

## 材料の流動解析によるスラグ形状および金型形状の研究開発\*

外山 真也<sup>\*1</sup>・佐藤 征亜<sup>\*1</sup>・河野 通成<sup>\*2</sup>・平田 幸次<sup>\*2</sup>  
木之下 弘幸<sup>\*3</sup>・海津 浩一<sup>\*4</sup>・池田 清彦<sup>\*3</sup>

Study on Influence of Slug Shape on Metal Flow in Simultaneous  
Forward-Backward Extrusion in Forging Process

Masaya TOYAMA, Masatsugu SATOH, Michinari KAWANO, Kouji HIRATA,  
Hiroyuki KINOSHITA, Kouichi KAIZU and Kiyohiko IKEDA

従来、自動車のシートベルトなどの機能部品として使用される複合ギアやダブルギアなどは、冷間鍛造により一定の形状に成形された後に、切削加工により製品寸法に成形されていた。しかしながら、近年の製造時間の短縮化、材料コスト削減の要望とともに、冷間鍛造のみによるネットシェイプ成形が強く要求されている。

そこで本研究では、複合ギアやダブルギア成形のモデル実験、ならびに三次元有限要素解析を行い、冷間鍛造成形により製品形状にネットシェイプ成形できる最適スラグ形状について検討し、スラグ形状によって材料の塑性流れをコントロールできることを明らかにした。

キーワード：冷間鍛造，CAE，有限要素法，シミュレーション，ニアネットシェイプ

### 1 はじめに

研究で対象とする複合ギアは、図1に示すように、ギア部とカム部から構成されている自動車用部品である。材質には、一般に高強度の炭素鋼鋼材が用いられている。この複合ギアを、経験的に決定した形状のスラグを用いて前方後方押し鍛造により成形した場合には、ギア部の先端部がテーパ状となり、カム部ではオーバーフローとなる部分があった<sup>1)</sup>。そのため、それらの部分を切削加工により除去して製品寸法に仕上げられていた。

そこで本研究では、一工程の押し鍛造で製品形状に近い形状に成形することにより、その後の切削加工を減し、製造時間の短縮、材料コスト削減を目指した。具体的には、素材の初期形状（スラグ形状）に着目し、数種類のスラグ形状につい

て、アルミニウム合金A1070材を用いた複合ギア成形のモデル実験、ならびに塑性流動解析ソフト(Deform)を用いた三次元剛塑性有限要素解析を行い、製品形状にネットシェイプ成形できるスラグ形状について検討した<sup>2)</sup>。

さらに、より複雑な形状であるダブルギアの鍛造成形にも取り組み、二段工程の鍛造成形において、量産化が可能であることを実証した。

### 2 実験方法および有限要素解析方法

図2は、有限要素解析モデルを示している。また、有限要素解析の条件を表1に示す。有限要素解析は、三次元剛塑性有限要素法により行い、スラグの素材を実材料に相当するAISI-4140とした。

本研究では、当初単純な円筒形状をもとにした一定断面積を持つ9種類のスラグ形状を考案し解析した。その結果をもとに、丸みを帯びた形状の4種類のスラグ形状を考案した。それらを使用して、複合ギアの成形性におよぼすスラグ形状の影響について検討した。具体的には、直径が異なる

\* 特定ものづくり基盤技術の高度化事業

\*1 機械電子部

\*2 株式会社 ニチワ

\*3 宮崎大学工学部

\*4 兵庫県立大学工学部

単純な円筒3種類、それから試験片の底部に突起を設けた円筒3種類、および変断面と底部に突起を持つ円錐3種類、さらに、丸みを帯びた形状4種類の試験片を用いて、モデル実験ならびに有限要素解析を行った。

アルミニウム合金A1070材を用いたモデル実験は、万能試験機を使って行い、パンチストロークが3 mm, 6 mm, 9 mm, および最終ストロークにおけるスラグの変形した形状を詳細に観察した。

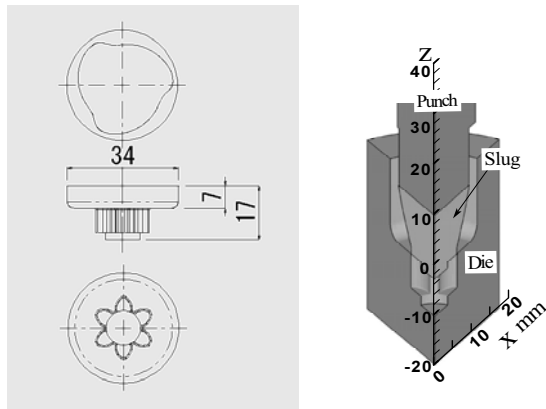


図1 複合ギア概略図 図2 解析モデル

表1 解析条件

Material: AISI-4140	$\sigma = 799.83 \varepsilon^{0.244}$
Flow stress (MPa)	
Total number of elements	30000
Punch speed	0.67mm/s
Punch stroke	19.6mm (In case of T101)
Increment of one step	0.05mm
Frictional coefficient of shear friction law	0.1

### 3 実験結果および有限要素解析結果

#### 3-1 複合ギアモデル実験の結果

プレス実験の結果から、スラグの断面積が小さい場合には、ギア先端部の成形性は良いが、カム部の成形性は悪い。一方、スラグの断面積が大きい場合には、ギアの先端部がドーム状（テーパ状）

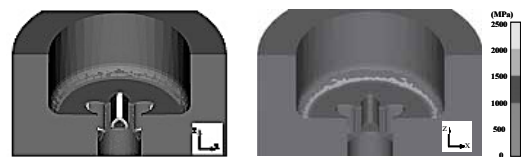
となりギア部の成形性が悪いことがわかった。また、試験片の底部に突起を設けると、ギア部先端が平らな形状になり、ギア部の成形性が良くなることがわかった。そして、変断面を持つ試験片のモデル実験の結果、下側断面が小さく、上側断面が大きい試験片を用いた場合に、ギア部とカム部の両方の成形性が良いことが明らかになった。

さらに、丸みを帯びたスラグ形状のプレス実験を行い、ほぼ製品形状と同等の形状を得ることが可能になった。そのスラグの形状と実験結果の一部を図3に示す。

また、丸みを帯びたスラグ形状に関して金型解析を実施したところ、図4(b)に示すとおり応力が低減され、金型への負荷が小さいことが確認できた。

	T201	T202
The types of slugs		
Deformed shape of slugs		

図3 プレス実験の結果



(a) 円筒形状のスラグを使用した場合 (b) 丸みを帯びたスラグを使用した場合

図4 金型応力分布

#### 3-2 ダブルギアモデル実験の結果

図5にダブルギアの製品形状を示す。このダブルギアの成形性の評価においては、複合ギアにおける解析結果をもとに、約20種類のスラグ形状を考案し、解析した。その塑性流動解析の状況を図6および7に示す。図6の解析においては、図8の1)に示す金型モデルを用いて解析した。この

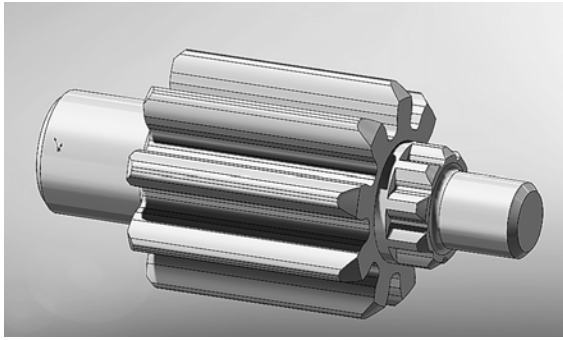


図5 ダブルギアの製品形状

とき、上方から押し出しピンによりスラグが変形し、金型の外側へ流れ出していることがわかった。

そこで、図8の2)に示すように金型の壁面(大ギアの外形に沿った壁面)の長さを伸ばして、スラグが外側へ流出することを防止するようにした。その解析状況を図7に示す。

これらの解析結果をもとに、材料S10Cを使用し、プレス実験を実施した。しかし、取り出し時の荷重が約9 ton程度となり、小ギア部分のシャフトなどが変形した。

そこで、やむなく二段の鍛造工程による成形、すなわち一回目に小ギア部分、二回目に大ギア部分を成形する工程を検討した。このとき、二回目の成形後の取り出しにおいては、小ギア部分を傷めないようにするため、取り出しピンの形状は、外形は大ギアの形状で、内径は小ギアの最大直径の円筒で中空にした形状となった。

実際のプレス実験による結果を図9から10に示す。図9は小ギア部分のみを成形した結果で、成形荷重は3ton程度である。図10は大ギア部分の成形結果で、成形荷重は27ton程度である。

### 3-3 背圧制御による成形実験

これまでの研究により、ダブルギアの成形は二段工程により、成形可能であることがわかった。このダブルギアのプレス実験に使用した金型には、大ギア部分の入り口においてテーパ部分を設け、材料の流れ込みを容易にしようとしている。そのため、大ギアの先端部分は、少し斜めに傾いている。

そこで、より大ギア部分の成形性を向上させようと背圧制御を付加したプレス実験を実施した。その結果を図11に示す。大ギア部分の成形時に背

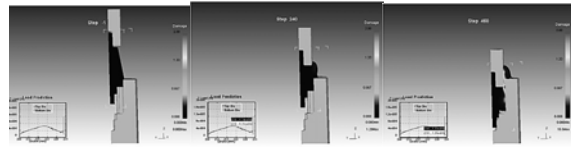


図6 ダブルギアの塑性流動解析状況(1)

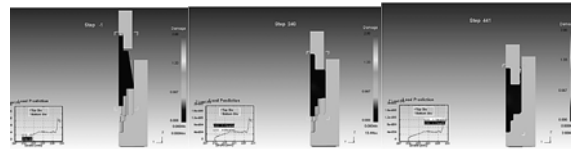
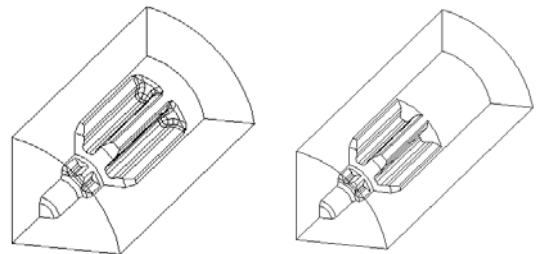


図7 ダブルギアの塑性流動解析状況(2)



1) 壁面長さ 4 mm      2) 壁面長さ12mm

図8 解析モデルにおける金型の変更

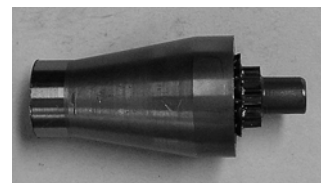


図9 小ギア部分の成形実験結果

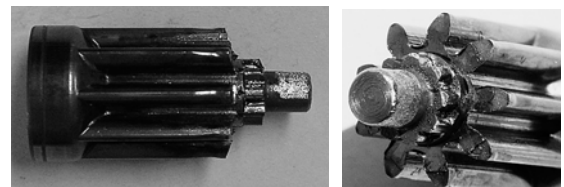


図10 大ギア部分の成形実験(背圧なし)

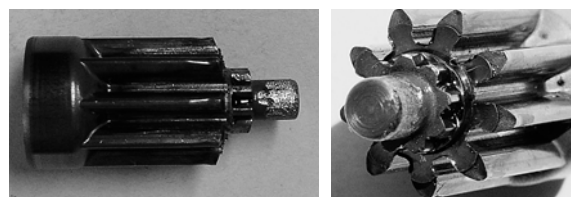


図11 大ギア部分の成形実験(背圧あり)

圧 (0.3ton程度) をかけることにより, 大ギアの先端形状が改善されていることがわかった。

#### 4 おわりに

本研究では, スラグ形状に着目し, 複合ギア成形のモデル実験, ならびに三次元剛塑性有限要素解析を行い, ネットシェイプ成形が可能な最適スラグ形状について検討した。さらに, それらの結果をもとに, ダブルギアの成形性についても同様に実験及び解析を行い, 製品化の目途を立てた。

得られた結果は以下のとおりである。

##### 複合ギアについて

- (1) 下側断面が小さく, 上側断面が大きい変断面を持つスラグを用いると, ギア部とカム部の両方の成形性が良好であることがわかった。
- (2) 上記の結果をもとに, 前方後方押出しによる複合ギアを成形するための最適なスラグ形状を明らかにすることができた。

##### ダブルギアについて

- (3) 二段の成形工程によりダブルギアの成形が可能であることを実証した。
- (4) 背圧制御を実施することでギア部の成形性を向上させることが可能である。

本研究は, 「特定ものづくり基盤技術の高度化」事業において実施されたものである。記して謝意を表す。

#### 5 参考文献

- 1) Jiro Saga and Hiroto Nojima: *Journal of the JSTP*, 12-127, 611-621 (1971)
- 2) 河野通成 他: 日本機械学会第21回計算力学講演会論文集, 8-33, 750-751 (2008)
- 3) 佐藤征亜 他: 日本機械学会第21回計算力学講演会論文集, 8-33, 748-749 (2008)
- 4) Masaya Toyama etc, ICTP 2008, WE 2-6, 602-603 (2008)