

NC パイプベンダーの開発

東海職業能力開発大学校 河瀬 博之
 千葉職業能力開発促進センター 青木 節

Development of NC Pipe Vender

Hiroyuki Kawase, Takashi Aoki

要約 工場の自動化生産ラインの自動機械には多くの油圧用配管（パイプ）が使用されており、このような機械を製作する過程で、パイプの切断と曲げ作業を行うが、パイプの曲げ作業は多大な作業時間と労力を要し、また曲げ精度も悪く歩留まりの問題をかかえている。そこで、今回、使用頻度の高いSTPSパイプ（くいこみ式管継手用精密炭素鋼）を対象とし、高精度かつ迅速に曲げ加工のできる「NCパイプベンダー」を開発した。従来の汎用パイプベンダーはメカニカルな手動方式であったのに対し、新開発のパイプベンダーは、サーボアンプ一体型のPLC（プログラマブルロジックコントローラ）にてサーボモータを制御し、曲げ加工を行うメカトロニクス機器の構成とした。この結果、従来2人作業を要し、かつ熟練作業者による曲げ加工が曲げ精度 $\pm 1^\circ$ 程度であったのに対し、今回の開発により作業者は熟練度によらず、1人作業で曲げ精度 $\pm 0.5^\circ$ 以内の曲げ加工が可能となり、且つ作業時間も短縮することができた。これにより、今後高能率・高精度の鋼管パイプ曲げ加工を行うことができる。

はじめに

工場の自動化生産ラインにおける自動研削盤や自動切削機械等においては、多くの油圧用配管が使用され

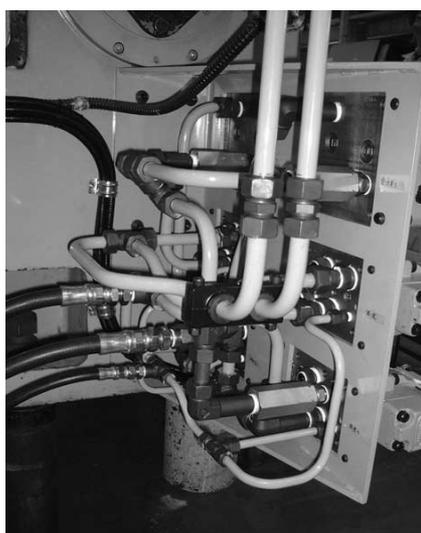


写真1 加工機械の油圧配管用パイプ

ている⁽¹⁾。

実際に企業で製作されている油圧配管材を使用した加工機械の例を写真1に示す。これらの加工機械等を製作する機械メーカーでは、油圧配管（以下パイプ）を鋼管メーカーより直線状で納入し、機械の設計に合わせて、切断と曲げ加工を行い、機械に組みつけている。切断・曲げ加工したパイプを写真2に示す。パイプの曲げ作業はメカニカル式のパイプベンダーで行っ



写真2 油圧配管用パイプ

ているが、曲げ作業時の曲げ荷重が大きく体力を要し且つ多くの作業時間を要している。また、曲げ精度に問題があり、歩留まりの問題も抱えている。そこで、今回、メカトロニクス技術を導入し、パイプを高精度かつ迅速に曲げ加工のできる「NCパイプベンダー」を開発することとした。

・従来の問題

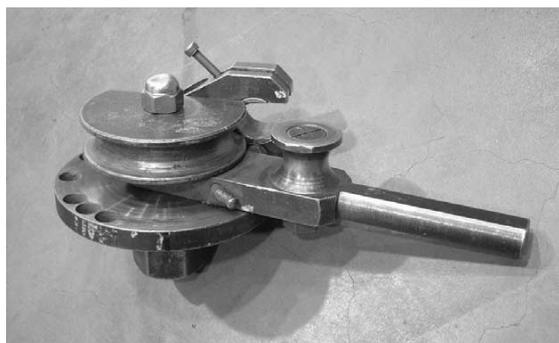


写真3 手動式ハンドベンダー

従来からパイプの曲げ作業において使用されている手動式ハンドベンダー(注1)を写真3に示す。

従来の問題点として以下が挙げられる。

曲げ角度精度が悪い。また熟練を要し、歩留まりに問題がある。

長い作業時間を要する。

2人作業が必要で、25以上のパイプでは曲げ作業が困難である。

・装置の仕様

新しく考案するNCパイプベンダーの仕様として、下記を設定した。

- ・従来二人以上で行っていた作業を一人で行えるような装置とする。
- ・装置が複雑とならないように、配管材用パイプは使用頻度の高い3種類のSTPSパイプ(くいこみ式管継手用精密炭素鋼鋼管)⁽²⁾に絞る。
- ・作業操作を行いやすいよう、パネルには必要最小限のスイッチのみとする。

具体的な、装置の仕様を表1に示す。曲げ角度は基本角度を15~135°の15°刻みとし、基本角度に対して±10°(1°刻み)で調整できるようにした。また加工速度は30%/secとした。

表1 装置の仕様

配管パイプ材	種類	STPS(くい込み式管継手用精密炭素鋼鋼管)
	直径×肉厚(mm)	16×t2 20×t2.5 25×t3
曲げ角度	基本角度	15~135°(15°刻み)
	調整角度	±10°(1°刻み)

・装置の設計と制作

今回開発のNCパイプベンダーはメカトロニクス装置⁽³⁾であり、メカニズム、アクチュエータ、コントローラ(制御)について吟味した。

1 メカニズム

パイプの曲げ加工のメカニズムは種々の方法を検討した。図1では、駒にパイプをセットし、左右から加圧する方法で、図2は駒にセットしたパイプにローラを駒に沿って押し当て回転させる方法である。いずれの方法においても、条件としては駒の半径Rがパイプの直径Dに対し、3倍以上必要であることが経験的に要求される。(注2)

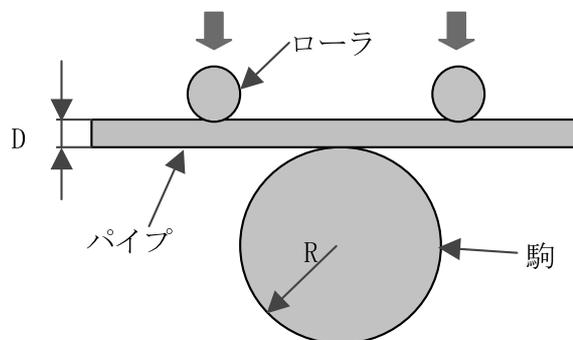


図1 加圧法1

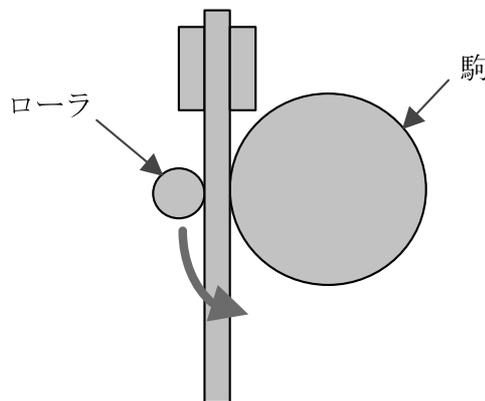


図2 加圧法2

$$R \ 3 \times D \ \dots \ (1)$$

これは、曲げ加工後にパイプ断面が楕円形となり、長径（X）と短径（Y）の差が顕著となるためである（図3）。このほか様々なメカニズムを検討したが、機械装置の構造がシンプルに設計できる図2の方法で進めることとした。

図4に最小の16パイプと最大の25パイプの曲げ加工図を示す。

パイプ曲げ部の構造は、中央のベンダー駒の凹部と外側のローラの凹部にパイプをはめ込み、ローラを回転させる構造とした。

パイプをセットし、チャック後、ローラを駒に沿って回転させ曲げ加工を行うが、曲げ加工時に曲げの反

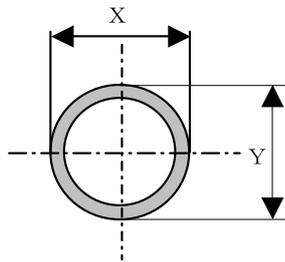


図3 パイプ断面

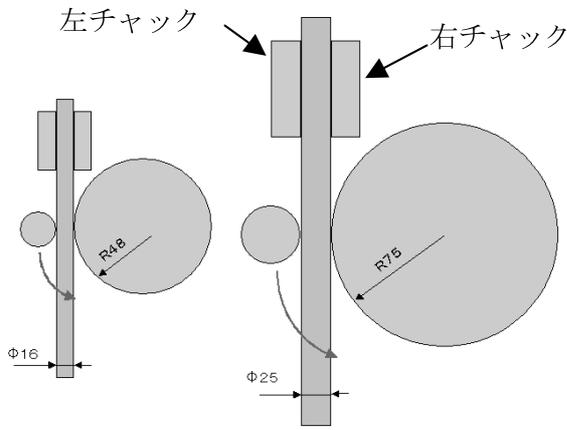


図4 曲げ加工モデル

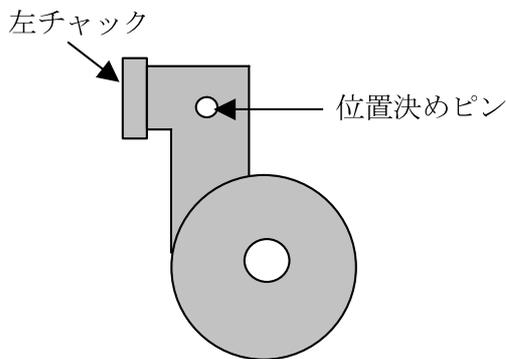


図5 左チャック一体型駒

力により、左側チャックに大きな荷重がかかり安定したクランプが行えない。このため、左チャックは駒一体型とし（図5）、右チャックにてクランプ作業を行うこととした。

2 アクチュエータ

曲げ加工のアクチュエータは油圧式と電動式を検討した。装置の軽量化と制御の容易さからはサーボモータが適切であるが、曲げトルクは油圧式が十分な力を得られる。そこで、パイプを曲げるときの要求トルクを評価した。図6に示すように管材を曲げるときに発生する曲げモーメントは

$$M = \sigma \times Z \ \dots \ (2)$$

σ：降伏応力

Z：断面係数

$$Z = \frac{\pi}{32} = \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2}$$

d₂：管外径

d₁：管内径

で表わされる⁽⁵⁾。

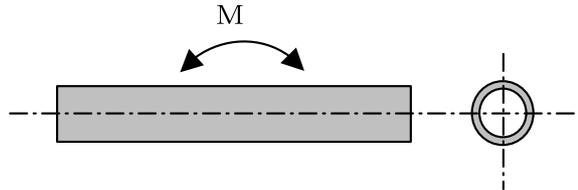


図6 パイプの曲げモーメント

表2に、(2)式より計算したパイプの曲げトルクと実測による曲げトルクを示す。実測による曲げトルクは手動式ベンダーを使用しばねばかりによる計測で求めた。25の手動式の曲げ加工の場合は、大きな曲げトルクが働き、手動では測定不可能である。計算による曲げトルクを“以下”としたのは、材料に顕著な降伏応力がなく、代わりに材料の引張強度を使用したため、実際に働く応力は引張強度以下である理由による。

表2 要求曲げトルク

パイプ直径と肉厚 (mm)	実測による曲げトルク (N・m)	応力計算による曲げトルク (N・m)
16 (t2)	76	120以下
20 (t2.5)	190	230以下
25 (t3)	測定不可	450以下

16、 20の曲げトルクは実測、計算共に、同等と考えられる。この結果、 25パイプの曲げトルクは最大で450N・mと考え、後述の減速機を併用すれば、制御の容易な電動のサーボモータで十分なトルクが得られ、曲げ加工は電動式で行うこととした⁽⁶⁾。

パイプのクランプについては簡易性と操作性を考慮し、空気圧で行うこととした。

3 制御

制御方法として、前述のアクチュエータの選定により、また現場でメンテナンスを行いやすいPLCとサーボアンプの一体化したコントローラを使用することとした。プログラムは汎用パソコンから専用のソフトウェアを使用して入力する。

4 全体設計

装置全体の設計を図7に示す。テーブルにパイプをセット後、エアシリンダとクランプバーによりパイプをクランプする。パイプの曲げ加工はローラが駒に沿って円周上に作動することにより行われる。

ローラの回転は、サーボモータの回転によりベルト

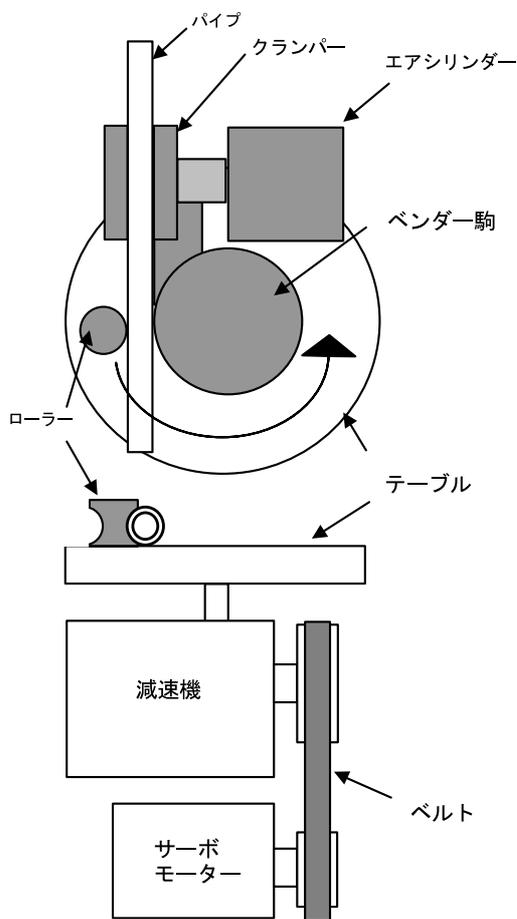


図7 パイプクランプ部および曲げ部

と減速機を介して、回転トルクの増大及び回転軸の垂直方向への変換を通して行う。

モータの出力は下記にて選定した。

- ・ベンディングの必要トルク $T = 450\text{Nm}$
- ・減速機の減速比 30
- ・ベルトの減速比 2
- ・減速における伝達効率 74%^(注3)

以上よりサーボモータに必要なトルク Tr は

$$Tr > 450 / (2 \times 30 \times 0.74) \\ = 10.1\text{Nm}$$

よって、市場のサーボモータより、11Nmのモータに決定した。

5 完成状態

写真4に完成品の外観を示す。長物のパイプにも対応できるよう手前にローラを有したサポートを取り付け、また底部にはキャスターを取り付け、工場内での移動をスムーズにした。写真5は本体主要部を示す。

写真6は曲げ加工の上面部を、写真7は、パイプをセットした状態を、写真8は動力機構部の外観を示す。写真9はコントローラの外観を示す。右側がサーボアンプ一体型のPLC(プルグラマブルロジックコントローラ)、左側に電源、端子台等が配置してある。

・作業方法

本装置の作業手順は以下の通りである。

パイプの径に合わせて、ベンダー駒、ローラ、ク

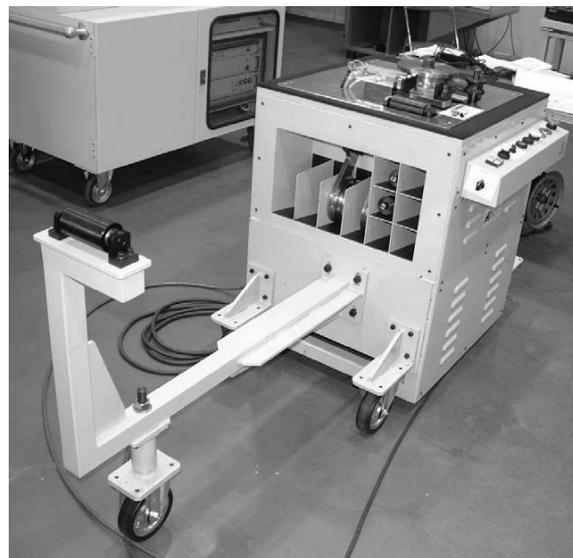


写真4 完成品外観



写真5 本体主要部

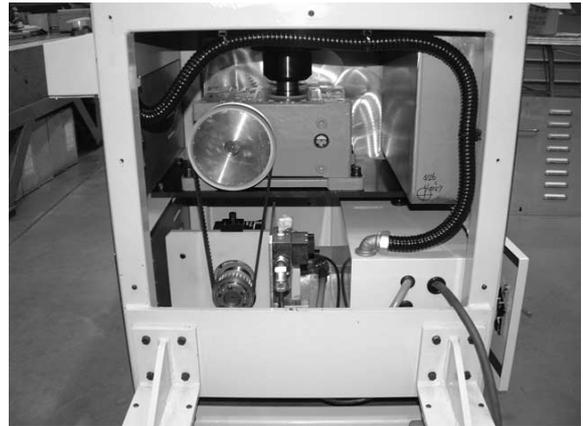


写真8 動力機構部

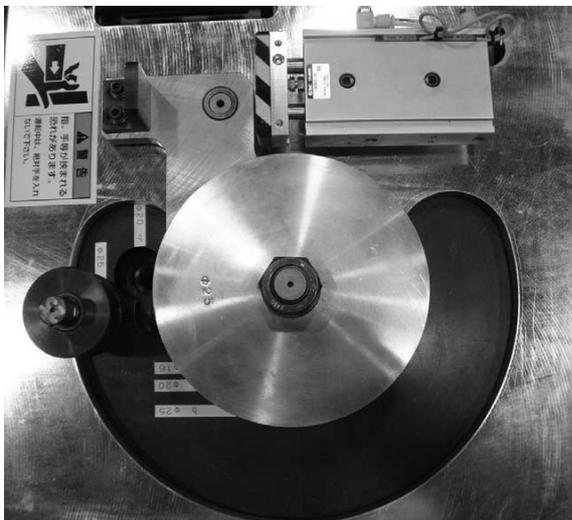


写真6 曲げ加工上面部



写真9 コントローラ外観



写真7 パイプをセットした状態

ランパーをセットする。

操作パネルで、径、曲げ角度を設定する。

クランプボタンで、パイプをクランプする。

起動スイッチで、自動曲げ加工する。

クランプボタンで、パイプをアンクランプする。

なお、装置は安全性を考慮して、フルプルーフ作用をするインタロック機構とし、稼動状態を示すパイロットランプ及び非常停止ボタンを設置した。また、安全作業を促す手・指挟まれ注意の警告シール貼付の配慮も行った。

・曲げ試験と装置の改良

1 パイプ円形部の撓み

曲げ加工後のパイプの断面の撓み、すなわちパイプ断面の真円度は、使用されるパイプが油圧用の配管であることから、それほど大きく問題にはならない。しかしながら、装置の設計と制作で述べた通り、(1)式の $R = 3 \times D$ を満たしていたにも関わらず、今回曲げ加

工したパイプの曲げ部が楕円上になり撓みが目測において認められたため、原因を検討した。

まず、下式により真円度を定義し、計測を行った。

$$\text{真円度 } s = (y - x) / D \times 100 (\%) \dots (3)$$

y : 加工後のパイプの垂直方向の直径
(加工後パイプの長径)

x : 加工後のパイプの水平方向の直径
(加工後パイプの短径)

D : 加工前のパイプ径 (円直径)

(3)式の定義による計測の結果、最も頻繁に使用する D= 16 のパイプにおいて、今回開発の NC パイプベンダで曲げ加工したパイプの真円度は10%程度であった。従来の手作業により曲げ加工したパイプについての計測を行ったところ、真円度として3%程度であり、従来方式が使用上問題ないことから、真円度3%以内を目標に改良を試みた。種々の原因を調査した結果、図8に示すように、パイプ材の半径より1mm程度大きく設計していたローラに原因があることが判明し、ローラの半径Rをパイプ半径に対し+0.05~+0.10に改良した。改良したローラを用い、曲げ試験を行い、真円度を計測した結果を、図9に示す。いずれの設定曲げ角度においても、真円度がほぼ3%以内となり、従来と同等な大きさで問題ない値となった。

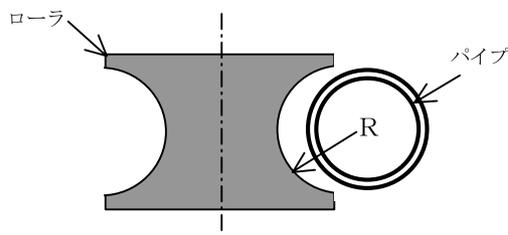


図8 ローラの改良

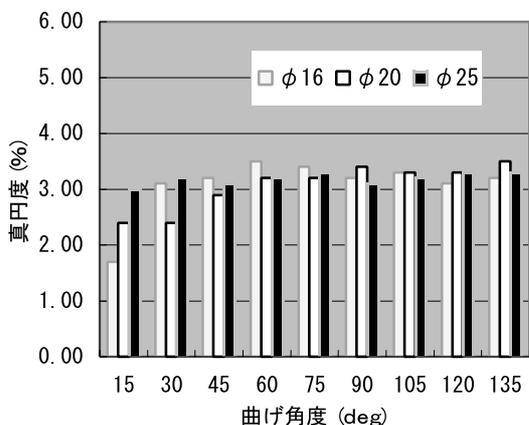


図9 曲げ角度と真円度

2 角度の補正

曲げ角度の設定は、下記理由による角度の補正を加えてコントローラ (PLC) に指示する必要がある。

- ・ 駒が回転スタート後、パイプに接触するまでの角度
- ・ 駒がパイプに接触後、パイプの円形断面が圧縮変形する角度
- ・ 曲げ加工を終了後、パイプが弾性変形で戻る角度 (スプリングバック量)
- ・ サーボモータから駒に回転力が伝達するまでのバックラッシュ及びメカニズム誤差による角度

実践的な NC パイプベンダに開発においては、それぞれの補正角度を吟味することはそれほど重要ではなく、これらトータルの補正角度を検出することが必要である。そこで、曲げ試験を行い、最初の設定値に対し、実測で得られたパイプの角度の差が最小となるように、繰り返し実験により補正角度を求めた。図10は最終的に求められた目標曲げ角度に対する実測値の差である。

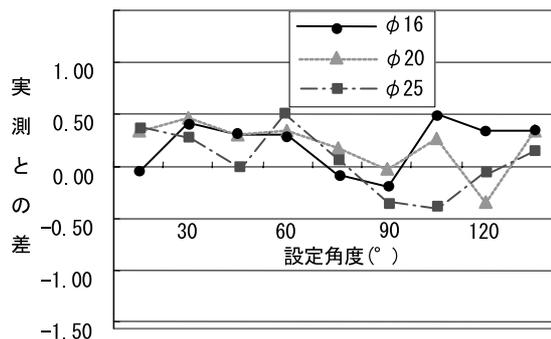


図10 設定角度と実測との差

写真10に曲げ加工した 16パイプにおける15 から135°まで、15°刻みの曲げ加工例を示す。

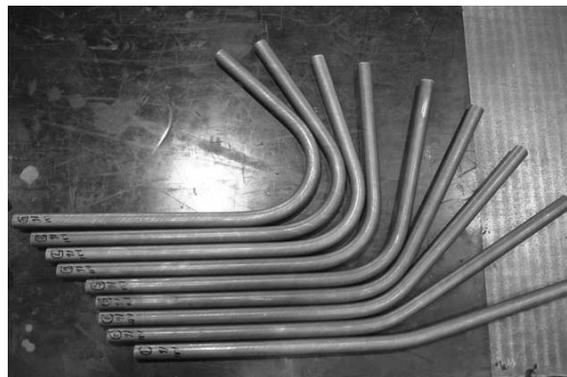


写真10 曲げ加工したパイプ

・自動化による効果と今後の課題

1 自動化による効果

従来の手動式に比べ、今回 NC パイプベンダーを開発したことで、表 3 に示す効果が得られた。

表 3 自動化の効果

項目	方式	手動式	自動化
		(ハンドベンダー)	(NC ベンダー)
作業時間	16	3分以上	1分以内
	20		
	25	作業不可	
曲げ精度		$\pm 1^\circ$	$\pm 0.5^\circ$ 以内
労力	16	2人作業	1人作業
	20		
	25	作業不可	

作業時間と曲げ精度

従来、熟練者が手動式で 16、20 のパイプを曲げ加工する作業時間は、おおそ平均的に 3 分以上要していた。この作業時間は曲げ精度に大きく関係し、 ± 1 以下を目標に曲げ加工する平均的な時間である。また、25 のパイプは従来の手動式では、前に述べた通り曲げ荷重が過大で、曲げ作業が不可能である。そこで、機械装置へパイプを設置する時は、2 本のパイプにエルボ等の継手を使用して接合していたため、非常に工数を要していた。

これに対し、今回開発した自動の NC パイプベンダーは、16～25 のいずれのパイプにおいても、熟練度に無関係に、作業時間を 1 分以内で、また曲げ精度は前項で述べた通り、 ± 0.5 以内で加工できるようになった。

労力

曲げ加工における曲げ荷重は大きく、従来は 2 人作業で行っていたが、今回の自動化により、1 人で作業が可能となった。

2 今後の課題

機械装置にパイプを組み付け時、時折、1 本のパイプに対して複数回曲げ加工を行う場合がある。このとき、曲げ部間の直線部寸法（図 11 の L 寸法）が手動式のパイプベンダーは簡易装置であるため、最低 120mm 程度であるのに対し、今回開発の NC パイプベンダーでは最低 180mm を要する。原因は NC パイプベンダー

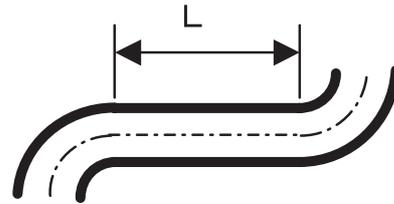


図 11 曲げ部間の直線距離

の設計が 16～25 までのパイプを 1 台で行うためである。この直線距離が 180mm 以下であることは、まれであるが、今後の検討事項である。

・総括

今回、NC パイプベンダーの開発により、曲げ加工を自動化したことで、加工時間の短縮、曲げ角度の高精度化、省力化を達成することができた。これにより、今後非常に効率化した鋼管曲げ加工を行うことができる。また、本装置を設計・製作する過程で、実践的なメカトロニクス技術（機械加工技術および制御技術）のレベルアップを図ることができた。

・謝辞

最後に、本研究を進めるにあたり、多大な協力をしていただいたスギヤマメカトロ株式会社 に深く感謝いたします。

[注]

(注 1) NTN 株式会社製

(注 2) スギヤマメカトロ(株)における実験値

(注 3) マキエース（安川電機株式会社製）の仕様値

[参考文献]

- (1) 不二越ハイドロニクスチーム、知りたい油圧、
ジャパンマシニスト、1994、p271 278
- (2) JIS ハンドブック、JISB2351、1997
- (3) 三浦宏文、メカトロニクス、オーム社、1996、p
2 10
- (4) 熊谷卓、自動化機構図解集、日刊工業新聞社、
1993、p71 152
- (5) 安土幸一郎、材料力学、コロナ社、1980、p97
101
- (6) 日経メカニカル別冊、メカ設計術シリーズ、日
経 BP 社、1991、p55 p71