

# 金属系インプラント製造のための逐次鍛造技術開発

名古屋大学大学院 工学研究科 マテリアル理工学専攻  
准教授 湯川伸樹  
(平成18 年度一般研究開発助成 AF-2006023)

キーワード：逐次鍛造，サーボプレス，加工精度

## 1. 研究の目的と背景

高齢者人口の増加が著しい昨今，加齢による生体機能の低下，損失を被る人も増加の一途をたどっている．特に骨粗鬆症などの理由から骨折をする人の数は多く，また骨折をきっかけとして寝たきりになる場合が多いため，現在では人工骨，人工関節，骨プレート等を積極的に使用し，できるだけ早期にリハビリテーションを行う事が推奨されている．このような埋入材（インプラント）としては高い生体親和性の他に，変形強度，疲労強度，靱性，耐摩耗性などの性質が求められ，そのためステンレス鋼，Co-Cr 系合金，Ti 合金などの金属系生体材料が多く用いられている．しかしこれらいずれの金属系生体材料も難加工材料であることから，特に日本においてはその加工および強度評価に関する研究は遅れている．部材によっては輸入率が非常に高い製品もあり，特に体内に埋め込まれるデバイスなどは約 90%が欧米からの輸入に依存している<sup>1)</sup>．

一方，一般の工業用金属部品の製造では生産効率，材料歩留り，材質改善などの点で，多くの利点をもつ塑性加工が多用されている．しかしながら塑性加工は大きな加工力を必要とすることから一般に工具が高価となり，そのために寸法，形状，重量など各患者個別に適合させる必要のある硬組織代替器具のための加工にはあまり向かないと考えられ，鋳造や機械加工が主に採用されてきた．しかし近年，加工制御技術の向上，材料変形挙動の予測技術の発展に伴って，材料を逐次的に加工して最終形状に精度よく仕上げる技術が発達してきている．この技術を用いれば，難加工材料である金属系生体材料においても，個々の患者に適した形状に実用的にかつ高精度に加工することが可能であると考えられる．逐次鍛造（インクリメンタルフォーミング）は単純な形状の工具を用いて材料に局所的で逐次的な塑性変形を与えることで所望の成形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>2-7)</sup>．逐次鍛造においてはその工具および加工単位は単純であるがその操作回数が非常に多くプロセスをどのように制御・生成するかが重要になる<sup>8)</sup>．

本研究では，最終的に Ti 系合金，Co-Cr-Mo 系合金製の人工骨，人工関節等を製造する事を目標に，対象が難加工材料であること，材料歩留りの点から切削加工を極力削減する必要があること，各患者個別に適合するものを迅速に製造できる可能性があること，加工によって材料の機械的特性の改善が期待できること，などを考慮して，逐次鍛造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，サーボプレスと多軸ロボット

と組み合わせた逐次鍛造装置を開発し，それを用いた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．

## 2. 実験方法

### 2.1 概要

実際の人工骨作製は様々な変形を組み合わせることで製品形状をつくる．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吟味した．

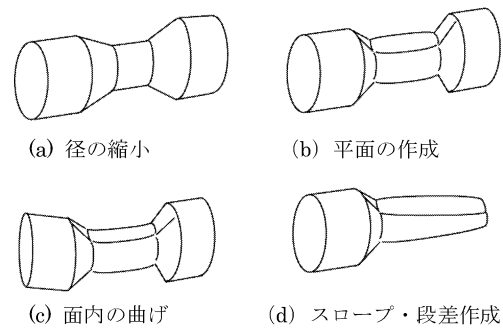


図 1 逐次鍛造における基本加工要素例

### 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．

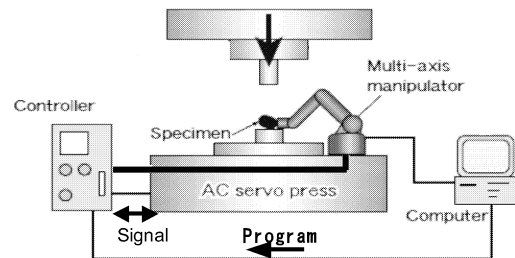


図 2 実験システム概要

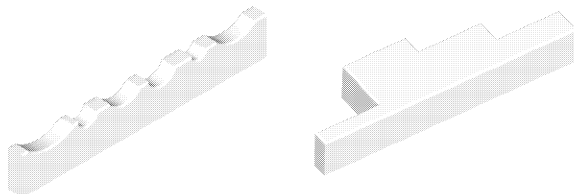


図3 サーボプレスおよびロボット

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。

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、加工硬化指数(n値)が人工骨でよく用いられるTi合金と近い材料であるアルミニウム合金A2017、および純チタンTB340Hを用いて実験を行った。それぞれの化学組成を表1に示す。

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, TB340H は  $\bar{\sigma} = 901 \times \bar{\epsilon}^{0.14}$  MPa であった。

表1 供試材の化学組成 (wt%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
A2017	0.54	0.20	3.94	0.63	0.57	0.02
	Cr	Zn	Al			
	0.02	0.04	Bal			
TB340H	C	O	N	Fe	H	Ti
	0.01	0.12	0.01	0.07	0.001	Bal

## 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するサイクルを1セットとする。割れが発生する限界圧縮率が圧縮条件によってどのように変化するかを調べた。まず様々な直径の材料に対して、1セットの圧縮で割れが発生する圧縮率を実験およびDEFORM3Dによる解析から求めた。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。

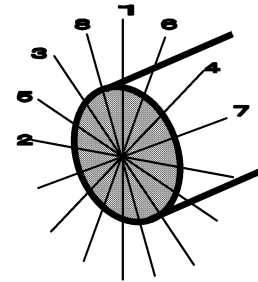


図5 縮径加工における圧縮順序

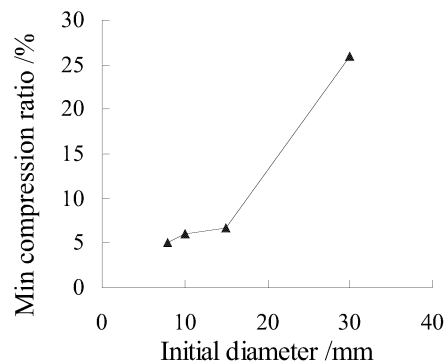


図6 初期直径と限界最小圧縮率の関係

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

次に表 2 に示す 5 種類の圧縮パターンで限界の圧縮率を調べた。その結果を表 2 中に示した。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す。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。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 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 $l\%$
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 (Case7) 方が真円に近くて、大きい圧縮率で少サイクル圧縮する (Case8) 方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いいと思われる。

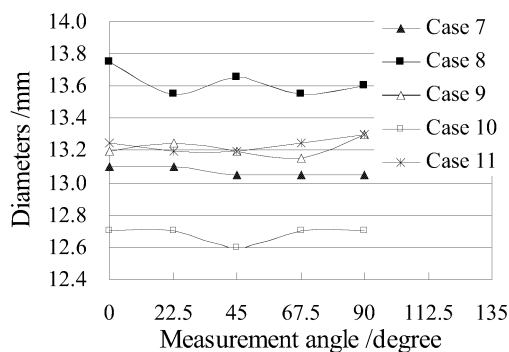


図 8 圧縮後の直径の分布

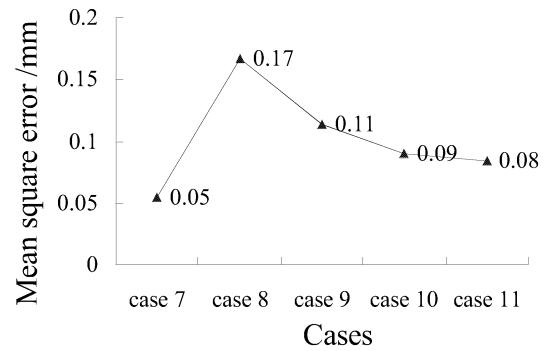


図 9 圧縮後の直径のばらつきの二乗平均

### 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、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。

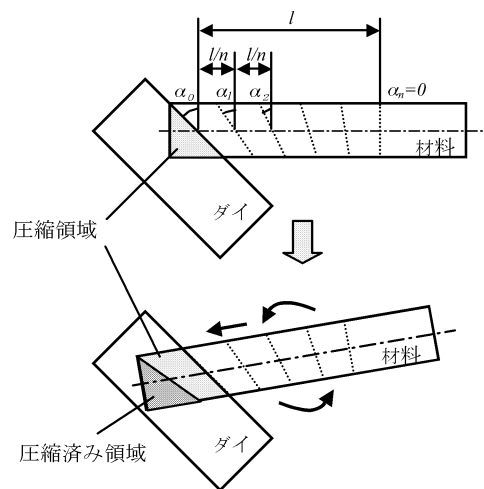


図 10 面内曲げ加工の方法

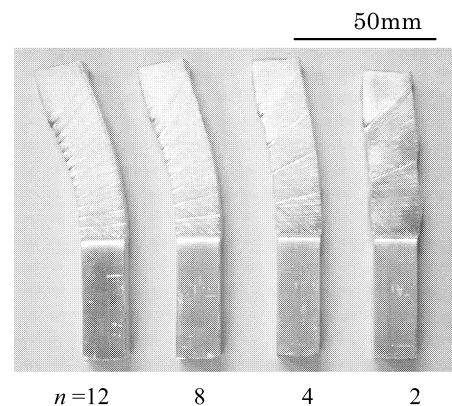


図 11 圧縮回数の面内曲げ量に対する影響 (角棒,  $l=40\text{mm}$ ,  $r=33\%$ , A2017)

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間の関係を示す. 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ことがみてとれる. 圧縮回数が少ないと一度に圧縮する長手方向の距離が増え, 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論ずる目的で, 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.

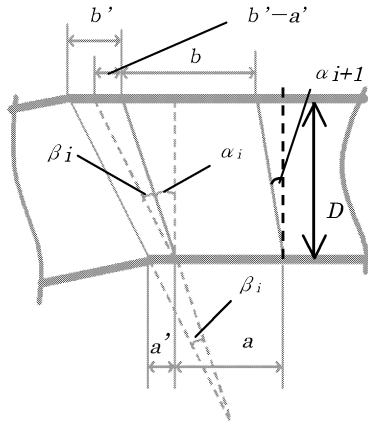


図 12 面内曲げの解析モデル

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傾向は同じで圧縮回数  $n$  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, つまり曲率半径が大きくなる.

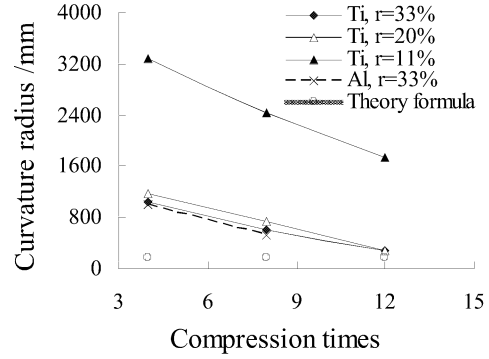


図 13 圧縮回数の曲率半径におよぼす影響

### 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>9)</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>10-12)</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.

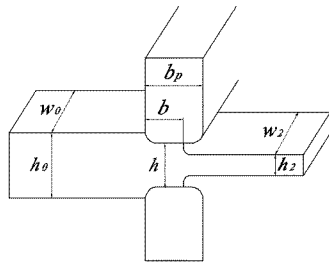
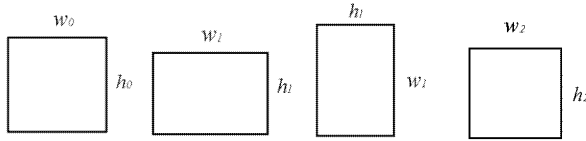


図 14 等幅階段加工の概要



(a)初期 (b)パス1 (c)90°回転 (d)パス2

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。

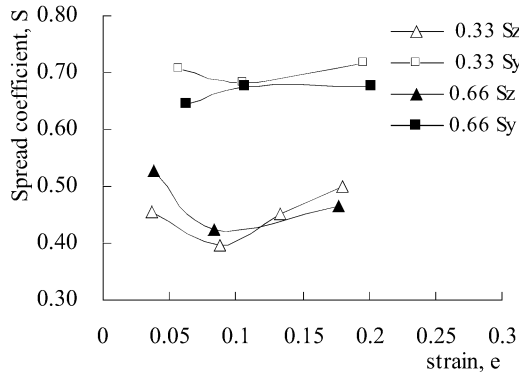


図 16 ひずみと幅広がり係数の関係

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。

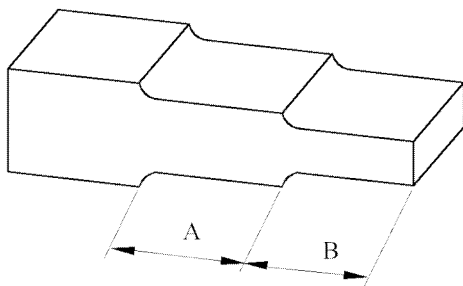


図 17 2 段の等幅階段形状

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。

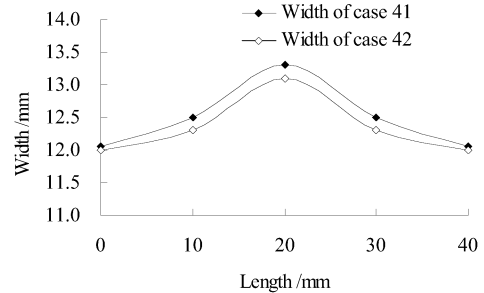


図 18 圧縮サイクル数が幅広がり量に及ぼす影響 (b=40mm)

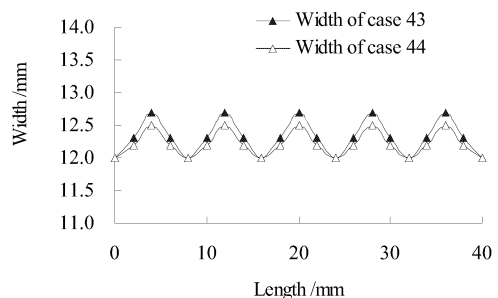


図 19 圧縮サイクル数が幅広がり量に及ぼす影響 (b=8mm)

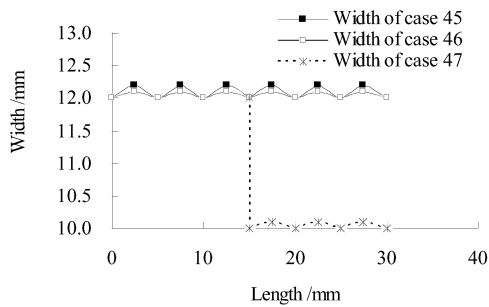


図 20 圧縮サイクル数が幅広がり量に及ぼす影響 (b=5mm)

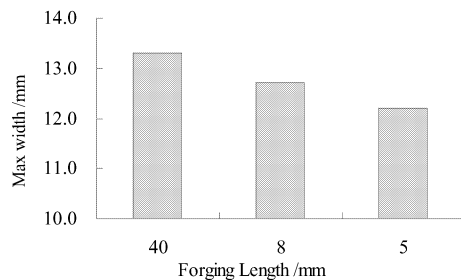


図 21 圧縮幅の最大幅に及ぼす影響 (Case42, 44, 46)

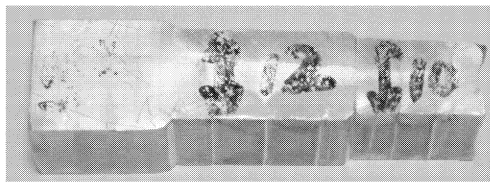


図 22 長手方向に幅を変化させた場合の加工後の材料の形状 (Case47)

#### 4. 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。

#### 謝 辞

本研究の遂行にあたり、(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究助成を受けたことを付記し、財団および関係各位に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 藏本孝一・森亜希子・杉野篤史：日本人に適した人工関節の開発, Vol. 69, No. 5 (2003), 636-640.
- 2) 松原茂夫：インクリメンタルフォーミングの発展と二三の課題, 塑性と加工, 第 42 巻 第 489 号 (2001), 1.
- 3) K. W. Lilly, A. S. Melligeri: Dynamic Simulation and Neural Network Compliance Control of an Intelligent Forging Center. J. Intelligent and Robotic Systems: Theory & Applications, 1996, 17: 81-99.
- 4) R. Kopp, T. Beckmann: Open-die Forging with a Six-Axis Robot as Forging Manipulator. Proceedings of the 5th International Conference on the Technology of Plasticity (ICTP), Columbus, Ohio. Oct. 1996, 347-350.
- 5) B. Aksakal, F. H. Osman, A. N. Bramley: Upper-Bound Analysis for the Automation of Open-Die Forging. J. Mater. Process. Technol., 1997, 71: 215-223.
- 6) F. H. Osman, J. Ferreira: Investigation into the automation of incremental forming processes. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1999, 213B: 311-331.
- 7) T. J. Nye, A. M. Elbadan, G. M. Bone: Real-time Process Characterization of Open Die Forging for Adaptive Control. J. Eng. Mater. and Technol., 2001, 123: 511-516.
- 8) 田中繁一：インクリメンタルフォーミングプロセスの制御に関する研究, 塑性加工春季講演会論文集, (2001), 95-96.
- 9) A. Tomlinson, J. D. Stringer: Spread and Elongation in Flat Tool Forging. J. Iron and Steel Inst., London, 1959, 193: 157-162.
- 10) A. Shutt: A Note on Spread in Indenting. Appl. Sci. Res., 1960, 9: 389-392.
- 11) J. G. Wistreich, A. Shutt: Theoretical analysis of bloom and billet forging. J. Iron and Steel Inst., London, 1959, 193: 163-176.
- 12) R. Sagar, B. L. Juneja: An Upper Bound Solution for Flat Tool Forging Taking into Account the Bulging of Sides. Int. J. Mach. Tool Des. Res., 1979, 19: 253-258.