



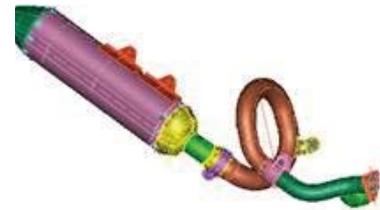
薄肉SUSの ハイドロベンド&フォーミング工法開発

Development of a hydrobending & forming method for thin-walled stainless steel pipe

葭野 民雄 鈴木 英彦 山村 易見

Abstract

This production method was developed with the aim of reducing the cost of forming motorcycle exhaust system pipes and increasing design freedom. This method has been developed as part of efforts to produce thinner-walled exhaust pipes and focused on the temperature-variant characteristics of the stainless steel alloy to develop an integrated hydrobending and hydroforming production method. This method has already been proven effective in greatly reducing cost in the production of the exhaust system parts adopted on the 2010 model Yamaha YZ450 and in increasing design freedom to enable a rear-positioned exhaust layout on this model.



NEWモデルの排気レイアウト
New model exhaust layout

要旨

本工法は、モーターサイクルの排気システムのコストダウンと設計自由度の向上を目指し開発を行った。排気管の薄肉化と一体成形に取り組み、材料の温度特性に着目した「ハイドロベンド&フォーミングの一貫工法」は、2010年モデル「YZ450F」で実用化され、大幅なコストダウンと後方排気レイアウトに貢献している。

1 はじめに

排気系製品は、動力性能の最適化に加え、騒音、燃費、排ガス等の環境要求が加わり、高機能化してきている。これらの機能を満たす為には、排気系製品のコストは、モデルコストの数%を占めるまで上昇して

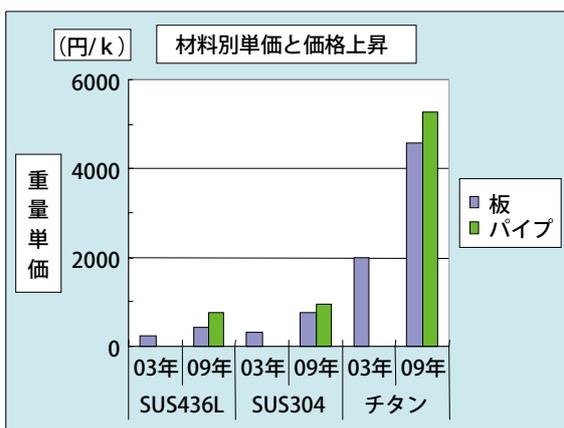


図1 材料費/重量

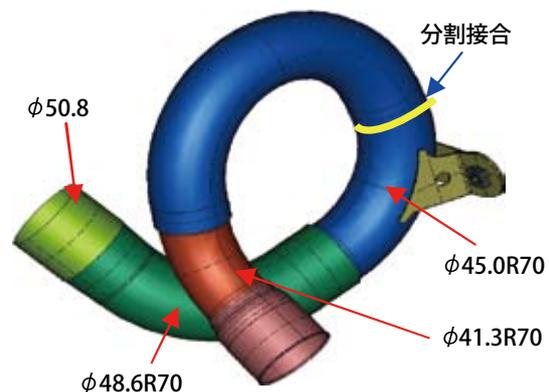


図2 製品形状と特徴

いる。こうした背景から、コストと設計自由度の両立を目指し、本工法の開発に着手した。

具体的には、①軽量化と②動力性能の最適化要求への対応に着目した。高機能モデルのエキゾーストパイプは①チタン材と②管径の変化を溶接構造で対応している。チタン材は高価(図1)で、溶接構造(図2)には設計制約が多いことが問題となっていた。更に溶接構造は、歩留まりが悪く、加工工程も多くなり、多数のワークセンター(=製造するライン:以下W/Cと記す)を必要とし、製造リードタイム(=製造するために与えられた日数:以下L/Tと記す)も長くなっていた。

2 一般的加工方法と新工法の狙い

ここで、一般的なエキゾーストパイプの曲げ工法(図4)について説明する。パイプを曲げる為には、パイプをクランプし、曲げ型に回転しながら巻きつける。曲げ内側は圧縮を受け座屈しシワに成り易く、曲げ外側は、短絡し扁平に成り易い。(図3)

これらの不具合はワイパーや芯金を用いることで防止できるが、薄肉になるとシワが発生し易くなる為、ワイパーや芯金でより強くパイプに摩擦力を与え材料を伸ばす必要が生じる。この抵抗の増加に打ち勝って、クランプがパイプを掴んで引っ張る事で、曲げが成立するが、薄肉パイプは剛性が低い為、クランプでパイプを保持できず、曲げ加工が困難となる。この問題を解決する為、弊社では、芯金の代わりに水圧を用いるハイドロベンド工法(図5)を独自に開発し、既に生産に使用している。

芯金が設備に固定されていない為抵抗が無く、クランプ部は水圧により剛性が上がり保持できる。そこで、設計の軽量化要求とコストダウンを両立させる為、ハイドロベンド工法で、高価なチタンから、安価なステンレスへの置換を狙い、超薄肉に挑戦することにした。

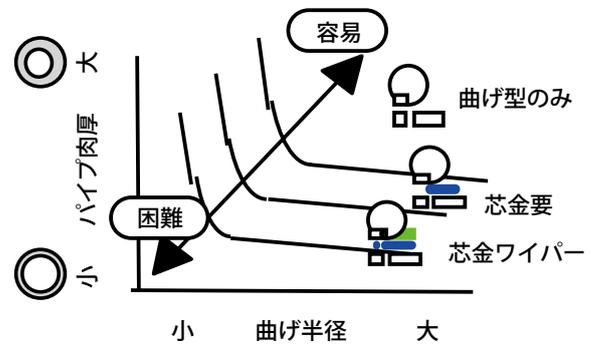


図3 曲げ加工性

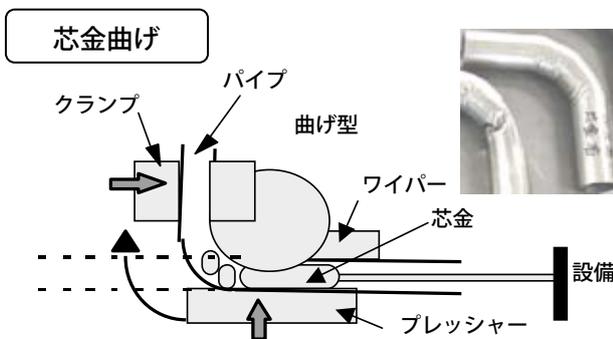


図4 一般的曲げ工法

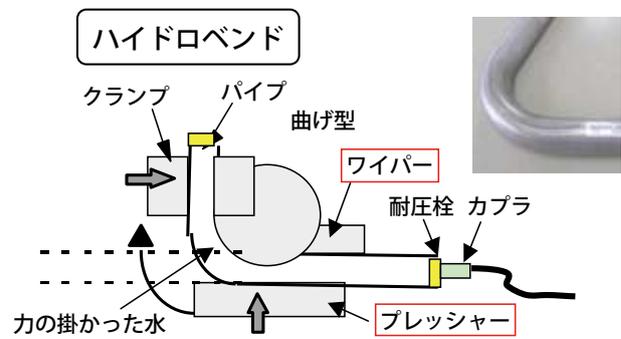


図5 ハイドロベンド工法

次に、動力性能の最適化要求とコストダウンを両立させる難題に挑んだ。トルク出力の最適化を図る

ため、管径は適切な位置で太くなる必要がある。ところが、従来は市販のパイプ径からサイズ違いのパイプ径への変化で、溶接可能な位置に制約されていた。今回、ハイドロフォーミング（水圧で管を膨らませる）工法により、管径を自由に変化させ、且つ一体成形することで、設計自由度の向上と大幅なコストダウンの両立を狙った。（図6）

ハイドロフォーミング工法は、連続曲げ加工した管を姿彫りした金型にパイプを入れて水圧で管径を太くし、精度を確保する。一体で成形できるこの工法は、接合位置や管径の制約が無く、歩留まりや加工工程の削減が狙える。一方、管径が太くなる部分で割れが生ずることから対応策が必要となる。（図7）

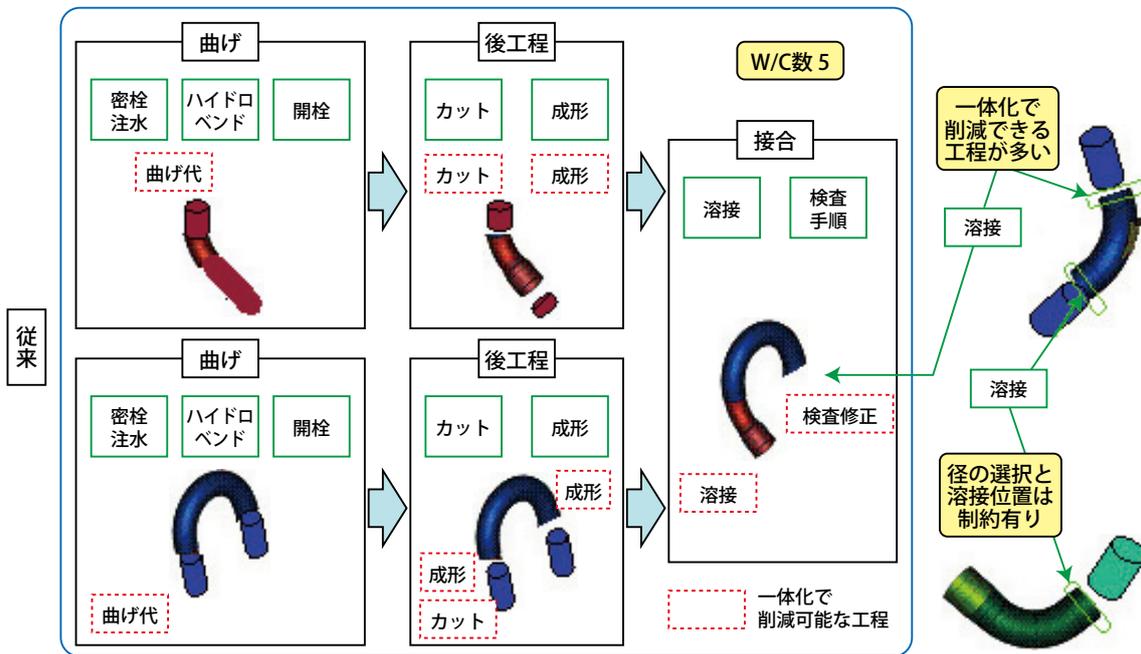


図6 溶接構造の場合の工程とW/C（製品の半分の詳細）



図7 ハイドロフォーム加工時の不具合

一般的なハイドロフォーミング工法の割れ防止策は、管軸方向から材料を送り込む機構を採用している。水圧と連動した軸押し機構は、高価な物となり、生産量が少ないと設備償却費がかさみ、コストUPになってしまう。（図8）また、曲げ加工後に一旦焼鈍する方法もあるが、その後のハイドロフォーミング工程でも、焼鈍の効率が悪くコストUPになってしまう。（図9）このことから、割れの原因を把握し、安価な割れ防止策を開発することが、重要課題となる。

最後に、前工程のハイドロベンドで密栓・注水したアドバンテージを活かし、ハイドロフォーミングまで

一貫で実施する工法で製造L/Tの短縮と更なるコストダウンを狙った。

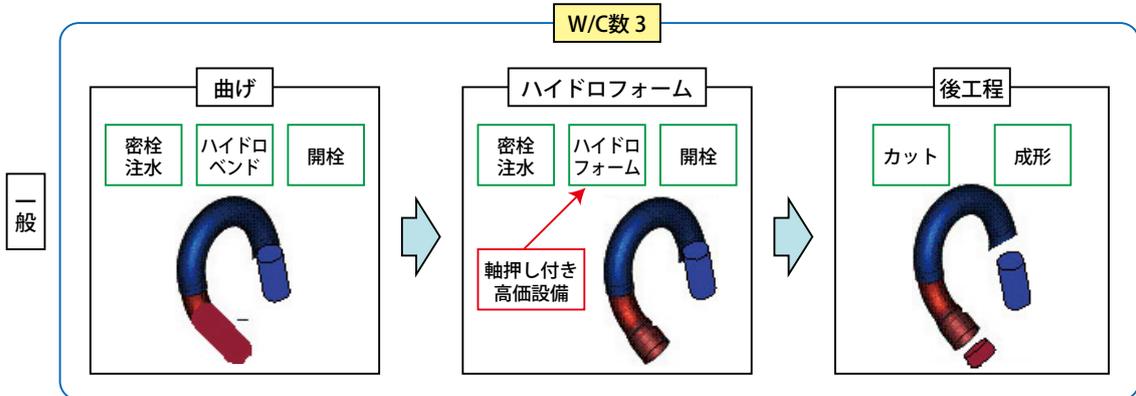


図8 一般的ハイドロフォーミングとその問題点

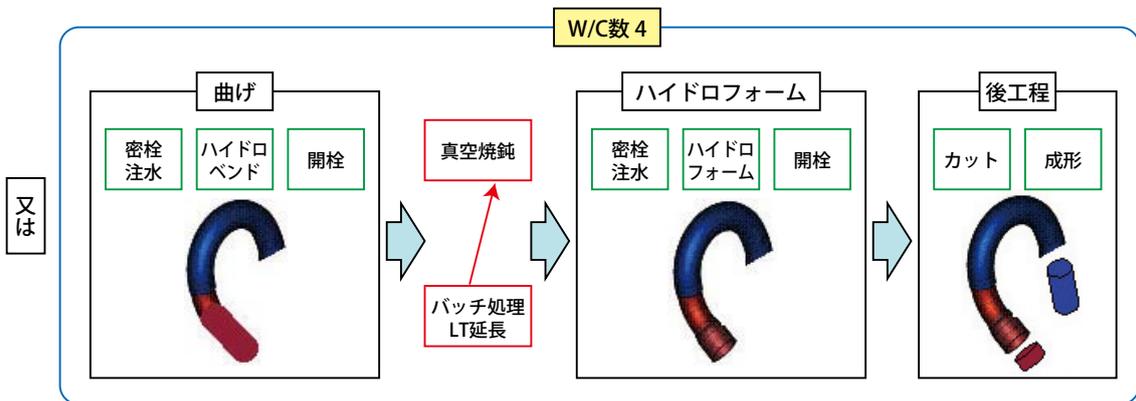


図9 一般的ハイドロフォーミングとその問題点

3 開発された技術の特徴と優位性

本工法開発の最大の特徴は、ハイドロベンドを薄肉排気管のプリベンド工程と位置付け、密栓し水を封入したまま、次工程のハイドロフォーミングと工程を一貫化させ、一体成形する事にある。(図10)

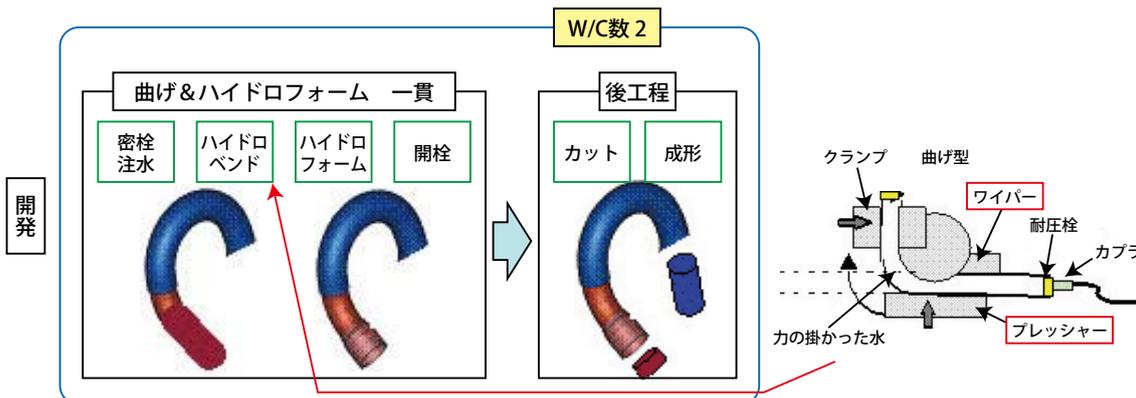


図10 開発した工程

この一貫化を成立させる最大の課題は、ハイドロベンドの低圧用密栓やカプラを、ハイドロフォーミングに共用できるまで、ハイドロフォーミングを低水圧化する事にある。低圧化に当たっては、そもそも何故、高圧が必要になるのかのメカニズムの解明から取り組んだ。

成形水圧は、形状や板厚が同じ場合、製品の硬度に左右される。そこで、各工程の加工硬化と成形性について説明する。チタン代替の材質としては、防錆力の高いSUS304を使用している。この材料は、曲げ加工によりマルテンサイト化し、加工硬化を起こす。

図11に示す様に、曲げ角度が大きくなるにつれて硬度はUPし、90度付近でピークになり、その後一定になる。

また、パイプの位置でも硬度は異なり、曲げの外側が硬い。次に図12に示す様に、曲げ加工後にハイドロフォーミングすると更に硬度はUPする。この硬度が成形限界硬度を超えることから、割れが起こる。

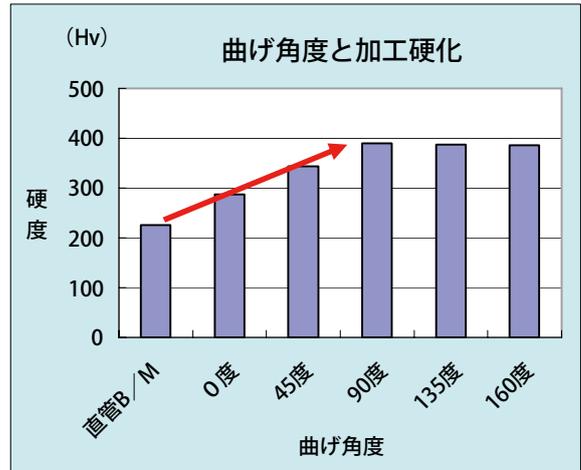


図11 曲げ加工による加工硬化事例

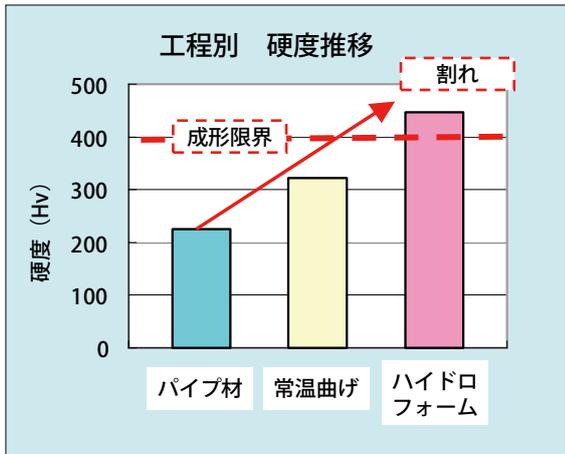


図12 工程と加工硬化推移

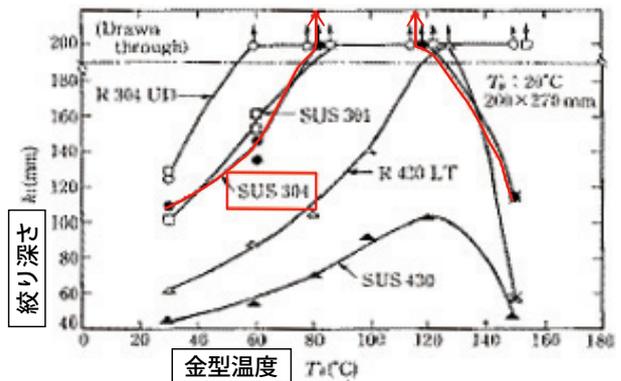


図13 温度と絞り性の相関[1]

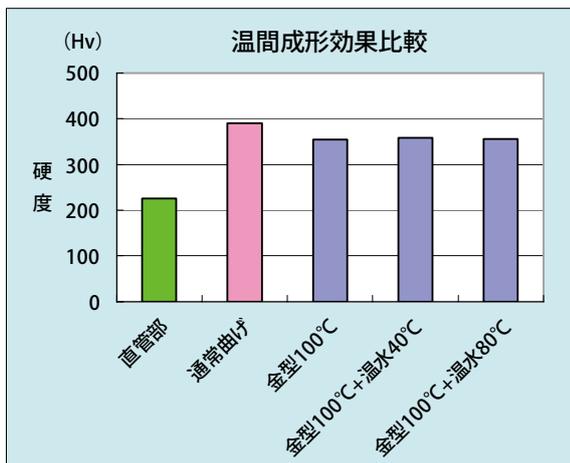


図14 各部の加温と成形結果

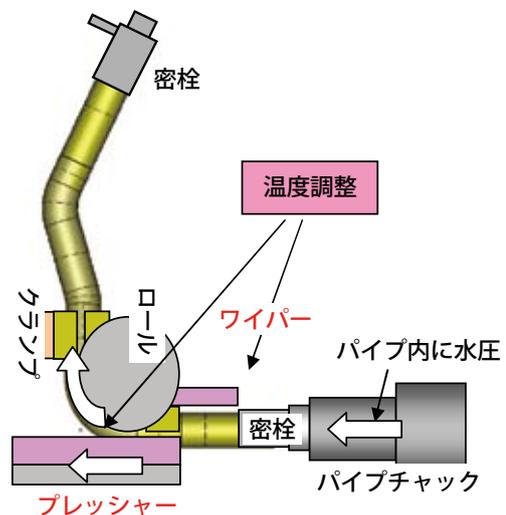


図15 温間ハイドロベンド

そこで、SUS304の温度依存性の高さに着目して、加工硬化を抑制する事とした。一般的に板金では約100℃付近で成形性が向上することが知られている。

パイプの曲げ加工では、どの金型を何℃に温めれば、どの程度効果があるのかを検証し(図14)の結果が得られた。この結果から、暖める金型は、プレッシャーとワイパーに特定し(図15)、ヒーターの選定では、段取り時間内に昇温させ、加工サイクルタイムで連続加工しても設定温度が維持できる物を選んだ。設定温度は、接品部と温度センサーの位置の違いによる温度勾配を把握し、110℃に設定し温度調節している。この温間曲げの効果により、図16で示すように、材料硬度が軟化し、製品の割れを抑制できた。

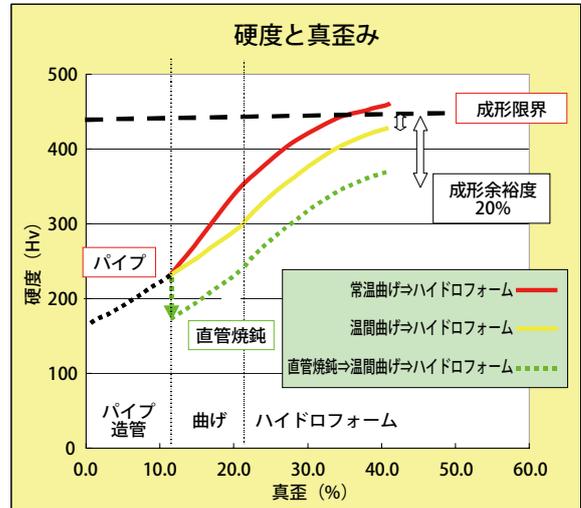


図16 工法別の高度と真歪の関係

しかし、成形余裕度は3%と低く、良品を得る為には、図17の様に、時間を掛けて水圧を上昇させる必要があった。そこで、更に硬度を下げるため、パイプ直管の時点で焼鈍を入れる事にした。直管状態での焼鈍は、炉内の収納効率が曲げ後よりも良いため、コスト上昇は少なく抑えられる。直管焼鈍で、材料が軟化した事により、成形余裕度は20%と向上した。(図16)また成形に必要な水圧も低減し、成形時間が短縮できた。(図17)

これらの工夫により、管軸方向から材料を送り込む機構も不要で、成形条件の作りこみも容易になった。(図18)

結果として、直管状態での焼鈍費用は、ハイドロフォーミングの成形加工費の低減で吸収できている。

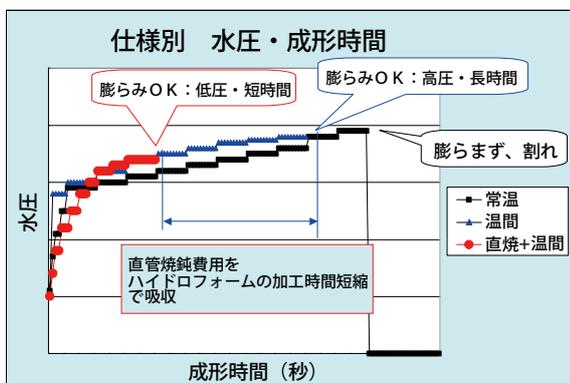


図17 曲げ工程別のハイドロフォーム成形時間



図18 直管焼鈍+温間曲げの結果

これらの開発により、低圧の油圧プレスと50MPaの水圧サーボ装置からなる、管軸押し機構が不要の工程が導入できた。



更に、本装置には、パイプ内に流れる水の量を計測するセンサーを搭載しており(図19)、加工中の水圧と水量の相関が把握できる。金型内でのパイプの膨らみは見えないが、この機能を利用すると図20の様に効率よく膨らんでいる部分と、時間を掛けてもあまり膨らまない部分が可視化できる。このことから、圧力と時間を見直す事により、効率の良い成形プログラムが作成できる。また、製品が金型形状まで膨むと水が流れなくなる事から、プログラム完了時の積算流量を管理することで、成形品質を保証する検査装置としても活用できる。

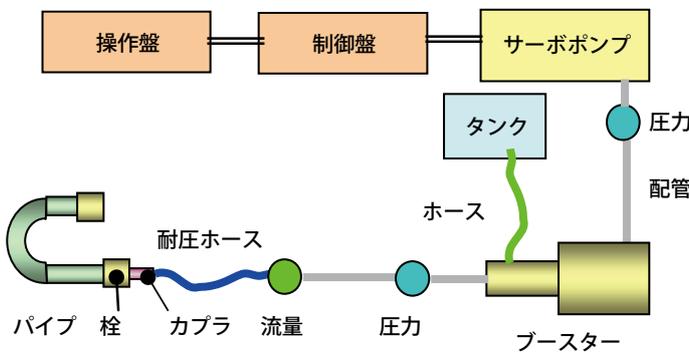


図19 水圧回路図

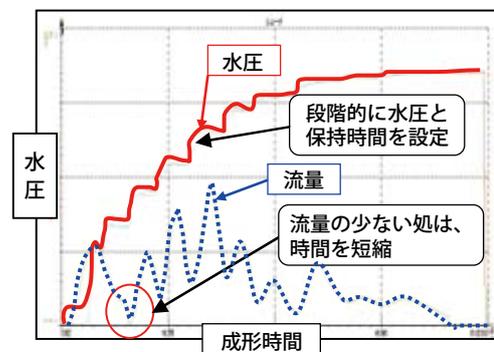


図20 水圧と流量及び成形時間

4 実用化の面から見た成果、実績

既に当社でのハイドロベンド工法による量産実績は2000年から約7万本/年に達している。今回、成形に必要な水圧を低く抑える事ができたことにより、密栓注水機、ベンダー、開栓機がそのまま流用できた。ハイドロベンド&フォーミングは2009年9月より、約500～2,000本/月の量産を開始している。図21に示すように、開栓機を移動しハイドロフォーミングを配置した。

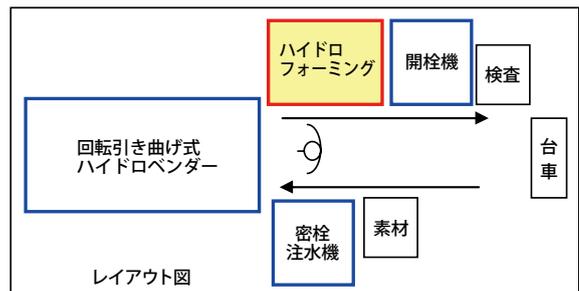


図21 ハイドロベンド&ハイドロフォーミングのラインレイアウト

5 技術的、経済的効果

5.1 設計自由度の向上

5.1.1 製品構造の一体化

今までは、既存のパイプ径から1サイズ大きなパイプ径への接続で、接続箇所も溶接上の制約から限られていた。今回の本工法開発により、任意のパイプ径や、テーパ形状も可能となった。また、溶接構造品に比べ、パイプのスプリングバックや扁平及び溶接歪量が少なく、高精度が得られる利点もある。

(図22)

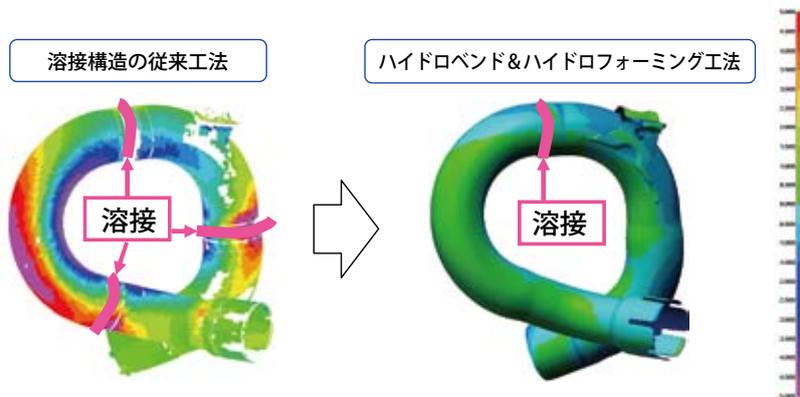


図22 工法別精度比較

5.1.2 薄肉SUSの製品化

塑性加工の実績では、試作段階で目標以上の軽量化を達成できた。(図23)最終的な生産仕様は、開発日程の都合上、板厚1ミリとなったが、目標達成の目処は立った。

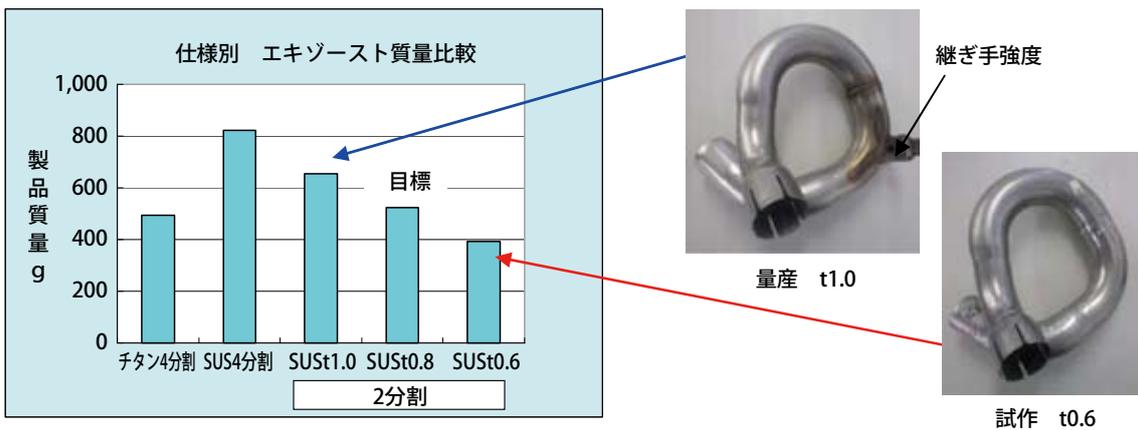


図23 仕様別質量比較

本工法開発を通して、NEWモデルの後方排気レイアウト(図24)の実現に大きく貢献し、質量ではマスの集中化、動力性能の最適化では、中低速域のドライバビリティーの向上に貢献できた。



図24 NEWモデルの排気レイアウト

5.2 コストダウン

高価なチタンを溶接で接合していた従来工程に比べ、薄肉ステンレスで一体化・一貫化したことによって、従来比59%のコストダウンを達成できた。(図25)

また、材料、加工、型治具、設備の全ての項目でコストダウンにつながった。

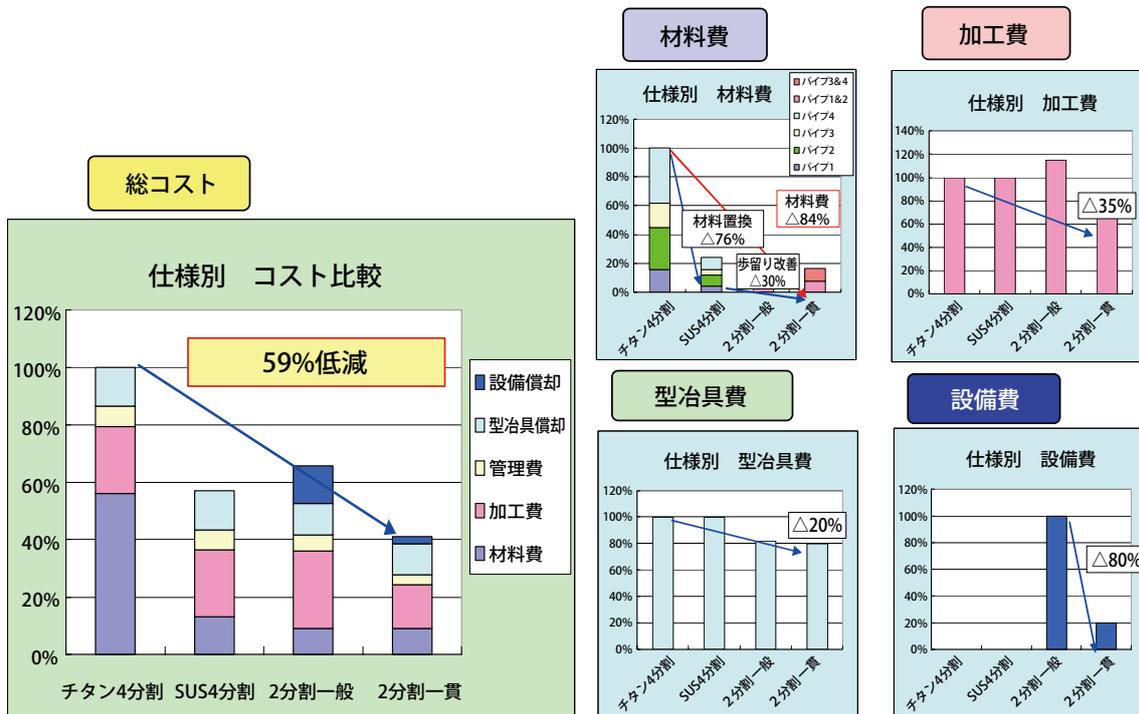


図25 仕様別コスト比較と項目別C/D効果

特に、薄肉の材料に特化し、加工硬化を抑制した事が、成形の低圧化を実現した。この効果により、ハイドロベンドとのシールの共通化、型締め力の低圧化、軸押し制御レスを可能とし、一般的装置金額の80%減で製造する事ができた。

5.3 L/Tの短縮(W/C削減)

4本のパイプを2本に一体化したことにより、部品数が減少し2工程削減、溶接も2工程減り、合計でW/Cを4削減。(図26)

一貫化により、焼鈍工程が2工程削減できW/Cを2削減。合計で、W/Cは半減以下となった。

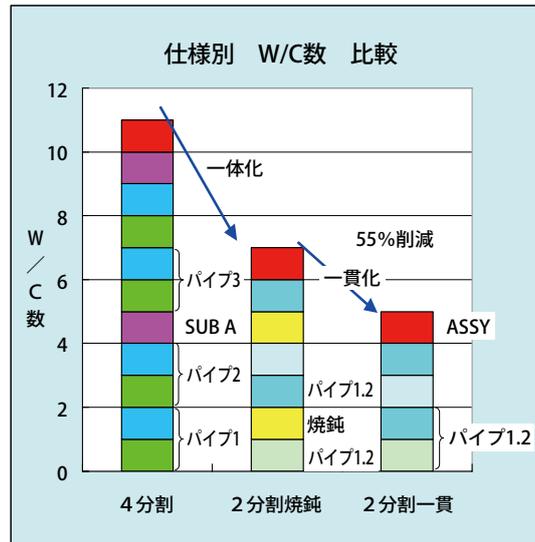


図26 仕様別W/C数比較

6 おわりに

今回の開発で、チタンに依存しない軽量化と、少量生産での一体成形化の道が開け、コストハーフを上回るコストダウンが実現した。また、設計自由度が向上し、モデルのコンセプトであるマスの集中(後方排気レイアウト)の実現に貢献できた。最後に、マフラーユニットとして技術開発し、更なる軽量化と最適な管径の変化を具現化し、差別化を目指したい。

■参考文献

- [1] 図13 野原清彦, 小野寛, “ステンレス薄鋼板の温間プレス成形”, 川崎製鉄技報, vol.17 (1985) No.3 fig3

■著者



葭野 民雄
Tamio Yoshino
技術本部
生産技術統括部
生産技術部



鈴木 英彦
Hidehiko Suzuki
技術本部
生産技術統括部
生産技術部



山村 易見
Yasumi Yamamura
技術本部
生産技術統括部
生産技術部