アルミニウム薄板の折紙法併用 CNC インクリメンタル張出成形における減肉化挙動

北澤 君義*・尾角 拓勉**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, No. 2 (1999), pp. 67-71

Thinning behavior in aluminum sheet metal stretch-expanding by CNC incremental forming process with ORIGAMI method

Kimiyo KITAOKA* and Hirokatsu OKAKU**

Although the CNC incremental forming process permits thin shell parts of great depth to be formed with multi tool-path schedules, the process causes remarkable thinning to the thin shell parts. In order to suppress the thinning, a new CNC incremental forming process with ORIGAMI method, in which a shell is formed from a flat blank by means of pre-bending (ORIGAMI process) and subsequent incremental stretch-expanding, has been developed. Automotive trunk-lid type panels are formed from aluminum and its alloy blanks by means of the process, and the influence of tool-path schedules, materials properties and forming conditions on the minimum wall-thickness of the panel are examined. It is found that there is a linear relationship between the amount of thinning and the height of stretch-expanding, since the straining in the stretch-expanding process is in plane strain. Experimental results show that the process is suitable for suppression of the thinning.

(Received June 15, 1998)

Keywords: sheet metal forming, CNC incremental forming, stretching, thinning, ORIGAMI method

1. 緒 言

薄板の CNC インクリメンタル成形では、薄板に対する工具の相対的な運動により創成される工具包絡面形状に薄板を成形するため、工具の運動制御を行うだけで薄板を自在な形状に成形することができる^{1)~5)}。ところで CNC インクリメンタル張出成形では、薄板に逐次加えるひずみを小さくすることにより、延性が著しく増大するため⁶⁾、通常の金属薄板を用いて球⁷⁾などの張出成形も可能になる。しかしこの延性の増大は著しい減肉化を伴うため、減肉化抑制がこの成形の課題になっている。この課題を克服する一つの方法として、あらかじめ薄板を目的成形形状に近い形状に曲げておき、この状態からインクリメンタル張出成形を行う「折紙法」(一種の予曲げ法)を併用した CNC インクリメンタル張出成形法が提案されている⁸⁾。この方法を単純な曲面パネルの成形へ適用し、しわなどの形状不良現象を回避してパネルの形状付与を可能にするためのパススケジュールが明らかにされている⁸⁾。この方法ではあらかじめ薄板を目的成形形状に近い形状に曲げてから逐次張出成形を行うため、原理的には減肉化の抑制効果を有するはずであるが、具体的な減肉化抑制挙動についてはほとんど明らかにされていない。

そこで本研究では、折紙法における減肉化挙動を実験的に

調べ、この挙動を支配する変形機構と減肉量予測法および減肉化抑制限界について検討する。

2. 実験方法

2.1 成形形状

折紙法⁸⁾では、Fig. 1 に示すように薄板を目的成形形状に内接あるいは内接形状に近い形状に曲げてから 1 パスあるいは数パスで緩く曲率をつけながらインクリメンタル張出成形を行うため、張出変形量が低下し、減肉化が抑制されるはずである。本研究では、この減肉化抑制挙動を比較的単純かつ純粋な条件下で検討する目的で、既報⁸⁾と同様に成形形状として Table 1 に示すパネルを取上げた。これは曲げ部(半

Table 1 Geometry and dimensions of the panel

$r(\text{mm})$	20
$H(\text{mm})$	35	
$W_x(\text{mm})$	160	
$W_y(\text{mm})$	125	
$R_0(\text{mm})$	500, 1000, 1500	

* 信州大学工学部 (〒380-8553 長野市若里500)。Faculty of Engineering, Shinshu University (500. Wakasato, Nagano-shi, Nagano 380-8553)。

** 信州大学大学院生 (長野市) [現在: 三菱自動車工業(株) (岡崎市)]。Graduate student, Shinshu University (Nagano-shi, Nagano) [Present: Mitsubishi Motors, Co., (Okazaki-shi, Aichi)]。

Fig. 1 Schematic illustration showing the application of the ORIGAMI method to produce an automotive trunk-lid-type panel.

径 $r=20$ mm) の稜線方向 (X 方向) に曲率半径 R_0 の円弧形状が付与された, 曲げ深さ H (両端部の深さ) が 35 mm, 稜線方向幅 W_X が 160 mm, Y 方向幅 W_Y が 125 mm のパネルである。なおこのパネルに関しては既報⁹⁾において形状不良現象の回避条件が明らかにされており, その結果との比較検討から形状付与性を考慮した場合の減肉化抑制限界の検討が可能になる。

2.2 成形プロセス

実験には既報⁹⁾と同様に CNC インクリメンタル成形機を用いた。Fig. 2 に示すようにこの成形機の XY テーブル上には Y 方向に移動可能な CNC ブランクホルドシステムがセットされている。まず同図(a)の折紙成形プロセスでは, ブランクホルダに薄板を保持し, 円柱状工具を用いて目的の成形形状に内接あるいは内接形状に近い形状に曲げた。この際, 曲げによる減肉化をゼロに抑える目的で, ブランクホルダの片端を Y 方向に移動させながら曲げを施し, 曲げによる薄板の Y 方向の伸び (膜変形) をゼロに抑えた (不伸長モデルを用いた幾何計算から Y 方向の移動量を決定: 曲げによる薄板の減肉がゼロに抑えられていることを肉厚測定により別途確認)。次に同図(b)に示す逐次張出成形プロセスでは, ローラ状工具を XZ 面内で包絡面半径 R_0 の円弧軌跡を描くように X 方向に移動させ, 薄板のインクリメンタル張出成形を行った。ここでは最初の張出成形パスの工具移動経路と折紙プロセスの曲げ形状を薄板の両端で一致させた。このため 1 パスで張出成形する場合には成形形状に内接するように曲げが施され, 同一の成形形状を多パスで張出成形する場合には最初のパス経路に内接するように曲げが施される。同図(c)に示すようにこの張出成形では, ローラ状工具を往復パターンで移動させた (1 回の工具移動で成形が行われる場合には 1 パス成形, 1 往復の工具移動の場合には 2 パス成形となる: 同図(c)の例は 5 パス成形)。ここではパス数 N を 1 から 5 の範囲内に設定し, 工具移動経路としてパネル

Fig. 2 Schematic illustration of the CNC incremental forming process with ORIGAMI method.

Table 2 Mechanical properties of materials used

Materials (JIS)	t_0 (mm)	σ_Y (MPa)	n	C (MPa)	σ_B (MPa)
Soft aluminum (A1100-O)	0.6	33	0.26	209	104
Hard aluminum (A1100-H18)	0.6	184	0.02	216	207
Soft aluminum (A1100-O)	1.0	30	0.29	194	97
Soft aluminum alloy (A5052-O)	0.6	99	0.31	426	212

t_0 : Thickness, σ_Y : Yield stress, $\sigma = C \varepsilon^n$, n : Work-hardening exponent, σ_B : Tensile stress

稜線と同じ曲率半径 R_0 を有する円弧軌跡を採用した。また 2 パス目以降の工具移動経路間のパスピッチ P を 1.0 mm, 2.0 mm, 3.0 mm の各値に設定した。

2.3 試料薄板

市販の軟質アルミニウム板 (A1100-O, 板厚 0.6 mm と 1.0 mm), 硬質アルミニウム板 (A1100-H18, 板厚 0.6 mm), 軟質アルミニウム合金板 (A5052-O, 板厚 0.6 mm) を幅 160 mm (X 方向) × 長さ 150 mm から 180 mm (Y 方向) の長方形形状に切断し, 実験に用いた。これら薄板の機械的性質を Table 2 に示す。

2.4 実験条件

薄板の圧延方向を Y 方向 (Fig. 2 参照) に揃え, 折紙成形

(a) Wall-thickness distribution in the ridge line ($N=2$, $P=1.0\text{mm}$). (b) Tool-path number N ($P=1.0\text{mm}$) (c) Tool-path pitch P ($N=2$)

Fig. 3 Influence of tool-path number and tool-path pitch on the distribution of wall-thickness (Soft aluminum, $t_0 = 0.6\text{ mm}$, $R_0 = 1000\text{ mm}$, Lubricant: Pasty MoS_2 , $V = 0.7\text{ mm/s}$).

プロセスでは半径 $r_1 = 20\text{ mm}$ の円柱状工具を、張出成形プロセスでは半径 $r_3 = 40\text{ mm}$ のローラ状工具（工具先端幅方向半径 $r_2 = 20\text{ mm}$ ）をそれぞれ用いた。潤滑剤としてペースト状二硫化モリブデンあるいはプレス油（粘度 $766\text{ cSt}/40^\circ\text{C}$ ）を用い、試料薄板と工具に塗布した。また折紙成形プロセス中の工具押込み速度を 10 mm/s に、ブランクホルダの Y 方向への移動速度を 1.2 mm/s にそれぞれ設定した。さらに張出成形プロセス中の工具移動速度 V を 0.7 mm/s と 1.4 mm/s の2条件に設定した。成形後、パネルの肉厚 t をデジタルポイントマイクロメータで測定し、この値と初期板厚 t_0 から肉厚ひずみ $\varepsilon_t (= \log(t/t_0))$ を算出した。なお減肉

Fig. 4 Influence of radius of curvature, R_0 , on the minimum wall-thickness, t (Soft aluminum, $t_0 = 0.6\text{ mm}$, $P = 1.0\text{ mm}$, Lubricant: Pasty MoS_2 , $V = 0.7\text{ mm/s}$).

化率として ε_t の絶対値の％表示を用いた。

3. 減肉挙動

3.1 減肉挙動に対する諸条件の影響

(a) パス数とパスピッチの影響

板厚 0.6 mm の軟質アルミニウム板から2パスで張出成形された $R_0 = 1000\text{ mm}$ のパネルのパネルの稜線上の肉厚分布を Fig. 3(a) に示す。肉厚は稜線中央で極小になっている。この稜線中央における曲げ方向 (Y 方向) の肉厚分布に対するパス数 N の影響を同図(b) に示す。最小肉厚は1パス成形で 0.55 mm 、2パス成形で 0.52 mm 、4パス成形で 0.475 mm となり、 N が増大するに従い、減肉化が進展している。なお4パス成形では二つの極小値を有する肉厚分布となっているものの、この段階では目視可能なくびれは観察されなかった（この2つの極小値については、通常の薄板球底パンチ張出成形において頂点から少し離れた場所で肉厚が極小になる現象と類似な機構により発生するものと推察される）。 $N=2$ の条件で2パス目のパスピッチ P を変えた場合の肉厚分布を同図(c) に示す。最小肉厚は $P=1.0\text{ mm}$ で 0.52 mm 、 $P=2.0\text{ mm}$ で 0.505 mm 、 $P=3.0\text{ mm}$ で 0.485 mm となっており、 P が増大するに従い、減肉化が進展している。

(b) パネル稜線の曲率半径の影響

最小肉厚に対するパネル稜線の曲率半径 R_0 の影響を Fig. 4 に示す。 $R_0 = 500\text{ mm}$ の場合には1パス成形で肉厚が 0.5 mm を下回っているものの、 $R_0 = 1500\text{ mm}$ の場合には2パス成形においても最小肉厚が 0.53 mm となり、減肉化挙動は R_0 の値により大きく異なる。

(c) 板厚・材質の影響

板厚 0.6 mm の硬質アルミニウム板の1パス成形では最小肉厚が 0.57 mm となり、減肉化率を 5.1% に抑えることができた。しかし2パス成形では破断が発生した。板厚 1.0 mm の軟質アルミニウム板の最小肉厚は、Fig. 5(a) に示すように1パス成形で 0.935 mm 、2パス成形で 0.855 mm となり、減肉化率はそれぞれ 6.7% と 15.7% となった。また同図(b) に示すように板厚 0.6 mm の軟質アルミニウム合金板の最小肉厚は、1パス成形で 0.555 mm 、2パス成形で 0.52 mm となり、減肉化率はそれぞれ 7.8% と 14.3% となった。このように破

(a) $t_0 = 1.0$ mm (Soft aluminum) (b) Soft aluminum alloy ($t_0 = 0.6$ mm)

Fig. 5 Comparison between distribution of wall-thickness in the one path method, $N=1$, and that in two path method, $N=2$ ($R_0=1000$ mm, Lubricant: Pasty MoS_2 , $P=1.0$ mm, $V=0.7$ mm/s).

断した硬質板の結果を除くと、板厚と材質が異なる場合においても、ほぼ同様の減肉化挙動を示した。

(d) 工具移動速度・潤滑条件の影響

Fig. 6(a)に工具移動速度 $V=1.4$ mm/s の場合の肉厚分布を示す。 $V=0.7$ mm/s の場合 (**Fig. 3(b)**参照) とほぼ同程度の減肉化挙動を示している。また同図(b)に示すプレス油潤滑の場合もペースト状二硫化モリブデン潤滑条件の場合 (**Fig. 3(b)**参照) よりも若干減肉化しているものの、ほぼ同程度の減肉化挙動を示している。

3.2 減肉化と総張出量の関係

上述の実験結果によれば、パスピッチ P とパス数 N が小さく、パネル稜線の曲率半径 R_0 が大きいほど減肉化が抑制できた。ところで P と N が小さく、 R_0 が大きいほど、稜線中央における折紙状態からの総張出量 (張出高さ) Δh_c が小さくなる。そこで上述の減肉化挙動を ε_t に対する Δh_c の影響としてまとめると **Fig. 7** のようになった。 ε_t に対する N と P および R_0 の影響は、 Δh_c と ε_t の一つの直線関係としてほぼ統一的にとらえることができる。この直線の切片の存在は、張出高さ Δh_c が極めて浅い場合には弾性回復のために塑性ひずみが入らないことを示している。しかし張出高さ Δh_c がある程度以上ある場合には、第一近似として Δh_c と $-\varepsilon_t$ が比例するものと考えられる。この直線関係を用いると、個々のパススケジュールにおける減肉量の推定が可能になる。

4. 減肉化抑止と形状付与

4.1 変形機構

減肉量が総張出量 (張出高さ) Δh_c に比例する原因を探る

(a) $V=1.4$ mm/s (Lubricant: Pasty MoS_2) (b) Lubricant: Press oil ($V=0.7$ mm/s)

Fig. 6 Comparison between distribution of wall-thickness in the one path method, $N=1$, and that in two path method, $N=2$ (Soft aluminum, $t_0=0.6$ mm, $R_0=1000$ mm, $P=1.0$ mm).

Fig. 7 Influence of height at stretch-expanding process, Δh_c , on thickness strain, ε_t (Soft aluminum, $t_0=0.6$ mm, $V=0.7$ mm/s, Lubricant: Pasty MoS_2).

目的で、パネル稜線中央の工具非接触面側にひずみゲージを貼り、工具進行方向 (X 方向) およびこれに垂直な方向 (Y 方向) のひずみ履歴を測定した。軟質アルミニウム板の2パス張出成形の場合の1パス目のひずみ履歴を **Fig. 8** に示す。同図(a)に示すように工具移動方向 (X 方向) のひずみ ε_x が曲げ・曲げ戻し過程を経た後、その膜ひずみ成分の堆積がわずかな値に留まっているのに対して、工具進行方向に垂直な

Fig. 8 Strain histories at center of ridge in the panel during the first path (Soft aluminum, $t_0=0.6$ mm, $N=2$, $R_0=1000$ mm, Lubricant: Pasty MoS_2 , $P=1.0$ mm, $V=0.7$ mm/s).

方向 (Y方向) のひずみ ε_y は、そのほとんどが膜ひずみとして堆積している。同図(b)はこのひずみ履歴をひずみ空間上で表示したものである。実線で示すスパイラル状にひずみ経路が曲っているのは、X軸方向の曲げ・曲げ戻しの繰返し変形の影響である。ひずみゲージを貼付けた側と反対側の工具接触面側では曲げ・曲げ戻しが逆になるため、同図中に示す破線のひずみ履歴をたどるものと推察される。したがって膜ひずみ成分がほぼ ε_y 軸上を上昇する、いわゆる平面ひずみ経路で成形が進展していることになる。2パス目においても1パス目の終点Eを起点として、1パス目と類似な ε_y 軸上を上昇するひずみ経路を繰返した (2パス目の値は1パス目よりも小さい)。この平面ひずみ状態では体積一定の関係から $\varepsilon_y = -\varepsilon_x$ の関係が成立する。一方、Fig. 7で明らかにしたように、実験結果からは第一近似として Δh_c と $-\varepsilon_x$ が比例する。したがって張出高さ Δh_c にほぼ比例して工具移動方向に垂直な方向が伸びるために、「張出高さにほぼ比例して減肉化する」とものと考えられる。なお体積一定の条件からも明らかのように、ここで明らかにされた平面ひずみ条件下の減

肉量は二軸張出成形の場合よりも少ないため、減肉化抑制効果の点でも有利な張出成形方式と考えられる。

4.2 形状付与を考慮した減肉化抑制限界

減肉化抑制の観点からは張出高さの低い条件が推奨される。既報⁸⁾によると張出高さが低い場合には、パネル両端部の張出変形量が少ないために、大きな弾性たわみの影響を受け、パネル両端部には未変形部が残存した。この形状不良現象に対しては $P=1.0$ mm の2パス成形 (往復成形) を施すことにより、その抑止が可能になった⁸⁾。したがってパネル両端部の総張出高さが1.0 mmとなる2パス成形で成形した場合のパネル稜線中央の総張出高さ Δh_c が、減肉化抑制限界時の張出高さを与える。この場合の減肉量は Fig. 7の直線関係を用いて推定でき、 $R_0=1000$ mm のパネルの場合には減肉化率が約14%となる。

5. 結 言

本報では折紙法を併用した薄板 CNC インクリメンタル張出成形の減肉化挙動を実験的に検討し、以下の結果を得た。

- (1) 減肉量に対するパスピッチとパス数およびパネル稜線の曲率半径などの諸条件の影響を、減肉量に対する総張出量の影響としてとらえることができ、総張出量にほぼ比例して減肉化することが明らかになった。この関係を用いると、各パススケジュールの減肉量の推定が可能になる。
- (2) ひずみ履歴の測定結果から、工具移動方向に垂直な方向が伸びる平面ひずみ状態で成形が進展するために「張出高さにほぼ比例して減肉化する」ことが明らかになった。
- (3) パネル両端部に残存する形状不良現象を抑止するためには $P=1.0$ mm の2パス成形を施す必要があるため、この条件の総張出高さに対応する減肉量が、形状付与性を考慮した場合の減肉化抑制限界となる。

参 考 文 献

- 1) 北澤君義：第168回塑性加工シンポジウムテキスト，日本塑性加工学会 (1996)，67.
- 2) 井関日出男，加藤和典，坂本誠一郎：日本機械学会論文集 C 編，58 (1992)，3147.
- 3) 松原茂夫：塑性と加工，35 (1994)，1311.
- 4) 北澤君義，若林昭彦，村田和也，清野次郎：塑性と加工，35 (1994)，1348.
- 5) 北澤君義，中島 明：日本機械学会論文集 C 編，62 (1996)，2018.
- 6) 北澤君義：軽金属，47 (1997)，65.
- 7) 北澤君義，山崎純生：平成8年塑性加工春季講演会講演論文集，(1996)，118.
- 8) 北澤君義，守国栄時：軽金属，48 (1998)，65.