

電解還元水を用いたステンレス鋼のエンドミル加工*

佐藤 運海^{*1}, 竹ノ内 敏一^{*2}, 原 宏^{*3}
山崎 隆夫^{*4}, 若林 信一^{*2}

End Milling of Stainless Steel Using Electrolyzed Reduced Water

Unkai SATO^{*5}, Toshikazu TAKENOUCHI, Hiroshi HARA,
Takao YAMAZAKI and Shin-ichi WAKABAYASHI^{*5} Faculty of Education, Shinshu University,
6 Nishinagano, Nagano-shi, Nagano, 380-8544 Japan

This paper describes development of end milling of stainless steel by electrolyzed reduced water of dilute sodium chloride solution, instead of conventional cutting with cutting fluid which is not environmentally consciousness. First, experimental equipments were built with a machining center, cutting fluid supply system made from the bath pump, temperature sensor and temperature recorder etc., and end milling processing of stainless steel was performed using electrolyzed reduced water of dilute sodium chloride solution and conventional cutting fluid (water solubility and no water solubility) respectively. Next, measured surface roughness, evaluated surface deterioration layer, temperature change of work piece and wear state of end milling. As the results of all evaluations above-mentioned, there is no enormous discrepancy between the end milling using electrolyzed reduced water and that of conventional using cutting fluid. It is supposed electrolyzed reduced water instead of cutting fluid is environmentally consciousness process.

Key Words: Cutting Fluid, Cutting Temperature, Surface Roughness, Tool Wear, Affected Layer, Electrolyzed Reduced Water, End Milling, Stainless Steel

1. 結 論

ステンレス鋼は延性, じん性に富み, 強度, 耐摩耗性が高いなどの良好な機械的性質を有するうえ, 耐食性に極めて優れているため, 化学プラント, タービンプレートから建築, 車両, 家庭用品まで数多くの分野においては必要不可欠な材料となっている。

鉄鋼材料と同様に, ステンレス鋼材質の機械部品, 精密部品も切削加工などによる粗加工, 仕上げ加工などの加工工程を経て, 機械装置に組み込まれる。しかし, 炭素鋼などと比べ, ステンレス鋼は, 熱伝導率が低いので, 工具刃先の温度が高くなり, 工具摩耗が激しくなるのみではなく, 加工硬化性が大きく, 構成刃先が発生しやすいので, 良好な加工面も得られにくいなどの特性から, 難削材とされている。現状では, ステンレス鋼の切削加工を行うとき, 工具刃先の冷却および潤滑のため多量の切削油剤を使用している。切削

油剤にはその機能を向上させるために, 硫黄, リン, 塩素などの極圧添加物と防錆剤が含まれており, 作業中にこれらの添加物を含んだミストや煙霧が飛散り, 作業環境を悪化させ, 作業者の健康にも悪影響を与えている。また, 使用後の切削油剤の廃棄溶液処理にも多くの費用がかかっている。環境保護政策の強化にともない, 切削油剤の使用に関する規制は一層厳しくなると考えられる。

著者らは希薄電解質塩の電解水を金属材料, 半導体材料の表面処理に応用する研究を行ってきた¹⁾⁴⁾。希薄 NaCl 電解還元水は鉄鋼材料などを腐食しない¹⁾うえ, 前報²⁾の報告どおりに切削油剤の替りに炭素鋼の切削加工にも応用することが可能である。また, 希薄 NaCl 電解還元水および電解酸化水は強いアルカリ性および酸性を示しているが, 化学薬液と異なって人体および環境に悪影響を与えず³⁾。使用後の廃棄溶液の処理も必要としないため, 環境負荷は極めて低い。そこで, 本研究では, 切削油剤の代わりに電解還元水を用いたステンレス鋼の切削加工法の開発を試みた。まず, マシニングセンタをベースに構築した加工機により, 電解還元水, 水溶性切削油剤および不水溶性切削

* 原稿受付 2005年8月17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(〒380-8553 長野市若里4-17-1)。^{*4} 正員, 長野県工科短期大学校(〒386-1211 上田市下之郷813-8)。

E-mail: unkai@ipc.shinshu-u.ac.jp

油剤を用いてステンレス鋼の切削加工を行い、加工時の被削材の温度を測定した。つぎに切削面のミクロ的な形状、表面あらさの測定、表面層の化学組成の分析および工具摩耗についての評価を行った。加工面の品質向上および工具の摩耗低減においては、電解還元水は切削油剤と同様の機能を持ち、切削油剤として使用できる結果を得たので報告する。

2 実験方法および条件

2-1 実験装置

実験装置のエンドミル加工部、切削油剤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³⁾と同様なので、詳細な記述を省略する。但し、本研究では切削油剤の供給量を 12 L/min、温度波計メモリハイコーダ 8835-01 のサンプリング速度を 100 ms、記録時間を約 3 分 20 秒に設定した。

また、エンドミルも前報³⁾と同様に直径 $\phi 8.0$ mm のスーパーハードエンドミル 4 枚刃 (㈱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 電解還元水をステンレス鋼の切削加工に用いた場合の効果、すなわち加工面の品質と工具の摩耗性を総合的に評価するために、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。以降では、水溶性切削油剤 NC-22EK-6 と不水溶性切削油剤 UB75 をそれぞれ切削油剤 NC-22EK-6 と UB75 を略称する。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鉱油、塩素 (10wt%以上) および硫黄 (1%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

電解還元水中の有害な塩素イオン(Cl)濃度を抑えるために、本研究では 3 槽式の電解水生成装置 (ノフィル社 DDL-3052)⁴⁾ を使用した。電解条件は電圧を 15 V、電流を 30 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) はそれぞれ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、CIC(Chloride Ion Concentration) と SIC(Sodium Ion Concentration) はそれぞれ塩化物イオン濃度とナトリウムイオン濃度である。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。

2-3 実験方法

2-3-1 試料の材質および外形寸法

被削材はステンレス鋼中においても最も切削しにくいオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 にした。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、15 mm おきに 11.5 mm から 17.5 mm までの 5 種類にした。また、試料の固定側の底面から 5 mm の高さの側面に温度センサを装着するために $\phi 1.1$ 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。

表面分析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 5 個の試料を

Table 1 Specific value of electrolyzed water

	ER water	EO water
pH	12.14	2.34
ORP (mV)	-890	1180
EC (S/m)	0.233	0.284
CIC (ppm)	12	220
SIC (ppm)	220	12

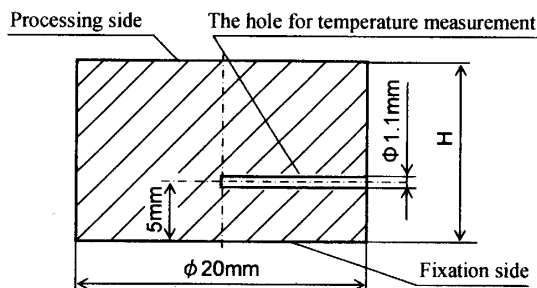


Fig.1 The outside and size of sample

加工した。なお、加工時の切削溶液と加工面との化学反応性、すなわち切削溶液が切削面の腐食、変質に及ぼす影響を確認するための表面分析を考慮して、加工終了後の試料面についてアセトンで洗浄を行い、高纯净度にした。切削加工を行うときの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。

2・3・3 加工面の評価

(1) 加工面のミクロ的形狀および表面あらさ

各切削溶液が加工面に及ぼす影響を調べるために、まず、工具と加工面との間の摩擦状況や、工具刃先の食込みによる被削材の変形状況を反映している加工面のミクロ的な形状について、レーザ 3D 測定器 (㈱キーエンス VK-9500) を用いて測定した。測定範囲は約 $700\text{ }\mu\text{m} \times 700\text{ }\mu\text{m}$ で、切削痕を強調するために縦方向におけるグラフの表示を 10 倍に拡大した。つぎに、表面あらさ測定器サーフテスト (ミットヨ㈱ SV414) を用いて、切削面の表面あらさ Ra および Rz を測定した。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。

(2) 加工面の表面層における化学組成の変化

切削溶液とする希薄 NaCl 電解還元水がステンレス鋼の加工面との化学反応性や加工面の汚染に与える影

響などを調べるために、各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, 以下はオージェ分析と略称する) による表面と深さ方向の元素分布分析 (Physical Electronics Inc 社製 Model 680) を行った。なお、分析エリアは約 $120\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ である。オージェデプスプロファイル分析について、イオン入射方向と加工面の法線方向との角度は 30° 度、スパッタ速度は 1.36 nm/min (SiO_2 膜換算値) となっている。

2・3・4 切削温度の測定

ステンレス鋼の切削溶液として使用する場合、十分な冷却作用が要求される。電解還元水の冷却作用を確認するために、各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 工具摩耗量についての評価

電解還元水を用いたエンドミルの刃先の摩耗状態を評価するために、マイクロスコープ (㈱キーエンス VHX-200) により、各切削溶液を用いたエンドミルの 4 枚の刃先について摩耗量を測定し、その平均値を求めて比較を行った。

3. 実験結果および考察

3・1 切削面の評価結果

3・1・1 ミクロ的な形状と表面あらさ

切込み量が 2.5 mm の切削面についてミクロ的な形状を測定した結果を図3に示す。その他の切込み量の切削面については同様の傾向になっているので図示を省略する。同図(a), (b), (c)はそれぞれ電解還元水、切削油剤 NC-22EK-6 および UB75 を用いた加工面である。この測定結果より次のことが言える。まず、図3(a)の電解還元水を用いた切削面においては、測定エリアの左下と右上の対角線上に切削痕になる山および谷が各 15 個程度顕著に現れていることに対して、同図(b), (c)の切削油剤 NC-22EK-6, UB75 による切削面においてはその傾向が弱くなっている。つぎに、同図(a), (b)と比べ、同図(c)においては、流動的な塑性変形が発生している。

電解還元水を用いた切削面において、切削痕として顕著に現れている山と谷は、エンドミルの送り速度および回転速度から、各刃の切削痕ではなく、エンドミルの一回転によるものであると推測できる。エンドミルの 4 枚の刃先は、軸方向における位置誤差があるため、切込み深さがそれぞれ微妙に異なっている。最も切込み量が多い刃先の切削痕は谷の部分、最も切込み量が小さい刃先の切削痕は山の部分となる。また、

Cutting fluid	Electrolyzed reduced water NC-22EK-6 UB75
Flow rate of cutting fluid	1.2 L/min
Material of samples	SUS304
Revolution speed of tool	1000 rpm
Feed speed of tool	60 mm/min
Cutting time	200 s (1 sample)
Depth of cut	0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm

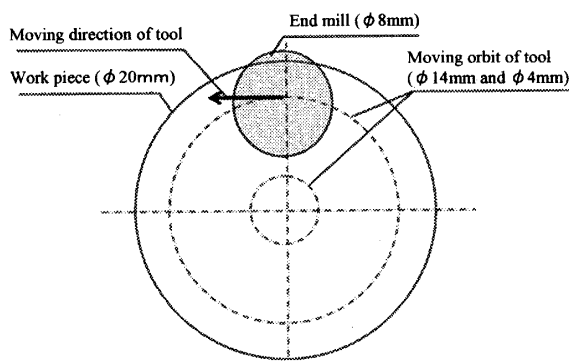


Fig.2 The relation between work piece and tool

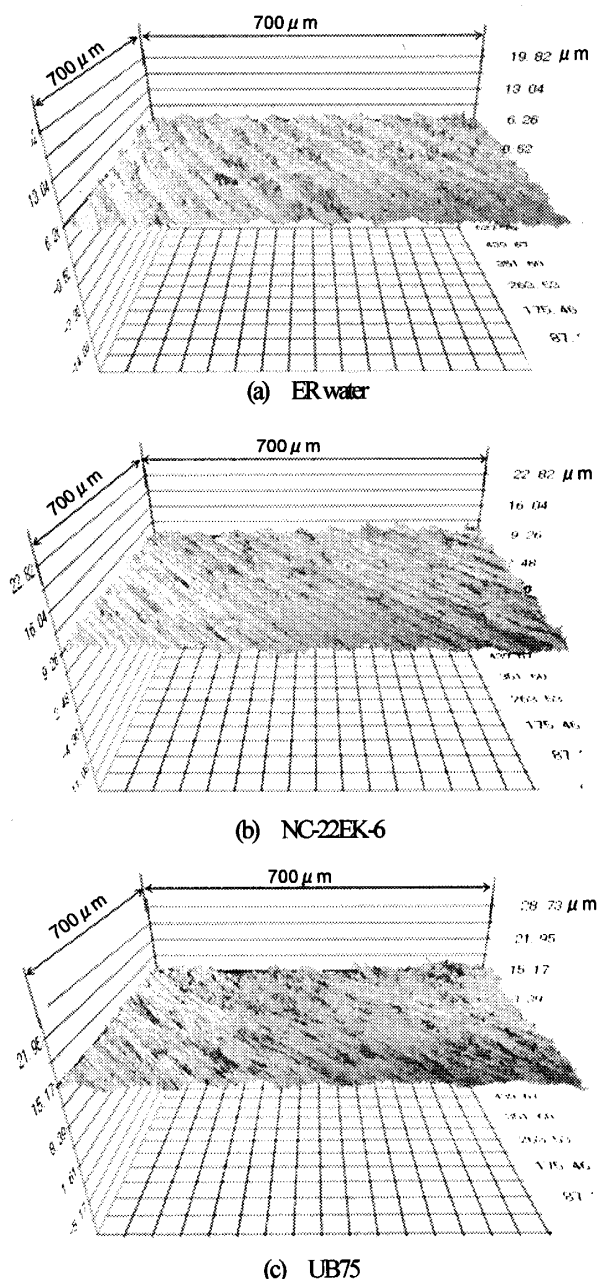


Fig.3 Microshape on cutting surface

電解還元水の潤滑作用が不十分で、切込み量が多い刃先は、直前の切込み量が小さい刃先の切削痕をこすって削っていくため、切削面に山と谷が顕著に現れていると考えている。これに対して、切削油剤 NC-22EK-6 および UN75 は潤滑作用があり、切込み量が多い刃先は切込み量の小さい刃先の切削痕をこすらず、各刃先の切削痕がわずかながら残っているため、切削面に山と谷が顕著に現れなかったと考えられる。電解還元水および切削油剤 NC-22EK-6 と比べ、切削油剤 UB75 による切削面に流動的な塑性変形が顕著に発生しているのは不溶性切削油剤の冷却作用が不十分であり、被削材の温度が高すぎてバニッシ作用など

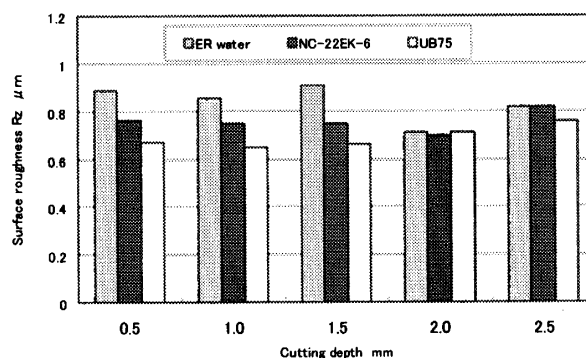
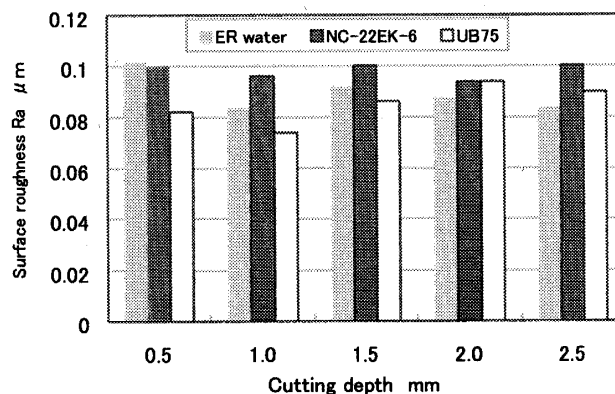


Fig.4 Measurement results of surface roughness

による塑性変形が発生しやすくなったためと思われる。

このことより、切削油剤と比べ、電解還元水を切削溶液とする場合、工具刃先の移動軌跡が切削痕に顕著に現れると判断できる。

切削面の表面あらさについての測定結果を図 4 に示す。同図(a), (b)はそれぞれ Ra および Rz に関するものである。図 4(a)の Ra については、切込み深さによってばらつきはあるが、全体的に言えば、電解還元水による切削面は不溶性切削油剤 UB75 と同程度であり、水溶性切削油剤 NC-22EK-6 と比べ小さい値になっている。これはそれぞれの切削溶液の特性に起因していると考えている。電解還元水と比べ、NC-22EK-6 を用いた場合は、潤滑作用があるため、切込み量が多い刃先の切削痕をこすることがなく、各刃先の切削痕が顕著に現れるため、Ra が大きくなる。また、UB75 と比べ NC-22EK-6 を用いた場合は切削温度が低く、バニッシ作用などによる塑性変形が小さいため、Ra の値も大きくなる。同図(b)の Rz について、電解還元水による切削面の値は最も大きく、そのつぎは切削油剤 NC-22EK-6 であり、最も小さくなっているのは UB75 である。これは、切削油剤 UB75 と比べ、電解

還元水および切削油剤 NC-22EK-6 の潤滑作用が弱く、切削面に深い谷などが残っているためである。

表面あらさの測定結果より、電解還元水による切削面の表面あらさ R_a は不水溶性切削油剤による切削面と同程度であり、水溶性切削油剤の切削面より小さくなっていること、 R_z は切削油剤と比べ電解還元水の方がわずかながら大きな値になっていることが分かる。

3・1・2 表面層における化学組成

切込み量 2.5 mm の切削面の表面分析結果のみについて述べる。その他の切込み量の切削面については同様の分析結果になっているので省略する。

オージェスペクトル分析により、切削面における主な検出元素の原子濃度と Fe 元素の原子濃度との比を図 5 に示す。C 元素については、電解還元水による切削面は最も低くなっている。それは、切削油剤 NC-22EK-6 および UB75 と比べ、電解還元水においては油脂をはじめ添加物がないため、切削面を汚染しないためと考えている。O 元素について、電解還元水を用いた切削面においては、わずかながら濃度が大きくなっている。これは切削油剤 NC-22EK-6 および UB75 中に還元剤があり、その還元剤の還元作用によって試料表面層の O 元素を取り出したためである。切削油剤による切削面の S 元素は切削油剤から加工面に付着したものと考えられる。

このことより、切削油剤と比較し、電解還元水による切削面の清浄度が高いと判断できる。

切削面について、オージェデプスプロファイルの分析結果を図 6 に示す。同図(a), (b), (c)はそれぞれ電解還元水、切削油剤 NC-22EK-6 および UB75 によるものである。

まず、C 元素の濃度について図 6(a)の電解還元水による切削面と比べ、同図(b), (c)の切削油剤 NC-22EK-6 および UB75 による切削面においては、表面層および試料の内部深くまで高くなっている。これは切削加

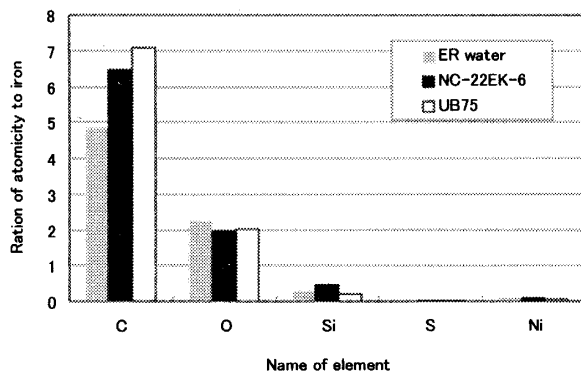
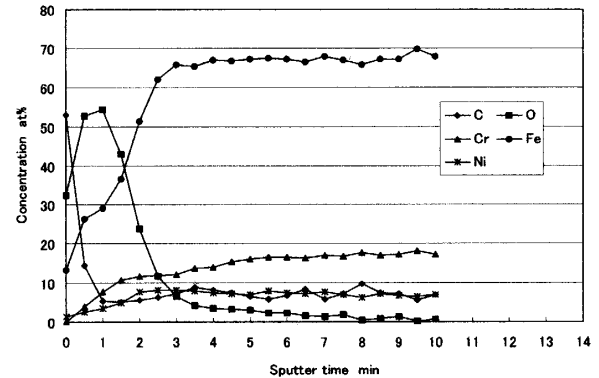
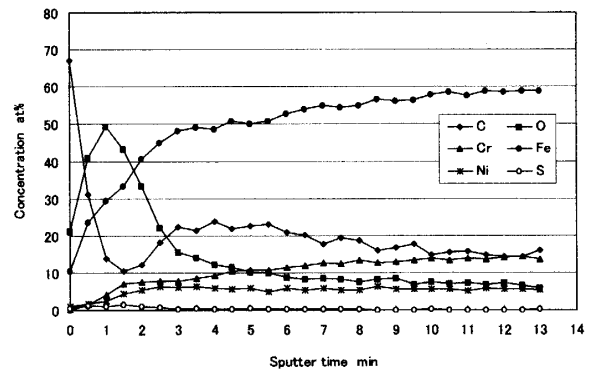


Fig.5 Ratio of the main element in surface layer

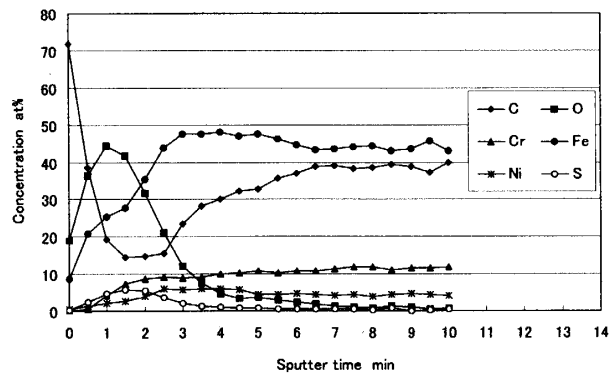
工時試料表面の温度が高くなり、切削油剤中の有機成分が切削面から試料の内部深くまで拡散したためである。このことより、電解還元水を用いた切削面の表面層における清浄度が高いと言える。これはオージェスペクトル分析の結果と一致する。つぎに O 元素の濃度について、分析開始から約 3 分まで、言い換えれば約 4 nm (SiO_2 膜の換算値) の深さまでは、電解還元水による切削面がわずかながら高くなっているが、



(a) ER water



(b) NC-22EK-6



(c) UB75

Fig.6 The results of auger depth profile analysis about cuttingsurface(cuttingdepth25 mm)

4 mm より深くなるとどちらの切削溶液を使用した切削面においても同様のレベルになっている。この程度の O 元素濃度の差異は切削面に影響を与えないと考えている。また、切削加工時の表面層における高温化による酸化の高速化と切削溶液の還元作用との総合作用の結果、どちらの切削面においても O 元素の濃度ピークが表面から約 1 mm の深さに現れた。さらに、同図(b), (c)により、切削油剤中の S 元素が切削面の表面層の内部深くまで拡散され、切削面を汚染していることが確認できる。他の元素については、大きな差異が生じていなかった。

この分析結果より、電解還元水を切削油剤としてステンレス鋼のエンドミル加工を行うとき、切削面の化学組成に影響を与えず、切削面の表面清浄度も高くなると判断できる。

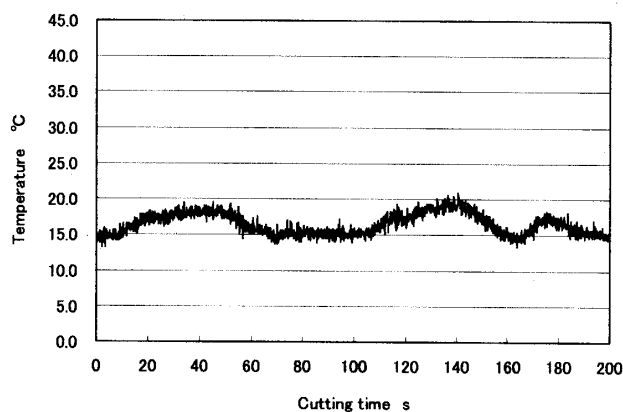
3・2 切削溶液の冷却作用

エンドミル加工時の被削材の温度変化を測定した結果を図 7 に示す。図 7(a), (b), (c)はそれぞれ電解還元水、切削油剤 NC-22EK-6 および UB75 を用いて、切込み量 2.5 mm の試料をエンドミル加工するとき、温度センサ（熱電対）の出力温度波形である。

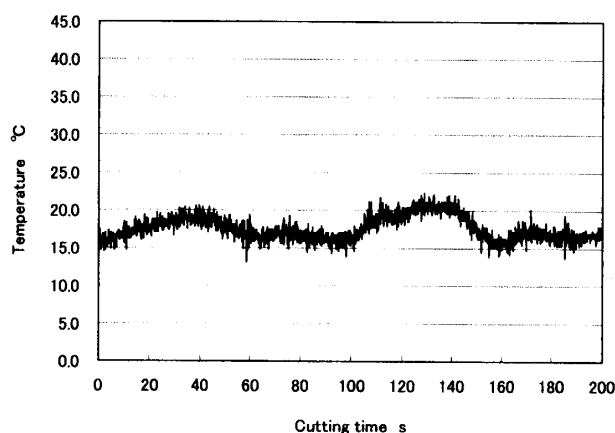
図 7(a)の電解還元水を使用した場合と比べ、同図(b)の水溶性切削油剤 NC-22EK-6 を使用した場合の被削材温度が少しながら高くなっており、同図(c)の不水溶性切削油剤 UB75 を使用した場合はかなり高くなり、その温度の変動幅も大きくなっていることが分かる。このことより、希薄 NaCl 電解還元水は水溶性切削油剤 NC-22EK-6 の同等以上の冷却作用があり、不水溶性切削油剤 UB75 より冷却作用が優れていると言える。ステンレス鋼の熱伝導率が低く、切削加工するとき工具刃先の温度が高くなりがちであり、電解還元水を切削溶液として使用すれば、被削材および工具刃先の温度上昇を抑えることができ、工具摩耗の軽減、熱膨張による加工部品の寸法誤差および形状誤差の低減が期待できると考えられる。

3・3 エンドミルの摩耗

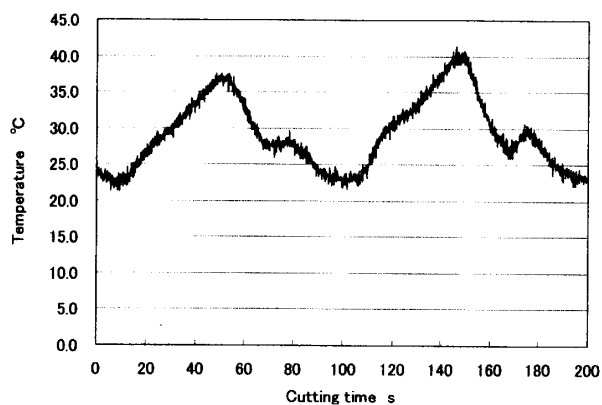
図 8(a), (b), (c)にそれぞれ電解還元水、切削油剤 NC-22EK-6 および UB75 を用いて加工を行うとき、使用したエンドミルの最も摩耗量が多い刃先のマイクロスコブ写真である。写真に写っている部位はエンドミルの回転軸方向から見た切れ刃の刃先、すなわちエンドミルのランド部である。また、刃先の側面、すなわち半径方向から見た切れ刃の刃先においては大きな差異がなかったため、図示を省略する。同図(a)に示すように、使用前および使用後のエンドミルの各刃先の長さである S の値を測定し、その減少量を刃



(a) ER water



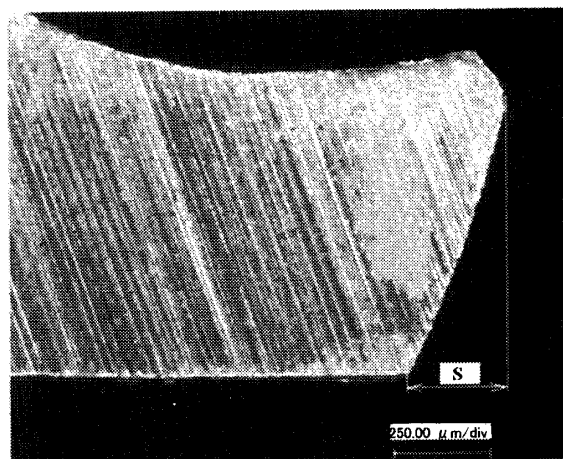
(b) NC-22EK-6



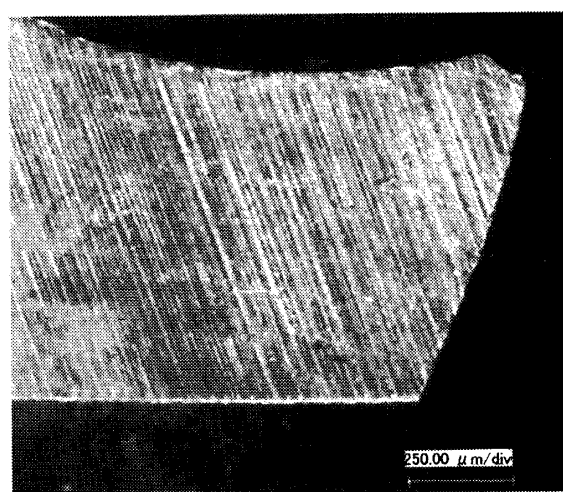
(c) UB75

Fig.7 Measurement results of cutting temperature
(cutting depth 2.5 mm)

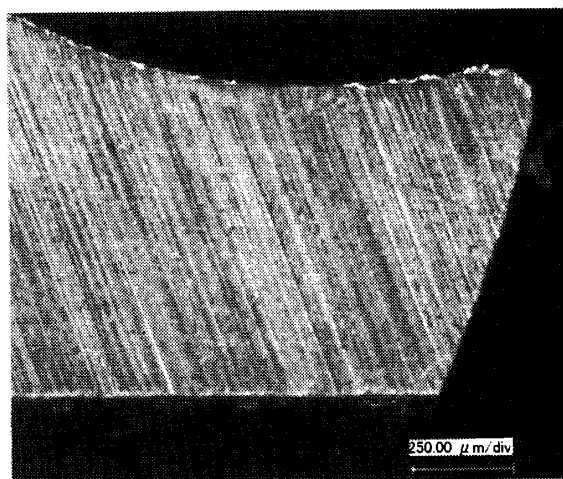
先の摩耗量として評価した。電解還元水、切削油剤 NC-22EK-6 および切削油剤 UB75 を使用したエンドミルについて、刃先摩耗量を測定した結果から求められた 4 枚の刃先摩耗量の平均値はそれぞれ 99 μm , 97 μm および 94 μm となっており、電解還元水を用いたエンドミルの摩耗量が最も大きく、そのつぎは水



(a) ER water



(b) NC-22EK-6



(c) UB75

Fig.8 Measurement results of wear-out distance in tip of the blade

溶性切削油剤 NC-22EK-6, 最も小さくなっているのは不水溶性切削油剤 UB75 である。これは切削溶液の

潤滑作用の大きさ順位と一致している。しかし、三者の間では大きな差異があるとは言えない。切削溶液から切削工具の刃先摩耗性に与える影響の要因は主に切削溶液の潤滑作用と冷却作用である。潤滑作用は工具刃先と加工面および切りくずとの間の摩擦を軽減し、工具の摩耗速度を抑えている。冷却作用は工具刃先の温度上昇を抑制し、工具刃先を軟化させず、潤滑作用と同様に工具の摩耗速度を低減できる。電解還元水は潤滑作用が不十分であるが、冷却作用が優れているため、その総合作用の結果、工具刃先の摩耗量は切削油剤を使用する場合と比べ大きな差異がなく、ステンレス鋼の切削加工に十分に適用できると考えている。

以上の結果より、希薄 NaCl 電解還元水を切削溶液として、ステンレス鋼の切削加工に適用する場合は、水溶性切削油剤および不水溶性切削油剤と比較し、加工面のミクロ的な形状と表面あらさにおいては大きな差異がなく、加工面の表面層における化学組成が同様になっているうえ、清浄度が高くなっていることが分かる。また、電解還元水を用いた被削材の温度上昇が小さく、工具刃先の摩耗性についても大きな差異がないため、精密部品の切削油剤による表面汚染の防止、切削油剤による環境負荷の軽減、切削コストの削減および作業者の健康を守るなどの観点から電解還元水を難削材であるステンレス鋼の切削溶液として使用する価値が大きいと判断した。

4. 結 言

以上の研究をまとめると次のようである。

(1) 希薄 NaCl 電解還元水は、切削油剤の代わりにステンレス鋼(SUS304)のエンドミル加工に適用することが可能である。切削油剤と比較し、電解還元水は切削面の性質に大きな影響を与えず、表面層における有機物(C 元素)の汚染が少なく、表面清浄度が高く要求される精密機器部品の切削加工に適切である。また、加工品の表面脱脂洗浄や切削油剤の廃棄処理などを必要としないため、切削加工コストの削減、環境負荷の低減に期待できる。

(2) 電解還元水の潤滑作用が不十分のため、工具刃先の移動軌跡が切削面に転写しやすく、切削油剤と比較し、表面あらさ R_z の値がわずかながら大きくなっている。しかし、表面あらさ R_a の値は切削油剤(水溶性および不水溶性)を使用する場合とほぼ同様のレベルになっている。

(3) 電解還元水を用いた切削面の表面層における化学組成は、切削油剤を使用する場合とほぼ同様であるが、切削油剤と比べ、電解還元水による切削面においては

有機物の汚染が少なく、表面清浄度が高い。

(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、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) エンドミルの刃先の摩耗量については、電解還元水、水溶性切削油剤および不水溶性切削油剤の間では、大きな差異がなく、ほぼ同様のレベルになっている。

5. 謝 辞

本研究の試料表面分析について、新光電気工業㈱分析室の阿部美和氏に多大な協力を頂き、ここに謝意を表す。

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., 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Water seminar Episode, the Basics of Overacidity Electrolyzed water (in Japanese), *Ohmsha*, (1998) pp.68.