

# 多軸パイプ状研磨ツールによる新しい高精度修正研磨法の研究

群馬大学大学院 工学研究科生産システム科学専攻  
准教授 林 偉 民

(助成時所属：秋田県立大学 システム科学技術学部機械知能システム学科)  
(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008029)

キーワード：小径研磨ツール，研磨，金型

## 1. 研究の目的と背景

近年、情報通信機器や自動車の軽量化に高張力板材のプレス成形が要求されている。高張力鋼板のプレス成形は、今までのプレス以上に金型に負担をかけ、金型の寿命が問題とされている。その対策として金型の精度を向上させることや高硬度金型材料を使用する。金型の精度向上について、金型の製造プロセスとして、今までの機械加工仕上げ以外に新しい研磨による仕上げが必要と考える。従来の研磨加工は、手作業あるいは回転電動工具による加工で、工具軌跡が一定方向であることから、面粗さを良くするためには、同じ場所を軌跡が交差するように多数回繰り返して走査し、作業時間と労働負荷が高いとされている。また、研磨する金型が高硬度、難加工化に推移していることから、長時間作業、経験者の不足などさまざまな問題が出ている。そのため、安定的な研磨量を得ながら、コンピュータ制御による効率的な高精度研磨法の開発が急務とされている。

高精度自由曲面などの形状加工において、一般に切削・研削加工の後に研磨加工を行うことが多い。従来の研磨加工は、手作業あるいは回転電動工具による加工で、工具軌跡が一定方向であることから、面粗さを良くするためには、同じ場所を軌跡が交差するように多数回繰り返して走査するような作業が必要となる。本提案では研磨軌跡の平均化の確立を目指す。一軸回転の電動工具では、工具の半径位置によって研磨速度が変化し、走査領域に亘って均一な研磨量分布とすることは容易ではない。本提案では研磨ツールの自転/公転による研磨方法を提案し、安定かつ再現性のよい研磨レートの実現を目指す。また、複雑形状金型に対して、複数のパイプ状研磨ツールを用いて、いわゆる多軸シェーバーのように、これらを自転/公転させる研磨方法を提案し、シミュレーションでその方法の有用性を検証した上、実際に自転・公転型研磨装置を製作し、その加工精度の検証や高精度修正研磨への応用について検討を行う。

## 2. 研究方法

### 2・1 加工原理

本研究では、形状補正と表面粗さの向上の同時実現を目指して、研磨軌跡の平均化と研磨量の安定化に着目して新しい研磨法を実現するために図1に示す自転/公転型研磨法を提案した。その原理としてパイプ状部材の端面を研磨の工具面として、このパイプの軸心回りの回転（自転）とこのパイプの軸心自体を別の軸心（公転軸）の周りに同時に回転させる構造とすること

によって、走査中の工作物との接触領域内の工具の走行軌跡の方向を連続的に変化させて、軌跡の等方性と、軌跡密度の均一性を高めようというものである。

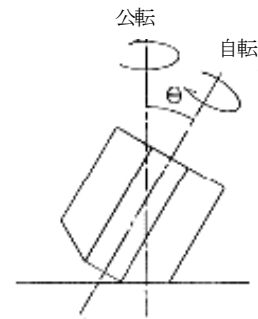


図1 自転/公転型研磨法の原理

図1に示す自転/公転の原理から、研磨ツールの自転軸は公転軸に対して傾いており、この2つの軸は、同一の平面内にあるようにする。工具面は円錐面ないし球面であり、工作物と接触するのは公転軸上の先端部である。公転軸が工具と工作物との接触領域の中心部を通り加工面に垂直となるように、工具が調整される。工具の自転と公転は同時に与えられる。

このように設定されているので、研磨作用は工具自転によって円錐面ないし球面によってなされ、公転は工具の走行方向を連続的に切り替える働きしている。公転のみでは接触領域の中心点では走行速度はゼロであり研磨は進行しがたい。パイプの肉厚が大きいとき、また自転軸と公転軸のなす角度 ( $\theta$ ) が大きいとき、工具と工作物の走査停止時の接触領域は大きくなる。一方、このとき接触領域内の速度分布は広がり、軌跡密度の均一性は低下する。

研磨加工中に工作物と工具の接触領域内加工面の任意の一点を過ぎる工具の走行方向はすべての向きに変化し、その周期は公転の回転周期であり、その軌跡は、接触領域全体わたって等方的で均一である。また、その点を単位時間当たり工具が通過する距離（軌跡密度）は、工具の平均半径における周速であって、全面均一である。この均一性等方性によって、加工面があらゆる方向に研磨されるので、表面あらかの向上が期待できる。また、軌跡密度も均一であるところから、接触領域全面に均一の研磨除去量が発生して、研磨能率も良好安定であると期待できる。

## 2・2 研究方法

本研究はまずシミュレーション手法により提案した研磨法の優位性の検証を行い、パイプ状研磨ツールの研磨能力、ツールの摩耗状況、加工軌跡の確認などの検討を行い、その後自転／公転型研磨ユニットの具体的設計を行い、安定的な研磨が行える自転／公転型研磨法の研磨効果を確認し、金型材料の基礎研磨データの蓄積を行う。

提案した新しい研磨法を検証するためにデスクトップタイプの研磨機を試作し、その研磨機へ搭載できる自転／公転型研磨ユニットの開発を行った。また、研磨加工効果や研磨除去量の安定性の確認も行った。

試作した装置の運動性能の確認を行った上、研磨実験に移行する。研磨加工は、代表的な金型材料である金型鋼や超硬合金などを対象として、各種パイプ状研磨ツールによる研磨特性の調査、研磨面品質の測定および研磨の安定性などを総合的に実験により調査し、試作する自転・公転式研磨ヘッドにより安定的な研磨加工の実現を目指す。

複雑形状の高精度研磨を行うために修正研磨を行うことが必要である。修正研磨への応用について、まずは研磨加工面の形状測定法を確立して、測定したデータに基づく修正研磨プログラムの開発を行う。また、実機研磨による形状修正研磨実験を行い、修正研磨の精度および安定性の確認を行う。

## 3. 研究成果

### 3・1 自転／公転型研磨ユニットの試作とその研磨検証

パイプ状研磨ツールを傾斜して、ツールを自転・公転させる研磨方法を取り、ツールの半径による研磨速度の変化が少なく、また、研磨軌跡は加工全域にわたって均一であり、加工面粗さの向上は勿論、安定的な研磨加工も実現しやすく、修正研磨加工に適している。

本研究においてまず、自転／公転が実現できる研磨ユニットの設計製造を行った。自転と公転が同時に実現できるように図2のような設計にした。研磨ユニットと同じ平面に取り付けられたモーターの駆動により自転公転運動が同時に実現できる。詳細は図3に示すように、モーターからの動力がベルトを通じて回転体に動力を伝える、また回転体に支持された自転軸がゴム輪を介して固定リングと摩擦によって動力を伝える仕組みになっている。モーターからの出力はスピードコントロールユニットにより18~280rpmの範囲で回転数の調節ができる。

試作した研磨ユニットを小型研磨加工機に搭載し(図4)、研磨実験を行った。図5に研削仕上げの金型鋼の表面にツールを固定して5分間研磨した研磨エリアの状態(単一研磨痕)を示す。研磨ツールにより安定的な除去加工ができ、研磨効果の確認ができた。また、加工性が異なる研磨ツールを使用し、研磨時間と研磨による除去量深さの関係を調べた。図6からわかるように、各種ツールによる研磨加工能力の違いが認められるが、研磨時残の増加につれ、研磨加工の除去量がほぼ安定的に増加し安定的に研磨ができることがわかった。

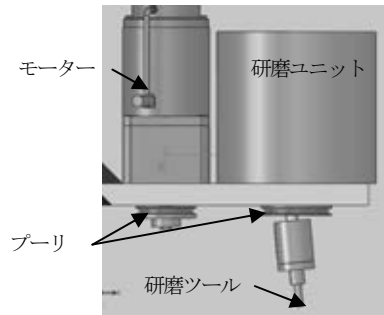


図2 自転／公転型研磨ユニット設計イメージ図

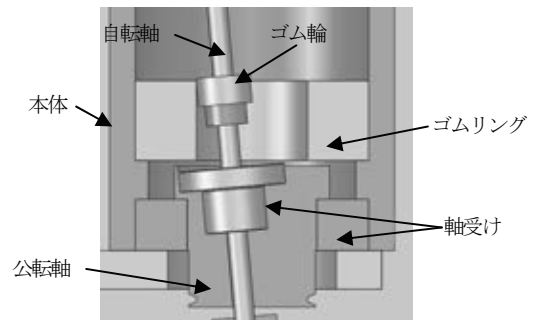


図3 自転／公転研磨ユニットの内部構造

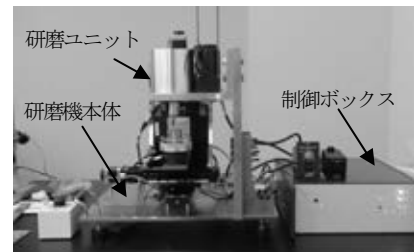


図4 試作した自転／公転型研磨ユニットを搭載した機械

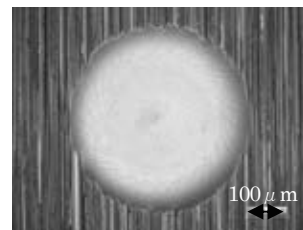


図5 研磨エリアの一例

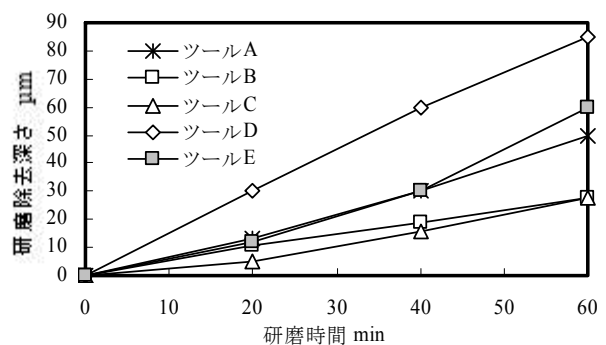


図6 研磨時間と除去深さの関係

### 3・2 改良型研磨ユニットの試作

3・1に自転と公転が同時にできる研磨ユニットの試作ができ、研磨性能の確認ができた。しかし、ツールの自転運動がゴム輪の摩擦による駆動することで、研磨負荷が増加するときに自転運動が止まる場合があった。また、研磨ユニットの軸と並行に駆動モーターを設置し、研磨ユニット全体の大きさも縮小することが難しく、将来多数研磨ユニットの設置により同時研磨加工に支障が出るのが判明した。そこで、新たに図7のようにコンパクトで、確実に研磨加工ができる新しい研磨ヘッドを開発した。今回の研磨ヘッドの設計目標はユニット自身がコンパクトで、一つのモーターによる自転/公転の実現が可能で、かつ自転と公転の回転数比をおおむね3:1になるように設計する。また、自転軸と公転軸の傾斜角を5°として設計し、遊星歯車伝動機構を用いる研磨ユニットを開発した。研磨圧力はツールを固定するホルダーの内部に入っているバネの復元力により調整する。

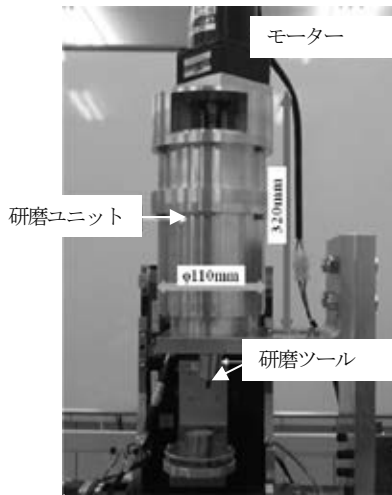


図7 試作した新型自転/公転型研磨ユニットの写真

### 3・3 自転/公転型研磨法の研磨安定性の検証

試作した改良型研磨ユニットを用いて、研磨加工特性および研磨エリアの安定性の検証実験を行った。ワークはSUS420材料を使用し、研削仕上げによって表面粗さがRa: 2.3μm程度に仕上げられ、実験に供した。研磨特性および研磨エリアの安定性を調査するために図8に示すように一定時間で研磨した研磨痕を対象にし、デジタルマイクロスコープで測定した画像の円周上の3点を指定して研磨痕半径を求めた。また、研磨の除去深さが図9のように触針式粗さ測定器で測定した断面曲線の最大高さを求めた。なお、初期研磨面はあらかじめ研削でRa0.23μm程度に統一した。研磨開始時は、あらかじめ研磨ツールのツールイングを行い、ワークと確実に接触できるように準備した。砥粒は研磨前に約5gを供給し、測定に合わせて10分間隔で更新した。また、研磨条件および使用する主なツールを表1、表2に示す。

図10に繰り返し実験した研磨痕の半径と研磨時間の関係を、図11に研磨の除去深さと研磨時間の関係を示す。研磨痕半径は研

磨時間が増加につれて半径の増加量が少なくなっていることがわかる。各回実験でのばらつき（研磨量の安定性）は最大で

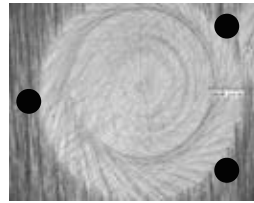


図8 研磨痕形状

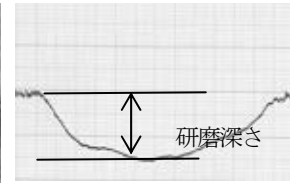


図9 研磨深さ形状

表1 研磨に使用したツール

研磨ツール	組成
CM	ポリウレタン樹脂（硬い）
BM	ポリウレタン樹脂（中間硬さ）
300A'	ポリウレタン樹脂（軟らかい）
GC3000A' 50	ポリウレタン樹脂 300A' +GC #3000 砥粒

表2 主な研磨実験条件

ワーク材料	SUS420
自転回転数	200rpm
傾斜角	5°
公転回転数	210rpm
研磨荷重	30.7g
砥粒	酸化アルミナ(#3000)

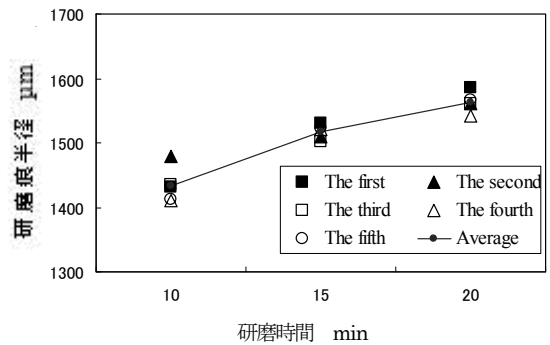


図10 研磨痕半径の安定性

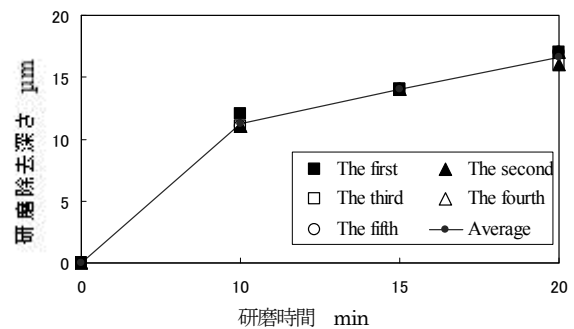


図11 研磨深さの安定性

400 $\mu\text{m}$ であった。また、除去深さは研磨時間の増加につれて増加するが、10分研磨以降増加量が低下している。これは研磨荷重が一定である状態で、研磨時間が進むと共に研磨痕が大きくなっていくために、平均研磨圧力が低下していくことが原因と考えられる。また、除去深さはどの時間の研磨でも各回の結果にはば差がなく安定していることがわかる。

図12に4種類のツールにおける研磨痕半径の平均値の比較を、図13に除去深さの平均値の比較を示す。研磨痕の半径と除去深さの結果から300A'ツールの研磨能力が大きくGC3000A'ツールの研磨能力が最も小さいことがわかった。これはツールの性質に関係していると思われる。表1に示したように300A'は4つのツールの中で最もやわらかいため砥粒の保持性能がよく研磨能力が大きいと考えられる。

図14は4種類の研磨ツールを用いた研磨実験における表面粗さ平均値の変化を示している。表面粗さは10分間研磨後の変化量が小さくなる傾向を示している。また表面粗さも除去深さと同様にやわらかいツールほど表面粗さが改善されている傾向が見られる。

図15に3種類のダイヤモンド砥粒を用いた研磨における表面粗さを示す。表面粗さは3種類の砥粒において5分間研磨以降は変化量が小さくなる傾向を示した。砥粒が細かいものは研磨時間が増大につれて砥粒があらいものより粗さの変化量が大きくなった。表面粗さが1番改善されたのは砥粒番号が#14000の砥粒を使用したときで、20分研磨後の粗さはRa0.018 $\mu\text{m}$ となった。

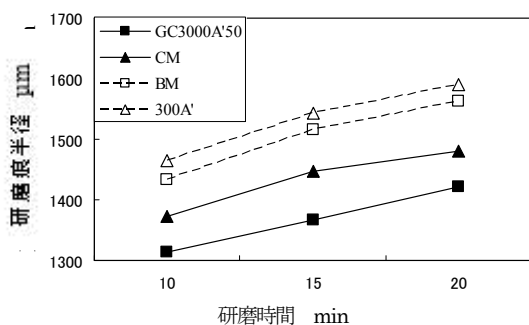


図12 各種ツールによる研磨痕半径の比較

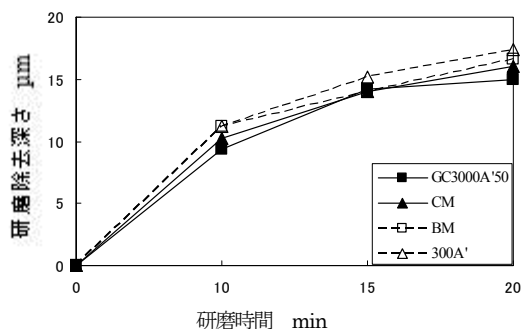


図13 各種ツールによる研磨深さの比較

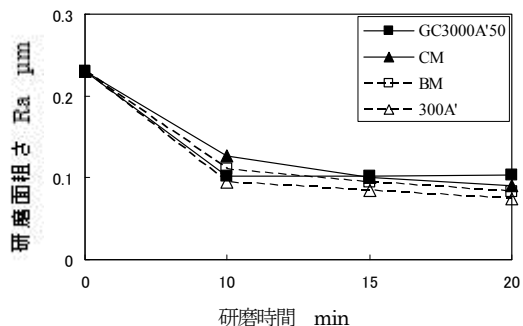


図14 各種ツールによる研磨面粗さの変化

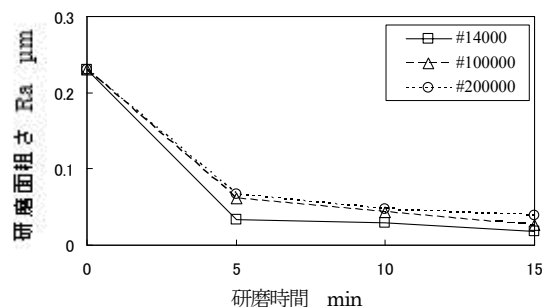


図15 ダイヤモンド砥粒による研磨面粗さの変化

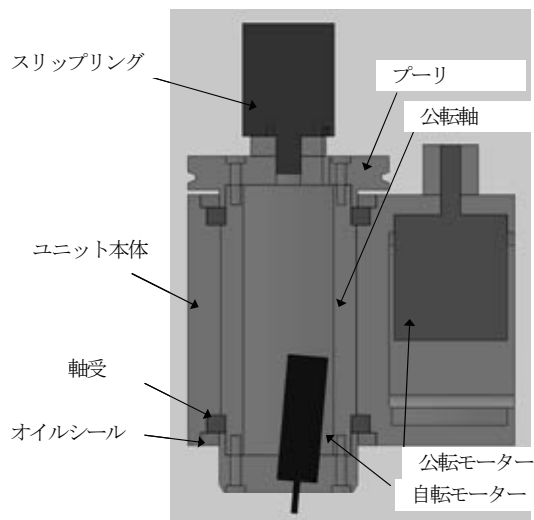


図16 実用型研磨ユニットのイメージ図

### 3・4 実用型研磨ユニット製作

3・2で試作した新型研磨ユニットによる安定的な研磨ができることが確認した。しかし、自転と公転の回転比が固定され、最適研磨条件の選択に支障が出ている。そこで将来の実用化を目指して、新たに実用型自転/公転型研磨ユニットの設計・製造を行った。図16にその設計イメージ図を示す。研磨ユニットのベース部に公転用のモーターが搭載され、ベルトを使用し動力を伝え、その動力がプーリの下のスピンドルに伝わり、スピンドルが回転して公転を与える。スピンドルの内部には自転用のモーターが搭載しており配線をスリップリングに繋げることで導線の絡まりを防いでいる。この2つのモーターにより研磨

ツールに自転／公転運動を同時に与えることが可能である。自転用モーターの回転数は最大 8000 rpm で、公転用モーターの回転数は最大 400 rpm である。また、自転用モーターには研磨用のツールホルダが取り付けられている。ツールホルダの中にはバネが入っていて、バネの復元力によって加工エリアに研磨圧力を与えている。図 17 卓上研磨機に搭載した実用型研磨ユニットの状況を示す。わかるように新たに製作した実用化研磨ユニットがコンパクトで、また、自転と公転回転の回転数がそれぞれ調節することができ、本研究に提案した複雑形状金型に対して、複数の研磨ユニットによる多軸シェーバー形式の研磨ができると考えられる。

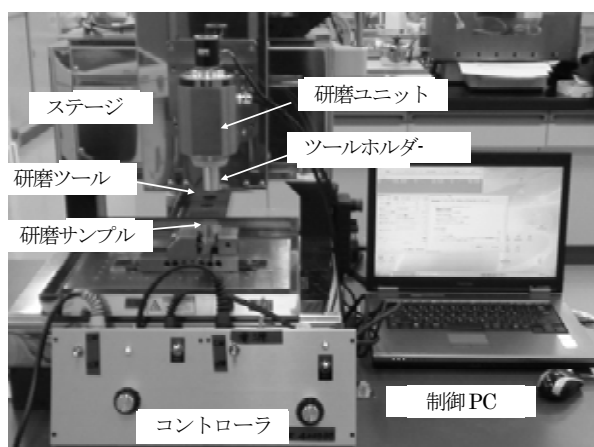


図 17 加工機に搭載した実用型自転／公転型研磨ユニット

#### 4. 結 論

本研究に、複雑形状金型の研磨法の開発を目指して、パイプ形状研磨ツールを用い、それを自転／公転させることによる安定的に研磨できる方法を提案した。また、自転／公転型研磨ユニットの試作を行い、金型材料の基礎研磨特性を確認した。実

験において、自転／公転型研磨法の安定的な研磨特性の確認ができ、複雑形状金型研磨への展開ができると考えられる。さらに、実用化を目指して実用型研磨ユニットの試作を行い、コンパクトな実用型自転／公転型研磨ユニットを完成し、今後これを用いてさらになる基礎実験を行う予定である。

#### 謝 辞

本研究は平成 20 年度財団法人天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成によって行われた。ここに深甚なる謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) H. Suzuki・T. Moriwaki・T. Okino・Y. Ando : Development of Ultrasonic Vibration Assisted Polishing Machine, Annals of the CIRP, 55, 1, (2006) 385.
- 2) 林 偉民・渡邊 裕・大森 整・河西 敏雄 : 連携加工プロセスによる光学素子のナノ精度鏡面加工, 成形加工, 18, 12 (2006) 842-847.
- 3) 上野嘉之・林 偉民・大森 整 : 日本機械学会年次大会講演論文集, 4 (2006), 586.
- 4) 林 偉民・鈴木 亨・森田晋也・渡邊 裕・大森 整 : V-CAM による金型自由曲面のポリシング, 型技術, 21, 8 (2006) 84-85.
- 5) 林 偉民・佐藤 翔太・佐藤 隆史・呉 勇波・山形 豊 : 卓上自転／公転型非球面形状研磨機の開発, 2008 年度日本機械学会第 7 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2008) 295-296.
- 6) 林 偉民・佐藤 隆史・呉 勇波・山形 豊 : 自転／公転型研磨装置の試作とその加工特性, 2009 年度日本機械学会年次大会講演会講演論文集 Vol. 4, (2009) 339-340.