

プレス加工シミュレーション活用技術の構築

鶴谷 知洋, 神生 直敏, 安田 星季

Development of Utilization Technology for Press Forming Simulation

Tomohiro TSURUYA, Naotoshi KAMIO, Seiki YASUDA

抄 録

難易度の高いプレス加工技術を確立する際、プレス加工シミュレーションを活用して実加工を減らすことで、金型や加工テストに係るコストと時間を削減し、効率化を図る取り組みが進められている。しかし、プレス加工シミュレーションにおいて、プレス加工を高精度に再現するにはパラメータ設定などが重要であり、これらはノウハウとなっている。

本研究では、プレス加工シミュレーションの最適パラメータ決定手法の確立を目的として、実加工品とシミュレーション結果の比較や多変量解析に基づいてパラメータの最適値探索を行い、効率的に精度の高いシミュレーション結果が得られることを確認した。

キーワード：プレス加工シミュレーション, 深絞り, 多変量解析

Abstract

For establishing a highly difficult press working technology, efforts are underway to reduce the cost and time required for dies and forming tests and to improve efficiency by utilizing press forming simulation. However, in press forming simulation, parameter setting is important to reproduce press forming with high accuracy, and these are know-how.

In this research, for the purpose of establishing the optimum parameter determination method for press forming simulation, the optimum parameter value search is performed based on the comparison of the actual machined product, the simulation result and the multivariate analysis. As a result, the simulation result with high efficiency and high accuracy is obtained.

KEY-WORDS : Press forming simulation, Deep drawing, Multivariate analysis

1. はじめに

プレス加工は、他の機械加工法と比較して加工速度が大きく低コストであることから、量産加工技術として広く普及している。特に深絞り加工は、金型間に材料を流入させることで立体形状を得る加工法であり、加工時間が短いため生産性が高く、また複雑形状の成形も容易なため、自動車部品をはじめとする多くの工業製品に適用されている¹⁾。ものづくりの現場では、製品の高度化、生産システムの自動化や高度化に伴い、各加工工程において高い加工精度が要求されており、プレス加工においても低コストかつ高生産性を保ちながらも加工精度の向上が求められている。深絞り加工において、しわや割れなどの代表的な不良なく高精度な加工を行うために

は、金型加工部の形状や潤滑状態、材料押さえ力など複数の加工パラメータの調整が必要であり、その決定には時間がかかる。そのため最近では、FEM等を用いた加工シミュレーションにより割れやしわなどの不良対策を金型の設計段階で反映させることで、製品開発のリードタイムとコストを削減する傾向が強い²⁾。また、加工シミュレーションの高精度化のため様々なモデルが提案されており³⁻⁵⁾、特に絞り工程の破断やしわ・面ひずみなどの不良は、加工シミュレーションにより実用的な精度の予測が可能となってきている⁶⁾。加工シミュレーションで高精度な結果を得るためにはパラメータの設定が重要であるが、設定値の決定方法はユーザー企業のノウハウとして公開されることはない。

本研究では、プレス加工の中でも深絞り加工を対象として、

事業名：経常研究

課題名：プレス加工シミュレーションを活用した深絞り加工の評価技術の構築

材料物性値の測定、実加工とシミュレーション結果の比較や多変量解析などを行い、高精度なプレス加工シミュレーション結果を得るために有効なパラメータおよびその効率的な最適値の導出方法を確立した。

2. 実験方法

2.1 深絞り加工

本研究の対象である深絞り加工は、図1に示すサーボプレス機（アイダエンジニアリング㈱製NC1-800(D))を用いて行った。サーボプレスの加圧能力は800kNで、エアダイクッションを備えている。材料は板厚1.0mmの2種類のアルミニウム合金A5052P-OおよびA5052-H32を使用した。ブランク材を図2に、加工品を図3に示す。加工条件と加工結果の関係に影響する要因を少なくするため、加工の種類は軸対称形状である円筒深絞りを選択した。加工に使用した金型の概略図を図4に示す。金型のダイは両面が使用でき、使用する面によって材料が引き込まれる際に接触するコーナー部（ダイR）を変えることができる。加工条件を表1に、実験条件を表2に示す。実験条件の水準について、加工速度はサーボプレス機の設定、材料押さえ力はダイクッションに供給する空気圧の設定、潤滑状態は潤滑油の使用有無により変更した。加工実験は実験条件の水準を組合せて行い、成形高さにより加工品を評価した。成形高さは、正常な成形の場合は天面を、割れが発生した場合は側面の割れ部分の高さをハイトゲージにて測定した。

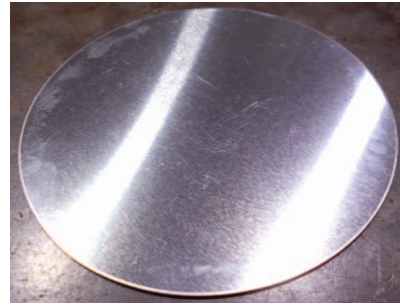


図2 ブランク材



図3 加工品（円筒深絞り）

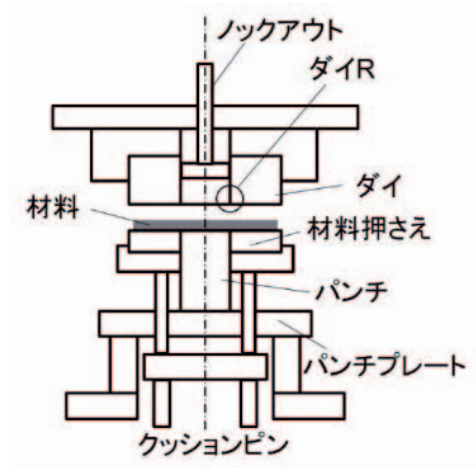


図4 金型概略図



図1 サーボプレス機

表1 加工条件

絞り径	φ54mm
ブランク径	φ110mm
絞り深さ	27mm
ダイ高さ	320mm
ストローク	160mm
潤滑油	カータジル GONEAT

表2 実験条件

加工速度	83.6mm/sec - 419mm/sec
材料押さえ力	6.25kN - 50kN
潤滑状態	低摩擦・高摩擦
ダイR	6・9

2.2 材料物性値測定

プレス加工シミュレーションを行う際、主に表3に示すシミュレーションパラメータの設定が必要となる。通常、設定の目安が示されているか、あらかじめ用意されている標準値があるためシミュレーションの実行は可能であるが、シミュレーション結果と実際の加工結果を比較し、シミュレーション結果の精度向上のため設定値の変更を繰り返すことが必要となる。そこで、シミュレーションパラメータの設定目安や標準値を用いたシミュレーション結果と、パラメータの実測値を用いた場合のシミュレーション結果を比較するため、材料物性値を測定した。測定は、引張試験機（㈱島津製作所製 AG-100kNXplus）による応力-ひずみ曲線、摩擦摩耗試験機（新東科学㈱製HHS2000）による摩擦係数を対象として行った。使用した引張試験機を図5に、引張試験片形状を図6に、摩擦摩耗試験機を図7に示す。応力-ひずみ曲線は、14B号試験片を用いて試験速度20mm/minで測定した。摩擦係数は、φ6のステンレスプローブを使用して測定した。

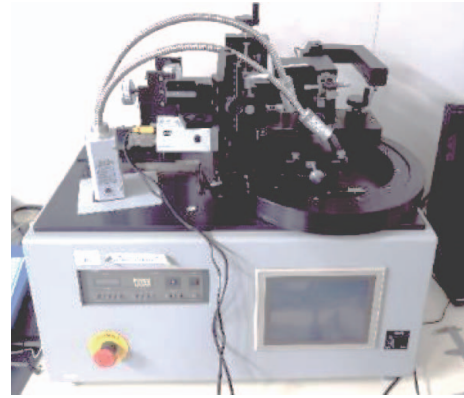


図7 摩擦摩耗試験機

表3 主なシミュレーションパラメータ

板厚	摩擦係数
質量密度	異方性特性
ヤング率	ブランクメッシュサイズ
ポアソン比	要素タイプ
降伏応力	断面方向積分点数
材料モデル	アワグラスタイプ
ストローク速度	ホルダ荷重

2.3 プレス加工シミュレーション

プレス加工シミュレーションには、㈱JSOL製 JSTAMP/NV2.8を用いた。シミュレーション画面の一例を図8に示す。本ソフトウェアは、材料データベースが標準で用意されており、われやしわの評価のほか、ブランク展開、トリムライン展開ができる。また、シェルとソリッドの両要素が使用でき、しごき加工にも対応している。プレス加工シミュレーションの設定を表4に示す。プレス加工シミュレーションのパラメータ設定は推奨設定を基本とし、材料物性値や加工条件はシミュレーションソフトウェアで用意されている標準値で実行したほか、実測値でも実行した。



図5 引張試験機

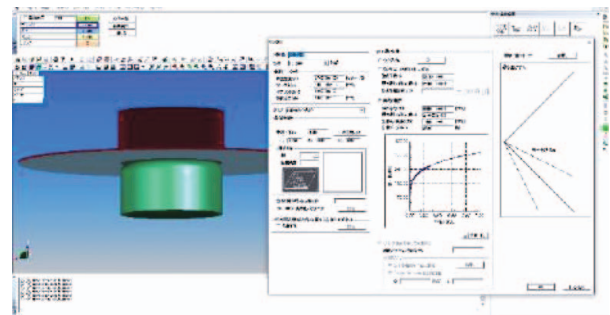


図8 プレス加工シミュレーション画面

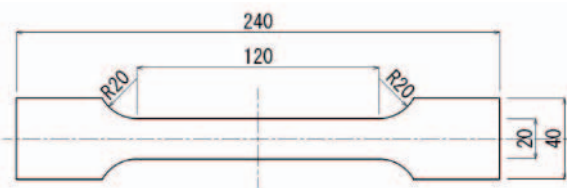


図6 引張試験片形状

表4 プレス加工シミュレーション設定

板厚	1.0mm
ブランクメッシュサイズ	0.7mm
材料モデル	Hill' 48 (タイプ37)
異方性特性	r : 0.85
要素タイプ	低減積分-ねじり剛性
断面積分点数	5層
アワグラスタイプ	剛性型

2.4 パラメータ選定および最適値導出

実加工に近い高精度なシミュレーション結果を得るためには、シミュレーションのパラメータ値の調整が必要である。またその調整は、シミュレーション活用の主な目的がリード

タイムとコストの削減であることから、効率的に行う必要がある。そのため、シミュレーションに標準で用意されている値を用いた場合と実測値を用いた場合のシミュレーション結果を比較し、精度や効率の観点から評価するとともに、精度に影響が大きいパラメータを重回帰分析により調べた。またそのパラメータについて、高精度なシミュレーション結果が得られる最適値の導出方法を検討した。

3. 実験結果と考察

3.1 深絞り加工

実験で得られた A5052P-H32 の加工品の例を図 9，図 10 に、A5052P-O の加工品の例を図 11～13 に示す。A5052P-H32 については、実験条件に関わらず全て割れが発生した。A5052P-H32 は伸びが小さいことから、本実験の環境では深絞り加工で正常な加工品を得ることが困難と考えられる。一方、A5052P-O については、実験条件によって正常な加工、加工終期での割れ発生、加工初期での割れ発生が見られた。A5052P-H32 と比べて十分な伸びがあることから、実験条件の選択により正常な加工が得られると言える。A5052P-O の実験条件と成形高さの測定結果を表 5 に示す。成形高さが 27 mm 程度であれば正常な加工であったことを示しており、ダイ R が大きく潤滑状態が低摩擦の場合が該当していることがわかる。これは、パンチにより材料がダイ内に押し込まれる際、材料が破断することなく流入できたためと言える。



図 11 A5052P-O 正常



図 12 A5052P-O 加工終期での割れ



図 13 A5052P-O 加工初期での割れ



図 9 A5052P-H32 加工中期での割れ



図 10 A5052P-H32 加工初期での割れ

表 5 実験条件と成形高さ (A5052P-O)

ダイ R	材料押さえ力 (kN)	加工速度 (mm/sec)	潤滑状態	成形高さ (mm)	加工状態
9	6.25	83.6	低摩擦	27.20	正常
9	6.25	419	低摩擦	27.16	正常
9	50	83.6	低摩擦	27.00	正常
9	50	419	低摩擦	26.98	正常
9	6.25	83.6	高摩擦	11.34	割れ
9	6.25	419	高摩擦	10.68	割れ
9	50	83.6	高摩擦	9.58	割れ
9	50	419	高摩擦	9.70	割れ
6	6.25	83.6	高摩擦	9.82	割れ
6	6.25	419	高摩擦	11.06	割れ
6	50	83.6	高摩擦	8.32	割れ
6	50	419	高摩擦	8.34	割れ
6	6.25	83.6	低摩擦	15.50	割れ
6	6.25	419	低摩擦	19.38	割れ
6	50	83.6	低摩擦	12.48	割れ
6	50	419	低摩擦	18.52	割れ

3.2 材料物性値測定

引張試験の結果を図14, 図15に示す。横軸はひずみ, 縦軸は応力である。図14はA5052P-H32, 図15はA5052P-Oの結果である。A5052P-H32はA5052P-Oと比較して伸びは小さいが引張強さが大きい。これらの引張試験の結果から得られた材料特性値を表6に示す。A5052P-H32の伸びが小さく, 前節の深絞り加工実験の結果の裏付けができた。次に摩擦係数の測定結果を表7に示す。摩擦係数については, 供試材それぞれについて3回測定した結果の平均である。A5052P-H32は潤滑油の有無の影響が小さいが, A5052P-Oでは潤滑油なしの場合, ありの場合と比べて摩擦係数が2倍程度となった。これは, A5052P-Oが柔らかくプローブの影響を受けやすいためと考えられる。

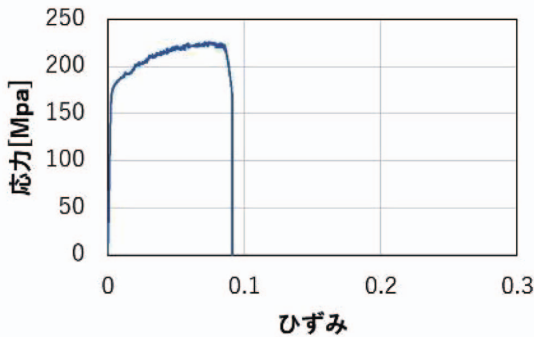


図14 応力-ひずみ線図 (A5052P-H32)

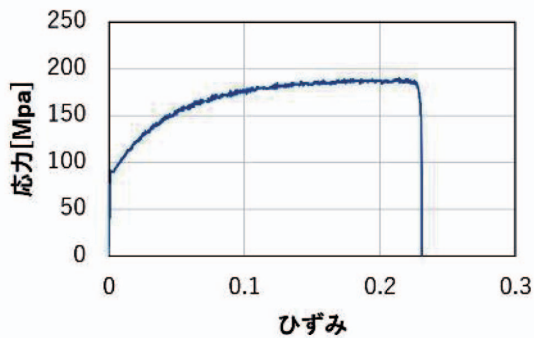


図15 応力-ひずみ線図 (A5052P-O)

表6 材料特性の実測値

	A5052-H32	A5052P-O
引張強さ (MPa)	226	190
伸び (%)	9	23
ヤング率 (MPa)	78000	69000

表7 摩擦係数

	A5052-H32	A5052P-O
潤滑油なし	0.114	0.279
潤滑油あり	0.142	0.145

3.3 プレス加工シミュレーション

A5052P-Oを用いたシミュレーション結果の例を図16~18に示す。A5052P-H32については, 深絞り加工の実験結果から本実験環境で正常な加工品を得ることが困難なため除外した。図において, 濃い部分は割れが発生した場所を示している。加工速度, 引張強さ, 伸び, ヤング率の標準値を用いた実験結果を表8に, 実測値を用いた結果を表9に示す。本研究で設定した条件では, 標準値を用いた場合と実測値を用いた場合で成形高さに大きな違いはなかった。また, 深絞り加工と同様に, 加工条件によって正常な加工, 加工終期での割れ発生, 加工初期での割れ発生が見られ, その傾向は似ていることから, シミュレーションの再現性は高いことが確認できた。

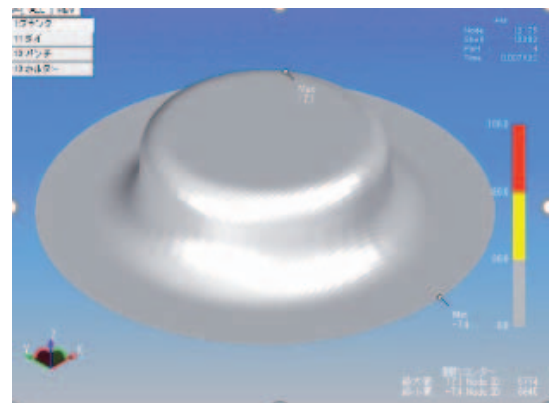


図16 シミュレーション結果 (正常)

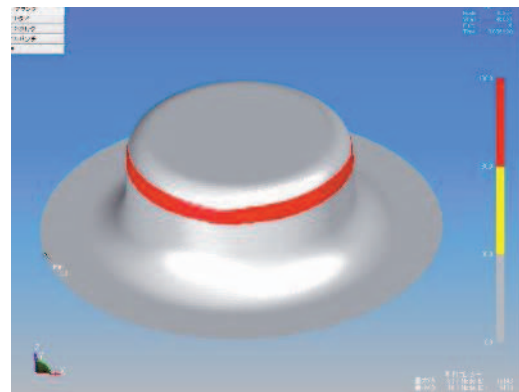


図17 シミュレーション結果 (加工終期での割れ)

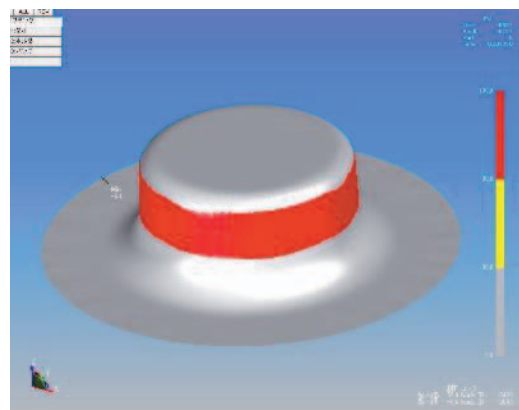


図18 シミュレーション結果 (加工初期での割れ)

表8 シミュレーション結果 (標準値)

ダイ R	材料押さえ力 (kN)	加工速度 (mm/sec)	摩擦係数	成形高さ (mm)	加工状態
9	6.25	5000	0.15	27.03	正常
9	6.25	10000	0.15	27.03	正常
9	50	5000	0.15	18.88	終割
9	50	10000	0.15	18.93	終割
9	6.25	5000	0.28	11.63	初割
9	6.25	10000	0.28	11.14	初割
9	50	5000	0.28	11.63	初割
9	50	10000	0.28	11.12	初割
6	6.25	5000	0.28	8.98	初割
6	6.25	10000	0.28	9.28	初割
6	50	5000	0.28	8.96	初割
6	50	10000	0.28	9.20	初割
6	6.25	5000	0.15	27.02	正常
6	6.25	10000	0.15	27.01	正常
6	50	5000	0.15	17.78	終割
6	50	10000	0.15	18.96	終割

初割：加工初期での割れ
終割：加工終期での割れ

表9 シミュレーション結果 (実測値)

ダイ R	材料押さえ力 (kN)	加工速度 (mm/sec)	摩擦係数	成形高さ (mm)	加工状態
9	6.25	5000	0.15	27.03	正常
9	6.25	10000	0.15	27.04	正常
9	50	5000	0.15	18.72	終割
9	50	10000	0.15	18.93	終割
9	6.25	5000	0.28	11.58	初割
9	6.25	10000	0.28	11.12	初割
9	50	5000	0.28	11.59	初割
9	50	10000	0.28	11.14	初割
6	6.25	5000	0.28	8.85	初割
6	6.25	10000	0.28	9.19	初割
6	50	5000	0.28	8.92	初割
6	50	10000	0.28	9.16	初割
6	6.25	5000	0.15	27.01	正常
6	6.25	10000	0.15	27.01	正常
6	50	5000	0.15	17.74	終割
6	50	10000	0.15	18.98	終割

初割：加工初期での割れ
終割：加工終期での割れ

3.4 パラメータ選定および最適値導出

表9および表10のシミュレーション結果により、加工速度、引張強さ、伸び、ヤング率の標準値と実測値では成形高さに大きな違いが見られなかったことから、迅速にシミュレーション結果を得るためには、材料特性値を測定せずに標準値を用いても支障がないと考えられる。実際の深絞り加工と標準値を用いたシミュレーション結果の比較を図19に示す。横軸は加工条件を組み合わせた加工サンプル、縦軸は成形高さを示す。横軸の中心線より左側はダイ R9、右側はダイ R6の結果を示している。なお、成形高さ27mm付近は正常な加工、それより小さい場合は加工中に割れが発生したことを示してお

り、割れが発生した時点での高さである。実際の深絞り加工とシミュレーション結果の誤差は、正常な加工と加工終期に割れが発生する加工条件の近くでのみ大きくなっている。よって、シミュレーション結果の精度向上のためにはパラメータ値の微小な修正が必要と言える。そこで、重回帰分析により成形高さに与える影響が大きいパラメータを導出し、値の調整を試みた。多変量解析の結果を表10に示す。目的変数は成形高さである。t 値から、成形高さへの寄与度は摩擦係数、材料押さえ力、ヤング率の順に大きく、特に摩擦係数の t 値が大きかった。そこで、調整するパラメータを摩擦係数一つにし、実際の深絞り加工とシミュレーション結果の迅速な合わせこみを行った。手順として、ダイ R9 で正常な深絞り加工品が得られたもののシミュレーションでは割れが発生した 2 サンプルを対象に、摩擦係数を初期値の 0.15 から変化させてシミュレーションを行い、実加工とシミュレーション結果の誤差が小さくなる摩擦係数を調べた。その結果、摩擦係数 0.12 の場合に最も誤差が小さくなった。次に、ダイ R6 を対象に摩擦係数を R9 と同じ 0.12 を適用したところ、実加工とシミュレーション結果の誤差が大きくなった。シミュレーションの調整パラメータを摩擦係数に固定していることから、ダイ R が加工結果に与える違いを摩擦係数で表現するため、基準となる摩擦係数とダイ R を用いて式(1)により適用する摩擦係数 μ を算出し最適値とした。その結果、ダイ R6 の場合の摩擦係数の最適値は 0.18 となった。この値を適用したシミュレーション結果を図20に示す。誤差の平均値は、最適化前が 19.1%、最適化後が 10% 以内となり、高精度なシミュレーション結果が得られた。

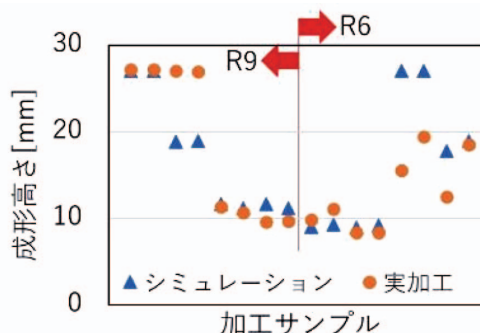


図19 深絞り加工とシミュレーション結果の比較

表10 多重回帰分析結果

説明変数	t 値
ダイ R	1.68
摩擦係数	-15.92
材料押さえ力	-4.88
加工速度	0.16
引張強さ	-0.64
伸び	-0.64
ヤング率	2.28

$$\mu = \mu_0 \frac{R_0}{R}$$

μ_0 基準摩擦係数 R_0 基準ダイR

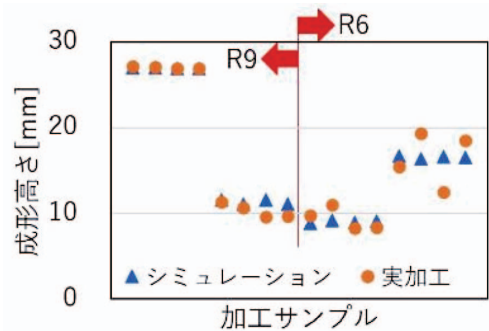


図 20 シミュレーション最適化の結果

4. おわりに

本研究では、深絞り加工を対象として実加工とシミュレーション結果の比較から、誤差の傾向やパラメータとシミュレーション結果の関係などを明らかにした。また、多変量解析によりシミュレーションパラメータの寄与度を明らかにし、調整するパラメータを絞った効率的な最適値導出手法を検討し適用した。その結果、誤差が10%以内となり、高精度なシミュレーション結果を得ることができた。

今後は、被加工材を変えた適用実験を行い、見出した手法の汎用性を検証する予定である。

謝辞

本研究で使用した引張試験機は、競輪の補助を受けて整備されました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 河本基一郎・宮坂卓嗣・山道 顕・野田拓也・北山哲士・小山浩季・山崎光悦：深絞り加工におけるブランク形状と分割可変ブランクホルダー力の同時最適化，日本機械学会論文集，Vol. 83, No. 845 (2017)
- 2) 小山純一・柳 明：金型内蔵マイクロセンシングシステムの開発，塑性加工学会誌，Vol.51, No.596, pp.60-64, (2010)
- 3) Khelifa, M., Oudjene, M: Numerical damage prediction in deep-drawing of sheet metals, Journal of Materials Processing Technology, Vol.200, pp.71-76, (2008)
- 4) Gallee, S., Pilvin, P.: Deep drawing simulation of a

metastable austenitic stainless steel using a two-phase model, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 210, pp. 835-843, (2010)

- 5) Karupannasamy, D.K., Hol, J., de Rooij, M.B., Meinders, T., Schipper, D.J.: Modelling mixed lubrication for deep drawing processes, Wear, Vol. 294-295, pp. 296-304, (2012)
- 6) 守屋岳志・高橋進・桑原利彦，自動車パネル絞り成形工程の成形条件自動最適化技術の開発，塑性加工学会誌，Vol.49, No.574, pp.53-57, (2008)

