



## 薄肉パイプ曲げ工法の開発と実用化 (ハイドロベンド)

Bending Method and Production System for  
Thin-walled Pipe (Hydro-Bending)

田代 庸司 Youji Tashiro 葭野 民雄 Tamio Yoshino

● MC 事業部 生産技術開発室 GSS 基礎技術 Gr / MC 事業部 エギゾースト SS 技術 Gr 早出

### Abstract

Pipe bending is a manufacturing technology that contributes to the lightening of products and increases adaptability to low-volume, high-variety type manufacturing schedules. Due to today's needs for resource conservation and compactness in products, there is a demand for thin-walled pipe bending technology that enables tight bending radiuses and produces high-quality bending with minimum cross-section distortion or scarring of the pipe. In the bending of thin-walled pipe, wrinkles occur easily and it is difficult to maintain precision of shape.

There have been a number of methods introduced for bending thin-walled pipe, but all of them have involved an increased number of steps and were therefore considered not suitable for mass production. At Yamaha we focused on a hydro-bending method in which both ends of the pipe are tightly sealed with reusable pressure-resistant caps and filled with a water at high pressure. During the development of this method, special attention was given to safety measures, which resulted in major reduction of the amount of air injected to pressurize the water and measures to deal with the occurrence of water leaks. In order to increase manufacturing efficiency, the capping and water injection process and the de-capping and emptying process were made separate steps so that production cycle time could be set around the actual bending process. The result is a high-quality bending method capable of producing quality products in one process with the thin-walled pipes (external diameter 38.1mm, wall thickness 0.85mm, bend radius 60mm) that had been considered difficult to mass-produce in the past. Furthermore, we were able to maintain a cycle time (one minute) that is the same as existing bending methods for thicker-walled pipes.

### 要旨

パイプ曲げ加工は機器の軽量化や多品種少量生産に対応した生産技術である。最近の省資源、コンパクト化などのニーズに伴い、薄肉管で曲げ半径が小さく、また断面変形、傷などの少ない高品質な曲げが要求されている。薄肉管の曲げ加工ではシワが発生し易く、形状精度などを維持することが難しくなっている。

世の中には薄肉管の曲げに対応するいくつかの方法があるが工程が増え量産には不向きと考えられていた。当社ではパイプ両端を再使用可能な耐圧栓で密栓し、内部に高圧水を充填して曲げる方法（ハイドロベンド）に着目した。開発にあたり、安全対策として高圧水へのエアの混入量極小、高圧水の水漏れ時の対策等を実施した。生産性向上に際しては、密栓・注水工程と開栓・排水工程を外段取り化し、曲げ工程のサイクルタイムに合わせた。これらの結果、従来方式では量産困難であった薄肉パイプ（外径 38.1mm、板厚 0.85mm、曲げ半径 60mm）を良品一発で従来並の生産性（サイクルタイム 1分）

を確保して、高品質に曲げ加工できる工法を開発、実用化できた。

## 1 はじめに

モーターサイクルのエンジンには鋼管製のエキゾーストパイプが使用されている。限られた空間にレイアウトされる為、複雑な曲がり形状となっている（図1）。

地球環境の観点から省資源、省エネの他、モーターサイクルとしてスポーツ性能、商品品質の向上の要求がある。このためエキゾーストパイプにおいても軽量化、耐久性を満足する薄肉ステンレス管が採用され始めている。さらに、デザインニーズの多様化から曲げ半径は小さくなる傾向がある。この結果、曲げ仕様としては厳しくなる中で、高品質を実現できる高度な生産技術が必要である。

現在は回転引き曲げベンダーという心金（マンドレル）を用いたパイプ曲げ装置を使用している。しかし薄肉パイプの剛性が低い為、曲げ加工中にクランプ部のすべりが生じ不良品が発生し易い。また、曲げ部のシワ、傷、断面変形等、品質上の問題も多い。

世の中にはパイプ曲げの手段として内部に氷、水等を充填する方法がある。しかしこれらは工程が増え、量産には不向きと考えられていた。

当社では流動性の高い水を充填する方法に着目し、その生産性を改善することで、薄肉パイプに対応できる工法を開発、実用化したので紹介する。



図1 マフラー外観とエキゾーストパイプ

## 2 現状のパイプ曲げ加工法

当社のエキゾーストパイプは早出勤場を中心に生産されている。パイプサイズは外径 30 から 60mm、肉厚 1.0 から 1.2mm、全長 400 から 700mm である。

### 2.1 エキゾーストパイプの製作工程

工場に納入されたステンレス素管は受入れ検査後、回転引き曲げベンダーで曲げ加工され、検査、洗浄、両端切断、フランジ溶接、圧漏れ検査、傷修正、バフ前仕上げ、バフ加工を経て完成する（図2）。

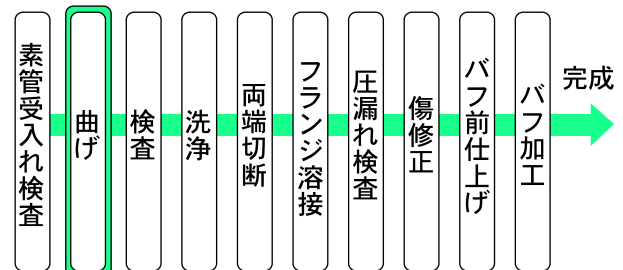


図2 エキゾーストパイプの製作工程

### 2.2 パイプ曲げ工程

回転引き曲げベンダーでは内径に合わせた心金にパイプを差込み、クランプ型、プレッシャー型を前進させてパイプを固定する。ロール型とクランプ型は一体化して回転し、パイプをロール型溝に巻きつけ

る様に曲げる。プレッシャー型は曲げの反力を受け止め、パイプの動きに従い移動する。心金は曲げによるパイプ断面の楕円化を防止すると共に、ワイパー型の反力を受けて、管壁をロール型、ワイパー型に押し付けてシワを防止する。心金部の摩擦低減のため極圧添加剤として塩素を多く含有した油剤を使用せざるを得ず環境面から対応が望まれている(図3、4)。

パイプベンダーの動作(パイプ位置決め、クランプ、回転曲げ等)はNC制御され操作性は良い。しかし、クランプ型やプレッシャー型、ワイパー型、心金の位置調整は熟練者でも試し曲げを繰り返す必要がある。シワが発生した場合、ワイパー型やプレッシャーの位置を調整し圧力を高めるが、心金部等の摩擦抵抗が増えクランプ部はすべり易くなる。クランプ力を高くするとクランプキズが問題となるため全体のバランスを再び取る必要がある(図5)。

このように調整した後はNC制御により、自動化され量産される。ワイパー型、心金はパイプとの摩擦で摩耗し、数日をおかず再調整し、数千個で交換する。

当社の競技用モーターサイクル現 YZF シリーズのパイプは肉厚が薄く、曲げ半径が小さいためシワが発生し易く、調整に数時間を要し生産性を妨げている。また、この調整の難しさがベンダーを専用機化させ稼働率を低下させている。

新モデルではより軽量化等のため、さらに厳しい曲げが要望され、現有の技術では量産困難である(表1、図6)。

表1 YZシリーズのパイプ曲げ仕様

	'01 現 YZ426F	'01 新 YZ426F	'01 新 YZ250F
パイプ外形 (mm)	41.3	41.3	38.1
肉厚 (mm)	1.0	0.8	0.85
曲げ半径 (mm)	80	75	60
曲げ角度 (度)	180	180	180
肉厚 / パイプ外径	0.024	0.019	0.022
曲げ半径 / パイプ外径	1.94	1.82	1.57
曲げ加工	従来方式 量産限界	従来方式 量産困難	

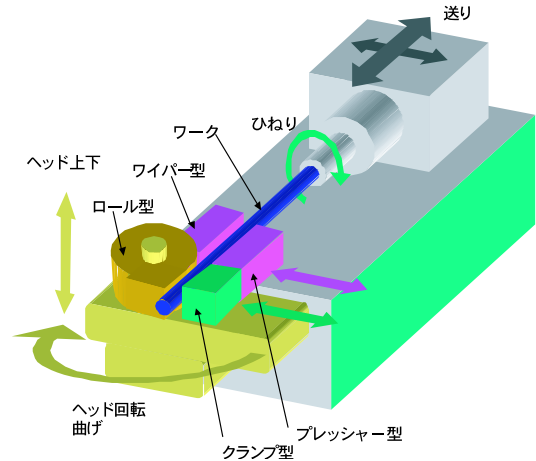


図3 回転引曲げベンダー

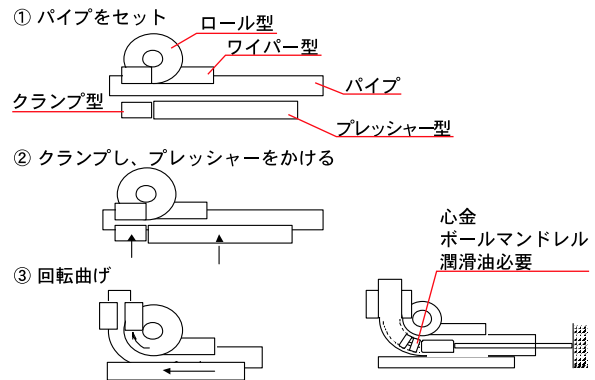


図4 回転引曲げベンダーの曲げ手順

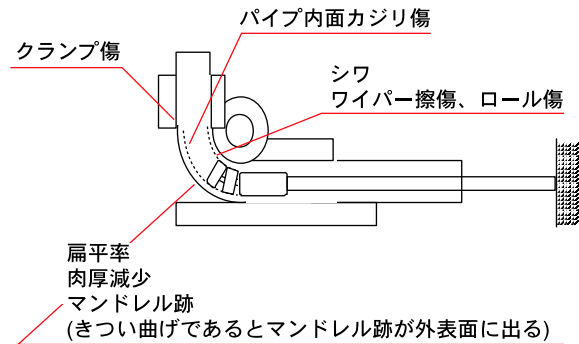


図5 品質不良と発生箇所

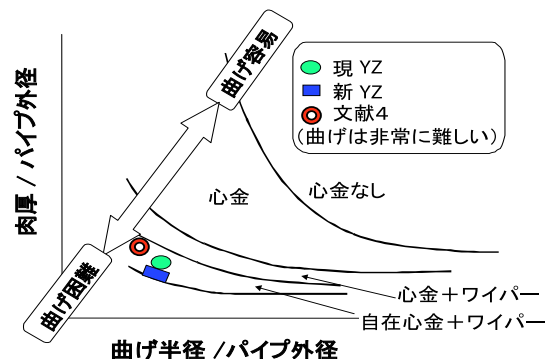


図6 曲げ仕様と曲げ加工の難易性

### 3 薄肉パイプ曲げ工法の開発

現状の改善に加え、より軽量化等をはかり商品性向上を図る為、新しいパイプ曲げ技術の開発に取り組んだ。

#### 3.1 パイプ断面変形の防止技術

パイプ曲げ技術において、断面変形を防止するには次の4つの基本的な方法がある。

- (1) パイプ内面から外力を加える (内圧)
- (2) パイプ内面から変位を拘束する (心金、氷、砂、低融点合金、熔融塩など)
- (3) パイプ外面から変位を拘束する (ロール型、プレッシャー型、ワイパー型)
- (4) パイプ軸方向から外力を加える

一般的なパイプの曲げはそれぞれ (2) として心金、(3) として金型一式、(4) として引き曲げ力を併用している。二重管等特殊な用途として (2) の氷等をパイプ内に充填し曲げる方法もあるが品質上の他、エネルギー面での問題も多い (表2)。

残る (1) の内圧 (水圧) について調査した。

表2 パイプの変形

基本的な変形防止法	事例	特 質
(1) パイプ内面から外力を加える	内圧 (水圧)	内面から均一に加圧可能、生産性 (密栓方法、サイクルタイム) 問題
(2) パイプ内面から変位を拘束	心金	一般的に利用、薄肉パイプにはシワ等の問題
	氷	二重管曲げにも応用、生産性やエネルギー上問題
	砂	二重管曲げにも応用、環境上 (粉塵、振動) 問題
	低融点合金	工程複雑、研究段階
	熔融塩	二重管曲げに応用、工程複雑
(3) パイプの外面から変位を拘束	金型	一般的に利用
(4) パイプの軸方向から外力を加える	引張り	シワの防止
	圧縮	破断の防止

#### 3.2 水圧法 (ハイドロベンド)

水圧のかけ方としては大きく分けて3種ある (図7)。

方式1は両端の耐圧栓を弾性部材で連結するもので、水の充填方法やシール構造に難点がある。また方式2は弾性体が軸方向に変形し、圧力の保持や耐久性に問題がある。それに対し、方式3では全長に亘って圧力を保持できる為、曲げる位置に制約がない。また、内圧によりパイプの軸方向に引張力が発生し、シワ発生防止に有効である。耐圧栓の抜け止め構造に工夫をすれば、実用化の可能性が高い。

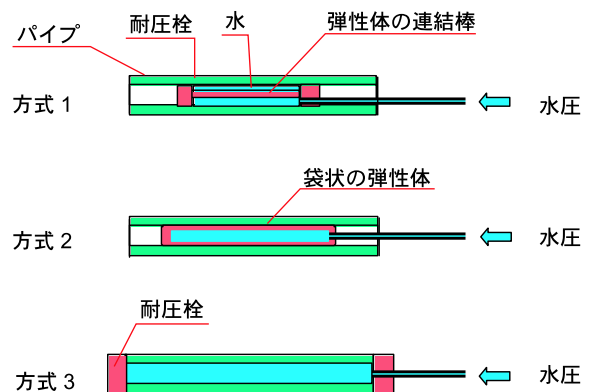


図7 水圧方式

必要な圧力は最大でパイプの降伏応力の前後である。この値はパイプ径、肉厚、材質および曲げの厳しさ(曲げ半径、曲げ角度、偏平率など)によって異なるがおよそ10から20Mpaである。パイプを膨張し成形するハイドロフォームと区別する為、この工法をハイドロベンドと呼ぶことにした(図8)。

課題としては(1)安全確保(高圧水へのエアーの混入防止、水漏れ対策等)、(2)密栓方法、(3)圧力制御、(4)生産性向上である。

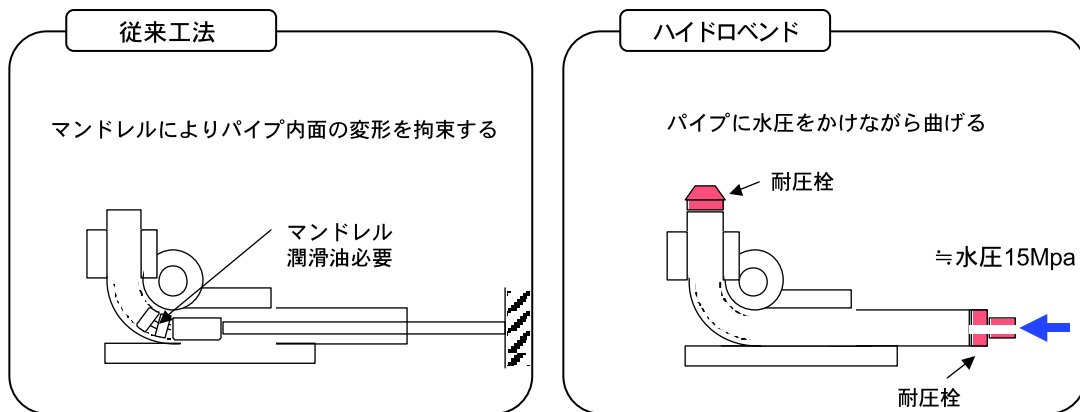


図8 工法比較

### 3.3 ハイドロベンドの要素技術

#### 3.3.1 耐圧栓

一般的に金属製の蓋をパイプに溶接する方式やパイプ端にネジを切り、栓をする方法があるが生産性に問題がある。

化学機械等の高圧容器製造会社では、パイプ溶接品質の確認のため耐圧栓を用いた水圧テストを実施している。この耐圧栓の原理は外部リングによりパイプ径拡張を防止し、くさび効果を利用してツメを内径に押し付け抜けを防止すると共にパッキンを拡張してシールする。今後の自動化にも対応し易い(図9)。

この機構の採用にあたり空気の混入を防止する必要がある。透明アクリルパイプを用いて、水充填時における空気の残留の有無を調査した。その結果、パイプ直立姿勢で上部の耐圧栓付近に空気溜まりがあることが判った。そこで溜まりの上部にエア抜き穴を設け、空気溜まりがなくなることを確認した(図10)。



図9 水圧栓写真

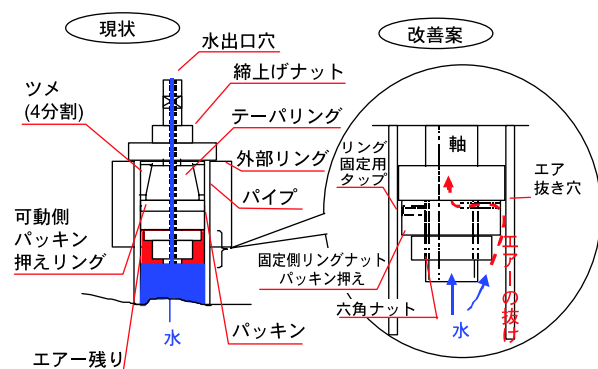


図10 耐圧栓の構造とエア-残り対策

### 3.3.2 水圧発生用ポンプ

曲げ加工中にシールが破損した場合の水の飛散を最小限に押えるため、ポンプは高压時流量が少なく、制御しやすいものが適している。本設備では空気圧を動力源としたプランジャー方式のポンプを採用した(図11)。

空気圧0.5Mpa で最大水圧20Mpa を発生する(図12)。

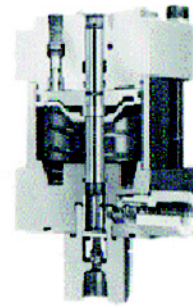


図11 ポンプ断面

### 3.3.3 圧力の制御

ハイドロベンドでは加工中にパイプの弾性変形や塑性変形により体積が増加するので圧力が低下する。これを常時一定になるよう制御する必要がある。そこでパイプ入口の圧力を検出し、設定圧とのずれが生じた場合、ポンプの駆動圧を制御して吐出圧を調整する仕組みが必要である(図13)。

作業安全上から、本装置には次のような制御が必要である。

(1) パイプへの水充填完了時に残留空気が無いこと;

注水時、ポンプ入口で気泡を検出したら停止する。また、パイプ出口からの水に気泡を感知しなくなってから規定時間後に注水停止する。

(2) 急激な昇圧は避ける;

シールが不完全の場合に備えて、水の飛散を最小限にする為、目標圧まで段階的に昇圧する。

(3) 昇圧時、パイプ内に残留空気が無いこと;

残留空気があると昇圧時間が長くなるため時間を検出し停止する。

(4) 昇圧後、耐圧栓の緩み、パイプ亀裂等の発生時の対応;

圧力の急激な低下と送水量の増加に伴って、ポンプのストローク回数が増える。これらを検出し異常時は停止する。

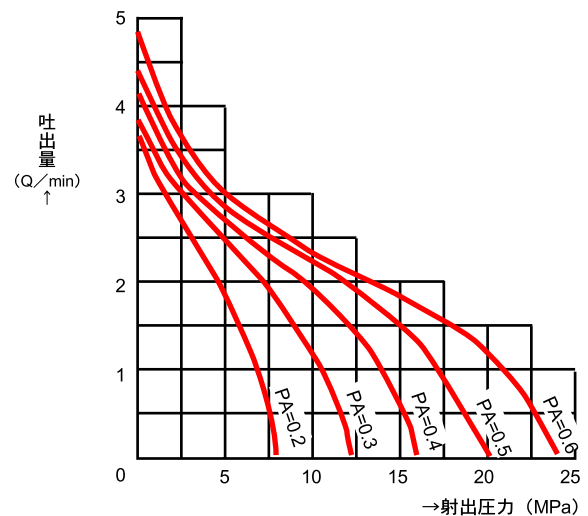


図12 ポンプ特性

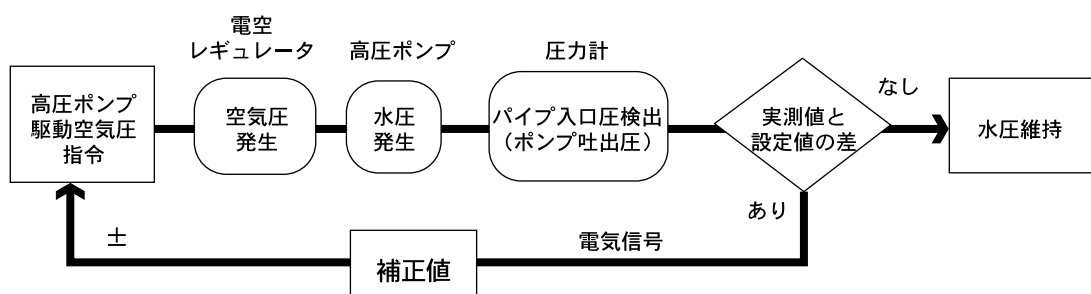


図13 高圧ポンプ制御

### 3.4 ハイドロベンド開発機

以上の要素技術の評価確立するため、単曲げベンダーを利用してテスト機を製作した (図 14)。

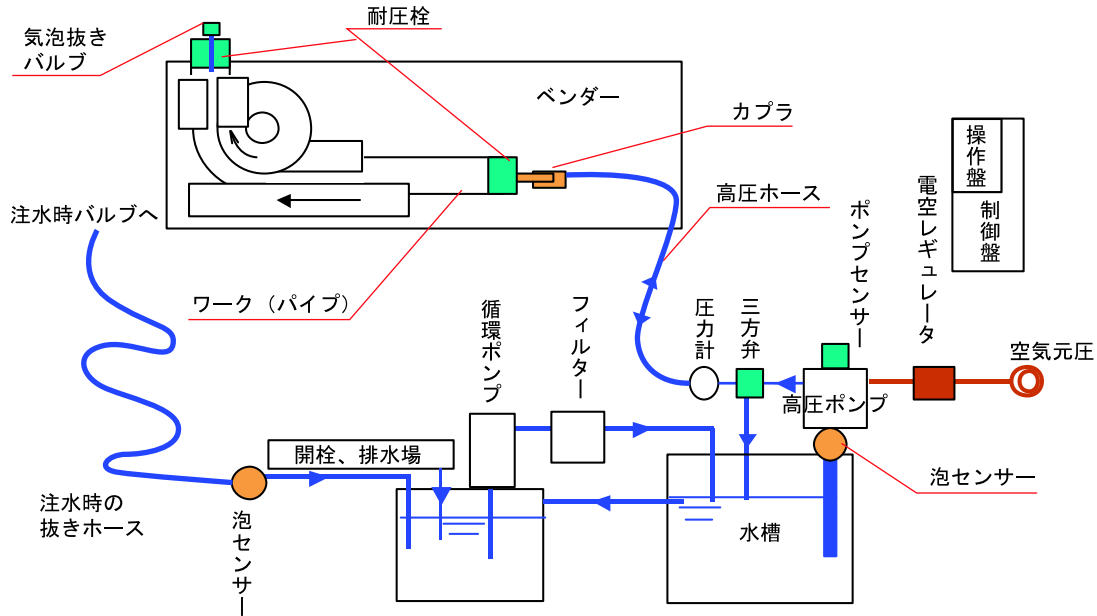


図 14 ハイドロベンド装置概要

### 3.5 曲げ加工手順

最初の水圧はパイプ材の降伏応力の半分を目安として設定する。

本装置での加工手順を以下に示す。

- (1) パイプに耐圧栓を取付け、気泡が無くなるまで注水し、水漏れを確認する。
- (2) ベンダーにパイプをセットし、設定水圧に加圧後、曲げ加工する。
- (3) ベンダーからパイプをはずし、開栓・排水する。

### 3.6 トライ結果

開発機で前述の新YZシリーズのパイプを曲げ加工した。

この結果、従来の方法では曲げ加工困難なパイプがシワ、キズ等の不具合も無く、断面偏平率 (= 最小外径 / 公称外径) も 96% と従来 (93%) 以上の品質を確保出来た (図 15)。

また、曲げ加工の条件出し、試加工の本数は通常の数分の一で済み、調整が非常に簡単である事が分かった。

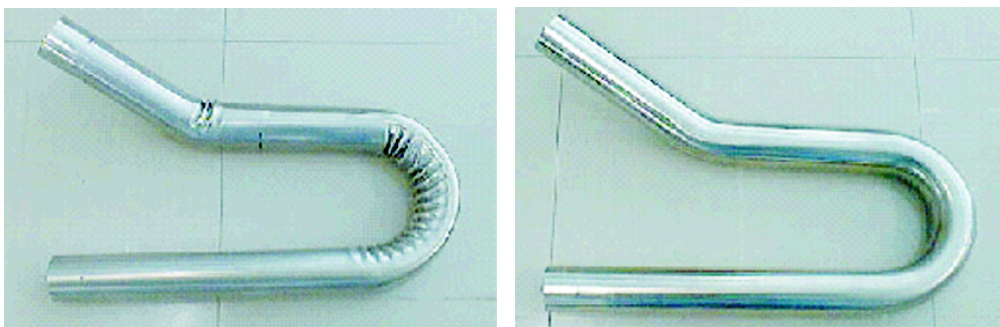


図 15 新 YZ250F エキゾーストパイプ曲げ結果

## 4 量産設備の開発

安全性を確保し、生産性として従来方法と同レベルを狙い (1) サイクルタイム1分、多機種対応を狙い (2) 段取り短縮、調整一発と2つの目標を立てた。

(1) サイクルタイム1分を目指すには解決すべき2つの課題がある。

イ. 密栓注水工程、開栓排水工程を外段取り化し、それぞれ1分以内とする。

ロ. 自動位置決め、複数回曲げ可能な設備にする。

(2) の機種変更段取り短縮、調整一発では

ハ. ベンダーのロール金型交換等は従来通り実施し、その他は出来るだけデジタル設定（プログラム交換）にする。

安全確保として

ニ. 耐圧栓の締め付けトルク管理、締め付け量の管理、耐圧栓の使用回数の管理を実施する。

これら4つの課題を達成するには機構の新設や改良が必要である。

### 4.1 量産設備の新設、改良項目

ベンダーは複数回曲げ可能な設備を改造する事にした。主な新設、改良項目について説明する。

(1) 密栓注水機の新設

パイプに耐圧栓を挿入後、ナットランナーにより自動で締め上げ、注水ポンプを新設して事前に注水する。

この時、規定のトルク、規定の締め付け量を外れた場合アラームで停止する。

(2) 高圧水供給配管の自動気泡抜き機構新設

注水後、供給する高圧水に気泡が無い事が必要である。本装置の始動時等、定期的に気泡抜きの機構を設けた。またベンダー上での高圧配管の接続部にはエアレスカップラを採用した。

(3) 耐圧栓の使用回数記憶回路

一機種で複数セットの耐圧栓を使用する。

このセット毎に生産回数を記憶し、消耗品（パッキン等）の寿命を管理する事で安全性も向上させた。

(4) 耐圧栓構造の改良

複数回の曲げ加工を実施するには耐圧栓装着後、パイプの一端を保持し、前進、ひねり等の動作が出来る様にする必要がある。そこで、反ロール側の耐圧栓にはベンダーへの取付け部を設ける。

また外部補強リングとの一体化をはかり、パイプへの耐圧栓の装着、搬送、等で自動化を容易にする（図16）。

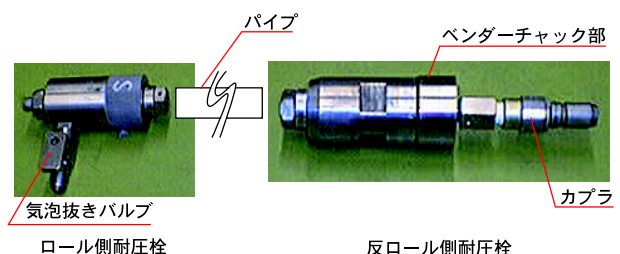


図16 量産用耐圧栓



## 4.2 量産設備概要

以上の改良項目を織り込むと共に安全性向上、作業負荷軽減、省人化の為、搬送ロボットを採用した。作業者はパイプの溶接線が曲げの内側になる様に決められた位置にパイプをセットし起動ボタンを押す。後の一連の工程は自動化されており、曲げ加工完了のパイプをシュートから取り出し、検査をする (図 17、表 3、図 18)。

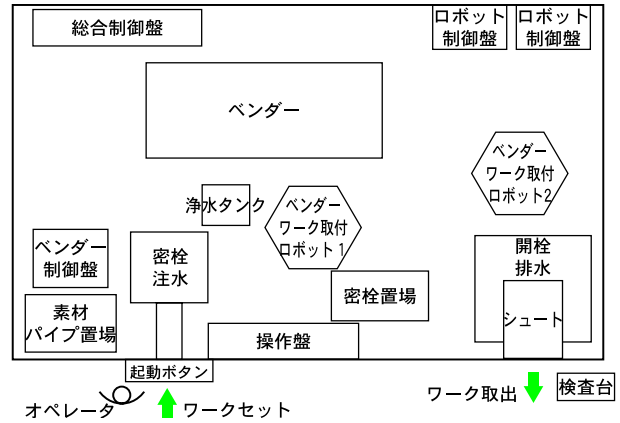


図 17 パイプ曲げ設備レイアウト

## 4.3 量産の事例

本設備にて新 YZ250F 用のエキゾーストパイプの生産を開始した。曲げ部の偏平率を同一にする為、曲げ角度毎に圧力を変化させている (表 4)。

表 4 YZ250F 生産条件

機種	新 YZ250F	パイプ径	38.1mm
		板厚	0.85mm
材質	SUS304L	曲げ半径	60mm
		曲げ角度 (度)	水圧力 (Mpa)
曲げ 1 回目		33.5	12
曲げ 2 回目		180	15.5

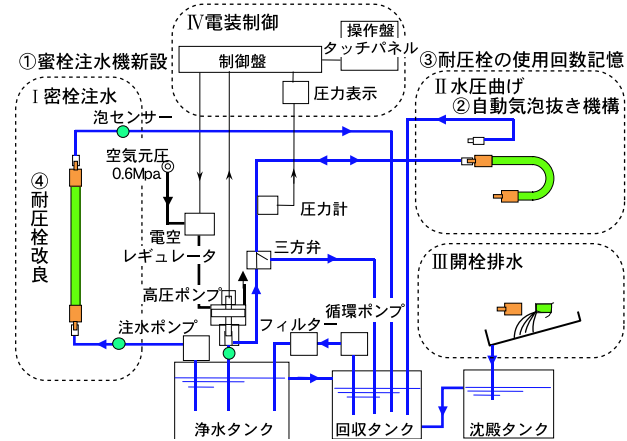


図 18 システム概要と主要な新設、改良項目

表 3 量産設備作業内容

作業名	作業内容
ワークセット	作業者がパイプをセットし起動ボタンを押す
密栓注水	ロボット 1 が耐圧栓を密栓注水機にセットする 密栓注水機でパイプに耐圧栓を取り付け、注水する
ワーク移動 1	ロボット 1 が注水完了パイプをベンダーにセットする
曲げ	曲げ加工機で設定水圧に加圧し、曲げ加工する
ワーク移動 2	ロボット 2 が曲げ完了のパイプを開栓機にセットする
開栓排水	開栓機で耐圧栓を外し、排水する
ワーク移動 3	ロボット 2 がパイプをシュートに運搬する
耐圧栓回収	ロボット 2 が耐圧栓を回収する
検査	作業者が検査ジグで曲げ精度を確認する

## 5 成果

- (1) 新YZ-Fシリーズのエキゾーストパイプの生産が目標サイクルタイムで出来た。
- (2) クランプすべりが防止され、クランプ型の滑り止め溝加工は不用になった。またクランプの材質をプラスチックにする事で、クランプ傷が減少し、表面品質が向上した。この為、傷取り工程を廃止し、素管として研磨パイプを使用する事でバフ前仕上げ工程も削減できた。研磨パイプの使用にあたり、素管納入の荷姿が改善され、運搬傷が無くなった。
- (3) 熟練を要した曲げ加工条件出しから開放され調整一発となった。この為、段取り時間が数分の一となり、安定した。従来、ベンダーは専用機化していたが、多機種対応となり稼働率が数倍に向上した。
- (4) 一般には加工の難しいチタンパイプ(チタンは親和性によりカジリが発生し易い)でも良好な曲げ加工が出来る。調整一発で良品を得られる事から高価なチタンパイプの曲げにも適している。
- (5) 心金用の含塩素潤滑油が不用となり、その洗浄工程も削減できた。
- (6) 多気筒生産は各気筒毎のロット生産であったが、各気筒一本ずつのセット生産が可能となった。

## 6 おわりに

本工法は1999年に開発し、本設備は2000年8月より生産移行した。開発初期より商品開発部門と連携を取り短期間に実用化できた。2001年11月からはハイドロベンド2号機を導入し、チタンエキゾーストパイプの生産を開始した。

なお本件に関してはシステム構成全体とパイプへの注水方法および水圧の制御方法について特許申請済みである。

今後、二重管パイプの曲げ加工法への応用、自動車エンジンのインテーク、エキゾーストパイプへの適応等を検討する。

### ■参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：「チューブフォーミング」, コロナ社, 1992
- 2) 田所豊年：「パイプの塑性加工」, 塑性と加工, VOL11, no.117(1970-10)
- 3) 相津昭一：「パイプベンダーによる曲げ加工」, プレス技術第3巻6号
- 4) 落合和泉：「曲げ加工」, プレス技術第17巻7号
- 5) 遠藤ほか：「円管の曲げ加工における形状精度」, 塑性加工学会誌第27巻300号, 1986
- 6) ㈱オプトン：公開特許公報、特開平10-58051, 1998年3月公開
- 7) ㈱ニチリン：特許公報, 第28998902号, 1999年3月登録
- 8) 中村ほか：「パイプ加工法」, 日刊工業新聞社, 1998
- 9) 日本塑性加工学会編：「最新塑性加工便覧 第2版」, コロナ社, 平成1