### Review



## 林 偉民\*

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

# W. Lin 1. はじめに

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. そのために、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  $5^{1)}$ .

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2). 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走査 するような作業が必要となる3). 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. 本提案ではパイ プ状研磨ツールを用い、そのツールの自転/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, 大型・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.

本報では、自転/公転型研磨ユニットの設計・製作とその基礎実験結果を報告し、また、その研磨法の理論解析を 行い、シミュレーションと実験結果の整合性を確認する.

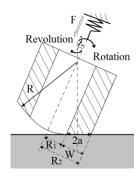


図1 自転/公転型研磨法の原理

#### 2. 実験方法

#### 2.1 実験装置の概要

本研究では、形状補正と表面粗さの向上の同時実現に目指して、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4).

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

<sup>\*</sup>群馬大学大学院理工学府 知能機械創製部門 教授

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、 表面あらさ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・公転式研磨へ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用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. 実験結果

#### 3.1 自転/公転型研磨ユニットの試作と研磨検証

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とり、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50.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

 $\sim$ 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。

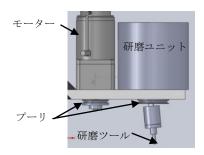


図2 自転/公転型研磨ユニット設計イメージ図

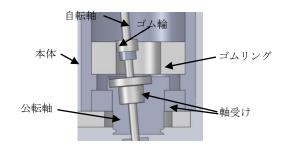


図3 自転/公転研磨ユニットの内部構造

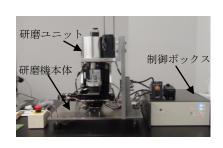


図4 試作の自転/公転型研磨ユニットを搭載した機械



図5 研磨エリアの一例

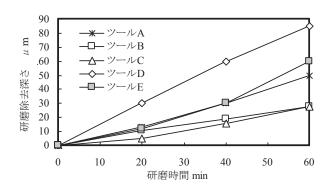


図 6 研磨時間と除去深さの関係

#### 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ことが判明 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6). 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.

### 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  $Ra: 2.3 \mu m$  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  $Ra0.23 \mu m$  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ルーイングを行い、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

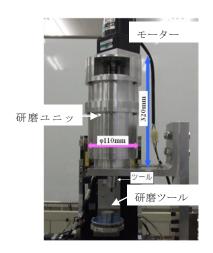


図7 試作した新型自転/公転型研磨ユニットの写真



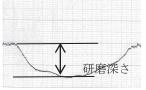


図8 研磨痕形状

図9 研磨深さ形状

表1研磨に使用したツール

研磨ツール名	構成(性質)
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 300A'+GC#3000 砥粒

表 2 主な研磨実験条件

	1 0 - 7   2   2   4   5   4   1   1
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)

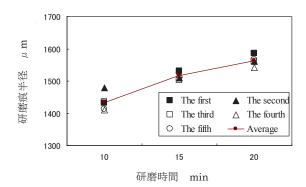


図 10 研磨痕半径の安定性

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 400μm 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ほぼ差がなく安定していることがわかる。

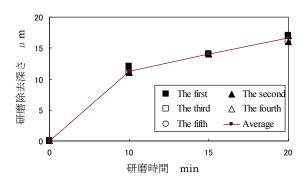


図 11 研磨深さの安定性

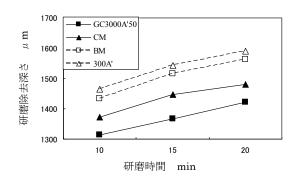


図 12 各種ツールによる研磨痕半径の比較

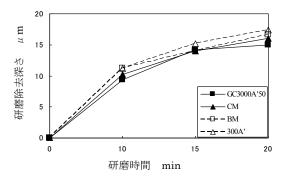


図13 各種ツールによる研磨深さの比較

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.

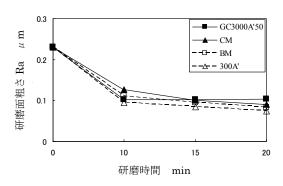


図 14 各種ツールによる研磨面粗さの変化

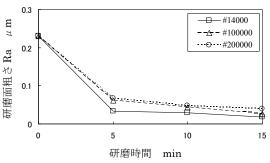


図 15 ダイヤモンド砥粒による研磨面粗さの変化

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。また研磨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  $Ra0.018\mu m$  となった。

#### 3.4 新しい実用型研磨ユニット試作

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に目指して、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 エエリアに研磨圧力を与えている<sup>7)</sup>. 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.

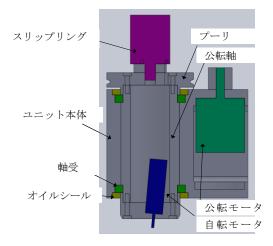


図 16 実用型研磨ユニットのイメージ図



図 17 加工機に搭載した実用型研磨ユニットの外観

#### 4. 最近の研究状況

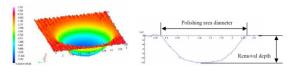
#### 4.1 実用型研磨ユニットによる研磨実験

研磨特性および研磨エリアの安定性を明らかにするために新作した実用型研磨ユニットにより, 研磨特性の検証 実験を行った. 一定時間で研磨した研磨痕を対象にし、非 接触式形状測定装置で測定した.図 18 に測定した研磨エリアのイメージを示す,測定データから研磨エリアの中心を通る断面プロファイルを取り出し,研磨痕直径および研磨深さと定義して,その変化を追究した.また,参考に研磨中に研磨エリア内研磨面の粗さ変化も白色光干渉顕微鏡で測定した.研磨開始時は,あらかじめ研磨ツールのツルーイングを行い,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 0.05g を供給し,測定に合わせて10 分間隔で更新した.また,主な研磨条件を表 3 に示す.なお,研磨ツールの変形やツールホルターとの精度を配慮し,今回の実験において,研磨ツールの材料は銅を使用した.

図 19 に公転運動の回転方向が異なる場合の研磨量の変化を示す。自転運動と公転運動の方向が逆の場合は研磨時間の増加につれ安定的に研磨ができることが分かった。図 20 に異なる研磨荷重での研磨量の変化を示す。研磨荷重の増加につれて、研磨除去量も比例に増加する。図 21 に研磨ツールの自転運動回転数が異なった場合の研磨量の変化を示す。自転回転数が大きくなるにつれて、研磨加工量も大きくなることが分かった。

表 3 主な研磨条件

研磨対象	SUS420, スライドガラス
研磨ツール	銅, 発泡ポリウレタン
自転速度	500-1550 rpm
公転速度	100-400 rpm
自転/公転軸傾斜角度	5 °
研磨荷重	62.5, 93.4, 187, 437 g
研磨砥粒	アルミナ,酸化セリウム
砥粒供給間隔	5 min
砥粒供給量	0.05 g
研磨時間	5-120 min



(a) 3-D イメージ

(b) 中心断面プロファイル

図 18 研磨エリアの測定例

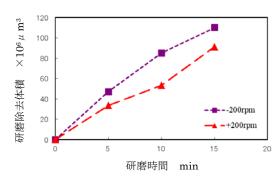


図 19 公転運動の回転方向による研磨量の差

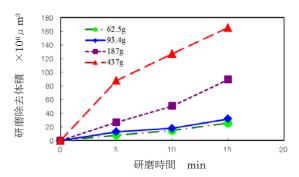


図 20 異なる研磨荷重での研磨量の変化

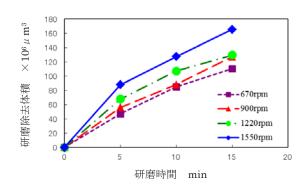


図 21 異なる研磨ツールの自転回転数での研磨量の変化

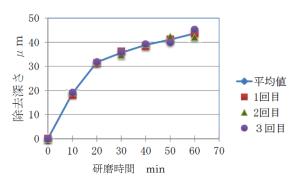


図 22 スライドガラスの研磨エリアの除去量変化

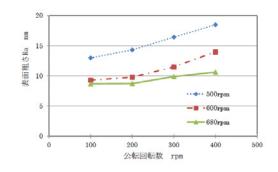


図 23 自転及び公転の回転数が異なる場合の粗さ

一方, 研磨対象をスライドガラスに変え, 自転/公転型 研磨法による研磨の安定性も行い, 研磨の安定性をさらに 確認した. 図 22 に自転回転数-200rpm, 公転回転数 680rpm 研磨荷重 187g の場合のスライドガラスの研磨除

去深さを示す.別々に行った3回実験の研磨深さのばらつきが少なく,平均値でも研磨時間の推移につれて研磨量が増加していることが分かった.ガラスが研磨対象材料とした場合,金型鋼より高い研磨能力を持ち,研磨量のばらつきも小さいことが分かった.図23に自転回転数と公転回転数を変化させた場合の研磨エリアの粗さを参考に示す.研磨工具自転の回転数が高い場合は良い表面粗さが得られ,また,公転回転数が低い場合は粗さの値が小さい傾向が分かった.

#### 4.2 自転/公転型研磨エリアの材料除去解析8)

一般的に研磨加工において材料の除去量は式(1)に示すプレストンの経験則に従う.ここに k は定数であり (研磨実験により求める), t は研磨時間, P および V は研磨領域における圧力および工具とワーク間の相対速度である.図1の自転/公転型研磨法の原理から研磨エリア半径 R はパイプ状研磨ツールの内径 R1, 外径 R2 と傾斜角  $\lambda$  と式(2)のような関係を持つ. 研磨中に研磨エリア半径は一定である.

$$\delta = k \cdot P \cdot V \cdot t \tag{1}$$

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2\sin \lambda} \tag{2}$$

図 24 に研磨エリア座標系の定義を示す. Z 軸方向を材料除去深さの反対として定義した. 自転および公転軸(それぞれ OQ および MN) が $\lambda$  の角度をなす, 研磨エリアの中心点 O を通る座標系 O-XY が確立される. 研磨ツールとワークの接触を Hertz 接触と仮定し, 研磨エリアの圧力分布は式(3) によって求められ, 最大圧力は式(4)によって計算できる(図 O24 の点O0). ここに, O1 によって郵画圧力である.

$$P = -\frac{P_o}{a}\sqrt{a^2 - x^2} \tag{3}$$

$$P_o = \frac{3F}{2\pi a^2} \tag{4}$$

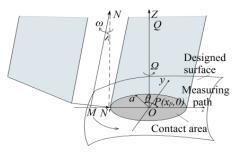


図 24 研磨エリア座標系の定義

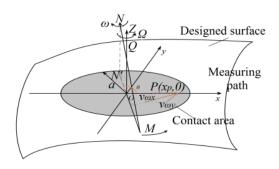


図 25 研磨エリアにおける速度分布

図 25 に研磨エリアにおける速度分布を示す。 $\omega$ は工具の自転角速度であり、 $\Omega$ は工具の公転角速度である。それらの値はそれぞれ式(5)、式(6)と式(7)によって求められる。

$$v_{\Omega} = \Omega x \tag{5}$$

$$v_{\omega y} = \omega \left( \frac{R_1 + R_2}{2} - \cos \lambda x \right) \cos \theta$$
 (6)

$$v_{\omega x} = \omega \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)^2 + x^2} \sin \theta \quad (7)$$

$$V = \sqrt{v_{\omega x}^2 + \left(v_{\omega y} + \Omega x\right)^2}$$
 (8)

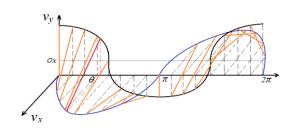


図 26 研磨エリアにおける工具一回転の速度分布

図 26 に研磨エリアにおける研磨工具の一回転の速度分布を示す. ピンク色の線の長さは相対速度の大きさを表す. 以上から, 研磨エリアの合成速度は式(8)によって求められる.

以上の関係をプレストンの式 (式 (1)) に代入し、単位 時間 dT あたりの研磨除去深さは式 (9) になる.

$$dh = k_p p_c v_s dT (9)$$

また,

$$dT = \frac{d\theta}{\Omega}$$
(10)

であり、式 (9) に式 (10) を代入すると. 単位角度あたりの材料除去深さが得られる.

よって、研磨されたエリアの除去深さおよびその形状を式(11)のよって計算することが出来る. なお、研磨定数 kp はあらかじめ研磨実験によって求める必要がある.

$$h = \int_0^{2\pi} k_p \frac{p_c v_s}{\Omega} d\theta \tag{11}$$

研磨実験方法について,これまですでに様々な条件で行われ,ここに省略するが,同じ条件で行った研磨実験結果とシミュレーションの比較を図27に示す.

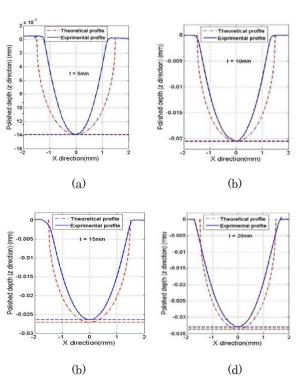


図 27 シミュレーションと研磨実験結果の比較

図 27(a)から研磨開始 5 分経過後に研磨時間を増大とともに研磨深さは着実に増加することが分かった. 10 分研磨後に研磨深さの増加量が減少する傾向が見られた(図27(b), (c), (d)). その原因として研磨時間の増大とともに研磨深さが増加したものの,平均研磨圧力は低下したと考えられる. さらに研磨時間の増大とともにシミュレーショ

ンと研磨実験結果が合致する傾向になり、理論計算と実際 の実験結果との整合性をとれていることがわかった.

5. おわりに

本研究は、コンピュータ制御による複雑形状金型の多軸 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 新しい研磨法を提案した。本研究の成果を以下に示す。

- 1) まず,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.
- 2) また,基礎研磨実験において,自転/公転型研磨法の安定的な研磨特性の確認ができ,コンピュータ制御による複雑形状金型研磨への展開ができると考えられる
- 3) 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、これを用いて基礎実験を行った.
- 4) 様々な材料で研磨実験を行った結果,自転/公転型 研磨による研磨は安定的に研磨量が得られること がわかった.
- 5) 現在,本研究がさらに展開しており,研磨理論から 検証が深まり,シミュレーションと実際の実験結果 との整合性がとれていることがわかった.

今後,多軸研磨実験も行い,複雑形状金型の研磨のみならず,光学素子やその金型の研磨への応用も展開する予定である.

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究開発助成により実施した研究に基づいていることを付記すると

ともに、同財団およびご関係の皆様に深く感謝の意を表す.

### 参考文献

- H. Suzuki T. Moriwaki T. Okino Y. Ando : Devolopment 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) 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
- 4) 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.
- 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.
- 7)林 偉民: 自転/公転型研磨 (RRP) 法の研磨特性の確認, 2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2013) 527-528.
- 8) H. Wang W. Lin: Spot Polishing Models of Rotation & Revolution Type Polishing Method based on the Preston equation, The 9<sup>th</sup> MIRAI Conference on Microfabrication and Green Technology, MACAU, Aug. 16, (2016) 66-69.