磁気研磨加工の研磨特性および仕上げ面性状

川久保 英樹

「機械の研究」 第65巻 第10号 別刷

2013年10月1日 発行

磁気研磨加工の研磨特性および仕上げ面性状

川久保 英樹*

1. はじめに

鉄粉などの磁気感応性粒子が磁界中へ供給されると，磁力線に沿って数珠つなぎに連結して，ブラシ状に整列する現象はよく知られている．磁気研磨加工は，ブラシ状に整列した磁気感応性粒子群（以後，粒子ブラシと呼ぶ）を加工工具として利用する加工法である．粒子ブラシは，繊維状のブラシとは異なり，接触面に多少の凹凸が存在しても，その形状に倣って形態を変化させて，工作物表面へ研磨圧力を発生することができる．そのため，自由曲面を有する金型の仕上げ加工への適用が有効である．また，磁気の物体透過現象を利用することで，パイプ内面の研磨にも適用することができる[1]．

このような中で，磁気研磨加工は最終工程として位置づけられ，表面粗さを向上させることのみならず，加工面の品質を向上させることが要求される．一般に，工作物が加工されると，その表面には加工変質層を生じるが，このことは磁気研磨加工においても同様であるため，磁気研磨後の加工変質層厚さなど，加工面の品質を評価することは極めて重要である．

本報では，磁性研磨材を用いた磁気研磨加工，および研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工に関する研磨特性・仕上げ面性状について述べる．

2. 磁気研磨加工の加工原理と研磨特性

2.1 磁性研磨材を用いたときの研磨性能

磁性研磨材を用いて磁気研磨加工を行う場合，粒子ブラシは磁性研磨材粒子によって形成される．磁性研磨材には，①数十 μm の強磁性材粒子表面に数 μm の砥粒を焼結結合して一体化したもの，②数十 μm の強磁性材粒子と数十 μm の砥粒粒子を焼結またはプラズマ粉体溶融後に破砕分級したものがあるが，これらは製造方法が特殊であるものが多く，コスト高であり，その種類も少ないといった問題点がある．そのため，著者は，強磁性材粒子と砥粒およびそれらを保持するための油脂を単純混合して作製する単純混合型磁性研磨材を開発し，その研磨特性を検討してきた[2)~4)]．

単純混合型磁性研磨材は，使用者が工作物の材質，前加工面粗さなどに合わせて，独自の磁性研磨材をつくることができるという利点がある．また，安価な材料を使用することによって，コストを抑えることができる．本報では，単純混合型磁性研磨材を使用したときの研磨特性について述べる．

表1に，単純混合型磁性研磨材の各構成要素を示す．強磁性材粒子は磁気吸引力による研磨圧力を発生し，砥粒は切れ刃となる．油脂は，強磁性材粒子と非磁性である砥粒粒子との結合材としての役割を果たす．

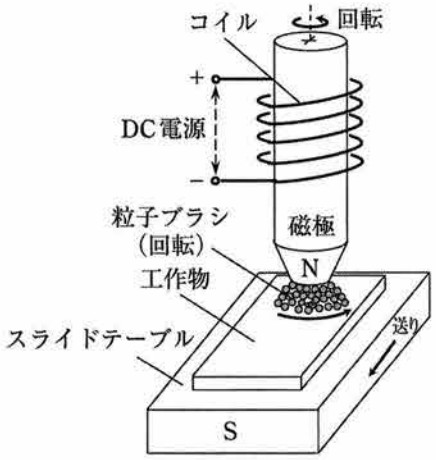
基本的な研磨特性を検討するため，平面の磁気研磨加工を行った．**図1**に，磁気研磨加工の加工原理図，平面磁気研磨装置の外観写真を示す．この装置は，汎用フライス盤の一部を磁気研磨用に改良したもので，コイル，回転磁極（N極），スライドテーブル（S極），ヨークによって構成されている．回転磁極は，フライス盤の主軸に取り付けてあり，コイル内で回転する．コイルを励磁すると磁束が発生し，回転磁極，ヨーク，スライドテーブルからなる閉磁気回路を形成する．工作物は，

表1 単純混合型磁性研磨材の構成要素

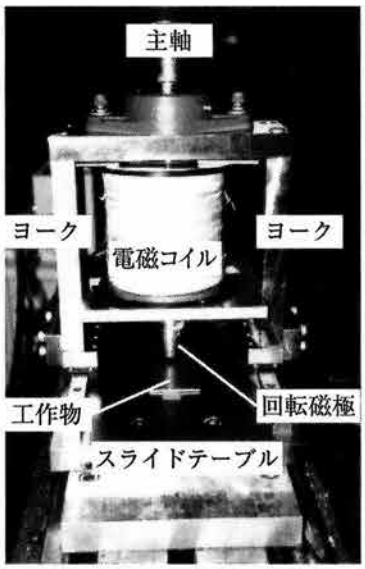
構成要素	役割
強磁性材粒子	磁気吸引力による研磨圧力を発生
砥粒	切れ刃
油脂	強磁性材粒子と砥粒粒子の結合材

* 信州大学 教育学部 技術教育講座(機械)講師
(Hideki Kawakubo)

0368-5713/13/¥500/1 論文/JCOPY



(a) 概略図



(b) 磁気研磨加工装置の外観

図 1　磁気研磨加工の原理

表 2　実験条件（単純混合型磁性研磨材を用いた磁気研磨加工）

工作物	SUS 304
板厚	3 mm
初期面粗さ	2 μm R_z
磁極回転数	620 min^{-1}
工作物送り速度	20 mm/min
工作物送り量	40 mm
磁極形状	外径 φ20 mm，材質 SS 400
起磁力	3 × 3000 A Turn
加工間隙	3 mm
加工液	研削液：ソリューブル
強磁性材	ショット用鋼球：φ115 μm，4.8 g
砥粒	WA#3000，1.0 g
油脂	デカン酸，0.25 g

スライドテーブル上に直接取り付ける．そして，回転磁極と工作物との加工間隙に磁性研磨材を供給して粒子ブラシを形成させ，粒子ブラシの回転と工作物の送りによって表面を研磨する．**表 2** に実験条件を示す．工作物は，非磁性材料である SUS 304 を使用した．磁極先端部の磁束密度は 0.5 T である．また，加工中には工作物表面への研磨屑や油脂の吸着を防止するためにソリューブルタイプの研削液を添加した．

図 2 に，パス回数を変化させたときの研磨量と表面粗さとの関係を示す．表面粗さは，2 パスまで急激に減少し，その後は徐々に減少する傾向がみられた．研磨量は，表面粗さの向上に伴い，ほとんど増加しなくなる．この事象は，加工によっ

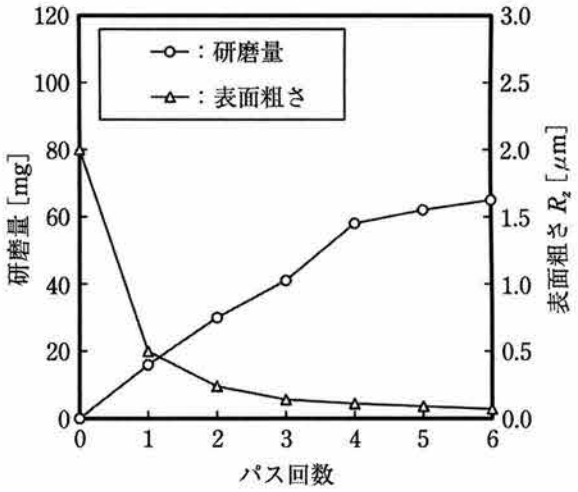
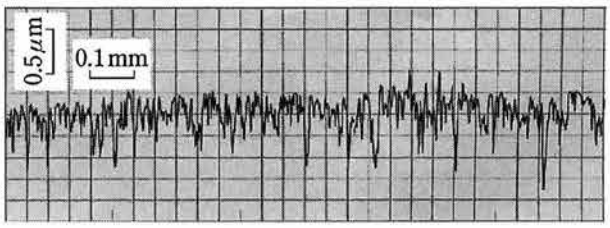
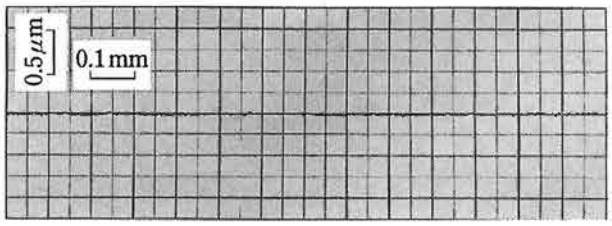


図 2　磁性研磨材を用いたときの研磨性能



(a) 研磨前



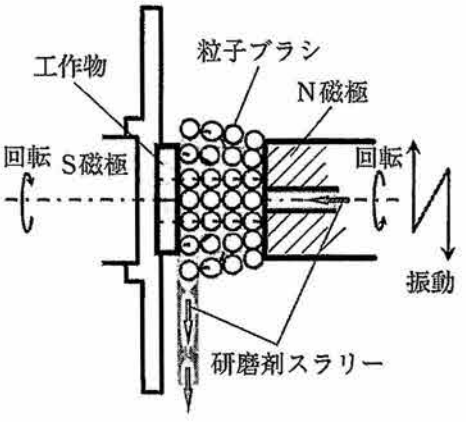
(b) 研磨後

図 3　研磨前後の粗さプロファイル

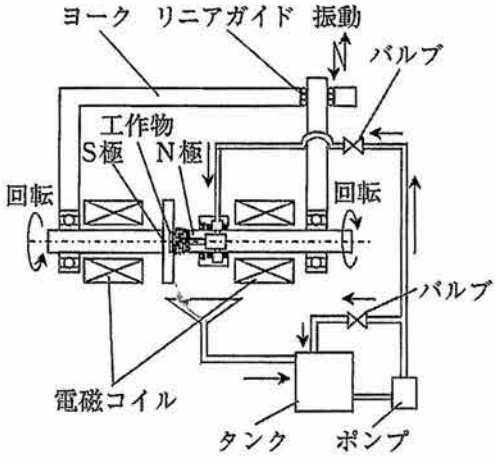
て生じた切り屑が粒子ブラシ内にとどまり，目づまり状態になったためである．このことは，長時間の高能率研磨を目的した場合には問題となるが，その一方で，目づまりした磁性研磨材（粒子ブラシ）は，工作物表面をラビング[5]しながら，砥粒粒度によって決定される表面粗さよりも小さな表面粗さにまで向上させる効果がある．本実験条件では，6パスの磁気研磨加工により，表面粗さが0.1μm R_z 程度に向上した．図3に，研磨前後の工作物の粗さプロファイルを示す．

2.2 研磨材スラリー連続供給式磁気研磨の研磨性能

前節に示したように，磁性研磨材を使用した場合，一定時間以上研磨すると研磨材の寿命によって除去能率が低下するという問題がある．そこで，研磨能率を維持しながら，長時間の磁気研磨加工を行うための手法を試みた．この方法では，強磁性材粒子のみで形成される粒子ブラシへ切れ刃となる非磁性の砥粒と研磨液を混合した研磨材スラリーを連続的に供給して研磨する[6]．本節では，スラリー連続供給式磁気研磨加工の研磨特性について述べる．



(a) 概念図



(b) 装置概略図

図4　スラリー連続供給式磁気援用加工

図4に，スラリー連続供給式磁気研磨の概念図および装置概略図を示す．この装置は，電磁コイル内に挿入した回転N磁極と回転S磁極を対向に配置したものであり，両磁極はヨークを介して閉磁気回路を形成している．N磁極は，回転運動と同時に，工作物の半径方向に振動運動する構造になっている．また，工作物はS磁極先端の工作物取付け用テーブル（非磁性）に装着して研磨する．

強磁性材粒子は，N磁極と工作物（S極側）間に供給されると磁力線に沿って粒子ブラシを形成し，工作物の表面に磁気吸引されて研磨圧力を発生する．研磨材スラリーは，スラリー供給用ユニットを介して N磁極のセンタースルー穴へ誘導され，磁極先端から加工部へ供給される．そして，加工に関与して流出した研磨材スラリーは，テーブル下部に設置された受け皿からタンクへ回収され，タンク内で撹拌後，ポンプを用いて循環供給する．表3に実験条件を示す．

図5に，研磨時間と研磨量，および表面粗さとの関係を示す．研磨量は，時間経過とともにほぼ一定の割合で増加する．これは，常に新しい砥粒が磁極の先端から供給されること，および加工に関与した砥粒と切り屑とが良好に排出されたためである．表面粗さは，研磨開始5分から10分までに急激に向上し，その後はほとんど変化しなくなり，粒子径によって決定させる固有の値を示した

表3　実験条件（研磨材スラリー連続供給式磁気研磨）

工作物	SUS304（ϕ 20 × 2 t mm）
初期表面粗さ	1 μmR_z
N磁極回転方向	1300 min^{-1}，CW
S磁極回転	200 min^{-1}，CCW
N磁極振動	振幅 20 mm，振動数 1 Hz
起磁力	3.0 × 3000 A Turn
加工間隙	3 mm
スラリー供給量	300 ml/min
砥粒混合割合	10 wt %
強磁性材	ショット用鋼球：ϕ 115 μm，4.0 g
砥粒	WA#3000
研磨液	研削液：ソリューブル

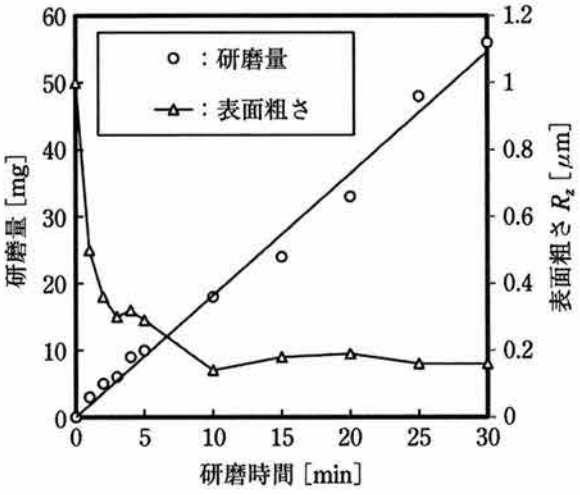


図 5　研磨材スラリー連続供給式磁気研磨の研磨性能

本実験条件においては，表面粗さは 0.14 μm R_z となった．

3．仕上げ面性状の評価

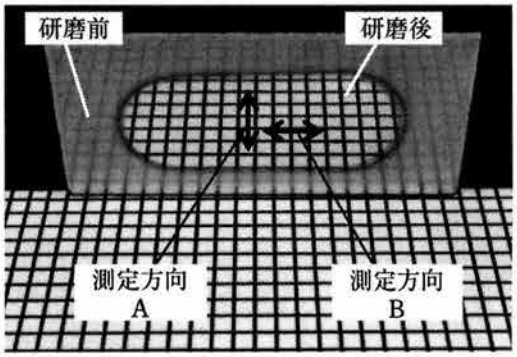
磁気研磨後の仕上げ面性状を評価するために，表面残留応力，加工変質層について測定した．仕上げ面の品質を評価する項目は上記以外にも存在するが，ここでは，上記 2 項目について検討した結果を述べる．

3.1　表面残留応力

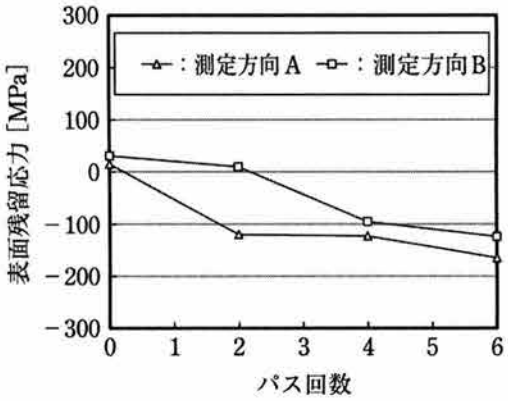
表面残留応力は，X 線回折法により $2\theta-\sin^2\phi$ 線図を用いて算出した．計測には理学（株）社製「MSF-2M」を使用した．**図 6** に，磁性研磨材を用いた磁気研磨加工による表面残留応力とその測定方向を示す．なお，研磨条件は 表 2 に示したとおりである．表面残留応力は，パス回数の増加に伴い，徐々に圧縮の方向に変化する傾向がみられた．研磨前は 15～30 MPa 程度の引張りの残留応力であるが，研磨後は 120～160 MPa 程度の圧縮の残留応力となった．

図 7 に，研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工による表面残留応力とその測定方向を示す．なお，研磨条件は 表 3 に示したとおりである．研磨前の表面残留応力は 15 MPa 程度の圧縮の残留応力であったが，研磨開始 5 分後には約 200 MPa の圧縮の残留応力になり，その後は 200 MPa 付近の値を示している．

以上より，磁気研磨加工による仕上げ面には，圧縮の残留応力が発生することが明らかになった．



(a) 残留応力の測定方法

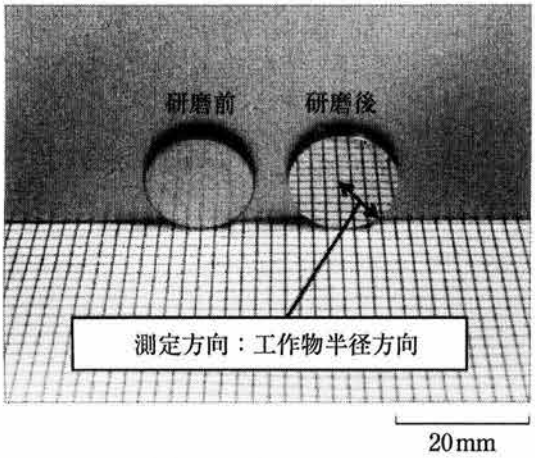


(b) パス回数と表面残留応力

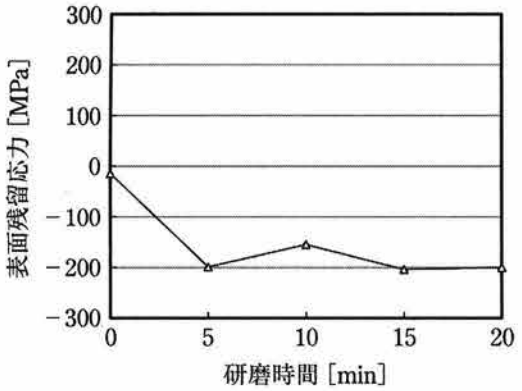
図 6　磁性研磨材を用いた磁気研磨加工による表面残留応力

この事象は，磁性研磨材の構成要素として使用されるショットピーニング用鋼球（強磁性材粒子）が加工面に対して押しならすように作用し，バニシング仕上げと同様の現象を与えた[7]ためと考えられる．

図 8 に，ワイヤーカット放電加工面を研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工によって研磨したときの表面残留応力とその測定方向を示す．ここで，測定方向 A はワイヤーカット放電加工時におけるワイヤー電極の走行方向，測定方向 B はワイヤーカット放電加工時の試料送り方向である．なお，研磨条件は 表 3 に示したとおりである．研磨前の試料は，焼鈍処理をしていないため，前加工による約 300 MPa の引張残留応力が存在している研磨開始後，残留応力は引張方向から圧縮方向に変化し，10 分以降においては 300～500 MPa の圧縮の値を示した．このとき，前加工の影響を完全に無視することはできないが，先に示した 図 6，図 7 の測定結果と同様に，バニシング効果が加工

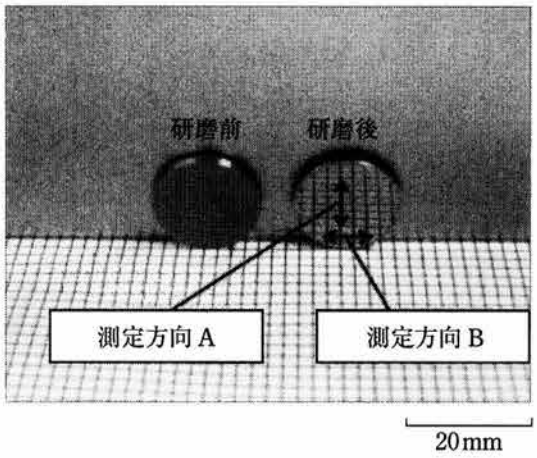


(a) 残留応力の測定方向

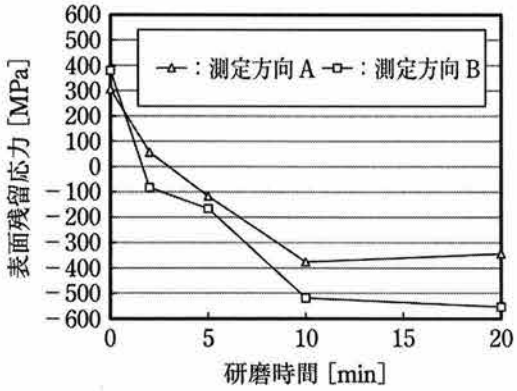


(b) 研磨時間と表面残留応力

図 7　研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工による表面残留応力



(a) 残留応力の測定方向



(b) 研磨時間と表面残留応力

図 8　研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工による表面残留応力（ワイヤーカット放電加工面）

面に付加されているものと考えられる．

3.2 加工変質層深さ

加工変質層の測定法には，腐食法，顕微鏡法，X線法，硬度法，再結晶法などが挙げられる[8]が，ここでは改良微小硬度法[9]を用いて測定を行った．この原理では，まず微小硬度計を用いて徐々に荷重を増加していきながら，表面の微小硬度と圧子貫入深さを測定し，微小硬度と圧子貫入深さとの関係曲線を求める．そして，圧子貫入深さが加工変質層深さよりも小さい場合には求めた関係曲線は一次関係にあり，また圧子貫入深さが加工変質層深さを超えた場合には関係曲線が二次関係にあるという特徴を利用して，関係曲線の変曲点から加工変質層の深さを算出する．

測定には，(株) エリオニクス社製の超微小押込み硬さ試験機「ENT-1100a」(最小荷重ステップ 20 nN) を使用した．ここでは 98.0 mN までは 9.8, 19.6, 29.4, 39.2, 49.0, 68.6 mN と荷重を変化させ，98.0 mN から 490.0 mN までは 49.0 mN ごとに，また 490.0 mN から 980.0 mN までは 245.0 mN ごとに荷重を変化させて，そのときの硬度を測定した．なお，一つの荷重に対しては試料表面の 5 箇所で測定を行い，その平均値を用いた．

図 9，図 10，図 11 に，磁気研磨面からの押込み深さとビッカース硬さとの関係を示す．図 9 は磁性研磨材による磁気研磨加工の場合，図 10 は研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工により焼鈍処理した工作物を研磨した場合，図 11 はワイヤーカット放電加工面をスラリー連続供給式磁気研磨加工した場合を示している．各関係曲線における直線部分（圧子貫入深さ 0〜0.5 μm 程度の範囲）が加工変質層に相当し，二次曲線部分（0.5 μm 程度〜）との境界位置が加工変質層深さになる．図から正確な加工変質層深さを求めることは困難であるため，松井が提案した計算方法[9]によって算出した．その結果，加工変質層深さは，磁性研磨

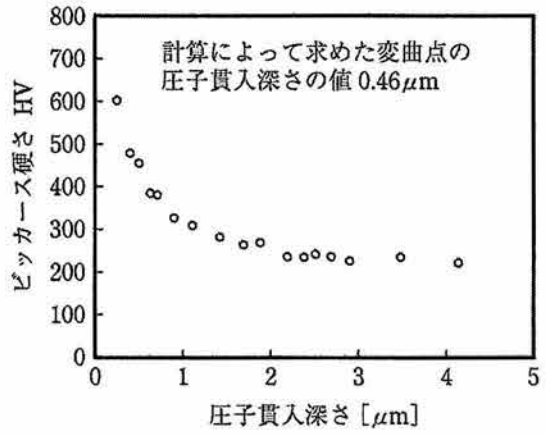


図 9　磁気研磨面からの押込み深さとビッカース硬さとの関係（磁性研磨材による磁気研磨加工）

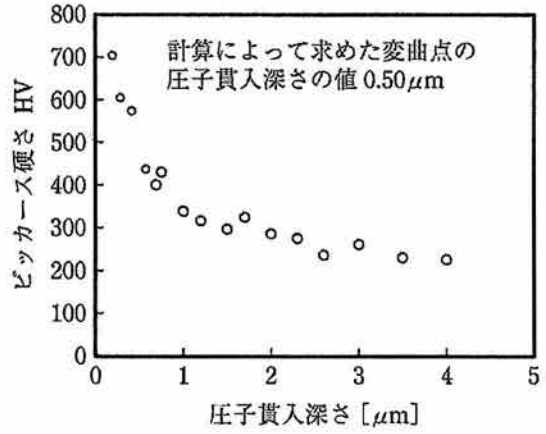


図 10　磁気研磨面からの押込み深さとビッカース硬さとの関係（研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工）

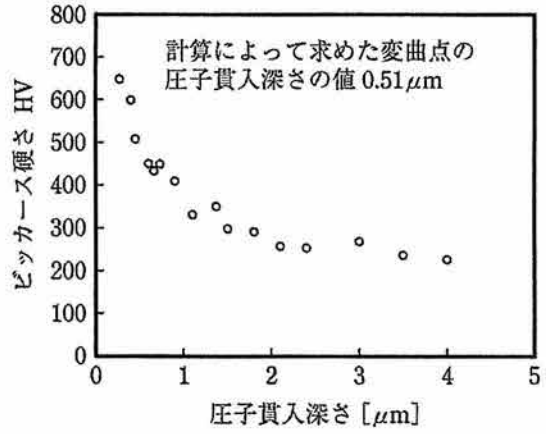


図 11　磁気研磨面からの押込み深さとビッカース硬さとの関係（研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工，ワイヤーカット放電加工面）

材を用いた場合（図 9）が 0.46 μm，研磨材スラリー連続供給式磁気研磨加工による場合（図 10，図 11）がそれぞれ 0.50 μm，0.51 μm であり，ダメージの少ない仕上げ面が得られることが明らかになった．

4．おわりに

磁気研磨加工は，フレキシブルな粒子ブラシによって複雑形状部品などの仕上げに有効な加工法である．本報では，平面試料を用いて研磨性能，および仕上げ面性状に関する評価とその加工メカニズムを考察した．

以下に示す知見は，磁気研磨によって，複雑形状部品やパイプの内面など，従来の加工法では困難とされる箇所の仕上げおよび表面改質するときに活用できる．

(1) 単純混合型磁性研磨材を用いた場合，一定時間以上研磨すると，研磨材の寿命によって粒子ブラシは目づまり状態になり，除去能率が低下するが，目づまり状態の粒子ブラシによるラビング効果で表面粗さは更に向上する．

(2) 強磁性材粒子のみで形成される粒子ブラシへ研磨材スラリーを連続的に供給して研磨することで，長時間の安定した磁気研磨加工が可能になる．

(3) 磁気研磨加工による仕上げ面には，圧縮の残留応力が発生する．これは，磁性研磨材中の強磁性材粒子が，加工面に対してバニシング仕上げと同様の効果を与えたためである．

(4) 改良微小硬度法により加工変質層深さを測定した結果，その値は 0.5 μm 程度であった．

参考文献

1) 砥粒加工学会編：砥粒加工技術のすべて，工業調査会（2006）pp.108-109.
2) 川久保英樹 ほか：砥粒加工学会誌，43, 2 (1999) pp.75-80.
3) 川久保英樹 ほか：日本機械学会論文集（C 編），65, 632 (1999) pp.1690-1697.
4) 川久保英樹 ほか：砥粒加工学会誌, 54, 1 (2010) pp.31-36.
5) 日本機械学会編：生産加工の原理，日刊工業新聞社（1998）p.126.
6) 川久保英樹 ほか：砥粒加工学会誌, 46, 8（2002）pp.401-406.
7) 松井正己 ほか：超仕上げ作業とその原理，養賢堂（1965）p.182.
8) 河村末久 ほか：研削加工と砥粒加工，共立出版社（1984）p.89.
9) 松井正己 ほか：超仕上げ作業とその原理，養賢堂（1965）p.173.