

すずき ひろふみ

氏 名 鈴木 浩 文

授 与 学 位 博士 (工学)

学 位 授 与 年 月 日 平成 9 年 9 月 10 日

学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学位規則第 4 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 6 0 年 3 月

大阪市立大学大学院工学研究科機械工学専攻前期博士課程 修了

学 位 論 文 題 目 非球面光学部品の超精密加工に関する研究

学 位 審 査 委 員

主 査 東北大学教授 庄司 克雄 東北大学教授 加藤 康司
東北大学教授 清野 慧 東北大学助教授 厨川 常元

論 文 内 容 要 旨

本研究は非球面光学部品の超精密加工に関するものであり、多様化した非球面形状、材質、要求精度を対象にして、図1に示す非球面光学部品の加工プロセスに基づいて研究を行った。軟質金属の非球面光学部品に関しては、単結晶ダイヤモンド・アールバイトを用いた切削加工において、刃物形状補正法を開発することにより形状精度の改善に関する研究を行った。セラミックスなどの硬質脆性材料は切削加工では鏡面加工が困難であり、レジンボンド・ダイヤモンド砥石による研削加工を施す必要がある。そこで砥石送り速度制御法を開発し、形状精度の改善に関する研究を行った。更に高い表面粗さが必要な場合、研削加工により前加工を行った後、形状精度を維持しながら表面粗さの改善を行うため、磁性流体を利用した研磨法の開発を行

い、そのメカニズムを解明すると共に形状を維持しながら表面粗さを改善する研究を行った。更に高い表面粗さと形状精度が必要な場合、研削加工により前加工を行った後、形状精度と表面粗さの改善を図るために、法線方向の加工圧をインプロセス計測制御する方式の微小工具研磨法を開発し、形状精度と表面粗さの改善に関する研究を行った。また、上記の研究において加工精度を向上させるには測定技術が不可欠であるため、加工直後の工作物の形状精度を鏡面加工機上で高精度に測定できる機上測定システムを開発し、測定精度の向上に関する研究を行った。

これらに基づき、本研究の内容を以下に要約する。
第1章では、本研究の背景となる非球面光学部品の

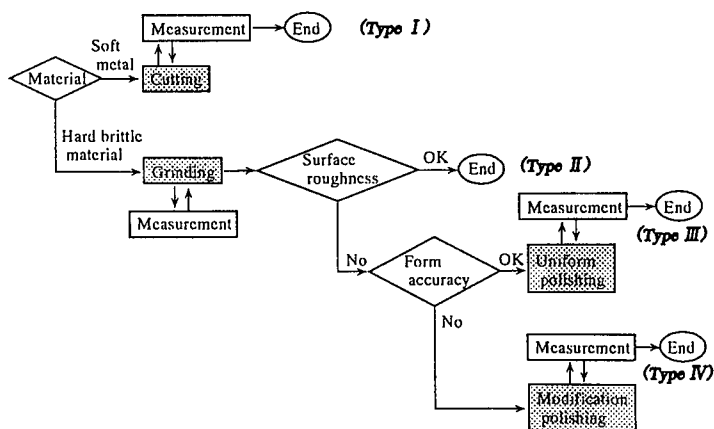


図1 非球面光学部品の加工プロセス

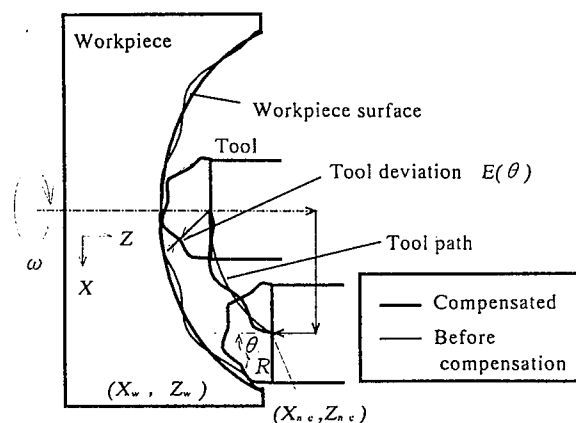


図2 刃物形状補正法による切削加工

超精密加工を行うことの必要性和重要性を指摘し、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、軟質金属材料の切削加工における形状精度の改善について研究を行った。従来のダイヤモンドバイトを用いた切削法では刃先の真円度誤差が工作物に転写され、工作物に形状誤差が生じていた。そこで、図2に示すようにダイヤモンドバイトの刃先の真円度誤差に基づいて刃物軌跡を補正する方法を開発した。この方法においては、ダミーサンプルによる第一次加工後の形状を計測し、ダイヤモンド・アールバイトの刃先の真円度誤差分布を分析し、次に工具軌跡の修正を行い高精度化を図る。検証実験では、ステンレス鋼に無電解ニッケル・メッキを施した金型を用いて形状精度の改善について実験を行った。その結果、バイトの刃先に $1\sim 5\mu\text{m}$ の真円度誤差が存在する場合でも、 $0.1\sim 0.2\mu\text{mP-V}$ の精密加工が可能となり、加工誤差が従来法より $1/10\sim 1/20$ に改善されることが明らかとなった。また、真円度精度の劣るアールバイトを用いても精密加工が可能となるため、約25%の加工コスト削減が可能であることを示唆した。

第3章では、硬質脆性材料の研削加工における形状精度の改善について研究を行った。従来のダイヤモンド砥石を用いた研削加工により、超硬合金(WC)や炭化珪素(SiC)などのセラミックス材料を非球面研

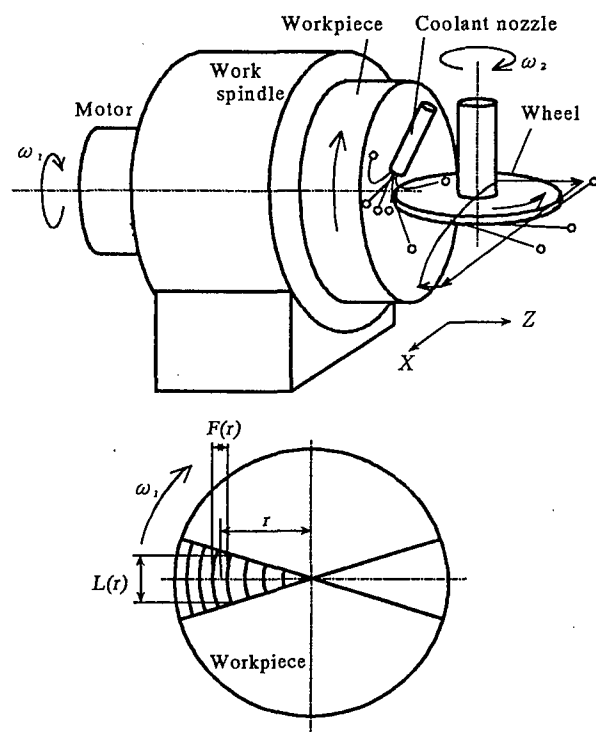


図3 工具送り速度制御法による研削加工

削する場合、砥石送り速度が一定であるため単位時間当たりの研削除去量が変動するため、研削抵抗の変動も極めて大きくなる。その結果、砥石や工作機械支持系の弾性変形量に大きな変化が生じるため、砥石と工作物の相対位置関係が安定せず、数 μm の形状誤差が生じていた。そこで、図3に示すように工作物の単位時間当たりの除去量が一定となるように砥石送り速度を制御することにより、研削抵抗の一定化を図る非球面研削システムを開発した。本システムを用いた検証実験では、軸対称で $\phi 60\sim 80\text{mm}$ のセラミック型、 $\phi 0.8\text{mm}$ のセラミック型、また大型(反射有効面積 $380\text{mm}\times 83\text{mm}$)で非軸対称ガラスミラーの研削実験を行い、砥石送り速度制御法が非球面形状の研削において有効であり、形状誤差が従来法より $1/2$ 以下に改善されることを明らかにした。

第4章では、研削加工後の工作物の表面粗さをさらに改善する研磨法について研究した。従来用いられている風船状ポリシャによる均等研磨法では、空気圧を利用して機械的圧力を負荷する構造であるため圧力分布を完全には均等にすることができず、形状精度の悪化を防ぐことができなかった。そこで、図4に示すように磁性流体を利用して電気的な磁力で加工圧を得ることのできる新しい均等研磨法の開発を行った。本研究では初めに、磁性流体に対する運動方程式から加工圧の理論式を誘導し、加工圧発生メカニズムを明らかにした。次に、ガラス、硬質脆性材料のニオブ酸リチウム(LiNbO_3)単結晶を用いた検証実験を行った。その結果、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の研磨量の均等性と $0.01\mu\text{mRmax}$

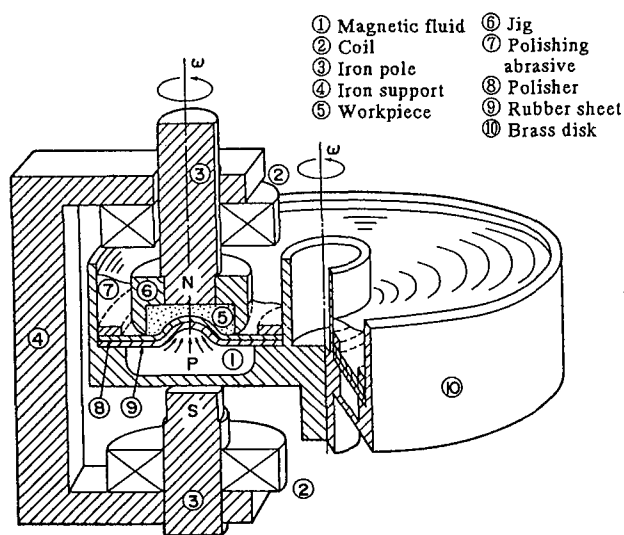


図4 磁性流体利用の均等研磨法

以下の表面粗さが得られ、その非球面研磨への適用の有効性を明らかにした。

第5章では、研削加工後の工作物の表面粗さと形状精度をさらに改善する研磨法について研究した。このような場合、微小回転工具を工作物表面上を走査し、工具滞留時間を制御して形状精度と表面粗さを改善することが行われていたが、従来法では、工作物の加工点における傾き角の変化に伴い、法線方向加工圧の変動が生じて形状誤差が生じていた。そこで、図5に示すように、微小な回転工具を有する研磨ヘッドを備えた5軸駆動の研磨装置および計測・加工システムを開発した。本開発装置の特徴は、工具回転軸が加工面上の加工点における法線方向に対して常に一定の角度を保ち、また、定圧制御機構を備えていることである。初めに、コンピュータ制御研磨法による形状創成理論に基づいて、工具の単一加工痕形状による形状修正能力についてシミュレーションを行い、単一加工痕と形状修正の効率の関係を明らかにした。次に、軸対称の非球面と非軸対称の非球面について検証実験を行った。本実験では、軸対称のガラス（BK7）製および単結晶Si製レンズの非球面創成研磨実験を行った。さらに、非軸対称の大型（反射有効面積380mm×83mm）の合成石英製楕円体ミラーの研磨実験を行った。検証実験の結果、加工物の最大傾きが30°以上の場合でも良好な形状精度と表面粗さが得られ、その非球面研磨への適用の有効性を明らかにした。特に形状誤差は1/2以下に改善されることを示した。

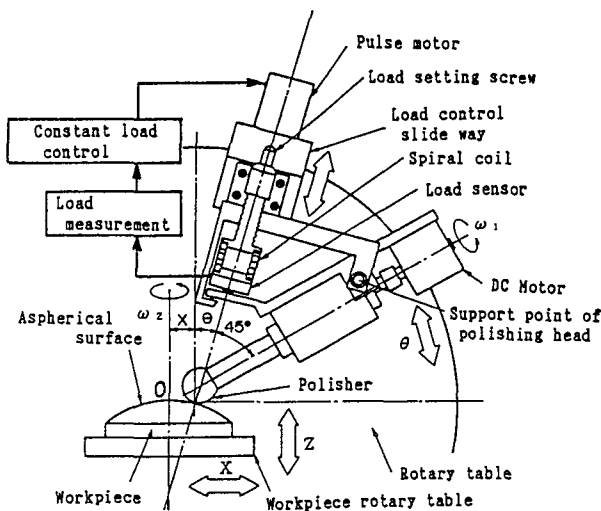


図5 微小工具研磨法

第6章では、加工物の形状精度を機上で測定する方法について研究を行った。従来の測定装置では測定長が短く、加工機から取り外して測定する必要があるなどの問題点があった。そこで、図6に示すように鏡面加工機上で高精度に測定できる機上測定システムを開発した。非球面光学部品を切削法、研削法、研磨法などにより高精度加工する場合、その加工プロセスにおいて加工物の加工形状誤差分布を加工後にポストプロセスで測定し、その測定データに基づいて形状修正する方法は非常に有効となっている。したがって、加工形状精度を向上させるには、その目標加工精度以上の精度の測定技術を確立することが重要となっている。本測定システムでは、先端にサファイア球を備えた測定プローブが加工機の工具台横に設置されており、空気静圧軸受けにより一定荷重で測定物に接触させて測定が行われる。そして、そのプローブをNCプログラムにより加工面の母線に沿って駆動させて、その偏差を差動トランスにより測定し、パソコンに取り込まれて最小自乗法により形状誤差曲線が計算される。本測定システムを用いて校正球による測定形状精度の評価を行った結果、 $\pm 0.04 \mu\text{m}/\phi 30\text{mm}$ の測定精度が得られ、従来の測定装置より測定誤差は約1/2に改善されることを明らかにした。さらに、本機上測定法を用いて加工実験を行った結果、加工誤差が $0.1 \mu\text{mP-V}$ 以下になり、従来より加工精度と加工時間が改善されることを示唆した。

以上の成果は今後、次世代の光通信機器、情報機器、マルチメディア用機器などの新しい光学部品の開発に展開されるものと考えられる。

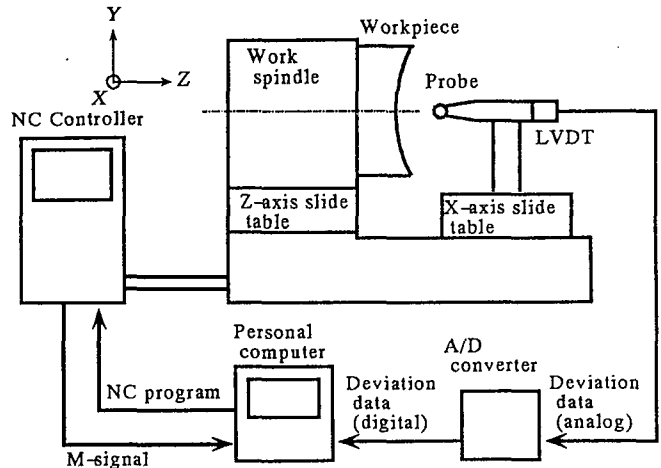


図6 機上形状測定システム

論文審査の結果の要旨

非球面レンズや非球面ミラーなどの非球面光学部品は光学製品の軽量化に不可欠であるが、加工の高精度化と低コスト化が大きな課題となっている。著者は、最近多様化している各種非球面加工の精度向上を目的として、切削から研削、研磨にわたり広範な研究を行っている。本論文はその成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、ダイヤモンド切削において、アールバイトの刃先形状誤差をダミー加工から逆算し、NCプログラムを補正することによって加工精度を大幅に改善す手法を提案している。そしてこれを、単結晶ゲルマニウム製フレネルレンズの加工に適用し、 $1\mu\text{m}$ 以上の形状誤差をもつバイトを使用しても約 $0.2\mu\text{m}$ の加工精度が得られることを実証している。これは、ダイヤモンド切削における工具の長寿命化と精度向上に寄与する貴重な成果である。

第3章では、研削系の弾性変形に起因する加工誤差の低減について述べている。すなわち工作物の周速変化に伴う研削抵抗の変化が加工誤差の要因であることを明かにし、単位時間あたりの材料除去量が一定になるよう砥石送り速度を操作する研削システムを開発し、加工精度の改善を実現している。

第4章では、従来のエアバルン式に代わる磁性流体を用いた新しい均等研磨法の開発について述べている。前加工面の形状精度を維持しながら表面粗さの向上を図る均等研磨法では、加工面全体にわたり単位時間あたりの研磨量を一定にする必要がある。そこで磁性流体の運動方程式から加工圧の理論式を誘導し、加工面全体にわたり加工圧を一樣にする磁極形状の設計指針を示した。この手法を、ダイヤモンド切削を行ったニオブ酸リチウム単結晶製光集積スペクトルアナライザの導波路レンズの研磨に応用し、形状劣化を $0.1\mu\text{m}$ 以下に押さえながら、 $0.01\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 以下の表面粗さを実現している。これは、高能率の非球面研磨法として興味ある成果である。

第5章では、形状修正研磨法について述べている。X線ミラーなどでは、鏡面と同時に高度の形状精度が要求される。そこで研磨工具の走査速度を操作することにより、予め測定した目標の非球面形状からの差分を選択的に除去し、表面粗さの改善と同時に形状修正を行う研磨システムを開発した。これを各種光学部品の加工に応用しその性能を検証しているが、特に反射有効面 $380\times 83\text{mm}^2$ の大型X線ミラーで形状精度 $\pm 0.6\mu\text{m}$ 、表面粗さ $0.5\text{nm}R_{\text{rms}}$ を実現した。これは、今後極めて高精度の非球面加工を行う上で、注目すべき成果である。

第6章では、加工面の形状を簡単な操作により加工機上で測定するシステムの開発について述べている。これは、サファイア球のプロープを用い、加工機自体をスケールにしたもので、 30mm の測定範囲で $\pm 0.04\mu\text{m}$ の測定精度を実現している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、多様化している各種非球面光学部品の加工精度の向上を目的として各種の提案を行い、その有効性を実証したもので、精密加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。