

# ベベル冷間歯形成型の ROV デファレンシャル部品への適用

Application of Beveled Cold Gear Forming to ROV Differential Parts

仲田 武弘 熊崎 正祥 鈴木 由美子 松下 浩次

当論文は、日本プラントメンテナンス協会(JIPM)の2018年度TPM優秀論文賞を受賞した内容に基づくものです。

## 要旨

近年、鍛造業界においては付加価値の高い鍛造品が求められている。社内ではこれまでニアネットシェイプを進めてきており、さらなる付加価値向上のために、ROV (Recreational Off-Highway Vehicle) のフロントデファレンシャルユニット (以後、フロントデフ) の構成部品であるベベルギヤの鍛造歯形成型に挑戦した。今回、解析を用いながら難鍛造加工材における冷間鍛造1工程成型を実現し、低コストな工法で立上げを行った。また、歯当たり試験機とベベルギヤ用三次元測定ソフトを用い、ベベルギヤの単品歯車精度保証方法を構築し、量産で運用を開始した。本稿では上記の活動について紹介する。

## Abstract

In recent years, high added-value components have been in demand in the forging industry. At Yamaha Motor, progress has been made with near net shaping, but in order to make further improvements in added value, we have embraced the challenge of bevel gear forging tooth forming of the constituent parts of ROV (Recreational Off-Highway Vehicle) front differential units. Through the use of analysis, this initiative successfully achieved cold forging one-process forming with difficult forging materials, thus establishing a low-cost production method. In addition, single-gear accuracy assurance methods were developed and usage in mass production begun through the use of tooth contact test equipment and three-dimensional measurement software for bevel gears. This report introduces the initiatives taken as part of the application of beveled cold tooth forming.

## 1 はじめに

近年、製造業において国内の人件費の高騰にともない、人件費が安く、消費地に近い海外での生産が進んでいる。鍛造業界においても同様に、国内の生産量は減少し、国内では付加価値の高い鍛造品が求められている。世の中では鍛造にて歯車を成型する工法は広く行われており、平歯車やベベルギヤの量産が行われている。

社内ではこれまで、鍛造完成品の段階で製品形状に近い形状に成形するニアネットシェイプを進めてきたが、鍛造歯形成型の生産実績はまだなかった。

今回、ROVのフロントデフを内製するにともない、構成部品であるベベルギヤ3部品(GEAR1、GEAR2、PINION DIFFERENTIAL)を対象に、2015年3月から歯車精鍛化量産開発に着手し、2017年4月より量産を開始することができた。本稿ではベベルギヤの歯車精鍛量産化の活動の中で行った、鍛造工程の作りこみおよび歯面精度保証について報告する。

## 2 内製化にともなう課題

フロントデフの構造と対象部品を図1に示す。フロントデフは前輪の中央付近に設けられ、左右のタイヤの回転数差を吸

収しつつ、同じトルクを振り分けて伝える差動装置であり、左右の回転数差に合わせて必要な方向に回転するのが特徴である。フロントデフの要求機能として、音や振動が少なく、滑らかに駆動することが重要であり、今回のROVに求められる商品性としても、静粛性が求められている。これらはベベルギヤの歯面精度の影響を大きく受けるため、良好な歯面を安定して生産することが求められる。また、内製化をするにあたり、低コストな工法選定も課題である。

## 3 工法選定

まず始めに、ベベルギヤの製造QDCを満足するための製造工法の検討を行った。

ベベルギヤの製造工法として、方案①『切削歯切り』、方案②『冷間鍛造1工程』、方案③『熱間鍛造+冷間鍛造(サイジング)による複合2工程』を検討した。各工法の特徴を表1に示す。

表より、鍛造工法である方案②③は切削工法である方案①と比べ、約40~50%コストが低いことが分かる。これは鍛造工法のサイクルタイムが速いことが大きな理由である。また、歯面状態においても、鍛造工法は切削加工で見られるツール

マークが無く、滑らかな歯面を成型することができるため、次に鍛造工法である方案②と③の比較を行った。

一般的なベベルギヤは方案③にて成型されているが、方案②が実現できると、工程数削減効果から、コストをさらに低減することができる。コストダウン効果としては方案③と比較し、約10%のコスト削減が見込まれるため、今回方案②『冷間鍛造1工程』による成型にチャレンジした。

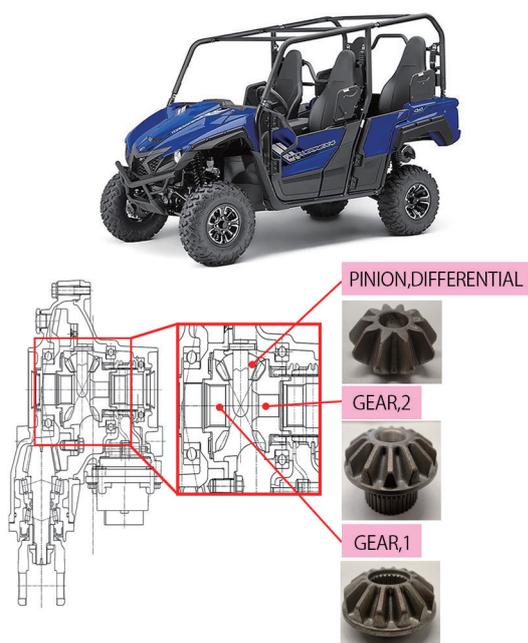


図1 フロントデフ構造と対象部品

表1 製造工法の特徴

方案	Q(歯面精度)	D(工程数)	C(コスト相対比)			
①切削歯切り	±0.02	○	工程:6	△	1.0	-
②冷間鍛造 1工程	±0.02	○	工程:4	○	0.5 (▲50%)	○
③熱間鍛造 +冷間鍛造 (複合鍛造)	±0.02	○	工程:6	△	0.6 (▲40%)	△

## 4 鍛造工程設計

鍛造の工程図を図2に示す。材質はSNCM系の改良合金鋼にて実施した。この材料は鍛造成型性が低いため、素材の前処理として、鍛造成型性を向上させるための球状化焼鈍と金型カジリ対策としてMoボンデを施した。



図2 鍛造工程図

また、今回の冷間鍛造工法には閉塞鍛造を採用した。閉塞鍛造の模式図を図3に示す。閉塞鍛造とは上下型を閉じた状態で上下のセンターピンを押し込み、材料を半径方向に流すことにより、低荷重で成型が行える工法である。この工法は軸部から半径方向に突起した部品に使用されることが多く、ベベルギヤの成型には広く使用されている工法である。一方で、稼動軸が2軸になるため、変形予測が難しいのが特徴である。この工程にて初回鍛造試作を実施した。

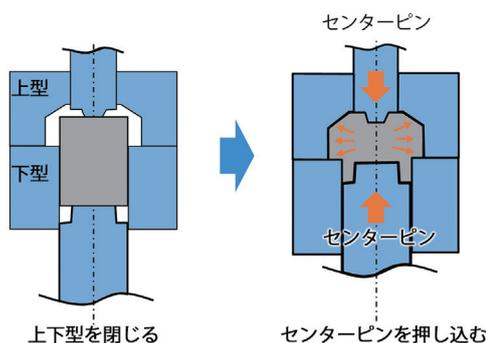


図3 閉塞装置構造図

## 5 鍛造工程作り込み

### 5-1. 初回鍛造試作結果

鍛造試作を行った結果、1ショット目から外径側歯底部に割れが発生した。成形過程の破断部の経過を図4に示す。図より、割れは外径側歯底部成型途中からすでに発生しており、破断部を観察すると、軸方向に対して斜めに割れていることが分かる。

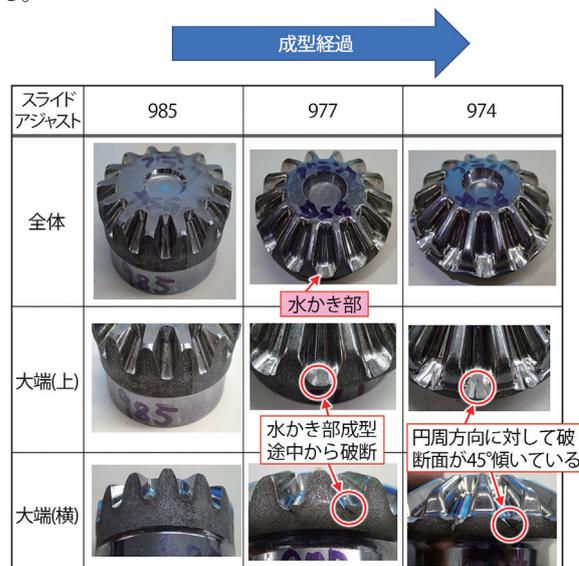


図4 成型経過

一般的に延性破壊の破断面は引張り応力の発生する方向に対し、45°方向に傾いて発生することから、これは円周方向に大きな引張り荷重が発生していることが要因と考えられる(図5)。

上記の推察から円周方向の応力に着目し、今回の試作のCAE解析を実施した(図6)。CAE解析結果より、外径側歯底部が成型される時、外径側歯底部の円周方向には最大で1120MPaの応力が発生しており、他の部位と比較して高い応力であることが分かる。そこで、この円周方向に発生する応力を現状以下に低減するための対策を検討した。

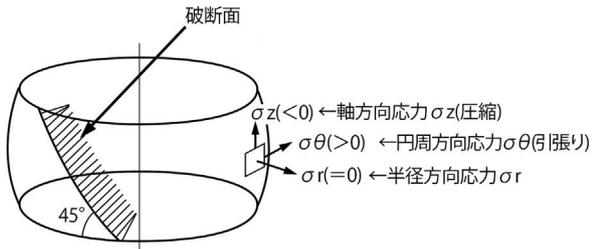


図5 割れの形態<sup>11)</sup>

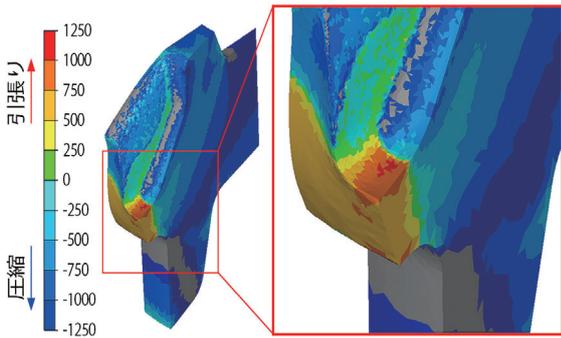


図6 破損部解析結果(円周方向応力)

## 5-2. 要因の検討

外径側歯底部成型時の円周方向応力に対する特性要因図を図7に示す。因子の中から、効果が予想される因子4種類を抽出し、確認を行ったが、『硬度』、『予備成形』、『加工速度』については効果が見られず、『材料流れ』の視点から、材料を破断部に流すことにより応力を下げる対策を検討した。検討にはCAE解析を用い、金型形状の違いによる影響を約40仕様の解析を実施し、検証した。

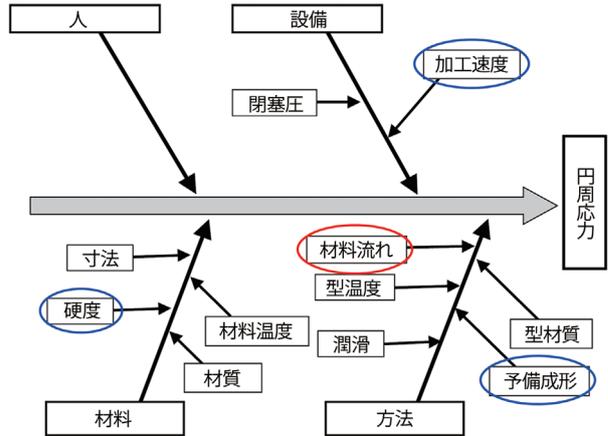


図7 特性要因図

## 5-3. 対策案検討

現状のフランジ部の厚さは4.5mmであり、その隙間に材料が流れ込むには大きな材料変形をとめない、材料割れが発生していると考えられる。そこで、破断部に材料を供給し、材料変形を抑え、応力を低減させる形状を検討し、最終的にボス部にテーパをつけた形状をCAE解析にて検証した(図8)。テーパは20°、30°、40°の3仕様にて実施した。解析結果を図10に示す。解析結果より、テーパが大きくなるにしたがって、円周方向応力が小さくなっていることが分かる。初回鍛造試作の解析結果と比較して25%~68%の円周方向応力の低減が見られた。

一方で、テーパ角度を大きくすると、その分素材重量を増やす必要があり、コストアップにつながるため、対策案としてはテーパ角度 $\theta = 30^\circ$ (現行比応力42%減)を採用した。

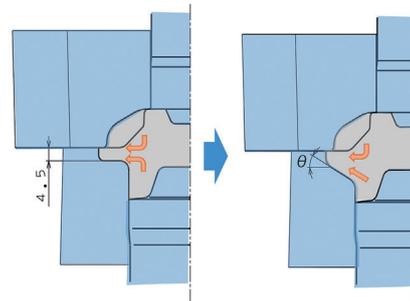


図8 対策案

## 5-4. 対策効果確認

対策仕様にて鍛造試作を実施した結果、外径側歯底部の割れは抑制された(図10)。今回、解析にて円周方向応力に着目し、これを低減させることにより、鍛造割れを抑制することができたが、現状その閾値は分かっていない。今後、解析と実機の合わせ込みを行い、閾値を明確にしていくことが必要である。

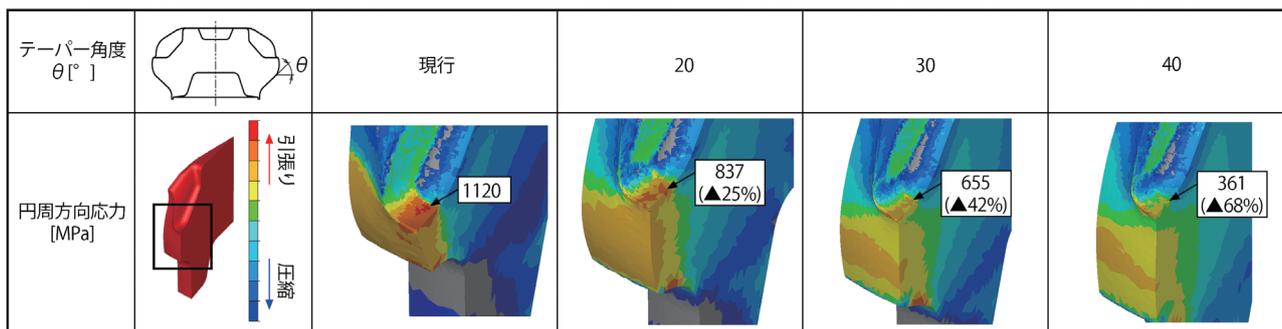


図9 テーパー角度による応力への影響



図10 対策後成型ワーク

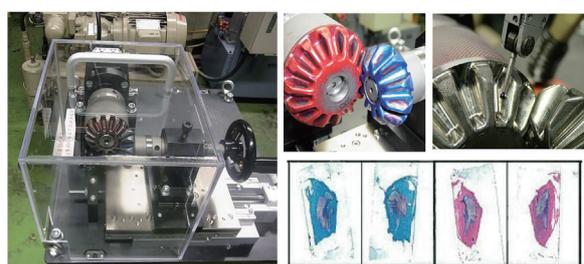


図11 歯当り試験機

## 6 歯面精度保障

### 6-1. 課題

通常、ベベルギヤの品質は組立位置での『歯当り』と『バックラッシュ』を歯当り試験機にて検査し、評価される。歯当り検査とは、かみ合う2つのベベルギヤを組立位置となる基準の位置に塗料を付けた状態でかみ合わせ、互いの当り方を確認する検査であり、バックラッシュ測定は組立位置での2つのギヤの遊びを示している(図11)。これらは歯面のできばえに影響を受け、精度が悪いと歯車の騒音、振動、破損・磨耗につながる。鍛造歯形成型において、従来通りでは鍛造成型後の旋盤工程後に初めて歯当り・バックラッシュ検査を行い、品質確認を行うことになってしまう。しかし、この段階で鍛造精鍛歯面が原因によるNGが発生すると、大量の不良品が発生してしまうため、鍛造完成品状態でもできばえを保証する必要がある。また、歯当り・バックラッシュはGEARとPINION、DIFFERENTIALのセットでしか検査できず、単品での評価ができないのが現状である。

図12にフロントデフの要求品質体系図を示す。鍛造工程において、歯当り・バックラッシュに影響を与える因子として歯形精度(歯厚、ピッチ誤差、歯溝の振れ、歯面形状)があげられるが、歯厚、歯面形状については具体的な単品での規格は無く、歯面のできばえを管理することができなかった。そこで、単品での歯面の精度を数値的に管理する仕組みの構築を目指した。

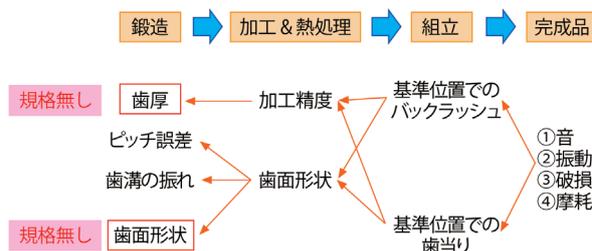


図12 フロントデフ要求品質体系図

### 6-2. 歯面の数値化と管理項目

まず、歯面を数値的に評価するために、ベベルギヤ用の三次元測定機測定ソフトを導入した。このソフトを用いた三次元測定結果を図13に示す。出力結果には『歯面誤差』、『歯厚誤差』、『各種ピッチ』が表示される。歯面誤差は歯面の任意のエリアを均等に分割し、ベースとなる3Dモデルに対して実物がどれほどずれているかを示した数値である。結果は各測定点を長方形に模擬して出力され、測定位置となる各格子交点に誤差が記載されている。また、歯厚誤差は測定エリアの中央の値を用い、3Dモデルとの差異が記載される。

歯面誤差においては歯面のできばえを管理するうえで、出力結果をそのまま管理項目とするにはデータ数が多く、歯面の特徴を捕らえづらい。そこで、平歯車で用いられている歯面精度規格を参考に、歯面全体と歯形・歯筋方向にデータを整理し、管理項目を決めた。管理項目を図14に示す。歯面誤差についてはこれらの管理項目をもとに評価を行い、歯厚誤差、

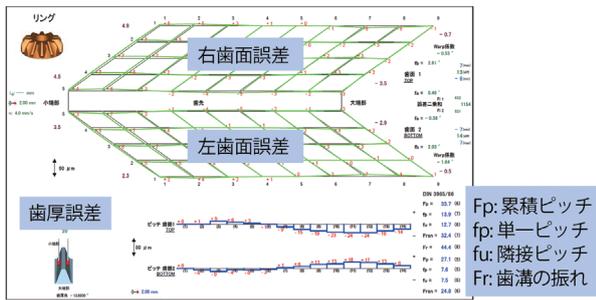


図13 三次元測定出力結果

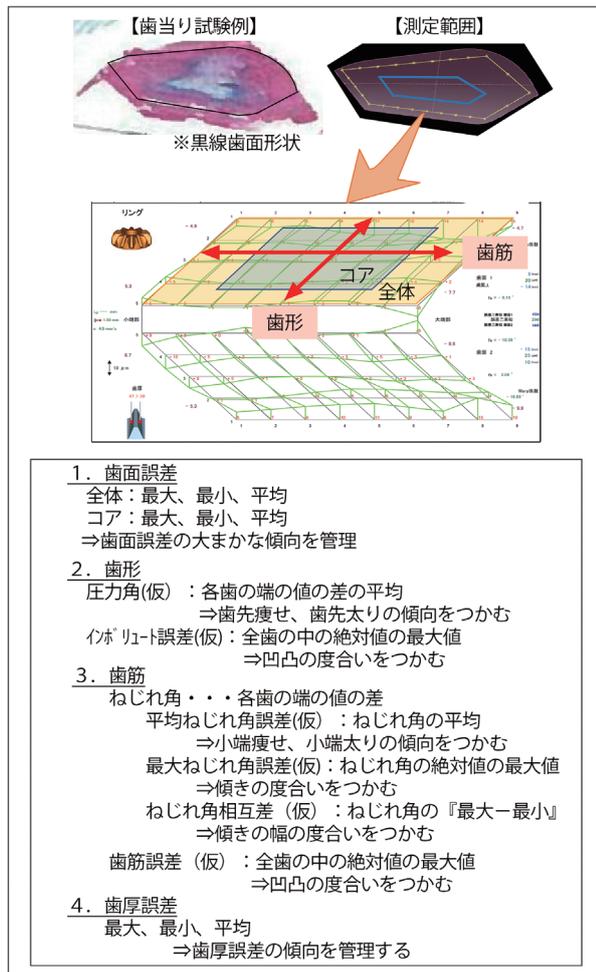


図14 管理項目

各種ピッチは測定結果をそのまま評価した。また、これらの管理項目には規格が無い場合、歯当り試験機を製作・導入し、歯当り検査と紐付けして管理規格の確からしさの確認を行った。

一方、上記の管理方法にて管理を行う場合、三次元測定を行う前に測定基準となる面を旋削加工にてつくる必要があり、生産中に評価することは困難である。そのため、管理頻度を確認するために歯面精度のばらつきも合わせて確認した。

### 6-3. 管理規格とばらつき確認

前述の管理規格をもとにN増しのトライにて管理規格の確認および歯面精度のばらつき確認を行った。加工数は1ロット約1000個を4ロット実施した。歯厚誤差および歯面誤差の結果を図15に示す。どちらの規格も同ロット内、同一金型内ではばらつきも少なく安定しており、歯当り結果も良好であった。このことから、一型内では安定した歯面精度を得ることが確認できた。

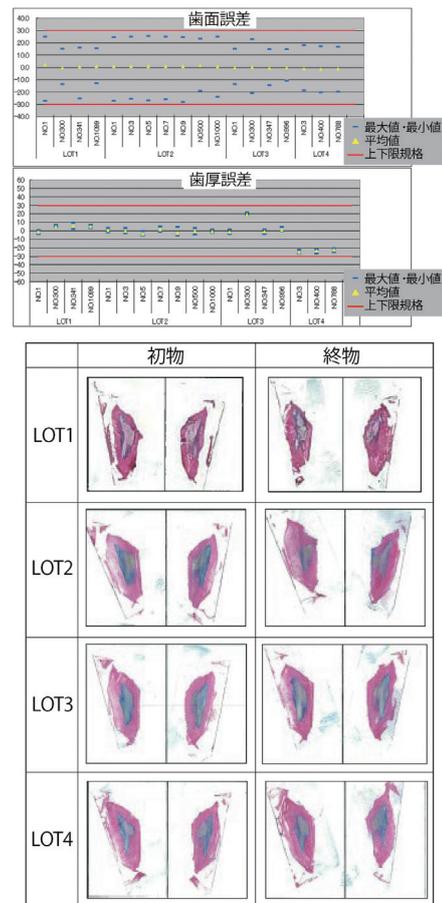


図15 歯面精度バラつきと歯当り結果

### 6-4. 型ごとのばらつき確認

上記よりロット内、ロットごとのばらつきについては確認ができたが、今後歯形を成型する金型を交換した時に、金型のできばえによるばらつきも確認する必要がある。金型交換時の歯面精度確認フローを図16に示す。確認項目は、金型歯面測定、鍛造品歯面測定、本工程加工確認、歯当り確認とし、これらが今回決めた規格の範囲内である時は予備型として生産現場に保管をすることとした。仮に歯面精度測定結果で規格外が発生した場合、歯当り検査結果が合格の場合はその数

値まで規格を変更し、規格の見直しを行うこととした。今後、金型更新ごとの測定データを蓄積し、規格・確認フローの改善を行っていく。

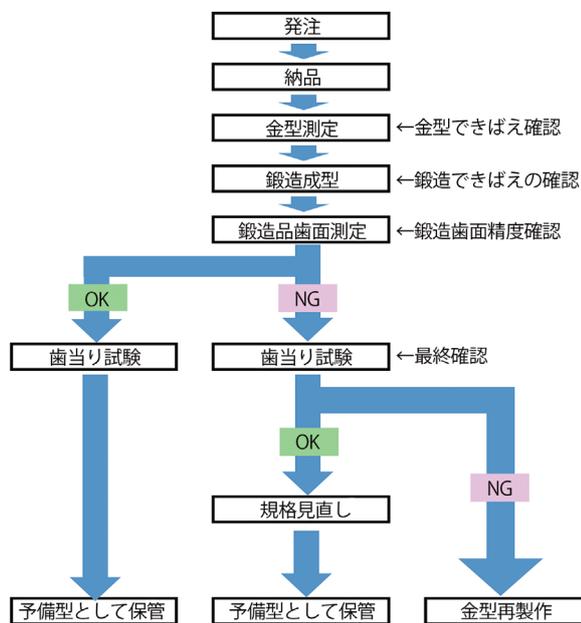


図16 予備金型確認フロー

■著者



**仲田 武弘**  
Takehiro Nakada  
生産本部  
製造技術統括部  
PT技術部



**熊崎 正祥**  
Masayoshi Kumazaki  
生産技術本部  
生産技術部



**鈴木 由美子**  
Yumiko Suzuki  
生産技術本部  
生産技術部



**松下 浩次**  
Kohji Matsushita  
生産技術本部  
生産技術部

## 7 おわりに

今回、鍛造歯形成型に挑戦し、生産立上げを行った。その中で、難鍛造加工材における冷間鍛造1工程成型を実現し、低コスト(切削加工比▲50%、従来加工比▲10%)の工法での立上げおよび精鍛化歯面保証の仕組みを構築することができた。新規部品内製化ということもあり、検証が不十分な部分も多く、後々に問題が発生してしまうことがあった。しかし、今回の開発を通して、ベベルギヤの歯形成型についてのポイントが見えてきたことは大きな収穫であった。今回の取り組みをもとに、冷間鍛造のしやすい製品形状の標準化を行い、製品設計・工程設計にフィードバックしつつ、他部品への展開を行っていきたい。

■参考文献

[1] 鍛造 —めざすはネットシェイプー コロナ社 日本塑性加工学会