

博士論文

マシニングセンタを用いた磁気研磨加工による
魔鏡面の創製に関する研究

2018

馬 雷

目 次

| | |
|--|----|
| 第1章 緒論 | |
| 緒論 | 1 |
| 参考文献 | |
| 第2章 5軸制御工作機械上での切削加工と磁気研磨加工による魔鏡面創製法の提案 | |
| 2.1 緒論 | 10 |
| 2.2 魔鏡面創製のための新たな加工法の提案 | 12 |
| 2.3 実験装置および方法 | 13 |
| 2.3.1 多軸マシニングセンタ | 13 |
| 2.3.2 加工材料 | 14 |
| 2.3.3 平面創製加工 | 14 |
| 2.3.4 マイクロ溝の創製 | 15 |
| 2.3.5 磁気研磨加工 | 16 |
| 2.4 実験結果および考察 | 18 |
| 2.4.1 切削したマイクロ溝 | 18 |
| 2.4.2 研磨加工後のマイクロ溝の形状変化 | 23 |
| 2.4.3 提案した手法の有効性と課題 | 26 |
| 2.5 結言 | 28 |
| 参考文献 | |
| 第3章 磁気研磨加工における前加工面と研磨パスの影響について | |
| 3.1 緒論 | 30 |
| 3.2 実験方法 | 31 |
| 3.3 実験装置 | 33 |
| 3.4 評価方法 | 34 |
| 3.4.1 前加工における評価手法 | 34 |
| 3.4.2 磁気研磨加工における評価方法 | 35 |
| 3.5 ボールエンドミル切削による仕上げ切削条件の最適化 | 38 |
| 3.6 磁気研磨加工における除去質量 M モデルの構築 | 42 |
| 3.6.1 研磨圧力 P のモデル化 | 43 |
| 3.6.2 研磨相対速度 v のモデル化 | 46 |
| 3.6.3 Pvt 分布の導出 | 49 |

| | | |
|---------|-------------------------|-----|
| 3. 6. 4 | プレストン定数 k の決定 | 5 2 |
| 3. 6. 5 | 鏡面化に必要な表面除去量 M の検討 | 5 4 |
| 3. 6. 6 | 魔鏡創製ケーススタディ実験およびその結果と考察 | 5 5 |
| 3. 6. 7 | 従来の磁気研磨加工法における課題 | 5 8 |
| 3. 7 | 結言 | 5 9 |
| | 参考文献 | |

第4章 磁気研磨ブラシによる研磨機構の解明

| | | |
|---------|-----------------------------|-----|
| 4. 1 | 緒論 | 6 2 |
| 4. 2 | 実験装置および観察手法 | 6 4 |
| 4. 2. 1 | 実験装置 | 6 4 |
| 4. 2. 2 | 観察手法 | 6 6 |
| 4. 3 | 市販の磁性研磨ペーストによる研磨特性の解明 | 6 8 |
| 4. 3. 1 | 磁気研磨ブラシの挙動 | 6 8 |
| 4. 3. 2 | 切りくずと仕上げ面性状の観察 | 7 2 |
| 4. 4 | 鋼球磁気研磨ブラシによる磁気研磨法 | 7 5 |
| 4. 5 | 鋼球磁気研磨ブラシによる押付け力特性の解明 | 7 7 |
| 4. 5. 1 | 磁性研磨ペーストの構成 | 7 7 |
| 4. 5. 2 | 実験条件と鋼球磁気研磨ブラシの挙動 | 7 8 |
| 4. 5. 3 | 市販磁気研磨ブラシと鋼球磁気研磨ブラシの研磨圧力の比較 | 8 3 |
| 4. 6 | 結言 | 8 5 |
| | 参考文献 | |

第5章 磁性メディア各諸元の押付け力への影響に関する研究

| | | |
|---------|-------------------------------------|-------|
| 5. 1 | 緒論 | 8 8 |
| 5. 2 | 磁性メディアからなる磁気研磨ブラシの押付け力発生機構に関する基礎的考察 | 8 9 |
| 5. 2. 1 | 磁性メディアの準備 | 8 9 |
| 5. 2. 2 | 押付け力への影響 | 9 1 |
| 5. 3 | 磁性メディアの諸元が研磨性能に及ぼす影響 | 9 9 |
| 5. 3. 1 | 研磨ブラシ用磁性メディアの準備 | 9 9 |
| 5. 3. 2 | 押付け力への影響 | 1 0 1 |
| 5. 4 | 結言 | 1 0 2 |
| | 参考文献 | |

第6章 磁性メディアに投射材を用いた場合の押付け圧力への影響に関する研究

| | | |
|---------|-------------|-----|
| 6. 1 | 緒論 | 105 |
| 6. 2 | 実験装置および実験方法 | 105 |
| 6. 2. 1 | 実験装置 | 105 |
| 6. 2. 2 | 実験方法 | 106 |
| 6. 3 | 実験結果 | 107 |
| 6. 4 | 結言 | 117 |
| | 参考文献 | |

第7章 結論

| | | |
|------|--------|-----|
| 7. 1 | 本研究の結果 | 120 |
| 7. 2 | 今後の課題 | 123 |

謝辞

第1章 緒 論

中国の前漢末期より，魔鏡（中国では透光鏡）と呼ばれる鑄造青銅鏡が現在まで伝えられている^{1.1)}。日本では，江戸時代より阿弥陀如来，文字，マリア像などが描かれた魔鏡が信仰の対象として，熟練鏡師によって製作されていた^{1.2)}。魔鏡は肉眼ではほとんど模様を認められない一見して普通の鏡でありながら，太陽光などの平行光を魔鏡面に反射させ，壁やスクリーンに投射させると，魔鏡背面に鑄造された模様を明暗パターンとして投影する特殊な鏡である。

ヒトの肉眼では鏡面に模様を感じない鑄造青銅の魔鏡が，光を反射させて鏡背面に存在する模様をスクリーンの明暗像として発生させる原理としては，魔鏡の断面肉厚が相違すると，(I) 鑄造時に溶金の冷却速度に差を生じ，これが組織の相違となって現われ，表面の光の反射率の変化により生じる組織説^{1.3)}，(II) 研磨時に肉厚の違いにより生じる圧力の差で鏡面の各部になめらかな凹凸を発生させる幾何説が存在していた^{1.4)}。米田らは京都の鑄鏡研磨技術者である山本鳳龍が伝統技法により製作した魔鏡を用いてその表面性状を定量的に測定し，鏡面に存在するミクロンオーダーのなめらかな凹凸部が反射光を収縮拡散する後者が支配的であることを示した^{1.5, 1.6)}。その原理図を図 1.1 に示す。ただし，鏡面上の模様が肉眼で認識されないためには，図に示すようにその曲面が次の二つの条件を満たす必要がある^{1.4, 1.7)}。

- (1) 溝深さ $0.6 \mu\text{m} \sim 1.5 \mu\text{m}$
- (2) 曲率連続 (C2 連続)

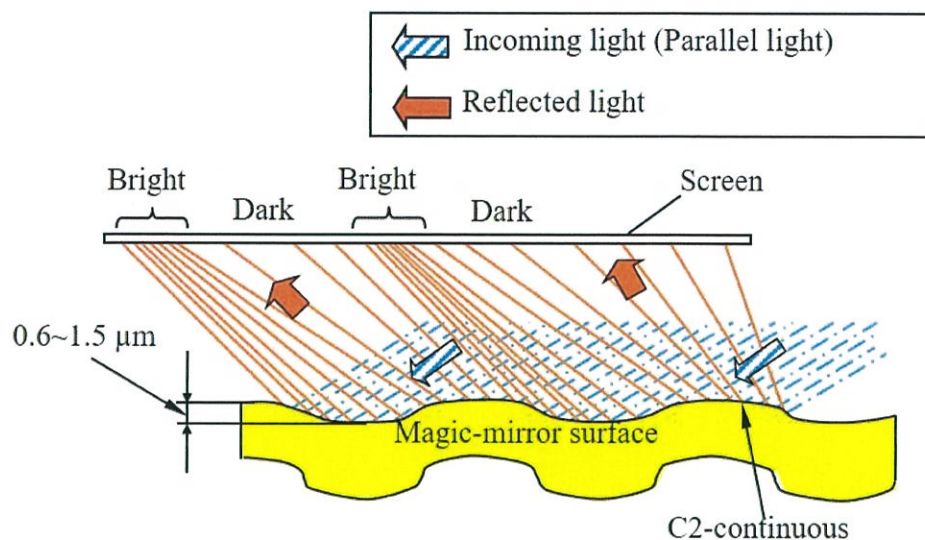


Fig.1.1 Mechanism of magic-mirror

職人による従来の魔鏡製作工程は、(1) 造型、(2) 鋳造、(3) 解砕、(4) 鏡面の研磨仕上げの工程があり、いずれも手作業で行われてきた (図 1.2 参照)。すなわち、(1)から(3)の工程で鏡の背面にスクリーンに映し出す模様を肉厚部と肉薄部で表現し、(4)の研磨工程において研磨時にかかる圧力により背面が肉薄部に該当する箇所は肉厚部より大きく弾性変形して除去率が下がり、研磨量の差異により、肉厚部がわずかに凹面となり、肉薄部がわずかに凸面となるものである。これに対して、日比野らは弾性変形を有限要素法にてシミュレーションし、その定性的な妥当性を示した¹⁴⁾。

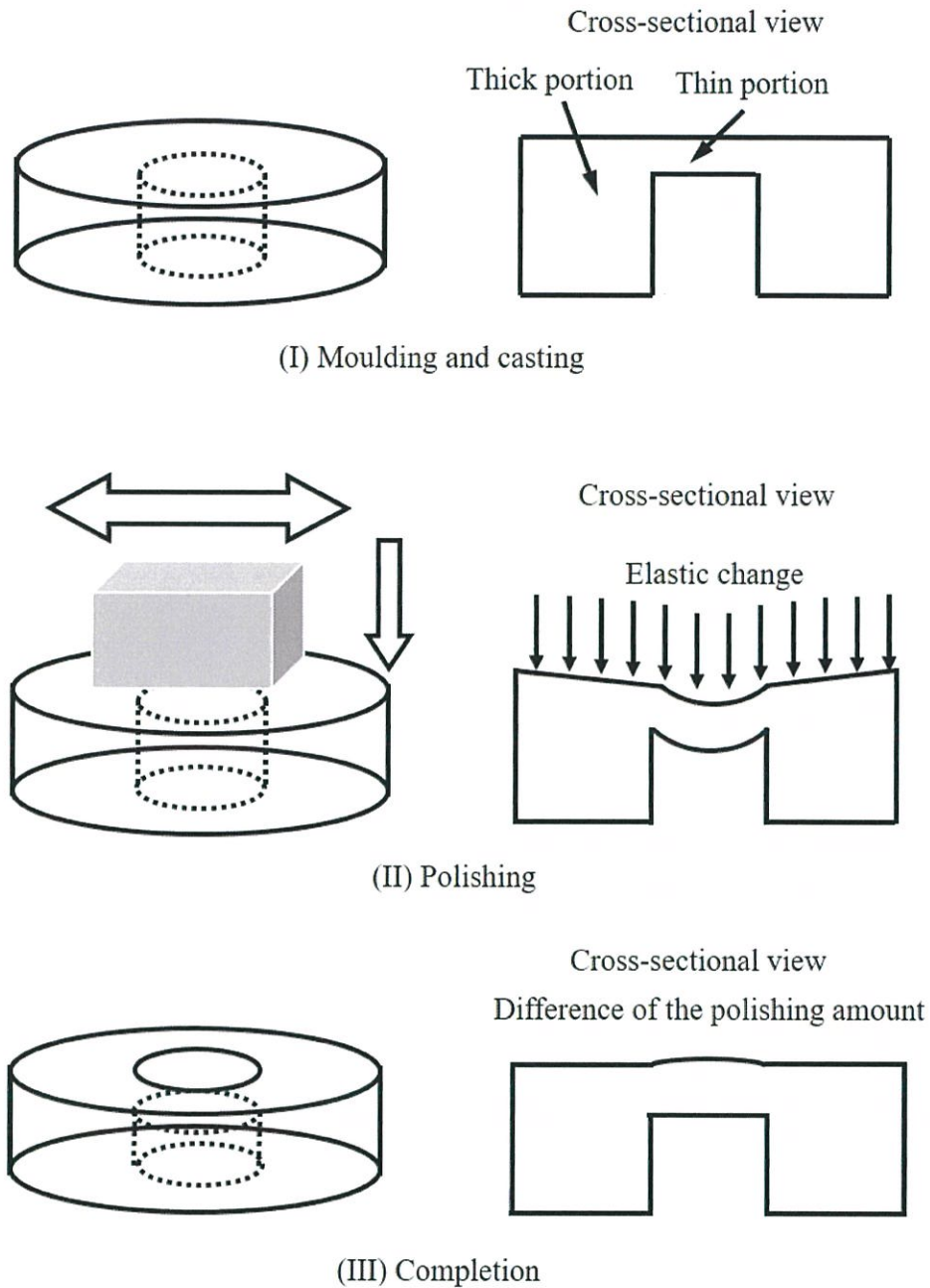


Fig.1.2 Traditional fabrication method (Skilled craftsmen)

図 1.2 より、特に研磨工程 II においては、厚み 3 mm (青銅の鑄造できる肉厚限界より) 程度の青銅鏡を 1 mm くらいまで削らないと (凹凸を形成するために必要な剛性差を出す必要) 魔鏡ができないということである。また、削り過

ぎでも割れが鏡に入ってしまうため、使いものにならない。そこで最新の超精密加工機を用いてその再現研究を試みる研究^{1.8)}も開始されているが、まだそれらは始まったばかりであり、現在唯一の魔鏡師である山本合金製作所五代目山本晃久氏の場合は、軽く面を叩く時の音の微妙な違いで判断しながら研磨作業を行っている。このようなコツやノウハウといった暗黙知である技能や技術の習得は、一朝一夕にいかないものである。しかし、現在暗黙知を豊富に有する熟練技能者の高齢化に伴う減少が問題視されている。加えて、暗黙知を継承する立場にある若手技能者も減少傾向にある^{1.9, 1.10)}。このような技能の枯渇問題を抱えている状況において、熟練技術者の暗黙知を形式知化し、若手技能者の育成や迅速なモノづくりの支援へと活かす手法の構築が課題となっている。このような問題は、魔鏡の製造のみでなく、現在の精密金型の製造においても問題提起されている。金型の研磨工程は熟練技術者の手作業で行われており、研磨作業は人間の技能や感覚を要するため、工作機械などを用いた自動化が困難とされている。研磨加工の自動化には磁気研磨法が着目されてきたが^{1.11)}、十分な磁力を生じるには電磁石の装置が必要^{1.12~1.18)}であり、有効な手法には達していない。

このような課題を解決する手法としては、熟練技能者の作業をビデオやフォースセンサーなどで記録し、動作解析を行うことで、ロボット^{1.19~1.24)}等を用いて熟練技能者の作業を忠実に模倣する手法^{1.25~1.27)}が考えられる。しかし、この手法ではその作業を行える熟練技能者の存在が前提であり、作業解析による熟練技能者育成の効率向上は期待できても、技能の伝承には相当の期間を要するだけでなく、その素養を持った人材の確保という問題が残る。一方、最近の工作機械の性能向上と強力なネオジウム磁石を応用した磁気研磨を組合せた新たな加工方法の開発により、これまで熟練技能者に頼っていた精密部品の加工も

工作機械で十分加工できるようになってきている。そこで、筆者らは、工作機械の性能向上と新たな加工法の開発により、熟練技能者の技能伝承問題を解決することを考えた。これを実現するために、本論文では上述の魔鏡を取り上げ、現状の工作機械の性能及び新しい加工法を用いて、熟練技能者の技能に頼らずに魔鏡を製作するための技術開発を行うことを目的とする。

本研究の構成は次のようになっている。

第 1 章は、本研究の目的と概要を述べている。

第 2 章では、新たな付加価値も期待できる新たな魔鏡創製手法を提案している。すなわち、すべての加工工程を魔鏡面に集約する可能性について検討している。さらに本提案手法の有効性と問題点を考察している。

第 3 章では、磁気研磨加工における前加工面と研磨パスの加工面への影響を調べ、最適なボールエンドミル加工条件の導出および磁気研磨加工パスのモデル化を行っている。すなわち、ボールエンドミル切削による加工後の表面粗さに着目し、後工程である磁気研磨に要する時間も考慮して総合的な能率の観点からの最適なボールエンドミル切削加工条件の決定法を検討している。さらに、磁気研磨加工での加工パスの決定を容易に行うため、鏡面化に必要な除去質量 M を推定できる方法も検討している。

第 4 章では、高速度カメラと動力計との組合せによる観察システムを構築し、磁気研磨実験専用ジグの開発を行っている。その観察システムを利用して磁気研磨ブラシの特性と押付け力の発生機構の解明を行っている。さらに、真球の鋼球による鋼球磁気研磨ブラシを提案し、市販の磁気研磨ブラシと比較しつつブラシ押付け力の制御可能性について検討している。

第 5 章では、エンドミル型磁気研磨工具とマシニングセンタを統合した研磨機構における基礎的な特性の考察を行っている。すなわち、磁性メディアの諸

元（形状，サイズ，個数及び総重量）に着目し，磁気研磨押付け力への影響について実験的に検討している．

第6章では，エンドミル型磁気研磨工具とマシニングセンタを統合した研磨機構におけるより実用的な特性の考察を行っている．すなわち磁性メディアに市販で安価な投射材を用い，磁性メディア固有の影響と，磁性研磨材としての効果について検討している．

第7章では，以上をまとめた本研究の結論を示している．

参考文献

- 1.1) Wu, R.C. and Dian, M.Z., “The Secret of Chinese Light Penetration Bronze Mirror” (Shanghai Science and Technology, China, 1982)
- 1.2) 渡辺正雄, “日本人と近代科学” (岩波新書, 1976)
- 1.3) 松田政夫, “凝固及び冷却時の収縮に起因する魔鏡現象”, 日本鑄造工学会, Vol.66, No.5, (1994), 365-370
- 1.4) 日比野謙一, “魔鏡の成因とその解明”, 応用物理, Vol.61, No.6, (1992), 600-603
- 1.5) 米田博幸, 石野享, “鑄銅鏡の鏡面状態と光の反射に及ぼす加工工程の影響”, 近畿大学理工学部研究報告, Vol.13, (1978), 185-194
- 1.6) 米田博幸, “魔鏡 (金属鏡) におけるナノデフレクション機構について”, 日本溶射協会, Vol.45, No.2, (2008), 52-55
- 1.7) 青山栄一, 廣垣俊樹, 大窪和也, 小川圭二, 澤和也, 小川幸子, 河井遼平, “マシニングセンタの CNC 機能を活用した切削と磁気研磨による魔鏡面の創製”, 砥粒加工学会誌, Vol.55, No.9, (2011), 540-545
- 1.8) Ahmed, S.A., Ko, J.H. and Yeo, S.H., “Fabrication of 3D submicron to micro textured surfaces using backside patterned texturing (BPT)”, Precision Engineering, Vol.47, (2017), 397-405
- 1.9) 門脇仁, “熟練技能をナレッジ化せよ”, 日刊工業新聞社, (2003), 1-210
- 1.10) 日比野健一, 山内真, 清水透, 松田浄史, “弾性変形による微細凹面構造の形成—魔鏡の結像原理”, 機械技術研究所所報, Vol.43, No.2, (1989), 18-26
- 1.11) Kim, J.D. and Noh, I.H., “Magnetic polishing of three dimensional die and mold surfaces”, International Journal Advanced Manufacturing Technology, Vol.33, (2007), 18-23
- 1.12) Kim, J.D. and Choi, M.S., “Study on magnetic polishing of free-form surfaces”, International Journal Machine Tools Manufacturing, Vol.37, No.8, (1997), 1179-1187
- 1.13) Yin, S.H. and Shinmura, T., “A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of

- three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing“, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.44, (2004), 383-390
- 1.14) 国枝正典, 中川威雄, 横塚勝, ”遊星歯車式磁力研磨工具の開発に関する研究“, *精密工学会誌*, Vol.54, No.2, (1988), 359-364
- 1.15) 国枝正典, 中川威雄, 樋口俊郎, ”磁力研磨工具を用いたロボットによる曲面の研磨“, *精密工学会誌*, Vol.54, No.1 (1988), 125-131
- 1.16) 進村武男, 高沢孝哉, 波田野栄十, ”磁気研磨法の研究 (第 1 報) –加工原理と二, 三の研磨特性“, *精密工学会誌*, Vol.52, No.5, (1986), 851-857
- 1.17) Lin, C.T., Yang, L.D. and Chow, H.M., “Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the taguchi method”, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.34, (2007), 122-130
- 1.18) 呉勇波, ”MCF スラリーを用いた樹脂デバイスのロボット研磨“, *砥粒加工学会誌*, Vol.57, No.9, (2013), 578-581
- 1.19) 浅川直紀, 栗山稜生, ”産業用ロボットを用いたばり取り作業の自動化 (中子のパーティングラインのばり取り) ”, *日本機械学会論文集*, Vol.77, No.782, (2011), 374-383
- 1.20) 浅川直紀, 瀬戸敬, 平尾政利, 竹内芳美, ”産業用ロボットによる面取り品質のコントロール (安全性を重視した面取りの場合) ”, *日本機械学会論文集*, Vol.68, No.673, (2002), 295-300
- 1.21) Bone, G.M. and Elbestawi, M.A., “Sensing and control for automated robotic edge deburring”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.41, No.2, (1994), 37-146
- 1.22) 水本善雄, 浅川直紀, 竹内芳美, ”産業用ロボットによる面取り作業の自動化“, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.68, No.669, (2002), 247-252

- 1.23) 武藤伸洋, 下倉健一郎, ”接触情報センシングを用いた倣い作業の教示と制御”,
日本ロボット学会誌, Vol.15, No.5, (1997), 744-751
- 1.24) 狼 嘉彰, H. LAKHANI, 松永三郎, 砂押貴光, ”表面倣い力制御ロボットに関する実験的研究(第 1 報, 力評価システムと三自由度ロボットテストベッドの試作)”,
日本機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.621, (1998), 288-295
- 1.25) 植木祐輔, 森重功一, 石田徹, 竹内芳美, ”産業用ロボットによる研磨作業の自動化”,
精密工学会誌, Vol.70, No.12, (2004), 1522-1526
- 1.26) 永田寅臣, 渡辺桂吾, 津田邦博, 川口修司, 藤本佳宏, 村瀬安英, ”多軸制御用
CL データに基づく倣い制御器を用いた力制御ロボットサンダーの開発とその評価実験”,
精密工学会誌, Vol.68, No.7, (2002), 953-957
- 1.27) Jose, A.D., Angel, F.C., Carlos, J. and Jorge, S., “Conformal polishing approach: Tool
footprint analysis”, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol.8, No.2, (2016), 1-14

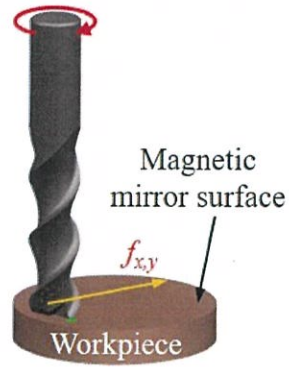
第 2 章 5 軸制御工作機械上での切削加工と 磁気研磨加工による魔鏡面創製法の提案

2.1 緒 論

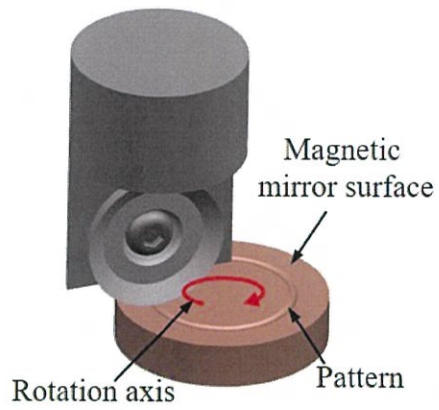
第 1 章で述べたように、ヒトの肉眼では鏡面に模様を感じない鑄造青銅の魔鏡が、光を反射させて鏡背面に存在する模様をスクリーンの明暗像として発生させる原理は、魔鏡の断面肉厚が相違することにより、研磨時に肉厚の違いにより圧力差が生じ、鏡面の各部になめらかな凹凸が発生するためである。ただし、鏡面上の模様が肉眼で認識されないためには、その面に下記の二つの条件を満たす必要がある。

- 1) 溝深さ $0.6\ \mu\text{m} \sim 1.5\ \mu\text{m}$
- 2) 曲率連続 (C2 連続)

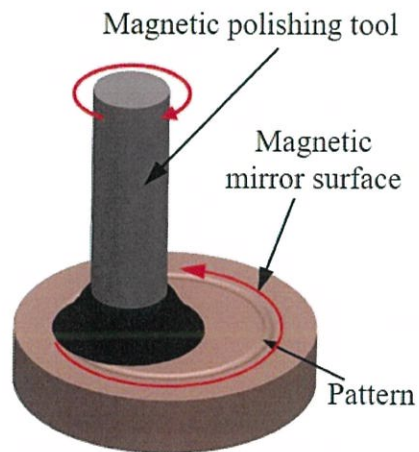
しかし、この条件を従来の職人が行っていた方法で実現するためには、かなりの熟練を要し、その技能の伝承が問題になっていることは第 1 章で述べたとおりである。上述したように、魔鏡を創製するためには、ミクロンオーダーの凹凸を曲率連続の条件のもとで、加工する必要がある。この厳しい条件を熟練技能者の技術とカンに頼らずに達成する方法としては、従来の工程を最新技術を駆使して自動化する方案も考えられるが、新たな加工法を採用することにより困難を回避する手法も考えられる。本章^{2.1,2.2)}では、従来の加工原理に存在する問題点を回避し、新たな付加価値も期待できる新たな魔鏡創製手法を提案し、その提案手法の有効性と問題点を明らかにする。



(I) Flat cutting by radius end-mill



(II) Creating pattern by non-rotational tool



(III) Completion by magnetic abrasive polishing

Fig. 2.1 Proposed fabrication method (CNC control)

2.2 魔鏡面創製のための新たな加工法の提案

図 2.1 に提案手法を示す。すなわち、図 2.1 の工程 I で、まず魔鏡面になる平面をラジラスエンドミルにより加工する。次の工程 II では、魔鏡像を映し出す模様を魔鏡としての条件(1)を満たすように非回転工具を用いて加工する。最後に、工程 III で磁気研磨工具を用い、鏡面に磨くとともに、工程 II でできた模様エッジ部をダレさせ、魔鏡の条件(2)を成立させる。本手法の大きな特徴はすべての加工が魔鏡面からの加工となるため、マシニングセンタを用いることで、段取り替えなしで行えるところにある。そのため、加工能率が高く、また、段取り替えによるワーク位置誤差（深さ方向）が発生しないため高精度加工が期待できる。

次に、提案手法の各工程において、その目的と選択した加工法の利点について述べる。

ワークを取り付けする時に取り付け精度をサブミクロンオーダーに再現良く行うことは非常に困難であるが、取り付け時の誤差が大きいと次工程の魔鏡模様を作成するとき溝深さが変化し、魔鏡成立条件(1)を満たすことができなくなる。そのため、工程 I では、次工程の基準面を製作するのが目的である。また、ラジラスエンドミル加工を選んだのは、平面や単純曲面の加工において、他の加工法（正面フライス加工やスクエアエンドミル加工）に比べ、効率よくサブミクロンオーダーの仕上げ面が得られるためである。

工程 II は魔鏡成立条件(1)を満たした模様を魔鏡面に作製するのが目的である。また、本工程で非回転工具であるヘールバイトを採用するのは多軸制御マシニングセンタでの応用が期待されつつあり^{2,3,2,4)}、精密加工への適用例も増大しつつある手法でもあり^{2,5)}、さらに以下の利点が考えられるためである。

- 1) 主軸を高速で回転する必要が無いため、振動の影響を無くせ、省エネにも

なる

- 2) 工具取付け時の工具振れのバラツキの影響を無視できる
- 3) 刃先形状の成型が容易なので、模様断面の形状を任意に設計できる利点がある

また、工程 III は、魔鏡面を鏡面に仕上げるとともに、魔鏡成立条件(2)を満たすことが目的である。磁気研磨を用いたのは、工程 II で避けるのが困難なエッジの発生を、磁気研磨の弱点であるエッジのダレを積極的に利用することで、魔鏡面としての条件(2)を疑似的に達成できると考えたためである。

2.3 実験装置および方法

2.3.1 多軸制御マシニングセンタ

実験に使用した立型 5 軸制御マシニングセンタ (SuperMILLER400, DMG 森精機製, CNC デジタル分解能: $1\ \mu\text{m}$) を図 2.2 に示す。この機械は直進 3 軸制御 (それぞれ X, Y, Z 軸と称す) および X, Y 軸まわりの旋回 2 軸制御 (それぞれ A, B 軸と称す) からなる 5 軸制御マシニングセンタ (以後, 5 軸 MC と略す) である。実験時は機械の姿勢を図 2.2 のように B 軸を 90° 回転させてテーブルが水平の状態で行い、本来原点復帰時の A 軸を Z 軸まわりの C 軸として用いた。

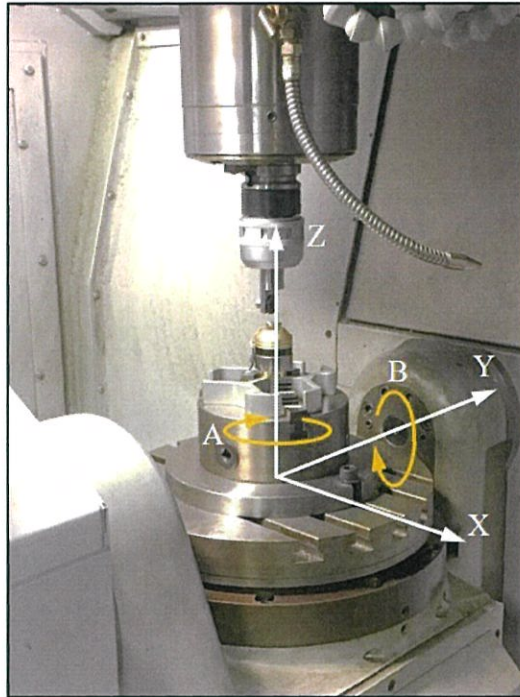


Fig. 2.2 Vertical type five axis controlled machining center

2.3.2 加工材料

魔鏡には古来より、青銅など銅系の材料が用いられてきた。そこで、本研究でも柔らか目で展延性難削材である七三黄銅^{2.6)}(C3604, ビッカース硬度 412 ~519 HV) を加工物とし、厚さ 5 mm, 直径 30 mm の円柱形状を加工物として用いた。

2.3.3 平面創製加工

本報における平面創製には、5 軸 MC により短時間で良好な平面度と仕上げ面を得るため、ラジラスエンドミルにより加工した。工具は超硬ラジラスエンド

ミル (三菱マテリアル製 MS2MRB, 刃径 : 6 mm, 工具先端 R : 2 mm, 刃数 : 2, ねじれ角 : 30°) を使用した. 主軸回転数を 6000 min^{-1} , 工具中心の指令送り速度を 600 mm/min , 切込み深さを 0.3 mm の加工条件で平面創製加工を行った.

2.3.4 マイクロ溝の創製

次に, マイクロ溝創製においては, 非回転工具の構成部分であるチップホルダ (長さ : 90 mm) をアルミ合金で製作し, ハイス製の丸駒チップ (三和製作所製 C20R06-B20P7, 直径 : 20 mm) を用いた (図 2.3(c)参照). また, 比較するために, 回転工具であるボールエンドミルを用いた. 図 2.3 に示すように, ボールエンドミルにおいては傾斜角 $\theta=0^\circ, 30^\circ$ の 2 条件について行った. その送り方向は Y 軸である. それぞれの工具による切削条件は表 2.1 に示す通りである. 魔鏡に求められる条件では溝深さは $1 \mu\text{m}$ 程度であるが, 上滑りの回避と次工程での研磨のための取りしろを考慮して切込み $10 \mu\text{m}$ としている. そして, マイクロ溝加工の切削距離 (直線) を 10.0 mm に設定した.

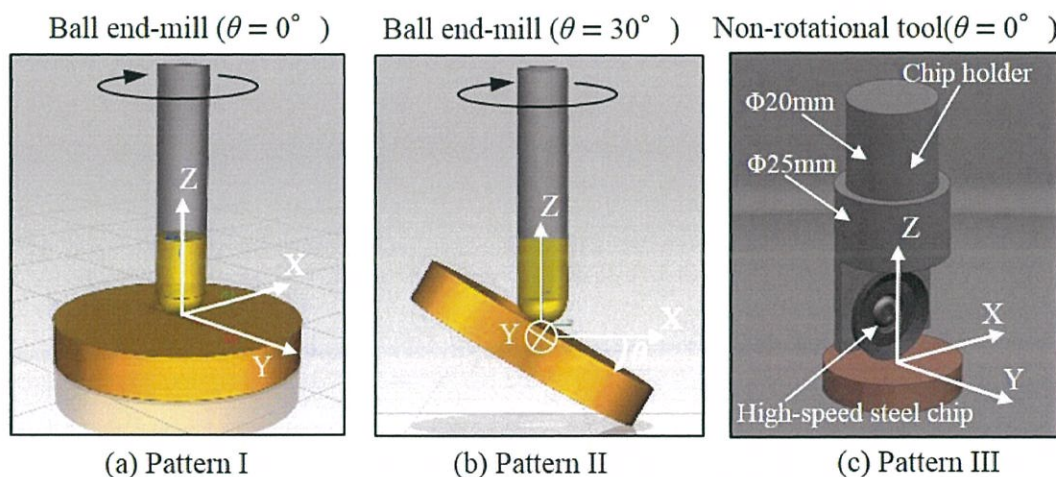


Fig. 2.3 Creating pattern by ball end-mill and Non rotational tool

Table. 2.1 Machining conditions by different tools

| | Ball end-mill | | Non-rotational tool |
|----------------------|--|------------------------------------|---|
| Angle of inclination | $\theta = 0^\circ$ | $\theta = 30^\circ$ | $\theta = 0^\circ$ |
| Tool | Diameter : 20.0 mm, Helix angle : 30° (2 cutting teeth), TiAlN coating | | High-speed steel chip Diameter : 20.0 mm Helix angle : 0° (1 cutting tooth) |
| Cutting speed | 18.8 m/min ($n = 3000$ mm/min) | 32.6 m/min ($n = 3000$ mm/min) | 45.0 m/min |
| Feed rate | 1.0 m/min | | 45.0 m/min |
| Depth of cut | 10 μm | | 10 μm |

2.3.5 磁気研磨加工

磁気研磨加工法は、フレキシブルに変形可能な磁気ブラシを利用するため、曲面の仕上げ研磨に有効であるが、エッジ部が存在する溝や段差部では、エッジがダレる欠点がある^{2.7)}。一方、魔鏡面の微小な凹凸には C2 連続の条件があり、これを成立させるのは非常に困難である。そこで、切削加工により創製した微小溝に生じるエッジを磁気研磨によりダレさせることで C2 連続にできるのではと考えた。

鏡面仕上げ加工においては、磁気研磨工具 NPS- $\Phi 6$ - $\Phi 10$ -R5 (FDK 製, 工具先端ボール部半径 : 5 mm) を用い、図 2.4 に示すように、研磨加工を行った。磁気研磨ペーストには磁性金属粒子(鋳鉄, 平均粒径 : $\Phi 50 \mu\text{m}$), 研磨砥粒(アルミナ, 平均粒径 : $\Phi 0.05 \mu\text{m}$) および溶媒(植物性油脂)から成る MPL-CU3LABOD(FDK 製)を用いた。磁気研磨加工条件は工具回転数 S が 750 min^{-1} , テーブルの送り速度 v が 10 mm/min, 研磨ギャップ(磁気研磨工具先端

と加工平面との距離の目標値) Δz が 0.4 mm である. また, 研磨パスは半径 5 mm と 10 mm の円形状パスで 2 回繰り返した研磨時間は約 40 分である (図 2.5 参照).

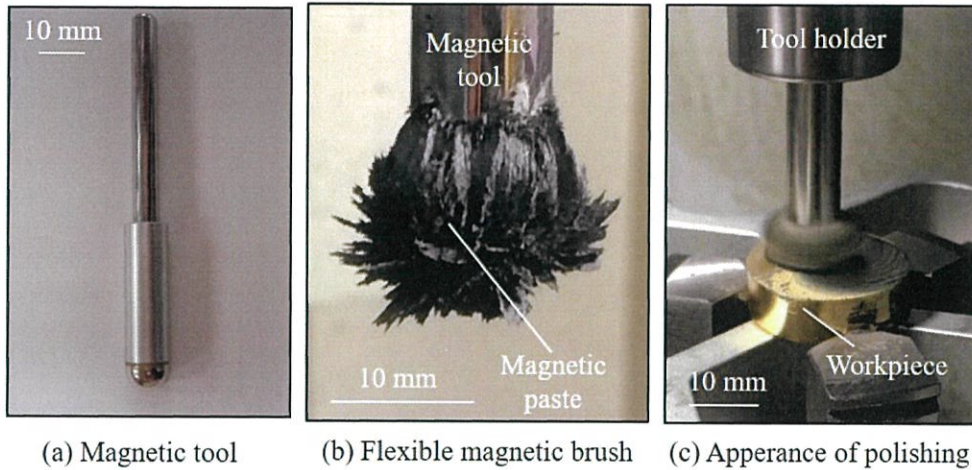


Fig. 2.4 Overview of magnetic abrasive polishing on 5 axis machining center

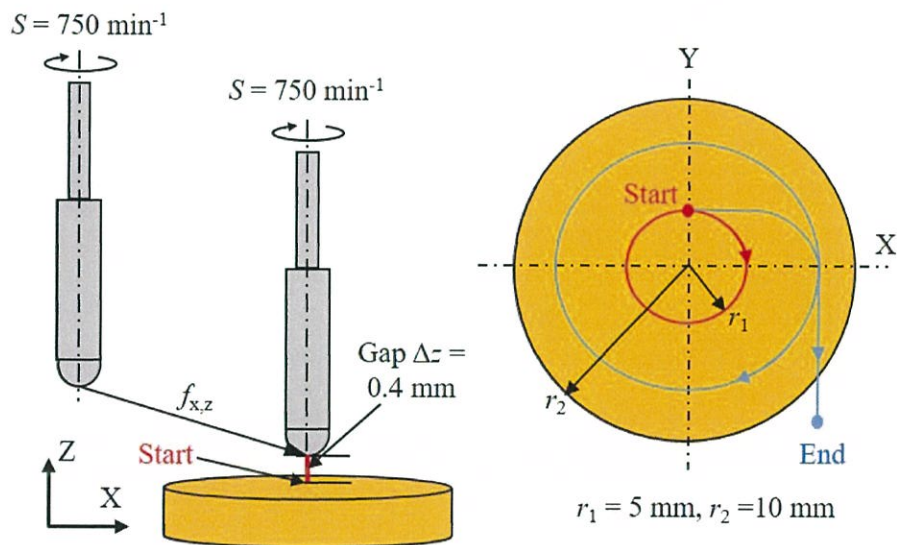


Fig. 2.5 Machining pass of magnetic abrasive polishing

2.4 実験結果および考察

2.4.1 切削したマイクロ溝

上述の加工条件で加工した結果を図 2.6 に示す。ラジラスエンドミルによる平面創製の面粗さは $R_a = 0.13 \mu\text{m}$ であった。図 2.6 には、各加工条件で加工した魔鏡像パターン（以下、パターンと称す）溝形状の光学顕微鏡写真を示す。

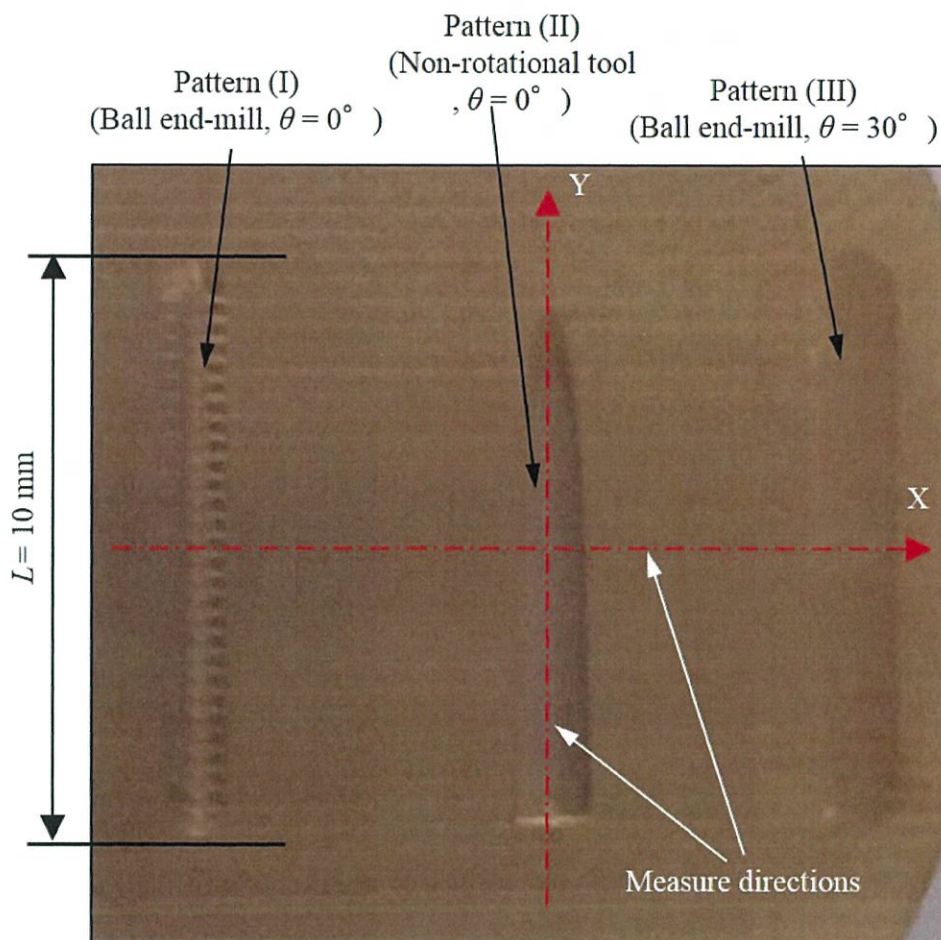


Fig. 2.6 Photograph of different patterns on workpiece surface

また、各パターンの断面形状を観察するために、図 2.7 に示すように、輪郭形状測定機コントレーサ (S-3000 Mitutoyo Co., Ltd) を用いて断面形状を測定した。その結果を図 2.8, 図 2.9 に示す。

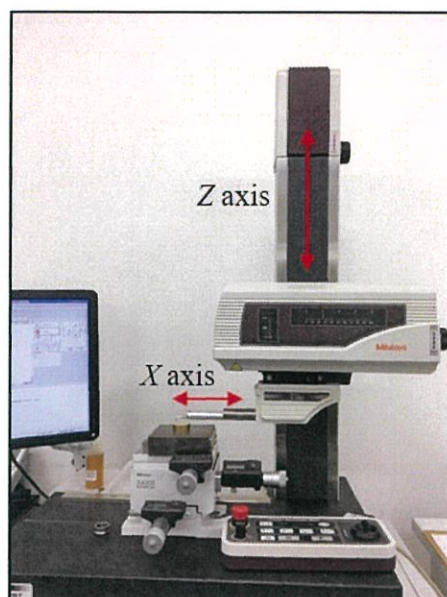
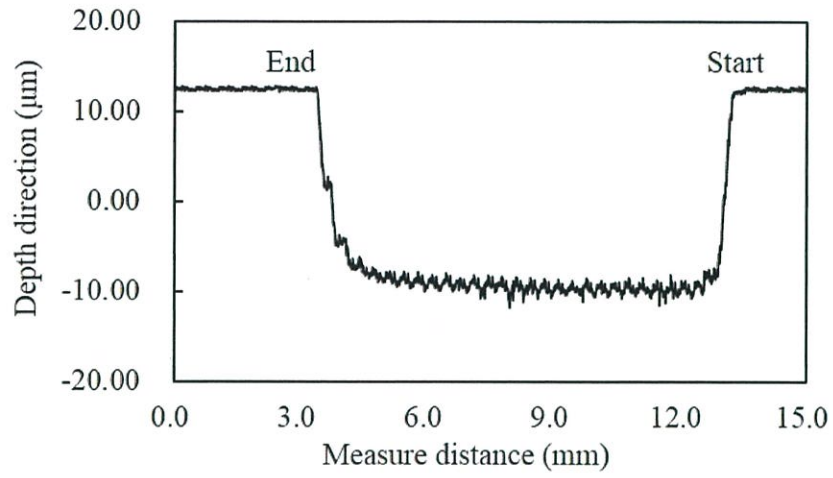
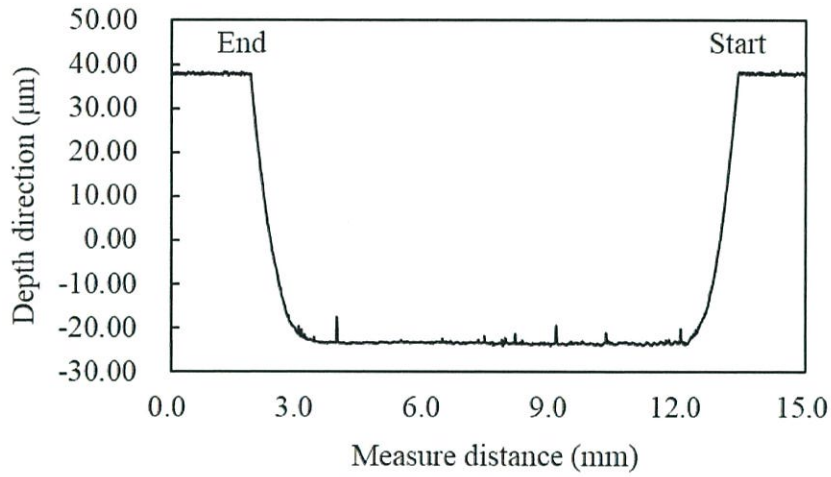


Fig. 2.7 Stylus type surface roughness tester, S-3000

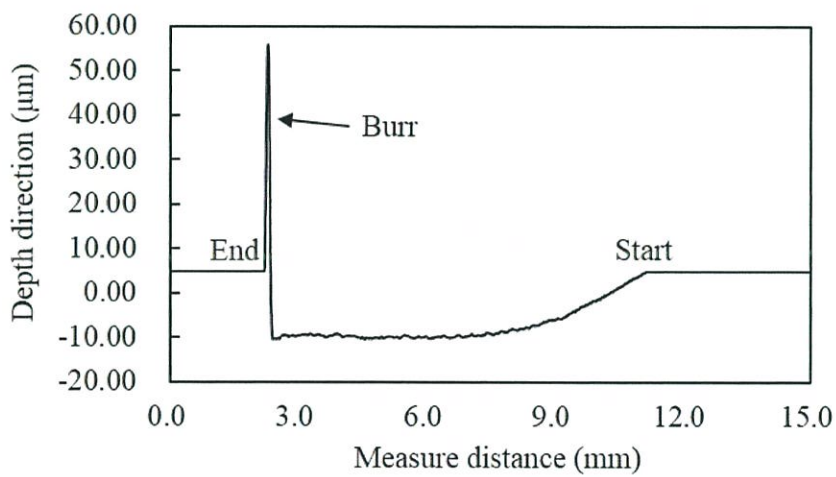
図 2.8 は各パターンの長さ方向（図 2.6 参照，Y 軸方向）における溝の断面形状を示している．図 2.8 より，回転工具により加工した溝の長さは，指令値通り 10.0 mm で仕上がっているが，ヘールバイトにより加工した溝の長さは 8.6 mm と短くなった．これは，Z 軸方向の切込みが終了する前に，Y 軸方向の移動が始まったのが原因であり，加工速度を優先する NC コントローラの特性的ためと見られる．そのため，M00（プログラムストップ）により，完全に切込み動作を終了させてから送り方向への移動を開始させると，この様な現象を回避できる．また，ヘールバイトのため，切り上げ時に大きなバリの生じることもわかる．また，パターンの溝深さを見ると，ボールエンドミルを用いた加工（図 2.8(a)と (b)）では設定切込み 10 μm よりを大きくなってが，これはボールエンドミル工具の芯振れが影響したためであり，回転工具の芯振れをミクロンオーダーに押さえることは非常に困難である．また，ボールエンドミルは工具中心では切削速度がゼロになるため，工具中心付近で切削を行う $\theta = 0^\circ$ では面粗さが悪くなっていることもわかる．



(a) Pattern (I)

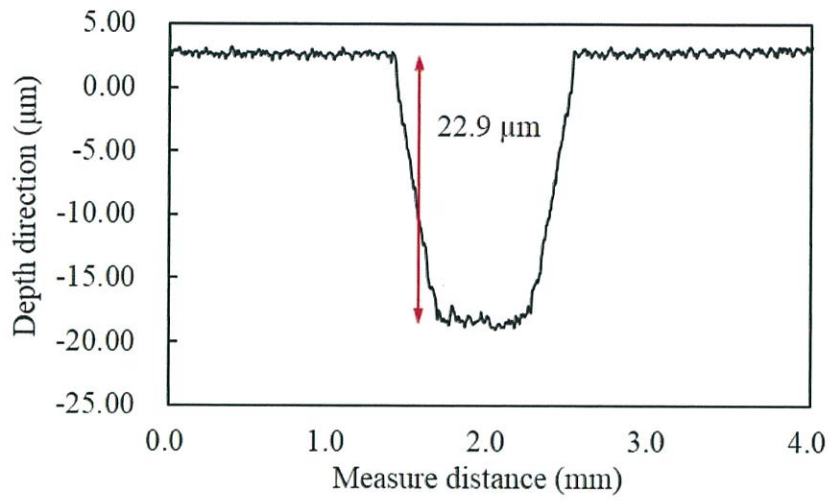


(b) Pattern (II)

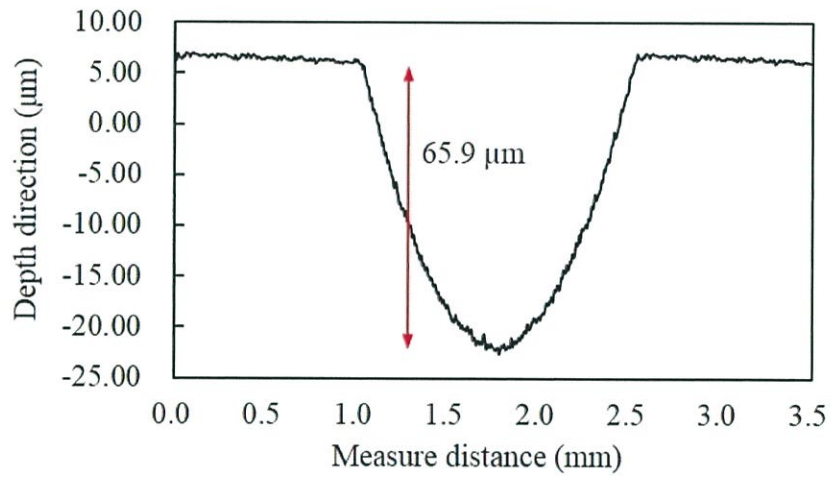


(c) Pattern (III)

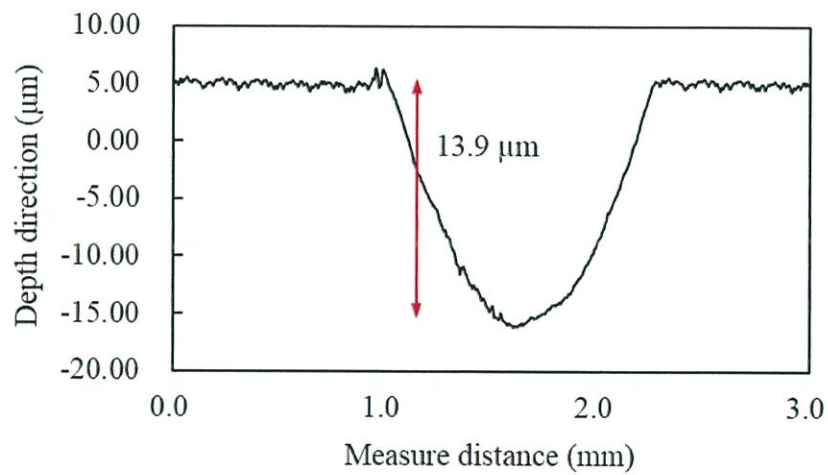
Fig. 2.8 Section curve of creating patterns in y direction



(a) Pattern (I)



(b) Pattern (II)



(c) Pattern (III)

Fig. 2.9 Section curve of creating patterns in x direction

図 2.9 に各パターンの幅方向 (X 軸方向, 図 2.6 参照) における溝の断面形状を示す. 図 2.9 (a) においては, ボールエンドミルの切削速度ゼロとなる点を含む加工であるためむしろの影響が大きく現れ, また工具振れの影響もあるため目的形状から大きくはずれた断面形状となっている. また, 図 2.9(b) では, 目的形状に近い形状が得られているが, 工具振れのために, 溝深さが大きくなっている. 図 2.9(c) では, ヘール加工で目的形状に近い形状が得られているが, 溝深さは設定値の $10\ \mu\text{m}$ よりも数ミクロン大きくなっている. これは, 工程 I と工程 II の間に工具交換が必要であるが, 工具の突出し量の調整には $10\ \mu\text{m}$ 程度の誤差があるためである. また, ヘールの特性により, 切削抵抗による逃げが数 μm 程度生じるため, 溝深さの誤差もたまたま数 μm で収まっている. そのため, 深さ方向 ± 10 数 μm の誤差が避けられない.

図 2.10 にヘールバイトの切れ刃の SEM 写真を示す. 市販のヘールバイト用チップは, 切れ刃稜の丸み半径が $23\ \mu\text{m}$ と切込み量とほとんど変わらないため, 逃げが大きくなったものと考えられる. しかし, ダイヤモンド工具などでは切れ刃稜丸み半径を数 nm にすることが可能であるので, ボールエンドミルによる場合の課題よりも解決は容易であると考えられる.

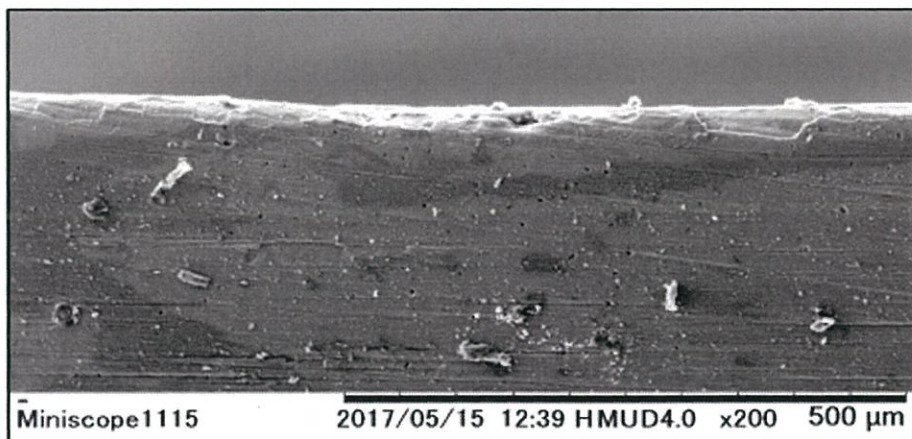


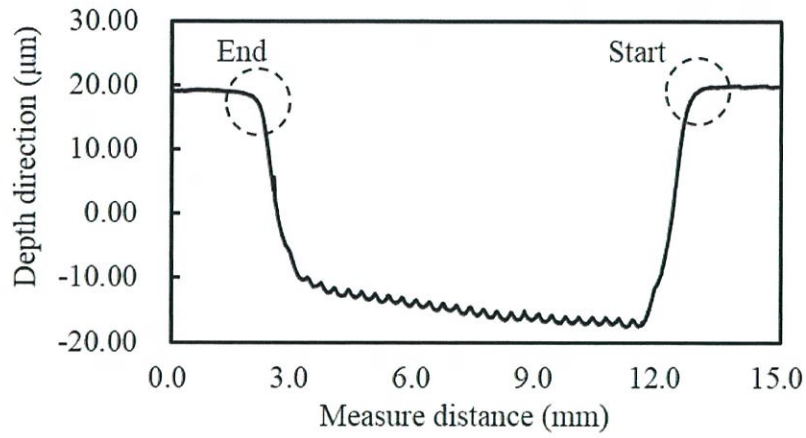
Fig. 2.10 Edge shape of the chip by scanning electron microscope (SEM)

2.4.2 研磨後のマイクロ溝の形状変化

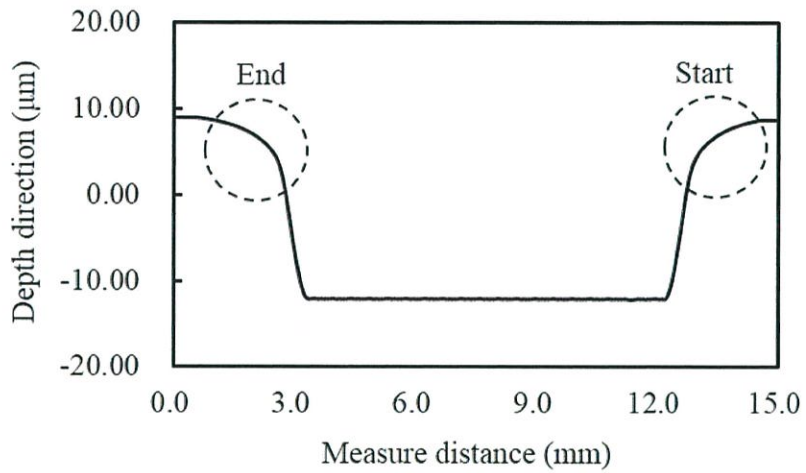
上述した磁気研磨加工法により仕上げ加工した後のパターン断面形状変化を輪郭形状測定機で測定した。その結果を図 2.11, 2.12 に示す。

図 2.11 に、ボールエンドミルおよびヘールバイトにより創製したマイクロ溝の研磨加工後パターン長さ方向の断面形状を示す。図 2.7 に示した研磨加工前の断面形状と比較すると、ボールエンドミル加工によるパターンにおいては、磁気研磨ブラシにより、溝端のエッジ部がダレ、ほぼ C2 連続の曲面が得られていることがわかる。一方、ヘールバイトによるパターンにおいては、磁気研磨加工後、終端に発生していたバリは、完全に除去されているが、エッジのダレは生じておらず、C2 連続の曲面が得られなかった。この問題は研磨パスの工夫により、図 2.11(a), (b)と同様な曲面が得られるものと考えられる。

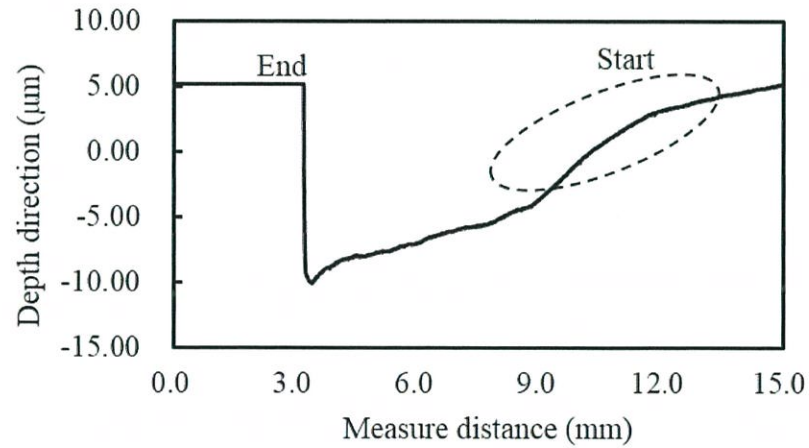
図 2.12 の溝断面形状を見ると、すべてのパターンにおいて、端部が十分にダレており、C2 連続な曲面に近い形状が得られていることがわかる。



(a) Pattern (I)

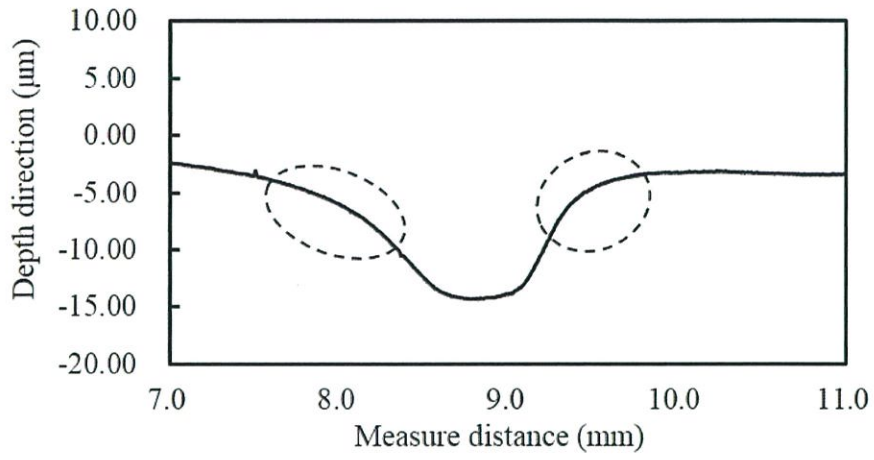


(b) Pattern (II)

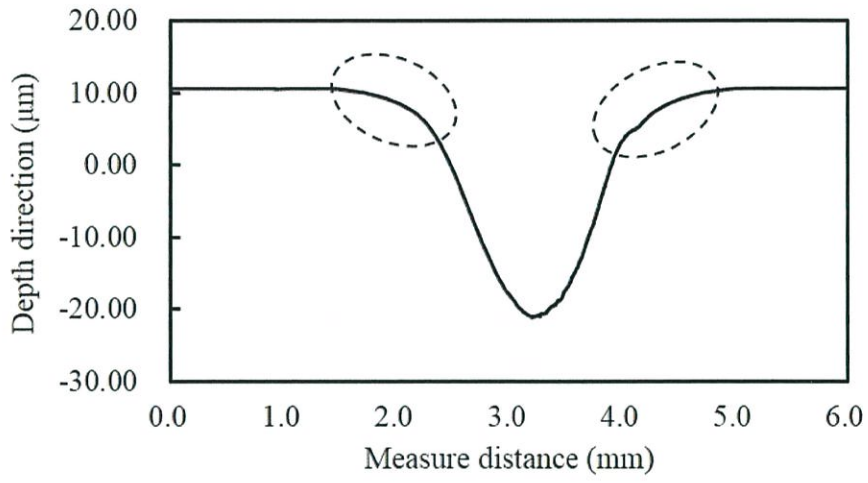


(c) Pattern (III)

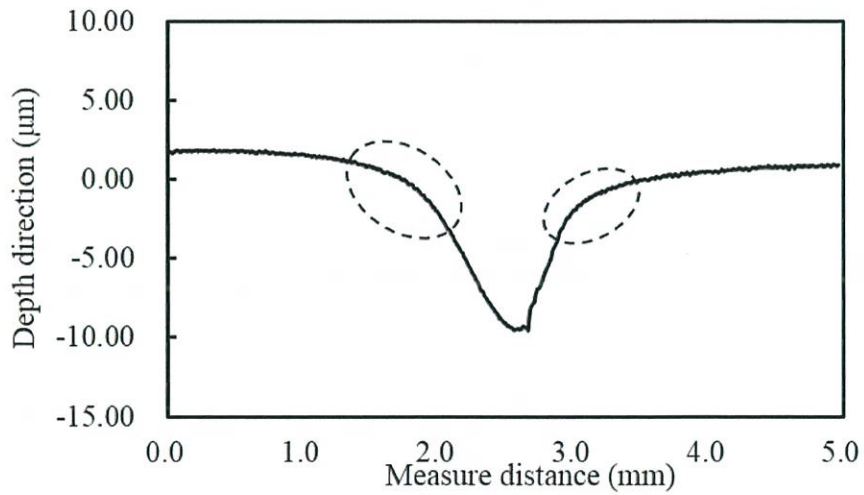
Fig. 2.11 Section curve of creating patterns in y direction after magnetic abrasive polishing



(a) Pattern (I)



(b) Pattern (II)



(c) Pattern (III)

Fig. 2.12 Section curve of creating patterns in x direction after magnetic abrasive polishing

2.4.3 提案した手法の有効性と課題

提案した手法により製作した魔鏡の性能を見るために、簡易的ではあるが図 2.13 に示すように、LED 懐中電灯を用いて本提案手法により製作した魔鏡面に入射角 45° で照射し、魔鏡の表面から垂直距離 40 cm の位置に魔鏡面に平行に設置した黒いスクリーン上に投射された反射像をスマートフォンにより撮影した。その結果を図 2.14 に示す。

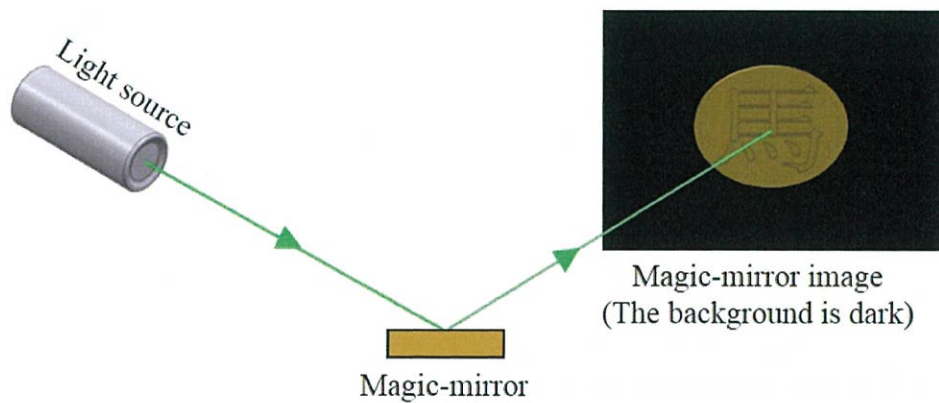


Fig. 2.13 Photogrammetry of magic-mirror image

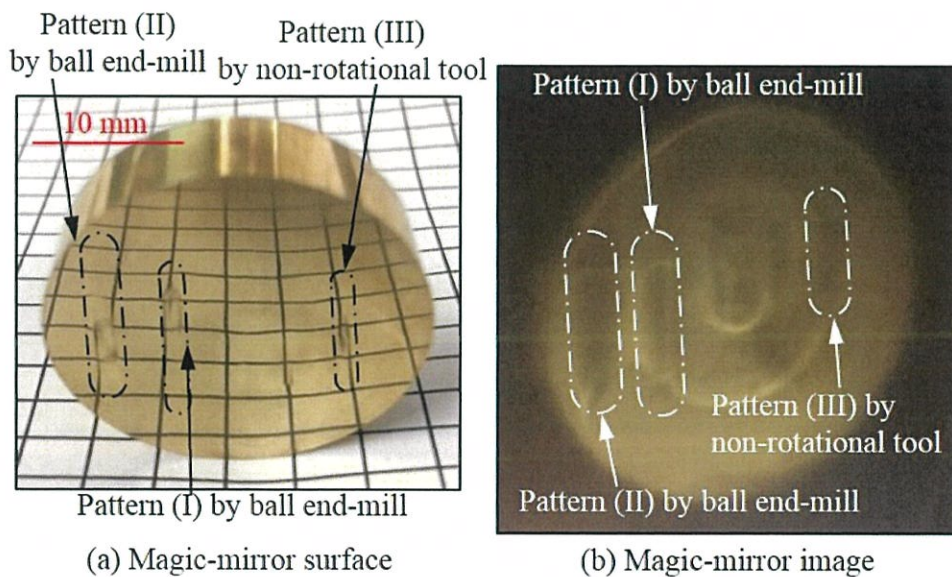


Fig. 2.14 Results of fabricated magic-mirror

図 2.14(a)を見ると魔鏡面に肉眼で認識できるパターンが現れており、図 2.14(b)より魔鏡像も鮮明に得られていないことがわかる。これは、上述したように、いずれの加工方法においても、魔鏡成立条件を満たさなかったためである。また、パターン以外の平面部分においても研磨ムラが生じており、魔鏡像にもムラが生じていることもわかる。前節までの実験結果より本手法を用いて魔鏡を製作するためには、以下に示す課題を解決する必要がある。

- 1) 本提案の加工工程では、ラジラスエンドミル、ヘールバイト、磁気研磨工具の 3 本の工具を使用する必要があるが、ラジラスエンドミルとヘールバイトの長さの補正をサブミクロン以下の精度で補正を行うのが困難なため、溝深さをミクロンオーダーで制御することができていない。そのため、工具のセッティングをサブミクロンオーダーの精度で実現できる手法あるいは工具交換を必要としない加工工程を見出す必要がある。
- 2) ヘールバイト加工では送り速度（＝切削速度）を速くすると、NC コントローラ特性により、プログラムした工具軌跡と異なった軌跡を取るため、正確に形状創製することができなかった。実験では、プログラム中にオプションストップを入れることで、この問題を解決できることはわかったが、オプションストップは手作業が入るため自動化ができない。そのため、自動でこの問題を回避する手法の開発が必要である。
- 3) 磁気研磨により、ヘール加工で生じたエッジをダレさせ、C2 連続に近い形状を得られることはわかったが、工具パスによってはその効果を得られない場合もあった。そのため、すべてのエッジにおいて同程度のダレを生じさせる工具パスを決定できる手法を開発する必要がある。
- 4) 磁気研磨加工による魔鏡面には加工ムラが発生することがわかった。この研磨ムラの原因の解明と対策が必要である。

2.5 結 言

本章では、魔鏡パターンの創製を対象とし、ボールエンドミルとヘールバイトにより、創製した模様断面形状を比較し、魔鏡としての性能を評価した。さらに、提案した魔鏡面の創製手法による工程集約型加工への可能性を示した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 本提案手法はすべての加工工程を魔鏡面に集約することによって、魔鏡面上で C2（曲率）連続の曲面創製に有効であることを示した。
- 2) 本提案手法を用いて魔鏡の製作を行った結果、完全な魔鏡面を得るまでには至らなかったが、それを実現するために解決すべき課題を明らかにすることができた。

参考文献

- 2.1) 馬雷, 凌南, 廣垣俊樹, 青山栄一, “5 軸工作機械機上での切削加工と磁気研磨加工による魔鏡面の創製”, ハリス理化学研究報告, Vol.58, No.3, (2017), 149-156
- 2.2) Tatsuya FURUKI, Lei MA, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, “Satiny and Continuous-Curvature Corrugated Surface Generation by Integrating End-Milling Processes and Magnetic Polishing with a Machining Center”, Proc. of International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology ASPEN2013, 1077, 247-252
- 2.3) 和田一啓, 竹内芳美, ”工具切れ刃断面変化を利用した 6 軸制御曲面平滑仕上げ”, 精密工学会誌, Vol.63, No.6, (1997), 874-878
- 2.4) 吉丸将史, 藤田康宏, 伊藤哲, 伊藤哲史, 鈴木裕, ”異形シール溝加工におけるヘール加工技術の適用”, 精密工学会誌, Vol.72, No.6, (2006), 745-749
- 2.5) Daisuke Kono, Atsushi Matsubara, Iwao Yamaji, Tomoya Fujita, “High-precision machining by measurement and compensation of motion error”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.48, (2008), 1103-1110
- 2.6) Kawai, R., Aoyama, E., Hirogaki, T., Ogawa, K. and Sawa, K., “Surface generation for magic-mirror by end-milling and magnetic polishing with digitally functioned CNC machining center”, Key Engineering Materials, Vol.523, No.524, (2012), 368-373
- 2.7) 馬雷, 古木辰也, 廣垣俊樹, 青山栄一, ”ボールエンドミル切削と磁気研磨加工をマシンニングセンタ上に統合した鏡面加工の導入による魔鏡面の創成”, 精密工学会 2013 年度関西地方定期学術講演会講演論文集, (2013), 43-44

第3章 磁気研磨加工における前加工面と研磨 パスの影響について

3.1 緒 論

前章では、魔鏡面成立条件を考慮して、魔鏡面を効率的に加工できることが期待できる新たな加工手法を提案し、その実現可能性と課題について検討を行った。その結果、魔鏡面パターンの創製に提案したヘールバイト加工は一般的に良く用いられているボールエンドミル加工に比べ優れていることがわかった。しかし、前工程の基準面作成工程と魔鏡面パターン創製工程との間での工具交換において、工具突出し量の調整に 10 数 μm の誤差が避けられず、溝深さをサブミクロンオーダーで制御するのが困難であることがわかった。さらに、ヘールバイトの特性上、切れ刃陵の大きさに比例して逃げ量が増大するため、溝深さをサブミクロンオーダーで制御するためには、逃げ量を考慮して切込みを設定しなければならない等の課題が明らかになった。ヘールバイトの切削抵抗による逃げの課題に関しては、切れ刃陵丸み半径が nm オーダーのダイヤモンド工具の使用や切削抵抗の計測結果を用いて切込み量を補正することにより、比較的容易に解決できる。しかし、工程間の工具交換による工具突出し量の補正については、サブミクロンオーダーでは、工具摩耗の影響も無視できないため機上での計測と補正が必要であり、この機能を NC 工作機械に付加する必要があるため、工作機械メーカーの課題であり、実際に加工を行うユーザー側での対応は困難である。

また、磁気研磨加工においては、魔鏡面パターンのエッジ部をダレさせ、C2

連続の魔鏡成立条件を満足させることが可能であることがわかった。しかし、研磨パスにより、C2 連続の条件を満たせない場合もあることや、平面部分においても魔鏡像に明暗のムラやゆがみが生じることが課題として明らかになった。

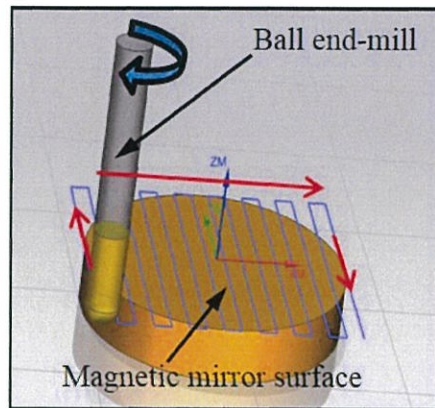
以上のことより、魔鏡面パターン創製のためのヘールバイト加工工程で明らかになった課題は工作機械メーカーが新たに対応すべき課題であり、魔鏡面パターンの C2 連続条件の成立と平面の鏡面化のための磁気研磨工程で明らかになった課題は実際に加工を行うユーザー側で対応しなければならない課題である。そのため、本論文では、ユーザーが対応しなければならない課題に目的を絞って、以後、磁気研磨加工における課題について検討を行う。

上述したように、磁気研磨加工における課題として、研磨パスにより C2 連続条件を満たせない場合や平面においても魔鏡像に明暗のムラやゆがみの生じることである。そのため、本章^{3.1,3.2)}では、磁気研磨加工における前加工面と研磨パスの加工面への影響を調べ、最適な前加工の加工条件および研磨パスについて検討を行った。

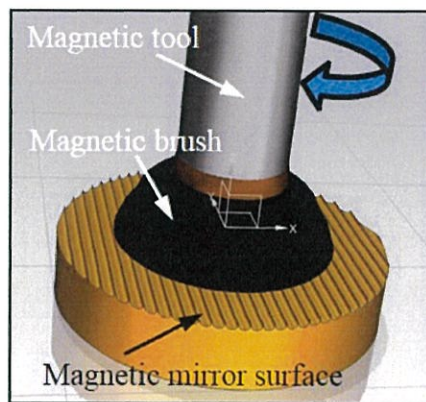
3.2 実験方法

前章で上述したように、磁気研磨工具による加工においては、研磨パスの影響により、魔鏡パターンの C2 連続化や平面に研磨ムラが発生する問題が明らかになった。その原因としては研磨パスによる研磨除去量の違いが研磨面性状に大きく影響したものと考えられる。また、研磨加工は研磨押付け圧力と時間で研磨量が決まるため、前加工面の仕上げ面粗さが大きいと研磨により除去しきれない場合もあるため、前加工面の粗さが重要である。そこで本章では、図 3.1(a)

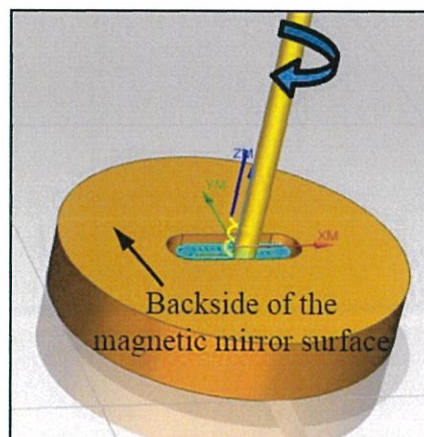
に示すように、前加工面の仕上げ面粗さを制御しやすいボールエンドミルを用いて前加工を行い、切削条件と仕上げ面粗さの関係を調べた。



(a) Flat cutting



(b) Magnetic polishing



(c) Groove cutting

Fig. 3.1 New fabrication method (CNC control)

次に、図 3.1(b)に示すように磁気研磨加工実験を行い、研磨条件から研磨除去量を算出する式を導出し、研磨後の仕上げ面の形状を予測することを試みた。最後に、魔鏡面の評価を行うために、図 3.1(c)に示すように、裏面よりスクエアエンドミルによる溝加工を行うことで魔鏡面側に数 μm オーダーの凹凸を作り、魔鏡としての評価を行った。

3.3 実験装置

加工装置には図 3.2(a)に示す立形 3 軸制御マシニングセンタ ROBODRILL α -T14 DSe (ファナック製, CNC デジタル分解能(最小指令値) : $1 \mu\text{m}$)を用いた。工具は工作物の平面切削に TiAlN コート超硬ボールエンドミル (刃径 : 4 mm , 工具先端ボール部半径 : 2 mm , 刃数 : 2, ねじれ角 : 30°)を用いた。鏡面仕上げに図 3.2(b)の磁気研磨バイト NPS- $\Phi 6$ - $\Phi 10$ -R5 (FDK 製, 工具先端ボール部半径 : 5 mm)を、磁気研磨ペーストには磁性金属粒子(鋳鉄, 平均粒径 : $\Phi 50 \mu\text{m}$), 研磨粒子(アルミナ, 平均粒径 : $\Phi 0.05 \mu\text{m}$)および溶媒(植物性油脂)から成る MPL-CU3LABOD(FDK 製)を用いた。鏡面裏面からの溝切削には 2 枚刃汎用スクエアエンドミル(工具径 : 2 mm , 刃数 : 2, ねじれ角 : 30°)を用いた。工作物の材質には黄銅 C3604 を用い、直径 30 mm , 厚さ 5 mm の円板とした。各工具は自動工具交換装置(ATC)により主軸に取り付けられ、工作物は X,Y テーブル上のバイスに加工面と工具が垂直になるように固定されている。

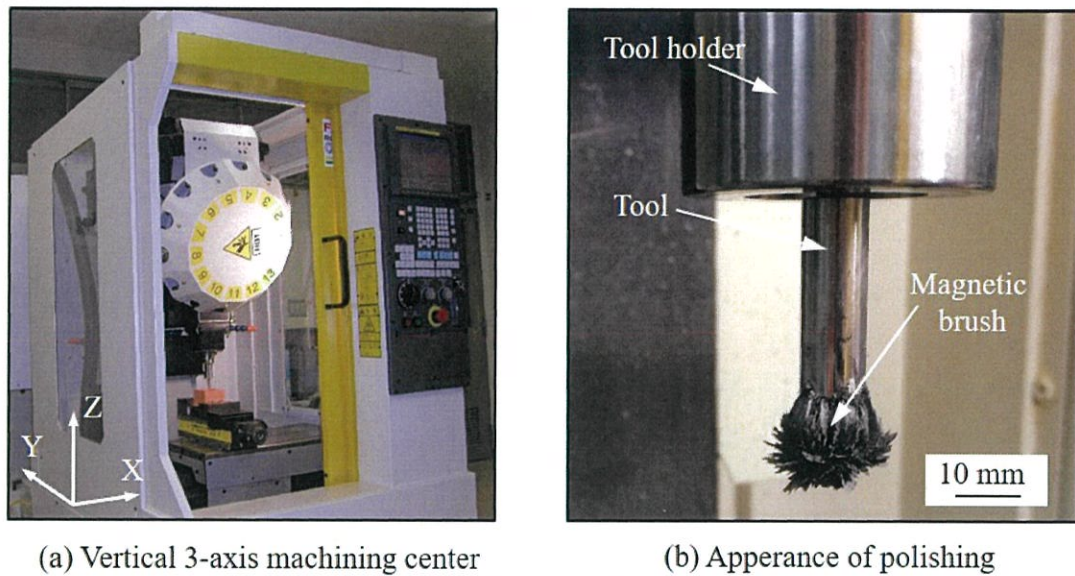


Fig. 3.2 Main parts of experimental device

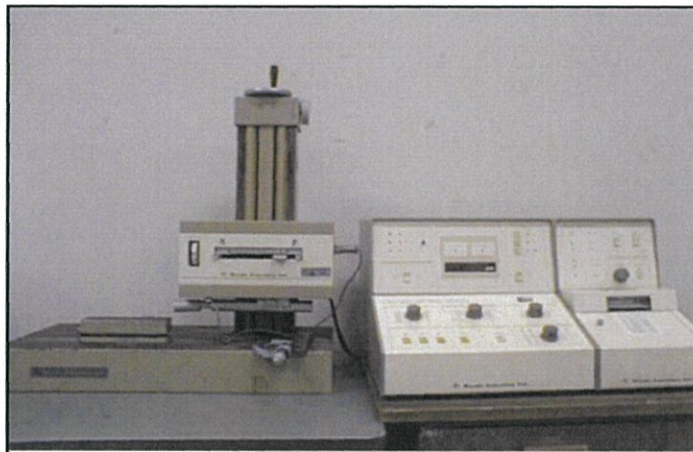
3.4 評価方法

3.4.1 前加工における評価方法

前加工工程における被加工物の評価方法は、表面性状を評価するパラメータとして、表面光沢度 Gr および表面粗さ(算術平均粗さ Ra , 最大高さ Rz)を採用した。表面光沢度 Gr の測定には、グロスチェッカーIG-410(堀場製作所製, 近赤外線光の入射角および受光角はいずれも 60°)を用いた。光沢度 Gr は工作物とガラス製基準板(屈折率: 1.567)に光を照射し, それらの反射率の比として表される(基準板において入射角 60° の場合, 反射率 10 %を光沢度 100 %とする)。表面粗さの測定には、触針式表面粗さ測定器 (小坂研究所製の SE-30C, 触針先端半径 $2\ \mu\text{m}$)を使用した^{3.3~3.5}。これら装置の外観を図 3.3 に示す。



(a) Gloss checker, IG-410



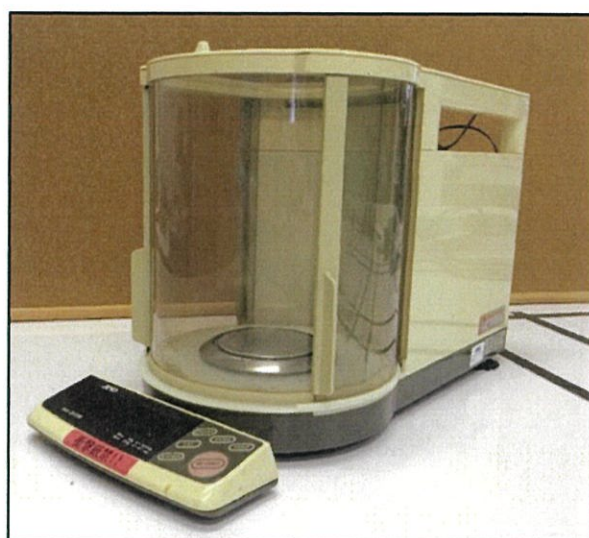
(b) Stylus type surface roughness tester, SE-30C

Fig. 3.3 Measuring instruments

3.4.2 磁気研磨加工における評価方法

磁気研磨加工工程における被加工物の評価方法は、表面性状を評価するパラメータとして、研磨圧力 P 、研磨除去量 M 、表面光沢度 Gr および表面粗さ(算術平均粗さ Ra 、最大高さ Rz)を採用した。研磨圧力 P の測定には、市販の動力計 9347C (KISTLER 社製 3 成分フォースセンサ) を使用した。研磨除去量 M の測定には、精密電子天秤 (AND 社製 HA-220M, 最小表示 0.01 mg) を利用した。

表面光沢度 Gr および表面粗さの測定には、上記のグロスチェッカーIG-410 および触針式表面粗さ測定器を使用した（図 3.3 参照）。これら装置の外観を図 3.4 に示す。



(a) Electronic scale, HA-220M



(b) 3-component force sensor, 9347C

Fig. 3.4 Measuring instruments

また、魔鏡としての性能を評価するために、魔鏡像の評価を行った。魔鏡像の評価方法としては、図 3.5 に示すように、人工太陽光を入射角 45° で照射し、面

から垂直距離 L の位置に魔鏡面に対して平行に設置した白色スクリーンに投影された像をデジタルカメラにて撮影し、画像処理ソフトにて画像をグレースケール化(256 階調)することによって輝度分布の測定を行った。人工太陽光の照射装置には XC-100B (セリック, 放射波長域: 370~780 nm) を使用した (図 3.6 参照)。そして, ウェーバーの法則に基づき, 魔鏡像各点の輝度値 C_i と背景(魔鏡像の周辺輝度)の平均輝度値 C_0 により, 各点のコントラスト T_i を求め評価した。式 3.1 にコントラスト T_i の定義^{3,5)}を示す。

$$T_i = (C_i - C_0) / C_0 \quad (3-1)$$

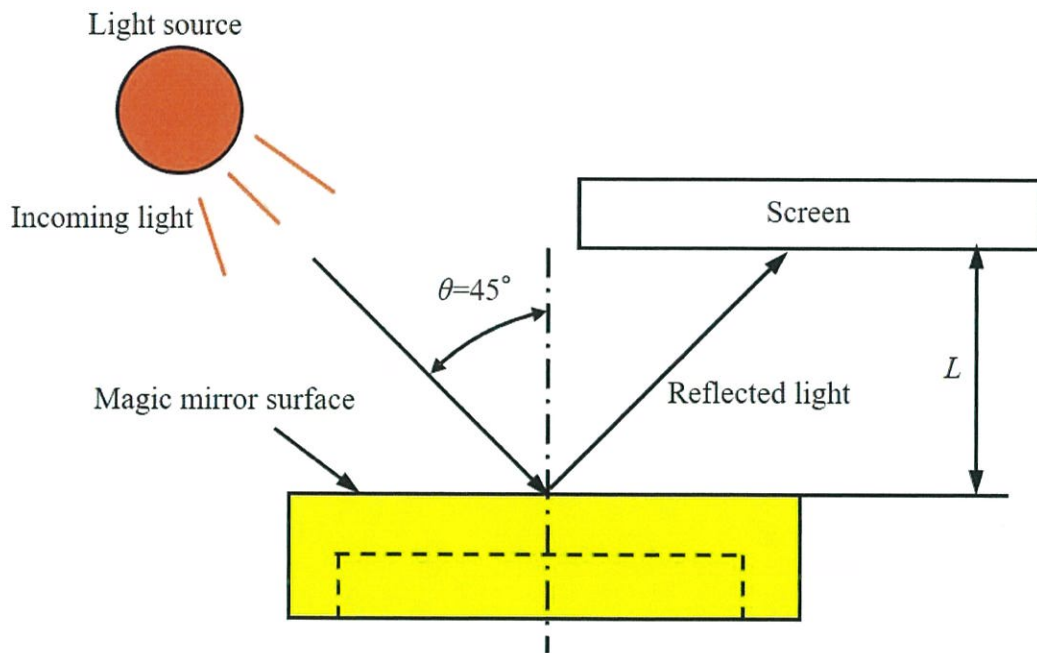


Fig. 3.5 Evaluation method of magic mirror image



Fig. 3.6 Artificial sunlight lighting, XC-100B

また先行研究^{3.5)}より、魔鏡像部分と平坦部分のコントラスト差が25%以上あれば、魔鏡像が明確になることが判明している。

3.5 ボールエンドミル切削加工での仕上げ切削条件の最適化

本研究ではボールエンドミル切削加工と磁気研磨加工をマシニングセンタ上で組み合わせた鏡面仕上げ手法を用いて、工作物表面全域を鏡面に仕上げる工程に着目してCNC加工条件を検討する。本章では磁気研磨加工により効率的にボールエンドミル切削痕を除去し鏡面化するため、ボールエンドミル切削加工における最適な切削加工条件について検討する。

仕上げ工程である磁気研磨加工により工作物表面を効率的に鏡面に仕上げるためには、その前工程（前加工）であるボールエンドミル切削加工によって得

られる表面粗さの大きさと加工時間が重要である。そこで、工具回転振れを考慮した幾何学的理論に基づいたボールエンドミル切削による 3 次元加工面の最大表面粗さ Rz_{Th} は、式(3-2)^{3.6)}で表される。

$$Rz_{Th} = (\Delta x_b^2 + f'_b{}^2)/8R \quad (3.2)$$

ここで Δx_b は X 軸方向のピックフィード、 f'_b は工具一回転当たりの送り量、 R は工具半径である。また、加工能率 s を考える。加工能率 s を工具一回転当りに工具が加工する領域の面積とすると、これは Δx_b と f'_b の積によって式(3-3)で表される。

$$s = \Delta x_b \times f'_b \quad (3-3)$$

これらの式より、次に等粗さ曲線と等能率曲線の関係を図 3.7 に示す。この図より、同じ仕上げ面粗さを得るためには、両曲線の交点において s は最大となる。すなわち、 $\Delta x_b = f'_b$ とする条件は高能率であり、工具のピックフィード方向及び送り方向の粗さが同じとなり、異方性の小さい表面形状を得ることができる。

上記を基に、3 水準の Rz_{Th} に対して $\Delta x_b, f'_b$ を求めた切削条件を表 3.1 に示す。また、磁気研磨加工の研磨条件は先行研究^{3.5)}を参考にして実験的に、工具回転数 $S_m = 750 \text{ min}^{-1}$ 、指令送り速度 $v_m = 5 \text{ mm/min}$ 、工具と工作物間の距離(研磨ギャップ) z_m は 0.4 mm とし、磁気研磨工具を研磨パス半径 $r_l = 5 \text{ mm}$ の円に従って走査した。研磨終了後に測定した表面粗さ Rz と研磨時間 t の関係を図 3.8 に、表面光沢度 Gr と研磨時間 t の関係を図 3.9 に示す。鏡面とする条件はボールエンドミルによる切削痕が除去され、表面光沢度 Gr が 90 % 以上の場合である。し

たがって、本論文では、これらの総合的な判断を容易とするため、図 3.8, 3.9 における近似曲線から数値を読み取ることとした。

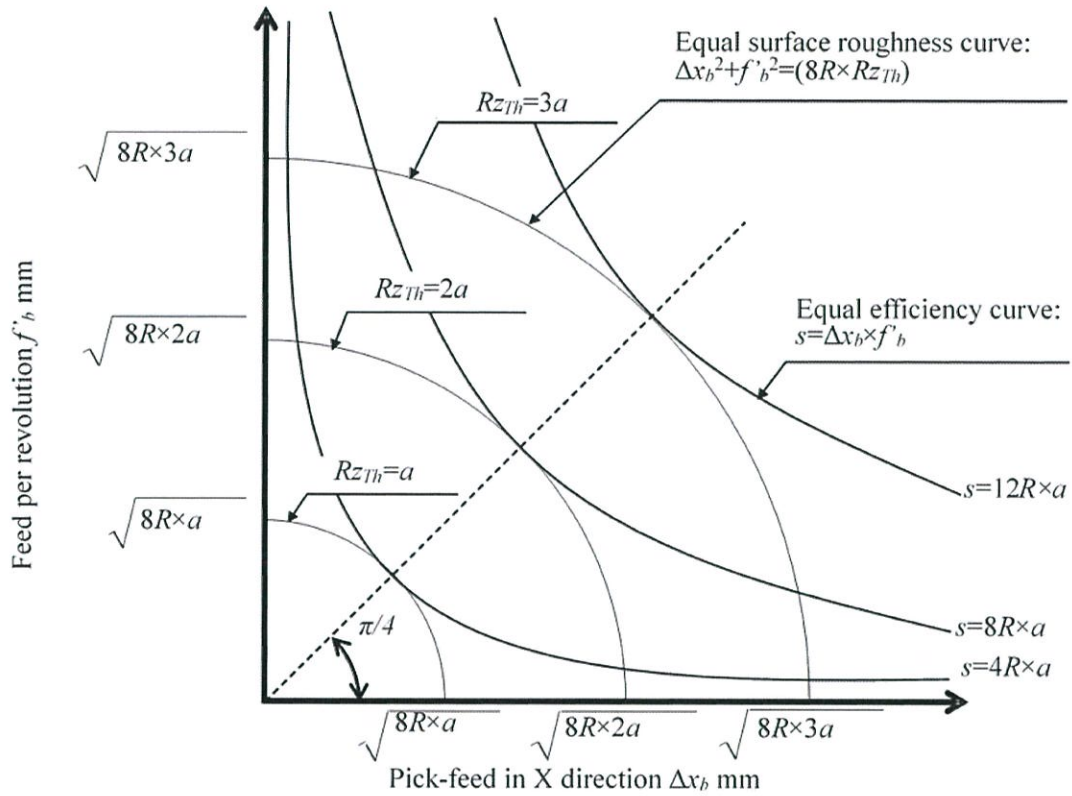


Fig. 3.7 Relationship between surface roughness and efficiency

Table 3.1 Ball end-mill machining conditions

| | | | |
|------------------------------------|------|-------|-------|
| Rz_{Th} μm | 5 | 15 | 25 |
| Rotational speed min^{-1} | 6000 | | |
| Depth of cut mm | 0.3 | | |
| Feed per rev mm/rev | 0.2 | 0.346 | 0.447 |
| Pick-feed mm | 0.2 | 0.346 | 0.447 |
| Total machining time min | 19.5 | 20.6 | - |

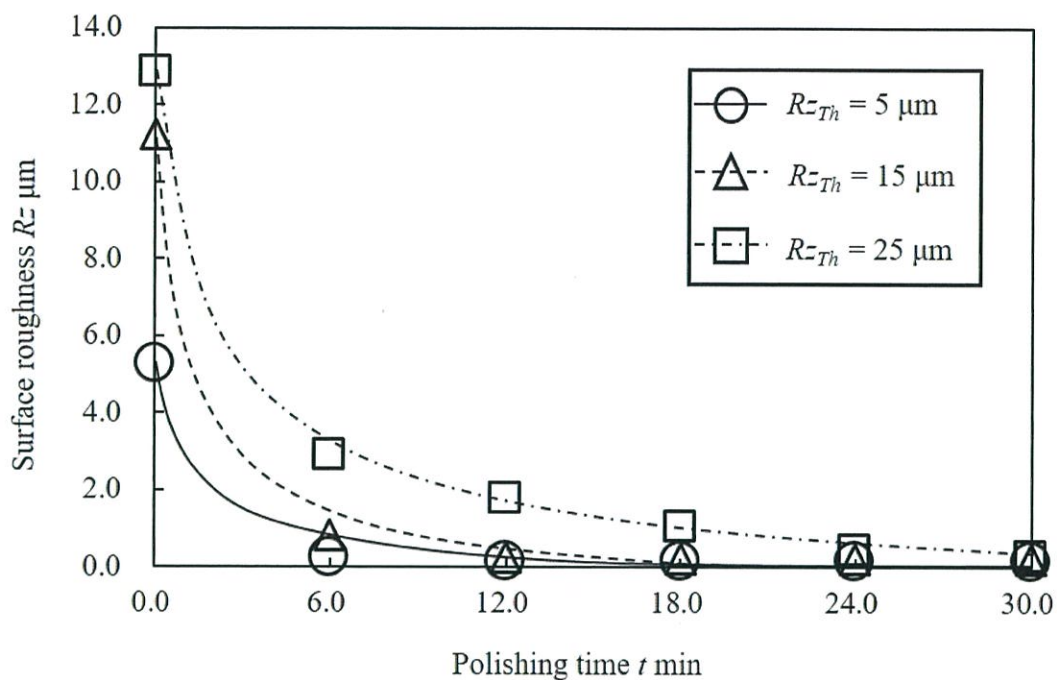


Fig. 3.8 Relationship between surface roughness Rz and polishing time t

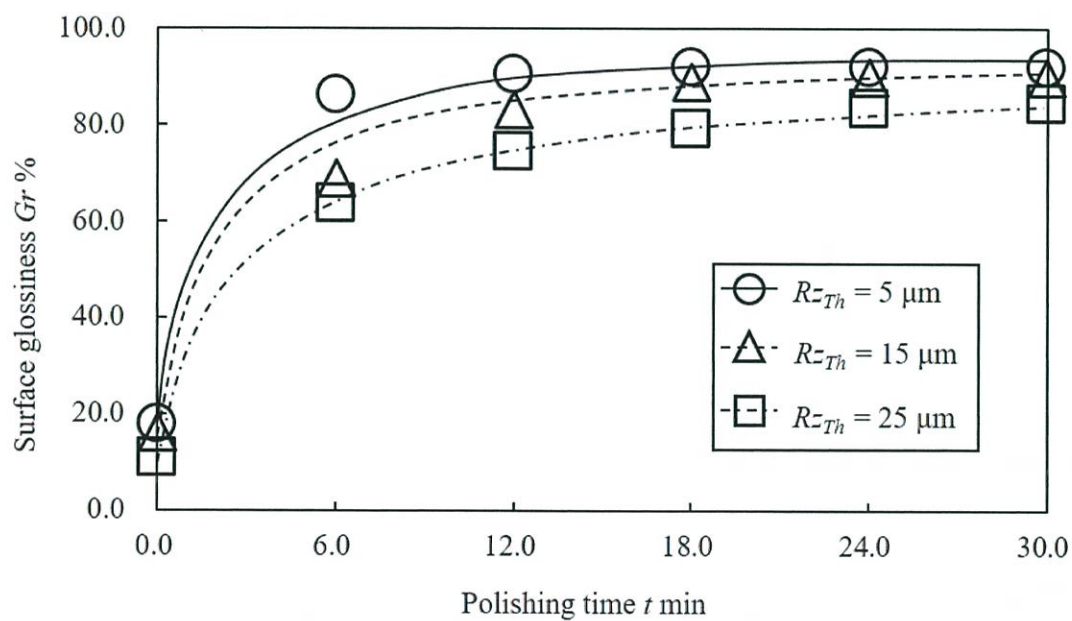


Fig. 3.9 Relationship between surface glossiness Gr and polishing time t

図 3.8 より, $Rz_{Th} = 5, 15 \mu\text{m}$ の場合において $t = 12 \text{ min}$ 時の Rz は $0.2 \mu\text{m}$ Rz に収束していることがわかる. また, 図 3.9 より, $Rz_{Th} = 5 \mu\text{m}$ において $t = 12 \text{ min}$ 時の Gr は 90 %以上と十分な光沢度を得ているのに対し, $Rz_{Th} = 15 \mu\text{m}$ の場合では Gr の収束に要する時間は 18 min であった. そこで, 総合的な能率を考えるため, ボールエンドミル加工時間を含めた総加工時間 T_{total} を考える. 本実験では, ボールエンドミル加工では, 工具は工作物表面(X-Y 平面上)をジグザジ状に往復走査される. したがって, 送り速度 F とピックフィード Δx_b が決まれば, ボールエンドミル加工時間を求めることができる. また, 磁気研磨加工時間は, 工作物表面のボールエンドミル切削痕が除去され, 表面光沢度 Gr が 90 %に達するまでに要した時間とした. 以上のボールエンドミル加工時間と磁気研磨加工時間の和を総加工時間 T_{total} とし, 表 3.1 に示す. $Rz_{Th} = 5, 15 \mu\text{m}$ では同等な加工時間であるが, 本研究では確実性を考慮して, 図 3.8 より研磨前表面粗さの小さい $Rz_{Th} = 5 \mu\text{m}$ となるボールエンドミル切削条件を最適条件とし, 採用した. また, $Rz_{Th} = 25 \mu\text{m}$ の場合の Gr は 30min 研磨後も 90 %に至らなかった. この要因は, Rz_{Th} の値が研磨ペースト内の金属粒子(平均粒径: $50 \mu\text{m}$)の 1/2 半径($25 \mu\text{m}$)に近くなると, 金属粒子, 研磨粒子の動きが低下するためだと考えられる. したがって, 前加工面は式(3-2)に基づき, 加工面粗さを少なくとも研磨ペースト内の金属粒子直径の 1/4 以下に仕上げた後に, 次工程の磁気研磨に入る必要があることがわかった.

3.6 磁気研磨加工における研磨量 M モデルの構築

次に磁気研磨パスの決定を容易にするため, 円形状パスによって研磨工具を 1 周させた場合の研磨量の予測を行うための指標について検討する. 単純な円柱

形状工具における磁気研磨量予測に関する報告例^{3.7, 3.8)}はあるが、本提案法のようなボールエンドミル型工具を用いた磁気研磨に関する報告は存在しない。しかしながら、精密金型の製造では、研磨加工における研磨量の違いなどによってその形状精度の悪化を生じさせてはならない。その一方で、本磁気研磨工具の永久磁石はその半径方向位置によって磁束密度が異なるため、従来のCAMソフトを用いて研磨パスを作成し、研磨した場合、形状精度の悪化を招くといった問題がある。すなわち、加工面全体の研磨量を予測したうえで、研磨パスを作成する必要がある。したがって、本論文では、研磨量の予測には式(3-4)の「プレストンの式」^{3.9)}を基本として、平面を対象に基本的な研磨量予測手法の構築を行った。

$$M = kPvt \quad (3-4)$$

ここで、 M は単位面積当たりの研磨量、 k はプレストン定数、 P は研磨圧力、 v は工具とワークの相対速度、 t は研磨時間である。

3.6.1 研磨圧力 P のモデル化

上記のプレストン式における研磨圧力 P のモデル P_m について検討する。磁気研磨加工では、工具先端部の永久磁石が発生させる磁場により研磨ペーストに含まれる磁性粒子が、図 3.10(a)のようにフレキシブルなブラシを形成し、このブラシを構成する磁性粒子(本例では鉄族粒子)に加えられる磁力によって工作物表面が押し付けられ、表面の研磨を行う。この磁力は、ボール形状の永久磁石の磁場解析結果により、表面に近づくほど大きくなり、遠ざかるほど小さく

なることが分かる．そのため，X-Z 平面における磁束密度 B の分布は Z 軸において対称な楕円形状として近似できる．その結果は図 3.10(b)の示すように，研磨ギャップ(工具とワーク間の距離)におおよそ反比例する．そこで，力センサを用いて工作物表面の中心上にて磁気ブラシを自転させた場合における押付力 F_m を測定した．その結果を図 3.11 に示す．

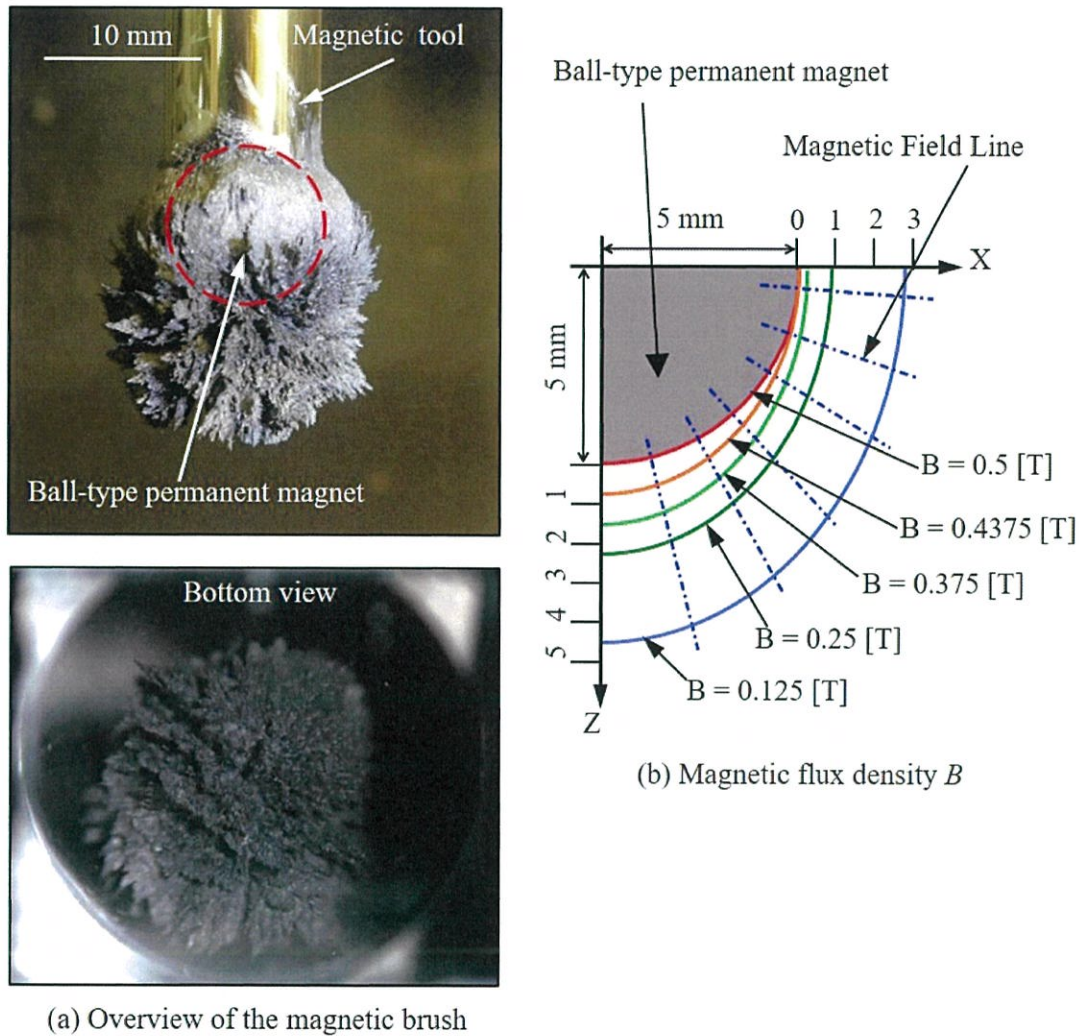


Fig. 3.10 Distribution of magnetic flux density B

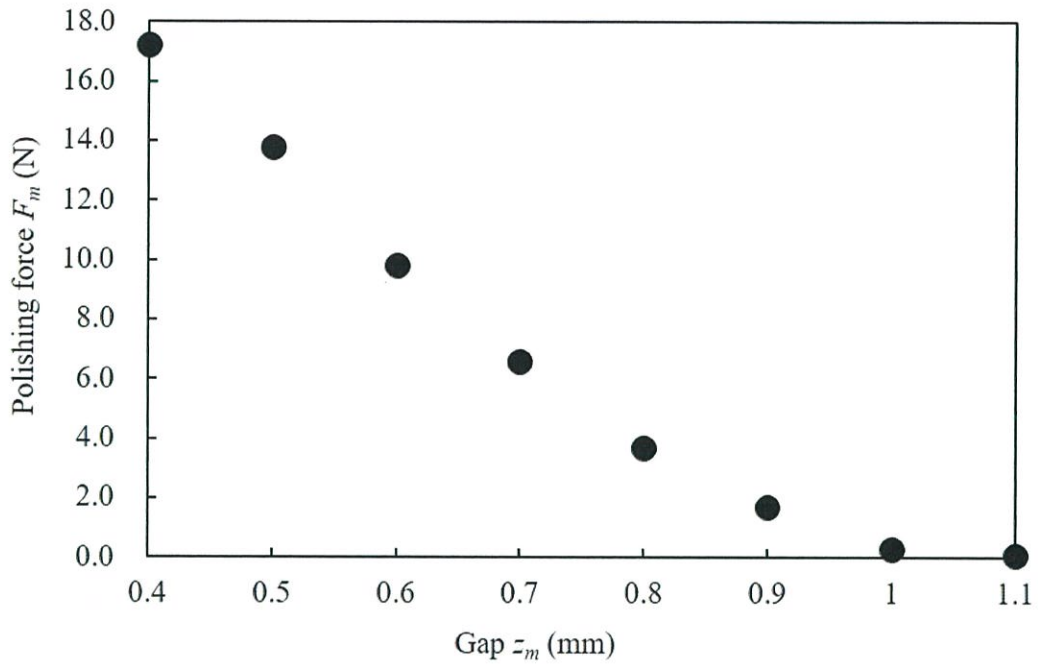


Fig. 3.11 Relationship between polishing force F_m and z_m

そして、接触範囲内に加えられる荷重 F_m (押付け力の測定値)は式(3-5)として表され、また、磁気ブラシ中心からの直線距離 r における研磨圧力 $P_m(r)$ の分布を式(3-6)と仮定することで、式(3-7)のように表れる。ここで、 a は定数、 r_2 は磁気ブラシの最大接触半径を示す。

$$F_m = 2\pi \int_0^{r_2} P_m(r) r dr \quad (3-5)$$

$$P_m(r) = a(r - r_2)^2 \quad (3-6)$$

$$F_m = 2\pi a \int_0^{r_2} (r^3 - 2r_2 r^2 + r_2^2 r) dr \quad (3-7)$$

次に、本研究で使用した半径 5 mm のボール形状の永久磁石における、 r - Z 平面での磁束密度 B の分布($z_m = 0.4$ mm の場合)を図 3.10(b)に示す。 r - Z 平面での B

の分布は Z 軸に対称な楕円形状として近似でき、ボール形状の永久磁石の r - Z 平面における等磁束密度線は永久磁石の中心からの距離 r と工具先端からの軸方向位置 z に依存する関数である式(3.8)として表される。なお、式(3.8)における p および q は、磁束密度 $B=0.5$ T のとき、 $p=q=5$ 、 $B=0.4375$ T のとき、 $p=5$ 、 $q=5.8$ 、 $B=0.375$ T のとき、 $p=5.2$ 、 $q=6.5$ 、 $B=0.25$ T のとき、 $p=5.8$ 、 $q=7.3$ 、 $B=0.125$ T のとき、 $p=7.8$ 、 $q=9.4$ となる。

$$\frac{r^2}{p^2} + \frac{z^2}{q^2} = 1 \quad (3.8)$$

式(3.8)および各磁束密度 B の場合での p 、 q により、研磨ギャップ $z_m = 0.4$ mm の場合における、磁束密度 $B=0$ となる磁気ブラシの最大接触半径 r_2 は 11.5 mm であることがわかった。さらに、図 3.11 および式(3.7)から、研磨ギャップ $z_m = 0.4$ mm での任意定数 a は 1.9 となり、研磨圧力 P_m のモデル式は式(3.9)のように表すことができる。

$$P_m(r) = 1.9(r - 11.5)^2 \quad (3.9)$$

3.6.2 研磨相対速度 v のモデル化

研磨相対速度 v のモデル化について検討する。研磨ブラシ中心 C における自転運動と原点 O における公転運動を組み合わせ加工した場合の磁気ブラシの移動モデルを図 3.12 に示す。ここで、磁気ブラシと工作物表面の接触範囲内で

の任意の点を点 Q とし、時間 $t=0$ の時のブラシ中心を C (その初期位置を $X=r_1$, $Y=0$)とすると、 t 秒間にブラシ中心は公転角速度 ω_W 、公転半径 r_1 で点 C' まで移動する。また、点 Q はこの公転運動および自転角速度 ω_P 、自転半径 r_2 の自転運動により、点 Q'' まで移動する。なお、自転運動では時計回り方向を正方向、公転運動では反時計回り方向を正方向とした。このとき、点 Q における X 軸方向の速度 $v_x(t)$ および Y 軸方向の速度 $v_y(t)$ は式 3.10 のように示される。また、本研究では、 $S_m=750 \text{ min}^{-1}$ 、 $v_m=5 \text{ mm/min}$ として研磨を行うため、 $\omega_W/\omega_P \approx 0$ とし、式 3.10 の X, Y 成分を合成すると研磨相対速度 $v(r)$ は式 3.11 となる。公転角速度 ω_W および自転角速度 ω_P は式 3.12 により得られる。

また、自転半径 r_2 は磁気ブラシと工作物表面の接触部分上の任意点における磁気ブラシ中心との直線距離を示しているので、式 3.11 に示すブラシ中心からの距離 r の関数として近似でき、図 3.13 のような分布となる。

$$\begin{aligned} v_x(t) &= \omega_W r_1 \cos \omega_W t + (\omega_W - \omega_P) r_2 \cos(\omega_W t - \omega_P t + \alpha) \\ v_y(t) &= \omega_W r_1 \sin \omega_W t + (\omega_W - \omega_P) r_2 \sin(\omega_W t - \omega_P t + \alpha) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} v(r) &= \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)} \\ &= \sqrt{\{\omega_W r_1^2 + (\omega_W - \omega_P)^2 r_2^2 + 2\{\omega_W r_1 (\omega_W - \omega_P) r_2\} \cos(\omega_P t - \alpha)\}} \\ &= \omega_P \sqrt{\frac{\omega_W}{\omega_P} r_1^2 + \left(\frac{\omega_W}{\omega_P} - 1\right)^2 r_2^2 + 2\left\{\frac{\omega_W}{\omega_P} r_1 \left(\frac{\omega_W}{\omega_P} - 1\right) r_2\right\} \cos(\omega_P t - \alpha)} \\ &\approx \omega_P \sqrt{r_2^2} = \omega_P r_2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \omega_W &= v_m / 60 r_1 \\ \omega_P &= (\pi \times S_m) / 30 \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$v(r) = \omega_p r_2 = 78.5r \quad (3.13)$$

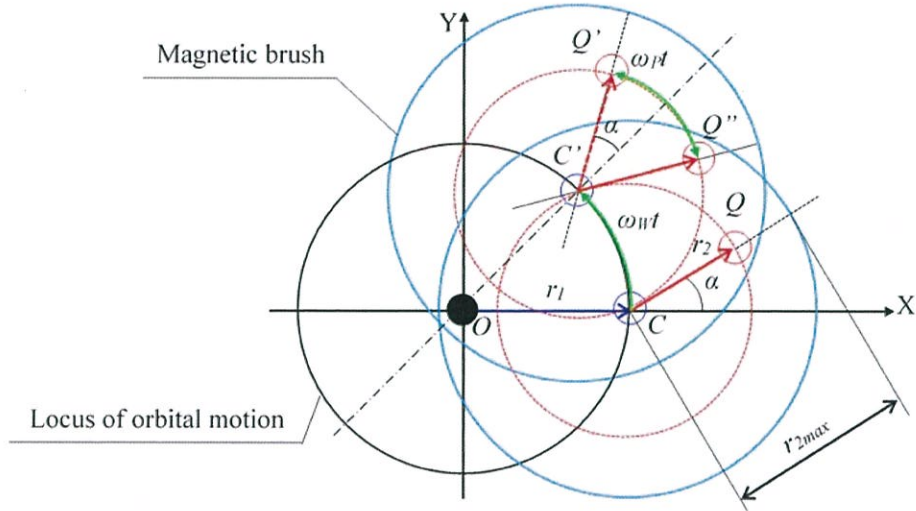


Fig. 3.12 Transfer model of magnetic brush

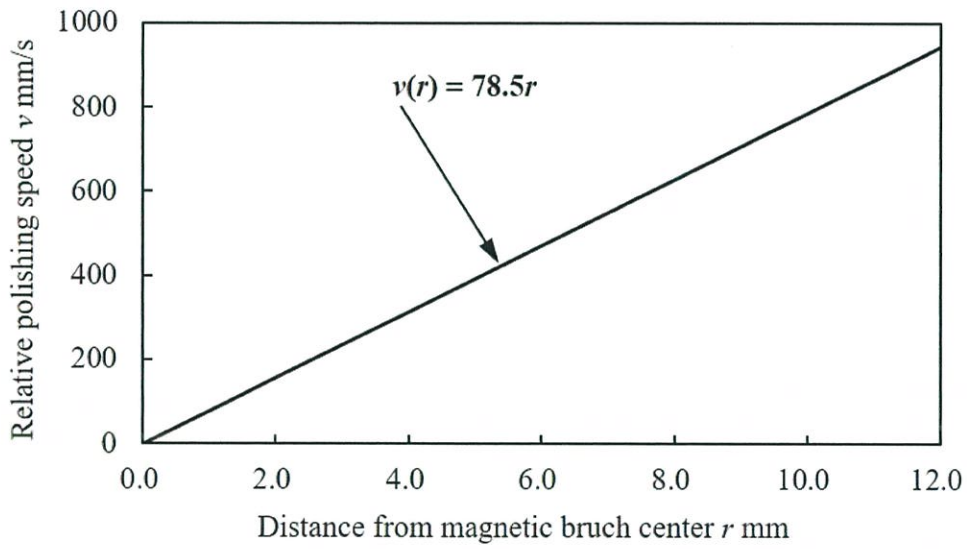


Fig. 3.13 Relationship between v and r

3.6.3 $P_m v t$ 分布の導出

式(3.9)および式(3.13)で表される研磨圧力 $P_m(r)$ と研磨相対速度 $v(r)$ により, $P_m v(r)$ は式(3.14)に示す磁気ブラシの中心からの直線距離 r における関数として表される.

$$P_m v(r) = P_m(r) \cdot v(r) = 147.8r^3 - 3399r^2 + 19549r \quad (3.14)$$

すなわち, 図 3.14 に示すように $P_m v$ 値はブラシ中心($r = 0$)より少し外側(本例では $r = 3.9$ mm)で極大値を示す.

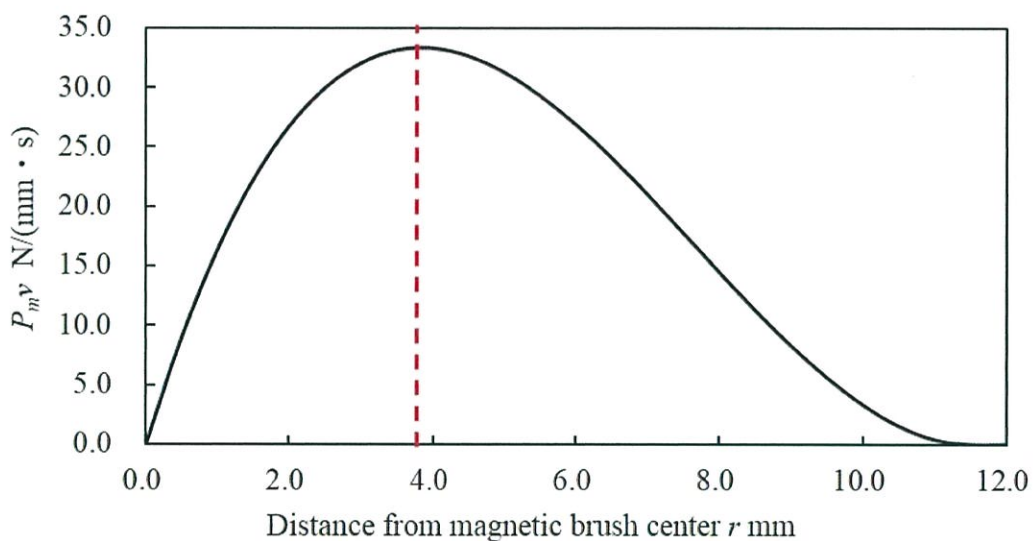
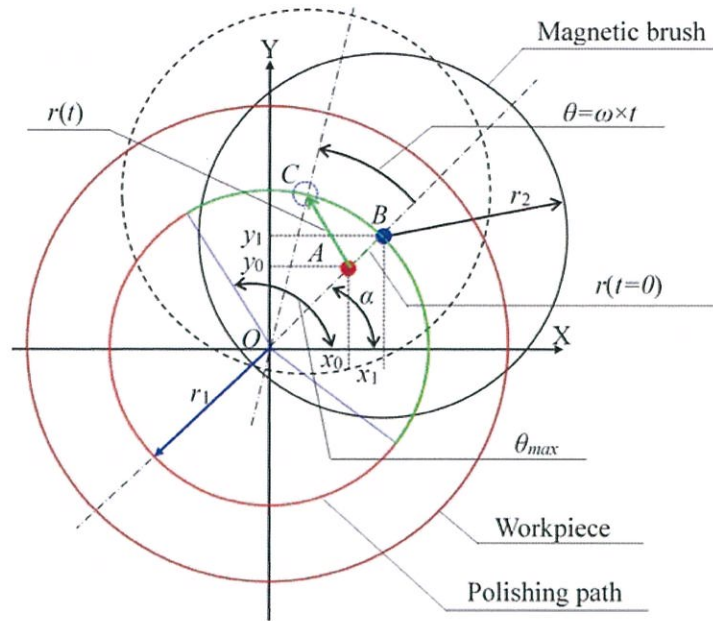


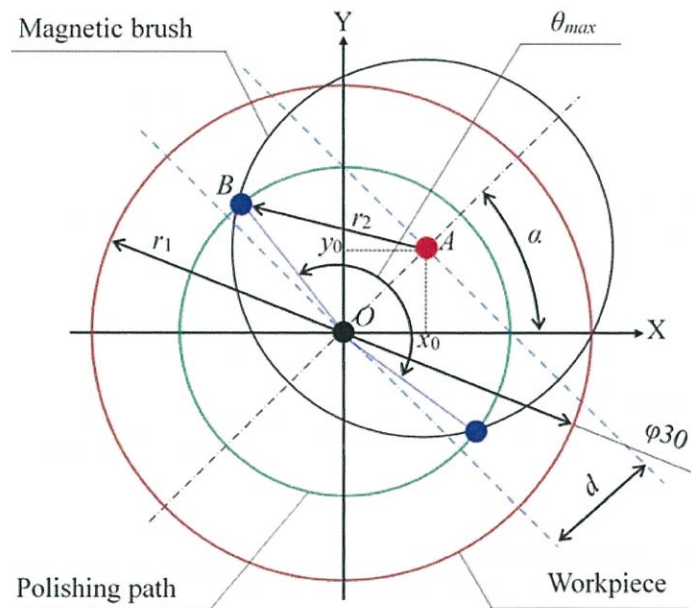
Fig. 3.14 Relationship between r and $P_m v$

次に工作物表面上における $P_m v t$ の分布について検討した. 工作物表面上の原点 O と任意点 A を結んだ直線 OA を時間変化の基準線とした場合における磁気ブラシの位置を図 3.15(a)に示す. $t = 0$ の場合の磁気ブラシ中心の位置を点 B (初期位置 $X=x_1, Y=y_1$) とすると, t 秒間に磁気ブラシ中心は, 角速度 ω で原点 O を

中心とする半径 r_1 の円軌道パス上を点 C まで移動する.



(a) Transition of magnetic brush ambulation



(b) Derivation of staying degree θ_{max}

Fig. 3.15 Brush staying position at given point on workpiece

ここで、点 $A(x_0, y_0)$ とブラシ中心位置 $B(x_1, y_1)$ との直線距離(工具中心からの半径方向位置)は式 3.15 で表され、また、座標角 α は式 3.16 で表されることから、時間 t の変化にともない点 A における P_{mv} の値が変化することがわかる。

$$r = \sqrt{(r_1 \cos(\omega t + \alpha) - x_0)^2 + (r_1 \sin(\omega t + \alpha) - y_0)^2} \quad (3.15)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(y_0/x_0) \quad (3.16)$$

そこで、点 A における P_{mv} の値を求めるために、磁気ブラシが点 A を滞留する時間全体における点 A とブラシ中心との距離 r の平均値 r_{Ave} を考える。研磨パス上において、磁気ブラシが工作物表面上の任意の点 $A(x_0, y_0)$ を滞留する範囲を求めるには、図 3.15(b)に示すように、点 A を中心として半径 r_2 の磁気ブラシと工作物表面との接触円を描くと、半径 r_1 の研磨パスにおいて点 A を中心とする半径 r_2 の円と重なり合っている部分が見られる。この円弧上に磁気ブラシの中心が位置する場合、点 A において磁気ブラシが滞留しているため、この円弧部分の角度を磁気ブラシ滞留範囲角 θ_{max} として式 3.17 で表される。ここで、 d は点 A 、原点 O 間の直線距離を示しており、式 3.18 として表される。ただし、点 A を中心とする半径 r_2 の円と研磨パスが重ならない場合($r_1+r_2<d$)は $\theta_{max}=0$ 、点 A を中心とする半径 r_2 の円が研磨パスを全包する場合($r_2-r_1>d$)は $\theta_{max}=2\pi$ とする。

$$\theta_{max} = 2 \cos^{-1}\{(r_1^2 + d^2 - r_2^2)/2r_1d\} \quad (3.17)$$

$$d = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (3.18)$$

以上により得られた θ_{max} を式 3.19 に導入することにより、滞留時間 T を導出

でき、微小時間 dt へと分割し、全ての分割点における点 A とブラシ中心との距離 r の平均値 r_{Ave} を求める。これを式 3.15 に適用すると、任意の点における P_{mv} の値を求められ、この P_{mv} の値に磁気ブラシ滞留時間 T を掛けることによって、任意の点における P_{mvt} の値を求めることができる。

$$T = \theta_{max}/\omega \quad (3.19)$$

3.6.4 プレストン定数 k の決定

本磁気研磨法($z_m = 0.4$ mm の場合)のプレストン定数 k を導出するため、工作物中心を中心点とする単円形状の研磨パスにおける半径 r_1 を変化させて磁気研磨を行い、各 r_1 の場合での工作物質量の減少量 ΔM を精密天秤によって測定した。そして、式 3.20 においてその減少量 ΔM を研磨面積 A (工作物表面において鏡面へ仕上がった面積) で除したものを式 3.4 の研磨量 M とした。前述した各 r_1 での P_{mvt} の予測値と式 3.20 により求めた研磨量 M を式 3.21 (式 3.4 により求めたプレストン定数 k の計算式) に代入して求めたプレストン定数 k を表 3.2 に示す。

$$M = \Delta M/A \quad (3.20)$$

$$k = M/Pvt \quad (3.21)$$

Table 3.2 Average $P_m vt$ and Preston constant k

| r_1 mm | $P_m vt$ N/mm | $k \times 10^{-6}$ $\mu\text{g}/(\text{N}\times\text{m})$ |
|----------|---------------|---|
| 2.5 | 5118 | 7.7 |
| 5 | 8155 | 4.7 |
| 7.5 | 12338 | 4.5 |
| 10 | 17371 | 2.7 |

本研究では、これらの平均値($k = 4.9 \times 10^{-6}$)をプレストン定数とした。この決定したプレストン定数 k の整合性を検証するため、研磨量の推定値と実際の研磨量との比較を図 3.16 に示す。研磨量の推定値と実験値との誤差はわずかであることがわかる。これは、磁性研磨ペースト中の磁性粒子が不規則に運動するといった性質が研磨量に影響を与えているためと考えられる。

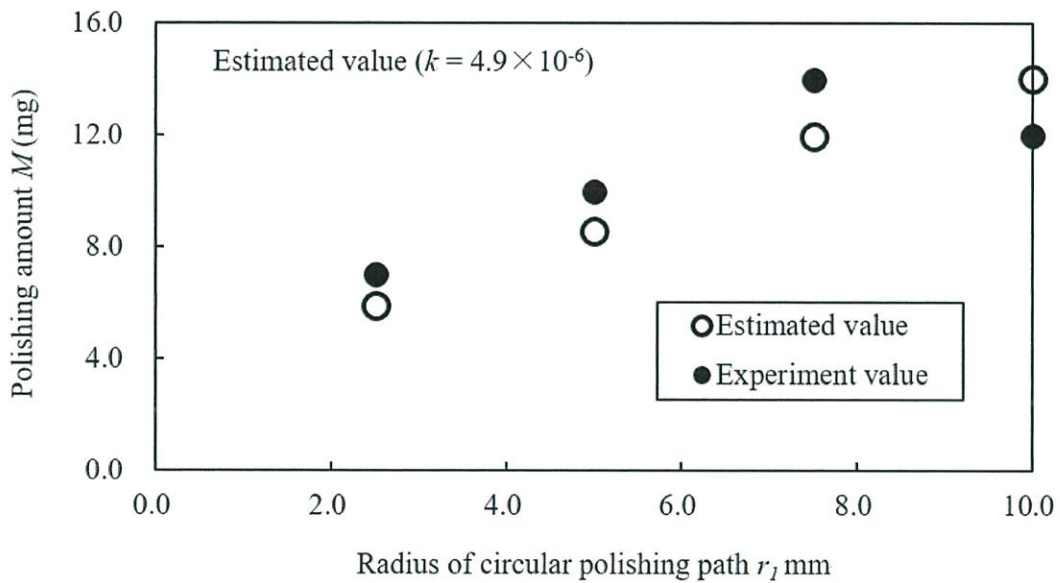


Fig. 3.16 Comparison between estimated value and experimental one

3. 6. 5 鏡面化に必要な表面除去量 M の検討

前項までにおいて述べた P_mvt 分布とプレストン定数 k を掛けることにより磁気研磨による単位面積当たりの除去質量 M を求めることができる. $r_1 = 5, 10 \text{ mm}$ の場合の M の等高線分布と実際に各条件で磁気研磨加工を行った工作物の加工面を図 3.17 に示す. そして, 実際に研磨加工された工作物の鏡面化された部分と不完全研磨部分との境界における研磨量を, 計算により求めた研磨量分布の図から読み取ることで, 鏡面化に必要な最低研磨量を求めた. その結果, 鏡面化に必要な最低研磨量 M は $15 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ であった.

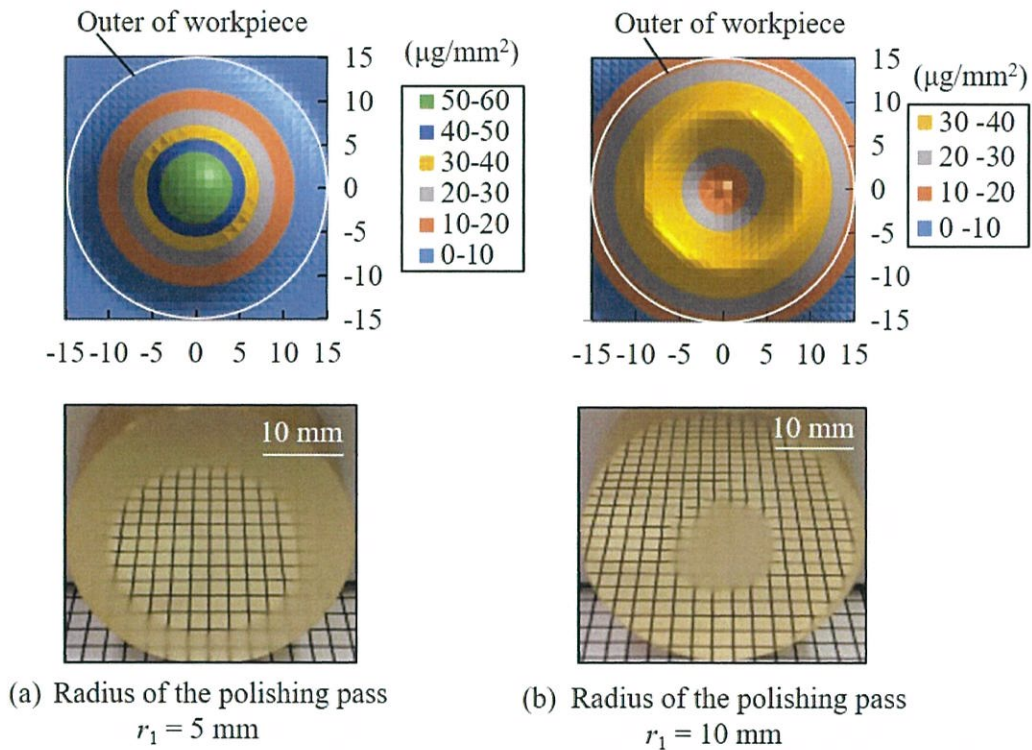


Fig. 3.17 Comparison of distribution of M and results of polishing experiment

次に, 表面粗さと研磨深さの関係を考える. まず, $Rz_{Th} = 5 \mu\text{m}$ Rz となるボールエンドミル切削条件により工作物の平面創製を行う. 次に, $r_1 = 5 \text{ mm}$ である研磨パスを用いて, 加工面上において研磨工具を 1 周させる. そして, 表面粗

さと研磨質量，研磨面積の測定を行った後に，同様の研磨加工を行う．最後に，以下の式 3.22 により研磨深さ h の計算を行う．

$$h = M_{mass} / (A_{mir.} \times \rho) \quad (3.22)$$

ここで， M_{mass} は研磨質量， $A_{mir.}$ は鏡面化された研磨面積， ρ は黄銅の密度である．図 3.18 に，表面粗さと研磨深さの関係を示す．図 3.18 より，鏡面化に必要な研磨深さ h は $12 \mu\text{m}$ であることから，前加工面の最大粗さ $5 \mu\text{m Rz}$ に対し，3 倍程度の深さを研磨することで十分な鏡面が得られることがわかった．

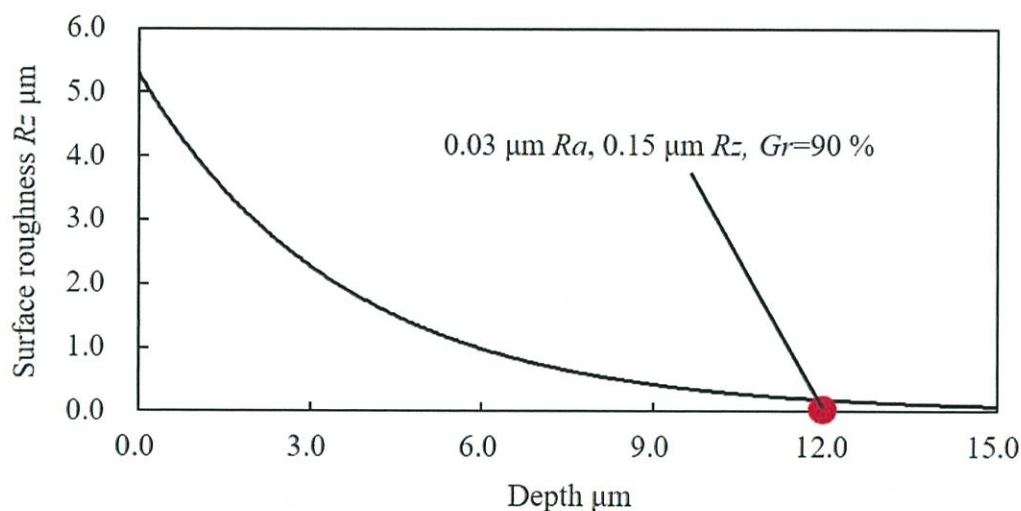
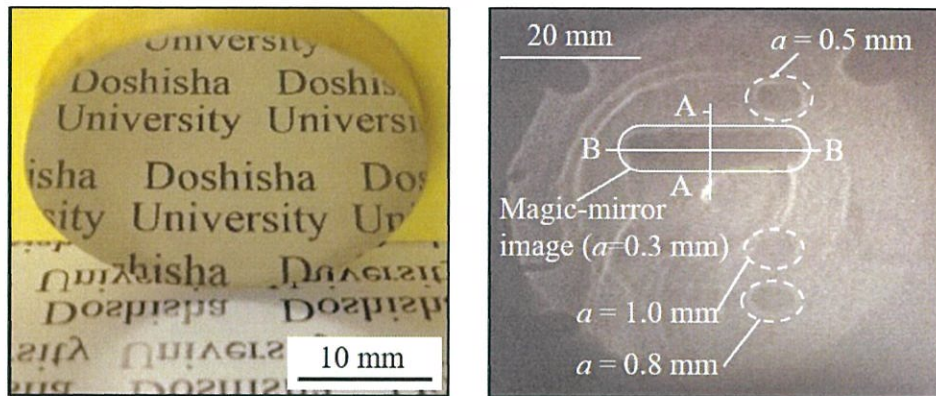


Fig. 3.18 Relationship between surface roughness and depth of polished surface

3.6.6 魔鏡創製ケーススタディ実験およびその結果と考察

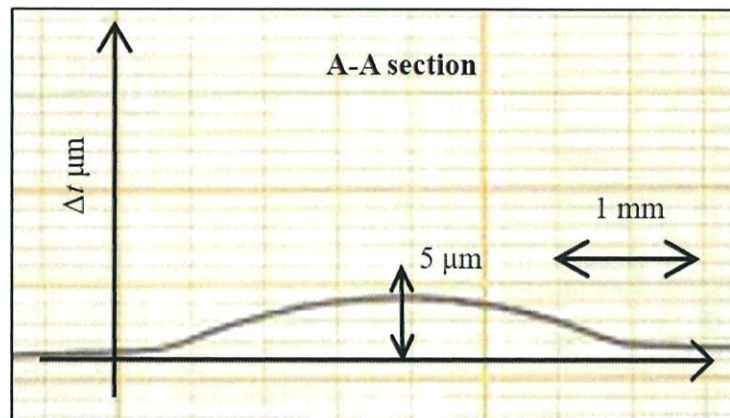
上記の結果を基に，実際に魔鏡の創製を試みた．実験方法は 3.4 項で述べたとおりである．ボールエンドミル切削により得た表面粗さは $5.3 \mu\text{m Rz}$ であり，磁気研磨条件は工具回転数 S_m が 750 min^{-1} ，送り速度 v_m が 5 mm/min ，研磨ギャ

トップ z_m が 0.4 mm である。研磨パスは加工面のすべての領域において研磨量 M が $15 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ となるように、半径 5, 10 mm の円を組み合わせた 2 重円形状パスである。そして、鏡面裏面から直線形状の溝切削加工(薄肉部厚さ a : 0.3, 0.5, 0.8, 1.0 mm, 切り込み量 : 0.5 mm/path, 送り速度 : 120 mm/min)を行った。図 3.19(a)に研磨加工された魔鏡面を示す。



(a) Magic-mirror surface

(b) Magic-mirror image



(c) Cross section profile of deformation on magic-mirror surface

Fig. 3.19 Results of fabricated magic-mirror

ボールエンドミル切削による切削痕が除去され鏡面化し、また、魔鏡裏面からの溝切削において生じるスラスト力による塑性変形は図 3.19(c)に示すように $\Delta t_{max} = 3 \mu\text{m}$ P-V (薄肉部厚さ $a = 0.3 \text{ mm}$) であり、図 3.19(a)に示すように、肉眼では認識できない、歪みの確認できない C2 連続面の鏡面(表面光沢度 $Gr = 90 \%$, $0.02 \mu\text{m}$ Ra , $0.26 \mu\text{m}$ Rz)が得られた。また、魔鏡とスクリーン間の距離 L を 300 mm としてスクリーンに投影した魔鏡像を図 3.19(b)に示す。薄肉部の厚さ 0.3 mm として加工した場合、実線で囲んだ部分にて横方向の直線形状の像が確認できたが、鏡面上にムラが生じたこともわかった。また、この投影像のコントラストの分布を図 3.20 に示す。

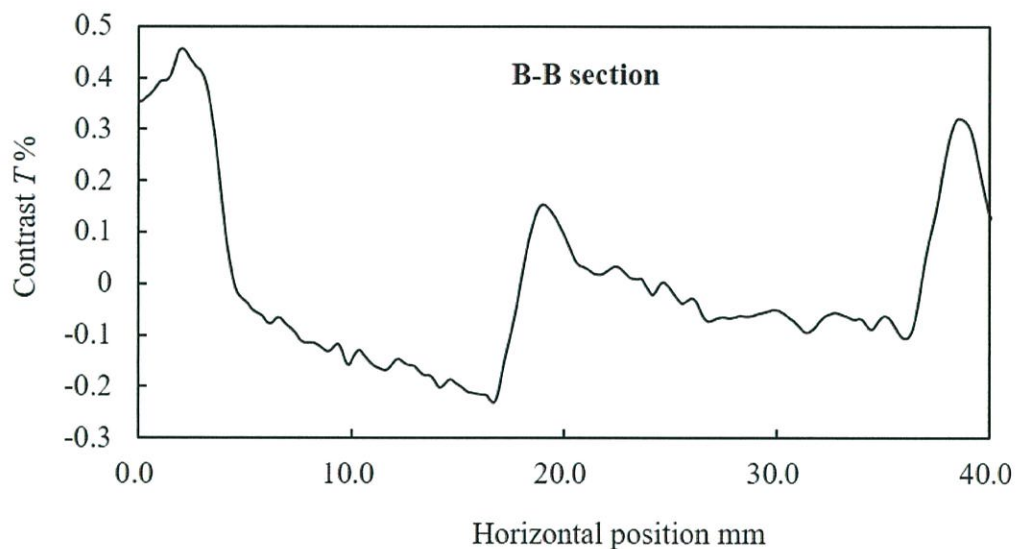


Fig. 3.20 Contrast changing features of fabricated magic-mirror

平坦部と魔鏡像部のコントラスト差はおおよそ 40 %程度であるため、魔鏡像の視認性としては十分といえる。ただし、溝中心に対して左右でコントラストが異なっている。これは溝のもっとも深い箇所を加工する際に工具が一軸方向にのみ走査されているため、スラスト力にバラつきが生じたためである。また、

薄肉部の厚さ 0.5, 0.8, 1.0 mm として加工した場合, 図 3.19(b)の点線で囲んだ部分にて像が確認できるが, 薄肉部厚さ 0.3 mm として加工した場合のような直線形状の像は確認できない. これは溝切削加工時のスラスト力に対して薄肉部厚さが大きく, 鏡面側に十分な塑性変形を生じさせることができなかつたためと考えられる.

3.6.7 従来の磁気研磨加工法における課題

前節まで, 従来の磁性研磨ペーストを用いて平面の仕上げ加工を行う場合, 磁気研磨加工法における問題点を発見した.

図 3.19(a)に示すように, 磁気研磨加工による平滑な鏡面に仕上がっている. その一方で, 図 3.19 (b)において, 明るくしている環形の陵や研磨の跡のようなムラが出ていることから, いわゆるブラシ押付け力の分布におけるバラツキが大きいため, 仕上げ面の平面度がくずれたこともわかる. 以上の結果より, 最大粗さ 10 μm 程度の粗い加工から加工能率よく中仕上げレスで最終仕上げとして鏡面を得ることができる一方で, ムラなく再現性のよい仕上げ加工をするには課題の残ることがわかった.

3.7 結 言

提案した磁気研磨加工法により効率的に加工面のボールエンドミル切削痕を除去し, 鏡面化するため, 最適なボールエンドミル加工条件の導出および磁気研磨加工のモデル化を試みた結果, 以下の結論が得られた.

- 1) ボールエンドミル切削による切削後の表面粗さに着目し、後工程である磁気研磨に要する時間も考慮した総合的な能率の観点からの最適切削加工条件の決定法を示した.
- 2) 磁気研磨加工での加工パスの決定を容易に行うため、単円形状パスでの P_{mvt} のモデル化を行い、実験によりプレストン定数 k を求めることで、鏡面化に必要な除去質量 M を示した.
- 3) 提案した魔鏡創製法によりケーススタディを行った結果、魔鏡面において歪みのない鏡面が得られ、また、スクリーンに像を投影した結果、コントラスト一定な直線形状の魔鏡像が得られた.
- 4) 従来の磁気研磨加工法による加工能率よく中仕上げレスで最終仕上げとして鏡面を得ることができる一方で、ムラなく再現性のよい仕上げ加工をするには課題の残ることがわかった.

参考文献

- 3.1) Lei MA, Tatsuya FURUKI, Toshiki HIROGAKI, Eiichi AOYAMA and Keiji OGAWA, “Magnetic Polishing and Endmilling Tool-Path to Fabricate Magic-Mirror Surface with a Machining Center”, Proc. of International Symposium on Flexible Automation 2014, ISFA2014-44L, 1-6
- 3.2) Tatsuya FURUKI, Lei MA, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, “Satiny and Continuous-Curvature Corrugated Surface Generation by Integrating End-Milling Processes and Magnetic Polishing with a Machining Center”, Key Engineering Materials, Vol.625 (Precision Engineering and Nanotechnology V), (2014), 247-252
- 3.3) Tatsuya FURUKI, Lei MA, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, “Smooth micro-unevenness surface generation of difficult-to-cut material by small diameter endmilling and magnetic polishing”, Proc. of International Conference on Precision Engineering 2014, 593-598
- 3.4) 古木辰也, 馬 雷, 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, “マシニングセンタ上での磁気研磨加工とエンドミル加工による魔鏡面の創製”, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No.820 DOI-10.1299/transjsme.2014dsm0390, (2014), 1-13
- 3.5) 青山栄一, 廣垣俊樹, 小川圭二, 潮見友洋, 関本雅樹, “マシニングセンタと研磨加工の融合による魔鏡面のデジタル創製に関する研究”, 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 127-128
- 3.6) 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 川口二俊, 末田秀則, 須知亮, “5 軸制御マシニングセンタで創製される仕上げ加工面の考察ーボールエンドミル加工における切削点一定化の効果と最適加工条件の設定法”, 精密工学会誌, Vol.75, No.10, (2009), 1238-1244

- 3.7) Xavier, P. and Christophe, T., “Automatic polishing process of plastic injection molds on a 5-axis milling center”, *Journal of Materials Processing Technology*, (2010), 1-22
- 3.8) Lin, W.Y., Xu, P., Li, B. and Yang, X.J., “Path planning of mechanical polishing process for freeform surface with a small polishing tool”, *Robotics and Biomimetics*, Vol.1, No.24, (2014), 1-15
- 3.9) Preston, W.F., “The theory and design of plate glass polishing machines”, *Japan Society of Glass Technology*, Vol.11, No.214, (1927), 214-256

第4章 磁気研磨ブラシによる研磨機構の解明

4.1 緒 論

磁気研磨ブラシとは、鉄粉と砥粒を油で混ぜた磁性研磨ペーストと先端に永久磁石を取付けた磁気研磨工具からなり、磁気研磨工具に取付けられた永久磁石に磁性研磨ペースト中の鉄粉がブラシ状に付着したもので^{4.1, 4.2}、研磨剤自身が磁気によりブラシを形成するブラシ研磨^{4.3}の一種と考えることができる。そして、先端に球状の永久磁石を取り付けることにより、ボールエンドミル加工により仕上げられた自由曲面を同じプログラムで研磨することができる。多軸マシニングセンタ^{4.4}や加工ロボットとの統合によって、従来対応が困難であった加工への応用が展開されつつある。例えば、精密容器のライニング、石油およびガスパイプライン、リテーナベアリング油圧部品の各種バルブなどの分野でその役割を果たしている^{4.5-4.7}。

これまでの磁気研磨法に関する研究は、表面あらさの改善に関するのが大半である^{4.7}。しかし、砥石を用いた研磨加工の場合と同様、磁気研磨ブラシの押付け力（以下、ブラシ押付け力と呼ぶ）が加工特性の大きな支配因子であると考えられる磁気研磨法^{4.7, 4.8}において、押付け力の特性と発生機構に関してはほとんど検討されていない。前章で述べたように、従来の磁性研磨ペースト（強磁性材粒子と砥粒および溶媒から単純に混合したもの）を用いて平面や曲面の仕上げ加工を行う場合、研磨特性のばらつきが大きく、形状精度の予測ができないため、加工プロセスの最適化の設定が困難であった。そこで、本研究では、ボールエンドミル型の磁気研磨工具とマシニングセンタを統合した自由曲面研磨加工の実用化を目的に、ブラシ押付け力を決定する因子の検討を行った。マ

シニングセンタでのエンドミル加工においては、(1)工具を設定の切り込みまで被削材に近づけていくアプローチと(2)形状を創生する形状加工とを区別して議論される場合が多い。磁気研磨ブラシの場合、ブラシ押付け力は磁気研磨工具先端と被加工物までの法線方向距離（ギャップ： Δn ）で管理されるのが一般的である。また、磁気研磨ブラシのブラシと被加工物との接触状態（接触面積、押付け力等）はアプローチ中に時々刻々と変化し、アプローチ終了後に定常値に収束するものと考えられる。そこで本研究では、アプローチ中のブラシ押付け力や被加工物との接触状態の変化を観察することにより、磁気研磨ブラシのブラシ押付け力の決定因子を検討した。

本章^{4.9)}では、非磁性体材料であるオーステナイト系ステンレス鋼とアルミニウム合金を用いて現象の可視化のために製作した磁気研磨実験専用ジグを用い、高速度カメラと動力計との組合せによる観察システムを構築し、市販の磁性研磨ペーストを用いて磁気研磨加工のメカニズムを考察した。さらに、それらの結果より、真球の鋼球による鋼球磁気研磨ブラシを提案した。そして、市販の磁気研磨ブラシと比較することにより、ブラシ押付け力を制御して鏡面化と形状誤差の僅少化を図る工程において重要な因子を検討した。

4.2 実験装置および観察手法

4.2.1 可視化のための実験装置

加工装置には図 3.2 に示す立型 3 軸制御マシニングセンタ ROBODRILL α -T14 DSe（ファナック製，最小指令値：1 μm ）と磁気研磨工具 NPS- $\Phi 6$ - $\Phi 10$ -R5（FDK 製，工具先端ボール部半径：5 mm）を用い，図 4.1(a)に示すように，平面研磨加工を行った。

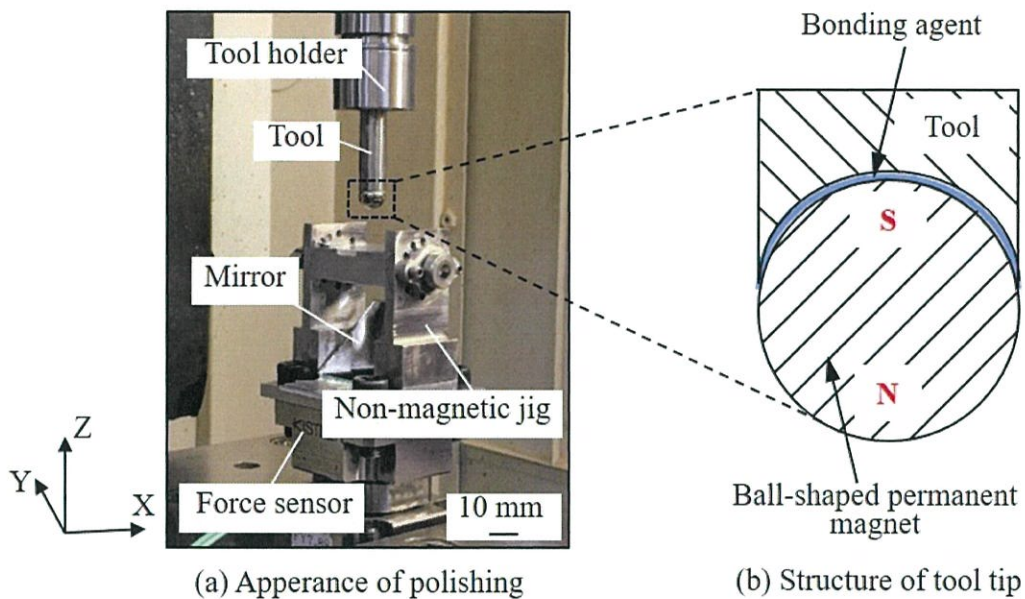
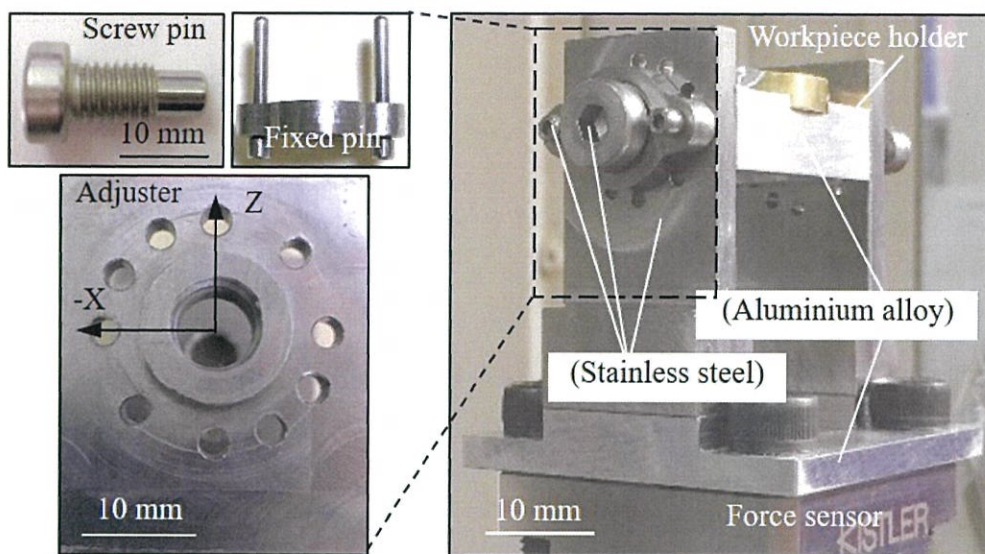


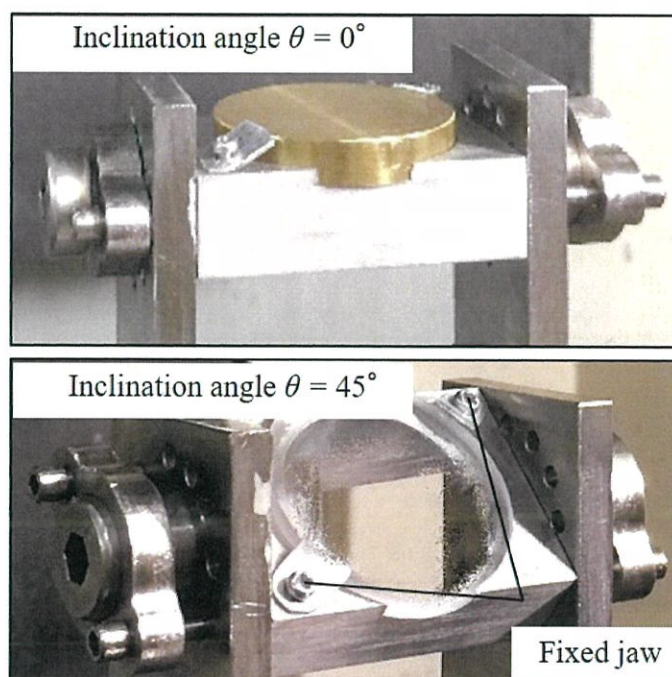
Fig. 4.1 Experimental device

また，図 4.1(b)に示すように，工具先端の球型強力ネオジウム永久磁石（磁場強さ：0.5 T，直径：10 mm）は接着剤で磁気研磨工具の穴部と結合している。この永久磁石の磁力により形成された磁気研磨ブラシ（=磁石の磁力線に沿って吸着した磁性研磨ペースト中の鉄粉）から加工物に作用する押付け力は，永久磁石による磁場分布に大きく依存するため，測定装置による磁場の変化を最小限にする必要がある。また，市販の動力計 9347C（KISTLER 社製 3 成分フォーリンク）は磁場分布に影響を与えるだけでなく，磁場により計測結果にも影

響が出る^{4.8)}. そこで図 4.2 に示すように動力計への磁場の影響を防ぐため, 磁気研磨実験専用の非磁性ジグ (以下, 専用ジグと呼ぶ) を製作した.



(a) Overview of special jig



(b) Overview in different inclination angles

Fig. 4.2 Design of special jig

そのジグの特徴は以下の通りである

- 1) 定位ピン (Fixed pin) とネジ付き固定ピン (Screw pin) により加工物を $\theta = 0^\circ$ (=加工平面が鉛直), 30° , 45° , 60° , 90° (=加工平面が水平) の 5 種類の角度に傾斜できる (図 4.2(a)参照).
- 2) 非磁性のオーステナイト系ステンレス鋼とアルミニウム合金で製作したため, 磁気研磨工具の磁場の影響を受けず押付け力の測定結果の再現性が高まる.
- 3) 加工物ホルダには直径 26 cm の穴を開けているため, その下にミラーを角度 $\alpha = \theta/2$ で設定し, 透明なアクリル板やガラス板を被加工材とすることで, 磁気研磨ブラシの挙動 (被加工材との接触領域) を動画撮影することができる (図 4.2(b)の下図参照).

将来, 自由曲面の磁気研磨自動化を実現するために, 各傾斜面に沿って磁気研磨ブラシの加工特性を観察することができる. ただし本報では, 加工物上面が水平状態 ($\theta = 90^\circ$) の場合の観察を以後の対象とする (図 4.2(a)参照).

4.2.2 観察手法

今までの多くの研究では磁性粒子の作用と研磨面との関係を解明するため, 垂直力測定装置に工夫を重ね, それなりの成果^{4,8)}をおさめてきたが, さらに, 磁気研磨ブラシの加工物表面上での振る舞いを直接観察できれば, より詳細な現象の解明が期待できる. そこで, この専用ジグを介して磁気研磨ブラシの押付け力と磁気研磨ブラシの挙動とを同時に観察する手法を開発した (図 4.3 参照).

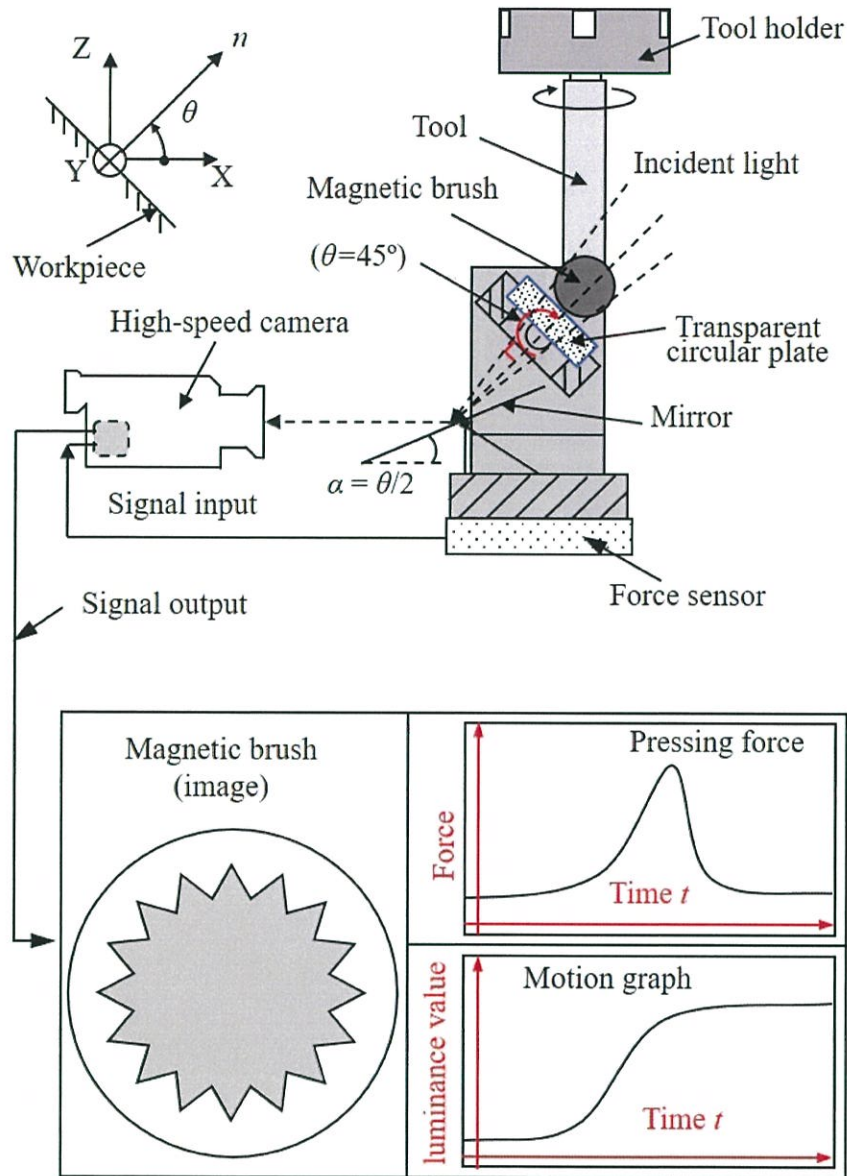


Fig. 4.3 Schematic of recording by a high-speed camera and a force sensor

ビデオ画像より各フレームの全画素輝度合計値を輝度加算値として計算し、その時間的变化を示した図をモーショングラフと呼ぶ。輝度値によりビデオ画像の時間的变化を数値化したものと考えることができる。本実験においては、透明なアクリル板加工物表面と磁気研磨ブラシの接触部分の輝度値の変化が大き

いため、接触面積の時間的変化を近似的に評価するための指標とした。また、図 4.3 に示すように、KENYENCE 製の VW-9000 高速度カメラ（1 チャンネルのデータロガー内蔵）に、動力計からのアナログ電圧信号を入力することができる。そのアナログ電圧信号を押付け力へ変換して動画との同期表示させることによって磁気研磨ブラシの加工特性を詳細に観察できる。この観察方法により研磨特性の主たる支配因子である押付け力の特性と押付け力の発生機構を系統的に明らかにすることが期待できる。

4.3 市販の磁性研磨ペーストによる研磨特性の解明

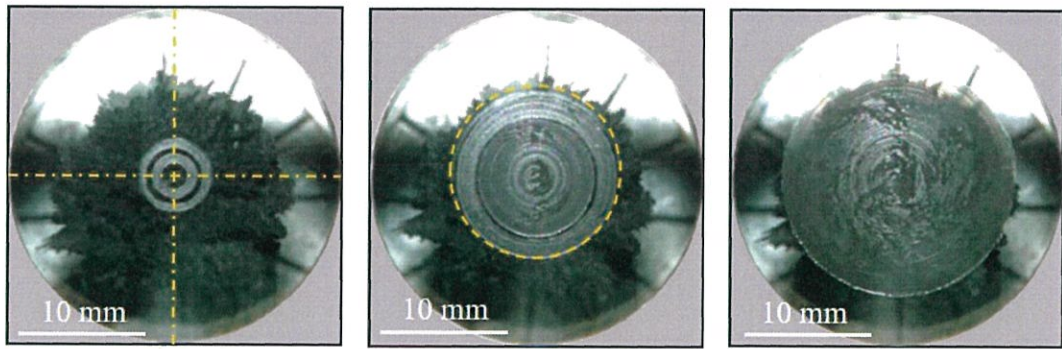
4.3.1 磁気研磨ブラシの挙動

磁気研磨加工法については加工圧制御に関して不明な部分が多い。そこで、平面形状の工作物に対して、磁気研磨工具を設定ギャップ（磁気研磨工具先端と加工平面とのギャップ Δn の目標値）までアプローチ（本研究では被削材表面に対して垂直に工具を近づけた）する間の磁気研磨ブラシと工作物の接触状態と押付け力との関係に注目した。すなわち、磁気研磨ブラシを構成する磁性研磨ペースト中の磁性粒子の分散性、凝集性^{4.10)}を観察した。

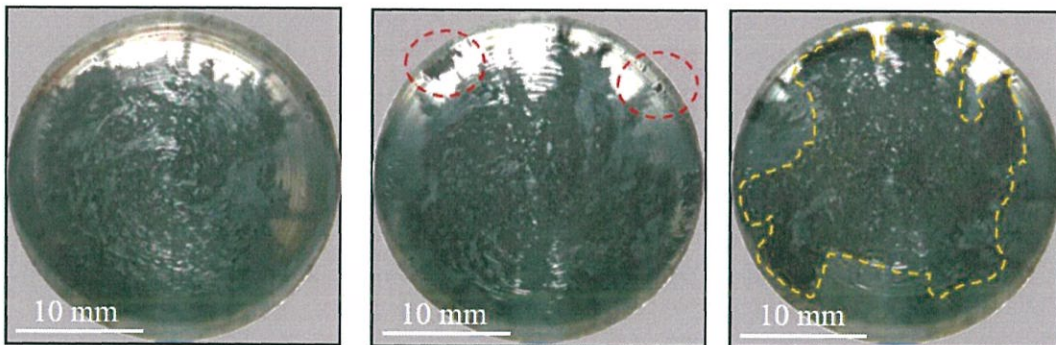
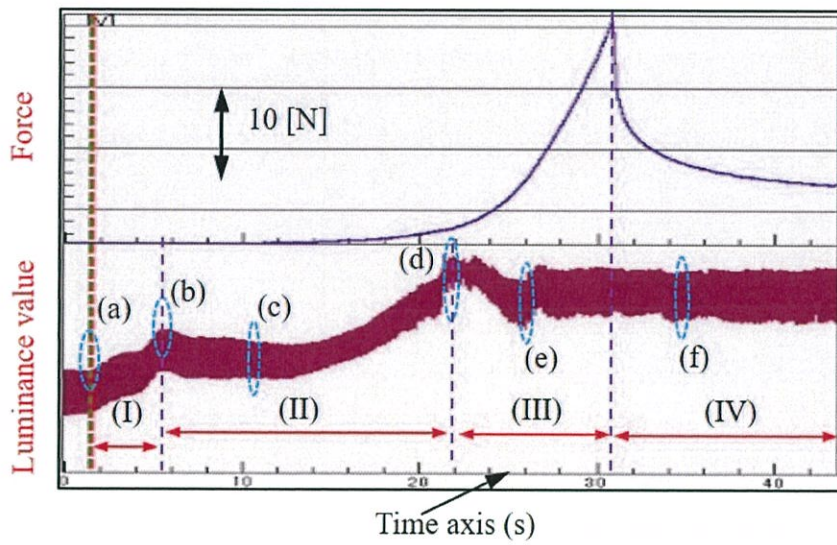
本実験では、磁性研磨ペーストに A 社製の磁性研磨ペースト（鉄粒子、粒径：1~100 μm 、アルミナ砥粒、粒径：0.05 μm および植物油からなる）を使用した。まず、工具回転数 $S = 750 \text{ min}^{-1}$ 、アプローチ速度（工具アプローチ時の加工物平面への法線 n 方向送り速度） $f_n = 18.0 \text{ mm/min}$ 、設定ギャップ（磁気研磨工具先端と加工平面とのギャップ Δn の目標値） $\Delta n = 0.3 \text{ mm}$ （ペースト中の鉄粒子の最大径の約 3 倍とした）、磁性研磨ペースト量 $w = 3 \text{ g}$ の研磨条件でアクリル板（直

径：30 mm, 厚さ：3 mm) を加工物としてアプローチ加工実験を行った。また、計測は開発した観察装置により、高速度カメラ(シャッタースピード:1/2000 sec, フレームレート：500 fps) による磁気研磨ブラシ接触状態と動力計による押付け力を同時に観察した。本実験では、ギャップ $\Delta n = 10.0$ mm からスタートし、設定ギャップ $\Delta n = 0.3$ mm に達して送りを停止した後、押付け力が安定するまで観察を行った。その結果を図 4.4 に示す。

図 4.4 中央のモーショングラフと各ビデオ画像より、磁気研磨ブラシ接触状態の時間的变化は、(I) $t = 0 \sim 4$ 秒 (図 4.4(a)~(b)), (II) $t = 4 \sim 20$ 秒 (図 4.4(b)~(d)), (III) $t = 20 \sim 30$ 秒 (図 4.4(d)~(e)), それ以降 (IV) の4つの領域に大別できることがわかる。(I)の領域では磁気研磨ブラシが加工物表面上で工具回転中心(図 4.4(a)のクロス破線参照)より半径方向に少し離れたところから接触がスタートして環状に拡大する。この領域ではモーショングラフ(接触面積に対応)は急激に増加している。しかし、押付け力はほとんど変化していない。(II)の領域では磁気研磨ブラシ中心部が接触し、接触領域は外側に拡大し、モーショングラフの値も指数関数的に増加する。しかし、押付け力の増加は緩やかである。(III)は接触が一定となる領域である。この領域では押付け力は指数関数的に急激に増加する。領域(II)までは磁気研磨ブラシは工作物表面内での変形が主体であり、領域(III)では工作物表面法線方向の変形が主になるため押付け力が急増したものと考えられる。また、磁気研磨工具が設定ギャップ位置に到達する(f)において押付け力が最大値に達し、送りが停止した状態で押付け力は指数関数的に定常値に収束する。これは磁気研磨ブラシが粘弾性的な性質を持つことを示している。



(a) $t = 0$ s, $\Delta l = 8.7$ mm (b) $t = 4.0$ s, $\Delta l = 7.5$ mm (c) $t = 11.6$ s, $\Delta l = 5.1$ mm



(d) $t = 20.4$ s, $\Delta l = 2.7$ mm (e) $t = 24.4$ s, $\Delta l = 1.5$ mm (f) $t = 29.4$ s, $\Delta l = 0.3$ mm

Fig. 4.4 Variation of pressing force of commercial polishing paste with times

また、ビデオ画像（図 4.4(d)~(f)）より、磁気研磨ブラシは円形に一様に分布せず、不均一・非定常に偏在していることがわかる。これが磁気研磨ブラシの研磨特性にばらつきが出る一つの要因と考えられる。また、各領域ともモーショングラフの縦軸方向の線幅が太くなっている。これは接触領域の時間的変動が大きいためである。また、磁気研磨ブラシから分離した磁性粒子のかたまりが観察される（図 4.4(e)破線部分参照）。これは磁気研磨ブラシが加工物表面上の過大な摩擦力（接線方向力）を受けたことが原因であると考えられる。この分離磁性粒子は再び磁気研磨ブラシに結合し、分離、結合を繰り返す。

磁気研磨ブラシが加工物に近づく際の変形特性を調べるために、磁気研磨ブラシによる押付け力の変化を詳細に検討した。その結果を図 4.5 に示す。

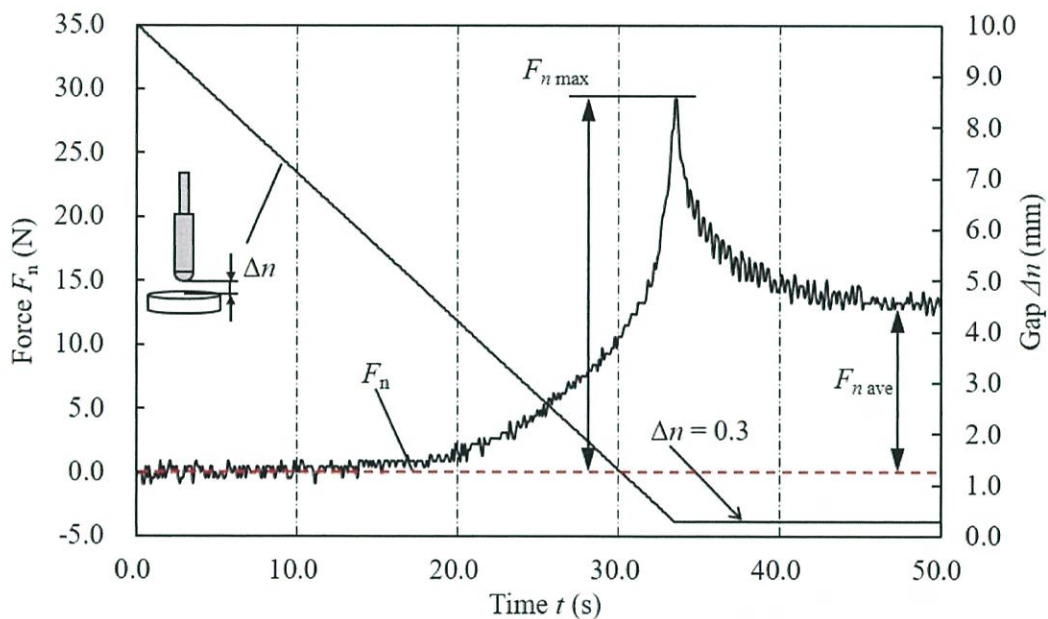


Fig. 4.5 Variation of pressing force of commercial polishing paste with time

図中には、磁気研磨工具と工作物間のギャップ Δn の変化も合わせて示した。図 4.5 よりアプローチ中、磁気研磨ブラシの押付け力は指数関数的に増加し、設定値に達した時点で最大値 $F_{n,max}$ となり、その後送りが停止した状態で時間とと

もに指数関数的に定常値（図 4.5 中の $F_{n\text{ ave}}$ ）に収束する粘弾性的な現象を示すことがわかる。この残留する定常押付け力が研磨加工時の押付け力となる。市販磁性研磨ペーストでは、最大押付け力 $F_{n\text{ max}} =$ 約 30 N，定常押付け力 $F_{n\text{ ave}} =$ 約 15 N であり，アプローチ中の押付け力の最大値は定常値の 2 倍あり，アプローチ条件の設定には注意が必要である。

4.3.2 切りくずと仕上げ面性状の観察

磁気研磨法において、高能率を達成している磁気研磨ブラシの研磨メカニズムについて検討するため、非磁性金属の中で柔らか目の黄銅（C3604，ビッカース硬度 412~519 HV）を加工物とし，設定ギャップ $\Delta n = 0.3$ mm で加工平面に平行な方向（図 4.6(a)の X_1 と X_2 の間）に送り運動を加えて 30 分間（送り速度 $f_x = 10.8$ mm/min，10 往復）の平面研磨実験を行った。加工後，磁性研磨ペーストを回収し，乾燥した後に永久磁石で Fe 粒子を除去した後，SEM による観察と X 線マイクロアナライザーによる元素分析を行った。その結果を図 4.7 に示す。

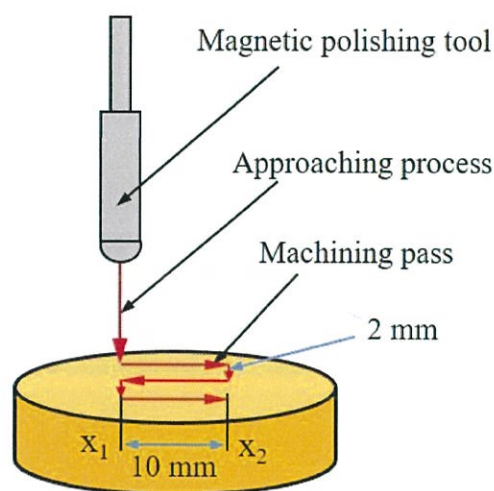


Fig. 4.6 Machining process by magnetic abrasive polishing

図 4.7(a)の SEM による観察視野内で切削作用により除去されたとと思われる切りくず状のものが確認できた。その中で最も大きい切りくず状のものは幅 0.4 μm 、長さ 6 μm 程度であった。そこで、この切りくず状のものの元素分析を行うと加工物の主要成分である Cu が検出された (図 4.7(b))。アルミナ砥粒のサイズ (粒径 0.05 μm 、図 4.7(c)) を考慮すると、この切りくず状のものは鉄粒子のエッジ (図 4.7(d)) による切削作用により生じた切りくずであることがわかった。

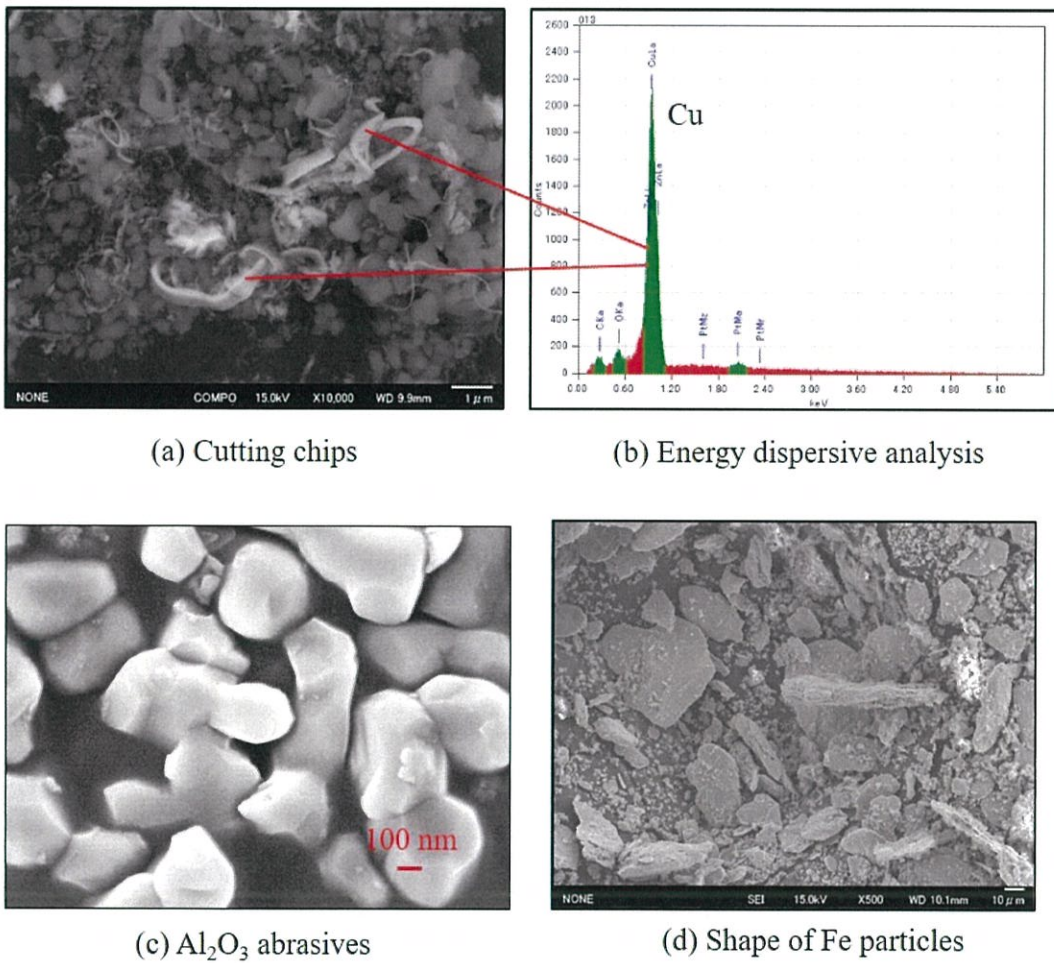
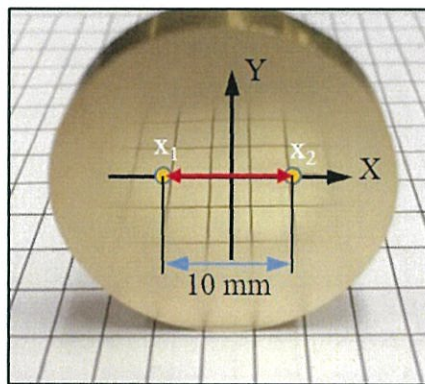
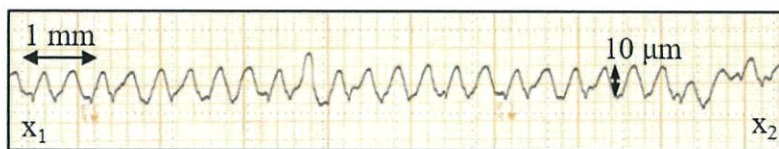


Fig. 4.7 Element analysis of polishing chips

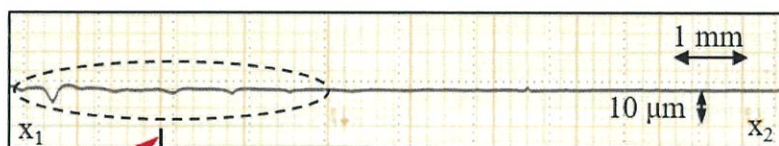
次に、加工した加工物の表面性状を評価するために、表面光沢度 Gr および断面曲線を採用した。表面光沢度 Gr の測定には、グロスチェッカーIG-410（堀場製作所製）を使用した。前章で述べたように、表面性状はボールエンドミルによる前加工面の切削痕が除去され、表面光沢度 Gr が 90% 以上の場合を鏡面とした。本実験で測定した加工物の表面光沢度は $Gr = 92.2\%$ であり、加工した加工物の表面は鏡面になることがわかった（図 4.8(a)）。また、図 4.6 に示している研磨加工パスにより加工された加工物の表面性状を評価した。その評価のパラメータとして断面曲線の測定には、触針式表面粗さ測定器を利用した。その結果を図 4.8 (b), (c) に示す。



(a) Photograph of polished workpiece



(b) Before finishing



Approach point

(c) After finishing

Fig. 4.8 Section curves obtained before and after finishing

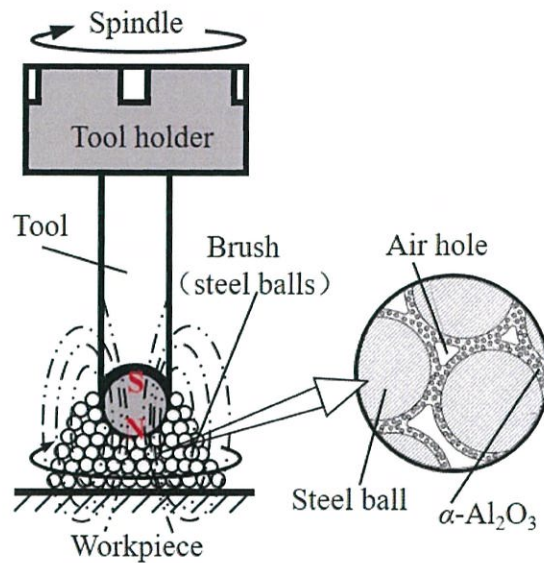
上述したように、ボールエンドミルの前加工面の切削痕（図 4.8(b)：最大粗さ 10 μm 程度）は磁気研磨によって図 4.8(a), (c)に示すように平滑な鏡面に仕上がっている。その一方で、図 4.8(a)の加工物の中心より左側 (x_1 側)において、図 4.8(c)の点線で囲む断面曲線部分がみだれていることから、いわゆる鉄粒子のエッジによる切削作用により平面度がくずれたこともわかる。この部分は磁気研磨工具のアプローチ位置に対応しており、アプローチ中の過大な押付け力により大きな切りくずを生成したためと考えられる。

以上の結果より、市販磁性研磨ペーストを用いて磁気研磨加工を行う場合には、鉄粒子のエッジによる切削加工とアルミナ砥粒による研磨加工が混在した加工であるため、バフ研磨よりも高能率な研磨を実現していることがわかった。しかし、最大粗さ 10 μm 程度の粗い加工から加工能率よく中仕上げレスで最終仕上げとして鏡面を得ることができる一方で、制御不能な鉄粒子のエッジによる切削作用も混在し、ムラなく再現性のよい仕上げ加工をするには課題 4.11, 4.12)の残ることがわかった。

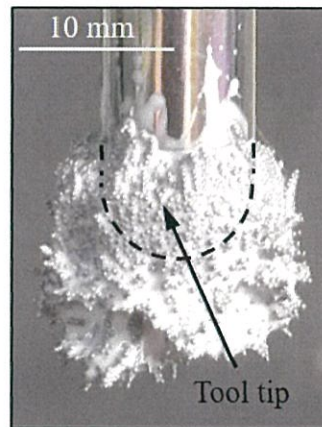
4.4 鋼球磁気研磨ブラシによる磁気研磨法

磁気研磨ブラシの加工表面での分布の不均一性は、研磨能率の安定性を崩すばかりでなく、加工面品質に大きな影響を及ぼすことがわかった。つまり加工欠陥の発生の原因になる^{4.9)}。上述の市販磁性研磨ペーストにおいて、鉄粒子の形状が不規則で凹凸が大きく、磁性粒子間の相対移動が表面の凹凸により妨げられるため困難となり、磁気研磨ブラシの分布に不均一性が発生したものと考えられる。すなわち、鉄粒子の形状が磁気研磨ブラシから加工物に作用する押付け力の分布に大きく影響することが考えられる。そこで、真球度が高く凹凸の

無い鋼球によるブラシを作製し、この鋼球磁気研磨ブラシと市販磁気研磨ブラシを比較することで鉄粉形状の研磨能力に及ぼす影響を検討した。鋼球磁気研磨ブラシの概略図とその写真を図 4.9 に示す。



(a) Model of polishing tool



(b) Steel balls brush

Fig. 4.9 Concept of magnetic polishing tool

提案した鋼球磁気研磨ブラシの磁性研磨ペーストは、鋼球とスラリーで構成されている。鋼球は、ベアリング用鋼球（高炭素クロム軸受鋼 SUJ2, $\Phi 0.35$ mm, 真球度 $0.4 \mu\text{m}$, 表面粗さ $R_z 0.09 \mu\text{m}$) を利用した。スラリーの構成は、合成ペ

ースオイル（主成分：合成油，超微粒子 PTFE）とアルミナ砥粒から成る。

4.5 鋼球磁気研磨ブラシによる押付け力特性の解明

4.5.1 磁性研磨ペーストの構成

本実験では，磁気研磨ブラシを形成する磁性研磨ペースト中の鉄粉形状の影響を考察するために，真球度の高い鋼球を用いた磁性研磨ペーストを作成し，鋼球磁気研磨ブラシによる押付け力の特性を実験により求めた。また，市販磁気研磨ブラシと比較することで，鉄粉形状の影響と押付け力発生機構を検討した。鋼球磁性研磨ペーストの構成成分の質量%と詳細を表 4.1 に示す。また，SEM で鋼球表面を観察した結果を図 4.10 に示す。図 4.10 に示した 2 次電子像より，WA 砥粒 (α -Al₂O₃，ビッカース硬度 1900~2100 HV) が鋼球 (SUJ2，ビッカース硬度 760~840 HV) 表面上に付着していることがわかる。

Table 4.1 Composition of model paste

| | |
|--------------|---|
| Brush | Steel balls (SUJ2, Φ 0.35 mm), 70 wt%. |
| Slurry | WAabrasives (α -Al ₂ O ₃ , 1.0 μ m), 7wt% |
| | Lubricating oil (PTFE) :118~122 cSt(40 °C), 14~17 cSt(100 °C), 23 wt%. |
| Total: 6.5 g | |

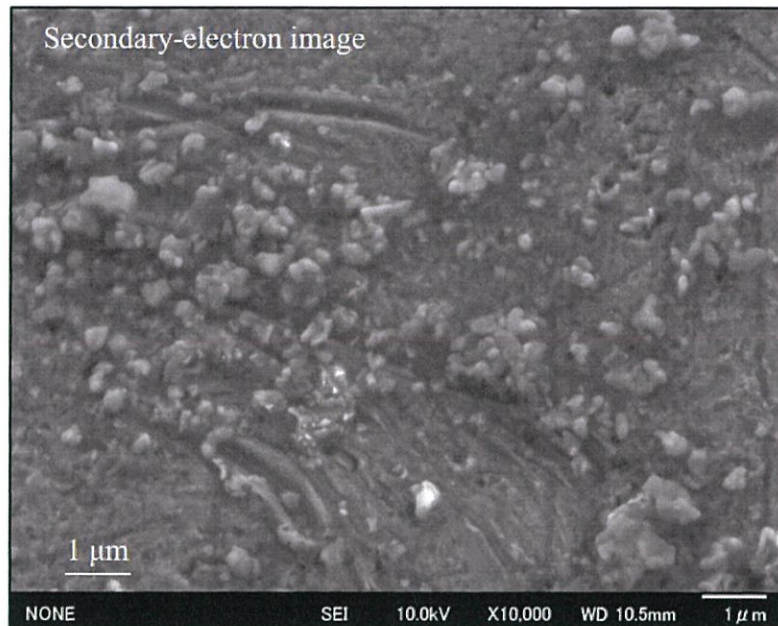
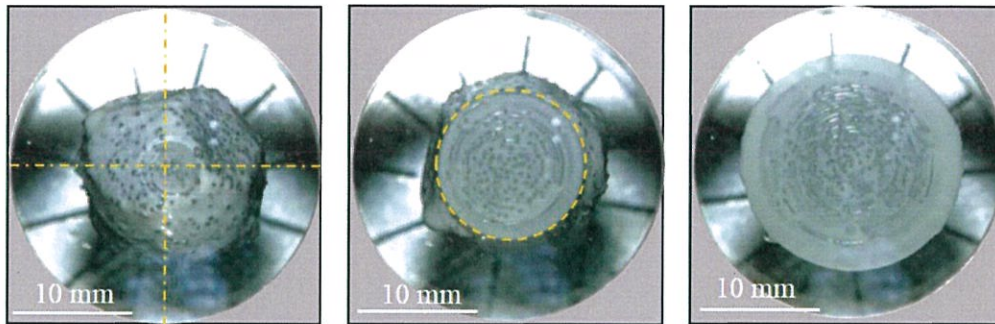


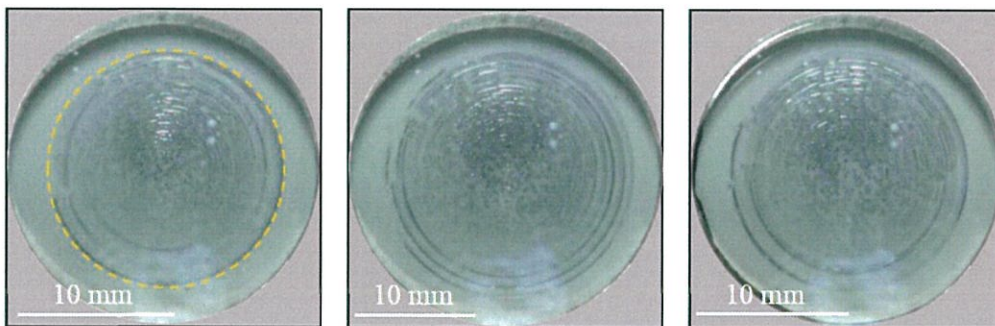
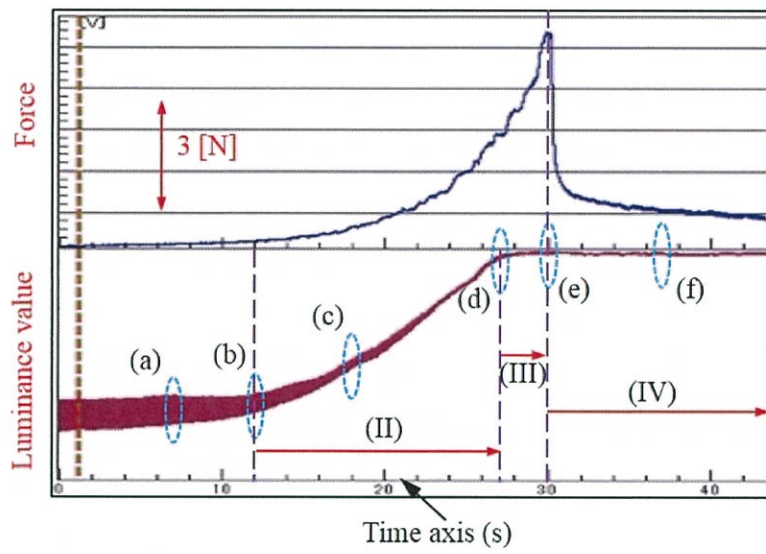
Fig. 4.10 SEM photograph of steel ball surface

4.5.2 実験条件と鋼球磁気研磨ブラシの挙動

直径 $\Phi 30$ mm, 厚さ 3 mm のアクリル板を加工物とし, 4.2.2 節で述べた観察手法によって加工中の鋼球磁気研磨ブラシの挙動と押付け力の変化を同時に記録した. 実験条件は, 工具回転数 $S = 750 \text{ min}^{-1}$ とし, 設定ギャップが $\Delta n = 1.0 \text{ mm}$ (=鋼球直径の約 3 倍程度) となるまで, 3.1 節と同様の手順でアプローチ中 ($\Delta n = 10.0 \text{ mm}$ より $f_n = 18.0 \text{ mm/min}$ で加工面にアプローチし, $\Delta n = 1.0 \text{ mm}$ に達した時点で送りを停止, その後の様子も観察) の変化を調べた. また, 高速度カメラの設定条件については, シャッタースピード $1/2000 \text{ sec}$, フレームレート 500 fps とした. その結果を図 4.11 に示す.



(a) $t = 0 \text{ s}$, $\Delta n = 7.75 \text{ mm}$ (b) $t = 5.0 \text{ s}$, $\Delta n = 6.4 \text{ mm}$ (c) $t = 11.0 \text{ s}$, $\Delta n = 4.6 \text{ mm}$



(f) $t = 30.0 \text{ s}$, $\Delta n = 1.0 \text{ mm}$ (e) $t = 23.0 \text{ s}$, $\Delta n = 1.0 \text{ mm}$ (d) $t = 20.0 \text{ s}$, $\Delta n = 2.05 \text{ mm}$

Fig. 4.11 Photographs of steel ball brush obtained by high-speed camera and force sensor

図 4.11 中央のモーショングラフと各ビデオ画像より，市販磁性研磨ペーストの場合と異なり（図 4.4 参照），(I) の領域が無くなり，(II) のブラシ接触面積が時間とともに増加する領域，(III) の接触領域が一定となる領域と (IV) の押付け力が定常値に収束する領域の 4 つの領域になる．不規則形状の鉄粉を球形に変えたことによりブラシ接触状態の不均一が改善され，磁気研磨ブラシの中心から接触がスタートしたため領域 (I) が無くなったものと考えられる．また，ビデオ画像より全領域において，鋼球磁気研磨ブラシの接触は円形に一様に分布していることがわかる．そのため，モーショングラフの変化も滑らかであり，縦方向の線幅も狭くなった．また，領域 (II) において接触面積の増大につれて磁気研磨ブラシの押付け力も増大する傾向や接触領域が一定値に収束しても増加を続ける傾向，領域 (III) でギャップが $\Delta n=1.0 \text{ mm}$ （設定ギャップ）となるときに最大値を取る（図 4.11(e)）ことなどは市販磁気研磨ブラシの場合と同様である．しかし，送りが停止すると同時に押付け力は急速に減少して定常値に収束しており，定常値も非常に小さくなっている．そこで，加工物を黄銅板（直径 $\Phi 30 \text{ mm}$ ，厚さ 5 mm ）に交換して，上記と同じ加工条件でアプローチ実験を行い，その時の押付け力の変化を動力計により詳細に計測した．その結果を図 4.12 に示す．

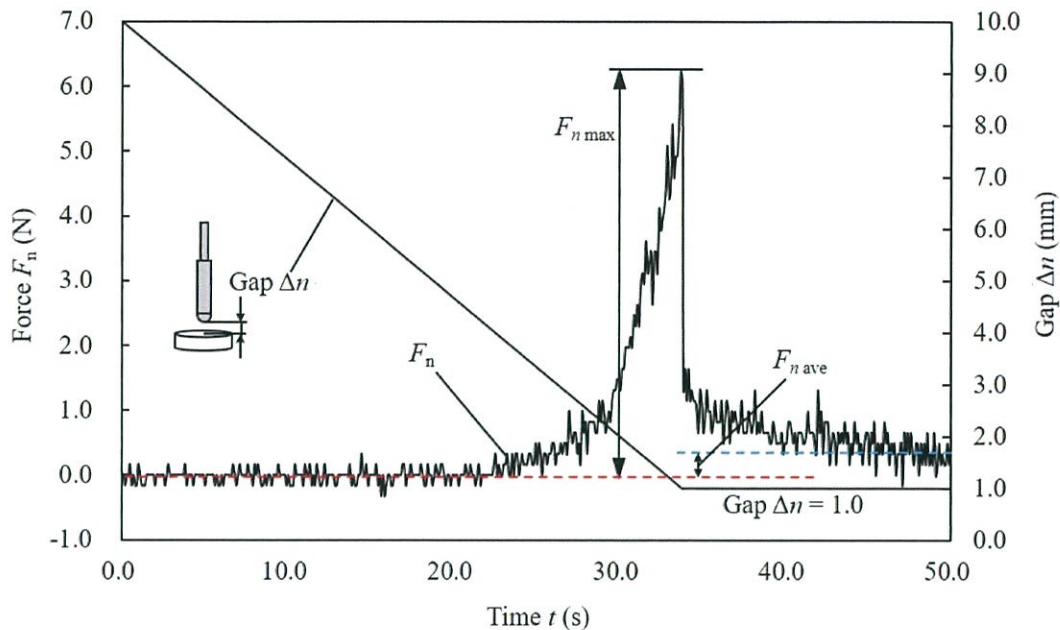


Fig. 4.12 Variation of pressing force of steel balls brush and Gap

図 4.12 より，鋼球磁気研磨ブラシの最大押付け力 $F_{n \max} = 6 \text{ N}$ は市販磁気研磨ブラシ (30 N) の約 5 分の 1 と小さく，定常押付け力 $F_{n \text{ ave}} = 0.5 \text{ N}$ は市販磁気研磨ブラシ (15 N) の約 30 分の 1 と非常に小さくなることがわかる．磁気研磨ブラシはアプローチ中に工作物によりブラシ形状が変形 (塑性的) させられるが，このときに磁気研磨ブラシを構成する鉄粉の配列が変化する．鋼球磁気研磨ブラシでは，鋼球同士の配列は相対的な滑りのみで変化できるため，磁力により生じる摩擦力に相当する力のみがブラシの最大押付け力になると考えられる．しかし，凹凸の大きな市販磁気研磨ブラシ中の鉄粉の場合，凹凸を乗り越えるための力も必要となるため，最大押付け力が大きくなったものと考えられる．また鋼球磁気研磨ブラシの場合，アプローチが終了しブラシ形状の変形が停止した時点で，鋼球は凹凸が無く相対移動が容易なため，ほとんどの鋼球が安定な状態に配列を完了しており，定常押付け力としては静摩擦力のみとなるため非常に小さくなったものと考えられる^{4.12)}．一方，市販磁気研磨ブラシ中の鉄粉

は凹凸が障害となり相対的な移動が困難なため、ブラシ形状の変形が停止しても、凹凸を乗り越える途中の鉄粉が多くを占めて安定な状態に配列が終了しないため定常押付け力が大きくなったものと考えられる。

さらに、磁気研磨ブラシの粘弾性的な特性を調べるために、設定ギャップまでの送り速度を変化させ、押付け力の最大値 $F_{n \max}$ と定常値 $F_{n \text{ ave}}$ の変化を比較した。実験条件は、アプローチ送り速度 $f_n = 3.6, 10.8, 18.0, 24.0, 90.0 \text{ mm/min}$ でアプローチ実験した。実験結果をそれぞれ図 4.13, 4.14 に示す。

図 4.13, 4.14 より、両ブラシともアプローチ送り速度 f_n に対して定性的には同様の傾向を示すことがわかる。しかし、押付け力の最大値 $F_{n \max}$ は鋼球磁気研磨ブラシでは市販磁気研磨ブラシの約 5 分の 1、定常値 $F_{n \text{ ave}}$ は市販磁気研磨ブラシの約 30 分の 1 と小さい値となっていることがわかる。

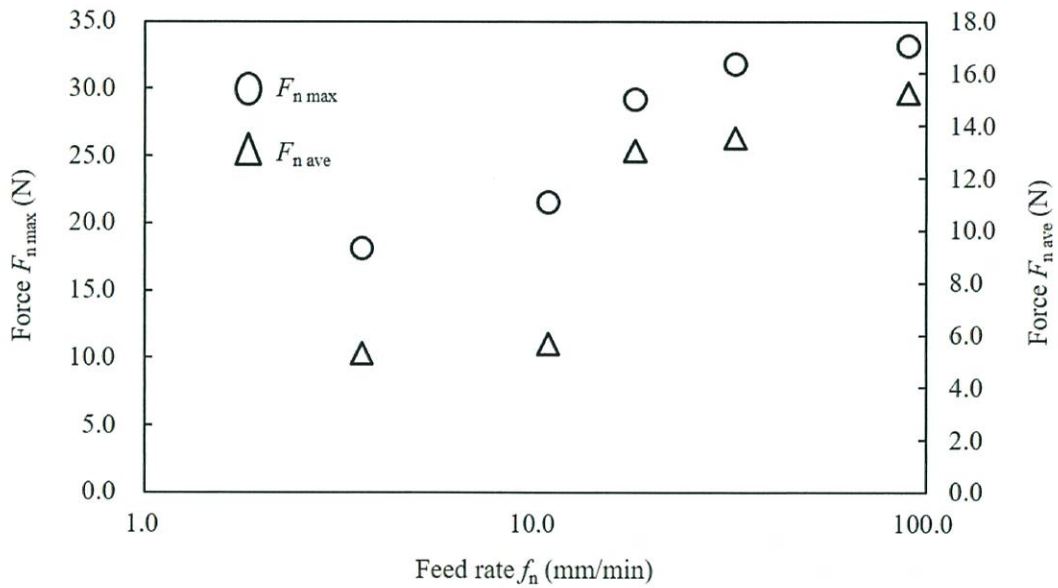


Fig. 4.13 Relationship between force F_n and feed rate f_z by commercial paste (gap $\Delta n = 0.3 \text{ mm}$)

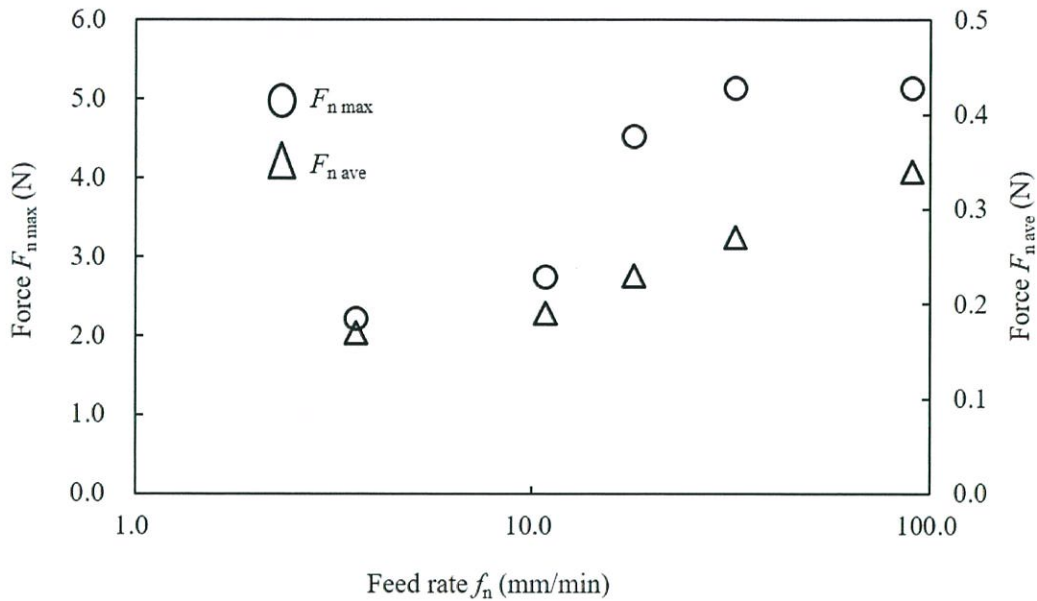


Fig. 4.14 Relationship between force F_n and feed rate f_z by steel-balls paste (gap $\Delta n = 1.0$ mm)

4. 5. 3 市販磁気研磨ブラシと鋼球磁気研磨ブラシの研磨圧力の比較

研磨においては研磨圧力が重要な最終指標と考えられる．そこで，図 4.4 や図 4.11 で取得したモーショングラフの動画の各画像とその時に同時取得した押付け力を用いてブラシの見掛けの接触面積（近似値）を求め，押付け圧力を計算した．その結果を図 4.15，4.16 に示す．両図より，アプローチ時の押付け圧力の最大値は市販磁気研磨ブラシで約 100 kPa なのに対して鋼球磁気研磨ブラシは約 20 kPa であり，その比は約 1/5 なのに対して，研磨加工時の押付け圧力となる定常時の押付け圧力は，市販磁気研磨ブラシが約 50 kPa なのに対して鋼球磁気研磨ブラシでは約 1 kPa であり，その比は約 1/50 とかなり小さくなることわかる．以上の実験結果より，磁気研磨ブラシの種類（鉄粉の形状）や大き

さの違いにより本磁気研磨ブラシでの押付け圧力は広範囲に変化することがわかった。これは、磁気研磨ブラシにおいて鉄粉の形状と大きさを適当に調整することにより、任意の押付け圧力に制御できる可能性を示唆しており、荒加工用と仕上げ加工用、材料別などの用途に合わせた磁性研磨ペーストの設計手法確立への可能性を見出すことができた。

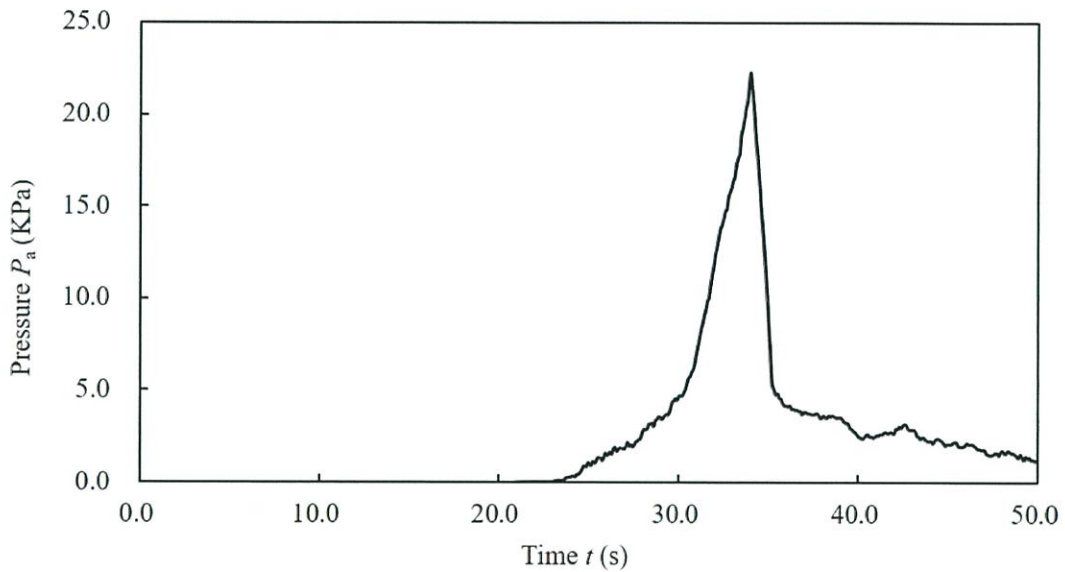


Fig. 4.15 Variation of the pressure P_a with time by steel-balls paste

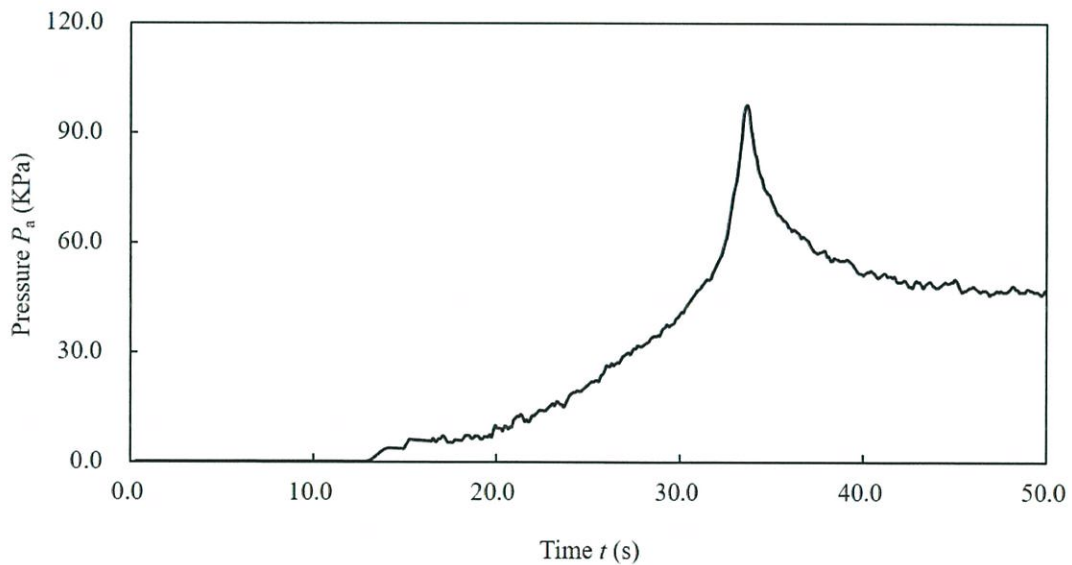


Fig. 4.16 Variation of the pressure P_a with time by commercial paste

4.6 結 言

本実験で可視化用に製作した磁気研磨実験専用ジグを用い、高速度ビデオ観察とそのモーショングラフ解析に基づく観察手法を利用して、磁気研磨ブラシの特性と押付け力の発生機構を実験的に検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 市販磁性研磨ペーストを用いて加工メカニズムを検討した結果、鉄粒子による切削加工とアルミナによる研磨加工の複合加工であることがわかった。
このため、高能率な鏡面仕上げ加工が実現されたものと考えられる。
- 2) 市販磁性研磨ペースト中の鉄粒子が不規則で凹凸の大きい形状のため、加工面内で磁気研磨ブラシが均一に分散せず、形状精度の維持および加工面の欠陥の回避が困難であることがわかった。
- 3) 本磁気研磨工具による研磨加工においては、磁性体（鉄粉）の形状および大きさが押付け圧力に大きく影響し、これらを変えることで押付け圧力を広範囲に制御できる可能性を見出した。
- 4) 本磁気研磨加工法では、アプローチ条件の設定に十分な配慮が必要で、非常に高い押付け圧力により形状精度を悪化させる原因となる。

参考文献

- 4.1) 森敏彦, 広田健治, 千田進幸, 川嶋義人, ”磁気研磨機構に関する力学的考察”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.671, (2002), 231-236
- 4.2) 土屋和博, 清水保雄, 榊和彦, 佐藤元太郎, ”磁気研磨法における研磨機構”, 日本金属学会誌, Vol.57, No.11, (1993), 1333-1338
- 4.3) 鄒艶華, 進村武男, ”定圧磁気ブラシを利用した新しい平面磁気研磨法に関する研究”, 砥粒加工学会, Vol.53, No.1, (2009), 31-34
- 4.4) 川久保英樹, 佐藤運海, 村田修一, ”スラリー吐出式磁気研磨工具の研磨性能に関する研究—非磁性加工物の仕上げ特性”, 砥粒加工学会, Vol.58, No.1, (2014), 247-252
- 4.5) Jayakumar, P., Ray, S. and Radhakrishnan, V., “Optimising process parameters of magnetic abrasive machining to reduce the surface roughness value”, Journal of Spacecraft Technology, Vol.7, (1997), 58-64
- 4.6) Li, W.H., Yang, S.Q. and Li, X.H., “Mechanism research of viscoelastic magnetic abrasive tools finishing”, Computer Modelling and New Technologies, Vol.17, (2013), 121-129
- 4.7) Sharma, V., Verma, G.C. and Pandey, P.M., “Magnetic Abrasive Finishing Process: State of the Art”, International Journal of Applied Engineering Research, ISSN 0973-4262, Vol.10, No.35, (2015), 27601-27607
- 4.8) 夏目勝之, 進村武男, ”平面磁気研磨法の加工機構に関する研究 (垂直方向押付け力特性の解明)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.74, No.737, (2008), 212-218
- 4.9) 馬雷, 古木辰也, 呉魏, 廣垣俊樹, 青山栄一, ”磁気研磨ブラシによる研磨機構の解明”, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.844 DOI-10.1299/transjsme.16-00253, (2016), 1-12
- 4.10) 河西敏雄, 安永暢男, ”高付加価値のための精密研磨”, 日刊工業新聞社, (2010), 135
- 4.11) Lei MA, Wei WU, Tatsuya FURUKI, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, “Investigation of Contact and Abrasive Phenomena between Endmill Type Tool and Workpiece in Magnetic Polishing”, Proc. of Asian Conf. on Mechanics of Functional Materials and Structures (ACMFMS2014), 563-566
- 4.12) Wataru YAGUCHI, Lei MA, Tatsuya FURUKI, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, “Investigation of Magnetic Polishing Method Ball-Nose Tool with a Four

Axis Controlled Machine Tool”, Proc. Of International Conference on Precision Engineering 2016 (ICPE2016), P39-8112, 1-4

第5章 磁性メディア各諸元の押付け力への影響に関する研究

5.1 緒 論

電気自動車 (EV) や、自動運転、安全機能の強化など自動車の高機能化で、「車の電子化」が進み、車載用電子部品や LED などの微細精密な分野の金型が増えつつある。加えて、医療や化学などの分野でも微細精密な金型が必要になっている。磁気研磨加工法は、フレキシブルに変形可能な磁性メディアブラシを利用するため、曲面の仕上げや段差面のエッジ丸み付け加工に有効な加工方法である。近年、多様な磁気研磨工具が開発されつつあり、工作機械と統合して数値制御による仕上げ工程の自動化実現が進められている^{5.1-5.3)}。

しかし、磁化された磁性メディアからなる磁気研磨ブラシの加工面への押付け力は、アプローチ中に磁気研磨ブラシの形状変化に伴う過大な押付け力の発生により、定常加工中の状態と大きく異なるため、アプローチ痕が残り均一な鏡面仕上げが出来ないという問題がある。また、磁性メディアのエッジによる制御不能な切削作用が混在し、ムラなく再現性のよい仕上げ面を得るには課題が残っている。このような問題は、研磨能率の安定性を崩すばかりでなく、加工面品質に大きな影響を及ぼし、いわゆる加工欠陥の発生の原因になる。

そこで本章^{5.4)}では、磁性メディアの形状やサイズなどに着目し、真球度が高く凹凸の無い鋼球と、それをプレス加工により変形させた異なる形状の磁性メディアによる磁気研磨ブラシを作製し、加工物に作用する押付け力制御への影響について比較検討した。

本章では、非磁性体材料を用いて製作した磁気研磨加工実験専用ジグを用

い、高速度カメラによる磁性メディアの加工中の動きや変形特徴を観察し、動力計で磁性メディアの加工中の押付け力変化を記録した。それらの結果より、磁気研磨加工法における磁気研磨押付け力（下記、押付け力）の発生メカニズムとその大きな支配因子となる磁性メディアの制御因子を検討した。

5.2 磁性メディアからなる磁気ブラシの押付け力発生機構に関する基礎的考察

5.2.1 磁性メディアの準備

図 5.1 に示すように、磁気工具の磁場により磁性メディアに磁極が発生し、磁極同士の引力と反発力によりブラシを構成している。そのため、磁性メディアにより構成される磁気ブラシの形状や大きさにはバラツキが大きいが、磁性メディアの数が多くなると平均化の原理によりバラツキも小さくなると考えられる。しかし、磁性メディアの形状により、その平均値は異なるものと考えられる。

また、前章の結果によって、市販磁性研磨ペースト中の磁性メディア（鉄磁性メディア）は不規則で凹凸の大きい形状のため、加工面内で磁気研磨ブラシが均一に分散せず、研磨能率の安定性を崩すばかりでなく、磁性メディアのエッジによる制御不能な切削作用も混在し、ムラなく再現性のよい仕上げ加工が困難となる問題が生じることが判明している。その対策として、鋼球磁気研磨ブラシを提案したが、アプローチ中に生じる最大押付け力 $F_{n \max}=6 \text{ N}$ は市販磁気研磨ブラシ ($F_{n \max}=30 \text{ N}$) の約 5 分の 1 と小さくなり改善されていることがわかるが、定常押付け力 $F_{n \text{ ave}}=0.5 \text{ N}$ は市販磁気研磨ブラシ ($F_{n \text{ ave}}=15 \text{ N}$) の約 30

分の 1 と非常に小さくなり加工能率が極端に小さくなってしまふこともわかった (図 4.5, 4.12 参照). 磁性メディアの種類 (鉄粉の形状) や大きさの違いによりアプローチ時の押付け力の最大値 $F_{n \max}$ および研磨加工時の押付け力の定常値 $F_{n \text{ave}}$ への影響が大きいことがわかった. そこで, 磁性研磨ペースト中の磁性メディアの形状に着目し, 異なる形状の磁性メディアを用いた場合の加工物に作用する押付け力を測定し, 磁性メディアの形状と押付け力の大きさおよび安定性との関係を調べた.

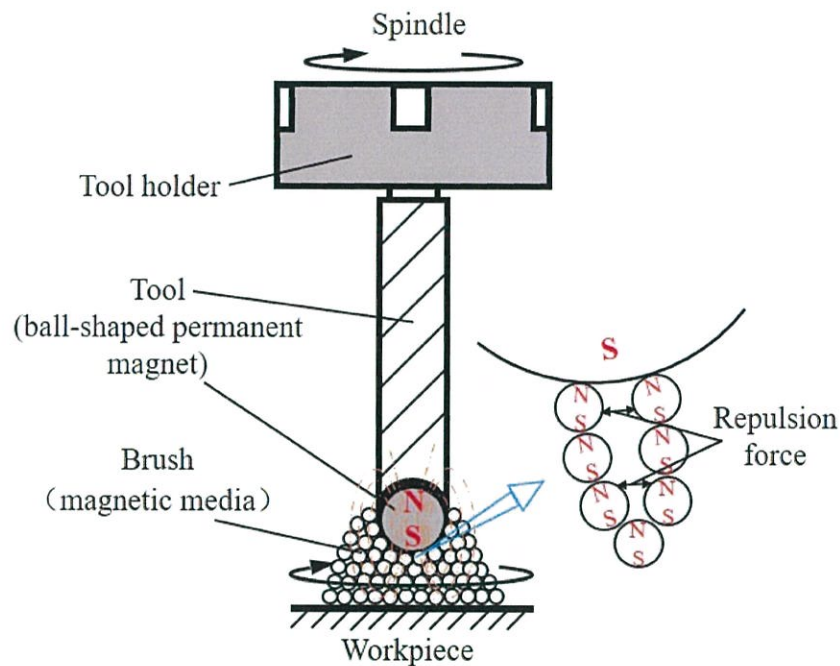


Fig. 5.1 Concept map of self-adaptive polishing tool

本実験では, 真球度が高く凹凸の無い鋼球 (Sphere, 高炭素クロム軸受鋼 SUJ2, $\Phi 10.0 \text{ mm}$, 真球度 $0.4 \mu\text{m}$, 表面粗さ $R_z 0.09 \mu\text{m}$) を利用した. また, 旋削加工により形状を変化させた樽型と円柱型の磁性メディアを製作した. 磁性メディアの重心から表面までの一番長い距離を L , 一番短い距離を S , 形状係数 $\alpha = L/S$

と定義すると、樽型の $\alpha = 1.26$ ($L = 5.8, S = 4.6$)、円柱型の $\alpha = 1.50$ ($L = 6.6, S = 4.4$) である (図 5.2 参照)。また、球型は $\alpha = 1.00$ ($L = 5.0, S = 5.0$) である。

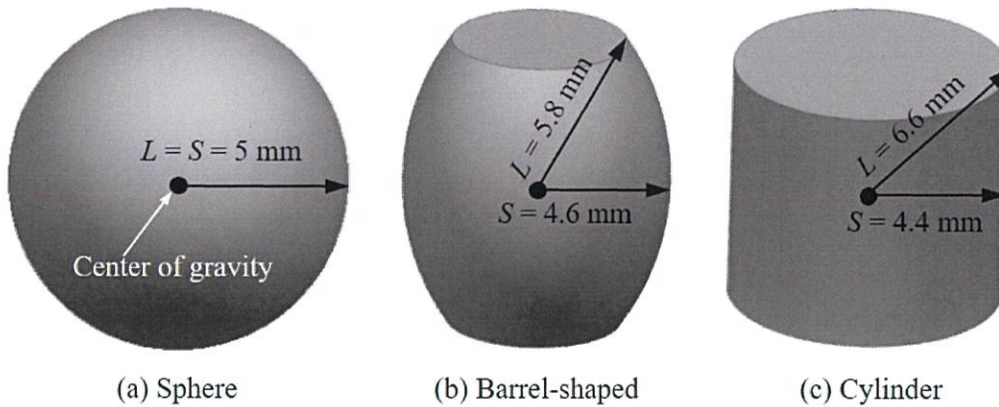
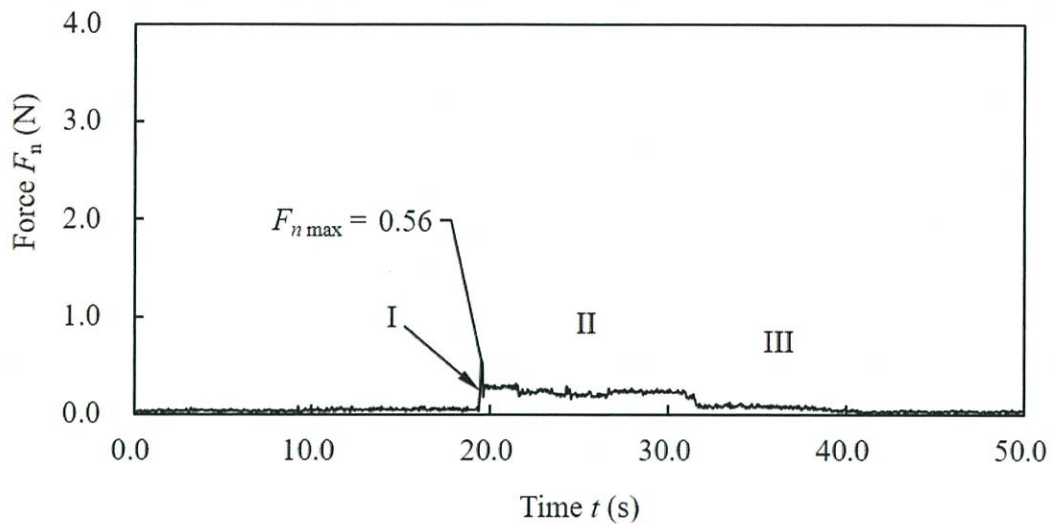


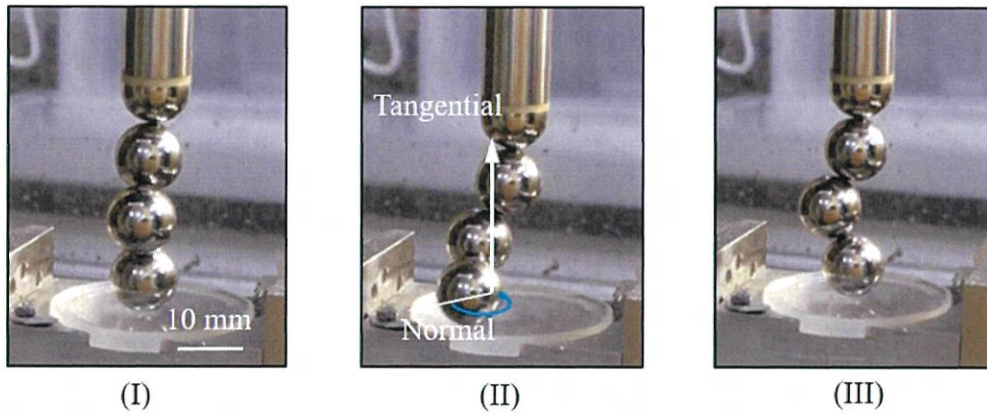
Fig. 5.2 Model of three different shapes magnetic media

5.2.2 押付け力への影響

まず、主軸は回転させずに、加工物表面の法線方向の送り速度 $f_n = 10.0$ mm/min, 設定ギャップ(磁気研磨工具先端と加工平面とのギャップ Δn の目標値) $\Delta n = 20.0 \sim 30.0$ mm, 異なる磁性メディアを3個ずつ用いて実験を行った。異なる磁性メディアによる押付け力の変化および形状変化を、フォースセンサーと高速度カメラで同時に記録したので、その一例を図 5.3~5.5 に示す。

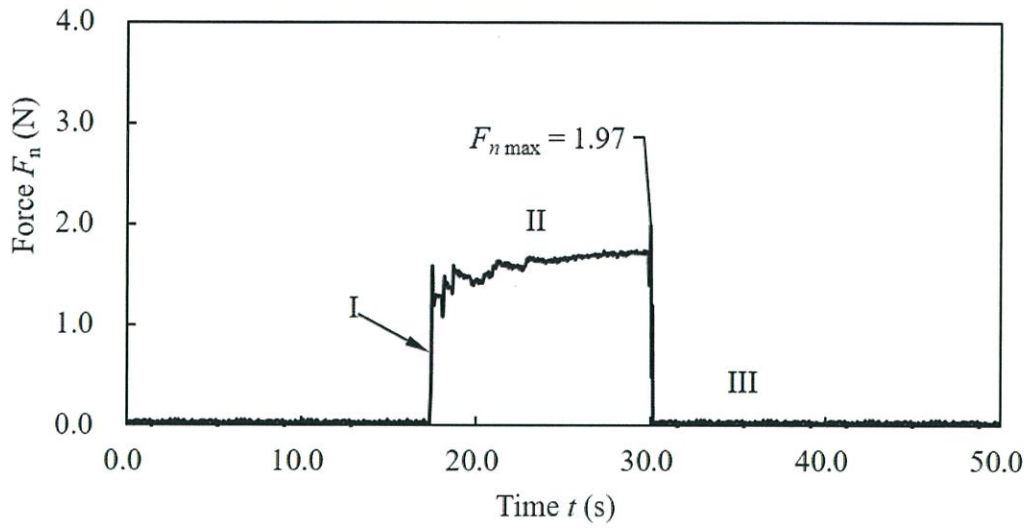


(a) Force of ball shape magnetic media during machining

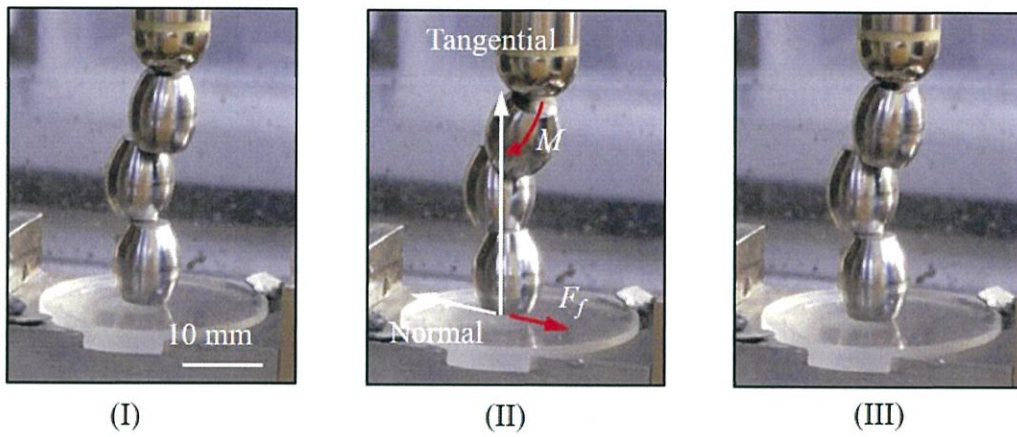


(b) Deformation conditions of ball shape magnetic media at points I, II and III

Fig. 5.3 Contact condition of ball shape magnetic media on workpiece surface

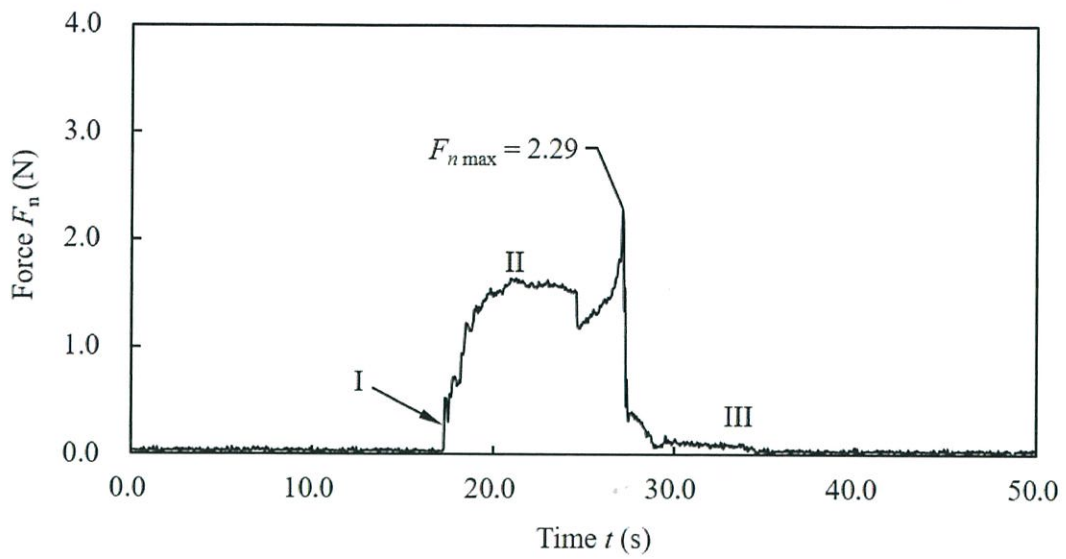


(a) Force of barrel-shaped magnetic media during machining

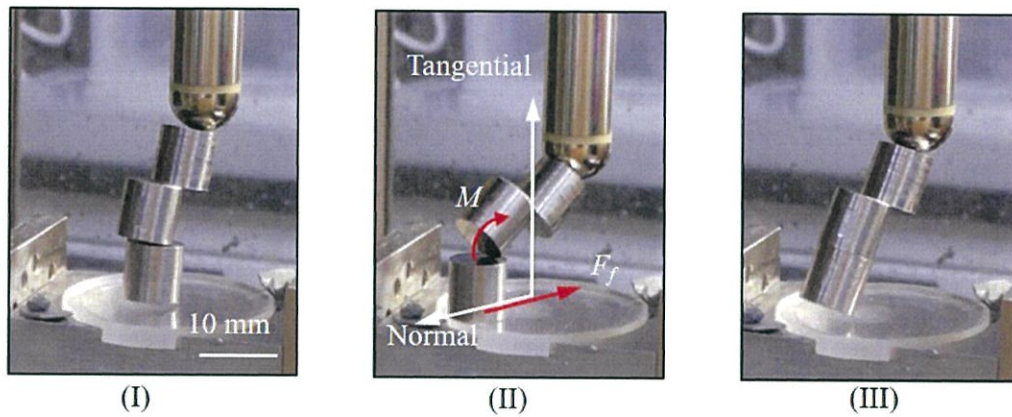


(b) Deformation conditions of barrel-shaped magnetic media at points I, II and III

Fig. 5.4 Contact condition of barrel-shaped magnetic media on workpiece surface



(a) Force of cylinder shape magnetic media during machining



(b) Deformation conditions of cylinder shape magnetic media at points I, II and III

Fig. 5.5 Contact condition of different shape magnetic media on workpiece surface

図 5.3 より，鋼球の磁性メディアでは，磁気工具下降中のブラシの変形は図 5.3(b)に示すように，磁性メディア同志のすべりにより生じるため，押付け力は摩擦力のみとなるため，同図(a)に示すように小さくなることわかる．一方，他の樽型や円柱型（図 5.4，5.5 参照）の磁性メディアの場合には，下降中のブ

ラシの変形には磁気メディア同志の相対すべりと回転が含まれるため複雑になる。そのため、押付け力の大きさも、バラツキも大きくなったと考えられる。加工物に押し付けるとき、磁性メディア間の反発力^{5.5)}が加工物に作用するため、押付け力が大きくなることがわかる。

また、磁性メディアの形状係数 α と押付け力 F_n の関係を図5.6に示す。図5.6において、磁性メディアの押付け力の最大値を $F_{n\max}$ 、平均値を $F_{n\text{ave}}$ 、最大値と平均値の偏差を ΔF とし、それらと形状係数 α の関係を示す。形状係数 α の増加とともに押付け力の最大値 $F_{n\max}$ が増加し、そして、押付け力の偏差 ΔF も増加している。これらより、磁性メディア間の接触面積が増加することにより、磁性メディア同志に作用する磁力が大きくなり、磁性メディア間の接触状態の安定性に大きく影響することがわかる。すなわち、磁性メディアが工作物側の反力を受ける時、磁性メディア間の接触面積が減少する方向に相対変位するため、磁力も減少する。このとき、磁性メディア間の相対変位に必要な摩擦力が加工物に作用する押付け力に転換される。そのため、磁性メディアの形状係数 α と偏差 ΔF の関係より、磁性メディアの形状を変えることでアプローチ中の過大な押付け力を小さく抑えられることがわかる。

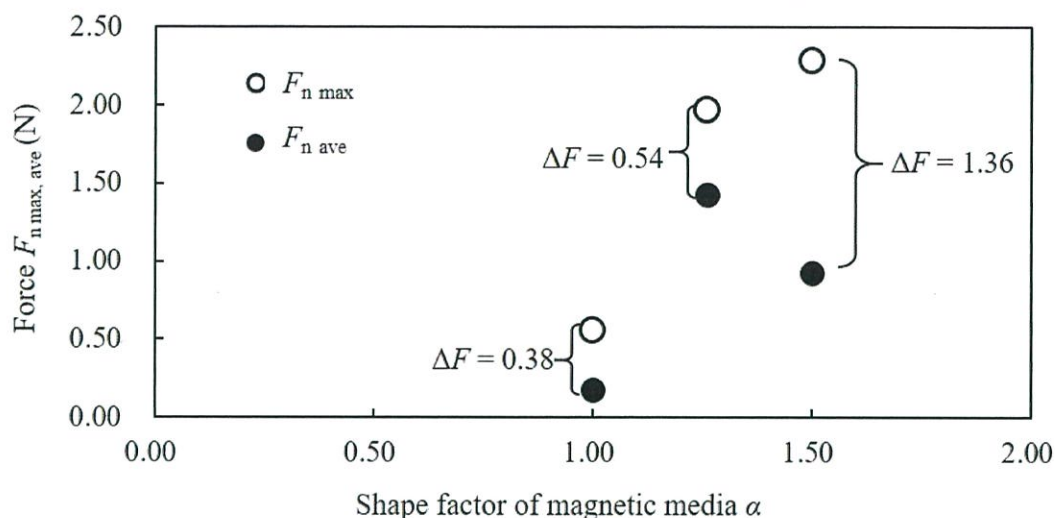


Fig. 5.6 Relationship between the shape factor α and the force F_n

次に、各異なる形状の磁性メディアを 6 個ずつ使い、高速度カメラ（シャッタースピード：1/2000 sec，フレームレート：500 fps）により、磁気研磨工具回転中の磁性メディアにより構成した磁気ブラシの安定性に関して観察した（図 5.7，5.8 参照）。図 5.7 は、主軸回転数を変化させたときの磁性メディアの状態を示した写真である。この図より、大きな遠心力（主軸回転数 $S = 1000 \text{ min}^{-1}$ ）を加えても、球型の磁性メディアは非常に安定していることがわかる。一方、樽型や円柱型の磁性メディアは、主軸回転数 $S = 500 \sim 600 \text{ min}^{-1}$ の間で遠心力により飛び出すことが観察された（図 5.7 の赤色破線参照）。また、図 5.8 は、樽型と円柱型の磁性メディアが遠心力により飛び出すまでの磁性メディア同志の相対変位を示したものである。樽型のメディアでは、接触面に遠心力によるモーメントが作用して面外の回転が生じ、面接触が点接触に移行した後に飛び出していることがわかる。円柱型の場合は、接触面積が大きいいため、まず面内のすべりが発生し、接触面積が減少してから面外の回転が生じている。

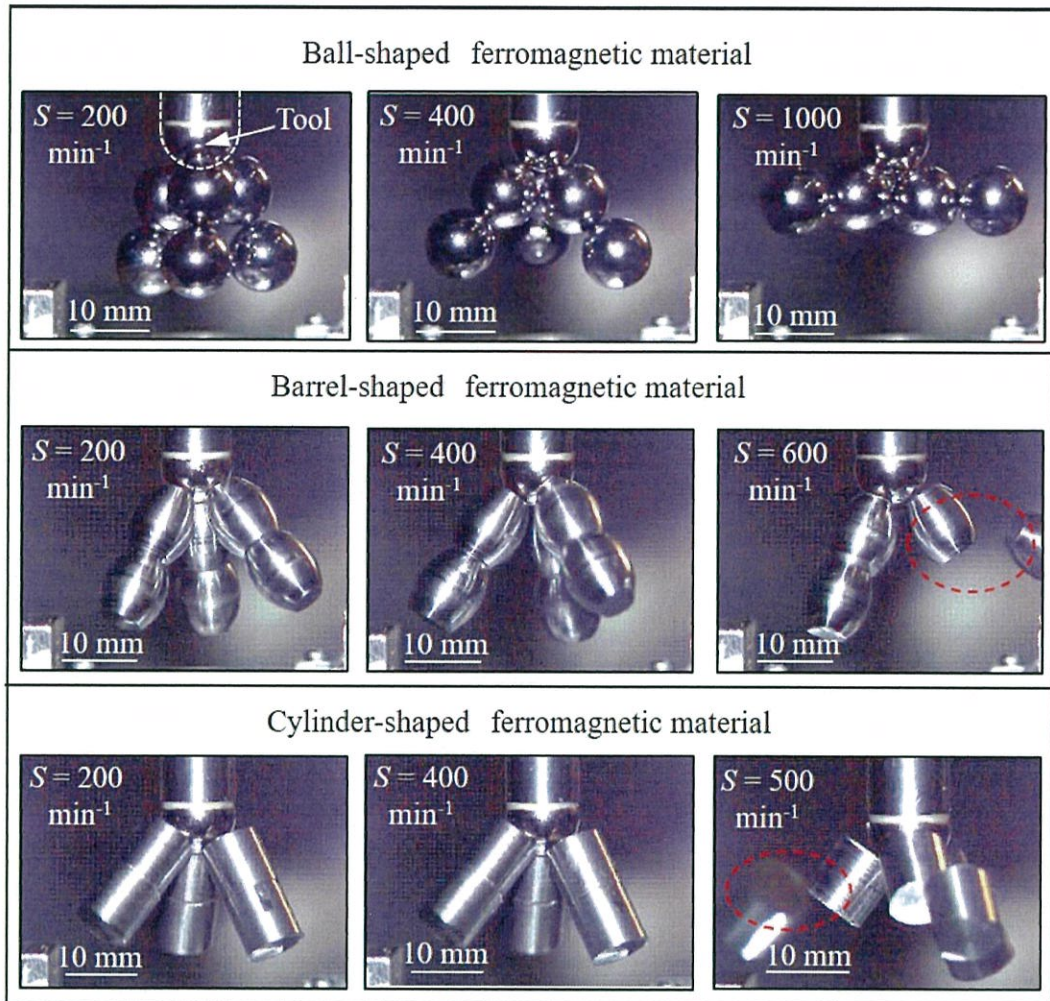


Fig. 5.7 Conditions of three different shapes magnetic media rotation under the magnetic field

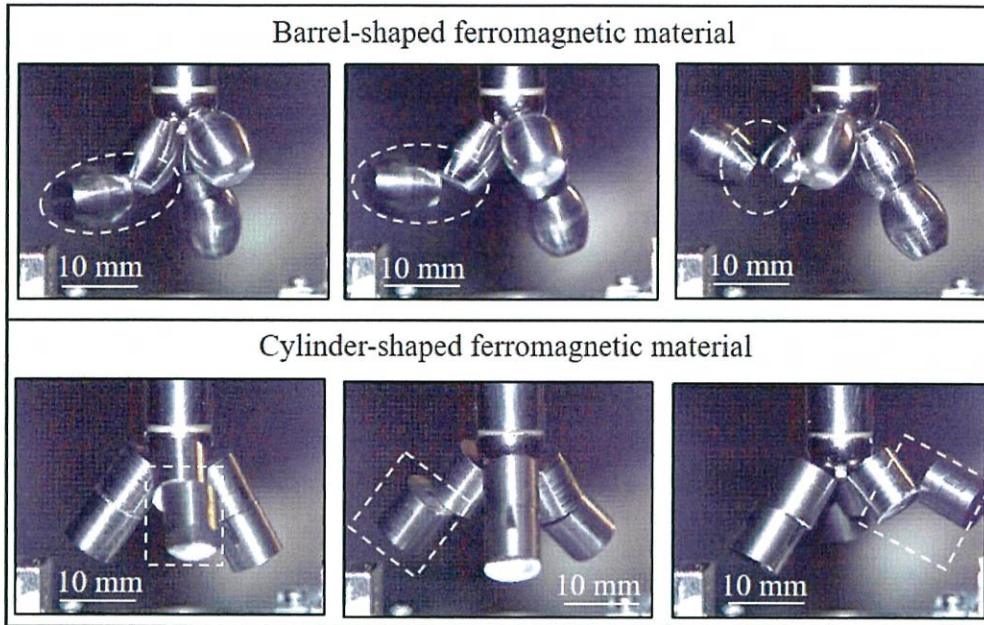


Fig. 5.8 Flung out details of barrel-shaped and cylinder-shaped magnetic media rotation under the magnetic field

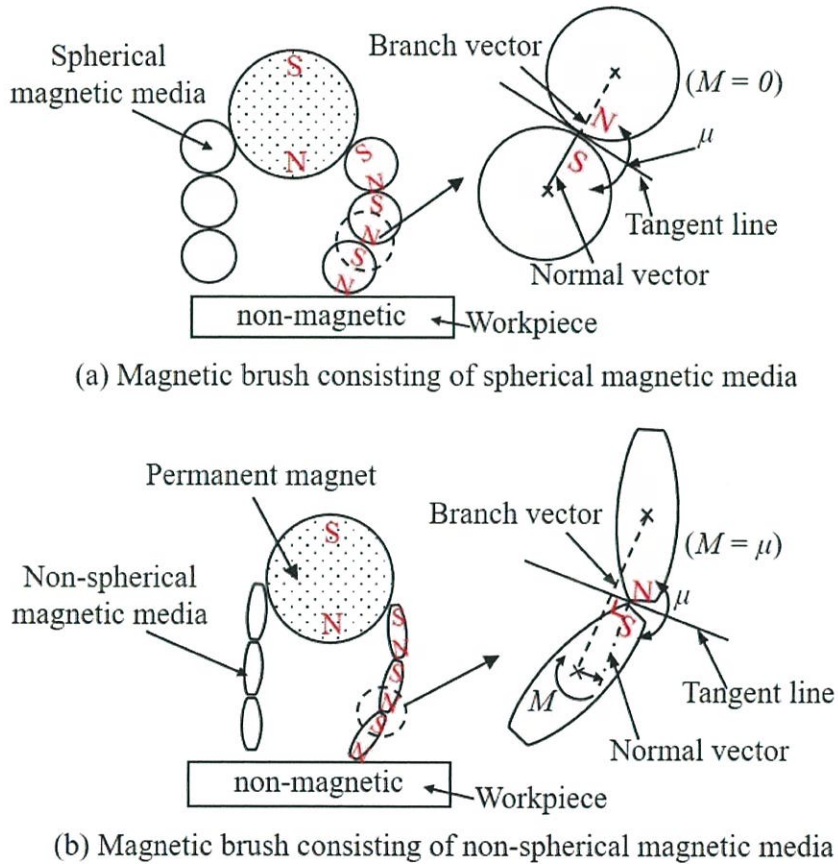


Fig. 5.9 Schematic diagram of MAP in the case of non-magnetic material

以上の結果より，球型と球型以外の磁性メディアによる押付け力の違いは次のように考えられる．図 5.9^{5,6,5,7)}に示す様に，球型の磁性メディアの場合，アプローチ中のメディア同志の相対変位はすべりのみのため，摩擦力しか作用せず，磁気ブラシの変形抵抗は小さく，復元力もほとんど発生しない．しかし，球型以外のメディアでは，すべりだけでなく，接触面同志の面外回転も必要になるため，磁気ブラシの変化抵抗が大きくなり，アプローチ終了後は，磁性メディア同志に生じた面外回転部分には磁力による復元力が作用するため，アプローチ後の定常状態においても押付け力が発生すると考えられる．一方，磁性メディアの重心の相対変位が磁性メディアの作用磁力に大きく影響しているため，磁気押付け力は磁性メディアの形状係数 α の増大とともに不安定になることがわかった．

5.3 磁性メディアの諸元が研磨性能に及ぼす影響

5.3.1 研磨ブラシ用磁性メディアの準備

磁気研磨において，研磨性能に影響を及ぼすのは磁性メディアの形状以外に，材質，サイズ，総重量なども考えられる．そこで，上述した磁性メディアより小さい磁性メディアを用意した．直径 5.0 mm の鋼球と，それをプレス加工により変形させた鞍型（形状係数 $\alpha=2.46$ ，図 5.10，5.11 参照）．さらに，直径 0.5 mm の鋼球と球型および非球型の投射材（平均サイズ 0.5 mm，形状係数 $\alpha=2.4$ ，図 5.12 参照）を磁性メディアとして利用し，磁性メディアの形状，サイズ，総重量（個数）が研磨特性に与える影響について検討した．

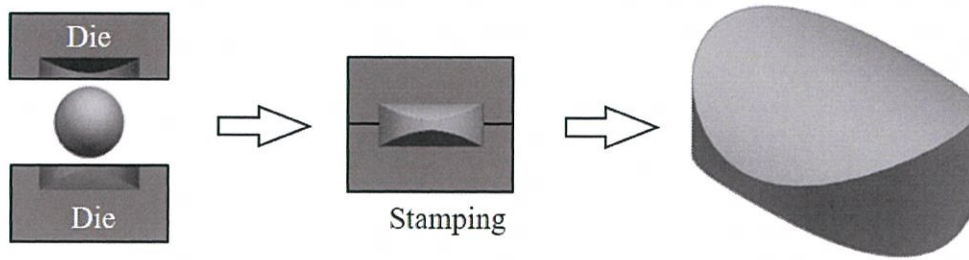


Fig. 5.10 Stamping of steel particle

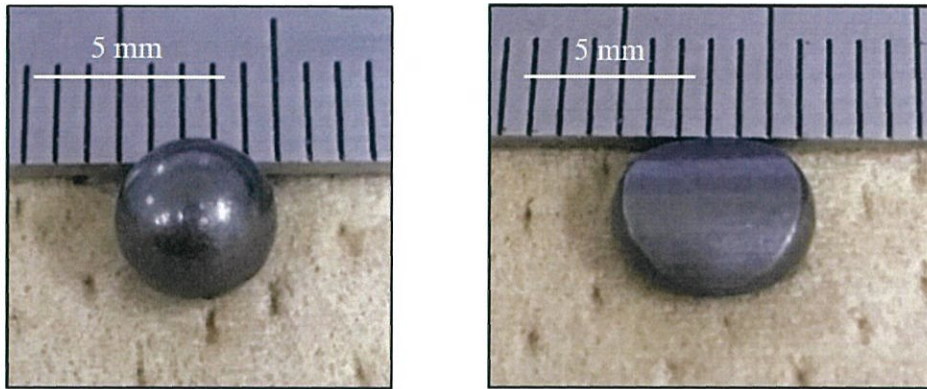


Fig. 5.11 Steel ball and transformed steel ball by stamping

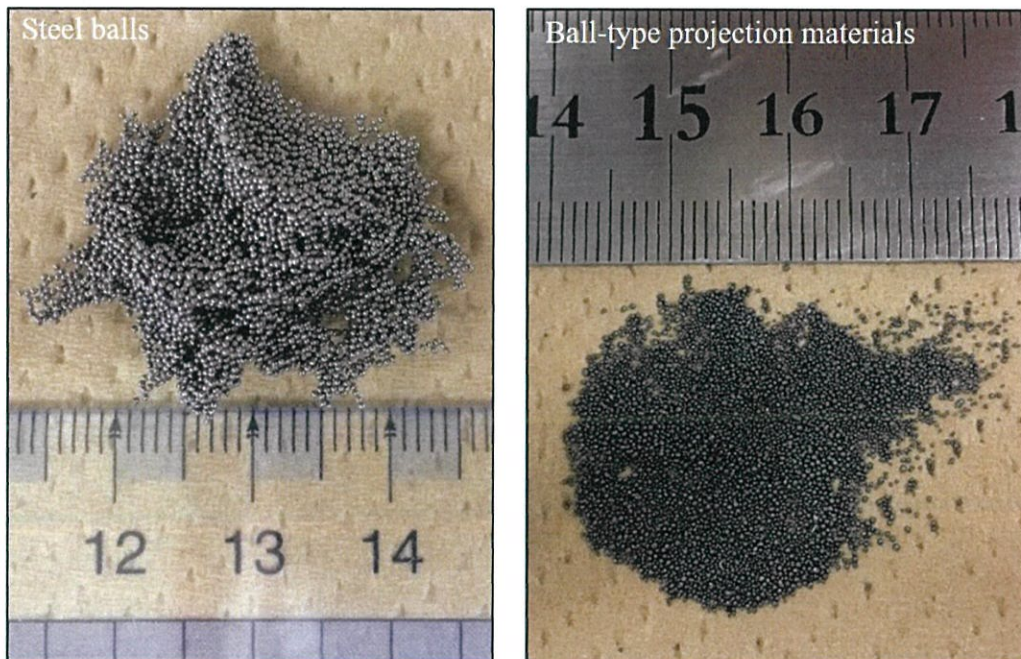
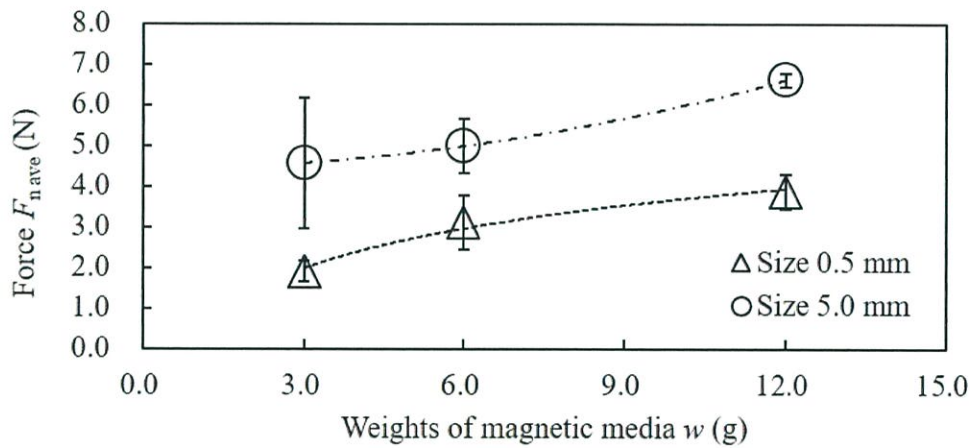


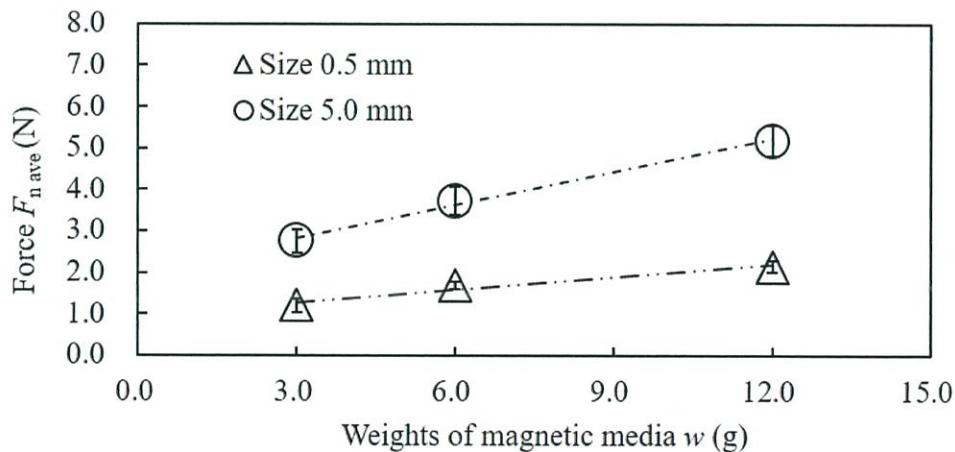
Fig. 5.12 Steel balls and ball-type projection materials

5.3.2 押付け力への影響

工具回転数 $S = 240 \text{ min}^{-1}$, Z 軸方向 (ワークと工具との垂直方向) の送り速度 $f_n = 10.0 \text{ mm/min}$, ギャップ (磁極先端と加工部位との距離) $\Delta n = 1.0 \text{ mm}$ の加工条件で, 磁性メディアの重さをそれぞれ 3 g, 6 g, 12 g の三つのパターンでそれぞれ 8 回繰り返し実験を行った. 磁性メディアのサイズおよび重さと押付け力との関係を調べるため, 潤滑油と磁性メディアのみを単純に混合した磁性研磨材を利用した.



(a) Non-spherical magnetic media in different sizes



(b) Aspherical magnetic media in different size

Fig. 5.13 Comparison of non-spherical and aspherical magnetic media in different weights

アプローチ後の磁気研磨加工の安定な状態での押付け力の平均値を $F_{n\text{ave}}$ とし、その結果を図 5.13 に示す。

図 5.13 より、磁性メディアのサイズが大きい方が、球型と非球型の両方とも押付け力の平均値 $F_{n\text{ave}}$ は増加していることがわかる。また、磁性メディアの総重量については、総重量が大きくなるほど $F_{n\text{ave}}$ が大きくなる傾向がみられる。また、非球型と球型の磁性メディアの形状の違いによる影響を見ると、球型の方が全体的に $F_{n\text{ave}}$ の値は小さく、そのバラツキも小さいことがわかる。これは、前章での考察の結果と一致している。また、非球型において、総重量が大きくなるほど $F_{n\text{ave}}$ のバラツキが小さくなっていることがわかる。これは、総重量が大きくなるほど磁気ブラシを構成する磁性メディアの個数が増大することによる平均化の影響と考えられる。

5.4 結言

本章では、エンドミル型磁気研磨工具とマシニングセンタを統合した研磨機構における基礎的な特性の考察を試みた。すなわち磁性メディアに、潤滑油を単純に混合した磁性研磨材を用い、磁性メディアの諸元（形状、サイズ、個数及び総重量）に着目し、磁気研磨押付け力への影響について実験的に検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 球型の磁性メディアに比べ、非球型のメディアの方が、アプローチ中および定常研磨中の押付け力やそのバラツキが大きくなるメカニズムを明らかにした。すなわち、球型の磁性メディアの場合、磁気ブラシの変形はメディア同志のすべりのみのため、変形抵抗も復元力も少なくなるが、非球型の場合、メディア同志の接触面での面内すべりと面外回転を必要とするため、

その変形抵抗も復元力も大きく、バラツキも大きくなることがわかった。

- 2) 磁性メディアのサイズが大きいほど、また総重量が大きいほど押付け力が大きくなることがわかった。
- 3) 非球型の方が球型よりも押付け力もそのバラツキも大きいですが、バラツキについては、総重量（個数）が増すにつれて、平均化の効果により少なくなることがわかった。

参考文献

- 5.1) Mehrdad, V. and Seyed, A.R., "Evaluation of parameters affecting magnetic abrasive finishing on concave freeform surface of al alloy via rsm method", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol.2016, (2016), 347-361
- 5.2) 川久保英樹, 土屋和博, 孫運海, 手塚佳夫, 三木一隆, 山崎隆夫, "単純混合型磁性研磨材の研磨性能に関する研究", *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.65, No.632, (1999), 386-393
- 5.3) Lin, C.T., Yang, L.D. and Chow, H.M., "Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the taguchi method", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.34, (2007), 122-130
- 5.4) Lei MA, Tatsuya FURUKI, Wei WU, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, "Estimation of unsteady and steady polishing force in magnetic abrasive finishing using a permanent magnet end-mill tool", *Materials Science Forum (Advances in Abrasive Technology XIX)*, Vol.874, (2016), 178-183
- 5.5) Mori, T., Hirota, K. and Kawashima, Y., "Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.143, (2003), 682-686
- 5.6) Lei MA, Tatsuya FURUKI, Wei WU, Toshiki HIROGAKI and Eiichi AOYAMA, "Elucidation of polishing mechanism used in magnetic polishing brush", *Proc. of International Symposium on Flexible Automation 2016 (ISFA2016)*, 31-37
- 5.7) Lei MA, Toshiki HIROGAKI, Eiichi AOYAMA, Tatsuya FURUKI and Wei WU, "Control of Pressing Force in Magnetic Abrasive Finishing Using Permanent Magnetic End-Mill Tool", *Proc. of International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC2017-2781*, (2017), 1-8

第6章 磁性メディアに投射材を用いた場合 の押付け圧力への影響に関する研究

6.1 緒 論

前章では、ミリオーダーの鋼球と、それをプレス加工により変形させた異なる形状の磁性メディアによる磁気研磨ブラシを作成し、高速度カメラにより記録した結果によって、磁気研磨押付け力の発生メカニズムを明らかにした。さらに、より小さい異なる形状の磁性メディアを用い、それらのサイズおよび総重量により、アプローチ中および定常研磨中の押付け力への影響について比較検討した。その結果、非球型の方が球型よりも押付け力もそのバラツキも大きい。バラツキについては、総重量（個数）が増すにつれて、平均化の効果により少なくなることがわかった。

そこで本章^{6.1)}では本手法の実用化に向け、環境負荷の軽減や加工のコストダウンという観点^{6.2)}から、ブラスト用の投射材（ミクロンオーダー）を磁性メディアとし、それらの形状や、サイズ（個数）を変えることで加工物に作用する押付け力を広範囲に制御できる可能性について検討した。

6.2 実験装置および実験方法

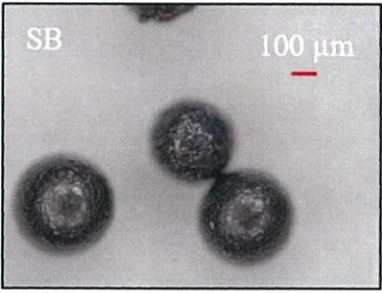
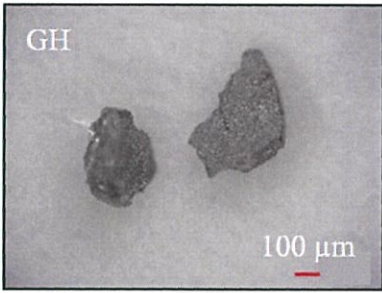
6.2.1 実験装置

本章で使用した実験装置は、4章の4.2節と同様とした。

6.2.2 実験方法

前章より，磁気研磨ブラシを構成する磁性メディアの個数が多いほど，平均化の効果により，バラツキが小さく安定した磁気研磨加工を行えることがわかった．そこで，前章までに用いたサイズよりさらに小さいサイズの磁性メディアを用いてその影響を検討した．表 6.1 に実験に利用した磁性メディアの諸元を示す．前章で述べたように，磁性メディアの重心から表面までの一番長い距離を L ，一番短い距離を S ，形状係数 $\alpha=L/S$ と定義すると，球型 (SB) $\alpha=1.0$ ，非球型 (GH) $\alpha=2.4$ である．

Table 6.1 Composition of steel ball paste

| | SB2, GH2: mean 200 μm | SB4, GH4: mean 400 μm | SB6, GH6: mean 600 μm |
|--|--|-------------------------------------|--|
| Magnetic media (projection materials) | SB, GH: 7.45 g/cm ³ , SB (Hv 390~510), GH (Hv 800~), SB (Bulk specific gravity 4.45 g/cm ³), GH (Bulk specific gravity 3.40 g/cm ³) | | |
| |  | |  |
| Abrasive grain | Alumina (Mean diameter 1.0 μm , Al ₂ O ₃), 2 g | | |
| | Exclude | | Include |
| Solvent | Lubricating oil (PTFE) :118~122 cSt (40°C), 14~17 cSt (100°C), 2 g | | |
| Magnetic media weight | 1.5, 3.0, 6.0 g | | |

6.3 実験結果

磁性メディアの影響を純粹に評価するため^{6.3)}, まず, 酸化アルミニウム砥粒 (以下, アルミナ砥粒と呼ぶ) なしの実験を行った. その結果を図 6.1 に示す. 図には, 磁性メディアの形状の影響をみるために, 形状ごとに, 全サイズの平均値を求めた. この図より, 磁性メディアの重さが増加すると, 球型, 非球型の磁性メディアともに押付け力 $F_{n\text{ave}}$ が同じ傾向で増加していることがわかった. また, 球型よりも非球型の方が大きいこともわかる. これらの傾向は前節の実験結果と一致する. さらに, バラツキについて見ると, 球型と非球型ともに総重量が大きくなると大きくなることがわかる. この図でのバラツキはサイズによる影響の違いを表わしているので, 総重量が大きくなるほどメディアサイズの影響が大きくなることがわかる. また, 球型と非球型を比較すると, 非球型の方がかなり大きく, サイズによる影響を受け易いことがわかった.

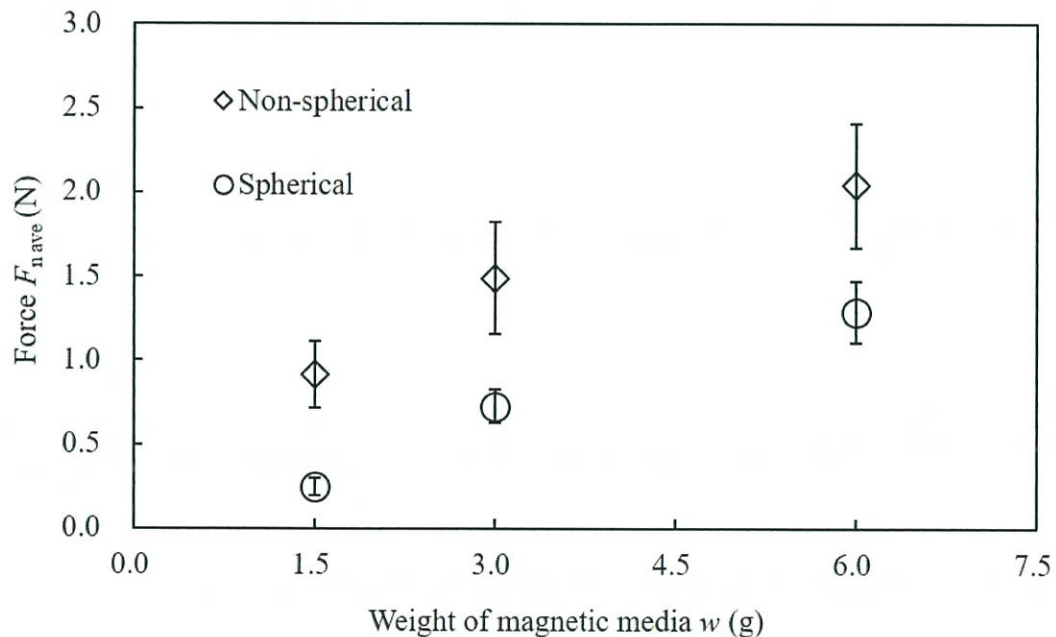


Fig. 6.1 Comparison of force by different shape magnetic media

次に、磁性メディア個数の影響と押付け力 $F_{n\text{ave}}$ との関係調べるために、球型の磁性メディアを用いて実験を行った。その結果は図 6.2 に示す。この図より、磁性メディアのサイズにより傾きは異なるが、どのサイズの磁性メディアにおいても個数が増えるにつれて、押付け力も線形的に増加することがわかる。また、その傾きは磁性メディアのサイズが大きい方が大きくなる傾向が見られるが、磁性メディアのサイズ 400 μm と 600 μm ではわずかに 600 μm の方が小さくなっており、磁性メディアのサイズには最適値が存在するものと考えられる。磁性メディアのサイズが同一の場合、個数に比例して押付け力が大きくなるのは、磁性メディア同志の相対変位に必要な力が、サイズが同じ場合には一定であり、個数に比例してメディア同志の接触点の数が増えるためと考えられる。また、磁性メディアのサイズが大きくなると、磁性メディア同志の相対変位に必要な力も大きくなるが、比例関係にはならず、最適値が存在するものと考えられる。

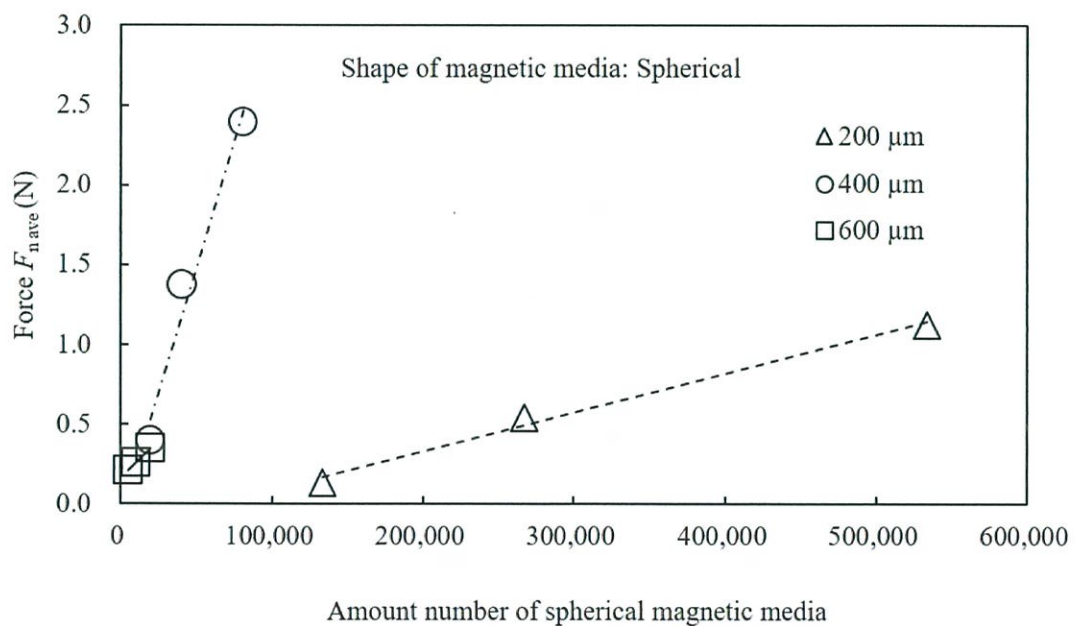


Fig.6.2 Relationship between the force $F_{n\text{ave}}$ and the amount number of spherical magnetic media

球型の磁性メディアと潤滑油に、アルミナ砥粒を加えた磁性研磨材を作成し、アルミナ砥粒の押付け力に対する影響を調べた。その結果を図 6.3 に示す。図 6.3 より、磁性メディアの総重量が大きくなるほど、わずかであるが、アルミナ砥粒のない方が押付け力も大きくなるのがわかる。これは、磁性メディア間にアルミナ砥粒が介在することで、固体潤滑材のように作用し、磁性メディア同志の相対変位を容易にするためと考えられる^{6.4,6.5}。

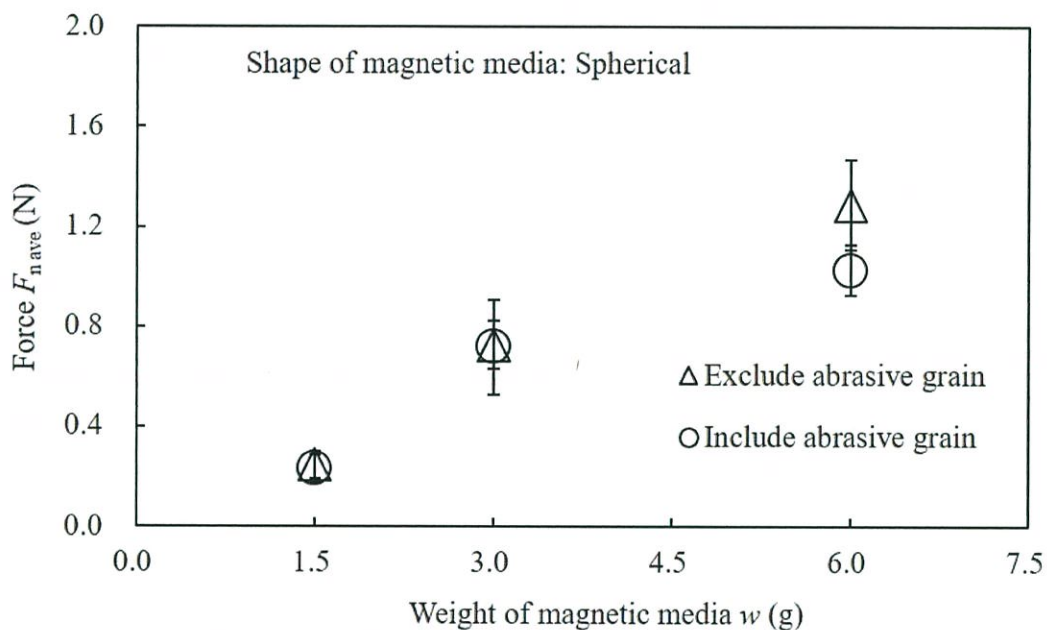
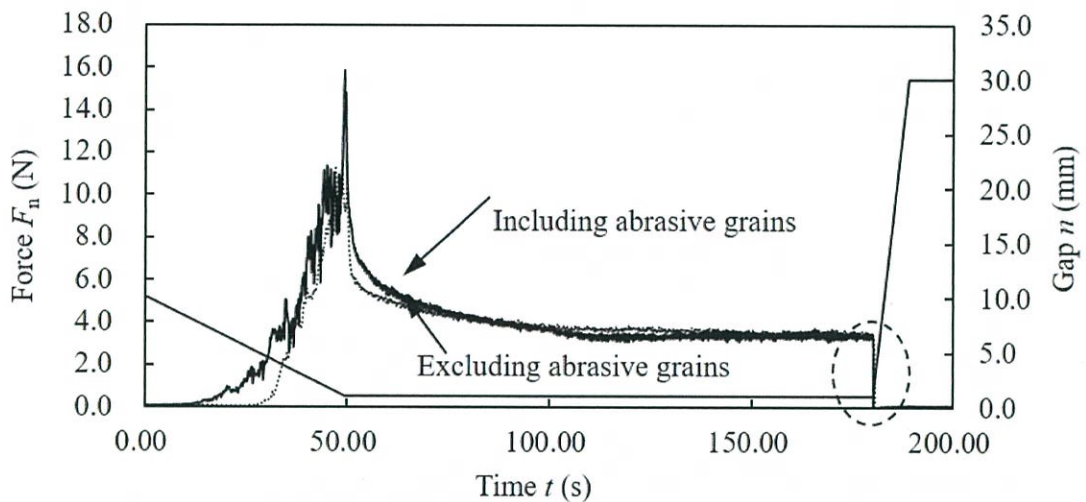


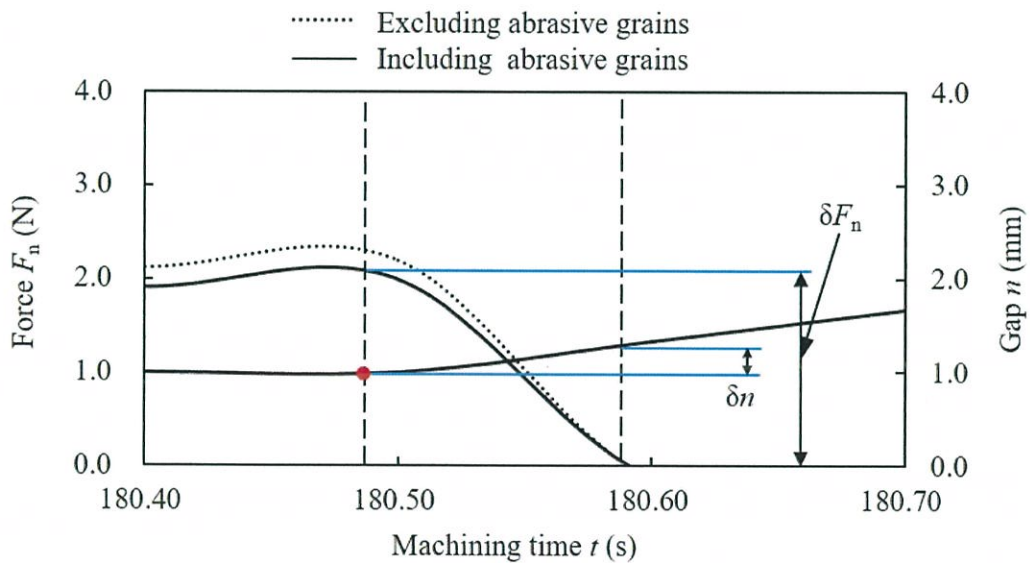
Fig. 6.3 Comparison of force by spherical magnetic medias between exclude and include abrasive grains

さらに、磁気研磨工具先端とワークとのギャップの変化による、押付け力の変化について詳細に調べるため、磁気研磨加工が終了する際の押付け力の変化を観察した。実験条件は、主軸回転数 $S=750 \text{ min}^{-1}$ 、加工物表面へアプローチ時の送り速度 $f_n=10.0 \text{ mm/min}$ 、設定ギャップ $\Delta n=1.0 \text{ mm}$ 、加工終了後に加工物表面から離れる時の送り速度 $f_n=200.0 \text{ mm/min}$ の条件で実験を行った。また、工作

機械内部のリニアスケールおよびエンコーダに基づく NC データをサーボ調整ツール SERVO GUIDE (ファナック製, 以下サーボガイドと呼ぶ) を用い, 磁気研磨工具移動中のすべての位置情報を同時に記録した. 本実験では, 測定のサンプリング時間はフォースセンサの記録周波数と等しい 100 ms と設定した. その結果を図 6.4 に示す.



(a) Overall change of force F_n during machining process



(b) Enlarge image

Fig. 6.4 Change characteristics of force δF_n to the gap δn

図 6.4(a)は、球型の磁性メディアから構成した磁性研磨材を用い、磁気研磨加工プロセスにおける押付け力の変化を示している。このうち、磁気研磨工具が加工物表面から離れる瞬間の押付け力の変化量 δF_n とギャップ変化量 δn の変化関係を拡大して図 6.4(b)に示す。

この図より、磁気研磨工具が加工物の表面から離れた瞬間（図 6.4 の赤い点）から押付け力 $F_{n\text{ave}}$ がゼロになるまでの間に、ギャップ量 δn の変化に対する押付け力 δF_n の関係を図 6.5 に示す。この図より δF_n と δn はほぼ線形関係にあることがわかる。そこで、ギャップ量 δn の変位に対する押付け力 δF_n の増加率 k （等価バネ定数）は以下の式(6-1)で近似的に表すことができる。

$$k = \delta F_n / \delta n \quad (6-1)$$

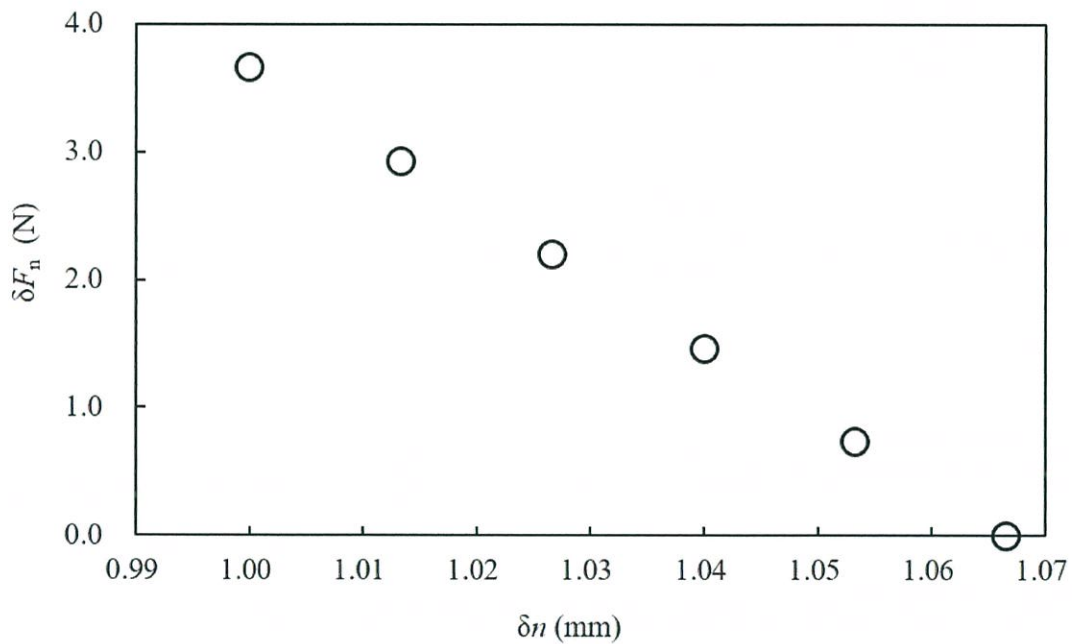


Fig. 6.5 Linear relationship between the force δF_n and the gap δn

図 6.6 に、アルミナ砥粒を含まない場合のバネ定数 k と磁性メディア総重量の関係を示す。この図より、球型の磁性メディアにおいてバネ定数 k の変化はわずかであるが、非球型の磁性メディアにおいては総重量の増加に対して k も大きくなることがわかる。これは、式(6-1)中の δF_n は総重量にほぼ比例して変化するのに対して δn はほとんど変化せず、 δF_n の変化は球型より非球型の方が大きいためである。

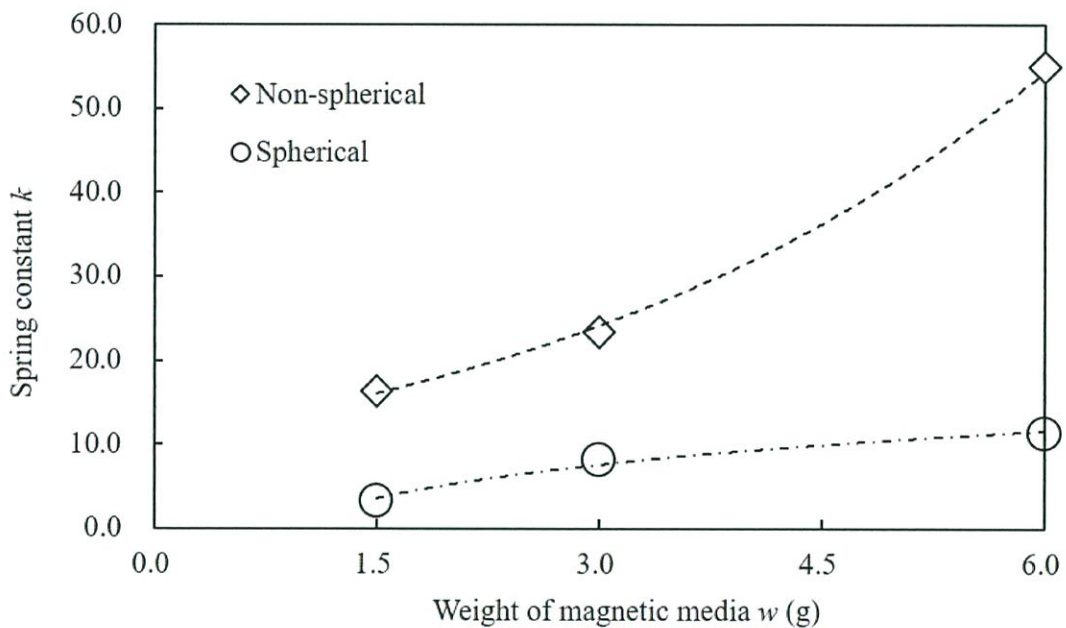


Fig. 6.6 Change of force relative to the gap exclude abrasive grains

図 6.7 にアルミナ砥粒を含む場合のバネ定数と磁性メディアの総重量の関係を示す。この図より球形、非球形の磁性メディアともに、総重量 1.5 g の非球形の磁性メディアを除いて、総重量に対するバネ定数 k の変化が小さくなっていることがわかる。これはアルミナ砥粒が固体潤滑材の役割をして、磁性メディア同志の相対変形が容易になったため、総重量による δF_n の変化が小さくなったためである。

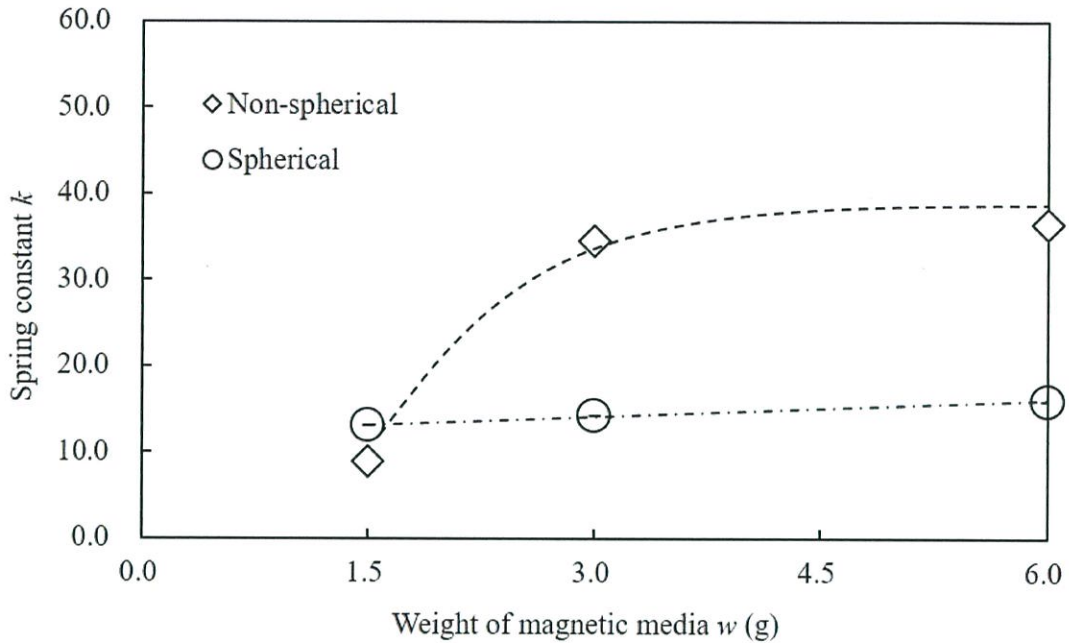


Fig. 6.7 Change of force relative to the gap include abrasive grains

以上の結果より、バネ定数 k が分かれば押付け力の目標値 (Desired value) F_D は $F_{n\text{ave}}$ 以下であれば、次式のようにコントロールできる。

$$F_D = F_{n\text{ave}} - k(n - \delta n) \quad (6-2)$$

ここで、 n は F_D を得るための磁気研磨工具先端の工作物からの距離、 δn は $F_{n\text{ave}}$ が得られる距離である。式(6.2)を用いて押付け力を広範囲にコントロールするためには $F_{n\text{ave}}$ をできるだけ大きくする必要がある。 $F_{n\text{ave}}$ に影響を与える因子として、これまでに磁性メディアの形状、サイズ、個数、総重量を取り上げ、個々の因子の影響を調べ、個々の因子の影響についてはある程度明らかにすることができた。しかし、これらの因子が独立して影響していないこともわかる。そこで、これらの因子の組み合わせで $F_{n\text{ave}}$ を最大にする最適な組み合わせ^{6.6, 6.7)}

が存在するかを調べた。図 6.8 に球型でアルミナ砥粒なしの場合の結果を示す。

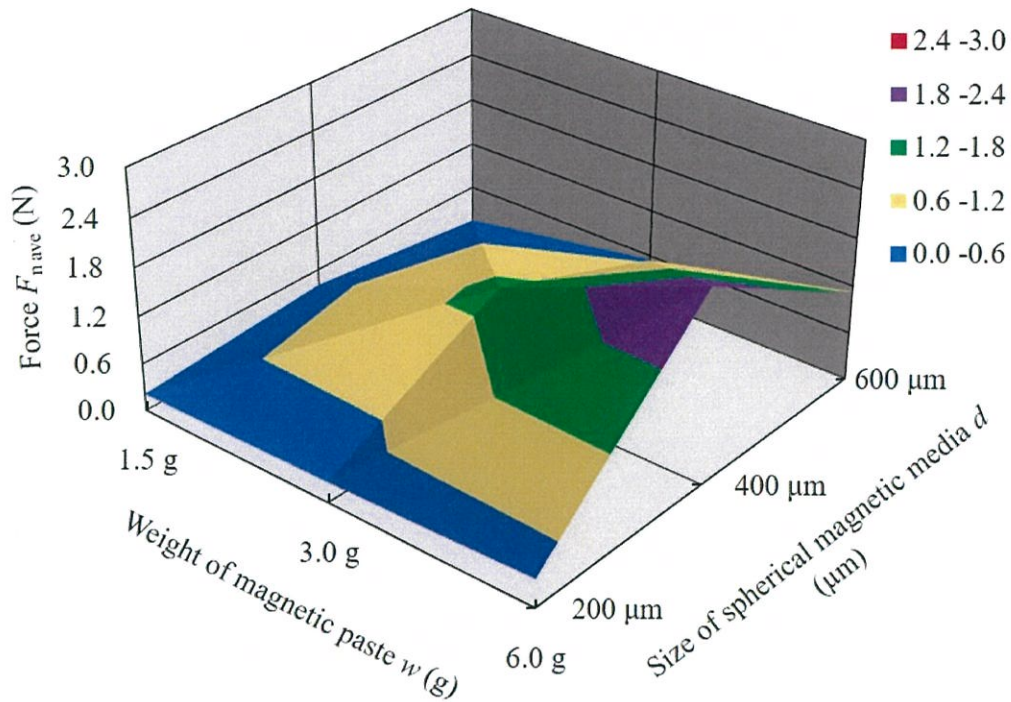


Fig. 6.8 Relationships between force $F_{n\text{ave}}$ and weight w or size d
(Spherical media without abrasive grains)

図 6.8 では、磁性メディア諸元のサイズ、個数、総重量の 3 因子のうち、2 因子を決めれば、残りの一因子は自動的に決まるので、5 章の図 5.13 で、 $F_{n\text{ave}}$ との関係が明確に得られた総重量とサイズをパラメータとしている。図 6.8 より、全体的に総重量が重いほど $F_{n\text{ave}}$ は大きくなるが、サイズには最適値^{6.6)}が存在することがわかる。しかし、磁性メディアのサイズにおける最適値の存在理由についてはまだ確認できておらず、今後の課題^{6.3)}である。

図 6.9 に非球形でアルミナ砥粒なしの場合の結果を示す。球形の場合に比べると複雑な変化を示しており、極値が図中黒いリングで示すように複数個所見られる。これは、非球形の場合、磁性メディア同志の相対変位が磁性メディア同志のすべりだけでなく、回転も伴うため、すべりだけの球形の場合よりも影響

が複雑になったものと見られる。

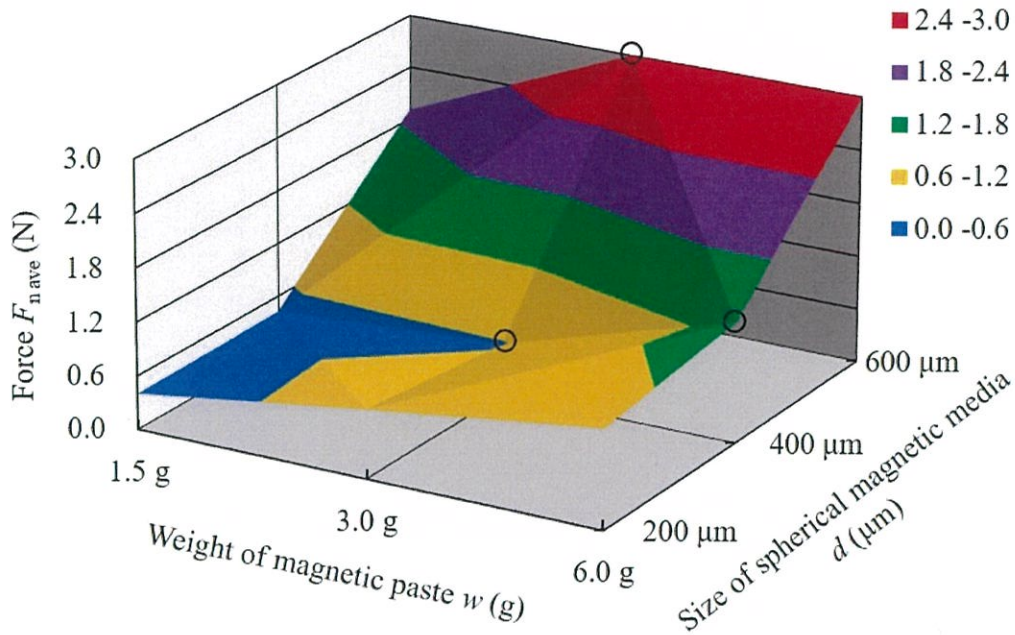


Fig. 6.9 Relationships between force $F_{n\text{ave}}$ and weight w or size d
(Non-spherical media without abrasive grains)

次に、アルミナ砥粒を含めた場合の結果を図 6.10 と図 6.11 に示す。図 6.10 の球形磁性メディアの場合は、アルミナ砥粒の固体潤滑剤としての作用によりわずかに押付け力 $F_{n\text{ave}}$ は小さくなっているが、傾向としてはほとんど変化していないことがわかる。一方、図 6.11 より非球形磁性メディアの場合、アルミナ砥粒の潤滑作用により、磁性メディア同志の相対すべりに必要な力が小さくなり、回転に必要な力の影響が大きくなったために、アルミナ砥粒なしの場合に比べると単調な分布になっているが、磁性メディア同志の相対すべりが主要因である球形メディアと分布の傾向が異なり、磁性メディア同志の相対回転が主要因となったためと考えられる。非球形の磁性メディアでは総重量とサイズともに最適値が存在することがわかった。

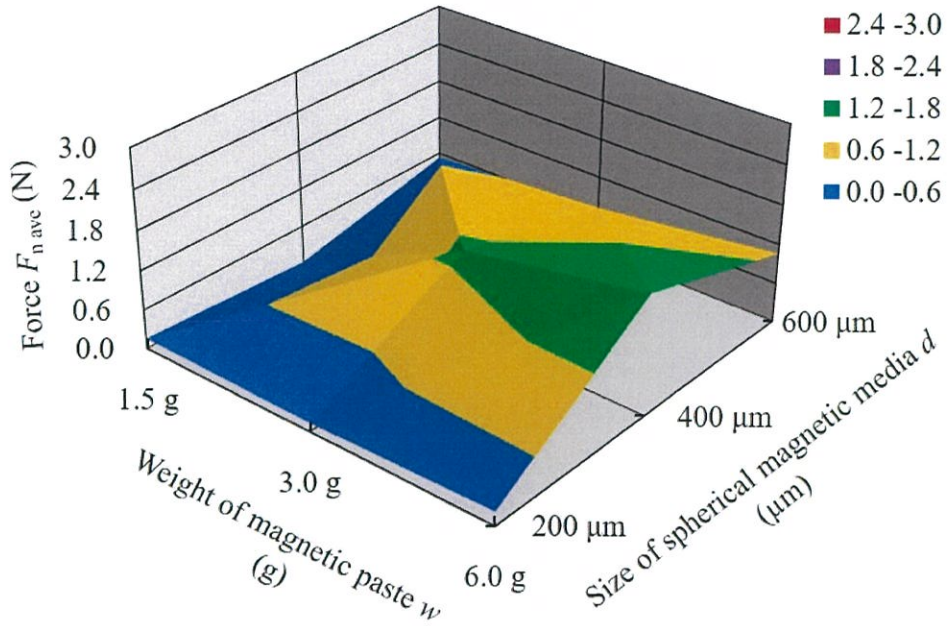


Fig. 6.10 Relationships between force $F_{n,ave}$ and weight w or size d
(Spherical media with abrasive grains)

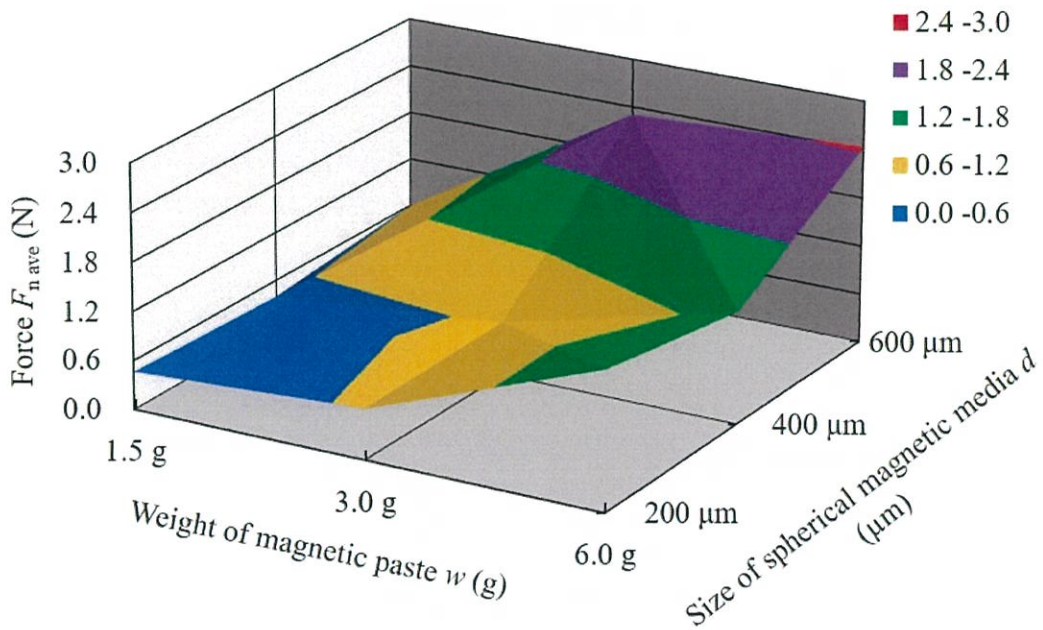


Fig. 6.11 Relationships between force $F_{n,ave}$ and weight w or size d
(Non-spherical media with abrasive grains)

6.4 結言

本章では、エンドミル型磁気研磨工具とマシニングセンタを統合した研磨機構におけるより実用的な特性の考察を試みた。すなわち磁性メディアに市販で安価の投射材を用い、潤滑油を単純に混合した磁性研磨材の押付け力への影響を、アルミナ砥粒の有無で比較することにより、磁性メディア固有の影響と、磁性研磨材としての効果について検討を行った。磁性メディアについての形状、サイズ、個数及び総重量に着目し、磁気研磨押付け力への影響について実験的に検討した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 磁性メディアの総重量が大きいほど、押付け力が大きくなり、球形の磁性メディアより非球形の磁性メディアの方が大きいことがわかった。また、磁性メディアサイズの影響についても、総重量が大きくなる程、また球形より非球形の方が大きくなることがわかった。
- 2) 球形の磁性メディアの個数については、同サイズの磁性メディアの場合、個数の増加に比例して大きくなることがわかった。これは、磁性メディア同志の相対変位に必要な力はメディアサイズが同一の場合、一定であり、磁性メディアの個数が増えると相対変位を生じる磁性メディア同志の接触点の数が比例的に増加するためと考えられる。また、その増加割合は、磁性メディアのサイズにより変わるが、その変化は磁性メディアサイズの変化とは比例しておらず極値を持つため、最適値が存在することもわかった。
- 3) 磁気研磨材中のアルミナ砥粒は、研磨材としての作用だけでなく、磁性メディア同志の相対変位において、固体潤滑剤としての作用もあることがわかった。
- 4) 磁気研磨工具の定常研磨状態から、被加工物から離れて押付け力がゼロとなるまでのギャップと押付け力の関係を調べたところ、ギャップの変化量と

押付け力の変化量にはほぼ線形的な関係があることがわかった。さらに、この関係を利用して、押付け力を制御する手法を提案した。

- 5) 提案した押付け力制御方法において、押付け力を広範囲に制御するためには、定常押付け力を大きくする必要があるため、磁性メディアの形状、総重量、磁性メディアサイズの影響を多変量解析的に調べた結果、球形磁性メディアの場合、総重量については大きいほど大きくなり、磁性メディアのサイズについては最適値が存在することがわかった。また、非球形の磁性メディアについては、総重量とサイズともに最適値が存在することがわかった。この磁性メディアの形状による傾向の違いは、磁性メディア同志の相対変位の違いで、球形の磁性メディアでは相対すべりが、非球形の磁性メディアでは相対回転が主要因となるためと考えられる。

参考文献

- 6.1) Lei MA, Tatsuya FURUKI, Toshiki HIROGAKI, Eiichi AOYAMA, “Development of polishing tool capable of self-adaptive to processing site using steel balls and magnetic force”, *Advanced Materials Research*, Vol.1136, (2016), 466-471
- 6.2) 川久保英樹, 土屋和博, 佐藤運海, ”単純混合型磁性研磨材を用いた磁性工作物材料の磁気研磨 (R 溝内面の部分研磨法の提案とその研磨特性)”, *砥粒加工学会誌*, Vol.54, No.1, (2010), 31-36
- 6.3) 馬雷, 凌南, 廣垣俊樹, 青山栄一, “磁性メディアの押付け力への影響に関する研究”, *日本機械学会* (投稿中)
- 6.4) 馬雷, 矢口航, 呉魏, 廣垣俊樹, 青山栄一, ”磁性メディアが異なるエンドミル型磁気研磨工具の性能に関する研究”, *日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会講演論文集*, (2017), 63-66
- 6.5) Kim, D.W., Cho, M.W., Seo, T.I. and Shin, Y.J., “Experimental study on the effects of alumina abrasive particle behaviour in mr polishing for mems applications”, *Sensors* (ISSN 1424-8220), (2008), 222-235
- 6.6) Girma, B., Joshi, S.S. and Raghuram, M.V.G.S., “An experimental analysis of magnetic abrasives finishing of plane surfaces”, *Machining Science and Technology*, Vol.10, (2006), 323-340
- 6.7) Vahdati, M. and Rasouli, S.A., “Evaluation of parameters affecting magnetic abrasive finishing on concave freeform surface of al alloy via rsm method”, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2016), 1-14

第7章 結 論

本章では、これまで述べてきた各章の結言の要点をまとめ、本研究によって得られた成果を明確にしている。

7.1 本研究の成果

本論文では、マシニングセンタ上での切削加工及び磁気研磨加工を統合することにより、新たな付加価値も期待できる新たな魔鏡創製手法を開発した。特に最適なボールエンドミル加工条件の決定手法及び磁気研磨加工において研磨加工パスのモデル化を行った。さらに、機上での磁気研磨加工法の実用化に向けて磁気研磨押付け力の制御性を向上するため、高速度カメラと動力計との組合せによる観察システムを構築し、開発した磁気研磨実験専用ジグを用いて、磁気研磨押付け力の発生メカニズムとその大きな支配因子となる磁性メディアの制御因子について検討を遂行した。

第2章から第6章までに得られた結果を総括すると以下のようなになる。

第2章では、提案した魔鏡面の創製手法による工程集約型加工への可能性を示した。すなわち、すべての加工工程を魔鏡面に集約することによって、魔鏡面上でC2（曲率）連続の曲面創製に有効であることを示した。さらに、本提案手法による魔鏡製作で十分な完成型まで達成するために、解決すべき問題点を明らかにした。その結果、魔鏡面パターン創製のためのヘールバイト加工工程で明らかになった課題は工作機械メーカーが新たに対応すべき課題であり、魔鏡面パターンのC2（曲率）連続条件の成立と平面の鏡面化のための磁気研磨工

程で明らかになった課題は実際に加工を行うユーザー側で対応しなければならない課題であることを明らかにした。

第3章では、磁気研磨加工における前加工面と研磨パスの加工面への影響を調べ、最適なボールエンドミル加工条件の導出および磁気研磨加工パスのモデル化を行った。その結果、ボールエンドミル切削による切削後の表面粗さに着目し、後工程である磁気研磨に要する時間も考慮した総合的な能率の観点から最適なボールエンドミル切削加工条件の決定法を示した。さらに、磁気研磨加工での加工パスの決定を容易に行うため、単円形状パスでの研磨量を推定する手法を提案し、予備実験により得られる定数を求めることで、鏡面化に必要な除去質量 M を推定できることを示した。一方、従来の磁気研磨加工法では能率良く中仕上げレスで最終仕上げとして鏡面を得ることができるが、ムラなく再現性の良い仕上げ加工をするには課題の残ることがわかった。

第4章では、開発した磁気研磨実験専用ジグを用い、構築した高速度カメラと動力計との組合せによる観察システムを利用して、市販の磁性研磨ペーストを用いて磁気研磨加工のメカニズムを明らかにした。さらに、それらの結果より、真球の鋼球による鋼球磁気研磨ブラシを提案し、市販の磁気研磨ブラシと比較することにより、ブラシ押付け力の制御可能性について検討した。その結果、市販磁性研磨ペーストを用いた加工メカニズムは鉄粒子による切削加工とアルミナ砥粒による研磨加工の複合加工であるため、高能率な鏡面仕上げ加工が実現されることがわかった。さらに、市販磁性研磨ペースト中の鉄粒子が不規則で凹凸の大きい形状のため、加工面内で磁気研磨ブラシが均一に分散せず、形状精度の維持および加工面の欠陥の回避が困難であることがわかった。本磁気研磨工具による研磨加工においては、磁性体（鉄粉）の形状および大きさが押付け圧力に大きく影響し、これらを変えることで押付け圧力を広範囲に制御

できる可能性を見出した。

第5章では、エンドミル型磁気研磨工具とマシニングセンタを統合した研磨機構における基礎的な特性の考察を行い、特に磁性メディアの諸元（形状、サイズ、個数及び総重量）に着目し、磁気研磨押付け力への影響について実験的に検討した。その結果、球型の磁性メディアに比べ、非球型のメディアの方が、アプローチ中および定常研磨中の押付け力やそのバラツキが大きくなるメカニズムを明らかにした。さらに、磁性メディアのサイズが大きいほど、また総重量が大きいほど押付け力が大きくなることがわかった。一方、非球型の方が球型よりも押付け力もそのバラツキも大きい、バラツキについては、総重量（個数）が増すにつれて、平均化の効果により少なくなることがわかった。

第6章では、エンドミル型磁気研磨工具とマシニングセンタを統合した研磨機構におけるより実用的な特性の考察を行うため、磁性メディアに市販で安価な投射材を用い、磁性メディア固有の影響と、磁性研磨材としての効果について検討した。その結果、磁性メディアの総重量が大きいほど、押付け力が大きくなり、球形の磁性メディアより非球形の磁性メディアの方が大きいことを明らかにした。そして、磁性メディアサイズの影響についても、総重量が大きくなる程、また球形より非球形の方が大きくなることがわかった。一方、球形の磁性メディアの個数については、同サイズの磁性メディアの場合、個数の増加に比例して大きくなることがわかった。さらに、磁性メディアの個数が増加するにつれて磁性メディア同志の接触点も増加するが、その増加割合は磁性メディアのサイズの変化とは比例しておらず極値を持つため、最適値が存在することもわかった。さらに、磁気研磨材中のアルミナ砥粒は、研磨材としての作用だけでなく、磁性メディア同志の相対変位において、固体潤滑剤としての作用もあることがわかった。また、磁気研磨工具の定常研磨状態から、被加工物か

ら離れて押付け力がゼロとなるまでのギャップと押付け力の関係を調べたところ、ギャップの変化量と押付け力の変化量にはほぼ線形的な関係があることがわかった。さらに、この関係を利用して押付け力を制御する手法を提案した。また、本手法を広範囲な押付け力制御に利用するためには、球形磁性メディアでは総重量については大きいほど良く、磁性メディアのサイズには最適値が存在し、非球形の磁性メディアでは総重量とサイズの両方に最適値が存在することがわかった。

7.2 今後の課題

本研究において、今後の課題として主に2つの問題が残されている。

その1つは、提案した工程集約型魔鏡面の創製手法の可能性を2章で示した。しかしながら、本提案手法を用いた魔鏡の製作では十分な精度が得られるに至っていない。特に、ヘールバイトの切削抵抗による逃げ量の解決方法についての検討を遂行していない。今後、切れ刃陵丸み nm オーダーのダイヤモンド工具の使用や切削抵抗の計測結果を用いて切込み量を補正する等の工夫が必要である。それらの遂行により、魔鏡面上の模様深さをサブミクロンオーダーで制御できるようになると考える。

もう1つは、エンドミル型磁気研磨工具とマシニングセンタを統合した研磨機構における磁気研磨押付け力の制御因子について検討を行い、一定の成果を得たが、磁性メディア以外の因子（例えば遊離砥粒の押付け力への影響）も検討する必要がある。さらに、本論文では非磁性加工物を対象に研究を行ったが、鋼材の様な磁性加工物の場合には磁気研磨押付け力の発生メカニズムが大きく

異なるため、そのメカニズムの解明と制御因子についての検討が必要である。

これら残された課題を解決することにより、工作機械の機上での切削加工工程から研磨での仕上げ加工工程までの一貫加工が可能となり、ものづくりの高精度・高能率化に大きく寄与するものと考ええる。

謝 辞

本論文は、同志社大学理工学部 教授 青山栄一 博士には、本研究の遂行に対し多大な御指導ならびに御鞭撻を賜りました。心から厚く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、同志社大学理工学部 教授 廣垣俊樹 博士より御懇篤なるご指導、御鞭撻を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

本論文の内容に対し、貴重な御助言を頂きました同志社大学理工学部 教授 田中達也 博士に厚く御礼申し上げます。

本研究および本論文完成と磁力等の解析に対し、惜しめない御助言および激励頂きました同志社大学理工学部 電気系 教授 藤原耕二 博士、准教授 高橋康人 博士に厚く御礼申し上げます。

本論文完成にあたり、惜しめない御助言および激励頂きました同志社大学研究開発推進機構 助教 呉魏 博士に厚く御礼申し上げます。

磁性メディア試作を行うにあたり、莫大なる御協力を頂いた株式会社三藤機械製作所 野辺弘道 博士に心から感謝申し上げます。また、加工物の測定を行うにあたり、莫大なる御協力を頂いた株式会社ミズホ 恩地好晶 博士、石井庸彦 氏に心から感謝申し上げます。さらに、投射材の提供を行うにあたり、莫大なる御協力を頂いた新東工業株式会社 田中グスターボ 氏に心から感謝申し上げます。

また、岐阜大学大学院工学研究科 助教 古木辰也 博士は第三章を執筆するにあたり、数多くの御教示、御鞭撻を賜った。ここに厚く感謝の意を表します。さらに、本研究を行うにあたり、実験データなどの取得など多方面にわたり同志社大学大学院生 矢口航 氏から多大なる御協力を賜った。ここに感謝の意を表します。

本研究の遂行に御協力頂いた同志社大学理工学部機械系学科生産システムデザイン研究室の各位に御礼申し上げます。

最後に、私の博士号の取得にあたり、常にご支援頂いた父親 馬維華に深く感謝の意を表すとともに、私の苦しい時期にあたたかく応援してくれた母親 劉艷芳、妻 黄美香および妻の両親に心から感謝致します。

2017年10月

馬 雷