

## チタンおよびチタン合金の切削 (第1報)\*

谷口正紀\*\*・藤田武男\*\*

Machining of Titanium and its Alloy (1st Report)

Masaki TANIGUCHI and Takeo FUJITA

## Abstract

Titanium and its alloy to have excellent heat resisting and anti-corrosion properties are used for aerospace industry and many parts of chemical equipments, but they are hard to machine.

Machining property of them is studied by the observation of tool failure, cutting resistance and tool life through hot-machining and normal machining.

- 1) Titanium alloy shows lower cutting resistance through hot-machining than normal machining, while titanium shows higher.
- 2) The failure of ceramics tool through hot-machining is larger than normal machining.
- 3) Sintered carbide (K-type), not contained TiC and TaC, is the best to machine the titanium and its alloy.

## 1. 緒言

チタンおよびチタン合金<sup>1)</sup>は耐熱性, 耐食性にすぐれているため航空宇宙産業<sup>2)</sup>をはじめ多くの化学装置に使用されている。しかしながらその加工は非常に困難である。本実験は難削材であるチタンおよびチタン合金をいかに経済的にかつ容易に切削できるかを見出すため他の金属切削に対し効果的であった加熱切削<sup>3)</sup>を採用し切削抵抗および工具損傷の観察を行ない、チタンおよびチタン合金の経済的加工について検討を加えることにした。

またチタン合金はある条件下では非常に化学的に活性でありこれが工具損傷におよぼす影響は大きい。そこで現在使用されている数種類の工具を使用し寿命試験を行ない、チタン合金切削のための最適工具を見つけると共にいかなる化学成分がチタン合金切削に影響を与えるかをおおまかに知ることをも目的とした。

## 2. 実験装置および被削材

## 2.1 機械, 装置

本実験に使用した加熱方法は局部電気抵抗加熱法で、旋盤は三菱 HL-300G 形高速旋盤 (ベッド上の振

り 320mm, 心間最大長さ 500mm, 電動機 3.7kW) である。測定装置には昌運工作所製機械試験所式 KSA 500形切削動力計, 新興通信工業製 DS 6/RJ 形動ひずみ測定器および渡辺測器製 WTR211-3C 形ペン書きレコーダを用いて切削抵抗の三分力を測定した。クレータ摩耗の測定には小坂研究所製 SE-4 形表面あらさ測定器を使用した。

## 2.2 工具

工具はスローアウェイ式クランプバイトで、チップ材種は加熱切削のときはセラミックを用い、寿命試験のときは超硬チップ (K-10, P-30, P-20, P-10, P-01) を使用し参考としてセラミックスとサーメットを使用した。刃部形状は前すくい角, 横すくい角, 前逃げ角, 横逃げ角, 前切れ刃角, 横切れ刃角, ノーズ半径の順に (-5, -7, 5, 7, 15, 15, 0.8) である。

## 2.3 被削材

被削材は 50φ×300 の鍛造丸棒を用いた。その機械的性質および化学成分を Table 1 に示す。

\* 昭和45年7月3日 日本機械学会中国四国支部徳島地方講演会において講演

\*\* 工業短期大学部機械工学教室

Table 1 Mechanical properties and chemical composition of workpieces

(a) Titanium

Yield strength 0.2% kg/mm <sup>2</sup>	Tensile strength kg/mm <sup>2</sup>	Elongation percentage %	Contraction percentage %
30	43	33	61

Fe	N	O	H	Ti
0.062	0.041	0.116	0.0026	Balance

(b) Titanium alloy

Yield strength 0.2% kg/mm <sup>2</sup>	Tensile strength kg/mm <sup>2</sup>	Elongation percentage %	Contraction percentage %
91	103	14	20

Fe	N	O	H	C
1.07	0.004	0.197	0.0072	0.009

Al	Cr	Ti
5.65	2.22	Balance

3. 実験条件

加熱条件を一定とするため被削材表面仕上げは切削速度100m/min, 送り0.09mm/rev, 切り込み0.5mmと一定にした。工具は東芝タンガロイ製 TA31-3型ホルダでチップ材種は超硬K-10を用いた。

送り：(加熱切削の場合)

0.03, 0.045, 0.09, 0.15, 0.3mm/rev

：(寿命試験の場合)

0.03mm/revのみ

切り込み：(加熱切削の場合) 0.5mm

：(寿命試験の場合) 1mm

加熱電流：0, 200, 250, 300 A

4. 実験結果および考察

4.1 切削抵抗

Fig. 1~Fig. 4はチタン合金切削における加熱電流と切削抵抗との関係を各切削速度ごとに表わした図であり、切削速度はそれぞれ38, 54, 75, 152m/minである。抵抗値は三分力の合力で表わした。図よりいずれの切削速度においても加熱することにより切削抵抗

が減少することがわかる。それも送りの大きいほうが加熱効果が顕著である。切削速度 38m/min 送り 0.3 mm/rev における 0 A と 300A とでは 26%の切削抵抗の減少が得られる。

また加熱電流のちがいによる切削抵抗の変化は中切削速度 75m/min で一番小さく低速度 38m/min と高速度 152m/min で大きくなる。

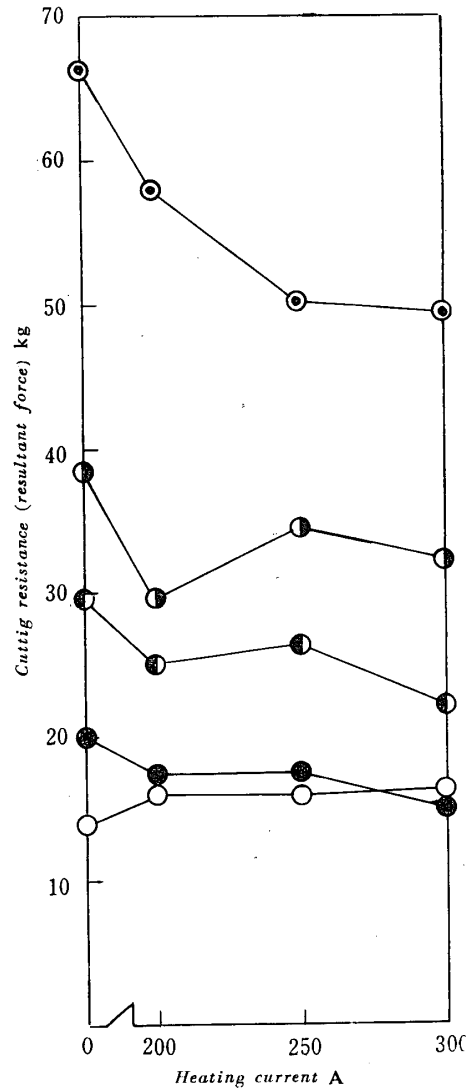


Fig. 1 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium alloy      Symbol :  
 Tool : Ceramics              ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm        ● 0.045    〃  
 Cutting Speed : 38m/min    ◐ 0.09    〃  
    ◑ 0.15    〃  
    ⊙ 0.3     〃

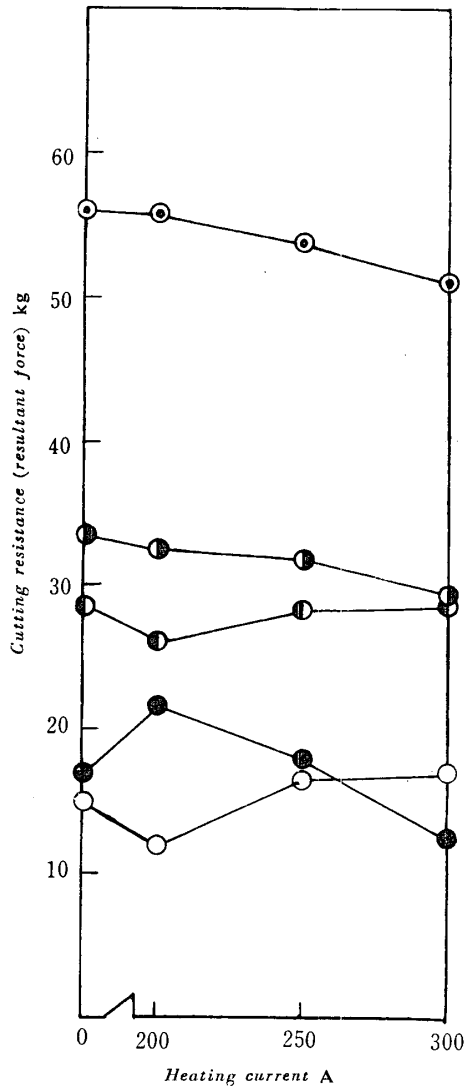


Fig. 2 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium alloy      Symbol :  
 Tool : Ceramics            ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm      ● 0.045 //  
 Cutting speed : 54m/min    ◐ 0.09 //  
                                   ● 0.15 //  
                                   ⊙ 0.3 //

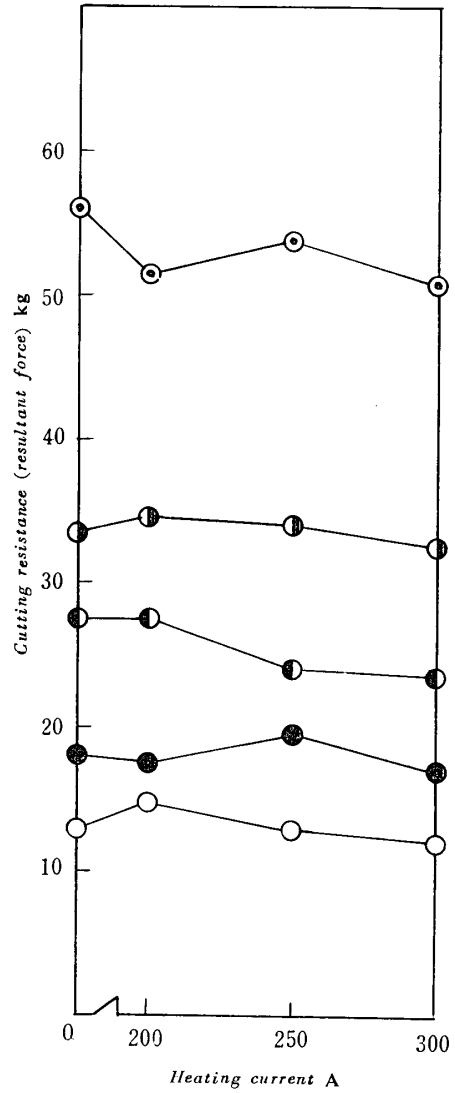


Fig. 3 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium alloy      Symbol :  
 Tool : Ceramics            ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm      ● 0.045 //  
 Cutting speed : 75m/min    ◐ 0.09 //  
                                   ● 0.15 //  
                                   ⊙ 0.3 //

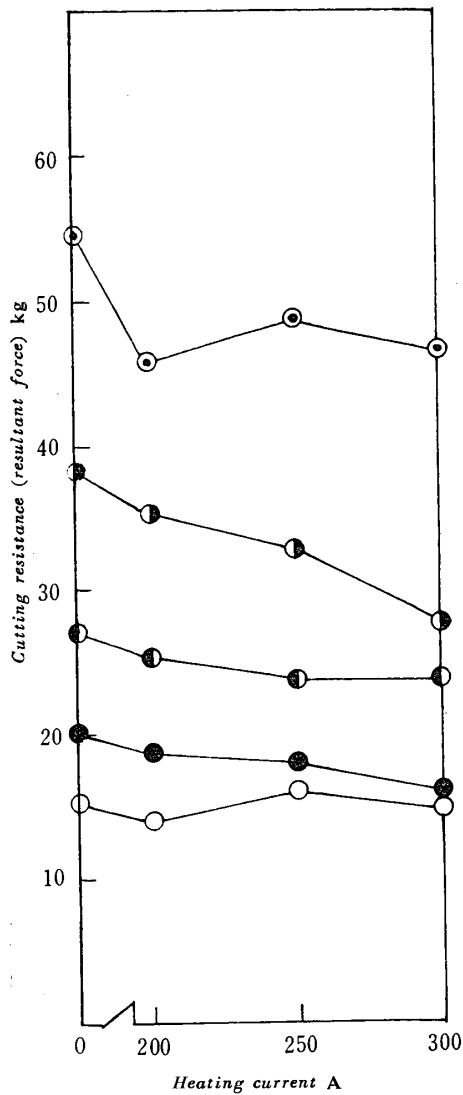


Fig. 4 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium alloy      Symbol :  
 Tool : Ceramics              ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm        ● 0.045 //  
    ◐ 0.09 //  
    ◑ 0.15 //  
 Cutting speed : 152m/min    ⊙ 0.3 //

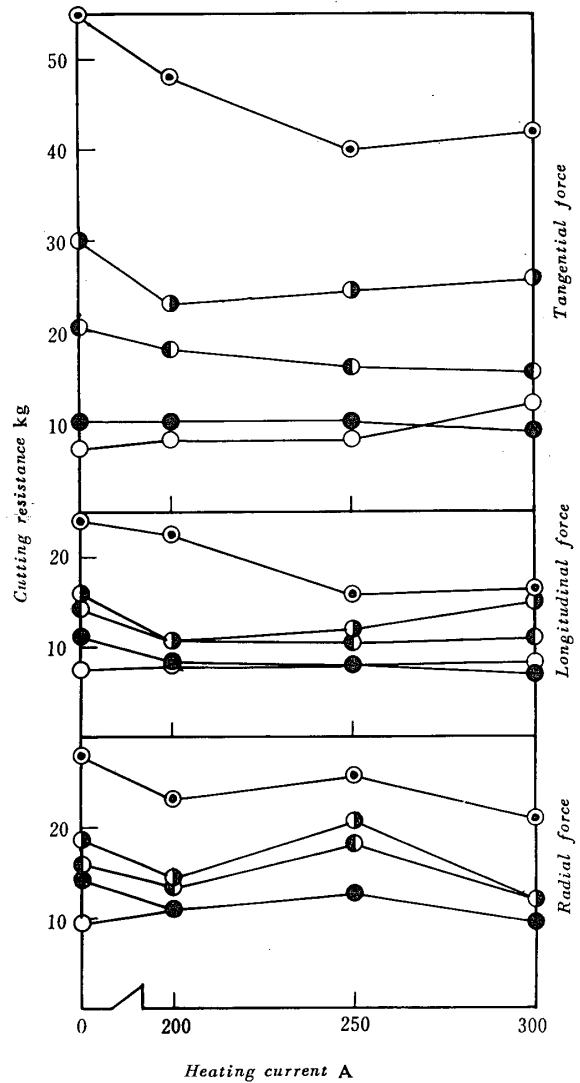


Fig. 5 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium alloy      Symbol :  
 Tool : Ceramics              ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm        ● 0.045 //  
    ◐ 0.09 //  
    ◑ 0.15 //  
 Cutting speed : 38m/min    ⊙ 0.3 //

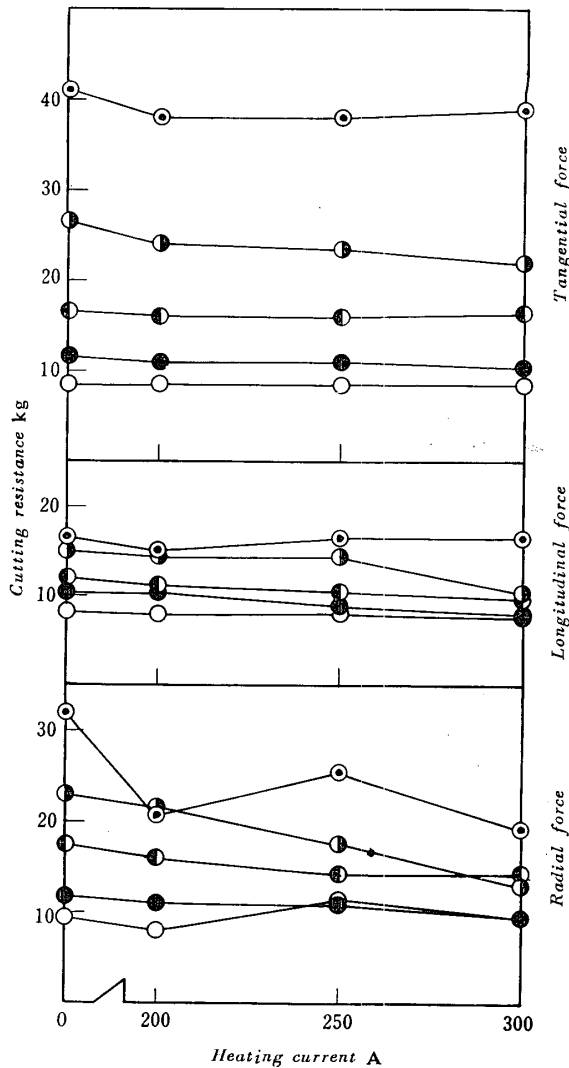


Fig. 6 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium alloy      Symbol :  
 Tool : Ceramics              ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm        ● 0.045 〃  
                                      ◐ 0.05 〃  
 Cutting speed : 152m/min    ● 0.15 〃  
                                      ⊗ 0.3 〃

つぎに各分力への影響をみる。Fig. 5, Fig. 6は加熱電流と各分力との関係を示したもので切削速度はそれぞれ38m/min と152m/min である。加熱による影響は主分力と背分力とに大きく現われ、特に背分力は変動が大きく送り分力にはあまり影響しない。それも高速度になるほど影響度が小さくなっている。

純チタンについてはFig. 7~Fig.10に示す。切削条件はFig. 1~Fig. 4と同様である。加熱による切削抵抗の減少は見られずむしろ加熱することにより、わずかではあるが抵抗値が増加し、チタン合金の場合と異なっている。

また当然のことながら送りの増大とともに抵抗値は増大するが特に主分力、背分力に大きく現われ送りが変化しても送り分力はあまり変化しない。

つぎに切削速度と抵抗との関係を0A と300A との場合について表わしたのがFig.11~Fig.14である。純チタン、チタン合金ともいずれの電流の場合でも切削速度の増加につれ抵抗値は単調に減少する。

チタンおよびチタン合金切削においては、構成刃先の発生が少ないため他の構成刃先の生じやすい金属材料切削のように各切削速度による抵抗値の増減は見られず切削速度の増加につれ被削材の軟化がすすみ単調に抵抗値は減少するようである。その減少の割合は300Aより0Aのほうが大きい。それは0Aのときは加熱されていないため低速と高速での切削温度差が大きくなり、300Aに加熱されているときは低速と高速での切削温度差が小さいためと考えられる。

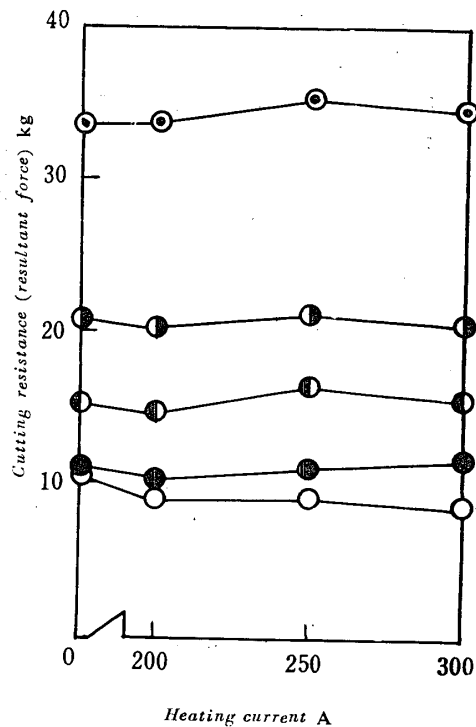


Fig. 7 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium              Symbol :  
 Tool : Ceramics              ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm        ● 0.045 〃  
                                      ◐ 0.09 〃  
 Cutting speed : 38m/min    ● 0.15 〃  
                                      ⊗ 0.3 〃

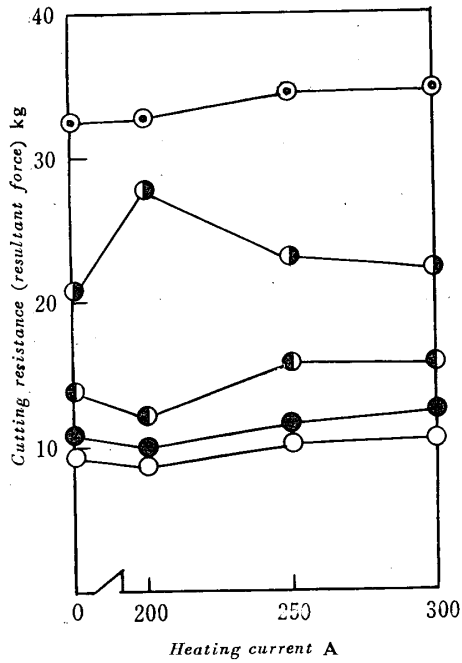


Fig. 8 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium  
 Tool : Ceramics  
 Depth of cut : 0.5mm  
 Cutting speed : 54m/min

Symbol :  
 ○ 0.03mm/rev  
 ● 0.045 //  
 ◐ 0.09 //  
 ● 0.15 //  
 ⊙ 0.3 //

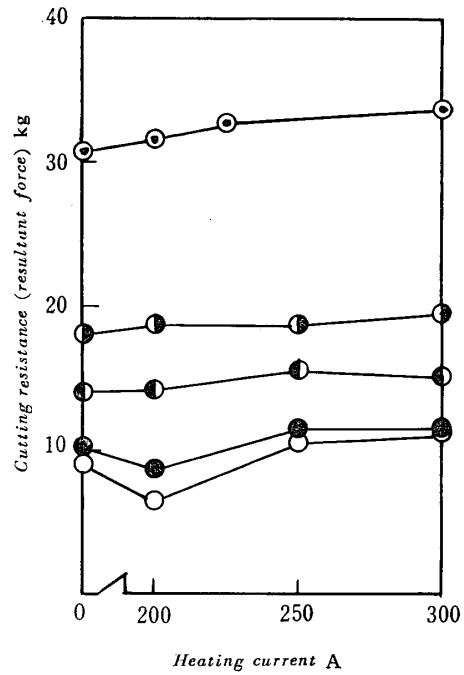


Fig.10 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium  
 Tool : Ceramics  
 Depth of cut : 0.5mm  
 Cutting Speed : 152m/min

Symbol :  
 ○ 0.03mm/rev  
 ● 0.045 //  
 ◐ 0.09 //  
 ● 0.15 //  
 ⊙ 0.3 //

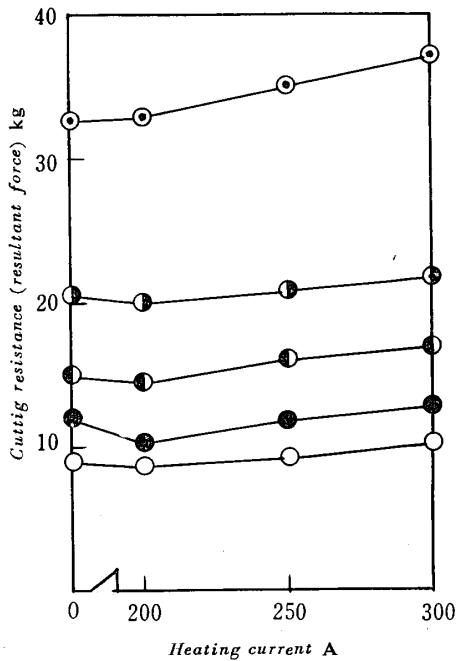


Fig. 9 Relationship between heating current and cutting resistance

Work : Titanium  
 Tool : Ceramics  
 Depth of cut : 0.5mm  
 Cutting speed : 75m/min

Symbol :  
 ○ 0.03mm/rev  
 ● 0.045 //  
 ◐ 0.09 //  
 ● 0.15 //  
 ⊙ 0.3 //

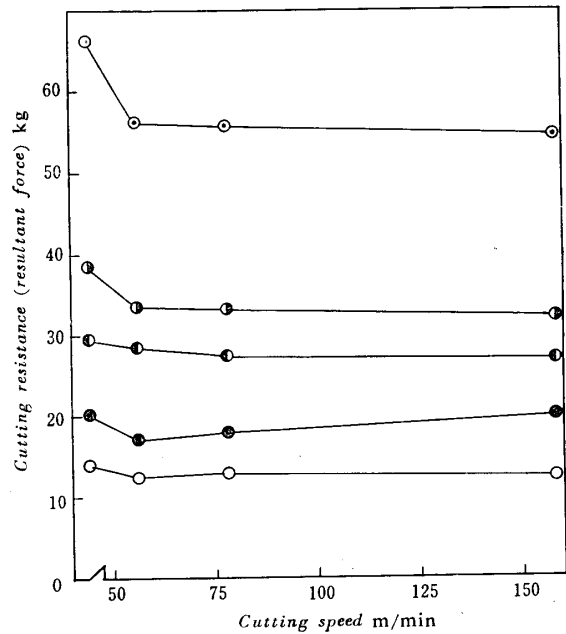


Fig.11 Relationship between cutting speed and cutting resistance

Work : Titanium alloy  
 Tool : Ceramics  
 Depth of cut : 0.5mm  
 Heating current : 0 A

Symbol :  
 ○ 0.03mm/rev  
 ● 0.045 //  
 ◐ 0.09 //  
 ● 0.15 //  
 ⊙ 0.3 //

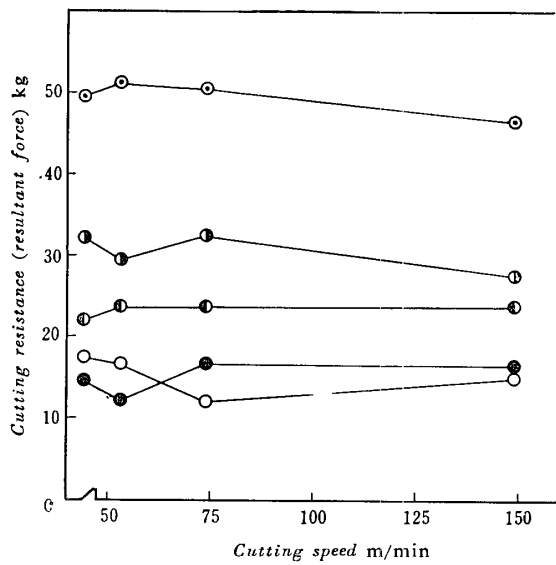


Fig.12 Relationship between Cutting speed and cutting resistance

Work : Titanium alloy      Symbol :  
 Tool : Ceramics              ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm        ● 0.045 〃  
    ◐ 0.09 〃  
 Heating current : 300A        ● 0.15 〃  
    ● 0.3 〃

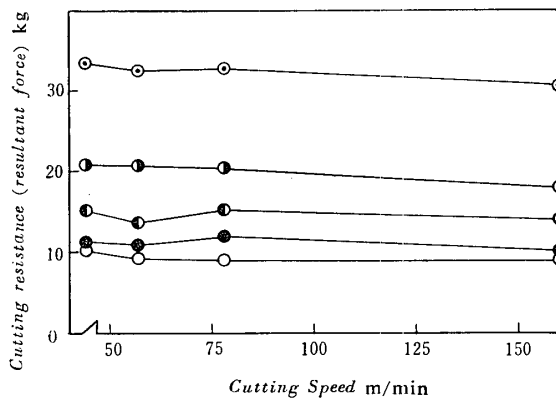


Fig.13 Relationship between cutting speed and cutting resistance

Work : Titanium              Symbol :  
 Tool : Ceramics              ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm        ● 0.045 〃  
    ◐ 0.09 〃  
 Heating current : 0A         ● 0.15 〃  
    ● 0.3 〃

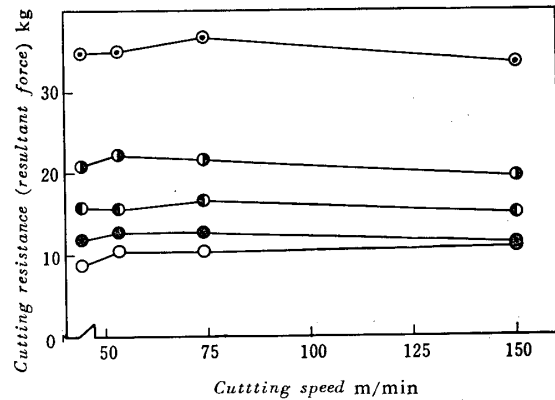


Fig.14 Relationship between cutting speed and cutting resistance

Work : Titanium              Symbol :  
 Tool : Ceramics              ○ 0.03mm/rev  
 Depth of cut : 0.5mm        ● 0.045 〃  
    ◐ 0.09 〃  
 Heating current : 300A        ● 0.15 〃  
    ● 0.3 〃

#### 4.2 加熱とセラミック工具の損傷

セラミックスを用いチタン合金を加熱切削した場合、前述の如く加熱することにより切削抵抗の減少が認められるがFig.17に示すように、工具損傷は加熱するほどはげしく逃げ面摩耗も0A, 20Aでは長方形であるが、250A, 300Aでは三角形になっている。いずれの電流においてもセラミックスの場合、境界部の損傷が大きく発達し、それが原因で大きなチップングを起こす。セラミックスでチタン合金を切削すると被削材の溶着、脱落がはげしく、切削時に被削材の著しいかえりが認められ、すくい角 $-7^\circ$ という切削条件も重なって境界部の損傷がはげしくなるものとする。

またセラミックスの熱伝導率の悪さにより境界部に大きな温度勾配を生じ熱亀裂による損傷も原因しているものと思う。

全般的にセラミックスの摩耗が大きくなるのはチタン合金は非常に化学的に活性であるため、切削時に発生する高熱が原因でセラミックス中の酸素とはげしく反応を起こすためと考えられる。

#### 4.3 最適工具材種の選定

工具寿命上から見た最適工具材種を見つけるため代表的な超硬合金 K-10, P-01, P-10, P-20, P-30 および参考としてサーメットとセラミックスを用いて常温で寿命試験を行なった。刃部形状は前述のように(-5, -7, 5, 7, 15, 15, 0.8)である。切込み1mm, 送り0.03mm/revとした。寿命値の判定はクレータ摩耗の場合は0.05mm, 逃げ面摩耗の場合は

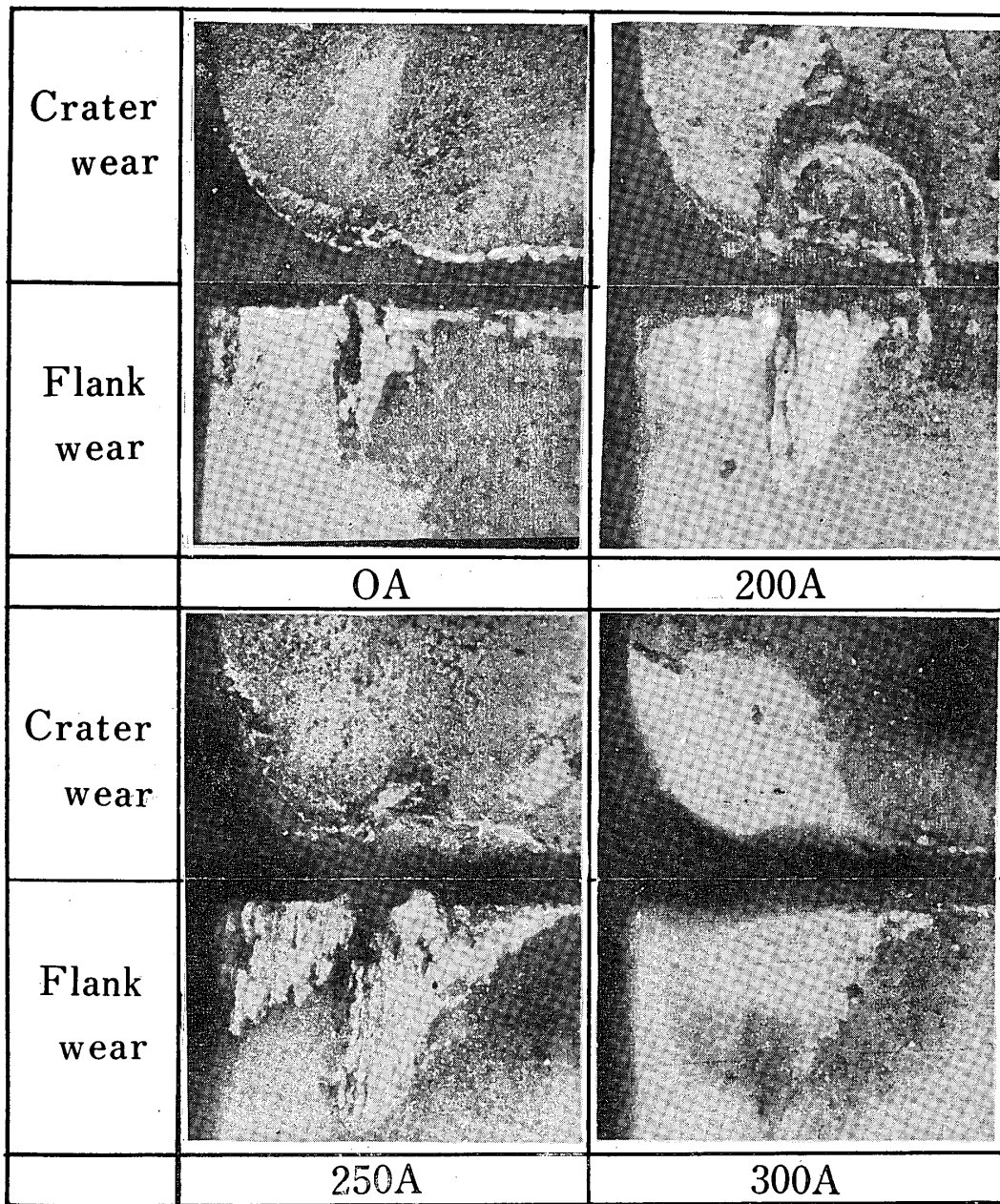


Fig.17 Photographs of tool wear

Work : Titanium alloy Tool : Ceramics

 $V \times d \times f = 75\text{m/min} \times 0.5\text{mm} \times 0.045\text{mm/rev}$  Cutting time  $T = 25\text{sec}$ 

0.4mmを基準とした。クレータ摩耗の測定は小坂式のアラサメータで1000倍で測定し、逃げ面摩耗は顕微鏡で測定した。その結果得た寿命曲線がFig.15, Fig.16である。純チタン, チタン合金とも寿命値はK-10 > P-30 > P-20 > P-01 > P-10 > サーマット > セラミックスとなる。チタン合金においては同じ超硬でもK-10とP-10とは同じ寿命時間に達するのにK-10のほうが約3倍の高速切削が可能である。

純チタンにおいては、チタン合金のときほど各工具による寿命値の差は認められないが、かなりの差は認

められる。これらの状態を工具損傷から検討してみよう。Fig.18はチタン合金切削における各工具のすくい面と逃げ面の損傷を示した写真で、Fig.20はそのときのすくい面の損傷をアラサメータで示したプロファイルである。切削速度は100m/min, 切削時間は2分である。各工具とも逃げ面の損傷は長方形が多くK-10, P-30, P-20は完全なる長方形摩耗で、摩耗幅も非常に小さい。P-10, P-01, サーマットでは摩耗形状も長方形より、いくぶんくずれかかり摩耗幅もK-10, P-30, P-20に比べて大きい。



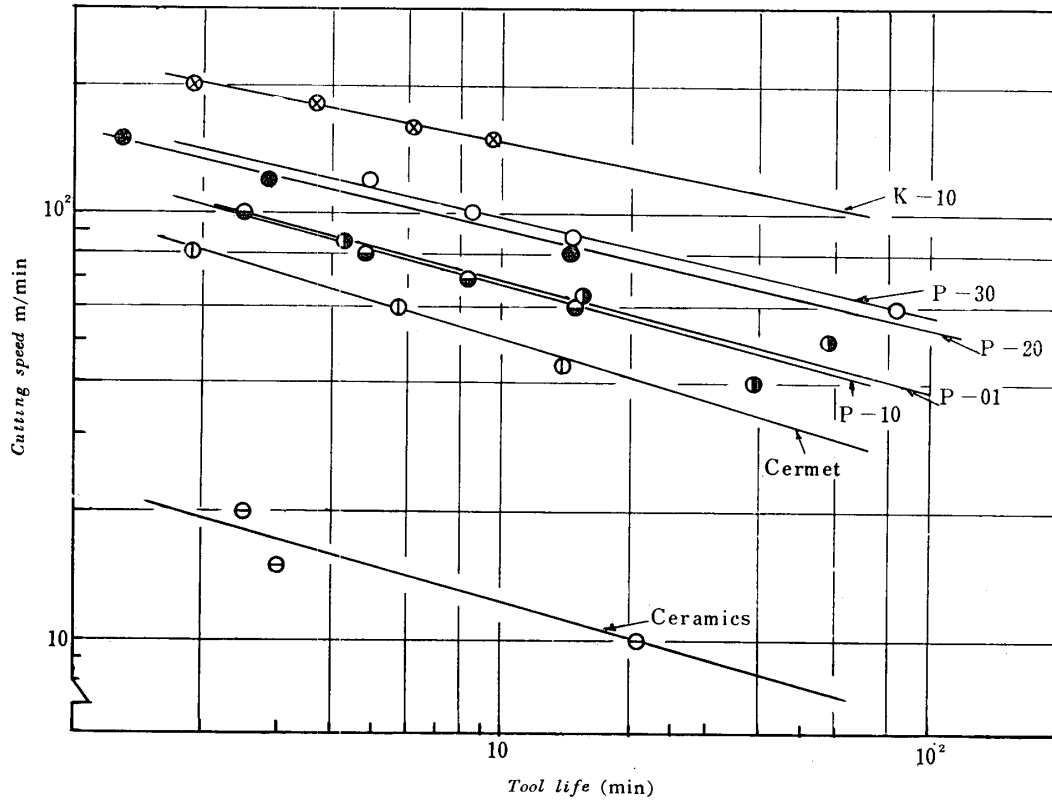


Fig. 15 Relationship between cutting speed and tool life  
 Work : Titanium alloy    Depth of cut : 1 mm    Feed : 0.03mm/rev  
 Symbol : ⊗ K-10    ○ P-30    ● P-20    ◐ P-01  
           ◑ P-10    ⊕ Cermet    ⊖ Ceramics

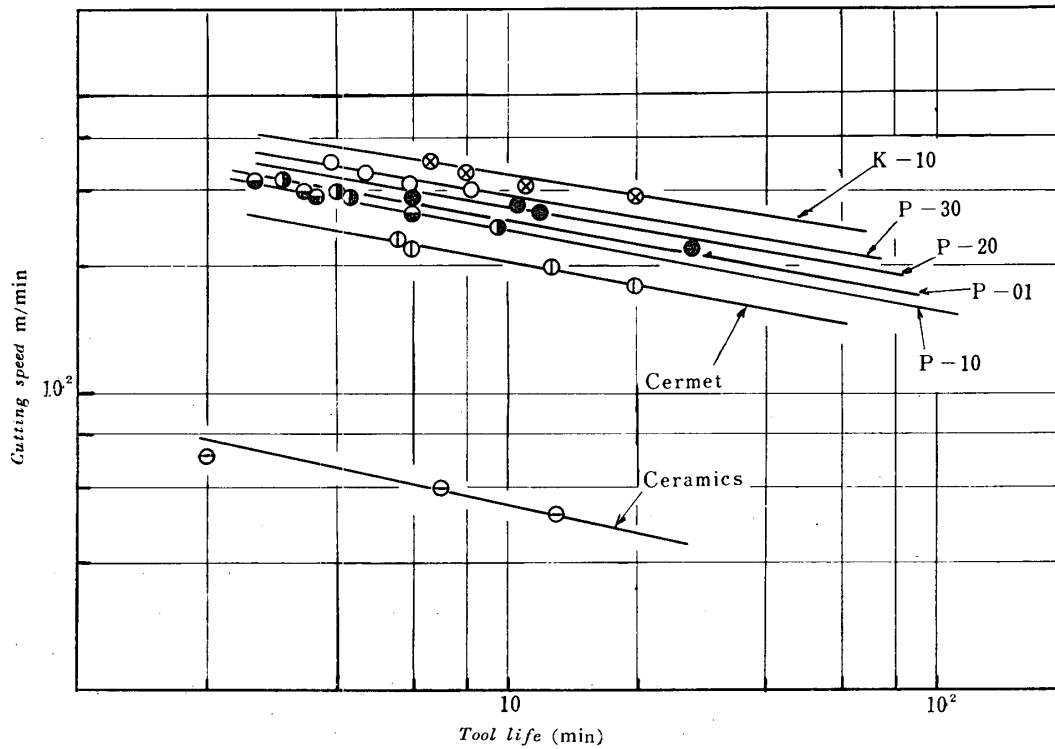


Fig. 16 Relationship between cutting speed and tool life  
 Work : Titanium    Depth of cut : 1 mm    Feed : 0.03mm/rev  
 Symbol : ⊗ K-10    ○ P-30    ● P-20    ◐ P-01  
           ◑ P-10    ⊕ Cermet    ⊖ Ceramics

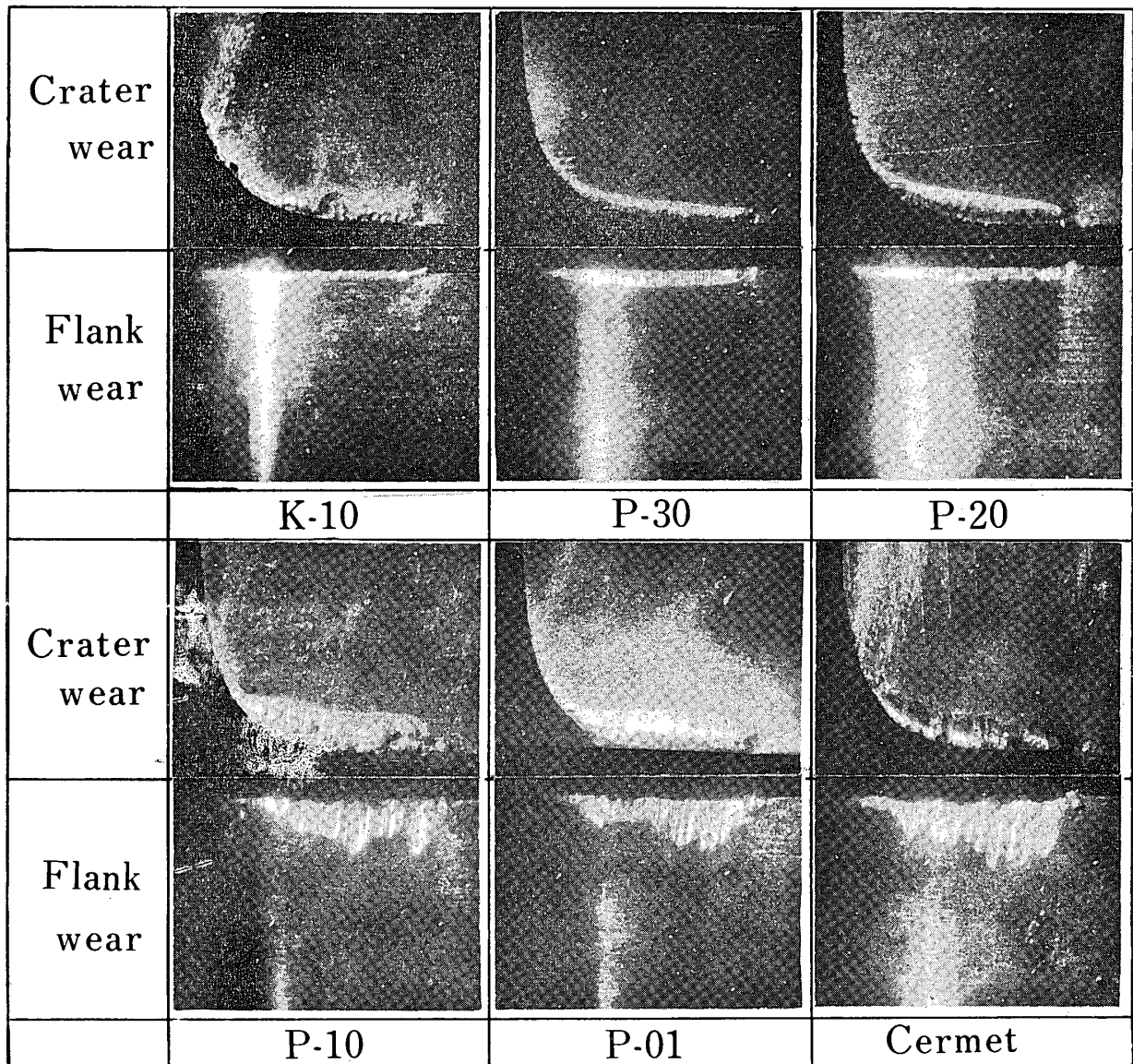


Fig.18 Photographs of tool wear

Work : Titanium alloy

 $V \times d \times f = 100\text{m/min} \times 1\text{mm} \times 0.03\text{mm/rev}$  Cutting time  $T = 2\text{min}$ 

つぎに純チタンの場合の各工具の損傷をFig.19に示す。切削速度  $290\text{m/min}$ 、切込み  $1\text{mm}$ 、送り  $0.03\text{mm/rev}$  である。チタン合金に比べ各工具とも逃げ面の損傷状態がかなり異なる。形状としては長方形であるが、純チタンの場合は摩擦により逃げ面が損傷するが、チタン合金では堤防が小さなチップングを起こし、それが原因での逃げ面の損傷が大半をしめる。そのためチタン合金切削においては各工具ともいったん摩耗が発生すると急激に発達し寿命にいたる。

また切削速度に相違はあるがクレータ幅もチタン合金では純チタンに比べ小さく、工具すくい面の端に集中するため大変欠けやすいすくい面摩耗の形状をして

いることがわかる。アジサメータによるプロファイルから明らかなように、工具と被削材の親和性の度合いを示すと考えられる工具一切屑間の接触長さ（工具端面からクレータ摩耗の終わりまでを接触長さとして仮定する）が K-10 が一番短かく P-30, P-20, P-10 の順に長くなっていることがわかる。

またクレータ深さも K-10 が一番小さく P-30, P-20, P-10 の順に大きくなっている。すくい面摩耗の形状から考えた場合接触長さの短いほうが接触長さの長いほうよりチップングが起りやすく、またすくい面接触部の単位面積あたりに受ける力が大きくなるためクレータの進行がはげしく寿命値も短くなると

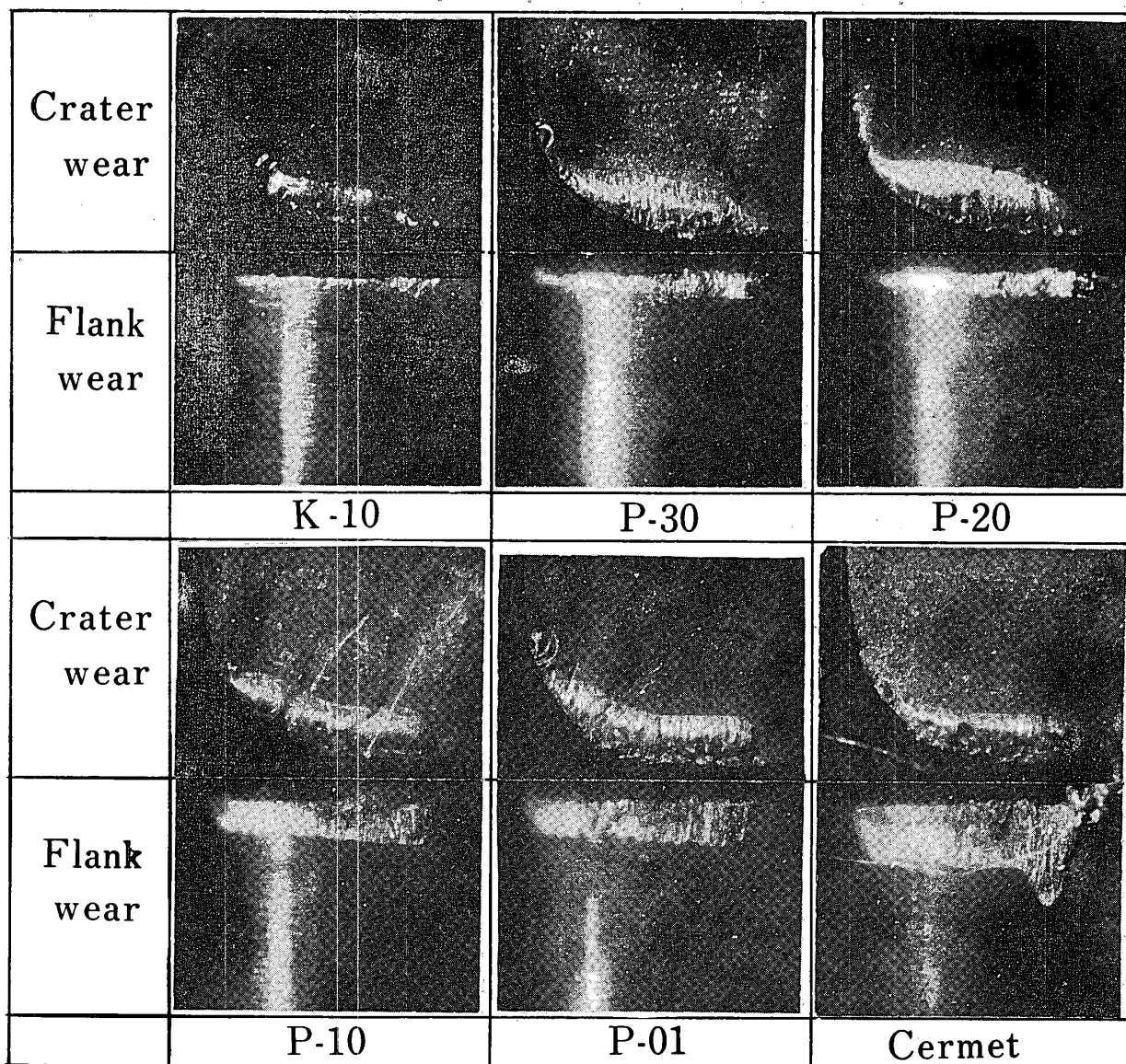


Fig.19 Photographs of tool wear

Work : Titanium

$V \times d \times f = 290\text{m/min} \times 1\text{mm} \times 0.03\text{mm/rev}$  Cutting time  $T = 5\text{min}$

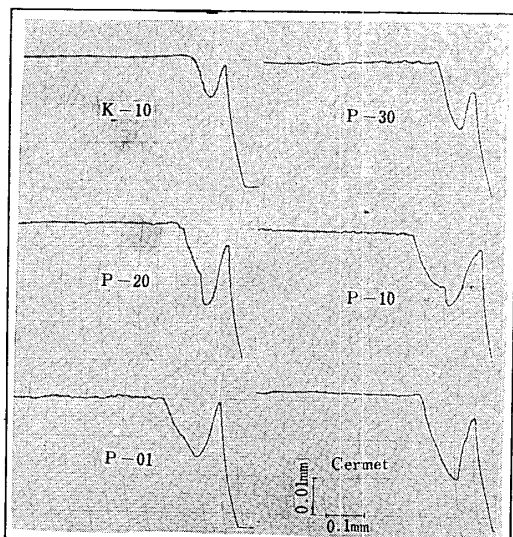


Fig.20 Profile of crater wear

Work : Titanium alloy

$V \times d \times f = 100\text{m/min} \times 1\text{mm} \times 0.03\text{mm/rev}$   
Cutting time  $T = 2\text{min}$

考えられるが、チタン合金切削では前述のように逆の結果すなわち接触長さの短いほうがクレータ摩耗が小さく寿命値も長い。これはチタンが化学的に活性であり、切削時に発生する高熱のため工具と被削材との間に化学反応がおこり、そのためによる工具損傷が大きく影響しているものと思う。それ故親和性に劣る。すなわち化学的に反応の起こりにくいと考えられるK-10がすくい面摩耗の形状の悪さにもかかわらず高い寿命値を得るものと思う。これを化学成分上から検討してみる。K-10はWC, Coより成りPタイプはそれらにTiCが含有されている。Tiの含有量もP-30, P-20, P-10, P-01の順に多くなっておりTiの含有量の多いほど寿命値が短い。これはTiが被削材との化学反応を促進させていることを示している。TiCが主成分であるサーメットはクレータ摩耗も逃げ面摩耗もK種, P種に比べて大きくチタン切削には適さない。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>主成分のセラミックスは溶着, 脱落によるチッピングがはげしく適当でない。これもAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とチタンとの相互作用の強いことと関連している。

純チタンはチタン合金に比べ引張り強さは約1/2.5であり、実際の切削抵抗も半分程度であるためチタン

合金の場合の約3倍の切削速度が可能である。

## 5. 結 言

以上を要約すると

- 1) セラミックスを用いチタン合金を加熱切削すると切削抵抗は減少するが、純チタンの場合は効果なくむしろ加熱することにより抵抗は増加する。
- 2) 加熱することによりセラミックスの摩耗は大きく急速に進展する。
- 3) チタンおよびチタン合金切削には超硬が適するが、特にWC, Coより成るK種が一番すぐれている。

## 参 考 文 献

- 1) 徳田祥一, 西村 孝: 日本機械学会誌, 72, 1475 (1969)
- 2) 井上英夫: 機械と工具, 17, 29 (1969)
- 3) 谷口正紀, 瀬戸雅文: 精密機械, 32, 275 (1966)

(昭和45年4月15日受理)