

# Application News

## No. i268

### 材料試験機

# バウシンガー効果を考慮した 高張力鋼板のプレス成形シミュレーション における面精度一致率の向上

## はじめに

輸送機の燃費改善のために車体の軽量化が求められています。高張力鋼板は薄い材料で車体を設計できるため、軽量化の一手段として注目されています。しかし、高張力鋼板はプレス成形後の形状不良が起きやすく、プレス金型の製作時に、多大な時間とコストを要するという課題がありました。近年、CAE (Computer Aided Engineering) 解析技術の進歩やPCの計算速度の改善により、形状不良の原因の一つとなっているスプリングバック現象の予測精度が向上しています。プレス成形用の金型製作においても CAE 解析は活用されており、開発時間の短縮と大幅なコスト低減を実現する手段として注目されています。

CAE 解析に用いるプレス成形シミュレーション解析ソフトウェアには、あらかじめ汎用的な金属材料の特性値が登録されており (デフォルト値)、これらの値を使用した簡易解析が可能です。しかし、デフォルト値のみを使用したシミュレーションにおいては、プレス成形品の理想形状との間に大きな差が生じてしまうため、そのまま適用することができません。従って、シミュレーションを高精度に行うためには、材料試験機を用いて各種特性値を取得し、これらの値をシミュレーションに適用することが必要です。

本稿では、島津精密万能試験機オートグラフ™を用いた一方向引張試験および面内反転負荷試験から得られた材料特性データをシミュレーションに適用しています。実測で得られたデータを用いることにより、複雑形状を有する自動車部品のプレス成形シミュレーションの高精度化に成功し、プレス成形実物品との面精度一致率が劇的に改善した事例をご紹介します。

T.Murakami, T.Awazu, Z.Miyazaki

## プレス成形性に影響する主な材料特性値

鋼板のプレス成形性を表す材料特性としては、一方向引張試験で評価されている弾性率、ランクフォード値 ( $r$  値)、加工硬化指数 ( $n$  値) だけでなく、弾性率の塑性ひずみ依存性および面内反転負荷試験を実施することで評価可能なバウシンガー効果などを挙げることができます。加えて、十字形状の試験片を用いた 2 軸引張試験によって取得できる降伏曲面も鋼板のプレス成形性を把握する上で重要であるとされています。

$r$  値は鋼板に引張負荷を与えた際、鋼板の幅方向の対数ひずみを板厚方向の対数ひずみで除して求めます。しかし、板厚方向のひずみを求める事は計測精度上困難であるため、試験片の体積を一定として、引張ひずみと幅ひずみの対数ひずみに置き換えて算出する方法が一般的です。 $r$  値は、絞り加工性の良し悪しを判別する指標であり、 $r$  値が大きいほど絞り加工性が良いとされています。ISO 10113、JIS Z2254 の平均塑性ひずみ比の規定に記載される通り、 $r$  値は高張力鋼板の圧延方向に対して、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  の 3 方向に沿って切り出した試験片を用いて評価することが一般的です (図1)。これらの値については、汎用的な材料試験機、伸び計および幅計を用いれば取得可能な物性値であり、試験システムとして世の中に広く普及しています。

一方、 $n$  値は、張り出し加工の良し悪しを判別する指標であり、 $n$  値が大きいほど張り出し加工性が良いとされています。

また、スプリングバック現象に寄与する鋼板のバウシンガー効果も、成形不良の一因であることから、高精度なプレス成形シミュレーションを行うためには、バウシンガー効果を考慮したシミュレーションモデルを構築することが必要です。バウシンガー効果とは、予変形によって塑性変形が生じた金属材料に逆方向の応力を負荷すると、圧縮降伏応力の絶対値が引張降伏応力に比べて大きく低下する特性です (アプリケーションニュース i262A より引用)。これまで、バウシンガー効果の評価については、鋼板が圧縮負荷時に座屈しやすいため、一部の専用試験機を用いた特殊な試験システムを用いる以外には手段がありませんでした。

精密万能試験機オートグラフの専用治具として開発されたバウシンガー効果測定治具 (図2) を使用すれば、汎用的な材料試験機を用いて、容易に鋼板の面内反転負荷試験を実施することができます。さらに、試験によって得られた引張圧縮応力 - ひずみ線図を、プレス成形シミュレーション解析ソフトウェアの活用データ形式へ出力することも可能です。

本稿では、シミュレーションに適用した材料特性値として、一方向引張試験においては弾性率と  $r$  値を、面内反転負荷試験においては引張圧縮応力 - ひずみ線図を、それぞれ取得して解析に用いました。

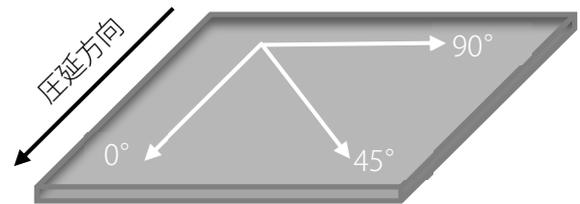


図1 鋼板圧延方向に対する試験片の切り出し方向

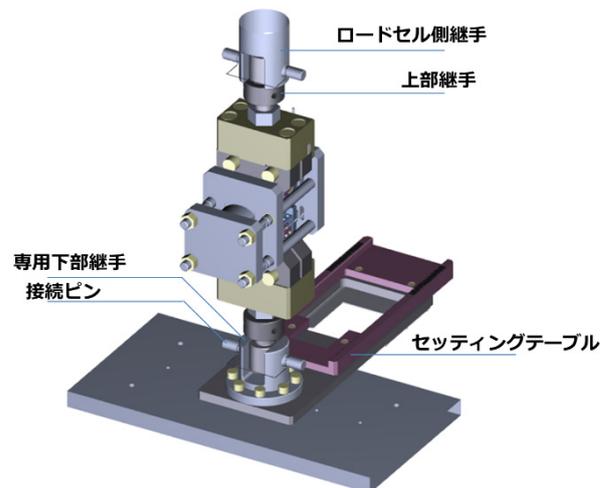


図2 バウシンガー効果測定治具

## ■ 一方向引張試験による材料物性値の取得

島津精密万能試験機オートグラフ、自動伸び計および幅計を用いた一方向引張試験により、高張力鋼板の引張弾性率、引張強度、 $r$  値等の引張物性データを取得しました。図3に一方向引張試験の試験風景を、表1に試験条件を示します。また、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ の3方向に沿って切り出した試験片それぞれで得られた $r$ 値の平均を算出し、シミュレーションに適用しました。

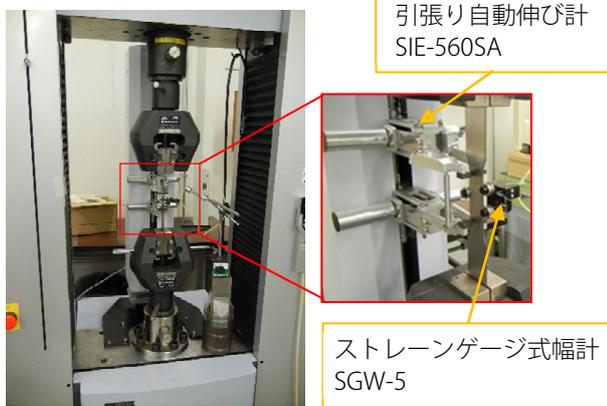


図3 一方向引張試験の試験風景

表1 一方向引張試験の試験条件

試験装置	: 島津精密万能試験機オートグラフ
伸び計	: SIE-560SA (GL=50)
幅計	: SGW-5
試験速度	: 0.005 /s
試験機制御方式	: ひずみ速度制御
ソフトウェア	: TRAPEZIUMX (シングル)
試験片形状	: JIS Z2241 5号試験片

## ■ 面内反転負荷試験データの取得

島津精密万能試験機オートグラフおよびバウシンガー効果測定治具を用いて、高張力鋼板の面内反転負荷試験を実施しました。図4に面内反転負荷試験の試験風景、表2に試験条件を示します。今回は、面内反転負荷ひずみを+3%および-3%に設定しました。

バウシンガー効果測定治具には、専用の接触式伸び計を取り付け可能な機構が設けられているため、試験片に生じたひずみを正確に測定することが可能です。また、バウシンガー効果測定治具には、ひずみゲージを用いたひずみ計測にも対応可能なオプションをご用意しています。

図5に面内反転負荷試験によって得られた引張圧縮応力 - ひずみ線図を示します。バウシンガー効果の影響を考慮したプレス成形シミュレーション解析を実施する際には、シミュレーションに必要なデータを試験機制御ソフトウェアの標準機能を用いてエクスポートし、シミュレーションソフトウェアに投入するだけで解析が可能です。

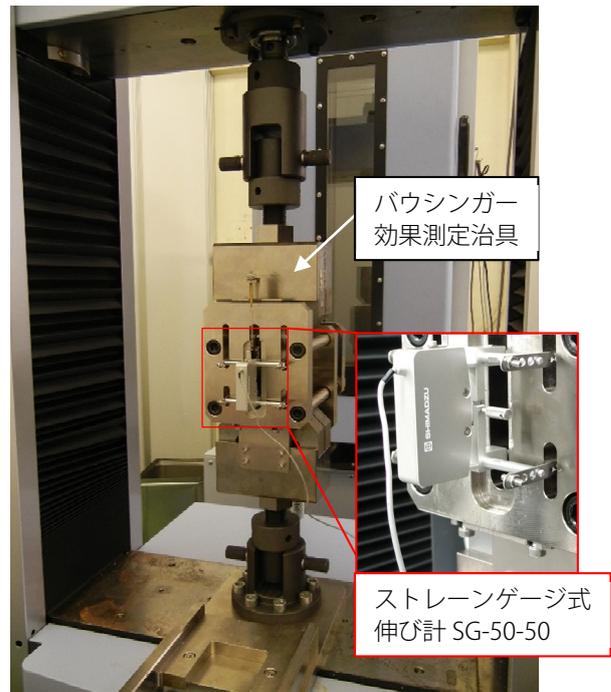


図4 面内反転負荷試験の様子

表2 面内反転負荷試験の試験条件

試験装置	: 島津精密万能試験機オートグラフ
治具	: バウシンガー効果測定治具
くし歯圧力	: 5 MPa
伸び計	: SG-50-50 (バウシンガー効果測定治具専用)
試験速度	: 1 mm/min
ソフトウェア	: TRAPEZIUMX (コントロール)
応力反転ひずみ	: 3% $\pm$ -3%

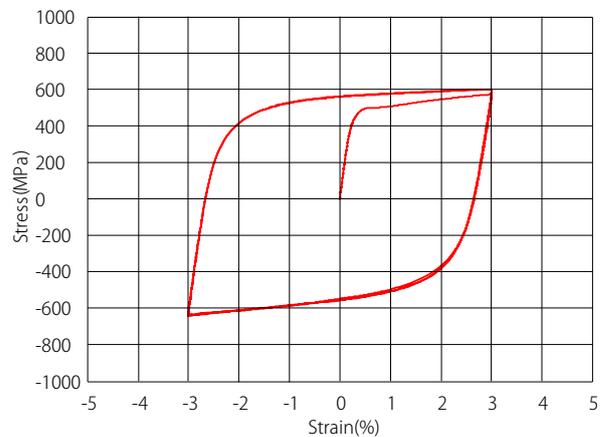


図5 面内反転負荷試験によって得られた応力 - ひずみ線図

## ■ プレス成形シミュレーション結果と プレス成形実物品の面精度一致率

図 6 にプレス成形シミュレーションとプレス成形実物品（実パネル）の面精度を比較するため、両者の一致率を評価した 18 箇所を示します。また、図 7 に実パネルとプレス方向の関係を示します。面精度一致率については、実パネルとシミュレーション結果の乖離量が±0.5 mm 以内に収まっている箇所の割合を以下の式から算出しました。

$$\text{面精度一致率 (\%)} = N_p / 18 \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$N_p$  : 実パネルとの誤差±0.5 mm 以内であった点数

プレス成形シミュレーションは、以下の 3 つの条件で解析を実施しました。

### 【解析条件 I】

プレス成形シミュレーションソフトウェアに標準登録されているデフォルト値を使用

### 【解析条件 II】

高張力鋼板の一方方向引張特性データを使用

### 【解析条件 III】

高張力鋼板の一方方向引張特性データおよび面内反転負荷試験で取得したデータを使用

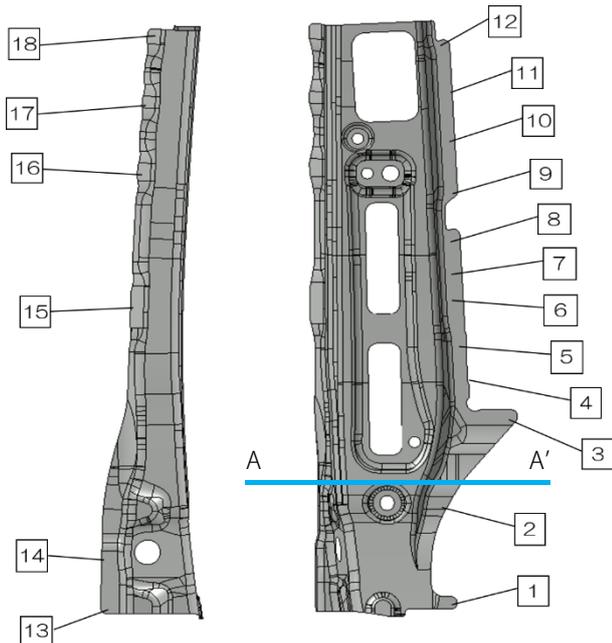


図 6 面精度測定ポイント

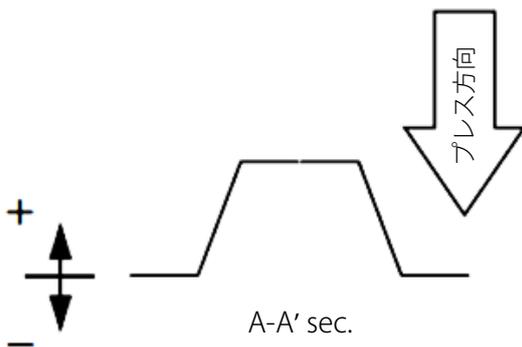


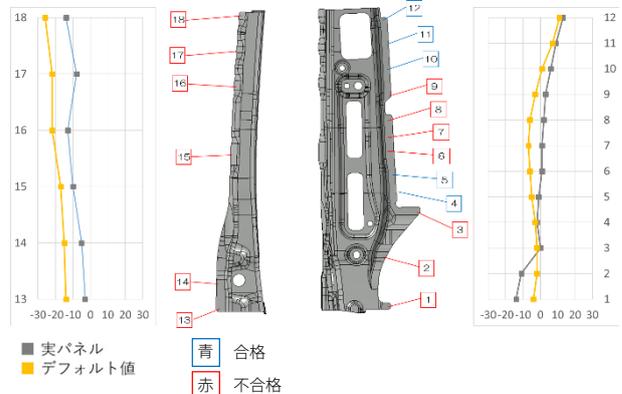
図 7 A-A'断面とプレス方向

## ■ デフォルト値を用いたシミュレーション

図 8 および図 9 に解析条件 I におけるシミュレーション結果を示します。図 8 は実パネルとシミュレーション結果の各計測点における理想形状との乖離量を示しています。両者を比較した場合の乖離量が±0.5 mm 以内である場合は、計測箇所を表す数字を青枠で、乖離量が±0.5 mm よりも大きい場合は、計測箇所を表す数字を赤枠で表記しています（次項図 10、図 12 においても同様に表記）。実パネルとシミュレーションの乖離量はしわ押さえ加工を施す部品端に位置する計測点 1、2、13 および 14 で大きくなる傾向があり、最大で 1 mm の乖離が見られる結果となりました。

図 9 は、実際に製作した実パネルとシミュレーション結果において、理想形状との乖離量を視覚的に表したコンター図です。実パネルは理想形状と実際の部品形状の一致性を、シミュレーション結果は理想形状とシミュレーション結果との一致性を色により表現しています。暖色に近づくほど理想形状に対して正の方向へ誤差が大きく、寒色に近づくほど負の方向へ誤差が大きいことを示しています。

実パネルとシミュレーション結果の乖離量は視覚的にも一致しない箇所が散見され、両者の面精度一致率は 28% でした。



\* 上グラフ水平軸に示した寸法精度は実測値に対して 10 倍した数値で表記

図 8 解析条件 I (デフォルト値使用) における面精度のばらつき

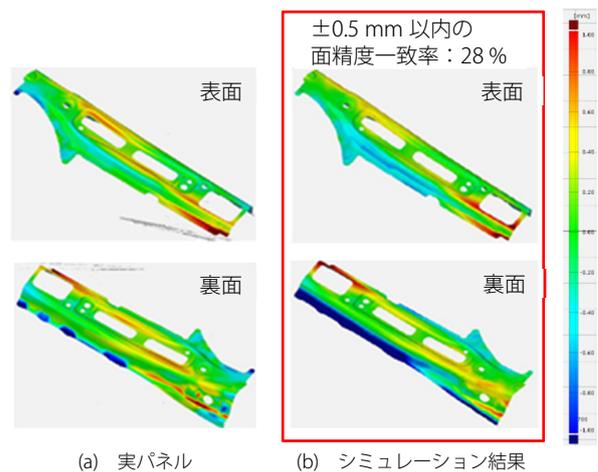


図 9 解析条件 I (デフォルト値使用) における面精度コンター図

## ■ 一方向引張試験特性データを用いたシミュレーション

図 10 および図 11 に解析条件 II におけるシミュレーション結果を示します。実パネルとシミュレーション結果の乖離量は計測点 1、2 においてはデフォルト値同様の乖離量となっていますが、面精度一致率は 50% に改善しました。図 11 におけるコンター図においては、デフォルト値と比べて改善した点は認められませんでした。

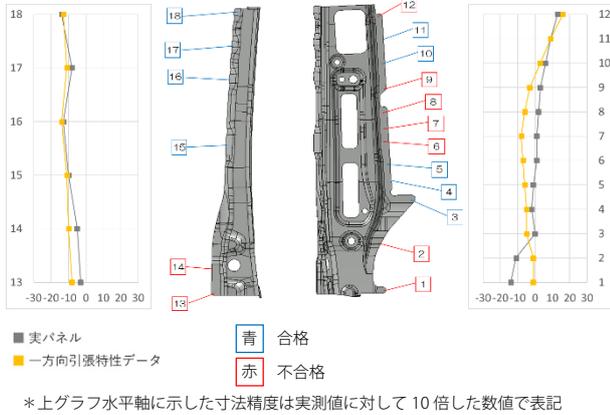


図 10 解析条件 II (一方向引張特性データ使用) における面精度のばらつき

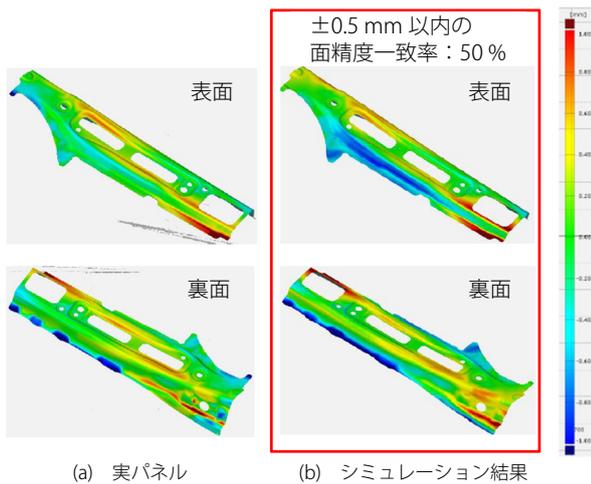


図 11 解析条件 II (一方向引張特性データ使用) における面精度コンター図

## ■ 一方向引張試験特性データおよびバウシ ンガー効果を考慮したシミュレーション

図 12 および図 13 に解析条件 III におけるシミュレーション結果を示します。実パネルとシミュレーション結果の乖離量は計測点 1、2 においては増加しましたが、13 および 14 では減少し、これに加えて乖離量が ±0.5 mm 以内におさまっている計測点が増加しており、面精度一致率は 61% に向上しました。図 13 におけるコンター図においては、デフォルト値や一方向引張特性データを用いたシミュレーション結果と比較したところ、表面において特に大きな改善が認められました。以上のことから、プレス成形シミュレーション解析を高精度化するには、一方向引張試験によって得られた材料特性データだけでなく、バウシinger 効果を考慮するために面内反転負荷試験によって得られたデータを適用することが重要であることがわかりました。

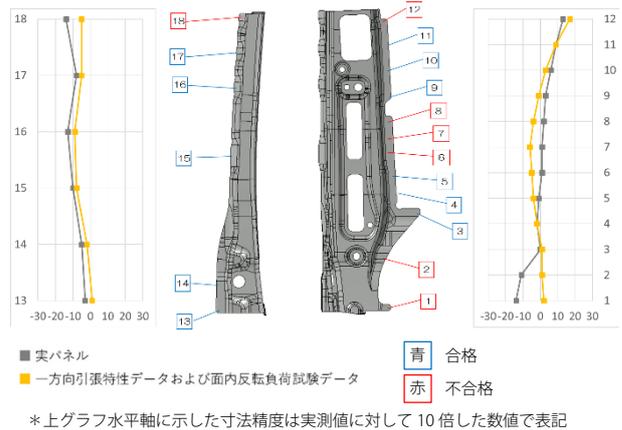


図 12 解析条件 III (一方向引張特性データおよび面内反転負荷試験データ使用) における面精度のばらつき

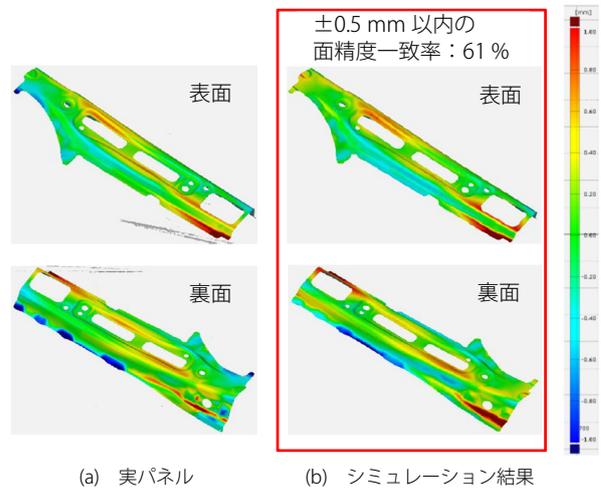


図 13 解析条件 III (一方向引張特性データおよび面内反転負荷試験データ使用) における面精度コンター図

## ■ まとめ

島津精密万能試験機オートグラフ、各種伸び幅計、バウシinger 効果測定治具を用いて取得した高張力鋼板の材料物性値を適用することにより、自動車用部品のプレス成形シミュレーションを高精度化できることが明らかになりました。

オートグラフおよび TRAPEZIUM は、株式会社 島津製作所の日本およびその他の国における商標です。

**株式会社 島津製作所** 分析計測事業部  
グローバルアプリケーション開発センター

初版発行：2019年5月

島津コールセンター ☎ 0120-131691  
(075) 813-1691

※本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。  
改訂版は下記の会員制 Web Solutions Navigator で閲覧できます。

<https://solutions.shimadzu.co.jp/solnavi/solnavi.htm>

会員情報サービス「Shim-Solutions Club」にご登録ください。

<https://solutions.shimadzu.co.jp/>

会員制 Web の閲覧だけでなく、いろいろな情報サービスが受けられます。