

# 金属帯板の送り曲げ加工法の開発

小川秀夫\*

## 1. 緒 言

金属帯板の曲げ加工法としてロール成形法がある。原理的には無限長の帯板の曲げ加工も可能であり、成形速度も速く大量生産に適した特徴を有している。

これに対してプレスブレーキによる曲げは、一般には曲げ型より長い板材の曲げはできないが、多品種少量生産の面からするとロール成形より有利である。

曲げ加工の分類<sup>1)</sup>によればロール成形による曲げは送り曲げ様式に分類され、プレスあるいはプレスブレーキによる曲げは突き曲げ様式に分類される。本研究では両者の曲げ様式の長所を取り入れ、加工形態は突き曲げ様式しながらも、曲げ型内での帯板の変形形態は送り曲げ様式となるようにし、プレスあるいはプレスブレーキによっても原理的には無限長の帯板の曲げ加工ができる新しい曲げ加工法を開発するものである。具体的には長尺の帯板をプレス機械の上下運動に同期して所定の長さずつ曲げ型内に送り込み、曲げ加工していくものである。これを送り曲げ加工法とよぶことにする。

## 2. 送り曲げ加工法の概要

送り曲げ加工法の最も基本的な形式は、汎用のプレス曲げ型内に帯板を順次送り込んで成形していくものである。図1はV曲げを対象としたときの型端部で生じる変形形状を示したものである。送り曲げ加工法の成否は、帯板を送って次の成形をした際に、型端部で発生した付加的変形の影響をどの程度消去できるかにかかっている。型端部での変形の特徴は、型端部O点から板縁部A点、及びB点にかけてフランジ面に折れ曲がりが発生することである。しかもこのときのOBでの折れ曲がり変形の大きさは曲げ角とほぼ同程度になってしまふことである。フランジ面の過度の折れ曲がり変形は、帯板を送って次の成形をした際にも完全には消去されず、曲げ成形後のフランジ部に波状

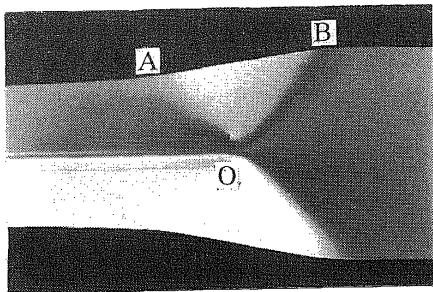


図1. 形端部で成形された帯板の変形形状

の形状不良（縫波）を残してしまう。

送り曲げ加工を可能にするためには、型端部での変形をタンデムのロール成形時にみられるような漸増的な形状にする必要がある。このための手段として傾斜型<sup>2)</sup>を用いることにした。傾斜型は図2(a)に示すように、汎用の曲げ型を長手方向に傾斜させたものである。傾斜させることによって、ダイに対するパンチの相対的な押込み量が図2(b)のように長手方向の各位置で連続的に変化する。このことを利用して図2(c)のような漸増的な形状を形成するものである。図3に傾斜型で成形された形状を示す。目的とした

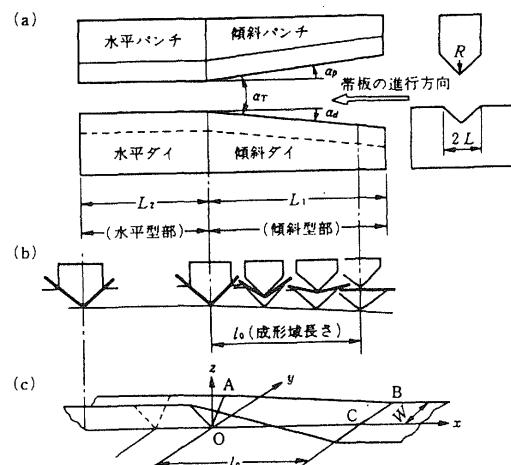


図2. 傾斜型の概略図と帯板の変形過程

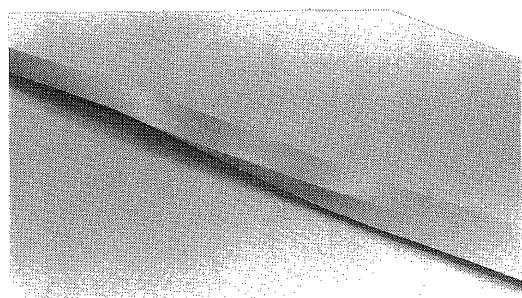


図3. 傾斜型部での変形形状

漸増的な形状が得られていることがわかる。

傾斜型で重要なことは傾斜角の大きさである。パンチとダイはそれぞれ個別にその傾斜角 $\alpha_p$ 、 $\alpha_d$ を設定できるが、 $\alpha_p$ と $\alpha_d$ の和で示される $\alpha_T$ が大きくなると、図2(c)に示した成形域長さ $l_0$ は短くなる。 $l_0$ が短くなると傾斜型部での成形形状に関連して、板縁長さABは板幅中心長さOCに対してより長くなり、板縁部に大きな伸びが発生することになる。

伸びの発生した板縁部は、次の工程で水平型部に送り込

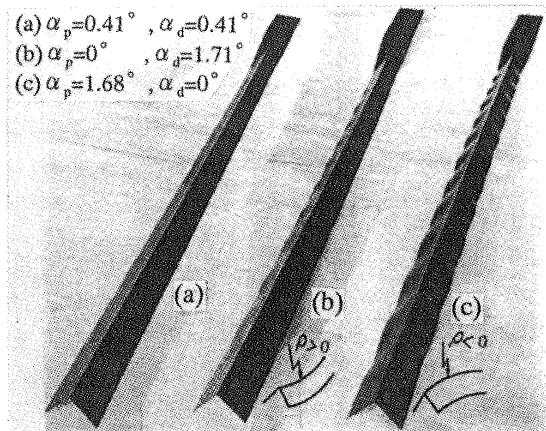


図4. 傾斜型によるV曲げ成形品の例

まれて成形を受けた際に、板幅中心長さと板縁長さが等しくなるように変形することから板縁部は圧縮される。このとき板縁部に発生している伸びが大きいと板縁部は座屈して、図4に見られるような縁波が発生する。縁波の発生を抑制するには、板縁部の伸びがある限度以下になるように $\alpha_T$ を小さく設定しなければならない。

また、成形品に発生する長手方向そりは $\alpha_p$ の影響を強く受ける。図4に示したように $\alpha_p$ が小さいとそりは正（鞍そり）となり、 $\alpha_p$ が大きくなると負（船底そり）へと変化する<sup>2)</sup>。

### 3. 送り曲げ加工法による金属帯板からの円管成形

#### 3.1 検討した2つの円管成形方式

基本的なV字形断面形状への送り曲げ加工が可能となったので、より高度な実用化を目指して金属帯板から長尺

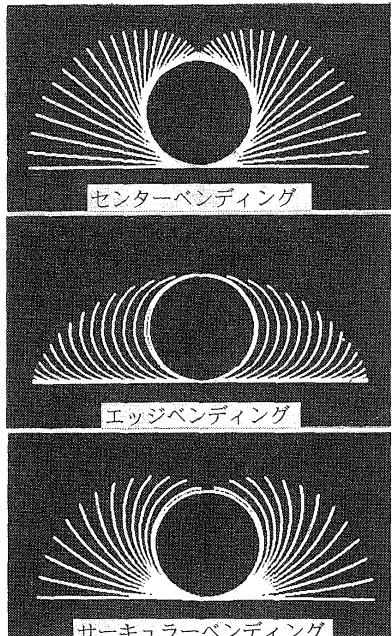


図5. 送り曲げ加工法による円管成形の基本方式

の円管を成形することを検討した。

送り曲げ加工法により帯板から円管を成形する方式として、図5に示す3基本方式を上げることができる。センターベンディングは帯板幅中央部から管と同じ半径で曲げていき、帯板の送り毎に曲げ位置を帯板幅中央部から板縁部へと移行していく方式である。板縁のたどる軌跡はインボリュート曲線となり、その軌跡長さは管直径の2.47倍である。エッジベンディング方式は帯板の両縁より管と同じ半径で曲げていき、帯板の送り毎に曲げ位置を帯板幅中央部へと移行していく。板縁のたどる軌跡はサイクロイド曲線であり、軌跡長は管直径の2倍である。サーキュラーベンディングは帯板幅全体に曲げ変形を与え、送り毎に曲げ半径を順次小さくしていく方式である。板縁のたどる軌跡長さは管直径の2.22倍である。

これらの3基本方式はロール成形によって帯板から円管を成形するときの方式とも共通するものであるが、プレス

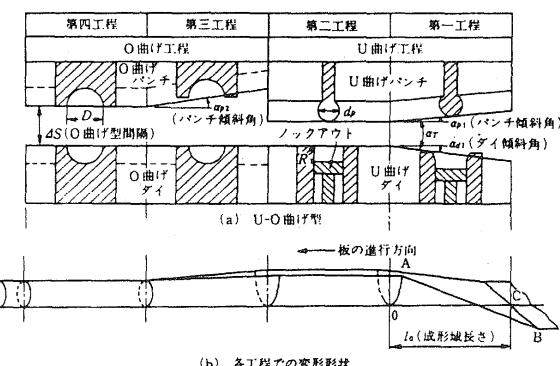


図6. 送り曲げUO成形法

加工（突き曲げ様式）の観点から見ると、センターベンディング方式はUO成形といえ、すでに広く行われている実績のある曲げ加工法である。一方、3基本方式の中で板縁の軌跡長さが最も短いのはエッジベンディング方式であった。この幾何学的特性は送り曲げ加工時の帯板板縁部に付加的に発生する長手方向ひずみを最小とする条件になる<sup>3)</sup>。成形品に発生する長手方向そりや縁波など、送り曲げ加工特有の形状不良は長手方向ひずみに起因するもの<sup>2)</sup>であったことから、軌跡長さの短いエッジベンディング方式は送り曲げ加工にとって有利な成形方式と考えられる。

以上の観点から、3基本方式のうちセンターベンディング方式（UO成形方式）とエッジベンディング方式の2つの方式によって、金属帯板から長尺の円管を成形することを以下に検討した。

#### 3.2 送り曲げUO成形方式による長尺帯板からの円管成形

送り曲げ加工法によるUO成形方式により帯板から長尺の円管を成形するには帯板の成形過程を図6(b)のような形状にすればよい。このような形状を帯板に与えるためにV曲げのときと同様、汎用のU曲げ型、O曲げ型を図6(a)のように長手方向に傾斜させた曲げ型を用いる。

実験では第一工程の U 曲げ型の傾斜条件として、パンチ傾斜角  $\alpha_{p1}$  とダイ傾斜角  $\alpha_{d1}$  の和  $\alpha_T$  がいずれも  $2^\circ$  で一定となるようにした。O 曲げ型は成形する管の外径と同一寸法の半円形断面のパンチとダイである。O 曲げ型の傾斜条件はパンチのみを  $\alpha_{p2}=2^\circ$  で傾斜させた。これは O 曲げ工程でのパスラインを水平とし、U 曲げ成形品が O 曲げ工程で長手方向に曲げられるのを避けるためである。

図 7 に U 曲げ時の典型的な成形形状例を示す。曲げ型の傾斜条件により長手方向そり、縁波が生じているが、これらの形状不良の発生機構は前述の V 曲げと共通点が多く、パンチ傾斜角  $\alpha_{p1}$  を調整することによって長手方向そりを防ぐことができ、送りピッチ長さ  $p$  を短くすることによって縁波高さを小さくすることができる。

図 8 は O 曲げ後の形状である。U 曲げ時に発生していた長手方向そりや縁波は、O 曲げ工程でほとんど消去している。この好ましい現象は一見、第四工程での O 曲げによる矯正効果とみなされるが、実際には第三工程での成形を含めた複雑な機構であり、左右板縁の縁波同士の接触、

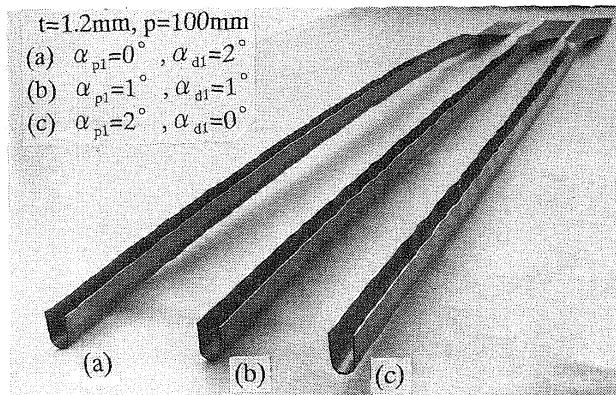


図 7. U 曲げ時の形状

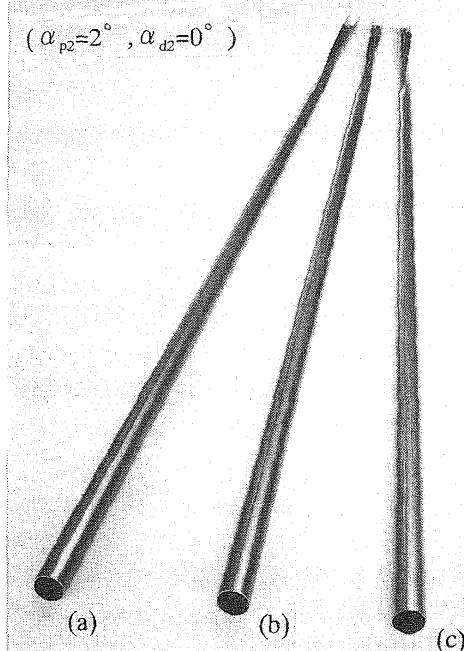


図 8. O 曲げ後の形状

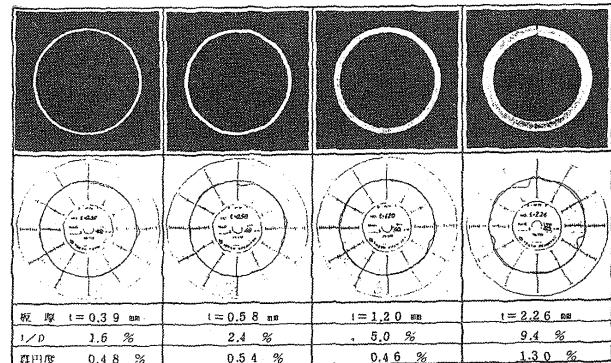


図 9. 管断面形状と真円精度

O 曲げ後の板厚変化などが関係している<sup>4)</sup>。

図 9 は得られた管の断面形状と真円度の測定結果である。ここでの真円度は成形された管の最大外径と最小外径の差を基準外径 (=O 曲げ型内径) で割った値である。通常の UO 成形法で行われているように、帯板幅を管の円周長さより 1%程度大きくしておき、O 曲げの最終段階で管周方向に圧縮変形を生じさせることによって真円度は向上する。とくに板厚が 1.2mm 以下の管 ( $t/D=5\%$ 以下の管) では真円度が 1%以下となり良好であった。それ以上の厚肉管では帯板板縁部の C 曲げによって真円度向上を図ることができる。

### 3.3 送り曲げエッジベンディング方式による長尺帯板からの円管成形

送り曲げ UO 成形法において、帯板縁部を曲げる C 曲げは真円度の向上に加えて縁波抑制にも効果があった。板縁部に与える C 曲げを順次板幅中央部へと移行していく方式がエッジベンディング方式であり、板縁のたどる軌跡長さが最短となる特徴があった。またプレス加工によって帯板に曲げ変形を与えていくことを考慮した場合、成形初期から成形終了まで C 曲げの単一工程を繰返すだけではなく、曲げ半径も常に一定でよい。したがってその曲げ型構造も非常に簡単なものとなる。

送り曲げ加工によるこれまでの V 曲げや UO 成形方式

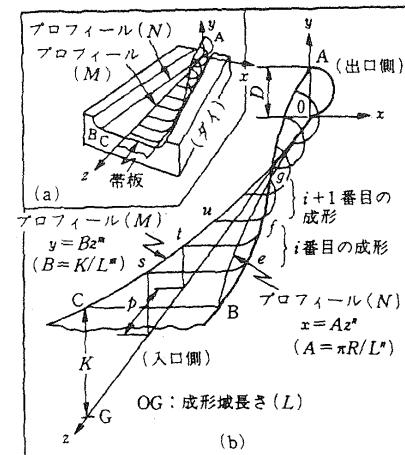


図 10. エッジベンディング方式の成形過程モデル

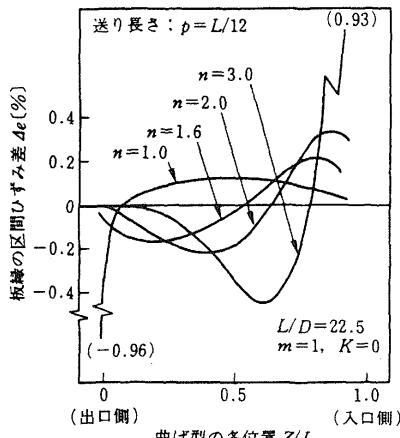


図 11. 送り毎に生じる板縁部のひずみ変化

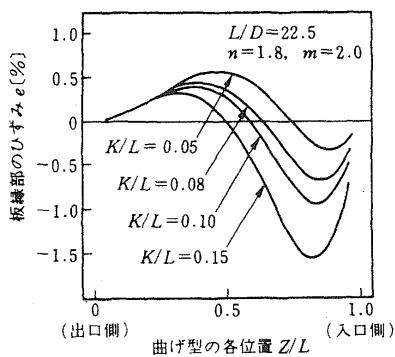


図 12. 板縁部のひずみ分布に及ぼす  $K/L$  の影響

による円管成形によると、長手方向そりは曲げ型の傾斜角で規定される長手方向形状の影響を強く受けた。一方、縁波は成形過程中的長手方向各位置での断面の成形量配分に関するものであった。これらの結果を考慮して、エッジベンディング方式による円管への成形過程を一般化して示すと図 10 のようになる。つまり、板縁部から板幅中央部へ管と同じ半径で曲げていき円形断面を成形していく過程において、その長手方向形状を板幅中心線 OC で規定し、長手方向各位置での断面の成形量配分を曲げ線 OB で規定す

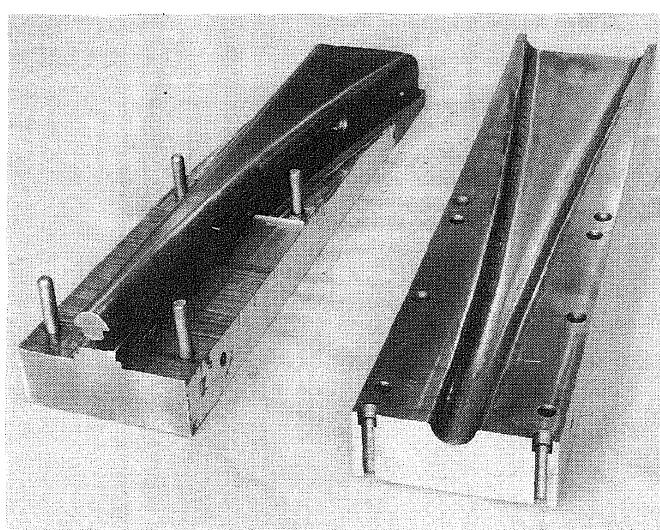


図 13. エッジベンディング方式用曲げ型

るものである。

モデルの適正形状を検討するために、ここでは OC を  $Y=BZ^m$  で表し、OB については XZ 平面上に投影したときに  $X=Az^n$  で示される曲線で表すこととした。成形部の全長を L、帯板入口部の高さを K、管の板厚中心での半径を R とすると、上式の A および B はそれぞれ  $A=\pi R/L^n$ 、 $B=K/L^m$  となる。ここでの n、m をプロフィール指数とよぶことにする。

図 11 は縁波抑制のための最適なプロフィール指数 n を検討した結果である。縦軸は帯板の送り毎に生じる板縁部のひずみの変化量  $\Delta e$  であり、 $\Delta e$  が大きな負の値を取ると縁波発生の恐れがある。n=1 の場合には出口側で  $\Delta e$  が負の大きな値を示し、n=3 の場合は成形域の中程で負の大きな値を示す。 $-\Delta e$  の値が最小となるのは n が約 1.6 のときであり、これが縁波抑制の最適条件といえる。

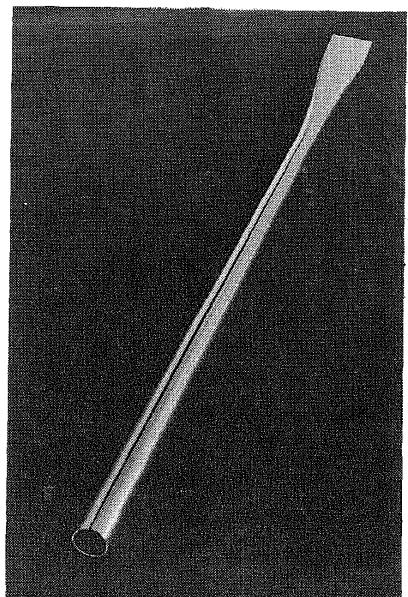


図 14. エッジベンディング方式により成形された円管

次に、長手方向そり抑制についての検討結果を図 12 に示す。入口部の高さ  $K/L$  を大きくすると、板縁部に生じるひずみ分布は全体として負の傾向が強まり、板縁部長さ AB は板幅中心部長さ OC より短くなる。このような条件では負のそりが生じると考えられ、AB と OC の長さがほぼ等しくなる  $K/L=0.08$  が好ましい条件といえる。プロフィール指数 m が変化しても AB=OC の関係はほぼ満たすものの、m が大きくなると帶板に付加的なひずみを大きく与えるようになる。付加的ひずみが最小となるのは m が約 2 のときである。

以上の検討に基づいて製作したエッジベンディング方式用の曲げ型が図 13 であり、この曲げ型によって得られた円管が図 14 である。成形後の管に縁波の発生は見られず、長手方向そりも極めて小さい。以上により本方式による帯板から円管への成形が可能となり、曲げ型設計基準の妥当性も確認できた。

#### 4. 実用化への適用（周辺技術の開発）

##### 4.1 送り曲げ加工用プレス機械の開発

これまでの成形実験により汎用のプレス機械、汎用の送り装置によっても送り曲げ加工が十分にできると判断できた。しかし生産性、操作性を向上させるには専用機の開発が望ましい。送り曲げ加工用専用機の機能としては、加工材の板厚が変動しても下死点で安定して十分な加圧が加えられること、S.P.M.および帯板の送り長さを大幅に変えられること、

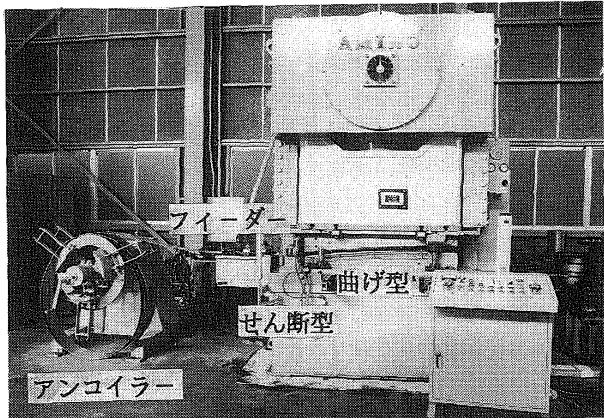


図 15. 送り曲げ加工用プレス機械

表1. プレス機械の主仕様

加工出力 (tonf)	100
ストローク長さ (mm)	60
デーライト (mm)	400
最大毎分ストローク数 (S.P.M.)	100
スライド寸法 (mm)	1550*500
ボルスター寸法 (mm)	1850*500
フレームギャップ (mm)	260
スライドアジャスト (mm)	50
電動機 (kw)	15

れることが必要となろう。操作性の面からいえばボルスターは比較的細長形状であることが望ましく、さらに後述のように、成形ライン中での管の切断、成形ライン中での断続溶接を行うためには、プレス機械に連動したせん断切れ刃の作動、溶接電流制御とのタイミング機能も必要であろう。

こうしたことから図 15 に示すような送り曲げ加工用プレス機械の開発を行った。表1はその主仕様である。生産速度を高めるために加工途中まではメカニカル式で駆動し、それ以降下死点までは油圧式で駆動して下死点で安定した加圧が行えるような機構になっている。周辺装置としてフィーダー、アンコイラーを付属し、所定の送り毎に管切断用のナイフ刃、治具を作動させる制御機能を備えている。

##### 4.2 管切断機構の開発

本来この加工法は長尺の円管を成形することを目的とするが、最終的には所定の寸法に切断しなければならない。また短尺管の成形にも適用できればさらに実用価値が高ま

る。こうしたことから成形ライン中の管の切断技術を検討した。管の切断手段として曲げ加工前の帯板の段階でナイフ刃によって帯板に切れ目をつけておき、管成形後に容易に切断分離できるようにしたものである。

図 16 は切れ目をつけるためのナイフ刃であり、これを曲げ型の前段にセットし、所定の送り回数に達すると油圧機構により刃を作動させて帯板に切れ目をつける。図 17 はナイフ刃により切れ目をつけた帯板を成形した結果である。切れ目の深さを板厚の 75% 程度とすることによって、管断面にゆがみを生じさせることなく切断が可能であった。

##### 4.3 断続溶接法の開発

送り曲げ加工により成形された円形断面をもつ長尺成形品に、いわゆる円管としての機能をもたせるには両板縁の会合部を溶接する必要がある。溶接する方法として、管成形後別工程で溶接する方法と、管成形の進行につれて溶接していく方法の二つが考えられる。多品種少量生産を本来の目的としている本加工法にとっては後者の断続溶接法が強く望まれる。また成形ライン中での溶接が可能となれば、管の曲げ、バルジといった 2 次成形も一連の工程内でできるといった利点も考えられる。したがってここでは帯板の送りに同期した非定常な断続溶接法の開発を検討した。

溶接法は TIG 溶接とし、ごく一般的な溶接機（最大電流 500A）を使用した。図 18 に示すように曲げ型出口部に溶接トチを固定しておき、送り装置によって送り出されてきた成形品がガイドロールを通過する位置で溶接するようにした。

断続運動をする成形品を溶接するには成形品の移動速度

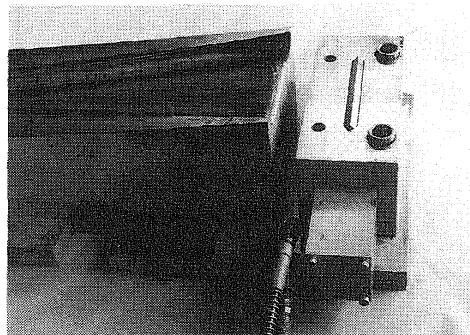


図 16. 管切断のための帯板せん断用ナイフ刃

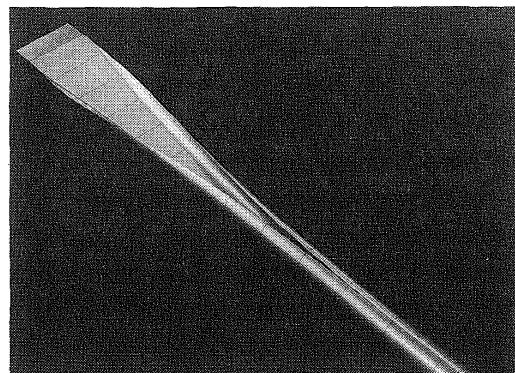


図 17. ナイフ刃により切れ目をつけた帯板の成形

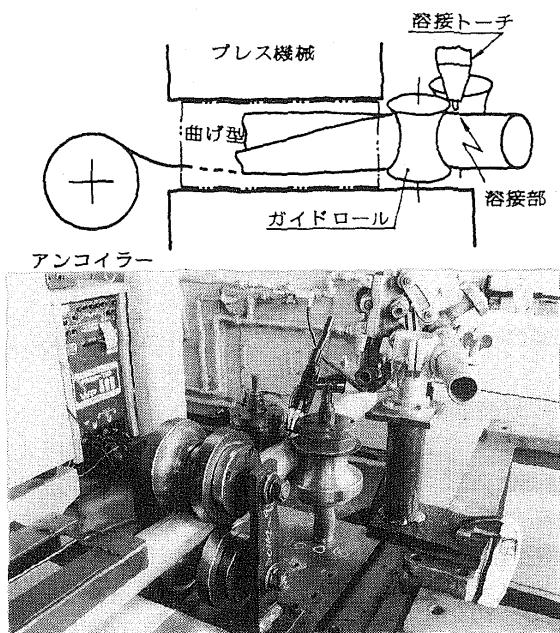


図18. 断続溶接装置の概略

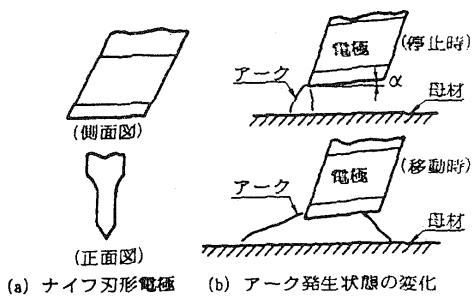


図19. ナイフ刃電極とアーケの発生状態

に比例して溶接電流を制御し、入熱量を変化させなければならぬ。一般型TIG溶接機のもつスロープアップ・ス

ロープダウン機能を利用してもその電流制御は十分でない不十分な電流制御を補うために、図19に示すようなナイフ刃形電極を開発した。通常の円錐形電極に比べて入熱分布を溶接線方向に分散できるとともに、溶け落ちを支配するアーケ力を1/3以下に低減することができた。さらに電極エッジを水平線に対して $\alpha$ だけ傾けることによって送電停止時の小電流状態においてもアーケが電極先端で安定して維持できるようにした。断続溶接部の引張試験、張出性試験などを行い、母材強度にはほぼ達する十分な成形性能が確保されていることを確かめた。

## 5. 結 言

プレス曲げ加工により、帯板から長尺円管を成形するより曲げ加工法を確立した。円管への成形方式として、U成形方式とエッジベンディング方式の2方式について検討した。また送り曲げ加工による円管成形法を実用化するための周辺技術として、専用のプレス機械、成形ライン中の管切断、断続溶接法の開発も行った。

現在、乗用車用超ハイテン材バンパーリンフォースメントの成形<sup>5)</sup>やシートスライドレール、ラジエーター部材成形等に実用されている。

## 参考文献

- 1)日本塑性加工学会編：プレス加工便覧，(1975)，丸善。
- 2)小川秀夫・阿部邦雄：塑性と加工，20-217(1979)，146。
- 3)加藤健三：冷間ロール成形，(1971)，日刊工業新聞社。
- 4)小川秀夫・田村公男・中川威雄：塑性と加工，25-278(1982)，238。
- 5)竹内雅彦・二橋岩雄・門間義明・古畠貴之：49回塑性連講論，(1998)，305。