

## 板成形性評価技術の高度化

### —材料異方性と繰り返し負荷時の応力-ひずみ挙動を考慮した成形シミュレーションの高精度化—

板材のプレス成形において、割れやしわの発生やスプリングバック量などを高精度に予測することがコンピュータシミュレーションに対して求められており、金型開発期間の低減に活用されている。

薄板材の面内異方性は主に割れやしわの発生に影響する。現在でも有限要素法の数値解析による高精度な割れ予測は難しい課題である。さらに薄鋼板は熱間圧延、冷間圧延を経て製造されるため圧延方向、圧延直角方向、圧延45度方向に機械的性質が異なる。とくに降伏条件に大きな影響を及ぼす $r$ 値の面内異方性は高い値を有する鋼板ほど一般的に大きくなる。そこで異方性の特性を精度よく数値解析に取り込むために2軸引張試験機<sup>\*1)</sup>により降伏曲面を測定し、異方性降伏関数YLD2000<sup>\*2)</sup>のパラメータを同定した。求めたYLD2000を用いて有限要素法による数値解析(FEM)を行い、実際の成形結果との比較を行った。YLD2000はアルミニウムの降伏曲面を再現するために開発され、近年鉄鋼材料への適用が広がっている。

ハイテンやアルミニウムなどはスプリングバック量が大きく、自動車用鋼板に用いられる超ハイテンはとくに顕著であり、設計形状を出すことが難しいことが知られている。このスプリングバックを有限要素法による数値解析で予測するためにしばしば用いられるが、繰り返し負荷における材料挙動を高精度に再現できる材料構成則吉田-上森モデル<sup>\*3)</sup>である。そこでサイクリック試験を行い、吉田-上森モデルを用いて繰り返し負荷時の材料挙動を再現した。またハット成形に対する数値解析を行い、実際の成形結果と比較を行った。



エンジニアリングメカニクス事業部  
CAE技術部  
構造加工技術室  
中島 伸吾



エンジニアリングメカニクス事業部  
構造技術部  
耐久試験技術室  
南 武俊

## B-1 異方性を考慮した数値解析技術

### 1-1 2軸引張試験装置による降伏曲面の測定

対象材はSPCE材として、十字試験片(第1図:スリット入り、全幅260mm、計測部60mm)と2軸引張試験機を用いた降伏曲面の測定を行った。応力比は0:1、1:4、1:2、3:4、1:1、4:3、2:1、4:1、1:0の9水準とした。測定結果から異方性降伏関数YLD2000のパラメータを同定した。

得られた等塑性仕事面を第2図に示す。塑性ひずみ0.0005~0.02まで全応力比において測定され、0.04、0.06は一部の応力比のみ測定された。図中、印が測定された降伏点を表し凡例の数字は塑性ひずみ量を表している。塑性ひずみが増加するに従い、降伏曲

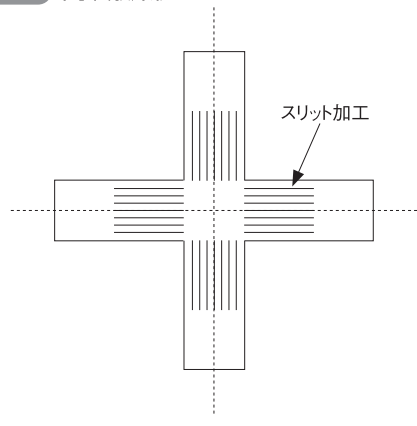
面が拡大していく様子が確認できる。等塑性仕事面を圧延方向の応力で無次元化した無次元化等塑性仕事面を第3図に示す。図中黒実線が等方性材料の降伏曲面であり、SPCEの測定結果は45度方向に膨らんでおり異方性が強いことが確認できる。異方性降伏関数Hill'48<sup>\*4)</sup>(図中青線)およびYLD2000(図中赤線)と測定結果の比較よりHill'48は測定結果よりも異方性が強く表れ、YLD2000は測定結果とほぼ一致した降伏曲面を描いていることがわかる。

Hill'48は $r$ 値のみによって降伏曲面を定める降伏関数であり、比較的容易に使用できることから頻繁に用いられる異方性降伏関数である。その一方で異方性の強い材料に対しては精度が低いことが知られている。

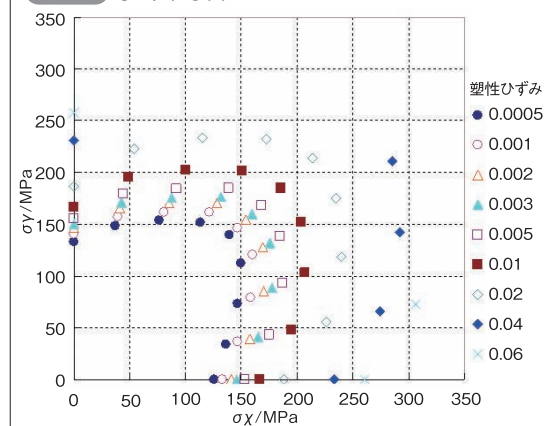
#### 参考文献

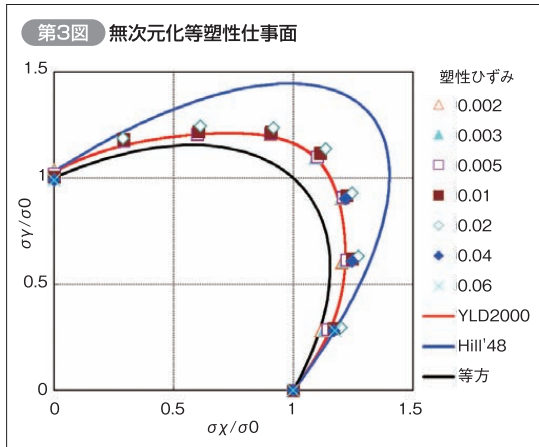
- \*1) 桑原利彦ほか: 塑性と加工, 40-457 (1999), p.145.
- \*2) F. Barlat et al.: Int. J. Plasticity, 19(2003), p.1297
- \*3) 吉田総仁ほか: 日本機械学会論文集A編, 68-667 (2002), p.639
- \*4) R. Hill: Proc. Roy. Soc. London, A193(1948), p.281

第1図 十字試験片形



第2図 等塑性仕事面





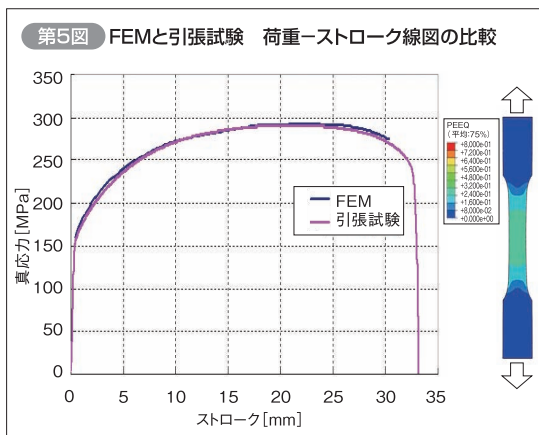
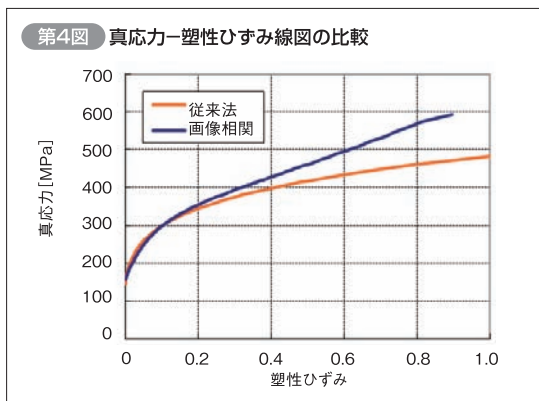
## 1-2 画像相関法による真応力-真ひずみの計測

通常、材料の変形抵抗を知るために単軸引張試験が行われ、標点間距離の変位量は伸び計を用いて計測する。しかしこの方法では最大荷重発生までのデータは使用できるものの、それ以降では試験片平行部に発生するくびれによる試験片断面積の変化や、局所伸びが生じることにより正確な真応力、真ひずみが求められなくなることが知られている。

そこで、引張試験時の試験片全体の变形画像を連続的に撮影し、ひずみ計測を画像相関法を用いて行い、試験片全体の变形とひずみの面分布解析を行った。

そこから得られた軸方向、幅方向のひずみ量から真応力-真ひずみデータを塑性ひずみ0.9まで算出した。

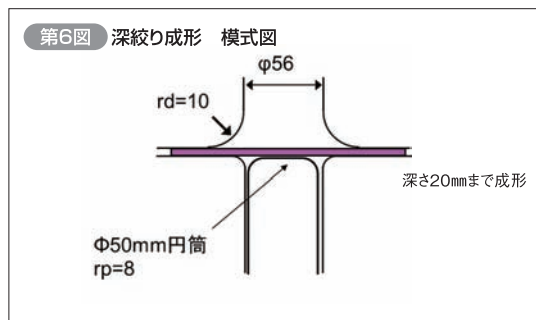
算出した真応力-真ひずみデータを従来法によるその比較を第4図示す。



画像相関法によって得られた真応力-真ひずみデータを用いて引張試験を再現した静的陰解法による有限要素法数値解析(FEM)を行った。得られた荷重-変位データを実際の引張試験で得られたそれと合わせて第5図に示す。第5図から両者はよく一致していることがわかる。このことから画像相関法によって得られた真応力-真ひずみデータが実際の材料挙動を高ひずみ領域まで表していることが確認された。

## 1-3 異方性降伏関数を用いた数値解析

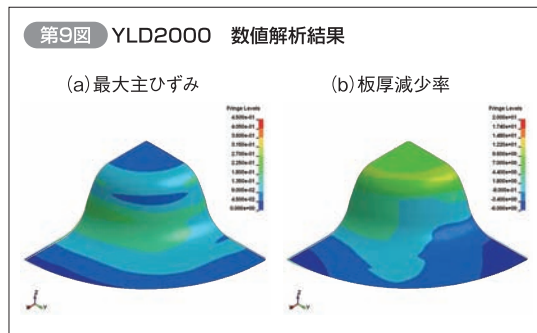
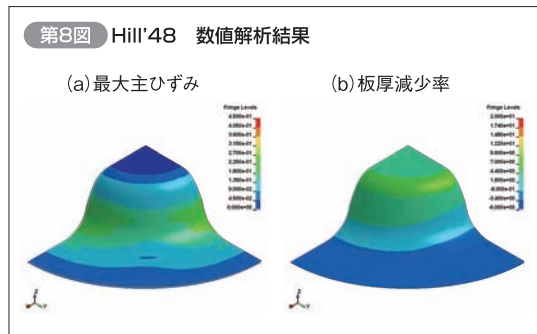
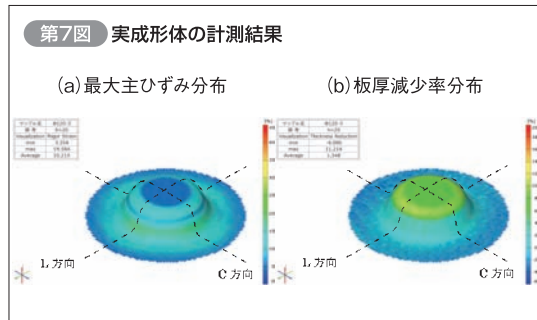
深絞り成形を対象にして異方性降伏関数を用いた数値解析を行うとともに、比較のために実成形を行った。深絞り成形の治具等を第6図に示す。汎用有限要素法数値解析ソフトLS-DYNA (LSTC社)を用い、動的陽解法を使用した。ブランク材はシェル要素、金型は剛体要素でモデル化を行った。異方性降伏関数としては前項で求めた降伏曲面Hill'48とYLD2000を用いた。実成形体に対して非接触式光学ひずみ計測装置ARGUS (GOM社)を用いてひずみ分布および板厚減少率の計測を行った。



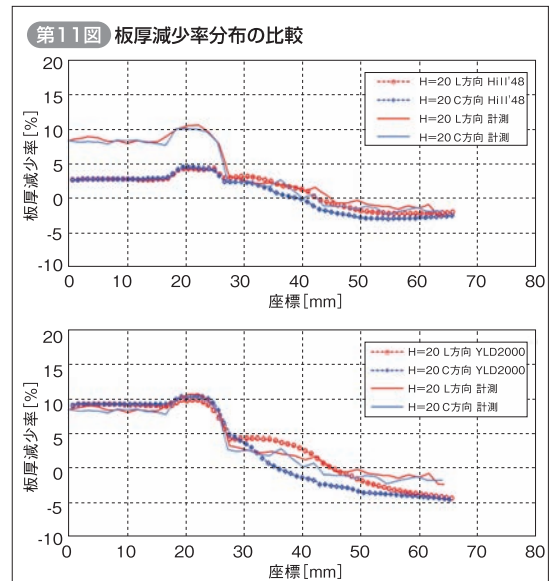
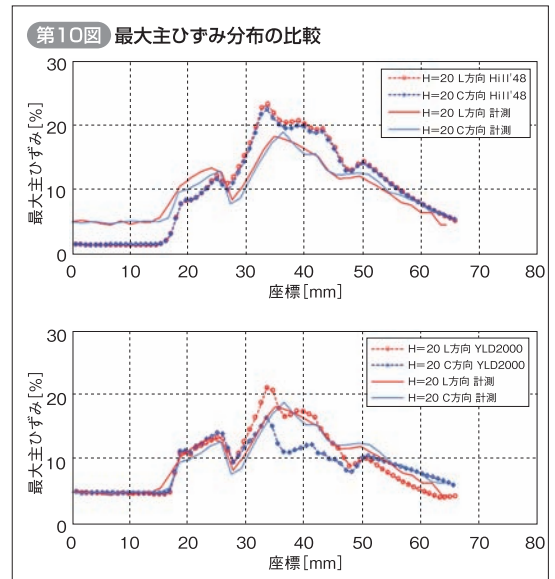
ARGUSによって計測された実成形体の最大主ひずみ分布と板厚減少率分布を第7図に示す。また数値解析によって得られた最大主ひずみ分布と板厚減少率分布を第8・9図に示す。第7図(a)、第8図(a)、第9図(a)は青から赤にかけてひずみ量が増えていることを表し、圧延方向(L)、圧延直角方向(C)にひずみが大きくなっている箇所が確認できる。第7図(b)、第8図(b)、第9図(b)は青から赤にかけて板厚が減少していることを表し、中心付近で板厚が減少していることが確認できる。L、C方向における最大主ひずみ分布と板厚減少率分布を数値解析と計測の比較を第10・11図に示す。第10図から計測では最大主ひずみ分布は座標25mm付近と35mm付近にピークを持つ分布となっている。座標25mm付近は底R部、座標35mm付近は流入肩R部である。Hill'48とYLD2000では後者のほうがより計測の分布の特徴を再現している。第11図から板厚減少率はHill'48では計測よりも小さく、とくに中心からの距離20mm付近までにおいて差が顕著である。割れは底R部近傍—中心からの距離20mm程度のところ—の最も板厚が薄くなっているところで生じるため、この領域で板厚減少率が小さく求まることは割れ予測精度に大きく影響する。Hill'48では割れを予測するこ

とが難しいことがわかる。一方、YLD2000では座標25mm付近でピークを持ち、計測における分布の特徴を再現できている。また計測との差が小さく、Hill'48よりも精度よく板厚減少率分布を再現できている。割れを精度よく予測できることがわかる。最大主ひずみ分布および板厚減少率分布においてHill'48よりもYLD2000の方が計測結果に近く、より精度よく板の変形挙動を再現できていると考えられる。

これらのことから、異方性のある板材を用いてプレ



ス成形時の割れ予測には材料の異方性を正確に表現できる異方性降伏関数を用いること、降伏曲面を測定し異方性降伏関数の精度を確認すること、高精度な真応力-真ひずみデータを用いることが重要であることがわかった。



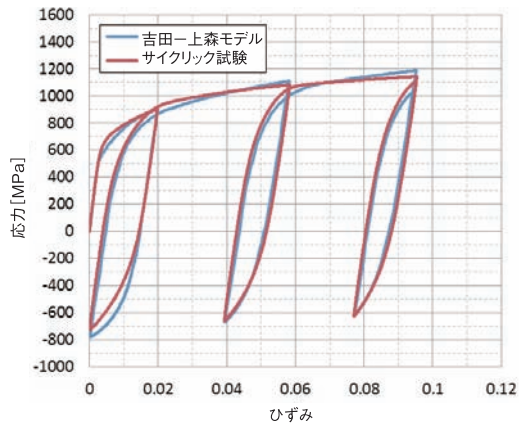
## B-2 スプリングバックに対する数値解析技術

### 2-1 サイクリック試験による構成則の同定

板成形におけるスプリングバックには繰り返し負荷時の応力-ひずみ挙動が強く影響しており、この挙動を表す材料構成則として吉田-上森モデルが一般によく知られている。吉田-上森モデルはいくつかの汎用数値解析ソフトにおいて採用されており、スプリングバックを予測するプレス成形シミュレーションにおいてしばしば使用される材料構成則である。低強度ハイテンでは吉田-上森モデルを使うことによってスプリングバックを精度よく予測できることが報告されているが、現在でも高強度ハイテンなどに対して予測精度は十分でない。

そこで、590、980、1180MPa級ハイテンに対して繰り返し負荷時における応力-ひずみ挙動を測定するために引張-圧縮を負荷するサイクリック試験を行った。これらのデータを用いて吉田-上森モデルのパラメータをパラメータ同定ソフトMatPara (CEM研究所)を用いて求めた。一例として980MPa級ハイテン材におけるサイクリック試験結果と吉田-上森モデルによる同定結果を第12図に合わせて示す。図中赤線がサイクリック試験の結果であり、青線が吉田-上森モデルである。両者はひずみ0.03以降よく一致しており、サイクリック試験から得られた応力-ひずみ挙動を吉田-上森モデルによって精度よく再現できていることがわかる。

第12図 980MPa級ハイテン材  
繰り返し負荷時の応力-ひずみ挙動の比較



## 2-2 ハイテンのスプリングバックFEM

スプリングバックの予測精度の検証としてハット成形を行った。汎用有限要素法数値解析ソフトLS-DYNAを用いてハット成形に対する数値解析を行った。加工工程は動的陽解法を用い、スプリングバックには静的陰解法を用いた。対象材料は590、980、1180MPa級ハイテン材であり、材料構成則には吉田-上森モデルを用い、ヤング率塑性ひずみ依存性については、予ひずみ量を変えた引張試験を行うことにより取得した。ブランク材はシェル要素、金型は剛体要素を用いてモデル化を行った。また同時に80tプレスを用いてハット成形を行い、スプリングバック後の形状計測を行った。写真1にハット成形体の外観写真を示す。

写真1 ハット成形体  
上から590、980、1180MPa級ハイテン材

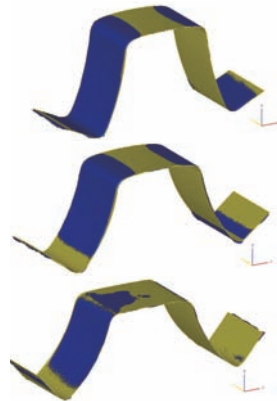


スプリングバック後の形状について数値解析結果と計測結果の比較を第13図に示す。図中青で描画され

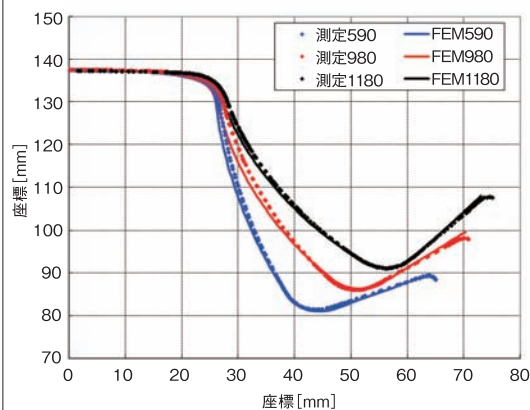
ているものが計測結果であり、黄が数値解析結果である。両者はほぼ重なった状態であり、形状がほぼ一致していることがわかる。より詳細に比較するためにスプリングバック後の幅方向中央断面における形状の比較を第14図に示す。図中点印が形状計測結果であり、実線が数値解析における板厚中心を表している。590、980、1180MPa級ハイテン材のいずれにおいても口開き量とフランジ端部高さが一致しており、実際のスプリングバック後の形状を精度よく再現できていることが確認できる。

このことから980、1180MPa級ハイテン材などの超ハイテンに対しても吉田-上森モデルで繰り返し負荷時の応力-ひずみ挙動を再現することができれば、ヤング率の塑性ひずみ依存性を考慮することによってスプリングバック量を精度よく予測できることがわかった。

第13図 スプリングバック後の形状比較  
上から590、980、1180MPa級ハイテン材



第14図 スプリングバック後の断面形状比較



板成形におけるシミュレーションの課題として、面内異方性の強い薄板材の割れやしわの発生とハイテンやアルミニウムなどのスプリングバック量の予測精度がある。これらの課題に対して、材料の降伏曲面を2軸引張試験機を用いて測定し、異方性降伏関数YLD2000を用いた有限要素法による数値解析を行うことで割れの予測精度を向上させることができた。また材料の繰り返し負荷時の応力-ひずみ挙動をサイクリック試験により測定し、その挙動を再現する吉

田-上森モデルを用いて有限要素法による数値解析を行うことで、スプリングバック挙動を精度よく再現できた。

今後も自動車などの輸送機に対して衝突安全性と低燃費が求められるためハイテン、アルミニウムの採用は増加し、これらの材料評価技術および数値解析技術の必要性は高まっていくと思われる。

(共著：材料評価事業部 橋本俊一、澤井百世／加古川事業所 頭根怜史／エレクトロニクス事業部 池田健一)