

高強度材料の形状凍結性に係わる高精度曲げ加工技術の開発

西野創一郎 *

1. まえがき

近年、自動車車体に要求されている項目として、軽量化と衝突安全性向上がある。しかし、この二項目は互いに相反する要素である。衝突耐力を向上させるためには車体骨格断面の大型化や構成部材の厚肉化が必要となり、車体の重量増加は避けられない。この車体重量増加を抑えると同時に安全性向上させるには、衝突エネルギーの吸収能力が大きい高張力鋼板を使用することが効果的である。高張力鋼板は従来の製品設計手法を変更することなく低コストでの軽量化が可能である。このため最近の乗用車車体における高張力鋼板の使用は大幅に増加しており、最近では車体の50%以上に高張力鋼板を用いたものも上市されている。また従来は590MPa級までであったものが、現在では780～1470MPa級まで検討されている。

一方、生産現場では、高張力鋼板の多用により形状精度確保・加工荷重不足・型カジリ・加工騒音等の多くの問題が顕在化している。この中でも、形状精度確保に関しては度重なる型へのスプリングバックの見込み補正を必要とする問題や生産時の材料バラツキによる形状変化やプレスの加工能力不足による形状凍結不良等の多くの問題が発生している。

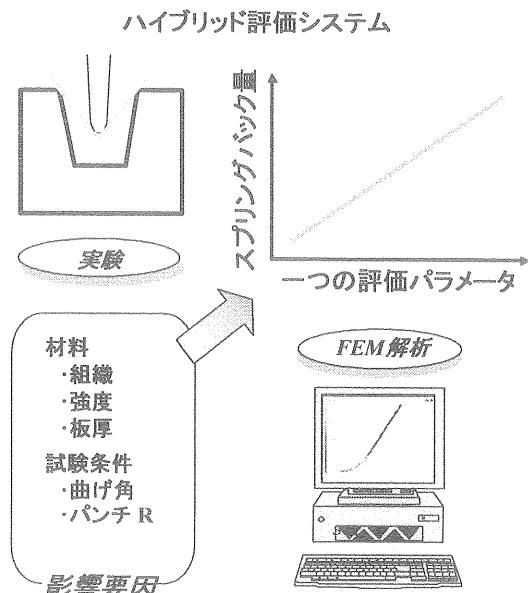


図1 実験と解析のハイブリッド化による
スプリングバック定量評価⁽⁴⁾⁽⁵⁾

かかる問題に対応したスプリングバックに関する研究報告例は数多い。その大半は材料構成則を精密化した自作ソフトによるシミュレーションであり、解析精度の向上に主眼が置かれている⁽¹⁾⁽²⁾。現場の技術者がすぐに導入できる汎用解析ソフトの有効活用について述べた報告は数少ない⁽³⁾。著者らは、成形の基本である曲げ加工の中の3点支持自由V曲げにおいて図1に示す「形状凍結性予測システム」を開発し、被加工材の種類と曲げ加工条件が決まればスプリングバック量を一義的に決定できることを見出した⁽⁴⁾。このシステムは、影響因子が多数存在して、シミュレーションでは定量的に算出困難なスプリングバック量は実験にて求め、逆にスプリングバックの発生原因で可視化の困難な残留応力（相当弾性ひずみ率）は汎用FEM解析ソフトを用いてシミュレーションにて求め、ハイブリット化することにより、V曲げ加工後の形状予測を可能にした。また、従来は形状凍結を図るために加圧曲げを行い、大きな成形荷重を必要としていた。これに対し、V曲げの成形過程を詳細に観察することにより、自由曲げ領域において、低荷重で必要曲げ角度が得られる可能性を見出した⁽⁵⁾。

一方、実際の製造現場においては、材料特性一つとっても製造ロットによって変化する。特に高張力鋼板化されることにより必然的にバラツキ量も大きくなる。これ以外にも使用機械やその経時変化、金型メンテナンスや潤滑状態等多くの要因が存在し、形状精度確保は対応困難な問題である。したがって、シミュレーションの高精度化に関する研究と並行して、製造現場の観点から高張力鋼板に適した成形法について基礎的な研究を行う必要がある。

高張力鋼板の成形法を考えた時、日本の製造現場で長年に渡って培われてきた「フォーム成形法」が効果的であると考えられる。この成形法が保有している数々の優れた特徴を、従来より使用されているドロー成形（深絞り）と比較して図2にて説明する。従来のドロー成形は素材外周を拘束して中央部を金型にて成形する。一方、フォーム成形は素材中央部を拘束して外周部を自由な状態（非拘束）にして成形する。そのため、フォーム成形では外周部の材料が自由に移動でき、成形が容易に行われる。また、成形の主体が曲げ加工である

ため、ドロー成形で見られる曲げ・曲げ戻しによるシャクレ等の不具合が少ない。これら「フォーム成形法」の特徴より、製品の展開形状にブランクした後成形されるため高歩留まりが得られる。また、素材寸法が小さく・型構造も単純化できることにより、成形荷重と型費の低減を図ることができる。これらよりフォーム成形は高張力鋼板の加工に適した省エネ・低コストの成形法であると考えられる。反面フォーム成形では材料が少ない拘束にて成形されていくため、被加工材の材料特性を十分に把握することが重要である。

本解説では、高張力鋼板のプレス加工にフォーム成形法を活用することを念頭において、材料特性を把握するため、フォーム成形の基本となるV曲げ試験を行い、「自由曲げ領域における曲げ角度と成形荷重の関係」に詳細検討を加え、低成形荷重にて曲げ精度を確保することが可能なことを述べる。

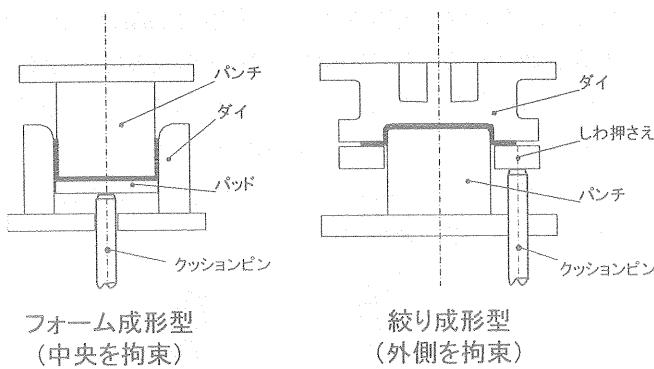


図2 型構造比較

表1 供試材の機械的性質

	複合組織			単相組織			
	A JSC1180Y DP	B JSC980Y DP	C JSC780Y DP	D JSC590Y DP	E JAC590R 折出強化	F JSH440W 固溶体強化 IF	G JAC270F IF
板厚 (mm)	1.6	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
降伏応力 [MPa]	1061	910	448	360	476	329	142
引張強さ [MPa]	1207	1080	892	777	619	469	282
n値	0.1	0.1	0.21	0.22	0.1	0.12	0.21
破断伸び [%]	5.3	6.7	11.3	16.7	15.3	20.7	32

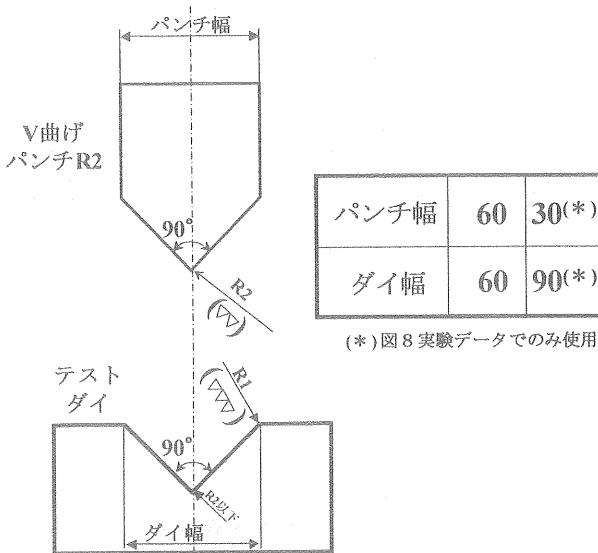


図3 試験型

次にこの得られた結果と「スプリングバックを定量的に予測可能」⁽⁴⁾⁽⁵⁾という結果を組み合わせて、材料拘束を最小限にして、曲げ成形を主体にして加工する「フォーム成形法」へ適用することにより、製造現場で大きな技術的課題となつていて「高張力鋼板成形における精度確保と加工荷重低減」への対応策について解説と提案を行う。

2. 低成形荷重での曲げ精度確保

2.1 供試材と試験方法

供試材の選定にあたって、より汎用性のあるデータを得るために、表1に示すように現在使用されている軟鋼板(IF鋼)・440MPa・590MPaのみでなく、今後使用が計画されている780MPa・980 MPa・1180 MPaも含めて試験を行った。また、試験条件としては図3に示したように、曲げ角度90度・先端パンチ R2mm の試験型を用いて、パンチ先端Rが供試材に接触した位置からのパンチの下降量を押し込み量として、この押し込み量を変化させ、各々の位置で試験型を開放して得られた供試材の角度を曲がり角度として測定した。

なお、図3に示すように、実験では2種類のパンチおよびダイ形状を準備した。基本的な実験ではパンチ幅60mm・ダイ幅60mmの金型を用いた。後述するように780MPaおよび1180 MPaの高張力鋼板に関する実験では、パンチ幅30mm・ダイ幅90mmの金型も併せて用いた。図4に押し込み量を変化させた時の型と供試材の関係の写真を示す。

2.2 押し込み量と曲がり角度の関係

図5に押し込み量を変えることにより得られる各供試材の曲がり角度変化の写真を、図6に各供試材における押し込み量と得られる曲がり角度の関係を示す。尚、図5の○印は試験型角度である、曲がり角90度が得られた試供材を示している。これらから押し込み量により、型角度より小さな曲がり角度を得られることがわかる。

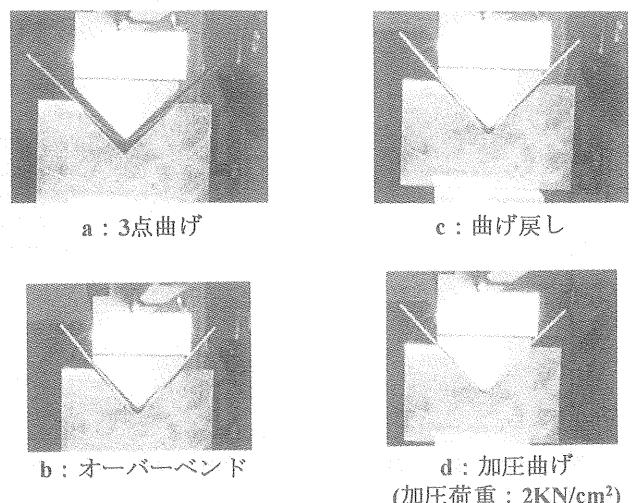


図4 加工工程中の試験片観察 (IF270)

この理由は図 4 b に示されたように、型角度より大きな曲げ、いわゆる試供材の剛性に起因するオーバーベンド現象が生じているためである。この部分を拡大した写真と模式図を図 7 に示す。更にパンチを押し込んでいくと、図 4 c に示したように曲げ戻しを受け型の設定角度に近づいていく。しかし、図 6 に示されているように、440 MPa～780 MPa 高張力鋼板では図 4 d に示された加圧曲げでも型角度が得られない。

引張強度 780 MPa 以下の鋼板（軟鋼板および高張力鋼板）では曲げ戻しが起こる前に、オーバーベンド現象によって曲がり角 90 度を得ることが可能である。一方、1180 MPa 超高張力鋼板ではオーバーベンド後の曲げ戻しによって形状確保されている。そこでパンチ幅を 60mm から 30mm へ、ダイ幅を 60mm から 90mm へ変更することによりオーバーベンドが顕著に起こる状態で曲げ試験を行った。その結果が図 8 である。参考のために 780 MPa 高張力鋼の実験データも併せて表示した。同図より、金型形状を調整することによりオーバーベンドのみで 1180 MPa 超高張力鋼板の形状確保が可能であることが理解される。

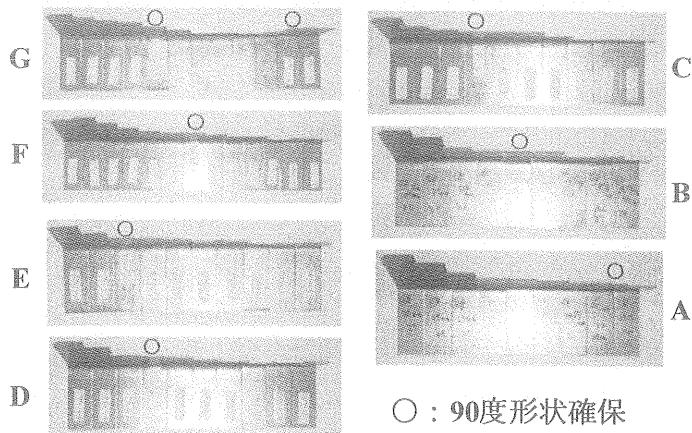


図 5 各供試材の曲がり角変化

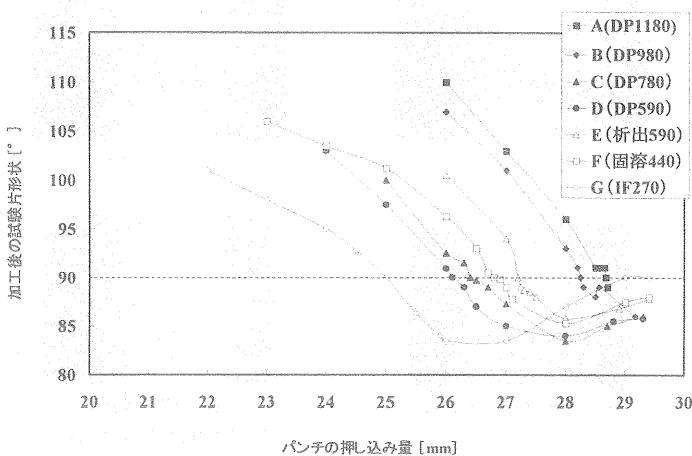


図 6 加工後の試験片形状と押し込み量の関係

2.3 押し込み量と成形荷重の関係

万能材料試験機にて図 9 に示した押し込み量と成形荷重の関係を求めた。これより、曲げ戻しが開始される以前の自由曲げ領域においては、非常に小さな成形荷重にて曲げ加工が可能なことが理解される。図 10 に図 6 の曲がり角 90 度での押し込み量と、図 9 より得られるその押し込み量における各供試材での加工力の関係を示す。

2.4 低成形荷重での曲げ精度確保の手法

2.2 項と 2.3 項の試験結果から、自由曲げ領域で押し込み量を変化させることにより、被加工材材質に対応して、低成形荷重で曲がり角度の制御が可能であることが証明された。このとき得られる曲がり角度は、文献(4)および(5)で述べている「スプリングバック量と相当弾性ひずみ率」の関係より予測可能である。

以上より、現在使用されている材料は勿論のこと、今後使用が計画されている 590 MPa 級以上の高張力鋼板成形においても、曲げ加工方式を応用した成形法(フォーム成形法)⁽⁶⁾⁽⁷⁾を採用することにより、高張力鋼板化により必然的に大きくなる材料バラツキを吸収して、低加工荷重で高精度な曲がり角度を得られる可能性が確認された。

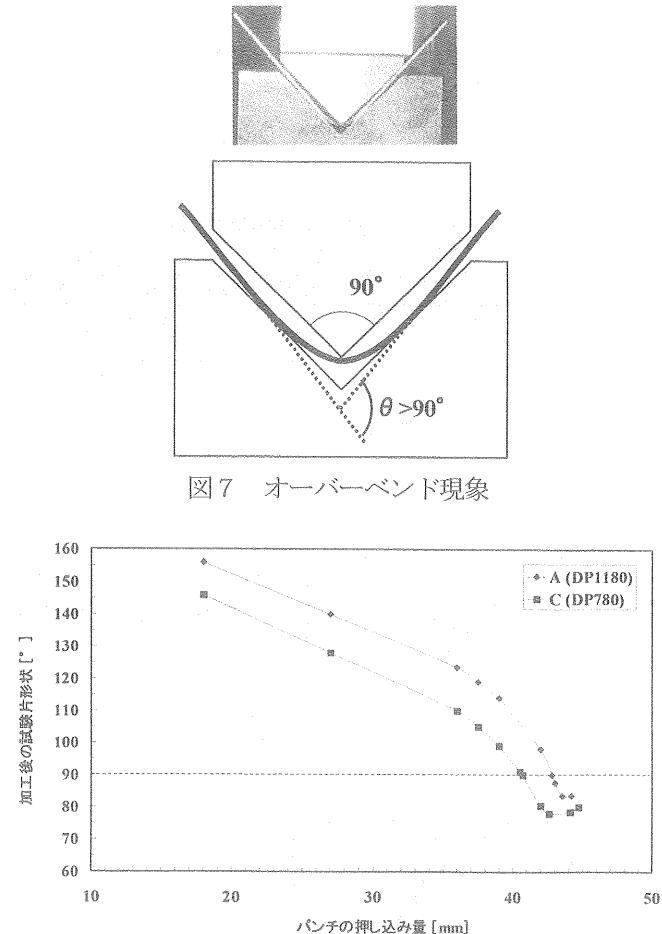


図 7 オーバーベンド現象

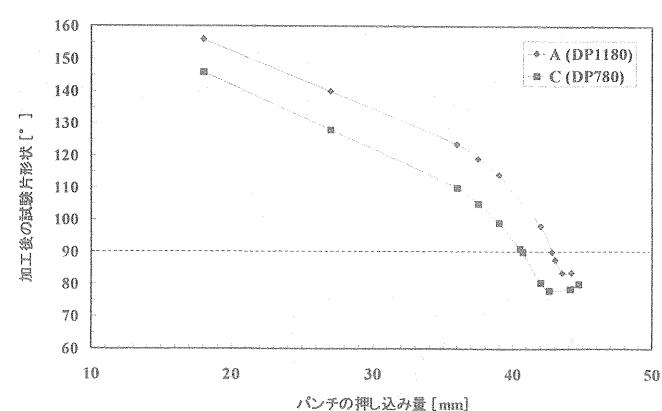


図 8 加工後の試験片形状と押し込み量の関係
(パンチ幅 30mm, ダイ幅 90mm)

3. 高張力鋼板成形の基本的な考え方

590MPa級以上の高張力鋼板の成形を考えた場合、従来から多く用いられてきた外周部を拘束して行う成形方法では、材料の高張力鋼板化に伴い、図11に示した縦壁部のシャクレの拡大と成形荷重の増大は避けられない。この理由は図12に示したように外周部を拘束して成形すると、成形の進展に伴って縦壁部が曲げ戻し加工を受ける。このため、被加工材に高張力鋼板を用いた場合、曲げ戻しを行うための荷重の増加と残留応力の増大に伴う大きなシャクレが発生する。一方、図13に示した事例より、フォーム成形法では基本的に曲げ加工を組み合わせて成形するため、シャクレの発生も少なく、スプリングバックの見込みも容易に行える。尚、フォーム成形法については文献(6)(7)を参照願いたい。

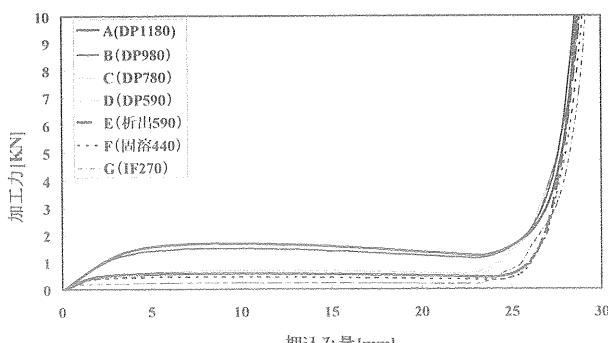


図9 各供試材における加工力と押し込み量の関係

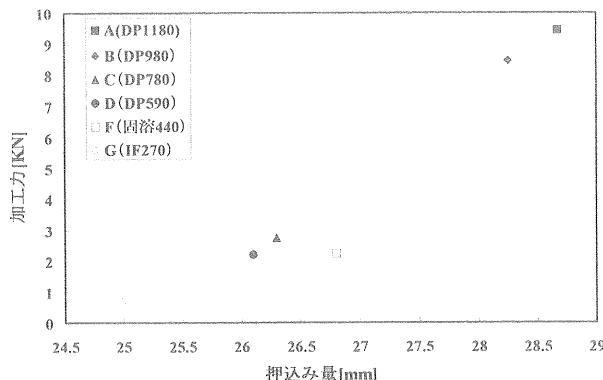
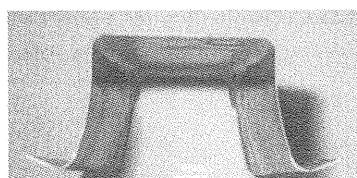
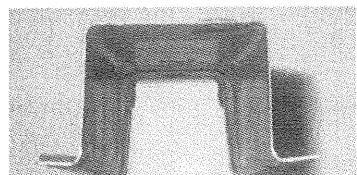


図10 形状確保時の加工力



高張力鋼板



軟鋼板

図11 従来方式で製造されたハット型部品

4. 高精度・低加工荷重での高張力鋼板成形法の提案

1節および2節で示した自由曲げ領域で高精度・低荷重の曲げが可能であること、及び、3節で述べたフォーム成形を組み合わせることにより得られる高張力鋼板を高精度・低加工荷重にて成形する手法について述べる。

4.1 検討製品形状

図14に示した断面形状(図11の事例の片側フランジを伸ばした製品形状にして、より複雑な成形にした)を事例として提案の成形法を従来方式との比較にて説明していく。このとき、ウェブ面端A/B部及び端末フランジの曲げラインC/Dは必ずしも直線である必要はない。最も、高張力鋼板化すると、加工方式に関係なく複雑形状の成形は困難であり、シンプルな形状にせざるを得ない。

4.2 従来方式における問題点

従来方式での加工は、図14に示したように1)絞り、2)トリム・ピアス、3)リストライク・フランジの3工程が最小限必要である。D部の曲げ精度を確保するにはカム方式のリストライクも必要となる。この方式で高張力鋼板を加工すると、成形工程において下記の問題が発生する。

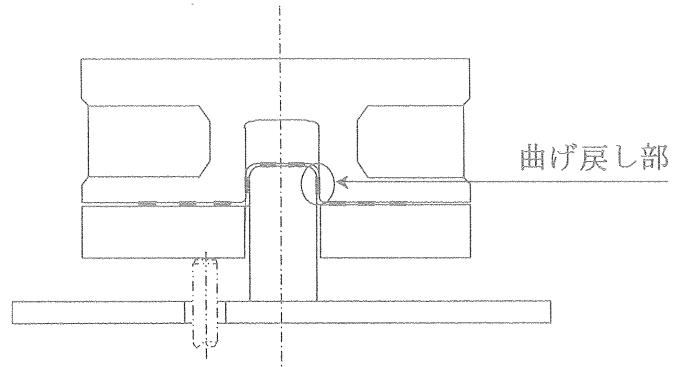


図12 従来方式による曲げ戻し

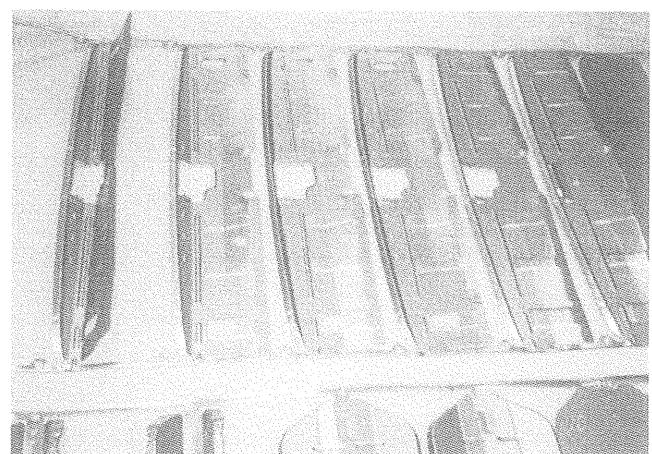


図13 フォーム成形事例

1) 絞り工程

- ・曲げ戻しに伴う縦壁部でのシャクレが発生
- ・材料流入の容易化と亀裂防止のため各角部Rを大きくして成形することが必要
- ・外周部を拘束して曲げ戻し成形するため大きな加工荷重が必要
- ・型と被加工材の接触面圧が高く接触距離も長くなるため型カジリが発生
- ・材料特性のバラツキがそのまま形状バラツキとなる
- ・シャクレ量の予測できないため、型への試行錯誤による見込み修正の繰り返しが必要
- ・外周部を拘束して成形するため型寸法が大きくなる
- ・トリム代を必要とするため材料歩留りが悪化する

2) リストライク・法兰ジ

- ・形状凍結に非常に大きな加工荷重が必要
- ・小さい角Rを得るため大きな加工荷重が必要
- ・材料特性のバラツキを相殺するためにには非常に大きな加工荷重が必要
- ・D部(鈍角曲げ)の曲げ精度がでない
- ・材料特性バラツキに伴う形状バラツキの調整が困難
- ・シャクレを矯正するために縦壁部のシゴキ加工が必要で、大きな加工荷重と型カジリ対策が必要
- ・大きな加工荷重に耐えられる剛性の高い型が必要

以上の問題点よりも明らかなように、従来方式の成形法では高張力鋼板化への対応は非常に困難である。

4.3 提案成形方式

図14に提案の加工工程、図15に成形型断面構造を示す。工程は1)第一フォーム、3)第二フォーム、4)リストライクの3工程で構成されている。

これらの図に示したように、第一フォームではウエブ面ABを拘束して、外側の形状を開いた状態で成形を行う。このとき、ウエブ面端A/Bの開き角は曲げタイミングをバランスさせ、端末のC/D部曲げ加工をスムーズに行える角度に設定している。また、端末のC/D部は被加工材と曲げ形状が決まれば一義的に決定されるスプリングバック量を見込む以外に、被加工材のバラツキを吸収できるように型の押し込み量の変えることにより曲げ角の調整が可能な構造としている。

第二フォームではウエブ面端A/B部に第一フォームのC/D部と同様に一義的に決定されるスプリングバック量を見込み、併せてパッドとパンチによるウエブ面での加圧により壁部の曲げ角が調整可能な構造としている。

リストライクは第二フォームで成形できない複雑な製品形状や局部的に相手部品との合わせ精度が要求される部分等が必要な場合のみ設定する。

4.4 提案成形方式での高精度・低加工荷重化

図14/15で提案した成形方式では、第一フォームではウエブ面で材料を拘束してA~D部の曲げ成形を行っているため、壁部(AC/BD)は曲げ戻し加工を受けない。その結果、高張力鋼板化で大きな問題となるシャクレは生じない。また、A/B部は自由曲げであり、ウエブ面より外側は材料を拘束しない「フォーム成形」であるため、低荷重での成形が可能である。一方、C/D部も自由曲げで、尚且つ被加工材のバラツキに応じて押し込み量を変えることにより曲げ角の調整が可能で、加圧曲げの必要がない。そのため、同様に低荷重にて成形可能である。

第二フォームでは、ウエブ面で第一フォーム成形品を拘束し、A/B部で自由曲げを行い、材料バラツキに応じてウエブ面での加圧力を変えて製品形状に成形している。これにより低荷重での加工が可能である。また、縦壁部にアンダーカ

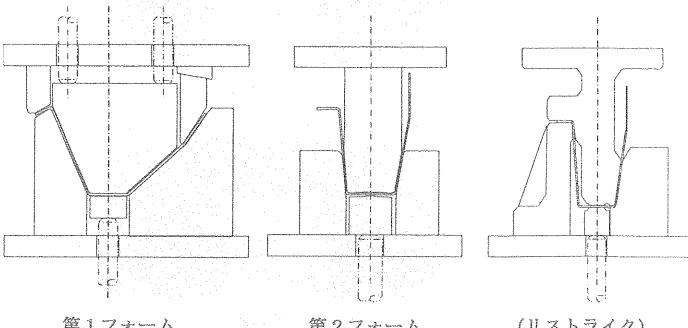


図15 フォーム成形型断面構造

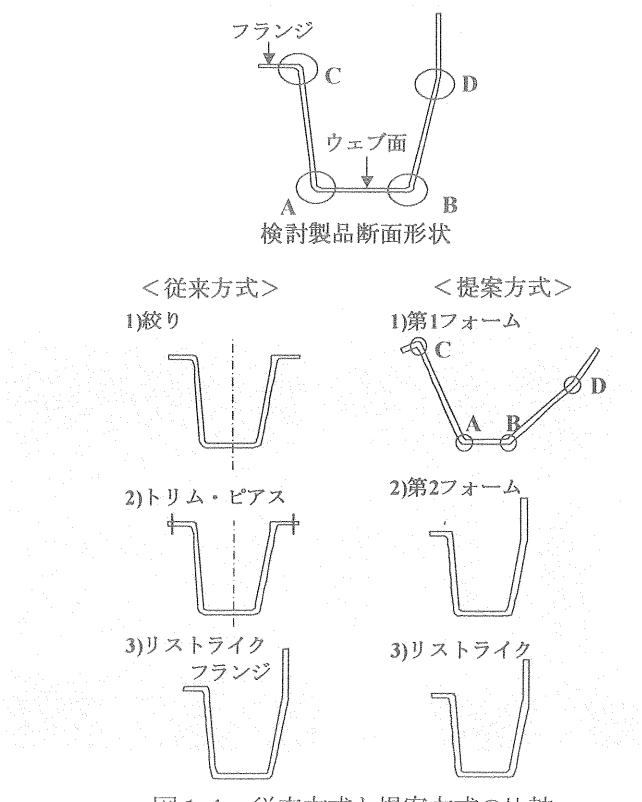


図14 従来方式と提案方式の比較

ット形状があっても第一フォームにて成形をしておき、第二フォーム型でアンダーカット部形状を逃がすことにより、カム型等による後加工を行わなくても成形可能である。

リストライクでは第一／第二フォームで精度確保できなかつた部分のみの加圧加工するため、低荷重で精度が得られる。

5.まとめ

軽量化と衝突安全性向上の両立を目指し、自動車車体の構成部材への高張力鋼板の活用が進んでいる。現状では590MPa級まで多用されており、今後更に780MPa以上への高強度化が進められている。一方、高張力鋼板の使用部位の増加に伴い、製造現場で多くの問題が発生している。しかし、従来の加工手法では十分に対応できない。

これらの問題を解決するため、曲げ成形の基本に立ち戻り、その成形過程を詳細に観察して得られた研究成果（「実験とFEMシミュレーションのハイブリッド化による被加工材の種類や曲げ条件に影響されないスプリングバック量の定量算出の可能化」と「自由曲げ領域で加工を行うことによる低加工荷重で成形の可能化」）を活用することにより、被加工材の種類に影響されることなく、低加工荷重で高精度な加工が可能なフォーム成形法の解説を行った。次いで、このフォーム成形法を活用することにより、現在自動車車体での適用部位が増大して、生産現場で種々の問題が生じている「被加工材の高張力鋼板化」に対する対応策の具体的な事例を挙げて、対応手法の提案を行った。

今回の解説では、高張力鋼板化に対して成形法からのアプローチを行った。しかし、より効果的・根本的な対応策は高張力鋼板の特性を考慮した合理的な製品設計仕様とすることである。次の機会には製品設計仕様と成形法との融合について述べたい。

本研究の遂行にあたり、天田金属加工機械技術振興財団の支援を受けたことに対し、感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 吉田総仁ほか: 大ひずみ繰返し塑性変形挙動を記述する構成式、日本機械学会論文集（A編），68-667，pp.415-421，(2002-3)
- (2) 桑原利彦ほか: 金属薄板の2軸引張曲げスプリングバック解析、塑性と加工，38-437，pp.582-586，(1997-6)
- (3) 大上哲郎ほか: パンパーモデル型フォーム成形実験とスプリングバックの静的陰解法FEMシミュレーション、塑性と加工，43-494，pp.219-223，(2002-3)
- (4) 大屋邦雄ほか: 自動車用鋼板の形状凍結性予測システム、塑性と加工，43-492，pp.40-44，(2002-1)
- (5) 西野創一郎ほか: 自動車用高張力鋼板の曲げにおける高精度化と加工力低減の提案、自動車技術会2002春季大会，No.7-02，pp.1-4，(2002-7)
- (6) 大屋邦雄: 製品設計とプレス成形技術の融合に関する研究、茨城大学博士学位論文，(2002-3)
- (7) 西野創一郎: プレス加工の省エネ・低コスト化、日立地区産業支援センター・新産業創造セミナーテキスト，(2003-12)