

# 博士学位論文審査要旨

2016年1月12日

論文題目：回転工具を用いた難削材加工の高精度化および高能率化に関する研究

学位申請者：古木 辰也

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 大窪 和也

要 旨：

航空機や医療機器など先端の産業分野では高機能な材料を使って高精度な加工を要求されることが多い。高精度な部品の加工には切削や研削，研磨などの除去加工が必要となるが，高機能な材料には除去加工が困難な難削材が多く，加工条件の決定が困難である。そのため，加工条件の選定には熟練した技術者の経験に頼っているのが現状である。本論文では，難削材の難削指数を基に代表的な難削性の異なる4種の材料に関して，それら材料の適応分野を想定し，新たな工具と加工法を開発することで，難削材の最適加工条件選定に対する指針を与えることを試している。

本論文は全8章で構成され，第1章において本研究の背景と目的について述べている。第2章では高硬度材であるバインダレス超硬合金を取り上げ，フレネルレンズのガラス成形金型を加工するためのダイヤモンド砥石による新たな加工方法と高精度ツーリング手法を開発し，その有効性を検証している。第3章では，前章の研削加工に必要な砥石ツーリングによる無駄時間を無くすために，PCDフライス工具を開発し，実際に金型の加工を行い精度評価することでその有用性を示している。第4章では，被削性の異なる材料からなるCFRPを取り上げ，種々の汎用工具を用いて切削実験を行い，CFRP加工に適した工具が備えるべき要件を明らかにしている。第5章では前章の結論を基に電着エンドミルを製作し，電着砥粒の材質や粒度を変えた切削実験より，CFRPの加工に適した電着エンドミルを開発している。また，熱伝導率が低いチタン合金に適用し，その有効性と課題を示している。第6章では展延性をもつ七三黄銅とステンレス合金を取り上げ，表面にマイクロ凹凸形状を持つ魔境を製作するためのボールエンドミル型磁気研磨工具とボールエンドミルを用いた加工手法を提案し，磁気研磨工具とボールエンドミルの最適な加工パスを示している。第7章では前章で使用したボールエンドミル型磁気研磨工具を用いた4軸制御磁気研磨法を開発し，非球面性状を創成することによりその有効性を示している。第8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。種々の難削性を持つ難削材に対して有効な加工手法と加工工具を開発し，それぞれの材料に対して求められる条件を明らかにしており，本論文は工学的に極めて価値あるものと評価できる。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

2016年1月12日

論文題目：回転工具を用いた難削材加工の高精度化および高能率化に関する研究

学位申請者：古木 辰也

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 大窪 和也

要 旨：

本論文の提出者は、2013年4月に本大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、International Journal of Key Engineering Materials,516,(2012),pp.629-633,International Journal of Advanced Materials Research,497,(2012),pp.15-19,International Journal of Advanced Materials Research,1017,(2014),pp.310-315,International Journal of Advanced Research.806,(2015),pp.203-208,日本機械学会論文集,80,820(2014),dsm0390,pp.1-13,International Journal of Key Engineering Materials,625,(2014),pp.247-252,に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2015年12月19日13時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員より、論文に関する諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、語学に関しては英語の語学試験に合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力および語学力は十分であることが確認できた。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： 回転工具を用いた難削材加工の高精度化および高能率化に関する研究  
氏名： 古木 辰也

## 要 旨：

我が国は 1950 年代の高度経済成長期以降、急速に科学技術が発展してきたが、近年の世界的な経済不振にともなってその発展は停滞気味である。その一方で、近年の中国や東南アジアの科学技術は目覚ましく進歩し、これまで日本やアメリカなどの先進国独自の技術であったものが、それら新興国に追いつかれている状態にある。加えて、これまで国内で行われていた自動車などの大量生産製品の製造拠点が海外に移されており、これにともなって、製造業の GDP 割合は 1900 年代と比べて約 4%低下しており、今後さらに国内での製造業および加工技術の衰退が危惧されている。今後も我が国が、科学技術とりわけ加工技術の分野において、世界をリードする立場になるには、これまで加工することが困難であった難削材をいかに高精度かつ高能率に加工する技術を開発できるかに掛かっているといっても過言ではない。

そこで、本研究では難削材の新たな加工方法や加工工具の開発を試み、実際の加工現場における技術者や作業者の加工方法、工具の選定を容易とすることを目的として、それらを体系化する。上述の難削材とは様々な削りにくい要因を持った材料の総称であり、難削材を個別に見ると、その材料によって適する加工方法に違いがある。材料の加工のしやすさを示す指標として、被削性指数がある。これは、硫黄快削鋼を削り、一定の工具寿命に対する切削速度を 100 として、比較する工作物材料の同一工具寿命に対する切削速度を百分率で表したものである。しかしながら、前述したように、難削材に分類される材料は様々な削りにくい要因を持っており、被削性指数だけでは、どのような加工方法が適切であるかは判断しにくい。そこで、本研究では山根氏が提唱する材料の硬度、引張強度、伸びと熱的特性で表されるレーダチャートおよび難削指数を用いて、難削材の分類を行った。そして、そのうち難削材として知られている、高硬度材であるバインダレス超硬合金および高い伸びを有するオーステナイト系ステンレス合金(SUS304)、高い熱的特性を有するチタン合金(Ti-6Al-4V)を採用し、これらに対する新規加工方法および工具の開発を試みた。さらに、近年では、特に航空機分野を代表として、炭素繊維と樹脂を組み合わせた複合材料である炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)の使用が急激に増加している。この CFRP は異種複合材料であるため、レーダチャートによる分類が困難であり、作業者が加工方法や加工条件の決定に苦慮している。また、研究レベルでは多くの工具や加工方法が提案されているが、現場レベルで作業者が容易に加工できる状況とは言いがたく、さらに、工具メーカーから販売されているダイヤモンドコーティング工具は高価であるといった問題も存在している。したがって、本研究では、前述した難削材に加えて、CFRP を加工している際の CFRP 温度や切削抵抗などの加工挙動や加工後の CFRP に生じるバリやアンカットファイバー、表面粗さについて調査し、新たな工具開発に取り組んだ。

第 1 章では、前述のとおり、まず本論文に関する研究の背景と難削材の定義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た。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た。

第 2 章では、高硬度難削材に分類されるバインダレス超硬合金を対象とし、また、ライフサイクルアセスメントの観点から注目を集めている太陽光発電用ガラス製フレネルレンズに焦点をあて、ガラス製フレネルレンズ成形用バインダレス超硬合金製金型の高精度加工の実現を試みた。高硬度難削材の加工に対しては、高硬度を有するダイヤモンドホイールの適用が有効であると思

われる。したがって、ニオブ製ツルアによる高精度、高能率ツルーイング手法を提案した。そして、本ツルアを用いてナイフエッジ状ダイヤモンドホイールのツルーイングを行った結果、従来ツルアと比べて短時間で極めてシャープなエッジを持つ砥石の創成が可能であることがわかった。また、本ツルーイング手法により創成されたナイフエッジ状ダイヤモンドホイールを用いて同時2軸研削法により、バインダレス超硬合金のフレネル形状の研削加工実験を行った。その結果、形状精度および表面粗さともに、光学製品として十分な精度を持つフレネル型の創製が可能であることがわかった。

第3章では、第2章のダイヤモンドホイールによる超硬合金の研削加工において、砥石の摩耗により複数回のツルーイングが必要となり、多くの非加工時間が生じるという問題が判明したため、優れた耐摩耗性を有する多結晶ダイヤモンド(Poly-crystalline Diamond, PCD)製フライス工具の開発を試みた。試作したPCD製フライス工具を用いて、第2章と同様にバインダレス超硬合金製フレネル型の超精密切削加工を試みた。その結果、1本の工具で優れた形状精度を有するフレネル型の創製が可能であった。その一方で、ワークの超硬合金粒子の脱落が生じることで、研削加工と比べて表面粗さが悪化することもわかった。

第4章では、山根氏のレーダチャートによる難削材の分類が困難である炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に着目した。CFRPの需要増加にともなって、CFRPの加工に関する研究が進んでいる。しかしながら、そのような研究の多くはトリミング加工(側面加工)やドリル加工のような限定的なものが多い。したがって、本章では、工具形状およびコーティングが異なる2種類のエンドミル工具とダイヤモンド砥粒を用いた研削工具を使用して、CFRPの正面切削加工および側面切削加工実験を行い、各種工具における特徴を整理することを試みた結果、工具形状や工具表面状態の違いによる加工挙動および加工面品位への影響について明らかにした。

第5章では、第4章のエンドミルと研削工具でCFRPの正面、側面切削加工を行った結果を基に、切削工具であるエンドミルと研削工具を組み合わせた、新たな工具である電着エンドミルの開発を試みた。電着した砥粒の違いによる影響を検証するため、微細なダイヤモンドもしくはcBN砥粒をエンドミル形状に電着固定した工具を試作し、CFRPの正面切削加工と側面切削加工を行った。その結果、最適な砥粒径は#1000であることがわかった。加えて、#1000砥粒を用いた電着エンドミルでは、従来のダイヤモンドコーティングエンドミルと比べて、加工後のCFRP断面はバリやアンカットファイバーのないシャープなエッジの創製が可能であるとともに、良好な表面粗さを得ることが可能であった。また、ダイヤモンド砥粒とcBN砥粒の違いが、CFRP温度や工具摩耗などに与える影響は小さいことがわかった。その一方で、刃先の砥粒脱落が生じるといった課題も判明した。さらに、CFRPとTi-6Al-4Vを組み合わせたスタック材料の側面切削加工を行うことで、チタン合金からCFRPや接着剤への熱伝導による機械的特性の悪化といった、今後の課題および改善点を明確化した。

第6章では、レーダチャートにおいて伸びが大きい展延性難削材に着目した。オーステナイト系ステンレス合金(SUS304)や七三黄銅のような優れた展延性を持つ材料は、その性質から変形しやすいため、所望形状が得にくい。さらに、遊離砥粒を用いた研磨加工で鏡面を得ようとした場合、砥粒の埋込みにより鏡面化が困難であるといった問題を有する。そこで本章では、鏡面上にC2連続3次元形状を持つ魔鏡の創製を取り上げ、ワークを効率的に鏡面化するため、磁気研磨量予測モデルを構築するとともに、これら展延性材料に対する曲率連続かつ薄肉なマイクロ凹凸形状の創製法を提案し、それらモデルおよび手法の有効性を検証した。その結果、SUS304の磁気研磨加工実験により、ワーク加工面の切削痕は除去され、平滑に鏡面化されることがわかった。加えて、マイクロ凹凸形状の創製実験により、ほぼ設計どおりの高さを有する曲率連続な凹凸の創製が可能であることを示した。

第7章では、近年、多品種少量生産の観点から注目されている加工工程を1台の加工機上で行う機上統合に着目し、5軸制御マシニングセンタ上で切削加工による形状創成と前章で提案した

磁気研磨加工を機上統合した複雑形状の均等研磨手法の開発を試みた。工具およびワークを多軸制御することにより、ワーク上のすべての点において工具接触点を一定とすることで、研磨量を一定化する均等研磨手法を提案し、七三黄銅に対して複雑形状として代表される非球面形状の均等研磨加工実験を行い、鏡面が得られることや形状精度の維持が可能であることを示したとともに、今後の改善点等についても明らかとした。

第8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た。以上、本研究において得られた難削材の加工に関する成果は、実際の加工現場の技術者や作業員にとって実用的な加工方法や加工条件の選定の一つの選択肢となることで、加工前の工程設計やテスト加工時間の削減につながり、加工安定化およびコスト低減に大きく寄与できると考えられる。