

無人遠隔操作型軽量冷間ロール成形機械の製造実験

拓殖大学工学部機械システム工学科

教授 小奈 弘

(平成13年度研究開発助成 AF-2001017)

キーワード：薄板ばね材の成形，ロール成形，曲げ一曲げ戻し

1. 緒言

塑性加工の分野では，軽量化を計るために薄板・高強度材の加工に関する研究が推進されている。しかし，このような材料は一般に硬く，伸び性が低いので，大きなスプリングバック，割れの発生など，普通鋼板の成形とは異なる種々の問題があり，これに対処できる加工技術の改善，新技術の開発が望まれている^{1), 2)}。

筆者は薄板・高強度材の加工技術の確立を計るために，薄板ばね材でパイプを製造する実験を行った。まず，従来のパイプ成形法で成形することを試みた。しかし，この方法は，板のスプリングバックが大きく，パイプ形状は得られなかった。このため，板により大きいひずみを与えるために，板がロール穴内で1.5重巻きから2重巻きになるほどの小径のロールを数段上記のスタンド出口側に追加して，スプリングバックを強引に押さえ込む，いわゆる，パイプ直径を絞り込んで小径化する“絞込み成形”を行った。また，これとは別に，スプリングバックを積極的に利用する成形法を考えた。この方法は，薄板ばね材をタンジェントベンダーで曲げた場合，曲げた後に少し前送りを行い，再び曲げるという“繰り返し曲げ”を行うと板はパイプ形状になる。これをロール成形に適用したものである。本方法は上述の“絞込み成形”に比べ，形状欠陥が発生せず，かつ，ロール調整が容易である成形方法であるが，非常に多くのロールスタンドを必要とするものである。このような理由から，少成形段数で薄板ばね材パイプが製造できる分割ロールによるロール幅調整型冷間ロール成形機械の開発を行った。本報は薄板ばね材によるパイプの成形に関する技術とパイプ成形機械の開発プロセスについて記している。

2. 実験材料

実験に用いた材料は，板厚 0.1mm，板幅 40mm の薄板ばね材である。本材料は，ステンレス鋼板(SUS304)を熱処理したものであり，本材の機械的性質は引張り強さ 2100MPa，破断伸び 1.5%，縦弾性係数 201GPa である。

3. 実験方法および実験装置

3-1 絞込み成形方法

基本的には普通鋼板のパイプ成形と同じであるが，普通鋼板の場合よりも多くの成形段数を用いている。また，成形後段のロール形状は，ロール穴内の円周長を成形素板の板幅よりも短くした小径穴ロールを用いている。Fig. 1 は，本実験装置の概略図である。図のエッジフォーミング部は，普通鋼板の場合には1段で行うが，本ばね材の場合には4段で行った。センターバンド部，およびスクイズフォーミング部は，Fig. 2 示すロールカセットを用いた。本ロールカセットは，半径 r の半円溝を加工した二本の直径 50mm

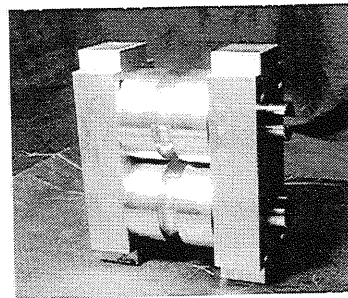


Fig.2 Roll cassette

円筒ロールをフレームに組み込んだものである。この二本の円筒ロールでできる円形穴部分にばね材を通してパイプを成形した。円形穴の直径($D=2r$)は，Table 1 のように $D=5.5\text{mm} \sim 22\text{mm}$ の 21 種類ある。実験は，21 種類のロールカセットを組み合わせた各種のロールパススケジュール

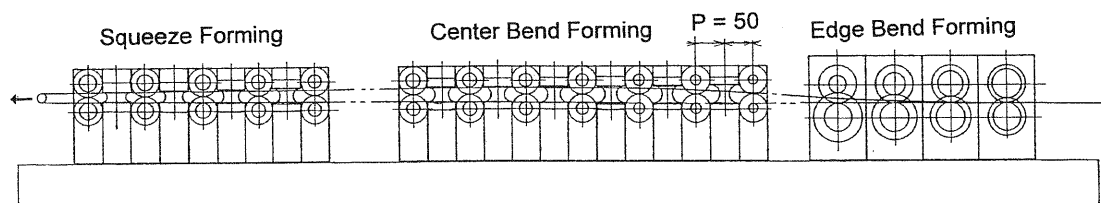


Fig.1 Schematic illustration of roll arrangement for squeeze forming method

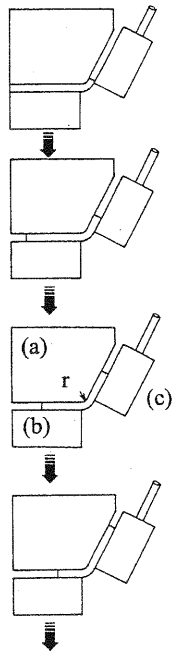


Fig.3 Progressive bending procedure by Tangent bender

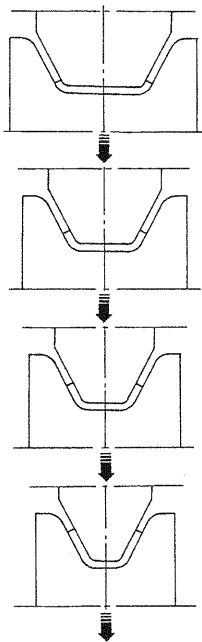


Fig.4 Progressive bending procedure by cold roll forming

ルで成形を行った。なお、ロールカセットの鋼製ボックスへの取り付けは、第1段目はロール軸を水平に、第2段目は垂直にセットするというように、水平、垂直と交互に取り付けている。また、ロールの駆動は、エッジフォーミング部は上下軸を強制駆動している。センターバンド成形部では、水平にセットした上下ロールのみを強制駆動にした。スクイズフォーミング部では水平・垂直にセットした全ロールを強制駆動にしている。なお、板のスプリングバックによる変形を最小に抑えるために、各ロールカセットの取り付けピッチを50mmとした。それゆえ、各円筒ロールの間隔は約0.1mm程度になっている³⁾。

3-2 曲げ曲げ戻し成形方法

Fig. 3はタンジェントベンダーによる薄板ばね材の順次曲げ成形を示している。これは、図示のように薄板ばね材を固定して曲げ、曲げた後に少しだけ前送りをする。そして、再び固定し曲げるという操作を繰り返している。当然、前送りしてから曲げると、その前に曲げられた部分はダイに押し当てられるために平らに曲げ戻される。しかし、曲げ戻された部分は、除荷後のスプリングバックによって曲がりが生じる。結局、このスプリングバック後の曲がり連続してパイプを形成するという、スプリングバックを利用した成形方法である。しかし、タンジェントベンダーによる成形は非生産的であるため、これを冷間ロール成形機械でできるようにした。Fig. 4は冷間ロール成形機械によるパイプの成形工程の概略図である。Fig.4は、対称溝形断面のウェーブ幅を順次狭くする成形であるが、図示のように、Fig.4の片側半分は、Fig.3のタンジェントベンダー曲げと全く同じであるからパイプが成形できるという考えである。ところで、タンジェントベンダー実験に用いたダイの肩半径 r は $r=2, 4, 6\text{mm}$ である。薄板ばね材を前に送る送り量は、ダイ肩半径 r から計算されるダイ肩部分の弧長を基準にして設定した。基準値より少ない場合を正、逆の場合を負にとっている。また、本冷間ロール成形機械の実験で用いた成形ロールの形状と寸法は、Table 2の付図ようである。対称溝形断面のウェーブ部分を成形する成形ロール幅 W は第1段を素板幅(40mm)にとり、これ以降を順次2mmずつ減らした。なお、最終段のNo.21段ロールは12.5mmにとっている。これは、No.20段ロールで曲げた板を曲げ戻すためである。本報では、これらのロールを各種組み合わせで作った4種類のロールパススケジュールについての結果を示している。

3-3 開閉型ロールによる曲げ曲げ戻し成形方法

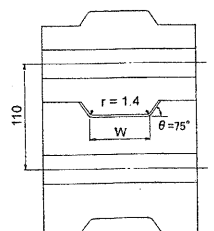
上記(3-2)の方法は、非常に多くの成形段数を必要とする。これを少成形段数で行うことを目的としたのが本成形である。Fig. 5(1)は、本成形に用いた4段タンデム冷間ロール成形実験装置である。Fig. 5(2)は、Fig. 5(1)を材料の進行方向(左側)と真上(右側)から見たロールを開閉する内部構造の概略図である。図示のように、対称溝形断面を成形

Table 1 Roll pass schedule to form pipe with squeeze forming method

Edge forming	Center bend forming										Squeeze forming												
	D	22	20	19.5	17.5	16.5	16	14.5	13.5	12	11.5	10.5	10	9.5	9	8.5	8	7.5	7	6.5	6	5.5	
No.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
No.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
No.3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
No.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
No.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
No.6	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Table 2 Roll pass schedule to form pipe with bend and bend-back forming method

Stand No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
W (mm)	40	38	36	34	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	12.5	
Pass No.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pass No.2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pass No.3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Pass No.4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○



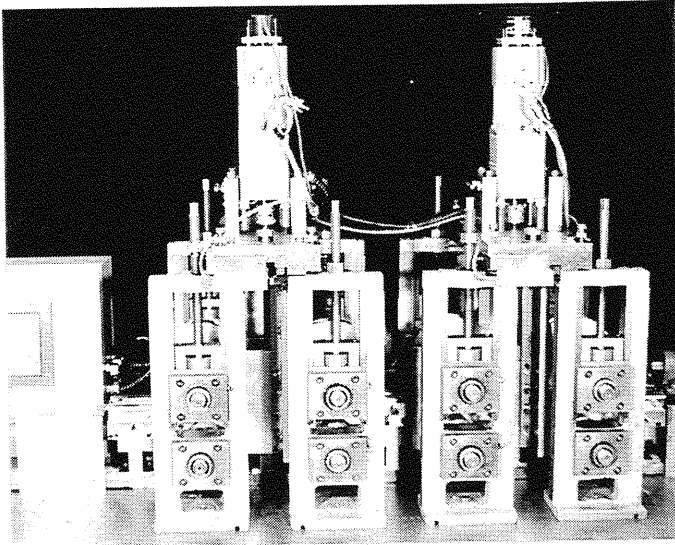


Fig.5 (1) 4 tandem cold roll forming machine providing control equipment of roll width

する上一対の分割ロールは、真鍮板(a), (b)ですべり接触の状態に接続されている。このロールに薄板ばね材を通板往復させるが、板が通過する度に、左右の上下ロールを一定量だけ中央側に寄せるようになっていく。たとえば、Fig. 5 (1)において、左側の2段タンデムスタンドを薄板ばね材が通過したら、機械を止める。そして、左側2段の左右ロール間隔を右側2段よりも狭める調整をラックバー(c)と(d)、およびピニオン(e)で行う。この調整の後に板を左側に戻すロールの逆回転を行う。ところで、ラックバー(c)と(d)は、それぞれ(a)と(b)にボルト止めされているから、ピニオン(e)を回転すると一対の左右上下ロールは互いに逆方向に移動する。ピニオン(e)の駆動は、スタンド真上に設置したACサーボモータ(f)によって行う。

4. 実験結果および考察

4-1 絞込み成形

4-1-1 薄板ばね材のスプリングバック Fig. 6は、Fig.1に示す実験装置で成形されたパイプの直径と、ロールパススケジュール最終段に設置されたロール穴直径との関係を示している。図示のように、最終段ロールの穴直径が増大するにつれて、スプリングバックは、指数関数的に増えて

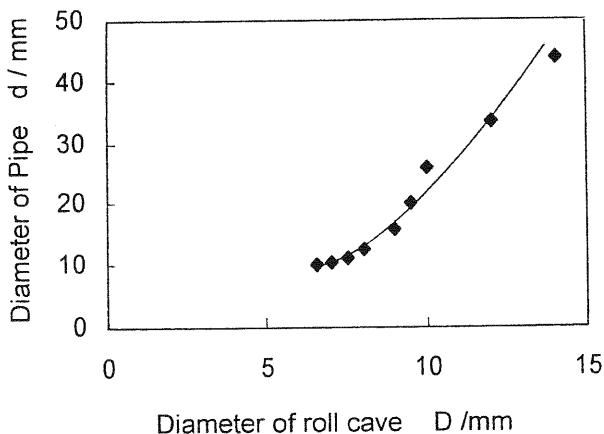


Fig.6 Relation between diameter of pipe and diameter of roll cave mounted on last stand

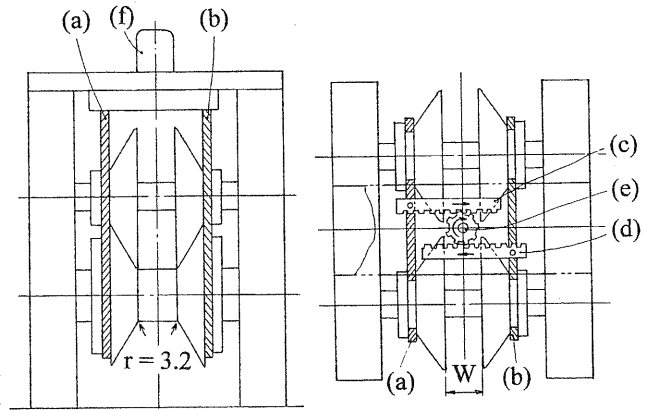


Fig.5 (2) Schematic illustration on mechanism of roll width adjustment seen from running sheet (left side) and from upper side direction(right side)

いることがわかる。しかし、スプリングバックの発生が指数関数的増大から緩やかな増大へと変化するのは、最終段ロールの穴直径が、 $d=8.0\text{mm}\sim 8.5\text{mm}$ になるときである。Fig. 7の下側実線は、最終段に設置したロール穴の直径が $d=8.0\text{mm}$ 以下であるロールパススケジュール(Table 1)で成形したときの結果である。図示のように、最終段ロールの穴直径が、 6.5mm から 8.0mm のときには、成形されたパイプ直径は、約 10mm から 12mm となる。この場合の、パイプの直径(D_p)と最終段ロールの穴直径(d)の比率(D_p/d)を求めると約 1.5 である。なお、このロール直径範囲におけるロール穴の内周長を計算すると $\pi d=20.4\text{mm}\sim 25.1\text{mm}$ となるから、素板板幅 40mm の材料はロール穴内で二重巻きの状態になっていることになる。ところで、ばね材が、直径 6.5mm の最終段ロールで成形されるとき、ばね板表面の曲げひずみを板厚中央に中立軸があると仮定して求めると $0.05/3.30=0.0152(1.52\%)$ となる。これは、本材の破断限界値である 1.5% とほぼ一致している。このことから、本絞り成形においてスプリングバックが少なくなるのは材料を破断限界近くにまで成形されたときであることが解る。また、本板材に対するロール穴径の限界値は、約 6.5mm であり、この方法によって得られるパイプ直径の限界値も約 $10\text{mm}\sim 12\text{mm}$ であるといえる。

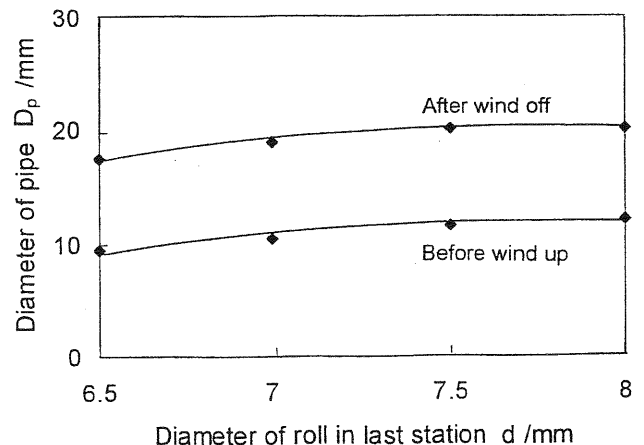


Fig.7 Diameter of pipe formed by roll with 6.5 mm to 8 mm diameter mounted on last stand

4-1-2 ロールパススケジュールと形状欠陥 Fig. 8 は、本成形方法で生じた各種の形状欠陥を示している。Fig. 8 (A)は、最終段ロールの穴直径が、6.5mm~7.5mm であるロールパススケジュールで成形したときに現われる形状欠陥である。これは、図示のようにパイプにひれが付く。これは、スプリングバック力がロール軸の弾性変形、軸と軸受けとの隙間を最大にするために、この隙間に薄板ばね材が入ったために生じると考えられる。Fig. 8 (B)は、最終段ロールの穴直径が 6.5mm 以下であるロールパススケジュールで成形したときに生じる形状欠陥である。図示のように、断面の一部が陥没して溝状になる。この形状欠陥は、最終段ロールの穴直径が 5.5mm, 6.0mm のときには頻発する。これは、ロールの成形圧縮力がパイプを押し潰したものと考えられる。Fig. 8 (C)は、最終段ロールの穴直径が、8.5mm 以下のときに生じる形状欠陥である。これは、板端に無周期的に現れる波状をした形状欠陥であり、縁波、波座屈と言われるものである。これは、板端部の伸び、板端部とロールとの接触摩擦によって生じた材料の伸びなどが波状になって現れたものとする。なお、この縁波は本材に限らず、薄板普通鋼板の成形でもよく現れる。

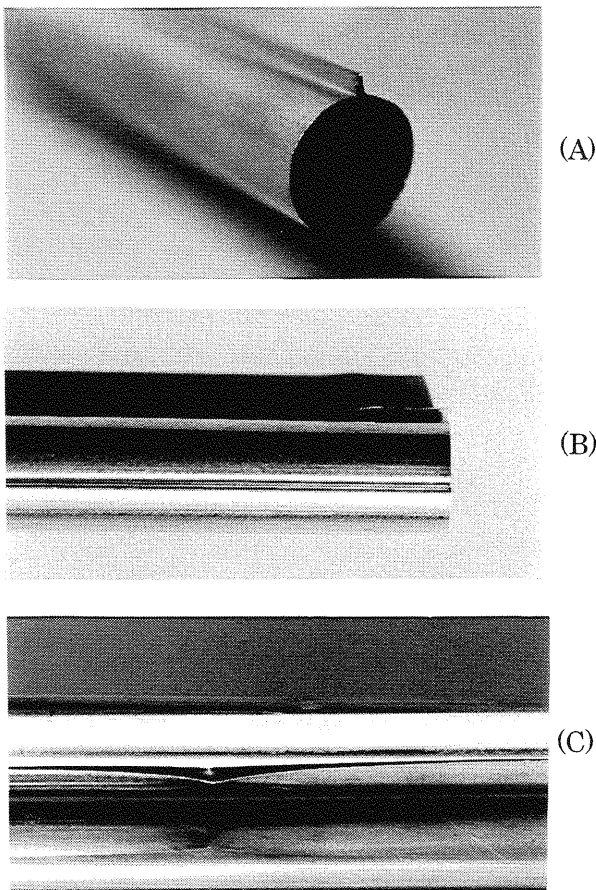


Fig.8 Several kinds of shape defects. (A):leak out of roll gape, (B):Crash, (C):Edge wave

4-1-3 形状欠陥の除去 Fig. 8 の形状欠陥(A)と(B)は、ロール成形限界を越えたものであるため、これの発生を回避する特別の手立てはない。(C)は、Fig. 9 に示す治具を用いることによって除去できた。Fig. 9 は、凸状の治具をパ

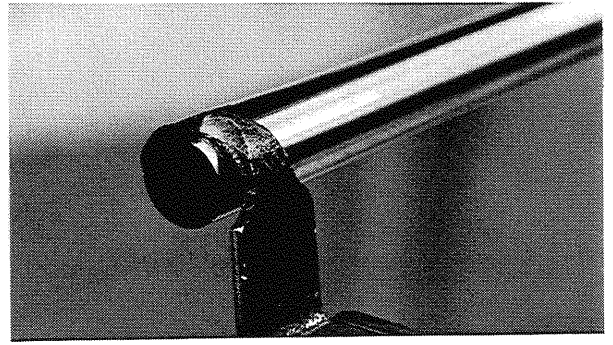


Fig.9 Tool to eliminate edge wave defect

イプ板縁から挿入させ、パイプ板端部近傍を持ち上げて成形する方法である。この方法によって縁波が除去される理由については明らかでない。しかし、図示のように、板端部を持ち上げた結果、波が消えたことは、板端部に集中的に生じていたひずみを拡散する効果が働いた結果と解釈できる。この方法は、鋼板の打ち出し成形で形を作る際に、ひずみの拡散を行いながら波を消していく方法に似ているからである。また、薄板普通鋼板のパイプ成形において、パイプ内側に入れた小径ロールで、パイプ縁部分を外側に張り出して縁波を消したという報告があるが、これは、原理的には本方法と同じである⁴⁾。

4-2 曲げ曲げ戻し成形方法

4-2-1 タンジェントベンダーによる曲げ曲げ戻し成形

Fig. 10 は、タンジェントベンダーによって成形された製品の曲げ半径 R_t と、材料の前送り量との関係である。図中の助変数は、ダイ肩半径 r である。図は、ダイ肩半径 r が

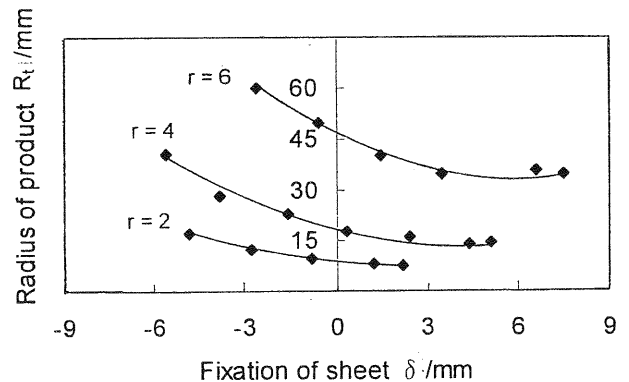


Fig.10 Radius of pipe formed by Tangent bender with 3 kinds of dies

小であり、かつ、材料前送り量を少なくとって曲げを繰り返した場合には、小径のパイプが得られることを示している。Fig. 11(A), (B)は $r=2$ mm のダイを用いて、材料前送り量を 1.0 mm ($\delta = 0.5\pi \times 2 - 1.0 = 2.14$ mm) と 6 mm ($\delta = 0.5\pi \times 2 - 6.0 = -2.86$ mm) にとって順次曲げを行ったときの製品を示している。なお、材料前送り量を 1.0mm にとったときは、曲げ角部の弧長 ($0.5\pi \times 2 = 3.14$ mm) に対して材料を 1mm だけ進めるために、同じ箇所がダイ肩部で 3 回近くも曲げを受けていることになり、同一箇所の複数回曲げはスプリングバックを少なくすることが解る。

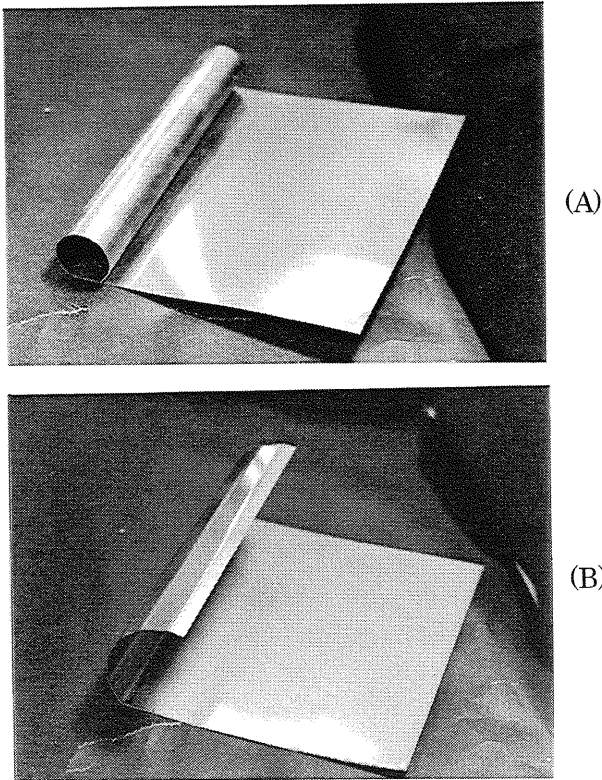


Fig.11 Samples of pipe formed by Tangent bender with Sholder radius of $r=2$ mm, (A) and (B) are formed with $\delta=2.21$ mm, $\delta=-2.86$ mm

4-2-2 冷間ロール成形機による曲げ曲げ戻し成形 Fig. 12 の(A), (B), (C), および (D) は, Table 2 のロールパススケジュール No.1 から No.4 で成形された製品の断面形状である。図示のように, 多くの成形段数を用いる No.1 で成形された製品の断面形状は, 高い真円度になるが, 成形段数が少なくなるにつれて真円度精度は低下し, 断面は楕円形状になる。No.1 の断面形状の方が, No.2~No.4 よりも真円精度が高いのは, Fig. 10 の実験が示すように, 板の同一箇所がロール曲げコーナで複数回の曲げを受けた効果が現われたものと考えられる。ところで, 本成形方法で得られる製品の特徴的なことは, Fig. 8 のような形状欠陥が全く生じないことに加え, 製品の長手方向そり, ねじれもほとんど生じないことである。縁波が生じないことについて考察すると, これは, 板の縁から少量の曲げ起こしを行っているためであると考えられる。別の見方をすれば, 極端に短いフランジの曲げ起こし成形であるために, 製品長手方向の伸びひずみは, ほとんど生じ無いと考えられる。

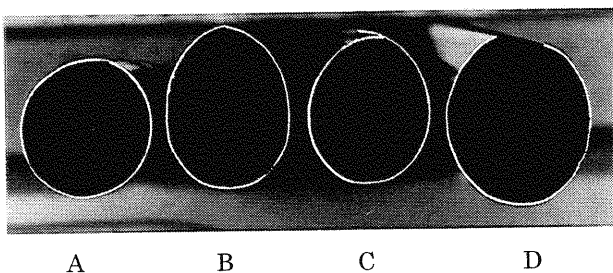


Fig.12 Sections of pipe formed by roll pass schedules No.1 to No.4 shown in Table 2

また, 平らに曲げ戻された後に生じるスプリングバック力は少ないため, 板とロールとの接触摩擦は少なくなり, 伸びひずみの発生も少なくなったことも考えられる。また, 製品の長手方向そり, ねじれが生じないのは, 成形過程で受ける曲げ-曲げ戻しによって板内のそり, 曲がりを起こす残留応力が弱められたためと考える。本成形方法における最小パイプ直径は, 11~12mm 程度であり, 前述の絞込み成形の製品直径とはほぼ一致している。

著者は, 本実験で用いたロールのロール曲げ角部の半径の値(1.4mm)に注目している。この理由は, 曲げ半径の値 1.4 mm は前記 4-1-1 で示した限界曲げ半径 $6.5/2 \approx 3.2$ mm 以下の値であるからである。理論的には, この曲げ半径 (1.4mm) で曲げた場合には, 板の表面ひずみは $0.05/1.45 = 0.034$ になり, 板の破断限界を越えている。しかし, 成形後のパイプの表面には, 肌荒れやヘアークラックなどは, 肉眼観察ではみとめられていない。厳密には腐食試験などで, これの有無を調べる必要があると考える。

4-2-3 開閉型ロール成形機による曲げ曲げ戻し成形

Fig. 13 は, 4 段タンデム冷間ロール成形機械のロール開閉による曲げ曲げ戻し成形の実験結果を示している。図示のように薄板ばね材を通すたびにロール間隔(W_{ad})を $W_{ad}=1, 2, 6, 8, 10$, および 12mm づつを狭める各場合の成形で得られたパイプの直径(d)を W_{ad} との関係で示している。なお, 本実験では, ロールの曲げ角部の曲げ半径を 3.2mm にとって, 前述の臨界曲げ半径を越えない値で実験を行った。図示のように, ロール間隔が最小の値である $W_{ad}=1$ mm に設定した場合でも, これによって得られるパイプの直径は約 22mm である。本成形におけるロールの曲げ角部の曲げ半径(3.2mm)は, 絞込み成形の場合の限界ロール直径(6.5mm)の値に相当するものであるが, 絞込み成形で得られるパイプの直径は 12mm, 本開閉型ロールの成形では 22mm であり, 両者の間に差を生じた。本開閉型ロール成形機で成形されたパイプの直径の方が大きな直径になったの理由には次の二つが考えられる。一つは, 絞込み成形は板材に直接, 材料の限界近くのひずみを与えるのに対して, 開閉型ロールでの成形はスプリングバックを利用した成形であるためである。もう一つの理由は, 後者の方法は上下ロールのクリアランス(隙間)が大きく, ばね板に充分な曲

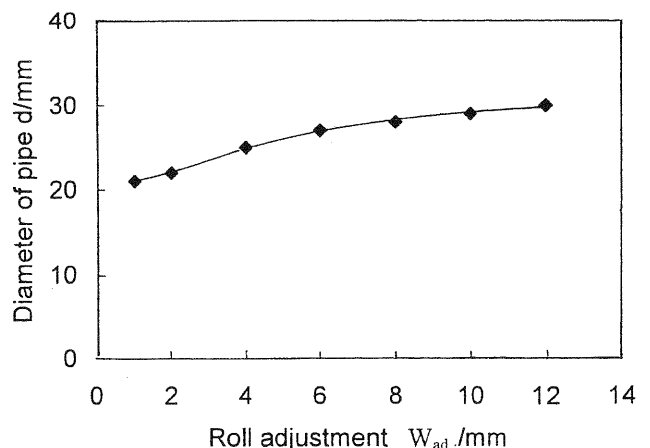


Fig.13 Diameter of pipe formed with tandem cold roll forming machine shown in Fig.5

げ力を働かすことができなかつたためである。これは、強い曲げ与えるためには上下ロールのクリアランスを狭めて、ばね材に圧縮力をかける方法をとったが、上下ロールのクリアランスを狭めると、材料は進行方向に対して蛇行しやすくなり、材料をロールの中心にするセンタリングが難しくなつたために、クリアランスを緩くして成形を行った。このことから、材料のセンタリングを保つ装置の改善を行えば、板の曲げ角部に強い圧縮をかけられる故、パイプの直径を更に減少できると考える。なお、この場合も、縁波、そり、ねじれなどの形状欠陥を生じないパイプを得ることができた。

4-3 宇宙基地建設資材への応用

Fig. 14 は、宇宙や僻地にパイプを大量に運搬することができる巻き取り-巻き戻しパイプの成形工程の製造概略図である。図は、冷間ロール成形機械で成形された薄板ばね材パイプをマンドレルで開いて平らな板にし、これを円筒ドラムに巻き取る。そして、この円筒ドラムを使用現場で巻き戻すと、巻き取られた平板は再びパイプの形状に戻ることを示している。この考え通りに、開いた板がパイプ形状に復元するかを確認する実験は、Fig. 1 の絞り込み成形機の出口側にマンドレルと円筒ドラムを設置して行った。なお、実験は、平板先端を円筒ドラムに固定した後に絞り込み成形機の駆動を止め、円筒ドラムで材料を引っ張る、いわゆる、“引き抜き成形”で行った。実験の結果、コイル状に巻き取られた平板はパイプ形状に復元することが確認されたが、この結果を Fig. 7 の上側実線で示している。なお、同図の下側に示す巻き取る前のパイプ直径に比べ、巻き戻し後のパイプの直径は大きくなった。これは、薄板ばね材が巻き取り-巻き戻しを受けるために、板のスプリングバック性が低下したためと考えられる。なお、絞り込み成形

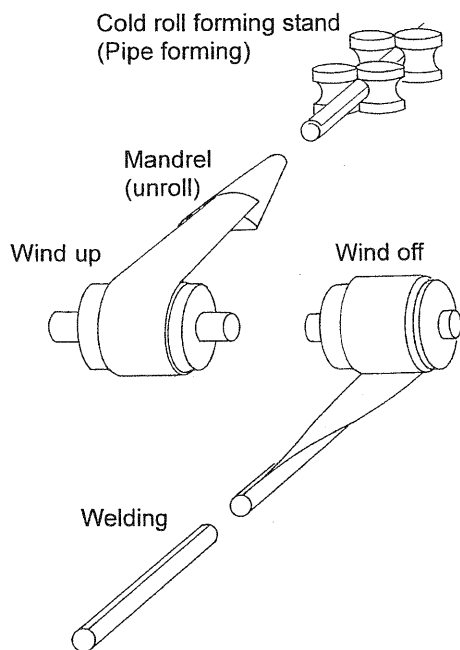


Fig. 14 Schematic illustration to produce wind up and wind off pipe

によるパイプはそり、ねじれは大きいですが、巻き戻した後のパイプは巻き取る前のそれよりも著しく減少した。

5. 結言

薄板ばね材でパイプを成形する実験を行った。本実験において得られた結果は次のようである。

- 1) タンデム冷間ロール成形機に組み込まれたロールの最終段ロールのロール穴内周長が素板板幅の半分程度であると、成形された薄板ばね材パイプは板両縁端が接続した閉パイプになる。
- 2) 絞り込み成形方法による(1)のパイプ成形において生じる各種の形状欠陥をロールパススケジュールとの関係を明らかにした。また、本形状欠陥の一つである縁波は、パイプ板縁から挿入した治具でパイプエッジを持ち上げる成形方法によって除去できた。
- 3) タンジェントベンダーで薄板ばね材を板端から曲げ→前送り→曲げ→前送りの繰り返し曲げを行うと、平板ばね材はパイプ状に変形する。本方法によって得られるパイプの直径は、タンジェントベンダーのダイ肩半径と材料の前送り量によって決まることを実験で明らかにした。
- 4) タンデム冷間ロール成形機で対称溝形断面のウェブ幅を順次減少させる成形工程で成形を行うと、タンジェントベンダー成形と同じ理屈で、パイプが成形できることを実験で確認した。
- 5) 上記(4)の方法は、多くのロール成形段数を必要とする。しかし、1段スタンドに組み込まれた対称溝形断面成形用分割ロールを対称溝形断面の両端から断面中央に向かって徐々に寄せる操作を、薄板ばね材が本ロールの前進・後退の往復を繰り返す度に行えば、1段スタンドでもパイプ断面が成形できることを実験で確認した。
- 6) 薄板ばね材パイプを開いて平板にして、これを円筒ドラムに巻きつける。次に、この平板を円筒ドラムから巻き戻すと、平板は再びパイプ形状に復元することを実験で確認した。なお、巻き取り後の復元パイプ直径は巻き取り前のパイプ直径よりは若干大きくなる。

本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団、および、平成12・13年度科学研究費基礎研究(C)の支援を受けて行ったものである。また、日新製鋼(株)、新日本製鐵(株)から薄板ばね材を提供して頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 広橋光治：塑性と加工，44-504(2003)，2。
- 2) 鎌土重晴・小島陽：同上，44-504(2003)，3-9。
- 3) 小奈弘：冷間ロールの調整法と自動設計法，(2002)，41-68，拓殖大学研究所。
- 4) 上井清史・鈴木孝司・三原豊：平12 塑加春講論，(2000)，141-142