1 パス法による薄板の CNC インクリメンタル張出し成形の可能性*

北澤 君 義^{*1}, 尾角 拓 勉^{*2}Possibility of CNC Incremental Stretch-Expanding of Sheet Metal
by Single-Tool-Path Process

Kimiyooshi KITAZAWA and Hirokatsu OKAKU

The process of CNC incremental forming is suitable for small-lot production of thin shell parts, since a variety of forming configurations can be realized by changing only the tool-path contour. However, the production rate of the process is relatively low because numerous tool-paths are generally necessary for producing the required profile. In order to reduce the tool-path schedule, the possibility of CNC incremental stretch-expanding of sheet metal by a single-tool-path process, in which a shell is formed from a flat blank by means of stretch-expanding on only one stroke of the tool, has been experimentally investigated. Aluminum and copper sheets were stretch-expanded to conical shells with several values of half-apex-angle α and spherical shells, and the deformation behavior was examined. It was found that, when α was larger than about 30° , conical shells were formed from a flat blank by means of the process with a single tool-path. Furthermore, experimental results showed that the values of thickness for all of the conical and spherical shells formed by the process with a single tool-path agree with those obtained from the sine law. It was therefore concluded that the proposed forming process with a single tool-path is useful for reduction of the tool-path schedules.

Key Words: Plastic Forming, Formability, Nonferrous Metal, Incremental Forming, Stretch-Expanding, CNC Forming Machine, Reduction of Tool-Path Schedules, Single-Tool-Path Process, Sine Law

1. 緒 言

最近, 薄板成形の多品種少量生産化への対応を可能にする塑性加工技術として, CNC インクリメンタルフォーミングが注目されている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾. この方法では, 工具の運動により創成される工具包絡面を金型の代りに用いるため, 一つの工具を用いだけで多種多様な形状に薄板を成形することができる. しかし, 様々な形状の製品が一つの工具を用いだけで供給可能となるものの, プレス成形などの大量生産方式と比べると成形時間がかかるため, 成形プロセスの短縮化が課題になっている. 成形プロセスを短縮する一つの方法として, パススケジュールの短縮化が考えられる. 例えば, 逐次張出し成形されていたものが1パスで張出し成形が可能になれば, パススケジュールの大幅な短縮

化が図れることになる.

そこで本研究では, 薄板 CNC インクリメンタル張出し成形のパススケジュール短縮化の観点から1パス張出し成形の可能性を実験的に検討した. その結果, 1パス張出し成形が可能であり, 成形形状に依存して肉厚が一意に決まることなどが明らかになったので, その結果を報告する.

2. 実験方法

2・1 CNC インクリメンタル成形機 自作の軸対称 CNC インクリメンタル張出し成形機⁽¹⁾⁽²⁾を用いて薄板の張出し成形を行った. 成形機の成形部近傍の外観を図1に示す. この成形機は, 棒状工具を回転する薄板の半径方向 (R 軸) 移動と回転軸方向 (Z 軸) 移動および RZ 面内で傾斜 (ψ 軸) させることができる3自由度のパソコン制御成形機である. この成形機では, 薄板をブランクホルダーにセットしてチャックに取り付け, 一定回転数で回転させる. そして棒状工具を Z 軸方向と R 軸方向に移動させながら薄板に押し

* 原稿受付 1995年8月21日.

*¹ 正員, 信州大学工学部 (〒380 長野市若里500).*² 信州大学大学院.

Fig.1 Conical stretch-expanding of sheet metal by CNC incremental forming machine.

Table 1 Mechanical properties of materials used.

Materials (JIS)	t_0 (mm)	σ_Y (MPa)	n	C (MPa)	σ_B (MPa)
Hard Aluminum (A1050-H18)	0.6	130	0.02	151	133
Soft Aluminum (A1050-O)	0.6	26	0.26	157	85
Hard Aluminum (A1050-H18)	1.0	116	0.01	125	120
Half-hard Copper (C1220-1/2H)	0.5	149	0.11	274	251

$\sigma = C \varepsilon^n$, n : Work hardening exponent, σ_Y : Yield stress, σ_B : Tensile strength, t_0 : Original thickness.

込み、逐次張出し成形を行う。この場合、棒状工具は相対的な意味で薄板に対して工具包絡面を描き、この工具包絡面形状に薄板を張出し成形する。従って、一つの棒状工具を用いただけでも、その運動を制御するだけで、薄板を様々な形状に張出し成形することが可能となる。

2・2 試料薄板 実験には、市販のリン脱酸銅半硬質板 (C1220-H14: 板厚0.6mm)、硬質アルミニウム板 (A1050-H18: 板厚0.6mm, 1mm)、軟質アルミニウム板 (A1050-O: 板厚0.6mm) から150mm×150mmに切断された試料薄板を用いた。試料薄板の機械的性質を表1に示す。

2・3 実験条件 図2(a)(b)に示す形状に薄板を張出し成形し、1パス成形の可能性を実験的に調べた。まず薄板を1パスで同図(a)に示す底面直径 $d = 80$ mmの円すい台形状に張出し成形した。次に1パスで薄板を同図(b)に示す半径 $R = 38$ mm、高さ $h = 27.5$ mmの部分球面形状に張出し成形した。また、1パス成形と後続パス成形における肉厚変化を調べる目的で、円すい台形状に1パス張出し成形された製品を図3(c)に示すように異なる半頂角を有する円すい台

Fig.2 Tool-path schedules for CNC incremental stretch-expanding of sheet metal.

形状に張出し成形した。

張出し成形品をマイクロカッターで切断後、肉厚をポイントマイクロメータで測定し、1パス成形と肉厚の関係についても検討した。ここでは、比較の目的で1パス張出し成形品の肉厚を、しごきスピニングにおいて知られているサイン則⁽⁸⁾⁽⁹⁾の値と比較した。もしサイン則が成立すると、半頂角 α の円すい部の肉厚 t は次式で与えられる。

$$t = t_0 \cdot \sin \alpha \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 t_0 は薄板の板厚である。なお、曲面形状の場合は、各場所における接円すい面の半頂角 α を用いて式(1)により肉厚が求まる。

実験には直径10 mmの棒状工具(先端が半球状)を用い、傾斜角 ψ を零度(棒状工具を薄板面に垂直に配置)に設定し、薄板の回転数 N を300 rpm とした。また薄板1回転当りの棒状工具の送り速度 f を0.014mm/rev, 0.028mm/rev, 0.14mm/revの各値に設定し、潤滑剤についてはペースト状二硫化モリブデンとプレス油(766cst)の二種類とし、これらの影響を調べた。なお潤滑剤は工具と薄板の双方に塗布した。

3. 実験結果

3・1 1パス成形の可能性 銅薄板の1パス張出し成形例を図3に示す。円すい台の半頂角 α が 30° 以上の条件では、銅薄板を1パスで様々な半頂角 α を有する円すい台形状に張出し成形することができた。しかし、 $\alpha = 20^\circ$ の条件では成形初期段階で割れが発生し、1パス成形することができなかった。同様にアルミニウム薄板についても、 α が 30° 以上の条件で1パスで円すい台形状に張出し成形することができた。従

(a) $\alpha = 20^\circ$: Fractured specimen

(b) $\alpha = 30^\circ$

(c) $\alpha = 45^\circ$

Fig.3 Conical shells produced by CNC incremental stretch-forming with a single tool-path (Half-hard copper, $t_0 = 0.5$ mm, Lubricant: Pasty MoS₂, $f = 0.14$ mm/rev).

Fig.4 Distribution of conical shell thickness t (Hard aluminum, $h = 33$ mm, $d = 40$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $t_0 = 0.6$ mm, Lubricant: Pasty MoS₂, $f = 0.14$ mm/rev).

Fig.5 Relationship between conical shell thickness t and angle from rolling direction θ (Hard aluminum, $h = 33$ mm, $d = 40$ mm, $\alpha = 45^\circ$, $t_0 = 0.6$ mm, Lubricant: Pasty MoS₂, $f = 0.14$ mm/rev).

って、薄板を1パスで張出し成形することができる。

3・2 肉厚に対する材質と板厚の影響 $\alpha = 45^\circ$ の円すい台形状に1パス張出し成形されたアルミニウム硬質板の肉厚分布を図4に示す。円すい側壁部の肉厚はほぼ一定な値となり、比較のため同図中に示したサイン則の値と一致している。図5は、圧延方向に対して角 θ だけ傾いた方向の肉厚の測定結果である。同図中に示したサイン則の値と一致しており、 θ の値に依存しないことがわかる。これらの結果をふまえ、以下では圧延垂直方向における円すい側壁中央部の肉厚を用いてサイン則の成立について検討することにする。

銅半硬質板とアルミニウム軟質板の円すい部の肉厚に対する半頂角 α の影響を図6に示す。いずれの材質の場合ともに、肉厚は比較のために同図中に示したサイン則の値と一致している。図7は板厚0.6mmおよび

(a) Half-hard copper : $t_0=0.5$ mm (b) Soft aluminum : $t_0=0.6$ mmFig.6 Relationships between conical shell thickness t and half apex angle α (Lubricant: Pasty MoS₂, $f=0.14$ mm/rev). (a) Hard aluminum : $t_0=0.6$ mm (b) Hard aluminum : $t_0=1.0$ mmFig.7 Relationships between conical shell thickness t and half apex angle α (Lubricant: Pasty MoS₂, $f=0.14$ mm/rev).

1.0mmのアルミニウム硬質板の円すい部の肉厚に対する α の影響を示している。板厚0.6mmおよび1.0mmのいずれの場合ともに、肉厚はサイン則の値と一致している。これらの結果から、本実験の範囲では、材質と板厚が変わってもサイン則が成立するものと判断される。

3・3 肉厚に対する工具送り速度と潤滑条件の影響

アルミニウム硬質板の円すい部の肉厚に対する工具送り速度 f の影響を図8に示す。 f が変化しても肉厚は一定な値を保ち、その値はサインの値に一致している。従って、サイン則は棒状工具の送り速度が変わっても成立するものと判断される。

上述の結果は、いずれもペースト状二硫化モリブデン潤滑条件下における結果であり、この条件下ではサイン則が成立した。そこで、プレス油潤滑下で、アルミニウム硬質板の円すい部の肉厚に対する α の影響を調べた。その結果、図9に示すように、プレス油潤滑条件下においても肉厚はサイン則の値と一致した。従

Fig.8 Relationship between conical shell thickness t and feed f (Half-hard copper, $t_0=0.5$ mm, Lubricant: Pasty MoS₂).

って、サイン則は潤滑剤が変わっても成立するものと判断される。

Fig.9 Relationship between conical shell thickness t and half apex angle α (Lubricant: Press oil, Hard aluminum, $t_0 = 0.6$ mm, $f = 0.14$ mm/rev).

4. 考察

4.1 球面形状の1パス成形 上述の結果によると円すい台形状の1パス成形が可能で、しかもサイン則が成立していた。このため、球面などの曲面形状に対しても1パス成形が可能になり、サイン則が成立するものと予想される。そこで部分球面形状を取り上げ、この予想を実験的に検討した。ところで、上述の実験結果によると α が 30° より小さい条件では成形初期段階で割れが発生した。そこで部分球面殻の接円すい面の半頂角の最小値がこの値より大きくなるように設定した部分球面殻形状（前述の図2(b)の形状）について実験を行った。その結果、部分球面殻の1パス成形が可能であり、図10に示すようにサイン則が成立していた。この結果から、曲面形状の1パス成形が可能であり、しかもサイン則が成立するものと判断される。

4.2 後続パス成形との関係 上述のように、棒状工具を用いて1パスで薄板を軸対称形状に張出し成形する場合、薄板はサイン則に従って変形した。そこで、後続パスにおけるサイン則の成立の有無を明らかにする目的で図2(c)に示す2パスのプロセスで円すい状の張出し成形を行った。その結果、図11に示すように、1パス目で $\alpha = 45^\circ$ の円すい状に成形した後、2パス目で $\alpha = 30^\circ$ に成形した場合の円すい部の肉厚の一部は、サイン則から外れ、サイン則の値よりも小さくなっていた。ところで、サイン則の成立は、円周方向ひずみがない状態で薄板が張出し成形されていることを意味している。サイン則が成立する状態に正值の円周方向ひずみが加わると、体積一定の条件から、肉厚ひずみがサイン則の値よりも小さくなる。このこ

Fig.10 Comparison of spherical shell thickness and those obtained from the sine law (Hard aluminum, $h = 27.5$ mm, $r = 38$ mm, $t_0 = 0.6$ mm, Lubricant: Pasty MoS₂, $f = 0.14$ mm/rev).

Fig.11 Comparison of the thickness of conical shell stretch-expanded with two tool-path and those obtained from the sine law (Hard aluminum, $h_1 = 17$ mm, $h_2 = 35$ mm, $d_1 = d_2 = 40$ mm, $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$, $t_0 = 0.6$ mm, Lubricant: Pasty MoS₂, $f = 0.14$ mm/rev).

とから、図11の結果は2パス目で円周方向ひずみが生じていることを示しているものと考えられる。従って、サイン則は1パス目だけで成立し、2パス目以降では図11に示す様な複雑な2軸張出し成形状態へ移行する。

4.3 スピニングとの双対性 スピニングは、回転しごき成形を除くと、しごきスピニングと絞りスピニングに分類される⁽¹⁰⁾。1パスで成形するしごきスピニングについては、サイン則の成立が古くから知られている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。図12に示すように、サイン則が成立する条件では、薄板の外周縁の直径が変化しない。しかし、外周縁の直径が減少する絞りスピニングの状態になると肉厚はサイン則の値よりも厚くなる⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。一

Fig.12 Conventional spinning and CNC incremental stretch-expanding.

方、上述のように、インクリメンタル張出し成形では1パス目についてはサイン則が成立するが、後続のパスでは2軸張出し成形されてサイン則の値よりも薄くなる。従って、サイン則の値を基準にして考えると、インクリメンタル張出し成形とスピニングは互いに双対なインクリメンタル成形になる。

4.4 プロセス短縮化と1パス成形 以上のように1パス成形が可能であることから、この1パスプロセスを利用するとCNCインクリメンタル張出し成形のプロセス短縮化が図れるため、成形時間の大幅な短縮が可能になる。また1パス張出し製品の肉厚に関してサイン則が成立することは、1パス張出し成形品の肉厚設計のみならず、後続パスにおける肉厚変化の推論に対しても実用上重要な知見を与える。

5. 結 言

本研究では、CNCインクリメンタル張出し成形のプロセス短縮化の観点から1パス成形の可能性を実験的に検討し、以下の結果を得た。

- (1) アルミニウム硬質板、アルミニウム軟質板、銅半硬質板のいずれの板材についても、1パスで半頂角 α が 30° 以上の円すい形状に張出し成形することができた。
- (2) 円すい形状に1パスで張出し成形された製品の肉厚はサイン則の値と一致した。薄板の材質と板厚、工具送り速度、潤滑条件が変わっても、このサイン則が成立していた。
- (3) 部分球面形状の1パス成形が可能であり、肉厚分布はサイン則の値と一致した。従って、曲面形状の1

パス成形も可能と考えられる。

(4) サイン則は1パス目だけに成立し、2パス目以降は2軸張出し成形状態へ移行する。この意味で、インクリメンタル張出し成形は、スピニングと双対な関係にある成形法と考えられる。

(5) この1パス成形プロセスを利用することにより、CNCインクリメンタル張出し成形プロセスの大幅な短縮化が可能になる。また1パス張出し製品の肉厚に関してサイン則が成立することは、1パス張出し成形品の肉厚設計のみならず、後続パスにおける肉厚変化の推論に対しても実用上重要な知見を与える。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金（一般研究C）および天田金属加工機械技術振興財団研究助成をもとに行われたことを記し、厚く御礼申し上げます。また潤滑剤をご提供頂いた日本工作油（株）に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) 北澤・清野・村田, 平成4年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1992), 535-538.
- (2) 北澤・若林・村田・清野, 塑性と加工, 35-406 (1994), 1348-1353.
- (3) 井関・加藤・坂本, 機論C, 58-554 (1992), 3147-3142.
- (4) 松原, 塑性と加工, 35-406 (1994), 1311-1316.
- (5) 松原・田中・中村, 塑性と加工, 35-406 (1994), 1330-1335.
- (6) 長谷部・島, 塑性と加工, 35-406 (1994), 1323-1329.
- (7) 中村・渡辺・熊田・川田・黒梅, 塑性と加工, 35-406 (1994), 1270-1277.
- (8) Kalpakcioglu, S., Trans. ASME J. Engineering for Industry, 83-2(1961), 125-130.
- (9) Kobayashi, S., Hall, I. K. and Thomsen, E. G., Trans. ASME J. Engineering for Industry, 83-4 (1961), 485-495.
- (10) 葉山, 回転塑性加工学, (1981), 255-383, 近代編集社.
- (11) Kobayashi, S., Trans. ASME J. Engineering for Industry, 85-1(1963), 44-48.
- (12) 葉山・室田, 精密機械, 29-5 (1963), 369-376.