

加藤 直幸

要旨

車体軽量化や高意匠化とともに、開発期間の短縮が求められ、プレス成形性を事前に予測するシミュレーション技術の重要性が高まっている。塑性加工の一つであるプレス成形は、板状の材料を金型(パンチとダイス)で挟み込むことにより、形を変えたり打ち抜いたりする成形法で、自動車の車体部品の製造では欠かすことのできない技術である。モーターサイクルでもプレス成形によって製造されている部品があり、要求される製品機能により様々な材質や板厚が用いられる。本稿ではアルミニウム合金板の弾塑性変形挙動および塑性異方性を忠実に再現することにより成形シミュレーションの精度向上を目指した取り組みを紹介する。

Abstract

Simulation technology to predict press formability is becoming increasingly important as shorter development period, as well as vehicle weight reduction and higher design quality are required. Press forming, one of the plastic forming processes, is a forming method that reshapes or punches out plate materials by placing them between dies (punches and dies), and is an important technology in the manufacturing of automobile body parts. Motorcycles also have parts that are manufactured by press forming, and various materials and thicknesses are used depending on the required product function. This paper introduces the Company's efforts to improve the accuracy of forming simulations by faithfully reproducing the elasto-plastic deformation behavior and plastic anisotropy of aluminum alloy sheets.

1 はじめに

車体軽量化を目的に自動車のクロージャパネルにも採用が進んでいる5000系/6000系アルミニウム合金板は、軟鋼板とほぼ同程度の強度を有するものの、伸びは2/3程度、深絞り成形性の指標とされる r 値は1/2以下、ヤング率は1/3程度であるため、割れ、しわ、形状凍結性(スプリングバック)などの問題が発生しやすく、軟鋼板に比べて成形自由度は大きく劣る。そのため、有限要素法(FEM)を用いたシミュレーションによる成形不具合の予測とその結果に基づいた適切なプレス工程設計が求められる。

モーターサイクルの燃料タンクは燃料を密閉保持するという機能部品であると同時に重要な意匠部品でもあることから、通常はプレス成形性に優れた軟鋼板が用いられるが、高い走行性能が求められる一部の機種では車体軽量化に寄与するアルミニウム合金板が採用されている(図1)。ブランクカットされた板材から形状を造り出す工程は「絞り成形」と呼ばれている。「絞る」とは範囲や量を小さくするような場合に用いられるが、プレス加工における絞り成形とは、周方向に材料を縮ませながら中心方向へ引き込ませることで立体形状を造り出す技術である。薄板材は面内方向に圧縮を受けると座屈現象であるしわが発生するため、適度な張力を与える必要があるが、このバランスを適切に保つことができない製品形状や成形方案の場合、

張力が不足すると側壁部分にしわが発生し、過剰な場合には頂点部分が材料を引き込むための荷重を支えきれず局所的なひずみ集中や板厚減少を起こし破断してしまう。



図1 アルミニウム合金製燃料タンク

プレス成形性を予測するシミュレーション技術は、1990年代半ばから実部品へ適用されてきたが^[1]、鋼板に比べて延性の低いアルミニウム合金を用いて意匠性、機能、製造要件を高いレベルで成立させた魅力的な製品を生み出していくためには、シミュレーション技術の高精度化が必要であると考えた。本稿

の2節では異方性降伏関数と大ひずみ繰返し塑性変形(特にバウシinger効果の表現)を中心とした材料モデリングについて解説し、その後3節ではその適用事例、精度検証について述べる。

2 材料モデリング

2-1. 材料構成則

板材と金型との接触状態や摩擦特性、計算に使用する有限要素タイプなど、成形シミュレーションの精度に影響を与える因子はいくつか挙げられるが^[2]、成形不具合を精度よく予測するためには、板材の弾塑性変形挙動をできるだけ忠実に表現できる材料モデルが必要となる。

プレス成形シミュレーションの材料モデルは、①降伏条件、②流れ則、③加工硬化則の3つの関係で構成されている。降伏条件とは材料が2軸(または3軸)の組合せ応力を受けているときに弾性限度に達して塑性変形を開始するときの条件則である。流れ則とは現在の応力に対して次の瞬間に生じる塑性ひずみ増分方向を規定し、加工硬化則は塑性変形の進行に伴う変形抵抗の増加を表現する構成則である。

2-2. 異方性降伏関数と関連流れ則

図2に示したように、コイル圧延方向にX軸、幅方向にY軸、板厚方向にZ軸となるような直交座標系を取ると、材料の立方体要素に作用する応力は、各面に垂直に作用する垂直応力3成分と、各面に平行なせん断応力3成分の計6つの独立な成分となるが、これらを組み合わせたものが材料に固有な値Cに達すると材料は降伏し、達していない状態は弾性状態と考える。

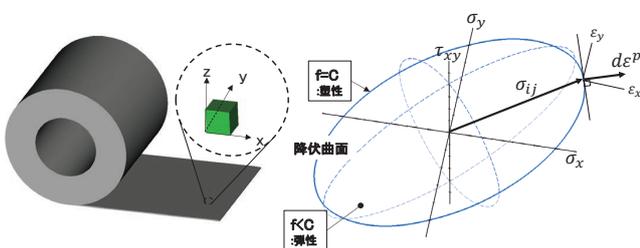


図2 多軸応力下の降伏条件

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) = C \quad \text{塑性状態}$$

$$f(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}) < C \quad \text{弾性状態}$$

ここで $f = C$ は降伏関数と呼ばれるが、薄板材料を扱うプレス成形の場合には板厚方向の応力成分は十分に小さく実用上無視できるため、考慮すべき応力は $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ の3成分となる。

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ を各軸とした応力空間で $f = C$ を表現すると楕円球形状の閉曲面(降伏曲面)となり、応力がこの内部にある状態は弾性状態、閉曲面まで到達すると材料は降伏し塑性変形を開始すると考える。

また、ある応力 σ_{ij} が作用し降伏曲面に達して材料が降伏したとすると、その次の瞬間に発生する塑性ひずみの増分方向 $d\varepsilon^p$ は、その応力点において降伏曲面の外向き法線方向と一致するとした関連流れ則が一般的に用いられている。このため、降伏曲面のモデル化は弾塑性の判別だけでなく、塑性ひずみ増分方向を決定する役割も担うため重要である。

この降伏曲面形状を実験的に取得する方法も研究、提案がされている(図3)^{[3][4]}。従来から行われている単軸引張試験により図中の黒色塗りつぶし印で示した応力点と、 r 値と呼ばれる塑性ひずみ比から各点の法線ベクトル方向が求まり、二軸引張試験や液圧バルジ試験、さらに平面ひずみ引張試験などを組み合わせることにより赤色塗りつぶし印で示した応力点を取得することができる。実際に1000系、5000系、6000系アルミニウム板材、および軟鋼板で取得した等塑性仕事面を図4に示す^{[14][15]}。マーカーは実験取得した応力点、破線は等方性材料に関する von Mises の降伏条件による降伏曲面形状を示しているが、いずれの材料もそれとは一致せず、またアルミニウム板材の中でも降伏曲面形状は異なっていることが分かる。これは金属板材を製造する際の圧延加工により形成される集合組織などに起因し、板材の方向によっても降伏応力や変形特性が異なることから異方性と呼ばれている。

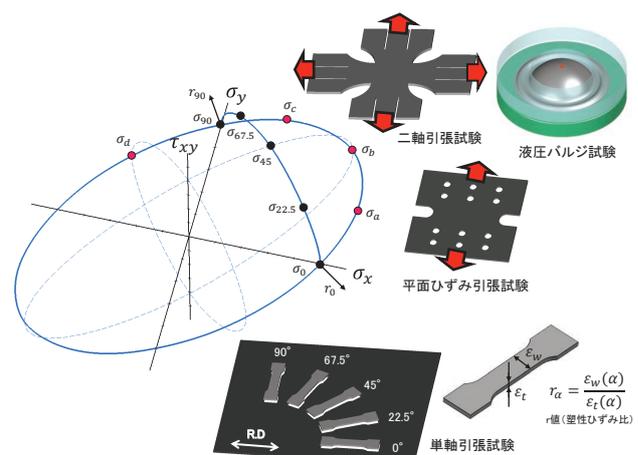


図3 単軸および二軸応力状態を再現する材料試験法

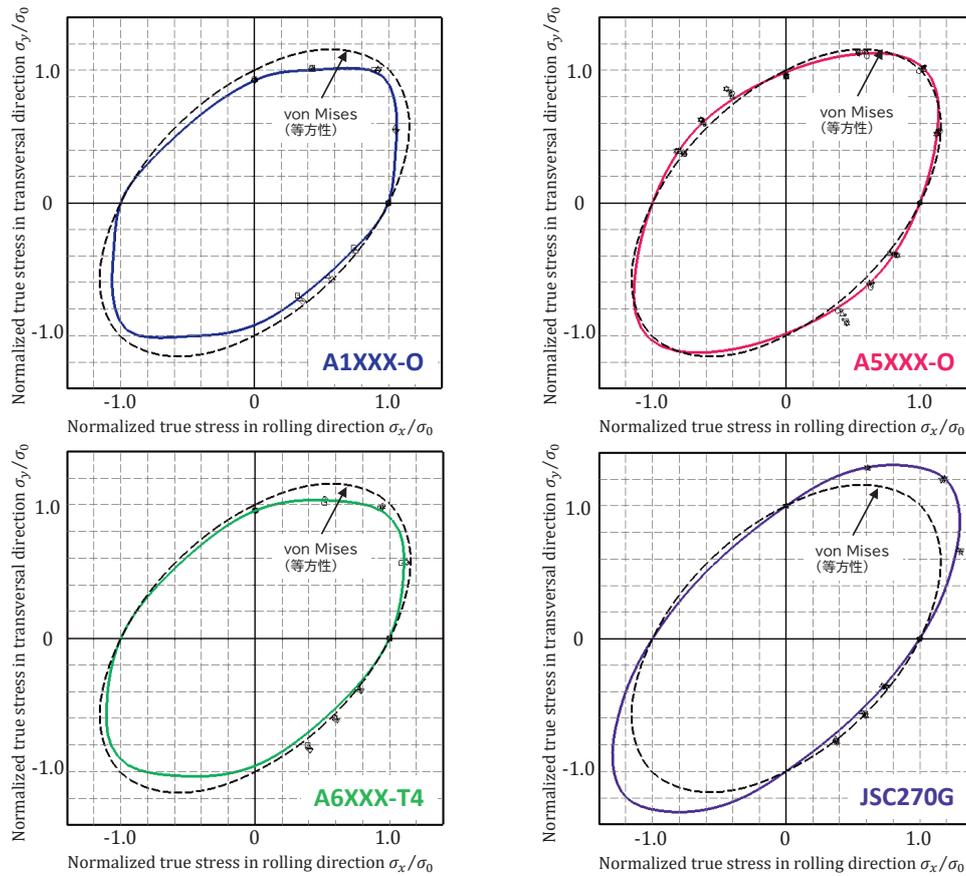


図4 各種板材の等塑性仕事面

材料により異なる降伏曲面形状を、成形シミュレーションでは異方性降伏関数を用いてモデル化する。異方性降伏関数については様々なものが提案^{[5][6][7]}されており、最も基本的で現在でもよく使われているものは1948年に発表されたHillの2次降伏関数^[8]である。一方、2013年にはYoshidaらにより6次多項式型の異方性降伏関数^[9]が提案されている。それぞれの平面応力表現は以下のようになる。

Hill48

$$\phi = (G+H)\sigma_x^2 + (H+F)\sigma_y^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + 2N\tau_{xy}^2 = \sigma_0^2$$

F, G, H, N: 異方性パラメータ

Yoshida 6-poly

$$\begin{aligned} \phi = & C_1\sigma_x^6 - 3C_2\sigma_x^5\sigma_y + 6C_3\sigma_x^4\sigma_y^2 - 7C_4\sigma_x^3\sigma_y^3 + 6C_5\sigma_x^2\sigma_y^4 - 3C_6\sigma_x\sigma_y^5 + C_7\sigma_y^6 \\ & + 9(C_8\sigma_x^4 - 2C_9\sigma_x^3\sigma_y + 3C_{10}\sigma_x^2\sigma_y^2 - 2C_{11}\sigma_x\sigma_y^3 + C_{12}\sigma_y^4)\tau_{xy}^2 \\ & + 27(C_{13}\sigma_x^2 - C_{14}\sigma_x\sigma_y + C_{15}\sigma_y^2)\tau_{xy}^4 + 27C_{16}\tau_{xy}^6 = \sigma_0^6 \end{aligned}$$

$C_1 \dots, C_{16}$: 異方性パラメータ

いずれも前半部分が垂直応力項、後半部分がせん断応力との連成項となっているが、垂直応力項のみを比較してもHill48は3個の異方性パラメータを持つ2次式であるのに対して、Yoshida

6-polyは7個の異方性パラメータを持つ6次式となっており、表現自由度の高いモデルである。それぞれの降伏関数によりモデル化した5000系アルミニウム合金板の降伏曲面形状を図5に示す^{[14][15]}。Hill48は圧延方向の降伏応力とr値、および圧延直交方向のr値しか再現できていないが、Yoshida 6-polyでは二軸応力の実験点も含め全体を精度よく再現することができている。

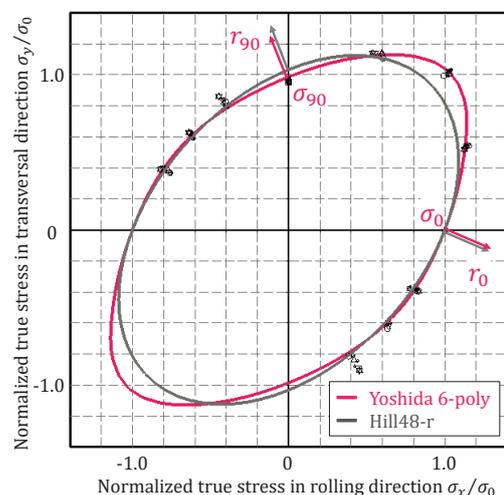


図5 5000系アルミ合金板材の降伏曲面モデル化

2-3. 大ひずみ域の異方性発展

図6に示す応力-ひずみ線図において ε_{p1} から ε_{p2} まで塑性ひずみが増大すると、矢印で示すように材料は加工硬化する。この加工硬化を降伏曲面で表現すると、塑性ひずみの増大とともに弾性領域が拡大し、降伏曲面は外側へ膨張することになる。異方性が変化しないことを前提とすると、降伏曲面は相似形状を保ちながら膨張することになるが、実際には多くの材料で塑性ひずみの進展とともに異方性は変化し、降伏曲面は形状を変化させながら膨張することが知られている。

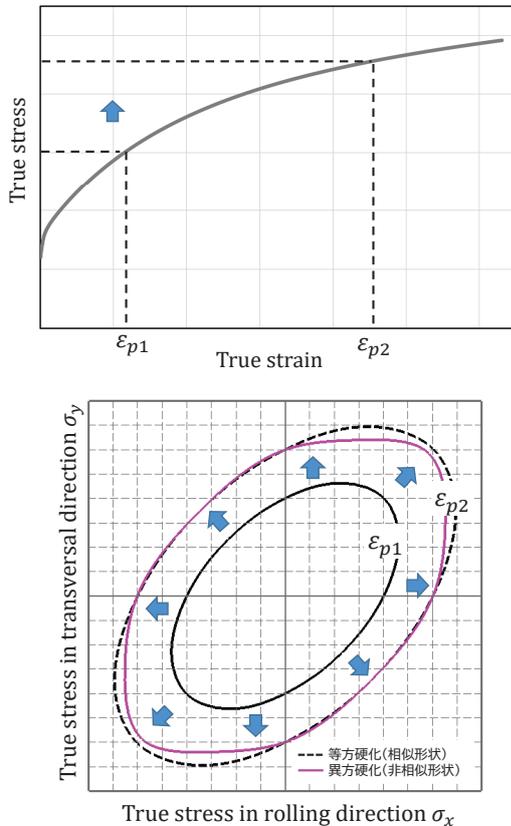


図6 加工硬化の表現

この異方性の発展についても以下に示す手法によりモデル化を行っている^[10]。

$$\phi(\sigma, \varepsilon_p) = \mu(\bar{\varepsilon}_p)\phi_1(\sigma) + (1 - \mu(\bar{\varepsilon}_p))\phi_2(\sigma)$$

$$\mu(\bar{\varepsilon}_p) = 1 - \left[\frac{\bar{\varepsilon}_p - \bar{\varepsilon}_{p1}}{\bar{\varepsilon}_{p2} - \bar{\varepsilon}_{p1}} \right]^p$$

塑性ひずみが比較的小さいときの異方性を表現する降伏関数 $\phi_1(\sigma)$ と、大ひずみ域の異方性を表現する降伏関数 $\phi_2(\sigma)$ を定義し、それらを相当塑性ひずみ $(\bar{\varepsilon}_p)$ 依存の内挿関数 $\mu(\bar{\varepsilon}_p)$ で補間することにより、塑性ひずみの進展とともに降伏曲面形状が変化していく異方硬化挙動を表現している。なお、式中の指数 p は $\bar{\varepsilon}_{p1} \leq \bar{\varepsilon}_p \leq \bar{\varepsilon}_{p2}$ における内挿パラメータである。

2-4. 大ひずみ繰り返し塑性モデル (Yoshida-Uemori model)

板材に引張応力を与えた後に除荷し、圧縮応力を与えて再降伏させたときの弾塑性挙動は図7のようになる。応力反転後の再降伏は極めて早い段階で起こり、加工硬化率が急激に変化する遷移的バウシinger効果を経て加工硬化が一時休止したような挙動が見られ、バウシinger効果がないと仮定した場合よりも小さな流動応力で塑性変形が進行する。また、除荷時の応力-ひずみの線形近似勾配(見かけヤング率)は塑性ひずみに依存して低下する。Yoshidaらの提案した非線形移動硬化則モデル (Yoshida-Uemori model)^{[11][12][13]}を適用することで、アルミニウム合金についてもこれらの弾塑性挙動を表現することができる(図8)。

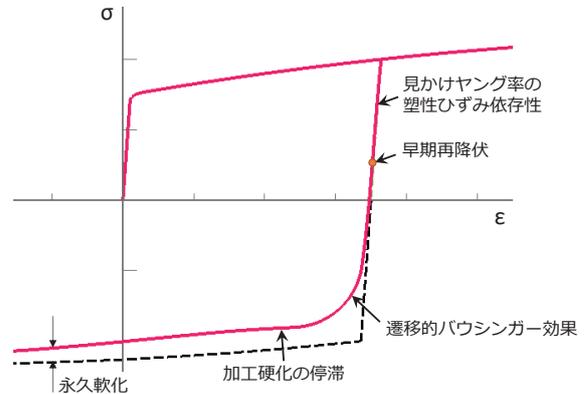


図7 応力反転における応力-ひずみ挙動

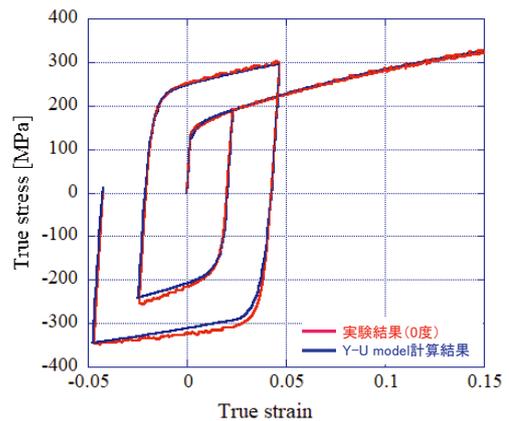


図8 Y-U model 計算結果と実験結果の比較 (5000系アルミニウム合金)

3 精度検証

3-1. 検証に用いたモデル

検証に用いたアルミニウム合金板の機械的特性を表1に示す。液圧バルジ、テーパカップ絞り、S-Railの各成形を行い、実

パネルとシミュレーション結果を比較した。シミュレーションには有限要素解析ソフトウェア JSTAMP/NV (ソルバーは LS-DYNA の動的陽解法) を使用し、前節で述べた材料特性をすべて表現することのできる材料モデルを開発し適用した。

表1 アルミニウム合金板材の材料特性

	公称板厚 [mm]	ヤング率 E [Gpa]	降伏強さ YS [MPa]	引張強さ TS [MPa]	伸び EL [%]	r 値
A5XXX-O	1.2	72	135	280	30	0.70
A6XXX-T4			140	240	28	0.58

3-2. 液圧バルジ成形による検証結果 (6000系アルミニウム合金)

液圧バルジ成形とは、図9に示すようにリング状に材料を拘束した状態で下側から液圧を付加して膨出させる成形法である。膨出成形される頂点部分は、液圧の上昇とともにほぼ等二軸引張応力状態で変形が進んでいく。図10は横軸に負荷液圧、縦軸に頂点部の板厚減少率をプロットした結果のグラフである。従来の単軸引張特性だけでなく、二軸引張の流動応力を正確にモデル化することで精度の良いシミュレーション結果が得られている。

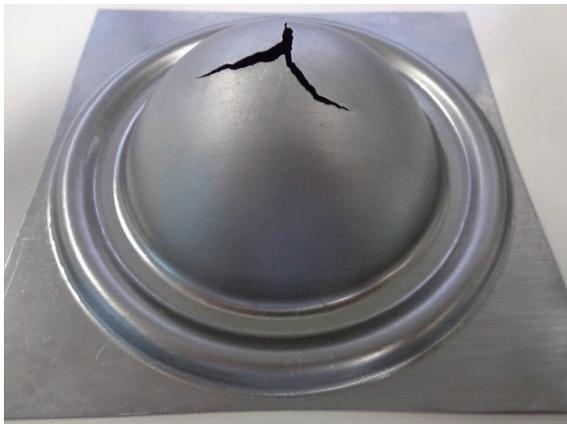


図9 液圧バルジ成形

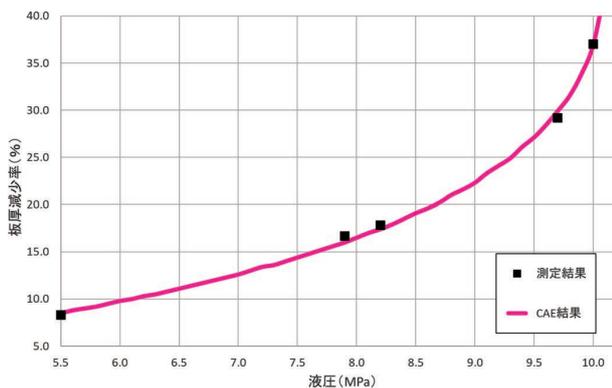
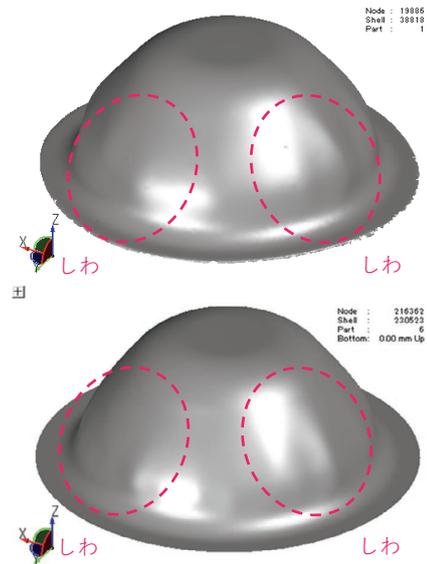


図10 液圧バルジ成形頂点部の板厚減少率

3-3. テーパカップ絞り成形による検証結果 (6000系アルミニウム合金)

一定のしわ押さえ力のもとブランク径を変化させてテーパカップ形状の深絞り成形を行った。ブランク径が比較的小さな場合にはボデーしわが発生し、ブランク径の拡大に伴いしわは改善されていくが、さらに拡大するとパンチ肩部で過度な板厚減少が生じて破断する。ボデーしわが発生した条件のパネル形状とともに、パンチ肩部で破断した条件において中心を通り圧延方向に平行な断面に沿って板厚減少率を計測し、シミュレーションと比較した結果を図11、12に示す。グラフの横軸は中心からの断面位置、縦軸は板厚減少率を示している。深絞り成形では部位により様々な応力状態となるが、適用した材料モデルではブランク径の僅かな変化によってしわ、割れが発生してしまうアルミニウム合金板の成形性が精度よく再現されている。



上段:測定結果/下段:CAE結果

図11 テーパカップ絞り成形(ブランク径φ250)

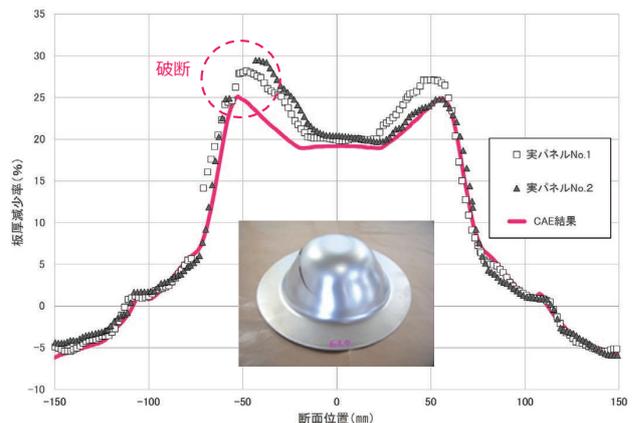


図12 テーパカップ絞り成形(ブランク径φ273)

3-4. S-Rail 成形によるスプリングバック検証結果 (5000系アルミニウム合金)

板材成形シミュレーションの国際会議 NUMISHEET'96においてベンチマークモデルとして採用された S-Rail 形状を参考に金型を製作し、離型後のパネル形状を非接触測定機により測定することで、実成形パネルとシミュレーション結果のスプリングバック変形を比較評価した(図13)。成形下死点において曲げ R 部には板外側に引張、板内側に圧縮の応力が生じており、離型時にはこれらが弾性回復することによって角度変化が起こる。縦壁部においてはフランジ部から流入する材料がダイ肩 R で曲げ変形、縦壁部で曲げ戻し変形を受けて形成され、板外側は引張、板内側は圧縮の応力状態となり、離型時にはこれらが弾性回復することによって生じるモーメントが駆動力となって壁反りが発生する。アルミニウム合金においても今回適用した材料モデルでこれらのスプリングバック変形を再現することができている。

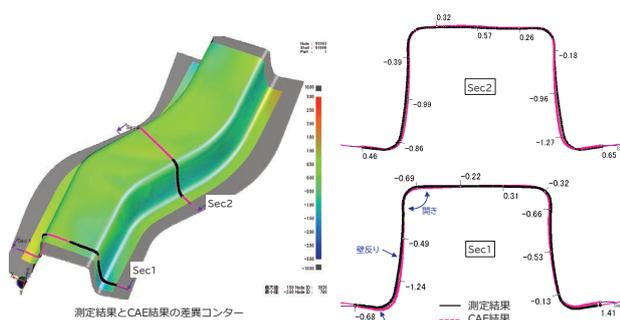


図13 S-Rail 成形によるスプリングバック (5000系アルミニウム合金)

4 おわりに

板材プレス成形を対象にしたシミュレーション技術開発とアルミニウム合金板への適用の取組みについて紹介した。材料の弾塑性挙動の計測やモデル化の手法については、大学などの研究機関における学術成果が応用展開されたものである。ものづくりの現場ではこれらを活用して、車体軽量化、性能向上に加えて、エネルギーや資源の有効活用といった課題にも貢献していくことが期待される。

なお、本稿の内容は(株)CEM 研究所 吉田総仁氏(広島大学名誉教授)、(株)JSOL 天石敏郎氏との共同研究によるものであり、(公社)自動車技術会の会誌「自動車技術」、(一財)素形材センターの会誌「素形材」へ寄稿した原稿^{[14][15]}を一部加筆修正したものである。

■参考文献

- [1] 高橋進:塑性と加工, 第57巻, 662号, p.167-168(2016)
- [2] 浜孝之:塑性と加工, 第51巻, 598号, p.1017-1022(2016)
- [3] 桑原利彦ほか:塑性と加工, 第40巻, 457号, p.145-149(1999)
- [4] 小西啓史, 瀧澤英男:第69回塑性加工連合講演会論文集, p.237-238(2018)
- [5] 後藤學:塑性と加工, 第19巻, 208号, p.377-385(1978)
- [6] F. Barlat, J. Lian: International Journal of Plasticity, 5, p.51-66(1989)
- [7] F. Barlat, et al.: International Journal of Plasticity, 19, p.1297-1319(2003)
- [8] R. Hill: Proc. Roy. Soc. A193, p.281-297(1948)
- [9] F. Yoshida, et al.: International Journal of Plasticity, 45, p.119-139(2013)
- [10] F. Yoshida, et al.: International Journal of Plasticity, 75, p.170-188(2015)
- [11] F. Yoshida, et al.: International Journal of Plasticity, 18, p.633-659(2002)
- [12] F. Yoshida, T.Uemori: International Journal of Plasticity, 18, p.661-686(2002)
- [13] F. Yoshida, T.Uemori: International Journal of Mechanical Sciences, 45, p.1687-1702(2003)
- [14] 加藤直幸ほか:自動車技術, 75, p.80-86(2021)
- [15] 加藤直幸ほか:素形材, 64, p.23-28(2023)

■著者



加藤 直幸
Naoyuki Katou
ヤマハモーター
エンジニアリング(株)
生産技術部