

冷間曲げ加工法の基礎

株式会社 山本水圧工業所

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。

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パイプの扁平を防ぐ技術として芯金を挿入して冷間で曲げる方法が伝わり、1955年頃からの経済の急激な発展と共に、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、造船、家電など多業種多種多用に使用され曲げ技術が飛躍的に向上しました。

弊社も、水圧試験機等でパイプ素材を扱うことが多かった事よりパイプベンダーの製造販売を開始し時代に合うベンダーを目指し、手動ベンダーからNCベンダー(1968年)に開発して販売致しました。

本章では配管曲げ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。

パイプとチューブの違いは？

パイプ …… 物質(液体、気体、固体)を輸送することが目的である各種配管関係の管をさし、実際の寸法とは異なる公称寸法 (NOMINAL SIZE) で呼ばれる。
又、肉厚はスケジュール(SCHEDULE) で表示されるもの。

(例) 配管用炭素鋼鋼管 SGP(STEEL GAS PIPE) 25A(1B)
 圧力配管用炭素鋼鋼管 STPG 370 -32A(1-1/4B) × Sch80 42.7 O.D

チューブ …… 管の内外で熱交換することを目的としたり、機械による切断切削加工を施し、機械構造用、土木建築関係の一般構造用に使用されるもの。
外径又は肉厚は実数値 (ACTUAL SIZE) で呼称される。

(例) ボイラー熱交換器用炭素鋼鋼管 STB(STEEL TUBE BOILER)
 機械構造用炭素鋼鋼管 STKM(STEEL TUBE KOZO MACHINE)
 配管用ステンレス鋼鋼管 SUS-TP(STEEL USE STAINLESS TUBE,PIPE)

欧米諸国では区別して呼ばれベンダーもTUBE又はPIPE BENDERとして区別される。
日本では明確な区別はなく一般に総称してパイプと呼んでいる。

STPG-圧力配管用炭素鋼鋼管の種類や表示記号等

圧力配管用炭素鋼鋼管の種類には、STPG370 と STPG410 の2種類があり「呼び径×呼び厚さ」のA又はB公称で表記される。国内では1分、2分などと呼ぶ場合もあり、さらに亜鉛めっきの有無によって名称が変わりそれぞれ以下のように表される。

例：A公称 6A×Sch80 B公称 1/8B×Sch80

分公称 B公称で表す配管口径を分母を8にした場合の表し方

例 1/2 B は4/8 B となり、その分子をとって4分と云う。

スケジュール番号 (Sch.No.) とは？

$$Sch\ No = \frac{\text{使用圧力}(P)}{\text{許容応力}(\sigma_a)} \times 1000$$

黒管と白管

黒管 … 亜鉛めっきを行わないSTPGパイプ

白管 … 亜鉛メッキを行ったSTPGパイプ (STPG -ZN)

製造方法を表す記号

圧力配管用炭素鋼鋼管の製造方法には板を巻いて溶接する電縫鋼(ERW)とマンネスマンプラグミル方式で製造するシームレス鋼管(Seamless Pipe)の二種類があり、それぞれ熱間又は冷間で仕上げられる。

製造方法を表す記号

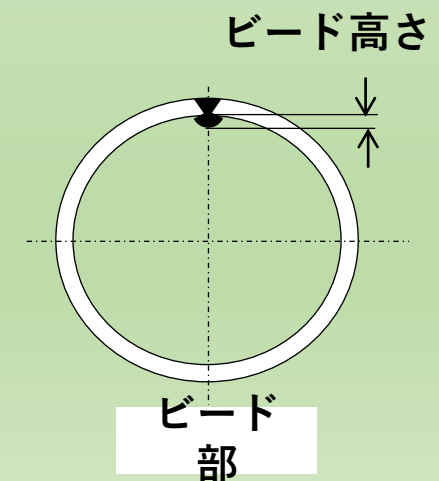
継目無し : S 電気抵抗溶接 : E 通常 S管、E 管と呼ぶ

仕上方法を表す記号

熱間仕上げ : H 冷間仕上げ : C ・電気抵抗溶接のまま : G

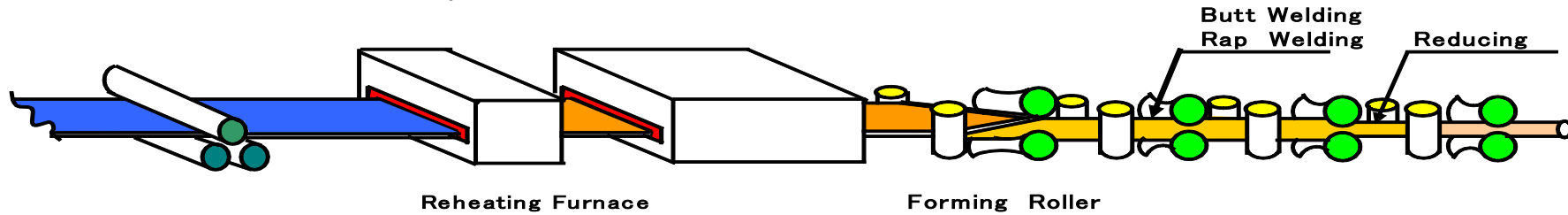
例 : 熱間仕上げ継目無し鋼管STPG370 → STPG370-S-H

電縫鋼管は肉厚均一であるが、溶接ビード部の残留応力、高さが、又、シームレス鋼管は偏肉があり、曲げ形状に影響を与えるので注意

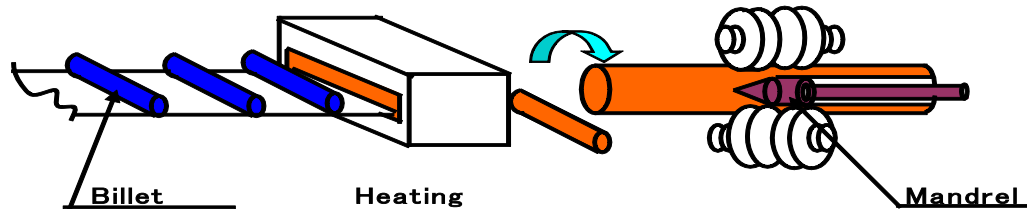


パイプ製造方法例

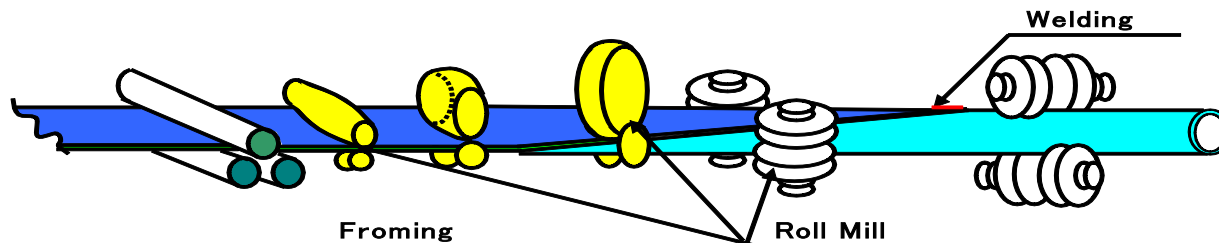
鍛接管の製造方法 熱間方法
 突合せ鍛接方法 Butt Welded
 重ね鍛接方法 Lap Welded



シームレス管の製造方法 (Mannesmann方式) 熱間方法



ERW管の製造方法 冷間方法



その他代表的な加工方法

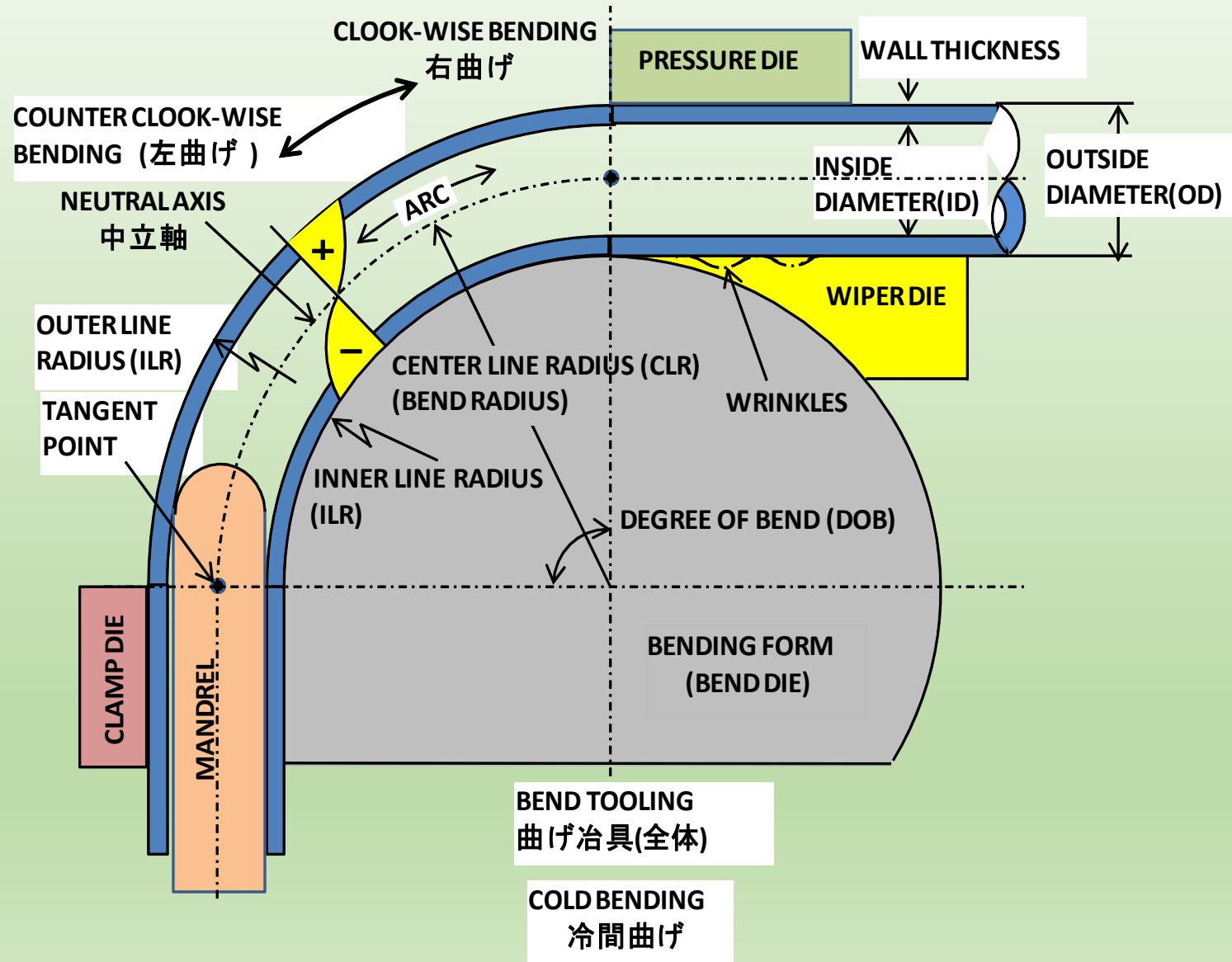
スパイラル製造方法 溶接
 大径管に適している、80 inch

UOE製造方法 溶接
 20~60 inch

熱間押し出し製造方法
 SUS.アルミ、銅管加工、小径管

ロールベンディング製造方法 溶接
 大径厚肉やタンクの製造
 数メートル径、100mm肉厚可

ベンダーで使用する主な用語

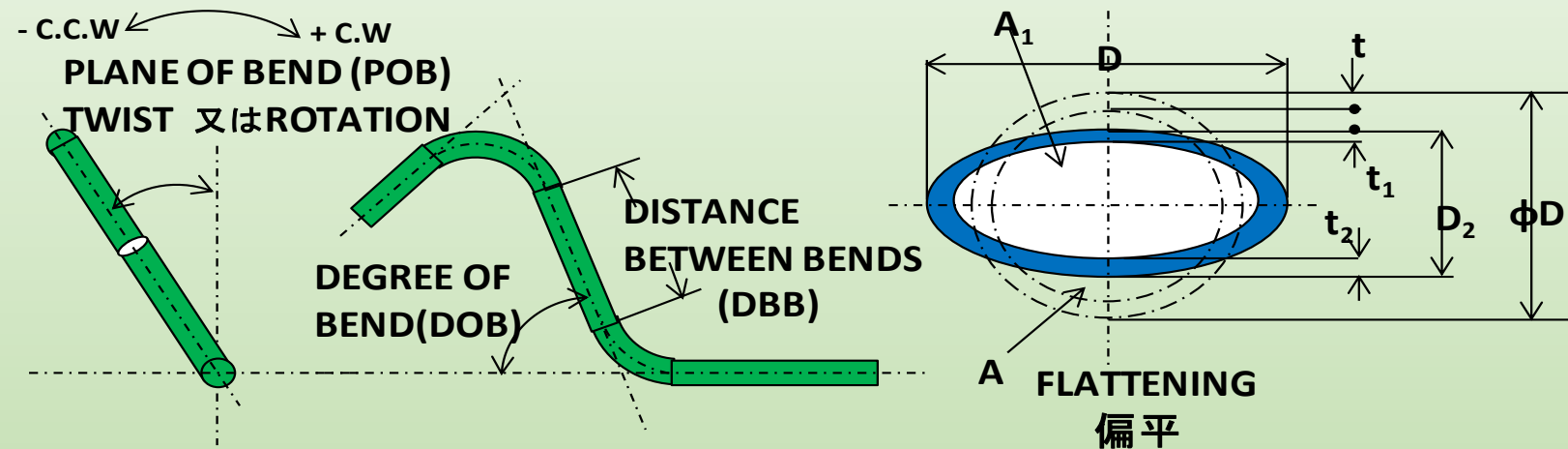


製造方法を表す記号

	用語	日本語の対訳	用語の意味
1.	ARC	円弧長	曲げの曲線部の長さ
2.	BEND RADIUS	曲げ半径	曲率の中心点からパイプの中心軸線までの長さ、通常パイプ外径の倍数にて表示される (R/D)
3.	BENDER	曲げ機	直線の材料を曲げ成形できる機械
4.	CENTER LINE RADIUS(CLR)	曲げ半径	BEND RADIUS と同じ
5.	COLD BENDING	冷間曲げ加工	冷間加工による曲げ
6.	DEGREE OF BEND(DOB)	曲げ角度	曲げ部における角度
7.	DISTANCE BETWEEN BENDS(DBB)	曲げ間長さ	隣接した曲げと曲げとの間の直線部の長さ (CNCベンダーでは送り長さという)
8.	FLATTENING	扁平	パイプの断面部の変形
9.	INSIDE DIAMETER(ID)	内径	パイプの断面内径の寸法
10.	INNER LINE RADIUS(ILR)	内側の曲げ半径	曲げ半径よりD/2を差引いた寸法
11.	NEUTRAL AXIS	中立軸	パイプ曲げ時、引張りも圧縮もされない部分
12.	OUTSIDE DIAMETER(OD)	パイプ外径	パイプ断面の外径寸法
13.	OVALITY	楕円化	パイプの断面部の変形
14.	PIPE RATIO	肉厚比	ODと肉厚との比率 (D/t)

	用語	日本語の対訳	用語の意味
15.	PLANE OF BEND(POB)	傾転角度	複数回曲げられたパイプの曲げ平面の相違、変化 (TWIST又はROTATION)
16.	SPRINGBACK	弾性	曲げ前後の角度の差
17.	TANGENT POINT	接点(接線)	曲げが始まり又は終了するポイント
18.	WALL THICKNESS	肉 厚	パイプの材料の板厚
19.	WALL FACTOR	肉 厚 比	ODと肉厚との比率 (PIPE RATIO)
20.	WALL THINNING	肉厚減少	曲げ成形後の肉厚の減少量又は比率
21.	WRINKLES	し わ	曲げ中にパイプの内表面に発生する座屈、うねり
22.	BEND TOOLING	曲 げ 治 具	曲げに用いられる金型(以下のもの
23.	BENDING FORM (BEND DIE)	曲 げ 型	パイプに曲率を支える成形型
24.	CLAMP DIE	クランプダイ	曲げ型にパイプを固定させる締め型
25.	PRESSURE DIE	プレッシャーダイ	曲げ時のパイプ反力を受ける圧力型
26.	MANDREL	芯 金	パイプの偏平を防ぐプラグ
27.	WIPER DIE	ワイパーダイ	パイプのシワを防止するシワ取り型
28.	CLOCK-WISE BENDING	右 曲 げ	ベンダー本体上面からみて 時計回りの軸回転の曲げ方法
29.	COUNTER CLOCK-WISE BENDING	左 曲 げ	反時計回りの回転の曲げ方法

曲げに必要な重要パラメーター数値



PIPE RATIO (肉厚比) = D/t

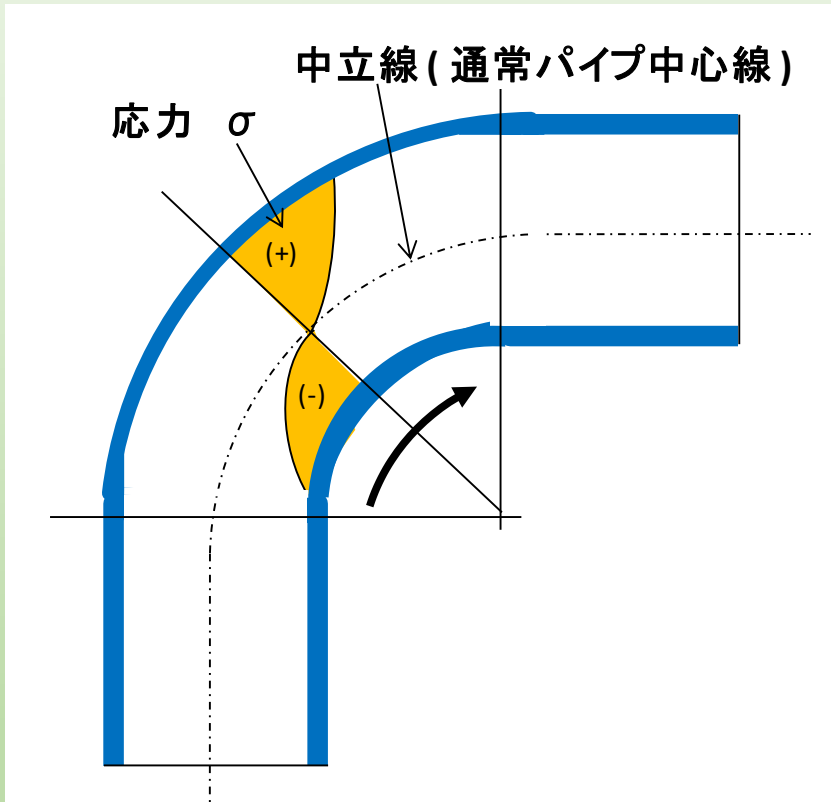
BEND RADIUS RATIO (曲げ係数) = R/D

WALL THINNING (減肉率) = $(t - t_1)/t \times 100$

OVALITY (橢円化) = $(D_1 - D_2) / D \times 100$

AREA RATIO (減面率) = $(A - A_1) / A \times 100$

中立軸 (NEUTRAL AXIS) とは？

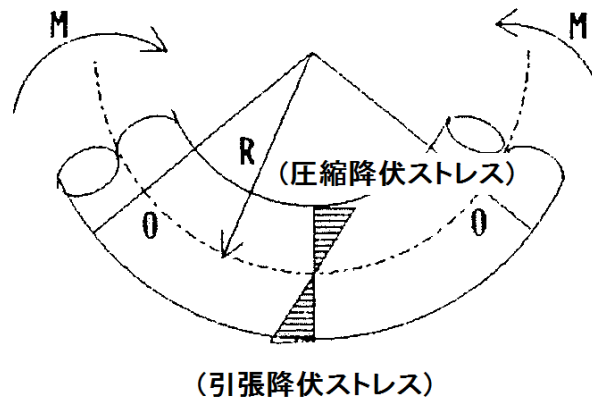


● **中立軸とは**

パイプを曲げると アウトラインは引張応力 (+)
インラインは圧縮応力 (-)

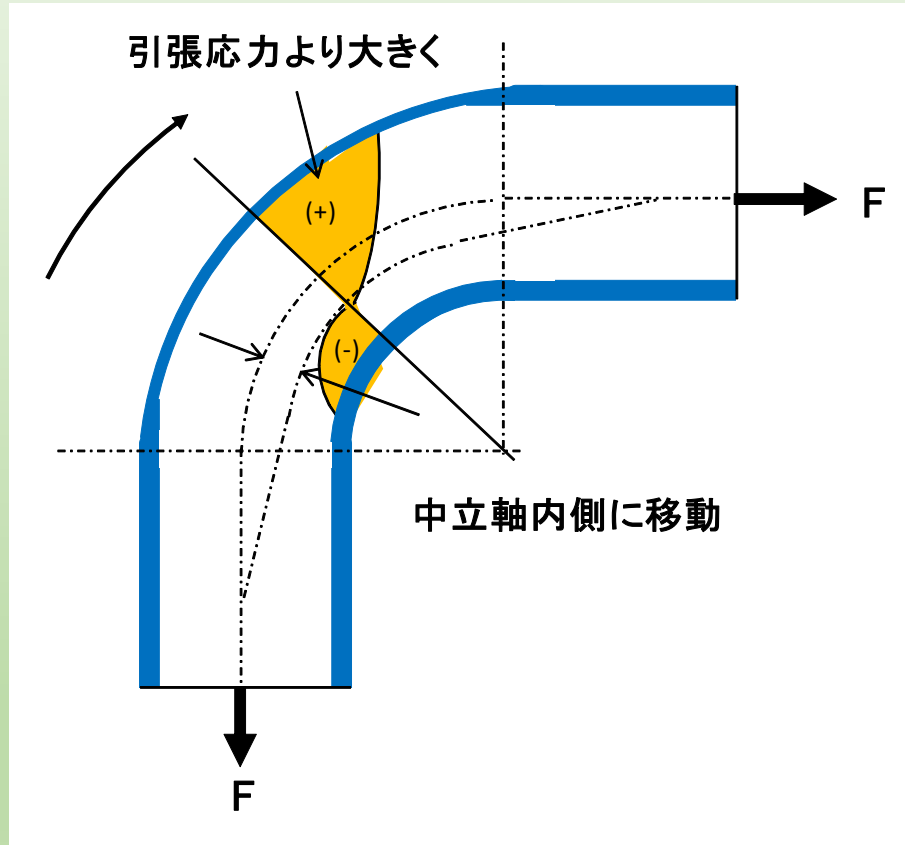
応力 $\sigma=0$ の位置が中立軸と呼ぶ

純モーメントで曲げた状態ではパイプの中心軸と一致する。



【 管に掛かる曲げの力 】

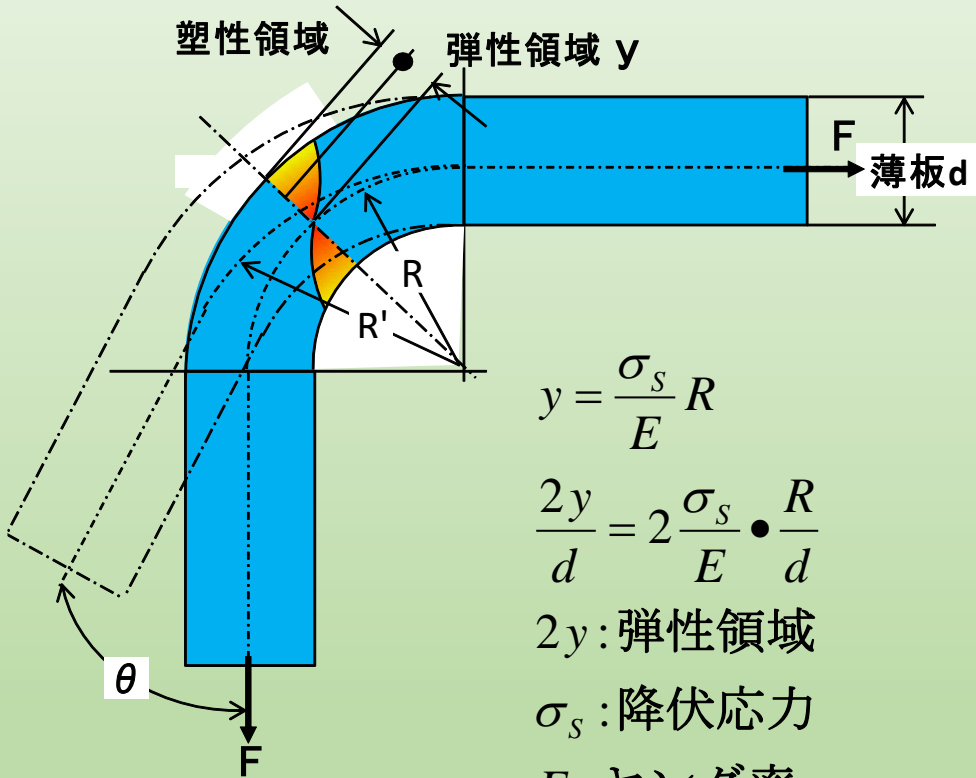
中立軸が曲げに及ぼす影響



パイプに引張力を加えて曲げればパイプに加わる引張応力は大きくなり、中立軸が内側に移動し中立軸から外側までの距離が長くなりより伸ばされることで減肉も大きくなる。その反面圧縮応力(座屈応力)は同様理由で小さくなりしわが出来難い曲げが可能となる。

そのため美観を重視する製品に応用される

薄板に引張力を加えて曲げる場合



$$y = \frac{\sigma_s}{E} R$$

$$\frac{2y}{d} = 2 \frac{\sigma_s}{E} \cdot \frac{R}{d}$$

2y: 弾性領域

σ_s : 降伏応力

E: ヤング率

R: 曲げ半径

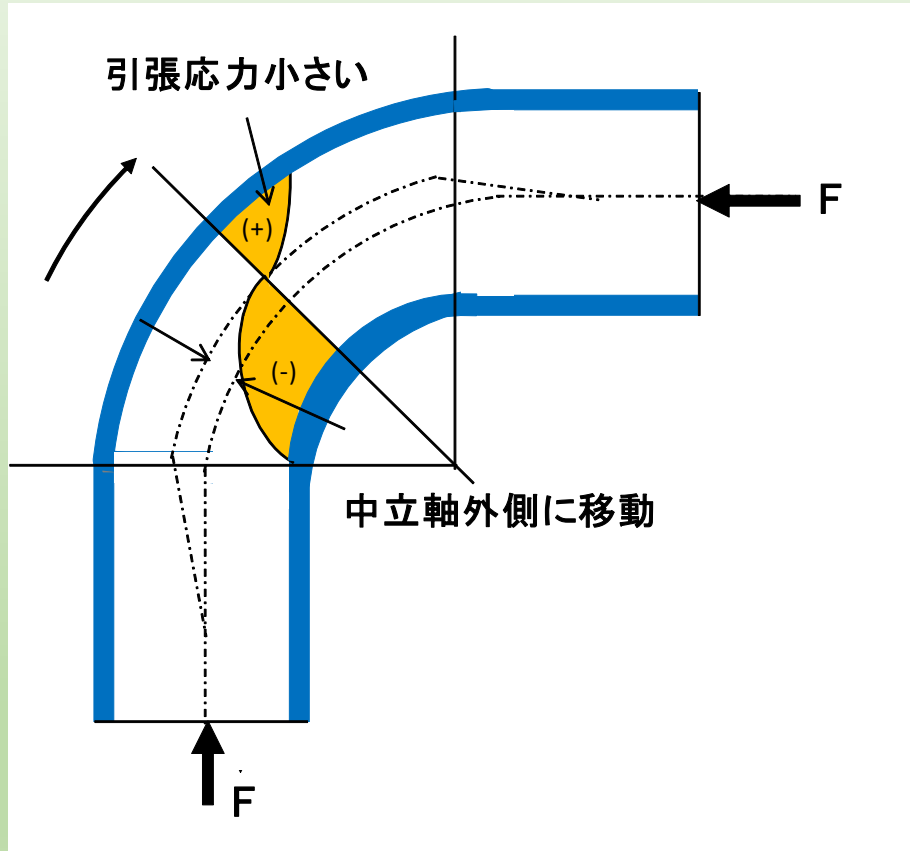
d: 板厚又は管径

薄板を曲げれば中立軸からアウトラインまでの距離が短いため、ひずみが小さく大きな弾性領域が残る。特に曲げRが大きい場合はこの傾向が大きく、スプリングバックが非常に大きくなる。このような場合引張力を加え中立軸を内側に移動すれば、弾性領域を小さくできスプリングバックの小さい曲げができる。極端例としては中立軸を内側R以下に合わせすることも行われている。この理論で曲げるのがストレッチベンダーである。

鋼板及び鋼管の場合の弾性ひずみ部分の幅

R/d	2	5	10	15	20	100
2y/d × 100 (%)	0.6	1.5	3	4.5	6.0	30

パイプに圧縮力を加えて曲げる場合



パイプに圧縮力を加えて曲げればパイプに加わる圧縮力が増大し、中立軸が外側に移動し中立軸から外側の距離が短くなり引張応力が減る。その結果減肉を小さくできる。減肉を重視するボイラーチューブ曲げ等に応用される。

曲げ基本方式

1. プレスベンディング (押し曲げ方式)

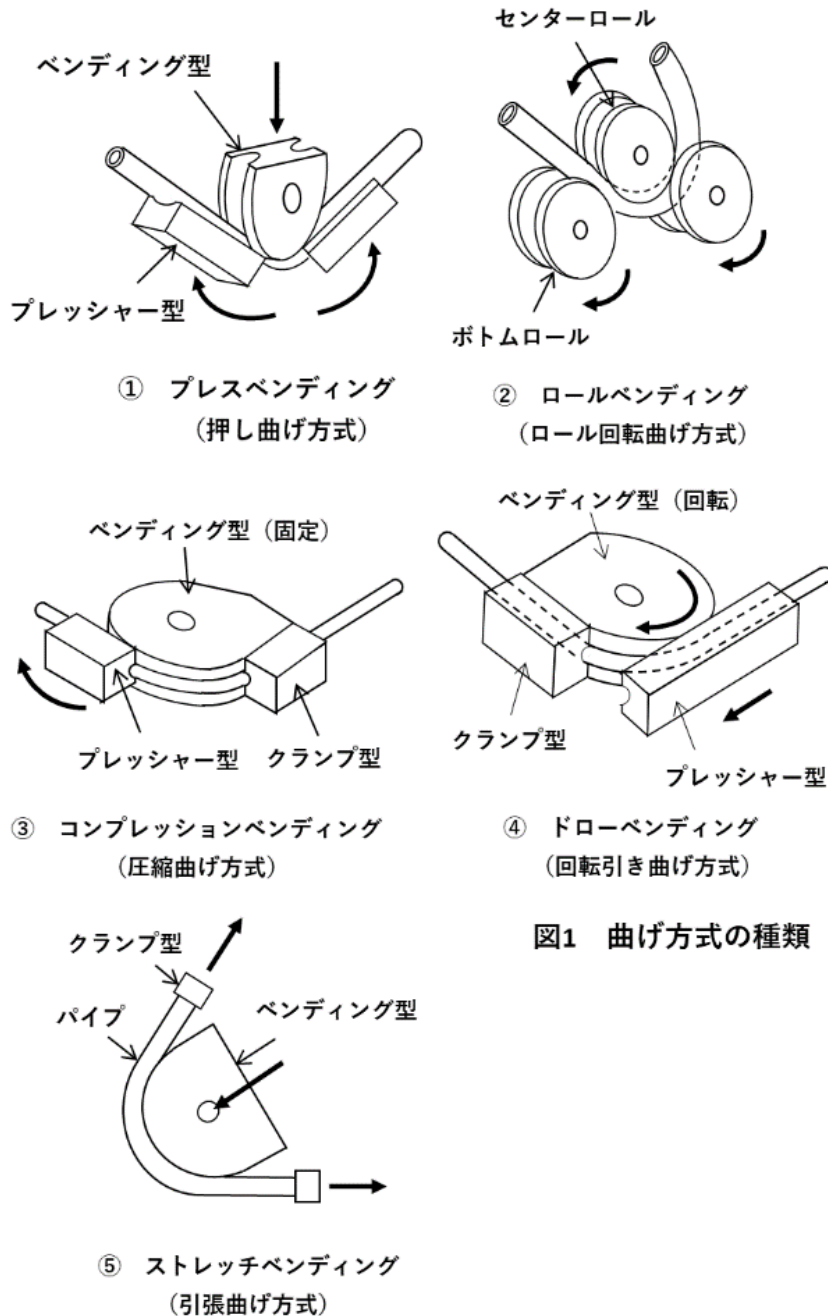
ベンディング型がプレスラムに取付けられ、プレッシャー型（ウイング型）が対峙してパイプを保持する。ラムの加圧力でパイプを押し下げ、プレッシャー型がベンディング型に沿いながら揺動しパイプが曲げられる。

2. ロールベンディング (ロール回転曲げ方式)

2個の回転駆動付きローラーが対峙し、上下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沿いながら回転しベンディング型に巻き付けて曲げる



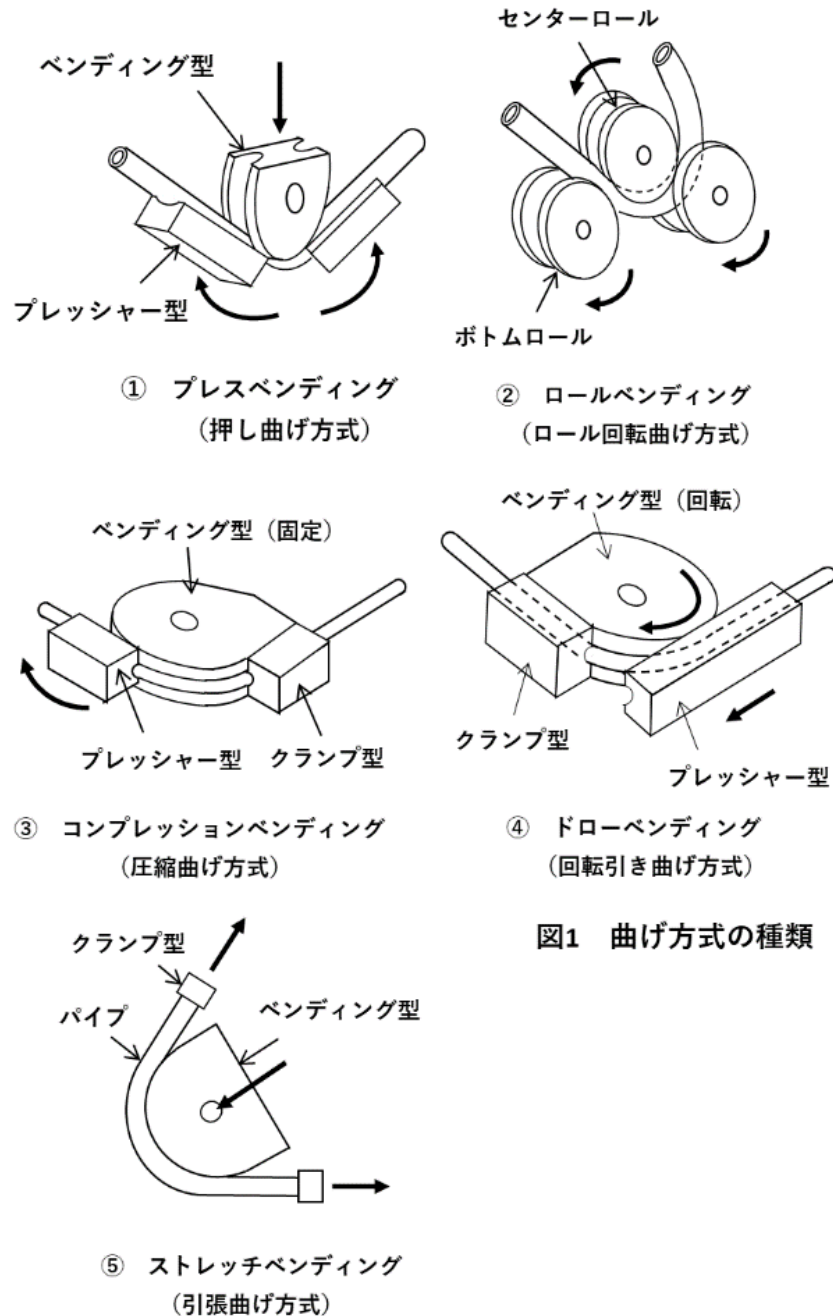
曲げ基本方式

4. 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。

5. ロータリドロベンディング

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。



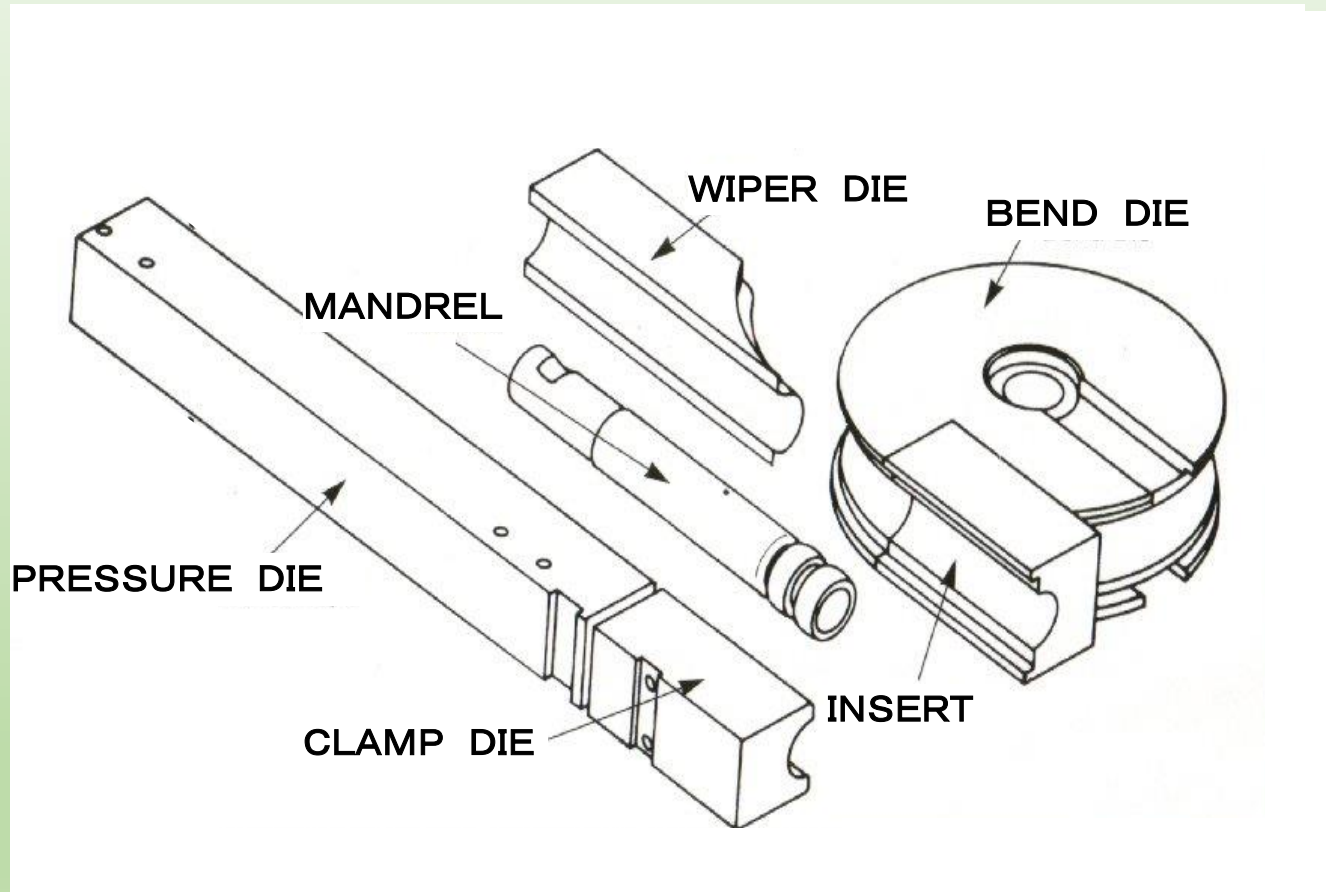
各曲げ方式の特徴

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)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 押し曲げ、引き曲げ可能で汎用性が最も広い 2. 厚肉、薄肉パイプの極小R (1.5DR以下)精密曲げが可能 3. マンドレルを使用すればパイプの楕円化、内側のシワを防止できる 4. アルミ押し出し材や異形パイプ曲げにも適用できる
コンプレッションベンディング (圧縮曲げ方式)	<ol style="list-style-type: none"> 1. マシンの構造が簡単で安価である 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(2ヶ所以上同時曲げ加工)
プレスベンディング (押し曲げ方式)	<ol style="list-style-type: none"> 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偏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)	<ol style="list-style-type: none"> 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)	<ol style="list-style-type: none"> 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最も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

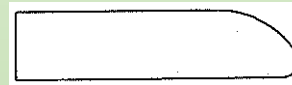
各曲げ方法の比較

式項目	曲げ方	ロータリードロー ベンディング	コンプレッション ベンディング	プレス ベンディン グ	ロール ベンディング	ストレッチ ベンディング
適用材料	パイプ アングル アルミ押出し材 (アルミサッシュ) 角パイプ 丸鋼	パイプ アルミサッシュ フラットバー	パイプ アルミサッシュ フラットバー	パイプ	アングル チャンネル フラットバー 鋼板 パイプ 丸鋼、角鋼	アルミサッシュ 各種異形材 パイプ
曲げ形状	1種R又は2種R曲 げ スパイラルコイル	1種R又は2種R曲 げ サーペンタイン曲げ	1種R曲げ	円曲げ アーチ曲げ スパイラル曲げ	複合R曲げ (変則R)	
最大曲げ角度	180°	180°	165°	360°	270°	
最小曲げ半径	1DR	2DR	1.5DR	ロール径×2	5DR	
生産性	優	良	優	良	劣	
加工領域	優	良	良	良	劣	
精密曲げ	優	良	劣	良	優	
加工面	平面	平面、立面	立面	平面、立面	平面	
機械の納入稼動績	多い	やや多い	やや少ない	多い	少ない	
主なる用途	汎用	自動車、エアコン	自動車、現場配 管	製缶、建築	航空機	

ロータリドロローベンディングの金型



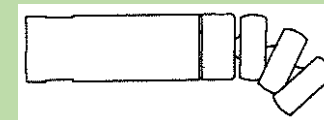
プラグマンドレル
(Plug mandrel)



フォームマンドレル
(Form mandrel)



1 ボールマンドレル
(1 ball mandrel)

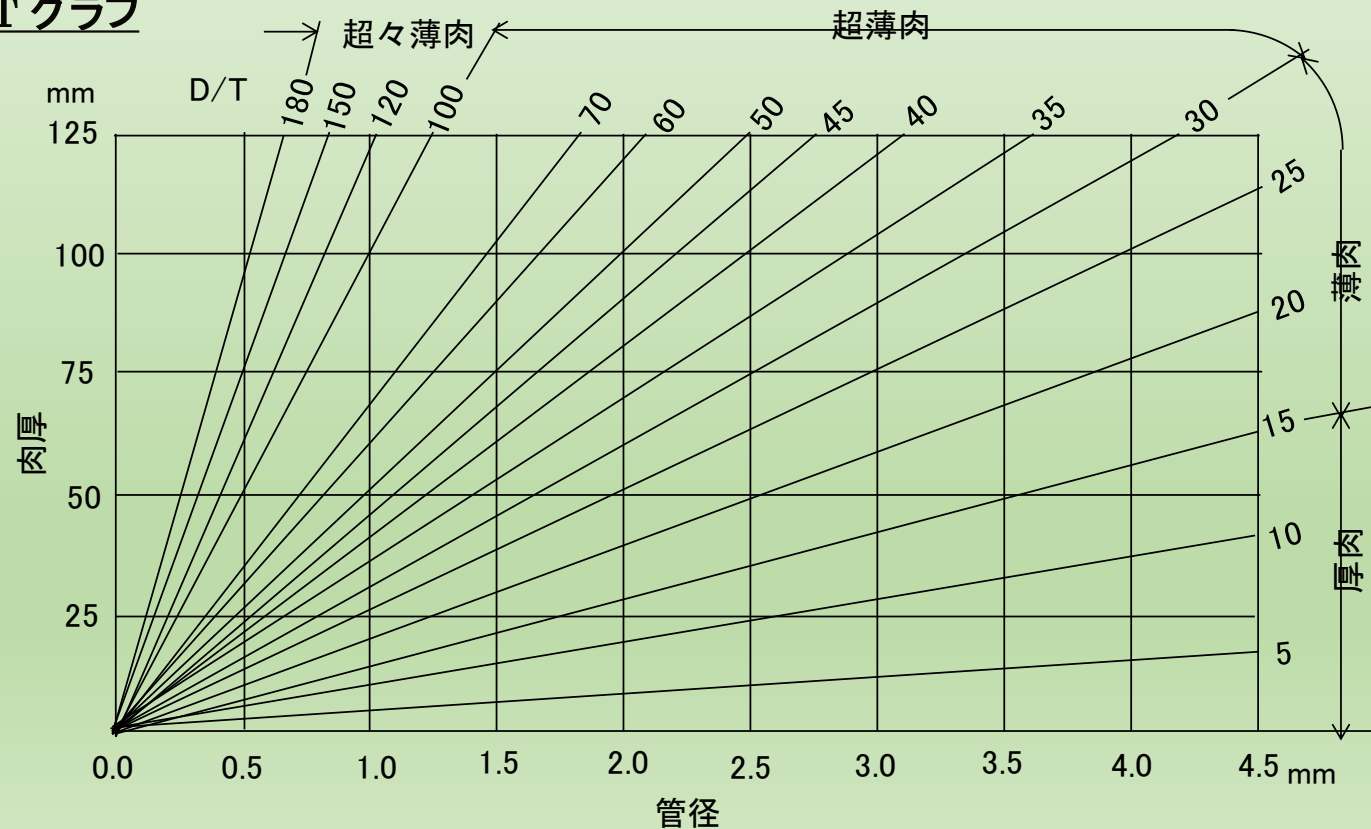


マルチボールマンドレル
(Multiple mandrel)

一般的な曲げの適用範囲

- 1) 曲げの品質（精度）と生産量
- 2) パイプの外径、肉厚、曲げ半径、曲げ半径比= D/R , 肉厚比= D/T
- 3) 材料の断面形状、曲げ角度、曲げ形状

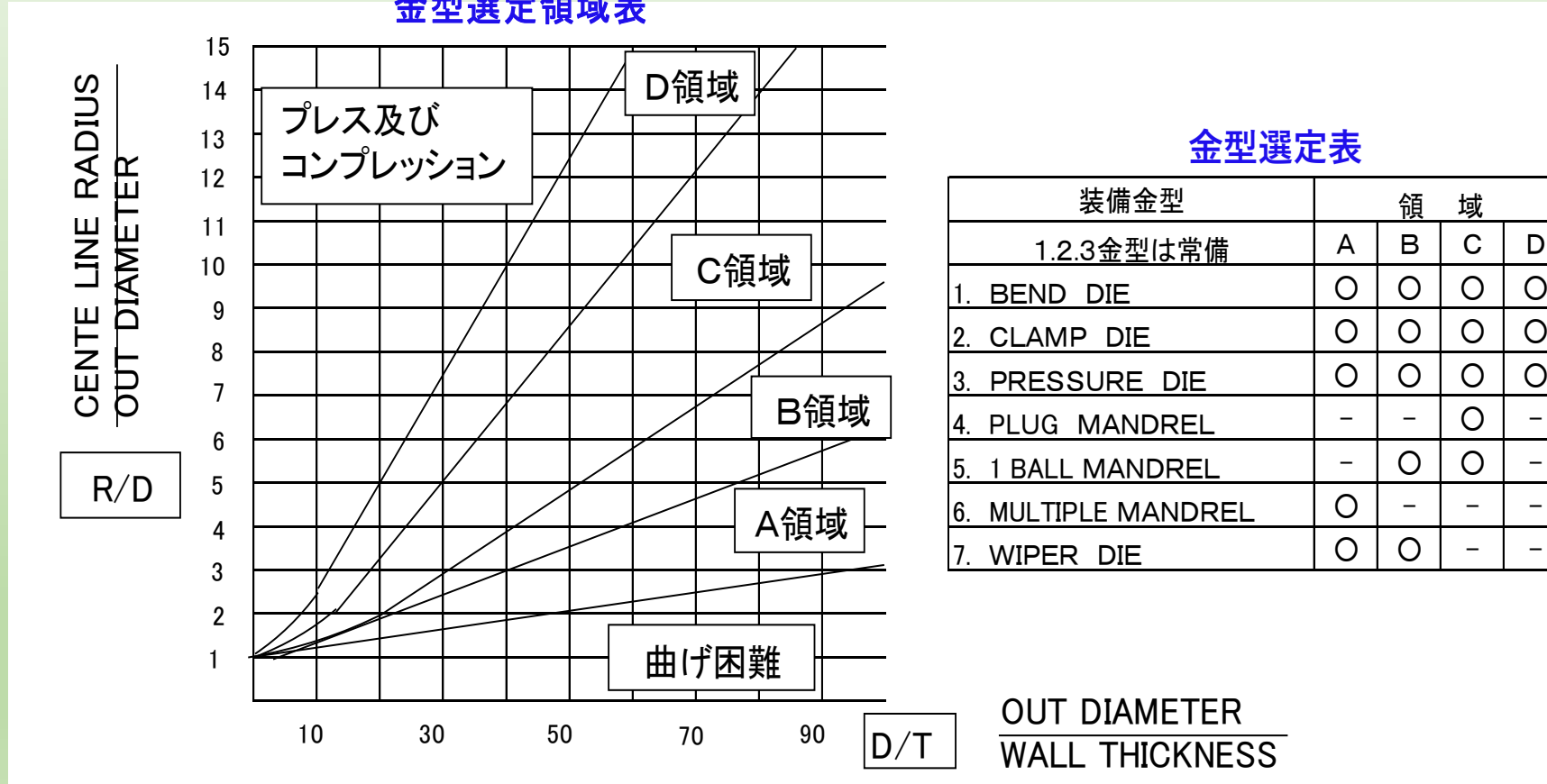
肉厚比 D/T グラフ



ロータリードロー曲げ方式の金型選択

「曲げの適用範囲表」からパイプの肉厚比(D/T)を求めることができる。D/Tが大きくなるほど曲げ治具は精密なものが要求され、曲げが難しくなっていく。D/RとD/Tにより「金型選定領域表」から領域選定、「金型選定表」から装備金型を知ることができる。

金型選定領域表

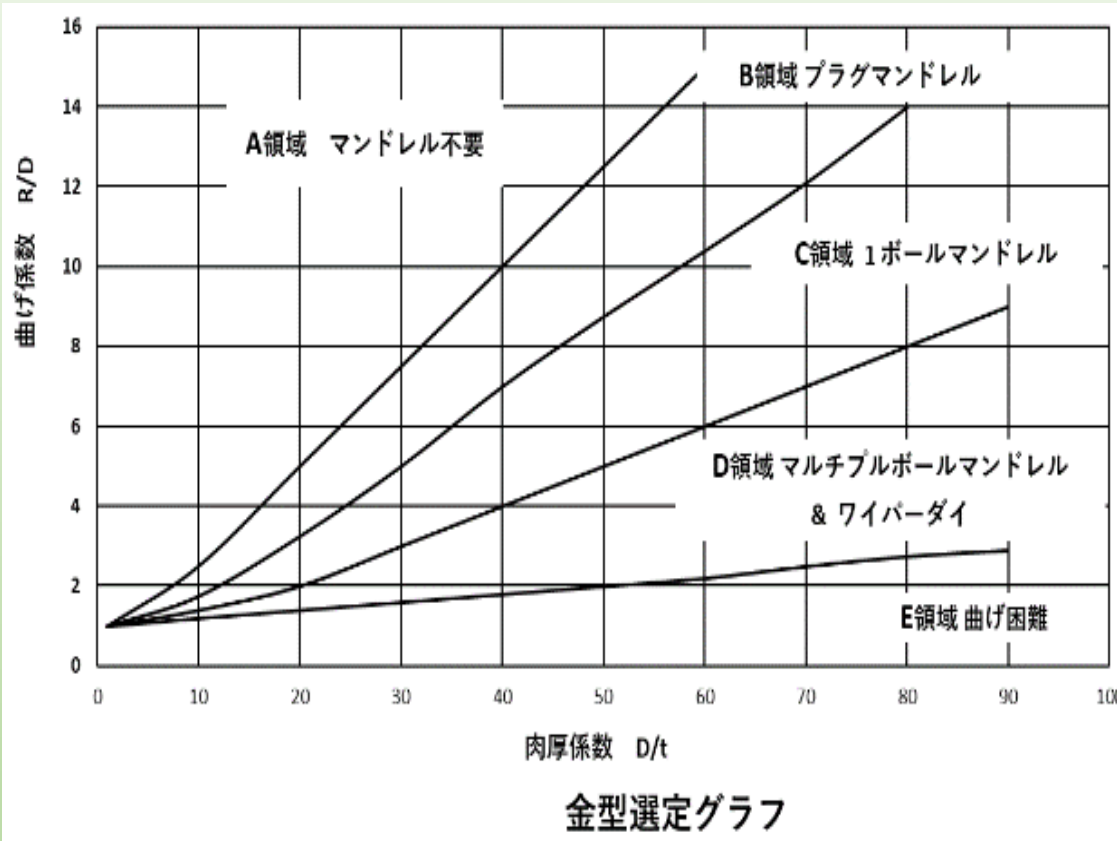


金型選定表

装備金型	領域			
	A	B	C	D
1.2.3金型は常備				
1. BEND DIE	○	○	○	○
2. CLAMP DIE	○	○	○	○
3. PRESSURE DIE	○	○	○	○
4. PLUG MANDREL	-	-	○	-
5. 1 BALL MANDREL	-	○	○	-
6. MULTIPLE MANDREL	○	-	-	-
7. WIPER DIE	○	○	-	-

上記曲げ金型選定はD/TとR/Dのパラメーターで決定するが、ブースターの有無、材料の機械的性質等考慮していないので注意を要す!

一般的な曲げ治具の選定表



金型選択表

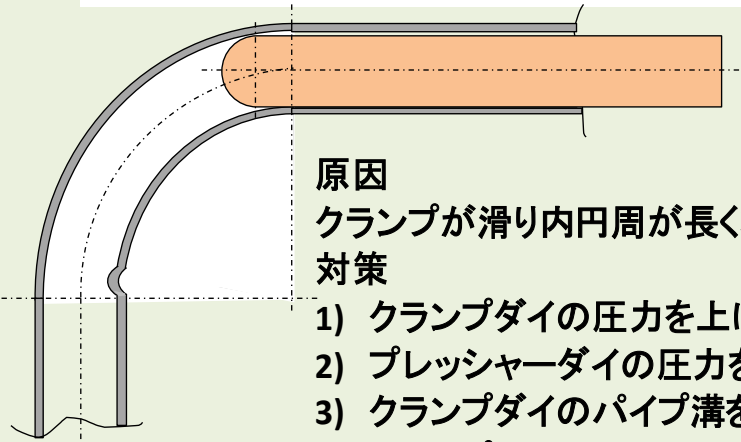
肉厚係数	曲げ係数							
	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	5
0	F	P	P	P	-	-	-	-
5	F	F	P	P	P	-	-	-
10	F	F	F	F	P	P	-	-
15	M1W	M1W	M1	M1	P	P	-	-
20	M2W	M1W	M1W	M1	F	F	P	-
25	M3W	M2W	M1W	M1W	M1	F	F	-
30	M3W	M3W	M2W	M2W	M1W	M1	F	F
35	M3W	M3W	M3W	M2W	M2W	M2W	M2	M1
40	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	M2
45	M4W	M3W	M3W	M3W	M3W	M3W	M2W	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:ワイパダイ 数値はボールの数を表す

灰色シェルは真鍮、銅管はワイパー不要

一般的な曲げ不良の原因と対策

1. パイプ滑り発生 (クランプダイ)



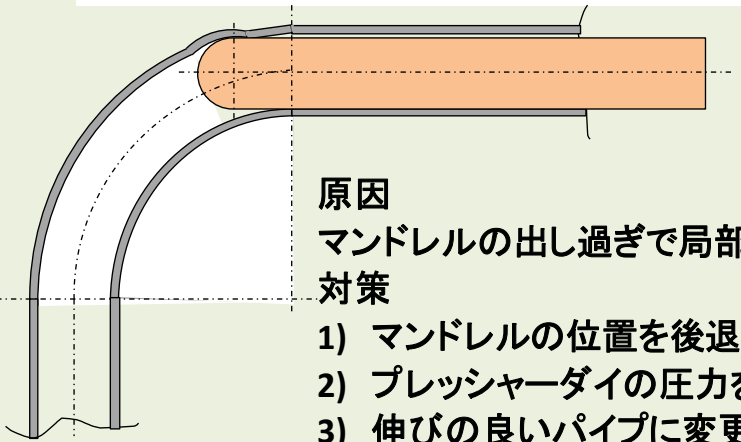
原因

クランプが滑り内円周が長くなり座屈する

対策

- 1) クランプダイの圧力を上げる
- 2) プレッシャーダイの圧力を下げる
- 3) クランプダイのパイプ溝を修正又は滑り防止溝の追加
- 4) クランプの長さチェック

2. パイプ切れる又はこぶ発生



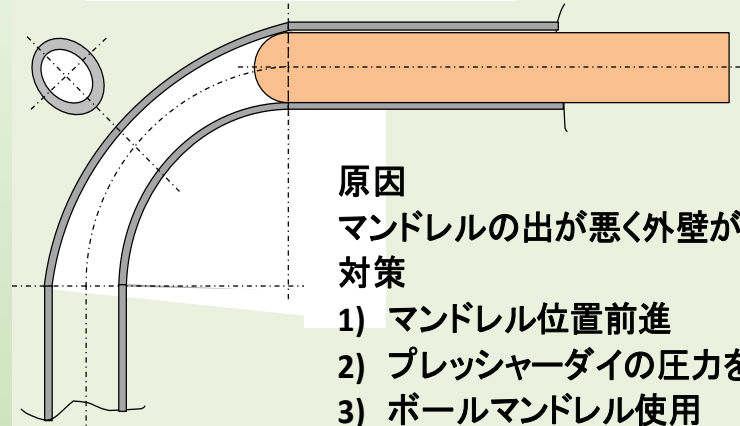
原因

マンドレルの出し過ぎで局部伸びする

対策

- 1) マンドレルの位置を後退
- 2) プレッシャーダイの圧力を下げる
- 3) 伸びの良いパイプに変更又は焼鈍し

3. パイプ偏平大きい



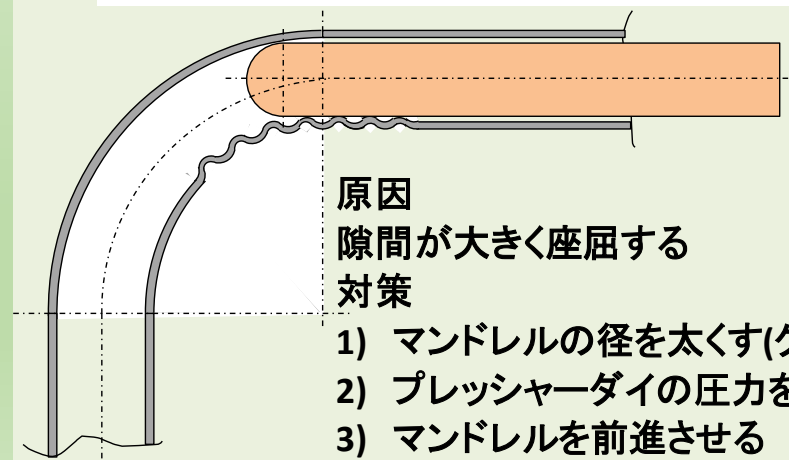
原因

マンドレルの出が悪く外壁が減肉しないため円周長さが短い

対策

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

4. パイプにしわ発生 (曲げ内側)



原因

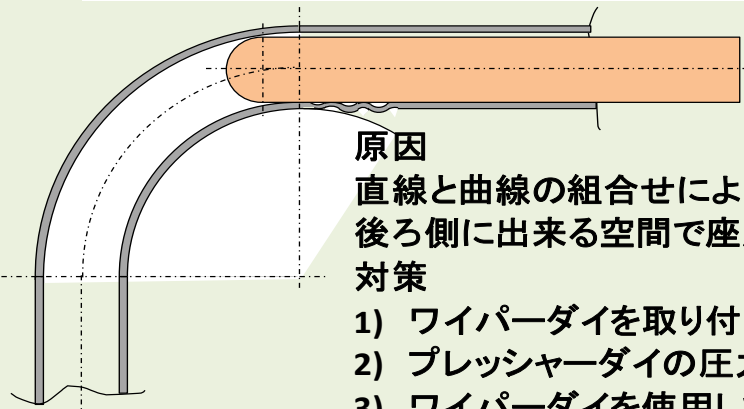
隙間が大きく座屈する

対策

- 1) マンドレルの径を太くす(クリアランスを小さくする)
- 2) プレッシャーダイの圧力を上げる
- 3) マンドレルを前進させる

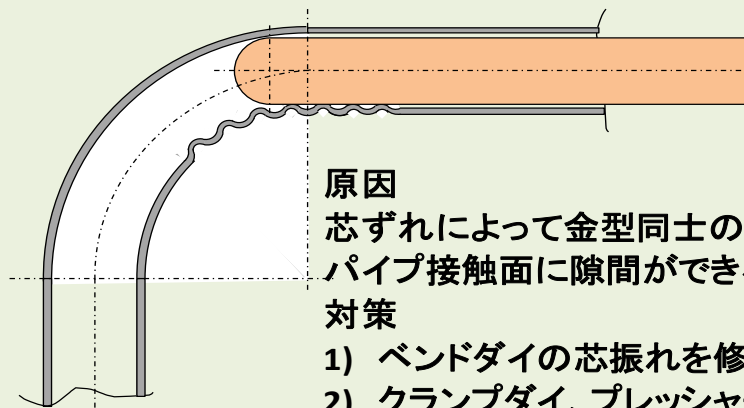
一般的な曲げ不良の原因と対策

5. パイプにしわ発生 (曲げ終わり部)



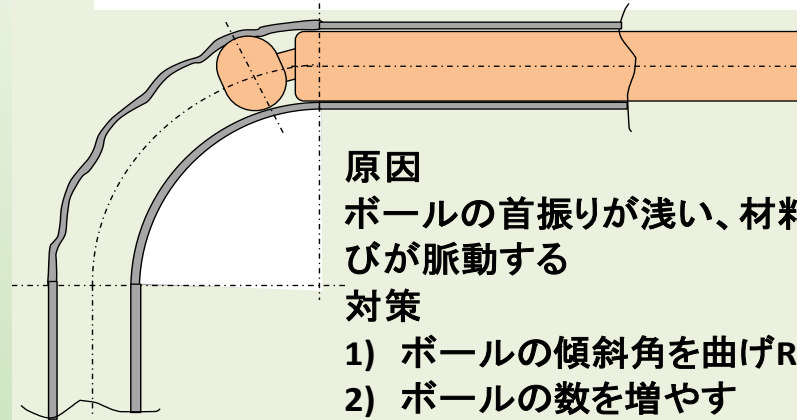
- 原因**
直線と曲線の組合せによりタンゼント位置より後ろ側に出来る空間で座屈する
- 対策**
- 1) ワイパーダイを取り付ける
 - 2) プレッシャーダイの圧力を上げる
 - 3) ワイパーダイを使用している場合はワイパーダイ前進させる

6. パイプに摺り傷、しわ発生



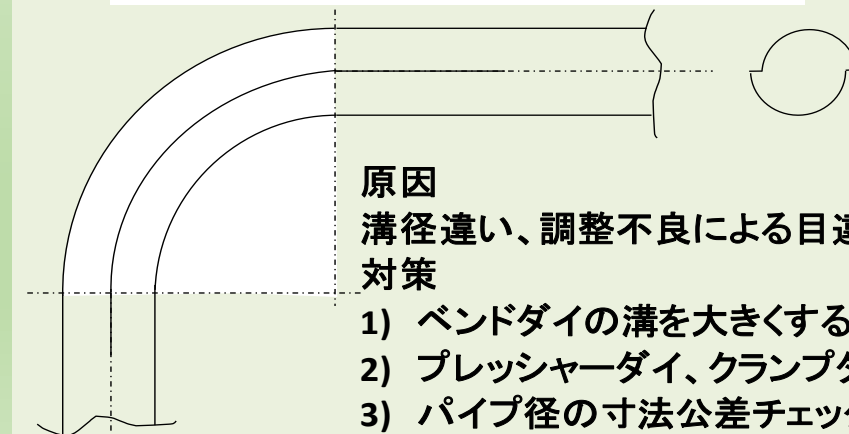
- 原因**
芯ずれによって金型同士の見違い、パイプ接触面に隙間ができる
- 対策**
- 1) ベンドダイの芯振れを修正する
 - 2) クランプダイ、プレッシャーダイの位置ずれを調整

7. パイプの外周部偏平、こぶ発生



- 原因**
ボールの首振りが浅い、材料が柔らかく局部伸びが脈動する
- 対策**
- 1) ボールの傾斜角を曲げRに合わす
 - 2) ボールの数を増やす
 - 3) 硬い材質のパイプに変更
 - 4) プレッシャーダイの圧力を下げる

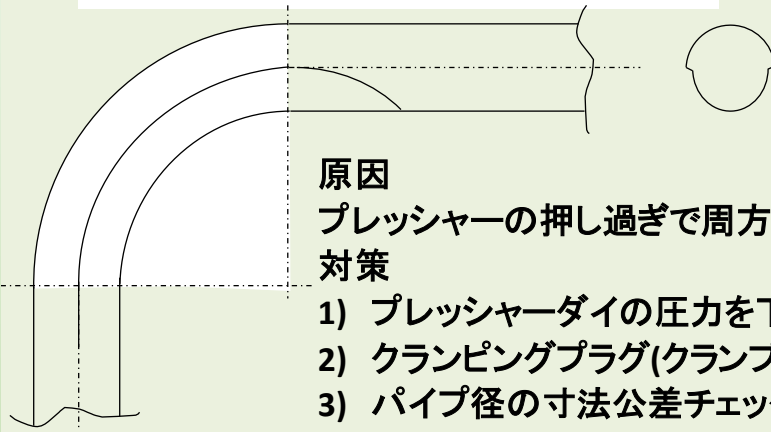
8. パイプ中心に傷、段差発生



- 原因**
溝径違い、調整不良による見違い
- 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) パイプ径の寸法公差チェック

一般的な曲げ不良の原因と対策

9. パイプにツールマークが付く



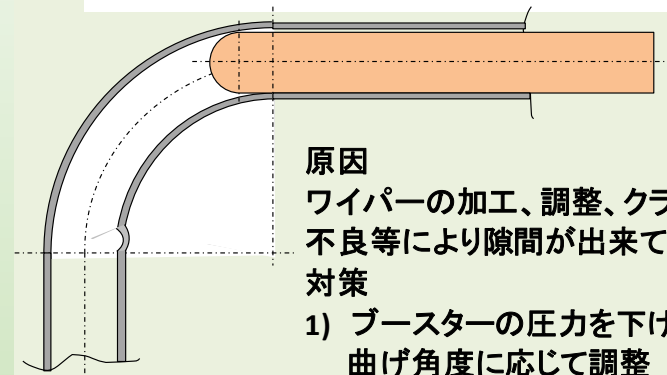
原因

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圧力を下げる
- 2) クランピングプラグ(クランプ芯金)を使用する
- 3) パイプ径の寸法公差チェック

10. クランプダイ側にこぶができる



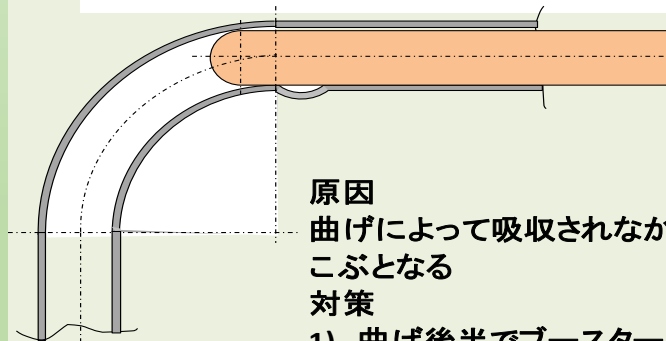
原因

ワイパーの加工、調整、クランプつなぎ目不良等により隙間が出来ている

対策

- 1) ブースターの圧力を下げるか曲げ角度に応じて調整
- 2) ワイパーの再調整
- 3) プレッシャーの圧力を上げる
- 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ができる



原因

曲げによって吸収されなかった肉が累積されこぶとなる

対策

- 1) 曲げ後半でブースターの圧力を下げるか曲げ角度に応じて調整
- 2) ワイパーの再調整
- 3) プレッシャーの圧力を下げる
- 4) ベンドダイに当たりを付けて潰す