

# カップ状部品のスプライン転造に関する研究

九州大学大学院 工学研究科 知能機械システム専攻

助手 松永良一

(平成8年度奨励研究助成 AF-96038)

キーワード：転造加工，新成形法，FEMシミュレーション

## 1. 研究の目的と背景

自動変速機（オートマチック・トランスミッション＝AT）は多種多様の部品で構成されている。本研究で取り上げるカップ状シートメタル部品外周部にスプライン成形を施したクラッチハブ部品もその一つである。現在、これらの部品の加工は、グローブ法、スピニング、プレス加工、切削加工等のいずれかで行われているが、より安価で高効率な新たな加工法が求められている。

そこで本研究では、これに代わる加工法として、歯車などの成形に利用されている2ローラダイスプランジ転造法<sup>2)</sup>を応用した、カップ状部品成形用転造法を提案する。この加工法は、スプライン軸形状の内工具にカップ状部品を取り付けて回転させ、同期回転する2個の外工具を両側から半径方向に押込むことにより、外工具の歯でカップ側壁を内側に張出させて歯溝を成形する方法である。

これまで著者らは、実験装置を製作し成形実験を行い、提案した加工法により環状部品にスプライン状歯形の成形が可能であることを確かめた<sup>3)</sup>。また、転造加工を外工具の単純押込み加工に近似した数値シミュレーションモデルを開発し、成形品歯形精度向上を目的とした外工具歯形形状の最適化を行った<sup>4)</sup>。

今回の研究では、市販の汎用解析ソフトABAQUSを用いた実加工に近い転造シミュレーションモデルによる、成形品の内工具からの浮上がり防止を目的とした外工具歯形最適化のための新たな指針を得るに至った経緯について述べる。成形品の目標精度として、実際にAT内で使用されているクラッチハブ部品を実測した結果を基に、JIS6級と定めた。

## 2. 解析方法

### 2.1 解析条件

解析には、市販の汎用FEM解析ソフトABAQUSスタンダードを使用した。本加工法では、カップ状素材をスプライン状歯形をもつ内工具に取り付け、スプライン状歯形をもつ2個の外工具を両側から半径方向に押込むことによりスプライン歯形が成形される。このときカップ底部付近では、底部の拘束を受けて三次元的変形になるが、解析を簡単にするために、カップ底部の影響を無視して素材を長いパイプ状と仮定し、平面ひずみ問題として取り扱った。

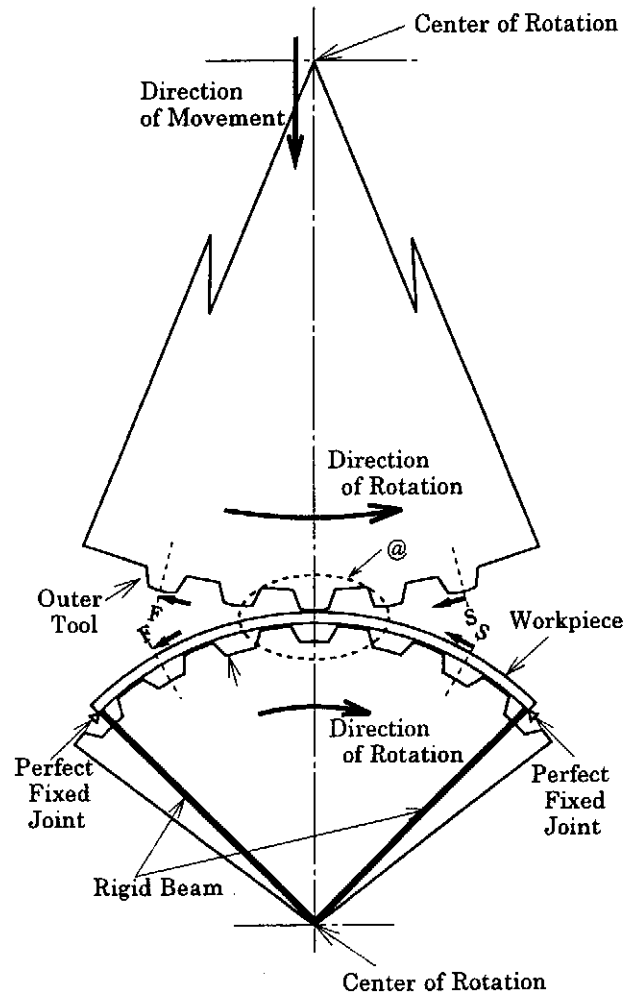


図1 解析モデル

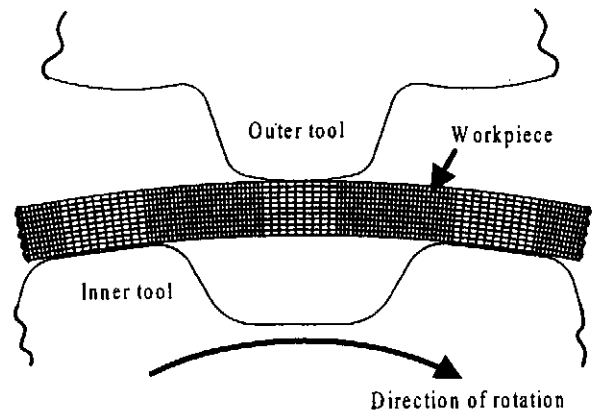


図2 素材の有限要素メッシュの拡大図

図 1 に、解析モデルを示す。工具は剛体とする。素材の解析領域は 6 ピッチ分とし、内工具中央部の溝上に位置する素材(@印)の変形状態を主に観察した。このように解析領域を限定したのは、計算時間短縮のためと、任意の素材 1 ピッチ分の変形は、隣接する素材 1 ~ 1.5 ピッチ分の変形の影響は強く受けるが、それより離れた領域の影響はほとんど無視できると考えられたためである。事実解析領域を 6 ピッチ分とした解析結果は、解析領域を素材全周分とした場合とほとんど変わらなかったため、この仮定は妥当であるといえる。

図 2 に、素材 1 ピッチ分の有限要素メッシュの拡大図を示す。メッシュ分割は半径方向に 10 等分割 (0.2mm)、円周方向には変形が大きい歯みぞ部に成形される領域をより細かい分割にした(約 0.15mm)。実際の素材は深絞りカップであるので、軸方向に約 0.2mm 程度の板厚差があるが、解析ではその平均値を取り、外径 116.7mm、板厚 2.0mm とした。材料の応力-ひずみ特性は、SPCD 板材の引張り試験結果を用いた。加工中工具と素材間にはクーロン摩擦が作用すると仮定し、摩擦係数  $\mu=0.1$  とした。

## 2.2 解析手法

図 1 に示すように、加工中内工具は時計方向に、外工具は反時計方向に、一定の角速度比(歯数比の逆数)で回転させた。実際の加工では、素材は内工具にねじ締結され、内工具とともに回転する。そこで解析でも、素材の両端を内工具の回転中心から延びる剛体梁に固定し、これを内工具と同一角速度で回転させた。また、外工具は両側から対称に半径方向に押込まれるので、素材の任意の 1 歯は、半回転毎に外工具と接触し成形される。

このことを考慮して、解析手順は以下のようにした。

- ① 外工具歯頂部と素材外周を接触させ、外工具と素材のかみ合い開始基準点(S)が中心線上にくるよう、両工具と剛体梁を回転させる。
- ② 内工具 1 回転あたり押込み 0.93mm という実験と同じ押込み速度で外工具を半径方向に押込みながら、系全体を 4 ピッチ分だけ図の(F)まで回転させる。
- ③ 外工具を素材とかみ合わない位置まで上方へ移動させ、ステップ①の状態にもどす。
- ④ ステップ①の初期状態から内工具半回転あたりの工具押込み量(0.465mm)だけ外工具を下方へ押込み、ステップ②に移る。以上の操作を、外工具が規定の押込み量に達するまで繰り返し、スプライン歯形を成形する。

## 2.3 工具形状

図 3 に前年までの研究結果に基づき製作した外工具歯形形状を示す。本研究ではこの工具を以後旧工具と呼ぶ。この工具の特徴は、工具歯頂部に適度な円弧を設けることにより、素材と工具の初期のかみ込みや接触をなめらかにし、加工初期に工具と素材の位相のずれを発生しにくくしていること、加工後期に成形品歯頂部を圧下することにより、歯角部へ材料を流動させて、歯角部を十分に成形させるために、歯溝部にも凸状の円弧が付加

されていることである。

これを外工具の基本歯形形状とし、細部の寸法を逐次変えることにより、外工具形状を最適化した。一方内工具歯形形状は、これまでと同形状とした。

## 3. 解析結果

### 3.1 旧工具による解析結果

図 4 に旧工具を用いた工具押込み量 3.3mm における押込み段階における素材の変形状態の解析結果を示す。比較のために、図 5 に以前の解析手法による押込み最終段階(3.3mm)の素材の変形状態を示す。かみ込み初期から中期にかけての素材の変形状態は今回の解析結果と前年のそれと比較的よく一致しており、中期段階までの素材の変形状態は、以前用いた単純押込みによる解析モ

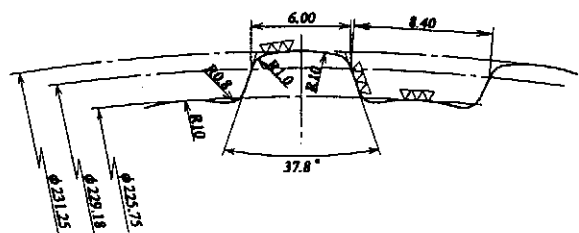


図 3 旧工具の歯形形状

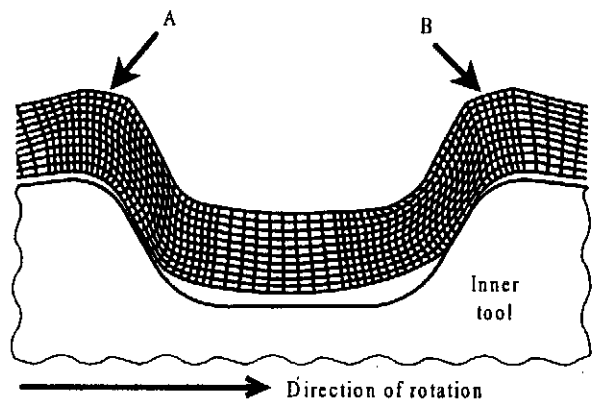


図 4 旧工具を用いた変形状態の解析結果 (押込み量 3.3mm)

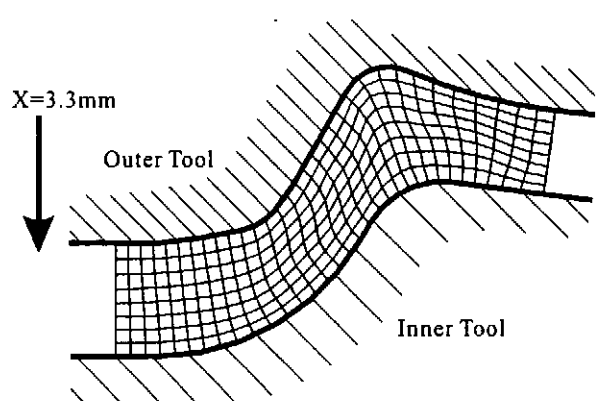


図 5 以前の解析手法による素材の変形状態

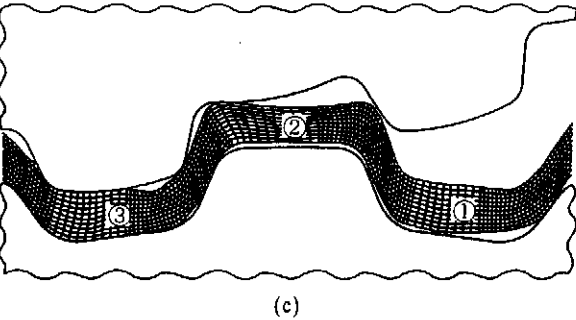
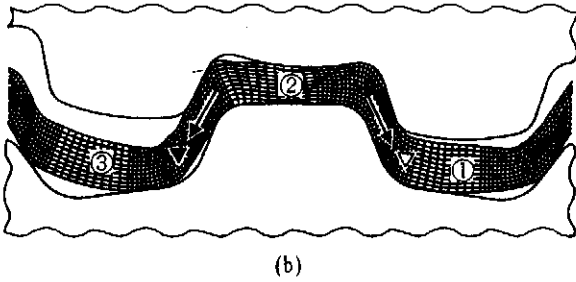
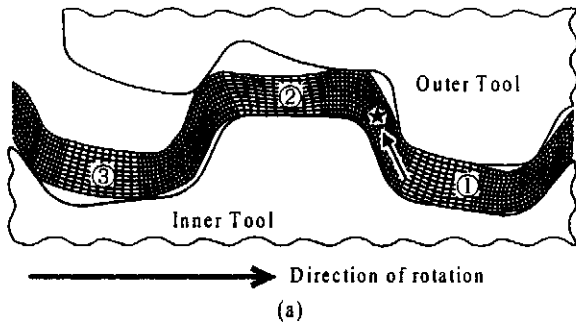


図6 転造モデルにおける変形状態の推移  
(押込み量 3.4mm)

デルでもかなりよくシミュレートできるといえる。これに対し最終押込み量 3.3mm において、単純押込みのモデルでは図 5 に示すように内工具と外工具の隙間に材料がほぼ完全に流入し、理想的な素材歯形形状が成形されている。

一方、本研究のモデルでは図 4 に示すように素材内面が内工具から浮き上がり、また材料は内外工具間隙間にまだ十分に充填していないなど、両者の結果は明らかに異なっている。これは素材に対する外工具の動きなど、加工工程が両者のモデルで異なるためだと思われる。

この点を考察するため、本研究の転造モデルでも角部 A,B を十分に成形できるよう、さらに押込み量を 0.1mm 増やして計算を行った。図 6(a)~(c)に転造モデルの押込み量 3.4mm における素材の変形状態の推移を示す。まず(a)の状態では、領域①の圧下により主に★印方向への材料流動が発生し、そのため①を支点として②から③にわたる比較的広い領域が内工具から浮き上がる。次に(b)から(c)への変形の推移では、領域②の圧下により、▼および△印方向への材料流動と、両端角部隙

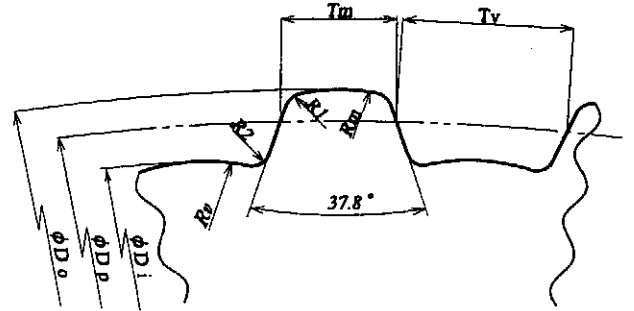


図7 外工具歯形の基本形状

表1 各外工具の諸元

	Old outer tool	New outer tool- I	New outer tool- II	New outer tool- III
$\phi D_o$	231.25	232.25	232.25	232.25
$\phi D_i$	225.75	225.75	225.75	225.75
Rm	10	10	10	10
Rv	10	10	30	10
R1	1.0	1.0	1.0	1.0
R2	0.8	0.8	0.8	0.8
Tm	6.00	6.00	6.00	6.30
Tv	8.40	8.40	8.40	8.10

間に素材が完全に充填し、外工具歯みぞ底角部が素材を抱え込みながら回転することの相乗効果のため、②を支点として、領域①は内工具から浮き上がり、領域③は内工具に押しつけられる。この加工現象は実験においても観察された。

こうした素材と工具の複雑な回転かみ合い運動に伴う加工現象は、前年の素材両端固定による単純押込みモデルでは再現できないため、両者の変形状態に差異が出たと思われる。したがって、工具最終押込み位置の決定、外工具歯みぞ底角部と素材の最適隙間、歯の右肩部に生じるかえりなど加工工程全般にわたる種々のパラメータを最適化するためには、今回提案した転造モデルを使用することが必須であるといえる。

### 3.2 新工具の提案

旧工具を用いた解析結果を基に、成形品が内工具から浮き上るのを抑制できる新たな外工具歯形形状を求めたことにした。図 7 に外工具歯形の基本形状を示す。浮き上りの最大の原因である、素材の円周方向への過度の伸びを抑制するには、図 6(b)において外工具歯底部による領域②の圧下量を少なくすることが考えられる。また、最終押込み段階において、外工具歯底部が領域②を圧下しているときに、歯頂部が領域①を圧下拘束するような加工状態が実現できれば理想的である。

これらの条件を同時に満足する一つの方法として、外径  $\phi D_o$  を大きくして、外工具歯たけを高くすることが挙げられる。そこで基準円直径  $D_p$ 、歯幅  $T_m$  と内径  $D_i$

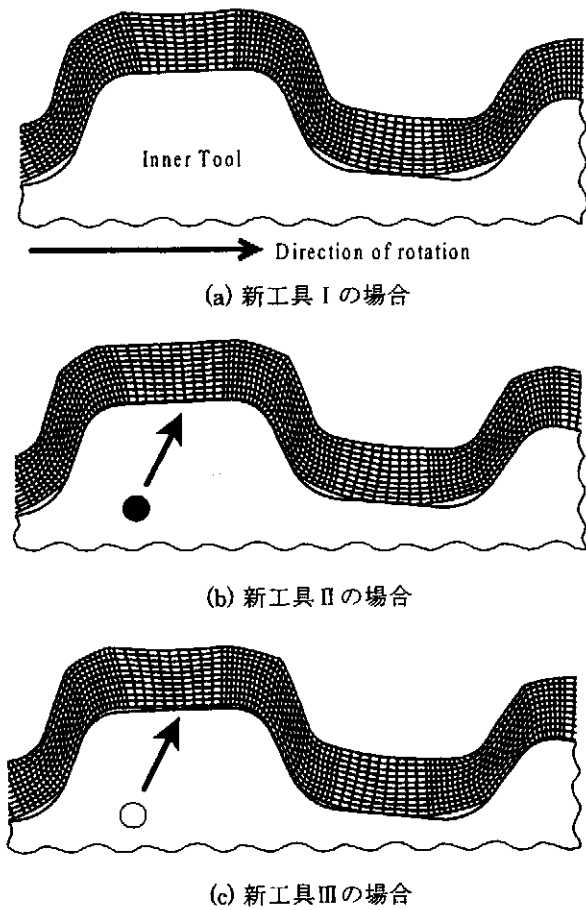


図8 新工具を用いた解析結果  
(押し込み量 3.5mm)

を一定とし、+10mm の範囲内で外径  $D_o$  をパラメータとして計算を行った結果、最適値として  $D_o=232.25\text{mm}$  が得られた。(歯たけは旧工具のものより 0.5mm 高い。)以後この外工具を新工具 I と呼ぶ。

また、後述するように、この新工具 I を用いた解析結果では、所要の成形品歯形形状を得られる押し込み量で材料が内工具と外工具の間を完全には充填しない。そこで工具歯たけを一定として工具間隙間を小さくするための他の形状パラメータとして歯底部円弧半径  $R_v$ 、歯幅  $T_m(T_v)$  を選択し、新工具 I より  $R_v$  を 10mm から 30mm に変更した外工具(以後新工具 II と呼ぶ)と、 $T_m$  を 0.3mm だけ大きくした外工具(以後新工具 III と呼ぶ)についても計算を行い、解析結果を新工具 I と比較した。Table 1 に 3 種類の新外工具歯形の各部寸法を示す。内工具形状は旧工具の解析時と同様とした。

### 3・3 新工具による解析結果

図 8(a)~(c)に、3 種類の新工具を用いて解析した場合の、成形品歯形形状を各々示す。また、図 9(a)~(c)に、最終押し込み段階における新工具 I による素材の変形状態の推移を示す。

図 8(a)と図 9 より、新工具 I を用いて加工した場合には、加工中も加工後も素材が内工具から浮き上ること

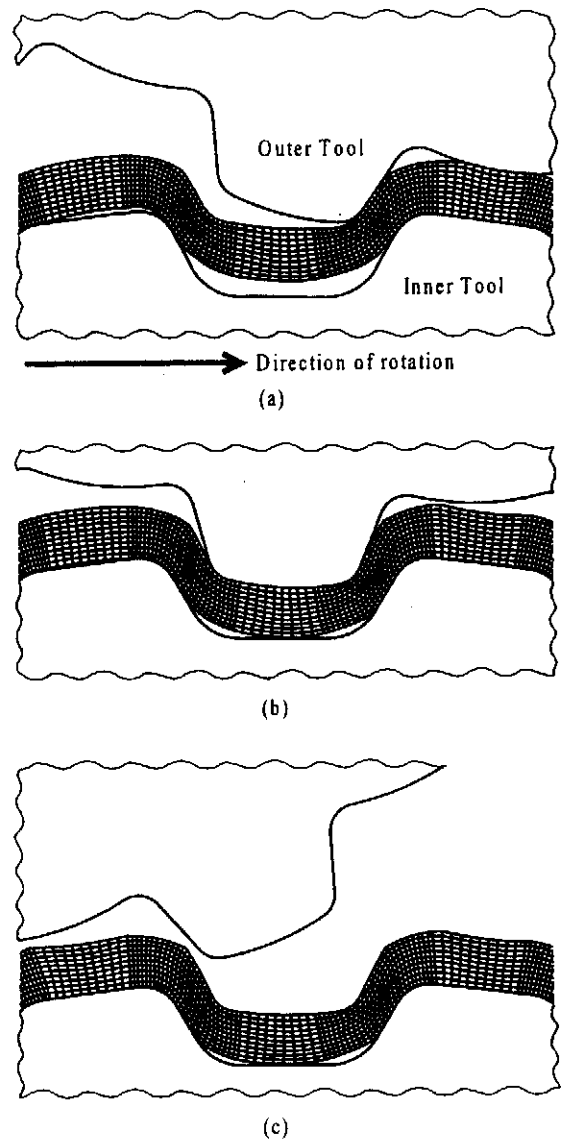


図9 最終押し込み段階における新工具 I による  
素材の変形状態の推移

はほとんどなく、左右ほぼ対称な歯形が成形されている。また成形品の歯たけは高くなり、歯側面直線部の長さは目標の 1.5mm を超え十分に確保されている。押し込み量は 3.5mm で旧工具の場合の最終押し込み量より 0.2mm 多いが、歯たけが 0.5mm 高いので、旧工具の場合より工具間隙間は広くなり、成形品の歯底内面は内工具に完全に接しておらず隙間が残っている。

一方図 8(b)に示す新工具 II の解析結果では、上述の残存隙間は小さくなっているが、成形品の内工具からの浮き上がりがわずかに生じている (●印)。新工具 II では、新工具 I の場合より歯底部円弧半径が大きいいため成形品歯頂部の圧下量が増し、円周方向への材料流れが増加して、旧工具の場合と同様の現象が生じたと思われる。

また図 8(c)に示す新工具 III の解析結果では、歯幅が新工具 I より広く、成形品歯側面部の圧下量が増えたため、さらに浮き上がり量が大きくなっている (○印)。実加工

では内工具からの浮き上がりがわずかでも生じると、カップ状である成形品は口縁部に向かって円錐状に開き、歯すじ精度が悪化する。従って、歯たけを高くした新工具Ⅰは成形品歯形精度に効果的であるが、新工具Ⅱ・Ⅲで行ったような歯底部円弧半径と歯幅の変更は逆効果であるといえる。

この解析結果に基づき、新工具Ⅰを実際に製作し加工実験を行った。図10に、この新工具Ⅰを用いて加工した成形品の歯形形状を示す。外側の歯形形状は、右肩部のかえりを除けば解析結果とよく一致し、歯側面の直線部長さも約1.6mm確保されている。また、これまでの外工具の中では、内工具からの浮き上り量は最小となった。歯側面部左右で肉厚に差があるが、これは加工初期の周速差に起因する内外工具間の位相のずれによるものと思われる。本実験装置のバックラッシ量は約0.7degであり、成形品歯側面の中央付近では円周方向で約1.4mmに相当する。これに対し、図10における成形品歯側面部の左右の肉厚差は約0.4mmとなっている。肉厚差の防止対策としては、バックラッシをできるだけ小さくするように実験装置の改良を必要とする。

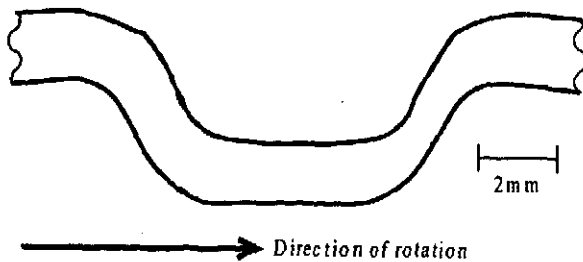


図10 新工具Ⅰで加工した成形品の歯形形状

以上から、新工具Ⅰは成形品歯側面の直線部長さが目標の1.5mmを超えるなど、十分な歯形に成形できることが分った。今後実験装置の改良を行い、肉厚差やかえりのない歯形形状の実現を目標としたい。また、歯すじ方向精度向上のため、成形品が円錐状に開く現象を解明

できる3次元解析シミュレーションモデルを開発する予定である。

#### 4. 結言

- (1) 転造モデルによるシミュレート結果を以前のもものと比較した。加工初期段階では、両者は比較的良く一致しているものの、加工後期において、本研究のモデルの方が、成形品内面の内工具からの浮き上がり、左右非対称の変形といった、実験で観察された回転加工特有の変形状態を再現できた。このことから、各種の転造加工パラメータを最適化するために、このシミュレーションモデルが有効であることが分った。
- (2) 本研究のシミュレーションモデルを用いて、以前提案した最適工具歯形形状を基準とし、外工具歯形形状の最適化を行った。その結果、外工具外径を大きくして歯たけを高くすることが効果的であることが分った。
- (3) 新たに得られた最適歯形形状を持つ外工具を製作し加工実験を行ったところ、成形品歯側面部の肉厚に不同はあるものの、歯形形状は解析結果とよく一致し、目標とした成形品歯形を十分に成形できる外工具歯形形状であることを実験的に確認した。

#### 5. 謝辞

本研究に対し、奨励研究として助成して下さった(財)天田金属加工機械技術振興財団に深く感謝の意を表します。

#### 6. 参考文献

- 1) 石井恭聡・中谷義訓・土肥雅宏・天満紳一郎：自動車技術，43-5(1989),36.
- 2) 尾崎龍夫・大庭 泰・船津和幸：九州大学工学集報，51-5(1978),671.
- 3) 松永良一・尾崎龍夫・竹増光家・釜下龍三・塚本願彦：塑性と加工，37-431(1996),1367.
- 4) 松永良一・尾崎龍夫・竹増光家・釜下龍三・塚本願彦：塑性と加工，37-424(1996),527.