研究論文

アルミニウム薄板の半楕円体状 CNC
インクリメンタル張出成形

北澤 君義*・中根 正勝**

Hemi-ellipsoidal stretch-expanding of aluminum sheet by
CNC incremental forming process with two path method

Kimiyooshi KITAZAWA* and Masakatsu NAKANE**

For incremental stretch-expanding of sheet metal, the reduction of tool-path schedule is recognized because numerous tool-paths are generally necessary for producing the required profile. A suitable tool-path schedule has been found for hemispherical shells, but the tool-path schedule for hemi-ellipsoidal shells has not been solved yet. In order to reduce the tool-path schedules for producing the hemi-ellipsoidal shells, a possibility of two path method in which a hemi-ellipsoidal shell is formed from a flat blank by means of conical stretch-expanding at first stage and subsequent hemi-ellipsoidal stretch-expanding at second stage was experimentally investigated using blanks of 1100 commercially pure aluminum sheet. Experimental results showed that the occurrence condition of unfavorable deformation modes, such as rupture and rising, depended much on the condition of conical shell height at first stage; by selecting suitable condition of the height, the hemi-ellipsoidal shell could be formed from the aluminum blank.

Keywords: sheet metal forming, CNC incremental forming, hemi-ellipsoidal shell, rupture, rising

(Received February 27, 1997)

1. 緒 言

CNC インクリメンタル成形^{1)~5)}は、薄板塑性加工の多品種少量生産化への対応を可能にする一つの成形法として注目されている。しかしこの成形では、成形プロセスの短縮化という逐次成形方式に特有な問題が課題として残されている。プロセス短縮化の観点からは1パス成形が究極のプロセスとなるが、例えば半楕円体形状などのように破断発生等の問題があるために1パス成形が難しい場合が多い。この場合、2パス成形が最小プロセスとなる。いままでに半楕円体形状の特別な場合である半球について2パス成形の可能性が明らかにされている⁶⁾ものの、半球よりも尖った形状の半楕円体については、2パス成形の可能性は明らかにされていない。もし、半楕円体成形の可能性が明らかになれば、半球をも含んだ一般的な観点から2パス成形を可能にするプロセスに関する基礎的な知見も得られるものと思われる。

そこで本研究では、アルミニウム薄板の2パス半楕円体状 CNC インクリメンタル張出成形挙動を実験的に検討し、半楕円体の2パス成形を可能にするプロセスを明らかにする。

2. 実験方法

2.1 成形機と実験条件

実験に使用した軸対称 CNC インクリメンタル成形機の成形部近傍の外観を Fig. 1 に示す。ここでは直径8.0 mm の棒状工具 (先端が球面状) を用い、薄板の回転数 ω を300 rpm とし、工具速度 V を0.7 mm/s あるいは0.35 mm/s に設定した。ま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 cSt) を用い、これらを棒状工具と薄板の双方に塗布した。

2.2 試料薄板

市販の硬質アルミニウム板 (A1100-H18: 板厚1.0 mm)、軟質アルミニウム板 (A1100-O: 板厚0.6 mm, 1.0 mm) から一辺150 mm の正方形のブランクを切断し、試料薄板とした。これら薄板の機械的性質を Table 1 に示す。

2.3 成形形状と工具パススケジュール

成形形状として Table 2 に示す半楕円体形状を取り上げ、頂点の高さ h_2 と底面半径 r_0 の比 h_2/r_0 として表される軸比 ζ を0.6, 1.0, 1.4, 1.6, 1.8 の5種類に設定した ($\zeta=1.0$: 半球)。これらの半楕円体を Fig. 2 に示す2パスの工具パススケジュールで成形した。まず同図(a)

* 信州大学工学部 (長野市)。Faculty of Engineering, Shinshu University (Nagano-shi, Nagano).

** 信州大学工学部学生 (長野市)。Student, Faculty of Engineering, Shinshu University (Nagano-shi, Nagano).

Fig. 1 CNC incremental forming machine for hemi-ellipsoidal stretch-expanding of aluminum sheet.

Table 1 Mechanical properties of materials used

Materials (JIS)	t_0 (mm)	σ_Y (MPa)	n	C (MPa)	σ_B (MPa)
Hard aluminum (A1100-H18)	1.0	174	0.02	214	192
Soft aluminum (A1100-O)	0.6	33	0.26	209	104
	1.0	30	0.29	194	97

t_0 : initial thickness, σ_Y : yield stress, n : work-hardening exponent, σ_B : tensile strength.

Table 2 Geometry and dimensions of hemi-ellipsoidal shells

h_2 (mm)	r_0 (mm)	ζ	Geometry
15	25	0.6	$\zeta = h_2 / r_0$
25	25	1.0	
35	25	1.4	
40	25	1.6	
45	25	1.8	
18	30	0.6	
30	30	1.0	
42	30	1.4	
48	30	1.6	
54	30	1.8	

に示すように薄板を1パスで半頂角 $\alpha=30^\circ$ あるいは 40° の円すい台形状に張出成形した。ここでは半球の場合⁶⁾と同様に2パス目の成形開始時に半楕円体の付根部に発生する破断を回避する目的で、円すい台の底面半径を半楕円体の底面半径 r_0 よりも1.0 mm 大きな値に設定した。次に同図(b)に示すように、2パス目で薄板を半楕

(a) First stage: Conical stretch-expanding.

(b) Second stage: Hemi-ellipsoidal stretch-expanding.

Fig. 2 Tool-path schedule for hemi-ellipsoidal CNC incremental stretch-expanding of sheet metal.

円体形状に張出成形した。円すい台の高さ h_1 は、Fig. 3に示すように半楕円体に内接する h_c 以下の値に設定した（ただし $h_2=h_1$ と h_c の交点Wの h_1 の値がその最大値となるため、これ以下の h_1 の領域）。なお $h_1 \leq h_c$ における成形限界を評価するために、補助パラメータとして接円すい面の半頂角 α_T （同図中の左上図参照：半楕円体で h_1 と同じ高さの点Pにおける接円すい面の半頂角 α_T ）を用いた。

3. 楕円体状張出成形の可能性

3.1 成形の可能性と不整形モード

成形後の外観をFig. 4に示す。第1段階の張出成形高さ h_1 を半楕円体に内接する値 h_c あるいは h_c 近傍の値に設定した場合、頂上部に円すい台が残存した（同図(a)）。この現象は、半球の場合⁶⁾と同様に h_1 を成形形状（半楕円体）に内接する値 h_c に設定したために、軸方向の逃げ現象に起因して発生したものと考えられる。 h_1

Fig. 3 Geometrical relationship between conical shell height, h_1 , and hemi-ellipsoidal shell height, h_2 .

をさらに低くすると、この円すい台の残存が消え、半楕円体の成形が可能になった (同図(b))。さらに h_1 の値を低くすると、第1段階の円すい台の上面部付近の高さまで張出成形した段階で破断 (同図(c))：以下、A破断と呼ぶが発生した。このように適切な値に h_1 を設定することにより、半楕円体の成形が可能になることが明らかになった。なお ζ が大きい場合には、半楕円体状張出成形中に破断 (同図(d))：A破断とは異なり破断発生部の上部に円すい台側壁が残存、以下、B破断と呼ぶが発生した。また ζ が小さい場合 ($\zeta=0.6$) には、軟質板を用いると頂上部にくぼみ現象が発生した (同図(e))：くぼみの深さが 0.2 mm 以上の場合をくぼみ現象として識別した。

3.2 成形限界に対する諸条件の影響

第1段階の円すい台の高さ h_1 と成形目的の半楕円体の高さ h_2 の関係から、硬質材の不整変形モードの発生領域を調べた結果を Fig. 5 に示す。 h_c の近傍の h_1 の条件で成形すると円すい台が残存し、 h_1 の値をこれよりも小さくすると成形可能な領域が現われ、 h_1 の値をさらに小さくするとA破断が発生した。このA破断の境界は $\alpha_T=30^\circ$ 、円すい台残存現象の境界は $\alpha_T=45^\circ$ のカーブと、それぞれほぼ一致している。なお $h_2=15\text{ mm}$ ($\zeta=0.6$) の条件では破断は発生せず、半楕円体の成形が可能であった。この $h_2=15\text{ mm}$ の条件では、大たわみ変形の影響のために裾野部の傾斜が約 30° となり、1パスの張出成形限界 $\alpha=25^\circ$ よりも大きくなるため、1パス成形が可能になった。一方、 $h_2=45\text{ mm}$ ($\zeta=1.8$)

Fig. 4 Photographs showing the deformation modes in hemi-ellipsoidal stretch-expanded aluminum sheets (Soft aluminum, $t_0=0.6\text{ mm}$, $\alpha=30^\circ$, $V=0.7\text{ mm/s}$, Lubricant: Pasty M_0S_2 , Refer to Fig. 9).

Fig. 5 Forming diagram of hemi-ellipsoidal stretch-expanding of hard aluminum sheet ($t_0=1.0\text{ mm}$, $r_0=25\text{ mm}$, $\alpha=30^\circ$, $V=0.7\text{ mm/s}$, Lubricant: Pasty M_0S_2).

の条件では、A破断とB破断が発生した。したがって2パス成形法では、 $\zeta=1.6$ 以下の半楕円体の成形が可能

(a) Lubricant: Press oil ($V = 0.7$ mm/s). (b) $V=0.35$ mm/s (Lubricant: Pasty M_0S_2).

Fig. 6 Forming diagrams of hemi-ellipsoidal stretch-expanding of hard aluminum sheet ($t_0 = 1.0$ mm, $r_0 = 25$ mm, $\alpha = 30^\circ$).

になる。

プレス油潤滑下で成形した場合には、Fig. 6(a)に示すようにペースト状二硫化モリブデン潤滑下における結果 (Fig. 5) と一致しており、成形限界に対するこれら二種類の潤滑条件の影響はほとんどないものと考えられる。工具速度 V を Fig. 5 の半分の 0.35 mm/s に設定した場合、Fig. 6(b) に示すように円すい台残存現象と A 破断の発生状況は Fig. 5 に示した $V=0.7$ mm/s の場合とほとんど変わらないものの、B 破断の発生領域が広がり、成形可能領域が $\zeta=1.4$ ($h_2=35$ mm) 以下に縮小した。

(a) $t_0 = 1.0$ mm. (b) $t_0 = 0.6$ mm.

Fig. 7 Forming diagrams of hemi-ellipsoidal stretch-expanding of soft aluminum sheet ($r_0 = 25$ mm, $V = 0.7$ mm/s, $\alpha = 30^\circ$, Lubricant: Pasty M_0S_2).

板厚 1.0 mm の軟質材の結果を Fig. 7(a) に示す。 $h_2 = 15$ mm ($\zeta = 0.6$) の条件では、硬質材の場合とは異なり、くぼみ現象が発生している。円すい台残存現象と B 破断の発生領域は硬質材とあまり変わらないものの、A 破断の発生境界は $\alpha_T = 20^\circ$ と 25° の中間の領域にまで広がり、成形可能領域が拡大している。また $h_2 = 25$ mm ($\zeta = 1.0$) の条件では A 破断は発生せず、1 バス成形 ($h_1 = 0$ mm) も可能になっている。同じ軟質材で板

Fig. 8 Forming diagram of hemi-ellipsoidal stretch-expanding of soft aluminum sheet for $\alpha=40^\circ$ ($t_0=0.6$ mm, $V=0.7$ mm/s, $r_0=25$ mm, Lubricant: Pasty M_0S_2).

厚0.6 mm の場合には、同図(b)に示すように $h_2=25$ mm ($\zeta=1.0$) の条件でA破断が発生し、同図(a)の板厚1.0 mm の場合よりも成形可能な領域が縮小した。しかしこれ以外の不整形変形モードの発生領域は、同図(a)の板厚1.0 mm の場合と同じであった。同じ板厚0.6 mm の軟質材を第1段階の円すい台の半頂角 $\alpha=40^\circ$ の条件で成形した場合の結果をFig. 8に示す。A破断と円すい台残存およびくぼみの発生境界は、Fig. 7(b)とほとんど変わらないものの、B破断の発生領域が著しく拡大しており、 $h_2=25$ mm ($\zeta=1.0$: 半球)の高さの半楕円体しか成形できない。 α が大きいと円すい面と半楕円面の距離が大きくなるため、第2段階中の張出し量が大きくなり、B破断が発生しやすくなったものと考えられる。したがって半球よりも尖った半楕円を成形するためには、 α を小さくする必要がある。

4. 成形可能領域

4.1 不整形変形の発生限界の推定

上述のように円すい台残存、A破断、B破断などの発生領域に囲まれた領域内で半楕円体の成形が可能になる。実用上の観点からは、これらの境界の推定法が問題になる。このうちB破断の境界は、尖った半楕円の成形限界を支配している。半楕円体が尖るほど、あるいは第1段階の円すい台の半頂角 α が大きくなるほど、円すい面と半楕円面の距離が大きくなるため、第2段階中の張出し量が大きくなり、B破断が発生するものと考えられる。

Fig. 9 Forming diagram of hemi-ellipsoidal stretch-expanding of soft aluminum sheet for $r_0=30$ mm ($t_0=0.6$ mm, $V=0.7$ mm/s, $\alpha=30^\circ$, Lubricant: Pasty M_0S_2).

一方、A破断の境界は、硬質材ではおよそ $\alpha_T=30^\circ$ 、軟質材では $\alpha_T=20^\circ$ から 25° の範囲となっている。ところでこのA破断は、第1段階の円すい台の上面部付近の高さまで張出成形した段階で発生する。すなわち第1段階の円すい台の影響がなくなり、薄板を直接1パスで半頂角 α_T の円すい面に張出成形し始める状態で破断が発生している。ところで薄板の1パス円すい状張出成形において破断が回避されて成形が可能になる条件は、硬質板については $\alpha=25^\circ$ 以上、板厚0.6 mmの軟質板については $\alpha=25^\circ$ 以上、板厚1.0 mmの軟質板については $\alpha=20^\circ$ 以上の条件であった。これらの値は、A破断の発生条件を与える α_T の値に近い。したがってA破断の発生限界は、1パス円すい台状張出成形の破断発生限界からほぼ推定できるものと考えられる。

上述の実験結果のように、円すい台残存現象の発生境界は、薄板の板厚、加工硬化指数、潤滑条件の影響をほとんど受けない。半球についてはこの現象を回避する試行錯誤的な方法が発見されている⁶⁾ものの、この現象の発生限界は明らかにされていなかった。本研究により、半球 ($\zeta=1.0$)を含む半楕円全体に対して、 $\alpha_T=45^\circ$ を境界にしてこの現象が発生することが初めて明らかになった。この結果は、半楕円体の成形過程のうちで、 $\alpha_T=45^\circ$ 以上となる頂上側の成形中に生じるメタルフロー挙動が、円すい台残存現象の発生に重要な影響を及ぼすことを示唆している。

4.2 プロセス設計基準

A破断の安全側の境界として軟質材に比べて成形領域が狭い硬質材の結果を用いると、A破断と円すい台残存現象を防ぐためには、 $30^\circ < \alpha_T < 45^\circ$ を満足するように h_1

の値を設定すればよい。この範囲では α_T ＝一定のカーブは、次式でほぼ近似できる（ただし $\zeta \geq 1.0$ 以上）。

$$h_2 \doteq a_0 \cdot h_1 + b_0 \quad (1)$$

ここで底面半径 r_0 を用いた無次元量 $\zeta = h_2/r_0$, $\eta = h_1/r_0$, $\beta = b_0/r_0$ を用いると、式(1)は次式となる。

$$\zeta \doteq a_0 \cdot \eta + \beta \quad (2)$$

特に $30^\circ < \alpha_T < 45^\circ$ の中間の値、すなわち、最も安全な選択条件となる $\alpha_T = 37.5^\circ$ の場合には、 $a_0 \doteq 1.0$ となり、また $\beta \doteq 0.38$ となるため、式(2)は次式になる。

$$\zeta \doteq \eta + 0.38 \quad (3)$$

式(3)は、軸比 ζ の半楕円体の張出成形中に生じるA破断と円すい台残存現象を回避するために必要な第1段階の円すい台の高さ $h_1 (= \eta r_0)$ を与える。この式(3)の有効性を確認するために、底面半径の異なる半楕円体 ($r_0 = 30 \text{ mm}$) を成形した。その結果、Fig. 9 に示すように式(3)の条件は成形可能領域内に位置しており、A破断と円すい台残存現象を回避するために必要な第1段階の円すい台の高さ h_1 を与える設計基準としての式(3)の有効性が明らかになった。

5. 結 言

アルミニウム薄板の2パス半楕円体状CNCインクリメンタル張出成形に関して以下の結果を得た。

(1) 第1段階の円すい台の高さ h_1 を適切な値に設定することにより、円すい台残存と破断が回避され、半楕円体の2パス張出成形が可能になった。

(2) 円すい台残存、破断の発生境界に対する第1段階の円すい台の半頂角 α 、薄板の板厚と加工硬化指数、潤滑条件、工具速度の影響を明らかにした。 α を 30° に設定すると、最大で底面半径の1.6倍の高さを有する尖った半楕円体の成形が可能であった。

(3) 半楕円体の成形を可能にする h_1 の設定条件を設計基準の形にまとめ、その有効性を実験的に明らかにした。

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)，279.
- 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，林真太郎，山崎純生：軽金属，46 (1996)，219.