## スピニング加工におけるファジィ援用 加エプロセス制御システムの開発

山梨大学大学院 医学工学総合研究部 機械システム工学専攻 准教授 吉原正一郎

(平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008020)

## キーワード:チューブフォーミング,スピニング加工,マグネシウム合金管,アルミニウム合金管, ファジィ

#### 1. 研究の目的と背景

マグネシウム合金は実用金属中最軽量であり、プラスチ ック材料より強度が高いため、その需要は増大している. また、本材料は板材だけでなく、管材やシェル状素材など の中空部材のニーズもあり検討されている.中空部材の加 工方法には回転加工、プレス曲げ等による加工などが挙げ られる.これらマグネシウム合金の構造部材の利用・ニー ズは、輸送機器では自動車の温室効果ガス排出削減の背景 より、燃料に水素を搭載した燃料電池車の適用が候補とし て挙げられる.現在、水素を貯蔵する圧力容器の材料には 主にアルミニウム合金管が使用されているが、今後、更な る軽量化が要求されるため、マグネシウム合金の圧力容器 への適用が期待されている.そこで、マグネシウム合金管 を用いて圧力容器を製造する場合、管端末部においてスピ ニング加工の適用の可否と、任意目的形状への加工の達成 を目的とした.

回転加工の一つであるスピニング加工は,逐次成形であ り、プレス加工などと比べて専用の金型を必要としないた め,加工の自由度が高く,設備も安価で設置でき,省コス トが可能である.また,多品種少量生産が可能な加工法と してその利用が増加しており,多くの研究が行われている 1~3). それらの研究は加工原理,加工法や加工条件が成形 に及ぼす影響が調査されている. すなわち、加工プロセス が重要であり、これの適正化を図るために知能化技術を援 用する手法が研究されている<sup>4)</sup>. スピニング加工において も加工工程は多くの方法があり,加工プロセスの適正化を 図るためには、熟練技術者の経験に依存している. そのた め,試行錯誤が必要となるため,工程数の増加,材料費や 人件費などのコスト増大が問題となっている. 更に, 熟練 者に依存するため, 昨今, 熟練技術者の減少が危惧されて いるため,経験技術の代替となる,経験を必要としない知 能化技術を援用した加工工程設計方法が求められている.

一方,知能化技術はロボット分野,電気分野や機械加工 分野などに適用されている.機械加工分野において,工程 数削減や製品の寸法精度向上などを目的とし,工作機械あ るいは加工法のインテリジェント化に関する研究が行わ れている<sup>5)</sup>. その手法は,数値制御,ニューラルネットワ ーク,ファジィ理論,画像化処理技術,データベースの構 築による方法などがある.それら知能化技術の適用により, 加工精度改善,成形性向上や加工工程設計の簡易化が報告 されている<sup>6.7)</sup>. これらの特徴をいかしスピニング加工に 適用する研究が行われている.具体的にはファジィモデル を適用したスピニング加工の有限要素シミュレーション により,工具押込み量の制御により加工時間の短縮が可能 であることが確認されている<sup>8)</sup>.しかしながら,加工工程 が製品精度,目的形状および肉厚分布にどのような影響を 及ぼすか明らかにされていない.実際に燃料電池のような 圧力容器を製造する場合,加工工程とこれらの評価項目と の関係を明らかにし,最良の加工プロセスを探索する必要 がある.

そこで,マグネシウム合金管端末部のスピニング加工に おいて,製品精度向上のために工具経路を制御するシステ ムの開発を目的とした.具体的には,被加工材形状を計測 できる画像計測を適用して製品精度を評価し,ファジィを 援用して工具経路を探索するシステムを提案し,その有効 性を調査した.また,アルミニウム合金を用いて加工プロ セスによる肉厚分布への影響についても調査した.

## 2. スピニング加工機の開発

## 2・1 スピニング加工機のコンセプト

本研究では、最終的には、スピニング加工の自動化を目 指しており、下記に示すコンセプトを基に加工装置を開発 した.

- (a)加工:マグネシウム合金およびアルミニウム合金管を 加工可能な加工力での制御.
- (b)動作:曲線形状に対応するためにローラ工具の2軸同 期制御.
- (c)制御:2軸同期制御を維持したローラ工具移動のための コンピュータ制御.
  - スピニング加工は小型および軽量部品の製造に対応可

能としている. ローラ工具の制御は, C++言語を用いてイ ンテリジェント化できるように対応した.

2・2 スピニング加工機の構成および制御方法

Fig.1 に開発したスピニング加工機の写真を示す.開発 したスピニング加工機において被加工材の回転装置は卓 上旋盤をベースに製作した.メインのスピニング加工機は, ACサーボモータおよびアクチュエータ,リニアガイドお よびPCで構成した. Table 1 にスピニング加工機の性能を 示す.加工治具にあたるローラ工具のX 軸方向の最大許 容荷重は 1150[N],Y 軸方向の最大許容荷重は 1380[N]で あり,送り速度は 0.01~10[mm/rev],被加工材回転速度は 340~1200[rpm]である.ローラ工具の材質は SKD 焼入れ材 を使用した.ローラ工具の形状は直径  $D_R=24$ [mm],先端 丸み半径 $\rho_R=2$ [mm]である.また,ローラ工具の取り付け 角度は,被加工材中心軸に対して 45[°]に設定した.なお, 本研究では,製品形状を測定するために,オンラインで, 画像処理できるよう CCD カメラを使用して,外形形状を 測定している.

## 加エプロセス推論システムにおけるデータベー ス構築方法

3・1 マグネシウム合金の温間スピニング加工の温度条件 3・1・1 実験条件

圧力容器は円管の端部を口絞り,円弧形状にする.本研 究では軽金属材料の管材の管端部において円弧形状に加 工する. Fig.2 に目的形状を, Table 2 に被加工材形状の寸 法を示す.一般にマグネシウムは常温では成形が困難であ るために温間での加工とした.加工工具のローラが移動す る加工パス回数は10回とし,10回目のパスにおいて管端 の加工半径が R=10[mm](Fig.2 参照)となるように加工を行 った.被加工材はマグネシウム合金円管(AZ31-O)を用いた. 被加工材はバーナーで加熱し,加工中の被加工材の温度は 非接触の温度計で測定した.被加工材の温度の条件は180, 200,220 および 240[℃]の4条件とした.本加工では,中 子は使用せず,被加工材の回転数は 340[rpm]で一定とし, ローラ工具の送り速度は 0.1[mm/rev]で一定とした.

#### 3・1・2 最適加工温度

**Table 3**に各温度における実験結果を示す.表中の◎は 高精度,○は中程度の精度,△は低精度の成形性を表す. 220[℃]の条件が最も高精度で加工が可能であったため, 以降の実験温度は 220[℃]とした.

#### 3・2 加工工具ローラの押込み量

### 3・2・1 実験条件

スピニング加工は逐次成形であるため,加工毎の状況から目的形状までの各ステップの押込み量が成品精度に対して重要な因子となる.そこで,これらの状態を把握するためにあらかじめ,加工半径を7.0,7.5,8.0,8.5,9.0 および9.5 [mm]の状態まで加工し,その後,目的形状である



Fig.1 Photograph of spinning machine

Table 1 Capability of spinning machine

Max. thrust force of X-axis [N]	1138
Max. thrust force of Y-axis [N]	1150
Roller speed range [mm/rev]	0.01~10
Workpiece rotation speed [rpm]	340~1200



Table 2 Shape of workpiece

Outer diameter D <sub>1</sub> [mm]	25.0	
Inner diameter D <sub>2</sub> [mm]	22.0	
Length of chucking part L' [mm]	16	
Length of workpiece L [mm]	36	

Table 3 Effect of temperature on	formability
----------------------------------	-------------



**Fig.3** Forming limit area for objective shape (R=10) by one roller pass

加工半径 R=10[mm]まで一回で加工した. それぞれの加工 中の半径に対してローラ工具の押込み量は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 および 3.0[mm]の 6 条件とした.

#### 3・2・2 目的形状に対する加工限界領域

Fig.3に実験から得られた目的形状(加工半径 R=10[mm]) に対して一回の加工パスで加工可能な加工限界領域を模 式的に示す. 図中において加工が成功した領域が I, 被加 工材がチャックから外れて加工が失敗した領域が II であ る. 被加工材形状の半径が 7.0~9.5[mm], 工具経路半径増 分が 0.5~2.5[mm]では加工は成功した. 被加工材形状の半 径が 7.0[mm], 工具経路半径増分が 3.0[mm]においては加 工が失敗したため, 従って制約条件は,工具経路半径増分 の最大値 2.5[mm]が適切である.

Fig.4 に各パス毎の目的形状と実形状の最大誤差を示す. 誤差は各回数のパスにおいて異なることを確認した.最大 誤差は概ね-0.5[mm]~0.5[mm]の範囲であるため,評価関 数において,誤差の範囲は-0.5[mm]~0.5[mm]であると思 われる.これら実験結果に基づいて,4章に示すメンバー シップ関数および If-Then ルールのパラメータを決定した.

# ファジィ援用加エプロセス制御システムの開発 1 工具経路

工具経路の制御は実際にはローラ工具先端丸み部の中 心座標の軌跡を制御することになる.従って,その軌跡を もとに制御する. Fig.5 にローラ工具と被加工材との幾何 学的関係を示す.被加工材形状の座標 C(C<sub>x</sub>,C<sub>y</sub>)は式(1),工 具経路であるローラ工具先端丸み部の中心座標 R(R<sub>x</sub>,R<sub>y</sub>)は 式(2)で算出される.

$$\begin{cases} C_x(\alpha) = r_n \left\{ \cos(\alpha) - \frac{\pi}{2} \right\} \\ C_y(\alpha) = r_n \left\{ \sin(\alpha) - 1 \right\} \end{cases}$$
(1)

$$\begin{cases} R_x(\alpha) = -\frac{\pi}{2}r_n + (r_n + \rho_R)\cos(\alpha) \\ R_y(\alpha) = -r_n + (r_n + \rho_R)\sin(\alpha) \end{cases}$$
(2)

ここで、 n は加工回数で、 $r_n$  は n 回目の加工時における 加工半径である.  $\rho_R$  はローラ工具の先端丸み半径、 $\alpha$ は線 分 O'R と x'軸とのなす角度である. ローラ工具は半径  $(r_n+\rho_R)$ の円弧において、 $0[^\circ]$ から  $90[^\circ]$ を  $9[^\circ]$ 毎に 10 等分 した円弧の点の間を、管のチャック側から端末へ向けて指 示した座標を移動するように制御する.  $r_n$  は  $r_i=1[mm]$ か ら  $r_{10}=10[mm]$ まで 1[mm]毎に増加させ、n が 10 回で目的 形状になるように設定した.

#### 4・2 画像処理技術

目的形状と実際の形状との間には Fig.4 に示したように 誤差が発生する.この誤差は各回数のパスにおいて異なる ことが確認された.また,加工回数の増加に伴い,材料は 加工硬化し,加工終盤のみ工具軌跡を修正することは適切 ではないと考えられる.従って,各パスにおいて加工終了 時に逐次形状を計測し,工具軌跡を修正する必要がある. そこで,本研究では画像処理技術を使用した工具軌跡制御 アルゴリズムを開発し,適切に工具が移動できるようにした.





Fig.7 Schematic of relationship between radius and angle of arc

#### 4·3 評価関数

Fig.6 に加工後の被加工材形状と目的形状との関係を示 す.被加工材形状の任意角度 $\alpha$ における目的形状の座標を  $V(v_x, v_y)$ ,実際の形状の座標を $U(u_x, u_y)$ とし,誤差 $d_n(\alpha)$ を 線分 UV と定義する. Fig.7 に 3 章の実験から得られた角 度 $\alpha$ における目的形状の半径と被加工材形状の半径の関 係を模式的に示す.被加工材形状の半径  $r_{nideal}$ は加工開始 点( $\alpha$ =90[°])から管端末部( $\alpha$ =0[°])に向けて増加し,相関が とれていることが確認できる.各角度における被加工材形 状の半径を線形近似すると, $d_n(\alpha)$ は式(3)で算出される.

$$d_n(\alpha) = L_n - r_{nideal} \tag{3}$$

 $d_n(\alpha)$ を評価関数に適用してファジィモデルを作成し,製品精度向上を図る.また,加工回数低減のためには,積極的に加工量を増やす必要がある.しかし,加工量が増大すれば加工不良が生じやすくなるため,適切な加工量を設定する必要がある.従って,トレードオフの関係が成立するため,ファジィを用いて適切に加工量を制御する.そこで,加工回数低減のために Fig.8 に示す工具経路の半径増分を $\Delta r_n(\alpha)$ として評価関数に適用した. $\Delta r_n(\alpha)$ は式(4)で算出される.

$$\Delta r_n(\alpha) = r_n(\alpha) - r_{(n-1)}(\alpha) \tag{4}$$

#### 4・4 ファジィによる工具経路半径増分の推論

**Fig.9** にメンバーシップ関数を,**Table 4** に If-Then ルー ルを示す.これらのメンバーシップ関数と If-Then ルール を用いて工具経路半径増分 $\Delta r_{(n+1)}(\alpha)$ の推論を行う.式(5) に $\Delta r_{(n+1)}(\alpha)$ を示す.

$$\Delta \mathbf{r}_{(n+1)}(\alpha) = \frac{\sum_{j} \mu_{d(\alpha)} \cdot \mu_{\Delta \mathbf{r}_{n}(\alpha)} \cdot \Delta \mathbf{r}_{j}}{\sum_{j} \mu_{d_{n}(\alpha)} \cdot \mu_{\Delta \mathbf{r}_{n}(\alpha)}}$$
(5)

ここで, *j* はメンバーシップ関数と If-Then ルールの種類 S(=Small), L(=Large), P(=Positive), N(=Negative)である. 工具経路の半径  $r_{(n+1)}(\alpha)$ は $\Delta r_{(n+1)}(\alpha)$ より算出する.式(6)に  $r_{(n+1)}(\alpha)$ を示す.

$$r_{(n+1)}(\alpha) = \sum_{n=1}^{n+1} \Delta r_n(\alpha) \tag{6}$$

#### 4・5 工具経路探索法

工具経路  $R_{opt}(R_{xopt}, R_{yopt})$ は  $r(n+1)(\alpha)$ より算出する.式(7) に  $R_{(n+1)opt}(R_{(n+1)xopt}, R_{(n+1)yopt})$ を示す.

$$\begin{cases} R_{(n+1)x_{opt}}(\alpha) = -\frac{\pi}{2} r_{(n+1)_{old}}(\alpha) + \{r_{(n+1)}(\alpha) + \rho_R\} \cos(\alpha) \\ R_{(n+1)y_{opt}}(\alpha) = -r_{(n+1)_{old}} + \{r_{(n+1)}(\alpha) + \rho_R\} \sin(\alpha) \end{cases}$$
(7)

ここで、 $r_{(n+1)ide}$ は目的形状の工具経路の半径であり、加工 開始点の決定に用いられる. $r_{(n+1)ide}$ は式(6)において、誤差 が出ない場合の $r_{(n+1)}(\alpha)$ の値として算出される.

#### 4・6 システム概要

前節の工具経路に基づいて,ファジィ援用加工プロセス 制御システムを開発した. Fig.10 にシステムの概略図を示 す.スピニング加工機は PC により制御した. 被加工材形 状は CCD カメラを使用して画像処理を行い計測した. ス ピニング加工機のローラ位置制御は直行する 2 軸のアク チュエータを使用した. 画像処理,工具経路探索およびロ ーラ位置制御は開発したアプリケーションにより実行す る. Fig.11 に本研究で使用したファジィ援用加工プロセス のためのフローチャートを示す. このフローチャートに従 い工具を制御した.



Table4 If-Then rule		
If	Then	
$\Delta r_n$ is Small and $d_n$ is Positive	$\Delta r_{\rm SP} = 2.5$	
$\Delta r_n$ is Small and $d_n$ is Negative	$\Delta r_{\rm SN} = 2.0$	
$\Delta r_n$ is Large and $d_n$ is Positive	$\Delta r_{\rm LP} = 1.0$	
$\Delta r_n$ is Large and $d_n$ is Negative	$\Delta r_{\rm LN} = 0.5$	



Fig.10 Schematic of system on spinning machine

## 5. ファジィ援用加工プロセス制御システムを用い たマグネシウム合金管端末部スピニング実験

#### 5·1 実験方法

実験条件は 3 章と同一とした.ファジィ援用加工プロ セス制御システムを適用した工具経路は,初期の目的形状 を r<sub>1</sub>=1[mm]とし,通常の加工では加工後に r<sub>1</sub>=1[mm]から r<sub>10</sub>=10[mm]まで 1[mm]毎に増加させ,ファジィ援用加工プ ロセス制御システムを適用する加工では,加工毎に工具経 路を探索して r を増加させ, r<sub>n</sub>=10[mm]で加工終了とした. 5・2 実験結果

Fig.12 に加工後の被加工材形状を示す.最適工具経路探索法を適用した場合において目的形状と実際の形状との間の最大誤差は 0.28[mm]であり,最適工具経路探索法を適用しない場合の誤差は 0.50[mm]を大きく下回った.さらに,加工回数においても,最適工具経路探索法を適用した場合は7回になり,加工回数の低減が確認された.

## アルミニウム合金管における肉厚制御に及ぼす 加エプロセスの影響

#### 6·1 実験条件

本章ではデータベースに必要な加工プロセス,即ち加工 方向が肉厚制御に及ぼす加工パスの影響を調査した. 被加 工材は、A1050アルミニウム合金管とした. 被加工材の寸 法は外径 D<sub>1</sub>=25.0[mm], 肉厚 t<sub>0</sub>=1.5[mm], 全長 L=36.0[mm] の管材を用いた.マグネシウム合金管の基礎実験と同様に, ローラ工具のパスの回数は10回とした.加工方向の違い によって端部の形状に与える影響を調査した. Fig.13 に加 工方向を示す.加工方向Aでは、はじめにY方向にロー ラ工具で押込み、その後、加工半径 r<sub>n</sub>を伴いチャック部 側の方向へ,加工方向 B ではチャック部側から加工半径 r<sub>n</sub>を伴い管端部側へ加工を行った. さらに, 各工程におい てローラの押込み量の違いによって端部の形状に与える 影響を調査するため,各行程の押込み量をかえて実験を行 った. Fig.14 に各工程におけるローラの押込み量を示す. ローラの押込み量の変化の割合は、線形増加(Path I)、対 数増加(Path II)及び指数増加(Path III)の3種類とした.

## 6・2 加エパスによる肉厚制御のデータベース構築 6・2・1 外径形状に及ぼす加工方向の影響

Fig.15 に加工部の断面外周形状を示す. Path A では全長の圧縮量は目的形状の端部から測定すると 1.8[mm]であった. 管端部から工具を移動したため常に圧縮され,管端部の圧縮が促進されたと考えられる.また加工部の裾側では円周方向の膨らみが確認された. Path B では 0.3[mm],短くなった. チャック部側より端部方向への加工であり,管材の加工部をローラが引き伸ばしたため,圧縮が抑制されたと思われる.

#### 6・2・2 肉厚に及ぼす加工方向の影響

Fig.16 にそれぞれ 10 工程終了後の Path A と Path B の肉

厚ひずみを示す. Path A では加工部の裾側で厚肉化が確認 された. 一方, Path B では初期肉厚を越える部分は確認で きず, 厚肉化はなされなかった. 以上より厚肉化に対して Path A が有効であることが確認できた.



Fig.11 Flowchart for spinning process using fuzzy



#### 6・2・3 外径形状に及ぼすローラ押込み量の影響

Fig.17 に加工部の断面外周形状を示す.加工部の形状に おいて,押込み量の違いによる差はほとんど見られなかっ た.しかし,全長の圧縮は Path II が 1.4[mm]と最も短く, Path I の 1.8[mm]および Path IIIの 2.6[mm]と比較して,圧 縮量が少ないことが確認できる.

#### 6・2・4 肉厚に及ぼすローラ押込み量の影響

Fig.18 に被加工材加工部の肉厚ひずみを示す.全ての Path において厚肉化できた.特に,Path IIの厚肉化した 加工部の領域では,他の Path に比べて広いことが確認で きる.また,Path IIIでは厚肉化した部分が最小であり, 加工末期の加工量が少ないほど肉厚が増加する傾向がわ かった.

#### 7. 結言

ファジィ援用加工プロセス制御システムを適用したス ピニング加工機を開発し,実験により以下の結論を得た.

- 開発したスピニング加工機を使用してマグネシウム合 金管端末部のスピニング加工における基礎実験を行い、 データベースを構築して、メンバーシップ関数と If-Then ルールのパラメータを決定した.
- ローラ工具と被加工材の幾何学的関係からファジィを 用いて工具経路を探索するファジィ援用加工プロセス 制御システムを開発した.
- 3)工具経路探索法を適用した場合, 誤差の減少が確認さ れ,工具経路探索法による製品精度の向上と加工回数の 低減を確認した.
- 4)アルミニウム合金管端末部のスピニング加工において 被加工材の形状および加工部の肉厚に及ぼす加工方向 とローラ押込み量の違いの影響を調査した.
- 5)加工方向により被加工材の外形形状は大きく変化し, 厚肉化には管端部からチャック方向へのパスが効果的 であることを確認した.
- 6) ローラ押込み量の違いが被加工材の形状および肉厚に 及ぼす影響を調査し、押込み量が直線的に増加すること で、管全体の圧縮量が減少し、加工部全体の肉厚も他の Pathに比べて増加した。

#### 謝辞

本研究は,財団法人天田金属加工機械技術振興財団によ り研究開発助成(AF-2008020)を賜りました.ここに記 して感謝の意を表します.

#### 参考文献

- 1) 稲田ほか: 塑性と加工, 16-172(1975), pp.371-378.
- 2) 島ほか: 塑性と加工, 38-440(1997), pp.814-818.
- 3) 戸塚ほか: 第60回塑性連講論, pp.379-380.
- 4) 吉原ほか: 塑性と加工, 38-348(1997), pp.348-353.
- 5) 楊ほか: 塑性と加工, 39-449(1998), pp.585-590.



Fig.15 Outer shape after path A and path B







Fig.18 Distribution of wall thickness strain of path I , II and III

- 6) 楊ほか: 塑性と加工, 34-395(1993), pp.1320-1325.
- 7) 宮沢ほか: 塑性と加工, 34-394(1993), pp.348-353.
- S. Yoshihara, et al : J. Mater. Process. Technol., 153-154 (2004), pp.816-820.