チューブハイドロフォーミング

Tube hydroforming

淵澤 定克*

Sadakatsu FUCHIZAWA*

1. はじめに

チューブハイドロフォーミング（以下、適宜 THF と略記する。また、ハイドロフォーミングを HF と略記する）は、文字通り管材を水（圧）で成形する技術である。そして、THF は複雑断面を持つ高剛性中空軽量部材を管材から一体成形することができるため、自動車の軽量化を図る自動車メーカーがこの技術を競って導入している。軽量化によって自動車から排出される温室効果ガス CO_2 の削減を図るためである。

1997 年に京都議定書で約束した日本の CO_2 の削減は、その期限が近づいているにもかかわらず目標（2008～2012 年までに 1990 年比較で 6% 削減）を達成できそうにもない。日本の CO_2 の総排出量の約 20% は運輸関係からで、さらにその中で自動車関係は約 90% を占めている。自動車の普及台数は世界規模で年々増加し、今後さらに増加してゆくことは間違いない。もし 1 台の自動車から排出される CO_2 を少しずつでも削減すれば、世界全体では莫大な量の CO_2 を削減することができる。究極の環境対策車は燃料電池車であるといわれているが、その普及にはまだまだ時間がかかりそうである。 CO_2 の排出量は自動車の重量に比例するので、即効性のある CO_2 削減策は軽量化である。さらに軽量化は燃料消費率の向上にもたらす。それゆえ自動車メーカーは軽量化技術の開発に全力を挙げて取り組んでいる。本稿では、軽量構造部材の新しい成形技術であり自動車軽量化を実現する技術の一つでもある THF 技術の概略を、最近の動向を含めて解説する。

2. チューブハイドロフォーミングの特徴

THF は、管材の両端を閉じて内部に高圧を負荷し、必要に応じて管端から押込みながら外側に置いた型に沿って管を塑性変形させて所望の形状の中空部品を作るものである。図 1¹⁾ に THF の工程を示す。中空部品は、もともと中空である管材から作るのが合理的ではあるが、従来、板材のプレス加工と溶接によって作ることが多かった。溶接の手間がかかり、製品の剛性も低い、管材よりも取扱いが簡単であることが大きな理由である。これに対して THF は比較的高度な加工技術が要求されるが、複雑断面形状の中空部品を溶接なしで一体成形することができるため、製品は軽量かつ高剛性であり、さらにコストダウンも可能である。自動車メーカーが軽量

化達成の手段の一つとしてこの技術を採用したため、近年急速に普及してきた。

THF は従来管材の液圧バルジ加工といわれ、比較的小さな部品、たとえば自転車のフレーム継手や配管継手など、管と管とをつなぐ継手部品を作るのに多く用いられていた。この技術は 1960 年代に日本で開発・実用化されたものである²⁾が、自動車部品、たとえばエンジンクレードルのような 1 本の長さが 2 メートル以上もある管材から作られる大きな部品・複雑形状部品の液圧バルジ加工は 1990 年代半ばまでは実用化されなかった。その理由は、複雑な加工工程を正確にコントロールすることが要求される THF を実施するには、コンピュータ技術の発達を待たなければならなかったからである。コンピュータ技術の進展により、高速で高精度な制御・加工技術を実現することができるようになったこと、およびコンピュータを用いたシミュレーションが実用に耐えるようになったことで、THF は大きな成長を遂げた。

THF の特徴をまとめて示すと、利点は

- (1) 管材の一体成形による部品統合・部品点数削減とそれに伴う金型費削減、組立工程の削減、溶接工程の省略
- (2) 加工硬化による製品の強度向上および中空閉断面構造による製品の剛性・強度信頼性の向上とそれに伴う軽量化

図 1 チューブハイドロフォーミング (THF) の工程¹⁾

* 宇都宮大学名誉教授（宇都宮市）。Professors emeritus, Utsunomiya University (Utsunomiya-shi, Tochigi). E-mail: sfuchizawa@mbr.nifty.com
 受付日：平成 19 年 6 月 12 日 受理日：平成 19 年 7 月 10 日

- (3) 雄型に相当する工具が液体であるため、剛体工具では実現不可能な複雑形状製品・長尺製品の加工が可能。型が雌型のみ（雄型不要）
- (4) 溶接フランジ不要による材料歩留まりの向上と軽量化
- (5) 高内圧負荷による製品精度の向上とスプリングバックの低減
- (6) 同じ型内で高圧を利用した穴あけ加工（ハイドロピアシング）も可能
- (7) 以上の総合効果としてのコストダウンの実現などである。

欠点は

- (1) 生産のサイクルタイムが長い
- (2) 板材に比べ多少複雑で高度な加工技術を要する
- (3) 管材の価格，加工機械設備の価格が多少高価
- (4) 成形品を他の部品と接合する技術が必要などである。

なお THF 技術は，ドイツでは 1996 年に DIN（ドイツ工業規格）に制定されている。日本では 2000 年に通商産業省（当時）の素形材技術戦略の中で，設計・製造プロセスの高度化を可能とする革新的加工技術として認定されている。また 2006 年には，経済産業省および中小企業庁による「中小企業の特定ものづくり基盤技術の高度化に関する指針」の中で，THF は中空軽量製品を得る新加工法として位置づけられ，その拡大および普及に資する技術開発の高度化が目標に掲げられている。

3. THF の基礎理論³⁾

ハイドロフォーミングの実際の加工においては管材の変形や応力状態は非常に複雑であるが，ここでは問題を単純化して，管の外側には変形を拘束する型がなく，円管が自由に張出変形する場合について考えることにする。管材料は等方性で十分に長く，一様張出変形するものとして扱う。管の変形前後の半径，肉厚，長さをそれぞれ， (r_0, r) ， (t_0, t) ， (l_0, l) とする。両端を閉じた薄肉円管（ $t \ll r$ ）に内圧 p と軸荷重 W （引張を正とする）が作用しているとき（図 2），管端近傍を除いて管に生じる応力やひずみは以下ようになる。

3.1 応力

管に作用する力の釣り合い方程式から，管に生じる応力は

$$\text{軸方向応力：} \quad \sigma_\varphi = pr/2t + W/(2\pi r t) \quad (1)$$

$$\text{円周方向応力：} \quad \sigma_\theta = pr/t \quad (2)$$

【例題】内圧 p と軸荷重 W を受けて一様変形する薄肉円管の軸方向の応力 σ_φ （式（1））を求めよ。

【解答】管に作用する外力は，右向きに，管端のふたにかかる内圧による力 $p\pi r^2$ と，軸荷重 W である。これに釣り合う管の軸直角断面に作用する内力は，左向きに $2\pi r t \sigma_\varphi$ である。よって軸方向の力の釣り合い方程式は $2\pi r t \sigma_\varphi = p\pi r^2 + W$ となり，これより式（1）が導かれる。

図 2 内圧と軸荷重を受ける薄肉円管

また， $t \ll r$ より肉厚方向の応力の大きさは σ_φ ， σ_θ に比べて小さく，無視できるので，管は平面応力状態であるといえることができる。

3.1.1 内圧のみを負荷する場合

このとき， $W=0$ であるから，式（1），（2）より

$$\text{軸方向応力：} \quad \sigma_\varphi = pr/2t \quad (3)$$

$$\text{円周方向応力：} \quad \sigma_\theta = pr/t = 2\sigma_\varphi \quad (4)$$

これより円周方向応力は常に軸方向応力の 2 倍であることがわかる。

3.1.2 内圧と軸圧縮荷重（ $W = -p\pi r^2$ ）を同時に負荷する場合

$W = -p\pi r^2$ を式（1）に代入すると

$$\text{軸方向応力：} \quad \sigma_\varphi = 0 \quad (5)$$

$$\text{円周方向応力：} \quad \sigma_\theta = pr/t \quad (6)$$

この場合の管の応力状態は円周方向 1 軸引張応力状態である。

3.2 ひずみの定義式

管の初期半径を r_0 ，初期肉厚を t_0 ，初期長さを l_0 とすると

$$\text{円周方向ひずみ} \quad \varepsilon_\theta = \log_e r/r_0 \quad (7)$$

$$\text{肉厚方向ひずみ} \quad \varepsilon_t = \log_e t/t_0 \quad (8)$$

$$\text{軸方向ひずみは} \quad \varepsilon_\varphi = \log_e l/l_0 \quad (9)$$

塑性変形の体積一定条件より

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_t + \varepsilon_\varphi = 0 \quad (10)$$

3.3 応力とひずみの関係式

平面応力状態における応力とひずみの関係式は次式で与えられる。

$$\varepsilon_\varphi = (\varepsilon_{eq}/\sigma_{eq}) \cdot (\sigma_\varphi - \sigma_\theta/2) \quad (11)$$

$$\varepsilon_\theta = (\varepsilon_{eq}/\sigma_{eq}) \cdot (\sigma_\theta - \sigma_\varphi/2) \quad (12)$$

6

ここに、 σ_{eq} , ε_{eq} はそれぞれ相当応力、相当ひずみである。

3.4 管のひずみ状態

3.4.1 内圧のみを負荷する場合 ($W=0$)

式 (4), (10), (11) より

$$\varepsilon_\phi = 0, \quad \varepsilon_t = -\varepsilon_\theta \quad (13)$$

この場合は軸方向にはひずみが生じず、管は伸び縮みしない。また、膨らむにつれて薄くなることがわかる。

3.4.2 内圧と軸圧縮荷重 ($W=-p\pi r^2$) を同時に負荷する場合

$$\varepsilon_t = \varepsilon_\phi = -\varepsilon_\theta / 2 \quad (14)$$

【例題】式 (14) を導け。

【解答】この場合の応力は式 (5) より $\sigma_\phi = 0$ である。これと式 (10), (11), (12) を用いると式 (14) が導かれる。

内圧に加えて軸圧縮荷重を負荷すると、内圧のみを負荷する場合 (式 (13)) に比べて肉厚方向ひずみは抑制される。

3.5 内圧と張出量 (円周方向ひずみ) の関係

管材料は次の n 乗硬化則 (n : 加工硬化指数, C : 強度係数) に従うものと仮定する。

$$\sigma_{eq} = C \varepsilon_{eq}^n \quad (15)$$

これまでに示した式を用いると、管に作用する内圧 p と円周方向ひずみ ε_θ の関係が以下のように求められる。なお、 ε_θ は管の半径 r と式 (7) で結びついているので、この関係は内圧 p と張出半径 r の関係を表しているともいえる。

3.5.1 内圧のみを負荷する場合 ($W=0$)

$$p = (C t_0 / r_0) \cdot (2 / (3)^{1/2})^{n+1} \cdot \varepsilon_\theta^n \cdot \exp(-2\varepsilon_\theta) \quad (16)$$

3.5.2 内圧と軸圧縮荷重 ($W=-p\pi r^2$) を同時に負荷する場合

$$p = (C t_0 / r_0) \cdot \varepsilon_\theta^n \cdot \exp((-3/2)\varepsilon_\theta) \quad (17)$$

式 (16), (17) から、内圧 p は管の半径 r_0 に反比例し、肉厚 t_0 、強度係数 C に比例することがわかる。図 3⁴⁾ に式 (16), (17) で表される関係を示す。縦軸には無次元化した内圧 (pr_0/Ct_0) をとっている。この図より、 C 値が同じならば n 値が大きいほど低い内圧で変形する。また、管は変形の初期にはかなりの内圧を負荷してもあまり膨らまず、内圧がある程度以上になると急に張出量が増加することがわかる。例えば、アルミニウム合金管 ($n \approx 0.2$) は破裂圧力の 80% を負荷しても破裂時の 10 数 % 程度しか張出さないことが、実験でも確かめられている⁵⁾。

3.6 最大内圧 (破裂圧力)

式 (16), (17) からそれぞれの最大内圧 p^* を求めると、次のようになる。

図 3 内圧と張出量 (円周ひずみ) の関係⁴⁾

3.6.1 内圧のみを負荷する場合 ($W=0$)

$$p^* = (C t_0 / r_0) \cdot (2 / ((3)^{1/2})^{n+1}) \cdot (n/e)^n \quad (18)$$

3.6.2 内圧と軸圧縮荷重 ($W=-p\pi r^2$) を負荷する場合

$$p^* = (C t_0 / r_0) \cdot (2n/3e)^n \quad (19)$$

これらの式から、軸圧縮荷重を負荷した場合には内圧のみの場合よりも最大内圧は低くなることがわかる。

なお、管の破裂がどのようなときに生じるかについてはいろいろな考え方が提案されているが、定説はない。実験的には、肉厚が薄い管の場合は内圧が最大になったときに破裂することが多いが、肉厚が厚い管の場合やある種の金属管では、内圧が最大になっても破裂を生じず、内圧が少しずつ減少しながら張出しが続いたのちに破裂することもある。ここでは対象を十分に長い薄肉円管としているので、便宜上、最大内圧を破裂圧力として取扱うことにする。

3.7 限界張出量 (限界ひずみ)

上述したように破裂は最大内圧時に生じると仮定したので、最大内圧時の張出量 (ひずみ) を限界張出量 (限界ひずみ) と呼ぶことにする。最大内圧時の円周方向ひずみ ε_θ^* および半径 r^* の値を求める。

3.7.1 内圧のみを負荷する場合 ($W=0$)

$$\varepsilon_\theta^* = n/2, \quad r^* = r_0 \exp(n/2) \quad (20)$$

3.7.2 内圧と軸圧縮荷重 ($W=-p\pi r^2$) を負荷する場合

$$\varepsilon_\theta^* = 2n/3, \quad r^* = r_0 \exp(2n/3) \quad (21)$$

これらの式から、 n 値が大きいほど限界張出量が多いことと、軸圧縮荷重を負荷すると内圧のみを負荷した場合より限界張出量が大きくなることがわかる。

【例題】管の軸方向引張試験において軸荷重が最大となるときの伸びひずみ ε_ϕ^* を求めよ。また、そのひずみの大きさと、内圧のみを受ける管の内圧最大時における円周方向ひずみ ε_θ^* の大きさを比較せよ。ただし、管材料は式 (15) で示す n 乗硬化則に従うものとする。

【解答】管が軸方向引張荷重 W のみを受けるときは、式 (1) において $p=0$ において $W=2\pi r t \sigma_\phi$ 。塑性変形の体積一定条件 ($rt=r_0 t_0$) および軸方向 (伸び) ひずみの定義式 (9) を用いると、軸荷重は伸びひずみ ε_ϕ の関数として次のように表される。 $W=2C\pi r_0 t_0 \cdot (\varepsilon_\phi)^n \cdot \exp(-\varepsilon_\phi)$ 。これより軸荷重が最大となる条件を求めると、 $\varepsilon_\phi^*=n$ となる。一方、内圧のみを受ける管の内圧最大時における円周方向ひずみ ε_θ^* は式 (20) より $n/2$ であり、1 軸引張の場合の軸荷重最大における伸びひずみの半分である。

4. THF 技術のポイント

THF の成否を左右する主な因子は、(1) 負荷経路、(2) 管の材料特性、(3) 型形状 (製品形状) と潤滑、である。これらの一つでも適正条件から外れると成形がうまくいかない。

4.1 負荷経路

ハイドロフォームされる管材は内圧と軸荷重または軸押込みによって成形される。THF が成功するかどうかは、内圧と軸荷重または軸押込み量の大きさと負荷するタイミング、すなわち負荷経路に大きく依存する。適切な負荷経路の設定が重要である。図 4 に内圧と軸荷重を負荷する場合の成形可能領域の模式図を示す。破裂や座屈 (しわ) などの成形限界に囲まれた成形可能領域内に負荷経路を設定しなければならない。成形可能領域は管の材料特性や製品 (型) 形状、潤滑条件によって異なり、また、HF の前に受けた加工 (たとえば、型に入れるための曲げ加工など) の影響も受けるので、適切な負荷経路の選定は簡単ではない。理論的には負荷経路は無数に考えられるが、単純な負荷経路における管材の変形挙動を把握することが基本的理解には必要である。

実際の THF においては軸荷重ではなく押込み量を制御して加工する場合が多い。張出変形を伴う加工においては管端からの軸押込みが張出部の肉厚減少を抑制し、成形限界を大幅に向上させる上で有効であることと、軸荷重制御よりも押込み量制御のほうが安定した加工ができるからである。しかし、大きな変形をさせようとして圧力を上げすぎると管は破裂し、押込みすぎると座屈 (しわ) を生じる。ただし、THF

図 4 成形可能領域 (内圧 + 軸荷重, 模式図)

においては軽度のしわはその後の変形過程で消滅させることも可能で、かならずしも成形限界とはならないこともある。

負荷経路の基本的なパターンとしては、①内圧を先行して負荷し、あとから軸押込みを負荷する経路、②内圧と軸押込みを比例的に負荷する経路、③軸押込みを先行し、あとから内圧を負荷する経路、および、④これらの組合せによる経路、が考えられる。実際に行われている負荷経路の多くは、①、②、およびこれらの組合せの経路である。

①の例を図 5⁶⁾ に示す。負荷経路は、内圧をある値まで先行負荷し、この内圧を一定に保ちながら軸押込みを加えるものである。この実験では自由張出加工におけるアルミニウム合金管の変形挙動に及ぼす保持内圧の影響を見たものである。これより、(1) 管に張出変形を起こさせるには破裂圧力に近い高い内圧を負荷する必要があること、(2) 内圧の大きさのわずかな違いで張出量が大きく異なり、大きな張出量を得ることのできる圧力範囲は狭いこと、がわかる。②の負荷経路、すなわち内圧と軸押込み量を比例的に負荷する直線経路 (図省略) では、破裂にいたるまで内圧上昇を続けることは不適切で、最終段階では内圧の上昇を止めるか、上昇比率を下げて成形するのが賢明である。

図 6⁷⁾ に、アルミニウム合金管の枝管成形における①と③の負荷経路による変形の比較を示す。負荷経路の最終到達点

図 5 アルミニウム管の自由バルジ変形 (内圧 + 軸押込み (折れ線経路))⁶⁾
(A6063, $D=40$ mm, $T=2$ mm, $L/D=2$)

図 6 枝管成形に及ぼす負荷経路の影響⁷⁾
(A6063, $D=40$ mm, $T=2$ mm, 枝管径 $D_b=30$ mm)

は同じでも変形状は大いに異なることがわかる。この例のように、内圧先行の負荷経路が適切である場合が多い。

4.2 管の材料特性

ハイドロフォームされる管材の変形挙動は材料特性に大きな影響を受ける。図 7⁷⁾ に 6063 アルミニウム合金管を破裂にいたるまで自由バルジ変形させた結果を示す。熱処理の違いに起因する材料特性値の影響は明白である。

変形前 A6063-O -T7 -H18
 $n = 0.23$ $n = 0.20$ $n = 0.06$
 $r = 0.63$ $r = 0.52$ $r = 0.36$

図 7 自由バルジ変形に及ぼす材料特性の影響⁷⁾
 (内圧のみ負荷, A6063, $D=40$ mm, $T=2$ mm, $L/D=2$)

(a) n 値の影響

(b) r 値の影響

図 8 自由バルジ張出限界に及ぼす材料特性の影響⁸⁾
 (内圧 + 軸押込み, ERW tube, $D=63.5$ mm, $T=1.6$ mm)

【例題】両端を閉じた薄肉円管に内圧を負荷するとき、管の長さが極めて短い場合を除き、図 7 に見られるように縦（軸方向）に亀裂を生じて破裂するのはなぜか。

【解答】式 (3), (4) より $\sigma_\theta = 2\sigma_\phi$ であり、管の円周方向には常に軸方向の 2 倍の引張応力が作用するから。

図 8⁸⁾ に自由バルジにおける円管の限界拡管率に及ぼす加工硬化指数 n 値や異方性パラメータ r 値の影響を示す。大きな張出量を得るためには n 値, r 値の大きい材料が適している。円管を角形断面に成形する型成形加工における肉厚分布に及ぼす材料特性値の影響を図 9⁹⁾ に示す (FEM シミュレーション)。 n 値, r 値が大きい方が肉厚分布が一樣になる。管の一部に突起 (枝管) を成形する加工 (T 成形, クロス成形など) においても n 値, r 値の大きい材料が高い成形性を示す。また、全伸びが大きい材料も大きな張出量を得られる。同程度の n 値 (一樣伸び) を有する鉄鋼材料がアルミニウム材料よりも成形性がよいのは、鉄鋼材料の局部伸び (したがって全伸び) がアルミニウム材料のそれよりも大きいこと

(a) n 値の影響

(b) r 値の影響

図 9 角筒型バルジ成形における肉厚分布に及ぼす材料特性の影響 (FEM)⁹⁾

図10 枝管高さに及ぼす伸びの影響¹¹⁾
(頭押さえあり, 軸押込み 50 mm, アルミニウム管, $D=23$ mm, 枝管径 $D_0=23$ mm)

によるものと思われる。また, チタン管は一樣伸びが極めて小さく n 値も小さいにもかかわらず大きな張出が得られる¹⁰⁾のは, 最大荷重点以降の局部伸びが大きいためと考えられる。ただし, 枝管頂点の変形を抑制するための頭押さえを使用したアルミニウム管の枝管成形においては, 伸びの小さい方が枝管高さを高くすることができるという報告もある(図10¹¹⁾)。

4.3 型(製品)形状と潤滑条件

THF においては, 型内におかれた管は内圧の負荷により張出して型内面に接触し, その後さらに変形を続けて型になじんだ形状へと成形される。型(製品)の寸法・形状によっては場所により拡管率が異なり, 拡管率の大きいところでは肉厚の減少が顕著になり, 破裂の可能性が高まる。

拡管に伴う肉厚減少の抑制には管端からの押込みが有効であるが, 特に高内圧を負荷する場合には管が型内面に強く押付けられ, 型との摩擦によって移動が拘束されるため, 押込みの効果が小さくなる。拡管部が管端から遠い場合や, 曲げ部や段差部がある場合には押込み効果はほとんど望めない。このため, 型に接触していない自由変形領域に変形が集中して肉厚減少が顕著になり, そこから破裂することがある。管端からの押込みの効果を高めるためには型内面と管表面との間の潤滑をよくする必要がある。潤滑がよい場合には管材料は型面上を滑ることができ, 全体の変形が均一化されて肉厚減少の局所化が避けられる。図11⁹⁾に肉厚分布に及ぼす管と型との摩擦係数の影響を示す(FEM シミュレーション)。円管から角管への成形においてコーナ R 部の肉厚減少の抑制に潤滑は効果的であり, 管端からの押込みが加わるとさらに顕著になる。

5. THF に用いられる管材

5.1 鋼管

THF に使用される管材料としては電気抵抗溶接鋼管, いわゆる電縫鋼管が最も多い。中でも機械構造用炭素鋼鋼管およびステンレス鋼鋼管が多く用いられている。近年, 縮径圧延によるオンライン加工熱処理によって成形性を改善した電縫

図11 角筒型バルジ成形における肉厚分布に及ぼす摩擦係数の影響 (FEM)⁹⁾

鋼管が開発されている¹²⁾。最近は自動車の軽量化の要請から, 部品の一層の薄肉化をねらって高強度鋼管の HF の研究が盛んである。

高強度鋼としては, DP (2 相組織) 鋼, TRIP (変態誘起塑性) 鋼, IF (固溶強化) 鋼などがあるが, 一般に強度が高いほど成形性が低下する。最近は r 値や伸びなどを改善した高強度鋼が開発され, それらの鋼材からつくられた高強度鋼管の HF が試みられている¹³⁾。成形性が改善されたとは言え, 高強度鋼管の HF は一般の鋼管より難しい。高強度鋼管の HF 技術の開発には高度化された材料技術と加工技術の両方が要求される。図12¹⁴⁾に TRIP 鋼管を用いた枝管成形実験の例を示す。枝管成形される管材は場所によって変形様式や変形量が大きく異なるが, TRIP 鋼の変態誘起塑性を巧みに利用した加工により, しわや破断を生じることなく十分な高さをもつ枝管の成形が可能であることを示している。

5.2 軽金属管

製品の軽量化のためには, 価格は高いが軽金属の使用が効果的である。最も多く用いられているのはアルミニウム合金管である。一般に 5000 系, 6000 系合金が用いられているが, 強度を要求される場合には 7000 系合金が用いられることもある。

アルミニウム合金管の HF における問題点は, 鋼管に比較して強度や成形性が劣ることと価格が高いことである。自動車産業においては, 従来の鋼管による部品をアルミニウム合金管で代替した部品開発は軽量化の達成程度とコストとのバランスで進められてきた。初期はコストの問題から高級車部品にしか適用されなかったアルミニウム合金製部品も徐々に適用車種を拡大している。THF によるアルミニウム合金製の自動車部品は, 特に軽量化効果の大きいサブフレーム (フロントサブフレーム (エンジンクレードル)), リアサブフレーム) への適用が進んでいる^{15), 16)}。

一般に高温においては伸びや成形性が格段に改善されるので, 常温での成形性が低いアルミニウム合金管に対しては高温 HF が期待されていた。しかしながら高温 HF には, 長い加熱時間, 温度管理, 高温での酸化や潤滑問題など, 実用化のために解決すべき課題が多く存在する。

最近これらの問題点を種々の技術で解決して, アルミニウ

図 12 TRIP 鋼の枝管成形例¹⁴⁾ 図 13 アルミニウム管の熱間バルジ成形による複雑形状部品の成形¹⁸⁾

ム合金管の熱間バルジ成形技術が開発された¹⁷⁾。2004 年発売の市販乗用車に搭載されたサブフレームにこの技術が適用されている。図 13¹⁸⁾ に熱間チューブバルジ成形でつくられた部品の断面形状を示す。フロントサブフレームの左右メンバ、リアサブフレームの前後メンバが熱間チューブバルジ成形品である。従来よりもはるかに複雑な形状をもつ部品が一体成形され、部品点数・溶接工程の削減、剛性の向上が実現し、軽量化とコストダウンが達成された。

素管は Al-Mg 系の新しく開発された合金管で、直接通電加熱により高速で予備加熱し、加熱してある金型内で軸押しを加えながら成形する。これにより、加熱時間の短縮が図られている。予備成形における成形形状の設定と管端からの軸押し込みのコントロールの工夫、および、成形工程をいくつかの段階に分ける工夫により、肉厚が比較的一様で高精度の製品が得られている。最大拡管率（周長変化率）は 90% 近くに達しており、常温加工ではできそうもない複雑な断面形状が成形されている。圧力媒体は空気で、成形圧力は約 3MPa、室温における成形圧力の 1/100 程度の低圧力で成形可能である。これに伴い、型締力も室温の場合の 1/10 程度ですみ、成

形設備も小型化された。熱間大変形時に問題となる結晶粒粗大化やキャビティに対しては材料開発で対処している。

このほか、基礎研究としては、6063-T5 管の熱間ガスバルジ成形における通電加熱特性を調べた報告¹⁹⁾があるほか、5754 合金管を 300°C で成形する HMGF (Hot Metal Gas Forming)²⁰⁾ や、5182 (Al-Mg-3.5Mn) 合金管を 450°C に加熱して窒素ガスで成形し、大きな拡管量が得られた結果²¹⁾などが報告されている。

マグネシウムは実用されている構造用金属材料の中では最も軽量であるが、常温での成形性が極めてよくない。しかし、AZ31 合金管や AZ61 合金管は高温での HF 実験においてかなりの成形性を示すことが報告されている^{22), 23)}。高温枝管成形実験における AZ31B 合金管の変形形状を図 14²⁴⁾に示す。ただし、まだ実用化されたという報告はない。

5.3 テーラードチューブ、テーパチューブ

通常の管材は軸方向、周方向に一樣な肉厚を有するストレート管である。一本の管から複雑形状に HF された製品は、場所により肉厚分布が異なる。逆に言えば肉厚分布が一樣な製品をストレート管から HF によって作ることは難しい。必

(a) $T=450^{\circ}\text{C}$, $p=2\text{MPa}$, $u=50\text{mm}$, $t=44\text{s}$ (b) $T=450^{\circ}\text{C}$, $p=1.4\text{MPa}$, $u=50\text{mm}$, $t=42\text{s}$

T : 温度, p : 内圧, u : 軸押し量, t : 成形時間

図 14 マグネシウム合金管の高温枝管成形²⁴⁾ (AZ31B, $D=50\text{mm}$, $T=2\text{mm}$)

図 15 テーラードチューブのハイドロフォーミング (FEM)²⁵⁾

図 16 テーパーチューブのハイドロフォーミング²⁶⁾

要な部位に必要な肉厚や強度をもつ製品を作るためには、加工前にそれに対応した肉厚分布や強度分布を有する管を用意すればよい。また、場所によって異なる拡管率が要求される場合には、それに対応した径をもつ管を準備すればよい。

このような考えに基づき、肉厚や強度または成形性が異なる管を溶接してつくったテーラードチューブや軸方向に径が異なるテーパチューブが HF に使用され始めている。素材の製造コストは高くなるが、不必要な肉厚（駄肉）の除去による軽量化や製品形状の自由度の拡大が期待される。加工技術の開発はまだ不十分である。

厚さの異なる IF 鋼管を溶接してつくったテーラードチューブの HF 実験結果の例を図 15²⁵⁾ に示す。通常の一様肉厚の管と同じ負荷経路ではうまく成形できないが、薄肉部分と厚肉部分の軸押しタイミングをずらして成形することによりしわのない製品を得ることができる。また、小径部と大径部で 2 倍異なるテーパチューブの成形実験例を図 16²⁶⁾ に示す。移動型を用いた軸押しによって、高強度鋼管のテーパチューブでも高い拡管率を得ることができている。

6. 最近の動向（加工方法の工夫）

すでにアルミニウム合金管の熱間バルジ成形など、いくつかの最近の技術動向について述べたが、それ以外の注目すべき技術について触れる。

6.1 型移動による成形

枝管成形における枝管高さを増大させるために、金型を分割して軸方向に移動できるようにし、これを内圧および軸押しの負荷とともに制御する加工法が提案された。これにより枝管高さが管外径の 2~2.5 倍に飛躍的に増大した (図 17²⁷⁾)。提案された加工法では第一段階で型内において低圧下での曲げ加工を行い、枝管と 180 度反対側に位置する部分（枝管成形において最も増肉される部分＝枝管底部）の肉厚を減少させるところが新しい考えである。これにより、第二段階で枝管底部の肉厚が過大になることなく、大きな枝管高さを得ることができた。

また、軸方向に移動可能な金型を用い、金型の移動と管の軸押しを同時に行うことによって、張出成形部における管軸方向のコーナ R の小さい製品を通常加工よりかなり低い内圧で成形する方法が紹介された²⁸⁾。

図 17 型移動による枝管成形²⁷⁾ 図 18 ハイドロフォーミングステアリングコラム³¹⁾

前述したテーパチューブの加工でも移動型が用いられていたが、共通するポイントは、型を管と一緒に移動させることにより型と管との摩擦を減らすことにある。

6.2 ハイドロピアシング、ハイドロバーリング、ハイドロジョイニング

THF においては、成形型内での管材の変形がほぼ終了したあと、型になじませるために高内圧を負荷し、製品精度を上げる（キャリブレーション）が行われる。この成形の最終段階における高圧を利用して、製品に穴をあける加工（ハイドロピアシング）が行われている。これも THF の特徴の一つで、製品への穴あけ加工を別工程とせず、同じ型を用いて連続工程で行うことができる。

ハイドロピアシングには穴を外側からあける方法と内側からあける方法がある。多くは管の外側からパンチを用いて穴をあけるが、一対の剛体のパンチとダイを用いる通常の穴あけ加工とは異なり、高圧の液体がダイの代わりをするので、

図 19 ハイドロバーリング³²⁾

押し込みたわみが大きい。これに対して高内圧をパンチ代わりにして管の内側から穴を開ける方法^{29), 30)}においては、金型がダイになるためたわみは少ないが、だれが大きくなることが指摘されている³⁰⁾。最近、複数の異形穴の外向きピアシングを高精度で行う技術が実用化され、この技術を駆使した一体成形ハイドロフォーミングステアリングコラムが登場した（図 18³¹⁾）。

ハイドロフォームされた部品と他の部品との結合を容易にするため、キャリブレーション段階における高圧を利用したバーリング加工が試みられている（図 19³²⁾）。また、管の外

側からの穴あけに続けて、ファスナ（リベット）の管壁へのかしめ留めを一工程で行う技術（ハイドロジョイニング）が提案されている³³⁾。

7. 成形性の評価

THF における管の成形限界は、破裂、座屈、しわなどである。これらは、管に負荷する内圧、軸荷重、軸押込み量などの大きさとタイミング（負荷経路）に大きく影響を受ける。また、管の強度や延性などの材質や、寸法・形状にも大きく影響される。さらに管と型との間の潤滑条件によっても異なる。HF における管の成形性の評価法はいくつか提案されているが、まだ確立されたものはない³⁴⁾。

成形性評価にしばしば使われるものにひずみ平面で表した成形限界線図 (FLC/FLD; Forming Limit Curve/Diagram) があるが、THF においては外力の負荷経路が複雑で、ひずみ経路

に大きく影響される FLC/FLD を用いることは適切でないことが多い。

これに対して応力平面で評価する方法もある。HF における管材の応力状態は管軸方向（子午線方向）応力と円周方向応力の 2 軸応力（平面応力）状態である。なぜなら、ハイドロフォームされる管材は比較的薄肉のものが多く、板材成形と同様、厚さ方向の応力はほかの応力に比べて小さく、無視することができるからである。これらの応力を座標にとった応力平面で表示する成形限界応力線図 (FLSC/FLSD; Forming Limit Stress Curve/Diagram) が提案されている (図 20³⁵⁾)。成形限界応力はひずみ経路に依存しないため、ひずみ経路をいちいち考慮せずにすむ利点がある。ただし、ひずみは直接測定できるのに対して応力のそれは難しい。

一方、円管を長方形断面の型内で HF することを想定し、内圧を一定に保った状態で管端から軸押しを行う実際の HF に近い条件下で成形限界を評価しようという提案もなされている。保持内圧－軸押量線図の中に破裂限界、座屈限界、しわ限界、コーナ R の限界線を引き、この限界線でかこまれた領域の大きさでその材料の成形性（余裕度）を評価するものである。図 21³⁶⁾ に例を示す。低強度で高延性の管は高強度で低延性の管より成形限界領域が広いことがわかる。 n 値や r 値も大きいほど成形領域が広い³⁷⁾。

8. おわりに

以上、THF について最近の動向も含め概略を述べた。THF は中空軽量部材の成形法であり素管が軽金属であればより一層その真価を発揮する。緒言でも述べたように、地球温暖化対策として自動車軽量化の要求は今後ますます強まることが予想され、それに応えるため、軽量金属の THF 製品がさらに多く使用されてゆくものと思われる。

THF は、中心となる加工技術のほかに材料技術、接合技術、シミュレーション技術、加工機械技術など、多くの周辺技術を複合した総合技術である。本稿ではスペースの都合上、シミュレーションや加工機械などについては触れなかったが、

Forming limit stresses for several stress paths. ○: linear stress paths; ●: combined stress paths I; △: combined stress paths II; □: combined stress paths III.

図 20 成形限界応力線図 (FLSC)³⁵⁾

Material A: 高強度・低延性

Material B: 低強度・高延性

図 21 成形可能領域の大きさによる成形性評価³⁶⁾

THF を成功に導くためには重要な役割を担っている。これらの種々の個別周辺技術とそれらをつなぐ全体技術の進展により THF は中空軽量部材の成形技術としてさらなる展開が期待される。

参 考 文 献

- 1) 阿部英夫, 園部 治: プレス技術, **39** (2001), 24-27.
- 2) 工業技術院名古屋工業技術試験所: 名古屋工業技術試験所 25 年史, (1978), 77-79.
- 3) 塑性加工学会編: チューブフォーミング-管材の二次成形と製品設計- (塑性加工技術シリーズ 10), コロナ社, (1992), 66-80.
- 4) 同上: 67.
- 5) 淵澤定克, 竹山寿夫: 精密機械, **45** (1979), 106-111.
- 6) S. Fuchizawa, M. Narazaki and A. Shirayori: Advanced Technology of Plasticity 1996 (Proc. 5th ICTP), (1996), 497-500.
- 7) 淵澤定克, 北村和幸, 奈良崎道治, 鋤本己信, 渡辺 勲: 塑性と加工, **36** (1995), 80-86.
- 8) O. Sonobe, Y. Hashimoto, T. Iguchi and H. Abe: IBEC Paper 20037010/2003-01-2737, (2003).
- 9) K. Manabe and M. Amino: Proc. AMPT'98, (1998), 523-530.
- 10) 淵澤定克, 美馬真人, 奈良崎道治: 第 45 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1994), 669-672.
- 11) 水越秀雄, 岡田英人, 若林広行: 第 49 回塑性加工連合講演会講演論文集, (1998), 323-324.
- 12) 依藤 章, 河端良和, 大西寿雄, 板谷元晶, 森岡信彦, 豊岡高明: 塑性と加工, **47** (2006), 1141-1145.
- 13) 例えば A. Konieczny, X. M. Chen, D. A. Witmer, M. F. Shi, Y. Hayashida and Y. Omiya: SAE Technical Paper Series, 2004-01-0830, (2004).
- 14) S. Sakamoto, Y. Terada, K. Ushioda and M. Mizumura: Proc. TUBE-HYDRO2005 Conf. (2005), 42-47.
- 15) 中尾敬一郎: 金属, **74** (2004), 700-705.
- 16) 末永雄二: プレス技術, **42** (2004), 28-31.
- 17) 福田文亮, 林 登, 小川 努, 横山 鎮, 堀 出: 軽金属, **55** (2005), 147-152.
- 18) 木山 啓, 北野泰彦, 中尾敬一郎: 同上, **56** (2006), 63-67.
- 19) 森謙一郎, 藤本浩次, 牧清二郎: 平成 19 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2007), 251-252.
- 20) T. Altan, Y. Aue-U-Lan, H. Palaniswamy and S. Kaya: Advanced Technology of Plasticity 2005 (Proc. 8th ICTP), Keynote Paper.
- 21) M. Keiglar, H. Bauer, D. Harrison and A. K. M. De Silva: J. Mat. Process. Technol., 167 (2005), 363-370.
- 22) C. C. Huang, J. C. Huang, Y. K. Lin and Y. M. Hwang: Materials Transactions, **45** (2004), 3142-3149.
- 23) R. Neugebauer, A. Sterzing, P. Kurka and M. Seifert: Advanced Technology of Plasticity 2005 (Proc. 8th ICTP).
- 24) 内山剛志, 直井 久, 高屋雅啓, 生田文昭, 桑原義孝: 第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2005), 129-130.
- 25) 井口敬之助, 水村正昭, 丹羽俊之, 栗山幸久, 澤田真也: 平成 17 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2005), 347-348.
- 26) 富澤 淳, 泰山正則, 亀岡徳昌: 第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2005), 197-198.
- 27) 佐藤浩一, 弘重逸朗, 平松浩一, 真野恭一: 平成 18 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2006), 1-2.
- 28) 黒川宣幸, 富澤 淳, 小嶋正康: 同上, (2006), 3-4.
- 29) 内田光俊, 富澤 淳: 同上, (2006), 15-16.
- 30) 上田祥弘, 塩見誠規, 小坂田宏造: 第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2005), 205-206.
- 31) 渡辺 靖, 阿部正一, 下飯和美, 富澤 淳, 内田光俊, 小嶋正康, 菊池文彦: 平成 19 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2007), 255-256.
- 32) 水村正昭, 栗山幸久, 井口敬之助: 第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2005), 189-190.
- 33) M. Farzin and R. Shivpuri: Advanced Technology of Plasticity 2005 (Proc. 8th ICTP).
- 34) Y. Mihara: Proc. TUBEHYDRO 2005 Conference, (2005).
- 35) 吉田健吾, 桑原利彦, 成原浩二, 高橋 進: 塑性と加工, **45** (2004), 123-128.
- 36) 水村正昭, 栗山幸久: 同上, **44** (2003), 524-529.
- 37) 水村正昭, 栗山幸久: 同上, **45** (2004), 60-64./**45** (2004), 103-107./**45** (2004), 817-821.