

氏名	吳 勇波		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成9年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4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	センタレス研削に関する研究		
指導教官	東北大学教授 庄司克雄		
論文審査委員	主査 東北大学教授 庄司克雄	東北大学教授 江村 超	
	東北大学教授 加藤康司	東北大学助教授 厨川常元	

論文内容要旨

1 緒言

センタレス研削は研削系の剛性の点で非常に優れている。また工作物の取り付けや取り外しが簡単で作業の自動化が容易である。しかし一方、成円機構が複雑であるため、独特な真円度問題が発生する。

センタレス研削では、その独特の成円機構から工作物の真円度曲線には高調波振幅が重畳する。しかし、研削条件を適当に設定することによって、この成分は理論的には無視することができる。したがって、円筒研削における「精度」を「真円度」と置き換えた場合、センタと工作物のセンタ穴の真円度に左右される円筒研削と比較して、ブレードの平面度と調整砥石の真円度に依存するセンタレス研削が高精度加工という点で不利であるとは思われない。本研究では、このような観点から、1)研削現象を議論する上で必要不可欠な研削抵抗測定法の開発、2)成円過程のシミュレーション解析と最適加工条件の設定、3)研削系成円効果の評価と外乱による真円度の劣化、4)調整砥石偏摩耗による工作物精度の劣化、5)研削抵抗の動的成分の検出による研削過程のモニタリングと研削系成円効果の評価について、センタレス研削の高精度化を課題に研究を行った。

2 研削抵抗測定法の開発

研削現象を議論する上で研削抵抗の評価は不可欠である。本研究では、ブレードとストップに作用する3分力と工作物回転速度とその変化から研削抵抗の2分力を算出する方法を提案し、測定装置を試作した。図1に測定システムの構成の概念図を示す。ブレードとストップに作用する力は3分力動力計1により測定する。工作物の回転速度とその変化は工作物5の側面にセンサー用ターゲット7を取り付け、近接センサ5を用いて測定した。

研削実験を行い研削抵抗を測定した。図2は研削抵抗の法線分力 F_{cn} を工作物1回転あたりの半径切り込み量 Δ についてプロットしたものである。実験結果は、 F_{cn} は Δ と V_w の増加と共に単調に増加するという研削抵抗の一般的な傾向を示した。そこで、同じ砥石を使って同じ工作物を円筒研削して研削抵抗を直接測定する比較実験を行い、以上

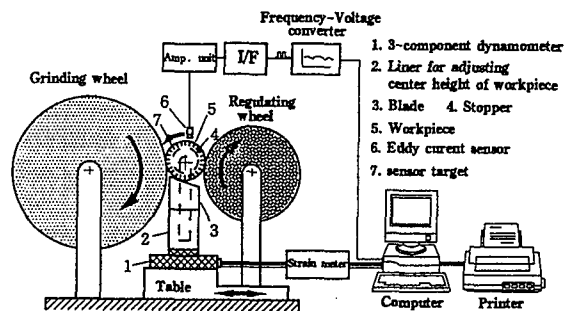


Fig.1 System diagram of grinding force measurement

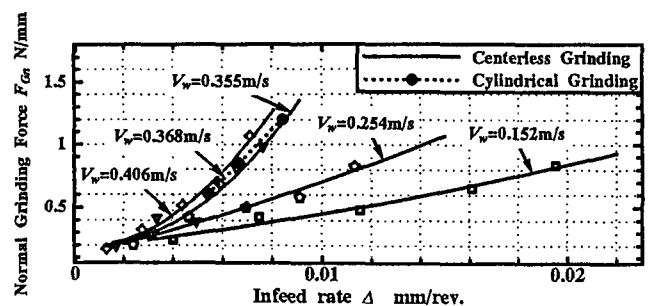


Fig.2 Relationship between grinding force and infeed rate

の測定結果を検証した。その結果を図2の破線で示した。内挿法を用いて両者を比べるとほぼ一致しており、本測定システムにより算出する方法が妥当であることが確認された。

3 成円過程のシミュレーションと最適加工条件の設定

本研究では、研削条件を考慮に入れた最適支持条件を見つけるために幾何学的条件だけではなく、研削条件をも考慮できる新しいシミュレーション法を開発した。シミュレーションと研削実験を行い、工作物の成円過程と最適加工条件を明らかにした。

シミュレーションでは、工作物を円周方向に $N=360$ 個のステップに分割し、送り込みとスパークアウトの2段階からなる研削サイクルを与えて各ステップ毎の半径減少量を計算した。初期の工作物には、円の一部に深さ $45\mu\text{m}$ のフラット部を設けたものを使用した。実験装置には図1の研削抵抗測定システムを使用した。工作物には円周の一部にフラット部を平面研削により設けた円筒体を使用した。

図3には真円度 E_r とプロファイルが研削に伴って変化の様子を示す。 E_r は初期の段階で著しく減少するが、その後は一定値に飽和する。スパークアウトに入ると更に E_r が減少するが、この場合も効果は開始直後に顕著に現れる。

加工条件とは、支持条件(γ と ϕ)と研削条件(n_w と Z')を指す。しかし γ と ϕ について、 ϕ の影響が小さいことから ϕ を一定にし γ の影響だけを考える。 κ の影響を実験的に調べるとき、 Z' を一定とし n_w だけを変えることにより κ の値を変化させた。図4は、最終真円度 E_{rm} に対する γ と κ の影響を(a)シミュレーションと(b)実験について比較した結果である。この結果によれば、 E_{rm} を最小にする γ と κ の組み合わせが存在する。

4 うねりの修正による成円と外乱による真円度の劣化

本節では、成円機構を考察した上で、うねり変化率という研削系の成円効果の評価関数を確立した。また外乱はうねりとして工作物外周面上に転写し、真円度を劣化させることも明らかになり、外乱の転写を最小限に抑制する方法をも提案した。

センタレス研削モデルでは、 N 回転研削後の工作物外周面上の山数 n のうねり $r_n(jn)$ と、初期うねり $r_0(jn)$ および周波数 n の外乱 $D_i(jn)$ ($i=1, 2, \dots, M$)との間に次の関係が成立する。

$$r_N(jn) = \kappa_r'^N(jn)r_0(jn) + r_{DN}(jn) \quad (1)$$

ここで $\kappa_r'(jn) = \frac{1}{1 + \frac{\kappa}{1-\kappa} \{1 - Z_{bn}K_1 e^{-j(\theta-\alpha)n} + Z_{rn}K_2 e^{-j(\theta-\gamma)n}\}}$ は加工条件および調整砥石の硬度に左右されるいわゆるうねり変化率である。また $r_{DN}(jn) = \frac{\kappa}{1-\kappa} \sum_{i=1}^N \kappa_r^i(jn) D_{N-i+1}(jn)$ は $D_i(jn)$ によるうねりである。さらに外乱による真円度誤差 $E_{r,D}$ は $E_{r,D} = 2.496 \sqrt{\sum_{n=2}^N |r_{DN}(jn)|^2}$ のように求められる。式(1)によれば研削後の最終うねりは初期うねりの残留と外乱の転写によるものであることがわかる。初期うねりの残留と外乱の転写の程度は $\kappa_r'(jn)$ に左右される。したがって研削

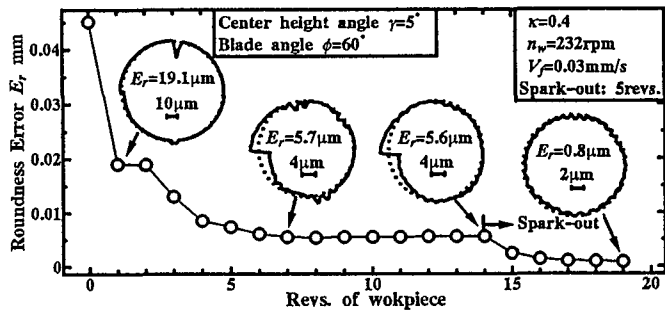


Fig.3 Variation of roundness and profile during grinding

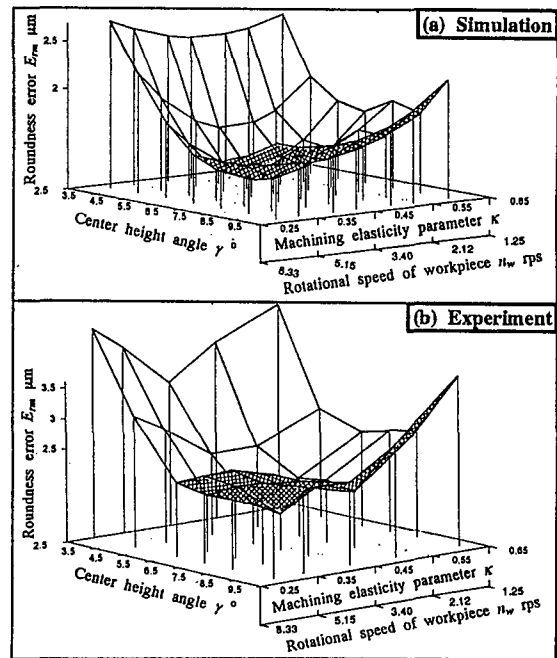


Fig.4 Influence of γ and κ on E_{rm}

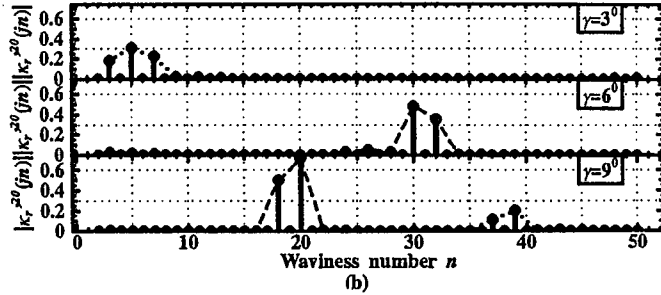
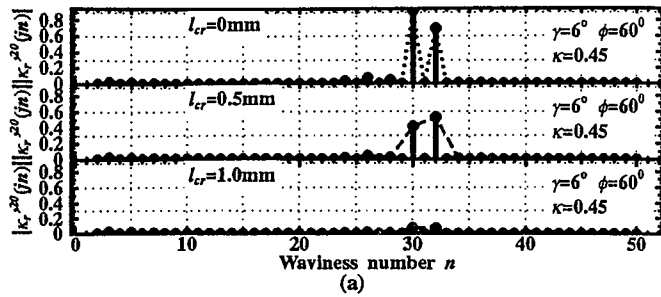


Fig.5 Influence of l_{cr} and γ on $\kappa_r^{20}(jn)$

い。図 5(b) に γ の影響を示す。心高が低いときにも高いときにも山数 20 以下のうねりの $|\kappa_r^{20}(jn)|$ が大きいので研削系の成円効果が良くない。 $\gamma=6^\circ$ の時山数 30 以上のうねりの $|\kappa_r^{20}(jn)|$ が大きい、通常の初期工作物では 30 山以上のうねりが小さいことを考えると研削後の真円度が最も良いと思われる。また $\gamma=3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ のときそれぞれ 5, 30, 20 山のうねりの $|\kappa_r^{20}(jn)|$ が最大であるので結局それぞれ 5, 30, 20 角形的工作物が形成されると推測できる。図 6 は実験結果である。工作物外周面形状と真円度への γ の影響は、上述の解析結果とよく一致する。

また実測によれば、外乱が主に研削砥石の回転と同期する周期的なものである。そこで研削砥石の単位偏心量による外周面ふれを外乱として E_{rd} の数値計算を行った。このとき、工作物 1 回転あたりの研削砥石回転数 $n_f n_g / n_w$ は外乱周波数となる。 E_{rd} の計算結果は図 7(a) のようになる。 n を整数から非整数に変化させれば、 E_{rd} がかなり小さくなり、外乱による真円度の劣化が随分抑制される。図 7(b) はこの抑制法の有効性を検証するための実験結果である。この実験結果は上述の解析結果とほぼ一致する。

5 調整砥石の偏磨耗と工作物形状精度の劣化

センタレス研削では、工作物を確実に支持するためにテーブルに垂直な平面内でわずかに傾けられる調整砥石は、工作物の円筒面とその全長にわたって接触を保持するように鼓型に成形する。このとき工作物と調整砥石間の相対周速 V_{wr} は、図 8 のように軸方向によって異なる。 V_{wr} が大きい場所ほど両者間の滑り距離が大きくなり磨耗による

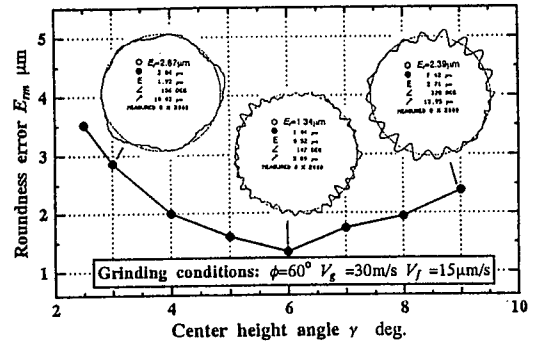


Fig.6 Influence of γ on E_{rm} and profile of workpiece

系成円効果の評価に $\kappa_r'(jn)$ を利用するのは好都合である。

図 5(a) に工作物と調整砥石との接触弧長さ l_{cr} の影響を示す。調整砥石が柔らかいほど l_{cr} が長くなるので、20 回転研削後の全うねり変化率 $|\kappa_r^{20}(jn)|$ が小さくなり研削系の成円効果が大きい。図 5(b) に γ の影響を示す。心高が低いときにも高いときにも山数 20 以下のうねりの $|\kappa_r^{20}(jn)|$ が大きいので研削系の成円効果が良くない。 $\gamma=6^\circ$ の時山数 30 以上のうねりの $|\kappa_r^{20}(jn)|$ が大きい、通常の初期工作物では 30 山以上のうねりが小さいことを考えると研削後の真円度が最も良いと思われる。また $\gamma=3^\circ, 6^\circ, 9^\circ$ のときそれぞれ 5, 30, 20 山のうねりの $|\kappa_r^{20}(jn)|$ が最大であるので結局それぞれ 5, 30, 20 角形的工作物が形成されると推測できる。図 6 は実験結果である。工作物外周面形状と真円度への γ の影響は、上述の解析結果とよく一致する。

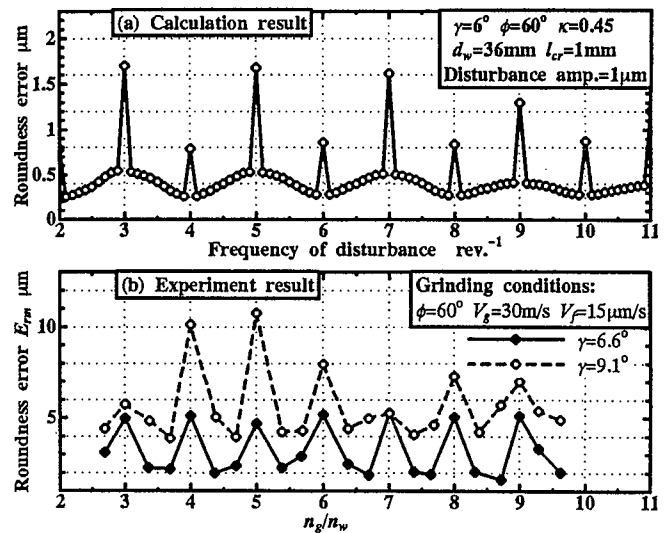


Fig.7 Influence of disturbance frequency on roundness

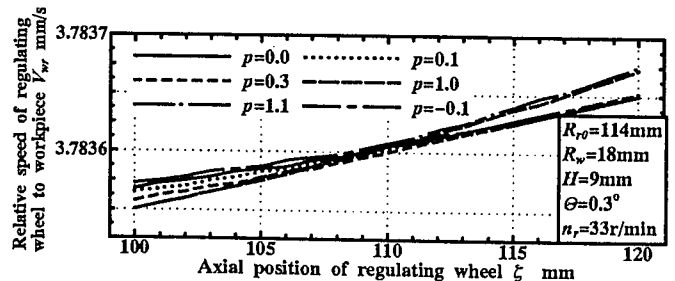


Fig.8 Variation of relative speed with axial position

半径減少が大きくなって偏磨耗が発生する。

偏磨耗が生じると、工作物にテーパが形成される。このテーパ状の工作物を研削すると、工作物の一部又は全長をブレード面から離れさせたりブレード面に落下させたりして工作物を振動させる。このような振動現象を研削中の工作物の2端面の近くにおける2カ所の上下方向の動きの測定によって観察した。図9にその測定結果を示す。このような振動が発生すると、研削砥石・調整砥石・ブレードの3者による拘束条件が満足できなくなり、研削系の成円効果が低下し、真円度を劣化させる。

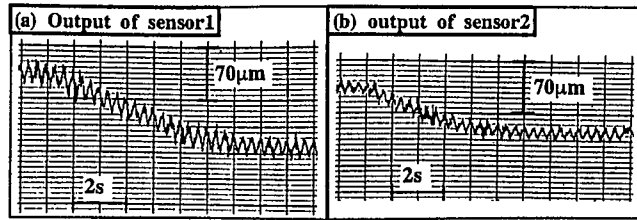


Fig.9 Results of upward motion of workpiece measurement

6 研削抵抗動的成分の検出による研削過程のモニタリングと研削系成円効果の評価

本研究では、最適加工条件の自動設定および不安定研削状態の回避を実現するため、研削抵抗の動的成分の検出によって、研削過程のモニタリングと研削系の成円効果の評価を行うことを試みた。

センタレス研削では、周波数 n の研削抵抗動的成分 $F_{Gni}(jn)$ と山数 n の外周面うねりの間には $F_{Gni}(jn) = K_s \{r_i(jn) - r_{i-1}(jn)\}$ の関係式が成立する。この式よりさらに次の関係式が求められる。

$$r_N(jn) = r_0(jn) + SF(jn) \quad \text{Where } SF(jn) = \frac{1}{K_s} \sum_{i=1}^N F_{Gni}(jn). \quad \text{い}$$

ま研削抵抗動的成分のパワースペクトル和 $P_{Fni} = \sum_{n=1}^N |F_{Gni}(jn)|^2$ を研削過程安定性の判別の時の特性パラメータとし、 P_{Fni} の変化を追跡することによって、研削過程のモニタリングを試みた。

図10はその結果の一例である。(a)の安定研削では P_{FBx} が研削につれて減少していく。真円度も $2.25\mu\text{m}$ とよかった。(b)の不安定研削では P_{FBx} が研削に伴い大きくなり真円度は $17.9\mu\text{m}$ と非常に悪かった。実験中ノイズの影響を低減するため動力計の垂直方向の出力 F_{Bx} で研削抵抗 F_{Gn} を代表させた。よって特性パラメータ P_{Fni} 、 $SF(jn)$ および P_{SF} はそれぞれ P_{FBxi} 、 $SF_B(jn)$ および P_{SFB} で代表させる。従って P_{FBxi} は研削中減少する傾向にあれば研削過程が安定状態、増加する傾向にあれば研削が不安定状態にあることを示す。

次は $SF(jn)$ とそのパワースペクトル和 $P_{SF} = \sum_{n=1}^N |SF(jn)|^2$ を安定研削状態での研削系の成円効果の評価するときの特性パラメータとする。図11は、 $SF(jn)$ と P_{SF} を求め、成円効果の評価を試みたシミュレーション結果である。(a)のように $SF(jn)$ のパターンが心高によってはっきり異なることから心高の適否はこのパターンによって判断できる。一方(c)のように、もう一つの特性パラメータ P_{SF} と真円度の対応関係は、心高の影響では良く対応していないが心高が一定であるとき外乱の

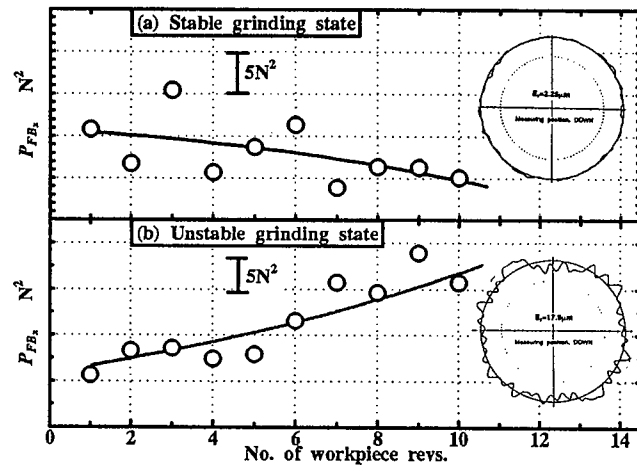


Fig.10 Variation of parameter P_{FBx} during grinding

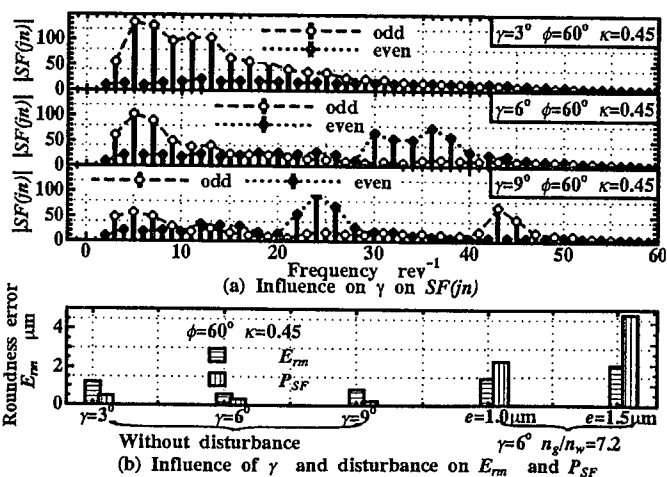


Fig.11 Influence of γ and disturbance on dynamic grinding force component and workpiece roundness

影響では良く対応している。したがって、 P_{SF} で外乱や研削条件の影響を知ることができる。図12(a)には $SF_B(jn)$ のパターンと研削後の工作物形状を示す。 $SF_B(jn)$ には周波数28の成分が一番大きい。これに対応して工作物は28角形が強調された形状となった。また、 $SF_B(jn)$ のパターンは上述のシミュレーション結果とほぼ一致している。図12(b)は、真円度への外乱などの影響を調べた実験結果である。値の大きい P_{SF} の方が値の大きい真円度誤差の方に対応している。したがって、幾何学支持条件が一定である場合、 P_{SF} から真円度を予測できる。

7 結 言

本研究では、センタレス研削の高能率化、高精度化のためには、種々の提案を行った。第2章では研削抵抗の2分力の測定方法を提案し、測定システムを試作して研削抵抗を算定した。第3章では、幾何学支持条件だけではなく研削条件をも考慮に入れたシミュレーション法を提案し、シミュレーションと実験によって工作物の成円過程と最適加工条件およびスパークアウトの役割を明らかにした。第4章では工作物外周面うねりは、加工条件や調整砥石の硬度および研削前のうねり、外乱などの要素から、どういう影響を受けるかを解析的に明らかにした。第5章では調整砥石の偏磨耗発生メカニズムとそれによる工作物の形状精度の劣化について考察した。第6章では研削抵抗の動的成分を検出し、研削過程のモニタリングと研削系の成円効果の評価を試みた。

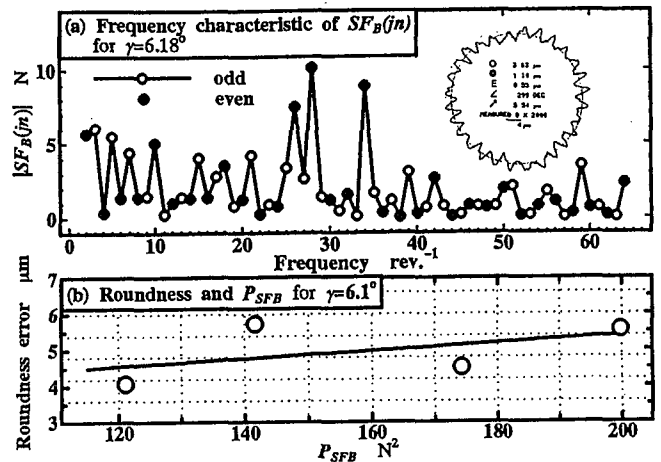


Fig.12 Relationship of dynamic grinding force component and roundness and profile of workpiece

審査の結果の要旨

センタレス研削は、円筒研削と比較して研削系の剛性が高く、高能率で生産性の高い加工法である。しかし反面、工作物の支持法に起因する独特の成円機構のため、加工精度が研削条件だけでなく工作物支持条件の影響を強く受ける。本論文は、センタレス研削における成円機構を解析的に検討し、高精度化への提言を行ったもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、研削抵抗の新たな測定法を提案している。研削抵抗は砥石と工作物の干涉状態を的確に表しており、研削状態を判断する最も基本的な現象量である。しかしセンタレス研削では、工作物の支持が固定されず時々刻々変化するために、研削抵抗を直接測定することが困難である。そこで本研究では、砥石、工作物、調整砥石、ブレード、ストッパの5者の力学的関係を基に、ブレードとストッパに作用する3分力と工作物の回転速度および回転加速度から研削抵抗の2分力を推定する方法を提案し、その測定システムを試作した。これは、研削状態のインプロセスモニタリングを可能にするもので高く評価される。

第3章では、研削系の総合剛性と研削剛性によって決まる加工弾性パラメータを導入し、幾何学的条件だけでなく研削条件も考慮に入れた工作物の成円過程のシミュレーション法を開発した。そしてこの手法を用い、真円度誤差を最小にする心高角と加工弾性パラメータの組み合わせが存在することを明らかにした。これは、最適加工条件の理論的設定が可能であることを示したもので実用上非常に有用である。

第4章は、真円度に対する調整砥石の影響について検討したものである。経験的には調整砥石は弾性係数の小さなものが良いとされ、ラバーボンド砥石が用いられているが、本研究では心高角と研削剛性によって決まる最適弾性係数があることを初めて理論的に示した。この成果は、調整砥石の設計基準を与えるもので、工業的有用性が高く評価される。

センタレス研削では、工作物の支持を安定化するために調整砥石を軸方向に傾ける。そのため軸に沿って調整砥石の周速に差が生じる。第5章では、そのような周速差に起因する調整砥石の偏摩耗について検討し、その結果生じる工作物の円筒度の劣化と工作物の振動との関係を明らかにした。

第6章では、研削抵抗の動的成分から研削過程の安定判別と研削系の成円効果を評価する方法を提案している。さらにこれは、研削抵抗の動的成分のベクトル和から真円度誤差の予測が可能であることを示しており、今後工作物の真円度をインプロセスで監視しながら、時々刻々変化する研削系を最適制御するシステムを構築する上で貴重な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文はセンタレス研削の高精度化を目的として成円機構を解明し、最適加工条件の設定基準および調整砥石の設計基準を提案したもので、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。