アルミニウム薄板円筒のウレタンロール成形機による加工

橘高 重義*・佐藤 金司**・宮 隆一***
尾崎 和雄****・加川 穂積**・五十嵐 茂樹*****

Forming of aluminum sheets into cylinders with
urethan elastomer roll machine

UDC: 669.71-12:621.774.35

Shigeyoshi KITTAKA*, Kinji SATO**, Ryuichi MIYA***, Kazuo OZAKI****, Hozumi KAGAWA**
and Shigeki IGARASHI*****

Aluminum sheets O and 1/2H in hardness and 0.5 to 2.0 mm in thickness were roll formed using urethan elastomer rolls 80°, 90° and 95° in hardness. The forming ratio is greatly affected by mechanical properties of the sheets. The O-sheets have better forming ratio than the 1/2-sheets. The 1/2H-sheets 1.5 and 2.0 mm in thickness are incapable of forming into cylinders, while the O-sheets are capable regardless of their thickness. The maximum forming ratio is achieved for the O and 1/2H-sheets 2.0 mm in thickness and for the rolls having different hardness. Both the O and 1/2H sheets 0.5 mm in thickness are formed at a forming radius particularly greater than the sheets having more thickness. As the forming radius of the sheet approaches to a radius of steel roll, the formed radius is definitely limited corresponding to the materials, sheet thickness and forming conditions.

(Received December 12, 1978)

1. 緒 言

金属薄板を円筒形に成形する方法としては、3本の鋼製ロールによるロール成形法がよく知られている。この方法には次のような欠点がある。

① 要求される円筒半径に成形するためには、材料に多数回のロール間パスを加えないと成形できない。

② 材料が硬い鋼製ロール間を通るので、加工した成品に表面損傷が発生しやすい。

③ 材料の面に孔や切り欠きがあると、折れ曲りが発生することがある。

このような問題点の解決として、ロールにポリウレタンゴムを使用した成形法がある。一對のロールの1本をウレタンゴムで作り、他の1本を鋼製ロールで構成する。この成形法の特徴は次のとおりである。

① 1工程で精度よく円筒状に成形できる。

② 材料面に孔などがあつても折れ曲りを生じない。

③ 加工した成品の表面にほとんど損傷を与えない。この点は軟質材料の加工に対しとりわけ有利である。

この加工法については、まだ成形機構の解明されていないところが多い。本報では、工業用純アルミニウムを加工するときの機構を、ウレタンゴムのかたさを変化させて検討した結果を報告する。

2. 方法および材料

2.1 装置

Fig. 1 に示すように鋼製ロールを固定し、ウレタンロールを上昇させて材料に圧下力を加える。鋼製ロールは直径90 mm、ウレタンロールの形状寸法は **Fig. 2** のとおりである。

2.2 材料

工業用純アルミニウム (JIS 1200) のO材および1/2H材を使用した。板厚は0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mmの4種類である。材料の機械的性質を **Table 1** にあげた。試験片

* 東京理科大学理学部 (東京都)。Faculty of Science, Science University of Tokyo (Tokyo).

** 東京理科大学理工学部 (東京都)。Faculty of Science & Technology, Science University of Tokyo (Tokyo).

*** ウレタンエンジニアリング (東京都)。Urethane-Engineering Co. Ltd.

**** スカイアルミニウム㈱ (東京都)。Sky Aluminum Co. Ltd.

***** 東京理科大学理工学部。〔現在、日本工業新聞社 (東京都)〕 Faculty of Science & Technology, Science University of Tokyo. Presently at Nippon Kogyo Shinbunsha Co. Ltd.

Fig. 1 Schematic view and relative arrangement of steel roll, Urethan roll and aluminum sheet.

- a) Contact between sheet and rolls. No loading condition.
b) Schematic diagram of forming process, load and reaction force distribution.

Fig. 2 Shape and dimension of Urethan roll.

Table 1 Properties of aluminum sheets.

Grade	Tensile strength (kg/mm ²)	n	F (kg/mm ²)	r	Elongation (%)
O	9.8	0.26	17.5	0.69	31.3
1/2H	13.6	0.032	15.5	0.37	12.8

は280×100 mmに切り出し、高さ100 mmの円筒に加工する。ウレタンロールのかたさは80°, 90°, 95°の3種類である。

2.3 方法

ロール間に材料を挿入し、鋼製ロール、材料、ウレタンロールが無負荷状態で接触した状態を圧下量0の基準にとる。負荷状態で、ウレタンロール頂部の変位量 S mmを圧下量と定義し、ダイヤルゲージで測定する。無負荷状態でロールの水平度を調整した後、実験を開始する。各ロールに対し、圧下量を1.0~3.0 mmにわたり0.5 mm間隔にとる。特に、かたさ80°には4.0, 5.0, 6.0 mmを付加する。これは薄板の曲げ加工で、突き曲げ加工又は折り曲げ加工における、ポンチ先端又は肩部

Fig. 3 Relation between compressive load and compressive displacement of Urethan roll for various sheet thickness.

Fig. 4 Relation between forming ratio and compressive displacement of Urethan roll for various sheet thickness.

の作用と類似したはたらきをする¹⁾。圧下量 S を材料の板厚 t で割ると、折り曲げ加工又は突き曲げ加工におけるストロークと類似に無次元化表示ができ、寸法の異なる材料間の比較が容易となる。これを圧下量係数 S_0 と定義する^{2,3)}。

圧下力の測定は、ウレタンロールの軸受支持部にひずみゲージを貼り付けて検出する。成形された円筒の半径

Fig. 5 Relation between forming ratio and sheet thickness for various compressive displacement of Urethan roll.

が、鋼製ロールの半径にどれだけ近づくかによつて成形率を次のように定義する。

$$[\text{成形率}] = \frac{[\text{鋼製ロールの半径}]}{[\text{円筒の成形半径}]} \times 100 (\%)$$

3. 結果と考察

3.1 結果

ロールのかたさに対し圧下量の限界があることがわかった。その値は次のとおりである。

かたさ 90°, 95° に対して, 3.0 mm
80° に対して, 6.0 mm

ロールの間を通つた材料は Fig. 1 の模式図に示すように鋼製ロールに巻きつくような形で成形される。

結果の一例として、かたさ 95° のロールについて 1/2 H 材と O 材についてあげる。Fig. 3 は圧下力と圧下量との関係を示す。Fig. 4 は成形率と圧下量との関係を、Fig. 5 は成形率と板厚との関係を示す。Fig. 3 より圧下力は 1/2 H 材の方がばらつきが大きく、また O 材で板厚 0.5 mm の場合の成形半径が他の板厚より異状に大きいことがわかる。また Fig. 4 と 5 より板厚 0.5 mm を除き、O 材は成形率がとてもよいことがわかる。

3.2 成形状態

結果の例としてあげた以外のロールかたさの場合も含めて、板厚 0.5 mm の場合は 1/2 H 材も O 材も他の板厚に比べて成形率がわるい。ほかの板厚では圧下量の増加につれて成形率はよくなる。

1/2 H 材では板厚が 1.5 mm 以上のとき、実験条件によつては成形不可能な場合がある。O 材ではこの現象はない。Table 2 はこの結果を 1/2 H 材について実験条件例に

Table 2 Region of forming possible under various experimental conditions (material: 1/2 H)

roll hardness	95°				90°				80°			
thick-ness	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0
displacement												
1.0 mm	●	△	△	△	●	△	△	△	●	△	△	△
1.5	●	△	△	△	●	△	△	△	●	△	△	△
2.0	●	△	△	△	●	△	△	△	●	△	△	△
2.5	●	△	△	△	●	△	△	△	●	△	△	△
3.0	●	△	△	△	●	△	△	△	●	△	△	△
4.0	●	△	△	△	●	△	△	△	●	△	△	△
5.0	●	△	△	△	●	△	△	△	●	△	△	△
6.0	●	△	△	△	●	△	△	△	●	△	△	△

Nomenclature

forming

not possible

possible but $R > 100\text{mm}$

possible

示した。板厚 2.0 mm のときはどのロールを使つても、圧下量 1.0 mm では成形不可能である。かたさ 80° のロールでは、圧下量 3.0 mm でようやく成形できる。

圧下量 1.0 mm に対応する各ロールの圧下力をみると、

ロールのかたさ 95° 90° 80°
圧下力 (kg) 600 560 340

である。これはロールのばね定数に相当する。

かたさ 80° のロールについて圧下量-圧下力の関係を調べると、

圧下量 (mm) 1.5 2.0 2.5
圧下力 (kg) 420 560 700

である。この場合、板厚 2.0 mm の材料を無圧下で接触しているロール間に挿入するだけで 560 kg 要することになり、この場合でも材料に多少の塑性変形は生じるが、所望の形状に曲げるには更に高い圧下力を必要とする。

1/2 H 材では板厚の増加につれて得られる成形率のばらつきが大きくなり、ときには成形率 0 の状態が生じる。O 材は、板厚 0.5 mm では成形率が 1/2 H 材とほぼ等しいが、1.0 mm 以上の板厚では成形率が平均 90% 以上になり、1/2 H 材よりも相当高い。また各圧下量における成形率にばらつきがほとんどない。

3.3 ロールかたさの効果

はじめにかたさ 95° と 90° のロールを比較する。1/2 H 材では板厚 1.5 と 2.0 mm で圧下量 1.0 と 1.5 mm との組合せ

Fig. 6 Compressive load as a function of compressive displacement of Urethan roll for parameter of roll hardness. Experimental points fall in shadow regions.

ではかたさ 90° の成形率はよくないが、それ以外一般に 90° のロールの方が成形率はよい。O 材は 95°, 90° のロールとも成形半径は、成形半径-圧下量線図でほぼ水平になり 50~47 mm を通る直線の近傍に実験点はあり、対応する圧下力は 500 から 1,600 kg にわたっている。だが、 $\frac{1}{2}$ H 材におけるほどの成形半径の変化はない。50 mm から 47 mm へと成形半径を 3 mm 変化させるのに 500 kg から 1,600 kg へと 1,100 kg を必要とするので、ロールがかたい場合には圧下力の効果がわるいことがわかる。Fig. 6 に圧下力と圧下量との関係を O 材および $\frac{1}{2}$ H 材を合せて示した。実験点は示された範囲内に落ちる。

90° と 95° のロールについては Fig. 6 に見るとおり接近しているので、つぎにこのグループと 80° のロールとの比較をする。かたさ 80° のロールで $\frac{1}{2}$ H 材を成形するとき、板厚 0.5 と 1.0 mm とは全圧下量にわたり成形可能だが、板厚 1.5 と 2.0 mm とでは成形不可能な場合が生じる。板厚 2.0 mm のとき圧下量を 1.0 mm より 2.5 mm にすると、圧下力は 340 kg から 700 kg になる。これと対応する 95° ロールの圧下量は、1.0 mm から 1.5 mm に移り、成形半径は 100 mm 以上になるが、80° ロールでは円筒にならず成形不可能の範囲に入る。成形半径がほぼ等しくなる加工条件に、95° ロールで圧下量 3.0 mm の圧下力

Fig. 7 Forming moment with compressive displacement of Urethan roll calculated from eq. (2) and experimental data for various sheet thickness. Left vertical axis indicates score moment for $\frac{1}{2}$ H-sheets. Right vertical axis indicates score moment for O-sheets.

1,620 kg のとき $R=53.4$ mm に対し、80° ロールで圧下量 6.0 mm の圧下力 1,820 kg のとき $R=52.0$ mm である。

O 材はすべてのロールについて成形可能であり、成形率はほぼ 90% 以上の高い値を示す。板厚 2.0 mm で圧下量を 1.0 mm から 6.0 mm まで増加させると圧下力は 350 kg から 1,600 kg まで増加するが、成形半径は 50 mm から 45.8 mm まで減少するだけで変化量は 4.2 mm にすぎない。つまり、圧下力を大きく増加させても成形が進まないことを意味し、これは O 材全体についての傾向である。板厚 0.5 mm のときを除いた残りの板厚につき O 材の結果の平均を求めると、成形半径 48.7 mm、成形率 92.4%、最大成形率 98.3%、最小成形率 82.6% となる。一方、 $\frac{1}{2}$ H 材では最大成形率 87.3% である。

今まで述べたことは Fig. 1 の模式図を参照するとよくわかる。O 材と $\frac{1}{2}$ H 材との材料の差は曲げに対する板のこわさとして効き、ウレタンロールを偏平にさせる程度の差として表われる。一方、ロールのかたさの差は同じく偏平になる程度の差として表われる。どちらも成形率などに影響を与える。ウレタンゴムと金属との間には強い摩擦がはたらくので⁴⁾、ロールと材料との間にすべりはなくこのため円筒仕上面に損傷が生じない。かたさにもよるであろうが、ゴムのヤング率は鋼の値の 10^{-5} 倍にすぎないといわれる⁵⁾。このため圧下力を特に強くうける両ロールの中心線と交わる点を中心として容易にゴムロールは変形しようとする。一方、ゴムは変形に際し体積不変なので⁶⁾、圧縮の少ない材料の入口側と出口側

Fig. 8 Variation of compressive load coefficient with compression coefficient for roll hardness 80°, 90° and 95° and 1/2H and O-sheets. Above; sheet thickness 1.5 mm. Below; sheet thickness 2.0 mm.

とで上方に逃げようとして材料の曲げ変形を効果的に進める。ロールの幅方向は材料の幅に比べて十分に大きいのでこちらの変形は押えられてしまう。

3.4 曲げモーメント

材料の板厚に比べ鋼ロールの半径は十分に大きいので、変形過程を一樣曲げとして考えることができる。材料の応力 σ とひずみ ϵ との関係を次の式で近似する。

$$\sigma = F \epsilon^n \quad F, n \text{ は定数} \quad (1)$$

材料の板幅を b 、板厚を t とする。成形半径を ρ 、曲げモーメントを M とすると、 M は次式で表わされる。

$$M = \frac{2bF}{n+2} \cdot t^{n+2} \cdot \rho^{-n} \quad (2)$$

この式に n 、 F 、 t 、 p の測定値を入れて M の値が計算できる。かたさ 95° のロールについて各圧下量に対し M を求めた結果を **Fig. 7** に示す。ほかのロールかたさについても類似な傾向を示す。次に、(2)式より

$$\frac{M}{\rho^{-n}} = \frac{2bF}{n+2} \cdot t^{n+2} = P_0 \quad (3)$$

とおく。 ρ の指数 $-n$ が 1 ならば上式は成形半径当り必要なモーメントそのものとなるが、現在の場合は中央項に着目して規定された板厚の材料を成形半径にするのに必要な荷重と解釈すると、右辺 P_0 の意味が与えられる。

圧下力 P を P_0 でわつた値を κ とおき圧下力係数と定義する。圧下力の無次元化である。**Fig. 8** に板厚 1.5 と 2.0 mm の場合の圧下力係数 κ とさきに定義した圧下量係数 S_0 との関係を示す。

Fig. 9 および板厚 0.5 mm と 1 mm の場合を総合すると板厚の増加につれ、またロールのかたさが低くなるにつれて κ の値が小さくなる。つまり、成形可能な範囲で鋼ロール半径に近い成形半径を得るのには、かたさの低いゴムロールを使用しても S_0 の値を適当にえらべば、小さい成形半径が得られる。圧下力 P に対してウレタンロールからの反力 $\bar{P}$ の値および分布状態によつて成形半径を小さくできることがある。

板厚 1.5 と 2.0 mm とで成形不可能な場合を κ - S_0 関係よりあげると次のようになる。

板厚 1.5 mm, かたさ 80°	$S_0 = 0.667$	$\kappa = 0.28$
2.0 mm, " 95°	$S_0 = 0.5$	$\kappa = 0.4$
" " 90°	$S_0 = 0.5$	$\kappa = 0.37$
" " 80°	$S_0 = 0.5$	$\kappa = 0.23$
" " "	$S_0 = 0.75$	$\kappa = 0.28$
" " "	$S_0 = 1.0$	$\kappa = 0.37$
" " "	$S_0 = 1.25$	$\kappa = 0.47$

以上より、成形不可能になる κ の下限があり、現在の場合よりみて、その値 κ_0 は $0.2 \leq \kappa_0$ とみられる。

ウレタンロールによる成形ではロールからの反力が重要な因子で、ゴムのかたさが小さいほど圧下力によりかなりの変形をする。そのため試験片と接触する部分では〔圧下力 P 〕 $\neq$ 〔反力 $\bar{P}$ 〕の、エネルギーが不可逆的に吸収される分が生ずる。成形効率は板厚とともに増加し、同一荷重ならば板厚の大きい方が η は大きく成形しやすい。ゴムかたさが 90° のときに、すべての板厚において η が大きい。成形効率は 90° のウレタンロールがもっともよい。

4. 結 言

ウレタンロール成形機による工業用純アルミニウムの円筒成形実験を行なつた結果、以下が明らかになった。

- (1) 材料の機械的性質により成形率は強く影響され、一般に 1/2 H 材よりも O 材の方が成形率がよい。
- (2) 板厚 0.5 mm の場合は他の板厚よりも成形半径が大きく、成形率が低い。また 1/2 H 材と O 材とで成形半径の差はそれほどない。
- (3) 板厚が大きいとき、1/2 H 材で成形不可能の状態が生じる。このときの板厚は 1.5 mm と 2.0 mm とであつた。O 材ではこの現象は生じない。
- (4) 最高の成形率が得られるのは、すべてのロールかたさに対して板厚 2.0 mm である。また、80° のロールでは成形不可能の範囲が広がる。

本実験の範囲で得られた最高の成形率はそれぞれ次のとおりである。

○材では $(R_0/R) \times 100 = 98.3\%$

$\frac{1}{2}H$ では $(R_0/R) \times 100 = 87.3\%$

終りに、石井、梶沢両君の熱心な実験遂行に対し深い感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 嵯峨, 佐藤: 塑性と加工**8-80** (1967), 502.
- 2) 嵯峨, 佐藤: 塑性と加工**8-80** (1967), 493.
- 3) 嵯峨, 佐藤: 塑性と加工**8-82** (1967), 597.
- 4) 橘高, 佐藤, 宮, 佐野: 塑性と加工**19-186** (1976), 607.
- 5) M. Gordon: High Polymers, Structure and Physical Properties, (植松訳) ゴードン高分子概論, 培風館 (昭45), 70.
- 6) L. R. G. Treloar: Introduction to Polymer Science, (塩川訳). Treloar 高分子科学入門, 共立出版 (昭50), 56.
- 7) 益田: 薄板の曲げ加工, 誠文堂 (昭38), 42.