

自動車外板パネル性能向上のための予測評価技術

Advanced Technologies Related to Simulation and Evaluation for Performance of Automotive Exterior Panels

米 村 繁*
Shigeru YONEMURA
小 杉 聡 史
Satoshi KOSUGI

吉 田 亨
Tohru YOSHIDA
中 川 淳 一
Junichi NAKAGAWA

上 西 朗 弘
Akihiro UENISHI

樋 渡 俊 二
Shunji HIWATASHI

抄 録

自動車のドアやフード、フェンダーなどの外板パネルには、プレス成形で面ひずみの発生を避けるため降伏応力は低く抑える必要がある一方で、耐デント性の向上には高い降伏強度が要求され、このような相反する要求特性を同時に満足するために焼付け硬化型鋼板が実用化されている。デント抵抗はプレスによる加工硬化と塗装工程での時効による降伏強さによる。そこで焼付け硬化型鋼板の変形による降伏強さの異方性の変化を調査した。一方、面ひずみに関しては、ハンドルエンボスを模擬したモデル金型による成形実験と成形解析により、面ひずみにおよぼす材料特性や成形条件の影響を検討した。さらに、開発したGauss曲率を用いた面ひずみ定量評価手法と可視化システムについて紹介した。

Abstract

The bake-hardenable steel sheets are often used in exterior automotive body panels, such as doors, hoods, and fenders, because these applications require high strength for dent resistance as well as low yield strength for surface deflection. The dent resistance depends on the yield strength of materials after work hardening by forming and strain ageing by paint baking. In this study, the anisotropy of yield strength has been investigated in a uniaxially prestrained and baked bake-hardenable steel. On the other hand, surface deflection is investigated by press forming experiments and their numerical simulations of the exterior door panel model. Emphasis is placed on the effects of mechanical properties and press forming condition on surface deflection are discussed. Furthermore, a new system for evaluation and visualization of surface deflection using Gaussian curvature is presented.

1. 緒 言

自動車のドアやフード、フェンダーなどの外板パネルには優れた深絞り成形性や張り剛性、耐デント特性、面形状品質（面ひずみ）が要求される。これら必要特性のうち、耐デント特性の向上には高い降伏強度の鋼板が有利である一方、プレス成形で面ひずみの発生を避けるには低い降伏応力の鋼板が望まれる。このような相反する要求特性を同時に満足するために、常温での時効を極力抑えつつ、塗装焼付け工程での時効により硬化する焼付け硬化型鋼板が開発され、実用化されてきた。

外板パネルに要求されるこれら必要特性のうちデントとはパネルに局所的な力を負荷し、除荷した際にくぼみが残

留する現象であり、これを回避するには所定の耐デント性を満足しつつ板厚を最小にできるように、プレス成形性や鋼板の降伏強さだけでなく、プレスによる加工硬化や塗装工程における焼付け硬化（BH：Bake hardening）を考慮して材料を選定することが重要となる。BH量は、一般に、単軸引張り予ひずみを与えた引張試験片に対する、焼付け塗装相当の熱処理による同方向単軸引張り降伏応力の上昇量と定義されている。しかし、板材成形後のパネルから切り出した試験片で熱処理前後の降伏応力を比較しても、それだけのBH量は認められないことが知られている^{1,3)}。これはBHの異方性によるものと考えられるが、その特徴は明らかでない。そこで、BH性を示す鋼板に単軸引張り予ひずみを加え、その単軸引張り降伏応力の面内異方性が熱処

* 君津技術研究部 主任研究員 博士(工学) 千葉県君津市君津1番地 〒299-1141

理前後でどのように変化するかを調査し、その特徴と機構を検討した。

一方、面ひずみは成形中のなじみ挙動あるいは成形後の離型時に生じる座屈、スプリングバックなどによる面外変形によって基準面からずれる現象であり⁴⁾、面ひずみの発生を避けるには低い降伏応力の鋼板が有利である。そのため、面ひずみは高強度鋼板を適用するうえでの阻害因子の一つであり、面ひずみを軽減するような材料、成形技術の開発が望まれている。しかし、面ひずみは数十 μm のパネル面外変形であり、その定量化と力学的解釈が容易でないことから⁴⁾、面ひずみにおよぼす材料特性や成形条件の影響は十分に解明できていない。そこで、面ひずみを軽減するための成形技術指針を得ることを目的とし、ハンドルエンボスを模擬したモデル金型による成形実験と成形解析により、面ひずみにおよぼす材料特性や成形条件の影響を検討した。さらに、新日本製鐵で開発した3次元曲率評価に基づく面ひずみ定量評価手法を紹介するとともに、モデル金型のプレス実験により、その有効性を検討した。

2. 鋼板の変形および時効による塑性異方性の変化

調査に供した鋼板は、引張強さが340MPa級のBH鋼板であり、板厚は0.7mmである。ここでは、1次変形として圧延方向に2%、6%の引張を施した材料を対象に、2次変形として1次引張方向から15°おきに0°~90°までの引張試験を実施した(図1)。さらに、BHの異方性を調査するため、1次変形後170℃で20分間の熱処理を施したものについても15°おきの2次引張試験を実施した。その結果、塑性異方性は予ひずみの増加とともに強くなり、最小値は $\theta=90^\circ$ の方向に、最大値は $\theta=45^\circ$ 近傍の方向に現れること、BH量は $\theta=45^\circ$ で最小、 $\theta=0^\circ$ と 90° で最大となり、BHの異方性により加工硬化による強い塑性異方性が緩和されることが明らかになった(図2)。

一般に、完全に焼鈍された多結晶単相金属の初期異方性は結晶方位分布が主要因であるが、ある程度大きな予ひずみを導入した材料の塑性異方性は結晶方位の変化よりも変形とともに結晶粒内部に生成する転位下部組織の影響が主要因であることが知られている⁸⁾。そこで、予ひずみ材の集合組織を素材と比較し、さらに、各すべり系の臨界分解せん断応力が等しいという仮定の下、Taylor理論を用いて

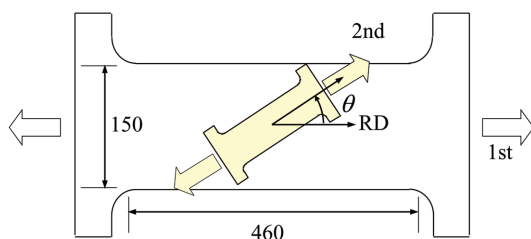


図1 実験方法
Experimental procedure

降伏応力の面内異方性を計算することで、予変形による集合組織変化が降伏応力におよぼす影響を見積もった。図3に素材と予ひずみ材の結晶方位分布関数を示す。素材の集合組織は板面と垂直な $\langle 111 \rangle$ 軸周りのほぼ面内等方的な結晶方位分布を有しているが、圧延方向への単軸引張り予変形により $(111)[0\bar{1}1]$ 方位の集積がやや顕著になる。

さらに、この結晶方位分布関数を基に、full constraints Taylorモデルを用いて降伏応力の面内異方性を計算した^{9,10)}。図4に素材と6%の単軸引張り予ひずみ材の結晶方位分布関数を用いて計算した降伏応力の面内異方性を示

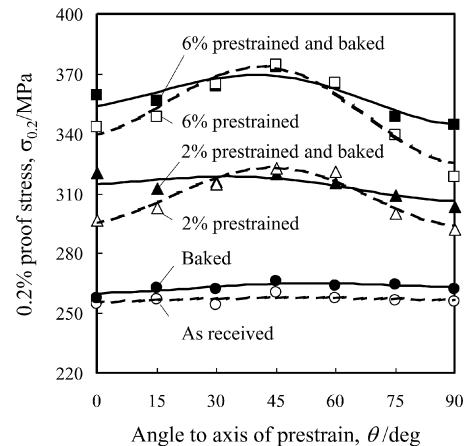


図2 0.2%耐力の異方性
Anisotropy of 0.2% proof stress

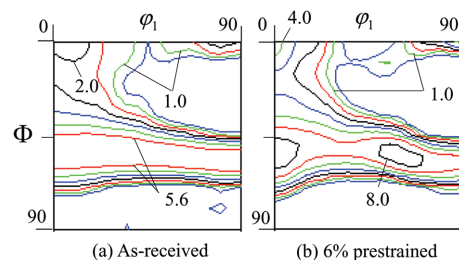


図3 結晶方位分布関数 ($\varphi_2=45^\circ$ 断面)
Orientation distribution function ($\varphi_2=45^\circ$ section)

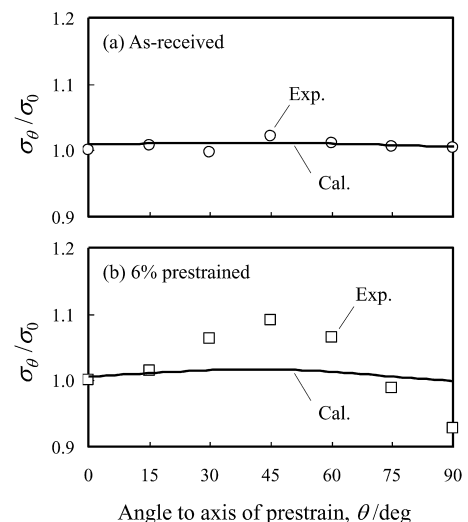


図4 実測値と集合組織から計算した異方性の比較
Comparison of anisotropy between measurement and those calculated from the experimental texture

すが、単軸引張り予ひずみ材の集合組織を用いても、降伏応力の面内異方性を再現できず、観測された加工誘起異方性は結晶回転だけでは説明できないことがわかる。これらの知見と170℃で20分間の熱処理では集合組織は変化しないことから、加工誘起異方性とBHの異方性は1次変形で導入された転位組織、熱処理によるそれらの固着と2次変形で活動するすべり系の相互作用が主要因と考えられる。

観測された異方性の機構について以下に考察する。Schmittら¹¹⁾は、ひずみモードが2段階に変化する場合の2次変形の降伏応力を特徴付けるために次式で定義されるパラメータを導入した。

$$\cos \alpha = \mathbf{A}^1 : \mathbf{A}^2 = A_{ij}^1 A_{ij}^2$$

ここで $\mathbf{A}^1$ と $\mathbf{A}^2$ はそれぞれ1次変形と2次変形の塑性ひずみ速度モードテンソルである。2次変形の降伏応力は $\cos \alpha = 1$ となる比例負荷経路に比べ $\cos \alpha = 0$ となる2次負荷で最も増加し、 $\cos \alpha = -1$ となる逆負荷で最も減少する。本供試材の場合、引張方向変化角 θ と $\cos \alpha$ の関係を計算し、さらに、図2の結果を $\cos \alpha$ で整理し直すと図5となる。これらから、本実験の2段階引張試験では $-1 \sim 1$ を取り得る $\cos \alpha$ の大部分が網羅され、起こり得る経路変化の大部分を観測していること、2次変形の降伏応力はSchmittら¹¹⁾の知見と良く一致することがわかる。さらに、BHの異方性も1次変形と2次変形のひずみ経路変化モードを特徴付けるパラメータ $\cos \alpha$ で統一的に整理できることが新たに明らかになった。すなわち、 $\cos \alpha$ が0に近いひずみ経路変化の場合にはBHは小さく、 $|\cos \alpha|$ が1に近い場合にはBHが大きく、これらの結果として予変形により生じた降伏応力の面内異方性は等方化する。

Teodosiuら¹²⁾は、結晶塑性論に基づく考察から、予ひずみ材の異方性を特徴付けるパラメータは1次変形と2次変形のすべりの重複度と解釈している。すなわち、 $\mathbf{A}^1$ は1次変形でのすべりによって生じた転位組織、内部応力(転位

堆積や結晶粒、硬質第2相、転位セル壁など各種スケールにおける不均一構造の変形に起因し生じる長範囲の弾性応力場)に対応し、 $\mathbf{A}^2$ は2次変形でのすべりと材料内部状態との相互作用に対応する。したがって、 $\cos \alpha$ を用いることで、2段階引張試験による2次変形の降伏応力と微視的構造の変化を見積もることができる。そこで、すべりの重複度が2次変形でのすべりと材料内部状態との相互作用に対応するという観点から、交差効果、Bauschinger効果、BHの異方性の機構について以下のように考えることができる¹³⁾。

$\cos \alpha$ の絶対値($|\cos \alpha|$)が1に近いひずみ経路変化(現活動すべり系と旧活動すべり系の共通成分が大きい場合)は、内部応力が顕著に作用する。この内部応力は、ひずみ経路変化前後ですべりの向きが変化しない場合は現可動転位の抵抗になり、すべりの向きが反転する場合は現可動転位の動きを補助する。後者の成分が多いひずみ経路変化($\cos \alpha = -1$ 近傍)でBauschinger効果が発現する。また、1次変形後に焼付け処理を施すと、このようなひずみ経路変化では、旧可動転位が焼付け処理により現活動すべり系上に固着され、強い障害となるためBHが大きいと考えられる。一方、 $\cos \alpha$ が0に近いと、旧すべり系の活動により生じた転位は熱処理によるCなどの固着を受けなくとも現活動すべり系に対して強い障害となり降伏応力を増加させる。このような成分が多いひずみ経路変化で交差効果が現れる。しかし、このような交差効果に寄与する転位はCなどにより固着されてもその効果に変化がなく、この場合のBHは小さいと考えられる。

本実験で得られた知見に基づけば、以下のようにBH効果を整理できる。すなわち、2軸張出し成形により得られた自動車外板パネルに対するデント抵抗は比例負荷($\cos \alpha = 1$)に近いひずみ経路を経ており、高いBH効果により良好な耐デント性を確保することができる(図6)。

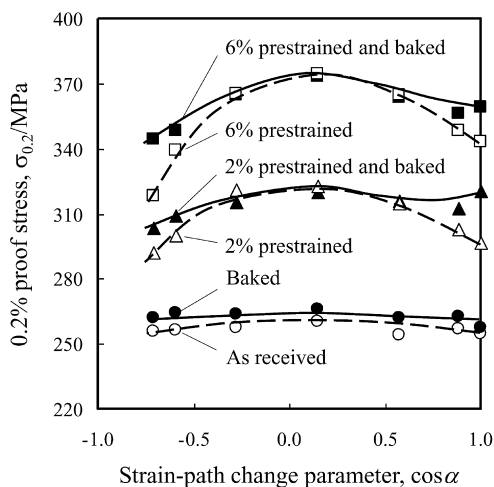


図5 $\cos \alpha$ で整理した0.2%耐力の異方性
Effect of strain-path change parameter on 0.2% proof stress in a prestrained and baked bake-hardenable steel

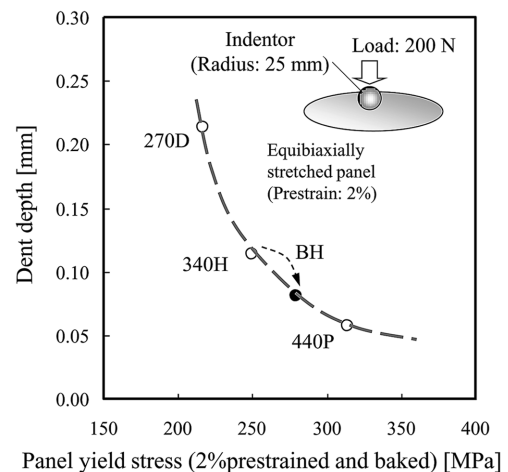


図6 予ひずみ材の降伏応力とデント特性の関係
Relationship between yield stress in a prestrained and baked various steels vs. dent resistance

3. 面ひずみにおよぼす材料、成形条件の影響と面ひずみ定量評価方法の開発

3.1 ハンドルエンボス部の面ひずみにおよぼす材料因子、成形条件の影響

調査に供した鋼板は、引張強さが340MPa級のBH鋼板であり、板厚は0.7mmである。プレス実験は、曲率半径が1200mmの円筒面形状をしたポンチ底のドアモデル型を用いて、600mm×600mmの正方形ブランクをポンチ底面の曲率0の方向と圧延方向が一致するように配置し、高さ25mmまで成形した(図7)。このブランクをしわ押さえ力800kNで成形し、離型後にパネルの面外変位を3次元接触式形状測定機により測定した。さらに、この成形面の断面プロファイルから評価スパン30mmでの2次微係数分布を計算し、面ひずみの評価指標とした(図8)。

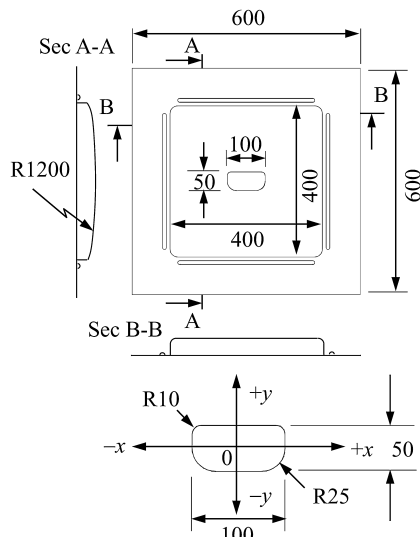


図7 ドアパネルのハンドルエンボス金型
Tools for the handle portion of the exterior door panel

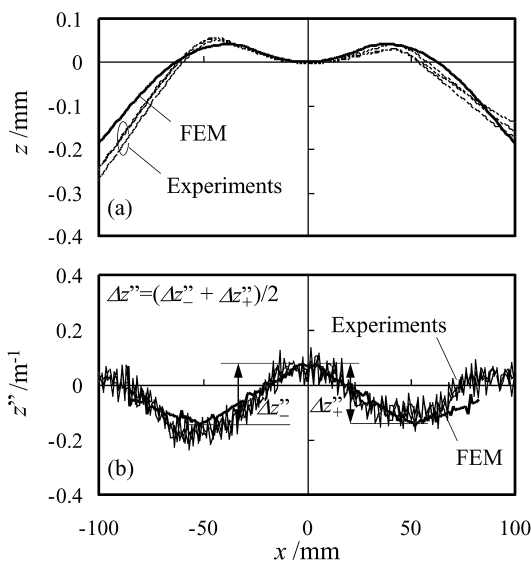


図8 実験と成形解析によるドアパネルの面ひずみ
Surface deflection of the exterior door panel model obtained by experiments and FEM calculations

成形解析には汎用の有限要素コードを用い、プレス下死点までの成形解析は動的陽解法で、離型時のスプリングバック解析は静的陰解法を用いた。解析には、実験に供した鋼板のブランクを1.0mmサイズへ要素分割し、材料モデルはHillの異方性降伏関数と以下のLemaitre-Chabocheによる複合硬化モデル¹⁴⁾を用いた。

$$f = \sigma_e(\sigma, \mathbf{X}) - R(\varepsilon^p)$$

$$R(\varepsilon^p) = R_0 + R_{sat}(1 - e^{-C_r \varepsilon^p})$$

$$d\mathbf{X} = C_x(X_{sat}\mathbf{N} - \mathbf{X})d\varepsilon^p$$

ここで、 $\sigma_e(\sigma, \mathbf{X})$ 、 ε^p 、 $\mathbf{X}$ 、 $R(\varepsilon^p)$ 、 $\mathbf{N}$ は、それぞれ、相当応力、相当塑性ひずみ、背応力、等方硬化応力、塑性ひずみ速度モードテンソルであり、 R_0 、 R_{sat} 、 C_r 、 X_{sat} 、 C_x は材料パラメータである(表1)。ここでは、①単一方向への単純せん断試験、②予ひずみ量を変化させた3水準の反転負荷試験¹⁵⁾により複合硬化モデルのパラメータを同定した(図9)。さらに、除荷時の応力-ひずみ非線形挙動に関しては、上森¹⁶⁾が提案した近似モデルを用いた。

$$E = E_0 - (E_0 - E_a)(1 - e^{-s\varepsilon^p})$$

図8に $y = +35$ 断面のプロファイルと実験と同じ方法で計算した2次微係数分布の実験と解析の比較を示すが、解析は実験を良好に再現していることがわかる。このように材料モデルや要素サイズの細分化など適切な解析手法を選択することにより面ひずみの予測が十分な精度で行えることが確認できたため、ここでは、成形実験とともに成形解析を利用して面ひずみにおよぼす材料特性や成形条件の影響を検討した。

面ひずみにおよぼす降伏応力の影響を検討するため、降伏応力を±20MPa変化させた仮想材料パラメータを用い

表1 FEMに用いた材料パラメータ
Material parameters used for FEM

R_0 (MPa)	R_{sat} (MPa)	X_{sat} (MPa)	C_r	C_x	E_0 (GPa)	E_a (GPa)	s
143	189	83	18	148	205	169	52

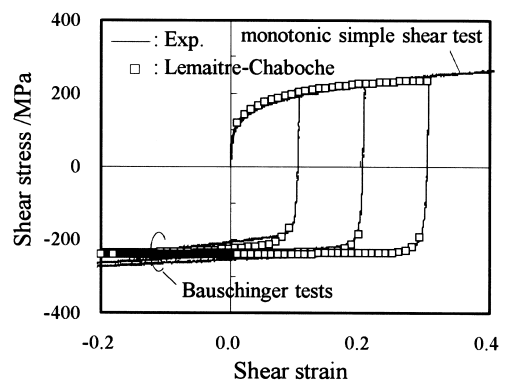


図9 単純せん断試験と計算によるせん断応力-せん断ひずみ曲線

Measured and calculated shear stress-strain curves
Monotonic and reversed simple shear tests after 10, 20 and 30% forward shear (Bauschinger tests)

た成形解析を行い、 $y=\pm 35$ 断面の2次微係数の最大・最小差 $\Delta z''$ を評価した。さらに、圧延方向から 0° 、 45° 、 90° 方向にブランクを切出し、面ひずみにおよぼす r 値の面内異方性の影響をプレス実験により調査した。その結果、ハンドルエンボス部の面ひずみに強く影響をおよぼす材料特性値は降伏応力であるが、それ以外にも塑性異方性の重要性が認められた(図10, 11)。

図11(a)にポンチ底面の最大曲率方向(エンボス長手方向に垂直方向)と圧延方向の角度 θ と $y=35$ 断面での面ひずみ評価値 $\Delta z''$ の関係を示す。ブランクの切出し方向を変えると観測される面ひずみも大きく変化し、最小値は 45° の方向で、最大値は 90° の方向で現れた。そこで、エンボス長手方向に垂直な応力成分の不均一分布が面ひずみの大きさの特徴付けるであろうと考え、エンボス長手方向に垂直方向の r 値を用いて整理し直すと、これらには良い相

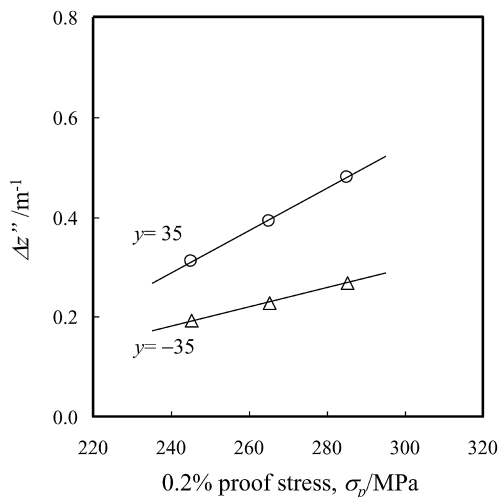


図10 降伏応力と面ひずみの関係
Relationship between yield stress vs. surface deflection

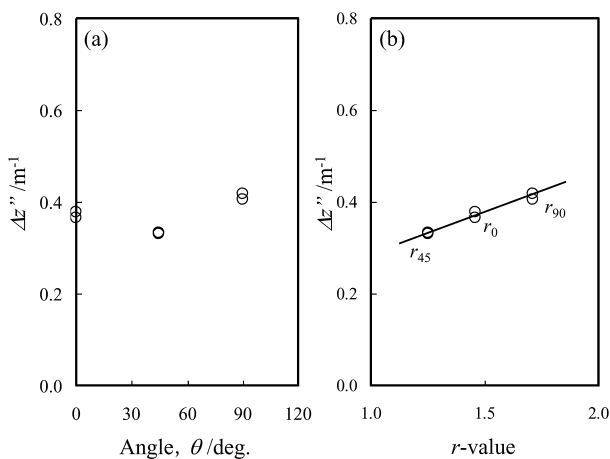


図11 (a)パンチ底面の最大曲率方向と圧延方向の角度と面ひずみの関係、(b)パンチ底面の最大曲率方向の r 値と面ひずみの関係
(a) Angle between punch maximum curvature direction and sheet rolling direction vs. surface deflection. (b) Relation between r -value in the punch maximum curvature direction vs. surface deflection

関が認められた(図11(b))。これは、同じ降伏応力を示す鋼板でも r 値を高めると引張変形抵抗に対する平面ひずみ変形抵抗の比が大きくなるため弾性回復時に生じるスプリングバックが増し、面外変形が増加したためと考えることができる¹⁷⁾。

さらに、面ひずみにおよぼす成形条件の影響を検討するため、しわ押さえ力(BHF)一定でエンボス深さのみを変化させた水準とBHFのみを変化させた水準を解析に供した(図12)。その結果、エンボス深さやBHFと面ひずみ評価値 $\Delta z''$ には良い相関があり、エンボス深さやBHFが増すと面ひずみは軽減する傾向を示した。これは、エンボス深さが増すと形状剛性が増加しスプリングバックが抑制されることやポンチ面でのなじみが改善されることに加え、作用する負荷張力が大きいほど成形下死点での面内応力分布が均一になり、弾性回復時における板面方向の収縮ひずみの差が軽減されるためと考えられる。

ハンドルエンボスを有するドアパネルは、成形開始後しばらくはポンチ面だけで成形されるが、成形後期にダイス側に固定されたエンボスポンチによりダイス成形される。このとき、エンボス周囲の直辺部には平面ひずみ引張変形で大きな塑性ひずみ導入されるのに対し、エンボス角隅部近傍の塑性ひずみの変化は小さい。この応力状態から除荷した場合、弾性回復ひずみに差が生じ、面外変形が生じる。したがって、面ひずみを軽減するにはプレス下死点時にハンドルエンボス周囲の応力の面内不均一分布を平準化する対策が有効である。そのためには、ハンドルエンボス角隅部の半径を大きくする、エンボスを深くする、BHFを高めるなどの手段が有効であるが、過大な張力は破断発生の危険性も高めるため、次節で紹介するような面ひずみ定量評価方法とCAEを駆使し、面形状不良や破断などの不良現象を包括的に検討し、成形技術指針や材料選択に反映することが重要である。

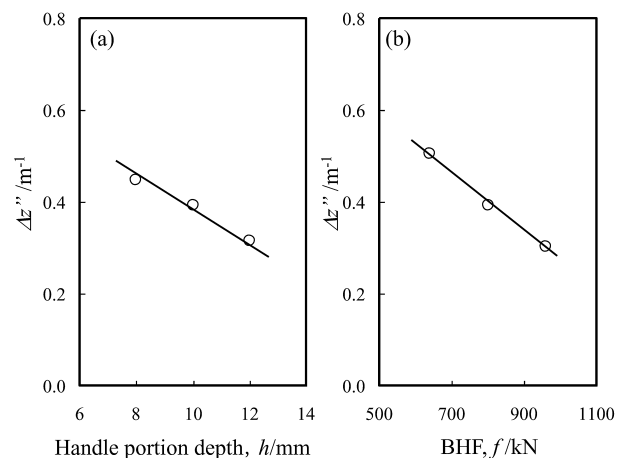


図12 (a)エンボス深さと面ひずみの関係、(b)しわ押さえ力と面ひずみの関係
(a) Relation between handle portion depth and surface deflection. (b) Relation between blank holding force (BHF) and surface deflection

3.2 面ひずみ定量評価方法

面ひずみは外板パネルに発生する微小な面精度不良であり、プレス成形における様々な不具合の中でも対策が最も困難な現象の一つである。面ひずみの検査は油砥石による研磨により、砥石当たりの強弱で判断する場合もあるが、出荷検査においては熟練した検査員による目視、触感により判定される場合が多い。従来、現場で発生する面ひずみが定量評価されていなかったため、対策の効果が定量的に把握されていない場合も多く、また、現象が微小であることからCAE解析での検討も困難であった。現在、外板パネルに対しても軽量化ニーズが高まっており、パネルを高強度化・薄肉化する検討も進められているが、面ひずみは、降伏応力が高く、板厚が薄くなるほど発生しやすくなる。このように、外板パネルへ高強度鋼板の適用を検討するうえで面ひずみが生産技術上の重要課題となっており、その発生位置や発生量の定量評価技術が望まれている。

従来の面ひずみの実験的な評価手法としては、モアレ縞を活用した等高線表示、断面測定座標値の2次微分による数値化が行われていた。しかし、モアレ縞では面ひずみの位置がおおよそ判明するものの数値化が困難であるため活用は限定されていた。また、2次微係数による評価は3点ゲージによる曲率変化と同義であるが、ある方向の断面プロファイルから得られる指標であるため、測定点の最大曲率方向と対応しない場合がある。また面ひずみの広がりを示す位置情報が得られないため、見込みなど金型修正への反映が困難であった。

そこで、従来の測定方向に依存した曲率評価ではなく、場の関数を用いた曲面の汎用的な3次元曲率評価手法を開発した。評価値としては曲面の曲がり具合を示す以下のGauss曲率を用いた。

$$K = \frac{f_{uu}f_{vv} - f_{uv}^2}{(1 + f_u^2 + f_v^2)^2}$$

ここで、 f_u, f_v は場の3次元曲面関数を $f(u, v)$ としたときの変数 u, v による偏導関数である。また、 f_{uu}, f_{vv}, f_{uv} は各変数に対応した2次偏導関数である。 K が正になる点では凹または凸の曲面となり、 K が負になる点では鞍状の曲面となるため、微小なうねりを感じ度良く表現できる。また、 K はスカラー値であるため、等高線表示を行うことで面ひずみの広がりに対応した表示が可能である。本手法はデジタルタイザ等の3次元形状測定結果に適用可能であるが、測定点群は間隔にばらつきがあるため前処理が必要である。曲率は評価長さに依存するため、 K を評価する前に得られた点群を等間隔の格子点上にデータ補間を行わねばならない。

ここでは、ハンドルエンボスを模擬したモデル金型による成形試験を行い、本手法による面ひずみの定量評価を実施した。調査に供した鋼板は、270～590MPa級の鋼板で板厚は0.7～0.8mmである。得られたパネルから接触式のデジタルタイザにより3次元点群を取得し、開発したシステム

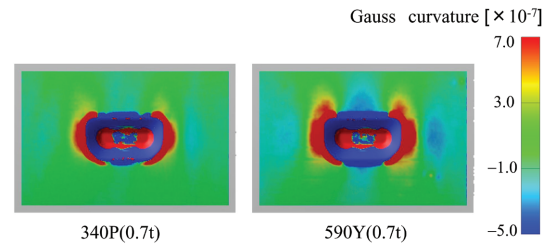


図13 エンボスモデル成形品の3次元曲率評価結果
Contour map of 3D curvature for emboss panels

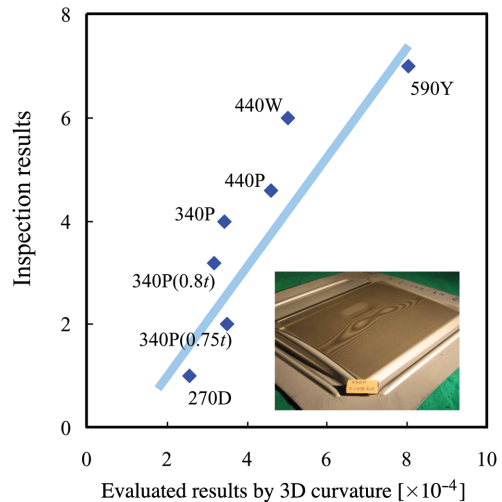


図14 3次元曲率による評価値と検査員による官能評価との対応

Relation between evaluated results by 3D curvature and inspection results

により数値処理することで3次元曲率分布を計算した。図13に引張強さにして340MPa級の鋼板と590MPa級の鋼板のGauss曲率等高線図を示す。この図から340MPa級の鋼板に比べ590MPa級の鋼板では、エンボス角隅近傍の上下方向に曲率変化の大きな領域があることが認められる。さらに、ここで得られた等高線の指定領域内のGauss曲率（絶対値）の総和をパネルの面ひずみ評価値とした場合、これらは検査員による官能評価と良い相関が見られ、パネルの合否レベルの判定にも活用できる可能性がある（図14）。また、開発した面ひずみ定量評価システムはCAE結果への適用も可能であるため、面ひずみの予測や事前対策の検討にも活用できる。

4. 結 言

自動車外板パネルには優れた深絞り成形性や張り剛性、耐デント特性、面ひずみが要求される。これら必要特性のうちデント抵抗は鋼板の変形応力と板厚に依存するため、外板パネル用高強度鋼板を適用することで板厚を減らすことができる。ただし、デント抵抗はプレス部品の変形量だけでなく変形様式によっても大きく変化するため、外板パネルの高強度化や軽量化のための設計を効率的に進めるためには、プレスによる加工硬化や塗装工程における焼付け

硬化のような材料の硬化挙動を正確に把握することが重要である。一方、面ひずみは外板パネルへ高強度鋼板を適用するうえでの阻害因子の一つであるが、本報で紹介した面ひずみ定量評価方法と成形技術指針に基づきCAEを駆使することで、面ひずみを軽減する部品形状、金型・工程設計、成形条件の最適化が可能である。

今後、自動車外板パネルの高強度化、軽量化のニーズに応じるためには、さらに優れた材料の開発と、その材料を適用するための利用加工技術の開発が重要である。

参考文献

- 1) Bailey, F.D. et al.: Proc. Symp. High Strength Sheet Steels for the Automotive Industry. 1994, p. 119
- 2) Okamoto, A. et al.: The Sumitomo Search. September, 1989, p. 183
- 3) Takechi, H.: Hot-and Cold-Rolled Sheet Steels. TMS-AIME, Warrendale, PA, 1988, p. 117
- 4) 石垣秀生: 塑性と加工. 24 (275), 1199 (1983)
- 5) 由田征史 ほか: 塑性と加工. 24 (275), 1260 (1983)
- 6) 白田松男 ほか: 塑性と加工. 24 (275), 1274 (1983)
- 7) 氏原 新: 塑性と加工. 24 (275), 1220 (1983)
- 8) Rauch, E.F. et al.: Mater. Sci. Eng. 113, 441 (1989)
- 9) Houtte, P.Van: Textures and Microstructures. 7, 29 (1987)
- 10) Raphanel, J.L. et al.: Int. J. Plasticity. 2, 371 (1986)
- 11) Schmitt, J.H. et al.: Mat. Sci. and Eng. 75, 13 (1985)
- 12) Teodosiu, C. et al.: Proc. NUMIFORM'95. 1995, p. 173
- 13) 米村 繁 ほか: 鉄と鋼. 92 (8), 516 (2006)
- 14) Chaboche, J.L.: Int. J. Plasticity. 7, 661 (1991)
- 15) 鈴木規之 ほか: 塑性と加工. 46 (534), 636 (2005)
- 16) 上森 武 ほか: 塑性と加工. 43 (494), 224 (2002)
- 17) 米村 繁 ほか: 塑性と加工. 52 (606), 811 (2011)



米村 繁 Shigeru YONEMURA
君津技術研究部 主任研究員
博士 (工学)
千葉県君津市君津1番地 〒299-1141



吉田 亨 Tohru YOSHIDA
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター
主幹研究員 博士 (情報科学)



上西朗弘 Akihiro UENISHI
鉄鋼研究所 薄板材料研究部 主幹研究員
博士



樋渡俊二 Shunji HIWATASHI
名古屋技術研究部長 主幹研究員
Ph.D.



小杉聡史 Satoshi KOSUGI
先端技術研究所 数理科学研究部
主任研究員 博士 (理学)



中川淳一 Junichi NAKAGAWA
先端技術研究所 数理科学研究部
主幹研究員