

電解還元水を用いた炭素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 Carbon 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 carbon 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 carbon steel was performed using electrolyzed reduced water of dilute sodium chloride solution and conventional cutting fluid 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 difference between the end milling process 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, Cutting Temperature, Cutting Fluid, Affected, Layer, Environmental Engineering, Electrolyzed Reduced Water, End Mill Processing, Carbon Steel

1. 結 論

金属材料の切削加工に使用している切削油剤の主な働きは、工具のすくい面または逃げ面の潤滑、工具および工作物の冷却、加工面の保護、そして切りくず排出の促進などであり、加工面粗さの良化、工具寿命の延長、被削材の形状・寸法精度および表面品質の保持などの効果をもたらす。しかし、切削油剤にはその機能を向上させるために、イオウ、リン、塩素などの極圧剤や防錆剤をはじめ様々な添加物が含まれており、作業中これらの添加物を含んだミスト、煙霧などが飛散り作業環境を悪化させている。また、使用後の切削油剤の廃棄処理、加工部品の表面洗浄などに多くの費用がかかっているのも現状である。近年、環境保護政策の強化にともない、切削油剤に関する経費が高くなる一方であり、切削油剤の使用規制がより厳しくなっている地域も多くなっている。

地球環境の保護およびコストの削減などを考慮し、冷風切削やMQL(Minimal Quantity Lubrication: 極微量切削油供給方式による切削加工)などの環境にやさしい金属材料の切削法の開発に関する研究が盛んに行われている¹⁾²⁾。冷風切削では、冷風の温度および圧力を制御すれば、十分な冷却作用を得ることが可能であるが、潤滑作用、加工面の保護および切りくず排出においては限界があり、冷風の製作コスト、供給時の騒音も問題になっている。MQLでは、切削油剤の削減に期待できるが、冷却作用および切りくずの排出などに限界がある。このように、様々な環境に優しい金属材料の切削加工法が開発され、優れた成果を得ているが、未解決あるいは今までの手法では解決できない問題も存在している。しかし、より環境配慮型の金属材料切削法の開発は必要不可欠となっている。

著者らは電解水の特性解明および金属材料の表面処理への応用について検討してきた³⁾⁴⁾。電解還元水は炭素鋼などを腐食しないうえ、優れた冷却特性を持っているため、切削油剤の代わりに炭素鋼の切削加工に応用できる可能性がある。また、電解水は人体および環境に悪影響を与えず⁵⁾、使用後の電解還元水を電解酸化水と混ぜればもとの水になるため、廃棄溶液の

* 原稿受付 2004年11月30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)。^{*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: unkaist@gipnc.shinshu-u.ac.jp

処理を必要としないこと、および切削面の表面洗浄が要らないことから、環境負荷の軽減、さらにコストの削減に期待できると考えられる。そこで、本研究では切削油剤の代わりに、希薄 NaCl 電解還元水を用いて、炭素鋼の切削加工法の開発を試みた。まず、マシニングセンターのヘッドにエンドミルを装着し、バスポンプとホースを用いて電解還元水などの切削溶液の供給システムを作製することにより実験装置を構築した。つぎに、作製した希薄 NaCl 電解還元水および現状の不水溶性切削油剤を用いて炭素鋼の切削加工（エンドミル加工）を行い、加工時の被削材の温度変化を測定した。さらに、切削面の表面あらさの測定、腐食生成物の有無の分析および工具摩耗についての評価を行った。希薄 NaCl 電解還元水は現状の不水溶性切削油剤に近い機能を持ち、炭素鋼の切削溶液として利用できる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

図1に実験装置のエンドミル加工部の外観を示した。加工部は、マシニングセンター（牧野フライス精機株MHNC-44A20）の回転工具軸にエンドミルを装着し、バスポンプ（大宇電子ジャパン株DBP-09）などを用いて切削溶液の供給システムを作製することにより構築した。試料は三つづめ連動チャックによってマシニングセンターのXY軸テーブルに固定されている。工具の回転速度は100rpmから8500rpmまで任意に設定できる。

切削溶液の供給システムに使用しているバスポンプの最大吐出量は約7L/minであり、吐出し口の背圧の増加につれ流量が小さくなる。切削溶液はバスポンプに駆動され、ホースを通して切削面に供給される。なお、本研究では切削溶液の供給量を約0.6L/minに調整した。

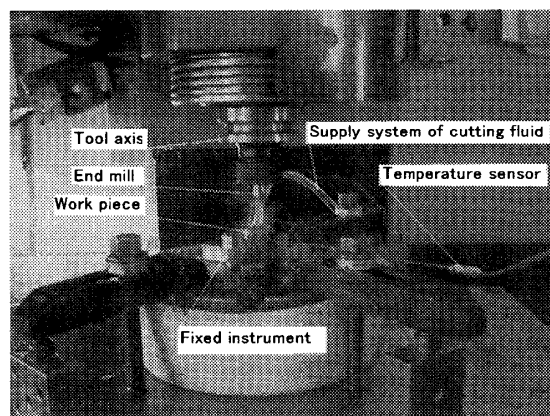


Fig.1 Photograph of experimental device

エンドミルは直径φ8.0mm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。

温度センサはK(CA)タイプのシーズ形熱電対（オムロン株E52-CA15A D=1.8M）を使用した。波形記録計メモリハイコーダ8835-01と電圧・温度ユニット8937（日置電機株）を用いて、被削材の温度変化を記録した。温度測定条件は、記録時間を各試料のエンドミル加工の開始から終了までの全加工時間（約100秒）に、サンプリング速度を50msに設定した。

2・2 切削溶液

電解還元水を炭素鋼の切削加工に用いた場合の効果を総合に評価するために、切削溶液は希薄 NaCl 電解還元水と市販の不水溶性切削油剤（ユシロンカットUB75, ユシロ化学工業株製）を使用した。ここでは、後者を切削油剤 UB75 と略記する。切削油剤 UB75 は冷却作用と潤滑作用にともに優れており、その主な構成成分は硫化鉱油、塩素（10wt%以上）および硫黄（1wt%以上）であり、40℃における動粘度は25.5mm²/sとなっている。なお、JIS K 2241 の分類に該当しない。

2・2・1 希薄 NaCl 電解還元水の作製

小型純水製造装置ピュアポート PP-101 型（柴田科学株）により生成した純水を用いて 0.05wt%NaCl の原液を作製した。その原液をポータブル超酸化水生成器 NKD-700（株アルテック）で電気分解を行うと、カソード側に電解還元水、アノード側に電解酸化水が生成される。なお、電気分解条件は、電圧が100V、電流が0.6A、電解時間が15分とした。0.05wt%NaCl 電解還元水の諸特性値を表1に示す。表中のORP(Oxidation Reduction Potential)は酸化還元電位、EC(Electrical Conductivity)は電気伝導率、CIC(Chloride Ion Concentration)は塩化物イオン濃度である。また、酸化還元電位は銀・塩化銀電極を比較電極に用いた測定値である。

2・3 実験方法

2・3・1 試料の材質および外形寸法

被削材を金属材料の中で最も大量に使用されている炭素鋼（S50C）にした。図2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

Table1 Specific value about electrolyzed reduced water

pH	11.92
ORP	-950mV
EC	0.254 S/m
CIC	220ppm

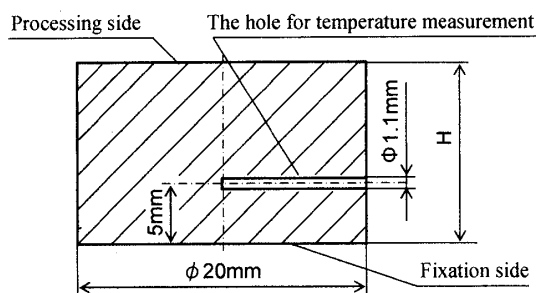


Fig.2 The outside and size of sample

Table2 Experimental condition

Cutting fluid	Electrolyzed reduced water, UB75
Material of samples	S50C
Revolution speed of tool	3000rpm
Feed speed of tool	200mm/min
Cutting time	95sec(1 sample)
Depth of cut	0.5mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm

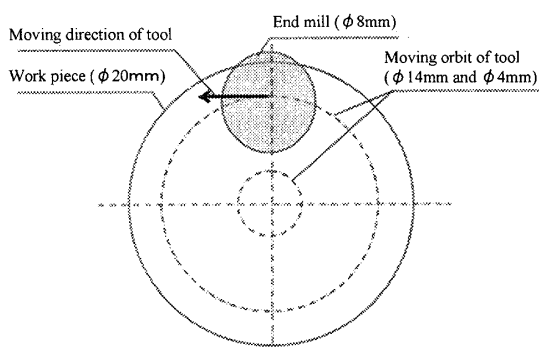


Fig.3 The relation between work piece and tool

であり、エンドミル加工量と、加工面の化学組成などを分析する表面分析装置の試料寸法に対する制限とを考慮し、それぞれ 11.5mm, 13.0mm, 14.5mm, 16.0mm および 17.5mm にした。試料の固定側の底面から 5mm の高さにある $\phi 1.1$ mm の穴は温度センサの装着用である。

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。

加工後の試料高さが 10mm 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、切削溶液毎にエンドミルを一本使用し、切込み量 0.5mm の試料から 2.5mm の試料まで順序に 2 個ずつ計 10 個の試料を加工した。その切削時間は約 16 分である。なお、加工面に腐食生成物の有無

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をアセトンで洗浄し、高純度にした。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 3 に示す。

2.3.3 加工面の評価

(1) 表面あらさ

表面あらさ測定器サーフテスト（ミットヨ株式会社 SV414）を用いて、切削面の表面あらさ R_y 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) 加工面における腐食生成物の有無の確認

切削油剤 UB75 による加工面を基準とし、電解還元水による加工面について、オージェ電子分光法（AES: Auger Electron Spectroscopy）による表面と深さ方向の元素分布分析（Physical Electronics Inc 社の Model 680）（以下はオージェ分析と省略する）および、ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) による表面元素の化学結合状態の分析（島津/Kratos 社 AXIS HS3.5）を行い、腐食生成物の有無、さらに切削面の清浄度、すなわち切削面と切削油剤との反応性による切削面表面層の汚染度合いを確認した。オージェスペクトル分析エリアは約 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ である。オージェデプスプロファイル分析については、イオン入射方向と試料表面の法線方向との角度は 30 度であり、スパッタ速度は約 $481\text{nm}/\text{min}$ (SiO_2 膜の換算値) である。また、ESCA 分析エリアは約 $300\mu\text{m} \times 700\mu\text{m}$ である。

2.3.4 切削溶液の冷却特性についての評価

エンドミル加工を行う際、被削材の温度計測用の穴に配置した熱電対の出力温度波形を用い、切削油剤 UB75 を対照にして、電解還元水の冷却特性を評価した。

2.3.5 工具摩耗量についての評価

各切削溶液に用いたエンドミルの刃先の摩耗状態について、マイクロスコップを用いて確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 切削面の評価結果

3.1.1 表面あらさ

加工面の表面あらさ R_y についての測定結果を図 4 に示す。図中の ER water (Electrolyzed reduced water) と UB75 はそれぞれ電解還元水と切削油剤 UB75 を用いたものである。切込み量は 0.5mm で小さい場合、両者はほぼ同様な値になっているが、切込み量が 0.5mm より大きくなると、電解還元水による加工面の表面あらさが大きい値となっている。それは切削油

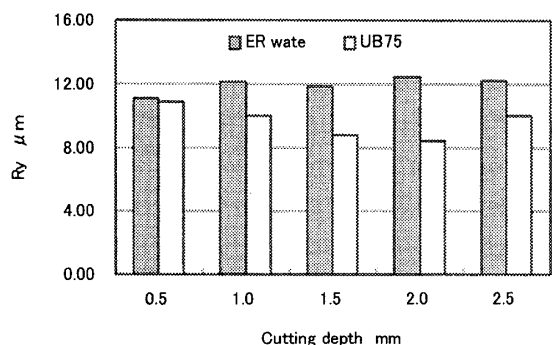


Fig.4 Relation between surface roughness and cutting depth

剤 UB75 と比べ、電解還元水に油分が含まれなく、潤滑作用が弱くなり、エンドミルの逃げ面等と加工面の間では十分な潤滑を得ることができなかったためと考えている。

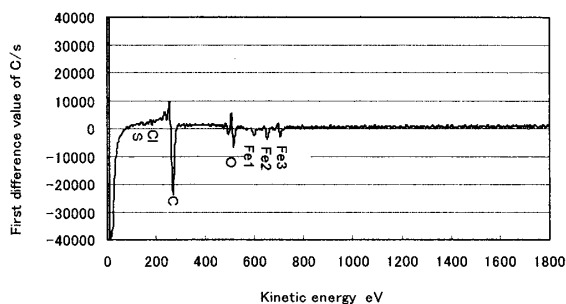
3・1・2 加工面における腐食生成物の有無

(1) オージェ分析結果

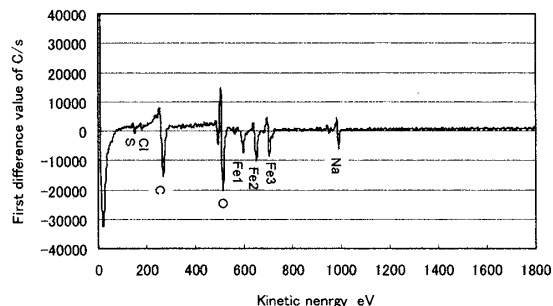
切込み量 2.5mmの加工面について、オージェスペクトル分析を行った結果を図5に示す。切込み量 0.5mm, 1.0mm, 1.5mmおよび 2.0mmの加工面は 2.5mmの場合と同様の傾向になっているので省略する。図5 (a), (b) はそれぞれ切削油剤 UB75 と電解還元水を用いた切削面の分析結果である。同図 (a) 中の塩素は切削油剤 UB75 から、(b) 中の塩素とナトリウムは電解還元水から切削面に付着したものである。

図5 (a) と比べ、同図 (b) 中の酸素強度が高く、炭素強度が低くなっている。電解還元水による加工面の酸素強度が高くなっている理由が二つあると考えられる。その一つの理由は電解還元水の pH および ORP 値によるものである。本実験に使用している電解還元水は pH が 11.92, ORP 値が -950mV(vs.Ag/AgCl) であり、ORP 値を標準電極電位に換算すると約 -750mV (vs.SHE) となる。この pH-ORP においては、電解還元水中の溶存酸素が鉄と結合して Fe₃O₄ などの化合物が生成される⁷⁾。もう一つの理由は、切削油剤 UB75 中に添加した防錆剤の還元作用により、切削油剤による加工面の酸素強度が低くなったことである。炭素強度が低くなっているのは、切削油剤 UB75 による加工面と比較し、電解還元水を用いた加工面は切削油剤などの有機物に汚染されなく、清浄度の高い加工面になっているためと考えている。

電解還元水を用いた切削試料の深さ方向における元素分布の変化を調べるために、オージェデプスプロファイル分析を行った。切込み量が 2.5mmの加工面についての分析結果を図6に示し、その他の切込み量の

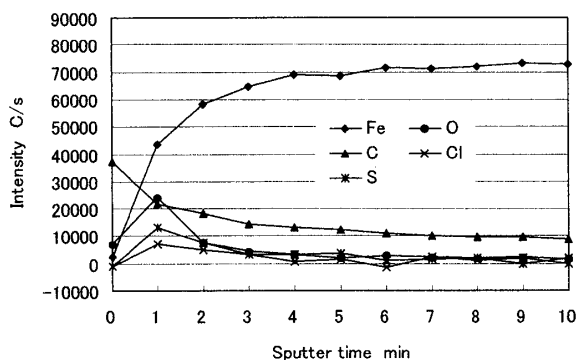


(a) UB75

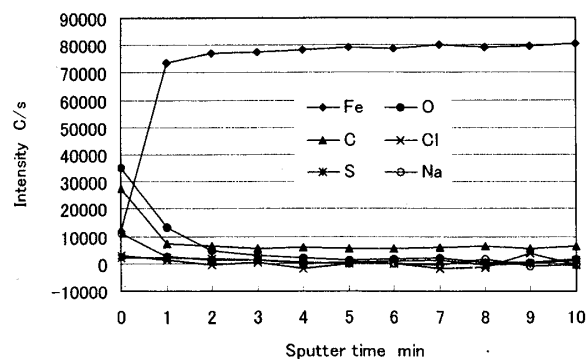


(b) ER water

Fig.5 The results of auger spectrum analysis about cutting surface (cutting depth 2.5mm)



(a) UB75



(b) ER water

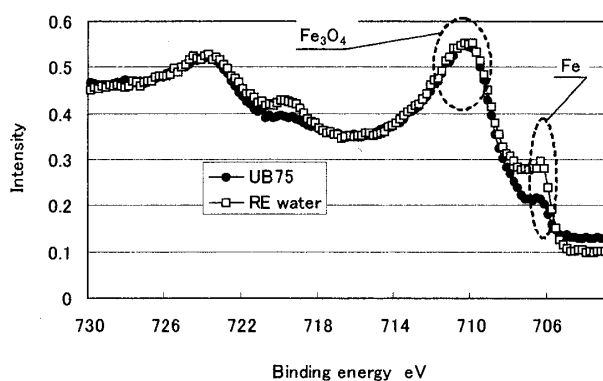
Fig.6 The results of auger depth profile analysis about cutting surface (cutting depth 2.5mm)

試料に関する分析結果は 2.5mm の場合と同様なので図示を省略する。図 6 (a), (b) はそれぞれ切削油剤 UB75 および電解還元水を用いた加工面の分析結果である。同図 (a) と比べ同図 (b) について次のようなことが言える。まず、O 元素の強度について、表面層においては、電解還元水による加工面の方が高く、分析開始から 1 分間の時点では、すなわち表面からの深さが約 4.16nm (SiO_2 膜の換算値) になると、切削油剤 UB75 による加工面の方が高くなり、その後、両者がほぼ同様のレベルになっている。つぎに C 元素の強度については、電解還元水を用いた試料の内部深くまでは低くなっている。さらに、その他の元素については、両者がほぼ同様なレベルになっている。この分析結果より、電解還元水を切削溶液として使用する場合、炭素鋼切削面に影響を及ぼす範囲は表面から数 nm であり、また、切削油剤と比べ電解還元水を用いた切削面の清浄度が高いと判断できる。

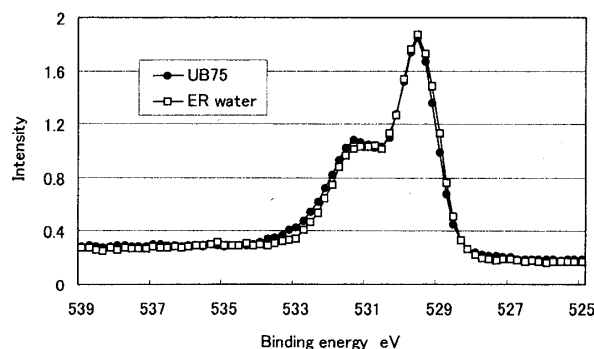
(2) ESCA 分析結果

切削油剤 UB75 と比較して、電解還元水を用いた加工面における主な化学元素の結合状態変化の有無を確認するために、試料表面について ESCA 分析を行い、その結果を図 7 に示す。同図 (a), (b), (c) はそれぞれ Fe 元素($\text{Fe}2p$), O 元素($\text{O}1s$)および C 元素($\text{C}1s$)についてのナノスケャン測定(狭域スペクトル測定)の結果であり、他の元素についてのナノスケャン測定結果の図示を省略する。同図 (a) において、金属 Fe に帰属される 706.4eV 付近のピーク、および Fe_3O_4 に帰属される 710.3eV 付近のピークが出現しているため、切削油剤 UB75 および電解還元水を用いた炭素鋼切削面において Fe 元素の主な化学結合は純鉄 Fe と酸化鉄 Fe_3O_4 になっていると判断できる。また、両曲線の間に大きな差異がないため、電解還元水を切削溶液とした場合、炭素鋼切削面の Fe 元素の化学結合状態に大きな影響を与えないことが言える。同図 (b) において、 Fe_3O_4 に帰属される 530eV 付近のピークが出現しているため、試料表面における O 元素の化学結合状態は主に Fe_3O_4 になっていることが分かる。これは同図 (a) の Fe 元素のナノスケャン測定結果と同様になっている。同図 (c) において、285eV 付近にピークが出現しているため、試料表面の C 元素の主な化学結合は C-C および C-H になっていることが分かる。また、切削油剤 UB75 による切削面の炭素強度が高いので、切削油剤中の油脂(C-H)などが切削面に付着していると推測される。

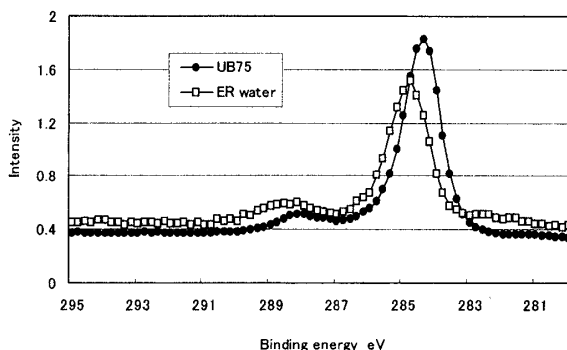
ESCA 分析結果より、希薄 NaCl 電解還元水を切削溶液として炭素鋼のエンドミル加工に応用する場合、



(a) The spectrum of $\text{Fe}2p$



(b) The spectrum of $\text{O}1s$



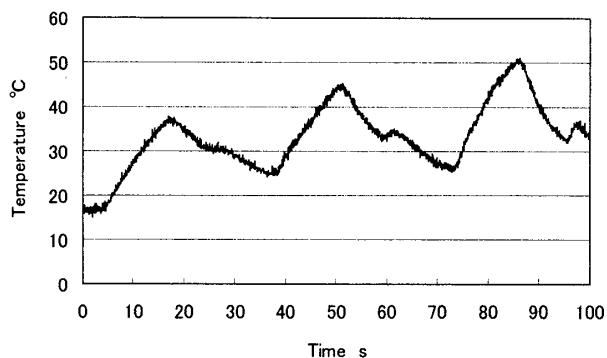
(c) The spectrum of $\text{C}1s$

Fig.7 The results of ESCA about cutting surface (cutting depth 2.5mm)

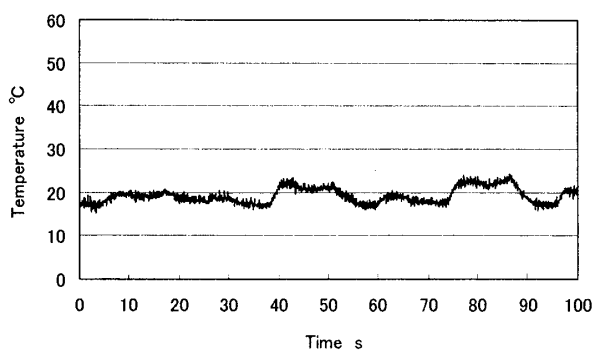
炭素鋼切削面における Fe 元素、O 元素などの化学結合に影響を与えず、切削油剤 UB75 と同様に切削面の主な組成は酸化鉄 Fe_3O_4 および純鉄になっていることが分かる。また、切削油剤 UB75 と比較し、電解還元水を用いた切削面の表面清浄度が高いと判断できる。

3・2 切削溶液の冷却特性

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 8 に示す。図 8 (a), (b) はそれぞれ切削油剤 UB75 と電解還元水を用いて、切込み量 2.5mm の試料をエンドミル加工するとき、温度センサ(熱電



(a) UB75



(b) RE wtaer

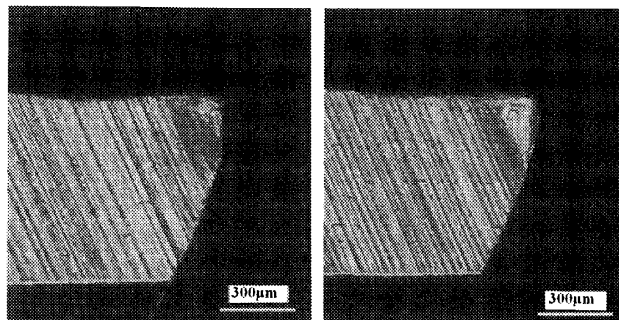
Fig.8 The results of cutting temperature and cutting fluid

対)の出力温度波形である。その他の切込み量の試料は2.5mmと同様の傾向になっているので省略する。

図8(a)と比べ、同図(b)に示している最高温度および温度変動の幅がともに小さくなっていることが分かる。このことより、電解還元水は切削油剤UB75より優れた冷却機能を持っていると言える。すなわち、電解還元水を切削溶液として応用する場合、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推測される。

3・3 エンドミルの摩耗

図9(a), (b)はそれぞれ切削油剤UB75と電解還元水により加工を行うとき、使用したエンドミルの刃先のマイクロスコップ写真である。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の部分である。刃先の摩耗量について、切削油剤UB75の $130\mu\text{m}$ に対して、電解還元水が $107\mu\text{m}$ となり、両者の間では大きな差異が生じなかった。切削溶液から切削工具の摩耗性に及ぼす影響は主に切削溶液の潤滑作用および冷却作用に起因していると考えられる。潤滑作用は工具と被削材および切りくずの間の摩擦を軽減し、工具の摩耗を抑制することができる。冷却作用は切削温度を



(a) UB75

(b) ER water

Fig.9 Relation between tool wear and cutting fluid

低下させ、工具刃先を軟化させないことができ、潤滑作用と同様に工具の摩耗を軽減できる。切削油剤UB75と比べ、電解還元水は潤滑作用が十分ではないが、冷却作用が優れている。潤滑作用と冷却作用の相乗作用の結果、電解還元水を用いたエンドミル刃先の摩耗状態はUB75とほぼ同程度になっていると考えている。

以上の結果より、希薄NaCl電解還元水を切削溶液として、炭素鋼の切削加工に応用する場合、不水溶性切削油剤と比較し、表面あらさ値が多少大きくなるが、切削面の表面層における化学組成および主要元素の化学結合状態がほぼ同様になっていること、電解還元水を用いた切削面の清浄度が高いことが分かる。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炭素鋼の切削溶液として使用する価値が大きいと判断できる。

4. 結 言

以上の研究をまとめると次のようである。

- (1) 切削油剤の替りに、希薄NaCl電解還元水を使用することができる。不水溶性切削油剤と比較し、電解還元水は潤滑作用が十分ではないが、冷却作用が優れており、さらに切削面の脱脂洗浄処理や、切削油剤の廃液処理などを必要としない特性がある。
- (2) 不水溶性切削油剤と比較し、電解還元水を炭素鋼の切削溶液として使用する場合、加工面の表面あらさ値が多少大きくなるが、表面層における化学組成および主要組成元素の化学結合状態は不水溶性の切削油剤を使用する場合と同様である。
- (3) 不水溶性の切削油剤と比較し、電解還元水を用いて切削加工を行う際、被削材の温度が低くなり、その温度の変動幅も小さくなる。
- (4) 電解還元水を用いた切削工具の摩耗状態は、不水溶性切削油剤と同程度である。

(5) 不水溶性の切削油剤と比べ、電解還元水を用いた加工面の表面清浄度が高い。

5. 謝 辞

本研究の試料表面分析について、新光電気工業株式会社分析室の小泉あゆみ氏、阿部美和氏に多大な協力を頂きまして、ここに謝意を表します。

参考文献

- ① 山崎隆夫, 三木一隆, 佐藤重毎, 佐藤元太郎: Ti6Al4V 合金の冷風切削, 軽金属, 53,10(2003)412
- ② 佐藤重毎, 山崎隆夫, 三木一隆, 手塚佳夫, 川久保英樹, 土屋和博, 榊和彦, 清水保雄: AC9B アルミニウム合金の冷風切削, 先端加工, 20,1(2001)42
- ③ 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, 69(2003)1342
- ④ 佐藤重毎, 竹ノ内敏一, 田中博志, 山崎隆夫, 若林言一, 佐藤元太郎: 電解還元水を用いた炭素鋼切削面の脱脂洗浄, 精密工学会誌, 70(2004)281
- ⑤ 竹ノ内敏一, 田中博志, 若林言一: アルカリ性電解水による金属表面の洗浄, 表面技術, 54,11(2003)818
- ⑥ ウォータ研究会編: 強酸性電解水の基礎知識, オーム社(1998)68
- ⑦ M.Pourbaix: Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution, NACE international(1974)312