

## 磁気援用加工法と電解還元水との複合による 圧縮残留応力の付与技術

川久保英樹\*1, 佐藤運海\*1, 村田修一\*2

Surface technology adding compressive residual stress  
by magnetic field-assisted machining using electrolyzed reducing water

Hideki KAWAKUBO, Unkai SATO and Shuichi MURATA

近年、アディティブマニュファクチャリングに代表される新たな製造技術の開発が進展しており、複雑な形状部品への仕上げ加工や表面処理など、後工程の加工技術は更に重要となる。このようななかで、磁気援用加工法は後工程の加工技術の1つとして期待できる。表面処理に着目すると、残留応力が疲労強度や応力腐食割れに影響を及ぼすことは知られており、加工面やパイプ内面へ圧縮残留応力を付与する技術が求められている。

著者らは、電解還元水を用いて磁気援用加工の研究を行い、従来法の金属加工液の場合よりも大きな圧縮残留応力が付与できることを明らかにしてきた。本研究では、電解還元水を加工液として用いた磁気援用加工法により、新たな圧縮残留応力の付与技術に関する基礎的な加工特性を検討した。更に、圧縮残留応力値を増大するための軸傾斜加工法の提案、および内面加工への適用を試み、本加工法の有用性を示した。

Key words: residual stress, magnetic field-assisted machining, electrolyzed reducing water, surface processing

### 1. 緒言

近年、除去加工が中心の製造技術に加えて、アディティブマニュファクチャリングに代表される新たな製造技術の開発が進展しており<sup>1)</sup>、複雑な形状部品などへの仕上げ加工や表面処理など、後工程の加工技術はこれまで以上に重要となる。このようななかで、磁気援用加工法は微細な凹凸面や複雑形状部品の加工に適していることから、後工程の加工技術のひとつとして期待できる。

表面処理に着目すると、残留応力が疲労強度、応力腐食割れに影響を及ぼすことは知られており、ショットピーニング<sup>2)</sup>、微粒子ショットピーニング<sup>3)</sup>、ウォータージェットピーニング<sup>4)</sup>、レーザーピーニング<sup>5)</sup>、圧縮残留応力生成工具の開発<sup>6)</sup>など、圧縮残留応力を付与する技術が検討されている。また、パイプ内面は加工が困難であり、別の手法として、外面を急速加熱して圧縮残留応力を付与する方法<sup>7)</sup>が検討されている。

著者らは、磁気援用加工技術と電解還元水利用技術との複合による表面加工を検討し、これまでに電解還元水スラリーを用いた磁気援用加工法の加工特性について明らかにしてきた<sup>8)</sup>。そのなかで、金属加工液スラリーと電解還元水スラリーを用いた場合について、表面残留応力を比較した結果、両者ともに残留応力は圧縮方向であることを明らかにした。また、従来法の金属加工液スラリーの場合と比較して、電解還

元水スラリーの方が圧縮残留応力値は大きく、砥粒濃度 0wt% で約 5 倍 (-250MPa)、砥粒濃度 5wt% で約 2 倍 (-100MPa) に増大することを明らかにした<sup>8)</sup>。これは、電解還元水は油成分を含まず潤滑効果がないため、磁気粒子ブラシと加工面との直接接触によってパニシ作用が大きく表れたためである。このことから、磁気援用加工法と電解還元水との複合技術は、微細曲面や複雑形状部品表面、パイプ内面などに対して、仕上げ加工を行うと同時に、圧縮残留応力を付与する新しい加工技術として応用できる。

本研究では、砥粒濃度 0wt% の電解還元水スラリー、すなわち電解還元水のみを加工液として用いた磁気援用加工法により、新たな圧縮残留応力の付与技術を提案し、平面加工による基礎的な加工特性を検討した。更に、軸傾斜加工法、およびパイプ内面への適用を試み、その有用性を示した。本報では、圧縮残留応力の付与に関する要素技術として得られた知見を報告する。

### 2. 実験方法

図 1 にスラリー吐出式磁気研磨工具<sup>9)</sup> (以下、磁気研磨工具と呼ぶ。)を小型 NC フライス盤へ取り付けられた状態を示す。磁気研磨工具は、先端部の永久磁石外側の二箇所からスラリー、あるいは加工液が吐出される。これまでに、磁性研磨材を用いた場合と比較して、加工能率の低下がみられず安定した磁気研磨が可能であることが明らかになっている<sup>9)</sup>。本研究では、平面加工により基礎的な加工特性を検討した。平面加工では磁気研磨工具の 1 回通過を 1 パスとして定義し、移動距離 60mm を往復動作させた。磁気粒子ブラシによる加工面

\*1 信州大教育学部: 〒380-8544 長野県長野市西長野6-ロ  
Faculty of Education, Shinshu University

\*2 長野県産業労働部: 〒380-8570 長野県長野市大字南長野宇  
幅下692-2

Department of Commerce, Industry and Labor, Nagano Prefecture  
(学会受付日: 2019年12月12日)  
(採録決定日: 2020年 2月23日)

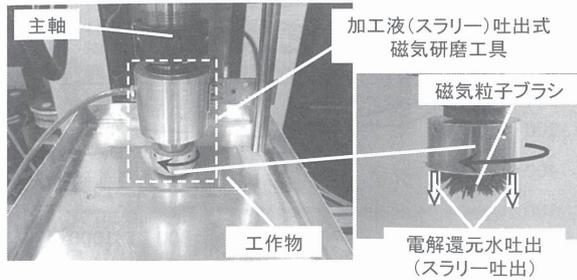


図1 実験装置の外観図

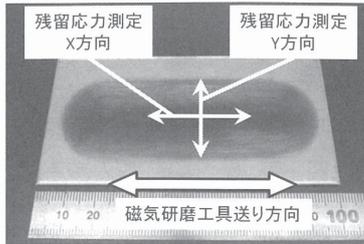


図2 X線応力測定の評価方向

表1 実験条件

試料	SUS304 No.2B, 厚さ:2mm 初期面粗さ:0.10~0.12 $\mu$ mRa
加工機	回転数:500 min <sup>-1</sup> 軸傾斜:0°, 2°, 5° 送り速度:30 mm/min X軸移動:60 mm/pass 加工間隙:3 mm
永久磁石	ネオジウム磁石, $\phi$ 20mm $\times$ 10mm (0.4T)
強磁性材粒子	供給量:4.8 g(加工中の供給なし) 不定形粒子(鋼製ショットグリッド) 粒子サイズ: G-212.5(125~300 $\mu$ m, 中央値212.5 $\mu$ m) G-302.5(180~425 $\mu$ m, 中央値302.5 $\mu$ m) G-505(300~710 $\mu$ m, 中央値505 $\mu$ m) G-712.5(425~1000 $\mu$ m, 中央値712.5 $\mu$ m) 鋼種・硬度:0.8~1.2%C-steel, $\geq$ 800HV0.5
	球形粒子(ショット用鋼球) 粒子サイズ: B-56.5(38~75 $\mu$ m, 中央値56.5 $\mu$ m) B-85(45~125 $\mu$ m, 中央値85 $\mu$ m) B-162.5(75~250 $\mu$ m, 中央値162.5 $\mu$ m) B-240(125~355 $\mu$ m, 中央値240 $\mu$ m) B-567.5(425~710 $\mu$ m, 中央値567.5 $\mu$ m) B-925(850~1000 $\mu$ m, 中央値925 $\mu$ m) 鋼種・硬度: B-56.5, B-85, B-162.5, B-240 1%C-steel, $\geq$ 700HV0.5 B-567.5, B-925 0.8~1.2%-steel, $\geq$ 420~540HV0.5
NaCl 電解還元水	pH:12, EC:210mS/m, ORP: -870 mV vs.Ag/AgCl 供給量:100 mL/min
研磨材スラリー	ベース溶液: NaCl 電解還元水 砥粒: WA#8000 砥粒混合割合: 5 wt% 供給量:100 mL/min

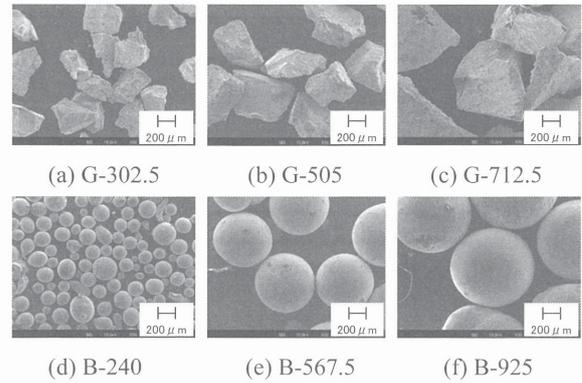


図3 強磁性材粒子のSEM観察像

への押付力を増大させるため、試料取り付け台下部に磁性材を配置した<sup>9)</sup>。

表面残留応力の測定には、PROTO社製X線応力測定装置iXRDを用いた。なお、図2に示すようにX方向、Y方向と定義して、二方向を測定した。未加工部の表面残留応力を測定した結果、平均値はX方向が-40.9MPa(上限値:+45MPa, 下限値:-77MPa), Y方向が-27.6MPa(上限値:+21MPa, 下限値:-62MPa)であった。また、SEMによる表面観察、表面粗さ、除去量を測定し、加工状態についても評価した。ここで、除去量、表面粗さは3回の実験結果の平均値であり、除去量については加工前後の工作物の重量差から求めた。

表1に実験条件を示す。本研究では、NaCl電解還元水を加工液<sup>10)</sup>として用い、磁気粒子ブラシへ連続供給しながら表面加工を行う。電解還元水には、油性の加工液が有する潤滑機能がないが、冷却機能は有している。また、電解還元水は加工液以外にも洗浄溶液としても使用できる<sup>11) 12)</sup>。強磁性材粒子は、不定形粒子に市販の鋼製ショットグリッド(表記をGとする。), 球形粒子に市販のショット用鋼球(表記をBとする。)を用いた。なお、G、Bに続く数字は、平均粒度範囲の中央値である。図3に強磁性材粒子の一例として、不定形粒子と球形粒子について各3種類のSEM観察像を示す。

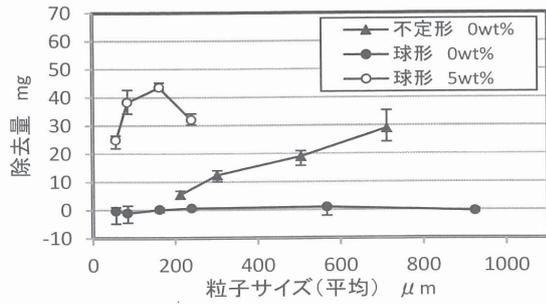
### 3. 実験結果および考察

本章では、除去量と表面粗さ、表面残留応力に及ぼす加工因子の影響を中心にして研磨実験を行った。また、その実験結果に関して考察した。

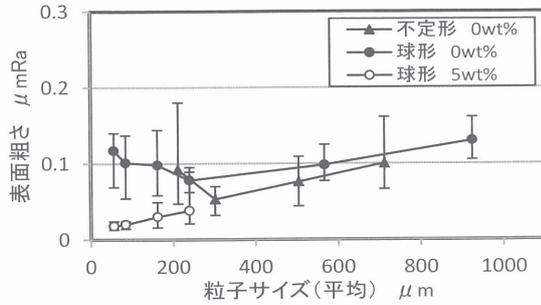
#### 3.1 強磁性材粒子形状とサイズの影響

図4に強磁性材粒子の形状およびサイズが除去量と表面粗さに及ぼす影響を、図5に加工面のSEM観察像を示す。参考として、球形粒子における砥粒濃度5wt%の電解還元水スラリーを用いた結果も示した。強磁性材と砥粒との組み合わせについては、研磨に適した粒径比(砥粒径/強磁性材粒子径)があることが明らかにされているが<sup>13)</sup>、ここでは予備実験から、WA#8000の砥粒を用いた際に研磨可能であった粒子サイズB-56.5, B-85, B-162.5, B-240の4種類を用いた。

除去量について比較する。球形粒子(砥粒濃度0wt%)の場合には除去量がほぼゼロであった。これは、切れ刃となる砥粒がないため、バニシ作用が支配的な加工であると考えられる。B-240, B-567.5ではSEM観察像で加工条痕が確認で

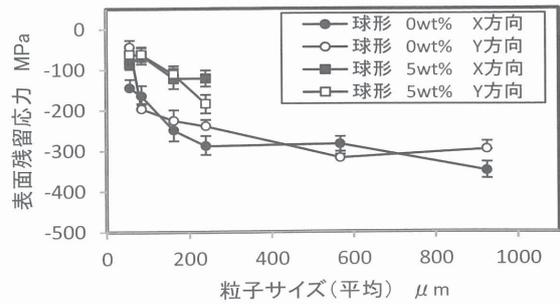


(a) 除去量

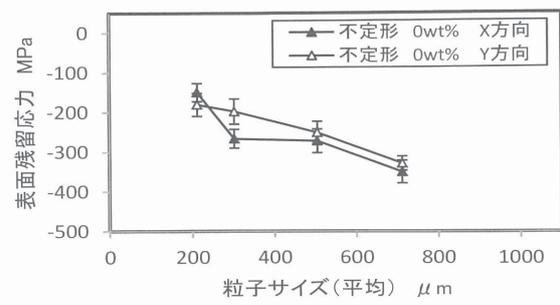


(b) 表面粗さ

図4 強磁性材粒子サイズと除去量・表面粗さとの関係 (40パス)



(a) 球形粒子 (砥粒 0wt%, 5wt%)



(b) 不定形粒子 (砥粒 0wt%)

図6 強磁性材粒子サイズと表面残留応力との関係 (40パス)

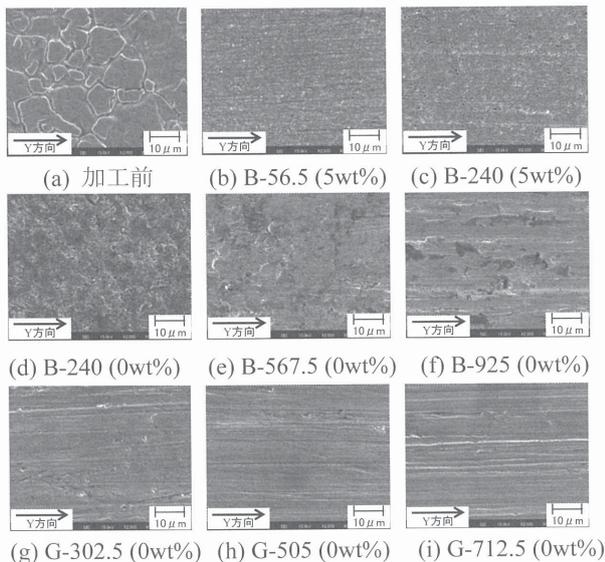


図5 加工面のSEM観察像 (40パス)

きないが、粒子サイズが大きな B-925 では、わずかに Y 方向の加工条痕がみられた。これは、前述のとおり除去量がほぼゼロであることから、表層部の塑性流動によるものと考えている。一方、球形粒子 (砥粒濃度 5wt%) では除去量があり、加工面を除去するためには砥粒が必要であることがわかる。

不定形粒子 (砥粒濃度 0wt%) の場合には、砥粒がない状態であるが除去量があり、SEM観察像では Y 方向の加工条痕がみられた。このことから、本研究で用いた不定形粒子は、表1に示したように球形粒子よりも硬度が高く、粒子表面の凹凸部が切れ刃となって加工面を除去しているといえる。また、本研究で用いた粒子の中で、硬度の差が少なく、サイズが同程度の不定形粒子 (G-212.5, G-302.5) と球形粒子 (B-240) とを比較すると、除去量には差がある。このことは、硬度の違いによる影響を含むものの、形状の違い (凹凸の有無) が、除去量

に大きく影響を及ぼしたためと考えている。これまで、球形粒子と電解還元水スラリー (砥粒あり) を組み合わせ、除去量が得られる磁気援用加工法<sup>8)</sup>を提案してきたが、本研究では不定形粒子により砥粒を使用せずに除去加工が可能であることを明らかにした。

また、粒子サイズが大きくなると除去量が増加しているが、その理由は、粒子の切れ刃が大きくなること、および粒子に作用する磁気力の増加が、押付力を増大させたためと考えている。SEM観察像からも、粒子サイズの増加により加工条痕は大きくなるのがわかる。

表面粗さに関しては、球形粒子 (砥粒濃度 0wt%) の場合、0.09 から 0.12μmRa の範囲であり、粒子サイズが大きくなると表面粗さは増加している。SEM観察像と併せて評価すると、加工面は球形粒子の擦過によって粗面化している。一方、不定形粒子では、砥粒が無い状態であっても除去加工によって、表面粗さの値が初期面よりも小さくなる。本研究では、G-302.5 において最小値を示し、0.06μmRa であった。

図6に強磁性材粒子の形状、およびサイズが表面残留応力に及ぼす影響を示す。図4と同様に、球形粒子 (砥粒濃度 5wt%) の結果も示した。球形粒子、不定形粒子の両者について、X、Y方向ともに圧縮方向に残留応力が増加した。圧縮残留応力付与の加工メカニズムについて、前述の除去量、表面粗さ、SEM観察像の結果を踏まえて考察する。

球形粒子 (砥粒濃度 0wt%) については、前述のとおり、粒子ブラシが加工面を擦過するのみで除去加工を行わない。すなわち、ラビングやブラウイングによるパニシ作用が支配的であり、加工面へ圧縮残留応力が付与されたものといえる。粒子サイズが大きくなると圧縮残留応力が増加しているが、これは粒子1つが受ける磁気力が増加し、パニシ作用が増大したためと考えられる。また、粒子サイズが B-567.5、B-925 のよ

うに大きくなると、圧縮残留応力の増加割合は減少した。これは、粒子サイズの増大で粒子と表面との接触点は減少するが、バニシ作用の増大よりも接触点減少の影響が大きく表れたこと、および表1に示すように粒子硬度が他と比較して低いためと考えている。

球形粒子(砥粒濃度 5wt%)では、強磁性材粒子のバニシ作用により圧縮残留応力を付与すると同時に、砥粒の切削作用によって残留応力付与面の一部を除去する。その結果、砥粒濃度 0wt%よりも圧縮残留応力値が小さくなったといえる。

次に、不定形粒子に関して考察する。不定形粒子では、凹凸部の切れ刃によって、ラビング、ブラウイング、微小切削の状態を繰り返している<sup>14)</sup>。その際、ラビング、ブラウイングによるバニシ作用が、加工面へ圧縮残留応力を付与している。また、粒子サイズの増加に伴う圧縮残留応力値の増加割合は、球形粒子よりも大きい。その理由は、粒子サイズが大きくなると押付力も増加するが、球形粒子よりも硬度が高く(表1参照)、とくに不定形粒子凸部に押付力が集中した結果、高い圧縮残留応力値が付与されたと考えている。

以上から、球形粒子ではバニシ作用が支配的な表面加工であり、不定形粒子では除去加工とバニシ作用が混在した表面加工であることを示した。

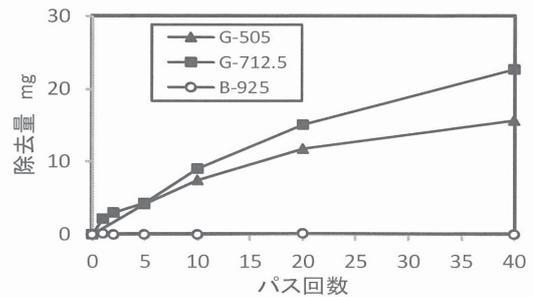
### 3.2 パス回数の影響

パス回数と強磁性材粒子が圧縮残留応力の付与に及ぼす影響について検討した。本加工技術を確認する上で、本加工条件における圧縮残留応力の付与能力の最大値を把握することが重要であると考え、3.1節の実験結果から、圧縮残留応力値が大きくなる強磁性材粒子(球形:B-925, 不定形:G-505, G-712.5)を選定して実験を行った。

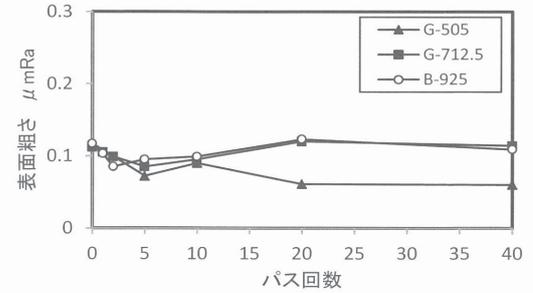
図7にパス回数と除去量および表面粗さの関係を示す。球形粒子では、前述のとおり除去量がほぼゼロであり、表面粗さは40パス後に0.109 $\mu\text{mRa}$ となり大きな変化はみられなかった。不定形粒子の場合、G-505, G-712.5ともに、ほぼ一定の増加割合で除去加工が行われている。20パス以降から増加割合が減少しているが、これは切りくずが磁気粒子ブラシ内に残留して目詰まりに近い状態となり、除去能力が低下したためである。表面粗さに関しては、40パス後にG-712.5で0.114 $\mu\text{mRa}$ 、G-505で0.061 $\mu\text{mRa}$ となり、両者に差がみられた。これは、粒子表面の凹凸の大きさに起因して、切込み深さに差があるためである。なお、10パスまでは表面粗さに差がみられないが、G-505はG-712.5よりも粒子径が小さいため凹凸による切込みが小さくなり、その結果、初期表面粗さが完全に除去できていないためと考えている。

図8にパス回数と表面残留応力の関係を示す。不定形粒子、球形粒子ともに、加工開始直後の5パス目までに、40パス後の圧縮残留応力値の約7割~9割まで圧縮残留応力値が増加することが明らかになった。

球形粒子の場合にはX方向とY方向との圧縮残留応力値の差が大きい傾向を示した。この事象は、次のように考えられる。バニシ作用による加工方向は、送り速度(X方向)が小さいことから、磁気粒子ブラシの周速度方向、すなわちY方向と考えることができる。これまでに、ラビングやブラウイングに

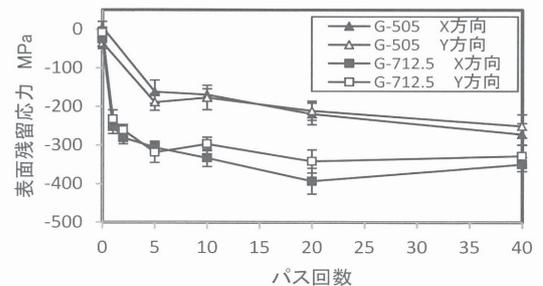


(a) 除去量

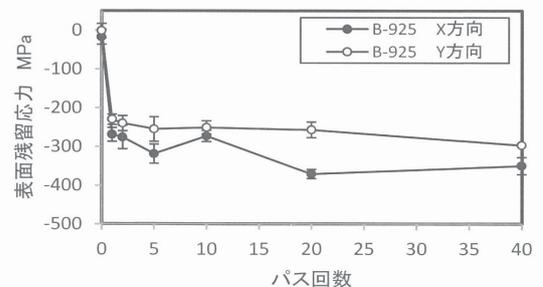


(b) 表面粗さ

図7 加工パス回数と除去量・表面粗さとの関係



(a) 不定形粒子 (G-505, G-712.5)



(b) 球形粒子 (B-925)

図8 加工パス回数と表面残留応力との関係

近い条件で正面フライス加工した場合、加工方向に対して直角な方向に高い圧縮残留応力が発生することが報告されている<sup>15)</sup>。本加工法も同様に、加工方向(Y方向)に直角なX方向に圧縮残留応力が大きくなったといえる。

図9にG-712.5とB-925の場合について、深さ方向の残留応力値を測定した結果を示す。ここでは、5パス後と40パス後の試料に対して、エッチングによって加工面を深さ方向に徐々に除去しながら、残留応力値を測定した。なお、加工前のX, Y方向の初期表面残留応力の平均値を参考にして、表面残留応力値が-30MPa以下になった時点で初期残留応力値に達したと判断し、そのときの深さを圧縮残留応力付与深さと定義した。

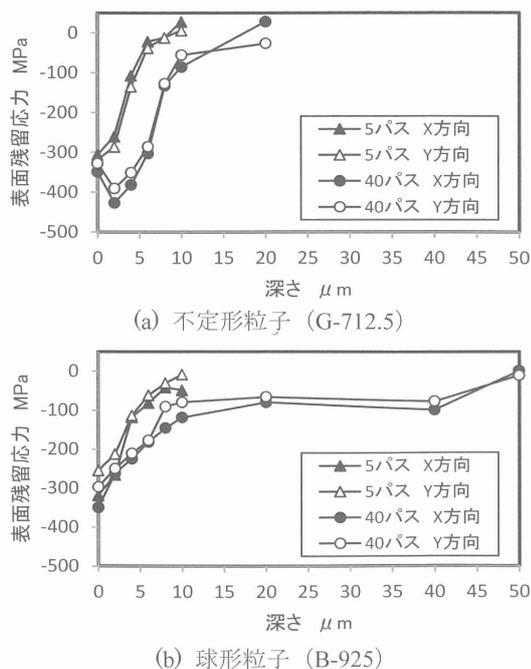


図9 加工表面からの深さと残留応力との関係

不定形粒子では、圧縮残留応力付与深さは、5 パス加工後で約 5 $\mu\text{m}$ 、40 パス加工後で約 10 $\mu\text{m}$  であると判断できる。40 パス加工後の場合、残留応力の最大値が内部にある S 形分布<sup>16)</sup>である。一方、5 パス加工後の場合は、残留応力の最大値が表面にある C 形分布<sup>16)</sup>の形態を示している。この違いは、前述のように、特に粒子凸部に押付力が集中し、深さ方向にも圧縮残留応力が多く付与されたと推察される。

球形粒子では、圧縮残留応力付与深さは 5 パス加工後で約 5 $\mu\text{m}$  である。一方、40 パス加工後では 10 $\mu\text{m}$  付近から約 -100MPa の圧縮残留応力が約 40 $\mu\text{m}$  まで付与されている。5 パス加工後、40 パス加工後ともに、圧縮残留応力は C 形分布である。不定形粒子との大きな違いは、40 パス加工後における圧縮残留応力付与深さであり、不定形粒子の場合の約 4 倍に増加している。これは、パス回数が増えることで、バニシ作用による内部ひずみが累積したためと考えている。

以上から、圧縮残留応力付与と深さを大きくする場合には、不定形粒子よりも球形粒子の方が適している。

### 3.3 回転軸の傾斜の影響と効果

主軸ヘッドの傾斜機能を用いて、磁気研磨工具に傾斜(傾斜角 2°, 5°)を与え、加工面への磁気粒子ブラシの接触状態を変化させたときの影響を検討した。既報<sup>17)</sup>では、軸傾斜による研磨性能と断面形状に関する検討を行ってきたが、本研究では圧縮残留応力付与の増大を目的としている。

図 10 に磁気研磨工具の傾斜状態と粒子ブラシ先端部の周速度ベクトルの模式図を示す。軸傾斜 0°の場合、磁気粒子ブラシ回転方向は加工面に対して水平であるが、傾斜がある場合、磁気粒子ブラシの周速度ベクトルには、加工面に垂直方向成分が加わることになる。また、傾斜がある場合の加工間隙は、図 10(b)に示すように、永久磁石と加工面との最短距離を 3mm に設定した。

加工面の測定に関しては、図 10 における X 軸上の測定点

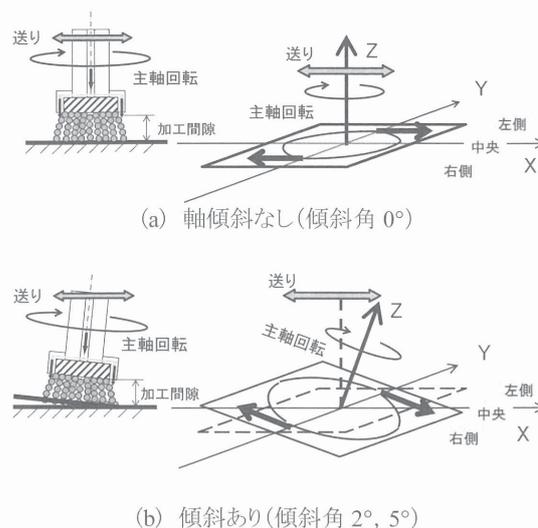


図 10 軸傾斜と粒子ブラシ先端部の速度ベクトル

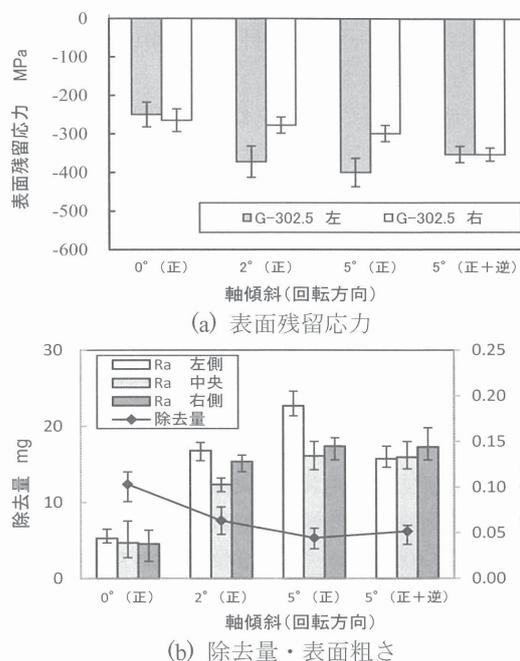


図 11 回転軸傾斜/回転方向が表面残留応力と除去量・表面粗さに及ぼす影響 (40 パス)

を「加工面中央」、X 軸(往路進行方向)から左側および右側へ 5mm の位置をそれぞれ「加工面左側」、「加工面右側」と定義して評価した。ここでは、砥粒を使用せずに除去加工が可能な不定形粒子を用いることとし、その中から表面粗さが最も良好であった G-302.5 を使用した。

本研究で使用した小型 NC フライス盤は、3 軸制御の加工機であり、図 10(b)に示した傾斜状態のまま、X 軸方向に往復の送り動作をする。そのため、加工面左側では常に磁気粒子ブラシによる垂直方向成分の速度ベクトル、すなわち強磁性材粒子によるピーニング効果が加算される。そこで、加工面左右で粒子の衝突状態が同一になるように、1 往復ごとに主軸の正転と逆転を変更しながら加工する方法(以後、軸傾斜加工法(正転+逆転)と呼ぶ。)を提案した。

図 11 に回転軸傾斜と回転方向が、表面残留応力、除去量、および表面粗さに及ぼす影響を示す。また、図 12 に加工後

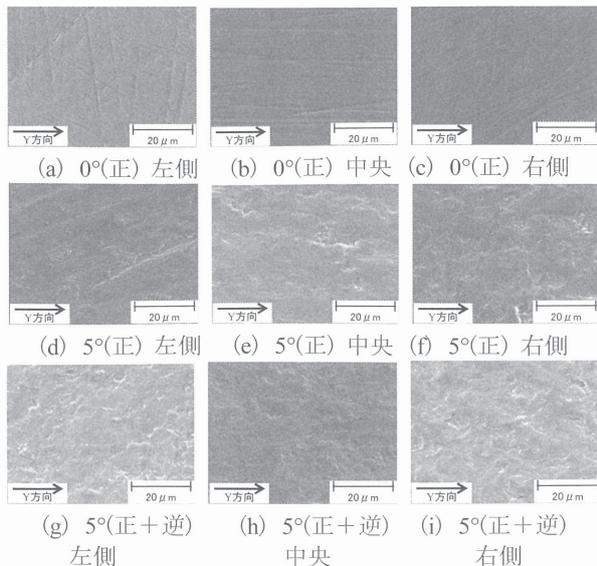


図 12 主軸傾斜・回転を変化させたときの加工面 SEM 観察像 (40 パス)

の SEM 観察像も示した。まず、軸傾斜 0°(正転)と、軸傾斜 2°、5°(正転)に関して考察する。軸傾斜 2°、5°(正転)の場合、加工面左側で、磁気粒子ブラシの加工面への衝突力が増加するため、右側よりも圧縮残留応力値は大きく、左右で不均一になった。また、本加工条件の軸傾斜角 2°と 5°では、表面残留応力値に大きな差はみられなかった。

軸傾斜 5°(正転+逆転)では、軸傾斜 5°(正転)と比較して、左右での不均一は改善されている。また、軸傾斜 0°(正転)の場合と比較して、圧縮残留応力値は約 1.4 倍に増加し、圧縮残留応力付与に有効であることが明らかになった。

図 11(b)より、軸傾斜 2°、5°(正転)時の表面粗さは、加工面左側、右側、および中央との差が大きく、SEM 観察像においても左右で差がみられた。一方、軸傾斜 5°(正転+逆転)においては左右の差はほとんどなく、均一に加工されている。また、軸傾斜 0°(正転)の場合、加工条痕が観察されるが、軸傾斜角 5°(正転)、および 5°(正転・逆転)の場合には加工条痕が観察されず、粗面化されている。この事象は、磁気粒子ブラシの衝突の増加によるものである。表面粗さの値は、軸傾斜 0°(正転)と比較して、約 3 倍に増加することから、粗面化加工技術に対しても効果があるといえる。

除去量については、軸傾斜角の増加によって減少する傾向を示した。図 10(b)に示すように、軸傾斜時の加工間隙の最小値は 3mm であるが、工具先端の位置によって加工間隙は異なり、軸傾斜 5°の加工間隙の最大値は 4.7mm と大きくなる。そのため、最小値以外の位置では加工間隙が増加して磁気力が低下し、除去量が減少したといえる。

以上から、軸傾斜加工法(正転+逆転)は、ピーニング効果による圧縮残留応力値の増大、および加工条痕がみられない均一な粗面化加工に有効である。

#### 4. パイプ内面加工への適用

パイプ内面加工への適用を試みた。図 13 は内面加工装置の外観図である。パイプは傾斜した状態で固定し、電解還元

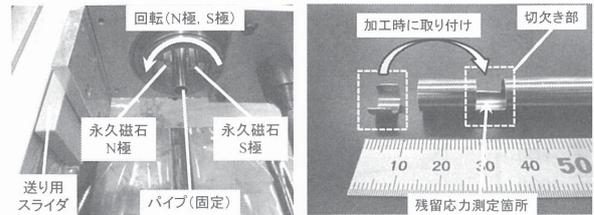


図 13 内面加工装置の外観 図 14 内面加工用試料

表 2 実験条件

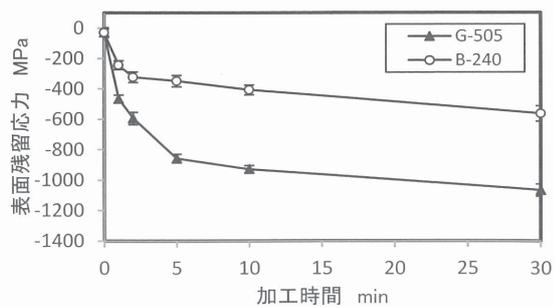
試料	SUS304 外径 φ 9.5mm, 内径 φ 8.5mm 厚さ: 0.5mm 初期面粗さ: 0.17~0.20μmRa
加工機	回転数: 1000 min <sup>-1</sup> 加工間隙: 1 mm 磁極配置: N-S 対向配置
永久磁石	ネオジウム磁石 18mm × 5mm × 4mm (0.4T)
強磁性材料粒子	供給量: 0.8g (加工中の供給なし) 不定形粒子 G-505 (詳細は表 1) 球形粒子 B-240 (詳細は表 1)
NaCl 電解還元水	pH: 12, EC: 210mS/m, ORP: -870 mV vs. Ag/AgCl 供給量: 4 mL/min

水をパイプ上部から供給しながら内面加工を行った。パイプ内面の表面残留応力を測定するためには、パイプを切断して測定用試料を作製する必要がある。しかしながら、内面加工後にパイプを切断すると、残留応力値に影響を及ぼす可能性がある。そこで、図 14 に示すように、事前に切欠きを設けておき、加工後にパイプを切断することなく、表面残留応力の測定ができるようにした。なお、測定機検出部の動作制限から、測定は円周方向のみとした。切欠き位置の加工前の残留応力の平均値は約 30MPa で、平面の加工前と同程度であることから、事前の切欠き加工による影響はないと判断した。

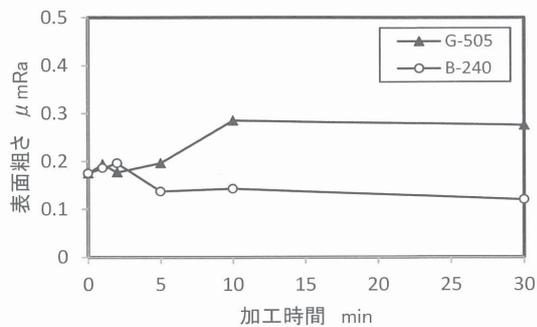
内面加工時には、パイプの切欠き部に対して同形状で同素材(SUS304)の部材をはめて固定し、切欠きがない状態を再現した。本実験では送りは与えずに、切欠き部の位置で内面加工を行った。表 2 に加工条件を示す。強磁性材料粒子は、平面加工の結果から、40 パス加工後の表面残留応力値(図 6)、および表面粗さの値(図 4(b))が同程度であった不定形粒子(G-505: -272MPa, 0.076μmRa)と、球形粒子(B-240: -289MPa, 0.078μmRa)の 2 種類で比較した。他の条件は、これまでの研究<sup>18)</sup>における条件を参考にした。

図 15 に内面加工における加工時間とパイプ内面の残留応力、および表面粗さの関係を示す。除去量に関しては、パイプへ切欠きを設けてあることから正確な測定ができないと判断し、評価から除外した。

内面加工においても、圧縮残留応力が付与されており、30 分後の圧縮残留応力値は平面加工の場合よりも増加した。平面加工と同様に、圧縮残留応力値は加工開始 5 分までは急激に増加するが、それ以降は徐々に増加した。単純比較はできないが、3 章までの平面加工時は加工間隙 3mm、試料厚さ 2mm であるのに対して、内面加工の実験では加工間隙 1mm、パイプ厚さ 0.5mm であることから、磁気粒子ブラシによ



(a) 表面残留応力



(b) 表面粗さ

図 15 パイプ内面の圧縮残留応力および表面粗さ

る押付力が大きくなり、圧縮残留応力値も大きくなったものといえる。とくに、G-505 においては、30 分加工後の残留応力値は-1068MPa まで付与された。球形粒子と不定粒子との差が大きい結果となったが、平面加工と内面加工では磁気粒子ブラシの形態が異なるため単純な比較が難しく、詳細なメカニズム解明は、今後の検討課題としたい。

表面粗さについては、平面加工の場合(図 4(b))には不定形の G-505 と球形の B-240 の表面粗さの値は同程度であったが、内面加工(30 分加工後)においては、G-505 の場合 0.28 $\mu\text{mRa}$  , B-240 の場合 0.12 $\mu\text{mRa}$  となり、不定形粒子の方が大きくなった。本実験では、送りがないうえに磁気粒子ブラシによる加工方向は回転方向のみとなる。その結果、不定形粒子表面の凹凸切れ刃による加工条痕が、球形粒子による擦過痕よりも大きくなったためである。

以上、パイプの内面へ圧縮残留応力の付与が可能であることを示した。

## 5. 結言

電解還元水を加工液として用いて磁気援用加工を行い、平面加工における圧縮残留応力の付与技術に関する基礎的な検討を行った。さらに、内面加工への適用を試みた。得られた結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 球形粒子(砥粒濃度0wt%)では、バニシ作用が支配的な加工であり、粒子サイズの増大により圧縮残留応力は増加する。本実験条件での最大値は約-300MPaであった。
- (2) 不定形粒子(砥粒濃度0wt%)では、除去加工とバニシ作用が混在した加工であり、粒子サイズの増大により圧縮残留応力は増加する。本実験条件での最大値は約-350MPaであった。
- (3) 圧縮残留応力付与深さを大きくする場合には、不定形粒

子よりも球形粒子が適している。本実験条件では、球形粒子の場合に圧縮残留応力付与深さは約40 $\mu\text{m}$ であった。

- (4) 軸傾斜加工法を提案し、軸傾斜0°の場合と比較して、軸傾斜5°(正転+逆転)における圧縮残留応力値が約1.4倍に増加すること、および加工条痕がみられない均一な粗面化加工に有効であることを示した。
- (5) 応用技術として、パイプ内面加工への圧縮残留応力付与を試みた。本実験条件における最大値は約-1000MPaであり、本加工法が有用であることを示した。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS科研費18K03870の助成を受けた。また、長野県工業技術総合センター 豊川良平氏、ならびに卒論学生 山田空平氏、勝見誠斗氏、中野麦香氏、増田緑氏に協力いただいた。記して謝意を表す。

## 6. 参考文献

- 1) 日本機械学会: 機械工学年鑑 2019, 16.加工学・加工機器, 16.1 概論, <https://www.jsme.or.jp/kikainenkan2019/chap16/>
- 2) 砥粒加工学会編: 砥粒加工技術のすべて, 工業調査会, (2006) 136.
- 3) T. SAWADA: Effect of Hardness of Shot Peening Media on Surface Modification Behavior of Vacuum Carburized Steel by Micro Shot Peening, J. Japan Inst. Met. Mater., 78, 6 (2014) 211 (in Japanese).
- 4) K. SUZUKI, T. SHOBU and A. SHIRO: Residual Stresses of Water-Jet Peened Austenitic Stainless Steel, Journal of the Society of Material Science, Japan, 62, 7 (2013) 437 (in Japanese).
- 5) Y. SANO: Laser Peening for Extending Service Life of Components, Journal of the Surface Finishing Society of Japan, 60, 11 (2009) 698 (in Japanese).
- 6) T. SEGAWA, H. SASAHARA, T. ISHIKAWA and M. TSUTSUMI: Development of Compressive Residual Stress Generating Cutter and Its Basic Performance, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 70, 6 (2004) 853 (in Japanese).
- 7) T. OHTA, K. KAMO, S. ASADA and T. TERASAKI: Study of stress improvement mechanism on inner surface of pipes using outer surface rapid heating by numerical analysis, Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 27, 4 (2009) 307 (in Japanese).
- 8) H. KAWAKUBO, U. SATO and S. MURATA: Study on magnetic field assisted machining using electrolyzed reducing water-based slurry - Removal capability and surface property for non-ferromagnetic materials -, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 60, 9 (2016) 509 (in Japanese).
- 9) 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).
- 10) U. SATO, T. TAKENOCHI, 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).
- 11) U. SATO, M. TAKEUCHI and H. KAWAKUBO: The Basic Characteristics and the Performance of Precision Washing of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Electrolyzed Reducing Water, J. Jpn. Soc. Precis. Eng., 78, 3 (2012) 231 (in Japanese).
- 12) 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).
- 13) 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 characteristics -, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 46, 8 (2002) 401 (in Japanese).
- 14) 日本機械学会編: 生産加工の原理, 日刊工業新聞社, (1998) 126.
- 15) 若林三記夫, 中山守, 玉村謙太郎, 日野和明: 正面プライス層の高圧縮残留応力に関する研究, 材料, 39, 444, (1990) 1254.
- 16) 砥粒加工学会編: 砥粒加工技術のすべて, 工業調査会, (2006) 147.
- 17) S. MURATA and H. KAWAKUBO: Influence of axis inclination of rotating magnetic poles on polishing performance and cross-sectional shape in magnetic polishing, J. Jpn. Soc. Abras. Technol., 63, 5 (2019) 238 (in Japanese).
- 18) 川久保英樹, 今井悠哉: 磁気援用技術による研磨および洗浄に関する研究, 2010 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集, (2010) 287.