

学位被授与者氏名	原田 武志 (Takeshi HARADA)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 17 号
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 20 日
論文題目	ダイヤモンド電鍍工具と同工具に対する砥粒平坦化ツルージング技術の開発
論文題目 (英訳または和訳)	Development of an electroformed diamond tool and truing techniques for flattening diamond grains on the tool working surface
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 仙波 卓弥 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 朱 世杰 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 後藤 穂積 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 内田 一徳
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>1990 年代の初めにドイツでマイクロ機械加工という加工概念が提案されて以来、我が国でもサイズが 1 mm 以下の機械部品を製造し得る、マイクロ切削加工やマイクロ研削加工といった超精密微細加工技術の開発が行われてきた。とくに、1990 年代の初めから 2000 年までの 10 年間には、超精密微細加工を実現し得る工作機械の開発が行われてきた。その結果として、工作機械に関する位置決めや送り運動に関する制御分解能は、100 nm から 1 nm 以下に向上した。</p> <p>1990 年代に行われた工作機械の開発に続き、2000 年代に入ると超精密微細加工を実現し得る工具の開発が行われてきた。過去 10 年間くらいの間に様々な工具が開発されてきたことは事実である。ただし、実用化されているのは単結晶ダイヤモンドを工具素材に用いたマイクロ切削加工用の工具のみであり、しかもこの工具は {111} 面に平行な結晶面で劈開するため、同合金やアルミ合金といった軟質非鉄合金の連続切削に限って用いられている。</p> <p>マイクロ切削加工と異なり、マイクロ研削加工は超硬合金や炭化珪素といった高硬度金型材料に対して超精密微細形状を作り得る潜在能力を持っている。しかし、耐欠損性や耐摩耗性に優れた工具素材の開発が停滞していることや、研削加工を行い粗さが 10 nm Rz 以下の平滑な加工面を作ることが容易でないことが原因で、現時点では実用化されていない。このように、マイクロ機械加工、とくにマイクロ研削加工を実現し得る研削工具や加工技術は開発できていないのが現状である。</p> <p>本研究では、直径が 0.1 mm 以下の研削工具を高速回転させてマイクロ研削加工を行い、高硬度金型材料に対して超精密微細形状を作ることができる、耐欠損性と耐摩耗性に優れた研削工具素材の開発や、同工具を使用し粗さが 10 nm Rz 以下の平滑な加工面を作ることができる工具成形技術の開発を行った。新たに開発したこれらの技術は、過去 10 年間に渡って停滞していた工具開発を補って余りあるだけでなく、マイクロ研削加工の実用性を世界で最初に実証したという点において工学的に有用である。</p> <p>本論文は序論、4 つの章、ならびに結論で構成されている。序論では、本研究で実施したマイクロ研削加工技術の開発に関わる国内・国外の研究開発動向、当該分野における本研究の学術的な特徴・独創的な点、ならびに工業的有用性を紹介した上で、本研究の目的を説明した。また、研究目的を達成するために行った研究実施内容と、各章に分けて記載した研究成果との関連を説明した。</p> <p>第 2 章では、DVD プレーヤのピックアップレンズに使われている二焦点フレネルレンズを量産するための金型を例に取り、直径が 1 mm 以下のガラス製レンズを量産するためには、超硬合金に対して超精密微細形状を成形し得る、マイクロ研削加工技術を開発する必要があることを示した。また、既存の電着工具を用いた研削実験の結果を示し、マイクロ研削加工を行い超精密微細と呼ぶにふさわしい加工面を作るためには、電着工</p>

具にも増して耐欠損性と耐摩耗性に優れた研削工具素材の開発や、粗さが 10 nm Rz 以下の平滑な加工面を作ることができる工具成形技術を開発する必要があることを示した。

第 3 章では、耐欠損性と耐摩耗性に優れた工具を作るために開発した合金強化形ダイヤモンド電鍍工具の製造技術と、試作したダイヤモンド電鍍工具の機械的特性を評価するために行った曲げ試験や硬さ試験の結果を示した。ニッケル/リン合金めっきを行い電析するニッケルの結晶サイズを 20 Å 程度に微細化すること、熱エッチングを行いめっき皮膜に共析させるダイヤモンド砥粒の表面を荒らすこと、ならびに試作したダイヤモンド電鍍工具に対して熱処理による合金強化を行うこと等により、P 種超硬合金の抗折力とほぼ同じ曲げ強さを持つ工具素材の開発に成功した研究の成果をまとめた。

第 4 章では、試作したダイヤモンド電鍍工具を使用し高硬度金型材料に対して粗さが 10 nm Rz 以下の平滑な加工面を作るために開発した砥粒平坦化ツルーイング技術と、その効果を確認するために実施した研削加工実験の結果を示した。ダイヤモンド電鍍工具を成形するためのツールに多結晶ダイヤモンド(PCD)を用いた上で、ダイヤモンド電鍍工具に対して PCD 工具を弾性接触させた状態でツルーイングを行うことにより、砥石作用面にある砥粒の先端を工具の輪郭に沿って平坦かつ平滑に成形できることを示した。また、同工具を用いると高硬度金型材料に対し粗さが 10 nm Rz 以下の平滑な研削加工面が得られることを示した。

第 4 章で示した研究を実施する過程で、ダイヤモンド電鍍工具を成形するために使用した PCD は本研究で試作したダイヤモンド電鍍工具にも増して耐摩耗性に優れていることが明らかになった。そこで、第 5 章では試作したダイヤモンド電鍍工具をマイクロ研削用の工具としてではなく、PCD 製のマイクロ工具を成形するためのツールとして使用するために行った研究の成果を示した。導電性を持つダイヤモンド電鍍工具を放電加工の電極としてだけでなく、研削工具として使用することにより、放電加工で荒らされた PCD 工具表面を平滑化することが可能であり、PCD 製切削工具の切れ刃稜を鋭利に成形できることを示した。

結論では、第 3 章から第 5 章に分けて示した研究実施内容と研究成果が、序論や第 2 章で紹介した研究目的を完全に満たす内容になっていることを総括した。とくに、第 4 章で示した砥粒平坦化ツルーイング技術は、人類史上誰も成し得なかった粗さが 10 nm Rz 以下の平滑な研削加工面を作るために必要不可欠な工具成形技術であり、学術的に独創性があるだけでなく工業的に有用であることを示した。また、第 5 章で紹介したように、本研究で開発したダイヤモンド電鍍工具は研削工具素材としてだけでなく、PCD を成形するためのツールとして極めて有効であることを示した。

論文内容の要旨
(英文)

The development of microfabrication techniques such as microcutting and microgrinding, has been carried out in Japan to fabricate micro-sized dies and molds since the beginning of the 1990s when the concept of mechanical microfabrication using a downsized traditional manufacturing system was proposed in Germany. A research project to develop an ultraprecise machining center, which was conducted in the 1990s contributed to increasing the resolution of the positioning and feed motions of the machining center from 100 nm to less than 1 nm.

Following the development of the machining center, the development of microcutting tools and microgrinding tools for fabricating microstructures with smooth surfaces of roughness less than 10 nm Rz has been conducted since the beginning of the 2000s. Several tools were proposed at the research level, but only a microcutting tool made of single-crystal diamond has been employed in practical use. However, diamond easily cleaves parallel to the <111> crystal plane, so that the tool cannot be applied to the interrupted cutting of hard materials.

Different from microcutting, microgrinding can be used to fabricate microstructures on hard materials such as cemented carbide and ceramics. However, the toughness and wear resistance of the conventional grinding tool are insufficient for microgrinding wherein a tool of small diameter is rotated at high speed. In addition, it is difficult to fabricate smooth surfaces with roughness less than 10 nm Rz by grinding even when the diamond grain size in the grinding tool is reduced, so that the microgrinding has never been applied in practical use.

Two major advances were realized that allow us to fabricate microstructures with smooth surfaces of hard and brittle materials by microgrinding, wherein a tool of small diameter is rotated at high speed. One is a grinding tool material with superior toughness and wear resistance, and the other is a truing technique whereby a surface roughness less than 10 nm Rz can be attained. These two achievements solve the problems that could not be overcome with the conventional microgrinding tool and are essential for fabricating smooth ground surfaces with a roughness of less than 10 nm Rz, which had been impossible up to now.

This doctorate thesis is made up of prolegomenon and four chapters and conclusion. Previous studies and the trend of research projects related to microgrinding, originality and effectiveness in both science and practice and the objectives of the thesis are explained in Prolegomenon. In addition, the contents of each chapter, in which the experimental results of the research project are presented, are briefly summarized.

In Chapter 2, the necessity of developing a microgrinding tool that can enable the fabrication of microstructures with smooth surfaces on cemented carbide is explained for the mass production of small glass lenses with a diameter less than 1 mm, focusing on a double focal pickup lens used for a DVD player as an example. In addition, it was explained that two major issues, a tool material with superior bending strength and wear resistance and a truing technique for flattening diamond grains on a tool working surface, should be resolved in order to establish microgrinding techniques, using the conventional electroplated tool as an example.

In Chapter 3, the results of research projects conducted for the development of grinding tool materials are presented. A tool manufacturing process using electroplating techniques and results of bending and indentation tests are presented. It was shown that an electroformed diamond tool having an equivalent bending strength as p-type cemented carbide could be developed by decreasing the electrodeposited nickel grain size to less than 20 Å using a Ni/P plating solution, roughening of the diamond grain surfaces by thermal etching, and the generation of the intermetallic alloy Ni₃P by heat treatment.

In Chapter 4, the results of a research project conducted on fabricating smooth surfaces with a surface roughness of less than 10 nm Rz using the electroformed diamond tool are presented. A four-axis rotary stage made for fabricating the tip of the electroformed diamond tool into a hemisphere with a radius of 50 μm and for flattening diamond grains on the tool working surface was presented. It was shown that the ground surface roughness of 4 to 6 nm Rz could be obtained by using the electroformed diamond tool, whereby the tip of diamond grains on the hemispherical tool working surface were flattened using a polycrystalline diamond (PCD) disk as a truer.

It was verified, through the truing test described in Chapter 4, that the PCD used for the truer has superior wear resistance compared with the electroformed diamond tool, therefore, a research project on the use of PCD in the microcutting tool was conducted. In Chapter 5, the results of forming tests using PCD for a microcutting tool and an electroformed diamond tool as a truer are presented. It was shown that the microcutting tool made of PCD with sharp cutting edges without chips could be formed by using the electroformed diamond tool not only for the anode used for electric discharge machining but also for the grinding tool to flatten roughened PCD surface.

In Conclusion, it was summarized that the results of research projects discussed in Chapter 3, Chapter 4 and Chapter 5 satisfied the objectives of this research project explained in Prolegomenon and Chapter 2. It was emphasized that truing techniques shown in Chapter 4 have originality in the scientific meaning and are essential for fabricating smooth ground surfaces with a roughness of less than 10 nm Rz that has so far never been accomplished. In addition, it was summarized that the electroformed diamond tool is effective not only as a microgrinding tool but also as the truer in forming the forming of microcutting tool made of PCD.

論文審査結果

<学位論文審査の結果>

マイクロ研削加工は、超硬合金や炭化珪素といった高硬度金型材料に対して超精密微細形状を作り得る潜在能力を持っており、ガラス製マイクロレンズの量産に用いられる高硬度金型の製造にマイクロ研削加工を用いるための研究が各国で行われている。しかし、耐欠損性や耐摩耗性に優れた工具素材が開発されていないことや、研削加工を行い粗さが 10 nm Rz 以下の平滑な加工面を作ることが容易でないことが原因で、マイクロ研削加工は実用化されていない。

本論文には、マイクロ研削加工を実用化するために行った研究の成果が纏められている。耐欠損性と耐摩耗性に優れた工具素材の開発に関しては、ニッケル/リン合金めっきを行い電析するニッケルの結晶粒を 20 Å程度に微細化すること、めっき皮膜に共析させるダイヤモンド砥粒の表面を熱エッチングにより荒らすこと、ならびに試作したダイヤモンド電鍍工具に対して熱処理による合金強化を行うことにより、P種超硬合金の坑折力とほぼ同じ曲げ強さを持つ工具素材を開発している。

また、粗さが 10 nm Rz 以下の平滑な研削加工面を作ることに関しては、工具先端の半径を 50 μm に成形した半球状・研削工具の砥石作用面にあるダイヤモンド砥粒の先端を工具の輪郭に沿って平坦かつ平滑に成形できる砥粒平坦化ツルーイング技術を開発することにより、研究目標を達成している。この、砥粒平坦化ツルーイングと表現している研削工具の成形概念は、学術的に新規性と独創性があるだけでなくマイクロ研削加工を実用化の上で必要不可欠な技術であり、工業的にも実用性の高い研究である。

このように、本論文にはマイクロ研削加工を実用化するために行った研究の成果が纏められており、学術的ならびに工業的に質の高い研究内容であると判断した。また、本論文に記載された研究の成果は、査読付き論文3編と申請者が講演した国際会議 Proceedings に公表されており、学位論文審査基準を満たしている。これら2つの観点から、学位審査委員会は本論文が学位論文として認められる内容であると判断した。

<学位論文公聴会>

平成20年11月の研究科委員会で学位審査申請が認められた後、計3回の予備審査を行った後、平成21年2月5日の15時から16:30分の90分間、学位論文公聴会を実施した。出席者は、教職員ならびに大学院・学部学生を合わせて計62名であった。1時間の発表の後に行われた質疑応答では、30分の間に副査を含む教員から計12の質問を頂いた。質問は論文の本質にかかわるレベルの高いものばかりであり、中には的はずれと思われる回答も見受けられた。ただし、教員からは申請者を教育する見地からの質疑と助言、申請者からは教えを請う真摯な態度での回答ができていたように

	<p>判断する。</p> <p><最終試験> 公聴会後の最終試験では、申請者が学位論文に関連する分野の学識を有し、今後自主的に研究を進めていく上の基本的研究能力を習得していることを確認した。また、国際会議 Proceedings を英語で執筆すると同時に英語で発表した実績もあり、英語能力は一定の水準に達していると判断した。</p> <p><総合判定> 学位審査委員会は、学位論文審査結果、学位論文公聴会結果、および最終試験結果を総合評価し、この学位論文が博士（工学）の学位に適格であると判断した。</p>
<p>主な研究業績</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 「合金強化形・極微粒ダイヤモンド電鍍工具の開発」、 日本機械学会論文集C編、73-726、pp. 626-631(2007-2) 著者：仙波卓弥、濱口元基、原田武志 2. 「半球状極微粒ダイヤモンド電鍍工具に対する砥粒平坦化ツルーイング技術」、 日本機械学会論文集C編、74-738、pp. 219-224(2008-2) 著者：原田武志、仙波卓弥、Brian J. STONE 3. 「PCD製マイクロボールエンドミルと超硬合金に対する荒加工への応用」、 日本機械学会論文集C編、74-739、pp. 232-238(2008-3) 著者：岡崎隆一、杉谷紀彦、原田武志、仙波卓弥 4. “A truing Technique of Flattening Diamond Grains for Fabricating Microstructures with Fine Surfaces”, Advances in Abrasive Technology 11 (Proc. of the ISAAT 2008), pp. 350-354 (2008-10) Authors : Takeshi HARADA, Takuya SEMBA