弾性体ベースインクリメンタルフォーミングによる アルミニウム合金薄板の垂直壁を有する製品の成形*

藤岡 玄紘**・鈴木 信行***・岡田 飛鳥****・竹内 修***

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 67, No. 7 (2017), 271-276
© 2017 The Japan Institute of Light Metals

Incremental forming with elastomer base for aluminum alloy sheet product with vertical wall*

Genko FUJIOKA**, Nobuyuki SUZUKI***, Asuka OKADA**** and Osamu TAKEUCHI***

Incremental forming is generally governed by the sine law and can not produce vertical walls. On the other hand, the incremental forming technology of a new style has been developed which is operated using a general-purpose elastomer base without instead of a blank support die. On this process, the step generated on the outer side of the blank sheet is moved by the bar tool like the motion of edge dislocation on the slip plane. In this operation, elements of material on the blank sheet can be delivered to the product by the bar tool going around the product. This means that this process can build a vertical wall by getting out of the sine law. By applying this technology, we attempted to form vertical wall products simulating a battery case. Forming examination has been conducted using blank sheet of aluminum alloy 5052-O. As a result, the products were created successfully, and the deformation properties were observed. In addition, square and dodecagonal double tubes formed successfully by using this process.

(Received January 11, 2017 Accepted April 9, 2017)

Keywords: incremental forming; aluminum alloy; sine law; elastomer; die-less

1. 緒 言

弾性体ベースを用いたインクリメンタルフォーミングは、製品固有のマンドレルの代わりに汎用の弾性体ベースを使用する^{1),2)}。弾性体に重ねた素板の周囲を拘束し、これに先端が球面の棒状工具を押し込み、製品の等高線に沿って一平面内を周回する。工具の通過により線状に張り出された変形域は弾性体表面から押し戻され、その両側が浅い段差となる。この内周側の段差を製品の一部とし、外側の段差を次の工具周回で改めて張り出し、新しい段差を生成する。この周回動作の繰り返しにより段差を順次累積させ、全体形状を築き上げて最終的に所望の製品を得る。

この加工法は、従来の逆張出し法^{3)~6)}に比べて形状精度は劣るものの、完全なダイレス化に伴う工業的メリットを期待できる。また素板支持部と工具の間の引張力が存在しないため、これに起因する割れも発生しない。しかし基本的な変形機構は正弦則^{7),8)}に律せられた張出しであり、理論上板厚がゼロとなる垂直壁は生成できない。本加工法の実用化を推

し進めるには、造形自由度の向上が望ましく、それには正弦則の克服が主要な課題であると思われる。この課題に対し、従来法についてはすでにいくつかの提案がなされており、いずれも工程を分けることにより、張出しの方向を変える手法が取られている^{9)~11)}。しかし本加工法は従来法と成形の形態が基本的に異なるため、これらの手法の採用は困難である。また、従来法では不可欠である簡易型を不要とする軽便さをセールスポイントとしているため、工程の複雑化は、加工技術としての存在意義の低下につながる。

他方、最近弾性体ベースを用いるダイレスしごきスピニングが提案された^{12),13)}。この加工法では、弾性体とともに回転する素板に棒状工具を押し込み、これにより生成されたドーナツ状ビードの段差を、製品側へしごき送りする動作を基本としている。段差は工具先端球面に押されて刃状転位のごとく移動し、製品の側壁に送り込まれる。しごきの範囲を調整してこの動作を繰り返すことにより、送り込まれた段差の累積が目的とする形状を構成する。送りの終点を一定にすると、しごきスピニングでありながら円筒面の生成が可能とな

* 本論文は軽金属学会第130回春期大会講演概要に掲載された内容を含む。

** 高知工科大学 大学院 知能機械システム工学コース (〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185) Postgraduate Course, Department of Intelligent Mechanical Systems Engineering, Kochi University of Technology (185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami-shi, Kochi 782-8502) E-mail: 215028z@gs.kochi-tech.ac.jp

*** 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 (南国市) Department of Social Design Engineering, Kochi National College of Technology (Nankoku-shi, Kochi)

**** 高知工業高等専門学校 本科 機械工学科 (南国市) Student, Mechanical Engineering, Kochi National College of Technology (Nankoku-shi, Kochi)

る。これは段差のしごき送りに伴い、素板材料の半径位置が変化し、正弦則から解放されるためである。

本加工法に対しても、段差のしごき送りを基本的な成形メカニズムとして取り入れることは可能である。それには弾性体ベース上での工具動作を、これまでの線状の張出しを積み重ねる周回から、段差をしごき送りする周回への改変が必要となる。そこでこの構想を基に、本加工法のみで垂直壁の形成を可能とし、これまで深絞り成形を必要としていた形状を有する製品への適用を目指した。実験ではアルミニウム合金薄板を用いて、工具押込み深さの局所的变化を含めた工具周回プログラムを作成し、側壁が垂直となる細長い容器形状の成形を試みた。さらにこの手法の発展性を評価する一環として、一端が連続した二重角筒形状を取り上げ、その試作も実施した¹⁴⁾。

2. 成形構想

ダイレスしごきスピニングでは、製品周囲の素板材料を張り出して段差を生成させ、これをしごき送りして半径方向に移動させ、垂直壁の構成要素として供給している。本加工法でこのような段差のしごき送りを実現するためには、最初に素板外周の余肉部に線状の張出しを与えて段差を生成する。次にその段差を、高さが必要以上に増加しないよう、周回しながら徐々に製品外形位置まで移動させる工具軌跡が必要となる。この軌跡は製品の平面形状から一定間隔にオフセットされた線群であり、これまで本加工法で適用してきた張出しを累積させるための等高線群に相当する。張出しでは頂上か

ら麓に下る方向で等高線を乗り換えていたが、段差のしごき送りでは、これとは逆の方向に乗り換える工具周回を行う。

この構想に基づき垂直な側壁を生成する概念を、模式図により Fig. 1 に示す。この図の工具進行方向は紙面に垂直となる。装置はこれまでの報告²⁾と同様、弾性体を充填した浅底容器状の成形ベース、その縁に設けた素板抑え、そして先端が半球面の棒状工具で構成される。成形は、初期の段差形成に有効な工具押込み深さおよび周回数を適用し、製品外形から一定距離隔てた素板外周領域に張出しを与え、ある高さの段差を形成する。次に工具の押込み深さを減少させ、内側の軌跡に乗り換えて周回させる。これにより形成された段差は、強い張出しを伴わずに軌跡の法線方向に押し出される。設定ピッチに従って順次内側の軌跡に乗り移る周回動作を繰り返すことにより、段差はしごき送りされて徐々に製品側に移動する。製品外周に到達した段差は側壁の一部となり、1 サイクルの成形が終了する。周回の最終軌跡が毎サイクル同じ位置となる工具動作を繰り返すと、段差の累積は垂直壁を形成することになる。

製品の側壁に到達した段差の高さと板厚は、そのまま製品側壁の高さ増分とその位置の板厚になる。したがって、各サイクルの製品到達時の段差の高さと板厚を調整することにより、製品の全体形状およびその板厚の変化の自在な制御が可能になると考えられる。

3. 実験方法

実験では、一般的なマイクロ組織を有する厚さ1.0mmのアルミニウム合金薄板A5052P-O (JIS-H-4000) を使用し、周囲の押さえ代と余裕を含み、250×300mmの長方形に切り出して素板として使用した。

Fig. 2 に成形目標とした製品形状、およびその周囲のしごき領域を示す。製品の平面形状は、両側がφ20mmの半円の長方形であり、その周囲が垂直壁となるバッテリーケースをイメージした細長容器とした。製品周囲のしごき範囲は、工具押込み深さの異なる2領域を設定し、工具中心位置により示している。外周を段差生成領域とし、工具押込み深さ $d_0=1.5\text{mm}$ 、周回ピッチ $p_0=1.0\text{mm}$ とした。そしてこの領域の内側から製品外周までの領域をしごき送り領域とし、種々の押込み深さ d および周回ピッチ p を適用して成形を行った。製品の高さ h に関しては、結果として得られる値をその形条件の評価尺度とした。

弾性体ベースは、プレートに幅200×長さ250×深さ

Fig. 1 Forming cycle for vertical wall building by pilling up of step on sheet section view (Tool trace is perpendicular to page surface).

Fig. 2 Product and forming area in the blank sheet.

20 (mm) のポケットを掘り込んだ浅底容器に、これと同寸法のショア硬さ A90°のエーテル系ウレタンエラストマ（弾性率：引張 50MPa, 曲げ 70MPa, 圧縮 60MPa）を充填している。この弾性体は圧縮変形に対する復元性に優れており、本実験環境での素板の局所張出しに対し、適度な剛性を有していると考えられる。弾性体ベース上面には、200×250 (mm) の切抜き穴を持つブランクホルダを備えており、これにより素板外周の幅 25mm を拘束する。これを小型マシニングセンター（森精機 DV5060）に取り付けた。棒状工具は、 $\phi 20$ mm の S45C みがき丸棒鋼（JIS-G-3108）の先端を $\phi 20$ mm の半球面に切削し、#400 のエメリーペーパーで仕上げている。

なお工具の送り速度は、本報の目的および実験環境の制約から、4m/min とする 1 条件とした。また素板表面には鉱油系潤滑剤（㈱アミノ社製、SHELL FORMRE SF-70）を塗布した。成形実験は、18～24°C の環境で実施した。

4. 結果および考察

4.1 垂直壁の生成過程

しごき送りの工具押込み深さ $d=1.0$ mm, 周回ピッチ $p=1.0$ mm を適用した場合の、6 サイクル目の成形途中の概況を Fig. 3 に示す。弾性体ベース上の素板の中央に高さ 20 mm を超える垂直壁を有した製品形状が浮き出され、その外周約 30 mm が低い段差として、しごき面より浮き上がっている状況が確認される。製品上面は、直辺部中央では断面がほぼ半円となり、両側の円弧部では平面に近くなり、その間が緩い曲面で連続している。目視による観察から、工具周回の終点

Fig. 3 View of forming operation on the elastic base.

Fig. 4 Formed sheet on the process.

となる製品の側壁は、成形サイクルごとに棒状工具側面と接触を生じている。この工具側面との干渉により、形状が矯正される効果も影響していると思われるが、製品の側壁は膨らみのない良好な平面が得られている。

成形の進行に伴って変化する素板の概観と、これを直辺部中央で切断した断面を Fig. 4 に示す。断面に関しては、切断に伴う内部応力が解放された影響と考えられるが、底面側が開いて左右の垂直壁が傾き、テーパ状となる変化が見られた。全体として、成形サイクル数と相関して垂直な側壁部が徐々に形成され成長し、製品高さが増加している状況が確認される。これより、この条件範囲では段差のしごき送りの機構が十分に機能していると考えられる。

成形途中の素板を取り出し、長辺方向中央と短辺方向中央で切断した。それぞれの断面を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。長辺方向の断面では、前のサイクルにより生成された製品

Fig. 5 Longitudinal section on processing at 6th cycle.

Fig. 6 Transverse section on processing at 6th cycle.

部が、次のサイクルによるしごき送り途中の段差の上に乗る、浮き上がった状態が認められる (Fig. 5(a))。また製品裾部および段差のフィレット半径が、ほぼ工具先端球面半径を写し取っており、製品に到達した段差は側壁に吸収されていると見ることができる (Fig. 5(b))。これに対し短辺方向では段差が不明瞭で、製品裾部に向かってなだらかな斜面となって連続し、弾性体表面から製品部を浮き上げている (Fig. 6(a))。製品裾部および段差のフィレット半径は、重なる範囲が小さく正確な比較は困難であるが、工具先端球面半径より明らかに大きい状況が確認される (Fig. 6 (b))。これは、長手方向中央部では直線の曲げに近いため、立体形状としての拘束力が小さく、スプリングバックが顕著に現れているた

Fig. 7 Tool mark range of vertical wall ($d=1.0$ mm, $p=1.0$ mm, 8th cycle).

(a) Short transverse section.

(b) Longitudinal section.

Fig. 8 Thickness distribution of axial section.

めと考えられる。

これより本加工法による垂直壁の生成メカニズムは、素板外周側からしごき送りされた段差が、製品領域に到達して側壁の一部となり、製品全体が裾からかさ上げされるように高さを増すと考えられる。ただし、軌跡の直線部と曲線部ではこの状況に差が見られ、直線部では曲線部に比較して段差が明瞭に形成されず、送られる段差の高さは小さい。その結果製品直辺部の高さ増分は、曲辺部に比較して小さくなる。成形品側面上部ではツールマークの傾きが見られ (Fig. 7)、この状況を示していると見られる。

4.2 板厚の変化

Fig. 4に示した各成形段階の製品の、短辺方向中央断面とこれに直行する長辺方向中央断面について、板厚分布の変化をそれぞれ Fig. 8(a) および (b) に示す。外周の段差生成域については、いずれの方向に関しても、成形サイクルを重ねるごとに板厚の減少が進んでいる。これに対し、段差のしごき送り領域および製品の垂直壁については、板厚の分布および変化とも、ほぼ逆の傾向が見られる。すなわち成形の進行に伴って、短辺方向断面では成形品の裾部が最小となる板厚の分布となり、そのまま減少が進む。これに対し、長辺方向断面では成形品裾部が最大となる板厚の分布となり、徐々に増加が進む。

これより、全体として製品外周の素板材料が段差のしごき送りにより移動し、製品の側壁に供給されて垂直壁が生成される状況が確認される。そして工具軌跡が円弧となる方向に関しては、段差のしごき送りにより縮みフランジ変形が生じていると考えられる。

Fig. 9は、Fig. 4に示した4サイクル成形後の成形品について、格子状に引いたけがき線の長手方向端部のけがき線の湾曲状況を示す。長手方向端部のけがき線は、大きく湾曲して側壁に流れ込んで行く状況が見られる。そして Fig. 10は、このけがき線より計測した長辺方向中央断面とこれに直行する短辺方向中央断面のひずみ分布を示す。直辺部に関しては軌跡方向ひずみがほぼゼロのままであり、マイナスの板厚方向ひずみとそのままプラスの軌跡法線方向ひずみとなり、垂直壁を形成する。そして曲線部に関しては、製品側壁では、軌跡方向 (円周方向) ひずみが負となり、プラスのひずみとして板厚方向と軌跡法線方向 (半径方向) に、ほぼ半々に配分される。製品外周の曲率半径が大きな領域では、円周方向

Fig. 9 View of scribed grid line curved after forming at transvers side.

Fig. 10 Strain distribution of axial section on the 4th cycle.

Fig. 11 Deformation direction of formed flange.

ひずみが徐々に増加してゼロに近づき、板厚方向ひずみがプラスからマイナスに減少し、半径方向ひずみはプラスを維持している。

この状況は Fig. 11 のように表される。長辺方向断面の曲線部と短辺方向断面の直辺部に存在してしごき送りを受ける微小要素 E_c と E_s が、工具周回により軌跡の法線方向に同じ距離 Δl を移動したと仮定すると、曲線部および直線部それぞれの要素の幅方向（円周方向）のひずみ ε_c , ε_s は、

$$\varepsilon_c = \ln(l_{c2}/l_{c1}) = \ln(r_2/r_1) < 0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = \ln(l_{s2}/l_{s1}) = 0 \quad (2)$$

となる。すなわち曲線部では縮みフランジ変形による負の円周方向ひずみが生じ、同時に半径方向と板厚方向に正のひずみが生じる。特に垂直壁が形成される製品裾部では、平面応力状態での一軸圧縮に近い状態となる。その結果、直線部に

Fig. 12 Influence of tool tip level ($p=1.0$ mm, 4th cycle). Fig. 13 Influence of contour pitch ($d=1.0$ mm, 4th cycle).

比較して曲線部では板厚の増加と垂直壁の高さ増分が大きくなったものと思われる。このように工具軌跡の曲率半径に関する影響は、板厚の変化や形状精度にも大きく影響を及ぼしており、今後詳細に解析を進める必要があると考えられる。

4.3 加工条件の影響

Fig. 12 に工具周回ピッチを 1.0 mm とし、異なる工具押込み深さを適用し、それぞれ 4 サイクルの成形した製品の概観を示す。弱い工具押込み深さ $d=0.7$ mm では、直辺部中央にわずかに垂直な側壁が形成され始めた状態となった (Fig. 12(a))。これに対して強い押込み深さ $d=1.3$ mm では、素板全面にそりを生じ、成形部がねじれるゆがみが発生しているが、30 mm を超える垂直壁が形成されている (Fig. 12(c))。この間の押込み深さ $d=1.0$ mm では、これらの中間的な垂直壁が形成された (Fig. 12(b))。この結果から、工具押込み深さは段差の高さ増分に強く影響し、押込み深さが大きいほど、成形高さの増加速度は大きくなる。ただし過度に大きい場合は、製品にゆがみが発生する場合もあり、成形品質に対して適切な工具押込み深さの設定が必要と思われる。

Fig. 13 に工具押込み深さ d を 1.0 mm とし、異なる周回ピッチ p を適用し、それぞれ 4 サイクルの成形した製品の概観を示す。形成されている垂直壁に関しては、表面性状の差はほとんど見られず、いずれも良好な表面状態が得られている。成形されている高さに関しては若干の差が見られ、周回ピッチが小さい方が高さは大きくなる傾向が見られる。これは、周回ピッチが小さいほど周回数が増えたことにより、しごき送りされる段差の数が増加したためと考えられる。ただし周回数の増加は、曲げ曲げ戻しに伴うしごき面の加工硬化を助長し、さらに加工時間の増加をもたらすため、これらを考慮した適切な周回ピッチの設定が望ましいと思われる。

4.4 二重角筒の成形

本加工法の成形特性や生成形状の可能性を探るため、実験に用いた製品よりも形状がより複雑となる、一端が連続した二重角筒の成形を試みた。二重角筒の成形では、外筒に対しては外周から中心方向へ、内筒に対しては中心から外周方向へ、内外両側のフランジ面に交互にしごきを与える必要がある。これにより、内外筒の高さは同時ではなく順番に変化するが、これらは上部で連続しているため、高さの増加が遅れ

Fig. 14 Double skin tube of square ($d=1.5$ mm, $p=2.0$ mm, 2nd cycle, $\phi 10$ mm).

Fig. 15 Double skin tube of dodecagonal ($d=1.5$ mm, $p=2.0$ mm, 3rd cycle, $\phi 10$ mm).

る側のフランジ面は、弾性体表面から持ち上げられることになる。浮き上がったフランジ面に工具を押し込むと、相対的に押込み深さを増加させたことになり、軸方向の引張変形が増加し、角筒裾部での破断の危険が増大する可能性も危惧される。そのため、弾性体表面から内外両方のフランジ面の浮き上がりができるだけ小さくなるよう、内外筒の高さの増加速度をバランスさせる調整が課題の一つになる。

Fig. 14およびFig. 15に、正方形および十二角形の二重角筒の成形例を示す。切断面の観察からは、いずれも垂直な側壁が形成されている (Fig. 14(b), Fig. 15(b))。正方形については、内外のコーナ部に割れや潰れのような変形が見られる (Fig. 14(a))。これに対し十二角形では、コーナ部も良好に成形されている (Fig. 15(a))。これは工具周回軌跡の進行方向に対する変化角度に起因していると考えられる。Fig. 1に示したように、段差は工具の進行方向に対して法線方向に移動し、Fig. 11に示したように曲線部では縮みフランジ変形を生じる。しかし曲線部を持たない角形では、コーナ部の外側では送られる段差がぶつかり合い、コーナ部の内側では段差が引張り合うことになる。したがって、コーナは段差移動の方向が切り替わる不連続部となり、変化角度が大きな場合は潰れや割れが発生したと考えられる。

以上から、本加工法を適用することにより二重角筒のような複雑形状の成形も可能になることが見通された。ただし平面形状の角部となる工具軌跡の角度急変部に関しては、段差の干渉による潰れや割れに注意を要する。今後、本加工法による生成可能な形状範囲の拡大とその形状品質向上のため、段差の干渉を詳細に解明していく必要がある。

5. 結 言

弾性体ベースを用いたインクリメンタルフォーミングにより、垂直壁を有する製品の形成を目的とした。アルミニウム合金薄板を素板とし、両端が半円の細長容器形状の成形実験を行った結果、以下に示す知見が得られた。

(1) 弾性体ベースを用いたインクリメンタルフォーミングにおいて、張出した段差をしごき送りして製品側に移動させる工具の周回動作を繰り返すことにより、垂直壁を有する製品の造形が可能となる。

(2) しごき送りでは、工具軌跡の法線方向に段差を押出し、刃状転位のごとく周回ごとに徐々に移動させる。これに伴って素板材料の同方向への移動が起こるため、成形部の板厚は正弦則の制約を受けない。

(3) 工具周回軌跡の曲線部では、段差のしごき送りによる縮みフランジ変形を生じて板厚が増加するため、直線部に比較して大きな板厚が確保され、側壁の板厚も高さ増分も大きくなる。

(4) 内外筒が一端で連続する二重角筒の形成も可能であり、本加工法は高い造形能を有する。ただし角形コーナ等の軌跡進行方向の変化部では、段差が滑らかに側壁と一体化せず、不連続な変形が発生する場合がある。

参 考 文 献

- 1) 鈴木信行, 南浦一誠, 吉岡真一: 特許出願, 特願2012-241170.
- 2) 鈴木信行, 藤岡玄紘, 市川隼人, 竹内 修: 塑性と加工, **55** (2016), 17-21.
- 3) 松原茂夫: 塑性と加工, **42** (2001), 991-995.
- 4) 網野廣之, 呂 言: 塑性と加工, **42** (2001), 1051-1055.
- 5) P. Pontice: SAE Int. Automotive Eng. Mag., 14-Aug-2013, (2013).
- 6) M. Amino, M. Mizoguchi, Y. Terauchi and T. Maki: 11th ICTP, (2014), 54-62.
- 7) 日本塑性加工学会編: 塑性加工便覧, コロナ社, (2006), 628.
- 8) B. P. Bewlay and D. U. Furrer: AMS Handbook, **14B** (2006), #05120.
- 9) 北澤君義, 中島 明: 軽金属, **47** (1997), 378-384.
- 10) S. Tanaka, K. Hayakawa, T. Nakamura: steel research int. (2011), Special Edition, 503-507.
- 11) 田中繁一: 素形材, **57** (2016), 8-12.
- 12) 中澤和志, 鈴木信行, 竹内 修: 第65回塑性加工連合講演会講演論文集, (2014.10), 171-172.
- 13) 鈴木信行: 軽金属, **66** (2016), 345-351.
- 14) 藤岡玄紘, 多田駿斗, 鈴木信行, 竹内 修: 軽金属学会第130回春期大会講演概要, (2016.5), 61-62.