

深絞り用金型の設計に関する研究

金城 洋、泉川 達哉、山内 章広、松本 幸礼

深絞り用金型の設計において、不良発生の予測と成形性の確認などを行うため、絞り加工の数値シミュレーションを行い、実際に金型を用いて成形した製品と比較実験を行った。これにより、数値シミュレーションを用いた金型設計手法の確立を行い、金型設計の高精度化、標準化への足がかりとすることを目的とした。今回の研究により、塑性加工の金型設計へのシミュレーション導入の有用性と課題が明らかになった。

1 はじめに

身の回りにある金属製品は、様々な加工法により製作されている。その中でもプレス加工は一般的な加工法であり、自動車のボディーから電子部品など多様な製品で見ることができる。

プレス加工は、他の加工法と比較すると、生産性が高いことから大量生産に向いており、様々なプレス加工技術が考案されている。絞り加工とは、プレス加工の一種で、一枚の金属板をパンチとダイと呼ばれる金型の間に挟み込むことにより、円筒などの筒状の形状に絞り込んでいく加工法であり、近年では携帯電話の電池ケースなどの深い筒状の容器を絞ることも可能となっている。

このようなプレス加工は、生産性の高さから県内においても需要は多いが、絞りなどの難易度の高い加工の金型製作においては、実績が少なく技術集積が不十分であるため、県外メーカーに頼っている現状がある。また、近年の金型設計に対する要求は、品質、コスト、及び納期とも一段と厳しさを増しており、技術のレベルアップは必要不可欠である。

絞りなどのプレス加工では、金型の設計と精度で成形の限界が大きく異なってくる。出来の良い金型であれば深く絞ることが可能で、製品精度が良いため不良も少なく、金型の耐久性も高い。こういった金型の設計においては、これまで現場技術者のノウハウと経験によるところが大きかったが、最近ではコンピュータによるシミュレーションが積極的に行われるようになってきた。金型を製作する前にシミュレーションを行うことで、金型の最適化を行い、金型を修正する時間、コストを削減するためである。

そこで今回は深絞り加工について製品試作とシミュレーションを行い、両者を比較することで数値シミュレーション技術の向上を目指し、手法の確立と有用性の検討を行った。そして今後の数値シミュレーションによる金型設計の高精度化、標準化への第一歩とした。

2 実験方法

2-1 実験モデル

今回の研究にて使用する絞り成形品の形状として、表 2-1 に示す円筒と角筒とした。円筒では、実際に金型を製作してテスト成形を行い、シミュレーション結果との比較を行った。角筒は、円筒シミュレーションの結果により最も適切と思われるパラメータ、材料モデルを使用し、絞り高さを変化させてシミュレーションを行った。今回このような単純な形状としたのは、実験式、理論などが既に確立されており、シミュレーション結果の検証が容易であるためである。

円筒絞りの場合は、絞る前の素板（以下ブランクという）の形状は円形となり、このブランク径が大きくなると製品の深さも大きくなるが、その分絞り抵抗が大きくなるので破断しやすくなる。このブランク径と加工後の円筒径の比を絞り比といい、通常絞り加工では絞り比 2 程度が限界とされている。今回は、ブランク径を絞り比 2.0～2.6 の範囲で変化させ、成形性を確認した。

表 2-1 実験モデル仕様詳細

	円筒	角筒
パンチ	φ25 mm	□ 25mm
ダイ	φ27.4 mm	□ 27.4mm
パンチ肩半径	5 mm	
ダイ肩半径	5 mm	
ブランク材質	SPCC	
ブランク板厚	0.97 mm	
絞り比	2.0～2.6	
絞り高さ	21.0～38.3 mm	16.0～25.0 mm

2-2 成形テスト実験

上記モデルの円筒絞り金型を製作し、成形テストを行った。金型の模式図を図 2-1 に、仕様を表 2-2 に示す。今回の金型は、絞り成形によく用いられている倒置型と呼ばれる構造で、上型にダイ、下型にパンチとしわ抑えを装備している。しわ抑えは金型下部のコイルバネに接

続されており、それによりしわ抑え力を発生する。ブランクには、厚み 0.97mm の SPCC 鋼板を使用し、ブランク形状（円形）への切り抜きは三菱電機株式会社製レーザー加工機（ML1212HD II-3013D）にて行った。テスト成形には、図 2-2 に示す株式会社アマダ製ユニバーサルプレスブレーキ（SPH-60）を使用した。

成形品の評価として、われの有無、しわの有無、板厚分布などを計測した。

2-3 シミュレーション

シミュレーションには、LSTC 社が開発した非線形構造解析ソフト「LS-DYNA」を使用した。「LS-DYNA」は衝突や落下などの衝撃問題や塑性加工などの非線形現象を解析するために開発されたソフトウェアである。今回の解析では、有限要素法を用いた動的陽解法を用いた。解析モデルには、三角形、四角形の薄いシートとしての扱いを行うシェル要素と、四面体、六面体などで厚みを再現できるソリッド要素の二種類を用い、計算時間、精度の面から比較した。

また、コンピュータを用いての塑性加工シミュレーションを行う際には、ブランク材料の塑性領域での材料特性が必要となる。そこでシミュレーションに先行して、材料モデルに入力するパラメータを得るための材料試験を実施した。図 2-3 に示す試験片を島津製作所製精密卓上万能試験機（AGS-5kNG）にて引っ張り試験を行い、応力-ひずみ曲線を算出した。

2-4 金型設計手法の検討

上記のシミュレーションの結果をふまえて、シミュレーションを活用した金型設計手法の検討を行った。検討に際しては、当センターが所有する試験機、シミュレーションソフト、加工機を標準仕様とした。

3 結果および考察

3-1 成形テスト実験

試作した金型を用いて、成形テストを行った。今回の金型は深さ方向に余裕を持たせることで、ブランク径の変化に対応できるものとした。表 3-1 にテストを行ったブランク径とその結果を、図 3-1、3-2 に成形した製品を示す。絞り比が 2.3 以上では製品の肩部分からの破断が発生した。今回の実験では、ブランクの大きさにかかわらず、全てパンチ肩からの破断の形態であった。成形が可能であったものに関しては、特にしわ等の発生は見られなかったが、SPCC の製造過程で圧延されることによる面内異方性の影響により、縁の部分で耳の発生が見られた。また、成形した加工品を半割にカットし板厚の

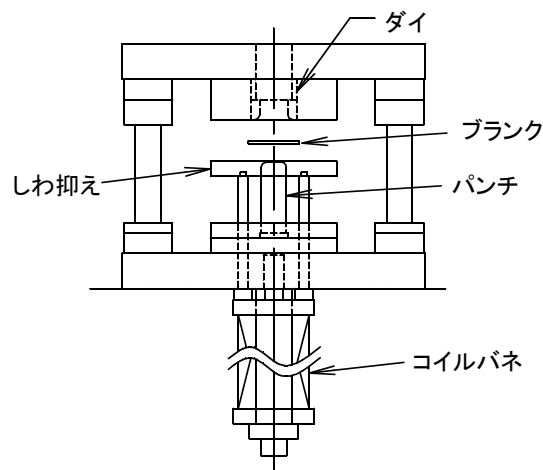


図 2-1 金型模式図

表 2-2 金型仕様詳細

パンチ材質	SKD11 相当
ダイ材質	SKD11 相当
しわ抑え板材質	HPM2T
しわ抑え力	3kN



図 2-2 ユニバーサルプレスブレーキ

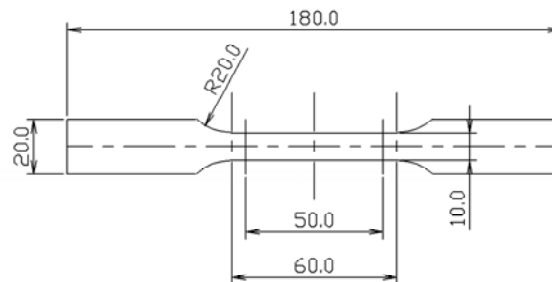


図 2-3 引っ張り試験片

測定を行い、シミュレーションで得られた値との比較を行った。その結果については、3-3-2にて後述する。

3-2 材料引っ張り試験

引っ張り試験に際しては素材の圧延方向を考慮し、試験片を圧延方向から0°、45°、90°の角度で採取を行い、それぞれに試験を行った。その結果を用いて作成したシミュレーションへの入力パラメータを表3-2、塑性ひずみ-応力曲線を図3-3に示す。今回の実験は、塑性領域での解析であることを考慮して、密度、ヤング率、ポアソン比は、一般的な値を使用した。

また、塑性ひずみ-応力曲線はもっとも平均と思われる曲線（圧延方向から0°）を採用した。真応力 σ 、真ひずみ ϵ の算出は以下の近似式による¹⁾。

$$\sigma = \sigma_N (1 + \epsilon_N) \quad \sigma_N: \text{公称応力}$$

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_N) \quad \epsilon_N: \text{公称ひずみ}$$

表 3-1 ブランク径とテスト結果

ブランク径	絞り比	成形結果
50.0 mm	2.0	良
52.5 mm	2.1	良
55.0 mm	2.2	良
57.5 mm	2.3	一部破断
60.0 mm	2.4	破断
62.5 mm	2.5	破断
65.0 mm	2.6	破断



図 3-1 成形品（絞り比2.0）



図 3-2 成形品（絞り比2.1~2.5）

なお最大荷重点以降は、この近似式の誤差が大きくなるため、最大荷重点以前の測定値により近似した以下のn乗硬化式により算出した。

$$\sigma = 550 \epsilon^{0.25}$$

また、作成したパラメータを用いて、引っ張り試験のシミュレーションを行い、妥当性を確認した。表3-3にシミュレーションとの比較結果を示す。

3-3 シミュレーション

前述した条件をもとに、図3-4に示す解析モデルを作成した。解析時間の短縮のため1/4もしくは1/8モデルのみを解析要素とし、工具速度は動的な効果がなければ解析結果は変わらないとの予測から2000mm/sに設定した。また、曲率に応じてメッシュを再分割するアダプティブ・メッシュ機能を用いて、計算時間の短縮を図っている。

解析の過程において、いくつかの材料モデルをテスト

表 3-2 材料パラメータ

密度	7860 kg/m3
ヤング率	207000 Mpa
ポアソン比	0.28
降伏応力	157 MPa
C値	0.252
ランクフォードR値	1.839

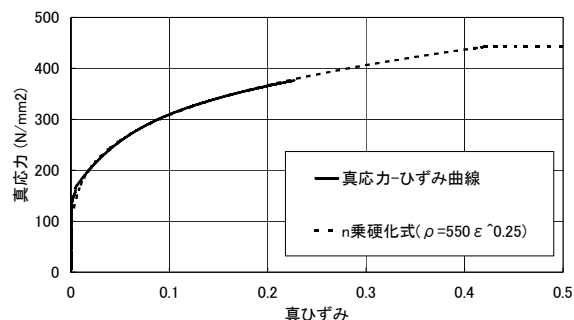


図 3-3 塑性ひずみ-応力曲線

表 3-3 引っ張り試験とシミュレーション比較

	引っ張り強さ	破断伸び
実試験	2928 N	23.3 mm
シミュレーション	2931 N	20.2 mm

したが、破断時の挙動、解析時間などを考慮した結果、シェル要素の場合は面外異方性弾塑性モデルを、ソリッド要素の場合は多直線近似等方弾塑性体モデルを採用した。破断、しわ等の不良判定方法として、以下の方法を用いた。

- ① 目視によるしわ、破断の判定
- ② 板厚減少率による破断の判定
- ③ 成形限界線（FLD）による判定

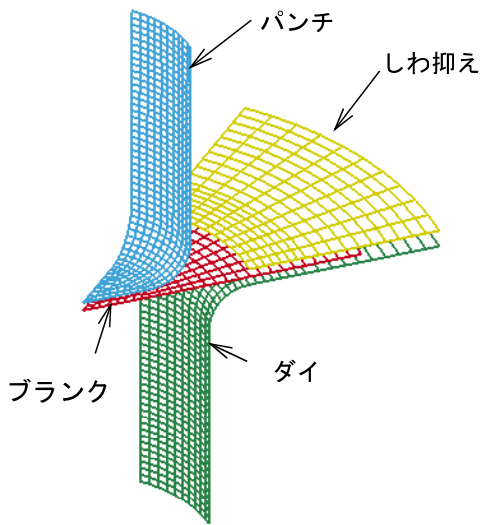


図 3-4 解析モデル（メッシュ表示）

3-3-1 φ25円筒解析結果

パンチ径φ 25 の円筒絞り、シェル要素でシミュレーションした成形の過程を図 3-5 に示す。また、板厚の減少率（%）を図 3-6（絞り比 2.0）、図 3-7（絞り比 2.5）に示す。絞り比 2.0 ではパンチ肩部で板厚が最も減少しているが、最薄部でも減少率は 9.62%であり、破断の発生は起こっていないと思われる。これに対し絞り比 2.5 では、途中までは順調に絞れるが、絞り高さが 14mm を超えるとパンチ肩部で急激に板厚が減少し、メッシュが異常な伸びを示す。これ以降は、パンチ肩部のメッシュが伸びるのみでフランジ部の材料は引き込まれない。以上のことから破断が生じているものと考えられる。

シミュレーションでは、パンチ肩での破断が起らずに成形できる最大絞り比が 2.4 となり、成形テスト結果と比較すると、シミュレーションの方が絞り性がやや高くなる傾向となった。

ソリッド要素を用いて同様の解析を行ったところ、板厚の分布がシェル要素を用いたときより、極端に現れる傾向があった。これについては、3-3-2 にて詳しく述べ

るが、今回採用したソリッドの材料モデルでは面外異方性の考慮ができなかったため、このような現象がみられたと推測される。

今回の実験モデルでは、シェル要素の解析時間が 4～8 時間程度、ソリッド要素での解析時間が 20～30 時間程度となった。今回のような比較的単純なプレス成形においては、解析時間と精度の両方で、シェル要素が有利との結果となった。

3-3-2 円筒成形テストとシミュレーションとの比較

実際に金型を用いて成形を行った製品をマイクロカッターで半割にし、ノギスにて板厚の測定を行った。また、同様の測定位置でのシミュレーションでの板厚分布を表示した。これらの結果を図 3-8 に、測定位置を図 3-9 に示す。シミュレーションについては、実際に測定することが困難である摩擦係数 μ をパラメータとしていくつかのパターンの解析を行った。その結果、シェル（ $\mu=0.3$ ）の場合が最も良くテスト成形結果と一致した。ソリッド要素を用いた場合は、板厚の厚い部分と薄い部分の差が大きくなる傾向にある。これは、今回ソリッド要素で用いた材料モデルが、材料の異方性を考慮できないタイプであり、等方性材料として扱ったためこのような結果になったと思われる。

3-3-3 □ 25角筒解析結果

円筒成形シミュレーションにて、最も良く成形テストとの相関が得られたパラメータを用いて、□ 25 の角筒シミュレーションを行った。その際の成形の様子を図 3-10 に示す。パンチ肩付近で板厚が最小になり、口部のコーナーにて板厚の最大点が表れている。

角筒絞りでは、最大成形高さの実験式が提唱されており¹⁾、この実験式によると今回のケースでは最大絞り高さは 16.2mm となる。これに対し、シミュレーションでは絞り高さ 20mm のブランクサイズまでは板厚の異常な減少は見られなかったが、ダイ肩に近いコーナー付近でのひずみがかなり大きな値を示していることから、壁割れ（ウォールブレイク）が起こっている可能性がある。しかしながら今回の研究では、角筒の実際の成形実験を行うことができなかったため、壁割れなど特殊な不良の発生の判定については今後の課題となった。

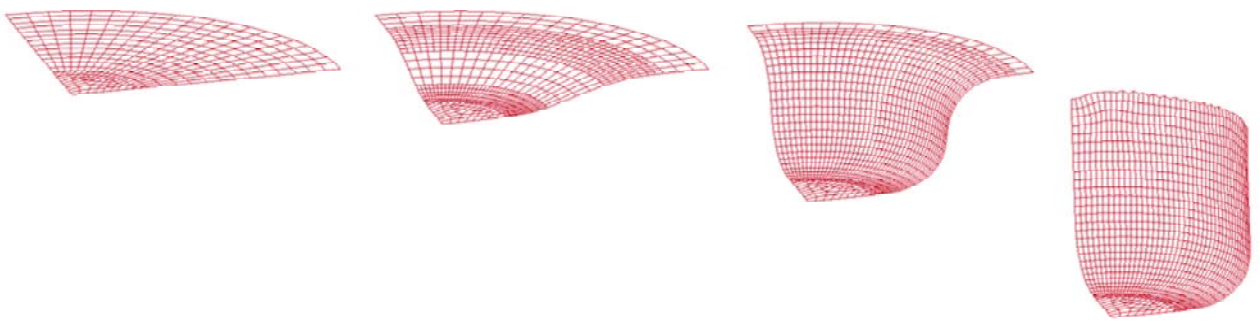


図 3-5 φ25円筒シミュレーション（メッシュ表示）

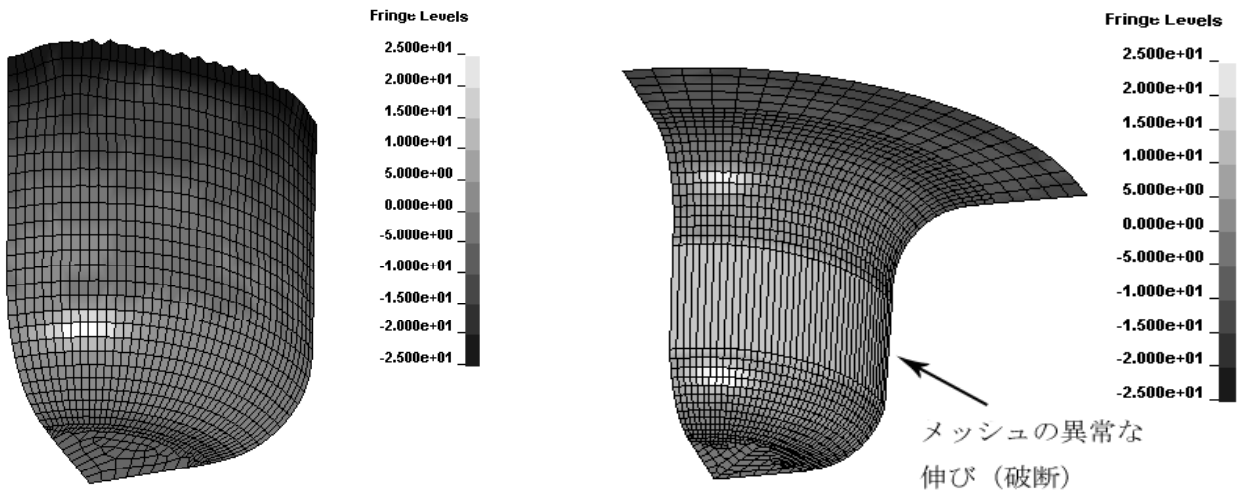


図 3-6 φ25円筒板厚減少率（絞り比 2.0）

図 3-7 φ25円筒板厚減少率（絞り比 2.5）

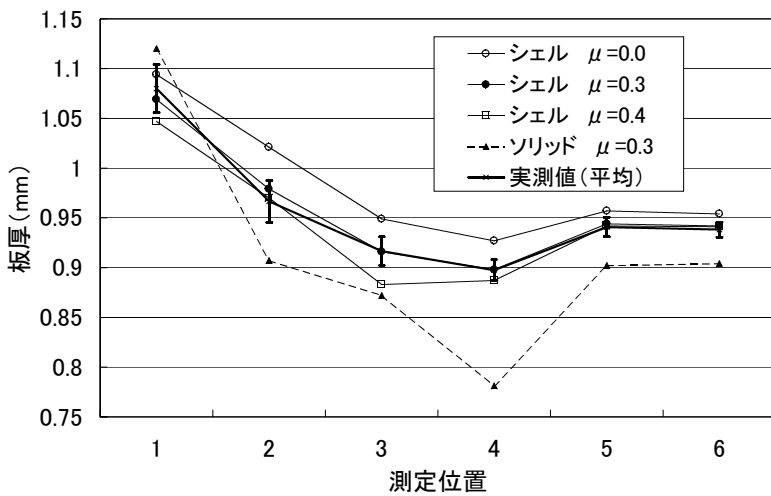


図 3-8 板厚分布

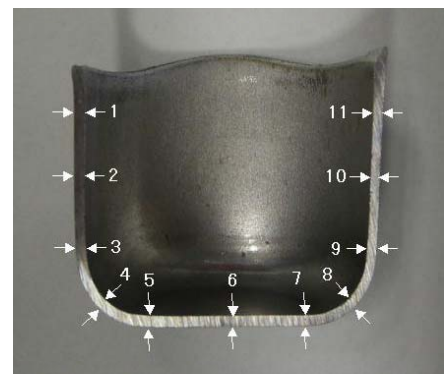


図 3-9 測定位置（但し 7～11 の測定ポイントはそれぞれ 5～1 に読みかえている）

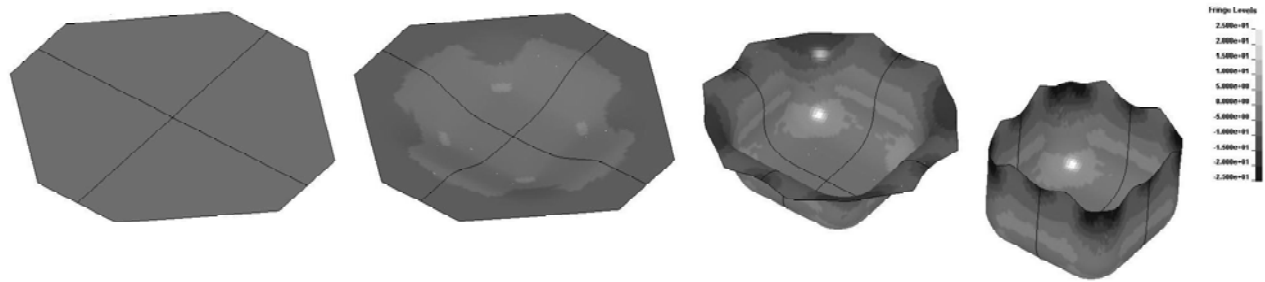


図 3-10 □25角筒シミュレーション（板厚減少率）

3-4 金型設計手法検討

当センターが所有する機器を用いた、シミュレーションを活用した金型設計の流れを検討した。

①製品、金型設計

3次元CAD（IDEAS、UGなど）にて、成形品の形状を作成、検討を行う。また、金型の設計も行い、3次元データを作成する。

②材料試験

成形シミュレーションに必要なパラメータを算出するため、オートグラフを用いた引っ張り試験や摩擦係数測定試験を行う。

③成形シミュレーション

上記②で得られたパラメータを用いて、非線形構造解析ソフト（LS-DYNA）によるシミュレーションを行う。

④解析結果の検討

シミュレーションで得られた結果を検討し、成形不良、成形限界の予測を行う。

⑤製品設計変更

④の結果を考慮し、製品設計、金型設計を変更する。

⑥金型製作

各種金属加工機（マシニングセンター・放電加工機等）により、金型の製作を行う。

⑦量産

製作した金型により、量産を行う。

4 まとめ

今回の研究により、プレス成形シミュレーションを活用した金型設計の有用性と問題点が明らかとなった。

1) 絞り加工シミュレーションを用いて、実際の成形との比較検討を行い、板厚分布や破断等を再現することができた。

2) 当センターが所有する機器を用いた、シミュレーションを活用した金型設計の流れを確立した。

3) 絞り成形品の不良予想に関して、危険性の高い場所の特定、原因の特定などが可能となった。

今回は単純な形状であったが、シミュレーションを用いて実際の絞り加工を再現することができた。特に、板厚分布などは、現実に近い値が得られた。しかしながら、破断やしわなどの不良の発生においては、可能性が高い箇所は判断できるものの、定量的にどの条件で発生するかを断定するのは困難であることが分かった。これらシミュレーション技術の向上は今後の課題であるが、事前に危険箇所を予測することができるため、試作の前に金型設計に反映し、設計変更や後加工を最小限に抑えることが可能となった。

今回のような塑性加工シミュレーションを扱う上で、最も重要となってくるのは、材料パラメータの取り扱いと、解析結果の判断であった。材料パラメータに関しては、得られた数値の精度と解析への入力パラメータへの変換に注意を要し、今後様々な材料データ蓄積の必要性がある。また、シミュレーションの解析結果の判断は、解析の正誤、指標となるパラメータの設定等、全て個々ユーザーに任されることになる。これらの技術を蓄積し、シミュレーションの適用範囲を広げていくことが今後の課題である。

参考文献

- 1) (社)日本金属プレス工業協会編、中村和彦、桑原利彦著 「プレス絞り加工」 日刊工業新聞社 (2002)
- 2) (社)日本金属プレス工業協会編、吹春寛著 「プレス成形シミュレーション」 日刊工業新聞社 (2003)
- 3) 吉田弘美編著 「金型設計基準マニュアル」 (株)新技術開発センター (1986)

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。