

薄鋼板の新しいプレス成形技術

松居正夫

Masao Matsui

(株) 豊田中央研究所材料1部 部長

New Technologies of Sheet Metal Press Forming

1 はじめに

平板材から継目のない立体形状部品を造る方法としては、一般に、その生産性の高さから板金プレスによる方法がとられている。それ故、プレス成形と言えば、板材の成形を指す場合が多く、プレス成形によって造られた部品はプレス部品とも呼ばれている。プレス成形はパンチ（上型）、ダイ（下型）、しわ押え（ブランクホルダ）の3つの型技術、被加工材である板材（ブランク）の成形性、成形するためのプレス機械の選定が主要条件であり、潤滑剤、型材の選定なども重要な技術要素である。プレス部品はこれら多くの技術が結集された結果として形造られているもので、その成形過程で破断、しわを始めとした様々な不良現象が発生する。この不良現象をいかに回避し、要求性能・精度を満足する部品を作り出すかが、板材のプレス成形技術の課題である。

薄鋼板のプレス成形技術は、特に、自動車の普及とともに進歩したと言っても過言ではない。自動車工業の発展とともに、薄鋼板で構成されている自動車車体部品を安く、大量に、高品質で、安定して、効率よく生産するための技術は必須の条件となり、薄鋼板を提供する鉄鋼メーカー側の材料開発と、提供された材料を製品に仕上げる自動車メーカー側の成形技術開発が一体となって、プレス成形技術の発展を促してきた。

その発展は時代の要請、社会環境の変化に依るところが大きい。すなわち、1960年代後半のモータリゼーションの到来以前の薄鋼板への要求は、低降伏点化による高成形性や、表面品質の改善など、生産性を向上させるための材料開発が主であった。この頃までに、プレス成形の基本要素である深絞り成形、張り出し成形、伸びフランジ成形、曲げ成形についての研究が盛んに実施され、成形性の基本体系が確立された。1970年代に入って本格的なモータリゼーションが始まり、自動車の台数が加速度的に増加すると、ガソリン消費量増大に伴う地球環境汚染問題、エネルギー安全保障問題から、排出ガス規制、燃費規制が強化され、

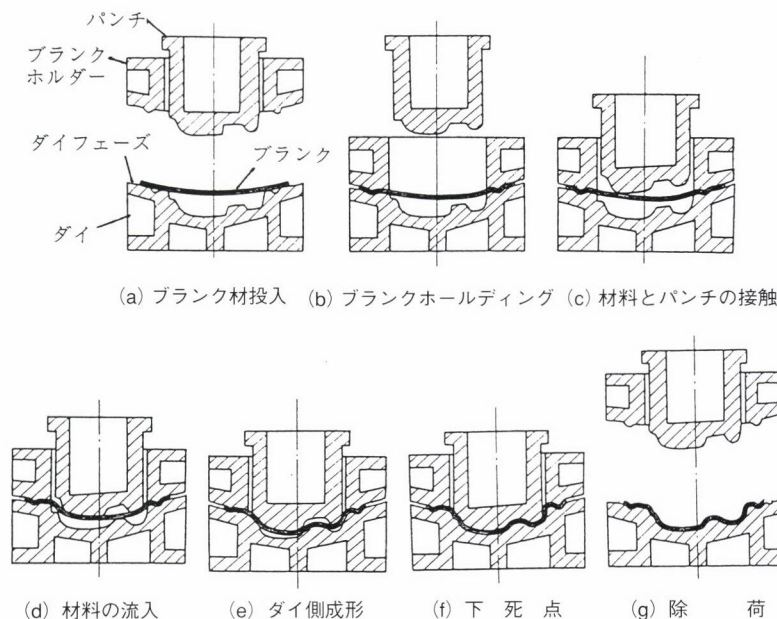
それに伴って、自動車の軽量化が促進された。自動車車体においては、高強度鋼板の利用による薄肉化が重要な手段の一つとなり、鉄鋼メーカーでは、成形性の良い高強度鋼板の開発が盛んに行われた。しかし、強度が向上すると必然的に成形性は劣り、破断やしわ、成形品の面品質の劣化などの不良現象や、金型への負荷の増大による金型損傷等が問題となり、これらを解決するために、プレス成形技術の新たな挑戦が始まった。特に、成形性を評価するためのLDH（Limiting Dome Height）テストの提案や、面ひずみ（面形状精度の一つで、部品形状が急に変化する部位の周辺に発生する凹凸の落差が数十～数百 μm のゆがみ）のメカニズムが論じられたのもこの頃である。また、薄肉化に伴って、耐食性の劣化も問題となり、各種表面処理鋼板が採用され始めたが、金型と材料の間の摺動特性の違いによる成形性劣化や、成形中の皮膜損傷による製品表面のきず、ピンブル（剥離物による凹凸のきず）の発生が課題となり、平板摺動やビード引き抜き試験による摩擦特性の評価も精力的に実施された。

軟鋼板に比べて成形性の劣る上記高強度鋼板や表面処理鋼板のような難加工材の成形では、破断やしわ、面ひずみ等の不良を発生させない成形深さをいかに向上させるかの技術開発が必要であり、そのための新しいチャレンジが始まっている。最近では、ユーザーの嗜好の多様化、メーカーの熾烈な市場獲得から、多種少量の自動車を短期間で、しかも安く世の中に出していくことが重要になり、それに対処するために、新しい加工技術の開発や生産準備期間の短縮のための方策が必要になってきている。

本稿では、自動車車体を構成している薄鋼板プレス部品を中心に、最近開発され、実用化されている新しいプレス成形技術を紹介する。

2 しわ押え力制御プレス成形技術

自動車車体部品のように、大寸法で複雑な形状をした製品は、一般に、後述する図10に示すように3～5工程を経て

図1 プレス成形プロセス¹⁾

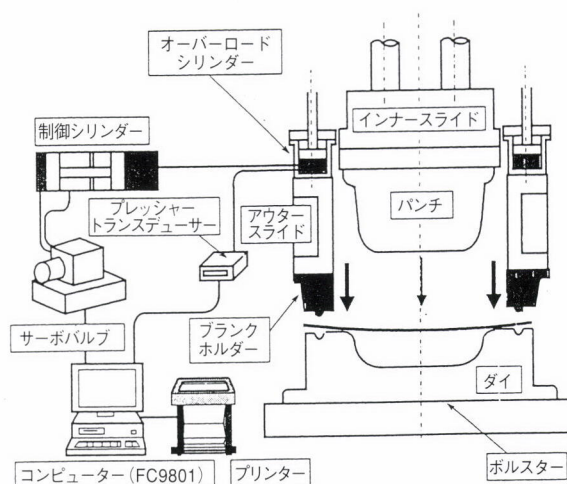
作られるが、このうち、絞り工程は、製品の良し悪しを決める重要な工程であり、薄板のプレス成形と言え、絞り成形を指す場合が多い。絞り成形の基本的なプロセスを図1に示す¹⁾。ブランクを型内に投入し、ブランクホルダー（しわ押え板）でブランク周辺部にしわ押え力を与え、パンチを押込んで立体的な形状を成形していくプロセスをとるが、成形の可否を左右する重要な因子の一つに、しわ押え力が挙げられる。従来、しわ押え力はプレス行程中一定に保たれているが、しわ押え力が高すぎると、パンチ力が材料の破断荷重に達して破断となり、逆に低すぎると、しわや面ひずみが発生する。寸法法で複雑な形状の部品では、破断やしわ等の不良現象が混在するため、一定しわ押え力ではすべての不良を回避して成形するための金型製作（主にダイとブランクホルダーの型合せ）に苦勞する。プレス成形中にしわ押え力を適切に変化させることができれば、大幅な成形限界（不良が発生しない最大の成形深さ）の向上が図れ、生産型の準備期間の短縮、ブランク材の低級化、成形不良率の低減、難加工材の成形等が期待できる。

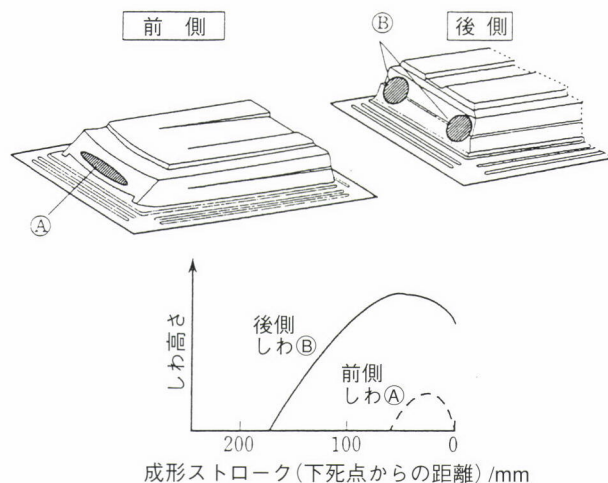
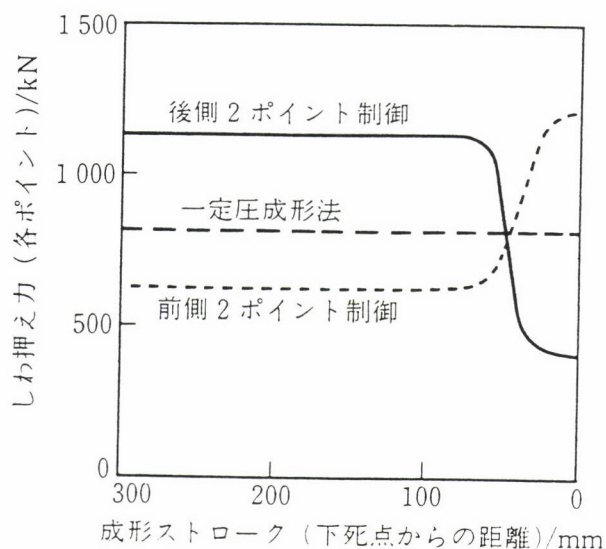
近年、このような観点から、薄板のプレス成形におけるしわ押え力制御技術に関する研究、開発が盛んに行われるようになってきた。開発したコンピュータ制御油圧プレス機械を用いて、円筒深絞り成形におけるしわ押え力制御の効果を調べた報告²⁾がその走りである。ここでは、自動車外板部品に実用化されているしわ押え力制御技術、および、将来有望と思われるさらに積極的なしわ押え力制御技術の一端を紹介する。

機械式複動プレス機のしわ押え力が、油圧を利用したオーバーロードシリンダー（過負荷の荷重がかかったときの安全弁に相当）を介して伝達されることに着目し、4ヶ所

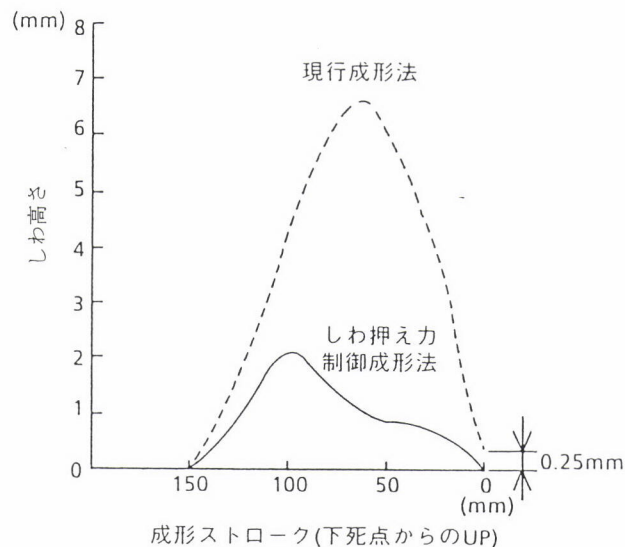
のオーバーロードシリンダーを電気・油圧サーボ弁を使用してしわ押え力を制御する方式が開発された³⁾。そのしわ押え力制御装置の概要を図2に示す。本装置は4ヶ所のオーバーロードシリンダーそれぞれに独立に制御シリンダー、サーボ弁を取り付け、オーバーロードの圧力を圧力変換器を介してコンピュータに取込み、設定した圧力になるように制御シリンダーの圧力を調整できるような仕組みになっている。この装置を10,000/6,000kN複動プレスに設置し、面ひずみや破断等の成形不良が発生し易い自動車ハイルーフパネルについて、制御効果が検討されている。

破断を発生させない適切な一定しわ押え力でハイルーフを成形した時の成形不良は、パネル前側のボディしわと後側コーナー部の肉余りしわである。この2つのしわは、図3に示すように発生・成長・消去のプロセスが異なっている。前側のボディしわは成形後期に発生し、後側の肉余り

図2 しわ押え制御装置概要³⁾

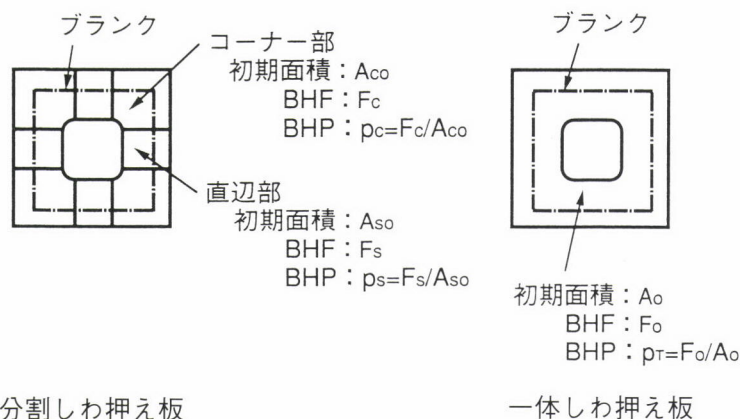
図3 しわの発生・成長・消去プロセス³⁾図4 しわ押え力制御パターン³⁾

しわは成形初期から発生し、両者のしわとも最終的には消去されない。そこで、パネル前側では成形後期のしわ発生に合わせてしわ押え力を増加させ、パネル後側では成形初期からしわ押え力を高くして、材料流入を少なくすること

図5 しわ高さの変化(ハイルーフ後側)⁴⁾

によりしわの成長を抑制し、成形後期には破断を回避するためにしわ押え力を減少させるような図4のしわ押え力制御パターンの効果が検討された。図5は、しわ押え力制御効果の一例を示したものである⁴⁾。パネル後側のしわは、しわ押え力制御することにより、プレス成形中に小さくでき、成形終了時(下死点)ではしわが完全に消去されている。その他の不良も抑制され、ハイルーフの成形には、図4に示したしわ押え力制御パターンで実用化されている。

上記の例は、一体しわ押え板(ブランクホルダー)を用いてしわ押え力を制御する場合であるが、しわ押え力をさらに積極的に制御するために、分割しわ押え板を用いる方法が提案されている^{5)~7)}。大寸法複雑形状部品では、部位によってしわ押え力の効果は異なるし、必要なしわ押え力の大きさも異なる。そのような部品に対して、形状に応じてしわ押え板を分割し、プレス成形中にそれぞれを個別に制御することができれば、しわ押え力制御の効果を大幅に引き出すことができると考えられる。このような観点から、コーナー部と直辺部で変形状態が大きく異なる四角筒絞り

図6 分割しわ押え板⁵⁾

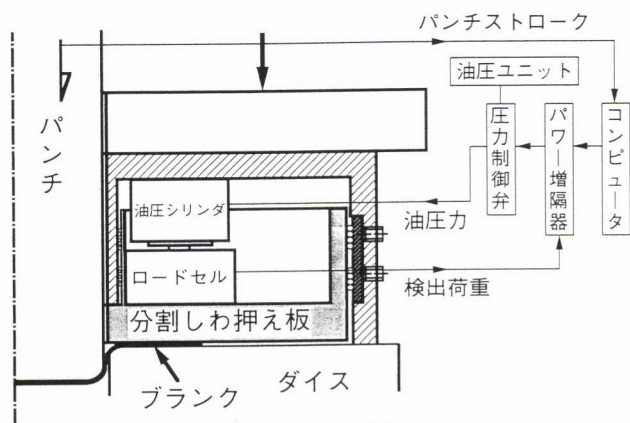


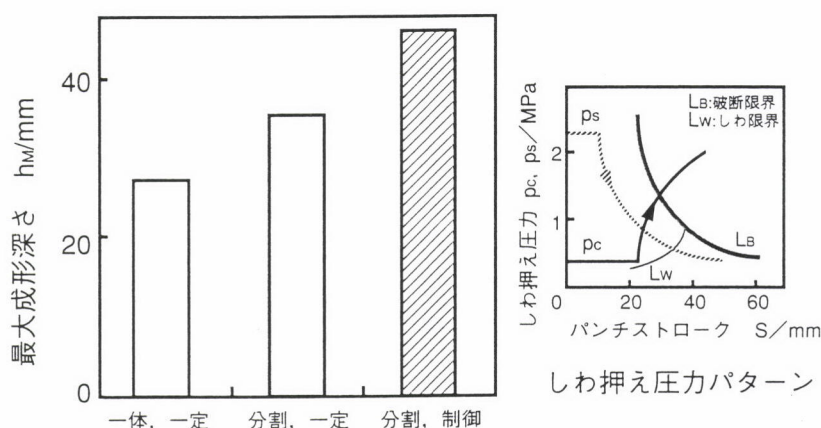
図7 分割しわ押え力制御装置の概略

成形をモデルとし取り上げ、分割しわ押え力制御を検討した例⁵⁾を紹介する。

図6は150×150の正四角筒絞りの分割しわ押え板を示したもので、コーナー部と直辺部の境界で8分割されている。図7は分割しわ押え板を取付けたときの型構造としわ押え力制御装置の概要である。それぞれのしわ押え板の背面には、独立に油圧シリンダーとロードセルが設置されている。しわ押え力は、各々のロードセルの検出荷重が、パンチの各ストローク位置においてあらかじめ設定された荷重値と一致するように、コンピュータと圧力制御弁で油圧を調整することにより制御される。

実験では、パンチ肩に生じる破断と、フランジ面に生じるしわを発生させないで成形できる最大成形深さを成形限界とし、この値が、一定しわ押え力の成形限界より大きくするようなしわ押え力制御パターンを試行錯誤で求めている。制御パターンの基本は、パンチの進行に伴って一定、漸増、漸減パターンとし、コーナー部のしわ押え圧力と直辺部のしわ押え圧力を色々組合わせた制御パターンが検討されている。

図8は板厚0.7mm、一辺340mmの正四角軟鋼板を用いた場合の成形限界が、一定しわ押え力成形よりも大幅に向上した制御パターンとその効果について示したものである。

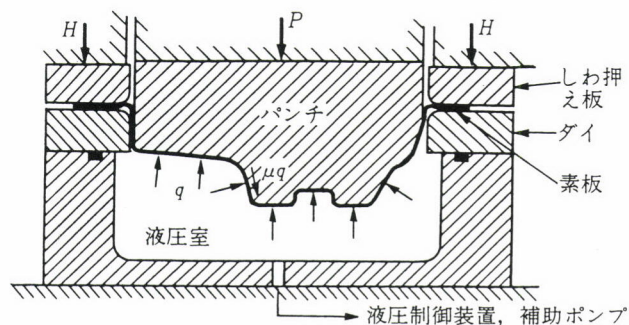
図8 分割しわ押え力制御の効果⁶⁾

直辺部のしわ押え圧力 (P_s) を初期に高く設定し、成形の進行とともに、一定しわ押え力成形の破断限界線に沿って漸減させ、コーナー部のしわ押え圧力 (P_c) を初期に低く設定し、その後直辺部のしわ押え圧力とほぼ対称に漸増させるパターンで制御することにより、一体、一定に比べて成形限界深さが約20mmも向上している。

以上のようにしわ押え力制御技術は、薄板プレス成形で発生する不良現象を抑制できる手段として、欧米でも、最近盛んに検討され始めている⁸⁾。しわ押え力制御技術で最も重要な課題は、最適なしわ押え力制御パターンをどのように設定するかであり、今後、FEMシミュレーションを活用した最適制御パターンの合理的な設定が進めば、本法が実生産の場で大いに使われていくものと思われる。

3 対向液圧成形法を利用した少量生産技術

本来、プレス成形は大量生産に向けた加工技術であり、品質の良いものをいかに安く、早く作るかに努力が払われてきた。しかし、自動車のニーズの多様化により、少量生産への対応も重要になってきた。少量生産では型費のコストに占める割合が大きくなり、これを解決する方法の一つとして対向液圧成形法が実用化されている。対向液圧成形法とは、下型の代わりに液体を満たした液圧室を用い、その液に圧力をかけると圧力が液に均一に作用するパスカルの原理を応用した成形法で、その基本原理を図9に示す⁹⁾。この成形プロセスでは、液圧室に液を満たした状態で、下しわ押え (ダイ) 上にブランク (素板) を置き、しわ押え力を作用させ、パンチを下降していくと液圧が発生して、ブランクがパンチに押しつけられて成形される。従って、下型が不要になり、しかもブランクがパンチになじみながら成形されるため、従来工法よりも深い絞り成形が可能であり、さらに形状凍結性も良いという特長を持っている。反面、成形時間が長く、生産性に劣るという欠点もある。

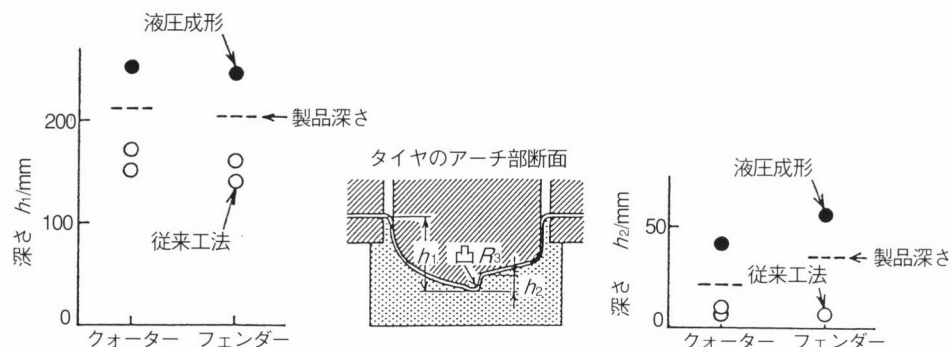
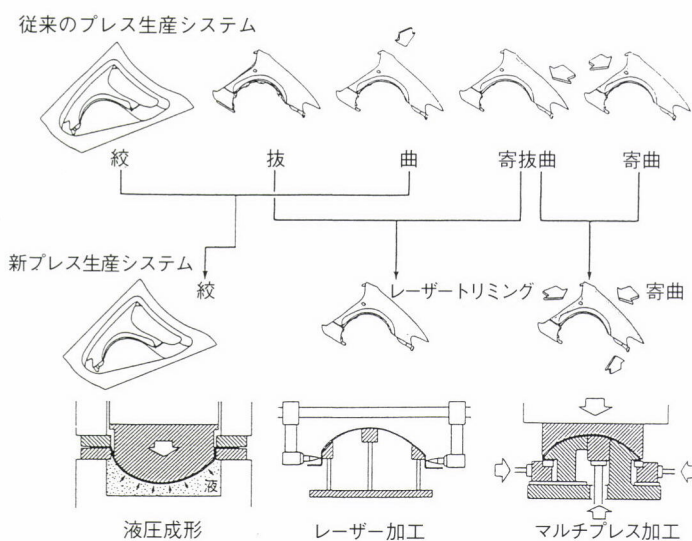
図9 対向液圧深絞り法⁹⁾

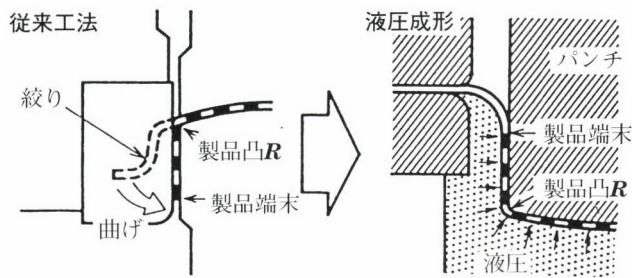
しかし、多種少量生産時代の到来とともに、絞り工程と曲げ工程の集約や下型の廃止による型費節減、高品質確保といった目的にマッチし、自動車車体パネルへの応用が検討された¹⁰⁾。以下にその概要を紹介する。

対向液圧成形法を組み込んだ少量生産プレスシステムの概要を図10に示す。フェンダパネルに例をとると、従来のプレス工法では、絞り、抜き、曲、寄抜き曲、寄曲の5工程を必要としたが、対向液圧成形法を採用することにより、絞り（曲げ加工も同時に行う）、レーザー加工機を用いた抜き、マルチプレスによる寄曲の3工程に集約

されている。短工程に集約された理由は対向液圧成形による絞り工程の高い深絞り成形性にある。図11に対向液圧成形法と従来工法の絞り深さを比較して示すが、対向液圧成形法では、従来のプレス成形法よりはるかに深い絞りが可能で、製品深さよりも高い深さが得られている。このことと、パンチへのプランクのなじみが良くなることから、図12に示したように、絞りと同時に曲げ成形も達成されている。対向液圧成形では絞り工程と曲げ工程が同時に行えることから、その後、抜き工程、寄曲げ工程を実施すれば良いことになり、工程短縮が可能になり、型費節減に大きく寄与している。

図10に示した生産システムで製造されている自動車車体パネルは11部品であり、型費は、従来に比べて65%の低減を実現している。一方、対向液圧成形法の課題は、成形スピードである。現在、フェンダやクォータのような大寸法パネルを成形するのに、1～1.5分の時間を要するが、成形時間がさらに短縮されれば、少量生産から中量生産にも対応できる技術として、今後ますます広がっていくものと思われる。

図11 絞り深さの限界¹⁰⁾

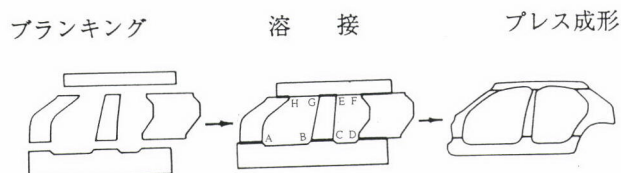
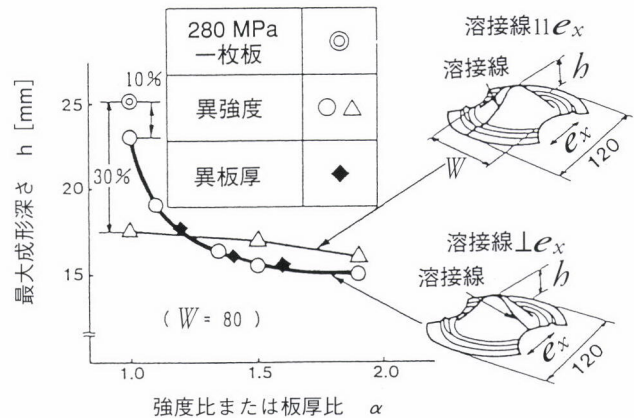
図12 絞りと曲げの工程集約¹⁰⁾

4 レーザ結合素材による一体化成形技術

自動車車体パネルの中でも、サイドパネルのように非常に大きく複雑な形状をしたものは、通常いくつかの部品に分割して成形をした後、溶接して一体品にしている。しかし、寸法精度の向上、接合コストの削減、プレス型費の低減等のためには、複数部品を一体化してプレス成形するのが望ましく、大型トランスファプレス機の普及とともに、一枚板の一体化成形も採用されるようになってきた。表1は分割タイプの成形法と一体化タイプの成形法の長所と短所を比較してまとめたものである¹¹⁾が、一体化タイプでは、パネルの各部位で要求される材質や板厚が異なるため、各部位の中の最上級の材質あるいは板厚をブランクに採用せざるを得ない。このため、部品の重量アップや材料費の上昇と歩留りの低下によるコストアップにつながる。これらの問題を解決し、両タイプの成形法の利点を生かした成形法として、レーザー溶接ブランクのプレス成形技術が開発された。この技術の実用例としてサイドパネルがあり、その概略工程を図13に示す。このサイドパネルへの適用のた

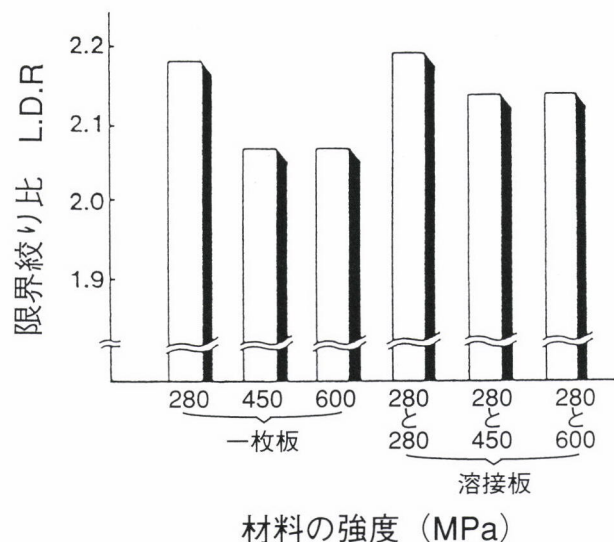
表1 自動車車体部品の分割タイプと一体化成形の比較¹¹⁾

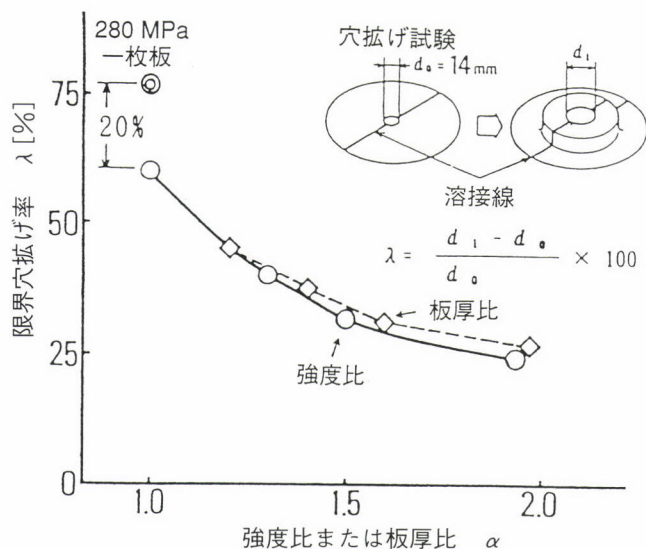
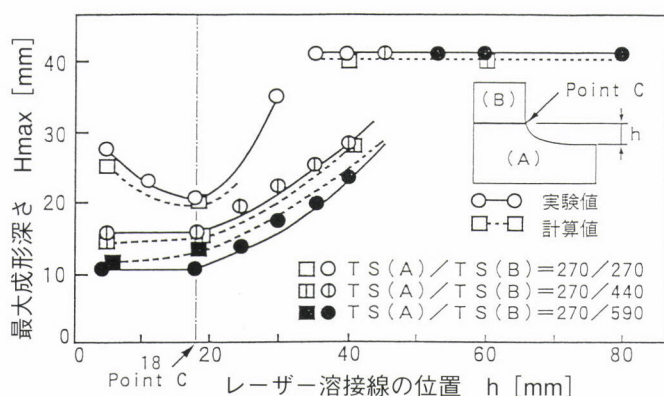
		従来型の分割タイプ		一 体 化 成 形	
概	観				
外 観		悪	い	×	良
型 数		20	型	×	4
製 品 精 度		低	い	×	高
材 料 歩 留 り		高い(65%)		○	低い(40%)
材料選択の自由度		高	い	○	低
重 量		軽	い	○	重

図13 レーザ溶接ブランクによるサイドパネルの一体化成形¹¹⁾図14 球頭張出し試験における強度比または板厚比と最大成形深さの関係¹¹⁾

めに、基本的な研究がいくつかなされている¹¹⁾。

レーザー結合ブランクがどの程度の成形性を持つか、を理解しておくことがまず重要であり、球頭張出し試験（張り出し性評価）、円筒深絞り試験（深絞り性評価）、穴上げ試験（伸びフランジ性評価）が実施された。それらの結果を図14～16に示すが、いずれの試験においても異強度材料の組合せ、異板厚の組合せによって成形性は大きく変化している。特にサイドパネルの場合、図13のA～Eに示した位置は非軸対称の伸びフランジ成形であるが、穴上げ試験（軸対称）による変形挙動とは異なり、溶接線位置によって成形性が異なることが予想される。そこで、モデル型によって溶接線位置に対する伸びフランジ性が検討された¹²⁾。その結果の一例を図17に示す。図にはFEMシミュレーションの結果も併記している。レーザー溶接ブランクの組合せの強度比を変えた場合、溶接位置によって、破断するまでの成形深さが変化しており、FEMシミュレーションでも実験と同様の結果を示している。このことから、伸びフランジ成形での溶接線位置の決定には、モデル型を用いた実験を

図15 溶接結合素材の限界絞り比¹¹⁾

図16 強度比または板厚比と限界穴抜き率の関係⁽¹¹⁾図17 レーザ溶接線の位置と最大成形深さの関係⁽¹²⁾

実施しなくても、計算で求めることができることを示した。

以上のように、レーザー結合ブランクの各種成形性を明らかにし、それをもとにサイドパネルの一体化成形を実用化させ、従来の一枚一体タイプの成形より、材料歩留りを15%向上させ、しかも分割タイプの成形にくらべてドア開口部の寸法精度を大幅に向上させている。本方法は、部品によって溶接線をどこに設定するかが大きな課題であるが、コスト削減のみならず、部位毎に必要な特性（強度、板厚）を持った材料を選択できるので、軽量化しながら車体の剛性を上げることもでき、各自動車メーカーでも成形性の基本から検討が始まっている。

5 おわりに

自動車車体部品を対象に、最近実用化が始まっている薄鋼板の新しいプレス成形技術について、その一部を紹介した。本文でも述べたように、自動車への要求は、社会情勢の変化、ユーザーニーズの変化によって変遷し、それに伴

って、薄鋼板で構成されている車体部品への要求も変化してきている。それに対処するために、材料も含めた従来プレス技術の改良・改善と新しい技術の導入により、プレス成形技術の向上が促されてきたといってもよい。本稿では割愛したが、新しい技術の流れとして取り組まれている計算機シミュレーション技術（CAE）では実部品の変形状態をかなりのところまで予測可能となり、実生産の場にも取り入れられるようになってきている。また、少量生産のための技術として、金型を用いないインクリメンタル成形法などの研究も始まっている。

21世紀に向けて、地球環境問題はさらに深刻化し、自動車車体部品へは、さらなる軽量化が求められるようになり、車体構造そのものの見直しや、薄鋼板のさらなる薄板化、アルミニウム等の新しい軽量材料の採用などが進むものと思われる。また、ニーズの多様化が益々進むことにより、さらなる生産準備期間の短縮や、低コスト化のための技術が要求されてくる。これらに対処するためには、先に述べたように、薄板のプレス成形において、今後も新しい技術の導入が不可欠となり、本稿がこれからの技術開発の指針になれば幸いである。

引用文献

- 1) 古林忠, 田村欣一: 塑性と加工, 24-275 (1983), p.1290
- 2) 真鍋健一, 浜野秀光, 西村尚: 塑性と加工, 29-330 (1988), p.740
- 3) 氏原新, 広瀬洋三: 塑性と加工, 33-375 (1992), p.373
- 4) 菱田祐次, 氏原新, 古林忠, 広瀬洋三, 小島正康: 春季塑性加工講演会論文集, (1990), p.49
- 5) 村田篤信, 恵比根美明, 松居正夫: 塑性と加工, 33-375 (1992), p.411
- 6) A. Murata, M. Matsui: Proc. 18th IDDRG Biennial Congress, Lisbon, Portugal, (1994), p.503
- 7) 寺前俊哉, 楊明, 真鍋健一, 西村尚: 春季塑性加工講演会論文集, (1994), p.757
- 8) K. Siegert, S. Wagner, M. Ziegler: SAE Paper 960824, (1996)
- 9) 中村和彦: 塑性と加工, 33-374 (1992), p.195
- 10) 池本公一: 塑性と加工, 33-375 (1992), p.379
- 11) 池本公一, 杉浦宏明, 東和男, 有馬幸一, 高砂俊之: 塑性と加工, 32-370 (1991), p.1383
- 12) 中川憲彦, 伊倉真, 夏見文章, 岩田徳利, 松居正夫: 塑性と加工, 35-404 (1994), p.1115

(1996年7月12日受付)