

3倍拡管を実現した大拡管ハイドロフォーミング技術の開発

Development of Large Expansion Hydroforming Technology Achieving Three-times Expanding

和田 学*
Manabu WADA

水村 正昭
Masaaki MIZUMURA

井口 敬之助
Keinosuke IGUCHI

金田 裕光
Hiromitsu KANEDA

抄 録

ハイドロフォーミングは部品統合と軽量化のメリットがある成形法であるが、従来の技術では素管の断面周長を1.0～1.4倍に拡管するのが限界であった。そこでハイドロフォーミングの適用拡大のため、大拡管を可能とする技術開発に取り組み、一工程で一方に限定して拡管し、これを繰り返す“拡管方向を限定した多工程成形法”と、新構造の可動金型である“交差式可動金型技術”を開発した。さらに、これら二つの開発技術を融合させて、素管の断面周長を3.0倍まで拡管できる革新的な“大拡管ハイドロフォーミング技術”を開発した。また、具体的な適用例として、自動車アクスルハウジングの一体成形に取り組み、冷間加工で中間熱処理なく、長尺管の中央部のみをハイドロフォーミングで大きく拡管する実部品の加工に成功した。従来の当該部品はプレス7部品の溶接構造であったが、一体成形できたことで溶接部がなくなり、疲労耐久性が向上して約10%の軽量化を実現できた。

Abstract

Tube hydroforming (hereinafter referred to as “HF”) is useful for the integrated forming of hollow parts, the expansion degree of which is approximately 1.1 times and 1.4 times the cross-sectional length of the blank tube at maximum. We studied large expansion technology of HF in order to target a broad range of applications of HF and found that by coupling the technologies of “multi-process unidirectional expansion” and “intersectional movable die technology”, it is possible to expand the circumference of a blank tube by a factor of three without intermediate heat treatment. Additionally, integrated the axel housings, of which only the middle part is expanded, achieving about 10 % weight reduction.

1. 緒 言

ハイドロフォーミング（以下、HFと称す）は金型内に鋼管を装着して型締めし、鋼管の内部を水で満たし、内圧を付与して膨張させ（以下、拡管）、金型形状に沿わせる加工法である。HFの一般的な工程を図1に示す。HFでは、拡管時に内圧を付加すると共に、管端を軸押しパンチで管軸方向に押し込むため（以下、軸押し）、拡管部分の肉厚減少を抑制できることが特徴である¹⁻³⁾。HFにおける拡管の指標の一つに拡管率がある。ここで拡管後の断面周長を L_1 、素管の断面周長を L_0 としたとき、拡管率 η を次のように定義する。

$$\eta = L_1 / L_0$$

HFは部品統合と軽量化のメリットが大きい成形法である。しかし、従来のHF技術における拡管率は1.0～1.1程度であり、最大でも1.4程度である（図2）⁴⁾。このため、

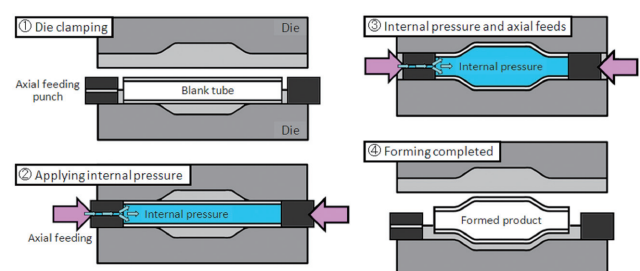


図1 HFの一般的な工程
Schematics of conventional hydroforming process flow

HFの適用部品は一部に留まり、シャシ系のクロスメンバーやサイドメンバー、排気系のエキゾーストマニホールド等に限られる。これを払拭してHFの適用を拡大し、部品統合と軽量化のメリットを広範に享受するためには、成形限界を向上させて大拡管を可能とするHF技術の開発が重要である。

* 名古屋技術研究部 主任研究員 博士(工学) 愛知県東海市東海町5-3 〒476-8686

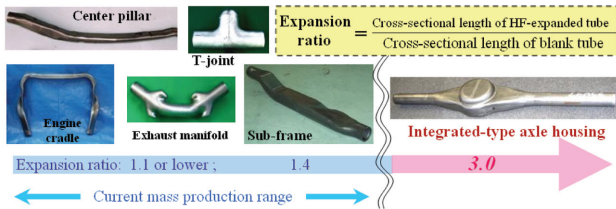


図2 HFの拡管率と適用部品
Expansion ratios of hydroforming and applied products

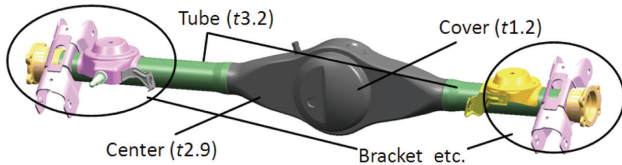


図3 バンジョー型アクスルハウジングの模式図
Schematic of banjo-type axle housing

なお、中間熱処理や管端の縮径加工を併用してHFにおける大拡管を実現した例があるものの⁹⁾、量産を考慮すると中間熱処理せず、冷間加工のみ、HFのみで成形できることが望ましい。そこで筆者らは、冷間加工のみで中間熱処理のないHFで拡管率 $\eta = 3.0$ を実現可能な“大拡管ハイドロフォーミング技術”の開発に取り組んだ。

また、自動車の重要保安部品のひとつにアクスルハウジングがある。これはデファレンシャルギア、ドライブシャフト、デフォイルなどを収容する中空のサスペンション部品で、バンジョー型やスプリット型などがあり、デファレンシャルギアの脱着が容易で構造が簡単な前者が多く用いられている⁹⁾。現行のバンジョー型アクスルハウジング(図3)は複数のプレス品を溶接して構成されているため、溶接部を削減することで疲労耐久性が向上し、軽量化の見込みがある。

しかしながら、アクスルハウジングを一体成形するためには拡管率 η が約3にもなる大拡管が必要のうえ、長尺管の中央部のみが膨出した形状で軸押しによる材料流入が難しいため、通常のHFでは成形が困難である。そこで筆者らは、上述の大拡管ハイドロフォーミング技術を用いて、バンジョー型アクスルハウジングの一体成形と軽量化を試みた。HFでの一体成形にあたり、従来のプレス成形では成形困難な形状も可能となることから、アクスルハウジングの形状には疲労耐久特性と音振動特性に有利な三次元曲面を採用した(図4)。

本報では筆者らが開発した大拡管ハイドロフォーミング技術の概要と、本技術を用いて試作した一体型アクスルハウジングの成形結果を報告する。

2. 大拡管ハイドロフォーミング技術の概要

2.1 拡管方向を限定した多工程成形法

HFで大拡管を実現するため、減肉を抑制しながら拡管

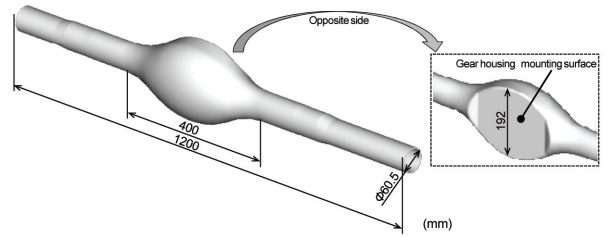


図4 三次元曲面形状の一体型アクスルハウジング
Integrated axle-housing with a 3D curved shape

を行うことが可能な純粋せん断変形を、積極的に活用できないか検討した。HFにおいては、十分な軸押しを行うことで純粋せん断変形での拡管が可能であるが、軸押しが過大であれば座屈が発生するため、必ずしも十分な軸押しができるとは限らない。例えば断面全周を拡管する自由バルジ成形の場合、軸押しをしても早々に座屈が発生して純粋せん断変形とはならない。座屈なく軸押しできるのは周方向単軸引張状態が限界であり⁷⁾、大拡管は困難である。

座屈の抑制には金型による材料拘束が有効である。例えば拡管方向を限定すれば、金型による材料拘束が増加し、軸押しを増やしても座屈しづらくなる。その結果、単軸引張よりも純粋せん断側で成形が可能となり⁸⁾、より大きな拡管を実現できる可能性がある(図5)。そこで、拡管方向を一方向に限定して成形し、これを多工程で繰り返し大拡管を実現する新たな成形法である、拡管方向を限定した多工程成形法を開発した⁹⁾。

2.2 交差式可動金型技術

アクスルハウジングのように、長尺管の中央部のみを拡管するHFは成形難易度が高い。これは、管端部から軸押しを行っても、材料と金型との摩擦抵抗によって材料が拡管部へ流入し難くなり、平面引張や等二軸引張といった破断限界の低い変形状態となって成形が困難となるためである(図6(1))。対策のひとつとして、金型の材料と接する

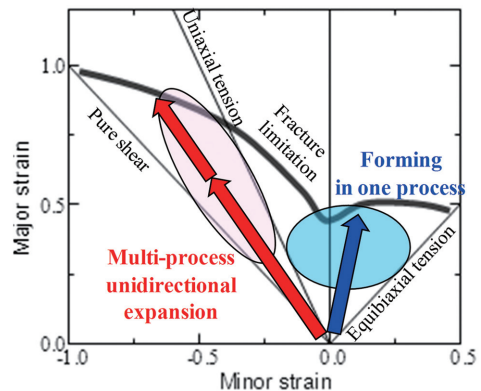


図5 全周拡管における従来の単一工程と拡管方向を限定した多工程成形法の変形状態の比較

Comparison between forming in one process and multi-process unidirectional expansion under all circumferences expanding

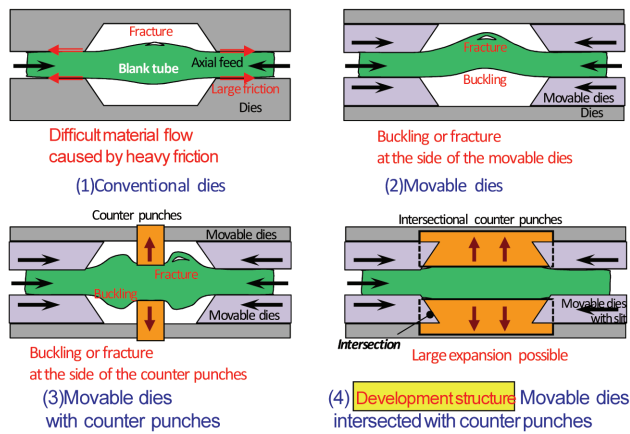


図6 金型構造と成形性
Dies structure and formability

部分を主型と分割し、これを管端部の軸押しと同時に駆動させる可動金型技術がある¹⁰⁾。これにより、摩擦抵抗の影響なく長尺管の中央部まで軸押しができ、純粋せん断変形により拡管が可能となって大拡管を実現できる。しかしながらその適用は、枝管成形のように拡管部が管軸方向に短い場合に限られる。

本開発では拡管率3.0もの大拡管を目指すため、必然的に拡管部が管軸方向に長くなる。この場合、可動金型を用いて拡管部を直接軸押しできても、成形初期の段階で材料を金型で十分に拘束できず、軸押しが先行して非拘束部から座屈が生じるか、内圧が先行して破断が生じるかの何れかとなる(図6(2))。この対策としては、拡管部にカウンタパンチを設けて金型による拘束を増やし、座屈を抑制する方法が考えられる。しかし、カウンタパンチは可動金型と干渉しない位置に配置する必要があるため、成形初期の段階で、可動金型とカウンタパンチとで間隙が生じてしまい、ここで座屈や破断が発生してしまう(図6(3))。

そこで、成形初期の段階から拡管部全体をカウンタパンチで拘束し、かつ可動金型を前進させることが可能となる、溝付可動金型と交差型カウンタパンチを用いた交差式可動金型構造を新たに開発した(図6(4))⁹⁾。

2.3 加工工程の概要

以上で述べた“拡管方向を限定した多工程成形法”と“交差式可動金型技術”を連携させ、これを“大拡管ハイドロフォーミング技術”として一体型アクスルハウジングの成形に適用した。

加工工程は3工程のHFである(図7)。素管には外径 $D = 60.5\text{mm}$ 、肉厚 $t = 2.8\text{mm}$ 、長さ $L = 1640\text{mm}$ 、鋼種STKM11Aの鋼管を用いた。拡管率 η は2.8である。

第1工程(HF1)では交差式可動金型技術を利用し、上下1方向に拡管する。この工程では、型締め後に内圧を付与しながら、固定金型内の溝付可動金型を軸押しパンチと同時に軸押しする。このとき素管が上下方向に拡管される

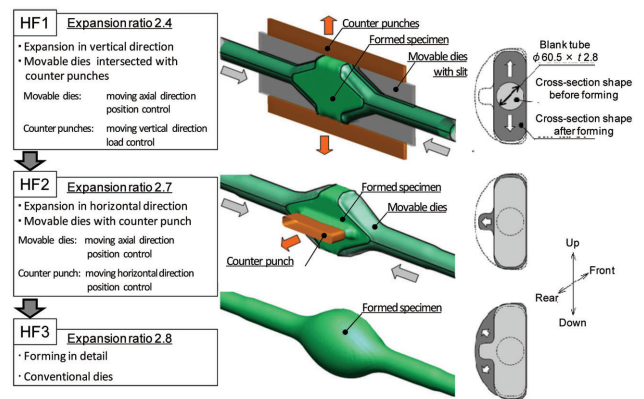


図7 大拡管ハイドロフォーミング技術を用いた一体型アクスルハウジングの成形工程

Forming process of integrated axle housing using large expansion hydroforming technology

と同時に、交差型カウンタパンチが上下方向へ移動する。溝付可動金型と交差型カウンタパンチは相互に交差し干渉しない構造である。詳細は次章で紹介する。溝付可動金型は位置制御、カウンタパンチは一定荷重による荷重制御である。

第2工程(HF2)は通常可動金型を用いて前後方向に拡管する。可動金型は固定金型内で前進し、拡管と同時にカウンタパンチが位置制御で前方向に移動する。なおHF1とは異なり、可動金型とカウンタパンチは交差しない。

第3工程(HF3)は高圧を付与し詳細形状を出すため、通常上下割りの固定金型を用いることとした。

3. 第1ハイドロフォーム工程の詳細検討

3.1 交差式可動金型構造

交差式可動金型技術では、溝付可動金型と交差型カウンタパンチ(以下、カウンタ)を用いるが、軸押し・内圧・カウンタ荷重の3軸の負荷経路が成形性に大きく影響する。そこで、上述した一体型アクスルハウジングの全3工程成形のうち、交差式可動金型技術を採用する第1工程(HF1)の類似形状について、加工条件が成形性に及ぼす影響を数値解析と実験の両面から調査した¹¹⁾。

素管と成形品の寸法形状の概略を図8に示す。素管には外径 $D = 60.5\text{mm}$ 、肉厚 $t = 2.5\text{mm}$ 、長さ $L = 1570\text{mm}$ 、鋼種STKM11Aの鋼管を用いた。成形品は素管の中央部のみが膨出した形状で、最大拡管部の寸法は拡管幅 $W = 185\text{mm}$ 、拡管長さ $L_e = 120\text{mm}$ 、拡管厚さ $H = 70\text{mm}$ とした。拡管率 η は約2.6である。

金型は上下の固定金型、固定金型に設置された上下左右4個の溝付可動金型、同じく固定金型に設置された上下2個のカウンタから構成される(図9)。溝付可動金型にはカウンタ形状に対応する溝を設けてあり、カウンタと干渉することなく前進させることが可能である。

次に成形手順を説明する。成形前後の金型位置および成

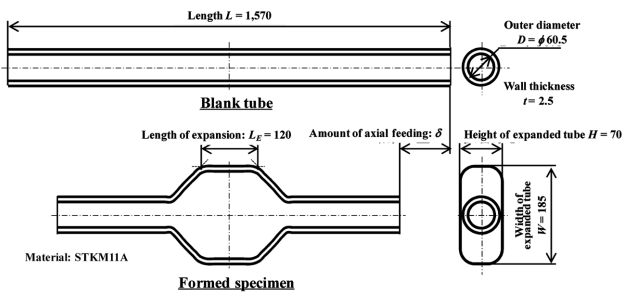


図8 素管と成形品の寸法形状
Sizes and shapes of blank tube and specimen

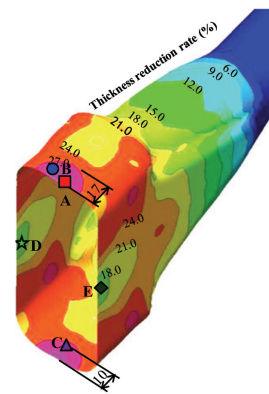


図10 成形後の肉厚分布
Thickness distribution after forming

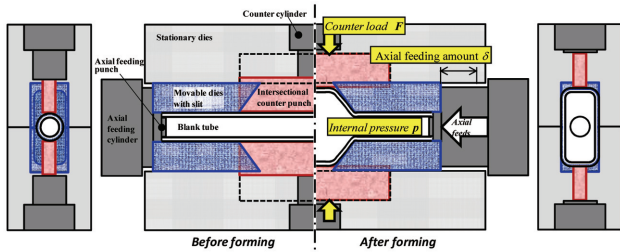


図9 成形前後の金型と成形品の模式図
Structure of intersectional movable dies before and after forming

成形品の模式図を図9に併記する。初めに、溝付可動金型が後退限、カウンタが前進限の状態、素管を下側の可動金型に置く。次に上側の金型一式を下降させ型締めする。続いて素管に成形水を充填し、軸押しパンチで管端をシールする。その後、カウンタに一定のカウンタ荷重 F を負荷し、後述の負荷経路に沿って、内圧 p を加えながら軸押しパンチと溝付可動金型を軸押し量 δ で同時に押し込む。軸押しパンチと溝付可動金型は位置制御、内圧は圧力制御、カウンタは一定荷重の荷重制御とした。また、カウンタ荷重 F は成形の進行に伴って徐々に押し戻されて後退するように設定した。最終的には素管が十分に拡管されて、溝付可動金型は前進限、カウンタは後退限まで移動する。最後に、内圧とカウンタ荷重を除荷して成形品を取り出し、成形完了となる。

3.2 FEM 解析方法

初めに、交差式可動金型技術による大拡管 HF の成形可否を検討した¹⁾。負荷経路の探索や成形状態の予測には数値解析を用いた。FEM ソルバーには動的陽解法の PAM-STAMP を使い、シェル要素で解析した。摩擦係数 μ は潤滑剤の使用を想定し $\mu = 0.09$ とした。

後述の適正負荷経路で成形した場合の、肉厚分布の解析結果を図10に示す。軸押し量 δ は 132mm、内圧 p は最大 37MPa、カウンタ荷重 F は 38kN である。破断限界を減肉率 40% と仮定し解析した結果、最大減肉率は図中 A で 31% となり、成形可能との見込みを得た。なお、減肉は最大拡管部の側面 A, B, C 近傍で大きく、平坦面 D, E 近傍で

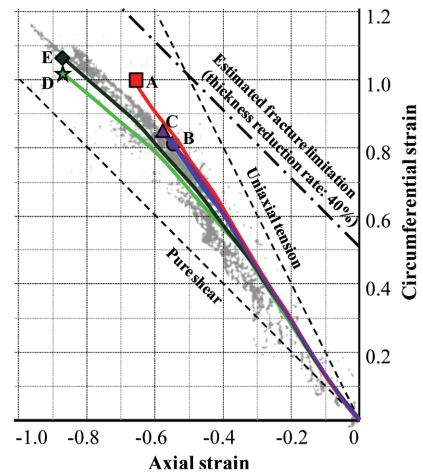


図11 ひずみ状態とひずみ経路
Strain conditions and strain paths

は小さい。

次に、解析モデル全要素における成形後のひずみ状態と A~E のひずみ経路、推定される破断限界線を図11に示す。全要素のひずみ状態が純粋せん断から単軸引張の間にあることが確認できる。これは、長尺管の中央部のみを膨出させる本形状においても、溝付可動金型を用いたことで、加工限界の高い純粋せん断から単軸引張にかけてのひずみ状態で成形できたためと考える。なお A, B, C は破断限界線に近く、減肉の進行を示唆していることが分かる。

数値解析の妥当性を検証するため、素管に 5mm 径のスクライブドサークルを転写のうえ実験を行い、成形後にひずみを測定して解析結果と比較した。A~E におけるひずみ状態の比較を図12に示す。A, B, C は解析と実験でほぼ一致したが、D, E は実験のひずみが解析よりも低めとなった。

原因のひとつに潤滑の影響が挙げられる。D, E 近傍は素管と固定金型とが大きく摺動する箇所であり、実験では潤滑切れとなった可能性がある。即ち、実験では解析よりも局部的に摩擦抵抗が大きくなり、D, E 近傍の変形が抑制されたものと推測する。可動金型を用いる場合は素管の直管

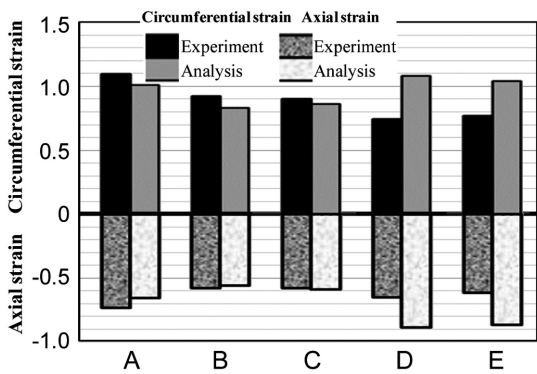


図12 軸方向ひずみと周方向ひずみにおける解析と実験の比較

Comparison of axial strain and circumferential strain between experiment and analysis

部と金型とが一体となって移動するため、成形性に及ぼす潤滑状態の影響は少ないとされるが¹⁰⁾、本成形における拡管部は固定金型との摺動面積が大きく、潤滑状態の差異が成形性に影響を与えたものと考えられる。しかしながら、成形可否の判断には破断限界に近いA, B, Cのひずみ状態が重要であり、これらは実験と解析とがよく一致していることから、成形条件の探索には数値解析を用いることとした。

3.3 適正加工条件の検討

続いて、負荷経路が成形性に及ぼす影響を数値解析で調査した¹¹⁾。適正負荷経路を探索した結果、図13に示す折れ線状の負荷経路が良好であることを見出した。

負荷経路と成形状態について、内圧のみが加わるa点までは拡管が殆ど進行しない。a点の直後、内圧と軸押しが同時に負荷された時点で拡管が始まり、a~bの区間は管端から拡管が進行する。その後、b点近傍で素管の拡管部が溝付可動金型の先端と接触するようになり、b~c~dの区間では溝付可動金型が拡管部を直接軸押しして、拡管が大きく進行する。

次に、負荷経路を変化させたときの成形性への影響を数値解析と実験の両面で調査した。一定のカウンタ荷重 $F =$

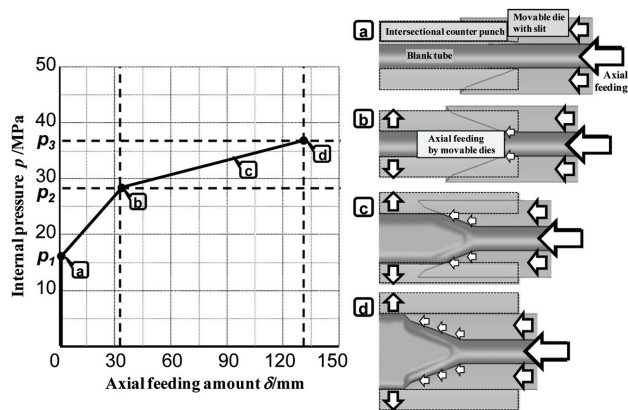


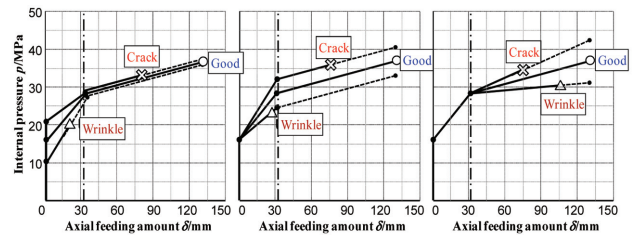
図13 適正負荷経路と成形状態
Adequate loading path and forming conditions

38kNで初期圧 p_1 、中間圧 p_2 、最終圧 p_3 を変化させた場合、適正な負荷経路においては良好な成形品を得ることができたが、適正よりも低い圧力では座屈が発生し、また適正よりも高い圧力では最大拡管部の側面で減肉が進行して割れが発生した(図14, 15)。これらは数値解析と実験とで結果が良好に一致した。

さらに上述の適正負荷経路において、カウンタ荷重 F を変化させたときの成形性への影響を調査した。適正なカウンタ荷重 $F = 38kN$ に対して過小の場合は、長手中央付近にしわが1本発生した(図16)。このように軸押しを伴う拡管では、管端に近いほど軸方向の応力が高く、通常は管端から拡管が進行して、素管は瓢箪型に変形する。本HFでは拡管部全体が均一に拡管されるように、カウンタパンチを用いて瓢箪型の変形を抑制しているが、カウンタ荷重が過小の場合は、瓢箪型の変形が進行して中央にしわが発生してしまう。逆に、カウンタ荷重が過大の場合は、カウンタパンチが成形品にめり込んで座屈が生じた。

3.4 第1ハイドロフォーム工程後の中間形状の最適化

次にHF1後の中間形状について、その適正形状を探索すべく、拡管部の断面形状を変化させて成形解析を行った¹²⁾。HF1成形形状の断面模式図を図17に示す。前方向の拡管代 E_F 、後方向の拡管代 E_R を各々0, 5, 10mmとし、



(a)When p_1 is changed (b)When p_2 is changed (c)When p_3 is changed

図14 負荷経路と成形性
Various loading paths and formability

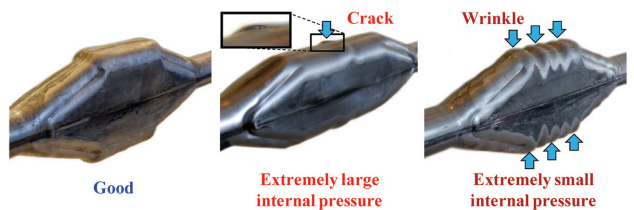


図15 最終圧 p_3 を変化させた場合の成形結果
Forming results when p_3 is changed

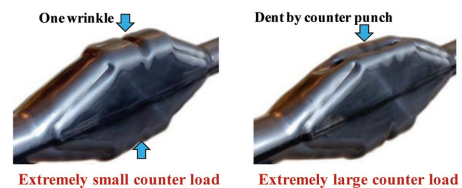


図16 カウンタ荷重を変化させた場合の成形結果
Forming results when counter load is changed

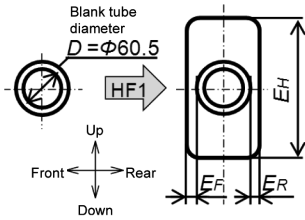


図 17 HF1 成形後の断面形状
Cross-sectional shape after HF1

表 1 HF1 試験条件と減肉率
Trial conditions and thickness results of HF1

Sample No.	Front expansion size E_F (mm)	Rear expansion size E_R (mm)	Expansion height E_H (mm)	Thickness reduction rate ζ
0-0	0.0	0.0	173.0	0.20
0-5	0.0	5.0	168.0	0.32
0-10	0.0	10.0	163.0	0.36
5-5	5.0	5.0	163.0	0.30
5-10	5.0	10.0	158.0	0.32
10-10	10.0	10.0	153.0	0.37

その組合せで計6通りの形状を設定した(表1)。拡管率 η は拡管部の上下寸法 E_H を調整して $\eta = 2.4$ 一定とした。

負荷経路は図13と同様の折れ線状で、形状毎に適正な条件を求めた。カウンタ荷重は形状毎に一定とした。以上より、破断せず成形可能な負荷経路およびカウンタ荷重を形状毎に探索のうえ、成形後のひずみ分布と減肉率 ζ を調査した。ここで減肉率 ζ は(拡管後の肉厚-素管の肉厚)/素管の肉厚である。なお、推定破断限界は過去の実績より減肉率 $\zeta = 0.4$ と仮定した。肉厚分布を図18に示す。また減肉率 ζ を表1に併記する。

減肉率 ζ は長手中央の拡管部上下端面 A 部で最大となる。前後非対称に拡管する No. 0-5, 0-10, 5-10 については、A 部が拡管される後方へとずれる。

また、減肉率 ζ は No. 0-0 が最も小さい。他のサンプルでは形状が前後方向に拡大する B 部で座屈する傾向があり、十分に軸押しを付与できない。しかし No. 0-0 は前後方向に拡管しないため B 部が存在せず、十分な軸押しが可能であるためと考える。さらに、前後方向に 10mm 拡管するサンプル No. 5-5 と No. 0-10 を比較すると、後者の減肉率が大きく、前後対称形状が適正であることが分かる。

続いて A 部のひずみ経路を図19に示す。前後方向の拡管代が増加するに伴い、変形の形態が単純せん断から単純引張・平面ひずみ側へ遷移し、減肉が進行することが分かる。

以上より、交差式可動金型技術を用いた HF1 において、軸押し・内圧・カウンタ荷重の3軸で適正な負荷経路をとることによって、良好な成形品を得られることが明らかとなった。また HF1 後の中間形状について、上下1方向のみに拡管する前後対称の形状が適正と判明した。

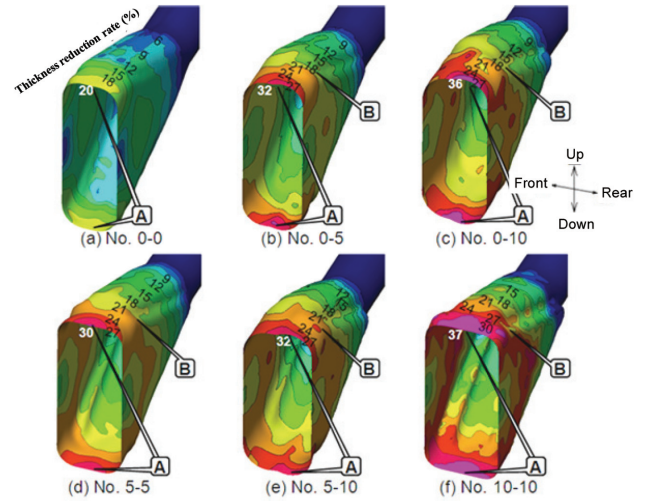


図 18 HF1 の肉厚分布コンター
Thickness contour of HF1

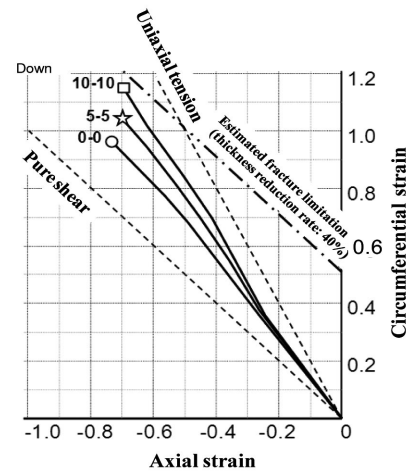


図 19 A 部におけるひずみ経路
Strain path of part A

4. 第2ハイドロフォーム工程の詳細検討

次に HF2 の適正加工条件と、HF2 後の適正な中間形状を探索すべく、HF1 の No. 0-0 形状について、HF2 の断面形状を変化させて成形解析を行った¹²⁾。HF2 成形後の断面形状を図20に示す。カウンタパンチ上下寸法 C_H を 40, 80, 120mm とし計3通りの形状を設定した(表2)。拡管率は $\eta = 2.7$ で一定である。

負荷経路は図21に示す折れ線状で、(iv)・(v)・(vi) 点の軸押し量、内圧は形状により適正な条件とした。このうち(v)点は、HF1 成形品が拡管されて HF2 の可動金型およびカウンタパンチと完全に接触する点である。また、カウンタパンチは位置制御で、移動量は 30.0mm で一定とした。以上より、破断せず成形可能な負荷経路を形状毎に探索のうえ、成形後のひずみ分布と減肉率 ζ を調査した。肉厚分布を図22に示す。また、減肉率 ζ を表2に併記する。

減肉率 ζ はカウンタパンチ上下寸法 C_H が狭いほど小さいことが分かる。HF2 では拡管部の縦壁に相当する I 部の

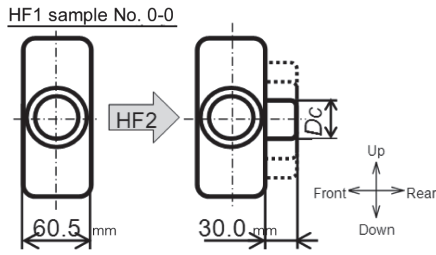


図 20 HF2 成形後の断面形状
Cross-sectional shape after HF2

表 2 HF2 試験条件と減肉率
Trial conditions and thickness results of HF2

Sample No.	Counter Punch height C_H (mm)	Thickness reduction rate ζ
0-0 · 40	40	0.22
0-0 · 80	80	0.29
0-0 · 120	120	0.39

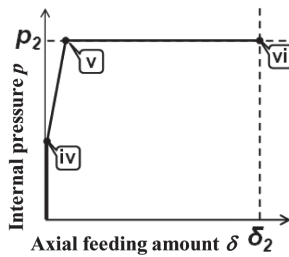


図 21 HF2 の負荷経路
Loading path of HF2

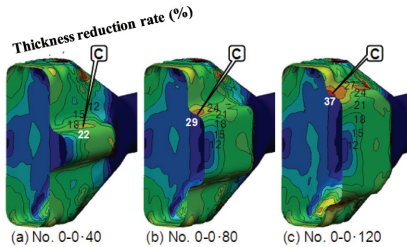


図 22 HF2 肉厚分布コンター
Thickness contour of HF2

変形が厳しく、軸押しが不足して減肉が進行する傾向にある。

次に長手中央断面の肉厚分布を図 23 に示す。図中に HF1 の肉厚分布も併記する。カウンタパンチ上下寸法 C_H に相当する部分を両矢印で図中に併記した。これより、減肉率がピークとなる部分が C 部に相当することが分かる。 D_c が小さい場合は HF1 で減肉の小さい箇所が C 部となるが、 D_c が大きい場合は HF1 で減肉の大きい箇所が C 部となり、減肉が局所化したものとする。

以上より HF2 において、適正な負荷経路と中間形状によって、良好な成形品を得られることが明らかとなった。

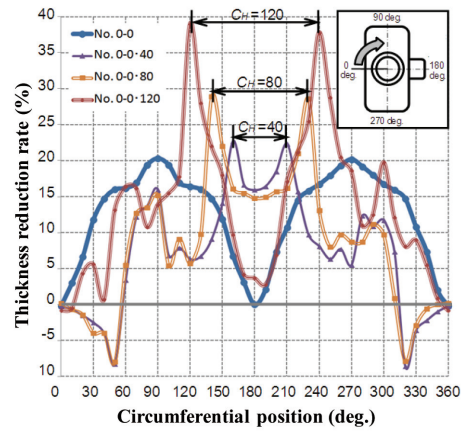


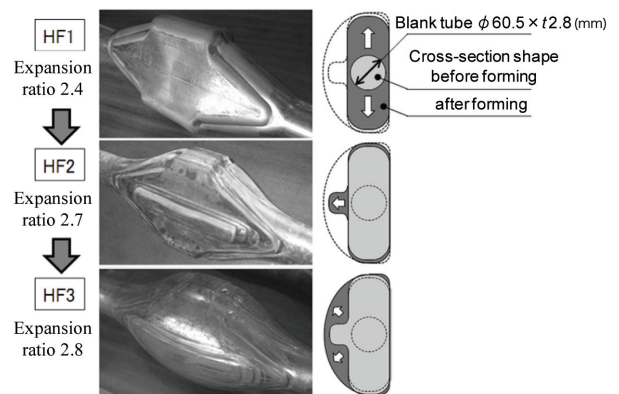
図 23 HF2 肉厚分布
Thickness distribution of HF2

5. 一体型アクスルハウジングの試作

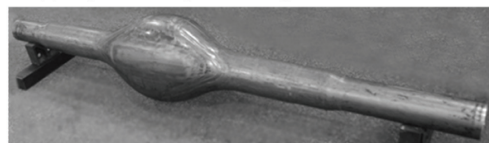
5.1 実試作結果

最後に、アクスルハウジングの一体成形を試みた⁹⁾。加工工程は図 5 の 3 工程であり、HF1・HF2 の加工条件と中間形状は 3・4 章の詳細検討を踏まえて選定した。3 工程を連成させた FEM 解析で成形性を繰り返し確認しながら詳細の成形条件、工程、金型構造を検討し、実試作を行った結果、図 24 に示す良好な成形品を得ることができた。減肉率は $\zeta = 0.34$ である。

以上より、三次元曲面形状をもつ一体型アクスルハウジングを、中間熱処理を行わない冷間加工の 3 工程 HF で成形可能であることを実証した。



(1) Expansion shapes at each process



(2) Final product after HF3

図 24 三次元曲面形状の一体型アクスルハウジングの成形
Three-process hydroforming of integrated axle-housings with 3D curved shape

5.2 試作品の特性

本報ではアクスルハウジングの一体化にあたり、現行品の形状に捉われずに軽量化を重視した新たな製品形状を検討した¹³⁾。新形状は軽量化できること、現行品の部品性能を満足すること、HFで一体成形できることの3点を満足するものとした。部品性能については、サスペンション部品として要求される剛性や疲労耐久特性に加えて、加振源であり音源となるデファレンシャルギアを収容するケースとしての振動音響特性も考慮した。

新形状は図4の通り、応力集中が生じ難い滑らかな三次元曲面である。本形状は応力集中が無い（図25）、疲労耐久特性が有利となるのみならず、平坦部が無い（図25）ため振動音響特性でも有利である。車体の前方側はデファレンシャルギアを取付けるための平坦部を持つが、平坦部近傍も曲面で構成した。

試作品の疲労耐久特性を確認するため、前述の実試作で得られた成形品について、ブラケット等を取り付けて車両搭載可能な状態とし（図26）、車体の上下および前後方向の台上加振試験を実施した。その結果、疲労耐久特性やそ

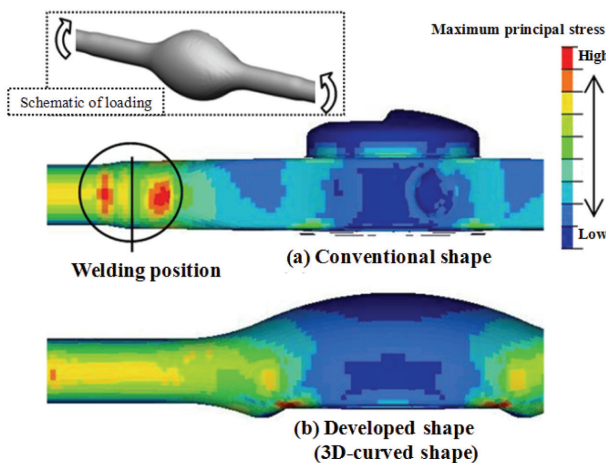


図25 上下負荷時の応力分布の比較

Comparison of maximum principal stress contour between developed and conventional axle-housings on bottom surface (load direction: bump)

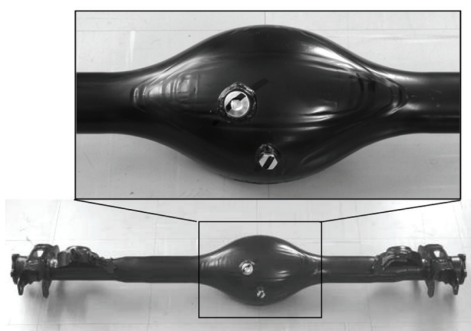


図26 車両搭載可能状態の一体型アクスルハウジング

Appearance of final prototype (To which vehicles can be attached)

他の部品特性を満足することを確認した。また、溶接なしにより部品の信頼性が向上し、約10%の軽量化効果を得ることができた¹⁴⁾。

6. 結 言

拡管率1.0～1.4である従来のHFの拡管率向上を狙い、純粋せん断変形で拡管が可能な“拡管方向を限定した多工程成形法”と、座屈を抑制しつつ十分な軸押しが可能な“交差式金型技術”を新たに開発し、これらを連携した大拡管ハイドロフォーミング技術によって、中間熱処理をせずに冷間加工のHFのみで、革新的な拡管率3.0を達成した。

交差式可動金型技術では軸押し・内圧・カウンタパンチ荷重の3軸の制御が必要となるが、数値解析を用いて適正な荷経路を見出した。また、拡管方向を限定した多工程成形法では、数値解析を駆使して適正な中間形状を明らかにし、大拡管ハイドロフォーミング技術を確立した。

さらに、本技術をアクスルハウジングの一体成形に適用した結果、従来プレス7部品の溶接構造をもつバンジョー型アクスルハウジングの溶接なし一体化を実現し、10%もの軽量化を達成できた。

開発した大拡管ハイドロフォーミング技術によって、HFの適用範囲が拡大し、部品統合と軽量化がさらに推進されることを期待する。

参考文献

- 1) 真鍋健一：塑性と加工. 39 (453), 3 (1998)
- 2) 淵澤定克：塑性と加工. 41 (478), 13 (2000)
- 3) 栗山幸久：塑性と加工. 45 (524), 21 (2004)
- 4) 那須興太郎：第27回金属プレス加工技術研究会. 2000, p. 1
- 5) 上田照森 ほか：プレス技術. 19 (9), 12 (1980)
- 6) 入野野健一 ほか：自動車整備の基礎 III シャシ編. 初版. 東京, 東京電機大学出版局, 1991, p. 46
- 7) 森茂樹 ほか：塑性と加工. 29 (325), 131 (1988)
- 8) 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. 219
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 和田学 ほか：平成24年度 塑性加工春季講演会講演論文集. 2012, p. 251
- 12) 和田学 ほか：平成25年度 塑性加工春季講演会講演論文集. 2013, p. 147
- 13) 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
- 14) 金田裕光 ほか：自動車技術. 67 (6), 90 (2013)



和田 学 Manabu WADA
名古屋技術研究部
主任研究員 博士(工学)
愛知県東海市東海町5-3 〒476-8686



井口敬之助 Keinosuke IGUCHI
鉄鋼研究所 加工技術研究部
主幹研究員 博士(エネルギー科学)



水村正昭 Masaaki MIZUMURA
鉄鋼研究所 加工技術研究部
上席主幹研究員 博士(工学)



金田裕光 Hiromitsu KANEDA
スズキ(株)
要素技術開発部
技術専門職 博士(工学)