

# 第 1 章 緒 論

## 1.1 本研究の背景と目的

超精密加工はその時代に一般に行われている精密加工よりも、一層精密な領域を目指す加工に付けられた名称で、その精度は絶対的ではなく、相対的に区分される<sup>1)</sup>。加工される材料、形状などにより得られる加工精度は異なるが、超精密加工はその最高の領域に挑戦する。しかも、加工精度は時代と共に進歩する。

超精密加工の意義は二つに分けられる。一方は精度向上による製品の高付加価値化である。それは、部品の高精度化により、製品の性能、信頼性が高まるためである。他方は先導技術からの要請に答えることにより、未踏の科学的成果を達成することにある。歴史的には超精密加工の実現により、新技術、新製品が開発されるという著しい波及効果がもたらされている。

わが国の超精密工作機械の開発の萌芽は1968年にRumbergerらによりMachine Design誌に発表された「静圧ねじ」に関する文献<sup>2)</sup>に示された「夢の工作機械」の内容にあったと考えられる。工作機械の全ての運動要素、すなわち、主軸、直線案内、送りねじに静圧軸受を採用することによって、加工精度を飛躍的に向上できることが提案された。

これを受けて、わが国では、製品性能の向上のための特定の超精密部品の超精密専用工作機械の開発が進められた。1970年代は情報化の先駆けの時代であり、事務機器、コンピュータ周辺機器などにアルミニウム合金などの軟金属からなる超精密加工部品が組み込まれるようになり、表面粗さと形状精度の向上に技術革新が求められ、感光ドラム<sup>3)</sup>、磁気ディスク<sup>4)</sup>、ポリゴン反射鏡<sup>5, 6)</sup>などの量産用に専用の超精密旋盤が開発された。

1980年代になると、超精密加工の用途が光学部品に発展し、平面や円筒のような単純な形状を鏡面に切削するだけでは需要を満たせなくなった。その例はCD（コンパクトディスク）に見られる。CD装置が急速に普及したのは、それに組み込まれる小径で、高精度な非球面レンズが超硬合金の金型を用いた成形技術により廉価に量産可能となったという背景がある。これには、軸対称非球面形状の金型を、光学面に、高能率に研削加工できる数値制御超精密研削加工機が開発されたこと<sup>7-9)</sup>が大いに貢献した。

超精密加工の最先端のニーズはX線用反射鏡である。次世代の半導体素子には $0.1\text{ }\mu\text{m}$ オーダの線幅が要求され、そのための露光装置の光源にはシンクロトロン放射(SR)のX線を採用することが計画されており、その集光系に大型の斜入射X線反射鏡が不可欠であるとされている<sup>10)</sup>。この反射鏡には高エネルギーのX線が照射されるので、熱伝導が良く、熱変形が小さく、耐熱性に優れた気相成長炭化けい素(CVD-SiC)が用いられる<sup>11, 12)</sup>。その形状は非軸対称・非球面からなる三次元自由曲面であり、サブミクロンの形状精度とオングストロームの表面粗さが要求される。

CVD-SiCはぜい性材料であり、通常の研削では、ぜい性破壊を起こし、研削面は光学面にできないとされてきた。したがって、これまで、これらの材料を反射鏡に加工するには、微細な遊離砥粒を用いて、工具の滞留時間をコンピュータ制御する研磨機により表面粗さとともに形状も仕上げられている<sup>13)</sup>。しかし、この加工法は著しく能率が低いことが問題である。

これらの反射鏡の超精密加工の生産性を向上するには、前工程で最終形状に近いニアネットシェイプに研削加工することが不可欠である。しかも、研削面にぜい性破壊のない光学面に延性研削することが要求される。ところが、これまでの研究は、カップ型ダイヤモンド砥石を装着したマシニングセンタを用い、窒化けい素などの構造材料であるセラミックスを研削し、鏡面を得る基礎的な研究が主であり<sup>14)</sup>、CVD-SiCからなる斜入射反射鏡を研削加工でサブミクロンの形状精度に仕上げた研究報告<sup>15)</sup>は稀である。斜入射X線反射鏡は長さが $500\text{ mm}$ 以上あり<sup>16)</sup>、大型で、非軸対称・非球面である。このような反射鏡の形状を超精密研削加工するための大型の数値制御超精密研削加工機は少なくとも国内には存在しないので、新たに開発する必要がある。この加工機は $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 以下の分解能のセンサを用いて数値制御されるが、クローズドループに含まれず、制御されない誤差が残るから、加工機は高精度、高剛性、低熱変形である必要がある。しかも、加工機の構成要素は従来機に比較して大型になるにもかかわらず、高精度を要求されるから、機械的に誤差を修正する機構、装置を開発する。

工作物が大きいと、加工機も大型になり、その主要な構造部に用いられる鋼材の熱変形は、設置環境の温度が $1\text{ K}$ 変化すると、 $10\text{ }\mu\text{m}/\text{m}$ 以上となり、工具と工作物間の熱変位をサブミクロン以下に抑えるのは容易ではない。そこで、空調した恒温室内に機械を設置する<sup>17)</sup>。しかし、機械に内蔵される運動要素での

潤滑油の摩擦，圧力降下による発熱により，恒温室に機械を設置しただけでは機械の熱変形を抑制するには不十分であるので，超精密油温制御装置付ポンプユニットを用いて発熱を吸収する対策も行われている<sup>18)</sup>。

機械精度を高め，機械の設置環境を整備しても，研削に伴う砥石摩耗，研削抵抗による工作物の弾性変形，研削熱による工作物の熱変形などのため形状誤差が生じ，また多刃の工具である砥石の材料除去特性は定量的に把握できないので，砥石の軌跡を正確に制御しても必ずしも形状精度を達成できるとは限らない。そこで，加工後に機上で形状誤差を測定し，加工用NCデータを補正し，形状精度を向上させるオンマシン計測・補正システムが搭載される<sup>19)</sup>。

ぜい性材料であるCVD-SiCからなる大型斜入射反射鏡をナノメータの表面粗さの光学面で，サブミクロンの形状精度の非軸対称・非球面に超精密研削するためには，砥石の弾性変形も無視できない。そこで，ぜい性材料を形状創成でき，かつ延性研削可能な超精密研削加工技術の確立が望まれる。

このような背景に基づいて，本研究では，（１）非軸対称・非球面の加工法を検討し，（２）高剛性で，超精密な大型数値制御研削加工機を設計・製作して，（３）温度変化を安定化させた恒温室に設置し，（４）オンマシン計測・補正により再現性のある系統誤差を除去できるシステムを搭載し，（５）ぜい性材料の延性研削条件を確立した上で，（６）最終的には，CVD-SiCからなる大型の楕円筒面形状反射鏡とトロイダル面形状反射鏡を加工し，ぜい性材料を非軸対称・非球面に延性研削でき，ナノメータの表面粗さとサブミクロンの形状精度が実現できる研削加工技術を確立することを目的とする。

## 1.2 本論文の概要

本研究は非軸対称・非球面加工用の数値制御超精密研削加工機を設計・製作して、実験によりその性能を評価し、ぜい性材料であるCVD-SiCからなる斜入射X線反射鏡をサブミクロンの形状精度とナノメータの表面粗さの光学面に加工する超精密研削加工技術を確立することを目的とした。

本論文の概要を各章毎に示すと、以下のようなものである。

第1章「緒論」では、「本研究の背景と目的」および「本論文の概要」について述べた。

第2章「非軸対称・非球面X線反射鏡の加工法」では、短波長のX線を全反射させる鏡の形状について説明し、非軸対称・非球面の超精密加工が不可欠であることを示した。次いで、反射鏡の形状精度、表面粗さなどに対する要求精度、材料についても言及した。さらに、非軸対称・非球面の加工法、砥石の断面形状誤差が加工精度に影響しない機械構成、そのための制御軸数と配置を検討して、仕様を決定するとともに、超精密研削加工機を構想した。

第3章「超精密研削加工機の要素の設計と評価」では、反射鏡に要求される形状精度は $0.1\text{ }\mu\text{m}$ オーダーであるから、研削加工機は砥石を数値制御により $0.01\text{ }\mu\text{m}$ /パルスの分解能で位置決めするが、制御ループに含まれない非制御域の誤差は機械的に防止する必要がある。そのために、運動要素、構造体、周辺機器および機械設置環境について、運動誤差、弾性変形あるいは熱変形を低減する方策を検討した。

砥石軸については、静圧軸受のラジアル剛性を高めるため、スピンドルの曲げ剛性の検討を行った。次いで、軸受の摩擦、潤滑油の圧力降下による発熱を算出し、熱変形防止のための材料の選定、モータの振動と発熱を遮断する粘性カップリング、軸受での発熱を吸収する静圧軸受の構造の設計を行い、さらに、潤滑油の冷却効果を実験により評価した。

直線案内については、ガイドレールの加工誤差を微小変形機構とレベリングブロックを用いて修正し、テーブルの運動精度を向上させた結果およびボールねじの振れと心違いに起因するテーブルの蛇行を一体切欠き構造のフローティングプレートにより $1/100$ に低減させた結果について述べた。

また、熱変形を低減するために、静圧軸受の潤滑油の発熱を吸収する超精密油

温制御装置付ポンプユニットを開発し、 $\pm 0.005\text{ K}$ の温度制御に成功した結果と、機械設置環境の温度変化による構造体の熱変形防止のための恒温室の効果についても報告した。

第4章「オンマシン計測・補正システム」では、まず、非軸対称・非球面加工用の5軸制御のための自動プログラミングのアルゴリズムについて触れ、加工後に機上で形状誤差を測定し、加工に用いた工具経路データから誤差を相殺し、加工精度を向上させるオンマシン計測・補正システムを流れ図に基づき説明した。

第5章「ぜい性材料の延性研削」では、反射鏡の材料であるぜい性材料をダイヤモンド砥石を用いて、サブミクロンの形状精度とナノメータの表面粗さに延性研削するために行った実験結果について示した。ぜい性材料をサブミクロンの形状精度に研削することを要求されると、砥石の弾性変形も無視できないことを明らかにし、CVD-SiCを平面研削し、レジノイドボンド、ビトリファイドボンド、ブロンズボンドの3種類の結合剤の中からブロンズボンドを選定した経緯について述べた。ぜい性材料であるCVD-SiCをぜい性破壊のない光学面に延性研削するため、粒度の異なる4種類の砥石について、研削条件を変えて加工し、ぜい性破壊面積率および表面粗さとの関係について調べた。CVD-SiCは微細な粒度#4000の砥石を使用し、 $3000\text{ mm/min}$ 以下の工作物速度で研削すれば、ぜい性破壊を起こさないことが分かった。さらに、砥粒切れ刃高さの不ぞろいによってもぜい性破壊が生ずること、切れ刃高さをそろえるには焼結SiCを研削し、切れ刃先端を機械的に摩耗させるドレッシング法が効果があることを明らかにした。このドレッシング法をCVD-SiCよりもぜい性であるZerodurにも応用した結果、延性研削が可能であることが判明した。

第6章「非軸対称・非球面の超精密研削」では試作したオンマシン計測・補正システムを装備した5軸制御超精密研削加工機を用い、第5章で得られた「ぜい性材料の延性研削」の結果をCVD-SiCからなる斜入射X線反射鏡の代表的形状である楕円筒面とトロイダル面の研削加工に適用し、本研究の成果を総合的に検証した結果について述べた。

第7章「結論」では、本研究により得られた主要な研究成果および結論を総括した。