PVD コーテッド工具による Ti-6Al-4V 合金の高速エンドミル切削における MQL の効果

藤原 順介^{*1}, 有元 崇晃^{*2}, 田代 徹也^{*3}

Effect of MQL in high speed end-milling of Ti-6Al-4V with PVD coated tools

Junsuke FUJIWARA^{*1}, Takaaki ARIMOTO^{*2} and Tetsuya TASHIRO^{*3}^{*1, *2} Graduate School of Engineering, Osaka University

2-1 Yamadaoka Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

^{*3} Department of Industrial Systems Engineering, Osaka Prefecture University College of Technology

26-12 Saiwaicho, Neyagawa-shi, Osaka 572-8572, Japan

Received 9 October 2015

Abstract

The high speed milling of Ti-6Al-4V was investigated in order to clarify the efficiency of MQL and PVD coated tool. Cutting speed was very high 200m/min. TiAlN, TiCN, TiN, DLC and non-coated tools were used. Cooling methods were dry, wet and MQL (15mL/h). In wet conditions, flaking was observed on all tools by thermal crack. So, tool life was very short on every tool. However the flaking did not occur in the dry and MQL cutting. And the tool life in the dry cutting was longer than that in the wet cutting. Tool life of PVD coated tools were longer than that of the non-coated tools in dry and MQL cutting. TiCN coated tool was long tool life compare to the other coated tools in dry cutting. The tool life in MQL method was longer than dry method except for TiCN coated tool. The wear progress of PVD tool was similar in MQL cutting. The tool life of DLC and TiCN coated tool was almost same in MQL method. And the longest tool life was TiN coated tool in MQL. Furthermore, cutting temperature was measured for each tool in dry cutting. Cutting temperature of TiN coated tool was lower than that of TiAlN and non-coated tool. And the cutting temperature of DLC and TiCN were lower than the other coated tools.

Key words : High speed cutting, MQL, Titanium alloy, PVD coatings, Tool wear, End-milling

1. 緒 言

チタン合金は高強度、耐摩耗性、高温強度、低熱伝導率などの性質を有し、航空宇宙における構造物用部材や航空機のエンジン用部材などに用いられている。航空機用に用いられる場合、チタン合金は主に切削によって加工されるが、チタン合金の特有の性質がチタン合金の切削において工具摩耗に悪影響を及ぼすことがわかっている(Metcut Research Associates, 1980), (Narutaki, 1996), (Usuki, 1996), (坂本他, 2003), (臼杵他, 2005)。特にチタン合金は熱伝導率が低く、切削熱による温度上昇が、被削材側ではなく工具刃先に集中しやすいため、著しく工具摩耗が増加し、工具寿命が短くなる。この切削熱と工具摩耗の関係については例えば、超硬工具によるチタン合金の切削では、ある切削温度を境に摩耗速度の進行が異なることがわかっている(関谷他, 2004)。切削速度を速くすると切削温度が上昇しやすくなるので、工具摩耗を抑えるために通常、チタン合金を切削する際には切削速度を 40m/min 程度の比較的低速度域の条件に設定して加工されることが多い。

また、近年、作業環境の改善や切削油の廃液処理など地球環境汚染の観点から、旋削、フライス加工、ドリル加工などの機械加工において、大量の切削油を使用していた加工方法を見直し、セミド

No. 15-00556 [DOI:10.1299/transjsme.15-00556], J-STAGE Advance Publication date : 12 February, 2016

^{*1} 正員, 大阪大学大学院 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

^{*2} 大阪大学大学院

^{*3} 正員, 大阪府立大学工業高等専門学校 (〒572-8572 大阪府寝屋川市幸町 26-12)

E-mail of corresponding author: tas@osaka-pct.ac.jp

ライ加工技術の開発が行なわれている。セミドライ加工の代表である極微量潤滑 MQL (Minimal Quantity Lubrication) による加工は、ごく少量の油をミスト状にして切削点に供給する方法である。ミストを供給する方式にはいくつかの方式があり、潤滑油のみのミストを供給する方式の他、水ミストと植物性切削油のミストを加工点に同時に供給する複合ミスト供給がある(河田他, 2003), (中村他, 1999)。これまでにこれら MQL を利用した切削加工の研究例として次のようなものがある。例えば、連続切削である旋削加工においては、ステンレス鋼の MQL 切削における工具摩耗の改善が報告されている(陳他, 2001), (鈴木, 2002)。また、チタン合金については、仕上げ加工工程において MQL 切削の適用が可能であること(若林他, 2012), MQL 切削により乾式切削よりも工具寿命が長いこと(Venkataramana et al., 2013), 高速旋削において水溶性切削液の MQL により切削性を改善できる可能性があるが MQL の供給方法に改善の余地があることが報告されている(落合, 酒井, 2013)。断続切削であるエンドミル加工では、チタン合金の MQL 加工によって低切削速度域においては工具温度の低減効果が認められるが、切削速度の増加に伴いその効果が減少していることや、MQL によりチタン合金の高速切削においてもチップングや欠損の発生を防止できることが報告されている(岡田他, 2012)。S45C の高速エンドミル切削では超硬工具よりも TiAlN コーテッド工具の切削温度は低くなり、MQL により 20~30℃切削温度は低下し、最適な条件下では工具摩耗を抑制する効果がある(細川他, 2004)ことがわかっている。また、SCM415 を被削材とする舞いツールによる V 溝加工においては、MQL は TiAlN コーテッド工具に対して有効であり(松岡他, 2014), エステル油剤を用いた MQL によるエンドミル加工では一般的な給油方法と同様の潤滑性能がある(峯川他, 2000)。これらのように、これまでのチタン合金に対する MQL 加工に関する研究では連続切削である旋削加工に関するものが多く、断続切削であるエンドミル加工における高速切削についてはまだコーティングの種類についての比較等が十分に検討されていない。また、MQL による加工方法によってチタン合金の高速切削における切削性の改善の可能性があると考えられる。

さらに、工具表面に耐熱被膜および耐欠損性を改善することができる被膜を付けたコーテッド工具においては、PVD 法によるコーティング膜を付けた工具が多く実用化されている。しかし、コーテッド工具によるチタン合金の MQL 加工についての研究例(川上他, 2011)はあるものの、コーティングの種類が工具摩耗に及ぼす影響についてはまだ十分に検討されておらず、チタン合金の切削において工具摩耗の少ない最適な膜を調べる必要がある。

本研究では、様々な PVD コーテッド工具を用いて、冷却方式による工具寿命への影響を調べることを目的とした。チタン合金をより高能率で切削するため、高速切削領域である切削速度 200m/min として、植物油をベースとしたオイルを用いた MQL によるエンドミル加工を行った。

2. 実験方法

チタン合金の切削にはマシニングセンタ(3.7/5.5kW, 300~10000rpm)を使用し、チップには超硬合金(K15 相当)のノンコーテッド工具および、母材をノンコーテッド工具と同じ超硬合金(K15 相当)とする TiAlN, TiCN, TiN, DLC の 4 種の被膜を PVD 法でコーティングした計 5 種類のチップを使用して行った。各コーティング膜の機械的性質を表 1 に示す。

実験方法の概観を図 1 に示す。実験条件は表 2 に示すように、切削速度 $V=200$ m/min, 軸方向切り込み $a_p=3.0$ mm, 半径方向切り込み $a_e=0.5$ mm, 1 刃あたりの切り込み $S_z=0.1$ mm/tooth, 冷却方式としては乾式, 湿式, ミスト式とした。湿式切削における切削液にはエマルジョンタイプのユシロ化学工業社製 FGE2001 を水のみで 10 倍に希釈したものを用い, 流量 10ℓ/min とした。また, ミスト液の供給には KST(ケイエステック)社製 ESLIM を用い, 植物油 (15mL/h) を工具すくい面側から 0.35MPa の圧力でミスト状に噴霧するようにした。工具及びその取り付け状態を図 2 に示す。

切削後, 光学顕微鏡で工具の主逃げ面最大摩耗幅 VB_{max} を測定し, 摩耗幅が 0.4mm に達したところを工具寿命とみなして切削を終了させた。

Table 1 Mechanical properties of PVD coating material. (Dijet Co. catalog)

	TiAlN	DLC	TiN	TiCN
Vickers hardness Hv	2800	1800-2500	2000	3000
Friction coefficient	0.5	0.1	0.3	0.3
Heat resistant temperature °C	800	200-400	600	600

Table 2 Cutting conditions.

Insert	ZPMT 160408R (DIJET)
Coating	Cemented carbide (K15), TiAlN, DLC, TiCN, TiN (PVD method)
Holder	SICL3216S32-2N (DIJET)
Tool diameter ϕ [mm]	32
Number of inserts	2
Cutting speed V [m/min]	200
Axial depth of cut a_p [mm]	3.0
Radial depth of cut a_e [mm]	0.5
Feed speed F [mm/min]	400
Depth of cut per tooth S_z [mm/tooth]	0.1
Cutting method	Down cut
Coolant	Dry, Wet, Mist

Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus. Cutting method was down-cut. Axial depth of cut was 3.0mm. Radial depth of cut was 0.5 mm.

Fig. 2 Tool holder and insert. : (a) Tool overview ; two inserts were set. (b) Dimension of insert.

3. 実験結果および考察

3・1 湿式切削時の工具摩耗

一般的にチタン合金は湿式で切削加工される．そこでチタン合金切削における工具摩耗機構の基本的な知見を得るために，湿式で高速フライス加工を行った．この際，すくい面と逃げ面の摩耗を観察したが，主逃げ面の摩耗が顕著であったので，主逃げ面の摩耗幅 VB_{max} を測定した．図 3 に湿式切削した場合における切削距離 L と主逃げ面最大摩耗幅 VB_{max} との関係を示す．図 3 から，ノンコーテッド工具および TiAlN 工具では工具寿命が 20m となり比較的 tool life が短かった．DLC, TiCN, TiN コーテッド工具の場合は工具摩耗の進行がやや緩やかで，工具寿命は 30m 程度と，ノンコーテッド工具よりも tool life が改善された．この中で特に DLC コーテッド工具については，定常摩耗領域における工具摩耗幅が他のコーテッド工具よりも小さかった．TiAlN 膜は被削材である Ti-6Al-4V 合金と近い組成を持っているため，被削材との親和性が高くコーティング層の摩耗や剥離が早く，ノンコーテッド工具と比較して tool life が改善されなかったものと考えられる．

Fig. 3 Relation between flank wear and cutting distance in wet. Tool life was very short in this cutting condition for all tools. Tool life of TiAlN coated tool was the shortest.

またノンコーテッド工具とコーテッド工具の工具寿命時の工具摩耗状態を図 4 に示す．全ての工具について，すくい面にフレーキング損傷が生じている．特にコーテッド工具において大きなフレーキングが生じていて，その中でも TiCN コーテッド工具は先端部分で大きなフレーキングが見られる．

湿式切削の場合では，すべての工具において図 4 に示すような欠損およびフレーキング損傷がすくい面に生じた後，工具逃げ面損傷が急激に進み tool life に達した．

本実験条件では，チタン合金の切削速度としては高速であるため切削温度が上昇し，チタン合金の熱伝導率が低いことから切削熱が刃先に滞留しやすい．さらに，工具が切削熱によって急加熱された後，断続切削であるため大量の切削油剤により工具が急冷却されることになる．これらが繰り返されて熱クラックが発生し，それが欠損の起点となりチッピングが生じやすくなったと考えられる．そのためすくい面において，図 4 に見られるようなフレーキング損傷が生じたと考えられる．そこで，熱クラックの発生を抑えるため，次に乾式切削を行った．

Fig. 4 Tool wear in wet cutting. Flaking occurred on flank face in every tool. In specially flaking of TiCN coated tool was very large on tool edge.

3・2 乾式切削時の工具摩耗

図 5 にコーテッド工具を用いて、乾式で切削を行ったときの逃げ面最大摩耗幅と切削距離との関係を示す。図 5 から、TiAlN コーテッド工具では、 $L=0\sim10\text{m}$ 程度における初期摩耗では摩耗幅が急に増加したが、それ以降 $L=80\text{m}$ 程度までの定常摩耗域では、安定したアブレイシブ摩耗により、工具摩耗は緩やかに増加した。なお、Insert 1 については初期摩耗が Insert 2 よりも大きかったため、定常摩耗部分においても Insert 2 よりも大きな値となっているがこの程度の差は無視してよい。DLC コーテッド工具および TiN コーテッド工具は同じように工具摩耗が増加した。これらの工具摩耗は TiAlN コーテッド工具に次いで初期摩耗が大きく、 $L=80\text{m}$ 周辺でチッピングが生じた後、逃げ面摩耗幅が急激に増加した。TiCN コーテッド工具は、初期摩耗が最も小さく、摩耗の進行も最も穏やかで正常摩耗が切削距離約 80m まで続いた。以降やや摩耗の増加率が大きくなり、切削距離が 120m 付近で工具摩耗幅の増加が急になり、その後、切削距離 140m で摩耗幅が 0.4mm を超え工具寿命に至った。また、乾式切削ではいずれの工具においても湿式切削と比較して、工具寿命は長くなった。

Fig. 5 Relation between flank wear width and cutting distance in dry cutting. Tool life was longer than wet cutting.

次に、乾式で切削した場合の工具寿命時の工具摩耗状態を図 6 に示す。ノンコーテッド工具では、初期摩耗は TiAlN コーテッド工具よりも小さいが、図 6(a) に示す欠損により工具寿命に至った。しかし、コーテッド工具については乾式切削ではどの工具においても湿式切削の工具すくい面に見られたようなフレーキング損傷は生じておらず、アブレイシブ摩耗の増加により工具寿命に達したことがわかる。ただし、コーテッド工具についてすくい面から観察すると、どの工具についても切れ刃上に小さなチップングが観察できる。DLC コーテッド工具は、チップングが他のコーテッド工具と比べて大きく見える。乾式切削では湿式切削のような急冷却は生じないために、熱クラックが原因となるフレーキングなどの損傷は生じなかったと考えられる。ただし、湿式切削に比べると切削温度は上昇しているために、すくい面を切りくずが摺動する際の摩擦熱による変色の程度が大きくなっていた。本実験における切削条件は、切込みが小さく比較的軽切削であるため、切削温度の上昇が激しくなかったことも工具寿命が長く、小さなチップングは発生するもののフレーキングにまでは至らなかった原因だと考えられる。

3・3 ミスト切削における工具摩耗

極微量の植物油ベースのオイルをミスト状にして噴霧する MQL 方式によって、湿式および乾式時と同様に切削実験を行った。この時の切削距離と逃げ面最大摩耗幅の関係を図 7 に示す。ノンコーテッド工具では、初期摩耗は乾式切削時と比較して小さく、その後の摩耗進行も緩やかであったが、乾式時と同様にチップングにより工具寿命に至った。また、コーテッド工具と比較すると工具寿命は最も短くなった。

TiAlN コーテッド工具については乾式切削時と同様に、他の工具と比較すると初期摩耗が最も大きくなった。しかし、摩耗幅は切削距離 80m 位までは増加せず、その後、他のコーテッド工具と同様の摩耗幅の増加率となる特徴的な摩耗の進行となった。DLC コーテッド工具においても、ミスト式切削では初期摩耗幅が乾式切削よりも小さくなった。さらに定常摩耗域も 100m 程度まで長くなった。

Fig. 6 Tool wear in dry cutting. There was no flaking in every tool. Change of rake face color was bigger than wet conditions by high cutting temperature and friction of chips.

Fig. 7 Relation between flank wear width and cutting distance in MQL cutting.

その後、切削距離 80m 周辺でチッピングが生じた後、摩耗幅の増加が急になり 150m で工具寿命に達した。TiCN コーテッド工具については、DLC コーテッド工具と同様の摩耗の進行であった。また、乾式時と同様の工具摩耗進行を示し、工具寿命も同じとなる結果となった。TiN コーテッド工具については、初期摩耗は DLC コーテッド工具や TiCN コーテッド工具よりもやや大きいもののその後の摩耗幅の増加率が他の工具と比較して最も小さく、120m 付近まで正常摩耗が続いた。その後、摩耗の増加率がやや大きくなったが、切削距離 160m 付近まで正常摩耗のまま増加した。

MQL 方式で切削した場合の、工具寿命時の工具摩耗状態を図 8 に示す。ノンコーテッド工具では、すくい面上の先端部分においてフレーキングが観察でき、切れ刃部分においてエッジ部分から逃げ面にかけて 2 か所に筋状の欠損が観察できる。このうちフレーキングは切削距離 45m で先端部において小さな領域で発生し、切削距離 67m で図 8(a)と同様の状態となった。筋状の欠損は切削距離 70m までは見られず、この欠損によって工具寿命に至った。

コーテッド工具の場合はどの工具においても、湿式切削で見られたような工具すくい面のフレーキング損傷は生じていない。乾式と MQL 方式の工具摩耗を比較すると、MQL 方式の切削では切れ刃のチッピングの大きさが乾式切削で生じているものよりやや小さい。また、すくい面上を切りくずが摺動する際の摩擦熱による変色の程度が小さく、切削温度は乾式切削の場合よりも低下していることがわかる。このことは、一例として図 9 に示す TiAlN コーテッド工具による乾式時と MQL 方式時との切りくずの写真において、乾式時の方が切りくずの色が全体的に黒っぽくなっていることから確認できる。

Fig. 8 Tool wear in MQL cutting. There was no flaking in every tool.

Fig. 9 Chip in dry cutting and MQL cutting at tool life of TiAlN coated tool. The color of the chips in dry cutting was darker than that in MQL cutting.

3・4 冷却方式の比較

以上のことから、MQL 方式による切削を行うことで、湿式切削の場合に比べて工具寿命が大幅に改善されることがわかった。また、湿式切削では急加熱、急冷却による熱クラックが工具の寿命を著しく悪化させる要因であることがわかった。

これらの結果をまとめて、湿式、乾式、ミスト式切削を行ったときの工具寿命時における切削距離を図 10 に示す。図 10 を見ると、TiCN コーテッド工具ではミスト式切削および乾式切削で同程度の工具寿命となった。その他の工具では、ミスト式切削により、乾式切削から 30～40m 程度、湿式切削から 50～120m 程度、工具寿命が改善された。また、湿式、乾式、ミスト式いずれの場合においても TiAlN, DLC, TiCN, TiN コーテッド工具では、ノンコーテッド工具より工具寿命が改善された。

Fig. 10 Comparison of tool life by cooling method. Tool life of every tool in MQL was longer than that in dry except for TiCN coated tool.

乾式切削では TiCN コーテッド工具が 144m で最も工具寿命が長かったが、本実験条件下で最も工具寿命が長くなった条件は、TiN コーテッド工具で MQL 方式切削を行った場合であった。TiN コーティング層は硬度では TiCN 工具に劣るが、母材へのコーティング層の密着性が良く、表面の平滑度が高いため、切りくずとの摩擦による切削温度の上昇が抑えられ、さらにコーティング層の剥離、消失が抑えられたため最も工具寿命が長くなったと考えられる。

ミスト式切削と湿式を比較した場合、少量の油剤の噴霧の気化熱により適度な冷却状態になり、熱クラックが発生しにくかったと考えられる。また、植物油ベースオイルによる工具表面の潤滑も得られ、

切削温度の上昇を抑制できたと考えられる．そのためチッピングの発生が遅く，工具寿命および耐欠損性が改善された．

3・5 切削温度の測定

PVD コーテッド工具に使用されているコーティング層は表 1 に示したようにビッカース硬さ，耐熱温度，摩擦係数が異なる．特に工具表面の摩擦係数の違いが切削温度に差を生じさせ，工具寿命に影響すると考えられるので，各コーテッド工具の乾式切削時における切削温度を放射温度計で測定した．測定に用いた放射温度計は NEC 製放射温度計 Avio G120 で，測定条件は測定レンジを 0~1500℃，サンプリングレートを 10fps，測定面の放射率を 0.20 と設定して計測した．なお，計測中の測定値は上下していたが，切りくずがすくい面上にあるときは工具表面ではなく切りくずの温度を測定することになり，切削温度が低く測定されることが考えられる．しかし，切りくずが離脱した場合には測定中の最高温度を記録するので，すくい面の温度が記録されていることになる．

図 11 に切削温度の測定の様子を示す．図 11(a)に上から見た概観を，図 11(b)に測定中の熱画像を示す．図 11(b)中の破線形状は工具ホルダの形状を示している．また中央部分の赤い部分が切削点で，いずれのフレームでもこの点において最高温度を示した．いくつかの画像を撮影し，この切削点の温度が最も高くなった時の値を切削温度として測定した．

図 12 に各工具の乾式切削時における切削温度の測定結果を示す．測定された切削温度は低い方から順に，TiCN コーテッド工具の場合 472℃，DLC コーテッド工具の場合 492℃，TiN コーテッド工具の場合 570℃，ノンコーテッド工具の場合 629℃，TiAlN コーテッド工具の場合 669℃となった．

この結果と表 1 より，DLC コーテッド工具の場合摩擦係数が 0.1 で最も小さく，TiAlN コーテッド工具の場合摩擦係数が 0.5 で最も大きいことから，切削温度については工具表面の摩擦係数が大きく影響していると考えられる．また，乾式切削時の切削温度については TiCN コーテッド工具，TiN コーテッド工具，TiAlN コーテッド工具の順に小さく，工具寿命は同じ順に長くなっていた．乾式切削におけるこれらの 3 つの工具については，切削温度の高低が工具寿命に影響を与えたと考えられる．

Fig. 11 Heat image in dry cutting by radiation thermometers. Broken line is tool holder. Red area is cutting point.

Fig. 12 Comparison of highest cutting temperature in dry cutting. Non-coated: 629°C, TiAlN: 669°C, DLC: 492°C, TiCN: 472°C, TiN :570 °C. Friction coefficient of TiAlN is most 0.5 and DLC is minimum 0.1. There is relation between cutting temperature and friction coefficient.

4. 結言

種々の工具を用い、また冷却方式を変化させてチタン合金の高速エンドミル切削時の工具摩耗特性を調べた。得られた結果を以下に示す。

- 1) PVD コーテッド工具を用いることにより工具の摩耗進行は遅くなった。
- 2) 湿式切削においては、切削油剤による急冷却と切削熱による急加熱の繰り返しにより、すくい面に大きなフレーキング損傷が生じた。
- 3) 乾式切削、ミスト切削のときには、フレーキング損傷はほとんど生じなかった。
- 4) TiAlN, DLC, TiN コーテッド工具やノンコーテッド工具を用いたミスト切削における工具寿命は、乾式の場合よりも長くなった。TiCN コーテッド工具の場合は乾式とミスト切削の工具寿命は同じ程度であった。
- 5) DLC, TiCN 工具を用いた乾式切削における切削温度は、他のコーテッド工具やノンコーテッド工具の場合よりも低くなった。

文 献

- 陳徳成, 鈴木康夫, 酒井克彦, 複合ミスト供給法による旋削加工の研究, 精密工, Vol.67, No.6 (2001), pp.922–926.
- 細川晃, 南部彰, 田中隆太郎, 山田啓司, 上田隆司, MQL 方式による高速エンドミル加工—(第3報) 切削温度と工具損耗特性—, 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2004), pp.523–524.
- 川上辰也, 臼杵年, 中島省吾, 久保田和幸, 若林利明, コーテッド工具によるチタン合金のMQL加工に関する研究, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2011), pp.229–230.
- 河田圭一, 中村隆, 松原十三生, 佐藤豊, 油膜付水滴加工液を用いたエンドミル加工の加工精度, 精密工学会誌, Vol.69, No.9 (2003), pp.1342–1347.
- 松岡寛憲, 久保明雄, 劉孝宏, 丘華, 中江貴志, 小野肇, 石原信太郎, 首藤周一, ホブ切りにおけるコーティング工具の摩耗挙動に及ぼす MQL の効果 (全面コーティング舞いツールによる基礎実験), 日本機械学会論文集 Vol.80, No.820 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014dsm0392.
- Metcut Research Associates, Machining Data Handbook 3rd Edition, Vol. 1 (1980), pp.2–216.
- 峯川洋己, 稲垣一郎, 中村誠, 鈴木繁, 上間丈司, 横田秀雄, 極微量切削液供給法による切削加工(フライス加工に

- 関する基礎研究), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.66, No.646 (2000), pp.2054–2059.
- 中村隆, 松原十三生, 糸魚川文広, 丹羽小三郎, 環境重視した微量油膜付水滴加工液の研究, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1999), pp.550–551.
- Narutaki, N., Grooving of Beta-titanium Alloys, Progress of Cutting and Grinding, Vol. 3 (1996), pp.51–56.
- 落合乙之, 酒井克彦, チタン切削における MQL の効果—各種ミストによる効果の検証—, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2013), pp.1043–1044.
- 岡田将人, 細川晃, 浅川直紀, 藤田祐介, 上田隆司, 低熱伝導率難削材のエンドミル加工における MQL の工具温度への影響, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.792 (2012), pp.3093–3103.
- 坂本重彦, 安井平司, 川田昌樹, チタン合金の超精密切削における表面粗さに及ぼす切削油剤の影響, 精密工学会誌, Vol.69, No.3 (2003), pp.402–406.
- 関谷克彦, 山根八州男, 鳴瀧則彦, Ti-6Al-4V 合金の高速エンドミル加工, 精密工学会誌, Vol.70, No.3 (2004), pp.438–442.
- 鈴木康夫, 複合ミスト法による旋削加工の動向, トライボロジスト, Vol.47, No.7 (2002), pp.526–532.
- Usuki, H., Face Milling of Beta Titanium Alloy, Progress of Cutting and Grinding, Vol.3 (1996), pp.57–62.
- 臼杵年, 佐藤公紀, 古谷諭, 鈴木利治, ハイス工具によるチタン合金の高速ドライエンドミル加工, 砥粒加工学会誌, Vol.49, No.9 (2005), pp.496–501.
- Venkataramana, M., Krishnamohan, R. D. G. and Hanumantha, R., Chip morphology of Ti-6Al-4V alloy under different machining conditions, Journal of Production Engineering, Vol.17, No.1 (2014), pp.27–32.
- 若林達哉, 前田幸男, 梶田正美, 徳武信一郎, 難削材のニアドライ切削における工具摩耗特性の検討, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2012), pp.197–198.

References

- Chen, D., Suzuki, Y. and Sakai, K., A study of turning operation by oil-water combined mist lubrication machining method, The Japan Society for Precision Engineering, Vol. 67, No. 6 (2001), pp.922–926 (in Japanese).
- Hosokawa, A., Nambu, A., Tanaka, R., Yamada, K. and Ueda, R., Studies on MQL in high-Speed endmilling –(3rd Report) cutting temperature and tool wear –, Proceeding of The Japan Society for Precision Engineering in Spring (2004) pp.1043–1044 (in Japanese).
- Kawakami, T., Usuki, H., Nakashima, S., Kubota, K. and Wakabayashi, T., Study on MQL machining of titanium alloy with coated tool, Proceeding of The Japan Society for Precision Engineering in Autumn (2011) pp.229–230 (in Japanese).
- Kawata, K., Nakamura, T., Matsubara, T. and Sato, Y., The Japan Society for Precision Engineering, Vol. 69, No.9 (2003), pp.1342–1347 (in Japanese).
- Matsuoka, H., Kubo, A., Ryu, T., Qiu, H., Nakae, T., Ono, H., Ishihara, S. and Shutou, S., Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.820 (2014), DOI:10.1299/transjsme.2014dsm0392.
- Metcut Research Associates, Machining Data Handbook 3rd Edition, Vol.1 (1980), pp.2–216.
- Minekawa, H., Inasaki, I., Nakamura, M., Suzuki, S., Kamima, T. and Yokota, H., Cutting with minimal quantity lubrication (Fundamental research on the milling process), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.66, No.646 (2000), pp.2054–2059 (in Japanese).
- Nakamura, T., Matsubara, T., Itoigawa, F. and Niwa, S., Study on oil film on water fog metal working fluid with environment, Proceeding of The Japan Society for Precision Engineering in Spring (1999) pp.550–551 (in Japanese).
- Narutaki, N., Grooving of Beta-titanium Alloys, Progress of Cutting and Grinding, Vol. 3 (1996), pp.51–56.
- Ochiai, T. and Sakai, K., Effect of MQL in the titanium cutting, Proceeding of The Japan Society for Precision Engineering in Spring (2013) pp.1043–1044 (in Japanese).
- Okada, M., Hosokawa, A., Asakawa, N., Fujita, Y. and Ueda, T., Influence of minimum quantity lubrication on tool temperature in end milling of difficult-to-cut materials having low thermal conductivity, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering, Series C, Vol.78, No.792 (2012), pp.3093–3103 (in Japanese).
- Sakamoto, S., Yasui, H. and Kawata, M., Effect of cutting fluid on surface roughness formed by ultra-precision cutting of titanium metal, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 69, No. 3 (2003), pp.402–406 (in Japanese).
- Sekiya, K., Yamane, Y. and Narutaki, N., High speed endmilling of Ti-6Al-4V, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 70, No. 3 (2004), pp.438–442 (in Japanese).
- Suzuki, Y., Developments in turning with oil-water combined mist, Journal of Japanese Society of Tribologists, Vol. 47, No.7

(2002),pp.526–532 (in Japanese)..

Usuki, H., Face Milling of Beta Titanium Alloy, Progress of Cutting and Grinding, Vol. 3 (1996), pp.57–62.

Usuki, H., Sato, K., Furuya, S. and Suzuki, T., High speed dry end milling of titanium alloy with HSS end mills, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, Vol. 49 No. 9 (2005), pp.496–501 (in Japanese).

Venkataramana, M., Krishnamohan, R. D. G. and Hanumantha, R., Chip morphology of Ti-6Al-4V alloy under different machining conditions, Journal of Production Engineering, Vol.17, No.1 (2014), pp.27–32.

Wakabayashi, T., Maeda, Y., Masuda, M. and Tokutake, S., Study on tool wear characteristics for near-dry cutting of difficult-to-machine material, Proceeding of The Japan Society for Precision Engineering in Autumn (2012), pp.197–198 (in Japanese).