

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

エンドミルの微小切込み切削によるステンレス鋼の表面改質に関する研究

熊本大学大学院自然科学研究科 産業創造工学専攻 先端機械システム講座

( 主任指導 坂本 重彦 准教授 )

論文提出者 川村 浩二

主論文要旨

近年、情報化社会は目覚ましい発展を遂げており、この発展を支えているのが半導体である。半導体は携帯電話、家電製品、自動車、医療機器など日常生活の様々なところに使用されている。これらの半導体デバイスの 2016 年度の世界市場規模は約 30 兆円、半導体製造装置の 2016 年度の世界市場規模は約 4 兆 5000 億円であり、今後も電気自動車関連、エネルギー分野（スマートグリッド）、センサーネットワークの広がりなどにより、更なる成長が予想される。しかし、現状の半導体製造技術は、これまでのようにトランジスタの集積密度を上げるのが難しくなっている。そのため、今後の半導体製造技術の方向性は、高性能の追求よりも高品質なものを低価格で安定供給することが求められるようになる。このことは、これまで半導体産業の発展に大きく貢献してきた超精密加工（切削加工・研削加工）技術、成膜技術、真空技術などの周辺技術にも大きく影響すると考えられる。従って、これからの半導体製造の現場では、高品質と低価格の両立が要求される。本研究では、これまでの超精密切削加工に関する多くの研究が行われたアルミニウム合金や銅合金などの軟質材料の単結晶ダイヤモンド工具による加工をより製造現場に近づけて、半導体製造のための各種装置部品に幅広く使用されているオーステナイト系ステンレス鋼の超硬工具による切削加工を行い、これらの部品の機能向上とコストダウンの両立を実現するための超精密切削加工技術の確立を目指す。

超精密切削加工は、高精度な工作機械の運動と極めて切れ味のよい工具の輪郭を被削材に転写することである。その加工精度は寸法・形状精度については、 $1\ \mu\text{m}$  以下、仕上げ面粗さについては  $0.01\ \mu\text{m}$  に達している。このレベルは一般の切削加工の精度と比較すると 2 桁以上の差がある。しかし、超精密切削では形状精度は数～数十  $\mu\text{m}$ 、切りくずの厚さは  $1\ \mu\text{m}$  以下が普通である。そのため、従来は切削現象をかなり大きな規模の変形・破壊現象として取り扱え、特に問題にならなかった種々の加工精度低下の要因が相対的に大きく現れてくることになる。実際に超精密切削を行う際には、仕上げ面性状が切削工具の個体差や被削材の特性などによって大きく変化することが挙げられる。このような切削機構の解明にあたっては、工具切れ刃近傍の微視的変形・破壊現象に基づく仕上げ面の形成過程を対象

とした新しい知見が必要になる。

本研究で対象とする半導体製造装置部品は、半導体やフラットパネルディスプレイの製造工程における化学蒸着法およびドライエッチングにおいて導入される各種ガスの流量制御機器の部品である。これらの部品は、半導体製造工程内において温度変化や雰囲気変化など厳しい環境にさらされる。このため加工後の部品は、寸法および形状などの幾何学的品質の要求事項を満たすだけでは不十分で、加工面近傍の残留応力や材料組織など加工面品位 (Surface Integrity) も考慮しておくことが重要である。

このような製品仕様を満たすため、一般的には切削加工で曲面などを含む様々な形状の加工を行い、精度要求のきびしい箇所は研削加工で高精度の仕上げ加工を行っている場合が多い。さらに、必要に応じて表面特性を向上させるため、ショットピーニングや高周波焼入れなどの表面処理が行われている。しかし、これらは専用装置が必要であり、多くの場合は部品加工を行う企業から表面処理ができる企業に外注している。このため、別工程による製品価格の上昇、製品品質の管理および生産リードタイムの延長が困難になるという問題がある。そこで、近年注目を集めている加工法がバニシング加工である。

バニシング加工は、塑性変形を利用して表面粗さを改善する手法として、古くから活用されている。日本において、バニシング加工の研究が多く行われたのは、(株)スギノマシンのローラバニシング工具が開発されて以降であるが、ローラバニシングの起源は 1930 年代にドイツで考案されて実用化されたのが始まりとされる。我々はエンドミルの微小切込み切削加工によるバニシング作用を活用し、マシニングセンタ上の加工工程のみで段取り替えなしに高品位な加工面を実現できる新たな精密加工法であるエンドミルバニシング法を提案している。

本加工法を用いれば、マシニングセンタ上の加工工程のみで、生産性を低下させることなく加工面に高い圧縮残留応力を有する高硬度で良好な平滑面を実現することが可能である。切削加工後の表面処理の主流であるショットピーニングと比較して、高精度、低価格および短納期を実現できる。また、バニシング工具と比較しても、別途専用工具を購入する必要がなく、エンドミル 1 本で高精度な形状創成と圧縮残留応力を有する高品位な加工面が実現でき、非常に効率的である。

本論文では、半導体製造装置部品、自動車部品などに使用されており、更なる使用用途の拡大が期待されるオーステナイト系ステンレス鋼について、より実用的な技術を見出すことを目的に、我々が提案した微小切込み切削であるエンドミルバニシング法による仕上げ面の高付加価値化を低価格および短納期で実現するための実験的な検討を行った。

本研究で行ったエンドミルの微小切込み切削によるステンレス鋼の表面改質に関する検討結果を以下に示す。

第 2 章「微小切込み切削が仕上げ面性状に及ぼす影響」では、我々が提案している微小切込み切削であるエンドミルバニシング法による加工面の高付加価値化を実現するため、前加工およびエンドミルバニシング加工後の仕上げ面性状について検討した。まず、前加工後の加工面の状態を把握するため、輪郭形状、表面粗さ、切削抵抗および合力が作用する角度を測定した。その結果、工具半径方向切込み量  $Rd = 50 \mu\text{m}$  以下になると、輪郭形

状精度に影響を与える切削抵抗  $F_y$  の差は小さくなり、アップカットおよびダウンカットの切削方式による輪郭形状精度の差異は  $1\ \mu\text{m}$  以内になることがわかった。また、前加工条件で表面粗さを測定したところ、新品工具のダウンカットにおいて、 $R_a = 0.398\ \mu\text{m}$ 、 $R_z = 2.081\ \mu\text{m}$  になった。このときの加工面を観察したところ、1 刃毎の刃径のばらつきが存在した。そのため、工具刃先真円度を測定してばらつきの小さくなる切削距離が  $260\ \text{m}$  であることを示した。切削距離  $260\ \text{m}$  の工具でエンドミルバニシング加工を行ったところ、切削速度  $V_c = 20\ \text{m/min}$ 、1 刃当たりの送り量  $f = 2\ \mu\text{m/tooth}$  の加工条件において、 $R_a = 0.080\ \mu\text{m}$ 、 $R_z = 0.400\ \mu\text{m}$  で、前加工後の加工面と比較すると  $R_a$ 、 $R_z$  は  $1/4$  以下になり、良好な平滑面が得られることを確認した。

第 3 章「微小切込み切削が加工変質層に及ぼす」では、エンドミルバニシング加工により生成した加工変質層の表面硬度、残留応力および材料組織の測定を行った。ビッカース硬度試験の結果より、エンドミルバニシング加工を行うと  $350\ \text{HV}$  以上の高硬度を有する仕上げ面になることがわかった。切削速度  $V_c = 20\ \text{m/min}$ 、1 刃当たりの送り量  $f = 2\ \mu\text{m/tooth}$  の加工条件において、もっとも高い表面硬度  $492\ \text{HV}$  になるとともに、X 線による応力測定で  $1191\ \text{MPa}$  の高い圧縮残留応力が得られることがわかった。加工変質層の深さ方向の組織観察結果より、加工変質層の深さは  $10 - 18\ \mu\text{m}$  程度であることがわかった。また、前加工およびエンドミルバニシング加工における工具寿命の検討も行った。前加工条件において、切削距離  $2600\ \text{m}$  になると逃げ面摩耗幅が  $18.3\ \mu\text{m}$  に増加し、刃先に微小なチップングが数多く発生する。そのため、工具寿命は  $2600\ \text{m}$  程度であるとした。また、エンドミルバニシング加工において、逃げ面摩耗幅と表面硬度の関係を示し、逃げ面摩耗幅の管理が重要であることを示した。切削速度  $V_c = 20\ \text{m/min}$ 、1 刃当たりの送り量  $f = 2\ \mu\text{m/tooth}$  の加工条件において、切削距離  $100\ \text{m}$  になると  $3.3\ \mu\text{m}$  程度のチップングが確認され、チップングの影響で工具軸方向の表面粗さが大きくなることを示した。

第 4 章「微小切込み切削が相変態に及ぼす影響」では、エンドミルバニシング加工により生成した加工変質層の結晶構造の分析を行った。X 線回折試験の結果より、エンドミルバニシング加工後の加工面は加工条件によりマルテンサイト相が誘起されることがわかった。マルテンサイト相が誘起する要因として、加工時の切削熱や切削力によって相変態に必要なエネルギーの付与が起こっていると考えられる。そのため、熱画像測定装置で温度測定、切削動力計で切削抵抗の測定を行った。温度測定の結果より、エンドミルバニシング加工時の工具の最高温度は  $20.8^\circ\text{C}$ 、被削材の最高温度は  $19.2^\circ\text{C}$  であり、マルテンサイト相が誘起する要因として、熱影響は小さいと推測された。切削抵抗の測定結果より、1 刃当たりの送り量  $f = 10\ \mu\text{m/tooth}$  の加工条件において、マルテンサイト変態に利用された切削抵抗とマルテンサイト比率は相関関係にあることがわかった。X 線の入射角度を固定した X 線回折試験の結果より、切削速度  $V_c = 20\ \text{m/min}$ 、1 刃当たりの送り量  $f = 2\ \mu\text{m/tooth}$  のエンドミルバニシング加工後の加工面において、加工表面層のマルテンサイト比率が高く、表面層から離れるにつれてマルテンサイト比率が減少することを示した。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章まで得られた主要な結論を要約し、総括した。