論　文

電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工法に関する研究
非磁性工作物に対する除去能力および仕上げ面性状

川久保英樹[*1], 佐藤運海[*1], 村田修一[*2]

Study on magnetic field-assisted machining using electrolyzed reducing water-based slurry
Removal capability and surface properties for non-ferromagnetic materials

Hideki KAWAKUBO, Unkai SATO and Shuichi MURATA

磁気援用加工法は，微細凹凸面や自由曲面の仕上げに有効である．そのようななかで，研磨材スラリー供給式磁気援用加工は，常に新しい砥粒が供給されると同時に，切りくずも排出するため，研磨性能が安定しており，長時間の仕上げ加工に適している．一方，電解還元水は，洗浄工程における化学薬液の代替洗浄液として期待されている．洗浄以外にも，切削油剤の代替液として使用した報告があり，電解還元水は研磨材スラリーのベース液として，使用可能であると考えられる．本報では，電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工法の基礎的研究として，非磁性工作物に対する除去能力，および仕上げ面性状について検討した．その結果，金属加工液スラリーを用いた従来法と比較して，除去能率に対する砥粒濃度の影響が小さく，均一な研磨条痕の仕上げ面が得られることを明らかにした．さらに，従来法よりも仕上げ面の圧縮残留応力が大きくなることを明らかにした．

Key words: magnetic polishing, abrasive slurry, polishing performance, electrolyzed reducing water, residual stress

1．緒　言

磁気援用加工法は，強磁性体粒子が磁力線に沿って連結する粒子群（以下，粒子ブラシと呼ぶ．）を研磨工具として使用する加工法である．粒子ブラシは，フレキシブルに変形しながら，磁気吸引力によって加工対象物の表面へ押し付けられて研磨圧力を発生するため，微細凹凸面や自由曲面の仕上げ加工に有効である．これまでの研究から，長時間の磁気援用加工には，研磨材スラリー供給式磁気援用加工法が有効であることが明らかにされている[1)]．著者らは，NC 工作機械との連携による表面仕上げ技術を確立するため，マシニングセンタ用のスラリー吐出式磁気研磨工具（以下，磁気研磨工具と呼ぶ．）を開発し，非磁性工作物における研磨能力について明らかにしてきた[2)]．そして，開発した磁気研磨工具を用いて，微細な凹凸を有する被加工物エッジ部の丸み付け加工への適用を行った[2)]．

一方，電解還元水は，半導体デバイス・精密部品などの洗浄工程において，化学薬液の代替洗浄液として期待されている．これまでに，電解還元水がバフ研磨後の洗浄溶液として使用可能であること[3)]，および電解還元水が高炭素鋼の表面に及ぼす影響[4)]が明らかにされている．また，洗浄以外にも，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エンドミル加工[5)]，電解還元水を用いたシリコンウエーハの精密研磨[6)]に関する報告がある．

このような背景において，本研究では，磁気援用加工法による物理的除去作用と電解還元水の化学的作用とを複合させた精密加工技術の確立を目的としている．本報では，基礎的研究として，電解還元水スラリーを用いて平面磁気研磨を行った．そして，除去能力，および仕上げ面性状について実験的に検討を行い，二三の知見が得られたので報告する．

2．電解還元水スラリー

研磨材スラリーは，砥粒（研磨材）をベース液に混合して作製する．従来の研磨材スラリー供給式磁気援用加工においては，ベース液として市販の水溶性金属加工液（以下，金属加工液と呼ぶ．）を用いてきたが，本研究では電解還元水をベース液として使用し，非磁性工作物である SUS304 材の研磨性能に及ぼす効果を検討した．

前述のとおり，ステンレス鋼のエンドミル加工において，切削油剤の代替として，NaCl 電解還元水が適用可能であることが明らかにされており[5)]，本研究では NaCl 電解還元水をベース液として使用する．

NaCl 電解還元水は，三槽式の電解水生成装置を用いて電解電流値 20A の条件で生成した[7)]．**表 1** に NaCl 電解還元水の基本特性を示す．比較のため，純水の基本特性も記載した．NaCl 電解還元水は，アルカリ性で ORP（酸化還元電位）がマイナスの値を示している．これは，電解還元水生成時に

*1 信州大学教育学部：〒380-8544 長野県長野市西長野 6-ロ
Faculty of Education, Shinshu University
*2 長野県工科短期大学校：〒386-1211 長野県上田市下之郷 813-8
Nagano Prefectural Institute of Technology
〈学会受付日：2016 年 4 月 19 日〉
〈採録決定日：2016 年 7 月 11 日〉

表 1　NaCl 電解還元水および純水の特性値

	NaCl 電解還元水	純水
pH	12.1	6.85
ORP　mV vs.Ag/AgCl	-870	385
EC　mS/ m	211	0.03

表 2　研磨材スラリーおよびゼータ電位の測定値

	電解還元水スラリー	金属加工液スラリー
砥粒	WA#8000	WA#8000
砥粒濃度	0.1 wt%	0.1 wt%
ベース液	NaCl 電解還元水 電解電流値:20A 生成機:三槽式 Pt-Ir 電極	金属加工液 (X-IT MetLube) 界面活性系 純水 30 倍希釈
ゼータ電位	−59mV	−51mV

還元体である水素の一部が溶解したためであり，NaCl 電解還元水の表面洗浄効果 [3]は，この還元力に起因すると考えている．

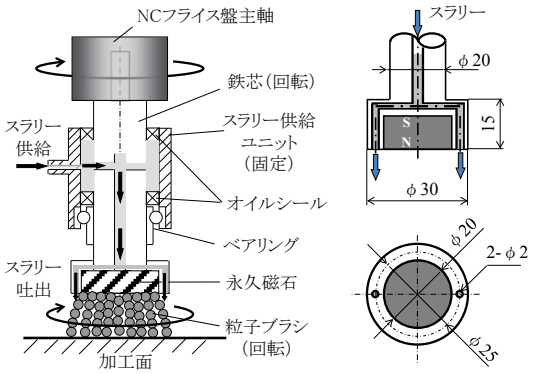
さらに， NaCl 電解還元水は，純水と比較して電気伝導率（EC）が高い特徴を有している．これは，電解還元水の生成時において，NaCl 電解質溶液中の Na+イオンが陰極電解槽に移動したためである [3]．

電解還元水スラリーは，NaCl 電解還元水に WA 砥粒を混合して作製した．一般に，研磨材スラリー中の砥粒の分散性は，仕上げ特性に影響を及ぼすといわれているが，砥粒分散性の指標のひとつとして，ゼータ電位が挙げられる．ゼータ電位の絶対値が大きい場合には，粒子間の斥力も大きくなり，粒子の分散性が高い状態にある [8]と判断できる．

そこで，電解還元水スラリーのゼータ電位について，ゼータ電位測定機（大塚電子製，ELSZ-1000ZS）を用いて測定を行った．比較のため，金属加工液スラリーについても測定した．**表 2** にゼータ電位の測定に用いた研磨材スラリーを示す．

測定の結果，ゼータ電位は電解還元スラリーでは−59mV，金属加工液スラリーでは−51mV であり，両者ともに負の値を示した．そして，ゼータ電位の絶対値は，電解還元水スラリーの方が，わずかに大きいことが明らかになった．このことから，電解還元水スラリーの砥粒分散性は，金属加工液スラリーよりもわずかに高い状態にあると判断できる．

電解還元水スラリーのゼータ電位については，次のように考えている．酸化物表面は，水に接触することで水和を起こして OH 基を有しており，このような状態では分散液の pH 値で表面電位が決定される [9]ことが知られている．高い pH 値では OH 基からの H+の引き抜きで負に帯電することになる [10]．本研究で使用した NaCl 電解還元水も pH12 程度のアルカリであることから，Al_2O_3 砥粒は，負に帯電すると考えられる．そして，負に帯電した Al_2O_3 粒子の周囲には，電解還元水中の Na+イオンが集まり，さらに Na+イオンの周囲に OH-イオンが集まることで，負のゼータ電位が発生すると推察される．



(a)　概略図　　(b)　先端部形状

図 1　スラリー吐出式磁気研磨工具

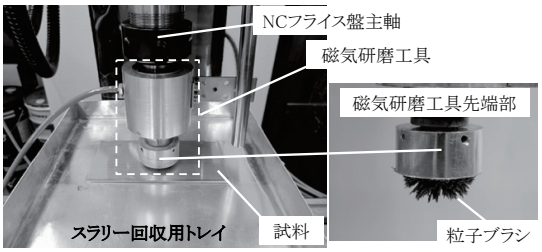


図 2　実験装置の外観

表 3　実験条件

試料	SUS304 No.2B，厚さ:2mm 初期面粗さ:0.11～0.13μm*Ra* (圧延方向に対して直角に測定)
回転数 送り速度 移動量 加工間隙	500 min^{-1} 30 mm/min 60 mm 3 mm
永久磁石	ネオジウム磁石，φ20mm×10mm(0.4T)
強磁性材粒子	ショットピーニング用鋼球: ビッカース硬さ 700 HV 以上，1%C-steel 供給量:4.8　g(加工中の供給なし) 平均粒子径:φ175μm
研磨材スラリー	吐出量:100 mL/min 砥粒:WA#8000 砥粒濃度:0wt%，0.1wt%，1.0wt%，5.0wt% ベース液:　NaCl 電解還元水 電解電流値 20A， 三槽式生成機，Pt-Ir 電極 金属加工液 界面活性系(X-IT MetLube) 純水 30 倍希釈

3. 実験方法

図 1 に磁気研磨工具の概略図と先端部形状を示す．本研究で用いる磁気研磨工具は，先端部の永久磁石外側の二箇所から研磨材スラリーが吐出する構造になっており，研磨能率が低下することなく，長時間の研磨が可能である [2]．本研究では，小型 NC フライス盤へ磁気研磨工具を取り付けて実験を行った．

図 2 に実験装置の外観を示す．NC フライス盤のテーブル上には加工用治具（磁性材）を設置し，その上にスラリー回収トレイ（非磁性材，厚さ 1mm）を取り付ける．試料はスラリー回収用トレイ上に直接取り付けて，研磨実験を行った．工具先端から吐出された研磨材スラリーは，研磨に関与したあと，回収用トレイからタンクへ戻り，再度磁気研磨工具へ循環供給される．

表 3 に実験条件を示す．試料は SUS304（非磁性材）であり，基本的な仕上げ特性を検討するため平面磁気研磨を行った．強磁性材粒子には，供試材として低コストである市販のショットピーニング用鋼球を使用した．砥粒濃度は，これまでの研究 [1]と予備実験から，0wt%から高くしていくと，はじめは研磨量が急激に増加するが，その後は増加割合が徐々に減少し，5.0wt%以上では飽和状態へ変化し始めることが確認されている．本研究では 5.0wt%を上限として，0wt%，0.1wt%，1.0wt%を加えた条件で実験を行った．

平面研磨実験は，磁気研磨工具の 1 回通過を 1 パスとして定義し，移動距離 60mm を往復動作させて，除去量，表面粗さ，表面観察，および表面残留応力を評価した．加工中には，試料の切りくず（非磁性体），および粒子ブラシ自身の削りくず（磁性体）が発生する．本実験装置には，スラリー中の切りくず除去システムは組み込まれていないことから，研磨材スラリーは加工時間 120 分を上限として交換した．また，磁性体の削りくずは，磁気力によって粒子ブラシ内に留まり，加工に影響を及ぼす可能性がある．しかしながら，粒子ブラシ内の切りくず除去は困難であることから，実験条件の 40 パス（加工時間 80 分）を上限として強磁性材粒子を交換した．

4．実験結果および考察

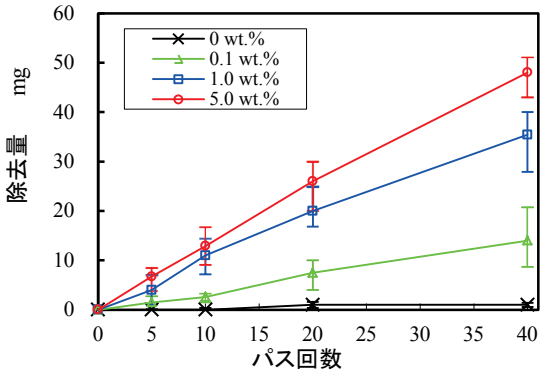
4．1　除去量について

金属加工液スラリーと電解還元水スラリーとを比較するため，砥粒濃度を変化させて研磨実験を行った．**図 3** にパス回数と除去量との関係を示す．図 3(a)は金属加工液スラリーの場合，(b)は電解還元水スラリーの場合であり，3 回の実験の平均値を示した．

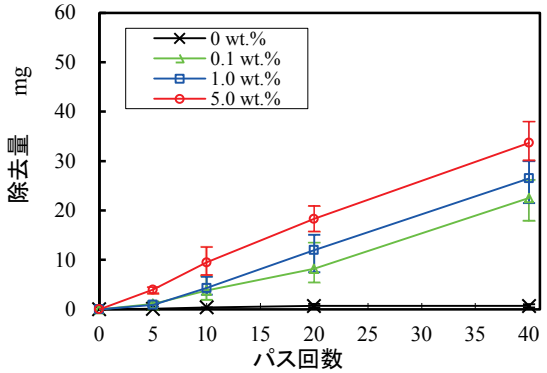
両者ともに研磨材スラリー供給式の磁気研磨工具を使用していることから，各砥粒濃度について，40 パス後（加工時間 80 分）においても極端に除去能力が低下することなく，除去量が得られた．ここでは，砥粒濃度 0wt%の場合も記載したが，両者ともに除去量は 1mg 以下であり，粒子ブラシ（強磁性材粒子）のみでは除去能力が極めて小さいことを示している．

まず，金属加工液スラリー（図 3(a)）について考察する．砥粒濃度が 5.0wt%から少なくなるにつれて，作用砥粒数の減少から全体的に除去量が低下する傾向を示すが，砥粒濃度に対する除去量の変化割合は，比例関係ではない．前述の既報 [1]の場合と同様に，砥粒濃度が 5.0wt%に近づくことで，除去量が徐々に飽和状態へ変化していくためと考えている．

また，20～40 パスの区間において，除去量の増加割合が



(a)　金属加工液スラリー



(b)　電解還元水スラリー

図 3　砥粒濃度，パス回数と除去量との関係

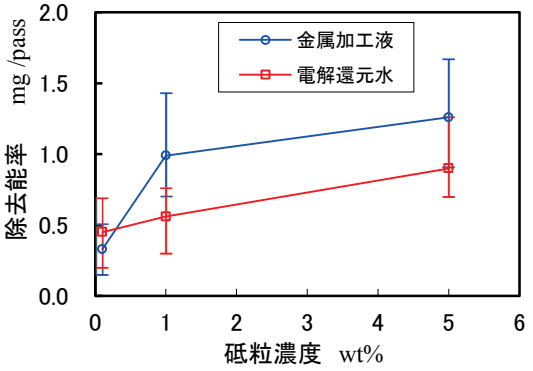


図 4　砥粒濃度と除去能率との関係

わずかに低下する傾向がみられるが，この事象は次のように考えている．前述のとおり，加工時間が長くなると，粒子ブラシを形成する強磁性材粒子が砥粒によって削られ，その削りくず（磁性体）が粒子ブラシ内に残留して目づまり状態になる [1) 2)]ため，除去能力が低下したものと推察される．除去能力の低下については，強磁性材粒子の交換時間（本実験では加工時間 80 分）をより短く設定し，新しい粒子ブラシを形成させることによって解決することができると考えている．

次に，電解還元水スラリー（図 3(b)）については，金属加工液スラリーの場合と同様に，砥粒濃度が低くなると除去量も減少した．また，砥粒濃度 1.0wt%，5.0wt%においては，金属加工液スラリー（図 3(a)）よりも除去量が少ないが，砥粒濃度

表 4　粘度の測定値

純水・ベース液・研磨材スラリー		粘度（測定温度）
純水		0.95 mPa･S（20.9℃）
ベース液	電解還元水	0.96 mPa･S（21.1℃）
	金属加工液(30 倍希釈)	1.03 mPa･S（21.3℃）
電解還元水スラリー(5.0wt%)		1.02 mPa･S（21.1℃）
金属加工液スラリー(5.0wt%)		1.11 mPa･S（22.0℃）

0.1wt%では，除去量が多い結果となった．

この実験結果を考察するため，**図 4** に砥粒濃度と除去能率との関係を示した．これは，図 3 に示した除去量の実験結果について，1 パス当りの除去量を算出して平均値を示したものである．金属加工液スラリーおける除去能率は，砥粒濃度 0.1wt%から 1.0wt%になると大きく変化するが，砥粒濃度 1.0wt%から 5.0wt%になるときは，除去能率の変化が小さくなる．これは，図 3(a)の考察のとおり，砥粒濃度が高い方向へ変化することで，除去能率が徐々に飽和状態へ変化していくためと考えている．

そして，前述のとおり，砥粒濃度 1.0wt%，5.0wt%では，電解還元水スラリーの除去能率は，金属加工液スラリーよりも低いことがわかる．この事象は，次のように考えている．**表 4** に振動式粘度計（CBC 社製，VISCOMATE VM-100A）による粘度の測定値を示すが，ベース液，および研磨材スラリーともに，金属加工液の方が，粘度はわずかに高い．加えて，金属加工液には，油成分の潤滑機能により，砥粒切れ刃の切削性を向上させる効果もある．以上から，電解還元水が油成分を含まないため，粘度および潤滑機能に起因する除去能力が金属加工液スラリーよりも劣り，除去能率が低くなったと考えられる．

一方，砥粒濃度 0.1wt%のように作用砥粒数が少ない条件では，電解還元水スラリーの除去能率は，砥粒濃度 1.0wt%に対して急激に変化することなく，その結果として，金属加工液スラリーをわずかに上回った．この事象は，次のように考えている．前述のとおり，ゼータ電位から判断した砥粒分散性は，電解還元水スラリーの方が，わずかに高い状態にあり，その結果，除去能率が上回ったと考えられる．さらに，これまでに電解還元水には水素ナノバブルが存在することが明らかにされている[3) 11)]が，ナノバブルによる表面洗浄効果も除去能力の向上に関与していると推察される．

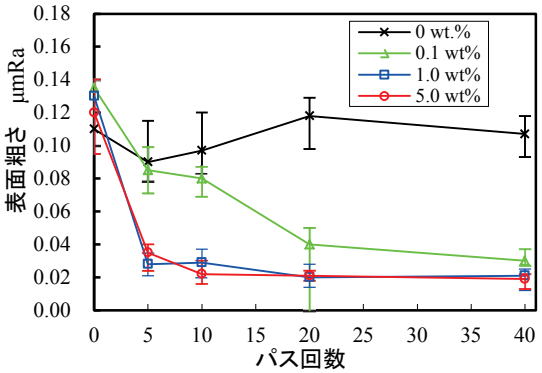
また，本実験範囲における全体的な傾向として，電解還元水スラリーの方が，砥粒濃度の影響が少ない傾向を示している．この事象は，砥粒分散性による除去能力の向上効果が，作用砥粒数の変化の影響を軽減したためと考えられる．

以上の加工特性は，除去能率を管理するうえで有用であり，砥粒使用量の削減にも寄与するものである．

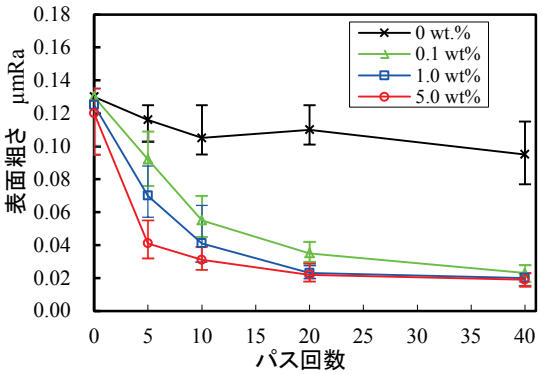
4．2　仕上げ面性状について

4．2．1　表面粗さ

図 5 に砥粒濃度を変化させたときのパス回数と表面粗さとの関係を示す．図 5(a)は金属加工液スラリーの場合，(b)は電解還元水スラリーの場合であり，3 回の実験の平均値を示した．粒子ブラシのみ，すなわち砥粒濃度 0wt%においては，両者ともにそれぞれ平均値が 1.1μmRa，1.0μmRa であり，初期面粗さからの変化は少ない．これは砥粒切れ刃による除去加工が行われなかったためである．



(a)　金属加工液スラリー



(b)　電解還元水スラリー

図 5　砥粒濃度，パス回数と表面粗さとの関係

金属加工液スラリー（図 5(a)）の場合，砥粒濃度 1.0wt%と 5.0wt%において，5 パスまでに表面粗さは急激に減少して，20 パスまでに平均値は 0.02μmRa になり，その後はほぼ一定値を示した．この値は，本実験条件において到達可能な表面粗さであると考えている．

一方，砥粒濃度 0.1wt%の場合は，作用砥粒数が少なく，表面粗さの向上に多くのパス回数が必要であり，40 パス後までに平均値は 0.03μmRa に向上した．1.0wt%と 5.0wt%のように到達表面粗さが 0.02μmRa にならないのは，除去量も少ないことから，前加工面を十分に除去できなかったためといえる．

次に，電解還元水スラリー（図 5(b)）の場合，表面粗さは急激に向上することなく，徐々に減少していく傾向を示した．これは前述の除去量に関連して，金属加工液スラリーの場合よりも，除去能力が低いことに起因している．砥粒濃度 1.0wt%と 5.0wt%では，20 パス後までに，平均値が到達表面粗さの 0.02μmRa に向上し，砥粒濃度 0.1wt%では 40 パス後までに平均値は 0.023μmRa になった．

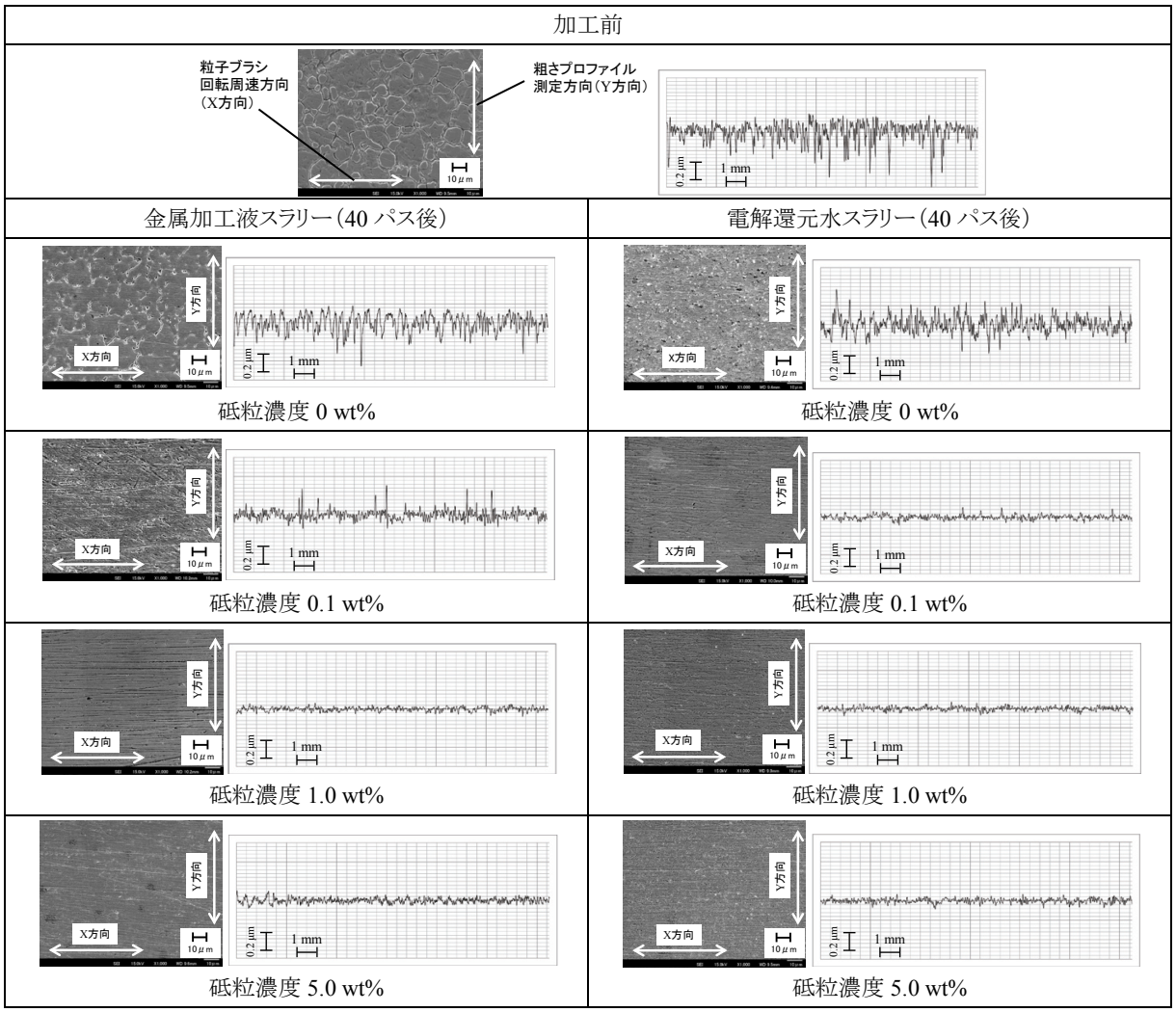


図 6　加工面の SEM 観察像と粗さプロファイル

4．2．2　表面状態の観察

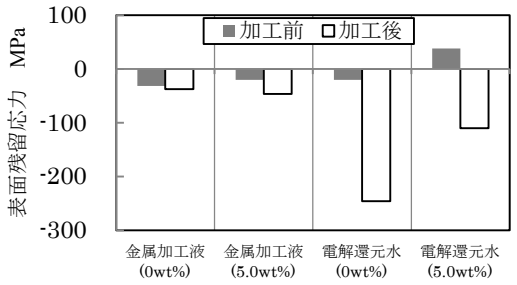
図 6 に加工前と 40 パス後の加工面の SEM 観察像と粗さプロファイルを示す．砥粒濃度 0.1wt%以上にみられる研磨条痕は，粒子ブラシの回転周速方向と同一（以下，X 方向と呼ぶ．）であり，粗さプロファイルは研磨条痕と直角方向（以下，Y 方向と呼ぶ．）に測定したものである．

砥粒濃度 1.0wt%，5.0wt%において，電解還元水スラリーと金属加工液スラリーの両者を比較すると，電解還元水スラリーの方が，X 方向に均一で細かい研磨条痕である．一方，金属加工液スラリーの場合には，部分的に大きな研磨条痕が観察された．この事象は，次のように考えている．前述のとおり，電解還元水スラリーの方が砥粒の分散性が高く，その結果，研磨条痕の細かい仕上げ面が形成されたと推察される．

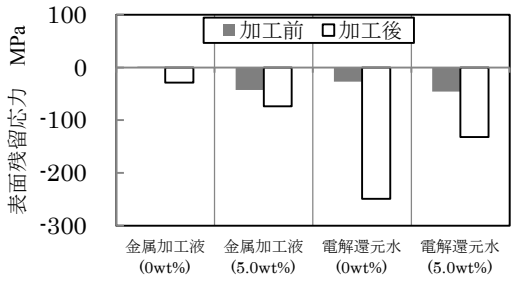
また，砥粒濃度 0.1wt%の電解還元水スラリーでは，作用砥粒数が少ない状態であるものの，電解還元水の砥粒分散効果によって，砥粒濃度 1.0wt%と同程度の仕上げ面に加工されている．一方，砥粒濃度 0.1wt%の金属加工液スラリーは，仕上げ面に凸部が観察され，砥粒濃度 0.1wt%の電解還元水スラリーとの違いが大きい．

次に，粒子ブラシと電解還元水のみ（砥粒濃度 0wt%）について考察する．4.1 節で述べたとおり，切れ刃となる砥粒がないため，除去量はほとんどない状態であるが，粗さプロファイルには，加工前にはなかった凸部が観察され，表面が粗面化していることがわかる．電解還元水は油成分を含んでおらず，加工面の洗浄効果 [5]もあることから，粒子ブラシ（強磁性材粒子）が，加工面に直接接触しながら擦過して，粗面化したものと考えられる．粗面化については，磁気援用加工法が得意とする微細凹凸面や複雑形状部品の仕上げ技術への新しい付与加工技術として，メッキ加工の下地生成など工業的な適用が期待できる．

一方，粒子ブラシと金属加工液のみ（砥粒濃度 0wt%）の場合，粗さプロファイルには加工前と同様に凸部がみられない．これは，金属加工液中の油成分の潤滑作用によって加工面が保護されて，粒子ブラシが加工面に直接接触しなかったためと考えられる．SEM 観察像には，わずかな擦過痕が観察されるが，電解還元水スラリーのような粗面化は観察されない．



(a) X 軸方向



(b) Y 軸方向

図 7　表面残留応力

4．2．3　表面残留応力

図 7 は表面残留応力を測定した結果である．測定は，PROTO 社製 X 線応力測定装置 iXRD を用いた．なお，図 6 と同様に研磨条痕の方向を X 方向，そして X 方向に直行する方向を Y 方向と定義して，二方向の測定を行った．

全体的な傾向として，加工後の表面残留応力は圧縮方向に増加しており，とくに，砥粒濃度 0wt%の電解還元水スラリーにおいて，−250MPa の圧縮残留応力となった．これは，粒子ブラシが表面を押しならすことによるバニシ作用に起因するものと考えられ，0wt%の電解還元水スラリーのように潤滑効果がない場合には，粒子ブラシと加工面との直接接触によって，バニシ作用が大きく表れると推察される．また，砥粒濃度 5.0wt%において，電解還元水スラリーでは，金属加工液スラリーよりも圧縮残留応力が高い値であった．これは，砥粒による微小切削作用と，粒子ブラシによるバニシ作用の両者が混在したためである．すなわち，電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工固有の仕上げ面性状であるといえる．

本研究では，基礎的研究のため平面試料を評価してきたが，以上の実験結果は，粒子ブラシの柔軟性を利用して複雑形状表面に圧縮残留応力を付与する新しい加工技術として応用可能であることを示唆している．

5．結　言

電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工法の除去能力，および仕上げ面性状について，従来の金属加工液スラリーを用いた磁気援用加工法と比較しながら，実験的な検討を行った．得られた結果をまとめると，次のとおりである．

(1) 従来法と比較して，除去能率に対する砥粒濃度の影響が小さい．この特性は，除去能率を管理するうえで有用である．

(2) 砥粒濃度が 1.0wt%，5.0wt%のように高い条件では，従来法よりも除去能率が低くなる．これは，油成分を含まず，粘性や潤滑性が低いためと考えられる．一方，砥粒濃度が 0.1wt%のように低い条件では，砥粒濃度の影響が少なく，従来法よりも除去能率が高くなった．これは，作用砥粒数が少ない条件下における砥粒分散性が，粘性や潤滑性に起因する除去能力を上回ったためと考えられる．

(3) 仕上げ面は，従来法よりも均一で細かい研磨条痕となる．また，砥粒濃度が 0.1wt%のように低い条件においても，1.0wt%，5.0wt%と同程度の仕上げ面が得られた．

(4) 表面残留応力は，従来法よりも圧縮方向に大きくなる．このことは，微細凹凸面や複雑形状部品に対して，表面粗さの向上と同時に，圧縮残留応力を付与する加工技術として応用が可能である．

(5) 粒子ブラシと電解還元水のみ（砥粒濃度 0wt%）で加工した場合，加工面は粗面化し，本実験条件において表面には−250MPa の圧縮残留応力が付与された．この技術は，微細凹凸面や複雑形状部品に対して，粗面化と同時に，圧縮残留応力を付与する技術として応用が可能である．

謝　辞

本研究の一部は，JSPS 科研費 JP26420046 の助成を受けた．記して謝意を表す．また，卒論学生　古澤裕太君に感謝の意を表す．

6．参考文献

1) H. KAWAKUBO, K. TSUCHIYA, U. SATO, T. YAMAZAKI, K. MIKI and Y. TEZUKA: Surface magnetic polishing using spindle through type magnetic pole - Influence of particle brush on polishing characteristcs -, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 46, 8 (2002) 401 (in Japanese).
2) H. KAWAKUBO, U. SATO and S. MURATA: Study on polishing performance of slurry discharge type magnetic polishing tool - Finishing characteristics of non-ferromagnetic materials -, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 58, 4 (2014) 247 (in Japanese).
3) U. SATO, M. TAKEUCHI and H. KAWAKUBO: The Basic Characteristics and the Performance of Precision Washing of Na_2SO_4-Electrolyzed Reducing Water, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 78, 3 (2012) 231 (in Japanese).
4) U. SATO, M. TAKEUCHI and H. KAWAKUBO: Influence of Dilute NaCl-Electrolyzed Reducing Water on the Surface of High Carbon Steel, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 78, 10 (2012) 894 (in Japanese).
5) U. SATO, T. TAKENOUCHI, H. HARA, T. YAMAZAKI and S. WAKABAYASHI: End Milling of Stainless Steel Using Electrolyzed Reducing Water, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., C, 72,718 (2006-6) 1987 (in Japanese).
6) U. SATO and K. ICHIKAWA: Precise Polishing of Silicon Wafer Using Dilute NaCl Electrolytically Reduced Water, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 72, 10 (2006) 1247 (in Japanese).
7) U. SATO, T. TAKENOUCHI, S. WAKABAYASHI and M. SATO: Ultra-Precision Washing of Silicon Wafer Using Electrolyzed Water, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 71, 6 (2005) 756 (in Japanese).
8) 例えば，高田じゅん:ζ電位測定法の原理と応用例，東亜合成グループ研究年報 14 号，(2011) 27.
9) 例えば，北原文雄，古澤邦夫:最新コロイド化学，講談社，(1990) 50.
10) B. RYU, M. TAKAHASHI and S. SUZUKI: Rheological Characteristics of Aqueous Alumina Slurry for Tape Casting, J. of the Ceramic Society of Japan, 101,6 (1993) 643 (in Japanese).
11) U. SATO, T. TAKENOUCHI and T. YAMAZAKI: Making Clear about the Basic Characteristics of the Electrolyzed Water of Dilute NaCl, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 75, 7 (2009) 902 (in Japanese).