

氏名	水野 雅裕		
授与学位	工学博士		
学位授与年月日	平成3年3月28日		
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 精密工学専攻		
学位論文題目	外周刃ブレードによる精密研削切断に関する研究		
指導教官	東北大学教授 庄司 克雄		
論文審査委員	東北大学教授 庄司 克雄	東北大学教授 加藤 正名	
	東北大学教授 加藤 康司	東北大学講師 厨川 常元	

論文内容要旨

第1章 序 論

外周刃ブレードによる精密研削切断は、半導体やセラミックスをはじめとする硬脆材料の切断において、最も一般的に用いられている加工方法である。この切断法は、砥粒を用いた他の切断法に比べ、加工能率が良く、しかも切断精度が比較的高いという優れた特徴を持っており、その需要は今後ますます増えていくことが予測される。

外周刃ブレードを用いた精密研削切断では、ブレードが薄ければそれだけ切断ロスや研削抵抗が小さくなるため、刃厚をできるだけ薄くしたいという要求は強い。しかしその場合、切断中、ブレードに刃厚方向の弾性変形（以下、混乱のない限り、単に弾性変形と呼ぶ）が生じ易くなり、それが切断精度を劣化させる主要因になる。ここで「切断精度」とは、切断軌道の曲がり（真直度）や理想的な切断軌道からの偏位、切断面の平坦度（平面度）を総合的に指している。外周刃ブレードによる精密研削切断は、研削形態はカットオフ研削やクリープフィード研削に類似している。しかし、そのような弾性変形が切断中に生じた場合、ブレード外周だけでなく側面も研削に関与するため、研削機構は全く異種のものになる。したがって、外周刃ブレードによる精密研削切断の諸現象を正しく理解するには、カットオフ研削やクリープフィードのような2次元的な研削機構の考察では不十分であり、3次元的な考察が必要になる。

本論文は、切断精度に影響を与える要因として特にブレードの弾性変形を取り上げ、ブレードに弾性変形を生じさせる要因としてブレード外周断面の非対称摩耗（以下、偏摩耗と呼ぶ）の影響が大きいことに着目した。そしてブレード外周が偏摩耗しているとき、ブレードにどのような研削抵

抗が作用し、その結果ブレードにどのような弾性変形が生じ、それによってどのような切断溝や切断面が創成されるか、また、切断面の平坦度、切断軌道の曲がりや偏位に対してそれがどのように影響するか、また、切断面の平坦度、切断軌道の曲がりや偏位に対してそれがどのように影響するか、さらに研削条件との関係はどうかなどについて議論する。

第2章 ブレードの弾性変形と偏摩耗

従来、外周刃ブレードによる精密研削切断の研削機構は、切断中にブレードが曲がらないものとして、2次元的なモデルで考えられていた。ところが抵抗線ひずみゲージを外周刃基部の両側面に貼付し、ブレードの弾性変形を観測しながら切断を行ったところ、ブレード最外周が最大で約150 μm も刃厚方向に変位している様子が観測された。また、その弾性変形は工作物と直接接触している部分の前後約10mm以上に及んだ。さらに、下向き切断において、ブレード外周が直接研削しなくなっても、ブレード側面刃工作物と弾性接触し、ブレードの弾性変形が継続することがわかった。この実験から、外周刃ブレードによる精密研削切断の研削機構は、3次元的なモデルで考える必要があることが明らかになった。

そのようなブレードの弾性変形の要因のひとつとして、偏摩耗の影響を取り上げて調べた結果、偏摩耗は弾性変形の支配的要因であり、切断面形状にも大きな影響を与えることが明らかになった。

次に、ブレードが弾性変形した状態で切断が行われたときの切断面の創成機構を明らかにするため、ブレード外周に故意にテーパをつけて切断を行った。そして、1パスの切断における研削抵抗の3分力と、切断を中断したときに得られる切断面形状から、研削領域でのブレードの弾性変形状態を推定した。その結果、切断開始直後に研削に関与するのは、ブレード外周および湾曲したブレードの内側の側面だけで、外側の側面は工作物と接触しないことがわかった。しかし、切断の進行に伴って、湾曲したブレードの外側の側面が研削に関与するようになり、それに起因する側面力によって、ブレードの弾性変形はブレードに作用する全側面力とブレードの曲げ抗力が釣り合うまで増幅する（以下、ブレードの弾性変形が定常状態に達したときの切断を定常切断と呼ぶ）ことがわかった。このように外周刃ブレードによる精密研削切断では、ブレード外周において発生する研削抵抗よりも、むしろ側面において発生する研削抵抗の方がブレードの弾性変形に対して強く影響すると考えられる。また、定常切断時におけるブレードのたわみは、接触弧の中央付近で最大となり、ブレードは研削領域においてテーブル送り方向に緩やかに湾曲した形状になることがわかった。さらに、ブレードがそのように湾曲した状態で切断が行われた場合、湾曲したブレードの外側の切断面は、ブレード側面やダイヤモンド層内周エッジによって修正されるので、比較的平坦度の高い切断面になることがわかった。

第3章 ブレード外周に作用する研削抵抗の解析

研削除去量の増加に伴い、ブレード外周に生じる偏摩耗はブレードの弾性変形の支配的要因であることが第2章で明らかになった。そのような、偏摩耗と弾性変形の間関係を議論するためには、まず、偏摩耗したブレード外周に作用する研削抵抗について明らかにしておく必要がある。

通常の研削では、研削性能について議論する際、研削抵抗の法線方向分力と接線方向分力だけが評価の対象となり、側面力はその対象になることはほとんどない。しかし、薄刃のブレードを用いる精密研削切断では、ブレードの弾性変形に直接影響するのはむしろ後者の方であり、側面力も含めた研削抵抗の3分力を理論的に考察しておく必要がある。

そこで本章では、砥粒切れ刃をブレード外周面に垂直な軸を持つ先端角 $2\bar{\alpha}$ の円錐形と仮定し、偏摩耗したブレード外周において発生する研削抵抗の3分力の理論式を導出した。また、ブレード外周に故意にテーパをつけて偏摩耗を与え、弾性変形が全く起こらない状態で研削を行うことによって、ブレード外周において発生する研削抵抗だけを取り出し、理論式の妥当性を検証した。その結果、ブレード外周において発生する側面力の総和 $F_{p,z}$ は、偏摩耗の大きさを定量化した値 K_f (偏摩耗形状係数)、テーブル送り速度、および工作物厚さなどに比例することが理論的に示され、実験により確かめられた。さらに、被削剤の比研削抵抗 $C \cdot p$ とブレード外周の砥粒切れ刃先端角 $2\bar{\alpha}_p$ を、研削抵抗の理論式と実測値から求める方法を提案した。その方法によって、実験で使用されたフェライトの $C \cdot p$ は $2400\text{N}/\text{mm}^2$ 、ドレッシング直後の $2\bar{\alpha}_p$ は約 175° であることがわかった。

第4章 ブレード側面に作用する研削抵抗の解析

切断中のブレードの弾性変形を議論するためには、ブレードに作用する全研削抵抗について明らかにしておく必要がある。そのうち、ブレード外周に作用する研削抵抗についてはすでに第3章で議論した。しかし、第2章の実験結果からわかるように、薄刃のブレードを用いる精密研削切断では、それよりもむしろブレード側面に作用する研削抵抗の方がブレードの弾性変形に大きく影響する。したがって、外周刃ブレードによる精密研削切断の研削機構を解明する上で、ブレード側面における研削抵抗を明らかにすることは非常に重要である。

そこで本章では、砥粒切れ刃をブレード側面に垂直な軸を持つ円錐形と仮定し、定常切断時においてブレード側面に作用する研削抵抗の3分力の理論式を導出した。また、ブレード外周に故意にテーパをつけて切断を行い、切断中のブレードの弾性変形状態とブレード側面における研削抵抗を測定して理論式の妥当性を検証した。その結果、ブレード側面において発生する側面力の総和 $F_{p,z}$ は、ブレードの弾性変形状態から定義される値 D_z に比例することがわかった。さらに、ブレード側面の砥粒切れ刃先端角 $2\bar{\alpha}$ を研削抵抗の理論式と実測値から求める方法を提案した。その方法によって $2\bar{\alpha}$ の初期値は約 178° であることがわかった。

第5章 定常切断時における切断溝の創成

定常切断時に創成される切断溝の断面形状や理想的な切断位置からの偏位を理論的に解析することは、偏摩耗や切断条件が切断精度に与える影響を解明する上で非常に重要である。そこで本章では、第3章と第4章で導出した研削抵抗の理論式に基づいて、定常切断時におけるブレードの弾性変形とそのとき創成される切断溝の断面形状を数値解析した。

数値解析を行う前に遠心力がブレードの剛性に与える影響を調べた。その結果、フランジからのブレードの突き出し量が刃厚の30倍以下に設定される一般的な精密研削切断では、ブレードの剛性

に与える遠心力の影響は極めて小さいことがわかった。さらに文献や簡単なモデル計算から、ブレードの振動による刃厚方向の慣性力や切断中のブレードの平面応力もブレードの弾性変形に対してわずかな影響しか与えないことがわかった。したがって、数値解析ではこれらの影響を無視した。数値解析によって求めたブレードの弾性変形状態は、第2章で実測した形状に定性的によく一致しており、これによって定常切断時の切断面の創成機構を理論的に示すことができた。また、算出したブレード形状をテーブル送り方向に垂直な平面へ正射影することにより、定常切断時に創成される切断溝の断面形状を求め、研削条件やブレードの剛性が切断精度に与える影響を調べた。その結果、実測した切断溝の断面形状と同様、湾曲したブレードの外側に創成される切断面は、ブレードが弾性変形しなかったときに創成される理想切断面からの偏位が少ない、平坦度の高い面になるが、内側に創成される切断面は垂直方向に対して凹形になることが明らかになった。また、カーブロス ϕ は主に湾曲したブレードの内側に生じ、偏摩耗形状係数 K_t 、速度比 v/V (v はテーブル送り速度、 V はブレード周速)、フランジからのブレード突出し量 ϕ 、工作物厚さ、ダイヤ層の厚さ、ブレード側面の砥粒切れ刃の頂角などの増加、刃厚 t 、ブレード径などの減少と共に大きくなり、特に ϕ と t の影響が大きいことがわかった。しかし、切込み深さ Δ は切断溝形状にほとんど影響を与えないことがわかった。さらに、単位時間当りの研削除去量を一定にして v と Δ を変えた場合、 v を小さく Δ を大きくした方が、わずかではあるが切断溝の位置精度が向上することがわかった。これらの結果は実験結果によく一致した。

第6章 結 論

本章は本研究で得られた成果を総括して述べている。

審査結果の要旨

外周刃ブレードによる精密研削切断は、薄いダイヤモンドブレードを用いた切断法のひとつであるが、セラミックスなどの硬脆材料の精密部品への応用が増えるに伴ってそれを支える重要な加工技術として位置づけられるようになった。しかし比較的新しい加工技術ということもあって、これまで工学的な立場から系統的な検討はほとんど行われていなかった。

本論文は、側面力によるブレードのたわみのために精密研削切断における加工機構は通常の研削とは全く異質なものになるという観点から、3次元的研究モデルを提案し切断面創成機構を明らかにしたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、切断中のブレードのたわみを抵抗線歪ゲージを用いて測定し、ブレードのエッジの偏摩耗が弾性変形の要因であることを明らかにした。同時に、切断を中断したときに得られる切断面形状の詳細な解析と研削抵抗3分力の記録から、切断中のブレードのたわみの状態を推測した。その結果、ブレードのたわみによってその側面が直接研削に関与するようになり、それに伴う側面力によってブレードのたわみがさらに助長されることが明らかになった。

これらの結果に基づいて、ブレードのたわみを考慮した3次元的研究モデルを提案し、砥粒切れ刃を円錐と仮定して切断抵抗の3分力を与える理論式を導いている。まず第3章では、ブレードの外周に作用する研削抵抗を解析し、エッジの偏摩耗に起因する側面力の理論式を求めた。

また第4章では、たわみによってブレードの側面が研削に直接関与するようになったときの研削抵抗を理論的に解析し、それに起因する側面力を明らかにした。これらの解析結果は、それぞれ実験的にその妥当性が確認されている。

第5章では、以上の結果に基づいて、切断中のブレードのたわみを理論的に解析し、切断溝の創成機構を解明した。その結果、切断軌道の曲がりや切断面の形状精度を定量的に議論することが可能になった。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、ブレードにたわみがあるときの切断面の創成機構を明らかにしたもので、従来、カットオフ研削やクリープフィード研削の延長線上でのみ議論されていた精密研削切断の研削に新機軸を与えるものであり、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、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。