

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420046

研究課題名(和文) 磁気援用加工法と電解還元水の複合による精密・清浄表面の創製法に関する研究

研究課題名(英文) Study on generating method of precise clean surface by complex technology between magnetic field assisted machining and electrolyzed reducing water

研究代表者

川久保 英樹 (KAWAKUBO, Hideki)

信州大学・学術研究院教育学系・准教授

研究者番号：90579129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、磁気援用加工技術をベースとした新たな精密・清浄表面創製法の確立である。そのために、磁気粒子ブラシの物理的除去作用と電解還元水の化学的作用との相乗効果による基本的な加工特性と加工メカニズムを検討した。具体的には、電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工法について、金属加工液ベースの研磨材スラリーによる従来法との比較を行った。その結果、加工特性(加工能率の安定性、仕上げ面の加工条痕の微細化)、および表面改質特性(圧縮残留応力の増大効果、粗面化)の有用性を示した。更に、各種加工対象物への適用、洗浄レス・環境配慮型表面加工法、および部分的表面改質に関する技術展開の可能性も示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is the establishment of the new surface processing method based on the magnetic field assisted machining using magnetic particle brush. The magnetic field assisted machining is effective for finishing minute corrugated surface and free-form surface. On the other hand, the electrolyzed reducing water is expected as a substitute cleaning solution for chemical medicinal solution used in cleaning process. The new surface processing method utilizes synergistic effect both removal action of the magnetic particle brush and chemical action of the electrolyzed reducing water. Concretely, magnetic field assisted machining using the electrolyzed reducing water-slurry was carried out, and processing characteristics and surface modification were compared with the conventional method. Following usefulness was shown; (1) processing efficiency, (2) miniaturization of abrasion mark, (3) addition of the compressive residual stress, (4) application to the roughening, etc..

研究分野：生産加工学

キーワード：表面加工 磁気援用加工 電解還元水 スラリー 加工能率 残留応力

### 1. 研究開始当初の背景

磁気援用加工法は、磁力線に沿って形成される磁性体粒子群（以下、磁気粒子ブラシと呼ぶ。）による磁気的な押付力を加工圧力として利用する加工法である。磁気粒子ブラシは、被加工面に対してフレキシブルに変形しながら接触できるため、複雑形状部品の仕上げ加工やエッジ加工に適している。また、非磁性体に対する磁力線の透過作用を利用して、パイプ内面の研磨も可能である。他に、加工面へ圧縮残留応力が発生することが確認されており、表面改質への適用も期待できる。一方、除去能率が低い、磁性研磨材の寿命による研磨性能低下、複雑形状仕上げ面に残留する油脂成分の除去洗浄が、超音波洗浄などでも困難といった課題がある。このような中で、研究代表者は、既存の工作機械に取り付け可能な、汎用性の高いスラリー吐出式磁気研磨工具を提案し、安定した除去能力と良好な仕上げ面が得られることを可能にできた。更に、微細凹凸面のエッジの丸み付け加工への適用も行ってきた。

電解還元水は、半導体デバイス・精密部品等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。研究代表者は、電解還元水を用いてバフ研磨後の研磨材除去洗浄を行い、洗浄溶液として使用可能であることを明らかにしてきた。更に、高炭素鋼に対する電解還元水の影響を検討し、純水とは異なり、表面に腐食作用を及ぼさないことを明らかにし、加工技術へ適用可能であることを示してきた。また、電解還元水は、炭素鋼やアルミニウム合金、ステンレス鋼、チタン合金の切削加工液としての応用も可能であることが明らかにされている。

本研究は、これまでの研究で明らかにした磁気援用加工法の長所と、電解還元水の長所とを組み合わせ、両者の相乗効果による新たな表面創製法を提案するものである。

### 2. 研究の目的

本研究は、磁気援用加工技術をベースとした新たな表面創製法の確立を目的としている。そのために、磁気粒子ブラシの物理的除去作用と電解還元水の化学的作用との相乗効果による精密・清浄な表面創製法の加工メカニズムを解明し、技術情報を学術体系化する。そこで、スラリー吐出型磁気研磨工具を用いて、砥粒と電解還元水による「電解還元水スラリーを使用した場合」、または「電解還元水のみを使用した場合」の研磨特性、洗浄性能、表面改質特性について、従来法との比較実験を行う。具体的には、研磨能率、研磨特性、仕上げ面の清浄度、表面改質の基本特性、加工メカニズムの解明、選択的表面改質の可能性、汚れ除去などといった観点から検討を進める。

### 3. 研究の方法

本研究では、磁気援用加工法の物理的除去

作用と、電解還元水の化学的作用の相乗効果について明らかにするため、以下の内容を検討する。

- (1) 基本的研磨特性の把握
- (2) 仕上げ面の分析
- (3) 加工メカニズムの解明
- (4) 各種材質の工作物への適用
- (5) 洗浄レス表面加工技術の可能性実験
- (6) 環境配慮型磁気援用加工法の可能性実験
- (7) 部分的表面改質の可能性実験

研磨実験は、小型の NC フライス盤を用いて、表 1 の実験条件で行う。

表 1 実験条件

試料	材質：SUS304 (初期面粗さ 0.12 μmRa) 無酸素銅 (初期面粗さ 0.055 μmRa) ソーダライムガラス (初期面粗さ 0.019 μmRa)
加工条件	回転数：500 min <sup>-1</sup> , 送り：30 mm/min, 移動量：60 mm, 加工間隙：3 mm
永久磁石	ネオジウム磁石, φ20mm×10mm (0.4T)
強磁性材 粒子	供給量：4.8g 材質・形状：球形鋼球 (φ55, 115, 175, 260 μm) 不定形鋼粉 (φ180, 300 μm) Ni 粉 (φ100 μm)
研磨材 スラリー	砥粒：WA#8000 (SUS304, 無酸素銅) CeO <sub>2</sub> (ソーダライムガラス) 砥粒濃度：0wt%, 0.1wt%, 1.0wt%, 5.0wt% ベース液：NaCl 電解還元水 金属加工液 (界面活性系, 純水 30 倍希釈)

### 4. 研究成果

#### (1) 基本的研磨特性の把握

##### ① 除去量について

従来法の金属加工液スラリーの場合と電解還元水スラリーの場合とを比較して、基本的研磨特性を検討した。図 1 にパス回数と除去量との関係を示す。両者ともにスラリー吐出式磁気研磨工具を使用しているため、ほぼ一定の割合で除去量が得られた。

図 2 に砥粒濃度と除去能率との関係を示した。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。ゼータ電位を測定した結果から、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る。このことから、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。

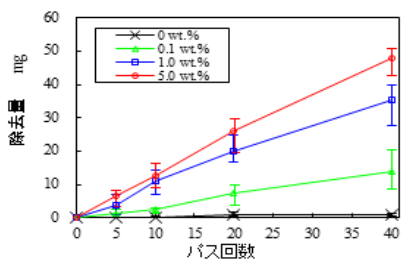
砥粒濃度 1.0wt%, 5.0wt%では、電解還元水スラリーの除去能率は、金属加工液スラリーよりも低い。これは、電解還元水が油成分を含まないため、粘度および潤滑機能に起因する除去能力が金属加工液スラリーよりも劣ったためと考えられる。

また、砥粒濃度 0.1wt%のように作用砥粒数が少ない場合、電解還元水スラリーの除去能率は、金属加工液スラリーをわずかに上回った。これは、砥粒分散性が高いためと考えられる。さらに、電解還元水中の水素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。

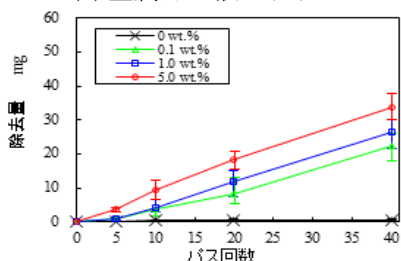
除去量に関して得られた成果をまとめると次のとおりである。

- ・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。

- ・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。
- ・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い。
- ・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。



(a) 金属加工液スラリー



(b) 電解還元水スラリー

図1 砥粒濃度とパス回数および除去量

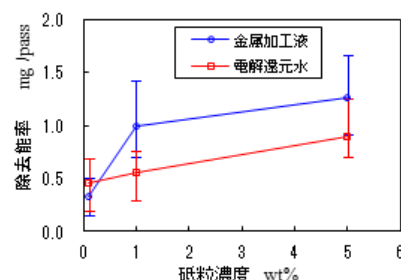


図2 砥粒濃度と除去能率との関係

## ②表面粗さについて

図3にパス回数と表面粗さとの関係を示す。粒子ブラシのみ(砥粒濃度0wt%)においては、両スラリーともにそれぞれ  $1.1\mu\text{mRa}$ ,  $1.0\mu\text{mRa}$  であり、初期表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。

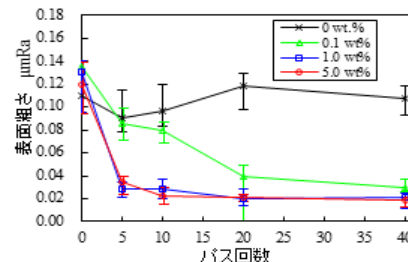
金属加工液スラリーの場合、砥粒濃度1.0wt%と5.0wt%において、5パスまでに表面粗さは急激に減少して、20パスまでに平均値は  $0.02\mu\text{mRa}$  になり、その後はほぼ一定値(到達可能な表面粗さ)を示した。一方、砥粒濃度0.1wt%の場合は、作用砥粒数が少なく、前加工面を十分に除去できなかった。

電解還元水スラリーの場合、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が、これは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、平均値は  $0.02\mu\text{mRa}$  (到達可

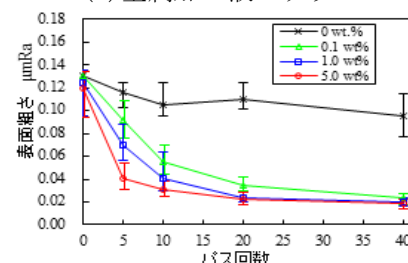
能な表面粗さ)になった。

表面粗さに関して得られた成果をまとめると次のとおりである。

- ・従来法と比較して、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すが、最終的な到達仕上げ面粗さは、従来法と同程度である。
- ・粒子ブラシのみ(砥粒濃度0wt%)場合、電解還元水スラリーの場合と従来法ともに、初期表面粗さからの変化は少ない。



(a) 金属加工液スラリー



(b) 電解還元水スラリー

図3 砥粒濃度とパス回数および表面粗さ

## (2)仕上げ面の分析

### ①仕上げ面性状について

図4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1.0wt%において、電解還元水スラリーと金属加工液スラリーとを比較すると、電解還元水スラリーの方が、均一で細かい研磨条痕であり、精密な仕上げ面が得られている。この事象は、砥粒の分散性に起因するといえる。

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た。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。

EDS分析の結果から、従来の金属加工液スラリーと電解還元水スラリーの両者ともに、加工面にわずかなAl成分が検出された。これは、WA砥粒の一部が仕上げ面に残留したものである。電解還元水スラリーの方が、わずかにAl成分の残留が多い結果となった。これは、表面洗浄効果もあるものの、油成分を含まず潤滑性に劣ることから、砥粒の残留がわずかに多くなったためと考えられる。この実験では、純水で金属加工液を希釈してスラリー液を作製したが、純水の代わりに電解還元水で希釈した場合、Al成分の検出は減少し

た. このことから電解還元水希釈の金属加工液スラリーには, 砥粒の残留抑制に関してわずかに効果があることが明らかになった.

粒子ブラシと電解還元水のみ(砥粒濃度 0wt%) の場合, 切れ刃となる砥粒がないため, 除去量はほとんどない. しかし, 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, 表面は粗面化している. これは, 電解還元水は油成分を含まず, 加工面の洗浄効果もあることから, 磁気粒子ブラシと加工面とが直接接触しながら擦過したためと考えられる. 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, 磁気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, SEM 観察像ともに凸部がみられず, 粗面化していない. 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, 磁気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.

仕上げ面性状に関して得られた成果をまとめると次のとおりである.

- ・仕上げ面は, 従来法よりも均一で細かい研磨条痕, すなわち精密な状態になる.
- ・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の状態が得られる.
- ・磁気粒子ブラシのみ(砥粒濃度 0wt%) の場合, 電解還元水スラリーを用いた場合には加工面は粗面化する.

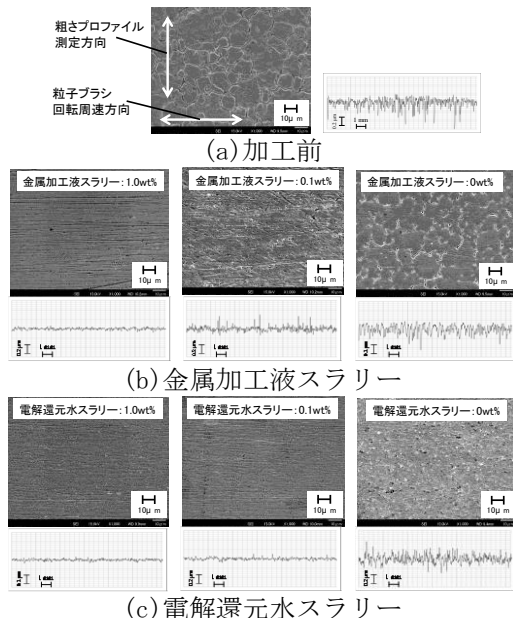


図 4 SEM 観察像と粗さプロファイル

## ②表面残留応力について

図 5 に磁気粒子ブラシを形成する強磁材粒子の粒径を変化させたときの表面残留応力の増加量を示す. 砥粒濃度 0wt%, 5wt% とともに,

強磁性材粒子の粒径の増加に伴い, 圧縮方向への残留応力の増加量は大きくなる. 強磁材粒子ひとつの磁気力が増大することに起因し, 加工面を押しならすバニシ作用が大きくなったためと考えている.

表面残留応力に関して得られた成果をまとめると次のとおりである.

- ・表面残留応力は, 従来法の加工面と比較して, より圧縮方向に大きくなる.
- ・磁気粒子ブラシと電解還元水のみ(砥粒濃度 0wt%) の場合, 砥粒が混合されている場合よりも更に大きな圧縮残留応力が付与される.

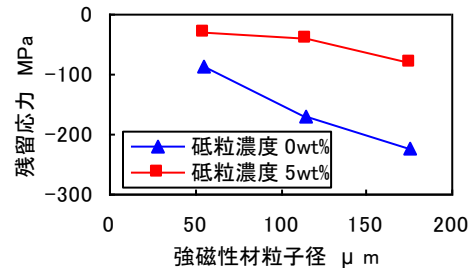


図 5 砥粒濃度と粒子径と表面残留応力

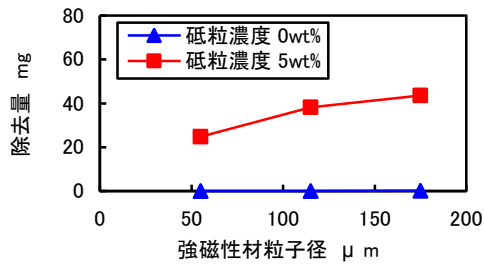
## (3)加工メカニズムの解明

除去量, 表面粗さ, SEM 観察像から, 残留応力付与のメカニズムを検討した. 図 6 に強磁材粒子の粒子径と除去量, および表面粗さの関係を示す. 砥粒濃度 0wt% については, 除去量は強磁材粒子径に関係なくほぼゼロであり, 表面粗さは加工前の  $0.1\mu\text{mRa}$  よりもわずかに減少した. また, 強磁性材粒子径の増加に伴い, 表面粗さの平均値がわずかに減少するが, ばらつきは大きくなる傾向を示した. 砥粒濃度 5wt% については, 除去量は強磁性材粒子径の増加に伴い増加する傾向がみられ, 表面粗さは 0wt% の場合と比較して全体的に向上し, 強磁材粒子径が小さいものの方が小さい値を示した.

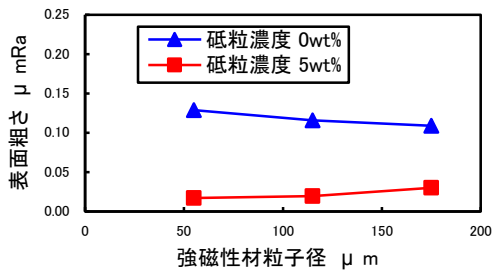
図 7 に SEM 観察像の一例を示す. SEM 観察像から, 砥粒濃度 5wt% においては研磨条痕が観察され, 砥粒による微小切削が行われていることがわかる. 上記の(1), (2)の研究結果と合わせて, 加工メカニズムをまとめると, 電解還元水スラリー(砥粒濃度 5wt%) の場合は, 磁気粒子ブラシによるバニシ作用と同時に砥粒による微小切削が行われている. そのため, バニシ作用では残留応力が付与され, 微小切削では残留応力を除去しながら表面粗さを改善するという現象が繰り返されていると推察される.

一方, 砥粒濃度 0wt% では研磨条痕は観察されず, 磁気粒子ブラシのバニシ作用のみで加工面を押しならしている. したがって, 電解還元水スラリー(砥粒濃度 0wt%) の場合は, 切り屑を排出せずにバニシ作用が中心の加工が行われ, 表面粗さの改善はわずかであるが, 多くの圧縮残留応力を付与している.

加工面分析のため、平面試料を用いて評価してきたが、この加工メカニズムは、磁気援用加工法が得意とする微細凹凸面、複雑形状面、パイプ内面といった加工対象物にも当てはめて考えることができる。

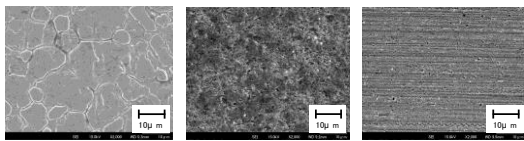


(a) 除去量



(b) 表面粗さ

図6 砥粒濃度および粒子径と研磨特性



(a) 加工前 (b) 0wt% (c) 5wt%

図7 SEM観察像の一例

#### (4) 各種材質の工作物への適用

SUS304材（非磁性材料）に対する基本的研磨特性を検討してきたが、ここでは無酸素銅材、ガラス材への適用を試みた。

##### ①無酸素銅材への適用実験

金属加工スラリーと電解還元水スラリーとの比較実験を行った。その結果、電解還元水の場合、加工面は表面粗さの劣化と付着物が確認され、研磨には適していないことが明らかになった。無酸素銅については、油成分を含む金属加工液ベースのスラリーが適しているといえる。

##### ②ガラス材への適用実験

純水ベースの酸化セリウムスラリーと電解還元水ベースの酸化セリウムスラリーとの比較実験を行った。ガラスの磁気研磨では、酸化セリウムとガラス材との化学的反応、および磁気粒子ブラシによる物理的除去によって除去加工が行われていくことになる。研究代表者らによるこれまでのガラス材の磁気研磨（酸化セリウム砥粒+純水）では、研磨材スラリー吐出部において除去量が多くなり、一般の金属を研磨する場合とは異なることが明らかになっていた。これは吐出部近

傍で酸化セリウムとガラスとの化学的反応が多くなったためと考えている。

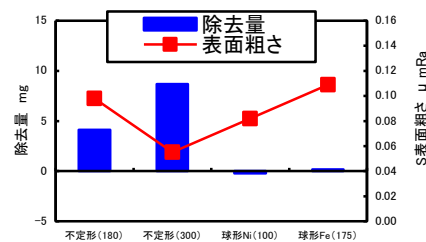
それに対して、電解還元水ベースの酸化セリウムスラリーでは、砥粒の分散性向上により、加工箇所の違いによる除去量の差が改善され、一般の金属を研磨する場合に近い加工断面が得られた。以上から、ガラス材に対して、磁気援用加工法と電解還元水スラリーとの複合研磨技術が有用であるといえる。

##### (5) 洗浄レス表面加工技術の可能性実験

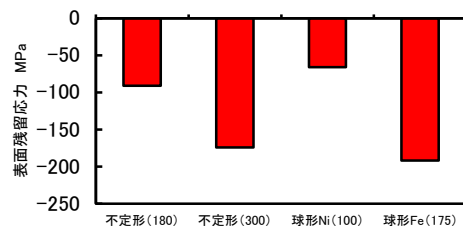
上記(1)、(2)、(3)の研究において、磁気粒子ブラシと電解還元水のみ（砥粒濃度0wt%）の場合、加工面の粗面化と同時に、従来法よりも大きな圧縮残留応力を付与できることを示した。ここでは、磁気粒子ブラシを形成する強磁性粒子の材種と形状を変えて、球形の鋼製強磁性材粒子（粒径175μm）との比較実験を行った。強磁性材粒子は、鋼製ショットグリッド（不定形：粒径180、300μm）、Ni粉（不定形：粒径100μm）を用いた。図8に除去量と表面粗さ、および表面残留応力の関係を示す。

不定形粒子の場合、除去量が確認された。これは球形粒子とは異なり、不定形粒子表面の凹凸が切れ刃となって、微小な除去加工を行っていると思われる。表面粗さは粒径300μmではわずかに向上して小さくなり、SEM観察像から加工条痕も確認できた。表面残留応力については、球形の鋼製粒子よりも小さい。これは、前述の砥粒濃度5.0wt%の場合の加工メカニズムと同様に、磁気粒子ブラシによるバニシ作用と砥粒による微小切削とが同時に行われているためといえる。

前述の砥粒を含む研磨材スラリーを用いた磁気援用加工では、加工面にわずかな砥粒の残留が確認されていた。しかしながら、本実験のように、不定形の鋼製粒子を用いることで、砥粒レスの表面加工が実現でき、砥粒の残留がない、清浄度の高い表面加工が可能になる。



(a) 除去量と表面粗さ



(b) 表面残留応力

図8 磁気粒子ブラシの材種・形状の違い

不定形 Ni の場合、除去量は負の値となった。加工面の EDS 分析の結果、Ni 成分が検出され、硬度が低い Ni 粒子成分が加工面へ移着されたためであり、磁気粒子ブラシの構成成分を加工面へ移着できることを示している。この事象は、異種材料を加工対象物表面へ移着させるための新たな技術展開として期待できる。また、Ni 粒子は、球形の鋼製粒子よりも硬度が低いため、表面へのバニシ効果は小さく、圧縮残留応力の増加が少ない。

#### (6) 環境配慮型磁気援用加工法の可能性実験

電解還元水スラリーの砥粒分散性機能を利用して、金属加工液ベーススラリーの金属加工液成分を減少させることを試みた。通常、水溶性金属加工液は、希釈倍率 10~30 倍で使用するが、本研究では希釈倍率 200 倍までの範囲で実験した。その結果、希釈倍率 200 倍においても、研磨性能が大きく低下することなく加工が可能であった。このことは、金属加工液の使用量軽減につながり、環境配慮型の磁気援用加工法として期待できる。

#### (7) 部分的表面改質の可能性実験

部分的表面改質の可能性実験として、マスキングによる露出面を選択的に磁気粒子ブラシで擦過した。その結果、露出面のみを加工できることを確認した。この事象から、選択的な表面改質技術への応用が期待できる。部分的表面改質の境界部における詳細は、今後の検討課題としたい。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 川久保英樹、佐藤運海、村田修一、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、査読有、砥粒加工学会誌、第 60 巻、第 9 号、A4、pp. 509-514 (2016)

[学会発表] (計 8 件)

- ① 川久保英樹、佐藤運海、村田修一、電解還元水の特性を融合した磁気援用加工による表面創成技術、2016 年度精密工学会秋季大会 (茨城大学)、A4、講演論文集、pp. 617-618 (講演番号 L15) (2016)
- ② 川久保英樹、佐藤運海、村田修一、電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工法 - 加工メカニズムの考察 -、2016 年度砥粒加工学会学術講演会 (兵庫県立大学)、A4、講演論文集、pp. 188-189 (講演番号 B33) (2016)
- ③ 川久保英樹、佐藤運海、村田修一、磁気援用加工による仕上げ面に及ぼす電解還元水スラリーの影響、2016 年度精密工学会春季大会 (東京理科大学)、A4、講演論文集、pp. 977-978 (講演番号 R39) (2016)
- ④ 川久保英樹、佐藤運海、電解還元水スラ

リーを用いた磁気援用加工の仕上げ特性、日本機械学会 2015 年度年次大会 (北海道大学)、A4、講演論文集、全 4 頁 (講演番号 G1300203) (2015)

- ⑤ 川久保英樹、佐藤運海、村田修一、電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工法、2015 年度砥粒加工学会学術講演会 (慶応義塾大学)、A4、講演論文集、pp. 316-317 (講演番号 D16) (2015)
- ⑥ 川久保英樹、佐藤運海、村田修一、電解還元水スラリーを用いた磁気研磨 - 砥粒濃度の影響 -、2015 年度精密工学会春季大会学術講演会 (東洋大学)、A4、講演論文集、pp. 233-234 (講演番号 D33) (2015)
- ⑦ 川久保英樹、佐藤運海、村田修一、電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工に関する研究、2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会 (鳥取大学)、A4、講演論文集、pp. 467-468 (講演番号 I47) (2014)
- ⑧ 川久保英樹、佐藤運海、村田修一、磁気研磨性能に及ぼすスラリー溶液の影響、2014 年度砥粒加工学会学術講演会 (岩手大学)、A4、講演論文集、pp. 337-338 (講演番号 D23) (2014)

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

川久保 英樹 (KAWAKUBO, Hideki)  
信州大学・学術研究院教育学系・准教授  
研究者番号：90579129

#### (2) 研究分担者

なし

#### (3) 連携研究者

佐藤 運海 (SATO, Unkai)  
信州大学・学術研究院教育学系・教授  
研究者番号：30345730

#### (4) 研究協力者

村田 修一 (MURATA, Shuichi)  
長野県工科短期大学校・生産技術科・講師