

# チューブハイドロフォーミング技術の新展開

淵澤 定克\*

Recent Developments in Tube Hydroforming Technology

Sadakatsu FUCHIZAWA

**Synopsis :** Tube hydroforming is a process for manufacturing highly rigid light-weight parts with complex cross sections by internal high-pressure and axial feeding or axial compressive loading. It offers some advantages when compared with the traditional manufacturing methods such as sheet stamping and welding, or casting. The essential advantages are: integration of parts, reduction in both component weight and manufacturing steps, high accuracy of shape and dimensions, etc.

Tube hydroforming was developed as an innovative technology in Japan over 40 years ago. Initially, it was available for manufacturing small and simple parts and has been used mainly in both the bicycle industries and the piping industries to manufacture fittings.

Recently, new computer technology offers advanced control technology in manufacturing large and complex parts, and also offers FE simulations as designing tools for manufacturing sound parts without failure, such as bursting, buckling or wrinkling. Tube hydroforming—refined by computer technology and increased in capacity—is widely regarded as a new technology for manufacturing light-weight parts.

To meet strong demands for saving fossil fuels and reducing CO<sub>2</sub> emissions which cause global warming, automobile industries have recently adopted tube hydroforming technology to reduce the total weight of the cars and cost of production.

This paper reviews the recent developments of tube hydroforming and discusses the key points of this technology.

**Key words:** hydroforming; tube; internal high-pressure; axial feeding; light-weight parts; automobile industry.

## 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）は、軽量で剛性の高い中空部品を管材から一体成形する加工法であり、近年、自動車部品製造に盛んに利用されるようになり、注目を集めている。THF は、昔の技術がリニューアルされ、よりスマートで高度な成形技術として装いを新たに再登場してきた古くて新しい技術である。

THF はすでに 40 年ほど前に中空軽量部材のすぐれた成形技術として日本で開発・実用化されたものである。しかしながら、自転車産業、配管産業等で利用されるにとどまり、広く利用されてはいなかった。基本技術は優れていたがそのほかの条件が整わなかったからである。

しかし、その後登場したコンピューター技術が成形技術を高度化し、複雑断面形状を有する大型の高剛性軽量中空部材を管から一体成形することを可能とした。一方、近年地球環境の破壊が深刻になり、自動車産業は化石燃料の大量消費、排気ガスによる大気汚染、地球温暖化の原因となる CO<sub>2</sub> の排出などの問題の早急な解決を強く迫られるようになった。自動車の軽量化はこれらに対応できる即効性のある有力な手段の一つである。

このように、技術の向上とニーズの存在という条件の変化が自動車メーカーをして THF 技術の採用に踏み切らせ、

約 10 年ほど前から自動車産業を中心に広く利用されるようになってきた。このような状況を背景に、THF に関する研究発表や技術講演なども盛んに行われるようになり、状況を呈している。

本稿では、自動車および自動車部品メーカー、管材メーカー、加工機械メーカーなどを巻き込んで急速な展開を示している THF 技術について述べる。なお、THF 技術については最近多くの解説がなされている<sup>1-6)</sup>ので、それらも参照されたい。

## 2. チューブハイドロフォーミングの特徴

チューブハイドロフォーミングとは文字どおり、管の水（液体）による成形加工法である。すなわち、型の中に入れた管の内部に高い液圧を負荷し、必要に応じて管端から押込みを行いながら塑性変形させ、型に沿って管を成形する加工法 (Fig. 1<sup>7)</sup>) であり、以下のような特徴を有している。

THF においては管に変形を生じさせるものは高圧の液体であり、通常のプレス加工、鍛造加工などのような剛体工具のパンチとダイによる加工とは異なっている。すなわち、雄型に相当するものが液体という柔軟工具であるので型は雌型のみでよく、また成形形状の自由度が大きいという特

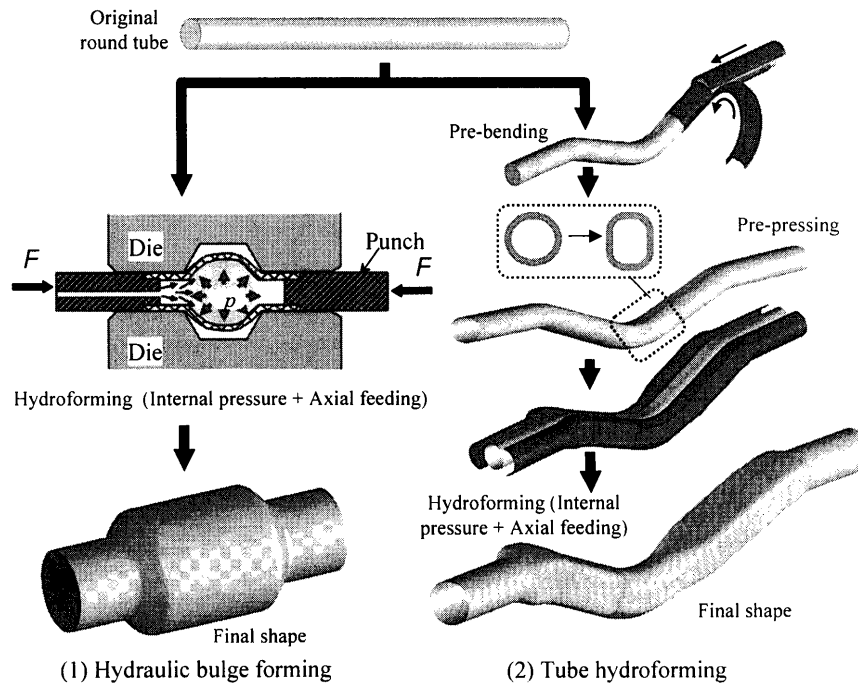


Fig. 1. Tube hydroforming process.<sup>7)</sup>

徴がある。すなわち、剛体パンチでは不可能な複雑断面形状を有する部品・長尺の部品を一体で成形することができる。

また THF の特徴の一つに、管の両端から管軸方向への圧縮力または押込みを加えることができる、ということがある。高内圧を負荷して張出し変形させると、管は必然的に肉厚を減じる。管端からの押込みは変形部への材料供給を助け、張出しに伴う肉厚減少を抑制するので、成形限界の向上に効果的である。また、押込みが管材料の型内での移動を促進するため、型に沿った変形が得られやすく、製品の型なじみがよくなり、形状精度が向上する。

一般には、加工しようとする管材料が成形型に入るよう曲げ加工などのプリフォーミングが行われる。前加工を行わず、管に曲げやつぶしを与えながら型を閉じる場合もある。また、成形後、同一型内で管材に穴あけ加工（ハイドロピアシング）を行うこともできる。THF は、狭義には成形型内での液圧バルジ加工をいうが、プリフォーミングの曲げ加工やつぶし加工、あるいはハイドロピアシングなども含めている場合もある。このようにチューブハイドロフォーミングは液圧バルジ加工を中心として周辺の加工も含めた複合加工であるということができる。

中空部品の作り方としては、THF のほかに、板材をプレス加工した後溶接して作る方法や、鋳造による方法もある。THF により中空部品を作る方法を、板材のプレス加工と溶接から作る方法と比較すると、次のような有利な点を有する。

- (1) 複雑断面を有する軽量中空部材の一体成形が可能。
- (2) 加工工程、溶接・組み立て工程の削減。

- (3) 部品点数の削減。
- (4) 型費用の削減。
- (5) 溶接フランジ不要による軽量化・材料歩留まりの向上。
- (6) 成形品は剛性が高く、スプリングバックが少なく、形状凍結性がよい。
- (7) 加工硬化による強度の向上とそれによる製品の薄肉化が可能。

一方 THF の欠点は以下の点である。

- (1) 加工に要する時間が長い。
- (2) 高圧を負荷する加工機械・設備が必要。
- (3) 多少高い加工技術が必要。
- (4) 素材の管材の価格が板材よりも高い。

THF にはこれらのマイナス面も有するが、上述したような数々の特徴を有し、適切な使い方をすればコストダウンも可能である。それゆえ多くの自動車メーカーを中心として THF 技術の採用が拡大している。

### 3. チューブハイドロフォーミングの再登場

まえがきで少し述べたように、THF 技術は 1960 年代に日本で開発・実用化されたものであるので、その生い立ちについて少し触れておきたい。この技術は当時の工業技術院名古屋工業技術試験所と（財）自転車技術研究所の共同研究により、自転車用フレーム継手を管材から液圧バルジ加工で製作する新しい加工法として登場した<sup>8)</sup>。それまでは板材からプレス加工と溶接により多くの工程を経て作られていたものを、電縫鋼管に内圧と軸押込みを負荷して突

起成形を行わせて作るようにしたもので、工程数が削減され、製品の強度信頼性が向上し、専用機による高能率生産により生産コストも下げることができた。液圧バルジ加工は従来の加工法に取って代わり、自転車用フレーム継手や配管用継手などの製造に適用された。自転車のヘッドラッグなどのフレーム継手は現在でもこの加工法によって生産されている<sup>9)</sup>。

この技術が実用化された頃は現在のようなコンピューターはまだ存在しなかったため、内圧と軸押込みのコントロールは機械的方式<sup>10)</sup>または電気制御方式<sup>11)</sup>によって行われていた。この方式は製品形状が比較的簡単なものの場合には十分威力を発揮したが、大型で複雑な形状の製品加工には適さなかった。それゆえ、この技術は自転車フレーム継手、配管継手、ペローズなど、小物で単純形状のもの製造や、変わったところでは管楽器（例えばホルンの朝顔管）のキャリブレーションなどに適用されていた。

その後、コンピューターが登場し、CNC加工機が出現するなど加工機械の知能化・高度化が進み、多様で複雑な加工が可能となった。また、コンピューターを利用したシミュレーション技術が進展し、FEMによる構造解析、成形シミュレーション、衝突安全解析などに威力を発揮するようになってきた。コンピューターによってリファインされた液圧バルジ加工は、あらためて軽量中空部品の高度な加工法として見直されるようになり、名称もチューブハイドロフォーミングとして再登場してきた。

一方近年、地球規模での環境破壊が人類全体の大きな問題となり、その解決が緊急な課題となってきた。自動車産業は、化石燃料の大量使用、排気ガスによる大気汚染、CO<sub>2</sub>による地球温暖化などに厳しく対処せざるを得なくなってきた。

国際鉄鋼協会(IISI)は、1993年アメリカで始まった低燃費(80 mpg≒34 km/L)の新世代の自動車を作る呼びかけ(PNGV)に応え、鉄鋼材料を使用してその実現を図ることを目標に、国際プロジェクト ULSAB<sup>12)</sup> (=Ultra Light Steel Auto Body 超軽量鋼製自動車車体, 1994-1998)を立ち上げた。

THFはこのULSABプロジェクトに軽量中空構造部材の加工法として採用され、このプロジェクトの成功によりそのメリットが広く認識されるようになった。ULSABの成功後、IISIは鉄鋼材料による自動車軽量化技術プロジェクトを、外板パネル(ULSAC)、サスペンション(ULSAS)、総合(ULSAB-AVC)へと拡大しているが<sup>13)</sup>、その中でもTHF技術は生かされている。

ヨーロッパ、特にドイツは自動車部品製造へのTHFの導入に熱心であり、1995年にはアルミニウム製のエンジンクレードルが作られている<sup>14)</sup>。1996年にはVDI(ドイツ技術者協会)の委員会が設置され、THF技術が国家規格(DIN)へ組み込まれている<sup>14)</sup>。

欧米に比べ日本の対応は遅かった。その理由は、日本では板材の成形加工技術がよく発達しており、自動車の中空部品も管材を用いずに板材からプレス加工と溶接で作るのが一般であり、板材からの部品製造ラインがよく整備されていたからである。このため、既存のラインを撤廃して新たに管材から部品を作ることは慎重であった。また、管材は板材よりも多少価格が高く、加工機械設備、特に高圧タイプのものは大掛かりで高価であったこと、加工に要する時間が長いことも理由の一つである。

日本では1999年に市販の乗用車にTHF製品が初めて搭載され、以後、年を追うごとにTHFによる部品の種類と数が増えている。2000年にはTHFは「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」であるとして重要素形材技術の一つに位置づけられている<sup>15)</sup>。

## 4. チューブハイドロフォーミングの研究の展開

### 4.1 成形限界と負荷経路

#### 4.1.1 成形限界

THFにおける管材の成形限界は、破裂、破断、座屈、しわなどである。これらを生じることなく健全な製品を作るためには成形限界をまえもって知っておくことが重要である。

ひずみ比一定の直線変形経路における管材の成形限界はひずみの比率によって大きく異なる<sup>16-20)</sup>。特に、平面ひずみ条件下での成形限界ひずみは小さい。管の両端を閉じて内圧のみを負荷する場合はほぼ平面ひずみ状態であり、管の有する成形能を十分に引き出してはいないことに留意すべきである。しかし、管軸方向に圧縮を負荷すると管は周

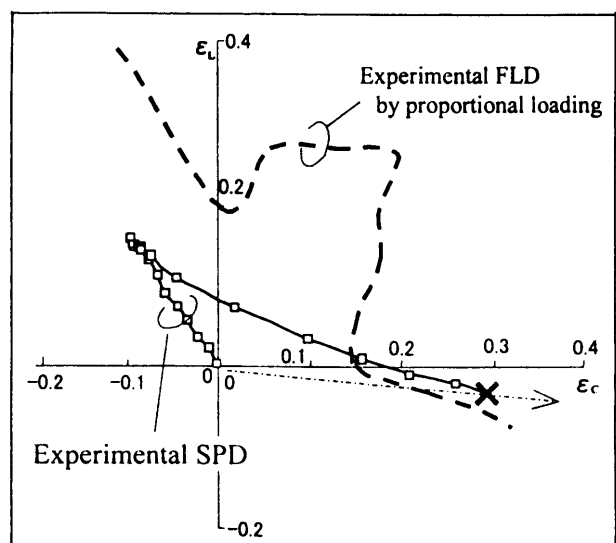


Fig. 2. Forming limit diagram (FLD) in proportional condition and strain path diagram (SPD) in condition of the notable path (longitudinal uniaxial (0.2)→circumferential uniaxial).<sup>16)</sup>

方向へ大きく張出し、成形限界が高くなる。また、変形途中でひずみ比を変化させた場合の成形限界ひずみは直線ひずみ経路におけるそれとは差異が見られ、ひずみ経路を的確に選択すれば比例負荷に比べて周方向への大幅な成形限界の向上（張出し量の増加）が可能であることが示されている<sup>16,20,21)</sup> (Fig. 2<sup>16)</sup>)。一方、ひずみ経路の変化のさせ方によっては逆に張出し量が減少することもあり<sup>20,21)</sup>、注意が必要である。

一方、成形限界を応力で評価する方法がある<sup>22-24)</sup>。ひずみ空間で表示した成形限界線はひずみ経路に依存するが、応力空間で表示した成形限界応力線はひずみ経路によらず、ほぼ同一の曲線上に集中するというアルミニウム管を用いた実験報告もある<sup>22)</sup>。これが他の材料についてもあてはまるかどうかは不明だが、興味深い。

管材の成形限界については板材に比べまだ十分に調べられておらず、各種材料に対するデータの蓄積が少ない。今後の研究に期待したい。

#### 4.1.2 負荷経路

THFにおいて最も重要なものは、管に負荷する内圧と、軸荷重または管端からの軸押込みの大きさとタイミングのコントロール、すなわち負荷経路の設定である。一般に負荷経路は内圧と軸押込み量を加工パラメーターとして設定されている。

管に内圧を負荷するだけでなく軸押込みを適切に行うと、変形部の肉厚減少が抑えられ、張出し量は大幅に増加する<sup>25-27)</sup>。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破裂を生じ、過度の押込みは座屈（しわ）を生じてしまう。ただしTHF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ができる場合があり、しわの発生が直ちに成形限界とはならない。

ここで、加工パラメーターについて整理しておく。THFにおける加工パラメーターとしては、内圧のほかに管に注入する水（圧力媒体）の量を考えることもできる。また、管端からの軸押込み量の代わりに軸圧縮荷重を加工パラメーターとして考えることができる。内圧および軸荷重は「圧力または力」であり、管に注入する水の量および軸押込み量は「容積または変位」である。組み合わせとしては四通りが考えられる。

内圧は、型成形のように圧力が途中で下降せず常に増加する場合（ただし、管に破裂は生じないものとする）には加工パラメーターとして問題はない。しかし、管の外側に変形を拘束する型がない自由バルジのような場合には、内圧が最大に達した後少しずつ圧力が下降しながら変形が進むことがある。このような場合には圧力をコントロールして変形を進めることは難しい。コンピューターシミュレーションにおいても、内圧をパラメーターにすると最大値に到達したところで安定解が得られなくなる<sup>28)</sup>。

また、軸圧縮荷重を加工パラメーターとすることもでき

るが、管に座屈が生じたときに軸荷重が急激に減少し制御が難しくなることに注意を要する<sup>29)</sup>。

このように、自由バルジ変形においては、同じ内圧または軸荷重の値に対して二つの異なる変形状態が存在する可能性があるため、これらを加工パラメーターとすることは適切ではない。一方、圧力媒体の注入量や軸押込み量に対してはそのようなことは起こらない。管に注入する水（圧力媒体）の量をコントロールすることによって最大内圧を求めることができ<sup>28,30)</sup>、また、軸押込み量をコントロールすることによって、座屈における急激な変形抵抗の減少による不安定を回避して、安定した変形を行わせることができる。このように加工は荷重制御ではなく変位制御で行う方がやりやすく、圧力媒体の注入量と軸押込み量を加工パラメーターとすることが望ましい。

型成形では一般に上述したような問題が起こりにくいため、多くの場合、内圧と軸押込み量を加工パラメーターとした加工が行われている。ただし、実操業の場においては、シール部からの水のリークによる内圧の降下や軸押しによる内圧の上昇などに配慮する必要がある。

管の成形性に及ぼす負荷経路の影響については、例えば内圧と軸押込み量を比例的に負荷する直線経路<sup>29)</sup>や、ある設定圧力まで内圧を負荷した後その圧力を維持しながら軸押込みを行う折れ線経路<sup>25)</sup>について調べられている。これまでに報告されているものは、内圧先行負荷後、押込みを行う負荷経路が適切であるとするものが多い<sup>31,32)</sup>。

一つの考え方として、内圧と軸押込みの組み合わせ方（負荷経路）によってTHFを、1. 内圧加工、2. 内圧優先加工、3. 軸押し優先加工、4. 軸押し加工に分類することができる<sup>33)</sup>。この分類は負荷経路を選択する際に、あるいは、製品の加工状態を把握する際に参考になるとと思われる。

1. の内圧加工は、あまり張出し量を要求しない場合に用いられ、軸押込みは行わない。負荷経路は単純（内圧のみ）で、管の破損は破裂であり、しわは生じない。このような変形は例えばエンジンクレドールのような厳しい曲がり部分を有する製品のハイドロフォーミングに見られる。2. の内圧優先加工は比較的変形領域が大きく、大きな張出し量を必要とする場合に適用される。張出しは内圧によって生じ、軸押しは張出しをアシストする役目になっている。破損は軸押し量に対して内圧が高すぎる場合に生じる破裂と、内圧に対して軸押し量が大きすぎる場合に生じる座屈（しわ）である。軸押しによって生じるあまり大きくないしわは、その後の内圧の負荷によって消滅させることができる。3. の軸押し優先加工は、張出し領域が比較的狭く、変形が局所的に行われる場合の加工である。典型的な例はT成形である。この場合、枝管の形成は主として軸押しによる材料供給によるものであり、内圧の役割は押込みによるめり込みを防ぐ補助的なものである。4. の軸

押し加工は、内圧を供給するポンプを使わず、管を端から押すことによって内部に充填した水の圧力の上昇を利用する加工である。内圧が破裂圧力を超さないようにリリースバルブを用いて圧力を逃がす必要がある。この加工法はポンプを使わないだけで、3. と基本的には同じである。

THFにおいて最も重要なポイントは負荷経路の最適化である。負荷経路に影響を及ぼす因子が多いため最適解を求めることは簡単にはできないが、シミュレーションはこのような場合に威力を発揮する。

内圧と軸押し（軸荷重）によって自由バルジ変形する場合について、いくつかの試みがなされている。例えば、内圧と軸押しの比例負荷における最適経路を最大張出し量为目标として自動的に求めるもの<sup>34)</sup>、内圧と軸圧縮力の比率を変えた時の座屈解析を中心として成形性向上のための最適負荷経路を探ろうとするもの<sup>35)</sup>、内圧と軸押しのパターンを何通りか変化させて検討したもの<sup>36)</sup>、成形後の肉厚分布の均一化を目標として最適経路を求めたもの<sup>37)</sup>などがある。内圧のみを負荷したときの自由バルジ変形における管端の縮み量を管材料の異方性パラメータを仮想的に変化させて求め、それに基づいて軸押し込み量を定めるという内圧優先加工における負荷経路を得る試みもなされている<sup>38)</sup>。

軸押し優先加工であるT成形においてはデータベースを用いたファジィ制御による加工システムが提唱されている。それによれば、従来のマニュアルによる負荷経路によるよりも座屈や破裂なしに十分な高さを持つ枝管が成形された<sup>39)</sup>。

最適負荷経路は、管材の材質、形状・寸法（外径、肉厚）、製品（型）形状、拡管率、管と型との摩擦（潤滑条件）などによって大きく影響を受けるほか、プリフォーミングとしてどのような加工を受けたか、プリフォーム形状や加工の程度などの影響を受ける<sup>2,40)</sup>。プリフォーミングによる肉厚の不均一分布や加工硬化による延性低下およびその不均一分布など、加工履歴を考慮する必要がある。

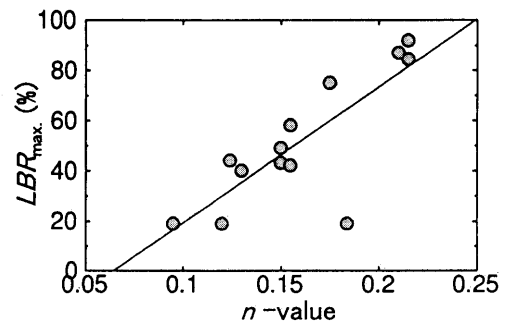
成形を成功させるためにはこれら種々の影響因子の影響を前もって把握し、製品の形状の設計、管材料の選定、潤滑条件の決定、そしてそれに適した負荷経路の選定を行わなければならないが、影響因子が極めて多いため、最適負荷経路を求めることは容易ではない。

負荷経路の適切さを素管成形余裕度で評価する試みがあるが、それについては4.5で述べる。

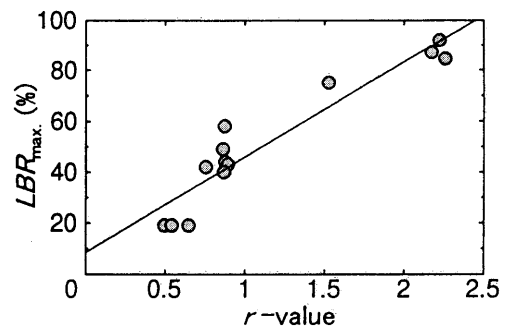
#### 4.2 管の材料特性

これまでの多くの実験的研究、理論的研究あるいはシミュレーションなどから、THFにおける管材の変形に及ぼす材料特性の影響は、変形形状が比較的簡単な場合についてはかなり明らかにされつつある。

上述した内圧優先加工のように、変形領域が比較的広く自由バルジに近い変形をするような場合には、大きな張出



(a) Effect of  $n$ -value



(b) Effect of  $r$ -value

Fig. 3. Effect of material properties on limiting bulging ratio ( $LBR_{max}$ ) (ERW tube,  $\phi 63.5 \times t 1.6$ ).<sup>27)</sup>

し量を得るためには加工硬化指数  $n$  値、異方性パラメータ  $r$  値、特に管軸方向の  $r$  値、伸びが大きい材料が適している<sup>2,27,41-44)</sup>。Fig. 3<sup>27)</sup>に限界拡管率に及ぼす  $n$  値、 $r$  値の影響を示す。これらの材料特性値の及ぼす影響を統計的手法で評価する研究<sup>45)</sup>もなされている。

管の外側に型を置いた型成形加工においては  $n$  値、 $r$  値が大きいほど肉厚分布が一様になる<sup>46)</sup>。 $n$  値が大きい管では軸押し中にしわが発生しやすいけれども、最終昇圧中に消滅しやすい<sup>47)</sup>。また、 $r$  値が大きいほどしわが軽減される<sup>48)</sup>。

また、押し込み優先加工のT成形の場合でも  $r$  値が大きい方が大きな枝管高さが得られる<sup>49)</sup>。しかし、枝管頂部に押え板を用いたT成形では伸びの小さい方が枝管高さが高くなる場合もあることが報告されている<sup>50)</sup>。

溶接管では、一般に溶接部と母材では強度や硬度、延性など機械的性質が異なる。ハイドロフォーミングのように内圧による拡管を伴う場合には、十分拡管しないうちに破裂が生じることがあり、問題となる。

ところで管材の材料特性値は通常は管軸方向の引張試験によって求められている。THFにおいては、特に拡管を伴う変形の場合では周方向の変形が主となるので、管軸方向の材料特性値だけで評価するのは望ましくない。管の液圧バルジテストにより二軸応力状態の応力ひずみ曲線を決定する方法も提案されている<sup>51,52)</sup>。

#### 4.3 管および製品（型）の寸法・形状

管の形状・寸法は成形圧力に大きな影響を及ぼす。成形圧力は管直径の増加に反比例して減少し、肉厚の増加に比例して増大する。肉厚が薄すぎると軸圧縮荷重による座屈を起こしやすく、厚すぎると加工が困難になる。ハイドロフォーミングにおいて一般に使用されている肉厚 $T$ は管の外径 $D$ との比で $0.02 \leq T/D \leq 0.1$ のものが多い<sup>53)</sup>。

また、管の変形部長さも変形に影響する。自由バルジの場合の成形圧力は、変形部長さが直径の2~3倍程度以上であれば長さの影響をほとんど受けないが、それより短くなると、長さの減少とともに急激に高くなる。一方張出し量は、管の材料特性値によって多少異なるが、変形部長さが直径の1~3倍程度するとき、最も大きくなる<sup>42)</sup>ので、製品設計においてこのことを考慮に入れると効果的であると思われる。

溶接管ではあまり問題にならないが、押し出しや引抜きで作られるアルミニウム管や銅管などの継目無管では偏肉の存在が問題になる<sup>54-56)</sup>。

製品の形状設計では過大な拡管率やきついコーナーRなどは十分考慮されなければならない。特に製品形状に管軸方向の曲率半径が小さい部分を有する場合には、管端から押し込んでも材料がその箇所を越して移動することが難しく、曲率部の先までは押し込みの効果は届かない。

#### 4.4 管と型との間の潤滑条件

ハイドロフォームされる管材は高压で型内面に押し付けられるため、型に接触した材料が摩擦によって動きにくくなり、管端からの軸押し込みの効果が減少する。このため軸押し込みの有効範囲は管端近傍に限られてしまう<sup>26)</sup>。材料移動が阻害されて材料供給がうまく行かなくなると、型に接触していない自由変形領域に変形が集中し、肉厚減少が進んで破断が早期に生じ、成形限界の低下を招く。型と管の間の潤滑をよくすると型接触部においても管材料はすべりを生じやすくなり、変形が均一化され肉厚減少の局所化が避けられる<sup>46)</sup>。円管から角管への成形において、コーナーR部の肉厚減少の抑制に潤滑は効果的であり<sup>57)</sup>、軸押し込みが加わるとさらにその効果が顕著になる<sup>58)</sup>。型の大きさと製品の拡管率により、材料の型なじみの程度が異なる場合には、最小肉厚減少部の発生箇所が異なり、破断を生じる位置が変わることがある<sup>59)</sup>。

ハイドロフォーミングにおける管と型との接触状況は管端部と型曲率部と拡管部とで異なり、面圧やすべり速度や変形の程度によって影響を受ける。それぞれの領域における摩擦係数を測定する実験装置が考案されている<sup>60)</sup>。

#### 4.5 成形性の評価

THFにおける管材の成形性を評価する方法の中でよく用いられるのは、4.1.1で述べた、管に生じたひずみまたは応力で表した成形限界線図である。もう一つの方法は、管に変形を与える加工パラメータによる評価である。こ

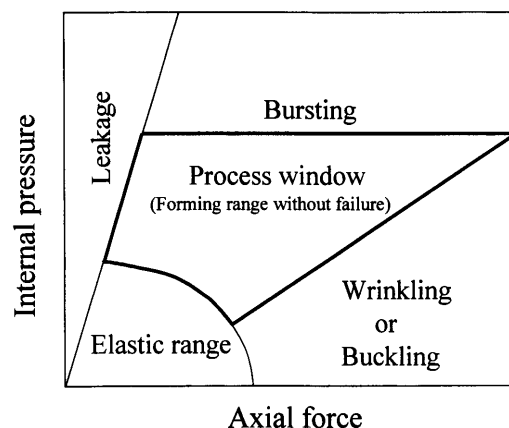


Fig. 4. Working diagram for free tube bulging.

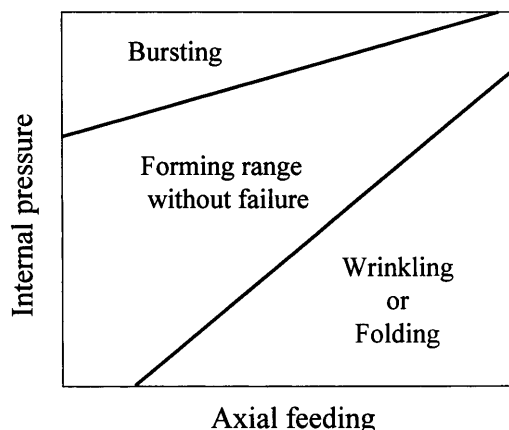


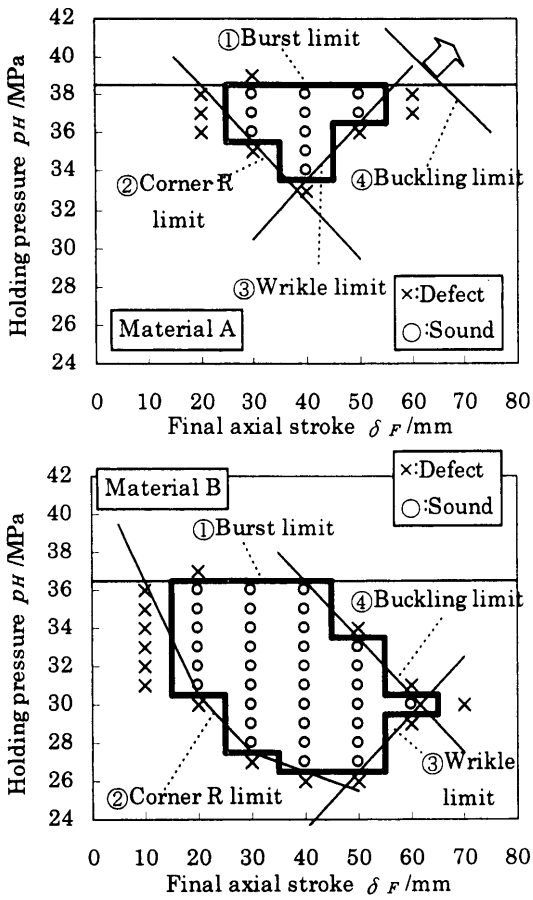
Fig. 5. Working diagram for T-forming.

こでは後者による評価方法を紹介します。この成形性の評価は実際の加工における適切な負荷経路の設定に密接に関係している。

Fig. 4に内圧と軸圧縮荷重をパラメータとしたときの成形可能領域の一例（概念図）を示す。これは円管の自由張出し成形の場合である。破裂、座屈（しわ）などの成形限界に囲まれた範囲が成形可能領域である。Fig. 5はT成形の例（概念図）である。内圧と軸押し量をパラメータとして示した。成形可能領域の大きさは管の材料特性や寸法・形状、製品の形状、管と型との潤滑条件等によって異なる。いずれの場合も破裂、座屈（しわ）などの成形限界に触れぬよう最適負荷経路を選択しなければならない。

例えばトライアルアンドエラーで求めたある負荷経路に対して負荷内圧の値を変化させ、破裂も座屈またはしわも生じないで成形できる圧力変動範囲の大きさをハイドロフォーミングにおける成形性（成形余裕度）を評価することが考えられる。あるいは軸押し込みの値を変化させ、同様に破裂も座屈またはしわも生じないで成形できる押し込み量の範囲の大きさを成形性（成形余裕度）を評価する<sup>27)</sup>。

内圧を一定値に保持しながら管端から押し込む負荷経路において、保持圧力と最終軸押し量で表した平面上に、破



Material A: High strength and low ductility  
 Material B: Low strength and high ductility

Fig. 6. Hydroforming range of steel tube ( $\phi 63.5 \times t 2.3$ ).<sup>61)</sup>

裂限界、製品のコーナーR限界、しわ限界、座屈限界を表示したとき、それらに囲まれた領域（成形可能領域）の面積の大きさを素管の成形余裕度を評価する方法が提案されている（Fig. 6<sup>61)</sup>）。これは、長方形断面を持つ金型を用い、一定内圧保持の場合についてのものであるが、各種の影響因子を考慮に入れた総合的な評価方法である。

そのほか、T成形における成形限界を考察したもの<sup>62)</sup>や、異形断面金型を用いて管の成形性を評価しようとする試み<sup>63)</sup>もある。

4.6 ハイドロピアシング

ハイドロフォーミングの最終工程で、型内にある成形部品に高内圧を負荷しながら穴あけ加工を行うことがある。型から取り出すことなく穴あけ加工ができることもTHFの特徴の一つである。この穴は部品の取り付け、塗装液の注入・排出のためや後加工における基準穴としても用いられる。ハイドロピアシングは、内圧が素材を支えるダイの役割をするので、通常のパンチとダイによる穴あけ加工の場合よりもダレが大きい。穴は打ち抜く場合と、完全には打ち抜かず一部を残して折り曲げる場合とがあり、目的に

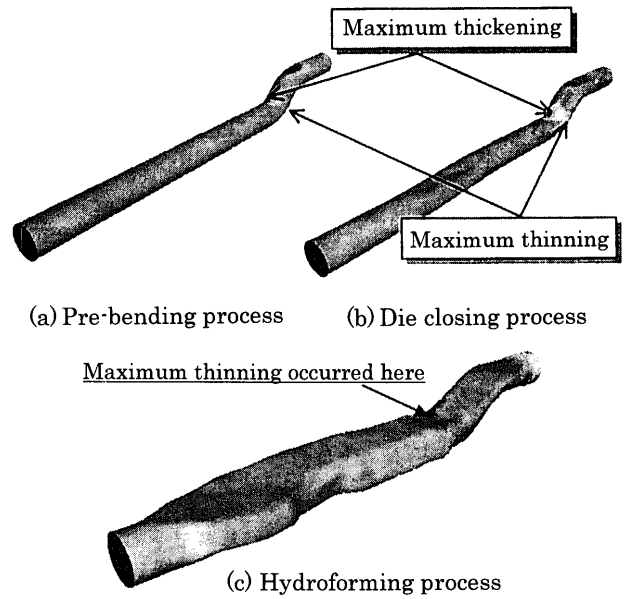


Fig. 7. Analytical results of hydroforming process by FEM.<sup>67)</sup>

よって使い分けられている。

ハイドロピアシングにおける加工特性に及ぼす内圧、パンチ径、素管強度等の影響が調べられている<sup>64,65)</sup>。

5. コンピューターシミュレーション

複雑形状製品の複合成形であるTHFにおいてはシミュレーションが欠かせない。上述したようにTHFにおける管材の変形挙動に影響を及ぼす因子はきわめて多く、例えば負荷経路、材料特性、製品形状、潤滑条件などの影響を実験によって調べることは多大な時間と労力と費用を要する。またそれらは互いに複雑に関係しあっているので、実験によって個別に調べることはほとんど不可能である。コンピューターシミュレーションではこれらを仮想的に独立して調べることができる。

また、特に大型部品の場合などは型の製作は簡単ではないので試作実験を安易に行うことはできない。最近のシミュレーション技術の進展は目覚しく、かなりの精度で実加工をコンピューター上で再現することができる。FEMシミュレーションはハイドロフォーミングにおける管材の成形性を予測するツールとして不可欠になってきている。製品設計、型設計、工程設計にシミュレーションを活用することにより、製品開発やトライアル期間が大幅に短縮され、コスト削減が実現する。

ハイドロフォーミングではプリベンディング、プリフォーミング、パルジング（狭義のハイドロフォーミング）、ハイドロピアシングなど、多工程を要する場合が多い。これらの連続工程シミュレーションも試みられている<sup>31,66)</sup>が、今後ますます必要とされるものである。

Fig. 7<sup>67)</sup>はTHFによって作られた自動車フロントサスペ

ンションメンバーの静的陽解法FEMシミュレーションの例である。成形プロセスごとの形状と肉厚分布が求められ、実部品との一致も見られている。そのほか、センターピラーインフォースメント<sup>68)</sup>、ペリメーターフレーム（エンジンクレードル）<sup>69)</sup>など、多くの部品の設計や解析にシミュレーションが活用されている。

## 6. 加工用管材と加工機械

### 6.1 ハイドロフォーミング用管材

管は従来、主として機械構造用、配管用、熱交換器用として使用されており、二次加工して用いられることは少なかった。JISにも加工用としての管は規定されていない。しかし最近では自動車の軽量化に対応するために管材の二次加工により中空部品が作られることが多くなり、特に電縫鋼管の自動車用途への供給が増加している<sup>70)</sup>。ここ10年ほどはハイドロフォーミング技術が導入され、THFに適した加工特性を有する管材の開発も行われるようになった。

現在THFに用いられている管材は、鋼管では電気抵抗溶接された機械構造用炭素鋼鋼管(STKM)が中心であり、そのほかステンレス鋼鋼管も用いられている。鋼管以外では、アルミニウム合金管など、延性材料の管であればハイドロフォーミングが可能である。

ハイドロフォーミングにおいては管材は拡張される場合が多く、溶接管では溶接部の成形性が問題となる。一般に溶接部は母材に比べて硬く延性が乏しいため、十分な拡張に耐えられず、溶接部またはその近傍の熱影響部において破裂を生じることがある。加工現場では部品の形状や加工工程を考慮に入れ、われなどが最も生じにくい位置に溶接部がくるように配慮して加工が行われている。溶接部の成形性改善のため、溶接管では焼準等の熱処理が行われている。また造管工程を工夫して、溶接部の組織が母材のそれとあまり変わらず、結晶粒微細化と高 $r$ 値化を実現した鋼管も登場している<sup>71)</sup>。

THFが本格的に普及し、例えば板材における自動車用鋼板や深絞り用鋼板のように、高強度と高加工性を兼ね備えたハイドロフォーム用鋼管が開発され、規格化されることを期待したい。

アルミニウム材料は強度では鉄鋼材料に劣るが、軽量という点では有利であり、自動車部品への採用も増加している。アルミニウム管は通常押し加工で作られるため、任意断面形状の管を製作することが可能である。アルミニウム管のハイドロフォーミングにおいては、素管の断面形状を製品のそれに近づけることによりプリフォーミング工程をなくすことが可能となる。ただし、押し形材、例えば角管のハイドロフォーミング<sup>72)</sup>においては、角部の成形性が問題となる<sup>73)</sup>。また、鋼管に比較して高価格であることも難点である。

製品の軽量化のためには強度上必要な部分以外の肉厚を薄くすることも有効である。肉厚の異なる管あるいは異なる材質の管を溶接して作ったテーラード管、または板状態で溶接してから造管したテーラード管のハイドロフォーミング<sup>74)</sup>は本格的な適用はまだなされていないが、今後次第に利用されてゆくものと思われる。なお、自転車産業の分野では、軽量化を図るため軸方向に連続的に肉厚変化を持たせたバテッド管<sup>75)</sup>がかなり以前からフレームに使用されている。バテッド管は引抜きなどによる塑性加工で作られ、溶接部がないため材質上の問題はあまり生じない利点があり、ハイドロフォーミングへの今後の利用が期待される。また、拡張率が製品位置によって異なるような場合にはテーバー管を用いるとよい場合もある。そのほか、製作上の技術的問題点はあるが周方向に肉厚の異なる管を用いたハイドロフォーミングも、製品の軽量化、高機能化のため有効であると考えられる。

ハイドロフォーミングの適用範囲が拡大されると、真っ直ぐで肉厚が一般的な管だけでは対応が難しくなり、いろいろな種類の形状、寸法、肉厚の管が要求されるようになるであろう。

### 6.2 チューブハイドロフォーミング用加工機械

THF用加工機械には高圧方式と低圧方式があり、加工目的によって使い分けられる。管材料が高強度、拡張量が多い、製品形状が複雑、寸法精度が要求される、などの場合には高圧方式が適している。加工機械は大型で、加工時間も長い。一方、製品形状が比較的単純で拡張量も大きくない場合には低圧方式が適しており、加工機械は小さくすみ、加工時間も短い。

ハイドロフォーミングにおいて最も大きく問題とされるのは、板材のプレス加工に比べて1つの部品製作に要する時間が長いことである。しかしハイドロフォーミングでは、プレス加工で必要となる中空部品とするための溶接工程は不要であり、全体で見ればサイクルタイムにおいてそれほどデメリットはない。

THF加工機は、ドイツの機械メーカーが高圧タイプの専用機を作り、先行していた。日本にも何台かが導入されている。高内圧で成形する場合や成形される部材が大型の場合などには、型締めのため例えば数千トンもの大きな力が必要になる。このため、機械も大型となり、据付けのためにしっかりした基礎や高い天井が必要で、機械を入れるための新たな建屋が必要になる場合もあった。また、大型・高圧タイプの機械では管に水を充填し加圧するために時間がかかり、さらに型の開閉のためにも時間がかかることが問題であった。しかし、最近ではこれらの欠点を改良した加工機械が登場し、サイクルタイムの短縮やコンパクト化も進んでいる。

例えば水の短時間充填システムによりサイクルタイムの短縮を図ったもの<sup>76)</sup>、シリンダーの役割を二つに分け、型



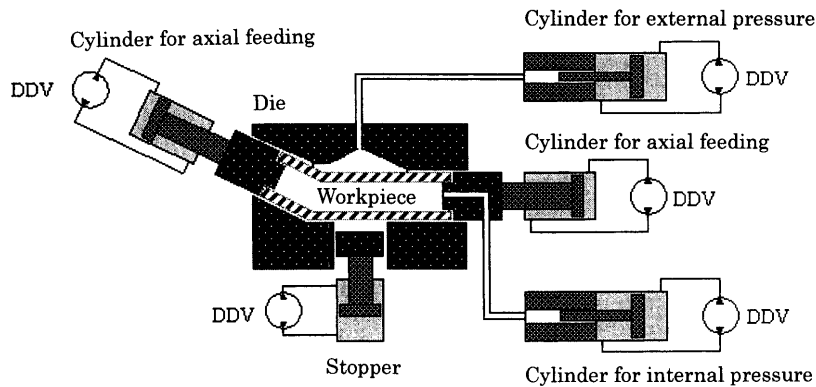


Fig. 8. Tube hydroforming machine with pressure fluctuation.<sup>82)</sup>

の開閉のためのシリンダー（小出力・大ストローク）と加工用のシリンダー（大出力・小ストローク）を別に設置し、型締めブロック方式を併用して高速化を図ったもの<sup>77)</sup>、型締めにメカニカルな機構を用いて小型化したもの<sup>78)</sup>、ハイドロフォーミングへ専用機化したもの<sup>79)</sup>、モジュール方式により部品の大きさの違いに対応するもの<sup>80)</sup>、C型フレームとセルフロック機構を採用して大幅にコンパクト化し、省エネルギーも図ったもの<sup>81)</sup>などが登場している。

また、THFにおいては高内圧を負荷するため管材は型に強く押し付けられる。管と型との間の高摩擦のため管端からの押し込みが効かず、拡管部への材料流入が妨げられ、成形限界が低下する。これを打破するために、内圧を振動させ、圧力が低下したときに同期して管端から押し込みを行うユニークな加工機械 (Fig. 8<sup>82)</sup>) も登場した。内圧振動は潤滑条件を良くしたときと同様の効果を示していると解釈される<sup>83)</sup>。なお、単純モデルでのFEMシミュレーションでも内圧振動による成形限界の向上が報告されている<sup>84)</sup>。

## 7. 実際の適用状況

前述したように、THFは自転車フレーム継手の製造技術としてスタートしたが、その後、TやYあるいは十字継手などの各種配管継手、ベローズ、自動車や機械の小物部品等に適用範囲を広げてきた<sup>85,86)</sup>。以下に特色あるハイドロフォーミング加工の例をいくつか挙げる。

自転車部品では従来4部品からなる前ホークを1本の管からハイドロフォーミングで作る技術が開発されている<sup>87)</sup>。また、航空エンジンの高圧タービンケース冷却用のステンレス鋼角管は、バンダーで円管を連続曲げ加工した後型内で角断面に高圧成形加工される<sup>88)</sup>。軽量化のためパイプラス構造とした大形コンテナクレーンのパイプ継手部分をハイドロフォームした例もある<sup>89)</sup>。

自動車部品ではすでに20年以上前に、ディファレンシャルギヤボックスのTHFの試みがなされた<sup>86,90)</sup>が、自動車メーカーの採用するところとはならなかった。日本で最

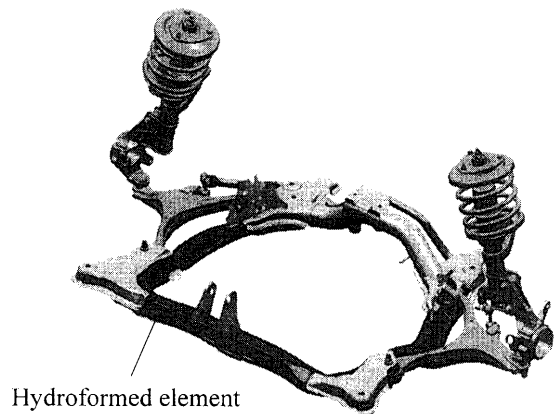


Fig. 9. Front sub-frame (Engine cradle).<sup>92)</sup>

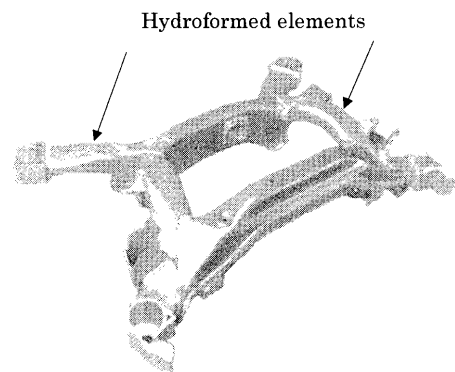


Fig. 10. Aluminum suspension member.<sup>100)</sup>

初に市販の乗用車にTHF部品が搭載されたのは、欧米に少々遅れて1999年である。部品はフロントサスペンションメンバー<sup>74)</sup>、リアサスペンションメンバー<sup>91)</sup>、センターピラー・リインフォースメント<sup>26,68)</sup>である。

その後、各種自動車部品が続々THFによって作られている。Fig. 9<sup>92)</sup>にフロントサブフレーム（エンジンクレードル）の例を示す。そのほかペリメーターフレーム（エンジンクレードル）<sup>93)</sup>、リアサブフレーム<sup>94)</sup>、フロントピラー・センターピラー<sup>95)</sup>や、ラジエーターサポート<sup>95)</sup>、インストルメントパネルビーム<sup>95)</sup>、吸排気関係のインターク

パイプ<sup>96)</sup>、エキゾーストマニホールド<sup>97,98)</sup>など、多岐にわたっている。

以上はほとんどが鋼管のハイドロフォーミングの例であるが、自動車の軽量化のため、管材料としてアルミニウム合金管の使用が増えてきている<sup>99)</sup>。Fig.10<sup>100)</sup>は乗用車のアルミニウム製リアサスペンションメンバーである。アルミニウム管はコストが鋼管よりも高く、軽量化のメリットとコストメリットの両方のバランスを勘案して適用されるが、今後は使用量が増えて行くものと思われる。

## 8. 技術課題と今後の展望

THFの技術的な課題としては、次のようなことがあげられる。

加工法・加工技術・評価：

- ・管の材料特性と加工方法（プロセスパラメーター）の関係の把握と評価
- ・成形限界の把握と最適負荷経路の設定法の確立
- ・管と型との潤滑条件の改善と摩擦の積極的利用

管材：

- ・高強度と高成形性を兼ね備えた管材の開発と規格の整備
- ・テーラードチューブ、テーパチューブの製造・供給
- ・管材の成形性評価試験方法の確立

加工機械：

- ・より一層のサイクルタイムの短縮とコンパクト化

その他：

- ・ハイドロフォーム部品と他の部品との接合技術の開発

以上の各種条件を考慮し、シミュレーションも活用した合理的な部品設計・工程設計が必要である。

THFは複雑断面形状の三次元形状を持つ高剛性中空軽量部材を一体成形することのできる優れた技術である。従来の機械加工、プレス加工、鍛造、鋳造等から転換させることによって、自動車産業のみならずより広い領域においてTHFの利用拡大が期待される。

THF技術そのものは優れたものであっても、これが一般に普及し、広く利用されるようにするためには、従来の加工工程、加工機械・設備をTHF用に変更するとメリットが出るようなものにしなければならない。最も重要なことは、THFでなければできないような部品、他の方法に比べ重量やコストなどの点で断然優位にあるような製品の開発である。

一方、現在THFを利用して部品製造を行っている自動車産業では、例えばエンジンクレードルやサスペンションメンバーなどは従来のプレス+溶接部品に比べて高品質のものが低価格で量産されて提供されている。しかし、一つ一つの部品をTHFに置き換えるだけではTHFの本格的普及には至らず、要素技術の一つとして終わってしまうであろう。トータルコストダウンは、材料技術、加工技術、接

合技術、シミュレーション技術、加工機械・設備等、関連する周辺技術を含めて設計思想全体の合理性の追求からもたらされる。その中に中空部品の製造方法として組み込まれてはじめてTHF技術が基盤技術の一つとして確たる位置を占めることができるであろう。

## 9. おわりに

THFは古くて新しい技術である。歴史は古いですが、コンピュータコントロールを用いた高度技術として自動車産業が軽量中空部品製造に適用し始めてから日が浅い。それゆえ、この加工技術の技術的可能性、適用に関する可能性は未知の部分があり、未開発の分野があるように思われる。THFは、加工技術そのものに加えて、管材料、加工機械、シミュレーションなど周辺の技術を複合した技術である。THFのもつポテンシャルは高く、個々の技術の発展とそれらの有機的結合により、新たな展開の可能性がある。今後の一層の発展が期待される。

## 文 献

- 1) S.Fuchizawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **41** (2000), 1075.
- 2) H.Abe: Proc. 2001 Mater. Forum, JSAE, Tokyo, (2001), 16.
- 3) 淵澤定克：第175・176回西山記念技術講座、日本鉄鋼協会編、東京、(2001)、55.
- 4) M.Koç and T.Altan: *J. Mater. Process. Technol.*, **108** (2001), 384.
- 5) K.Manabe, S.Fuchizawa and H.Abe: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **43** (2002), 20.
- 6) H.Abe: Proc. Int. Workshop on Tube Hydroforming, "TUBEHYDRO 2003", JSTP, Tokyo, (2003), 42.
- 7) H.Abe: *Press Working*, **39-7** (2001), 24.
- 8) 名古屋工業技術試験所25年史、名古屋工業技術試験所編、名古屋、(1978)、77.
- 9) H.Yamaki: Proc. 180th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1998), 41.
- 10) 特許公報 昭41-6449 (1966).
- 11) J.Kimura: Proc. 75th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1981), 52.
- 12) Y.Kuriyama: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **39** (1998), 1009.
- 13) Y.Kuriyama, K.Yamazaki, K.Hashimoto and H.Oohashi: Proc. 2002 Mater. Forum, JSAE, Tokyo, (2002), 16.
- 14) D.Schmoeckel, C.Hielscher and M.Prier: Proc. 6th Int. Conf. Technol. Plast., Springer, Berlin, (1999), 1171.
- 15) The Mater. Process Technol. Center (SOKEIZAI CENTER): <http://sokeizai.jp> (accessed 2004.1.25)
- 16) K.Sato and K.Ito: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **44** (2003), 1189.
- 17) S.Fuchizawa, H.Kondo, A.Shirayori and M.Narazaki: Proc. 53rd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2002), 219.
- 18) Y.Itami and Y.Kuriyama: Proc. 52nd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 11.
- 19) S.Toyoda, K.Uwai, K.Suzuki, T.Saito, A.Yoshitake and T.Mori: SAE Technical Paper Series, 1999-01-0027, (1999).
- 20) S.Mori, K.Manabe and H.Nishimura: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **29** (1988), 131.
- 21) T.Kuwabara, K.Yoshida, K.Narihara and S.Takahashi: Proc. 2002 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2002), 255.
- 22) K.Yoshida, T.Kuwabara and S.Takahashi: Proc. 2003 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2003), 139.
- 23) S.Kim and Y.Kim: *J. Mater. Process. Technol.*, **128** (2002), 232.
- 24) C.Back and M.Miyagawa: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **32** (1966), 447.
- 25) S.Fuchizawa, M.Narazaki and A.Shirayori: Proc. 5th Int. Conf. Technol. Plast., Ohio State Univ., Columbus, (1996), 497.

- 26) S.Majima, T.Sugiyama, K.Terada, S.Takahashi, D.Sumitomo, T.Yoshida and Y.Kuriyama: Proc. 2000 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2000), 427.
- 27) O.Sonobe, Y.Hashimoto, T.Iguchi and H.Abe: IBEC Paper 20037010/2003-01-2737, (2003).
- 28) A.Shirayori, S.Fuchizawa, M.Narazaki and H.Ishigure: Proc. NUISHEET 2002, (2002), 441.
- 29) S.Fuchizawa, A.Shirayori, H.Yamamoto and M.Narazaki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **35** (1994), 250.
- 30) A.Shirayori, H.Ishigure, S.Fuchizawa and M.Narazaki: Proc. 2001 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 139.
- 31) H.L.Xing and A.Makinouchi: *Int. J. Mech. Sci.*, **43** (2001), 1009.
- 32) M.Mizumura, Y.Kuriyama and T.Yoshida: Proc. 2000 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2000), 433.
- 33) L.Gao, S.Motsch and M.Strano: *J. Mater. Process. Technol.*, **129** (2002), 261.
- 34) H.Ishigure, S.Orii S.Fuchizawa and A.Shirayori: Proc. 1999 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1999), 227.
- 35) K.Ikeda, K.Ito, K.Shibata and T.Osuga: Proc. 50th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1999), 451.
- 36) N.Ma, T.Noguchi and M.Harada: Proc. 51st Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2000), 363.
- 37) J.-B.Yang, B.-H.Jeon and S.-I.Oh: *J. Mater. Process. Technol.*, **113** (2001), 666.
- 38) A.Shirayori, S.Fuchizawa and M.Narazaki: Proc. 2003 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2003), 135.
- 39) M.Suetake, K.Manabe, S.Miyamoto, H.Koyama T.Yagami and M.Yang: Proc. 54th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2003), 333.
- 40) J.Liu: SAE 2001 Congress, 2001-01-1134, JSTP, Tokyo, (2001), 137.
- 41) S.Fuchizawa and H.Takeyama: *J. Jpn. Soc. Precision Eng.*, **37** (1971), 565, and *ibid.*, **44** (1978), 1482.
- 42) S.Fuchizawa and H.Takeyama: *J. Jpn. Soc. Precision Eng.*, **45** (1979), 106.
- 43) S.Fuchizawa: Proc. 1st Int. Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1984), 297.
- 44) S.Fuchizawa: Proc. 2nd Int. Conf. Technol. Plast., Springer-Verlag, Berlin, (1987), 727.
- 45) K.Suzuki, M.Fukumura, T.Mori and M.Shiratori: Proc. 7th Int. Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2002), 1453.
- 46) K.Manabe and M.Amino: *J. Mater. Process. Technol.*, **123** (2002), 285.
- 47) M.Mizumura and Y.Kuriyama: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **45** (2004), 60.
- 48) M.Mizumura and Y.Kuriyama: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **45** (2004), 103.
- 49) T.Yoshida and Y.Kuriyama: Proc. 49th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1998), 321, and Proc. 50th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1999), 447.
- 50) H.Mizukoshi, H.Okada and H.Wakabayashi: Proc. 49th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2000), 323.
- 51) S.Fuchizawa, M.Narazaki and H.Yuki: Proc. 4th Int. Conf. Technol. Plast., Int. Acad. Pub., Beijing, (1993), 488.
- 52) T.Sokolowski, K.Gerke, M.Ahmetoglu and T.Altan: Proc. 6th Int. Conf. Technol. Plast., Springer, Berlin, (1999), 1217.
- 53) Y.Yoshitomi, H.Kamohara, T.Shimaguchi, H.Asao and H.Nomura: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **28** (1987), 432.
- 54) A.R.Ragab, S.A.Khorshid and R.M.Takla: *J. Eng. Mater. Technol.*, **107** (1985), 293.
- 55) A.Shirayori, S.Fuchizawa and M.Narazaki: *Trans. NAMRI/SME*, **30** (2002), 111.
- 56) A.Shirayori, S.Fuchizawa, H.Ishigure and M.Narazaki: *J. Mater. Process. Technol.*, **139** (2003), 58.
- 57) M.Fukumura, K.Suzuki, A.Yoshitake, Q.Yu and M.Shiratori: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 1009.
- 58) M.Kojima, T.Okui and K.Moribe: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 1008.
- 59) S.Fuchizawa, T.Tomioka, A.Shirayori and M.Narazaki: Proc. 54th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2003), 337.
- 60) P.Groche and A.Peter: Proc. 7th Int. Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2002), 1477.
- 61) M.Mizumura and Y.Kuriyama: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **44** (2003), 524.
- 62) H.Hishida and I.Hiroshige: Proc. 52nd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 1.
- 63) K.Manabe, S.Kunibe and S.Nakamura: Proc. 50th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1999), 445.
- 64) M.Uchida and M.Kojima: Proc. 2001 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 129, and Proc. 52nd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 3.
- 65) T.Kuwabara, H.Katsuta, M.Murakawa, H.Noguchi and M.Jin: Proc. 2000 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2000), 441.
- 66) N.Ma, Y.Umezu and M.Harada: Proc. 2000 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2000), 431.
- 67) T.Hama, M.Asakawa and A.Makinouchi: Proc. 52nd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 9.
- 68) T.Yoshida, Y.Kuriyama, D.Sumitomo, K.Terada, S.Takahashi, S.Majima and T.Sugiyama: Proc. 2000 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2000), 425.
- 69) T.Ogawa: Proc. 205th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 17.
- 70) 第4版鉄鋼便覧第3巻(2)4編, 日本鉄鋼協会編, 東京, (2002), 12.1+, 12.2.8.
- 71) T.Toyouka and Y.Kawabata: Proc. 216th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2002), 23.
- 72) K.Kondo, K.Nakashima and H.Iseki: Proc. 52nd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 13, and Proc. 2002 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2002), 257.
- 73) A.Shirayori, S.Fuchizawa, M.Narazaki and S.Tanaka: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **39** (1998), 613.
- 74) J.Shao and Y.Shimizu: Proc. Int. Seminar on Recent Status & Trend of Tube Hydroforming, JSTP, Tokyo, (1999), 73.
- 75) R.Takagi: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **24** (1983), 1101.
- 76) K.Heimerl and W.Zimmermann: Proc. Int. Joint Symp. on Innovative Tubes and Competitive Tubular Products, JSTP, Tokyo, (2000), 192.
- 77) T.Koshimizu: *Press Working*, **41-7**, (2003), 42.
- 78) Fukumura and T.Yamamoto: *Press Working*, **39-7**, (2001), 53.
- 79) T.Yasutomo: *Press Working*, **41-7**, (2003), 47.
- 80) K.Aida: *Press Working*, **39-7**, (2001), 66.
- 81) S.Ishihara and K.Hiramatsu: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1162.
- 82) T.Nomura and T.Yamada: Proc. 190th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2000), 49.
- 83) T.Hama, M.Asakawa, H.Fukiharu and A.Makinouchi: Proc. 53rd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2002), 223, and Proc. 54th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2003), 339.
- 84) K.Mori, A.U.Patwari and S.Maki: Proc. 53rd Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2002), 337.
- 85) チューブフォーミング (塑性加工技術シリーズ10), 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1992), 65.
- 86) 中村正信, 丸山清美, 久保田晶之, 中村友信, 大木康豊 著: パイプ加工法 (第2版), 日刊工業新聞社, 東京, (1998), 139.
- 87) 特許公報 昭60-16855, (1985).
- 88) A.Takahashi: Proc. 106th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1986), 17.
- 89) H.Kamohara, T.Matsumura, Y.Yositomi and H.Nomura: Proc. 1983 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (1983), 133.
- 90) T.Ueda and A. Taguchi: *Press Working*, **18-9**, (1980), 12.
- 91) S.Majima, T.Morita and S.Nakagawa: Proc. 205th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 13.
- 92) S.Waku: Proc. 205th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 7.
- 93) T.Hamaguchi, K.Kato and T.Iwashita: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1166.
- 94) H.Ono: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1174.
- 95) M.Mason: Proc. Int. Seminar on Recent Status & Trend of Tube Hydroforming, JSTP, Tokyo, (1999), 80.
- 96) K.Kato: *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1176.
- 97) Y.Hamanishi and K.Kato: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 277.
- 98) K.Nakajima and H.Iseki: Proc. 205th Symp. Technol. Plast., JSTP, Tokyo, (2001), 31.
- 99) K.Nasu: *Press Working*, **41-3**, (2003), 38.
- 100) S.Majima and S.Nakagawa: *Press Working*, **41-7**, (2003), 39.