



入門講座

素材を形に～素材の加工方法－4

薄板のプレス成形性とその評価

Formability of Steel Sheets in Stamping and Evaluation Methods

吉田 亨
Tohru Yoshida

新日鐵住金（株）
技術開発本部 鉄鋼研究所
利用技術研究部 上席主幹研究員

1 はじめに

薄板の用途は自動車部品・容器類をはじめ建築用部材、電機器具筐体など広範囲に亘っており、使用素材の適用産業分野での必要機能を認識しながら材料開発が進められてきた。特に、成形時の割れやしわ発生を抑制し、所望の形状に成形することを目的に、プレス成形性を重視した開発が進められてきた。その中では、成形試験から得られた知見を基に化学成分および製造条件を決定し、鋼板の金属組織の結晶方位を適正に制御することで、深絞り性に優れた鋼板開発へと繋がった例もある。一方、プレス成形には、絞り成形以外に、張出し成形、曲げ成形、伸びフランジ成形といった異なる変形様式での成形法があり、それらに適した材質は成形法ごとに異なっている。本稿では、薄板のプレス成形の基本的な事項を理解することを目的とし、プレス成形の変形様式やその評価方法、プレス成形性と材料特性の関係について述べる。

2 塑性加工としてのプレス成形

プレス成形は、任意の形状の金型を用いて素材を所望の形状に変形させる塑性加工の一種である。金属の加工には塑性加工以外にも、切削・鋳造などの他の材料加工法があるが、①材料歩留、②生産性、③得られる材質、の観点から有利な塑性加工が量産加工手段として用いられる場合が多い¹⁾。産業界で実用的に使われている代表的な塑性加工法の特徴を表1に示す。これらのうち、板圧延は回転するロールにより材料を一方向に延ばす加工法であり、一般に素材の加工に用いられることが多い。鍛造のうち、自由鍛造では熱間で材料を部分的に圧縮加工し、熱間・温間・冷間型鍛造では金型内で素材に圧縮を加えて加工する。これら圧延や鍛造では大きな寸法変化を実現できるが、それによる加工力の増加を軽減するため熱間で行うことも多い。それに対し、プレス成形は“薄板材料に引張り主体の力を作用させ、金型と類似の形状

表1 主な塑性加工法の特徴

加工法		加工温度	負荷様式	加工への期待		形状自由度
				増減肉	材質向上	
プレス成形	冷間プレス	冷間	引張	△	△	◎
	ホットスタンプ	熱間	引張	△	◎	◎
ロール成形		冷間	曲げ	△	—	◎
板圧延	熱間圧延	熱間	圧縮	◎	○	—
	冷間圧延	冷間	圧縮	◎	△	—
鍛造	熱間鍛造	熱間	圧縮	◎	◎	◎
	冷間鍛造	冷間	圧縮	◎	◎	○
押出し		熱間	圧縮	◎	○	△
引抜き		冷間	引張	◎	◎	—

大:◎>○>△:小

を創成する”、点が他の加工法と最も異なる点である。また、変形が引張りであるため寸法変化はあまり大きくない。

3 プレス成形の基本成形様式

前節において、プレス成形は引張り主体の応力状態で加工する方法と説明したが、板材の場合、主軸方向が引張応力であっても、それに直交する幅(副軸)方向が同じように引張応力なのか、圧縮応力なのか、または応力ゼロなのか、で塑性変形開始応力(降伏応力)や成形限界が異なる。板材のプレス成形では実用性の点から、この負荷状態を2次元平面内における主方向の伸び変形と縮み変形を用いて表現することが多い。これら“伸び-伸び”・“伸び-縮み”を「変形様式」と呼んでいる。これに関して、プレス成形の基本的な成形様式を図1に示すように、絞り・張出し・伸びフランジ・曲げの4つに分類し、実際のプレス成形はこれら基本成形様式の内のいくつかの組合せから成り立つと考えることができる²⁾。この考えに従うと、4つの基本成形様式の各々の機構や支配要因の理解は、自動車パネルのような複雑形状部品で起きる各種の成形問題の解決に役立つことが期待される。

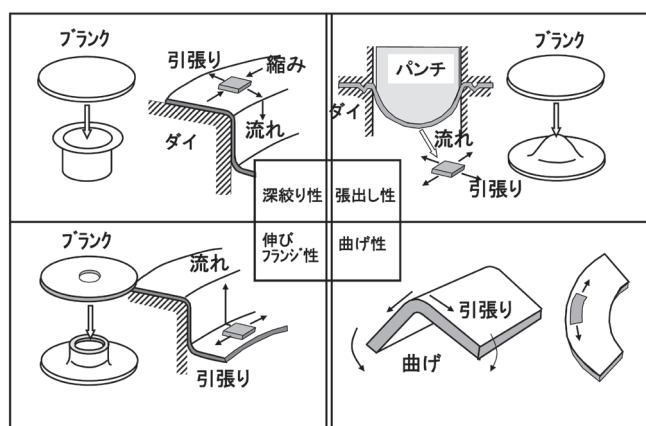


図1 プレス成形の4つの基本成形様式²⁾

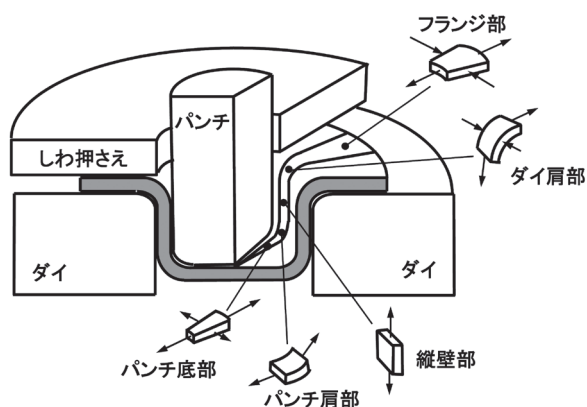


図2 円筒深絞りにおける変形状態

3.1 深絞り成形

深絞り成形は薄板を様々な複雑形状の容器に加工する手法であるが、材料の深絞り性は最も単純な形状である円筒容器の深絞り(円筒深絞り)で評価される場合が多く、深絞りのメカニズムも理解しやすい。円筒深絞りでは、材料は円形素板から深絞り部品に変化する。その変形状態を図2に示す。その成形過程では、素板の外周側(フランジ部)の材料は周方向の圧縮を受け縮み変形するが、この変形により材料は加工硬化し、材料内には周方向の圧縮応力が発生する。この圧縮応力に抗して深絞りを進めるためには、流入方向(素板基準での半径方向)に引張りを加える必要があり、その結果、フランジ部の材料の変形様式は“伸び-縮み”となる。次に、フランジ部からダイス穴内に流入し縦壁を構成する材料には、深絞りの進行に必要な引張り力が加わるが、側壁部に対応するパンチの直径は一定であるので周方向には伸び・縮みは起きない。それ故、側壁部の材料の変形様式は“幅縮みのない1方向伸び(平面ひずみ)”となる。また、側壁部に作用する素板半径方向の引張り力は、パンチ肩部を經由して部品底面部の材料に作用する。その結果、底面部の材料には“引張り-引張り”の応力が加わり、変形様式は“伸び-伸び”となる。このように深絞り部品の底面・縦壁・フランジの変形様式は「伸び-伸び」・「平面ひずみ」・「伸び-縮み」となる。薄鋼板の深絞り性については、日本でも過去数十年間に実験的・理論的な研究が多数行われ、それらにより得られた結果は一般的に認知され、実際の成形現場や材料開発に应用されている。深絞り性は材料のランクフォード値(以下、 r 値)と相関が高いことが知られており、実験においても証明されている。 r 値は単軸引張試験における板幅方向の対数ひずみと板厚方向の対数ひずみの比であり、式(1)で評価される値である。

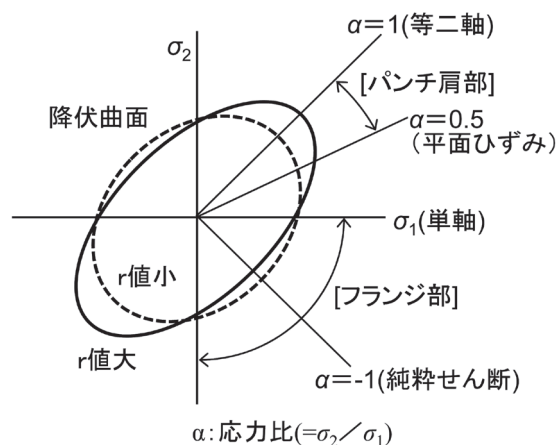


図3 降伏曲面と変形様式

$$r = \varepsilon_b / \varepsilon_t = \ln(b/b_0) / \ln(t/t_0) \dots\dots\dots (1)$$

b_0 : 初期板幅、 t_0 : 初期板厚、

b : 指定ひずみでの板幅、 t : 指定ひずみでの板厚

図3に降伏条件に及ぼす r 値の影響を示すが、 r 値が大きいとフランジ部の変形抵抗が下がる一方、平面ひずみ変形であるパンチ肩や縦壁部の変形抵抗は増大し、破断の危険性が低下することから、深絞り性向上効果を理論的に説明できる。

3.2 張出し成形

材料の延性を活用する張出し成形は、材料の周囲を拘束した上で、パンチを突き出して加工される。図4はパンチ張出しにおける成形の進行に伴うパンチと材料の接触状態の変化を示している。成形開始直後には、パンチの頂点部付近だけが材料に接触し、パンチストローク S の増加に伴い接触部は拡大する。この時、パンチに接触していない材料部分には引張りだけが作用するが、材料がパンチ面に接触すると摩擦抵抗と曲げが加わるため、材料内にはパンチとの接触点で最大になるような応力分布が生じ、成形の進行と共に最大応力部

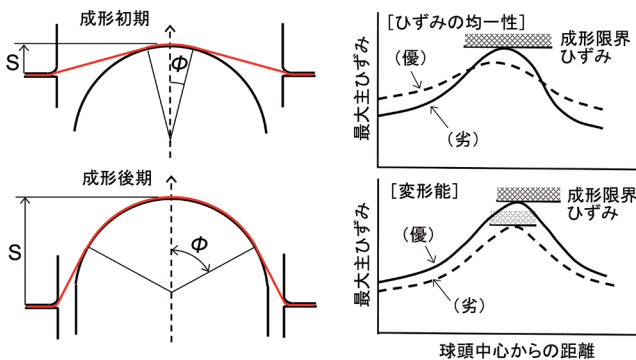


図4 球頭張り出し過程の工具接触状態と張出し性を支配する因子

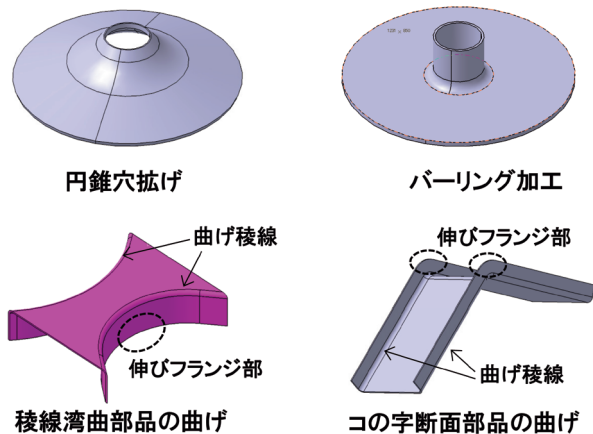


図5 伸びフランジ成形の種類

は外周方向に移動する。材料の変形限界を考えると、張出し成形が進行するとひずみ集中を受ける領域で2軸の引張り応力が増加し、やがて材料内の一部が塑性不安定状態となり、破断に至る。張出し成形限界の向上には、破断に至る前に塑性変形部位の領域が広がることで高さをかせぐことが肝要であり、“変形を均一化させる”ことが重要である。この材料～パンチの接触領域における成形性向上の方策としては、パンチ肩半径を大きくすることや、摩擦係数を小さくする、などが効果的である。また、張出し性に優れる材料としては、ひずみの均一化特性で高いこと以外に、破断限界ひずみが大きいことが挙げられ、 n 値が高いことはいずれにも有利となることから、張出し成形性の向上に効果がある³⁾。 n 値とは加工硬化指数と呼ばれる値であり、式(2)に示す n 乗硬化型塑性の指数で表されるプレス成形性因子である。

$$\sigma = K\varepsilon^n \dots\dots\dots (2)$$

3.3 伸びフランジ成形

伸びフランジ成形は図5に示すように曲げ稜線が湾曲している等、曲げ線の外側のフランジ部に伸び変形を生じる加工である。実部品においては様々な部位で現れる変形様式である。通常、材料メーカーでは、この伸びフランジ成形性を評価するのに主に穴広げ試験を行っている。穴広げ試験は、せん断加工により丸穴を加工しておき、フランジ部を拘束した上で穴中心に合わせた軸対称工具で穴を広げて行き、破断発生時の穴径から以下の式(3)で穴広げ率(λ)を測定する試験法である。

$$\lambda (\%) = (d_b - d_0) / d_0 \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

d_0 : 初期穴径、 d_b : 破断時の穴径

穴広げ性は伸びフランジ成形性の一種と考えることができる。穴広げ試験では、初期穴をせん断加工で形成するため、せん断加工条件が穴広げ率に影響する。せん断加工における切口面の概略図を図6に示す。切口面はだれ、せん断面、破断面

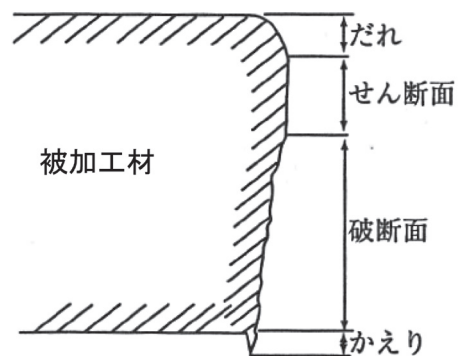


図6 せん断加工における切口面

面、かえり（バリ）で構成され、その比率は打抜きクリアランス等の影響を受ける。図7は打抜きクリアランスを板厚比で5～15%変化させた高強度鋼板の穴広げ率であるが、最適値が存在することが分かる。これは、せん断時に打抜き端面に導入される加工硬化や破断面粗さ等の性状が影響するためである。また、円錐工具での穴広げ試験においてかえりの向きを変えた場合に穴広げ率が変化する。だれ部を円錐工具に接触させた場合の穴広げ率はかえり部を円錐工具に接触させた場合の穴広げ率よりも小さい。この理由として、かえり部は加工硬化が過大で残延性がないこと、主に破断面側からひずみが大きくなるので、その切り欠き効果で亀裂が進展しやすいこと、が挙げられる。

3.4 曲げ成形

基本的な曲げ加工は板の面内変形を伴わないことから、絞り加工や張出し加工に比べて比較的単純な加工である。しかしながら、曲げ加工では板厚方向に応力、ひずみが分布し、スプリングバックが生じやすくなる。スプリングバックとは、加工後に金型から取り出すなど外力が除かれた際に、加工前の状態に戻ろうとする弾性回復現象である。実部品では

単純な曲げ加工だけですむことは殆どないが、絞り部品や張出し部品でも曲げの領域が殆ど含まれるので、曲げの理論や考え方を理解しておくことは重要である。図8に単純曲げを受けた材料の板厚方向のひずみ分布と応力分布を示す³⁾。ひずみは中立面からの距離に比例し、内外表面が最も大きくなり、曲げ曲率が大きい（曲げ半径が小さい）ほど大きくなる。また、板厚方向の応力分布は、ほぼ材料の引張変形における応力とひずみの関係に対応した分布となる。また、曲げ半径が小さくなると、外表面ひずみが大きくなるため、亀裂を生じる場合がある。曲げの外表面ひずみは引張試験の伸び値より大きくなっても割れを生じない場合があるが、それは板厚方向のひずみ勾配により割れ抑止力が働くからである⁴⁾。

板材を曲げ加工すると角度変化や壁そり、ねじれ、稜線反りと呼ばれる形状不良が見られる。これらは総称してスプリングバック（寸法精度不良）と呼ばれ、材料強度が高くなるほど弾性回復ひずみが大きいため、最終製品として要求される寸法精度の確保が困難になりやすい。図9にハット曲げ成形における壁そり発生メカニズムを示す²⁾。フランジ部からダイ肩部に流入した材料は曲げ応力を受け、さらに、縦壁部に引き込まれると逆方向の曲げ応力を受ける。成形終了後も離形前の縦壁部では曲げモーメントが働いており、金型から開放されると同時に縦壁部にそりが発生することになる。降

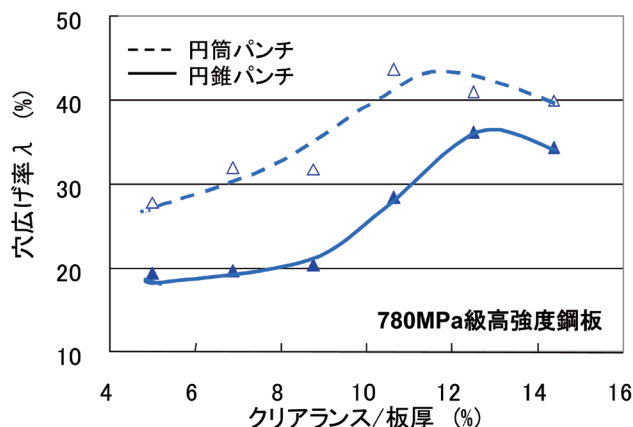


図7 穴広げ率に及ぼす打抜きクリアランスの影響(高強度鋼板の例)

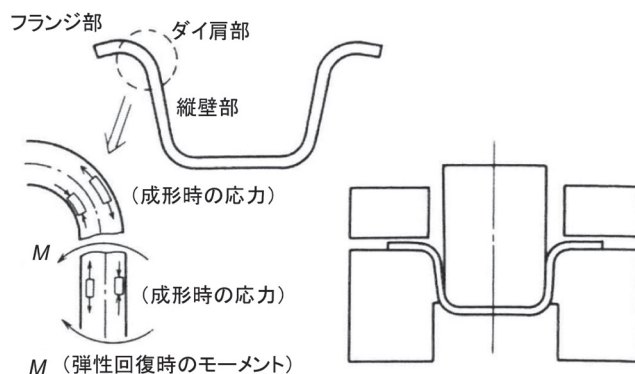


図9 壁そりの発生メカニズム²⁾

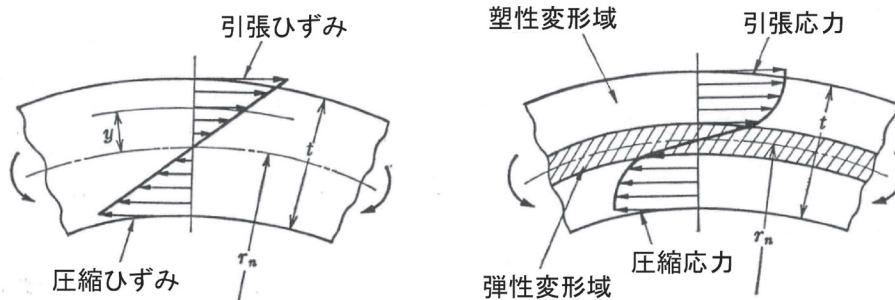


図8 曲げにおける板厚方向のひずみ分布と応力分布³⁾

伏強さが高く、曲げモーメントの大きくなる高強度鋼板では壁そり量が軟鋼などに比べて大きくなる。高強度鋼板の成形ではスプリングバックを抑制し、製品の寸法精度を確保することが重要となってくるが、ハット断面部品の絞り曲げで発生する壁反りについては、フォーム成形 (図10) を活用することで、縦壁での曲げ・曲げ戻しを抑制し壁反りの駆動源となる曲げモーメントを低減することができる。図11にドローベンド成形とフォーム成形における壁反り量と材料強度の関係を示すが、縦壁角度により効果の違いはあるが、いずれの場合もフォーム成形の場合に壁反りが小さくなる⁵⁾。

4 薄板の延性と破断限界

プレス成形における破断限界評価では、成形品に生ずるひずみ分布をスクライブド・サークルにより測定し、あらかじめ求めておいた成形限界ひずみと比較することにより、成形余裕度や破断の危険性を判断するのが一般的である。この手法は成形限界線図 (Forming Limit Diagram : FLD) として広く用いられてきた。スクライブド・サークルとは、成形前の素板にあらかじめ円形の模様をエッチング等で描いておき、成形前後の円形の直径を比較することにより、ひずみ比

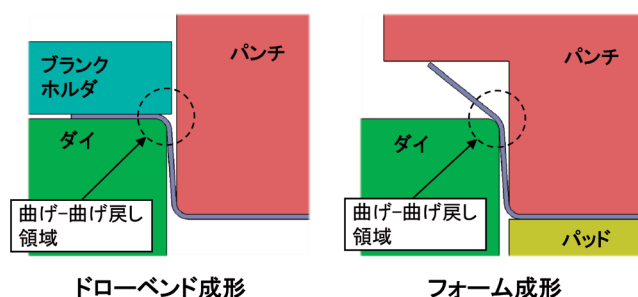


図10 ドローベンド成形とフォーム成形

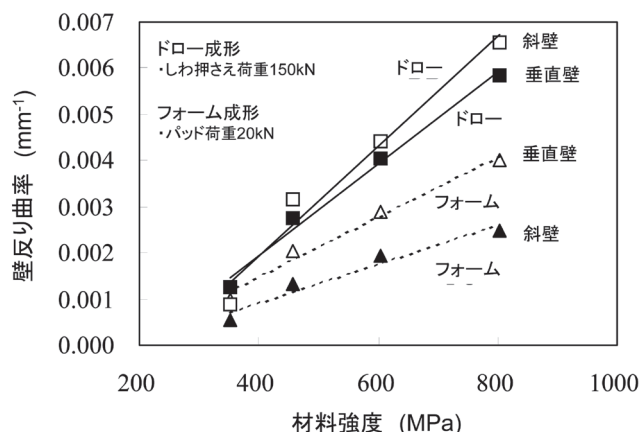


図11 フォーム成形における壁反り低減効果

やひずみの大きさを測定する手法である。成形限界ひずみを実験により求めるには、通常はスクライブド・サークルを用いて最大・最小の主ひずみを測定し、それらを $\epsilon_x - \epsilon_y$ 座標にプロットしてひずみ分布や成形限界線とする。また、FLDを求めるには通常は球頭パンチ (または円筒パンチ) を用い、幅の異なる何枚かの矩形素板を張出し成形して破断限界ひずみを測定する方法が一般的である (図12)⁶⁾。また、成形限界に関する理論分野では、塑性不安定条件から得られるくびれ発生時のひずみをFLDの代用とすることも行われ、材料特性値の影響が調べられてきた。特に、最近では、成形シミュレーションを用いて得られたひずみ分布とFLDの比較から成形余裕度や成形難易度を推定する方法が主流となっている。

薄板の延性は2つの観点から評価されることに注意が必要であり、標点間距離が比較的大きい全伸びや成形限界線に対し、もう1つは極限変形能に代表される、標点間距離を極端に短くした際の破断伸びである。図13に極限変形能とその求め方の例を示す⁷⁾が、図中右グラフの白丸がFLDであり、黒丸が極限変形能を示す限界ひずみである。標点間距離を無限に小さくしたときの破断伸びは、材料の真の破断ひずみ (または極限ひずみ) であり、一種の延性パラメータと考えることができる。全伸び (または均一伸び) は張り出し性等の全体成形性との相関が高く、極限変形能は穴広げ等の局部変形限界との相関が高い。

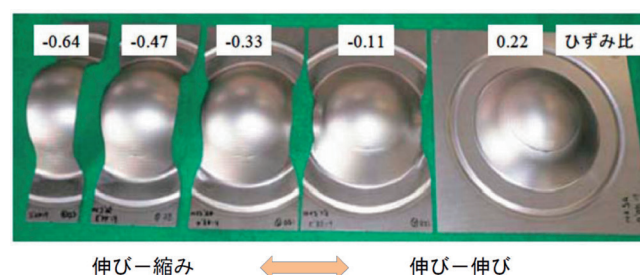


図12 FLDを測定するための成形試験例⁶⁾

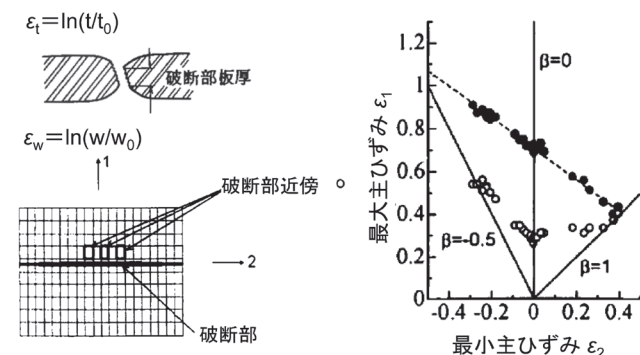


図13 極限変形能の評価方法⁷⁾

表2 プレス成形不良と材料特性の関係

成形不良現象		降伏応力	引張強さ	全伸び	n値	r値	ヤング率	極限変形能	板厚
破断	パンチ肩割れ		△	◎	○	◎			○
	伸びフランジ割れ			○	○			◎	○
	曲げ割れ			○	○			◎	◎
面形状	しわ	◎	△		○	△	△		◎
	面ひずみ	◎	△		○	△	○		○
寸法精度	角度変化	◎	△		○		○		○
	壁反り	◎	△		○		○		○
	ねじれ	◎	△		○		○		○
	稜線反り	◎	△		○		○		○

影響度（大◎～○～△小）

5 プレス成形不良と材料特性の関係

プレス成形における成形不良は「破断」、しわ、面ひずみ等の「面形状不良」および「寸法精度不良」に分類される。

実部品の成形では形状や工程が複雑になることから、さまざまな形態の破断やしわが発生する。それぞれの種類の破断やしわに対応した対策が必要になる。製品形状を変更しない前提で検討される代表的な対策は、ブランク形状及び成形工程の変更、しわ押さえ力等の加工条件の変更、金型のビード形状、余肉形状の変更等である。面ひずみは、自動車外板のような滑らかな曲面に生ずる数十～数百ミクロンの幾何学的な不整現象であり、意匠性が重要な場合に不良とされる。寸法精度不良は成形品を成形後に金型から取り出す、あるいは、不要な部分をトリミングするなど、拘束を緩和することで残留応力が駆動力となり、新たなつりあいを満たすよう部品に弾性変形（スプリングバック）が生じることで発生する。表2にプレス成形で生じる成形不良と材料特性の関係を示す²⁾。ただし、ここで示した相関はあくまで基本的なものであり、部品形状や工程の複雑度によって成形性、成形限界を支配する要因が変わってくることに注意が必要である。

6 おわりに

鉄鋼材料は一般的に成形性、溶接性、コスト、リサイクル性に優れるため多くの産業で主要な素材として用いられてきた。その中でも、薄板は主要な鉄鋼製品としてプレス成形を主体に幅広い分野で利用されている。プレス成形の肝とも言

える金型技術は、形状が複雑になるほど熟練者の経験が必要とされ、これまでも“匠の技”として国内でも脈々と受け継がれてきた。一方で、プレス機械はモーション制御が可能なサーボプレスが“日本発”の技術として開発され、様々なセンシング技術と組み合わせて、プレス加工の“見える化”や“知能化”技術の開発が日々進んでいる。さらには、プレス成形シミュレーション技術の著しい発展も鑑みると、今後の薄板のプレス成形は従来では困難と考えられていた難成形部品の加工や高レベルな生産性向上の実現が可能になっていくのではないかと期待が膨らむ。将来の技術を開拓するには、プレス成形に関わる優秀な技術者の育成が肝要であり、本稿がその入り口として参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 鈴木弘：塑性加工，裳華房，(1984)
- 2) 薄鋼板成形技術研究会：プレス成形難易ハンドブック第4版，日刊工業新聞社，(2017)
- 3) 中川威雄，阿部邦雄，林豊：薄板のプレス加工，実教出版株式会社，(1977)
- 4) 永井康友：塑性と加工，38 (1997) 442, 967.
- 5) 吉田亨，磯貝栄志，橋本浩二，片山知久，栗山幸久：塑性と加工，46 (2005) 534, 656.
- 6) 栗山幸久：塑性と加工，47 (2008) 548, 815.
- 7) 宅田裕彦，蟹江智文，磯貝栄志，吉田亨：鉄と鋼，91 (2005) 6, 553.

(2017年9月29日受付)