



チューブフォーミング技術の現状と展望

Present Status and Outlook of Tube Forming Technology

真鍋健一
Kenichi Manabe

東京都立大学 大学院工学研究科
機械工学専攻 教授

1 はじめに

管状素材を用いて行う各種二次成形加工を総称したチューブフォーミングは1980年代初頭のガソリン価格高騰や米国CAFÉ規制法案を受けて自動車の軽量化による燃費向上を図る重要技術として一時脚光を浴びた。その後落ち着いた感があったが、近年になって地球環境保全の観点からこのチューブフォーミングの技術開発が再燃している。なかでも複合加工技術としてのハイドロフォーミングは、1994年より国際鉄鋼協会主導でスタートした鉄鋼材料による一連の自動車軽量化プロジェクトで、その軽量化に重要な製造技術として自動車構造部材に導入された。それが火付け役となって、いまやハイドロフォーミングを含めたチューブフォーミング技術の開発研究が世界で凌ぎを競っている。今後も、地球温暖化防止策として2008～2010年に実施予定の欧州自動車CO₂排出量規制やわが国の国内燃費規制のため、切実な燃費向上を解決する軽量化成形加工法として、中空構造部材化を図るチューブフォーミングへの工法シフトが予測されている。また、人に優しく自動車衝突時の安全性向上の要求から、中空構造化による衝突エネルギー吸収効果増大も相まって、いまや、それは「地球環境と人に優しい車づくり」をスローガンとする自動車業界の革新的生産加工技術として重要な役割を果たそうとしている。

本稿では、ますます軽量高剛性が要求される自動車分野を中心に、新材・部品成形法として構造物軽量化をリードし支えるチューブフォーミング技術の現状とその技術課題を含めて展望することにする。

2 なぜ、軽量高剛性化部材加工にチューブフォーミングか、さらなる軽量化には？

2.1 中空構造化・補剛化

一般に構造部材や部品を中空化すれば、同一質量で比較すると部材剛性が向上する。図1は、中実部材を中空部材化することによる軽量効果を、同一曲げ強度と同一曲げ剛性の場合について理論的に求めたものである。同一曲げ強度は中実部材と中空部材の断面係数Zを等しい ($Z_{bar} = Z_{tube}$) とし、また同一曲げ剛性は断面二次モーメントIを等しい ($I_{bar} = I_{tube}$) として得られるもので、それぞれ式 (1) と (2) で表される。

$$\alpha \left(= \frac{W_{tube}}{W_{solid}} \right) = \left(\frac{d_o}{d_s} \right)^2 - \sqrt{\left(\frac{d_o}{d_s} \right)^4 - \left(\frac{d_o}{d_s} \right)} \quad \dots\dots (1)$$

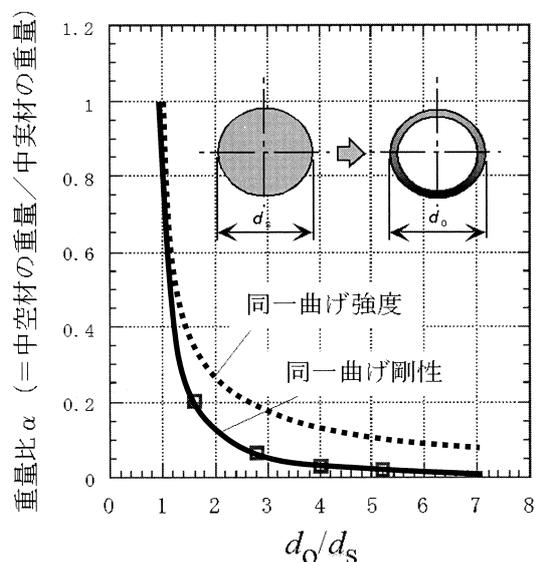


図1 中空構造化による軽量効果

$$\alpha \left(= \frac{W_{\text{tube}}}{W_{\text{solid}}} \right) = \left(\frac{d_o}{d_s} \right)^2 - \sqrt{\left(\frac{d_o}{d_s} \right)^4 - 1} \dots\dots\dots(2)$$

この図より、中実材をちょっとでも外径を大きくして中空化することで著しい軽量化が実現できることがわかる。剛性に対してより大きな軽量化効果が得られる。またねじりモードに対しても、また円管だけでなく角管に対しても同様な効果が得られる。また、管状部品は補剛効果が大きく、エネルギー吸収効果が大きくなることも自動車用部材に有用とされる理由である。

それでは、チューブフォーミングのメリットはどこにあるのであろうか？ その一般的な特長は、①材料歩留まりの向上および一体成形化による部品点数の削減などによる素材費の削減、工数低減や加工時間短縮による製造コスト削減、②溶接箇所への減少による製品品質および信頼性の向上、である。一方、短所は①横断面が閉じた形状であるため、金型工具を内部に入れて利用することが困難で、板材のプレス加工に比べ高度な加工技術が要求される、②管材料自体の肉厚ならびに形状寸法精度が板材に比べ劣るだけでなく、管の内外両面から金型で形状転写が難しく、結果的に製品精度が劣る、③板材成形に比べノウハウが多く技術蓄積および加工設計法が確立していない点である。

2.2 高比強度・比剛性材料への転換

さらなる軽量化を図るためには、同一材料であれば高強度化することによる薄肉化で軽量化が達成できる。図2はM.F. Ashbyの資料¹⁾を参考に、代表的材料の鉄鋼、Al合金、Mg合金、FRPの比強度マップを表したものである。図中の傾いた直線は同一比強度レベルを表している。この図から、鉄鋼とAl合金は平均ではほぼ同じで、Mg合金が次に高く、

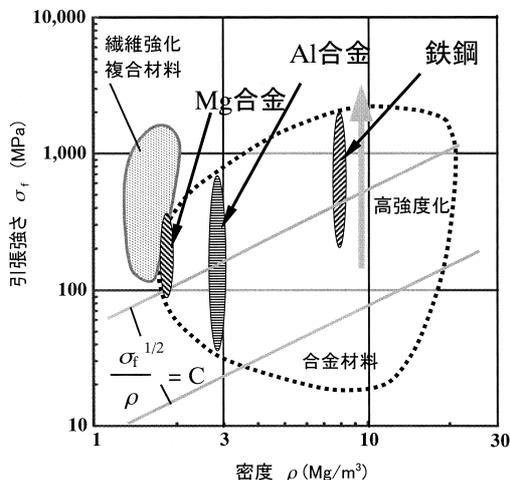


図2 代表的材料の鉄鋼、Al合金、Mg合金、FRPの比強度マップ

FRPが最も比強度が高いことがわかる。生産コストや環境負荷の面で優れる金属材料ではMgが優れている。しかし、各金属材料でも強度レベルに幅があり、高強度化することによって、金属の種類によらずほぼ同一の比強度が達成でき、それによる薄肉化で大幅な軽量化が期待できる。一方、比剛性 (E/ρ) の面からは上記金属材料には大きな差がなく、FRPが最も優れている。

以上のことから、部材を中空構造化し使用材料をさらに高強度化することがさらなる軽量化に必須であるといえる。しかし、その成形加工の面から見れば、高強度で薄肉材料になればなるほど、成形性や耐しわ性が著しく低下するため、その克服が重大な加工技術課題になっている。

3 各種成形加工法

3.1 ハイドロフォーミング

3.1.1 チューブハイドロフォーミング²⁾の特長

①部材の中空構造化による軽量効果、補剛効果が大きく、エネルギー吸収効果が大きい、②一体成形による部品点数や溶接箇所への減少、③材料歩留まり向上、スプリングバック抑制/形状精度向上などがあるが、短所として、①サイクルタイムが長くプレスより生産効率が低い、②液体のシール法が難しい、③摩擦の影響が大で、長尺管では軸押込みによって金型内部へ材料流動させることが困難、④ノウハウが多く加工設計法が確立していないなどが挙げられる。

3.1.2 加工機械・加工方案

ますますチューブハイドロ部品の自動車構造部材・部品への適用が進んでいる。これを支えるハイドロフォームマシンも進歩し、自動車構造部材の成形にも適用できる低価格コンパクトマシン (図3³⁾) や、サイクルタイム短縮、一台のマシンでプリフォームも可能な装置などが開発され、ハイドロフォーミングのもつ上述の課題が次々に改良・改善されている。加工性に大きな影響を及ぼす因子の摩擦に関しては、それを大幅に軽減するために内圧を振動負荷する方式があり、効果を挙げている。新装置開発により、工法としての普及に弾みがついている。また、加工法案として「低圧法」、「高圧法」があるが、表1に示す特徴を考慮して製品部材に適した方法も実用的には確立しつつある。

3.1.3 超軽量化に適した管材料

一層の軽量化を図るためには、鉄鋼ではハイテン化がポイントになる。1997年にスタートした強度2倍、寿命2倍を目指した「超鉄鋼プロジェクト」も進展しているが、その鋼管を用いた成形加工に関する成果はまだ公表されていない。実

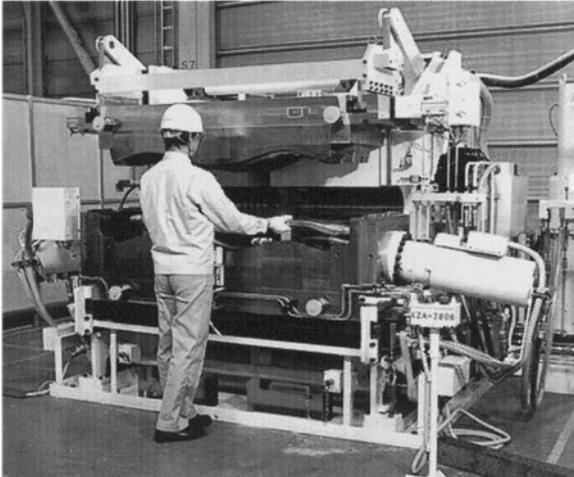


図3 C型積層フレーム構造のコンパクトな省エネ hidroフォーム装置²⁾
(成形可能素管長：1500mm、設備面積：4×4×2.4m)

表1 低圧法と高圧法の比較

方式	低圧法	高圧法
負荷内圧	< 150 MPa	200 ~ 600 MPa
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 設備の小型化 設備費削減 加工時間の短縮 管周長変化が小 肉厚減少が小 	<ul style="list-style-type: none"> スプリングバックが小 高い形状・寸法精度 シャープなコーナーR

用化が待たれるところである。このような薄肉・高強度材料の成形性は極めて悪く上述のとおり、その hidroフォーム性を克服する新加工技術開発が要望される。

他の方法論として、自動車構造部品の材料や板厚を最適配置設計するテーラードチューブを用いた hidroフォーミングが開発研究されている(図4⁴⁾)。

材料面からは hidroフォーム性の優れた鋼管の材料開発が進行している。しかし、チューブ hidroフォーム性と材料特性の解明は依然として立ち遅れている。

表2は鋼管を対象として hidroフォーミングの材料変形の分類と支配的な材料及び加工因子をまとめたものである。このような分類と体系化は引き続き望まれる。その前に、管材料の成形性評価法を確立する必要がある。

3.1.4 加工プロセスの最適設計と最適制御

成形シミュレーションソフトの進歩とPCの著しい高性能化と低価格化によって、シミュレーション技術の普及と適用が進んでいる。プリフォームも含めた多工程成形シミュレーションおよびその最適化、また hidroフォーミングの内圧

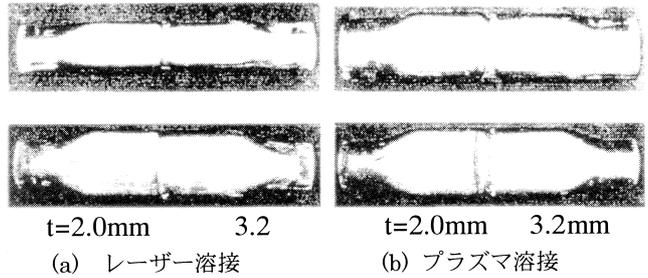


図4 テーラードチューブの hidroフォーム部品例⁴⁾

表2 鋼管の hidroフォーミングにおける材料変形の分類と支配的な材料および加工因子⁵⁾

予成形	HF 成形における材料変形	特徴・特記事項	材料・プロセスパラメータ					
			伸び	局部伸び	n 値	r 値	負荷経路	摩擦係数
なし	張出し変形	平面ひずみ/2 軸引張り変形	◎		○			
	軸圧縮・張出し変形	圧縮-引張り応力変形、座屈-破断限界			○	◎	◎	○
	軸圧縮・押し出し変形	内圧で座屈抑制しながらの押し出し変形、面内せん断変形					◎	○
曲げ変形	整形・張出し変形	低拡管率、横断面形状へのなじみ変形(局部張出し)		○	◎		○	◎
	張出し変形	曲げによる偏肉(増肉・減肉)と円周方向強度不均一分布の影響大。						
	軸圧縮・張出し変形				○	◎	◎	○
	軸圧縮・押し出し変形						◎	○
整形・張出し変形						○	◎	
プレス潰し変形	張出し変形	横断面内局部的曲げコーナー部の HF での変形抑制、HF 横断面形状とのマッチング。金型との接触状況の変化。横断面内平均拡管率と分割された自由変形部での局部拡管率。						◎
	軸圧縮・張出し変形					○	◎	○
	軸圧縮・押し出し変形			○	◎	○	◎	○
	整形・張出し変形						○	◎
曲げ後プレス潰し変形	張出し変形	曲げ変形とプレス潰し変形欄の特記事項の重畳。残留変形余裕度小なので軸押し効果期待できない場合は整形程度に留めるか、中間熱処理を施す。						
	軸圧縮・張出し変形						◎	○
	軸圧縮・押し出し変形			◎	○	◎	◎	○
	整形・張出し変形						○	◎
縮径変形	張出し変形	縮径変形による増肉・機械的性質変化、内面しわに留意。必要に応じ中間熱処理。						
	軸圧縮・張出し変形		○	◎		◎	◎	○
	軸圧縮・押し出し変形						◎	○
	整形・張出し変形						○	◎

と軸押込みの負荷経路の最適化も行われている。最適化設計として市販の汎用最適化ツールを用いて数理計画的に解析できるようになっている。

このほか、ハイドロフォーミングプロセス制御にファジィ適応制御の試みが行われている。図5はT字継手成形のプロセス制御にデータベースに基づくファジィ推論を適用してヴァーチャルフォーミングを実施したときの内圧と軸押込み及

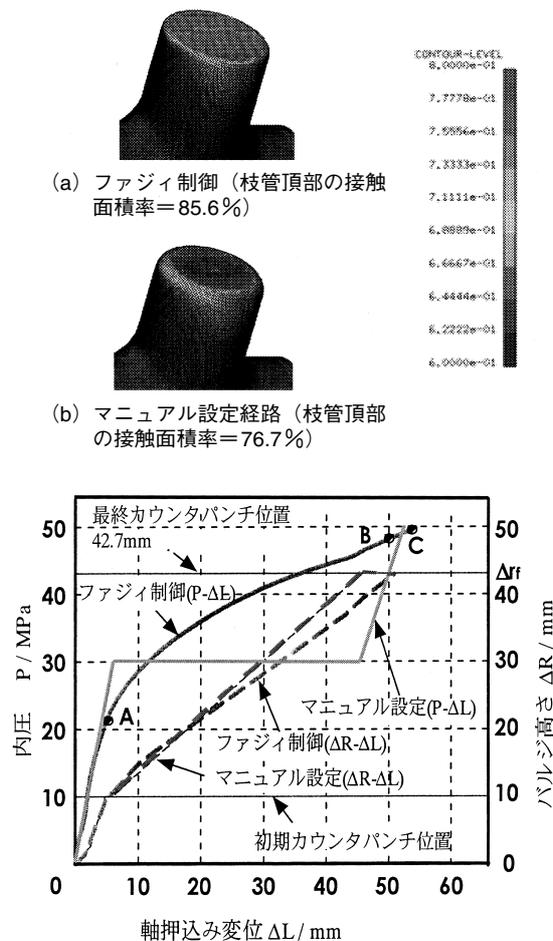


図5 カウンタ付きT字継手成形のファジィプロセス制御結果

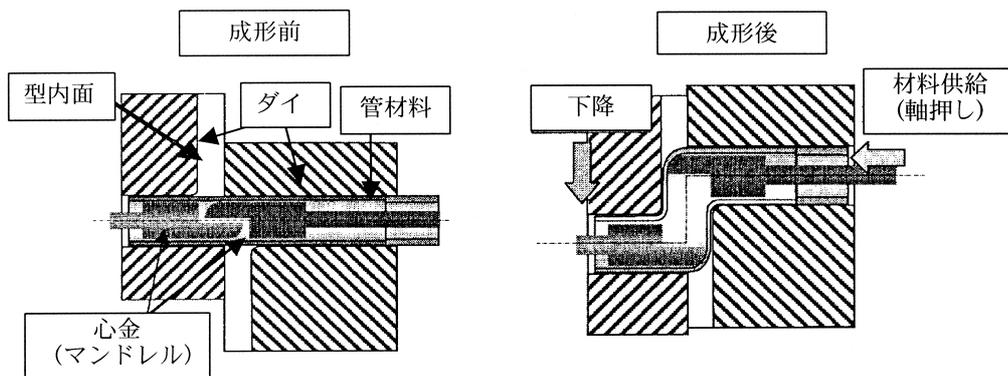


図6 分割心金を用いた極小曲げ半径を得るせん断曲げ加工法

びカウンタパンチの変位の制御結果である。従来であれば経験と試行錯誤で長期間かけて決定していた負荷経路を一義的に、しかも加工中の諸条件の変化にも対応して適正化が可能である。本方式ではT継手の肉厚分布の均一化や加工限界の向上も期待できる。種々の成形形状の加工プロセスへ適用の拡大が待たれる。

3.2 曲げ加工

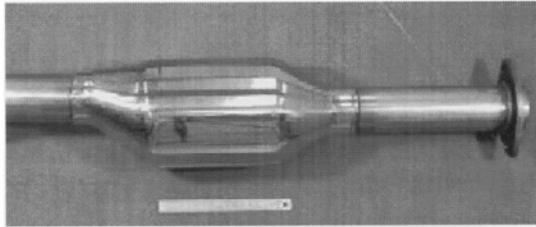
かなり古くから行われ、チューブフォーミングの中では成熟した技術のように感じられるが、近年になっても多くの新しくユニークな曲げ加工法が引き続き考案・開発されてきている。極めて小さい曲げ半径の曲げ加工ができる液圧を利用した連続せん断曲げ加工法が1994年に実用化されたが、工法上、多くの問題があった。それを図6に示す分割心金を用いて改良したプレスを用いる新しいせん断曲げ加工法が開発された⁷⁾。加工品の真円度も高く肉厚変化も引き曲げに比べ小さく高品質で低コスト化を実現している。

3.3 スピニング加工

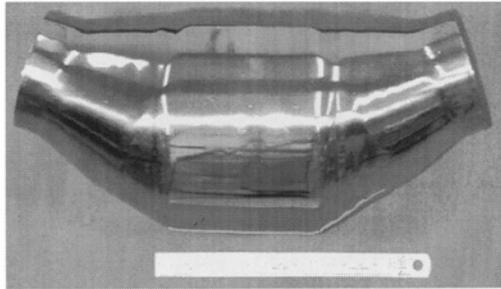
従来のスピニングの概念を覆したような加工法が開発された。自動車の排気系部品にはチューブフォーミングが適用されている。最近、排気ガス浄化触媒コンバーターの性能向上とコストダウン、設計の柔軟性向上などから、CNCスピニングマシンによる偏心スピニングおよび傾斜スピニング加工法が開発されて実用化されている。図7は偏心スピニングと傾斜スピニングの加工例である⁸⁾。

3.4 変肉厚加工

自転車ではより合理的な強度特性を持つフレームとするため、「バテッド管」が使用されていた。ステアリングラックバーの高精度歯形成形に変肉厚加工と鍛造的な加工で高品質な中空ラックバーの加工が行われている⁹⁾ (図8)。

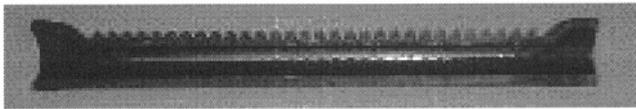


(a) 偏心スピニング加工



(b) 傾斜スピニング加工

図7 CNCスピニングマシンで製造された排気ガス浄化触媒コンバータケース

図8 変肉厚加工で高精度歯形加工された自動車用ステアリングラックカバー⁹⁾

3.5 その他の加工

逐次成形加工法に分類される棒状工具等を用いる揺動回転成形¹⁰⁾やNC工作機械による管材のインクリメンタルフォーミング¹¹⁾(ダイレスNCフォーミング¹²⁾)は多品種少量生産に合致する注目される加工技術として発展しつつある。口広げや口絞り等の管端部および管胴部の成形ならびにせん断加工¹³⁾に有用で、しかも非軸対称な複雑形状部品の成形に十分適用できるようになっている。

近年のナノ・マイクロブームでチューブフォーミングにもその波が押し寄せている。医療機器(無痛注射針ほか)や精密機器・電子部品(マイクロノズル)などマイクロチューブのニーズも拡大しつつある。いまや50 μ mのSUS製マイクロチューブ¹⁴⁾が生産されるようになっている。今後、MEMS部品にも流体搬送用として、また軽量構造部材としてその需要は拡大すると予測される。マイクロチューブフォーミング技術は今後急速に研究開発されると期待される。

4 今後の課題とまとめ

近年の活発な研究開発によって、チューブフォーミング工法、管材料および加工機械の著しい技術進歩ならびに加工特

性全般の解明が進み、いまや自動車への展開も目を見張るものがある。軽量高剛性化に適した革新的成形加工技術としてチューブフォーミングが多く適用され普及するためには、解明/解決すべき次のような課題も山積している。

- ①加工性の優れた管材の開発と成形性評価法の確立
 - ②チューブフォーミングに適した部品設計法の確立
 - ③管と型の間の摩擦・潤滑の利用と斬新な潤滑技術開発
 - ④成形品の疲労強度または寿命に及ぼす加工履歴・硬化の影響解明
 - ⑤多工程としてのハイドロフォーミングとシミュレーション技術の確立
 - ⑥最適負荷経路の解明とそのプロセス制御技術の開発研究
 - ⑦他の部品との接合技術の開発
 - ⑧材料および加工ノウハウのデータベース化とその技術蓄積
 - ⑨サイクルタイムの大幅短縮と、コンパクトで安価な加工装置の開発
 - ⑩テーラードチューブの開発とその成形加工法開発
 - ⑪薄肉ハイテン管材(例:超鉄鋼)に対する成形性向上加工技術の開発
 - ⑫マイクロチューブの製造法開発とその二次加工技術の開発
- チューブフォーミング、とりわけチューブハイドロフォーミング技術は設計/製造プロセスの高度化を可能にする革新的加工技術の一つとして認められている。しかし、上記のように依然として、加工ノウハウや加工技術の蓄積が少ないため、軽量成形技術としてその開発・研究の余地は大いに残されている。管材料、加工プロセスおよびシミュレーション技術の面から評価法も含めて技術を結集して、チューブフォーミングを真の意味で革新的軽量成形加工技術として確立し、他の要素技術と十分に競合できるものになることを期待したい。

参考文献

- 1) M.F.Ashby: Materials Selection in Mechanical Design, (1992), Pergamon Press
- 2) 真鍋健一, 淵澤定克, 阿部英夫: 塑性と加工, 45 (2002) 500, 234.
- 3) 石原貞夫, 平松浩一: 材料とプロセス, 16 (2003) 5, 1162および, 日経メカニカル, no.570 (2002)
- 4) J.Shao and Y.Shimizu: Proc.Int. Seminar on Recent Status & Trend of Tube Hydroforming, Tokyo(1999), 73.
- 5) 真鍋健一, 宮本俊介, 小山寛: 平14 塑加春講論, (2002), 259. および, 末武正充, 真鍋健一, 宮本俊介, 小山寛, 谷上哲也, 楊明: 第54回塑性加工連合講演会講演論文集, (2003), 333.

- 6) 阿部英夫：自動車技術会2001材料フォーラムテキスト，
(2001)，16.
- 7) 浜西洋一・加藤和明：第205回塑加シンポテキスト，
(2001)，37.
- 8) 加藤和明：材料とプロセス，16 (2003) 5，1176
- 9) (株) チューブフォーミングカタログ
- 10) 例えば，北澤君義，小林勝，飯田実：塑性と加工，30
(1989) 337，563.
- 11) 例えば，松原茂夫：塑性と加工，35 (1994) 398，256.
- 12) <http://www.amino.co.jp/>
- 13) 松原茂夫：第43回塑性加工連合講演会論文集，(1992)，
1.
- 14) <http://www.ohbakiko.co.jp/>

(2004年8月27日受付)