

氏名 (本籍)	金 英 洙(韓国)
学位の種類	博士(工学)
学位記号番号	甲 第 128 号
学位授与年月日	平成12年 9 月13日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	ストレッチドロウ法による缶成形に関する研究 (A Study of Can-Forming by Stretch-Drawing Process)
学位論文審査委員	(主査) 教授 後 藤 学 (副査) 教授 戸 梶 恵 郎 教授 堂 田 邦 明

論文内容の要旨

板材の塑性成形で基本的な円筒深絞り成形に関して、素板の成形性の評価はもっぱら限界絞り比(Limiting Drawing Ratio, L.D.R.)で行うことが常識になっている。すなわち、これが大なるほど深絞り性が高いと考える。しかし、本来深絞り成形は平らな板から低付き容器を成形するのが目的であり、最初に所望するカップ深さがあり、深さが重要な因子である。また、材料の節約の観点から、所定の深さのカップを得るのになるべく小さな寸法の素板を使いたいという要請がある。しかし、L.D.R.には成形できる最大カップ深さとか、ある深さのカップを成形するのにいかに素板寸法を小さくできるか、といった重要な観点が脱落している。おそらく、L.D.R.が大なる板材ほどこうした要請にも応えられるという暗黙の了解があると思われるが、それが真実なのかの検討は従来ない。

一般的な板材のプレス成形において、典型的不良現象としての破断は、ほぼ例外なく引張下で曲げを受ける部位で生じるが、それはこの板厚減少促進が原因である。したがって、一般論として板材成形においては可能な限り引張下曲げを軽度抑えることが常識である。円筒深絞り成形では、素板はポンチ肩部とダイス肩部で引張下曲げを受ける。したがって、曲げ作用を緩和するために、ポンチ肩及びダイス肩半径はなるべく大きく採り、板厚の6～10倍とすることが常識化している。深絞り性評価因子としてのL.D.R.は、こうした常識のもとで慣用されているものである。ダイス肩半径に上限が設けられているのは、大き過ぎると破断とは別種の不良現象であるボディしわを誘起するからである。

ところが、比較的最近今津らがダイス肩半径を板厚よりやや大きい程度とする深絞り成形を検討し、さらに初段に浅絞りしたカップを素材として用いることでダイス肩での引張を積極的に増す方法で、忌避するべきとされてきた「引張下曲げ」作用を強め、ダイス肩での破断を来すことなく、通常の深絞り成形より深いカップを造る技術を開発した。これは引張下曲げで板厚減少が促進されると、結果としてカップがその分深くなることを狙ったもので、ストレッチドロウ法と呼ばれる。つまり、深絞り成形においてダ

イス肩半径は板厚のオーダーまで小さくしてもよいことが明確化され、さらにそれによりカップ深さを増大させることができることがわかった。

しかし、今津らの技術開発はもっぱら飲料用スチール缶の製法に限定され、板厚 0.2mm 程度の薄い硬質鋼板からの缶成形技術である。この技術が深絞り手法による円筒成形全般においてどのような効果をどの程度発揮するか、つまりより一般的な 1mm 程度の板厚で各種材質かつ各種調質度（各種硬質度あるいは軟質度）の板材への適用性はどうか、ストレッチドロ性といった板材の成形性が定義できるのか、またその支配因子は何なのか、などに関しては何も分かっていない。

それにも増して、ストレッチドロ成形法の成功は、著者らに深絞り性評価法の不完全性を強く認識させた。すなわち、「カップ深さ」も評価の尺度として用い、これをより重視することが必要である。また、従来の深絞り法に拘泥することなく、それに代わってストレッチドロ法を円筒成形全般に浸透させることが実際有効であるか否かを明確にする必要がある。

こうしたことを背景として、本研究では円筒成形によく使われる各種材質、調質度及び板厚 (0.7 ~ 1.0mm) の板材を供試材とし、一方ダイス肩半径は 0.5 ~ 3.0mm まで種々に変え、単段及び 2 段ストレッチドロ成形を行い、通常深絞り成形結果と比較しながらストレッチドロ成形への各種因子の影響を明らかにし、深絞りに対する優位性を定量的に明示した。また、単段ストレッチドロに関して、4 次降伏関数の係数 X 値を導入して、ストレッチドロ成形性を検討した。

さらに、このようなストレッチドロ法による底付き円筒容器成形法を一層一般化する目的で、2 段成形に関し実験的に検討し、通常深絞り成形より相当に有利であることを種々の具体的データによって明示した。全限界絞り比（素板直径 / 2 段目ポンチ直径）を最大にし、限界カップ深さを最大にするためには初段でカップ直径を大きく、2 段目で絞り比を大とすることがよいこと、カップ深さが規定される時はそれが中位の深さなら最適の絞り比の組み合わせがあること、その時ストレッチドロ効果が最も生かされること、などを明示した。総じて、限界絞り比の他、カップ深さという観点を重視すべきことを明確化した。

一方、以上の実験的な検討に加えて、ストレッチドロ成形法の数値シミュレーションも行った。使用したコードは動的解析用であり、この準静的成形法が動的数値計算可能か否かに関する研究例はない。即ち、陽解法動的有限要素法コード D Y N A 3 D を用いて、単段及び 2 段のストレッチドロ円筒成形を数値的にシミュレートした。六面体ソリッド・リング要素を用い、解析精度を確保するため板厚を 4 層に分割した。単段成形では板厚 0.7 ~ 1.0mm 及び 3mm、2 段成形では板厚 0.7 ~ 1.0 mm の各種金属材料を対象とし、別途行った実験結果と比較して、特にカップ深さに関して実用上十分な精度で解析できることを確認した。このことはまた、提供した多くの実験データの信頼性の補強情報ともなるものである。

その他、厚さ 3mm の厚板に関しても、主に単段成形の実験を行い、しごきも作用する条件でも実験して、厚板においてもストレッチドロ効果のあることのほか、ストレッチドロとしごき作用との干渉を明らかにした。これについても数値シミュレーションを行っている。

論文審査結果の要旨

提出された学位論文に関して、審査委員会において公正にして慎重な審査を行った結果、その内容は工学博士の学位に十分値するものであるとの結論を得た。

即ち、板材のプレス成形（塑性加工）で最も基本的で多用される成形法に深絞りがあるが、本論文はその改良としてのストレッチドロウ法 Stretch-Drawing Process について、特に最も重要である缶成形に関して精緻かつ広範に研究したものである。これは、今日に至るまで、ダイス肩半径 r_d を小さくすると、板材がダイス肩を通過する際強い *bending under tension*（引張下曲げ）を受けるので板厚が急激に減少し、板材の破断を来たしてカップ成形不能であるとの根深い常識があり、そのため r_d は板厚の 8 - 10 倍が採用されて来た（プレス便覧にもそのように明記されている）。この常識を覆して、より小さな r_d を採用することで、強い *bending under tension* による板厚減少を積極的に利用し、より深いカップを成形しようとするものである。この手法はある製缶メーカーでごく限定的に利用され始めているに過ぎないので、その一般的有効性に関して何も資料がない状況である。本論文では、それに対して豊富なデータを提供し、その普遍的な有効性を定量的に明らかにし、もってストレッチドロウ法が従来の深絞り法に取って代わり得るものであることを明確化している。また、従来板材の深絞り性は限界絞り比(LDR)で評価されてきたが、与えられた直径の素板から成形可能な缶の最大深さ、あるいは材料節約の観点から所定の深さの缶を得るのに要する最小の素板直径という視点が、LDR以上に重要であることを明らかにしている。その際、ダイス肩半径 r_d を素板厚さの3倍以下とするストレッチドロウ法によってこそ、そうした新しい視点が活かされることを示している。最も多用される厚さ 1 mm 程度の、広範な材質の板材に関して、 r_d を種々変更して単段成形と2段成形の実験を遂行し、いずれにおいても、同一直径の素板から、通常の再絞り成形に比して相当に深いカップが成形可能であることを定量的に明らかにしている。その際、壁部の板厚分布が一層均一になることも確認している。それ故、参照に供するため、通常の深絞りとの比較において「深さ利得比」と「素板節減率」を定義して、それを調査・図表化しており、実務資料としても貴重なデータを提供している。2段成形に関しては、1段目と2段目での最適絞り比配分、つまり工程設計の適切化も調査している。その結果、一般則として、ただより深いカップを成形したいとの視点からは、2段目成形が可能であるという条件の下、初段成形においてもなるべく大きなポンチ直径を採用し、素板にも初段成形で限界ぎりぎりの大きな直径を選べば、2段成形後最も深い最終成形品が得られることを示している。しかし、通常の深絞りとの比較では、むしろ中位の絞り比において、ストレッチドロウの効果が最も発揮されることを示している。その他、板厚 3 mm の厚板について、一部しごき効果も付加する場合に対しても調査し、やはり相応の効果を認めている。さらに、以上の全てのケースについて数値シミュレーションを実行し、その可能性と信頼性を吟味すると共に、実験データの補強情報を与えている。その手法は、弾塑性動的陽解法コードである汎用有限要素法ソフト、DYNA3Dの公開版を用いているが、モデル化には工夫を凝らし、またプリ・ポストは自作している。それ以上に、材料要素の運動方向がしばしば変化することと、ダイス

肩半径が小さいための困難から、基本的に準静的加工であるストレッチドロー法がこの動的コードで数値シミュレーション可能か否かは、事前には全く不明であり、むしろ否定的に思われた。しかし、特に成形品深さの予測に関して、単段及び2段成形とも、実はそれが実用的精度で可能であることを示した事は、この数値シミュレーション技法の応用範囲を拡大する意味でも、また塑性加工への数値シミュレーション技法の活用に、より一層の展望を開いた点でも、意義は大きい。

最終試験結果の要旨

論文提出者は、学位論文審査期間中および公聴会における試問などによる最終試験に明快に答述し、論文内容の分野に関して深く広い知識と創造力・独創性を有すること、また研究遂行能力のあることを証明した。さらに、当人は過去3編の英文論文を公表しており、また国際会議で英語による口頭発表も2度経験していて、英語力についても全く問題ないと判断された。

よって、最終試験に合格、との結論を得た。