チタンの被削性に関する研究*

竹 山 秀 彦** 村 田 良 司**

Study on Machinability of Pure Titanium

Hidehiko TAKEYAMA, Ryozi MURATA

Titanium is a material hard to machine. The machinability of commercially pure titanium ST 60 is investigated experimentally from various standpoints, that is, chip formation, cutting force, tool wear, tool life, etc. The machinability in terms of chip formation and cutting force is better than ordinary ferrous materials, whereas the machinability of tool wear or tool life is extremely poor although the cutting temperature is not so high.

This will be attributed to its extraordinary chemical activity and thus considerable welding to a tool material.

Based upon the extensive tool life tests, the most suitable tool material (K 10), the most adequate tool shape (-5° side rake angle) for turning titanium have been selected, the effects of feed, depth of cut, cutting speed, machining atmosphere, etc. being investigated to establish the machining standard.

1. 緒 言

今世紀における注目すべき金属材料として登場したチタンは、比重が小さく重さ当たりの抗張力が高いため航空機、ミサイルなどの材料としてかくべからざるものである。またその秀れた耐蝕性のために、船用機器、化学機械などにもその用途が広まっている。

しかるにその加工の面においてはすこぶる問題が多く非常に加工しにくい金属であるとされている。

この報告はチタン系材料のうち純チタン（国産材料）をとりあげ、その被削性を調べ、同時に寿命試験を行なつて旋削作業標準を設定し、切削加工条件選定の目安とした。本来ならば合金チタンをもとりあげるべきところであるが、現状ではまだ均一な合金を入手することがむづかしい段階にある。

2. 実験条件

実験に用いた装置、その他の条件は以下の通りである。

2.1 実験用旋盤

モナーク被削性試験用旋盤（放電管制御式 20IP）

2.2 測定項目と測定法

(a) 逃げ面摩耗（工具顕微鏡による）

(b) すくい面摩耗（理研式超あらさ計による）

(c) 切削抵抗（MIT 型 2 次元動力計）

(d) 切削温度（工具・被削材熱電対法）

(e) セン断角（切り屑あつまりより算出する）

2.3 工 具

被削性試験には廃き型チップ（各種超硬合金およびサーメット）を、寿命試験には JIS-31・2 型を用いた。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（0，可変，6，6，15，15，0.5）とし横すくい角は実験目的により変化させた。なおサーメット，セラミックでは（-7，-7，7，7，15，15，0.8）の刃形を用いた場合もある。これはその都度明示する。

2.4 被 削 材

100φ×500 丸棒（鍛造，住友軽合金規格 ST 60）を用い，その化学成分および機械的性質は Table. 1 にかかげる。被削材の均一性を調べる意味で，半径方向の硬度分布を測定した（Fig. 1）。これによると H_B 160 に対し

Table. 1 被削材 ST 60 の化学分析表および機械的性質

成 分	N	Si	Fe	Ti	C
%	0.007	0.01	0.25	残	0.02 (参考値)
降 伏 点 (ひずみ 1%)	抗張力	硬 さ	伸 び	比 重	
33.0kg/mm ²	50.5kg/mm ²	158Hv	23%	4.5	

* 精機学会大会にて発表

** 工業技術院機械試験所 正会員

±0.5 位の散布であり、まずまず半径方向の硬度むらはないと云える。

Fig. 1 被削材の硬度分布

2.5 雰囲気

被削性に及ぼす雰囲気の効果を知るため Fig. 2 のように、すくい面または逃げ面から不活性気体 (Ar 99.99%, N₂ 0.007%, O₂ 0.001%, H₂ 0.001%, H₂O 0.001%) と酸素を吹付けつつ切削し、空気中における場合と比較した。

Fig. 2 不活性気体吹付け装置

このような簡単な吹付け装置で果たして気体が切削点に到達し十分空気を遮断するかどうかには問題があるが、一応の傾向は知りうるであろう。

3. 純チタンの被削性

3.1 切り屑生成

Fig. 3 は代表的な切り屑の写真である。切削速度 50~500 m/min, 送り 0.05~0.4 mm/rev, 切込み 0.5~3

mm なる本実験の領域では一応流れ型の切り屑を生ずる。しかし四六黄銅や鋼などでみられる連続切り屑に比べるとかなりせん断のピッチがあらう。なお切削比はすくい角 0° の場合 0.45~0.55 程度で鋼の場合に対し大きく、また切り屑あつまりから計算したせん断角は Fig. 4 に示す通り、25°~28° (すくい角 0°) であつてこれも炭素鋼などと比べると大きい。

Fig. 3 純チタニウムの代表的切り屑

Fig. 4 チタン切削における切削速度とせん断角

いまチタンの材料的性質から少し調べてみよう。チタンは非常に高い融点をもっているが、温度が上昇すると急激にその強度が低下すること Fig. 5 に示す通りである¹⁾。そこで切削の際、せん断面においては速いはずみ速度に伴って短時間に大きなエネルギーが消費され、急速に温度が上昇すると考えられる。このようなせん断面における温度上昇によりせん断しかつたところの強度が低下し、その効果が加工硬化の影響を相殺してあまりあるため、ますますすべり易くなる。ゆえにそれに隣つた他のすべり面をえらぶことなくせん断の局所化²⁾が行なわれると考えられる。これは丁度材料の性質がいはば脆

Fig. 5 各種金属の引張り強度の温度による変化

くなくなったように作用する（たとえば快削添加物³⁾を加えた場合にやや似ている）。また純チタンは通常稠密六方晶系であり、その性質上比較的脆性に富むことも考えられる。

以上のことは前述したように切り屑のせん断のピッチが比較的あらいということでもうかがえ、また大きな切削比やせん断角をもつ理由ともなっていると考えられる。また切削速度を増加してもあまりせん断角が大きくなるのは、上記の材料性質が速度によるひずみの局所化作用の働く余地を少なくしているためともいえる。

雰囲気によるせん断角の変化は Fig. 4（前出）でみるようにほとんどみられない。しかし工具材によつてはやや差があり、サーメット(TiC系)は超硬合金(K20)よりも2~3°小さくなっている。これはサーメット(TiC系)の方が金属チタンとの親和力が強く、工具切り屑接触長さを増し（実際 Fig. 9（後出）をみても接触長さに変化がある）、したがってせん断角が減少したものと推察される。結論的に切り屑生成よりみた被削性は比較的良好であるといえる。

3.2 切削抵抗

切込み1mm、送り0.15mm/revの場合、主分力は約40kg、送り分力は約12kg（Fig. 6）であり、比切削抵抗にすると主分力で260kg/mm²、送り分力は85kg/mm²となる。同程度の抗張力を持つ炭素鋼では大体400kg/mm²（主分力）、200kg/mm²（送り分力）であるのと比べるとはるかに小さい。

いま純チタン（Ti 75A）と0.45% C 鋼（SAE 1045）との、応力とひずみの関係を比較すれば Fig. 7 のようであるが、それらから観察される強度の相違より、切削によつてえられた比切削抵抗の相違の方がずっと大きいのは、やはり前記したように切削温度によつてチタンの

Fig. 6 純チタン切削における切削速度と切削抵抗

Fig. 7 各種金属の引張りにおける応力とひずみの関係

強度が急速に低下するためと思われる。

なおこの場合においても雰囲気の影響はあまり認められず、アルゴン、空気、および酸素気中における測定値の差は有意であると断定できない。

結論的には切削抵抗よりみた被削性は良好といえる。

3.3 切削温度

切削点近傍の温度つまり切削温度は工具の摩耗ないし寿命に重大な影響を与える要素である⁴⁾。この部分の温度は主として熱源であるせん断面とすくい面のエネルギー損失と被削材および工具の熱放散特性によつてきまる。

チタンの熱伝導率は0.0434cal/cm.s.°Cで18-8不銹鋼（AISI 302, 0.0475cal/cm.s.°C）並みであり、比熱は0.129cal/g°C（0~200°C）であるが、比重が小さいため体積比熱は、0.581cal/cc.°Cと比較的小さくなり、結局熱放散が少なくなつて切削温度は高くなるはずである。ところが実測値は Fig. 8 に示す通り約600~880°C（切削速度50~200m/min）であつて炭素鋼（900°C内外）と同等であつた。これは前記切削抵抗が小さいので当然熱源のエネルギー損失が少なく、これら両効果が相殺しているものと考えられる。

Fig. 8 切削速度と切削温度の関係

なお雰囲気の効果はあまりみられないが酸素、アルゴン、空気の順に温度が高目になっている傾向があり、その差異は低速で著しい。

4. 工具寿命

4.1 工具摩耗特性

Fig. 9 は純チタンの切削における代表的な工具摩耗

の写真である。逃げ面摩耗は切削のごく初期にはほぼ一様な摩耗を生ずるのであるが、摩耗幅 0.3~0.4 mm をこえる頃からノーズ半径部の摩耗が著しく進み三角形の摩耗になることが多い。切削時間と逃げ面摩耗幅の経過 (Fig. 10) は普通の金属の場合、両対数の図表で約 0.5 の勾配をもち摩耗幅 0.25~0.4 mm に

Fig. 9 チタン切削における工具摩耗例 (上: すくい面, 下: 逃げ面)

おいて折れ曲る傾向が多いのに対し、前記三角状摩耗を生じた場合には摩耗幅が比較的小さい段階からほぼ一様で急な勾配を持ち、摩耗進行が早い。このように、異常に摩耗経過が早い原因としては、被削材に含まれるアブレッシブ (たとえばチタンカーバイドなど) による効果、チタンの溶着による transfer-type の摩

耗、溶着性チッピングなどがあげられる。

Fig. 10 逃げ面摩耗の経過 (概念図)

しかしこの場合の原因をチタン材中の含有炭素による TiC に帰するのはやや無理があると思われる。というのは炭素量 0.2% 以下であれば遊離の TiC を生ずることはないとされ、この例では高々 0.02% で 1 桁少ないからである。したがっておそらく後の 2 つの理由が妥当であろう。

Fig. 9 をみてもすくい面に著しく溶着物がへばりついているのがわかる。このような激しい溶着の起こるのは主としてチタンの持つ化学的活性に基づくものと考えられる。したがってこの種金属を切削するにはどうしても被削材の付着、溶着が起りにくい工具材種をえらぶ必要がある。

4.2 最適工具材種

工具寿命の上からみた最適工具材種をみつけるため、代表的超硬合金 P 05, P 10, P 10', M 10, K 10, K 10' (ISO 分類記号) および参考としてサーメット (TiC 系), アルミナセラミック [但しサーメットとセラミックのみ刃形が異なり (-7, -7, 7, 7, 15, 15, 0.8)] を用いて寿命試験を行なった。

Fig. 11 は各種工具材の代表的摩耗の写真で超硬一元合金は比較的安定な摩耗を生じるのに対し超硬三元合金

Fig. 11 チタニウム切削の際の代表的工具摩耗 (上段: すくい面摩耗, 下段: 逃げ面摩耗)

は三角状摩耗となることが多く、またセラミックは送りの割りに切り屑接触長さが大きく溶着性チッピングが多い。

Fig. 12 はこの時の逃げ面摩耗寿命曲線、**Fig. 13** はすくい面摩耗寿命曲線である。工具寿命の順位はそれぞれつぎようになる。

$K10 > K10' > M10 > P20 > P05 > P10 > \text{サーメット}$
($V_B 0.6$)

$K10 > K10' > M10 > P05 > P20 > P10 > \text{サーメット}$
($K_T 0.05$)

Fig. 12 各種工具材種と寿命曲線 (逃げ面摩耗) 送り=0.2mm/rev; 切込み=1.0mm; 刃部形状=超硬工具 (0, 10, 6, 6, 15, 15, 0.5), サーメット (-7, -7, 15, 15, 0.8)

Fig. 13 各種工具材種と寿命曲線 (すくい面摩耗) 切込み=1mm; 送り=0.2mm/rev, 刃部形状=超硬 (0, 10, 6, 6, 15, 15, 0.5), サーメット (-7, -7, 7, 7, 15, 15, 0.8)

Fig. 14 工具材種と工具寿命 (逃げ面摩耗) 刃部形状=サーメットおよびセラミック (-7, -7, 7, 7, 15, 15, 0.8), 超硬 (0, -5, 6, 6, 15, 15, 0.5), その他 Fig. 12 と同じ

つまり K 系統 (一元合金 WC と Co のみからなる) が秀れ、M および P 系統 (TiC を含む二元三元合金) がこれにつき TiC を主成分とする サーメットはさらに劣る結果となる。

これは前記被削材と工具との化学的親和性の影響という考え方を支持する。なお TiC を含まないアルミナセラミックも **Fig. 14** に示すように工具寿命ははるかに劣り、チッピングの傾向も多く、かつすくい面摩耗 (他の被削材に対する耐すくい面摩耗性は極めて秀れている) も著しい。これもやはり Al_2O_3 と Ti との相互作用が強いことと関連している。

雰囲気の影響に及ぼす効果はどうかというと、工具材として超硬合金 K20 を用いた場合 (**Fig. 15**) の工具寿命はアルゴン、酸素、空気の場合になる。しかしその効果はわずかであつて実用的意味はほとんどない。

Fig. 15 雰囲気の影響に及ぼす影響

被削材=ST 60; 寿命判定基準 $V_B=0.4$ mm; 工具=K20 (0, 0, 6, 6, 15, 15, 0.5); 送り=0.15mm/rev; 切込み=1.0mm

4.3 刃部形状の影響

4.2 における最適工具材種 K10 を用い、最適横すくい角を求めるため横すくい角 α を $\pm 25^\circ$ にわたり変化させて寿命試験をした。**Fig. 16** によると逃げ面摩耗寿命

Fig. 16 横すくい角の工具寿命へ及ぼす影響 (フラック摩耗)

送り=0.15mm/rev; 切込み=1.0mm; 工具=K10 (0, 可変, 6, 6, 15, 15, 0.5)

においては $\alpha = -5^\circ$ がよく、ついで $+5^\circ$ 、 -15° の順となる。 $+25^\circ$ と $+15^\circ$ は一見低速領域でまさるようであるがチッピングの機会が多いので実用的ではない。また -25° は高速領域では秀れているが寿命曲線の傾きが急で60分寿命切削速度ではかえって劣る。一方すくい面摩耗寿命から見ると $+5^\circ$ が良く、 $+25^\circ$ 、 $+15^\circ$ 、 -5° がこれについて良い (Fig. 17)。

実際の工具寿命を決定するものはすくい面摩耗と逃げ面摩耗の双方であるから、両寿命曲線のうちきびしい部分のみとつて考えると $+5^\circ > \alpha > -5^\circ$ が適当であり、そのうち -5° が最適である (Fig. 18)。

Fig. 17 横すくい角の工具寿命へ及ぼす影響 (すくい面摩耗), 切削条件 Fig. 16 と同じ

Fig. 18 横すくい角の工具寿命へ及ぼす影響 (総合) 切削条件 Fig. 16 と同じ

4.4 送りと工具寿命

4.2, 4.3 より工具材種 K 10, 横すくい角 -5° なる最適条件を用いて切削諸元と工具寿命の関係を実地に追求した。

送りを増加させた場合寿命曲線は単調に下方に移る。これはすくい面摩耗, 逃げ面摩耗とも同様である (Figs. 19, 20)。この間の事情をあきらかにするため, 送りを横軸にとつて60分, 30分, 10分各寿命に対する切削速度 (V_{60} , V_{30} , V_{10}) を示すと (Figs. 21, 22) となる。

すなわちすくい面摩耗で寿命を規定した場合 $V_{60} \propto f^{-0.36}$, 逃げ面摩耗で規定すると $V_{60} \propto f^{-0.215}$ の関係となる (ただし f は送りである)。しかしながら, 各送りにおける工具摩耗形状 (Fig. 23) をみると, 送りが小さくなるにつれ逃げ面摩耗幅が小さいうちから 三角摩

切込み=1.0mm, 工具材種=K10, 刃部形状=(0, -5, 6, 6, 15, 15, 0.5)

Fig. 19 送りの影響 (フランク摩耗)

切込み=1.0mm; 工具=K 10 (0, -5, 6, 6, 15, 15, 0.5)

Fig. 20 送りの影響 (すくい面摩耗)

切削条件は Fig. 19 と同じ

Fig. 21 60分寿命切削速度と送りの関係 (すくい面摩耗) 切削条件は Fig. 19 と同じ

Fig. 22 60分寿命切削速度と送りの関係 (フランク摩耗) 切削条件は Fig. 19 と同じ

Fig. 23 各種送りにおける工具摩耗形態

Fig. 24 切込みの寿命へ及ぼす効果
 切削速度=250m/min, 送り=0.15mm/rev, 刃部
 形状 (0, -5, 6, 6, 15, 15, 0.5)

耗が生ずる傾向があるので、送り0.1mm/rev以下を用いることは好ましくないとと思われる。この傾向は18-8不銹鋼⁹⁾などの場合と同様である。

4.5 切込みと工具寿命

Fig. 24 は送りその他の条件が一定で、0.5~4mmの範囲で切込みを変化させたときの工具寿命を示す。

逆げ面摩耗寿命、すくい面摩耗の両方とも切込みによる寿命の変化はほとんどない。強いてあげれば切込み1mm以下で寿命がやや増加しているといえるが、これはノーズ半径部でもおに削ることになって切り屑流れ方向や有効すくい角が変化し議論の対象にならない。

結 言

(1) 純チタンの切り屑生成、切削抵抗等よりみた被削性は予想外に良い。これは逆説的ではあるがチタンの強度と温度特性がわるく、したがっていわば脆性破壊の様相を呈するためと考えられる。

(2) 工具寿命からみた被削性はすこぶるわるく、しかも摩耗痕の形状が不規則で、多く三角状になる。この意味からは加工しにくい金属である。

(3) 工具摩耗性ないし工具寿命からみた被削性がある最大の原因は本被削材の化学的活性とそれに基因する溶着性にあると考えられる。

(4) 雰囲気の影響は予想に反して効果が認められない。ただしこれは実験手段が不備で、切削点近傍に十分に気体が及んでいないとも考えられる。

(5) 純チタンの切削における最適工具材種は、K10 (ISO) で、TiCを含む二元三元合金、TiC系サーメット、 Al_2O_3 を主成分とするセラミック等はいずれも不適当である。

この原因は溶着による摩耗やチッピングにある。

(6) 最適横すくい角は -5° である。送りに対して寿命は単調にのびるが送り0.1mm/rev以下は好ましくない。

切込みの効果はあまりみられない。

(7) チタンは非常に溶着しやすいため、切り屑が仕上げ面にちよつとでも触れるとたちまちへばりつき仕上げ面をザラザラにする。また切り屑流れが停滞すると刃先が瞬間的に高温となり、切り屑が発火燃焼することもある(空気中で約 1200°C で発火する)。切り屑の誘導排出には十分注意が必要である。

なお被削材の入手に当たり、便宜をはかれた前住友軽金属技術部次長山本実氏、本実験に助力して下さった斉藤製作所斉藤裕氏に深甚なる謝意を表する。

(1961, 12月20日 受付)

参考文献

- 1) Machining Titanium, Massachusetts Institute of Technology, 1954, 4.
- 2) 竹山秀彦: 高速切削に関する研究, 精密機械, 22巻 (1956), 354, 431.
- 3) 竹山秀彦, 白井英治: 鉛入り快削黄銅の被削性, 精密機械, 25巻 (1959), 461.
- 4) 竹山秀彦, 村田良司: 工具摩耗の温度依存性, 精密機械, 27巻 (1961), 33.
- 5) 竹山秀彦: 切削作業標準設定に関する研究 (第1報), 精密機械, 24巻 (1958), 586.