することが出来ないため,きわめて低能率の加工条件で加工 せざるを得なかった<sup>4)</sup>.高速度切削には,耐熱性に優れたセ ラミックスや cBN 焼結体が有効な工具材種であり,山根ら<sup>5)</sup>

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail: wada@mech.nara-k.ac.jp

Table 1 Chemical composition of high-nickel alloy.

											(mass %)
Ni	Cr	Fe	Nb	Мо	Ti	Al	Co	Si	W	Cu	Р
52.2	19.0	19.0	4.8	3.1	1.0	0.5	0.2	0.1	0.04	0.03	0.01

Table 2 Properties of sintered cubic Boron Nitride compact.

Tool type	Binder phase*	Contents rate**	Grain size of cBN [µm]	Hardness [HV]	T. R. S. [GPa]
Type I	TiCN-Al	45/55	5.0	2700-2900	0.80-0.90
Type II	TiN-Al	65/35	3.0	3200-3400	1.00-1.10
Type III	TiN-Al	75/25	5.0	3500-3700	1.15-1.30
Type IV	TiC-Al	60/40	3.0	3000-3200	0.95-1.20
Type V	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al	60/40	3.0	3000-3200	0.90-1.10

\*: Main element, \*\*: (cBN grain/ binding phase), T. R. S.: Transverse-rupture strength

は、セラミックス工具によるインコネル718の高速度切削を 行い、工具損傷、特に境界部の損傷についてその発生状況を 調べ、境界損傷の抑制法について検討し、インコネル718の 高速度切削の可能性を探った。新谷ら<sup>4</sup>は、結合材の異なる CBN工具3種を用いてインコネル718材を旋削し、CBN工 具の損傷形態を観察することにより適合材種の選定と損耗機 構の解明を行った。

さて,超耐熱合金の切削には,高圧の切削油剤をすくい面 と逃げ面に供給する高圧クーラント切削法が有効である. 猪 谷ら<sup>0</sup>は,インコネル718の高圧クーラント切削を行い,通 常の湿式切削(常圧外部給油)に比べ,切削温度低下に効果 があることを示した.さらに,板倉ら<sup>7</sup>は,超硬合金K20種 工具でインコネル718の高圧クーラント切削を行い,切削油 剤の流速を速くなるに従って逃げ面摩耗幅が減少することを 明らかにした.このように,高圧クーラントを切削部に供給 する方法は,工具摩耗抑制に有効である<sup>8-10</sup>と考えられる. さらに,切削部へ高圧クーラントを供給することにより,工 具損傷抑制効果のみならず切りくず処理性の向上<sup>11</sup>も期待さ れる.

以上のことから,高ニッケル合金のように熱伝導性が悪 く,凝着摩耗を起こしやすい被削材の高速度仕上げ切削にお いては,cBN焼結体工具による高圧クーラント切削が有効で あると考えられるが,cBN焼結体の摩耗特性について体系的 に調べた研究は見あたらない.そこで本研究では,cBN焼 結体工具による高ニッケル合金の高速度仕上げ切削を対象と し,有効な cBN焼結体を見出すことを目的として,cBN含 有量,cBN粒径,および結合材の異なる5種類のcBN燒結 体の工具摩耗を調べた.また,高圧クーラント切削における 切りくず形状,および表面粗さについても調べたのでその結 果についても報告する.

#### 2 実験方法

被削材として使用した高ニッケル合金の化学成分を Table 1 に示す.

使用工具材は、Table 2 に示す3 種類の結合材の cBN 焼結

体を用いた. すなわち, 結合材が, TiCN-Al, あるいは TiN-Al で, cBN 含有量の異なる Type I, Type II, および Type III の cBN 焼結体である. なお, Al は cBN 焼結体の焼結助剤とし て用いられ, 焼結時に cBN 粒子および結合材と反応し焼結 後には Al としては残留しない. さらに, cBN 含有量がほぼ 同じで, 結合材が異なる Type III, Type VI, および Type VI の cBN 焼結体である. これら 5 種類の cBN 焼結体は, 全て 市販品である.

□25 mm×25 mmバイトホルダ(セコツール PTJNL2525M16JETL 型バイトホルダ)に、TNGA160408型チップを取付け使用し た. この場合の工具形状は、-6°、-6°、6°、6°、23°、-7°、 0.8 mmとなる.ここで、7つの数字は、前から順に前すくい 角、横すくい角、前逃げ角、横逃げ角、前切刃角、横切刃角、 コーナ半径である.また、cBN 焼結体の工具切れ刃にはチャ ンファーホーニングが施され、その寸法はチャンファ幅 W = 0.13 mm、角度θ=25°、R ホーニング R = 0.015 mm である.

使用工作機械は,森精機社製SL-25型ターニングセン ター(11/15 kW,主軸最高回転数4200 min<sup>-1</sup>)である.切 削は,乾式,および湿式で行った.湿式切削では高圧クー ラントユニットを使用したハイプレッシャー法を用いた. 使用した高圧クーラントユニットは,(株)トクピ製作所製 HIPRECO185-20型高圧クーラントユニット(最大供給圧力 20 MPa,最大供給流量45 L/min)である.高圧クーラントは, 逃げ面およびすくい面の2方向から切削部へ供給された.

Table 3 に示す切削条件で高ニッケル合金の外周旋削を行い、切りくず形状、表面粗さ、工具摩耗を調べた. すなわち、乾式、湿式切削ともに送り 0.10 mm/rev、切込み 0.20 mmと一定とした. 乾式切削では切削速度 5.00 m/s のみ、湿式切

Table 3 Cutting conditions in cutting high-nickel alloy.

Cutting speed	5.00, 7.50, 10.00 m/s
Feed rate	0.10 mm/rev
Depth of cut	0.20 mm
Cutting method	Wet (high pressure coolant supply), Dry cutting

削では切削速度を, 5.00, 7.50, および 10.00 m/s に変化させ た. クーラント圧力は、7、14、および20 MPaで、クーラン トユニットからの切削油剤の供給量は、それぞれ16L/min, 23 L/min, および 28 L/min である. 切削油剤はユシローケン FGS650(濃度10±3%)を用いた.表面粗さの測定には、 (株)東京精密社製ハンディサ-フE-40A型触針式表面粗さ 測定器を用い,送り方向の仕上げ面のプロフィールを記録した.

#### 3 実験結果および考察

切削速度を 5.00 m/s,送り 0.10 mm/rev,切込み 0.20 mm と 一定として、クーラント圧力を変化させて高ニッケル合金を 旋削し、切りくずを調べた. Fig.1に、Type II 工具の場合を 示す.一般に、工具摩耗の進行により切りくず形状が変化す る. そこで、工具摩耗が小さい切削開始付近の切りくずを採 取した. 乾式切削の場合をFig.1(a)に示す. クーラント圧 力が7,14,および20 MPaの湿式切削の場合を,それぞれ Fig. 1 (b), (c), および (d) に示す. 高圧クーラント切削では, 切りくずは短く折断される. Fig. 1から, 切削速度を 5.00 m/s で乾式切削すると連続した切りくずが生成される.これは、



(a) Dry cutting

(b) Coolant pressure of 7 MPa 2 mm



(b) Coolant pressure of 14 MPa (d) Coolant pressure of 20 MPa

Fig. 1 Chip generated when turning high-nickel alloy with various coolant pressures at cutting speed of 5.00 m/s, at feed rate of 0.1 mm/rev, depth of cut of 0.2 mm and work-piece diameter of 68 mm.

送り、切込みが小さいため薄い切りくずが生成される、さら に、チップブレーカが付与していないため、切りくずは曲げ られることなく連続した切りくずが生成される. これに対 し、クーラント圧力が7 MPa 以上では、切りくずが折断され ている.また、クーラント圧力が高くなるほど、切りくずは 短く折断されるが、これには次の理由が考えられる. すなわ ち,中山<sup>12)</sup>によると,チップブレーカをつけたバイトで旋削 すると切込みに比べ送りの小さい場合、切りくずの折れかた には、加工物障害形、うずまき形、および逃げ面障害形の3 つの折断様式を報告している.このうち,加工物障害型,あ るいは逃げ面障害型は、チップブレーカによってある曲率を 与えられた切りくずが、加工物の肩(または外周)、あるい は逃げ面にあたり、切りくずが曲げられ折断される. また、 切りくずが折れるか否かを直接支配するものとして、切りく ずの延性,切りくずの曲率半径,および切りくず厚さをあ げている<sup>13)</sup>.このうち、切りくずの曲率半径が小さい場合、 チップブレーカに加わる力も大きくなり、また切りくずも折 断されやすい. さて、切りくずを曲げる作用は通常チップブ レーカによって行われるが、本研究で使用した cBN 焼結体 工具にはチップブレーカは付与されていない. 高圧クーラン ト切削では、クーラントによる流体圧力が切りくずを曲げる 作用を行っている. このため. クーラント圧力を高圧にする ことによって、切りくずに作用する曲げモーメントが増加 し、切りくず流出半径の減少、およびそれに伴う切りくずの 曲率半径の減少によって切りくずが折断されたと考えられる.

以上のことから、高ニッケル合金の切削においても、高圧 クーラント法を用いることにより、切りくず処理性、特に切 りくず折断性能が向上することがわかる.

Fig.2に、切削速度5.00 m/s で乾式切削した場合の工具摩 耗を示す.ここで、Lは切削距離である.いずれの工具も、 切込み境界部に、大きな損傷が見られる、山根ら14)は、セラ ミック工具でインコネル718の切削を行い、横逃げ面境界摩 耗幅(Notch wear on the depth of cut line) および逃げ面平行 部摩耗幅(Average flank wear)を調べた結果,逃げ面平行部 摩耗幅に比べ横逃げ面境界摩耗幅が大きく発達することが特 徴とし、ある切削領域を越えると減少するとしている、本研



(a) Type I (L=0.22 km)



(b) Type II (L=0. 25 km)



(c) Type III (L=0.25km) Fig. 2 Tool wear observed after turning high-nickel alloy with various cBN tools at cutting speed of 5.00 m/s under dry cutting.

究でも、高ニッケル合金を、切削速度 5.00 m/s で乾式切削し た場合、いずれの工具も、逃げ面平行部に比べ切込み境界部 の摩耗が大きく発達している。新谷<sup>4)</sup> らは、インコネル 718 の切削を 3 種類の CBN 工具で行った結果、CBN 工具の損耗 形態は切削速度の違いにより大きく異なり、低速と高速では 大きく破損するが、これらの中間域では適正条件が存在する として、3 つの切削領域、すなわち切削速度 1.0 m/s 付近の領 域 I, 切削速度 2.5 m/s 付近の領域 II, および切削速度 4.0 m/s 付近の領域 III に分けている。さらに、切削速度と切削温度 を対応させている。特に、切削速度 4.0 m/s 付近の高速度切 削では、各工具とも超硬工具でインコネル材を加工したとき に観察される凝着欠損<sup>15)</sup> により寿命が決定づけられるとして いる。このことから、本研究においても、高ニッケル合金を 切削速度 5.00 m/s で乾式切削した場合、いずれの工具も凝着 欠損により工具が激しく損傷したものと考えられる。

次に、クーラント圧力20 MPaで、切削速度を5.00, 10.00 m/s の2種類に変化させて高ニッケル合金の湿式切削を行った. Fig.3に、工具の摩耗状態を示す.先ず、切削速度5.00 m/s の場合について述べる.Type II 工具では、Fig.2に示した 乾式切削に比べ、切込み境界部の工具損傷はかなり改善さ れている.しかし、Type I, Type III 工具では、Fig.2に示し た乾式切削に比べ、コーナ部の損傷はやや改善されている が、切込み境界部の工具損傷については高圧クーラント切 削を行っても顕著な改善は見られない.次に,切削速度が 10.00 m/s の場合について述べる. Type II 工具では,切削速 度を 10.00 m/s の高速度切削にすることによりコーナ部の摩 耗幅(逃げ面平行部摩耗幅)は増加しているが,切込み境界 部の境界摩耗が抑制されている.

以上のことから、Fig.2に示した乾式切削の場合とFig.3 に示す高圧クーラント切削の場合を比較すると、いずれの工 具について損傷状態がかなり改善されている. 工具の凝着欠 損を抑えるには、切削温度を低下させること、あるいは被削 材と工具の凝着を防止することが有効な方法である. 板倉 ら<sup>7)</sup>は,超硬合金工具でインコネル718を切削速度0.83 m/s で切削した場合、高圧注液により切削温度が250K低減した としている. さらに、本研究で使用した切削油剤は、ソリュ ブル型水溶性切削油剤で、高潤滑に優れている. これらの 理由から、切削速度 5.00 m/s の場合、高圧クーラントを供給 することにより凝着欠損が抑えられ、工具の損傷状態が改 善されたと考えられる.次に,高圧クーラント切削におい て, Type II, Type III 工具では, 切削速度 10.00 m/s の高速度 切削にすることによりコーナ部の摩耗幅(逃げ面平行部摩耗 幅)は増加しているが、切込み境界部の境界摩耗が抑制され ている.この理由として、次のことが考えられる.切削温 度は、切削速度10.00 m/sの方が高温である、加藤ら<sup>16</sup>は、 ADI (ベイナイト地球状黒鉛鋳鉄)を4種類のCBN工具で



V: Cutting speed, L: Cutting distance

Fig. 3 Tool wear observed after turning high-nickel alloy with different cBN tools at coolant pressure of 20 MPa.

切削を行った結果,いずれのCBN 工具の摩耗速度も切削温 度1100K(切削速度1.67 m/s)付近で極小値を持つ直線で表 されるとしている. すなわち, 切削温度には適した切削温度 が存在することが分かる. このため, 高ニッケル合金の高圧 クーラント切削では、切削速度10.00 m/sの方が適した切削 温度であったと推察できる. さらに, 高ニッケル合金は加工 硬化を起こしやすいため、切込み境界付近は前回の切削で加 工硬化している. 切削速度が低速の場合, 加工硬化した部分 の温度上昇による軟化が生じにくいが、高速度切削にするこ とにより加工硬化が低減され境界摩耗が小さくなったと考 えられる. なお, Type I 工具の場合, Fig. 2 (a), および Fig. 3 中の切削速度 5.0 m/s における A 部に示すように、すくい面 の切りくず両端と接触する部分に細長い溝状の摩耗(溝摩 耗)が大きく発生しており、Type II, Type III 工具の場合と 摩耗の状態がやや異なる.このため、後述のFig.4で示され るように、Type I 工具の逃げ面摩耗幅の最大値は、切削速度 10.00 m/s の方が切削速度 5.00 m/s より大きくなっている. こ れには,次の理由が考えられる.大石ら<sup>17)</sup>は,CBN工具で SUS304をCBN含有量の少ない工具で切削した場合、切削 速度 5.33 m/s では横逃げ面に大きな欠損が発生し、切削速度 2.67 m/s 以上では境界摩耗により寿命が決定される. 切削速 度1.33 m/s にすると欠損は前逃げ面に発生しやすくなり、ま た溝摩耗が形成されるとしている. CBN 工具における溝摩 耗の生成は、結合材として用いられているセラミックスのぜ い性の影響が大きいとして、溝摩耗は、セラミックス系結合 材含有量の多いCBN 工具で,Ni 含有量の多い被削材を低切 削速度(実験では1.33 m/s)で削ったときに、すくい面の工 具・切りくず接触域の両端部に形成するとしている.また, 被削材と工具の凝着は溝摩耗が形成される必要条件としてい る。この溝摩耗は、工具・切りくず接触領域の両端部におい て、工具材の一部が、凝着物の離脱時にcBN粒子が剥離す ることによって発生するとしている.ことから推察すると, Type I工具の結合材含有量は他の工具に比べ多い(CBN含有 量は少ない). このため、乾式切削では、高温のため被削材 とCBN 工具の凝着が激しく起こり、すくい面上に溝状の摩 耗が大きく生成される、高圧クーラント切削では、被削材と CBN 工具の凝着が起っているが、切削速度 10.00 m/s の高速 度切削では溝摩耗が抑制され、逃げ面摩耗が増加したと考え られる.

Fig. 4に逃げ面摩耗幅の最大値を示す. なお, Fig. 2および Fig. 3 で示したように cBN 焼結体工具で高ニッケル合金を



Fig. 4 Flank wear width in turning high-nickel alloy with various cBN tools at coolant pressure of 20 MPa.

切削した場合、切削条件により、逃げ面境界摩耗幅 (VN) あるいは逃げ面平行部摩耗幅(VC)が大きく発達した. そ こで、VN, あるいはVCの大きい方を逃げ面摩耗幅の最大 値 (VBmax) とした.3種類のcBN 焼結体工具では,Type Ⅱ工具の逃げ面摩耗幅が最も小さい. また, 切削速度を高く すると、Type II 工具の逃げ面摩耗幅の最大値は小さくなっ ている. このことから, 主結合材が TiCN-Al, あるいは TiN-Al である3種類のcBN 焼結体工具の中では、cBN 含有率が 65%のType II工具の逃げ面摩耗幅が最も小さいことがわか る. これには, 次の理由が考えられる. 加藤ら<sup>10</sup>は, ADIの CBN 工具による切削において、切削温度 1100 K(切削速度 1.67 m/s)の条件下における工具の配合比が摩耗速度と高温 硬度(1273 K)に及ぼす影響について示している.また、こ の図には各配合比に対する結合材の平均厚さを算出し、併記 している. その結果、結合材厚さが厚くなると、高温硬度が 結合材厚さの薄い工具に比し約 1/3 程度に低下し、結合材自 身が持つ硬度に近くなるために耐摩耗性が低下する.一方, 結合材厚さが薄い場合には、高温硬度値は維持されるもの の結合力が低下するため摩耗速度が増加するとしている. 本研究で用いた Type I, II, III 工具の結合材の厚さ, すなわ ち平均自由行路<sup>18)</sup>を求めると、Type I 工具の結合材の厚さは 4.1 µm で, Type II, III 工具の結合材の厚さはいずれも 1.1 µm である.このため、結合材の厚さが最も厚い Type I 工具の摩 耗がやや大きくなったと考えられる. さらに, Type II 工具 の cBN 粒径 3 µm は, Type III 工具の 5 µm に比べ小さい.加 藤ら<sup>16</sup>は、大粒径のcBN工具は切れ刃のcBN粒子にマイク ロ破砕が観察されることやこれに起因する cBN 粒子の大き さに相当した脱落が観察されるが、小粒径 cBN 粒工具の切 れ刃稜線ではcBN 粒子破砕やこれに起因するような粒子の 脱落はほとんど観察されず、鋭利さを保っているとしてい る.本研究でも、硬質物質である cBN 粒子の脱落が主因と して摩耗が進行すると考えられる.このため、cBN 粒径が小 さい Type II では、cBN 粒子の破砕やこれに起因するような 粒子の脱落が起りにくくなり、Type II 工具の逃げ面摩耗幅 が小さくなったと考えられる.

以上のことから,高ニッケル合金の高圧クーラント切削で は、主結合材がTiCN-Al,あるいはTiN-AlのcBN焼結体の 場合,cBN含有率65%でcBN粒径3µmのcBN焼結体が優 れていることがわかった.そこで,主結合材が工具摩耗に及 ぼす影響を明らかにするために,cBN含有率が65%程度, cBN粒径3µmで,結合材の異なるcBN焼結体工具で高ニッ ケル合金の高圧クーラント切削を行った.Fig.5に,cBN 含有量が60~65%で,結合材が,TiN-Al,TiC-Al,および Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Alである3種類のcBN焼結体工具の摩耗状態を示す. なお、クーラント圧力は20MPaである.切削速度5.00m/s の場合,いずれのcBN焼結体も逃げ面の切込み境界部に大 きな損傷が見られる.これに対し,切削速度を10.00m/sに 高速にすると,いずれのcBN焼結体も逃げ面の切込み境界 部は抑制され、コーナ部の摩耗が主な工具損傷となってい る.Type Vの逃げ面摩耗幅が最も小さくなっており,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-



V: Cutting speed, L: Cutting distance

Fig. 5 Tool wear observed after turning high-nickel alloy with different cBN tools under coolant pressure of 20 MPa at cutting speed of 5.00 m/s and 10.00 m/s.

Alの結合材を持つ cBN 焼結体が高ニッケル合金の高圧クー ラント切削に有効な結合材種であることがわかる. なお. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Alの結合材を持つ Type V が高ニッケル合金の高圧 クーラント切削に有効な結合材である理由は次の通りと考え られる. すなわち, Table 2 に示したように, Type II, Type IV. および Type VのcBN 含有量はほぼ同じで、cBN 粒径は 3µmで同じである. また, Type Vの硬さ, 抗折力は, Type II, Type IV に比べ、それぞれ小さいか、あるいは同程度で ある.このため、工具の硬さ、抗折力以外の要因が考えられ る.新谷ら<sup>19)</sup>は、TiN 結合材を用いた cBN 焼結体を 1273 K で10 min 間アルゴンガス中で保持したものと、無加熱試料 との組成の比較をX線回折によって行っている. その結果, 非加熱試料のX線回折から、工具材は、cBN、AIN、TiB2、 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,およびTiNから形成されているとしている.そし て、同試料を加熱処理すると cBN 粒子の主結合材である TiN の一部がもろいTiO2へと変化し、cBN 粒子の結合強度を低 下させることを推測している.本研究でも、TiN-Alの結合 材を持つ Type II の場合, 主結合材である TiN の一部がもろ いTiO<sub>2</sub>へと変化し、cBN粒子の結合強度を低下し、摩耗が 大きくなったと考えられる. また, TiC-Alの結合材を持つ Type IV の場合も、主結合材である TiC の一部がもろい TiO<sub>2</sub> へと変化したと推察される.これに対し、Al2O3-Alの結合材 を持つ Type V の場合, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は酸化しないため, 上記のよう

な酸化反応が生じなかったと考えられる. なお, 結合材に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を持つ cBN 焼結体は, 耐酸化性が優れているため, 切 削温度が高くなる被削材の切削に使用されている. したがっ て, 結合材に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al を持つ Type V は, 高ニッケル合金の 高圧クーラント切削に有効な工具材である.

そこで、Type V工具について、切削速度、クーラント圧 力の効果を詳細に調べるために、工具の逃げ面摩耗幅の最大 値 (VBmax), すなわち逃げ面境界摩耗幅 (VN) あるいは 逃げ面平行部摩耗幅(VC)のいずれかの大きい方が0.15 mm を超えるまで切削を行い, Type V工具の摩耗進行(切削距 離と逃げ面摩耗幅の最大値との関係)を求めた、次に、この 摩耗進行において、工具の逃げ面摩耗幅の最大値が0.15 mm になる切削時間を寿命時間とした. Fig.6に工具寿命曲線 (V-T線図)を示す. 切削速度7.25, および10.00 m/sでは クーラント圧力 20 MPa で切削すると長時間の切削が可能で ある. これに対し、切削速度 5.00 m/s では、クーラント圧力 20 MPa で切削すると工具寿命が最も短くなる. Fig. 7 に, 切 削速度 5.00, および 10.00 m/s における工具の摩耗状態を示 す. クーラント圧力 20 MPa の場合, 切削速度 5.00 m/s では 逃げ面の境界部の摩耗が大きくなり工具寿命に達する. これ に対し、切削速度10.00 m/s では逃げ面の境界部の摩耗が抑 制される. E. O. Ezugwu ら<sup>8)</sup>は、PVD コーテッド超硬合金工 具でインコネル718の高圧クーラント切削を、クーラント圧



Fig. 6 Tool life curve when turning high-nickel alloy with Type V tool under high pressure coolant supplies of 7 MPa, 14 MPa and 20 MPa at feed rate of 0.1 mm/rev and depth of cut of 0.2 mm.

力,切削速度を変化させて工具寿命を調べた.その結果, 切削速度0.83 m/s でクーラント圧力203 bar (20.3 MPa)の 場合,工具寿命時間は,通常の湿式切削に比べ740%改善 されるが,切削速度0.33 m/sの場合,工具寿命は通常の湿式 切削に比べ短命で,さらに切削速度0.33 m/sの方が切削速度 0.50 m/sに比べ短命であるとしている.本研究でも,低速度



Fig. 8 Relation between cutting distance and surface roughness when turning high-nickel alloy under coolant pressure of 20 MPa at cutting speed of 10.00 m/s.

切削時にクーラント圧力を高圧にすると、工具寿命が短命に なり同様な傾向が得られた.

以上のことから,高ニッケル合金の高速度仕上げ切削では、Type Vを用いクーラント圧力を高圧にすることで、工 具寿命の延命に有効であることが明らかになった.そこで、 クーラント圧力 20 MPa、切削速度 10.00 m/s で高速度切削し た場合の表面粗さを調べた.Fig.8に、この場合の表面粗さ



V: Cutting speed, P: Coolant pressure, L: Cutting distance

Fig. 7 Tool wear observed after turning nickel alloy with Type V tool under coolant pressure of 7 MPa, 14 MPa and 20 MPa at cutting speed of 5.00 m/s and 10.00 m/s.

Rz(最大高さ)を示す. 佐田ら<sup>20)</sup>は、炭素鋼工具鋼を超硬 合金工具で旋削し、切削時間の経過による切削仕上げ面粗さ の変化を調べた. その結果、送りマークの山の高さが切削時 間の経過とともに次第に高くなり、それにしたがって切削仕 上げ面の粗さも増大していくとしている. Fig.8に示すよう に高圧クーラント切削においても、表面粗さは切削距離の増 加につれ増加している.

#### 4 結 言

本研究では、cBN 焼結体工具による高ニッケル合金の仕上 げ切削を対象に、高速度切削による高能率切削加工を達成す るために、高圧クーラント切削を行い、切りくず形状、工具 摩耗、および表面粗さを調べた.

得られた主な結果は、次の通りである.

- (1) クーラント圧力を高圧にすることにより、切りくずは短く折断された.このため、高圧クーラント切削は、切りくず処理性、特に切りくず折断性能向上に有効な方法であった.
- (2) 高ニッケル合金の仕上げ切削の場合,乾式切削では,逃 げ面の切込み境界部に,大きな工具損傷が見られた.これに対し,cBN 含有量 50~60%の cBN 焼結体による高速度・高圧クーラント切削では,逃げ面の切込み境界部の工具損傷を抑制することができた.
- (3) 高ニッケル合金の高圧クーラント切削には、cBN 含有量が60%で、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Alの結合材を持つcBN 焼結体が有効な工具材種であった.
- (4) cBN 含有量が60%で、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Alの結合材を持つ cBN 焼 結体工具による高ニッケル合金の高圧クーラント切削に おいて、クーラント圧力を高圧で切削する場合、切削速 度を低速にすると、逃げ面の切込み境界部に大きな工具 損傷が生じ、工具寿命が短命になった。

以上のことから、cBN 含有量が60%で、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Alの結合 材を持つ cBN 焼結体工具で高ニッケル合金の仕上げ切削を 行う場合、切削速度 7.50 m/s 以上の高速度切削では、クーラ ント圧力を高圧にすることにより工具寿命の延命に有効であ ることが明らかになった.

#### 辞

cBN 焼結体工具のご提供にご協力いただきました(株)タンガロイに感謝の意を表します.

#### 文 献

- K. Itakura, M. Kuroda, H. Omokawa, H. Itani, K. Yamamoto, Y. Ariura: "Wear Mechanism of Coated Cemented Carbide Tool in Cutting of Super Heat Resisting Alloy Inconel", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 65 (1999) 976-981.
- K. Karino: Nansakuzai Sinsozai no Sessakukakou Handobukku, Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd., (2002) 256.
- 3) S. Hanasaki, J. Fujiwara, K. Sakagami, Y. Hasegawa: "Cutting

of a High-Nickel Alloy: 1st Report, Mechanism of Flank Groove Wear Formation", Transactions of the JSME (C), **55** (1989) 780-786.

- K. Shintani, H. Kato, et al.: "Cutting Performance of CBN Tools in Machining of Nickel Based Superalloy", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 58 (1992) 1685-1690.
- Y. Yamane, N. Amano, K. Hayashi, N. Narutaki: "High Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools–Suppression of Notch Wear–", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **59** (1993) 1815-1820.
- H. Itani, M. Kuroda, T. Egawa, M. Takeuchi, K. Itakura: "High Efficiency Cutting of Difficult-to-Machine Material by High Pressure Injection", Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Technical Review, 35 (1998) 148-151.
- K. Itakura, M. Kuroda, Y. Doi, H. Tsukamoto, Y. Ariura: "High Speed Cutting of Super Heat Resisting Alloy Inconel 718–On the Finish Cutting with High Pressurized Cutting Fluid–", 66 (2000) 1611-1615.
- E. O. Ezugwu, J. Bonney: "Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools", Journal of Materials Process Technology, 152-154 (2004) 1045-1050.
- E. O. Ezugwu, R. B. Da Silva, J. Bonney, Á. R. Machado: "Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45-9 (2005) 1009–1014.
- E. O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane: "An overview of the machinability of aeroengine alloys", Journal of Materials Processing Technology, **134-2** (2003) 233-253.
- E. O. Ezugwu: "High speed machining of aero-engine alloys", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 26-1 (2004) 1-11.
- K. Nakayama: "Breaking-up of Chip by Chip Breaker", JSPE, 26-307 (1960) 482-483.
- K. Nakayama: "A Study on Chip Breaker", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 27-178 (1961) 833-843.
- 14) Y. Yamane, K. Hayashi, N. Narutaki: "High Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools (2nd Report)–Potentiality of TiC Whisker Reinforced Alumina Ceramic Tool–", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 61 (1995) 1463-1467.
- 15) N. Iijima, H. Takeyama, Y. Yamamoto: "Microscopic Analysis of Metal Adhesion on Tool Surface and Prevention of Brittle Fracture of Tool Material–Study on Surface Characterization of Cutting Tool Material and Prevention of Its Brittle Fracture (Part 2)–", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 52 (1986) 1335-1341.

- 16) H. Kato, K. Shintani, Y. Fujimura: "Wear Performance of CBN Tool in Machining of ADI (Effect of Tool Life on Sintered Elements)", Transactions of Japan Soc. of Mechanical Engineers (Ser. C), 57-541 (1991) 3027-3031.
- 17) K. Oishi, T. Ono, S. Miyazawa, "Basic Investigation on Mechanism of Groove Wear Formation", Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 52 (1986) 819-825.
- H. Suzyki, T. Tanase, "the influence of carbide Grain-Size and Binder Content on the Transverse-Rupture Strength of WC-

Co Cemented Carbide", J. Japan Inst. Met. Mater., **40** (1976) 726-732.

- 19) K. Shintani, H. Kato, Y. Fujimyra, A. Yamamoto: "Cutting Performance of CBN Tools in Machining of Austempered Bainitic Spheroidal Graphite Cast Iron", J. Jpn. Soc. Precision Engineering, 56 (1990) 2261-2266.
- 20) T. Sata, K. Amano: "Correlation of Roughness of Machined Surface with Tool Wear", Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 26 (1960) 686-690.