研究論文

Ti-6%Al-4%V 合金の増減送りドリル加工*

櫻井 恵三**・足立 勝重**・亀川 俊明***
小川 恒一****・花崎 伸作*****

Intermittently decelerated feed drilling of Ti-6%Al-4%V alloy*

Keizo SAKURAI**, Katsushige ADACHI**, Toshiaki KAMEKAWA***

Koichi OGAWA**** and Shinsaku HANASAKI*****

When drilling a titanium alloy, its low heat conductivity causes slow dispersion of heat evolved as a result of friction with a drill. Then a significant build up of heat at the cutting edges occurs, resulting in the increased welding phenomenon of chips at the tool flank as well as increased chipping. Therefore, it becomes difficult to determine a suitable cutting condition and tool material. In this work, intermittently decelerated feed drilling tests with high speed steel drills for a Ti-6%Al-4%V alloy were carried out on a CNC machine tool to improve the rate of chip removal. The results show the formation of easy-to-eliminate chips, reduced chip clogging, increased chip removal. Consequently, heat is readily dispersed to the exterior and the build up of heat at the cutting edges is reduced, resulting in the increased tool life by two times over a conventional drilling. Intermittently decelerated feed drilling is an effective method in drilling titanium alloys.

Keywords: Ti-6%Al-4%V alloy, intermittently decelerated feed drilling, high speed steel drill, CNC, tool life

(Received June 22, 1995)

1. 緒 言

チタン合金は、軽量で耐熱性、耐食性に優れた特性を有するために高性能材料として熱交換器、航空機、宇宙・原子力産業の部品等に広く用いられてきた¹⁾。この材料は高性能をもつ反面、熱伝導率が鋼の約1/5と小さいことや化学的な活性度が高く、かつ親和性が強いことなどからその機械加工は難しく、工具寿命からみた被削性は非常に劣っている²⁾。とくに、ねじれ刃ドリルによる穴あけ加工はきわめて困難である。すなわち、被削材とドリルとの摩擦によって生じた熱が拡散されにくく刃先に集中し、刃先温度が急激に上昇するので工具すくい面への切りくずの凝着現象が激しくなる。そのために、切りくずの排出性の低下によるチップングの誘発や工具寿命が短くなるなどいろいろな問題を抱えている。

通常、この種の材料の穴あけには超硬ドリルが用いられるが、比較的高価で再研削が困難でかつ折れやすい。他方、ダイヤモンドドリルは非常に高価であり、加工コストの面から現実的でない。また、高速度鋼ドリルを用いる場合は、比較的靱性はあるが耐熱性に問題がある。

さらに、加工法の面からはステップ方式³⁾や工具に振動を与える方法⁴⁾などがあるが、加工能率や特殊な装置を必要とするなどの問題がある。このように、これらに対処し得る適切な工具材質や加工条件が見出されたとは言いがたく、高能率な加工法の研究が要望されているのが現状である。

著者らは先に、増減送りドリル加工（以下増減加工と呼ぶ）はドリル刃先にパルス的な衝撃作用がはたらき、切りくず詰まりが緩和されて切りくずの排出性が高まることを示した。さらに、この加工法がアルミニウム合金の穴あけに対して、工具寿命、加工能率の観点から有効であるという知見を得た⁵⁾。

そこで本研究では、上述の知見をもとにチタン合金 (Ti-6%Al-4%V) を被削材として増減加工による穴あけを行った。その加工特性（ドリル寿命、切削抵抗、切りくず形状など）について検討し、チタン合金の穴あけに対して、増減加工が工具寿命や加工能率の観点から有効であることを示した。また、本加工法と比較検討のために、通常のドリル加工（以下慣用加工と呼ぶ）による穴あけを行い、加工特性を比較した。

* 軽金属学会第88回春期大会（平成7年5月）で一部発表。

** 大阪産業大学工学部（大東市）。Faculty of Engineering, Osaka Sangyo University (Daito-shi, Osaka).

*** 大阪産業大学大学院生（大東市）。Graduate Student, Osaka Sangyo University (Daito-shi, Osaka).

**** 大阪府立大学総合科学部（堺市）。College of Integrated Arts and Sciences, University of Osaka Prefecture (Sakai-shi, Osaka).

***** 大阪大学工学部（吹田市）。Faculty of Engineering, Osaka University (Suita-shi, Osaka).

2. 実験方法

2.1 実験装置と実験条件

穴あけ実験には、CNC ドリルメイト (FANUC 社製 5.5 kW) を用いた。Fig. 1 に、増減加工の原理を示す。これは、連続送り中にドリルの送り方向に減速した送りを微小幅だけ周期的に一定ピッチで挿入する手法である。

本実験では、0.7 mm の深さに対して送り $S_{acc}=1.33$ mm/s で送り、次に 0.3 mm の微小な深さを減速した送り $S_{dec}=0.57$ mm/s で送る方法を採用した。この送りの変化を周期的に繰返しながらドリル加工を行った。Table 1 に切削条件を示す。一方、比較のために行った慣用切削の送りは $S=0.1$ mm/rev (0.95 mm/s) で一定とし、回転数は $N=570$ rpm とした。なお、増減加工と慣用加工の両加工時間は、約 21 s (穴深さ 20 mm) で両者の加工能率は同じである。

また、切削抵抗は、Fig. 2 に示すようにドリルチャッキング部に取付けた圧電式回転型切削動力計 (キスラー社製 9123B) を用いて、ドリル側からスラスト、トルクを測定し、得られたデータを EWS で記録してデータ処理を行った。

この場合、動力計がドリルチャッキング部にアタッチメントとして取付けられているので、被削材の形状や大きさに制限されることなく切削抵抗 (スラスト、トルク) の測定が可能となる。従来の切削動力計は、動力計を被

Fig. 1 Illustration of intermittently decelerated feed drilling.

Table 1 Cutting conditions

Drill diameter	d	6 mm
Feed rate	S	0.1 mm/rev
Revolution	N	570 rpm
Frequency ratio	W_f	0.2 Hz/rev
Amplitude	a	0.05 mm
Drilling depth		20 mm (Through hole)
Cutting fluid		Soluble type (JIS W1-1)

削材側に取付けて用いるために物理的な制限から、穴あけ開始からドリル寿命に至るまでの切削抵抗を連続的に測定することができなかった。そのため、ドリル寿命に至るまでの切削抵抗を測定するには、一定間隔でサンプリングするなど不連続な測定しかできなかった。また、これらの断片的な切削抵抗のデータをもとに寿命全体を推論してきたために、寿命に至るまでのドリルの挙動を正確に把握できなかった。

しかし、本実験では、回転式動力計をドリルチャッキング部に取付けることにより従来のような物理的な制限がなくなり、加工現場と同一の条件で穴あけ開始から寿命に至るまでのスラスト、トルクの情報を連続的にすべて記録することが可能となった。

2.2 被削材およびドリル

本実験に使用した被削材は、Ti-6%Al-4%V チタン合金で円筒状の連棒棒 ($\phi 200 \times$ 厚さ 20 mm) を旋削加工し、加工表面はいいに仕上げ加工した。Table 2 および Table 3 に、被削材の化学成分および機械的性質をそれぞれ示す。

穴あけには、SKH56 TiN コーティング製の直径 6

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup for cutting force measurements.

Table 2 Chemical composition of workpiece (mass %)

C	Al	V	Fe	N	O	H	Ti
0.005	6.22	4.22	0.214	0.003	0.163	0.007	bal.

Table 3 Mechanical properties of workpiece

Yield strength	904 MPa
Tensile strength	999 MPa
Elongation	12%
Reduction of area	24%
Vickers hardness	327 HV

mm (先端角 118° , ねじれ角 36.3° , 逃げ角 14° , シンニングなし) のドリルを用いた。なお, ドリル材質のばらつきを少なくするために同一ロットで製作されたドリルを実験に用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ドリル寿命の比較

Fig. 3 に増減加工と慣用加工によるドリル寿命試験の結果を示す。増減加工の平均穴あけ寿命個数は24.9穴であり, 慣用加工のそれは11.4穴で, 増減加工は慣用加工に比べて約2.2倍の寿命個数が得られた。ここで, ドリル寿命は完全損傷を寿命基準とし, 寿命までの穴あけ個数で評価した。また, 寿命試験にはそれぞれ10本のドリルを使用した。

3.2 切削抵抗の比較

Fig. 4 に, 慣用加工の場合のスラスト, トルク (寿命穴あけ個数が9穴の場合) を連続測定した結果の一例を示す。全般的にみて, 1穴目から9穴目までに至るスラスト, トルクの挙動は一穴ごとに異なることがわかる。とくに, トルクの挙動の変化が大きいことが判明した。スラストの静的成分は, 穴あけ開始から8穴目まで約900 Nではほぼ一定な値を示し, 寿命直前の9穴目で約1000 Nに増大している。

また, トルクの静的成分は, スラストと異なり1穴目の約2 N・mから寿命直前の9穴目の約4 N・mまで穴あけ個数の増加とともに増大している。このことは, 慣用加工においては1穴目から切りくず詰まりが進行し, 急速にドリル寿命に至ったと推察される。また, 2穴目からすでに穴出口付近のトルクが急増していることから切りくずの排出性の悪さがトルクの挙動からもわかる。このように切りくずの排出性が悪いと, チタン合金は熱伝導度が小さく比熱も小さいため, ドリルとの摩擦によって生じた熱が拡散されにくく刃先に集中し, 刃先温度が

急激に上昇しドリル寿命を早める原因になる。

Fig. 5 は, 増減加工で行った場合のスラスト, トルク (寿命穴あけ個数が35穴の場合) である。増減加工による連続的な挙動をみると, この場合もスラストに比べてややトルクの変化は大きくなっている。

スラストの静的成分は, 1穴目から32穴目まで約1000 Nではほぼ一定な値を示し, 寿命直前の3穴目から増大している。また, スラストの動的成分は, 寿命に至るまではほぼ一定の変動幅を示している。

他方, トルクの静的成分も1穴目から31穴目まで約2 N・mではほぼ一定値を示す。このことは, 増減加工では, 遅い送りから早い送りにドリルの送りを变化させた場合, その瞬間からドリルが半回転する微小時間に切削厚さが急激に厚くなる。また, 早い送りから遅い送りに变化させた場合は, その逆に切削厚さが急激に薄くなる。このように送りを周期的に変化させることにより, ドリル切れ刃に発生する衝撃的なパルス作用が切りくずの排出性を高めるために良好な切削状態が得られ, ドリル寿命を向上させたものと考えられる。

Fig. 3 Comparison of drill life between intermittently decelerated feed drilling and conventional drilling.

Fig. 4 Cutting force in conventional drilling.

Fig. 5 Cutting force in intermittently decelerated feed drilling.

(a) Thrust

(b) Torque

Fig. 6 Comparison of cutting force between intermittently decelerated feed drilling and conventional drilling.

次に、両者の切削抵抗を詳細に調べるために一例として、Fig. 6に両加工法の5穴目のスラスト、トルクの対比を示す。

全般的にみて、両加工ともトルクはスラストに比べて激しく変動している。慣用加工の場合、穴あけ始めにスラストが急増し、そして貫通間際になるとトルクが激し

く急増しており、切りくず詰まりが進行している様子がわかる。これに対し、増減加工の場合、スラスト、トルクは穴あけ始めから周期的変動幅をもった動的成分が生じ、穴貫通まではほぼ一定の変動幅で進行している。この理由は、送りの増減によって切削厚さに周期的な変動が起こるためである。さらに、送りが変化する瞬間は切削厚さが急激に変化し、刃先に衝撃的なパルス作用がはたらき、切りくずの生成機構が変わるためである。

また、増減加工の場合、トルクの静的成分は、穴深さが約15 mmまでは慣用加工とほぼ同じ値を示す。ところが、穴深さが約15～20 mmの間では、慣用加工の場合はトルクが急増し切りくず詰まりを起こしていると推察される。これに対して増減加工の静的成分は、慣用加工に比べて約1.4 N·m低い値を示し、切りくずの排出が良好に行われていることがわかる。

このように、増減加工のドリル寿命が慣用加工に比べて長寿命になった理由として、切削抵抗から裏付けられるように、切りくず詰まりが緩和されて切りくずの排出性が改善されたことが原因と考えられる。

3.3 切りくず形状の比較

両加工法の切りくずの排出性と切りくず形状との関連を調べるために切りくず形状を観察した。Fig. 7に両加工法の代表的な切りくず形状を示す。

慣用加工による切りくずは、長く連続した切りくずが排出される。チタン合金は延性の高い材料なので、切りくずがドリル溝面との摩擦で流出が阻害されてチタン合金特有のジグザグ形切りくず⁶⁾が発生しているのが観察される。このように、切りくずが長くなると穴内壁でその排出が拘束され、ドリル溝に沿ったジグザグ形で直線状の切りくずを排出するようになる。

一般にドリル加工は、切削点での切れ刃両端の切削速度が極端に異なるわけであるから、切りくずの外縁付近

Fig. 7 Comparison of chips.

は流出が阻害されることになる。Fig. 6 で示した慣用加工のトルクの挙動からも裏付けられるように、本実験のような 3D を越える深穴になると、塊状の切りくずになり排出が困難になる⁷⁾。その結果、ドリル損傷の原因になるとともに、ドリル寿命を早めるものと考えられる。

これに対し、増減加工の場合は、送りの増減によって切りくずの外径（巻き径）とピッチも増減を繰返しながら、送りの増減の周期に対応した長さに折断された切りくずが排出されているのが観察される。

さらに、増減加工による切りくず折断状態を詳細にみると、Fig. 8 に示すように、増減加工の場合の切りくずが折断された断面端部には、特異な形状のカールが観察される。すなわち、送りの変化に対応してカール状に生成された切りくずは、その部分で折断が容易になっていくものと思われる。したがって、増減加工の場合は、ドリルの送りを周期的に変化させることにより切りくずの折断効果が促進される。その結果、慣用加工に比べて切りくずの排出性が向上し、ドリル寿命が延びたものと考えられる。

3.4 切りくず凝着の比較

Fig. 9 に切りくずの凝着状態（穴あけ個数が11穴目の場合）の比較を示す。同図(b)に示す慣用加工の場合は、完全寿命に至ったもので、切れ刃すくい面に切りくずが凝着しているのが観察される。そして、外周コーナ部付近に大きな損傷がみられ穴あけが不可能になったことがわかる。

他方、同図(a)に示す増減加工の場合は、マージン部付近に軽い凝着が観察されるが、この程度の切りくず付着ならば穴あけが続行されることが確認された。

これらの切りくずの凝着状態の観察からもわかるように、増減加工では慣用加工に比べて切りくずの排出性がよいために、切りくずによって切削熱が外部に効果的に排出されていると考えられる。そのために、ドリル切れ刃部の温度上昇が抑制され⁸⁾、ドリル寿命が延びたもの

(a) Intermittent decelerated feed drilling

(b) Conventional drilling

Fig. 8 Comparison of chip shapes.

と推察される。

以上の実験結果を総合的にみて、ドリル刃先に衝撃的なパルス作用がはたらく増減加工は、Ti-6%Al-4%V 合金の加工能率を高める有効な手段であることが判明した。すなわち、ドリル切れ刃に作用する衝撃的なパルス作用によって切りくずの折断が促進され、切りくず詰まりが緩和され、切削抵抗（静的成分）が減少する。さらに、切削油剤の浸透作用による冷却効果が促進され、ド

(a) Intermittent decelerated feed drilling

(b) Conventional drilling

Fig. 9 Photographs of worn drill points.

リル刃先の摩擦熱が減少し、切れ刃全般にわたって付着する凝着物が抑制されたものと判断される。したがって、切れ刃の摩耗が小さくなり、ドリル寿命等に大きく影響を及ぼしたものと考えられる。とくに、Ti-6%Al-4%V合金のような熱伝導率が低く靱性があり、かつ硬さの大きい被削材に対して本加工法を適用することは効果的である。

4. 結 言

本研究では、高速度鋼ドリル (SKH56 TiN コーティング) を用いて Ti-6%Al-4%V 合金に増減送りドリル加工および通常のドリル加工を行った場合の加工特性 (ドリル寿命, 切削抵抗, 切りくず形状) を比較検討した。その結果, 次のことが明らかになった。

(1) 増減送りドリル加工の穴あけ寿命個数は, 通常のドリル加工のそれに比べて, 約 2 倍の穴あけ寿命個数が得られた。

(2) 1 穴目から寿命に至るまでのスラスト, トルクを連続的に測定した結果, 増減送りドリル加工のスラスト, トルクの静的成分は, 寿命直前の約 3 穴目まではほぼ一定な値を示す。しかし, 通常のドリル加工の場合, トルクの静的成分は 1 穴目から寿命に至るまで穴あけ個数の増加とともに増大する。

(3) 増減送りドリル加工は, 切りくずの生成機構が周期的に変化する。この生成機構の変化は切りくずの折断を促進し, 切りくずの排出性を向上し, 切りくず詰まりを緩和してドリル寿命を延ばす効果がある。

参 考 文 献

- 1) 梅澤三造, 木曾弘隆: 機械技術, **35** (1987), 80.
- 2) チタニウム協会編: チタンの加工技術, 日刊工業新聞社, (1992), 19.
- 3) 櫻井恵三, 足立勝重, 小川恒一, ラルフニバ: 軽金属, **42** (1992), 389.
- 4) 櫻井恵三, 足立勝重, 小川恒一: 軽金属, **42** (1992), 633.
- 5) 櫻井恵三, 足立勝重, 小川恒一, ラルフニバ: 軽金属, **41** (1991), 258.
- 6) 小川 誠: ねじれ刃ドリルに関する研究, 学位論文 (1990), 41.
- 7) 新井 実: 切りくず処理の基礎と応用, 日刊工業新聞社, (1990), 113.
- 8) 足立勝重, 小川恒一, 新井典久, 井垣 久: 軽金属, **40** (1990), 171.