

# 軸引張り負荷法による帯板の面内曲げ加工機の開発

坂木 修次\*

## 1. まえがき

平板円環状部品は、従来より、薄板を打抜き加工することによって造られることが多い。しかし、この方法では材料の利用効率が低いため、新しい加工法の開発が求められている。その加工法としては、帯板をその面内で曲げ加工する方法、いわゆる、面内曲げ加工がある。面内曲げ加工では、帯板の面内の曲げ剛性が、面外への曲げ剛性に比較して著しく大きく、ねじりを伴う面外への曲げ座屈変形が発生しやすい。高い曲げ加工度を得るために、しわ等の座屈変形の発生を抑制する対策が必要になる。

はじめに、このような面内曲げの基礎的な変形特性を明らかにするために、均等曲げモーメントを負荷した場合の横座屈限度を推定した<sup>1,2)</sup>。また、片持り状の集中荷重負荷における加工特性の実験結果を検討し、横座屈限度には断面比の及ぼす影響が大きいことを明らかにした<sup>3)</sup>。さらに、曲げモーメント負荷に加えて軸引張りを負荷することが座屈の発生を抑え、加工限度の向上に顕著な効果をもつ<sup>4)</sup>ことを述べる。

次に、高い加工能率のもとに面内曲げ加工を行う実用的な方法として、帯板を所定の曲げ半径をもつ巻胴に巻付ける面内巻付け曲げ加工<sup>4,5)</sup>を紹介する。この面内曲げ加工機は、軸引張りの負荷によって、しわ変形を効果的に抑制し、また、倒れ変形の拘束治具を備えたものである。

## 2. 面内曲げにおける横座屈限度

帯板の面内曲げ加工における横座屈の発生状況及び発生限度を検討する。図1-1に示すように、加工力として帯板の面内、すなわち、y-z平面内に均等曲げモーメントを負荷する。比較的板厚が厚い場合は図1-2のように座屈によるしわを発生することなく面内曲げ製品を得ることができる。

一方、板厚が比較的薄く、面外への曲げ剛性が小さい場合は、図1-3のように、ある程度曲げ変形が進行した後に、ねじり変形を伴う面外への曲げ変形が生じる<sup>1,2)</sup>。これは横座屈とよばれる不整変形で、その形状は、一般に、しわと呼ばれるものである。この変形はくびれ・割れとともに、面内曲げ加工限度の要因の一つになっている。このような座屈による変形は、曲げ変形度が小さい範囲で発生することではなく、変形度がある限界を超えて大きくなつた後に発生するのが特徴である。

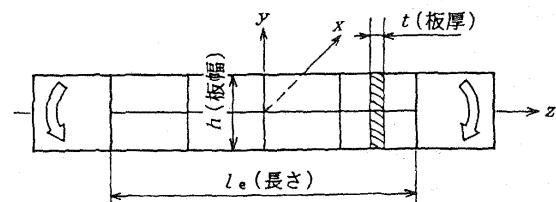
ここで、帯板の両端が挟み支持され、均等曲げモーメントを受ける場合の解析を基本として、図1-1のように、その両端がy-z面内での回転が自由で、y軸回りの回転が

拘束されているときの横座屈限度の面内曲げモーメント  $M_{cr}$  及び面内曲げ加工度  $\rho_{cr}/h$  を求める<sup>2)</sup>。

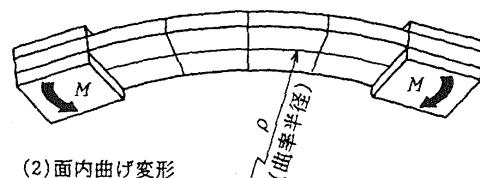
帯板の長さが  $l_e$  のとき、解析で用いる長さ  $l$  は、図1-3に示すように、しわ変形の半波長 ( $l = l_e/2$ ) とする。この座屈変形の基準となる長さ  $l$  を座屈長さ  $l_{cr}$  とも呼ぶ。弾性域の面外曲げ剛性を  $B_1$ 、ねじり剛性を  $T$  とすると、横座屈限度の面内曲げモーメント  $M_{cr}$  は次式で表される。

$$M_{cr} = \frac{\pi \sqrt{B_1 T}}{l} \quad (1)$$

式(1)で示される座屈限度の面内曲げモーメント  $M_{cr}$  は弾性域の値であり、塑性域での座屈曲げモーメントは、塑性域の面外曲げ剛性及びねじり剛性を適用する必要がある。弾性域における面外曲げ剛性  $B_1$  及びねじり剛性  $T$  は、それぞれ、常に一定であるのに対して、塑性域における面外曲げ剛性では、縦弾性係数  $E$  の代わりに断面の曲げひずみ量に対応した接線係数  $d\sigma/d\varepsilon$  を用いる。



(1) 帯板各部の名称と座標系



(2) 面内曲げ変形

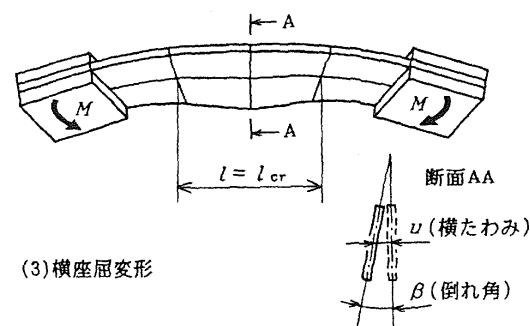


図1 面内曲げ座屈変形<sup>1)</sup>

したがって、面内曲げ変形度が大きくなるほど接線係数が小さくなり、同時に面外曲げ剛性も小さくなるという特徴がある。ねじり剛性は、ねじり変形の初期では弾性域のねじり剛性を保持していることが実験的に確かめられており、塑性域においても弾性域のねじり剛性を適用することができる<sup>2)</sup>。

いま、曲げ変形を受けた帯板の中立軸の曲率半径が  $\rho$  になっているものとし、材料の応力ひずみ関係を  $\sigma = C\varepsilon^n$  とすると、この曲率半径のときに横座屈が発生すると仮定した場合に必要な面内曲げモーメント  $M_{cr}$  は次のように表される。ここで、中立面の曲率半径を  $\rho$ 、板厚を  $t$ 、板幅を  $h$ 、せん断弾性係数を  $G$ 、塑性係数を  $C$ 、加工硬化指数  $n$  値を  $n$ 、しづわの半波長を  $l_e$  とする。

$$M_{cr} = \frac{\pi \sqrt{\frac{Cht^6}{18}} \left(\frac{h}{2}\right)^n \rho^{1-n} \left(1 - 0.63 \frac{t}{h}\right) G}{l} \quad (2)$$

一方、帯板が横座屈を生じることなく中立面の曲率半径が  $\rho$  になったものとすると、そのときの面内曲げモーメント  $M$  は次式で表される。

$$\frac{M}{t} = A \left(\frac{1}{\rho}\right)^n, \quad A = \frac{2C(h/2)^{n+2}}{n+2} \quad (3)$$

式(2)及び(3)の値が等しくなったときの曲率半径  $\rho$  が塑性域の横座屈限度の曲率半径  $\rho_{cr}$  となる。

一般に、座屈限度は供試材及び加工装置に含まれる初期不完全性の影響を受ける。また、塑性域の面内曲げでは、断面各部の面外曲げ剛性が面内曲げひずみに依存するため、面外曲げ剛性をまとめて一つの値として解析した結果と異なる。圧縮領域の最外層で、圧縮応力が優先する局部座屈が発生しやすくなり、この解析結果と多少の差異が生じる。その効果は加工硬化指数の大きな焼なまし材に対して大きく影響することになる。したがって、このような効果を補正係数  $K$  に含めると、一般の材料に対して、 $0.6 \leq K \leq 1.4$  のようになる<sup>2)</sup>。横座屈限度の加工度を、板幅  $h$  との比  $\rho_{cr}/h$  で表すと、式(4)のようになる。

$$\frac{\rho_{cr}}{h} = \frac{K}{2} (n+2)^{-\frac{2}{n+1}} \left\{ \frac{0.23}{1 - 0.63 t/h} \cdot \left( \frac{C}{G} \right) \left( \frac{l_e}{h} \right)^2 \left( \frac{h}{t} \right)^4 \right\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (4)$$

式(4)について、 $K=1.0$  とし、特定の材料を仮定して、供試材の寸法の影響を表すと、図2 のようになる。図より、横座屈は断面比  $h/t$  及び細長比  $l_e/h$  が小さいほど、座屈限度の加工度が大きくなり、また、断面比  $h/t$  の影響が、細長比  $l_e/h$  の影響よりも大きいことが解る。同様に、形状を固定して供試材の加工硬化指数  $n$  と塑性係数  $C$  の効果を表すと 図3 のようになる。図より、加工硬化指数  $n$  が大きいほど、横座屈が生じにくくなることが解る。

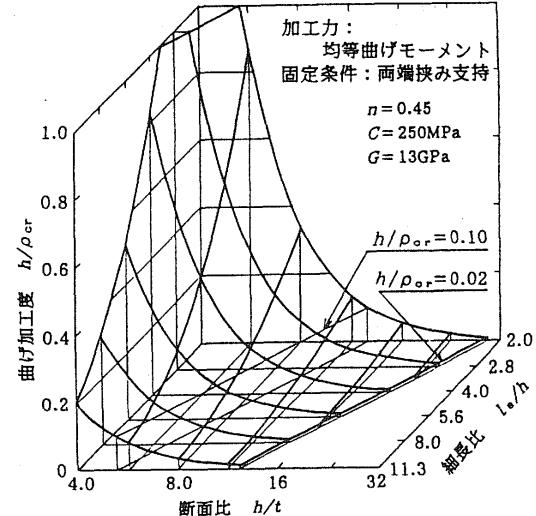


図2 横座屈限度の加工度に及ぼす寸法の影響(解析)<sup>2)</sup>

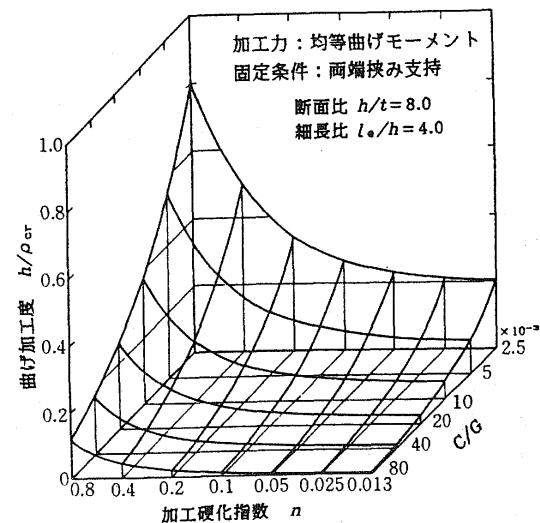


図3 横座屈限度に及ぼす材料特性の影響(解析)<sup>2)</sup>  
G:せん断弾性係数, C:塑性係数

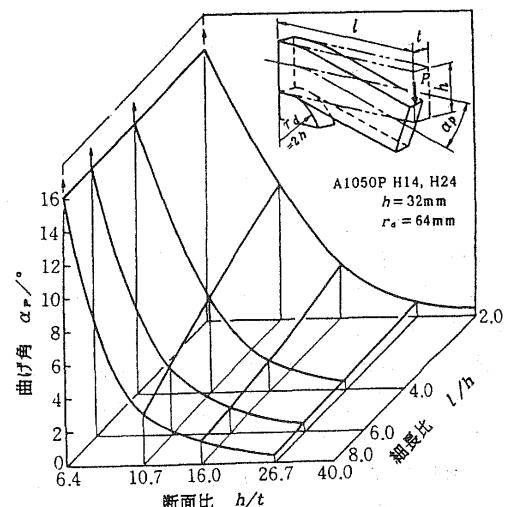


図4 片持ち曲げ負荷による横座屈限度(実験)<sup>3)</sup>

### 3. 面内曲げ加工の基礎実験結果

片持ばかり状に保持した供試材の自由端の板幅方向に集中荷重を負荷し、負荷点の横変位を拘束しない場合の横座屈限度の面内曲げ角を図4に示す。図によれば、断面比及び細長比が大きい場合は弾性域で横座屈を生じているが、断面比  $h/t = 6.4$  のように小さい条件では、細長比にかかわらず十分に塑性曲げが可能になり、曲げ角  $\alpha_p = 16^\circ$  に至っている。細長比による影響は比較的小さく、工具設計上で、板押えとパンチの相対位置はある程度広い範囲に選び得ることを示している。

### 4. 回転引曲げによる面内曲げ加工特性

#### 4.1 加工装置及び工具配列 I

実用面内曲げ加工機として試作した軸引張り負荷機構を持つ回転引曲げ加工機の概念図を図5に示す。この装置の主要な部分は、帯板を巻付ける巻き筒とそれを回転させる減速機付モーター及び帯板に所定の軸引張りを負荷するための軸力負荷装置等で構成されている。巻付けダイの曲げ半径は交換により選択可能である。

曲げ荷重は、帯板を取付けた巻き筒を回転したときに、帯板が曲げ力負荷棒に接触して発生する曲げモーメントによって負荷している。軸引張り力は巻き筒に巻取られる帯板の両側を摩擦板で挟みつけることによって発生する摩擦力として負荷している。摩擦板はてこの作用をもつ軸力負荷用アームの一端に取付けられている。アームの他端はスクリュージャッキに接続され、スクリュージャッキは軸力負荷用モーターで駆動されている。

この軸引張り力をロードセルによって検出し、それをフィードバック信号とするサーボ増幅器によって、軸引張り力は曲げ過程で常に所定の大きさを保つように制御されている。また、曲げ加工の開始以前に所定の軸引張りを発生させておく必要があり、軸力負荷装置には助走機能を備えている。

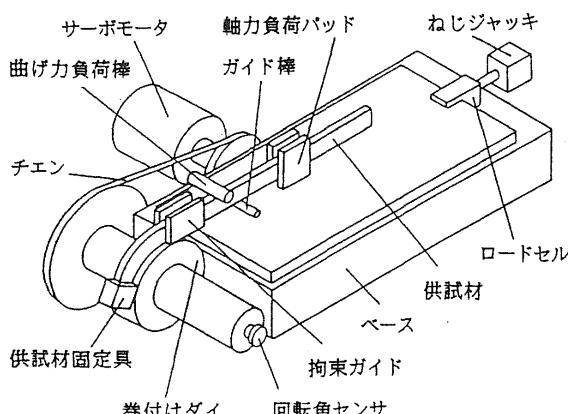


図5 軸引張り負荷面内曲げ加工装置概念図

軸引張りの大きさ  $P_a$  は、帯板の単純引張り試験による最大引張り荷重  $F_{max}$  に対する比、すなわち、軸力付加率  $P_a/F_{max}$  によって設定している。軸力付加率は 0~0.5 の範囲で、その効果を検討した。

はじめに、回転引曲げによる面内曲げ加工の基本特性を明らかにするために、曲げモーメントを発生するための曲げ力負荷棒及び軸引張り力負荷部から構成される工具配列を用いた。これを工具配列 I<sup>4)</sup> とし、図6に示す。曲げ力負荷棒は曲げ点から供試材の板幅（高さ） $h$  の6倍の位置に配置している。

巻付けダイの曲げ半径  $R$  は 64mm とする。

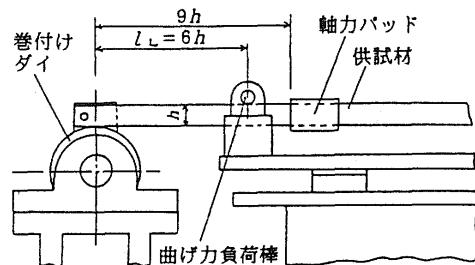


図6 軸引張り負荷面内曲げ加工機の工具配列 I<sup>4)</sup>

#### 4.2 回転引曲げ面内曲げ加工の変形特性

面内曲げ加工では座屈が発生しやすく、加工限度の要因となる。座屈発生限度は帯板の板厚に関する断面比  $h/t$ 、細長比（帯板の負荷長さ／板幅） $l_L/h$  のほか、帯板の固定条件などに影響される。

面内曲げ加工用試料にはアルミニウム合金 A6063S-T6 材の帯板を用いた。帯板の板厚  $t$  は 3.0, 4.0 及び 5.0 mm、板幅  $h$  は 30mm としている。これにより板幅  $h$  及び板厚  $t$  に関する断面比  $h/t$  は 10, 7.5 及び 6.0 となっている。加工度は板幅  $h$  と帯板の中央軸の曲率半径  $r_0 = R + h/2$  の比  $h/r_0$  で表す。

はじめに、曲げ点における拘束ガイドを用いない工具配列 I による座屈モードを図7に示す。図の横軸は軸力付加率  $P_a/F_{max}$  を、縦軸には、加工の過程で不整変形を発生するまでの回転角を加工度  $\alpha_w$  として示している。

図によれば、板厚が 4.0mm で断面比  $h/t$  が 7.5 では、軸力付加率  $P_a/F_{max} = 0.2$  の場合に、加工度  $\alpha_w$  がおよそ  $80^\circ$  で帯板の圧縮側に座屈変形を発生している。さらに加工を進めると、帯板の圧縮側に連続した波形の座屈変形（しわ）が現れる。この変形の一例を図8-1に示す。このような波形の不整変形を座屈モード I と呼ぶ。

軸力付加率を高め、 $P_a/F_{max} = 0.22 \sim 0.25$  の範囲で軸引張りを負荷した場合は  $\alpha_w = 270^\circ$  に至るまで不整変形は生じていない。この条件で完全に加工された製品の一例を図8-2に示す。このように、軸引張りの負荷は波形座屈の発生を防止して、加工限度を高めるために著しい効果を持つことがわかる。

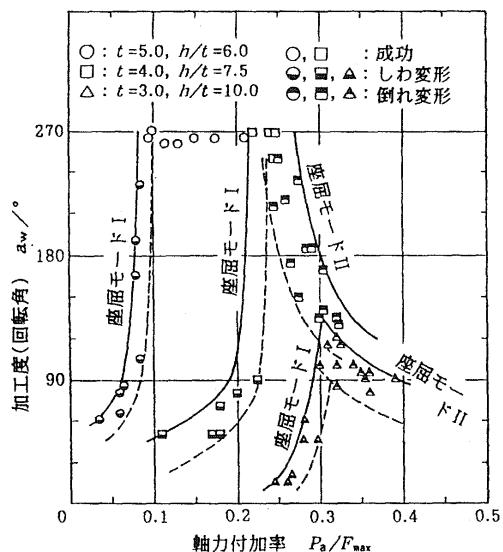


図7 軸引張り負荷回転曲げ座屈モードに及ぼす断面比及び軸力付加率の影響<sup>4)</sup>  
 [ A6063S-T6,  $l_L/h = 6.0$ ,  $h/r_o = 0.38$  ]  
 [  $P_a$ : 軸引張り力,  $F_{max}$ : 最大引張り荷重 ]

一方、さらに軸引張りを高め、 $P_a/F_{max} = 0.25$  を超えるような条件では、むしろ加工限度が低下する現象が現われる。ここで発生する不整変形は帯板全体が面外に倒れる座屈変形である。このような不整変形を示す加工結果の一例を図8-3に示す。この倒れ変形を座屈モードIIと呼ぶ。板厚  $t$  が 5.0mmで断面比  $h/t$  が 6.0 の場合は、図7に示すように、板厚  $t = 4.0\text{mm}$  の場合に比較して加工限度は高くなっている。軸力付加率が小さく、 $P_a/F_{max} = 0.06$  の軸引張りを負荷した場合でも、加工度  $\alpha_w$  はおよそ  $80^\circ$  になり、 $P_a/F_{max} = 0.10$  では  $270^\circ$  以上の加工度が得られている。

板厚  $t$  が 3.0mmで断面比  $h/t$  が 10.0 の場合は、板厚  $t = 4.0\text{mm}$  の場合に比較して加工限度は低く、軸力付加率  $P_a/F_{max} = 0.25$  の軸引張りを負荷しても加工度  $\alpha_w$  は  $20^\circ$  に過ぎない。 $P_a/F_{max} = 0.30$  の場合の加工度  $\alpha_w$  は最大で  $120^\circ$  と考えられ、この場合も軸引張り負荷の効果を示している。板厚  $t$  が 3.0mm の場合は、 $t = 4.0\text{mm}$  の場

合と同様に、限界を超えて軸引張りを高めると座屈モードIIの不整変形が現われている。このように、帯板の巻付け曲げでは板厚が厚いほど、また軸力付加率が高いほどしわ変形による加工限度が高くなることがわかる。

巻きのトラバース機能を用いて多数巻きを試みた結果を図8-4に示す。加工条件は、板厚  $t$  が 5.0mmで断面比  $h/t$  が 6.0、軸力付加率  $P_a/F_{max} = 0.14$  の軸引張りを負荷している。加工度  $\alpha_w$  はおよそ  $1500^\circ$  に達している。したがって、この加工法では一回巻きで  $270^\circ$  の加工度の得られる条件では、多数巻きも可能になっていると考えられる。

座屈変形は、一般に、引張り応力状態で生じることはなく、圧縮応力によって生じるものである。座屈モードI及びIIの座屈変形の力学モデルは図9のようになる。

座屈モードIは図9-1に示すように、曲げ変形によって帯板の圧縮側に生じる圧縮応力によって誘発される座屈変形である。巻付け曲げ加工では塑性変形が進行する領域が比較的狭いため、座屈形状が連続したしわ状になる。座屈限度は帯板の圧縮側部分の面外曲げ及びねじり剛性に依存しているため、板厚の影響を強く受けることになる。また、軸引張りの負荷は中立軸を圧縮側へ移動させ、圧縮応力が低下することによって、座屈モードIのしわ変形限度を著しく向上させることになる。

座屈モードIIの力学モデルを図9-2に示す。この変形は帯板面内に生じる軸引張荷重の半径方向分力によって帯板が面外へ倒れる座屈変形である。その座屈限度は半径方向分力の大きさ、板厚・板幅・長さ等の寸法及び帯板の両端の固定条件によって決定されるものである。したがって、軸力付加率が高い場合に、また、加工度が増加して帯板の曲げ変形が進行する部分の面外方向の拘束力が低下したときに、この座屈は発生しやすくなるものと考えられる。

これらの座屈モードI及びIIは異なる原因によって発生するもので、帯板の寸法によっては、軸力付加率にかかわらず、座屈モードIのみが発生することもある。

これらの座屈限度の他に、くびれ及び割れの発生も加工限度の重要な要素になっている。

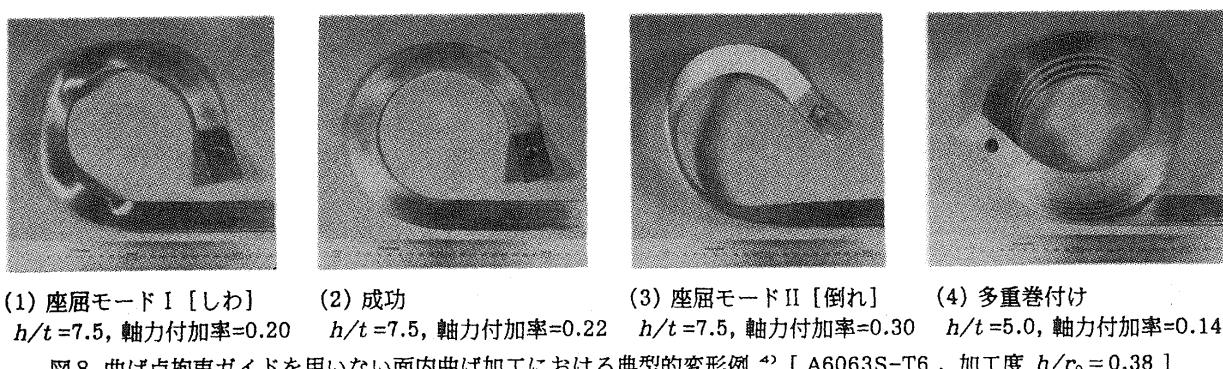
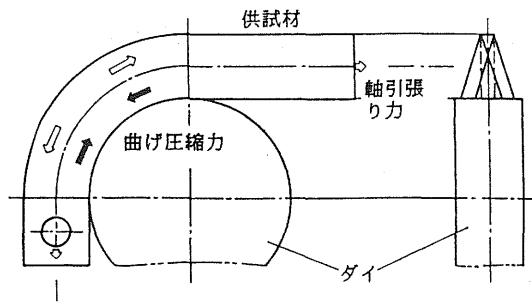
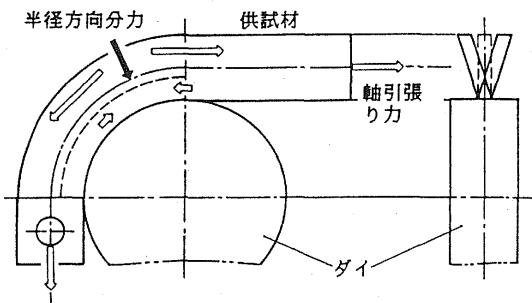


図8 曲げ点拘束ガイドを用いない面内曲げ加工における典型的変形例<sup>4)</sup> [ A6063S-T6, 加工度  $h/r_o = 0.38$  ]



(1) 座屈モード I : しわ変形



(2) 座屈モード II : 倒れ変形

図 9 座屈変形発生の力学モデル

## 5. 実用工具配列による面内回転引曲げ加工限度

前章に示した面内巻付け曲げ加工特性を基に、図 5 に示した加工装置の一部を改良し、実用加工を目指した工具配列による加工限度を求めた。この工具配列 II を 図 10 に示す。

基本的工具配列として、曲げモーメントを発生するための曲げ力負荷棒を、曲げ点から供試材高さ  $h$  の 4 倍の位置に配置し、また、同じく 6.0 または 6.7 倍の位置に、荷重伝達部の変形を拘束し、また、曲げモーメントを局所化するためのガイド棒を設けている。また、曲げ変形開始点附近で供試材が面外方向へ変位することを制限するための曲げ点拘束ガイドを設けている。巻付けダイの曲げ半径  $R$  は 200, 100 及び 50mm とする。

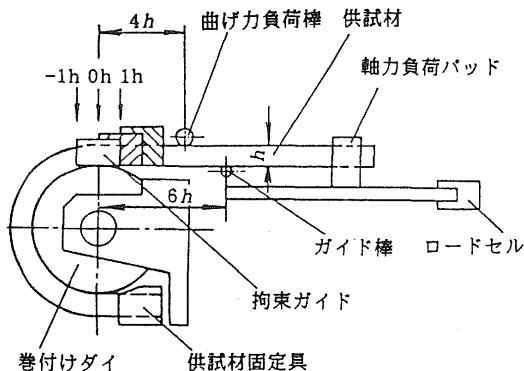


図 10 工具配列 II

表 1 供試材

試料	材質	板幅 $h$	板厚 $t$	ショア硬さ HS
1	A6063S-T5	40	3.0	17 ~ 20
2	A6063S-T6	30	2.0	19 ~ 22.5
3	A6063S-O	40	3.0	10 ~ 11.5

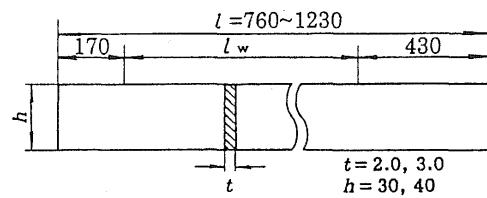


図 11 供試材の形状・寸法

供試材には数種類の寸法のアルミニウム合金帯板を選んだ。加工機の巻付けダイの曲げ半径は供試材高さ  $h$  の 6.7 ~ 1.3 倍とし、しわの発生に及ぼす工具配列の影響と最小軸力付加率等について検討している。供試材にはアルミニウム合金 A6063S-T5, T6 及び O 材を用いた。供試材の一覧を 表 1 に、また、形状・寸法を 図 11 示す。

### 5.1 軸引張り負荷の効果

面内曲げにおけるしわ発生を抑えるためには、軸引張りの負荷が有効である<sup>4)</sup>。これは、軸引張りを負荷し、中立軸位置を圧縮側に移動させ、圧縮ひずみを低減することによって、しわの発生を抑えるものである。一例として、A6063S-T5,  $h=40$ ,  $t=3.0$  mm の供試材を曲げ半径  $R=100$ , 加工度  $h/r_0=0.33$  で加工した場合の軸引張り負荷の効果を 図 12 に示す。この場合は 1h の位置(図 10 参照)に曲げ点拘束ガイドを設けている。図によれば、軸力付加率を高めることによって、しわピッチ  $p$ 、しわ高さ  $\delta_w$  ともに減少し、しわが消滅することがわかる。

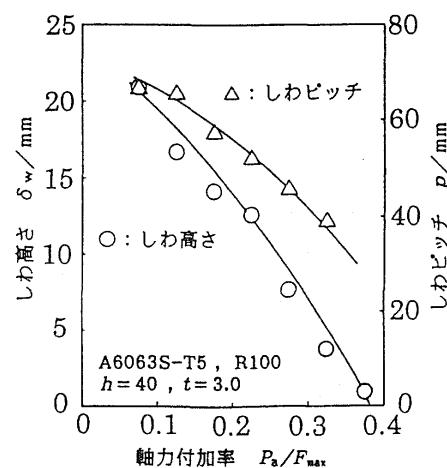


図 12 軸引張り負荷の効果

A6063S-T5,  $h/t=13.3$ ,  $h/r_0=0.33$   
曲げ点拘束ガイド位置: 1h

## 5.2 曲げ点横変位拘束の効果

しわの発生は、圧縮ひずみの大きさ、しわの発生を許容する領域の長さと板の薄さ、すなわち、細長比と断面比などの形状及び拘束条件等によって、その発生限度が影響される。曲げ点変位拘束の効果を図13に示す。図によれば、R100及びR200のように、曲げ半径が比較的大きい

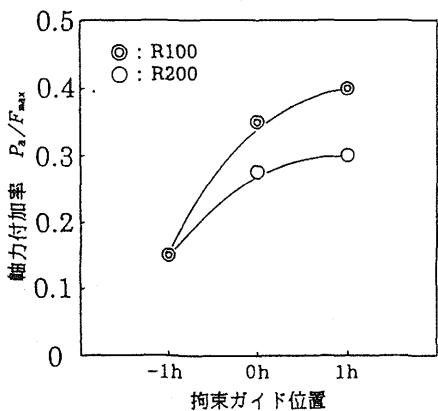
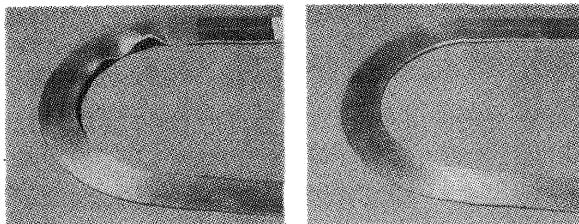


図13 曲げ点拘束ガイドの効果 [A6063S-T5]  
[  $h/t=13.3$ ,  $h=40$ ,  $h/r_0=0.33, 0.18$  ]

表2 加工限度 [ 曲げ点拘束ガイド位置 : -1h ]

材質	板幅 $h$	板厚 $t$	加工限度 $h/r_0$ /[軸力 $P_a/F_{max}$ ]
A6063S-T5	40	3.0	0.57/[0.25]
A6063S-T6	30	2.0	0.33*/[0.45]
A6063S-O	40	3.0	(0.57)/[0.5]

\*: 多重くびれあり。



(1)  $P_a/F_{max}=0.4 \rightarrow 0.2$  [1h] (2)  $P_a/F_{max}=0.15$  [-1h]  
図14 加工例1

[ A6063S-T5,  $h/t=13.3$ ,  $h/r_0=0.33$  ]

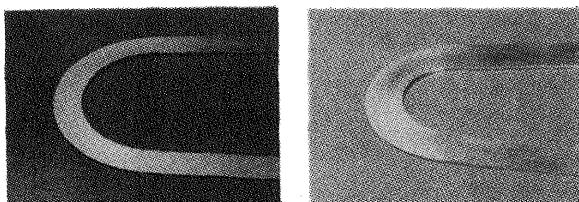


図15 加工例2 [63-T6]  
 $h/t=15.0$ ,  $h/r_0=0.33$   
 $P_a/F_{max}=0.45$

図16 加工例3 [63-T5]  
 $h/t=13.3$ ,  $h/r_0=0.57$   
 $P_a/F_{max}=0.25$

場合は、曲げ点拘束ガイド位置の影響が大きく、-1hにガイドを配置した場合に、圧縮側のしわ変形を消滅させるために必要な軸力付加率は0h及び1hの場合のおよそ1/2～1/3になっている。

## 5.3 加工限度

軸力負荷回転引曲げ加工による加工限度の加工度の一例を表2に示す。図14-1に軸力付加率を連続的に減少した場合の加工例を示す。限界軸力付加率以上ではしわが発生しないが、それ以下では、軸力付加率の減少に対応して、しわ高さ及びピッチとともに増加する様子がわかる。図14-2には、-1hに曲げ点拘束ガイドを置き、一定軸力付加率  $P_a/F_{max}=0.15$ とした場合の成功例を示す。図15には多重くびれの例を示す。図16は、板厚  $t=3.0\text{mm}$ ,  $h/t=13.3$ を軸力付加率0.25で加工したもので、加工度  $h/r_0=0.57$ を達成した例である。

## 6. まとめ

帯板の面内曲げ加工について、曲げ加工限度の検討及び加工限度の向上法を試み、次のような結論を得た。

- (1) 帯板の面内曲げ加工における不良現象には、圧縮応力領域より発生するしわ変形、倒れ変形及びくびれ・割れがある。
- (2) しわ変形の発生限度は、帯板の板厚の増大、すなわち、断面比の減少に伴い、加工限度は著しく高くなる。
- (3) 加工力に軸引張りを付加することによって、しわ変形の発生を抑え、加工限度を著しく向上することが可能になる。
- (4) 面外変位の拘束条件などの工具配列が加工限度を律する重要な要素になる。曲げ点において帯板の面外方向変位を拘束することによって倒れ座屈の発生限度を著しく高めることができる。
- (5) A6063S-T5材で、板厚  $t=2.0\text{mm}$ 、断面比  $h/t=15$ の場合は軸力付加率が0.45で加工度は  $h/r_0=0.33$ に達し、板厚が厚くなるほど小さな軸力付加率で加工が可能になっている。

終わりに、本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団の研究開発助成によってなされたものであることを記し、深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 塑性加工技術シリーズ\* 14 曲げ加工 (1995), 121, コロナ社。
- 2) 坂木ほか：塑性と加工, 25-284(1984), 825.
- 3) 坂木ほか：塑性と加工, 20-226(1979), 1002.
- 4) 坂木ほか：塑性と加工, 35-397(1994), 170.
- 5) 周ほか：47回塑性加工講論 (1996), 395.

\* 東京都立科学技術大学 機械システム工学科 教授