平成 29年度 戦略的基盤技術高度化•連携支援事業 戦略的基盤技術高度化支援事業

「燃費向上および低コスト化に寄与する動力伝達部品の 板金成形技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 近畿経済産業局 補助事業者 公益財団法人 京都高度技術研究所

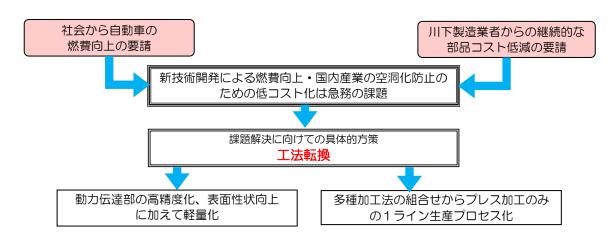
目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	1
1-3 成果概要	3
1ー4 当該研究開発の連絡窓口	4
第2章 本論	5
2-1 ブランク設計手法及び構造設計手法の確立	5
2-1-1 材料流動解析モデルの構築と実験検証	5
2-1-2 ブランク設計法の構築	11
2-1-3機能向上設計	15
2-2 歯形を有するダブルカップ部品のプレス加工法の確立	18
2-2-1 外周ダブルカップ形状加工法の確立	18
2-2-2 歯形成形加工法の確立	38
2-2-3 加工プロセスの技術統合	42
2-3 性能・実用性評価技術の確立	43
2-3-1 中間品(外周ダブルカップ形状品)の評価と金属組織調査	43
2-3-1 中間品(外周ダブルカップ形状)の品質評価と金属組織評価	45
2-3-2 歯形成形品評価と疲労特性影響評価	46
2-3-3 実用化評価	51
最終章 全体総括	54
3-1 研究開発の成果	54
3-2 事業化展開	54

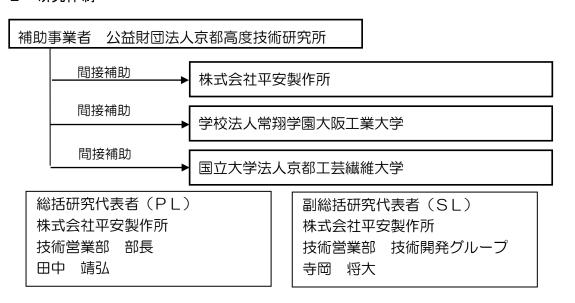
第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

近年の環境配慮による燃費規制の高まりにより、川下製造業者は乗用車の燃費を早急に向上する事が求められている。燃料電池自動車や水素自動車の次世代環境対応車の開発も取り組まれているものの、車両価格が約700万円と高い上に、インフラ整備等の遅れもあり本格普及は2020年以降となる見通しである。一方、新興国では従来型エンジンを搭載し環境に配慮した安価な自動車が求められている。そのため、エンジン車の燃費向上技術への取組みが重要視されている。その中で、川下製造業者はエンジンの効率向上を最重要な技術的取組みと位置付けている事から、動力伝達部品の摩擦損失低減による熱効率向上に注目している。そこで、本開発ではエンジンの動力伝達部品を対象とし、当社で、これまでにプレス加工で蓄積された技術を基に全く新しい工法を確立させ、燃費向上に寄与する伝達部の高精度化と面粗度の向上を図る事で+αの燃費向上に寄与する。併せて多種加工法(粉末冶金+切削加工)を組み合わせて製造されているプロセスを、薄板鋼板からのプレス加工のみとする事で、材料費と加工費を低減させてコスト▲50%を達成する。



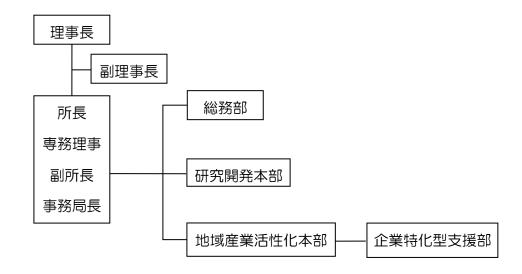
1-2 研究体制



管理体制

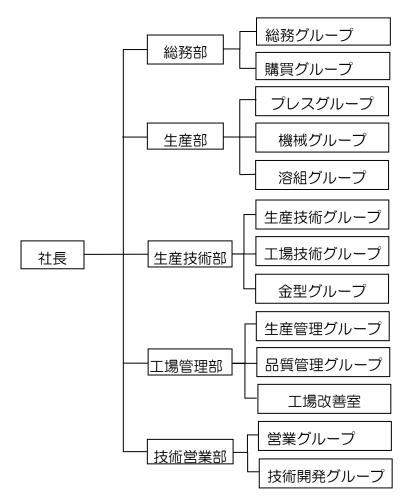
①事業管理機関

公益財団法人 京都高度技術研究所

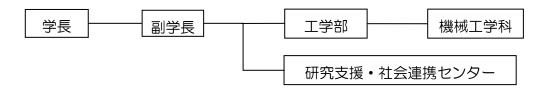


②研究等実施機関

株式会社平安製作所



学校法人常翔学園 大阪工業大学



国立大学法人 京都工芸繊維大学



研究者氏名

(株式会社 平安製作所)

田中 靖弘 (PL)、寺岡 将大 (SL)、荒木 邦彦、田邉 晃、内田 聡裕、大西 聡、 尭部 憲嗣、城間 紀彰、鬼頭 直宏

(学校法人常翔学園 大阪工業大学) 上辻 靖智 教授

(国立大学法人 京都工芸繊維大学) 飯塚 高志 准教授、小野 裕之 助教

協力者(アドバイザー)

(三菱自動車工業株式会社) 蒲原 輝展

1-3 成果概要

1-3-1 ブランク設計手法及び構造設計手法の確立

タイミングプーリーのベルトとプーリー間の噛み合い状態を模擬した機構解析と試作 形状および軽量化形状における強度解析を実施した。

また、新工法のプレス加工法において最適なブランク形状を算出するブランク設計法 を考案した。

1-3-2 歯形を有するダブルカップ部品のプレス加工法の確立 タイミングプーリーを対象とした試作金型を製作し、外周ダブルカップ板金プレス加

工法を確立した。工法確立において重点部位のワレ、巻き込み、未充填のないダブルカップ形状を製作した。

1-3-3 性能・実用評価技術の確立

ダブルカップ形状部品の寸法、硬度測定、金属組織観察を行った。 またタイミングプーリーの評価試験として、現流品である粉末冶金品とのトルク伝達評価比較試験、単品耐久試験(回転曲げ試験、振動試験)を実施した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(事業管理機関)

公益財団法人 京都高度技術研究所 地域産業活性化本部長 孝本 浩基 〒600-8813 京都市下京区中堂寺南町 134 番地

TEL: 075-315-3606 FAX: 075-315-6634

E-mail: komo@astem.or.jp

(研究等実施機関)

株式会社平安製作所 技術営業部技術開発グループ 寺岡 将大 〒520-1823 滋賀県高島市マキノ町中庄 464

TEL: 0740-27-2163 FAX: 0740-27-1277

E-mail: teraoka@heian-mfg.co.jp

第2章 本論

2-1 ブランク設計手法及び構造設計手法の確立

2-1-1 材料流動解析モデルの構築と実験検証

試作品製作のための基準材料の材料特性の確認および材料流動解析の解析精度向上を目的として、SPHC、SS400 について引張試験を行った。引張試験で得られた変形抵抗曲線(塑性ひずみ-真応力)、ランクフォード値(r値)から板厚異方性を求めた。

〈変形抵抗曲線の算出〉

①試験片寸法

JIS 規格による 13B 号試験片
 (板厚 3.0mm、板幅 12.5mm、標点距離 50mm、平行部長さ 60mm)

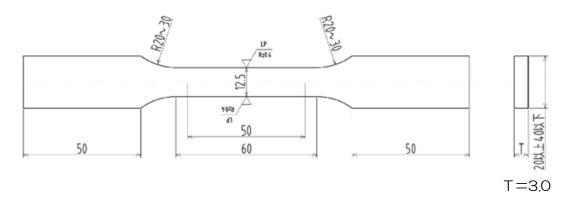


図 1 試験片寸法

• 試験本数

SPHC 計 15本(材料の圧延方向に対して、0°、45°、90°) SS400 計 15本(材料の圧延方向に対して、0°、45°、90°)

②試験条件

・試験機:島津製作所製 オートグラフ AG-X

試験治具:つかみ具(形名: MWG-100KNA 品番 346-52791-02)つかみ歯(平板用やすり目 品番 346-52672-21)許容引張荷重 100kN

・ 測定変位: クロスヘッドの変位を測定

• 測定荷重: ロードセルの出力を測定(最大測定可能荷重 250kN)

• 試験速度: 10mm/min

• 試験温度:室温

③測定結果

荷重-ストローク線図

各方向(O°、45°、90°)のストローク線図を図 2、3 に示す。SPHC で行った試験では、各方向でバラつきの小さい 3 本(O°方向:A1、A3、A4 45°方向:B1、B2、B3 90°方向:C1、C3、C5)を使用した。

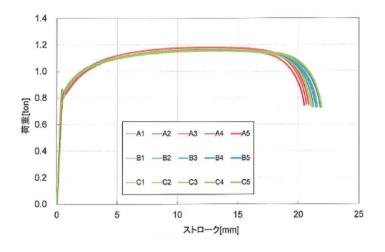


図 2 荷重-ストローク線図(SPHC)

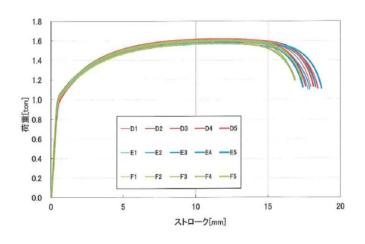


図 3 荷重-ストローク線図(SS400)

④引張特性

表1、2に引張特性として0.2%耐力、引張強さ、伸びおよび絞りを示す。

表 1 引張特性(SPHC)

角度		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	絞り [%]
	A1	214.23	321.68	41.92	32.71
-0	A3	226.77	322.98	41.90	32.54
0°	A4	222.61	321.58	41.48	32.62
	平均	221.20	322.08	41.77	32.62
	B1	227.14	316.50	42.97	33.70
4=0	B2	230.72	315.53	42.55	33.88
45°	В3	230.43	315.78	43.04	33.97
	平均	229.43	315.94	42.85	33.85
Te.A.F	C1	232.09	317.07	42.15	33.07
90°	C3	228.98	317.50	43.43	33.12
	C5	232.10	318.17	43.74	32.83
	平均	231.06	317.58	43.11	33.01

※0.2%耐力・引張強さは公称応力で表示。 ※伸び・絞りは破断後の試験片から算出。

表 2 引張特性(SS400)

角度		0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]	絞り [%]
	D1	250.69	423.14	35.56	29.14
	D2	252.85	423.23	36.20	30.22
00	D3	250.58	417.38	36.41	30.52
0°	D4	257.96	424.06	35.76	30.37
	D5	256.91	422.90	34.61	29.44
	平均	253.80	422.14	35.71	29.94
	E1	261.67	413.39	35.05	30.08
	E2	260.39	412.44	35.46	30.11
4=0	E3	265.83	418.90	36.08	29.87
45°	E4	263.02	418.66	37.22	31.01
	E5	265.30	419.31	34.54	30.27
	平均	263.24	416.54	35.67	30.27
	F1	268.93	423.37	35.61	29.78
	F2	268.11	423.81	33.11	28.66
000	F3	268.17	423.30	34.01	29.11
90°	F4	268.17	420.06	34.37	28.43
	F5	260.42	415.31	33.31	28.66
	平均	266.76	421.17	34.08	28.93

※O.2%耐力・引張強さは公称応力で表示。 ※伸び・絞りは破断後の試験片から算出。

⑤変形抵抗曲線

荷重-ストローク線図から真ひずみを求めた後に、降伏点以降を塑性域(塑性ひずみ)として定義し真応力-塑性ひずみのグラフを図4、5に示す。塑性ひずみは荷重ストローク線図の最大荷重までをデータとして使用した。各真応力-塑性ひずみデータを平均して変形抵抗曲線(図6、7)を算出した。

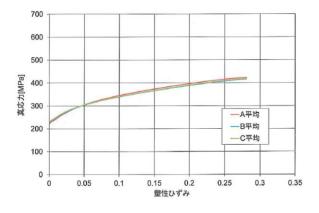


図 4 真応力-塑性ひずみ(SPHC)

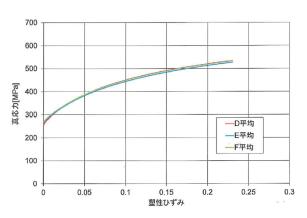


図 5 真応力-塑性ひずみ(SS400)

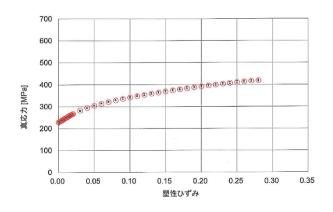


図6 変形抵抗曲線(SPHC)

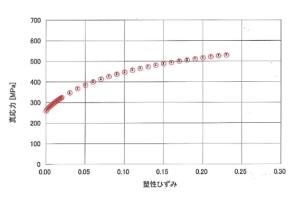


図 7 変形抵抗曲線(SS400)

〈r値(ランクフォード値)の算出〉

1)試験片寸法

• 変形抵抗曲線算出時と同様

②試験条件

試験設備は変形抵抗曲線を求める試験と同様で、ランクフォード値を求めるために、 伸び方向の公称ひずみ 15%まで引張った。

③測定結果

試験片測定として公称ひずみ 15%まで引張った試験片の評点間距離を測定し、まとめたものを表 3、4に示す。

試験前 試験後 角度 試験片 板厚 板幅 板厚 板幅 [mm] [mm] [mm] [mm] 12.52 2.73 11.99 A6 2.87 0° A7 2.86 12.51 2.74 11.95 **A8** 2.87 12.50 2.73 11.96 12.52 2.76 11.93 **B6** 2.88 45° B7 2.87 12.51 2.76 11.93 12.52 2.74 11.94 **B8** 2.86 B6 2.86 12.52 2.75 11.91 90° B7 2.86 12.52 2.74 11.94

表 3 測定結果(SPHC)

表 4 測定結果(SS400)

12.51

2.75

11.90

2.86

B8

		言式具	試験前		食後
角度	試験片	板厚 [mm]	板幅 [mm]	板厚 [mm]	板幅 [mm]
	D6	2.98	12.53	2.86	12.04
0°	D7	2.97	12.51	2.86	12.01
	D8	2.99	12.52	2.88	12.02
	E6	2.98	12.52	2.88	11.97
45°	E7	2.98	12.51	2.87	11.98
	E8	2.97	12.50	2.88	11.96
	F6	2.98	12.51	2.87	11.95
90°	F7	2.98	12.50	2.86	11.96
	F8	2.97	12.50	2.86	11.95

表3、4より板幅方向と標点距離から板厚方向の対数ひずみを求め(変形中の体積一定として仮定)、式(1)から各方向のr値を算出した。

各方向の r 値を rO、r45、r90 と示し板厚異方性を式(2)を用いて各方向の r 値を求めた。

各方向の r 値をまとめたものを表 5、6 に示す。結果から SPHC、SS400 共に材料の 異方性の影響は小さいが分かった。(板厚異方性 1=異方性無し)

板幅方向の 板厚方向の 角度 試験片 r値 平均 板厚異方性 対数ひずみ 対数ひずみ 3.068 3.156 1.029 A4 0° A5 3.107 3.171 0.980 | 1.012 3.045 1.028 A6 3.130 **B4** 3.066 3.179 0.964 0.964 0.926 0.947 45° **B5** 3.077 3.323 B6 3.072 3.227 0.952 C4 3.029 3.259 0.929 0.987 0.948 90° 3.118 C5 3.078 C6 3.021 3.259 0.927

表 5 r 値まとめ(SPHC)

表 6 r 値まとめ(SS400)

角度	試験片	板厚方向の 対数ひずみ	板幅方向の 対数ひずみ	r値	平均	板厚異方性
	D6	3.185	3.255	1.022		
0°	D7	3.267	3.213	0.983	0.994	
	D8	3.303	3.227	0.977		
	E6	3.363	3.119	0.928		
45°	E7	3.241	3.155	0.973	0.936	0.957
	E8	3.460	3.142	0.908		
	F6	3.270	3.112	0.952		
90°	F7	3.185	3.148	0.988	0.960	
	F8	3.325	3.124	0.939		

2-1-2 ブランク設計法の構築

図8に本事業で開発する新工法における加工プロセスの流れと加工品の形状変化を示す。直径 d_0 、板厚 t_0 である円形のブランク材から、ドロー・リストライク、鍛圧、しごきの大きく3つの加工プロセスを経て、外周ダブルカップ形状の中間品に成形する。重要な形状パラメータとして、ドロー加工後ではカップの外径 d_1 、高さ h_1 とそれぞれの部位における板厚 t_{d1} 、 t_{h1} 、リストライク加工後でも同様にカップの外径 d_2 、高さ h_2 とそれぞれの部位における板厚 t_{d2} 、 t_{h2} に着目する。また、鍛圧加工後では、カップの外径 d_3 、高さ h_3 、突出し部の長さ w_3 とそれぞれの部位における板厚 t_{d3} 、 t_{h3} 、 t_{w3} とする。さらに、しごき加工後では、カップの外径 d_4 、高さ h_4 、 w_4 とそれぞれの部位における板厚 t_{d4} 、 t_{h4} 、 t_{v4} とする。

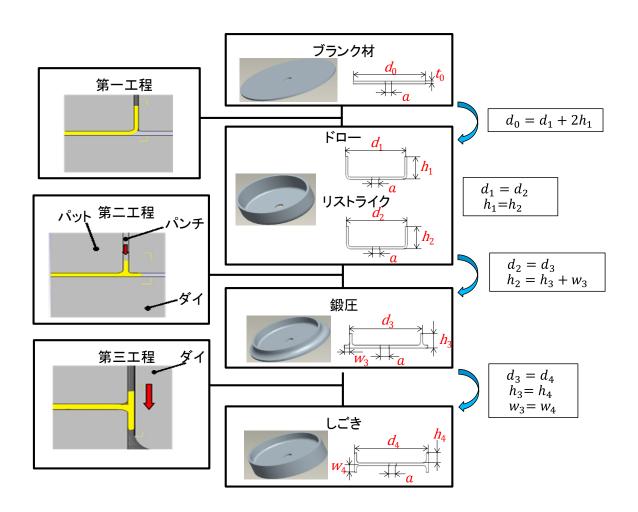


図8 本事業で開発する新工法における加工プロセスと加工品の形状変化

本ブランク設計では、しごき加工後のダブルカップ寸法からブランクの直径を導出することを目的とする。その具体的な方法として、以下の2つを検討する。

1.工程形状更新法

2.体積/表面積不変法

工程形状更新法では、各プロセスにおける形状パラメータに対して図中右に記載した 簡便な関係式を適用する。それらの関係式に基づいて、ダブルカップ寸法から鍛圧、リストライク、ドローを経て形状パラメータを逐次更新して、最終的にブランク寸法を導出する。一方、体積/表面積不変法では、しごき加工後のダブルカップ形状における体積または表面積がブランクの体積または表面積と同じであることを仮定してブランク寸法を導出する。すなわち、直径 d_0 、板厚 t_0 である円板状のブランクで、中心に直径 a_0 の円孔を有する場合、ブランクの体積 V_0 は、

$$V_0 = \frac{\pi}{4} (d_0^2 - a_0^2) t_0 \tag{1}$$

と計算できる。これが成形品の体積 V_i と等しいと仮定してブランクの直径 d_0 を逆算すれば、

$$d_0 = \sqrt{\frac{4V_i}{\pi t_0} + a_0^2} \tag{2}$$

となる。同様に、ブランクの表面積 Soは、

$$S_0 = \frac{\pi}{4} (d_0^2 - a_0^2) \times 2 + \pi d_0 t_0 + \pi a_0 t_0$$
(3)

となり、成形品の表面積 S_iはと等しいと仮定すれば、ブランクの直径 d_iは

$$d_0 = -t_0 + \sqrt{t_0^2 + \frac{2S_i}{\pi} - 2a_0 \cdot t_0 + a_0^2}$$
(4)

と算出できる。

新工法の加工プロセスは、平成27年度に当初案のトライ実験を行い、問題点を抽出 して改善策を検討した。これを踏まえて、平成28年度から改良案のトライ実験を実施 し、これに応じてブランク設計法も新工法の当初案と改良案に対して適用し、その有効 性を検証した。最初に、当初案に対するブランク設計法の適用結果を示す。表了に体積 /表面積不変法に用いるダブルカップ形状の体積および表面積の比較を示す。ここで は、カップの外径 d_4 、高さ h_4 、 w_4 とそれぞれの部位における板厚 t_{c4} 、 t_{h4} 、 t_{w4} に対 し、図面寸法を用いた場合とサブテーマ2において実施された当初案のトライ実験から 得た実測寸法を用いた場合の体積と表面積を比較する。また、サブテーマ2においてポ イントマイクロメータで計測した板厚分布データに基づいて3次元CADソフト(PTC Creo)により形状モデルを再構築して算出した体積と表面積もあわせて比較する。次 に、表8に工程形状更新法および体積/表面積不変法に基づいて算出したブランク直径 を比較する。また、トライ実験で投入したブランク直径の実寸法 129.7mm に対する 誤差も示す。これより、工程形状更新法は過大評価、体積/表面積不変法は過小評価す る傾向が確認される。一方、体積/表面積不変法において、表面積よりも体積を不変と して算出したブランク直径において誤差が小さいことも分かる。また、最も正確な体積 を入力値とした3次元CAD計算値の誤差が最小であった。以上の結果より、ブランク 設計として、R 部も考慮した正確な形状モデルを3次元CADソフトで構築して体積を 算出し、ブランクと体積が同じであることを仮定してブランク直径を導出する方法が有 効であると言える。

表
7 当初
案トライ
実験における
ダブルカップ
形状の
体積および
表面積の
比較

	図面寸法	実測寸法	3次元CAD
	Ø90.0 000 10.0 t=3.0mm	990.0 3.155 3.019 10.0 2.928 %	
体積 V ₄ (mm ³)	3.524×10^4	3.625×10^4	3.707×10^4
表面積S ₄ (mm ²)	2.418×10^4	2.542×10^4	2.341×10^4

表8 当初案トライ実験に対して導出したブランク直径の比較

			ブランク直径(mm)	Error(mm)
工程形状更新法		132.1	2.4	
	网表士法	V	122.7	-7.0
	図面寸法		122.9	-6.8
体積/表面積不変法	FT 704 - L 74	V	127.5	-2.2
	実測寸法 -		124.6	-5.1
	0.4-0.45		128.5	-1.2
	3次元CAD	S	119.5	-10.3

次に、当初案に対するブランク設計法の適用結果を示す。表9に体積/表面積不変法に用いるダブルカップ形状の体積および表面積の比較を示す。ダブルカップ成形品は、当初案のトライ実験では客先要求仕様形状の相似形で外径をおよそ 40%小さくした90mmであるのに対して、改良案のトライ実験では客先要求仕様の外径 120mmに変更されている。表10に工程形状更新法および体積/表面積不変法に基づいて算出したブランク直径を比較する。また、トライ実験で投入したブランク直径の実寸法154.6mmに対する誤差も示す。当初案への適用結果と同様に、工程形状更新法は過大評価する傾向が確認される。一方、体積/表面積不変法において、表面積よりも体積を不変として算出したブランク直径において誤差が小さいことも分かる。以上の結果より、ブランク設計として、当初案および改良案のいずれのトライ実験に対しても体積不変法による算出値の誤差が小さく、有効であることが検証できた。

表9 当初案トライ実験におけるダブルカップ形状の体積および表面積の比較

	実測寸法	3次元CAD
	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	
体積 $V_4(mm^3)$	5.712×10^4	5.839×10^4
表面積 $S_4(mm^2)$	3.789×10^4	4.421×10^4

表10 当初案トライ実験に対して導出したブランク直径の比較

			ブランク直径(mm)	Error(mm)
寸法関係式			164.70	10.10
	実測寸法	V	157.22	2.62
体積/表面積不変法	关例 1 压 S		152.54	-2.06
体惧/衣叫惧个发达	0.4Z=0.4D	V	158.95	4.35
	3次元CAD S		164.95	10.35

2-1-3機能向上設計

タイミングプーリーの機能向上設計を実現するため、3次元CADソフト(PTC Creo)を用いてタイミングプーリーとベルトの形状モデルを作成した。ベルトは上半分の接触領域のみ作成した。図9に接触面の一例を示す。本結果は、タイミングプーリーを固定してベルトを左回りに 0.005°回転させた場合の干渉判定から得た。この場合、1 歯あたりのベルトとの接触面積は85.1mm²であった。

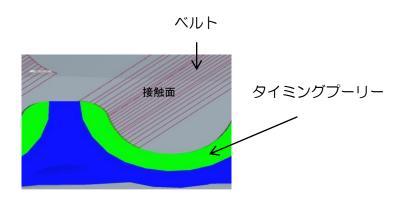


図9 3次元CADによるタイミングプーリーとベルトのモデル化

次に、3次元解析ソフトの機構解析により特定した接触面に対して、ベルトとのかみ合いにより作用する外力を理論的に算出する(日本機械学会論文集、42 巻、pp.2233-2241、1976)。図1 Oにタイミングプーリーとベルトのかみ合い状態の模式図を示す。 T_k は、k-1 番目の歯と k 番目の歯の間に位置するベルトに作用する張力を意味し、 Q_k は k 番目の歯に生じる反力である。ここで、力のつり合いにより k 番目の歯に生じる反力 Q_k は

$$Q_k = \frac{T_{k-1}cos\theta - T_kcos\varphi}{cos\emptyset} \tag{5}$$

のように求まる。本理論式を図9のタイミングプーリーに適用し、それぞれの歯に生じる反力を算出した結果を図11に示す。タイミングプーリーの上部半分の歯(1番から23番まで)がベルトと噛み合った状態で、タイミングプーリーを左回りに回転させる場合を想定した。タイミングプーリーに加わる総荷重値は、2-3-2で実施した試験条件から算出し、964Nと設定した。歯に生じる反力は、ベルトがかみ合い始める1番の歯で最大となり、左へ回転が進むにすれ単調に減少することがわかる。特に、かみ合い始めから4分の1の領域、すなわち1番から11番の歯で大きな反力を生じ、12番以降の歯にはほとんど力が作用しないことがわかる。

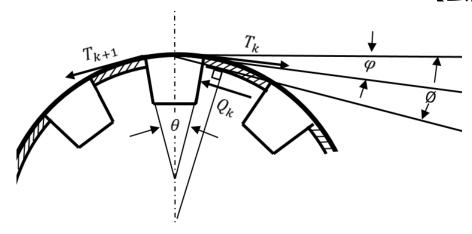


図10 タイミングプーリーとベルトのかみ合い状態



図11 理論式により算出したタイミングプーリーの歯に生じる反力

タイミングプーリーの安全性評価を目的とし、有限要素解析により使用環境下における変形と応力分布を分析した。図12に使用したタイミングプーリーの有限要素モデルを示す。応力評価の精度を確保するため、タイミングプーリーを4つの領域(内径プレート部の応力集中部とそれ以外、外周ギヤ部の応力集中部とそれ以外)に区分し、要素の種類とサイズを調整した。まず、内径プレート部には形状整合性を重視して四面体二次要素を適用し、応力集中部はメッシュサイズを 0.25mm、それ以外は 3.0mm に設定した。一方、外周ギヤ部には解析精度を重視して六面体一次要素を適用し、応力集中部はメッシュサイズを 0.25mm、それ以外は 1.5mm に設定した。図 12 の有限要素モデルに対して、中心の開口部側面の変位 7 を完全拘束した状態で、ベルトとのかみ合いによる外力として、外周ギヤ部には理論式により算出した図11の反力を負荷した。図11の反力は、機構解析により特定した図9の接触面に等分布外力として入力した。

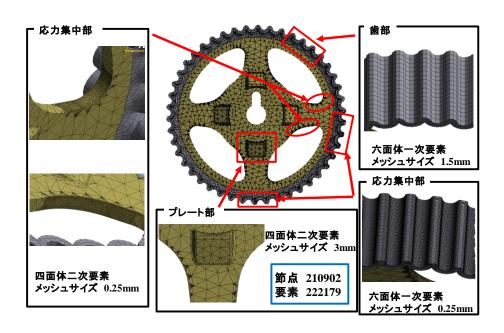


図12 タイミングプーリーの有限要素モデル

有限要素解析により得たかみ合い状態におけるタイミングプーリーの変形状態を図13に示す。ここでは、新工法の複合プレス加工により作製した標準品(中央図)と内径プレート部を肉抜きした複合プレス加工の軽量品(右図)を比較して示す。圧粉焼結加工による従来品と重量を比較した時、標準品でおよそ0.5%軽量化、軽量品でおよそ11%軽量化した。なお、変形量は30倍に拡大して表示している。図13よりベルトとのかみ合いによってタイミングプーリーは非対称に変形し、ベルトとのかみ合い始めに高い外力を受け、大きく変形することがわかる。なお、標準品と比較して、軽量品は大きく変形しているが、歯先の最大変位は0.04mm以下であり、軽量化した場合でも十分な剛性を備えていることが確認できた。

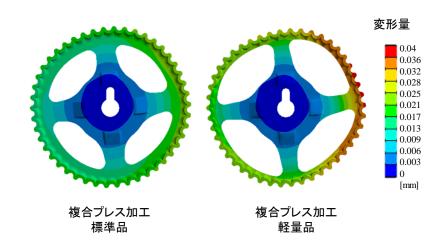


図13 かみ合い状態におけるタイミングプーリーの変形

次に、かみ合い状態のタイミングプーリーに生じる最大主応力の分布を図14に示す。複合プレス加工による標準品と軽量品のいずれにおいても最大応力はプレート部の肉抜きエッジ部分において発生し、その値は標準品で53.1MPa、軽量品で106.1MPaとなり、ほぼ倍増することが確認できる。また、外周ギヤ部ではかみ合う直前の歯元で最大応力が発生し、標準品では45番の歯元に36.6MPa、軽量品では46番の歯元に70.6MPaの応力が発生することが判明した。材料のSS400の疲労限度は125MPaであることから、11%軽量化した場合でも発生する応力は疲労限度以下となり安全であることが検証できた。

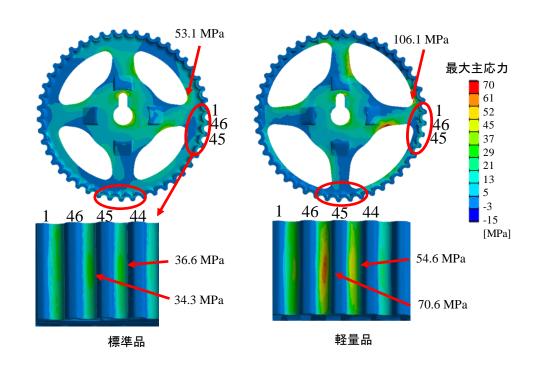


図14 かみ合い状態のタイミングプーリーに生じる応力分布

2-2 歯形を有するダブルカップ部品のプレス加工法の確立

2-2-1 外周ダブルカップ形状加工法の確立

外周ダブルカップ形状のプレス加工技術を確立するために、まずは客先要求仕様のタイミングプーリーの形状の相似形で小さくした予備実験形状で中間品(ダブルカップ形状)を成形するための基礎実験を行う。次に顧客要求仕様の形状で実験を行って材料流動解析と実験結果から最適条件を設定すると共に、2-1-2のブランク設計手法へ反映する。

CAE 解析ソフト DEFORM を用いて、外周ダブルカップ形状に至るまでの成形プロセスを検討した。解析により複数の成形案を検討した結果からプレス化が可能と考えられる成形案でプレス工程を決定した。決定したプレス工程から試作金型の製作を行った後に、プレス加工のトライを実施し中間品(ダブルカップ形状)の試作を行った。

〈材料流動解析〉

まず外周ダブルカップ形状にするためにカップ形状の状態から 3 パターンの成形 方法で材料流動解析モデルを構築した。その後プレス成形性の可否を判断するため に、最大荷重を調査した。解析条件は、材質 SAPH44O、カップ板厚 3.0mm、パンチの押込み速度は 100mm/sec で一定とし、解析モデルは解析時間短縮のため に、1/4 のモデルで作成した。

【成形案A】

カップの端面からパンチを押し込み、下に材料を流し込む方法。

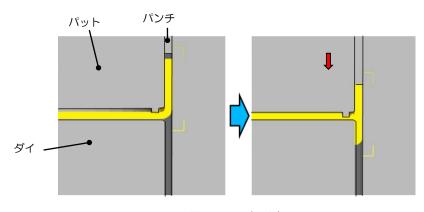


図 15 成形案 A

【成形案 B】

カップの端面からパンチを押し込み、材料を上下に分流させる方法。

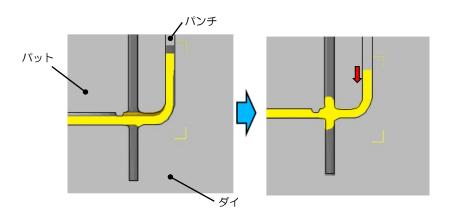


図 16 成形案 B

【成形案C】

カップの端面からパンチを押し込み、外周方向に材料を流し込む。その後に外周に流れた材料をダイでしごきおとす方法

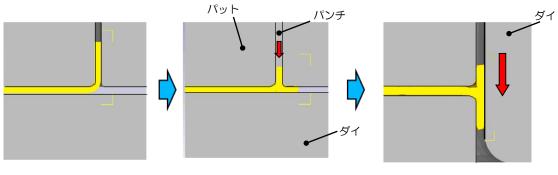


図 17 成形案 C

〈解析結果〉

図 18~20に成形時にかかる荷重と成形時間の関係を示す。グラフの横軸にパンチがストロークしている時間、縦軸に成形荷重を示す。赤線はパンチ、ダイにかかる荷重で、青線は材料を抑えるパットの荷重を示す。弊社の試作プレス機の能力は500t であり、成形をするためには500t 以内の能力に抑えなければならない。なお、成形時にかかる荷重はパンチ、ダイ、パットにかかる荷重の合計になる。グラフの結果から成形案 A では1,906t、成形案 B は2,103t となり成形可能な能力を大きく上回っている。成形案 C では436t となり成形可能な能力になった。3 パターンの成形案の結果、成形案 C が成形可能見込みがあるため、この結果をもとに工程設計を行った。

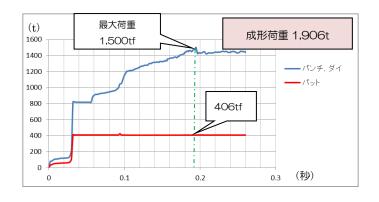


図 18 荷重-成形時間【成形案 A】

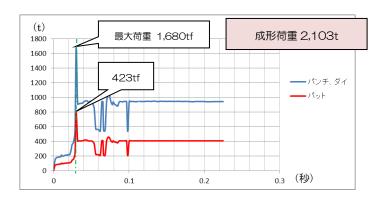


図 19 荷重-成形時間【成形案 B】

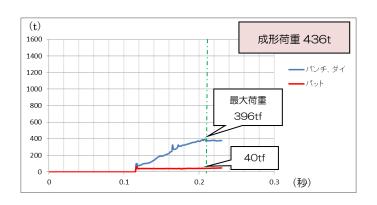


図 20 荷重-成形時間【成形案 C】

図 21 に平成27年度でトライした当初案の試作工程と巻き込みの状態を示す。試作工程は、第1工程で t3.0 の薄板鋼板を円盤状に切り抜いたものを、第2工程の絞り工程でカップ形状に成形する。第3工程のリストライク工程ではカップ形状の底面のRの矯正を行い、第4工程の鍛圧工程でカップ端面を押込み、材料を円周方向に流していく。第5工程のしごき工程で、第4工程で円周方向に流した材料を下にしごいてダブルカップ形状を完成させる。トライ結果では第3工程から、第4工程の鍛圧工程で材料が流れた時に、根元部分で巻き込みが発生した。この現象について調査を実施した。



図21 試作工程とトライ結果(平成27年度)

第3工程のリストライク工程から巻き込みが発生した第4工程の鍛圧工程までの材料の流れを段階的に把握するための調査用サンプルを製作した。サンプルはプレス機のダイハイト(ボルスタ上面~スライド下面の距離)を 2mm ずつ下げていき、各断面状態をマイクロスコープで観察した。

観察した結果を図22に示す。ダイハイトを712mmから694mmに下げていくと、初めに710mmの時に内側のRがなくなりエッジになっている事がわかる。そこからさらに成形が進んでいくと、縦壁部の材料がその上に乗り上がり最終的には材料の巻き込みが発生している事がわかる。原因としてはダイハイト710mmで材料と金型のパットのRに隙間が出来た状態になり、そのまま成形が進んでいくとその隙間に材料が充填されて巻き込みが発生したものだと考えられる。

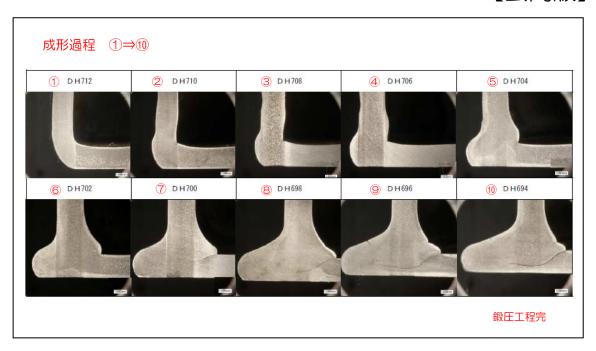
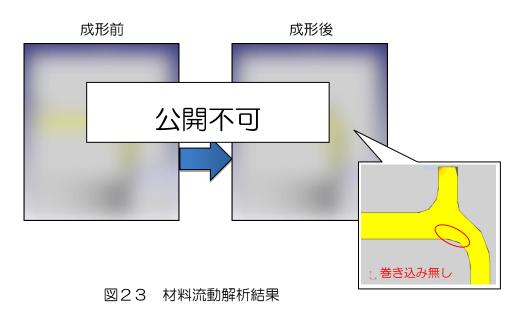


図22 巻き込み発生の様子

〈材料流動解析〉(平安製作所)

予備実験の結果から、材料流動解析を用いたプレス工程の見直しを実施した。リストライク工程完の形状から鍛圧工程に関する材料流動解析モデルを構築した。成形案としてダイとパットで材料を挟み込んだ状態で下降させていきカップの端面をパンチに押し当ててカップ上部に材料を流していく方法を考案した。解析結果で確認した項目は、巻き込みの有無等の材料流れの確認および社内のプレス機で対応可能かどうかを検討するために成形荷重を確認した。解析条件は材質 SAPH440、板厚3.0mm、パンチの押込み速度は100mm/secで一定とした。



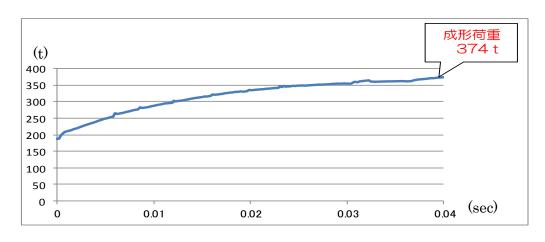


図24 成形荷重

〈解析結果〉(平安製作所)

図23の成形後の結果を確認すると、パットと材料の隙間もなく巻き込みの発生も見られなかった。また、図24は横軸にパンチと材料が接触してからの時間、縦軸に成形荷重を示す。弊社の試作プレス機の能力は500tであり、成形するためには500t以内の能力に抑えなければならない。グラフの結果から成形荷重は374tとなり対応可能な能力である事が確認できた。

〈プレス工程〉(平安製作所)

材料流動解析の決定した試作工程を図25に示す。

薄板鋼板から、円盤状のブランク形状にした後に第2工程の絞り工程でカップ形状に成形する。第3工程でカップの端面を鍛圧して反対側に材料を流す。第4工程でカップ部分をしごいて外周ダブルカップ形状を成形する。なお、試作金型については第2工程~第4工程までを製作した。

試作金型については平成27年度に導入したヤスダCNCジグボーラー(安田工業 株 型式: YBM640 VerⅢ)を活用して内製し、高精度な金型部品の製作をすると共 に、製作リードタイム短縮にも努めた。

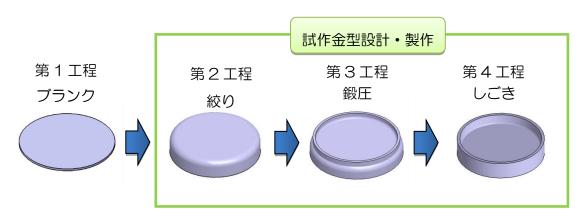


図25 外周ダブルカップ試作工程(平成28年度)

〈プレス加工トライ〉

製作した試作金型を使用して、プレス加工トライを実施した。今回は加工材料、第 2工程の絞り工程のカップ形状の内側のRと、鍛圧工程からダブルカップ形状に至る までのしごき工程の工程数と潤滑の種類をトライ因子とした。

トライ条件	1	2	3
材質	SPHC	SS400	SPHC
絞り型 肩R	3.5	3.5	3
しごき工程数	1	1	2
潤滑	モリブデン	モリブデン	一液潤滑剤

表 11 プレス加工トライ条件

表12にトライ結果を示す。トライ結果の確認項目は第3工程の鍛圧工程の断面観察、鍛圧した際の突起部の高さ、プレス成形荷重を確認し、第4工程のしごき工程では断面観察を実施した。トライ結果から条件1~3いずれも鍛圧工程完で僅かながら材料の巻き込みが見られた。しごき工程完になると根元に割れが見られた。

トライ条件 1 2 3 断面 観察結果 鍛 圧 工 突起高さ 程 狙い値 4.3 3.0 3.5 5.0mm プレス 380t 360t 480t 荷重 断面 き 観察結果 工 程

表12 プレス加工トライ結果

銀圧工程の巻き込みの原因の一つとしては、突起部への材料流れが悪いと考えられる。その巻き込みがしごき工程をすることで割れに進行したと考えられる。対策として、さらに材料を突起側に流しやすいようにカップ部分の肩Rを一つRから複合Rに変更した。表13に鍛圧形状見直し後のトライ結果を示す。見直し前の結果は突起高さが一番出ていたトライ条件1を比較対象とした。鍛圧形状見直し後では、鍛圧工程完、しごき工程完いずれの状態でも巻き込み、割れ共に見られなかった。突起の高さ、およびプレス成形荷重については見直し前後で大きな差はなかった。以上より、割れ、巻き込みのない外周ダブルカップ形状の成形をする事ができた。

表13 鍛圧形状見直しトライ結果

	鍛圧形状	見直し前(条件1)	見直し後
鍛圧	断面観察結果		
工	肩R形状	10R	複合R
作主	突起高さ (狙い値5.0mm)	4.3	4.5
	プレス荷重(t)	360	330
しごき工程	断面観察結果	U (10)	

 第1 工程 ブランク
 第2 工程 絞り
 第3 工程 鍛圧
 第4 工程 しごき

図26 工程サンプル

〈板厚分布調査〉

外周ダブルカップ形状のプレス加工技術を確立するために、外周ダブルカップ形状を形成するためのトライ実験を行い、新工法の各プロセスにおける形状、寸法、組織、機械的特性を詳細に分析した。一例として、しごき加工後のダブルカップ形状に対してポイントマイクロメータで計測した板厚分布を図27に示す。測定間隔は約2mmである。赤の水平線はブランクの初期板厚を示し、内径部の測定点12と第2側壁部の測定点3において局所的な板厚減少が見受けられる。表14にトライ実験より得た、ドロー、リストライク、鍛圧、しごき加工後の成形品の寸法測定結果を示す。板厚は、内径部や側壁部の領域ごとに平均した値を示す。これらの実測値は、ブランク設計にも使用した。

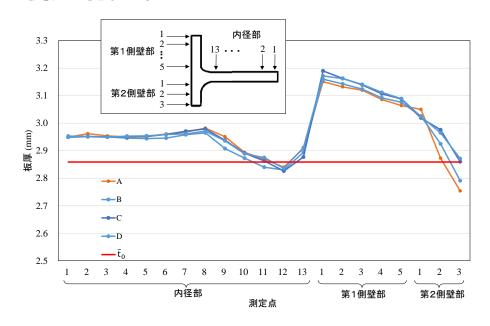


図27 しごき加工後のダブルカップ形状に対する板厚分布測定結果

ドロー (mm) 90.00 33.50 2.850 t_{d1} 2.860 t_{h1} リストライク (mm) d_2 90.00 34.00 2.843 2.791 銀圧 (mm) 90.10 d_3 15.50 6.700 2.803 3.153 3.893 しごき (mm) 90.00 d₄ d_4 12.45 8.650 2.928 t_{h4} 3.155 3.019

表14 成形品の寸法測定結果

(1) ダブルカップ形状の成形が可能な薄板成形法の考案

ダブルカップ形状を塑性加工で作製しようとする場合、まず図28に示すような鍛圧(複合押出し)による成型が候補である。しかしながら、この工法を用いる場合、板厚が薄いほど、底部の直径が大きいほど大きな加工荷重が必要となる。したがって、本開発で目的としているプーリーのような薄肉のダブルカップ形状の作製に用いるには現実的ではない。

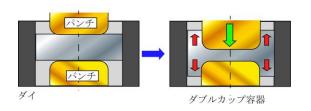


図28 鍛圧によるダブルカップ成形

より低い荷重で薄肉のダブルカップ形状を成形するには、薄板成形法を応用する方法が効果的であるように思われる。荷重の増大を抑制するためには、薄板成形法の応用が効果的と考えられる。そこで、図29および図30に示すような薄板成形法を応用した 2 つの加工法を考案した。ここではそれぞれ逆内面しごき(Reverse Inner Ironing)加工法および圧縮曲げ逆内面しごき(Reverse Inner Ironing with Compressive Bending)加工法と呼ぶことにする。逆内面しごき加工法では、前工程で作製された深絞り容器を容器底側からしごき加工を加える加工である。圧縮曲げ逆内面しごき加工法は、逆内面しごきに圧縮曲げ加工の要素を取り入れた加工法である。

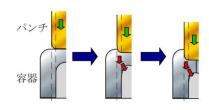


図29 逆内面しごき加工

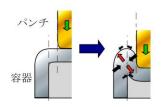


図30 圧縮曲げ逆内面しごき加工

(2) 逆内面しごき加工法および圧縮曲げ逆内面しごき加工法の実現可能性の検討 次に(A) で提案した逆内面しごき加工法および圧縮曲げ逆内面しごき加工法について、塑性加工解析用ソフトウェアを用いてその実現可能性、成形荷重の程度および 検討すべき金型形状パラメータなどに関する検討を行った。

まず、逆内面しごき加工の解析を行った。最終形状としておよそ外径 ϕ 100mm、厚さ t3mm、高さ h30mm のダブルカップ形状を得ることを想定して、厚さ t3mm、外径 ϕ 150mm の鋼板(SS400)の初期ブランクから、パンチ外径 ϕ 100mm、ダイ内径 ϕ 107mm のダイスを用いて解析上で深絞り容器を作製した。

パンチ肩 R については、ダブルカップ成形時に容器内隅のひけを抑制するとともに、絞りによる体積確保の効果を期待して、大きめの R15mm とした。解析ソフトウェア上で作製した深絞り容器形状を図31(a)のように配置し、容器底部からしごきパンチによってしごき加工を行う。しごきパンチ外径およびパンチ肩 R の大きさを調整しながら、解析を行いダブルカップ成形が可能なパンチ形状についてトライ&エラー的に調査した。

図31(b)には一例としてパンチ外径 φ102mm、肩RO.2mm で深さ12mm までダブルカップ成形した成形後の形状を示す。結果に見られるように、容器内隅に多少のひけを生じるものの、考案した成形法によってダブルカップ形状が作製できる可能性があることが確認できた。ただし、容器肩部の材料余りとしごき加工によって容器内隅に流れ込む材料によって容器底部は大きく湾曲する形になる。

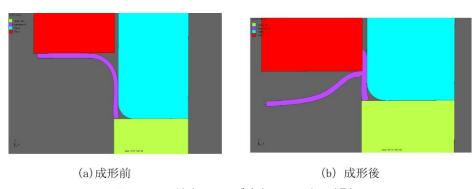


図31 逆内面しごき加工の成形解析

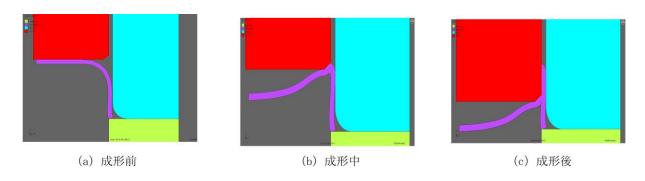


図32 圧縮曲げ逆内面しごき加工の成形解析

次に圧縮曲げ逆内面しごき加工に関しても、同様にパンチ外径およびパンチ肩形状を調整しながら、解析を行いダブルカップ成形が可能なパンチ形状についてトライ&エラー的に調査した。当初想定したようなクリアランスでは材料の巻き込みが生じてしまい、効果的に圧縮曲げ変形を与えることができなかった。そこで、パンチ角形状を工夫した初期パンチ径と同程度の外径を有するパンチを用いて加工を行うことを検討した。この場合、パンチ角部で圧縮曲げを与えながら、その後引き続いてしごき加工を行い、最終的にダブルカップ形状を成形できると考えられる。

成形解析例を図32に示す。図32(b)に示すように、成形初期にパンチ角部に材料を取り込み、この部分で圧縮曲げとなり、その後、取り込んだ部分をしごきながら最終的に図32(c)のようにダブルカップ形状が成形可能であることが確認できた。ただし、この場合も、逆内面しごき加工の場合と同様に余った材料のため大きく湾曲しながら成形が進行することになる。

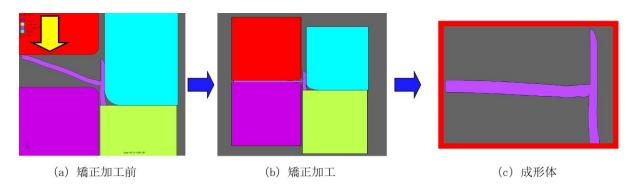


図33 矯正加工によるダブルカップ底部の平坦化

逆内面しごき加工および圧縮曲げ逆内面しごき加工については、次工程で矯正(リストレーション)加工を行うことで余った材料をさらに側壁部へ流し込みながら、底部の平らなダブルカップ形状を得られると考えられる。そこでダブルカップ成形後の矯正加工の解析を試みた。図33には逆内面しごき加工後の容器に矯正加工を行った例を示す。図から矯正加工によって容器底部が平坦化され、ダブルカップ形状を得ることが可能であることが確認できた。形状や板厚の寸法精度などは今後の課題であるが、ピアッシング後の鍛圧などによって、要求仕様を満足する形状にできることが期待できる。

解析結果を図34にまとめる。逆内面しごき加工および圧縮曲げ逆内面しごき加工ともに片側で 12mm 以上の高さをもったダブルカップ容器が 1000kN (100tf) 程度の荷重で成形可能である可能性が示された。これは鍛圧による後方押し出し加工のおよそ 1000 分の 1 程度の荷重であり、現実的な加工法であるといえる。

	しごき	圧縮曲げ	板厚減少
第1工程 (初期カップ作製)	(初期板厚:3 mm) 424 kN (≒42.4 tf)	(初期板厚:3 mm) 424 kN (≒42.4 tf)	(初期板厚:6 mm) 1003 kN (≒100.3 tf)
第2工程 (ダブルカップ作製)	923 kN (≒92.3 tf)	1094 kN (≒109.4 tf)	1.06×10 ⁶ kN (≒106000 tf)
成形高さ	12 mm	14 mm	14.5 mm

図34 解析結果まとめ

(3) 逆内面しごき加工法および圧縮曲げ逆内面しごき加工法における課題

逆内面しごき加工および圧縮曲げ逆内面しごき加工における課題としては、前述したように寸法精度や形状精度などがあげられるが、これらに関しては最終工程を工夫することによって解決の見込みがある。一方で、解析結果から加工後に容器内隅部で図35(a)に示すような材料の巻き込みやひけが発生する可能性があることが示唆され、これがまず解決すべき最大の課題と考えられる。これらを抑制する方法として、図35(b)に示すようにカウンターパンチを用いて材料流れを制御したり、角隅部に背圧パッドを配置して角隅部のRを強制的に与える方法が考えられる。ここでは、できるだけ簡易な方法で形状不良を抑制することを念頭に置き、金型形状パラメータおよびパンチ押込み量が成形に及ぼす影響について検討し、検討に基づいて第1工程(深絞り工程)のパンチ肩R、ダブルカップ成形に当たる第2工程の成形パンチの肩面取り幅および角度についてその影響を検討した。

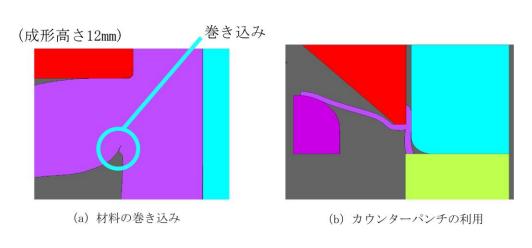


図35 容器内隅部の材料巻き込みおよびひけの発生の抑制方法

まず第 2 工程の容器内角に生じるひけの発生についてメカニズムを検討した。図36に圧縮曲げ逆内面しごき加工法における容器内角のひけ発生について検討した結果を示す。図に示すように、深絞り容器を底部方向から成形を始めると、曲げを与えることで内側に圧縮が生じ、その部分の材料が巻き込まれると大きなひけを生じることになる。このとき、成形パンチの角によって素材に板面方向の圧縮を与え、内角部を増肉させることによりひけを抑制しながら曲げを行う必要がある。一方、容器の底部中央を見ると、逆向きの曲げが生じることがわかる。この逆曲げをうまく利用することで容器角部の材料をより底部の内側まで引き込むことができれば、内角部を伸ばしながら加工できるため効果的と考えられる。

例えば、第 1 工程の深絞りパンチの直径をダイ穴径に対して小さくとり、ややテーパ状の容器を作製すると、第 2 工程の成形時に内角部を効果的に巻き込みながら伸ばすことが可能であると考えられる。この効果については、図に示すように第 2 工程の成形パンチの角部形状が同様に影響すると考えられる。第 2 工程の成形パンチと容器底部の接触は第 1 工程と第 2 工程のパンチの相対的な直径によって変化する。第 2 工程の成形パンチ頂上直径が第 1 工程のパンチ直径に対して相対的に小さ

いとひけを促進し、相対的に大きければひけが抑制できるものと予想できる。

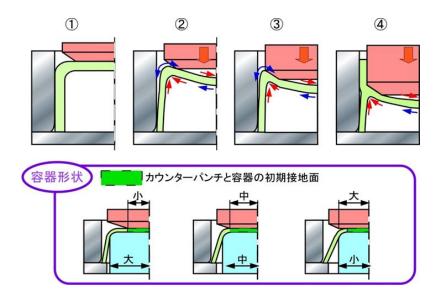
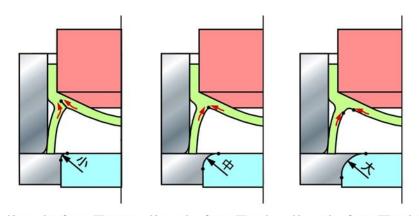


図36 ダブルカップ工法における容器内角のひけ発生のメカニズム

同様に第1 工程のパンチ肩 R について考えると、図37に示すように肩 R が小さい場合、容器内面に沿ったプロファイルは長くなり、逆に肩 R を大きくするほどプロファイルは短くなる。プロファイルが長くなればなるほど、早期に折れ曲がりが生じ、ひけを生じやすくなる原因となると考えられる。また、第2 工程パンチ角の面取り角度に関しては、板面内の圧縮をより効果的に生じさせるほど容器内角の増肉を促進できると考えられることから、適切な角度が存在すると考えられる。これらの工具形状パラメータがひけの発生に及ぼす影響に関する



第1工程パンチ肩R(小) 第1工程パンチ肩R(中) 第1工程パンチ肩R(大) ひけ発生しやすさ(大) ひけ発生しやすさ(中) ひけ発生しやすさ(小)

図37 第1工程パンチのパンチ肩Rの影響

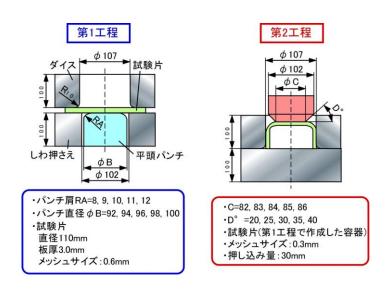


図38 金型形状パラメータによるひけ抑制法の検討

考察をもとにして、FEM(有限要素法)解析を用いて、理論的な確認を行うこととした。検討に用いた解析系および条件を図38に示す。図に示すように、第1 工程で重要な金型パラメータとしてパンチ肩RA およびパンチ直径 B を選択した。第2 工程については、パンチ頂上直径 C と角度 D である。

まず第1工程の金型形状パラメータを変化させて作製した容器について、第2工程を施し、ひけ発生時のパンチ押込み量、すなわちダブルカップ成形高さを比較した。結果を図39に示す。図では色が赤くなるほどひけ発生が遅れることになる。結果から、パンチ肩半径については大きいほど、パンチ直径について小さいほどひけの発生が遅れるという結果が得られ、最適条件は判明しなかった。

次に第1工程のパンチ肩Rとパンチ直径の大きさを10mm および96mm に固定して、第2工程の金型形状パラメータを変化させてひけ発生時のパンチ押込み量を比較した結果を図40に示す。図より明瞭ではないが、最適な条件が存在することがわかった。

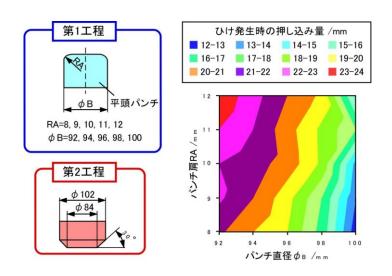


図39 第1工程のパンチ形状パラメータがひけ発生時の押し込み量に及ぼす影響

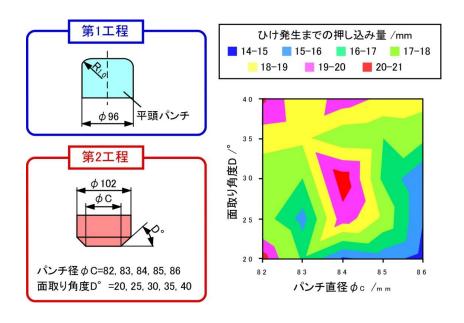


図 40 第2工程のパンチ形状パラメータがひけ発生時の押し込み量に及ぼす影響

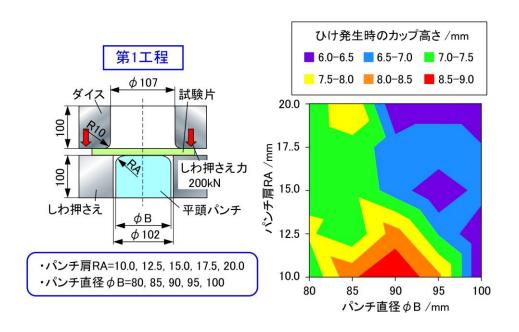


図 41 第1工程のパンチ形状パラメータがひけ発生時の押し込み量に及ぼす影響(広範囲)

ただし、これらの解析ではひけの発生を目視で判断しており、より定量的な定義が必要と考えた。そこで、便宜上ではあるが、ひけを定量的に定義して判断基準を統一した状況で、より広い範囲のパンチ肩 R の条件(10mm~20mm)で同様の解析を行った。結果を Fi 図 41 に示す。結果からパンチ直径 90mm、パンチ肩 R10mm~12.5mm でひけの発生がしにくいという結果を得ることができた。

(4) ダブルカップ工法の第2工程の改良方法の検討

次に第 2 工程を改良することによって、ひけの発生を抑制する方法について検討した。ひけを抑制するためには、単純に容器底部の材料を引張り上げることが効果的と考えられる。そこで、図 42 のように第 2 工程の成形パンチの表面に凹部を設け、向かいにカウンターパンチを配置することで底部の材料を加工中に引き上げる方法について検討した。

図 43 に工具形状パラメータとしてカウンターパンチの高さ h、カウンターパンチの先端半径 h および成形パンチのパンチ肉厚 h と設定して、FEM 解析を行った結果を示す。結果からカウンターパンチの設置高さについては、高いほどひけが抑制できることが確認できた。

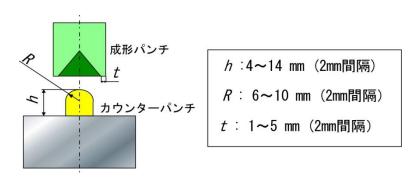


図 42 第2 工程の改良方法の提案

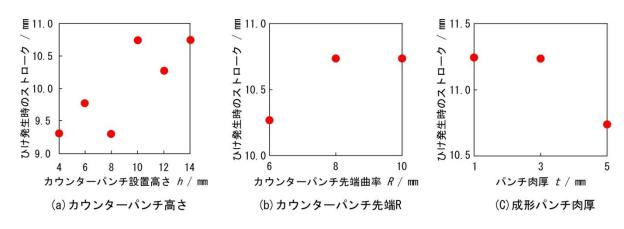


図 43 改良工程における工具形状パラメータがひけ発生に及ぼす影響

(5) スケールダウンした簡易実験用金型による成形実験

最後に解析結果をもとにして、40%にスケールダウンした簡易実験用金型を設計・作製し、実際にダブルカップ形状を作製することを試みた。逆内面しごき加工および圧縮曲げ逆内面しごき加工およびその後の矯正加工に関してそれぞれの金型を設計作製し、実験を行った。

簡単化するために、ここでは軟質アルミニウム(A1100-O)板を用いて実験を行った。深絞りには、外径 ϕ 40mmのパンチおよび内径 ϕ 44mmのダイを用いた。

また、逆内面しごき加工には外径 φ41.5mm のパンチを用い、圧縮曲げ逆内面しごき加工には外径 φ40mm のパンチを用いた。図 44 から図 47 に逆内面しごき加工および圧縮曲げ逆内面しごき加工およびその後の矯正加工を行って得られたダブルカップ容器をそれぞれ示す。

図から割れなどを発生することなく、ダブルカップ容器が得られることが確認できた。いずれの加工においても第2工程の最大成形荷重はおよそ40kN(4tf)であった。容器内隅には解析結果から予想されたように、やはりわずかなひけが見られた。加工荷重については、鋼材(SS400)の変形抵抗がアルミニウムのおよそ4倍程度で、スケール的に2.5倍(面積で6.25倍)になることを考慮しても解析結果通りおよそ1000kN(100tf)でダブルカップ形状が成形可能であることが確認できた。



(a) パンチ側



(b)ダイ側

図 44 逆内面しごき加工によって得られたダブルカップ容器



(a) パンチ側



(b)ダイ側

図 45 逆内面しごき加工後の矯正加工によって得られたダブルカップ容器



(a) パンチ側



(b)ダイ側

図 46 圧縮曲げ逆内面しごき加工によって得られたダブルカップ容器







(b)ダイ側

図 47 圧縮曲げ逆内面しごき加工後の矯正加工によって得られたダブルカップ容器

逆内面しごき加工および圧縮曲げ逆内面しごき加工のそれぞれの加工で得られたダブルカップ成形および矯正加工後の容器断面を図 48 および図 49 に示す。図 48 に示した逆内面しごき加工で得られた容器はしごき部で板厚の減肉があるため、板厚の増減肉を考える必要がある。ダブルカップ中央面に関してはおよそ平坦化できており、容器内隅のひけもそれほど大きなものでないことがわかる。図 49 に示した圧縮曲げ逆内面しごき加工によって作製された容器は容器内隅にやや引けがあるものの、およそ理想通りの形状を示すことが確認できた。現状では、圧縮曲げ逆内面しごき加工の方がより現実的な方法と考えられるので、今後はひけの抑制と要求仕様の達成を検討していく必要がある。



(a) ダブルカップ成形後



(b)矯正加工後

図 48 逆内面しごき加工によって得られた成形体の断面



(a) ダブルカップ成形後



(b) 矯正加工後

図 49 圧縮曲げ逆内面しごき加工によって得られた成形体の断面

また、(4)で検討した改良工程に関してもスケールダウンした成形実験を行った。圧縮曲げ逆内面しごき加工によって、パンチ押し込み量を 6mm~10mm として作製し、第3工程(矯正加工)までを行って得たダブルカップ容器を図50において比較している。この方法で第2 工程終了後には、改良前の加工法によって作製された容器とは逆方向に材料余りが生じる形状が得られる。外観的にはきれいなダブルカップ容器を作製することが可能であった。このことから、カウンターパンチを配置して容器内隅を伸ばしながらの加工も可能であることが確認できた。しかしながら、多くの成形容器には、内隅部にひびの発生が見られた。これは第2 工程時に隅部が引張りを受けるためと考えられる。したがって、効果的にひけを抑制するためには、別の方法を検討する必要がある。

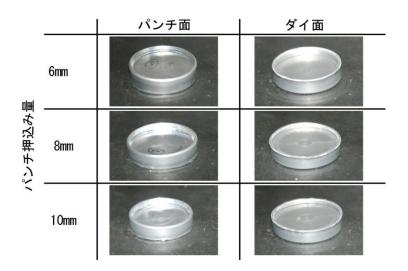


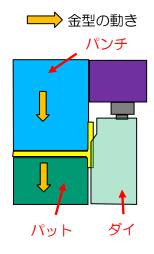
図50 改良工程(圧縮曲げ逆内面しごき加工)によって成形された第3工程後の容器

2-2-2 歯形成形加工法の確立

2-2-1外周ダブルカップ形状加工法の確立で試作したダブルカップ形状品の縦壁部に顧客要求仕様形状の歯形成形加工を行う。トライ結果から最適加工条件の特定をする。

歯形成形加工に実績のある協力メーカーと工程検討を実施した。CAE解析による成形の可否については依頼を行い、歯形成形工程を決定した。歯形成形時に材料の金型が接触するパンチ、ダイ、パットは製作を依頼して、弊社ではそれらの部品を組立ててプレス加工できる状態にして、トライを実施した。

【型構造】





下型



図 51 歯形成形金型

〈プレス加工トライ〉

初めに金型破損による開発進捗遅れの恐れがあるため、金型の保護をした状態でトライを実施した。実施方法として、ダブルカップ形状完の中間品に、鍛造加工や過酷な板成形をする際に行うボンデ処理(リン酸塩処理)という潤滑被膜を形成させて、材料と金型のすべり性を向上して金型へかかる負荷を低減させた。

さらに2-3-1で実施した硬度測定結果から、ダブルカップ形状品の硬度がブランクに対して約2倍向上している事がわかっていたため、焼鈍処理を実施してブランクの状態に近い程度まで硬度を低下させてプレス加工トライを行った。

図 52 は歯形成形4工程目までを終了した試作品の状態であるが、ボンデ処理および 焼鈍処理をした状態だと歯形のワレは発生しない事が確認できた。しかし、次にボン デ処理と焼鈍処理をしない状態で加工をすると根元に割れが発生してしまった。

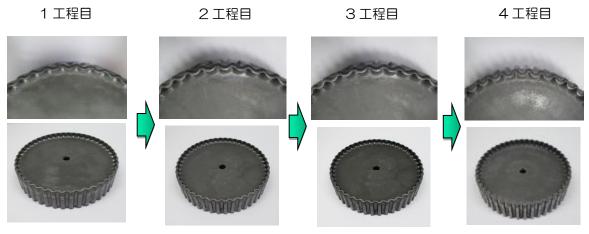


図52 工程サンプル

ボンデ処理、焼鈍処理品



ボンデ処理、焼鈍未処理品



図53 トライ結果

〈外周歯先部のヘコミの改善〉

平成 28 年度で試作した歯形成形品は歯先部に図53のようなヘコミが発生した。 これは歯形成形する前のダブルカップ形状の状態から発生しており、このヘコミが歯 形成形した後でも残っているという事が調べていく内にわかった。平成 29 年度では このヘコミを改善するための検討およびトライを行った。



図54 ヘコミの発生

へコミに対する方策として、鍛圧形状からダブルカップ形状にするためのしごき工程およびその後の歯形成形の工程変更や金型の設定を見直した。

【対策1:しごき工程の追加】

平成 28 年度の試作工程の設定は鍛圧工程後に、2 回のしごき工程を経てダブルカップ形状にしていた。このしごき工程を追加する事で 1 回あたりのしごき量を小さくとる事にした。しごきの 1 工程目と 4 工程目は同じ設定値で間に 2、3 工程目を追加した。この対策品(ダブルカップ形状品)のへこみ量を測定すると、対策前では 0.26mm であったものが、0.07mm まで改善された。

しごき	パンチ設定		
UCa	H28年度	H29年度	
1	φ124.7	φ124.7	
2	-	φ121.7	
3	-	φ120.3	
4	φ119.7	φ119.7	

工程	ヘコミ量 (mm)		
H28年度	0.26		
H29年度	0.07		

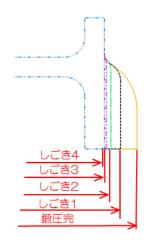


図 55 しごき工程の追加

【対策2 歯形成形工程の金型R変更】

歯形成形工程での対策としてはダブルカップ形状ですでに発生しているヘコミをより悪化させない事が必要である。歯形成形された材料を不要な部分に流れない様にするため図 56 の様にパンチとノックアウトの肩Rを小さくとるように金型を修正した。歯形成形の 1 工程目の試作品のヘコミ量を測定すると変更前のR3 では 0.35mm あったものが、対策品のR1 では 0.18mm まで低減された。

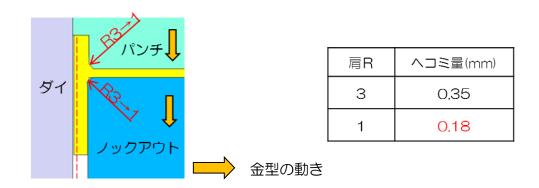
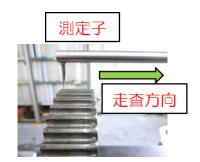


図 56 歯形成形工程のパンチ肩R変更

上記の対策を織り込んで最終の試作をした状態が図57の通りである。 歯先部を形状測定(コントレーサー)で測定したが、ヘコミは小さくなった。





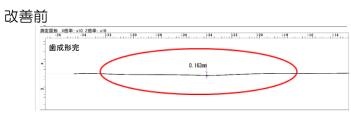






図57 ヘコミの改善

2-2-3 加工プロセスの技術統合

2-2-1、2-2-2を経て製作された歯形を有するダブルカップ形状部品に対して相手部品の取付穴や位置決めとなる側壁を成形する工程(切押し、トリム)の試作金型を製作しプレス加工トライを実施した。これにより 2-3-2、2-3-3で実施する各種評価試験を行う事ができるようになった。

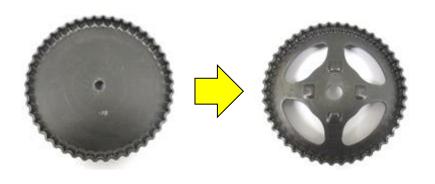


図58 切押し、トリム工程

2-3 性能・実用性評価技術の確立

2-3-1 中間品(外周ダブルカップ形状品)の評価と金属組織調査

新工法の成形プロセスにおいて、ドローからリストライク、鍛圧、しごきに及ぶ成形品の金属組織を走査型電子顕微鏡により観察し、圧延方向や部位による結晶形態の違いを調査した。図59にドロー、図60にリストライク、図61に鍛圧、図62にしごき加工後の観察結果を示す。また、図63に成形プロセスに伴うアスペクト比(円周方向の平均粒径に対する半径方向の平均粒径の比)の変化を示す。内径部の組織変化は少なく、鍛圧の変形部(内径部と側壁部の結合部分)において大きな組織変化が見受けられる。

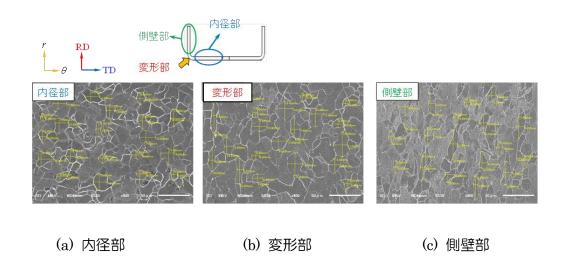


図59 ドロー加工後のSEM 組織観察結果

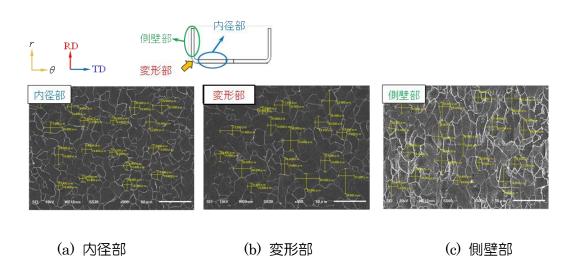


図60 リストライク加工後の SEM 組織観察結果

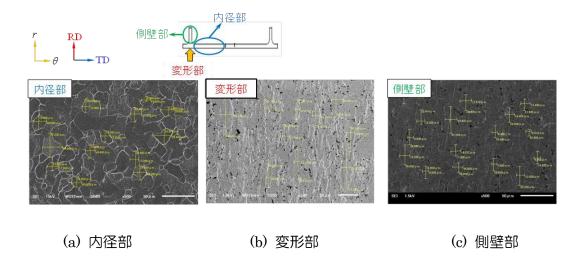


図61 鍛圧後の SEM 組織観察結果

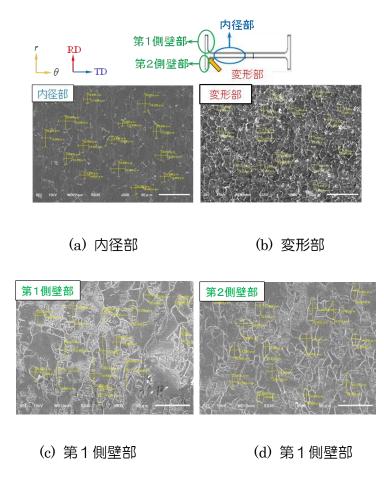


図62 しごき後の SEM 組織観察結果

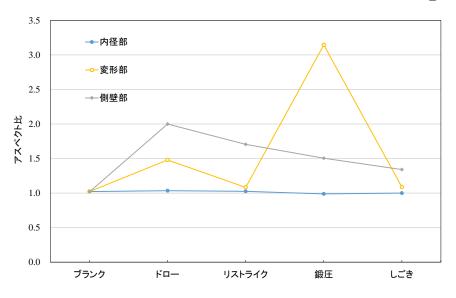


図63 成形プロセスに伴う平均粒径アスペクト比の変化

2-3-1 中間品(外周ダブルカップ形状)の品質評価と金属組織評価

プレス加工により製作するダブルカップ形状品は、従来工法とは異なり、加工硬化や 材料組織変化が生じる。そこで、ビッカース硬度試験機を用いて、加工硬化に伴う硬度 分布を調査する。また、走査型電子顕微鏡により、圧延方向や部位による結晶形態の違 いを調査する。

〈ダブルカップの工程毎の硬度分布調査〉

ダブルカップ形状に至るまでの各工程(絞り、鍛圧、しごき)で硬度を調査した。 試験条件として、試験力 5kgf、試験力保持時間 5sec で測定を行った。

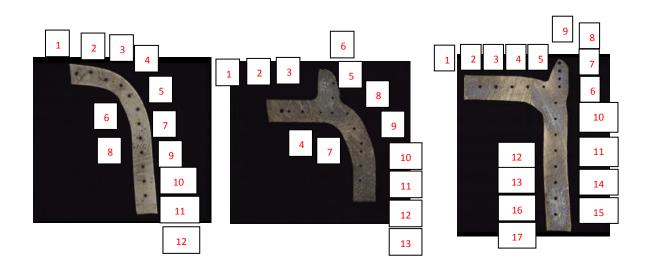


図64 測定部位(絞り)

図65 測定部位(鍛圧)

図66 測定部位(しごき)

【測定結果】

ブランクの状態がHV150であったのに対して、鍛圧工程でHV291、しごき工程(焼鈍無し)でHV291まで向上しており、約2倍の加工硬化が生じている。 ピークの硬度の測定部位は巻き込みが発生していた根元の部分になる。鍛圧完からしごき完に対しては大きな硬度変化は発生していない事も結果から明らかになった。

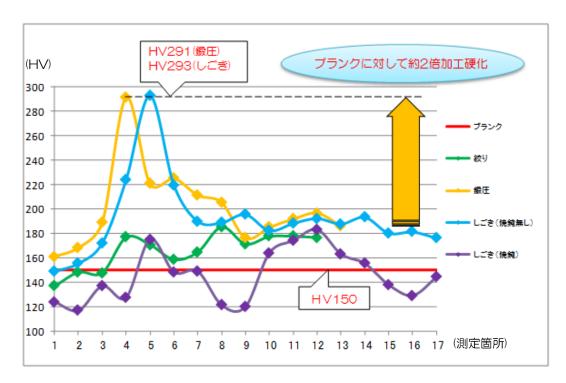


図67 硬度分布まとめ

2-3-2 歯形成形品評価と疲労特性影響評価

歯形成形品の評価として、非接触3Dスキャナを活用した加工形状の全体像を捉え、 面データとする事で、金型修正にフィードバックする。

また、新工法と従来工法では歯面の形状および表面粗さが異なるため、ベルトをかけて回転した時の摩擦損失が異なると考えられる。その影響を調査するための、トルク伝達評価試験装置を設計・製作した。

〈3Dスキャナによる面計測手法の確立〉

非接触3Dスキャナを活用して2-3-2で試作した歯形形状品を評価する手法を確立する。非接触3Dスキャナとは測定物にレーザーを照射する事で、PC上に多数の点群データから成る形状が測定される。その測定形状をCADデータ(設計形状)と合せる事で、測定物の形状の全体像を捉える事で、汎用測定具(ノギス、ハイゲージ)や接触式の三次元測定機では不足している情報を読み取る事が可能となる。

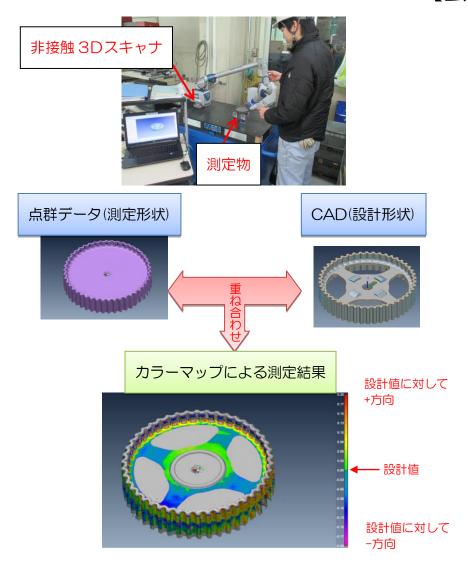


図 68 非接触 3Dスキャナについて

【測定結果】

2-2-2で試作した歯形成形品に対する測定結果を図69に示す。測定品は平成28年度で試作した歯先部にヘコミがあるものである。歯先側を確認すると、歯幅の中央部に0.188mmのヘコミが見られた。結果から、非接触3Dスキャナでも歯面の微細な形状の変化を捉える事が可能である。

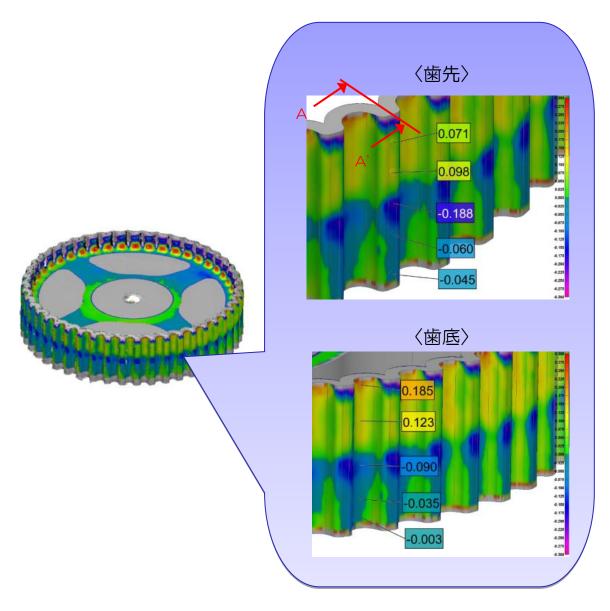


図69 測定結果

〈歯形表面粗さ調査〉

焼結品とプレス品の歯形の表面粗さを粗度計を使用して測定をした。 結果は歯先、歯底いずれの部位も焼結品より表面粗さの低減ができた。

表 15 表面粗さ測定結果(単位: μm)

測定部位	プレス	焼結		
歯先	Ra 0.09	Ra 0.11		
歯底	Ra 0.11	Ra 0.49		

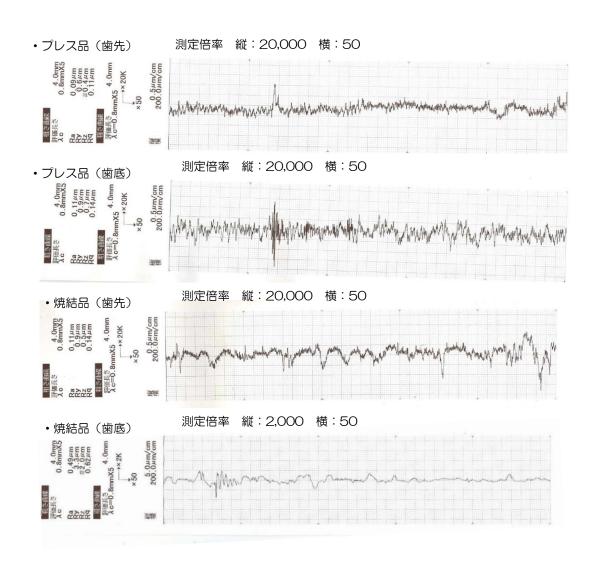


図70 表面粗さ曲線

〈トルク伝達評価試験装置の設計・製作〉(平安製作所)

摩擦損失の調査方法として、ベルトをかけた2個のプーリーのそれぞれにかかるトルクを計測する事で、駆動側プーリーに対して被動側プーリーにどれだけトルクの変動が起こっているか確認する。

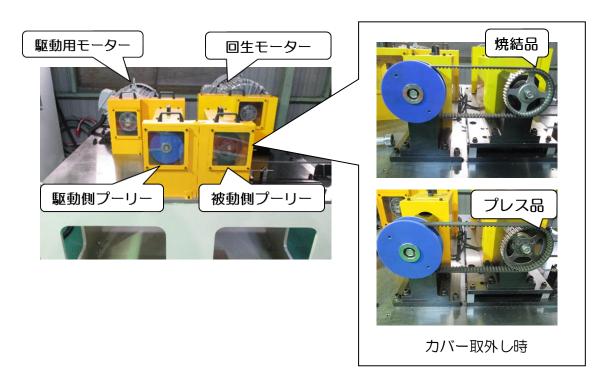


図71 装置外観図

表16 試験装置仕様

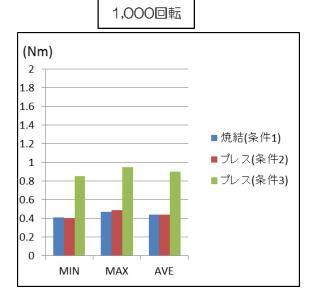
項目	仕様			
①寸法(mm)	1126×1480×1350			
②モーター回転数(rpm)	0~3、250			
③ベルト張力(N)	100			
④駆動トルク(Nm)	0~50			

〈トルク伝達評価試験結果〉

試験方法として、駆動側プーリーは焼結品で固定し、被動側プーリーを焼結品、面粗度の違うプレス品にそれぞれ替えて摩擦損失(駆動-被動間トルク差)を確認した。回転数はエンジン回転の常用域 2,000rpm と高回転域 6,500rpmの 2 水準とし、クランクシャフトの回転数はエンジン回転数の 1/2 となる。トルクはその時にかかる数値になる。

下図の試験結果から、歯面の面粗度が悪化すると摩擦損失も大きくなる。また、プレス品は焼結品に比べて 1.1~2 倍摩擦損失が大きくなる事が分かった。

			摩擦損失	駆動-被動間	トルク差)			
条件	駆動側	被動側	被動側面粗度(Ra)	回転数(rpm)	トルク(Nm)	MIN	MAX	AVE
1	焼結	焼結	0.11	1,000	10	0.41	0.47	0.44
2	焼結	プレス	0.12	1,000	10	0.40	0.49	0.44
3	焼結	プレス	3.01	1,000	10	0.85	0.95	0.90
4	焼結	焼結	0.11	3,250	50	0.65	0.81	0.73
5	焼結	プレス	0.12	3,250	50	0.71	0.85	0.78
6	焼結	プレス	3.01	3,250	50	1.30	1.10	1.20



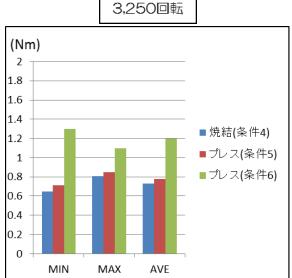


図 72 トルク伝達評価試験結果

2-3-3 実用化評価

〈振動耐久試験〉

試験条件としては、振動試験機の加振部に振動試験治具を取付け、その治具に試作したタイミングプーリーを取り付ける。加速度が30Gかかる時の周波数で10⁷回加振を行い破損の有無を確認した。加振方向についてはプーリーの取付面に対して、水平方向と垂直方向の2パターンで試験を行った。結果、探傷試験(カラーチェック)で確認した所、いずれの条件でも破損は見られなかった。

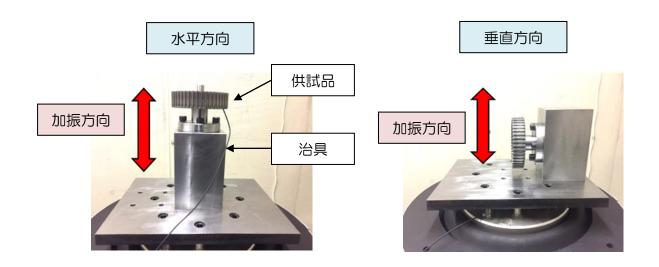


図73 振動試験

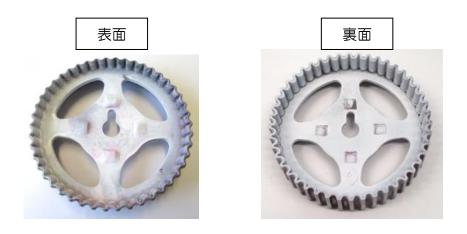


図74 試験結果

〈回転曲げ試験〉

試験方法としては、カムシャフト相当治具に試作したタイミングプーリーを取付けてベルトをかける。下のプーリーはタイミングプーリーと同じ歯形を持った治具で、その下に曲げモーメントがかかるように重りを吊っている。これにより、エンジン実機相当の曲げモーメントを与えた状態を模擬して 10⁷回の運転を行い、破損の有無を探傷試験で確認した。結果は図76の通り、破損はみられなかった。

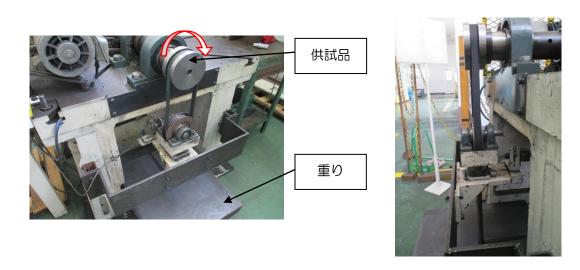


図75 回転曲げ試験



図76 試験結果

最終章 全体総括

3-1 研究開発の成果

平成27年度から取り組んだ本基盤技術高度化支援事業は、ブランク設計手法及び構造設計手法の確立と、歯形を有するダブルカップ部品のプレス加工法の確立、性能・評価技術の確立に対して一連の事業を完結した。

【ブランク設計手法及び構造設計手法の確立】

CAE解析を活用して現行の焼結品に対して、0.5%軽量化をした試作形状の設計をする事ができた。

また、外周ダブルカップ板金プレス加工法において最適なブランク形状を算出する ブランク設計法を考案した。

【歯形を有するダブルカップ部品のプレス加工法の確立】

板厚 3.0mm、外径 ϕ 115mm、フランジ高さ 22mm のワレ、巻き込み、未充填のないダブルカップ形状部品を製作できた。

また、そのダブルカップ形状部品に対してヘコミの発生しない歯形成形品を製作する事ができた。

【性能・実用評価技術の確立】

試作品の各種評価(寸法、硬度、金属組織観察)の実施に加えて、歯面の面粗度の 違いが摩擦損失にどの様に影響するか評価する事ができた。

また、タイミングプーリーの焼結品をプレス品に置き換えた際の耐久面についても 各種耐久試験をクリアし、信頼性の確認ができた。

3-2 事業化展開

外周ダブルカップ板金プレス工法は今回の研究開発対象である自動車部品のタイミング プーリーのみならず様々な部品に適用できると考えられる。そのため、自動車産業以外で も販路開拓に向け展示会へ出展しPRを行う予定である。積極的な新規市場への販路開拓 を推進することで事業化を目指す。