

## 《特集：パイプの曲げ加工のいろいろ》

## 冷間曲げ加工法の基礎

＜配管用曲げ技術を現場的発想で基礎から解説＞

(株)山本水圧工業所 福村 卓巳

## 1. はじめに

流体の輸送手段としてパイプが使用されたのは、中国で使用された竹管が始まりとされ、以後幾多の改良を経て現在多種多用のパイプが製造されている。日本での鋼によるパイプ製造は1905（明治38）年呉海軍工廠が製造した艦艇装備用のものが最初であった<sup>(1)</sup>。当時このパイプを曲げる手段としては、砂又は松脂などを詰め加熱曲げを行っていたが、戦後まもなくアメリカから心金を挿入して冷間で曲げる方法が伝わり、それ以来曲げ技術が飛躍的に向上した。

パイプは同一重量なら剛性が大きく重量軽減につながることから自動車、建築、家具など多業種多種多用に使用されているが、本章では配管曲げに絞ってこの分野で一番多く使用されている冷間引き曲げ技術の基礎について解説する。

## 2. 曲げについて

## 2-1 曲げの基本方式

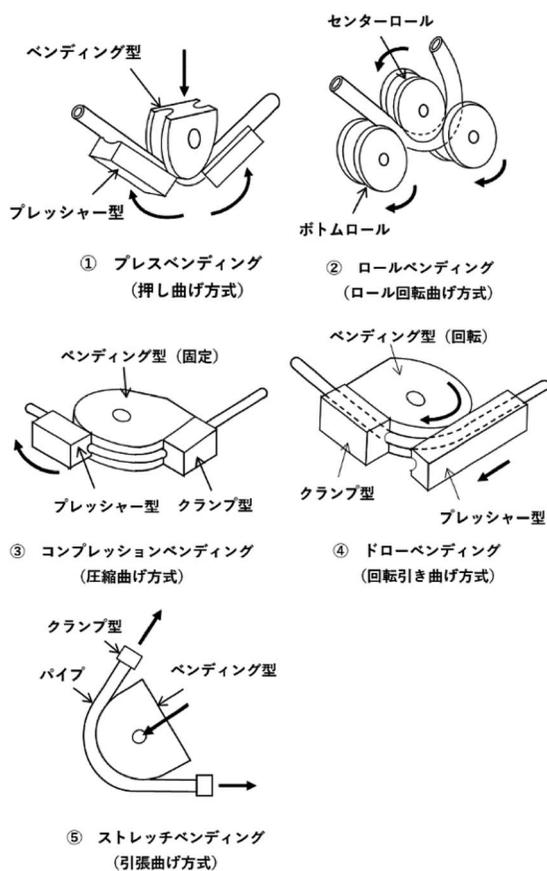
パイプの曲げ方法には応用を含めれば千差万別な方法があるが、ここでは基本の5方式について簡単に述べる（第1図参照）。

## (1) プレスベンディング

ベンディング型がプレスラムに取付けられ、プレッシャー型（ウィング型）が対峙してパイプを保持する。ラムの加圧力でパイプを押し下げ、プレッシャー型がベンディング型に沿いながら揺動しパイプが曲げられる。

## (2) ロールベンディング

2個の回転駆動付きローラーが対峙し、上下



第1図 曲げ方式の種類

可動ローラーの加圧により、モーメントが与えられ曲げられる。

## (3) コンプレッションベンディング

ベンディング型は固定されておりパイプはクランプ型によりベンディング型に固定され、プレッシャー型がベンディング型にパイプを押し

えつけるように冷いながら回転しベンディング型に巻き付けて曲げる。

(4) ロータリードローベンディング

ベンディング型、クランプ型共に回転しパイプはクランプ型によりベンディング型に固定されスライド式プレッシャー型で押えた後ベンディング型を回転し型に沿って引きながら巻き付けるように曲げる。

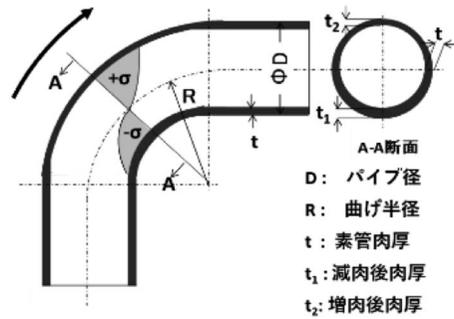
(5) ストレッチベンディング

材料の両端をチャック装置で掴み、長手軸方向に引張り力を加えながらベンディング型を押し付けベンディング型の形状を転写するように曲げる。

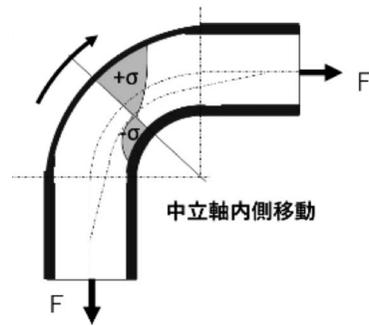
それぞれの手法の特徴を第1表にまとめる。

第1表 各曲げ方式の特徴

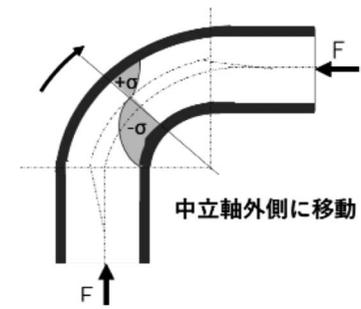
曲げ方式	特 徴
ロータリードローベンディング (回転引き曲げ方式)	1.押し曲げ、引き曲げ可能で汎用性が最も広い 2.小径から大径までと幅の広い曲げができる 3.厚肉、薄肉パイプの極小R(1.5DR以下)精密曲げが可能 4.心金を使用すればパイプのへん平化、しわを防止できる 5.アルミ押し出し材や異形パイプ曲げにも適用できる 6.立体曲げに適している
コンプレッションベンディング (圧縮曲げ方式)	1.マシンの構造が比較的簡単で安価である 2.作業性は良いが小R曲げには不向き 3.家具等対称物を曲げるのに適する(左右同時曲げ加工)
プレスベンディング (押し曲げ方式)	1.構造が最も簡単で手軽なため現場配管用として使用される 2.自動化すればパイプの扁平が大きいが生産性は良い
ロールベンディング (ロール回転曲げ方式)	1.同一金型で任意に曲げ半径が決定できる 2.パイプをはじめ各種型鋼を大Rで曲げるのに適する 3.円形、スパイラル状、アーチ状に曲げることができる 4.ロール金型3点ですみ金型費が安価
ストレッチベンディング (引張り曲げ方式)	1.複合R形状(楕円、放物線)の曲げに適している 2.スプリングバックが小さく精密曲げが可能 3.航空機の機体など付加価値の高いパーツ加工に適している



第2図 通常曲げ



第3図 引張曲げ



第4図 押し曲げ

2-2 パイプ曲げの基本

第2図に示すようにパイプを曲げれば外側では引張応力により減肉し、内側では圧縮応力により増肉するので、当然応力±0となる点が存在する。この点を連ねた線を中立軸 (Neutral axis) と呼ぶ。中立軸は圧縮と引張の抵抗違いでパイプ中心線より少しずれるが、値は小さく中立軸とパイプの中心は一致するとしてよい。曲げと同時に外部より引張力を加えると、中立軸が第3図に示すように内側に移動し、外側の肉厚部に更に引張応力が加わる。他方内側の肉

厚部にも引張応力が加わり圧縮応力は、引張応力分軽減され座屈応力が小さくなる。その結果座屈応力にて発生するパイプ内側のしわが出難くなる。逆に曲げと同時に外部より圧縮力を加えると、中立軸が第3図に示すように外側に移動し、外側の肉厚部に圧縮応力が加わり引張応力は圧縮応力分軽減される。その結果減肉を小さくすることが出来る。他方内側の肉厚部にも圧縮応力が加わり圧縮応力は更に増大し増肉す

る。これらの現象を使い分けることで、目的の形状に曲げることが出来る。

### 2-3 材料の伸びと曲げ半径の関係

材料によって伸び率が違い限界曲げ半径が変わる。伸びと曲げ半径の関係は第2図において曲げ半径Rの周長は変化せず、曲げパイプ径Dの外側周長が最大伸びとなる故伸び率 $\varepsilon\%$ は式(1)となる。例えば口径Dのパイプを曲げ半径 $R=2D$ で曲げるとすれば

$$\varepsilon = \frac{D}{2R} \times 100 \quad \dots(1)$$

計算上では25%の伸びが必要であるが、実際はタンゼントポイント（曲げ接線位置）でメタルフローが断絶する訳ではなく、曲げ始め及び曲げ終わり前後より一部材料が取り込まれるのと、へん平の影響を受け計算値より値は小さくなる。最近の配管省スペース化要求に応得するため、曲げ半径が小さくなっており、1D曲げも行われるようになってきた。この場合は50%の伸びが必要となり不足するので、ブースター装置（後述する）を使用し減肉を防止しながら曲げを行うケースが増えてきた。

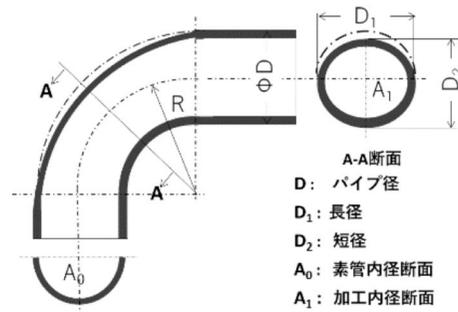
### 2-4 曲げの品質評価

パイプ曲げの品質評価は内外面に傷がないことの他に、へん平率（Flattening）又は、楕円化率（Ovality）減面率（Area reduction）、減肉率（Wall thinning）としわ（Wrinkles）の発生有無などで行われるので説明する。

#### (1) へん平率又は楕円化率

へん平率と楕円化率は同意語で、どちらも使用されているが本章ではへん平率で記載する。

2-2節で述べたように曲げパイプ外周には引張力が作用し、円弧が直線になろうとして第5図のように楕円状にへん平化する。どの程度変形したかを变形後の長、短径の差と素管径との割合で表され式(2)となる。へん平率は曲げ半径が小さい程、肉厚が薄い程大きくなるが、へん平率を上げると減肉率が大きくなるので注意が必要である。



第5図 へん平化

$$\eta_o = \frac{D_1 - D_2}{D} \times 100 \quad \dots(2)$$

ここで、曲げた後 hidroforming など二次加工を施す場合は、へん平率を意図的に大きくし減肉を防いだ上で二次加工を行うことがある。ベンダーで曲げる場合は、構造的に金型で全面拘束されないので、へん平率をコントロールするのは難しい。へん平率を上げなければならない時は、心金やワイパーダイ（後述する）等金型の組合せを工夫する必要がある。へん平率は一般的に美観を重視する製品で5%以下、流体輸送に使用する製品で10%以下だが客先と合意しなければならない。

#### (2) 減肉率

圧力配管の肉厚は曲げ後の減肉率を見込んで厚くして決められる。そのため多量生産品又は直管長さが非常に長い製品は、減肉率により重量が大きく左右される。減肉率 $\eta_t$ は肉厚係数 $\alpha$ と曲げ係数 $\beta$ で決まり一般的には式(3)<sup>(2)</sup>となり、薄肉小曲げ半径のときは式(4)<sup>(2)</sup>になる。これらをグラフにすると第6図のようになり肉厚係数、曲げ係数共に小さい程大きくなる。

$$\eta_t = \frac{t - t_1}{t} = \frac{0.5}{(\beta + 1)} \quad \dots(3)$$

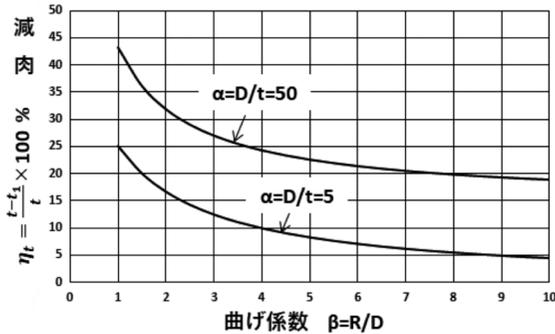
$$\eta_t = \frac{t - t_1}{t} = \frac{0.15\beta + 0.508}{1.015(\beta + 0.5)} \quad \dots(4)$$

ここで  $t$ : 素管肉厚  $t_1$ : 減肉後肉厚

$$\alpha = \frac{D}{t} \quad \beta = \frac{R}{D}$$

(3) 減面率 (Area reduction)

減面率は通常問題にならないが、ボイラーチューブなど小曲げ半径で曲げ数が非常に多い場合、減肉を防ぐため通常ブースター装置を付けて押し曲げを行う。



第6図 曲げ半径に対する減肉率

そのため曲げ内側の増肉が増え内径断面が小さくなり圧力損失が増え重量に影響する。減面率 $\eta_A$ は式(5)で表される。

$$\eta_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad \dots(5)$$

ここで $A_0$ : 素管面積  $A_1$ : 曲げ後の面積

3. 曲げトルク

曲げトルクの計算式は心金の摩擦、潤滑、加工硬化、へん平などを伴うため正確に解くのは難しい。文献にもいろいろな式が紹介されているが、本文では日本塑性加工学会編チューブフォーミングより引き曲げにおける実験式式(6)<sup>(2)</sup>を紹介する。

$$T = \mu Z \sigma_b^3 \sqrt{\frac{D}{R}} \quad \dots(6)$$

ここで、 $D$ : パイプ外径  $d$ : パイプ内径  
 $R$ : 曲げ半径  $\sigma_b$ : 引張強さ

$Z$ は肉厚 $t$ に対して次の値をとる。

$t > 0.06D$ のとき  $Z = 0.1(D^4 - d^4)/D$

$t < 0.06D$ のとき  $Z = 0.8t(D - t)^2$

また  $\mu$ は次の係数である。

$\mu = 1.0$  (心金なし)

$\mu = 2.0$  (プラグ心金、潤滑良好)

$\mu = 3.0$  (ボール心金、潤滑良好)

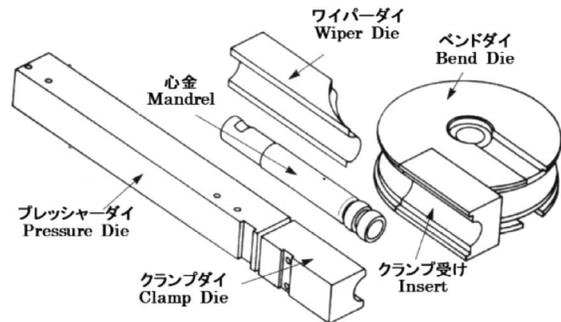
$\mu = 5 \sim 8$  (心金使用、潤滑不良)

4. 曲げ金型

4-1 金型の種類

ドロベンディングの全金型装備は第7図に示す。Bend die、Clamp dieとPressure dieは必須であるが、Wiper dieとMandrelについては曲げの難易度に応じて使い分ける。

- ① 曲げ金型 (Bend Die) : 溝の断面は通常半円であるが、楕円形としパイプを变形させ潰れ難くすることで、心金をなくし作業性を高める方法も取られる。
- ② クランプダイ (Clamp Die) : パイプが滑らないようクランプと受けダイ (Insert) とで挟み込み曲げ金型に固定する。クランプ長さが短いとパイプが滑りしわの原因となるので注意が必要である。曲げ半径と肉厚によりおおよその基準があるので第2表に記載しておく。
- ③ プレッシャーダイ (Pressure Die) : 曲げ時パイプの反力を受け止めると同時に、パイプにフープ応力を与えへん平としわを防止する。スライド式プレッシャーの長さは曲



第7図 金型全装備図

第2表 クランプダイ基準長さ D=パイプ外径

曲げ半径	パイプ肉厚(mm)	クランプダイ長さ
1D	0.9以下	4D
	0.9~1.65	3D
	1.65以上	2D
2D	0.9以下	3D
	0.9~1.65	2D
	1.65以上	1.5D
3D	1.65以下	2D
	1.65以上	1D

げ角度に対する周長長さ+2~3D必要であり長いものになる。このため干渉領域が問題となる場合があり、このような場合はリトラクトプレッシャーダイにするのがよい。

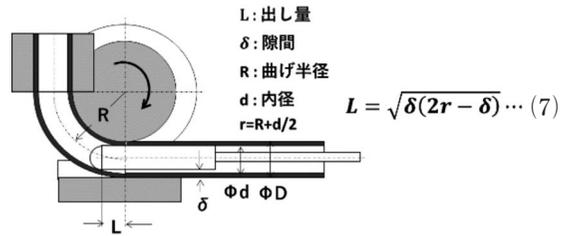
④ ワイパーダイ (Wiper Die) : 曲げ金型曲率とパイプの接線 (Tangent point) 間にできる隙間をワイパーダイで埋めてしわを防止する。ワイパーダイの先端は第8図に示すように薄くなり、加工が難しくなる。そのため先端の良否により曲げの良否が左右されることがある。

⑤ 心金 (Mandrel) : パイプの内部に挿入しへん平力の反力でパイプ内側肉厚を押さえてしわの発生とへん平を防止する。第8図に示すように心金にはいろいろな種類がある。プラグ式は先端が球面で最も簡単。フォーム式は曲げ外側肉厚の内面曲率に沿う曲面を有する。1ボール式は自在首振りのボールが埋め込まれており、比較的難易度の高い領域で使用する。マルチボール式は難易度に応じてボールの数を増やして使用する。ラミネート式は主に角管などに使用されスプリング板を重ねて、パイプと一



第8図 心金の種類

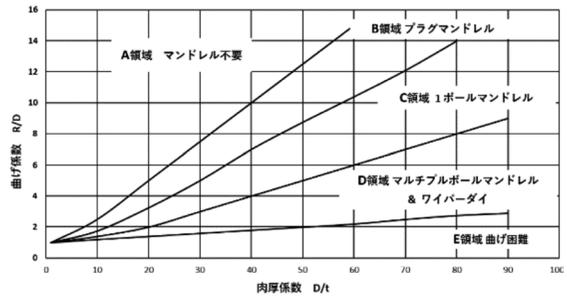
緒に曲げてへん平を防ぐ。ケーブル式はボール式のピッチが大きい欠点を補う方式で、超薄肉の曲げなどに使用される。パイプ内径と心金の隙間はへん平と減肉に大きな影響を与えるが、心金の出し量で調整を行い、出し過ぎると減肉し、引き過ぎるとへん平が大きくなる。幾何学的に求めた出し量の計算は式(7)で行う (第9図参照)。



第9図 マンドレル出し量

#### 4-2 金型の選択

金型の選択は曲げ係数と肉厚係数のパラメータでグラフ第10図と第3表の金型選定表により選択する。上記金型選定は経験によるもので



第10図 金型選定グラフ

第3表 金型選定表

肉厚係数	曲げ係数							
	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	5
0	F	P	P	P	P	-	-	-
5	F	F	P	P	P	-	-	-
10	F	F	F	F	P	P	-	-
15	M1W	M1W	M1	M1	P	P	-	-
20	M2W	M1W	M1W	M1	F	F	P	-
25	M3W	M2W	M1W	M1W	M1	F	F	-
30	M3W	M3W	M2W	M2W	M1W	M1	F	F
35	M3W	M3W	M3W	M2W	M2W	M2W	M2	M1
40	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	M2
45	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	M2W
50	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	M2W

注記 P:プラグ心金 F:フォーム心金 M:ボール心金 W:ワイパーダイ 数値はボールの数を表す  
 灰色シェルスは真鍮、銅管はワイパー不要

1. タンゼントポイント近辺内側にこぶが発生

原因  
パイプが滑り曲率が変化し周長が長くなり座屈する

対策

- 1) クランプダイの力量を上げる
- 2) プレッシャーダイの力量を下げる
- 3) クランプダイの滑り止め溝を修正又は追加
- 4) クランプの長さを長くする

2. パイプが切れる又はこぶが発生

原因  
マンドレルの出し過ぎで局部伸びする

対策

- 1) マンドレルを下げる
- 2) プレッシャーダイの力量を下げる
- 3) 伸びの良いパイプに変更又は焼鈍

3. パイプのへん平が大きい

原因  
マンドレル引き過ぎのため真円が保てない

対策

- 1) マンドレル位置前進
- 2) プレッシャーダイの力量を上げる
- 3) ボールマンドレル使用

4. 曲げ内側にしわ発生

原因  
パイプとマンドレルの隙間が大きくなり座屈する

対策

- 1) マンドレルの径を太くし隙間を小さくする
- 2) プレッシャーダイの力量を上げる
- 3) マンドレルを前進させる

5. タンゼントポイント後方にしわ発生

原因  
タンゼントポイント後方に隙間があり座屈する

対策

- 1) ワイバーダイを取り付ける
- 2) プレッシャーダイの力量を上げる
- 3) ワイバーダイを使用の場合はワイバーダイを前進させる

6. パイプに摺り傷、しわ発生

原因  
芯ずれにより金型同士の目違いが起こりパイプ接触面に隙間ができる

対策

- 1) ベンドダイの芯振れを修正する
- 2) クランプダイ、プレッシャーダイの位置ずれを調整

7. パイプの外周部がへん平又はこぶ発生

原因  
ボールの首振りか浅いかピッチが長い又は材料が柔らかく局部伸びが駆動する

対策

- 1) ボールの傾斜角を深くする
- 2) ボールのピッチを縮め数を増やす
- 3) 硬い材質のパイプに変更
- 4) プレッシャーダイの力量を下げる

8. パイプ中心に傷、段差発生

原因  
溝径違い、芯の調整不良による目違い

対策

- 1) ベンドダイの溝を大きくする
- 2) プレッシャーダイ、クランプダイの芯高さ調整
- 3) パイプ径の寸公差チェック

9. パイプにツールマークが付く

原因  
プレッシャーの押し過ぎで周方向に座屈する

対策

- 1) プレッシャーダイの力量を下げる
- 2) クランピングプラグを使用する
- 3) パイプ径の寸公差チェック

10. タンゼントポイント近辺外側にこぶが発生

原因  
ワイバーダイ先端破損、調整、及びクランプ受けつなぎ目不良等により隙間が出来ている

対策

- 1) ブースターの力量を下げるか曲げ角度に応じて力量調整
- 2) ワイバーダイの再調整
- 3) プレッシャーの力量を上げる
- 4) クランプのつなぎ目チェック

11. プレッシャー側にこぶ発生

原因  
しごかれた肉厚が吸収されず累積され座屈しこぶとなる

対策

- 1) 曲げ後半でブースターの力量を下げるか曲げ角度に応じて調整
- 2) ワイバーの再調整
- 3) プレッシャーの力量を下げる
- 4) ベンドダイに当たりを付けて直す

12. パイプがねじれる

原因  
プレッシャーダイの芯がベンドダイの芯より高いため上下当たり面の摩擦力で伸びに差がある

対策

- 1) プレッシャーダイの高さをベンドダイを基準にして少し低く目に調整する

第11図 曲げトラブル一覧

材料の機械的性質、ブースターの有無など考慮していないので目安である。

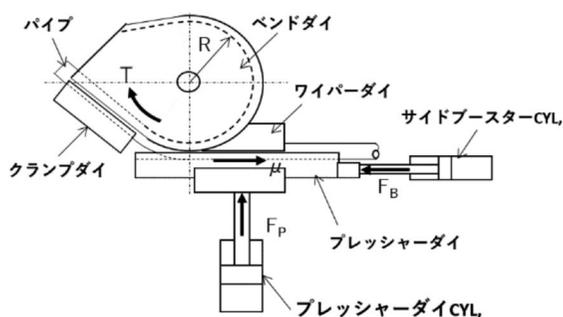
## 5. ブースター装置

近年省スペース化で曲げ半径が小さくなっており、ブースター装置を使用して曲げるケースが増えている。ブースター装置にはプレッシャーダイを外部より押し込むサイドブースタ方式(第12図)とパイプを直接クランプして押し込むクランプ方式(第13図)の2種類がある。

それぞれの特徴は

### (1) サイドブースタ装置

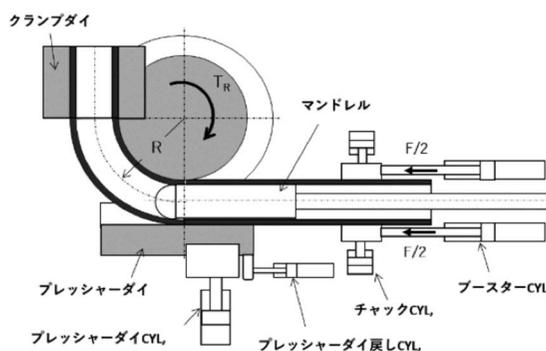
サイドシリンダでプレッシャーダイを押し込むので引張応力範囲のみに圧縮応力が作用し、減肉と増肉共に抑制される利点がある。反面圧縮力はプレッシャーダイとパイプの摩擦力で決まるため、目荒らしなどの摩擦力を増やす工夫が必要であるが装置が簡単で作業性が良いため多量生産に向いている。



第12図 サイドブースター

### (2) 管クランプブースター

パイプを直接クランプしパイプ自身を押し込むため、引張応力領域、圧縮領域共に大きなブースター力が伝達され、減肉抑制効果が大きい。反面増肉も大きくなるため減面率に注意が必要である。高圧配管など減肉を重視するボイラーチューブや小R曲げで伸びが不足する曲げに使用される。ブースターシリンダーに背圧を加えればブレーキ力となりストレッチ曲げも可能である。



第13図 クランプブースター

## 6. 曲げのトラブル

パイプを曲げる難しさは金型で全面拘束されることなく塑性を行わなければならないところにある。拘束されない部分は気まま勝手に動く傾向にあり、これをわずかな金型でコントロールを行わなければならない、いろいろなトラブルが起る。主な現象と対策を以下に列記する。

## 7. おわりに

種々の曲げ手法より、最も精密に曲げられるドロウベンディングを主として紹介した。一概に、曲げ加工と言っても近年は様々な用途により要望が異なり尚且つ、難度の高い曲げ仕様に応じた曲げ手法を用いて曲げているが、本稿では曲げの基礎的な事項を著者の経験も交えて記載した。したがって配管技術の購読の専門諸氏には易しい内容となったが容赦願いたい。

### <参考文献>

- (1) 下川義雄・著：日本鉄鋼技術史
- (2) 日本塑性加工学会編、チューブフォーミング2019

### 【筆者紹介】

福村卓巳  
 (株)山本水圧工業所 顧問