

非軸対称鍛造品を対象とした工程設計支援のための加工性評価に関する一考察

笹富 祐* 梅田 政信* 牟禮 雄二** 片峯 恵一* 川東 輝舟*
 (九州工業大学*) (鹿児島県工業技術センター**)

1. はじめに

鍛造品の工程設計では、加工限界や材料特性等の多くの専門知識が必要とされる。しかし、近年、海外生産の増加や団塊世代の退職のために知識の継承等が課題となっている。そこで、鍛造加工の専門家の知識を蓄積し工程設計に利用する鍛造工程設計支援システム^[1]が開発されている。同システムは、自動車部品の一つであるヨーク等の非軸対称部位を有する鍛造品（以下、非軸対称鍛造品）の形状を入力として、複数の工程設計案を出力可能である。

しかし、鍛造加工における非軸対称鍛造品の設計制約は未整備であるため、同システムは、断面減少率等の加工性を考慮できていない。

そこで本稿では、鍛造品の形状が加工力に与える影響について考察し、非軸対称鍛造品の鍛造加工における加工力の見積り手法とそれを用いた断面減少率の評価手法を提案する。また、検証実験を行い、加工力見積り手法の妥当性を評価する。

2. 鍛造加工とその設計制約

2.1 軸対称鍛造品における設計制約

工程設計は、金型の破損や鍛造部品の品質不良を防ぐため、設計制約を考慮して行う必要がある^[2]。軸対称鍛造品における設計制約は、加工法によって異なり、一般的に表 1 に示すものが知られている。本稿では、この中でも特に断面減少率について議論する。

表 1：加工法による設計制約の分類

		設計制約	
加工法	前方押し出し	断面減少率	テーパ角
	後方押し出し		L/d
	据え込み	据え込み率	L/D

3. 断面減少率

断面減少率は、押し出し加工において、素材の断面積の減少により金型に発生する応力が金型を破損することを防ぐための設計制約の一つである。加工軸に垂直に押し出す場合において、前方押し出し加工における断面減少率の算出方法、および後方押し出し加工における断面減少率の算出方法は、それぞれ図 1、図 2 に示すとおりである。

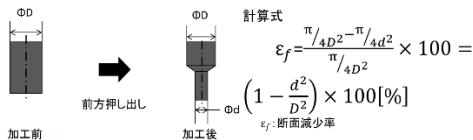


図 1：前方押し出し加工における断面減少率

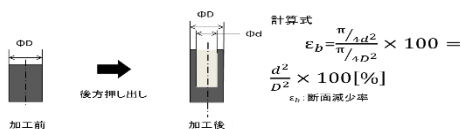


図 2：後方押し出し加工における断面減少率

3. テーパ形状と加工力に関する FEM 解析

3.1 テーパ形状における断面減少率評価の問題点

軸対称、非対称を問わず、鍛造品の上端や下端に、先端部が次第に細くなるようなテーパ角が与えられた形状（以下、テーパ形状）がない場合、前述の算出式を使用可能と考えられる。しかし、テーパ形状を持つ場合、通常の押し出し加工と比べ加工力が増加すると考えられるため、加工性の評価に断面減少率をそのまま用いるのは適切ではない。

そこで本稿では、様々なテーパ角、断面形状の部品における加工力を FEM を用いてシミュレーションし、テーパ形状と加工力との関係を分析した。

3.2 実験の方法

テーパ形状による加工力の変化を調べるために、解析ツール Simufact.Forming を用いて、FEM 解析を行った。素材と金との摩擦係数は 0.25、加工温度は 220°C、加工速度は 10mm/s とした。対象の形状は A6061 とし、素材形状は直径 76mm、高さ 38mm の円柱とした。加工後形状は、ヨーク形状を基準とした二つの突起付形状とし、突起部を様々なテーパ形状に変化させた。本稿では、突起部の断面形状は、四角形と円形とし、四角形には向かい合う二面及び四面に対してテーパ角を付与した。解析対象の形状を表 2 に示す。図 3 は、素材形状から表 2②の二面テーパで正面勾配 5° の形状への押し出し加工の例を表している。

表 2：対象となる形状

形状名	形状の説明
①	Straight テーパ角なし
②	Straight-Wide-5deg 二面テーパ
③	Straight-Wide-10deg Wideは正面勾配
④	Straight-Wide-15deg
⑤	Straight-Wide-20deg
⑥	Straight-Wide-5deg-Side-5deg 四面テーパ
⑦	Straight-Wide-10deg-Side-5deg Wideは正面勾配
⑧	Straight-Wide-10deg-Side-10deg Sideは側面勾配
⑨	Straight-Cone-5deg 円錐テーパ
⑩	Straight-Cone-10deg

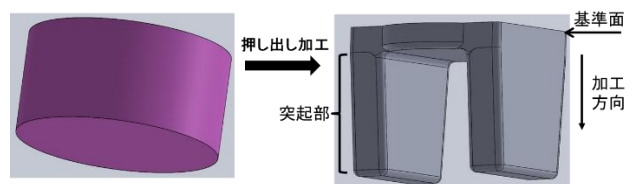
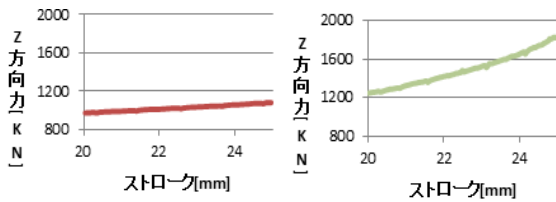


図 3：素材形状から二面テーパで正面勾配 5° の形状への加工例

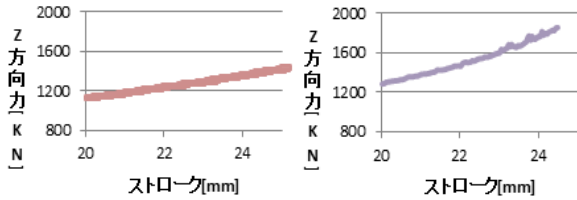
3.3 実験結果

表 2 中、二面テーパ角を持つ形状の FEM 解析結果を図 4 に、四面テーパ角を持つ形状の FEM 解析結果を図 5 にそれぞれ示す。各図の横軸はストローク、縦軸は加工力である。図 4、図 5 はテーパ形状のみを押し出しているときの結果である。



(a)②の解析結果 (b)⑤の解析結果

図 4：二面テーパ角を持つ形状の FEM 解析結果



(a)⑥の解析結果 (b)⑧の解析結果

図 5：四面テーパ角を持つ形状の FEM 解析結果

4. テーパ角，断面形状と加工力との関係

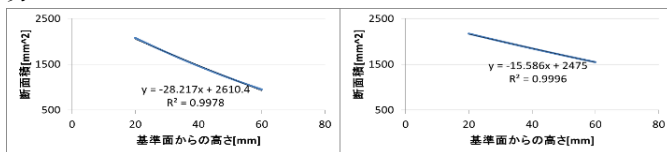
加工力は 3.3 節で述べた実験結果より，断面形状，テーパ角，パンチのストロークと関係があると考えられる．突起部の断面積は，断面形状とテーパ角および基準面からの変位とによって決まる．図 6(a)，(b)は，表 2⑥，⑧における断面積と基準面からの変位との関係を表したものである．この図から，断面積は，基準面からの変位量に応じてほぼ単調に減少していることが分かる．他の形状でもほぼ同様である．以下では，単位変位量あたりの断面積の減少量を断面積減少係数と呼ぶことにする．ここで図 6 において，関係式はグラフの相関関数， R^2 は相関の強さを表している．

図 7 は，断面積減少係数，ストロークと加工力との関係を表したグラフである．この図より，加工力は，断面積減少係数とストロークの増加に伴い単調に増加している．この 3 変数間の関係を mathematica を用いて分析したところ，加工力 F は断面積減少係数 α とストローク x の関数

$$F = f(\alpha, x) = 0.56\alpha^2 + 3.27x^2 + 4.13\alpha x - 88.70\alpha - 161.44x + 2930.74 \quad (式 1)$$

F : 加工力[kN] α : 断面積減少係数 x : パンチのストローク[mm]

により，相対誤差 5.54%以内で近似可能なことが分かった．



(a)⑥のグラフ (b)⑧のグラフ

図 6: 基準面からの高さ と断面積 との関係

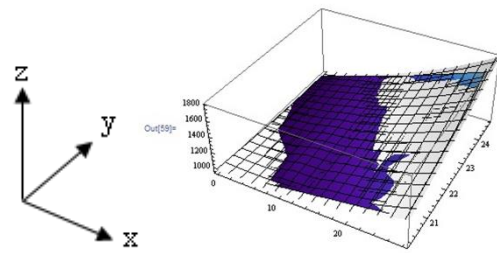


図 7：断面積減少係数(x 軸)，ストローク(y 軸)，加工力(z 軸)間の関係

5. 実験と評価

4 章で考察した断面積減少係数，ストローク，加工力に関する仮説の検証実験を行った．解析対象とした形状のテーパ部における断面積減少係数とストロークとから近似式に基づいて加工力を予測し，FEM 解析結果と比較した．表 3 に実験結果を示す．表 3 に示すとおり，予測値と FEM 解析結果との相対誤差は，最大 5%強となる．この結果から，テーパ角を持つ部品において断面積減少係数とストロークとから加工力を 5%程度の相対誤差内で見積り可能なことが確認できた．

表 3：近似式による予測と FEM 解析結果の比較

断面積減少率	ストローク[mm]	FEM解析値F[kN]	予測値F'[kN]	絶対誤差[kN]	相対誤差[%]
6.65	20.19	977.68	995.02	17.33	1.77
13.40	21.61	1089.12	1078.83	10.29	0.94
18.20	21.77	1177.66	1175.33	2.33	0.20
20.69	23.73	1347.11	1375.73	28.62	2.12
28.09	24.20	1791.71	1700.52	91.19	5.09

6. 断面減少率の評価手法

2.3 節で述べた断面減少率の性質より，断面減少率は加工力に比例すると考えられる．したがって，テーパ角 0° における断面減少率を ε' ，加工力を F' とし，テーパ角を持つ形状における断面減少率を ε ，加工力を F とするとき，テーパ角を持つ形状における断面減少率 ε は，以下の関係式

$$\varepsilon = \frac{F}{F'} \times \varepsilon' \quad (式 2)$$

により，換算可能と考えられる．ここで， F' および F は，(式 1)を用いて算出する．

7. おわりに

本稿では，非軸対称鍛造品における加工力見積り手法とそれを用いた断面減少率の評価手法を提案した．また検証実験を行い，加工力見積り手法の妥当性を確認した．

今後は，摩擦係数や変形抵抗等が加工力に与える影響についても検討する必要がある．また，実際の鍛造加工を用いた検証実験を行い，本手法の有効性を確認する必要がある．据え込み率や L/D 等の設計制約の定式化も今後の課題である．

参考文献

- [1] N.Wakasugi, et al, "Preliminary Study on Process Planning Method for Non-Axisymmetrical Forged Products", International Symposium on Applied Engineering and Sciences, 2015
- [2] Y. Okayama, et al, "Process Planning Method for Precision and Workability in Cold Forging", International Workshop on ICT, 2013