

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

著者	岡田 将人, 細川 晃, 浅川 直紀, 藤田 祐介, 上田 隆司
雑誌名	Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C
巻	78
号	792
ページ	3093-3013
発行年	2012-01-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/32477

doi: 10.1299/kikaic.78.3093

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*

岡田 将人^{*1}, 細川 晃^{*1}, 浅川 直紀^{*1}, 藤田 祐介^{*2}, 上田 隆司^{*1}

Influence of Minimum Quantity Lubrication on Tool Temperature in End milling of Difficult-to-Cut Materials having Low Thermal Conductivity

Masato OKADA^{*1}, Akira HOSOKAWA, Naoki ASAKAWA, Yusuke FUJITA and Takashi UEDA

^{*1} Kanazawa University, Institute of Science and Engineering
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192, Japan

The effect of minimum quantity lubrication (MQL) method in end milling of stainless steel and titanium alloy that are typical difficult-to-cut materials with coated carbide tool is investigated. The effect is mainly evaluated by tool flank temperature, cutting force and tool wear behavior. The tool flank temperature is measured using a two-color pyrometer with an optical fiber having small measurement area and high response speed under non-contact condition with tool. In MQL cutting of SUS304 and Ti-6Al-4V at cutting speed $v=25\text{m/min}$, the tool flank temperature decreases approximately 50°C and 100°C than the case of dry cutting respectively, and the effect of MQL on tool flank temperature is especially obtained in low-speed cutting. On the other hand, the tool flank temperature in MQL cutting of Ti-6Al-4V is higher than the case of dry cutting in cutting speed $v=100\text{m/min}$ or more. In the high-speed cutting of Ti-6Al-4V, it is observed that the several chips adhere on the rake face of cutting edge. In addition, the output voltages from detector are obtained when the adhesion chips on the cutting edge pass through the measurement area of two-color pyrometer. In the case of the SUS304, the feed and thrust force are decreased by the supplying oil mist in high speed cutting. The generation of micro-crack at cutting edge is contained by applying MQL even high speed cutting of Ti-6Al-4V that is not obtained the effect of temperature decreasing.

Key Words : Cutting Temperature, Cutting Force, Chip, Two-Color Pyrometer, Minimum Quantity Lubrication, Difficult-to-Cut Material

1. 緒 言

ステンレス鋼やチタン合金などに代表される難削材は、優れた機械的性質や耐熱性、耐食性、生体親和性を有することから幅広い製品に用いられており^{(1), (2)}, 今後も難削材加工の継続的な需要の高まりが予想される。一般的にこれらの難削材は、熱伝導率が低く工具温度が上昇することで摩耗が促進され、工具損傷や加工精度の低下に進展することが問題となる。そのため、加工中の工具は熱的に非常に過酷な環境下に置かれており、これらの問題解決には加工中の工具温度を把握することが重要となる。また熱伝導率だけに限らず、ステンレス合金であれば高い伸びと加工硬化性、チタン合金であれば工具材料との化学的親和性が高いことなども、難削性を示す要因として挙げられている⁽³⁾。このことから、熱伝導率の低い難削材においても、それらの切削特性は材質によって個別に検討することが肝要である。

近年、環境資源の保護、切削油剤使用に伴う電力消費ならびに廃液処理に要する費用等の問題から、ドライ加工の機運が高まっている。しかしながら、工具の冷却、潤滑ならびに切りくず排出作用を担う切削油剤を全く使用しないことは、工具温度の上昇が問題となる難削材加工においては、工具に対して特に過酷な熱環境を強い

* 原稿受付 2012年2月28日

^{*1} 正員, 金沢大学理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

^{*2} 正員, 福井工業高等専門学校 教育研究支援センター

E-mail: okada@se.kanazawa-u.ac.jp

ることになる。そこで、切削油剤の使用量を極力抑えた加工法として MQL (Minimum Quantity Lubrication) がある。MQL は、切削油剤をミスト状にして高圧エアとともに加工部に供給する加工法である。これまでに MQL の作用メカニズムや難削材に対する適用例が報告されている^{(4)~(6)}。また、チタン合金を対象としたエンドミル加工において、水溶性油剤による湿式加工の場合が、MQL 加工よりも工具寿命が著しく短いとの結果も得られており⁽⁷⁾、エンドミル加工において、特に有効性が期待できる。しかしながら、工具摩耗の直接的な要因となる工具温度に対する MQL の効果について検討された報告は極めて少ない。これは、切削加工における発熱領域が工具刃先の微小領域であるため測定が難しいことが一因である。特に、工具自体が高速で回転するドリル加工や工具が回転しながら、その温度が過渡的に変化するエンドミル加工において、工具温度を高精度で測定することは難しい。

そこで本研究では、難削材のエンドミル加工に MQL を適用した場合の、工具温度を主とした切削特性への影響について明らかにすることを目的とする。工作物には熱伝導率が低く、工具温度が高温となることが難削性を示す主な要因であるステンレス鋼ならびにチタン合金を用いた。また、一般的な鋼材の切削特性と比較するために機械構造用炭素鋼も用いた。工具には、現在広範に用いられているコーテッド超硬工具を用い、著者らが開発した光ファイバ型 2 色温度計により外周刃の逃げ面温度を測定した。逃げ面温度に加え切削抵抗、工具摩耗形態によりドライ加工に対する MQL の適用効果について詳細に検討したので報告する。

2. 実験方法

2.1 光ファイバ型 2 色温度計

図 1 に実験に用いた光ファイバ型 2 色温度計の概略図を示す。切削中の工具外周刃逃げ面から輻射される赤外線光ファイバにより受光し、赤外線検出素子まで伝送することで、高速回転する工具の過渡的な温度を測定する。赤外線検出素子には、光起電力型 InAs 素子と光導電型 InSb 素子を用いた。両素子は光ファイバと同一光軸上に配置されている。光ファイバから照射された赤外線において 0.5~3.4 μm の波長域を有する赤外線を前面に配置された InAs 素子により受光する。次に、InAs 素子を透過した赤外線の中で 3.4~6.5 μm の波長域を有する赤外線を後面に配置された InSb 素子により受光する。本温度計は両素子の出力比から温度を求めることで、測定対象物の輻射率の影響を受けない特徴を有する。加えて、光ファイバの受光面積に相当する微小な測定面積と、100kHz までの入力に対し安定した出力が得られる高い応答速度を有している。これまでに種々の機械加工における加工部温度の測定に成功しており^{(8)~(10)}、オイルミスト供給下でも測定が可能であることを確認している^{(11)~(13)}。

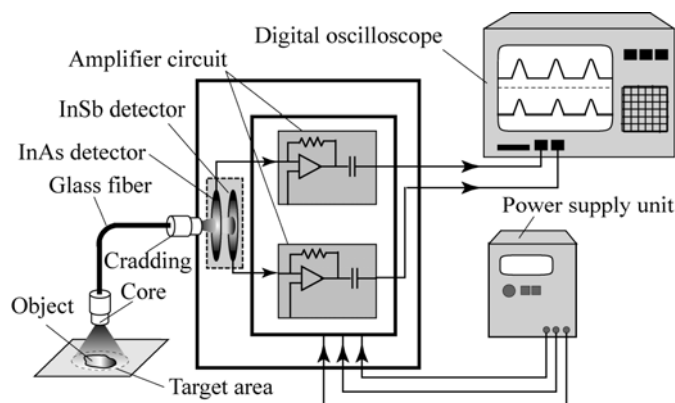


Fig. 1 Schematic illustration of two-color pyrometer with an optical fiber

2.2 実験装置・方法

図 2 に実験装置の概略図を、表 1 に主な実験条件を示す。エンドミル加工は、立形マシニングセンタ(NV4000, 株式会社森精機製作所製)に、スローアウェイ型エンドミルを取り付けて、工作物の側面加工を行った。実験に使用したチップホルダは、4 枚刃の装着が可能であるが、各刃先チップの取り付け誤差による実切り込み量の変化を防ぐため、1 枚刃のみ装着した。刃先チップには超硬合金工具 K10 種を母材とし、その表面に TiAlN と AlCrN を交互に約 1000 層にわたり PVD コーティングした多層コーテッド超硬チップを用いた。著者らはこれまでに、このコ

ーティング材質の難削材加工における切削特性に関して報告しており⁽¹⁰⁾、高い硬度と酸化開始温度により、優れた耐摩耗性と耐熱性を有していることを確認している。なお、コーティング膜は刃先部において $3.5\mu\text{m}$ の厚みを有している。切削抵抗の測定には、圧電センサ(9251A, 日本キスラー(株)製)を組み込んだ3軸切削動力計を用い、チャージアンプを介して出力波形をストレージスコープに記録した。エンドミル加工における切削抵抗は工具の回転に伴い変動し、得られる出力はパルス状になる。本報において切削抵抗は各方向成分の切削パルスごとの最大値とした。なお、インパルスハンマを用いたFFT解析により、動力計、マシニングセンタを含めた系の固有振動数は3成分ともに 3kHz 以上であり、動特性の観点から本実験での使用に支障のないことを確認している。工具の外周刃逃げ面温度は工作物にかけた貫通穴($\phi 1.0\text{mm}$)に光ファイバを挿入し、切削終了時点(図2<Top view>の位置)における工具逃げ面温度を測定した。軸方向の切り込み量は 5.0mm であり、温度測定位置は、工具刃先から 3.0mm の位置とした。図3にチップホルダに設けられたオイルホールの外観を示す。MQLによるオイルミストは、高压エアによりチップホルダ内部を通してオイルホールから工具すくい面に向けて吐出される。なお、刃先チップを取り付けていない刃先部のオイルホールはコーキング剤によりシールしており、吐出されるオイルミストは全てチップを取り付けた刃先のみ供給される。オイルミストの供給量は約 12ml/h 、供給圧は 0.5MPa とした。

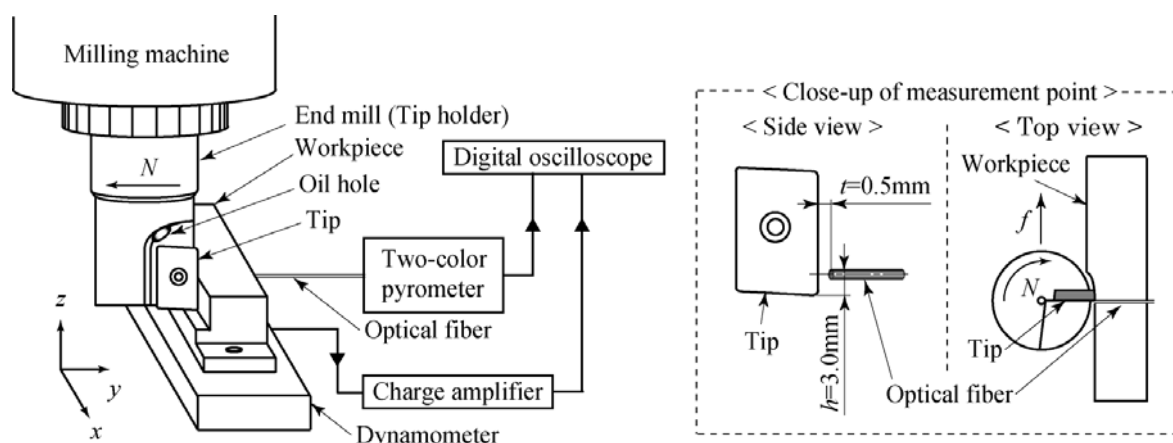


Fig. 2 Experimental set-up

Table 1 Experimental conditions

Cutting tool	Throw-away type single tooth end mill Diameter $D = 25\text{ mm}$ Axial rake angle $\gamma_a=23^\circ$, Radial rake angle $\gamma_r=5^\circ$ Base material: Cemented carbide, JIS K10-grade Film material: Multi-layered TiAlN/AlCrN
Cutting speed	$v = 25, 100, 300\text{ m/min}$
Feed per tooth	$f = 0.10\text{ mm/tooth}$
Radial and Axial depth of cut	$R_d = 0.25, 0.50\text{ mm}$, $A_d = 5.0\text{ mm}$
Cutting style	Down-cut
Lubricant	Dry, Air blow, MQL (Flow rate $q=12\text{ml/h}$, Mist pressure $p=0.5\text{MPa}$)
Mist oil	Vegetable oil, Water-insoluble Specific gravity $\rho=0.91$, Viscosity $\eta=30\text{mPas}$ @ 25°C
Optical fiber	Core diameter $\phi_c = 500\mu\text{m}$ Acceptance angle $\xi_m = 23.6^\circ$ Measuring spot diameter $\phi_m = 940\mu\text{m}$

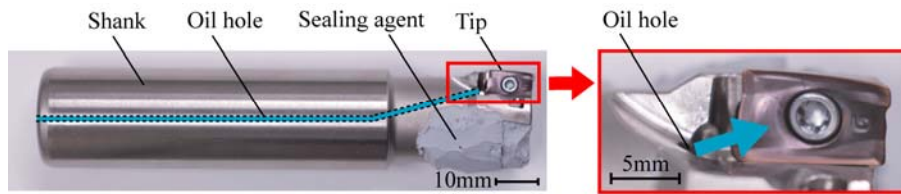


Fig. 3 Outline of oil hole

2・3 工作物の材料特性

難削材が難削性を示す要因は、それぞれの材料により異なり、主に材料特性の硬さ、引張強さ、伸び、熱伝導率が挙げられる⁽¹⁴⁾。そこで、表2にS50C、SUS304、Ti-6Al-4Vの材料特性を被削性指数(MR値)と併せて示す。これらの特性値は複数の文献で示された値の平均であり、硬さは本実験で用いた工作物の実測値も示す。表2より実測値と引用した硬さの平均値が近い値を示しており、硬さ以外の特性値も実験に使用した材料の特性を概ね表していると考えられる。S50Cは被削性指数が52であり、一般的に難削材には分類されない。しかしながら、機械構造用部材として広範に用いられており、その被削性がよく知られているため、難削材との比較のために用いる。S50Cと比較するとSUS304、Ti-6Al-4Vともに熱伝導率が低く、工具温度の上昇を招く難削材であることがわかる。その他の特徴としてSUS304は伸びが大きく、Ti-6Al-4Vは特に熱伝導率が低く、硬さ、引張強さが高いことがわかる。被削性指数はS50Cが最も高く、次いでSUS304、Ti-6Al-4Vの順に難削性を示している。

Table 2 Properties of workpiece material⁽¹⁴⁾⁻⁽²³⁾

Material	Vickers hardness (Actual value) [MPa]	Vickers hardness (Mean value) [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	Thermal conductivity @ R.T. [W/m·k]	Machinability rating [%]
S50C	210	208	675	14	44	52
SUS304	151	160	592	51	16	34
Ti-6Al-4V	318	326	1041	12	8	22

3. 実験結果および考察

3・1 MQLによる工具外周刃逃げ面温度への影響

図4にそれぞれの工作物を切削速度 $v=25, 100, 300\text{m/min}$ 、半径方向切り込み量 $R_d=0.25\text{mm}$ で切削した場合の外周刃逃げ面温度 θ_a をドライとMQL加工の場合で示す。ここで θ_a は、工具摩耗がほとんど進行しない実切削距離 $L_c=0.33\text{m}$ に到達した時点の値を示している。また、 θ_a は光ファイバ型2色温度計より得られた出力波形10パルス分の平均値である。図より、いずれの工作物においても v の増加とともに θ_a が明らかに増加しており、いずれも $v=25\sim 300\text{m/min}$ において 250°C 以上の上昇が認められる。これより難削材においても一般的な炭素鋼と同様に v による θ_a への影響が大きいことがわかる。また、同一切削条件下の工作物による θ_a の違いをみると、いずれの切削条件においてもS50Cが最も低く、SUS304、Ti-6Al-4Vの順になっている。これは、表2に示す被削性指数と整合が取れる結果であり、被削性指数の最も低いTi-6Al-4Vのドライ加工では $v=25\text{m/min}$ でも $\theta_a=360^\circ\text{C}$ 以上に達している。著者らはこれまでに、高硬度焼き入れ鋼のエンドミル加工において、工作物硬さが θ_a に大きな影響を有していることを確認している⁽²⁴⁾。そのため、図4の工作物による傾向は、材料特性の中でも硬さと熱伝導率の影響が大きいと考えられる。そのため、高い硬度と低い熱伝導率を有するTi-6Al-4Vの切削時が工具に対し最も熱的に過酷な環境にあったと考えられる。

図5に図4の場合の温度低減量 TDV (Temperature Decreasing Value) と温度低減率 TDR (Temperature Decreasing Rate) を示す。本報で TDV とはドライ加工とMQL加工時の θ_a の差とし、 TDR とは TDV をドライ加工時の θ_a で除した値とする。これらはMQLによる工具温度の低減効果を数値化した値である。図より、 v の増加に伴い TDV 、 TDR が減少しており、いずれの工作物においても高速領域ではMQLによる工具逃げ面温度の低減効果が低いこ

とがわかる。この傾向は難削材の場合に顕著で、Ti-6Al-4V の場合、 $v=25\text{m/min}$ では 90°C 、25%以上の高い温度低減効果が認められるのに対し、 $v=100\text{m/min}$ では、その効果はほとんど認められない。さらに $v=300\text{m/min}$ においては負の値となっており、ドライ加工時の θ_a のほうが低いことを示している。

v の増加とともに MQL による温度低減効果が減少するのは、切削毎の刃先と工作物間の接触時間が短くなることで、接触時間中に供給される油剤ならびに高压エア量が減少することに起因すると考えられる。また、 v の増加に伴い、吐出されたオイルミストが工具に付着せず浮遊ミストとなる割合が増加していることが考えられる。笹原ら²⁵⁾は工具空転状態において、工具回転数が浮遊ミスト量に影響を与えないことを明らかにしている。しかしながら、本実験は切削加工中における刃先周辺での現象であり、 v の増加に伴う切削部の状況の変化による影響も考慮する必要がある。そのため、 v による浮遊ミスト量への影響については、今後さらなる検討を要する。一方、Ti-6Al-4V の $v=300\text{m/min}$ において、MQL の θ_a がドライ加工時より明らかに高温となった要因は、刃先への切りくず溶着に起因すると考えられるが、詳細は次節以降で述べる。

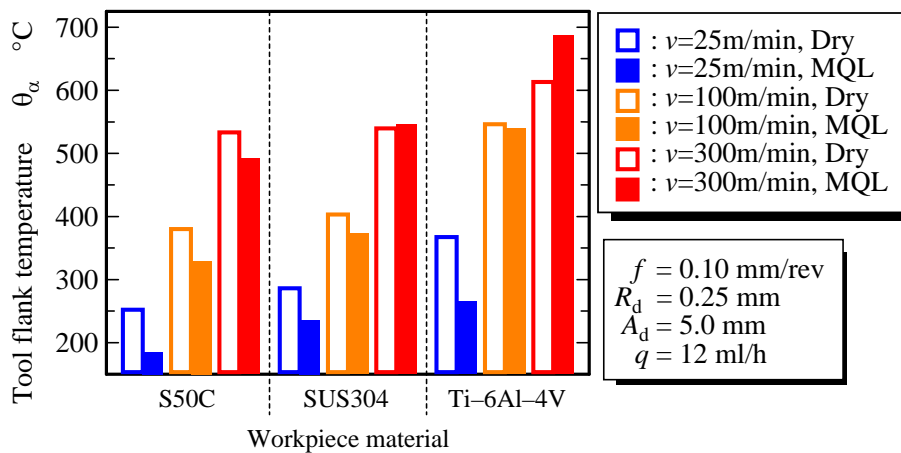


Fig.4 Influence of workpiece material on tool flank temperature

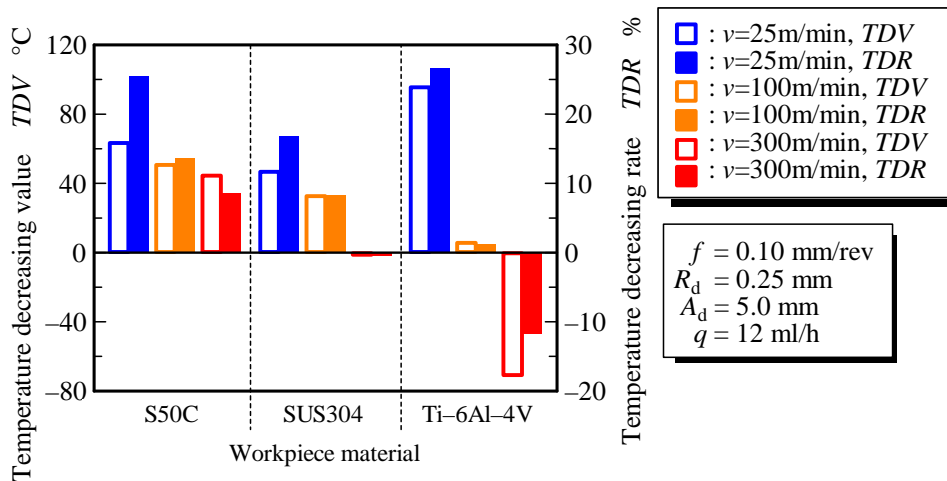


Fig.5 Effect of supplying oil mist on tool flank temperature

3・2 切りくず溶着と切りくず形状

図 6 (a)~(c)に未摩耗工具により Ti-6Al-4V を切削速度 $v=300\text{m/min}$ 、半径方向切り込み量 $R_d=0.25\text{mm}$ で実切削距離 $L_c=0.65\text{m}$ まで切削した後の刃先部 SEM 写真をドライ、エアブロー、MQL 加工の場合で示す。エアブロー加工はオイルミストを含まない高压エアを MQL と同様に供給圧 0.5MPa でオイルホールより供給した場合である。図よりドライ加工の点線部において、刃先部稜線に沿って、すくい面上に切りくずが溶着していることがわかる。溶着した切りくずは複数枚の切りくずより構成されており、切削毎に新たに排出された切りくずが、以前に溶着

していた切りくずを押し出しながら、相互に溶着したことがわかる。図の場合、約 12 回の切削による切りくずが溶着している。これに対し、エアブローならびに MQL 加工の場合は微量の切りくずの溶着は確認できるが、ドライ加工のような溶着は認められない。オイルミストを含まないエアブローでも MQL 加工と同様の傾向が得られていることから、これは主に高圧エアの切りくず排出作用による効果といえる。なお、 $v=300\text{m/min}$ までの切削速度において、図 6 のドライ加工時のような明らかな刃先部の切りくず溶着が認められたのは $v=100, 300\text{m/min}$ におけるドライ加工時の Ti-6Al-4V のみであり、S50C, SUS304 ではいずれの条件においても認められなかった。このことから、Ti-6Al-4V 切削時は特に切削部が高温になっており、前述した θ_a の結果が裏付けられるとともに、Ti-6Al-4V の工具材質に対する高い化学的親和性が影響していると考えられる。また、そのような高温下においても、高圧エアを供給することにより刃先部への切りくず溶着を防ぐことができるといえる。

図 7 に主な切削条件における切りくず外観を示す。これらは、各条件により排出された切りくず形状の代表的なものを示している。図より、最も θ_a が高い切削条件である $v=300\text{m/min}$ のドライ加工でも S50C, SUS304 には切りくず相互の溶着は認められない。これに対し、Ti-6Al-4V のドライ加工では $v=25\text{m/min}$ で溶着は認められないものの、 $v=100, 300\text{m/min}$ では複数の切りくずによる溶着が認められた。この複数の切りくず溶着が確認された両者を比較すると、 $v=100\text{m/min}$ では切削毎の切りくず相互の境界が明確で切削毎の切りくず形状が保持されているのに対し、 $v=300\text{m/min}$ では境界が明確でなく、それぞれの切りくずが幅方向に細かな凹凸形状を呈していることがわかる。このことから、 $v=300\text{m/min}$ では、切りくずがより高温で溶着し、切削毎に押し出される際に軟化した切りくずが幅方向に圧縮の力を受けたと考えられる。また、Ti-6Al-4V の $v=300\text{m/min}$ においてもエアブロー、MQL 加工時には、溶着が認められず切削毎に 1 枚ずつ排出された切りくず形状を呈していた。これは刃先部への切りくず溶着の傾向と同様であり、高圧エアの供給による切りくず排出効果が裏付けられる。

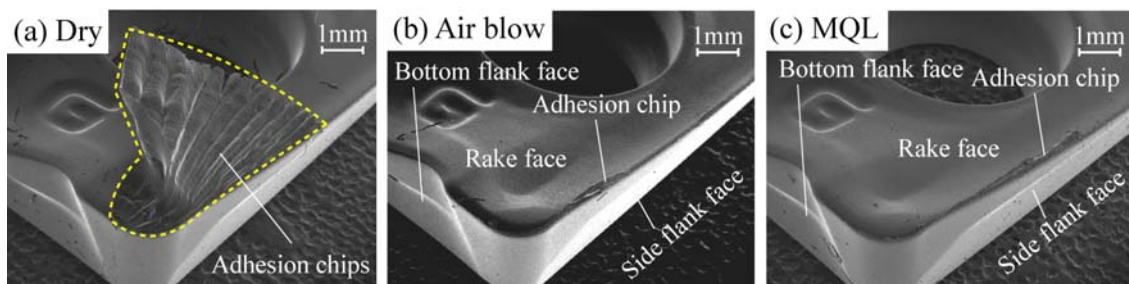


Fig.6 SEM photographs of tool tip after cutting of Ti-6Al-4V

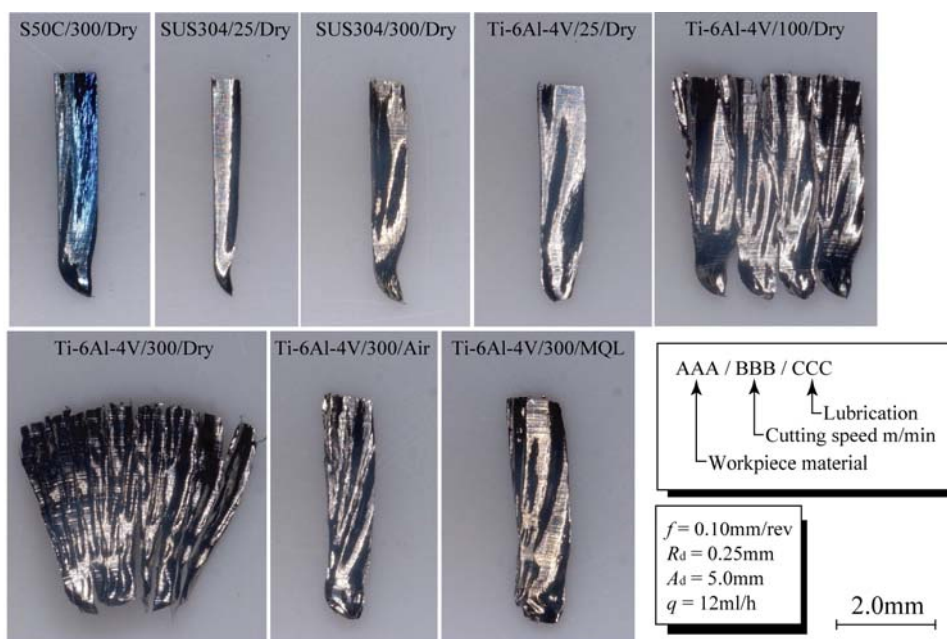


Fig.7 Outlines of typical chip form

3.3 光ファイバ型 2 色温度計の出力波形

図 8 に切削速度 $v=300\text{m/min}$ 、半径方向切り込み量 $R_d=0.25\text{mm}$ で Ti-6Al-4V を切削した際に、光ファイバ型 2 色温度計の InAs, InSb 素子から得られた代表的な 1 パルス分の出力波形を、図 4 で示した外周刃逃げ面温度 θ_α とともに示す。図より、刃先部に切りくずの溶着が認められなかったエアブロー, MQL 加工の場合、波長 $\lambda=0.25\text{ms}$ 程度のパルス(図中 $\Delta\tau_2$ 部)が確認できる。これに対し、刃先への複数切りくずの溶着が認められたドライ加工の場合、 $\Delta\tau_2$ 部以前から両素子の出力(図中 $\Delta\tau_1$ 部)が認められる。ここで、エアブロー, MQL 加工における出力パルスの波長とファイバ受光面直径、刃先の周方向速度から理論的に求められる逃げ面発熱部の周方向幅が約 0.31mm であり、微小な発熱領域に対する出力であることがわかる。また、その波形はピーク点を軸に左右対称形状であることがわかる。これらのことから、エアブロー, MQL 加工で得られた出力パルスが外周刃逃げ面部の微小な発熱領域の通過を捉えた出力波形といえる。

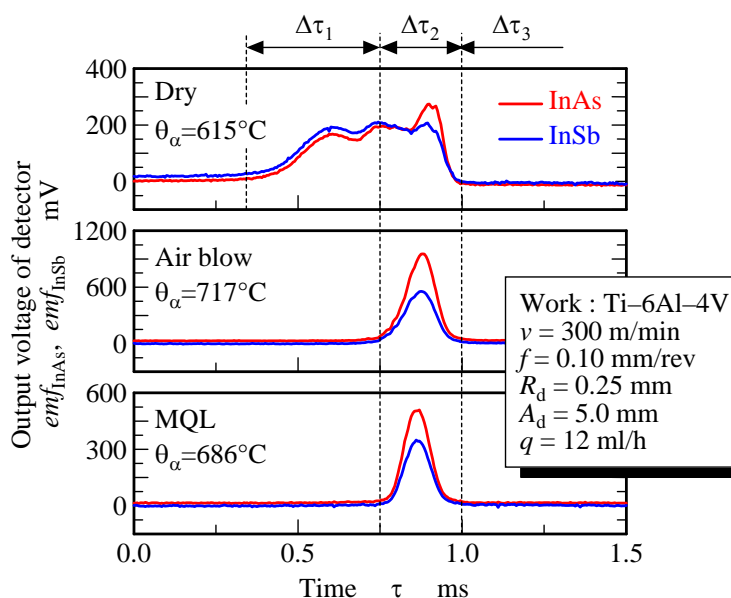


Fig.8 Typical wave profile of Ti-6Al-4V cutting in $v=300\text{m/min}$

図 9(a)~(c)に工具刃先が 2 色温度計のファイバ受光面前面を通過する際の模式図を示す。図中 $\Delta\tau_1$ ~ $\Delta\tau_3$ は図 8 の出力波形の各時点を表している。刃先に切りくずが溶着していない場合、切削により加熱された逃げ面部がファイバの測定領域に入ることによって出力が得られ($\Delta\tau_2$ 部)、刃先逃げ面部が測定領域を通過すると温度計からの出力はゼロとなる($\Delta\tau_3$ 部)。そのため、 $\Delta\tau_1$ 部で温度計からの出力が認められたドライ加工の波形は、逃げ面部が測定領域を通過する以前の $\Delta\tau_1$ 部の時点でファイバ前面を熱源が通過したことを示す。そのため、ドライ加工における $\Delta\tau_1$ 部の出力は、刃先すくい面部に溶着した切りくずに切削熱が流入し加熱されたことにより生じたものといえる。波形より $\Delta\tau_1$ 部の切りくずの最高温度は約 520°C 、温度計からの出力が得られた加熱部の周方向幅は、逃げ面を含めて約 2.34mm であった。これらのことから、3.1 節において、MQL の θ_α がドライ加工より高温であったのは、ドライ加工の場合は刃先に切りくずが溶着することで、刃先部の熱容量が増加したことにより起因すると考えられる。これに対し、エアブローと MQL 加工の場合、切りくずの溶着がないために、相対的にドライ加工時より刃先部の熱容量が小さくなり、切削により生じた熱が刃先のみで伝導したことで、ドライ加工よりも高温になったと考えられる。また、図 6, 7 に示すように、ドライ加工において刃先に切りくずが溶着する場合に、切りくず相互も溶着しているため切削の進行によって刃先の溶着切りくずが発生、成長、脱落を不規則に繰り返す様子を出力波形で確認している。加えて、図 8 のドライ加工時において、溶着切りくずの発生ならびに脱落時の θ_α が 640°C 程度であり、刃先部の熱容量が減少することによる工具温度の変動が認められた。しかしながら、成長過程では、切削パルスごとの温度変動が認められないこと、溶着切りくずの発生、脱落が最短でも数パルスに 1 回程度しか生じないことから、本実験では、発生ならびに脱落時も含めた平均値として θ_α を示している。

エアブローとMQL加工の θ_a には30°C程度の差が認められ、エアブロー加工のほうが高温であった。この差は、オイルミストの有無による影響であり、高圧エアとともにオイルミストを供給することで、油剤による冷却、潤滑作用により、逃げ面温度の低減効果が得られることがわかる。

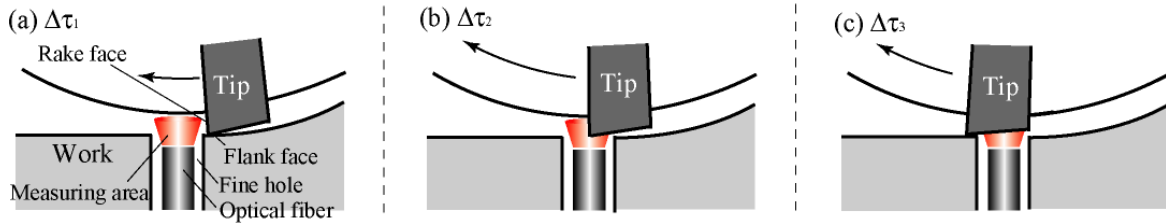


Fig.9 Schematic illustration of relative position between cutting edge and measurement area

図10に切削速度 $v=100\text{m/min}$ 、半径方向切り込み量 $R_d=0.25\text{mm}$ で各工作物をドライ加工した場合の1パルス分の出力波形を示す。切りくずの溶着が認められなかったS50C、SUS304においては $\lambda=0.8\text{ms}$ 程度の波長のパルスが確認でき、逃げ面温度のみを捉えていることがわかる。これに対し、切りくずの溶着が認められたTi-6Al-4Vでは、 $v=300\text{m/min}$ の場合と同様の波形であることがわかる。この場合、 $\Delta\tau_1$ 部の切りくず温度が最高で約300°C、周方向幅が1.9mm、 $\Delta\tau_2$ 部の逃げ面加熱部の周方向幅が0.39mmであった。なお、切りくず相互の溶着が認められなかったTi-6Al-4Vの $v=25\text{m/min}$ におけるドライ加工では、パルス波形がピーク点を基準に対称形状であった。これらのことから、図5に示すTi-6Al-4VのTDV、TDRが、 $v=25\text{m/min}$ の場合に非常に高い値を示していたのに対し、 $v=100\text{m/min}$ で顕著に減少したのは、 v の増加による θ_a の上昇により切りくずの溶着が発現したためと考えられる。また、SUS304の $v=300\text{m/min}$ 、ドライ加工においても、パルス波形が切りくず溶着時の形状となった。図7において、切りくず相互の溶着は確認できないが、SUS304においては $v=300\text{m/min}$ から刃先への切りくず溶着が生じ始めたと考えられ、これにより図5に示すようにTDV、TDRが減少したと考えられる。

これらより、工具温度が高温となる難削材加工では、刃先に切りくずが溶着すると、刃先部の熱容量が増大し、エアブローやMQL加工と比較すると相対的に θ_a は低下する。そのため、MQLによる工具寿命への効果は、切削速度の増加に伴い潤滑、抗溶着性、切りくず排出によるものが支配的になり、冷却による効果は相対的に減少するといえる。

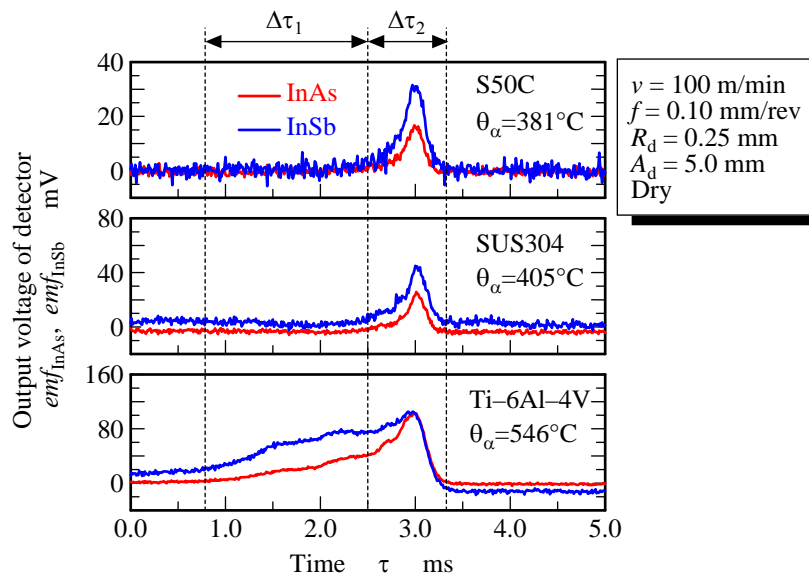


Fig.10 Influence of workpiece material on output wave profile

3・4 切削抵抗

図 11 に SUS304 と Ti-6Al-4V の送り分力 F_x 、背分力 F_y をドライ、エアブロー、MQL 加工でそれぞれ示す。工作物材質で比べると、SUS304 は F_x が、Ti-6Al-4V は F_y が大きいことがわかる。これは SUS304 が伸びならびに加工硬化性が高いために切削時のせん断角が小さく、送り方向の抵抗が大きくなるためである⁽²⁶⁾。これに対し、Ti-6Al-4V は伸びが小さく硬度が高いためにせん断角が大きくなり背分力が大きくなったと考えられる。これは図 7 の $v=25\text{m/min}$ 、ドライ加工における SUS304 の切りくずは幅が狭く肉厚であるのに対し、同一切削条件の Ti-6Al-4V の切りくずは幅が広く薄肉であることから裏付けられる。

SUS304 をみると、切削速度 v の増加に伴い F_x は減少し F_y が増加しているが、両成分ともに v の増加に伴い MQL の抵抗がドライ加工より低くなっていることがわかる。 $v=300\text{m/min}$ においては F_x で 23%、 F_y で 15% 以上の低減が認められ、MQL による効果が得られていると考えられる。

Ti-6Al-4V では、 v の増加に伴い MQL がドライ加工より低くなっていることがわかる。特に F_y の $v=300\text{m/min}$ においては MQL 加工により 90N、12% 以上の低減効果が認められた。また、 $v=300\text{m/min}$ のエアブロー加工時もドライ加工より低く MQL と同様の切削抵抗であった。これらのことから、MQL ならびにエアブロー加工の高速領域における切削抵抗の低減効果は、刃先部への切りくず溶着を防ぐことにより、切りくずの良好な排出を促すとともに、溶着切りくずの噛みこみを防いでいることに起因していると考えられる。これらより、切削抵抗は高速領域において MQL による低減効果が認められた。なお、低速領域において MQL の効果が認められにくいのは、切削速度によるオイルミストの潤滑状態への影響を無視した場合、低速領域ではオイルミスト供給により切削部の冷却効果が得られ、これが切削熱による工作物の軟化を防いだことが一因であると考えられる。これは、 $v=300\text{m/min}$ において、MQL 加工時より θ_a が高温であったエアブロー加工時の切削抵抗のほうが F_x 、 F_y ともに若干低くなっていることから裏付けられるとされている。さらに、オイルミストの潤滑作用による切削抵抗への影響は、他の要因と比較すると大きくないと考えられる。

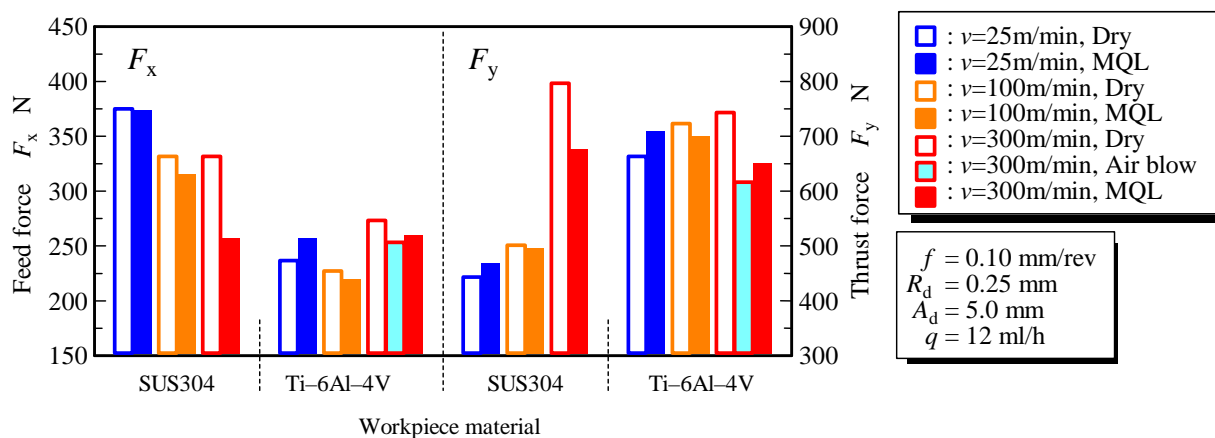


Fig.11 Influence of supplying oil mist on cutting force in SUS304 and Ti-6Al-4V

3・5 工具摩耗形態

図 12(a)~(c) に Ti-6Al-4V を切削速度 $v=300\text{m/min}$ 、半径方向切り込み量 $R_d=0.50\text{mm}$ で実切削距離 $L_c=108\text{m}$ まで切削後の工具刃先コーナー部の SEM 写真を示す。SEM 写真は撮影対象物の元素の原子番号により濃淡が決まる反射電子像である。この場合、工具コーティングが濃灰色、工作物が淡灰色、工具母材が白色で写ることを確認している。図より、いずれの場合も外周刃逃げ面部に帯状の白色、淡灰色の領域が認められる。これは、コーティング膜が剥離し、工具母材が露出した部分に工作物である Ti-6Al-4V が凝着していると考えられる。コーティング膜の剥離領域を逃げ面摩耗とすると、その幅はいずれの場合でも大きな違いが認められない。しかしながら、ドライ、エアブロー加工においては工具母材が露出した箇所に、図中矢印で示す微小クラックが認められる。これは、切削で生じる熱衝撃により熱亀裂が発生したと考えられる。ここで、エアブローならびに MQL 加工は、工具逃げ面温度 θ_a がドライ加工よりも高温であった。これに関わらずドライ、エアブロー加工にのみ熱亀裂の発生が認められ、MQL には認められなかったため、オイルミストを供給することにより、熱亀裂の発生を抑制する

効果が期待できることがわかる。なお、オイルミストによる明らかな効果が認められたことから、本実験で高速領域であった切削速度 $v=300\text{m/min}$ においても、加工部へオイルミストが供給されていたことがわかる。

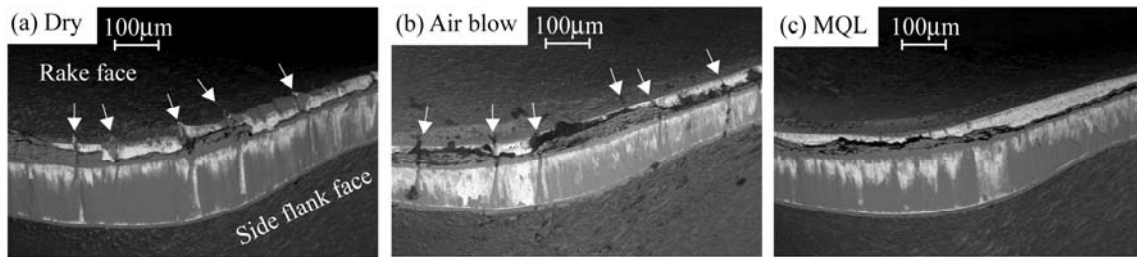


Fig.12 SEM photographs of worn tool tip in cutting of Ti-6Al-4V at $v=300\text{m/min}$

図 13(a)~(c)に Ti-6Al-4V を切削速度 $v=600\text{m/min}$, 半径方向切り込み量 $R_d=0.50\text{mm}$ で切削後の工具刃先部の SEM 写真を示す。実切削距離 L_c はドライ加工で $L_c=38\text{m}$, MQL 加工で $L_c=70\text{m}$ であり, (b)には(a)中の A 部拡大写真を示す。前述の通り, v は工具逃げ面温度に対し大きな影響を有しており, $v=600\text{m/min}$ の場合, 加工中の工具逃げ面部は極めて高温に達していると考えられる。図 13(a)~(c)を比較すると, ドライ加工の場合に刃先部稜線が大きく後退し, 大規模なコーティング膜の剥離が生じている。また刃先部はチッピングと明らかな工作物の凝着が見られる。ドライ加工では, $L_c=38\text{m}$ に達した時点で, チッピングが生じ切削が困難な状態になった。これに対し MQL の場合は, 切削距離がドライ加工よりも長いにも関わらず, 刃先部稜線の後退は僅かであり, 逃げ面部に摩擦は認められるものの切削の継続は可能な状態であった。これらのことから高速領域においても, MQL を適用することで熱亀裂の発生を防ぐ効果が期待できる。加えて, その後の亀裂の進展を抑制することで, チッピングや欠損を防ぐことができるといえる。

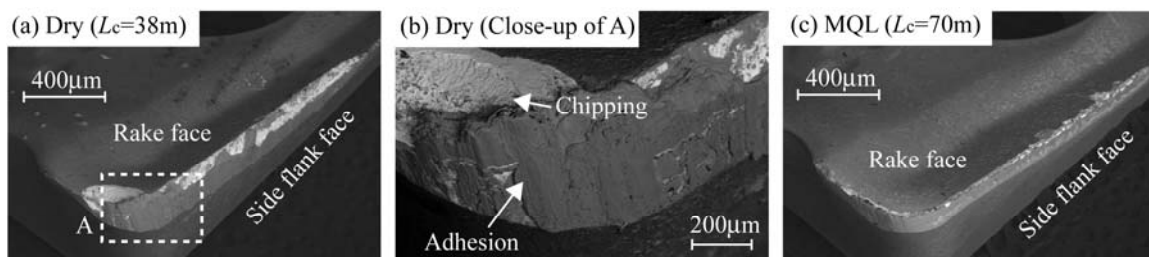


Fig.13 SEM photographs of worn tool tip in cutting of Ti-6Al-4V at $v=600\text{m/min}$

4. 結 語

2 種類の難削材 (SUS304, Ti-6Al-4V) と機械構造用炭素鋼 (S50C) を対象としたコーテッド超硬工具によるエンドミル加工において, オイルミストを高圧エアにより供給する MQL の効果を主に工具温度の観点から, ドライ加工, エアブロー加工と比較して検討した。以下にその結果をまとめる。

- (1) 外周刃逃げ面温度は, Ti-6Al-4V が最も高く SUS304, S50C の順であり, 各工作物の熱伝導率ならびに被削性指数と相反する傾向が得られた。いずれの場合も低速領域においては MQL による工具温度の低減効果が認められたが, 切削速度の増加に伴い, その効果が減少した。
- (2) ドライ加工において工具刃先への切りくず溶着が認められる切削条件では, MQL の工具逃げ面温度がドライ加工の場合より高くなる。
- (3) 工具刃先に切りくずが溶着すると, 刃先部の熱容量が増加し, 切削時に生じた熱エネルギーが工具刃先と溶着した切りくずに流入し, 相対的に切りくずが溶着しない場合より工具逃げ面温度が低下する。
- (4) 切削抵抗は SUS304 の場合には送り分力が大きく, Ti-6Al-4V の場合には背分力が大きい。MQL による切削抵抗の低減効果は, どちらの材料も高速領域で大きく, 特に SUS304 においては, その低減効果が顕著に認められる。

- (5) MQLによる工具逃げ面温度の低減効果が認められないTi-6Al-4Vの高速切削においても、MQLを適用することで、刃先部に生じる熱亀裂の発生と進行を抑制し、チップングや欠損の発生を防止できる。

文 献

- (1) 宮野真一, 福塚友和, 松尾吉晃, 杉江他曾宏, “種々のステンレス鋼への炭素薄膜被覆と固体高分子形燃料電池用セパレータ材料への適用”, 炭素, Vol.2011, No.247 (2011), pp.54-58.
- (2) 新家光雄, “チタンおよびチタン合金の最近の応用と研究・開発動向”, 日本鉄鋼協会々誌:鉄と鋼, Vol.90, No.6 (2004), pp.462-471.
- (3) 狩野勝吉, “データでみる切削加工の最先端技術”, 工業調査会, (1992), pp.429-450.
- (4) Toshiaki Wakabayashi, Ichiro Inasaki, Satoshi Suda, Hideo Yokota, “Tribological Characteristics and Cutting Performance of Lubricant Esters for Semi-dry Machining”, *Annals of the CIRP*, Vol.52, Issue 1, (2003), pp.61-64.
- (5) Yasuhiro Kamata, Toshiyuki Obikawa, “High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.192-193, No.1, (2007), pp.281-286.
- (6) E.A. Rahim, Hiroyuki Sasahara, “A study of the effect of palm oil as MQL lubrication on high speed drilling of titanium alloy”, *Tribology International*, Vol.44, Issue 3, (2011), pp.309-317.
- (7) 関谷克彦, 山根八洲男, 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.8, (2004), pp.1086-1090.
- (8) Takashi Ueda, Masahiko Sato, Kazuo Nakayama, “Cooling characteristics of cutting grain in grinding”, *Annals of the CIRP*, Vol.45, Issue 1, (1996), pp.293-293.
- (9) Tatsuaki Furumoto, Takashi Ueda, Yasuhiro Kano, Akira Hosokawa, “Surface temperature during cavity preparation on human tooth by Er:YAG laser irradiation”, *Annals of the CIRP*, Vol.60, Issues 1, (2011), pp.555-558.
- (10) Masato Okada, Akira Hosokawa, Ryutaro Tanaka, Takashi Ueda, “Cutting performance of PVD-coated carbide and CBN tools in hardmilling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.51, Issue 2, (2011), pp.127-132.
- (11) 岡田将人, 上田隆司, 細川晃, “非軸対称形状を有した刃先交換式ドリルの切削特性とMQLの適用効果”, 日本機械学会論文集C編, Vol.77, No.783, (2011), pp.4297-4307.
- (12) 小澤匡史, 細川晃, 田中隆太郎, 古本 達明, 上田隆司, “旋削加工におけるMQLの効果: 工具すくい面および逃げ面に供給されるオイルミストの作用機構”, 砥粒加工学会誌, Vol.53, No.2, (2009), pp.88-93.
- (13) 細川晃, 小澤匡史, 田中隆太郎, 古本達明, 上田隆司, “旋削加工におけるMQLの効果: ファイバ連結型2色温度計を用いた工具刃先温度の測定”, 精密工学会誌, Vol.74, No.10, (2008), pp.1080-1085.
- (14) 山根八洲男, 関谷克彦, “難削指数による難削性の評価”, 精密工学会誌, Vol.70, No.3, (2004), pp.407-411.
- (15) 草道英武, 村上陽太郎, 木村啓造, 和泉修, “金属チタンとその応用”, 日刊工業新聞社, (1983), pp.52-53.
- (16) 狩野勝吉, “難削材の切削加工技術”, 工業調査会, (1989), pp.27, 189, 203.
- (17) 藤村善雄, “実用切削加工法”, 共立出版, (1980), p.189.
- (18) 鈴木節男, “難加工材の切削・研削・ドリル加工ー現場に活かす実践技術ー”, 海文堂出版, (1990), pp.29, 31.
- (19) 竹山秀彦, “難削材の加工技術ー宇宙材料と一般材料の被削性と生産性ー”, 工業調査会, (1972), pp.60-65.
- (20) S. L. Hoyt, “ASME Handbook, Metals Properties”, *McGRAW-HILL BOOK*, (1954), pp.58, 162-163.
- (21) 日本金属学会, 日本鉄鋼協会, “鉄鋼材料便覧”, 丸善, (1993), pp.535, 618-625.
- (22) T. J. Drozda, C. Wick, “Tool And Manufacture Engineering Handbook Vol. 1 Machining”, *Society of Manufacturing Engineers*, (2002), pp.1-55.
- (23) 日本鉄鋼協会, “鉄鋼便覧”, 丸善, (1962), p.84.
- (24) 細川晃, 岡田将人, 北川修介, 田中隆太郎, 上田隆司, “cBN工具によるハードミリング”, 精密工学会誌, Vol.73, No.2, (2007), pp.226-231.
- (25) 笹原弘之, “オイルミスト供給エンドミル加工”, 精密工学会誌, Vol.68, No.7, (2002), pp.895-898.
- (26) 藤村善雄, “実用切削加工法”, 共立出版 (1980), p.192.