

チタン合金及び焼入れ鋼のドライによる穴加工の切削条件の検討

森本和邦*, 佐本芳正*

Research on Dry Drilling Condition of Titanium Alloy and Hardened Steel

Kazukuni MORIMOTO and Yoshimasa SAMOTO

Key words: Titanium Alloy, Hardened Steel, Dry Cutting

1. はじめに

金属の切削加工の多くにおいて切削油剤は潤滑作用, 冷却作用, 切り屑排出作用が期待され使用されている。しかし, 使用済の切削油剤は最終的に産業廃棄物として処理されており, 環境負荷低減の観点から削減が求められている。切削油剤の減量化あるいは使用しない切削加工技術として, 切削油剤を微量のみ供給するMQL(Minimum Quantity Lubrication)加工, 切削油剤を使用せず低温のガスを加工部位に供給する冷風加工, 切削油剤を使用せず冷却も行わないドライ加工がある¹⁻³⁾。これらの加工技術の中で, ドライ加工は切削油剤を使用しない, 新規設備導入が必要ないといった点で優れているが, 十分な冷却性や切り屑排出性が得られにくく, 切削温度が上昇しやすいため, 工具寿命が短いといった課題がある。鋳鉄はドライ加工が利用されているが, チタン材や焼入れ鋼の加工は, 切削温度が上昇しやすく, 工具寿命が短いといった理由から切削油剤を用いることが一般的であり, ドライ加工で市販の工具を使用した際に適した切削条件の探索はあまり行われていない。

本研究では, ドライ加工に適した切削条件の調査を目的とし, チタン合金, 焼入れ鋼の穴加工について市販のドリルを用いたドライ加工を行い, 加工精度の評価及び工具摩耗の観察により調査したので報告する。

2. 実験方法および実験材料

2. 1 被削材および貫通穴加工

2. 1. 1 加工方法

被削材のチタン合金 Ti-6Al-4V は大きさが 200 (w) mm×200 (l) mm×4.7 (t) mm, 硬さが HV320, 焼入れ鋼(クロムモリブデン鋼 SCM440) は大きさが 100 (w) mm×200 (l) mm×10 (t) mm, 硬さが HV300 の板材に貫通穴加工を行った。貫通穴加工には, ジグ中ぐり盤(株)三井精機製, 最高回転数 2100 rpm) を使用し, ドライ加工を行った。

2. 1. 2 評価方法

加工精度の評価には加工穴の穴径, 表面粗さの測定を行った。穴径は CNC 三次元測定機(株)東京精密 PA800A-V) により測定し, ドリル径, エンドミル径と加工穴径との差を設定穴径寸法差として評価した。加工穴の表面粗さの測定は触針式の表面粗さ・輪郭複合測定機(株)東京精密サーフコム 2000SD2) を用い算術平均粗さ Ra と最大高さ粗さ Rz を評価した。

工具摩耗の観察にはビデオマイクロスコープ(株)KEYENCE VH-6300) を用いドリルの先端部を 100 倍に拡大し観察を行った。

2. 1. 3 熱処理方法

クロムモリブデン鋼の熱処理には電気炉(TOYO SEISAKUSHO OPM-28) を使用し, 950 °C で 60 分保持した後水冷し焼入れを行い, 550 °C で 60 分保持し水冷し焼き戻しを行った。

2. 2 チタン合金

* ものづくり研究課

表 1 チタン合金切削条件および工具摩耗量

	実験条件 1	実験条件 2	実験条件 3	実験条件 4
使用工具	Cr 複合多層コーティング粉末ハイスドリル VPH-GDS $\phi 8$ ねじれ角 30°			
工具突出し量 [mm]	45			
チャッキング方法	コレットチャック			
回転速度 N [rpm]	370	500	370	500
送り量 f [mm/rev]	0.1	0.1	0.18	0.18
推奨条件	切削速度 6~10 [m/min], 回転速度 320 [rpm], 送り量 0.08~0.16 [mm/rev]			
逃げ面摩耗量 [μm]	33	21	47	47

表 2 焼入れ鋼切削条件

	実験条件 5	実験条件 6	実験条件 7	実験条件 8
使用工具	ノンコーティング超鋼エンドミル MG-EMS $\phi 10$ ねじれ角 30°			
工具突出し量 [mm]	40			
チャッキング方法	ドリルチャック			
回転速度 N [rpm]	370	500	370	500
送り量 f [mm/rev]	0.025	0.025	0.04	0.04
推奨条件	切削速度 27.9 [m/min], 回転速度 890 [rpm], 送り量 0.033 [mm/rev]			
加工穴数	6	8	6	8

チタン合金の板材に市販の弱ねじれ溝 60° 、材質が HSS、ノンコーティングの $\phi 4$ のセンター穴ドリルでセンター穴加工を行った後、市販の $\phi 8$ 、ねじれ角 30° のクロム系コーティング粉末ハイスドリル（以下ハイスドリルと表す）でドライ貫通穴加工を行った。工具の突出し長さは 45 mm、加工穴深さは 4.7 mm とし、工具の保持にはコレットチャックを使用した。表 1 に切削条件（以下実験条件とする）を示す。実験条件は工具メーカーの水溶性切削油使用時の推奨条件を参考に選定した。センター穴ドリルは各実験条件をとおして同じものを 1 本使用し、ハイスドリルは各実験条件で 1 本ずつ使用し 55 穴加工を行い工具摩耗の観察を行った。

2. 3 焼入れ鋼

生材のクロムモリブデン鋼 SCM440 に水冷による焼入れ焼き戻しを行い、硬さを HV300 になるように調質した。加熱温度は手作業の焼入れ焼き戻しで金属組織のマルテンサイト変態を起こすため高く設定した。

貫通穴加工は市販の弱ねじれ溝 60° 、材質が HSS、ノンコーティングの $\phi 4$ のセンター穴ドリルでセンター穴をあけ、ハイスドリルで穴径 8

mm の下穴を加工した後、 $\phi 10$ のノンコーティング 4 枚刃超硬エンドミル（以下焼入れ鋼用エンドミル）でドライ加工を行った。工具の突き出し長さは 40 mm、加工穴深さは 10 mm とし、工具の保持にはコレットチャックを使用した。表 2 に実験条件を示す。実験条件は工具メーカーの水溶性切削油剤使用時の推奨条件を参考に選定した。各実験条件においてセンター穴ドリル、ハイスドリルは同じものを使用し、ハイスドリルは切れ味が悪くなった時に適宜交換した。焼入れ鋼用エンドミルは実験条件ごとに一本ずつ使用し、1 穴加工するごとにビデオマイクロスコープで工具摩耗の観察を行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 チタン合金

3. 1. 1 工具摩耗

図 1 に穴加工後のハイスドリルの先端部の工具摩耗写真、逃げ面摩耗図を示す。図 1 は実験条件 1 の時のもので、他条件で大きな違いは見られなかった。工具摩耗は逃げ面摩耗量によって評価した。

逃げ面摩耗量の結果を表 1 に示す。逃げ面摩耗

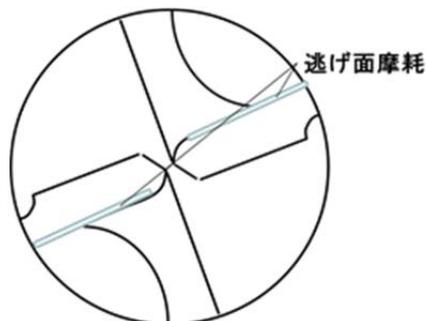
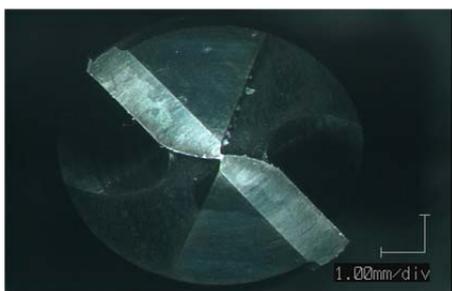


図1 チタン合金工具摩耗写真および工具摩耗図
(実験条件1 N=370rpm, f=0.10mm/rev)

量は送り量の大きい2つの実験条件3, 4で大きく、回転速度が速く、送り量の小さい実験条件2で逃げ面摩耗量が小さいといった結果であり、今回の調査では実験条件2が工具摩耗量を小さくすることが分かった。工具摩耗量は工具寿命に達するまで加工できていないため、工具寿命が長いかどうかは判断できないが、ドライ加工で高効率に加工できる可能性があることがわかった。

3. 1. 2 バリや切り屑

送り量の小さい実験条件1, 2ではバリが生じ、切り屑がドリルに巻きついた。一方で送り量の大きい実験条件3, 4ではバリの発生も無く切り屑がドリルに巻きつくことも無かった。今回の調査では実験条件3, 4がバリの発生、切り屑処理において優れていた。

3. 1. 3 加工精度

設定穴径寸法差をグラフにしたものを図2に示す。どの実験条件においても工具摩耗による穴径の減少は認められず、1穴目と55穴目でほとんど穴径の差は見られなかった。加工精度が最も良かった実験条件4は設定穴径寸法差がドリル径より100 μ m程度大きかった。

加工穴の表面粗さの測定結果を図3に示す。算術平均粗さRaが1~2 μ m程度、最大高さ粗さRzは5~8 μ m程度であり、大きな違いは見られ

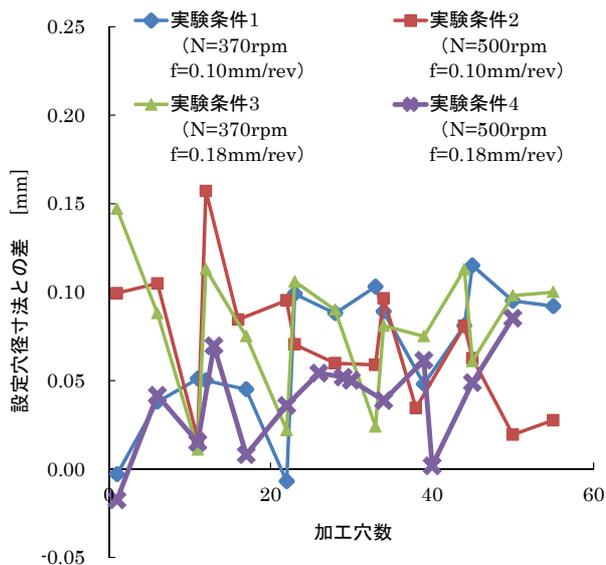


図2 チタン合金 設定穴径寸法差

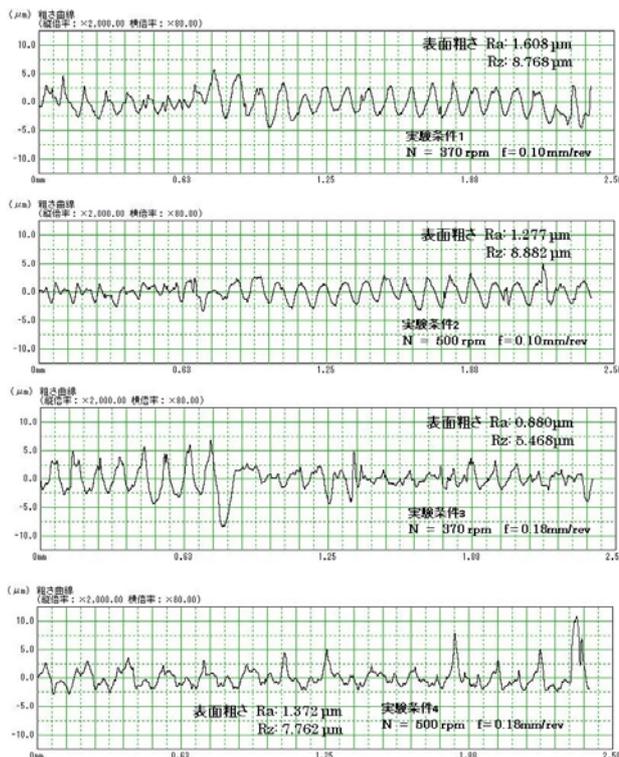


図3 チタン合金表面粗さ曲線

なかった。

3. 1. 4 切削条件

切削条件は工具摩耗量、切りくず排出性、穴径寸法の3点において、穴径寸法の精度を重視し、実験条件4が今回の実験では適切であると判断した。チタン合金の加工ではチタン合金の熱伝達率

が小さいため切削熱が工具に集中し、熱による工具摩耗が促進されるが⁵⁾、断続加工を行ったため熱が工具に溜まらず工具摩耗量は少なかったと考えられるため、マシニングセンター等のNC加工機での連続加工では、今回の調査と同じ切削条件で熱による摩耗の影響、工具寿命、高送りが可能かどうかは検証が必要である。

3. 2 焼入れ鋼

3. 2. 1 工具摩耗

各実験条件において一般的な工具寿命を基準として工具寿命基準を逃げ面摩耗幅が 200 μm に達した時とし、工具寿命に達するまで加工を行った。今回の調査では最大 8 穴の加工で逃げ面摩耗幅が寿命基準に達した。図 4 に焼入れ鋼加工後のエンドミルの先端部の工具摩耗写真、エンドミルの工具摩耗図を示す。図 4 は実験条件 5 の時の工具摩耗で他条件においても大きな工具摩耗の差は無かった。工具摩耗は逃げ面における工具摩耗量で評価し、各実験条件で逃げ面において境界摩耗、溶着が生じていた。境界摩耗が生じていることから工具の耐摩耗性、耐欠損性や硬さが十分でないことが推測され、4 枚刃のエンドミルの使用や切り屑が粉状になっていたことから切り屑排出性が悪く切削抵抗の増大や切削温度が上昇していた事も推測される。

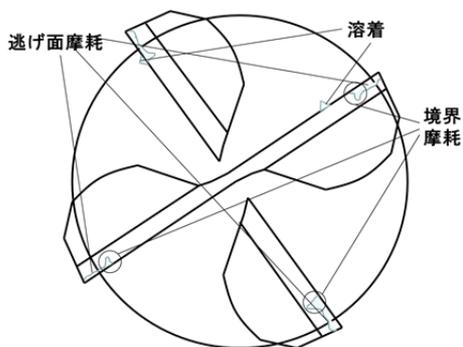


図 4 焼入れ鋼用エンドミル逃げ面摩耗

3. 2. 2 バリや切り屑

バリはどの実験条件においても生じなかった。切り屑は各実験条件で粉状の切り屑であり、穴内部に詰まりが生じていた。

3. 2. 3 加工精度

設定穴径寸法差をグラフにしたものを図 5 に示

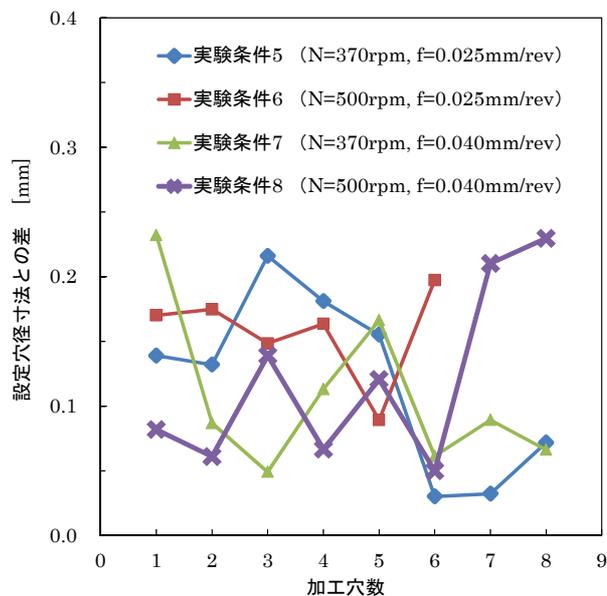


図 5 焼入れ鋼穴径測定結果

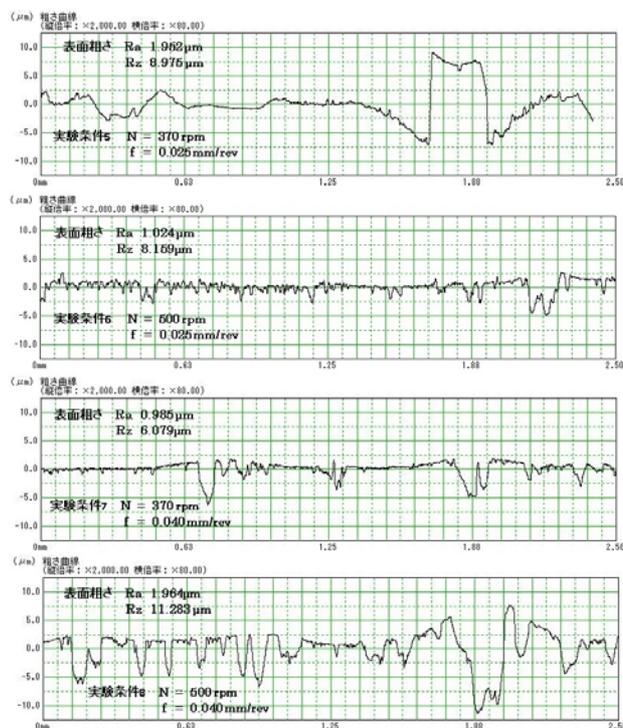


図 6 焼入れ鋼表面粗さ曲線

す。各実験条件において設定穴径寸法差は 250 μm 程度あった。実験条件 6, 8 は加工穴の増加に伴い設定穴径寸法差が大きくなったが、一方で実験条件 5, 7 では摩耗前の設定穴径寸法差より摩耗後の設定穴径寸法差の方が小さかった。実験条件 6, 8 では工具に溶着した凝着物が構成刃先⁴⁾を形成したため工具摩耗後の穴径が拡大したと考えられる。一方で実験条件 5, 7 では溶着量が少なかったため、最終的に工具摩耗により穴径が減少したと考えられる。

加工穴の表面粗さの測定結果を図 6 に示す。算術平均粗さ R_a が 1~2 μm , 最大高さ粗さ R_z が 6~11 μm であり、実験条件ごとに粗さ曲線には違いが見られた。これは各実験条件で切り屑が粉状になっており、切り屑が穴中で詰まり、加工時に切削抵抗を増大させていたことが推測されるため、回転速度や送り量の違いで切り屑排出性に差が出たことによる違いであると考えられる。

3. 2. 4 切削条件

切削条件は、どの実験条件においても工具寿命が短い結果であり、ドライ加工での有効な切削条件は見いだせなかった。改善するためには、切り屑排出性をよくする対策、例えばコーティングの施された超硬ドリルや 2 枚刃のエンドミルの使用が必要であると考えられる。

4. 結言

チタン合金、焼入れ鋼において市販の工具を用いたドライ貫通穴加工における適切な切削条件を調査したところ、以下のことがわかった。

(1) チタン合金はドライ加工で湿式切削よりも

高能率に穴加工できる可能性があることがわかった。今回の調査では回転速度 500 rpm, 送り量 0.18 mm/rev が穴径寸法精度を重視した際に最適な切削条件であった。しかし、断続加工であったため、NC 加工機による連続加工では、再現性の検証が必要である。

(2) 焼入れ鋼は今回の調査ではドライ加工で高能率に穴加工することはできなかった。回転速度 370 rpm, 500 rpm, 送り量 0.025 mm/rev, 0.04 mm/rev を組み合わせた 4 種類の実験条件全てで、切り屑排出性が悪く、工具摩耗が著しかったことから、切り屑排出性をよくする対策が必要であることがわかった。コーティングの施された超硬ドリルや 2 枚刃の超硬エンドミルの使用が対策として考えられる。

参考文献

- 1) 槇山正ほか：“ドリル加工における MQL の効果 (第 1 報)” 精密工学会誌, 73(2), 232-236, (2007)
- 2) 加藤隆弘ほか：“冷風を用いた切削加工の切削温度と工具寿命” 明石工業高等専門学校研究紀要, 46, A13-A17, (2003)
- 3) 大島郁也ほか：“ドライ切削の被削性及び経済性評価：第 2 報, 中炭素鋼と合金工具鋼のエンドミル及びドリル加工” 日本機械学会論文集, C 編 67(661), 3034-3039, (2001)
- 4) 小野浩二ほか：理論切削工学 現代工学社, p42-44
- 5) 狩野勝吉：難削材・新素材の切削加工ハンドブック工業調査会 p287-288