前方後方押出しによる複合ギア成形* (成形性と金型応力に及ぼすスラグ形状の影響)

佐藤 征 亜^{*1}, 木之下 広幸^{*2}, 外山 真也^{*3}
河野 通成^{*4}, 平田 幸次^{*4}, 海津 浩一^{*5}

Compound Gear Forming by Forward-Backward Extrusion (Influence of Slug Shape on Formability and Die Stress)

Masatsugu SATO^{*6}, Hiroyuki KINOSHITA, Masaya TOYAMA,
Michinari KAWANO, Koji HIRATA and Koichi KAIZU

^{*6} Miyazaki Prefecture Mechanical Technology Center,
39-82 Ootakecho, Nobeoka-shi, Miyazaki, 882-0024 Japan

The compound gear has a gear on one side and a cam profile on the other side. It is used in a seat belt system for an automobile. The compound gear has been produced through multiple forging processes and cutting processes. From the requirement for the lower costs of production and labor saving, it is very important to reduce the number of forging processes. So, the compound gear forming by the forward-backward extrusion in the cold forging was attempted. But it is very difficult to obtain the product without the defect, and the damage of the die sometimes occurs. In this study, to obtain the suitable slug shape for improving formability of the slug and preventing the damage of the die, 3D finite element simulations for the forward-backward extrusion process using several types of slugs with the different shapes in cross section and the same volume were carried out, and the relationship between the slug shape and its formability and the influence of the slug shape on the stress of the die in the extrusion process were examined in detail. On basis of the obtained results, the suitable slug shape which was able to be formed into near net shape of the product and which could be formed in the lower extrusion load were proposed. The effects of the proposed slug shape on the forward-backward extrusion in the cold forging were also confirmed by the finite element simulation and the experiment.

Key Words: Forging, Extruding, Plastic Working, Gear, Formability, Metal Flow, Die Stress, Finite Element Method

1. 緒 言

複合ギアは自動車用シートベルトに用いられている部品で、図1に示すように、カムとギアの両形状を有する複雑な形状をしている。複合ギアの素材には機械構造用炭素鋼鋼材 (S15C 材または AISI-4140 材) が用いられ、従来から複数の冷間鍛造工程を経た後に切削加工を行うことにより作製されている。しかし、複数の鍛造工程を経ることにより形状誤差が累積するという問題があり、その誤差を除去するためには高精度の切削加工が必要な上に多量の切りくずも生じていた。さらに近年の厳しいコスト削減の要求から、鍛造

工程数を可能な限り削減することによる生産の効率化が強く求められている。そこで我々は、一工程の冷間鍛造で不具合のない製品形状を得ることを目標とし

Fig. 1 Schematic illustration of compound gear

* 原稿受付 2010年6月4日。

^{*1} 宮崎県機械技術センター (☎ 882-0024 延岡市大武町 39-82)。

^{*2} 正員, 宮崎大学工学部 (☎ 889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)。

^{*3} 正員, 宮崎県工業技術センター (☎ 880-0303 宮崎市佐土原町東上那珂 16500-2)。

^{*4} (株)ニチワ (☎ 889-3151 日南市上方 1765)。

^{*5} 正員, 兵庫県立大学大学院工学研究科 (☎ 671-2280 姫路市書写 2167)。

E-mail: sato@mmtc.or.jp

て、冷間での前方後方押出しによる複合ギアのニアネットシェイプ成形を試みた。

これまでに冷間での前方後方押出しによる成形では、素材の流動応力（変形抵抗）が非常に高くなるために成形性が悪く、製品に何らかの欠陥が発生することが多いと報告されている⁽¹⁾。我々も一定断面を有する形状のスラグを用いて、冷間での前方後方押出しにより複合ギアの成形を試みた。図2は、その成形品に生じた欠陥と金型の損傷状況の一例を示している。この図から、ギア部の先端には欠肉による未充填部分が生じ、歯先部にはき裂が生じている。また、カム部のフランジにはフローマークが発生している。さらに、金型表面には割れや剥離などが生じている。したがって、これらの不具合を改善する何らかの手段を講じなければならないが、これまでに本研究で対象とするような歯形を有する複雑形状の部品を冷間前方後方押出しにより良好な状態に成形する指針は示されていないようである。そのような状況の中で、過去のかさ歯車の鍛造に関する研究^{(2)～(4)}において、歯部への材料の充填は中実円柱形状のスラグの直径と高さによって影響を受けることから、歯先に欠肉などの欠陥を生じさせないためには、適切な形状の円柱状スラグを選ぶ必要があることが報告されている。しかしながら、これらの報告では、スラグの形状は中実円柱形状に限定

されており、複合ギアのような複雑な形状の製品を前方後方押出しにより成形する場合に、このような単純な形状が適切な形状であるかは不明である。

本研究では、複合ギアの冷間前方後方押出しにおける不具合を改善する手段として、変断面形状を有するスラグを用いる。これによって、材料の塑性流れを制御し、複合ギアのニアネットシェイプ成形が実現できるとともに、金型への負荷の低減も同時に実現できることを示す。

具体的には、本研究においては、実材料を用いた実機による試行錯誤的な成形トライは金型が破損する可能性が高いので実施できない。そのため、まず適切なスラグ形状を決定するための知見を得るために、一定体積で断面積の異なる数種類のスラグ形状を用いて、三次元有限要素法によるスラグの成形解析と金型の応力解析を行った。そして、それらのスラグに関する塑性流れを詳細に分析することで、冷間前方後方押出しにおける成形性とスラグ形状との関連性を明らかにするとともに、スラグ形状が金型応力に及ぼす影響について検討した。次に、得られた結果を基にニアネットシェイプ成形が可能で、成形荷重と金型に発生する応力のどちらも低減できる変断面形状を有するスラグ形状を提案し、有限要素解析と鍛造機による成形実験を行うことにより検証した。

Fig. 2 Some defects of the product and damage of die

Fig. 3 Various shapes of slugs used for experiments and numerical simulations

Fig. 4 Finite element model

Table 1 Computational conditions

Slug	Material: S15C	$\sigma = 720.69 \epsilon^{0.222}$
	Flow stress (MPa)	
	Total number of elements	60000
Die	Material: AISI-H-13	210
	Young's Modulus (GPa)	
	Total number of elements	80000
Velocity of stem		0.67mm/s
Frictional coefficient (Shear friction law)		0.1

2. 有限要素解析

2.1 スラグ形状 スラグ形状が成形性と金型に及ぼす影響についての知見を得るために、数種類のスラグ形状を用いて三次元有限要素解析を行った。図3は有限要素解析に用いたスラグ形状を示している。T-1 スラグおよびT-2 スラグはともに一定断面積を有し、断面積を可能な限り小さくした形状と断面積を大きくした形状である。T-3 スラグおよびT-4 スラグは断面積を変化させた変断面形状を有し、上下の面がT-1 スラグあるいはT-2 スラグとほぼ同じ断面積を持つ形状である。

2.2 有限要素解析の方法 解析には総合加工シミュレーションソフト Deform システム(米国 SFTC 社)を使用し、スラグの成形解析と金型の応力解析との連成解析を行うことで、スラグ形状が複合ギアの成形性と金型応力に及ぼす影響について検討した。その際に、スラグは三次元剛塑性体、金型は三次元弾性体として定義した。図4に金型形状と有限要素解析に用いたモデルを示す。また表1に計算条件を示す。有限要素計算は簡略化のために、1/6 分割モデルを使用し、カム部分に関しては円弧形状で近似した。

3. 結果と考察

3.1 スラグの成形性 図5はステムの押し込み量が6mmと9mmの場合の剛塑性有限要素計算により得られたスラグの塑性流れを示している。これらの結果から、断面積の小さい一定断面形状を有するT-1スラグの場合には、初期成形段階では主にギア部が形成され、カム部はその後形成されている。これは、T-1スラグは押し込み比が小さいために、カム部よりギア部の方に塑性流れが生じやすいためと考えられる。一方、断面積の大きい一定断面形状を有するT-2スラグの場合は、ギア部とカム部の両形状が同時に形成される特徴がある。

変断面を有するT-3スラグおよびT-4スラグの場合は、T-2スラグの場合と同様にギア部とカム部が同時に形成され、その塑性流れはT-1スラグとT-2スラグの中間の様相を示している。すなわち、T-2スラグと比較した場合には、ギア部への塑性流動は良好であるが、カム部への塑性流動は悪い。

図6は剛塑性有限要素計算により得られた成形途中でのスラグの変形した形状を示している。図6の(a)および(b)は、変形したスラグを側面と下面から見た形状を表している。この図から、成形途中ではスラグの変形した形状が大きく異なること、およびスラグの

形状の違いによって欠肉やフローマークなどの欠陥の発生の有無が異なることがわかる。このことから、適切なスラグ形状を用いることにより、欠陥のない良好な成形品を得ることが可能であると考えられる。そして、適切なスラグ形状を見出すために、各スラグ形状に対する塑性流れの特徴を明らかにすることが重要であると考えられる。

Fig. 5 Metal flow patterns of slugs obtained by FEM

Fig. 6 Deformed shapes of slugs

Fig. 7 Deformed shapes of T-3 slug and T-4 slug obtained by experiments using A1070 aluminum alloy

Fig. 8 Distributions of equivalent plastic strain of compound gear after forming

各スラグについて主な特徴を挙げると、T-1 スラグおよびT-4 スラグでは、カム部にフローマークが形成されている。また、T-2 スラグおよびT-3 スラグでは、ギア先端部に欠肉が生じている。

図7はアルミニウム合金A1070材からなるT-3スラグとT-4スラグを用いた場合の成形実験によって得られた成形品の様相を示している。図6と図7の結果の比較から、有限要素計算により得られた成形品の形状と成形実験により得られた成形品の形状は非常に類似していることがわかる。そして図7の実験結果より、T-3スラグではギア先端部において欠肉が発生し、T-4スラグではカム部にフローマークが発生していることが確認できる。

以上の結果より得られた知見については、以下の通りである。

- (1) 断面積の小さい一定断面形状を有する T-1 スラグは、ギア部の成形性は良好であるが、カム部の成形性はフローマークが発生することから悪い。
- (2) 断面積の大きい一定断面形状を有する T-2 スラグは、カム部の成形性は良好であるが、ギア部の成形性は先端部に欠肉が発生することから悪い。これは T-1 スラグの結果と相反する結果である。
- (3) 変断面形状を有する T-3 スラグおよび T-4 スラグの塑性流れは、T-1 スラグと T-2 スラグの中間的な様相を示す。

3-2 成形品の塑性ひずみ 図8は有限要素計算により得られた複合ギアの成形後の相当塑性ひずみ分布を示している。図8から、いずれのスラグを用いても成形品の最終形状には大きな差はないが、成形品の

相当塑性ひずみ分布は大きく異なっている。具体的には、T-1 スラグは、相当塑性ひずみ値が他と比較して全体的に大きく、カム部においてひずみ分布が著しく不均一となっている。T-1 スラグの相当塑性ひずみの値が大きい理由は、他のスラグを用いた場合よりも成形後の高さ減少率が大きいと考えられる。また、カム部の不均一なひずみ分布については、フローマークの発生によるものと考えられる。

T-2 スラグの相当塑性ひずみは、T-1 スラグと比較すると全体的に小さく、ひずみ分布もより均一である。またT-3 スラグおよびT-4 スラグの相当塑性ひずみもT-1 スラグと比較すると全体的に小さく、ひずみ分布もより均一になっている。

3-3 金型応力解析 図9は有限要素計算により得られた最終成形段階における金型の最大主応力分布を示している。図9から、全てのスラグを用いた場合において、金型のギア歯底部分とフランジ側面のコーナー部において高い応力が生じている。そして最大応力は応力集中によりギア歯底部分に生じている。したがって、この部分で最も金型が損傷しやすいと考えられる。このことは、図2に示す金型の損傷状況において、金型の割れがギア歯底部分にき裂が入ることから生じている状況と一致している。

各スラグを用いた場合の金型のギア歯底部分での最大主応力を比較すると、小さい断面積を有するT-1スラグを用いた場合には、最大主応力は他のスラグを用いた場合よりも高い。一方、大きい断面積を有するT-2スラグを用いた場合には、最大主応力は比較的低い。また、T-3スラグおよびT-4スラグを用いた場合には、

Fig. 9 Distributions of maximum stress in die at final punch stroke

ギア歯底部分の最大主応力はT-1 スラグを用いた場合よりも低い。さらにT-3 スラグとT-4 スラグを用いた場合の比較では、最大主応力はT-3 スラグの方がT-4 スラグよりも低いという特徴がある。

3・4 スラグの最終形状と鍛造機での成形 これまでの結果から、断面積の小さい一定断面形状を有するT-1のようなスラグ形状は、ギア部の成形性は良好であるが、カム部の成形性はフローマークが発生することから悪くなる。また、金型の応力も高い。一方、断面積の大きい一定断面形状を有するT-2のようなスラグ形状は、カム部の成形性は良好で金型の応力も低い。ギア部の成形性は欠肉が発生することから悪くなる。このようにどちらのスラグも一長一短があるが、カム部に発生したフローマークは切削加工により容易に除去可能であるのに対して、ギア先端の欠肉に関しては致命的な欠陥である。そのため、ギア先端部を目標とする製品形状と一致するように成形する必要がある。したがって、カム部には多少のフローマークが生じるが、ギア先端の欠肉はほとんど生じないT-4のような変断面を有するスラグ形状が複合ギアの成形に効果的であると考えられる。さらに、成形荷重を低減するために、スラグの高さ減少率を小さくすることも重要である。以上のことから、T-4 スラグをベースとし、側面に曲面を有すること、高さを低く抑えることを考慮して最終的なスラグ形状を決定した。これをT-5 スラグと呼び、図10にその形状を示す。

図11はS15C材からなるT-5 スラグを用いて、250tonfの冷間鍛造機（フォーマー）により成形した場合の成形品の外観を示している。ギアの歯先に若干の小さいき裂が発生しているが、図2の成形品と比較

すると、致命的な欠陥がほとんどなくなり、ギアとカムの成形性が大幅に改善されていることがわかる。

図12はT-5 スラグを用いた場合の有限要素計算によって得られた最終成形段階における金型の最大主応力分布を表している。T-5 スラグを用いた場合の最大主応力値は、図9に示すT-1 スラグからT-4 スラグを用

Fig. 10 Final shape of slug (T-5)

Fig. 11 Aspects of product in the case where T-5 slug made of S15C is used

Fig. 12 Distributions of maximum stress generated in die in the case of T-5 slug

いた場合と比較してギア部の応力が非常に小さくなっていることがわかる。

図 13 は有限要素計算により得られた押出し荷重とステム位置との関係を示している。ステム位置の z 方向は図 4 に示す通りである。この図から、断面積の小さいスラグは押出し荷重が大きい傾向にあることがわかる。この理由は、断面積の小さいスラグほど高さ減少率が大きいために素材の加工硬化により変形抵抗が大きくなるためと考えられる。T-5 スラグの押出し荷重は、他のスラグと比較して明らかに低減されている。これは、スラグの側面を曲面にしてその高さを低く抑えた効果が現れているものと考えられる。

図 14 は有限要素計算により得られた金型内部に生じた最大応力（最大主応力の最大値）とステム位置との関係を示している。なお、最大応力が生じる位置は一定ではなく、成形過程により変化している。しかし、最終成形段階（ステムの位置が最下点の段階）では、T-5 スラグを除いてギア歯底付近で最大の応力が生じている。この図から、T-1 スラグを用いた場合の金型に発生する最大応力は成形過程を通じて常に高くなっている。一方、T-2 スラグを用いた場合では、最大応力は比較的低い値となっている。T-5 スラグを用いた場合では、最大応力は他のスラグを用いた場合よりも低く、金型に発生する応力は明らかに低減されている。以上の結果から、T-5 スラグは成形性が良好であるとともに、成形荷重が小さく、金型応力も低いことがわかった。

4. 結 言

本研究では、冷間での前方後方押出しによる複合ギアの成形において、金型の損傷無しに良好な製品を得ることを目的として、数種類の同一体積を有するスラグ形状に対して、成形性と金型応力に関する三次元有限要素解析を行った。そして、各スラグ形状に対する塑性流れの特徴、ならびに成形品の欠陥の発生状況を明らかにした。また同時に、スラグ形状が金型応力に及ぼす影響を明らかにした。さらに、それらの解析結果に基づいて、変断面形状を有するスラグ形状を提案した。その提案したスラグに対する有限要素解析結果と鍛造機による成形実験から、成形性が良好であること、成形荷重は小さくなること、および金型応力も小さくなることを示した。また、金型にも損傷が生じないことを確認した。

本研究の結果から、前方後方押出し成形において、適切なスラグ形状を選択することにより、塑性流れを制御してニアネットシェイプ成形ができるとともに、

Fig. 13 Relationship between extrusion load and stem position

Fig. 14 Relationship between the maximum stresses generated in the die and the stem position.

成形荷重と金型に発生する応力を低減できることが明らかになった。

本研究の一部は、九州経済産業局の「戦略的基盤技術高度化支援事業（平成 19 年度～平成 20 年度）」において、宮崎県の産学官連携により実施されたものです。ここに記して感謝の意を表します。また研究を遂行するにあたりご支援いただいた宮崎県産業支援財団の長谷川誠氏、および幣島和裕氏に謝意を表します。

文 献

- (1) J., Saga, H., Nojima: On the Crack Initiation in A Workpiece during Forward Backward Extrusion, *Journal of the JSTP*, Vol.12, No.127 (1971), 611-621.
- (2) The Japan Society for Technology of Plasticity: *Forging Technology*, (1997), p.141, Corona publishing Co., Ltd.
- (3) M., Izumisawa, Effect of die and workpiece geometry on the defect formation on the tooth face of hot forged straight bevel gears—Study on hot forged straight bevel gears I—, *Journal of the JSTP*, Vol.16, No.178(1975), pp.1049-1056.
- (4) M., Izumisawa, Effect of die and workpiece geometry on the defect formation on the tooth face of hot forged straight bevel gears—Study on hot forged straight bevel gears II—, *Journal of the JSTP*, Vol.17, No.180(1976), pp.14-21.