

チタン・チタン合金の小径ドリル加工

福島県ハイテクプラザ 吉田智
斎藤俊郎
夏井憲司

1. 諸言

チタン・チタン合金は、比重が小さい・比強度が高い・耐食性が高いなどの優れた特性を持つことから、航空・宇宙、輸送、医療をはじめとする様々な分野で用途が拡大してきている。しかし、同時に熱伝導率が低い・ヤング率が小さいといった特性も持っており、これらが工具寿命の低下などを引き起こし、難削材として扱われている。

本研究では、チタン・チタン合金の加工の中で、小型精密部品等の加工で行われる小径ドリル加工を取り上げ、効率的な加工を行うための条件設定について検討を加えた。

2. 調査内容

チタン・チタン合金のドリル加工では、熱伝導率が低いため他の被削材に比べて工具が加工熱による損傷を受けやすいが、直径 1mm 以下の小径ドリル加工では内部給油（センタースルークーラント）が使用できない。さらにドリル径の数倍を超える深穴加工では切り屑詰まりによる折損を生じやすくなるため、加工時にはステップフィードによる刃先冷却・切り屑排出が必要になる。そこで、本研究ではチタン・チタン合金の小径ドリルによる深穴加工の条件設定の指針を得るため、加工効率の面から加工条件について検討を加えた。

実験に使用したドリルはφ0.5mm 超硬合金製ルーマ型ドリル（シャンクφ3mm）5 種で、いずれも工具メーカーからオーステナイト系ステンレス（SUS304）加工向けに市販されているものである。表 1 にそれぞれのドリルの外観・緒元を示す。

加工条件については、各ドリルの推奨条件からチタンと同様に熱伝導率が低く難削材として扱われているオーステナイト系ステンレスの切削条件を参考とし、8 割程度の条件である回転数 8,000 回転（切削速度 12.5m/min）、送り速度 32mm/min（回転あたり送り 0.004mm/rev）、ステップフィード量 0.05mm（0.1D）、エマルジョン系水溶性切削液による湿式切削（外部給油）を基準の加工条件として、回転数（切削速度）、送り速度（送り量）、ステップフィード量を表 2 のように変化させて加工し、加工時間と工具摩耗を比較した。

被削材はチタン合金（Ti-6Al-4V、750℃焼き戻し、100×80×t10mm）で、深さ 4mm（8D）の止まり穴を加工し、100 穴加工ごとの工具摩耗を測定した。加工にあたっては固定サイクル（小径深穴加工ドリルサイクル：G83）を使用している。また、工具食い付き時の振れ周りを防止するため、同径のドリル（スターティングドリル）で深さ 0.3mm の下穴をあけてから加工した。

表 1 ドリル一覧

	先端	側面	緒元
工具 A			ねじれ角 26~32 度 先端角 140 度 超硬合金+コーティング (TiAlN 系)
工具 M			ねじれ角 30 度 先端角 130 度 超微粒超硬合金+コーテ ィング (TiAlN 系)
工具 N			ねじれ角 30 度 先端角 140 度 超硬合金+コーティング (TiCrAlN 系)
工具 O			ねじれ角 30 度 先端角 120 度 超超微粒子超硬合金+コ ーティング (TiAlN 系)
工具 T			ねじれ角 30 度 先端角 140 度 超微粒超硬合金+コーテ ィング (TiCN 系)

表 2 実験条件

No.	回転数 (切削速度)	送り速度 (送り量)	ステップフィード量 (mm)
1	8,000rpm (12.6m/min)	32mm・min (0.004mm/rev)	0.05mm (0.1D)
2	8,000rpm (12.6m/min)	32mm・min (0.004mm/rev)	<u>0.10mm (0.2D)</u>
3	8,000rpm (12.6m/min)	<u>40mm・min (0.005mm/rev)</u>	0.05mm (0.1D)
4	<u>12,000rpm (18.8m/min)</u>	<u>48mm・min (0.004mm/rev)</u>	0.05mm (0.1D)
5	8,000rpm (12.6m/min)	32mm・min (0.004mm/rev)	<u>0.15mm (0.3D)</u>
6	8,000rpm (12.6m/min)	32mm・min (0.004mm/rev)	<u>0.20mm (0.4D)</u>

実験には㈱牧野フライス製作所製 FF 加工機 HYPER5（外観：図 1、機械仕様：表 3）を使用した。また工具摩耗は、走査型レーザー顕微鏡（島津製作所製 OLS1100）を用いて、加工前後のドリル刃先（逃げ面）の観察画像から、刃先の後退量を含む逃げ面摩耗幅を測定した。



図 1 加工機外観

表 3 加工機の仕様

主軸回転数	3,000～32,000rpm
テーブル送り速度	1～16,000mm/min
ストローク	X600×Y400×Z400mm
位置決め精度	±1μm

3. 結果

以下に加工実験の結果を示す。表 4 は各実験条件における一穴あたりの加工に要する時間である（早送り速度 $F0=8,000\text{mm/min}$ の場合）。基準とした No. 1 の条件での加工時間 44.5 秒に対し、ステップフィード量を 2 倍にした No. 2 の条件では 26.0 秒と約 40%の短縮、送り速度を 1.25 倍とした No. 3 の条件では約 10%、回転数を 1.5 倍とした No. 4 の条件では約 18%の短縮となっている。

表 4 穴加工に要する時間

No.	加工時間 (sec)	変更条件
1	44.5	—
2	26.0	ステップフィード量×2
3	40.0	送り速度×1.25
4	36.5	回転数×1.5
5	20	ステップフィード量×3
6	17	ステップフィード量×4

No. 1 の条件における加工時間のうち、切削送りに要する時間は約 23.5 秒（固定サイクル G83 で、R 点 0.2mm、アプローチ距離 0.1mm に設定した際の総移動距離 12.5mm から算出）で、残りの約 21 秒が早送りに要する時間と考えられる。回転数（切削速度）または送り速度（回転あたり送り）を上げた場合、切削送りに要する時間はそれにほぼ反比例して減少するが、ステップフィードの回数は変わらないため、早送りに要する時間は変わらない。上記に基づき、No. 4 の条件で加工した際に要する時間を計算すると、No. 4 では回転数の上昇に伴って送り速度も 1.5 倍になるため、

$$(\text{切削送り時間} : 23.5 / 1.5 = 15.6 \text{ 秒}) + (\text{早送り時間} : 21 \text{ 秒}) = 36.6 \text{ 秒}$$

となり、実測値とほぼ同じ値となる。一方、ステップフィード量を増やした場合は、それに伴ってステップフィード回数が減るとともに切削送りによる移動距離も減少する。回転数を2倍にした際の加工時間(推定)とNo.2の条件の加工時間を比較すると、

$$\begin{aligned} & (\text{切削送り時間: } 23.5/2=11.8 \text{ 秒}) + (\text{早送り時間: } 21 \text{ 秒}) = 32.8 \text{ 秒} \\ & > \text{No.2 ステップフィード量} \times 2 \quad 26.0 \text{ 秒} \end{aligned}$$

となり、ステップフィード量を増やしたほうが加工時間の短縮率が大きくなることがわかる。なお、早送り時間については、No.1の条件での早送りによる移動距離344.6mmから算出される所要時間2.5秒(F0=8,000mm/min時)に対して実際の所要時間は21秒であることから、ほとんどが加減速の時間と考えられ、早送り速度を変えても所要時間はあまり変わらないものと思われる。

以上から、加工効率の面から加工条件を考えた場合、ステップフィード量の調整が効果的であるといえる。

次に工具摩耗であるが、図2はNo.1の条件の加工前後の刃先の観察写真、図3は300

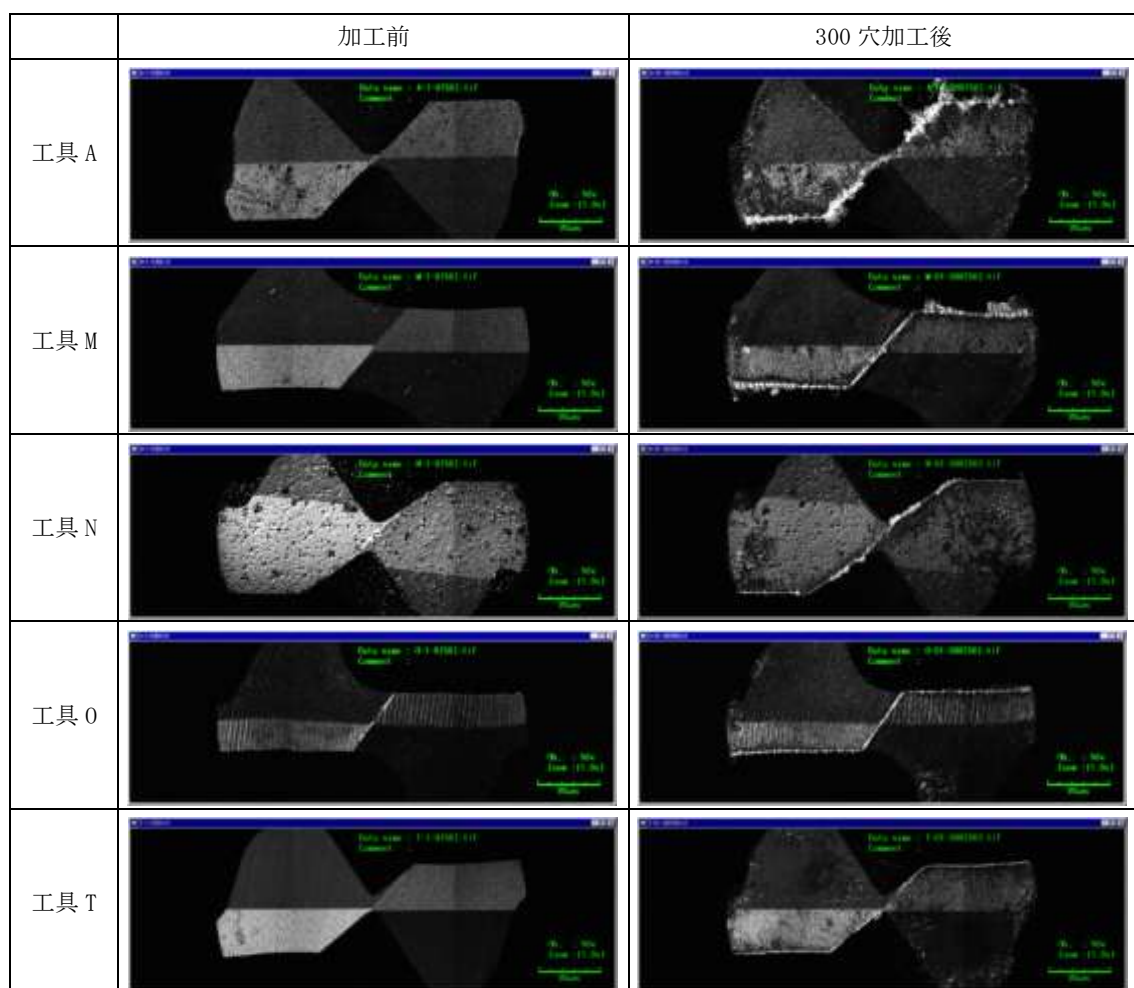


図2 刃先観察写真 (No.1)

穴加工後の工具摩耗の測定値である。工具摩耗は、逃げ面の4～6か所の測定値の平均であり、最大・最小をエラーバーで示してある。この結果を見ると、工具A、M、Nはチップニングなどにより局部的に摩耗が進んでいる個所がみられ、比較的摩耗量も大きい。一方、工具O、Tは摩耗量も比較的小さく、ばらつきも小さい。

図4は実験条件1～4の各工具の逃げ面摩耗を示したものである。工具による摩耗量の傾向としては、いずれの条件でもNo.1の条件と同様、工具O、Tの摩耗が小さくなっている。条件による摩耗量の変化については、工具によりやや傾向が異なり、A、M、TではNo.1の条件が最も摩耗量が大きく、送り速度(送り量)、ステップフィード量を大きくすると摩耗量が小さくなる傾向がみられる。またNでは回転数(切削速度)を上げた条件で摩耗が大きくなっている。

次に図5はステップフィード量を変化させたNo.1、2、5、6の逃げ面摩耗の平均値を示したものである。A、Nはステップフィード量0.15mm(0.3D)で折損(1穴目)、Tはステップフィード量0.2mm(0.4D)で折損(100穴未満)しているが、M、Oは特に損傷は見られない。条件による摩耗量の変化については、折損した工具も含めて、ほとんどの工具でステップフィード量を大きくすると摩耗量が小さくなっている。図6は工具MのNo.1、No.2、No.5、No.6の工具摩耗、図7は刃先の観察写真を示したものであるが、ステップフィード量が大きくな

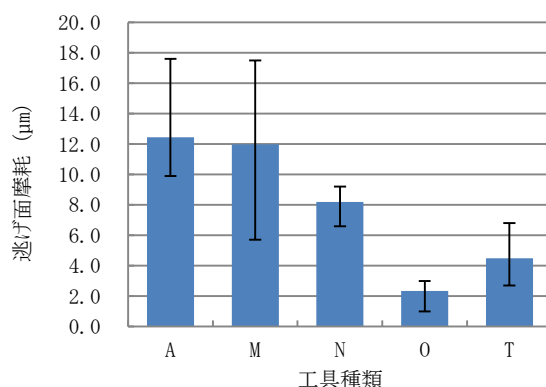


図3 工具摩耗 (No. 1、300 穴加工後)

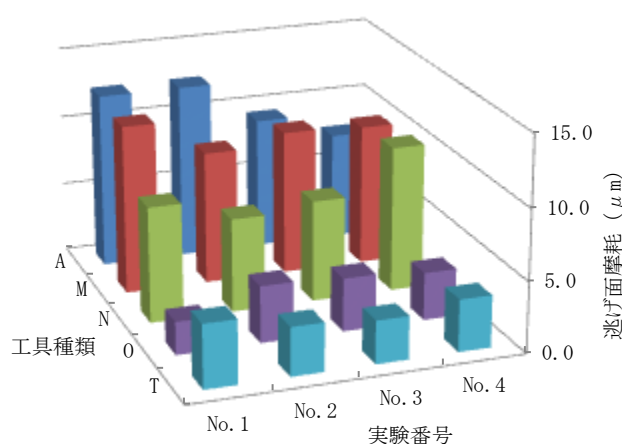


図4 工具摩耗 (No. 1～4、300 穴加工後)

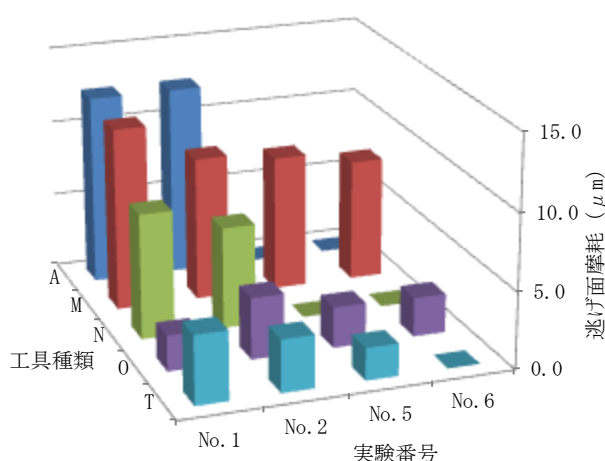


図5 工具摩耗 (No. 1, 2, 5, 6、300 穴加工後)

るにしたがって摩耗量が小さくなっていることが確認できる。

以上の結果について、摩耗量や条件を変化させた際の摩耗量の変化の違いは工具材種やコーティング、切れ刃形状などによるところが大きいと考えられるが、加工条件の変化による影響も認められる。まず送り速度（送り量）については、送り速度（送り量）を上げると、切削時に切れ刃が被削材に接触しながら移動する長さが短くなり、摩耗量が減少する傾向が見られた。また、回転数（切削速度）については、回転数を上げると切削時の刃先の温度上昇が大きくなり、摩耗量が大きくなることが考えられる。ステップフィード量については、ステップフィード量を大きくすると切り屑排出動作の回数が減り、切れ刃に圧着した切り屑の剥離による摩耗（超合金粒子の脱落）が抑えられ、工具摩耗量が小さくなるものと考えられる。

また、ステップフィード量を大きくした No. 5、No. 6 の条件で一部の工具で折損を生じているが、これについては、No. 5 の条件（ステップフィード量 0.15mm (0.3D)）で折損した A、N の工具は、表 1 および図 2 の刃先形状を見ると、他の工具よりも芯厚が厚くなっている。No. 6

の条件（ステップフィード量 0.2mm (0.4D)）で折損した T の工具も、折損していない M、O の工具に比べるとやや芯厚が厚い。今回の加工実験で生じた切り屑の形状を見ると、図 8、図 9（工具 M、No. 1、No. 6 の切り屑の SEM 観察像）のように厚さ数 μm 程度の連続した蛇腹型をしており、No. 6 の条件では長いもので 3~4mm 程度の長さがある。このため、芯厚の厚い工具では切り屑詰まりを生じて折損したのと考えられる。なお、T の工具については、M、O の工具とシンニング形状が異なるために、生成される切り屑形状にも違いがあると思われ、それが切り屑詰まりの一因となった可能性も考えられる。

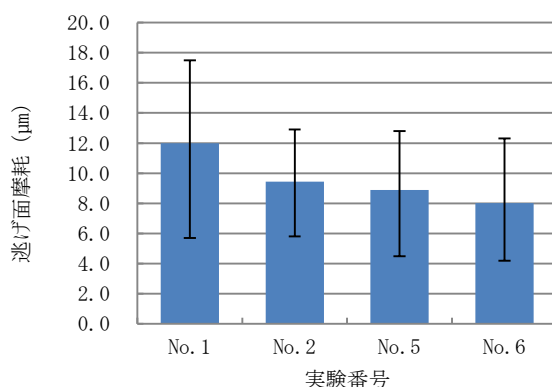


図 6 工具摩耗（工具 M、300 穴加工後）

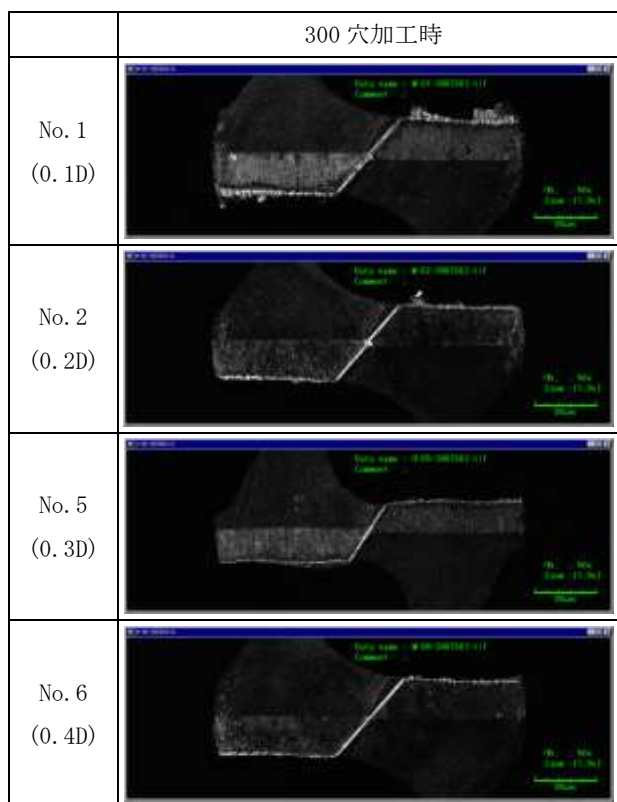


図 7 刃先観察写真（工具 M）



図8 切り屑形状（工具 M、No. 1）



図9 切り屑形状（工具 M、No. 6）

以上のことから、効率的な穴加工には、工具摩耗の面からもステップフィード量の調整が有効であると考えられるが、工具の形状等により切り屑詰まりによる折損を生じる場合があるので、使用する工具に合わせた条件設定が必要となる。

4. 結言

以上、チタン合金の小径ドリル加工実験を行った結果、次のことが分かった。

- 1) 小径深穴ドリルサイクル（G83）による穴加工では、送り速度（送り量）、回転数（切削速度）よりも、ステップフィード量の調整が加工時間短縮に効果的である。
- 2) 送り速度（送り量）を上げると、切削時に切れ刃が被削材に接触しながら移動する長さが短くなり、摩耗量が減少する傾向が見られる。
- 3) 回転数（切削速度）を上げると、切削時の刃先の温度上昇が大きくなり、摩耗量が大きくなる。
- 4) ステップフィード量を大きくすると、切り屑排出動作の回数が減り、切れ刃に圧着した切り屑の剥離による摩耗（超硬合金粒子の脱落）が抑えられ、工具摩耗量が小さくなる。
- 5) チタン合金の穴加工では、蛇腹状の連続した切り屑が生じるため、ステップフィード量を大きくすると、工具形状によっては折損を生じやすくなる。