

ハイドロフォーム成形技術の開発

Development of Hydroforming Technology

水村正昭^{*(1)} 本多修^{*(2)} 吉田亨^{*(3)} 井口敬之助^{*(4)}
 Masaaki MIZUMURA Osamu HONDA Tohru YOSHIDA Keinosuke IGUCHI
 栗山幸久^{*(5)}
 Yukihisa KURIYAMA

抄 録

近年、自動車部品に利用されつつあるハイドロフォーム(HF)は、成形条件が複雑で分かりにくいという課題を抱えていた。そこで本論文では簡易な形状の金型を用いたHF試験とFEM解析を実施し、まずHF中の材料の変形状態を調査した。また、その変形状態が内圧と軸押しとの負荷経路によって変化することも分かった。次に、素管の材料の影響を明確にするため、独自の評価法である成形余裕度評価法を確立し、それを利用してHFに及ぼす材料特性の影響を明確にした。さらに、従来は巨大で高価であったHF装置の小型化も実現した。これらの成果により、HF市場はさらに拡大された。

Abstract

Recently hydroforming has been applied for auto parts however it has problem that forming condition is difficult. In this report, hydroforming tests and FEM analysis with simple shape were carried out and deforming behavior during hydroforming were observed. It was found that the loading path of internal pressure and axial feeding has effect on hydroforming deformation. Next hydroforming allowance evaluation method was developed. By this method, the effect of material properties was proved. The conventional hydroforming machine is large and expensive, but a compact machine was developed. By these results, hydroforming market becomes larger.

1. 緒 言

ハイドロフォーム(以後、HFと称す)は、古くからバルジ加工という呼び名で自転車用部品¹⁾や配管継手²⁾等の加工に用いられてきた。しかし近年ではULSAB(Ultra Light Steel Auto Body)プロジェクト^{3,4)}に代表されるように、軽量化ニーズから自動車部品への適用が広まっている。特に欧米では早くから適用^{5,6)}が始まり、その市場は急速に拡大している。一方、国内でも1999年から実部品への適用^{7,8)}を開始した。筆者らは、このような市場動向とほぼ並行して当該成形法の研究に取り組み、基礎的な成形技術、材料評価法、実部品開発技術、成形設備等、広範囲に渡って開発してきた。本報では、それら多くの研究開発成果の一端を報告する。

2. ハイドロフォームの特徴

HFとは、金型内に管材を装着し、当該管内部に水圧を負荷することによって金型形状に仕上げる成形法である。その際に、両管端から強制的に材料を流入させ(以後、軸押しと称す)、減肉を抑制しながら大変形を行う。

HFを自動車部品に適用する場合は、形状が複雑であるため、管材そのままの形状では金型に装着することができず、事前に曲げや断面潰し等の予加工を施した後に金型に装着する例も多い。また内圧負荷中にピアス穴を空けることも可能である。このように近年では、それらの工程を総称してHFと呼ぶことも多い(図1)。

HFが自動車部分野で急速に普及しつつある理由、すなわち従来

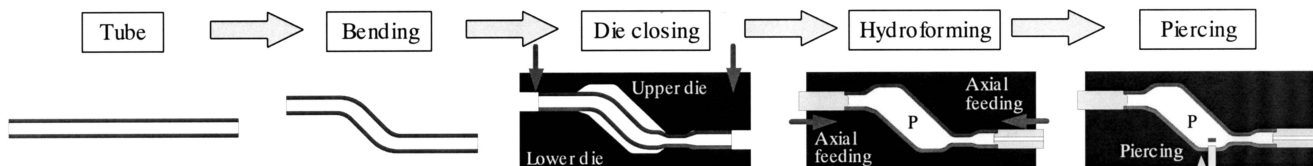


図1 一般的なHF工程
 General hydroforming process

^{*(1)} 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主任研究員
 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2279
^{*(2)} 名古屋製鉄所 設備部 マネジャー

^{*(3)} 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主任研究員 情報科学博士
^{*(4)} 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 研究員
^{*(5)} 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 所長 工博

のプレスに対してのHFの利点としては、以下のような項目が挙げられる。

- 部品統合によるコストダウン
- 溶接フランジ部削減による軽量化
- 溶接箇所削減による疲労特性向上
- 閉断面化、加工硬化による部品強度向上
- 金型内ピアスや溶接削減による工程省略
- トリム代削減による歩留り向上
- 全体を塑性変形することによるスプリングバック低減
- 極力せん断変形を実現することにより大変形が可能

以上のようにHFには数多くの利点があるが、プレスに比べると、まだその市場は小さく伸び悩んでいるのが現状である。その理由、すなわちHFの欠点としては下記のような項目がある。

- 成形条件が複雑であり、熟練技能が必要
- 加工装置が巨大で高価
- サイクルタイムが長く、生産性が低い
- 他部品とのスポット溶接が困難

特に に関しては、HFが新しい技術であるからという理由だけでなく、成形パラメータが多く複雑であるという理由が大きい。すなわち、内圧や軸押しとの組合せ、およびその負荷経路によって成形可否が決定され^{9,10)}、しかも材料等が変化すると、その適切な成形条件も変化する。そこで本報では、どのような材料でどのような成形条件で加工すれば、適切なHFが実現されるかという点に関して報告する。また最後に、上記 の課題に対する検討例として、小型で安価なHF装置の開発の発展にも述べる。

3. ハイドロフォームに及ぼす負荷経路の影響

3.1 実験およびFEM解析方法

HFは内圧と軸押しの負荷経路によって成形可否が決定されるが、その一般的な影響を調査するため簡易な形状の金型を用いて試験を行った。具体的には、外径63.5mmの管材を用いて図2に示されるような95mm×63mmの長方形断面の金型でHFを行った。

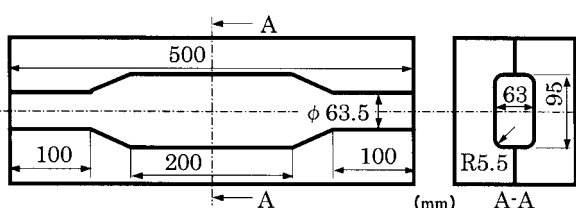


図2 HF試験に用いた金型形状
Die shape for HF tests

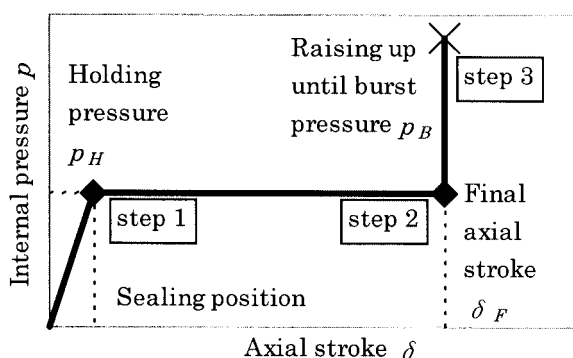


図3 HF試験における負荷経路
Loading path in HF tests

負荷経路においても簡易な経路を選択した。図3のように、シールのため管端を若干量軸押ししながら内圧 p_H まで昇圧し、その後、内圧 p_H を保持したまま両管端をそれぞれ δ_F まで軸押し、最後に軸押し量 δ_F を保持したままバースト圧力 p_B まで昇圧した。通常は、昇圧を伴いながら軸押しする方が一般的であるが、パラメータ数を減らすため、ここでは軸押し中の内圧を一定とした。また最終圧力のある値に定めると材料の強度によってコーナー形状の仕上がり等が変わるため、本試験ではバーストするまで昇圧する方法とした。

供試材には、外径63.5mm、肉厚2.3mm、長さ490mmの鋼管を用いた。材料特性は、降伏応力(YS):340MPa、引張強さ(TS):400MPa、全伸び(EI):38.1%であり、外表面には潤滑性の良い防錆油を塗布した。

実験における現象を詳細に調べるため並行してFEM解析を実施した。ソルバーにはPAM-STAMP(動的陽解法)を採用し、約2.5mm角の四角形シェル要素を用いた。なお、加工硬化は n 乗則で近似し、摩擦係数 $\mu = 0.07$ とした。その他、金型形状や負荷経路は実験と同一条件とした。

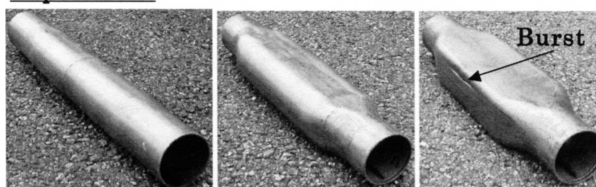
3.2 HF中の変形形状

まず本HFの加工途中における変形過程を観察した。図4は、 $p_H = 36\text{MPa}$ 、 $\delta_F = 40\text{mm}$ の条件で加工した場合に得られる各ステップでの変形形状の実験およびFEM結果である。最初のstep 1ではほとんど拡管されず、step 2の段階で軸押しとの進行とともに周方向に拡管される。すなわちstep 1では軸押しが微小なことから、平面ひずみ状態の変形と考えられ、まだほとんど降伏条件に達していないが、step 2で軸圧縮が負荷されて初めて降伏条件に達し、拡管が進行していく。なお、最後のstep 3の昇圧過程では、コーナーRの形成のみがなされ、最終的にはコーナーRの立上り部であるR止り部からバーストする場合が多い。

なお、同図より、本FEMは実験の変形過程を良好にシミュレートしている。さらに、HF中のしわ形状等、定量的にも良く一致していることを確認しているが、詳細は参考文献¹¹⁾に譲る。

次に、本FEMを用いて負荷経路の影響を調査した。図5は、最終軸押し量 $\delta_F = 40\text{mm}$ の場合の各種保持圧力下におけるHF加工中の変形挙動を示す。(a)は、最小肉厚ひずみの挙動であるが、各時点でも最小を示す位置の値のため、変形とともに当該箇所は変化する。本図の垂直にひずみが変化している箇所は、内圧一定下で軸押しをし

Experiment



FEM

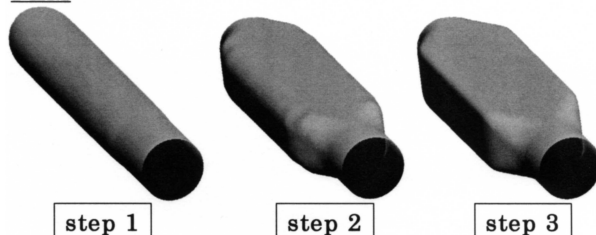
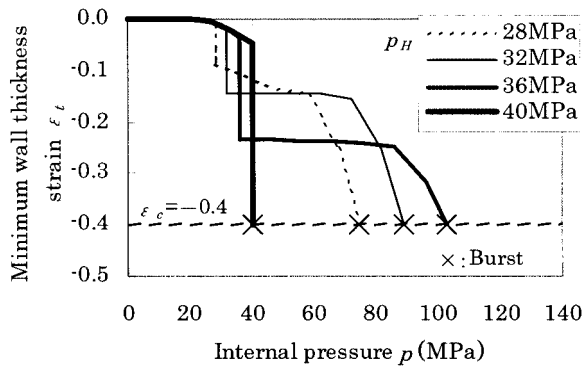
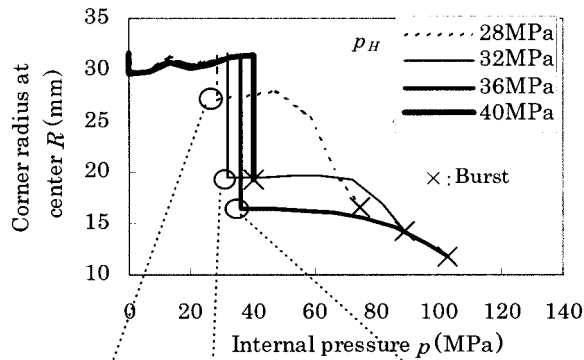


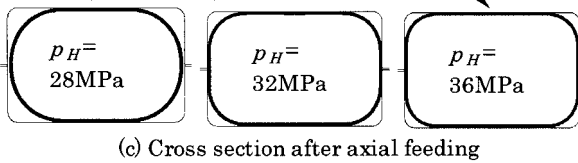
図4 HF中の変形過程
Deforming shape during HF process



(a) Minimum wall thickness strain during hydroforming



(b) Corner radius at center during hydroforming



(c) Cross section after axial feeding

図5 HF中の肉厚ひずみとコーナーR推移
Behavior of wall thickness strain and corner radius during HF

ているstep 2の工程を示している。なお、図中の×印はバーストを意味しているが、実測結果から限界ひずみ $\epsilon_c = -0.4$ になった時にバーストすると仮定した。一方(b)は、中央断面部の外面コーナーRを示しており、また本図中 印で示している軸押し完了時の断面形状を(c)に記載する。

本FEM結果より、保持圧力 p_H が高いほど軸押し中の拡管が助長され、 $p_H = 36\text{MPa}$ の例では軸押し完了時(step 2)でコーナーRもかなり小さくなり、金型にほぼ密着した断面になる。したがって、当然、

肉厚も薄くなるため、保持圧力 p_H が過度に高い40MPaの例では、軸押し中に限界肉厚に達しバーストを起こす。

しかし、軸押し中にバーストを起こさない範囲であれば、最終的な昇圧時(step 3)には保持圧力 p_H の低い方が早く限界ひずみに達し、低下でバーストする。これは上述の断面形状を見ても分かるように、保持圧力 p_H の高い方が軸押し完了時(step 2)で金型に密着しコーナーでの隙間が狭くなるため、その後の昇圧に耐え得るからである。すなわち、軸押し中は材料が流動しているため周方向にもある程度均一に材料が流れ込むが、軸押し完了後の昇圧時は、金型接触箇所材料がほとんどグリップされ、R止り部にひずみが集中するため、コーナー隙間の広い方が早くバーストすると考えられる。

以上のように、HFに及ぼす負荷経路の影響は大きく、適正な負荷経路を選択することが非常に重要であると言える。例えば上述の結果から、軸押し中の圧力は、バーストしない程度に高圧にした方が最終的には高圧まで負荷でき、断面形状も良好となる。

4. ハイドロフォームに及ぼす素管材料の影響

4.1 HFの成形余裕度評価法の開発

前章より、どのような負荷経路がHFにとって適切かということが、一例ではあるが明らかになった。次に、どのような素管がHFに適しているかという点に関して検討した。

しかし、素管のHF性の評価方法はまだ確立されておらず、せいぜい自由バルジ試験^{12,13)}による評価のみであるが、当該方法では、ひずみ比 (=軸方向ひずみ/周方向ひずみ) が -0.5 ~ 1 の範囲でしか評価していない。一方、実生産のHFでは、外側に金型が存在し、ひずみ領域もせん断側 (< -0.5)まで広がっている例¹⁴⁾も多い。また、HFでは材料によって適切な負荷経路が異なる点も問題であり、例えば、ある一定の負荷経路で各種素管を評価してしまうと公平な評価とはならない。

そこで、良好な成形品が得られるHF成形可能範囲の広さで素管の相対的な評価をすることを試みた。このような、いわゆる成形余裕度の概念は、従来からプレス加工の分野では存在しており、プレスのクッション圧を変動させて割れやしわの発生しない成形可能範囲を求めることによって、成形余裕度を相対評価している。一方、HFにおいては、前述のように成形の良否を決定するパラメータが多いため同様の評価が困難であった。しかし前章の実験で用いた図3のような負荷経路を選択すれば、HFの複雑な成形条件が保持圧力 p_H と軸押し量 δ_F の2つだけで整理できる。図6に、前章の実験で用いた

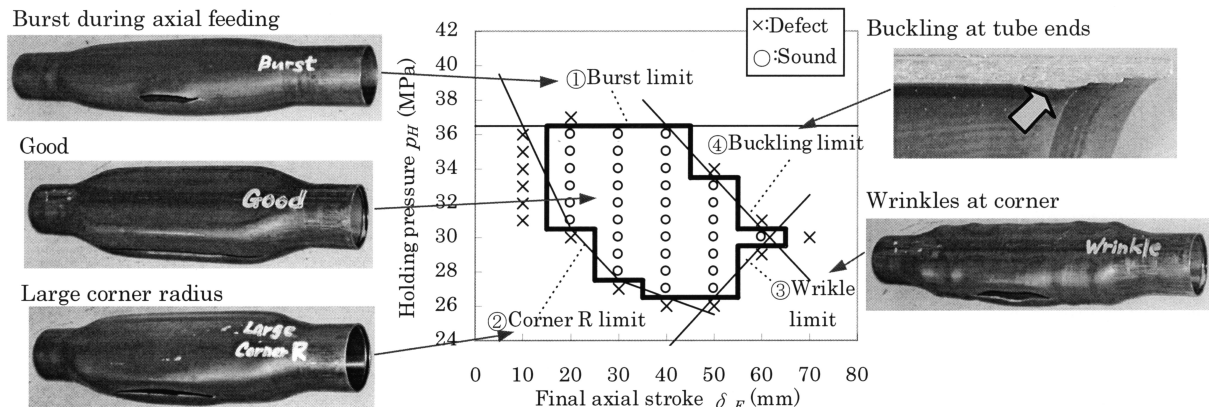
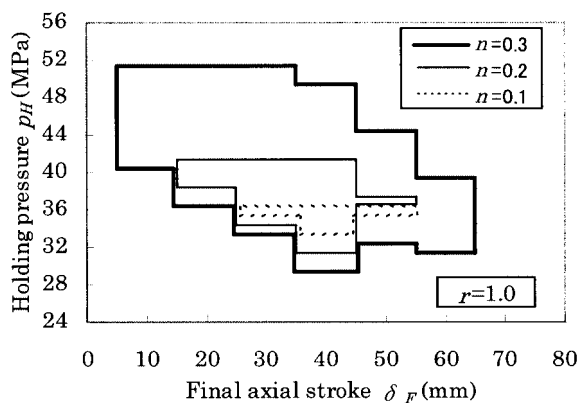
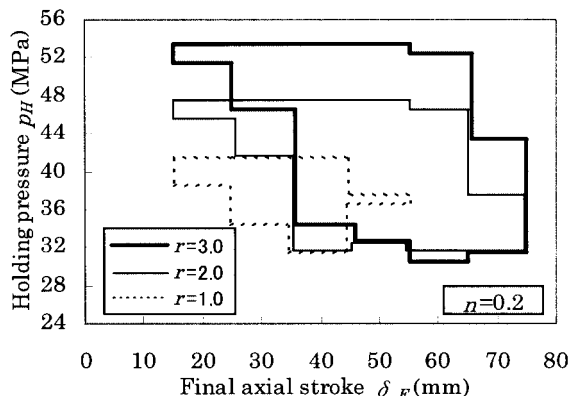


図6 HFの成形余裕度評価
Forming allowance evaluation for HF



(a) Effect of n-value



(b) Effect of r-value

図7 成形余裕度及ぼすn値, r値の影響
Effect of n-value and r-value on HF allowance

金型と材料における成形余裕度の評価例を示す。本図で成形可能範囲は4本の限界線に囲まれているが、それぞれ以下の4種類である。

バースト限界：軸押し中にバーストする限界の保持圧力

コーナーR限界：コーナーR 20mm

しわ限界：長方形部のしわ曲率 0.007mm^{-1}

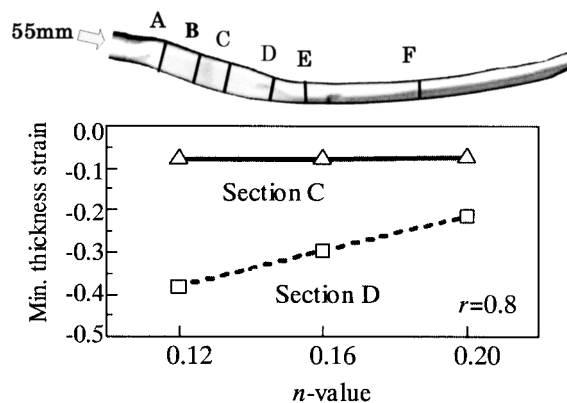
管端座屈限界：管端近傍のしわ曲率 0.07mm^{-1}

この手法で得られた成形余裕度を各種素管で求めて比較することにより、素管のHF性を相対的に評価可能となる。

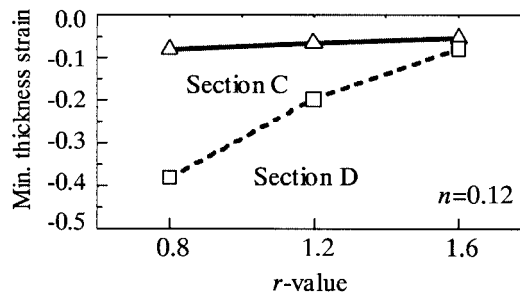
4.2 HFの成形余裕度及ぼす材料特性の影響

上述の成形余裕度評価法は、素管の総合的な特性が評価できる意味で非常に有用であるが、逆に言うとも、効果を及ぼす加工因子の特定が困難である。そこで、より一般的な指標でHF性を評価するため、成形余裕度及ぼすn値とr値の影響を調査した。

材料特性個別の影響を調査するにはFEM解析が有効であるため、前章で使用したFEMを使用してn値とr値の影響を検討した。結果を図7に示す。これより、n値が向上すると成形可能範囲は全体的に広がるのに対し、r値の場合は、その増加とともに成形可能範囲は高圧側、高軸押し側に移動しながら拡大する。言い換えると、ある材料からn値を向上させた材料に切り替えた場合は同一条件でも成形可能であるが、r値を向上させた場合には、成形条件を変えないと逆に成形不良が発生することがあり得ることを意味している。したがって、n値, r値とも、その値を増加させるとHF成形性は向上するが、r値の場合は、成形条件を変えないとその効果を十分発揮できないことに注意する必要がある。



(a) Effect of n-value



(b) Effect of r-value

図8 実部品のHFに及ぼすn値とr値の影響
Effect of n-value and r-value on HF of actual parts

4.3 実部品における材料特性の影響

以上より、少なくとも前述のような単純形状では、n値, r値がHF性に影響を及ぼすことが分かった。次に、実際の複雑な部品形状における影響を検討した。

図8はセンターピラーラインフォース[®]におけるFEM解析例である。これより、D断面では、n値, r値とも減肉抑制に効果があるが、管端に近いC断面ではほとんど効果がない。C断面では軸押しの影響により強制的に材料が流動・拡張するため、材料特性の効果が現れにくかったと考えられる。このように、部品形状や部位によっても材料特性の効果は変わってくるため、実部品を成形する際には、必ずしもn値やr値の高い材料が必要とは限らない。

5. コンパクトなハイドロフォーム装置の開発

5.1 HF装置の小型化, 安価化

前章までで、HFの負荷経路や材料の選定に関してある程度の知見を得た。これにより、2章で述べたHFの欠点 に対して1つの指針が得られたと考えている。次に「の欠点である」加工装置が巨大で高価 に対しての開発について述べる。本開発はトヨタ自動車(株)と共同で取り組み¹⁵⁾、図9のように従来機に対して体積比で1/10に小型化した装置を実現した。その結果、価格は半分以下、消費エネルギーも1/10に削減できた。以下に、本装置の開発ポイントを説明する。

(1) 成形工程から見た機能整理

従来のHF装置は、金型の開閉と成形中の金型開き防止を同一機構で行うため、大出力で長ストロークのシリンダが必要であった。そのため機械本体および油圧装置が大型化していたが、それぞれの機能を分割整理したことでシンプル小型化した(図10)。

(2) 積層Cフレーム構造

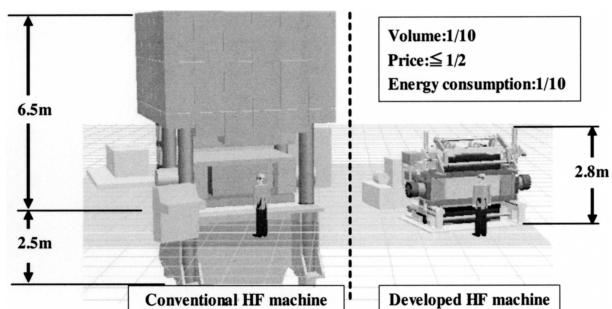


図9 HF装置のサイズ比較(型締め力:35000kN)
Comparison of HF machine size (die closing force: 35000kN)

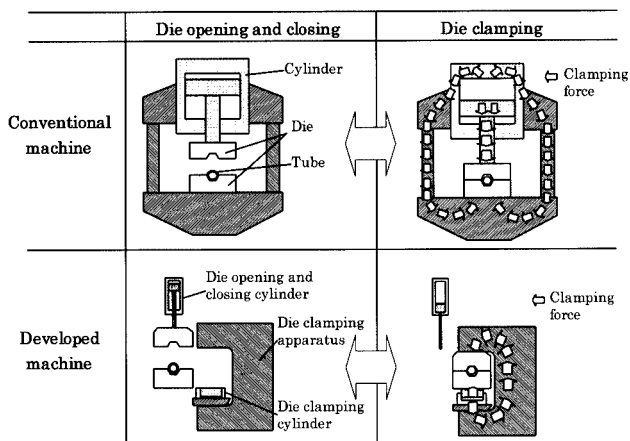


図10 HF装置の型締め機構の比較
Comparison of die closing mechanism of HF machine

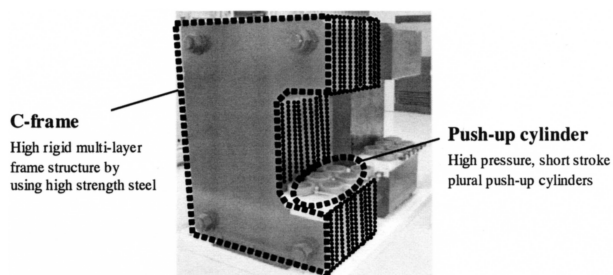


図11 HF開発機のCフレーム構造
C frame structure of developed HF machine

金型開き防止に積層Cフレーム構造を採用した。これは巨大な成形反力を最短距離で支持・押さえ込むためであり、C形状の780MPa級高張力厚板を長手方向に積層した構造とした(図11)。これにより小型フレームを実現した。

(3) 金型開き防止用シリンダ

成形中の金型開き防止用のシリンダは、短ストロークのため高耐圧化が可能となる。さらに、複数個のシリンダで荷重分担させることで、小型化、大出力化を実現した。

(4) その他の新技術の導入

増圧器で造られた成型用超高压水を素管内部に供給すると同時に

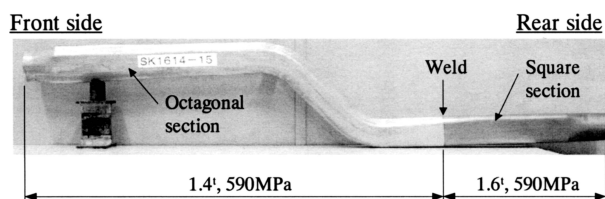


図12 HF開発機による成形例(フロントサイドメンバー)
Forming example by developed HF machine (front side member)

金型開き防止用シリンダにも供給し、常に成形反力に応じた型締め力を発生させるセルフロック機構を考案した。また、ACサーボモータ駆動油圧ポンプによる軸押し制御システムなどを導入した。

5.2 本開発装置によるHF成形例

本開発装置を用いてHFを行った例としてフロントサイドメンバーの成形例を述べる。本部品は新日本製鐵が独自に形状設計した部品であるが、先端側は衝突特性を考慮し、拡管率25%の八角形断面とした。素管は外径94mmで長さ2180mmの鋼管を用い、肉厚は1.2~1.6mm、強度は290~590MPaの各種材料で成形した。また肉厚の異なるテーラードチューブでも成形しており、図12の例は先端側が肉厚1.4mm、強度590MPa、後端側が肉厚1.6mm、強度590MPaのテーラードチューブによる加工例である。

6. 結 言

近年、自動車部品に利用されつつあるハイドロフォームは、成形条件が複雑で分かりにくいという課題を抱えていたが、簡易な形状におけるHF試験とFEM解析により、負荷経路や材料特性の影響が明らかになった。また、従来は巨大で高価であったHF装置の小型化も実現した。これらの成果により、HF市場はさらに拡大されたが、他部品との接合技術等、まだまだ解決すべき課題も多い。今後、HF適用部品のさらなる拡大を図るためにも、それらの課題を解決していくことが重要である。

参考文献

- 1) 高木六弥: 塑性と加工. 12(120), 59(1971)
- 2) 淵澤定克: 塑性と加工. 30(339), 473(1989)
- 3) Schaik, M.: IBEC '97. 1997, p.113
- 4) 栗山幸久: 塑性と加工. 39(453), 1009(1998)
- 5) Bruggemann, C. J.: Hydroforming 1999. 1999, p.353
- 6) Vanker, R. W. et al.: IBEC '96. 1996, p.118
- 7) 那須興太郎: 第27回金属プレス加工技術研究会, 2000, p.1
- 8) 真嶋聡ほか: 平12塑加春講論. 2000, p.427
- 9) Dohmann, F.: Hydroforming 1999. 1999, p.1
- 10) 木村剛ほか: 51回塑加連講論. 2000, p.347
- 11) 水村正昭ほか: 塑性と加工. 45(516), 60(2004)
- 12) Altan, T. et al.: Hydroforming 1999. 1999, p.105
- 13) 桑原利彦ほか: プレス技術. 39(7), 48(2001)
- 14) Yoshida, T. et al.: IDDRG2000-21st. 2000, p.43
- 15) 鶴原吉郎: 日経メカニカル. (570), 22(2002)