

# 博士学位論文審査要旨

2017年12月19日

論文題目： 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

学位申請者： 馬 雷

審査委員：

主 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 田中 達也

要 旨：

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、魔鏡背面に鋳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。魔鏡製作工程は、(1) 造型、(2) 鋳造、(3) 解枠、(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。特に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。そこで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基礎的な研究を行い、その有効性と課題を検討している。

本論文は全7章で構成され、第1章において本論文に関する研究の背景および研究概要を述べることにより、本研究の目的を明らかにしている。第2章では魔鏡面の創成手法に工程集約型の加工法を提案し、本手法を実現するために解決すべき課題を明確にしている。第3章では磁気研磨加工における最適な前加工条件と加工パスの決定法について検討している。第4章では磁気研磨加工用観察システムを開発し、市販磁気研磨工具の問題点を明らかにしている。第5章では磁性メディアの諸元（形状、サイズ、個数及び総重量）の磁気研磨押付け力への影響について検討している。第6章では磁性メディアの最適な諸元と押付け力を制御する手法を提案している。第7章では得られた結果とその要点および結論を総括し、今後の展望について述べている。これらの成果は、切削加工工程から研磨での仕上げ工程までの一貫加工を実現するための重要な指針を与えており、熟練技能の伝承に頼らない生産システムの開発に大きく寄与するものである。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2017年12月19日

論文題目： 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

学位申請者： 馬 雷

審査委員：

主 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 田中 達也

要 旨：

本論文提出者は、理工学研究科博士課程（前期課程）を修了している。本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集, Vol.80, No.820, DOI-10.1299/transjsme.2014dsm0390, pp.1-13, Int. J. of Key Eng. Materials, Vol.625, pp.247-252, Int. J. of Advanced Materials Research, Vol.1136, pp.466-471, Int. J. of Materials Science Forum, Vol.874, pp.178-183, Proc. of Int. Symposium on Flexible Automation 2016, pp.31-37, ハリス理化学研究報告 Vol.58, No.3, pp.149-156 等に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2017年12月9日に学術講演会が開かれ、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により、十分な理解が得られた。講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を確認できた。提出者は英語による論文発表や語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 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

氏名： 馬 雷

要 旨：

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。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。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。

職人による従来の魔鏡製作工程は、(1) 造型、(2) 鑄造、(3) 解枠、(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。特に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。さらに、このようなコツやノウハウといった暗黙知は熟練技能者に頼っているのが現状である。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。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。

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、ロボット等を用いて熟練技能者の作業を忠実に模倣する手法が考えられる。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、本研究では、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基礎的な研究を行い、その有効性と課題を明らかにした。

本論文は、以下の示す全7章で構成している。

第1章では、本論文に関する研究の背景および研究概要を述べることにより、本研究の目的を明らかにしている。さらに、その目的を達成するための本論文の構成および概要を述べている。

第2章では、魔鏡面の創成手法に工程集約型の加工法を提案し、その可能性を示している。すなわち、すべての加工工程を魔鏡面に集約し、魔鏡の条件を満たすために最適な各工程での加工手法を示し、その有効性を示している。また、本手法を実現するために、工作機械メーカー側が解決しなければならない課題とユーザー側で解決できる課題を明確にしている。

第3章では、前章の結論より、ユーザー側が解決しなければならない課題として、磁気研磨に注目し、最適な前加工条件の導出および磁気研磨加工パスの決定法について述べている。すなわち、ボールエンドミル切削による前加工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前加工条件の決定法を示している。また、磁気研磨加工での加工パスの決定を容易に行うために、研磨量を推定する手法を提案している。さらに、従来の磁気研磨加工法では能率良く鏡面を得ることができるが、仕上げ加工にムラが生じることも明らかにしている。

第4章では、磁気研磨実験専用ジグを開発し、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、従来の磁気研磨加工法の研磨メカニズムを明らかにしている。また、鋼球による鋼球磁気研磨ブラシを提案し、従来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ている。すなわち、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が実現されるが、鉄粒子が不規則な形状のため、加工面内で磁気研磨ブラシが均一に分散しないため加工ムラの生じることを明らかにしている。さらに、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する事実から押付け圧力を広範囲に制御できる可能性を示している。

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本的な特性を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。その結果、球型の磁性メディアに比べ、非球型の磁性メディアの方が、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ている。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を示している。さらに、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ことが、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を明らかにしている。

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実用性を考慮して、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。すなわち、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ている。また、磁性メディアの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を示している。また、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を明らかにしている。さらに、磁気研磨工具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を利用して押付け力を制御する手法を提案している。

第7章では、本研究で得られた知見および結論を総括し、今後の課題や展望について述べている。

以上、本研究において得られたマシニングセンタと統合した新しい加工法に関する成果は、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を実現するための重要な指針を見出しており、熟練技能の伝承に頼らない生産システムの開発に大きく寄与するものである。