

ハイドロフォーミングの新加工技術の開発

Development of New Hydroforming Technology

水 村 正 昭*
Masaaki MIZUMURA
末 廣 正 芳
Masayoshi SUEHIRO

和 田 学
Manabu WADA
栗 山 幸 久
Yukihisa KURIYAMA

佐 藤 浩 一
Koichi SATO

井 口 敬之助
Keinosuke IGUCHI

抄 録

ハイドロフォーミングは、日本では1999年以降、多くの自動車部品に適用されてきた。今後さらなる適用部品を拡大するため成形限界の向上と他部品との結合技術に着目して以下のような新加工技術を開発した。(1) 可動金型を用いた高枝管張出し技術、(2) 直角方向への二枝張出し技術、(3) 拡管方向を限定した交差式可動金型技術による大拡管成形技術、(4) ハイドロバーリングとナット埋め込み技術、(5) 全長フランジ成形技術。

Abstract

Hydroforming has applied for many kinds of auto parts in Japan since 1999. In order to expand hydroforming market, increasing of hydroforming limit and joining technology between hydroforming component and other component are important. Therefore authors developed following five new hydroforming technologies, (1) high branch forming technology with moving dies, (2) forming technology of two branches with right angle each other, (3) large expanding technology by means of expanding method with restricted expanding direction and crossing moving dies and counter punches each other, (4) hydro-burring and nut-inlaying technology and (5) full length flange forming technology.

1. 緒 言

ハイドロフォーミングは、金型内に管材を装着した後、内圧と管軸方向の押込み（以後、軸押しと称す）によって金型形状に添わせる加工法である。古くにはバルジ加工という呼び名で自転車部品¹⁾や配管継手²⁾など比較的単純な枝管張出し加工に用いられていたが、1994年に開始されたULSAB（Ultra Light Steel Auto Body）プロジェクト³⁾を契機に、呼び名もハイドロフォーミング（以後、HFと称す）に変わり、複雑な形状の自動車部品への適用が進んだ。例えば、図1に示されるように、金型装着前に曲げ加工や潰し加工を施すことで複雑な形状の加工が可能になった。また内圧を負荷したまま穴を開けることも可能である⁴⁾（以後、本技術をハイドロピアスと称す）。HFの普及は欧米から広まったが^{5,6)}、日本でも1999年に初めて適用が開始^{7,8)}された後、多くの部品に適用が拡大された。

HFの主なメリット、すなわちHFを適用する際の理由は

多くあるが、代表的な2点として“部品統合”と“軽量化”が挙げられる⁹⁾。具体的に“部品統合”のメリットを説明すると、これまで複数の板材を溶接することで製造していた部品を1本の管材から製造することで、トータルのコストが低減でき、また溶接部が削減されることから耐疲労特

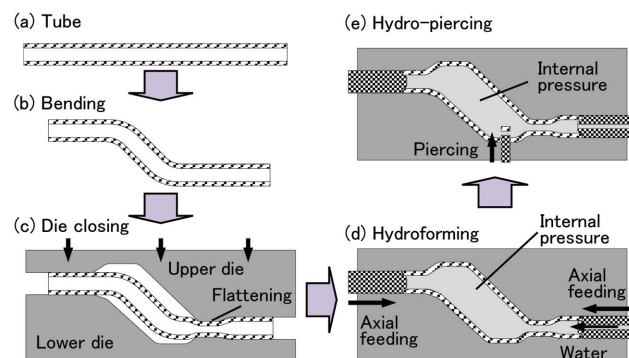


図1 一般的なハイドロフォーミングのプロセス概略
General hydroforming process

* 鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター 主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

性や組立て精度等も向上する。一方“軽量化”は、溶接に必要な余肉が削減できるということと、従来のスポット溶接のような不連続な結合と比べて強度や剛性が上がる分、板厚が下げられるということで実現される。

以上のようなメリットによりHFの適用は開始当初は進んだが、その適用部品は、シャシー系のクロスメンバーやサイドメンバー¹⁰⁾、排気系のエキゾーストマニホールド¹¹⁾等、かなり限られる。今後、適用部品を拡大するには、上述のHFのメリットをより活かすこと、すなわちさらなる部品統合と軽量化を目指す必要がある。そのための加工技術として、筆者らは成形限界の向上を検討してきた。本報では、その開発内容に関して紹介する。

また、逆にHFのデメリットを解消することも適用拡大には有効である。HFのデメリットの一つに、他部品との結合の困難性があるが⁹⁾、これに対しての対策技術も筆者らは検討を進めてきたためその開発内容に関しても合わせて紹介する。

2. ハイドロフォーミングの成形限界の向上

HFの加工形状は、枝管張出しタイプと拡管タイプの二つに大きく分類できる。そのそれぞれのタイプにおける成形限界が向上すれば、これまで適用できなかった部品へのHFの適用が可能になり、さらに多くの部品数の統合も可能になる。前者の枝管張出しタイプに関しては、枝管高さの限界向上として可動金型を用いた高枝管張出し技術を、また枝管の数を増やした直角方向への二枝張出し技術をそれぞれ開発した。一方、後者の拡管タイプに関しては拡管方向を限定した交差式可動金型技術を開発した。以下、それぞれの技術に関して紹介する。

2.1 可動金型を用いた高枝管張出し技術

一般に管材は、内圧だけではほとんど変形せず、軸押しが重量されることで大きく変形が進行する¹²⁾。言い換えると、いかに軸押しで材料を流入させるかが大変形のポイントとなる。しかし従来のHFでは管端のみ軸押しするため直管部の摩擦抵抗の影響で材料が枝管部に流入し難い。そこで筆者らは材料流入を促す方法として可動金型を用いた加工法を開発した。

本加工法は図2¹³⁾のSTEP2に記載されるように、管端周辺の金型自体を可動させることで枝管部に材料を流入し易くした。またSTEP1で予め若干曲げておくことで、より可動金型の肩部で管材を押込み易くしている。本方法により得られた高枝管張出しサンプルを図3¹³⁾に示す。素管は、外径31.8mm、肉厚1.0mm、鋼種STKM11Aの鋼管を用いた。通常のHFではせいぜい素管径 D の1倍程度の枝管高さ(1D)が限界とされるが、本方法では素管径の2.2倍の枝管高さ(2.2D)が達成できた。

本工法では、可動金型によって枝管部への材料流入を促

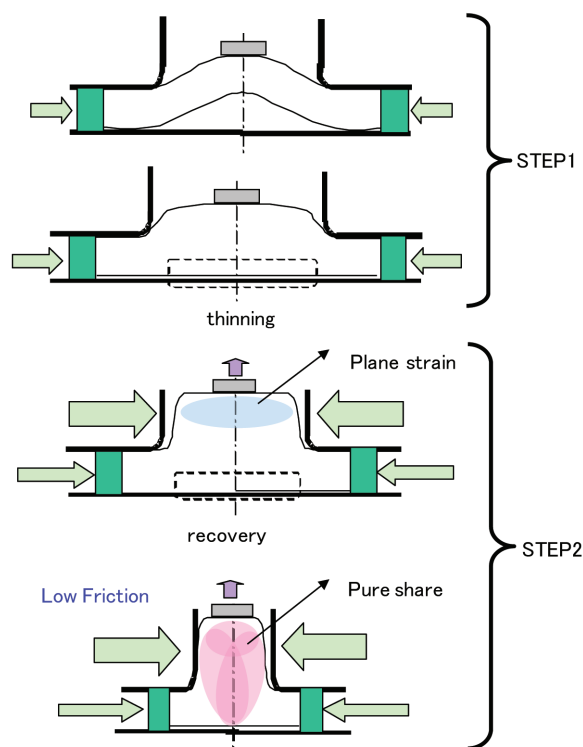


図2 可動金型を用いた高枝管張出し加工技術¹³⁾
High branch forming technology with moving dies

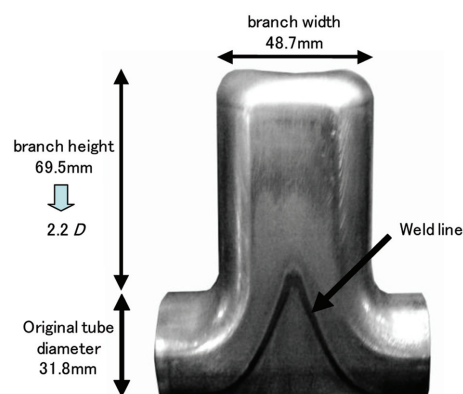


図3 可動金型技術によって加工した高枝管張出し成形例¹³⁾
Sample with high branch formed by moving dies

進しているが、その効果をひずみ状態で示すと図4¹³⁾のようになる。通常のHFでT字形に成形した(a)の場合は枝管頂点部近傍で、平面ひずみや等二軸引張になるのに対し、本方法ではほとんど全部の領域で純粋せん断に近いひずみ状態となる。以上のことから本加工法は大変形加工に有効であることが分かる。

2.2 直角方向への二枝張出し技術

前節でも述べたように大変形加工には純粋せん断変形となるひずみ状態が好ましい。例えばT字形に成形する場合は、軸方向に圧縮された材料が周方向に伸びるような材料流動が側面部で起きている¹⁴⁾。しかし枝管を直角方向に張出すということは、その側面部から別の枝管を張出すことを意味するため、これまでそのような形状をHFで加工す

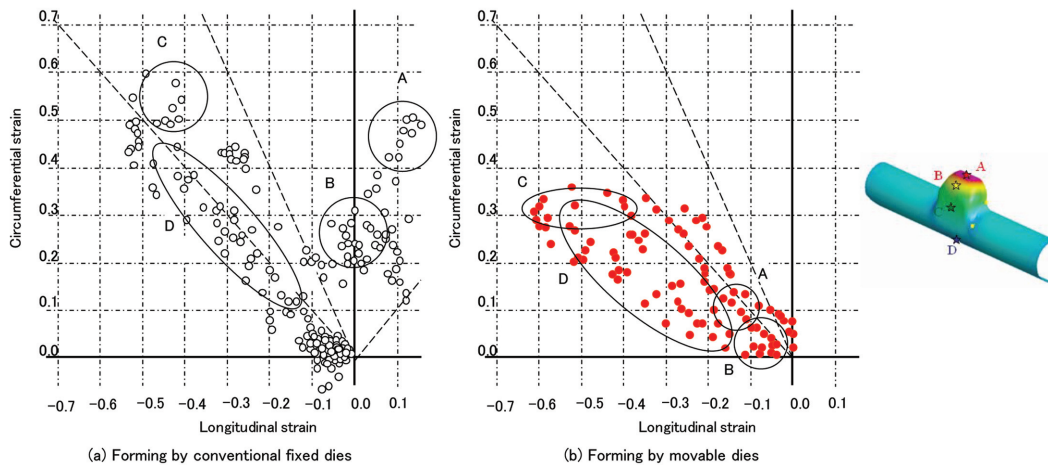


図4 枝管張出し成形後のひずみ状態のFEM解析結果¹³⁾
FEM results of strain states after forming branch by hydroforming

ることは困難であった。

しかし、筆者らは図5¹⁵⁾に示すような直角方向に二枝張出すHF加工を実現した。本例は、外径114.3mm、肉厚2.9mm、強度TS440MPa級の鋼管を用いて枝管の軸方向幅 $W_L=140\text{mm}$ の枝管を直角方向に二枝張出した。実現化のポイントは、二枝の張出し位置を故意にオフセットすることである。

図6¹⁵⁾に、枝管の軸方向幅 W_L に対するオフセット量 K の比を変えた場合のそれぞれのひずみ状態をFEMで計算した結果を示す。本HFにおける一番の割れ危険部は二枝の間の箇所の同図a部であるが、 K/W_L の値が小さいほど、すなわちオフセット量が小さいほどa部のひずみが纯粹せん断から周方向単軸引張側に傾き、ひずみの絶対値も大きくなる。



図5 直角方向に二枝張出し加工した例¹⁵⁾
Forming samples with two branches with right angle each other

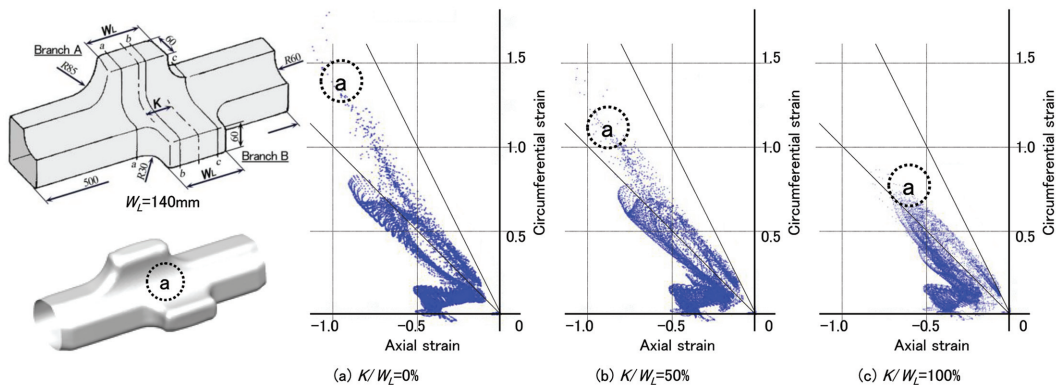


図6 直角方向二枝張出し成形後のひずみ状態のFEM解析結果¹⁵⁾
FEM results of strain states after forming two branches with right angle each other

くなる。一方で、二枝の位置が完全にオフセットされた $K/W_L=100\%$ の場合はa部も他の箇所とほぼ同じひずみになる。以上のことから、二枝の位置のオフセットを適当な値に選択することでa部のひずみを小さくできて当該HFが実現できる。つまり、完全に同じ位置で直角方向に二枝張出すのは困難であるが、二枝位置が若干オフセットされた形状に修正すれば直角方向に二枝張出すことが可能となる。

2.3 拡管方向を限定した交差式可動金型技術

2.1節でも述べたように、大変形を実現するためには純粹せん断変形が有利である。しかし、管材を軸押しありの自由バルジさせる場合、座屈が発生するため純粹せん断変形は実現できず、せいぜい周方向単軸引張状態が限界である¹⁶⁾。座屈を防ぐためには金型による拘束が有効であり、しかも成形初期から金型に接触していることが好ましい。以上のことから、ある方向は金型と接触させ、その直角方向のみに拡管する形状が純粹せん断変形を実現し易い¹⁷⁾。

そこで筆者らが開発した方法は、まず横方向の変形を拘束して縦方向に拡管し、次いで縦方向の変形を拘束して横

方向に拡張することで最終的に全方位的に大きな拡張形状を得る加工法である。図7¹⁸⁾に、本加工法により外径60.5mm、肉厚2.5mm、鋼種STKM11Aの鋼管の周長を約3倍の断面周長に拡大した加工例を示す。なおHFの拡張率は一般に(成形後の周長-素管周長)/素管周長×100%で表現されるが、図7の3倍拡張の例は拡張率200%に相当する。現在適用されているHF部品の一般的な拡張率は10%程度であり、最大でも40%程度である⁷⁾。それらと比べると本加工法で得られる拡張率が画期的に大きいことが分かる。

また本加工ではもう一つ新しい加工技術として交差式可動金型を開発した。一般に、拡張したい箇所に対して管端からの距離が長い形状の場合、管端からの軸押しは直管部の摩擦抵抗のため材料が流入し難い。そこで2.1節でも述べたように可動金型技術の適用を試みた。しかし図8¹⁸⁾の(b)に示すように、可動金型は初期状態で互いの金型の距離が離れているため通常のHF以上に軸方向の座屈や破裂が起き易い。それを防ぐために(c)のようなカウンタパンチを使用するとカウンタパンチと可動金型との間に初期の隙間が生じ、やはり座屈や破裂が生じ易い。そこで開発した方法が交差式可動金型である。これは(d)に示すように、可動金型に設けられた溝の中をカウンタパンチが可動する構造となっている。これにより成形初期から管材のほとんど全部の周囲を可動金型やカウンタパンチによって拘束されるため、座屈や破裂が生じ難くなる。

本技術を用いて、従来7部品の溶接構造であったものを1本の鋼管からHFで加工する一体型アクスルハウジングを開発した¹⁹⁾。図9¹⁸⁾に試作品の写真を示す。素管の外径は60.5mm、肉厚は2.8mm、鋼種はSTKM11A、最終的な拡張率は180%である。なお、本アクスルハウジングは疲労耐久性上有利となるように応力集中部が少なくなる滑らかな球面形状に設計されている。

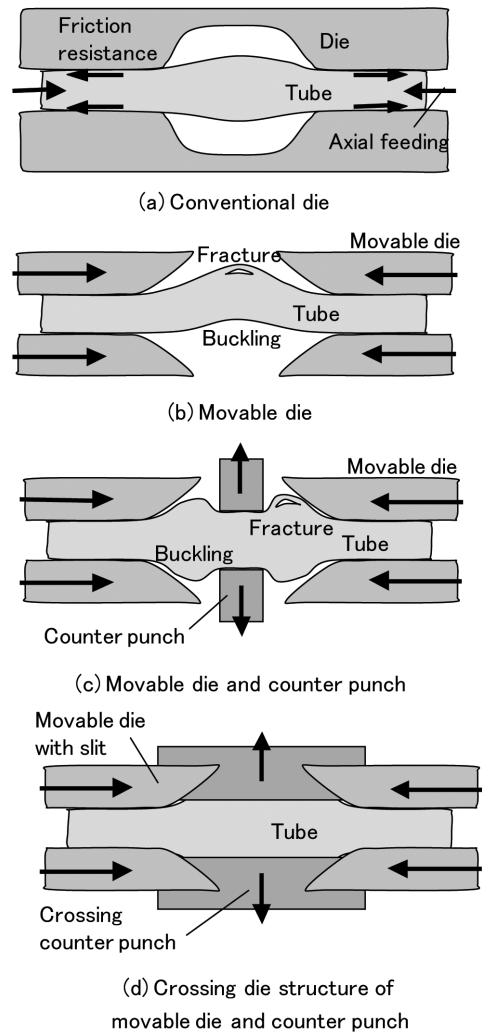


図8 ハイドロフォーミングの金型構造の比較¹⁸⁾
Comparison of die structures for hydroforming



図9 大拡張成形技術によって成形したアクスルハウジング¹⁸⁾
Axle housing formed by large expanding hydroforming

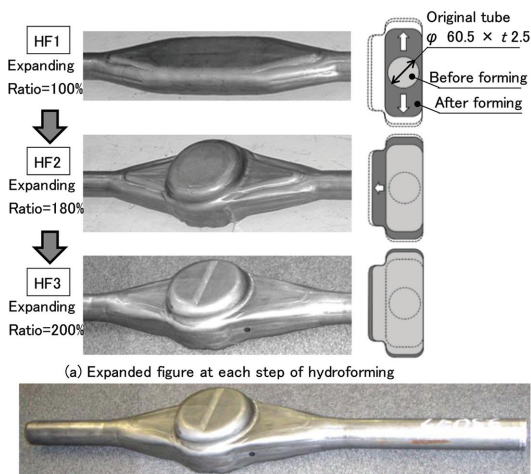


図7 拡張方向を限定した多工程成形による大拡張成形例¹⁸⁾
Forming samples with large expansion ratio by multi steps hydroforming method with restricted expanding direction

3. 他部品との結合技術の開発

HFの成形品と他の部品との結合は、元々アーク溶接されるようなシャシー系の部品の場合は従来と同様にアーク溶接すれば良い。しかしスポット溶接やボルト結合が主体であるボディ系の部品の場合、溶接フランジ部がないHF成形品は他部品との結合が困難となる。そこで筆者らはHF成形品と他部品との結合を容易にした新シーズ技術としてハイドロバーリング及びナット埋め込み技術と全長フランジ成形技術を開発した。以下にそれぞれの開発内容を説明する。

3.1 ハイドロバーリングとナット埋め込み技術

諸言で述べたように、内圧を負荷した状態でHF成形品

に穴を空けるハイドロピアスは量産でも一般的に行われている技術である。筆者らは当該技術を応用してHF成形品の内部に穴広げ加工を施すハイドロバーリング技術を開発した。図10²⁰⁾に本技術の説明図を示す。通常のHF加工後(a)、内圧を保持したままピアスパンチでハイドロピアスを行う(b)。その後、ピアスパンチの肩部でバーリングパンチを押し込み、ハイドロピアスで空けた穴をHF成形品の内部に押し広げる(c)。その間、内圧は保持されたままであるが、その内圧が高いほどバーリング形状はシャープに成形され、低いほどバーリング肩部はだれる。ただし、ハイドロバーリング時の穴縁の割れに関しては内圧の低い方が有利となるが、ここでは詳細²¹⁾は省略する。

図11²⁰⁾は、外径63.5mm、肉厚2.3mm、強度TS 460MPa

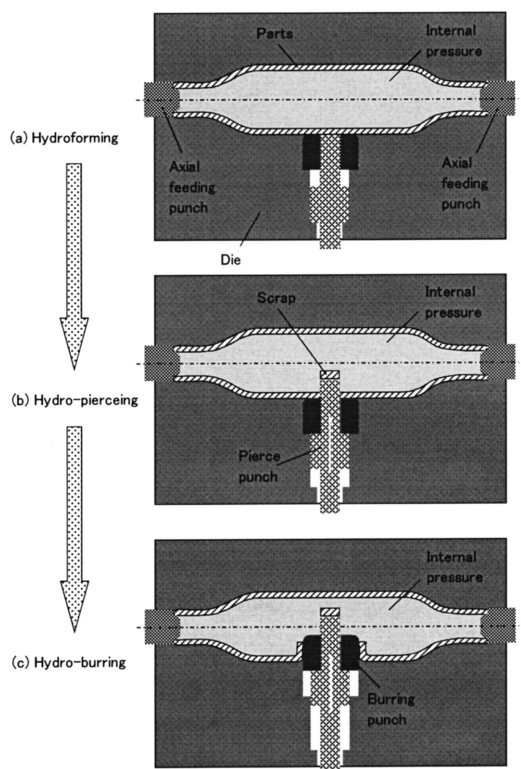


図10 ハイドロバーリングのプロセス概略²⁰⁾
Hydro-burring process

級の鋼管を拡張率50%の長方形断面に拡張するHF加工を施した後に、10mm径のピアスパンチで穿孔し、続いて20mm径のバーリングパンチでハイドロバーリングした例である。このハイドロバーリング部にM22のタップ加工を施した例が図12²⁰⁾の(a)である。このねじ部を使用すればHF成形品と他の部品とが(b)のようにボルト結合が可能になる。

しかし、上述の方法では素管が薄肉の場合はタップ加工が難しいという問題がある。また高強度材のように穴広げ率の低い材料はハイドロバーリングの高さを高くすることが困難である。そこで予めタップ加工が施されたナットをHF成形品に埋め込む技術を開発した。図13²²⁾に本技術の概略のプロセスを示す。基本的には図10のハイドロバー

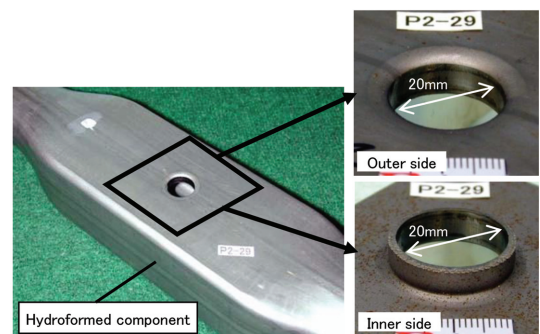


図11 ハイドロバーリング後の成形品の例²⁰⁾
Sample after hydro-burring test

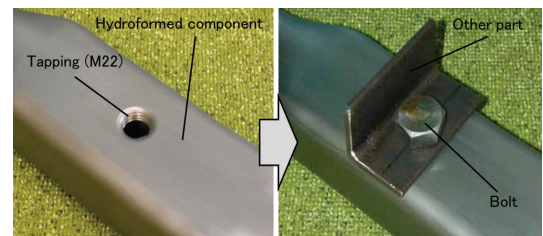


図12 ハイドロバーリングにタップ加工を施して他部品とボルト締結した例²⁰⁾
Bolting hydroformed component to other part after tapping at hydro-burring position

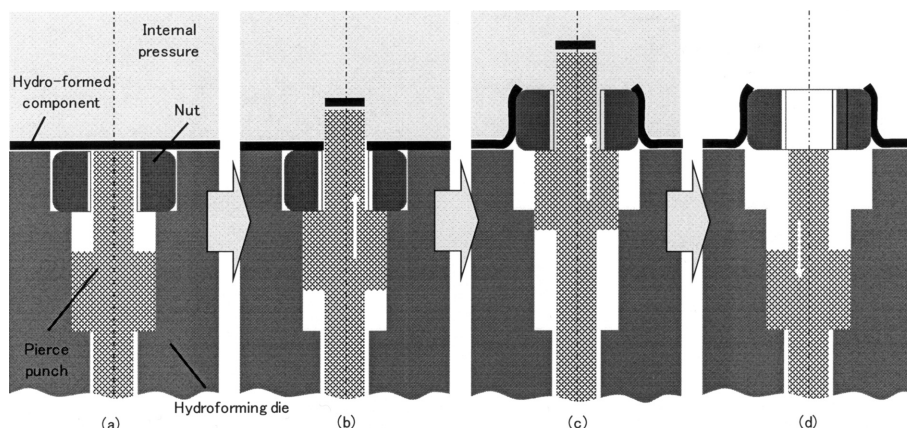


図13 ハイドロフォーミングの成形品へのナット埋め込み技術のプロセス概略²²⁾
Processes of nut inlaying into hydroformed component

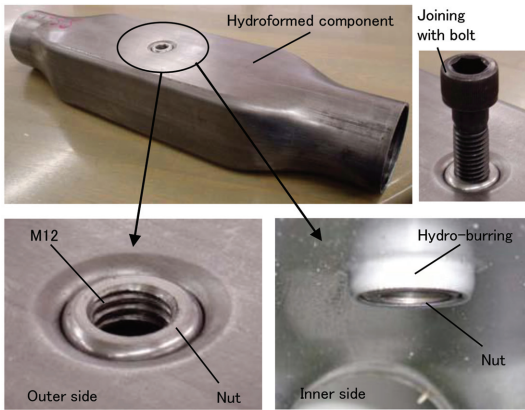


図14 ハイドロバーリングによるナット埋め込み技術でナットを埋め込んだハイドロフォーミングの成形品の例²²⁾
Sample of hydroformed component with inlayed nut by hydro-burring

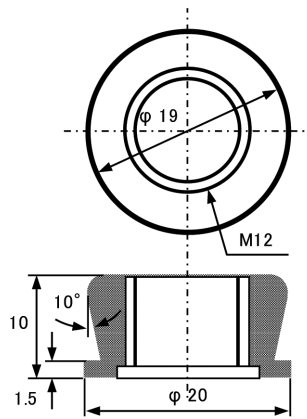


図15 ハイドロフォーミングの成形品に埋め込むナットの最適形状(単位 mm)²²⁾
Detailed sizes of the best nut for inlaying into hydroformed components (dimensions in mm)

リングと同様であるが、ここではバーリングパンチの代わりにナットを使用し、加工後にナットをHF成形品に埋め込んだままにする。図14²²⁾は図11と同様のHF成形品の形状の例であるが、素管には若干肉厚の薄い外径63.5mm、肉厚2.0mm、強度TS 440MPa級の鋼管を用いた。本図のように当該技術を用いれば薄肉の素管でもこの埋め込まれたナットを用いて他部品とのボルト結合が容易になる。なお、ナットの形状も各種試したが、埋め込み時のシール性、埋め込み後のHF成形品内外への外れ難さ、締結時の引き抜き荷重、ねじれトルクなど、各種の特性上最も適した形状として図15²²⁾の形状を開発した。

3.2 全長フランジ成形技術

HF成形品には、溶接用のフランジ部が存在しない。そのため、従来のフランジ部を利用したスポット溶接やボルト結合が適用できない。そこでHFの加工中に金型で挟み込むことでフランジ部を成形する加工法が考えられるが、一部のみ挟み込むと、その周辺にしわや割れが発生し易くなる。内田ら²³⁾は周辺部を折り畳むような構造で一部のみ

フランジ成形することを実現しているが、複雑な機構の金型が必要になる。そのため筆者らは全長に渡ってフランジ部を有するHF成形を検討した。全長に渡ってフランジを成形すると、前述のような周辺のしわや割れは問題がなくなる。しかし、管端もフランジを成形することになるため、内圧を保持しながら管端を変形することが可能となるようなシール技術が必要となる。そこで管端フラットシール方法を開発した。

フラットシール方法の手順を図16²⁴⁾に示す。まず下型に円形断面の素管を置く。なお、素管長さは金型長さよりも長くするが、その金型からはみ出す長さをシール長さ L_s と定義する。素管を置いた状態のままフラットな形状の軸押しパンチを前進させ、管端と接触させて管内部に水を充填する(a)。次に管内部の圧力 P を P_1 まで昇圧させるが、その際にフラットシールを確保するため管端押し付け力 F を F_1 まで増加させる。その状態を維持したまま上型を降下させて型締めすると上面にフランジ形状が成形される(b)。その後、さらに内圧 P を P_2 まで上昇させると同時に管端押し付け力 F を F_2 まで増加させる。最後に内圧 P のみ昇圧してHF成形品の形状を整える(c)。以上の一連の負荷経路を図17²⁴⁾に示す。

上記のような要領で、外径60.5mm、肉厚2.5mm、強度TS 430MPa級の鋼管を用いて全長フランジ成形したサンプルを図18²⁴⁾(a)に示す。同図(b)は内圧なしで加工した例であるが、内圧がないとフランジ側の上面部が凹む傾向になるが、フラットシールで内圧が保持されながら成形す

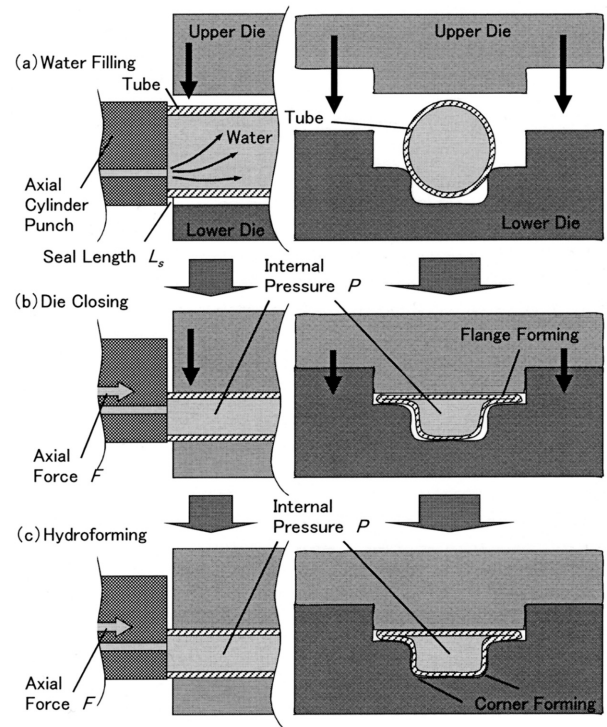


図16 フラットシール技術を用いたハイドロフォーミングプロセス概略²⁴⁾
Hydroforming process with flat seal

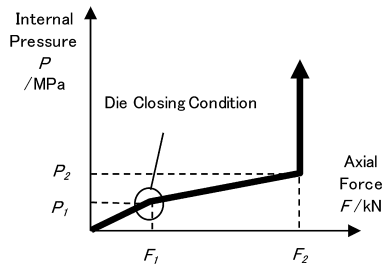


図17 フラットシールを用いる場合の負荷経路²⁴⁾
Hydroforming loading path for flat seal



(a) Formed sample by hydroforming with flat seal technology



(b) Formed sample without internal pressure

図18 全長フランジ成形を施したハイドロフォーミングの成形例²⁴⁾

Hydroforming samples with full length flange

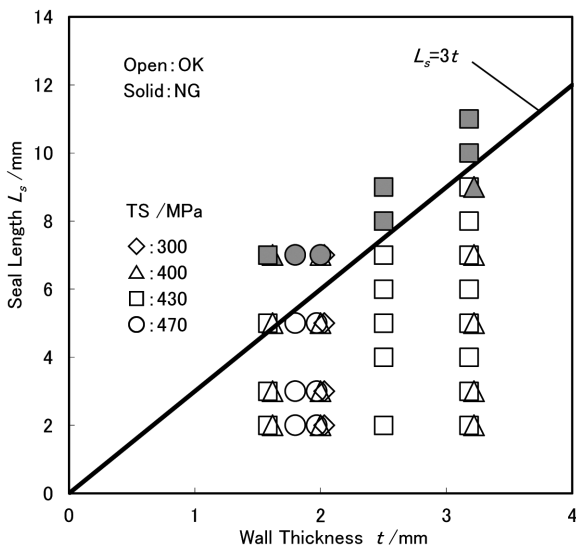


図19 フラットシールのシール性に及ぼすシール長さの影響²⁴⁾
Effect of seal length on flat seal performance

ると上面部が平坦に成形できていることが分かる。

図18の例以外にも各種の肉厚 (1.6 ~ 3.2mm) および強度 (TS 300 ~ 470MPa) でも試験したが、いずれもフラットシールに成功し全長フランジ成形品が得られた。フラットシールのシール性に及ぼす影響としては、シール長さ L_s 、シール端面の性状、負荷経路 (内圧 P_1 , P_2 、押し付け

力 F_1 , F_2) などがあり、それぞれ詳細に調べたがここではシール長さ L_s の影響のみ紹介する。図19²⁴⁾に各種鋼管でシール長さ L_s を変えた場合のシール可否の結果を示す。シール長さ L_s が長過ぎると押し込み時に管端が座屈してシールが漏れ易くなる。その限界は素管の強度に依らずほぼ肉厚 t の3倍程度である。なお、シール長さ L_s は短過ぎても材料が引き込まれてシールが漏れ易くなる。以上のことから、シール長さ L_s は肉厚 t の3倍弱を狙うのが適切である。

4. 結 言

HFの適用部品を拡大するために、成形限界の向上と他部品との結合技術に着目して以下のような新加工技術を開発した。

- 1) 可動金型を用いて枝管部への材料流入を促進することで素管径の2.2倍の高さの枝管張出しを実現した。
- 2) 二本の枝管の位置を故意にオフセットすることで直角方向に二枝張出す技術を開発した。
- 3) 拡管する方向を限定するHFを多工程行うことで最終的に大拡管を実現する加工法を開発した。また可動金型とカウンタパンチが交差しながら移動する金型構造も活用することで中央部が素管周長の約3倍に拡管されたアクスルハウジングを開発した。
- 4) ハイドロピアス後に内圧を負荷したまま穴広げするハイドロバーリング技術を開発した。そのバーリング部にタップ加工を施したりナットを埋め込むことで他部品とのボルト結合が可能になった。
- 5) 管端を変形させながらシールを保持するフラットシール技術を開発し、当該技術を応用して全長にフランジ部を有するHF成形品の加工が可能になった。

以上のように開発した新加工技術を用いれば、自動車分野を初め他の産業分野にもHF技術がさらに広まっていくと確信する。

謝 辞

本論文の2.1節の可動金型を用いた高枝管張出し技術はトヨタ自動車(株)との共同開発であり、また2.3節の拡管方向を限定した交差式可動金型技術はスズキ(株)との共同開発であることを記すとともに両社に厚く御礼申し上げます。

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) 栗山幸久: 塑性と加工. 39 (453), 1009 (1998)
- 4) Leitloff, F.U. et al.: 塑性と加工. 39 (453), 1045 (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:平成12年度 塑性加工春季講演会講演論文集. 2000, p. 427
- 9) 水村正昭 ほか:機械と工具. 46 (10), 46 (2002)
- 10) 那須興太郎:塑性と加工, 46 (531), 321 (2005)
- 11) 加藤和明:CAMP-ISIJ. 16, 1176 (2003)
- 12) 水村正昭 ほか:塑性と加工. 44 (508), 524 (2003)
- 13) 佐藤浩一 ほか:平成18年度 塑性加工春季講演会講演論文集. 2006, p. 1
- 14) 吉田 亨 ほか:第49回 塑性加工連合講演会講演論文集. 1998, p. 321
- 15) 和田 学 ほか:平成23年度 塑性加工春季講演会講演論文集. 2011, p. 59
- 16) 森 茂樹 ほか:塑性と加工. 29 (325), 131 (1988)
- 17) 水村正昭 ほか:第59回 塑性加工連合講演会講演論文集. 2008, p. 219
- 18) 和田 学 ほか:第62回 塑性加工連合講演会講演論文集. 2011, p. 173
- 19) 金田裕光 ほか:第62回 塑性加工連合講演会講演論文集. 2011, p. 171
- 20) 水村正昭 ほか:第56回 塑性加工連合講演会講演論文集. 2005, p. 189
- 21) 水村正昭 ほか:第58回 塑性加工連合講演会講演論文集. 2007, p. 403
- 22) 水村正昭 ほか:平成20年度 塑性加工春季講演会講演論文集. 2008, p. 231
- 23) 内田光俊 ほか:平成22年度 塑性加工春季講演会講演論文集. 2010, p. 181
- 24) 水村正昭 ほか:平成21年度 塑性加工春季講演会講演論文集. 2009, p. 421



水村正昭 Masaaki MIZUMURA
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター
主幹研究員 博士 (工学)
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511



和田 学 Manabu WADA
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター
主任研究員 博士 (工学)



佐藤浩一 Koichi SATO
名古屋技術研究部 主任研究員
博士 (情報科学)



井口敬之助 Keinosuke IGUCHI
名古屋技術研究部 主任研究員



末廣正芳 Masayoshi SUEHIRO
鉄鋼研究所 加工技術研究開発センター所長
博士 (工学)



栗山幸久 Yukihiro KURIYAMA
横浜国立大学 安全・安心の科学教育センター
教授 博士 (工学)
(元 鉄鋼研究所)