アルミニウム合金薄板の非軸対称二重外板構造体への成形

徳弘 慧司^{1*}・鈴木 信行²・多賀 勇人³
笹岡 慧³・竹内 修²Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 69, No. 5 (2019), 281-286
© 2019 The Japan Institute of Light MetalsForming of aluminum alloy sheet to
non-axisymmetric double-skin structureSatoshi TOKUHIRO^{1*}, Nobuyuki SUZUKI², Hayato TAGA³
Kei SASAOKA³ and Osamu TAKEUCHI²

Most of air intake lip skins of jet engine nacelle on airplane are made of aluminum alloy sheet by the reason of flight function, anti-icing and bird strike durability. And some of them have a shape of non-rotational symmetry. It is impossible to form a product like that by normal spinning process. On the other hand, incremental forming enable to form non-rotational shape except vertical wall. Thereupon, one idea was proposed, *i.e.*, the new process that combined die-less shear spinning used as pre-forming and incremental forming used as finish forming. In this case, the wall element on the pre-formed product should be shrunk in itself when it moved to the die surface set in the finish forming process. This deformation mechanism is contrary from that of conventional incremental forming. An experiment was conducted to verify the feasibility of this conception using aluminum alloy sheet 5052-O. As a result, shrinkage of the wall element on the pre-formed product was observed, and a minutiae model of air intake lip skin with a shape of non-axial symmetry was formed successfully.

(Received November 30, 2018 Accepted February 13, 2019)

Keywords: incremental forming; shear spinning; aluminum alloy sheet; sine law; air intake lip skin

1. 緒 言

近年航空機の構造材料は、これまで主流であった高強度アルミニウム合金から、比強度、比剛性に優れるCFRP等の先進複合材料へ、置き換えが進んでいる。しかし、ジェットエンジンナセル先端の空気取入口外板 (air intake lip skin) に関しては、依然としてアルミニウム合金が採用されている。この構造部位は、着氷の防止 (anti-icing) や鳥衝突に対する耐久性 (bird-strike durability) 等、運用上不可欠な機能が要求されている。これに対し、アルミニウム合金は、熱伝導性や鳥衝突時の塑性変形によるエネルギー吸収等、金属材料特有の物性を具備している。これらの特性から、この構造部位に対しては、アルミニウム合金が複合材料より優位に評価されているためである^{1), 2)}。そしてその多くは回転対称の二重外板形状をしており³⁾、ドーナツ状の素板を用いて、スピニングと穴拡げにより成形されている⁴⁾。

一方、航空機の中には、着降装置の高さを抑えながら地表と機体下面とのクリアランスを確保するため、ナセルの下側の膨らみを抑え、その分を水平方向に張出した形態も多く見

られる (Fig. 1)。この場合、ナセルの正面形状はおにぎり状となり、エアインテイクリップスキンの外周側も非回転対称となるため、通常のスピンニングでは成形することができ

Fig. 1 Air intake lip with non-rotational symmetry.

¹ 高知工業高等専門学校 専攻科 (〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1) Student, Advanced Course, Kochi National College of Technology (200-1 Monobe-otsu, Nankoku-shi, Kochi 783-8508)

² 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)

³ 高知工業高等専門学校 機械工学科 (南国市) Student, Mechanical Engineering, Kochi National College of Technology (Nankoku-shi, Kochi)

* 責任著者 E-mail: s1803@gm.kochi-ct.jp

ない。他方、棒状工具を用いた逆張出しインクリメンタルフォーミング^{5),6)}（以降、“逆張出し”を省略）は、工具が等高線をたどれるほとんどの形状を生成することができる。ただし、一般に正弦則^{7),8)}と呼ばれる制約から、成形面の傾斜角に応じて板厚が減少する。多くのエアインテイクリップスキンは、内外板とも後方側では垂直に近い傾斜角を有しており、この成形法でも対応できない。そのため、このような形態に対しては、生産数量にかかわらず、専用金型を用いたプレス成形が選択されている。

近年、弾性体ベースを用いたダイレスしごきスピニングが提案された⁹⁾。この技術は基本的にしごきスピニングであるが、垂直壁の生成も可能である。また、この技術を用いた二重円筒の成形^{10),11)}や、円筒側壁の肉厚の制御方法¹²⁾等も報告されている。そこで筆者らは、この技術とインクリメンタルフォーミングを組み合わせることにより、非回転対称の二重外板を成形する方法を案出した。すなわち、前者により回転対称の予備成形体を準備し、これを後者により非回転対称の最終形状に仕上げる2段階の工程である。

この考案では、仕上げ工程において、回転対称の予備成形体を、非回転対称の型を覆うようにセットする。するとこれらの間に空隙が生じ、これを消滅させることが仕上げ成形の目的となる。このとき生成される変形は、従来とは異なる様式に従うと予測され、この技術の応用範囲を広げられる可能性もある。そこでこの考案の実現を目指し、アルミニウム合金薄板を用いて、非回転対称のエアインテイクリップスキンを想定した二重外板形状の成形を試みた。

2. 成形構想

インクリメンタルフォーミングは、通常のスピニングでは成形できない非回転対称の形状を含め、広い範囲の造形が可能である。ただし正弦則の制約を受け、理論上板厚がゼロとなる垂直壁の生成は困難とされている。これに対し、工程を分けて張出しの方向を変えることにより、これを克服する方法も提案されている^{13)~16)}。しかし、航空機ジェットエンジンナセルのエアインテイクリップスキンへの適用は、大きな板厚の減少が予想され、明らかに適切でない¹⁷⁾。

そこでまず初めに、弾性体ベースを用いたダイレスしごきスピニングを用いて、回転対称の二重円筒を成形する。これを予備成形体として目的とする非回転対称の支持型にセットし、インクリメンタルフォーミングを用いて最終形状に仕上げる。このとき予備成形体は、型に覆い被せるようにセットされるため、型と干渉しない、より大きな形状とする必要がある。

支持型に対し予備成形体がセットされると、場所により大きさは異なるが、それらの間に空間が発生する。そして仕上げ工程は、予備成形体に対してこの空間を消滅させる成形となる。すなわち、型の等高線に沿って周回する棒状工具は、型から離れた位置にある予備成形体の板要素を圧迫し、連続的に型の表面まで移動させる変形を与えることになる。

内板側に関しては、予備成形品の板要素を、その外側に位置する型表面へ送る成形となる。これは従来と同じ張出しであり、素板材料の延性が期待できる範囲であれば、特に問題は予想されない。エアインテイクリップスキンの内板に関しては、基本的に回転対称であり、予備成形の形状をこれに一

Fig. 2 Deformation plan of finish stage.

致させることも可能である。

これに対し外板側では、予備成形品の板要素を、その内側に位置する型表面に送る成形となる。すなわち、型の等高線より長い円弧を型に沿わせるため、要素の円周方向の長さを短縮しなければならない。この状況を、模式図により Fig. 2に示す。これは絞り成形であり、従来の張出し成形とは異なる、新しい様式に従った造形能力が発揮されることを意味する。

予備成形品の板要素は、セットされた位置から型の表面に送られるまでの間、工具接触部の周囲や逆側の表面が非拘束の状態で面内圧縮を受ける。そのため、絞り変形に要する荷重を支持する周囲の剛性のバランスによっては、不安定な変形を生じる可能性もある。すなわち、板要素は面内に絞り込まれずに座屈し、しわとなることも予想される。これを回避するためには、変形要素を支持する非変形域の剛性や強度を考慮した、加工条件の設定が重要になると考えられる。

3. 実験方法

素板は、厚さ1.0mmのアルミニウム合金薄板A5052P-O (JIS H 4000)を受入れのまま使用し、周囲の押さえ代と余裕を含み直径170mmの円板とした。

Fig. 3に非回転対称のエアインテイクリップスキンを想定した二重外板の目標形状を、面により示す。各面は成形品板厚の内側位置を示しており、仕上げ型の外表面を構成する。内板側は回転対称である。断面A-Oの輪郭は楕円であり、断面B-Oの輪郭は楕円と円弧の組合せである。

Fig. 4に弾性体ベースを用いたダイレスしごきスピニングによる予備成形形状を示す。外板側に関しては、面内絞り変形発現の有無を明瞭に観察できるように、型との間の空間が大きくなる円筒面とした。そして目標形状の内板の中心を軸とした回転形状の最大径 (Fig. 4に示す直径 δ) を、円筒の内径とした。外板側の成形過程やその成否を調査するための予備成形体については、実験の効率を図るため、内板の成形を省略し、Fig. 4の実線 (a) で示す単純な円筒とした。他方、エアインテイクリップスキンを模擬した縮小モデルの試作で

Fig. 3 Product copied after air intake lip skin.

Fig. 4 Axial section of pre-formed product.

Fig. 5 Support die for incremental forming.

は、内板の成形も実施し、Fig. 4の破線 (β) で示す二重円筒の予備成形体を準備した。

ダイレスしごきスピニングによる予備成形は、ショア硬さA90°、厚さ20mm、直径130mmのウレタンエラストマ上で行われた。先端球面径15mmの棒状工具を使用した。成形高さを確保し、側壁の最小板厚が素板の50%以上になるよう、工具押込み深さとしごき回数を設定した。NC旋盤を用いた成形のプロセスおよび条件は、前報⁹⁾と同じであるため、詳細は省略する。また、ひずみの測定方法についても、既報¹²⁾と同じであるため省略する。

(a) Out view

(b) cut section

Fig. 6 Pre-formed product.

(a) $h = 5.0$ mm(b) $h = 10.0$ mm (c) $h = 15.0$ mm(d) $h = 20.0$ mm

Fig. 7 Deformation process.

インクリメンタルフォーミングによる仕上げ成形は、3Dプリンタを用いて製作したABS樹脂の支持型を使用した。その外観をFig. 5に示す。成形設備は、株式会社アミノ社製ダイレスNCフォーミングマシンRA型を使用し、送り速度は3.0m/minとした。いずれの成形でも、素板表面には鉱油系潤滑剤（昭和シェル石油株式会社、Shell Tonna S3M）を塗布した。また実験は、16~24°Cの温度環境下で実施した。

4. 結果および考察

4.1 成形過程

Fig. 6にダイレスしごきスピニングにより外板側のみを成形した予備成形体を示す。上面は、側壁への曲げに対するスプリングバックと思われるが、若干の膨らみを生じてドーム状となった (Fig. 6(a))。型の輪郭を重ねた軸断面と、垂直に成形された側壁から (Fig. 6(b))、ほぼ目的とした形状が得られていることがわかる。

次にこの予備成形体を、工具先端球面径 $d=15$ mm、等高線ピッチ $dZ=1.0$ mmとして、インクリメンタルフォーミングによる仕上げ成形を行った。その変形の過程を、工具先端深さ h の各成形段階について、Fig. 7に示す。工具周回により頂部周囲に段差が生成され (Fig. 7(a))、これが徐々に下方へ押し下げられ (Fig. 7(b)~(c))、最終的にフランジ面に達し、消滅した (Fig. 7(d))。上面のドーム状の膨らみは、成形の初期段階で解消された。これは、工具と支持型先端の間で、型の輪郭に沿った曲率半径の小さな曲げが生成されたためと

思われる。

これらの成形品を、Fig. 3の断面A-O, B-Oの位置で切断し、その変化を比較した。その結果を、型の輪郭線を重ね、Table 1に示す。それぞれの断面とも、いずれの成形段階においても、段差より上部の成形が終了した領域はほぼ型に沿っており、型との空間は消滅している。また段差より下部の領域は予備成形の形状が維持され、型表面までの距離が保たれている。そして成形が終了した領域の板厚は、成形品中央に見られる素板の元板厚と同等か、それ以上に増加している状況も見られる。これは、成形が終了した領域の板要素が

円周方向の縮み変形、すなわち面内絞りを受けた結果であると推測される。

この成形品について計測したひずみの分布をFig. 8に示す。予備成形では、側壁部 (Fig. 8に示すOuter skin領域) は、プラス側の半径方向とマイナス側の板厚方向が対称に近い分布となり、その差分となる円周方向ひずみは、頂部 (Fig. 8に示すa) から裾部 (Fig. 8に示すb) にかけて、徐々にマイナス方向に増加している。

この領域に対して仕上げ成形が施されると、全体として円周方向ひずみが減少して板厚方向ひずみが増加する。これらに比較し、半径方向ひずみの変化は小さい。そして断面B-Oより、予備成形体と型との空間の大きかった断面A-Oの方が、この傾向が強く見られる。これは、板要素の円周方向の縮み変形により空間が消滅し、その分板厚が増加した状況を示している。すなわち、インクリメンタルフォーミングにおいて、面内絞りによる形状生成が成立していると考えられる。

4.2 加工条件の影響

Table 2に、種々の工具先端球面径 d と等高線ピッチ dZ を組み合わせで行った、仕上げ成形の成否を示す。 $d=5.0\text{mm}$ に関しては、工具先端の過負荷による変形を避けるため、 $dZ=1.0\text{mm}$ と 2.0mm の条件を省略している。これより、工具径 d が大きくなると、成形が成立する可能性が高くなる傾向が見られる。その逆の場合は、成形の初期から工具先端が予備成形体にめり込むように変形が進行し、予備成形体の側壁部を外側に押し出し、型との空間の中央が潰れる傾向が見られ

Table 1 Cut section

h	10mm	
	Section A-O	Section B-O
5.0 mm
10.0 mm
15.0 mm
20.0 mm

Table 2 Success or Failure

$d \backslash dZ$	0.5 mm	1.0 mm	2.0 mm
$\phi 5.0\text{ mm}$	×	—	—
$\phi 10.0\text{ mm}$	×	×	△
$\phi 15.0\text{ mm}$	△	○	○

○: Success ×: Failure (Clash) △: Root breakage

Fig. 8 Distribution of strain.

(a) Out view (b) Cut section

Fig. 9 Failure sample 1 (Clash).

(a) Unstable (b) Clashed

Fig. 10 Deformation mechanism.

(a) Over load (b) Bend & re-bend

Fig. 11 Failure sample 2 (Root breakage).

た。その例を Fig. 9 に示す。

成形途中で潰れが発生する原因は Fig. 10 のように考えられる。工具径 d が過度に小さい場合は、板要素は円周方向に縮まずに外側に押しやられ、上面と側壁の角部の曲率半径を小さくする (Fig. 10(a))。そして中央領域は座屈して分断され、外周側の盛り上がり形成される (Fig. 10(b))。このような形状になると、それ以降の工具周回でこの変形が助長され、潰れが進行することになる。

等高線ピッチ dZ の影響に関しては、工具径 d との組み合わせによって異なるが、 $d=10\text{ mm}$, $dZ=2.0\text{ mm}$ および $d=15\text{ mm}$, $dZ=0.5\text{ mm}$ の条件で、いずれも裾部にしわや破断が見られた。その外観を Fig. 11 に示す。これは、工具が予備成形体を下方に押し下げる負荷を裾部フランジが支持できなかった (Fig. 11(a))、あるいは工具周回によりフランジがたわみ、その曲げ曲げ戻しを過度に受けた割れと見られる (Fig. 11(b))。

4.3 エアインテイクリップスキンの縮小モデル

Fig. 12 に航空機ジェットエンジンナセルのエアインテイクリップスキンを模擬した縮小モデルの、成形中の様子を示

Fig. 12 Finishing using preform of double cylinder.

(a) Top side (b) Bottom side

Fig. 13 Miniature model of air intake lip skin.

す。用いた予備成形体は、Fig. 4 に破線で示す、内外筒両方を成形した二重円筒である。工具先端球面径 $d=15\text{ mm}$ 、等高線ピッチ $dZ=0.5\text{ mm}$ を用いて、内外面を交互に周回して成形を進めている。仕上げ成形終了後、Fig. 3 に示す寸法に従い、余肉部をトリムした製品の外観を Fig. 13 に示す。

先端側は、支持型通りの小さな曲率半径に仕上がリ、後端側は、内外板とも垂直の傾斜が生成されている。モデルの表面は、内外面とも滑らかで工具接触痕による等高線は見られない。全体として目的の形状に仕上がっており、Fig. 1 に示した実機に近い様相を呈している。この成形結果から、非回転対称のエアインテイクリップスキンのような、垂直壁を含む二重外板形状の成形を実現できる見通しが得られたと考えられる。

5. 結 言

弾性体ベースを用いたダイレスしごきスピニングによる予備成形体を、インクリメンタルフォーミングにより仕上げ成形を行うことにより、非回転対称の二重外板形状を生成する工程を考案した。その実現を目指し、アルミニウム合金薄板を素板とした成形実験を行った。その結果、以下に示す知見が得られた。

(1) 支持型との間に空間を有する予備成形体を、インクリメンタルフォーミングにより仕上げ成形することにより、板面内の絞り変形が成立し、その空間を消滅させて型に沿った形状を得ることができる。

(2) これは従来の張出しとは異なった適用形態であり、予備成形体を必要とするものの、板厚の増加や垂直壁の生成が可能となる。その効果的な運用により、この成形法の適用範囲を広げることができる。

(3) インクリメンタルフォーミングによる絞り変形の成否は、棒状工具先端の球面径と等高線ピッチが大きく影響し、その組み合わせが不適切な場合は、空間領域の潰れや、裾部フランジのしわや割れを生じる。

(4) この工程は、プレス機械や専用金型を使用せずに、航空機ジェットエンジンナセルのエアインテイクリップスキンのような、垂直壁を含む非回転対称の二重外板形状を生成する場合に、有効かつ有用であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Rolls Royce: The Jet Engine, Wiley, (2015), 242.
- 2) Boeing: AERO, QTR-04, Boeing Commercial Airplanes, (2006), 17-23.
- 3) JAXA 研究開発本部編：航空機研究開発の現在から未来へ、丸善プラネット, (2011), 73.
- 4) Spincraft Aviation (Application, Hard Ware), Brochure.
- 5) 松原茂夫：塑性と加工, **42** (2001), 991-995.
- 6) 網野廣之, 呂 言：塑性と加工, **42** (2001), 1051-1055.
- 7) 葉山益次郎, 室田忠雄, 工藤洋明：日本金属学会論文集, **31** (1965), 1259-1269.
- 8) 川井謙一：塑性と加工, **35** (1994), 1286-1290.
- 9) 鈴木信行：軽金属, **66** (2016), 345-351.
- 10) 鈴木信行, 松本夢史, 笹岡修太, 徳弘慧司, 竹内 修：軽金属, **67** (2017), 35-40.
- 11) N. Suzuki, S. Tokuhito and O. Takeuchi: Procedia MAFG., **15** (2018), 1270-1277.
- 12) S. Tokuhito, N. Suzuki and O. Takeuchi: Procedia MAFG., **15** (2018), 1232-1238.
- 13) 北澤君義, 中島 明：日本機械学会論文集 (C 編), **62** (1996), 2018-2024.
- 14) 北澤君義, 中島 明：軽金属, **47** (1997), 378-384.
- 15) 北澤君義, 中島 明：軽金属, **49** (1999), 72-76.
- 16) 田中繁一：素形材, **57** (2016), 8-12.
- 17) 鈴木信行, 佐野利幸, 高科建太郎：塑性と加工, **51** (2010-1), 23-27.