

# $\alpha$ - $\beta$ チタン合金のドリル加工

## Drilling of $\alpha$ - $\beta$ Titanium Alloy

加藤明

Akira Kato

機械素材研究所 機械・計測制御担当

JIS 60 種  $\alpha$ - $\beta$  チタン合金 (Ti-6Al-4V) は、耐熱性、耐食性、強度のバランスに優れるが、工具損傷が激しいため切削加工が困難であり、工具損傷低減のための工具への被膜付加等の研究が行われている。 $\alpha$ - $\beta$  チタン合金 (Ti-6Al-4V) の加工性の基礎的検討として、ドリル加工試験を実施した。工具損傷や加工穴寸法を比較したところ、チタン合金の加工には超硬工具が適しているが、少数の穴加工であれば経済性に優れるハイス工具でも加工可能であることがわかった。

### 1. はじめに

チタン合金は、非磁性で、低密度、高耐食、高比強度、生体適合性などの特徴のため、航空宇宙、プラント、生体などの分野で使用されており<sup>1)</sup>、今後も需要拡大が見込まれる。

チタン合金は成分組成により特性が異なり、耐食性と加工性に優れる JIS 1~4 種純チタン、耐熱性に優れる JIS 50 種  $\alpha$  チタン合金 (Ti-1.5Al)、強度に優れる JIS 80 種  $\beta$  チタン合金 (Ti-4Al-22V)、耐熱性、耐食性、強度のバランスに優れる JIS 60 種  $\alpha$ - $\beta$  チタン合金 (Ti-6Al-4V) などの種類がある<sup>2)</sup>。このうち、Ti-6Al-4V は、Al 及び V がそれぞれ 6%、4% 程度含まれることから、「64 チタン」とも呼ばれ、機械装置や輸送機器などの構造部品の材料として広く使用されている。しかし、この合金の切削加工は工具損傷が激しいために困難であり、工具損傷低減のための工具への被膜付加<sup>3)</sup>や加工中の冷却方法<sup>4)</sup>などについての研究が行われている。

鳥取県内のチタン合金切削加工の状況は、加工実績がある企業は少ないものの、加工業務参入の意欲を有する企業も複数見受けられる。これらの企業ではチタン合金加工技術を蓄積する必要があり、加工条件などの技術情報収集が課題となっている。

そこで、県内企業に対してチタン合金加工技術の情

報を提供するために、各種ドリルによる Ti-6Al-4V の穴加工実験を行い、工具損傷の観察や加工穴寸法測定などを実施したので報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 供試材料及び供試工具

供試材料は、寸法 100×100×12.7mm の Ti-6Al-4V 熱間圧延材であり、酸化皮膜の除去を行わずに用いた。供試材料の化学成分を表 1 に示す。

供試工具は、切削工具用の鋼であるハイス鋼製のドリル (以下 SD 工具)、高硬度な TiN 膜を施したハイスドリル (以下 Ti 工具)、より高硬度で耐熱性も高い (Al,Ti)N 系膜を施したハイスドリル (以下 Al 工具)、母材にハイスよりも硬度の高い超硬材料を用い、ドリルに適した高耐熱高硬度 (Al,Ti,Cr)N 系膜を施したドリル (以下 HM 工具) の 4 種を用いた。いずれも市販の工具で、工具径 5mm、2 枚刃である。供試工具の諸元を表 2 に示す。

表 1 供試材料の化学成分 (wt%)

Al	V	C	Fe	O	N	Y	Ti
6.36	4.28	0.026	0.22	0.188	0.007	<0.00	Bal.

表2 供試工具の諸元

ドリル	SD	Ti	Al	HM
母材	ハイス	←	←	超硬
被膜	無し	TiN	(Al,Ti)N	(Al,Ti,Cr)N
硬度 母材 (HV)	700	←	←	1800
被膜	—	1800	2800	2900
膜酸化開始温度 (°C)	—	600	800	1100
先端角(°)	118	←	←	140
シンニング	無し	X	X	Z
工具径(mm)	5	←	←	←
工具長(mm)	92	←	←	90
刃数(枚)	2	←	←	←

## 2.2 実験方法及び評価項目

実験は縦型マシニングセンタ(安田工業製YBM640V verIII)を用いて行った。供試材料を油圧式バイスで固定し、工具突出量はコレット先端から70mmとした。切削条件は表3のとおりである。刃が材料を削るときの相対速度である切削速度、工具1回転当たりの切削量である送りは、オーステナイト系ステンレスの加工条件を参考として決定した。加工実験の様子を図1に示す。加工間隔は穴中心間9mmとし、1列あたり10穴の加工を行った。加工実験前後の被削材写真例を図2に示す。実験終了条件は工具が折損した場合、または加工穴数が50穴に到達した場合とした。

評価項目は、加工穴数、工具損傷、加工穴寸法及び真円度とし、いずれもマイクロスコープ(ハイロックス製KH8700)を用いて、加工穴数が1、10、20、30、40、50穴の場合に評価を行った。工具損傷の測定例を図3に示す。この図は、ドリルの先端側から刃の一枚を拡大観察したものである。この図の上方から下方に向けて白い帯状の部分が観察されるが、ドリルの刃が摩耗して光沢を帯びたものであり、光沢部分の上下中間付近の摩耗や欠けの幅を工具摩耗量、ドリル外周部の刃が摩滅や欠損した幅を外周刃後退量とした。

表3 切削条件

切削速度	30m/min
送り	0.1mm/rev
冷却	水溶性切削油 JIS A1種 外部給油 約4ℓ/min
ステップ	無し
加工方法	貫通

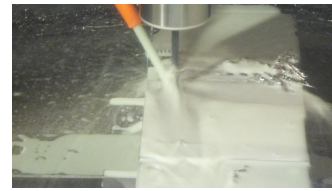
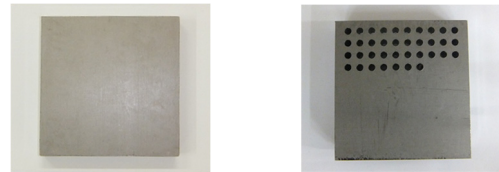


図1 加工実験の様子



(a) 実験前

(b) 実験後 (SD)

図2 供試材料の外観例

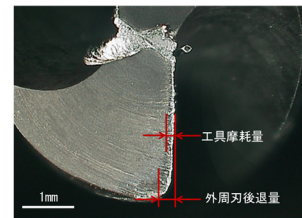


図3 工具損傷測定例

## 3. 結果と考察

各実験の加工穴数結果を図4に示す。HM工具は50穴に到達したが、SD、Ti、Al工具は実験中に折損した。切り屑を観察したところ、折れにくい切り屑が生成されており、折損の原因はドリル溝から切り屑が適切に排出されず、切り屑詰まりにより加工負荷が増大したためと考える。

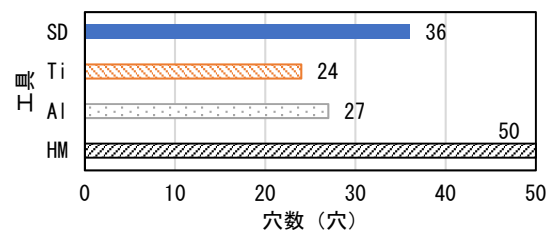


図4 実験終了穴数

また、SD工具は、Ti、Al工具よりも折損までの加工穴数が多かったが、図5に示す工具損傷写真において、(1)、(6)、(10)の溝の形状を比較すると、Ti、Al工具よりもSD工具の溝が広いことがわかり、このために切り屑詰まりが抑制されたと考える。HM工具は実験終了まで折損に至らなかった。

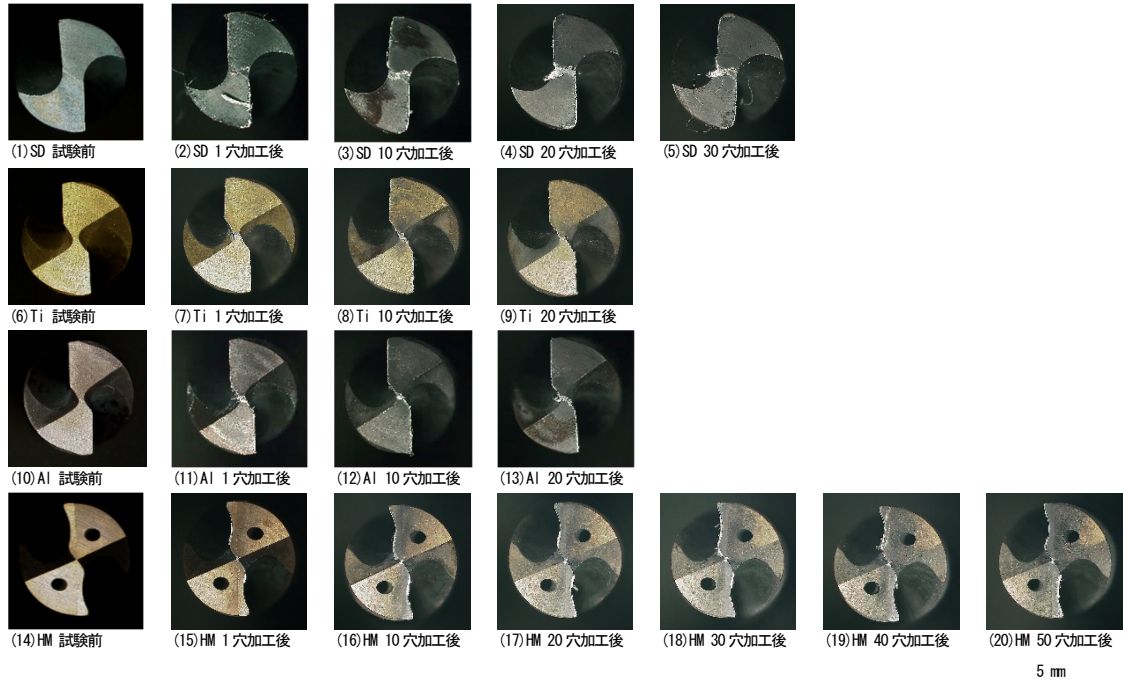


図5 工具損傷写真

一般的に強度と硬度は正の相関があることから、表2から超硬工具はハイス工具よりも強度が高いと言え、超硬工具の方が折損しにくいためと考える。

図5より、いずれのドリルも加工穴数の増加に伴い、刃の損傷が顕著になることが分かる。ドリルの中心付近や刃に付着物が見られるが、これは加工材料が凝着したものである。加工中に凝着の生成・脱落の現象が不規則に起こっていると推測するが、そのためにドリルの刃の見かけ上の先端角、すくい角、逃げ角などが変化することになり、加工負荷変動の誘因となることや、凝着の脱落時に工具材料の一部を剥落させることなどが、工具損傷の増大に繋がったと考える。

工具摩耗量測定結果を図6に示す。20穴加工後の工具摩耗量を比較すると、Al、HM工具の摩耗の量は、SD、Ti工具の約1/2倍であった。SD、Ti、Al工具は、いずれも母材がハイス鋼であることから、Al工具の摩耗が少なかった理由は、(Al,Ti)N膜の影響と推測され、この膜によりSD、Ti工具に比べて表面硬度が高くなることで、耐摩耗性が向上したためと考える。同様に、HM工具の摩耗量が少ない要因は、(Al,Ti,Cr)N膜によるものに加え、母材がハイス鋼よりも硬度の高い超硬であったことによると考える。

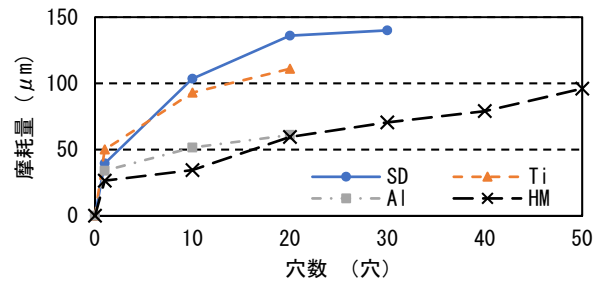


図6 工具摩耗量測定結果

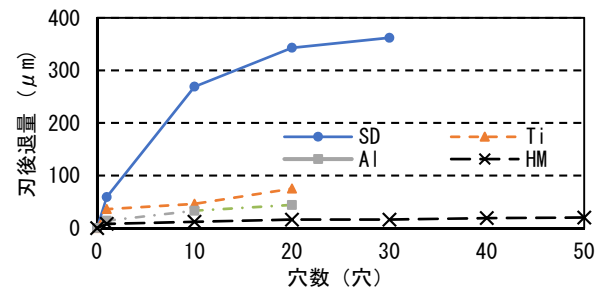


図7 外周刃後退量測定結果図

一方、Ti工具はTiN被膜の硬度が他の被膜よりも低いため、耐摩耗性の向上が限定的であったと推測する。

外周刃後退量測定結果を図7に示す。20穴加工後の後退量は、SD、Ti、Al、HM工具がそれぞれ343、75、44、16μmであり、SD工具の外周刃損傷が著しく大きかった。Ti、Al、HM工具は、切削時の負荷を低減するためにシンニング（ドリル先端を削って特に薄くした部分）が施されているが、SD工具はシンニングの無い

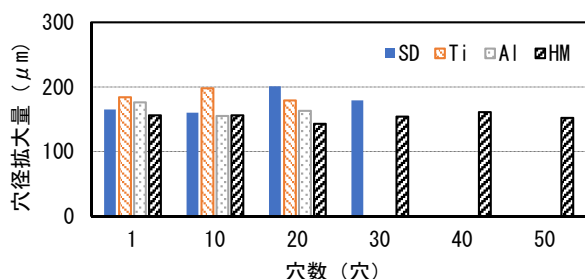


図8 加工穴径拡大量測定結果

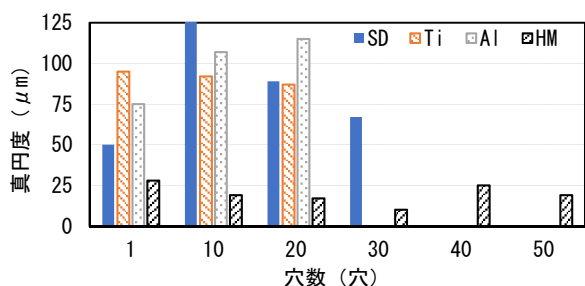


図9 加工穴真円度測定結果

形状である。そのため、他の工具に比べ切削時の負荷が大きく、加工中の温度が上昇して工具強度が低下したために、損傷が大きくなったと考える。

穴径拡大量測定結果を図8に示す。いずれの工具も、穴径が工具径よりも200 $\mu\text{m}$ 程度拡大した。一般的に鋼のドリル加工では、穴が工具径よりも100 $\mu\text{m}$ 程度拡大する<sup>5)</sup>とされているが、本実験では先に述べた通り刃に凝着が生じており、外周刃の凝着による見かけの工具径の拡大や、凝着・脱落時の加工負荷変動による工具の振動などが、穴径拡大の要因と考える。

穴真円度測定結果を図9に示す。HM工具は、SD、Ti、Al工具に比べ、真円度が小さく、より精度の良い加工穴が得られた。HM工具は母材が剛性の高い超硬であり、加工負荷に対する工具の変形が小さかったためと考える。

以上の通り、加工可能穴数や加工穴形状精度の観点からSD、Ti、Al、HM工具について比較すると、チタン合金の加工にはHM工具が適すると言える。

次に、経済性の観点から検討してみる。本実験で使用した工具価格の比は、SD工具を1とすると、Ti、Al、HM工具はそれぞれ2.2、2.4、23.5であり、HM工具は特に高価である。また、Ti、Al、HM工具は被膜工具のため、再研削では被膜の再被覆が必要であり、超硬が

母材のHM工具は一般的な加工現場で保有する装置では再研削が困難である。これに対し、SD工具は被膜なしのハイス工具であるので、一般的な加工現場においても、再研削して再使用が可能であり、再研削時にシンニングを施せば、再使用時の工具損傷を抑えることも出来る。鳥取県内には、多種少量加工の業態の企業が多いが、少量のチタン合金加工であれば、高価なHM工具ではなく、加工穴数などを管理しながら安価なSD工具を再研削しながら用いることが工具費コストの低減に有効であると考えられる。

#### 4. おわりに

JIS 60種チタン合金 (Ti-6Al-4V) のドリル加工を行い、以下の結果を得た。

- ・(Al,Ti,Cr) N 膜超硬ドリルによるチタン合金の加工は、工具損傷が少なく、加工穴形状精度に優れる
- ・ハイスドリルによるチタン合金加工は、工具被膜の有無や被膜種の違いによる加工性能の差異は小さい
- ・工具費コスト低減の観点からは、少量のチタン合金加工であれば、被膜なしハイスドリルを再研削しながら用いることが有効である

今後は、JIS 80種などのチタン合金について、加工技術調査を行う予定である。

#### 謝 辞

本実験は、令和元年度に開催された「難削材加工技術研究会」(主催：公益財団法人鳥取県産業振興機構)において、参加企業から寄せられた意見を参考に実施した。また、実験で使用したマイクロスコープは、公益財団法人 JKA の補助事業により導入したものである。ここに感謝の意を表す。

#### 文 献

- 1) 小柳禎彦; 耐熱チタン合金の開発史について、まてりあ, 日本金属学会, 58(4), p.188-192(2019).
- 2) JIS H 4600 チタン及びチタン合金一板及び条, 日本規格協会, p.3(2012).
- 3) 宋小奇, 高橋幸男, 何偉銘, 井原透; Ti-6Al-4V 切削

加工における構成凝着層の生成に及ぼすコーティング層の影響, 日本機械学会論文集, 86(881), p.1-14(2020).

- 4) 藤原順介, 有元崇晃, 田代徹也; Ti-6Al-4V 合金の高速切削における複合ミストの供給量の影響, 日本機械学会論文集, 86(883), p.1-12(2020).
- 5) ツールエンジニア編集部; 穴加工用工具のすべて, 大河出版, p.31(2006).