

電解還元水を用いたアルミニウム合金のエンドミル加工*

佐藤 運海^{*1}, 竹ノ内 敏一^{*2}
原 宏^{*3}, 若林 信一^{*2}

End Milling of Aluminum Alloy Using Electrolyzed Reduced Water

Unkai SATO^{*4}, Toshikazu TAKENOUCHI,
Hiroshi HARA and Shin-ichi WAKABAYASHI^{*4} Faculty of Education, Shinshu University,
6 Nishinagano, Nagano-shi, Nagano, 380-8544 Japan

This paper describes the development of a process for end milling of aluminum alloy, using electrolyzed reduced water of dilute sodium chloride solution instead of the dry cutting. Dry process cutting is applied to the process of precision instruments where great surface cleanliness is essential. However, when using dry process cutting, it comes into question how to prevent the cutting temperature from rising, and the tool from wearing promptly. There is every possibility that electrolyzed reduced water is adaptable to the processing of the precision instrument, because it does not contain oils and fats, and excels in the cooling operation. First, we experimented in dry cutting, cutting using electrolyzed reduced water or cutting fluid. Next, we evaluated the cut surface cleanliness, surface roughness of cutting surface, the cutting temperature, and the tool wear. By this study, the following matters became clear. (1) The cutting surface layer which is done with electrolyzed reduced water is clearer than the one which is done by dry process cutting surface. And passivity layer was formed on the cutting surface which is done with electrolyzed reduced water. (2) If using electrolyzed reduced water, we can prevent the tool point of a blade from agglutinating. (3) The cutting temperature which is caused by the cutting using electrolyzed reduced water is low. (4) When the material is small, the surface roughness value of the cut surface which is done with electrolyzed reduced water is bigger than the one which is done by dry process cutting.

Key Words: Cutting Fluid, Cutting Temperature, Tool Wear, Affected Layer, Electrolyzed Reduced Water, Cleanliness, End Milling

1. 結 言

アルミニウム合金は、比重が小さく比強度が大きいなどの良好な物理的、機械的性質を有するうえ、耐食性に大変優れているため、精密機器をはじめ様々な産業分野において広く使用されている。特に、最近シリコンウエハーやプリント基板などの半導体製造装置における大型化にともない、その構成部品の軽量化は要求されている。軽量でマイグレーションによる汚染の危険性が小さいアルミニウム合金を半導体材料、電気、電子部品の検査、計測装置などの精密機器に使用する傾向が大きくなっている。精密機器として使用する場合、加工面の表面清浄度が高く要求されがちである。これらの精密機器部品を切削加工する際、汚染を

防ぐために切削油剤を使用することができない。現状では主に乾式切削によって製作しているが、切削温度の高温化による不具合や工具摩耗などの問題が存在している。加工面を汚染せず、切削温度の低下および工具摩耗の緩和をもたらすことができる精密機器部品の切削加工法の開発が望ましい。

著者らは希薄電解質塩溶液の電解水を用いた金属材料および半導体材料の表面処理、機械加工について研究し、電解還元水はシリコンウエハーの微粒子除去洗浄および金属材料の切削面の脱脂洗浄に有効であり^{1)~3)}、切削油剤の代わりに、炭素鋼の切削加工にも応用できる結果を得た⁴⁾。電解還元水は油脂や化学薬液を含まず、また水道水や純水と異なり加工設備を腐食する心配がなく、優れた冷却作用があるため、切削溶液としてアルミニウム合金の精密機器部品の切削加工にも応用できる可能性が大きいと推測できる。電解水は人体および環境に悪影響を与えず⁵⁾、切削溶液などとして使用する場合、廃棄溶液の処理を必要としないため、環境負荷の軽減および製造コストの削減に

* 原稿受付 2006年2月21日。

^{*1} 正員、信州大学教育学部(☎380-8544 長野市西長野6の口)。^{*2} 新光電気工業(株)(☎381-0014 長野市大字北尾張部36)。^{*3} 正員、信州大学工学部(☎380-0928 長野市若里4-17-1)。

E-mail: unkast@gipnc.shinshu-u.ac.jp

期待できる。そこで、本研究では、希薄 NaCl 電解還元水を用いて、アルミニウム合金の切削加工について検討を行った。まず、乾式、即ち切削溶液を使用しない場合、および希薄 NaCl 電解還元水、水溶性切削油剤と不水溶性切削油剤を用いて、アルミニウム合金の試料についてエンドミル加工を行った。つぎに乾式および各種切削溶液による加工面について表面分析を行い、表面および表面層の清浄度、化学組成の変化を明らかにした。また、加工面の表面あらさ、切削温度および工具摩耗についても評価を行った。電解還元水による切削面の清浄度が乾式切削よりも高いなどの結果を得たので報告する。

2. 実験装置および実験方法

2-1 実験装置

実験装置のエンドミル加工部、切削溶液の供給システムおよび切削温度測定用の温度センサ、温度波形記録計は前報⁴⁾と同様なので、詳細な記述を省略する。但し、本研究では切削溶液の供給量を 1.5L/min、温度波形メモリハイコーダ 8835-01 のサンプリング速度を 10ms、記録時間を 100 秒に設定した。

また、切削工具エンドミルは直径 $\phi 8.0$ mm のスーパーハードエンドミル 4 枚刃 (株不二越 4SE12) を使用しており、その材質はコバルトハイスである。

2-2 切削溶液

希薄 NaCl 電解還元水による切削面の清浄度を定性、定量的に評価を行うために、切削溶液は、電解還元水のほかに、市販の水溶性切削油剤 (NC-22EK-6、豊栄産業(株)製) と不水溶性切削油剤 (ユシロンカット UB75、ユシロ化学工業(株)製) を使用した。さらに、現状の乾式切削と比較するために、切削溶液を使用しない切削条件も設けた。電解還元水の特性値における経時変化の影響を受けないために、電解還元水を生成してから 2 時間以内に使用するようにし、また使用方法としては、循環型ではなく、一回のみを使用することにした。以降では、水溶性切削油剤 NC-22EK-6 および不水溶性切削油剤 UB75 をそれぞれ切削油剤 NC-22EK-6 と UB75 と略称する。NC-22EK-6 は主な構成成分が石油系炭化水素油、アミン類および硫化脂肪酸であり、冷却作用に優れている。切削油剤 UB75 は主な構成成分が硫化鋳油、塩素 (10wt%以上) および硫黄 (1wt%以上) であり、特に潤滑作用に優れている。なお、切削油剤 UB75 は JIS K 2241 の分類に該当せず、NC-22EK-6 は A1 種 2 号に該当する。

2-2-1 電解還元水の生成

被削材および加工装置を腐食する作用がある塩化

物イオン(Cl⁻)を除去するために、本研究では 3 槽式の電解水生成装置 (ノフィル社 DDL-3052)³⁾ を使用した。電解水生成条件は電圧を 13 V、電流を 23 A とし、電解還元水および電解酸化水の流量はともに 2.5 L/min である。アノード電解槽およびカソード電解槽に水道水を供給しながら生成した電解還元水および電解酸化水の諸特性値を表 1 に示す。表中の ORP (Oxidation Reduction Potential) は酸化還元電位で、銀・塩化銀電極を比較電極に用いた測定値である。ER water (Electrolyzed Reduced water) と EO water (Electrolyzed Oxidized water) は電解還元水と電解酸化水である。また、EC (Electrical Conductivity) は電気伝導率で、電解水中のイオン濃度と比例して変動する。CIC (Chloride Ion Concentration) と SIO (Sodium Ion Concentration) はそれぞれ塩化物イオン(Cl⁻)濃度とナトリウムイオン(Na⁺)濃度である。電解還元水中の塩化物イオン濃度および電解酸化水中のナトリウムイオン濃度がゼロになっていないのは水道水を使用したためである。

本研究においては、生成した電解酸化水は使用済みの電解還元水に混ぜて中性の溶液になり、廃棄したが、製造プロセスなどを工夫すれば、電解酸化水の強い脱脂洗浄性能²⁾ および金属イオン残渣除去性能³⁾ を十分に有効利用できると考えられる。

2-3 実験方法

2-3-1 試料片の外形寸法

図 1 は加工前の試料の形状と寸法を示す模式図である。図中の H は試料の高さであり、エンドミルの加工量と、加工面の化学組成などを分析する表面分析装置の仕様とを考慮し、1.5mm おきに 11.5mm から

Table 1 Specific value of electrolyzed water

	ER water	EO water
pH	11.98	2.07
ORP(mV)	-880	1198
EC(S/m)	0.306	0.380
CIC(ppm)	12.0	346.2
SIC(ppm)	305.0	12.0

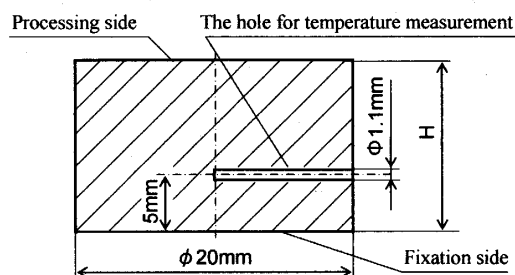


Fig.1 The outside and size of sample

17.5mm までの 5 種類にした。また、試料の固定側の底面から 5mm の高さの側面に温度センサを装着するために $\phi 1.1\text{mm}$ の孔を開けた。

2・3・2 切削条件およびエンドミル加工

切削条件を表 2 に示す。

加工面の表面清浄度を評価する装置の試料に関する許容可能なサイズから、加工後の試料の高さが 10 mm になるように各試料についてそれぞれの切込み量（三分の一の加工量）でエンドミル加工を 3 回行うことにした。また、切削溶液ごとにエンドミルを一本使用し、切込み量 0.5 mm の試料から 2.5 mm の試料までの順番で 2 個ずつ計 10 個の試料を加工した。なお、加工後の試料面をアセトンで洗浄し、加工時付着した油脂などを除去した。エンドミルと試料との位置関係、および工具中心の移動軌道を図 2 に示す。すなわち、エンドミルは、まず原点位置から試料にアプローチし、加工物と接触してから切削加工をしながら $\phi 14\text{mm}$ の移動軌道に入る。つぎに、 $\phi 14\text{mm}$ の移動軌道に沿って一周移動しながら切削加工を行う。最後に $\phi 4\text{mm}$ の移動軌道に入り切削加工を一周行い、一回のエンドミル加工を終了する。

2・3・3 加工面の評価

(1) 加工面の清浄度

加工面の表面および表面層の清浄度について定性、

Table 2 Experimental condition

Cutting fluid	Without cutting fluid Electrolyzed reduced water NC-22EK-6 and UB75
Flow of cutting fluid	1.5 L/min
Material of samples	Al-Mg-Si alloy (A6061B)
Revolution speed of tool	5000 rpm
Feed speed of tool	300 mm/min
Cutting time	100 s/(1 sample)
Depth of cut	0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm

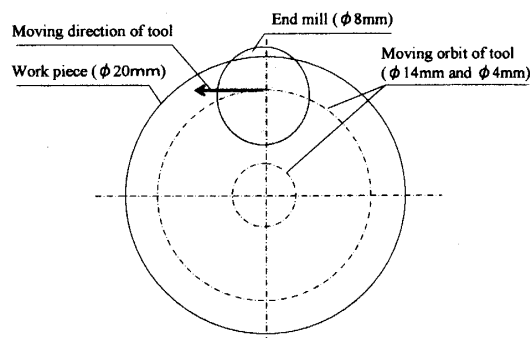


Fig.2 The relation between work piece and tool

定量的な評価を行うために、乾式方式を用いた切削面、および各種切削溶液を用いた切削面についてオージェ電子分光法 (AES: Auger Electron Spectroscopy, 以降はオージェ分析と略称する) による表面および深さ方向の元素分布分析 (Physical Electronics Inc 社 Model 680) を行った。分析エリアは約 $120\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ である。オージェデプスプロファイルの分析について、電子ビームの入射方向と加工面の法線方向との角度は 30 度、スパッタリングレートは $5.95\text{nm}/\text{min}$ (SiO_2 膜換算値) に設定した。

(2) 加工面の表面あらさおよびミクロ的形狀

加工面の表面あらさ Rz, Ra について表面あらさ測定器サーフテスト (ミツトヨ(株)SV414) を用いて測定した。なお、各試料の切削面について、任意 5 箇所を測定し、その平均値を求めた。さらに、各切削面における微細な相違を確認するために、レーザ 3D 測定器 (株キーエンス VK-9500) を用いて、約 $700\mu\text{m} \times 700\mu\text{m}$ のエリアについて加工面のミクロ的な形状を測定した。

2・3・4 切削温度の測定

電解還元水の冷却作用を評価するために、乾式方式および各種切削溶液を用いた場合の被削材の温度変化について、被削材の温度計測用の孔に配置された熱電対の出力温度波形を用いて、比較を行った。

2・3・5 工具摩耗量の評価

マイクロスコープ (株キーエンス VHX-200) を用いて、使用後のエンドミル刃先について外観確認および摩耗量の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3・1 加工面の評価結果

3・1・1 加工面の清浄度

オージェスペクトルの分析結果に基づき求めた切込み量 2.5mm の切削面における主な検出元素の濃度を図 3 に示す。その他の切込み量の切削面に関する分析結果は同様になっているので省略する。まず、C 元素の濃度について、電解還元水による切削面はもっとも低く、そのつぎは水溶性切削油剤 NC-22EK-6 であり、乾式切削面と不水溶性切削油剤 UB75 による切削面は同程度で、もっとも大きくなっている。電解還元水による切削面の C 元素濃度が低くなっているのは、電解還元水中に油脂がないことと、切削温度が低くなっていること (3・2 切削温度の測定結果) に起因している。乾式切削面の C 元素濃度が高くなっているのは、切削温度が高く、切削面と切削雰囲気中の炭酸ガスなどの化学反応によるものと推測される。また、

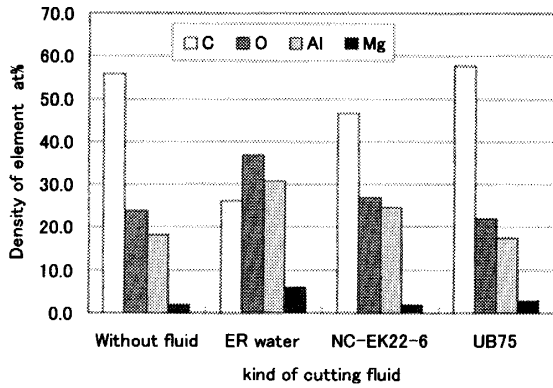


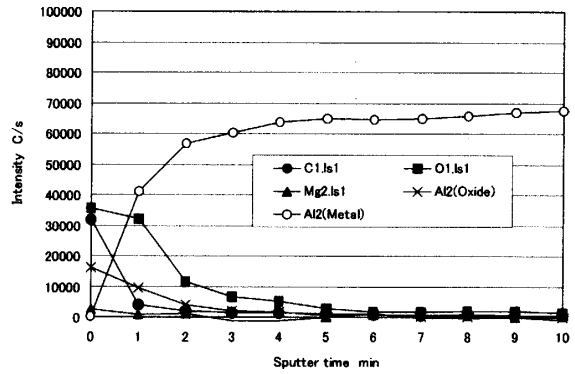
Fig.3 Content of the main elements on cutting surface

切削油剤による切削面の場合、切削油剤から有機あるいは無機炭素が切削面に付着したためと考えている。つぎに、O元素の濃度については、切削油剤による切削面は乾式切削面と同様であり、電解還元水による切削面はもっとも高くなっている。これは電解還元水による切削面の表面層に薄い酸化皮膜(Al_2O_3)が形成されたためである⁶⁾。Al元素の濃度について、電解還元水による切削面はもっとも大きくなっている。Mg元素の濃度については、乾式切削面および切削油剤による切削面と比べ、電解還元水を用いた切削面はわずかながら高くなっている。それは、アルカリ性の電解還元水はアルミニウムに対して一定のエッチング作用があり⁷⁾、Al元素がエッチングされた割に、Mg元素などの濃度が高くなったためである。

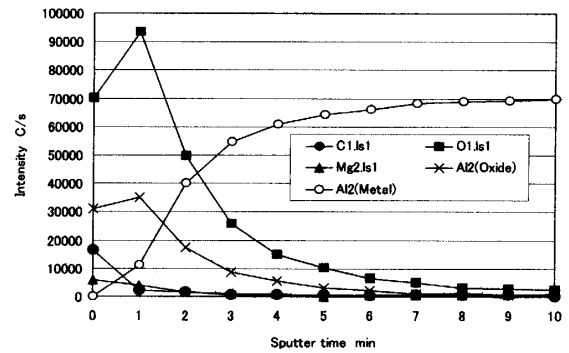
このことより、電解還元水をアルミニウム合金の切削加工に応用する場合、加工面の清浄度は乾式切削面よりも高くなるのみではなく、アルミニウム合金を電解還元水に浸漬した場合と同様に、加工面に薄い不動態皮膜を形成することができると判断した。

オージェスペクトル分析と同様に、切込み量2.5mmの切削面に関するオージェデプスプロファイル分析結果を図4に示し、その他の切込み量の切削面についての分析結果を省略する。同図(a), (b), (c), (d)はそれぞれ乾式切削方式、電解還元水、切削油剤NC-22EK-6およびUB75を用いた切削面の分析結果である。

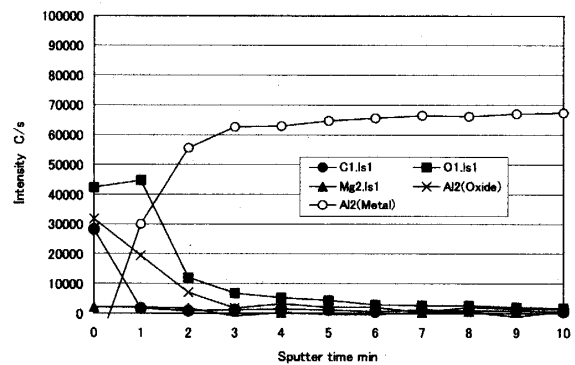
まず、同図(a)と比べ、各切削面のC元素の強度は次のようになっている。電解還元水による切削面の同図(b)においては、分析開始から約3分までの間は小さく、その後はほぼ同様のレベルでゼロに収束した。水溶性切削油剤NC-22EK-6による切削面の同図(c)は分析開始から表面の奥深くまで同様のレベルになっている。不水溶性切削油剤UB75による切削面の同図(d)においては、分析開始から分析終了の時点までは高く



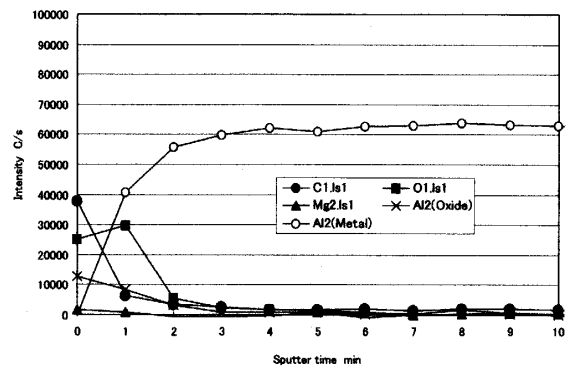
(a) Without cutting fluid



(b) ER water



(c) NC-22EK-6



(d) UB75

Fig.4 The results of auger depth profile analysis

なっている。分析終了の時点におけるC元素強度について、同図(d)の不水溶性切削油剤による切削面は分析装置の検出感度である1000C/sより高く1843C/sとなり、同図(a), (b), (c)の乾式、電解還元水および水溶性切削油剤のどちらによる切削面においても分析装置の検出感度以下になっている。電解還元水による切削面のC元素強度が小さくなっているのは、電解還元水中に油脂などの有機物が含まず、電解還元水から切削面にC元素を拡散しないことと、電解還元水が冷却作用に優れ、切削温度が低くなり、切削面と切削雰囲気との化学反応が起こりにくいことに起因していると考えている。切削油剤による切削面、すなわち同図(c), (d)におけるC元素強度が高くなっているのは、切削油剤の油脂などが切削面に拡散したためである。また、水溶性切削油剤NC-22EK-6と比べ、不水溶性切削油剤UB75による切削面のC元素強度が高くなっているのは、切削油剤の構成成分と切削温度における差異に起因している。

つぎにO元素の強度については、電解還元水による切削面はもっとも大きく、乾式切削面およびNC-22EK-6による切削面はほぼ同様のレベルで、電解還元水による切削面の次であり、もっとも小さくなっているのはUB75による切削面である。電解還元水による切削面のO元素強度が高くなっているのは、切削面と電解還元水との化学反応によって、切削面に不動態皮膜(Al_2O_3)を形成したためである⁶⁾。また、乾式切削面と比較し、電解還元水による切削面のO元素強度が10000C/s以下に収束したのは約3分遅れ、深さに換算すると約20nm(SiO_2 膜換算値)である。この程度の厚さの酸化皮膜は加工面の表面性質に影響を与えないと判断した。UB75による切削面のO元素強度が低くなっているのは、切削油剤に防錆剤などを添加

したためと考えている。また、電解還元水および切削油剤による切削面において、切削面の表面より分析時間の1分の時点ではO元素の強度がもっとも高くなっているのは、電解還元水中の溶存水素、切削油剤中の防錆剤の還元作用によるものと考えている。

最後に、Mg元素の強度については、分析開始、すなわち表面においては、電解還元水による切削面がわずかながら高くなり、分析開始から3分程度経つと、どちらの切削面においても同程度になっている。純アルミニウムおよび酸化アルミニウムの強度は酸素の強度に依存して変化するので、詳細な考察を省略する。分析開始からC元素強度の消失までの時間は、電解還元水による切削面は3分、乾式およびNC-22EK-6による切削面はともに4分となっているが、UB75による切削面は22分の分析が終了するまで消失しなかった。C元素の消失時間より求めたC元素の拡散深さ(SiO_2 膜換算値)は図5に示す。C元素の拡散深さからも、電解還元水による切削面の表面層における清浄度は切削油剤および乾式の切削面より高いことが分かる。

オージェデプスプロファイル分析結果より、電解還元水をアルミニウム合金の切削溶液として使用する場合、切削面の表面層における清浄度が高いこと、切削面の表面に薄い不動態皮膜(Al_2O_3)を形成することができることを判断でき、電解還元水は清浄度が高く要求されている精密機器の切削加工に応用できると言える。

3・1・2 加工面の表面あらさおよびミクロ的形狀

加工面の表面あらさRzについての測定結果を図6に示す。Raは同様の傾向になっているので図示を省略する。切込み量が0.5mm, 1.0mmで小さいとき、電解還元水による切削面と乾式切削面が同程度であるが、切込み量が1.5mm以上になると、電解還元水による切

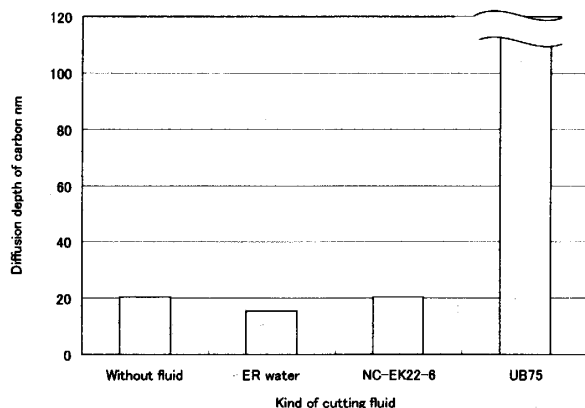


Fig.5 The relation between diffusion depth of carbon and cutting fluid

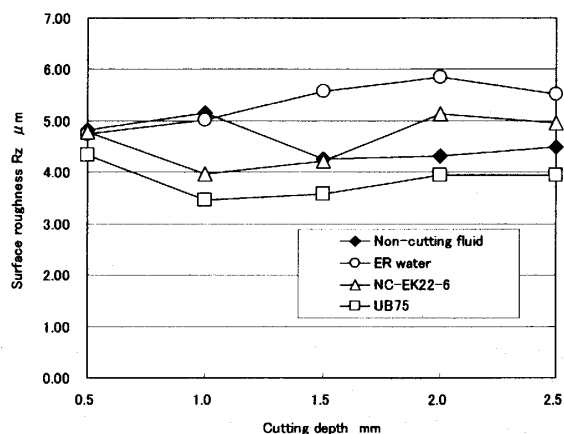


Fig.6 The result of measurement of the surface roughness

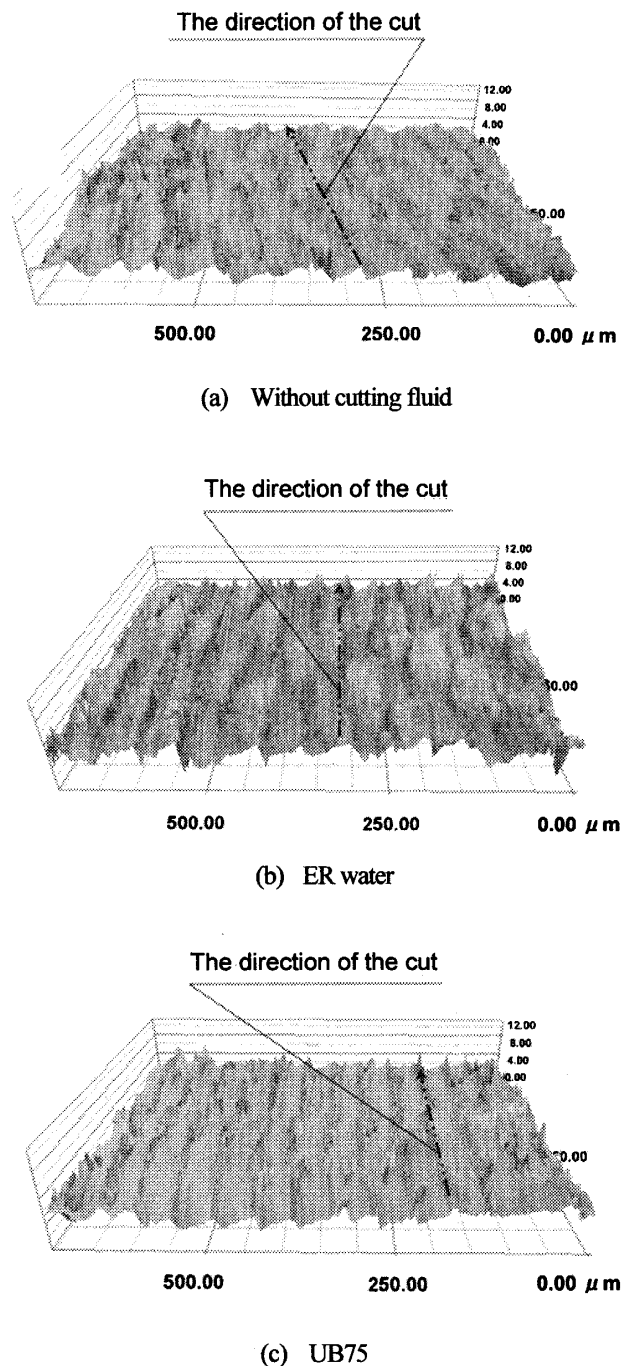


Fig.7 Micro shape on cutting surface

削面はもっとも大きく、そのつぎは水溶性切削油剤 NC-22EK-6 および乾式切削であり、不水溶性切削油剤 UB75 による切削面はもっとも小さくなっている。

切削面のミクロ的な形状についての測定結果を図 7 に示す。同図(a), (b), (c)はそれぞれ乾式切削方式、電解還元水および不水溶性切削油剤 UB75 による切込み量 2.0mm の切削面に関するものであり、水溶性切削油剤 NC-22EK-6 による切削面は電解還元水と同様の傾向になっているので省略する。

加工面のミクロ的な形状測定の結果から次のことが言える。どちらの切削面においても、切削方向において約 $350\ \mu\text{m}$ から $400\ \mu\text{m}$ の周期で凹凸が発生している。また、乾式および UB75 による切削面と比べ、電解還元水による切削面の高さの変動幅が大きくなっている。エンドミルの回転速度および直径から、加工面の高さにおける変動の周波数が約 5200Hz から 6000Hz となっていることを算出できる。凹凸の周波数より、切削方向における高さの変動は、被削材への切込みにおける四つのエンドミル刃先の位相差によるものではなく、加工システムの固有振動によるものであると判断できる。電解還元水と比べ、乾式切削面における高さの変動が小さくなっているのは、切削温度 (3.2 切削温度の測定結果に述べる) に起因していると考えている。電解還元水と比べ乾式切削の温度が高く、被削材の刃先の部分が塑性変形しやすくなるため、加工システムの固有振動による被削材の弾性変形量が小さくなる。加工システムの固有振動による被削材の弾性変形は振動方向が変わるたびに発生したり消失したりするため、加工面の向き方向における微細な変化に影響を与え、切込み深さの変動原因、すなわち加工面における凹凸の発生原因となる。また、加工面の向き方向における変化は被削材の弾性変形量に比例し大きさが変化するため、電解還元水と比べ弾性変形量の小さい乾式切削面における凹凸の高さ変動幅、言い換えれば表面粗さの値が小さくなる。UB75 による切削面は、切削温度が高いうえ、潤滑作用が充分あるため、高さの変動幅が小さくなっていると考えている。これは表面あらさの測定結果と一致している。

このことより、加工部品が小さいとき、電解還元水による切削面の表面あらさ値が大きくなる可能性があると言える。

3・2 切削温度の測定結果

図 8 に切削加工時の温度センサの出力波形を示す。同図(a), (b), (c)はそれぞれ乾式、電解還元水および不水溶性切削油剤 UB75 による切削加工の温度変化である。水溶性切削油剤 NC-22EK-6 の切削温度は電解還元水とほぼ同様なので省略する。乾式切削を行うときの切削温度はもっとも高く、そのつぎは不水溶性切削油剤 UB75、切削温度がもっとも低くなっているのは電解還元水である。この実験結果より電解還元水は優れた冷却作用があると言える。

3.3 工具刃先の摩耗

エンドミル刃先のマイクロスコープ写真を図 9 に示す。同図(a), (b)はそれぞれ乾式切削および電解還元水による切削加工に使用したエンドミルである。切削油

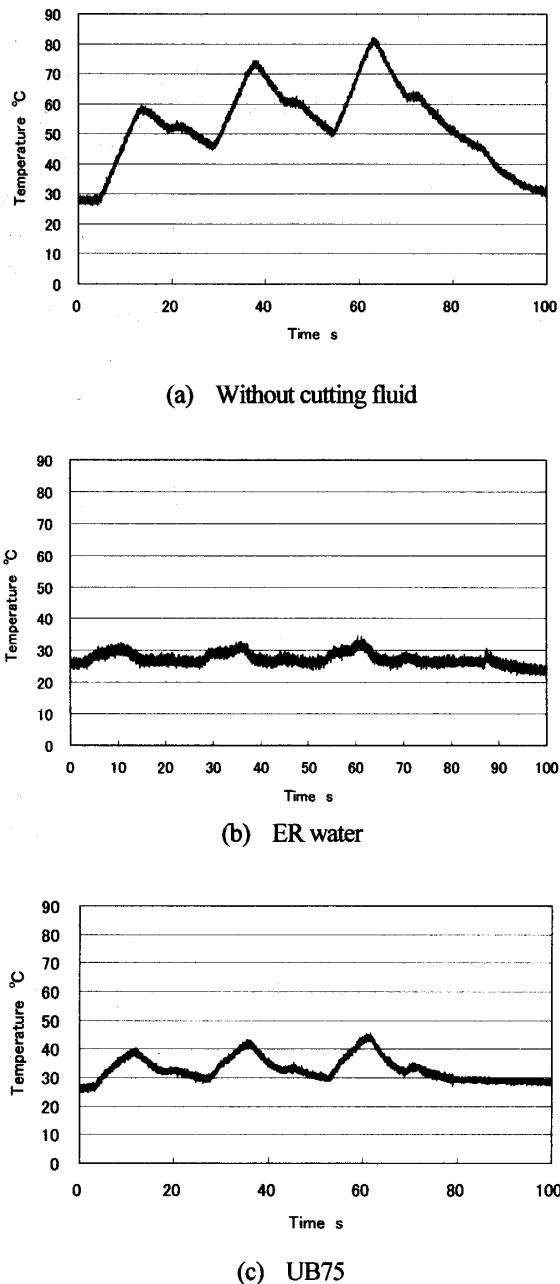
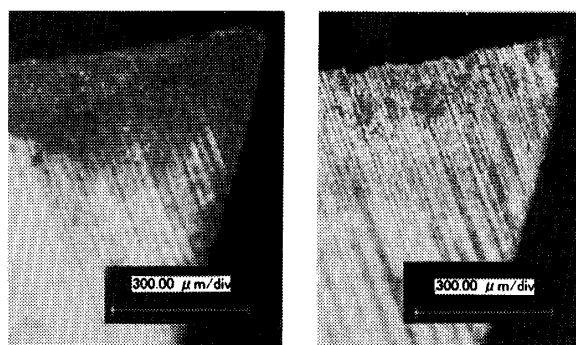


Fig.8 Results of measurement about cutting temperature



(a) Without cutting fluid (b) ER water

Fig.9 The microscope image of the blade

剤による切削加工に用いたエンドミルの刃先は電解還元水の場合とほぼ同様なので省略する。写真に写っている部位はエンドミルの軸方向から見た切れ刃の刃先，すなわちエンドミルのランド部である。また，刃先の側面，すなわち半径方向から見た切れ刃の刃先においては乾式切削および切削溶液による切削加工の間では大きな差異がなかったため，図示を省略する。切削時間が短いため，刃先の摩耗量については，乾式切削，および電解還元水，切削油剤 NC-22EK-6, UB75 による切削の間では大きな差異がなかった。しかし，同図(a)と(b)を比較してみると，乾式切削に用いた工具刃先では凝着が発生し，変色も起こっているが，電解還元水の切削加工に用いた工具の刃先には凝着が発生しなかったことが分かる。言い換えれば，電解還元水は切削油剤と同様に，工具刃先における凝着の発生を抑えることができると言える。

このことより，電解還元水をアルミニウム合金の切削加工に応用する場合，乾式切削と比べ工具刃先の凝着が発生しにくく，工具の寿命を延長できる可能性があると考えられる。

4. 結 言

以上の研究により以下の事項を明らかにした。

(1) 希薄 NaCl 電解還元水を切削溶液として，アルミニウム合金の切削加工に応用できる。電解還元水は切削面の性質に悪影響を与えず，乾式切削および切削油剤と比較し，切削面においては，有機物などの油脂および切削加工の雰囲気からの汚染が少なく，表面清浄度が高い。また，加工部品の表面洗浄や切削油剤の廃棄処理などを必要としないため，切削コストの削減，環境負荷の軽減に期待できる。

(2) 乾式切削および切削油剤と比べ，電解還元水を用いた加工面の表面層においては，炭素による汚染層の深さがもっとも小さい。

(3) 乾式切削に用いたエンドミルの刃先では，凝着が発生し，変色も起こっているが，電解還元水による切削加工に用いた工具刃先は，切削油剤を使用した場合と同様に，凝着も変色も発生しない。

(4) エンドミル加工を行う際，被削材の温度上昇については，電解還元水は水溶性切削油剤と同様のレベルになり，乾式切削並びに不水溶性切削油剤と比べ，被削材の最高温度および温度変動幅がともに小さくなっている。

(5) 切込み量が大きく，被削材のサイズが小さい場合，乾式および不水溶性切削油剤と比べ，電解還元水および水溶性切削油剤による切削面の表面あらさ値

が大きくなる可能性がある。

文 献

- (1) Sato, U. et al., Study on Degreasing by Electrolyzed Reduced Water for Cutting Surface of Carbon steel, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol70, No.2 (2004), pp.281-286.
- (2) Sato, U. et al., Study on Degreasing by Electrolyzed Oxidized Water for Cutting Surface of Carbon steel, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol70, No.5 (2004), pp.635-639
- (3) Sato, U. et al., Ultra-Precision Washing of Silicon Wafer Using Electrolyzed Water, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol71, No.6 (2005), pp.756-761.
- (4) Sato, U. et al., End Milling of Carbon Steel Using Electrolyzed Reduced Water, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.710 (2005), pp.3074-3080.
- (5) Water Seminar Episode, the Basics of Overacidity Electrolyzed Water (in Japanese), *Ohmsha*, (1998)pp.68
- (6) Sato, U. et al., Influence of Dilute NaCl Electrolyzed Water on Character of Al-Mg Alloy Cutting Surface, *Journal of Japan Society for Precision Engineering*, Vol70, No.12 (2004), pp.1510-1515.
- (7) M.Pourbaix: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution, *NACE international* (1974)168.