

# インコネル718の旋削加工に関する研究

—乾式切削の場合—

機械金属部 前野一朗, 市来浩一, 田中秀穂\*, 佐藤正彦\*

Study on Turning of Inconel 718 Alloy

—on Dry Cutting—

Ichiro MAENO, Koichi ICHIKI, Hideho TANAKA \*, and Masahiko SATO \*

時効硬化処理したニッケル基耐熱合金インコネル718を、現在市販されている超硬合金 K 10, P 20, サーメット, セラミック, CBN の計 5 種類の切削工具を使用して乾式旋削を行い、工具損傷, 仕上げ面, 工具寿命及び工具コストについて検討した。その結果, 工具寿命は CBN, 超硬合金 K 10, P 20, サーメット, セラミック工具の順となり, 仕上げ面粗さを考慮した加工では超硬合金 P 20 工具が良い。最適切削速度領域は CBN 工具で 50 m/min, 超硬合金 K 10, P 20 工具では 25 m/min 付近に存在し, 工具コストを考慮した場合, K 10, CBN 工具を比較すると超硬合金 K 10 工具がかなり有利であるが, 加工能率では CBN 工具が 2 倍有利であることがわかった。

## 1. 緒 言

近年, 本県では耐熱合金, セラミックス等の難削材料の加工技術の高度化が要請されており, 筆者らはこれまで種々の難削材料に関して切削加工技術の研究を行ってきた。

今回取り上げた材料は, ニッケル基耐熱合金であるインコネル718で, Ni を主成分とした合金である。その成分内容は 53% Ni - 19% Cr - 18% Fe - 5% Nb + Ta - 3% Mo その他多くの微量成分を含む析出硬化型の合金で, 熱伝導率が低い, 高温強度が高い等の材料特性を持つため, 各種難削材の中でも被削性の最も悪い部類に入る<sup>1)2)</sup>。また, 上記特性のほか, 腐食環境に強い等の利点があるためジェットエンジンやガスタービン用部品として利用されている<sup>3)</sup>。

しかし, インコネル718は, まだ加工の歴史が浅く加工技術データは十分であるとは言えない。

そこで, 本報告では最適切削加工条件を見いだすことを

目的として, 現在市販されている超硬合金 K 10 (以下 K 10 と称す), 超硬合金 P 20 (以下 P 20 と称す), サーメット, セラミック, CBN の 5 種類の切削工具を用いてインコネル718の旋削を行い, 工具寿命, 仕上げ面粗さ及び工具コストについて検討した結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2. 1 被削材

実験に供した被削材は, インコネル718 (HB 415) の時効硬化処理材で形状は  $\phi 75\text{mm} \times 150\text{mm}$  である。その化学成分を表 1 に示す。

### 2. 2 切削工具と実験条件

使用した切削工具は, 市販品で K 10, P 20, サーメット, セラミック, CBN の 5 種類である。その工具材の成分と機械的性質及びチャンファーを表 2 に示す。

実験には, 精密旋盤 (株)昌運工作所製 ST - 5 型, 無段

表 1 インコネル 7 1 8 の化学成分

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	Cu	Al
%	0.03	0.08	0.06	0.009	0.001	52.55	18.73	3.10	0.15	0.02	0.47
化学成分	Ti	Nb+Ta	B	Fe							
%	0.96	5.05	0.0048	Bal							

\* 鹿児島大学工学部

表2 工具材の成分と機械的性質及びチャンファー

工具材	成分	硬度 HRA	抗折力 MPa	熱伝導率 W/m·K	比重	チャンファー mm×deg
K 10	WC-Co	92.0	2354	79.53	14.7	----
P 20	WC-TiC-TaC-Co	91.5	1961	33.49	11.9	0.03×-25°
サーメット	TiC-TiN-TaC-WC	92.0	1667		7.0	0.04×-30°
セラミック	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	92.6	981	17874	3.27	0.08×-30°
CBN	CBN-TiN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HV >3000	863			0.02×-15°

表3 実験条件と工具諸元

工具名	成分	切削条件	切削諸元	
			切削速度	送り
K10 (WC-Co) P 20 (WC-TiC-TaC-Co) サーメット (TiC-TiN-TaC-WC) セラミック (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> ) CBN (CBN-TiN-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		切	切削形態	旋削, 外丸削り, 乾式
			工具形状	0°, 5°, 11°, 6°, 15°, 15°, 0.8 mm
			工具寸法	12.70 × 12.70 × 3.18mm
			切削速度	K 10 : 12.5 25 50 m/min
				P 20 : 12.5 25 50 m/min
				サーメット : 12.5 25 50 m/min
				セラミック : 12.5 25 50 m/min
	CBN : 25 50 100 m/min			
		切込み	0.5mm	
		送り	0.1mm/rev	

変速機付き)を使用した。切削は外丸削りとし、全て乾式で行った。表3に実験条件と工具諸元を示す。

### 2.3 測定項目

一定切削時間毎に工具の横逃げ面摩耗幅と横逃げ面及び前逃げ面の境界摩耗幅を工場顕微鏡(株)ニコン製MM-22型)で測定し、工具損傷状態を観察した。

また、歪ゲージ式切削動力計(佐藤工業(株)製AST-TM)で切削抵抗を測定し、接触式表面粗さ測定機(株)ミツトヨ製サーフテスト701)で表面粗さを測定した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 工具損傷形態と逃げ面摩耗経過

図1, 2, 3, 4に切削速度12.5, 25, 50, 100 m/minにおける横逃げ面摩耗幅が約0.2mmになったときの工具損傷状態を示す。

K 10, P 20, サーメット, セラミック, CBN 工具の刃先には全ての切削条件で付着物が観察され、特に切削速度の低い12.5 m/minの条件では、工具刃先への付着物または構成刃先が多く観察された(図1)。

K10 工具では、切削速度12.5 m/minの場合のみ横逃げ

面境界摩耗が観察され、他の条件では観察されなかった。また、他の工具に比べ、前逃げ面の境界摩耗が小さく、大きな欠けが見られない等、本実験で使用した工具の中で最も安定した摩耗形態を示した。逃げ面の摩耗は、アブレッシブ摩耗である<sup>4)</sup>(図1, 2, 3)。

P 20, サーメット工具はK 10工具に次いで、ほぼ安定した摩耗形態を示した。逃げ面の摩耗はアブレッシブ摩耗であるが、サーメット工具の切削速度50 m/minでは急激に横逃げ面摩耗が進行し、切削速度が速過ぎると言える(図3)。

セラミック工具の場合は、切削初期から全ての切削速度で横逃げ面境界部からすくい面にかけてチップングもしくは欠けを生じ、その傾向は切削時間の経過と共に大きくなった。また、逃げ面は微小チップングから発達したと思われる筋状の凹凸のある激しい凝着摩耗形態を呈した。これは、窒化けい素系セラミックがインコネル718に対して反応性が高いこと<sup>5)</sup>、工具刃先の付着物の成長脱落が考えられること、工具の抗折力が981 MPaと小さいこと、被削材の高温強度が816℃で516 MPaと高いこと<sup>3)</sup>等に起因するものと考えられる(図2, 3)。

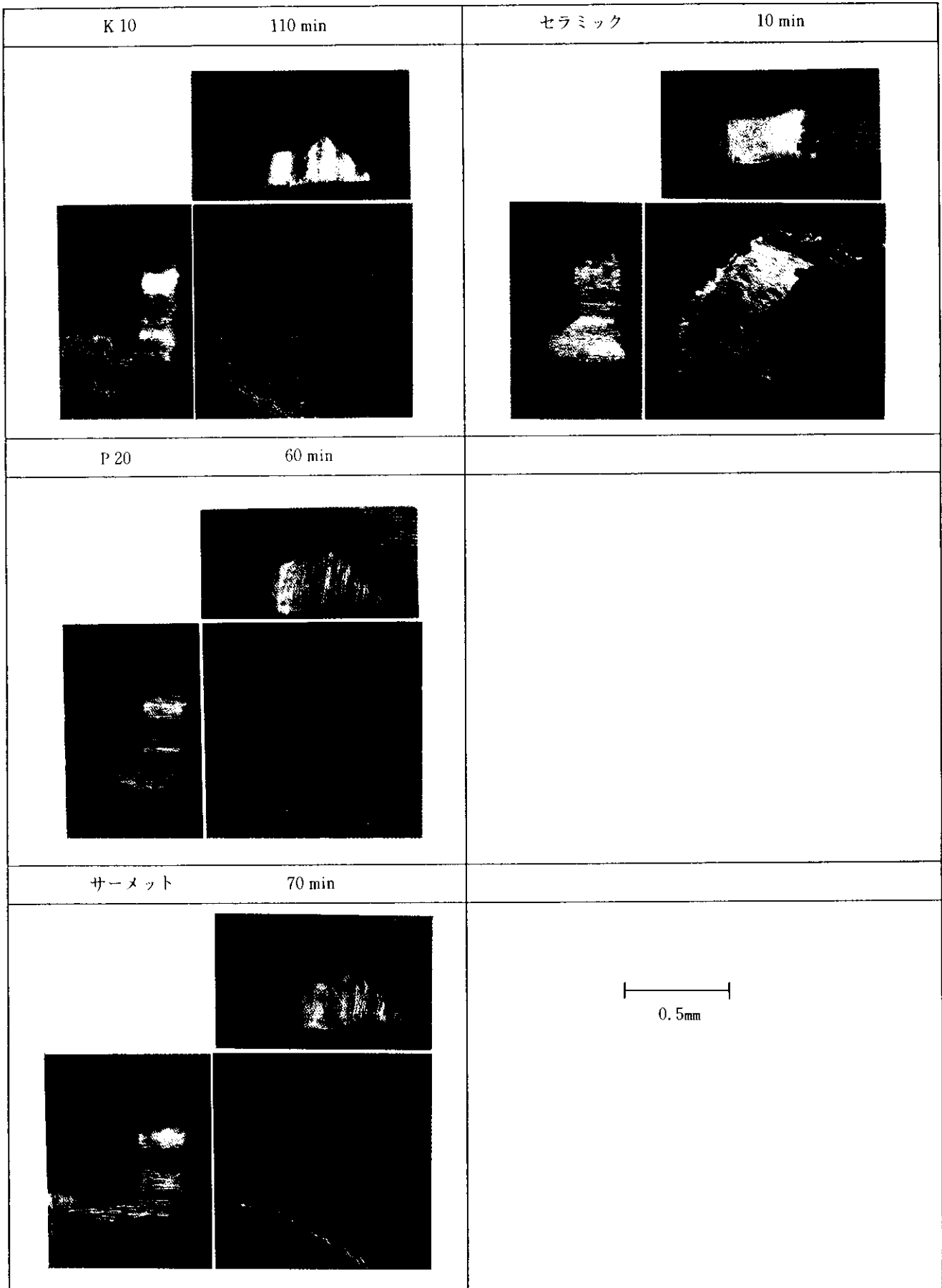


図1 各種工具の切削速度12.5 m/minにおける工具損傷状態  
 $V_s = 0.2\text{mm}$ 付近  
 ( $t = 0.5\text{mm}$ ,  $f = 0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

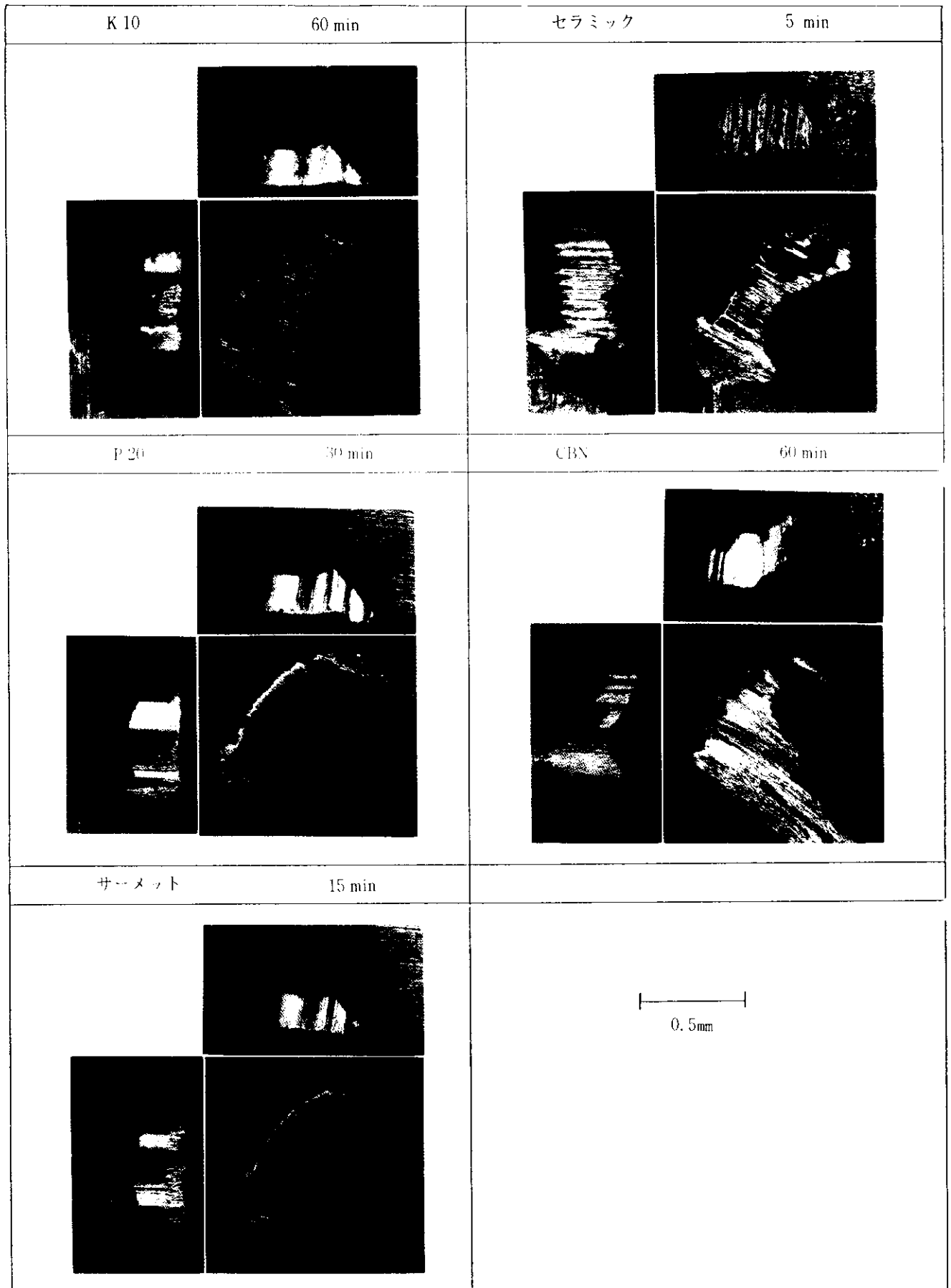


図2 各種工具の切削速度25 m/minにおける工具損傷状態  
 $V_n = 0.2\text{mm}$ 付近  
 $(t = 0.5\text{mm}, f = 0.1\text{mm/rev}, \text{乾式})$

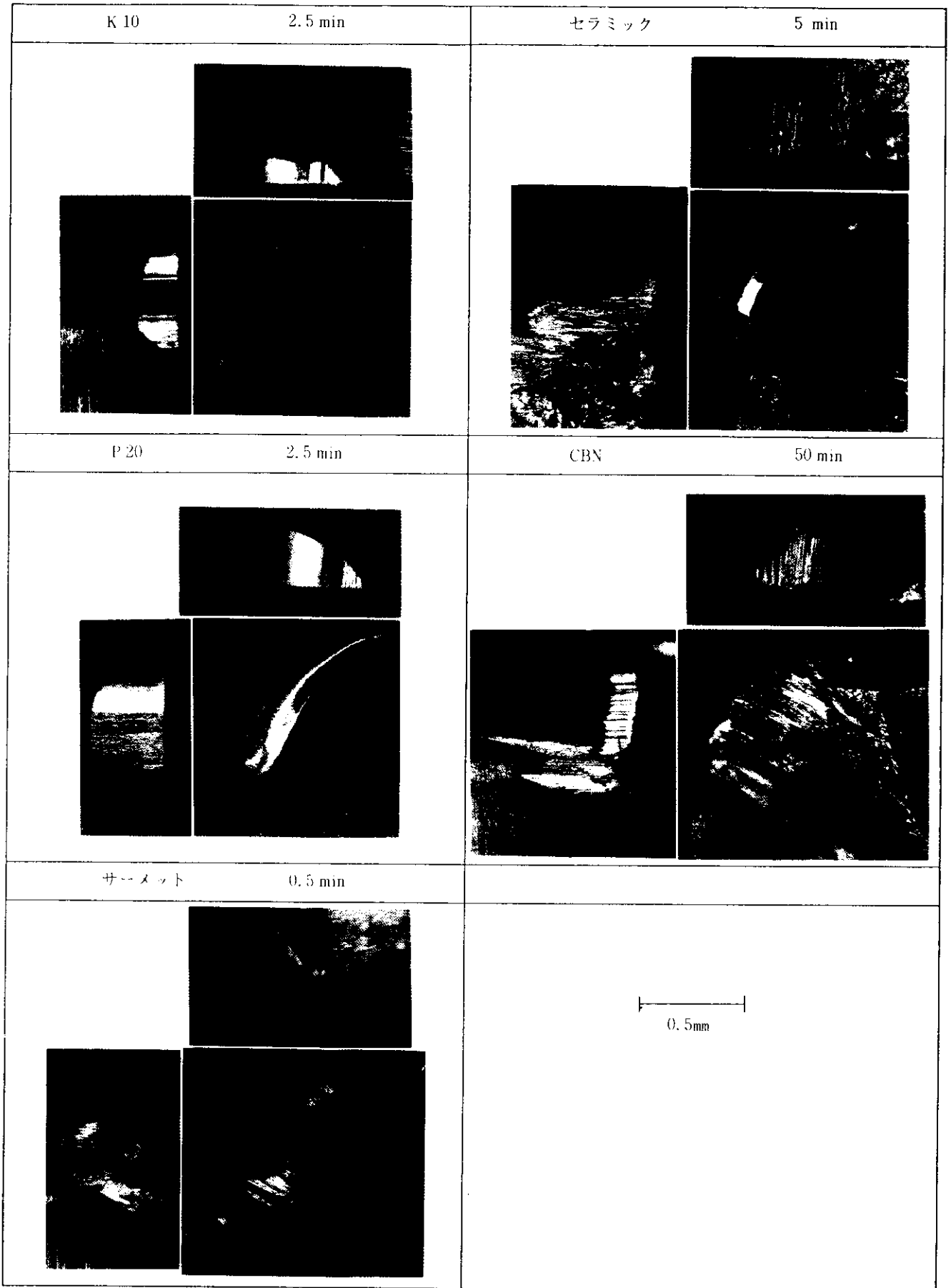


図3 各種工具の切削速度50 m/minにおける工具損傷状態  
 $V_t = 0.2\text{mm}$ 付近  
 $(t = 0.5\text{mm}, f = 0.1\text{mm/rev}, \text{乾式})$

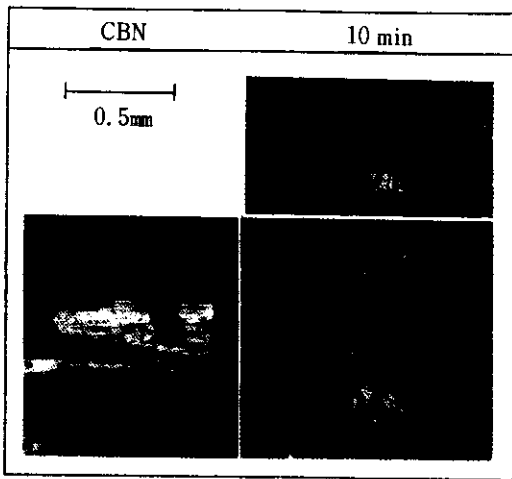


図4 CBN 工具の切削速度100 m/min における工具損傷状態  
 $V_0 = 0.2\text{mm}$  付近  
 ( $t = 0.5\text{mm}$ ,  $f = 0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

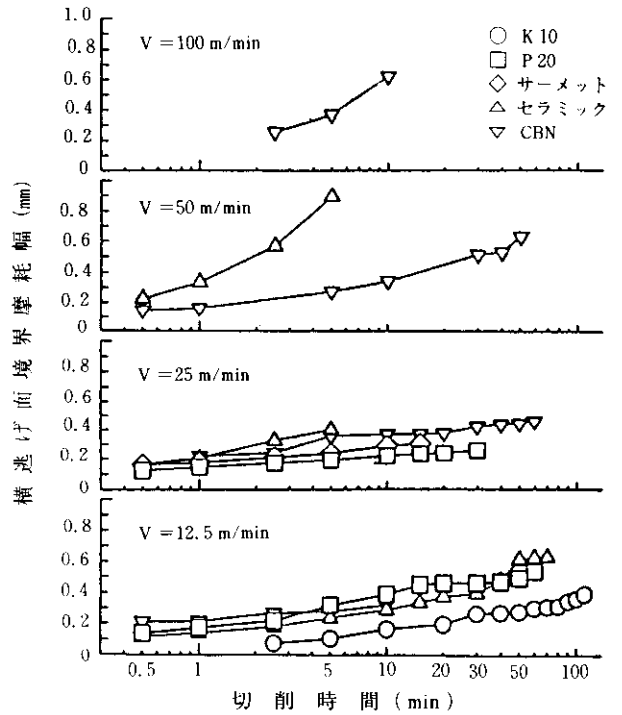


図6 各種切削工具の横逃げ面境界摩耗経過曲線  
 ( $t = 0.5\text{mm}$ ,  $f = 0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

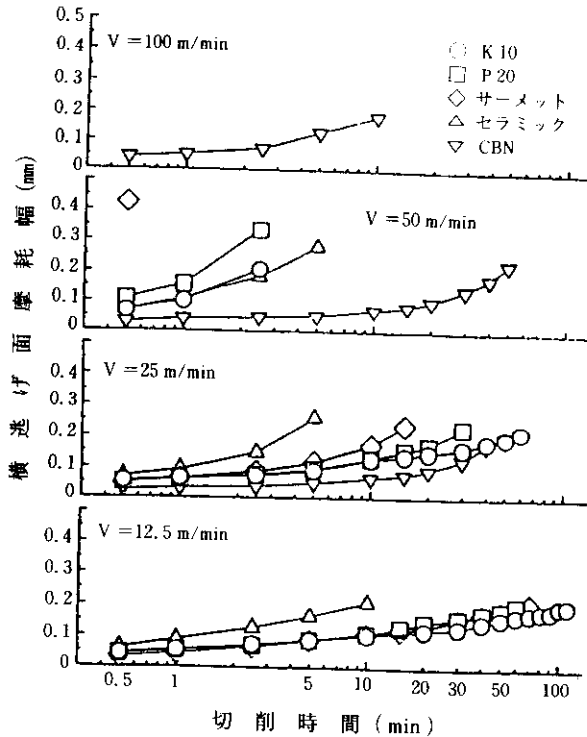


図5 各種切削工具の横逃げ面摩耗経過曲線  
 ( $t = 0.5\text{mm}$ ,  $f = 0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

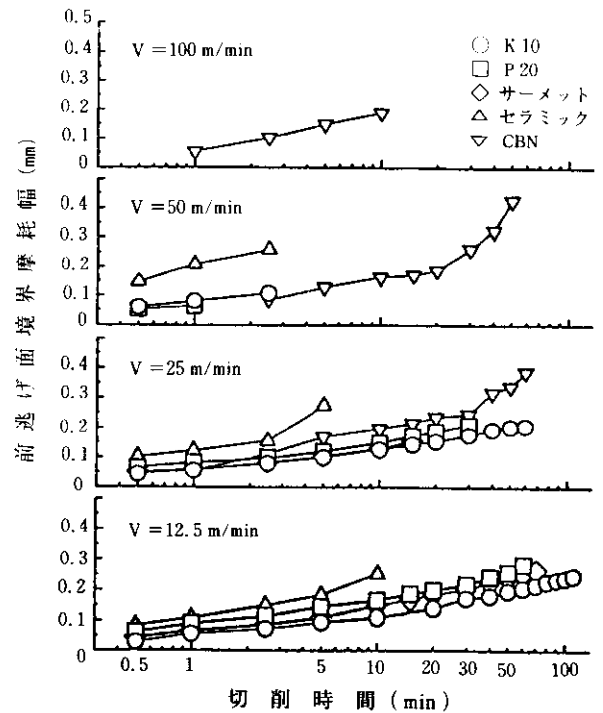


図7 各種切削工具の前逃げ面境界摩耗経過曲線  
 ( $t = 0.5\text{mm}$ ,  $f = 0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

CBN 工具の場合は、切削速度25, 50, 100 m/min, 切削時間2.5 min で全て前逃げ面境界部に欠けを生じた。また切削速度25 m/min の切削時間15 min, 切削速度50 m/min の切削時間10 min, 切削速度100 m/min の切削時間2.5 min で各々横逃げ面境界部にも欠けを生じ、切削時間が経過すると前逃げ面境界部、横逃げ面境界部の欠けは大きく成長した。これは、被削材の高温強度が高いこと、セラミック

工具の場合と同じように工具刃先の付着物の成長脱落が考えられること、工具の中で抗折力が863 MPa とかなり小さいこと等に起因するものと考えられる。逃げ面の摩耗進行状況は安定していない(図2, 3, 4)。

図5に、実験より得られた各工具の横逃げ面摩耗経過曲線を示す。図に示すように横逃げ面摩耗の経過では、各工具共に切削速度が高くなると当然のことであるが摩耗の進

行は早くなる。CBN 工具は、切削速度25 m/min の場合、横逃げ面摩耗幅が0.2mm付近で K 10 工具とほぼ同じ工具寿命を示した。これは、横逃げ面境界摩耗が発生した CBN 工具の場合、前述したように境界部に欠けが発生し、その欠けの成長が横逃げ面摩耗の進行を早くしたと考える。このことが、横逃げ面境界摩耗の発生しなかった K 10 工具との差であると考えられる。また、CBN 工具は切削速度50 m/min の場合、他の工具が切削時間 5 min 以下で横逃げ面摩耗幅0.2mmに達するのに比べ50 min と長寿命である。

切削時間でみると K 10 工具の切削速度12.5 m/min の場合が110 min と最も長い時間切削できることが確認できた。また、前述したように、サーメット工具の切削速度50 m/min の場合、切削時間がわずか0.5 min で横逃げ面摩耗幅は0.426mmに達しており、インコネル718の旋削条件としては切削速度が速過ぎると言える。

図6に、各工具の横逃げ面境界摩耗経過曲線を示す。K 10 工具の切削速度12.5 m/min の条件では横逃げ面に境界摩耗が観察された。また、P 20、サーメット工具の切削速度50 m/min では横逃げ面摩耗の進行が早く、境界摩耗は観察されなかった。

セラミック工具の場合、切削速度25 m/min、切削時間 5 min で横逃げ面境界摩耗は0.461mmに達した。また、前述したように CBN 工具の場合、切削速度25 m/min 切削時間15 min、切削速度50 m/min 切削時間10 min、切削速度100 m/min 切削時間2.5 min で横逃げ面境界部に欠けを生じており、これ以上切削を継続すると欠けは大きく成長した。このように横逃げ面の境界摩耗が進行するに従い、被削材の端面にはばりが発生し、その高さは徐々に大きくなった。

図7に、各工具の前逃げ面境界摩耗経過曲線を示す。急激に横逃げ面摩耗が進行したサーメット工具の切削速度50 m/min 以外の全ての条件では、前逃げ面に境界摩耗が観察された。特に、前逃げ面境界部に欠けを生じたセラミック、CBN 工具は、他の工具に比べ前逃げ面境界摩耗の進行が速い。

### 3.2 切削抵抗

図8、9、10に各工具による切削抵抗の変化を示す。

すなわち、図8に主分力、図9に送り分力、図10に背分力の変化を示す。

図8で明かなように、主分力は各工具共に切削時間の経過と共に徐々に増加する。特にチャンファーが一番大きく摩耗の激しいセラミック工具の場合が他の工具に比べその

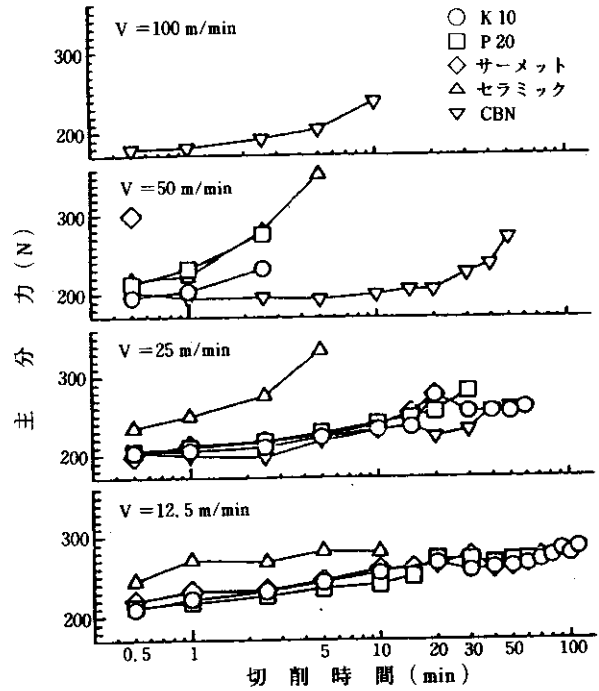


図8 各種切削工具の切削抵抗（主分力）の変化 (t=0.5mm, f=0.1mm/rev, 乾式)

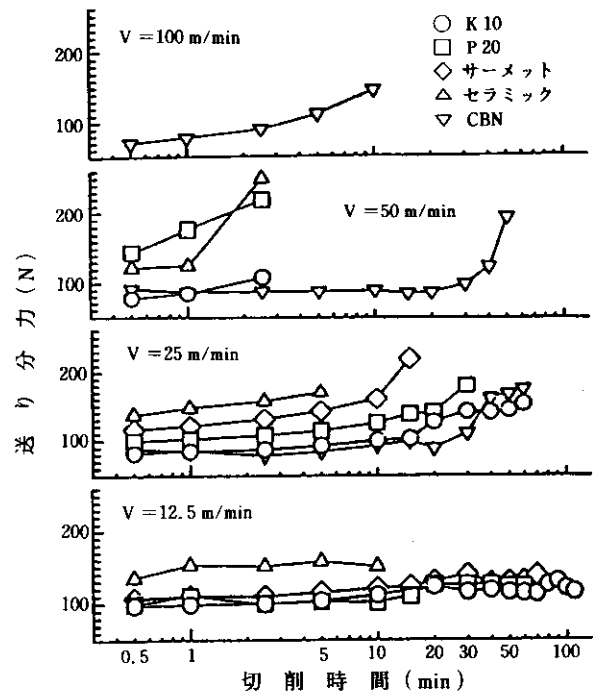


図9 各種切削工具の切削抵抗（送り分力）の変化 (t=0.5mm, f=0.1mm/rev, 乾式)

増加が大きい。

図9で明かなように、送り分力は切削速度12.5 m/min の場合、切削時間の経過と共に余り変化せずほぼ一定であるが、切削速度が大きくなると切削時間の経過と共に増加する。

図10で明かなように、背分力は切削速度が大きくなると切削時間の経過と共に増加する。

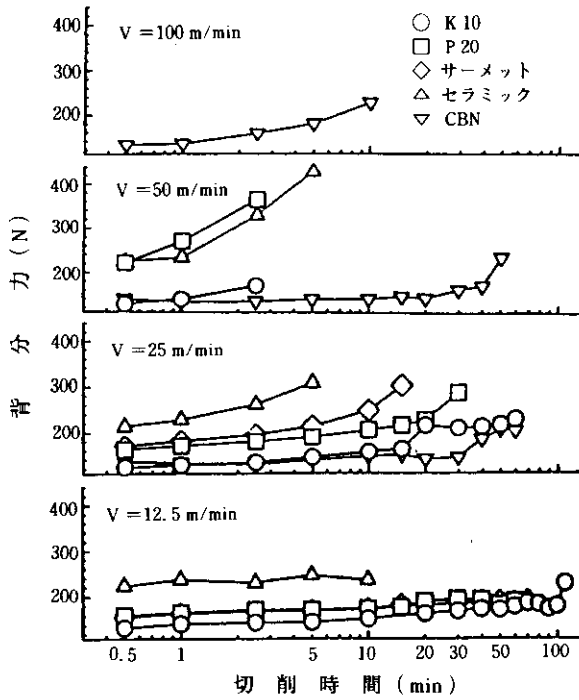


図10 各種切削工具の切削抵抗(背分力)の変化  
( $t=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

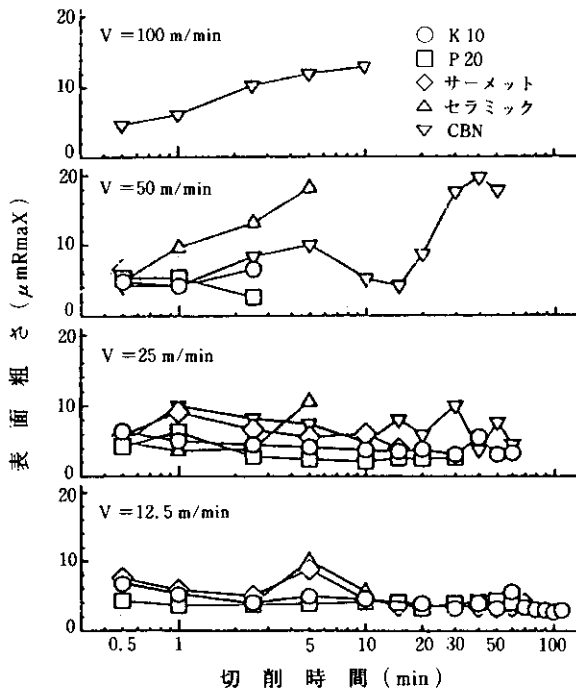


図11 各種切削工具の表面粗さの変化  
( $t=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

横逃げ面摩耗幅が0.2mm付近及びそれ以上に達すると急激に増加する傾向を示し、その値は主分力を越える場合もあった。

### 3.3 仕上げ面粗さ

図11に、実験より得られた各工具の切削時間による表面粗さの変化を示す。図で明かなように、切削速度12.5、25

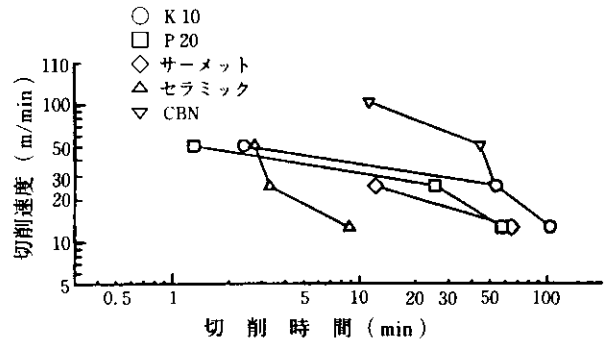


図12 各種切削工具の寿命曲線 ( $V_b=0.2\text{mm}$ )  
( $t=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

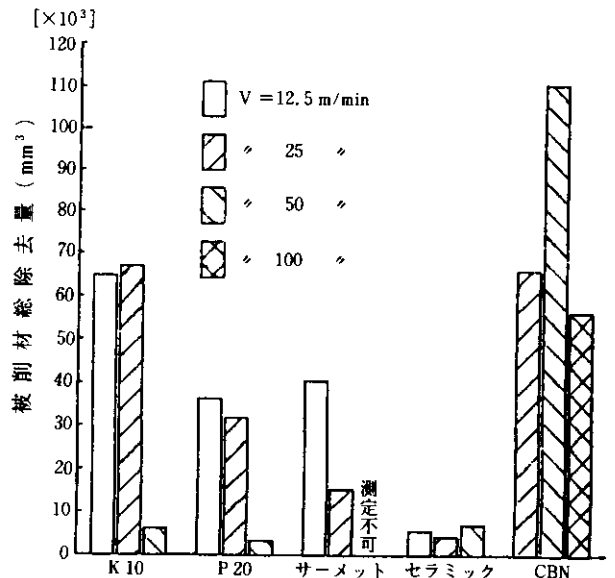


図13 各種工具による被削材の総除去量の比較  
 $V_b=0.2\text{mm}$   
( $t=0.5\text{mm}$ ,  $f=0.1\text{mm/rev}$ , 乾式)

m/min の場合、全ての工具ではほぼ3~10  $\mu\text{mRmax}$  の表面粗さが得られた。また、切削速度50、100 m/min の場合、セラミック、CBN 工具ではほぼ3~20  $\mu\text{mRmax}$  の表面粗さが得られた。全ての工具の中で、P20工具の場合は仕上げ面粗さが小さい傾向にあり、特に、切削速度25 m/min の場合、切削初期には4  $\mu\text{mRmax}$  程度の表面粗さを示すが、切削時間2.5 min 以後2~3  $\mu\text{mRmax}$  と表面粗さは向上し、最も良い結果を得た。このことは、インコネル718が工具との反応性が高く、超硬合金の場合、元素分析結果では高濃度のCo層が検出されたとする文献<sup>5)</sup>もあり、P20、K10工具のCo量を調べたが、P20工具で約8%、K10工具で約6%が含有されており、Co量から判断すると相反する結果となり、表面粗さが向上した原因は他にあると考えられる。



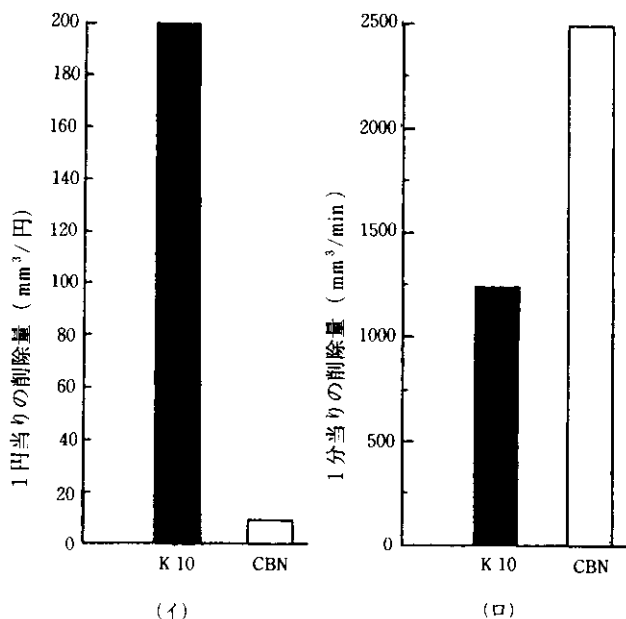


図14 K 10, CBN 工具の工具コストの比較

セラミック工具の場合は、切削速度25 m/min 切削時間5 min で10.6 μmRmax, 切削速度50 m/min 切削時間5 min では18.2 μmRmax と表面粗さが粗くなった。これは前述したように、セラミック工具が微小チップングから発達したと思われる筋状の凹凸のある激しい凝着摩耗形態を示すことや前逃げ面境界部の欠けによる影響と考えられる。

また、前逃げ面境界部に欠けを生じた CBN 工具の場合も同じように切削速度25 m/min 切削時間30 min で10.1 μmRmax, 切削速度50 m/min 切削時間40 min で19.7 μmRmax, 切削速度100 m/min 切削時間10 min で13.0 μmRmax と他の工具に比べ表面粗さが粗かった。表面粗さの粗い被削材の表面には微粉状の切り屑の付着が観察された。これは、前逃げ面に欠けを生じた切り刃が付着物の成長脱落により鈍化することと付着物の脱落時に仕上げ面へも付着したと考えられる。

### 3. 4 工具寿命

図12に、実験より得られた寿命曲線を示す。寿命判定基準は、横逃げ面摩耗幅  $V_b = 0.2\text{mm}$  である。図で明かなように工具寿命は、CBN, K 10, P 20, サーメット, セラミック工具の順で短くなった。工具寿命が長かった CBN, K 10, P 20 工具の最適切削速度は、CBN 工具で50 m/min, K 10, P 20 工具で25 m/min 付近に存在すると考えられる。

これらのことからサーメット, セラミック工具は、インコネル718の切削工具材種としては不適であると考えられる。

### 3. 5 工具コスト

図13に、横逃げ面摩耗幅  $V_b$  が0.2mmに達するまでの各工

具による被削材の総除去量を示す。図で明かなように、総除去量の最も多い切削条件は CBN 工具の切削速度50 m/min, CBN 工具の切削速度25 m/min, K 10 工具の切削速度25 m/min, K 10 工具の切削速度12.5 m/min の順となり、CBN, K 10 工具が他の工具に比べ除去量が多いことがわかる。

ここで工具コストを考えてみると、金額面では、定価で CBN 工具が12000円/1個, K 10 工具が1340円/1個である。1個当たりの使用可能コーナー数は、CBN 工具が1コーナー, K 10 工具が4コーナーである。従って CBN 工具が12000円/1コーナー, K 10 工具が1340/4で335円/1コーナーとなり、K 10 工具が CBN 工具に比べ約1/36の金額となる。1円当たりの除去量は、総除去量で最も多い CBN 工具の切削速度50 m/min の場合が110196 mm³, K 10 工具の切削速度25 m/min の場合が66911 mm³ であるので、CBN 工具では、110196/12000となり9.2 mm³/円, K 10 工具では66911/335となり199.7 mm³/円となる。従って1円当たりの除去量では K 10 工具が CBN 工具に比べ21.7倍と非常に有利であることがわかる (図14, (イ))。

また、加工能率面では、総除去量で最も多い CBN 工具の切削速度50 m/min, K 10 工具の切削速度25 m/min の場合で横逃げ面摩耗幅  $V_b$  が0.2mmに達するまでの切削時間は、CBN 工具で44.3 min, K 10 工具で53.8 min であり、1 min 当たりの除去量は CBN 工具が110096/44.3で2487.5 mm³/min, K 10 工具が66911/53.8で1243.7 mm³/min となり CBN 工具が K 10 工具に比べ2倍良いことがわかる。(図14, (ロ))。

## 4. 結 言

各種難削材料の中でも特に被削性の最も悪い部類に入る材料であるニッケル基耐熱合金インコネル718を、市販されている K 10, P 20, サーメット, セラミック, CBN 工具を用いて乾式旋削し、次のような結論を得た。

- (1) 工具寿命は CBN, K 10, P 20, サーメット, セラミック工具の順で短くなった。
- (2) 仕上げ面粗さを考慮する加工では、P 20 工具が良い。
- (3) 最適切削速度領域は、CBN 工具の場合50 m/min, K 10, P 20 工具の場合25 m/min 付近に存在する。
- (4) サーメット, セラミック工具は、インコネル718の切削工具としては、不向きである。

(5) 工具コストを考慮した場合、金額面ではK 10工具がCBN 工具に比べ21.7倍と非常に有利であるが、加工能率ではCBN 工具がK 10工具に比べ2倍有利である。

### 参 考 文 献

1) 狩野勝吉：“難削材の切削加工技術”，工業調査会(1989) p.189

- 2) 泊誠ら：鹿児島県工業技術センター研究報告，1,73 (1989)
- 3) 日立金属(株)：超耐熱合金資料，No.269, p. 4, 6
- 4) 竹山秀彦ら：耐熱合金の難削特性と工具材の適応性に関する研究,精密工学会誌,55,8 (1989)p. 1486
- 5) 山根八洲男：第8回難削材加工専門委員会資料 (1991) p. 1