固体潤滑シートを用いたチタン合金の穴あけ加工における バリ高さに及ぼすドリル表面テクスチャリングの影響

大山 慎太郎^{*1}, 梅原 徳次^{*2}, 上坂 裕之^{*3}, 鄧 興瑞^{*1}, 村島 基之^{*4}, 堀江 茂^{*5}, 松山 洋介^{*6}

Effect of drill surface texturing on back burr height with solid lubricating sheet in titanium alloy drilling

Shintaro OYAMA^{*1}, Noritsugu UMEHARA^{*2}, Hiroyuki KOUSAKA^{*3},
Xingrui DENG^{*1}, Motoyuki MURASHIMA^{*4}, Shigeru HORIE^{*5} and Yousuke MATSUYAMA^{*6}

^{*1,*2,*4} Dept. of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603, Japan

^{*3} Dept. of Mechanical Engineering, Gifu University

1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu 501-1193, Japan

^{*5} Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc.

Mitsubishi Building, 2-5-2 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8324, Japan

^{*6} Yonezawa Dia Electronics Co., Inc.

3-446-3 Hachimanpara, Yonezawa-shi, Yamagata 992-1128, Japan

Received: 24 August 2016; Revised: 1 April 2017; Accepted: 19 April 2017

Abstract

This paper describes about the effect of drill surface texturing on height of back burr in titanium alloy drilling process with solid lubricating sheet. Titanium alloy is difficult to conduct drilling because titanium alloy is hard and ductile material. And the workers cannot use plenty of liquid coolant for preventing the productivity decline when the work places are above their heads in production fields. Therefore drills are exchanged frequently even though the cost increases. In this study, we measured the cutting force by a loadcell to know the effect of drill surface texturing and solid lubricating sheet on drilling process of work pieces made of Ti-6Al-4V. As the results, drill with rough textured rake surface showed high burr height in exit of Ti-6Al-4V. On the other hand, drill with rough textured flank surface showed low burr height only if drilling with solid lubricating sheet. Moreover, drill with the specific texturing on flank surface by wire electric discharge machining showed low burr height.

Key words : Titanium alloy, Texturing, Solid lubricating, Burr, Drilling

1. 緒 言

チタンは軽量性、高強度、耐食性に優れている材料であり(正橋, 2011), 航空機分野や海水利用分野, 化学プラントなどで利用されてきた。純チタンは低温において α 相であるが, 885°C 以上において β 相に相変態する。 α 相は強度に優れ, β 相は加工性に優れるため, α 相と β 相, 両方の長所を取り入れたチタン合金が開発されてき

No.16-00378 [DOI:10.1299/transjsme.16-00378], J-STAGE Advance Publication date: 8 May, 2017

^{*1} 名古屋大学 工学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

^{*2} 正員, フェロー, 名古屋大学 工学研究科

^{*3} 正員, 岐阜大学 工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

^{*4} 正員, 名古屋大学 工学研究科

^{*5} 正員, 三菱瓦斯化学(株) (〒100-8324 東京都千代田区丸の内 2-5-2 三菱ビル)

^{*6} 米沢ダイヤエレクトロニクス(株) (〒992-1128 山形県米沢市八幡原 3-446-3)

E-mail of corresponding author: oyama@ume.mech.nagoya-u.ac.jp

た．中でも Ti-6Al-4V は強度，加工性ともに優れるため幅広く利用されている．航空機産業での炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic: CFRP) の普及に伴い，耐食性や熱膨張率において CFRP との適合性に優れるチタン合金の需要が増加している．今後 CFRP の需要が増加するとともに，チタン合金の需要もさらに増加することが予想される(稲垣他, 2013)．

また，航空機の組立では部品同士をボルト，リベット及びファスナを用いて締結するため，それらを通すための穴あけ加工を行う必要がある．この穴あけ加工は航空機の製造において頻繁に行われる加工であり，大型機では一機当たり 100 万カ所以上，B787 では主翼だけで数万カ所もの穴あけ加工が必要となる(日刊工業新聞, 2012)(深川, 2012)．これらのことから，航空機分野におけるチタン合金の穴あけ加工の重要性が高まると考えられる．しかし，チタン合金は熱伝導率が小さく，切削熱が発熱部の切れ刃と工具すくい面に集中し，局部的に温度を上昇させるうえ，高温において工具材料と化学的に活性であるため，難削材であるといわれている(狩野, 2011)．

一般的な穴あけ加工では切削油を使用することで工具と工作物間の摩擦軽減や冷却効果による工具摩耗抑制，加工精度向上，切屑排出性の向上などの効果を得ている(佐久間, 1965)．しかし，航空機という巨大で立体的な構造物の穴あけ加工においては，加工箇所が作業者の頭上にあることも多い．そのような箇所における液体切削油の使用は作業性を大きく損なわせるため(製造現場ドットコム, 2013)，液体切削油を使用できない環境下で難削材であるチタン合金の穴あけ加工を行う必要がある．現状では穴の品質確保のためにドリルを頻繁に交換しながら加工しており，加工費の増加と交換の手間による生産性の悪化が生じている．さらにそのような加工環境下での穴あけ加工時にチタン合金の出口側に発生するバリが顕著になり，このバリが他材料との重ね合わせの際に気密性を損なうとして問題となっている．このようなチタン合金穴あけ加工における問題に対して川崎らは，固体潤滑シートのチタン合金穴あけ加工への適用を行うことを提案した．固体潤滑シートは電子産業においてプリント基板の穴あけ加工における潤滑性を高めるためにアルミ合金シート上に潤滑層を形成した固体潤滑材である(三菱瓦斯化学株式会社, 1999, 2001)．本研究で用いた固体潤滑シートは 2 枚のアルミ合金シート間に潤滑層を形成した固体潤滑材である．川崎らは固体潤滑シートの適用により，チタン合金穴あけ時の切削温度を抑制し，チタン合金出口側のバリ高さを抑制できることを明らかにした(川崎他, 2015)．この潤滑層の融点は 80°C 程度であり，加工中の切削部においては潤滑剤が液状に変化していることが考えられる．

一方，川堰らはアルミニウム合金の穴あけ加工において直径 0.5 mm のドリルスくい面上にフェムト秒レーザを用いて深さ 2 μm 程度のテクスチャリングを施し，スラスト力の低減を実現している(川堰他, 2008)．川堰らは切削液浸潤環境のみで穴あけを行っており，スラスト力低減の理由としてテクスチャリングが油だまりとしての効果を発揮していると考えしている．しかし，航空機産業への応用を考えた際には液体の切削油剤ではなく固体潤滑剤を使用した穴あけ加工は作業者の頭上の穴あけ加工の作業性を向上させることができる．そこで本研究では，固体潤滑シートを用いたチタン合金穴あけ加工に着目した．

本研究ではチタン合金の穴あけ加工において問題となっているバリ高さのさらなる抑制に着目し，チタン合金の穴あけ加工における出口側バリ高さ抑制に対して固体潤滑シートとドリル表面へのテクスチャリングの組み合わせが及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．初めに，ドリル表面へのテクスチャリングにより固体潤滑シートの潤滑剤がドリル表面へ移着することを促すことを狙い，ドリルスくい面または逃げ面のどちらにテクスチャリングを行うことがバリ高さの抑制に有効であるかを明らかにすることを試みた．そこで研磨紙によりすくい面または逃げ面へテクスチャリングを行ったドリルを用いて穴あけ加工を行い，バリ高さへの影響を調べた．そして，次に逃げ面へのテクスチャリングが有効であることが明らかになったうえで，ワイヤ放電による逃げ面への溝形状テクスチャリングがバリ高さに及ぼす影響を調べた．

2. 実験方法

2・1 穴あけ加工試験機

図 1 に本試験で用いた切削抵抗測定用穴あけ加工試験機の全体概略図を示す．穴あけ試験はチタン合金の上に固体潤滑シートを重ねてロードセル上にセットし，上方よりドリルで穴あけを行う．図 2 にバリ高さの測定位置を示す．本研究では穴出口側のバリを測定し，図 2 中の Height を出口部のバリ高さとして定義している．穴あけ加工試験条件はすべての実験で送り速度 25 mm/min，ドリル回転速度は 500 rpm を用いた．

2・2 固体潤滑シート, 試験片及びドリル

本研究で用いた固体潤滑シートは, 厚さ 1 mm の潤滑層を厚さ 150 μm のアルミ合金シートで挟みこんでいる. 潤滑層はポリエチレンオキサイド及びその他の潤滑成分が配合されて構成されている. また, 実験 3.5 においては SEM/EDS による潤滑剤の移着状態を明らかにするために潤滑層に炭素粒子を混合した固体潤滑シートを使用した. 図 3 に固体潤滑シートの概略図を示す. チタン合金は Ti-6Al-4V, 厚さ 3 mm を用いた. また, ドリルは超硬合金製であり, ドリル径 6 mm, 先端角 120°, ねじれ角 40°のものをを用いた.

Fig. 1 Schematic drawing of cutting force measuring system.

Fig. 2 Definition of the height of back burr.

Fig.3 Schematic drawing of solid lubricating sheet.

2・3 レーザ顕微鏡によるバリ高さの測定方法

バリ高さの測定はレーザ顕微鏡を用いて行った. 穴あけ加工では, ドリル入口及び出口側にバリが生成されるが, 一般に出口側のバリが高く問題となるため, 本研究ではドリル出口側のバリの高さを測定した. 図 4 はレーザ顕微鏡で観察した穴のドリル出口側の一例である. 8 点でバリ高さを測定し, それらの平均をバリ高さとした.

Fig.4 Image of typical back burrs around a drilling hole observed by laser microscope.

3. 実験結果

3・1 ドリルすくい面または逃げ面への研磨紙によるテクスチャリングがバリ高さに及ぼす影響

チタン合金穴あけ加工において固体潤滑シートとドリル表面の表面粗さがバリ高さに及ぼす影響を明らかにするために, ドリルのすくい面もしくは逃げ面に研磨紙によるテクスチャリングを施したドリルを用いてチタン合金穴あけ加工を行い, 加工後の出口側のバリ高さをレーザ顕微鏡により測定した. このテクスチャリングを本論文では以降, ラフネステクスチャリングと呼ぶことにする. 使用した研磨紙の番号は #1500, #800, #240 であり,

数字が大きな研磨紙によるラフネステクスチャリングほど研磨面の表面粗さが粗くなっていく。穴あけ加工実験の結果を図5に示す。なお、Normal drill のバリ高さを1とし、測定したそれぞれの穴あけ加工におけるバリ高さを Normal drill のバリ高さで除することにより正規化を行っており、以降のすべての実験結果において同様の方法で正規化を行っている。図5(a), (b)はそれぞれすくい面、逃げ面にラフネステクスチャリングを施したドリルによるチタン合金穴あけ加工時のバリ高さを、使用したドリル表面の表面粗さにより整理している。別の実験において、放射温度計(NEC Avio 製 InfReC Thermo GEAR G120X)により穴出口側の切削温度を測定したが、いずれの穴あけ加工も、川崎らが提唱したバリ形状が変化する温度境界である 350℃(川崎他, 2015)よりも低い切削温度であり、温度によるバリ高さ・バリ形状のモードの変化はなかった。すくい面にラフネステクスチャリングを施した場合、固体潤滑シートの適用・非適用に関わらず表面粗さの増加とともにバリ高さが増加する傾向にあった。一方、逃げ面にラフネステクスチャリングを施したドリルについては固体潤滑シート適用下ではバリ高さが減少するが、無潤滑下では逃げ面の表面粗さが増加するとバリ高さは増加する傾向を示した。

Fig.5 Relationship between the height of back burr in titanium alloy drilling and drill surface roughness
(a) in the case of drill with textured rake face or (b) in the case of drill with textured flank.

3・2 ワイヤ放電加工によるドリル逃げ面への溝状テクスチャリングがバリ高さに及ぼす影響

前節で逃げ面にテクスチャリングを施すことで固体潤滑シート使用下ではバリ高さを減少することができた。そこで、次にドリル逃げ面への溝状テクスチャリングが固体潤滑シート適用下でのチタン合金穴あけ加工においてバリ高さに及ぼす影響を明らかにするために、ワイヤ放電加工により3種類のテクスチャリングを行ったドリルを作製し、それらのドリルを用いてチタン合金穴あけ加工を行った。このテクスチャリングを本論文では以降、ワイヤ放電テクスチャリングと呼ぶことにする。図6に作製した3本のドリルを示す。Radial No.1は切れ刃から1480 μm 離れた位置に切れ刃と平行に、Radial No.2は切れ刃から400 μm 離れた位置に切れ刃と平行に、Circumferential No.1はほぼ円周方向にワイヤ放電テクスチャリングを施してある。これらのドリルを用いてチタン合金穴あけ加工を行った結果を図7に示す。固体潤滑シート適用下においてRadial No.2による穴あけ加工では、未処理のドリルによる穴あけ加工よりもバリ高さが35%以上低減した。一方、固体潤滑シートを適用しなかった場合のRadial No.2による穴あけ加工では、未処理のドリルによる穴あけ加工よりもバリ高さが30%上昇した。

Fig.6 Drills textured by wire electric discharge machining.

Fig.7 The height of back burr in titanium alloy drilling with drills textured by wire electric discharge machining.

3・3 バリ高さと最大スラスト力・最大トルクの関係

固体潤滑シート適用下でのテクスチャリングを施したドリルによるチタン合金穴あけ加工において、最大スラスト力・最大トルクとバリ高さの関係を明らかにするために、図5と図7の実験において同時に測定していたチタン合金穴あけ加工時の最大スラスト力または最大トルクを横軸に、レーザ顕微鏡により測定したバリ高さを縦軸にして整理した結果をそれぞれ図8(a), (b)に示す。図中の凡例は Rake がすくい面, Flank が逃げ面にテクスチャリングを施したドリルを示し、それに続く数字は用いた研磨紙の番号を示している。図8(a)より、最大スラスト力に関してはテクスチャリングを施したドリルは未処理のドリルよりもすべて大きなスラスト力を示していた。しかし、最大スラスト力、最大トルクとバリ高さに明確な相関はないことがわかった。

Fig.8 Relationship between the height of back burr and (a) maximum thrust force
or (b) maximum torque in titanium alloy drilling with textured drills.

3・4 ドリル肩部がチタン合金を貫通する直前のスラスト力・トルクとバリ高さの関係

ドリル肩部がチタン合金を貫通する直前のスラスト力またはトルクを横軸にとり、バリ高さを縦軸にして図5と図7の実験データを整理したものを図9(a), (b)に示す。また、穴あけ加工時のスラスト力・トルクの推移の実例を図10に示す。このとき最大スラスト力・トルクはそれぞれ図10中の(B), (C)時点での値であり、ドリル肩部貫通直前のスラスト力、トルクは図10中の(D)時点での値である。図9(a), (b)よりドリル肩部貫通直前のスラスト力・トルクとバリ高さについて、特にトルクとバリ高さに比例の相関関係があることが分かった。

Fig.9 Relationship between the burr height and (a) thrust force or (b) torque just before finish drilling in the case of drilling by textured drill.

Fig.10 Transition of the thrust force and the torque while drilling.

3・5 ドリル表面への潤滑剤移着に対するテクスチャリングの影響

テクスチャリングが固体潤滑シート潤滑剤のドリルへの移着に及ぼす影響を調べるために、以下の実験を行った。ドリル肩部が固体潤滑シートを貫通した直後にドリルを引き抜いて穴あけ加工をやめた後、引き抜いたドリルの逃げ面全体とドリル肩部を SEM/EDS により観察した。実験後のドリルの SEM 画像を図 11 に示す。上段のドリル逃げ面全体像の SEM 画像中の赤い四角内を拡大したものが下段のドリル肩部の SEM 画像である。未処理のドリルと比較して、テクスチャリングを施したドリルにおいて黒色の付着物が肩部の切れ刃のより近くに付着していることが視覚的に分かる。また黒色の付着物からは EDS 分析の結果、炭素のピークが多く検出された。また、図 12(a)に各ドリル肩部の EDS による元素分析における検出元素中の炭素の組成比を、図 12(b)に各ドリル肩部の EDS による元素分析における炭素の検出ピーク強度を示す。この際、観察視野について元素分析を面分析により行った。図 12(a), (b)からテクスチャリングを施したドリルでは炭素の組成比、炭素のピーク強度ともに未処理のドリルよりも 2 倍以上増加したことがわかる。

Fig.11 SEM images of drill shoulder after transferring test.

Fig.12 Result of EDS analysis of drill shoulder after transferring test

(a) Percentage of Carbon and (b) Intensity of C peak.

4. 考 察

4・1 バリ抑制に有効なドリル表面テクスチャリング位置

図5より固体潤滑シートを使用したチタン合金穴あけ加工において、バリ高さを減少するための適切なテクスチャリングはすくい面ではなく逃げ面に行うことであることが明らかになった。

2次元切削理論におけるせん断面モデルにおいては、すくい面の摩擦を下げることによりせん断角が大きくなり、切れ味が増すと一般に言われている。しかし本研究においてはすくい面へのラフネステクスチャリングはバリ高さを増加させる傾向にあることがわかった。その要因としては、すくい面が切りくずと接している面であり、ラフネステクスチャリングにより潤滑剤の移着性を向上させたとしても切りくずが潤滑剤を持ち去っていく影響が大きいためであると考えられる。また表面粗さにより、切りくず流出性が悪化することが考えられ、これも切削性を悪化させる要因であると考えられる。

一方で、逃げ面は穴あけ加工中、被削材の未切削部分に押し付けられている。この未切削部分は対の切れ刃が切削した加工面、新生面であるうえに、チタン系材料は凝着が起きやすいと一般的に言われているため(日比他, 2002)、未切削部分とドリル逃げ面において凝着が起きやすい状況になると考えられる。

一般に、テクスチャリングの効果として期待されるものは流体動圧発生、摩耗粉の格納、移着力の向上などが挙げられるが、本研究ではドリル逃げ面にテクスチャリングを施すことによりドリル肩部において潤滑剤の移着量が増加していると考えられる。これは図 10, 図 11 よりドリル肩部への黒色付着物の付着量はバリ高さ抑制に効果のあったテクスチャリングの存在によって増加していると考えられることから説明ができる。

そもそもバリの発生機構は、三角形状に残った被削材の未切削部分をドリル肩部が押し込みによって立ち上げるロールオーバーバリと、ドリルの回転によりこすりあげられるようにして発生するポアソンバリで構成されている(和田, 吉田, 2000)。図 13(a)に未処理のドリル, 図 13(b)に Radial No.2 を使用して行ったチタン合金穴あけ加工において発生したバリの SEM 画像を示す。図 13(a)において, バリの表面にドリルの送りと回転を合わせた方向である左下へ向かうような流れの方向性が確認できた。そのことから未処理のドリルと固体潤滑シートを用いた穴あけ加工においても, ドリル肩部貫通直前において凝着していた被削材を引きはがすようにしてバリが発生していると考えられる。それに対して図 13(b)においてバリの表面に左下へと向かう流れは確認できなかったことから, 未切削部分とドリル逃げ面の凝着が抑制できていると考えられる。また, 図 9(b)において, 逃げ面テクスチャリングを施したドリル肩部貫通直前のトルクが未処理のドリルよりも低いことは, 逃げ面テクスチャリングと固体潤滑シートにより未切削部分とドリル逃げ面の凝着が抑制されていると考えられる。

以上のことから, 逃げ面テクスチャリングにより固体潤滑シート潤滑剤の移着性が向上し, ドリル逃げ面と未切削部分の凝着を防ぐことによって, チタン合金穴あけ加工におけるバリ高さの低減をもたらしたと考えられる。

Fig.13 Viewing point in SEM observation and SEM images of the exit burr drilled with solid lubricating sheet by (a) Normal drill and (b) Radial No.2.

4・2 ドリル逃げ面テクスチャリングが穴あけ加工に及ぼす影響

図 5, 図 7 の実験結果からわかるように, チタン合金穴あけ加工において逃げ面に施したラフネステクスチャリング, ワイヤ放電テクスチャリングとも, 固体潤滑シートと組み合わせた場合にのみ, バリ高さの抑制効果が表れた。固体潤滑シートを適用しない穴あけ加工の場合, ラフネステクスチャリングは摩擦抵抗を増大させ, ワ

ワイヤ放電テクスチャリングはドリル刃先の剛性を下げるなど、滑らかな切削を阻害し、バリを抑制する効果はほとんどないと考えられる。

一方、固体潤滑シートと組み合わせた場合には逃げ面テクスチャリングがバリ高さの抑制に良い影響を与えている。ラフネステクスチャリングでは、図9において表面粗さが大きなドリル程、ドリル肩部貫通直前のスラスト力・トルクが低いことから、表面粗さを与えることでドリル表面への潤滑剤の移着力の向上がなされたことが推察できる。ワイヤ放電テクスチャリングでは、ドリルの溝を切る際のワイヤ放電加工で加工した溝の端に図14(a)に示すようなバリが、図14(b)のように連続して発生していることが確認されたことから、この溝の端にあるバリによってドリル逃げ面表面での潤滑剤の流れが未処理のドリルと比べて変化し、潤滑剤の移着性が向上していると考えられる。このバリは他のドリルについても観察されたが、Radial No.1, Circumferential No.1ともドリル切れ刃から離れた位置にあるために、切れ刃付近の潤滑剤の流れに影響を与えていないと考える。

以上のことからラフネステクスチャリングとRadial No.2に施したようなワイヤ放電テクスチャリングは、固体潤滑シートと両テクスチャリングを組み合わせた場合にのみ、バリの低減を実現したと考える。

Fig.14 (a) Surface profile of texturing of Radial No.2 and (b) 3D surface profile of Radial No.2 by laser microscope.

4・3 バリ高さに及ぼすスラスト力とトルクの影響

実験結果3・4で示したようにテクスチャリングを施したドリルによるチタン合金穴あけ加工における、穴出口側バリ高さをドリル肩部がチタン合金板を貫通する直前のスラスト力、トルクにより整理したところ、比例の相関関係を見せた。4.1節で議論したようにドリル肩部が被削材の三角形の未切削部分を立ち上げることでバリが発生するために、ドリル肩部貫通直前のスラストやトルクとバリ高さに相関が取れたことは合理的であると考えられる。

5. 結 言

チタン合金の穴あけ加工において、固体潤滑シートとドリル表面へのテクスチャリングの組み合わせがチタン合金のドリル抜け側のバリ高さに及ぼす影響を明らかにした。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 研磨紙でドリル逃げ面の表面粗さを増加させた場合(ラフネステクスチャリング)、固体潤滑シートを適用した場合のみ出口部のバリ高さが1/2に減少した。また、固体潤滑シート非適用の場合は逃げ面の粗さの増加とともにバリ高さは増加した。
- (2) ワイヤ放電加工を用いて逃げ面上に3種類の溝を付け(ワイヤ放電テクスチャリング)、固体潤滑シート適用下でチタン合金穴あけ加工を行ったところ、逃げ面上に切れ刃と平行に溝を作成した場合には溝がないドリルよりもバリ高さが35%以上低減された。逃げ面上の平行溝の場合において、固体潤滑シート非適用下ではバリ高さは溝がない場合よりも30%程高くなった。
- (3) 固体潤滑シート適用下でのチタン合金穴あけ加工において、穴の抜け側のバリ高さとドリル貫通直前のスラスト力・トルクに線形な相関関係があることがわかった。

文 献

- 深川仁, 航空機用難削材料・耐熱合金の加工, 日本機械学会誌, Vol. 115, No.1128 (2012), pp. 762-766.
- 日比裕子, 榎本祐嗣, 佐々木信也, チタン系複合材料の摩耗と表面化学反応との関係, 表面化学, Vol. 23, No.7 (2002), pp. 404-410.
- 稲垣育弘, 武智勉, 白井善久, 有安望, 航空機チタンの適用状況と今後の課題, 新日鐵住金技報, Vol. 396 (2013), pp. 23-28.
- 狩野勝吉, 難削材・新素材の切削加工ハンドブック, 森北出版株式会社 (2011), pp. 287-288.
- 川崎貴之, 梅原徳次, 上坂裕之, 野老山貴之, 堀江茂, 松山洋介, 固体潤滑シートによるチタン合金板の穴あけ加工におけるバリ発生の抑制, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.831 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00247.
- 川堰宣隆, 杉森博, 森本英樹, 森田昇, 堀功, マイクロ・ナノテクスチャによる表面機能の制御を利用した切削工具の開発(第3報)–工具の応用化– (2008), 2008 年度精密工学会秋季大会講演会論文集.
- 正橋直哉, ものづくり基礎講座 金属の魅力をみなおそう 第一回チタン, クリエイションコア東大阪(online) <http://www.kansaicenter.imr.tohoku.ac.jp/_userdata/kinzoku_titanium.pdf> (2011) (参照日 2015 年 1 月 15 日).
- 三菱瓦斯化学株式会社, プリント配線板の孔明け加工法 (1999), 特許公報.
- 三菱瓦斯化学株式会社, 小孔あけ用滑材シート (2001), 特許公報.
- 佐久間敬三, 穴加工と穴加工用工具の設計, ラジオ技術社 (1965), p.2, 23.
- 製造現場ドットコム, 富士重工業 航空宇宙カンパニーの最新生産技術を観た! ~より正確により速く CFRP 高速穿孔の秘密を探る~, 1/28, (2013), <<http://seizougenba.com/node/2415>>, (参照日 2015 年 1 月 16 日).
- 一般社団法人日本航空宇宙工業会, 日本の航空宇宙工業 平成 27 年度 (2015).
- 和田浩明, 吉田薫, 金属のドリル加工におけるバリ無し化, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 7 (2000), pp.1109-1114.

References

- Fukagawa, H., Processing of the hard to cut materials and heat-resistant alloys for aircraft, Vol. 115, No. 1128 (2012), pp. 762-766 (in Japanese).
- Hibi, Y., Enomoto, Y. and Sasaki, S., Relationship between wear and surface chemical reactions of Ti based composites, Journal of the Surface Science Society of Japan, Vol. 23, No.7 (2002), pp. 404-410.
- Inagaki, I., Takechi, T., Shirai, Y. and Ariyasu, N., Application and features of titanium for aerospace industry, Nippon steel & Sumitomo metal corporation technical report, Vol. 396 (2013), pp. 23-28 (in Japanese).
- Kano, K., Cutting handbook of the hard to cut materials and new materials, Morikita Publishing Co.,Ltd (2011), pp. 287-288, (in Japanese).
- Kawasaki, T., Umehara, N., Kousaka, H., Tokoroyama, T., Horie, S. and Matsuyama, Y., Reduction of burr generation with solid lubricating sheet for drilling titanium alloy, Transactions of JSME (in Japanese), Vol.81, No.831 (2015), DOI:10.1299/transjsme.15-00247.
- Kawasegi, N., Sugimori, H., Morimoto, H., Morita, N. and Hori, I., Development of a cutting tool utilizing control of surface function induced by micro/nanometer-scale texture(3rd report) – Application of the textured tool –, Transactions of the lecture meeting of the great autumn meeting, The Japan Society for Precision engineering (2008), pp. 61-62 (in Japanese).
- Masahashi, N., Manufacturing Basic Lecture “Discover merits of metal” No. 1 Titanium, Creation Core East Osaka (online), available from <http://www.kansaicenter.imr.tohoku.ac.jp/_userdata/kinzoku_titanium.pdf> (2011), (accessed on 15 January, 2015) (in Japanese).
- Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc., Drilling Method for printed writing board, Patents publication (1999).
- Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc., Lubricating sheet for small hole drilling, Patents publication (2001).
- Sakuma, K., Drilling process and design of tools for drilling process, Radio technology Co., Ltd (2011), p. 2, 23, (in Japanese).
- Seizougenba.com, Fuji Heavy Industry Ltd. The latest production technology of aerospace company ~more minutely and more quickly, Investigate the secret of quick drilling CFRP~ (online), available from <<http://seizougenba.com/node/2415>> (2013), (accessed on 16 January, 2015) (in Japanese).
- The Society of Aerospace Companies, Japanese Aerospace Industry (2015) (in Japanese).
- Wada, H. and Yoshida, K., Burrless Drilling of Metals, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 66, No. 7 (2000), pp.1109-1114.