

(論文)

# 鍛伸加工における工程設計技術

## Process Design for Extended Forging



柿本英樹\* (工博)

Dr. Hideki KAKIMOTO



高森秀樹\*\*

Hideki TAKAMORI



高橋洋一\*\* (工博)

Dr. Yoichi TAKAHASHI



吉田鷹志\*\*\*

Takashi YOSHIDA

The process design for extended forging was developed using numerical simulation to establish a process that would assure both the productivity and surface quality of extended forging using the open die free forging press. The coefficient of friction is important for accurately predicting the forged shape. The coefficient of friction using 3D-FEM (the Finite Element Method) is identified using a model experiment. The forged shapes of the square process and the tap process are analyzed by using this 3D-FEM. The relationship between the forging conditions and the forged shape is shown. The predicted equations using numerical models are constructed using these relations. The effectiveness of using the predicted equations is verified by the actual process.

まえがき＝自由鍛造プレスを用いて銅塊（素材）からフランジ付き丸棒を製造する場合、まず、加熱炉で素材を所定温度まで加熱してプレス装置に搬入し、マンピュレータでこれをつかむ。素材をつかんだ状態のまま移動・回転させながら平工具を使って圧下を繰返して目標寸法に近づけていき、最後に孔型（タップ）を有する工具を使って仕上げる方法が一般的である。この工程を鍛伸工程と呼んでおり、断面形状や使用工具によって荒工程・中間工程（四角工程）・仕上工程（八角工程・タップ工程）に分けられている。従来から、鍛伸加工の工程設計（鍛造パススケジュール）を事前に決定し、実機に適用した事例<sup>1)</sup>が報告されている。しかしながら、鍛造前に鍛造パススケジュールを決定するため、鍛造途中で曲がりなどの発生によって予測値と異なった形状になった場合、パススケジュールの継続的な適用が難しくなり、プレスオペレータが介入せざるを得ない状況となる。一方、プレスオペレータが介入すると、オペレータ個人の能力が生産性や表面性状などに大きく影響を及ぼすため、ばらつきが発生しやすい傾向となる。このため、鍛造途中でのパススケジュールをフレキシブルに変更でき、極力プレスオペレータ個人の能力に頼らずに鍛造パススケジュールを適宜決定していく工程設計手法を確立することが重要となる。

そこで本稿では、プレスオペレータの介入頻度が高い中間工程（四角工程）、および鍛造時間や寸法精度のばらつきが大きい仕上工程（タップ工程）において、工程設計手法を確立することを目的とした。

四角工程では幅広がり特性を簡易に予測することが重要である。そこで、数値シミュレーション技術を活用した鍛造形状の幅広がり特性における数値モデル式を提案すると同時に、実機実験による数値モデル式の精度検証

を行った。

また、仕上工程では、圧下量を大きくしてパス数を減らすことによって鍛伸工程の生産性を向上させることができるが、一方で表面性状は悪化する。また、寸法精度を始めとする表面性状を良好にするためには圧下量を小さくする必要があるが、生産性が悪化する。とくに、タップ工程では素材が長くなるため、生産性のばらつきが大きくなる。そこで、数値シミュレーション技術を活用して鍛造条件（八角形状、送り、回転角度）が表面性状に及ぼす影響を調べ、実機実験により効果を検証した。

### 1. 鍛伸工程

図1は実機4,000トン自由鍛造プレス装置の概観である。素材を保持・移動・回転させるためのマンピュレータが装備されている。この自由鍛造プレスでは、主にフランジ付き丸棒などを製造しており、その鍛造工程を図2に示す。加熱炉で所定温度に加熱した素材（押湯側）をマンピュレータで保持して鍛造を開始する。鍛造工程で

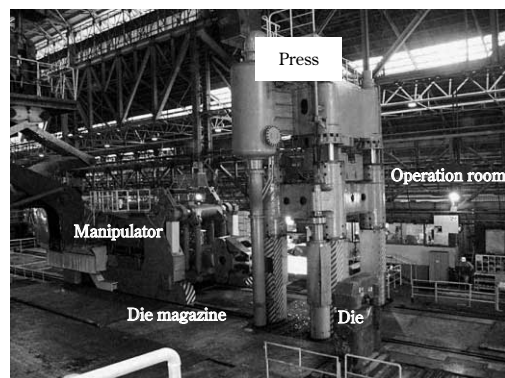


図1 自由鍛造プレスの外観  
Fig. 1 Appearance of free forging press

\*技術開発本部 材料研究所 \*\*鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 技術開発部 \*\*\*鉄鋼事業部門 鋳鍛鋼事業部 鍛圧部

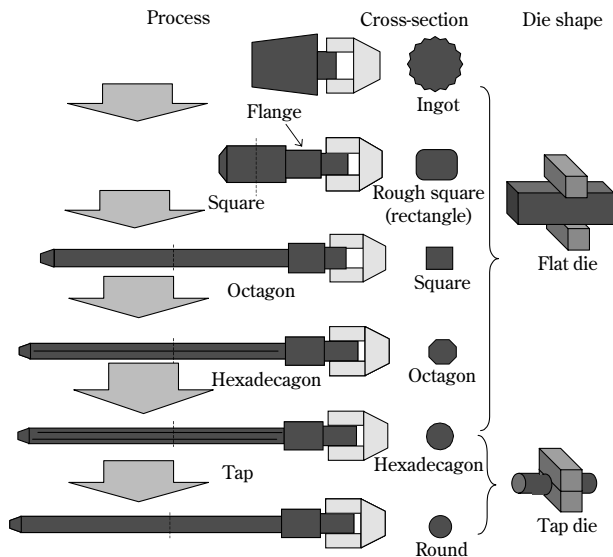


図2 フランジ付丸棒の鍛造工程  
Fig. 2 Forging process of round bar with flange

は、効率よく断面積を減少させると同時に工具交換を必要最小限に抑えるため、平面の工具（以下、平金敷という）を用いるのが一般的である。まずフランジ部を鍛造し、続いて軸部を鍛造する。軸部の鍛造では、素材を軸方向に動かして全長を鍛造した後、素材を90°回転させて同様に鍛造し、断面形状を四角形に整える（荒工程）。この鍛造を繰り返すことによって断面形状（四角形）を保ったまま断面積を減少させ、所定の寸法まで鍛造する（中間工程：四角工程）。その後、仕上工程として、四角の角を圧下して八角形状を作る（八角工程）。さらに、八角の角を圧下して十六角形状を作る（十六角工程）。最後にタップ工具を用い、圧下と回転を繰り返し与えて円形断面形状を作って（タップ工程）鍛造を終了する。なお、十六角工程は八角形状を修正する目的の工程のため、省略されることもある。

## 2. 三次元数値シミュレーション

自由鍛造では、素材に圧下を加えることによって軸方向および幅方向の2方向に材料流動が生じる。この幅方向の材料流動を予測するために、ここでは汎用剛塑性有限要素解析ソフト (FORGE3D) を用いた。FORGE3Dは並列計算が可能であり、軸材の鍛伸加工のような長尺物を対象とした場合でも実用上十分な計算速度が得られることから使用した。

本稿では、FORGE3Dを活用して種々の実機鍛造条件と幅寸法の間関係を調べることによって幅寸法に関する数値モデル式を構築し、さらに、操業中にパススケジュールを決定できるシステムを構築した。以下にその概要を述べる。

### 2.1 摩擦係数の同定

数値シミュレーションを用いて鍛造形状を精度よく予測するためには、とくに、素材と工具との摩擦係数を明らかにする必要がある。通常、リング圧縮試験により圧縮後の形状から摩擦係数を同定する方法が用いられているが、鍛伸加工の場合、軸方向と幅方向の材料流れが同じではないため、リング圧縮試験では同定できないと考

えられる。また、表面酸化スケールと金型との相互作用があると考えられる。

このため、実機に近い条件でモデル実験を行い、種々の摩擦係数（クーロン則）を与えた場合の断面形状を比較することによって摩擦係数の同定を行った。

モデル実験は実機の1/5サイズで、素材形状は幅100mm、高さ60mm、長さ500mm、角rは10mmとした。素材を1,200°Cに加熱し、素材表面の酸化スケールをはく離させた後、圧下速度1mm/sとして四角工程を模擬した実験を行った。その後、空冷して工具中央面において幅寸法を測定した。図3に実験装置の外観を示す。なお、モデル実験での圧下量は12mmとし、噛（かみ）込み量は50mm一定とした。一方、数値シミュレーションでは、1/4対称モデルとし、実験と同一条件で実施した。また、変形抵抗は別途行った圧縮実験により得られた値を用いた。

数値シミュレーションで得られた摩擦係数と最大素材幅 ( $W_{max}$ ) / 初期素材幅 ( $W$ ) の関係を図4に示す。最大素材幅の測定位置は、工具中央面でのバルジ部が最大となる位置とした。数値シミュレーションにおいて、工具と素材との摩擦係数が低い場合は自由面のバルジ形状が少なく、逆に摩擦係数が高い場合は自由面のバルジ形状が大きくなる。モデル実験から1パス目の  $W_{max}/W=1.13$  が得られ、図中に点線で示した。この結果から、モデル実験と同等の幅広がりを示す摩擦係数は0.15と決定した。

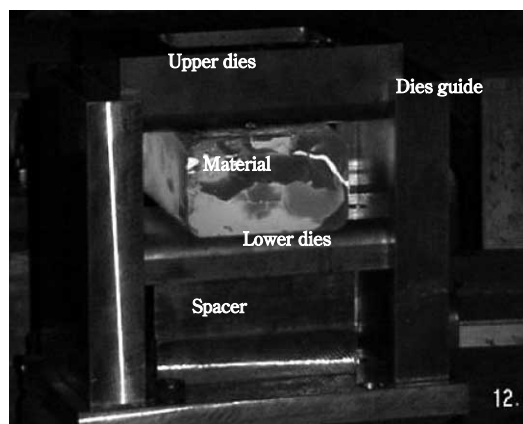


図3 実験装置の外観  
Fig. 3 Appearance of experimental unit

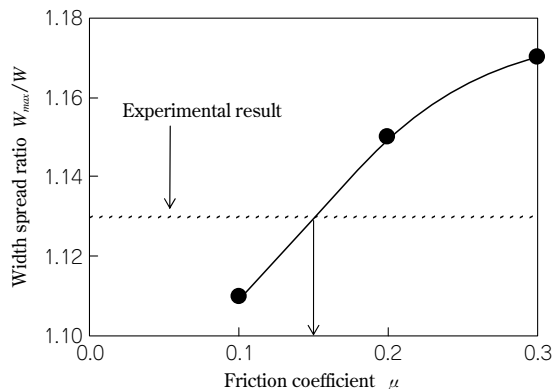


図4 摩擦係数  $\mu$  と幅広がり率  $W_{max}/W$  との関係  
Fig. 4 Relationship between friction coefficient  $\mu$  and width spread ratio  $W_{max}/W$

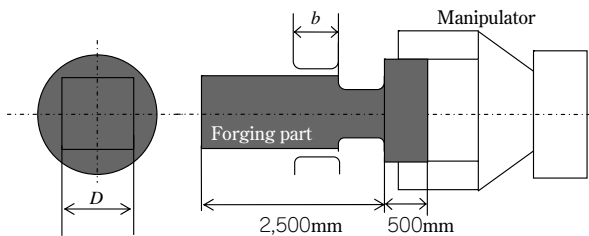


図5 四角工程の解析モデル  
Fig. 5 Analytical model for square process

表1 四角工程の解析条件  
Table 1 Analytical conditions for square process

D (mm)	Bite b (mm)	Reduction (%)
400~1,000	125, 250, 375	10~50

## 2.2 実機相当の数値シミュレーション

図5に四角工程の解析モデルの一例を示す。工具には平金敷を用いている。また、実機の鍛造状態を再現するため、マニピュレータの掴（つか）み部をモデル化した。実機では、圧下することによってマニピュレータ側とその反対側への材料流動が生じ、マニピュレータ側への流動はマニピュレータの緩衝機構によって吸収される。そこで、数値シミュレーションでも同様な挙動となるようにマニピュレータ掴み部での素材の拘束条件は、円周部のみ円周方向の拘束を行った。なお、軸方向は鍛造の影響がなく節点移動がないことを別途確認しているため、拘束条件は与えていない。鍛造部は2,500mmとし、鍛造方向は実機と同様に一方向とした。表1に解析条件を示す。素材の四角形状を400mmから1,000mmの範囲で変化させ、工具噛込み量 $b$ を125mm, 250mm, 375mmとした。圧下率は素材の高さに対して10%から50%の範囲で変化させた。

## 3. 四角工程における工程設計手法

### 3.1 数値モデル式の構築

四角工程では、任意の四角形状から任意の四角形状を作る。そこで、工程設計を容易に行うためには、四角形状の寸法変化を数値シミュレーションで求めるのではなく、簡易的に形状予測することが必要となる。そこでここでは、幅広がりに関する数値モデル式を構築することにより、任意四角形状の簡易的な形状予測を試みた。

一般的に、幅広がりには工具噛込み量と相関があるため、噛込み量と幅広がりとの関係を定量的に明確にする必要がある。

はじめに、初期形状が幅 $W_0$ 、厚さ $H_0$ 、長さ $L_0$ から噛込み量 $b$ で鍛造した後、幅 $W_1$ 、厚さ $H_1$ 、長さ $L_1$ に変化したと仮定した場合、噛込み比を以下のように定義する。

$$\text{噛込み比} = b/W_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、幅広がり係数 $s$ を以下の式で定義した。

$$s = -\ln(W_1/W_0) / \ln(H_1/H_0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

一方、体積一定の法則より以下の式が得られる。

$$\ln(W_1/W_0) + \ln(L_1/L_0) = -\ln(H_1/H_0) \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上式(2)および式(3)から

$$\ln(L_1/L_0) / \ln(H_1/H_0) = -1 + s \quad \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。これより以下の式が得られる。

$$W_1 = W_0 \cdot (H_0/H_1)^s \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$L_1 = L_0 \cdot (H_0/H_1)^{1-s} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、噛込み比 $b/W_0=1$ の場合、理想的な状態では幅広がりと同じ伸びは等しくなる。すなわち、上記の式(5)、式(6)から

$$s = 1 - s$$

となり

$$s = 1/2$$

が得られる。また、噛込み比 $b/W_0$ が非常に小さい場合、幅広がりが生じない。すなわち、

$$W_1/W_0 = 1$$

より

$$s = 0$$

となる。さらに、噛込み比 $b/W_0$ が非常に大きい場合では伸びがなくなる。すなわち、以下のようになる。

$$s = 1$$

これらの極限状態を満たす $s=f(b/W_0)$ で最も簡単な式は以下の式で表される。

$$s = \frac{b/W_0}{1+b/W_0} \quad \dots\dots\dots (7)$$

図6に式(7)から得られる幅広がり係数 $s$ と噛込み比 $b/W_0$ の理想的な関係を示す。

以上から、幅広がり係数 $s$ は噛込み比 $b/W_0$ の関数で表される。ところで、噛込み比 $b/W_0=1$ の場合、実際の鍛造伸加工では軸方向に拘束されているために必ずしも幅広がりと同じ伸びは等しくならない。一方で、 $b/W_0=0$ または $\infty$ の場合では、軸方向あるいは幅方向の一方に伸びることが予測される。そこで、式(7)を満たすように以下のように $b/W_0$ に定数 $a$ を乗じることを考えた。

$$s = \frac{a \times b/W_0}{1+a \times b/W_0} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、定数 $a$ は材料の異方性、工具形状、材料と工具の潤滑状態など加工の状況によって決定される。そこで、前述した解析モデルおよび解析条件を用いて $s$ と $b/W_0$ の関係を調べた。図7に解析により得られた $s$ と $b/W_0$ の関係を示す。図中の●は解析結果を示す。式(8)を用いて最小2乗法から係数 $a$ を算出した結果、 $a=1.52$

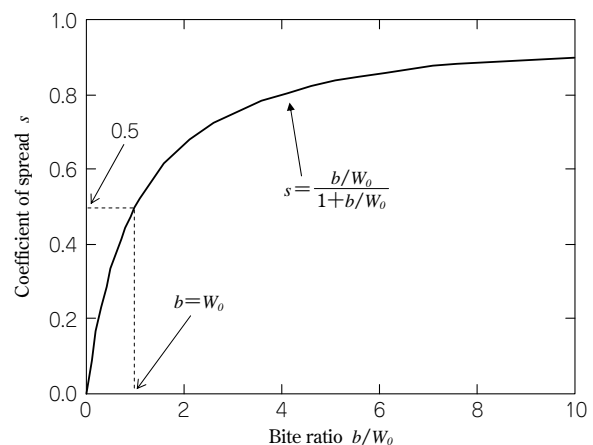


図6 幅広がり係数 $s$ と噛込み比 $b/W_0$ との関係  
Fig. 6 Relationship between coefficient of spread  $s$  and bite ratio  $b/W_0$



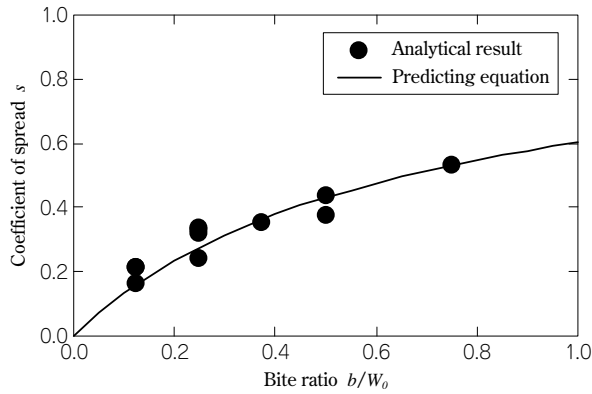


図7 数値シミュレーションにより得られた幅広がり係数  $s$  と噛込み比  $b/W_0$  との関係

Fig. 7 Relationship between coefficient of spread  $s$  and bite ratio  $b/W_0$  obtained by numerical simulation

が得られ、近似式(9)を得た。式(9)を図7の実線で示す。

$$s = \frac{1.52 \times b/W_0}{1 + 1.52 \times b/W_0} \dots\dots\dots (9)$$

以上より、鍛造後の幅寸法は式(10)によって算出できる。

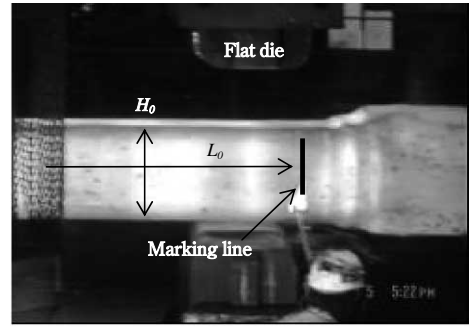
$$W_1 = W_0 \cdot (H_0/H_1)^{\frac{1.52 \times b/W_0}{1 + 1.52 \times b/W_0}} \dots\dots\dots (10)$$

3.2 実機による検証

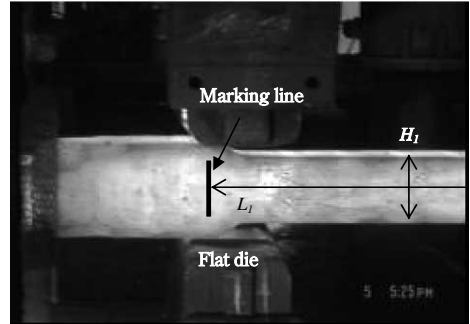
実機での幅広がり測定することにより、前節での数値シミュレーションにより得られた予測式の妥当性を検証した。図8に実機実験の様子を示す。実機では、圧下すると自由面がバルジ形状となるため、正確な幅広がり測定することは困難である。そこで、はじめに所定の断面形状にした後、試験材の側面に所定の長さにはけぎ線を入れて鍛造し、鍛造後の伸びを測定した。その後、体積一定則から平均幅広がり算出した。なお、1パス目の圧下後に寸法を測定し、引続き素材を90°回転させて2パス目の圧下を行って複数パスの影響も調査した。この方法により、幅広がり軸方向のばらつきおよび圧下方向のばらつきが平均化されて算出される。一方、上述した幅寸法の予測式についてもばらつきが平均化された値が算出されるため、同方法による検証が妥当であると考えられる。

はじめに、圧下率が実機実測から算出される幅広がり係数に及ぼす影響を調べた。図9に実機より得られた幅広がり係数と噛込み比の関係を示す。 $b/W_0$ を変数にすることで幅広がり係数  $s$  との相関があることが分かる。また、図9から1パス目、2パス目ともに解析結果から得られた式で近似できることが分かる。なお、2パス目に比べ1パス目のばらつきが大きい、この原因として  $b/W_0$  が0に近づくに伴い、工具角部  $R$  の影響が大きくなるためと考えられる。

つぎに、鍛造後の幅寸法に関して実機より得られた結果と上式から得られた値との比較を行った。図10にその結果を示す。同図より、ほぼ±5%以内で予測できることを確認した。なお、素材形状が大きい場合にばらつきが大きくなる原因として、荒工程での素材寸法のばらつき、とくに、素材角部  $R$  の影響により、工具と素材との幅方向の接触長がばらつくためと考えられる。



(A) Experiment preparation



(B) Forging end

図8 実機実験の様子

Fig. 8 Appearance of actual experiment

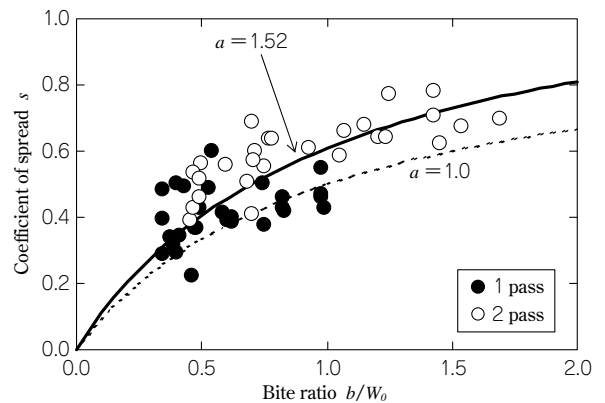


図9 実機実験により得られた幅広がり係数  $s$  と噛込み比  $b/W_0$  との関係

Fig. 9 Relationship between coefficient of spread  $s$  and bite ratio  $b/W_0$  obtained by experiment

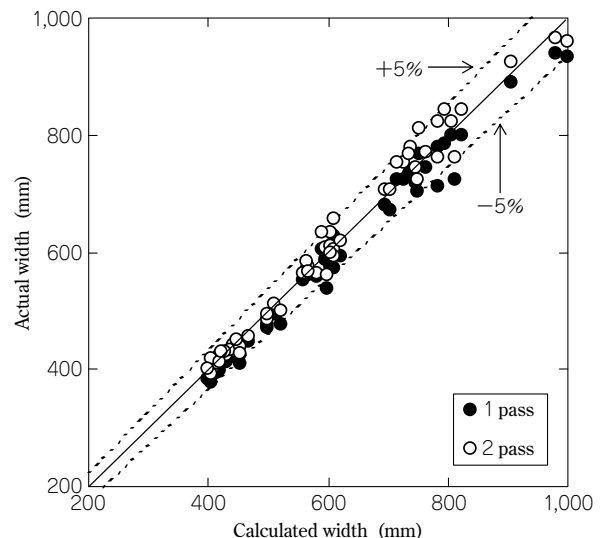


図10 実機幅寸法と計算により得られた幅寸法の比較

Fig.10 Comparison of actual width and calculated width

#### 4. タップ工程における工程設計手法

タップ工程とは孔型を有する工具を用いて鍛造する工程である。多角形状の断面を有する素材に圧下を与えた後、素材に回転および移動を繰返して目標寸法の円形形状に仕上げていく。タップ鍛造の1つであるスパイラル鍛造<sup>2)</sup>は、素材に回転のみを与える一般的なタップ工程と異なり、回転と工具噛込み量(送り量)を同時に与えながら鍛造するため、生産性に優れていると考えられている。しかしながら、素材形状や金型形状、鍛造条件が相互に影響し合うため、これらの適正化が必要である。そこで、数値シミュレーションを活用し、スパイラル鍛造工程での鍛造条件が寸法精度に及ぼす影響を調べた。

##### 4.1 スパイラル鍛造条件が寸法精度に及ぼす影響

一般的なタップ鍛造とスパイラル鍛造の違いが寸法精度に及ぼす影響を数値シミュレーションを用いて調べた。図11にタップ工程の解析モデルを示す。

目標の仕上径をφ500mmとして、初期八角寸法を対辺504.6mmとした。この場合の丸断面積に対する八角断面積の断面積比は107.5%である。タップ金型形状は中心角度90°、R250とした。すなわち、上下金型の間が0の場合、φ500mmとなる。初期八角形状、仕上形状および金型形状を一定とし、工具噛込み量および回転角度が寸法精度に及ぼす影響について調べた。表2にタップ鍛造とスパイラル鍛造の解析条件(5種類)を示す。単位長さ(ここでは300mm)および単位角度(ここでは180°)の同一領域内での圧下回数を同一にして比較した。

図12に表2の解析番号4における軸半径の軸方向変化を示す。同図に示すように、軸半径が周期的に変化していることが分かる。端部である0~500mm間および1,500~2,000mmの間は非定常部と考えられるため、今

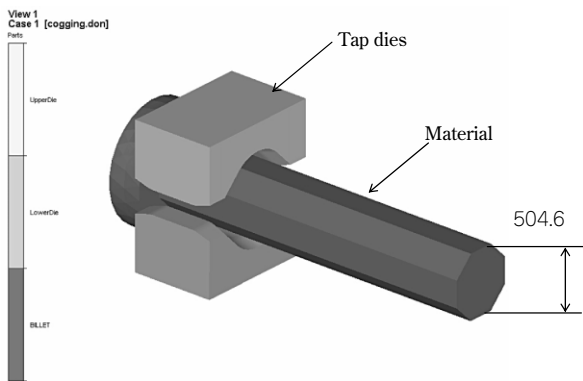


図11 タップ工程の解析モデル  
Fig.11 Analytical model for tap process

表2 タップ鍛造とスパイラル鍛造の解析条件

Table 2 Analytical conditions of tap forging and spiral forging

No.	Tap forging		Spiral forging		
	1	2	3	4	5
Rotated:degree (°)	20	45	20	45	60
Press times (/180°)	9	4	9	4	3
Bite (mm)	150		300/18	300/8	300/6
Press times (/300mm)	18	8	18	8	6

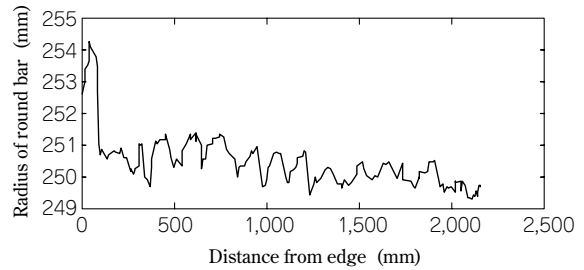


図12 軸半径の軸方向変化(解析番号4)  
Fig.12 Radius distribution in case of analytical No.4

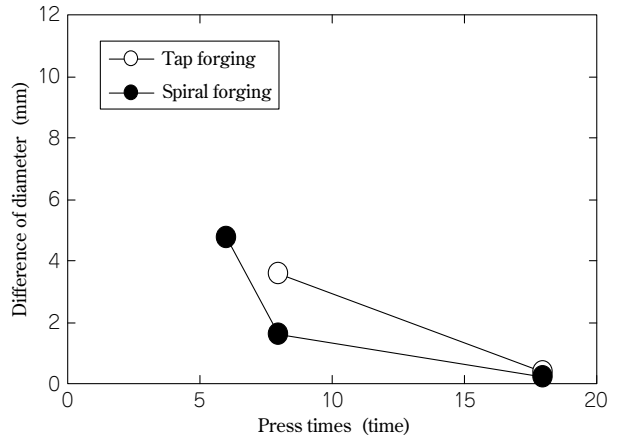


図13 タップ鍛造およびスパイラル鍛造における回転角度と径差(寸法精度)の関係

Fig.13 Relationship between angle of rotation and difference of diameter among tap of forging and spiral forging

回は定常部の500~1,500mmにおいて半径を評価した。なお、寸法精度を表す指標として定常状態での径差(最大半径-最小半径)を用いた。

図13にタップ鍛造およびスパイラル鍛造における回転角度と径差の関係を示す。圧下回数の増加に伴って径差が小さくなる傾向にあることが分かる。また、1周あたりの圧下回数が8回および18回の場合ともタップ鍛造に比べスパイラル鍛造の方が径差は小さくなっていることが分かる。とくに圧下回数が18回の場合では、タップ鍛造での径差3.5mmに対してスパイラル鍛造では1.6mmとおおよそ1/2程度に抑えられており、スパイラル鍛造の方が寸法精度が良いことが分かった。一方で、圧下回数が6回の場合では、急激に径差が大きくなる傾向にある。この原因として、1回の圧下あたりの送り量が大きいため、圧下されていない部分が発生するためであると考えられる。

##### 4.2 工具噛込み量と回転角度の関係

スパイラル鍛造において、圧下回数は工具噛込み量と回転角度により影響される。そこで、工具噛込み量および回転角度が寸法精度に及ぼす影響を調べた。表3に示すように解析条件は、解析番号2-1(No.2-1)を基準として、送りおよび回転角度をともに0.5倍(No.1-1)、1.5倍(No.3-1)、2倍(No.4-1)とし、さらに、工具噛込み量のみを変えた場合(No.2-2, 2-3)とした。

図14に解析番号1-1, 2-1, 3-1, 4-1の解析結果を示す。また、図15に工具噛込み量が同じで回転角度が異なった場合の径差を示す。図14から工具噛込み量、回転角度とも小さくなるに伴い、径差が小さくなる傾向にあるこ

表3 タップ工程の解析条件  
Table 3 Analytical conditions for tap process

No.	1-1	2-1	2-2	2-3	3-1	4-1
Feed (mm)	37.5	75	37.5	112.5	112.5	150
Angle of rotation (°)	22.5	45	45	45	67.5	90
Press times A (/180°)	8	4	4	4	2.7	2
Press times B (/300mm)	8	4	8	2.7	2.7	2
B/A	1	1	2	0.67	1	1

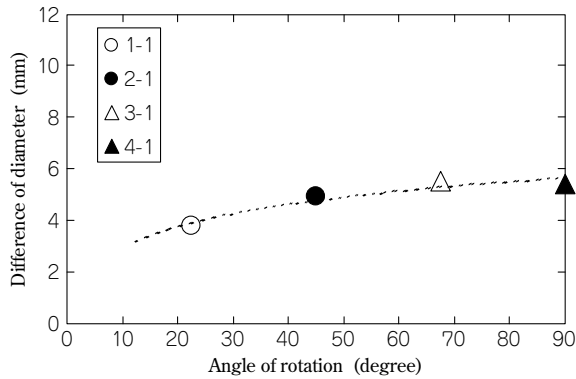


図14 各解析条件における回転角度と径差の比較  
Fig.14 Relationship between angle of rotation and difference of diameter

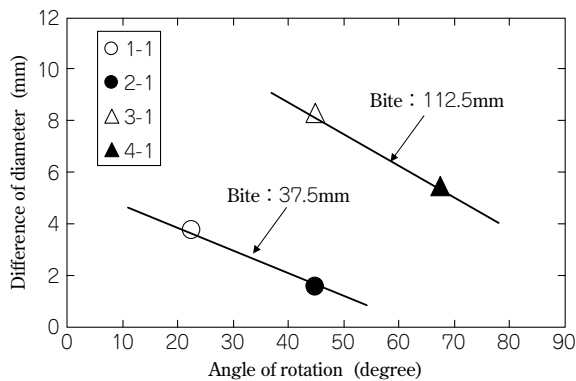


図15 送り異なった場合における回転角度と径差の比較  
Fig.15 Relationship between angle of rotation and difference of diameter in case of difference feed

とが分かるが、その差は小さい。これは、各圧下間の素材と金型の接触域の重なり（オーバーラップ量）が多くなり、素材表面が金型内面Rに沿いやすいため、同一箇所を複数回圧下するためと考えられる。また、図15から工具噛込み量が小さく回転角度が大きくなるに伴い、径差が小さくなる傾向にあることが分かる。これも素材と金型の接触域の重なりが多くなるためと考えられる。

以上から、工具噛込み量を小さく、また回転角度を大きくすることによって寸法精度が向上することが分かった。一方で、スパイラル鍛造において工程設計を行うにあたり、工具噛込み量および回転角度と寸法精度との関係を明確にする必要がある。

そこで、300mmあたりの圧下回数Bを180°回転あたりの圧下回数Aで除した値と径差の関係を調べた。図16に結果を示す。同図から、B/Aが大きくなるに伴って径差が小さくなる傾向にある。なお、このB/Aが大きくなるに伴い、オーバーラップ量が多くなることを示してい

る。図16を活用することにより、目標の寸法精度となるB/Aを得ることができ、生産性の観点から回転角度や送りを決定することができる。

### 4.3 八角形状寸法の影響

最終目標径に対する八角断面積比SNを変化させた数値シミュレーションを行い、初期八角形状の影響について調べた。ここでは、SN=1.05, 1.075, 1.10の3条件とした。なお、解析条件は表3と同じである。

図17に各八角寸法における送り回数/圧下回数と径差の比較を示す。各条件ともB/Aが大きくなるに伴い、径差が小さくなる傾向は変わらないが、断面積比SNが径差に影響を及ぼしていることが分かる。今回の数値シミュレーションの結果から、B/A=2の場合では、断面積増加率SN=1.075で径差が2mm以下となっており、適正値に近いと考えられる。ところで、径差が5mm以下を目標とした時、ばらつきの最大で曲線近似を行うと、B/A≥1.5で目標到達の可能性があることが分かる。ここで、B/A<1では断面積比SN=1.05で径差が一番小さく、逆に、B/A≥1では断面積比SN=1.05で径差が最大である。これは、断面積比SN=1.05ではB/A<1では全周を圧下していないが、他の断面積比に比べて八角寸法が小さいために径差が最小になると考えられる。逆にB/A≥1では圧下回数が多いため、断面積比が小さいと圧下中にくぼみが生じ、それが残存して径差が大きくなると考えられる。

以上のことから、表面寸法ばらつき5mm以内を許容し、生産性最大化を目指す場合は、B/A≥1.5で回転角

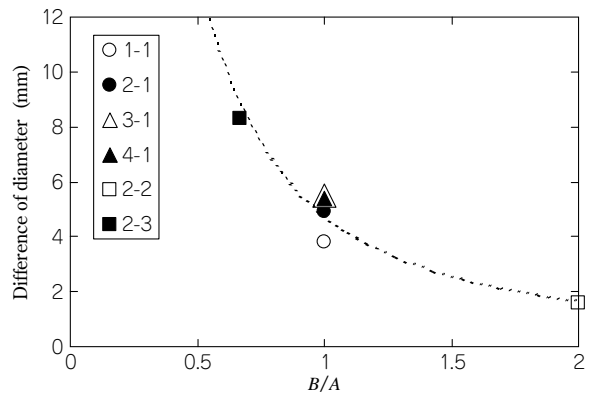


図16 B/Aと径差の関係  
Fig.16 Relationship between B/A and difference of diameter

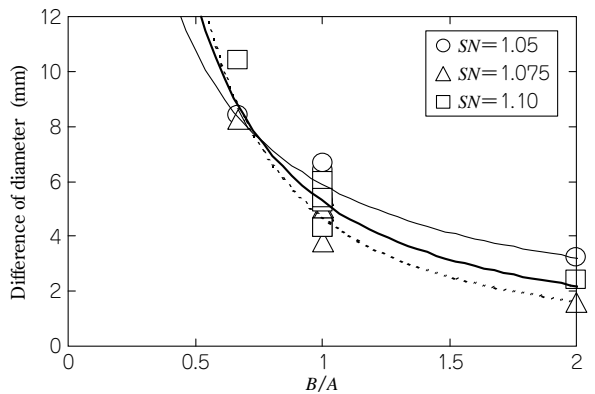


図17 各八角寸法における送り回数/圧下回数と径差の比較  
Fig.17 Relationship between B/A and difference of diameter in case of changing octagon size

度と送り量をできる限り大きくする必要がある(例えば、金型回転角度 90°, 送り 150mm)。一方、寸法精度を重視する場合は、断面積増加率=7.5%とし、 $B/A \geq 2$ を満たす工具噛込み量および回転角度を選ぶ必要がある。

## 5. 実機による工程設計手法の効果検証

### 5.1 四角工程

2パスで幅と高さが同一寸法形状に鍛造する場合の四角工程概略図を図18に示す。

本稿における四角工程の工程設計方法は、四角形状の高さ  $H_{sh}$ ・幅  $H_{sw}$  を測定し、2パス目の高さおよび幅寸法が目標四角形状(高さ  $H_s$ , 幅  $H_s$ )となる1パス目の圧下量を導出することである。ここで、1パス目後の形状を幅  $W_l$ , 高さ  $H_{sl}$  とすると、式(10)から以下の式が得られる。

$$W_l = H_{sw} \cdot (H_{sl}/H_{sh})^{\frac{1.52 \times b/H_{sw}}{1+1.52 \times b/H_{sw}}} \dots\dots\dots(11)$$

$$H_s = H_{sl} \cdot (H_s/W_l)^{\frac{1.52 \times b/H_{sl}}{1+1.52 \times b/H_{sl}}} \dots\dots\dots(12)$$

式中の  $b$  は噛込み量(送り量)を示しており、ここでは1パス目および2パス目とも同じとしている。式(11)および式(12)を連立させることで  $W_l$  および  $H_{sl}$  が得られ、1パス目および2パス目の圧下量を算出できる。その後、得られた工程を元実際に鍛造することにより目標形状が得られる。

表4に上記の予測式を活用した実機適用例を示す。初期形状の高さ520mm、幅500mmから2パスで高さ、幅とも450mmになるように設計した。なお、工具噛込み量は250mmで一定である。実機適用結果は誤差が2%以内であり、精度よく予測可能であることが分かった。これにより、プレスオペレータ個人の能力によることなく、任意の四角形状から目標四角形状まで2パスの圧下

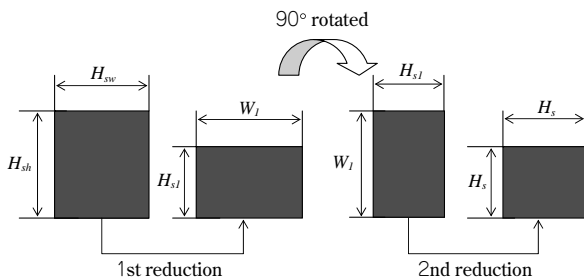


図18 四角工程の概略図  
Fig.18 Appearance of square process

表4 予測式を活用した実機適用例  
Table 4 Example of process design

	Process design (mm)		Actual size (mm)	
	Width	Height	Width	Height
Initial	500	520	500	520
1 pass	431	524	431	532
2 pass	450	450	452	450

表5 実機試作における鍛造条件  
Table 5 Actual forging conditions

Process design	Octagon size (mm)	Target size (mm)	Bite (mm)	Angle of rotation (°)	B/A
Conventional forging design	505	500	40	45	0.93
Modified forging design	505	500	75	90	2

による工程設計を行うことが可能となった。

### 5.2 タップ工程

図17の結果を活用して実機試作を行い、寸法精度への効果を確認した。実機試作における鍛造条件を表5に示す。改善した鍛造条件では、 $B/A=2$ として生産性を考慮して工具噛込み量を最大とし、回転角度を90°に決定した。実機により径差を実測した結果、従来の鍛造条件では7mmであったが、改善した鍛造条件では4mmとなり寸法精度が向上することを確認した。また、3,000mmを鍛造する時間を比較した場合、従来の鍛造条件では176秒かかるが、改善した鍛造条件では130秒となり、生産性向上の効果も得られた。

むすび=鍛伸工程において、数値シミュレーションを活用して四角工程での鍛造形状予測式を構築した。また、タップ工程の鍛造条件が寸法精度に及ぼす影響について調べた。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 数値シミュレーションの結果から工具噛込みと幅広がりとの関係を明らかにし、幅広がりに関する数値モデル式を構築した。これを活用することにより、複数パスでも実機幅広がりを±5%以内で予測することが可能であることを実機確認した。
- 2) 幅広がり数値モデルを活用することにより、プレスオペレータ個人の能力によらず任意の四角形状から目標四角形状まで2パスの圧下による工程設計が可能であること、および工程設計手法の有効性を確認した。
- 3) タップ工程において鍛造条件が寸法精度に及ぼす影響を調べた結果、単位長さ(本稿では300mm)あたりの圧下回数/180°あたりの圧下回数で整理可能であることを明らかにした。
- 4) タップ工程の工程設計手法を実機に適用した結果、従来条件に比べて生産性および寸法精度とも向上することを確認し、工程設計手法の有効性を確認した。

### 参考文献

- 1) 中田和広：鑄鋼と鍛鋼, No.493, (1994), pp.15-22.
- 2) K.Yamamoto: 13th IFM, vol.1, (1997), pp.115-132.