



N. Yukawa

## サーボプレスを用いた逐次鍛造技術の開発

湯川 伸樹\*

### 1. 研究の目的と背景

一般的な型鍛造においては、棒材を出発点に、荒打、仕上げ、バリ抜きと言った工程を経る。荒打、仕上げ鍛造では材料の充満の程度により高い成形荷重が必要となることが多く、その場合、大型のプレス設備や強度の高い金型材料などを使用する必要があった。また工程ごとに異なる金型を使用することから、金型の設計・作製が製造時間やコストの増大の要因となっている。さらに鍛造荷重の増大を抑えながら材料の充満を進めるため、材料をバリとして流動させながら加工することが多く、製品歩留まりを低下させていた。

一方、逐次鍛造は単純な形状の工具を用いて材料に局所的で逐次的な圧縮や打撃を与えることで所望の形状を得る成形法であり、従来より特に鋼の大型部材についての研究が多くなされているが、より複雑な形状の成形に適用する事により高価な金型を省略できるとともに従来の手法では不可能な成形を可能とするフレキシブルな加工技術として注目されている<sup>1-6)</sup>。この技術を用いることで、究極的には、目標形状と同体積の材料で製造可能となり、鍛造後の切削加工も少なく済むようになるため、材料ロスを削減できる。また、逐次鍛造は型鍛造に比べて加工力が小さく済むので、金型及び設備のコンパクト化が可能であり、それにともなう省コスト、省エネルギーが期待できる。しかし一方で、逐次鍛造はその工具及び加工単位は単純であるが、その操作回数が非常に多く成形の自由度が大きいため、成形経路をどのように制御・決定するかが大変重要になる<sup>7)</sup>。しかし、これらの成形条件は、熟練者の経験によって決定されているのが現状である。

そこで本研究では、経験則に頼らないシステム開発を目指し、CAE (Computer Aided Engineering) による工程設計を採用し、サーボプレスと多軸ロボットを連動させた逐次鍛造システムによる高精度加工法の開発を目指した。

まず第1段階として、基本的な材料成形の特性について調査した。また同時に3次元剛塑性FEM解析による鍛造工程のシミュレーションを行い、加工精度、加工限界の把握、ならびに工程の最適化について検討した。次に軸径の縮小、平面工具による面内の曲げ加工、階段形状の作成の基本的な材料成形の特性について調査した。

次に逐次鍛造の実部品への応用として、コネクティングロッドの荒地成形への適用を試みた。

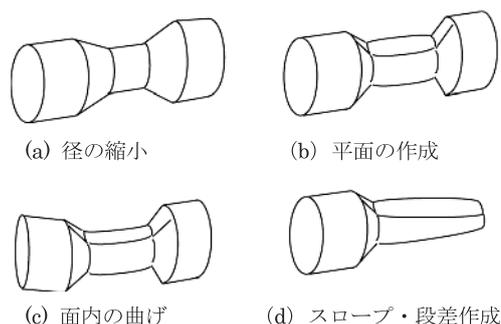


図1 逐次鍛造における基本加工要素例

### 2. 実験方法

#### 2.1 概要

実際の鍛造部品を逐次鍛造を用いて製品形状をつくるには、様々な変形要素を組み合わせる必要がある。例えば曲げる、段差をつける、連続的に径を変える、角をつけるなどである(図1)。本実験ではその中の①平行工具による回転圧縮加工、②縮径加工、③面内曲げ加工、④等幅階段加工という4項目について、作成した逐次鍛造システムを用いた実験を行った。それぞれの項目の変形を考察し、逐次鍛造システムの問題点や精度について検討した。

#### 2.2 実験装置

本研究では図2および図3に示すように、サーボプレス H1F80 (コマツ産機製) と産業用6軸ロボット MELFA RV-1A (三菱電機製) を連動させて用いた。サーボプレスは動力にサーボモータを用いたプレスであり、スライドの動きや速度などを比較的自由に制御できるため、本研究のようなフレキシブル加工に適していると考えられる。

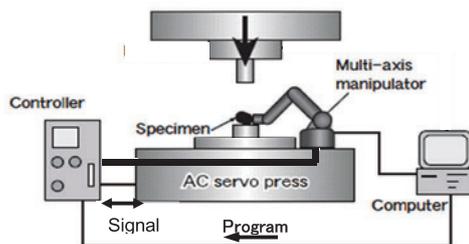


図2 実験システム概要

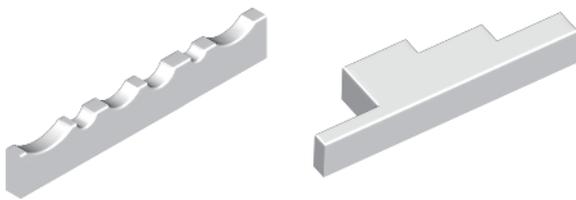
\*名古屋大学大学院工学研究科 准教授



図3 サーボプレスおよびロボット

ロボットの先端に実験で使う試験片に合わせたハンドを作製してロボットに取り付けた。

金型には SKD11 を用い、縮径加工においては図 4 (a) に示す幅 8mm で様々な半径の円弧形を配置した上下型を、また平面圧縮加工、面内曲げ加工、等幅階段加工においては図 4 (b) に示す幅 8mm で奥行きが 8, 14, 26 および 36mm の平面を配置した上下型を用いた。実験は全て無潤滑で行った。



(a) 円弧形金型 (b) 平面金型

図4 金型形状

### 2.3 供試材

本研究では、アルミニウム合金 A2017, および純チタン TB340H を用いて実験を行った。

材料は径縮小実験においては直径 15mm, 長さ 90mm の丸棒に、また曲げおよび段差作成の実験においては 15mm x 15mm, 長さ 90mm の角棒に機械加工して供試材とした。変化抵抗は端面拘束圧縮試験の結果より、A2017 は  $\bar{\sigma} = 694 \times \bar{\epsilon}^{0.13}$  MPa, TH340H は  $\bar{\sigma} = 901 \times \bar{\epsilon}^{0.14}$  MPa であった。

## 3. 実験の結果および考察

### 3.1 平行工具による回転圧縮加工における圧縮限界

材料に TB340H を用い、図 4 (b) の平行工具を用い、図 5 に示すような圧縮位置に材料を回転させながら位置 1 から位置 8 まで同じ圧縮率で順次圧縮した。これを 1 セットの圧縮とする。圧縮率は本研究においては全て初期直径または厚さに対する比率で表した。このように丸棒を並行工具で側方圧縮すると、材料中心部に引張応力が生じ、条件によって割れが発生する。その割れが発生する最小の限界

圧縮率が圧縮条件によってどのように変化するか調べた。

図 6 に素材の直径と 1 セットの圧縮で割れが発生する最小の圧縮率との関係を示す。素材が大きくなるほど、大きな圧縮率を与えないと素材中心に割れが発生する事が分かる。

次に表 2 に示す 5 種類の圧縮パターンで圧縮した時の限界の圧縮率を調べた。その結果を表 2 中に示した。Case2 では、第 1 セットの圧縮率は限界最小圧縮率よりわずかに高い値から圧縮を始めているが、最終的には 52.6% まで圧縮された後、材料表面から割れが発生した。

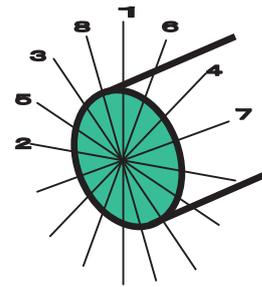


図5 縮径加工における圧縮順序

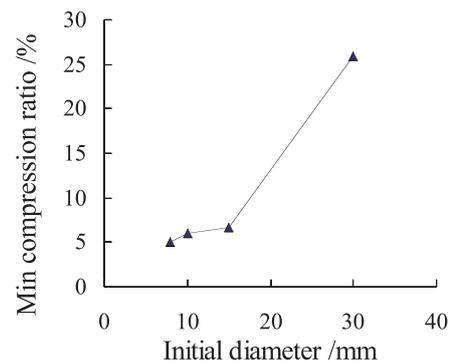


図6 初期直径と限界最小圧縮率の関係

Case 2 ~ 5 の結果より、第 1 セットの圧縮率が大きくなると、限界の圧縮率がわずかに上昇し、またそれに至る圧縮セットの回数も減らせることが分かる。しかし図 7 に示した Case1 のように、第 1 セットの圧縮率が過大になると、その時点で割れが発生するため、その傾向はある限度がある事が分かる。



図7 Case1 で発生した割れ

### 3.2 円弧型工具による縮径加工

材料に TB340H を用い、円弧半径が 10mm で幅が 8mm の金型を用い図 5 の順序で表 3 に示す 5 種類のパターンで圧縮を行い、加工後の試験片について直径を 45° おきに測定して、圧縮量の真円度に対する影響について検討した。

表2 平面圧縮加工における圧縮パターン

Case	圧縮セットの数	各セットにおける圧縮率 /%	限界圧縮率 /%
1	1	28.5	28.5
2	8	8, 7, 7, 7, 7, 7, 7, 2.6	52.6
3	7	12.6, 7, 7, 7, 7, 8, 5.4	54
4	7	21, 7, 7, 7, 7, 4, 3	56
5	5	25, 7, 10, 7, 7	56

表3 縮径加工における圧縮パターン

Case	各セットにおける圧縮率 /%
7	1% x 13 = 13%
8	5% x 2 = 10%
9	3% x 4 = 12%
10	3% x 4 + 1% = 13%
11	5% x 2 + 2% + 1% = 13%

各位置における直径の測定結果を図8に示す。グラフが直線に近づくほど真円に近いことを表している。図から細かい圧縮率で多サイクル圧縮する場合 (Case7) が真円に近く、逆に大きい圧縮率で少サイクル圧縮する場合 (Case8) は真円度が悪いことが分る。各パターンにおいて、直径のばらつきの二乗平均を求めたものを図9に示す。最後の圧縮率が小さいパターンでは真円度が高いと考えられる。また最後の圧縮率が同じ場合、最後から二番目の圧縮率が小さい方が真円度が良いと思われる。

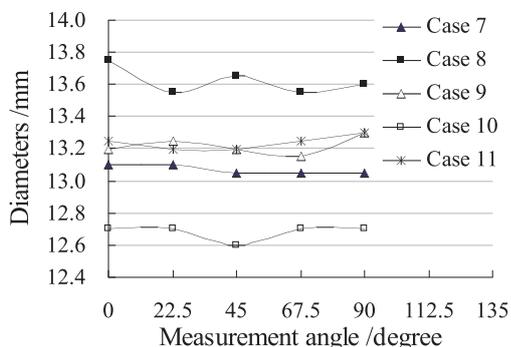


図8 圧縮後の直径の分布

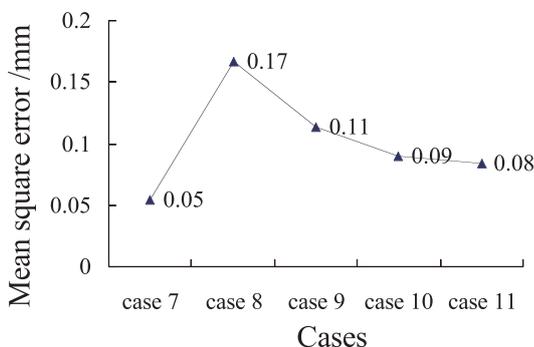


図9 圧縮後の直径のばらつきの二乗平均

### 3.3 平行工具を用いた面内曲げ加工

供試材をロボットで工具に対して斜めに送りながら角

度を変化させ、圧縮を行うことにより曲げ加工を行った。すなわち図10に示すように、A2017 および TB340H の各材料を角度  $\alpha_0 = 45^\circ$  で型に進入させ圧縮率  $r$  で圧縮、その後順に  $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$  の角度となるように材料を回転させながら送り、 $n$  回圧縮を繰り返す。全体圧縮長さを  $l$ 、圧縮回数を  $n$  として、 $l$  と  $n$  を変化させた場合の曲がり方 (曲率半径及び曲率) の違いを調査した。なお  $\alpha_0 = 45^\circ$  で進入させる最初の圧縮は  $l$  や  $n$  に関係なく一定の圧縮長さで行っている。そのためこれを回数や全体圧縮長さには加えていない。

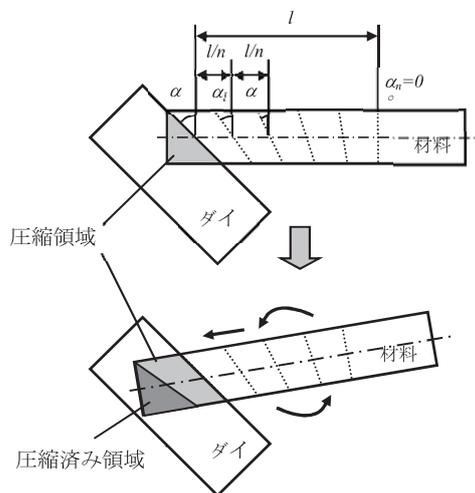


図10 面内曲げ加工の方法

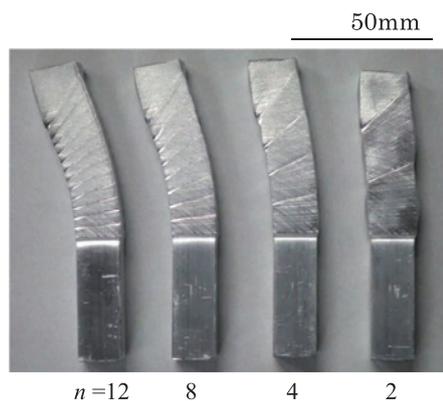


図11 圧縮回数の面内曲げ量に対する影響 (角棒,  $l=40\text{mm}$ ,  $r=33\%$ , A2017)

図11に、A2017角棒で圧縮長さ  $l=40\text{mm}$ 、圧縮率  $r=33\%$  の場合の、圧縮回数  $n$  と曲がりの程度との関係を示す。同じ全体圧縮長さの場合、圧縮回数を多くして細かく圧縮した方が曲率半径が小さくなるのがわかる。圧縮回数が

少なく、一度に圧縮する長手方向の距離が大きいと工具の摩擦による材料への拘束力が大きくなり、幅方向への広がりが増加することにより長手方向の伸び量が小さくなり、その結果曲がり量が小さくなるものと考えられる。

曲げの変形特性を理論的に検討するため、曲げ変形モデルを考案、導入し実際の実験結果と比較した。簡単のため棒材を角柱として考える。図12に示すように、 $a, b$ を圧縮領域の上辺および下辺の長さ、それぞれの圧縮による伸びを  $a'$  及び  $b'$  とし角柱幅を  $D$  とすると、一度の圧縮で発生する曲がり角度  $\beta_i$  は次のように求められる。

$$\beta_i = \tan^{-1} \left( \tan \alpha_i + \frac{b'-a'}{D} \right) - \alpha_i \quad (1)$$

圧縮率を  $r$  とし、伸びが長手方向のみと仮定すれば、 $n$  回圧縮した後の角度の総和  $S$  は

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} \left[ \tan^{-1} \left\{ \frac{\tan \alpha_i - r \tan \alpha_{i+1}}{1-r} \right\} - \alpha_i \right] \quad (2)$$

よって材料の先端の角度は  $S$  だけ傾くことになり、圧縮後の全体長さを  $l' (= l / (1-r))$  とすると、曲率半径は  $R = l'/S$  となる。

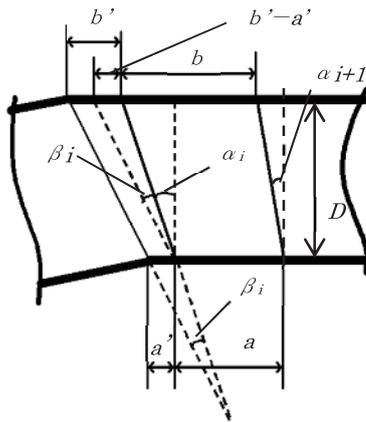


図12 面内曲げの解析モデル

モデル式で求めた曲率半径を角棒材による実験と比較して図13に示す。モデル式においても実験の場合と同様に圧縮回数  $n$  が多いほど曲率半径が小さい、つまり大きく曲がりが発生することが分かる。しかし  $n$  が小さいときには、実験値の曲率半径がモデル式における計算結果より著しく大きい。これはモデル式では圧縮に対する伸びを長手方向のみと仮定したことが大きな原因であると考えられる。実際は圧縮回数  $n$  が少ないと幅方向に伸び、その分長手方向の伸びが減少し、曲率半径が大きくなる。

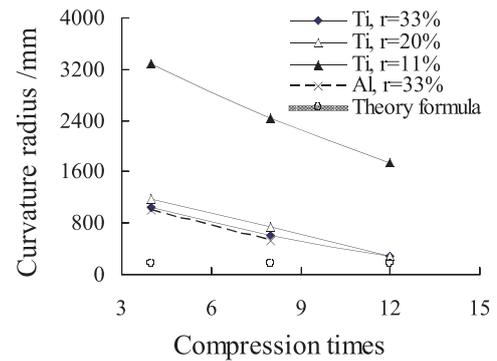


図13 圧縮回数の曲率半径におよぼす影響

### 3.4 平行工具を用いた等幅階段形状の加工

A2017の角棒を材料とし、平面金型を使用して等幅の階段形状の加工を試みた。まず試験片を平面金型に対して垂直に送り、縦方向に計算した中間の寸法高さ  $h_1$  まで圧縮して、ついで幅広がり影響を無くするため、材料を  $90^\circ$  回転させ目指す高さ  $h_2$  を圧縮する。これを第一サイクルとする(図14)。この後、同様に順番に  $n$  サイクル加工を繰り返して、第一階段目の階段を作成した。2段の加工をする場合、この後さらに角棒の先端から第二番目の階段を同様に圧縮する。

角棒試材は塑性異方性があり、鍛造すると幅広がり量が縦方向と横方向で異なるため、精密制御のために材料の異方性を考慮した次のようなモデルを考えた。

平面金型を用いて角棒を圧縮すると、鍛造後の寸法は Tomlinson-Stringer によって、次式によって推定できる<sup>8)</sup>。

$$w_1 = w_0 (h_0 / h_1)^{S_z} \quad (3)$$

$$l_1 = l_0 (h_0 / h_1)^{1-S_z} \quad (4)$$

ここで  $h$  は材料の厚さ、 $l$  は長さ、 $w$  は幅であり、添字の 0 は鍛造前、1 は鍛造後を示す。また  $S_z$  は縦方向の鍛造における幅広がり係数<sup>9-11)</sup>である。

目的の寸法  $w_2$  と  $l_2$  を狙って加工しても、幅広がりが生じるために  $w_1$  と  $l_1$  になる。そのため寸法を修正するために、幅方向にもう一回鍛造することが必要である。横方向鍛造に対しても、次式が成立するとする。

$$w_2 = h_1 (w_1 / h_2)^{S_y} \quad (5)$$

$$l_2 = l_1 (w_1 / h_2)^{1-S_y} \quad (6)$$

ここで  $S_y$  は横方向の鍛造における幅広がり係数である。試材の初期寸法と目標寸法が与えられると、式(3)~(6)より次式が求まる。

$$w_1 = w_0 \times h_0^{S_z} \times \left( \frac{w_0^{S_y} \times h_0^{S_y S_z}}{w_2 \times h_2^{S_y}} \right)^{\frac{S_z}{1-S_y S_z}} \quad (7)$$

$$h_1 = \left( \frac{w_0^{S_y} \times h_0^{S_y S_z}}{w_2 \times h_2^{S_y}} \right)^{\frac{1}{S_y S_z - 1}} \quad (8)$$

従って幅広がり係数  $S_z$  と  $S_y$  が分かれば、中間の寸法

$w_1$  と  $h_1$  または  $l_1$  の値を求めることができる。1 サイクルの状況を図 15 に示す。

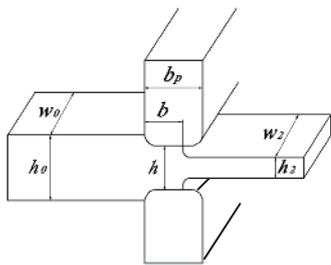


図 14 等幅階段加工の概要

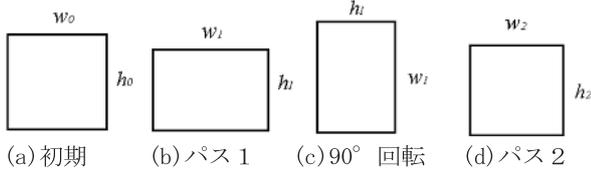


図 15 平面工具による角棒の圧縮

まず幅広がり係数を求めるために、断面寸法 15x15mm、相対長さ ( $l_0/w_0$ ) が 0.33 と 0.66 の直方体の圧縮実験を行った。図 16 に縦方向と横方向圧縮実験からの幅広がり係数  $S_z$  と  $S_y$  を示す。横方向の幅広がり係数  $S_y$  は縦方向の  $S_z$  より大きいことが分る。更に、 $S_y$  はひずみの影響が小さいと考えられる。

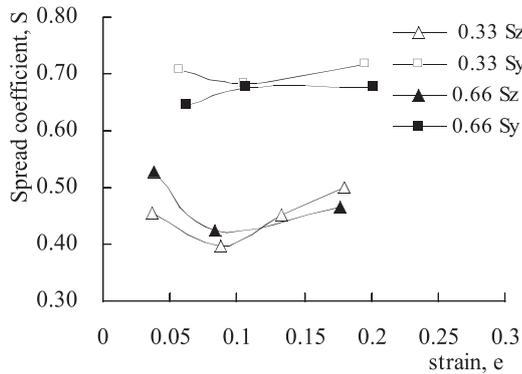


図 16 ひずみと幅広がり係数の関係

次に A2017 を材料として、図 17 に示すような 1 段 (B 部長さが 0) および 2 段の等幅階段形状を、表 4 に示す圧縮パターンによって作成した。圧縮後の形状を測定し、圧縮パターンの加工精度に及ぼす影響について調べた。

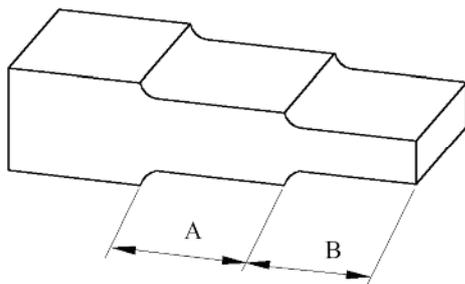


図 17 2 段の等幅階段形状

表 4 等幅階段加工における圧縮パターン

Case	b/mm	圧縮スケジュール	A 部, B 部の幅 /mm	A 部, B 部の長さ /mm
41	40	0°-90°	12, -	40, 0
42	40	0°-90°-0°-90°	12, -	40, 0
43	8	0°-90°	12, -	40, 0
44	8	0°-90°-0°-90°	12, -	40, 0
45	5	0°-90°	12, 12	30, 10
46	5	0°-90°-0°-90°	12, 12	30, 10
47	5	0°-90°-0°-90°	12, 10	30, 10

Case41 と Case42 はともに圧縮長さを 40mm とし、Case41 では 1 サイクル、Case42 では 2 サイクルの加工とした。図 18 に長手方向に沿った幅の分布を示す。圧縮サイクル数が 1 回の場合より 2 回の方が幅広がり量が小さいことがわかる。

1 サイクルの圧縮幅 (図 14 中の  $b$  の値) を 8mm (Case43, 44), 5mm (Case45, 46) と小さくした場合を図 19 および図 20 に示す。圧縮長さが 40mm の場合と同様に、圧縮サイクル数が 1 回の場合より 2 回の方が、幅広がり量は小さいことが分かる。

Case42, 44, 46 における加工後の材料の幅の最大値を図 21 に示す。圧縮幅が 5mm の場合 (Case46) では、ほぼ目標である 12mm となっていることが分かる。

A 部と B 部の幅を変更したもの、すなわち長手方向で幅の変化がある場合についても検討した。Case47 は圧縮幅を 5mm と小さくし、A 部の幅を 12mm, B 部の幅を 10mm としたものである。材料の幅の長手方向の分布を図 19 に重ねて表示した。またこのときの試験片の状態を図 22 に示す。このように、途中で幅を変化させても、幅の変動には大きな影響がないことが分かる。

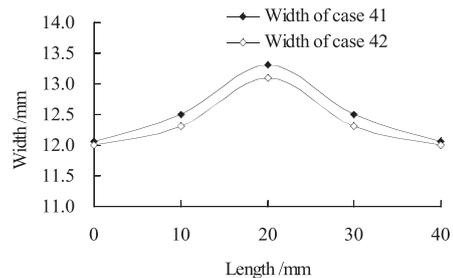


図 18 圧縮サイクル数が幅広がり量に及ぼす影響 (b=40mm)

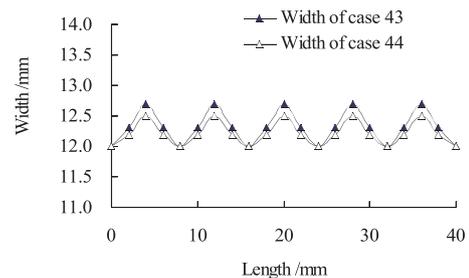


図 19 圧縮サイクル数が幅広がり量に及ぼす影響 (b=8mm)

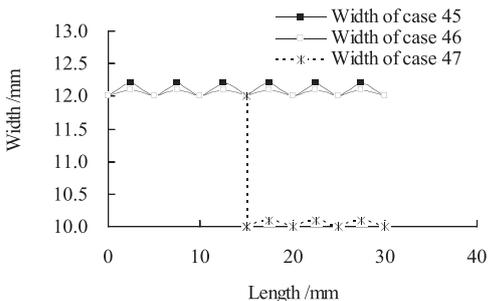


図 20 圧縮サイクル数が幅がり量に及ぼす影響 ( $b=5\text{mm}$ )

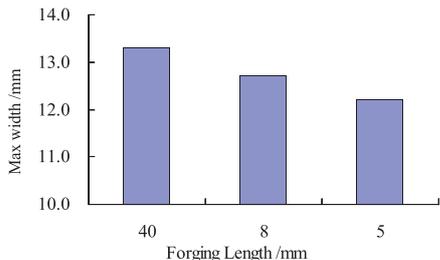


図 21 圧縮幅の最大幅に及ぼす影響 (Case42, 44, 46)

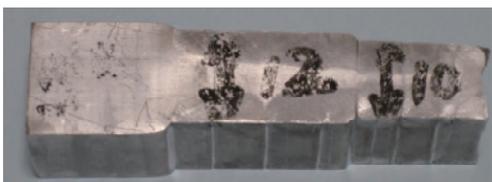


図 22 長手方向に幅を変化させた場合の加工後の材料の形状 (Case47)

### 4. 実部品への逐次鍛造の適用

逐次鍛造の実部品への応用として、コネクティングロッドの荒地の自動成形システムを開発した。工程数が多く、成形の自由度が大きいため、FEM 解析を用いて材料の圧縮位置、圧縮量を変化させながら、最終形状から最適な加工プロセスを逆算し、その成形経路を元に全自動成形を図った。

#### 4.1 逐次鍛造加工プロセス

成形経路を決定するために3次元FEM解析を用いて工程設計を行った。被加工材の圧縮位置、圧縮量を変化させ、最終形状が目標とする予成形品形状に近く、工程数が最も少ない経路を最適とした。材料はA1050を用い、初期寸法は長さ90mm、幅49mm、厚さ21mmとした。加工プロセスを図23に示す。1~3の工程で圧縮すると、材料は「長手方向」と「厚さ方向」に広がる。そこで4工程目では、材料を90度回転させ、厚さ方向に膨らんだ部分を元の板厚に戻すように圧縮しており、さらに材料を長手方向に伸ばしていく。これらの操作を繰り返すことによって14工程で目的形状を得られる成形経路に決定した。

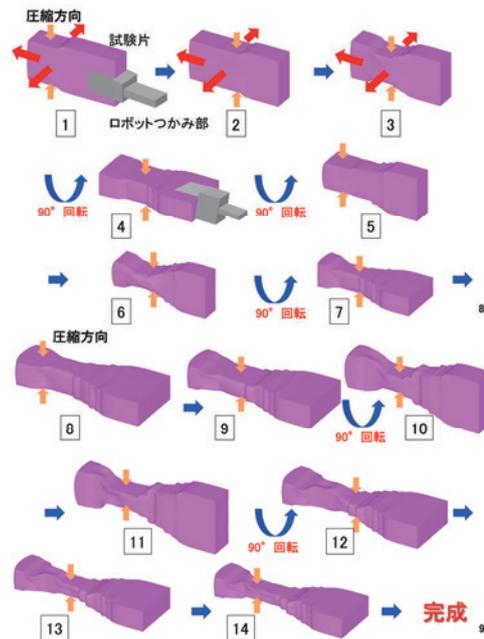


図 23 逐次鍛造加工プロセス

### 4.2 結果

自動成形した予成形品を図24に示す。また成形品の5箇所で測定した長さを解析結果と比較して図25に示す。両者は概ね良い一致を示している。計測位置2と3において若干の差が見られるのは、実験において軸の細い部分(図23の11工程目)を圧縮する際に、金型と材料の接触面積が小さく、滑って圧縮されなかったことが原因だと考えられる。



図 24 成形後の材料形状

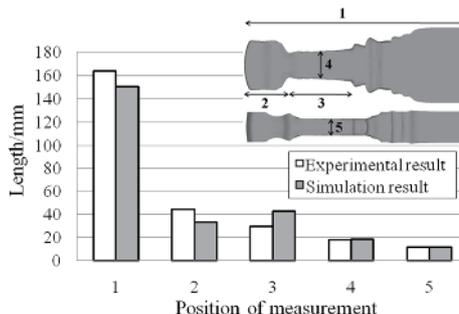


図 25 成形後製品の寸

## 5. まとめ

サーボプレスとアーム型ロボットを連動させ、逐次鍛造実験を行い、以下の結果を得た。

- (1) 逐次鍛造システムの基本モデルを構築できた。
- (2) 平行工具を用いた回転圧縮加工において、初期に大圧下を加えることにより、圧縮限界が向上する。しかし過大な圧縮を加えるとその時点で割れが発生するため、その向上には限界がある。
- (3) 縮径加工において、仕上げに軽圧下することにより、加工精度が向上する。
- (3) 面内曲げ加工について全体圧縮長さが一定の場合において圧縮回数を多くしたほうが曲がりが発生しやすい。圧縮回数が一定の場合、一度の圧縮距離を小さくすることで曲がり量を増やすことができる。
- (4) 角棒材料の異方性を考えて縦方向と横方向の幅広がり係数を求めた。それを用いて等幅階段形状を精度よく加工することが可能となった。
- (5) 実部品への応用として、コネクティングロッドの荒地成形に適用を試みた。

## 参考文献

- 1) 松原茂夫：塑性と加工，第42巻 第489号(2001)，1.
- 2) K. W. Lilly, A. S. Melligeri: Theory & Applications, 1996, 17: 81-99.
- 3) R. Kopp, T. Beckmann: Proc. 5th Int. Conf. Technol. Plasticity, (1996), 347-350.
- 4) B. Aksakal, F. H. Osman, A. N. Bramley: J. Mater. Process. Technol., 71(1997), 215-223.
- 5) F. H. Osman, J. Ferreira: Proc. Inst. Mech. Engrs., 213B(1999), 311-331.
- 6) T. J. Nye, A. M. Elbadan, G. M. Bone: J. Eng. Mater. and Technol., 123(2001), 511-516.
- 7) 田中繁一：塑性加工春季講演会論文集，(2001)，95-96.
- 8) A. Tomlinson, J. D. Stringer: J. Iron and Steel Inst., 193(1959), 157-162.
- 9) A. Shutt: Appl. Sci. Res., 9(1960), 389-392.
- 10) J. G. Wistreich, A. Shutt: J. Iron and Steel Inst., 193(1959), 163-176.
- 11) R. Sagar, B. L. Juneja: Int. J. Mach. Tool Des. Res., 19(1979), 253-258.