



エンドミル加工の高精度化に関する研究

白瀬, 敬一

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1989-03-17

(Date of Publication)

2009-01-30

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1273

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001273>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏名・(本籍)	白 瀬 敬 一 (京 都 府)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工博ろ第31号
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位授与の日付	平成元年3月17日
学位論文題目	エンドミル加工の高精度化に関する研究

審 査 委 員 主査 教授 岩 田 一 明
 教授 中 西 英 二 教授 中 川 隆 夫

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、NC工作機械による高精度加工の実現を目的として、NC工作機械の知能化および加工誤差の予測制御に必要な、加工誤差の要因分析と推定を行った。また、これまで議論されることがなかった加工誤差のばらつきについても定量的な評価を試みた。ここで対象としたのは、機械加工の中で広く一般に行われているエンドミル加工である。エンドミルは加工中に大きく弾性変形し、これが加工誤差に影響を及ぼすが、本研究の成果を背景として、加工誤差の低減が期待できる異形ねじれ刃エンドミルを考案し、その効果を切削実験で確認した。さらに、構造体内部の圧力分布を推定する手法を提案し、主軸ヘッドと工具ホルダの接合部について、接触圧力分布推定の可能性を検討した。本研究で得られた結論を要約すると以下のようにまとめられる。

第1章では、本研究の背景と問題点を整理し、研究の目的および重要性を明らかにした。

第2章では、加工精度に関わる因子を加工誤差生成システムとしての視点から総合的に考え、加工誤差の要因分析を行った。ここでは加工誤差と主要な誤差要因との関係を定式化したうえで、切削条件を人為的に変化させた場合の切削力および加工面形状の変化を手がかりに、個々の誤差要因を定量的に分離し、最終的な加工誤差との関係を明らかにすることを試みた。

切削条件の変化と加工面形状の変化は良好な対応を示し、個々の誤差要因を定量的に分離することができた。特にエンドミルの弾性変形による誤差成分が、最終的な加工誤差に占める割合が大きかった。しかし、工具径を大きく、突出し量を小さく選べばその割合を小さくすることができ、そうした場合、機械要素接合部の変形による誤差成分を小さく抑える（機械要素接合部の剛性を高くする）ことが重要であることがわかった。

第3章では、エンドミル加工の切削機構を理論的に解明し、数学モデルを用いた計算機シミュレ-

ションにより加工誤差を推定した。推定した加工誤差を切削実験で得られた加工誤差と比較したところ、工具径、切込み、刃数などの違いに対して、定性的にも定量的にも良い結果が得られ、推定手法の妥当性が確かめられた。また、エンドミルの弾性変形による誤差成分が加工誤差に占める割合を、種々の切削条件について検討したところ、エンドミルの工具径はできるだけ大きく、突出量は小さくして加工することが非常に重要であることがわかった。2種類の工具ホルダについて、同様な検討を行ったところ、工具ホルダにかかわる誤差成分の比率が、エンドミルの弾性変形による誤差成分の比率を上回る場合も認められ、加工誤差に及ぼす工具ホルダの影響が比較的大きいことが明らかとなった。

なお、加工誤差を推定するために、エンドミルの切刃微小部分について傾斜切削モデルを適用して切削力を推定したが、推定値は実測値とかなりよく一致した。

第4章では、2種類の加工誤差のばらつきについて検討した。1つは加工に使用する工具ホルダやエンドミルの組合せが異なる場合に現れる加工誤差のばらつきである。

この場合、工具ホルダの型式（シャンク径）が異なれば、明らかに加工誤差にばらつきが生じている。これは工具ホルダ自身の剛性の違いが、加工誤差に影響を与えているためと考えてよい。一方、型式が同じ場合には、製品個々のばらつきが加工誤差のばらつきに影響を与えることはない。ところが、エンドミルの場合は型式が同じであっても、製品個々の寸法精度や剛性にばらつきがあり、これが加工誤差のばらつきに影響を与えていた。

もう1つは同じ工具ホルダとエンドミルを用いて加工を行っていても、工具ホルダやエンドミルの着脱、エンドミルの締付トルクの変化あるいは工作物の取付方法など、作業者の技量や環境に左右されて生じる加工誤差のばらつきである。

この場合、加工誤差のばらつきは定常的なものと加工現場の状況に依存するものとの2つに分けて考えることができ、この2つの原因でそれぞれ分布している正規分布を重ね合わせた分布で近似することができた。従って、加工誤差のばらつきはこれらの正規分布の標準偏差で定量的に評価できる。定常的な加工誤差のばらつきは、実験を行ったすべてのマシニングセンタで1~2 μm 程度であった。このばらつきのために、現状のマシニングセンタ等で避けることが困難な加工精度の分散が生じると考えれば、その分散は $\pm 3\sigma$ で3~5 μm 程度になる。

また、加工誤差のばらつきは、工具ホルダやエンドミルを着脱することによって大きくなるが、その影響は小さく、工作物の取付・取外しが非常に大きな影響を与えていることがわかった。

第5章では、ねじれ刃エンドミルの切削機構を検討し、加工誤差の減少が期待できる異形ねじれ刃エンドミルを考案した。第2章および第3章で、エンドミルの弾性変形による誤差成分が最終的な加工誤差に占める割合が大きいことがわかったが、異形ねじれ刃エンドミルはこの誤差成分を小さくするための工夫である。

まず、切刃を不等間隔で配置した9種類の異形ねじれ刃エンドミルについて、第3章で開発した計算機シミュレーションを用いて加工誤差を推定した。この推定結果をもとに、加工誤差の低減が特に期待される2種類の異形ねじれ刃エンドミルを試作し切削実験を行った。

ねじれ刃エンドミルの切刃を不等間隔で配置することにより、下向き切削によるほとんどの切削条件で加工誤差を減少させることができた。さらに、切刃を左ねじれとした場合には、刃先側の加工誤差が減少することから、加工誤差低減の効果は著しく、従来の4枚刃エンドミルと比較すると加工誤差の最大値が70～80%程度にまで小さくなった。また、切刃が不等間隔であるために、従来の4枚刃エンドミルで発生したびびり振動も抑えられた。

第6章では、構造体内部の応力分布を推定する手法を開発した。これは、主軸ヘッドと工具ホルダ、工具ホルダとエンドミルといった工作機械と工具の接合部の機械特性として、その接触圧力分布を明らかにすることを目的としている。この手法は、直接測定することが不可能な構造部材間の応力分布を、構造体表面の変形状態から推定しようとするまったく新しい試みである。

まず、簡単に2次元モデルを用いて、基礎理論の有効性を確認した。実際にモデルに荷重を作用させ、その時のモデル表面の相対変位をもとに荷重の推定を行ったところ、推定結果は実際に作用させた荷重とよく一致した。

次に、この基礎理論を拡張して、テーパ接合部にアイソパラメトリック要素を用いた解析モデルを用いて、テーパ接合部の分布荷重を推定する手法を考案した。実機に見立てた実験モデル（有限要素モデル）を用いて数値実験を行い、テーパ接合部の受圧面全体での分布荷重を推定したところ、推定結果は定性的にも定量的にも最初に仮定した分布荷重とよく一致した。しかし、分布荷重を等価節点力に換算して推定荷重と設定荷重の相対誤差を求めたところ、最大で7%程度であった。この相対誤差は、基礎式の制約から荷重が推定できる標本点の数が制限されるための精度不足や数値積分の際の計算誤差によるものと考えられる。従って、より高精度の荷重推定のためには、解析モデルの改良あるいは解析方法の改善が必要となる。

論文審査の結果の要旨

本論文は、エンドミルによる高精度加工の実現を目的として、エンドミル加工の基本形態である側面加工を対象として、加工誤差の要因分析ならびに誤差要因に基づく加工の高精度化について述べたものである。

本論文は7章からなり、第7章は結論である。

第1章は、全体としての緒論であり、機械加工において加工精度に影響を与える誤差要因をまとめるとともに、従来行われてきているエンドミルの加工誤差に関する研究について概説し、誤差要因の定量的分析の重要性を述べている。また、本論文の全体構成を示している。

第2章では、エンドミルによる側面加工における加工誤差の要因を分析している。すなわち、誤差要因として機械・工具系の弾性変形、コラムと主軸ヘッド、主軸ヘッドと工具ホルダおよび工具ホルダとエンドミルとの接合部での変形、工具と工作物の熱変形などを考慮して、これらの要因と加工仕上げ面の形状および寸法誤差との関係を定式化している。また、実験時のパラメータとなる工具径、突き出し量、切込みなどを変化させながら実際の加工を行い、加工誤差に占める

これらの要因の定量的評価を行っている。

第3章では、数値制御工作機械の知能化および加工精度の予測制御を実現するための基礎解析として、エンドミルの切削機構を理論的に解明し、エンドミル加工を表現するモデルを提案している。このモデルは、エンドミルの切れ刃微小部分を傾斜切削モデルで表現し、機械・工具系をモデル化するものである。また、このモデルを用いて切削力および加工仕上げ面の断面形状の計算を行い、加工実験の結果と比較することで本モデルの妥当性を検証している。

第4章では、従来ほとんど議論がなされていなかった加工誤差のばらつきを定量的に評価する手法を提案し、加工誤差にばらつきを生じさせる原因とその影響を解析している。この解析においては、工作機械、工具ホルダ、エンドミルの組合せによる加工誤差のばらつき、工具ホルダやエンドミルの着脱、エンドミルの締め付けトルクの変化および工作物や工具などの取り付け方法により生じる偶発的な誤差を考慮して、実験計画法に基づき切削実験を行うとともに、この実験で得られた加工誤差のデータを統計的に解析している。

第5章では、エンドミルの弾性変形が加工誤差の大きな割合を占めることに着目して、ねじれ刃エンドミルの切削機構を解析し、加工中の弾性変形の減少が期待できる異形ねじれ刃エンドミルによる加工法を検討している。すなわち、第3章で提案したシミュレーション手法を用いて、各種の異形刃エンドミルの加工面形状を計算し、加工誤差の低減効果が期待できる断面形状の異形刃エンドミルを試作するとともに、切削実験によりその有効性を確かめている。

第6章では、主軸ヘッドと工具ホルダ、工具ホルダとエンドミルの接続部の変形を評価するための基礎解析として、これら接続部の接触圧力分布を求める手法を提案している。この手法は、直接的な測定ができない構造部材間の接触圧力を、構造体表面の変形の分布から推定するものである。この手法の開発に際しては、まず、単純な2次元問題のモデルを用いて、基礎となる接触圧力の解析理論の検証を行い、次に、この理論を3次元に拡張することによって、工作機械の主軸ヘッドと工具ホルダの接続部を記述する3次元モデルを作成し、接続部の圧力分布の解析を行っている。

以上、本論文は、エンドミルによる側面加工の精度の向上を目的として、各種の誤差要因と加工精度との関係を分析し、加工誤差を定量的に推定する手法を提案するとともに、その改善の方策を検討したものであり、工学的および技術的にきわめて価値あるものと判断できる。

よって、論文提出者白瀬敬一は工学博士の学位を得る資格があると認める。